

# 地域社会 DX 推進パッケージ事業(AI 検証タイプ)

## 宮城県仙台市

工事現場等における AI を用いた通信量削減および  
メタサーフェス反射板による電波不感地域改善の実証

---

### 実証報告書

2026 年 1 月 30 日

### AI02 仙台市

NTT ドコモビジネス株式会社

国立研究開発法人情報通信研究機構、

株式会社ポケット・クエリーズ、株式会社大林組、AGC 株式会社、

ドコモ・テクノロジー株式会社、株式会社横須賀リサーチパーク



---

## 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.....	2
0.2.1	【ユースケース①:エッジ AI による通信量の低減】:実証結果.....	2
0.2.2	【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】:実証結果.....	4
0.2.3	【拡張性に関する検証】.....	4
0.2.4	【効果検証】.....	5
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
1.1.1	本実証の背景 .....	8
1.1.2	取り組むべき課題 .....	8
1.1.3	AI×通信の現状と今後の可能性.....	9
1.2	実証の目的 .....	10
1.3	最終目標・構想イメージ.....	10
1.3.1	最終目標・構想.....	10
1.3.2	技術・サービスの在り方.....	11
1.4	本実証の位置づけ・目標.....	11
1.4.1	工事現場での実証.....	12
1.4.2	農場での実証.....	14
1.4.3	AI 技術.....	14
1.4.4	通信技術.....	15
1.5	社会実装に向けたロードマップ・取り組みの発展性.....	16
2.	業務実施体制.....	18
2.1	実証機関 .....	18
2.2	実施体制図 .....	19
3.	通信システム及び AI システムの構築.....	20
3.1	通信システム及び AI システムの全体像 .....	20

3.1.1	通信システム.....	20
3.1.2	AI システム .....	22
3.2	通信システム及び AI システムの設置場所 .....	22
3.2.1	【仙台市新庁舎建替工事現場】.....	23
3.2.2	【東北大学青葉山キャンパス】.....	26
3.2.3	【フィールド共通】.....	28
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.....	30
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.....	30
4.	AI モデルの開発・学習.....	32
4.1	AI モデルの全体像 .....	32
4.1.1	画像解析 AI .....	32
4.1.2	動的メタサーフェス反射板.....	34
4.1.3	取得したデータ一覧.....	36
4.1.4	データセット作成に係る処理 .....	37
4.1.5	システム全体のデータフロー図.....	37
4.1.6	データの適切さ .....	39
4.2	AI モデルの学習プロセス .....	39
4.3	AI モデルの開発・学習にあたっての留意事項等 .....	40
5.	実証の手法 .....	41
5.1	ユースケース①:エッジ AI による通信量の低減.....	41
5.1.1	実証内容の詳細 .....	41
5.1.2	利用技術・データ .....	43
5.1.3	必要性・新規性.....	44
5.1.4	検証条件 .....	45
5.1.5	開発・評価項目 .....	45
5.1.6	KPI/KGI.....	50
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.....	53
5.2.1	実証内容の詳細 .....	53
5.2.2	利用技術・データ .....	55
5.2.3	必要性・新規性.....	55
5.2.4	検証条件 .....	56
5.2.5	開発・評価項目 .....	56
5.2.6	KPI/KGI.....	58
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.....	60
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.....	61
5.5	拡張性に関する検証.....	62
5.5.1	実証内容の詳細 .....	62
5.5.2	前提条件 .....	63

5.5.3	評価項目 .....	64
5.5.4	KPI/KGI.....	65
5.6	効果検証 .....	67
5.6.1	実証内容の詳細 .....	67
5.6.2	前提条件.....	67
5.6.3	評価項目 .....	67
5.6.4	KPI/KGI.....	70
6.	実証の結果・考察 .....	72
6.1	全体スケジュール.....	72
6.2	ユースケース①:エッジ AI による通信量の低減.....	73
6.2.1	実証スケジュール .....	73
6.2.2	KPI/KGI との比較結果.....	73
6.2.3	開発・評価項目の結果 .....	79
6.2.4	考察 .....	87
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.....	89
6.3.1	実証スケジュール .....	89
6.3.2	開発・評価項目の結果 .....	89
6.3.3	KPI/KGI との比較結果.....	99
6.3.4	考察 .....	110
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.....	112
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.....	113
6.6	拡張性に関する検証.....	114
6.6.1	実証スケジュール .....	114
6.6.2	評価項目の結果 .....	114
6.6.3	KPI/KGI との比較結果.....	117
6.6.4	考察 .....	118
6.7	効果検証 .....	120
6.7.1	実証スケジュール .....	120
6.7.2	評価項目の結果 .....	120
6.7.3	KPI/KGI との比較結果.....	125
6.7.4	考察 .....	126
7.	本実証の総括 .....	128
7.1	本実証の成果・課題.....	128
8.	参考資料 .....	131
8.1	システム構成図・設計書 .....	131
8.2	ネットワーク構成図・設計書 .....	138

8.3	使用機器・ソフトウェア一覧 .....	139
8.4	取得したデータの例 .....	147
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 .....	153
8.6	広報活動実績 .....	154
8.7	参考文献 .....	157

# 0. エグゼクティブサマリ

## 0.1 実証概要

社会課題である労働力不足を背景に、建設や農業等の労働集約型の産業では、業務の省力化・省人化が望まれている。特に、工事現場や農場などでは、危険箇所での作業や、広範な領域にまたがる業務遂行が求められることから、省力化・省人化に繋がり、現場でのリアルタイム監視や自動制御の安定化を実現するような AI やロボットの利活用が必要とされている。省力化・省人化を目的とした AI 利活用システムの実現、およびこれらの技術を効果的に運用するためには、AI 自体の性能向上に加えて、リアルタイム性の確保のため、安定した通信ネットワーク環境を構築することが不可欠である。AI の導入に際しては、オンプレミス環境ではなく、オンライン化された構成が一般的となりつつあるが、映像などの大容量データをクラウドに送信し分析を行う際には、通信負荷や帯域確保が技術的課題として顕在化する。そのため、現場(エッジ)-クラウド間での映像・制御データの送受信において、安定した通信環境の確保が不可欠となる。電波の遮蔽等の影響を避け、通信カバレッジを確保することはもとより、AI 等の技術を活用してデータ通信量を削減することが、安定した通信ネットワーク環境を構築することに資すると期待される。

そこで本実証では、図 0.1-1 に示すような将来像を実現するため、移動可能なロボットからの映像を分析する、異常検知エッジ・クラウド AI の分散処理により、通信量削減効果を検証する(ユースケース①)とともに、

メタサーフェス反射板での送受信端末位置に応じた適応的な電波反射方向制御により不感エリア解消の効果を検証する。(ユースケース②)。加えて、実社会への AI・ロボット活用の拡張性を検討した。

ユースケース①での主な検証内容としては、仙台市新庁舎建替工事現場にて、移動ロボットに搭載したカメラによる煙検出でのエッジ・クラウド連携の効果を評価。工事現場における監視は、不審者の侵入も監視対象となることから、同様の環境における人物検出についても評価。また、東北大学青葉山キャ

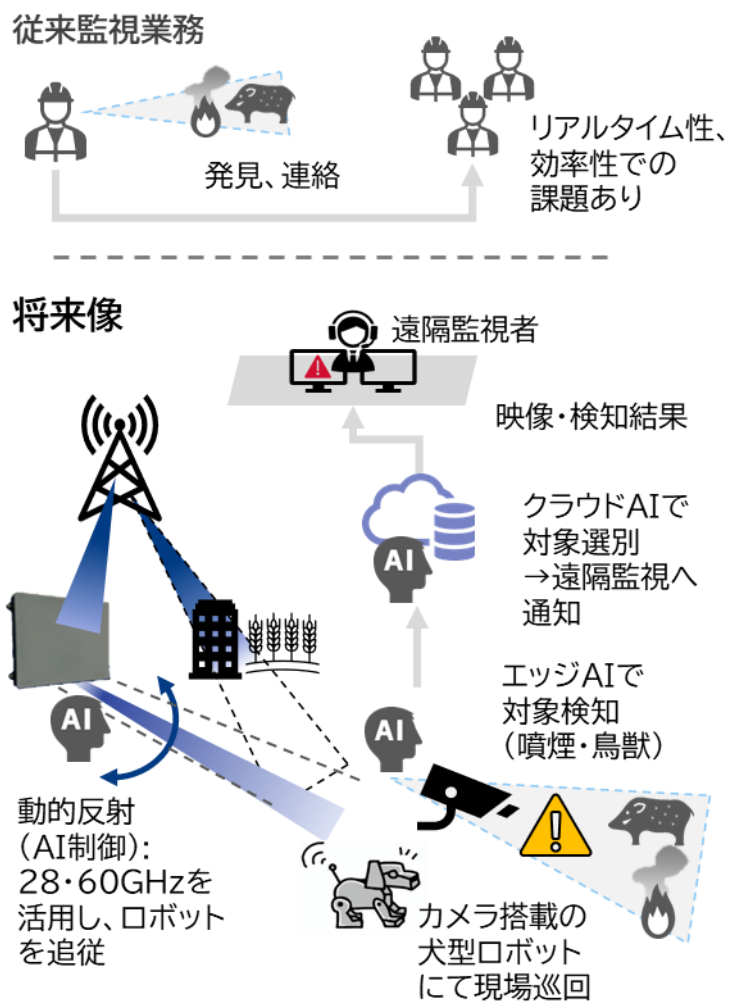


図 0.1-1 本実証が目指す将来像

ンパスでは、移動ロボットに搭載したカメラ映像における鳥獣の検出でのエッジ・クラウド連携の効果を評価。共通の検証内容として、エッジ AI での検出処理性能、クラウド AI での検出処理性能を比較し、クラウドに映像を全て伝送した場合のデータ通信量とエッジ・クラウド AI 連携した場合のデータ通信量を評価。

ユースケース②での主な検証内容としては、仙台市新庁舎建替工事現場にて、工事現場内の公衆 5G の不感エリアに対し、4.5GHz のメタサーフェス反射板を活用したエリア拡張の有効性を検証。また、東北大学青葉山キャンパスでは、公衆 5G、LTE の不感エリアに対し、4.5GHz のメタサーフェス反射板を活用したエリア拡張と 28GHz・60GHz の動的な反射方向制御によるエリア拡張の有効性を検証。

以上を踏まえて、目指す将来像は、メタサーフェス反射板とエッジ・クラウド協調 AI の活用により、監視や安全確保等の業務の効率化を実現し、AI 連携型の情報処理基盤と通信範囲拡張の技術を組み合わせたソリューションを他分野・異業種に展開し、AI・ロボットの活用による省人化を目指すことで、社会全体の労働力不足の解決に貢献することである。

## 0.2 KPI/KGI の内容と達成状況

### 0.2.1 【ユースケース①:エッジ AI による通信量の低減】:実証結果

#### 郊外での獣監視

表 0.2-1 エッジ AI による通信量の低減(郊外での獣監視):実証結果

番号	目標値	結果	達成状況
定性評価	1 特定の対象物の自動監視業務における削減効果	一部達成	<ul style="list-style-type: none"> <li>エッジでの解析だけでは対象物の見逃しが発生する可能性が一定量あり、獣監視においては現時点ではクラウドでの改めての確認が必要になるため、通信データ削減効果は限定的である。</li> </ul>
	2 特定の環境での自動監視業務における削減効果	一部達成	<ul style="list-style-type: none"> <li>エッジでの誤検出が少ないため大きな通信データ削減効果が期待できる一方、郊外のように獣と背景とのコントラストが低い環境では対象物の見逃しが発生する可能性があり、データ削減効果は限定的である。</li> </ul>
	3 特定のアルゴリズムによる AI を用いた自動監視業務において削減効果が得られる	一部達成	<ul style="list-style-type: none"> <li>YOLO に基づく検出で、時間帯や監視対象までの距離次第では獣が大きく明瞭に映ることでエッジでの検出可能性が高まりデータ削減効果が期待できるものの、条件により異なるので効果は限定的である。</li> </ul>
定量評価	1 エッジ処理での F2(再現率重視)検出率 90%以上	65%	<ul style="list-style-type: none"> <li>汎用(ファインチューニングなし)モデル利用で未達成。</li> </ul>
	2 クラウド処理での F2(再現率重視)検出率 95%以上	74%	<ul style="list-style-type: none"> <li>汎用(ファインチューニングなし)モデル利用で未達成。</li> </ul>
	3 クラウドへのデータ送信量の削減量 80%以上	92%	<ul style="list-style-type: none"> <li>エッジでの誤検出によるデータ送信も考慮すると、24 時間の監視のうち獣の出現時間が 245 分以下であるならば、80%以上の削減が達成される。</li> </ul>

	4	クラウド側での処理時間の削減量 80%以上	92%	<ul style="list-style-type: none"> <li>クラウドでの AI 解析処理に係る計算時間は送信されたデータの時間長に比例するため、データ送信量が 80%以上の削減が達成された結果、処理時間も 80%以上の削減が達成される。</li> </ul>
--	---	-----------------------	-----	--

## 工事現場での火災監視

表 0.2-2 エッジ AI による通信量の低減(工事現場での火災監視):実証結果

番号		目標値	結果	達成状況
定性評価	1	特定の対象物の自動監視業務における削減効果	達成	<ul style="list-style-type: none"> <li>エッジにおける検出の見逃しがほぼなく、誤検出も比較的少ないことから、煙を対象物とした自動監視業務において通信データの削減効果は得られる。</li> </ul>
	2	特定の環境での自動監視業務における削減効果	達成	<ul style="list-style-type: none"> <li>エッジにおける検出の見逃しがほぼなく、誤検出も比較的少ないことから、工事現場での自動監視業務において通信データの削減効果は得られる。</li> </ul>
	3	特定のアルゴリズムによる AI を用いた自動監視業務において削減効果が得られる	達成	<ul style="list-style-type: none"> <li>動きベクトルも利用した YOLO に基づく検出で、エッジにおいて高い検出性能を実現できたことから、データ削減効果は得られる。</li> </ul>
定量評価	1	エッジ処理での F2(再現率重視)検出率 90%以上	97%	<ul style="list-style-type: none"> <li>現地取得データによる学習モデル利用で達成。</li> </ul>
	2	クラウド処理での F2(再現率重視)検出率 95%以上	99%	<ul style="list-style-type: none"> <li>現地取得データによる学習モデル利用で達成。</li> </ul>
	3	クラウドへのデータ送信量の削減量 80%以上	83%	<ul style="list-style-type: none"> <li>エッジでの誤検出によるデータ送信も考慮すると、24 時間の監視のうち煙の出現時間が 130 分以下であるならば、80%以上の削減が達成される。</li> </ul>
	4	クラウド側での処理時間の削減量 80%以上	83%	<ul style="list-style-type: none"> <li>クラウドでの AI 解析処理に係る計算時間は送信されたデータの時間長に比例するため、データ送信量が 80%以上の削減が達成された結果、処理時間も 80%以上の削減が達成される。</li> </ul>

## 不審者検知

表 0.2-3 エッジ AI による通信量の低減(不審者検知):実証結果

番号		目標値	結果	達成状況
定性評価	1	特定の対象物の自動監視業務における削減効果	一部達成	<ul style="list-style-type: none"> <li>エッジでの解析だけでは対象物の見逃しが発生する可能性が一定量あり、不審者監視においては現時点ではクラウドでの改めての確認が必要になるため、通信データ削減効果は限定的になる。</li> </ul>
	2	特定の環境での自動監視業務における削減効果	一部達成	<ul style="list-style-type: none"> <li>エッジでの誤検出が少ないため大きな通信データ削減効果が期待できる一方、背景とのコントラストが低い環境では対象物の見逃しが発生する可能性があり、データ削減効果が限定的となる。</li> </ul>
	3	特定のアルゴリズムによる AI を用いた自動監視業務において削減効果が得られる	一部達成	<ul style="list-style-type: none"> <li>YOLO に基づく検出で、時間帯や監視対象までの距離次第では不審者が大きく明瞭に映ることでエッジでの検出可能性が高まりデータ削減効果が期待できるものの、条件により異なるので効果は限定的である。</li> </ul>

定量 評価	1	エッジ処理でのF2(再現率重視)検出率 90%以上	83%	<ul style="list-style-type: none"> <li>汎用(ファインチューニングなし)モデル利用で未達成。</li> </ul>
	2	クラウド処理でのF2(再現率重視)検出率 95%以上	100%	<ul style="list-style-type: none"> <li>汎用(ファインチューニングなし)モデル利用で達成。</li> </ul>
	3	クラウドへのデータ送信量の削減量 80%以上	94%	<ul style="list-style-type: none"> <li>エッジでの誤検出によるデータ送信も考慮すると、24時間の監視のうち不審者の出現時間が274分以下であるならば、80%以上の削減が達成される。</li> </ul>
	4	クラウド側での処理時間の削減量 80%以上	94%	<ul style="list-style-type: none"> <li>クラウドでのAI解析処理に係る計算時間は送信されたデータの時間長に比例するため、データ送信量が80%以上の削減が達成された結果、処理時間も80%以上の削減が達成される。</li> </ul>

## 0.2.2 【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】: 実証結果

表 0.2-4 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:実証結果

番号	目標値	結果	達成状況
定性 評価	1	巡視ロボットの移動中の監視カメラ映像に対するエッジ・クラウド AIによる解析結果が、全移動範囲において所要の解析精度の評価	<p>所要の解析精度が得られる</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>基地局からの直接波を受けている時と反射板を経由した電波を受けている時とでの、クラウドに届いた映像データのビットレートに極端な差はなかった。</li> </ul>
	2	巡視ロボットの移動中における通信速度(スループット)・伝送遅延時間の時間変動に対する瞬時変化特性、平均分布特性などの分析	<p>3Mbps 達成</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>平均 5Mbps の通信を行っており、目標の 3Mbps を達成</li> </ul>
定量 評価	1	メタサーフェス反射板を適用した状態で、巡視ロボットに対する通信速度と受信電界強度を測定し、実証エリアごとの傾向の違いを評価	<p>一部達成</p> <p>通信速度の基準(3Mbps)を満たす範囲が95%以上、受信電界強度-100dBmを基準とした時の評価は以下の通り。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>キャンパス:通信速度の基準を満たす範囲が95%、受信電界強度は測定ラインごとにばらつきがあった(最大値-86.4dBm、最小値-111.4dBm)</li> <li>工事現場:通信速度の基準を満たす範囲が93%、平均受信電界強度-102.2dBm</li> <li>ラボ:通信速度 3Mbps 以上、平均受信電界強度-60dBm</li> </ul>
	2	既存のエリア拡張手段(中継機、プライベート5Gなど)と比較し、コスト削減効果50%以上のコスト削減	<p>一部の実験結果から追加基地局に対するコスト削減を算出</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>キャンパスにおける公衆基地局(4.5GHz)への反射板適用により見かけ上1.5倍の通信エリア拡大したケースを仮定</li> <li>携帯電話網不感地域へ追加の基地局を設置して通信エリア化することを想定した場合、既存基地局数の所要数が50%増となるのに対し、そのコスト増分を反射板の適用により抑制可能</li> </ul>

## 0.2.3 【拡張性に関する検証】

表 0.2-5 拡張性に関する検証:実証結果

番号	目標値	結果	達成状況	
定性評価	1	本実証の知見・技術の適用範囲となりうるユースケースを導出すること	2 件	<ul style="list-style-type: none"> <li>電力業における保守点検、通信建設業における防災・防犯での活用ユースケースを導出。</li> </ul>
	2	本実証と異なる条件・環境でのユースケースを導出すること	5 件	<ul style="list-style-type: none"> <li>本実証とは異なる工事現場、農場における活用ユースケースを導出。</li> </ul>
定量評価	1	異なる産業・分野への横展開検証において、ヒアリングを実施する:最低 2 社以上	2 社	<ul style="list-style-type: none"> <li>当初想定していた異なる産業・分野に該当する事業者へヒアリングを実施。</li> </ul>
	2	異なる条件・環境への横展開検証において、ヒアリングを実施する:最低 2 社以上	2 社	<ul style="list-style-type: none"> <li>当初想定していた異なる条件・環境に該当する関係者へヒアリングを実施。</li> </ul>

## 0.2.4 【効果検証】

表 0.2-6 効果検証:実証結果

番号	目標値	結果	達成状況	
定性評価	1	AI を導入することによる安心感の向上	達成	<ul style="list-style-type: none"> <li>移動可能な犬型ロボットを使用した AI 画像解析を行ったことで、定点カメラでの監視と比較し、実際の現地での見回りに近い安心感を得られることが判明。</li> </ul>
定量評価	1	安全管理(資機材管理):現場内巡視の運用コスト(4名×0.25日=1人日程度)と、ロボット×AI×通信設備のコスト比較	有効である	<ul style="list-style-type: none"> <li>以下の通り、削減効果は一定見込まれる。 <ul style="list-style-type: none"> <li>人件費:1,800,000 円/月</li> <li>ロボット×AI×通信設備費:600,000 円/月</li> <li>差額:1,200,000 円/月×100 現場=1.2 億円/月</li> </ul> </li> </ul>
	2	工程進捗管理:管理業務の運用コスト(2名×0.25日=0.5人日程度)とロボット×反射板×通信設備のコスト比較	有効である	<ul style="list-style-type: none"> <li>以下の通り、削減効果は一定見込まれる。 <ul style="list-style-type: none"> <li>人件費:900,000 円/月</li> <li>ロボット×反射板×通信設備費:300,000 円/月</li> <li>差額:600,000 円/月×100 現場=0.6 億円/月</li> </ul> </li> </ul>
	3	設備監視・巡視業務に係るコスト(現状:200万円/月程度)、農地の鳥獣対策として行われる電気柵の維持コスト(電気代及び下草処理に係る人件費)と、ロボット×AI×通信設備のコストを比較	有効である	<ul style="list-style-type: none"> <li>以下の通り、削減効果は一定見込まれる。 <ul style="list-style-type: none"> <li>職員見回り: <ul style="list-style-type: none"> <li>設備監視・巡視コスト:2,000,000 円</li> <li>電気柵維持コスト : 121,000 円</li> </ul> </li> <li>ロボット・AI 検知見守り <ul style="list-style-type: none"> <li>見守り運営費用 : 615,000 円</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>

## 0.3 考察

ユースケース①:エッジ AI による通信量の低減での実証では、見落としが大きな被害に繋がる可能性のある監視対象に対し、高い検出性能を KGI として設定した。その達成に向け、結果に影響を与えることが考えられた 3 つの要因(監視対象、映像取得環境、アルゴリズム)を KPI の定量評価に設定した。

その結果、KGI を達成したのは、現地取得データでモデル学習を行った、工事現場における(映像取得環境)、動きベクトルに基づくアルゴリズムを用いて(アルゴリズム)、煙(監視対象)の検出を行った場合であった。今回の実証実験では複数の要因が同時に変化しているため、本結果へのこれらの要因の個別の正確な寄与度について断言することはできない。一方で、実験室環境で個別に要素を変化させて得られるような実験データではなく、本実証実験で行った実際的な環境での取得データにおいても、これらの要因が無視できない程度の定性的な影響を結果に及ぼすことが判明したのも事実である。特に、KGI を達成できたのが、現地取得データでモデルを学習した条件だけであったことを考慮すると、既存の汎用モデルをそのまま適用しただけでは、実用に足る性能は期待できない可能性が高いと言える。

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での実証では、フィールドの実証を通して、反射板の効果を十分に活用するには、反射板に到来する電波の電界強度が十分に高い必要があることが分かった。携帯電話のような端末が直接基地局と通信する際は、受信電界強度が-100dBm 程度であれば問題ないが、反射板を経由する際は、反射板による損失が発生するため、通常良好とされる-80dBm でも電界強度が小さかった。特に周波数が大きい 28GHz を使った動的反射板は試作段階だったこともあり、-80dBm の電界強度に対して、反射板経由の波で通信ができなかった。今後の運用では、反射板の設置場所の入念な調査及び反射板デバイスの性能向上が必要となる。

また、犬型ロボットを使用した可動カメラによる監視、および取得した映像をもとにした画像解析 AI 検知については、実際の工事現場・農場職員に対して、人が行う業務との差分や改善点の洗い出しを目的としたアンケートやヒアリングを実施し、可動カメラによる広範囲の監視が可能、一定の検知精度を担保できることから、職員の安全感、安心感の向上につながることを確認され、職員の見回りによる代替方法としての可能性があることを確認できた。

## 0.4 成果

ユースケース①:エッジ AIによる通信量の低減での実証により、結果に影響を及ぼす要因が複数存在するものの、それらの要因が、求められるレベルの結果を得るのに必要な一定の水準を達成する、または、達成されるような適切なものを選択することで、人が行う監視業務に匹敵する検出精度で、ロボットにて取得した映像から AI 解析を実現できる可能性が示唆された。データ通信量を削減する観点では、出現頻度が少なく、エッジ AI における誤検出も大きくない場合は、エッジ AI とクラウド AI の連携利用により、通信量を大幅に削減できることが確認され、その有効性が示された。

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での実証により、複数の環境、周波数帯を網羅的に試験したことで、反射板の得手不得手を体系的に示すことができた。十分な活用には入念な準備が必要であるものの、弱電界または不感地域となっているエリアをカバーする手段の一つになり得ることを示した。

また、本検証より、移動可能なロボットによる AI 画像解析の効果や既存監視業務の自動化を図る等、今後の社会実装に向けて有効性が確認できた。遠隔監視に AI 検知を組み合わせることで遠隔監視者の作業削減や鳥獣発見漏れリスクの軽減を確認できた。

## 0.5 課題

ユースケース①:エッジ AI による通信量の低減での実証により、一般公開されているような学習済の利用可能なモデルは、再学習なしには必ずしも高い検出性能を期待できないことが判明した。再学習の手順、必要なデータ量、アルゴリズム等の技術的な課題を解決していく必要がある。また、エッジ・クラウド連携において、出現率の低い監視では、クラウド AI の稼働が低くなる。ただし、いつデータが来るか分からないため、常にサーバは待機状態を維持しなければならず、電力を消費する。また、計算能力を使用せずに待機だけさせるのは無駄であり、その時間の有効活用も大局的なリソース最適化の視点では検討すべき課題となる。技術面以外にも、再学習や最適化の作業をどのタイミングで誰が実施し、その効果がどの程度持続するのか等、社会実装には技術面以外の様々な観点で、社会実装モデルを検討する必要がある。

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での実証において使用した 28GHz の動的メタサーフェス反射板は試作開発中のデバイスであり、反射利得や反射方向などの精度向上の余地があった。そのため、本検証において改善したエリアは小さく限定的であった。しかしながら、基地局や端末の動作等も踏まえた反射ビームの最適化や反射損失の改善によって、エリア拡大を見込むことができる。実際の携帯電話網では、28GHz のエリアカバー率は電波伝搬経路上の遮蔽物の影響や見通し外の影響により他の周波数(3.7GHz、4.5GHz 等)と比べて低いが、伝搬条件が良いエリアでは広帯域伝送によって超高速の伝送が可能となる。従って、反射板によって見通し外のエリアに電波を送り届けることで、28GHz のエリアカバー率の改善に貢献できると考える。

また、社会実装を進めるためには、AI 認識精度向上、見守りエリアの拡大、ロボット稼働時間の拡大などの複数の課題がある。それらを解決するために、他のツールの活用なども模索して検討する必要がある。例えば、監視や見回り業務への適用を想定した場合、ロボットだけではなく、ドローンの活用なども組み合わせて対象エリアに応じて監視・見回り業務を分担することも考えられる。今回の実証実験で確認した犬型ロボットと映像 AI の組み合わせに限らず、様々な技術を組み合わせるなど視野を広げて考えることが、社会実装可能性を高める上では必要である。

# 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

### 1.1.1 本実証の背景

少子高齢化等に起因する我が国の労働力不足が今後の大きな社会課題の一つとされているが、とりわけ東北エリアにおいて労働力不足の深刻化を指摘する推計が示されている<sup>1</sup>。

こうした労働力不足の解消には、できる限り業務の省力化・省人化や無人化を図ることが必要であり、特に建設や農業など労働集約型の産業において、人手のかかる業務の省力化・省人化や無人化を強く推進することが効果的である。実際、一部建設会社等においては、移動可能なロボット等を用いて遠隔による監視を実現しようとする試みが行われているが、工事現場や山間地域等では、通信ネットワーク環境(以下通信環境という。)に制約があるため、社会実装の実現可能な安定的かつ効率的なシステムを実現するためには、エッジ側の AI や通信環境が効果的に連動した仕組みを構築し、省力化・省人化や無人化の実現が可能な遠隔監視システムを実現することが不可欠である。

このため、本実証においては、ユーザーとなる産業界と通信業界が連携し、汎用的に人手による監視・巡視を必要とする業務に代替可能なシステムとして、「移動可能なロボットに、制約のある通信環境下においても AI 画像解析が可能な装置を取り付ける」とともに、「メタサーフェス反射板やミリ波基地局を活用した補完的な通信環境を提供する」ことで、人物や鳥獣の監視・追跡や火災検知を想定した煙監視等の省力化・省人化や無人化の実現を目指すものである。

また、本実証フィールドである仙台市は、東北唯一の政令指定都市として常に東北地域の産業の発展をけん引しており、仙台市における実証成果は、同様の労働力不足の課題を抱える東北地方の他地域や多様な産業分野に横展開していく効果が高いと見込まれる。

### 1.1.2 取り組むべき課題

#### 【社会的な課題】

- 労働集約型産業における人手を要する業務の省力化・省人化や無人化
- 人の立ち入りが危険・困難な場所での遠隔監視の実現(災害復旧、熊対策、森林など)

#### 【フィールドにおける具体的な課題】

上記の社会的な課題が顕在化しているフィールドとして、【工事現場】と【農場】が想定される。具体的には、以下の課題解決が必要である。

- 工事現場(建設、通信、電気等)
  - 高所や建設工事中等、危険エリアにおける安全監視や進捗管理業務
  - 防犯(不法侵入、盗難等)、防災(火災等)観点での常時監視業務
  - 上記監視業務エリアにおいて、建物・建材による遮蔽物や、高所・地下等地形的要因となる通信不感エリアが一定存在

---

<sup>1</sup> 株式会社パーソル総合研究所, 中央大学, 「労働市場の未来推計 2035」 p.6

- 農場
  - 獣害、防犯(不法侵入、盗難等)、防災(火災等)観点での常時監視業務
  - 上記監視業務が広大エリアにまたがるケースや、山間部等地理的要因による通信不感エリアが一定存在

### 1.1.3 AI×通信の現状と今後の可能性

工事現場においては、危険エリアへの不法侵入や、火災の発見等、早期に発見し、通知する必要が高い事象が多く、会社や事務所、監視拠点等のセンターへの通知の重要度が高い。また、農場フィールドでは、特に夜間において、鳥獣の目視が遠隔では困難になる。そこで、鳥獣の網膜反射(厳密にはタペタムでの光反射)から AI が鳥獣の種類を精緻に判断し、センターへの通知等を実現することで、迅速な対策検討や被害状況の把握が可能となる。エッジ端末に搭載した AI でイベントを検知し、必要な情報を伝送することは、これらに大きな貢献をすることが期待される。

整った通信環境があることで、クラウドにデータを送信し、クラウド側で AI 処理をさせることも可能になる。クラウド側の AI 処理により、画像解析の精度向上や、センター側へ質の高い情報共有も可能となる。一方、高精細な映像等はデータ容量が膨大となるため、エッジ側からの安定的な映像伝送は期待できない。そのため、エッジ端末に搭載した AI でイベントを検知し、通信環境に応じて必要な情報を伝送することが期待される。しかしながら、工事現場では、特に地下階や 100m 以上の高層階において、携帯電話網(公衆モバイル通信)の電波が届かないことが多く、大容量通信や高速通信をあきらめる場合が多い。このような貧弱な通信環境の場合、センターへ戻ってから、データをアップロードしたり、ダウンロードしたりすることになるため、リアルタイム性が確保しにくくなる。その解決手段として、公衆基地局の増設以外にも、ローカル 5G や Wi-Fi HaLow、WiGig 等の各種無線システムも活用して必要なカバレッジエリアを確保しつつ、基地局や無線システムのビームフォーミング追従制御により巡視ロボット・犬型ロボットなどの動態デバイスとの安定した通信を確保することが考えられる。近年、これらの手段に加えて、公衆基地局(または無線システムのアクセスポイント)と端末間に 反射指向性を制御可能なメタサーフェス反射板を追加設置することで、端末または動態デバイスが必要とするカバレッジエリアを柔軟かつ低コストで拡大させる手段の検討が進んでおり、今後、同指向性制御に AI を活用することでさらなる高効率、高品質なシステムの実現も期待される。

## 1.2 実証の目的

以上のような背景・課題を踏まえ、工事現場や農場などでは、危険箇所での作業や、広範な領域にまたがる業務遂行が求められることから、省力化・省人化に繋がり、現場でのリアルタイム監視や自動制御の安定化を実現するような AI やロボットの利活用が必要とされている。省力化・省人化を目的とした AI 利活用システムの実現、およびこれらの技術を効果的に運用するためには、AI 自体の性能向上に加えて、リアルタイム性の確保のため、安定した通信ネットワーク環境を構築することが不可欠である。

AI の導入に際しては、オンプレミス環境ではなく、オンライン化された構成が一般的となりつつあるが、映像などの大容量データをクラウドに送信し分析を行う際には、通信負荷や帯域確保が技術的課題として顕在化する。そのため、現場(エッジ)-クラウド間での映像・制御データの送受信において、安定した通信環境の確保が不可欠となる。電波の遮蔽等の影響を避け、通信カバレッジを確保することはもとより、AI 等の技術を活用してデータ通信量を削減することが、安定した通信ネットワーク環境を構築することに資すると期待される。

本実証では、移動可能なロボットからの映像を分析する異常検知エッジ・クラウド AI の分散処理により、通信量削減効果を検証する(ユースケース①)。具体的には、エッジ側での通信状況を把握して、その状況に合わせた形で、エッジとクラウドのそれぞれでの映像 AI を連携利用することで、検出精度を低下させることなくデータ通信量および計算量が削減でき、通信資源および計算資源を有効活用することを目指す。また、実際の点検・監視等を想定して、クラウド対応型映像監視プラットフォームを構築し、エッジ・クラウド間連携処理の実社会への実装可能性を検証する。

また、メタサーフェス反射板での送受信端末位置に応じた適応的な電波反射方向制御により不感エリア解消の効果を検証する(ユースケース②)。具体的には、既存の公衆 5G(Sub6 帯)に対して、低コストで設置可能なメタサーフェス反射板(可搬型の静的反射板)を使用しエリア改善効果を実証する。加えて、公衆 5G(28GHz 帯)の基地局および移動端末に対して、無線局(実験試験局)の免許を追加取得し、動的メタサーフェス反射板による適応的な通信環境の構築可能性を検証する。ここで、反射板自体は無線信号の増幅等は行っておらず、無線局免許の取得を要しない。

さらに、高速伝送が可能となるアンライセンスの 60GHz においても、エリアカバー率の課題に対して、WiGig(Wireless Gigabit)(60GHz 帯)に動的反射板制御を適用したシステムを使用し、屋内の遠隔監視拠点への監視映像の安定した伝送ができることを目指す。

以上の実証結果を踏まえて、実社会への AI・ロボット活用の拡張性を検討する。

## 1.3 最終目標・構想イメージ

### 1.3.1 最終目標・構想

本実証においては、「工事現場」および「農場」のフィールドでの実証を行い、以下の観点から省力化・省人化を目指す。

工事現場内での安全管理の観点では、現場に定点カメラを設置する、または、ドローン等で定点撮影することで、長期間安全管理が行えること、また、犬型ロボットなどの移動体へ AI による墜落制止用器

具(安全帯)やヘルメット未着用等作業員の不安全行動や安全通路上の資材放置を自動で検知する危険度判定機能を組み込むことで、犬型ロボットによる安全巡視が可能になることを考えており、安全管理における対象検知から対策実行までの自動化を目指す。さらに、常時監視が必要な危険物使用時、人が立ち入ることが困難なエリアにて、不審者や火災の発生等をロボットやドローンを用いた正確かつ迅速な検知、現場内外への情報連携等の対応までの自動化を目指す。

工程進捗管理の観点では、従来では作業員が目視や定点カメラから進捗の管理・確認を行っていたが、ドック(基地局)を設置して、ドローンの飛行を自動化し、ドック(基地局)から画像データを自動アップロードすることで、進捗を把握できる点群データ生成までのプロセスの大幅な省人化を目指す。獣害観点では、夜間等の人の見回りが厳しいタイミングや広大なエリア等をロボットが見回り、アラートや通報、追い払う等の対応も含めて、対象検知から対策実行までの自動化を目指す。

この目指す世界を実現するために、AI と通信を組み合わせ、最適な通信環境の構築や、不感エリアでの通信効率化、エッジ側の処理性能向上を行うことで、AI の社会実装の推進に貢献できると考えている。

### 1.3.2 技術・サービスの在り方

AI 検知については、一定の条件の下でのシステム実装まで進め、自治体等での利用を想定したサービスへの発展を促進するためのひとつの足掛かりとする。例えば、獣出没地域に機動的に監視カメラを配することで、獣害被害の可能性のあるあらゆる場所にカメラを配置するよりも設備・通信・景観・心理・コスト等様々な面で地域社会への実装に適したシステムとして導入可能な映像 AI を用いた省力化・省人化に寄与する自動監視サービスに繋げる。安定した高速通信環境とロボットをセットで顧客業務環境に提供するパッケージを構築する。エッジ AI および高速通信環境を組み合わせ実現される機能である画像解析による状況取得と AI による状況判断からロボット自律制御補助等を実装し、顧客業務に適用することを目指す。

通信については、AI 電波方向制御の実環境における有効活用をめざし、メタサーフェス反射板(可動式静的反射板、動的制御反射板を含む)の様々な建物、土地への実装を進め、特定の通信環境における実証に留まらない形で、多様な環境における通信エリア拡充システムとしての実装を目指す。

さらに、公衆 5G の 3.7GHz 帯/4.5GHz 帯/28GHz 帯から WiGig で用いられるような 60GHz 帯に至る幅広い周波数における AI 電波方向制御の実用化により、個々の応用において求められる通信への要件を満足できる無線システムの選択肢を増やすことで、大容量通信のフレキシブルかつ経済的な活用を見据えた実装を目指す。なお、4.5GHz、28GHz、60GHz の様々な周波数帯を今回の実証において含めた主たる理由は、国内において現在普及している公衆 5G 向け移動端末における 28GHz 帯の搭載率が 100%には至ってはならず、本実証において対象とするユースケースを含めた幅広いユースケースで使用されるより多くの端末機種を考慮したものである。

## 1.4 本実証の位置づけ・目標

本実証では、1.1 および 1.3 に記載した労働力不足の課題が特に顕在化している監視業務を、人に代

わって実行可能とすることを目的としている。監視業務においては、夜間を含む終日での鳥獣検知や火災検知の際の煙などの形が変わるものの検知が求められるため、煙検知や夜間でも識別可能な網膜反射を利用した鳥獣検知を含む画像解析 AI は、代替技術として適していると考えられる。システムとして通信負荷を削減させ、様々な場所への適用を目指すため、エッジ AI およびクラウド AI の連携による通信量削減を目指して実証を行う。また、形状が変化する煙の解析や網膜反射を利用した鳥獣検知などの夜間監視に対応できる解析手法は新規性を有していると考え、本ソリューションを用いての実証に至った。

加えて、移動可能なロボットを用いることで、従来の固定式カメラによる監視システムで生じる死角の解消につながる。従来方式が通信帯域や電源確保といった制約により設置可能な場所が限定されていたのに対し、本ソリューションは設置および運用の自由度が高く、結果として運用コストの低減が期待できる。

さらに、工事現場や農場などのフィールドでは、地形や構造物による遮蔽物の影響で公衆 5G の不感エリアが生じやすい。そのため、通信環境整備にかかるコストを最小化しつつ、補完的に不感エリアを解消できる手段が必要である。本観点から、ローカル 5G や中継機と比較してコストおよび消費電力の面で優位性を持つメタサーフェス反射板は、本実証の通信手段として最適であると判断した。なお、メタサーフェス反射板は、ユースケースに対応した実証例がこれまでにない。そのため、どのような利用環境に適應できるかを検証する点においても、本実証は新規性を有している。

#### 1.4.1 工事現場での実証

安全管理観点では、対象検知から対策実行までの省人化・自動化を目指すにあたって以下のように自動化率の各水準に応じた達成基準を定義し、年度ごとに達成状況を評価・整理する。

20%:AI 検知機能が動く(見逃し/誤検知あり)現場でのリアルタイム検知なし

30%:AI 検知機能が動く(見逃し/誤検知あり)現場でのリアルタイム検知ができる

40%:AI 検知機能が動く(見逃し/誤検知ほぼなし)現場でのリアルタイム検知ができる(人が常時監視/判断)

50%:自動通知・記録まで一連で動く(対応は人)

70%:半自動運用(各所情報連携等一次対応まで自動、最終介入のみ人)

100%:完全自動化

2025 年度は定点画像や犬型ロボットで撮影した画像を解析することで不審者や火災の自動検知、ヘルメット未着用等作業員の不安全行動や現場内に長期間留まる資機材の管理、安全通路内に置かれた資機材に対してアラートを出す等の管理を実施し、どこまで自動化ができるのか、またできない部分の課題の洗い出しを行い、本実証では最終構想に向けて 20%程度進捗させることを目指した。

実証の結果、解析後のアラートを遠隔監視室のモニターへ自動的に表示させる仕組みや遠隔臨場の実現においては自動化を実現した。一方で画像解析 AI での監視では一定見逃しの発生可能性がある点やロボットの遠隔操縦における通信の一部不安定さ、作業員が一名遠隔監視室に常駐する必要があるといった点での課題が明らかになった。

工程進捗管理観点では、進捗を把握できる点群データ生成までのプロセスの大幅な省人化を目指すにあたって以下のように自動化率の各水準に応じた達成基準を定義し、年度ごとに達成状況を評価・整理する。

20%:ドローンと犬型ロボットの近距離操縦

- 30%:点群データ生成の自動化(アプリ入力以外)
- 40%:ドローンと犬型ロボットの遠距離操縦、アプリ入力の自動化
- 50%:データアップロードの自動化、ドローンと犬型ロボットの自動操縦
- 70%:半自動運用(“進捗状況の可視化等一次対応”まで自動、最終介入のみ人)
- 100%:完全自動化

2025 年度はできるだけ人を介在させないで、工程進捗管理を実施できるように、ドローンの自動飛行や撮影画像の自動アップロードまでを行い、本実証での通信環境でどこまでデータのやり取りができるのか、管理稼働効率化の効果検証等と並行して、必要な通信環境の要件洗い出しを行い、最終構想に向けて 30%程度進捗させることを目指した。

ドローンでの工程進捗管理では、撮影画像のアップロードや点群データ生成の一部工程において自動化を達成した。一方で、点群データ生成における SfM アプリでの必要事項入力や点群データのアップロードについては未だ手動である。またロボットでの工程進捗管理においては、走行および点群データのカラー化・座標合わせの一部工程では自動化を達成した。一方で点群データのカラー化・座標合わせに必要な項目入力や点群データのアップロードについては手動である。

また、工事現場におけるドローン&60GHz メタサーフェス動的反射板システムの実証では、無事 60GHz 通信を確立し、ドローンドックの制御(離陸用ドアの開閉等)及びドローン撮影済み映像の伝送を 60GHz メタサーフェス動的反射板経由で東京の遠隔監視拠点にて操作することができた。必要な通信環境の要件として、ドローンポートからクラウドへ画像データ約 1GB を約 15 分で送信できる程度であることが示された。

表 1.4-1 工事現場における今後のロードマップ(2025 年~2027 年)

	2025 年	2026 年	2027 年
安全管理	自動化進捗率:20% →ドローンやロボットを活用した危険度判定によるアラートの自動化、防犯・防災対応の自動化に向けた課題抽出	自動化進捗率:40% →ロボットを活用した危険度判定、防災検知、不審者検知による防犯対応の一部自動化、完全自動化(進捗率 100%)に向けた課題抽出	自動化進捗率:70% →ロボットを活用した危険度判定、防災検知、不審者検知による防犯対応の自動化
工程進捗管理	自動化進捗率:30% →ドローンの自動飛行、撮影画像の自動アップロード、工程進捗管理の自動化に向けた課題抽出	自動化進捗率:50% →工程進捗管理における画像データや点群データ生成の一部自動化、完全自動化(進捗率 100%)に向けた課題抽出	自動化進捗率:70% →工程進捗管理における画像データや点群データ生成の自動化
自動化実施 エリア	エリア化進捗率:20% →通信受信側の通信環境判断によるエッジ・クラウド側でのデータ処理分散およびメタサーフェス反	エリア化進捗率:50% 通信コア NW 側の通信環境判断によるエッジ・クラウド側でのデータ処理分散およびメタサーフェス	エリア化進捗率:70% 通信の送受信側それぞれで通信環境判断を行い、組み合わせた結果によるエッジ・クラウド側で

	射板やビームフォーミング等の通信 AI を活用した自動化実施エリア拡大に関する課題抽出	反射板やビームフォーミング等の通信 AI の汎用化を見据えた自動化実施エリア拡大(進捗率 100%)に関する課題抽出	のデータ処理分散およびメタサーフェス反射板やビームフォーミング(マルチアクセス、ダイバーシチ)等の通信 AI を活用した自動化実施エリア拡大
--	---	--	--

### 1.4.2 農場での実証

獣害対策観点では、対象検知から対策実行までの省人化・自動化を目指すにあたって以下のように自動化率の各水準に応じた達成基準を定義し、年度ごとに達成状況を評価・整理する。

20%:AI での基礎検知が動く(見逃し/誤検知あり)現場でのリアルタイム検知なし

30%:AI での基礎検知が動く(見逃し/誤検知あり)現場でのリアルタイム検知が動く

40%:AI での基礎検知が動く(見逃し/誤検知ほぼない)現場でのリアルタイム検知が動く(人が常時監視/判断)

50%:自動通知・記録まで一連で動く(対応は人)

70%:半自動運用(“各所情報連携・追い払い対応等一次対応”まで自動、最終介入のみ人)

100%:完全自動化

2025 年度は夜間等の人の見回りが厳しいタイミングでのロボット活用を見据えて、獣の AI 検知を行うことを想定しており、現状の獣害対策(電気柵等)との比較による課題抽出等も行い、最終構想に向けて 30%程度進捗させることを目指した。

実証の結果については工事現場同様、解析後のアラートを遠隔監視室のモニターへ自動的に表示させる仕組みや遠隔臨場の実現においては自動化を実現した。一方で画像解析 AI での監視では一定見逃しや誤検知の発生可能性がある点やロボットの遠隔操縦における通信の一部不安定さ、作業員が一名遠隔監視室に常駐する必要がある点での課題が明らかになった。またロボットでの見回りによる自動化に適しているかは農場の規模と動物の種類によるため、現状の獣害対策である電気柵とロボットでの見回りは現状セットで行う必要がある点も課題として挙げられた。

### 1.4.3 AI 技術

エッジまたはクラウド処理のみを前提とした、固定カメラでの取得映像に基づく検出性能に対しては既に評価<sup>23</sup>されているが、エッジ・クラウド連携利用についての評価が行われていないため、本実証実験を通して達成できる検出精度および通信量や計算量の視点での削減効果について定量的に評価した。また、固定カメラの様にひとつの視点に固定されるのではなく、ロボットに搭載することで機動的に視点が

<sup>2</sup> Kikuta, K., Murata, K. T. and Murakami, Y., “A Daytime Smoke Detection Method Based on Variances of Optical Flow and Characteristics of HSV Color on Footage from Outdoor Camera in Urban City,” Fire Technology, vol. 60, pp. 1427-1452, 2024.

<sup>3</sup> 菊田和孝、村田健史、西村太志、“映像 IoT 技術と画像解析による桜島モニタリング”、日本火山学会 2024 年度秋季大会、2024.

変化するカメラで取得される映像情報に対する監視を目的とした映像 AI の適用可能性についての基礎的知見を獲得することを目指した。

実証の結果、エッジ・クラウド連携による検出精度についてはエッジ単体やクラウド単体に比べて誤検出が少なくなる一方、クラウド AI 単体の場合よりもエッジ・クラウド連携時の方が、見逃しが増える傾向が見られた。また、エッジ・クラウド連携による通信量の削減効果については、どの条件においても一定のデータ削減効果が確認されたものの、削減量と要求精度のバランスが課題として残った。ロボット搭載カメラによる映像 AI の適用可能性に関しては、不審者や熊などの距離が十分に近づかなければ検出が難しい監視対象物において、犬型ロボットが移動することで対象物との距離を縮められ、検出に成功する例が確認された。

#### 1.4.4 通信技術

上記でもあげられている、工事現場での安全管理の自動化、工程進捗管理に必要なデータのやりとり、ロボット制御(遠隔操作、自動化)、AI 解析を高度化させるための高精細画像等のアップロードに必要な通信環境の構築を目指して、本実証では、メタサーフェス反射板による Sub6 エリアの補完や 28GHz 帯の動的反射制御による通信可能領域の拡大、ビームフォーミングを活用した WiGig による大容量通信に対して、どの環境や周波数の利用が効果的なのか、要件を満たせるのか等の効果検証を行う。ここで、静的反射板は反射板デバイスの特性(反射指向性等)が固定(時間変動無し)であるのに対して、動的反射板は当該特性が専用の制御装置によって時間とともに変動可能とする。

また、ロボットの制御に必要な通信環境については、現時点ではロボットの制御として求める最適な通信環境は限られたエリアにしかないため、遠隔操縦に不安が残る状態(広範囲に使用可能な 5G LTE では上りで数 Mbps の回線しか用意できていない。高速なローカル 5G 回線だと、建物の影響を受けやすく電波が届かない箇所が多い)である。また、サーバサイドで動作する LLM を用いて、ロボットの周りの状況取得・判断を実装しているが、リアルタイム性を持たせるためにはレスポンスが遅い状態であるため、本実証における通信システムを活用しつつ、遠隔操作と自動化の二つの観点で必要な通信環境の要件を洗い出した。

実証の結果、ロボットの遠隔操縦において、公衆モバイル通信の品質が良い条件下では映像・操作の遅延は少なく良好な操縦性が得られたものの、通信状態が悪化すると操縦用 POV 映像が途切れ、周囲状況の把握や操縦が困難になるという課題があった。

今後の対応策として、回線スループットに応じた映像データ量の調整、細い回線でも必要な映像が伝送できるようより効率的なコーデックへの変更、POV 映像に頼らない操作 GUI の改良、現状のラジコン的なリアルタイム手動操作ではない局所的な自律走行機能の開発が考えられる。加えて、農場のようにロボット近傍に幾何学的構造物が少ない環境では、遠隔操縦側からロボットの向きが把握しづらく、単純に目標方向へ直進させることが難しいという課題もあった。このような環境への対応策としては、GNSS が利用可能な環境では Google Map 上にロボット位置・方位を表示、利用できない環境では SLAM によるマップと位置・方位表示の活用が有効である。

なお、遠隔操作における実運用の際には、映像と合わせてオーディオ伝送も可能とする仕組みやロボットの転倒防止のための搭載機器のコンパクト化や低重心化が求められる。加えて、自動走行を実現するうえで、建設現場のような工事進捗に応じて日々マップが変化する環境にも対応できるマップ生

成手法やナビゲーション方法の検討が今後の重要なポイントとなる。

## 1.5 社会実装に向けたロードマップ・取り組みの発展性

実証で実施する、工事現場や農場における AI と通信のソリューションを社会実装することを念頭に、各分野の今後のロードマップ(2025 年～2027 年)を以下に示す。

### 【2025 年/本実証】

工事現場では、建設業務と並行して、安全管理、工程進捗管理、防犯・防災対策等様々な人的工数を要する場面が存在しており、そういった場面に対して AI を活用した自動化を図るためには、検知・判断精度の品質を高めるとともに、ドローン・ロボットが収集する画像・映像・点群データのやりとりに必要な通信品質を確保する必要がある。今年度は、ロボットによる危険度判定とアラートの自動化を試行し、現場で必要となる通信要件を洗い出した。

また、農場では、獣害対策が人手依存で非効率かつ既存の電気柵のみでは検知・抑止に限界があるという課題に対して、監視運用の効率と検知確度の向上を図りつつ、電気柵との比較検証からコスト・保守性・誤検知率の観点で改善余地を抽出した。

これらを支える AI 面では、AI 処理の最適配置による解析効率化の効果を検証するほか、定点映像に比べて視点・環境変化が大きい動態デバイスの映像解析に固有の課題を特定した。さらに、夜間での獣検知や、形状が不定な煙の検知における誤検知・見逃しを低減するため、精度向上に向けた要件を整理した。

通信面では、メタサーフェス反射板や WiGig によるカバレッジエリア拡大が実効的に得られるかを評価した。

### 【2026 年】

工事現場では、ロボットによる自動巡回・検知・通報を組み合わせることで防犯対応の自動化を進めるとともに、検知後の一次対応に必要な条件や検知精度を洗い出す。また、人が入りづらい・危険な場所での設備点検に伴う安全・工期・コストの制約を軽減するため、ロボットの遠隔・自律走行の適用可能性を検討し、必要な要件を具体化する。

AI 面では、エッジとクラウドの協調で現場制約(遅延・帯域・電力)を踏まえつつ解析精度自体の引き上げを図り、動態デバイス映像における解析精度の向上の実現を目指す。さらに、人の追跡検知や、水・雲など不定形物に対する検知精度を向上させ、実運用に耐える再現性・評価手法を確立する。

通信面では、メタサーフェス反射板の設計・設置指針を汎用化し、現場形状や材料差があっても効率的にカバレッジを拡大できる運用容易性を高めるとともに、WiGig のビームフォーミングにマルチアクセス機能を組み合わせ、多数の動態端末が同時・切替接続しても安定したスループットと低遅延を維持できるかを検証し、スケーラビリティ要件を明確化する。

### 【2027 年】

工事現場では、資機材管理や防犯を含む安全管理を広域に運用する負荷と、工程進捗の計測から可

視化までの手作業が残る課題に対し、ロボットと映像解析を核に、異常検知—通報—記録—エスカレーションまでの業務および進捗管理の一連プロセスを自動化して、現場の省力化を推進する。また、人が立ち入れない危険な箇所での設備点検をロボットによる自律走行/リモートオペレーションで自動化し、点検頻度の向上、保全品質の平準化の実現を目指す。

AI 面では、サードパーティの映像解析処理をカメラ内に追加実装できるネットワークカメラを活用し、これまでの実証で得たエッジ AI 処理をカメラ内部へ組み込み、エッジ側の信頼性・保守性・可用性を向上させる。

通信面では、メタサーフェス反射板を建物やテラス等へ実装して死角低減とエリア均質化を図り、ビームフォーミングと組み合わせて「必要な場所・時」に帯域を集中的に供給する通信エリア拡充システムの一部実装を目指す。さらに WiGig では、マルチアクセス機能の実装により、遮蔽・混雑・移動といった実環境変動に強いフレキシブルな大容量通信環境を段階的に具現化する。

## 2. 業務実施体制

### 2.1 実証機関

実証機関について、表 2.1-1 に示す。

表 2.1-1 実証機関

代表機関	法人名	NTT ドコモビジネス株式会社 東北支社
	代表者氏名	鈴木 建一
	所在地	〒980-0011 宮城県仙台市青葉区上杉 1-1-2 ドコモ東北ビル
	業務の概要	実証事業の全体統括
構成員	法人名	ドコモ・テクノロジー株式会社
	代表者氏名	中村 寛
	所在地	東京都千代田区永田町二丁目 11 番 1 号 山王パークタワー16 階
	業務の概要	通信技術実証の実施
	構成員とした理由	5G 技術を用いる端末の開発と応用について多岐にわたる実績を有するため。
構成員	法人名	国立研究開発法人情報通信研究機構
	代表者氏名	徳田 英幸
	所在地	東京都小金井市貫井北町 4-2-1
	業務の概要	画像解析 AI の実装
	構成員とした理由	Beyond 5G、AI、量子情報通信、サイバーセキュリティなどの研究開発実績を多数有しているため
構成員	法人名	AGC 株式会社
	代表者氏名	平井 良典
	所在地	東京都千代田区丸の内一丁目 5 番 1 号
	業務の概要	メタサーフェス反射板の開発
	構成員とした理由	携帯電話網不感地域における通信確立のためメタサーフェス反射板活用が不可欠であるため
構成員	法人名	株式会社ポケット・クエリーズ
	代表者氏名	佐々木 宣彦
	所在地	東京都新宿区西新宿 3-20-2 東京オペラシティタワー52F
	業務の概要	犬型ロボットの調達
	構成員とした理由	ロボット・IoT を活用した DX ソリューションの開発・販売において多数実績を有するため
構成員	法人名	株式会社横須賀リサーチパーク
	代表者氏名	鈴木 茂樹
	所在地	神奈川県横須賀市光の丘 3 番 4 号 YRP センター1 番館 1F
	業務の概要	展示会の開催
	構成員とした理由	研究技術関連の展示会開催実績を多数有するため
構成員	法人名	株式会社大林組
	代表者氏名	運輸 賢治
	所在地	東京都港区港南 2 丁目 15 番 2 号
	業務の概要	工事現場フィールドでの実証業務
	構成員とした理由	庁舎建替工事会社であり、ロボティクス分野において多数の実績を有するため
協力機関	法人名	NTT アクセスサービスシステム研究所
	代表者氏名	小松 宏至
	所在地	神奈川県横須賀市光の丘 1-1(横須賀研究開発センタ)
	業務の概要	動的・静的メタサーフェス反射板に関する技術支援
	協力機関とした理由	メタサーフェス反射板に関する技術、評価、検証ノウハウを有しており、実証事業の遂行に向けて寄与できると考えるため
協力機関	法人名	国立大学法人東北大学

	代表者氏名	富永 梯二
	所在地	宮城県仙台市青葉区片平二丁目 1-1
	業務の概要	学術的見地から先端的な助言の実施、検証フィールド提供
	協力機関とした理由	学術的見地から本実証に向けた先端的助言、検証フィールドの提供を得るため
協力機関	自治体名	仙台市
	市長氏名	郡 和子
	所在地	仙台市青葉区国分町三丁目 7 番 1 号
	業務の概要	実証場所の所管局や指定管理者、区役所等との調整および実証にかかる広報周知
	協力機関とした理由	協力協定に基づき、実証に係る現場説明・広報周知、各種許認可に係る協力を得るため

## 2.2 実施体制図

実施体制図について、図 2.2-1 に示す。

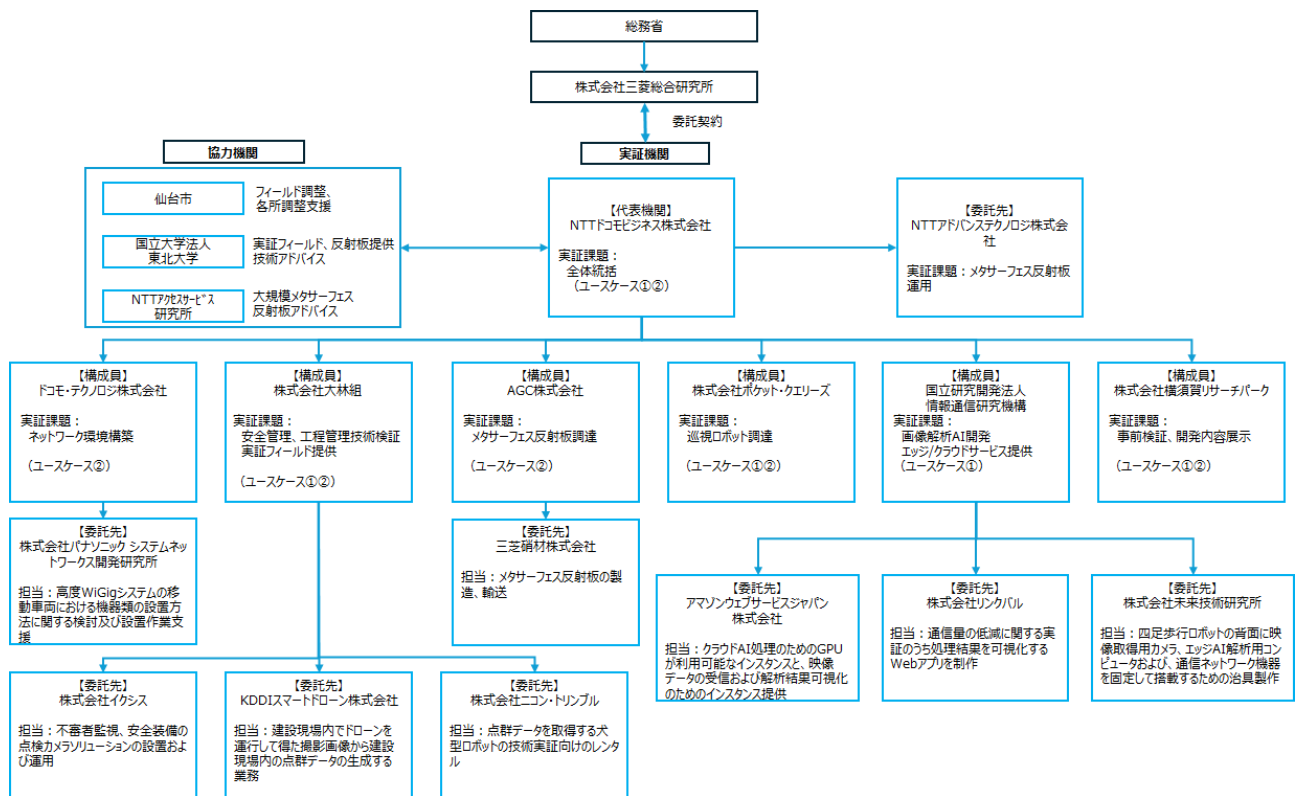


図 2.2-1 実施体制図

### 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

図 3.1-1 に示す通り、犬型ロボットの上に 5G ルータや WiGig 等の通信機器・エッジ AI・カメラを搭載し、エッジ AI で解析した映像を反射板で反射させた電波を通じてクラウド AI に送信しエッジ・クラウド連携による AI 解析性能の評価を行う。

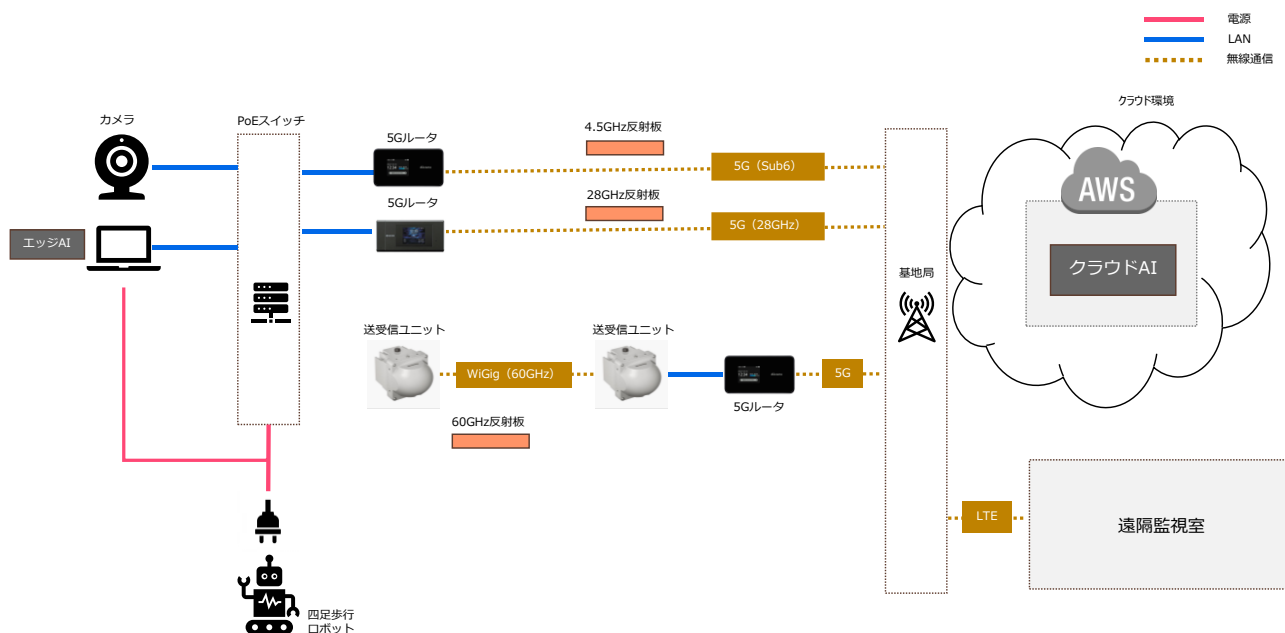


図 3.1-1 AI 解析の全体構成図

##### 3.1.1 通信システム

###### 【メタサーフェス反射板】

メタサーフェス反射板は、入射する電波を鏡面反射ではなく、特定の角度範囲に異常反射させることができる。加えて、単純な反射板とは異なり、拡散しつつ反射させることができるため、基地局からの電波が建物等により遮蔽されている地下や建物の裏側へ、通信エリアを効果的に拡大することが可能である。さらに、静的反射板・動的反射板の 2 種類が存在し、静的反射板はメタサーフェス反射板デバイスの特性(反射指向性等)が固定(時間変動無し)である。見た目が透明なため、見通しを確保することも可能である。

また、動的反射板とはメタ原子と呼ばれる微小な構造体を平面的に集積したものであり、各メタ原子の反射特性を変更することで、入射した電波の反射方向を任意の方向に制御することが可能である。この特性を利用することで、遮蔽物の陰など電波が届きづらい場所にも有効な通信環境を提供することが可能である。なお、本実証では公衆 5G の基地局と移動端末に動的反射板を組み合わせた実験を実施するため、実験試験局免許の申請を、実験場所を含む地域を所管する総合通信局に対して行い、

2025年12月11日付で免許を取得した。また、並行して、実験エリアにおいて関係する他のモバイル通信事業との干渉調整を実施し、当該協議内容に従って実験を行った。

## 【WiGig】

WiGigとは、60GHz帯(ミリ波帯)を使用するIEEE 802.11ad規格ベースの無線LANであり、高速・大容量のデータ通信が可能である。本実証で使用するWiGig装置は、ビームフォーミング機能を有しており、移動する端末をリアルタイムに追従する。なお、WiGigはいわゆるアンライセンスバンドを使用しており、無線局免許の取得が不要である。

本実証では、市販されているWiGig通信モジュールのペア(2台)と、実験用に試作された動的反射指向方向制御が可能な60GHz帯のメタサーフェス反射板を組合せて使用した。

### 【WiGig通信モジュールについて】

WiGig通信モジュールの送受信アンテナは、モジュール筐体内に組み込まれており、取り外し不可の構造となっている。WiGig通信モジュールの主な仕様は表3.1-1に示す通りである。

表 3.1-1 WiGig通信モジュールの主な仕様

項目		仕様内容
無線部	周波数	57~64GHz
	チャンネル	CH1 (58.32GHz)、CH1.5 (59.4GHz) CH2 (60.48GHz)、CH2.5 (61.56GHz)、CH3 (62.64GHz)
	変調方式	MCS1~MCS12 (BPSK/QPSK/16QAM)
	接続形態	P2P/P2MP 接続
	セキュリティ	AES 128bit
外部インターフェース		RJ45 コネクタ (10/100/1000 Base-T)
ネットワーク機能		ブリッジ機能、IPv4 サポート、VLAN、DHCP クライアント
ユーザインターフェース		Web、CLI、SNMP
装置電源	形態	PoE (IEEE802.3af) ※PoE+ (IEEE802.3at) にも対応
	消費電力	10W 以下
動作温度範囲		-30°C~50°C
保護等級		IP67
サイズ(突起物を除く)		70.5 x 70.5 x 99.4 mm
質量		500g 以下
認証	国内	<p>&lt;電波法&gt; 同法の規定に基づく以下の技術基準適合をアンテナ内蔵の通信モジュールについて認証済み。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>無線設備の種類: 特定無線設備(60GHz帯省電力データ通信システム)</li> <li>根拠法令: 特定無線設備の技術基準適合証明等に関する規則第二条十九の四の二</li> </ul> <p>&lt;電気通信事業法&gt; 同法の規定に基づく以下の技術基準適合について認証済み。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>端末の種類: 専用通信回線設備等端末(専用通信回線設備又はデジタルデータ伝送用設備に接続される端末)</li> <li>根拠法令: 端末設備等規則 第九条、第三十四条の八および十</li> </ul>

### 3.1.2 AI システム

#### 【画像解析 AI】

本実証実験で取り入れた画像解析 AI の特徴のひとつは、映像解析により抽出した動きベクトルを基本として対象物の検出を行う AI 技術である点である。これにより従来の形状認識を前提とする AI では対象とすることが難しい不定形状の対象物の検出を実現する。また、本手法は動き情報と色情報の両方を使うことで、フレーム内の他の動く物体や雲のような類似な対象物の誤検出を低減することができる。

動き情報の抽出には大きな計算リソースが必要となるが、検出能力の低下と引き換えに、計算処理が軽量なアルゴリズムを用いることで、計算リソースや消費電力に制約のあるエッジでの実装も可能となる。本実証実験では、この特徴を活かし、エッジのカメラにおいて取得された映像に対し、エッジカメラ側での映像 AI 処理により対象物の検出を物体認識(獣や人の検出の場合)または軽量な動きベクトル映像処理(煙検出の場合)に基づき検出する。クラウドでは、エッジよりも大きなモデルを用いた物体認識や厳密な動きベクトルの抽出処理に基づく特徴量を使用して判別処理を行うことで、高い精度での対象物の検出を行う。

動きベクトルに基づく検出手法は、光点の動きから対象物を検出することができるため、夜間に活動する獣の網膜反射にも適用可能である。鳥獣の検知においては、従来の物体認識に基づく手法を日中は適用できるものの、夜間など映像から外形の判別が困難になる環境では、赤外線カメラ等が必要となる。一方、網膜反射による光点の動きを検知する動きベクトルに基づく手法ではそのような特殊なカメラを必要としない。今回の実証実験で使用する AI 技術では、従来手法である物体認識と、動きベクトルに基づく検出手法を組み合わせるため、このようなシステム構成的な制約を生じさせず、昼夜間を問わず監視を実現することができる。

#### 【動的メタサーフェス反射板】

動的メタサーフェス反射板の AI 制御は、携帯電話網不感地域における通信の確立に向けた技術である。深層強化学習(DQN)を用いて動的な反射パターンを学習しており、逐次的な追従によって、対象となる通信端末に反射波を送り届けるものである。

## 3.2 通信システム及び AI システムの設置場所

映像解析処理をアドオンとして機能追加できるカメラへの将来的な実装を前提に、エッジ AI 処理をシングルボードコンピュータ(Jetson)に実装した。最終的には、検出精度を下げることなく通信データを削減する効果を得るため、エッジ AI とクラウド AI を組み合わせて解析を行ったが、本実証ではその効果を定量的に比較評価する必要性から、エッジ AI で処理していない高画質の同じカメラ取得映像を並行して帯域の広い回線を用いてクラウドへ伝送し、クラウド AI での解析も行った。これにより、1)エッジ AI のみ、2)クラウド AI のみ、3)エッジ AI とクラウド AI の連携利用のそれぞれの形態での検出精度とデータ通信量を実際の利用場面の下で収集することができ、エッジ AI およびクラウド AI との連携利用の効果を定量的に実証評価できる環境を構築した。

また、通信システムにおいて適用するメタサーフェス反射板は、以下に示す 3 つの検証パターンごとに異なる対応周波数帯と反射板種別(静的・動的)の組み合わせにより使用した。

表 3.2-1 通信システムの検証パターンおよび実施場所

検証パターン	対応周波数帯	反射板種別
パターン①	Sub6(4.5GHz)帯	静的反射板
パターン②	28GHz 帯	静的・動的反射板
パターン③	60GHz 帯	動的反射板

ここで、使用した各メタサーフェス反射板は、可搬型(分解するタイプを含む)であるとともに、実証現場において設置位置・設置条件(方位角、仰角・俯角など)を安全性・耐久性を十分に考慮した上で柔軟に調整可能となるよう工夫した。

### 3.2.1 【仙台市新庁舎建替工事現場】

#### 通信システム概要(図 3.2-1 参照)

##### 【通信】

公衆 LTE のみ利用可能なエリアや、公衆モバイル通信が困難なエリアに対して、メタサーフェス静的反射板(検証パターン①)を適用することで、既存の公衆 5G(4.5GHz 帯)のエリアを拡張し、通信環境を改善した。

また、60GHzメタサーフェス動的反射板システムを用いた際にドローンポートから送信する映像を遠隔監視拠点に送る際の通信品質について検証を行った。

##### 【AI】

通信環境によってエッジ AI、クラウド AI、エッジ AI とクラウド AI の連携利用を使い分けた。

##### 【その他(通信以外)】

通信同様、電池残量、AI 対象によってエッジ AI、クラウド AI、エッジ AI とクラウド AI の連携利用を使い分けた。

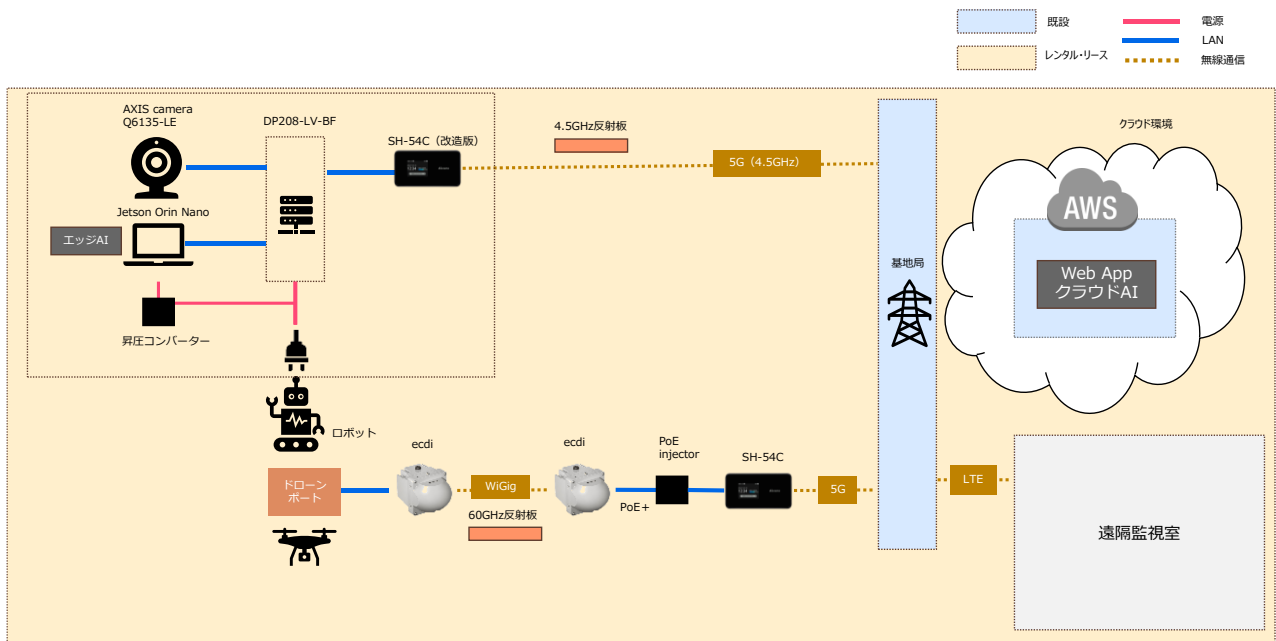


図 3.2-1 実証実験システム構成図(画像解析 AI・反射板): 仙台市新庁舎建替工事現場

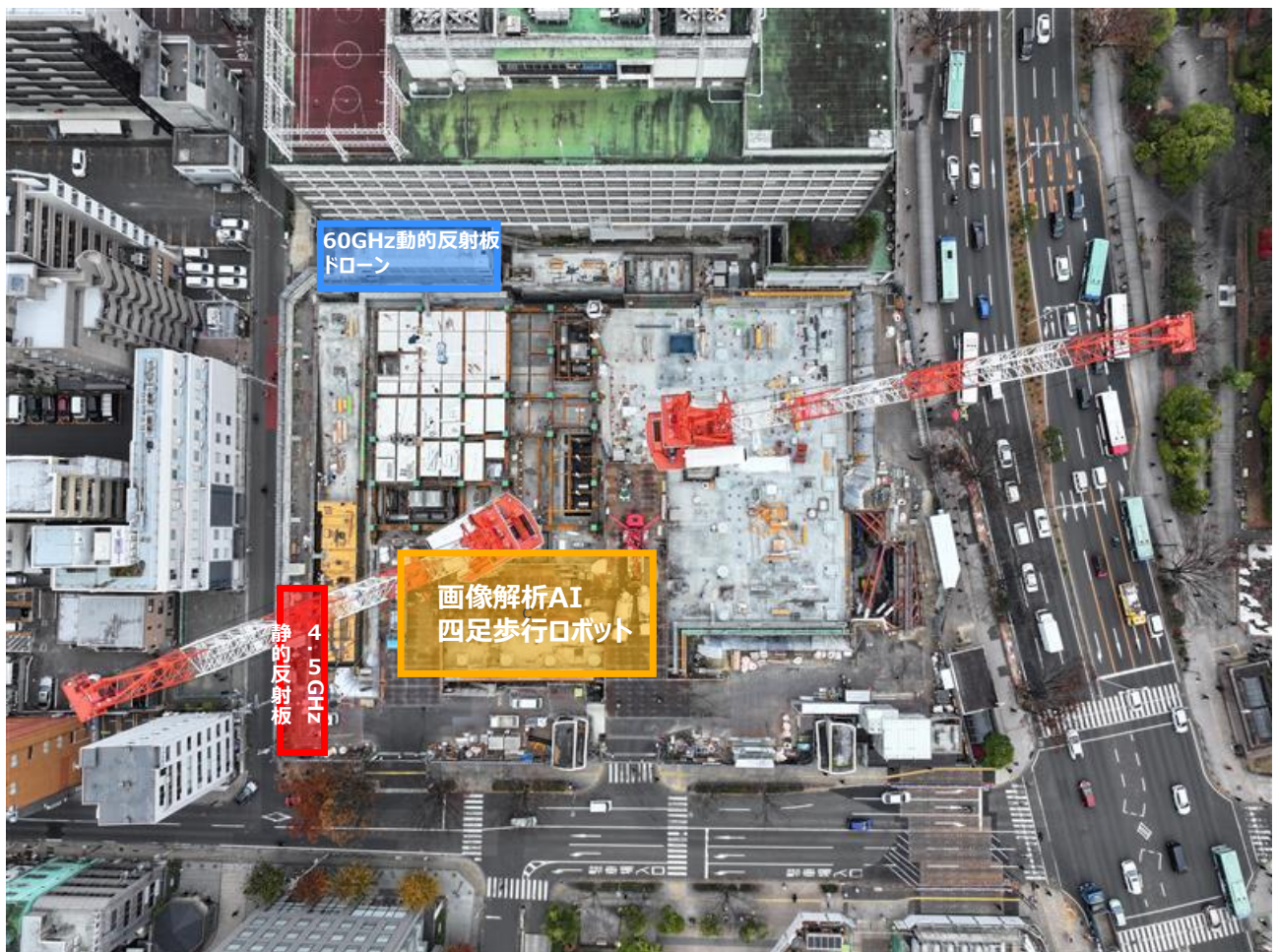


図 3.2-2 実証実験フィールド: 仙台市新庁舎建替工事現場



図 3.2-3 4.5GHz 静的反射板設置風景:仙台市新庁舎建替工事現場

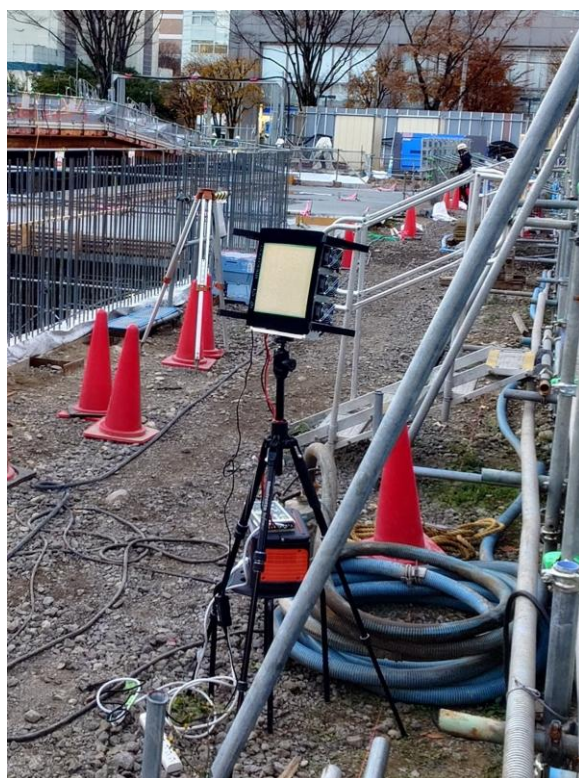


図 3.2-4 60GHz 動的反射板設置風景：仙台市新庁舎建替工事現場

### 3.2.2 【東北大学青葉山キャンパス】

通信システム概要(図 3.2-5 参照)

#### 【通信】

公衆モバイル通信の利用が困難なエリアに対して、メタサーフェス反射板(検証パターン①、②)の適用により、既存の公衆 5G(4.5GHz 帯)基地局、公衆 5G(28GHz 帯)基地局を活用して無線局(実験試験局)免許を取得した実験用基地局、および、無線局免許を要しない WiGig(60GHz 帯)の可搬型アクセスポイントにおける各々のカバレッジエリアを拡張し、通信環境を向上させることが可能かを検証した。

#### 【AI】

通信環境によってエッジ AI、クラウド AI、エッジ AI とクラウド AI の連携利用を使い分ける

#### 【その他(通信外)】

通信同様、電池残量、AI 対象によってエッジ AI、クラウド AI、エッジ AI とクラウド AI の連携利用を使い分ける。

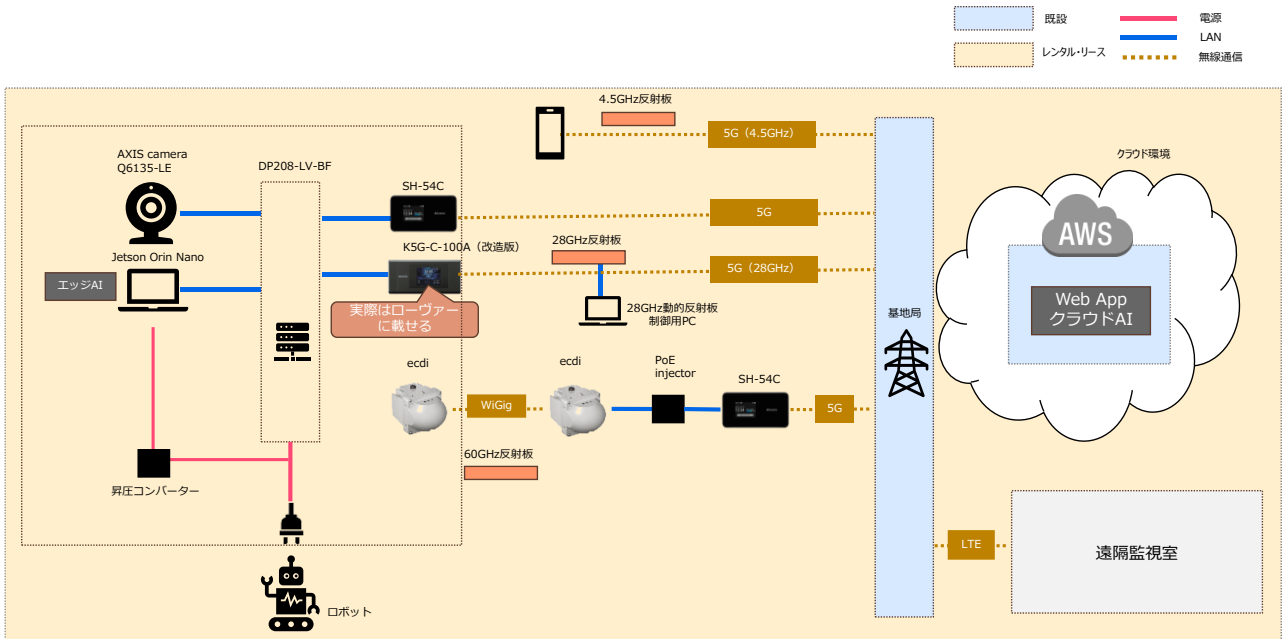


図 3.2-5 実証実験システム構成図(画像解析 AI・反射板):東北大学青葉山キャンパス

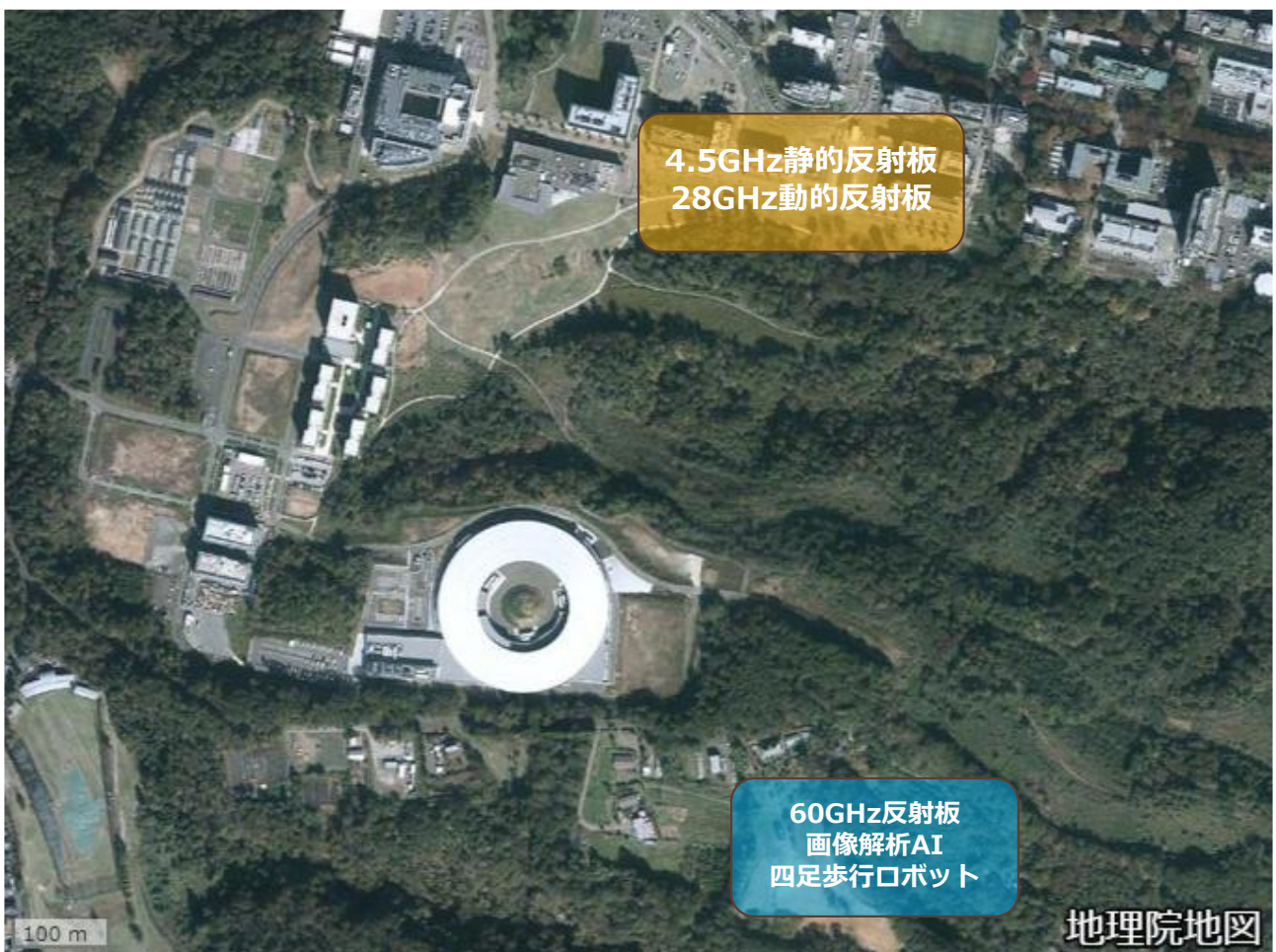


図 3.2-6 実証実験フィールド:東北大学青葉山キャンパス



図 3.2-7 4.5GHz 静的反射板設置風景:東北大学青葉山キャンパス

### 3.2.3 【フィールド共通】

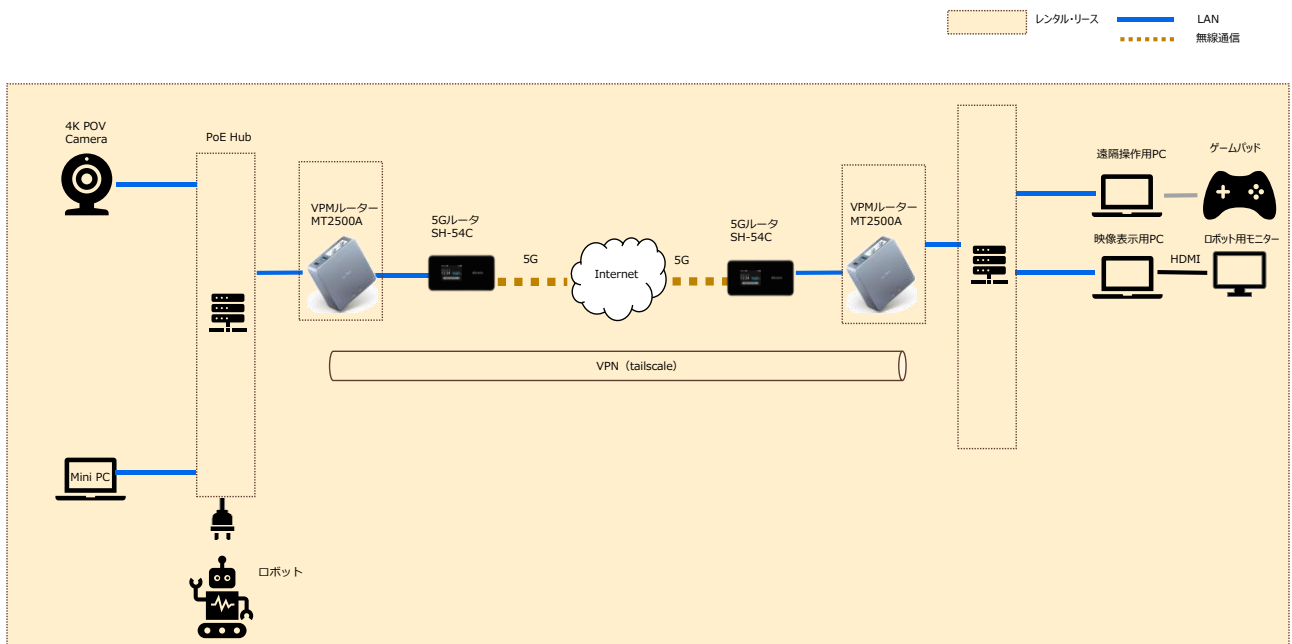


図 3.2-8 実証実験システム構成図(犬型ロボット):フィールド共通

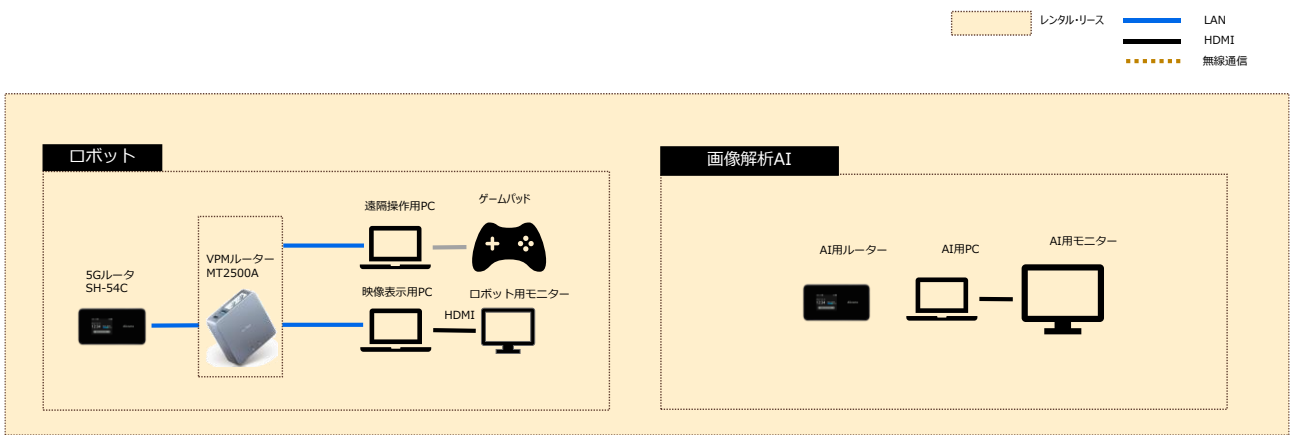


図 3.2-9 実証実験システム構成図(遠隔監視室):フィールド共通

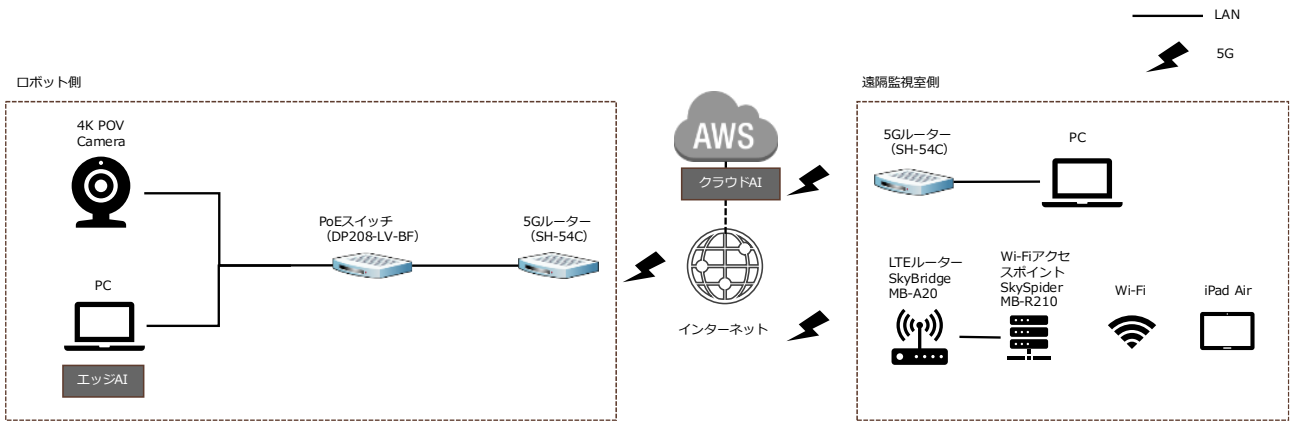


図 3.2-10 実証実験ネットワーク構成図(4.5GHz,28GHz 反射板)

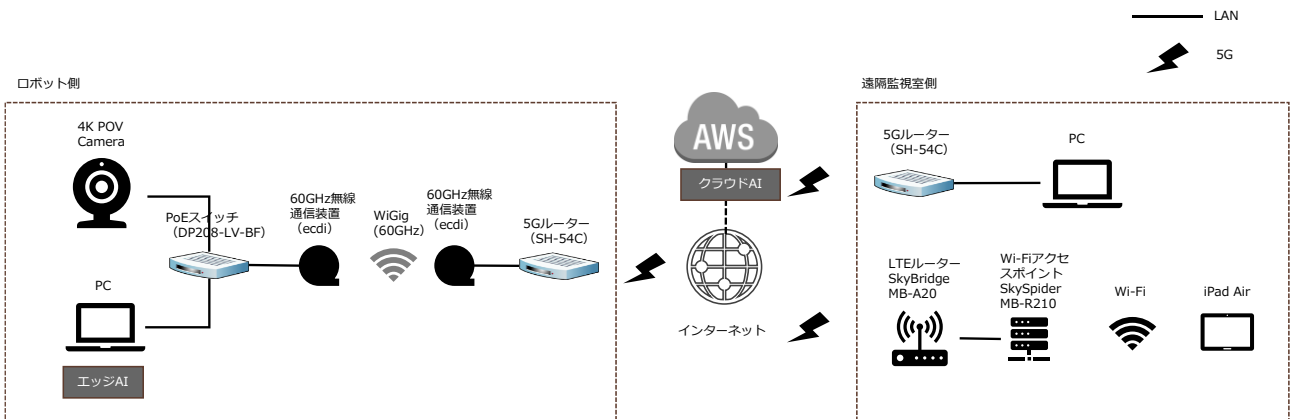


図 3.2-11 実証実験ネットワーク構成図(60GHz 反射板)

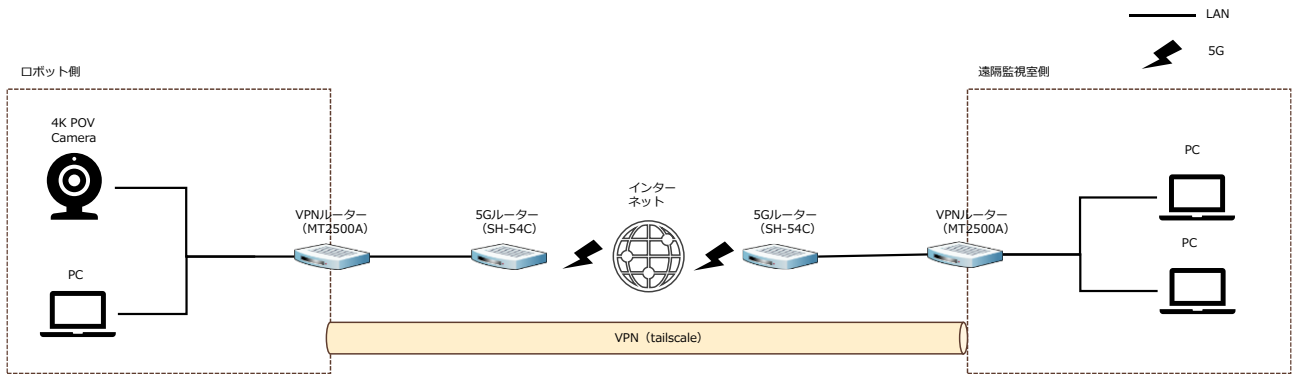


図 3.2-12 実証実験ネットワーク構成図(犬型ロボット)

### 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

実証を実施するにあたり開発・機器購入に発生した費用は表 3.3-1 に示す通りである。

表 3.3-1 開発・機器購入に発生した費用

システム/機器	要件	内容	金額	備考
AI 検知システム	クラウド	監視画面構築	100 万円	
		クラウド利用料(月額)	60 万円	
	エッジ	電源、架台等構築	190 万円	
		PTZ カメラ	43 万円	
		エッジ処理 PC	5 万円	Jetson Orin Nano
メタサーフェス 反射板(静的)	4.5GHz	設計・構築費	970 万円	反射板 20 枚
	28GHz	設計・構築費	200 万円	反射板 10 枚

※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

通信システム及び AI システムの構築にあたって留意すべき事項については、表 3.4-1 に示す通りである。

表 3.4-1 留意事項

分類	事項	要因	対処法	影響度合い
システム構築	当初想定していた映像プラットフォームの利用取りやめ	想定よりコストがかかることが判明した。	映像保存は既存クラウド(AWS)や画面録画にて行う。	解析自体は映像プラットフォームなしでも可能であるため、実証内容の変更はなし。よって影響度小。
	クラウド AI 利用可能日に制限	GPU を搭載したクラウド(AWS)のサーバが需要過多で利用できない状態に。	オンデマンドではなく日を指定した事前予約の枠組みを利用した。	予約できない日はオフラインで解析することで実証スケジュールへの影響を低減。
ネットワーク構築	28GHz 動的反射板を公衆モバイル通信と組合せ	運用中の公衆 5G 基地局と市販されている移動端	免許取得の対象となる基地局を運用する部門や移	無線局免許の取得が必要の実験項目については、

	<p>て実験するために必要な 実験試験局取得手続きの 長期化</p>	<p>末の双方について実験試 験局免許の取得実績は非 常に少なく、当該免許の申 請に必要となる情報の収 集と調査に時間を要した。</p>	<p>動端末の製造メーカーとの 調整を進めつつ、免許が 不要な屋内(ラボ)環境で の実験や、追加免許を要 しない屋外環境での静的 反射板による基礎検証を 推進した。</p>	<p>免許取得時期が検証時期 に大きく影響するため、免 許取得手続きに関する事 前調査を十分に行うととも に、免許取得前に実施可 能な予備実験(屋内実験、 シミュレーション等)につい ても検討する。</p>
--	--	--	--	---

## 4. AIモデルの開発・学習

---

### 4.1 AIモデルの全体像

#### 4.1.1 画像解析 AI

##### 【開発した AI 等の概要及び性能目標】

本実証では、人物検出、日中の獣検出、および煙検出のいずれにも YOLOv4 を用いた。人物検出および日中の獣検出では、取得した RGB 画像に対して YOLOv4 による従来型の物体検出を適用した(表 4.1-1 及び表 4.1-2 参照)。一方、煙検出では、煙が背景を透過しやすく RGB 画像では十分な特徴が得られないため、YOLOv4 の入力として動きベクトル(オプティカルフロー)を用いた。これにより、煙に特有の拡散といった動的特徴を強調することで、検出性能を向上させた。なお、本手法は未発表技術(後日、別の場で発表予定)のため、詳細は本報告書では割愛する。

夜間の獣検出においては、網膜反射により生じる光点の動きベクトルの軌跡情報を利用し、LSTM (Long Short-Term Memory)による時系列的な動き解析を組み合わせる手法で検出を行う。モデルは、46 日間にわたり中山間部の圃場において夜間に赤外機能付固定カメラで撮影した映像データを基に、そこから赤外光の反射による光点が映っている時間区間を視認で抽出して学習させたものを使用する。鹿が 318 件、兎が 515 件、その他の反射光が 3651 件の計 4484 件の軌跡データがモデルの学習に使用されている。1 件あたりのデータ長は、10FPS で 20 フレーム、したがって 2 秒である。学習したモデルの性能は、学習データを取得したのと同じ環境での取得データを用いた解析では適合率で 90%、再現率で 91%であることを確認している。夜間における検出アルゴリズムの詳細については、未発表技術(後日、別の場で発表予定)であるため本報告書では割愛する。

検出対象物が明らかに無いとエッジ AI が判断した場合には、映像データの送信を停止することでクラウド AI と連携する。これにより、全映像データを常にクラウドサーバ上で処理した場合と比較して、検出精度を損ねることなくデータ通信量を 90%以上削減する(図 4.1-1 参照)。

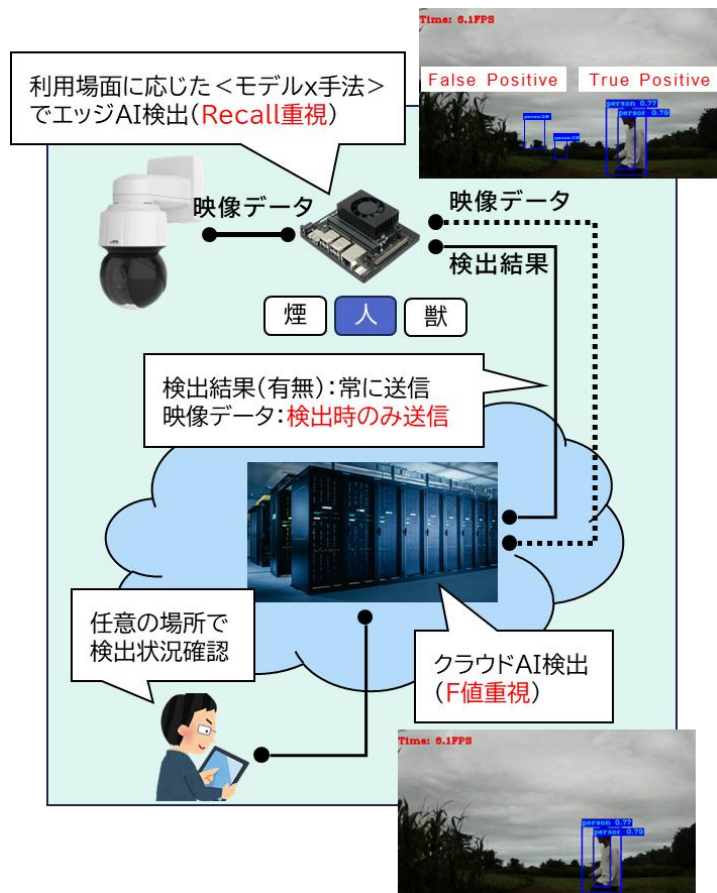


図 4.1-1 開発した AI のシステム上での実装場所と役割図

### 【開発した AI の性能】

- エッジ AI:
  - 検出アルゴリズムの性能として、獣検出(網膜反射)の精度 0.91、煙検出の平均適合率 0.99 を過去に屋外で取得した動物・煙映像にて確認
  - 表 4.1-1 における検出処理時間および検出遅延時間は、エッジ AI 処理を Jetson Orin Nano で実行した場合

表 4.1-1 エッジ AI の諸元表

エッジ AI			
検出対象	獣	煙	人
アルゴリズム	YOLOv4 (昼)/ LSTM (夜)	YOLOv4	
モデルパラメータ数	6,062,814		
入力画像解像度	608x608	480x480	608x608
特徴量	形状(昼)/ 動きベクトル(夜)	動きベクトル	形状
検出処理時間	1 秒未満(AI 処理部のみ)		
検出遅延時間	2~3 秒(映像取得、オプティカルフロー解析含む)		

- クラウド AI:

- パラメータ数で、エッジ AI よりも約 10 倍のモデルを利用

表 4.1-2 クラウド AI の諸元表

クラウド AI			
検出対象	獣	煙	人
アルゴリズム	YOLOv4 (昼) / LSTM (夜)	YOLOv4	
モデルパラメータ数	64,429,405		
入力画像解像度	608x608	608x608	608x608
特徴量	形状(昼) / 動きベクトル(夜)	動きベクトル	形状
検出処理時間	1 秒未満(AI 処理部のみ)		
検出遅延時間	エッジからの通信遅延も含有するため、未計測		

## 4.1.2 動的メタサーフェス反射板

### 【開発した AI 等の概要及び性能目標】

携帯電話網不感地域における通信の確立に向けて、動的メタサーフェス反射板の制御に AI を適用する。用いた AI は深層強化学習(DQN)であり、逐次的な追従によって、対象となる通信端末に反射波を送り届けるものである。性能目標は受信電力(RSRP)の 10 dBm 程度の改善とした。図 4.1-2 は、動的メタサーフェス反射板に DQN を適用した場合のイメージ図である。

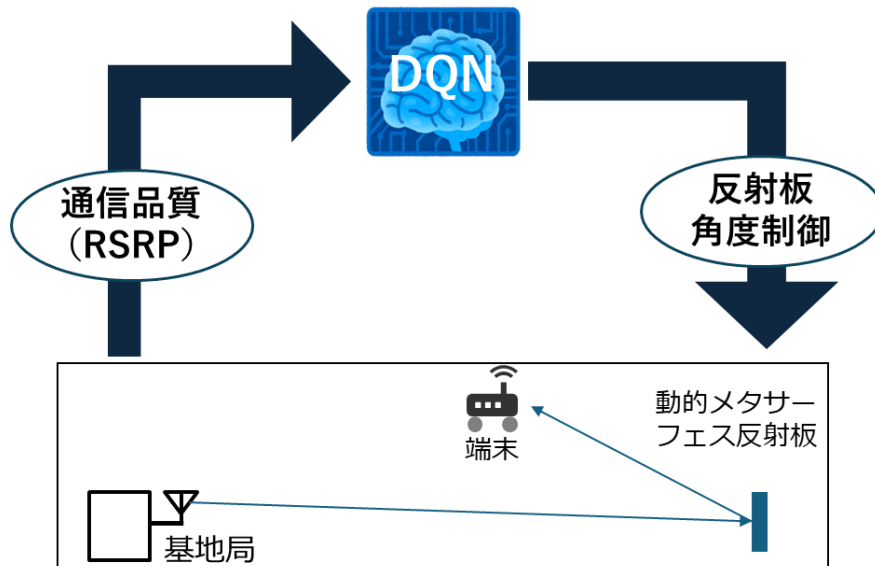


図 4.1-2 動的メタサーフェス反射板に DQN を適用した場合のイメージ図

### 【開発した AI の性能】

開発した AI の性能検証を図 4.1-3 の環境で実施した。本環境は、NTT 横須賀研究開発センター内の実験室であり、28GHz の 5G 相当の基地局から送信される電波を開発した AI を適用した動的メタ

サーフェス反射板を介して、RSRP の測定が可能なエリアテストが受信する構成である。本環境において、実験データの取得を実施した。表 4.1-3に本検証に関する仕様およびDQNに関する設計パラメータを示す。本表に記載の通り、周波数帯は 5G NR の 28GHz、動的メタサーフェス反射板のサイズは 400 mm×400 mm、反射角度は±40 度であり、DQN における報酬は RSRP、行動選択は  $\epsilon$ -greedy 法を用いた。図 4.1-4 より、AI を適用することで、RSRP が 10dBm 程度改善することを確認した。

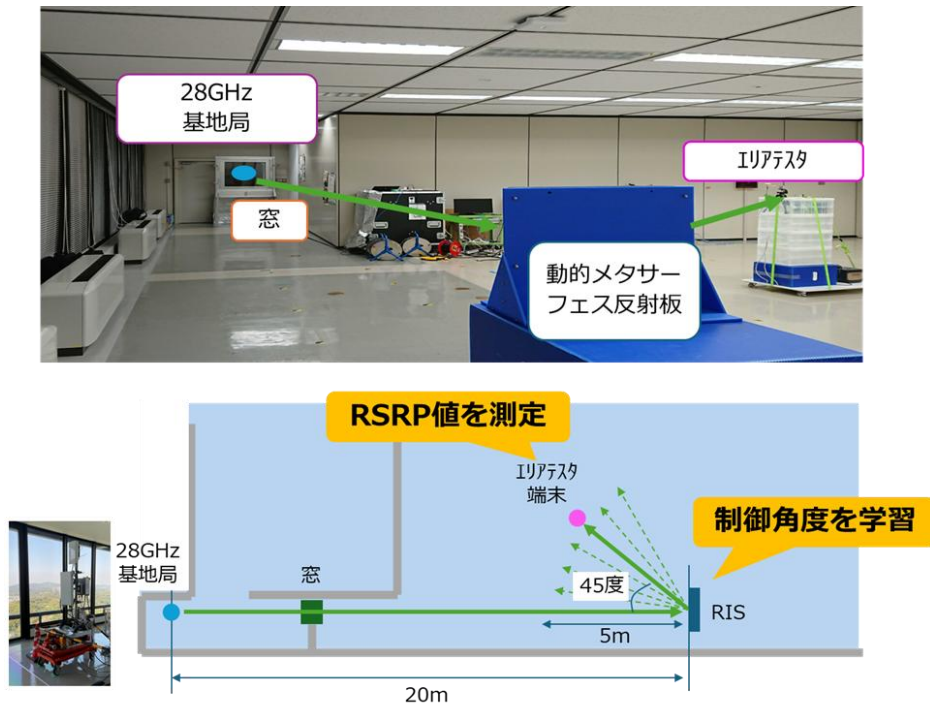


図 4.1-3 実験環境

表 4.1-3 仕様及び実験パラメータ

パラメータ	値
周波数帯	28GHz (5G)
反射板サイズ	400mm×400mm
学習アルゴリズム	Deep Q Network (DQN)
報酬	RSRP
行動選択	$\epsilon$ -greedy法 $\epsilon = \exp\left(-\frac{t}{100}\right)$
行動	反射板の角度制御パターン (0~59度)

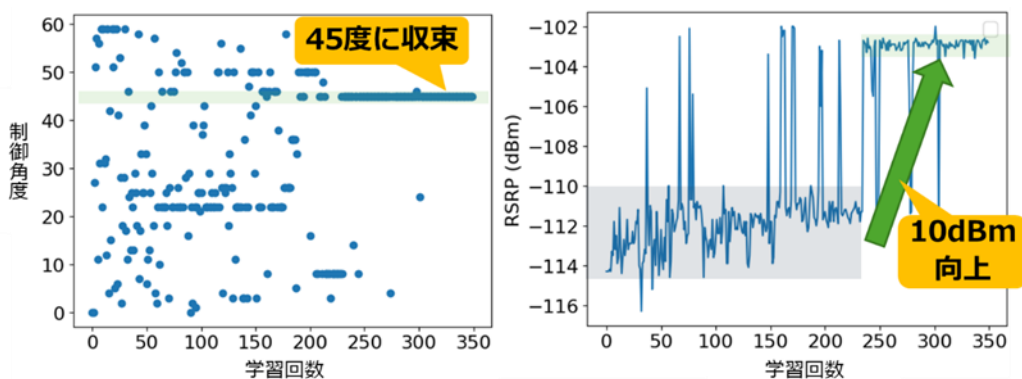


図 4.1-4 実験結果

### 4.1.3 取得したデータ一覧

本実証実験期間中に取得した映像データは、表 4.1-4 のとおりである。また、取得したデータの諸量および総取得データ長について、表 4.1-5 および表 4.1-6 に示す。

また、動的メタサーフェス反射板のデータセットを表 4.1-7 に示す。

表 4.1-4 取得した映像データ

項番	用途	データ取得機器名	稼働場所	データ項目	データ収集期間	データ形式
1	工事現場での監視業務削減評価用データ	犬型ロボット背面搭載監視カメラ AXIS Q6135-LE	仙台市新庁舎 建替工事現場	煙 不審者	2025年12月1日～2025年12月5日	FLV形式
2	山間域での有害獣監視作業軽減評価用データ	犬型ロボット背面搭載監視カメラ AXIS Q6135-LE	東北大学青葉山キャンパス 農学部圃場	熊を印刷したクロス用紙 不審者	2025年12月9日～2025年12月11日	FLV形式

表 4.1-5 取得したデータの諸量

	1. 生のカメラ映像	2. エッジ AI 検出結果	3. クラウド AI 検出結果
解像度 (pixel)	1920x1080 1280x720	1920x1080 960x540 640x360	1920x1080 1280x720 960x540 640x360
フレームレート (fps)	8 4 2	8 4 2 1	8 4 2
ビットレート (bps)	220k～5.1M	100k～1.8M	260k～520k

表 4.1-6 実証実験期間における取得データ

工事現場	農学部圃場
294.6 分	305.6 分

- 動的メタサーフェス反射板

表 4.1-7 動的メタサーフェス反射板のデータセット

項番	用途	データ取得機器名	稼働場所	データ項目	データ収集期間	データ形式
1	実験環境における AI を適用した動的メタサーフェス反射板制御	エリアテスタ	NTT 横須賀研究開発センタ内の実験室	RSRP	2025 年 9 月	TEXT 形式

#### 4.1.4 データセット作成に係る処理

##### 1) 画像解析 AI

- 対象物検出に動きベクトルを使用することから、ロボットが移動中に撮像されたデータは、目的とする対象物の検出への悪影響が予想されるため、学習用のデータセットから除外して取り扱う。
- 目的とする対象物の検出性能が画質により影響を受けることが予想されるため、カメラでの撮像画質を数パターン違えて撮像し、画質情報と組みにして管理する。
- 実証実験と同一環境において学習用のデータを取得できる機会は限られるため、類似の環境でデータ取得を行い、モデル性能改善への効果を評価の上、必要に応じて学習データとして利用する。

##### 2) 動的メタサーフェス反射板

- 動的メタサーフェス反射板の入射角および反射角に対する RSRP のデータを準備する。
- 上記データを統合して、DQN によって学習できるデータセットを作成する。

#### 4.1.5 システム全体のデータフロー図

##### 1) 画像解析 AI

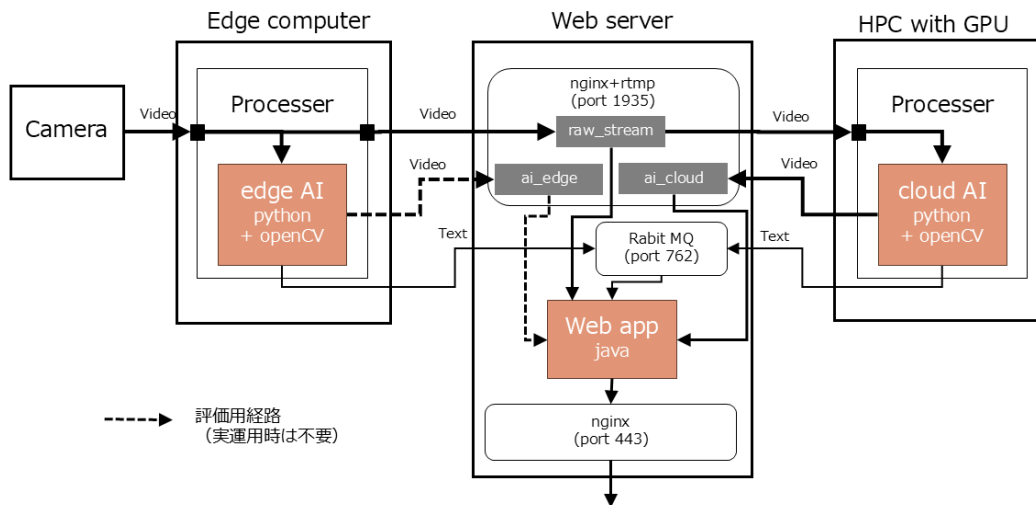


図 4.1-5 画像解析 AI 全体のデータフロー図

本実証実験でのデータフローは、図 4.1-5 に示すとおりである。

1. カメラのストリーミング配信をエッジコンピュータで受信し、FLV 形式に変換した上で、Web server 上の RTMP サーバ(1935 番ポート)の raw\_stream と名付けたチャンネルに中継して転送する。
2. エッジコンピュータでは、このストリーミング映像を基にエッジ AI により監視対象の有無を 1 秒ごとに判断し、その結果を Web server 上の Rabbit MQ サーバ(762 番ポート)に送信する。また、検出結果の情報(検出対象物の種類、場所、信頼度)を重畳した映像を Web server 上の RTMP サーバ(1935 番ポート)の ai edge と名付けたチャンネルに送信する。
3. GPU を利用できる高性能コンピュータ(HPC)は、raw\_stream のストリーミング映像を読み取り、クラウド AI により監視対象の有無を判断し、その結果を Web server 上の Rabbit MQ サーバ(762 番ポート)に送信する。キーを違えることで、エッジ AI から送信された検出結果データと区別する。また、エッジ AI と同様に、検出結果の情報(検出対象物の種類、場所、信頼度)を重畳した映像を Web server 上の RTMP サーバ(1935 番ポート)の ai\_cloud と名付けたチャンネルに送信する。
4. Web アプリは、raw\_stream、ai\_edge、ai\_cloud の各チャンネルのストリーミング映像を読み出し、ブラウザ上に表示するとともに、Rabbit MQ に届いたデータを読み出して、検出ログとして同じブラウザ上に表示する。

## 2) 動的メタサーフェス反射板

図 4.1-2 動的メタサーフェス反射板に DQN を適用した場合のイメージ図を示す。この図で示すように、動的メタサーフェス反射板に設定される入射角と反射角のパラメータに対する RSRP のデータセットを作成し、このデータセットを DQN によって学習を実施する。学習モデルを用いて、RSRP が向

上可能な動的メタサーフェス反射板に設定される入射角と反射角を出力する。

#### 4.1.6 データの適切さ

##### 1) 画像解析 AI

本アルゴリズム検証時には晴天時の映像を学習データとして用いている。その効果を確認するため、曇天の条件下で実験を行った際にも、90%以上の検出精度を達成している<sup>4</sup>。日射量による色への影響を解析し、相関が彩度は 0.01、明度が-0.08 と非常に小さいことを確認した。この結果から、使用データの代表性が十分であると判断できる。

##### 2) 動的メタサーフェス反射板

検証で用いた装置は、5G の検証用のデバイスおよび測定器であるため、データは適切に取得できると判断できる。

### 4.2 AI モデルの学習プロセス

##### 1) 画像解析 AI

- 4.1.1 の表に示す検出対象のうち、熊および不審者の検出については、今回の実験環境で取得したデータでの追加学習は実施せず、YOLOv4 の既存モデルを使用した。モデルの解像度は、608x608 ピクセルを使用した。
- 煙検出用 AI モデルについて、煙発生装置による煙映像を学習データとして利用した。学習データは、エッジ用モデルは 480x480 ピクセル画像 600 枚を使用し、クラウド用モデルは 608x608 ピクセル画像 400 枚を使用した。50 エポックの学習を行い、mAP はエッジ用モデルで 88.3%、クラウド用モデルは 86.7%となった。学習には Intel oneAPI Deep Neural Network Library (oneDNN)対応の Intel Xeon CPU Max 9480 を利用し、計算所要時間はエッジ用モデルで 55 分、クラウド用モデルは 214 分となった。
- 学習データは、実証実験期間に取得したデータの中の複数の時間タイミングの画像である。エッジとクラウドの学習データは、別々のデータセットである。
- 煙検出では、監視対象の形状ではなく動きベクトルに基づく検知を行っている。オプティカルフロー解析を行い、動きベクトルにして学習モデルを構築する必要がある。オプティカルフロー解析は計算負荷が大きいため、エッジコンピュータにおいては今回使用した NVIDIA Jetson Orin Nano の組み込み関数を使用した。一方、クラウドにおいては、一般的な OpenCV のオプティカルフロー解析関数を利用している。したがって、エッジとクラウドでモデル構築に使用する動きベクトルの精度も異なることになる。

---

<sup>4</sup> K.Kikuta, et al., “A daytime smoke detection method based on variances of optical flow and characteristics of HSV color on footage from outdoor camera in urban city,” Fire Technology, vol. 60, pp. 1427-1452, 2024.

## 2) 動的メタサーフェス反射板

動的メタサーフェス反射板の入射角と反射角の制御にあたり、リアルタイムにパラメータ設定が可能なDQNを用いた。学習プロセスは以下の通りである。

- データセットの作成
- DQNによる学習モデルの作成
- 学習モデルを用いた推論

## 4.3 AIモデルの開発・学習にあたっての留意事項等

### 1) 画像解析 AI

#### ➤ 工夫事項

既存の煙検出モデルは、過去の煙データ(主に屋外での野焼き)を学習していたため、今回の実証環境で観測された煙の特徴(流動性が高く、時間変化が激しい)に対応できず、mAP はエッジ用モデルの場合は 23.2%、クラウド用モデルでは 63.7%と低い値となった。この課題に対し、実証実験期間中に取得した煙映像の一部を学習に利用した。

#### ➤ 計画差分

当初計画では既存データのみで学習を完了する予定だったが、精度不足により追加データ取得が必要となった。

追加データは、以下の技術的観点を考慮して収集した。

- ✓ 背景の多様性: 人の動きがある環境を含む映像を取得し、誤検出を低減。
- ✓ 光条件の変化: 昼夜、曇天など異なる照度条件で撮影し、モデルのロバスト性を向上。
- ✓ 煙の形状: 風速の変化による濃度・流速が異なる煙を収集し、特徴量の汎用性を確保。

この学習により、4.2に記載のように検出率の改善を確認した。

### 2) 動的メタサーフェス反射板

#### ➤ 工夫事項

検証で用いた DQN は一般的に利用されるものをそのまま利用しているため、大きな留意事項はないが、学習用データセットを自動的に収集するシステムを構築した。具体的には、自動走行可能ローバから位置情報を取得するとともに、同期した測定器から受信電力情報をリアルタイムに収集した。

#### ➤ 計画差分

当初計画では低速移動を想定していたが、採用したロボットの移動速度に対応させるため、AI モデルを用いた推論の判定速度の調整を実施した。

## 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

画像解析 AI を用いた通信負担の低減・通信量の確保等の実証として、エッジ AI またはクラウド AI 処理のみを前提とした固定カメラでの取得映像に基づく検出性能に対しては既に評価しているが、エッジ・クラウド連携利用についての評価が行われていない。そこで、本実証では、エッジ・クラウド連携利用による検出精度および通信量や計算量の視点での削減効果について定量的に評価する。具体的には、2 つのフィールドと 3 つの監視対象(①郊外での獣監視、②工事現場での火災監視、③郊外での不審者)で実証を実施する。なお、エッジ・クラウド連携は 3 つの監視対象全てにおいて実施する。詳細は以下のとおりである。

#### 5.1.1 実証内容の詳細

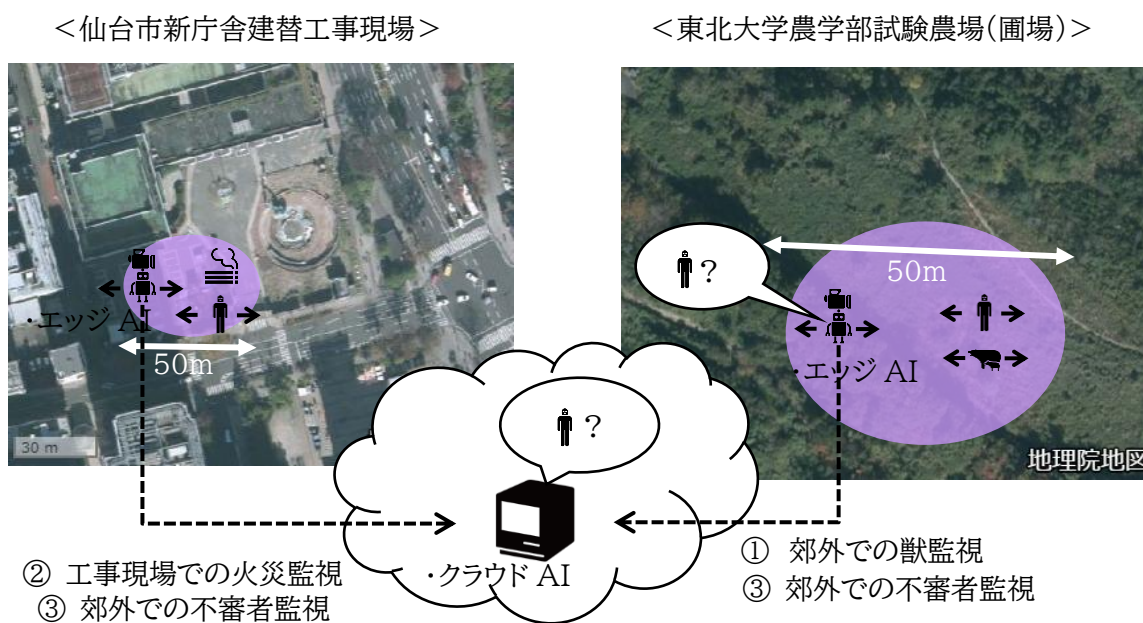


図 5.1-1 フィールドにおける実験実施環境の概要

図 5.1-1 は、フィールドにおける実験実施環境の概要を示したものである。実際の利用場面として想定される実証実験場所において様々な構図や条件において映像を取得し、エッジ AI とクラウド AI による対象物の検出性能およびエッジ・クラウド連携による通信データ量削減を評価する。カメラによる映像取得は固定カメラではなく、犬型ロボットに搭載した移動カメラを前提とする。

#### 【工事現場および農場での実験】

複数の監視対象物および監視環境を準備して、その環境で取得した映像をエッジおよびクラウド AI で解析することで、エッジ・クラウド連携による検出精度および連携による通信量の削減量を導出した。

## 1) 実証内容:郊外での獣監視

表 5.1-1 実証内容:郊外での獣監視

概要	郊外での獣監視を取り上げ、エッジとクラウドでの適切な映像 AI 利用によりデータ通信量・計算量の観点で効率化を図る技術を検証する。
開発技術	カメラ側に軽量エッジ AI 機能を搭載し、クラウドに高度な AI 処理を実装して、エッジでの検出状況や映像取得環境に応じてデータ送信制御を行った場合の効果の評価とその効果の可視化が行えるシステム。
実証手順	実施内容
1	昼間の時間帯における獣検出を、エッジ AI として軽量な手法を採用して評価する。大判クロスに獣(熊)の写真を印刷し、印刷面を広げて動かすことで農場に熊が出現した状況を模擬し、加えてロボットを移動させることで映像内の対象物の有無や背景に変化を与える。エッジ・クラウド連携動作では、エッジ AI で可能性がないと判定されたデータが送信されなくなり、クラウド AI による検出の機会を失うことになるため、再現率 (Recall) 重視のパラメータ設定 (誤検出をある程度許容) が必要となる。
2	上記と同じ条件で取得した映像に対し、エッジ AI を行わずに全データをクラウドに送信してクラウドにおいて AI 処理して検出を行う。
3	エッジ AI で検出 (誤検出含む) された映像データのみを対象にクラウドで AI 検出を行い、クラウドにデータ送信されなかった時間帯のデータも含めて F2 検出率を算出する。したがって、データが送信されなかった時間帯に対象物が存在していたら偽陰性として計算する。
4	対象物の形状判別が困難となる夜間において、上記 2 の実験をクラウド AI 技術として物体形状ではなく網膜裏の光反射を用いる手法を適用して評価する。

表 5.1-1 に示す通り、実際に野生の獣が出現してもおかしくない農場や林等の環境において、任意の監視視点を実現できる移動ロボットに搭載したカメラによる取得映像に対し、エッジコンピュータによる獣(本実証実験では特に熊)の検出処理性能、取得した映像データを全てクラウドに伝送した場合の通信量、および、伝送されたデータに基づいてクラウドにおいて検出処理を実施した場合の検出性能を後述する開発・評価項目に基づき評価する。また、エッジでの検出状況に基づいてデータ送信の制御を行うエッジ・クラウド連携により達成される送信データの削減量を導出する。

実際の動物、または、それを模擬したものを検出対象物とし、昼夜(周辺環境の明度)や対象物とカメラの位置関係などの環境要因にバリエーションを持たせて評価する。夜間の検出においては、物体形状や網膜裏の光反射を利用することから、LED 光の到達する範囲内に検出対象物が位置する必要がある。

## 2) 実証内容:工事現場での火災監視

表 5.1-2 実証内容:工事現場での火災監視

概要	工事現場での火災監視を取り上げ、エッジとクラウドでの適切な映像 AI 利用によりデータ通信量・計算量の観点で効率化を図る技術を検証する。
開発技術	※①郊外での獣監視と同一のため割愛
実証手順	実施内容
1	煙検出を、エッジ AI として軽量な手法を採用して評価する。実際の工事現場において火災を模した安全な煙を舞台や撮影での演出用白煙発生器で発生させ、ロボットを移動させることで映像内の対象物の有無や背景に変化を与える。エッジ・クラウド連携動作では、エッジ AI で可能性がないと判定されたデータが送信されなくなるため、再現率 (Recall) 重視のパラメータ設定 (誤検出をある程度許容) が必要となる。
2	上記と同じ条件で取得した映像に対し、エッジ AI を行わずに全データをクラウドに送信してクラウドにおいて

	AI 処理して検出を行う。
3	エッジ AI で検出(誤検出含む)された映像データのみを対象にクラウドで AI 検出を行い、クラウドにデータ送信されなかった時間帯のデータも含めて F2 検出率を算出する。したがって、データが送信されなかった時間帯に対象物が存在していたら偽陰性として計算する。

表 5.1-2 に示す通り、工事現場における火災監視を取り上げ、煙の検出を通してエッジ・クラウド連携の効果を評価する。実際の工事現場において、足元が土で周囲に建材や足場、建設途中の建物が存在し、背景が遮音や目隠しのための仮囲い等になっている映像データを解析対象とする。また、主に作業者がいないときの自動火災監視を想定しているため、人の映り込みは基本的に少ない環境で実施する。

### 3)実証内容:郊外での不審者監視

表 5.1-3 実証内容:郊外での不審者監視

概要	郊外での不審者監視を取り上げ、エッジとクラウドでの適切な映像 AI 利用によりデータ通信量・計算量の観点で効率化を図る技術を検証する
開発技術	※①郊外での獣監視と同一のため割愛
実証手順	実施内容
1	人物検出を、エッジ AI として軽量な手法を採用して評価する。農場に不審者が侵入した状況を模擬するとともに、ロボットを移動させることで映像内の対象物の有無や背景に変化を与える。エッジ・クラウド連携動作では、エッジ AI で可能性がないと判定されたデータが送信されなくなるため、再現率(Recall)重視のパラメータ設定(誤検出をある程度許容)が必要。
2	上記と同じ条件で取得した映像に対し、エッジ AI を行わずに全データをクラウドに送信してクラウドにおいて AI 処理して検出を行う。
3	エッジ AI で検出(誤検出含む)された映像データのみを対象にクラウドで AI 検出を行い、クラウドにデータ送信されなかった時間帯のデータも含めて F2 検出率を算出する。したがって、データが送信されなかった時間帯に対象物が存在していたら偽陰性として計算。

表 5.1-3 に示す通り、人の往来が少なく監視の目が届き難い中山間域における違法・危険行為(農作物や太陽光発電設備からの金属の窃盗、不法投棄、立ち入り禁止区域や危険区域への侵入等)の監視業務を想定し、郊外において人を監視対象とした際の性能評価を行う。獣を監視対象とした実証実験と同じ環境で実証実験を実施することで、監視対象と環境のそれぞれが性能に及ぼす影響についての考察を可能にするのがもうひとつの目的である。

## 5.1.2 利用技術・データ

AI 技術として、エッジ AI 処理をシングルボードコンピュータに実装し、クラウド AI との連携により、エッジおよびクラウド双方でカメラ映像をリアルタイムに解析し、性能比較を行う構成とした。映像解析アルゴリズムには、リアルタイム性の高い YOLO を採用した。評価には高画質カメラ映像を用い、以下の 2 種類のデータを対象とした。

- カメラから取得した非圧縮映像を用いたエッジ AI 解析
- ネットワーク経由で伝送した圧縮映像を用いたクラウド AI 解析

これらのデータに対して、検出精度および通信量を定量的に評価・比較することで、実利用環境におけるエッジ AI およびクラウド AI 連携の効果を検証した。データ取得条件としては、時間的には日中から夕刻までの時間帯、地理的には仙台市新庁舎建替工事現場および東北大学農学部圃場を対象とし、環境条件や背景の異なる複数のシナリオを設定することで、様々な利用環境下での性能検証を可能とした。

なお、エッジ処理は映像解析機能をアドオンとして追加可能なカメラへの将来的な実装を想定している。最終的な運用では、用途や通信状況に応じてエッジ AI とクラウド AI を切り替えて適用することで効果を発揮するが、本実証ではその有効性を定量的に把握するため、エッジ AI で処理を行わないカメラ映像を並行して広帯域回線によりクラウドへ伝送し、クラウド AI による解析も実施した。

### 5.1.3 必要性・新規性

#### 必要性

工事現場や農場では、広範囲かつ長時間の監視が必要となり、高解像度映像をクラウドに常時送信すると、通信帯域・通信コストが大きく増加する。また、通信インフラが十分でない現場では、大容量データの継続的な送信そのものが困難である。このため、AI を用いて現場側で一次的に処理することで通信量を削減する意義は大きい。

一方、エッジ AI は、事象の発生に対して即時的に処理が可能である反面、電力やサイズ、計算性能等の制約のため、複雑な画像解析を行わせるのが難しい。そのため、既存のエッジ AI 監視技術は、小さいモデルを用いた物体認識を前提にする手法が多い。

クラウドでの AI 処理も大きなモデルを用いることで誤検出を低減できるが、検出手法自体は物体形状に基づくものが多い。通信量の増大や遅延といった課題も残る。本実証課題での AI 処理では、従来の物体形状に基づく検出手法に代えて、不定形な動体検出に適した移動ベクトル情報や、夜間における網膜反射に基づく検出手法を採用することで、エッジでの検出精度を高め、通信量削減と検出性能の両立を図る必要がある。

本研究における課題解決への有効性は、エッジ AI によるリアルタイム解析を活用することで、クラウドへの依存度を低減し、通信遅延や通信コストを抑制しながら迅速な異常検知を実現できる点にある。

#### 新規性

複雑な地形を移動可能なロボットと不定形状が検出可能な AI 検知システムを組み合わせ、多様な環境と様々な監視対象に対応できる機動的で柔軟性の高い遠隔検知システムの新たな構築が求められる。本実証においては、上記の必要性・新規性を踏まえて多様な地形環境において移動可能なロボットに、学習情報と異なる条件下においても高い検出精度を実現する AI 画像解析装置を搭載し、横展開における高い汎用性をもつ検知システムを検証する。本ソリューションの優位性として、従来の固定式カメラによる監視システムが、通信帯域や電源確保の制約により設置場所が限定されていたのに対し、設置・運用の自由度が高く、運用コストの低減が可能である点が挙げられる。

## 5.1.4 検証条件

今回の実証において、開発・評価項目に依らない不変の実証の条件(地理的・空間的条件、時間的条件、天候条件等)を記載する。ただし、地理的、空間的、時間的要因も考慮するため、これらの要因は不変にするのではなく、積極的に変化させて実験を実施している。したがって、本記載方法は必ずしも適切ではないが、変化させたことによる各項目のバリエーションについて表 5.1-4 に記載する。

表 5.1-4 検証条件

地理的条件	・宮城県仙台市の市街地に位置する新庁舎建設現場の敷地内 ・仙台市の郊外の青葉山に位置する東北大学青葉山キャンパス内の圃場(農学部試験農場)
空間条件	・建設工事現場においては、周囲に建築資材が置かれており、工事作業者が映像に含まれているものも少なくない。また、鉄筋の骨組みが林立しており、背景は工事現場を囲う仮設の防音・防塵壁になっている。 ・郊外の実験条件においては、背景は背の高い草木が茂っており、その手前に野生動物の圃場への侵入を阻止する金網の柵が設けられている。地面には土や枯草が広がり、上方は空が映る画角の構図となる。
時間的条件	日中(お昼前)から夕刻(16 時台)にかけて実施。実証実験の実施時期が 12 月であり、場所も日本では比較的緯度の高い地域にあたる宮城県であるため、夕刻における実験実施時間は日の入り時刻付近に対応する。
天候条件	実証実験を実施していた期間においては、晴れや曇りであり、降雨、降雪の条件での取得データは含まれていない。

## 5.1.5 開発・評価項目

次に示す 3 項目について、以下の開発・評価項目を表 5.1-5、表 5.1-11、表 5.1-15 に示す通り設定した。

### 郊外での獣監視

表 5.1-5 開発・評価項目:郊外での獣監視

番号	開発・評価項目
1	昼間の時間帯におけるエッジ AI での対象物の検出性能
2	同じ条件でクラウドにデータ送信し AI 解析した場合の対象物の検出性能
3	クラウドへ全データを送信した場合と比較してデータ送信量の削減効果
4	形状に基づく検出が困難な夜間において目の光反射を用いた動きベクトルに基づく検出性能

### 1) 昼間の時間帯におけるエッジ AI での対象物の検出性能

表 5.1-6 昼間の時間帯におけるエッジ AI での対象物の検出性能:郊外での獣監視

目的	エッジ AI での獣の検出性能を評価するために、以下に説明する手順により評価を行う。特に再現率に着目して評価を行う。
計測項目	適合率(Precision)、再現率(Recall)、F 検出率(F-score)、F2 検出率(F2-score)
測定手法	映像データを取得し、AI 解析によりフレーム単位の検出結果を取得。それを下記の検証手順により解析にし、計測項目の値を得る。
検証手順	欄外に示す詳細検証手順によりデータを解析し、前述の計測項目を計算し、エッジ AI での対象物の検出について再現率 95%以上を達成できるかを検証する。

検証手順については表 5.1-6 に示す通りである。また、詳細検証手順を以下に示す。

#### 1. フレーム単位で検出

本実証実験で使用した AI アルゴリズムは、フレーム毎に処理して対象物の検出を行うものである。したがって、検出結果もフレーム毎に得られる。本実証実験の解析では、8FPS のデータを使用したことから、毎秒 8 個の検出結果が得られる。

#### 2. 正解のラベル付け

映像データを視認で確認し、対象物の有無を判断して正解ラベルを付与する。映像の中には、監視対象が途中でフレームイン・アウトしたりするものや、煙のように途中から発生し拡散して消滅するもの、全体に暗い映像など、監視対象の有無の判別を視認でも明確に行うのが難しいものも含まれる。そこで、ラベル付けはフレーム単位ではなく、秒単位でラベラの主観により付与している。

#### 3. 平均化および二値化(有無判別)

1 フレームごとにシフトする 1 秒ごとの塊のうち半数以上で検出された場合に「有」と判断する。本実証実験の解析では 8FPS のデータを使用したことから、8 フレームのうち 4 フレーム以上で検出された場合には、その時刻における検出結果が「有」となる。

#### 4. 検出・誤検出のカウント方法

対象物が出現してから消える間のどこかの時間タイミングにおいて検出された場合 (True Positive) は、その出現に対して検出に 1 回成功したと判断する。一方、検出をミスする (False Negative) 場合は、対象物が出現してから消えるまでの間、一度も「有」の結果が得られなかった場合に対応し、その時に 1 回の検出ミスをしたとカウントする。一方、「無」については、対象物が無いとラベル付けられている時間帯における検出結果に対し、「無」と判断された数だけ正しく「無」と判断したとカウントする (True Negative)。逆に、「有」と判断された数が誤検出 (False Positive) としてカウントされる。以上の処理の図解したものが図 5.1-2 である。

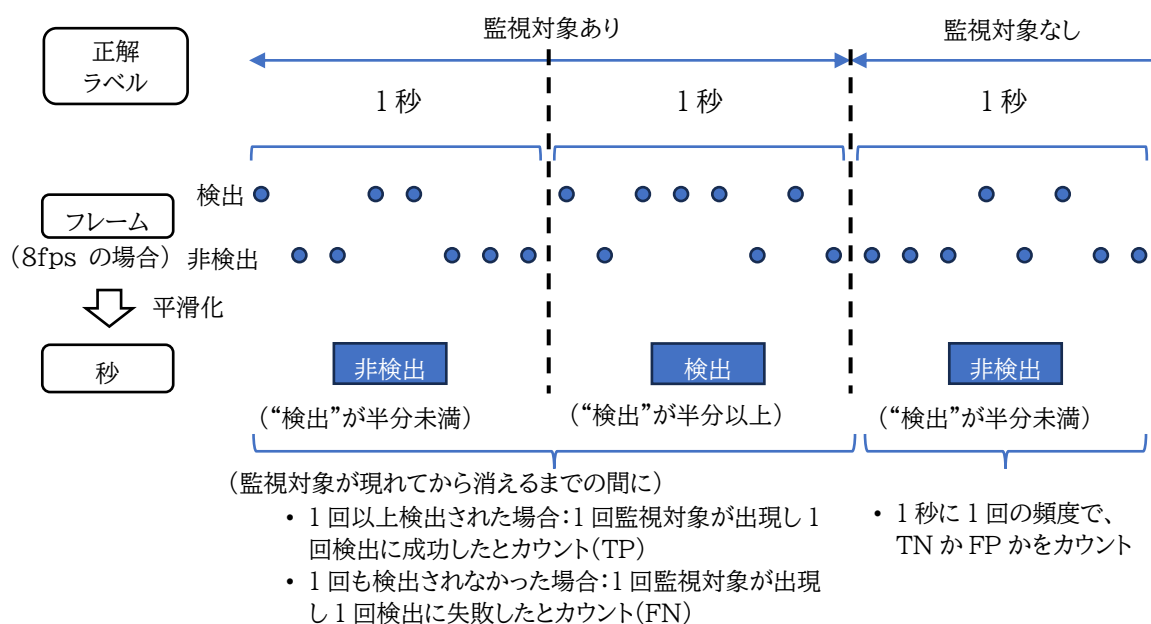


図 5.1-2 検出・誤検出のカウント方法

## 5. 混同行列の生成と評価指標の計算

上記のカウント結果を基に混同行列を生成する。正解としての「有」の数に対して、「無」の数が著しく多い状態になるため、評価指標の計算に際しては、それぞれの母数で除して正規化した上で計算を行った。計算したい評価指標は、表 5.1-7 の混同行列を基にして次の計算式で求めている。

表 5.1-7 混同行列

		検出結果	
		有	無
正解ラベル	有	TP (True Positive)	FN (False Negative)
	無	FP (False Positive)	TN (True Negative)

適合率： AI が“監視対象が居る”と判定したうち、対象が本当に居た割合（見落としは考慮しない）

$$\text{Precision} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FP})$$

再現率： 監視対象が居たときに、AI が“監視対象が居る”と判定した割合（誤検出は考慮しない）

$$\text{Recall} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FN})$$

適合率と再現率の調和平均： 適合率と再現率の両方を考慮して一つの評価指標で表したもの

$$\text{F-score} = 2 * (\text{Precision} * \text{Recall}) / (\text{Precision} + \text{Recall})$$

（検出漏れも誤検出もなく完全な検出が出来た場合にのみ 1 になる）

再現率を重視した適合率と再現率の調和平均： 再現率の重みを増やして平均を計算

$$\text{F2-score} = 5 * (\text{Precision} * \text{Recall}) / (4 * \text{Precision} + \text{Recall})$$

（監視対象が危険物の場合は、誤検出よりも検出漏れの発生が問題になるため）

## 2) クラウドにデータ送信し AI 解析した場合の対象物の検出性能

表 5.1-8 クラウドにデータ送信し AI 解析した場合の対象物の検出性能：郊外での獣監視

目的	クラウドにデータを送信して AI 解析した場合の対象物の検出性能を評価する。これにより、エッジ AI とクラウド AI の性能の差を明らかにする。併せて、エッジ・クラウド連携による効果を評価する。
計測項目	上記「昼間の時間帯におけるエッジ AI での対象物の検出性能」における「計測項目」に同じ。
測定手法	上記「昼間の時間帯におけるエッジ AI での検出性能」における「測定手法」に同じ。
検証手順	上記「昼間の時間帯におけるエッジ AI での対象物の検出性能」における「検証手順」に同じ。ただし、エッジ・クラウド連携による効果を評価する際には、検出・誤検出のカウント方法は、以下に従うものとする。 上記「昼間の時間帯におけるエッジ AI での対象物の検出性能」に記した手法と基本的に同じ手法で計算するが、「有」とラベル付けされた時間区間においては、エッジ AI 解析結果とクラウド AI 解析結果の両方が共に「有」の場合のみ「有」の判定とする。これは、エッジ AI において検出された場合にのみクラウドに映像を伝送するという本実証実験でのデータ送信方針に基づくものである。逆に、「無」とラベル付けされた時間区間においては、クラウド AI 単体において「有」と判別されるものであってもエッジ AI 単体で「無」の判定となるものについては、「無」として扱っている。これは、エッジ AI において「無」と判断された場合は、クラウドに映像データが送信されないため、クラウドでの検出は行われなかったことを考慮したものである。

## 3) クラウドへ全データを送信した場合と比較してデータ送信量の削減効果

表 5.1-9 クラウドへ全データを送信した場合と比較してデータ送信量の削減効果：郊外での獣監視

目的	エッジ AI で対象を検出した場合にのみクラウドへデータを送信する方式では、データ送信量の削減量は、監視対象の出現頻度と検出精度の両方に依存する。そこで、前項において測定した検出性能に基づきデータ送信量の削減量を監視対象の出現頻度の関数として表現する。
計測項目	データ削減量
測定手法	エッジ AI における誤検出割合を FP、監視対象物の出現割合を Appearance としたときに、削減割合 Reduction を $\text{Reduction} = (1 - \text{Appearance}) * (1 - \text{FP})$ により算出する。
検証手順	導出した関数に基づき、目標とするデータ送信量の削減量が達成される熊の出現頻度を導出し、それが想定アプリケーションにおいて妥当な数字であることを示す。

## 4) 形状に基づく検出が困難な夜間において目の光反射を用いた動きベクトルに基づく検出性能

表 5.1-10 形状に基づく検出が困難な夜間において目の光反射を用いた動きベクトルに基づく検出性能：郊外での獣監視

目的	中山間部のように、獣の目の光以外は何も見えないほどに明かりが乏しい環境での獣検出を想定したもの
計測項目	検出の有無
測定手法	東北大学青葉山キャンパス内の圍場は、夜間は目的に合致する環境が再現されることが期待される。そこで、同じ場所において昼間と同様の実験を行う。獣の目の光の反射は、昼間の実験において使用した熊の写真を印刷したクロス熊の目の部分に反射板を貼付したものを使用する。加えて、当該写真が横向きの写真で片目しか映っていないことから、反射板を 2 つ貼付して別の用紙も評価に使用する。
検証手順	熊を対象とした学習データがないことから、データがある野生の鹿と兎を対象として学習したモデルを使用し、目の光の反射光による情報だけで、実験環境において検出が可能であること実証する。

## 工事現場での火災監視

表 5.1-11 開発・評価項目：工事現場での火災監視

番号	開発・評価項目
1	昼間の時間帯におけるエッジ AI での対象物の検出性能
2	同じ条件でクラウドにデータ送信し AI 解析した場合の対象物の検出性能
3	クラウドへ全データを送信した場合と比較してデータ送信量の削減効果

### 1) 昼間の時間帯におけるエッジ AI での対象物の検出性能

表 5.1-12 昼間の時間帯におけるエッジ AI での対象物の検出性能：工事現場での火災監視

目的	エッジ AI での煙の検出性能を評価する。
計測項目	適合率、再現率、F 検出率、F2 検出率
測定手法	映像データを取得し、AI 解析によりフレーム単位の検出結果を取得。それを基に計測項目の値を得る。
検証手順	前述の計測項目を計算し、エッジ AI での対象物の検出について再現率 95%以上を達成できるかを検証する。

詳細な手順は、5.1.51)昼間の時間帯におけるエッジ AI での対象物の検出性能を参照。

### 2) クラウドにデータ送信し AI 解析した場合の対象物の検出性能

表 5.1-13 クラウドにデータ送信し AI 解析した場合の対象物の検出性能：工事現場での火災監視

目的	クラウドにデータを送信して AI 解析をした場合の煙の検出性能を評価する。
計測項目	適合率、再現率、F 検出率、F2 検出率
測定手法	映像データを取得し、AI 解析によりフレーム単位の検出結果を取得。それを基に計測項目の値を得る。
検証手順	前述の計測項目を計算し、エッジ AI での対象物の検出について再現率 95%以上を達成できるかを検証する。ただし、エッジ・クラウド連携による効果を評価する際には、検出・誤検出のカウント方法を一部変更する。

詳細な手順は、5.1.52)クラウドにデータ送信し AI 解析した場合の対象物の検出性能の項を参照。

### 3) クラウドへ全データ送信した場合と比較してデータ送信量の削減

表 5.1-14 クラウドへ全データ送信した場合と比較してデータ送信量の削減：工事現場での火災監視

目的	前項において測定した検出性能に基づきデータ送信量の削減量を煙の出現頻度の関数として表現する。
計測項目	データ削減量
測定手法	削減割合を関数として算出する。
検証手順	目標とするデータ送信量の削減量が達成される監視対象物の出現頻度を導出し、それが想定アプリケーションにおいて妥当な数字であることを示す。

詳細な手順は、「5.1.53)クラウドへ全データを送信した場合と比較してデータ送信量の削減効果の項を参照。

## 郊外での不審者監視

表 5.1-15 開発・評価項目：郊外での不審者監視

番号	開発・評価項目
1	昼間の時間帯におけるエッジ AI での対象物の検出性能
2	同じ条件でクラウドにデータ送信し AI 解析した場合の対象物の検出性能
3	クラウドへ全データを送信した場合と比較してデータ送信量の削減効果

### 1) 昼間の時間帯におけるエッジ AI での対象物の検出性能

表 5.1-16 昼間の時間帯におけるエッジ AI での対象物の検出性能: 郊外での不審者監視

目的	エッジ AI での不審者の検出性能を評価する。
計測項目	適合率、再現率、F 検出率、F2 検出率
測定手法	映像データを取得し、AI 解析によりフレーム単位の検出結果を取得。それを基に計測項目の値を得る。
検証手順	前述の計測項目を計算し、エッジ AI での対象物の検出について再現率 95%以上を達成できるかを検証する。

詳細な手順は、5.1.51) 昼間の時間帯におけるエッジ AI での対象物の検出性能に記した表欄外の“(詳細検証手順)”を参照。

### 2) クラウドにデータ送信し AI 解析した場合の対象物の検出性能

表 5.1-17 クラウドにデータ送信し AI 解析した場合の対象物の検出性能: 郊外での不審者監視

目的	クラウドにデータを送信して AI 解析をした場合の不審者の検出性能を評価する。
計測項目	適合率、再現率、F 検出率、F2 検出率
測定手法	映像データを取得し、AI 解析によりフレーム単位の検出結果を取得。それを基に計測項目の値を得る。
検証手順	前述の計測項目を計算し、エッジ AI での対象物の検出について再現率 95%以上を達成できるかを検証する。ただし、エッジ・クラウド連携による効果を評価する際には、検出・誤検出のカウント方法を一部変更する。

詳細な手順は、5.1.5 開発・評価項目 2)クラウドにデータ送信し AI 解析した場合の対象物の検出性能の項を参照。

### 3) クラウドへ全データ送信した場合と比較してデータ送信量の削減

表 5.1-18 クラウドへ全データ送信した場合と比較してデータ送信量の削減: 郊外での不審者監視

目的	前項において測定した検出性能に基づきデータ送信量の削減量を不審者の出現頻度の関数として表現する。
計測項目	データ削減量
測定手法	削減割合を関数として算出する。
検証手順	目標とするデータ送信量の削減量が達成される監視対象物の出現頻度を導出し、それが想定アプリケーションにおいて妥当な数字であることを示す。

詳細な手順は、「5.1.5 開発・評価項目 3)クラウドへ全データを送信した場合と比較してデータ送信量の削減効果の項を参照。

## 5.1.6 KPI/KGI

KGI・KPI の設定は、通信量削減と検出率の維持を両立させる目的に基づき、表 5.1-19 に示す通

り定量評価の KPI として検出率、通信量、クラウド計算時間の 3 指標を設定し、エッジ AI の有無による比較評価を実施した。定性評価の KPI として監視対象、配備環境、使用アルゴリズムの 3 因子を設定し、自動監視業務削減の効果について評価を実施した。

なお、過去の他の監視対象に対するエッジ・クラウド連携に関する研究から検出率 90%以上や全データをクラウドに送信した場合に対する必要な送信量が 2.3%といった実績を根拠に、実証実験でも達成が期待される目標として設定している。

表 5.1-19 定性評価/定量評価

定性評価/定量評価		目標値
定性評価	KGI	AIによる任意の自動監視業務においてエッジ AI の利用によりデータ通信量が削減される
	KPI	1 特定の対象物の自動監視業務における削減効果
		2 特定の環境での自動監視業務における削減効果
		3 特定のアルゴリズムによる AI を用いた自動監視業務において削減効果が得られる
定量評価	KGI	エッジ・クラウド連携による自動監視により検出精度を低下させずにデータ通信量を 90%以上削減する
	KPI	4 エッジ処理での F2(再現率重視)検出率 90%以上
		5 クラウド処理での F2(再現率重視)検出率 95%以上
		6 クラウドへのデータ送信量の削減量 80%以上
		7 クラウド側での処理時間の削減量 80%以上

- ① 特定の対象物の自動監視業務における削減効果  
データ通信量の削減に効果が得られる可能性について、監視対象ごとに行った定量評価結果をもとに考察し、定性的な傾向について評価する。
- ② 特定の環境での自動監視業務における削減効果  
データ通信量の削減に効果が得られる可能性について、実証実験場所ごとに行った定量評価結果をもとに考察し、適用環境に対する定性的な傾向を評価する。
- ③ 特定のアルゴリズムによる AI を用いた自動監視業務において削減効果が得られる  
監視対象により、用いる検出アルゴリズムの特徴量が異なる。物体の形状に着目するものとオプティカルフローによる動きベクトルに着目するものがある。データ通信量の削減に効果が得られる可能性について、これらの違いが定量評価結果に及ぼした効果について比較考察し、定性的に評価する。
- ④ エッジ処理での F2(再現率重視)検出率 90%以上  
エッジで検出されない場合は、クラウドへデータが送信されなくなることから、高い再現率が求められる。一方で、エッジの限られたリソースで達成できる能力の目安として 90%を設定する。
- ⑤ クラウド処理での F2(再現率重視)検出率 95%以上

監視タスクにおいて見落としが発生するのは望ましくない。一方で、人間が映像をモニターで監視していても100%の検出が可能ではないことを考慮し、高い値の目安として95%を設定する。

⑥ クラウドへのデータ送信量の削減量 80%以上

平均的なデータ送信量の削減量を導出するために、データ通信速度はどの地点においても一定と仮定する。これにより、送信する時間割合とデータ送信量が比例関係になり、クラウド AI によって監視対象が検出された時間分をデータ送信量に対応づける。これに加え、エッジ AI において誤検出した際にも、クラウドにデータ送信が行われるため、誤検出割合をデータ送信量に上乗せして削減量を求める。監視対象の出現割合は、大きくないことから十分な削減量が期待されるため KGI 達成に向けた目標のひとつとして削減量 80%を設定する。

⑦ クラウド側での処理時間の削減量 80%以上

データ送信量削減量が80%に対応するKPIのひとつとして、計算量の削減量も同量を設定する。

## 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

携帯電話の電波が通常と比較して弱い(弱電界)、または届きにくい(不感地域)における対策として、基地局の増設が挙げられる。しかし、基地局の増設にはコストが大きく、弱電界等のエリアがごくわずかな狭いエリアだった場合は費用対効果に見合わない。

そのような条件下における対応策として、本実証ではメタサーフェス反射板を用いて公衆5G(4.5GHz, 28GHz)のカバレッジエリアの拡張を行う。

また、柔軟な無線アクセスネットワークの提供手段として、60GHz 帯で通信を行う WiGig と反射板を組み合わせたシステムの検証を行い、動態デバイスの大容量通信に対して、環境および周波数ごとの傾向を捉え評価する。

### 5.2.1 実証内容の詳細

図 5.2-1 のように実証フィールドに各周波数に対応した反射板を設置。基地局からの波を反射板が特定の方向に反射させて、反射板が無い状態では弱電界または不感地域となっていたエリアをカバーすることを目的に検証を行う。

今回実証を行うフィールドとそれぞれの場所における対象となる周波数の対応は表 5.2-2 の通りとなる。なお、それぞれの周波数における使用する反射板の種類は表 5.2-3 を参照。

表 5.2-1 に示す手順で検証を行い、反射板設置前と設置後それぞれにて移動端末の通信速度などを取得することで設置による効果を評価する。

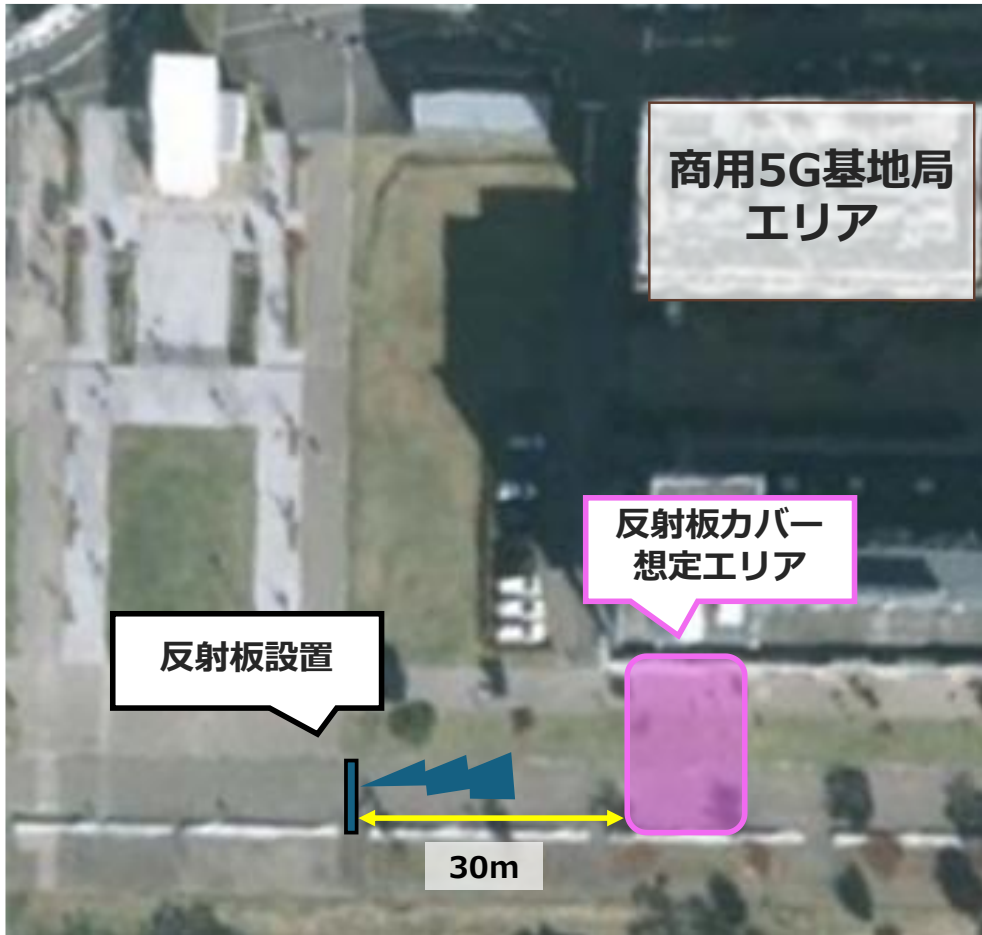


図 5.2-1 実証フィールドにおける基地局,反射板,想定カバーエリアの例

表 5.2-1 実施手順(各フィールド共通)

	実施内容
1	反射板設置前のフィールドにおいて、反射板がカバーすると想定されるエリアを測定
2	反射板設置後、1と同じエリアを測定
3	1,2の結果から2のデータが1よりも上回っているかを確認する
4	3で1よりも同等もしくは下回る場合は、反射板を物理的に調整して再度実施 反射板設置後が設置前より良い環境を探索する

表 5.2-2 各フィールドと対応する周波数一覧

実証フィールド	対応周波数
工事現場	4.5GHz
キャンパス	4.5GHz/28GHz

ラボ	60GHz
----	-------

## 5.2.2 利用技術・データ

静的反射板および動的反射板の 2 種類を使用する。どちらも設計された周波数および反射角度の範囲で動作するが、動的反射板は反射範囲の動的制御が可能であるため静的反射板と比較して反射板によるエリア拡張率が大きくなることが期待される。

上記のエリア拡張率の判定には、該当エリアに存在する評価用端末から通信速度(上りスループット)と受信電界強度の 2 種類のデータを取得する。

これらのデータを取得する時間帯は日中から夕刻までの時間帯で、取得する場所は仙台市新庁舎建替工事現場および東北大学青葉山キャンパスを対象とする。それぞれで各反射板を設置し、主に場所ごとおよび周波数ごとの特性評価を行う。

## 5.2.3 必要性・新規性

### 必要性

人手不足は各業界・業種に共通する喫緊の課題である。特に工事現場や山間部等での監視業務では、屋内外・時間帯・危険地形など多様な環境下で、不定形な煙や害獣等の監視対象を見分け、早期に発見・通報することが求められる一方、従事者数は継続的に減少傾向にあるため熟練人材への依存が大きく、限られた人員を有効活用し業務を遂行するために遠隔臨場の達成が求められている。達成にあたって重要な観点となる遠隔監視(映像・センサデータのリアルタイム伝送)や自動検知等により省力化・省人化を進めるには、安定した通信環境の確保が前提となる。しかし、地形・構造物等の遮蔽物のあるエリアでは公衆 5G の不感地域が発生しやすく、連絡手段や通信システムの導入・運用に支障をきたしている。

遮蔽物による公衆 5G の不感地域は、従来であれば基地局増設等での対応が中心となるが、用地確保、電源・回線の引込み、各種調整・工事が必要となり、費用・期間の面で負担が大きい。特に、監視対象が点在する山間部や、工期に応じて拠点が移動する現場では、基地局増設のみでの解消はコスト面・機動性の面で阻害要因となる。

そこで、通信環境整備にかかるコストを最小化しながら不感地域を補完的に解消する手法が求められている。基地局を増設せずに不感地域を解消でき、かつ中継機と比較した際により低コストかつ設置が容易である点で、メタサーフェス反射板は必要性を有している。

### 新規性

複雑な地形を移動可能なロボットと不定形状が検知可能な AI 検知システムを組合せ、多様な環境と様々な監視対象に対応できる機動的で柔軟性の高い遠隔検知システムの新たな構築が求められる。また、通信の不感地域解消には、低コストかつ AI 等を用いた効率的なエリア拡張を実現する技術が求め

られる。当該フィールドにおいて通信キャリアの無線エリアやビームフォーミング可能な高周波無線の大容量ネットワークに対してメタサーフェス反射板を用いることは、高周波～低周波まで利用可能で、エリア柔軟性の高いネットワークを実現し、無線エリア改善を目指すという観点で新規性を有している。

本実証においては、上記に必要性・新規性を踏まえて多様な地形環境において移動可能なロボットに、学習情報と異なる条件下においても高い検出精度を実現する AI 画像解析装置を搭載し、横展開における高い汎用性をもつ検知システムを検証するとともに、メタサーフェスによる通信キャリアネットワークのスポット改善とビームフォーミングによる柔軟性の高いネットワークを組み合わせた通信システムの検証を行う。

## 5.2.4 検証条件

動的反射板および静的反射板の周波数対応は表 5.2-3 の通りとなる。

表 5.2-3 各周波数帯と使用する反射板一覧

周波数帯	反射板の種別
4.5GHz	静的反射板
28GHz	動的反射板/静的反射板
60GHz	動的反射板

動的反射板および静的反射板問わずすべての実証パターンにおいて表 5.2-4 の通りとなる。

表 5.2-4 検証条件

設置場所(地理的条件)	メタサーフェス反射板の設置位置まで、公衆 5G および LTE, WiGig の電波が十分なレベルで到達すること。(具体的な数値は各反射板のスペックに関わるため、割愛する。)
設置場所(空間的条件)	反射板の物理的な角度や位置調整ができるスペースを確保すること
実証を行う際の時間帯	時間帯による反射板の性能変化はない
実証を行う際の天候	雨や雪等の天候不良は、反射板の性能劣化や故障を招くため実施しない

## 5.2.5 開発・評価項目

表 5.2-5 開発・評価項目

番号	開発・評価項目
1	工事現場にメタサーフェス反射板を設置して、不感エリア・弱電界エリアへの電波(公衆 5G)の反射によるエリア拡張効果の計測
2	キャンパスにメタサーフェス反射板を設置して、不感エリア・弱電界エリアへの電波(公衆 5G)の反射によるエリア拡張効果の計測
3	ラボにメタサーフェス反射板を設置して、不感エリア・弱電界エリアへの電波(WiGig)の反射によるエリア拡張効果の計測

### 1) キャンパスにメタサーフェス反射板を設置して、不感エリア・弱電界エリアへの電波(公衆 5G)の反射によるエリア拡張効果の計測

表 5.2-5 に示す通り、巡視ロボット等の移動ルート上でメタサーフェス反射板の設置により拡張されたエリアにおける通信速度(スループット)が、測定した範囲で所要の通信速度を上回る場所(以下、場所率)が 95%を達成するかを確認する。

なお、所要通信速度の具体的な値としては、巡視ロボットからの監視カメラ映像の解像度としてフル HD 映像を仮定し、同映像の所要伝送速度を踏まえて遠隔監視側との無線通信(無線区間において上り回線を使用)の目標通信速度(スループット)を 3Mbps 以上とする(以下、同様)。

また、メタサーフェス反射板の設置によるエリア拡張効果の評価指標(参考指標)として平均受信電界強度を対象エリアにおいて評価し、受信電力(RSRP:Reference Signal Received Power)換算で-100 dBm を超える値(対象エリアの周辺において事前測定した値を踏まえて設定)を達成しているかを確認する。

スループットの測定には、オープンソースソフトウェアでネットワークパフォーマンスの測定ツールである Iperf を使用する。

Iperf は、クライアントとサーバの機能があり、両端間のデータストリームを作成して一方向または双方向のスループットを測定できる。

本検証では、クライアント側をロボットの模擬とし、サーバ側を遠隔監視側の模擬として測定を実施する。なお、測定中はロボットを使用せず、移動端末から測定用サーバに対してデータ通信を行い、測定中は対象エリアを歩行してスループットを測定する。データストリームには UDP を使用。転送レートは、目標通信速度である 3Mbps を上回る 5Mbps として、目標を達成できるかを確認する。

## 2) 工事現場にメタサーフェス反射板を設置して、不感エリア・弱電界エリアへの電波(公衆 5G)の反射によるエリア拡張効果の計測

キャンパスと同様、通信速度の場所率が 95%を達成するかを確認する。

スループットの測定には、オープンソースソフトウェアでネットワークパフォーマンスの測定ツールである Iperf を使用する。

Iperf は、クライアントとサーバの機能があり、両端間のデータストリームを作成して一方向または双方向のスループットを測定できる。

本検証では、クライアント側をロボットの模擬とし、サーバ側を遠隔監視側の模擬として測定を実施する。なお、測定中はロボットを使用せず、移動端末から測定用サーバに対してデータ通信を行い、測定中は対象エリアを歩行してスループットを測定する。データストリームには UDP を使用。転送レートは、目標通信速度である 3Mbps を上回る 5Mbps として、目標を達成できるかを確認する。

## 3) ラボにメタサーフェス反射板を設置して、不感エリア・弱電界エリアへの電波(WiGig)の反射によるエリア拡張効果の測定

表 5.2-5 に示す通り、メタサーフェス反射板の設置により拡張されたエリアにおける通信速度が、所要の通信速度を上回るかを確認する。

なお、所要通信速度の具体的な値としては、巡視ロボットからの監視カメラ映像の解像度としてフル

HD 映像を仮定し、同映像の所要伝送速度を踏まえて遠隔監視側との無線通信(無線区間において上り回線を使用)の目標通信速度(スループット)を 3Mbps 以上とする(以下、同様)。

また、メタサーフェス反射板の設置によるエリア拡張効果の評価指標(参考指標)として平均受信電界強度を対象エリアにおいて評価し、受信電力(RSRP:Reference Signal Received Power)換算で-100 dBm を超える値(対象エリアの周辺において事前測定した値を踏まえて設定)を達成しているかを確認する。

## 5.2.6 KPI/KGI

表 5.2-6 定性評価/定量評価

定性評価/定量評価		目標値	
定性評価	KGI・KPI	1	巡視ロボットの移動中の監視カメラ映像に対するエッジ・クラウド AI による解析結果が、全移動範囲において所要の解析精度の評価
		2	巡視ロボットの移動中における通信速度(スループット)・伝送遅延時間の時間変動に対する瞬時変化特性、平均分布特性などの分析
定量評価	KGI・KPI	1	メタサーフェス反射板を適用した状態で、巡視ロボットに対する通信速度と受信電界強度を測定し、実証エリアごとの傾向の違いを評価
		2	既存のエリア拡張手段(中継機、プライベート 5G など)と比較し、コスト削減効果 50%以上のコスト削減

### 【定性評価】

表 5.2-6 に示す通り、メタサーフェス反射板の適用によって通信環境が改善された対象エリアにおいて、巡視ロボットの移動中の監視カメラ映像に対するエッジ・クラウド AI による解析結果が、全移動範囲において所要の解析精度が得られているか、また、遠隔監視の運用観点で期待するレベルにあるかなどを総合的に評価する。

なお、これらの総合評価に向けては、監視カメラ映像の解析精度と通信品質通信環境の相関を考察できるよう、巡視ロボットの移動中における通信速度(スループット)の時間変動に対する瞬時変化特性、平均分布特性などの分析を行う。また、伝送遅延時間について時間変動が認められる場合は、当該変動についても同様の分析を行う。

遠隔監視が運用観点で代替となりうるレベルにあるかどうかについては、監視カメラ及び AI から得られた映像と実際の人による巡視作業を比較し、同様の作業が可能であるかを分析する。

### 【定量評価】

#### (1) 実証エリア(検証パターン)の場所率に関する達成状況 95%以上

実証エリア(検証パターン)ごとの場所率に関する達成条件(95%)を満足しているか確認する。

上記で述べた場所率は、5.2.5 と同様に、巡視ロボット等の移動ルート上で、メタサーフェス反射板に

より拡張されたエリアにおける目標通信速度(3Mbps)を達成している場所の割合を指している。

達成条件が未達となる場合に、これらの測定・評価との関係を踏まえてメタサーフェス反射板の設置条件や動的制御等を調整することで、場所率の改善が可能かを確認した上で、全ての検証パターンに対する総合評価を整理する。なお、場所率の改善状況の確認においては、評価エリアにおける地理的図面上に受信電界強度の測定結果を可視化表示し、面的傾向も確認する。

## **(2) 既存のエリア拡張手段(中継機、プライベート5Gなど)と比較し、コスト削減効果50%以上のコスト削減**

対象エリア(反射板自体の設置場所周辺、反射板によりエリア拡張を行う場所周辺)における基地局からの位置関係(離隔距離、方位角、高さ差分)、基地局アンテナの指向性、メタサーフェス反射板の反射指向性等を踏まえた上で、メタサーフェス反射板設置によりエリアカバレッジがどのように拡大したかを考察するとともに、カバレッジ拡大に要するコスト面についての考察を併せて行う。なお、コストに関しては、導入環境での条件を仮定した上で、既存のエリア拡張手段(中継機、プライベート5Gなど)と比較し、50%以上のコスト削減(一般的な設備導入時の目標値として考えられる値を設定)が見込めるかを評価する。

### 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

当該ユースケースは実施しなかった。

#### 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

拡張性に関する検証手順は図 5.5-1 に示す通り実施した。

#### 拡張性に関する検証手順

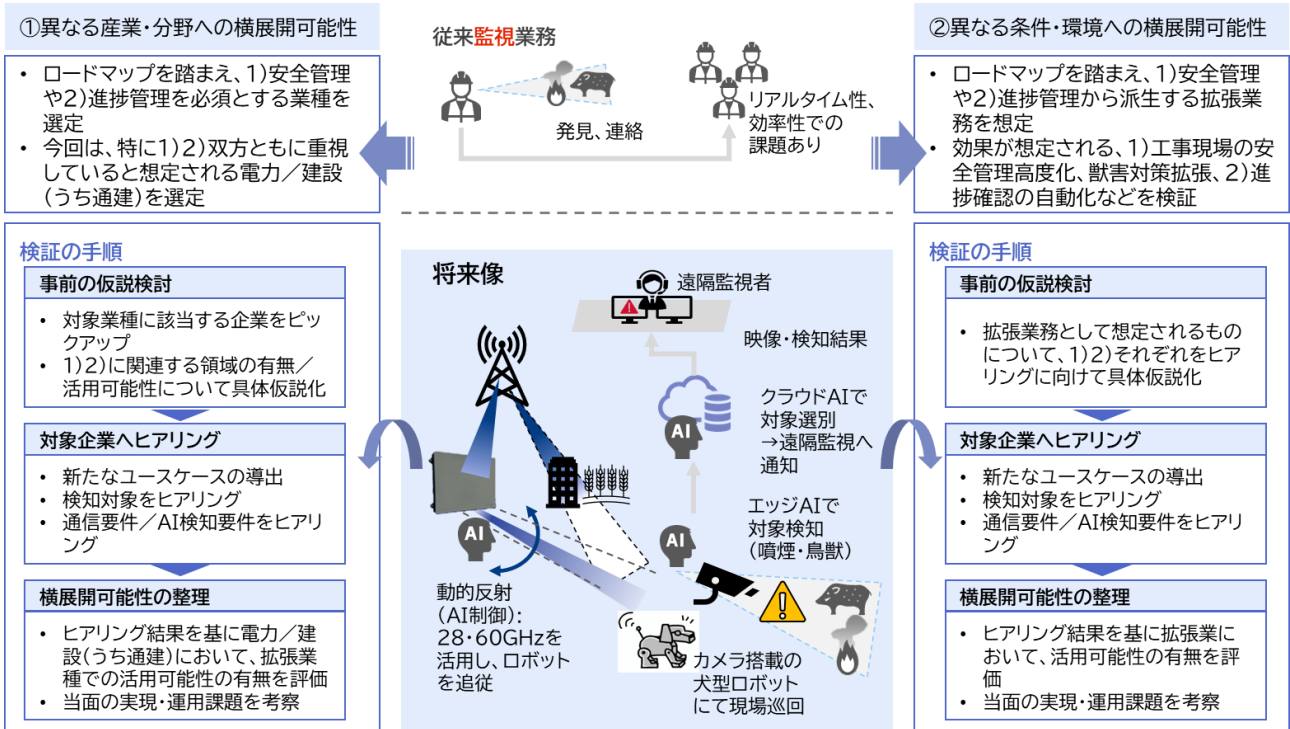


図 5.5-1 拡張性に関する検証手順

図 5.5-1 に示す通り、具体的には、①異なる産業・分野への横展開可能性、②異なる条件・環境への横展開可能性の2つの視点に係る詳細検討を実施し、拡張性に関する検証を行った。

上記を検証するにあたり、検証対象とした企業や団体、ヒアリング項目等は表 5.5-1 に示す通りである。

表 5.5-1 検証対象とした企業や団体、ヒアリング項目

条件項目	① 異なる産業・分野への横展開可能性	② 異なる条件・環境への横展開可能性
検証の観点	今回の実証対象の業種以外で同内容を横展開できる余地があるかを検証	今回の実証対象となっている団体において、拡張的に異なる条件は環境へ横展開できる余地があるかを検証
検証対象とした企業/団体	・電力業 ・通信建設業	・東北大学 ・株式会社大林組

ヒアリング項目	①事業概要及び各部の概況等について ②課題確認 1)現場監視の現行課題について 2)電波状況改善に係る課題感の有無 3)監視負荷に係る課題感の有無 ③上記課題への対応可能性 1)AI 検知の活用可能性・実現性 2)通信改善の可能性・実現性 ④今後の適用可能性について 1)今回の実証内容の活用性 2)上記実現性に求める AI 検知、通信改善以外の要件、物事、ニーズ	①実証を踏まえた所感 1)安全管理/獣害対策の所感 2)進捗管理についての所感 3)安全管理/獣害対策の転用可能性 4)進捗管理の転用可能性 ②異なる環境で実行する要件仮説 1)AI 検知の活用可能性 2)通信改善の可能性 ③今後の適用可能性について 1)今回の実証内容の活用性 2)追加で必要な技術
---------	--	--

### 5.5.2 前提条件

本実証の拡張性を検討するうえで、前提条件となる項目及び内容は表 5.5-2 に示す通りである。

表 5.5-2 前提条件

条件項目	詳細内容
地理的/空間的条件	(1) 反射板による中継が成立するための視通性 <ul style="list-style-type: none"> <li>建物密集地・森林・山地の形状により、反射面の確保が困難なケースでは通信性能が低下する。</li> <li>このため反射板利用においては、視通線を確保するために、設置高さ・角度調整の自由度が確保されていることが前提。</li> </ul> (2) 通信インフラの最低限の到達性 <ul style="list-style-type: none"> <li>弱電地域であっても、反射板を用いた場合に必要な最低電界強度(受信感度)が確保できる地形であること。</li> <li>また、反射面で電界強度が確保できたとしても、反射・回折させた電波の到達が見込めない距離や地形、障害物が存在する場所では本方式の適用は難しい。</li> </ul> (3) 機器設置に必要な空間確保 <ul style="list-style-type: none"> <li>カメラ・エッジ AI 装置・反射板・電源設備(ソーラー等)の物理的な設置スペースが確保できること。</li> <li>保守アクセスが可能な場所であり、定期点検を行える動線が確保されていること。</li> </ul> (4) 電源確保 <ul style="list-style-type: none"> <li>実使用上、商用電源または安定した独立電源(ソーラー+蓄電)が確保できる地理条件が必要。</li> <li>電源の不安定さは常時稼働およびクラウド解析連携の不達リスクを増大させる。</li> </ul>
時間的条件	(1) 朝の時間帯に伴う前提条件 <ul style="list-style-type: none"> <li>早朝の霜・結露が発生する環境では、カメラ・反射板の性能が大きく低下するため、結露対策(ヒーター・撥水コート)**が整備されていることが前提。</li> <li>昼間の強日射や急激な温度上昇に耐えるため、装置内部が高温にならない放熱構造が必須。</li> </ul> (2) 夜の時間帯に伴う前提条件 <ul style="list-style-type: none"> <li>夜間は光量不足により、日中と同じ撮像モードでは、暗所ノイズにより推論精度が下がるため、赤外線照明または夜間専用の撮像モードの導入が前提。</li> <li>夜間は湿度上昇・結露が増えるため、反射板・レンズ・筐体に対して防湿構造や防水規格を満たしていることが必須条件。</li> </ul>

天候条件	<p>(1) 雨・雪・霧による品質低下</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>豪雨や吹雪ではカメラ映像内に映る映像体が視認しにくくなることから、エッジ AI の精度が低下するため、対策が前提。</li> <li>霧の濃い地域では赤外線透過性も低下するため、 Fog フィルターや複数波長対応、または複数台構成が必要。</li> </ul> <p>(2) 風・台風による装置の安定性</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>強風で反射板の角度が微妙に変わると通信品質が急低下するため、固定構造の強化、耐風設計が前提。</li> <li>風振れ・揺れによるカメラの画像ブレが推論精度を低下させるため、防振機構や固定強度の確保が必要。</li> </ul> <p>(3) 降雪地域に固有の制約</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>積雪により反射板やカメラが覆われるため、雪落とし構造、角度設定、融雪ヒーターが前提条件。</li> </ul>
------	---

### 5.5.3 評価項目

本実証の拡張性を検討するうえでの評価項目は表 5.5-3 に示す通りである。

表 5.5-3 評価項目

番号	評価項目
1	<p>① 異なる産業・分野への横展開可能性に係る評価</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>建設業や農業と異なる、電力/通建業へのヒアリング結果を基に異なる産業や分野での活用可能性の有無を評価</li> <li>当面の実現・運用課題を考察</li> </ul>
2	<p>② 異なる条件・環境への横展開可能性に係る評価</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>工事現場や農場のフィールド提供元へのヒアリング結果を基に異なる条件や環境での活用可能性の有無を評価</li> <li>当面の実現・運用課題を考察</li> </ul>

#### 1. 異なる産業・分野への横展開可能性に係る評価

はじめに、①異なる産業・分野への横展開可能性に係る評価について、評価の目的、詳細な評価項目、評価/検証手法は表 5.5-4 に示す通りである。

表 5.5-4 評価の目的、詳細な評価項目、評価/検証手法

	詳細内容
評価の目的	<ul style="list-style-type: none"> <li>本実証においては、工事現場での危険エリアへの侵入、一次産業での獣害、両社に共通する防犯、防災、広大な巡視範囲、通信環境の不足などへ対応することを想定している</li> <li>こうした課題のキーエッセンスを踏まえ、特に同様の共通課題があると考えられるインフラ領域で電力、また実証メンバでもあるゼネコンではない建設(うち通建)業をターゲットとして、横展開可能な業種有無の存在を確認する</li> </ul>
詳細な評価項目	<p>上記の目的を達成すべく、以下の項目で横展開性＝拡張性を評価する。</p> <p>&lt;評価 1:類似ユースケースの有無&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>本実証における安全管理や工事進捗管理に類するプロセスの有無を確認</li> </ul> <p>&lt;評価 2:本実証での取組が上記ケースでの要件を満たすかどうか&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>AI 検知に必要な要件、通信要件の 2 点を中心に、技術的に適用可能かどうかを評価</li> </ul>
評価/検証手法	<p>具体的な評価プロセス、手法は以下の通り。</p> <p>&lt;事前の仮説検討&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>対象業種に該当する企業をピックアップ</li> <li>関連する領域の有無/活用可能性について具体仮説化</li> </ul>

	<対象企業へヒアリング> ●新たなユースケースの導出 ●検知対象をヒアリング ●通信要件/AI 検知要件をヒアリング <横展開可能性の整理> ●ヒアリング結果を基に電力/建設(うち通建)において、上記評価項目 1・2 を実施し、拡張業種での活用可能性の有無を評価 ●当面の実現・運用課題を考察
--	--

## 2. 異なる条件・環境への横展開可能性に係る評価

次いで、②異なる条件・環境への横展開可能性に係る評価について、評価の目的、詳細な評価項目、評価/検証手法は表 5.5-5 に示す通りである。

表 5.5-5 評価の目的、詳細な評価項目、評価/検証手法

	詳細内容
評価の目的	●本実証においては、工事現場での危険エリアへの侵入、一次産業での獣害、両社に共通する防犯、防災、広大な巡視範囲、通信環境の不足などへ対応することを想定している。今回はコンソーシアムメンバーである大林組、フィールド提供している東北大学の状況を鑑み、安全管理や進捗管理といった日常業務について、より発展した高度な業務への横展開が可能かどうかを評価し、横展開性を整理することが目的である
詳細な評価項目	上記の目的を達成すべく、以下の項目で横展開性＝拡張性を評価する。 <評価 1:類似ユースケースの有無> ●本実証における安全管理や工事進捗管理に関し、拡張的に自動化などが出来得る範囲でユースケースの有無を確認 <評価 2:本実証での取組が上記ケースでの要件を満たすかどうか> ●AI 検知に必要な要件、通信要件の 2 点を中心に、技術的に適用可能かどうかを評価
評価/検証手法	具体的な評価プロセス、手法は以下の通り。 <事前の仮説検討> ●拡張業務として想定されるものについて、1)2)それぞれをヒアリングに向けて具体仮説化 <対象企業へヒアリング> ●新たなユースケースの導出 ●検知対象をヒアリング ●通信要件/AI 検知要件をヒアリング <横展開可能性の整理> ●ヒアリング結果を基に拡張業務において、活用可能性の有無を評価 ●当面の実現・運用課題を考察

### 5.5.4 KPI/KGI

本実証において、設定した目標値は表 5.5-6 に示す通りである。

表 5.5-6 定性評価/定量評価

定性評価/定量評価	番号	目標値
定性評価	1	①本実証の知見・技術の適用範囲となりうるユースケースを導出すること

	2	②本実証と異なる条件・環境でのユースケースを導出すること
定量評価	3	①異なる産業・分野への横展開検証において、ヒアリングを実施する：最低 2 社以上
	4	②異なる条件・環境への横展開検証において、ヒアリングを実施する：最低 2 社以上

### 定性評価の設定理由

本定性評価は、①②それぞれユースケースの導出を設定している。

この理由は、少なからず異なる産業や条件においても、横展開の妥当性を加味するうえで最も必要となる観点として、一定のケースが存在しうることが根拠になると考えられるためである。

### 定量評価の設定理由

本定量評価は、上記同様①②ともにヒアリングによって実施する想定である。

この指標設定の理由は、ターゲットとなりうる企業や団体へ個別具体的に落とし込んで横展開性を評価するために必要であり、該当する手法としてアンケート調査等よりもヒアリングを実施する方が、効果が高いと見越したためである。

## 5.6 効果検証

### 5.6.1 実証内容の詳細

図 5.6-1 に示す通り、効果検証については以下の項目の検証を行う。

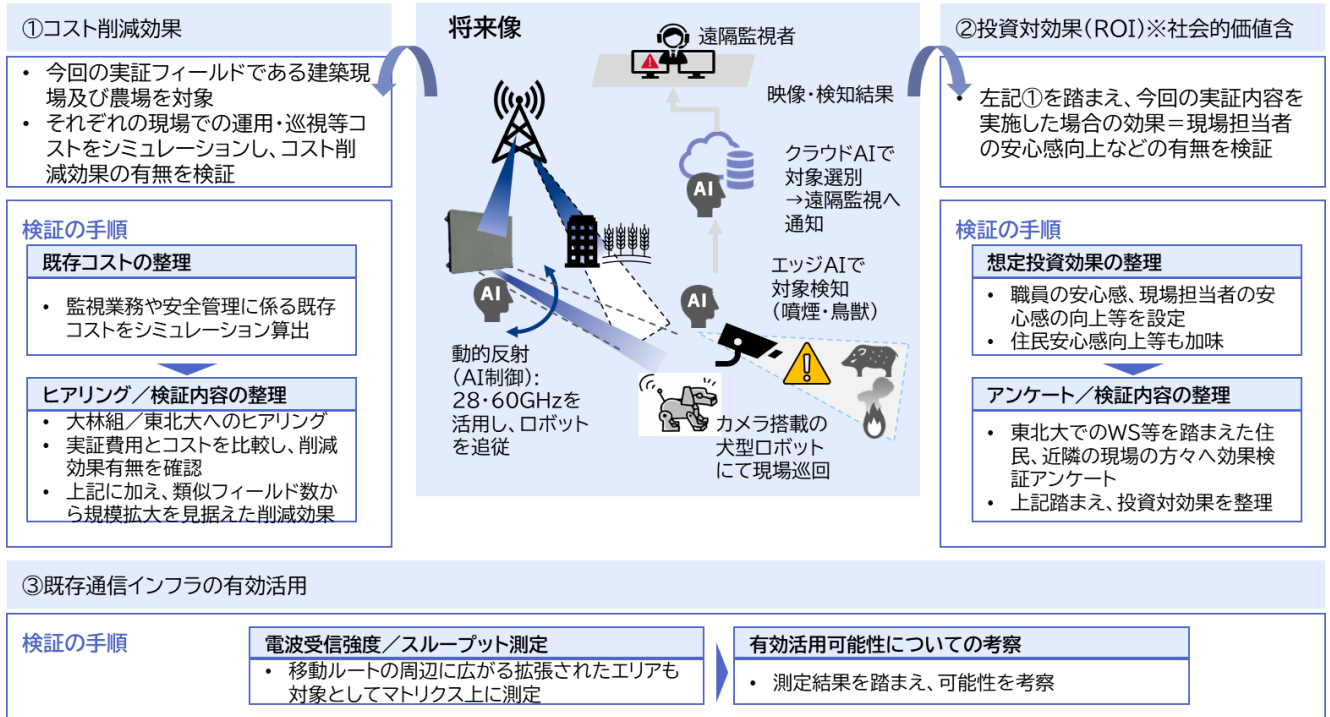


図 5.6-1 効果検証に関する検証手順

### 5.6.2 前提条件

前項の前提条件と同内容のため割愛。

### 5.6.3 評価項目

表 5.6-1 評価項目

番号	評価項目
1	コスト削減効果 ●実証費用とコスト比較し、削減効果の有無を確認
2	投資対効果(ROI) ●各実証フィールドにおいてどのコストがどの程度減できるかの検証
3	既存通信インフラの有効活用 ●拡張されたエリアにおいても電波受信強度があるかどうかを確認
4	実証分野における社会的価値 ●現場担当者の安心感、地域住民の安心感の向上が見られるかどうか確認

## 1) コスト削減効果

表 5.6-1 に示す通り、本実証においては、建設現場における監視業務と、農場における害獣対策に対し、AI を用いた省人化や省設備化の効果を検証する。定量的な評価や検証について、具体的には下記の手法にて評価を行う。

定性的な観点では、実証機関でもある大林組、東北大学農学部へのヒアリング等により評価を行う。

### ○建築現場

・安全管理(資機材管理):現場内巡視の運用コスト(4 名×0.25 日=1 人日程度)と、ロボット×AI×通信設備のコスト比較

無人で運用可能とした場合、100 現場でコストに換算すると、1.2 億円/月の削減効果を得られると想定できる。

・工程進捗管理:管理業務の運用コスト(2 名×0.25 日=0.5 人日程度)とロボット×AI×通信設備のコスト比較

無人で運用可能とした場合、100 現場でコストに換算すると、0.6 億円/月の削減効果を得られると想定できる。

### ○農場

設備監視・巡視業務に係るコスト(現状:200 万円/月程度)、農地の鳥獣対策として行われる電気柵の維持コスト(電気代及び下草処理に係る人件費)と、ロボット×AI×通信設備のコストを比較

併せて、AI 検知システムと通信環境の整備にかかる費用については、AI 検知システムを設置する場所をクラウドまたはエッジの各パターンに分け、AI 検知システム構築コストと、要求する通信性能を担保できる通信設備コストに対して、コスト削減をどこまで実現できるか実フィールドの状況に基づき検証を行う。

またクラウド実装については横展開によりコスト削減効果は向上していくと考えられるため、スケール規模に応じてどの程度効果が変わるかの検証も行う。

## 2) 投資対効果(ROI)

表 5.6-1 に示す通り、①コスト削減効果に記載のとおり、各実証フィールドにおいてどのコストがどの程度減できるか検証を行う。

また、投資に対するコスト削減以外の効果については以下を検証する。

### 【建設現場】

・ロボットおよび AI 検知を用いることによる危険地帯への侵入回避を要因とした職員の安心感等による職場環境および雇用流動等の向上について、実証機関でもある大林組へのヒアリング等を通じた検証を行う。

### 【農場】

・現状有効な対策である電気柵における漏電や誤作動リスクの回避による職員や周辺住民への安全性、安心感の向上について、また導入費用や導入による効果面等の比較について、協力機関でもある東北大学農学部へのヒアリング等を通じた検証を行う。

#### 【フィールド共通】

・メタサーフェス反射板を用いた既存キャリア網による通信と WiGig 通信による大容量の効率利用にかかる投資に対し、クラウド AI 検知システムの可用性向上を要因とした横展開性の向上について検証を行う。

・メタサーフェス反射板を用いた通信環境改善を図った場合と図らない場合それぞれによる横展開可能なフィールド数を推計し、投資対効果が得られる横展開数および 1 フィールドあたりのコストについて算出および比較を行う。

### 3) 既存通信インフラの有効活用

表 5.6-1 に示す通り、上記 5.2 に記載した技術検証では、巡視ロボット等の移動ルートを対象として電波受信強度、通信速度(スループット)をメタサーフェス反射板の設置前後で測定し、通信環境の拡充効果を検証しているが、既存インフラ(公衆移動通信ネットワーク)のサービスエリアをさらに有効活用するためには、上記移動ルート等に限定せず、より広い地域を対象としてメタサーフェス反射板の適用効果を検証することが重要である。

そこで、電波受信強度、スループットを測定は、移動ルートの周辺に広がる拡張されたエリアも対象として、マトリクス状に(面的に)測定を行うことで、既存サービスエリアの面積(平方キロメートル)を相対的に何%拡張可能となるのか評価する。その際、例えば、メタサーフェス反射板のサイズを変えた場合、すなわち、メタサーフェス反射板の導入に必要なコストが増減する場合の測定・評価も行うことで、本技術の有用性を多面的に検証し、地域への導入検討において参照可能とすることも重要である。

### 4) 実証分野における社会的価値

表 5.6-1 に示す通り、1.1 に記載した総合的な課題とフィールドの課題を解決することで、監視業務に従事する警備員の負担軽減、監視精度の向上による安心感の獲得といった社会的価値が得られる。

また、AI の画像解析処理をエッジ側とクラウド側で負荷分散することで、優れたネットワーク環境に依存しない AI 実装環境の構築を実現できる。

○課題解決効果を示す定量的な指標としては、以下を用いる。

・工事現場での不審者監視や農場での鳥獣監視・煙監視を自動化することによる監視対象の発見率や、監視対象発見時の速やかな緊急連絡対応、監視精度の向上による監視作業を導入することによる、業務に割く稼働人数の変化を数値化(同一環境での人員数の変化を記録)

・監視作業の自動化による安心感の変化を数値化。

具体的な数値化の方法としては、各実証フィールドの業務従事者に対し「安心性・安心感は、何%程度の改善効果がありましたか？」という項目でのアンケートを実施(類似業務「総務省 地域デジタル基盤活用推進事業 林業不感地帯解消実証」で同様の項目でのアンケート実績あり)

○通信部分についての地域間格差の縮小について評価する指標としては、以下を用いる。

- ・通信が不十分な地域を WiGig やメタサーフェス反射板を使用して通信を補強したエリアと、通常のセルラー通信エリアのスループットの比較
- ・同環境下でのエリアカバー率の比較
- ・同環境下での画像解析 AI の検知率や解析時間、映像確認用 PC へのデータ受信時間における閾値の比較

## 5.6.4 KPI/KGI

表 5.6-2 定性評価/定量評価

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定性評価	1	AI を導入することによる安心感の向上
定量評価	2	工事現場 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 安全管理(資機材管理):現場内巡視の運用コスト(4名×0.25日=1人日程度)と、ロボット×AI×通信設備のコスト比較</li> <li>• 無人で運用可能とした場合、100現場でコストに換算すると、1.2億円/月の削減効果を得られると想定できる。</li> <li>• 工程進捗管理:管理業務の運用コスト(2名×0.25日=0.5人日程度)とロボット×AI×通信設備のコスト比較</li> <li>• 無人で運用可能とした場合、100現場でコストに換算すると、0.6億円/月の削減効果を得られると想定できる。</li> </ul>
	3	農場 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 設備監視・巡視業務に係るコスト(現状:200万円/月程度)、農地の鳥獣対策として行われる電気柵の維持コスト(電気代及び下草処理に係る人件費)と、ロボット×AI×通信設備のコストを比較本実証と異なる条件・環境でのユースケースを導出すること</li> </ul>

### AI を導入することによる安心感の向上の設定理由

建設・工事現場、農場の状況について①、②に記載の通り省人化、省力化が求められているが、ロボット及び AI 検知システムによる見回りにより危険の回避が図れることによる安全性、安心感について職員の視点から評価を行う。

本実証では、表 5.6-2 に示す通り、評価に際し、大林組職員、東北大学農学部関係者へのヒアリングやアンケートを通し、評価を実施することが確度高く実施できると考える。

### 工事現場に関する定量評価の設定理由

働き方改革により、2024 年度から建設業の残業時間は上限規制が設けられた。そのため、建設現

場の現場監督業務については省力化が求められている。その中で、単純作業・繰り返し作業や長時間拘束される作業は、最新の DX・AI 技術等へ置き換えることで省力化を推進したい環境にある。

本事業では、安全管理業務と工程進捗管理業務の省力化をターゲットとし、表 5.6-2 に示す通り現状の最新技術で達成の見込みのある数値目標を定めた。

### **農場に関する定量評価の設定理由**

労働力不足を背景に、農業などの労働集約型の産業では、業務の省力化、省人化が望まれており、業務の効率化が急務である。近年の温暖化に伴い、獣害による作物への食害が深刻化し、経済的損失が発生している。防護柵や電気柵を設定し対応策を実施しているが、作業性に影響が出る。

本実証では、表 5.6-2 に示す通り、通信環境を活用しリアルタイム性を確保した、AI 見回り検知システムにより、省力化、省人化をコスト面で比較を行う。

## 6. 実証の結果・考察

### 6.1 全体スケジュール

本実証の全体スケジュールを図 6.1-1 に示す。

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	中間報告	最終報告
① エッジAIによる通信量の低減	実証準備 (事前計測、物品調達等)	機器調達					結合試験						
		環境構築						プログラム動作試験		安定性試験			
	実証					エッジAI事前検証		クラウドAI事前検証		現地実証(データ取得)			
実証評価	シナリオ検討			検証項目検討					報告書作成		視察会		
② 不感地域における通信の確立	実証準備 (事前計測、物品調達等)	動的反射板調達・静的反射板開発											
		環境構築・実験局免許申請								設置・環境測定			
	実証					60GHz事前検証		28GHz事前検証		4.5GHz事前検証		現地実証(データ取得)	
実証評価	シナリオ検討			検証項目検討					報告書作成		視察会		

図 6.1-1 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①における実証スケジュールを図 6.2-1 に示す。

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エッジ AIによる通信量の低減	実証準備		契約手続き			調達公募	製造		実験審査	試験			
	実証			シナリオ検討								① 工事現場	② 郊外の甫場
	実証評価										解析	報告書	

図 6.2-1 ユースケース①における実証スケジュール

### 6.2.2 KPI/KGI との比較結果

#### 郊外での獣監視

表 6.2-1 定性評価/定量評価

定性評価/定量評価		目標値	
定量評価	KGI	エッジ・クラウド連携による自動監視により検出精度を低下させずにデータ通信量を 90%以上削減する	
	KPI	1	エッジ処理での F2(再現率重視)検出率 90%以上
		2	クラウド処理での F2(再現率重視)検出率 95%以上
		3	クラウドへのデータ送信量の削減量 80%以上
		4	クラウド側での処理時間の削減量 80%以上
定性評価	KGI	AIによる任意の自動監視業務においてエッジ AI の利用によりデータ通信量が削減される	
	KPI	5	特定の対象物の自動監視業務における削減効果
		6	特定の環境での自動監視業務における削減効果

		7	特定のアルゴリズムによる AI を用いた自動監視業務において削減効果が得られる
--	--	---	---

### 1) エッジ処理での F2(再現率重視)検出率 90%以上

表 6.2-5 からエッジ処理での F2 検出率割合は 0.65 であり、KPI として設定した 90%以上をこの条件においては達成されなかった。実物ではなくクロスに印刷した写真を使用していたため、形状的なバリエーションが乏しく、これが低い検出率の結果になった要因のひとつとして考えられる。また、監視対象の熊の色が周囲の環境の保護色になっており、特にカメラから距離が遠い条件で熊がフレームインし、カメラとの距離が近くならないままフレームアウトする条件においては、検出に失敗する例が多く見られた。

### 2) クラウド処理での F2(再現率重視)検出率 95%以上

表 6.2-5 からクラウド処理での F2 検出率割合は 0.74 であり、KPI として設定した 95%以上をこの条件では達成されなかった。エッジよりも 0.09(9ポイント)高い性能を示してはいるものの、KPIとして設定した値に到達しなかった。原因としては、エッジ処理に関する前項に記したのと同じ理由が考えられる。

### 3) クラウドへのデータ送信量の削減量 80%以上

図 6.2-3 から、監視対象物(熊)の時間出現割合(横軸)が約 17%以下になれば、80%以上のデータ削減(縦軸)が見込めることになる。つまり、24 時間監視しているうち熊が出現するのが 245 分以下であるならば、常にクラウドへデータを送信した場合と比較してエッジ・クラウド連携を行うことで、80%以上のデータ送信量の削減が達成されることを意味する。野生の熊の監視において、1日に 245 分以上も映像に映っている事態は考え難いため、本 KPI は達成されたと考えられる。

### 4) クラウド側での処理時間の削減量 80%以上

クラウドでの AI 解析処理に係る計算時間は、送信されたデータの時間長に比例する。24 時間のうち 1 時間、熊が出現していたと仮定すると、データの送信量は 5.1.5 に記した削減量の計算方法に基づき 92%削減される。その結果、クラウドにおける処理時間も 92%削減されるため、本 KPI は達成されたと考えられる。

### 5) 特定の対象物の自動監視業務における削減効果

定量評価の結果から、熊を対象物とする自動監視業務において、エッジ AI の導入によりクラウドへのデータ送信量の削減効果が見込まれることが判明した。ただし、エッジ AI における F2-score は 0.65 であり検出漏れが多い。クラウド AI における F2-score も必ずしも高くなく、この条件においてはクラウドへデータを送信する利点は大きくない。この場合、エッジ AI に基づく送信制御を行っても検出精度への影響は少ないことから、送信制御を行うことで一定のデータ削減効果は見込めると考えられる。

## 6) 特定の環境での自動監視業務における削減効果

定量評価の結果から、圃場での自動監視業務において、エッジ AI の導入によりクラウドへのデータ送信量の削減効果が見込まれることが判明した。ただし、エッジ AI における F2-score は 0.65 であり検出漏れが多い。クラウド AI における F2-score も必ずしも高くなく、この条件においてはクラウドへデータを送信する利点は大きくない。この場合、エッジ AI に基づく送信制御を行っても検出精度への影響は少ないことから、送信制御を行うことで一定のデータ削減効果は見込めると考えられる。

## 7) 特定のアルゴリズムによる AI を用いた自動監視業務において削減効果が得られる

定量評価の結果から、既存モデルを用いた YOLO アルゴリズムの利用において、エッジ AI の導入によりクラウドへのデータ送信量の削減効果が見込まれることが判明した。ただし、エッジ AI における F2-score は 0.65 であり検出漏れが多い。クラウド AI における F2-score も必ずしも高くなく、この条件においてはクラウドへデータを送信する利点は大きくない。この場合、エッジ AI に基づく送信制御を行っても検出精度への影響は少ないことから、送信制御を行うことで一定のデータ削減効果は見込めると考えられる。

## 工事現場での火災監視

表 6.2-2 定性評価/定量評価

定性評価/定量評価		目標値	
定量評価	KGI	エッジ・クラウド連携による自動監視により検出精度を低下させずにデータ通信量を 90% 以上削減する	
	KPI	1	エッジ処理での F2(再現率重視)検出率 90% 以上
		2	クラウド処理での F2(再現率重視)検出率 95% 以上
		3	クラウドへのデータ送信量の削減量 80% 以上
		4	クラウド側での処理時間の削減量 80% 以上
定性評価	KGI	AI による任意の自動監視業務においてエッジ AI の利用によりデータ通信量が削減される	
	KPI	5	特定の対象物の自動監視業務における削減効果
		6	特定の環境での自動監視業務における削減効果
		7	特定のアルゴリズムによる AI を用いた自動監視業務において削減効果が得られる

### 1) エッジ処理での F2(再現率重視)検出率 90%以上

表 6.2-7 からエッジ処理での F2 検出率割合は 0.97 であり、KPI として設定した 90%以上を達成している。現場で取得した映像データを用いてモデルのファインチューニングを実施していることが貢献していると考えられる。

### 2) クラウド処理での F2(再現率重視)検出率 95%以上

表 6.2-7 からクラウド処理での F2 検出率割合は 0.99 であり、KPI として設定した 95%以上を達成している。

### 3) クラウドへのデータ送信量の削減量 80%以上

図 6.2-6 から、監視対象物(煙)の時間出現割合(横軸)が約 9%以下になれば、80%以上のデータ削減(縦軸)が見込めることになる。つまり、24 時間監視しているうち煙が発生するのが 129 分以下であるならば、常にクラウドへデータを送信した場合と比較してエッジ・クラウド連携を行うことで、クラウドへの 80%以上のデータ送信量の削減が達成されることを意味する。実際の監視環境において、火事の元となり得る煙の発生が、1 日のうち 129 分以上も起こる可能性は低いため、本 KPI は達成されたものと考えられる。

### 4) クラウド側での処理時間の削減量 80%以上

クラウドでの AI 解析処理に係る計算時間は、送信されたデータの時間長に比例する。24 時間のうち 1 時間、煙がエッジで観測していたと仮定すると、データの送信量は 5.1.5 に記した削減量の計算方法に基づき 83%削減される。その結果、クラウドにおける処理時間も 83%削減されるため、本 KPI は達成されたと考えられる。

### 5) 特定の対象物の自動監視業務における削減効果

定量評価の結果から、煙を対象物とする自動監視業務において、エッジ AI の導入によりクラウドへのデータ送信量の削減効果が見込まれることが判明した。エッジ AI における Recall は 1.00 であり、全ての煙発生を見逃していない。このことから、煙の対象物とした自動監視業務において、エッジ AI の導入によりデータ送信量の削減効果は充分期待できるものと考えられる。

### 6) 特定の環境での自動監視業務における削減効果

定量評価の結果から、工事現場での自動監視業務において、エッジ AI の導入によりクラウドへのデータ送信量の削減効果が見込まれることが判明した。エッジ AI における Recall は 1.00 であり、全ての煙発生を見逃していない。このことから、工事現場での自動監視業務において、エッジ AI の導入によりデータ送信量の削減効果は充分期待できるものと考えられる。

### 7) 特定のアルゴリズムによる AI を用いた自動監視業務において削減効果が得られる

定量評価の結果から、オプティカルフロー解析に基づく動きベクトルを用いた YOLO による自動監視業務において、エッジ AI の導入によりクラウドへのデータ送信量の削減効果が見込まれることが判明した。エッジ AI における Recall は 1.00 であり、全ての煙発生を見逃していない。このことから、オプティカルフロー解析に基づく動きベクトルを用いた YOLO による自動監視業務において、エッジ AI の導入によりデータ送信量の削減効果は充分期待できるものと考えられる。ただし、本実証実験においては、現場での取得映像データを用いたファインチューニングを実施している。これがデータ削減効果を得る上での必須要件か否かについては、今回の実験結果からは断定はできないが可能性は高いと推定される。

## 郊外での不審者監視

表 6.2-3 定性評価/定量評価

定性評価/定量評価		目標値	
定量評価	KGI	エッジ・クラウド連携による自動監視により検出精度を低下させずにデータ通信量を 90% 以上削減する	
	KPI	1	エッジ処理での F2(再現率重視)検出率 90% 以上
		2	クラウド処理での F2(再現率重視)検出率 95% 以上
		3	クラウドへのデータ送信量の削減量 80% 以上
		4	クラウド側での処理時間の削減量 80% 以上
定性評価	KGI	AI による任意の自動監視業務においてエッジ AI の利用によりデータ通信量が削減される	
	KPI	5	特定の対象物の自動監視業務における削減効果
		6	特定の環境での自動監視業務における削減効果
		7	特定のアルゴリズムによる AI を用いた自動監視業務において削減効果が得られる

### 1) エッジ処理での F2(再現率重視)検出率 90% 以上

表 6.2-9 からクラウド処理での F2 検出率割合は 0.83 であり、KPI として設定した 90% 以上をこの条件においては達成されなかった。

### 2) クラウド処理での F2(再現率重視)検出率 95% 以上

表 6.2-9 からクラウド処理での F2 検出率割合は 1.00 であり、KPI として設定した 95% 以上を

達成している。

### 3) クラウドへのデータ送信量の削減量 80%以上

図 6.2-8 から、監視対象物(不審者)の時間出現割合(横軸)が約 19%以下になれば、80%以上のデータ削減(縦軸)が見込めることになる。つまり、24 時間監視しているうち不審者が出現するのが 274 分以下であるならば、常にクラウドへデータを送信した場合と比較してエッジ・クラウド連携を行うことで、クラウドへの 80%以上のデータ送信量の削減が達成されることを意味する。実際の監視環境において、不審者が映像に映り込むのが、1 日のうち 274 分以上も起こる可能性は低いため、本 KPI は達成されたものと考えられる。

### 4) クラウド側での処理時間の削減量 80%以上

クラウドでの AI 解析処理に係る計算時間は、送信されたデータの時間長に比例する。24 時間のうち 1 時間、不審者が出現していたと仮定すると、データの送信量は 5.1.5 に記した削減量の計算方法に基づき 94%削減される。その結果、クラウドにおける処理時間も 94%削減されるため、本 KPI は達成されたと考えられる。

### 5) 特定の対象物の自動監視業務における削減効果

定量評価の結果から、不審者を対象物とする自動監視業務において、エッジ AI の導入によりクラウドへのデータ送信量の削減効果が見込まれることが判明した。エッジ AI における F2-score が 0.83 であるのに対し、クラウドでの F2-score は 1.00 であることから、高い検出精度を求めるとすれば、エッジ AI を用いないほうが望ましい。データ送信量の削減効果については、要求検出精度との兼ね合いとなる。高い検出精度を求めるとすれば全てをクラウドへ送信する必要があり、データ削減効果が得られなくなる。

### 6) 特定の環境での自動監視業務における削減効果

定量評価の結果から、圃場での自動監視業務において、エッジ AI の導入によりクラウドへのデータ送信量の削減効果が見込まれることが判明した。エッジ AI における F2-score が 0.83 であるのに対し、クラウドでの F2-score は 1.00 であることから、高い検出精度を求めるとすれば、エッジ AI を用いないほうが望ましい。データ送信量の削減効果については、要求検出精度との兼ね合いとなる。この結果は、同じく圃場で実施した熊を検出対象とした場合とは、必ずしも同一ではない。つまり、環境要件がデータ通信量の削減効果に対して、支配的に寄与するものではないことを示唆していると考えられる。

### 7) 特定のアルゴリズムによる AI を用いた自動監視業務において削減効果が得られる

定量評価の結果から、既存モデルを用いた YOLO アルゴリズムの利用において、エッジ AI の導入によりクラウドへのデータ送信量の削減効果が見込まれることが判明した。エッジ AI における F2-score

が0.83であるのに対し、クラウドでの F2-score は1.00であることから、高い検出精度を求めるのであれば、エッジ AI を用いないほうが望ましい。データ送信量の削減効果については、要求検出精度との兼ね合いとなる。この結果は、同じく YOLO のアルゴリズムを用いて熊を検出対象とした場合とは、必ずしも同一ではない。使用しているモデルも異なることから、特定のアルゴリズムによる効果よりもモデルや他の要因による影響が、データ削減効果には大きく寄与するものと考えられる。

## 6.2.3 開発・評価項目の結果

### 郊外での獣監視

表 6.2-4 開発・評価項目

番号	開発・評価項目
1	昼間の時間帯におけるエッジ AI での対象物の検出性能
2	同じ条件でクラウドにデータ送信し AI 解析した場合の対象物の検出性能
3	クラウドへ全データを送信した場合と比較してデータ送信量の削減効果
4	形状に基づく検出が困難な夜間において目の光反射を用いた動きベクトルに基づく検出性能

#### 1) 昼間の時間帯におけるエッジ AI での対象物の検出性能

#### 2) 同じ条件でクラウドにデータ送信し AI 解析した場合の対象物の検出性能

上記 2 項目についての結果をまとめて、下記の表 6.2-5 および図 6.2-2 に示す。

表 6.2-5 郊外での獣監視に関する実証実験での検出結果

	Precision	Recall	F-score	F2-score
エッジ	0.96	0.60	0.74	0.65
クラウド	0.96	0.70	0.81	0.74
エッジ・クラウド	0.99	0.67	0.80	0.71

1.00 = 100%

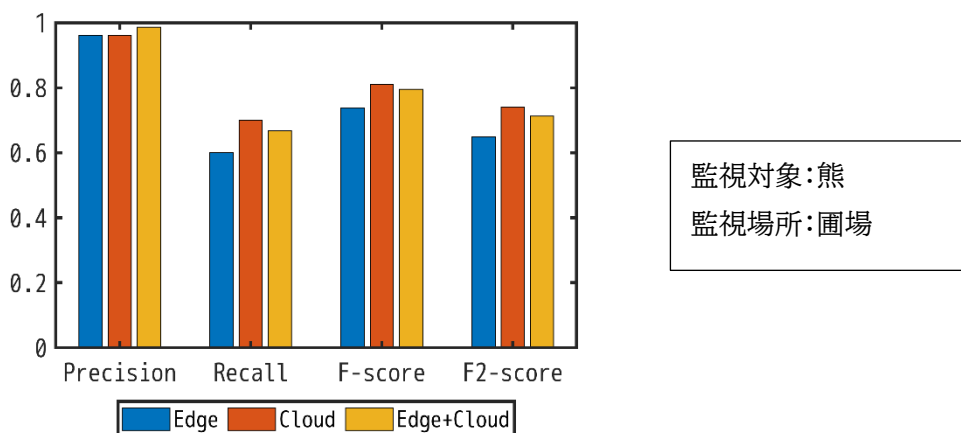


図 6.2-2 郊外での獣監視に関する実証実験での検出結果のグラフ

熊の検出については、YOLO 内のモデルに熊の学習データは含まれていたが、人と比較したときの学習データの取得困難さに起因する元々のモデルの検出対象が人に比べて高くはない性能に加え、実証実験では大判クロスに印刷した熊の写真を使用しており、熊の映像としての形状が 1 パターンであったこと等が、芳しくない検出性能を示した原因のひとつとして考えられる。

### 3) クラウドへ全データを送信した場合と比較してデータ送信量の削減効果

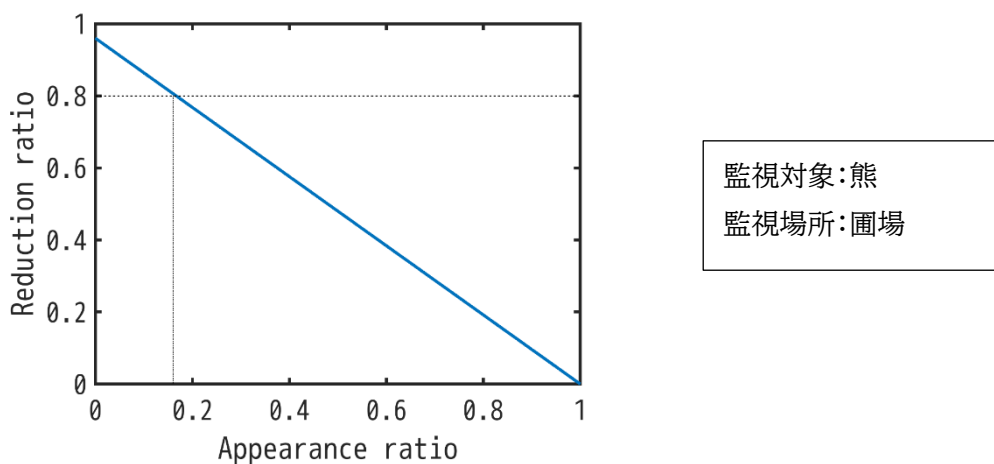


図 6.2-3 郊外での獣監視に関する実証実験でのデータ伝送量の削減効果のグラフ

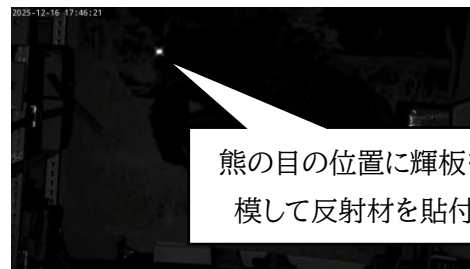
本条件での取得データから算出された誤検出率に基づき、監視対象の出現割合とデータ送信量の削減効果の関係性を示したものが図 6.2-3 である。ここで、「監視対象の出現割合」とは監視目的で映像データを取得している時間の内、実際に監視対象が映像内に出現していた時間のことである。例えば、10 時間監視していたうち監視対象が映っていた時間が述べ 1 時間であれば、監視対象の出現割合は 0.1 になる。また、縦軸の「Reduction ratio」は、全てのデータをクラウドに送る場合と比較したときのデータ送信量の削減割合を示している。つまり、送信データ量が同じ場合は 0 で、クラウドへはデータを全く送信しなくて良くなる場合が 1 である。

#### 4) 形状に基づく検出が困難な夜間において目の光反射を用いた動きベクトルに基づく検出性能

本項目は、中山間部のように、獣の目の光以外は何も見えないほどに明かりが乏しい環境での獣検出を想定したものである。東北大学青葉山キャンパス内の圃場は、夜間は同様の環境が再現されることが期待されたが、実験の数日前に実証実験場所の近くにおいて本物の野生の熊出現の報告があった。安全な場所からカメラを搭載した犬型ロボットだけが現場に行くシナリオや、夕刻から翌朝まで犬型ロボットだけが現場を巡回するシナリオを想定した実験準備はしておらず、暗闇に近い環境での人手による現場作業は関係者の安全の確保が難しいことから実験実施を断念した。その代わり、代替環境として図 6.2-4 に示すように室内に同様の環境を構築し、同じシステム構成で暗闇での対象物検出の可能性を評価した。なお、獣の目の光の反射は、昼間の実験において使用した熊の写真を印刷したクロス熊の目の部分に反射板を貼付したものを使用した。加えて、当該写真が横向きの写真で片目しか映っていないことから、反射板を2つ貼付して別の用紙も評価に使用した(図 6.2-4 参照)。



暗闇で熊のポスターを撮影しても距離が遠いと形状判別が困難



熊の目の位置に輝板を模して反射材を貼付

カメラからの赤外光が反射し、遠くても光点として撮影は可能



目を模するために反射材を2か所に貼付して人手でうさぎを模して動きを与える



何かの反射光を検知。特定の対象物としては認識されていない

映像に重畳された時刻情報に反応

人手で動かした光点は、その動きから「rabbit」と検出

図 6.2-4 夜間の獣の目の光反射を模した室内での実験の様子

今回使用したモデルは、4.1.1 節で述べたように「うさぎ」、「しか」、「その他」の 3 つの対象物を検出対象として学習したものである。本来とは異なる屋内環境での限定的な実験ではあるが、学習データを

取得した環境とは異なる環境においても、うさぎを模して動かした対象物は「うさぎ」と検出され、それ以外の光点は「その他」と検出されることが確認された。夜間も活動する動物は、網膜裏の輝板で光を反射するため、異なる動き方をする対象物であれば、本手法で検出できる可能性は高い。また、学習データについても、映像データで記録しているため、例えば、熊のように出現頻度が少ない獣であっても1回の出現の間に多くのパターンの学習データを獲得できる。したがって、監視対象の映像を取得して学習データに追加することで、暗闇に近い環境でもエッジ AI での対象物の検出と、それによる通信量の削減が見込めると予想される。

## 工事現場での煙監視

表 6.2-6 開発・評価項目

番号	開発・評価項目
1	昼間の時間帯におけるエッジ AI での対象物の検出性能
2	同じ条件でクラウドにデータ送信し AI 解析した場合の対象物の検出性能
3	クラウドへ全データを送信した場合と比較してデータ送信量の削減効果

### 1) 昼間の時間帯におけるエッジ AI での対象物の検出性能

### 2) 同じ条件でクラウドにデータ送信し AI 解析した場合の対象物の検出性能

上記 2 項目についての結果をまとめて、下記の表 6.2-7 および図 6.2-5 に示す。

表 6.2-7 工事現場での煙監視に関する実証実験での検出結果

	Precision	Recall	F-score	F2-score
エッジ	0.87	1.00	0.93	0.97
クラウド	0.95	1.00	0.97	0.99
エッジ・クラウド	0.96	1.00	0.98	0.99

1.00 = 100%

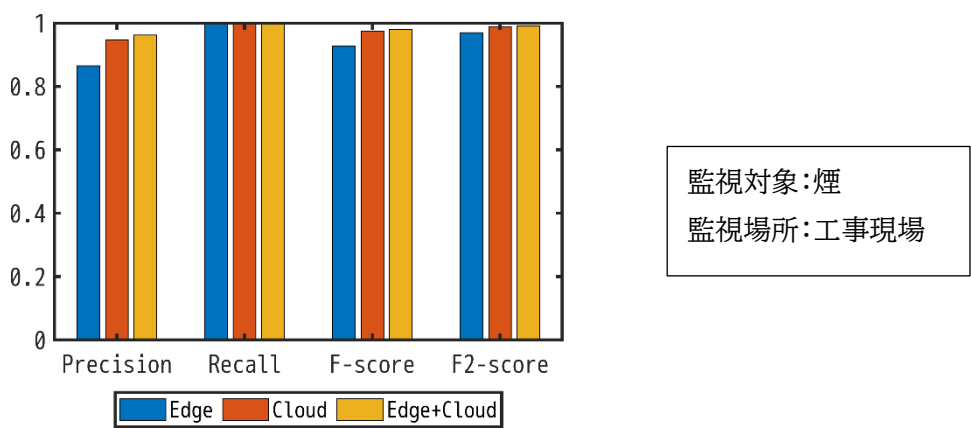


図 6.2-5 工事現場での煙監視に関する実証実験での検出結果のグラフ

F2 検出率は KGI を達成している。煙検出用 AI モデルについては「4.2 AI モデルの学習プロセス」で説明した方法で現場での取得データに基づき学習を実施したという要因が考えられる。加えて、工事現場という環境による要因も考えられる。資材や建築途中の構造物が無数にあり、遠方からでは監視対象がそもそも映像に映らない。逆に、犬型ロボットによる移動カメラにより、監視対象が映像に映る状態においては、監視対象までの距離がある程度近くなっている。その結果、画角における監視対象の占める面積割合が相対的に大きくなり、解像度が高い映像に対する検出が行えることになる。

### 3) クラウドへ全データを送信した場合と比較してデータ送信量の削減効果

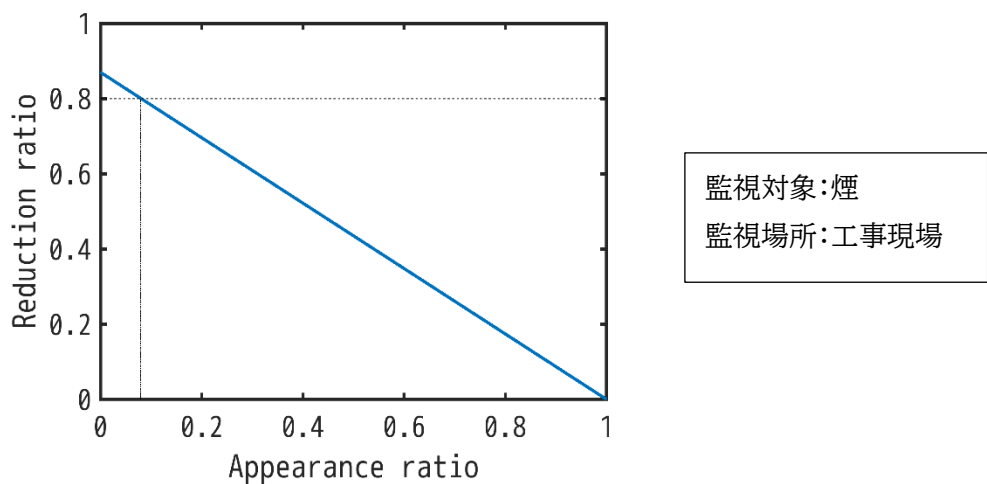


図 6.2-6 監視対象の出現割合と実現されるデータ削減効果の関係

各条件での取得データから算出された誤検出率に基づき、監視対象の出現割合とデータ送信量の削減効果の関係性を示したものが図 6.2-6 である。煙検出は、他の条件と比較して誤検出率が高く (Precision が低く)、その結果クラウドへのデータ送信が増えることを反映して傾斜が緩い直線になっている。要因としては、監視対象が煙であったことよりも、データ取得場所が工事現場であったことが大

きいと考えられる。獣や不審者を対象とした実験を実施した郊外の圃場では、対象物以外には特徴的な構造をしたものが比較的少ない。それに対し、昼間の作業日における工事現場においては、様々な構造物が存在しているのに加え、作業者も頻繁に行き交っている。煙検出に用いている動きベクトルに基づく手法では、煙と誤検出する可能性のある形状が画面内に現れるタイミングも発生し得る。実際、人の影を煙として検知している例も存在している。

## 郊外での不審者

表 6.2-8 開発・評価項目

番号	開発・評価項目
1	昼間の時間帯におけるエッジ AI での対象物の検出性能
2	同じ条件でクラウドにデータ送信し AI 解析した場合の対象物の検出性能
3	クラウドへ全データを送信した場合と比較してデータ送信量の削減効果

### 1) 昼間の時間帯におけるエッジ AI での対象物の検出性能

### 2) 同じ条件でクラウドにデータ送信し AI 解析した場合の対象物の検出性能

上記 2 項目についての結果をまとめて、下記の表 6.2-9 および図 6.2-7 に示す。

表 6.2-9 郊外での不審者監視に関する実証実験での検出結果

	Precision	Recall	F-score	F2-score
エッジ	0.98	0.80	0.88	0.83
クラウド	0.99	1.00	0.99	1.00
エッジ・クラウド	1.00	0.80	0.89	0.83

1.00 = 100%

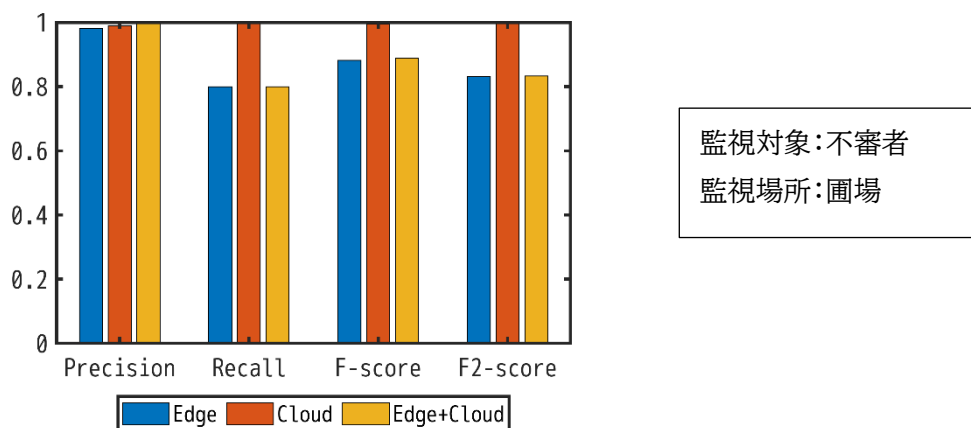


図 6.2-7 郊外での人物監視に関する実証実験での検出結果のグラフ

エッジ AI の検出性能と比較して、一様に高い性能を示している。特に人(不審者)の検出については、極めて高い検出結果が得られる。検出対象が人の場合、多くの学習データの取得が比較的容易で、大量学習データに基づいて映像取得環境にあまり依存しないモデルが構築されているのが理由として考えられる。本実証実験においては、人が検出されたことをもって不審者が検出されたと判断していた。作業が行われない夜間や休日の工事現場等、その時間帯に出現した人は不審者と見做して差し支えない場合はよいが、不審者ではない人も映り込む可能性のある条件下での不審者検出を行う場合は、その判別を行う仕組みが必要になる。

### 3) クラウドへ全データを送信した場合と比較してデータ送信量の削減効果

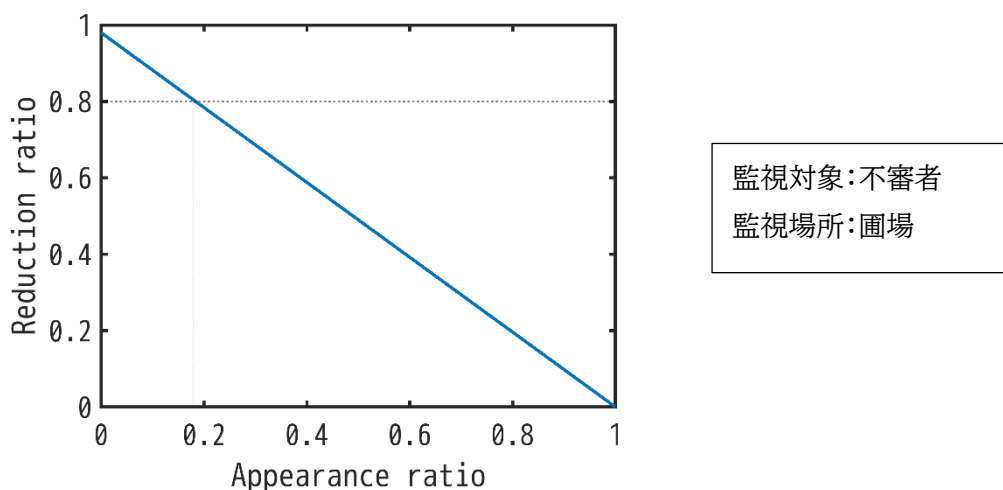


図 6.2-8 監視対象の出現割合と実現されるデータ削減効果の関係

本条件での取得データから算出された誤検出率に基づき、監視対象の出現割合とデータ送信量の削減効果の関係性を示したものが図 6.2-8 である。

## 6.2.4 考察

Precision は、いずれの対象物においてもエッジ・クラウド連携により高い値を実現することが可能となる。これは、エッジ AI とクラウド AI の両方が誤検出をしなければ、最終的な誤検出は発生しないことに起因している。それとは逆に、エッジ AI において検出がされないことにはクラウド AI で検出できる対象であってもエッジ・クラウド連携動作の際にはクラウドにデータが送信されないため、クラウド AI での検出が行われない。これがクラウド AI 単体の時よりもエッジ・クラウド連携時の Recall が低下している要因である。F2-score は、Recall を重視した評価指標であるため、同様の傾向が見られる。

どの条件においても、一定のデータ削減効果は見込まれることが確認されたことから、エッジ・クラウド連携が有効であることは実証できたと考えられる。一方で、データ削減量が要求精度との兼ね合いになる面も多い結果であった。この問題の解消には、目的とする検出対象物を AI が検出する精度を高めることが重要である。そのためには、学習データを増やすことや適用場所に特化してチューニングを行うなど、複数の方法が考えられる。これらを組み合わせることで、検出精度を上げるとともにデータ削減効果の向上も期待される。図 6.2-9 は、各条件での結果を重ねて描いたグラフである。この図において y 軸との切片は、エッジ AI による誤検出発生率で決まり、誤検出が全く発生しない場合には 1 になる。この時、監視対象の出現割合が 20% であれば 80% のデータ削減が期待される。しかし、実際には誤検出が発生するため、監視対象が現れなくてもデータを送信し、データ削減効果が減少する。誤検出が多くなると y 軸との切片の位置が下がり、誤検出の発生率が 20% を超えると 0.8 を下回るため、監視対象の出現割合に関係なく 80% 以上の削減効果は達成できなくなる。今回の 3 条件の中では、煙検出が一番誤検出の発生率が高かったため、傾斜の緩い直線になっている。

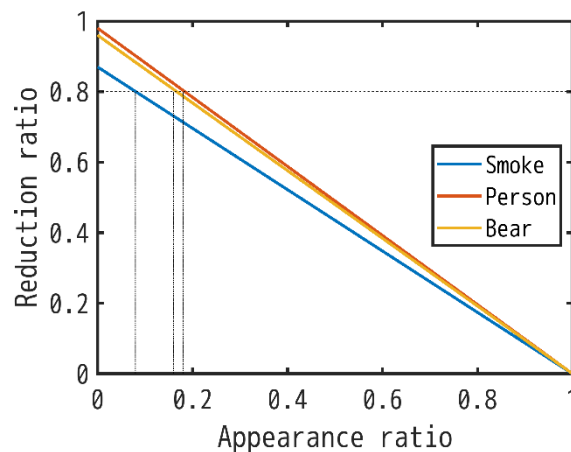


図 6.2-9 監視対象の出現割合と実現されるデータ削減効果の関係(条件比較)

図 6.2-9 から、煙を対象とした監視においては、エッジとクラウドの連携利用による F2-score が 1 に漸近している。これは、監視者が常に映像を監視しているのとほぼ変わらない性能をロボットと映像 AI による煙の発生検出で実現できていることを意味している。したがって、対象物が煙の場合には、自動監視業務を移動ロボットと AI に代替することで業務削減が達成できる可能性が示唆されたと考えら

れる。一方、不審者および熊の監視業務については、F2-score が 0.6~0.8 程度に留まっている。このことは、対象物の見逃しが発生する可能性が一定量あることを意味している。したがって、業務削減効果は限定的になると予想される。しかし、これは今回用いたモデルでの結果であり、前述のとおり複数ある方法で AI の検出精度を高めることにより、エッジ・クラウド連携によるデータ削減効果を獲得して、業務削減は可能であると考えられる。

煙の検出において高い性能が達成できた要因として、ファインチューニングが大きく寄与しているのは間違いないが、その他にも考え得る要素が幾つかある。そのひとつとして、煙が空間的に広がることが挙げられる。熊や不審者の検出においても、対象物までの距離が比較的近く、画角内の多くの面積を占める場合には高い精度で検出ができています。これは、対象物について解像度の高い情報が利用できる条件において高い検出性能が達成できていると言い換えることもできる。煙の発生地点がカメラから多少遠くても、時間の経過とともに煙が空間的に広がると、画角内での大きさも大きくなり検出が容易になる。これに対して、不審者や熊は時間が経過しても大きくはならないため、距離が近づかない限り検出が難しくなる。犬型ロボットが動くことで対象物までの距離が近くなり、検出に成功する例も見られたことが、この考察の根拠となる。その意味では、AI の再学習だけが精度を高める唯一の手段ではなく、多くの学習データの入手が困難なアプリケーションにおいても、別の手段で検出精度の改善が実現できることを示唆している。

煙の検出における高い検出性能の考えられるもう一つの要因は、オプティカルフロー解析による動きベクトルを使用している点である。オプティカルフローを使用しない一般的な形状に基づく解析では、背景とのコントラストで対象物の特徴量が薄れる場合がある。それに対し、オプティカルフロー解析を行うことで背景の影響が薄れ、対象物の特徴が際立ち検出性能が向上していると推測される。

また、網膜検知において熊が誤検知された理由としては、輝板反射に基づく夜間監視における熊の学習データが乏しかったことが想定される。なお、熊等の網膜反射検出に関する具体的な改善策としては、学習データを作成しモデルを学習させることが挙げられる。熊の学習データは映像で取得しているため、実環境での実物のデータさえ取得できれば、大量の学習データを収集できる。

## 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

### 6.3.1 実証スケジュール

ユースケース②における実証スケジュールを図 6.3-1 に示す。

ユースケース	周波数	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
② 不感地域に おける通信 の確立	4.5GHz 静的反射板	実証準備	反射板開発									
			環境構築							設置		
		実証			シナリオ検討						データ 取得	
		実証評価									解析・報告書作成	
	28GHz 動的反射板	実証準備	実験局免許申請									
			環境構築									
		実証			シナリオ検討					データ取得 (静的)	データ取得 (動的)	
		実証評価									解析・報告書作成	
	60GHz 動的反射板	実証準備	環境構築									
実証				シナリオ検討						データ 取得		
実証評価										データ 取得	解析・報告書作成	

図 6.3-1 ユースケース②における実証スケジュール

### 6.3.2 開発・評価項目の結果

表 6.3-1 開発・評価項目

番号	開発・評価項目
1	キャンパスにメタサーフェス反射板を設置して、不感エリア・弱電界エリアへの電波(公衆 5G)の反射によるエリア拡張効果の計測
2	工事現場にメタサーフェス反射板を設置して、不感エリア・弱電界エリアへの電波(公衆 5G)の反射によるエリア拡張効果の計測
3	ラボにメタサーフェス反射板を設置して、不感エリア・弱電界エリアへの電波(WiGig)の反射によるエリア拡張効果の測定

## (1) キャンパスにメタサーフェス反射板を設置して、不感エリア・弱電界エリアへの電波(公衆 5G)の反射によるエリア拡張効果の計測

### ① 4.5GHz 静的メタサーフェス反射板

4.5GHz 静的反射板の効果を確認するため、図 6.3-2 のような位置関係で測定を実施。基地局の見通しがある位置に反射板を設置し、反射板無しの場合にて受信電力が $-100\text{dBm}$  以下となるポイントを試験エリアと定めた。(図中①)

さらにエリア拡張の効果を見定めるため、図中①のラインから 1m ずつ測定を行い、図中⑧のラインまで同様の測定を実施した。



図 6.3-2 反射板設置位置と測定ラインの関係

スループットの測定結果を表 6.3-2 に示す。

5Mbps の伝送レートで試験を行っていたため、平均値は全ての測定ラインで 3Mbps の目標値を達成していた。また、通信速度の場所率に関しても 95%以上を達成していることを確認した。

次に各測定ラインにおける端末の受信電力の測定結果を表 6.3-3 に示す。

平均値では、3 本目の測定ライン(反射板から 33m 離れた地点)が最も良く、8 本目の測定ライン(反射板から 38m 離れた地点)が最も悪いという結果になった。

一方で、最小値については、すべての測定ラインで $-100\text{dBm}$ を下回っていた。

平均値で $-100\text{dBm}$ を超えた測定ライン 3 本目の時系列グラフを図 6.3-3 に示す。横軸が測定時間となっており、図 6.3-2 にある建物から芝生方面へと歩いて測定した様子となっている。この結果から、建物側を中心に反射板による効果があった。

一方で、芝生側に行く途中は反射板の効果が発揮されるエリアから外れるため、一時的に品質の劣化が起きていた。

他の測定ラインとの差分が出た理由としては、本実証の地理的条件が考えられる。反射板設置位置から測定ライン⑧に至るまでは緩やかな坂となっており、平坦ではない。また、反射板と基地局が見通しを取れるように反射板を仰角方向で 15 度の傾きを設けているため、坂の勾配と併せて測定ラインからは 15 度以上の傾きが発生している。したがって、平坦であればすべてのラインで-100dBm を切ることができたが、今回の地理的条件においては測定ラインごとに少しずつ角度が変わっていたため、平均値で比較したときに 3 本目のラインが一番良い結果となったと考えられる。

表 6.3-2 各測定ラインにおけるスループットの平均値、場所率

	1 本目	2 本目	3 本目	4 本目	5 本目	6 本目	7 本目	8 本目
平均値 [Mbps]	5.4	5.3	5.4	5.4	5.4	5.5	5.4	5.4
場所率 [%]	98	99	97	99	97	98	96	97

表 6.3-3 各測定ラインにおける受信電力の平均値、最大値、最小値

	1 本目	2 本目	3 本目	4 本目	5 本目	6 本目	7 本目	8 本目
平均値 [dBm]	-100.4	-103.0	-86.4	-102.6	-101.3	-100.9	-101.4	-101.8
最大値 [dBm]	-90.1	-95.1	-75.3	-95.1	-93.7	-92.9	-90.7	-92.7
最小値 [dBm]	-108.5	-111.4	-107.6	-109.7	-107.2	-106.8	-108.5	-109.4

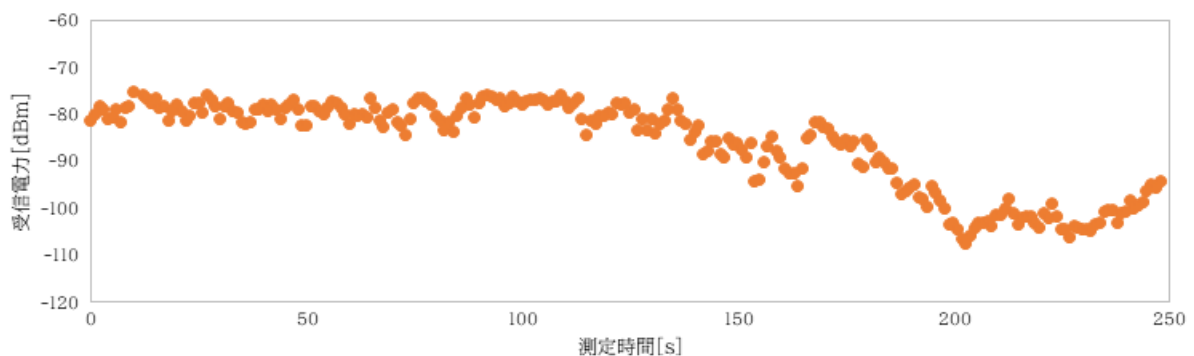


図 6.3-3 測定ライン 3 本目における受信電力

② 28GHz 動的メタサーフェス反射板

28GHz 動的メタサーフェス反射板の効果を確認するため、基地局からの見通しが確保できる位置に反射板を設置し、図 6.3-4 のような位置関係で測定を実施した。図 6.3-4 に示すようにメタサーフェス反射板から基地局が設置されている建物の直下方向の直線上で測定を行い、エリア拡張効果の検証を実施した。なお、動的メタサーフェス反射板の基本特性を評価するため、金属反射板を動的に角度変更が可能な治具を用いたシステムの検証も加えて実施した。図 6.3-5 に本検証で用いたシステム構成図を示す。



図 6.3-4 28GHz メタサーフェス反射板設置位置と測定ラインの関係

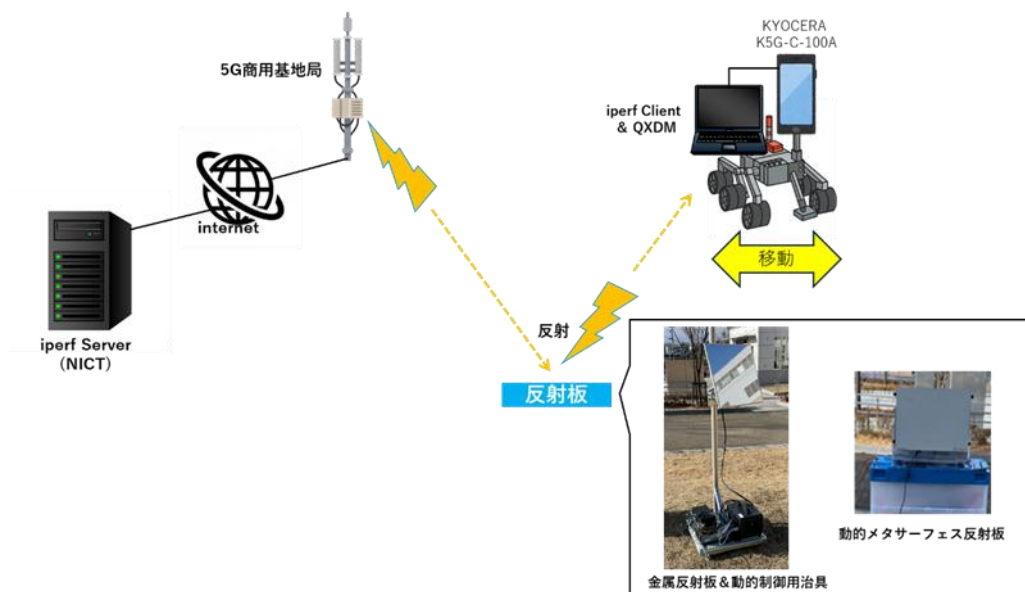


図 6.3-5 システム構成

メタサーフェス反射板なし、金属反射板設置、動的メタサーフェス反射板設置それぞれにおける受信電力(RSRP)の測定結果を表 6.3-4 に示す。まず、反射板なしでは基地局からの信号が届かないため、28GHz で接続ができずに受信電力の取得ができなかった。一方で、金属反射板(動的制御)は基地局からの信号を低損失に反射させるため、28GHz で接続ができ、-80~-90dBm の範囲で受信電力が観測された。最後に、動的メタサーフェス反射板は、反射板なしと同様に、28GHz で接続ができずに受信電力の取得ができなかった。これは、動的メタサーフェス反射板が試作段階のデバイスであり、基本動作を確認する目的のものであったため、反射損失が 10dB 程度となった。詳細な検証は実施していないため、反射損失の具体的な値は把握しておらず、28GHz で接続ができる十分な受信電力が得られないことが実証実験を通してわかった。

表 6.3-4 受信電力(RSRP)の測定結果

	0m	2m	4m	6m	8m	10m	12m	14m	16m	18m
反射板なし	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
金属反射板 (動的制御)	-83 dBm	-85 dBm	-84 dBm	-82 dBm	-90 dBm	-82 dBm	-85 dBm	-83 dBm	-85 dBm	-88 dBm
動的メタサーフェ ス反射板	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

次に、メタサーフェス反射板なし、金属反射板設置、動的メタサーフェス反射板設置それぞれにおけるスループットの測定結果を表 6.3-5 に示す。まず、反射板なしと動的メタサーフェス反射板は受信電力の結果と同様に、28GHz に接続できないため、スループットの結果が得られなかった。一方で、金属反射板(動的制御)は約 4Mbps のスループットが観測された。この結果より、場所率は 100%となった。

表 6.3-5 スループットの測定結果

	0m	2m	4m	6m	8m	10m	12m	14m	16m	18m
反射板なし	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
金属反射板 (動的制御)	4.0 Mbps	4.1 Mbps	3.9 Mbps	4.0 Mbps	3.9 Mbps	3.8 Mbps	3.8 Mbps	3.6 Mbps	3.9 Mbps	3.6 Mbps
動的メタ サーフェス 反射板	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

最後に、図 6.3-6 に受信電力、図 6.3-7 にスループットの改善効果を示す。

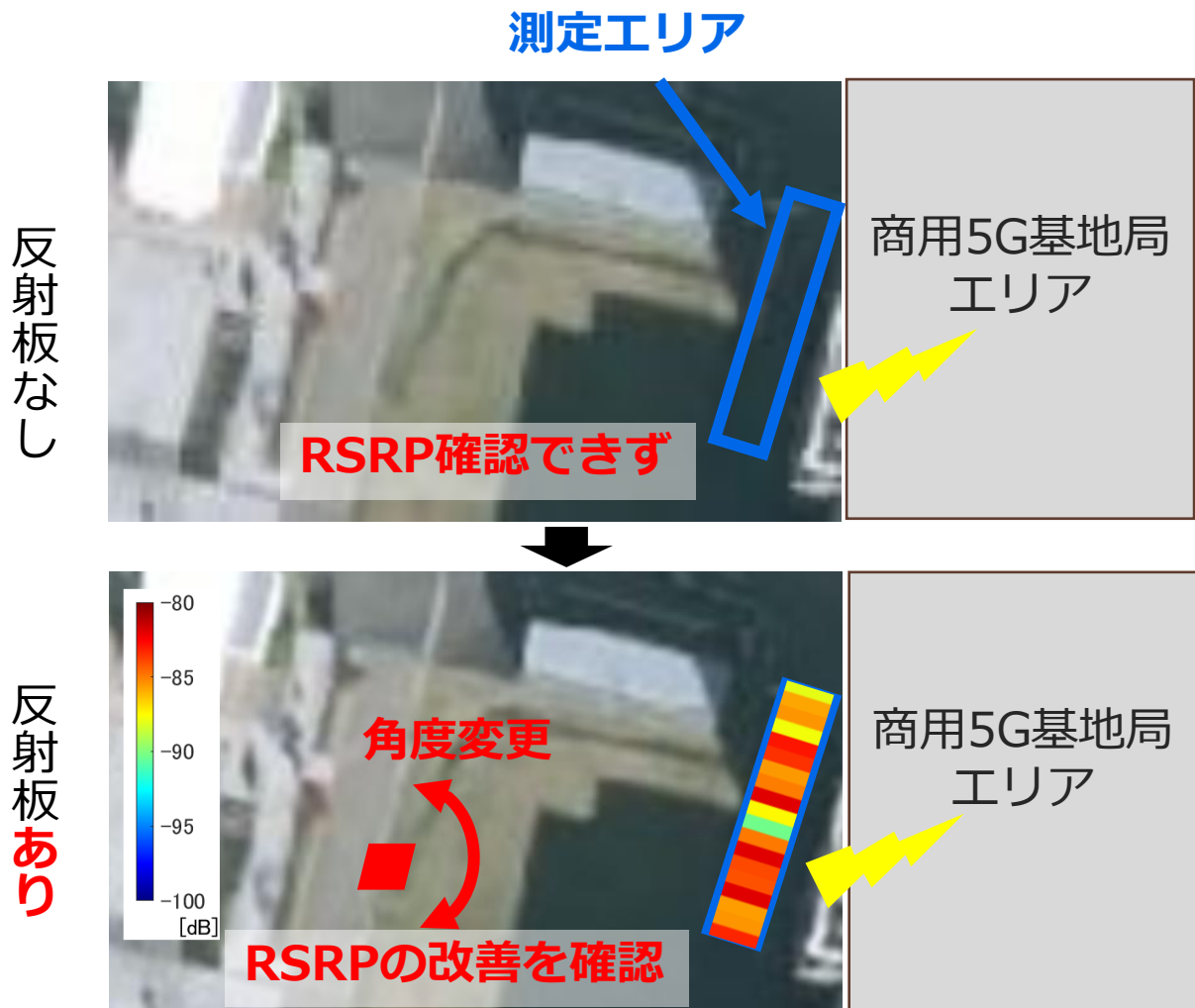


図 6.3-6 受信電力(RSRP)の測定結果

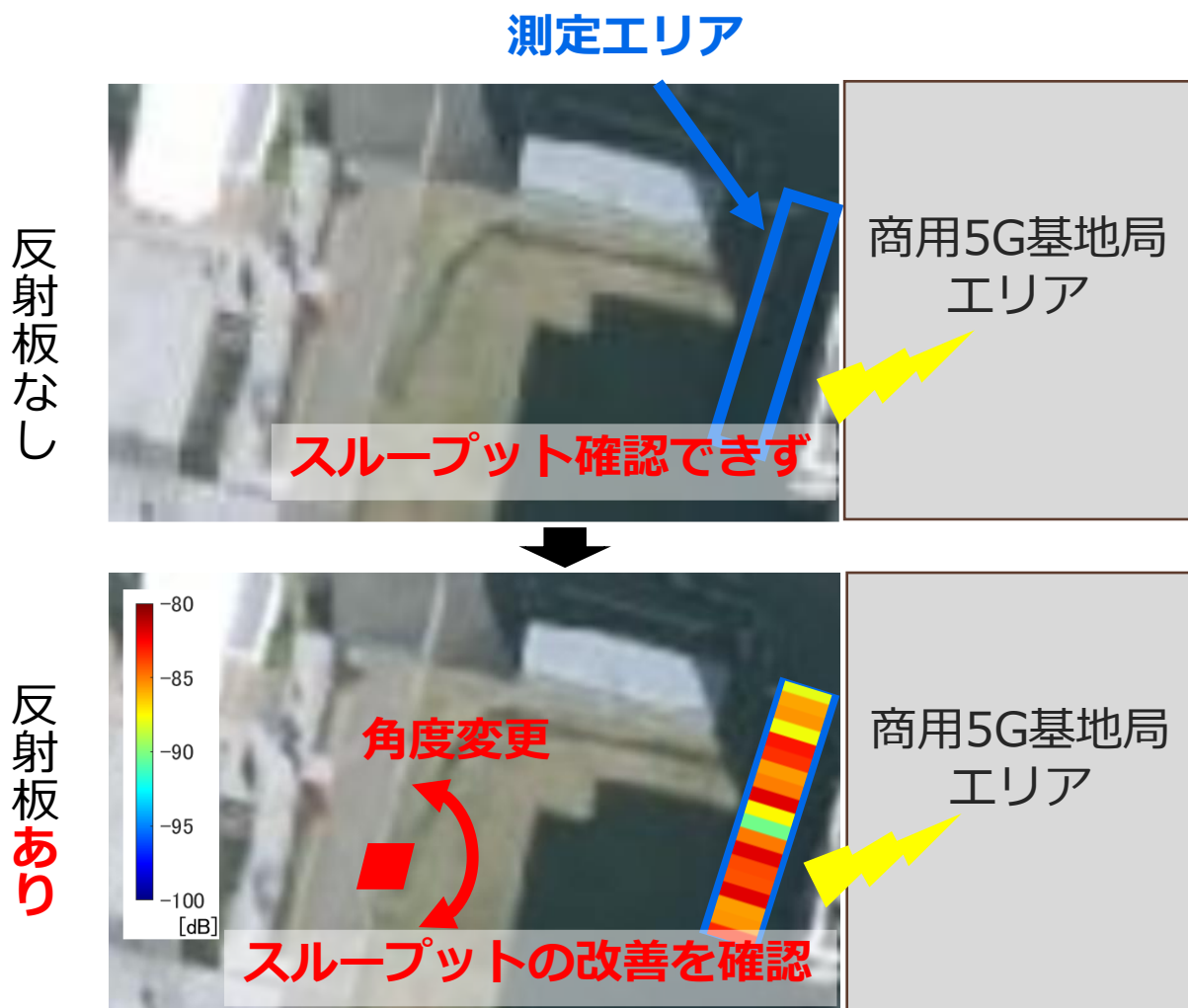


図 6.3-7 スループットの測定結果

(2) 工事現場にメタサーフェス反射板を設置して、不感エリア・弱電界エリアへの電波(公衆5G)の反射によるエリア拡張効果の計測

工事現場における4.5GHz 静的反射板の効果を確認するため、図 6.3-8 のような環境で測定を実施。

図中赤枠に4.5GHz 対応の静的反射板を10枚並べ、ピンク枠にあるH型の構台下のコンクリート面を反射板がカバーするエリアとなり、本エリアを測定場所と定めた。

本測定エリアにおいて、周回するコースで測定を実施。周回することで、反射板近傍から遠方までのデータが取得できる。

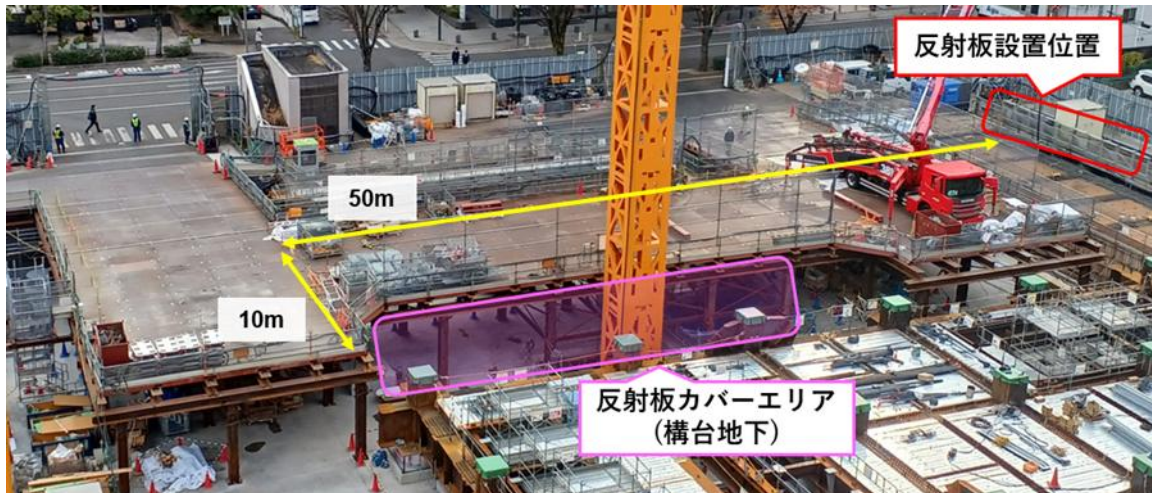


図 6.3-8 反射板位置と反射板がカバーするエリアの関係

スループットの測定結果を図 6.3-9 に示す。併せて表 6.3-6 に測定したスループットにおける平均値,最大値,最小値および場所率を示す。

5Mbps の伝送レートで試験を行っていたため、平均値は全ての測定ラインで 3Mbps の目標値を達成していた。一方で、場所率に関しては 95%以上を達成していなかった。

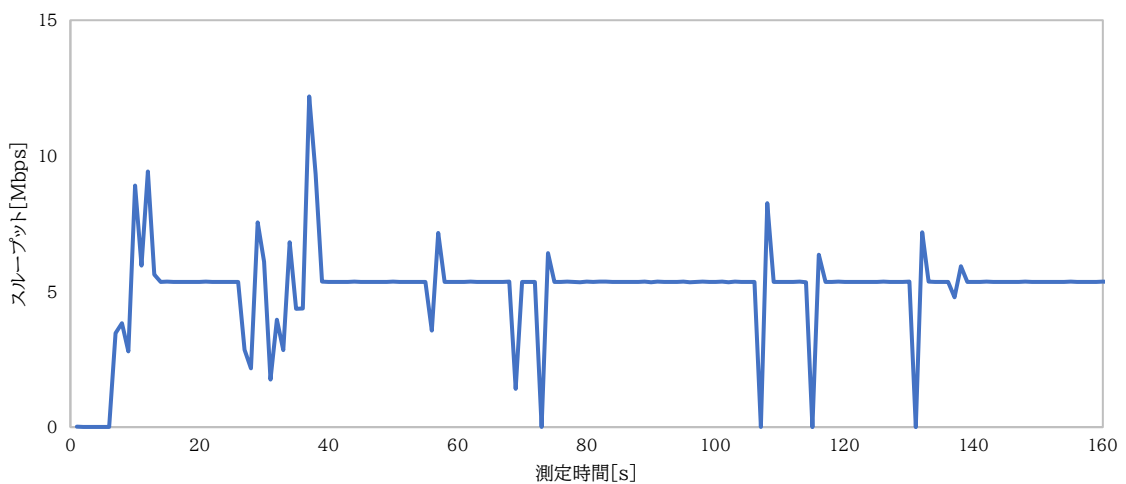


図 6.3-9 反射板カバーエリアにおける上りスループット

表 6.3-6 測定したスループットの平均値、最大値、最小値、場所率

平均値[Mbps]	最大値[Mbps]	最小値[Mbps]	場所率[%]
5.1	12.2	0	93

次に同エリアにおける受信電界強度の結果を図 6.3-10 に示す。

測定エリアにおける平均受信電界強度は-102.2dBm と目標値と定めた-100dBm を下回る結果となった。

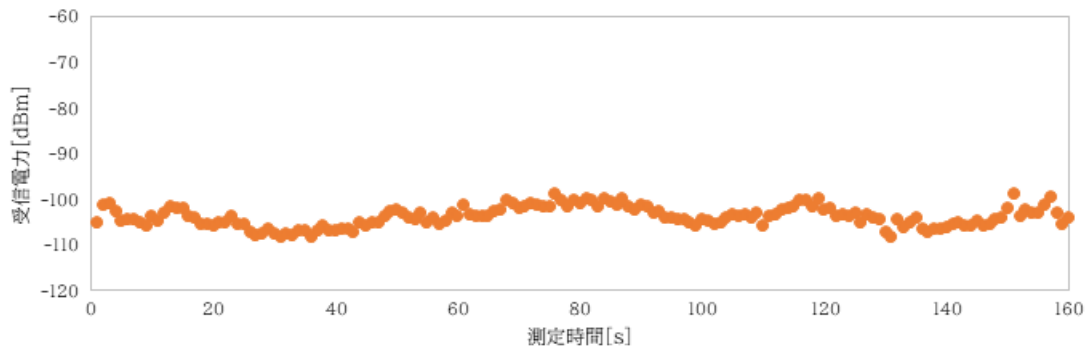


図 6.3-10 反射板カバーエリアにおける受信電界強度

スループットの場所率および平均受信電界強度が目標値を下回る結果となった。

このような結果となった要因として、反射板が設置場所の環境にどれだけ柔軟に対応できるかが挙げられる。

図 6.3-11 に示すように反射板周辺の電界強度は構台下のカバーエリアよりも良好であるため、基地局からの電波は問題ないと考えられる。

しかし、反射板を経由して構台下に届ける過程でいくつかの損失が発生する。一点目は反射板で反射したときの損失であり、性質上避けられない。二点目は、周辺環境による損失であり、特に工事現場のような場所では、金属類のような電波を反射、減衰させる材質が使われることが多い。これらが密集した空間では意図しない電波の反射が起きてしまうため、電波同士が干渉しあい結果として品質が悪くなることがある。

今回の実証環境では、作業中の環境だったため日ごとに状況が変わってくる。反射板設計段階での環境や実証開始までの環境、および実証中の環境すべて異なり、これらに完全に対応していくのは非常に難しい。たとえば、設計段階では反射板を塞ぐような木材はないという計画だったのに対して、実証までの期間で計画以上の進捗となり木材が設置されていた、という事例もあった。

今回使用した静的反射板は一度設計すると自由に能力を変えることができないため、設計段階の想定と違った環境で実施したため、上記で述べた結果になったと考えられる。

また、上記で述べた損失に関しては中継器も同様に発生する事象であり、かつ中継器を動かすための電力が必要となった場合は、電力を必要としない反射板はカバーエリアを拡張するにあたって有用だと考えられる。

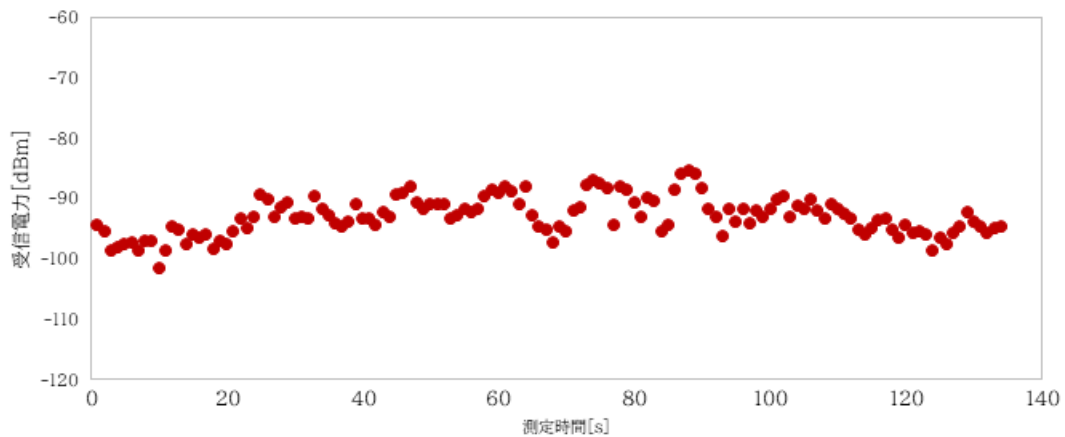


図 6.3-11 反射板周辺の受信電界強度

### (3) ラボにメタサーフェス反射板を設置して、不感エリア・弱電界エリアへの電波(WiGig)の反射によるエリア拡張効果の測定

測定環境の様子を図 6.3-12 に示す。無線装置を室内と室外にそれぞれ 1 機ずつ設置し、経路の途中に反射板を設置した。

WiGig は 60GHz 帯を使用した無線通信方式で、公衆 5G のような周波数帯と比較して直進性が高いため、図 6.3-12 のように直角に位置するような端末同士では通信ができない。したがって、反射板設置前は 60GHz に関しては不感エリアと言える。

反射板設置した際の通信速度を図 6.3-13 に示す。5.2.5 でも述べたが、今回の測定方法は無線装置に実装されている通信速度測定機能を使用した。この機能によって装置同士を結ぶ無線区間の通信速度を測定することができる。したがって、限りなく 60GHz 帯が持つ能力を最大限に活用した測定方法となる。

通信速度の平均値は 1873Mbps となり、不感エリアとなっていた場所に対して、反射板は不感エリアの解消に寄与することが分かった。



図 6.3-12 測定環境

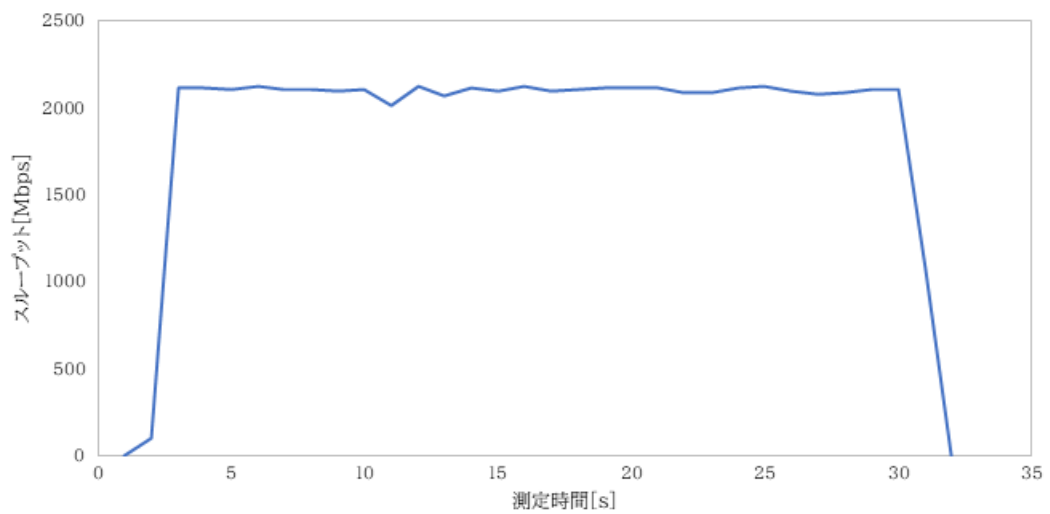


図 6.3-13 反射板によるエリア構築した際の上りスループット

### 6.3.3 KPI/KGI との比較結果

表 6.3-7 定性評価/定量評価

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定性評価	1	巡視ロボットの移動中の監視カメラ映像に対するエッジ・クラウド AI による解析結果が、全移動範囲において所要の解析精度の評価
	2	巡視ロボットの移動中における通信速度(スループット)・伝送遅延時間の時間変動に対する瞬時変化特性、平均分布特性などの分析

定量評価	3	メタサーフェス反射板を適用した状態で、巡視ロボットに対する通信速度と受信電界強度を測定し、実証エリアごとの傾向の違いを評価
	4	既存のエリア拡張手段(中継機、プライベート 5G など)と比較し、コスト削減効果 50%以上のコスト削減

## 1. 巡視ロボットの移動中の監視カメラ映像に対するエッジ・クラウド AI による解析結果が、全移動範囲において所要の解析精度の評価

エッジ AI による解析結果は通信環境に依存しないため、巡視ロボットの移動中の監視カメラ映像に対するエッジ・クラウド AI による解析結果は、クラウドへ送信された映像の品質が巡視ロボットの移動により、どのように変化するかによって決定される。そこで、巡視ロボットの位置により、クラウドに届く映像データの品質(単位時間あたりの情報量)の変化で評価する。各実験条件で計測されたビットレートが図 6.3-14 であり、計測時の実験条件をまとめたものが表 6.3-8 である。

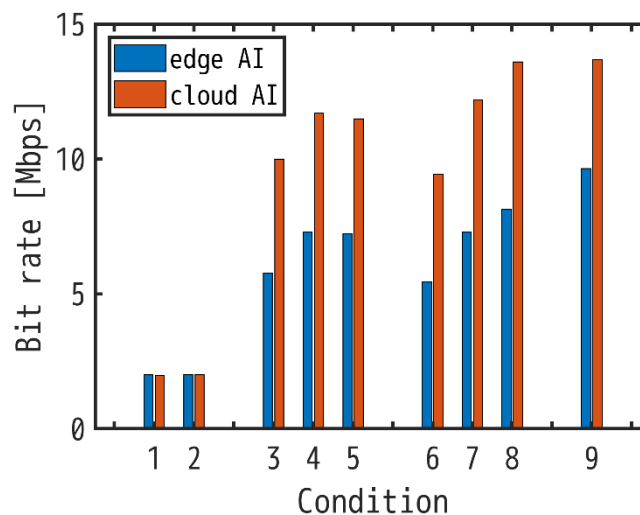


図 6.3-14 計測された映像ストリーミングのビットレート

表 6.3-8 ビットレート計測時の実験条件

条件番号	指定レート [Mbps]	巡視ロボットの位置	送信用ルータの受信状況
1~2	2	反射板エリア外	4G 受信
3~5	20	反射板エリア外	4G 受信
6~8	20	反射板エリア内	5G 受信
9	100	直接波エリア内	5G 受信

cloud AI への送信映像データの解像度は 1280x720 であるのに対し、edge AI の解析結果を重畳した映像データの解像度は 960x540 である。送信時にビットレートを 2 Mbps に設定した条件においては、指定したとおりのビットレートで送信されている。その他の条件においては、設定したビットレートよりも元々の映像のビットレートが低く、そのビットレートでの送信が今回の 4G および 5G の受信環境では送信可能な範囲であったため、元の映像のビットレートで送信できていたと推測される。

巡視ロボットが無線基地局の電波を直接受けられる位置に来たときのクラウドに届いた映像データのビットレート(13Mbps~14Mbps)は、反射板を通さないと電波が受からない位置に来たときにクラウドに届いた映像データのビットレート(7Mbps~14Mbps)と極端な差がないことが実験で確認された。観測されたビットレートの差は、映像コンテンツの違いに基づく圧縮効率の差で生じ得る程度の大きさであった。このことから、巡視ロボットが反射板により構築された領域も含めて受信エリア内を移動する限りにおいては、エッジ・クラウド AI での解析精度に大きな悪影響を及ぼすことは考えにくいと判断される。

## 2. 巡視ロボットの移動中における通信速度(スループット)・伝送遅延時間の時間変動に対する瞬時変化特性、平均分布特性などの分析

ロボットの移動中における通信速度を示したグラフを図 6.3-15 に示す。

平均的な変動においては、5Mbps だったため、安定した通信ができていた。一方で、瞬間的なスループットの落ち込みまたは上昇が一部区間に発生していたことを確認した。

この事象は、対向のサーバはインターネット上に存在しており、常に一定の通信速度で通信をしているわけではない。また、当該区間のパケットが損失しているか(パケットロス)を確認したところ、発生していないため、問題はないと考えられる。

測定時間を通じて、瞬時的な変動はあったが、無線区間における品質は担保できていたと言える。

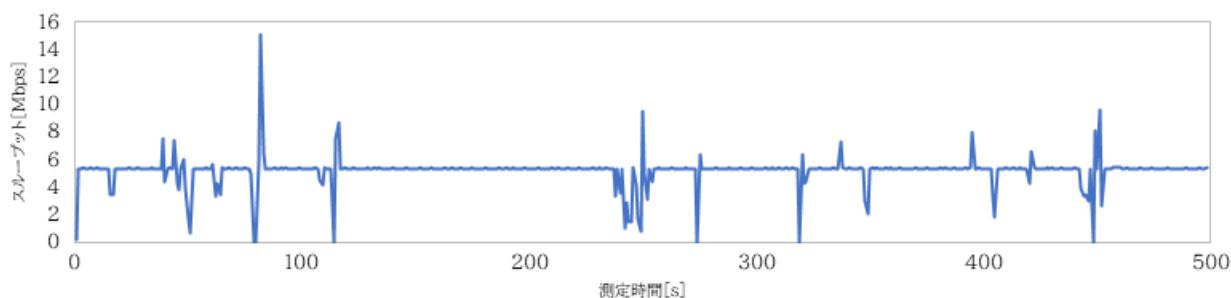


図 6.3-15 ロボットの移動中におけるスループット

## 3. メタサーフェス反射板を適用した状態で、巡視ロボットに対する通信速度と受信電界強度を測定し、実証エリアごとの傾向の違いを評価

### 1) キャンパスにおける評価

スループットを測定した結果を表 6.3-9 に示す。

平均値は測定場所問わず大きな差分は見られなかった。一方で、最大値および最小値については場所ごとに差分が見られた。

差分が見られた理由としては、測定環境にあると考えられる。今回使用した通信経路は、測定用端末(クライアント)から測定用サーバに対して上り通信を行う。サーバに到達する間に一般的なインターネットを経由するため閉域網のような環境と違い常に一定の通信速度にはならない。したがって、瞬時的に5Mbpsを上下するような結果になったと考えられる。

図 6.3-16 で測定ライン 3 本目におけるスループットの時系列グラフを示したように、瞬時的な変動は起きていたが、スループットがゼロになるといった事象は発生していないため問題ない。

場所率については、各測定ラインにおいて95%を達成することができた。

表 6.3-9 各測定ラインにおけるスループットの平均値、最大値、最小値、場所率

	1 本目	2 本目	3 本目	4 本目	5 本目	6 本目	7 本目	8 本目
平均値 [Mbps]	5.4	5.3	5.4	5.4	5.4	5.5	5.4	5.4
最大値 [Mbps]	17.4	10.1	17.8	15.7	12.6	14.3	15.3	12.9
最小値 [Mbps]	0.7	0.9	0.5	1.5	1.1	0.7	0.7	0.4
場所率 [%]	98	99	97	99	97	98	96	97

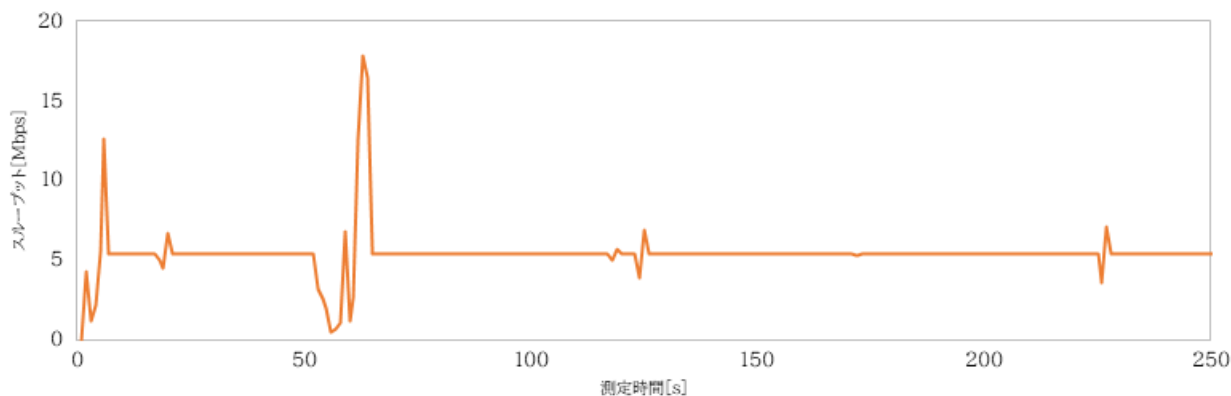


図 6.3-16 測定ライン 3 本目におけるスループット

続いて受信電界強度の結果を表 6.3-10 に示す。

平均値では、3 本目が-100dBm を上回る結果となった。一方で、最大値では、すべてのラインで-100dBm を上回ったことから測定範囲においてスポット単位で効果が反射板の効果があったと考えら

れる。

表 6.3-10 各測定ラインにおける受信電力の平均値、最大値、最小値

	1 本目	2 本目	3 本目	4 本目	5 本目	6 本目	7 本目	8 本目
平均値 [dBm]	-100.4	-103.0	-86.4	-102.6	-101.3	-100.9	-101.4	-101.8
最大値 [dBm]	-90.1	-95.1	-75.3	-95.1	-93.7	-92.9	-90.7	-92.7
最小値 [dBm]	-108.5	-111.4	-107.6	-109.7	-107.2	-106.8	-108.5	-109.4

表 6.3-9、表 6.3-10 からキャンパスにおけるスループットおよび受信電界強度の結果を示した。

スループットはすべての測定ラインで場所率 95%を達成し、受信電界強度は 3 本目の測定ラインで達成することを確認した。

それぞれの項目で達成できた場所があった理由として、反射板を図 6.3-2 のように設置し、反射板と基地局の間に遮蔽物がなく直接波が補足できる状況にしたことが挙げられる。基地局の足元でもなければ、反射板から見て最適な位置に基地局がいたため、反射板の性能を十分に活用できた。

一方で、受信電界強度は測定ラインごとに大きなばらつきのある結果となった。これは、反射板の持つ能力と反射板がカバーするエリアの環境の 2 点が要因だと考えられる。

今回使用した反射板は 30 度方向のから入射した波を 0 度方向に反射させる能力を持つ。したがって、メタサーフェスの能力により、通常とは異なる角度へ反射した波は、図中の上部建物側へと反射される。

加えて建物周辺の地形は緩やかな上り坂になっており、反射板から見ると平坦なエリアにはなっていない。したがって、測定ラインごとに反射板との角度、距離が異なるため、結果も異なっている。

上記の理由から 3 本目の測定ラインが一番良い結果になったのだと考えられる。

## 2) 工事現場における評価

工事現場における通信速度の分布を表 6.3-11 に示す。また、同エリアにおける受信電界強度の分布を表 6.3-12 に示す。

反射板を適用したエリアにおいて、通信速度において場所率は目標値として定めていた 95%に届かず、受信電界強度の平均値も-100dBm を下回る結果となった。

表 6.3-11 通信速度の分布(平均値、最大値、最小値、場所率)

平均値[Mbps]	最大値[Mbps]	最小値[Mbps]	場所率[%]
-----------	-----------	-----------	--------

5.1	12.2	0	93
-----	------	---	----

表 6.3-12 受信電界強度の分布(平均値、最大値、最小値)

平均値[dBm]	最大値[dBm]	最小値[dBm]
-102.2	-96.2	-111.8

上表は同エリアにおける反射板適用効果を高めるため反射板の角度調整を実施していた、かつ実証最終日に取得したデータとなっている。6.3.2でも述べたように、反射板設置場所およびカバーエリアの状況が日ごとに変わる環境であるため、表 6.3-13 に実証開始時からの調整結果を示す。

なお、調整中は受信電界強度を中心に判定を行っていたため、通信速度の取得は行っていない。

反射板の角度調整については、図 6.3-17 に示すように仰角および俯角方向への角度調整が可能となっている。表 6.3-13 には、この角度調整機構を使用して改善を図った結果も含まれている。なお、表中では、0 度を起点にプラスの角度を仰角、マイナスの角度を俯角としている。表中にある反射板 1 枚ごとの振り分け番号に対応する並び方は図 6.3-18 に示す通りとなる。

下表で平均値が最も良かったのは No. 5 だった。しかし、No. 6 から「45cm 高さ上昇」という表記があるように環境が異なる。これは、図 6.3-19 に示す通り、11 月 28 日以降から反射板の前面に木材が設置された。これが反射板の反射方向を埋めてしまい、反射能力の著しい低下を判断したことから、回避するために 45cm の嵩上げを行った。

表 6.3-13 反射板の角度調整による結果一覧

No.		平均値 [dBm]	最大値 [dBm]	最小値 [dBm]	測定日
1	反射板設置前	-103.1	-95.0	-112.7	11/25
2	反射板①～⑤: 0 度, 反射板⑥～⑩: 10 度	-102.9	-96.3	-107.6	11/26
3	反射板①～⑤: 0 度, 反射板⑥～⑩: 10 度, 角度調整-1.5 度	-104.2	-95.8	-115	11/27
4	反射板①～⑤: 0 度, 反射板⑥～⑩: 10 度, 角度調整-3.0 度	-103.6	-98.1	-109.6	11/27
5	反射板①～⑤: 0 度, 反射板⑥～⑩: 10 度, 角度調整+1.5 度	-102	-95.6	-108	11/27
6	反射板①～⑤: 0 度, 反射板⑥～⑩: 10 度, 角度調整 0 度, 45cm 高さ上昇	-103.1	-97	-109	11/28
7	反射板①～⑤: 0 度, 反射板⑥～⑩: 10 度, 角度調整-1.5 度, 45cm 高さ上昇	-103	-95.8	-107.9	11/28

8	反射板①~⑩: 10度,角度調整-1.5度, 45cm 高さ上昇	-102.1	-96.5	-107	11/28
9	反射板①~⑩: 0度,角度調整-1.5度, 45cm 高さ上昇	-102.2	-96.2	-111.8	12/2



図 6.3-17 反射板の角度調整機構



図 6.3-18 反射板 1 枚ごとの振り分け番号



図 6.3-19 木材の設置状況

面的傾向把握のため、地図上に受信電界強度をプロットしたものを図 6.3-20、図 6.3-21、図 6.3-22 に示す。画像に表示されている No.については表 6.3-13 の No.と一致するようになっている。

画像右下にプロットの凡例を表示しており、暖色系に行くにつれて $-60\text{dBm}$  に近づき、寒色系に近づくとつれて $-120\text{dBm}$  となっている。本実証における基準として $-100\text{dBm}$  を上回ることにしているが、これらの画像では水色から緑の範囲が相当する。

地図プロットを作成する際に測定端末が収集する位置情報を用いているが、構台下(地下相当)等の影響で通常よりも精度が低くなっているため、プロットの軌跡はあくまで目安となる。

反射板からの距離が大きくなるにつれて受信電界強度は低下していくが、その傾向が顕著だったのは

No.4 だった。画像の右側青いプロットが増えており、地面方向への反射量が増える代わりに遠方まで届けることができなくなっている。No.5 は仰角方向(上空方向)への調整を行っており、反射板に近い部分は電界強度の値はやや下がっているが、No.4 では品質の悪かった部分が改善されている。

一方で、No.6 以降は前述の通り、図 6.3-19 の木材が設置されたため嵩上げを行っている。したがって、以降は仰角方向への調整を行っていない。これは 45cm 高くしたことで上空方向への調整を行うと反射波が構台下部の金属類と被り効果を発揮できないためである。

No.6 と No.7 を比較すると、画像上では大きな差分は見られなかった。

次に反射板の種類を変えたパターンを 2 通り実施した。No.8 は入射した波を 10 度方向へ反射させる反射板を 10 枚並べ、No.9 は 0 度方向へ反射させる反射板を 10 枚並べた。こちらも同様に画像による判別では、大きな差分は見られなかった。



図 6.3-20 No.1~3 の地図プロット(受信電界強度)

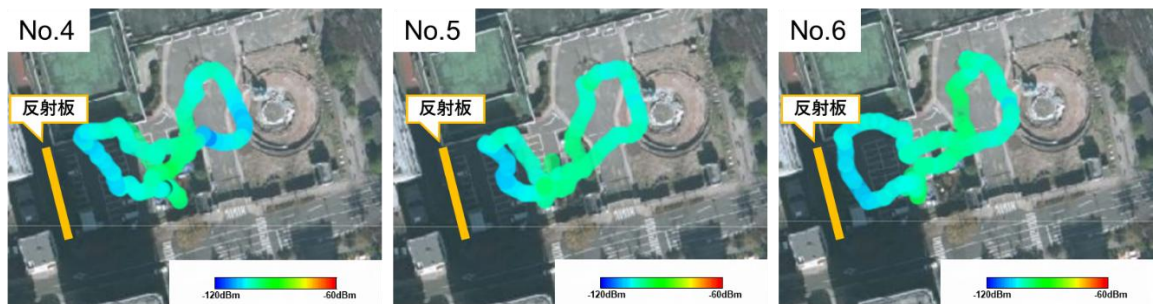


図 6.3-21 No.4~6 の地図プロット(受信電界強度)

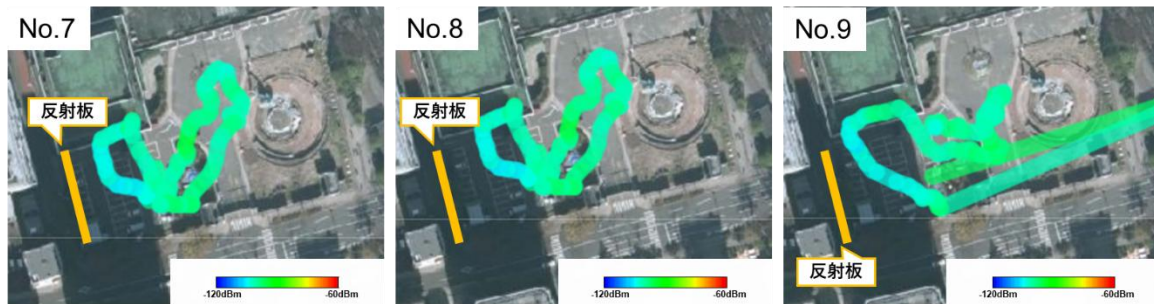


図 6.3-22 No.7~9 の地図プロット (受信電界強度)

### 3) ラボにおける評価

6.3.2 で示した通り、反射板無しの際は無線装置同士が繋がることができず、通信ができないエリアだったが、反射板を設置したことによって装置が繋がったため、無線区間における通信速度は平均1873Mbpsという結果が得られた。

更に実践的なユースケースを想定し、図 6.3-23 に示すように送信側の無線装置からPCに接続したカメラの映像を受信側に送信するという映像伝送の実証を行った。

この実証でも同様に、反射板設置前は直進性の高い 60GHz 帯の特性が影響して通信ができる状態ではなかった。反射板設置後は通信が確立していたため反射板の有効性を示すことができた。

図 6.3-26 に映像伝送中の通信速度を示す。今回のカメラはフル HD 相当のため、3Mbps～5Mbps 相当の通信レートが必要となる。測定中は所要レートを満たしており、かつ 5.2.6 で定めた基準である 3Mbps を満たす結果となった。

また、図 6.3-27 に示す通り、映像伝送中の受信電界強度は平均して-60dBm と、安定した値となっており、反射板によるエリア拡張の有効性を示すことができた。

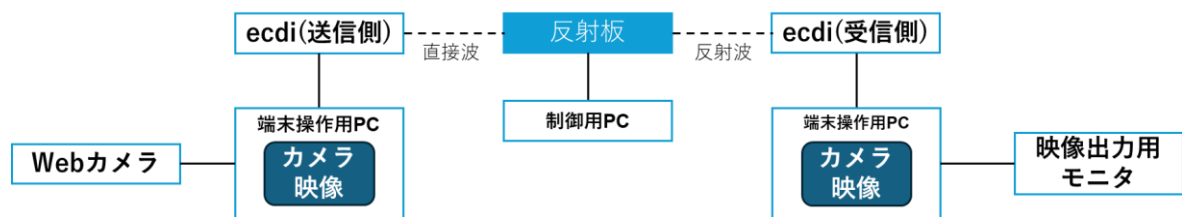


図 6.3-23 映像伝送試験構成図



図 6.3-24 実験環境①



図 6.3-25 実験環境②

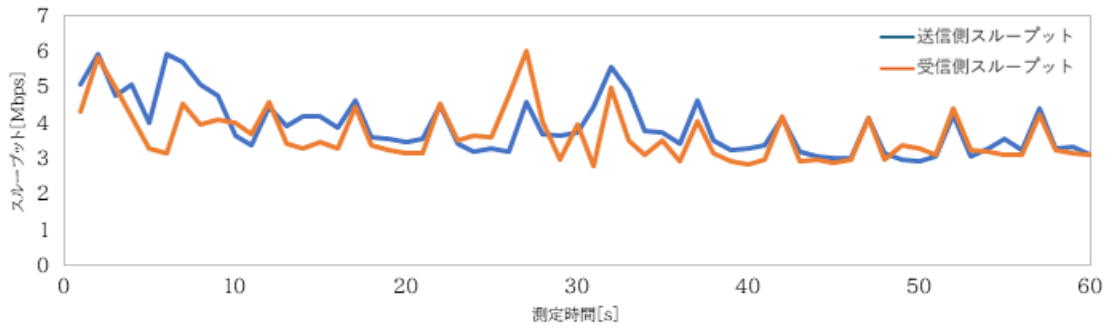


図 6.3-26 映像伝送中の通信速度

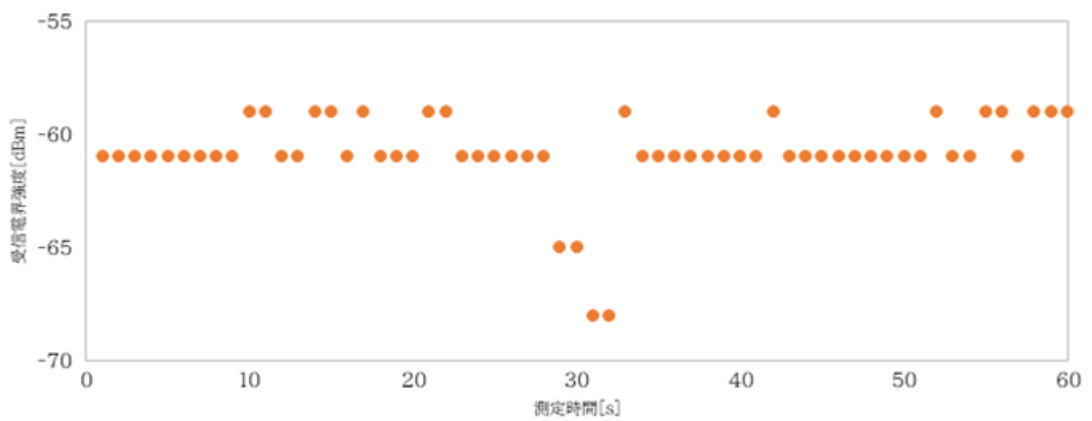


図 6.3-27 映像伝送中の受信電界強度

4. 既存のエリア拡張手段(中継機、プライベート 5G など)と比較し、コスト削減効果 50%以上のコスト削減

当初計画時には 5.2.6 にて定量評価として「既存のエリア拡張手段(中継機、プライベート 5G など)と比較し、50%以上のコスト削減」と記載したが、基地局や反射板、その他のエリア拡張にかかるイニシャルコストおよびランニングコストは機器の種類や地域条件によって異なるため、一概に比較できない。したがって、具体的なコスト削減率を定量的に示すことは難しい。

そこで、本検証では基地局からの電波が届く最大距離と反射板による反射エリアが届く最大距離を比較し、相対的にコスト削減効果が見込めることを評価する。

実証結果の中から、ユースケース②の目的である携帯電話網の不感地域における通信確立に向け基礎となる実証事例として、キャンパスにおける公衆 5G ネットワーク(4.5GHz 基地局)を利用したメタサーフェス反射板によるエリア拡張の実証実験結果を取り上げ、不感地域の通信エリア化を公衆 5G 基地局(固定または可搬型)の追加設置によって行う場合と比較したコスト削減効果について以下に述べる。

- ・反射板の設置により、所要のスループットを満たすことのできる反射エリアの最大距離(実測した範囲)は、反射板を設置した場所と対象基地局からの距離の約 50%となり、見かけ上、1.5 倍の通信エリア(カバレッジ)拡大となっている。

- ・前項の結果は、携帯電話網不感地域へ追加の基地局(既存基地局数の所要数が 50%増)を設置して通信エリア化することを想定した場合、そのコスト増分を反射板の適用により抑制可能であることを示している。

なお、上述した 5G 基地局の追加において、実際には、反射板そのものの装置コスト、設置コストも考慮する必要があるが、通信エリアの拡張範囲や組合せを行う基地局数などによりトータルコストは変動するため、他の通信エリア拡張手段として考えられる中継器、ローカル 5G などプライベート 5G を組合せることも含め、所要の通信量とコストのバランスを最適化することが求められる。

#### 6.3.4 考察

各フィールドで取得した結果を周波数および反射板の種類ごとに分類した。(表 6.3-14、表 6.3-15 参照)

周波数が高くなるにつれて、反射板設置前後の改善効果は大きくなるのが分かった。4.5GHz では、実証フィールドが完全に不感地帯ではなかったが、28GHz および 60GHz における反射板設置前は不感地帯となっていた。これは、周波数が高くなるほど直進性が高く、遮蔽物等に弱いという電波の周波数特性に依存する結果だと考えられる。

前節までに示した複数環境(キャンパス、工事現場、ラボ)および幅広い周波数帯(4.5GHz、28GHz、60GHz)におけるメタサーフェス反射板システム(反射板と組合せられる基地局・アクセスポイントと端末を含めた一体的なシステムとして位置づけ)の検証とその結果については、今後、多様なソリューションにおいて応用されるモバイル通信・無線通信システムへメタサーフェス反射板システムの導入を進める際、参照可能な基礎データや基本設計手法が含まれている。

今回の検証では、反射板の設置場所の検討にあたり、先行するエリア測定、計算機シミュレーションを事前に実施した。さらに、反射板の位置や方向等のパラメータを柔軟に調整可能な機構についても検討を行い、実際の反射板に装備した上で、同調整機能によりパラメータ変更を行った場合の反射エリアや通信品質に与える影響を評価し、反射板設置の最適化に必要な知見を得た。特に、28GHz メタサー

フェス動的反射板においては試作段階のデバイスであり、基本動作を確認する目的のものであったため、接続ができる十分な受信電力が得られないことが実証実験を通してわかった。反射損失の改善方法としてはビームパタンの改善や、基板の素材、反射素子の形状、間隔、反射素子に接続される電子デバイス等使用素材の改善が考えられる。

また、前節でも言及したように、既存システムに追加設置してカバレッジエリアを拡大するメタサーフェス反射板と同様の手段として中継器があるが、無線信号を増幅して容易にカバレッジエリアを拡張できる一方、干渉の増加を抑えた設置場所の検討やシステム全体の再設計が必要である。また、消費電力の観点では、無線信号の増幅器を要しないメタサーフェス反射板が無電力または相対的に低消費電力動作となる可能性があり、有利である。以上を考慮し、メタサーフェス反射板と中継器を有効活用するよう使い分けすることが求められるが、メタサーフェス反射板は、潜在的に反射指向性制御による柔軟なエリア構築が可能であり、AI を活用したより高度な技術の開発により、幅広い分野と環境において用いられる多様なソリューションの要求に答えられるエリア拡張手段の実現が期待される。

表 6.3-14 各周波数における反射板設置前後の測定結果(通信速度)

	4.5GHz (静的反射板/キャンパス)	4.5GHz (静的反射板/市役所)	28GHz (金属反射板/キャンパス)	28GHz (動的反射板/キャンパス)	60GHz (動的反射板/キャンパス)
反射板設置前 [Mbps]	3.5	3	-	-	-
反射板設置後 [Mbps]	5.5	4.1	4.1	-	5.5

表 6.3-15 各周波数における反射板設置前後の測定結果(受信電界強度)

	4.5GHz (静的反射板/キャンパス)	4.5GHz (静的反射板/市役所)	28GHz (金属反射板/キャンパス)	28GHz (動的反射板/キャンパス)	60GHz (動的反射板/キャンパス)
反射板設置前 [dBm]	-110	-110	-	-	-
反射板設置後 [dBm]	-75.3	-102	-82	-	-60

#### 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

当該ユースケースは実施しなかった。

## 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

拡張性に関する検討は以下の通り実施した。

具体的には、本実証開始以降、ユースケースに基づく仮説検討を行った。

<仮説>

- ・通信設備の施工、設備保守等の分野は携帯電話網不感地域での業務が存在するのではないか
- ・同分野においては、現場監視の有資格者が限られていて現場数に対する担い手が不足しているのではないか
- ・他の分野において、現状の課題感と本実証の方向性にズレは無いか
- ・実現性に求められるレベルがあるのではないか
- ・異なる環境では、AI 検知技術の使い方や目的が変わるのではないか

上記の仮説に基づき、ヒアリング内容の詳細化を行った。

これに基づき、ヒアリング対象となるユーザー企業を整理し、実証内容におけるユースケースの拡張性についてヒアリングを行うとともに定量/定性評価としてとりまとめを行った。

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	中間報告	最終報告		
拡張性に関する検証	実証準備 (拡張性仮説の検討/整理)		各ユースケース毎の仮説検討					ヒアリング内容の詳細化			アポイント				
	実証(ヒアリング等)											ヒアリング実施期間 ▲▲ 通建/電力			
	実証評価												定量とりまとめ		
													定性とりまとめ		

図 6.6-1 拡張性に関する検証における実証スケジュール

### 6.6.2 評価項目の結果

表 6.6-1 評価項目

番号	評価項目
1	①異なる産業・分野への横展開可能性に係る評価 ・ヒアリング結果を基に電力/建設(うち通建)において、拡張業種での活用可能性の有無を評価 ・当面の実現・運用課題を考察
2	②異なる条件・環境への横展開可能性に係る評価 ・ヒアリング結果を基に拡張業務において、活用可能性の有無を評価 ・当面の実現・運用課題を考察

## 1. 異なる産業・分野への横展開可能性に係る評価

表 6.6-2 評価結果

番号	分野	活用方法	当面の実現・運用課題
1	電力分野	建物(土木部門)と発電設備(各発電部門)の保守点検業務で AI を駆使し不安全行動を検知する	<ul style="list-style-type: none"> <li>AI 精度に対して、映像の背景などが影響しているうちは汎用性が低いいため、実現性が低いと評価。</li> <li>カメラで撮影されることについて現場の人は抵抗がある。</li> <li>堅牢な施設内での無線エリア拡張として反射板が活用できる可能性がある。</li> <li>ケーブル引き込みや電源準備は、特注ケーブルや足場を組む必要があるため、費用と期間を要するところ、メタサーフェス静的反射板は電源を必要としないところを評価したい。</li> <li>反射板の大きさは、建物内だと設置場所が限定される。</li> </ul>
		設備計器等の見回りを AI+移動ロボットを駆使して実施する	<ul style="list-style-type: none"> <li>計器の異常を AI に学習させるために、学習データを十分に揃えるところが課題</li> <li>設備監視は、音も検知対象になるため、聴覚としての AI 学習が必要</li> </ul>
2	通建分野	高所現場において作業中の不安全行動を AI カメラで検知する ※作業前の AI 活用は事例がある。(身だしなみチェックや危険予知ミーティングのコーチングなど)	<ul style="list-style-type: none"> <li>不安全行動を検知して、作業員へ伝えるまで自動化をしなければ、監視者の担い手不足改善につながらない。</li> <li>現実的には定点で撮影し、カメラの PTZ 操作が遠隔で操作できるレベル。</li> <li>エッジ AI で自動化できれば、常時リアルタイムな映像は不要となると思われる。</li> <li>安全サイドに寄せた誤検知が多いと、作業員からはシステムへの信用性を損なうため、高い AI 検知の精度とチューニングが求められる</li> <li>ローカル 5G や Wi-Fi であれば、特定の電波帯域の改善で効果があるかもしれないが、現段階で開空間の主たる帯域は 4G のため、複数帯域に対応した反射板が必要。</li> </ul>
		太陽光発電銅線盗難対策	<ul style="list-style-type: none"> <li>盗難検知をしても、現地駆けつけまでの時間がかかる状況。遠隔地からの自動発報・自動飛行/追尾が求められる。</li> </ul>

## 2. 異なる条件・環境への横展開可能性に係る評価

表 6.6-3 評価結果

番号	分野	活用方法	当面の実現・運用課題
1	東北大学	果樹盗難対策	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 当面は夜間にドローン操縦を行い、監視の目として実験している。</li> </ul>
		鉄道インフラ(線路沿い)の害獣払い	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 人による見回りが難しい夜間・明け方に熊が出やすいのでロボットが監視してくれると有用である。</li> <li>・ 熊の種類によって夜景との判別が難しい場合がある。</li> <li>・ 線路や道路の横をロボットが歩けるようにすればフェンスより安くなるかもしれない。</li> <li>・ 動物は負の刺激を強烈に記憶するため、音や光以上のダメージを与えて払う必要がある。</li> <li>・ 熊がいた場所を地図上でリアルタイムにプロットしていくだけでも良いかも。</li> <li>・ フェンス対策と比較してのコスト安が求められる。</li> </ul>
	農家の効率化/稼働支援/後進育成	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 除草してくれるなら楽。</li> <li>・ 果樹剪定は経験も重要なので、遠隔で指示できるのであれば有用である。</li> <li>・ ドローンなどで樹の上からだけでは見えないものもあるので、地上を移動するロボットで見てもらうこともできる。</li> <li>・ ロボットが荷物を運ぶといった作業支援もできるのではないかと、追従するだけでも便利かもしれない。大きくなると農業機械になるので小型化されるとよい。</li> <li>・ キュウリ農家で例えると、箱がいっぱいになったらロボットが置きに行く、などあると良い。(歩行ロボットは実際に作業している場所の近くまで行ける)</li> </ul>	
2	大林組	作業員の不安全行動の監視	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 高所での安全帯の不使用、危険エリアへの侵入などを監視し、アラートを出すことにより、事故を未然に防ぐ。</li> </ul>
		建設現場内の資機材の滞留監視	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 建設現場内の資機材はその場所で作業を行うための資機材であるため、作業が終われば、速やかに片付けられなければならない。片付けが行われず、放置された資機材を感知し、アラートを出すことにより、現場内が整然とし、不安全リスクが解消される。</li> </ul>

### 6.6.3 KPI/KGI との比較結果

表 6.6-4 定性評価/定量評価

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定性評価	1	本実証の知見・技術の適用範囲となりうるユースケースを導出すること
	2	本実証と異なる条件・環境でのユースケースを導出すること
定量評価	3	異なる産業・分野への横展開検証において、ヒアリングを実施する:最低 2 社以上
	4	異なる条件・環境への横展開検証において、ヒアリングを実施する:最低 2 社以上

#### 1. 本実証の知見・技術の適用範囲となりうるユースケースを導出すること

表 6.6-5 に記載のとおり、知見・技術の適用範囲でユースケースが導出された。

表 6.6-5 導出ユースケース

番号	分野	導出件数	導出ユースケース
1	電力業	2 件	建物(土木部門)と発電設備(各発電部門)の保守点検業務で AI を駆使し不安全行動を検知する
			設備計器等の見回りを AI+移動ロボットを駆使して実施する
2	通信建設業	2 件	高所現場において作業中の不安全行動を AI カメラで検知する
			太陽光発電銅線盗難対策

#### 2. 本実証と異なる条件・環境でのユースケースを導出すること

表 6.6-6 に記載のとおり、知見・技術の適用範囲でユースケースが導出された。

表 6.6-6 導出ユースケース

番号	分野	導出件数	導出ユースケース
1	東北大学	3 件	果樹盗難対策
			鉄道インフラ(線路沿い)害獣払い
			農家の効率化/稼働支援/後進育成

2	大林組	2 件	作業員の不安全行動の監視
			建設現場内の資機材の滞留監視

### 3. 異なる産業・分野への横展開検証において、ヒアリングを実施する:最低 2 社以上

以下の 2 社に対してヒアリングを実施した。

表 6.6-7 ヒアリング対象

番号	分野	事業内容
1	電力業	<ul style="list-style-type: none"> <li>・社内 DX 推進の主管(スマート保安業務)</li> <li>・現場を有している各部門へ DX を活用した保安業務の提案やサポート、PoC を協同している</li> <li>・情報システム担当と通信担当を背景としたメンバで構成されている</li> </ul>
2	通信建設業	<ul style="list-style-type: none"> <li>・主にドコモ等キャリアの基地局施工を担当。鉄塔やビル屋上など高所作業が多く、安全ルール遵守が最重要</li> <li>・全社的には、モバイル部門だけでなく、公共事業の電気設備、トンネル防水工事、インフラ線路系作業など多岐にわたる。</li> <li>・サッカー場やトンネル照明など、グループ会社も含め高所現場が多い。</li> </ul>

### 4. 異なる条件・環境への横展開検証において、ヒアリングを実施する:最低 2 社以上

以下の 2 社(1 大学・1 社)に対してヒアリングを実施した。

表 6.6-8 ヒアリング対象

番号	組織	研究/業務内容/所属 等
1	国立大学法人東北大学	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大学院 農学研究科 戦略統括部門</li> <li>・大学院 農学研究科 作物学研究室</li> <li>・大学院 農学研究科 生物生産科学 草地-動物生産生態学</li> <li>・大学院 農学研究科 生物生産科学 動物栄養生化学</li> </ul>
2	株式会社大林組	技術本部技術研究所生産技術研究部

#### 6.6.4 考察

本実証で検証された画像解析 AI は、工事現場やインフラ点検などにおける安全性向上や効率化に

貢献する可能性があり、特に不安全行動検知や移動ロボットによる設備点検においては担い手不足対策や現場の高度化に向けて社会実装が期待される。一方で、AI 精度が映像の背景など現場環境の影響を強く受けることによる汎用性の課題や、検知後の作業員への伝達までを自動化しなければ監視者不足の解消につながらないという点が指摘された。

また、メタサーフェス静的反射板については、従来のケーブル敷設や電源準備を必要とする通信手段と比較して、電源不要で容易に設置できる点においてコスト・工期削減の利点がある。その一方で、設置位置の物理的制約や構造物の形状、複数帯域対応の必要性などにより効果が限定される場合があることも明らかとなった。

上記の観点から、本実証で検証された技術は電力・建設・農業・インフラ保守など多様な分野での活用可能性が示された。国内 DX 推進やスマート保安の拡大、地方における人手不足や高齢化に伴う課題解決、さらには農業での盗難対策や作業支援、鉄道インフラでの害獣対策など地域社会への貢献が期待される一方、作業員の AI 監視への心理的抵抗感やロボット走行路の整備・安全確保など、社会実装に向けた非技術的ハードルの存在も課題として挙げられるため、これらを解消するにあたっては運用ガイドラインの整備を行う必要がある。

## 6.7 効果検証

### 6.7.1 実証スケジュール

効果検証に関する検討は以下の通り実施した。

具体的には、本実証開始以降、ユースケースに基づくヒアリング・アンケート内容の作成を行った。

ヒアリング・アンケートを実施する際には、既存の見回りや監視・巡視とロボットによる見回り等が異なる事から、作業をイメージしやすい様、東北大学の農学部の関係者に遠隔監視室からロボット操作の体験やAIによる鳥獣検知映像を確認後に実施した。

これに基づき、実証内容における効果検証についてヒアリング・アンケートを実施し、定量/定性評価としてとりまとめを行った。

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効果検証の	実証準備 (コスト削減効果等仮設の検討/整理)	アンケート・ヒアリング方法の検討											
	実証(アンケート、ヒアリング)					アンケート・ヒアリング方法詳細検討							
	実証準備								機器等準備				
	実証評価									実証期間 ▲ヒアリング・アンケート			
											実証結果整理		

図 6.7-1 効果検証における実証スケジュール

### 6.7.2 評価項目の結果

表 6.7-1 評価項目

番号	評価項目
1	コスト削減効果 実証費用とコスト比較し、削減効果の有無を確認
2	投資対効果(ROI) 各実証フィールドにおいてどのコストがどの程度減できるかの検証
3	既存通信インフラの有効活用 拡張されたエリアにおいても電波受信強度があるかどうかを確認
4	実証分野における社会的価値 現場担当者の安心感、地域住民の安心感の向上が見られるかどうか確認

#### 1) コスト削減効果の評価

①工事・建設現場

○本検証の評価においては、1現場あたりの発生するコストを比較し評価する。

・安全管理

表 6.7-2 安全管理におけるコスト

【円/月】

項番	項目	費用
1	安全管理コスト	1,800,000
2	ロボット、AI 検知システム、通信・クラウドサービス費用	600,000

・工程進捗管理

表 6.7-3 工程進捗管理におけるコスト

【円/月】

項番	項目	費用
1	工程進捗管理コスト	900,000
2	ロボット、反射板、通信・クラウドサービス費用	300,000

評価条件

- ・安全管理コストおよび工程進捗管理コストは建設会社社員の人件費
- ・ロボット、AI 検知システム、反射板、通信・クラウドサービス費用は、当該技術が実用化された時点のレンタル、サブスクリプション相当の費用を想定

②農場

○本検証の評価においては、1農場の見回りに発生するコストを比較し評価する。

表 6.7-4 農場見回りに係るコスト

【円/月】

項番	項目	費用
1	設備監視・巡視コスト	2,000,000
2	電気柵維持コスト	121,000
3	ロボット及び AI 検知システム	615,000

評価条件

- ・電気柵維持コストには、月の電気代及び月 2 回の下草刈りの労務費を算出
- ・ロボット及び AI 検知システムで利用したクラウド利用料及び通信料については以下の通り算出  
クラウド利用料:実証で契約した 1 日の利用料をもとに計算した月額利用料  
通信料:通信会社の月額利用料
- ・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

る。

○本検証で得られたクラウド利用料について、横展開フィールドが増加するごとに、1 フィールドあたりのコストがどの程度削減されるかを評価する。

表 6.7-5 フィールド数に応じた削減効果

【円/月】

項目	1 フィールド	10 フィールド	100 フィールド	200 フィールド	300 フィールド
クラウドコスト	600,000	60,000	6,000	3,000	2,000
削減効果	—	▲540,000	▲594,000	▲597,000	▲598,000

評価条件

- ・フィールド数は最大 300 を参考値とする
- ・クラウド利用料は実証で契約した 1 日の利用料をもとに計算した月額利用料とする

## 2) 投資対効果の評価

### ①工事・建設現場

仙台市庁舎の建設現場に従事する建設現場の職員および本実証に参加した大林組の社員へヒアリングし、評価を行った。

### ○ヒアリング結果(主な意見を抜粋)

・現時点の関連コストでは、煙検知、夜間の人検知ともに従来方式の方がコストは低い。今後、関連技術が実用化され、建設系のレンタル会社等から安価にレンタルできるようになれば、費用対効果は高まると思われる。

・煙検知については火災検知に、人検知については不審者検知に、それぞれ発展すると、導入希望者が増えると思われる。

・現状、AI 検知は固定カメラで対応することが多いが、その場合、対象エリアが非常に狭い。犬型ロボットのカメラを利用し、複数台の犬型ロボットが動き回ることによって現場内全域の監視が可能になるので、導入効果がより高まると思われる。

・AI 検知機能について、昼間は安全管理等に使い、夜間は不審者検知に使うなど、複数目的で長時間使うことで、相対的な導入コストが下がり、費用対効果が向上すると思われる。

・建設業界は働き改革で残業時間が規制される中、AI 検知機能を利用することで、本来行うべき品質管理業務等に現状より多くの時間を割けるようになるため、残業時間短縮に寄与する。

・AI 検知機能が自動化された際の職員の安心感は、上記効果を加味すると、現状より約 50%程度アップすると思われる。

### ②農場

東北大学農学部関係者へのヒアリング、アンケートを通し評価を実施した。

○ロボット及び AI 見回りによる安全性、安心感についてアンケート調査を実施

アンケート方法

質問に対して、回答を①非常にそう思う(5点)、②ややそう思う(4点)、③どちらともいえない(3点)、④あまり思わない(2点)、⑤全く思わない(1点)の5段階で評価し、各評価の点数化を行い、5点満点で評価を実施。

表 6.7-6 質問内容及び評価結果

項番	質問内容	評価	備考
1	ロボットによる見回りは、農場で作業を実施するあたり安心感が増すと考えられますか？	4.3 点	・大規模農場において有効
2	遠隔監視により農作業中の不安が改善されると感じられますか？	4.3 点	・見回りの強化になる
3	ロボット及び遠隔監視による見回りは、電気柵やフェンスなど現状の対策と比較しどの程度効果があると思われますか？	2.7 点	・圃場の規模と動物種類による ・電気柵とセットで使う方が良い

○通信環境の改善を図った場合と図らない場合の横展開可能フィールド数の推定

横展開可能なフィールド数は表 6.7-7 より 60,462 フィールド存在していると考えられる。

表 6.7-7 農地フィールド数比較<sup>5</sup>

農業経営体数(3ha 以上)	都市的・平地農業地域(3ha 以上)	中間・山間地域(3ha 以上)
172,209 フィールド	111,747 フィールド	60,462 フィールド

評価条件

- ・見回りが必要な農場の広さ 3ha 以上を想定
- ・通信環境の改善が必要な農場を中間・山間地域の農地、改善不要な農場を都市的・平地農業地域の農地と想定

○ロボット及び AI 検知見守り 1 フィールドあたりのコスト

表 6.7-8 導入費用(初期)

項番	項目	費用(万円)
1	クラウド AI 開発費	300

<sup>5</sup> 政府統計の総合窓口(e-Stat),「農林業センサス / 2020 年農林業センサス 確報 農業地域類型別報告書」, [https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?stat\\_infid=000040060337](https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?stat_infid=000040060337), (2026 年 1 月 15 日閲覧)

2	ロボット導入費用	1,500
3	反射板導入費用(1枚)	20

表 6.7-9 運用費用(継続)

項番	項目	費用(円/月)
1	クラウド AI 利用料(※)	60 万
2	通信費用	1.5 万

評価条件

・クラウド利用料は、実証で利用した 1 日契約の利用料をもとに月額利用料を試算

### 3) 既存通信インフラの有効活用の評価

メタサーフェス反射板の適用することで既存の公衆 5G(4.5GHz)に対して拡張されたエリアにおいて、スループットと受信電界強度の総合的な評価結果(基となる詳細測定データは 6.3.2 参照)は以下の表 6.7-10 の通りである。両実験エリアとも、総合的には 5Mbps を上回る平均スループットとなっているが、既存基地局の有効活用に向け反射エリア内での安定した通信品質を得るためには、総合的に -100dBm を上回る受信電界強度を導入指針として、反射板の設置位置と反射方向のさらなる調整を行うことが望ましい。

表 6.7-10 反射板拡張エリアにおける総合的な評価結果

項番	反射板実験エリア	平均スループット	平均受信電界強度
1	キャンパス	5.4Mbps	-99.6dBm
2	工事現場	5.1Mbps	-102.2dBm

### 4) 実証分野における社会的価値の評価

東北大学農学部関係者へのヒアリング、アンケートを通し評価を実施した。

○監視作業の自動化による安心感を数値化

アンケート方法

・最大の安全感、安心感を 100%とし、実証の内容からどの程度安全感、安全感があるか数値で回答  
 ・回答を①非常にそう思う(5点)、②ややそう思う(4点)、③どちらともいえない(3点)、④あまり思わない(2点)、⑤全く思わない(1点)の 5 段階で評価し、各評価を点数化し、5 点満点で評価を実施

表 6.7-11 アンケート結果

項番	質問内容	評点	備考
1	ロボット及び AI 検知システム通知、遠隔監視室からの見回りにより作業中の安全性・安心感は、何%程度の改善効果が見込まれると思われませんか？	20%	
2	農作業中のストレスが軽減されると思われませんか？ 例 電気柵による感電リスク、維持メンテ作業のわずらわしさ など	4.0 点	
3	ロボット及び AI 検知システム・遠隔監視による見回り、人による見回りを比較し農場見回りの代替に今後なり得ると思いませんか？	3.7 点	AI 検知精度向上による

### 6.7.3 KPI/KGI との比較結果

表 6.7-12 定性評価/定量評価

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定性評価	1	AI を導入することによる安心感の向上
定量評価	2	<p>工事・建設現場</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>安全管理(資機材管理):現場内巡視の運用コスト(4名×0.25日=1人日程度)と、ロボット×AI×通信設備のコスト比較</li> <li>無人で運用可能とした場合、100現場でコストに換算すると、1.2億円/月の削減効果を得られると想定できる。</li> <li>工程進捗管理:管理業務の運用コスト(2名×0.25日=0.5人日程度)とロボット×反射板×通信設備のコスト比較</li> </ul> <p>無人で運用可能とした場合、100現場でコストに換算すると、0.6億円/月の削減効果を得られると想定できる。</p>
	3	<p>農場</p> <p>設備監視・巡視業務に係るコスト(現状:200万円/月程度)、農地の鳥獣対策として行われる電気柵の維持コスト(電気代及び下草処理に係る人件費)と、ロボット×AI×通信設備のコストを比較本実証と異なる条件・環境でのユースケースを導出すること</p>

#### 【定性評価】 AI による安心感の向上

##### ①工事・建設現場

ロボット×AI または反射板×通信設備のうち、犬型ロボットを用いることで、建設現場内を自由に隈なく監視ができるため、定点カメラを利用した場合より広範囲を管理することができる。1台の犬型ロボットでは、タイミングが合わないことが想定されるため、将来的には複数台の犬型ロボットを稼働させることで、タイムラグを低減することが可能である。

##### ②農場

表 6.7-6 に記載の通り、アンケート結果からも AI を導入により見回りの安心感向上が図られることが確認された。アンケートの評価点からも職員による見回りに近い安心感、安全感が得られることが結果より得られた。

#### 【定量評価】 設備の監視・巡視コスト比較、異なる条件・環境でのユースケース

#### ①工事・建設現場

不安全行動や資機材の滞留を把握し、未然に防止することで、現場内の安全度は高まり、事故の発生リスクを低減することができると考えられる。

#### ②農場

既存の職員による監視・巡視コスト、電気柵維持コストとロボット×AI×通信設備での維持管理コスト比較は表 6.7-4 に記載の通りであり、導入に向けて投資対効果を考慮すると他の業務への展開し、スケールメリットを図ることが重要である。

他業への設備監視・巡視を実施しており、省人化、省力化を求められている業種、業界への展開が必要である。

ヒアリングを通し出てきた案として高速道路や地方のローカル鉄道の活用が見込まれるとご意見があり、両事業は、日ごろから道路、鉄道の安全・安心運行ため監視・巡視を実際に実施しており、鳥獣害の侵入等による運行停止や一部規制が発生しており、自動化を望まれるという声があると伺った。建設業や農業以外にもロボット及び AI 検知、遠隔監視見回りの可能性が多いにあると考えられる。

### 6.7.4 考察

#### ① 工事・建設現場

作業中や工事・建設現場の見回りを犬型ロボットで実施することで、作業中や現場の安心・安全の向上を確認した。クラウド監視カメラとロボットによる見回りを比べると、監視カメラでは、どうしても設置上、視野外が生じてしまい、全体を洩れなく監視することが困難であるが、ロボットによる見回りは、カメラの視野外でも監視することができるため、工事・建設現場全体を見回り可能である。

ただし、クラウド監視カメラの様に作業時間中常に監視とは行かないため、実際ロボットによる監視を実施する場合は、複数台のロボットを活用した見回りにより、工事・建設作業中の本当に安全な見回りが可能になると考えられる。

また、巡視員による作業員の保護具確認についてもロボットに設置したカメラから確認、注意を実施することができ、工事で利用する資機材置き場の監視も実施できたので、人による巡視と同等の見回りがロボットで実施可能であると考えられる。

本実証より、工事・建設現場では、頻繁な巡視や作業員に都度連絡しての確認・指示が必要となるが、遠隔地からリアルタイムで作業現場の状況を確認することで効率的に作業中の安全確保を可能とし、工事・建設現場の見回り業務の効率化を図ることができると考えられる。

#### ② 農場

既存の職員による見回りとロボット及び AI 検知、遠隔監視による見回りを比較すると職員の安全感、安心感が向上することを検証結果より確認でき、既存の見回りの代替方法の一つになり得ると考えられる。

また、農場を電気柵で囲うことによる、農作業中のストレスについても緩和できる可能性をヒアリング結果より確認し、ロボット及び AI 検知、遠隔監視による見回りにより安全感、安心感の満足度をさげることなく、職員の作業性を向上させることが期待できる。

さらに、見回りを必要とする農場は、小規模農場(3ha 未満)より大規模農場(3ha 以上)が必要とされることをヒアリングより確認した。特に農業従事者は、ご自身の耕作地に鳥獣が荒らしにくることを残された足跡などから事前に把握し警戒している。小規模農場の様に目が届く規模であれば労力をかけず見回りを行えるが、需要は低いと考えられる。大規模農場では、見渡しただけでは茂みの中や作物の影などで見えにくく、一目で農場全体を確認することができないため、第三者やロボットなど農作業者とは別に見回りを実施する必要がある。

労働集約型産業においては、人手不足が常態化しており、建設現場や農場の安全感、安心感のために職員稼働を割り当てるのが難しいフィールドについては、ロボット及び AI 検知や遠隔監視室からの監視、巡視要望が強くなり、見回りの自動化の必要性は増えると考えられる。

## 7. 本実証の総括

---

### 7.1 本実証の成果・課題

ユースケース①: エッジ AI による通信量の低減での実証において、エッジで対象物が検出された場合のみクラウドにデータを送信して検出を行うことで、全てのデータをクラウドに送信する場合と比較して、検出精度を損ねることなく 90% 以上のデータ削減が実証された。今回の実証実験では、検出対象や適用場所・時間により、エッジ AI による検出での再現率が低下する事例も見られたため、これを高めるのが今後の課題である。そのためには、汎用モデルではなく、現場で取得したデータでのチューニングが有効であることが示唆された。また、固定カメラではなく移動カメラを用いることにより、監視対象との距離が近付き、相対的に解像度の高い映像となることで検出率が高まる可能性も示された。本実証実験で直接的には実証していないが、実験データから得られた知見に基づくと、対象物の動きが少ないものであっても、カメラ側の視点が変わることで見えている対象物の形状が変化し、それにより固定カメラでは検出が困難なケースでも検出できる可能性も高まると考えられる。

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での実証では、複数環境(キャンパス、工事現場、ラボ)において、幅広い周波数帯(4.5GHz、28GHz、60GHz)のメタサーフェス反射板(静的反射板または動的反射板)を用いた携帯電話網電波不感地域の改善、すなわち通信エリア化に向けた検証を実施した。その結果、各周波数帯に特有の電波伝搬特性と異なる通信環境がもたらす反射エリア形成の違いや、所望の通信エリアを確保するための反射板の設置方法・調整方法に関して、具体的な検証データに基づく多くの知見を得ることができた。これらの実証成果については、今後、多様なソリューションにおいて応用されるモバイル通信・無線通信システムへメタサーフェス反射板の導入を進める際、参照可能なデータや設計手法として活用して行きたい。一方、より高度なメタサーフェス反射板の応用に向け検討を進めた動的反射板の反射指向性 AI 制御については、今回の実証で得られた基礎データを活用して、当該制御機能を実現する上での技術的課題の整理とその対策について検討を継続し、さらなる実験検証を進めて行きたい。加えて、反射板デバイス自体の性能向上に向けた検討や、反射板応用システムの社会実装に向けた導入コストや制度面を意識した検討も継続して行きたい。

また、本実証では、AI・遠隔監視室から見回りによる職員、農業従事者の安全感、安心感の向上や既存の監視・巡視業務の代替になり得ることが示された。工事・建設現場は、作業場所に高所を含み、日々工事進捗により作業環境が変わるため、安全な状態を保つことが難しい状況である。そのため、日々、安全パトロールを実施している現状がある。今後、少子高齢化等により更なる労働力不足が懸念されることから、省人化、省力化が求められている。

さらに、農場におけるロボット及び AI 検知や遠隔監視室からの監視・巡視についても有効性を確認し、既存の見回りの代替手段になり得ることが確認できた。農業従事者は、農場に鳥獣が侵入してくる可能性を残された足跡から注意をしているが、作業中のため茂みや作物の影からの侵入などへの対処が難しく、安全・安心に作業を実施するために、作業中の監視、巡視は必要である。また、鳥獣は昼間以外に夜間にも侵入し、農作物を荒らすことがあるため、夜間帯の見回りが可能なロボット及び AI 検知や遠隔監視室からのロボット見回りが必要であると確認できた。遠隔監視室からの見回りにおいても監視

画面を注視する必要がなく、AI が侵入した鳥獣を通知してくれるため、AI の活用で監視作業の負担軽減を確認できた。

ただし、実施計画書「1. 実証の目的及び内容等(5) 社会実装に向けたロードマップ・取組みの発展性」にも記載の通り本実証での進捗率は 20～30%であり、認識距離、ロボットの連続駆動時間、動物に倒された場合の自立、判定動物の種類など実際サービスとして利用するには、まだ機能として不足している。特に、農場においては、鳥獣の発見後、撃退や追い出しまで実施できないことには、完璧な対策にはならず、見つけるだけではなく、追い払うまでを想定した対応が求められている。実際、ロボットによる見守りを農場等に導入するには、安心性、安全性、導入の容易さという点が重要だと考える。本実証の様に AI サポートを受けながらとは言え、人が確認をしなければならない状況では、費用対効果が小さいと考える。

今後も実証を継続することで、AI・ロボットの活用による監視や安全確保等の業務の効率化を実現し、AI 連携型の情報処理基盤と通信範囲拡張の技術を組み合わせたソリューションを他分野・異業種に展開し、社会全体の労働力不足の解決に貢献していきたい。



## 8. 参考資料

### 8.1 システム構成図・設計書

- ユースケース①の実験におけるシステムのハードウェア構成

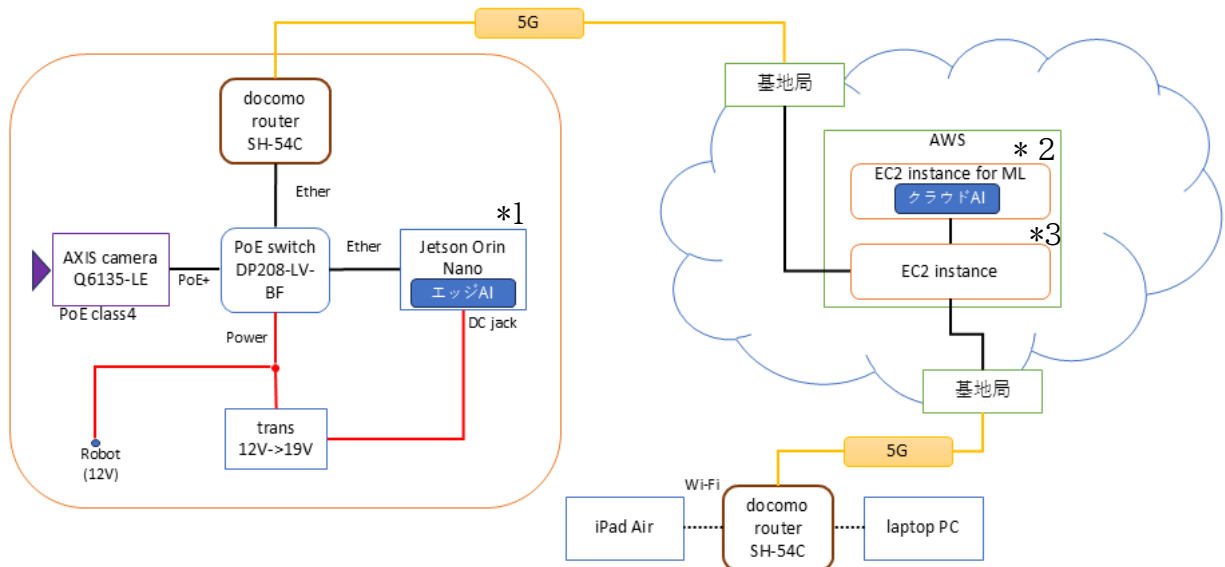


図 8.1-1 ハードウェア構成図

表 8.1-1 ハードウェア詳細

エッジ AI (*1)	
機器	NVIDIA Jetson Orin Nano
処理内容	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ネットワークカメラの映像をストリーミングで読み込み</li> <li>2. RTMP サーバーのストリーミングの指定チャンネル(raw stream)にそのまま転送</li> <li>3. 解像度およびフレームレートを落としてエッジ AI で検出処理</li> <li>4. 検出結果(対象物の有無、検出した場合は対象の種類)を Rabbit MQ サーバーの指定したキューに送信</li> <li>5. 検出結果を映像データに重畳した映像データを解像度およびフレームレートを調整して RTMP サーバーのストリーミングの指定チャンネル(ai_edge)に送信</li> </ol>
クラウド AI (*2)	
機器	AWS EC2 p5.4xlarge インスタンス
処理内容	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. RTMP サーバーに届いた映像ストリーミングをストリーミングで取り込み</li> <li>2. クラウド AI での検出処理</li> <li>3. 検出結果(対象物の有無、検出した場合は対象の種類)を Rabbit MQ サーバーの指定したキューに送信</li> </ol>

	4. 検出結果を映像データに重畳した映像データを解像度およびフレームレートを調整して RTMP サーバーのストリーミングの指定チャンネル(ai_edge)に送信
Web サーバー 兼	RTMP サーバー 兼 MQ サーバー (*3)
機器	AWS EC2 c6.4xlarge インスタンス
処理内容	<p>Web サーバー:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Web サーバーとして 80 番および 443 番ポートでクライアントからの接続を待つ</li> <li>2. 接続があった場合には、Web アプリにより MQ サーバーへ検出結果の問い合わせをする とともにRTMPサーバーに接続して映像ストリーミングを取得</li> <li>3. それらをブラウザの画面上に適切に構成して表示</li> </ol> <p>RTMPサーバー:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>4. RTMP サーバーとして 10935 番ポートでクライアントからの接続を待つ</li> <li>5. エッジ AI からの生映像ストリームおよび検出結果を重畳した映像ストリームを受け取る</li> <li>6. クラウド AI からの検出結果を重畳した映像ストリームを受け取る</li> <li>7. Web サーバーから要求に応じて、映像ストリームを提供</li> </ol> <p>MQ サーバー:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>8. Rabbit MQ サーバーとして 5672 番ポートでクライアントからの接続を待つ</li> <li>9. エッジ AI およびクラウド AI からの検出結果を受け取りキューに保存</li> <li>10. Web サーバーから問い合わせに応じてキューの内容を返す</li> </ol>

● Web サーバーの設定ファイル(/etc/nginx/nginx.conf) の RTMP 関連部の記述

```

rtmp {
  server {
    listen 10935;
    chunk_size 128;

    application raw_stream {
      live on;
      hls on;
      hls_fragment 1s;
      hls_path /var/www/html/raw_stream;
      record all;
      record_unique off;
      record_interval 5m;
      record_suffix -%d-%b-%y-%T.flv;
      record_path /mnt/flv/raw_stream;
    }

    application ai_edge {
      live on;
      hls on;

```

```

        hls_fragment 1s;
        hls_path /var/www/html/ai_edge;
        record all;
        record_unique off;
        record_interval 5m;
        record_suffix -%d-%b-%y-%T.flv;
        record_path /mnt/flv/ai_edge;
    }
    application ai_cloud {
        live on;
        hls on;
        hls_fragment 1s;
        hls_path /var/www/html/ai_cloud;
        record all;
        record_unique off;
        record_interval 5m;
        record_suffix -%d-%b-%y-%T.flv;
        record_path /mnt/flv/ai_cloud;
    }
}

```

(注) ストリーミング映像のデータをファイルに保存しておく必要がなければ、record all を record off に変更し、それ以下の record 関連の記述は不要。

● Web アプリの構成説明図

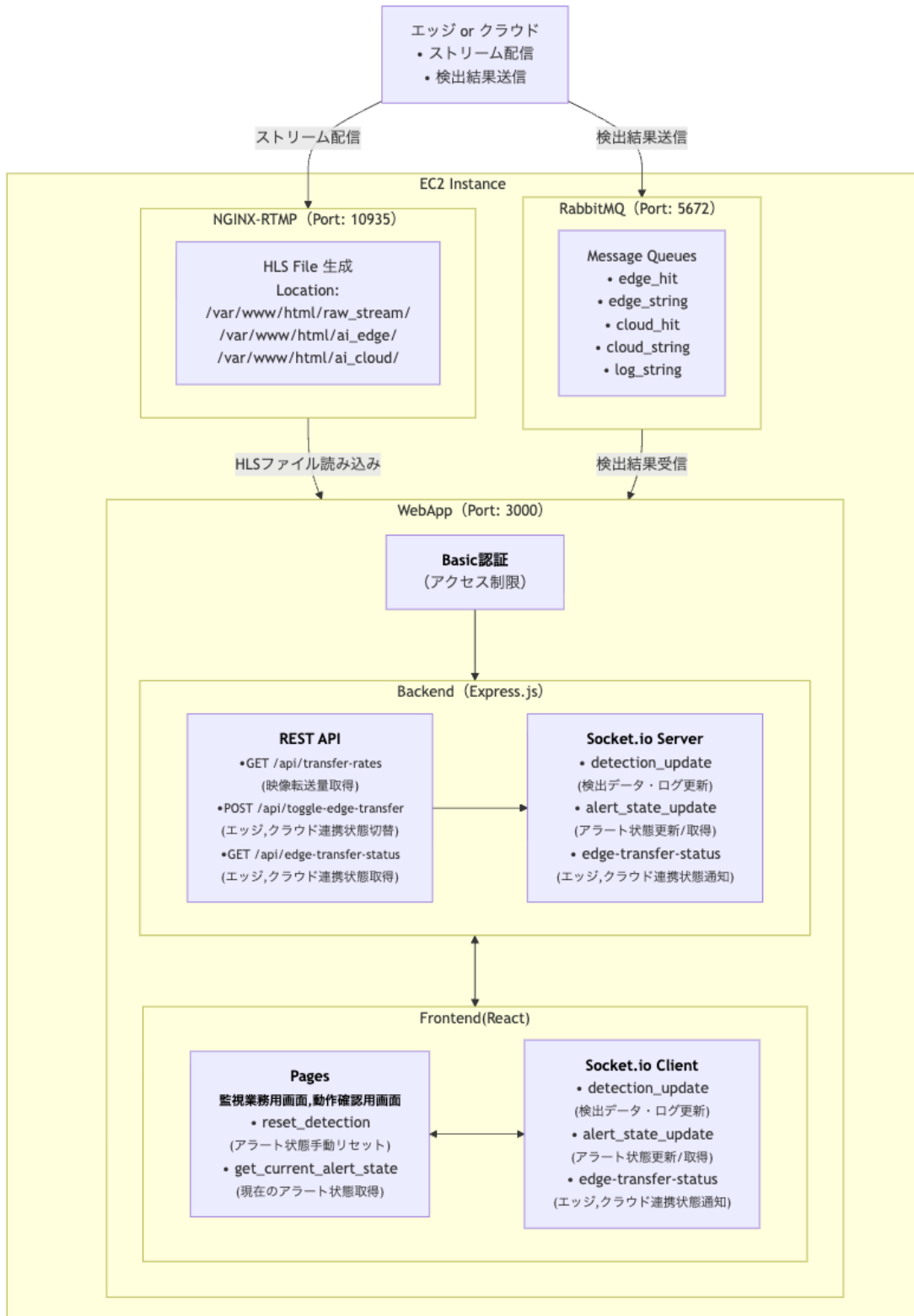
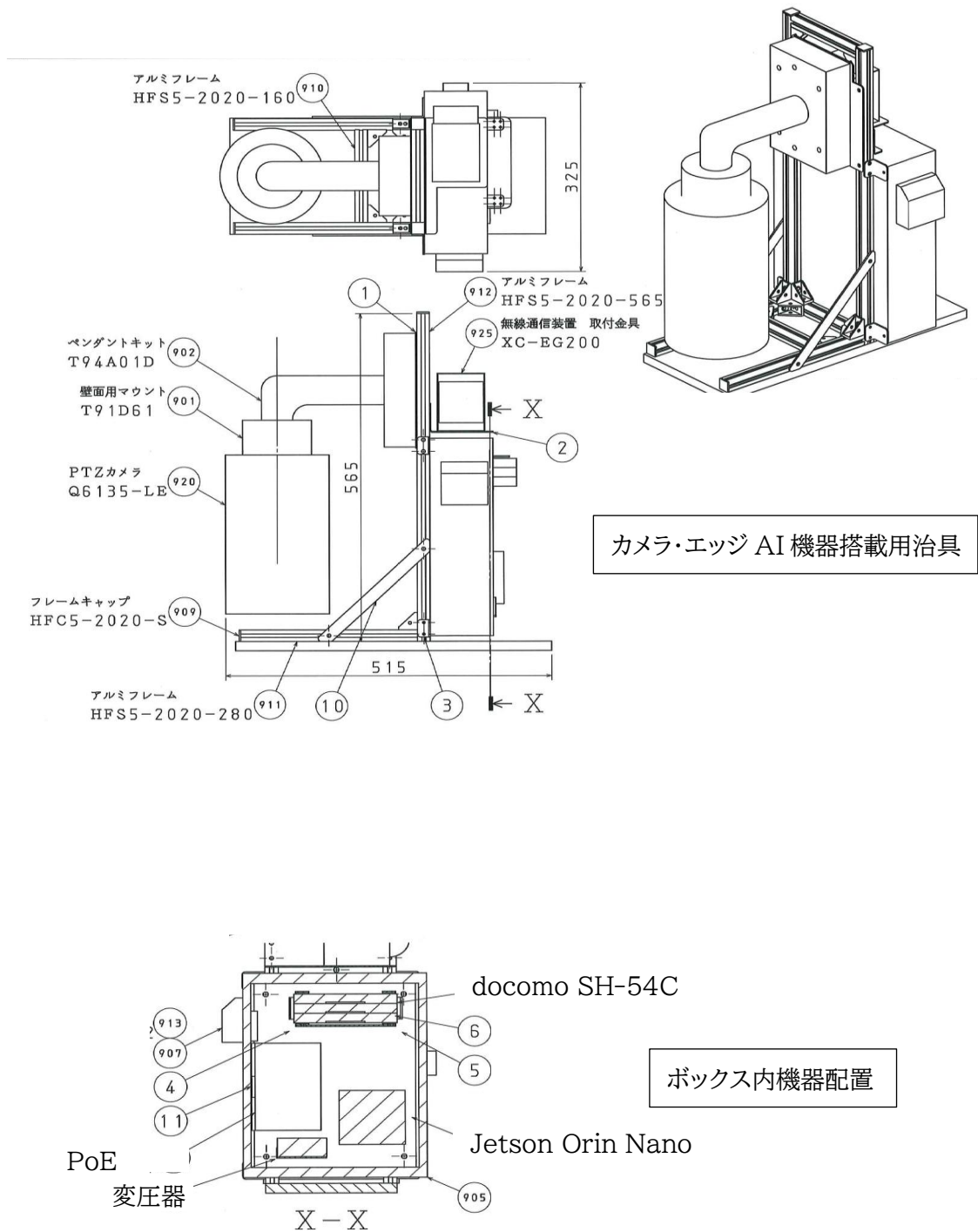


図 8.1-2 Web アプリの構成説明図

● カメラおよびエッジコンピュータをロボットの背面に固定するための治具



ユースケース②の実験におけるシステムの構成は次のとおりである。

- 静的反射板(4.5GHz)

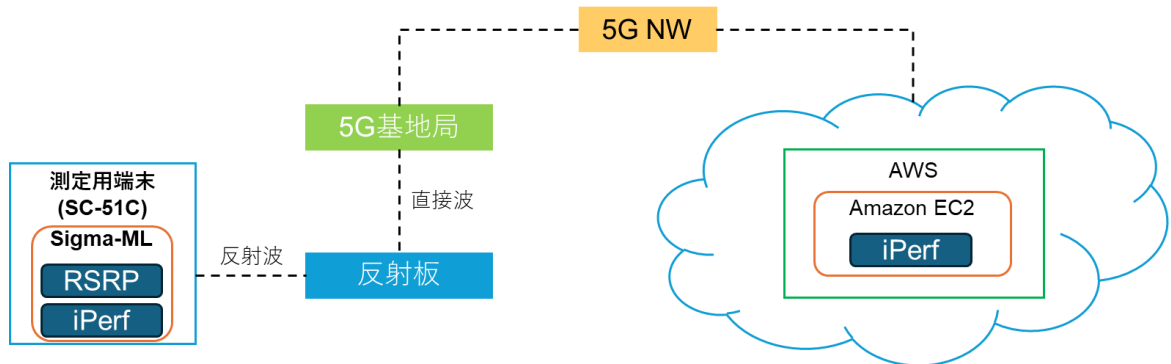


図 8.1-4 静的反射板(4.5GHz)におけるシステム構成

動的反射板のように外部からの制御機能はないため、反射板を設置するのみとなる。

- 動的反射板(28GHz)

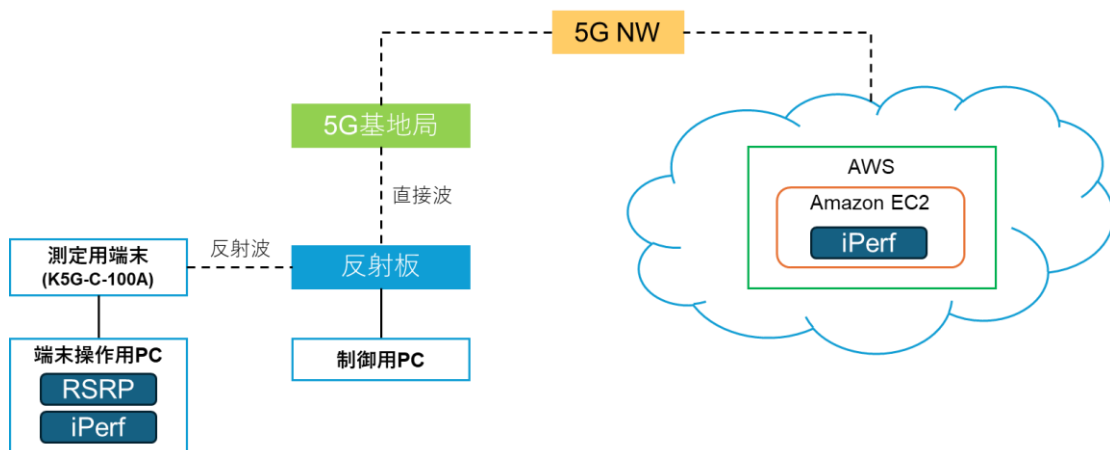


図 8.1-5 動的反射板(28GHz)におけるシステム構成

- 動的反射板(60GHz)

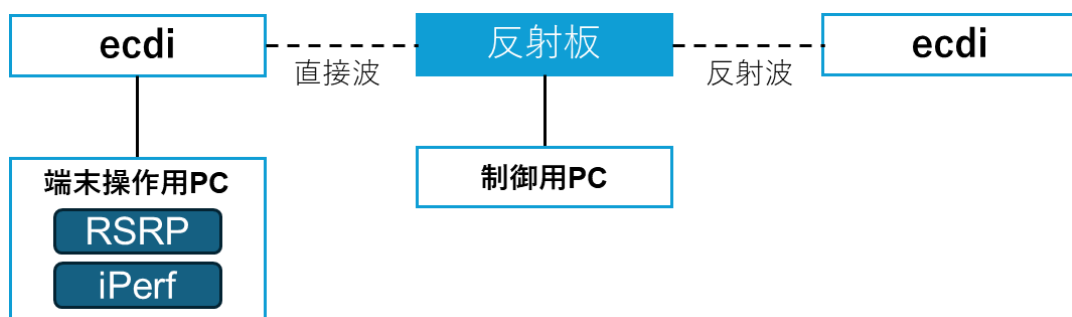


図 8.1-6 動的反射板(60GHz)におけるシステム構成

動的反射板(28GHz/60GHz)反射板に制御用の PC を接続。PC から反射板の位相制御を行い、反射角度等の調整を行う。

○iVoRi Box システム構成図(Internet)

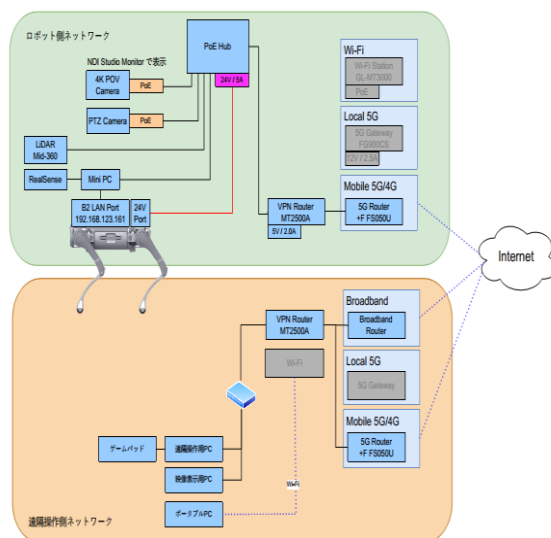


図 8.1-7 iVoRi Box システム構成図(Internet)

○iVoRi Box システム構成図(Wi-Fi)

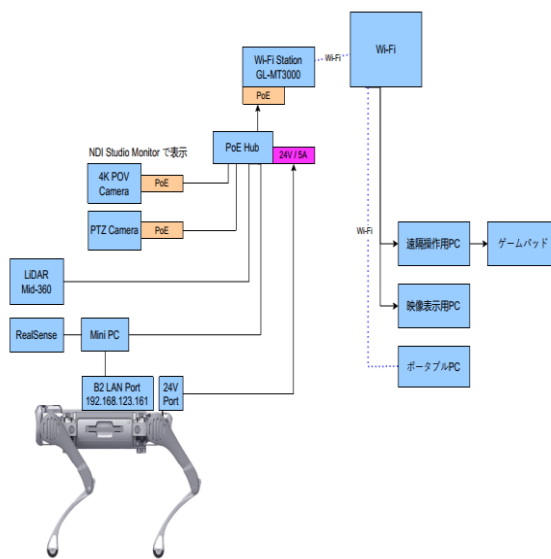


図 8.1-8 iVoRi Box システム構成図(Wi-Fi)

## 8.2 ネットワーク構成図・設計書

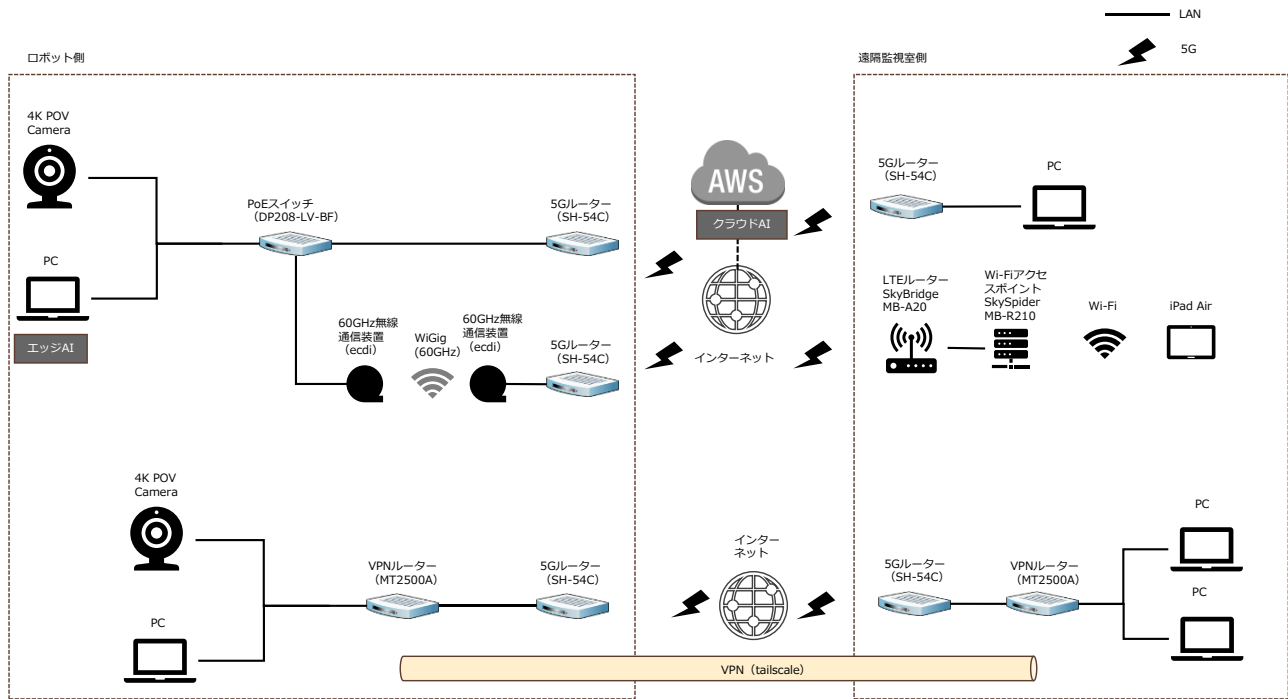


図 8.2-1 ネットワーク構成図

## 8.3 使用機器・ソフトウェア一覧

### 【ユースケース①②における四足歩行ロボット+遠隔制御システム】

カメラ・エッジ AI による遠隔巡視を実施する為、今回使用した四足歩行ロボットと遠隔制御システムについて以下記載する。(四足歩行ロボットと遠隔制御システムは個別の機器の為、個々に記載する)



図 8.3-1 カメラ・エッジ AI と遠隔制御システムを搭載した四足歩行ロボット

#### ➤ 四足歩行ロボット

名称:Unitree B2-W

機能:ホイール付き 4 足による移動。高速モードと障害物対応モードのモード切替可能。

標準移動速度は 6km/h、最大速度は 15km/h。

階段や不整地などは 30cm 程度の段差であれば乗り越え/昇降可能。勾配 45 度まで登坂可能

防塵防水性能はIP67。全天候対応。水深浅目の水路/川などであれば移動可能

急な衝撃を受けても自動でバランス保持対応。

40kg までの機材の運搬可能(リヤカーなどの利用で 80kg 以上牽引可能)

本体搭載カメラによる撮影、3DLiDAR による周辺の 3D 情報取得。

その他オプションパーツ搭載による機能拡張(例:ロボットアーム搭載による障害物除去など)

サイズ:立ち:1098mm\*550mm\*758mm

座り:950mm\*550mm\*450mm

重量:75kg(本体重量:65kg、バッテリー重量:10kg)

稼働時間:・バッテリーフル充電で最大 6 時間程度。

負荷の大きい荷物を搭載して連続稼働する場合や、遠隔制御システムやルーター、カメラなどの搭載機器の電気を本体バッテリーから取得する場合は短くなる。

充電はバッテリー交換で実施。バッテリーは 2 時間程度で充電完了。

オプション:ホイールは通常の足へと換装可能(ホイール無しの機体は UnitreeB2 と呼ぶ)

その場合、移動性能/稼働時間に変化有(基本、B2-W の方が性能は上)

外部取付アームあり(リモコン制御型)。外部自動充電板による非接触充電可能。

操作:Bluetooth リモコンによる操作(有効距離は最大 100m 程度)。

公式のスマホアプリによる遠隔制御。

導入概算額:本体のみの場合、1300 万(2 次開発可能な型式)

補足:ロボット本体は中国の UnitreeRobotics の代理販売となる。

➤ 遠隔制御システム

名称:iVoRiBox

機能:Wi-Fi、またはインターネットを経由して四足歩行ロボットを遠隔操作。

ロボットに搭載したカメラによるリアルタイムの映像表示。

サイズ:機材搭載用の上板があり、このサイズは「長さ 500mm\*幅 200mm」となっており、これに収まるように機能に応じた機材を搭載する。

高さも特に規定はないが、ロボットの移動時のバランスに応じて調整する。

重量:搭載する機材の組み合わせ次第で変動。最小限の組み合わせであれば 2-3kg 程度

稼働時間:ロボットのバッテリーから電力を供給する為、ロボットの稼働時間に準ずる。

オプション:センサー追加による人追従機能、ライントレース機能、3DLiDAR による 3DMAP 取得、障害物回避、作成した 3DMAP による自律移動、マイク/スピーカーによる音声通話、

AR ツール組み込みによる測定、360 度カメラ・POV カメラによる撮影、

サーモセンサーなどセンサー類搭載による計測、撮影データ解析など

操作:制御側 PC で遠隔カメラ映像を見ながらパッドによる操作が基本。

自律走行の場合は、先に設定を行い、スタートさせる(マニュアルでの割込みは可能)

導入概算額:700 万(ソフト 500 万、ハード 200 万)

補足:機能については、顧客の要望に応じて開発を行う。

また小型の四足歩行ロボット(Unitree Go2-W)用にサイズ/機能を調整したのものもあり。

【ユースケース①:エッジ AI による通信量の低減における使用機器・ソフトウェア】

➤ データ取得に関する機器

➤ ネットワークPTZカメラ 1 台

◇機種:AXIS Q6135-LTE

◇解像度:1920x1080

◇フレームレート:

◇通信プロトコル:Real-Time Messaging Protocol (RTMP)

◇用途:映像データの取得

➤ データ通信に関する機器・ソフトウェア

➤ PoE スイッチ

◇機種:DP208-LV-BF

◇駆動電圧:12V

◇用途:ネットワークPTZカメラへの PoE 給電;カメラ-エッジ AI 機器間有線通信;

エッジ AI 機器-モバイルルーター間有線通信

- モバイルルーター
  - ◇機種:docomo SH-54C
  
- データ処理に関する機器・ソフトウェア
  - エッジ AI
    - ◇機種:NVIDIA Jetson Orin Nano
    - ◇OS:Ubuntu 24.04
    - ◇CPU:6 コア Arm Cortex-A78AE
    - ◇GPU:NVIDIA Ampere アーキテクチャ(第 3 世代)
    - ◇メモリ:8 GB
    - ◇駆動電圧:19V
  - クラウド AI
    - ◇機種:AWS EC2 p5.4xlarge インスタンス
    - ◇OS:Ubuntu 24.04
    - ◇vCPU:16
    - ◇GPU:NVIDIA Hopper アーキテクチャ (第 4 世代) Tensor Core H100x1
    - ◇GPU メモリ:80 GB
    - ◇メモリ:256 GB
  
- データ利用に関する機器・ソフトウェア
  - Web サーバー
    - ◇機種:AWS EC2 c6i.4xlarge インスタンス
    - ◇OS:Ubuntu 24.04
    - ◇vCPU:16
    - ◇アーキテクチャ:x86\_64
    - ◇メモリ:32 GB
    - ◇RTMP サーバー:nginx-rtmp-module
  - 監視用クライアント
    - ◇機種:iPad Air 11-inch (M3)
    - ◇OS:iPadOS 18.7.2
    - ◇メモリ:128 GB
    - ◇監視画面閲覧ソフト:Safari
  
- Web アプリ
  - 監視業務用 Web 画面
    - ◇目的:実際の管理業務で利用する場面を模擬



図 8.3-2 監視業務用 Web 画面構成

表 8.3-1 コンポーネント

	コンポーネント	機能
①	画面切り替えボタン	選択した画面が表示される
②	日付・時刻表示	現時刻と日付を表示する
③	検出インジケータ	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 未検出時は緑色</li> <li>● 検出結果ログで検出を受信した際に赤色に変化</li> <li>● アラート解除ボタンが押下されると緑色に戻る</li> </ul>
④	表示映像	現在映し出されている映像の表示
⑤	映像表示切替ボタン	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 選択した映像が表示される</li> <li>● 選択されたボタンは拡大し、文字が大きく、背景色が緑色に変化</li> </ul>
⑥	映像	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 映像表示切り替えボタンで選択された元映像、エッジ AI 検出映像、クラウド AI 検出映像のいずれかを表示</li> <li>● 検出時(アラート時)は映像枠が赤色に点滅、アラート解除ボタンが押下されると点滅が停止</li> </ul>
⑦	検出結果ログ	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 映像表示切り替えボタンに応じて、検出結果ログを表示</li> <li>● 元映像、エッジ AI 検出が選択時:エッジ AI からの検出結果ログを表示</li> <li>● クラウド AI 検出が選択時:クラウド AI からの検出結果ログを表示</li> <li>● ログエリアはスクロール機能付き</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>● 900 件のログを表示し、毎秒更新</li> <li>● ログのフォーマット:時刻 - メッセージ 形式</li> <li>● 検出ログは背景色が赤色で文字が大きく表示</li> </ul>
⑧	内部処理ログ	<ul style="list-style-type: none"> <li>● エッジ AI またはクラウド AI からの内部処理ログを表示</li> <li>● ログエリアはスクロール機能付き</li> <li>● 900 件のログを表示し、毎秒更新</li> <li>● ログのフォーマット:時刻 - メッセージ 形式</li> </ul>
⑨	アラート解除ボタン	アラート状態を解除する

➤ 評価実験時の動作確認用 Web 画面

◇ 目的:本実証実験において動作状況を確認するため



図 8.3-3 評価実験時の動作確認用 Web 画面構成

表 8.3-2 コンポーネント

	コンポーネント	機能
①	データ送信状況	<ul style="list-style-type: none"> <li>● エッジ→クラウド間のデータ送信状況を可視化</li> <li>● クラウドへ映像データ転送中:映像データ矢印青く点滅</li> <li>● エッジ、クラウド AI から検出ログ受信時:検出結果矢印赤く点滅</li> <li>● 映像データ転送中またはエッジ、クラウド AI から検出ログ受信時:エッジ、クラウドの楕円が点滅しつつ拡大</li> </ul>
②	エッジ・クラウドデータ	映像データの送受信量を kbps/Mbps 単位での数値

	送受信量	表示
③	送受信量メーター	24 段階のバーグラフでリアルタイムのデータ送受信量を表示
④	映像表示	元映像、エッジ AI 検出映像、クラウド AI 検出映像の表示
⑤	エッジ AI 検出ログ	<ul style="list-style-type: none"> <li>● エッジ AI からの検出結果ログを表示</li> <li>● ログエリアはスクロール機能付き</li> <li>● 900 件のログを表示し、毎秒更新</li> <li>● ログのフォーマット:時刻 - メッセージ 形式</li> <li>● 検出ログは背景色が赤色で文字が大きく表示</li> </ul>
⑥	クラウド AI 検出ログ	<ul style="list-style-type: none"> <li>● クラウド AI からの検出結果ログを表示</li> <li>● ログエリアはスクロール機能付き</li> <li>● 900 件のログを表示し、毎秒更新</li> <li>● ログのフォーマット:時刻 - メッセージ 形式</li> <li>● 検出ログは背景色が赤色で文字が大きく表示</li> </ul>
⑦	エッジ・クラウド連携 ON/OFF ボタン	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 映像表示切り替えボタンに応じて、検出結果ログを表示</li> <li>● エッジ・クラウド連携 ON:3 つの映像が表示される</li> <li>● エッジ・クラウド連携 OFF:エッジ AI 検出映像エリアを「連携 OFF」プレースホルダ表示に切り替え</li> </ul>

【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での使用機器・ソフトウェア】

・4.5GHz 静的メタサーフェス反射板

対応周波数	4.5GHz帯 (5G)
反射板サイズ	幅1065mm × 高さ1065mm
反射角度 (固定/電気制御無)	固定
使用枚数	20枚(予備2枚)
使用場所	仙台市市役所新庁舎建設現場 及び 東北大学 青葉山キャンパス (地下鉄青葉山駅周辺)
備考	専用架台10台 (+予備1台) (東北大にて使用)



図 8.3-4 4.5GHz 静的メタサーフェス反射板詳細

・28GHz 動的メタサーフェス反射板

対応周波数	28GHz帯 (5G)
反射板サイズ	幅320mm × 高さ260mm
反射角度 (可変/電気制御有)	水平 $-60^{\circ}$ ~ $+60^{\circ}$
使用枚数	2枚 (予備1枚)
使用場所	東北大学 青葉山キャンパス (地下鉄青葉山駅周辺)
備考	反射角度の電気制御を行わない 場合は静的反射板として動作 (反射角度は鏡面反射相当)



図 8.3-5 28GHz 動的メタサーフェス反射板①詳細

対応周波数	28GHz帯 (5G)
反射板サイズ	幅300mm×高さ380mm ※外枠除く
反射角度 (可変/電気制御有)	水平 $-60^{\circ}$ ~ $+60^{\circ}$
使用枚数	2枚 (予備1枚)
使用場所	東北大学 青葉山キャンパス (地下鉄青葉山駅周辺)
備考	反射角度の電気制御を行わない 場合は静的反射板として動作 (反射角度は鏡面反射相当)

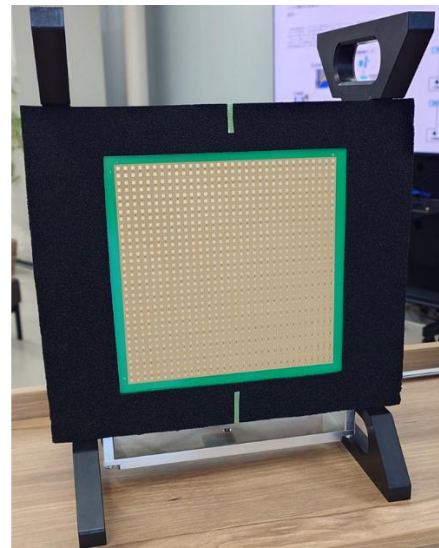


図 8.3-6 28GHz 動的メタサーフェス反射板②詳細

・60GHz 動的メタサーフェス反射板

対応周波数	60GHz帯 (WiGig)
反射板サイズ	幅200mm×高さ200mm ※外枠除く
反射角度 (可変/電気制御有)	水平 $-45^{\circ}$ ~ $+45^{\circ}$
使用枚数	1枚
使用場所	東北大学 青葉山新キャンパス 農場エリア 及び 仙台市役所新庁舎建設現場
備考	反射角度の電気制御を行わない 場合は静的反射板として動作 (反射角度は鏡面反射相当)



図 8.3-7 60GHz 動的メタサーフェス反射板詳細

## 8.4 取得したデータの例

ユースケース①における取得映像データ例は次のとおりである。

- 圃場における熊検出

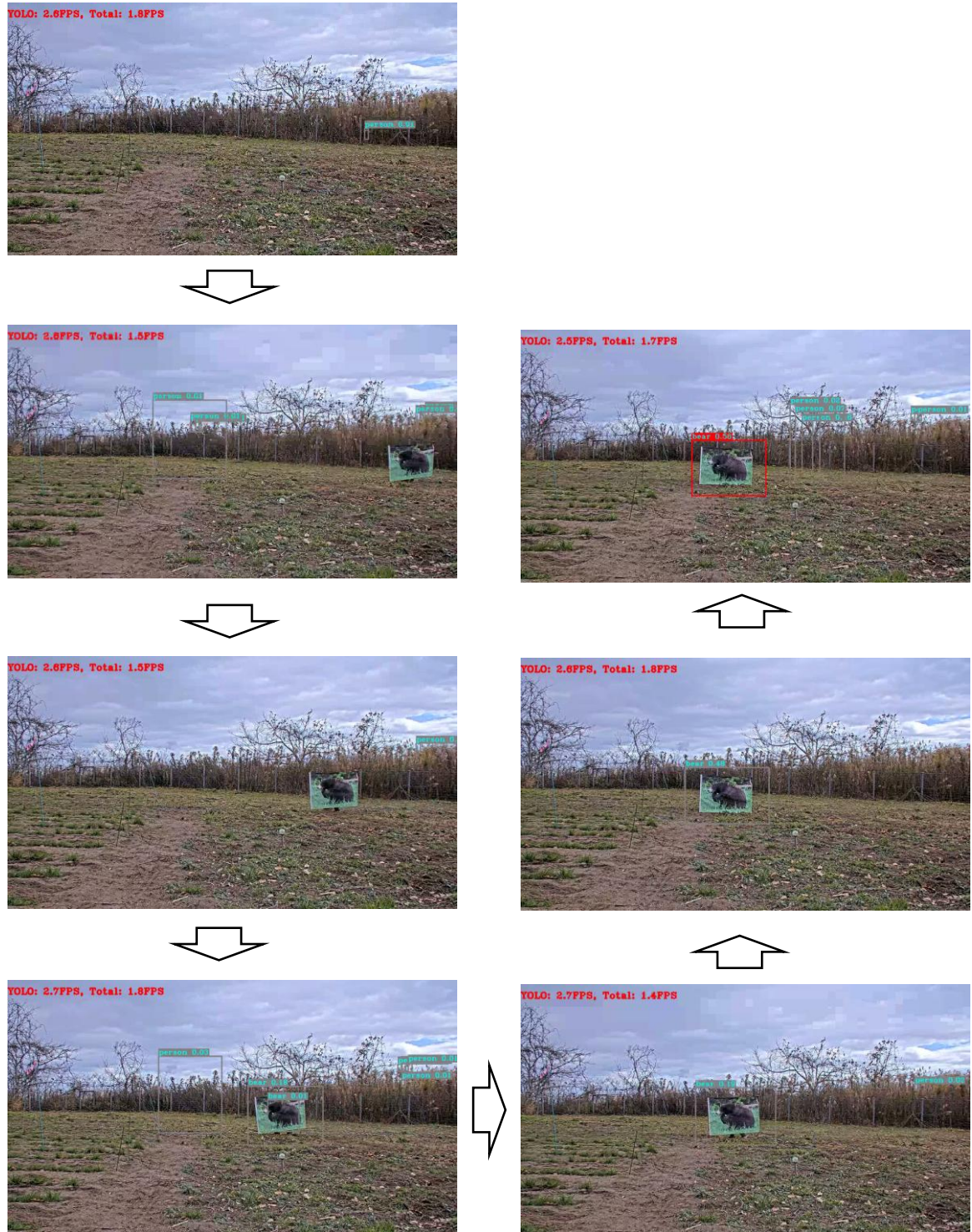


図 8.4-1 取得データ例(圃場における熊検出)

- 工事現場における不審者検出



図 8.4-2 取得データ例(工事現場における不審者検出)

- 圃場における不審者検出

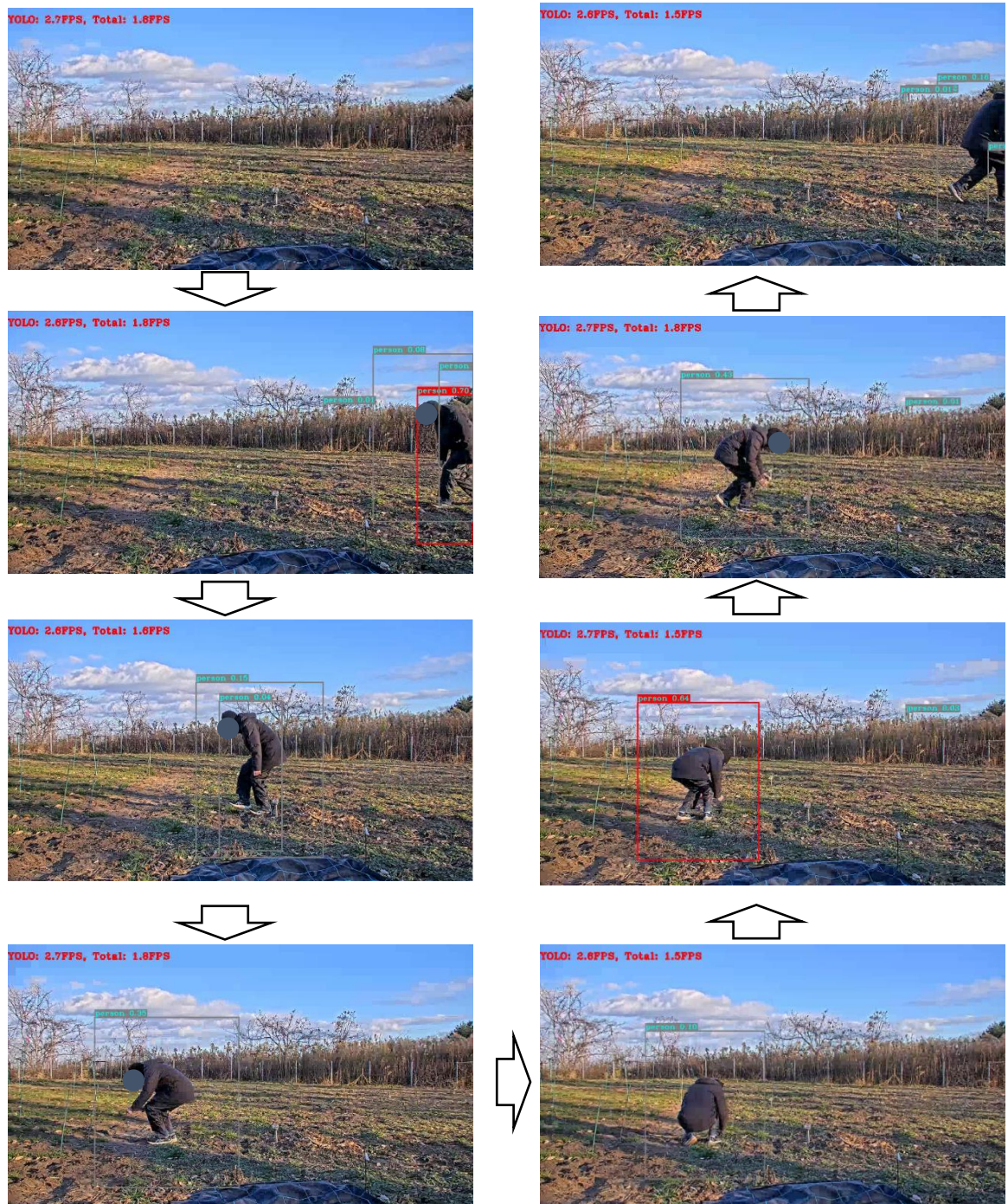


図 8.4-3 取得データ例(圃場における不審者検出)

- 工事現場の暗がりにおける不審者検出

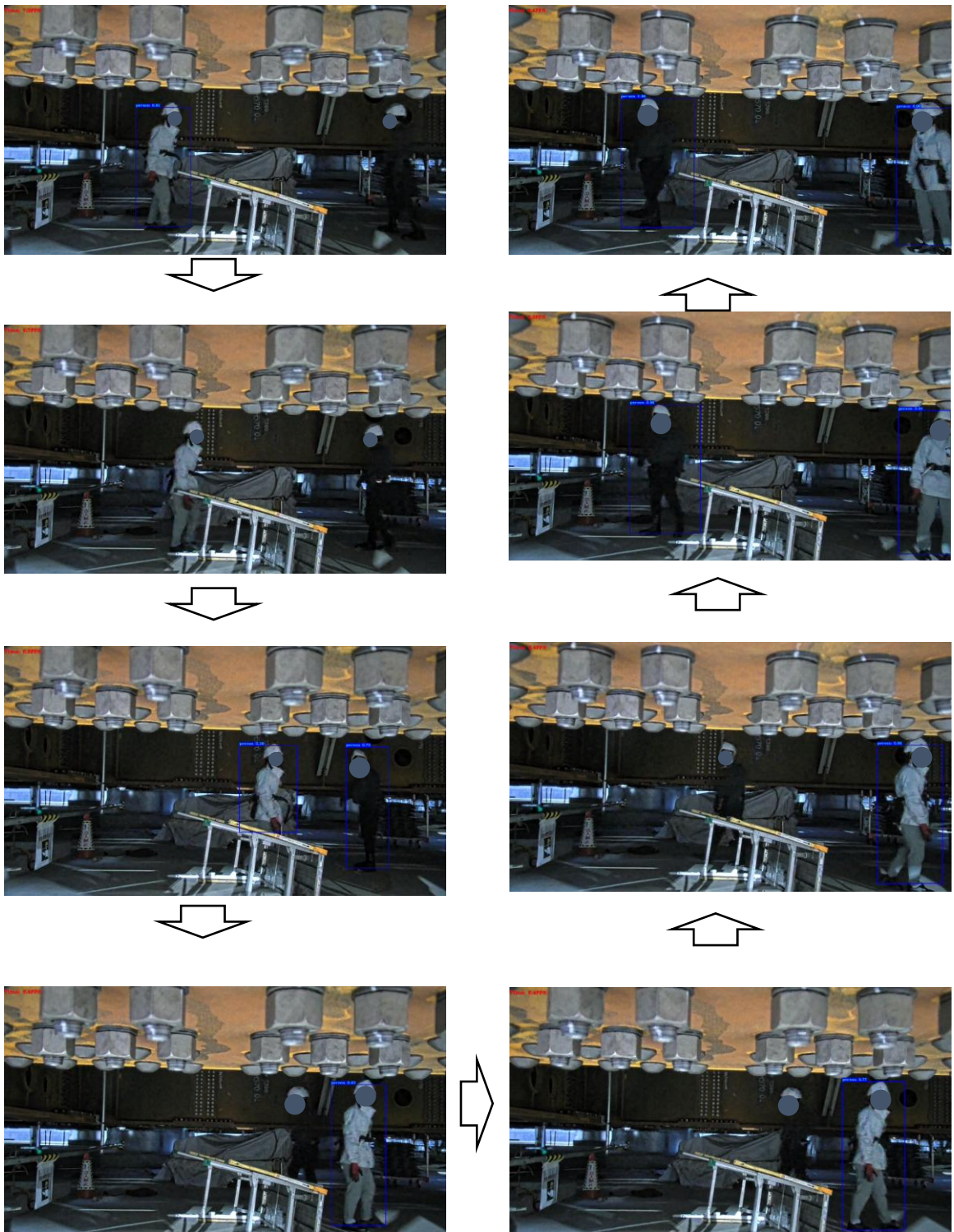


図 8.4-4 取得データ例(工事現場の暗がりにおける不審者検出)

- 工事現場における煙検出

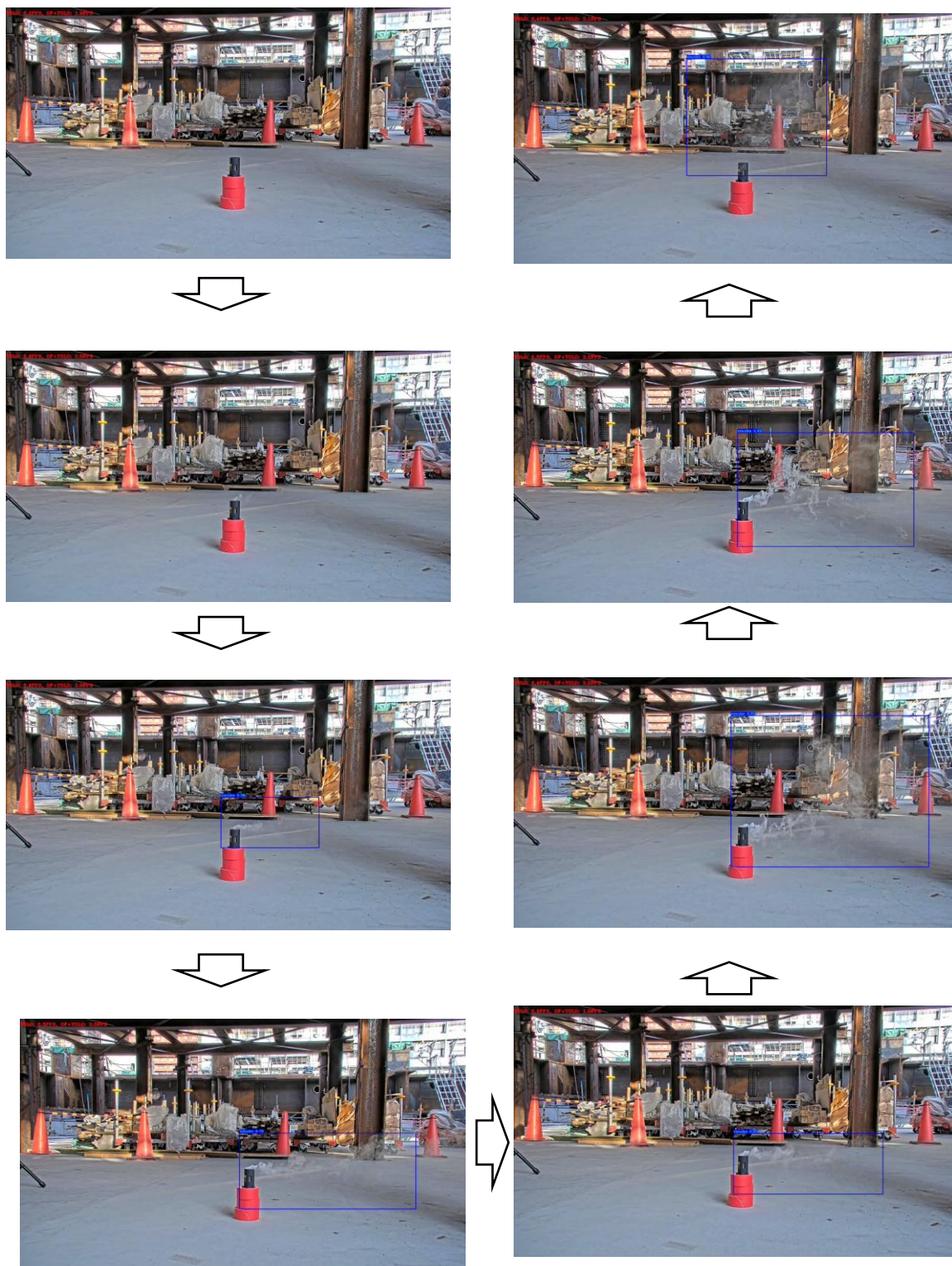


図 8.4-5 取得データ例(工事現場における煙検出)

ユースケース②における取得したデータの例は次のとおりである。  
測定に使用した端末で取得したデータは通信速度(スループット)と受信電界強度の2点になる。  
通信速度の例を図 8.4-6、受信電界強度の例を図 8.4-7 に示す。

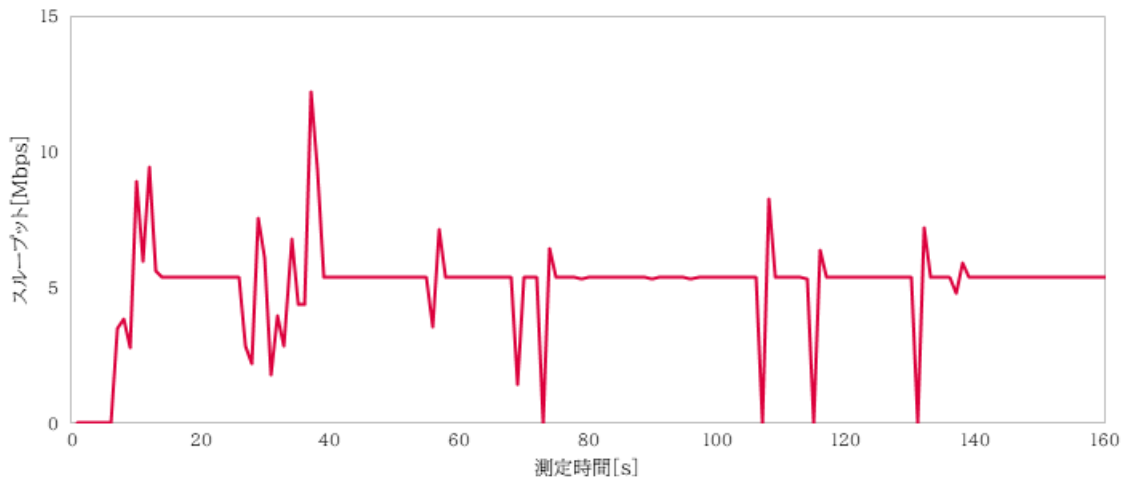


図 8.4-6 通信速度(スループット)の例

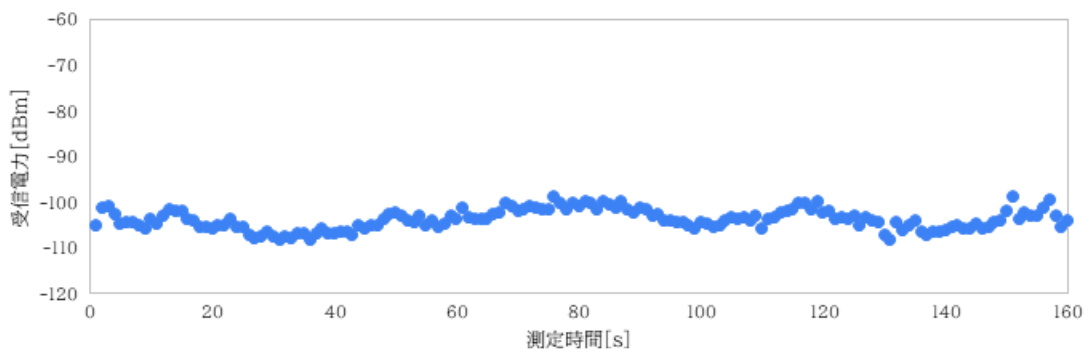


図 8.4-7 受信電界強度の例

## 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

該当なし

## 8.6 広報活動実績

表 8.6-1 広報活動実績

	掲載日	掲載元	公開内容(タイトル)/URL
報道 発表	2025/12/05	NTT ドコモビジネ ス株式会社	宮城県仙台市新庁舎建替現場および東北大学青葉山新 キャンパスにおいて実現場における AI 活用の実証実験を 開始 <a href="https://www.ntt.com/about-us/area-info/article/20251205.html?msockid=324e444475ce6aa91cd9526871ce61dd">https://www.ntt.com/about-us/area- info/article/20251205.html?msockid=324e444 475ce6aa91cd9526871ce61dd</a>
	2025/12/05	ドコモ・テクノロジ株 式会社	宮城県仙台市新庁舎建替現場および東北大学青葉山新 キャンパスにおいて実現場における AI 活用の実証実験を 開始 <a href="https://www.docomo-tech.co.jp/content/news_release/pdf/press-release_20251205.pdf">https://www.docomo- tech.co.jp/content/news_release/pdf/press- release_20251205.pdf</a>
	2025/12/05	国立研究開発法人 情報通信研究機構	仙台市において実現場における AI 活用の実証実験を開始 <a href="https://www.nict.go.jp/publicity/topics/2025/12/05-1.html">https://www.nict.go.jp/publicity/topics/2025/1 2/05-1.html</a>
	2025/12/05	株式会社大林組	宮城県仙台市新庁舎建替現場および東北大学青葉山新 キャンパスにおいて実現場における AI 活用の実証実験を 開始 <a href="https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20251205_1.html">https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news2 0251205_1.html</a>
	2025/12/05	国立大学法人東北大 学	宮城県仙台市新庁舎建替現場および東北大学青葉山新キャン パスにおいて実現場における AI 活用の実証実験を開始 <a href="https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2025/12/press20251205-01-AI.html">https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2025/12/pr ess20251205-01-AI.html</a>
	2025/12/05	仙台市	総務省「地域社会 DX 推進パッケージ事業(AI 検証タイプ)」 の取り組みを開始しました <a href="https://www.city.sendai.jp/project/supercity/sendaisupercity.html">https://www.city.sendai.jp/project/supercity/se ndaisupercity.html</a>
メディア	2025/12/05	khb 東日本放送	AI で業務を効率化 仙台市役所建て替え工事で実証実験 <a href="https://www.khb-tv.co.jp/news/16203967">https://www.khb-tv.co.jp/news/16203967</a>

	2025/12/05	tbc 東北放送	AI ロボット活用で”人手不足の解消”や”業務の効率化”へ 仙台市役所新庁舎の建設現場で実証実験 <a href="https://newsdig.tbs.co.jp/articles/tbc/2331559?display=1">https://newsdig.tbs.co.jp/articles/tbc/2331559? display=1</a>
	2025/12/05	仙台放送	AI ロボットが現場巡回し異常検知 仙台市役所建て替え工 事で実証実験 通信環境など検証
	2025/12/05	NHK	AI やロボット活用で工事現場の作業省力化へ 仙台で実証 実験
	2025/12/05	日本経済新聞電子版	建設現場や農場の作業、AI で省力化実験 仙台市で NTT 系や大林組 <a href="https://www.nikkei.com/article/DGXZQOCC124850S5A111C2000000/">https://www.nikkei.com/article/DGXZQOCC124 850S5A111C2000000/</a>
	2025/12/06	ミヤギテレビ	【建て替え中】仙台市役所、『AI』や『ロボット』を工事現場に 活用する実証実験 <a href="https://news.ntv.co.jp/n/mmt/category/society/mmf245a5cc87d743a892d407a016dac146">https://news.ntv.co.jp/n/mmt/category/society/ mmf245a5cc87d743a892d407a016dac146</a>
	2025/12/06	日本経済新聞	建設現場・農場、省人化へ(12月6日 地方経済面 東北 2 ページ)
	2025/12/06	河北新報	工事現場で AI ロボ活用/NTT/建設中の仙台市役所で実 験(12月6日朝刊 10面)
	2025/12/06	河北新報オンライン	工事現場で AI ロボ活用 NTTが建設中の仙台市役所で実 験 <a href="https://kahoku.news/articles/20251205khn000090.html">https://kahoku.news/articles/20251205khn000 090.html</a>
	2025/12/08	日刊建設工業新聞	NTTドコモビジネス、大林組ら/AI・ロボ活用拡大へ実証実 験(12月8日 技術・商品 3面)
	2025/12/10	日刊工業新聞	建設現場 AI 活用検証 ドコモビジ 仙台市など 通信環境 を整備(12月10日朝刊 26面) <a href="https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00768441">https://www.nikkan.co.jp/articles/view/007684 41</a>
その他	2025/10/03 2025/10/04	YRP オープンイノ ベーションデー2025 展示会	「仙台実証 AI コンソーシアム」として、展示ブースを設置 <a href="https://yrp.co.jp/open_innovationday_2025_exhibition/">https://yrp.co.jp/open_innovationday_2025_exhi bition/</a>

	2025/11/26	TOHOKU DX GATEWAY 2025 [自治体向け DX 展 示会]	「仙台市×東北大学スマートフロンティア協議会企画展」内で 総務省「地域社会 DX 推進パッケージ事業(AI 検証タイプ)」 の紹介ブースを設置 <a href="https://tohoku-dx-gateway.jp/">https://tohoku-dx-gateway.jp/</a>
--	------------	---	--

## 8.7 参考文献

- 1) 株式会社パーソル総合研究所, 中央大学, 「労働市場の未来推計 2035」
- 2) Kikuta, K., Murata, K. T. and Murakami, Y., “A Daytime Smoke Detection Method Based on Variances of Optical Flow and Characteristics of HSV Color on Footage from Outdoor Camera in Urban City,” *Fire Technology*, vol. 60, pp. 1427-1452, 2024.
- 3) 菊田和孝、村田健史、西村太志、“映像 IoT 技術と画像解析による桜島モニタリング”、日本火山学会 2024 年度秋季大会、2024.
- 4) K.Kikuta, et al., “A daytime smoke detection method based on variances of optical flow and characteristics of HSV color on footage from outdoor camera in urban city,” *Fire Technology*, vol. 60, pp. 1427-1452, 2024.

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  
(代表機関:NTT ドコモビジネス株式会社)

実証報告書

工事現場等における AI を用いた通信量削減および  
メタサーフェス反射板による電波不感地域改善の実証

---

2026 年 1 月

AI02 仙台市  
NTT ドコモビジネス株式会社  
国立研究開発法人情報通信研究機構、株式会社ポケット・クエリーズ、株式会社大林組、  
AGC 株式会社、ドコモ・テクノロジー株式会社、株式会社横須賀リサーチパーク

---