

地域社会 DX 推進パッケージ事業(AI 検証タイプ)

東京都小平市

工場など複雑な電波環境におけるエッジ AI を用いた通信量削減および通信リソース最適化の実証

実証報告書

2026年1月30日

AI03 小平市

株式会社国際電気

NTT 東日本株式会社

目次

0.	エグゼクティブサマリ.....	1
0.1	実証概要	1
0.2	KPI/KGI の内容と達成状況.....	1
0.3	考察.....	5
0.4	成果.....	6
0.5	課題.....	7
1.	実証の目的及び内容等.....	8
1.1	実証の背景・取り組むべき課題.....	8
1.2	実証の目的.....	9
1.3	最終目標・構想イメージ.....	9
1.4	本実証の位置づけ・目標.....	11
1.5	社会実装に向けたロードマップ・取り組みの発展性.....	12
2.	業務実施体制.....	13
2.1	実証機関.....	13
2.2	実施体制図.....	13
3.	通信システム及び AI システムの構築.....	14
3.1	通信システム及び AI システムの全体像.....	14
3.2	通信システム及び AI システムの設置場所.....	17
3.3	通信システム及び AI システムの構築・運用に要した費用.....	25
3.4	通信システム及び AI システムの構築にあたっての留意事項等.....	26
4.	AI モデルの開発・学習.....	27
4.1	AI モデルの全体像.....	27
4.1.1	本実証により確立を目指す AI モデル・アルゴリズムの概要.....	27
4.1.2	AI モデル・アルゴリズムの機能(ルールベース).....	28
4.1.3	AI モデル・アルゴリズムの機能(機械学習).....	30
4.1.4	AI モデルの開発・改善計画.....	39
4.1.5	本 AI モデルの効率性と優位性.....	40
4.2	取得したデータ.....	41

4.2.1	取得したデータ一覧.....	41
4.2.2	データセット作成に係る処理.....	41
4.2.3	システム全体のデータフロー.....	45
4.2.4	データの適切さ.....	52
4.3	AIモデルの学習プロセス.....	56
4.3.1	学習環境.....	56
4.3.2	学習プロセス.....	56
4.3.3	AIモデルの評価.....	57
4.4	AIモデルの開発・学習にあたっての留意事項等.....	80
4.4.1	不均衡データ対策.....	80
4.4.2	特徴量エンジニアリング.....	81
4.4.3	モデル.....	81
4.4.4	データ収集.....	81
5.	実証の手法.....	82
5.1	ユースケース①:エッジ AIによる通信量の低減.....	82
5.1.1	実証内容の詳細.....	82
5.1.2	利用技術・データ.....	83
5.1.3	必要性・新規性.....	83
5.1.4	検証条件.....	84
5.1.5	開発・評価項目.....	85
5.1.6	KPI/KGI.....	89
5.2	ユースケース②:山間部や海中等の携帯電話網不感地域における通信の確立.....	90
5.3	ユースケース③:多種多様なデバイスに対する通信リソースの最適化.....	91
5.3.1	実証内容の詳細.....	91
5.3.2	利用技術・データ.....	92
5.3.3	必要性・新規性.....	93
5.3.4	検証条件.....	94
5.3.5	開発・評価項目.....	95
5.3.6	KPI/KGI.....	118
5.4	ユースケース④:分散ネットワークにおける新たな AI ソリューションの創出.....	120
5.5	拡張性に関する検証.....	121
5.5.1	実証内容の詳細.....	121
5.5.2	前提条件.....	122
5.5.3	評価項目.....	123
5.5.4	KPI/KGI.....	131
5.6	効果検証.....	134
5.6.1	実証内容の詳細.....	134
5.6.2	前提条件.....	135
5.6.3	評価項目.....	137

5.6.4	KPI/KGI.....	143
6.	実証の結果・考察.....	146
6.1	全体スケジュール.....	146
6.2	ユースケース①:エッジ AI による通信量の低減.....	146
6.2.1	実証スケジュール.....	146
6.2.2	開発・評価項目の結果.....	147
6.2.3	KPI/KGI との比較結果.....	160
6.2.4	考察.....	160
6.3	ユースケース②:山間部や海中等の携帯電話網不感地域における通信の確立 ...	163
6.4	ユースケース③:多種多様なデバイスに対する通信リソースの最適化.....	164
6.4.1	実証スケジュール.....	164
6.4.2	開発・評価項目の結果.....	164
6.4.3	KPI/KGI との比較結果.....	207
6.4.4	考察.....	210
6.5	ユースケース④:分散ネットワークにおける新たな AI ソリューションの創出.....	212
6.6	拡張性に関する検証.....	213
6.6.1	実証スケジュール.....	213
6.6.2	KPI/KGI との比較結果.....	232
6.6.3	考察.....	240
6.7	効果検証.....	242
6.7.1	実証スケジュール.....	242
6.7.2	評価項目の結果.....	242
6.7.3	KPI/KGI との比較結果.....	260
6.7.4	考察.....	266
7.	本実証の総括.....	267
7.1	本実証の成果・課題.....	267
8.	参考資料.....	269
8.1	システム構成図・設計書.....	269
8.2	ネットワーク構成図・設計書.....	269
8.3	使用機器・ソフトウェア一覧.....	270
8.4	取得したデータの例.....	274
8.5	その他、当該システムを再現する上で参考となる資料.....	275
8.6	広報活動実績.....	275
8.7	参考文献.....	275

0. エグゼクティブサマリ

0.1 実証概要

現代社会において、産業のデジタル化とスマート化が急速に進展し、多様なアプリケーションが同時並行で運用される環境が一般化している。それに伴いデータトラフィック量も増大しており、通信インフラの重要度が増している。特に製造業、物流施設などのミッションクリティカルな分野では、複数のネットワークや多様なアプリケーションが稼働する環境が主流となっており、電波遮蔽物による通信断絶や通信障害、伝送遅延の発生は生産性の低下や品質悪化につながる深刻な課題となっている。

昨今、ローカル 5G の登場により高速・大容量・低遅延の通信が実現可能となったが、単一のネットワーク技術に依存した環境では、変動する需要や多様な用途に対して常に最適な通信環境を提供することは困難である。また、障害発生時のリスクも高まっている。

本実証は、これらの課題に対し、製造現場や物流倉庫内などでの多様な通信環境の変化やトラフィック混在環境における輻輳・遅延の発生といった通信課題を解決し、システム継続性と効率性を飛躍的に向上させることを目的としている。具体的には、ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網を組み合わせたハイブリッドネットワーク環境を構築し、AI 技術を活用した異常検知と通信経路の最適化により、複数のネットワークや多様なアプリケーションが稼働している環境下における高信頼通信基盤の構築と、AI 活用による最適制御の自動化実現を目指す。

主な検証内容として、エッジ AI による映像データ伝送量の低減検証、多種多様なデバイスに対する通信リソースの最適化検証を実施し、さらに他産業分野への横展開可能性や経済的・社会的効果についても検証を行う。これにより、産業全体の DX 推進と社会インフラの強靱化に貢献することを目指している。

0.2 KPI/KGI の内容と達成状況

以下に技術検証 ユースケース①の KPI/KGI の内容と達成状況を示す。

番号	目標値	結果	達成状況
定性評価	1 配信されたカメラ映像が、運用で実用可能な画質であること	達成	<ul style="list-style-type: none">➤ 運用で実用可能な画質であった。➤ 低解像度(1Mbps)での通常監視における視認性、高解像度(8Mbps)での詳細確認の十分性を確認した。➤ 解像度切り替え時のフレームドロップやブロックノイズがなく、実務上の判断が支障なく行える画質を実現した。
定量評価	2 AI 適用前後を比較し、AI によるデータ伝送量 30%以上削減できること	達成	<ul style="list-style-type: none">➤ 設定したパターンにおいて、約 80%の伝送量削減することができた。➤ 目標の 30%削減を大幅に上回る削減率を達成した

以下に技術検証 ユースケース③の KPI/KGI の内容と達成状況を示す。

番号	目標値	結果	達成状況
定性評価	1	AGV 映像品質が十分であり、作業者が安全に遠隔操作・判断できること	一部達成 <ul style="list-style-type: none"> ローカル 5G⇔Wi-Fi 環境では、映像品質が十分であり、作業者が安全に操縦・判断できる結果となった ローカル 5G⇔公衆網環境、Wi-Fi⇔公衆網環境では、公衆網の通信帯域が不十分のため、映像が途切れてしまった
	2	カメラからの音声の途切れ・遅延が発生せず、明瞭に伝達できること	一部達成 <ul style="list-style-type: none"> ローカル 5G⇔Wi-Fi 環境では、音声を明瞭に伝達することができた ローカル 5G⇔公衆網環境、Wi-Fi⇔公衆網環境では、公衆網の通信帯域が不十分のため、映像といっしょに音声も途切れてしまった
定量評価	3	AI 制御による負荷分散を活用した際のパケットロス率 1%以下	一部達成 <ul style="list-style-type: none"> ローカル 5G⇔Wi-Fi 環境:0.0~0.4%で目標達成した。 ローカル 5G⇔公衆網環境:公衆網切り替え後に一部で 1%超過した。 Wi-Fi⇔公衆網環境:公衆網切り替え後に一部で 1%超過した。
	4	必要スループット維持率 80%以上	一部達成 <ul style="list-style-type: none"> ローカル 5G⇔Wi-Fi 環境:7.8~9.3Mbps で目標達成した。 ローカル 5G⇔公衆網環境:公衆網切り替え後は 6.4Mbps を下回ることがあり目標未達成であった。 Wi-Fi⇔公衆網環境:公衆網切り替え後は 6.4Mbps を下回ることがあり目標未達成であった。 スループットが 6.4Mbps 未満に低下した試行では、全てで映像品質劣化が発生した。
	5	異常検知から復旧・切替時の通信途絶時間 0ms、通信途絶率 0%	一部達成 <ul style="list-style-type: none"> ローカル 5G⇔Wi-Fi 環境では、回線切り替えがスムーズに実施され通信途絶なく目標達成した。ただし、回線切替後に一部で映像途切れ・乱れが発生した ローカル 5G⇔公衆網環境では、公衆網への切替後に映像途切れ、映像乱れが発生した Wi-Fi⇔公衆網環境では、一部で公衆網への切替後に通信断または映像途切れが発生した
	6	サービス不稼働率 0%	一部達成 <ul style="list-style-type: none"> 総合的なサービスレベル指標維持検証において通信切断、映像途切れが発生した試行があった。 これらの試行においては、サービス不稼働となる時間帯があり、目標値を達成できていない ローカル 5G⇔Wi-Fi 環境(Wi-Fi 負荷)においては映像品質の劣化がなくサービス不稼働率 0 となり目標を達成した。

以下に拡張性検証の KPI/KGI の内容と達成状況を示す。

番号	目標値	結果	達成状況	
定性評価	1	物流・防災分野の実ユースケースにおける通信要件整理	達成	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 物流業、防災業、航空業の3分野における通信要件を体系的に整理することができた ➢ 物流業は、本技術の適用性が高い結果となった。 ➢ 防災業は、本技術の適用性が困難である結果となった。 ➢ 航空業は、本技術の適用性が限定的である結果となった。
	2	多様な環境条件下での通信品質維持能力確認	達成	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 物流倉庫を模擬した大型遮蔽物(トタン)設置という環境条件変化に対し、本実証で開発した AI 技術が有効に機能することが実証された。 ➢ トタン設置により、受信電界強度やスループットは低下したが、本技術を活用することで、映像の途切れや乱れを防止し、通信品質維持していることが実証できた。
	3	ローカル 5G 不在環境でもハイブリッドネットワークのメリットを活かせる構成モデルの確立	一部達成	<ul style="list-style-type: none"> ➢ Wi-Fi+公衆網構成における検証を実施し、一定の効果を確認できた。 ➢ Wi-Fi 接続開始時(機械学習):映像品質問題なし、スループット約 8.0Mbps であった。 ➢ 公衆網接続開始時:通信品質が不十分であった。スループット 2.6~7.5Mbps で映像途切れが発生した。
定量評価	4	他分野を想定した模擬環境試験において必要スループット維持率 80%以上を達成	一部達成	<ul style="list-style-type: none"> ➢ ローカル 5G⇔Wi-Fi 環境:約 8.0Mbps で目標達成した ➢ Wi-Fi+公衆網環境(Wi-Fi 接続時):約 8.0Mbps で目標達成した。 ➢ Wi-Fi+公衆網環境(公衆網接続時):2.6~7.5Mbps で目標未達成であった。
	5	他分野を想定した模擬環境試験においてパケットロス率 1%以下	一部達成	<ul style="list-style-type: none"> ➢ ローカル 5G⇔Wi-Fi 環境:パケットロス率 0.0%で目標達成した ➢ Wi-Fi+公衆網環境:映像途切れ・乱れが発生した試行では目標未達成であった。
	6	Wi-Fi+公衆網構成でも品質劣化時の通信途絶時間 0ms、通信途絶率 0%	一部達成	<ul style="list-style-type: none"> ➢ Wi-Fi 接続開始時(機械学習):通信途絶時間 0ms、通信途絶率 0%を達成した。 ➢ 公衆網接続開始時:両方式とも映像が途切れ、目標未達成であった。

以下に効果検証の KPI/KGI の内容と達成状況を示す。

番号	目標値	結果	達成状況
定性評価	1 カメラ映像が自動作業の実施可否の判断が可能な画質であること	一部達成	<ul style="list-style-type: none"> ➤ ローカル 5G⇔Wi-Fi 検証:映像品質に関する 3 項目すべてで平均 3.7 点以上(4 段階評価)を獲得し、目標達成した。 ➤ Wi-Fi⇔公衆網検証:「移動しているカメラの映像は安全面・実用面で問題ない」が平均 2.7 点で目標(3.0 点)をわずかに下回った。 ➤ 公衆網使用時の映像品質低下や遅延が課題。公衆網はバックアップ回線としての位置づけが適切である。
	2 アンケートにおける業務効率改善の実感度が 5 段階評価で平均 4.0 以上であること	達成	<ul style="list-style-type: none"> ➤ ローカル 5G⇔Wi-Fi 検証:平均 3.4 点で目標達成した。 ➤ Wi-Fi⇔公衆網検証:平均 3.3 点で目標達成した。 ➤ 通信障害の自動検知と無線切り替えにより、作業者の負担が大幅に軽減され、業務効率改善が現場レベルで実感された。
定量評価	3 運用工数 30% 低減、障害復旧時間 30% 低減	達成	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 運用工数削減:77.8~85.2%削減 ➤ 障害復旧時間削減:実質 100%削減 ➤ AI 活用により製造代替作業を削減、年間コスト削減率 87.4%を実証した。 ➤ 障害検知から復旧まで人手作業で 3~4 日要していたが、AI 制御により通信品質劣化を予兆段階で検知し、代替ネットワークへ自動切り替えを実現した。
	4 スループット維持率 80%以上、遅延変動 30%減少	一部達成	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Wi-Fi 接続開始時:両 AI 方式ともスループット維持率 100%で目標達成した。 ➤ 公衆網接続開始時:ルールベースで部分的達成、機械学習では未達成であった。 ➤ 遅延変動:Wi-Fi→公衆網で遅延時間が 10 倍に増加した。公衆網→Wi-Fi で遅延時間が 30%以下に減少した。 ➤ Wi-Fi 環境が良好な場所では、通信制御 AI(機械学習)による適切な経路維持で安定した高品質通信を実現した。
	5 投資回収期間 4 年以内	未達成	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 投資回収期間:6.2 年であった。 ➤ 改善の余地として、①削減コストに間接的効果(生産性向上、品質改善、安全管理強化)を含める、②運用コストの最適化、③製品化による初期投資額削減が挙げられる。

0.3 考察

- 本実証では、エッジ AI による通信量削減と AI 活用ハイブリッドネットワーク制御により、製造現場における「止めない製造」の実現可能性を実証した。
- ユースケース①では、エッジ AI による移動体検知と連動した動的映像品質制御により、目標値 30%削減に対して約 77.4%~80.5%という 2.6~2.7 倍の通信量削減効果を達成した。前方 5m 拡張の方向限定型検知エリア設定(設定②)は、80.4%の削減率と 100%の切り替え成功率を両立し、誤検知率を 85%に抑制できた。8 時間稼働で 225GB を約 44GB まで圧縮でき、同一ネットワークで 15~17 台程度のカメラ運用が可能となることが実証された。
- ユースケース③では、異常検知 AI と通信制御 AI を組み合わせたハイブリッドネットワーク制御システムにより、電波環境や通信回線の混雑状況の変化に対しても安定した通信品質を維持できることを実証した。全試行の約 34%において AI 技術による映像品質維持効果が確認され、通信異常の予測的回避と動的な通信リソース最適化を同時に実現する本技術の先進性が実証された。ローカル 5G⇔Wi-Fi 環境ではパケットロス率 0.0~0.4%、スループット 7.8~9.3Mbps を達成し、単一ネットワークや固定 QoS 方式では回避困難な通信異常に対し、必要最低限の無線リソースで通信品質を維持できる優位性を確認した。一方で、公衆網を含む環境では通信帯域不足による映像途切れが発生し、社会実装に向けては通信制御 AI の性能改善が課題となった。具体的には、切替先の回線状態を受信電界強度のみでなく無線チャンネル品質や無線リソース占有率で評価する機能、異常検知 AI 出力の平均化処理見直しによる制御遅延短縮が必要である。
- 拡張性検証では、物流業で最も高い適用可能性を確認し、トタン設置実験において電波環境変化に対しても映像の途切れを完全に防止できることを実証した。ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網の 3 種類を組み合わせたハイブリッド構成が最も優れており、特にローカル 5G⇔Wi-Fi 組み合わせは高い適応性を示した。
- 効果検証では、投資回収期間 6.2 年という結果が得られ、当初目標の 4 年以内を上回ったものの、AI 活用による自動化により人手不足や属人化の解消に貢献できることが確認された。今後、通信制御 AI(機械学習)の性能向上、公衆網を含む構成の安定性向上などの技術的改善により、投資回収期間の短縮と社会実装の加速が期待される。

0.4 成果

- 本実証では、ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網を組み合わせたハイブリッドネットワーク環境において、AI 技術を活用した異常検知と通信経路の自動最適化により、製造現場における高信頼通信基盤の構築に成功した。
- ユースケース①:エッジ AI による通信量の低減では、移動体検知と連動した動的映像品質制御により、目標値 30%削減に対して約 77.4%~80.5%という目標の 2.6~2.7 倍の通信量削減効果を達成した。前方 5m 拡張の方向限定型検知エリア設定では、80.4%の削減率と 100%の切り替え成功率を両立し、従来 3~4 台のカメラで帯域を占有していた環境において、15~17 台程度のカメラを同一ネットワークで運用可能となることが実証された。
- ユースケース③:多種多様なデバイスに対する通信リソースの最適化では、異常検知 AI と通信制御 AI を組み合わせたシステムの段階的検証を実施した。第 1 段階で AI 技術を導入しない状態での基準データを取得、第 2 段階で AI 技術を導入した状態での測定、第 3 段階で実際の移動シナリオを想定した総合的な比較検証を行い、AI 導入による改善効果を定量的に評価した。ローカル 5G⇄Wi-Fi 環境では、パケットロス率 0.0~0.4%で目標の 1%以下を達成し、異常検知 AI が通信品質劣化を予兆段階で検知、通信制御 AI が最適なネットワークへの切り替えを実行することで、電波遮蔽物による通信環境の変化やネットワーク負荷の増大に対しても安定した通信品質を維持できることが確認された。一方、公衆網環境では屋内における通信帯域不足により映像途切れが発生し、公衆網をバックアップ回線として活用する際の通信品質確保が課題として明確になった。
- 拡張性検証では、物流業、防災業、航空業の 3 分野における通信要件を整理し、物流業では大型遮蔽物設置という環境条件変化に対し、AI 技術が有効に機能することが実証された。ローカル 5G 不在環境でもハイブリッドネットワークのメリットを活かせるのか検証するために行った Wi-Fi+公衆網構成の検証では、Wi-Fi 環境が良好な場所では機械学習の通信制御 AI による適切な経路維持により、安定した高品質通信を実現できることが確認された。
- 効果検証では、AI ハイブリッドネットワーク制御システムの導入により、年間約 368 万円(削減率 87.4%)のコスト削減効果、運用工数削減率 77.8~85.2%、障害復旧時間の実質 0ms 化を実証した。投資回収期間は 6.2 年と算出され、当初目標「4 年以内」を上回ったが、間接的効果を含めれば 4 年以内に収まる可能性がある。社会的価値の評価では、国際電気ラボ関係者および関連工場関係者 20 名を対象としたアンケート調査で平均 3.1~3.4 点(4 点満点)の高評価を得た。

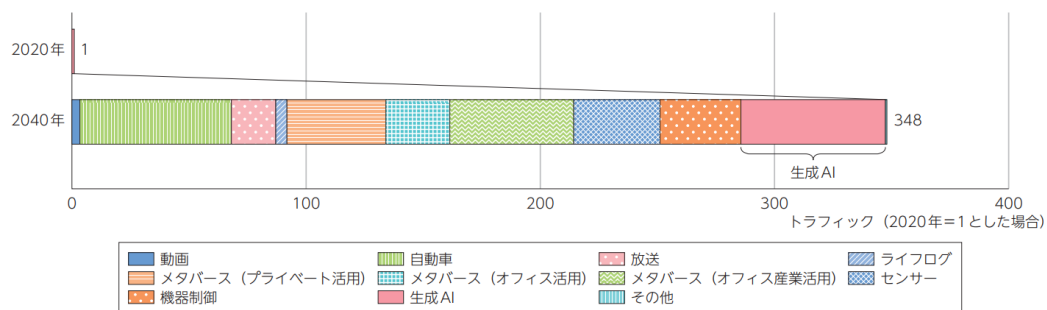
0.5 課題

- 本実証を通じて、AI×通信の社会実装に向けた技術的改善課題と展開課題が明確になった。
- 技術的改善課題として、第一にエッジ AI 検知の精度向上が挙げられる。全方向 5m 拡張の検知エリア設定では誤検知率 95%、前方 5m 拡張でも誤検知率 85%が残存しており、照明条件の変化、複数人の同時検知、走行中の AGV との識別など、製造現場の多様な状況に対応できる検知アルゴリズムの改良が必要である。
- 第二に、公衆網の通信品質向上である。公衆網を主要通信回線として使用する構成は、屋内環境では通信品質が不安定であり、スループット維持に課題があることが判明した。公衆網接続開始時の検証では、測定開始時 8.0Mbps 以上あったスループットが移動により平均 2.6～4.2Mbps まで低下し、経路切り替え前に映像が切断される事象が発生した。今後、公衆網→Wi-Fi 切り替えパターンを含む多様な学習データの拡充と、通信制御 AI の切り替えロジック改良により、各回線の通信品質をリアルタイムに監視・評価して切り替え判断に反映する機能の実装が必要である。
- 第三に、通信制御 AI(機械学習)の改良である。Wi-Fi 環境が良好な場所では適切な経路維持により安定した高品質通信を実現できるが、公衆網を含む多様な環境下では、ルールベース通信制御 AI の方が切り替え判断の透明性と確実性において優位性を示した。通信制御 AI(機械学習)の学習データ拡充、屋内・屋外、Wi-Fi・公衆網の組み合わせなど多様な通信環境下での最適な経路選択を可能にする必要がある。
- 今後の展開課題として、第一に横展開の推進が挙げられる。本実証で確立した技術と知見を、製造業以外の産業分野(物流、インフラ監視、農業など)へ横展開することで、社会全体の DX 推進に貢献できる。特に、複数の監視カメラや通信機器が常時稼働する環境において、通信量削減と通信品質維持を両立する本技術の適用可能性は高いと考えられる。今回ニーズを聴取した物流業や航空業の事業者と連携して実フィールドでの検証の具体化を進めるとともに、他の産業分野での適用可能性についても探索を継続する必要がある。
- 第二に、実証成果の発信である。本実証で得られた定量的成果(運用工数削減率 77.8～85.2%、障害復旧時間実質 0ms、年間コスト削減率 87.4%、投資回収期間 6.2 年など)を、製造事業者、通信事業者、ソリューション提供事業者へ積極的に発信し、導入検討の促進を図る必要がある。また、段階的導入による初期投資の抑制や、効果検証を経た横展開といったアプローチについても、具体的な導入モデルとして提示していくことが重要である。

1. 実証の目的及び内容等

1.1 実証の背景・取り組むべき課題

現代社会において、産業のデジタル化とスマート化が急速に進展し、多様なアプリケーションが同時に稼働する複数用途のアプリケーションが同時並行して運用される環境が一般化されている。それに伴いトラフィック量も増大しており、その重要度(堅牢性、柔軟性)が増している。特に製造業、物流施設などのミッションクリティカルな分野では、複数のネットワークや多様なアプリケーションが稼働している環境が主流となっている。そのため電波遮蔽物による通信断絶や通信障害、伝送遅延が発生すると、生産ラインでの異常検知漏れによる障害発生による品質の低下や、AGV が制御できなくなることによる生産ライン停止が生産性低下につながるなど工場や倉庫での課題となっている。



(出典) 三菱総合研究所「ICTインフラの三重苦を回避する」^{*24}

出典:<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r06/pdf/n1610000.pdf>

図 1.1-1 産業のデジタル化とスマート化によるデータトラフィックの増加

また昨今ローカル 5G の登場により高速・大容量・低遅延の通信が実現可能となったが、単一のネットワーク技術に依存した環境では、変動する需要や多様な用途に対して常に最適な通信環境を提供することは困難である。また、障害発生時のリスクも高まっている。

上記課題に対し、以下課題が挙げられる。

1. 複数用途のアプリケーションが同時並行して運用される環境での通信品質確保

製造業、物流業では、ローカル 5G などの単一ネットワーク環境下で複数の異なる要件を持つアプリケーションが共存する環境が主流となっている。こうした環境において、AGV の遠隔制御、異常発生時の通知などミッションクリティカルな用途に必要な通信品質を確実に担保する技術が確立されておらず、急務となっている。

2. ネットワークの冗長化によるシステム継続性の確保

産業用途では通信の断絶が許容されない場面が増加しているが、単一ネットワークに依存するシステムでは、障害発生時のリスクが高いため、ローカル 5G に加え、Wi-Fi や公衆網といった複数無線による冗長化により可用性を担保することが必要である。また、無線を切り替えて移動する際にシームレスな接続が求められる。

3. ネットワークのトラフィック状況に応じたリアルタイム制御の自動化

① エッジ部で AI を活用した通信負荷軽減

② 複数のネットワークのリアルタイム自動制御

複数のネットワーク技術を併用することになるが、現状は個別に各ネットワークを運用管理する必要が

あり、技術者の負担増大やコスト増加につながっている。特に昨今では専門技術者の不足が深刻であり、持続可能な省人化・省力化した運用モデルの確立が急務となっている。

1.2 実証の目的

本実証は、製造現場や物流倉庫内などでの多様な通信環境の変化やトラフィック混在環境における輻輳・遅延の発生といった通信課題を解決し、システム継続性と効率性を飛躍的に向上させることで、スマート産業基盤の実現に貢献することを目的としている。

具体的には複数のアプリケーションが稼働している環境下における高信頼通信基盤の構築と、AI 活用による最適制御の自動化実現を目指す。

実証の目的達成に向け、以下の検証を行う。

1. 複数のアプリケーションが稼働している環境における最適化された通信品質の検証

ローカル 5G を核としつつ、Wi-Fi や公衆網を組み合わせたハイブリッドネットワーク環境を構築する。異なる通信特性を持つネットワークチャネルを連携させることで、複数のネットワークが稼働している環境においても、各アプリケーションの要求に応じた最適な通信品質を見極める。特にミッションクリティカルな用途である、製造業における AI を活用したリアルタイム映像解析を検証シーンとして選定し、必要な通信品質を常時確保することを目指す。

2. 通信の冗長化とシームレスなエリア展開

複数の無線ネットワークを冗長的に活用し、一部の無線区間に障害が発生した場合でも、シームレスに別無線へ切り替えることで通信の可用性およびシステム継続性を検証する。また、エリアの補完や拡張を効率的に実現し、AGV 等の移動体においても安定した通信環境を提供する。これにより、産業用途だけでなく緊急対応などの重要シーンでも安心して利用できる高信頼システムの確立を目指す。

3. ネットワークトラフィック状況に応じたリアルタイム制御の自動化検証

①エッジ AI によるデータ圧縮・要約機能、移動体センシングデータのリアルタイム整理、通信負荷変動時の動的リソース割当てにより解決する。

②ネットワーク状態や端末の振る舞いをリアルタイムで監視・分析し、環境変化を表示する運用管理プラットフォームを構築する。収集したデータを基に、最適なネットワーク制御パラメータを自動的に調整し、常に最適な通信環境を維持する仕組みを検証する。これにより、専門知識を持たない担当者でも高度なネットワーク運用が可能になり、運用コストの削減と安定性向上を両立する。

これらの検証を通じ、生産性向上や安全性確保、迅速な意思決定を支援し、産業全体の DX 推進と社会インフラの強靱化に貢献する。

1.3 最終目標・構想イメージ

本実証の最終目標は、多様な通信環境の変化に自律的に適応し、あらゆるアプリケーションに最適な

通信環境を常時提供することである。そのために、AI を利用しネットワーク状態や端末の振る舞いをリアルタイムで監視・分析し、環境変化を表示する運用管理プラットフォームを活用することにより「環境適応型 AI 高信頼通信基盤」の確立を 2027 年度までに目指す。

本実証の成果は、以下のようなユースケースでの社会実装を想定している。

1. 移動する多様な大型遮蔽物(物流倉庫内の搬送物・駐車場のトラック)に対応する無線運用

物流倉庫や空港などにおいて、大型の電波遮蔽物の移動によって通信環境が急変することに対し、AI が電波伝搬特性の変化をリアルタイムで予測・検知して、最適なネットワークチャネル(ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網)へ自動的に切り替える。これにより、物流管理や車両・船舶・航空機の安全運行に必要な情報の途絶を防止し、システムの継続性と安全性を確保する。

2. 安定した遠隔制御・ロボット運用

ローカル 5G の特性を活かし、複数用途(ロボット制御、ドローン監視、センサーデータ収集など)にてロボットやシステムが同時稼働する環境において、AI がリアルタイムでトラフィック状況を分析し、各用途の要求品質に合わせた最適なリソース配分を実現する。特に制御データなど低遅延が求められる通信とセンシングデータなど大容量伝送が必要な通信の混在環境でも、それぞれの要件を満たすネットワークスライスを動的に構成・制御する。さらに、用途ごとのトラフィックパターンを AI が学習し、将来の輻輳を予測して事前に対策を講じることで、常に安定した通信環境を維持する。

3. 製造ラインの品質管理

製造ラインの品質管理や監視カメラシステムにおける高精細映像のリアルタイム伝送・解析をエッジ AI にて実現する。通信状況に応じてエッジ側での前処理範囲を動的に調整し、必要最小限のデータ伝送で高精度な分析結果を得る仕組みを構築する。また、映像品質と分析精度のバランスを保ちながら、ネットワーク負荷に応じた最適な映像パラメータ(解像度、フレームレート、圧縮率など)を自動調整することで、限られた帯域でも常に業務に必要な十分な映像品質と解析精度を確保する。

1.4 本実証の位置づけ・目標

現在の複数のネットワークや多様なアプリケーションが稼働している環境下では、電波遮蔽物による通信断絶、通信の混在による品質低下といった課題が存在している。一方、最終目標である「環境適応型 AI 高信頼通信基盤」の確立の実現には以下のような問題が存在する。

1. データ不足と効果未検証

複数のネットワーク、アプリケーションが稼働している環境下ではハイブリッドネットワーク運用データや、AI による制御効果の実証データが不足しており、導入判断の根拠となる定量的知見が確立されていない

2. 最適構成・パラメータの未確立

各ユースケース(物流、ロボット制御、映像伝送)に最適なネットワーク構成やパラメータ設定が体系化されていない

3. AI モデルの未確立

通信環境の変化予測や最適制御を行う AI モデルの基本構造や学習手法が確立されておらず、実用化への道筋が確立されていない

本実証は、これらのギャップを埋めるステップ1として、実環境でのデータ収集と AI プロトタイプ of 構築・検証を行い、将来の実用システム開発に向けた基盤を確立する。

具体的には以下のとおりである。

1. ローカル 5G を活用した複数のアプリケーションが稼働している環境下への最適な通信環境提供

ローカル 5G を核とした複数のアプリケーションが稼働している環境に最適な通信環境を提供する基盤を確立する。産業現場でのアプリケーション高度化と利用拡大に伴い、ローカル 5G エリアの拡張と普及が加速する中、多様な要件を持つトラフィックが混在する環境でも各用途に最適な通信品質を保証する方法論を確立する。

2. ハイブリッドネットワークで冗長化/シームレス化し、必要性に応じた環境を提供

ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網を組み合わせたハイブリッドネットワークにより、冗長化による安定性とシームレスな接続を実現する。全域を単一ネットワークで構築するのではなく、用途や必要性に応じて複数のネットワークを組み合わせた構築を行うことで、社会実装を考慮した通信インフラのモデルケースを提供する。

3. ネットワークの混雑状態などをリアルタイム監視する仕組みを構築し提供

通信状態や環境変化をリアルタイムで監視し、分析するシステムの基盤を構築する。AI のプロトタイプ of 構築とデータ収集の枠組みを確立することで、将来的なネットワーク運用管理の高度化に向けた土台を築く。これにより、サービスレベルの維持と運用効率の向上を両立する次世代ネットワーク運用のあり方を提示する。

本実証以降では、ステップ2として、AI プロトタイプ of 最適化、ハイブリッドネットワークの改善、ネットワークの健全性維持/改善を行い、最終目標である「環境適応型 AI 高信頼通信基盤」の確立の実現に向けて取り組む。

1.5 社会実装に向けたロードマップ・取り組みの発展性

まず 2025 年度までに収集した複数のアプリケーションが稼働している環境下でのデータと AI プロトタイプを基に、通信環境の予測アルゴリズム精度の向上と実用化検証を実施する。実際にデモ環境でローカル 5G⇔Wi-Fi、公衆網⇔Wi-Fi のエリアを構築・導入実験を行い、長期運用データの蓄積を通じて AI モデルの精度向上と運用ノウハウの蓄積を図る。2026 年度には、初期導入実験から抽出された課題を解決しながら、ハイブリッドネットワークの機能を高度化させる。特に複数通信技術間でのシームレスな切り替え技術の完成度を高め、通信状態の予測に基づくプロアクティブな制御機能の実装を目指す。また、ローカル 5G が導入されていない環境においても Wi-Fi、公衆網の組み合わせによるハイブリッドネットワーク構成の最適化手法の確立を目指す。2027 年度には、蓄積された運用データと改良された AI モデルを活用し、完全自律型の通信制御システムとしての製品化を完了させ、幅広い産業分野への展開を本格化させる。特に製造業、物流、インフラ監視、防災など社会的重要性の高い分野を中心に普及を図るとともに、自動運転やスマートシティなど、将来の高度社会インフラとの連携も視野に入れた発展的取組を進める。これらの取組により、多様な通信環境における高信頼な通信基盤を実現し、日本の産業競争力強化と社会課題解決への貢献を目指す。特に、デジタルトランスフォーメーションが進む産業現場において、安定性と柔軟性を両立した通信基盤を提供することで、製造業の DX 推進、物流の効率化、インフラ監視の高度化など、多岐にわたる社会的効果を創出する。

表 1.5-1 社会実装に向けたロードマップ

年度	計画	実施場所
2025	<ul style="list-style-type: none"> ・ ルールベースと機械学習を組み合わせた AI プロトタイプの基本構造確立と精度検証 ・ 特徴量抽出アルゴリズムの最適化 ・ 実証環境でのハイブリッドネットワーク基本動作検証 ・ 実環境データ収集と分析基盤の構築 	株式会社国際電気(以下国際電気とする)デモ環境、製造棟で試験導入
2026	<ul style="list-style-type: none"> ・ 統計・時系列解析手法を用いた特徴量追加による AI モデル高度化 ・ 通信状態予測精度向上の最適化 ・ 複数通信間シームレス切り替え技術の完成 ・ ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網環境での最適構成手法確立 	国際電気デモ環境での高度化、機能追加 実フィールド(生産工場)への導入
2027	<ul style="list-style-type: none"> ・ 強化学習アルゴリズムによる自律通信経路最適化の実現 ・ 完全自律型の通信制御システムの製品化 ・ 製造業、物流業など複数業種への本格展開 ・ 自動運転、スマートシティ連携などに関する実証および導入検討 	製造業、物流業への製品の展開 自動運転、スマートシティの PoC

2. 業務実施体制

2.1 実証機関

代表機関	法人名	株式会社 国際電気
	代表者氏名	代表取締役 佐久間 嘉一郎
	所在地	東京都港区西新橋 2-15-12(日立愛宕別館 6F)
	業務の概要	無線通信・映像ソリューションを中心とした開発・製造
構成員	法人名	NTT 東日本株式会社
	代表者氏名	代表取締役社長 澁谷 直樹
	所在地	東京都新宿区西新宿 3-19-2
	業務の概要	東日本地域における地域電気通信業務及びこれに付帯する業務、目的達成業務、活用業務
	構成員とする理由	ローカル 5G を含めた先進的な無線技術に関する知見・ノウハウを有し、実証における無線環境評価等の検証支援が可能なため。

2.2 実施体制図

以下に実施体制図を示す。

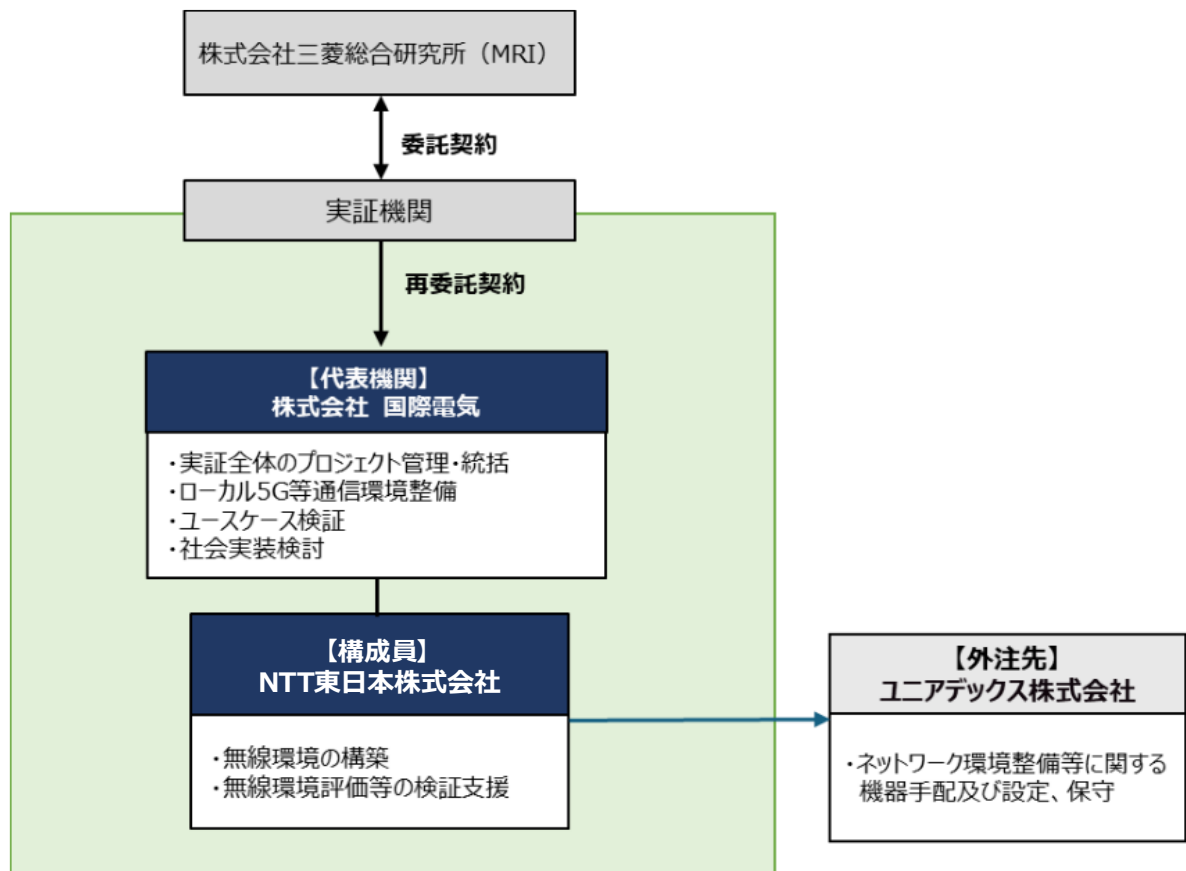


図 2.2-1 実施体制図

3. 通信システム及び AI システムの構築

3.1 通信システム及び AI システムの全体像

本システムでは、ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網を統合したハイブリッドネットワーク環境において、AI 技術を活用し、最適な通信制御やデータ処理を実現した。

本実証では 2 つの主要なユースケースを検証する。ユースケース①では、エッジ AI による通信量の低減を行う。この検証では、製造現場の監視カメラにおいて、国際電気製エッジ AI が侵入禁止エリアへの移動体侵入をリアルタイムで検知し、検知時のみ高解像度映像(8Mbps)へ自動切替することで、平時は低解像度(1Mbps)での伝送により通信負荷を削減する。ユースケース③では、多種多様なデバイスに対する通信リソースの最適化を行う。この検証では、AGV や監視カメラなど複数のアプリケーションが同時稼働する環境において、受信電界強度、スループット、ICMP 応答時間などの通信品質データを時系列で収集・分析し、通信品質の変化パターンから 1 秒後の異常発生確率を推定する異常検知 AI と、異常検知 AI の推定結果とネットワーク状態(電界強度、遅延時間等)に基づいて、最適な通信回線(ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網)への自動切り替えや QoS 調整を実行する通信制御 AI により、各デバイスに最適な通信環境を提供する。

これら 2 つのユースケース検証を組み合わせることで、限られた無線リソースの効率的活用と、環境変化に対応した高信頼な通信基盤の両立を実現する。

以下にシステム構成図を示す。

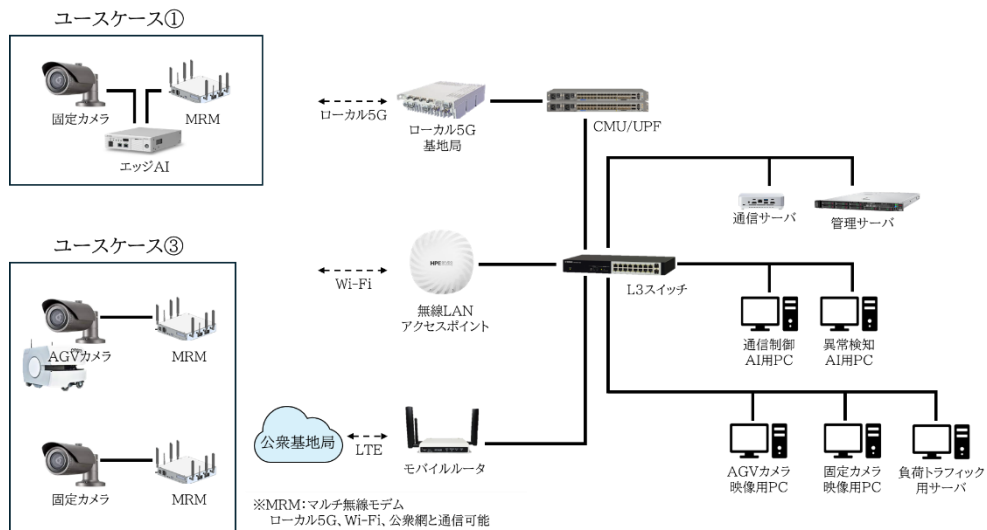


図 3.1-1 ユースケース①、③ システム構成図

システムとしては以下の4つの要素を組み合わせることで、効率的かつ柔軟な通信システムを構築した。

① 用途ごとの適切なパラメータ、サービスレベル指標の創出

複数のユースケースが同時並行で稼働する状況において、トラフィック特性をリアルタイム解析し、最適な5Gパラメータを動的に調整する。これにより、通信遅延・スループット・信頼性など通信品質のバランスを、ユースケース特性に応じて最適化する。

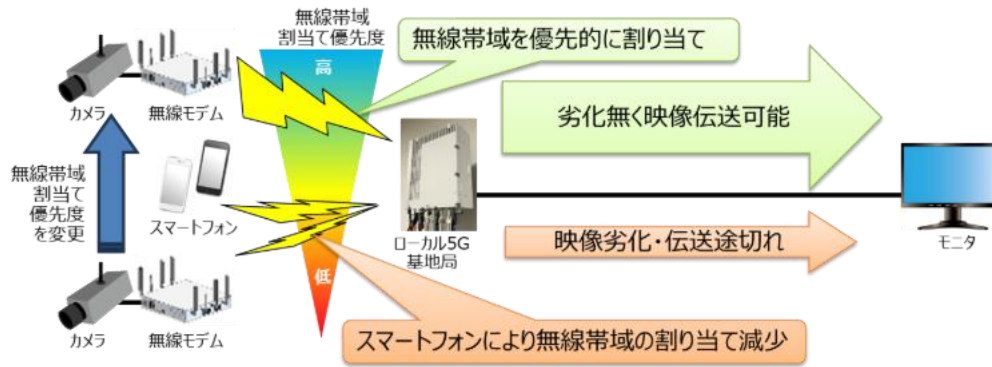


図 3.1-2 ローカル 5G パラメータの最適化の概念図

② ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網のハイブリッドネットワークによる冗長性・エリア補完

通信の信頼性を高めるため、各ネットワークの状態を監視し、最適な通信経路を選択する。途切れない通信環境を実現し、冗長性とエリア補完を確保する。



図 3.1-3 ハイブリッドネットワークの概念図

③ ハイブリッドネットワークの監視と振る舞い検証及び環境変化に合わせたネットワーク制御

ハイブリッドネットワーク上の通信状況や端末の振る舞いを監視・分析することで、異常な通信パターンの検出・復旧手法の確立、異常通信発生時の最適通信経路の選択を行い、システムの安定性を向上させる。

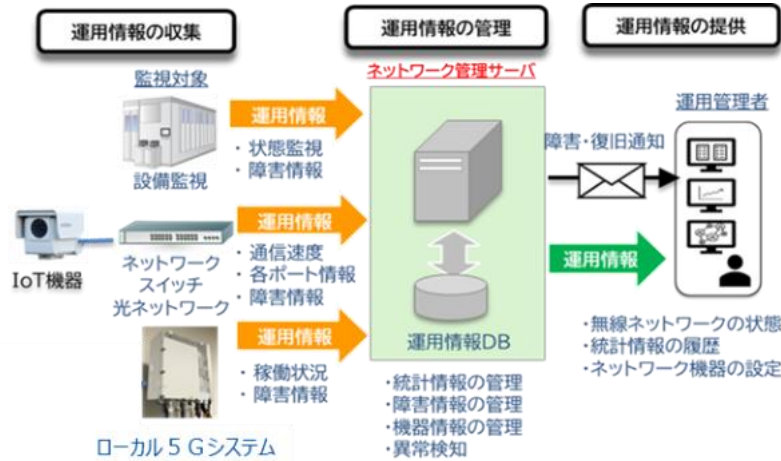


図 3.1-4 ハイブリッドネットワーク監視の概念図

④ AI 活用によるデータ伝送量の低減

エッジ AI を活用し、生データをクラウドに送信せずに解析結果のみを送送することで、通信負荷を軽減する。例えば、カメラ映像から必要な情報のみを抽出し、異常検知結果を送信することで、帯域を効率的に利用する。

本システムにより、産業分野でのデータ活用が加速し、スマートファクトリーやスマートシティの実現、災害時の迅速な情報共有、効率的なインフラ管理など、幅広い社会価値を生み出すことが期待される。

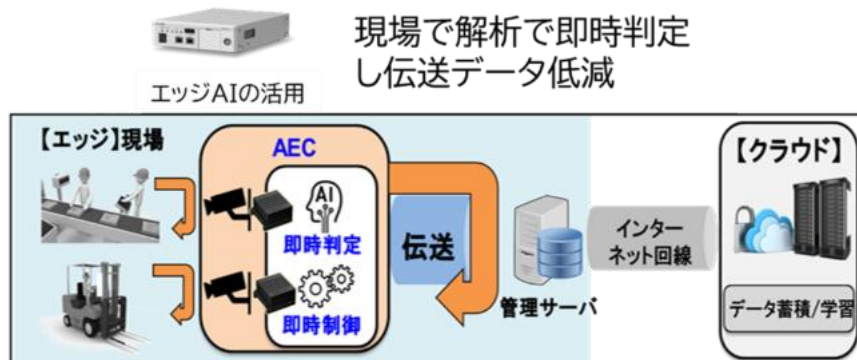


図 3.1-5 エッジ AI を活用によるデータ伝送量の低減概念図

3.2 通信システム及び AI システムの設置場所

(1) 設置場所

本実証環境は、ローカル 5G 基地局や各種アプリケーションを設置している国際電気協創ラボおよび同社製造棟を選定した。協創ラボでは、各種無線、アプリケーションが混在している環境にハイブリッドネットワーク環境を構築した。製造棟では、製造業や物流業などの現場を模擬した環境を構築した。製造棟では無線機器等の検証・製造を行っている設備であり、実際の製造現場の基本的な環境を有している。本検証では、製造業や物流業の現場で頻繁に発生する電波環境の変化を再現するため、金属製の棚を模した大型の電波遮蔽物を意図的に配置した。これにより、実際の物流倉庫において、在庫棚の移動や生産設備のレイアウト変更に伴って発生する電波遮蔽や通信品質の劣化を模擬し、ハイブリッドネットワークの切り替え効果を検証する環境を構築した。



図 3.2-1 実験場所:国際電気協創ラボ



図 3.2-2 実験場所:国際電気製造棟

各種機器の設置場所を以下に示す。

表 3.2-1 実施場所と無線利用設備

実証場所			無線利用設備	
項番	設置場所	住所	基地局	移動局
1	協創ラボ	東京都小平市御幸町 32	ローカル 5G 基地局 アクセスポイント LTE ルータ	マルチ無線モデム スマートフォン
2	製造棟	東京都小平市御幸町 32	ローカル 5G 基地局 アクセスポイント LTE ルータ	マルチ無線モデム スマートフォン

協創ラボの設置について図 3.2-3 を用いて説明する。協創ラボにローカル 5G コア装置、ローカル 5G 基地局、LTE ルータを設置する(既設)。ローカル 5G コア装置から協創ラボ外に設置したアクセスポイントまで LAN ケーブルで接続した。ローカル 5G 基地局周辺からアクセスポイント周辺を検証メイン場所として行った。

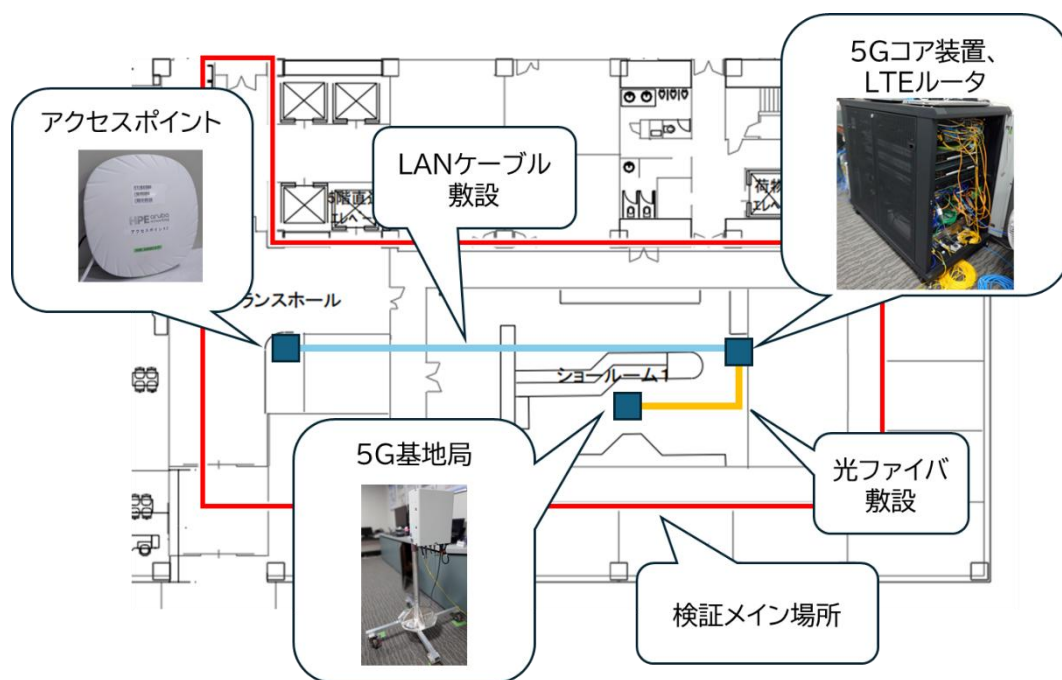


図 3.2-3 協創ラボ機器設置場所

次に製造棟の設置について図 3.2-4 を用いて説明する。協創ラボから、ローカル 5G 基地局、アクセスポイントまでの間を光ファイバ、LAN ケーブルで接続した。ローカル 5G 基地局周辺からアクセスポイント周辺を検証メイン場所として行った。

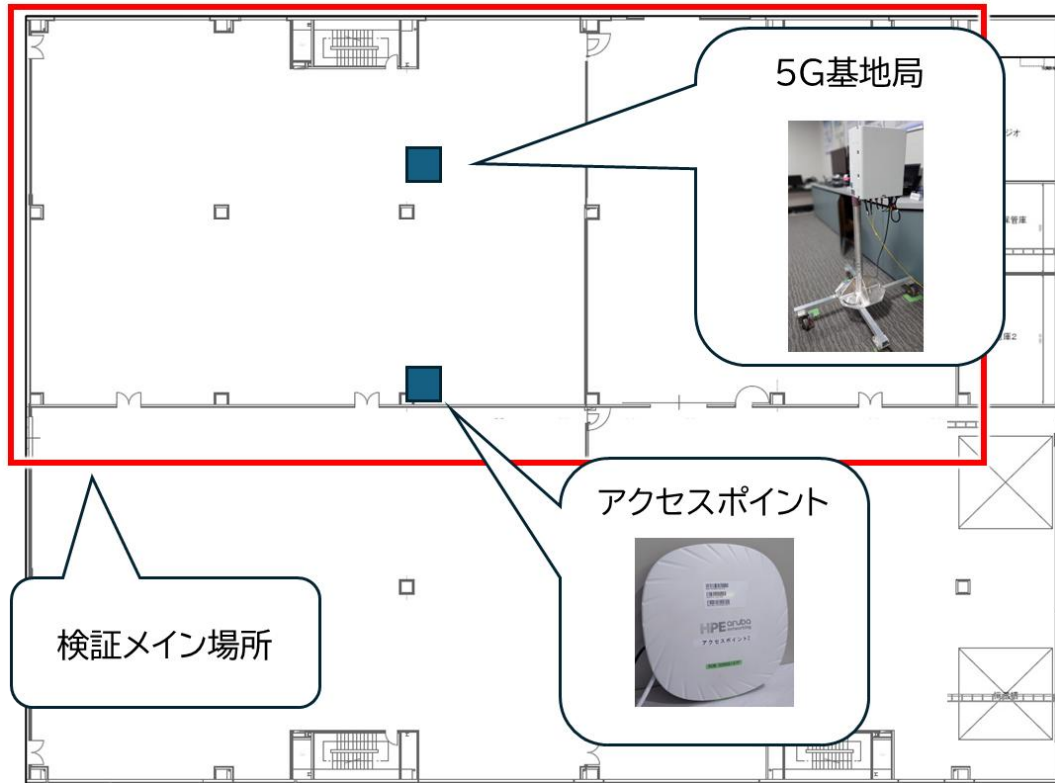


図 3.2-4 製造棟機器設置場所

(2) ネットワークシステム構成

本検証のシステムは Nokia 社製 SA 方式のローカル 5G システム、Aruba 社製のアクセスポイント、公衆網として IIJ 社の回線を活用した。なお、国際電気協創ラボおよび製造業の公衆網環境は 5G 回線が弱いため、LTE 回線にて検証を行った。本検証で業務アプリケーションと接続する端末は国際電気製マルチ無線モデム(MRM)を活用した。

ユースケース①では、無線部としてローカル 5G、アプリケーションとして固定カメラ、国際電気製エッジ AI を活用した。エッジ AI で移動体を検知後した際、エッジ AI 制御用 PC でカメラの解像度を変更した。

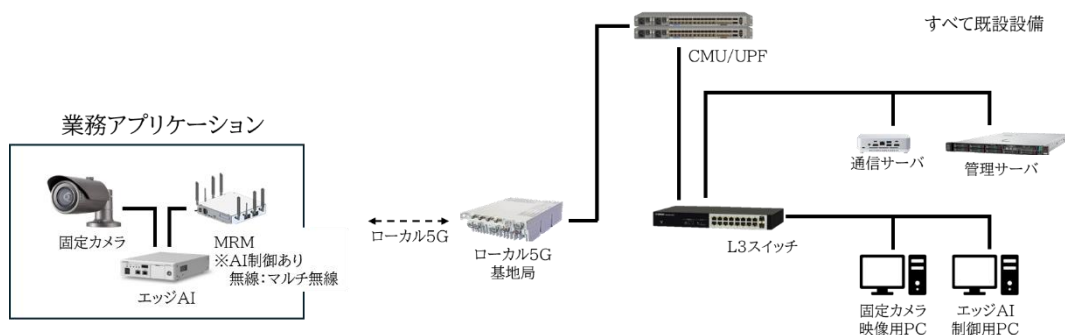


図 3.2-5 ユースケース①システム構成図

ユースケース③では、無線部としてローカル 5G、Wi-Fi、公衆網を活用し、通信端末を国際電気製マルチ無線モデム(MRM)、アプリケーションとして固定カメラ、AGV を活用する。

本システムは、通信サーバ、管理サーバ、異常検知 AI、通信制御 AI から構成され、複数の無線環境下での最適な通信リソース配分を実現する。

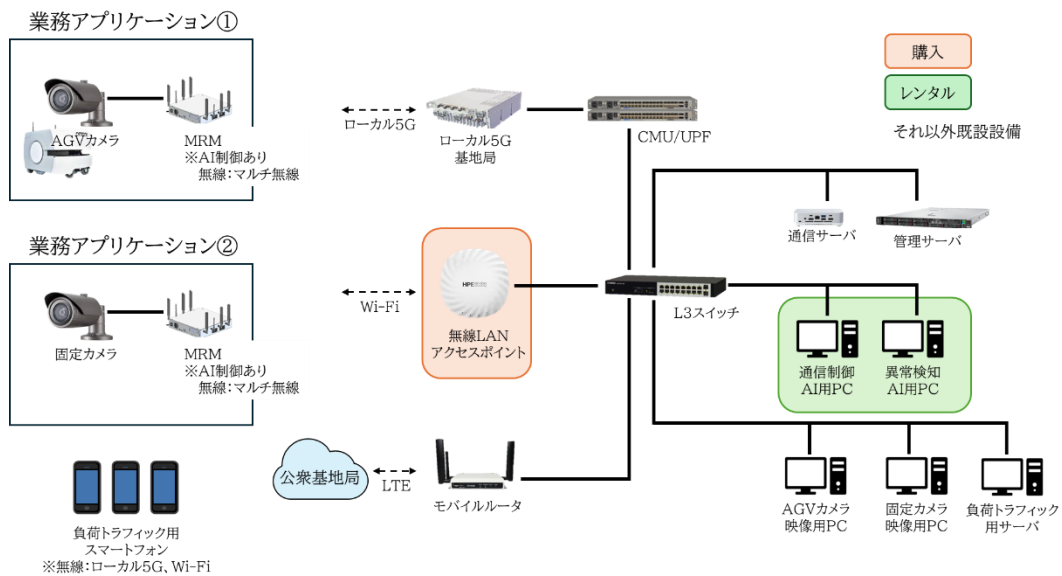
通信サーバは、パケット冗長化技術によりデータ伝送の信頼性を向上させる機能を有している。複数の無線回線を介してデータを送信することで、一部の回線で障害が発生した場合でも通信の継続性を確保できる。また、MRM と連携することで、アプリケーション側は接続する無線方式(ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網)を意識することなく利用可能となっており、シームレスな通信環境を提供する。

管理サーバは、無線ネットワークを構成する全ての機器と運用情報を一元管理する役割を担っている。具体的には、各無線回線の通信品質(受信電界強度、スループット、遅延時間、パケットロス率)、接続端末の状態、ネットワーク負荷状況などをリアルタイムで収集・監視する。収集したデータは時系列データとして蓄積され、異常検知 AI および通信制御 AI の入力データとして活用される。これにより、ネットワーク全体の利用状況を可視化し、障害部位の早期発見および予防的な対策が可能となる。

マルチ無線モデム(MRM)は、ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網などの各種無線を組み合わせることで利用可能な通信端末である。通信制御 AI からの指示に基づき、最適な無線回線への自動切り替えを実行する。また、各無線回線の通信状態を常時監視し、管理サーバへ定期的に報告する機能を有している。

異常検知 AI は、管理サーバから収集した通信品質データを基に、現在接続している無線回線の状態が 1 秒後にどのクラス(正常、遅延発生、パケットロス発生、両方発生)に該当するかを確率として推定する。この予測結果は通信制御 AI へ渡され、回線切り替えや QoS 制御の判断材料として活用される。

通信制御 AI は、異常検知 AI の推論結果および現在のネットワーク状態を基に、最適な通信経路の選択と QoS の動的調整を実行する。具体的には、ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網の中から最適な回線を選択し、ローカル 5G 使用時には通信状況に応じた最適な QoS 設定値を推定する。これにより、通信品質の劣化が予測される場合には事前に回線切り替えや QoS 制御を行い、アプリケーションからサーバまでの End-to-End 通信において安定した品質を維持する。システム全体の動作フローとしては、①MRM および各通信機器から通信状態データを管理サーバへ集約、②管理サーバから異常検知 AI へデータを送信し将来の通信品質を予測、③異常検知 AI の予測結果を通信制御 AI へ送信、④通信制御 AI が最適な回線と QoS 設定を判断、⑤通信サーバおよび MRM へ制御指示を送信し実行、という流れで自律的な通信最適化を実現している。



本システム構成により、製造現場における多様なアプリケーションが同時稼働する環境においても、各デバイスの通信要件に応じた最適なりソース配分と高い信頼性を両立することが可能となる。

(3) ネットワークシステム使用機器

本検証における各基地局無線特性について以下に示す。

① ローカル 5G 基地局

機器の仕様は以下の通りである。



図 3.2-7 ローカル 5G 基地局外観図

表 3.2-3.2 ローカル 5G 基地局仕様

項目	定格
型式	AWHTA
設置台数	1 台
周波数バンド	n79(4600MHz~4900MHz)
占有周波数帯幅	100MHz
アンテナ	送信:4Tx/4Rx MIMO
送信出力	受信:2Tx/2Rx MIMO
外径寸法(W×H×D)	種類:指向性、無指向性、平面など選択
重量	1W×4(4TX-4RX)
同時接続台数	約 345×245×130 mm
最大スループット	約 11kg
接続可能範囲	256 台

② アクセスポイント

機器の仕様は以下の通りである。



図 3.2-8 アクセスポイント外観図

表 3.2-2 アクセスポイント仕様

項目	定格
型式	Q9H61A
対応	802.11a/b/g/n/ac/ax
設置台数	1台
周波数帯	5GHz帯
変調方式	最大1,024QAM
外径寸法(W×H×D)	約200×200×46mm
重量	0.81kg
有線インタフェース	2500/1000/100BASE RJ-45
最大スループット(5GHz)	4,800Mbps
MIMO	4×4MIMO(4ストリーム)

③ LTE ルータ

機器の仕様は以下の通りである。



図 3.2-9 LTE ルータ外観図

表 3.2-3 LTE ルータ仕様

項目	定格
型式	iR700B
設置台数	1台
周波数帯	800MHz、1800MHz、2100MHz
外径寸法(W×H×D)	約 125×25×78mm
重量	275g(アンテナ、AC アダプタ含まず)
有線インタフェース	10/1000/100BASE RJ-45×4 ポート

3.3 通信システム及び AI システムの構築・運用に要した費用

以下に通信システム及び AI システムの構築・運用に要した費用について示す。

なお、本実証では、ローカル 5G システム(Nokia 製 SA 方式)や関連するアプリケーションは既設設備を使用したため、本実証における費用は発生していない。またコンソーシアムにて設備・機器を仮設設置したため、設置工事費は発生していない。

表 3.3-1 通信システム及び AI システムの構築・運用に要した費用

Wi-Fi アクセスポイント	設備・機器費	基地局/3 局	34.2 万円
	設置工事費		0 万円
異常検知 AI、 通信制御 AI 用サーバ	設備・機器費	基地局/2 局・7 ヶ月レンタル	50 万円
	設置工事費		0 万円
Wi-Fi アクセスポイント	運用・保守費	基地局/3 局・1 年間	6 万円
合計			90.2 万円

※記載の金額は実証中における参考価格であり実装時は諸条件に応じて大きく変動する可能性がある。

※設計・設置・運用に係る人件費等は別途必要。

3.4 通信システム及び AI システムの構築にあたっての留意事項等

本実証におけるシステム構築において、実施計画から変更が生じた主要な事項として、Wi-Fi アクセスポイントの機種変更がある。実施計画段階では、Wi-Fi 環境の構築にあたり Mist AP45 の採用を予定していた。同製品は AI 機能を搭載し、ネットワーク管理の効率化が期待できることから選定したものである。しかし、システム構築の詳細検討段階において、本実証で必要とする要件を満たせないことが判明した。第一に、データ取得頻度の制約である。本実証では、AI によるリアルタイムな異常検知と通信制御を実現するため、無線区間の状態を 1 秒間隔で監視する必要があった。しかし、Mist AP45 では端末情報の取得が 10 分に 1 回という仕様であり、本実証が求めるリアルタイム性を確保できないことが確認された。第二に、必要データの取得制約である。本実証で開発する異常検知 AI は、Wi-Fi 回線における無線区間の混雑状況を把握するため、「電波が発射されている時間率」などの詳細な無線利用状況データを入力データとして使用する設計としていた。しかし、Mist AP45 では、AI モデルの学習および推論に必要な混雑度の詳細データが取得できない仕様であることが判明した。これにより、当初設計していた AI モデルの入力データを確保できないという根本的な課題に直面した。

上記課題への対策として、Wi-Fi アクセスポイントを Aruba AP-635 に変更した。同製品は、SNMP を用いた管理が可能であり、管理サーバから定期的なポーリングにより、1 秒間隔でのデータ取得が実現できる。これにより、本実証で求められるリアルタイム監視の要件を満たすことができた。また、Aruba 製 AP は、Private MIB として「電波が発射されている時間率」などの詳細な無線利用状況を提供している。この情報を SNMP により取得することで、Wi-Fi 回線特有の混雑や通信品質劣化の兆候を検知するための入力データとして活用することが可能となった。

アクセスポイントの機種変更により、2025 年 8 月時点で機器選定・調達の見直しが必要となったが、調達リードタイムが短かったため、全体スケジュールへの影響は最小限に抑えられた。

本実証での経験を踏まえ、他地域において同様のハイブリッドネットワークシステムを構築する際には、以下の点に留意する必要がある。AI を活用したリアルタイム制御を実現する場合、必要なデータの種類、取得頻度、データフォーマットを事前に明確化し、選定する機器がこれらの要件を満たすことを詳細に確認する必要がある。特に、製品仕様書に記載されている機能だけでなく、実際のデータ取得方法(API、SNMP、syslog 等)や取得間隔の制約について、メーカーへの問い合わせや実機検証により確認することが重要である。また、本実証では、SNMP による詳細なデータ取得が必要であったが、製品によっては SNMP でアクセス可能な情報が限定されている場合や、Private MIB の提供状況が異なる場合がある。システム設計段階で、必要な管理情報に対応した管理プロトコルが利用可能であることを確認すべきである。機器選定においては、複数の候補製品を比較検討できるよう、調達プロセスに一定の柔軟性を持たせることが望ましい。また、変更が生じた場合でも全体スケジュールへの影響を最小化できるよう、調達リードタイムの短い製品や国内で広く流通している製品を候補に含めることも有効である。以上の留意点を踏まえることで、本実証と同様の技術基盤を他地域においても効率的に構築することが可能となると考えられる。

4. AI モデルの開発・学習

4.1 AI モデルの全体像

4.1.1 本実証により確立を目指す AI モデル・アルゴリズムの概要

本実証では、ネットワークの最適化と通信負荷の低減を目的とした AI モデルを開発・適用し、リアルタイムでの異常検知・トラフィック制御を実現するために、成果として以下の 2 つの AI モデルを確立した。

(1)異常検知(Anomaly Detection Model)

・通信品質の変動をリアルタイムで監視し、異常パターンを検出・分類する。

(本実証でルールベース AI を開発・適用し、機械学習のプロトタイプを開発。)

・従来の閾値ベースの手法では検出できない故障を学習し、従来の閾値ベースの手法よりも新たな異常パターンに対応可能。

(本実証以降に学習データ及び特徴量を追加し高度化予定。)

(2)通信経路最適化(Traffic Optimization Model)

・ローカル 5G と Wi-Fi のハイブリッドネットワークにおける最適な回線制御を実施。

(本実証でルールベース AI を開発・適用、機械学習のプロトタイプを開発)

・最適な回線制御により、パケットロスの最小化。

(本実証でルールベース AI を開発・適用、機械学習のプロトタイプを開発)

・強化学習を活用した回線制御の最適化。

(本実証以降に報酬関数を導入した学習手法を検討し、高度化予定)

表 4.1-1 実施計画の各 AI モデルの担う部分

	異常検知			トラフィック最適化		
	25 年度	26 年度	27 年度	25 年度	26 年度	27 年度
ルールベース	○	←	←	○	←	←
機械学習	○ プロト	○ 高度化	←	○ プロト	○ 高度化	←
強化学習	対象外			×	×	○

※ルールベースは人間が設定したルールに則って実施する。

4.1.2 AIモデル・アルゴリズムの機能(ルールベース)

(1) 異常検知 AI(ルールベース)の機能

異常検知 AI(ルールベース)は収集した通信状態データに基づき、事前に定義したルールに従って異常を判断する。機械学習モデルを用いずに、決定論的かつ説明可能な異常検知を実現している。

異常検知 AI(ルールベース)は管理サーバから通信状態に関する各種指標を取得する。定期的にデータを収集し、収集した通信状態データをもとに、あらかじめ定義したしきい値と条件式により状態を分類する。

(2) 異常検知 AI(ルールベース)の入力データ

異常検知 AI(ルールベース)の方式で使用する入力データを表 4.1-2 に示す。

表 4.1-2 異常検知 AI(ルールベース)の入力データ

項番	入力データ
1	MRM での受信電界強度[dBm]
2	アプリケーションデータの受信量[bps]

(3) 異常検知 AI(ルールベース)のアルゴリズム

受信電界強度、アプリケーションデータの受信量の順番で事前に定義したしきい値と比較し、状態を判定する。

・受信電界強度がしきい値未満の場合

「異常検知」の状態と判定

・受信電界強度がしきい値を上回り、かつアプリケーションデータの受信量が”目標しきい値”以下の場合

「異常検知」の状態と判定

・受信電界強度がしきい値を上回り、かつアプリケーションデータの受信量が”安全しきい値”以上の場合

「安全」の状態と判定

(4) 通信制御 AI(ルールベース)の機能

通信制御 AI(ルールベース)は、異常検知 AI が検知した結果を受け、通信品質の維持・改善のためのアクションを実行する。

通信制御 AI(ルールベース)のアクションの内容を表 4.1-3 に示す。

表 4.1-3 通信制御 AI(ルールベース)の内容

項目	説明
通信経路の切替制御	ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網の中から選択された回線へ経路を切り替える
5G の QoS 優先度引き上げ	ローカル5G の無線リソースを優先的に割り当て、高品質な通信を確保する
5G の QoS 優先度引き下げ	ローカル5Gの無線リソースを解放し、他の接続端末とシェアする

「通信制御の切替制御」では優先度順に切替先候補の受信電力を事前に確認し、あらかじめ定義した受信電力のしきい値を上回る場合にのみ切り替えを実行する。一方、切替先候補が弱電界と判断される場合には、通信品質の悪化を防ぐため、現状の通信経路を維持する方針とした。

(5) 通信制御 AI(ルールベース)の入力データ

通信制御 AI(ルールベース)で使用する入力データを表 4.1-4 に示す。

表 4.1-4 通信制御 AI(ルールベース)の入力データ

項番	入力データ
1	MRM での受信電界強度[dBm]
2	現在の通信経路
3	QoS 値

(6) 通信制御 AI(ルールベース)のアルゴリズム

異常検知 AI の結果に基づき、通信制御を実行する。

・異常を検知かつ受信電界強度がしきい値以下の場合

「通信経路の切替制御」を選択

・異常を検知かつ受信電界強度がしきい値を上回る場合

「5G の QoS 優先度引き上げ」

ただし、5G の QoS 優先度引き上げをベースとし、QoS 優先度がすでに最大値であるなど引き上げられない状況においては「通信経路の切替制御」の選択で対応する。

- ・異常を検知せず安全である確率がしきい値以上の場合
「5G の QoS 優先度引き下げ」を選択

4.1.3 AI モデル・アルゴリズムの機能(機械学習)

(1) 異常検知 AI の機能

本実証において構築した異常検知 AI は、通信回線の状態をリアルタイムで監視し、通信品質の劣化や異常が発生した際に、当該事象を迅速に検知・通知する機能を有している。具体的には、遅延時間、パケットロス率、スループット等の通信品質に関する指標を時系列データとして収集・分析し、突発的な通信断やトラフィックの異常な変動を検知する。

また、本 AI は、あらかじめ設定した固定的な閾値に基づく従来手法では対応が困難であった、事前に想定されていない異常パターンについても検知可能となっている。通信品質指標の時間的推移や変動傾向を総合的に分析することで、輻輳の発生や、通常の監視対象に含まれていない機器のトラブル等、明確な閾値を設定しにくい事象についても異常として捉えることができる。

これにより、通信障害の早期把握および運用者への迅速な通知を可能とし、安定した通信環境の維持に寄与することを目的としている。図 4.1-1 にパケット・ロスによる異常の例を示す。

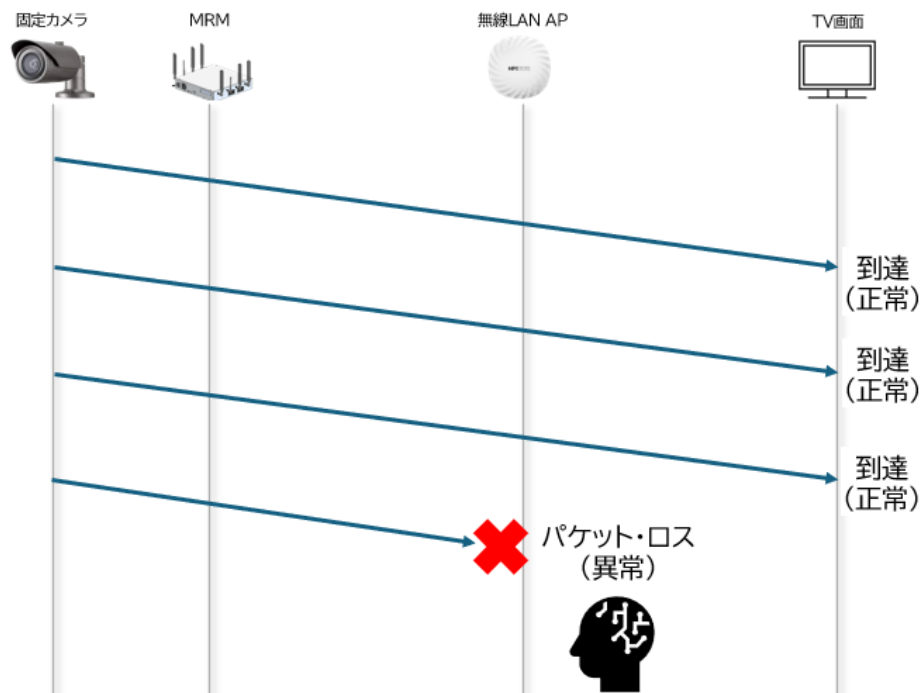


図 4.1-1 異常検知 AI のパケット・ロス検知機能

(2) 異常検知 AI の入力データ

本実証における異常検知 AI では、通信状態およびアプリケーションの動作状況を的確に把握するため、複数のデータを入力データとして使用している。主な入力データは表 4.1-5 のとおりとなっている。

まず、通信回線の状態データとして、ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網の各通信回線における MRM での受信電波強度、また、MRM と管理サーバ間の ICMP 応答時間を通信回線毎に取得している。加えて、Wi-Fi 回線については、電波が発射されている時間率を取得し、通信環境の混雑状況や利用状態の把握に活用している。

次に、アプリケーションデータとして、端末とサーバ間での送受信データ量を取得し、通信トラフィックの変動状況を把握している。さらに、現在使用している通信回線の種別(ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網)を入力データとして取り込み、各回線の状態とアプリケーション挙動との関係性を踏まえた異常検知を行っている。これらの入力データを組み合わせて時系列的に分析することで、通信品質の劣化や異常の兆候を多角的に捉えることを可能としている。また、異常の兆候をとらえ、通信回線の切り替えや QoS の変更を行うために、データの取得周期は1秒周期としている。

表 4.1-5 異常検知 AI への入力データ

項番	入力データ
1	MRM での受信電界強度[dBm]
2	MRMと管理サーバ間のICMP 応答時間[msec]
3	アプリケーションデータの送信量[bps]
4	アプリケーションデータの受信量[bps]
5	Wi-Fi 回線の混雑率 (Wi-Fi 回線のみ)

(3) 異常検知 AI の推定対象

異常検知 AI は、現在使用している通信回線の状態が 1 秒後にどのクラスに該当するかを確率として推定している。各クラスの詳細を表 4.1-6 に示す。

表 4.1-6 異常検知 AI のクラス

クラス	内容
クラス 0	パケットロスなし、超遅延パケットなし(正常)
クラス 1	片方向遅延が 100msec 以上発生
クラス 2	パケットロスが発生
クラス 3	100msec 以上の遅延とパケットロスが同時発生

※100msec は重機等の遠隔操作が十分可能な映像伝送遅延をもとにしている¹。

¹ 建設重機の超遠隔操作に次世代通信技術 IOWN とローカル5Gを初適用
https://www.ntt-east.co.jp/release/detail/20250801_02.html

(4) 異常検知 AI のアルゴリズム

表 4.1-7 にアルゴリズムの比較表を示す。今回は、入力データがすべて数値のテーブル形式かつ時系列データであり、またAIの説明性を確保するために、アルゴリズムは勾配ブースティング系(LightGBM²、XGBoost³、CatBoost⁴)および Random Forest⁵を使用した。また、各アルゴリズムの性能比較を行うための評価指標としては Macro-F1⁶を使用した。図 4.1-3 に、評価指標を算出するための検証データ部分の選定方法を示す。

表 4.1-7 AI アルゴリズムの特徴

	線形回帰 ⁷	勾配ブースティング ⁸	深層学習
得意なデータタイプ	数値のテーブル形式 時系列の数値	数値のテーブル形式 時系列の数値	画像、言語
非線形への対応	×	○	○
AIの説明性	◎	◎	△
GPU	不要	モデルによる	必要
特徴	コストパフォーマンスが 良い	テーブル形式などの 構造化データに強い	画像や言語などの 非構造化データに強い

² LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree
Guolin Ke, Qi Meng, Thomas Finely, Taifeng Wang, Wei Chen, Weidong Ma, Qiwei Ye, Tie-Yan Liu
Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIP 2017) | December 2017

³ XGBoost: A Scalable Tree Boosting System
Tianqi Chen, Carlos Guestrin
arXiv:1603.02754v3

⁴ CatBoost: unbiased boosting with categorical features
Liudmila Prokhorenkova, Gleb Gusev, Aleksandr Vorobev, Anna Veronika Dorogush, Andrey Gulin
arXiv:1706.09516

⁵ 統計的学習の基礎 —データマイニング・推論・予測
Trevor Hastie, Robert Tibshirani, Jerome Friedman
第15章 Random Forests

⁶ 各クラスについて F1 スコアを計算

$$F1 = 2 \times \frac{\text{適合率} \times \text{再現率}}{\text{適合率} + \text{再現率}}$$

各クラスの F1 スコアをクラス数で平均化 (n はクラス数を示す)

$$\text{Macro-F1} = \frac{F1_1 + F1_2 + \dots + F1_n}{n}$$

⁷ 統計的学習の基礎 —データマイニング・推論・予測
Trevor Hastie, Robert Tibshirani, Jerome Friedman
第3章 回帰のための線形手法

⁸ 統計的学習の基礎 —データマイニング・推論・予測
Trevor Hastie, Robert Tibshirani, Jerome Friedman
第10章 ブースティングと加法的木

異常検知 AI のタスクを表 4.1-8 に示す。

表 4.1-8 異常検知 AI のタスク

項目	異常検知 AI
教師あり/教師なし	教師あり
タスク	4 クラス分類問題
出力	4 クラスそれぞれの確率
評価指標	Macro-F1

異常検知 AI のアーキテクチャを図 4.1-2 に示す。リアルタイムの実測データに対して特徴量エンジニアリングを追加し、異常検知 AI の入力としている。

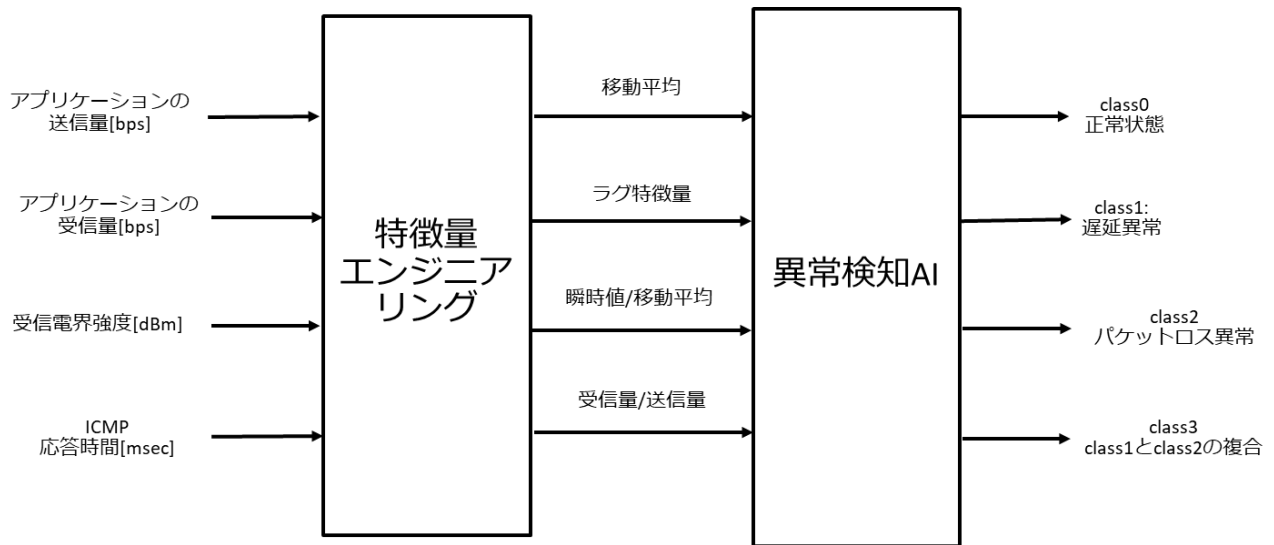


図 4.1-2 異常検知 AI のアーキテクチャ

交差検証の方法を図 4.1-3 図 4.1-3 交差検証に示す。検証データ部分は学習には使用しない。AI モデル学習中に検証データで推論を行い、Macro-F1 を算出した。また、20%毎のグループに分ける方法としては、グループ内におけるクラス毎の分布の偏りを防ぐために層化抽出法⁹を採用した。

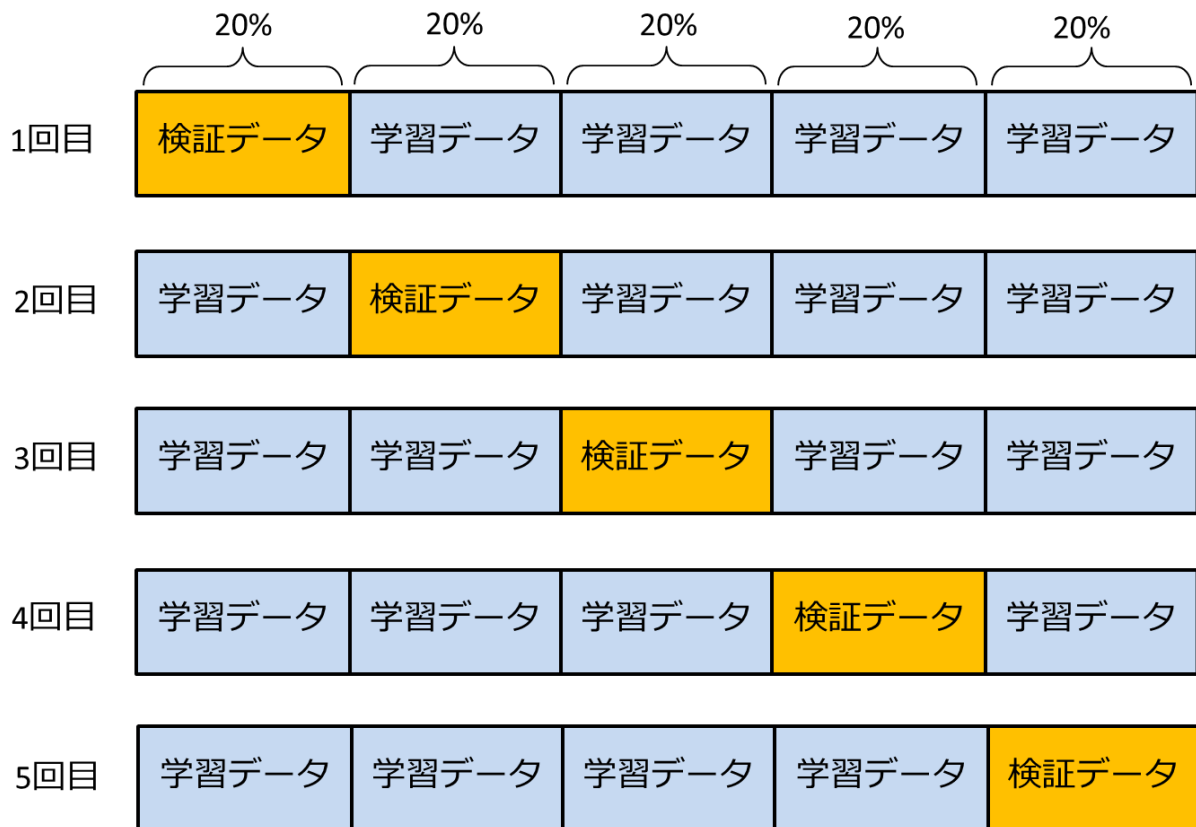


図 4.1-3 交差検証¹⁰

表 4.1-9 に異常検知 AI の交差検証で使用した総データ数を示す。1 データとは、1 秒毎の値である。

表 4.1-9 異常検知 AI の交差検証で使用した総データ数

回線の種別	総データ数
ローカル5G 回線	3119
公衆回線	353
Wi-Fi 回線	555

⁹ 概説 標本調査法
土屋 隆祐(著)

¹⁰ 統計的学習の基礎 —データマイニング・推論・予測
Trevor Hastie, Robert Tibshirani, Jerome Friedman
7.10 交差確認

表 4.1-10 に評価結果を示す。異常検知 AI の推論モデルには、回線毎に Macro-F1 が良いモデルを使用した。

表 4.1-10 各モデルの Macro-F1 値

モデル	ローカル 5G 回線	公衆回線	Wi-Fi 回線
Random Forest	0.8824	0.8016	0.6975
XGBoost	0.8613	0.8093	0.7053
LightGBM	0.8521	0.8309	0.7289
CatBoost	0.8455	0.8300	0.6829

※交差検証 5 回の平均値

(5) 通信制御 AI の機能

本実証における通信制御 AI は、複数の無線通信手段を統合的に制御し、安定した通信環境を実現することを目的としている。具体的には、ルールベース AI によって実施した回線切り替えおよび QoS 制御の結果をデモデータとして活用し、ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網の中から最適な通信経路を選択するための学習を行っている。また、各通信回線のトラフィック量や遅延、パケットロス等のネットワーク負荷状況を分析し、その時点の通信状態に応じた最適な回線制御を実施する。これにより、通信品質の劣化が発生しやすい状況においても、適切な通信経路への切り替えや QoS 制御を行うことが可能となる。これらの制御を通じて、遅延やパケットロスの発生を抑制し、アプリケーションからサーバまでの End-to-End 通信において、安定した通信環境を提供することを目指す。図 4.1-4 に動作概要を示す。

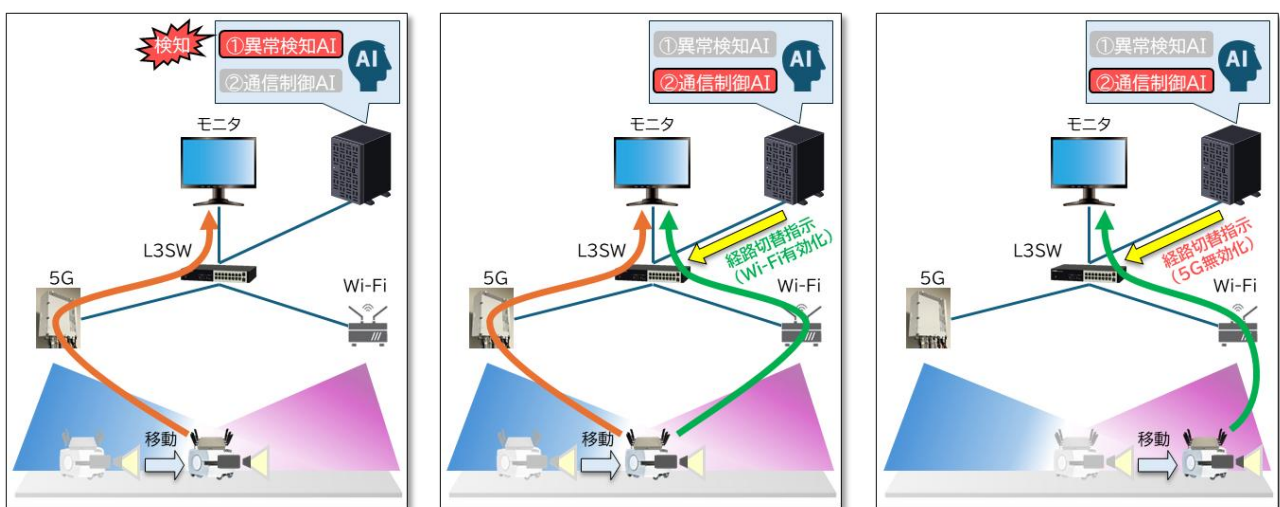


図 4.1-4 通信制御 AI の動作概要

(6) 通信制御 AI の入力データ

本実証における通信制御 AI では、通信経路の選択および QoS 制御を適切に行うため、複数の情報を入力データとして使用している。まず、異常検知 AI の推論結果として、通信状態を 4 クラスに分類した各クラスの発生確率を入力データとして取り込み、将来的な通信品質劣化の兆候を考慮した制御判断に活用している。次に、通信回線の状態データとして、MRM の各通信回線における受信電波強度を取得し、無線環境の良否を判断するための基礎情報として使用している。また、現在使用している通信回線の種別(ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網)を入力データとして取り込み、回線切り替えの要否や切り替え先の選定に反映している。さらに、ローカル 5G 回線を使用している場合には、現在設定されている QoS 値を入力データとして取得し、QoS 変更による通信品質改善の可否を判断するために利用している。

これらの入力データを総合的に評価することで、通信状態に応じた最適な通信経路の選択および QoS 制御を実現している。表 4.1-11 と表 4.1-12 に入力データを示す。

表 4.1-11 通信制御 AI への入力データ

項番	入力データ
1	異常検知 AI の出力
2	MRM における受信電界強度[dBm]

表 4.1-12 通信制御 AI(QoS 制御)への入力データ

項番	入力データ
1	異常検知 AI の出力
2	QoS 値
3	ICMP 応答時間[msec]

(7) 通信制御 AI のアルゴリズム

表 4.1-13 に強化学習の比較を示す。今回は強化学習の一手法である模倣学習(行動クローニング)¹¹を選定した。アルゴリズムには、入力データがすべて数値のテーブル形式であるため、勾配ブースティング系の LightGBM を使用した。表 4.1-14 に通信制御 AI のタスクを示す。

表 4.1-13 強化学習の手法

手法	模倣学習	報酬ベース
目的	専門家行動の模倣	累積報酬の最大化
報酬関数	不要	必要
教師データ	必要	不要

¹¹ ALVINN: An Autonomous Land Vehicle In a Neural Network
 Dean A. Pomerleau
<https://www.cs.cmu.edu/~sross1/publications/Ross-AIStats10-paper.pdf>

メリット	報酬設計が不要	汎用性が高い
デメリット	分布外に弱い	報酬設計と探索が難しい

表 4.1-14 通信制御 AI のタスク

	通信経路の制御	ローカル 5G 回線の QoS 制御
方策	専門家行動	専門家行動
出力	回線	QoS 値
アルゴリズム	LightGBM(分類モデル)	LightGBM(回帰モデル)
評価指標	エピソード ¹² の成功率 マクロ平均値 ¹³	エピソードの成功率 マクロ平均値

図 4.1-5 に通信制御 AI のアーキテクチャを示す。

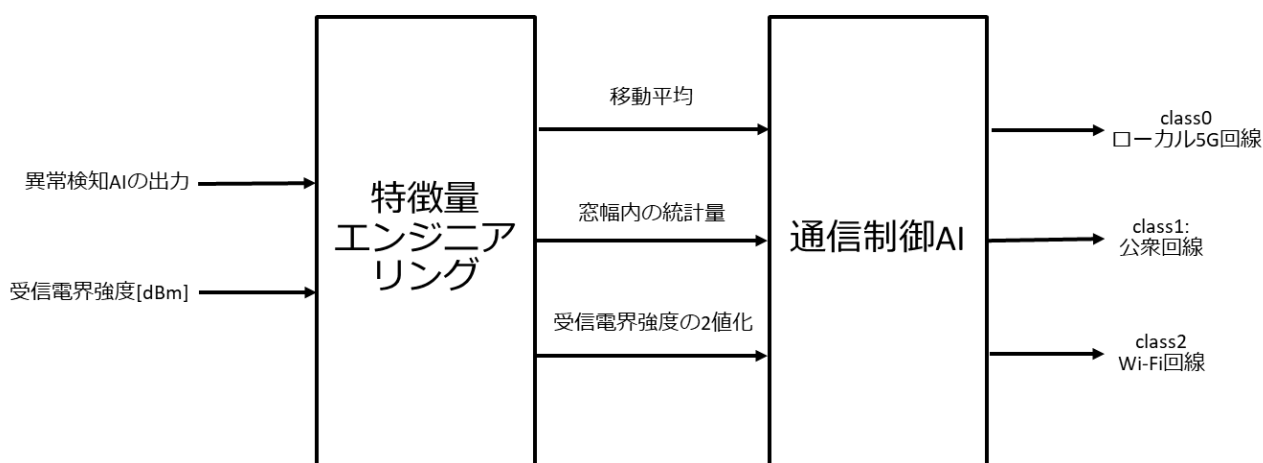


図 4.1-5 通信制御 AI のアーキテクチャ

図 4.1-6 に通信制御 AI(QoS 制御)のアーキテクチャを示す。

¹² 開始状態から終端状態に到達するまでの一連のステップのまとめ

¹³ 各クラスについて F1 スコアを計算

$$F1 = 2 \times \frac{\text{適合率} \times \text{再現率}}{\text{適合率} + \text{再現率}}$$

各クラスの F1 スコアをクラス数で平均化 (n はクラス数を示す)

$$\text{Macro 平均} = \frac{F1_1 + F1_2 + \dots + F1_n}{n}$$

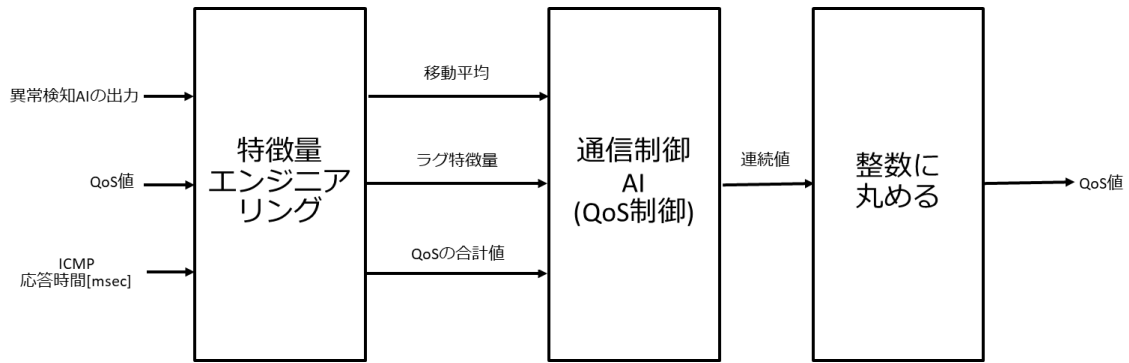


図 4.1-6 通信制御 AI(QoS 制御)のアーキテクチャ図

表 4.1-15と表 4.1-16に交差検証で使用した総データ数を示す。1データが1秒分である。

表 4.1-15 通信制御 AI の交差検証で使用した総データ数

回線の種別	総データ数
ローカル5G 回線	1091
公衆回線	603
Wi-Fi 回線	182

表 4.1-16 通信制御 AI(QoS 制御)の交差検証で使用したデータ数

項目	総データ数
QoS 制御	4741

学習結果を表 4.1-17と表 4.1-18 に示す。

表 4.1-17 通信制御 AI の学習結果

通信経路	マクロ平均
ローカル 5G 回線	0.7959
公衆回線	0.8205
Wi-Fi 回線	0.7619

※交差検証 5 回の平均値

表 4.1-18 通信制御 AI(QoS 制御)の学習結果

通信経路	マクロ平均
QoS 制御	1.0000

※交差検証 5 回の平均値

(8) 通信制御 AI の推定対象

本実証における通信制御 AI の推定対象は、通信品質およびネットワーク負荷の状況を踏まえた最適な通信制御内容である。具体的には、以下の 2 点を推定対象としている。

まず、ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網の中から、その時点の通信状態および将来的な品質劣化の可能性を考慮した上で、最適な通信回線を推定する。次に、ローカル 5G 回線を使用する場合には、現在の通信状況やアプリケーションの要求品質に応じて、最適な QoS 設定値を推定する。これにより、回線切り替えだけでなく、QoS 制御による柔軟な通信品質の最適化を可能としている。

(9) 異常検知 AI と通信制御 AI の推論結果を踏まえた通信リソース制御の動作

本実証における通信リソース制御では、異常検知 AI および通信制御 AI の推論結果をもとに、通信状態に応じた自律的な制御を行っている。

具体的には、異常検知 AI により推定された通信品質劣化の発生確率や、通信制御 AI により推定された最適な通信回線およびローカル 5G 回線の QoS 設定を踏まえ、ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網の通信回線の切り替え、ならびにローカル 5G 回線における QoS の自動切替を実施する。

これにより、通信品質の低下が予測される場合には事前に回線切替や QoS 制御を行い、遅延やパケットロスの発生を抑制するとともに、アプリケーションからサーバまでの End-to-End 通信において、安定した通信品質の維持を図る。

4.1.4 AI モデルの開発・改善計画

本実証では、ネットワークの最適化を目的として、AI モデルの開発および継続的な改善に取り組んだ。AI モデルの高度化に向けては、開発内容を段階的に整理し、2 つのフェーズに分けて検討を行った。

本実証(令和 7 年度)では、フェーズ 1 に相当する対応を実施し、AI モデルの基礎的な構築および適用検証を行った。また、フェーズ 2 については、令和 8 年度以降の実用化を見据えた課題として整理した。

(1) フェーズ 1(AI モデルの初期構築)

フェーズ 1 では、AI モデルの基盤構築を目的として、以下の取り組みを実施した。

まず、ルールベースにより定義した特徴量の抽出および収集データを用いて、AI モデルの基本的な学習を行った。これにより、通信品質の変動を捉えるための基礎的な判定能力を持つ初期異常検知 AI を構築した。また、通信制御については、ルールベース AI による制御結果を教師データとし、模倣学習(行動クローニング)を用いた初期通信制御 AI を構築した。これにより、従来のルールベース制御の知見を AI モデルに反映させることを可能としている。

学習期間は約 2.5 か月間とし、2025 年 8 月および 10 月下旬から 12 月上旬にかけて学習および検証を実施した。構築したモデルについては、ベースライン評価を行うとともに、ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網を組み合わせたハイブリッドネットワーク環境において適用検証を行った。

(2) フェーズ 2(AI モデルの精度向上および運用最適化)

フェーズ 2 では、フェーズ 1 で構築した AI モデルを基に、さらなる精度向上および運用面での最適化を目指す。具体的には、管理サーバの処理高速化を行い、リアルタイム性の向上を図る。

また、リアルタイムで取得される通信データを活用した追加学習および適用検証を実施し、通信環境の変化に追従可能なモデルへの改善を進める。さらに、通信制御 AI については、事前に想定していない通信状態にも対応できるよう、報酬関数を導入した学習手法を検討する。

これらの取り組みをハイブリッドネットワーク環境に適用し、継続的な改善を行うことで、実運用を見据えた通信制御の高度化を目指す。

4.1.5 本 AI モデルの効率性と優位性

本実証で採用する AI モデルは、ネットワークの最適化をリアルタイムで行い、従来の手動制御よりも高効率な通信環境を提供する。以下に従来手法と本実証の AI モデルの比較を示す。

表 4.1-19 従来手法と本実証の AI モデルの比較結果

項目	従来の手動制御	本実証の AI モデル
異常検知	閾値ベース(固定)	AI による自動検知(学習型)
トラフィック制御	事前設定のみ	AI が最適提案
改善スピード	遅い(手動チューニング)	迅速(動的制御)

本モデルの特徴は、AI によるリアルタイム最適化を可能とし、通信品質・ネットワーク負荷・システム安定性の向上を同時に実現できることにある。

4.2 取得したデータ

4.2.1 取得したデータ一覧

項番	用途	データ取得機器名	データ項目	取得場所	データ収集期間	データ形式
1	異常検知 AI の学習	管理サーバ	MRMと管理サーバ間との ICMP 応答時間	国際電気協創ラボ	令和7年7月～令和7年12月	CSV
		MRM	受信電界強度、送信スループット			
		通信サーバ	受信スループット、使用している無線回線(ローカル5G/Wi-Fi/公衆網)、教師データ(片方向遅延時間、パケットロス率)			
		無線 LAN アクセスポイント	Wi-Fi 回線の混雑率			
2	異常検知 AI の学習	管理サーバ	MRMと管理サーバ間との ICMP 応答時間	国際電気電波暗室	令和7年8月～令和7年9月	CSV
		MRM	受信電界強度、送信スループット			
		通信サーバ	受信スループット、使用している無線回線(ローカル5G/Wi-Fi/公衆網)、教師データ(片方向遅延時間、パケットロス率)			
		無線 LAN アクセスポイント	Wi-Fi 回線の混雑率			
3	通信制御 AI の学習	管理サーバ	MRMと管理サーバ間との ICMP 応答時間	国際電気協創ラボ	令和7年12月	CSV
		通信サーバ	使用している無線回線(ローカル5G/Wi-Fi/公衆網)			
		MRM	受信電界強度			
		CMU	ローカル5GのQoS			
		異常検知 AI	クラス0からクラス3の確率			

4.2.2 データセット作成に係る処理

本実証における AI モデルの学習にあたっては、通信品質データを用いたデータセットを作成するため、欠損値処理、不均衡データへの対策、および特徴量エンジニアリングを実施した。各処理内容は以下のとおりである。

(1) 欠損値処理

取得した通信品質データは時系列データであるため、データ欠損が発生した場合には、直前時刻の値を用いて補完を行った。これにより、時系列の連続性を維持し、学習データとしての整合性を確保している。

(2) 不均衡データへの対策

取得したデータは、正常状態に相当するクラス 0 の出現頻度が高く、不均衡なデータ分布となっていた。そのため、多数派であるクラス 0 のデータを間引くアンダーサンプリングを実施した。

クラス 0 のデータを間引く際には、受信電界強度の頻度分布が偏らないよう配慮し、電界強度の分布が概ね一様となるようにデータを選定している。これにより、特定の電界条件に偏った学習となることを防止した。なお、少数派クラスを増加させる手法として、SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling Technique)¹⁴を用いたオーバーサンプリングについても検証を行ったが、本実証においては明確な性能向上効果が確認されなく、またノイズをエンハンスするという問題点もあるため、最終的な学習データには採用していない。

¹⁴ SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique
N. V. Chawla, K. W. Bowyer, L. O. Hall, W. P. Kegelmeyer
arXiv:1106.1813

(3) 特徴量エンジニアリング

AI モデルの予測精度向上を目的として、取得したデータに対して特徴量エンジニアリングを実施した。具体的には、下記表に示す算術演算を行い、新たな特徴量を追加した。

説明変数が時系列データであることから、移動平均およびラグ特徴量を用い、時間的な変動傾向を捉えられるようにした。また、瞬時値と平均値の比については、無線通信における MAC スケジューラで用いられるプロポーショナル・フェアネスの考え方を意識した計算式を採用した。さらに、アプリケーションの受信量および送信量については、実際に到達したデータ量を指標として用い、通信品質とアプリケーション挙動との関係性を学習に反映させた。以下に説明変数と新たな特徴量を示す。

表 4.2-1 説明変数と新たな特徴量

説明変数	移動平均 (窓幅 3 と 5)	窓幅内の 最大値 (窓幅 3 と 5)	窓幅内の 最小値 (窓幅 3 と 5)	窓幅内の 揺れ幅 (窓幅 3 と 5)	ラグ (1つ前と の差分)	瞬時値/ 平均値	受信量 / 送信量
受信電界強度	○	○	○	○	○	○	-
ICMP 応答時間	○	○	○	○	○	○	-
アプリケーション の送信量	○	○	○	○	○	○	○
アプリケーション の受信量	○	○	○	○	○	○	○

(4) 交差検証

本実証における AI モデルの評価にあたっては、学習データと評価データを適切に分割するため、層化 k 分割交差検証(stratified k-fold)を採用した。これにより、各分割において目的変数のクラス分布が偏らないよう配慮した。さらに本実証では、意識的なデータ分割を行うことを目的として、交差検証用の補助変数を追加した。具体的には、目的変数と受信電界強度を組み合わせた変数を作成し、交差検証の際に、目的変数の分布に加えて受信電界強度の比率も各分割で概ね保持されるように設定した。これにより、特定の電界条件に偏った学習や評価となることを防止し、より実運用に近い条件下でのモデル性能評価を可能とした。

(5) 教師データの作成方法

まず、実測データを記録する。表 4.2-2 が実測データの例で、縦方向が時間方向となっており、説明変数は AI に入力する変数で、目的変数は AI が予測する変数である。次に、予測を行うために、目的変数を1秒前に移動する。移動したものが表 4.2-3 予測用データの例となる。最後に、目的変数をクラス分けする。クラス分けした結果が表 4.2-4 教師データの例となる。

表 4.2-2 実測データ例

時刻[sec]	説明変数				目的変数	
	送信量[bps]	受信量[bps]	受信電界強度 [dBm]	ICMP 応答時 間[msec]	パケットの遅延 時間[msec]	パケットロス率 [%]
1	8000000	8000000	-95	53	28	0
2	8000000	8000000	-100	64	27	0
3	8000000	8000000	-99	55	25	0
4	8000000	8000000	-102	68	30	0
5	8000000	8000000	-107	70	30	0
6	8000000	7999999	-110	120	60	1
7	8000000	7999995	-111	140	70	2
8	8000000	7999985	-112	160	80	3
9	8000000	7999970	-113	200	90	4
10	8000000	7800000	-114	300	110	5

表 4.2-3 予測用データ例

時刻[sec]	説明変数				目的変数	
	送信量[bps]	受信量[bps]	受信電界強度 [dBm]	ICMP 応答時 間[msec]	パケットの遅延 時間[msec]	パケットロス率 [%]
1	8000000	8000000	-95	53	27	0
2	8000000	8000000	-100	64	25	0
3	8000000	8000000	-99	55	30	0
4	8000000	8000000	-102	68	30	0
5	8000000	8000000	-107	70	60	1
6	8000000	7999999	-110	120	70	2
7	8000000	7999995	-111	140	80	3
8	8000000	7999985	-112	160	90	4
9	8000000	7999970	-113	200	110	5
10	8000000	7800000	-114	300	150	10

表 4.2-4 教師データ例

	説明変数				目的変数
時刻[sec]	送信量[bps]	受信量[bps]	受信電界強度[dBm]	ICMP 応答時間[msec]	予測値[クラス]
1	8000000	8000000	-95	53	0
2	8000000	8000000	-100	64	0
3	8000000	8000000	-99	55	0
4	8000000	8000000	-102	68	0
5	8000000	8000000	-107	70	2
6	8000000	7999999	-110	120	2
7	8000000	7999995	-111	140	2
8	8000000	7999985	-112	160	2
9	8000000	7999970	-113	200	3
10	8000000	7800000	-114	300	3

4.2.3 システム全体のデータフロー

(1) データ収集

データ収集におけるシステム全体のブロック図を示す。MRM や通信機器のデータは管理サーバに保存される。

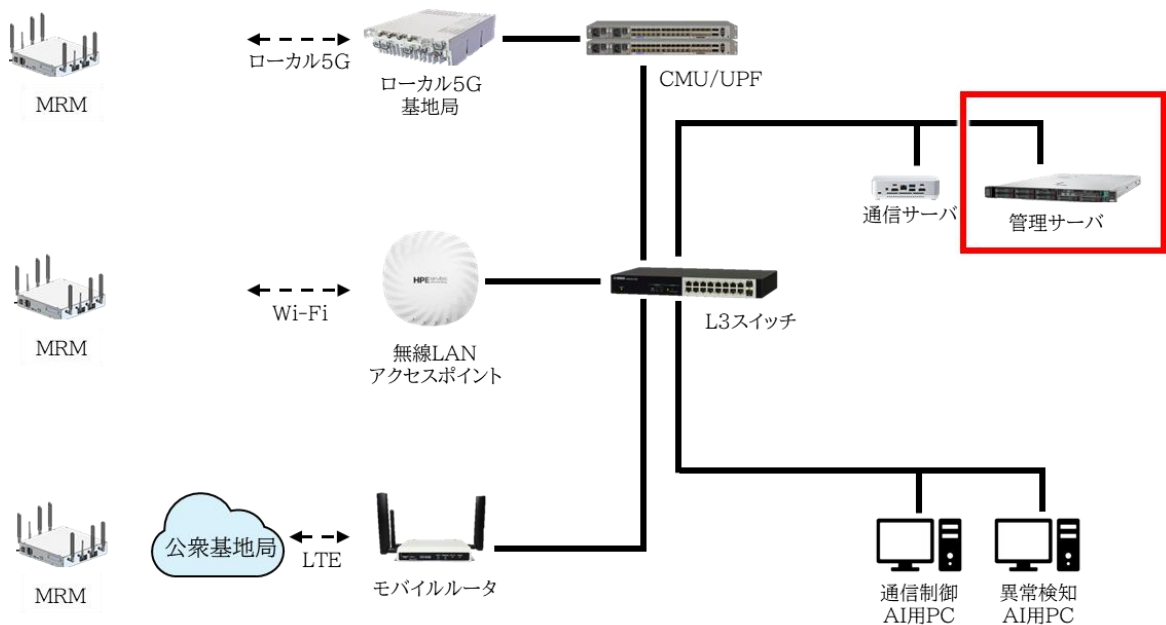


図 4.2-1 システム全体のブロック図

次に各機器から収集する方法を示す。

① MRM からの収集

本実証では、通信状態に関するデータのうち、受信電界強度およびスループットを MRM から収集している。MRM は、ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網を含む複数の通信回線の状態を取得・通知する機能を有しており、AI モデルに必要な基礎的な無線状態および通信量の把握を目的として利用している。

以下に MRM からデータ収集するフローを示す。

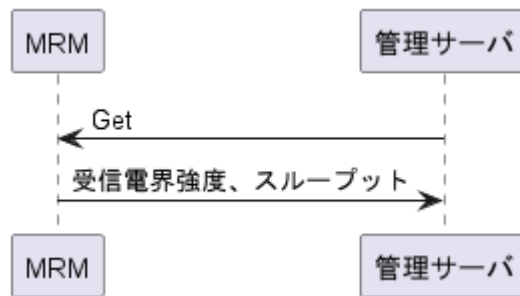


図 4.2-2 MRM からデータ収集するフロー

② 通信サーバからの収集

本実証では、通信制御および AI 推論に必要な運用情報として、スループットおよび現在使用している通信回線の種別を管理サーバから収集している。

以下に通信サーバからデータ収集するフローを示す。

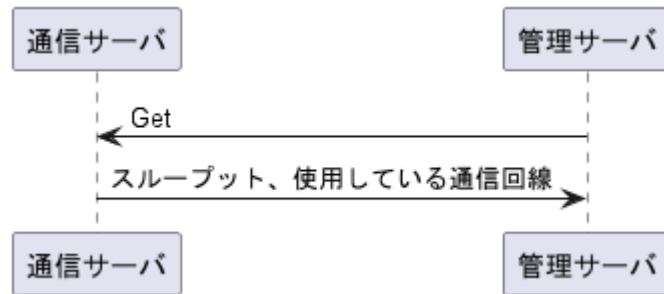


図 4.2-3 通信サーバからデータ収集するフロー

③ CMU からの通知

本実証では、ローカル 5G 回線における QoS 設定値を把握するため、CMU から管理サーバへ通知する仕組みを取り入れている。CMU は、現在設定されているローカル 5G 回線の QoS 値を管理サーバに通知する。取得した QoS 情報は、通信制御 AI の入力データとして利用され、QoS 変更による通信品質改善の可否や、最適な QoS 設定値の推定に活用している。以下に CMU から通知するフローを示す。

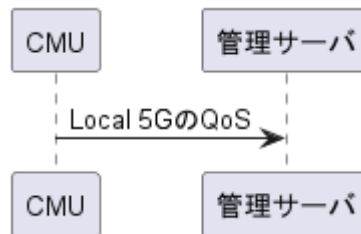


図 4.2-4 CMU から通知するフロー

④ 無線 LAN アクセスポイントからの収集

本実証では、Wi-Fi 回線における無線利用状況を把握するため、無線 LAN アクセスポイントから「電波が発射されている時間率」を収集している。無線 LAN アクセスポイントからのデータ収集は、SNMP を用いて実施している。管理サーバから無線 LAN アクセスポイントへ SNMP による定期的なポーリングを行い、対象となる管理情報を取得する。

「電波が発射されている時間率」については、アクセスポイントが提供する Private MIB に定義されている情報を参照して取得している。本指標は、一定時間内に無線電波が送信状態にあった割合を示すものであり、無線区間の負荷状況や混雑度合いを把握するための指標として活用している。

取得したデータは、時系列データとして管理サーバへ集約され、異常検知 AI の入力データとして利用することで、Wi-Fi 回線特有の混雑や通信品質劣化の兆候を検知するために

活用している。

以下に無線 LAN アクセスポイントからデータ収集するフローを示す。

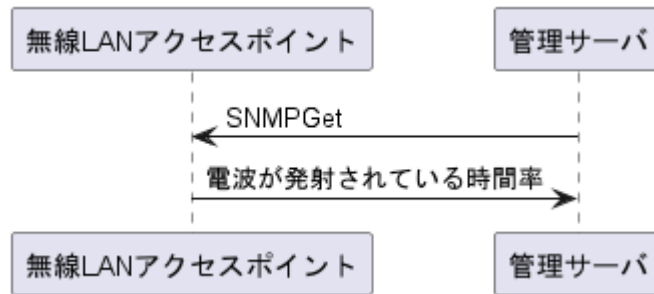


図 4.2-5 無線 LAN アクセスポイントからデータ収集するフロー

⑤ ICMP 応答時間の収集

本実証では、End-to-End 通信における遅延状況を把握するため、ICMP 応答時間を収集している。ICMP 応答時間の収集フローでは、管理サーバから MRM に対して ICMP Echo Request を定期的を送信し、対応する ICMP Echo Reply が返却されるまでの時間を計測・記録する。計測された往復時間は、時系列データとして管理サーバに蓄積され、通信品質評価のための基礎データとして利用している。

本手法により、ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網を含む各通信経路における遅延の変動を継続的に把握することが可能となり、異常検知 AI の学習用データおよび推論用データとして活用することができる。

以下に ICMP 応答時間を収集するフローを示す。

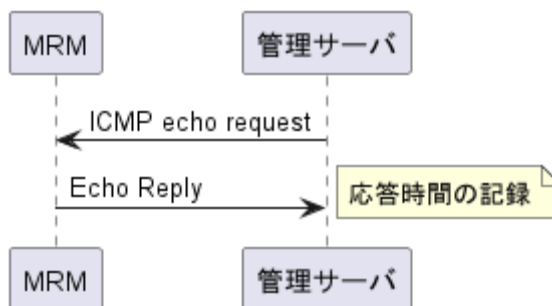


図 4.2-6 ICMP 応答時間を収集するフロー

⑥ 異常検知 AI の予測結果

本実証では、異常検知 AI による推論結果を通信制御に活用するため、異常検知 AI が出力する各クラスの発生確率を管理サーバで収集している。異常検知 AI は、通信状態を 4 つのクラス(クラス 0～クラス 3)に分類し、それぞれの状態が発生する確率を推論結果として出力する。

異常検知 AI からの推論結果の収集フローでは、異常検知 AI が一定周期で推論を実行し、クラス 0 からクラス 3 までの各確率値を管理サーバへ送信する。

収集した推論結果は、通信制御 AI の入力データとして利用されるほか、通信回線の切り替えやローカル 5G 回線における QoS 制御を判断するための基礎情報として活用する。これにより、実測データと AI 推論結果を組み合わせた通信リソース制御を実現している。

以下に異常検知 AI の予測結果を収集するフローを示す。

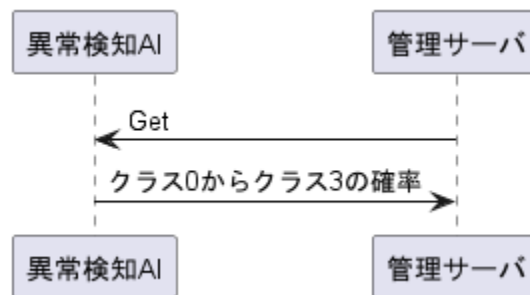


図 4.2-7 異常検知 AI の予測結果を収集するフロー

(2) AI の学習および推論用データ

AI の学習および推論用データは、(1)で管理サーバに収集されたデータを取り出す。

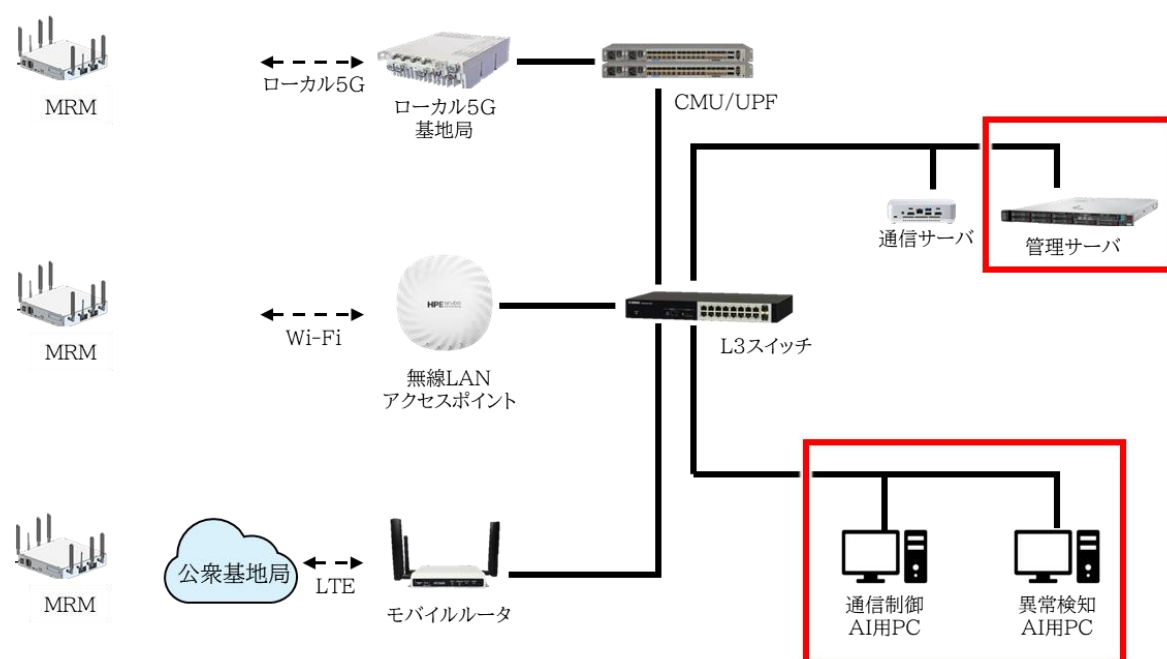


図 4.2-8 システム構成図(管理サーバ、AI用PC)

① 異常検出 AI が学習および推論用に使うデータ

本実証では、異常検知 AI の学習およびリアルタイム推論に必要な通信品質データを、管理サーバからのリクエストに基づいて取得している。異常検知 AI は、通信状態を定量的に評価するため、複数の通信品質指標を入力データとして使用している。

データフローとしては、異常検知 AI が推論または学習処理を行う際に、管理サーバからの Request を契機として、各データ取得元から必要な情報を取得している。具体的には、無線区間の状態を示す指標として受信電界強度、通信量を示す指標としてスループット、ならびに End-to-End 通信の遅延状況を示す指標として MRM と管理サーバ間の ICMP 応答時間を取得している。

取得した各データは、時系列データとして整形された上で、異常検知 AI の入力データとして使用される。これにより、瞬時的な通信状態のみならず、時間的な変動傾向を踏まえた学習およびリアルタイム推論が可能となる。

以下に異常検出 AI が学習およびリアルタイム推論用に使うデータのデータフローを示す。



図 4.2-9 異常検出 AI が学習およびリアルタイム推論用に使うデータのデータフロー

② 通信制御 AI が学習および推論用に使うデータ

本実証では、通信制御 AI が最適な通信経路および通信リソース制御を推定するため、複数の情報を入力データとして用いて推論を行っている。通信制御 AI は、通信品質の将来的な変化を考慮した制御判断を行うため、実測データと異常検出 AI の推論結果を組み合わせ利用している。

通信制御 AI の推論用データフローでは、管理サーバからの Request を契機として、必要なデータを取得する。具体的には、異常検出 AI が出力するクラス 0 からクラス 3 までの各発生確率を取得し、通信品質劣化の発生可能性を示す指標として利用する。

あわせて、無線区間の状態を示す指標として受信電界強度、End-to-End 通信の遅延状況を示す指標として ICMP 応答時間を取得する。これらのデータを統合的に評価することで、現在の通信状態および将来的な品質劣化の兆候を考慮した推論を行う。

取得した各データは、時系列データとして整形された上で通信制御 AI の入力データとして使用され、最適な通信回線を選択やローカル 5G 回線における QoS 制御に活用される。

以下に通信制御 AI が学習およびリアルタイム推論用に使うデータのデータフローを示す。

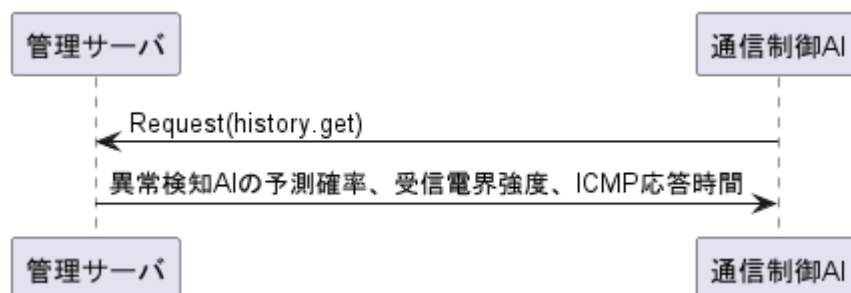


図 4.2-10 通信制御 AI が学習およびリアルタイム推論用に使うデータのデータフロー

4.2.4 データの適切さ

本実証において使用したデータについては、AI モデルの学習および評価における代表性および適正性を確保することを目的として、取得条件および取得環境に配慮して収集している。

データ取得は、協創ラボおよび電波暗室の複数の場所で行った。協創ラボでは、実環境に近い無線環境下における通信品質の変動を取得し、電波暗室では、外乱の影響を排除した条件下で意図的に電波環境を変化させたデータを取得している。これにより、実運用環境を想定したデータと、通信品質劣化要因を明確に切り分けたデータの双方を学習データに含めることが可能となっている。

また、データ取得にあたっては、移動体の走行コースの周回方法の変更、アンテナの有無や設置条件を変化させるなど、通信状態が多様に変化する条件を意図的に設定している。これにより、特定の走行パターンや電波条件に偏らない、幅広い通信状態を含むデータを取得している。

これらの取り組みにより、本実証で使用したデータは、実運用を想定した通信環境の多様性を反映しており、AI モデルの学習および評価において十分な代表性および適正性を有していると考えている。

(1) 異常検知 AI

① ローカル5G 回線

ローカル 5G 回線において、学習に使用した各クラスのデータ数を示す。1データは 1 秒単位のデータである。

表 4.2-5 学習に使用した各クラスのデータ数

クラス	データ数
クラス 0	2757
クラス 1	56
クラス 2	292
クラス 3	14

② 公衆網回線

公衆網回線において、学習に使用した各クラスのデータ数を以下に示す。なお、Class2 (パケットロス)の事象については、Class3 (超遅延とパケットロスが同時に発生)に包含される形となっており、Class2 単独のデータは存在しない。

表 4.2-6 学習に使用した各クラスのデータ数

クラス	データ数
クラス 0	210
クラス 1	87
クラス 2	0
クラス 3	56

③ Wi-Fi 回線

Wi-Fi 回線において、学習に使用した各クラスのデータ数を以下に示す。

表 4.2-7 学習に使用した各クラスのデータ数

クラス	データ数
クラス 0	484
クラス 1	12
クラス 2	49
クラス 3	10

(2) 通信制御 AI

① ローカル5G回線

ローカル 5G 回線を使用している状態からの行動データ数を以下に示す。

表 4.2-8 ローカル 5G 回線を使用している状態からの行動データ数

行動	データ数
ローカル 5G(現状維持)	1030
LTE 回線に変更	29
Wi-Fi 回線に変更	32

② 公衆網回線

公衆網回線を使用している状態からの行動データ数を以下に示す。

表 4.2-9 公衆網回線を使用している状態からの行動データ数

行動	データ数
ローカル 5G 回線に変更	32
LTE(現状維持)	523
Wi-Fi 回線に変更	48

③ Wi-Fi回線

Wi-Fi 回線を使用している状態からの行動データ数を以下に示す。

表 4.2-10 Wi-Fi 回線を使用している状態からの行動データ数

行動	データ数
ローカル 5G 回線に変更	30
LTE 回線に変更	50
Wi-Fi(現状維持)	102

④ QoS の制御

ローカル 5G 回線における QoS 制御(5QI 変更)に関する学習データ数を以下に示す。

表 4.2-11 ローカル 5G 回線における QoS 制御に関する学習データ数

5QI 値	データ数
9	1651
8	1386
7	334
6	913
5	457

上記のとおり、異常検知 AI および通信制御 AI の学習にあたっては、複数の通信回線および制御状態に関するデータを収集・整理して使用している。一方で、異常系データや回線切り替え・QoS 変更といった行動データは相対的に少なく、不均衡なデータ分布となっていることから、本実証ではアンダーサンプリング等の対策を講じている。今後は、異常状態や制御結果のさらなる蓄積により、AI モデルの汎化性能向上を図る予定である。

4.3 AIモデルの学習プロセス

4.3.1 学習環境

以下に学習環境を示す。

表 4.3-1 学習環境

項目	内容	備考
OS	Ubuntu 22.04LTS	
GPU	NVIDIA 社 GeForce RTX 4090	NVIDIA 社の RAPIDS cuDF、AI モデル (LightGBM、XGBoost、CatBoost) で使用
学習所要時間	約 15 分/モデル	
試行回数	100 以上 10000 未満で設定	検証データを使用した早期終了 (Early Stopping) で学習停止
交差検証回数	5	学習データ 80%、検証データ 20%

4.3.2 学習プロセス

本実証における AI モデルの学習および評価は、以下のステップに従って実施した。

(1) 前処理

学習データの品質を確保するため、学習前に前処理を実施した。具体的には、時系列データにおいて欠損が発生した箇所については直前の値による補完を行った。また、通信品質の変動傾向を捉えるため、移動平均やラグ特徴量等の特徴量を追加した。さらに、正常状態に相当するデータが多数を占める不均衡データであったため、アンダーサンプリングを実施し、学習データの偏りを緩和した。

(2) AIモデルの構築

前処理後のデータを用いて、AI モデルの構築を行った。通信環境の特性差を考慮し、ローカル 5G、Wi-Fi および公衆網と通信回線ごとに個別の異常検知 AI モデルと通信制御 AI モデルを作成した(表 4.1-10 各モデルの Macro-F1 値を参照)。これにより、回線特性に応じた通信品質変動を適切に学習できる構成としている。

(3) 評価

構築した各 AI モデルについて、複数の観点から評価を行った。評価指標としては、クラス不均衡の影響を受けにくい Macro-F1 を用いた。加えて、AI モデルがどの説明変数を

重視しているかを把握するため、Feature Importance の確認および SHAP¹⁵による解析を実施した。さらに、混同行列を用いて、各クラスにおける予測結果の傾向を確認した。

(4) 採用する AI モデルの決定

評価結果を踏まえ、Macro-F1 の値が最も良好な AI モデルを採用モデルとして選定した。これにより、特定クラスに偏らない総合的な予測性能を重視したモデル選定を行っている。

(5) 本番環境での推論

選定した AI モデルを本番環境に適用し、リアルタイムでの推論を実施した。本番環境においては、実際の通信状態データを入力として用い、通信品質の変動や異常兆候を推定し、通信制御に活用した。

4.3.3 AI モデルの評価

異常検知 AI の Macro-F1 値は 4.1.3(4)に記載している。また、通信制御 AI のマクロ平均値は 4.1.3(7)に記載している。

① ローカル 5G 回線の異常検知 AI について

ローカル 5G 回線の異常検知 AI の Feature Importance を図 4.3-1、SHAP を図 4.3-2、また混同行列(Confusion Matrix)¹⁶の結果を図 4.3-3 に示す。Feature Importance と SHAP の解析結果より、管理サーバと MRM 間の ICMP 応答時間(RTT)とローカル5G 回線の受信電界強度(RSRP)がモデルに大きな影響を与えている。また、混同行列の結果より、異常のラベルを間違えることは発生していない。Feature Importance と SHAP に表示されている変数の意味を表 4.3-2 に示す。

¹⁵ SHAP: A Unified Approach to Interpreting Model Predictions
Scott Lundberg, Su-In Lee
arXiv:1705.07874

¹⁶ 評価指標入門 ~データサイエンスとビジネスをつなぐ架け橋
高柳慎一, 長田怜士 著
4.3 混同行列

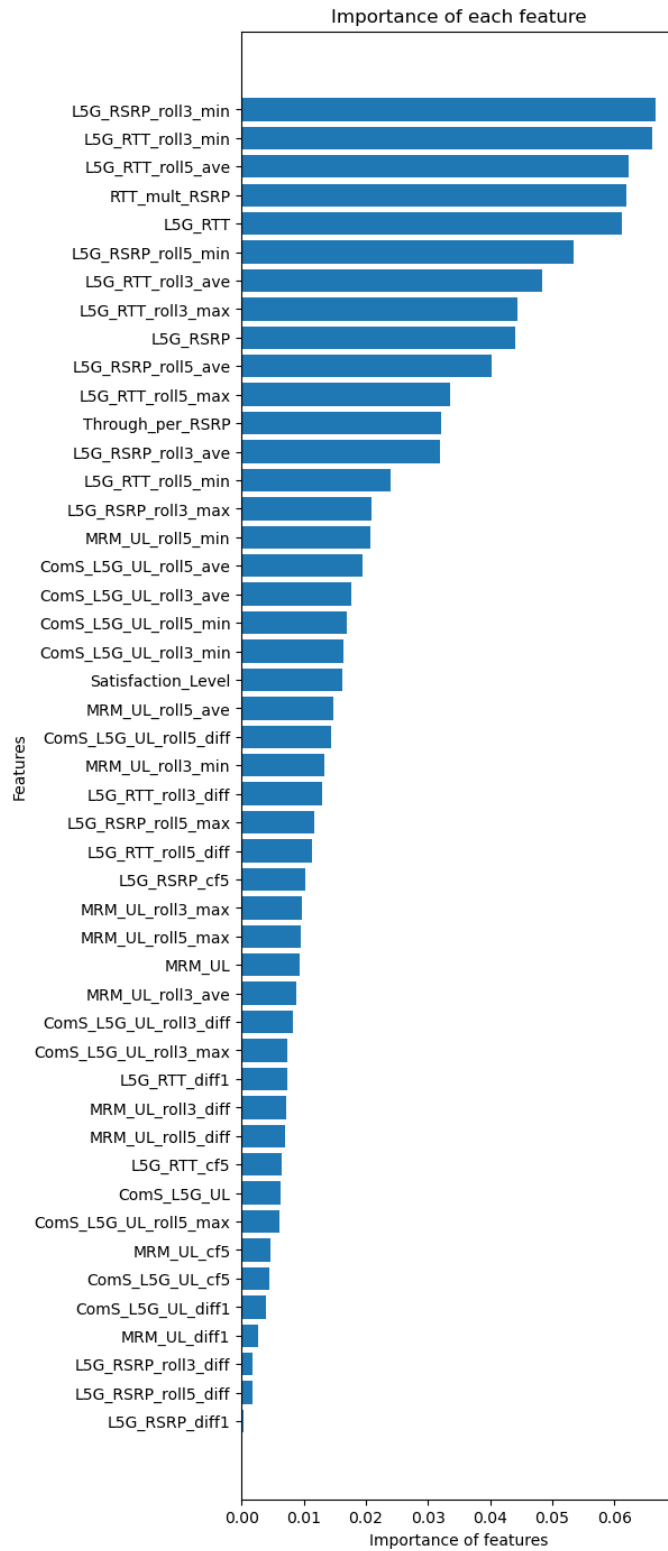


図 4.3-1 ローカル 5G 回線の異常検知 AI の Feature Importance

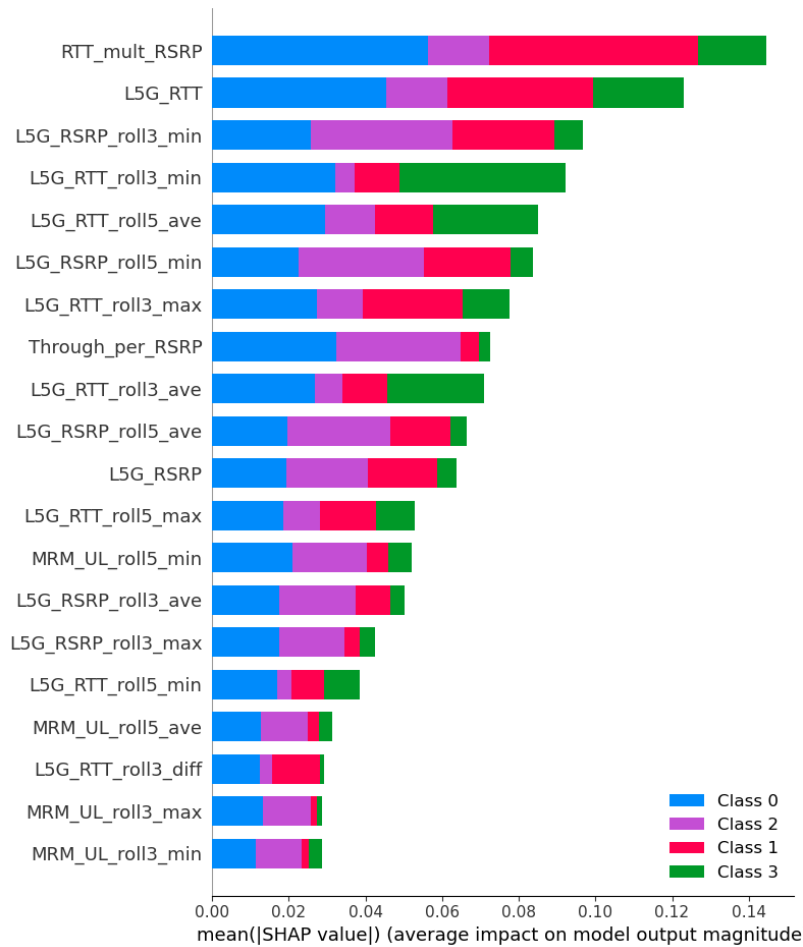


図 4.3-2 ローカル 5G 回線の異常検知 AI の SHAP

表 4.3-2 ローカル 5G 回線の異常検知 AI の Feature Importance と SHAP の変数に関する解説

変数名	解説
L5G_RSRP	ローカル5G 回線の受信電界強度
L5G_RSRP_roll3_min	受信電界強度の窓幅 3 内の最小値
L5G_RSRP_roll3_max	受信電界強度の窓幅 3 内の最大値
L5G_RSRP_roll3_ave	受信電界強度の窓幅 3 の平均値
L5G_RSRP_roll3_diff	受信電界強度の窓幅 3 内の最大値と最小値の差
L5G_RSRP_roll5_min	受信電界強度の窓幅 5 内の最小値
L5G_RSRP_roll5_max	受信電界強度の窓幅 5 内の最大値
L5G_RSRP_roll5_ave	受信電界強度の窓幅 5 の平均値
L5G_RSRP_roll5_diff	受信電界強度の窓幅 5 内の最大値と最小値の差
L5G_RSRP_diff1	受信電界強度で 1 秒前との差分
L5G_RSRP_cf5	受信電界強度 / 受信電界強度の窓幅 5 の平均値
L5G_RTT	管理サーバと MRM 間の ICMP 応答時間
L5G_RTT_roll3_min	ICMP 応答時間の窓幅 3 内の最小値
L5G_RTT_roll3_max	ICMP 応答時間の窓幅 3 内の最大値

L5G_RTT_roll3_ave	ICMP 応答時間の窓幅 3 の平均値
L5G_RTT_roll3_diff	ICMP 応答時間の窓幅 3 内の最大値と最小値の差
L5G_RTT_roll5_min	ICMP 応答時間の窓幅 5 内の最小値
L5G_RTT_roll5_max	ICMP 応答時間の窓幅 5 内の最大値
L5G_RTT_roll5_ave	ICMP 応答時間の窓幅 5 の平均値
L5G_RTT_roll5_diff	ICMP 応答時間の窓幅 5 内の最大値と最小値の差
L5G_RTT_diff1	ICMP 応答時間で 1 秒前との差分
L5G_RTT_cf5	ICMP 応答時間 / ICMP 応答時間の窓幅 5 の平均値
MRM_UL	送信スループット
MRM_UL_roll3_min	送信スループットの窓幅 3 内の最小値
MRM_UL_roll3_max	送信スループットの窓幅 3 内の最大値
MRM_UL_roll3_ave	送信スループットの窓幅 3 の平均値
MRM_UL_roll3_diff	送信スループットの窓幅 3 内の最大値と最小値の差
MRM_UL_roll5_min	送信スループットの窓幅 5 内の最小値
MRM_UL_roll5_max	送信スループットの窓幅 5 内の最大値
MRM_UL_roll5_ave	送信スループットの窓幅 5 の平均値
MRM_UL_roll5_diff	送信スループットの窓幅 5 内の最大値と最小値の差
MRM_UL_diff1	送信スループットで 1 秒前との差分
MRM_UL_cf5	送信スループット / 送信スループットの窓幅 5 の平均値
ComS_L5G_UL	受信スループット
ComS_L5G_UL_roll3_min	受信スループットの窓幅 3 内の最小値
ComS_L5G_UL_roll3_max	受信スループットの窓幅 3 内の最大値
ComS_L5G_UL_roll3_ave	受信スループットの窓幅 3 の平均値
ComS_L5G_UL_roll3_diff	受信スループットの窓幅 3 内の最大値と最小値の差
ComS_L5G_UL_roll5_min	受信スループットの窓幅 5 内の最小値
ComS_L5G_UL_roll5_max	受信スループットの窓幅 5 内の最大値
ComS_L5G_UL_roll5_ave	受信スループットの窓幅 5 の平均値
ComS_L5G_UL_roll5_diff	受信スループットの窓幅 5 内の最大値と最小値の差
ComS_L5G_UL_diff1	受信スループットで 1 秒前との差分
ComS_L5G_UL_cf5	受信スループット / 受信スループットの窓幅 5 の平均値
RTT_mult_RSRP	ICMP 応答時間 x 受信電界強度
Through_per_RSRP	送信スループット / 受信電界強度
Satisfaction_Level	受信スループット / 送信スループット

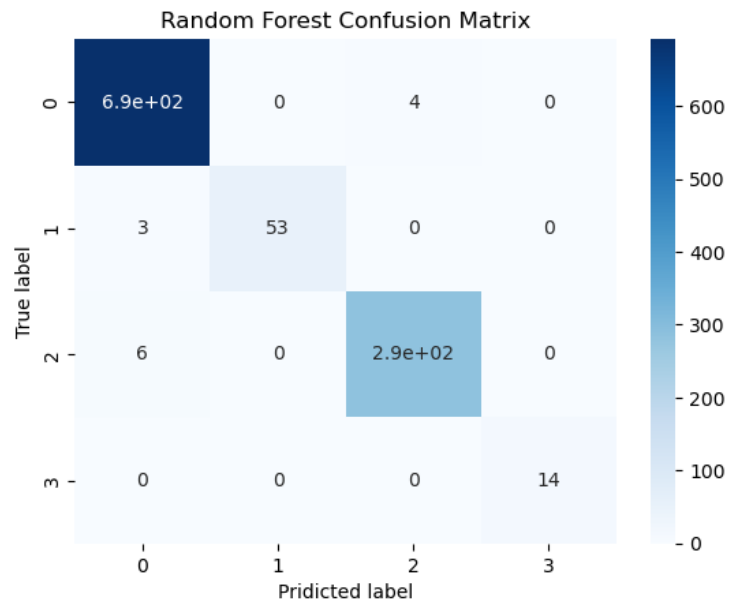


図 4.3-3 ローカル 5G 回線の異常検知 AI の混同行列

② 公衆網回線の異常検知 AI について

公衆網回線の異常検知 AI の Feature Importance を図 4.3-4、SHAP を図 4.3-5、また混同行列の結果を図 4.3-6 に示す。Feature Importance と SHAP の解析結果より、管理サーバと MRM 間の ICMP 応答時間(RTT)と公衆網の受信電界強度(RSRP)がモデルに大きな影響を与えている。混同行列が 3 行 3 列になっているのは学習データに class2 のデータがないためである。Feature Importance と SHAP に表示されている変数の意味を表 4.3-3 に示す。

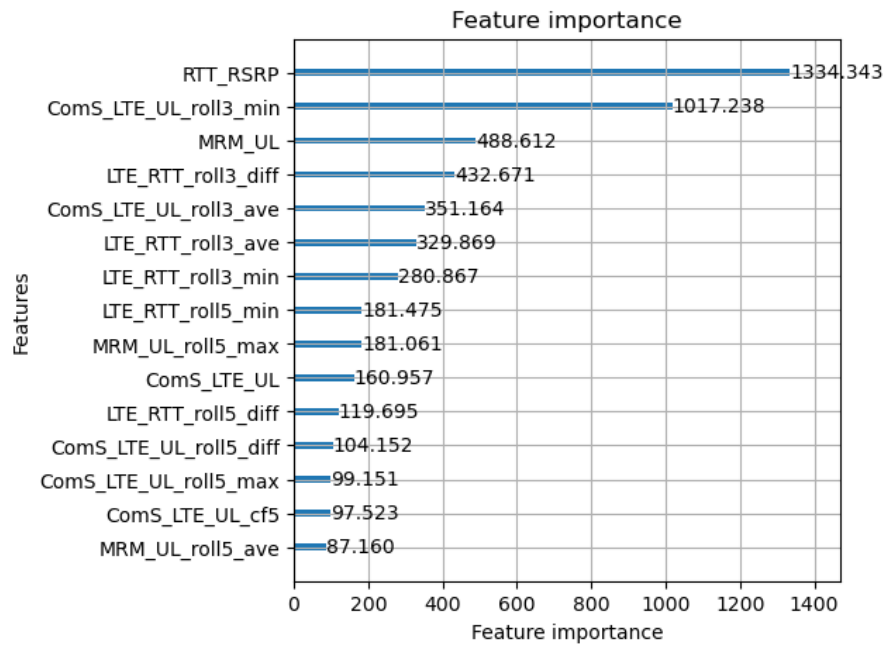


図 4.3-4 公衆網回線の異常検知 AI の Feature Importance

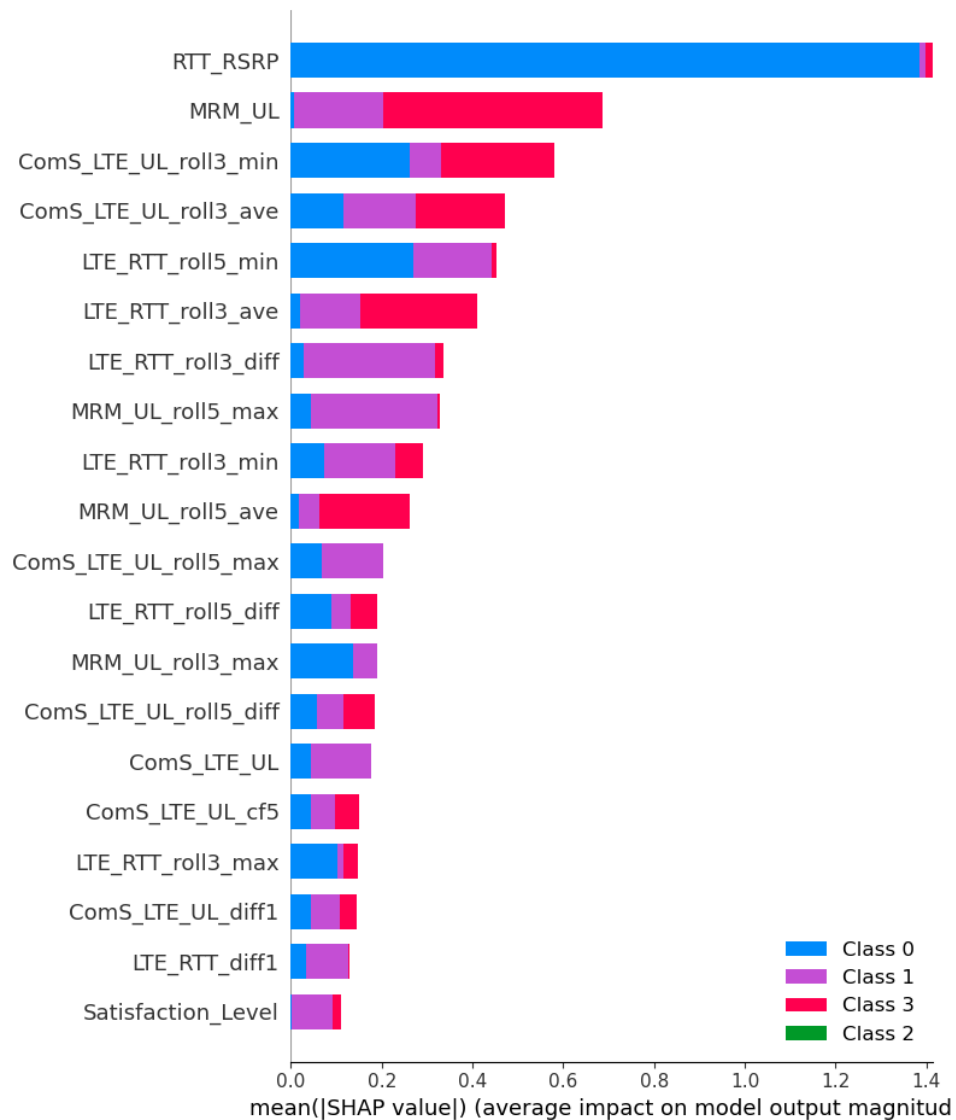


図 4.3-5 公衆網回線の異常検知 AI の SHAP

表 4.3-3 公衆網回線の異常検知 AI の Feature Importance と SHAP の変数に関する解説

変数名	解説
RTT_RSRP	ICMP 応答時間 x 公衆網回線の受信電界強度
Satisfaction_Level	受信スループット / 送信スループット
ComS_LTE_UL	受信スループット
ComS_LTE_UL_diff1	受信スループットで1秒前との差分
ComS_LTE_UL_cf5	受信スループット / 受信スループットの窓幅5の平均値
ComS_LTE_UL_roll3_min	受信スループットの窓幅 3 内の最小値
ComS_LTE_UL_roll3_ave	受信スループットの窓幅 3 の平均値
ComS_LTE_UL_roll5_max	受信スループットの窓幅 5 内の最大値
ComS_LTE_UL_roll5_diff	受信スループットの窓幅 5 内の最大値と最小値の差
LTE_RTT_diff1	ICMP 応答時間で1秒前との差分

LTE_RTT_roll3_min	ICMP 応答時間の窓幅 3 内の最小値
LTE_RTT_roll3_max	ICMP 応答時間の窓幅 3 内の最大値
LTE_RTT_roll3_ave	ICMP 応答時間の窓幅 3 の平均値
LTE_RTT_roll3_diff	ICMP 応答時間の窓幅 3 内の最大値と最小値の差
LTE_RTT_roll5_min	ICMP 応答時間の窓幅5内の最小値
LTE_RTT_roll5_diff	ICMP 応答時間の窓幅5内の最大値と最小値の差
MRM_UL	送信スループット
MRM_UL_roll3_max	送信スループットの窓幅 3 内の最大値
MRM_UL_roll5_max	送信スループットの窓幅5内の最大値
MRM_UL_roll5_ave	送信スループットの窓幅5の平均値

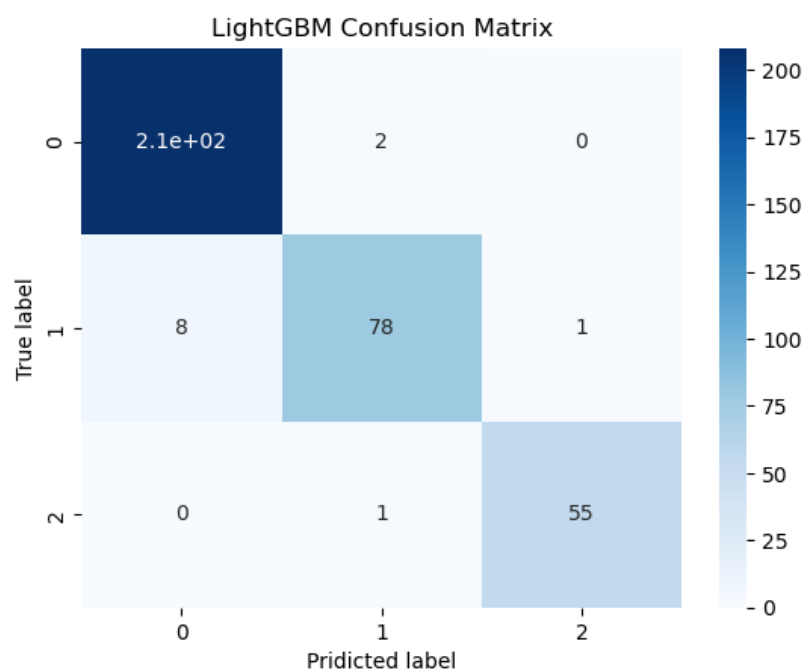


図 4.3-6 公衆網回線の異常検知 AI の混同行列

③ Wi-Fi 回線の異常検知 AI について

Wi-Fi 回線の異常検知 AI の Feature Importance を図 4.3-7、SHAP を図 4.3-8、また混同行列の結果を図 4.3-9 に示す。Feature Importance の解析結果では、Wi-Fi 回線の混雑率がモデルに大きな影響を与えている。一方、SHAP の解析結果では、受信電界強度(RSSI)がモデルに大きな影響を与えている。Feature Importance と SHAP に表示されている変数の意味を表 4.3-4 に示す。

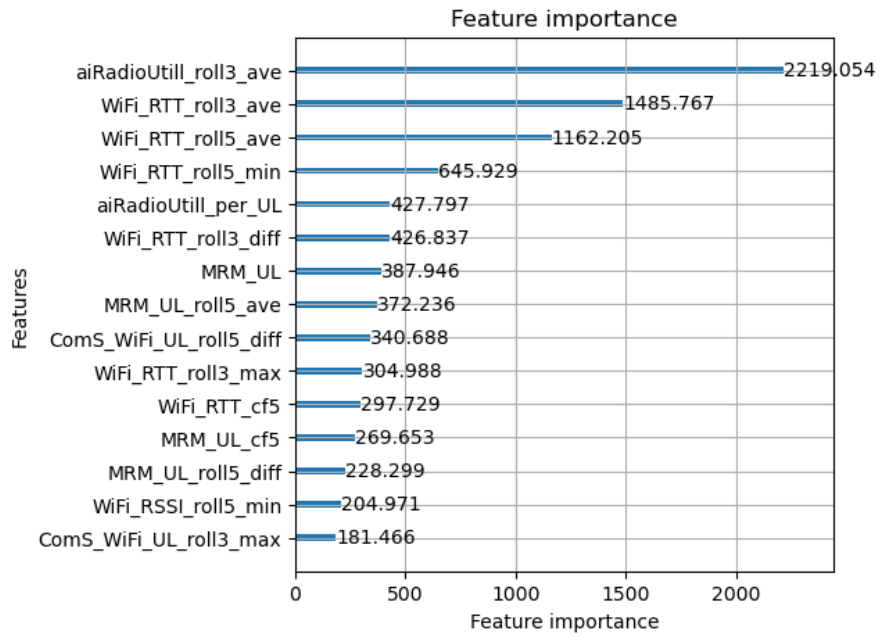


図 4.3-7 Wi-Fi 回線の異常検知 AI の Feature Importance

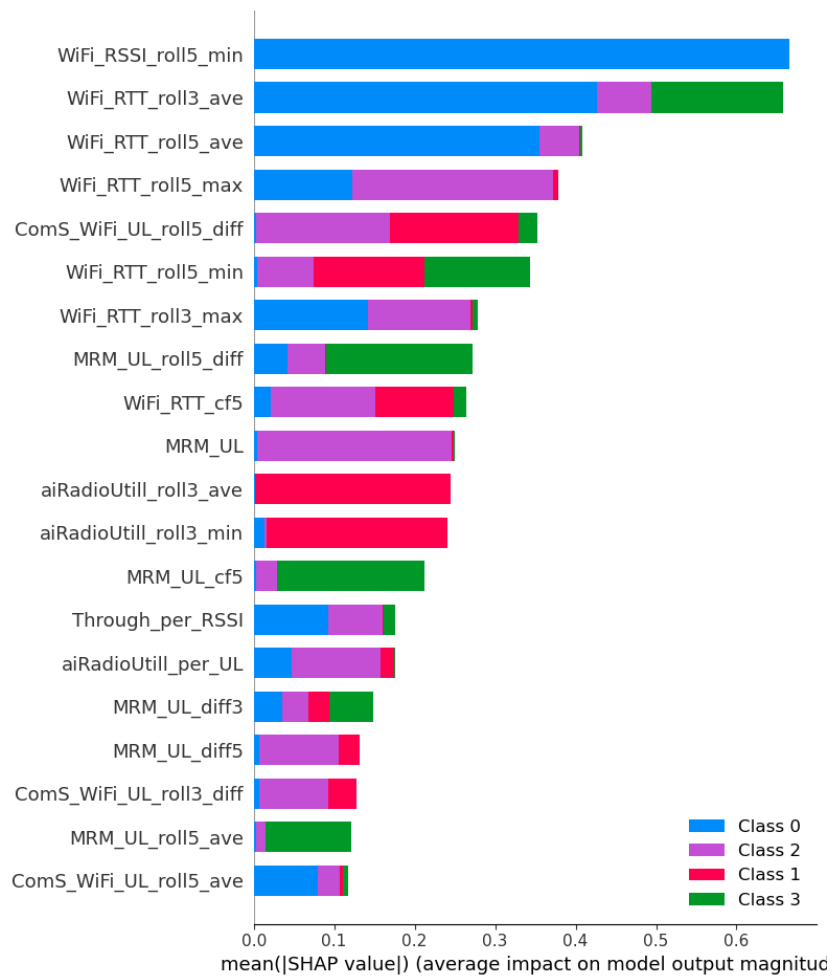


図 4.3-8 Wi-Fi 回線の異常検知 AI の SHAP

表 4.3-4 Wi-Fi 回線の異常検知 AI の Feature Importance と SHAP の変数に関する解説

変数名	解説
WiFi_RSSI_roll5_min	Wi-Fi 回線の受信電界強度の窓幅 5 内の最小値
WiFi_RTT_roll3_ave	ICMP 応答時間の窓幅3での平均値
WiFi_RTT_roll3_max	ICMP 応答時間の窓幅3内での最大値
WiFi_RTT_roll5_ave	ICMP 応答時間の窓幅5での平均値
WiFi_RTT_roll5_max	ICMP 応答時間の窓幅5内での最大値
WiFi_RTT_roll5_min	ICMP 応答時間の窓幅5内での最小値
WiFi_RTT_cf5	ICMP 応答時間 / ICMP 応答時間の窓幅5の平均値
ComS_WiFi_UL_roll3_diff	受信スループットの窓幅3内での最大値と最小値の差
ComS_WiFi_UL_roll5_ave	受信スループットの窓幅5の平均値
ComS_WiFi_UL_roll5_diff	受信スループットの窓幅5内での最大値と最小値の差
MRM_UL	送信スループット
MRM_UL_cf5	送信スループット / 送信スループットの窓幅5の平均値
MRM_UL_roll5_diff	送信スループットの窓幅5内での最大値と最小値の差
MRM_UL_roll5_ave	送信スループットの窓幅5の平均値
MRM_UL_diff3	送信スループットで3秒前との差
MRM_UL_diff5	送信スループットで5秒前との差
aiRadioUtile_roll3_ave	Wi-Fi 回線の混雑率で窓幅3の平均値
aiRadioUtile_roll3_min	Wi-Fi 回線の混雑率で窓幅3内の最小値
aiRadioUtile_per_UL	Wi-Fi 回線の混雑率 / 送信スループット
Through_per_RSSI	送信スループット / 受信電界強度

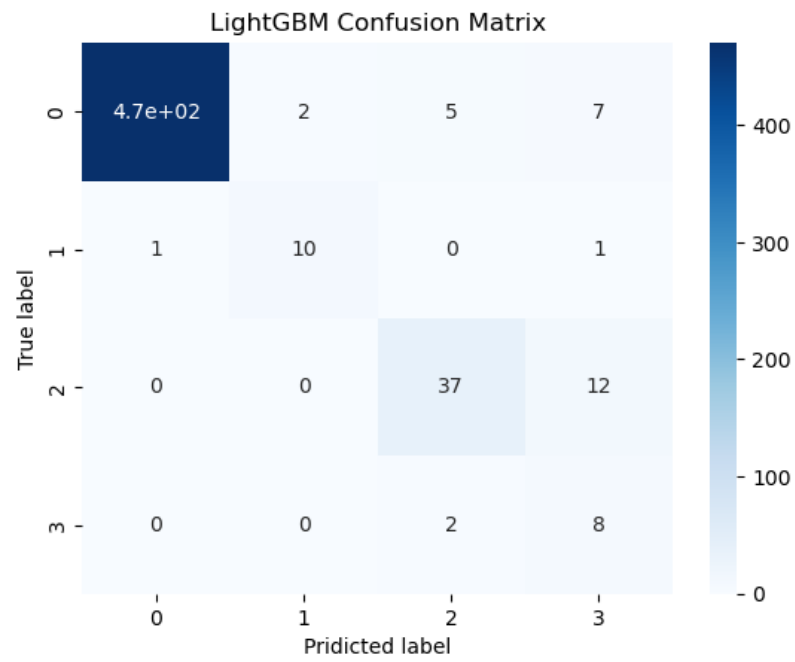


図 4.3-9 Wi-Fi 回線の異常検知 AI の混同行列

④ ローカル 5G 回線の通信制御 AI について

ローカル 5G 回線の通信制御 AI の Feature Importance を図 4.3-10、SHAP を図 4.3-11、また混同行列の結果を図 4.3-12 に示す。Feature Importance と SHAP の解析結果ともに、異常検出 AI の正常状態(class0_prob)がモデルに大きな影響を与えている。Feature Importance と SHAP に表示されている変数の意味を表 4.3-5 に示す。

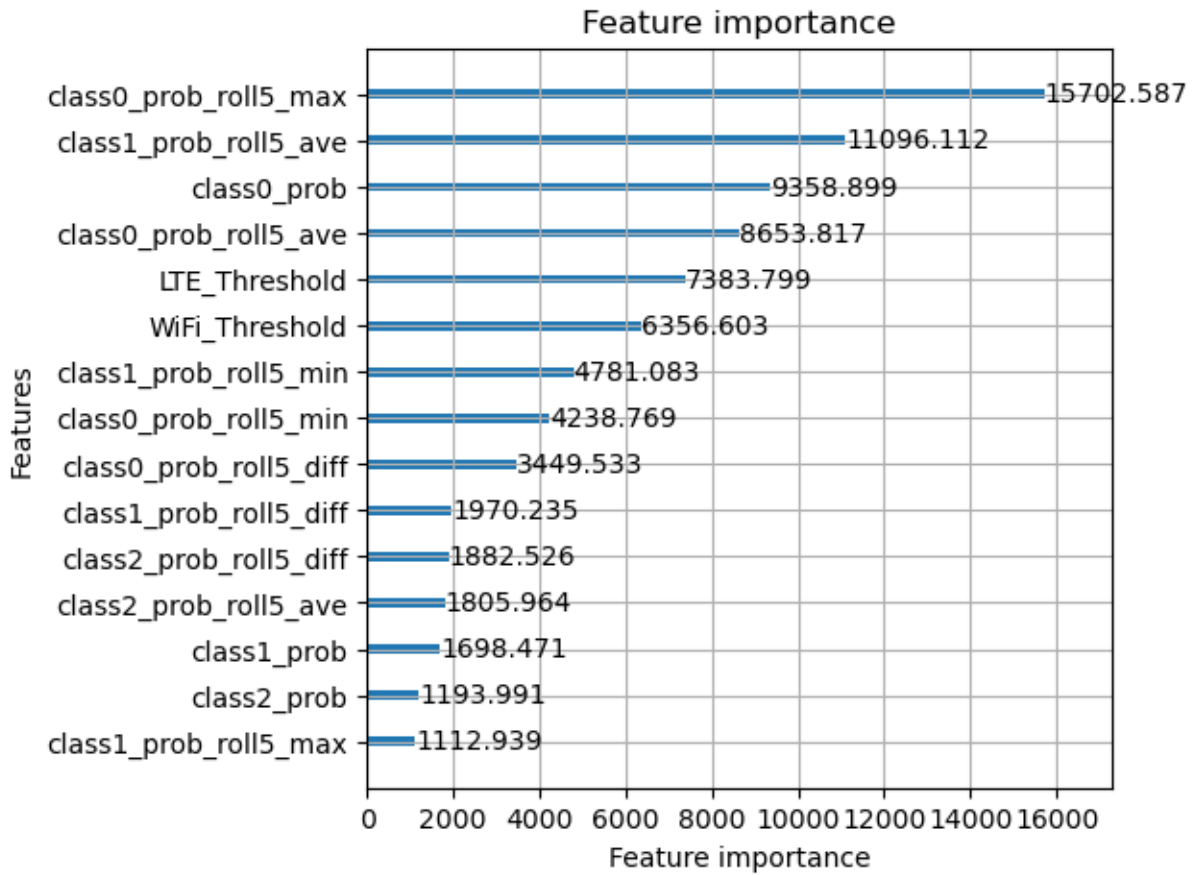


図 4.3-10 ローカル 5G 回線の通信制御 AI の Feature Importance

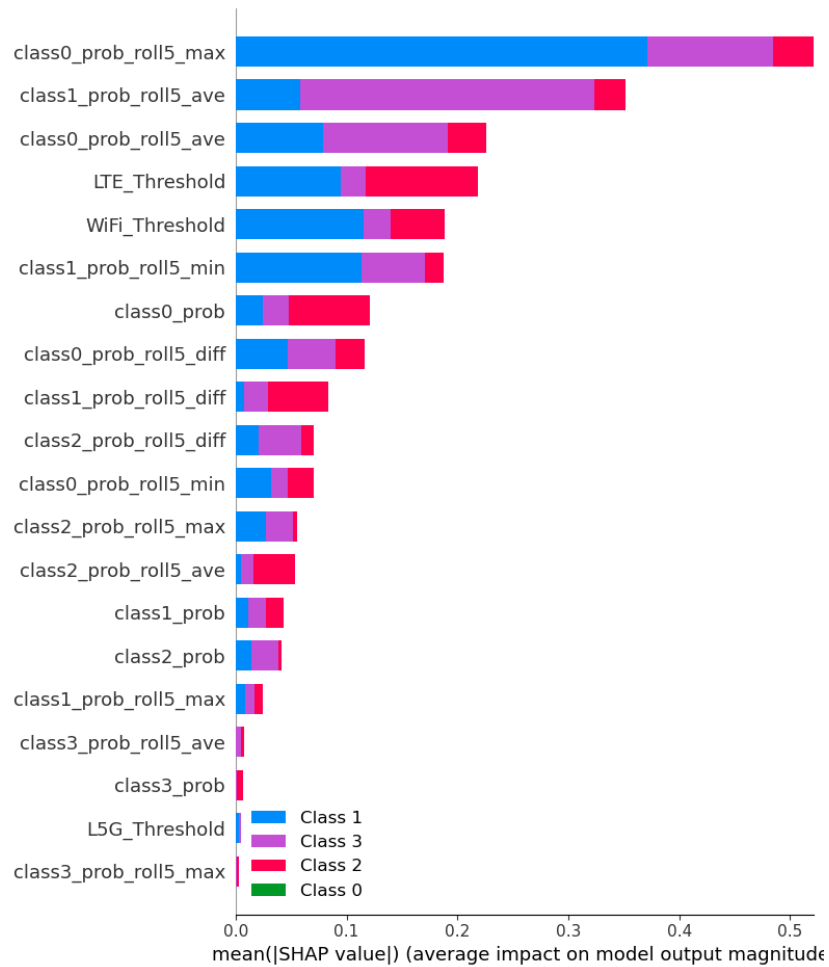


図 4.3-11 ローカル 5G 回線の通信制御 AI の SHAP

表 4.3-5 ローカル 5G 回線の通信制御 AI の Feature Importance と SHAP の変数に関する解説

変数名	解説
class0_prob	異常検知 AI クラス 0 の確率
class0_prob_roll5_min	異常検知 AI クラス 0 の窓幅5内の最小値
class0_prob_roll5_max	異常検知 AI クラス 0 の窓幅5内の最大値
class0_prob_roll5_ave	異常検知 AI クラス 0 の窓幅5の平均値
class0_prob_roll5_diff	異常検知 AI クラス 0 の窓幅5内の最大値と最小値の差
class1_prob	異常検知 AI クラス 1 の確率
class1_prob_roll5_min	異常検知 AI クラス 1 の窓幅5内の最小値
class1_prob_roll5_max	異常検知 AI クラス 1 の窓幅5内の最大値
class1_prob_roll5_ave	異常検知 AI クラス 1 の窓幅5の平均値
class1_prob_roll5_diff	異常検知 AI クラス 1 の窓幅5内の最大値と最小値の差
class2_prob	異常検知 AI クラス 2 の確率
class2_prob_roll5_max	異常検知 AI クラス 2 の窓幅5内の最大値
class2_prob_roll5_ave	異常検知 AI クラス 2 の窓幅5の平均値

class2_prob_roll5_diff	異常検知 AI クラス 2 の窓幅5内の最大値と最小値の差
class3_prob	異常検知 AI クラス 3 の確率
class3_prob_roll5_max	異常検知 AI クラス 3 の窓幅5内の最大値
class3_prob_roll5_ave	異常検知 AI クラス 3 の窓幅5の平均値
L5G_Threshold	ローカル5G 回線の受信電界強度が-90dBm 以上か未満か
LTE_Threshold	LTE 回線の受信電界強度が-100dBm 以上か未満か
WiFi_Threshold	Wi-Fi 回線の受信電界強度が-70dBm 以上か未満か

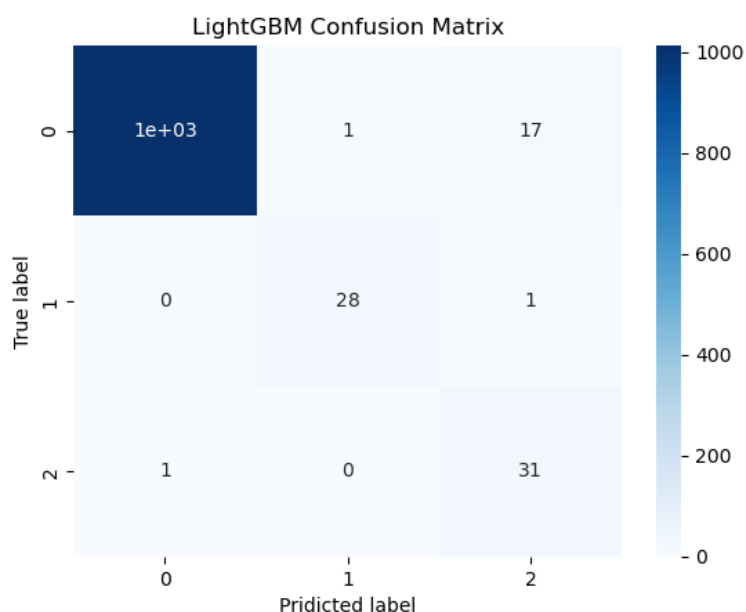


図 4.3-12 ローカル 5G 回線の通信制御 AI の混同行列

混同行列のラベルの意味を表 4.3-6 混同行列のラベルの意味に示す。

表 4.3-6 混同行列のラベルの意味

ラベル	動作
0	ローカル 5G 回線を使い続ける
1	公衆回線に切り替える
2	Wi-Fi 回線に切り替える

⑤ 公衆網回線の通信制御 AI について

公衆網回線の通信制御 AI の Feature Importance を図 4.3-13、SHAP を図 4.3-14、また混同行列の結果を図 4.3-15 に示す。Feature Importance と SHAP の解析結果ともに、ローカル 5G 回線の受信電界強度がある閾値以下になっているかどうかのフラグ(L5G_Threshold)がモデルに大きな影響を与えている。Feature Importance と SHAP に表示されている変数の意味を表 4.3-7 に示す。

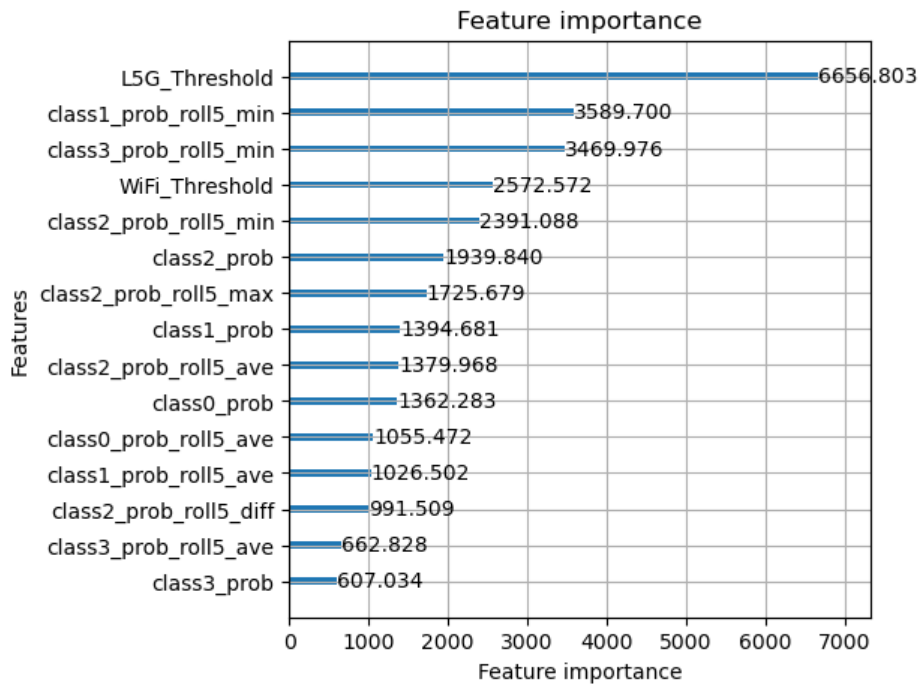


図 4.3-13 公衆網回線の通信制御 AI の Feature Importance

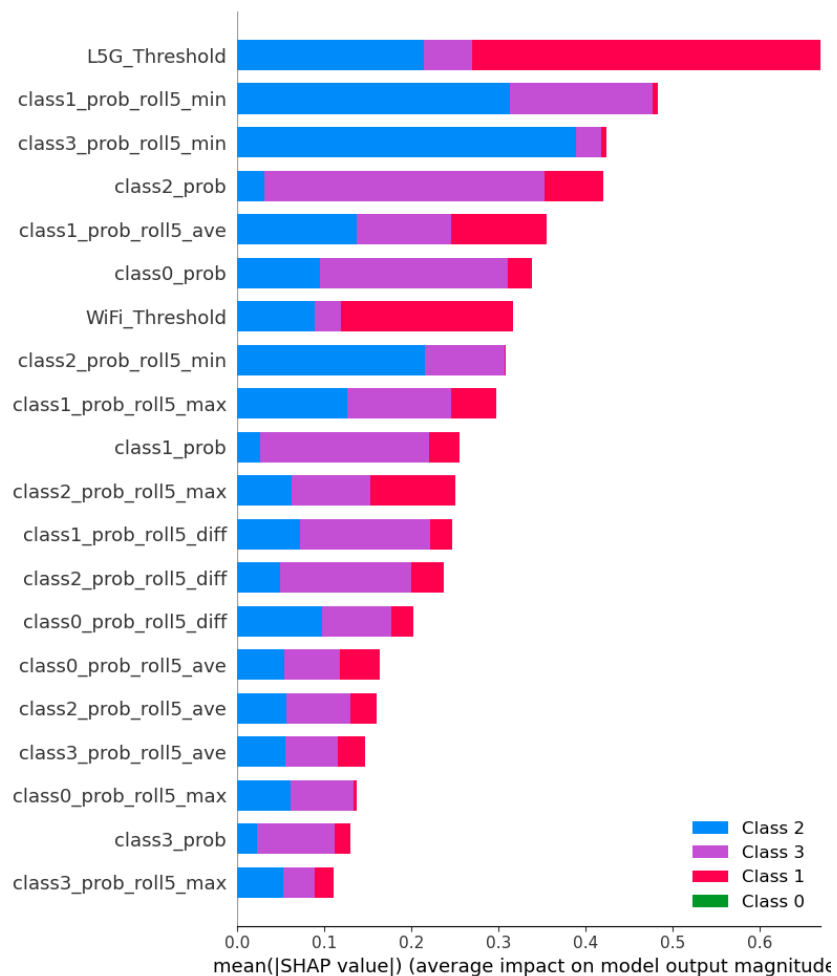


図 4.3-14 公衆網回線の通信制御 AI の SHAP

表 4.3-7 公衆網回線の通信制御 AI の Feature Importance と SHAP の変数に関する解説

変数名	解説
class0_prob	異常検知 AI クラス 0 の確率
class0_prob_roll5_max	異常検知 AI クラス 0 で窓幅5内の最大値
class0_prob_roll5_ave	異常検知 AI クラス 0 で窓幅5の平均値
class0_prob_roll5_diff	異常検知 AI クラス 0 で窓幅5内の最大値と最小値の差
class1_prob	異常検知 AI クラス 1 の確率
class1_prob_roll5_min	異常検知 AI クラス 1 で窓幅5内の最小値
class1_prob_roll5_max	異常検知 AI クラス 1 で窓幅5内の最大値
class1_prob_roll5_ave	異常検知 AI クラス 1 で窓幅5の平均値
class1_prob_roll5_diff	異常検知 AI クラス 1 で窓幅5内の最大値と最小値の差
class2_prob	異常検知 AI クラス 2 の確率
class2_prob_roll5_min	異常検知 AI クラス2で窓幅5内の最小値
class2_prob_roll5_max	異常検知 AI クラス2で窓幅5内の最大値
class2_prob_roll5_ave	異常検知 AI クラス2で窓幅5の平均値
class2_prob_roll5_diff	異常検知 AI クラス2で窓幅5内の最大値と最小値の差
class3_prob	異常検知 AI クラス 3 の確率
class3_prob_roll5_min	異常検知 AI クラス 3 で窓幅5内の最小値
class3_prob_roll5_max	異常検知 AI クラス 3 で窓幅5内の最大値
class3_prob_roll5_ave	異常検知 AI クラス 3 で窓幅5の平均値
L5G_Threshold	ローカル5G回線の受信電界強度が \geq -90dBm 以上か未満か
WiFi_Threshold	Wi-Fi 回線の受信電界強度が \geq -70dBm 以上か未満か

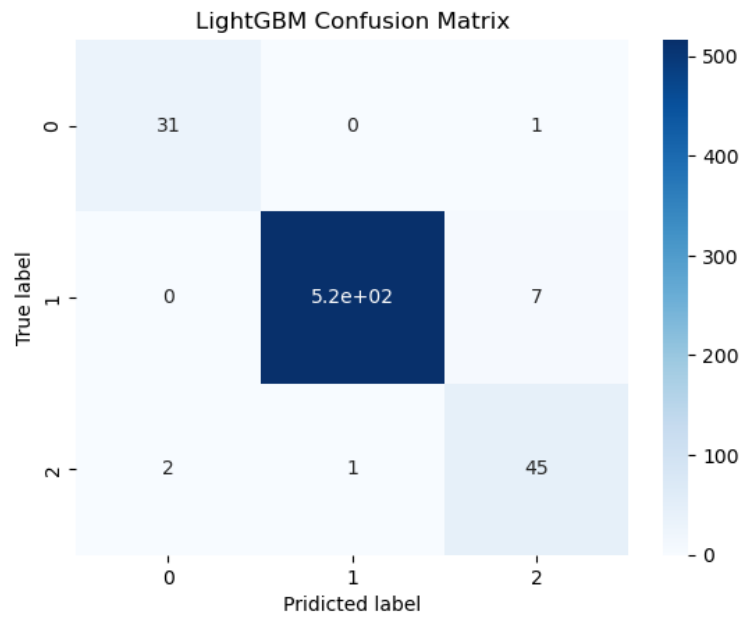


図 4.3-15 公衆網回線の通信制御 AI の混同行列

混同行列のラベルの意味を下記表に示す。

表 4.3-8 混同行列のラベルの意味

ラベル	動作
0	ローカル 5G 回線に切り替える
1	公衆回線を使い続ける
2	Wi-Fi 回線に切り替える

⑥ Wi-Fi 回線の通信制御 AI について

Wi-Fi 回線の通信制御 AI の Feature Importance を図 4.3-16、SHAP を図 4.3-17、また混同行列の結果を図 4.3-18 に示す。Feature Importance の解析結果ではローカル 5G 回線の受信電界強度がある閾値以下になっているかどうかのフラグ (L5G_Threshold) がモデルに大きな影響を与えている。一方、SHAP の解析結果より、自分自身の受信電界強度がある閾値以下になっているかどうかのフラグ (Wi-Fi_Threshold) がモデルに大きな影響を与えている。Feature Importance と SHAP に表示されている変数の意味を表 4.3-9 に示す。

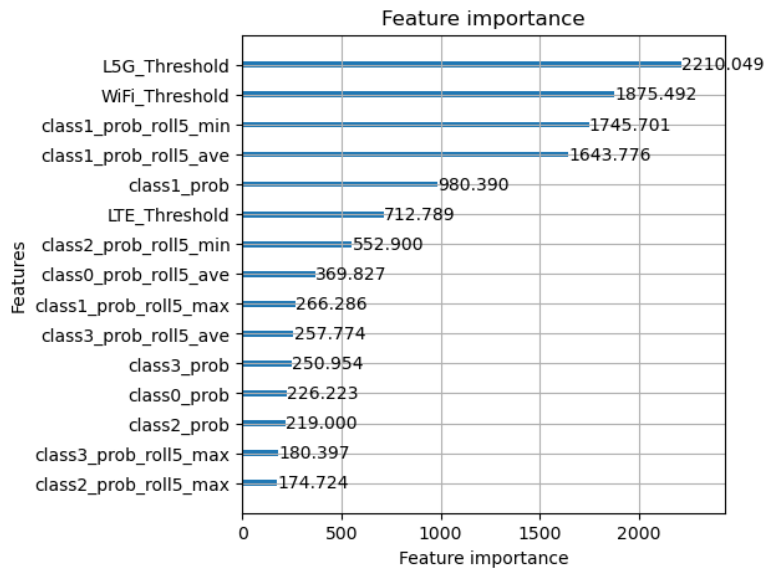


図 4.3-16 Wi-Fi 回線の通信制御 AI の Feature Importance

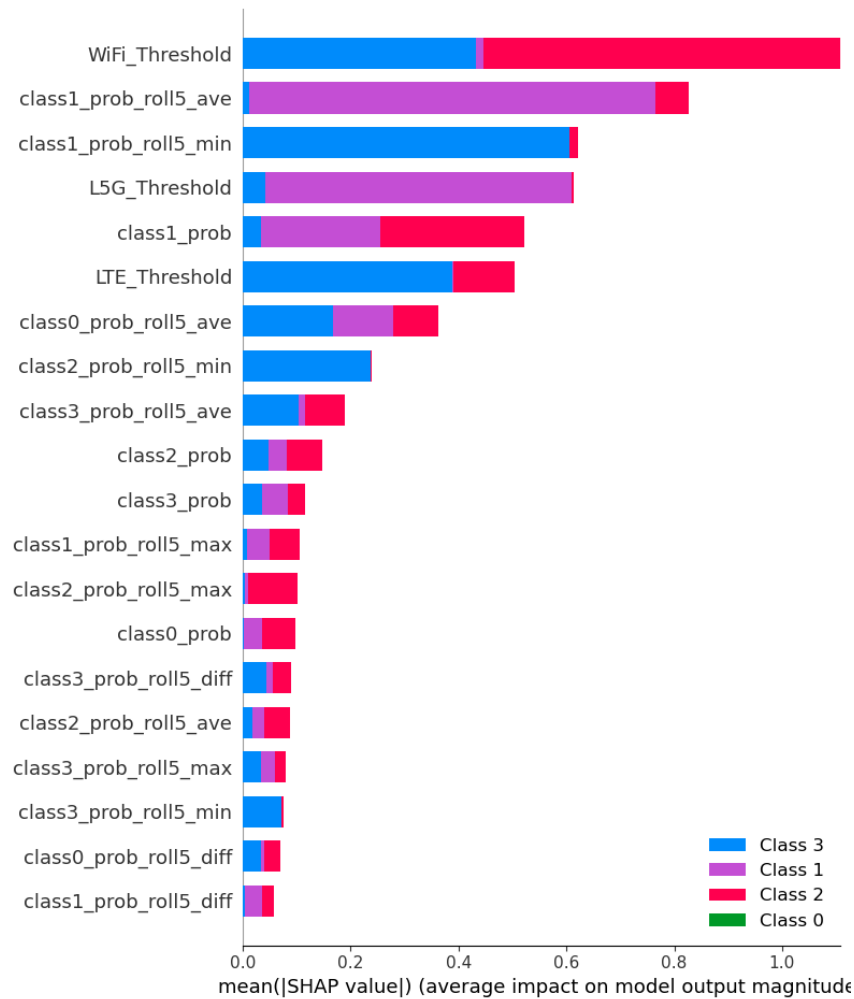


図 4.3-17 Wi-Fi 回線の通信制御 AI の SHAP

表 4.3-9 Wi-Fi 回線の通信制御 AI の Feature Importance と SHAP の変数に関する解説

変数名	解説
class0_prob	異常検知 AI クラス 0 の確率
class0_prob_roll5_ave	異常検知 AI クラス 0 で窓幅5の平均値
class0_prob_roll5_diff	異常検知 AI クラス 0 で窓幅5内での最大値と最小値の差
class1_prob	異常検知 AI クラス 1 の確率
class1_prob_roll5_min	異常検知 AI クラス 1 で窓幅5内の最小値
class1_prob_roll5_max	異常検知 AI クラス 1 で窓幅5内の最大値
class1_prob_roll5_ave	異常検知 AI クラス 1 で窓幅5の平均値
class1_prob_roll5_diff	異常検知 AI クラス 1 で窓幅5内での最大値と最小値の差
class2_prob	異常検知 AI クラス2の確率
class2_prob_roll5_min	異常検知 AI クラス2で窓幅5内の最小値
class2_prob_roll5_max	異常検知 AI クラス2で窓幅5内の最大値
class2_prob_roll5_ave	異常検知 AI クラス2で窓幅5の平均値
class3_prob	異常検知 AI クラス3の確率

class3_prob_roll5_min	異常検知 AI クラス3で窓幅5内の最小値
class3_prob_roll5_max	異常検知 AI クラス3で窓幅5内の最大値
class3_prob_roll5_ave	異常検知 AI クラス3で窓幅5の平均値
class3_prob_roll5_diff	異常検知 AI クラス3で窓幅5内の最大値と最小値の差
L5G_Threshold	ローカル5G回線の受信電界強度が-90dBm以上か未満か
LTE_Threshold	LTE回線の受信電界強度が-100dBm以上か未満か
WiFi_Threshold	Wi-Fi回線の受信電界強度が-70dBm以上か未満か

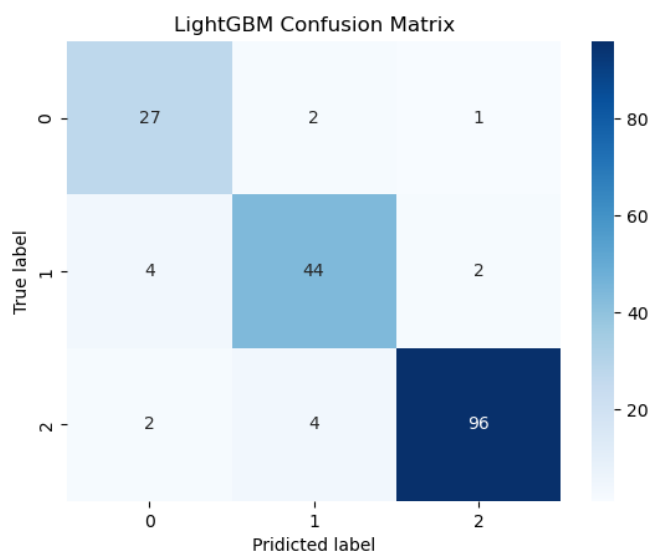


図 4.3-18 Wi-Fi 回線の通信制御 AI の混同行列

混同行列のラベルの意味を下記表に示す。

表 4.3-10 混同行列のラベルの意味

ラベル	動作
0	ローカル 5G 回線に切り替える
1	公衆回線に切り替える
2	Wi-Fi 回線を使い続ける

⑦ ローカル 5G 回線の QoS 制御 AI について

ローカル 5G 回線の QoS 制御 AI の Feature Importance を図 4.3-19、SHAP を図 4.3-20、また混同行列の結果を図 4.3-21 に示す。Feature Importance と SHAP の解析結果ともに、今の 5QI 値がモデルに大きな影響を与えている。また、SHAP に class が表示されていないのは、回帰モデルを使用したためである。混同行列は回帰の出力値を丸めて整数にした 5QI 値で比較している。Feature Importance と SHAP に表示されている変数の意味を表 4.3-11 に示す。

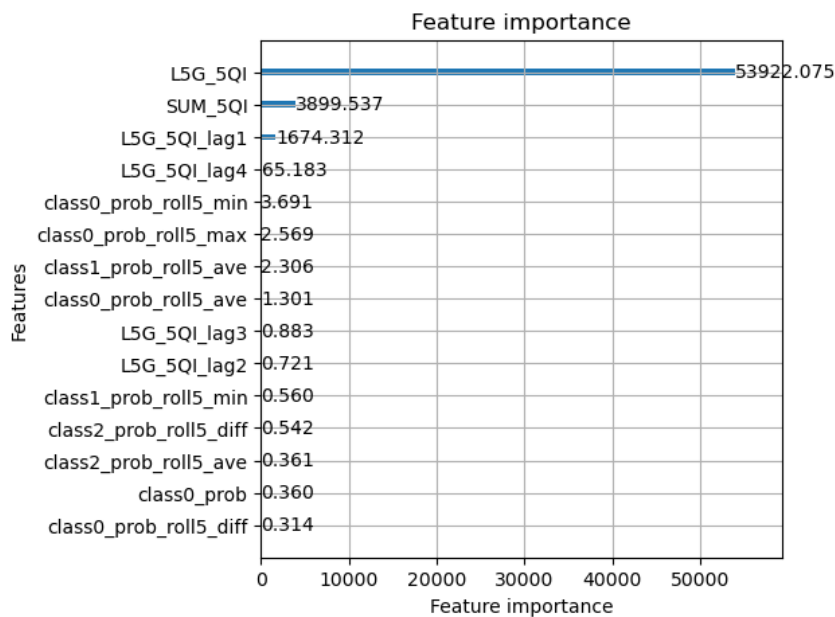


図 4.3-19 ローカル 5G 回線の QoS 制御 AI の Feature Importance

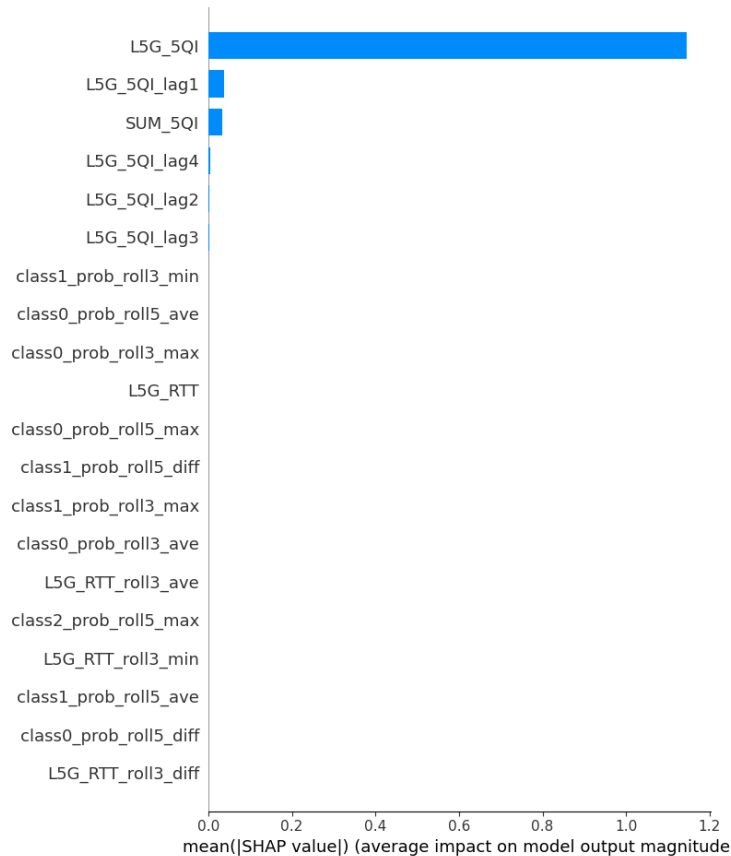


図 4.3-20 ローカル 5G 回線の QoS 制御 AI の SHAP

表 4.3-11 QoS 制御 AI の Feature Importance と SHAP の変数に関する解説

変数名	解説
L5G_5QI	現在の 5QI の値
L5G_5QI_lag1	1 秒前の 5QI 値
L5G_5QI_lag2	2 秒前の 5QI 値
L5G_5QI_lag3	3 秒前の 5QI 値
L5G_5QI_lag4	4 秒前の 5QI 値
SUM_5QI	直近 5 秒間分の 5QI の合計値
class0_prob	異常検知 AI の class0 の確率
class0_prob_roll5_min	異常検知 AI の class0 の確率で窓幅 5 内の最小値
class0_prob_roll5_max	異常検知 AI の class0 の確率で窓幅 5 内の最大値
class0_prob_roll5_ave	異常検知 AI の class0 の確率で窓幅 5 の平均値
class0_prob_roll5_diff	異常検知 AI の class0 の確率で窓幅 5 内の最大値と最小値の差
class1_prob_roll5_min	異常検知 AI の class1 の確率で窓幅 5 内の最小値
class1_prob_roll5_ave	異常検知 AI の class1 の確率で窓幅 5 の平均値
class2_prob_roll5_ave	異常検知 AI の class2 の確率で窓幅 5 の平均値
class2_prob_roll5_diff	異常検知 AI の class2 の確率で窓幅 5 内の最大値と最小値の差

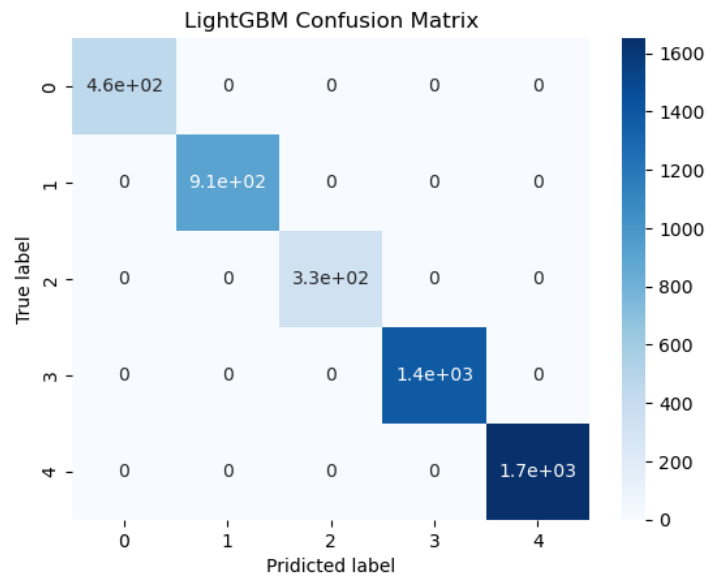


図 4.3-21 ローカル 5G 回線の QoS 制御 AI の混同行列

4.4 AIモデルの開発・学習にあたっての留意事項等

4.4.1 不均衡データ対策

本実証で取り扱う通信品質データは、正常状態に相当するデータが多数を占め、異常状態に相当するデータが少ない不均衡データとなっている。このため、AIモデルの学習および評価において、少数派データを適切に扱うことを目的として、以下の不均衡データ対策を実施した。

① アンダーサンプリング

多数派データであるクラス 0 について、学習データから一部を間引くアンダーサンプリングを実施した。クラス 0 のデータを間引く際には、受信電界強度の頻度分布が偏らないよう配慮し、クラス 0 内の受信電界強度分布が概ね一様となるようにデータを選定した。これにより、特定の電界条件に偏った学習となることを防止した。

② 層化 k 分割交差検証の採用および分割方法の設定

モデル評価には、層化 k 分割交差検証を採用した。分割にあたっては、目的変数のクラス分布に加え、受信電界強度の比率も各分割で保持されるよう設定し、学習データおよび検証データの双方において、通信状態の分布が極端に偏らないようにしている。

③ 交差検証回数の最適化

少数派データが学習データおよび検証データの双方に含まれるよう、交差検証の分割数を調整した。これにより、特定の分割において少数派データが欠落することを防ぎ、安定した性能評価を行えるようにした。

④ 学習時のクラス重みの調整

AIモデルの学習時には、クラスごとのデータ数に応じてクラス重み(class_weight)を設定した。これにより、少数派クラスの誤分類が学習過程で適切に考慮されるようにし、不均衡データ下でも各クラスを均等に識別できるモデル構築を目指した。

⑤ 評価指標としての Macro-F1 の採用

モデル評価指標としては、各クラスの性能を均等に評価できる Macro-F1 を採用した。これにより、多数派クラスの影響を過度に受けることなく、少数派クラスを含めた総合的な予測性能を評価した。

4.4.2 特徴量エンジニアリング

無線特有の特徴エンジニアリングとして、プロポーショナル・フェアネスの計算式および受信電界強度がハンドオーバー閾値よりも高いか低いかという 2 値化を行った。

4.4.3 モデル

ローカル 5G 回線の QoS 制御 AI に関して、QoS 値が順序的に変わるので回帰モデルを使用した。

4.4.4 データ収集

本実証では、AI モデルの学習および評価に用いるデータの代表性を確保するため、さまざまな通信環境条件下でデータを取得した。取得環境および条件は以下のとおりである。

① 実環境と電波暗室の併用

データ収集は、実際の運用環境に近い協創ラボなどの実環境と、外来ノイズや他システムの影響を排除できる電波暗室の両方で実施した。

実環境では、周辺電波や遮蔽物の影響を受けた現実的な通信品質変動を取得し、電波暗室では、電波環境を意図的に変化させることで、通信品質劣化の要因を明確にしたデータを取得している。これにより、多様な通信状態を含む学習データの構築を可能とした。

② アンテナの有無による測定

通信条件の違いによる影響を把握するため、アンテナを接続した状態と、アンテナを接続しない状態の双方で測定を実施した。アンテナ有無の条件を切り替えることで、受信電界強度や通信品質が大きく変化する状況を意図的に作り出し、良好な通信状態から劣化状態まで幅広いデータを取得している。

これらの条件下で取得したデータを学習および評価に用いることで、特定の環境条件に偏らない AI モデルの構築を目指した。

5. 実証の手法

5.1 ユースケース①:エッジ AI による通信量の低減

5.1.1 実証内容の詳細

本実証は、製造現場における安全管理と通信効率化の両立を目的とした、エッジ AI による動的映像品質制御技術の検証を行う。従来の監視システムでは常時高解像度での映像伝送により通信帯域を圧迫していたが、本技術では国際電気製エッジ AI を活用し、侵入禁止エリアへの移動体侵入をリアルタイムで検知することで、異常時のみ高解像度映像を伝送する仕組みを実現する。

技術的特徴は、既存の AI 検知技術を基盤としながら、検知結果に応じた解像度の動的変更と通信量削減を実現するアルゴリズムである。通常時は 1Mbps の低解像度で映像を伝送し、異常検知時のみ 8Mbps の高解像度へ自動切替することで、平時の通信負荷を大幅に削減する。このエッジ AI による映像品質制御と通信ネットワークの接続最適化により、検知から解像度変更までをシームレスに実現する点が本実証の新規性である。

検証は国際電気協創ラボのローカル 5G 環境下で実施され、2 つの主要な検証項目から構成される。第一に、AI によるデータ伝送量の低減効果を定量的に測定し、切り替え応答時間とスループット変化の確認を行う。第二に、解像度切り替え時間中の移動体フレームアウト防止を目的とした検知エリアの最適化検証を実施し、検知精度と通信負荷のトレードオフ関係を評価する。

本実証を通じて、目標とする 30%以上の通信量削減を達成するとともに、製造現場における安全性と通信効率を両立する実用的なソリューションモデルの確立を目指す。

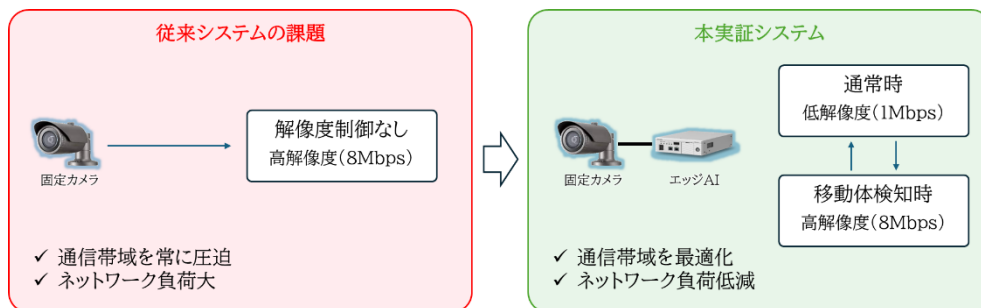


図 5.1-1 ユースケース① 実証概要図

5.1.2 利用技術・データ

本検証では、映像伝送の通信手段としてローカル 5G を使用する。エッジ AI による移動体検知時に低解像度映像から高解像度映像への切り替えを行うが、ローカル 5G の低遅延特性により、検知から映像品質変更までのタイムラグを最小限に抑えることが可能である。無線区間での遅延が小さいため、AI 検知結果に基づく即座の解像度切り替えが実現でき、高解像度映像の安定伝送も可能である。

利用するエッジ AI は国際電気製 AI エッジコントローラを使用する。本機は、予め設定したエリア内に移動体(人物、車両など)が侵入した際に、リアルタイムで検知し、その結果を上位サーバへ通知する機能を有している。カメラ映像から移動体の位置・動きを分析し、侵入禁止エリアへの侵入を判定する。本機の特徴として、カメラ映像をエッジ側で処理し、検知結果のみを通信することで、通信負荷を軽減する点が挙げられる。また、検知エリアの位置・範囲を自由に設定できるため、現場の状況に応じた柔軟な運用が可能である。エッジ側で AI 処理を行うことで、生の映像データをクラウドへ送信する必要がなく、通信量を大幅に削減できる。

5.1.3 必要性・新規性

近年、IoT デバイスや高精細映像伝送の需要が増加し、産業分野では遠隔制御やリアルタイム監視など、多様な用途で大容量のデータ通信が発生している。特に、プラントやインフラ設備の運用においては、安定した通信環境の確保が不可欠であり、ネットワークの最適なりソース配分が求められている。しかし、通信帯域には限りがあり、無制限にリソースを割り当てることはできない。

従来の監視システムでは、通信環境の変化や混雑状況に応じた動的な制御が行われておらず、常時高解像度で映像を送信することが一般的である。この結果、必要のない場面でも通信帯域を占有し、ネットワーク全体の混雑を招くとともに、通信遅延やパケットロス、さらには通信断といった問題が発生しやすい状況であった。また、既存のエッジ AI は、設定したエリアに移動体が侵入したことを検知する機能を有しているが、この検知結果を通信制御に連携させる仕組みは確立されていない。AI 検知機能と通信帯域制御が独立して動作していたため、検知結果に応じた即座の通信制御ができず、不要な高解像度伝送が継続されるという非効率性があった。

これに対し、本実証で取り組むソリューションは、エッジ AI による移動体検知結果に応じて通信帯域を動的に変更するアルゴリズムを新規に開発し、通信量を削減することに特化した。具体的には、具体的には、カメラ付近に設置したエッジ AI が人や物の動きを自動的に検知し、その検知結果に応じて映像の画質を切り替える仕組みである。普段は低画質で映像を送信し、AI が侵入禁止エリアへの侵入を検知した瞬間だけ、自動的に高画質の映像に切り替わる。これにより、必要な時だけ高画質映像を送るため、無線通信の混雑を大幅に軽減することができる。

本実証の新規性は、既存のエッジ AI 検知技術を活用しつつ、検知結果に応じた通信帯域の動的変更を実現する統合制御アルゴリズムを開発することである。国際電気の開発済みアセットである物体検知技術を再学習やパラメータ調整なく活用し開発を効率化したうえで、通信帯域の変更等の通信ネットワークとの接続部分を新規に開発している。そのため、既存技術では困難であった、検知結果に応じた通信帯域の動的変更および通信量の削減が本実証における新規性となっている。

5.1.4 検証条件

(1) 地理的・空間的条件

本実証は国際電気協創ラボにおいて実施する。

検証環境は以下の特性を有す：

・協創ラボ：屋内環境、既設ローカル 5G 基地局を活用

(2) 時間的条件

実証期間は 2025 年 8 月から 12 月までの約 5 ヶ月間とし、アルゴリズム開発期間を 2025 年 8 月から 10 月に設定する。開発したアルゴリズム適用させ、11 月に実施する。

(3) 電波環境条件

本実証で使用する無線規格ごとの周波数帯は以下のとおりである：

ローカル 5G:4.6-4.9GHz 帯

各無線規格の通信性能は、実証環境における電波伝搬特性に依存する。実証機関が保有する知見によりエリア設計について十分考慮検討しているが、想定外の電波特性で KPI 達成に懸念がある事象が発生した場合は、その調査等も行い検証結果として報告する。

(4) 天候等の外的要因

本実証は屋内環境で実施するため、天候等の外的要因の影響は限定的である。

5.1.5 開発・評価項目

番号	開発・評価項目
1	開発したアルゴリズム
2	AIによるデータ伝送量の低減検証
3	検知エリア最適化による通信効率向上検証

1) 開発したアルゴリズム

本検証で開発した動的ビットレート制御アルゴリズムは、カメラ、エッジ AI、管理サーバ、エッジ AI 制御用 PC の 4 つのコンポーネント間の連携により動作する。

まず、エッジ AI が常時カメラ映像を監視し、予め設定した検知エリア内に移動体が侵入したことを検知すると、その検知結果をエッジ AI 制御用 PC へ即座に送信する。エッジ AI 制御用 PC は、エッジ AI から「移動体検知あり」の通知を受信すると、エッジ AI に対して映像解像度を低解像度(1Mbps)から高解像度(8Mbps)へ変更する指示を送信する。これにより、侵入禁止エリアへの侵入が発生した際には、詳細な状況確認が可能な高精細映像の伝送が開始される。

一方、検知エリア内にいた移動体が検知エリア外へ退出したことをエッジ AI が検出すると、同様に検知結果がエッジ AI 制御用 PC へ伝達される。エッジ AI 制御用 PC は「移動体なし」の通知を受信すると、エッジ AI に対して映像解像度を高解像度(8Mbps)から低解像度(1Mbps)へ戻す指示を送信する。これにより、通常監視状態では通信帯域の占有を最小限に抑え、他のアプリケーションが使用可能な帯域を確保する。

このアルゴリズムの特徴は、エッジ AI による移動体検知結果と通信制御を統合的に連携させることで、検知から解像度変更までを自動的かつシームレスに実行できる点である。従来のシステムでは、AI 検知機能とエッジ AI 制御が独立して動作していたため、検知結果に応じた即座の帯域制御ができなかったが、本アルゴリズムでは各コンポーネント間のリアルタイム通信により、状況に応じた最適な映像品質と通信効率の両立を実現している。



図 5.1-2 開発したアルゴリズム

2) AIによるデータ伝送量の低減検証

本検証では、製造・物流等の現場において、エッジ AI を活用した映像データの解像度制御による通信量削減効果を実証した。具体的には、侵入禁止エリアへの移動体検知時のみ高解像度映像を伝送することで、平時の通信負荷を大幅に低減し、限られた通信帯域の効率的活用を実現した。

システム構成および評価項目は以下の通りである。

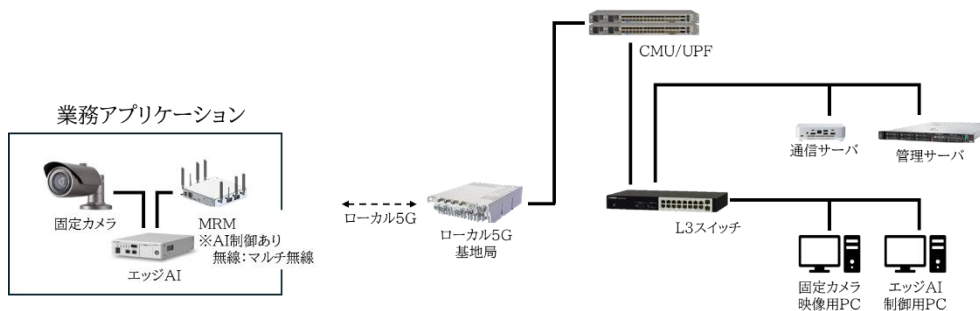


図 5.1-3 システム構成図

1. 実施場所:協創ラボ
2. 無線環境:ローカル 5G
3. 評価機器:固定カメラ 1 台

評価項目は以下の通りである。

1. 解像度切り替え時間
AI エッジで設定した検知エリア内に移動体が侵入したときに解像度が切り替わるまでの時間を確認した
2. スループット
AI エッジが移動体を検知したとき、低解像度のスループットから高解像度のスループットに変化するのかが確認した

評価手法は以下の通りである。

1. システム構成図の通り構築後、MRM をローカル 5G に接続し、映像伝送を開始する。
2. 事前にエッジ AI にて設定した検知エリア内に移動体が侵入した時、映像が低解像度 (VGA/FHD 1Mbps) から高解像度 (FHD 8Mbps) に切り替わるのかがそれぞれ確認する。またその際、移動体が検知エリアに侵入した時からカメラの設定が変更完了するまでの時間も測定する。
3. 検知エリア内にいる移動体が検知エリア外に出たとき、映像が高解像度 (8Mbps) から低解像度 (1Mbps) に切り替わるのかが確認する。またその際、移動体が検知エリア外に移動した時からカメラの設定が変更完了するまでの時間も測定する。
4. 上記検証を 10 回行う

3) 検知エリア最適化による通信効率向上検証

AI エッジによる解像度切り替えにおいて、解像度切り替えに要する時間中に移動体が検知枠から離脱してしまう課題が想定される。この対策として、本検証では検知エリアを本来の検知エリアより大きいサイズで設定し、最適な検知エリアサイズを導出した。具体的には、本来検知すべきエリア(内側エリア)に加えて、より広い範囲の外側エリアを設定した。移動体が外側エリアに侵入した時点で解像度切り替えを開始することで、内側エリアへ到達する前に高解像度への移行を完了させ、切り替え時間中のフレームアウトを防止した。ただし、検知エリアを拡大することで誤検知率が増加し、平均的な通信量が増大する可能性があるため、検知精度と通信負荷のトレードオフ関係を定量的に評価した。

机上検討には 1) AI によるデータ伝送量の低減検証で得られた結果を用い、人の歩行速度(約 80m/分(1.33m/s))を基準として実施した。

評価項目は以下の通りである。

1. 机上検討結果との比較
机上検討したエリアに移動体が侵入した時、解像度が切り替わるのか確認した
2. 誤検知率
協創ラボに構築した模擬環境にて、実際の検知エリアにどれくらいの割合入っているのか
3. 通信量の 30%低減
検知エリアを大きくした場合に通信量が30%低減できるのか確認した

評価手法は以下の通りである。

1. 机上検討した結果をもとに大きいサイズの検知エリアを構築する。
2. 移動体が大きいサイズの検知エリアに侵入し、本来の検知エリアに入る前に解像度が切り替わるのか確認する。
3. 大きいサイズの検知エリアのみ入った人数と本来の検知エリアに入る人数をカウントし、通信量削減効果が目標とする 30%削減に対してどの程度達成されるかを確認する。

5.1.6 KPI/KGI

本検証で設定した定性評価および定量評価の目標値を以下に示す。

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定性評価	1	配信されたカメラ映像が、運用で実用可能な画質であること
定量評価	2	AI 適用前後を比較し、AI によるデータ伝送量 30%以上削減できること

1) 配信されたカメラ映像が運用で実用可能な画質であること

製造現場における安全管理では、監視カメラによる映像品質が作業エリアの安全確保と異常検知の精度を左右する重要な要素となっている。本実証では、エッジ AI を活用した動的映像品質制御により、通常時は低解像度(1Mbps)、異常検知時は高解像度(8Mbps)へ自動切り替えを行うが、この解像度変更が実用レベルの映像品質を維持できるかを確認する必要がある。

具体的には、製造現場の管理者や安全担当者が遠隔から侵入禁止エリアへの移動体侵入を監視する際に、通常時は状況確認や人・物体の有無の識別、異常検知時は侵入者の特定や詳細な状況把握といった判断が可能な画質が求められる。最も重要な評価基準は「安全管理業務に必要な判断ができる画質が、解像度切り替えの前後を通じて維持されているか」という点である。

評価にあたっては、実際の製造現場において安全管理担当者や作業監督者が映像を確認し、低解像度映像での通常監視における視認性、高解像度への切り替え応答時間の妥当性、高解像度映像での詳細確認の十分性、解像度切り替え時のフレームドロップやブロックノイズの有無などの観点から実務上の判断が支障なく行えるかを検証した。

2) AI 適用前後を比較し、AI によるデータ伝送量 30%以上削減できること

製造現場の監視システムでは、複数のカメラが常時高解像度で映像を伝送することで通信帯域を圧迫し、ネットワーク全体の通信品質低下を招くことが課題となっている。本実証では、エッジ AI による異常検知と連動した動的映像品質制御により、必要時のみ高解像度伝送を行うことで通信負荷を削減する。30%削減の根拠として、無線ネットワークシステムでは帯域使用率が約 70-80%を超えると急激にパフォーマンスが低下するため、常時高解像度伝送による帯域圧迫を回避する必要がある。通常時の低解像度化と異常時のみの高解像度化により、理論的には約 79%の削減効果が見込まれるが、実際の運用では異常検知頻度のばらつきや切り替えオーバーヘッドを考慮し、保守的に 30%以上の削減を目標値として設定した。

5.2 ユースケース②:山間部や海中等の携帯電話網不感地域における通信の確立

当該ユースケースは実施しなかった。

5.3 ユースケース③:多種多様なデバイスに対する通信リソースの最適化

5.3.1 実証内容の詳細

本実証は、製造現場における複数用途のアプリケーションが同時並行して稼働する環境での通信品質確保と効率性向上を目的とした、AIを活用したハイブリッドネットワーク制御技術の検証を行う。現代の製造現場では、AGVの遠隔制御、監視カメラによる安全管理など、多様なアプリケーションが同一ネットワーク上で混在して稼働しており、それぞれが異なる通信要件(低遅延、大容量帯域、高信頼性)を持っている。このような環境では、電波遮蔽物による通信断絶や、トラフィック輻輳による品質低下が発生すると、生産ラインの停止やAGV制御不能といった重大な影響が生じる。本技術では、通信状態のリアルタイム監視による通信品質の異常検知と、複数の無線技術を組み合わせたハイブリッドネットワークにより、環境変化や負荷変動に対しても各デバイスが最適な通信環境を維持できる仕組みを実現する。

技術的特徴は、2つあり、現在接続しているネットワークにおけるパケットロスや遅延の増大を事前に検知し、1秒後の異常発生確率を出力する異常検知AIと、異常検知AIの出力及びネットワークの状態に応じてネットワークの切り替えやQoSの変更を実行する通信制御AIである。この2つのAIの連携により、従来の単一ネットワーク環境では困難であった、障害の予測的回避と動的な通信リソース最適化を同時に実現する点が本実証の新規性である。

検証は国際電気協創ラボにおいて実施され、2つの主要な検証項目から構成される。第一に、移動による無線切り替え検証では、無線接続されたカメラを強電界エリアから弱電界エリアに移動させることで、通信品質劣化を検知し、最適なネットワークヘシームレスに切り替えできるのか確認する。第二に、多接続・QoS検証では、トラフィックを段階的に増加させることでネットワーク負荷を検知し、QoS設定を動的に変更することで、主要アプリケーションの通信品質が維持されることを確認する。本実証を通じて、目標とするスループット維持率80%以上、パケットロス率1%以下、通信途絶時間0ms、遅延変動30%減少を達成するとともに、製造現場における多様なデバイスへの最適な通信リソース配分と、高信頼性を両立する実用的なソリューションモデルの確立を目指す。

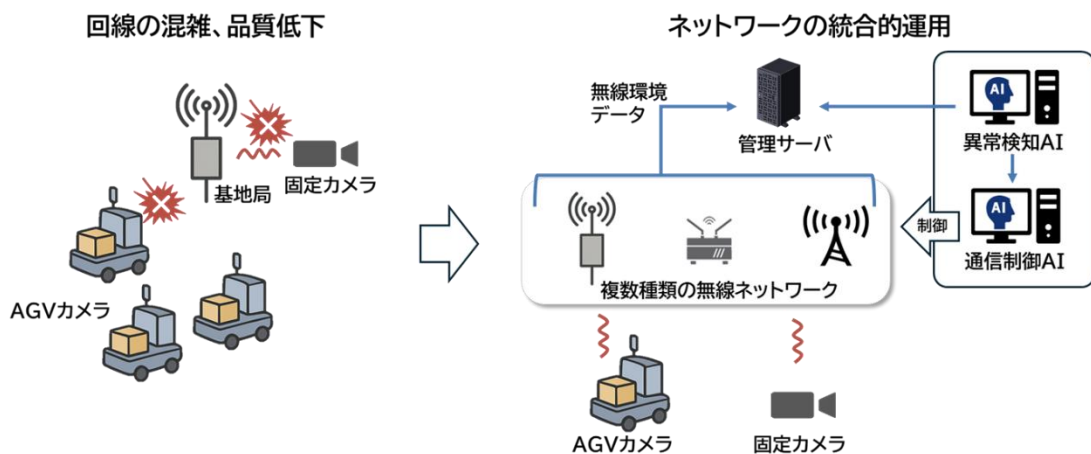


図 5.3-1 ユースケース③ 実証概要図

5.3.2 利用技術・データ

本検証では、製造現場における多様なデバイスの最適な通信リソース配分を実現するため、ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網を使用する。3 つの無線技術を組み合わせることで、単一ネットワークでは環境変化や負荷変動により、通信品質が低下していた状況でも安定した通信品質を維持することが可能である。

本システムの AI 技術は、異常検知 AI と通信制御 AI の 2 つで構成される。異常検知 AI は、現在接続しているネットワークにおけるパケットロスや遅延の増大をリアルタイムで監視・分析し、1 秒後の異常発生確率を予測する。従来のしきい値ベースの検知方式では、異常が顕在化してから対処するため、すでに通信品質が劣化した状態での対応となる。通信品質の変化パターンから将来の通信品質の異常を予測することで、実際の障害発生前に予防的な対策を講じることを可能となる。通信制御 AI は、異常検知 AI の出力およびネットワークの状態に基づいて、最適な通信経路の選択と QoS の動的調整を実行する。複数の無線ネットワークが利用可能な環境において、各アプリケーションの要求品質と現在のネットワーク状態を考慮し、最適なネットワークへのシームレスな切り替えを自動的に行う。

この 2 つの AI の連携により、従来の単一ネットワーク環境では困難であった、障害の予測的回避と動的な通信リソース最適化を同時に実現する。

5.3.3 必要性・新規性

近年、製造現場において IoT デバイスの普及とデジタル化の進展により、AGV の遠隔制御、監視カメラによる品質管理など、多様なアプリケーションが同時に稼働する環境が一般化している。それに伴いトラフィック量も増大しており、安定した通信環境の確保が不可欠となっている。しかし、通信帯域には物理的な限界があり、無制限にリソースを割り当てることはできず、特にローカル 5G 環境では、限られた周波数帯域を複数のアプリケーションで共有する必要があるため、効率的なリソース配分が求められている。

従来の製造現場におけるネットワーク運用では、通信環境の変化や混雑状況に応じた動的な制御が行われておらず、各アプリケーションが常に同じ通信リソースを使用し続けることが一般的である。この結果、必要のない場面でも通信帯域を占有し、ネットワーク全体の混雑を招くとともに、通信遅延やパケットロス、さらには通信断といった問題が発生しやすい状況であった。また、電波遮蔽物の移動や基地局の不調などにより通信品質が劣化した場合でも、実際に通信断が発生してから人手による復旧作業を開始するため、その間 AGV が制御不能となり生産ラインが停止するなど、製造工程に重大な支障をきたしている。

これに対し、本実証で取り組むソリューションは、AI を活用した予測的な異常検知と動的なネットワーク制御により、通信帯域の効率的活用とシステムの継続性確保を両立することに特化している。具体的には、異常検知 AI がパケットロスや遅延の増大といった通信品質の変化を監視し、1 秒後の異常発生確率を予測する。この予測結果に基づいて通信制御 AI が、実際の通信断が発生する前に最適なネットワークへ自動切り替えを実行する。また、ネットワーク負荷が高まった際には、アプリケーションの重要度に応じた動的な QoS 制御を行い、AGV 制御のようなミッションクリティカルな通信に優先的に帯域を割り当てることで、限られたリソースを効率的に活用できる。

本実証の新規性は、通信異常の予測的検知と自動的なネットワーク切り替えを実現する統合制御アルゴリズムを開発することである。従来の通信制御技術では、しきい値ベースの事後対応型の異常検知が主流であり、異常が顕在化してから対処するため、すでに通信品質が劣化した状態での対応となっていた。本実証では、機械学習技術を活用して通信品質の時系列変化パターンから将来の異常を予測する異常検知 AI と、その予測結果に応じて複数の無線ネットワーク間でシームレスに切り替える通信制御 AI を統合的に開発する。この 2 つの AI の連携により、従来技術では困難であった障害の予測的回避と動的な通信リソース最適化を同時に実現する点が、本実証における新規性である。

5.3.4 検証条件

(1) 地理的・空間的条件

本実証は国際電気協創ラボにおいて実施する。

検証環境は以下の特性を有す：

・協創ラボ：屋内環境、既設ローカル 5G 基地局を活用

(2) 時間的条件

実証期間は 2025 年 8 月から 12 月までの約 5 ヶ月間とし、ルールベース AI 開発期間を 2025 年 8 月から 10 月、機械学習 AI を 2025 年 10 月から 12 月に設定する。

(3) 電波環境条件

本実証で使用する無線規格ごとの周波数帯は以下のとおりである：

ローカル 5G:4.6-4.9GHz 帯

Wi-Fi:5GHz 帯

公衆網:800MHz 帯、1.7GHz 帯、2.1GHz 帯

各無線規格の通信性能は、実証環境における電波伝搬特性に依存する。実証機関が保有する知見によりエリア設計について十分考慮検討しているが、想定外の電波特性で KPI 達成に懸念がある事象が発生した場合は、その調査等も行い検証結果として報告する。

(4) 天候等の外的要因

本実証は屋内環境で実施するため、天候等の外的要因の影響は限定的である。

5.3.5 開発・評価項目

番号	開発・評価項目
1	開発した異常検知 AI、通信制御 AI
2	構築した NW 環境の基本性能測定
3	各アプリケーションのデータ測定
4	無線リソース共有環境のデータ測定
5	1 端末における通信経路切り替え検証
6	多接続検証
7	QoS 検証
8	総合的なサービスレベル指標維持

本検証は、異常検知 AI と通信制御 AI の効果を段階的に実証することを目的としており、AI 技術を導入していない従来環境と AI 導入環境を体系的に比較することで、ハイブリッドネットワーク制御における改善効果を定量的に評価する。

検証は 3 つの段階で構成される。第 1 段階である「2.構築した NW 環境の基本性能測定」、「3.各アプリケーションのデータ測定」、「4.無線リソース共有環境のデータ測定」は、AI 技術を導入しない状態での通信環境とアプリケーション動作を測定し、比較の基準を取得する。第 2 段階である「5.1 端末における通信経路切り替え検証」、「6.多接続検証」、「7.QoS 検証」は、異常検知 AI と通信制御 AI を導入し、同一条件下での通信品質とアプリケーション動作を測定する。第 3 段階である「8.総合的なサービスレベル指標維持」は、実際の移動シナリオを想定した総合的な比較検証を行い、AI 導入による改善効果を定量的に明らかにする。

1) 開発した異常検知 AI、通信制御 AI

本実証では、ネットワークの最適化と通信品質の維持を目的として、異常検知 AI と通信制御 AI の 2 つの AI モデルを開発した。AI モデルの開発は段階的なアプローチを採用し、表 4.1-1 に示すとおり、令和 7 年度においてルールベース AI の開発・適用と機械学習 AI のプロトタイプ開発を実施した。

異常検知 AI については、ルールベースと機械学習の 2 つを開発した。ルールベースの異常検知 AI は、受信電界強度、スループット、QoS 優先度等のデータを入力とし、事前に定義したしきい値と比較することで通信状態を評価し、制御判断を行う。この方式は決定論的かつ説明可能な制御を実現している。一方、機械学習の異常検知 AI は、通信回線の状態をリアルタイムで監視し、遅延時間、パケットロス率、スループット等の通信品質指標を時系列データとして収集・分析することで、1 秒後の通信状態を 4 クラス(表 4.1-6 に示す正常、遅延発生、パケットロス発生、両方発生)に分類し、各クラスの発生確率を推定する機能を有している。アルゴリズムには勾配ブースティング系 (LightGBM、XGBoost、CatBoost) および Random Forest を使用し、表 4.1-10 に示すとおり各アルゴリズムの性能比較を実施した上で、Macro-F1 を評価指標として採用することで、クラス不均衡の影響を受けにくい評価を実現している。図 4.1-2 に異常検知 AI のアーキテクチャを示す。通信制御 AI についても、同様にルールベースと機械学習の 2 つを開発した。ルールベースの通信制御 AI は、異常検知 AI の予測結果を主判定軸とし、補助的に受信電界強度を考慮して制御内容を決定する。機械学習方式の通信制御 AI は、異常検知 AI の推論結果および各通信回線の受信電波強度等の状態データをもとに、ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網の中から最適な通信回線を選択するとともに、ローカル 5G 使用時には適切な QoS 設定値を推定する機能を有している。本 AI は強化学習の一手法である模倣学習を採用し、表 4.1-14 に示すとおり、ルールベース AI による制御結果を教師データとして学習することで、専門知識に基づく制御判断を AI モデルに反映させている。アルゴリズムには LightGBM を使用し、通信回線の制御については分類モデル、QoS 制御については回帰モデルとして実装しており、図 4.1-5 および図 4.1-6 にそれぞれのアーキテクチャを示す。学習結果については、表 4.1-17 および表 4.1-18 に示すとおり、各通信環境において高い精度を達成した。

これら 2 つの AI の連携により、通信品質劣化の予測的検知と、その予測に基づく自律的な通信制御を実現し、製造現場における安定した通信環境の維持を可能としている。

2) 構築した NW 環境の基本性能測定

製造業現場を模した国際電気ラボ環境において、協創ラボ内の各測定ポイントにおける無線環境の基本性能を測定し、ネットワークの強電界エリア・弱電界エリアを特定することで、後続検証における測定条件の妥当性を確保した。

システム構成および評価環境は以下の通りである。

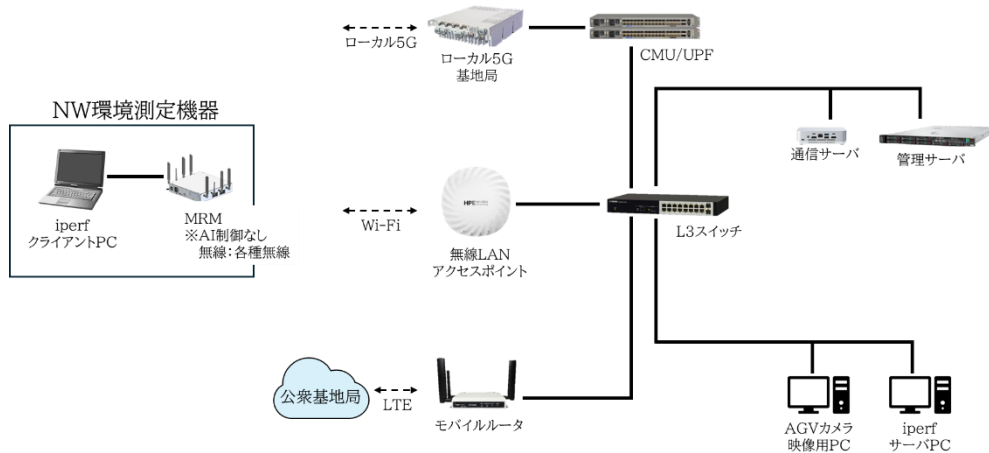


図 5.3-2 システム構成図

1. 実施場所:協創ラボ
2. 無線環境:ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網(LTE)
3. 評価機器:電波環境を測定する機器は下図のとおりである

測定器種別	ローカル5G	キャリア網(LTE)	Wi-Fi
測定器名	VIAVIソリューションズ OneAdvisor 800	Accuver XCAL / XCAP	Ekahau Ekahau AI Pro
写真			
機能概要	<ul style="list-style-type: none"> ■ 付属アンテナでの電波状況を可視化し、干渉の可能性を確認 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 端末(UE)でのLTE受信レベルやノイズ、などを測定 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Wi-Fiの信号強度をエリアマップの様に可視化可能
	<ul style="list-style-type: none"> ■ 通過した経路のローカル5G電波強度を地図上に視覚化 	<ul style="list-style-type: none"> ■ キャリアLTEの電波品質の解析と結果の可視化として利用 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Wi-Fiの最適な設置位置を自動選定

図 5.3-3 測定機器一覧

評価項目は以下の通りである。

1. 受信電界強度
各測定ポイントにおける各無線環境の受信電界強度を測定する。
2. ネットワーク性能
各測定ポイントにおける UL スループット、パケットロス率、遅延時間を測定する

測定箇所および機器設置場所は以下の通りである。

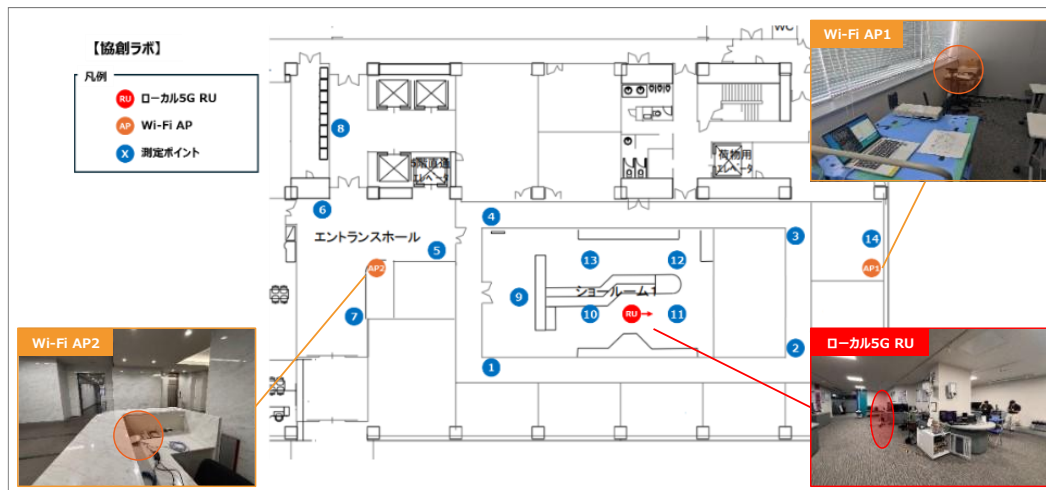


図 5.3-4 協創ラボの測定ポイント

ローカル 5G の RU は協創ラボの中央に設置し、エリア全体をカバーできるように配置した。Wi-Fi アクセスポイントについては、会議室側に AP1、エントランス入口付近に AP2 をそれぞれ設置した。アンテナ高などの設置条件は次表の通りである。

表 5.3-1 各機器の設置条件

無線機器	周波数	アンテナ高	送信電力	アンテナ利得	EIRP
ローカル 5G	4.84989GHz	1.5m	36dBm	12.5dBi	48.5dBm
Wi-Fi 1	5GHz 帯	1m	23dBm	7.5dBi	30.5dBm
Wi-Fi 2	5GHz 帯	1m	23dBm	7.5dBi	30..5dBm

測定手法は以下の通りである。

■ローカル5G 環境における各アプリケーションのデータ測定

1. システム構成図の通り構築後、MRM をローカル 5G に接続する
2. 図 5.3-4 の 14 箇所の測定ポイントにて、各評価項目を測定する。

■Wi-Fi 環境における各アプリケーションのデータ測定

1. システム構成図の通り構築後、MRM を Wi-Fi に接続する
2. 図 5.3-4 の 14 箇所の測定ポイントにて、各評価項目を測定する。

■公衆網(LTE)環境における各アプリケーションのデータ測定

1. システム構成図の通り構築後、MRM を公衆網に接続する
2. 図 5.3-4 の 14 箇所の測定ポイントにて、各評価項目を測定する。

3) 各アプリケーションのデータ測定

協創ラボ内にて、実際のアプリケーション(AGV カメラ、固定カメラ)を用いて、各測定ポイントで映像が正常に視聴できるかを確認する。

システム構成および評価環境は以下の通りである。

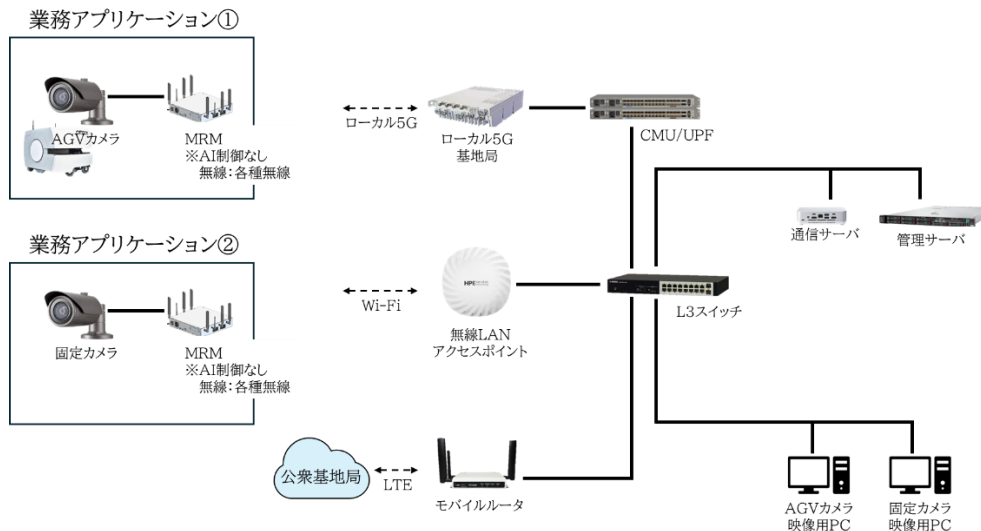


図 5.3-5 システム構成図

1. 実施場所:協創ラボ
2. 無線環境:ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網(LTE)
3. 評価機器:AGV カメラ、固定カメラ(通信速度:1Mbps)、固定カメラ(通信速度:8Mbps)

評価項目は以下の通りである。

1. 映像品質
映像品質(映像の途切れの有無、映像の乱れの有無、映像の停止の有無)を確認する。
2. 受信電界強度
各測定地点での受信電界強度を確認する。
3. ネットワーク性能
パケットロス率、RTT、アプリケーションのスループットを確認する。
4. 映像伝送遅延時間
PC1 の時計を撮影し、映像を PC2 の画面に表示させ両画面から遅延時間を測定する。

評価手法は以下の通りである。

■ローカル5G 環境における各アプリケーションのデータ測定

1. システム構成図の通り構築後、MRM をローカル5G と接続し映像伝送を開始する。
2. 以下14個所の測定ポイントにて評価項目を1分間ずつ測定する。

■Wi-Fi 環境における各アプリケーションのデータ測定

1. システム構成図の通り構築後、MRM を Wi-Fi と接続し映像伝送を開始する。
2. 14個所の測定ポイントにて評価項目を1分間ずつ測定する。

■公衆網(LTE)環境における各アプリケーションのデータ測定

1. システム構成図の通り構築後、MRM を公衆網(LTE)と接続し映像伝送を開始する。
2. 14個所の測定ポイントにて評価項目を1分間ずつ測定する。

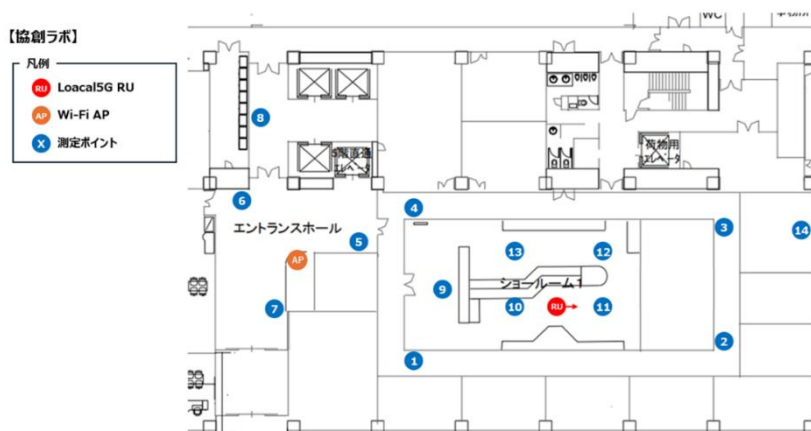


図 5.3-6 測定ポイント

4) 無線リソース共有環境のデータ測定

AI 技術を導入しない状態で、弱電界エリアにおいて他端末との無線リソース共有が発生した際に、映像が切斷・劣化するかを測定する。この測定結果が、AI 導入効果を評価するための比較基準となり、従来環境では無線リソース共有により映像品質が劣化するという課題を定量的に記録する。

システム構成および評価環境は以下の通りである。

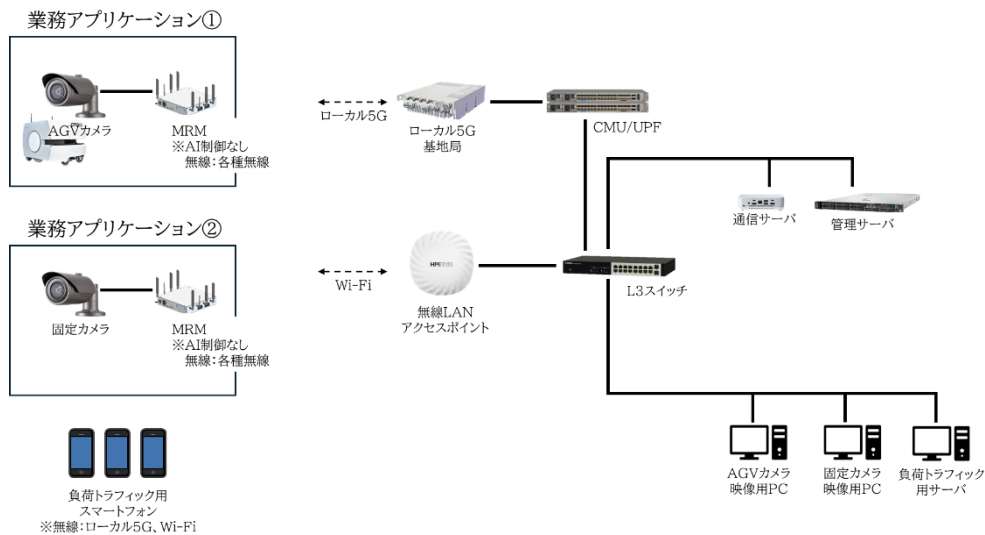


図 5.3-7 システム構成図

1. 実施場所:協創ラボ
2. 無線環境:ローカル 5G、Wi-Fi
※公衆網(LTE)には負荷をかけられないため、測定対象外とした。
3. 評価機器:AGV カメラ、固定カメラ(通信速度:1Mbps)、固定カメラ(通信速度:8Mbps)
iPerf クライアント 3 台(複数の接続端末数を模擬)
※ネットワーク負荷は以下条件で生成
増減速度:30 秒ごとに 400Mbps を 1 台ずつ追加

評価項目は以下の通りである

1. 映像品質
映像品質(映像の途切れの有無、映像の乱れの有無、映像の停止の有無)を確認する
2. 受信電界強度
各測定ポイントの受信電界強度を確認する
3. ネットワーク性能
無線リソースが共有されたときのパケットロス率、RTT、アプリケーションのスループットを確認する

評価手法は以下の通りである。

■ローカル 5G 環境における無線リソース共有環境のデータ測定

1. システム構成図の通り構築後、MRM をローカル 5G と接続し、映像伝送を開始する(開始位置ではローカル 5G は弱電界)
2. 下図参照の測定ポイントにて評価項目を測定する

【協創ラボ】

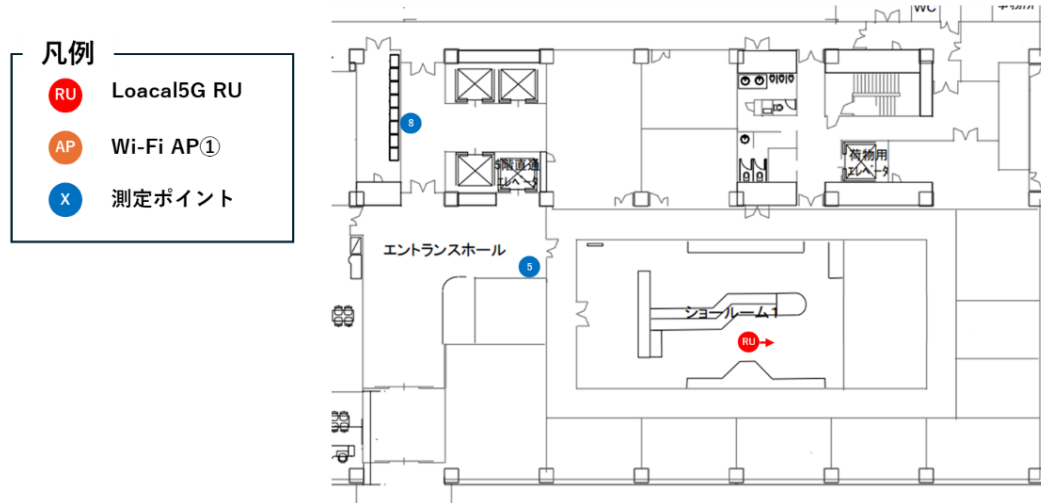


図 5.3-8 測定ポイント

3. 30 秒後、iPerf にて高トラフィック(400Mbps)を流す。30 秒後に 2 台目を追加、さらに 30 秒後に 3 台目を追加(最大で 3 台同時にトラフィックを流す)
4. トラフィックを流す端末の台数ごとに映像品質を確認する(計 3 回実施)
5. 同様の測定を中電界ポイントで実施する

■Wi-Fi 環境における無線リソース共有環境のデータ測定

1. システム構成図の通り構築後、MRM をローカル 5G と接続し、映像伝送を開始する(開始位置では Wi-Fi は弱電界)
2. 下図参照の測定ポイントにて評価項目を測定する

【協創ラボ】

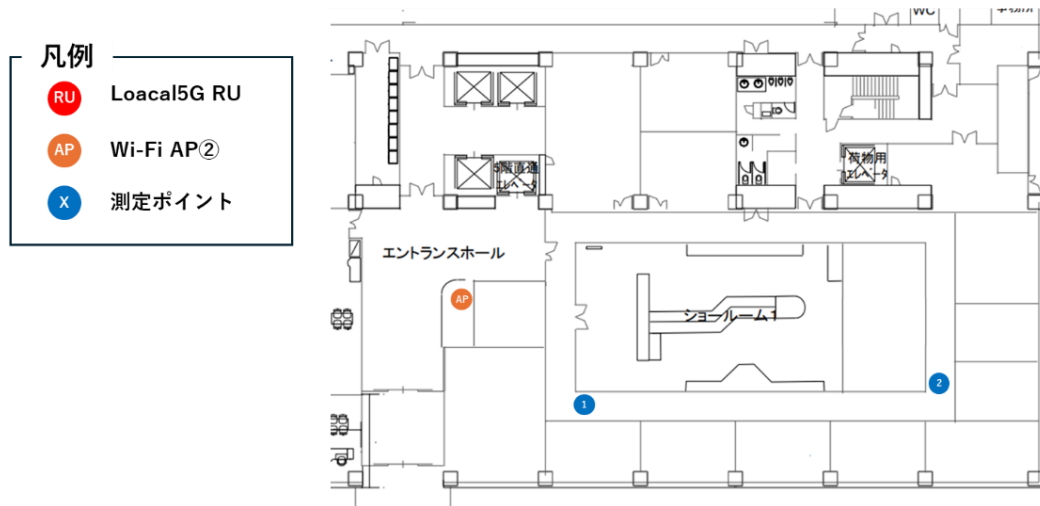


図 5.3-9 測定ポイント

3. 30 秒後、iPerf にて高トラフィック(400Mbps)を流す。30 秒後に 2 台目を追加、さらに 30 秒後に 3 台目を追加(最大で 3 台同時にトラフィックを流す)
4. トラフィックを流す端末の台数ごとに映像品質を確認する(計 3 回実施)
5. 同様の測定を中電界ポイントで実施する

5) 1 端末における通信経路切替検証

異常検知 AI と通信制御 AI を導入し、電波環境が悪化した際に最適な無線回線へ自動切替することで、映像が途切れることなく視聴できることを確認する。これにより、各アプリケーションのデータ測定で確認された弱電界エリアでの映像劣化が、AI 導入により解消されることを実証し、AI 技術の基本的な効果を確認する。

システム構成および評価環境は以下の通りである。

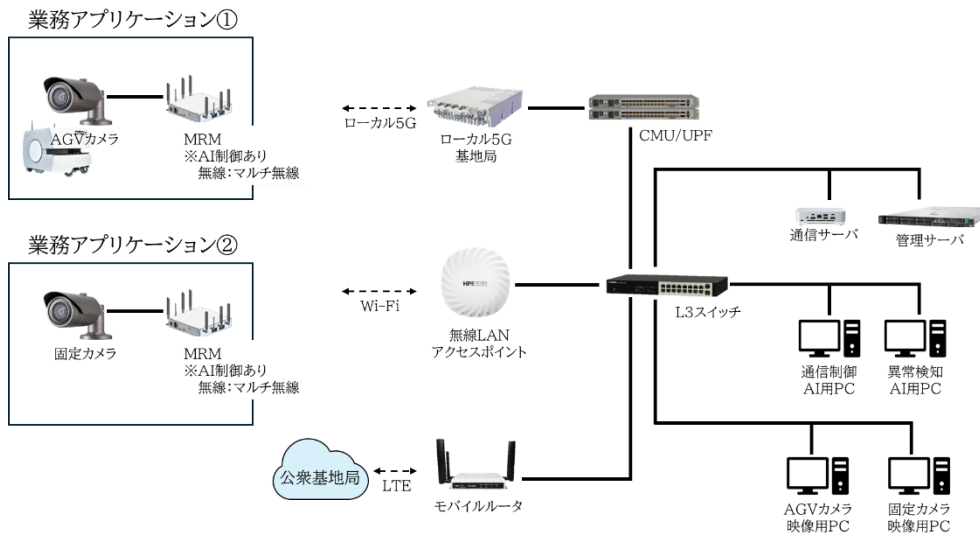


図 5.3-10 システム構成図

1. 実施場所:協創ラボ
2. 無線環境:ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網(LTE)
3. 評価機器:AGV カメラ、固定カメラ(通信速度:1Mbps)、固定カメラ(通信速度:8Mbps)

評価項目は以下の通りである

1. 映像品質
映像品質(映像の途切れの有無、映像の乱れの有無、映像の停止の有無)を確認する
2. 受信電界強度
各測定ポイントの受信電界強度を確認する
3. ネットワーク性能
無線リソースが共有されたときのパケットロス率、RTT、アプリケーションのスループットを確認する

評価手法は以下の通りである。

■ローカル 5G+Wi-Fi 環境における通信経路切替検証

1. システム構成図の通り構築後、MRM をローカル 5G と接続し、映像伝送を開始する。（開始位置ではローカル 5G は強電界エリア、Wi-Fi は弱電界エリア）
2. 下記の測定ポイントにて評価項目を測定する

【協創ラボ】

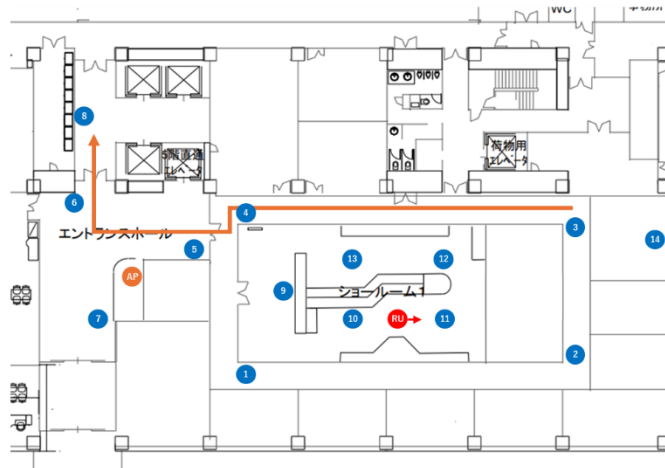


図 5.3-11 測定ポイント

3. ローカル 5G の強電界エリアから弱電界エリアに移動する
4. 通信方式がローカル5G から Wi-Fi に自動切り替えするか確認する

【協創ラボ】

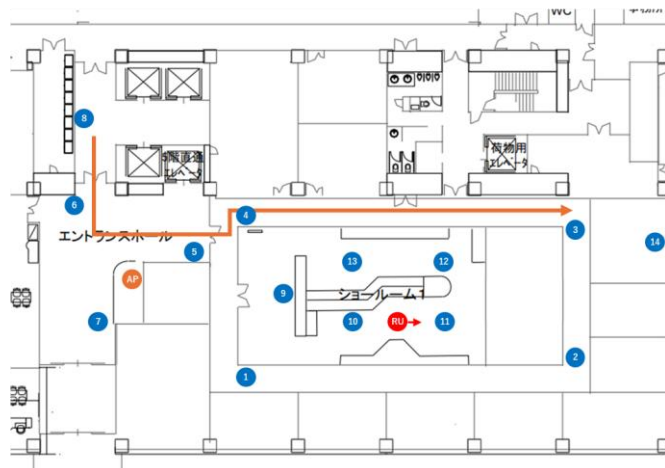


図 5.3-12 測定ポイント

5. Wi-Fi へ切替後、Wi-Fi の強電界エリアから弱電界エリアに移動する
6. 通信方式が Wi-Fi からローカル 5G に自動切替するか確認する。
7. ローカル5G+Wi-Fi 測定を計 3 回実施する

■ローカル 5G+公衆網(LTE)環境における通信経路切替検証

1. システム構成図の通り構築後、MRM をローカル 5G と接続し、映像伝送を開始する。（開始位置ではローカル 5G は強電界エリア、公衆網は弱電界エリア）
2. 下記の測定ポイントにて評価項目を測定する

【協創ラボ】

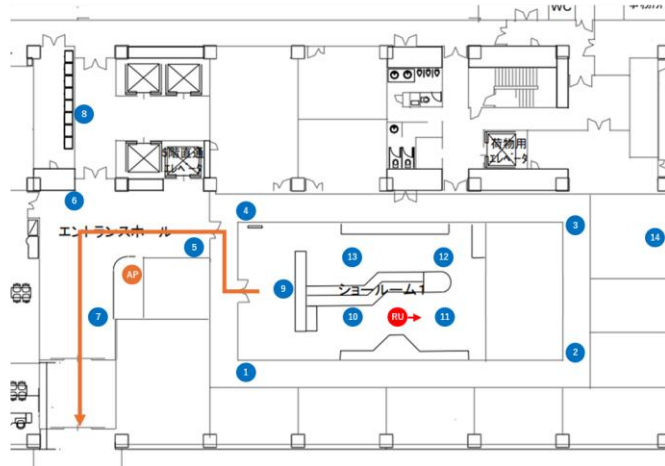


図 5.3-13 測定ポイント

3. ローカル 5G の強電界エリアから弱電界エリアに移動する
4. 通信方式がローカル5G から公衆網に自動切替するか確認する

【協創ラボ】

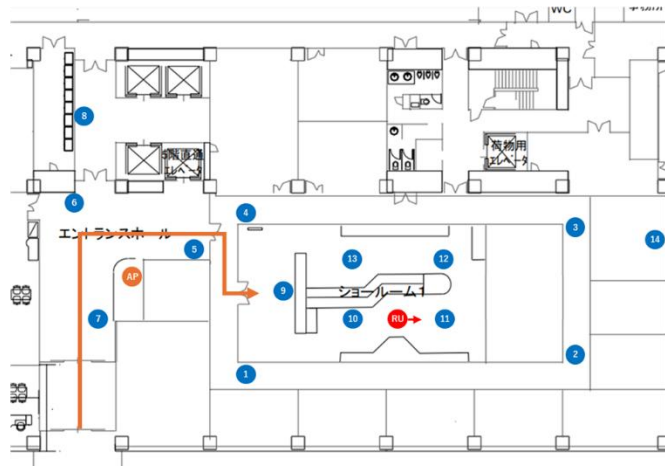


図 5.3-14 測定ポイント

5. 公衆網へ切替後、公衆網の強電界エリアから弱電界エリアに移動する
6. 通信方式が公衆網からローカル 5G に自動切替するか確認する
7. ローカル5G+公衆網測定を計 3 回実施する

■Wi-Fi+公衆網(LTE)環境における通信経路切替検証

1. システム構成図の通り構築後、MRM を Wi-Fi と接続し、映像伝送を開始する。(開始位置では Wi-Fi は強電界エリア、公衆網は弱電界エリア)
2. 下記の測定ポイントにて評価項目を測定する

【協創ラボ】

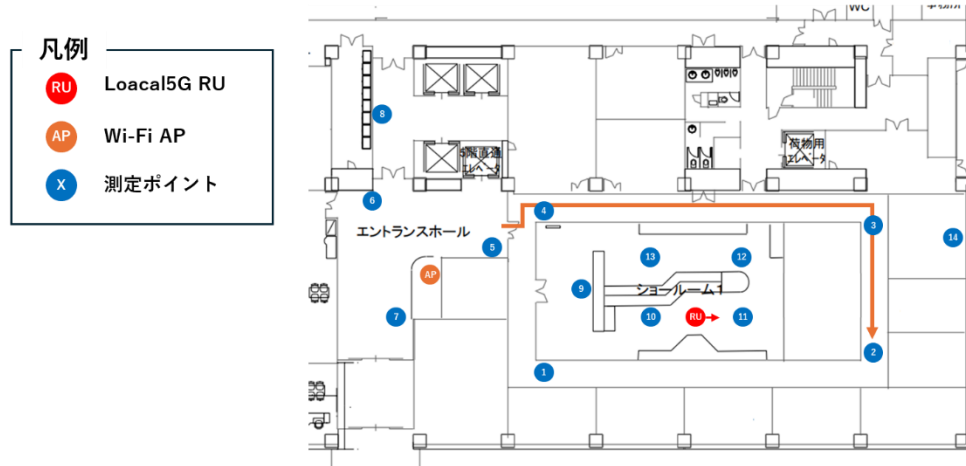


図 5.3-15 測定ポイント

3. Wi-Fi の強電界エリアから弱電界エリアに移動する
4. 通信方式が Wi-Fi から公衆網に自動切替するか確認する

【協創ラボ】

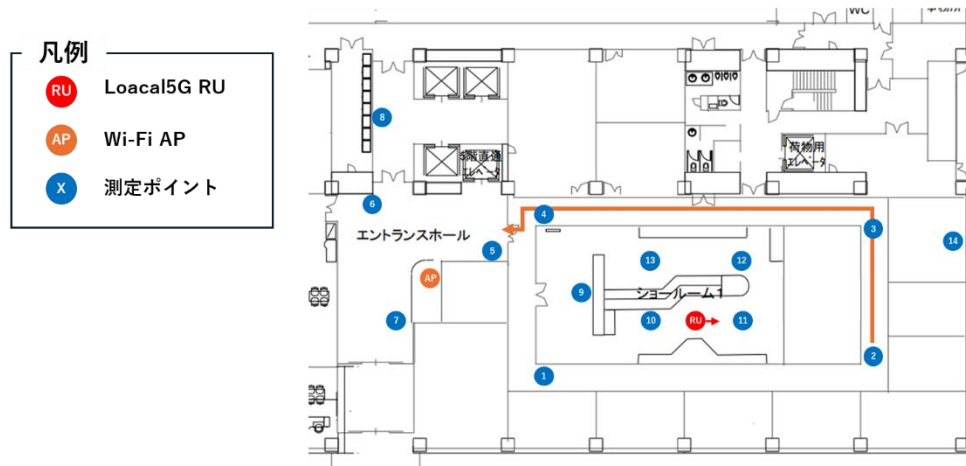


図 5.3-16 測定ポイント

5. 公衆網へ切替後、公衆網の強電界エリアから弱電界エリアに移動する
6. 通信方式が公衆網から Wi-Fi に自動切替するか確認する
7. Wi-Fi+公衆網測定を計 3 回実施する

6) 多接続検証

無線リソース共有環境(多接続による負荷発生)においても、AI による通信経路切替により映像品質が維持されることを確認する。無線リソース共有環境のデータ測定で確認された映像切断・劣化が、AI 導入により解消されることを実証し、負荷環境下でも AI 技術が有効であることを確認する。

システム構成および評価環境は以下の通りである。

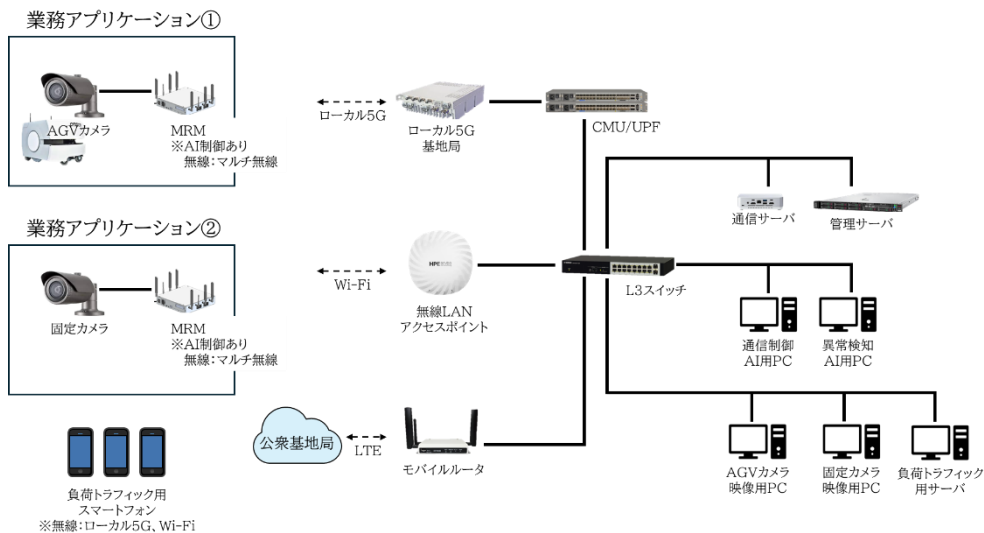


図 5.3-17 システム構成図

1. 実施場所:協創ラボ
2. 無線環境:ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網(LTE)
3. 評価機器:AGV カメラ、固定カメラ(通信速度:1Mbps)、固定カメラ(通信速度:8Mbps)
iperf クライアント 3 台(複数の接続端末数を模擬)
※ネットワーク負荷は以下条件で生成
増減速度:30 秒ごとに 400Mbps を 1 台ずつ追加

評価項目は以下の通りである

1. 映像品質
映像品質(映像の途切れの有無、映像の乱れの有無、映像の停止の有無)を確認する
2. 受信電界強度
各測定ポイントの受信電界強度を確認する
3. ネットワーク性能
無線リソースが共有されたときのパケットロス率、RTT、アプリケーションのスループットを確認する

評価手法は以下の通りである。

■ローカル 5G+Wi-Fi 環境における多接続検証

1. システム構成図の通り構築後、MRM をローカル 5G と接続し、映像伝送を開始する。(開始位置ではローカル 5G は弱電界)
2. 下図参照の測定ポイントにて評価項目を測定する

【協創ラボ】

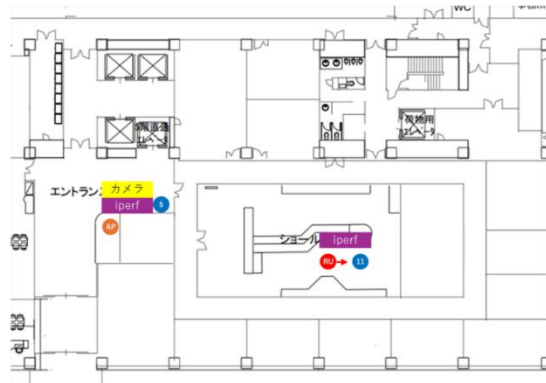


図 5.3-18 測定ポイント

3. 30 秒後、iPerf にて高トラフィック(400Mbps)を流す。30 秒後に 2 台目を追加、さらに 30 秒後に 3 台目を追加(最大で 3 台同時にトラフィックを流す)
4. 通信方式がローカル 5G から Wi-Fi に自動切り替えするか確認する
5. ローカル5G+Wi-Fi 測定を計 3 回実施する

■Wi-Fi+ローカル 5G 環境における多接続検証

1. システム構成図の通り構築後、MRM を Wi-Fi と接続し、映像伝送を開始する。(開始位置では Wi-Fi は弱電界)
2. 下図参照の測定ポイントにて評価項目を測定する

【協創ラボ】

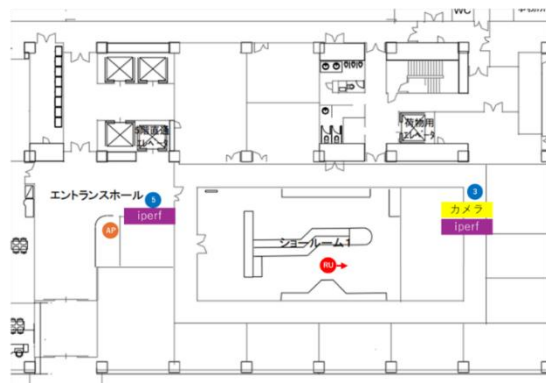


図 5.3-19 測定ポイント

3. 30 秒後、iPerf にて高トラフィック(400Mbps)を流す。30 秒後に 2 台目を追加、さらに 30 秒後に 3 台目を追加(最大で 3 台同時にトラフィックを流す)
4. 通信方式が Wi-Fi からローカル 5G に自動切替するか確認する
5. Wi-Fi+ローカル5G 測定を計 3 回実施する

■ローカル 5G+公衆網(LTE)環境における多接続検証

1. システム構成図の通り構築後、MRM をローカル 5G と接続し、映像伝送を開始する。(開始位置ではローカル 5G は弱電界)
2. 下図参照の測定ポイントにて評価項目を測定する

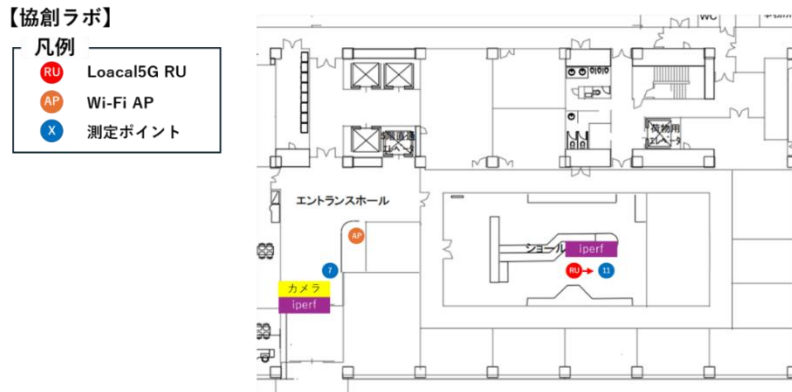


図 5.3-20 測定ポイント

3. 30 秒後、iperf にて高トラフィック(400Mbps)を流す。30 秒後に 2 台目を追加、さらに 30 秒後に 3 台目を追加(最大で 3 台同時にトラフィックを流す)
4. 通信方式がローカル 5G から公衆網(LTE)に自動切替するか確認する
5. ローカル5G+公衆網(LTE)測定を計 3 回実施する

■Wi-Fi+公衆網(LTE)環境における多接続検証

1. システム構成図の通り構築後、MRM を Wi-Fi と接続し、映像伝送を開始する。(開始位置では Wi-Fi は弱電界)
2. 下図参照の測定ポイントにて評価項目を測定する

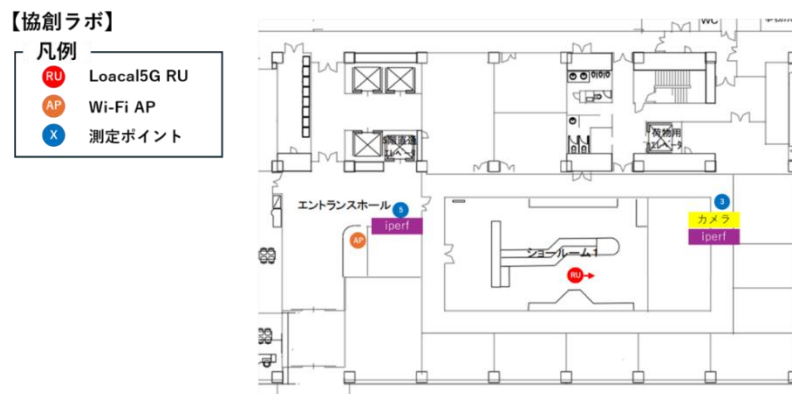


図 5.3-21 測定ポイント

3. 30 秒後、iperf にて高トラフィック(400Mbps)を流す。30 秒後に 2 台目を追加、さらに 30 秒後に 3 台目を追加(最大で 3 台同時にトラフィックを流す)
4. 通信方式が Wi-Fi から公衆網(LTE)に自動切替するか確認する
5. Wi-Fi+公衆網(LTE)測定を計 3 回実施する

7) QoS 検証

AIによるローカル5G回線のQoS動的制御により、多接続環境でも重要アプリケーションの通信品質を優先的に確保できることを確認する。多接続検証との違いは、多接続検証がQoS制御なしで通信経路切替のみで対応するのにに対し、QoS検証ではローカル5G回線のQoS値(5QI)を動的に変更し、同一回線内での優先制御を実施する点にある。これにより、通信経路切替だけでなく、QoS制御という高度な機能によっても通信品質が維持できることを実証する。

システム構成および評価環境は以下の通りである。

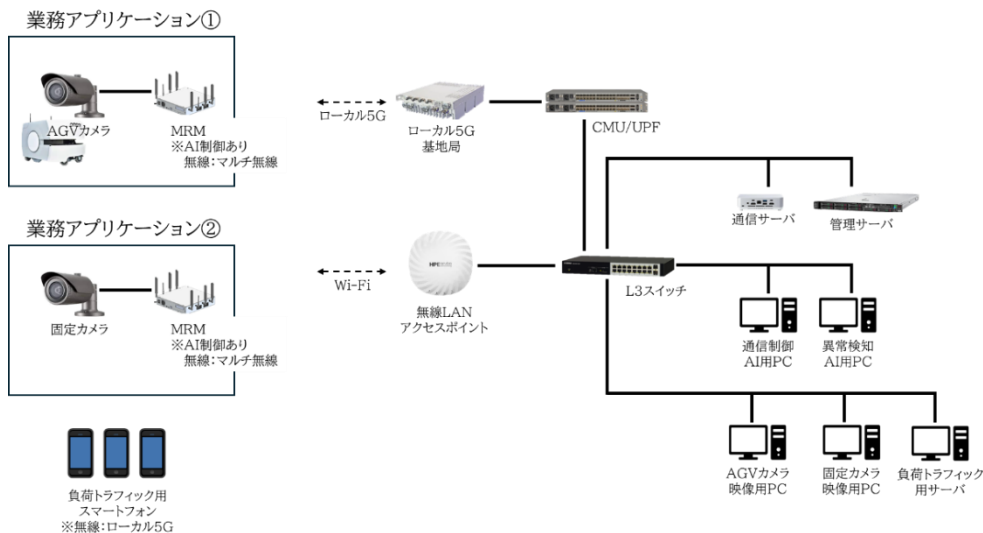


図 5.3-22 システム構成図

1. 実施場所:協創ラボ
2. 無線環境:ローカル 5G
3. 評価機器:AGV カメラ、固定カメラ(通信速度:1Mbps)、固定カメラ(通信速度:8Mbps)

評価項目は以下の通りである。

1. 映像品質
映像品質(映像の途切れの有無、映像の乱れの有無、映像の停止の有無)を確認する
2. 受信電界強度
各測定ポイントの受信電界強度を確認する
3. ネットワーク性能
無線リソースが共有されたときのパケットロス率、RTT、アプリケーションのスループットを確認する

評価手順は以下の通りである。

1. システム構成図の通り構築後、MRM をローカル 5G と接続し、映像伝送を開始する。(開始位置ではローカル 5G は弱電界)
2. 下図参照の測定ポイントにて評価項目を測定する

【協創ラボ】

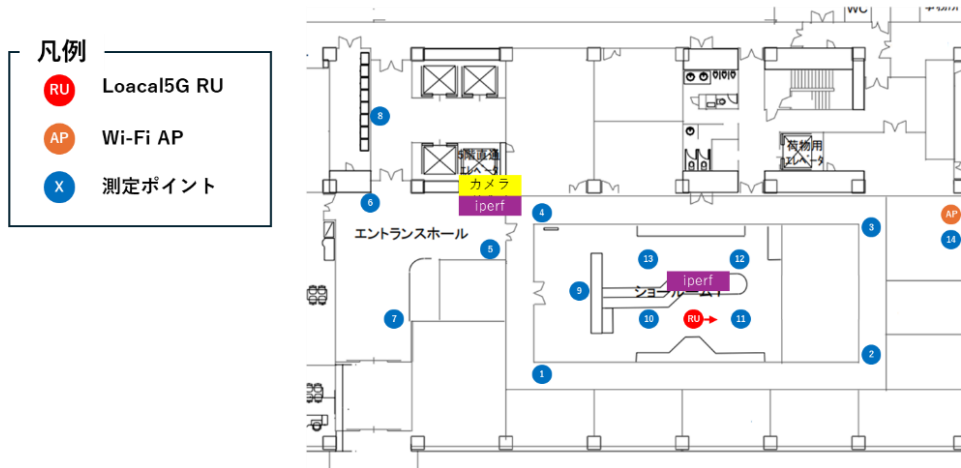


図 5.3-23 測定ポイント

3. 30 秒後、iPerf にて高トラフィック(400Mbps)を流す。最初に 1 台の端末でトラフィックを流し始め、15秒後に 2 台目を追加、さらに15秒後に 3 台目を追加(最大で 3 台同時にトラフィックを流す)
4. ローカル 5G の QoS 設定が変更されるのか確認する。同様の測定を計 3 回実施する

8) 総合的なサービスレベル指標維持

AI なし環境と AI あり環境において、実際の移動シナリオを想定した総合的な比較検証を実施する。負荷変動を変動させることで、複数アプリケーションが同時に稼働していると仮定し、協創ラボ内を移動しながら、AI なし、AI ありの両環境で映像品質、通信品質を比較測定する。これにより、個別検証項目で確認された効果が、実運用を想定した複合的な環境下でも総合的に発揮されることを実証し、本技術の実用性と社会実装可能性を総合的に評価する。

システム構成および評価環境は以下の通りである。

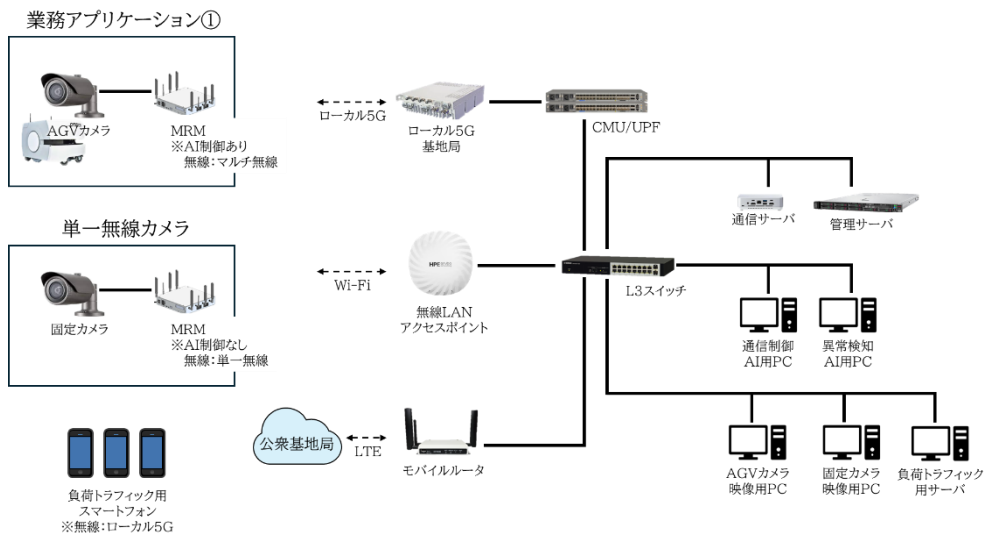


図 5.3-24 システム構成図

1. 実施場所:協創ラボ
2. 無線環境:ローカル 5G+Wi-Fi、ローカル 5G+公衆網(LTE)、Wi-Fi+公衆網(LTE)
※公衆網に負荷をかけることは難しいため、公衆網→ローカル 5G/Wi-Fi は実施しない。
3. 評価機器:AGV カメラ、固定カメラ(通信速度:1Mbps)、固定カメラ(通信速度:8Mbps)

評価項目は以下の通りである。

1. 映像品質
映像品質(映像の途切れの有無、映像の乱れの有無、映像の停止の有無)を確認する
2. ネットワーク性能
無線リソースが共有されたときのパケットロス率、RTT、アプリケーションのスループットを確認する

評価手順は以下の通りである。

■ローカル 5G+Wi-Fi 環境における AI 制御による無線環境の切替および QoS 制御検証

1. システム構成図の通り構築後、MRM をローカル 5G と接続し、映像伝送を開始する。(開始位置ではローカル 5G は強電界)
2. 下図参照の測定ポイントにて評価項目を測定する

【協創ラボ】

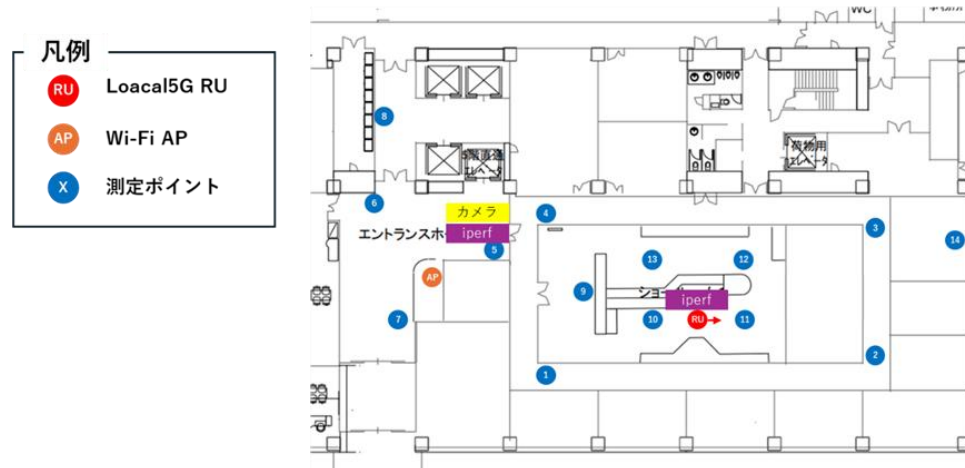


図 5.3-25 測定ポイント

3. 30 秒後、iPerf にて負荷トラフィックを流す
4. 1台あたりの MRM の負荷は10秒ごとに変化し、次のパターンを繰り返す
0Mbps→50Mbps→100Mbps→150Mbps→200Mbps→150Mbps→100Mbps
→50Mbps→0Mbps(以下、繰り返し)
5. これにより3台の MRM の負荷合計は10秒ごとに次のパターンを繰り返す
0Mbps→150Mbps→200Mbps→450Mbps→600Mbps→450Mbps→200Mbps
→150Mbps→0Mbps(以下、繰り返し)
6. ローカル 5G の強電界エリアから弱電界エリアに移動
7. 約 5 分間の周回測定を行い、通信方式の切替等、計測項目を取得

■Wi-Fi+ローカル 5G 環境における AI 制御による無線環境の切替および QoS 制御検証

1. システム構成図の通り構築後、MRM を Wi-Fi と接続し、映像伝送を開始する。(開始位置では Wi-Fi は強電界)
2. 下図参照の測定ポイントにて評価項目を測定する

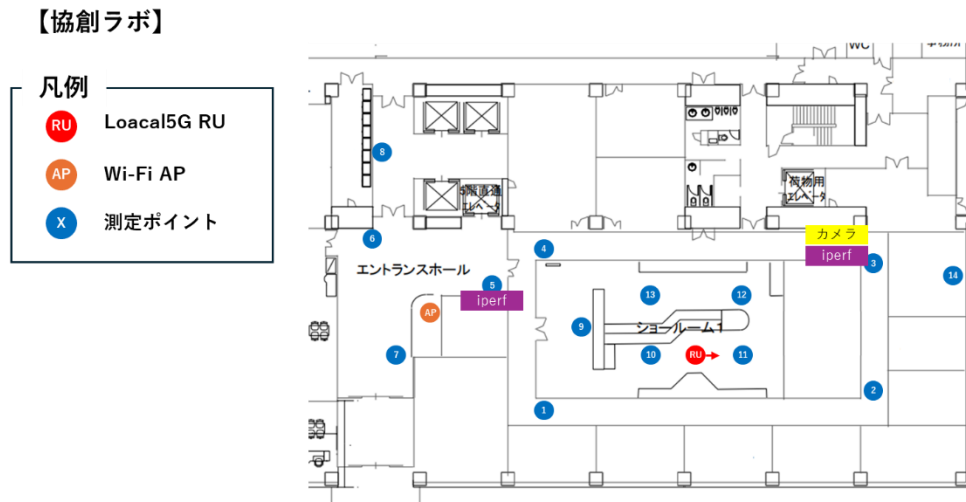


図 5.3-26 測定ポイント

3. 30 秒後、iPerf にて負荷トラフィックを流す
4. 1台あたりの MRM の負荷は10秒ごとに変化し、次のパターンを繰り返す
0Mbps→50Mbps→100Mbps→150Mbps→200Mbps→150Mbps→100Mbps
→50Mbps→0Mbps(以下、繰り返し)
5. これにより3台の MRM の負荷合計は10秒ごとに次のパターンを繰り返す
0Mbps→150Mbps→200Mbps→450Mbps→600Mbps→450Mbps→200Mbps
→150Mbps→0Mbps(以下、繰り返し)
6. ローカル 5G の強電界エリアから弱電界エリアに移動する
7. 約 5 分間の周回測定を行い、通信方式の切替等、計測項目を取得する

■ローカル 5G+公衆網(LTE)環境における AI 制御による無線環境の切替および QoS 制御検証

1. システム構成図の通り構築後、MRM をローカル 5G と接続し、映像伝送を開始する。(開始位置ではローカル 5G は強電界)
2. 下図参照の測定ポイントにて評価項目を測定する

【協創ラボ】

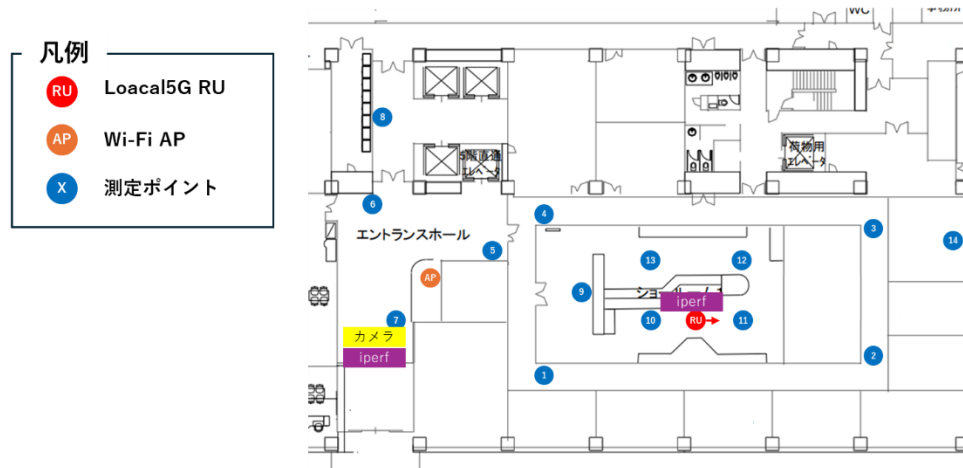


図 5.3-27 測定ポイント

3. 30 秒後、iPerf にて負荷トラフィックを流す
4. 1台あたりの MRM の負荷は10秒ごとに変化し、次のパターンを繰り返す
0Mbps→50Mbps→100Mbps→150Mbps→200Mbps→150Mbps→100Mbps
→50Mbps→0Mbps(以下、繰り返し)
5. これにより3台の MRM の負荷合計は10秒ごとに次のパターンを繰り返す
0Mbps→150Mbps→200Mbps→450Mbps→600Mbps→450Mbps→200Mbps
→150Mbps→0Mbps(以下、繰り返し)
6. ローカル 5G の強電界エリアから弱電界エリアに移動
7. 約 5 分間の周回測定を行い、通信方式の切替等、計測項目を取得

■Wi-Fi+公衆網(LTE)環境における AI 制御による無線環境の切替および QoS 制御検証

1. システム構成図の通り構築後、MRM を Wi-Fi と接続し、映像伝送を開始する。(開始位置では Wi-Fi は強電界)
2. 下図参照の測定ポイントにて評価項目を測定する

【協創ラボ】

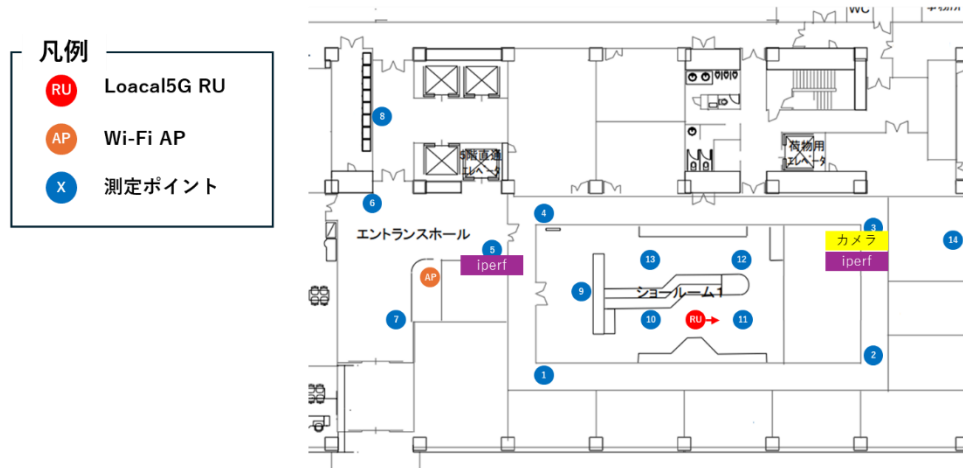


図 5.3-28 測定ポイント

3. 30 秒後、iPerf にて負荷トラフィックを流す
4. 1台あたりの MRM の負荷は10秒ごとに変化し、次のパターンを繰り返す
0Mbps→50Mbps→100Mbps→150Mbps→200Mbps→150Mbps→100Mbps
→50Mbps→0Mbps(以下、繰り返し)
5. これにより3台の MRM の負荷合計は10秒ごとに次のパターンを繰り返す
0Mbps→150Mbps→200Mbps→450Mbps→600Mbps→450Mbps→200Mbps
→150Mbps→0Mbps(以下、繰り返し)
6. ローカル 5G の強電界エリアから弱電界エリアに移動
7. 約 5 分間の周回測定を行い、通信方式の切替等、計測項目を取得

5.3.6 KPI/KGI

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定性評価	1	AGV 映像品質が十分にあり、作業者が安全に遠隔操作・判断できること
	2	カメラからの音声の途切れ・遅延が発生せず、明瞭に伝達できること
定量評価	3	AI 制御による負荷分散を活用した際のパケットロス率 1%以下
	4	必要スループット維持率 80%以上
	5	異常検知から復旧・切替時の通信途絶時間 0ms、通信途絶率 0%
	6	サービス不稼働率 0%

1) AGV 映像品質が十分にあり、作業者が安全に遠隔操作・判断できること

製造現場において、AGV や監視カメラによる映像伝送は作業の安全性と効率性を左右する重要な要素となっている。本実証では、ハイブリッドネットワークによる通信経路の最適化とエッジ AI によるデータ伝送量の低減を実施するが、これらの技術導入によって映像品質が実用レベルを維持できるかを確認する必要がある。

具体的には、作業者が遠隔から製造ラインの異常を判断する際に、必要十分な解像度とフレームレートが確保されていることが求められる。通信負荷軽減のために解像度やフレームレートを動的に調整する本実証のアプローチにおいて、最も重要な評価基準は「業務遂行に必要な判断ができる画質が維持されているか」という点である。

評価にあたっては、実際の作業現場において作業や管理者が映像を確認し、作業の実施可否判断、異常検知、安全確認などの実務上の判断が支障なく行えるかを検証する。

2) カメラからの音声の途切れ・遅延が発生せず、明瞭に伝達できること

製造現場においては、映像伝送に加えて音声通信が作業指示や緊急時の情報伝達において極めて重要な役割を果たしている。本実証では、ハイブリッドネットワークによる通信経路の最適化と AI による動的リソース配分を実施するが、これらの技術導入によって音声通信品質が実用レベルを維持できるかを確認する。評価にあたって、音声の途切れがないこと、ノイズや歪みが少なく、発話内容を正確に理解できることとして検証する。

3) AI 制御による負荷分散を活用した際のパケットロス率 1%以下

端末から映像確認端末の測定区間において、パケットロス率 1%以下を達成することを目標とする。測定方法は 1 秒間隔でパケットロス率を測定し、測定時の損失パケット数を計測する。測定条件としては、遮断物による電波環境変化時や接続端末数の増加に伴うネットワーク負荷が発生時の 2 つの条件下にてパケットロス率 1%以下を維持することを目標とする。

リアルタイム通信において、パケットロス率 1%以上は体感品質に顕著な劣化をもたらす。具体的にはフレーム欠落による画面の乱れ、遅延が発生する。物流倉庫といった、環境変化が激しい状況下でもこの品質を維持できることが、実用化の前提条件となる。

4) 必要スループット維持率 80%以上

端末から映像確認端末の測定区間において、必要スループットの維持率 80%以上を達成することを目標とする。必要スループットとして、FHD 映像伝送カメラの伝送容量 8Mbps とする。維持率 80%以上とは、必要スループットの 80%以上を常時確保することを指しているため、スループット 6.4Mbps 以上を維持することを目標とする。

20%を超えるスループットの低下は可変ビットレートでも吸収しきれず、映像のカクツキやブロックノイズを引き起こす。技術検証と同様の基準を適用することで、他分野においても同様の品質保証が可能であることを実証する。

5) 異常検知から復旧・切替時の通信途絶時間 0ms、通信途絶率 0%

品質劣化時でも通信途絶時間 0ms、通信途絶率 0%を達成することを目標とする。測定方法は、伝送される映像を目視で確認し、映像が途切れていないこと、乱れが発生していないことを検証する。具体的には、ネットワーク切替時を含む連続した映像記録を取得し、フレームの欠落、ブロックノイズの発生、フリーズの有無を確認する。

6) サービス不稼働率 0%

製造現場において複数のアプリケーションが同時稼働する環境下で、AI 制御によるハイブリッドネットワークの自動切り替えおよび QoS 制御により、映像伝送サービスが一切停止することなく連続稼働する(サービス不稼働率 0%)ことを目標とする。製造現場のミッションクリティカルなアプリケーションでは、わずかな通信断も生産ラインの停止や安全性の低下を招く恐れがある。特に AGV 制御不能による生産停止、監視カメラ途絶による異常検知の遅れは、重大な経済的損失や安全リスクにつながる。従来の単一ネットワーク環境では、障害発生時に人手による復旧作業が完了するまでサービスが停止していたが、AI 自動切り替えにより通信途絶を回避し、「止めない製造」を実現する必要がある。本実証により、単一ネットワークでは達成困難な高可用性をハイブリッドネットワーク制御で実現できることを実証する。

5.4 ユースケース④:分散ネットワークにおける新たな AI ソリューションの創出

当該ユースケースは実施しなかった。

5.5 拡張性に関する検証

5.5.1 実証内容の詳細

本実証で構築するハイブリッドネットワーク制御システムは、製造現場を想定して設計されているものの、その技術基盤は製造業の枠を超えて、様々な産業分野や環境条件に適用できる高い汎用性と拡張性を有している。本検証では、システムの異なる分野への適用性や環境適応性を体系的に評価し、社会実装の範囲拡大と地域社会や産業の課題解決を目指す。

本検証では、3つの検証項目から構成されている。

第一に、異なる産業・分野への横展開の可能性検証では、物流業、防災業、航空業など各産業分野の関係者にヒアリングを行い、他分野への適用性を評価する。具体的には、AGV 映像や固定カメラ映像といったアプリケーションのスループット要件、リアルタイム制御に必要な遅延時間の上限値、業務継続に必要な可用性レベルといった信頼性要件、さらには大型遮蔽物による電波環境の変化といった環境特性について詳細な調査を行い、ネットワーク混雑回避や通信断絶の防止といった効果を検証する。同様に、防災分野、航空業界においても実現可能性を探る。

第二に、異なる条件・環境への横展開の可能性検証では、本技術が特定の産業や環境に依存することなく、広範な条件下で適応可能な汎用的モデルとなるよう、各種産業分野でのヒアリングで得られた多様な環境条件を製造棟にて再現し、体系的な環境条件変動試験を実施する。これにより、システムの環境適応力を実証的に評価し、異なる環境下でも安定した性能を発揮できることを確認する。

第三に、ネットワークのスケーラビリティ検証では、異なる条件・環境への横展開の可能性検証で構築した多様な環境条件を模擬した製造棟において、接続端末数の増加に伴うネットワーク負荷が発生した場合でも、AI 制御による最適な無線環境への切り替えや QoS 制御により通信品質が維持できることを検証する。

これら3つの検証を通じて、本システムが製造業のみならず、物流、防災、航空をはじめとする多様な産業分野において、それぞれの固有の要件や環境条件に適応しながら、安定した通信品質を提供できる汎用性の高い技術基盤であることを実証する。さらに、将来的な社会実装において、システムの規模拡大や新たな用途への展開が可能な持続可能で拡張性の高いアーキテクチャを有することを明らかにし、地域社会や産業界が抱える通信インフラに関する多様な課題の解決に貢献できる次世代通信システムの実現可能性を示す。

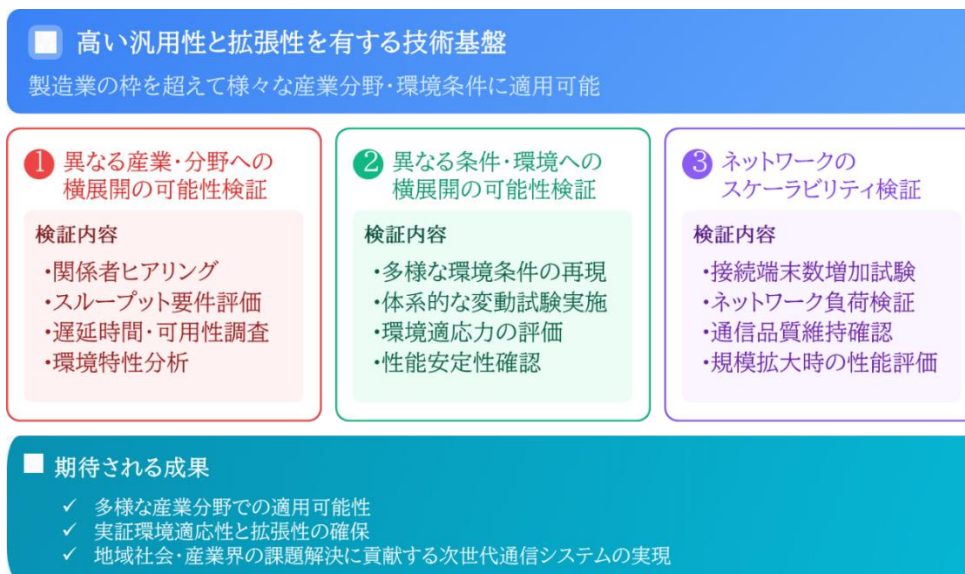


図 5.5-1 拡張性検証 実証概要図

5.5.2 前提条件

(1) 地理的・空間的条件

本実証は国際電気協創ラボおよび製造棟において実施する。物理的に異なる環境(物流倉庫、防災拠点)での実機検証は本実証範囲外とし、製造現場で取得したデータを基に他環境への適用可能性を分析・評価する。

検証環境は以下の特性を有する：

- ・協創ラボ：屋内環境、既設ローカル 5G 基地局を活用
- ・製造棟：実際の生産現場、屋内環境

(2) 時間的条件

実証期間は 2025 年 8 月から 12 月までの約 5 ヶ月間とし、他分野のお客様へのヒアリング期間を 2025 年 8 月から 11 月に設定する。ヒアリング結果を踏まえ、製造棟に環境を構築し、12 月に実施する。

(3) 電波環境条件

本実証で使用する無線規格ごとの周波数帯は以下のとおりである：

ローカル 5G:4.6-4.9GHz 帯

Wi-Fi:5GHz 帯

公衆網:800MHz 帯、1.7GHz 帯、2.1GHz 帯

各無線規格の通信性能は、実証環境における電波伝搬特性に依存する。実証機関が保有する知見によりエリア設計について十分考慮検討しているが、想定外の電波特性で KPI 達成に懸念がある事象が発生した場合は、その調査等も行い検証結果として報告する。

(4) 天候等の外的要因

本実証は屋内環境で実施するため、天候等の外的要因の影響は限定的である。ただし、公衆網の通信品質については、実証期間中の外部ネットワーク状況の影響を受ける可能性がある。

5.5.3 評価項目

番号	評価項目
1	異なる産業・分野への横展開の可能性検証
2	異なる条件・環境のネットワーク測定
3	異なる条件・環境への横展開の可能性検証
4	ネットワークのスケラビリティ検証

1) 異なる産業・分野への横展開の可能性検証

本実証で適用する AI を活用した通信負荷の低減や通信量の確保技術は製造業だけではなく、物流・防災分野・航空分野をはじめとする各種産業にも広く応用可能であると考えている。そのため、各産業分野の関係者にヒアリングを行うことで、他分野への適用性評価を行う。

評価項目は以下の通りである。

1. 本検証で開発した AI が適応できるのか評価するため、各分野の担当者に以下内容のヒアリングを実施

表 5.5-1 ヒアリング事項

#	大項目	質問事項
1	無線環境	無線技術(Wi-Fi、LTE、ローカル 5G)の種類について
2	無線環境	無線を利用しているアプリケーションについて
3	無線環境	上記アプリケーションのデータ伝送容量について
4	無線障害	無線を利用しているとき、障害が発生して運用が停止した事象の有無
5	無線障害	上記事象の通信断の発生回数や障害の種類について
6	無線障害	異常検知から復旧完了までの平均時間、対応の要する人員数について
7	その他	アプリケーションの優先順位付けは実施しているのか

2. 各産業分野の関係者へのヒアリング結果から、本実証で開発した AI の適用可否を判断する

2) 異なる条件・環境のネットワーク測定

本検証では、実際の生産現場を模擬した環境である製造棟内における無線環境の詳細な性能測定を実施し、後続の各種検証の基礎データを取得する。製造棟はローカル 5G、Wi-Fi、公衆網の 3 種類の無線技術が利用可能であり、これらの無線環境における通信性能を各測定ポイントで計測することで、製造棟全体の電波カバレッジと通信品質の分布を把握する。

システム構成および評価環境は以下の通りである。

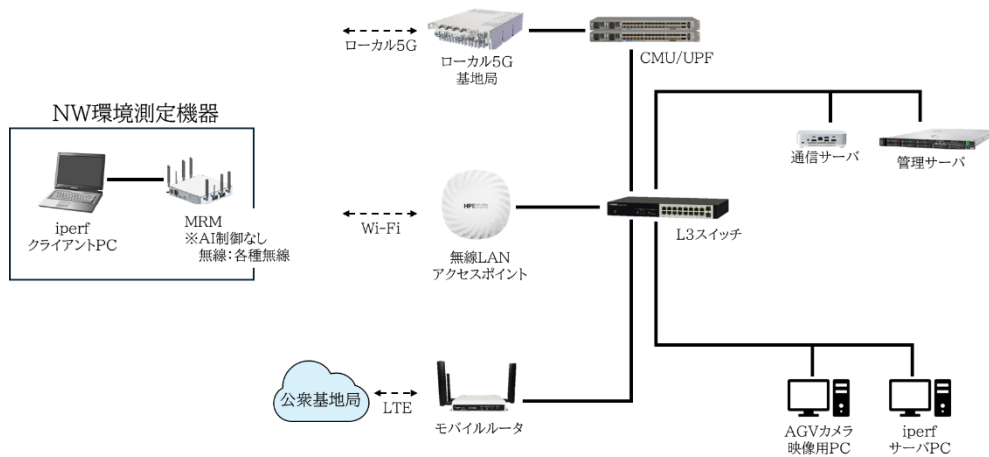


図 5.5-2 システム構成図

1. 実施場所：製造棟
2. 無線環境：ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網(LTE)
3. 評価機器：電波環境を測定する機器は下図のとおりである

測定器種別	ローカル5G	キャリア網(LTE)	Wi-Fi
測定器名	VIAVIソリューションズ OneAdvisor 800	Accuver XCAL / XCAP	Ekahau Ekahau AI Pro
写真			
機能概要	<ul style="list-style-type: none"> ■ 付属アンテナでの電波状況を可視化し、干渉の可能性を確認 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 端末(UE)でのLTE受信レベルやノイズ、などを測定 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Wi-Fiの信号強度をエリアマップの様可視化可能
	<ul style="list-style-type: none"> ■ 通過した経路のローカル5G電波強度を地図上に視覚化 	<ul style="list-style-type: none"> ■ キャリアLTEの電波品質の解析と結果の可視化として利用 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Wi-Fiの最適な設置位置を自動選定

図 5.5-3 測定機器一覧

評価項目は以下の通りである。

1. 受信電界強度
各測定ポイントにおける各無線環境の受信電界強度を測定する。
2. ネットワーク性能
各測定ポイントにおける UL スループット、パケットロス率、遅延時間を測定する

測定箇所および機器設置場所は以下の通りである。

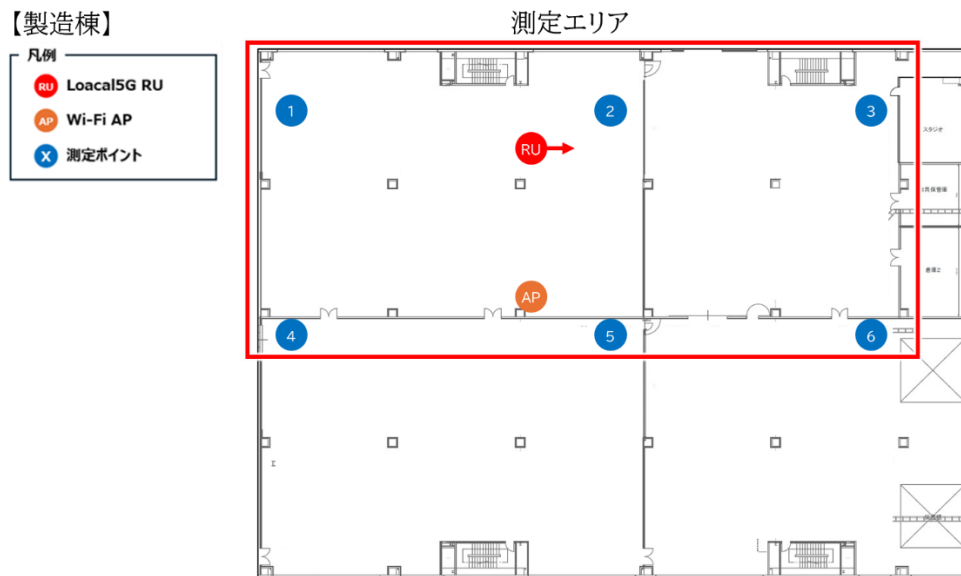


図 5.5-4 測定箇所一覧

ローカル 5G の RU は製造棟の中央に設置し、エリア全体をカバーできるように配置した。Wi-Fi アクセスポイントについては、通路側に AP に設置した。

測定手法は以下の通りである。

■ローカル5G 環境における各アプリケーションのデータ測定

1. システム構成図の通り構築後、MRM をローカル 5G に接続する
2. 図 5.5-4 の 6 箇所の測定ポイントにて、各評価項目を測定する。

■Wi-Fi 環境における各アプリケーションのデータ測定

1. システム構成図の通り構築後、MRM を Wi-Fi に接続する
2. 図 5.5-4 の 6 箇所の箇所の測定ポイントにて、各評価項目を測定する。

■公衆網(LTE)環境における各アプリケーションのデータ測定

1. システム構成図の通り構築後、MRM を公衆網に接続する
2. 図 5.5-4 の 6 箇所の箇所の測定ポイントにて、各評価項目を測定する。

3) 異なる条件・環境への横展開の可能性検証

大型物流倉庫でのレイアウト変更による遮断物による電波環境変化を検証する。物流倉庫内では、在庫配置の変更や大型搬送物の移動により電波環境が日々変わっており、電波遮断が発生する。本検証では、ローカル 5G と Wi-Fi のハイブリット構成において、遮蔽物により一方の通信が遮断された場合でも、シームレスに無線を切り替え、通信品質を維持できることを確認する。

システム構成および評価環境は以下の通りである。

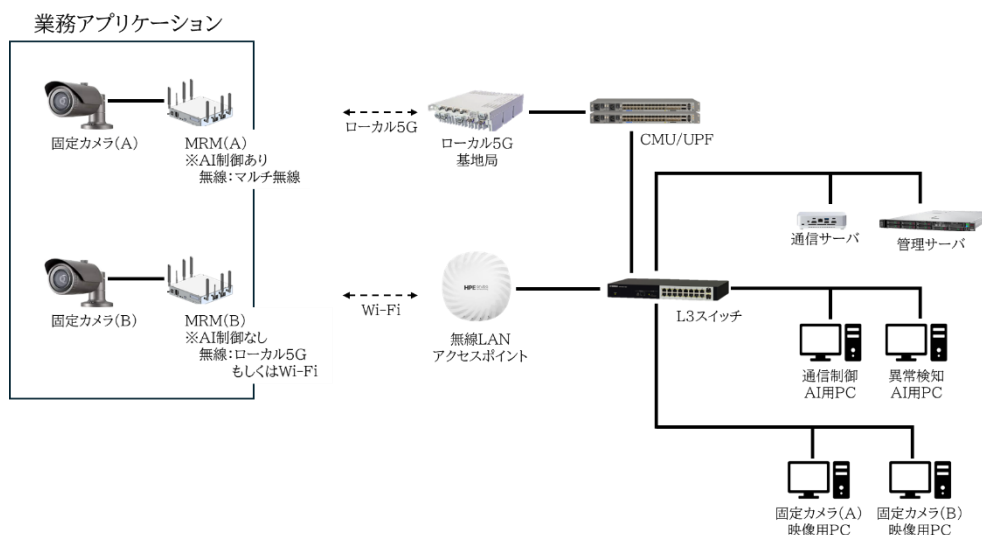


図 5.5-5 システム構成図

1. 実施場所:製造棟
2. 無線環境:ローカル 5G、Wi-Fi
3. 評価機器:固定カメラ 2 台(通信速度:8Mbps)
4. 障害物:トタン板(ローカル 5G 基地局周辺に設置)

評価項目は以下の通りである。

1. 映像品質
無線機の前に遮断物が設置されたときの映像品質(映像の途切れの有無、映像の乱れの有無、映像の停止の有無)を異常検知 AI(機械学習)と通信制御 AI(ルールベース)の組み合わせ、および異常検知 AI(機械学習)と通信制御 AI(機械学習)の組み合わせの両方で検証し、それぞれの品質を確認する
2. 受信電界強度
遮蔽物が基地局周辺に設置された後の各測定ポイントの受信電界強度を確認する
3. ネットワーク性能
遮蔽物が基地局周辺に設置された後のパケットロス率、RTT、アプリケーションのスループットを確認する

評価手法は以下の通りである。

1. ローカル 5G 基地局周辺に物流倉庫内の搬送物を模擬したトタンを設置する
2. システム構成図の通り構築後、ローカル 5G と接続し、映像伝送を開始する。
3. 以下 6 個所の測定ポイントにて評価項目を測定する。

【製造棟】

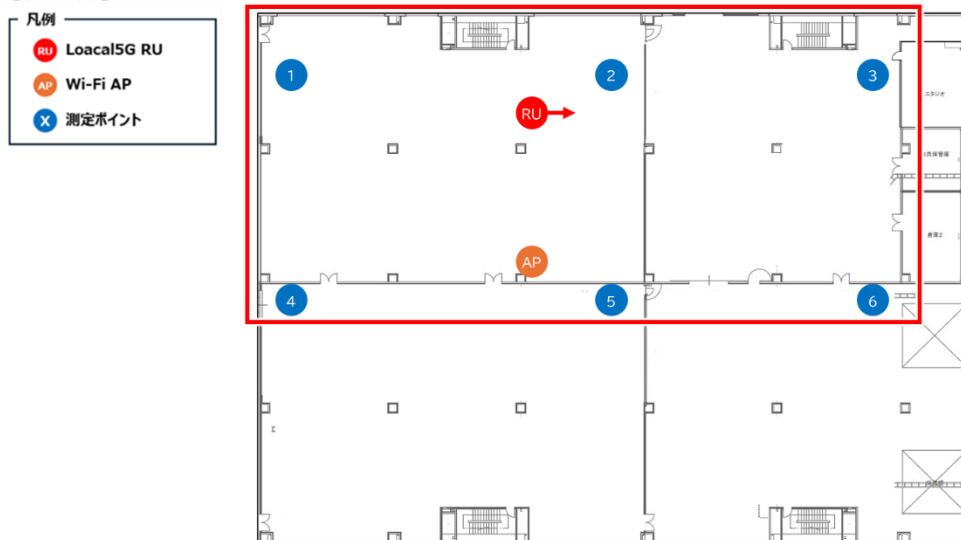


図 5.5-6 製造棟 測定エリア

4. トタンをローカル 5G 基地局から外し、台車をトタンありのときに電波環境が劣化した測定ポイントに台車を設置し、映像伝送を開始する。約 30 秒間安定動作を確認する。
5. トタン板をローカル 5G 基地局前に設置する。
6. 無線の品質低下を検知し、無線がローカル 5G から Wi-Fi に切り替わることを確認する
7. 異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(ルールベース)の組み合わせにより 3 回実施
8. 異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(機械学習)の組み合わせにより 3 回実施

4) ネットワークのスケラビリティ検証

本検証では、複数アプリケーションが同時に稼働している物流倉庫環境を模擬した製造棟において、接続端末数の増加に伴うネットワーク負荷が発生した場合でも、AI 制御による最適な無線環境への切り替えや QoS 制御により通信品質が維持できることを検証する。

システム構成および評価環境は以下の通りである。

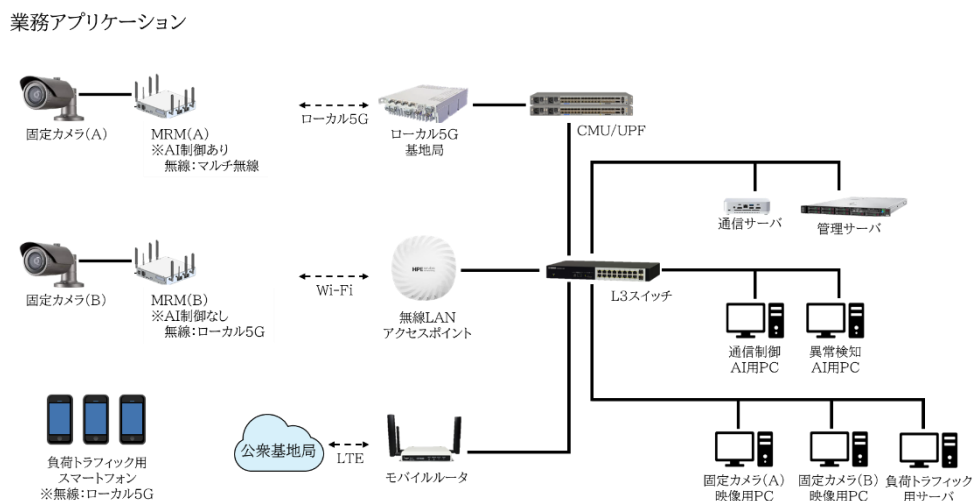


図 5.5-7 システム構成図

1. 実施場所:物流倉庫を模擬した製造棟
2. 無線環境:ローカル 5G、Wi-Fi
3. 評価機器:固定カメラ 2 台(通信速度:8Mbps)、iperf クライアント 3 台(複数の接続端末数を模擬)
※ネットワーク負荷は以下条件で生成
増減速度:10 秒ごとに 50Mbps/台ずつ増減

評価項目は以下の通りである

1. 映像品質
映像品質(映像の途切れの有無、映像の乱れの有無、映像の停止の有無)を異常検知 AI(機械学習)と通信制御 AI(ルールベース)の組み合わせ、および異常検知 AI(機械学習)と通信制御 AI(機械学習)の組み合わせの両方で検証し、それぞれの品質を確認する。
2. 受信電界強度
各測定ポイントの受信電界強度を確認する
3. ネットワーク性能
エリア移動中および切り替え時のパケットロス率、RTT、アプリケーションのスループットを確認する

評価手法は以下の通りである。

■ローカル 5G⇔Wi-Fi エリア移動検証

1. システム構成図の通り構築後、MRM をローカル 5G と接続し、映像伝送を開始する。
2. 映像用 PC にて、固定カメラの映像確認後、負荷トラフィック用スマートフォンを用いて接続端末数の増加の模擬を行う。
3. 下図のように物流倉庫環境を模擬した製造棟内を移動し、無線状況に応じた振る舞いを確認する。

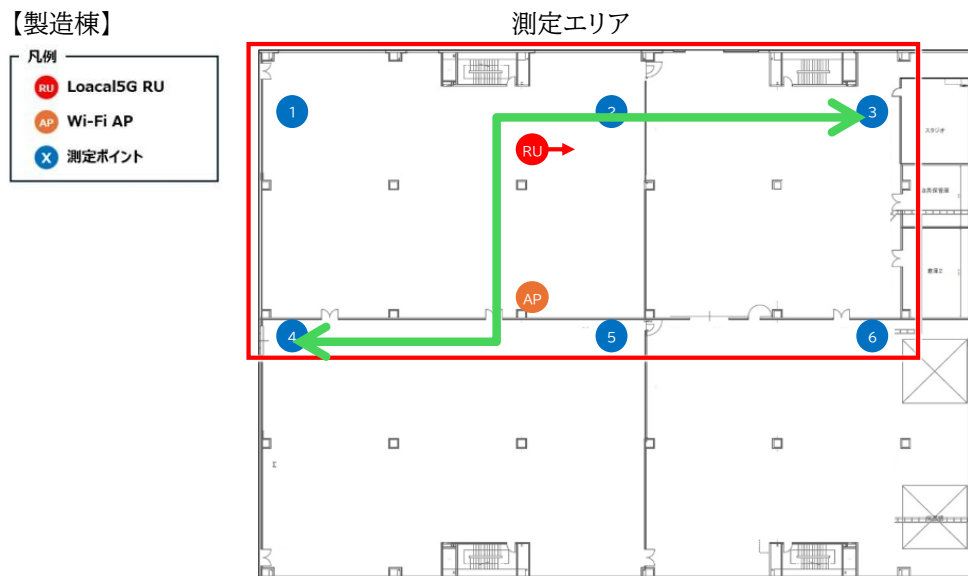


図 5.5-8 製造棟 測定エリア

4. 異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(ルールベース)の組み合わせにより 3 回実施
5. 異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(機械学習)の組み合わせにより 3 回実施

■Wi-Fi⇄公衆網エリア移動検証

1. システム構成図の通り構築後、MRM を Wi-Fi と接続し、映像伝送を開始する。
2. 映像用 PC にて、固定カメラの映像確認後、負荷トラフィック用スマートフォンを用いて接続端末数の増加の模擬を行う。
3. 下図のように物流倉庫環境を模擬した製造棟内を移動し、無線状況に応じた振る舞いを確認する。

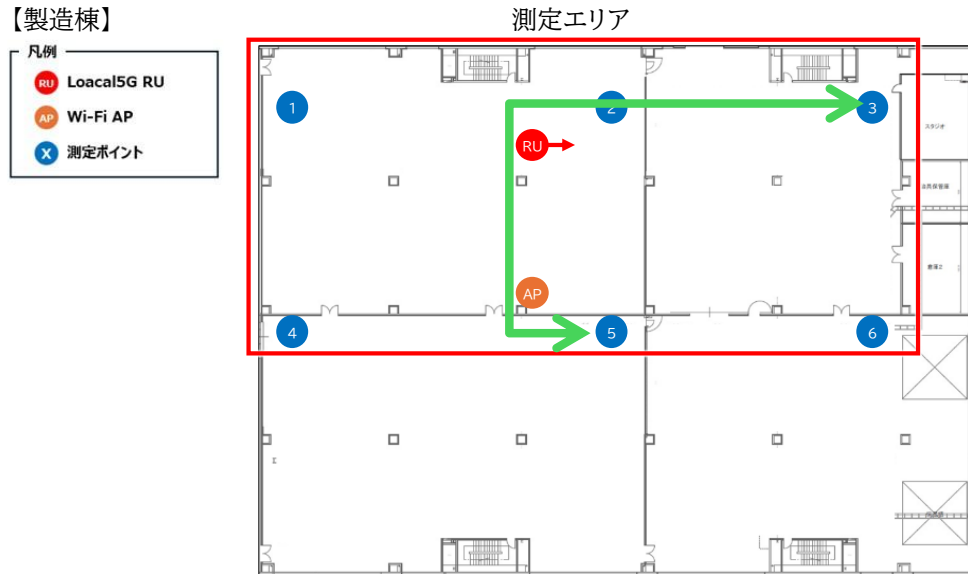


図 5.5-9 製造棟 測定エリア

4. 異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(ルールベース)の組み合わせにより 3 回実施
5. 異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(機械学習)の組み合わせにより 3 回実施

5.5.4 KPI/KGI

本検証で設定した定性評価および定量評価の目標値を以下に示す。

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定性評価	1	物流・防災・航空分野の実ユースケースにおける通信要件整理
	2	多様な環境条件下での通信品質維持能力確認
	3	ローカル 5G 不在環境でもハイブリッドネットワークのメリットが活かせる構成モデルの確立
定量評価	4	他分野を想定した模擬環境試験において必要スループット維持率 80%以上を達成
	5	他分野を想定した模擬環境試験においてパケットロス率 1%以下
	6	Wi-Fi+公衆網構成でも品質劣化時の通信途絶時間 0ms、通信途絶率 0%

1) 物流・防災・航空分野の実ユースケースにおける通信要件整理

物流分野、防災分野、航空分野における必要スループット、許容遅延時間、信頼性要件を関係者にヒアリングしてまとめる。また、各分野で想定される同時接続端末数と帯域要求を明確化する。

本実証で確立する技術の他分野展開可能性を評価するため、実際の適用先候補となる物流・防災・航空分野の通信要件を体系的に整理することが必要である。これにより、本システムの適用範囲と必要なカスタマイズ項目が明確になり、社会実装への道筋を具体化できる。

2) 多様な環境条件下での通信品質維持能力確認

大型遮蔽物移動時、無線リソース共有発生時といった環境条件変化における通信品質維持を確認する。各条件下で、スループット低下率、パケットロス率、遅延時間変動を測定し、許容範囲内であることを確認する。

物流倉庫や災害現場など、本技術を展開する環境が製造現場とは異なる特性を持つ。これらの環境変化に対するロバスト性を実証することで、実用性を担保することができる。

3) ローカル 5G 不在環境でもハイブリッドネットワークのメリットが活かせる構成モデルの確立

Wi-Fi と公衆網の組み合わせ構成での通信品質を測定し、ローカル 5G 環境との性能比較データを取得する。また、Wi-Fi + 公衆網構成における最適なネットワーク切替制御方法を確立する。

ローカル 5G 導入には高額な初期投資が必要であり、中小企業や地方自治体では導入が困難な場合がある。Wi-Fi+公衆網の組み合わせでも本技術の効果が発揮できることを実証することで、導入障壁を下げ、より広範な社会実装が可能になる。

4) 他分野を想定した模擬環境試験において必要スループット維持率 80%以上を達成

端末から映像確認端末の測定区間において、必要スループットの維持率 80%以上を達成することを目標とする。必要スループットとして、FHD 映像伝送カメラの伝送容量 8Mbps とする。維持率 80%以上とは、必要スループットの 80%以上を常時確保することを指しているため、スループット 6.4Mbps 以上を維持することを目標とする。

20%を超えるスループットの低下は可変ビットレートでも吸収しきれず、映像のカクツキやブロックノイズを引き起こす。技術検証と同様の基準を適用することで、他分野においても同様の品質保証が可能であることを実証する。

5) 他分野を想定した模擬環境試験においてパケットロス率 1%以下

端末から映像確認端末の測定区間において、パケットロス率 1%以下を達成することを目標とする。測定方法は 1 秒間隔でパケットロス率を測定し、測定時の損失パケット数を計測する。測定条件としては、遮断物による電波環境変化時や接続端末数の増加に伴うネットワーク負荷が発生時の 2 つの条件下にてパケットロス率 1%以下を維持することを目標とする。

リアルタイム通信において、パケットロス率 1%以上は体感品質に顕著な劣化をもたらす。具体的には

フレーム欠落による画面の乱れ、遅延が発生する。物流倉庫といった、環境変化が激しい状況下でもこの品質を維持できることが、実用化の前提条件となる。

6) Wi-Fi+公衆網構成でも品質劣化時の通信途絶時間 0ms、通信途絶率 0%

Wi-Fi と公衆網の組み合わせ構成において、品質劣化時でも通信途絶時間 0ms、通信途絶率 0% を達成することを目標とする。測定方法は、伝送される映像を目視で確認し、映像が途切れていないこと、乱れが発生していないことを検証する。具体的には、ネットワーク切替時を含む連続した映像記録を取得し、フレームの欠落、ブロックノイズの発生、フリーズの有無を確認する。

5.6 効果検証

5.6.1 実証内容の詳細

本実証は、製造業における AI を用いたハイブリッドネットワーク制御システムの導入効果を、経済性と社会性の両面から包括的に検証し、その実用性と普及可能性を明らかにすることを目的としている。

製造現場において、ローカル 5G や Wi-Fi などの無線通信インフラは、AGV や監視カメラの制御・運用に不可欠な基盤技術となっている。しかし、現実の製造環境では、生産品目や生産量の変動に応じたレイアウト変更、設備の経年劣化、予期せぬ機器障害など、様々な要因により通信障害が発生している。

現実の製造環境を調査すべく、株式会社国際電気関連会社である五洋電子株式会社へのヒアリング調査を行い、金属棚の移動による電波遮断、基地局の送信機器や電源システムの不具合による無線出力低下、アンテナの破損によるエリア縮小といった 3 つの典型的な障害事例が確認された。これらの障害により、AGV や監視カメラが通信不能となり、生産ラインの停止、品質・安全管理機能の喪失、緊急対応作業の発生など、製造工程に重大な支障をきたしている。さらに、障害復旧には専門技術者の派遣、部品手配、高所作業などが必要となり、数時間から数日を要する場合もあり、多大な経済的損失が発生していることが分かった。

本実証で導入する AI ハイブリッドネットワーク制御システムは、障害発生時にシステムが自動的に無線の異常を検知し、影響を受けたエリアの通信を即座に Wi-Fi ネットワークへ切り替えることで、通信の継続性を確保する。これにより、生産ラインの停止を回避し、製造工程への影響を最小限に抑えることが可能となる。

本実証は、4 つの検証項目から構成されている。第一に、コスト削減効果検証では、システム導入による運用コストの削減効果を定量的に評価する。具体的には、生産ライン停止による機会損失、緊急対応作業に要する人件費、修理・交換費用、レイアウト再調整に伴う作業コスト、復旧作業に要する時間とコストなど、各項目についてシステム導入前後の比較を行い、経済的価値を明確化する。

第二に、投資対効果(ROI)検証では、コスト削減効果検証で得られた結果を基に、システム導入の経済的合理性を分析する。ハードウェア費用、ソフトウェアライセンス費用、システム構築費用、設定・調整作業費用などの初期投資額に対し、年間のコスト削減効果から投資回収期間を算出することで、企業の設備投資としての妥当性と、投資回収後の純粋なコスト削減効果の享受時期を明確化する。

第三に、既存通信インフラの有効活用検証では、ローカル 5G の導入が困難な環境における解決策を検証する。ローカル 5G は高速・大容量・低遅延という優れた特性を持つ一方で、専用の周波数免許取得、基地局設備の導入、運用管理体制の構築など、多大な初期投資と技術的ハードルが存在する。特に中小規模の製造拠点や地方の工場では、こうした投資負担が大きく、無線通信環境の整備が進まない課題がある。本検証では、既存の Wi-Fi インフラと公衆網を組み合わせ、AI 制御により最適な通信経路を選択することで、実用的な通信品質を実現できることを実証し、通信環境の地域格差解消と中小製造事業者のデジタル化推進に貢献する知見を提供する。

第四に、社会的価値の評価検証では、経済的効果だけでなく、業務効率改善、安全性向上、働き方改革などの多角的な観点から定性的な評価を実施する。通信インフラの安定化は、作業員の労働環境改善、安全管理体制の強化、生産性向上による競争力強化など、企業活動全体に波及する効果をもたらす。通信断による緊急対応作業の削減は時間外労働を減少させてワークライフバランスの向上に寄与し、

監視カメラの安定稼働は事故やトラブルの早期発見を可能にして作業者の安全性を高める。これらの効果を把握するため、国際電気ラボ関係者および国際電気関連工場関係者を対象としたアンケート調査を実施し、5段階評価により数値化して統計的に分析する。

これらの多角的な検証を通じて、本システムが製造業における通信インフラの課題を解決し、経済的価値と社会的価値の両面で貢献できる有効なソリューションであることを実証する。

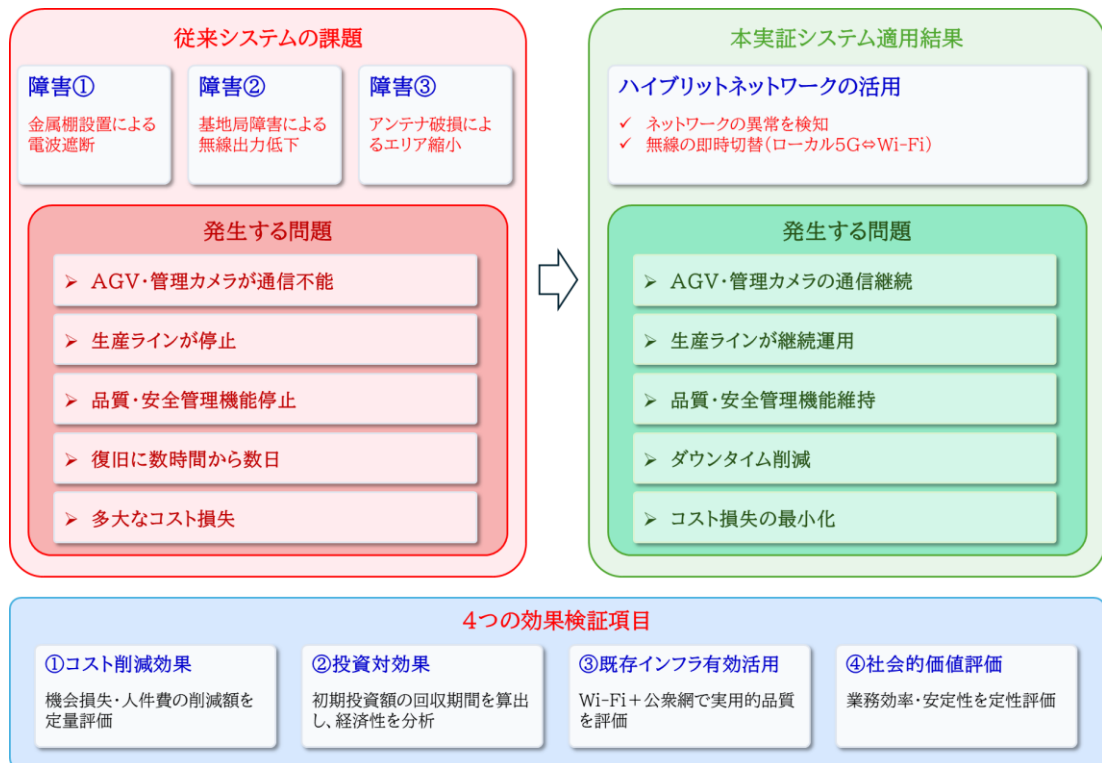


図 5.6-1 公衆網回線の通信制御 AI の SHAP

5.6.2 前提条件

(1) 地理的・空間的条件

本実証は実際の生産現場を模擬した製造棟において実施する。

検証環境は以下の特性を有す：

- ・製造棟: 実際の生産現場、屋内環境

(2) 時間的条件

実証期間は 2025 年 8 月から 12 月までの約 5 ヶ月間とし、効果検証は以下の期間で実施する。

- ① 運用コスト削減効果の測定: 2025 年 8 月～11 月
- ② 投資対効果(ROI)の算出: 2025 年 12 月
- ③ 既存通信インフラの有効活用検証: 2025 年 12 月
- ④ 社会的価値の評価検証: 2025 年 12 月

(3) 電波環境条件

本実証で使用する無線規格ごとの周波数帯は以下のとおりである：

ローカル 5G:4.6-4.9GHz 帯

Wi-Fi:5GHz 帯

公衆網:800MHz 帯、1.7GHz 帯、2.1GHz 帯

各無線規格の通信性能は、実証環境における電波伝搬特性に依存する。実証機関が保有する知見によりエリア設計について十分考慮検討しているが、想定外の電波特性で KPI 達成に懸念がある事象が発生した場合は、その調査等も行い検証結果として報告する。

(4) 天候等の外的要因

本実証は屋内環境で実施するため、天候等の外的要因の影響は限定的である。ただし、公衆網の通信品質については、実証期間中の外部ネットワーク状況の影響を受ける可能性がある。

5.6.3 評価項目

番号	評価項目
1	コスト削減効果検証
2	投資対効果(ROI)検証
3	既存通信インフラの有効活用検証
4	社会的価値の評価検証

1) コスト削減効果検証

本検証では、AI を活用したハイブリッドネットワーク制御システムの導入により、製造現場における通信障害に起因するコストがどの程度削減されるかを定量的に評価する。具体的には、ローカル 5G 環境における障害発生時に、AI 制御による Wi-Fi への自動切り替え機能が、従来の手動復旧作業と比較してどれだけ経済的価値を創出するかを明らかにした。

そのため、製造現場における通信障害がどのようなものがあるのか調査するため、国際電気関連会社の五洋電子株式会社の IT 担当者に対し、製造業における障害事例についてヒアリングを実施する。同社では、AGV や監視カメラをローカル 5G により制御・運用することで、リアルタイムでの生産管理と効率的な製造工程の実現を図っている

ヒアリング事項については以下の通りである。

表 5.6-1 ヒアリング事項

#	大項目	ヒアリング事項
1	無線環境	無線技術を利用しているアプリケーションについて
2	無線環境	上記アプリケーションのデータ伝送容量について
3	無線障害	無線を利用しているとき、障害が発生して運用が停止した事象の有無
4	無線障害	上記事象の通信断の発生回数や障害の種類について
5	無線障害	異常検知から復旧完了までの平均時間、対応の要する人員数について
6	その他	アプリケーションの優先順位付けは実施しているのか

上記結果を踏まえ、障害ケースごとにコストがどの程度削減されるのか検証する。
評価は机上検討で行う。評価基準は以下の通りである。

■従来環境での障害対応

1. 障害検知:作業者が現場にて通信異常を発見するまでの時間
2. 原因分析:ネットワーク管理者が現地調査し、原因を特定するまでの時間
3. 無線切替作業:ローカル 5G で運用していた機器を Wi-Fi 環境に切り替える時間
4. 製造人手作業:無線が停止している期間、人手作業をした時間
5. 復旧対応:基地局の周辺の変更および機器交換するまでの時間
6. 動作確認:復旧後の通信品質確認するまでの時間

■AI 活用環境での障害対応時間

1. 障害検知:通信品質の劣化を自動検知し、管理者に通知するまでの時間
2. 原因分析:ネットワーク管理者が現地調査し、原因を特定するまでの時間
3. 無線切替作業:ハイブリッドネットワークにて無線が切り替わる時間
4. 製造人手作業:無線が停止している期間、人手作業をした時間
5. 復旧対応:基地局の周辺の変更および機器交換するまでの時間
6. 動作確認:復旧後の通信品質確認するまでの時間

本検証では、システム導入により、生産ライン停止による作業コスト、復旧作業に要する時間とコストが、どの程度削減可能であるかを定量的に評価する。

2) 投資対効果(ROI)検証

本検証では、前述のコスト削減効果検証で得られた結果を基に、AI を用いたハイブリッドネットワーク制御システムの導入における投資対効果を分析する。具体的には、システム導入に必要な初期投資額に対して、年間のコスト削減効果がどの程度の期間で初期投資を回収できるかを算出し、本ソリューション導入の経済的合理性を検証する。

初期投資額には、AI ハイブリッドネットワーク制御システムのハードウェア費用、ソフトウェアライセンス費用、システム構築費用、導入に伴う設定・調整作業費用などを含む。一方、年間のコスト削減効果としては、コスト削減効果検証で定量化された、生産ライン停止による機会損失の削減額、緊急対応作業や復旧作業に要する人件費の削減額、レイアウト再調整に伴う作業コストの削減額などを合算する。

これらのデータを用いて投資回収期間を算出することにより、本システム導入が企業の設備投資として妥当であるか、また何年でシステム導入費用を回収し、以降は純粋なコスト削減効果を楽しむことができるかを明確化する。

3) 既存通信インフラの有効活用検証

本検証では、ローカル 5G の導入が困難な地域や環境においても、既存の通信インフラを有効活用することで、製造現場に求められる通信品質を確保できるかを評価する。具体的には、Wi-Fi と公衆網によるハイブリッドネットワークを AI 制御することで、どの程度の通信品質が維持できるかを検証し、地域間の通信環境格差を縮小する効果を評価した。

本検証は、拡張性検証の「ネットワークのスケラビリティ検証」で実施した Wi-Fi⇄公衆網の検証と同じ内容を効果検証の観点から評価するものである。

システム構成および評価環境は以下の通りである。

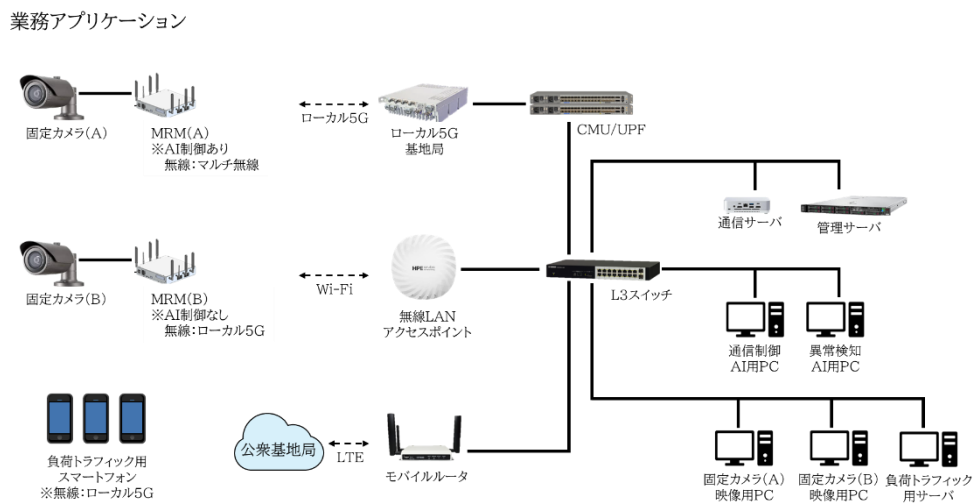


図 5.6-2 システム構成図

1. 実施場所:物流倉庫を模擬した製造棟
2. 無線環境:Wi-Fi、公衆網
3. 評価機器:固定カメラ 2 台(通信速度:8Mbps)、iperf クライアント 3 台(複数の接続端末数を模擬)
※ネットワーク負荷は以下条件で生成
増減速度:10 秒ごとに 50Mbps/台ずつ増減

評価項目は以下の通りである

1. 映像品質
映像品質(映像の途切れの有無、映像の乱れの有無、映像の停止の有無)を確認する
2. 受信電界強度
遮蔽物が基地局周辺に設置された後の各測定ポイントの受信電界強度を確認する
3. ネットワーク性能
遮蔽物が基地局周辺に設置された後のパケットロス率、RTT、アプリケーションのスループットを確認する

評価手法は以下の通りである。

1. システム構成図の通り構築後、MRM を Wi-Fi と接続し、映像伝送を開始する。
2. 映像用 PC にて、固定カメラの映像確認後、負荷トラフィック用スマートフォンを用いて接続端末数の増加の模擬を行う。
3. 下図のように物流倉庫環境を模擬した製造棟内を移動し、無線状況に応じた振る舞いを確認する。

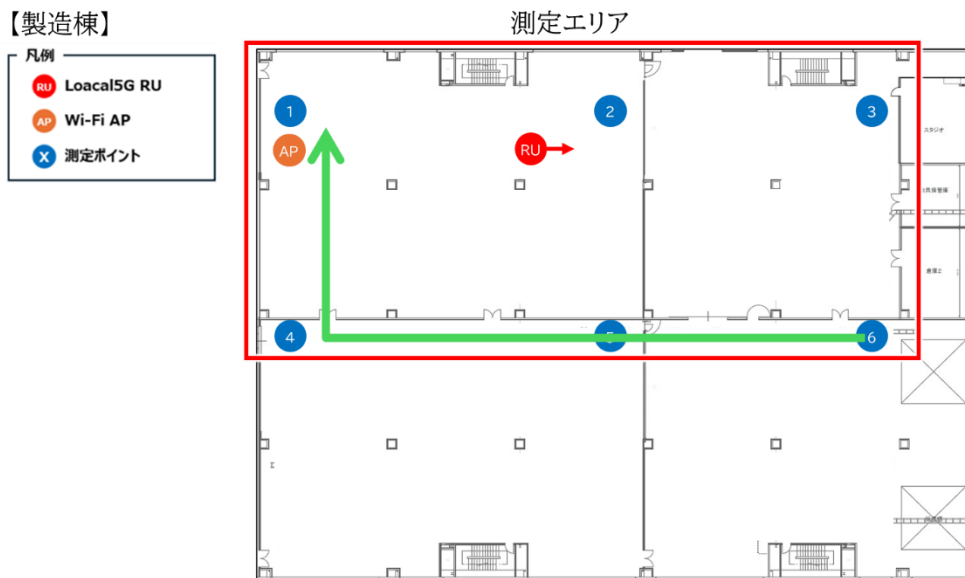


図 5.6-3 測定エリア範囲

4. 異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(ルールベース)の組み合わせにより 3 回実施
5. 異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(機械学習)の組み合わせにより 3 回実施

4) 社会的価値の評価検証

本検証では、AI を用いたハイブリッドネットワーク制御システムが製造業現場にもたらす社会的価値を、経済的効果だけでなく、業務効率改善、安全性向上、働き方改革などの多角的な観点から定性的に評価する。

製造現場における通信インフラの安定化は、単なるコスト削減にとどまらず、作業者の労働環境改善、安全管理体制の強化、生産性向上による競争力強化など、企業活動全体に波及する幅広い効果をもたらす。例えば、通信断による緊急対応作業の削減は作業者の時間外労働を減少させ、ワークライフバランスの向上に寄与する。また、監視カメラの安定稼働は事故やトラブルの早期発見を可能にし、作業者の安全性を高める。さらに、ネットワークの信頼性向上により、新たなIoT機器の導入やデータ活用が促進され、事業拡大や新サービス創出の機会が生まれることも期待される。

これらの社会的価値を体系的に把握するため、本検証では国際電気ラボ関係者および国際電気関連工場関係者を対象としたアンケート調査を実施する。アンケートは以下の通りである。

収集したデータは統計的に分析し、どの領域でどの程度の改善効果が認められたか、また作業や部門によって評価に差異があるかなどの傾向を把握する。

総務省地域社会 DX 推進パッケージ事業(AI 検証タイプ)

効果検証 社会的価値評価アンケート

本アンケートは、AI を用いたハイブリッドネットワーク制御システムが製造業現場にもたらす社会的価値を多角的に評価することを目的としています。

製造現場における通信インフラの安定化は、コスト削減だけでなく、作業者の労働環境改善、安全管理体制の強化、生産性向上による競争力強化など、企業活動全体に波及する幅広い効果をもたらします。

各項目について、通信品質向上によってもたらされた変化を 4 段階でご評価ください。

■ローカル 5G⇄Wi-Fi 検証

1:同意しない～4:同意する

#	内容	結果
1	AI の設定が容易である	1 2 3 4
2	機器設置が容易である	1 2 3 4
3	AI 適用後のカメラの映像品質は良い	1 2 3 4
4	無線が切り替わったときのカメラの映像品質に違和感がない	1 2 3 4
5	移動しているカメラの映像は安全面・実用面で問題ない	1 2 3 4
6	AI システム導入により、通信障害対応の業務効率が改善されると思う	1 2 3 4

■Wi-Fi⇄公衆網検証

1:同意しない～4:同意する

#	内容	結果
1	AI の設定が容易である	1 2 3 4
2	機器設置が容易である	1 2 3 4
3	AI 適用後のカメラの映像品質は良い	1 2 3 4
4	無線が切り替わったときのカメラの映像品質に違和感がない	1 2 3 4
5	移動しているカメラの映像は安全面・実用面で問題ない	1 2 3 4
6	AI システム導入により、通信障害対応の業務効率が改善されると思う	1 2 3 4

1	ご意見(良い点)	
2	ご意見(悪い点、改善点)	

所属・お名前: _____

図 5.6-4 アンケート内容

5.6.4 KPI/KGI

本検証で設定した定性評価および定量評価の目標値を以下に示す。

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定性評価	1	カメラ映像が自動作業の実施可否の判断が可能な画質であること
	2	アンケートにおける業務効率改善の実感度が5段階評価で平均4.0以上であること
定量評価	3	運用工数30%低減、障害復旧時間30%低減
	4	スループット維持率80%以上、遅延変動30%減少
	5	投資回収期間4年以内

1) カメラ映像が自動作業の実施可否の判断が可能な画質であること

製造現場において、AGV や監視カメラによる映像伝送は作業の安全性と効率性を左右する重要な要素となっている。本実証では、ハイブリッドネットワークによる通信経路の最適化とエッジ AI によるデータ伝送量の低減を実施するが、これらの技術導入によって映像品質が実用レベルを維持できるかを確認する必要がある。

具体的には、作業者が遠隔から製造ラインの異常を判断する際に、必要十分な解像度とフレームレートが確保されていることが求められる。通信負荷軽減のために解像度やフレームレートを動的に調整する本実証のアプローチにおいて、最も重要な評価基準は「業務遂行に必要な判断ができる画質が維持されているか」という点である。

評価にあたっては、実際の作業現場において作業員や管理者が映像を確認し、作業の実施可否判断、異常検知、安全確認などの実務上の判断が支障なく行えるかを検証する。

2) アンケートにおける業務効率改善の実感度が4段階評価で平均3.0以上であること

本実証で構築する AI 活用ハイブリッドネットワークシステムの社会的価値を評価するためには、実際の利用者が感じる業務改善効果を測定することが重要である。国際電気ラボ関係者および関連工場関係者を対象としたアンケート調査により、通信品質の安定化、障害復旧時間の短縮、運用負荷の軽減といった効果が実務レベルでどの程度実感されているかを把握する。

4段階評価(1:同意しない、2:あまり同意しない、3:やや同意する、4:同意する)において平均3.0以上という目標値は、「やや同意する」以上の評価を多数の回答者から得ることを意味している。この水準は、システム導入による明確な効果が現場レベルで認識されており、今後の本格展開に向けた有用性が実証されたと判断できる基準となる。

3) 運用工数30%低減、障害復旧時間30%低減

従来の単一ネットワーク環境では、通信障害が発生した際に原因特定から復旧までの一連の作業を人手で行う必要があり、専門技術者の作業負担が大きな課題となっていた。特に複数のアプリケーションが混在する環境では、どのアプリケーションが通信品質低下の影響を受けているかの切り分け、最適な対策の選択、設定変更作業など、多岐にわたる工程が必要となる。

本実証で導入する AI 活用システムでは、ネットワーク状態のリアルタイム監視と異常検知により、障害の予兆段階での検出が可能となる。また、検知した異常に対する最適な対処方法の提示や、一部の復旧作業の自動化により、技術者の作業工数と障害復旧時間の双方を大幅に削減することを目指す。

測定にあたっては、障害対応に関わる作業を「障害検知」「原因分析」「復旧対応」「復旧後の動作確認」の4つの工程に細分化し、それぞれの所要時間と作業工数を計測する。AI導入前の人手作業による対応と、AI支援による対応を比較することで、削減効果を定量的に評価する。

運用工数30%、障害復旧時間30%低減することで、運用コスト削減効果が実現できると想定し設定した。限られた技術者リソースをより高度な業務に振り向けることが可能となり、また通信障害による業務への影響を最小限に抑え、システムの可用性向上に貢献することが可能である。

4) スループット維持率 80%以上、遅延変動 30%減少

製造現場の環境は、複数のアプリケーションが同時に通信を行っているため、ネットワークの輻輳により個々のアプリケーションのスループットが低下し、遅延のばらつきが増大するリスクがある。特に、AGV 制御、映像伝送などそれぞれ異なる通信特性を持つアプリケーションが混在する場合、適切なりソース配分が行われないと重要度の高い通信が十分な品質を確保できない可能性がある。

本検証では、端末から映像確認端末の測定区間において、必要スループットの維持率 80%以上を達成することを目標とする。必要スループットとして、FHD 映像伝送カメラの伝送容量 8Mbps とする。維持率 80%以上とは、必要スループットの 80%以上を常時確保することを指しているため、スループット 6.4Mbps 以上を維持することを目標とする。

20%を超えるスループットの低下は可変ビットレートでも吸収しきれず、映像のカクツキやブロックノイズを引き起こす。技術検証と同様の基準を適用することで、他分野においても同様の品質保証が可能であることを実証する。

遅延変動については、遅延の平均値だけでなく、遅延のばらつき(ジッター)が大きいと、映像の表示タイミングのずれ、音声の不自然な間隔、制御信号の不安定な伝達などの問題が発生する。AIによる通信経路の動的最適化により、ネットワーク状況の変化に応じて最も安定した経路を選択することで、遅延のばらつきを 30%抑制する。遅延変動の測定は、一定時間内における遅延時間の標準偏差として算出し、AI 制御の有無による比較を行う。

5) 投資回収期間 4 年以内

本実証で構築するハイブリッドネットワークシステムの経済的妥当性を評価するため、投資対効果(ROI)の観点から投資回収期間を設定する。

初期投資コストには、AI 制御システム導入費用(ハイブリッドネットワーク制御システム、ソフトウェアライセンス)、その他関連費用(ネットワーク設計、システム構築)が含まれる。年間運用コストには、設備保守費、通信費、運用人件費が含まれる。

導入効果による年間削減額は、運用効率化による人件費削減(AI 自動異常検知・復旧による作業時間削減)と、ダウンタイム削減による生産性向上効果(通信障害による生産ライン停止時間の削減、AGV 運用停止による物流遅延の削減)から算出する。

投資回収期間の算出は、初期投資額を年間純効果(年間導入効果から年間追加運用コストを差し引いた額)で除することにより行う。産業設備への投資において、一般的な投資回収目標期間は 5 年以内とされることが多い中、本実証では 4 年以内という目標を設定した。これは、AI による運用効率化効果とダウンタイム削減効果が十分に大きく、通常よりも早期の投資回収が見込めることを前提として設定した。

6. 実証の結果・考察

6.1 全体スケジュール

6.2 ユースケース①: エッジ AI による通信量の低減

6.2.1 実証スケジュール

ユースケース	フェーズ	2025年									2026年		
		5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月		
①	実証準備 (事前計測、物品調達等)		機器調達	環境構築			エッジAI環境構築						
	実証								現地実証 (協創ラボ)				
	実証評価								視察会 報告書 初版作成				

6.2.2 開発・評価項目の結果

番号	開発・評価項目
1	開発したアルゴリズム
2	AIによるデータ伝送量の低減検証
3	検知エリア最適化による通信効率向上検証

1) 開発したアルゴリズム

本検証では、エッジ AI による移動体検知結果に応じて映像解像度を動的に変更する制御アルゴリズムを開発した。本アルゴリズムは、カメラ、エッジ AI、管理サーバ、エッジ AI 制御用 PC の 4 つのコンポーネント間の連携により動作する。

エッジ AI が予め設定した検知エリア内への移動体侵入を検知すると、その検知結果をエッジ AI 制御用 PC へ送信する。エッジ AI 制御用 PC は「移動体検知あり」の通知を受信すると、エッジ AI に対して映像解像度を低解像度(1Mbps)から高解像度(8Mbps)へ変更する指示を送信し、侵入禁止エリアへの侵入時には詳細な状況確認が可能な高精細映像の伝送を開始する。一方、移動体が検知エリア外へ退出した際には、エッジ AI 制御用 PC は「移動体なし」の通知を受信し、映像解像度を高解像度(8Mbps)から低解像度(1Mbps)へ戻す指示を送信することで、通常監視状態では通信帯域の占有を最小限に抑える。

2) AIによるデータ伝送量の低減検証

本実証では、エッジ AI による移動体検知と連動した解像度の動的切り替え機能について、切り替え応答時間とスループット変化の測定を行った。検証は低解像度(VGA)→高解像度(FHD)、低解像度(FHD)→高解像度(FHD)にて行った。

以下に低解像度(VGA)、高解像度(FHD)のときの結果を示す。

表 6.2-1 低解像度(VGA)、高解像度(FHD)のときの切り替え時間

回数	低解像度→高解像度 切り替え時間	回数	高解像度→低解像度 切り替え時間
1回目	3.80 秒	1回目	3.93 秒
2回目	3.81 秒	2回目	3.79 秒
3回目	3.78 秒	3回目	3.77 秒
4回目	3.83 秒	4回目	3.64 秒
5回目	3.48 秒	5回目	3.76 秒
6回目	3.75 秒	6回目	3.66 秒
7回目	3.64 秒	7回目	3.50 秒
8回目	3.61 秒	8回目	3.81 秒
9回目	3.77 秒	9回目	7.24 秒
10回目	3.42 秒	10回目	3.66 秒

表 6.2-2 切り替え時間まとめ

切り替え方向	平均切り替え時間	標準偏差	最小時間	最大時間
低解像度→高解像度	3.69 秒	0.13 秒	3.42 秒	3.83 秒
高解像度→低解像度	4.08 秒	1.11 秒	3.50 秒	7.24 秒



図 6.2-1 低解像度(VGA)の結果

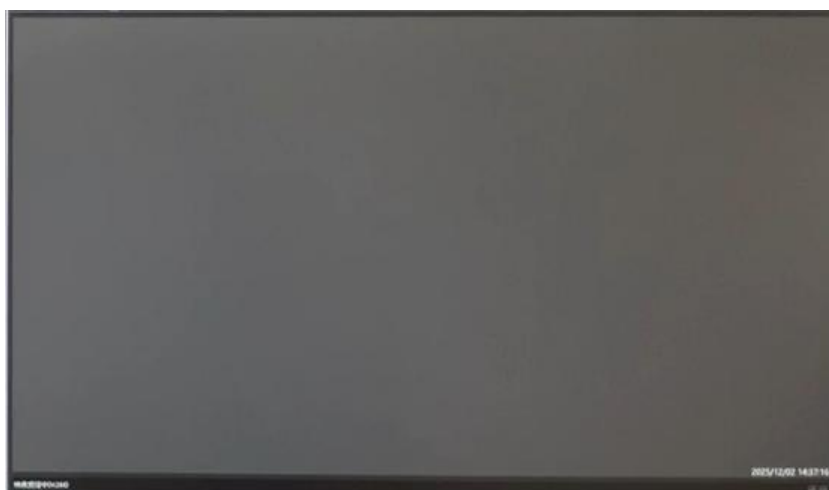


図 6.2-2 低解像度(VGA)から高解像度(FHD)に切り替わる時



図 6.2-3 高解像度(FHD)の結果

以下に低解像度(FHD)、高解像度(FHD)のときの結果を示す。

表 6.2-3 低解像度(FHD)、高解像度(FHD)のときの切り替え時間

回数	低解像度→高解像度 切り替え時間	回数	高解像度→低解像度 切り替え時間
1回目	3.17 秒	1回目	2.44 秒
2回目	2.36 秒	2回目	2.43 秒
3回目	2.52 秒	3回目	5.64 秒
4回目	2.33 秒	4回目	2.56 秒
5回目	2.56 秒	5回目	5.43 秒
6回目	2.40 秒	6回目	2.72 秒
7回目	2.85 秒	7回目	2.69 秒
8回目	2.56 秒	8回目	2.69 秒
9回目	2.72 秒	9回目	3.31 秒
10回目	2.72 秒	10回目	2.42 秒

表 6.2-4 切り替え時間まとめ

切り替え方向	平均切り替え時間	標準偏差	最小時間	最大時間
低解像度→高解像度	2.62 秒	0.22 秒	2.33 秒	3.17 秒
高解像度→低解像度	3.23 秒	1.16 秒	2.42 秒	5.64 秒



図 6.2-4 低解像度(FHD)の結果



図 6.2-5 高解像度(FHD)の結果

本検証では、VGA と FHD の解像度変更を伴うパターン①(平均 3.69 秒)と、FHD 解像度を維持しながらビットレートのみを変更するパターン②(平均 2.62 秒)の 2 つの実装方式を比較評価した。両パターンともに、エッジ AI が移動体を検知した際に、低解像度時のスループット(約 1Mbps)から高解像度時のスループット(約 8Mbps)へ正常に変化することを確認できた。ただし、解像度切り替え時の動作については、低解像度(VGA)⇄高解像度(FHD)への変更する際、図 6.2-2 のように解像度切り替えに伴い、映像が切断される結果となった。低解像度(FHD)⇄高解像度(FHD)への変更では、解像度が切り替わらないため図 6.2-4、図 6.2-5 のように映像の切断は発生しなかったが、切り替え中に映像が一時停止することがあった。これは、パターン②がカメラの解像度設定変更に伴う映像の再取得が不要であったため、パターン①に比べて約 29%(1.07 秒)の切り替え時間短縮したと考えられる。

また本検証における主観評価の結果、低解像度と高解像度の両方において、移動体の特定および作業エリアの全体状況把握が可能な画質であることを確認した。ただし、両解像度には以下のような特性の違いが存在する。

低解像度では、移動体の存在の検知・特定、作業エリア全体の状況把握、人や物体の有無の識別など、通常の監視業務における基本的な視認性が確保されている。一方、高解像度では、侵入者の詳細な識別(顔の特徴など)、細かい動作や作業内容の確認、小さな対象物の詳細な確認など、より鮮明な映像による正確な状況判断が可能となる。

本検証の目的である「侵入禁止エリアへの移動体検知」においては、低解像度でも移動体の特定と全体状況把握が十分に可能であり、通常監視には実用上問題ないレベルの画質が確保されている。高解像度は、異常検知時の詳細確認、すなわち侵入者の特定や状況の正確な把握が必要な場面で使用することを想定している。この使い分けにより、約 80%の通信量削減を達成しながら、製造現場の安全管理業務に必要な視認性を確保することが可能となった。

以上の結果から、低解像度から高解像度へ切り替える時間は①約 2.6 秒(FHD(1Mbps)から FHD(8Mbps))～②約 3.7 秒(VGA(1Mbps)から FHD(8Mbps))であり、より高速な応答が可能で映像の切断も発生しない FHD 解像度を維持した方式で実施することが適切であると判断できる。

3) 検知エリア最適化による通信効率向上検証

1)AI によるデータ伝送量の低減検証にて、低解像度から高解像度へ切り替える時間は①約 2.6 秒 (FHD(1Mbps)から FHD(8Mbps))～②約 3.7 秒(VGA(1Mbps)から FHD(8Mbps))ということがわかった。本実証では、この結果をもとに外側の検知エリアの距離の机上検討を行った。

人の歩行速度(約 80m/分(1.33m/s))を基準とした場合、必要な検知距離は以下の通りである。

①: $2.6 \text{ 秒} \times 1.33 \text{ m/s} = 3.46 \text{ m}$

②: $3.7 \text{ 秒} \times 1.33 \text{ m/s} = 4.92 \text{ m}$

よって移動体が内側エリアに到達する前に高解像度へ切り替え完了させるためには、内側から全方向に 4～5m 拡張する必要があることがわかった。

この机上検討結果をもとに協創ラボにて模擬環境を構築した。以下に構築した模擬環境について示す。内側検知エリアについて台形状にした理由は、机が一部斜めに設置されているため、机の配置に合わせた実際の歩行可能範囲を効率的にカバーできるようにした。また縦 4.8m を設定した理由としては、1)の結果を踏まえ、作業者がギリギリ検知できる実用的な距離として設定した。

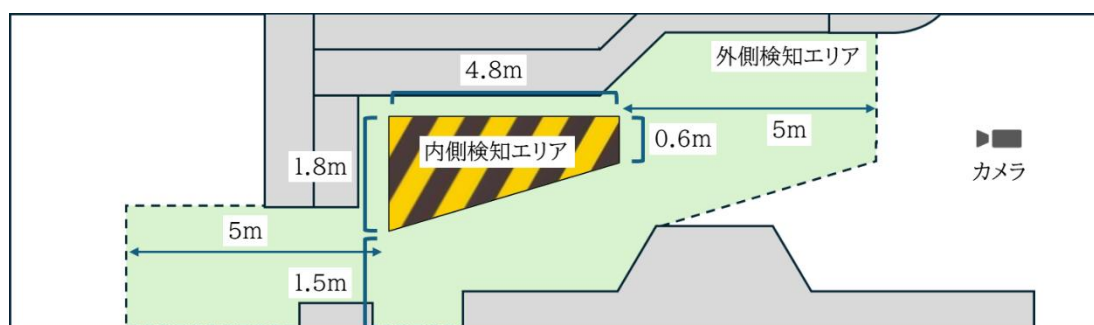


図 6.2-6 外側検知エリアをそれぞれ 5m に設定

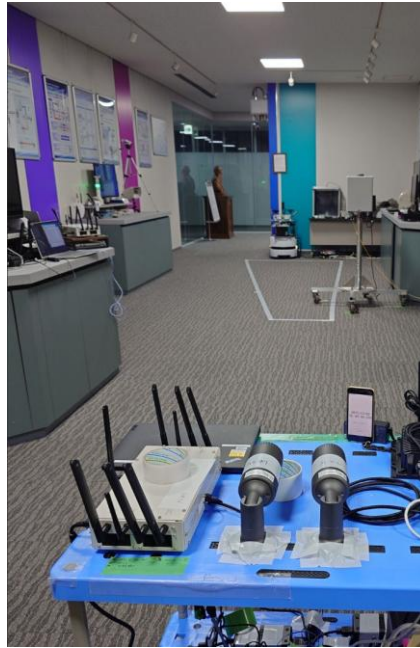


図 6.2-7 内側検知エリア

図 6.2-6 に示す通り、外側検知エリアを 5m 拡張することで、あらゆる方向からの侵入に対して解像度切り替え時間を確保できる構成となっている。内側検知エリアは 1.8m×4.8m とした。床面には白色テープで内側エリア、青色テープで外側エリアを明示し、検知精度の目視確認を可能とした。

構築した模擬環境において予備的な動作確認を実施したところ、協創ラボの通路幅は約 3.3m と限定的であり、全方向に 5m 拡張した外側エリアは通路のほぼ全域をカバーする結果となった。この構成では、内側の侵入禁止エリアとは無関係に通路を通行する社員のほぼ全員が外側エリアを通過することとなり、誤検知が多発することが予想された。特に、内側エリアに平行して通路を横断する動線が頻繁に発生するラボ環境の特性上、本来検知すべき正規侵入と区別できない状態であった。このため、ラボ環境の制約下においても有効に機能する検知エリア設定の再検討が必要と判断された。

上記課題への対策として、外側エリアを方向限定で拡張した。これは、全方向一律に外側エリアを拡張するのではなく、主要な侵入経路となる特定方向にのみ外側エリアを設定する検証である。これは協創ラボ環境の通行パターンを確認したところ、内側エリアに平行して通路を横断する社員が多く、また狭い通路環境においても、方向を限定することで通路全体をカバーすることなく、必要な検知性能を確保できると考え、設定した。

外側エリアを方向限定で拡張するパターンとして、以下 2 パターンを設定した。

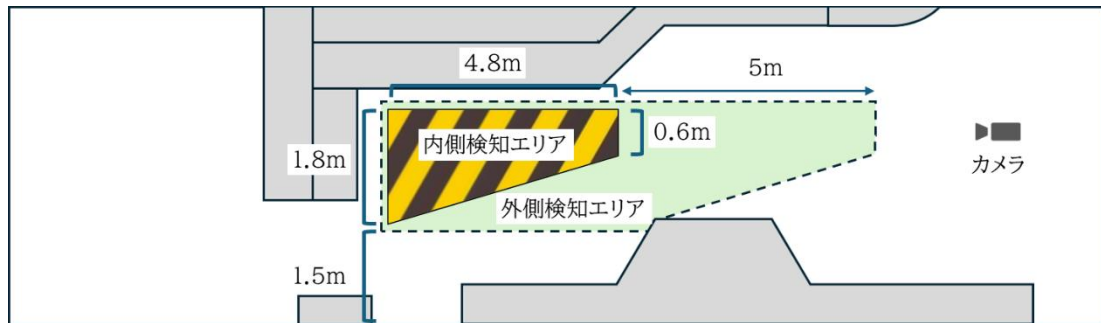


図 6.2-8 特定方向限定で外側検知エリアを設定(前方 5m)

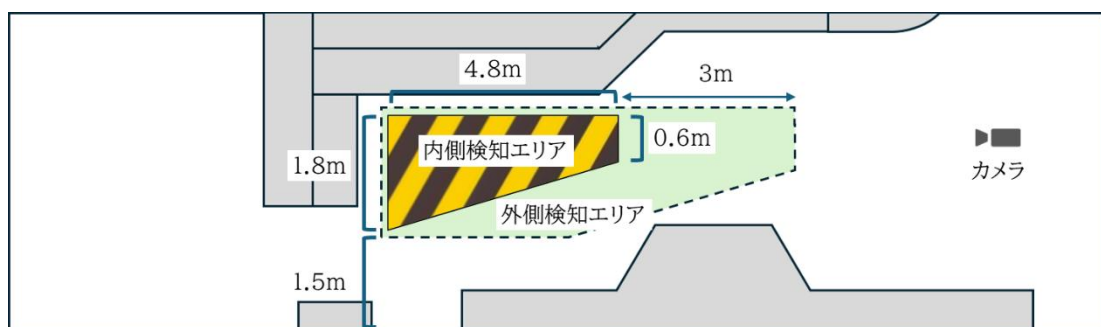


図 6.2-9 特定方向限定で外側検知エリアを設定(前方 3m)

前方 5m に方向に外側検知エリアを設定したパターンでは、前方から来た侵入者に対しては、解像度切り替え時間を確保できる構成となっている。また内側エリアに平行して通路を横断する動線については検知しないようにしている。前方 3m に方向に外側検知エリアを設定したパターンでは、机上検討で算出した必要最低距離以下となっているが、誤検知を最小限に抑えつつ、理論上は切り替えに成功する最小限の構成となっている。一方で、移動速度の変動や斜め侵入などの想定外の状況に対する余裕が少ないため、実用性の観点からリスクが存在している構成である。

この 3 パターン(設定①:全方向 5m、設定②:前方 5m、設定③:前方 3m)による比較検証を実施することで、環境制約下での最適なエリア設定を明らかにすることとした。

協創ラボの通行回数は1日に約100回程度のため、測定は、通行回数100回を指標として行った。以下に測定結果を示す。

表 6.2-5 通行回数100回検知結果まとめ

項目	従来方式 常時 8Mbps	内側エリア のみ	設定① 全方向 5m	設定② 前方 5m	設定③ 前方 3m
切り替え 成功率	-	60%	100%	100%	100%
検知回数	-	5回	92回	34回	31回
正規侵入 検知	-	5回 (30分12秒)	5回 (30分12秒)	5回 (30分12秒)	5回 (30分12秒)
誤検知	-	-	87回 (22分12秒)	29回 (8分52秒)	26回 (8分2秒)
高解像度 稼働時間	8時間		55分16秒	38分56秒	38分6秒
高解像度 稼働率	100%		11.5%	8.1%	7.9%
通信量	225GB		約 50.8GB	約 44.1GB	約 43.7GB
削減率	-		約 77.4%	約 80.4%	約 80.5%

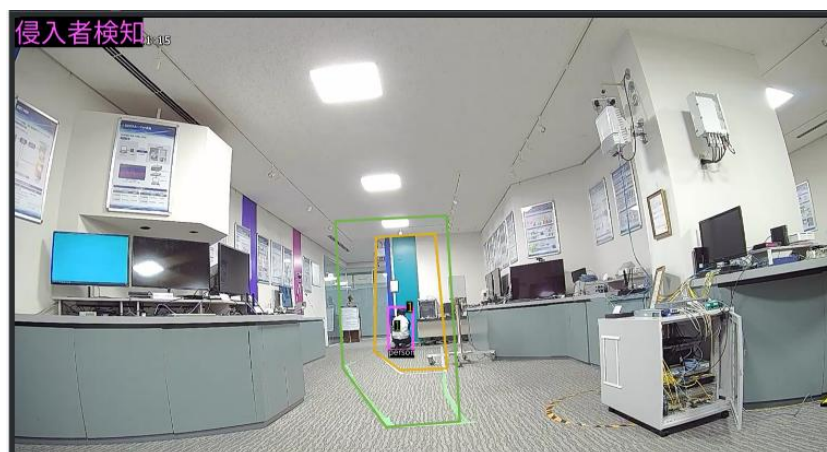


図 6.2-10 検知時の結果



図 6.2-11 非検知時の結果

内側エリアのみ設定した場合の切り替え成功率は、5 回中、2 回解像度切り替え中に移動体が内側エリアから出てしまったので、60%という結果となった。一方設定①、設定②、設定③ともに、外側エリアを設けることで、解像度切り替え中に社員が検知枠から通過する前に切り替わることが分かり、切り替え成功率は100%となった。

内側エリアへ実際に侵入した回数として、機器の調整作業 2 回(各 15 分滞在)、前方からの通過 3 回(平均 4 秒)の合計 5 回であった。

各設定の誤検知の回数は以下の通りである。

設定① 機器の調整作業:1 回(5 分滞在)、内側エリアに平行して通路を横断:86 回(平均 12 秒)

設定② 内側エリアに平行して通路を横断:29 回(平均 8 秒)

設定③ 内側エリアに平行して通路を横断:26 回(7 秒)

設定①では、通路を通行する社員の大半である 92%(92 回/100 回)が外側エリアで検知され、そのうち誤検知率は約 95% (87 回/92 回)であった。設定②では、前方のみ外側エリアを構築することにより、検知回数が 34%(34 回/100 回)と劇的に減少し、また誤検知率は約 85%(29 回/34 回)となった。設定③では、設定②より外側エリアが狭いため、検知回数が 31%(31 回/100 回)、誤検知率は約 84%(26 回/31 回)となった。

上記結果から高解像度稼働時間。高解像度稼働率の算出を行った。結果は以下の通りである。

※高解像度稼働率は8時間を 100%とした。

設定①:55 分 16 秒(11.5%)

設定②:38 分56秒(8.1%)

設定③:38 分6秒(7.9%)

またそれぞれの通信量および削減率の算出を行った。結果は以下の通りである。

設定①

通信量:約 50.8GB

$(8\text{Mbps} \times 8 \text{時間} \times 11.5\% + 1\text{Mbps} \times 8 \text{時間} \times 88.5\%) \times 3600 \div 1024$

削減率:約 77.4% (50.8GB/225GB)

設定②

通信量:約 44.1GB

$(8\text{Mbps} \times 8 \text{時間} \times 8.1\% + 1\text{Mbps} \times 8 \text{時間} \times 91.9\%) \times 3600 \div 1024$

削減率:約 80.4% (44.1GB/225GB)

設定③

通信量:約 43.7GB

$(8\text{Mbps} \times 8 \text{時間} \times 7.9\% + 1\text{Mbps} \times 8 \text{時間} \times 92.1\%) \times 3600 \div 1024$

削減率:約 80.5% (43.7GB/225GB)

通信量削減効果については、全ての設定において目標とする 30%削減を大幅に上回る結果となった。設定①では 77.4%の削減率を達成し、全方向からの侵入に対応できる標準設定としては十分な性能を示した。設定②では 80.4%の削減率を達成し、設定①から更に 3.0 ポイントの改善を実現した。設定③では最高の 80.5%削減率を記録したが、設定②との差はわずか 0.1 ポイントに過ぎない。高解像度稼働率で見ると、従来方式の 100%に対し、設定①は 11.5%、設定②は 8.1%、設定③は 7.9%と大幅に低減されており、無線リソースの効率化に大きく貢献することが確認された。

本検証結果から内側エリアのみの設定だと切り替え成功率 60%に留まっていたのに対し、外側検知エリアを設けることで、全ての設定において切り替え成功率 100%を達成した。この結果は解像度切り替え中に移動体が検知エリア外に到達する前に高解像度への移行が完了できていることを示している。これは、机上検討で算出した必要距離の設計値が妥当であったことを示している。

3 つの設定の比較においては、誤検知率の観点から設定②および設定③が設定①よりも優れていることが明らかとなった。設定①では通路を通行する社員の大半が検知され、誤検知率が約 95%と極めて高かったのに対し、方向限定型の設定②、③では検知回数そのものが大幅に減少した。これは、協創ラボのような狭い通路環境において、横断通行による誤検知が主要な問題であり、前方のみに外側エリアを限定することでこれを効果的に抑制できることを示している。一方、設定②と設定③の通信量削減率の差はわずか 0.1 ポイントであり、実質的な性能差は極めて小さい。設定③は机上検討で算出した必要最小距離を下回る構成であるため、今回の検証では切り替え成功率 100%を達成したものの、移動速度の変動や直線的な侵入パターンが発生した場合には切り替え失敗のリスクが存在する。削減率の

わずかな向上のために安全マージンを犠牲にすることは実用上適切でないと判断され、十分な余裕を持つ設定②が最適な選択であるといえる。設定②は、誤検知の大幅な削減と高い信頼性を両立しており、実運用において最もバランスの取れた構成であると評価できる。

以上により、二段階検知エリア方式は、環境制約下においても高い通信量削減効果と完全な切り替え成功率を両立できる実用的な技術であることが検証された。特に、方向を限定した検知エリアは、狭い環境における誤検知削減の有効な手段として、今後の展開において重要な設計手法となることが示された。設定②は 80.4%の削減率を達成し、目標 30%の 2.7 倍の性能を確認したことで、無線リソースの効率化に大きく貢献できることが実証された。

6.2.3 KPI/KGI との比較結果

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定性評価	1	配信されたカメラ映像が、運用で実用可能な画質であること
定量評価	2	AI 適用前後を比較し、AI によるデータ伝送量 30%以上削減できること

1) 配信されたカメラ映像が、運用で実用可能な画質であること

「AI によるデータ伝送量の低減検証」における映像品質の主観評価において、低解像度(1Mbps)、高解像度(8Mbps)ともに移動体の特定および作業エリアの全体状況把握が可能な画質であることを確認できた。これにより、製造現場の安全管理業務に必要な視認性が確保され、運用上実用可能な画質であることが実証されたと考えられる。

2) AI 適用前後を比較し、AI によるデータ伝送量 30%以上削減できること

「検知エリア最適化による通信効率向上検証」において、3 つの検知エリア設定パターンで通信量削減効果を測定した結果、全ての設定において目標の 30%削減を大幅に上回る削減率を達成した。

削減効果については以下の通りであった。

表 6.2-6 通信システム及び AI システムの構築・運用に要した費用

設定パターン	高解像度稼働率	通信量	削減率	目標達成
従来方式	100%	225GB	-	-
設定①	11.5%	約 50.8GB	約 77.4%	約 2.6 倍
設定②	8.1%	約 44.1GB	約 80.4%	約 2.7 倍
設定③	7.9%	約 43.7GB	約 80.5%	約 2.7 倍

従来の常時高解像度伝送では 8 時間で 225GB の通信量が発生するのに対し、各設定では約 44GB から 51GB 程度まで削減可能であることがわかった。この結果は無線リソースの効率化に極めて大きな貢献をもたらすと考えられ、ローカル 5G 環境において、映像伝送が占有する帯域を約 80%削減できることで、同一ネットワーク上で稼働する他のアプリケーション(AGV 制御、センサーデータ収集等)に十分なリソースを配分が期待できると考えられる。

6.2.4 考察

本実証では、エッジ AI による移動体検知と連動した動的映像品質制御により、製造現場における通信量の大幅削減と実用的な映像品質の両立を実証した。特に、目標値 30%削減に対して約 77.4%～80.5%という目標の 2.6～2.7 倍の削減効果を達成したことは、限られた無線リソースの効率的活用という観点から、産業分野における通信インフラの課題解決に大きく貢献する成果といえる。

社会実装に向けた活用見通しとして、本技術は製造業のみならず、インフラ監視といった、複数の監視カメラが常時稼働する環境において即座に展開可能であると考えられる。検証で確立した二段階検知エリア方式は、環境制約下でも高い削減効果と 100%の切り替え成功率を両立できる実用的な設計手法であり、特に方向限定型の設定②(前方 5m)は、誤検知の大幅削減と信頼性を両立した最適構成として、今後の展開における標準モデルとなることが期待される。また、本技術はカメラの機種に依存せず、既存の監視システムにエッジ AI 装置を追加するだけで導入可能であるため、新規設備投資を最小限に抑えた段階的な展開が可能である。

他の通信手段との比較において、従来の常時高解像度伝送では 8 時間で 225GB の通信量が発生するのに対し、本システムでは約 44GB まで削減可能であり、ローカル 5G 環境において映像伝送が占有する帯域を約 80%削減できることが確認できた。これにより、同一ネットワーク上で稼働する他のアプリケーションに十分なりソースを配分できるため、単一ネットワークでの多用途運用も実現できる。また、常時低解像度伝送といった単純な帯域削減手法と比較して、本技術は異常検知時のみ高解像度化することで、安全管理に必要な詳細確認と通信効率化を両立している。

国内市場の拡大および地域社会・産業の課題解決への貢献として、本技術は複数の側面から社会的価値を創出できると考えられる。第一に、製造業や物流業における DX 推進の加速が期待される。通信帯域の制約により複数カメラの同時運用が困難であった中小規模の製造拠点においても、本技術の導入により既存のローカル 5G インフラで十分な台数の監視カメラを運用可能となり、AI 異常検知や遠隔監視などの高度な安全管理システムの普及が促進されることが考えられる。第二に、通信コストの削減効果により、特に地方の製造拠点や中小企業における通信インフラ整備の経済的ハードルが低下する。設定②では高解像度稼働率を 8.1%に抑制できるため、通信費用の大幅削減が可能となり、限られた予算の中でも安全性と効率性を両立した製造環境の構築が実現できると考えられる。

本システムにおける低解像度と高解像度の使い分けの意義について補足する。低解像度では、移動体の存在検知、作業エリア全体の状況把握、人や物体の有無の識別といった通常監視に必要な基本的な視認性が確保されている。一方、高解像度でなければ実現できない重要な機能として、侵入者の詳細な識別(顔の特徴など)、細かい動作や作業内容の正確な確認、小さな対象物や異常箇所の詳細な把握が挙げられる。これらは、侵入禁止エリアへの侵入が発生した際の責任者の特定や、事後的な原因分析、安全対策の立案において不可欠な情報となる。

特に製造現場においては、安全管理上の事故や異常が発生した際に、「誰が」「どのような行動を取ったか」「どのような状況であったか」を正確に記録・確認できることが極めて重要である。低解像度では移動体の存在は確認できるものの、個人の特定や詳細な状況判断には限界がある。本システムは、平常時は低解像度で通信負荷を最小限に抑えながら、異常検知時には自動的に高解像度に切り替えることで、通信効率化と詳細記録の両立を実現している。この仕組みにより、約 80%の通信量削減を達成しながらも、安全管理上必要な詳細情報を確実に取得できるため、製造現場における実用的なソリューションとして機能すると考えられる。

類似技術との比較における本技術の先進性・新規性は、エッジ AI 検知機能と通信帯域制御の統合

にある。既存のエッジ AI 技術は、設定したエリアへの移動体侵入を検知する機能を有しているが、検知結果を通信制御に連携させる仕組みは確立されていなかった。本実証で新規に開発した統合制御アルゴリズムは、AI 検知結果に応じた通信帯域の動的変更を実現し、検知から解像度変更までをシームレスに実行することができる。また、二段階検知エリア方式により、切り替え時間中の移動体フレームアウトを防止しながら、誤検知を最小限に抑える最適化を実現することができた。この方式は、従来の単一検知エリア方式では達成困難であった、高い信頼性と効率性の両立を可能にしている。

複数の実装方式を比較検討した結果、解像度変更方式については、VGA⇔FHD の切り替え(パターン①)よりも、FHD 解像度を維持しながらビットレートのみを変更する方式(パターン②)が、切り替え時間を約 29%短縮し、かつ映像の切断を回避できるため実用上優れていることがわかった。検知エリア設定については、全方向 5m 拡張(設定①)は切り替え成功率 100%を達成するものの誤検知率 95%と実用性に課題があり、前方のみ 5m 拡張(設定②)は誤検知率を 85%まで低減しつつ 80.4%の削減率を維持できるため、最適なバランスを実現することができた。前方 3m 拡張(設定③)は削減率 80.5%と最高値を示しているが、設定②との差はわずか 0.1 ポイントであり、理論上の必要最小距離を下回る構成であるため安全マージンが不足している。これらの検証結果から、実運用においてはパターン②の解像度維持型切り替えと、設定②の方向限定型検知エリアの組み合わせが、信頼性・効率性・実用性の観点から最も優れた構成であると結論づけられる。

本実証の導入効果は、通信量を約 80%削減可能であり、8 時間稼働で 225GB の通信量を約 44GB まで圧縮できる。これは、従来 3~4 台のカメラで帯域を占有していた環境において、15~17 台程度のカメラを同一ネットワークで運用可能となることを意味する。解像度切り替え時間は平均 2.6 秒であり、人の歩行速度(約 1.33m/s)を考慮すると、検知エリアを本来の侵入禁止エリアより前方 5m 拡張することで、切り替え中のフレームアウトを防止できる。ただし、狭い通路環境など物理的制約がある場合は、主要な侵入方向のみに検知エリアを限定することで、誤検知を削減しつつ同等の削減効果を維持することができる。システム導入の初期コストとしては、エッジ AI 装置および制御システムの追加が必要だが、既存のカメラやネットワーク機器をそのまま活用できるため、大規模な設備更新は不要と考えられる。また、専門技術者による複雑な設定作業は最小限であり、検知エリアの位置と範囲を現場の状況に応じて設定するのみで運用が可能である。これらの定量的データと具体的な設計指針により、導入検討段階における技術的判断が可能となり、製造業をはじめとする様々な産業分野への本技術の普及が促進されることが期待される。

6.3 ユースケース②:山間部や海中等の携帯電話網不感地域における通信の確立

当該ユースケースは実施しなかった。

6.4 ユースケース③:多種多様なデバイスに対する通信リソースの最適化

6.4.1 実証スケジュール

ユースケース	フェーズ	2025年									2026年			
		5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月			
③	実証準備 (事前計測、物品調達等)		機器調達											
				環境構築		異常検知AI構築 通信制御AI構築 (ルールベース)		異常検知AI構築 (機械学習)						
	実証					現地実証 (協創ラボ)								
	実証評価											視察会 ▲ 報告書 初版作成		

6.4.2 開発・評価項目の結果

番号	開発・評価項目
	開発した異常検知 AI、通信制御 AI
1	構築した NW 環境の基本性能測定
2	各アプリケーションのデータ測定
3	無線リソース共有環境のデータ測定
4	1 端末における通信経路切替検証
5	多接続検証
6	QoS 検証
7	総合的なサービスレベル指標維持

1) 開発した異常検知 AI、通信制御 AI

本実証では、異常検知 AI と通信制御 AI の 2 つの AI モデルを開発した。各 AI モデルについて、ルールベースと機械学習の両方を開発し、段階的なアプローチによる実証を実施した。

異常検知 AI は、ルールベースではしきい値に基づく通信状態評価を実現し、機械学習方式では時系列データ分析により 1 秒後の通信状態を 4 クラスに分類し各クラスの発生確率を推定した。勾配ブースティング系アルゴリズムを使用し、Macro-F1 による評価を実施した結果、表 4.1-10 各モデルの Macro-F1 値に示すとおり高い精度を達成した。通信制御 AI は、ルールベースで異常検知結果に基づく制御判断を実現し、機械学習では模倣学習により最適な通信回線選択と QoS 制御を実現した。LightGBM を用いた分類モデル・回帰モデルを構築し、表 4.1-17 および表 4.1-18 に示すとおり、各通信環境において高い精度を達成した。これら 2 つの AI の連携により、通信品質劣化の予測的検知と自律的な通信制御を実現し、製造現場における安定した通信環境の維持を可能とした。

2) 構築した NW 環境の基本性能測定

以下に測定地点ごとに無線機器からの見通し状況(LOS/NLOS)を示す。

表 6.4-1 測定点・通信方式別 LOS/NLOS 状況一覧

測定地点	エリア	ローカル 5G	Wi-Fi AP1	Wi-Fi AP2	公衆網
1	ショールーム外 通路	LOS	NLOS	NLOS	NLOS
2		NLOS	NLOS	NLOS	NLOS
3		NLOS	NLOS	NLOS	NLOS
4		NLOS	NLOS	NLOS	NLOS
5	エントランス ホール	NLOS	NLOS	NLOS	NLOS
6		NLOS	NLOS	NLOS	NLOS
7		NLOS	NLOS	NLOS	NLOS
8		NLOS	NLOS	NLOS	NLOS
9	ショールーム内	NLOS	NLOS	NLOS	NLOS
10		LOS	NLOS	NLOS	NLOS
11		LOS	NLOS	NLOS	NLOS
12		NLOS	NLOS	NLOS	NLOS
13		NLOS	NLOS	NLOS	NLOS
14	会議室	NLOS	NLOS	LOS	NLOS

公衆網は、屋外の基地局を参照点としているため、全ポイントが NLOS 環境となった。また Wi-Fi AP2 についても、エントランスホールエリアのカウンターテーブル内に設置したため、全測定地点で NLOS 環境となった。

各測定地点にて、受信電界強度、ネットワーク性能(UL スループット、パケットロス率、遅延時間)の測定を行った。以下にローカル 5G の測定結果を示す。

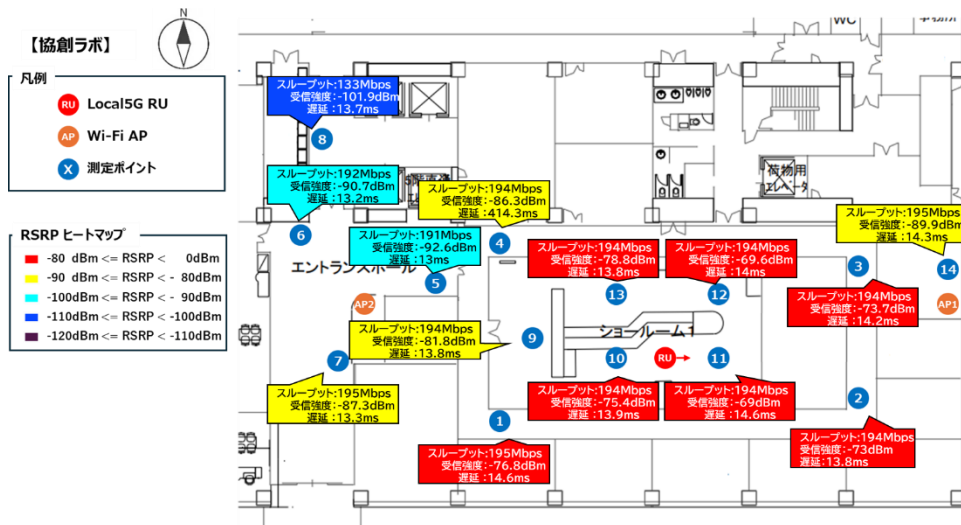


図 6.4-1 ローカル 5G 使用時の各ポイントの測定結果

表 6.4-2 ローカル 5G 使用時の各ポイントの測定結果

測定地点	受信電界強度 [dBm]	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	遅延時間 [ms]
1	-76.8	195	3	14.6
2	-73.0	194	3	13.8
3	-73.7	194	3	14.2
4	-86.3	194	3	14.3
5	-92.6	194	4	13.1
6	-90.7	192	3	13.2
7	-87.3	195	3	13.3
8	-101.9	133	34	13.7
9	-81.8	194	3	13.8
10	-75.4	194	3	13.9
11	-69.0	194	3	14.6
12	-69.6	194	3	14.1
13	-78.6	194	3	13.7
14	-69.9	195	3	14.3

上記の結果から、本実証環境におけるローカル 5G は、RSRP が-90dBm 程度の測定地点ではスループットは約 190~200Mbps となる一方、RSRP が-100dBm 以下の測定地点においては受信電界強度の低下に伴いスループット性能が 30%程度劣化することを確認できた。

次に Wi-Fi AP1 を使用した各測定地点にて、受信電界強度、ネットワーク性能(UL スループット、パケットロス率、遅延時間)の測定結果を示す。

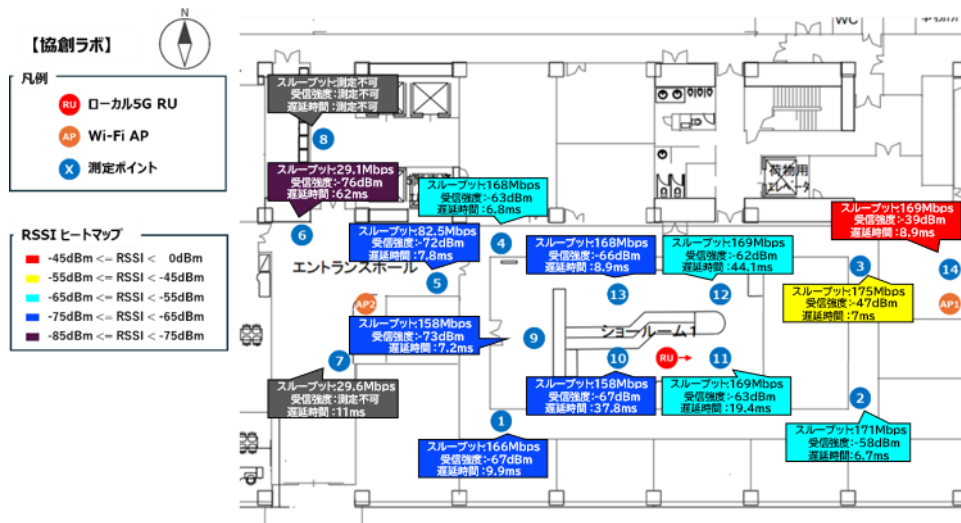


図 6.4-2 Wi-Fi 1 使用時の各ポイントの測定結果

表 6.4-3 Wi-Fi 1 使用時の各ポイントの測定結果

測定地点	受信電界強度 [dBm]	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	遅延時間 [ms]
1	-67.0	166.0	2	9.9
2	-58.0	171.0	3	6.7
3	-47.0	175.0	2	7.0
4	-63.0	168.0	1	6.8
5	-72.0	82.5	24	7.8
6	-76.0	29.1	51	62.0
7	測定不可	29.6	39	11.0
8	測定不可	測定不可	測定不可	測定不可
9	-73.0	158.0	1	7.2
10	-67.0	158.0	1	37.8
11	-63.0	169.0	1	19.4
12	-62.0	169.0	2	44.1
13	-66.0	168.0	1	8.9
14	-39.0	169.0	1	8.9

次に Wi-Fi AP2 を使用した各測定地点にて、受信電界強度、ネットワーク性能(UL スループット、パケットロス率、遅延時間)の測定結果を示す。

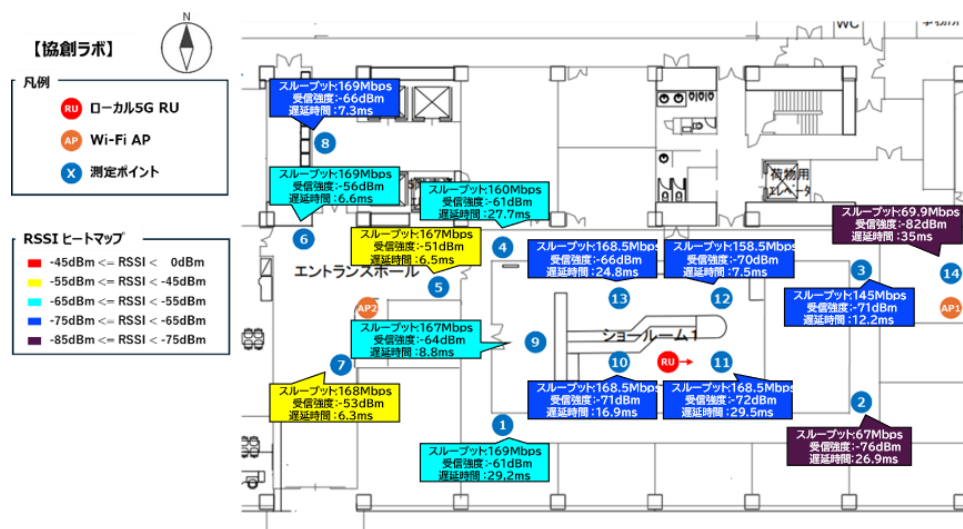


図 6.4-3 Wi-Fi 2 使用時の各ポイントの測定結果

表 6.4-4 Wi-Fi 2 使用時の各ポイントの測定結果

測定地点	受信電界強度 [dBm]	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	遅延時間 [ms]
1	-61.0	169.0	1	29.2
2	-76.0	67.0	33	26.8
3	-71.0	145.5	4	12.2
4	-61.0	160.0	0.1	27.7
5	-51.0	167.5	0.8	6.5
6	-56.0	169.0	0.8	6.6
7	-53.0	168.0	1	6.3
8	-66.0	169.0	1	7.3
9	-64.0	167.0	1	8.8
10	-71.0	168.5	1	16.9
11	-72.0	168.5	1	29.5
12	-70.0	158.5	6	7.5
13	-66.0	168.5	1	24.8
14	-82.0	69.9	0.1	35.0

Wi-Fi AP1 および AP2 は、多くの測定地点において 160Mbps 以上の高スループットを示す結果となった。一方、一部の測定地点ではスループットが約 80Mbps まで低下しており、設置環境や遮蔽物の影響に起因する性能変動が観測された。

最後に公衆網を使用した各測定地点にて、受信電界強度、ネットワーク性能(UL スループット、パケットロス率、遅延時間)の測定結果を示す。

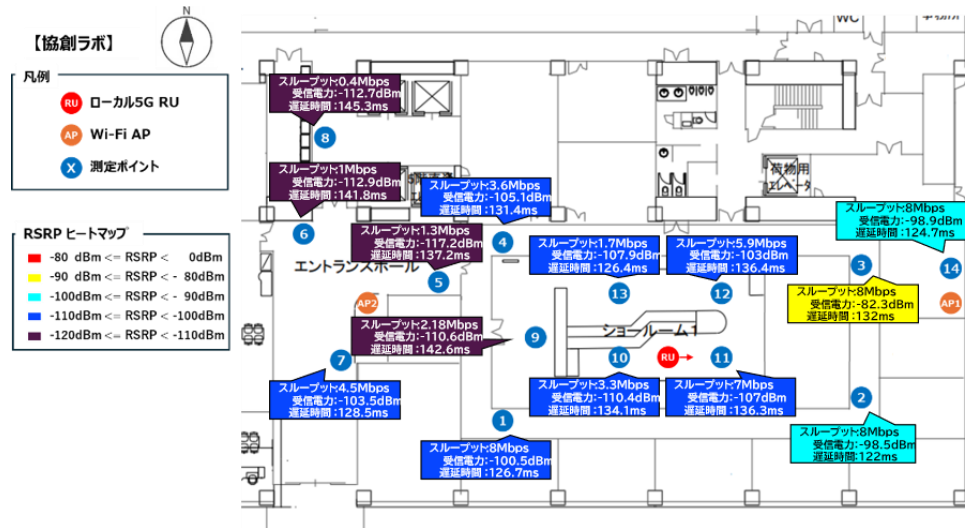


図 6.4-4 公衆網使用時の各ポイントの測定結果

表 6.4-5 公衆網使用時の各ポイントの測定結果

測定地点	受信電界強度 [dBm]	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	遅延時間 [ms]
1	-100.5	8.0	0%	126.7
2	-98.6	8.0	0%	122.0
3	-82.3	8.0	0%	132.0
4	-105.1	3.6	-51%	131.5
5	-117.2	1.3	-79%	137.3
6	-112.9	1.0	0%	141.8
7	-103.5	4.5	-42%	128.5
8	-112.7	0.4	0%	145.3
9	-110.7	2.2	-73%	142.6
10	-110.4	3.3	-60%	134.1
11	-106.9	7.0	-5%	136.3
12	-103.0	5.9	-27%	136.4
13	-107.8	1.7	-79%	126.4
14	-98.9	8.0	0%	124.7

公衆網は受信電界強度が良好な一部の測定地点においてのみ 8Mbps 程度のスループットを確認できたが、多くの測定地点では要件を満たさない結果となった。そのため、アプリケーション要件の安定的な確保は困難であり、全測定地点に対して受信電界強度が良好なポイントは 30%程度に限定されることがわかった。

3) 各アプリケーションのデータ測定

各アプリケーション測定として、AGV カメラ、固定カメラ(通信速度:1Mbps)、固定カメラ(通信速度:8Mbps)それぞれを活用し、各種無線(ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網(LTE))で測定を行った。

また Wi-Fi AP1 は、表 6.4-3 の結果のように測定地点によって、電波環境が悪くアプリケーションが利用できないため、Wi-Fi AP1 は今後使用せず、AP2 のみ実施した。

以下にローカル 5G 活用時の AGV カメラ、固定カメラの各測定ポイントでの測定結果を示す。

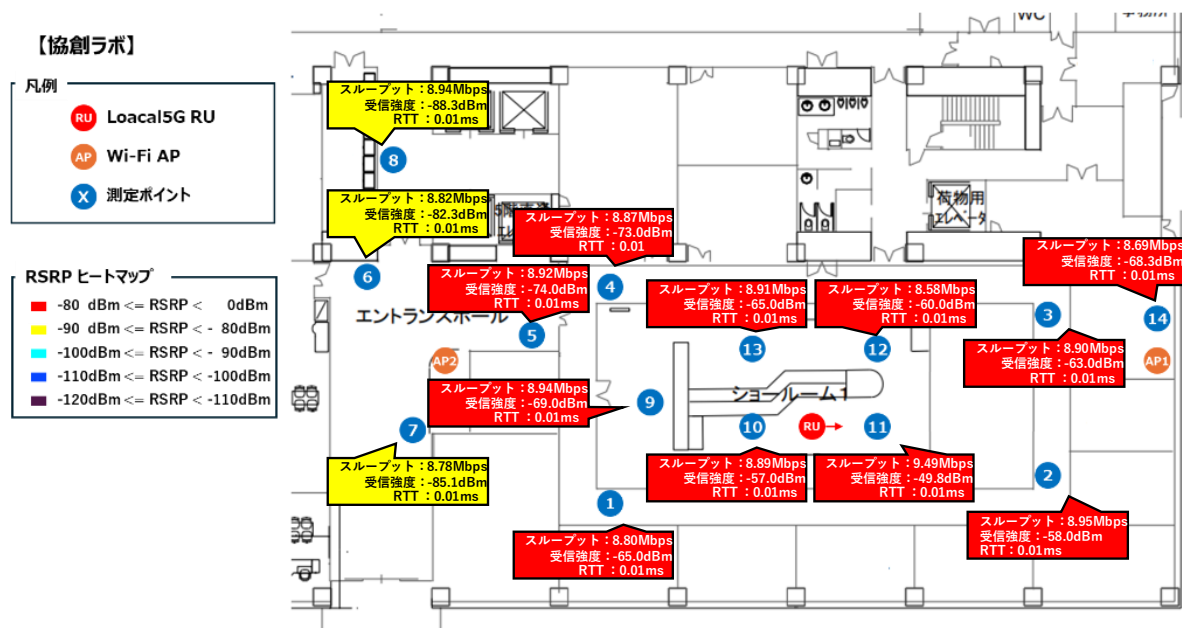


図 6.4-5 AGV カメラ活用時の各測定ポイントでの測定結果(ローカル 5G)

表 6.4-6 AGV カメラ活用時の各測定ポイントでの測定結果(ローカル 5G)

測定地点	映像品質	受信電力 [dBm]	スループット [Mbps]	パケットロス率[%]	遅延時間 [ms]	映像伝送遅延[s]
1	途切れ: なし 乱れ: なし	-65.0	8.80	0.0	12.6	0.96
2	途切れ: なし 乱れ: あり	-58.0	8.95	0.0	13.4	1.11
3	途切れ: なし 乱れ: なし	-63.0	8.90	0.0	13.3	0.98
4	途切れ: なし 乱れ: なし	-73.0	8.97	0.0	12.0	0.93
5	途切れ: なし 乱れ: なし	-74.0	8.92	0.0	12.8	0.99
6	途切れ: なし 乱れ: なし	-82.3	8.82	0.2	12.6	1.04
7	途切れ: なし 乱れ: なし	-85.1	8.78	0.8	13.6	0.96
8	途切れ: なし 乱れ: なし	-88.3	8.94	0.1	12.8	1.05
9	途切れ: なし 乱れ: なし	-69.0	8.96	0.0	13.2	1.04
10	途切れ: なし 乱れ: なし	-57.0	8.89	0.0	13.7	1.40
11	途切れ: なし 乱れ: あり	-49.8	9.49	0.0	11.9	1.26
12	途切れ: なし 乱れ: なし	-60.0	8.58	0.0	12.9	1.05
13	途切れ: なし 乱れ: なし	-65.0	8.91	0.0	13.2	0.97
14	途切れ: なし 乱れ: なし	-68.3	8.69	0.0	13.2	1.01

表 6.4-7 固定カメラ(通信速度:1Mbps)活用時の各測定ポイントでの測定結果(ローカル 5G)

測定地点	映像品質	受信電力 [dBm]	スループット [Mbps]	パケットロス率[%]	遅延時間 [ms]	映像伝送遅延[s]
1	途切れ: なし 乱れ: なし	-65.0	1.1	0.0	12.3	0.46
2	途切れ: なし 乱れ: なし	-58.1	1.0	0.0	12.9	0.45
3	途切れ: なし 乱れ: なし	-63.8	1.1	0.0	12.1	0.45
4	途切れ: なし 乱れ: なし	-61.0	1.0	0.0	13.2	0.45
5	途切れ: なし 乱れ: なし	-78.4	1.1	0.0	11.1	0.46
6	途切れ: なし 乱れ: なし	-80.9	1.0	0.0	12.0	0.44
7	途切れ: なし 乱れ: なし	-82.6	1.1	0.0	12.5	0.44
8	途切れ: なし 乱れ: なし	-88.0	1.1	0.0	12.5	0.44
9	途切れ: なし 乱れ: なし	-66.3	1.1	0.0	11.6	0.45
10	途切れ: なし 乱れ: なし	-54.0	1.0	0.0	13.1	0.44
11	途切れ: なし 乱れ: なし	-45.0	1.2	0.0	12.5	0.44
12	途切れ: なし 乱れ: なし	-58.5	0.6	0.0	12.5	0.43
13	途切れ: なし 乱れ: なし	-63.0	1.1	0.0	13.4	0.44
14	途切れ: なし 乱れ: なし	-68.0	1.1	0.0	12.5	0.44

表 6.4-8 固定カメラ(通信速度:8Mbps)活用時の各測定ポイントでの測定結果(ローカル 5G)

測定地点	映像品質	受信電力 [dBm]	スループット [Mbps]	パケットロス率[%]	遅延時間 [ms]	映像伝送遅延[s]
1	途切れ: なし 乱れ: なし	-61.8	7.9	0.0	14.9	0.44
2	途切れ: なし 乱れ: なし	-61.0	8.0	0.0	14.5	0.46
3	途切れ: なし 乱れ: あり	-68.2	8.0	0.0	13.7	0.45
4	途切れ: なし 乱れ: なし	-71.0	7.9	0.0	13.4	0.46
5	途切れ: なし 乱れ: なし	-79.1	8.3	0.0	14.7	0.46
6	途切れ: なし 乱れ: なし	-81.4	8.1	0.0	16.3	0.45
7	途切れ: なし 乱れ: あり	-80.3	2.1	0.0	11.5	0.44
8	途切れ: なし 乱れ: なし	-93.0	8.0	0.0	14.5	0.54
9	途切れ: なし 乱れ: あり	-66.9	7.9	0.0	13.2	0.47
10	途切れ: なし 乱れ: なし	-58.0	8.0	0.0	14.9	0.45
11	途切れ: なし 乱れ: なし	-48.0	8.5	0.0	14.2	0.46
12	途切れ: なし 乱れ: あり	-61.0	7.8	0.0	13.2	0.51
13	途切れ: なし 乱れ: あり	-66.0	8.0	0.0	14.1	0.47
14	途切れ: なし 乱れ: あり	-61.0	8.0	0.0	12.9	0.48

上記の結果から、本実証環境におけるローカル 5G は、測定ポイント⑤の 1 回目、測定ポイント⑧のすべてにおいてスループットの低下が確認された。また測定ポイント⑤の1,3 回目、測定ポイント⑧のすべてにおいて映像の切断を確認された。

以下に Wi-Fi 活用時の AGV カメラ、固定カメラの各測定ポイントでの測定結果を示す。

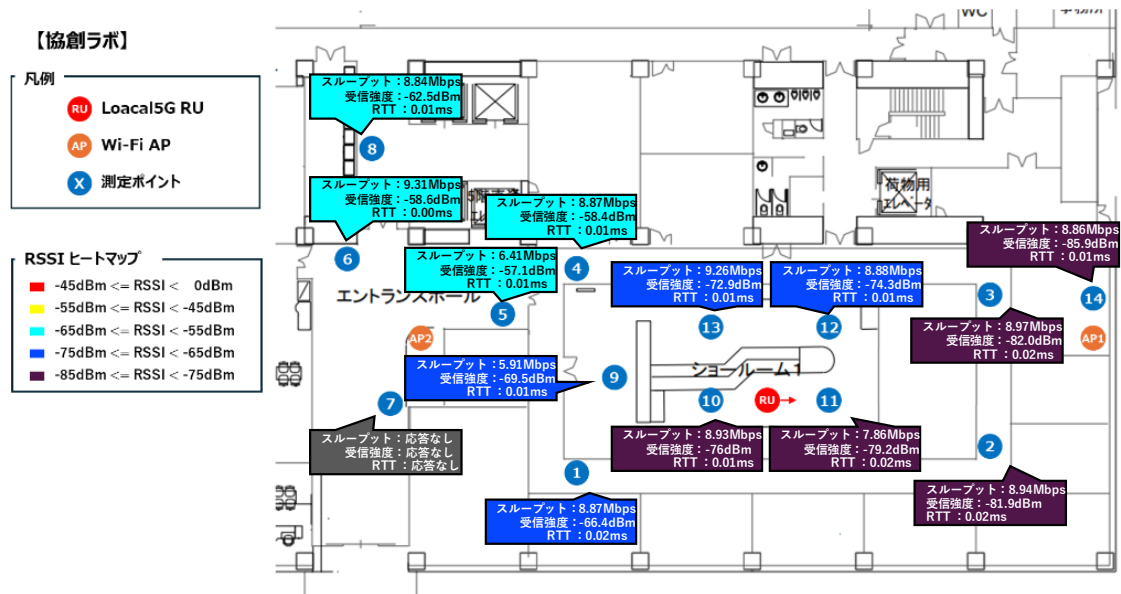


図 6.4-6 AGV カメラ活用時の各測定ポイントでの測定結果(Wi-Fi)

表 6.4-9 AGV カメラ活用時の各測定ポイントでの測定結果(Wi-Fi)

測定地点	映像品質	受信電力 [dBm]	スループット [Mbps]	パケットロス率[%]	遅延時間 [ms]	映像伝送遅延[s]
1	途切れ: なし 乱れ: なし	-66.4	8.9	0.0	15.8	1.81
2	途切れ: なし 乱れ: なし	-81.9	8.9	0.0	20.7	1.89
3	途切れ: なし 乱れ: なし	-82.0	9.0	0.0	19.1	1.96
4	途切れ: なし 乱れ: なし	-58.4	8.9	0.0	5.2	1.84
5	途切れ: なし 乱れ: なし	-57.1	6.4	0.0	5.3	1.78
6	途切れ: なし 乱れ: なし	-58.6	9.3	0.1	6.0	1.75
7	途切れ: なし 乱れ: なし	-59.1	9.2	0.1	4.9	1.48
8	途切れ: なし 乱れ: なし	-62.5	8.8	0.3	5.1	1.90
9	途切れ: なし 乱れ: なし	-69.5	5.9	0.2	5.2	1.06
10	途切れ: なし 乱れ: あり	-76.0	8.9	0.1	6.4	1.53
11	途切れ: なし 乱れ: あり	-79.2	7.9	0.0	5.6	1.37
12	途切れ: なし 乱れ: あり	-74.3	8.9	0.1	5.2	1.35
13	途切れ: なし 乱れ: あり	-72.9	9.3	0.1	5.6	1.56
14	途切れ: なし 乱れ: なし	-85.9	8.9	0.0	10.3	1.82

表 6.4-10 固定カメラ(通信速度:1Mbps)活用時の各測定ポイントでの測定結果(Wi-Fi)

測定地点	映像品質	受信電力 [dBm]	スループット [Mbps]	パケットロス率[%]	遅延時間 [ms]	映像伝送遅延[s]
1	途切れ: なし 乱れ: なし	-66.3	1.1	0.0	4.9	0.43
2	途切れ: なし 乱れ: なし	-83.0	1.1	0.2	5.8	0.63
3	途切れ: なし 乱れ: なし	-82.5	1.0	0.2	5.2	0.57
4	途切れ: なし 乱れ: なし	-61.9	1.0	0.1	5.1	0.55
5	途切れ: なし 乱れ: なし	-54.5	1.0	0.1	5.0	0.53
6	途切れ: なし 乱れ: なし	-52.6	1.1	0.1	5.1	1.25
7	途切れ: なし 乱れ: なし	-54.4	1.0	0.0	5.1	1.87
8	途切れ: なし 乱れ: なし	-57.0	1.1	0.0	5.3	1.61
9	途切れ: なし 乱れ: なし	-66.3	1.1	0.7	5.6	0.59
10	途切れ: なし 乱れ: なし	-72.3	1.0	0.0	5.8	0.45
11	途切れ: なし 乱れ: なし	-76.0	0.7	0.1	14.8	0.49
12	途切れ: なし 乱れ: なし	-72.8	0.8	0.2	5.8	0.46
13	途切れ: なし 乱れ: なし	-68.1	0.4	0.0	5.3	0.91
14	途切れ: なし 乱れ: なし	-85.2	0.5	0.6	6.4	0.49

表 6.4-11 固定カメラ(通信速度:8Mbps)活用時の各測定ポイントでの測定結果(Wi-Fi)

測定地点	映像品質	受信電力 [dBm]	スループット [Mbps]	パケットロス率[%]	遅延時間 [ms]	映像伝送遅延[s]
1	途切れ: なし 乱れ: なし	-67.2	8.0	0.1	4.9	0.69
2	途切れ: なし 乱れ: なし	-83.3	8.0	0.1	5.6	0.63
3	途切れ: なし 乱れ: なし	-83.0	8.0	0.2	5.6	0.58
4	途切れ: なし 乱れ: なし	-62.0	8.0	0.2	6.9	0.64
5	途切れ: なし 乱れ: なし	-53.6	8.1	0.0	5.1	0.56
6	途切れ: なし 乱れ: なし	-53.3	8.0	0.1	5.0	0.57
7	途切れ: なし 乱れ: なし	-55.4	8.1	0.3	5.3	0.53
8	途切れ: なし 乱れ: なし	-62.6	8.1	0.2	5.3	0.56
9	途切れ: なし 乱れ: なし	-67.4	8.0	0.2	17.6	0.54
10	途切れ: なし 乱れ: なし	-73.1	8.1	0.2	13.1	0.58
11	途切れ: なし 乱れ: なし	-76.4	8.6	0.0	5.5	0.47
12	途切れ: なし 乱れ: なし	-75.6	8.3	0.0	16.5	0.47
13	途切れ: なし 乱れ: なし	-69.9	8.0	0.1	5.6	0.60
14	途切れ: なし 乱れ: なし	-86.0	7.9	0.0	13.0	1.60

以下に公衆網活用時の AGV カメラ、固定カメラの各測定ポイントでの測定結果を示す。

表 6.4-12 AGV カメラ活用時の各測定ポイントでの測定結果(公衆網)

測定地点	映像品質	受信電力 [dBm]	スループット [Mbps]	パケットロス率[%]	遅延時間 [ms]	映像伝送遅延[s]
1	測定不可	-	-	-	-	-
2	測定不可	-	-	-	-	-
3	測定不可	-	-	-	-	-
4	測定不可	-	-	-	-	-
5	測定不可	-	-	-	-	-
6	測定不可	-	-	-	-	-
7	測定不可	-	-	-	-	-
8	測定不可	-	-	-	-	-
9	測定不可	-	-	-	-	-
10	測定不可	-	-	-	-	-
11	測定不可	-	-	-	-	-
12	測定不可	-	-	-	-	-
13	測定不可	-	-	-	-	-
14	測定不可	-	-	-	-	-

AGV を活用した場合、どの測定ポイントでも映像伝送することができなかった。

表 6.4-13 固定カメラ(通信速度:1Mbps)活用時の各測定ポイントでの測定結果(公衆網)

測定地点	映像品質	受信電力 [dBm]	スループット [Mbps]	パケットロス率[%]	遅延時間 [ms]	映像伝送遅延[s]
1	途切れ: なし 乱れ: なし	-95	1.1	0	103.4	0.68
2	途切れ: なし 乱れ: なし	-90	1.1	0	107.7	0.66
3	途切れ: なし 乱れ: なし	-90	0.6	0	103.5	1.34
4	途切れ: なし 乱れ: なし	-104	0.7	0	102.3	0.75
5	途切れ: なし 乱れ: なし	-109	1.0	0	419.7	1.37
6	途切れ: なし 乱れ: なし	-104	1.0	0	108.3	0.69
7	途切れ: なし 乱れ: なし	-99	1.1	0	115.0	0.68
8	途切れ: なし 乱れ: なし	-111	1.1	0	291.1	6.78
9	途切れ: なし 乱れ: なし	-100	1.1	0	108.3	5.36
10	途切れ: なし 乱れ: なし	-100	1.0	0	109.8	16.03
11	途切れ: なし 乱れ: なし	-100	0.7	0	95.0	0.67
12	途切れ: なし 乱れ: なし	-100	1.2	0	99.7	0.95
13	途切れ: なし 乱れ: なし	-105	1.0	0	111.9	1.32
14	途切れ: なし 乱れ: なし	-85	1.0	0	106.0	0.59

表 6.4-14 固定カメラ(通信速度:8Mbps)活用時の各測定ポイントでの測定結果(公衆網)

測定地点	映像品質	受信電力 [dBm]	スループット [Mbps]	パケットロス率[%]	遅延時間 [ms]	映像伝送遅延[s]
1	測定不可	-	-	-	-	-
2	途切れ: なし 乱れ: なし	-87	8.0	0.0	136.7	0.88
3	測定不可	-	-	-	-	-
4	測定不可	-	-	-	-	-
5	測定不可	-	-	-	-	-
6	測定不可	-	-	-	-	-
7	途切れ: なし 乱れ: なし	-98	6.5	2.8	543.4	1.76
8	測定不可	-	-	-	-	-
9	測定不可	-	-	-	-	-
10	測定不可	-	-	-	-	-
11	測定不可	-	-	-	-	-
12	測定不可	-	-	-	-	-
13	測定不可	-	-	-	-	-
14	途切れ: なし 乱れ: なし	-85	8.0	0.0	124.1	0.80

4) 無線リソース共有環境のデータ測定

本検証では、AI 技術を導入しない状態で、弱電界エリアにおいて他端末との無線リソース共有が発生した際に、映像が切断・劣化するかを測定した。この測定結果は、後述する多接続検証(AI 導入効果検証)の比較基準となり、従来環境では無線リソース共有により映像品質が劣化するという課題を定量的に記録することを目的としている。

検証は、ローカル 5G 環境および Wi-Fi 環境において実施した。公衆網(LTE)については負荷をかけることができないため、測定対象外とした。

ローカル 5G 環境では、弱電界ポイント(測定ポイント⑤、⑧)において、AGV カメラおよび固定カメラの測定を実施した。以下に結果を示す。

表 6.4-15 ローカル 5G における AGV カメラの測定結果

測定ポイント	映像品質	受信電力 [dBm]	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]
⑤1 回目	切断: あり 途切れ: あり 乱れ: あり	-79.84	6.1	1.3	47.1
⑤2 回目	切断: なし 途切れ: あり 乱れ: あり	-80.00	7.1	18.5	416.8
⑤3 回目	切断: あり 途切れ: あり 乱れ: あり	-79.00	7.0	18.4	473.2
⑧1 回目	切断: あり 途切れ: あり 乱れ: あり	-92.00	7.0	14.5	637.2
⑧2 回目	切断: あり 途切れ: あり 乱れ: あり	-89.00	1.7	31.0	23.77
⑧3 回目	切断: あり 途切れ: あり 乱れ: あり	-88.33	7.3	12.5	831.2

表 6.4-16 ローカル 5G における固定カメラ(通信速度:1Mbps)の測定結果

測定ポイント	映像品質	受信電力 [dBm]	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]
⑤1 回目	切断: なし 途切れ: あり 乱れ: あり	-80.5	1.06	0.0	15.0
⑤2 回目	切断: なし 途切れ: あり 乱れ: あり	-82.1	1.04	0.0	13.4
⑤3 回目	切断: なし 途切れ: あり 乱れ: あり	-79.6	1.05	0.0	12.6
⑧1 回目	切断: なし 途切れ: あり 乱れ: あり	-91.7	1.08	0.0	13.4
⑧2 回目	切断: なし 途切れ: あり 乱れ: あり	-94.0	1.06	0.0	12.6
⑧3 回目	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: あり	-94.0	1.06	0.0	27.9

表 6.4-17 ローカル 5G における固定カメラ(通信速度:8Mbps)の測定結果

測定ポイント	映像品質	受信電力 [dBm]	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]
⑤1 回目	切断: あり 途切れ: あり 乱れ: あり	-82.48	2.71	8.5	49.1
⑤2 回目	切断: なし 途切れ: あり 乱れ: あり	-82.00	7.31	5.0	95.5
⑤3 回目	切断: あり 途切れ: あり 乱れ: あり	-81.00	6.54	10.5	215.9
⑧1 回目	切断: あり 途切れ: あり 乱れ: あり	-93.00	6.13	9.0	110.7
⑧2 回目	切断: あり 途切れ: あり 乱れ: あり	-92.76	2.01	11.7	61.7
⑧3 回目	切断: あり 途切れ: あり 乱れ: あり	-90.61	2.25	18.5	15.4

次に Wi-Fi の測定結果を示す。

表 6.4-18 Wi-Fi における AGV カメラの測定結果

測定ポイント	映像品質	受信電力 [dBm]	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]
②1 回目	切断: あり 途切れ: あり 乱れ: あり	-83.2	0.37	1.8	282.7
②2 回目	切断: あり 途切れ: あり 乱れ: あり	-83.5	1.1	31.5	59.7
②3 回目	切断: あり 途切れ: あり 乱れ: あり	-84.0	0.53	0.7	242.1
①1 回目	切断: あり 途切れ: あり 乱れ: あり	-75.7	2.73	31.2	144.1
①2 回目	切断: なし 途切れ: あり 乱れ: あり	-74.1	8.98	0.0	239.0
①3 回目	切断: なし 途切れ: あり 乱れ: あり	-74.8	8.63	3.4	365.5

表 6.4-19 Wi-Fi における固定カメラ(通信速度:1Mbps)の測定結果

測定ポイント	映像品質	受信電力 [dBm]	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]
②1 回目	切断: あり 途切れ: あり 乱れ: あり	-82.8	0.52	1.4	211.3
②2 回目	切断: なし 途切れ: あり 乱れ: あり	-83.0	1.09	0.3	184.1
②3 回目	切断: なし 途切れ: あり 乱れ: あり	-83.1	1.15	1.2	204.1
①1 回目	切断: あり 途切れ: あり 乱れ: あり	-75.6	0.31	2.0	287.3
①2 回目	切断: あり 途切れ: あり 乱れ: あり	-75.4	0.43	3.5	240.3
①3 回目	切断: あり 途切れ: あり 乱れ: あり	-76.7	0.44	7.0	271.6

表 6.4-20 Wi-Fi における固定カメラ(通信速度:8Mbps)の測定結果

測定ポイント	映像品質	受信電力 [dBm]	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]
②1回目	切断：あり 途切れ：あり 乱れ：あり	-83.36	2.54	3.7	136.0
②2回目	切断：あり 途切れ：あり 乱れ：あり	-83.81	2.26	17.8	156.1
②3回目	切断：あり 途切れ：あり 乱れ：あり	-82.82	1.33	33.2	131.9
①1回目	切断：あり 途切れ：あり 乱れ：あり	-76.00	0.84	2.3	169.8
①2回目	切断：あり 途切れ：あり 乱れ：あり	-75.47	1.98	24.3	128.6
①3回目	切断：あり 途切れ：あり 乱れ：あり	-76.16	0.93	0.8	212.2

無線リソース共有環境のデータ測定により、AI 技術を導入しない従来環境では、複数端末による無線リソース共有が発生した際に、以下の課題が定量的に確認された。

1. 弱電界エリアにおいて、トラフィック負荷の増加に伴いパケットロス率と RTT が大幅に増加し、通信品質が著しく劣化する。これに伴い、映像品質は、映像の切断、途切れ、乱れが頻発し、安定した映像視聴が困難である。
2. 高ビットレートを要求するアプリケーション(8Mbps カメラ)ほど、通信品質劣化の影響を強く受ける
3. ローカル 5G 環境、Wi-Fi 環境の両方で同様の問題が発生する

これらの測定結果は、多接続検証における AI 導入効果を評価するための重要な比較基準となり、AI 技術による通信制御の有効性を実証するための基礎データとして活用される。

5) 1 端末における通信経路切替検証

1 端末における通信経路切替検証として、AGV カメラ、固定カメラ(通信速度:1Mbps)、固定カメラ(通信速度:8Mbps)それぞれを活用し、各種無線(ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網(LTE))の内 2 種の組み合わせで測定を行った。

本検証は機械学習の異常検知 AI とルールベースの通信制御 AI を用いて実施した。

以下に AGV カメラの測定結果を示す。

表 6.4-21 ローカル 5G+Wi-Fi 環境における AGV カメラの測定結果

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	回線切替
③→⑧1 回目 (L5G→Wi-Fi)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 8.8 Wi-Fi: 8.9	L5G: 0.3 Wi-Fi: 0.0	L5G: 16.9 Wi-Fi: 5.1	あり
③→⑧2 回目 (L5G→Wi-Fi)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 9.0 Wi-Fi: 9.3	L5G: 0.1 Wi-Fi: 0.1	L5G: 17.0 Wi-Fi: 21.3	あり
③→⑧3 回目 (L5G→Wi-Fi)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 9.3 Wi-Fi: 9.1	L5G: 0.1 Wi-Fi: 0.2	L5G: 12.5 Wi-Fi: 9.1	あり
⑧→③1 回目 (Wi-Fi→L5G)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 9.3 L5G: 8.9	Wi-Fi: 0.1 L5G: 0.4	Wi-Fi: 12.6 L5G: 17.9	あり
⑧→③2 回目 (Wi-Fi→L5G)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 9.2 L5G: -	Wi-Fi: 0.1 L5G: -	Wi-Fi: 6.0 L5G: -	なし
⑧→③3 回目 (Wi-Fi→L5G)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 8.9 L5G: -	Wi-Fi: 0.1 L5G: -	Wi-Fi: 10.2 L5G: -	なし

表 6.4-22 ローカル 5G+公衆網環境における AGV カメラの測定結果

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	回線切替
⑦→⑦外 1 回目 (L5G→公衆網)	途切れ: あり 乱れ: なし 音声:途切あり	L5G: 8.7 公衆網: 0.2	L5G: 0.1 公衆網: 1.0	L5G: 12.3 公衆網: 100.2	あり
⑦→⑦外 2 回目 (L5G→公衆網)	途切れ: あり 乱れ: なし 音声:途切あり	L5G: 8.8 公衆網: 5.8	L5G: 0.1 公衆網: 0.0	L5G: 12.4 公衆網: 178.9	あり
⑦→⑦外 3 回目 (L5G→公衆網)	途切れ: あり 乱れ: なし 音声:途切あり	L5G: 8.9 公衆網: 3.4	L5G: 0.0 公衆網: 6.6	L5G: 12.7 公衆網: 137.5	あり
⑦外→⑦1 回目 (公衆網→L5G)	映像流れず 音声流れず	-	-	-	-
⑦外→⑦2 回目 (公衆網→L5G)	映像流れず 音声流れず	-	-	-	-
⑦外→⑦3 回目 (公衆網→L5G)	映像流れず 音声流れず	-	-	-	-

表 6.4-23 Wi-Fi+公衆網環境における AGV カメラの測定結果

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	回線切替
⑤→②1 回目 (Wi-Fi→公衆網)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 8.9 公衆網: -	Wi-Fi: 0.0 公衆網: -	Wi-Fi: 6.7 公衆網: -	なし
⑤→②2 回目 (Wi-Fi→公衆網)	途切れ: あり 乱れ: なし 音声:途切あり	Wi-Fi: 6.3 公衆網: -	Wi-Fi: 0.0 公衆網: -	Wi-Fi: 9.6 公衆網: -	なし
⑤→②3 回目 (Wi-Fi→公衆網)	途切れ: あり 乱れ: なし 音声:途切あり	Wi-Fi: 9.2 公衆網: 3.5	Wi-Fi: 0.5 公衆網: 1.9	Wi-Fi: 5.7 公衆網: 240.0	あり
②→⑤1 回目 (公衆網→Wi-Fi)	映像流れず 音声流れず	-	-	-	-
②→⑤2 回目 (公衆網→Wi-Fi)	映像流れず 音声流れず	-	-	-	-
②→⑤3 回目 (公衆網→Wi-Fi)	映像流れず 音声流れず	-	-	-	-

ローカル 5G から Wi-Fi への切替は 3 回の試行全てで成功した。一方、Wi-Fi からローカル 5G への切替は 3 回の試行中 1 回のみ成功となり、切替の発生しなかった 2 回の試行については、Wi-Fi の受信電界強度が低下しても通信品質の劣化が小さく、異常検知 AI の出力結果が回線切替条件を満たさず Wi-Fi での通信が維持される結果となった。

公衆網(LTE)においては通信帯域が不十分なため AGV カメラ映像(8Mbps)を伝送することができず、公衆網からローカル 5G または Wi-Fi への切替の検証は実施できなかった。また、ローカル 5G または Wi-Fi から公衆網へ切替が実施された場合には、切替後に通信断となる結果となった。

Wi-Fi から公衆網への切替の 1 回目と 2 回目の試行においては、Wi-Fi の受信電界強度が低下しても通信品質の劣化が小さく、異常検知 AI の出力結果が回線切替条件を満たさず Wi-Fi での通信が維持される結果となった。1 回目については映像品質の劣化はなかったが、2 回目については映像途切れが発生した。3 回目の試行では回線切替が実施されたが、公衆網への切替後に通信断となった。

以下に固定カメラ(通信速度:1Mbps)の測定結果を示す。

表 6.4-24 ローカル 5G+Wi-Fi 環境における固定カメラ(1Mbps)の測定結果

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	回線切替
③→⑧1 回目 (L5G→Wi-Fi)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 1.1 Wi-Fi: -	L5G: 0.0 Wi-Fi: -	L5G: 12.2 Wi-Fi: -	なし
③→⑧2 回目 (L5G→Wi-Fi)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 1.1 Wi-Fi: -	L5G: 0.0 Wi-Fi: -	L5G: 11.9 Wi-Fi: -	なし
③→⑧3 回目 (L5G→Wi-Fi)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 1.0 Wi-Fi: -	L5G: 0.0 Wi-Fi: -	L5G: 11.2 Wi-Fi: -	なし
⑧→③1 回目 (Wi-Fi→L5G)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 1.1 L5G: -	Wi-Fi: 0.2 L5G: -	Wi-Fi: 5.7 L5G: -	なし
⑧→③2 回目 (Wi-Fi→L5G)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 1.0 L5G: 1.1	Wi-Fi: 0.2 L5G: 0.0	Wi-Fi: 9.0 L5G: 11.7	あり
⑧→③3 回目 (Wi-Fi→L5G)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 1.0 L5G: 1.1	Wi-Fi: 0.3 L5G: 0.0	Wi-Fi: 6.9 L5G: 10.5	あり

表 6.4-25 ローカル 5G+公衆網環境における固定カメラ(1Mbps)の測定結果

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	回線切替
⑦→⑦外 1 回目 (L5G→公衆網)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 1.2 公衆網: -	L5G: 0.0 公衆網: -	L5G: 12.1 公衆網: -	なし
⑦→⑦外 2 回目 (L5G→公衆網)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 1.1 公衆網: 1.1	L5G: 0.0 公衆網: 0.0	L5G: 12.6 公衆網: 101.9	あり
⑦→⑦外 3 回目 (L5G→公衆網)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 1.2 公衆網: 1.1	L5G: 0.0 公衆網: 0.0	L5G: 11.9 公衆網: 106.0	あり
⑦外→⑦1 回目 (公衆網→L5G)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	公衆網: 1.0 L5G: 1.1	公衆網: 0.0 L5G: 0.0	公衆網: 120.5 L5G: 11.7	あり
⑦外→⑦2 回目 (公衆網→L5G)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	公衆網: 1.0 L5G: 1.1	公衆網: 0.0 L5G: 0.0	公衆網: 107.3 L5G: 11.9	あり
⑦外→⑦3 回目 (公衆網→L5G)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	公衆網: 1.1 L5G: 1.2	公衆網: 0.0 L5G: 0.0	公衆網: 105.0 L5G: 11.6	あり

表 6.4-26 Wi-Fi+公衆網環境における固定カメラ(1Mbps)の測定結果

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	回線切替
⑤→②1 回目 (Wi-Fi→公衆網)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 1.0 公衆網: 1.1	Wi-Fi: 0.1 公衆網: 0.0	Wi-Fi: 5.7 公衆網: 102.9	あり
⑤→②2 回目 (Wi-Fi→公衆網)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 10. 公衆網: 1.1	Wi-Fi: 0.1 公衆網: 0.0	Wi-Fi: 6.4 公衆網: 103.9	あり
⑤→②3 回目 (Wi-Fi→公衆網)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 1.1 公衆網: 1.0	Wi-Fi: 0.6 公衆網: 0.0	Wi-Fi: 7.6 公衆網: 105.3	あり
②→⑤1 回目 (公衆網→Wi-Fi)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	公衆網: 1.1 Wi-Fi: 1.1	公衆網: 0.0 Wi-Fi: 0.0	公衆網: 104.2 Wi-Fi: 6.0	あり
②→⑤2 回目 (公衆網→Wi-Fi)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	公衆網: 1.1 Wi-Fi: 1.1	公衆網: 0.0 Wi-Fi: 0.1	公衆網: 105.1 Wi-Fi: 5.4	あり
②→⑤3 回目 (公衆網→Wi-Fi)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	公衆網: 1.1 Wi-Fi: 1.1	公衆網: 0.0 Wi-Fi: 0.1	公衆網: 105.7 Wi-Fi: 5.2	あり

ローカル 5G から Wi-Fi への切替は 3 回の試行全てで、Wi-Fi からローカル 5G への切替については 3 回の試行中 1 回で、ローカル 5G から公衆網への切替についても 3 回の試行中 1 回で切替が発生しなかった。これらは、映像伝送レート 1Mbps であったため受信電界強度が低下しても十分な通信品質が維持されたためである。他の試行については切替が発生している。回線切替の有無によらず全ての試行に映像品質には問題はなかった。

以下に固定カメラ(通信速度:8Mbps)の測定結果を示す。

表 6.4-27 ローカル 5G+Wi-Fi 環境における固定カメラ(8Mbps)の測定結果

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	回線切替
③→⑧1 回目 (L5G→Wi-Fi)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 8.0 Wi-Fi: 8.0	L5G: 0.0 Wi-Fi: 0.2	L5G: 13.7 Wi-Fi: 5.3	あり
③→⑧2 回目 (L5G→Wi-Fi)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 8.0 Wi-Fi: 8.0	L5G: 0.0 Wi-Fi: 0.0	L5G: 13.7 Wi-Fi: 6.3	あり
③→⑧3 回目 (L5G→Wi-Fi)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 7.9 Wi-Fi: 8.0	L5G: 0.0 Wi-Fi: 0.1	L5G: 13.3 Wi-Fi: 6.4	あり
⑧→③1 回目 (Wi-Fi→L5G)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 8.0 L5G: 8.0	Wi-Fi: 0.2 L5G: 0.0	Wi-Fi: 7.0 L5G: 13.9	あり
⑧→③2 回目 (Wi-Fi→L5G)	途切れ: なし 乱れ: なし	Wi-Fi: 8.0 L5G: 8.0	Wi-Fi: 0.1 L5G: 0.0	Wi-Fi: 5.9 L5G: 12.9	あり

	音声:途切なし				
⑧→③3 回目 (Wi-Fi→L5G)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 8.0 L5G: 8.0	Wi-Fi: 0.2 L5G: 0.0	Wi-Fi: 5.7 L5G: 13.3	あり

表 6.4-28 ローカル 5G+公衆網環境における固定カメラ(8Mbps)の測定結果

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	回線切替
⑦→⑦外 1 回目 (L5G→公衆網)	途切れ: あり 乱れ: なし 音声:途切あり	L5G: 7.8 公衆網: 3.1	L5G: 0.0 公衆網: 0.0	L5G: 13.5 公衆網: 118.3	あり
⑦→⑦外 2 回目 (L5G→公衆網)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 8.0 公衆網: -	L5G: 0.0 公衆網: -	L5G: 13.1 公衆網: -	なし
⑦→⑦外 3 回目 (L5G→公衆網)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 8.0 公衆網: -	L5G: 0.0 公衆網: -	L5G: 14.0 公衆網: -	なし
⑦外→⑦1 回目 (公衆網→L5G)	映像流れず 音声流れず	-	-	-	-
⑦外→⑦2 回目 (公衆網→L5G)	映像流れず 音声流れず	-	-	-	-
⑦外→⑦3 回目 (公衆網→L5G)	映像流れず 音声流れず	-	-	-	-

表 6.4-29 Wi-Fi+公衆網環境における固定カメラ(8Mbps)の測定結果

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	回線切替
⑤→②1 回目 (Wi-Fi→公衆網)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 8.0 公衆網: 8.0	Wi-Fi: 0.2 公衆網: 0.0	Wi-Fi: 9.0 公衆網: 140.9	あり
⑤→②2 回目 (Wi-Fi→公衆網)	途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切あり	Wi-Fi: 8.2 公衆網: -	Wi-Fi: 0.2 公衆網: -	Wi-Fi: 8.7 公衆網: -	なし
⑤→②3 回目 (Wi-Fi→公衆網)	途切れ: なし 乱れ: あり 音声:途切なし	Wi-Fi: 8.1 公衆網: -	Wi-Fi: 12.6 公衆網: -	Wi-Fi: 7.2 公衆網: -	なし
②→⑤1 回目 (公衆網→Wi-Fi)	映像流れず 音声流れず	-	-	-	-
②→⑤2 回目 (公衆網→Wi-Fi)	映像流れず 音声流れず	-	-	-	-
②→⑤3 回目 (公衆網→Wi-Fi)	映像流れず 音声流れず	-	-	-	-

ローカル 5G と Wi-Fi の切替は全てで成功しており、映像品質にも問題はなかった。

公衆網(LTE)においては固定カメラ映像(8Mbps)を伝送することができず、公衆網からローカル 5G または Wi-Fi への切替の検証は実施できなかった。また、ローカル 5G または Wi-Fi から公衆網へ切替が実施された場合には、切替後に通信断となる結果となった。

ローカル 5G から公衆網への切替は 3 回の試行中 1 回のみ切替が行われたが、切替後に通信断となった。他 2 回の試行については、公衆網の電界強度データが正しく収集されていなかったため回線切替制御が動作せず、ローカル 5G での通信が維持される結果となった。

Wi-Fi から公衆網への切替は 3 回の試行中 1 回のみ切替が行われ、映像品質にも問題がなかった。2 回目の試行については、異常検知 AI の出力結果が回線切替条件を満たさず Wi-Fi での通信が維持され、映像品質の劣化が発生した。3 回目の試行については、異常検知 AI の出力結果は回線切替条件を満たしたが、公衆網の電界強度が低かったため回線切替が実施されず Wi-Fi での通信が維持され、映像品質の劣化が発生した。

6) 多接続検証

多接続検証として、AGV カメラ、固定カメラ(通信速度:1Mbps)、固定カメラ(通信速度:8Mbps)それぞれを活用し、各種無線(ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網(LTE))の内 2 種の組み合わせで測定を行った。

本検証は機械学習の異常検知 AI とルールベースの通信制御 AI を用いて実施した。

以下に AGV カメラの測定結果を示す。

表 6.4-30 ローカル 5G+Wi-Fi 環境における AGV カメラの測定結果

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	回線切替
⑤1 回目 (L5G→Wi-Fi)	途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切あり	L5G: 8.7 Wi-Fi: 8.8	L5G: 0.9 Wi-Fi: 17.7	L5G: 46.3 Wi-Fi: 5.2	あり
⑤2 回目 (L5G→Wi-Fi)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 8.8 Wi-Fi: 8.8	L5G: 0.0 Wi-Fi: 0.0	L5G: 36.1 Wi-Fi: 10.9	あり
⑤3 回目 (L5G→Wi-Fi)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 9.3 Wi-Fi: 9.0	L5G: 0.0 Wi-Fi: 0.1	L5G: 28.7 Wi-Fi: 10.3	あり
③1 回目 (Wi-Fi→L5G)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 8.9 L5G: 9.0	Wi-Fi: 0.0 L5G: 0.0	Wi-Fi: 14.6 L5G: 12.9	あり
③2 回目 (Wi-Fi→L5G)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 9.2 L5G: 9.2	Wi-Fi: 1.8 L5G: 0.0	Wi-Fi: 23.2 L5G: 13.2	あり
③3 回目 (Wi-Fi→L5G)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 8.4 L5G: 8.1	Wi-Fi: 0.0 L5G: 0.0	Wi-Fi: 10.3 L5G: 13.3	あり

表 6.4-31 ローカル 5G+公衆網環境における AGV カメラの測定結果

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	回線切替
⑦1 回目 (L5G→公衆網)	途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切あり	L5G: 6.9 公衆網: 7.3	L5G: 0.6 公衆網: 11.6	L5G: 38.2 公衆網: 541.3	あり
⑦2 回目 (L5G→公衆網)	途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切あり	L5G: 8.9 公衆網: 3.4	L5G: 0.0 公衆網: 2.7	L5G: 14.5 公衆網: 146.3	あり
⑦3 回目 (L5G→公衆網)	途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切あり	L5G: 8.8 公衆網: 1.0	L5G: 0.0 公衆網: 0.4	L5G: 17.1 公衆網: 149.5	あり

表 6.4-32 Wi-Fi+公衆網環境における AGV カメラの測定結果

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	回線切替
③1 回目 (Wi-Fi→公衆網)	途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切あり	Wi-Fi: 8.8 公衆網: 7.1	Wi-Fi: 0.1 公衆網: 0.8	Wi-Fi: 24.6 公衆網: 147.7	あり
③2 回目 (Wi-Fi→公衆網)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 9.2 公衆網: 9.1	Wi-Fi: 0.0 公衆網: 0.0	Wi-Fi: 16.6 公衆網: 139.4	あり
③3 回目 (Wi-Fi→公衆網)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 8.9 公衆網: 8.9	Wi-Fi: 0.0 公衆網: 0.0	Wi-Fi: 22.7 公衆網: 118.3	あり

ローカル 5G と Wi-Fi の切替は全ての試行で成功したが、ローカル 5G から Wi-Fi への切替後に映像品質が劣化した試行が 1 回あった。

公衆網(LTE)においては AGV カメラ映像(8Mbps)を伝送することができず、ローカル 5G から公衆網への切替の 3 回の試行全てと Wi-Fi から公衆網への切替の 1 回目の試行については、公衆網に切替が実施された後に通信断となった。Wi-Fi から公衆網への切替の 2 回目と 3 回目の試行では、公衆網に切替後も映像品質が維持された。

以下に固定カメラ(通信速度:1Mbps)の測定結果を示す。

表 6.4-33 ローカル 5G+Wi-Fi 環境における固定カメラ(1Mbps)の測定結果

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	回線切替
⑤1 回目 (L5G→Wi-Fi)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 1.0 Wi-Fi: -	L5G: 0.0 Wi-Fi: -	L5G: 12.5 Wi-Fi: -	なし
⑤2 回目 (L5G→Wi-Fi)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 1.0 Wi-Fi: -	L5G: 0.0 Wi-Fi: -	L5G: 12.3 Wi-Fi: -	なし
⑤3 回目 (L5G→Wi-Fi)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 1.0 Wi-Fi: -	L5G: 0.0 Wi-Fi: -	L5G: 12.0 Wi-Fi: -	なし
③1 回目 (Wi-Fi→L5G)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 1.0 L5G: 1.0	Wi-Fi: 0.1 L5G: 0.0	Wi-Fi: 12.0 L5G: 12.8	あり
③2 回目 (Wi-Fi→L5G)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 1.2 L5G: 1.1	Wi-Fi: 0.2 L5G: 0.0	Wi-Fi: 14.1 L5G: 12.9	あり
③3 回目 (Wi-Fi→L5G)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 1.1 L5G: 1.2	Wi-Fi: 0.0 L5G: 0.0	Wi-Fi: 11.8 L5G: 13.2	あり

表 6.4-34 ローカル 5G+公衆網環境における固定カメラ(1Mbps)の測定結果

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	回線切替
⑦1 回目 (L5G→公衆網)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 1.0 公衆網: -	L5G: 0.0 公衆網: -	L5G: 10.9 公衆網: -	なし
⑦2 回目 (L5G→公衆網)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 1.0 公衆網: 1.0	L5G: 0.0 公衆網: 0.0	L5G: 16.9 公衆網: 96.0	あり
⑦3 回目 (L5G→公衆網)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 1.0 公衆網: -	L5G: 0.0 公衆網: -	L5G: 11.2 公衆網: -	なし

表 6.4-35 Wi-Fi+公衆網環境における固定カメラ(1Mbps)の測定結果

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	回線切替
③1 回目 (Wi-Fi→公衆網)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 1.1 公衆網: 1.0	Wi-Fi: 0.1 公衆網: 0.0	Wi-Fi: 21.4 公衆網: 90.6	あり
③2 回目 (Wi-Fi→公衆網)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 1.0 公衆網: 1.0	Wi-Fi: 0.0 公衆網: 0.0	Wi-Fi: 10.0 公衆網: 95.7	あり
③3 回目 (Wi-Fi→公衆網)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 1.1 公衆網: 1.0	Wi-Fi: 0.0 公衆網: 0.0	Wi-Fi: 13.7 公衆網: 91.3	あり

ローカル 5G から Wi-Fi または公衆網への切替については 1 回を除いて切替されることはなかった。これは、映像伝送レート 1Mbps であったため、多接続による負荷があっても十分な通信品質が維持されたためである。Wi-Fi からローカル 5G または公衆網への切替は全ての試行で成功した。回線切替の有無によらず全ての試行において映像品質には問題はなかった。

以下に固定カメラ(通信速度:8Mbps)の測定結果を示す。

表 6.4-36 ローカル 5G+Wi-Fi 環境における固定カメラ(8Mbps)の測定結果

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	回線切替
⑤1 回目 (L5G→Wi-Fi)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 8.0 Wi-Fi: 8.0	L5G: 0.0 Wi-Fi: 0.0	L5G: 24.3 Wi-Fi: 16.3	あり
⑤2 回目 (L5G→Wi-Fi)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 8.2 Wi-Fi: 8.0	L5G: 0.0 Wi-Fi: 0.1	L5G: 18.3 Wi-Fi: 5.8	あり
⑤3 回目 (L5G→Wi-Fi)	途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切あり	L5G: 8.0 Wi-Fi: 8.0	L5G: 0.0 Wi-Fi: 19.0	L5G: 22.1 Wi-Fi: 13.7	あり
③1 回目 (Wi-Fi→L5G)	途切れ: なし 乱れ: なし	Wi-Fi: 7.9 L5G: 7.9	Wi-Fi: 0.1 L5G: 0.0	Wi-Fi: 13.2 L5G: 14.3	あり

	音声:途切なし				
③2 回目 (Wi-Fi→L5G)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 8.0 L5G: 7.9	Wi-Fi: 0.0 L5G: 0.0	Wi-Fi: 20.6 L5G: 14.8	あり
③3 回目 (Wi-Fi→L5G)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 7.9 L5G: 8.0	Wi-Fi: 0.1 L5G: 0.0	Wi-Fi: 9.4 L5G: 13.7	あり

表 6.4-37 ローカル 5G+公衆網環境における固定カメラ(8Mbps)の測定結果

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	回線切替
⑦1 回目 (L5G→公衆網)	途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切あり	L5G: 7.9 公衆網: 3.9	L5G: 0.0 公衆網: 16.2	L5G: 35.3 公衆網: 144.2	あり
⑦2 回目 (L5G→公衆網)	途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切あり	L5G: 8.1 公衆網: 3.2	L5G: 0.0 公衆網: 4.5	L5G: 123.9 公衆網: 206.5	あり
⑦3 回目 (L5G→公衆網)	途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切あり	L5G: 8.1 公衆網: 1.8	L5G: 0.0 公衆網: 8.7	L5G: 60.0 公衆網: 129.1	あり

表 6.4-38 Wi-Fi+公衆網環境における固定カメラ(8Mbps)の測定結果

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	回線切替
③1 回目 (Wi-Fi→公衆網)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 7.9 公衆網: 8.0	Wi-Fi: 0.0 公衆網: 0.0	Wi-Fi: 11.4 公衆網: 123.5	あり
③2 回目 (Wi-Fi→公衆網)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 8.0 公衆網: 7.9	Wi-Fi: 0.0 公衆網: 0.0	Wi-Fi: 18.0 公衆網: 141.7	あり
③3 回目 (Wi-Fi→公衆網)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 7.9 公衆網: 8.0	Wi-Fi: 0.0 公衆網: 0.0	Wi-Fi: 11.2 公衆網: 122.1	あり

全ての試行で切替は成功したが、ローカル 5G から Wi-Fi への切替後に映像品質が劣化した試行が 1 回あった。また、ローカル 5G から公衆網への切替では 3 回の試行全てで公衆網への切替後に通信断となった。これは、測定ポイントにおける公衆網の通信帯域が不十分であり固定カメラ映像(8Mbps)を伝送できなかったためと考えられる。

7) QoS 検証

多接続検証として、AGV カメラ、固定カメラ(通信速度:1Mbps)、固定カメラ(通信速度:8Mbps)それぞれを活用し、ローカル 5G で測定を行った。

本検証は機械学習の異常検知 AI とルールベースの通信制御 AI を用いて実施した。

以下に AGV カメラ、固定カメラの測定結果を示す。

表 6.4-39 AGV の測定結果

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	QoS 制御
③1 回目	途切れ: あり 乱れ: なし 音声:途切あり	7.9	0.3	36.4	9→8→7→8→9→ 8→7
③2 回目	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	8.9	0.1	17.1	9→8
③3 回目	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	8.7	0.1	17.0	9→8→7→6→5

表 6.4-40 固定カメラ(1Mbps)の測定結果

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	QoS 制御
③1 回目	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	1.1	0.0	10.8	なし
③2 回目	未実施				
③3 回目	未実施				

表 6.4-41 固定カメラ(8Mbps)の測定結果

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	QoS 制御
③1 回目	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	7.9	0.0	14.9	9→8
③2 回目	途切れ: なし 乱れ: なし	8.0	0.0	35.6	9→8→9→8
③3 回目	途切れ: なし 乱れ: なし	8.2	0.3	37.7	9→8→9→8

AGV カメラ、固定カメラ(通信速度:8Mbps)での測定においては QoS 制御が行われ、AGV カメラでの 1 回の試行を除いては映像品質に問題はなかった。AGV カメラの 1 回目の試行においては、QoS 優先度を上げたことで通信品質が十分に改善したため、QoS 優先度を下げる制御、つまり、無線リソースの割り当てを減らす制御が実施されたが、その後に通信断となった。

固定カメラ(通信速度:1Mbps)での測定では、映像伝送レート 1Mbps であったため、多接続による負荷があっても十分な通信品質が維持されたため QoS 制御が行われることはなかった。複数回試行しても同様の結果が得られることが予想されたため、2 回目、3 回目の試行は省略した。

8) 総合的なサービスレベル指標維持

総合的なサービスレベル指標維持検証として、AGV カメラ、固定カメラ(通信速度:1Mbps)、固定カメラ(通信速度:8Mbps)それぞれを活用し、各種無線(ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網(LTE))の内 2 種の組み合わせで測定を行った。

本検証は機械学習の異常検知 AI とルールベースの通信制御 AI を用いて実施した。

以下に AGV カメラの測定結果を示す。

表 6.4-42 ローカル 5G+Wi-Fi 環境における AGV カメラの測定結果(ローカル 5G 負荷)

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス 率[%]	RTT[ms]	通信制御
AI あり 1 回目 (L5G+Wi-Fi)	切断: 5 回 途切れ: あり 乱れ: なし 音声:途切あり	L5G: 8.8 Wi-Fi: 25.3	L5G: 8.6 Wi-Fi: 0.0	L5G: 67.9 Wi-Fi: 5.5	QoS 制御あり 回線切替なし
AI なし 1 回目 (L5G)	切断: 7 回 途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切あり	-	-	-	-
AI あり 2 回目 (L5G+Wi-Fi)	切断: 5 回 途切れ: あり 乱れ: なし 音声:途切あり	L5G: 8.1 Wi-Fi: -	L5G: 0.1 Wi-Fi: -	L5G: 45.2 Wi-Fi: -	QoS 制御あり 回線切替なし
AI なし 2 回目 (L5G)	切断: 5 回 途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切あり	-	-	-	-
AI あり 3 回目 (L5G+Wi-Fi)	切断: 4 回 途切れ: あり 乱れ: なし 音声:途切あり	L5G: 6.9 Wi-Fi: -	L5G: 0.5 Wi-Fi: -	L5G: 50.1 Wi-Fi: -	QoS 制御あり 回線切替なし
AI なし 3 回目 (L5G)	切断: 5 回 途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切あり	-	-	-	-

表 6.4-43 ローカル 5G+Wi-Fi 環境における AGV カメラの測定結果(Wi-Fi 負荷)

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス 率[%]	RTT[ms]	通信制御
AI あり 1 回目 (Wi-Fi+L5G)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 9.1 L5G: 8.9	Wi-Fi: 0.0 L5G: 0.2	Wi-Fi: 14.7 L5G: 14.7	QoS 制御あり 回線切替 3 回
AI なし 1 回目 (Wi-Fi)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	-	-	-	-

AIあり2回目 (Wi-Fi+L5G)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 9.1 L5G: 9.0	Wi-Fi: 0.0 L5G: 0.1	Wi-Fi: 15.1 L5G: 14.3	QoS制御あり 回線切替2回
AIなし2回目 (Wi-Fi)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	-	-	-	-
AIあり3回目 (Wi-Fi+L5G)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 9.1 L5G: 9.0	Wi-Fi: 0.1 L5G: 0.1	Wi-Fi: 13.7 L5G: 13.8	QoS制御あり 回線切替5回
AIなし3回目 (Wi-Fi)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	-	-	-	-

表 6.4-44 ローカル 5G+公衆網環境における AGV カメラの測定結果(ローカル 5G 負荷)

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス 率[%]	RTT[ms]	通信制御
AIあり1回目 (L5G+公衆網)	切断: 1回 途切れ: あり 乱れ: なし 音声:途切あり	L5G: 4.8 公衆網: -	L5G: 0.0 公衆網: -	L5G: 13.1 公衆網: -	QoS制御あり 回線切替なし
AIなし1回目 (L5G)	切断: なし 途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切なし	-	-	-	-
AIあり2回目 (L5G+公衆網)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 8.0 公衆網: -	L5G: 0.0 公衆網: -	L5G: 17.9 公衆網: -	QoS制御なし 回線切替なし
AIなし2回目 (L5G)	切断: なし 途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切なし	-	-	-	-
AIあり3回目 (L5G+公衆網)	切断: 1回 途切れ: あり 乱れ: なし 音声:途切あり	L5G: 7.9 公衆網: 0.8	L5G: 0.0 公衆網: 0.0	L5G: 22.1 公衆網: 139.4	QoS制御あり 回線切替1回
AIなし3回目 (L5G)	切断: なし 途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切なし	-	-	-	-

表 6.4-45 Wi-Fi+公衆網環境における AGV カメラの測定結果(Wi-Fi 負荷)

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス 率[%]	RTT[ms]	通信制御
AIあり1回目	切断: 3回	Wi-Fi: 8.0	Wi-Fi: 0.0	Wi-Fi 26.4	回線切替5回

(Wi-Fi+公衆網)	途切れ: あり 乱れ: なし 音声:途切あり	公衆網: 4.3	公衆網: 5.5	公衆網: 141.4	
AIなし1回目 (Wi-Fi)	切断: なし 途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切なし	-	-	-	-
AIあり2回目 (Wi-Fi+公衆網)	切断: 4回 途切れ: あり 乱れ: なし 音声:途切あり	Wi-Fi: 8.7 公衆網: 4.6	Wi-Fi: 0.0 公衆網: 0.0	Wi-Fi: 18.6 公衆網: 166.5	回線切替7回
AIなし2回目 (Wi-Fi)	切断: なし 途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切なし	-	-	-	-
AIあり3回目 (Wi-Fi+公衆網)	切断: 2回 途切れ: あり 乱れ: なし 音声:途切あり	Wi-Fi: 8.8 公衆網: 3.6	Wi-Fi: 0.0 公衆網: 3.5	Wi-Fi: 21.6 公衆網: 155.9	回線切替9回
AIなし3回目 (Wi-Fi)	切断: 2回 途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切あり	-	-	-	-

ローカル 5G+Wi-Fi 環境(ローカル 5G 負荷)の AI ありの試行では、QoS 制御のみが実施され、回線切替は実施されなかった。QoS 優先度を上げたことで通信品質が十分に改善した後に、QoS 優先度を下げる制御が実施されたことによる通信断が複数回発生した。AI ありと AI なしを比較すると、AI ありの方が切断の回数が少なく、QoS 制御による通信品質の改善効果が認められる。

ローカル 5G+Wi-Fi 環境(Wi-Fi 負荷)においては、QoS 制御と回線切替制御の両方が実施されており、映像品質の劣化もなかった。ただし、AI なしでも映像品質の劣化はなかった。

ローカル 5G+公衆網環境(ローカル 5G 負荷)においては、異常検知されたポイントでの公衆網の受信電界強度が低く、3 回中 2 回は回線切替が実施されず内 1 回は接続断となり、残りの 1 回は公衆網への切替が実施されたが、公衆網の通信帯域が不十分であり接続断となった。AI なしの測定においても映像途切れ、映像乱れが発生しており、AI ありと AI なしでの有意な差はないと考えられる。

Wi-Fi+公衆網環境(Wi-Fi 負荷)においては、全ての試行で複数回の回線切替が実施されたが、公衆網の通信帯域が不十分であり、公衆網への切替後に接続断が発生した。AI なしの測定においても映像途切れ、映像乱れが発生しているが、切断の回数は AI ありの方が多く、回線切替によって映像品質の劣化度合いが悪化したと言える。

以下に固定カメラ(通信速度:1Mbps)の測定結果を示す。

表 6.4-46 ローカル 5G+Wi-Fi 環境における固定カメラ(1Mbps)の測定結果(ローカル 5G 負荷)

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス 率[%]	RTT[ms]	通信制御
AIあり1回目 (L5G+Wi-Fi)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 1.1 Wi-Fi: -	L5G: 0.0 Wi-Fi: -	L5G: 12.8 Wi-Fi: -	QoS 制御なし 回線切替なし
AIなし1回目 (L5G)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	-	-	-	-
AIあり2回目 (L5G+Wi-Fi)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 1.1 Wi-Fi: -	L5G: 0.0 Wi-Fi: -	L5G: 12.4 Wi-Fi: -	QoS 制御なし 回線切替なし
AIなし2回目 (L5G)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	-	-	-	-
AIあり3回目 (L5G+Wi-Fi)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 1.1 Wi-Fi: -	L5G: 0.0 Wi-Fi: -	L5G: 12.4 Wi-Fi: -	QoS 制御なし 回線切替なし
AIなし3回目 (L5G)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	-	-	-	-

表 6.4-47 ローカル 5G+Wi-Fi 環境における固定カメラ(1Mbps)の測定結果(Wi-Fi 負荷)

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス 率[%]	RTT[ms]	通信制御
AIあり1回目 (Wi-Fi+L5G)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 1.0 L5G: 1.1	Wi-Fi: 0.1 L5G: 0.0	Wi-Fi: 6.9 L5G: 11.5	QoS 制御なし 回線切替1回
AIなし1回目 (Wi-Fi)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	-	-	-	-
AIあり2回目 (Wi-Fi+L5G)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 1.0 L5G: 1.1	Wi-Fi: 0.1 L5G: 0.0	Wi-Fi: 11.7 L5G: 11.4	QoS 制御なし 回線切替1回
AIなし2回目	切断: なし	-	-	-	-

(Wi-Fi)	途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし				
AIあり3回目 (Wi-Fi+L5G)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 1.0 L5G: 1.1	Wi-Fi: 0.1 L5G: 0.0	Wi-Fi: 8.8 L5G: 11.4	QoS制御なし 回線切替1回
AIなし3回目 (Wi-Fi)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	-	-	-	-

表 6.4-48 ローカル 5G+公衆網環境における固定カメラ(1Mbps)の測定結果(ローカル 5G 負荷)

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス 率[%]	RTT[ms]	通信制御
AIあり1回目 (L5G+公衆網)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 1.0 公衆網: -	L5G: 0.0 公衆網: -	L5G: 12.7 公衆網: -	QoS制御なし 回線切替なし
AIなし1回目 (L5G)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	-	-	-	-
AIあり2回目 (L5G+公衆網)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 1.0 公衆網: -	L5G: 0.0 公衆網: -	L5G: 11.5 公衆網: -	QoS制御なし 回線切替なし
AIなし2回目 (L5G)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	-	-	-	-
AIあり3回目 (L5G+公衆網)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	L5G: 1.1 公衆網: -	L5G: 0.8 公衆網: -	L5G: 11.5 公衆網: -	QoS制御なし 回線切替なし
AIなし3回目 (L5G)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	-	-	-	-

表 6.4-49 Wi-Fi+公衆網環境における固定カメラ(1Mbps)の測定結果(Wi-Fi 負荷)

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス 率[%]	RTT[ms]	通信制御
AIあり1回目 (Wi-Fi+公衆網)	切断: なし 途切れ: あり 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 1.1 公衆網: 1.1	Wi-Fi: 0.0 公衆網: 0.0	Wi-Fi: 32.8 公衆網: 108.0	回線切替3回
AIなし1回目	切断: なし	-	-	-	-

(Wi-Fi)	途切れ: なし 乱れ: あり 音声:途切なし				
AIあり2回目 (Wi-Fi+公衆網)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 1.1 公衆網: 1.1	Wi-Fi: 0.1 公衆網: 0.0	Wi-Fi: 33.0 公衆網: 108.2	回線切替6回
AIなし2回目 (Wi-Fi)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	-	-	-	-
AIあり3回目 (Wi-Fi+公衆網)	切断: なし 途切れ: あり 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 1.1 公衆網: 1.1	Wi-Fi: 5.2 公衆網: 0.0	Wi-Fi: 28.0 公衆網: 115.2	回線切替5回
AIなし3回目 (Wi-Fi)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	-	-	-	-

ローカル 5G+Wi-Fi 環境(ローカル 5G 負荷)およびローカル 5G+公衆網環境(ローカル 5G 負荷)においては、全試行で QoS 制御も回線切替も実施されておらず、ローカル 5G でのみの通信が維持されたが、映像品質の劣化はなかった。これは、映像伝送レート 1Mbps であったため受信電界強度の低下や多接続による負荷があっても十分な通信品質が維持されたためである。

ローカル 5G+Wi-Fi 環境(Wi-Fi 負荷)においては、各試行で 1 回ずつ Wi-Fi からローカル 5G への切替が実施され、映像品質の劣化はなかった。ただし、AI なしの試行でも映像品質は良好であり、回線切替による効果とは言えず、映像伝送レート 1Mbps であったため Wi-Fi でもローカル 5G でも十分な通信品質が維持されたためと考えられる。

Wi-Fi+公衆網環境(Wi-Fi 負荷)においては、全試行で複数回の回線切替が実施されており、公衆網への切替後に映像途切れが発生する場合があった。AI なしでは映像乱れはあるものの映像途切れはなかったため、映像品質の劣化度合は AI ありの方が大きいと言え、通信帯域が不十分な公衆網への切替は逆効果と言える。

以下に固定カメラ(通信速度:8Mbps)の測定結果を示す。

表 6.4-50 ローカル 5G+Wi-Fi 環境における固定カメラ(8Mbps)の測定結果(ローカル 5G 負荷)

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス 率[%]	RTT[ms]	通信制御
AIあり1回目 (L5G+Wi-Fi)	切断: 4回 途切れ: あり 乱れ: なし 音声:途切あり	L5G: 7.9 Wi-Fi: 7.9	L5G: 0.0 Wi-Fi: 0.0	L5G: 31.3 Wi-Fi: -6.2	QoS 制御あり 回線切替1回
AIなし1回目 (L5G)	切断: なし 途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切なし	-	-	-	-
AIあり2回目 (L5G+Wi-Fi)	切断: 4回 途切れ: あり 乱れ: なし 音声:途切あり	L5G: 6.9 Wi-Fi: 8.0	L5G: 0.0 Wi-Fi: 0.1	L5G: 30.4 Wi-Fi: 7.7	QoS 制御あり 回線切替1回
AIなし2回目 (L5G)	切断: 4回 途切れ: あり 乱れ: なし 音声:途切あり	-	-	-	-
AIあり3回目 (L5G+Wi-Fi)	切断: 5回 途切れ: あり 乱れ: なし 音声:途切あり	L5G: 5.1 Wi-Fi: -	L5G: 0.7 Wi-Fi: -	L5G: 33.5 Wi-Fi: -	QoS 制御あり 回線切替なし
AIなし3回目 (L5G)	切断: 5回 途切れ: あり 乱れ: なし 音声:途切あり	-	-	-	-

表 6.4-51 ローカル 5G+Wi-Fi 環境における固定カメラ(8Mbps)の測定結果(Wi-Fi 負荷)

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス 率[%]	RTT[ms]	通信制御
AIあり1回目 (Wi-Fi+L5G)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 8.0 L5G: 8.1	Wi-Fi: 0.0 L5G: 0.1	Wi-Fi: 13.8 L5G: 12.0	QoS 制御あり 回線切替3回
AIなし1回目 (Wi-Fi)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	-	-	-	-
AIあり2回目 (Wi-Fi+L5G)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 8.0 L5G: 8.1	Wi-Fi: 0.0 L5G: 0.1	Wi-Fi: 16.6 L5G: 12.2	QoS 制御あり 回線切替3回
AIなし2回目 (Wi-Fi)	切断: なし 途切れ: なし	-	-	-	-

	乱れ: なし 音声:途切なし				
AIあり3回目 (Wi-Fi+L5G)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	Wi-Fi: 8.0 L5G: 8.0	Wi-Fi: 0.0 L5G: 0.0	Wi-Fi: 14.9 L5G: 11.7	QoS制御あり 回線切替1回
AIなし3回目 (Wi-Fi)	切断: なし 途切れ: なし 乱れ: なし 音声:途切なし	-	-	-	-

表 6.4-52 ローカル 5G+公衆網環境における固定カメラ(8Mbps)の測定結果(ローカル 5G 負荷)

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス 率[%]	RTT[ms]	通信制御
AIあり1回目 (L5G+公衆網)	切断: 3回 途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切あり	L5G: 5.7 公衆網: 8.0	L5G: 0.3 公衆網: 3.4	L5G: 30.6 公衆網: 267.0	QoS制御あり 回線切替2回
AIなし1回目 (L5G)	切断: なし 途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切なし	-	-	-	-
AIあり2回目 (L5G+公衆網)	切断: 5回 途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切あり	L5G: 5.7 公衆網: -	L5G: 0.6 公衆網: -	L5G: 35.2 公衆網: -	QoS制御あり 回線切替なし
AIなし2回目 (L5G)	切断: なし 途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切なし	-	-	-	-
AIあり3回目 (L5G+公衆網)	切断: 3回 途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切あり	L5G: 7.3 公衆網: 7.9	L5G: 1.0 公衆網: 0.0	L5G: 39.2 公衆網: 181.2	QoS制御あり 回線切替2回
AIなし3回目 (L5G)	切断: なし 途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切なし	-	-	-	-

表 6.4-53 Wi-Fi+公衆網環境における固定カメラ(8Mbps)の測定結果(Wi-Fi 負荷)

測定ポイント	映像品質 音声	スループット [Mbps]	パケットロス 率[%]	RTT[ms]	通信制御
AI あり 1 回目 (Wi-Fi+公衆網)	切断: 2 回 途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切あり	Wi-Fi: 1.1 公衆網: 1.1	Wi-Fi: 0.0 公衆網: 0.0	Wi-Fi: 32.8 公衆網: 108.0	回線切替 6 回
AI なし 1 回目 (Wi-Fi)	切断: 1 回 途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切あり	-	-	-	-
AI あり 2 回目 (Wi-Fi+公衆網)	切断: 1 回 途切れ: あり 乱れ: あり 音声:途切あり	Wi-Fi: 1.1 公衆網: 1.1	Wi-Fi: 0.1 公衆網: 0.0	Wi-Fi: 33.0 公衆網: 108.2	回線切替 5 回
AI なし 2 回目 (Wi-Fi)	切断: 1 回 途切れ: あり 乱れ: なし 音声:途切あり	-	-	-	-
AI あり 3 回目 (Wi-Fi+公衆網)	切断: 3 回 途切れ: あり 乱れ: なし 音声:途切あり	Wi-Fi: 1.1 公衆網: 1.1	Wi-Fi: 5.2 公衆網: 0.0	Wi-Fi: 28.0 公衆網: 115.2	回線切替 5 回
AI なし 3 回目 (Wi-Fi)	切断: 1 回 途切れ: あり 乱れ: なし 音声:途切あり	-	-	-	-

ローカル 5G+Wi-Fi 環境(ローカル 5G 負荷)およびローカル 5G+公衆網環境(ローカル 5G 負荷)においては、QoS 制御および回線切替が実施されているが、通信断を含む映像品質の劣化が発生した。QoS 優先度を上げる制御が実施されているものの通信断となっている場合があり、通信制御が間に合わなかったものと考えられる。

ローカル 5G+Wi-Fi 環境(Wi-Fi 負荷)においては、QoS 制御と回線切替制御の両方が実施されており、映像品質の劣化もなかった。ただし、AI なしでも映像品質の劣化はなかった。

Wi-Fi+公衆網環境(Wi-Fi 負荷)においては、全ての試行で回線切替が実施されたが、公衆網の通信帯域が不十分であり、公衆網への切替後に接続断が発生した。AI なしの測定においても映像途切れ、映像乱れが発生しているが、切断の回数は AI ありの方が多く、回線切替によって映像品質の劣化度合が悪化したと言える。

6.4.3 KPI/KGI との比較結果

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定性評価	1	AGV 映像品質が十分であり、作業者が安全に遠隔操作・判断できること
	2	カメラからの音声の途切れ・遅延が発生せず、明瞭に伝達できること
定量評価	3	AI 制御による負荷分散を活用した際のパケットロス率 1%以下
	4	必要スループット維持率 80%以上
	5	異常検知から復旧・切替時の通信途絶時間 0ms、通信途絶率 0%
	6	サービス不稼働率 0%

1) AGV 映像品質が十分であり、作業者が安全に遠隔操作・判断できること

6.4.2 5)~8)の AGV カメラでの検証結果において、映像途切れ、映像乱れ、更には通信断が発生した試行があり、これらの試行においては AGV 映像品質が十分とは言えず、目標値を達成できていない。映像途切れ、映像乱れ、および、通信断の主な原因としては、以下の 3 つがある。

第一の原因は、通信帯域が不十分な回線への切替が実施されたことである。無線エリア全域にてアプリケーションの所要帯域を確保できる通信回線が少なくともひとつは存在していなければ、通信制御を行ったとしても AGV 映像品質を維持することはできないが、今回の検証環境においてはどの回線でも所要帯域を確保できないポイントが存在しており、検証環境が適切ではなかったと言える。しかしながら、検証環境だけが原因ではなく、通信制御のアルゴリズムにも問題があったと考えられる。今回実装した通信制御 AI(ルールベース)は、切替先の無線回線については受信電界強度でのみ評価しており、その通信品質については考慮していないために、回線切替を実施することで更に通信品質が劣化する結果を招いた。切替先の回線で十分な通信帯域が確保できるかを事前に評価することができれば、制御の結果として通信品質が劣化することは回避できると考える。

第二の原因は、ローカル 5G の QoS 制御において、通信品質が十分に改善した際に QoS 優先度を下げた無線リソースの割り当てを減らす制御を行ったことである。通信品質が十分に改善したかどうかは異常検知 AI の出力結果によって判定しているが、異常検知 AI の出力結果は現在の回線状態を維持した場合に通信異常が発生する確率であり、異常発生確率がどんなに低くても、回線状態を変更しても問題ないことを保証するものではない。QoS 優先度を下げる制御の実施については、無線リソースの使用状況などの情報を基に判断する必要があると考えられる。

第三の原因は、通信制御 AI(ルールベース)において異常検知 AI の出力結果の平均値によって制御実施判定を行っていることにより制御遅延や制御未実施となったことである。異常検知 AI 出力結果の平均化は、異常検知 AI の誤検知によって不必要な通信制御が実施されることを回避するために実装したものであるが、異常検知 AI 出力結果の平均を取ることで、最初に異常を検知してから制御実施条件を満たすまでに遅延が生じたり、異常を検知しているものの平均値は制御実施条件を満足しなくなる場合がある。その結果、異常を検知しているにもかかわらず制御が間に合わなかったり、制御が実施されない場合があったと考えられる。今回の検証では直近 5 秒間の異常検知 AI 出力結果の移動平均を計算して制御実施判定を行ったが、移動平均を計算する時間については調整の余地があると考えられる。

検証全体としては目標値未達成となるが、回線の通信帯域が十分な環境下での検証、例えば、「1 端末における通信経路切替検証」におけるローカル 5G+Wi-Fi 環境では映像途切れ、映像乱れは発生しておらず、AGV 映像品質が十分であり、作業者が安全に遠隔操作・判断ができる結果となっていることから、部分的には目標達成と言える。

2) カメラからの音声の途切れ・遅延が発生せず、明瞭に伝達できること

6.4.2 5)~8)の AGV カメラでの検証結果において、ローカル 5G⇔Wi-Fi 環境では、音声を明瞭に伝達することができた。一方、ローカル 5G⇔公衆網環境、Wi-Fi⇔公衆網環境では、公衆網の通信帯域が不十分のため、映像といっしょに音声も途切れてしまった。

ローカル 5G⇔Wi-Fi 環境においては、目標値を達成し、音声を明瞭に伝達することができ要因として、以下が挙げられる。第一に、両回線ともに十分な通信帯域を確保できたことである。ローカル 5G は高速・大容量・低遅延の通信特性を有しており、また実証環境における Wi-Fi 環境も比較的安定した通信帯域を提供できたため、映像データと音声データを同時に伝送する際にも、音声通信に必要な帯域が確保できたと考えられる。第二に、異常検知 AI と通信制御 AI の連携により、通信品質の劣化が予測される際に適切なタイミングで回線切替が実施されたことである。6.4.2 5)~8)の検証結果に示されるように、ローカル 5G⇔Wi-Fi 環境ではパケットロス率 0.0~0.4%と極めて低い値を維持しており、音声パケットの欠落が最小限に抑えられたことが、明瞭な音声伝達を実現できた要因となっていると考えられる。

一方、ローカル 5G⇔公衆網環境および Wi-Fi⇔公衆網環境においては、目標値を達成できなかった。この原因として、屋内における公衆網の通信品質が原因であると考えられる。6.4.2 の 5)~8)の検証結果において、公衆網への切り替え後に映像途切れや映像乱れが発生したが、これは音声通信においても同様の問題が発生したことを示している。映像データは音声データよりもデータ量が大幅に大きいため、通信帯域が不足した場合、映像と音声の両方が同時に影響を受けることとなる。さらに、5)~8)の検証において「通信帯域が不十分な回線への切り替えが実施されたこと」が映像途切れの主要因の一つとして指摘されているが、この問題は音声通信にも直接的に影響している。通信制御 AI(ルールベース)が切替先の無線回線を受信電界強度のみで評価し、実際の通信品質(スループットや遅延)を考慮していなかったため、公衆網への切り替えにより通信品質がさらに劣化する結果を招いたと考えられる。

3) AI 制御による負荷分散を活用した際のパケットロス率 1%以下

電波環境変化時の条件化での検証となる「1 端末における通信経路切替検証」において、ローカル 5G+Wi-Fi 環境でのパケットロス率は 0.0~0.4%であり目標達成となった。ローカル 5G+公衆網環境ではパケットロス率が最大で 6.6%と 1%を超えることがあったが、1%を超えたのは公衆網のパケットロス率であり、公衆網の通信帯域が不十分であることが原因と考えられる。Wi-Fi+公衆網環境で AI 制御が実施された試行でのパケットロス率は最大で 1.9%であった。こちらも公衆網において発生しており、公衆網の通信帯域が不十分であることが原因と考えられる。

接続端末数の増加に伴うネットワーク負荷発生時の条件化での検証となる「多接続検証」においては、Wi-Fi および公衆網にてパケットロス率が 1%を超える試行があり、目標未達となった。Wi-Fi でのパケットロス率は検証環境の周辺で同一周波数が使用されていたなどの外的要因により発生した可能性が考えられる。公衆網でのパケットロスは通信帯域が不十分であったことに起因していると考えられる。

4) 必要スループット維持率 80%以上

「1 端末における通信経路切替検証 1 端末における通信経路切替検証」、「多接続検証」の AGV カメラおよび固定カメラ(8Mbps)での検証において、ローカル 5G+Wi-Fi 環境でのスループットは 7.9Mbps~9.3Mbps であり、必要スループットの 80%である 6.4Mbps 以上を維持できているため目標達成となる。ローカル 5G+公衆網環境および Wi-Fi+公衆網環境においては、公衆網の通信帯域が不十分であるため、スループットが 6.4Mbps を下回る試行があり、目標未達となった。尚、スループットが 6.4Mbps 未満に低下した試行では、全てで映像品質劣化が発生した。

「QoS 検証」の AGV カメラおよび固定カメラ(8Mbps)での検証におけるスループットは 7.8~8.9Mbps であった。QoS 制御によってスループット 6.4Mbps 以上を維持できており、目標達成となった。

5) 異常検知から復旧・切替時の通信途絶時間 0ms、通信途絶率 0%

「1 端末における通信経路切替検証 1 端末における通信経路切替検証」において、ローカル 5G+Wi-Fi 環境での試行では映像途切れ、映像乱れの発生はなく、回線切替時の通信途絶時間 0ms、通信途絶率 0%の目標を達成できた。ローカル 5G+公衆網環境および Wi-Fi+公衆網環境では公衆網への切替時に映像途切れ、映像乱れが発生した試行があり目標未達となった。これらは公衆網の通信帯域が不十分であったことに起因すると考えられる。

「多接続検証」においては、ローカル 5G+Wi-Fi 環境でも映像途切れ、映像乱れが発生した試行があったが、回線切替時には映像途切れ、映像乱れ発生しておらず、回線切替後に発生しているため、目標達成と言える。映像途切れ、映像乱れは Wi-Fi 通信時に発生しており、検証環境の周辺で同一周波数が使用されていたなどの外的要因により発生した可能性が考えられる。ローカル 5G+公衆網環境および Wi-Fi+公衆網環境では公衆網への切替時に映像途切れ、映像乱れが発生した試行があり目標未達となった。これらは公衆網の通信帯域が不十分であったことに起因すると考えられる。

6) サービス不稼働率 0%

「総合的なサービスレベル指標維持」検証において、映像途切れ、映像乱れ、更には通信断が発生した試行があった。これらの試行においては、サービス不稼働となる時間帯があり、目標値を達成できていない。通信品質の劣化原因については、1)で述べた通りである。

ただし、ローカル 5G+Wi-Fi 環境で Wi-Fi 側に負荷を掛けた試行では、映像途切れ、映像乱れ、通信断のいずれも発生しておらず、サービス不稼働率 0%となり目標達成となっている。この試験条件のみで検証エリア全域で通信帯域を確保できる状態にあったものと考えられる。

6.4.4 考察

本検証の結果としては、十分な映像品質を確保できず目標値を満足できない場合が存在したが、一方で、通信異常を事前に検知し、通信異常を回避する通信制御により映像品質を維持できた場合もあり、検証技術を活用することにより一定の効果が期待できることを確認した。実際、「総合的なサービスレベル指標維持」検証において、QoS 制御、回線切替制御のいずれか、または、両方が実施された試行数は 29 であり、その内 10 試行では映像品質の劣化が発生しておらず、全試行の約 34%において検証技術による効果があったと言える。

社会実装に向けては、通信制御 AI の性能改善が課題と考える。具体的には、通信品質の悪い回線への切替を回避するために、通信制御を実施した後の通信品質を事前に評価した上で通信制御を実施する必要がある。そのためには、切替先の回線状態を受信電界強度のみではなく、無線チャネルの品質や無線リソースの占有率などを使って評価することが有効と考える。また、異常検知 AI の出力結果の平均化処理を見直すことで、通信異常が検知されてから通信制御が実施されるまでの遅延を短縮することも改善効果が高いと考える。通信制御 AI の性能が改善されることで、より汎用的な環境においても効果が期待できるものと考ええる。

他の通信手段との比較としては、単一の無線ネットワークのみを使用した場合、或いは、QoS が固定の場合では無線環境や通信回線の混雑状況の変化による通信異常の発生を避けられなかったのに対し、本検証技術の適用により無線環境や通信回線の混雑状況に変化があっても安定した通信品質を維持できる点で優位性があると考ええる。

国内市場の拡大および地域社会・産業の課題解決への貢献として、製造業や物流業における DX 推進が期待できる。本検証技術の適用により重要なアプリケーション通信の信頼性を高めることが可能となるため、これまで無線での接続が困難だった高い信頼性が求められるアプリケーションも無線で接続できるようになり、より柔軟なネットワーク設計が可能になると考える。

類似技術との比較における本技術の先進性・新規性としては、通信障害の予測的回避と動的な通信リソース最適化を同時に実現する点にある。例えば、複数の無線回線を使って冗長通信することで比較的容易に通信障害を回避することは可能であるが、冗長分の無線リソースも常時使用することとなり、限られた無線資源を浪費していることになる。一方で、本技術においては、無線回線を切り替えて使用することで、必要最低限の無線リソースを使用しながらも通信障害を回避することが可能となっており、通信品質の維持とシステム全体としての無線リソース有効活用を同時に可能にできる点に先進性・新規性があると考ええる。

本検証技術を有効に機能させるためには、適切に無線エリア設計されていることが必要となる。具体的には、アプリケーションが通信するエリア全域において、アプリケーション所要帯域を確保できる無線回線が少なくともひとつは存在するように各無線エリアを配置しなければならない。どの無線回線でもアプリケーション所要帯域が確保できないならば、本検証技術を活用したとしてもアプリケーション通信品質を維持することはできないためである。適切な無線エリアが構築された環境下においてのみ、本検証技術による効果が期待できるという点には留意が必要と考える。

6.5 ユースケース④:分散ネットワークにおける新たな AI ソリューションの創出

当該ユースケースは実施しなかった。

6.6 拡張性に関する検証

6.6.1 実証スケジュール

ユースケース	フェーズ	2025年									2026年		
		5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月		
拡張性に関する検証	実証準備 (事前計測、物品調達等)		機器調達			異常検知AI構築 通信制御AI構築 (ルールベース)			異常検知AI構築 通信制御AI構築 (機械学習)				
	実証			環境構築		横展開先の選定		ヒアリング			環境構築	現地実証 (製造棟)	
	実証評価											報告書作成	

評価項目の結果

番号	評価項目
1	異なる産業・分野への横展開の可能性検証
2	異なる条件・環境のネットワーク測定
3	異なる条件・環境への横展開の可能性検証
4	ネットワークのスケラビリティ検証

1) 異なる産業・分野への横展開の可能性検証

異なる産業・分野への横展開の可能性検証を行うため、各産業分野の関係者にヒアリングを行った。以下に各ヒアリング結果を示す。

①物流業

物流業として、ロジスティード様、ロジスティードソリューションズ様にヒアリングを行った。ヒアリング結果を以下に示す。

表 6.6-1 物流業へのヒアリング結果

#	大項目	ヒアリング事項	ヒアリング結果
1	無線環境	無線技術 (Wi-Fi、公衆網、ローカル 5G)の種類について	<ul style="list-style-type: none"> ・倉庫内で主にWi-Fiを活用しており、一部公衆網も活用している。 ・ローカル 5G については活用していない。
2	無線環境	無線を利用しているアプリケーションについて	<ul style="list-style-type: none"> ・Wi-Fi はハンディーターミナルやタブレットのピッキング作業で利用している。AMR の位置情報・制御信号でも利用している。 ・タブレットについては一部公衆網も利用している。
3	無線環境	上記アプリケーションのデータ伝送容量について	<ul style="list-style-type: none"> ・上記アプリケーションの伝送容量は、映像配信のような大容量データは送信していない
4	無線障害	無線を利用しているとき、障害が発生して運用が停止した事象の有無	<ul style="list-style-type: none"> ・倉庫内は日々荷物の設置レイアウトが変わる。金属製品や液体製品などにより倉庫内の電波が弱くなり、Wi-Fi が届きにくい場所ができたことがある。発生頻度についてはレイアウト状況による。 ・アクセスポイントの故障により、Wi-Fi エリアが縮小したことがある。
5	無線障害	上記事象の通信断の発生回数や障害の種類について	
6	無線障害	障害検知から復旧完了までの平均時間、対応の要する人員数について	<ul style="list-style-type: none"> ・レイアウト変更による電波が弱くなる状況では、臨時にアクセスポイントを設置したり、作業エリアを電波が強い場所に変更したりする ・機器の故障については、現場最寄りの本部から IT 担当者が移動し、対応する。
7	その他	アプリケーションの優先順位付けは実施しているのか	<ul style="list-style-type: none"> ・データ量が少ないこともあり、特にな

②防災業

防災業として国際電気防災担当者や関連事業者にヒアリングを行った。ヒアリング結果を以下に示す。

表 6.6-2 防災業へのヒアリング結果

#	大項目	ヒアリング事項	ヒアリング結果
1	無線環境	無線技術(Wi-Fi、公衆網、ローカル 5G)の種類について	・専用無線を使っており、Wi-Fi、公衆網、ローカル 5G については活用していない
2	無線環境	無線を利用しているアプリケーションについて	-
3	無線環境	上記アプリケーションのデータ伝送容量について	-
4	無線障害	無線を利用しているとき、障害が発生して運用が停止した事象の有無	・機器故障時はシステムダウンしてしまうため、情報伝達の多重化・多層化を行い、冗長性を確保している。そのため運用が停止することはない。
5	無線障害	上記事象の通信断の発生回数や障害の種類について	
6	無線障害	障害検知から復旧完了までの平均時間、対応の要する人員数について	-
7	その他	アプリケーションの優先順位付けは実施しているのか	-

③航空業

航空業として、株式会社 JAL スカイ様、株式会社 JAL グランドサービス様にヒアリングを行った。ヒアリング結果を以下に示す。

表 6.6-3 航空業へのヒアリング結果

#	大項目	ヒアリング事項	ヒアリング結果
1	無線環境	無線技術(Wi-Fi、LTE、ローカル 5G)の種類について	<ul style="list-style-type: none"> ・空港では社内 Wi-Fi、公衆網、IP 無線、MCA 無線を使用している。 ・ローカル 5G は導入していない。
2	無線環境	無線を利用しているアプリケーションについて	<ul style="list-style-type: none"> ・スマホ・タブレット(iPhone、iPad)を業務端末として使用している。 ・監視カメラシステムでロビー、カウンター、搭乗口、飛行機をリアルタイムで撮影し、オペレーション業務に活用している。 ・IP 無線機を通信手段として使用している
3	無線環境	上記アプリケーションのデータ伝送容量について	<ul style="list-style-type: none"> ・監視カメラは有線でアップロード、無線でダウンロードのみ。 ・映像配信のような大容量データの無線伝送は行っていない。
4	無線障害	無線を利用しているとき、障害が発生して運用が停止した事象の有無	<ul style="list-style-type: none"> ・毎日ではないが、通信の状態が悪くなることもある。 ・日中の混雑時(お客様と社員の端末数増加)につながりにくい状況が発生することがある。ただし原因は不明である。
5	無線障害	上記事象の通信断の発生回数や障害の種類について	<ul style="list-style-type: none"> ・飛行機が到着したタイミングや日中の混雑時に、利用者数の増加によりつながりにくくなることもある。 ・コンテナ、飛行機、格納庫などの物理的障害物による影響は特に報告されていない。
6	無線障害	障害検知から復旧完了までの平均時間、対応の要する人員数について	<ul style="list-style-type: none"> ・MCA 無線がつながらなくなった事象はないが、万が一つながらなくなった場合は、他の用途で使用している IP 無線やトランシーバー、電話などで代替対応が可能である。
7	その他	アプリケーションの優先順位付けは実施しているのか	<ul style="list-style-type: none"> ・明示的な優先順位付けの実施については言及なし

本ヒアリング結果を踏まえ、各産業分野における本実証で開発した AI の適用可否を以下のように判断した。

①物流業:適用可能

物流倉庫では、レイアウト変更に伴う大型遮蔽物(金属棚、液体製品等)の移動により電波環境が日々変化し、Wi-Fi が届きにくい場所が発生している。また、アクセスポイント故障による通信エリア縮小も確認されている。これらの課題に対し、本実証で開発した AI によるリアルタイム通信監視・異常検知・自動経路切り替え技術を適用することで、以下の効果が期待できる。

第一に、電波環境の変動をリアルタイムに解析し、障害発生を事前に予測することで、通信品質の維持と運用停止リスクの低減が可能となる。第二に、障害検知や復旧対応を自動化することで、復旧時間の短縮と人員負荷の軽減が実現できる。第三に、既存のアプリケーションは通信データ量が軽量であるため、AIによる通信最適化や優先制御を導入してもシステム負荷が低く、業務への影響が少ない。

また、現時点ではWi-Fiを主に活用しつつ、一部のタブレット端末では公衆網も併用する運用が行われており、本実証で構築するハイブリッドネットワーク環境の基盤が既に存在している。ローカル 5G 未導入の現状においても、AI は Wi-Fi や公衆網の最適化に対応可能であり、将来的なローカル 5G 導入時にも容易に適応できる拡張性を備えている。

以上の理由から、本実証で開発した AI は物流分野における実際の課題解決に有効である。特に、以下のような物流事業者への横展開の可能性が高いと判断した。第一に、大規模倉庫を運営し、日常的にレイアウト変更が発生する事業者である。第二に、金属製品や液体製品など電波遮蔽性の高い荷物を多く取り扱う事業者である。第三に、AGV やロボットなど自動化設備の導入を進めており、リアルタイム通信の安定性が業務継続に直結する事業者である。これらの条件下では、通信環境の変動に柔軟に対応できる本技術の適用価値が特に高まると考えられる

②防災業:適用困難

防災分野では、専用無線システムを使用しており、Wi-Fi、公衆網、ローカル 5G といった本実証で対象とする無線技術は活用されていない。また、機器故障時のシステムダウンを防ぐため、情報伝達の多重化・多層化により十分な冗長性が既に確保されており、運用停止が発生しない体制が構築されている。

本実証で開発した AI は、ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網といった汎用無線技術のハイブリッド制御を前提としているため、専用無線システムを主体とする防災分野への直接的な適用は技術的に困難である。また、既に高い冗長性と可用性が確保されている現状において、開発した AI による通信最適化の必要性は低いと判断される。

したがって、防災分野への本実証技術の横展開は、現時点では適用可能性が低いと結論づけた。

③航空業:限定的に適用可能

航空業では、社内 Wi-Fi、公衆網(LTE)、IP 無線、MCA 無線といった複数の無線技術を活用しており、スマホ・タブレットによる業務端末や監視カメラシステムのダウンロードに無線通信が使用されている。日中の混雑時に利用者数の増加により通信がつながりにくくなる事象が確認されているものの、原因は不明とされている。

本実証で開発した AI は、混雑時の通信品質悪化を事前に検知し、最適な無線回線への自動切り替えを行うことで、通信品質の安定化に寄与できる可能性がある。特に、社内 Wi-Fi と公衆網(LTE)のハイブリッド制御により、混雑時の負荷分散を実現し、つながりにくい状況の改善が期待できる。

ただし、航空業特有の課題として以下の点が確認された。第一に、MCA 無線が繋がらなくなった場

合の代替手段として、IP無線やトランシーバー、電話による手動の切り替えが既に運用されており、自動切り替えの必要性は相対的に低いことである。第二に、監視カメラの映像アップロードは有線で行われており、無線伝送による大容量データ通信の最適化という本実証の主要な適用場面が存在しないことである。

以上を踏まえると、航空業への本実証技術の適用は、混雑時の通信品質安定化という限定的な場面において有効性が見込まれるものの、適用効果は限定的であると判断される。

一方で、将来的な横展開の可能性としては、以下のような航空事業者への適用が期待される。第一に、貨物専門の航空事業者や貨物取扱量の多い空港において、AGV や無人搬送車の導入が進む場合である。第二に、広大な敷地面積を持つ大規模空港において、有線インフラの整備が困難なエリアでの無線通信需要が高まる場合である。これらの条件下では、複数の無線回線を自動的に最適化する本技術の適用価値が高まることが期待される

2) 異なる条件・環境のネットワーク測定

以下に測定地点ごとに無線機器からの見通し状況(LOS/NLOS)を示す。

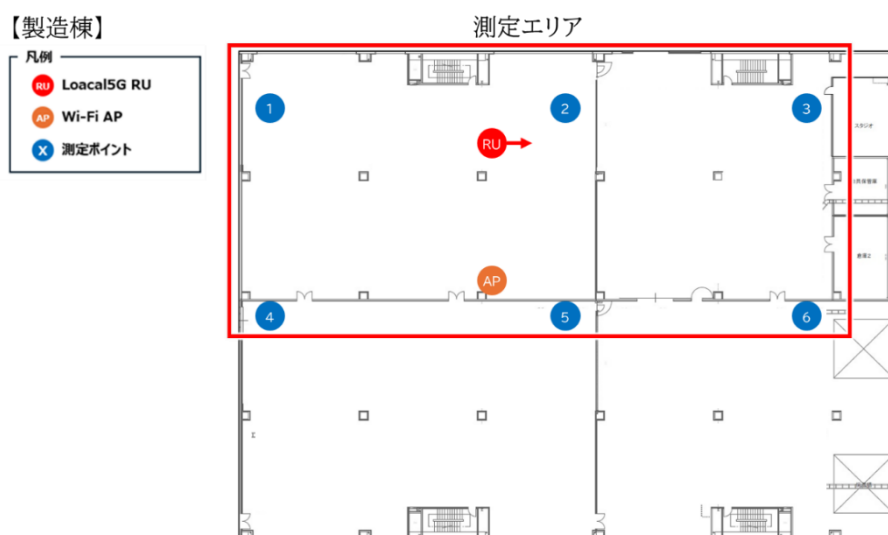


図 6.6-1 製造棟の測定ポイント

表 6.6-4 測定点・通信方式別 LOS/NLOS 状況一覧

測定地点	エリア	ローカル 5G	Wi-Fi AP	公衆網
1	窓際	NLOS	NLOS	NLOS
2		LOS	NLOS	NLOS
3		NLOS	NLOS	NLOS
4	通路側	NLOS	NLOS	NLOS
5		NLOS	LOS	NLOS
6		NLOS	NLOS	NLOS

公衆網は、屋外の基地局を参照点としているため、全ポイントが NLOS 環境となった。また製造棟は壁が多く、Wi-Fi AP についても、全測定地点で NLOS 環境となった。

各測定地点にて、受信電界強度、ネットワーク性能(UL スループット、パケットロス率、遅延時間)の測定を行った。以下にローカル 5G の測定結果を示す。

【製造棟】

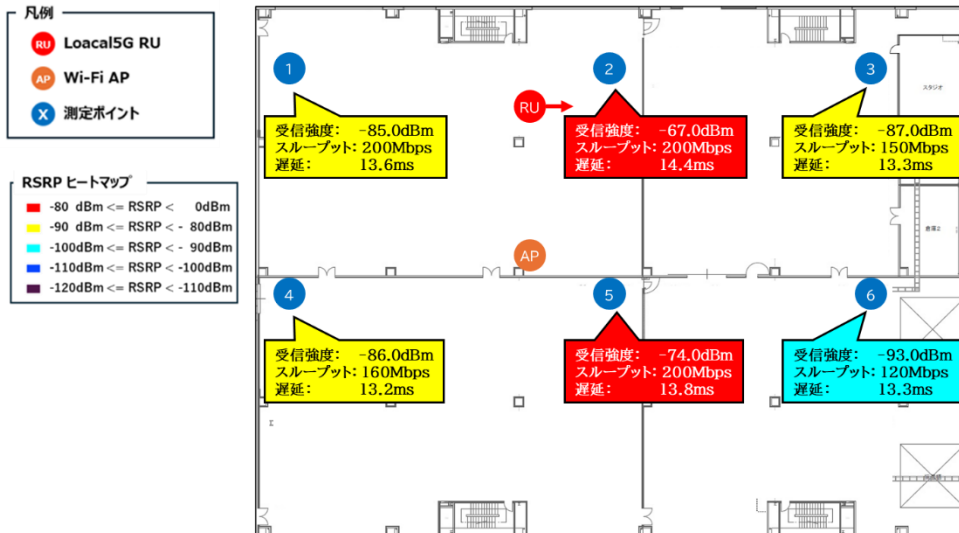


図 6.6-2 ローカル 5G 使用時の各ポイントの測定結果

表 6.6-5 ローカル 5G 使用時の各ポイントの測定結果

測定地点	受信電界強度 [dBm]	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	遅延時間 [ms]
1	-85.0	200	3.0	13.6
2	-67.0	200	3.0	14.4
3	-87.0	150	3.0	13.3
4	-86.0	160	3.0	13.2
5	-74.0	200	3.0	13.8
6	-93.0	120	3.0	13.3

上記の結果から、本実証環境におけるローカル 5G は、RSRP が-80dBm 程度の測定地点ではスループットは約 190~200Mbps となる一方、RSRP が-85dBm 以下の測定地点においては受信電界強度の低下に伴いスループット性能が 20~30%程度劣化することを確認できた。

次に Wi-Fi AP を使用した各測定地点にて、受信電界強度、ネットワーク性能(UL スループット、パケットロス率、遅延時間)の測定結果を示す。

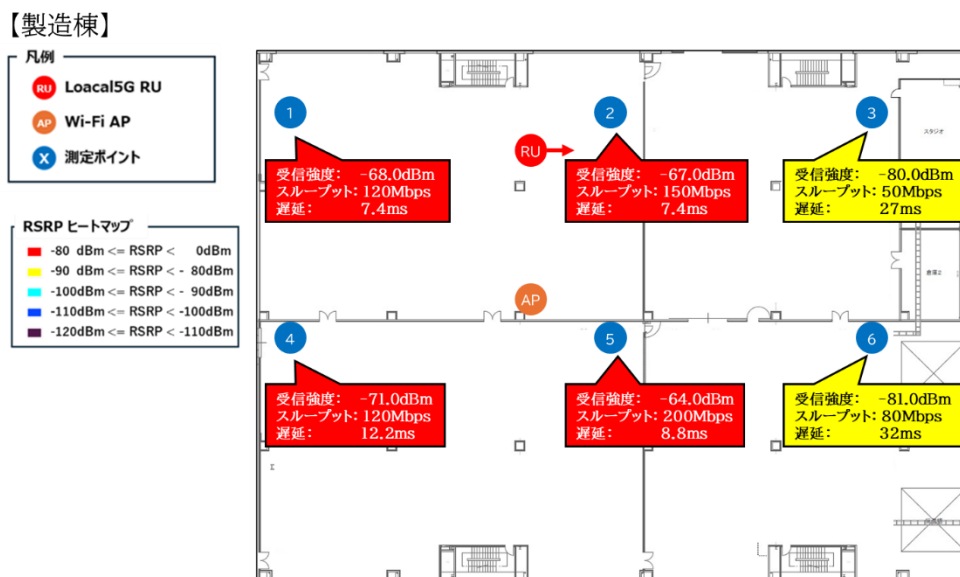


図 6.6-3 Wi-Fi 使用時の各ポイントの測定結果

表 6.6-6 Wi-Fi 使用時の各ポイントの測定結果

測定地点	受信電界強度 [dBm]	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	遅延時間 [ms]
1	-68.0	120	1.0	7.4
2	-67.0	150	1.0	7.3
3	-80.0	50	1.0	27
4	-71.0	120	1.0	12.2
5	-64.0	200	1.0	8.8
6	-81.0	80	1.0	32

Wi-Fi AP は、多くの測定地点において 120Mbps 以上の高スループットを示す結果となった。一方、一部の測定地点ではスループットが約 80Mbps まで低下しており、設置環境や遮蔽物の影響に起因する性能変動が観測された。

最後に公衆網を使用した各測定地点にて、受信電界強度、ネットワーク性能(UL スループット、パケットロス率、遅延時間)の測定結果を示す。

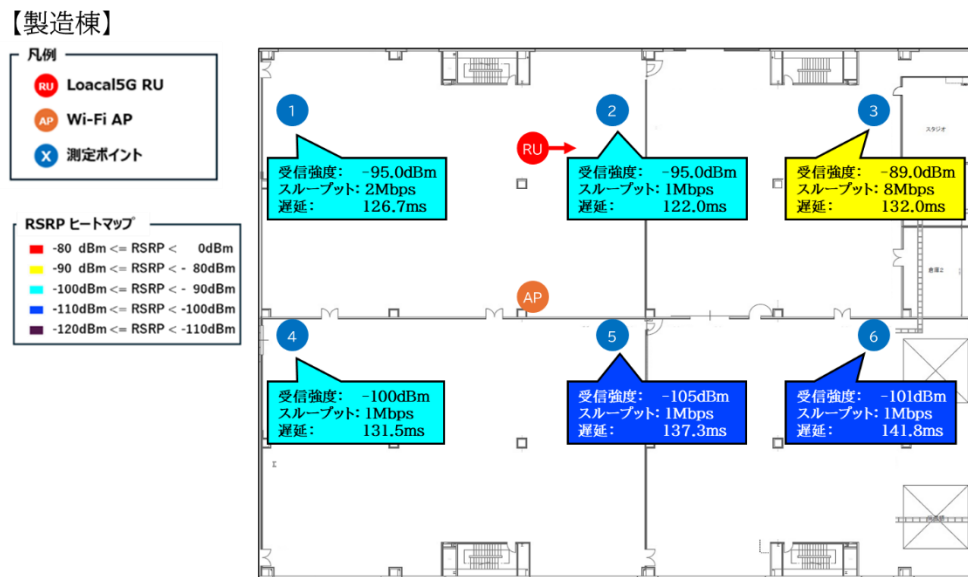


図 6.6-4 公衆網使用時の各ポイントの測定結果

表 6.6-7 公衆網使用時の各ポイントの測定結果

測定地点	受信電界強度 [dBm]	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	遅延時間 [ms]
1	-95.0	2	0.0	126.7
2	-95.0	1	0.0	122.0
3	-89.0	8	0.0	132.0
4	-100.0	1	0.0	131.5
5	-105.0	1	0.0	137.3
6	-101.0	1	0.0	141.8

公衆網は受信電界強度が良好な一部の測定地点においてのみ 8Mbps 程度のスループットを確認できたが、多くの測定地点では要件を満たさない結果となった。そのため、アプリケーション要件の安定的な確保は困難であり、全測定地点に対して受信電界強度が良好なポイントは 15%程度に限定されることがわかった。

3) 異なる条件・環境への横展開の可能性検証

以下にローカル 5G 基地局周辺に物流倉庫内の搬送物を模擬したトタンを設置した際の受信電界強度、ネットワーク性能(UL スループット、パケットロス率、遅延時間)の結果を示す。

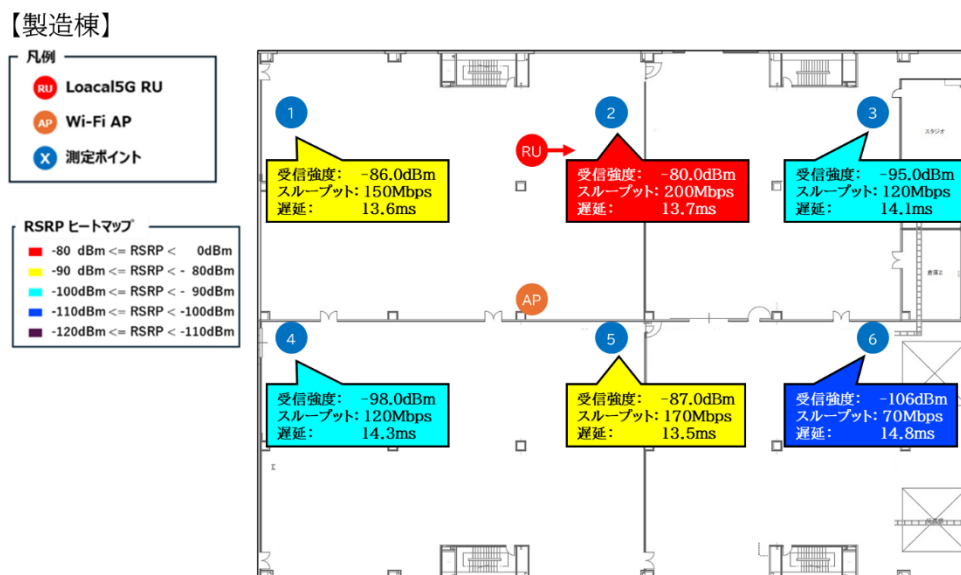


図 6.6-5 6.6-6 ローカル 5G 使用時の各ポイントの測定結果

表 6.6-8 ローカル 5G 使用時の各ポイントの測定結果

測定地点	トタンなし		トタンあり			
	受信電界強度 [dBm]	スループット [Mbps]	受信電界強度 [dBm]	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	遅延時間 [ms]
1	-85.0	200	-86.0	150	0.0	13.6
2	-67.0	200	-80.0	200	0.0	13.7
3	-87.0	150	-95.0	120	0.0	14.1
4	-86.0	160	-98.0	120	0.0	14.3
5	-74.0	200	-87.0	170	0.0	13.5
6	-93.0	120	-106.0	70	0.0	14.8

上記の結果から、ローカル 5G 基地局周辺にトタンを設置した場合、受信電界強度が劣化する結果となった。この結果をもとに異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(ルールベース)の組み合わせと異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(機械学習)の組み合わせにて実施した。

以下に異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(ルールベース)の測定結果を示す。

表 6.6-9 異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(ルールベース)の測定結果

測定ポイント	映像品質	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	経路切り替え
⑤ 1回目	途切れ: なし 乱れ: なし	L5G: 8.0 Wi-Fi: 7.9	L5G: 0.0 Wi-Fi: 0.0	L5G: 12.6 Wi-Fi: 6.0	あり
⑤ 2回目	途切れ: なし 乱れ: なし	L5G: 7.9 Wi-Fi: 8.0	L5G: 0.0 Wi-Fi: 0.0	L5G: 12.4 Wi-Fi: 5.0	あり
⑤ 3回目	途切れ: なし 乱れ: なし	L5G: 8.0 Wi-Fi: 8.0	L5G: 0.0 Wi-Fi: 0.0	L5G: 11.9 Wi-Fi: 5.1	あり

以下に異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(機械学習)の測定結果を示す。

表 6.6-10 異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(機械学習)の測定結果

測定ポイント	映像品質	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	経路切り替え
⑤ 1回目	途切れ: なし 乱れ: なし	L5G: 8.0 Wi-Fi: -	L5G: 0.0 Wi-Fi: -	L5G: 12.6 Wi-Fi: -	なし 異常検知 AI: 異常予測なし
⑤ 2回目	途切れ: なし 乱れ: なし	L5G: 7.9 Wi-Fi: -	L5G: 0.0 Wi-Fi: -	L5G: 12.4 Wi-Fi: -	なし 異常検知 AI: 異常予測
⑤ 3回目	途切れ: なし 乱れ: なし	L5G: 8.0 Wi-Fi: -	L5G: 0.0 Wi-Fi: -	L5G: 11.9 Wi-Fi: -	なし 異常検知 AI: 異常予測

異常検知 AI(機械学習) + 通信制御 AI(機械学習)では通信経路が切り替わらなかったため、異常検知 AI の出力結果を以下に示す。

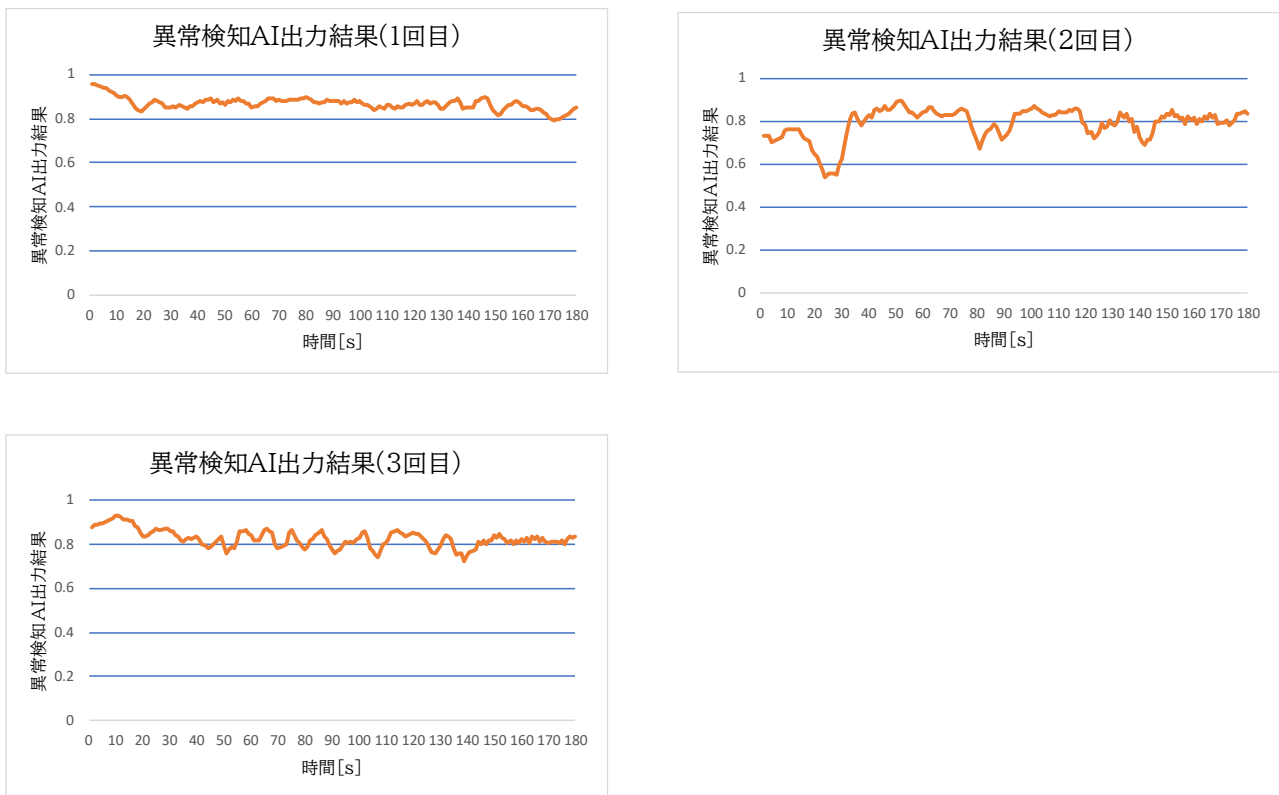


図 6.6-7 異常検知 AI(機械学習) + 通信制御 AI(機械学習)時の異常検知 AI 出力結果

通信制御 AI(ルールベース)のときは、異常検知 AI(機械学習)の出力結果が図 6.6-7 のように 0.8 を下回ると通信経路が切り替わっていたが、通信制御 AI(機械学習)では通信経路が切り替わらなかった。これは以下要因が考えられる。

第一に、RTT 取得タイミングとサンプリング頻度の問題が挙げられる。本検証では 1 秒に 1 回 RTT を取得しているが、この単一の RTT 測定結果に判断が依存しているため、測定タイミングにおいて RTT の結果が遅延していると、異常検知 AI の出力結果は悪化する傾向にある。瞬間的なネットワークの揺らぎや一時的な遅延が、本来の通信品質を正確に反映しない可能性がある。この問題に対しては、1 秒間に複数回 RTT を取得する、または複数機器の RTT を平均化するなどの統計処理を追加することで、より安定した判断が可能になると考えられる。

第二に、学習データの不均衡または不足が考えられる。通信制御 AI(機械学習)の学習段階において、切り替えが必要となる異常状態のサンプルデータが十分に含まれていなかった可能性がある。特に、異常検知 AI の出力が 0.8 を下回るような状況の学習が不十分であった場合、モデルは適切な切り替え判断を行えない。通信制御 AI(ルールベース)では明示的な閾値による判断を行うため、学習データの質や量に依存せず動作する。今後はより多様な異常パターンを含む学習データセットの構築が必要である。

第三に、特徴量の設計や重み付けの問題が考えられる。通信制御 AI(機械学習)が異常検知 AI の出力値を特徴量として適切に取り込めていない、またはその特徴量の重要度が低く設定されてしまっている可能性がある。機械学習モデルは複数の特徴量から総合的に判断を行うため、RTT やスループット、パケットロス率などの他の特徴量の影響が強い場合、異常検知 AI が異常を示しているにもかかわらず、それが切り替え判断に十分反映されない可能性があり、これが原因で通信経路が切り替わらなかったと考えられる。

4) ネットワークのスケラビリティ検証

本検証では、物流倉庫環境を模擬した製造棟において、接続端末数の増加に伴うネットワーク負荷が発生した場合における、AI制御による通信品質維持能力を検証した。検証は、ローカル 5G⇄Wi-Fi エリアおよび Wi-Fi⇄公衆網エリアの 2 つの環境において実施し、異常検知 AI(機械学習)と通信制御 AI(ルールベース)の組み合わせ、および異常検知 AI(機械学習)と通信制御 AI(機械学習)の組み合わせについて、それぞれ測定を行った。

■ローカル 5G⇄Wi-Fi エリアの検証結果

(1) 異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(ルールベース)の測定結果

以下にローカル 5G 接続開始時の測定結果を示す。

表 6.6-11 ローカル 5G 接続開始時の測定結果

測定ポイント	映像品質	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	経路切り替え
③ → ② → ⑤ →④ 1 回目	途切れ: なし 乱れ: なし	L5G: 8.1 Wi-Fi: 8.3	L5G: 0.0 Wi-Fi: 0.0	L5G: 12.3 Wi-Fi: 5.7	あり
③ → ② → ⑤ →④ 2 回目	途切れ: なし 乱れ: なし	L5G: 8.1 Wi-Fi: 8.0	L5G: 0.0 Wi-Fi: 0.0	L5G: 13.5 Wi-Fi: 6.0	あり
③ → ② → ⑤ →④ 3 回目	途切れ: なし 乱れ: なし	L5G: 8.4 Wi-Fi: 8.2	L5G: 0.0 Wi-Fi: 0.0	L5G: 13.4 Wi-Fi: 4.9	あり

次に Wi-Fi 接続開始時の測定結果を示す。

表 6.6-12 Wi-Fi 接続開始時の測定結果

測定ポイント	映像品質	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	経路切り替え
④ → ⑤ → ② →③ 1 回目	途切れ: なし 乱れ: なし	L5G: 8.1 Wi-Fi: 8.3	L5G: 0.0 Wi-Fi: 0.0	L5G: 12.3 Wi-Fi: 6.4	あり
④ → ⑤ → ② →③ 2 回目	途切れ: なし 乱れ: なし	L5G: 8.1 Wi-Fi: 8.0	L5G: 0.0 Wi-Fi: 0.0	L5G: 13.3 Wi-Fi: 6.8	あり
④ → ⑤ → ② →③ 3 回目	途切れ: なし 乱れ: なし	L5G: 8.0 Wi-Fi: 8.1	L5G: 0.0 Wi-Fi: 0.0	L5G: 13.2 Wi-Fi: 6.5	あり

ローカル 5G 接続開始の場合、3 回の測定すべてにおいて、経路切り替えが実行され、映像の途切れや乱れは発生しなかった。ローカル 5G 接続時のスループットは 8.1~8.4Mbps、Wi-Fi 切り替え後のスループットは 8.0~8.3Mbps と、いずれも目標スループット 8Mbps を維持した。パケットロス率は全測定で 0.0%であった。RTT については、ローカル 5G 接続時は 12.3~13.5ms、Wi-Fi 接続時は 4.9~6.0ms であった。

Wi-Fi 接続開始の場合も、3 回の測定すべてにおいて、経路切り替えが実行され、映像の途切れや乱れは発生しなかった。Wi-Fi 接続時のスループットは 8.0~8.1Mbps、ローカル 5G 切り替え後のスループットは 8.1Mbps と、いずれも目標スループット 8Mbps を維持した。パケッ

トロス率は全測定で 0.0%であった。RTT については、Wi-Fi 接続時は 6.4~6.8ms、ローカル 5G 接続時は 12.3~13.3ms であった

(2) 異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(機械学習)の測定結果

以下にローカル 5G 接続開始時の測定結果を示す。

表 6.6-13 ローカル 5G 接続開始時の測定結果

測定ポイント	映像品質	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	経路切り替え
③ → ② → ⑤ →④ 1 回目	途切れ: なし 乱れ: なし	L5G: 8.0 Wi-Fi: -	L5G: 0.0 Wi-Fi: -	L5G: 13.0 Wi-Fi: -	QoS 変更 切り替えなし
③ → ② → ⑤ →④ 2 回目	途切れ: なし 乱れ: なし	L5G: 8.1 Wi-Fi: -	L5G: 0.0 Wi-Fi: -	L5G: 13.1 Wi-Fi: -	QoS 変更 切り替えなし
③ → ② → ⑤ →④ 3 回目	途切れ: なし 乱れ: なし	L5G: 8.0 Wi-Fi: -	L5G: 0.0 Wi-Fi: -	L5G: 12.7 Wi-Fi: -	QoS 変更 切り替えなし

次に Wi-Fi 接続開始時の測定結果を示す。

表 6.6-14 Wi-Fi 接続開始時の測定結果

測定ポイント	映像品質	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	経路切り替え
④ → ⑤ → ② →③ 1 回目	途切れ: なし 乱れ: なし	L5G: - Wi-Fi: 8.0	L5G: - Wi-Fi: 0.0	L5G: - Wi-Fi: 10.5	なし 異常検知 AI: 異常予測なし
④ → ⑤ → ② →③ 2 回目	途切れ: なし 乱れ: なし	L5G: - Wi-Fi: 8.0	L5G: - Wi-Fi: 0.0	L5G: - Wi-Fi: 7.1	なし 異常検知 AI: 異常予測あり
④ → ⑤ → ② →③ 3 回目	途切れ: なし 乱れ: なし	L5G: - Wi-Fi: 8.0	L5G: - Wi-Fi: 0.0	L5G: - Wi-Fi: 16.4	なし 異常検知 AI: 異常予測なし

ローカル 5G 接続開始の場合、3 回の測定すべてにおいて、経路切り替えは発生せず、QoS 変更のみが実行された。映像の途切れや乱れは発生しなかった。ローカル 5G 接続時のスループットは約 8.0Mbps と目標スループット 8Mbps を維持した。パケットロス率は全測定で 0.0% であった。RTT は約 13ms であった。

Wi-Fi 接続開始の場合、3 回の測定すべてにおいて、経路切り替えは発生しなかった。映像の途切れや乱れは発生しなかった。Wi-Fi 接続時のスループットは約 8.0Mbps と目標スループット 8Mbps を維持した。パケットロス率は全測定で 0.0% であった。RTT は 7.1~16.4ms であった。なお、3 回中 1 回の測定において異常検知 AI が異常を予測したが、通信制御 AI による切り替えは実行されなかった。

■Wi-Fi⇄公衆網エリアの検証結果

(1) 異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(ルールベース)の測定結果

以下に Wi-Fi 接続開始時の測定結果を示す。

表 6.6-15 Wi-Fi 接続開始時の測定結果

測定ポイント	映像品質	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	経路切り替え
③→②→⑤ 1回目	途切れ: なし 乱れ: あり	Wi-Fi: 8.1 公衆網: 8.0	Wi-Fi: 0.0 公衆網: 0.0	Wi-Fi: 10.0 公衆網: 154	あり
③→②→⑤ 2回目	途切れ: あり 乱れ: あり	Wi-Fi: 8.0 公衆網: 8.0	Wi-Fi: 0.0 公衆網: 0.0	Wi-Fi: 16.7 公衆網: 152	あり
③→②→⑤ 3回目	途切れ: あり 乱れ: あり	Wi-Fi: 8.0 公衆網: 8.1	Wi-Fi: 0.0 公衆網: 0.0	Wi-Fi: 9.2 公衆網: 104	あり

次に公衆網接続開始時の測定結果を示す。

表 6.6-16 公衆網接続開始時の測定結果

測定ポイント	映像品質	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	経路切り替え
⑤→②→③ 1回目	途切れ: なし 乱れ: あり	Wi-Fi: 8.9 公衆網: 7.5	Wi-Fi: 0.0 公衆網: 0.0	Wi-Fi: 5.2 公衆網: 193	あり
⑤→②→③ 2回目	途切れ: あり 乱れ: あり	Wi-Fi: - 公衆網: 4.2	Wi-Fi: - 公衆網: 0.0	Wi-Fi: - 公衆網: 177	切り替え前に 映像断
⑤→②→③ 3回目	途切れ: あり 乱れ: あり	Wi-Fi: - 公衆網: 2.6	Wi-Fi: - 公衆網: 0.0	Wi-Fi: - 公衆網: 309	切り替え前に 映像断

Wi-Fi 接続開始の場合、3回の測定すべてにおいて経路切り替えが実行された。1回目の測定では映像の途切れは発生しなかったが乱れが発生し、2回目および3回目の測定では切り替え後に映像の途切れおよび乱れが発生した。スループットについては、Wi-Fi 接続時は 8.0～8.1Mbps、公衆網切り替え後は 8.0～8.1Mbpsと目標スループット 8Mbps を維持した。RTT については、Wi-Fi 接続時は 9.2～16.7ms であったが、公衆網切り替え後は 104～154ms と大幅に増加した。パケットロス率は全測定で 0.0%であった。

公衆網接続開始の場合、1回目の測定では経路切り替えが実行され、映像の途切れは発生しなかったが乱れが発生した。公衆網接続時のスループットは 7.5Mbps、Wi-Fi 切り替え後は 8.9Mbps であった。RTT については、公衆網接続時は 193ms、Wi-Fi 切り替え後は 5.2ms であった。2回目および3回目の測定では、経路切り替えが実行される前に映像が途切れ、公衆網接続時のスループットは 2.6～4.2Mbps と目標値 8Mbps を大きく下回り、RTT は 177～309ms と非常に高い値を示した。

(2) 異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(機械学習)の測定結果

以下に Wi-Fi 接続開始時の測定結果を示す。

表 6.6-17 Wi-Fi 接続開始時の測定結果

測定ポイント	映像品質	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	経路切り替え
③→②→⑤ 1回目	途切れ: なし 乱れ: なし	Wi-Fi: 8.0 公衆網: -	Wi-Fi: 0.0 公衆網: -	Wi-Fi: 5.2 公衆網: -	なし
③→②→⑤ 2回目	途切れ: なし 乱れ: なし	Wi-Fi: 8.0 公衆網: -	Wi-Fi: 0.0 公衆網: -	Wi-Fi: 10.1 公衆網: -	なし
③→②→⑤ 3回目	途切れ: なし 乱れ: なし	Wi-Fi: 8.0 公衆網: -	Wi-Fi: 0.0 公衆網: -	Wi-Fi: 4.8 公衆網: -	なし

次に公衆網接続開始時の測定結果を示す。

表 6.6-18 公衆網接続開始時の測定結果

測定ポイント	映像品質	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	経路切り替え
⑤→②→③ 1回目	途切れ: あり 乱れ: あり	Wi-Fi: - 公衆網: 4.4	Wi-Fi: - 公衆網: 0.0	Wi-Fi: - 公衆網: 196	切り替え前に 映像断
⑤→②→③ 2回目	途切れ: あり 乱れ: あり	Wi-Fi: - 公衆網: 4.0	Wi-Fi: - 公衆網: 0.0	Wi-Fi: - 公衆網: 196	切り替え前に 映像断
⑤→②→③ 3回目	途切れ: あり 乱れ: あり	Wi-Fi: - 公衆網: 2.6	Wi-Fi: - 公衆網: 0.0	Wi-Fi: - 公衆網: 156	切り替え前に 映像断

Wi-Fi 接続開始の場合、3回の測定すべてにおいて経路切り替えは発生しなかった。映像の途切れや乱れは発生しなかった。Wi-Fi 接続時のスループットは 8.0Mbps と目標スループット 8Mbps を維持した。パケットロス率は全測定で 0.0%であった。RTT は 4.8~10.1ms であった。

公衆網接続開始の場合、3回の測定すべてにおいて経路切り替えは発生せず、切り替え前に映像が途切れた。3回の測定すべてで映像の途切れおよび乱れが発生した。公衆網接続時のスループットは 2.6~4.4Mbps と目標値 8Mbps を大きく下回り、RTT は 156~196ms と非常に高い値を示した。

ローカル 5G⇔Wi-Fi エリアにおける検証では、異常検知 AI(機械学習)と通信制御 AI(ルールベース)の組み合わせにおいて、すべての測定で適切な経路切り替えが実行され、安定した通信品質を維持できることが確認された。ルールベースの通信制御 AI は、異常検知 AI の予測結果に基づいて確実に経路切り替えを実行し、映像の途切れや乱れを防止できた。一方、異常検知 AI(機械学習)と通信制御 AI(機械学習)の組み合わせでは、すべての測定回において経路切り替えが発生せず、QoS 変更のみが実行された。通信品質自体は維持されたものの、期待される経路切り替え動作が行われなかった点で課題が残る結果となった。

この差異が生じた原因として、3)異なる条件・環境への横展開の可能性検証でも同様に述べたが、以下要素があると考えられる。第一に、学習データの不足が考えられる。模倣学習を使用した通信制御 AI(機械学習)の学習段階において、切り替えが必要となる異常状態のサンプルデータが十分に含まれていなかった可能性がある。特に、異常検知 AI の出力が 0.8 を下回るような状況の学習が不十分であった場合、モデルは適切な切り替え判断を行えない。通信制御 AI(ルールベース)では明示的な閾値による判断を行うため、学習データの質や量に依存せず動作するが、機械学習方式では学習データに含まれていないパターンに対して適切な汎化ができない可能性がある。今後は、より多様な異常パターンを含む学習データセットの構築が必要である。

第二に、特徴量の設計が指摘できる。模倣学習を使用した通信制御 AI(機械学習)が異常検知 AI の出力値を特徴量として適切に取り込めていない、またはその特徴量の重要度が低く設定されてしまっている可能性がある。機械学習モデルは複数の特徴量から総合的に判断を行うため、RTT やスループット、パケットロス率などの他の特徴量の影響が強い場合、異常検知 AI が異常を示しているにもかかわらず、それが切り替え判断に十分反映されない可能性がある。Feature Importance や SHAP 値の分析により、異常検知 AI の出力値が切り替え判断においてどの程度の重要度を持っているかを確認し、必要に応じて特徴量エンジニアリングやモデルの再学習を実施する必要がある。

Wi-Fi⇔公衆網エリアにおける検証結果からは、公衆網の通信品質が製造棟内において著しく不十分であったことが明らかとなった。具体的には、公衆網接続時のスループットが 2.6~7.5Mbps と目標値 8Mbps を大きく下回り、RTT が 104~309ms と非常に高い値を示した。この結果、ルールベース方式の通信制御 AI では、異常検知 AI の予測に基づいて公衆網への経路切り替えを実行したものの、切り替え先の公衆網自体の通信品質が低いため、映像の途切れや乱れが発生した。特に公衆網接続開始時の測定では、3 回中 2 回において切り替え実行前に映像が途切れるという深刻な問題が発生した。

一方、機械学習方式の通信制御 AI では、Wi-Fi 接続開始時に経路切り替えを実行せず、Wi-Fi 接続を維持することで映像品質を保持した。これは、機械学習 AI が公衆網の通信品質が低いことを学習データから認識し、切り替え先として不適切と判断した結果と考えられる。しかし、公衆網接続開始時の測定では、経路切り替えが実行されず、切り替え前に映像が途切れるという問題が発生した。この場合、通信品質が劣化している公衆網から、より良好な Wi-Fi への切り替えが期待されたが、機械学習 AI は切り替えを実行しなかった。

これらの結果から、Wi-Fi⇔公衆網環境における課題として、以下の 3 点が指摘できる。第一に、公衆網の電波環境が製造棟内において十分ではなく、基地局との距離や障害物の影響により、安定した通信品質が確保できていないことである。第二に、ルールベース方式の通信制御 AI は、切り替え先の通信品質を事前に評価せずに切り替えを実行するため、切り替え先の品質が低い場合には映像品質の劣化を防げないことである。第三に、模倣学習方式の通信制御 AI は、切り替え先の品質が低いと判断

した場合に切り替えを実行しない保守的な動作をする一方で、現在の接続先の品質が著しく劣化している場合でも切り替えを実行しない傾向があることである。

通信制御 AI の今後の改善方向として、切り替え先の通信品質を動的に評価し、切り替え判断に反映させる方式の改良が求められる。具体的には、各通信回線の受信電界強度、スループット、RTT などの指標をリアルタイムで監視して報酬を算出し、切り替え先の報酬が現在の接続先よりも優れている場合にのみ切り替えを実行する方法が考えられる。

総括として、ネットワークのスケラビリティ検証において、異常検知 AI(機械学習)と通信制御 AI(ルールベース)の組み合わせは、ローカル 5G⇔Wi-Fi 環境において優れた性能を示し、接続端末数の増加に伴うネットワーク負荷が発生した場合でも安定した通信品質を維持できることが実証された。一方、異常検知 AI(機械学習)と通信制御 AI(機械学習)の組み合わせについては、ローカル 5G⇔Wi-Fi 環境において経路切り替えの実行に課題が確認されたものの、Wi-Fi⇔公衆網環境においては、切り替え先の品質が低い場合に不要な切り替えを抑制する効果が確認された。模倣学習方式の通信制御 AI については、分布外を取り込むための多様な異常パターンを含む学習データの拡充、あるいは、報酬ベースの方式に変更する改善が必要である。

6.6.2 KPI/KGI との比較結果

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定性評価	1	物流・防災分野の実ユースケースにおける通信要件整理
	2	多様な環境条件下での通信品質維持能力確認
	3	ローカル 5G 不在環境でもハイブリッドネットワークのメリットが活かせる構成モデルの確立
定量評価	4	他分野を想定した模擬環境試験において必要スループット維持率 80%以上を達成
	5	他分野を想定した模擬環境試験においてパケットロス率 1%以下
	6	Wi-Fi+公衆網構成でも品質劣化時の通信途絶時間 0ms、通信途絶率 0%

1) 物流・防災分野の実ユースケースにおける通信要件整理

本検証では、物流業、防災業、航空業の 3 分野における通信要件を体系的に整理し、本実証で開発した AI 技術の適用可能性を評価した。各分野のヒアリング結果から抽出された通信要件と、本技術による対応可能性を以下に示す。

①物流業における通信要件

物流業におけるヒアリング調査により、以下の通信要件が明確化された。

表 6.6-19 物流業の通信要件まとめ

使用無線技術	Wi-Fi(主要)、公衆網 LTE(一部タブレット)
主要アプリケーション	ハンディーターミナル、タブレットによるピッキング作業、AMR の位置情報・制御信号
データ送信容量	比較的軽量(映像配信のような大容量データなし)
主要課題	レイアウト変更による電波変動、アクセスポイント故障
本技術の適用性	高い

②防災業における通信要件

防災業におけるヒアリング調査により、以下の通信要件が明確化された。

表 6.6-20 防災業の通信要件まとめ

使用無線技術	専用無線(Wi-Fi、公衆網、ローカル 5G 未使用)
主要アプリケーション	-
データ送信容量	-
主要課題	なし(既存の多重化・多層化で冗長性確保済)
本技術の適用性	困難

③航空業における通信要件

航空業におけるヒアリング調査により、以下の通信要件が明確化された。

表 6.6-21 航空業の通信要件まとめ

使用無線技術	社内 Wi-Fi、公衆網(LTE)、IP 無線、MCA 無線
主要アプリケーション	スマホ・タブレット、監視カメラダウンロード
データ送信容量	比較的軽量(映像配信のような大容量データなし)
主要課題	混雑時の通信品質悪化、原因不明の接続不良
本技術の適用性	限定的

本検証を通じて、物流業、防災業、航空業の3分野における通信要件を体系的に整理することができた。その結果、本実証で開発した AI 技術は、物流業において最も高い適用可能性を有し、航空業においては限定的ながら適用効果が見込まれることが明らかになった。一方、防災業については、専用無線システムを主体とする現状において、直接的な適用は困難であることが確認された。この通信要件整理により、KPI「物流・防災分野の実ユースケースにおける通信要件整理」は達成されたと評価できる。

2) 多様な環境条件下での通信品質維持能力確認

6.6.13)異なる条件・環境への横展開の可能性検証において、ローカル 5G 基地局周辺に物流倉庫内の搬送物を模擬したトタンを設置し、環境条件の変化による影響を測定した。

表 6.6-8 に示す通り、トタン設置により以下の通信品質変化となった。

- ・受信電界強度:1~13dBm 低下
- ・スループット:約 20%~40%低下
- ・パケットロス率:0.0%(変動なし)
- ・遅延時間:13.3~14.8ms(変動なし)

このような環境変化に対し、表 6.6-9 に示す異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(ルールベース)の組み合わせでは、3 回の測定すべてにおいて適切に経路切り替えを実行した結果、以下の通信品質を維持した

- ・映像品質:途切れなし、乱れなし
- ・スループット:約 8.0Mbps
- ・パケットロス率:0.0%
- ・遅延時間:ローカル 5G:約 12ms、Wi-Fi:約 5.0ms

本検証により、物流倉庫を模擬した大型遮蔽物(トタン)設置という環境条件変化に対し、本実証で開発した AI 技術が有効に機能することが実証された。トタン設置により受信電界強度が最大 13dBm 低下し、スループットが最大 42%低下する厳しい環境変化が発生したにもかかわらず、異常検知 AI(機械学習)が通信品質劣化を事前に検知し、通信制御 AI(ルールベース)が適切なタイミングで Wi-Fi への経路切り替えを実行することで、映像の途切れや乱れを完全に防止できた。

また、遅延時間についても、ローカル 5G 接続時は約 12ms、Wi-Fi 接続時は約 5.0ms と、いずれも低遅延を維持しており、リアルタイム性が求められる映像伝送アプリケーションにおいて十分な性能を発揮することが確認された。

これらの結果から、物流倉庫における日々のレイアウト変更や大型遮蔽物の移動といった実運用環境下での環境変動に対し、本技術が実用的な通信品質維持能力を有することが実証され、目標を達成したと評価できる。

3) ローカル 5G 不在環境でもハイブリッドネットワークのメリットが活かせる構成モデルの確立

6.6.14) ネットワークのスケラビリティ検証の Wi-Fi⇄公衆網エリア検証において、2 つの AI 方式による測定を実施した。

(1) 異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(ルールベース)の結果では、Wi-Fi 接続開始時は 3 回の測定すべてで経路切り替えを実行する結果となった。映像品質については、1 回目は映像途切れなし・乱れありとなったが、2・3 回目は途切れあり・乱れありとなった。Wi-Fi 接続時のスループットは、約 8.0Mbps であり、公衆網切り替え後のスループットも約 8.0Mbps であった。公衆網接続時は、1 回目は経路切り替えを実行したが、2・3 回目は切り替え前に映像が途切れる結果となった。公衆網接続時のスループットは、1 回目は約 7.5Mbps、2・3 回目は約 2.6Mbps であった。

(2) 異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(機械学習)の結果では、Wi-Fi 接続開始時は 3 回の測定すべてで経路切り替えを行わなかった。映像品質については、3 回の測定すべてで映像途切れなし・乱れなしとなった。Wi-Fi 接続時のスループットは、約 8.0Mbps であった。公衆網接続時は、3 回の測定すべてで経路切り替え前に映像が途切れる結果となった。公衆網接続時のスループットは、約 2.6Mbps であった。

本検証により、Wi-Fi+公衆網構成におけるハイブリッドネットワークの実用性と課題が明確化された。ルールベース方式の通信制御 AI は、異常検知結果に基づいて機械的に切り替えを実行するため、切り替え先(公衆網)の通信品質が不十分な場合でも切り替えを行い、結果として映像の途切れや乱れが発生した。対照的に、模倣学習方式の通信制御 AI(機械学習)は、学習データから公衆網の品質が低いことを認識し、Wi-Fi 接続時には切り替えを抑制することで安定した通信を維持できた。これは、模倣学習方式の機械学習 AI(機械学習)が切り替え先の通信品質を考慮した判断を行う能力を有することを示している。

しかし、公衆網接続開始時には、両方式とも映像断が発生し、Wi-Fi への適切な切り替えが実行されなかった。これは、現在の接続先(公衆網)の品質が著しく劣化している状況下で、より良好な切り替え先(Wi-Fi)が存在するにもかかわらず、切り替え判断が適切に機能しなかったことを意味している。

以上から、Wi-Fi+公衆網構成のハイブリッドネットワークモデルは、以下の条件下で有効性を発揮することが実証された：

1. 主たる通信回線として Wi-Fi が安定して使用できる環境
2. 公衆網は補助的な役割に留める運用設計
3. 模倣学習方式の通信制御 AI(機械学習)による切り替え先品質を考慮した制御

一方、製造棟や倉庫などの屋内環境では公衆網の電波環境が不十分であり、公衆網を主回線として使用する構成には限界があることも明らかとなった。今後の改善方向として、(1)各回線の通信品質をリアルタイムに監視・評価し切り替え判断に反映する機能の追加、(2)切り替え実行後の品質をフィードバックとして学習する仕組みの実装が必要であると考えられる。

結論として、Wi-Fi+公衆網構成におけるハイブリッドネットワークの構成モデルは、Wi-Fi 主体の運用においては確立できたと評価できるが、公衆網主体または完全な双方向切り替えを前提とした構成モデルの確立には至らず、部分的達成と評価することができる。

4) 他分野を想定した模擬環境試験において必要スループット維持率 80%以上を達成

6.6.14) ネットワークのスケラビリティ検証において、物流倉庫環境を模擬した製造棟内で、接続端末数増加に伴うネットワーク負荷発生時の測定を実施した。目標スループット 8Mbps に対する各測定結果は以下の通りである。

■ローカル 5G⇔Wi-Fi エリアの検証

(1) 異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(ルールベース)

- ・ローカル 5G(約 8.0Mbps)→Wi-Fi(約 8.0Mbps) スループット維持率 100%以上
 - ・Wi-Fi(約 8.0Mbps)→ローカル 5G(約 8.1Mbps) スループット維持率 100%以上
- 全測定において、スループット維持率 100%達成

(2) 異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(機械学習)

経路切り替えしなかったが、ローカル 5G、Wi-Fi ともにスループット約 8.0Mbps であった。
スループット維持率 100%以上

■Wi-Fi⇔公衆網エリアの検証

(1) 異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(ルールベース)

- ・Wi-Fi(約 8.0Mbps)→公衆網(約 8.0Mbps) スループット維持率 100%以上
 - ・公衆網(約 7.5Mbps)→Wi-Fi(約 8.0Mbps) スループット維持率 100%以上
- ただし、2・3 回目の結果としては、経路切り替え前に映像が切断されてしまった。

(2) 異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(機械学習)

- ・経路切り替えしなかったが、Wi-Fi のスループットは約 8.0Mbps であった。
- ・公衆網については、スループットが約 2.6~4.4Mbps のため、
経路切り替え前に映像が切断されてしまった。

本検証により、本実証で開発した AI 制御によるハイブリッドネットワークシステムが、他分野への横展開を想定した模擬環境試験において、目標値である必要スループット維持率 80%以上を達成できることが実証された。特に、ローカル 5G⇔Wi-Fi エリアにおける全測定で維持率 100%以上を記録し、目標値を上回る結果を得た。

ローカル 5G⇔Wi-Fi 構成では、異常検知 AI(機械学習)がネットワーク負荷の増加や通信品質の劣化を適時に検知し、通信制御 AI が適切なタイミングで経路切り替え(ルールベース方式)または QoS 制御(機械学習方式)を実行することで、常に 8.0Mbps 以上のスループットを維持できた。これは、2つの高品質な無線回線(ローカル 5G と Wi-Fi)を適切に使い分けることで、安定した通信品質を確保できることを実証するものである。

一方、Wi-Fi⇔公衆網構成では、結果が二極化した。Wi-Fi 接続時にはスループット維持率 100%以上と優れた性能を示したが、公衆網接続時にはスループット維持率 33~94%と大きくばらつき、特に機械学習方式では 3 回すべてでスループット維持率 80%未達となった。この原因は、表 6.6-7 に示す通り、製造棟内における公衆網の受信電界強度が-89~-105dBm と弱く、屋内環境において公衆網単独では安定した通信品質を確保できないためである。

本目標値である維持率 80%以上は、「AI 制御によるハイブリッドネットワーク構成」における達成目標であり、単一ネットワーク回線の性能評価ではない点に留意が必要である。公衆網単独では維持率 80%未達となったが、これは公衆網自体の屋内電波環境の限界を示すものであり、本実証の主目的で

ある「複数ネットワークを組み合わせたハイブリッド構成による AI 制御の有効性」の評価とは区別して考えるべきである。実際に、表 6.6-18 の 1 回目測定では、公衆網接続開始(7.5Mbps、維持率 94%)から Wi-Fi への切り替えにより 8.9Mbps(維持率 111%)へと改善されており、ハイブリッド構成の有効性が確認できる。ただし、2・3 回目の測定では切り替え前に映像断が発生しており、公衆網品質が極めて低い状況下での切り替えタイミングの最適化が今後の課題として残る。

本実証で開発した AI 制御技術は、ローカル 5G、Wi-Fi といった安定した無線回線を含むハイブリッドネットワーク環境において、他分野への横展開を想定した場合でも必要スループット維持率 80%以上を確実に達成できることが実証された。ただし、屋内環境における公衆網の品質限界も明確化されたため、実運用においては、主要通信回線としてローカル 5G または Wi-Fi を配置し、公衆網は補助的な役割に位置づける設計が必要である。

5) 他分野を想定した模擬環境試験においてパケットロス率 1%以下

本検証のパケットロス率の測定結果を以下に示す。

(1) 異なる条件・環境のネットワーク測定

- ・ローカル 5G:3%
- ・Wi-Fi:1%
- ・公衆網:0%

本測定は、AI 制御なしの単一ネットワーク使用時のパケットロス率である。ネットワーク負荷を最大にしているため、ローカル 5G 単独使用時は 3%、Wi-Fi 単独使用時は 1%であった。

(2) 異なる条件・環境への横展開の可能性検証

- ・異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(ルールベース):ローカル 5G:0%→Wi-Fi:0%
- ・異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(ルールベース):ローカル 5G:0%

ただし、経路切り替えはなし

(3) ネットワークのスケラビリティ検証

■ローカル 5G⇔Wi-Fi エリア

- ・異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(ルールベース):ローカル 5G:0%⇔Wi-Fi:0%
- ・異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(機械学習):ローカル 5G:0%、Wi-Fi:0%

ただし、通信制御 AI(機械学習)による経路切り替えはなし

■Wi-Fi⇔公衆網エリア

- ・異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(ルールベース):Wi-Fi:0%⇔公衆網:0%
- ・異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(機械学習):Wi-Fi:0%、公衆網:0%

ただし、通信制御 AI(機械学習)による経路切り替えはなし

本検証により、本実証で開発した AI 制御技術が、パケットロス率 1%以下という目標値を大きく上回る 0.0%の性能を達成できることが実証された。特に、AI 制御を適用した全測定において、パケットロス率 0.0%という結果となった。

AI 制御なしのローカル 5G 単独使用時にはパケットロス率 3%が観測されたのに対し、AI 制御によるハイブリッドネットワーク構成では 0.0%に改善されたことである。これは、以下によるものと考えられる。

第一に、異常検知 AI がネットワーク品質劣化の予兆を事前に検知し、パケットロスが発生する前に通信経路の切り替えまたは QoS 調整を実行することで、パケットロスの発生を未然に防止できたことである。表 6.6-9 に示す通り、大型遮蔽物設置により受信電界強度が最大 13dBm 低下、スループットが最大 42% 低下する厳しい環境変化が発生したにもかかわらず、AI 制御により経路切り替えを実行することでパケットロス率 0.0% を維持できたと考えられる。

第二に、ハイブリッドネットワーク構成により、一方の回線で通信品質劣化が発生した場合でも、他方の回線に即座に切り替えることで、パケットロスを伴わないシームレスな通信継続が可能となった。表 6.6-11～表 6.6-14 に示す通り、ローカル 5G⇔Wi-Fi 間の経路切り替えにおいて、いずれの回線使用時もパケットロス率 0.0% を維持できたことは、切り替え処理自体がパケットロスを引き起こさない設計が実現できていることを示している。一方、公衆網については、AI 制御なし・あり共にパケットロス率 0.0% を記録したが、スループットや RTT は他の回線に比べて劣る結果となっており、パケットロス率のみでは通信品質を総合的に評価できない点に留意が必要である。

本実証で開発した AI 制御によるハイブリッドネットワーク技術は、目標値であるパケットロス率 1% 以下を達成するだけでなく、実用上ほぼ理想的な 0.0% を実現できることが確認され、他分野への横展開においても高信頼通信基盤を提供できる技術として評価できる。

6) Wi-Fi+公衆網構成でも品質劣化時の通信途絶時間 0ms、通信途絶率 0%

6.6.14) ネットワークのスケラビリティ検証の Wi-Fi⇔公衆網エリア検証において、品質劣化時の映像途絶状況を測定した。

Wi-Fi 接続開始時において、異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(ルールベース)の組み合わせでは、3 回中 1 回のみ映像途切れなし、2 回は公衆網への切り替え後に映像途切れが発生し、通信途絶発生率 66.7% となった。一方、異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(機械学習)の組み合わせでは、3 回の測定すべてで映像途切れ・乱れなしを達成し、通信途絶時間 0ms、通信途絶率 0% を実現した。公衆網接続開始時は、ルールベース、機械学習両方とも映像途絶が発生した。ルールベースでは 3 回中 2 回、機械学習では 3 回すべてで切り替え前に映像が途切れた。これは、製造棟内における公衆網の通信品質が著しく不十分であったことが原因である。

Wi-Fi 接続維持時は機械学習方式で目標達成(通信途絶時間 0ms、通信途絶率 0%)したが、公衆網接続開始時は両方式とも未達成であった。

本検証により、Wi-Fi+公衆網構成におけるハイブリッドネットワークの通信途絶防止能力について、Wi-Fi 接続開始時において、異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(機械学習)の組み合わせでは、3 回の測定すべてで「映像途切れなし、乱れなし」を達成し、通信途絶時間 0ms、通信途絶率 0% という目標を達成した。この間、スループット 8.0Mbps、RTT 4.8~10.1ms、パケットロス率 0.0% という優れた通信品質を維持し、経路切り替えを実行せずに Wi-Fi 接続を継続することで安定した映像配信を実現できた。

この成功の要因は、模倣学習方式の通信制御 AI(機械学習)が、切り替え先である公衆網の通信品質が不十分であることを学習データから認識し、品質が劣化する可能性のある経路切り替えを抑制したためと考えられる。対照的に、同じ Wi-Fi 接続開始時であっても、異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(ルールベース)の組み合わせでは、3 回中 2 回で映像途絶が発生した。ルールベースは、異常検

知結果に基づいて機械的に公衆網への切り替えを実行するが、切り替え先の公衆網の品質が不十分 (RTT 104~154ms)であったため、切り替え後に映像が途切れた。これは、切り替え判断において切り替え先の通信品質を事前評価する機能の重要性を示唆している。

一方、公衆網接続開始時には、両方式とも課題が確認された。ルールベースでは 3 回中 2 回、機械学習では 3 回すべてで、経路切り替え実行前に映像が途切れた。この原因は、製造棟内における公衆網の通信品質が著しく不十分であり、目標スループット 8Mbps を確保できないためである。

特に、表 6.6-16 の 2・3 回目測定および表 6.6-18 の全測定において、公衆網のスループットが 2.6~4.4Mbps と極めて低く、RTT も 177~309ms と高遅延であったことが、映像途絶の直接的な原因となったと考えられる。これは、現在の接続先(公衆網)の品質が著しく劣化している状況下で、より良好な切り替え先(Wi-Fi)が存在するにもかかわらず、適切なタイミングで切り替えが実行されなかったことを意味している。

品質劣化時の通信途絶時間 0ms、通信途絶率 0%という目標に対し、部分的達成という結果について以下原因が考えられる。

第一に、現状の通信制御 AI は、現在接続中の回線の品質が劣化した際に切り替えを判断する設計となっているが、公衆網品質が初めから不十分な場合、異常検知 AI が「通常状態からの劣化」を検知できず、切り替えトリガーが発火しない可能性があると考えられる。

第二に、模倣学習方式の通信制御 AI(機械学習)は、学習データにおいて「公衆網から別回線への切り替え」のパターンが十分に含まれていなかった可能性がある。Wi-Fi→公衆網の切り替え抑制は学習できているが、逆方向の公衆網→Wi-Fi 切り替えは学習が不十分であった可能性もある。

今後の改善方向として、以下の対策が必要である:

- 1.各回線の通信品質をリアルタイムに監視・評価し、切り替え判断に反映する機能の実装
- 2.現在接続中の回線品質が劣化している場合、他回線の品質を積極的に評価し、より良好な回線への切り替えを実行するアルゴリズムの改良
- 3.公衆網→Wi-Fi 切り替えパターンを含む多様な学習データの拡充
- 4.切り替え実行後の通信品質をフィードバックとして学習データに追加する仕組みの構築

結論として、Wi-Fi+公衆網構成における通信途絶時間 0ms、通信途絶率 0%の目標は、Wi-Fi 接続維持時(機械学習方式)において達成されたが、公衆網接続開始時には未達成であった。これは、製造棟内での公衆網品質不足および通信制御 AI の切り替えアルゴリズムの改善余地を示すものである。

実用化に向けた推奨事項として、Wi-Fi+公衆網構成では、主要通信回線として Wi-Fi を配置し、公衆網は補助的な役割(Wi-Fi 障害時のバックアップ)に位置づける設計が有効である。この構成により、通信途絶時間 0ms、通信途絶率 0%を実現できると考えられる。

6.6.3 考察

本実証における拡張性検証では、異なる産業分野への横展開可能性と多様な環境条件への適応性を評価した。物流業、防災業、航空業を対象としたヒアリング調査の結果、物流業において最も高い適用可能性を確認した。物流倉庫では日々のレイアウト変更により電波環境が変動し、本技術によるリアルタイム監視・異常検知・自動経路切り替えが有効に機能する。現状では Wi-Fi と公衆網を主に使用しており、ローカル 5G 未導入環境でも本技術が有効であることから、初期投資を抑えた段階的導入が可能である。防災業は専用無線システムを主体とし既に十分な冗長性を確保しているため適用は限定的であり、航空業は混雑時の通信品質悪化への対応として限定的な効果が見込まれる。

社会実装に向けては、物流業での早期展開が最も有望である。物流業界では人手不足と DX 推進が課題となっており、AMR やピッキング支援システムなど無線通信依存システムの導入が加速している。本技術により通信障害リスクが低減され、安定稼働が可能となる。また、本検証で確立した通信要件の体系的整理手法は、他産業への展開時にも活用可能である。

従来の単一ネットワークや固定構成と比較して、本技術は通信障害の予測的回避を実現する。異常検知 AI(機械学習)が通信品質劣化を事前に検知し、障害発生前に代替ネットワークへ切り替えることで、サービス継続性を確保できる。トタン設置実験では、受信電界強度が最大 13dBm 低下、スループットが最大 42% 低下する環境変化に対しても、3 回の測定すべてで映像の途切れや乱れを完全に防止した。また、冗長通信と異なり、通常時は単一ネットワークで運用するため、必要最小限の無線リソースで通信品質維持と全体の無線リソース有効活用を両立できる。

国内市場への貢献として、本技術はローカル 5G およびハイブリッドネットワーク市場の拡大に寄与する。国内のローカル 5G 基地局の導入は 2025 年 10 月末時点で 1900 件となり、導入が進んでいるが、運用面での通信障害対応が課題となっている。本技術によりこれらの課題を解決し、特に中堅・中小企業における導入意欲の向上が期待される。また、国土交通省の「総合物流施策大綱(2021 年度～2025 年度)」において物流 DX が重点施策として掲げられており、本技術は物流業界全体の生産性向上とサービス品質向上に寄与できる。地方では公衆網の通信品質が都市部と比較して不安定な場合があり、本技術により地理的条件による通信品質の差異を吸収し、地方における先進システム導入を促進できる。

本技術の先進性は、通信障害の予測的回避と動的な通信リソース最適化を同時に実現している点にある。従来技術は事後対応または単一指標による閾値判定型が主流であったが、本技術では機械学習により複数の通信品質指標を総合的に分析し、1 秒後の異常発生確率を予測する。また、ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網という特性の異なる 3 種類のネットワークを統合的に管理し、アプリケーション要求品質と現在のネットワーク状態に応じて最適なネットワークを動的に選択する。特に、ローカル 5G 不在環境でも Wi-Fi+公衆網で一定の効果を発揮できることを実証した点は、導入障壁を大きく下げる重要な知見である。

システム構成の比較から、以下の知見が得られた。ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網の 3 種類を組み合わせたハイブリッド構成が最も優れており、特にローカル 5G⇔Wi-Fi の組み合わせは大型遮蔽物による電波環境変化に対して高い適応性を示した。Wi-Fi⇔公衆網構成は公衆網の通信品質が外部ネットワーク状況に依存するため安定性が劣るが、初期投資制約がある場合は段階的導入戦略として有効である。AI 制御について、模倣学習方式の通信制御 AI(機械学習)は、トタン設置実験で 3 回の測定すべてで経路切り替えが行われず通信品質が悪化したまま維持される結果となり、RTT 測定のサンプリ

ング頻度、学習データ量不足による分布外の課題が明らかとなった。

導入を促す定量的な目安として、以下を示す。導入効果が期待できる環境は、①日々のレイアウト変更や大型遮蔽物移動により電波環境が変動する環境、②複数アプリケーションが同時稼働しネットワーク負荷が変動する環境、③通信障害が業務に重大な影響を与える環境である。通信品質の基準として、必要スループット維持率 80%以上、パケットロス率 1%以下となる。投資対効果については、通信障害が月 1 回、1 回 2 時間の業務停止を引き起こす環境では、年間約 1,200 万円のコスト削減効果が見込まれ、投資回収期間は 2～5 年程度と想定される。段階的導入として、まず Wi-Fi+公衆網構成で効果を検証し、業務拡大に応じてローカル 5G を追加する方式を推奨する。

今後の技術的課題として、機械学習ベースの通信制御 AI の性能向上、公衆網を含む構成の安定性向上、切り替え時の通信途絶時間の最小化が挙げられる。これらは学習データの充実、特徴量設計の改善、推論速度の高速化により段階的に解決可能である。本技術は国内のローカル 5G 市場拡大、物流 DX 推進、地方での先進システム導入促進など、マーケット拡大と地域社会・産業の課題解決に大きく貢献する可能性を有しており、本検証の成果を基に実用化を進め、多様な産業分野での社会実装を推進していくことが期待される。

6.7 効果検証

6.7.1 実証スケジュール

ユースケース	フェーズ	2025年									2026年		
		5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月		
効果検証	実証準備 (事前計測、物品調達等)		機器調達			異常検知AI構築 通信制御AI構築 (ルールベース)			異常検知AI構築 通信制御AI構築 (機械学習)				
	実証			環境構築					五洋電子 ヒアリング	投資対 効果検討	環境 構築	現地実証 (製造棟)	
	実証 評価											アンケート	報告書作成

6.7.2 評価項目の結果

番号	評価項目
1	コスト削減効果検証
2	投資対効果(ROI)検証
3	既存通信インフラの有効活用検証
4	社会的価値の評価検証

1) コスト削減効果検証

コスト削減効果検証を行うため、国際電気関連会社の五洋電子株式会社の IT 担当者に対し、製造業における障害事例についてヒアリングを実施した。以下にヒアリング結果を示す。

表 6.7-1 五洋電子へのヒアリング結果

#	大項目	ヒアリング事項	ヒアリング結果
1	無線環境	無線技術 (Wi-Fi、公衆網、ローカル 5G) の種類について	・倉庫内で主にローカル 5G、Wi-Fi を活用している。公衆網は活用していない。
2	無線環境	無線を利用しているアプリケーションについて	・Wi-Fi はハンディターミナルやタブレットのピッキング作業で利用している。 ・ローカル 5G では AMR カメラ映像伝送 360 度カメラ監視、音声通話を行っている。
3	無線環境	上記アプリケーションのデータ伝送容量について	・容量は明確ではないが、カメラ映像伝送では、FHD の映像配信を行っている。
4	無線障害	無線を利用しているとき、障害が発生して運用が停止した事象の有無	・Wi-Fi 障害: アクセスポイントの故障により業務に影響が発生した実績がある。(4 年に 1 回) ・ローカル 5G 障害: 以下 3 種類の障害が発生したことがあり、AGV1 台、監視カメラ 2 台が完全停止した実績がある。
5	無線障害	上記事象の通信断の発生回数や障害の種類について	①金属棚設置による電波遮断(年 4 回) ②基地局障害による無線出力低下(4 年に 1 回) ③アンテナ破損によるエリア縮小(年 1 回)
6	無線障害	障害検知から復旧完了までの平均時間、対応の要する人員数について	・Wi-Fi 障害: 障害検知、原因調査に 2 時間、平均復旧時間 2~3 時間である。 ・ローカル 5G 障害: ①金属棚による電波遮断: 障害検知 2 時間、IT 担当者 2 名による原因調査 8 時間、Wi-Fi 手動切替 8 時間、5G 復旧後切替 8 時間である。機器が止まっている間は、製造担当者 2 名による代替作業 28 時間である。 ②基地局障害: 障害検知 2 時間、IT 担当者 2 名による原因調査 16 時間、Wi-Fi 手動切替 8 時間、5G 復旧後切替 8 時間、品質テスト 4 時間である。機器が止まっている間は、製造担当者 2 名による代替作業 36 時間である。 ③アンテナ破損: 障害検知 2 時間、IT 担当者 2 名による原因調査 16 時間、Wi-Fi 手動切替 8 時間、5G 復旧後切替 8 時間、品質テスト 4 時間である。機器が止まっている間は、製造担当者 2 名による代替作業 36 時間である。
7	その他	アプリケーションの優先順位付けは実施しているのか	・特にない

本検証では、上記結果より得られた 3 つの典型的な障害シナリオについて、従来の人手による対応と AI 導入後の自動対応を比較し、コスト削減効果を定量的に評価した。

以下にヒアリング調査により特定された 3 つのユースケースを示す。

■障害①:金属棚設置による電波遮断

製造現場では、生産品目や生産量の変動に応じて定期的に製造レイアウトを変更しており、製品部品を保管している金属製の棚を移動させる必要が生じる。移動後の金属棚がローカル 5G 基地局の前方に配置された場合、金属による電波遮蔽効果により通信エリアが大幅に縮小し、本来カバーエリア内で稼働していた AGV や監視カメラが通信不能となった。

発生頻度:年 4 回

影響:AGV1台、監視カメラ2台が完全停止

■障害②:基地局障害による無線出力低下

基地局の送信機器や電源系統に不具合が生じた場合、無線出力が設計値より著しく低下し、通信エリアが縮小する。この障害により、AGV1 台と監視カメラ 2 台が通信エリア外になることで完全に通信不能となった。基地局の故障診断、修理手配、復旧作業には専門技術者の派遣が必要であり、復旧までに数時間から数日を要することがわかった。

発生頻度:4 年に 1 回

影響:AGV1台、監視カメラ2台が完全停止

■障害③:アンテナ破損によるエリア縮小

製造現場では、レイアウト変更時の接触や搬送物の衝突、経年劣化により、アンテナが破損するリスクが存在する。複数のアンテナで通信エリアを形成しているため、1 本のアンテナが破損すると、当該エリアの電波強度が急激に低下する。この障害により、AGV1 台と監視カメラ 2 台が通信エリア外になり停止する事態が発生した。破損したアンテナの特定、交換部品の手配、高所作業を伴う交換作業には専門技術者と設備が必要であり、安全確保のため生産を一時停止する場合もあることがわかった。

発生頻度:年に 1 回

影響:AGV1台、監視カメラ2台が完全停止

各障害シナリオの作業時間は、五洋電子株式会社へのヒアリング結果に基づき机上にて設定した。また製造担当者による人手作業は、従来の AGV・カメラ運用時と比較して作業効率が下がるため、30%低下とした。

作業員の時間単価は 6,000 円/時間として算出した。

■障害①:金属棚設置による電波遮断(従来方式時)

表 6.7-2 従来環境での作業コスト①

対応工程	担当者	作業時間/人	人件費
1.障害検知	作業者による発見	2 時間	12,000 円
2.原因調査	IT 担当者 2 名	8 時間	96,000 円
3.Wi-Fi への手動切り替え作業	IT 担当者 2 名	8 時間	96,000 円
4.製造担当者による代替作業	製造担当者 2 名	28 時間	336,000 円
作業効率 30%低下による追加損失	-	-	100,800 円
5.ローカル 5G 復旧後の手動切り替え作業	IT 担当者 2 名	8 時間	96,000 円
1 回あたりの合計	-	-	736,800 円
年間コスト(年 4 回)	-	-	2,947,200 円

■障害②:基地局障害による無線出力低下(従来方式時)

表 6.7-3 従来環境での作業コスト②

対応工程	担当者	作業時間/人	人件費
1.障害検知	作業者による発見	-	-
2.原因調査	IT 担当者 2 名	16 時間	192,000 円
3.Wi-Fi への手動切り替え作業	IT 担当者 2 名	8 時間	96,000 円
4.製造担当者による代替作業	製造担当者 2 名	36 時間	432,000 円
作業効率 30%低下による追加損失	-	-	129,600 円
5.ローカル 5G 復旧後の手動切り替え作業	IT 担当者 2 名	8 時間	96,000 円
6.動作確認・品質テスト	IT 担当者 2 名	4 時間	48,000 円
1 回あたりの合計	-	-	1,005,600 円
年間コスト(4 年に 1 回)	-	-	251,400 円

■障害③:アンテナ破損によるエリア縮小(従来方式時)

表 6.7-4 従来環境での作業コスト③

対応工程	担当者	作業時間/人	人件費
1.障害検知	作業者による発見	-	-
2.原因調査	IT 担当者 2 名	16 時間	192,000 円
3.Wi-Fi への手動切り替え作業	IT 担当者 2 名	8 時間	96,000 円
4.製造担当者による代替作業	製造担当者 2 名	36 時間	432,000 円
作業効率 30%低下による追加損失	-	-	129,600 円
5.ローカル 5G 復旧後の手動切り替え作業	IT 担当者 2 名	8 時間	96,000 円
6.動作確認・品質テスト	IT 担当者 2 名	4 時間	48,000 円
1 回あたりの合計	-	-	1,005,600 円
年間コスト(年 1 回)	-	-	1,005,600 円

従来方式の年間総コストは以下の通りである。

表 6.7-5 従来環境での作業コストまとめ

障害種別	発生頻度	1 回あたりのコスト	年間コスト
障害①	年 4 回	736,800 円	2,947,200 円
障害②	4 年に 1 回	1,005,600 円	251,400 円
障害③	年 1 回	1,005,600 円	1,005,600 円
合計	-	-	4,204,200 円/年

AI を活用したハイブリットネットワーク制御システム導入後は、以下の改善効果が得られると想定している。

1. 障害検知:無線状況をリアルタイム監視しているため、即時検知
2. Wi-Fi への切替:AI 自動切替により 0ms(即座)で実行
3. 運用継続:AGV・カメラの停止なし(0ms)
4. 5G への復旧:5G 復旧後、AI 自動切替により即座に戻し(0ms)

以下に AI を活用したハイブリットネットワーク制御システム導入後のコストについて示す。

■障害①:金属棚設置による電波遮断(AI 活用時)

表 6.7-6 AI 活用環境での作業コスト①

対応工程	担当者	作業時間/人	人件費
1.障害検知	障害検知	-	-
2.原因調査	IT 担当者 2 名	8 時間	96,000 円
3.Wi-Fi への手動切り替え作業	AI 検知	0ms	0 円
4.製造担当者による代替作業	-	0ms	0 円
作業効率 30%低下による追加損失	-	-	0 円
5.ローカル 5G 復旧後の手動切り替え作業	AI 検知	0ms	0 円
1 回あたりの合計	-	-	96,000 円
年間コスト(年 4 回)	-	-	288,000 円

■障害②:基地局障害による無線出力低下(AI 活用時)

表 6.7-7 AI 活用環境での作業コスト②

対応工程	担当者	作業時間/人	人件費
1.障害検知	作業による発見	-	-
2.原因調査	IT 担当者 2 名	16 時間	192,000 円
3.Wi-Fi への手動切り替え作業	AI 検知	0ms	0 円
4.製造担当者による代替作業	-	0ms	0 円
作業効率 30%低下による追加損失	-	-	0 円
5.ローカル 5G 復旧後の手動切り替え作業	AI 検知	0ms	0 円
6.動作確認・品質テスト	AI 検知	0ms	0 円
1 回あたりの合計	-	-	192,000 円
年間コスト(4 年に 1 回)	-	-	48,000 円

■障害③:アンテナ破損によるエリア縮小(AI 活用時)

表 6.7-8 AI 活用環境での作業コスト③

対応工程	担当者	作業時間/人	人件費
1.障害検知	作業者による発見	-	-
2.原因調査	IT 担当者 2 名	16 時間	192,000 円
3.Wi-Fi への手動切り替え作業	AI 検知	0ms	0 円
4.製造担当者による代替作業	-	0ms	0 円
作業効率 30%低下による追加損失	-	-	0 円
5.ローカル 5G 復旧後の手動切り替え作業	AI 検知	0ms	0 円
6.動作確認・品質テスト	AI 検知	0ms	0 円
1 回あたりの合計	-	-	192,000 円
年間コスト(年 1 回)	-	-	192,000 円

従来方式の年間総コストは以下の通りである。

表 6.7-9 AI 活用環境での作業コストまとめ

障害種別	発生頻度	1 回あたりのコスト	年間コスト
障害①	年 4 回	96,000 円	288,000 円
障害②	4 年に 1 回	192,000 円	48,000 円
障害③	年 1 回	192,000 円	192,000 円
合計	-	-	384,000 円/年

年間コスト削減効果の比較は以下の通りである。

表 6.7-10 通信システム及び AI システムの構築・運用に要した費用

障害種別	従来	AI 導入後	年間削減コスト	削減率
障害①	2,947,200 円	288,000 円	2,659,200 円	90.2%
障害②	251,400 円	48,000 円	203,400 円	80.9%
障害③	1,005,600 円	192,000 円	813,600 円	80.9%
合計	4,204,200 円/年	528,000 円/年	3,676,200 円/年	87.4%

本検証により、AI を活用したハイブリッドネットワーク制御システムの導入により、年間約 360 万円(削減率 87.4%)のコスト削減効果が実証された。これにより製造現場における通信障害対応の効率化と生産性維持に大きく貢献することが定量的に確認された。

本システムを活用することで、運用停止時間が従来の 3~4 日間から実質 0ms となり、生産ラインの継続性が保証され、製造業における最重要課題である「止めない製造」の実現に大きく貢献できると考えられる。

2) 投資対効果(ROI)検証

本検証では、前述の 6.7.21)コスト削減効果検証で算出された年間約 360 万円のコスト削減効果を基に、AI ハイブリットネットワーク制御システムの導入における投資対効果を分析した。具体的には、システム導入に必要な初期投資額に対して、年間コスト削減効果がどの程度の期間で初期投資を回収できるのかを算出し、本ソリューション導入の経済的合理性を検証した。

まずハイブリットネットワーク制御システム導入に必要な追加機器を以下示す。なお、本検証では国際電気関連会社の五洋電子株式会社を想定し、検証を行っているため、ローカル 5G、Wi-Fi といった無線機器は導入済みである。また機器、保守については、要件によって選定機器やオプションが異なるため、参考価格として記載する。

表 6.7-11 ハイブリットネットワーク制御システム導入に必要な追加機器費(参考価格)

#	機器名称	概算価格	備考
1	管理サーバ	4,500,000 円	システム設計、構築費含む
2	通信サーバ	3,500,000 円	システム設計、構築費含む
3	MRM	500,000 円	
4	AI 用サーバ	500,000 円	ソフトウェア費は除く
	合計	9,000,000 円	

次に本検証で開発した AI ソフトウェア費(参考価格)について以下に示す。

表 6.7-12 AI ソフトウェア費(参考価格)

#	機器名称	概算価格	備考
1	AI ソフトウェア費	7,000,000 円	システム設計、構築費含む
	合計	7,000,000 円	

最後にハイブリットネットワーク制御システムの年間保守費(参考価格)について以下に示す。

表 6.7-13 年間保守費(参考価格)

#	機器名称	概算価格	備考
1	機器保守費	500,000 円	ハードウェア保守
2	ソフト保守費	500,000 円	ソフトバグ修正費、性能改善対応費
	合計	1,000,000 円	

本実証で開発した AI ソフトウェア費の設定については以下観点から算出した。

第一に、本実証で開発した AI システムの開発規模と技術的価値を考慮した。本システムは、異常検知 AI(機械学習)と通信制御 AI(ルールベース or 機械学習)の 2 つの主要な AI コンポーネントで構成される。異常検知 AI は、ネットワーク状態の時系列データから通信品質の劣化を予測的に検知する機械学習モデルであり、データ収集、前処理、特徴量設計、モデル選定、学習、検証という一連のプロセスを経て開発された。通信制御 AI は、複数の無線方式(ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網)の通信状態をリアルタイムに評価し、最適な通信経路を動的に選択する制御アルゴリズムであり、ルールベースと機械学習の両手法を組み合わせた独自の実装となっている。これらの開発には、データサイエンティスト、AI エンジニア、ネットワークエンジニア、システムインテグレーターの協働により、要件定義から実装、テスト、検証まで相当の工数と期間を要している。

第二に、ハードウェア費用 900 万円との対比において、AI ソフトウェア費用 700 万円(約 78%)という設定は、システム全体における技術的価値の配分として妥当な水準であると判断した。本システムを活用し、実証された年間 360 万円のコスト削減効果の大部分は、異常検知と迅速な経路切り替えによって実現されたものであり、システムの価値創出における中心的役割を果たしていると考えられる。

第三に、システム導入によって実現される年間 360 万円のコスト削減効果との対比において、初期投資の経済的合理性を担保できる水準であることを確認した。AI ソフトウェア費用を含む総初期投資額 1,600 万円は、後述する投資回収期間の算出において、一定の経済的合理性を有する範囲内に収まっている。

ただし、本実証で開発した AI システムはプロトタイプであり、今回設定した 700 万円という価格は、将来の社会実装における販売価格設定の参考値として位置づけられる。実際の製品化にあたっては、以下の要素を踏まえた価格の見直しが必要となる。

まず、競合システムとの価格比較が不可欠である。現在市場に存在する産業用ネットワーク管理システムや無線の異常検知システム、無線通信制御システムなどの競合製品について、機能範囲、性能水準、価格帯を詳細に調査し、本システムの競争力を客観的に評価する必要がある。特に、本システムが提供する「ハイブリッドネットワークの AI 制御」という独自価値が、既存システムと比較してどの程度の価格を正当化できるかを見極めることが重要である。例えば、単機能の異常検知システムや経路制御システムと比較した場合の付加価値、統合ソリューションとしての利便性、導入・運用の容易性などを総合的に評価し、適切な価格ポジショニングを決定する必要がある。

次に、想定顧客の予算感の把握が必要である。本システムの主要なターゲット顧客は中小規模の製造事業者であり、これらの企業がネットワークインフラ投資に充てられる予算には限界がある。特に、ローカル 5G 導入が困難な地方の製造拠点や中小企業では、初期投資額が導入判断の重要な要素となる。想定顧客層に対するヒアリング調査やアンケート調査を実施し、「導入を検討できる価格帯」「費用対効果として許容できる投資回収期間」「年間保守費用として許容できる範囲」などの具体的な予算感を把握した上で、価格設定を最適化することが求められる。

システム導入後の年間運用コストとして、表 6.7-13 に示した通り、機器保守費とソフトウェア保守費をあわせて年間 100 万円とした。従来システムにおいても通信費や基本的な運用人件費は発生しているため、本検証では、ハイブリッドネットワーク制御システム導入により追加で発生する運用コストとして、システム固有の保守費用のみを計上した。機器保守費 50 万円には、管理サーバ、通信サーバ、MRM、AI 用サーバなどのハードウェア保守、定期点検費用が含まれている。ソフトウェア保守費 50 万円には、AI ソフトウェアのバグ修正、性能改善対応、セキュリティアップデート対応などが含まれている。

投資回収期間の算出について、前述の 6.7.21) コスト削減効果検証で算出された年間約 360 万円とシステム導入に伴う追加の年間運用コストを考慮し、投資回収期間を以下の通り算出した。

・年間純効果 = 年間コスト削減効果 - 年間追加運用コスト

・年間純効果 = 360 万円 - 100 万円 = 260 万円

・投資回収期間 = 初期投資額 ÷ 年間純効果

・投資回収期間 = 1,600 万円 ÷ 260 万円 ≒ 6.2 年

3) 既存通信インフラの有効活用検証

本検証では、ローカル 5G 導入が困難な中小企業や地方自治体における本技術の適用可能性を評価するため、既存の通信インフラである Wi-Fi と公衆網を組み合わせたハイブリッドネットワーク構成での通信品質維持能力を検証した。

具体的には、6.6.14) ネットワークのスケラビリティ検証で行った 0 製造棟において、Wi-Fi と公衆網の基本性能測定を実施し、各通信環境の特性を明らかにした上で、AI 制御による通信経路切り替え機能の効果を評価した。これにより、高額な初期投資を要するローカル 5G を導入せずとも、本技術による通信品質の安定化が実現可能であることを定量的に明らかにした。

製造棟における通信環境の基本性能測定では、Wi-Fi と公衆網それぞれの受信電界強度、スループット、パケットロス率、遅延時間を 6 箇所の測定地点で計測した。

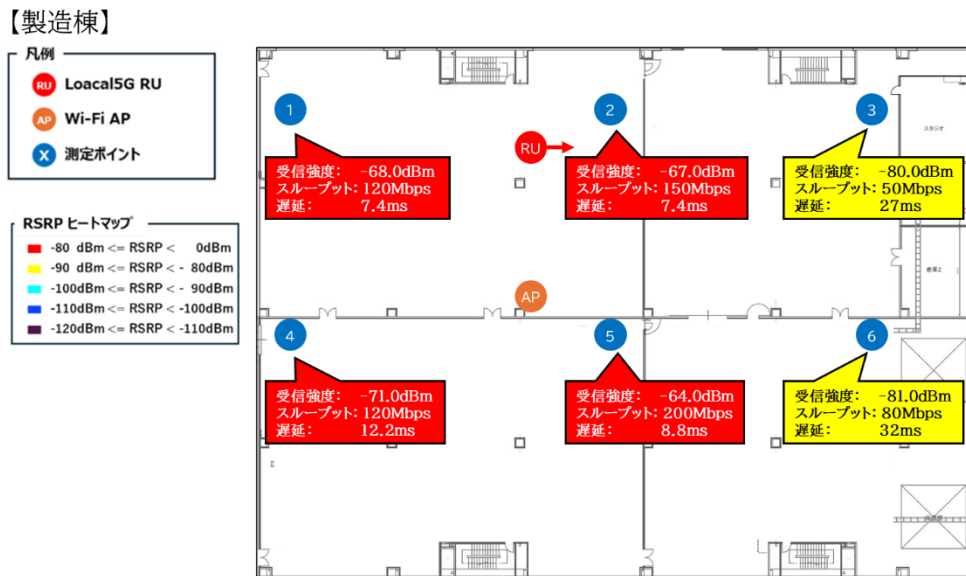


図 6.7-1 Wi-Fi 使用時の各ポイントの測定結果

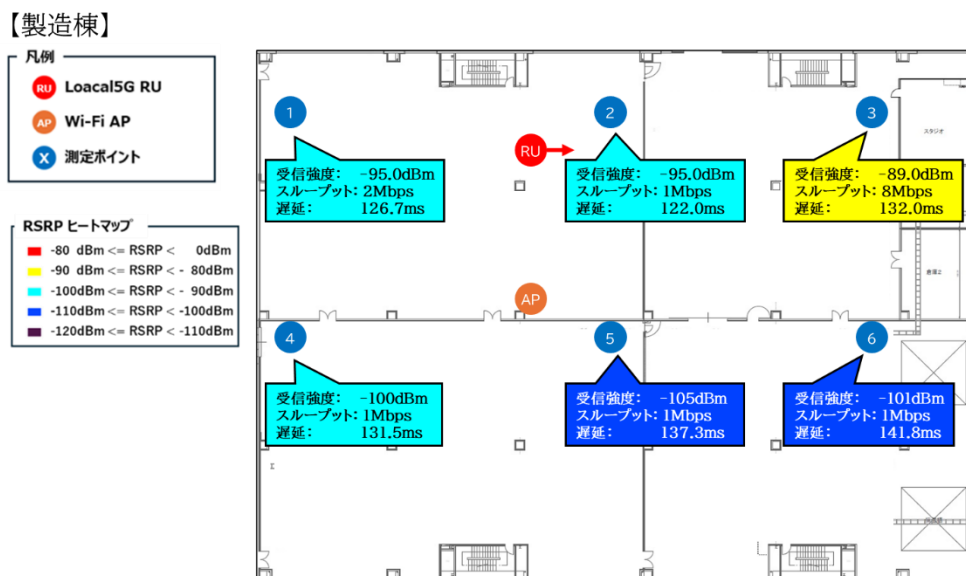


図 6.7-2 公衆網使用時の各ポイントの測定結果

Wi-Fi の測定結果から、Wi-Fi 環境は設置環境や遮蔽物の影響により性能変動が観測されるものの、測定地点の約 67%において 8Mbps の映像伝送要件を大幅に上回る通信性能を確保できることが確認された。一方、公衆網の測定結果は、受信電界強度が良好な一部の測定地点においてのみ 8Mbps 程度のスループットを確認できたが、多くの測定地点では要件を満たさない結果となった。全測定地点に対して受信電界強度が良好なポイントは約 17%程度に限定されることがわかった。この結果は、屋外に設置された公衆網基地局を参照点としているため、製造棟内部の全測定地点が NLOS 環境となり、建物の壁や構造物による電波減衰が顕著に影響していることを示している。

Wi-Fi と公衆網の組み合わせ構成における AI 制御による通信経路切り替え検証では、異常検知 AI (機械学習) と通信制御 AI (機械学習) を組み合わせた構成により、固定カメラ(通信速度:8Mbps)を用いた映像伝送試験を実施した。検証結果は 6.6.14) ネットワークのスケラビリティ検証の Wi-Fi と公衆網の結果と同様である。

(1) 異常検知 AI(機械学習) + 通信制御 AI(ルールベース)の測定結果

以下に Wi-Fi 接続開始時の測定結果を示す。

表 6.7-14 Wi-Fi 接続開始時の測定結果

測定ポイント	映像品質	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	経路切り替え
③→②→⑤ 1回目	途切れ: なし 乱れ: あり	Wi-Fi: 8.1 公衆網: 8.0	Wi-Fi: 0.0 公衆網: 0.0	Wi-Fi: 10.0 公衆網: 154	あり
③→②→⑤ 2回目	途切れ: あり 乱れ: あり	Wi-Fi: 8.0 公衆網: 8.0	Wi-Fi: 0.0 公衆網: 0.0	Wi-Fi: 16.7 公衆網: 152	あり
③→②→⑤ 3回目	途切れ: あり 乱れ: あり	Wi-Fi: 8.0 公衆網: 8.1	Wi-Fi: 0.0 公衆網: 0.0	Wi-Fi: 9.2 公衆網: 104	あり

次に公衆網接続開始時の測定結果を示す。

表 6.7-15 公衆網接続開始時の測定結果

測定ポイント	映像品質	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	経路切り替え
⑤→②→③ 1回目	途切れ: なし 乱れ: あり	Wi-Fi: 8.9 公衆網: 7.5	Wi-Fi: 0.0 公衆網: 0.0	Wi-Fi: 5.2 公衆網: 193	あり
⑤→②→③ 2回目	途切れ: あり 乱れ: あり	Wi-Fi: - 公衆網: 4.2	Wi-Fi: - 公衆網: 0.0	Wi-Fi: - 公衆網: 177	切り替え前に 映像断
⑤→②→③ 3回目	途切れ: あり 乱れ: あり	Wi-Fi: - 公衆網: 2.6	Wi-Fi: - 公衆網: 0.0	Wi-Fi: - 公衆網: 309	切り替え前に 映像断

(2) 異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(機械学習)の測定結果
以下に Wi-Fi 接続開始時の測定結果を示す。

表 6.7-16 Wi-Fi 接続開始時の測定結果

測定ポイント	映像品質	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	経路切り替え
③→②→⑤ 1回目	途切れ: なし 乱れ: なし	Wi-Fi: 8.0 公衆網: -	Wi-Fi: 0.0 公衆網: -	Wi-Fi: 5.2 公衆網: -	なし
③→②→⑤ 2回目	途切れ: なし 乱れ: なし	Wi-Fi: 8.0 公衆網: -	Wi-Fi: 0.0 公衆網: -	Wi-Fi: 10.1 公衆網: -	なし
③→②→⑤ 3回目	途切れ: なし 乱れ: なし	Wi-Fi: 8.0 公衆網: -	Wi-Fi: 0.0 公衆網: -	Wi-Fi: 4.8 公衆網: -	なし

次に公衆網接続開始時の測定結果を示す。

表 6.7-17 公衆網接続開始時の測定結果

測定ポイント	映像品質	スループット [Mbps]	パケットロス率 [%]	RTT[ms]	経路切り替え
⑤→②→③ 1回目	途切れ: あり 乱れ: あり	Wi-Fi: - 公衆網: 4.4	Wi-Fi: - 公衆網: 0.0	Wi-Fi: - 公衆網: 196	切り替え前に 映像断
⑤→②→③ 2回目	途切れ: あり 乱れ: あり	Wi-Fi: - 公衆網: 4.0	Wi-Fi: - 公衆網: 0.0	Wi-Fi: - 公衆網: 196	切り替え前に 映像断
⑤→②→③ 3回目	途切れ: あり 乱れ: あり	Wi-Fi: - 公衆網: 2.6	Wi-Fi: - 公衆網: 0.0	Wi-Fi: - 公衆網: 156	切り替え前に 映像断

Wi-Fi 接続開始時の測定では、測定ポイント③→②→⑤の経路において3回の試行を実施した結果、全ての試行で経路切り替えは発生せず、Wi-Fi による安定した映像伝送が維持された。Wi-Fi 環境でのスループットは 8.0Mbps、パケットロス率 0.0%、RTT は 4.8~10.1ms の範囲で推移し、映像の途切れや乱れは観測されなかった。これは、Wi-Fi 環境が当該経路において十分な通信品質を確保できており、公衆網への切り替えが不要であったことを示している。

対照的に、公衆網接続開始時の測定では、測定ポイント⑤→②→③の経路において3回の試行を実施した結果、全ての試行で経路切り替え前に映像断が発生した。公衆網環境でのスループットはいずれも 8Mbps の要件を満たすことができず、映像の途切れと乱れが観測された。RTT については、公衆網環境では 156~196ms と高い遅延が記録されており、Wi-Fi 環境の 4.8~10.1ms と比較して約 20~40 倍の遅延が発生していることが確認された。この結果は、公衆網環境が製造棟内部の特定経路において映像伝送要件を満たすための十分な通信品質を確保できないことを示しており、通信制御 AI による通信経路切り替えが起動する前に通信品質が大幅に劣化したことを意味している。

これらの検証結果から、Wi-Fi と公衆網を組み合わせたハイブリッドネットワーク構成においては、Wi-Fi 環境が良好な場所では安定した通信品質を維持できる一方、公衆網への切り替えを前提とした運用には課題があることが明らかとなった。特に、製造棟のような屋内環境では、公衆網の受信電界強

度が-95dBm 以下となる測定地点が多く、このような環境下では 8Mbps の映像伝送要件を満たすことが困難である。また、公衆網の遅延時間は Wi-Fi と比較して大幅に高く、リアルタイム性が要求される AGV 制御や監視カメラ映像伝送といったアプリケーションにおいては、品質劣化のリスクが高いことが示された。

一方で、Wi-Fi 環境が良好な測定地点においては、本技術を活用することで安定した通信品質を維持できることが実証された。Wi-Fi アクセスポイントの適切な配置により、測定地点の約 67%において 8Mbps を大幅に上回る通信性能を確保できており、これらのエリアでは本技術の効果が十分に発揮される。また、Wi-Fi 環境が一時的に劣化した場合でも、異常検知 AI により予測的に品質劣化を検知し、他の通信経路への切り替えを試みることで、従来の手動切り替えと比較して迅速な対応が可能となる。ただし、切り替え先となる公衆網の通信品質が不十分な場合には、切り替えによってかえって通信品質が劣化する可能性があることが本検証により明確となった。

本検証の結果は、既存通信インフラを活用したハイブリッドネットワーク構成の導入検討において重要な知見を提供する。ローカル 5G 導入が困難な中小企業や地方自治体においては、まず Wi-Fi 環境の充実を図ることが最優先課題であり、複数のアクセスポイントを適切に配置することで、本技術による通信品質の安定化効果を最大限に活用できる。公衆網については、屋外や開放的な環境では有効なバックアップ回線となり得るが、製造棟のような閉鎖的な屋内環境では通信品質の制約が大きいいため、Wi-Fi 環境の冗長化構成を優先的に検討することが推奨される。具体的には、複数の Wi-Fi アクセスポイントを異なる場所に配置し、AI 制御による Wi-Fi 間の切り替えを活用することで、公衆網に依存せずとも安定した通信環境を構築できる可能性がある。

今後の技術開発においては、通信制御 AI の方式を改良し、切り替え先の通信品質を事前に評価する機能を追加することが重要である。現在の実装では、切り替え後の回線について受信電界強度のみで評価しており、スループットやパケットロス率といった実際の通信品質は考慮されていない。このため、受信電界強度が良好であっても、実際には通信品質が不十分な公衆網への切り替えが実行されてしまうケースが発生している。切り替え判断時に、受信電界強度に加えて予測されるスループットやパケットロス率を総合的に評価し、通信品質が十分に確保できる回線にのみ切り替えを実行するアルゴリズムの開発が必要であると考えられる。また、Wi-Fi 環境の最適化についても、電波カバレッジの可視化ツールやアクセスポイント配置の最適化支援機能を開発することで、導入企業が自社環境に適した Wi-Fi 構成を容易に設計できるようにすることが、本技術の社会実装を促進する上で重要となる。

4) 社会的価値の評価検証

AI を用いたハイブリッドネットワーク制御システムが製造業現場にもたらす社会的価値を多角的に評価することを目的として、国際電気ラボ関係者および国際電気関連工場関係者である五洋電子株式会社の社員合計 20 名を対象にアンケート調査を実施した。本調査では、ローカル 5G⇔Wi-Fi 検証および Wi-Fi⇔公衆網検証の 2 つの検証パターンについて、AI 適用の有無による映像品質、通信安定性、業務効率改善への期待度等を 4 段階評価(1:同意しない~4:同意する)で評価した。

以下にローカル 5G⇔Wi-Fi 検証の評価結果を示す。

表 6.7-18 ローカル 5G⇔Wi-Fi 検証の評価結果(N=20)

#	内容	評価結果(人)				平均 評価
		1	2	3	4	
1	AI の設定が容易である	0	8	10	2	2.7
2	機器設置が容易である	0	3	12	5	3.1
3	AI 適用後のカメラの映像品質は良い	0	0	5	15	3.8
4	無線が切り替わったときのカメラの映像品質に違和感がない	0	0	7	13	3.7
5	移動しているカメラの映像は安全面・実用面で問題ない	0	0	6	14	3.7
6	AI システム導入により、通信障害対応の業務効率が改善されると思う	0	2	8	10	3.4

評価基準: 1=同意しない、2=あまり同意しない、3=やや同意する、4=同意する

次に Wi-Fi⇔公衆網検証の評価結果を示す。

表 6.7-19 Wi-Fi⇔公衆網検証の評価結果(N=20)

#	内容	評価結果(人)				平均 評価
		1	2	3	4	
1	AI の設定が容易である	0	8	10	2	2.7
2	機器設置が容易である	0	3	12	5	3.1
3	AI 適用後のカメラの映像品質は良い	0	4	11	5	3.1
4	無線が切り替わったときのカメラの映像品質に違和感がない	0	5	11	4	3.0
5	移動しているカメラの映像は安全面・実用面で問題ない	0	8	10	2	2.7
6	AI システム導入により、通信障害対応の業務効率が改善されると思う	0	3	9	8	3.3

評価基準: 1=同意しない、2=あまり同意しない、3=やや同意する、4=同意する

ご意見(良い点)

- ・ AI 適用前と比較して映像の途切れがなくなり、非常にスムーズになった。特にローカル 5G と Wi-Fi の切り替えがシームレスで驚いた。
- ・ 通信障害時の対応が自動化されることで、作業効率が大幅に向上すると感じた。現場での負担軽減が期待できる。
- ・ 映像品質が安定しており、安全管理面での活用可能性が高いと思う。
- ・ 無線が自動で切り替わるため、作業者が通信を意識せずに業務に集中できる点が良い。
- ・ 公衆網への切り替えにより、Wi-Fi エリア外でも映像配信が継続できる点が画期的だと思う。

ご意見(悪い点・改善点)

- ・ AI の初期設定がやや複雑で、専門知識がないと設定が難しいと感じた。マニュアルの充実が必要である。
- ・ 公衆網使用時の映像品質が低下し、細かい作業確認には不十分であった。安全面での利用には改善が必要である。
- ・ 公衆網への切り替え時に若干のラグがあり、リアルタイム性が求められる場面では不安がある。
- ・ 公衆網の通信品質に依存するため、エリアによっては映像が乱れることがある。品質保証が課題。
- ・ AI の設定項目が多く、初心者には敷居が高いと感じた。
- ・ 移動中のカメラで公衆網を使用する場合、遅延が気になり実用性に課題を感じた。

本アンケート調査の結果、AI を活用したハイブリッドネットワーク制御システムは、通信品質の安定化と業務効率改善において有効であることが確認された。特に、ローカル 5G と Wi-Fi を組み合わせた構成では、高品質な映像伝送と自動切り替え機能により、製造現場における安全管理や品質確認の精度向上に大きく貢献することが期待される。

一方で、公衆網を活用した構成については、通信品質の変動が大きく、リアルタイム性が要求される用途では課題が残ることが明らかとなった。公衆網は屋内環境において受信電界強度が低下しやすく、映像の乱れや遅延が発生する可能性が高い。このため、公衆網はバックアップ回線としての位置づけが適切であり、主要な通信回線としては Wi-Fi の冗長化構成を優先的に検討することが良いと考えられる。

AI 設定の容易性については、両検証パターンで共通して改善の必要性が指摘された。現状では専門的な知識が必要とされるため、設定マニュアルの充実より、導入障壁を低減することが社会実装に向けた重要な課題である。

通信障害対応の業務効率改善については、両検証パターンで平均 3.2～3.4 点と良好な評価を得ており、AI 制御による自動化が現場の作業負担軽減に寄与することへの期待が示された。本システムの導入により、通信障害発生時の手動対応が不要となり、迅速な復旧と安定した通信環境の維持が実現できる可能性が高いと評価される。

本検証では、ローカル 5G や Wi-Fi といった高品質な通信環境を主軸とし、AI 制御による自動切り替え機能を活用することで、通信品質の安定化と業務効率改善を両立できることが実証された。今後は、設定の容易性向上と公衆網品質の改善に取り組むことで、より幅広い企業での導入が促進されると考えられる。

総務省地域社会 DX 推進パッケージ事業(AI 検証タイプ)

効果検証 社会的価値評価アンケート

本アンケートは、AI を用いたハイブリッドネットワーク制御システムが製造業現場にもたらす社会的価値を多角的に評価することを目的としています。

製造現場における通信インフラの安定化は、コスト削減だけでなく、作業者の労働環境改善、安全管理体制の強化、生産性向上による競争力強化など、企業活動全体に波及する幅広い効果をもたらします。

各項目について、通信品質向上によってもたらされた変化を 4 段階でご評価ください。

■ローカル 5G⇄Wi-Fi 検証

1:同意しない～4:同意する

#	内容	結果
1	AI の設定が容易である	1 2 ③ 4
2	機器設置が容易である	1 2 ③ 4
3	AI 適用後のカメラの映像品質は良い	1 2 3 ④
4	無線が切り替わったときのカメラの映像品質に違和感がない	1 2 3 ④
5	移動しているカメラの映像は安全面・実用面で問題ない	1 2 3 ④
6	AI システム導入により、通信障害対応の業務効率が改善されると思う	1 2 3 ④

■Wi-Fi⇄公衆網検証

1:同意しない～4:同意する

#	内容	結果
1	AI の設定が容易である	1 2 ③ 4
2	機器設置が容易である	1 2 ③ 4
3	AI 適用後のカメラの映像品質は良い	1 ② 3 4
4	無線が切り替わったときのカメラの映像品質に違和感がない	1 ② 3 4
5	移動しているカメラの映像は安全面・実用面で問題ない	1 ② 3 4
6	AI システム導入により、通信障害対応の業務効率が改善されると思う	1 2 ③ 4

1	ご意見(良い点)	AI 適用前と比較して、映像の違和感がなくなり、非常にスムーズになった。特にローカル 5G と Wi-Fi を切り替えがシームレスで良かった。
2	ご意見(悪い点、改善点)	公衆網への切り替え時に若干の遅延がある。リアルタイム性が求められる場面では不安がある。

所属・お名前: XXXXXXXXXX

図 6.7-3 アンケート結果1

総務省地域社会 DX 推進パッケージ事業(AI 検証タイプ)

効果検証 社会的価値評価アンケート

本アンケートは、AI を用いたハイブリッドネットワーク制御システムが製造業現場にもたらす社会的価値を多角的に評価することを目的としています。

製造現場における通信インフラの安定化は、コスト削減だけでなく、作業者の労働環境改善、安全管理体制の強化、生産性向上による競争力強化など、企業活動全体に波及する幅広い効果をもたらします。

各項目について、通信品質向上によってもたらされた変化を 4 段階でご評価ください。

■ローカル 5G⇔Wi-Fi 検証

1:同意しない～4:同意する

#	内容	結果
1	AI の設定が容易である	1 ② 3 4
2	機器設置が容易である	1 2 ③ 4
3	AI 適用後のカメラの映像品質は良い	1 2 3 ④
4	無線が切り替わったときのカメラの映像品質に違和感がない	1 2 3 ④
5	移動しているカメラの映像は安全面・実用面で問題ない	1 2 3 ④
6	AI システム導入により、通信障害対応の業務効率が改善されると思う	1 2 3 ④

■Wi-Fi⇔公衆網検証

1:同意しない～4:同意する

#	内容	結果
1	AI の設定が容易である	1 ② 3 4
2	機器設置が容易である	1 2 ③ 4
3	AI 適用後のカメラの映像品質は良い	1 2 ③ 4
4	無線が切り替わったときのカメラの映像品質に違和感がない	1 2 ③ 4
5	移動しているカメラの映像は安全面・実用面で問題ない	1 2 ③ 4
6	AI システム導入により、通信障害対応の業務効率が改善されると思う	1 2 ③ 4

1	ご意見(良い点)	映像品質が安定しており、安全管理面での活用可能性が高いと思う。
2	ご意見(悪い点、改善点)	AI の設定項目が多く、初歩には教員が高いと感じる。

所属・お名前:



図 6.7-4 アンケート結果 2

6.7.3 KPI/KGI との比較結果

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定性評価	1	カメラ映像が自動作業の実施可否の判断が可能な画質であること
	2	アンケートにおける業務効率改善の実感度が4段階評価で平均3.0以上であること
定量評価	3	運用工数30%低減、障害復旧時間30%低減
	4	スループット維持率80%以上、遅延変動30%減少
	5	投資回収期間4年以内

1) カメラ映像が自動作業の実施可否の判断が可能な画質であること

国際電気ラボ関係者および国際電気関連工場関係者である五洋電子株式会社の社員合計20名を対象としたアンケート調査において、AIを活用したハイブリッドネットワーク制御システムのカメラ映像品質に関する評価を実施した。評価は4段階評価(1:同意しない、2:あまり同意しない、3:やや同意する、4:同意する)で行った。

ローカル5G⇔Wi-Fi検証では、映像品質に関する3項目すべてにおいて平均3.7点以上の高評価を得た。特に「AI適用後のカメラの映像品質は良い」については平均3.8点と最も高く、回答者の大多数が「やや同意する」以上の評価を示した。これは、ローカル5GとWi-Fiを組み合わせた高品質な構成により、製造現場における安全管理や品質確認業務に必要な映像品質が確保されていることを示していると考えられる。

Wi-Fi⇔公衆網検証では、映像品質に関する評価がローカル5G⇔Wi-Fi検証と比較してやや低い結果となった。特に「移動しているカメラの映像は安全面・実用面で問題ない」については平均2.7点と、目標値である「やや同意する(3点)」をわずかに下回った。これは、公衆網使用時の映像品質低下や遅延に関する懸念を反映していると考えられる。

アンケートの自由記述において、以下のような意見が得られた。

良い点として、「AI適用前と比較して映像の途切れがなくなり、非常にスムーズになった」「映像品質が安定しており、安全管理面での活用可能性が高い」といった肯定的な評価が多数得られた。

改善点としては、「公衆網使用時の映像品質が低下し、細かい作業確認には不十分であった」「移動中のカメラで公衆網を使用する場合、遅延が気になり実用性に課題を感じた」といった指摘があった。

本検証により、AI活用ハイブリッドネットワーク制御システムは、ローカル5GやWi-Fiといった高品質な通信環境を主軸とすることで、製造現場における自動作業の実施可否の判断に必要な映像品質を実現できることが実証された。一方、公衆網については、屋内環境における通信品質の制約から、バック

アップ回線としての位置づけが適切であることが明らかとなった。今後の社会実装においては、Wi-Fi環境の充実を優先し、複数のアクセスポイントを適切に配置することで、公衆網に依存せずとも安定した映像品質を確保できる構成が良いと考えられる。

2) アンケートにおける業務効率改善の実感度が4段階評価で平均3.0以上であること

国際電気ラボ関係者および国際電気関連工場関係者である五洋電子株式会社の社員合計20名を対象としたアンケート調査の業務効率改善に関する評価について以下の結果が得られた。

- ・ローカル5G⇔Wi-Fi検証:4段階評価で平均3.4点
- ・Wi-Fi⇔公衆網検証:4段階評価で平均3.3点

両検証パターンともに、目標値の3.0以上を達成しており、回答者の大多数が「やや同意する」以上の評価を示した。これは、AI活用ハイブリッドネットワーク制御システムの導入により、通信障害対応の業務効率が明確に改善されることが、現場レベルで実感されていることを示している。

目標達成の要因として、以下の点が挙げられる。第一に、通信障害の自動検知と無線切り替えにより、従来は手作業で実施していた障害対応作業が不要となり、作業者の負担が大幅に軽減されたことである。第二に、ローカル5GとWi-Fiを組み合わせた高品質な構成により、映像品質の安定性が向上し、安全管理や品質確認業務の精度が高まったことである。第三に、通信障害による生産ラインの停止リスクが低減され、製造工程の継続性が保証されたことである。

一方、アンケートの自由記述において、AI設定の容易性に関する改善要望が両検証パターンで共通して指摘された。現状では専門的な知識が必要とされるため、設定マニュアルの充実や、直感的な操作インターフェースの開発により、導入障壁を低減することが、社会実装に向けた重要な課題である。また、Wi-Fi⇔公衆網検証においては、公衆網使用時の映像品質低下や遅延に関する懸念が示されており、公衆網はバックアップ回線としての位置づけが適切であると考えられる。

3) 運用工数 30%低減、障害復旧時間 30%低減

6.7.21)コスト削減効果検証において、国際電気関連会社の五洋電子株式会社へのヒアリングにより特定された3つの典型的な障害シナリオの従来の人手による対応とAI導入後の自動対応を比較し、運用工数および障害復旧時間の削減効果を定量的に評価した。

表 6.7-2～表 6.7-8 に示す通り、3つの障害シナリオにおける作業工程別の作業時間を比較した結果、以下の削減効果が確認された。

表 6.7-20 運用工数削減比較結果

#	障害シナリオ	従来環境	AI活用環境	削減率
1	金属棚設置による電波遮断	合計 54 時間/人	合計 8 時間/人	85.2%
2	基地局障害による無線出力低下	合計 72 時間/人	合計 16 時間/人	77.8%
3	アンテナ破損によるエリア縮小	合計 72 時間/人	合計 16 時間/人	77.8%

障害復旧時間については、従来方式では通信断発生から通信復旧までに無線ネットワークの切り替え作業があったため、3～4 日間を要していたが、AI 活用システムでは無線ネットワークを自動で切り替えるため実質 0ms となっている。そのため、削減率は 100%となった。

運用工数は 77.8～85.2%削減(目標 30%に対し約 2.6～2.8 倍)、障害復旧時間は実質 100%削減(目標 30%に対し約 3.3 倍)を実現したため、目標値を大幅に上回って達成することができた。

運用工数と障害復旧時間の大幅削減が実現された要因として、以下の点が挙げられる。

第一に、AI による自動異常検知と即座の経路切り替えにより、従来人手で行っていた作業の大部分が自動化されたことである。特に、製造代替作業(28～36 時間)の完全削減は、AGV・カメラの稼働継続により生産ラインの停止を回避できたことを示しており、「止めない製造」の実現に大きく貢献している。

第二に、通信途絶時間 0ms の実現により、従来 3～4 日間要していた障害復旧時間が実質的に消失したことである。従来方式では、障害検知から原因特定、手動切り替え、復旧対応、動作確認という一連の作業に数日を要していたが、AI 制御により通信品質劣化を予兆段階で検知し、劣化が実際の通信断に至る前に代替ネットワークへ自動切替することで、ユーザ側からは障害が発生していないかのような連続的な通信環境を提供できている。

第三に、原因調査作業については依然として人手が必要であるものの、その間も通信は継続されているため、緊急性が低下し、計画的な対応が可能となったことである。従来は通信断により生産が停止しているため、IT 担当者は緊急対応として迅速な復旧を迫られていたが、AI 導入後は通信が継続されているため、通常業務時間内での計画的な原因調査と恒久対策の実施が可能となり、作業者の労働環境改善にも寄与している。

これらの効果により、年間コスト削減率 87.4%という目標を大きく上回る成果が実証された。本システムは、製造現場における通信障害対応の効率化と生産性維持に大きく貢献し、「止めない製造」の実現に向けた有効なソリューションであることが定量的に確認されたと考えられる。

4) スループット維持率 80%以上、遅延変動 30%減少

6.7.23)既存通信インフラの有効活用検証において、固定カメラ(通信速度 8Mbps)を用いた映像伝送試験を実施し、スループット維持率および遅延(RTT)の測定を行った。

Wi-Fi 接続開始時の検証結果については、以下のような結果となった。

異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(ルールベース)の場合は、表 6.7-14 のように 3 回の測定すべてにおいて、Wi-Fi→公衆網へ経路切り替えが発生しており、経路切り替え前後のスループットを確認すると、ともに 8.0Mbps 以上(維持率 100%以上)であった。

異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(機械学習)の場合は、表 6.7-16 のように 3 回の測定すべてにおいて、Wi-Fi→公衆網へ経路切り替えが発生しなかったが、スループットは 8.0Mbps 以上(スループット維持率 100%以上)であった。

公衆網接続開始時の検証結果については、以下のような結果となった。

異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(ルールベース)の場合は、表 6.7-15 のように 1 回目は公衆網→Wi-Fi へ経路切り替えが発生し、スループットは 7.5Mbps→8.9Mbps とスループット維持率 100%以上であった。しかし、2・3 回目は測定開始時 8.0Mbps 以上あったスループットが、移動することで平均 2.6、4.2Mbps と低下し、Wi-Fi へ経路切り替え前に映像が切断されてしまった。

異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(機械学習)の場合は、表 6.7-17 のように 3 回の測定すべてにおいて経路切り替え前に映像断が発生した。公衆網の平均スループットについては、2.6Mbps～4.4Mbps であった。

次に遅延変動時間について示す。

Wi-Fi 接続開始時の検証結果については、以下のような結果となった。

異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(ルールベース)の場合は、表 6.7-14 のように Wi-Fi 接続時の RTT:9.2～16.7ms、公衆網切り替え後の RTT:104～154ms であった。

異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(機械学習)の場合は、表 6.7-16 のように Wi-Fi 接続時の RTT:4.8～10.1ms であった。

公衆網接続開始時の検証結果については、以下のような結果となった。

異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(ルールベース)の場合は、表 6.7-15 のように公衆網接続時の RTT:193ms、Wi-Fi 切り替え後の RTT:5.2ms であった。

異常検知 AI(機械学習)+通信制御 AI(機械学習)の場合は、表 6.7-16 のように 3 回の測定すべてにおいて経路切り替え前に映像断が発生し、RTT:156～196ms であった。

結果として、Wi-Fi 接続開始時の検証では、両 AI パターンともにスループット維持率 80%以上の目標を達成した。公衆網接続開始時の検証では、ルールベースで部分的達成(33.3%)、機械学習で未達成となった。遅延変動については、Wi-Fi→公衆網については遅延時間が 10 倍となっており、公衆網→Wi-Fi については、遅延時間が 30%以下となっていた。

これらの結果から、既存通信インフラを活用したハイブリッドネットワーク構成においては、以下の知見が得られた。

第一に、Wi-Fi 環境が良好な場所では、通信制御 AI(機械学習)による適切な経路維持により、安定した高品質通信(スループット維持率 100%、低遅延・低変動)を実現できる。

第二に、公衆網を主要通信回線として使用する構成は、屋内環境では通信品質が不安定であり、スループット維持に課題がある。公衆網は、屋外や開放的な環境でのバックアップ回線としての位置づけ

が適切である。

今後の改善策として、まず、模倣学習方式の通信制御 AI(機械学習)の公衆網→Wi-Fi 切り替えパターンを含む多様な学習データの拡充を行い、分布外を減らす方法がある。あるいは、通信各回線の通信品質をリアルタイムに監視・評価して報酬を算出し、報酬関数を使用した切り替え方式に変更する方法がある。

5) 投資回収期間 4 年以内

本検証結果から、以下の知見が得られた。

第一に、AI 活用による運用効率化とダウンタイム削減の効果が、定量的に実証されたことである。年間 260 万円の純効果は、通信障害による生産ライン停止の回避、緊急対応作業の削減、復旧時間の短縮といった具体的な成果として現れており、製造現場における「止めない製造」の実現に大きく貢献している。

第二に、投資回収期間を短縮するための改善余地がある点である。算出された投資回収期間 6.2 年は、当初設定した KPI 目標「投資回収期間 4 年以内」を上回る結果となったが、本実証では、通信障害対応のコスト削減のみを評価対象としたため、実際には以下のような間接的効果も期待できると考えられる。

- ・通信品質安定化による生産性向上効果(不良品削減、作業効率向上)
- ・データ活用による品質改善効果(トレーサビリティ向上、予知保全)
- ・安全管理体制の強化効果(事故リスク低減、労災削減)

これらの間接的効果を含めて評価すれば、年間削減効果はさらに増大し、投資回収期間は 4 年以内に収まる可能性があると考えられる。

第三に、運用コストの最適化により、投資回収期間をさらに短縮できる可能性があることである。本実証で設定した年間保守費 100 万円は、プロトタイプシステムの保守を想定した金額であり、保守業務の効率化、予防保全の高度化などにより、削減余地がある。例えばリモート保守の拡充、予測保全の実装などにより、保守費用を 50~70 万円程度まで削減できれば、年間純効果は 290~310 万円となり、投資回収期間はさらに短縮される。

第四に、製品化にあたっての価格最適化の重要性である。本実証では個別カスタマイズを前提としたプロトタイプの価格を設定したが、製品化にあたっては、ソフトウェアの標準化、ハードウェアの汎用化、導入プロセスの効率化などにより、初期投資額を削減できる余地がある。例えば、AI ソフトウェアをパッケージ化し、設定ウィザードによる導入を可能にすることで、システム設計・構築費を大幅に削減できる可能性がある。初期投資額を 1,600 万円から 1,200 万円程度まで圧縮できれば、投資回収期間は約 4.6 年となり、目標値に近づくと考えられる。

本検証結果は、AI 活用システムの社会実装における重要な示唆を提供している。技術的には高い効果の実証され、経済的にも一定の合理性が確認されたものの、目標とする投資回収期間を達成するためには、間接的効果の可視化、運用コストの削減、導入価格の最適化が鍵となることが明確となった。今後の製品化においては、これらの課題に対処することで、より多くの製造事業者が導入可能な実用的なソリューションとして提供できると考えられる。

6.7.4 考察

本実証で開発した AI 活用ハイブリッドネットワーク制御システムは、2025 年度以降に本格化するローカル 5G 市場の拡大と製造業 DX 推進の中で、極めて高い社会実装の可能性を有している。

総務省「令和 6 年版情報通信白書」によれば、日本企業の約 50%がデジタル化に未着手であり、特に中小企業では約 70%が「未実施」と回答している。また、デジタル化の課題として「人材不足(42.1%)」が最も高く、次いで「アナログな文化・価値観が定着している(29.3%)」が挙げられている。本システムは、このような人材不足や属人化といった製造業が抱える構造的課題に対し、AI による自動化と通信の安定化により、専門人材への依存を低減できる点で、社会実装の意義が大きいと考えられる。

他の通信手段と比較した効果として、本実証で開発した AI 活用ハイブリッドネットワーク制御システムは、従来の単一ネットワーク環境や手動管理方式と比較して、顕著な優位性を実証した。

第一に、通信途絶時間 0ms の達成である。従来方式では障害検知から復旧まで 3~4 日間を要していたが、AI 制御により通信品質劣化を予兆段階で検知し、劣化が実際の通信断に至る前に代替ネットワークへ自動切替することで、ユーザ側からは障害が発生していないかのような連続的な通信環境を提供できている。これは、単一技術では実現困難な「止めない製造」の具体的実現例である。

第二に、各通信技術の長所を活かした最適な使い分けが可能となった点である。本実証では、ローカル 5G と Wi-Fi を主要通信回線として高品質・低遅延通信を実現し、公衆網をバックアップ回線として位置づけることで、通信品質と可用性を両立させることができた。

第三に、AI 活用による自動化により、製造担当者による代替作業(28~36 時間)を完全に削減できた点である。これは、通信障害時にも生産ラインを停止させないシステム設計が、製造現場の生産性維持に直結することを示している。

本システムは以下の産業課題解決に貢献すると考えられる。

第一に、人手不足への対応である。総務省調査によれば、日本企業のデジタル化における最大の課題は「人材不足」である。本システムは、AI による自動異常検知と経路切り替えにより、従来 IT 担当者 2 名が対応していた障害対応作業を自動化し、人的リソースの効率的活用を可能にしている。

第二に、属人化の解消である。製造現場では熟練作業員への依存が課題となっているが、本システムは通信障害対応という専門的業務を AI が担うことで、特定個人への依存を低減し、業務の標準化と継続性を確保している。

本実証の結果から、製造事業者、通信事業者、ソリューション提供事業者が本システムの導入を検討する際の定量的指針として、以下を提示する。

本実証では投資回収期間 6.2 年という結果が得られた。これは、当初設定した KPI 目標「4 年以内」を上回る結果となった。一般的に、設備投資の回収期間は 3~5 年が標準とされていたが、近年の経済の不確実性の高まりを受け、特に中小企業では 2 年以内、可能であれば 1 年以内が望ましい目標とされている。一方で、大規模な工場建設のような大型事業では 5 年前後のより長期的なスパンで計画される。本システムは、通信インフラの高度化という戦略的投資として位置づけられ、6.2 年という投資回収期間から短縮するためには 6.7.35)でも述べたような改善策が必要であると考えられる。

7. 本実証の総括

7.1 本実証の成果・課題

本実証では、ローカル 5G、Wi-Fi、公衆網を組み合わせたハイブリッドネットワーク環境において、AI 技術を活用した異常検知と通信経路の自動最適化により、製造現場における「止めない製造」を実現する高信頼通信基盤の構築に成功した。

ユースケース①:エッジ AI による通信量の低減では、移動体検知と連動した動的映像品質制御により、目標値 30%削減に対して約 77.4%~80.5%という目標の 2.6~2.7 倍の通信量削減効果を達成した。特に、前方 5m 拡張の方向限定型検知エリア設定(設定②)では、80.4%の削減率と 100%の切り替え成功率を両立し、誤検知率を 85%に抑制することに成功した。これにより、8 時間稼働で 225GB の通信量を約 44GB まで圧縮でき、従来 3~4 台のカメラで帯域を占有していた環境において、15~17 台程度のカメラを同一ネットワークで運用可能となることが実証された。

ユースケース③:多種多様なデバイスに対する通信リソースの最適化では、異常検知 AI と通信制御 AI を組み合わせたシステムの段階的検証を実施した。第 1 段階で AI 技術を導入しない状態での基準データを取得、第 2 段階で AI 技術を導入した状態での測定、第 3 段階で実際の移動シナリオを想定した総合的な比較検証を行い、AI 導入による改善効果を定量的に評価した。ローカル 5G⇄Wi-Fi 環境では、パケットロス率 0.0~0.4%で目標の 1%以下を達成し、異常検知 AI が通信品質劣化を予兆段階で検知、通信制御 AI が最適なネットワークへの切り替えを実行することで、電波遮蔽物による通信環境の変化やネットワーク負荷の増大に対しても安定した通信品質を維持できることが確認された。一方、公衆網環境では屋内における通信帯域不足により映像途切れが発生し、公衆網をバックアップ回線として活用する際の通信品質確保が課題として明確になった。

拡張性検証では、物流業、防災業、航空業の 3 分野における通信要件を整理し、物流業では大型遮蔽物設置という環境条件変化に対し、AI 技術が有効に機能することが実証された。ローカル 5G 不在環境でもハイブリッドネットワークのメリットが活かせるのか検証するために行った Wi-Fi+公衆網構成の検証では、Wi-Fi 環境が良好な場所では模倣学習の通信制御 AI(機械学習)による適切な経路維持により、安定した高品質通信を実現できることが確認された。

効果検証では、AI ハイブリッドネットワーク制御システムの導入により、年間約 368 万円(削減率 87.4%)のコスト削減効果、運用工数削減率 77.8~85.2%、障害復旧時間の実質 0ms 化を実証した。投資回収期間は 6.2 年と算出され、当初目標「4 年以内」を上回ったが、間接的効果を含めれば 4 年以内に収まる可能性がある。社会的価値の評価では、国際電気ラボ関係者および関連工場関係者 20 名を対象としたアンケート調査で平均 3.1~3.4 点(4 点満点)の高評価を得た。一方、本実証を通じて、いくつかの技術的改善課題が明確になった。

第一に、エッジ AI 検知の精度向上である。全方向 5m 拡張の検知エリア設定では誤検知率 95%という課題があり、前方 5m 拡張でも誤検知率 85%が残存している。今後、照明条件の変化、複数人の同時検知、走行中の AGV との識別など、製造現場の多様な状況に対応できる検知アルゴリズムの改良が必要である。

第二に、公衆網の通信品質向上である。効果検証において、公衆網を主要通信回線として使用する

構成は、屋内環境では通信品質が不安定であり、スループット維持に課題があることが判明した。公衆網接続開始時の検証では、測定開始時 8.0Mbps 以上あったスループットが、移動することで平均 2.6～4.2Mbps まで低下し、経路切り替え前に映像が切断される事象が発生した。今後、公衆網→Wi-Fi 切り替えパターンを含む多様な学習データの拡充と、通信制御 AI の切り替えロジックを改良し、各回線の通信品質をリアルタイムに監視・評価して切り替え判断に反映する機能の実装が必要である。

第三に、模倣学習を使用した通信制御 AI(機械学習)の改良である。現状では、Wi-Fi 環境が良好な場所では適切な経路維持により安定した高品質通信を実現できるが、公衆網を含む多様な環境下では、ルールベース通信制御 AI の方が切り替え判断の透明性と確実性において優位性を示した。今後、通信制御 AI(機械学習)の学習データを拡充し、屋内・屋外、Wi-Fi・公衆網の組み合わせなど、多様な通信環境下での最適な経路選択を可能にする必要がある。あるいは、報酬関数を導入して AI の方式を変更する方法がある。

本実証の今後の展開課題としては、本実証の成果を全国の製造現場に展開するためには、以下の取り組みが重要であると考えられる。

第一に、横展開の推進である。本実証で確立した技術と知見を、製造業以外の産業分野(物流、インフラ監視、農業など)へ横展開することで、社会全体の DX 推進に貢献できる。特に、複数の監視カメラや通信機器が常時稼働する環境において、通信量削減と通信品質維持を両立する本技術の適用可能性は高いと考えられる。今回ニーズを聴取した製造業や航空業の事業者と連携して実フィールドでの検証の具体化を進めるとともに、他の産業分野での適用可能性についても探索を継続する必要がある。

第二に、実証成果の発信である。本実証で得られた定量的成果(運用工数削減率 77.8～85.2%、障害復旧時間実質 0ms、年間コスト削減率 87.4%、投資回収期間 6.2 年など)を、製造事業者、通信事業者、ソリューション提供事業者へ積極的に発信し、導入検討の促進を図る必要がある。また、段階的導入による初期投資の抑制や、効果検証を経た横展開といったアプローチについても、具体的な導入モデルとして提示していくことが重要である。

8. 参考資料

8.1 システム構成図・設計書

以下に本実証のシステム構成図を示す。

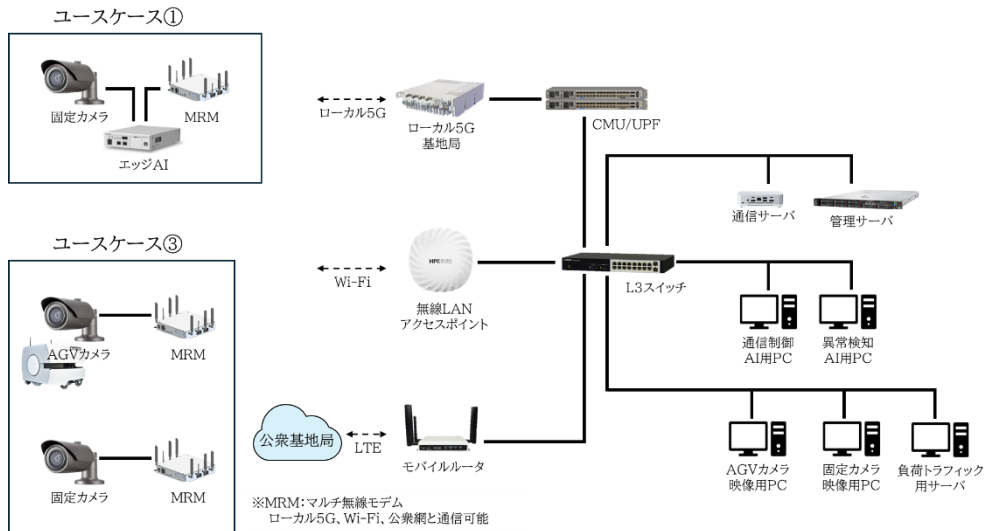


図 8.1-1 ユースケース①、③ システム構成図

8.2 ネットワーク構成図・設計書

8.3 使用機器・ソフトウェア一覧

(1) AI用PC

異常検知 AI および通信制御 AI に使用した PC の仕様を表 8.3-1、ソフトの仕様を表 8.3-2 に示す。

表 8.3-1 PC の仕様

メーカー	DELL
名称	Precision 3660 Tower
CPU	Core i9-13900
メモリ	128GB
ストレージ	2TB SSD
GPU	Nvidia GeForce RTX 4090 24GB

表 8.3-2 ソフトの仕様

OS	Ubuntu 22.04 LTS
Python	3.12
CUDA	12.8
RAPIDAS	25.12
pandas	2.2.3

(2) 5GPF 管理サーバ

仕様は以下のとおりである



図 8.3-1 実施 5GPF-MS-0101 外観図

表 8.3-3 5GPF-MS-0101 仕様

項目	定格
ソフトウェア型式	5GPF-MS-0101
設置台数	1 台
CPU	Corei7
メモリ	16GB
ストレージ	512GB

有線 LAN	10BASE-T/100BASE-TX/1000BASE-T
外形寸法	306.9x208.4x15.9 mm(最薄部、突起部含まず)
質量	約 1.22kg
電源	AC アダプタ:100-240VAC(50/60Hz)

(3) 5GPF 通信サーバ

仕様は以下のとおりである。



図 8.3-2 5GPF-CS-0102 外観図

表 8.3-4 5GPF-CS-0102 仕様

項目	定格
型式	5GPF-CS-0102
設置台数	1 台
CPU	Intel Core™ i3-8145UE Processor (2.2GHz)
メモリ	16GB
ストレージ	128GB
有線 LAN	1Gb 2port
外形寸法	182(W)x155(D)x30.3(H)mm (突起物を含まず)
質量	約 1.3kg (取付け金具を含まず)
電源	AC アダプタ:100-240VAC(50/60Hz)

(4) 無線マルチモデム

仕様は以下の通りである。



図 8.3-3 5GPF-MRM 外観図

表 8.3-5 5GPF-MRM 仕様

項目	定格
型式	5GPF-MRM
設置台数	2 台
周波数帯	B41 n79(4600MHz～4900MHz) 2.4GHz 帯／5GHz 帯
外径寸法(W×H×D)	約 300×60×160mm(突起部除く)
重量	約 3.5kg 以下(本体)
有線インタフェース	10/1000/100BASE RJ-45

- (5) AI エッジコントローラー
仕様は以下の通りである。



図 8.3-4 VG-IP4000-H2 外観図

表 8.3-6 VG-IP4000-H2 仕様

項目	定格
型式	VG-IP4000-H2
設置台数	1 台
外径寸法(W×H×D)	約 190×60×250mm(突起部除く)
重量	約 1.6kg 以下(本体)
有線インタフェース	10/1000/100BASE RJ-45
CPU	Dual-Core NVIDIA Denver 2 64bit CPU and Quad-Core Arm Cortex-A57 MPCore processor
メモリ	4GB

8.4 取得したデータの例

データの例として、図 8.4-1 と図 8.4-2 に正常状態と時系列グラフと異常状態(パケットロス発生時)の時系列グラフを示す。図 8.4-2 においては、受信電界強度が低下するにつれてパケットロス率が上昇している。

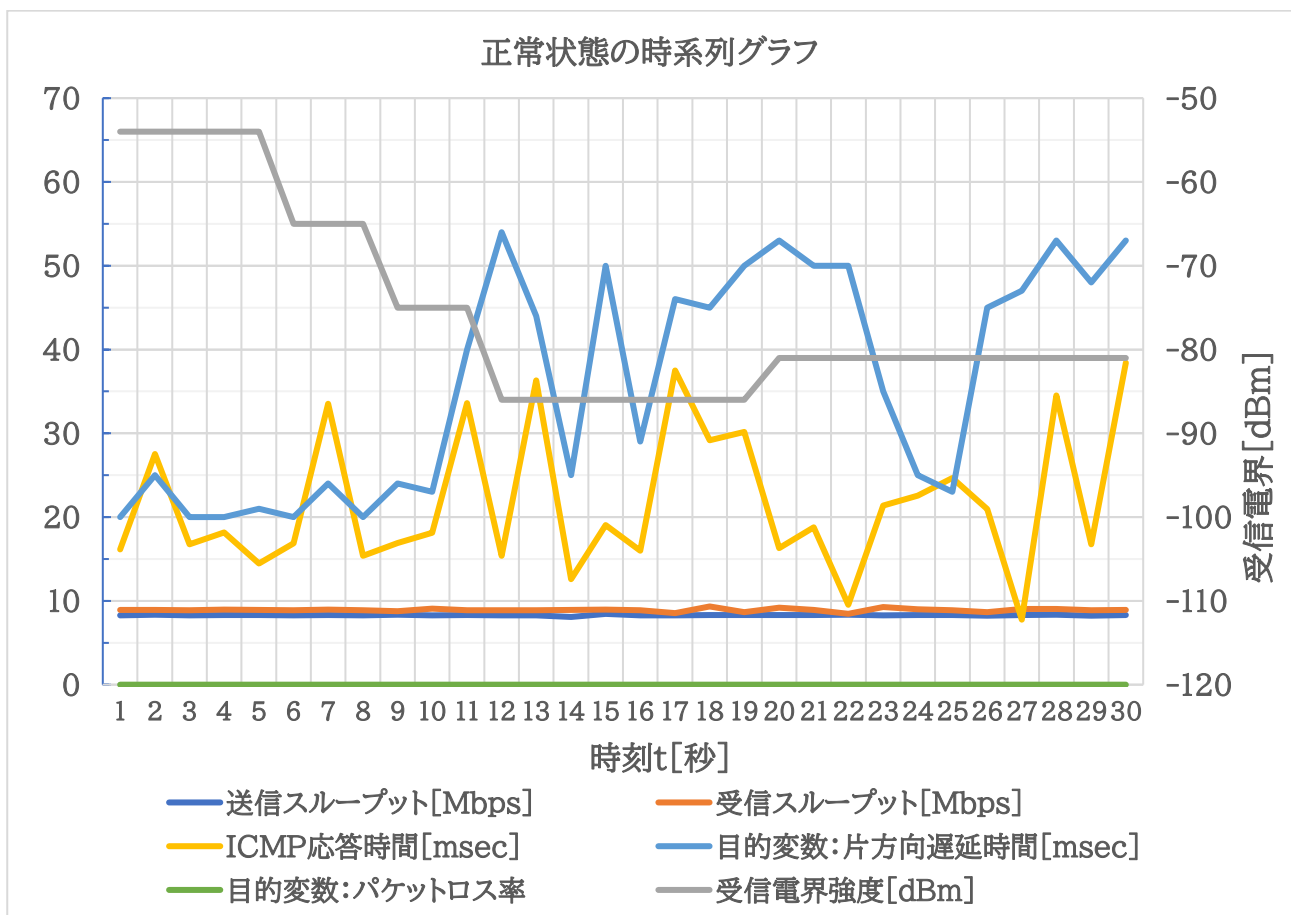


図 8.4-1 正常状態の時系列グラフ

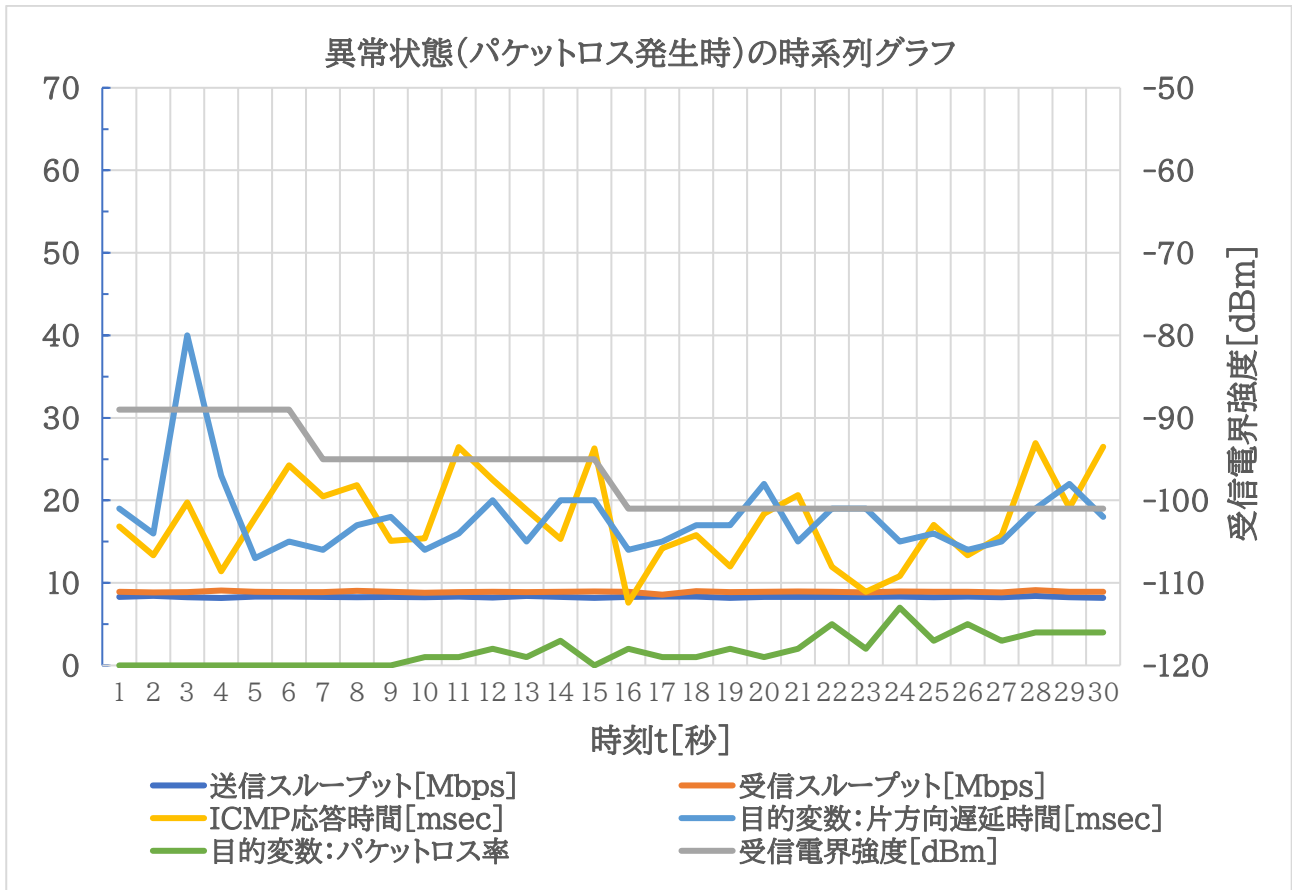


図 8.4-2 異常状態(パケットロス発生時)の時系列グラフ

8.5 その他、当該システムを再現する上で参考となる資料

なし

8.6 広報活動実績

本実証での広報活動実績はない

8.7 参考文献

実証報告書に記載済みである。

地域社会 DX 推進パッケージ事業(AI 検証タイプ)

AI を用いた通信負荷の低減・通信量の確保等の検証に関する調査研究(実証機関:株式会社国際電気)

実証報告書

工場など複雑な電波環境におけるエッジ AI を用いた通信量削減および通信リソース最適化の実証

2026 年 1 月

AI03 小平市
株式会社国際電気
NTT 東日本株式会社
