令和３年度事後事業評価書

政策所管部局課室名：消防庁　消防大学校消防研究センター

評価年月：令和３年８月

１　政策（研究開発名称）

エネルギー・産業基盤災害対応のための消防ロボットの研究開発

２　研究開発の概要等

（１）研究開発の概要

・実施期間

平成 26 年度～令和２年度（７か年）

消防ロボットの研究開発を平成 26 年度～平成 30 年度の５年計画で開始した。この５年間の研究開発の評価を実施するために開催した消防本部職員を含む外部有識者で構成される研究評価会における評価や意見、消防ロボットの完成度、消防本部のニーズ及び配備要望等を踏まえ、消防ロボットを社会実装する段階まで研究開発を進めることとし、令和元年度～令和２年度の２年間で実証配備及びこれに基づく改良等を実施した。

・実施主体

総務省消防庁消防大学校消防研究センター

・総事業費

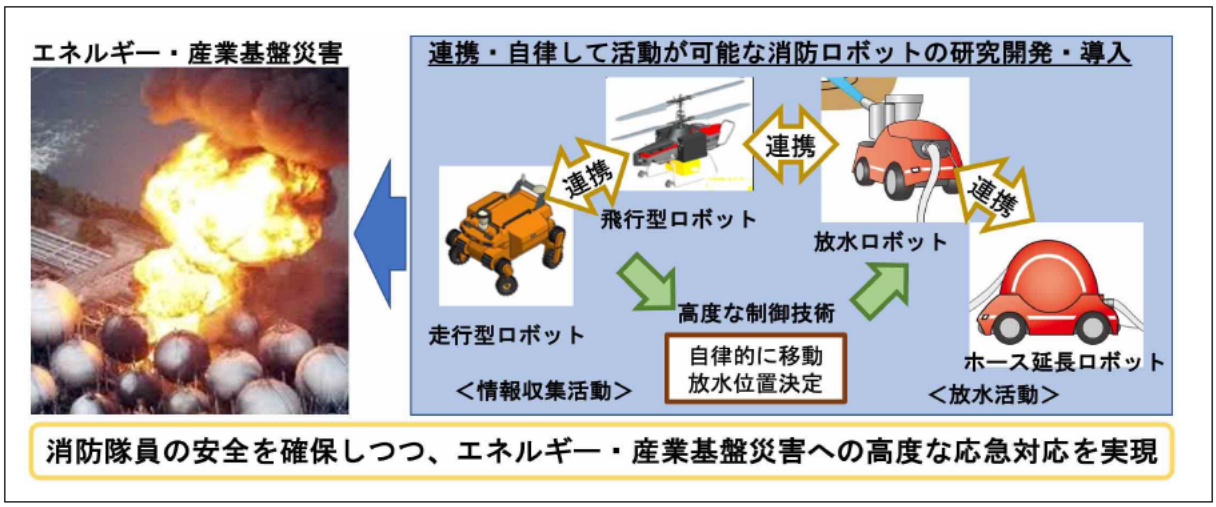
1,497 百万円

平成 26 年度	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	令和元年度	令和２年度
205 百万円	225 百万円	259 百万円	347 百万円	340 百万円	50 百万円	71 百万円

総　額
1,497 百万円

・概　要

東日本大震災におけるＬＰガスの大規模な爆発火災、平成 24 年の姫路市化学プラント爆発火災における消防職員の殉職等の教訓として、消防隊が現場に近づけない過酷な環境となる石油コンビナート災害における活動手段の確保が課題となっている。今後発生が懸念されている南海トラフ巨大地震・首都直下地震の被害想定地域には、我が国有数のエネルギー・産業基盤が集積しており、情報収集活動や放水活動を自律的かつ協調連携して行い、実戦において活用できるレベルの消防ロボットシステムを研究開発する。



単体のロボットで大規模な災害に対応することは難しく、複数のロボットやコンピュータが共同で対応する必要がある。このため、「消防ロボットが共同して活動するチーム」を「消防ロボットシステム」という用語を用いて呼ぶこととする。

大規模な火災や爆発危険性の高い事故において災害の拡大を抑制する消防ロボットシステムには主に、以下の３つの技術が必要となる。

・協調連携技術：1 台のロボットの動きを認識して他のロボットが連動して移動する技術、及び、1 台のロボットが得た画像情報を解析し、他のロボットの動作に活かす技術。
・耐放射熱技術：本研究では国内で想定される最も高熱となる石油タンク火災を想定し、この火災に対して有効に放水が届く 50m 程度まで近接して活動が可能となる耐熱技術。
・自律技術：大規模災害においては対応が長時間となり、全てを遠隔操縦で行うことは操作者への負担が大きく、また、微妙な操作は遠隔操縦では難しいため、ロボット自身が自ら判断し機能する自律技術。

これらの技術は研究論文レベルでは実現可能とされているものの、災害現場での実運用に耐え得る技術とはなっていない。そこで、これらの技術を災害現場での実運用に耐え得るレベルに引き上げ、実戦レベルで運用可能な消防ロボットシステムを開発する。

消防ロボットシステムは以下の表のとおり構成される。

ロボット等	機能等
飛行型偵察・監視ロボット	上空から災害全体の状況を偵察するとともに消火活動に最適な場所の選定やそこに至る侵入経路の選定に必要な情報を収集する他、放水開始後、放水砲ロボットの放水が届いている地点を監視する。
走行型偵察・監視ロボット	地上を走行しながら、石油化学コンビナート敷地内の通路の状況を偵察し、放水開始後、放水砲ロボットの放水が届いている地点を監視する。
放水砲ロボット	泡を放射及び水を放水することができる放水砲を備え、消火や冷却を行う(*1)。
ホース延長ロボット	必要なホースを積載し、ホースを延長する（消防では、移動しながらホースを敷設することを「延長する」と言うため、以下ホースを延長すると表記する）(*2)。
指令システム	情報を解析するとともに、各ロボットが有効に機能するよう指令を出し、各ロボットが取得した画像などの情報をシステム全体で共有する。
搬送車輌	各ロボット及び指令システムを稼働させるための電源装置等を装備し、消防ロボットシステムを一括して積載し、現場へ搬送する。

(*1) 原油等を貯蔵している石油タンクの火災は、水では消火することはできず、泡（薬剤を水に混合し泡とする）で空気を遮断し、消火する。また、火災が発生している石油タンクは、火災の熱により強度が低くなり、倒壊する等の危険な状況となる可能性が高いことから、火災が発生している石油タンクに水を放水し冷却する。さらに、火災が延焼することを防ぐために、延焼する危険がある施設に水を放水し冷却する。

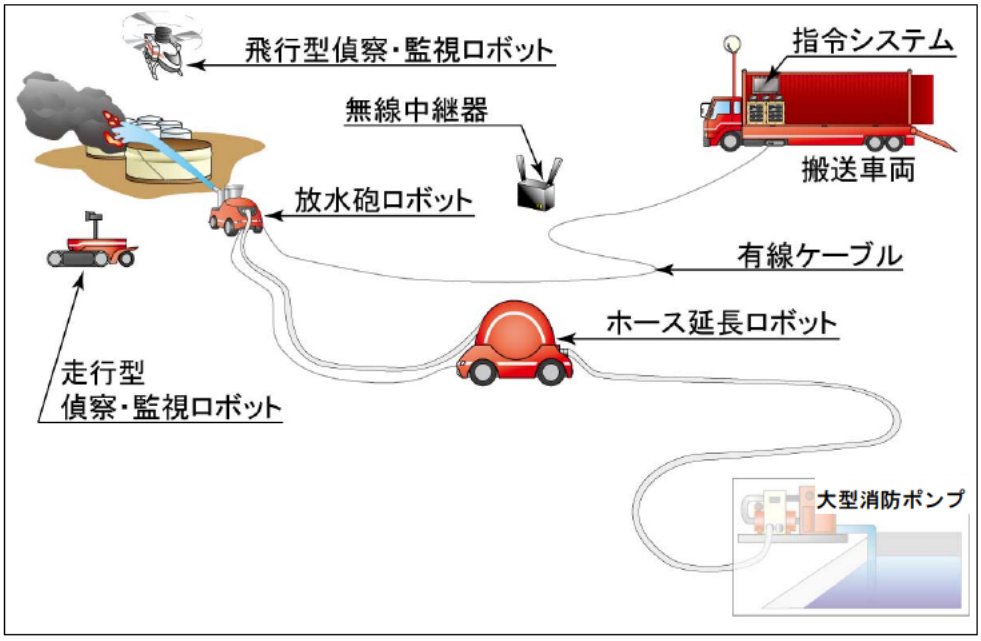
(*2) これまでの放水ロボットは消防隊員から数十メートル離れて活動する性能しかなく、ホース延長も放水ロボットがホースを引きずってホース延長することが多かった。
本研究開発で想定する大規模火災では、放水砲ロボットが石油タンクに対して 50m まで近接できるとすると、火災による放射熱が大きいため、消防隊員が活動できる場所は放水砲ロボットから 300m の位置となる。このため、放水砲ロボットへ送水する消防ポンプを消防隊員が操作するには、消防隊員が活動できる領域まで自律的にホースを延長する専用のロボットの研究開発が必要となった。このようなホース延長ロボットの研究開発は世界初の試みである。

なお、研究開発に当たっては、消防隊員が活動できる安全な領域での作業は消防隊員が行うものとし、消防ロボットシステムの機能を最小限とした。例えば、消防隊員が活動できる安全な領域までホース延長ロボットがホースを延長してきた後に、ポンプへホースを接続し、ポンプを操作する作業は消防隊員が行うこととした。

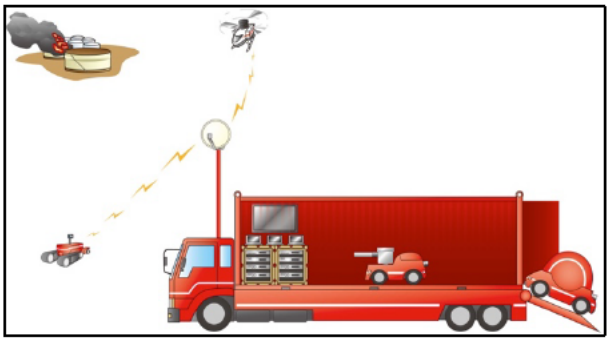
令和元年５月 24 日の石田総務大臣（当時）の閣議後の会見において、消防ロボットシステムを装備した部隊の発足及び、研究開発した消防ロボットシステムについて、「SCRUM FORCE スクラムフォース」と、また、消防ロボットシステムを構成する各ロボットについて、飛行型偵察・監視ロボットを「スカイ・アイ」、走行型偵察・監視ロボットを「ランド・アイ」、放水砲ロボット

を「ウォーター・キャノン」、ホース延長ロボットを「タフ・リーラー」と命名することが発表された。

〇消防ロボットシステム（スクラムフォース）の構成と活動イメージ

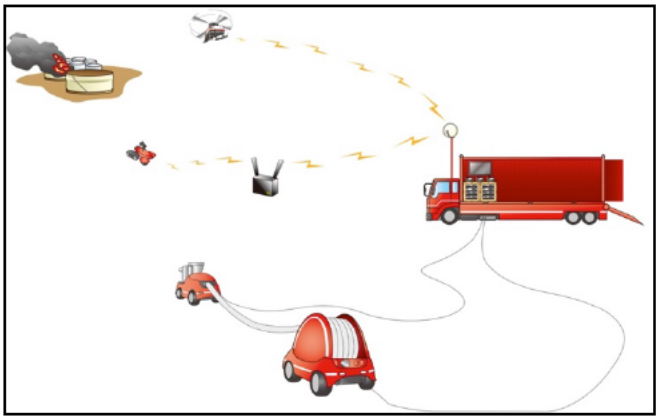


①現場に到着後、各ロボットを降ろし、稼働準備する。並行して、指令システムを立ち上げると車輌に取り付けられた GPS で位置を確認し、自動的に石油化学コンビナートの地図を読み込む。
②火災が発生している施設を地図上で指定すると、風向きを考慮し、飛行型偵察・監視ロボットの飛行経路を指令システムが提案する。消防隊員が確認ボタンを押すと、自動離陸し、偵察活動を開始する。

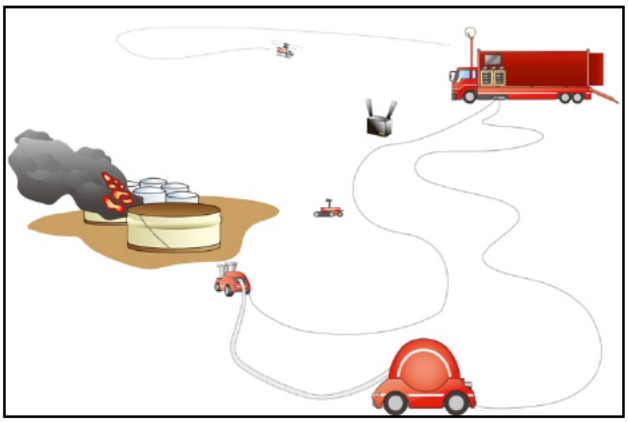


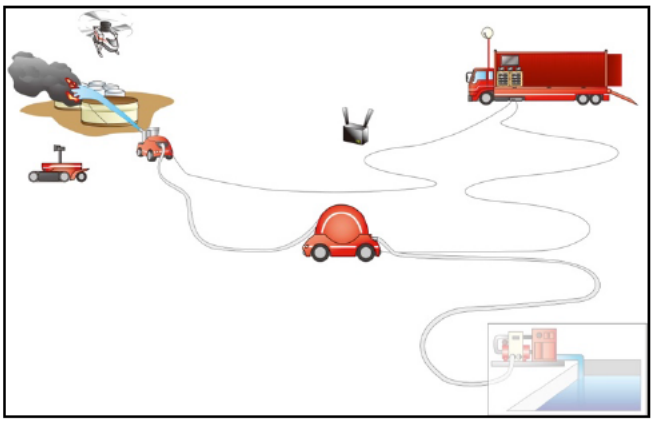
指令システム画面

③指令システムが石油タンク火災の消火あるいは延焼防止の冷却のための放水部署位置を提案する（図中のA、B、C）。消防隊員は、走行型偵察・監視ロボットが撮影した画像で道路状況等を確認し、部署位置を決定する。
④指定された放水部署位置への移動経路を指令システムが提案する。消防隊員が確認ボタンを押すと、放水砲ロボットが、指定された経路で移動を開始、ホース延長ロボットは放水砲ロボットに自動追従走行し、放水部署位置まで移動する。



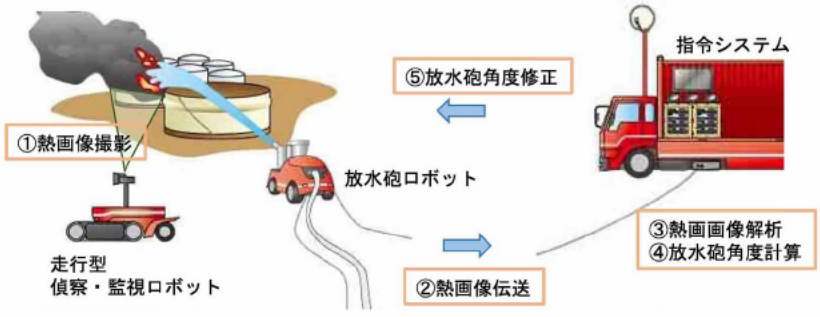
⑤放水砲ロボットとホース延長ロボットが指定された放水部署位置へ到達すると、ホース延長ロボットは自動追従走行モードからホース延長モードに切り替わり、ホースを置きながら走行し、消防ポンプ（水源）のある場所へ自動走行する。
放水砲ロボットは、予め用意されたデータベースから放水する石油タンクの寸法等及び風向・風速を勘案し、放水砲の角度を設定する。
⑥ホース延長ロボットが、隊員が活動できる安全な領域に到達すると、消防隊員がホースを消防ポンプに接続し送水を開始する。送水開始後は走行型偵察・監視ロボットが放水を撮影し、指令システムが画像解析し、放水を届かせたい場所から逸れないよう放水砲ロボットに継続的に指令を出す。

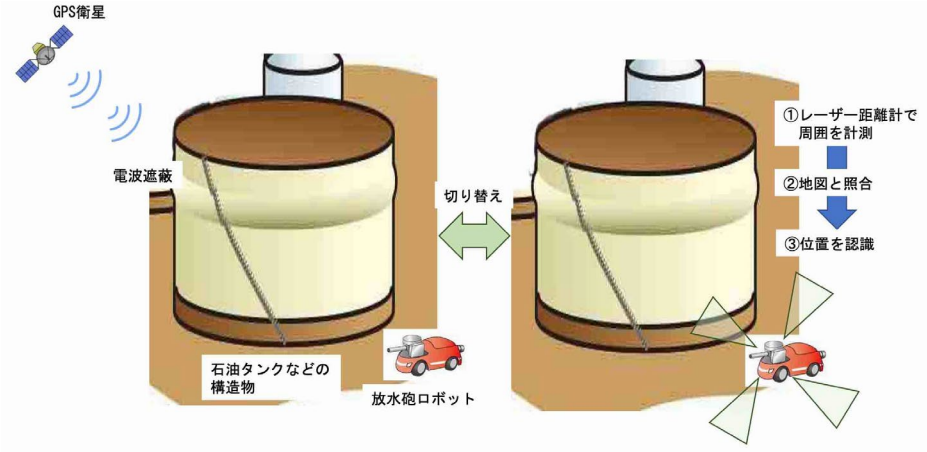
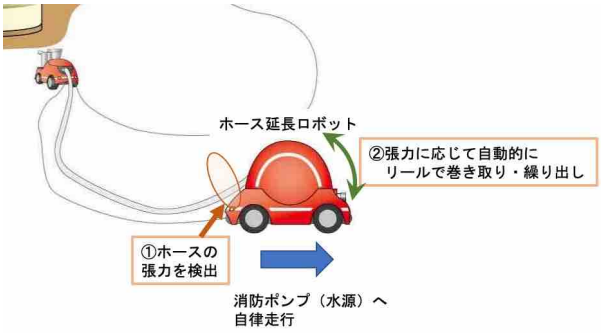


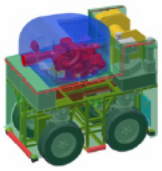
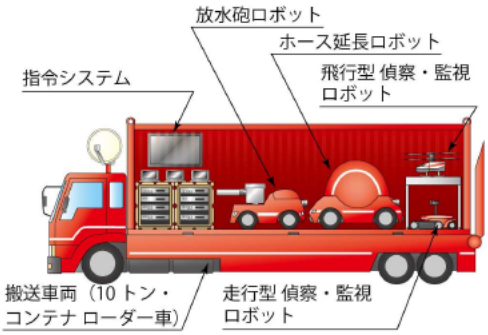


○研究開発の工程

【フェーズ１】基礎技術研究及び消防ロボットシステムの開発製作

技術の種類	技術開発の概要
基礎技術の研究	主に自律技術、耐放射熱技術(*3)、複数ロボット間の協調連携技術の研究を進め、災害環境下においても現場で機能するレベルで実用化する。 「・」技術は各単体ロボットの試作機に導入し、完成度を高め実戦配備型に導入。 「◇」技術はより長期の研究が必要と考えられるため、実戦配備型で導入し、実戦配備型の改良において完成度の向上を図る。 ○協調連携技術 ・ホース延長ロボットは、まず放水砲ロボットに追従して放水砲ロボットが放水する地点まで移動し、ホースを延長しつつ送水ポンプのある地点へ移動する。この時、放水砲ロボットの背面をホース延長ロボットのカメラで撮影し、画像処理によって、放水砲ロボットの位置・距離を判断し、自動的に追従し、放水砲ロボットと連携して走行移動する技術。 ◇放水開始後、走行型偵察・監視ロボットが側方から放水状況を監視し、走行型偵察・監視ロボットから送られる熱画像を解析し、放水が届いている点を推定し、画面上で指定した位置に、放水が届くように放水砲ロボットの放水砲の向きを自動的に修正する技術。 

	○自律技術 ・自律移動技術のうち、飛行型については、上空を飛行するため GPS(*5) による位置認識で十分に自律移動が可能である。 地上を走行するロボットについては、高精度な GPS(RTK-GPS)(*6)を利用する。しかし、石油コンビナート内には金属構造物が多いため、GPS の電波が遮蔽され、GPS によってロボットの位置が認識できない領域がある。そこで、 △事前に石油化学コンビナートでロボットを走行させ、回転式のレーザー距離計(LiDAR: Light Detection and Ranging)を利用し、周囲の建物や構造物、道路状況等の周辺の形状を計測し、計測したデータを基に「ロボットの自律走行用の地図」を作成する。 ▲ロボットが自律走行する際に、回転式のレーザー距離計で周辺にある建物や構造物等を計測し、事前に作成した「ロボットの自律走行用の地図」と照合することによりロボットがロボット自身の位置を認識する。 この△地図を作成し、▲地図と照合し位置を認識する技術は SLAM（Simultaneous Localization and Mapping；自己位置推定と地図の同時作成）と呼ばれる技術である。この技術は大変高度な技術で、推定が上手くいかないことがある。さらに、ロボットに搭載されている、車輪の回転計、加速度計、ジャイロなどを利用して位置を推定する手法（オドメトリィと呼ばれる）もあるが精度が低い。このため、石油化学コンビナートでは、RTK-GPS での位置計測、SLAM による位置推定、オドメトリィによる位置推定を適宜切り替え自律走行する。  ・ホース延長ロボットについては、走行しつつ、ホースの張力を検知し、ホースを引きずることなく、自動的にリールを繰り出し、巻き取りを行う技術。  ○耐放射熱技術 ・国内に設置されている最大級の石油タンク（直径 100m と想定）に、燃焼した際の発熱量が最も大きい原油(*6)を貯蔵している状況において、全面火災(*7)となった場合に 50m 離れた位置で受ける熱量に安全率を考慮し、20kw/㎡の放射熱を受け続けてもロボットが機能し続けられる技術の開発。 ・放水砲ロボットに接続するホース耐熱性も放水砲ロボットの耐熱性能に対応させ、通水後の内圧に耐える強度を保持する技術の開発。 ・GPS、熱画像カメラ、回転式レーザー距離計など熱に弱い計測機器を熱から守りつつ、システム全体の機能を維持する技術の開発。
試作機の開発（各単体ロボット）	全体システムの研究開発の前段階として、消防ロボットシステムを構成する各単体ロボットを試作する。各ロボットには、「基礎技術の研究」において実用化レベルを目指して開発した技術のうち、協調連携技術、自律技術、耐放射熱技術を導入する。なお、協調連携技術については、単体ロボットの試作としているため、「基礎技術の研究」欄に示したとお

	り、一部の技術については、「実戦配備型の開発」において導入するものとする。 飛行型 偵察・監視ロボット 走行型 偵察・監視ロボット  放水砲ロボット ホース延長ロボット 図　消防ロボットシステムを構成する各単体ロボット試作機のイメージ
試作機の評価	消防ロボットシステムを構成する各単体ロボットの試作機について、消防本部において試験評価を実施する。
実戦配備型の開発	消防本部における試作機の評価を基に、実戦配備し実災害環境下で確実に動作し、消防本部での運用に耐え得る「実戦配備型」の開発製作を行う。 ・自律走行技術の精度の向上、協調連携による放水砲制御技術の導入 ・実証配備する消防本部管内の大規模石油化学コンビナートにおける災害に、自律走行技術を活かし対応するため、「ロボットの自律走行用地図」を作成する。  図　開発する実戦配備型消防ロボットシステムのイメージ

(*3) 放射熱：火炎から電磁波として放射されるエネルギー。大規模火災では熱の大部分が放射熱となる。本研究開発では、大規模な火災を想定しているため、放射熱に対する対策が必要になる。

(*4) GPS(Global Positioning System)は、正確には、衛星から発射される電波を受信し位置を特定する、米国が整備しているシステムである。現在は、欧州、ロシア、中国などの衛星も利用されているため、正確にはGNSS(Global Navigation Satellite System)と表記すべきであるが、一般的にGPSと記述されることが多いため、ここではGPSと表記する。

(*5) RTK-GPS：Real Time Kinematic GPS、実時間動的GPS。地上に設置した「基準局」で受信した衛星からの電波を解析し、修正情報を組み合わせることによって、高い精度の測位を実現する技術。条件さえ整えば、10cm以下の精度で位置を計測することが可能。

(*6) 原油の種類によって燃焼したときの発熱量は異なる。本研究では、国内で想定し得る大規模火災に対応できるよう、最も発熱量が大きい原油を想定した。なお、精製された各種油は原油より発熱量が大きいが、大型のタンクで保存されることが少ないため、原油を想定した。

(*7) 石油タンクの全面火災：大型の石油タンクの屋根は、貯蔵している油の上にフタが浮いている「浮き屋根」構造となっている。地震による揺れなどの影響で浮き屋根が貯蔵している油の中に沈下してしまうことがある。この状態では、ひとたび火災となると石油タンクの上面全域の火災となる。これを「石油タンクの全面火災」と呼んでいる。これに対して、浮き屋根が正常に油の上にある状況では、油の貯蔵量により浮き屋根が上下する際に必要となる、石油タンクの側板とのわずかな隙間だけの火災となる。これを「石油タンクのリング火災」と呼んでいる。

【フェーズ２】実戦配備型消防ロボットシステムの実証配備

技術の種類	技術開発の概要
実証配備	・消防本部へ緊急消防援助隊(*8)の車輌として配置、実証配備する。 ・消防本部に実証配備し、実戦配備型消防ロボットシステムで対応すべき災害が発生した場合、即応して出動することを前提に訓練を実施する、また、必要があれば実災害に出動する。訓練においては、消防研究センター及び企業と連携し、順次練度を高める。 ・首都直下型地震に自律走行技術を活かし対応するため、東京湾岸地域の大規模石油化学

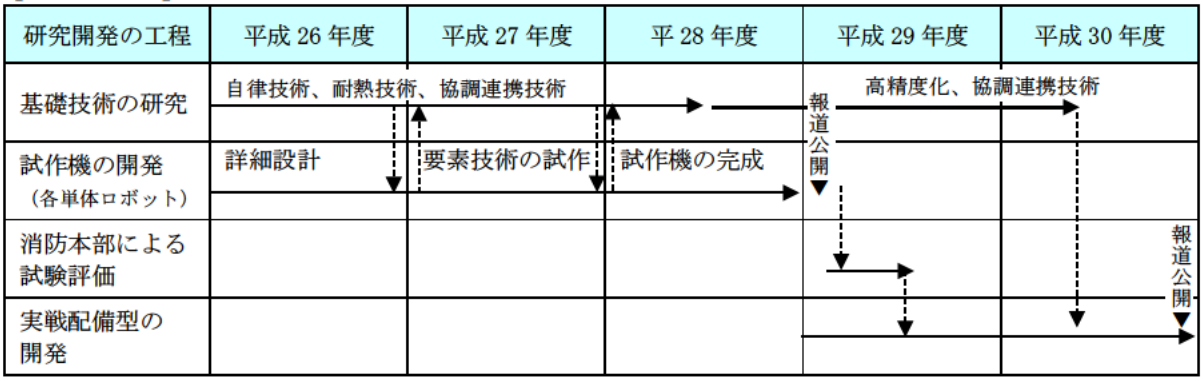
	コンビナートの「ロボットの自律走行用地図」を作成する。 ・上記の運用を通じて、消防本部の現場目線での実用性向上のために必要な改良事項を聴取する。
新技術導入検討	・消防ロボットシステムへの導入を想定し、研究開発開始時に整備されていなかった技術、考慮されていなかった技術について有効性を検討する。
実戦配備型の改良	・実証配備における消防本部の意見聴取から、運用上改良が必要な項目、検討した新技術のうち、有効性が確認された技術について、優先度・実現可能性の観点から検討し、実証配備している実戦配備型の改良、システムの改善を行う。
量産型仕様等のとりまとめ	・各消防本部において、現地の状況に応じて消防ロボットシステムの構成及び機能を選択できるよう、複数の仕様をとりまとめる。 ・実証配備における消防本部の意見聴取から必要とされる操作技量維持等手法をとりまとめる。

(*8) 緊急消防援助隊：大規模災害や特殊災害が発生した場合、被災地からの要請あるいは消防庁長官からの出動の指示など受けて、各都道府県の消防本部や航空隊が被災地に迅速に出動し、災害に対応する部隊。

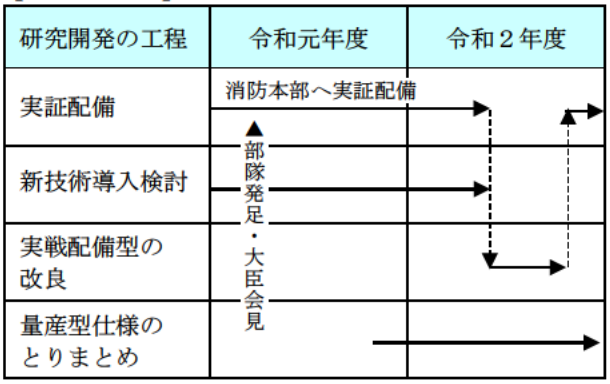
・スケジュール

本研究開発においては、平成 26 年度～平成 30 年度の５年間をフェーズ１の期間として、基礎技術研究及び消防ロボットシステムの開発製作を実施し、令和元年度～令和２年度の２年間をフェーズ２の期間として、社会実装の第一段階として、フェーズ１の最終成果物である実戦配備型消防ロボットシステムを消防本部へ実証配備する計画とした。なお、フェーズ１においては、ユーザーとなる消防本部職員を含む外部有識者で構成される研究評価会を開催し、現場ニーズや高度な科学技術の活用のための助言を得るとともに、事業実施内容の評価を受け、進めることとし、フェーズ２では、実証配備する消防本部との意見交換等によって方向性を定め進めることとした。また、フェーズ１からフェーズ２へ進めるかについては、外部有識者で構成される研究評価会の評価や意見、消防ロボットシステムの完成度、消防本部のニーズ、消防本部からの配備要望等を勘案して判断することとした。

【フェーズ 1】



【フェーズ 2】



（２）達成目標

【フェーズ１】

石油化学コンビナート等において大規模な事故・災害が発生すると、消防隊員が災害の現場に接近し、消防活動を行うことができない。そこで、本研究開発のフェーズ１として、ロボット技術等の高

度な技術を活用し、石油化学コンビナート等における大規模な事故・災害に対応し、災害拡大の抑制を図るための消防ロボットシステムを、実戦配備ができるレベルで研究開発することとし、以下の通り達成目標を設定した。

①消防ロボットシステムを構成する各単体ロボット試作機の完成

当初３年間（平成 26 年度～平成 28 年度）において、基礎技術の研究を進め、消防ロボットシステムを構成する各単体ロボット（飛行型偵察・監視ロボット、走行型偵察・監視ロボット、放水砲ロボット、ホース延長ロボット）の試作機を完成させる。なお、本研究開発を効率的に遂行し、目標を達成するために、ユーザーとなる消防本部職員を含む外部有識者で構成される研究評価会を開催し、現場ニーズや高度な科学技術の活用のための助言を得るとともに、事業実施内容の評価を受ける。

②実戦配備型消防ロボットシステムの完成

平成 29 年度～平成 30 年度の２年間において、試作した各単体ロボットを消防本部に貸与し、試験評価を実施する。試験評価の結果を基に、各種技術を高精度化するとともに、運用上の指摘事項について検討・改良し、消防ロボットシステムを実戦配備が可能なレベルで完成させる。実戦配備型には、試作した４種のロボットに加え指令システム及び搬送車輌で構成する。なお、ユーザーとなる消防本部職員を含む外部有識者で構成される研究評価会を継続開催し、現場ニーズや高度な科学技術の活用のための助言を得るとともに、事業実施内容の評価を受ける。

【フェーズ２】

完成させる実戦配備型消防ロボットシステムについて、「消防ロボットの研究開発事業に係る評価会」(*9)における評価を受けるとともに、消防本部の要望も勘案し、以下の③及び④を達成目標とするフェーズ２に進めるかを判断することとした。フェーズ２に進んだ場合の達成目標を以下の通り設定した。

③実戦配備型消防ロボットシステムの実証配備と高度化

令和元年度～令和 2 年度の 2 年間において、社会実装の第一段階として、実戦配備型を消防本部に実証配備し、その運用において消防本部目線からの意見を聴取し、実用性向上のための改良を行う。さらに、研究開発開始時には整備されていなかった新技術の導入検討を行い、有効性が確認され、導入が可能な技術については改良時に導入する。改良後の実戦配備型を消防本部に再度配備し、次年度からの通常配備につなげる。

④複数の仕様とりまとめ

実証配備での成果を基に、令和 2 年度末までに、今後量産され、配備が進む可能性を見据え、消防本部の状況に応じて選択可能な複数の仕様をとりまとめる。

(*9)　「消防ロボットの研究開発事業に係る評価会」：災害対応のための消防ロボットの研究開発事業について、研究開発目標をより高度な次元で達成するため、消防本部の意見、社会的ニーズ、科学的及び技術的観点等から、研究進捗及び計画について意見等を聴取し、評価等を受けるために開催した（平成 26 年度～平成 30 年度）。詳しくは「６　学識経験を有する者の知見の活用」参照。

○関連する主要な政策

・困難地形における走行・作業エリア環境認識向上技術ＣＢＲＮ対応遠隔操縦車両システムの環境認識向上技術の研究試作（防衛省防衛装備庁、平成 28～令和元年度）

遠隔操縦をより容易にする映像表示等の技術を防衛省防衛装備庁において、自律して機能する技術を消防庁で分担し、配備後の実際の運用における計測機器の堅牢性、搬送機器等に関する技術について情報交換を実施する。なお、本研究の先行研究である「ＣＢＲＮ対応遠隔操縦作業車両システム」外部研究評価委員会（平成 28 年度）に委員として参画するとともに、本研究開発の研究評価会に当該研究の責任者にオブザーバーとしての参画を依頼し、相互の研究協力を図る。

・ロボット現場検証・評価（国土交通省総合政策局、平成 26～27 年度）

ロボットによるガレキ等の除去技術を国土交通省総合政策局において、可燃性ガスが滞留するする領域でのロボット技術を消防庁で分担し、配備後の実際の運用における計測機器の堅牢性に関する技術について情報交換を実施する。なお、国土交通省が外部へ委託し実施した、「次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会」、「同委員会災害調査部会」及び「同委員会応急

復旧部会」（平成 26～27 年度、「応急復旧部会」については平成 30 年度にも実施）に委員として参画するとともに、本研究開発の研究評価会に当該研究の責任者をオブザーバーとしての参画を依頼し、相互の研究協力を図る。

・エネルギー・産業基盤災害即応部隊の充実強化（消防庁、平成 26 年度～平成 30 年度）

全国の地域ブロック（6 ブロック）を基本として、石油コンビナート等災害防止法施行令に定める区域に指定されている 12 地域にエネルギー・産業基盤災害即応部隊（ドラゴンハイパー・コマンドユニット）が組織されている。エネルギー・産業基盤災害即応部隊には、本研究開発の消防ロボットシステムに送水する大容量ポンプ車が装備される。

○政府の基本方針（閣議決定等）、上位計画・全体計画等

名称（年月日）	記載内容（抜粋）
世界最先端 IT 国家創造宣言（平成 25 年 6 月 14 日閣議決定） （平成 26 年 6 月 24 日閣議決定） （平成 27 年 6 月 30 日閣議決定）	Ⅲ．目指すべき社会・姿を実現するための取組 ２．健康で安心して快適に生活できる、世界一安全で災害に強い社会 （２）世界一安全で災害に強い社会の実現 ① 命を守る災害関連情報の提供等、防災・減災体制の構築 災害現場に近付けない大規模災害・特殊災害等に際して、IT を活用してリモートで操作できる災害対応ロボット等 2018 年度までに導入し、順次高度化を図る。
世界最先端 IT 国家創造宣言（平成 28 年 5 月 30 日閣議決定）	II.「国から地方へ、地方から全国へ」 ３．［重点項目３］超少子高齢化社会における諸課題の解決 （３）IT 利活用による諸問題の解決に資する取組 ④ 安全で災害に強い社会の実現 ・IT を利活用することにより、準天頂衛星などの宇宙インフラや地理空間情報（G 空間情報）等を活用した避難誘導、消防活動、被災者の安否確認や避難所機能の強化等の災害現場対応を可能とする。
「世界一安全な日本」創造戦略（平成 25 年 12 月 10 日閣議決定）	Ⅲ 戦略の内容 ２ G８サミット、オリンピック等を見据えたテロ対策・カウンターインテリジェンス等 （２）原子力発電所等重要施設の警戒警備及び対処能力の強化 ③ 緊急事態への対処能力の強化 緊急対処事態を想定した国民保護訓練、原子力発電所等に対するテロ発生を想定した共同訓練等の各種訓練を実施し、関係機関の対処能力強化や関係機関相互の連携強化等を図るとともに、SAT、NBC テロ（核物質、生物兵器及び化学兵器を用いたテロ）対応専門部隊、特別高度救助隊、高度救助隊等の装備資機材の充実を図る。
南海トラフ地震防災対策推進基本計画（平成 26 年３月中央防災会議）	第３章南海トラフ地震に係る地震防災対策の基本的な施策 第１節　地震対策 ２　火災対策 ⑧緊急消防援助隊等の増強 【具体目標】 ・緊急消防援助隊に配備可能な消防防災ロボット平成 30 年度開発完了を目指す。 第７節 様々な地域的課題への対応 ４　石油コンビナート地帯及び周辺の安全確保 【具体目標】 ・ エネルギー・産業基盤災害即応部隊（ドラゴンハイパー・コマンドユニット）の応急対応に資する消防防災ロボットの研究開発平成 30 年度完了を目指す。
南海トラフ地震防災	第３章南海トラフ地震に係る地震防災対策の基本的な施策

対策推進基本計画（令和元年５月 31 日中央防災会議） （令和３年５月 25 日中央防災会議）	第１節　地震対策 ２　火災対策 ⑧緊急消防援助隊等の増強 ・緊急消防援助隊の消火部隊等の増強や必要な車輌等の整備を図るとともに、航空部隊の充実、消防防災ロボットの導入を図る。 【具体目標】 ・緊急消防援助隊に配備可能な消防防災ロボット平成 30 年度開発完了を目指す。 ・消防防災ロボットについて、実戦配備を踏まえた機能の最適化、準天頂衛星の活用等新技術の導入を図ることにより、令和２年度末に量産型仕様の策定を目指す。 第７節 様々な地域的課題への対応 ４　石油コンビナート地帯及び周辺の安全確保 【具体目標】 ①石油コンビナート防災対策の充実等 ・ エネルギー・産業基盤災害即応部隊（ドラゴンハイパー・コマンドユニット）の応急対応に資する消防防災ロボットの研究開発平成 30 年度完了を目指す。 ・消防防災ロボットについて、実戦配備を踏まえた機能の最適化、準天頂衛星の活用等新技術の導入を図ることにより、令和２年度末に量産型仕様の策定を目指す。
国土強靱化基本計画 （平成 26 年６月３日閣議決定）	別紙１　プログラムごとの脆弱性評価結果 ５．大規模自然災害発生後であっても、経済活動（サプライチェーンを含む）を機能不全に陥らせない 5-3）コンビナート・重要な産業施設の損壊、火災、爆発等 ○コンビナートの災害に備え、エネルギー・産業基盤災害即応部隊（ドラゴンハイパー・コマンドユニット）の体制強化を図るとともに、関係機関との合同訓練の実施、高度な消防ロボットの研究開発等を推進する必要がある。 ６．大規模自然災害発生後であっても、生活・経済活動に必要最低限の電気、ガス、上下水道、燃料、交通ネットワーク等を確保するとともに、これらの早期復旧を図る 6-1）電力供給ネットワーク（発変電所、送配電設備）や石油・LP ガスサプライチェーンの機能の停止 ○エネルギー供給施設の災害に備え、エネルギー・産業基盤災害即応部隊（ドラゴンハイパー・コマンドユニット）が新設されたところであり、同部隊の体制整備を図るとともに、高度な消防ロボットの研究開発、関係機関による合同訓練の実施等を推進する必要がある。加えて自衛防災組織の充実強化を図る必要がある。
国土強靱化アクションプラン 2014 （平成 26 年６月３日国土強靱化推進本部）	第３章 各プログラムの推進計画 ５．大規模自然災害発生後であっても、経済活動（サプライチェーンを含む）を機能不全に陥らせない 5-3）コンビナート・重要な産業施設の損壊、火災、爆発等 ○コンビナートの災害に備え、エネルギー・産業基盤災害即応部隊（ドラゴンハイパー・コマンドユニット）の体制強化を図るとともに、関係機関との合同訓練の実施、高度な消防ロボットの研究開発等を推進する。 ６．大規模自然災害発生後であっても、生活・経済活動に必要最低限の電気、ガス、上下水道、燃料、交通ネットワーク等を確保するとともに、これらの早期復旧を図る 6-1）電力供給ネットワーク（発変電所、送配電設備）や石油・LP ガスサプライチェーンの機能の停止

	○エネルギー供給施設の災害に備え、エネルギー・産業基盤災害即応部隊（ドラゴンハイパー・コマンドユニット）の体制整備を図るとともに、高度な消防ロボットの研究開発、関係機関による合同訓練の実施等を推進する。
国土強靱化アクションプラン 2015（平成27年6月16日、国土強靱化推進本）	第３章 各プログラムの推進画等 ５．大模自然災害発生後であっても、経済活動（サプライチェーンを含む）を機能不全に陥らせない 5-3 コンビナート・重要な産業施設の損壊、火災、爆発等 ６．大規模自然災害発生後であっても、生活・経済活動に必要最低限の電気、ガス、上下水道、燃料、交通ネットワーク等を確保するとともに、これらの早期復旧を図る 6-1　電力供給ネットワーク（発変電所、送配電設備）や石油・LPガスサプライチェーンの機能の停止 ○高度な消防ロボットの研究開発等を推進する。
国土強靱化アクションプラン 2016（平成28年5月24日国土強靱化推進本部決定） 2017（平成29年6月6日国土強靱化推進本部決定） 2018（平成30年6月5日国土強靱化推進本部決定）	第３章 各プログラムの推進画等 ５．大模自然災害発生後であっても、経済活動（サプライチェーンを含む）を機能不全に陥らせない 5-3 コンビナート・重要な産業施設の損壊、火災、爆発等 ６．大規模自然災害発生後であっても、生活・経済活動に必要最低限の電気、ガス、上下水道、燃料、交通ネットワーク等を確保するとともに、これらの早期復旧を図る 6-1　電力供給ネットワーク（発変電所、送配電設備）や石油・LPガスサプライチェーンの機能の停止 ○高度な消防ロボットの試作機の製作を行う。 第４章 プログラム推進のための主要施策 １．行政機能／警察・消防等 ［警察・消防等］ ○消防ロボットをはじめ大規模・特殊災害対応車輌・資機材等を研究開発・導入する。
国土強靱化年次計画2020（令和２年６月１８日国土強靱化推進本部決定）	２　45 の各プログラムの推進方針及びプログラム推進のための主要施策 ５．経済活動を機能不全に陥らせない 5-3 コンビナート・重要な産業施設の損壊、火災、爆発等 （推進方針） ○ドラゴンハイパー・コマンドユニット及び消防ロボットシステム（スクラムフォース）について、関係機関との合同訓練の実施等を通じた運用体制の強化を図る。
科学技術イノベーション総合戦略 2014～未来創造に向けたイノベーションの懸け橋～（平成26年6月24日閣議決定）	第２章 科学技術イノベーションが取り組むべき課題 第１節 政策課題について Ⅲ．世界に先駆けた次世代インフラの構築 ３．重点的取組 （４）自然災害に対する強靱な社会の構築 ③2030 年までの成果目標 ・ＩＣＴを活用してリモートで操作できる災害対応ロボット等を2018 年度までに導入し、順次高度化 別表　第２章　科学技術イノベーションが取り組むべき課題 詳細工程表 （４）自然災害に対する強靱な社会の構築 災害情報の迅速な把握・伝達技術やロボット等による災害対応・インフラ復旧技術 2014年度　災害対応消防ロボットの予備設計の完了 2015年度　試作機に実装する要素技術の仕様の確定

	2016 年度　単体ロボットの試作機完成 2020 年までに災害対応・インフラ復旧の自動化・無人化技術の現場への導入
科学技術イノベーション総合戦略 2015（平成 27 年６月 19 日閣議決定）	第２部 科学技術イノベーションの創出に向けた２つの政策分野 第２章 経済・社会的課題の解決に向けた重要な取組 Ⅲ．世界に先駆けた次世代インフラの構築 ⅱ）自然災害に対する強靭な社会の実現 ３．重点的取組 （３）「対応力」関連技術 ①取組内容 ・災害時にも適用できる次世代社会インフラ用ロボットの開発（大規模災害現場における情報収集、消火、救助、応急復旧を、安全確保を踏まえて行うためのロボット技術の開発） ②2020 年までの成果目標 ・災害対応ロボットについて現場検証を踏まえ順次導入・活用拡大 ・過酷な環境下において、遠く離れた地域から遠隔操縦可能なロボットや高機動パワードスーツの実用化に資する技術の確立
科学技術イノベーション総合戦略 2016（平成 28 年５月 24 日閣議決定）	第２章　経済・社会的課題への対応 （２）国及び国民の安全・安心の確保と豊かで質の高い生活の実現 Ⅱ　自然災害に対する強靭な社会の実現 ３）「対応力」関連技術 ・災害時にも適用できる次世代社会インフラ用ロボットや応急橋梁技術の研究開発（大規模災害現場における情報収集、消火、救助、応急復旧を、安全確保を踏まえて行うためのロボット技術の開発） ４）社会実装に向けた主な取組 ・フィールドを活用した技術開発の実用性の検証と技術開発へのフィードバック
科学技術イノベーション総合戦略 2017（平成 29 年６月２日閣議決定）	第３章　経済・社会的課題への対応 （２）国及び国民の安全・安心の確保と豊かで質の高い生活の実現 ②　自然災害に対する強靭な社会の実現 iii)「対応力」関連技術 ・災害時にも適用できる次世代社会インフラ用ロボットや応急橋梁技術の研究開発（大規模災害現場における情報収集、消火、救助、応急復旧を、安全確保を踏まえて行うためのロボット技術の開発） （2020 年までの成果目標） ・災害対応ロボットについて現場検証を踏まえ順次導入・活用拡大
統合イノベーション戦略（平成 30 年６月 15 日閣議決定）	第６章 特に取組を強化すべき主要分野 （１）ＡＩ技術 ③ 今後の方向性及び具体的に講ずる主要施策 ⅱ）戦略的な技術開発等の推進 解決すべき社会課題分野（農業、健康・医療・介護、建設、防災・減災、製造等）において、データ連携基盤を活用したＡＩ技術の社会実装、ロボット技術等と組み合わせた応用開発、現在のＡＩ技術の弱みを克服する基礎・基盤的な研究開発を産学官が一体となって強力に推進する。
統合イノベーション戦略 2019（令和元年６月 21 日閣議決定） 2020（令和２年７月 17 日閣議決定）	第Ⅱ部 第５章　特に取組を強化すべき主要分野 （５）安全・安心 ②目標達成に向けた施策・対応策 ii）育てる （ウ）自然災害の対応等に資する技術 被災地等における過酷な環境下でも、人命救助やエネルギー供給を

	可能とし、 迅速な復旧を実現する技術（例えば、災害時の極限環境でも能力を発揮する遠隔自律ロボット技術、ロボット遠隔制御にも貢献する脳情報通信技術、自然災害時もエネルギーの活用を可能とする蓄電・電源技術、通信ネットワーク復旧のためのコグニティブ通信技術等）
「日本再興戦略」改訂2014－未来への挑戦－（平成26年6月24日閣議決定）	第二 ３つのアクションプラン 一．日本産業再興プラン ５．立地競争力の更なる強化 ５－３．環境・エネルギー制約の克服 （３）新たに講ずべき具体的施策 ⑧石油・LPガスサプライチェーン等の維持・強化 自然災害の被害想定等を踏まえ、新たな計画の策定等により、これまでにない規模の自然災害にも対応した復旧迅速化対策を推進する。 中短期工程表「立地競争力の更なる強化⑪」 石油・LPガスサプライチェーン等の維持・強化① 2014年度 エネルギー・産業基盤災害対応のための消防ロボットの研究開発に着手し、実用レベル試作機の設計完了 2016年度 単体ロボット一次試作完了 2018年度 実用可能なロボット完成 2019年度以降 順次導入・高度化
「日本再興戦略」改訂2015 －未来への投資・生産性革命－（平成27年6月30日閣議決定）	第二 ３つのアクションプラン 一．日本産業再興プラン ５．立地競争力の更なる強化 ５－３．環境・エネルギー制約の克服 （３）新たに講ずべき具体的施策 ⑤国内石油・ LPガス供給網等の維持・強化 製油所等の災害対応能力の強化に向けた強靭化投資計画の策定等を促す。 中短期工程表「立地競争力の更なる強化⑯」 石油・LPガスサプライチェーン等の維持・強化② 2015年度 エネルギー・産業基盤災害対応のための消防ロボットの設計に基づき部分試作及び性能検証の完了 2016年度 単体ロボット一次試作完了 2018年度 実用可能なロボット完成 2019年度以降 順次導入・高度化
日本再興戦略2016 －第４次産業革命に向けて－（平成28年6月２日 閣議決定）	第２ 具体的施策 Ⅰ 新たな有望成長市場の創出、ローカル アベノミクスの深化等 １．第４次産業革命の実現 （２）新たに講ずべき具体的施策 ⅰ）第４次産業革命の鍵を握る人工知能技術の研究開発と社会実装を加速 するための司令塔機能の確立と規制・制度改革、企業や組織の垣根を越 えたデータ利活用プロジェクト等の推進 ② 規制・制度 改革 、データ利活用プロジェクト等の推進 【プロジェクト抽出体制の整備】 【個別プロジェクトの実行実現】 ＜BtoC のビジネス領域関連＞ オ）次世代ロボットの利活用促進 人工知能の研究開発・産業化に向けた取組とも連携しながら、複数のロボットが周囲の環境等も認識した上で、自律的に連携していくといった新たなロボット社会の実現に向け、緊急時を含む人の移動・物の輸送、災害対応、インフラ維持管理などをはじめ、幅広い

	分野における技術開発・実証を進める。技術開発・実証を進める。 中短期工程表「エネルギーミックスの実現と環境・エネルギー投資の拡大⑮」 資源価格の低迷下での資源安全保障の強化等③ 2016 年度　エネルギー・産業基盤災害対応のための消防ロボットの設計、部分試作及び性能検証に基づき、単体ロボットの 1 次試作を完了 2018 年度　実用可能なロボット完成 2019 年度以降　順次導入・高度化
未来投資戦略 2017 ―Society 5.0 の実現に向けた改革― 具体的施策（平成 29 年６月９日）	中短期工程表「エネルギーミックスの実現と環境・エネルギー投資の拡大⑮」 資源価格の低迷下での資源安全保障の強化等③ 2018 年度　実戦型消防ロボットシステムの開発・完成 2019 年度以降　順次導入・高度化
未来投資戦略 2018―「Society 5.0」「データ駆動型社会」への変革―（平成 30 年６月 15 日）	第２ 具体的施策 Ⅰ.「Society 5.0」の実現に向けて今後取り組む重点分野と、変革の牽引力となる「フラッグシップ・プロジェクト」等 ［１］「生活」「産業」が変わる ３．次世代産業システム （３）新たに講ずべき具体的施策 ⅰ）モノのサービス化・ソリューション化 ② ロボット技術の社会実装
ロボット新戦略（2015 年２月 10 日　日本経済再生本部）	第４節 インフラ・災害対応・建設分野 （４） 2020 年に目指すべき姿 ③災害対応 人が近づくことの出来ない現場での応急復旧等には遠隔操縦・自律型のロボットを導入する。
首都直下地震緊急対策推進基本計画（平成 27 年 3 月 31 日閣議決定）	７　緊急対策区域における緊急対策の円滑かつ迅速な推進に関し政府が講ずべき措置 ① 計画的かつ早急な予防対策の推進 カ その他の安全確保対策 （ウ）石油コンビナート等集積地区における安全確保 【具体目標】 ・ エネルギー・産業基盤災害即応部隊（ドラゴンハイパー・コマンドユニット）の応急対応に資する消防防災ロボットの研究開発平成 30 年度完了を目指す。 ③ 円滑かつ迅速な災害応急対策、災害復旧・復興への備え ア 一人でも多くの命を救うための防災関係機関相互の連携による災害応急体制の整備 【目標】 （ⅰ）緊急消防援助隊等の増強 ・緊急消防援助隊の消火部隊等の増強や必要な車輌等の整備を図るとともに、航空部隊の充実、消防防災ロボットの導入を図る。 【具体目標】 ・緊急消防援助隊に配備可能な消防防災ロボット平成 30 年度開発完了を目指す。
経済財政運営と改革の基本方針 2016 ～600 兆円経済への道筋～（平成 28 年６月２日閣議決定）	第２章 成長と分配の好循環の実現 ２．成長戦略の加速等 （５）防災・国土強靱化、成長力を強化する公的投資への重点化 ② 国土強靱化 センサー・ロボット・小型無人機（ドローン）による被災状況調査等の国土強靱化に資する技術開発・実証及び導入・普及を積極的に進

	める。
経済財政運営と改革の基本方針 2017～人材への投資を通じた生産性向上～(平成29年６月９日閣議決定)	第２章 成長と分配の好循環の拡大と中長期の発展に向けた重点課題 ４．地方創生、中堅・中小企業・小規模事業者支援 （５）防災・国土強靱化、成長力を強化する公的投資への重点化 ②防災・減災 南海トラフ地震、首都直下地震などの大規模地震や津波、水害、土砂災害、火山災害などの自然災害に対し、ＩＣＴの活用・研究・人材育成を含め、堤防整備、ダム再生など、防災・減災の取組を推進 ５．安全で安心な暮らしと経済社会の基盤確保 （４）資源・エネルギー 平時有事を問わず、国内の石油・ＬＰガスの安定供給確保に向けたサプライチェーンの維持・強化等に取り組む
経済財政運営と改革の基本方針 2018～少子高齢化の克服による持続的な成長経路の実現～（平成 30 年６月 15 日閣議決定）	第２章 力強い経済成長の実現に向けた重点的な取組 ７．安全で安心な暮らしの実現 （２）資源・エネルギー、環境対策 ②資源・エネルギー 平時有事を問わず、国内の石油・ＬＰガスの安定供給確保に向けたサプライチェーンの効率的維持・強化 （３）防災・減災と国土強靱化の推進 体制整備に努めつつ、ハード・ソフト両面において防災・減災対策、国土強靱化の取組を進める。
ＡＩ戦略 2019 ～人・産業・地域・政府全てにＡＩ～ （令和元年６月 11 日統合イノベーション戦略推進会議決定）	Ⅲ 産業・社会の基盤作り Ⅲ－１　社会実装 （３）国土強靱化（インフラ、防災） ＜具体目標 3＞ 近年多発する自然災害に対応した、ＡＩを活用した強靭なまちづくり （取組） ・大規模・特殊災害の対応強化のための、複数のロボットが連携し自律的に消火活動を行う新技術の実証と機能の最適化、コストダウン等の推進

（３）目標の達成状況

【フェーズ１】

①消防ロボットシステムを構成する各単体ロボット試作機の完成

当初３年間（平成 26 年度～平成 28 年度）において、基礎技術の研究を進め、消防ロボットシステムを構成する各単体ロボット（飛行型偵察・監視ロボット、走行型偵察・監視ロボット、放水砲ロボット、ホース延長ロボット）の試作機を完成させ、目標を達成した。平成 28 年度末開催の「消防ロボットの研究開発事業に係る評価会」において、Ｓ／Ａ／Ｂ／Ｃの四段階評価のうち、全委員一致で「Ａ」の評価を得た。なお、完成させた各単体ロボットを平成 29 年４月 14 日に実演公開した。

②実戦配備型消防ロボットシステムの完成

平成 28 年度に完成した各単体ロボットの試作機を２箇所の消防本部に各２ヶ月間貸与し、試験評価を実施した。試験評価の結果を基に、基礎技術の研究において開発した技術を高精度化し、実戦にて想定される運用上の課題を検討し、解決することにより、計画通り平成 30 年度中に消防ロボットシステムを実戦配備が可能なレベルで完成させた。

平成 30 年度末開催の「消防ロボットの研究開発事業に係る評価会」において、実演公開も実施し、Ｓ／Ａ／Ｂ／Ｃの四段階評価のうち「Ｓ−」の評価を得た（各委員の評価では、Ｓ評価が多く、Ａ評価もあったため、評価会全体の評価としては「Ｓ−」とした。）。完成した実戦配備型消防ロボットシステムは、性能、完成度ともに当初の想定より高く、消防本部への配備が可能なレベルとなった。また、消防本部のニーズと合致し、消防本部から配備の要望もあった。

結果として、実証配備する消防本部管轄内における石油化学コンビナート等における爆発が想

定される災害や大規模な火災に対して、自律走行技術機能を活かした実戦対応が、管轄外においては遠隔操縦による走行を基本とした実戦対応が可能となった。

【フェーズ２】

「消防ロボットの研究開発事業に係る評価会」におけるフェーズ１の研究成果である消防ロボットシステムの性能・完成度等の評価、「消防ロボットシステムは、実際に配備した上で、運用上の実用性の向上を実現すべき」との提言、また、消防本部のニーズ及び配備要望等を踏まえ、実戦配備型消防ロボットシステムで対応すべき災害が発生した場合、即応して出動することを前提として、緊急消防援助隊の資機材として消防本部に実証配備し、引き続き運用上の実用性の向上等を進めることとした。

③実戦配備型消防ロボットシステムの実証配備と高度化

東日本大震災において爆発火災が発生した石油化学コンビナートを管轄する消防本部に実証配備し、その運用において消防本部目線からの意見を聴取し、実用性向上のための改良を行い、目標を達成した。さらに、新技術の導入検討を行い、有効性が確認され、可能な技術については導入した。また、消防隊員による消防ロボットシステム操作習熟のより効率的な向上並びに技量維持のため、指令システムシミュレータ及び飛行型偵察・監視ロボットのシミュレータを開発し導入した。

結果として、首都直下地震で想定される石油化学コンビナート等における爆発が想定される災害や大規模な火災に対して、消防隊員がより運用しやすい装備資機材として、自律走行機能を活かした実戦対応が、より広域の災害等の対応においては遠隔操縦による走行を基本とした実戦対応が可能となった。

④複数の仕様とりまとめ

今後の配備を見据え、消防本部の状況に応じて選択可能な３種類の仕様をとりまとめ、目標を達成した。さらに、実証配備において必要性が明らかになった飛行型偵察・監視ロボットの操作員の技量維持プログラム、消防本部から要望があった教官育成プログラムをとりまとめた。これにより、各消防本部における導入が、より容易になった。

【フェーズ１】

技術の種類	技術開発の概要
基礎技術の研究	○協調連携技術 ・放水砲ロボットの背面をホース延長ロボットのカメラで撮影し、画像処理によって、放水砲ロボットの位置・距離を判断し、自動的に追従し、放水砲ロボットと連携して走行移動する技術を確立した。 図　連携した自動追従走行の様子 ◇放水開始後、走行型偵察・監視ロボットが側方から放水状況を監視し、走行型偵察・監視ロボットから送られる熱画像を解析し、放水が届いている地点を推定し、画面上で指定した位置に、放水が届くように放水砲ロボットの放水砲の向きを自動的に修正する技術を確立した。（特許出願中）

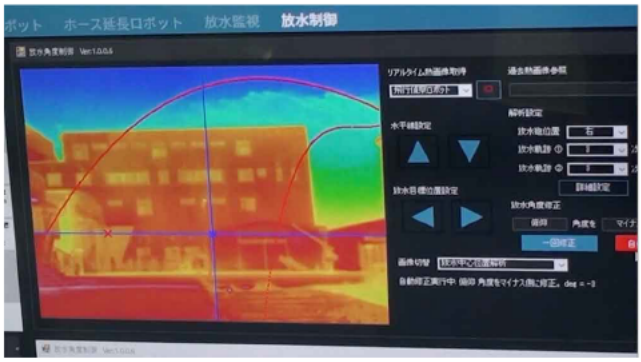


図　熱画像の自動解析による、放水が届いている推定地点の表示

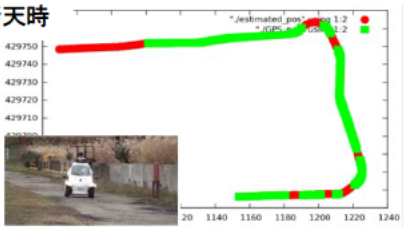
○自律技術

・自律走行技術

RTK-GPS での位置計測、SLAM による位置推定、オドメトリィによる位置推定を適宜切り替え自律走行する技術を確立した。

図　石油化学コンビナート内での
GPS による位置測定結果
赤：精度不十分、緑：精度良好

晴天時



雨天時

図　GPS による位置測定結果に対する天候の影響
赤：精度不十分、緑：精度良好

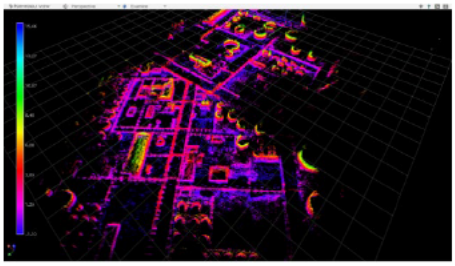


図　ロボットの自律走行用地図作成の一例

・ホース延長ロボットについて、走行しつつ、ホース繰り出し部にあるセンサでホースの張力を検知し、ホースを引きずることなく、自動的にリールを繰り出し、巻き取りを行う技術を実現した。

図　自動リール制御によるホース延長の様子
（特許取得）

○耐放射熱技術

・20kw/㎡の放射熱を受け続けてもロボットが機能し続けられる技術を開発した。(国内・海外特許出願中)

・ロボットの外装をアルミ蒸着布で覆い、約 95%の放射熱を反射

・ロボットに吸収される残り 5%の放射熱による温度上昇を、ロボット内部からアルミ蒸着布に噴霧し、ロボット内部を電子機器が機能できる温度に保つ。なお、放水砲ロボット内部に水タンクを設置し、水が送水されるまでの間も、内部での水噴霧が可能である。

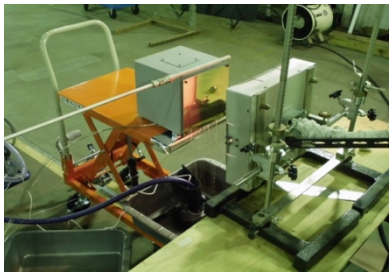


図　小規模耐熱性実験

図　アルミ蒸着布、内部に水噴霧装置を備えた放水砲ロボット

・ホースについて、放水砲ロボットの耐熱性能と同等の耐熱性があり、通水後の内圧に耐える強度を保持する技術を開発した。(特許取得)

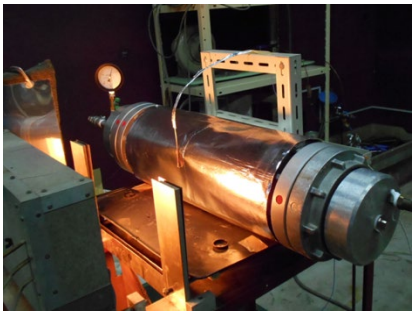


図　内圧をかけた状態でのホースの耐熱実験

図　耐熱性の高いホースを積載したホース延長ロボット

・回転式レーザー距離計について、計測の必要に応じて上下させ、保護筒の中に収納する。また、カメラなどのセンサが取り付けられている台は回転式となっており、温度に応じて、ロボット内部に収納し冷却する構造とすることにより、熱から守りつつ、システム全体の機能を維持することを可能にした。

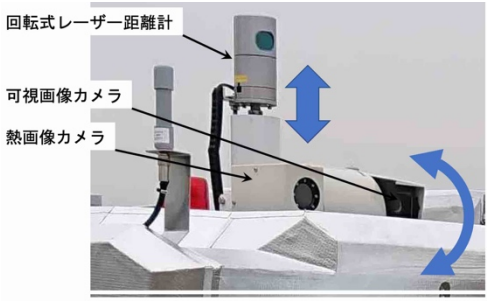
	 図　計測機器を熱から保護する機構 ○その他の技術 ・単一の放水口を持つ放水ノズルの内部の切り替えによって、広角放水、ストレート放水、泡放射に対応できる放水ノズルを開発した。 ・泡を放射する際に、風の影響を小さくし、目標位置に泡を届かせる性能、十分な消火性能を持つ泡を発泡する性能を両立させた新機構を開発した。（特許取得） ・火災が発生している石油タンクに有効に放水するために適した地点を自動的に計算し、また、その地点への移動経路を自動的に算出する技術を開発した。（特許出願中）
各単体ロボットの試作機の開発	全体システムの研究開発の前段階として、消防ロボットシステムを構成する各単体ロボットを試作した。各ロボットには、「基礎技術の研究」において実用化レベルを目指して開発した技術のうち、協調連携技術、自律技術、耐放射熱技術を導入した。 ・連続稼働 10 時間を実現。ただし、飛行型偵察・監視ロボットは、適宜バッテリーを交換し、連続稼働時間の 1/2 以上飛行し、上空からの偵察・監視活動の実施を実現した。 飛行型　　走行型 偵察・監視ロボット　偵察・監視ロボット　　放水砲ロボット　ホース延長ロボット 図　消防ロボットシステムを構成する各単体ロボット試作機
試作機の評価	研究開発する消防ロボットシステムの試作した各単体ロボットについて、消防本部における評価試験を実施した。 ・消防本部所有の訓練施設等の他、管轄内の石油化学コンビナートにおいて試験を実施。 ・２消防本部、各２ヶ月間試験を実施。 放水試験　　自律走行・追従走行試験 図　消防本部における評価試験の実施状況
実戦配備型の開発	消防本部における試作機の評価を基に、実戦配備し実災害環境下で確実に動作し、消防本部での運用に耐え得る「実戦配備型」の開発製作を行った。 ・自律走行技術の精度の向上 ・実証配備する消防本部管内の大規模石油化学コンビナートの「ロボットの自律走行用地図」を作成した。

図　作成した石油化学コンビナートのロボットの自律走行用地図の一例（一部）

図　ロボットによる石油化学コンビナート敷地内の構造物等計測の様子

・指令システムの開発、搬送車輌の製作。1台の搬送車輌に消防ロボットシステム全体を積載するために、各ロボットを小型・軽量化した。

図　実戦配備型消防ロボットシステム

【フェーズ２】

技術の種類	技術開発の概要
実証配備	・消防本部へ実証配備し、基本的な機能習熟の後、緊急消防援助隊特殊装備小隊として、令和元年５月 24 日に部隊発足した。

図　発隊式

図　スクラムフォース　ロゴマーク

図　隊旗

・配備当初、実災害対応においては、ロボットの走行は遠隔操縦による走行としたが、首都直下型地震において自律走行技術を活かし対応するため、東京湾岸地域の大規模石油化学コンビナートの「ロボットの自律走行用地図」の整備を進め、また、消防隊員の習熟により、最終的には、実災害対応時においても、自律走行技術を活用できるレベルとなった。

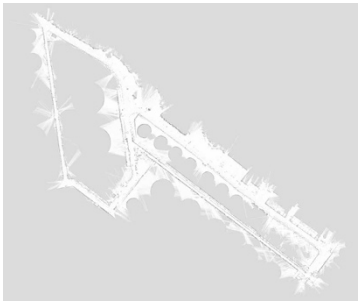


図　作成した東京湾岸地域の大規模石油化学コンビナートの
　　ロボットの自律走行用地図の一例（一部）

・消防本部に実証配備し、実戦配備型消防ロボットシステムで対応すべき災害が発生した場合、即応して出動することを前提に訓練を実施した。訓練においては、消防研究センター及び企業と連携し、順次練度を高めた。最終的に、現場到着後 15 分で活動開始（最短 10 分程度）、30 分で放水開始を実現した。
・上記の運用を通じて、消防本部の現場目線での実用性向上のために必要な改良事項を聴取した。細かい項目も含めると約 40 項目の意見が提示された。

新技術導入検討

研究開発開始時に整備されていなかった技術、考慮されていなかった技術の有効性を検討した。

・準天頂衛星(*10)を利用した GPS 技術の精度を確認し、RTK-GPS と比較し同程度の精度で位置計測できることを確認した。

図　精度確認試験に使用した準天頂衛星対応 GPS 受信機

・コスト削減を目指し、平成 30 年に開発されたローコスト回転式のレーザー距離計の性能検証を実施し、２台用いることによって現在の１台と同程度の精度が得られることを確認した。

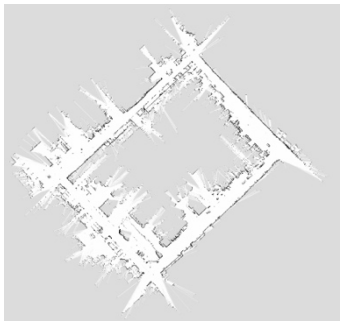


図　ローコストレーザースキャナを使用して作成した
　　ロボットの自律走行用の地図（消防研究センター構内）

・ロボットの自律走行用の地図のより効率的な作成法を確立し、必要な計測補助器具を作成した。
・消防隊員の消防ロボットシステム操作習熟度の向上・技量維持を図るため、指令システムシミュレータ及び飛行型偵察・監視ロボットのシミュレータを製作し、導入した。

<table>
<tr><td></td><td>

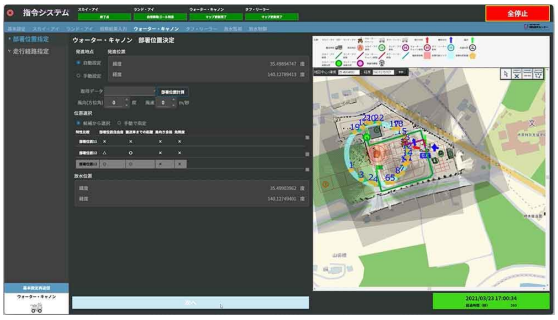
図　製作した指令システムシミュレータ</td></tr>
<tr><td>実戦配備型の
改良</td><td>消防本部の意見聴取及び新技術の検討を基に、優先度・実現可能性の観点から検討し、実証配備している実戦配備型の改良、システムの改善を行った。
・実証配備における消防本部の意見聴取から、運用上改良が必要な項目について提示された意見のうち約８割の項目に対応した。主な項目は、
・指令システムの画面表示について、消防隊員の実用性向上のための配置変更意見に従って変更した。
・システムエラー表示に、エラー回避または復旧のための対応手順を表示。これまでエラー表示で進捗しなかった作業が大幅に改善された。
・ロボットの動作モードなどの状態は指令システムに表示されるのみであったが、ロボット周辺で作業している作業員が指令システム操作員に確認せずにロボット状態を把握できるよう、ロボットに簡易な表示器を設置。これにより、準備時間を短縮することができた。
・一部のロボットだけ使用する場合は、これまで単体操縦装置で実施してきたが、指令システムからも可能とした。
提示された意見のうち対応できなかった主な項目は、
・ディスプレイが、状況によっては太陽光や反射によって見にくいことがあり、改善希望があったが、既存品を利用しているため対応ができなかった。
・搬送車輌内のロボットの収納配置の変更の希望があったが、大規模な改修となるため、実現できなかった。
 

図　改良した指令システムメイン画面
・検討した新技術のうち、有効性が確認されたもの。
・準天頂衛星技術について今後精度の向上が期待されることから、対応受信機を改良時に走行型偵察・監視ロボットに導入することとした。
・ローコストレーザースキャナについては、有効性が確認されたものの、これまで１台であった物と同等な性能とするためには、２台取り付ける必要があり、採用するためにはロボットの大幅な改造が必要であることが判明したため、改良時の導入は見送ることとした。</td></tr>
<tr><td>量産型仕様等の
とりまとめ</td><td>・研究開発した消防ロボットシステムは、最大級の火災・災害に対し、現状の技術で実現し得る性能を実現している。一方で、各消防本部において、現地の状況に応じて消防ロボットシステムの構成及び機能を選択できるよう、３種類の仕様をとりまとめた。概要は以下の通りである。
１．改良した実戦配備型を量産化する仕様
構成：飛行型偵察・監視ロボット、走行型偵察・監視ロボット、放水砲ロボット、ホース延長ロボット、指令システム、搬送車輌
機能：自律移動、自動放水修正（協調連携技術）、高耐熱
２．放水システムとし、偵察・監視は既存の機器・方法を活用する仕様
構成：放水砲ロボット、ホース延長ロボット、指令システム、搬送車輌
機能：自律移動、高耐熱
導入費用　１型の 2/3、維持経費　１型の 1/2
３．放水システムとし、移動を遠隔操縦とする仕様</td></tr>
</table>

	偵察・監視及びロボットの搬送は既存の機器・方法を活用 構成：放水砲ロボット（遠隔操縦）、ホース延長ロボット（遠隔操縦） 機能：高耐熱 導入費用　１型の 1/3、維持経費　１型の 1/6 ・飛行型偵察・監視ロボットの操縦技量維持、教官育成プログラムをとりまとめた。概要は以下の通りである。 ・飛行型偵察・監視ロボットの操縦技量維持については、１年に１回、規定の飛行を実施し、ビデオ審査を受けることとした。 ・教官育成プログラムについては、最低飛行時間数を設定し、手動で高度な操縦が可能なこと、機体が不安定になる前に判断し操縦、安定化を図れることなどを盛り込んだ。

（*10）準天頂衛星：都市部における建築物や山間部では山が衛星からの電波を遮蔽し、GPS の電波が受信できないことがあるが、真上に衛星があると常に電波の受信が可能となる。常に日本の真上に衛星があるように整備された衛星が準天頂衛星「みちびき」であり、令和元年 11 月から本格運用されている。また、基準局で解析された補正データが準天頂衛星からの電波で配信され、GPS の精度の向上が図られる。

３　政策効果の把握の手法

実戦配備型消防ロボットシステムの研究開発が完了するまでの期間である平成 26 年度～平成 30 年度の５年間、消防本部職員及び学識経験者で構成される「消防ロボットの研究開発事業に係る評価会」を開催し、災害対応のための消防ロボットの研究開発事業について、研究開発目標をより高度な次元で達成するため、消防本部のニーズ、社会的ニーズ、科学的及び技術的観点等から、研究進捗及び計画について意見等を聴取し、評価等を受けた。さらに、「国の研究開発に関する大綱的指針（平成 28 年 12 月 21 日　内閣総理大臣決定）」に基づき、「消防研究センター研究評価委員会」において、研究開発が国民の安心・安全な生活の実現に対する貢献性を考慮し、消防防災活動に資する戦術、資機材等への転化が可能な技術であるかという観点から、事前評価では研究開発の実施計画に基づき実施すべきか否かについて意見等を聴取し評価を、また、中間評価では研究開発の進捗と計画に基づく研究開発の継続について意見等を聴取し評価を受けた。

さらに、消防ロボットシステムを構成する各単体ロボット試作機について消防本部における試験評価を行うとともに研究開発した消防ロボットシステムを消防本部に実証配備し、実用性の検証を行った。なお、消防ロボットシステムの研究開発事業の実施においては、各地の消防本部における意見交換を行った。

また、外部発表や特許出願件等も調査し、必要性・有効性等を分析した。

４　政策評価の観点・分析等

○研究開発による論文・研究発表・特許の実績からの分析

研究開発による論文・研究発表・特許の実績から、合計６件の論文発表（うち５件は海外論文誌発表、さらに今年度１件掲載、２件投稿中を含めると９件）、合計 7 件の特許出願（うち 3 件は特許取得済、また１件は海外特許出願）などの成果を挙げている。また、本研究開発に関する依頼講演（うち国際会議２件）が 14 件、テレビ放映を含む報道掲載が 43 件（うち 4 件は海外放送）、専門誌等における依頼執筆が 19 件と、社会的注目度・期待度の高い研究開発であり、本研究開発の成果物である消防ロボットシステム（スクラムフォース）は、既に社会実装が行われている。以上より、本研究開発は十分な成果を上げており、その必要性、有効性等が認められる。

主な指標	平成 26 年度	平成 27 年度	平成 28 年度	令和 29 年度
査読付き誌上発表論文数	０件（　０件）	０件（　０件）	０件（　０件）	０件（　０件）
査読付き口頭発表論文数（印刷物を含む）	０件（　０件）	０件（　０件）	０件（　０件）	２件（　２件）
その他の誌上発表数	２件（　０件）	１件（　０件）	２件（　０件）	４件（　０件）
口頭発表数	１件（　０件）	２件（　０件）	２件（　０件）	３件（　０件）

講　　演	5件（　0件）	2件（　0件）	2件（　0件）	4件（　1件）
特許出願数	0件（　0件）	0件（　0件）	2件（　0件）	1件（　0件）
特許取得数	0件（　0件）	0件（　0件）	0件（　0件）	0件（　0件）
意匠登録	0件（　0件）	0件（　0件）	0件（　0件）	0件（　0件）
報道発表数	0件（　0件）	0件（　0件）	1件（　0件）	0件（　0件）
報道掲載数	3件（　0件）	2件（　0件）	0件（　0件）	20件（　0件）

主な指標	平成30年度	令和元年度	令和2年度	合計
査読付き誌上発表論文数	0件（　0件）	2件（　2件）	1件（　1件）	3件（　3件）
査読付き口頭発表論文数（印刷物を含む）	1件（　0件）	0件（　0件）	0件（　0件）	3件（　2件）
その他の誌上発表数	3件（　0件）	4件（　0件）	3件（　0件）	19件（　0件）
口頭発表数	0件（　0件）	0件（　0件）	2件（　0件）	10件（　0件）
講　　演	1件（　1件）	0件（　0件）	0件（　0件）	14件（　2件）
特許出願数	0件（　0件）	1件（　0件）	3件（　1件）	7件（　1件）
特許取得数	0件（　0件）	1件（　0件）	2件（　0件）	3件（　0件）
意匠登録	2件（　0件）	0件（　0件）	0件（　0件）	2件（　0件）
報道発表数	1件（　0件）	0件（　0件）	0件（　0件）	2件（　0件）
報道掲載数	6件（　2件）	9件（　2件）	3件（　0件）	43件（　4件）

上記の他、
査読付き誌上発表論文数　令和3年度　掲載1件（1件）、投稿中2件（1件）
その他誌上発表数　令和3年度　2件
報道発表　平成25年度　1件
書籍掲載　令和元年度　1件、令和3年度　1件、原稿提出中　1件（発行日未定）

注1：各々の件数は国内分と海外分の合計値を記入。（括弧）内は、その内海外分のみを再掲。
注2：「査読付き誌上発表論文数」には、定期的に刊行される論文誌や学会誌等、査読（peer-review（論文投稿先の学会等で選出された当該分野の専門家である査読員により、当該論文の採録又は入選等の可否が新規性、信頼性、論理性等の観点より判定されたもの））のある出版物に掲載された論文等（Nature、Science、IEEE Transactions、電子情報通信学会論文誌等および査読のある小論文、研究速報、レター等を含む）を計上。
注3：「査読付き口頭発表論文数（印刷物を含む）」には、学会の大会や研究会、国際会議等における口頭発表あるいはポスター発表のための査読のある資料集（電子媒体含む）に掲載された論文等（ICC、ECOC、OFCなど、Conference、Workshop、Symposium等でのproceedingsに掲載された論文形式のものなど。ただし、発表用のスライドなどは含まない。）を計上。なお、口頭発表あるいはポスター発表のための査読のない資料集に掲載された論文等（電子情報通信学会技術研究報告など）は、「口頭発表数」に分類。
注4：「その他の誌上発表数」には、専門誌、業界誌、機関誌等、査読のない出版物に掲載された記事等（査読の有無に関わらず企業、公的研究機関及び大学等における紀要論文や技報を含む）を計上。
注5：PCT（特許協力条約）国際出願については出願を行った時点で、海外分1件として記入。また、何カ国への出願であっても1件として計上。また、国内段階に移行した時点で、移行した国数分を計上。

○各観点からの分析

観点	分析
必要性	平成15年の十勝沖地震における石油タンク全面火災の発生、平成23年の東日本大震災における市原市の石油コンビナートのＬＰガスプラント爆発・火災などの事案では、全国の消防の応援による災害応急対応を行ったところであるが、鎮圧するまでに石油タンク全面火災では39時間以上、石油コンビナートのＬＰガスプラント爆発・火災では８日以上を要するなど、長期間にわたる困難な消火活動を必要とした。また、平成24年の姫路市化学プラント爆発火災事故では、消防隊員を含む36人が負傷し、消防隊員1人が殉職した。このような教訓から、消防隊員の安全を確保しつつ、これらの災害を早期に抑制し、産業活動の早期再開を図るとともに、周囲の住民の安全・安心を確保するためには、消防の資機材等の高度化・高機能化が不可欠である。 大規模な自然災害発生時のエネルギー・産業基盤における大規模な火災や爆発等の特殊な災害に対しては、高度な資機材等を装備した全国的な消防の応援により対応する必要があり、緊急消防援助隊

	が国（消防庁長官）の指示等により即応することになるため、緊急消防援助隊資機材として国が研究開発する必要がある。具体的には、緊急消防援助隊が装備する高度な資機材として、高い耐放射熱性能を有し、情報収集活動や放水活動を自律的かつ協調連携して行い、実戦において活用できるレベルの消防ロボットシステムが必要である。 「日本再興戦略」2014、2015、2016 において「講ずべき施策」とされ、その工程表において実施計画が明記された。国土強靱化及び震災対策基本計画においては、「国土強靱化基本計画」（平成 26 年度）、「国土強靱化アクションプラン」2014～2018 及び「国土強靱化年度計画」2020 において「プログラム推進のための主要施策」等として位置づけられ、「南海トラフ地震防災対策推進基本計画」並びに「首都直下地震緊急対策推進基本計画」の地震対策を推進する基本計画に「具体目標」として施策が明記された。科学技術研究の面からは、「科学技術イノベーション戦略」2015、2016、2017、並びに「統合イノベーション戦略」2019、2020 において「目標達成に向けた施策・対応策」として位置づけられた。さらに「世界最先端 IT 国家創造宣言」平成 26～28 年において「目指すべき社会・姿を実現するための取組」として位置づけられた。この他に、「ロボット新戦略」「AI 戦略」等においても先端技術の活用という面からも、具体目標に対する取組等として位置づけられた。 以上より、本研究開発には必要性があったと認められる。
効率性	石油化学コンビナート等の特殊な災害現場環境下で機能できる自律移動技術の開発が遅れている一方で、消防ロボットシステムを社会実装するためには、要素技術の統合が必要であり、本研究開発による社会実装を見通した研究開発の他に効率的で質の高い代替手段がないのが実情である。 研究開発の体制は消防研究センターが中心となり、国土交通省、防衛省、経済産業省等の関係省庁と連携して取り組んだ。消防活動上の留意すべき点については消防本部と、石油化学コンビナート地域における取組については石油化学コンビナート企業との意見交換を頻繁に行うとともに、災害発生現場等の視察を実施した。さらに、先端技術については大学との意見交換に基づき実用可能性について機械製作企業と検討し、機械製作企業が持つ社会実装が可能な完成度の高い技術を利用した。単体ロボットの試作機の試験評価は消防本部において石油化学コンビナート企業の協力も得て実施し、また、社会実装に当たっては災害を経験している消防本部を選定し、それぞれの特質に応じた分担により、効率的に進めてきた。さらに、請負企業側においても、独自に協力を得られる消防本部を選定し、協力の了解を得ることを公募の応募条件とするとともに、業務実施体制について公募応募時に提出を求め、「消防ロボットの研究開発事業に係る評価会」において了承を受けた。放水ノズルの開発企業、飛行型偵察・監視ロボットの開発企業、走行型偵察・監視ロボット及び指令システムの開発企業、放水砲ロボット及びホース延長ロボットの開発企業、先端技術研究は大学、さらに搬送車輌製作企業での分担体制とすることにより高度な技術開発を要する各分野について責任の所在を明確にするとともに、定期的に連絡会議を設け、各分野の連携が円滑に行われるようにした。 各年度の公募応募時に予算計画書（全体）及び（各機関）について提出を求め、各年度の第 1 回の「消防ロボットの研究開発事業に係る評価会」において、研究計画とは別に経費執行等の効率性について評価を実施し、いずれの年度も委員全員から「適」評価を受けている。 研究開発した実戦配備型消防ロボットシステムは、研究開発品ではあるが、その完成度が予想されていたレベル以上に高く、そのまま消防本部へ実証配備できた。 以上より、本研究開発には効率性があったと認められる。
有効性	過酷な災害現場環境下でも活用可能な自律移動技術、協調連携技術、高い耐放射熱技術を開発するとともに要素技術を統合し、石油化学コンビナート等における大規模火災や爆発危険性の高い事案に対応可能な消防ロボットシステムを研究開発し、実戦で運用できるレベルに実用性を高めた。また、更なる高度化を目指し、実証配備を基に実用性の更なる最適化及び準天頂衛星技術の導入を図るなど改良を実施した。 研究開発の成果物である消防ロボットシステムを装備した部隊は、緊急消防援助隊の特殊装備小隊として発隊した。さらに、大規模な火災や爆発等の特殊な災害に対しては、高度な資機材等を装備した全国的な消防の応援により対応する必要があり、緊急消防援助隊が国（消防庁長官）の指示等により即応することになるため、実証配備を基に石油化学コンビナート等における爆発が想定される災害や大規模な火災に対する実戦対応を可能とした。 発生が危惧される首都直下型地震や南海トラフ地震において、エネルギー・産業基盤が被災し大規模火災や爆発危険性が高い事案が発生した場合、消防ロボットシステム（スクラムフォース）を活用することにより、災害の拡大を抑制することが可能となり、周辺の住民の安全・安心の向上はもとより、より早いエネルギー・サプライチェーンの復旧、ひいては災害後の国民生活のより早い復旧・復興に貢献することが期待される。さらには、工場、倉庫やトンネル等における火災に対しても、一般的な消防隊の装備では近接が難しい状況下においても、より早い火災の鎮圧、被害の抑制に貢献が期待される。

	消防本部に実証配備することにより、実戦配備型消防ロボットシステムで対応すべき災害が発生した場合、即応して出動することを前提に訓練を実施し、必要があれば実災害に出動する体制とした。研究期間終了後は通常配備とし、災害に備えている。 以上より、本研究開発には有効性があったと認められる。
公平性	研究開発の成果物である消防ロボットシステム（スクラムフォース）を装備した部隊は、緊急消防援助隊の特殊装備小隊にとして発隊した。大規模な火災や爆発等の特殊な災害に対しては、高度な資機材等を装備した全国的な消防の応援により対応する必要があり、緊急消防援助隊が国（消防庁長官）の指示等により即応することになるため、国民の安全・安心な生活の確保に繋がるものであり、本研究開発の成果は、広く国民の利益になる。 平成 26 年度の研究開発に係る業務請負者の選定に当たっては、提案者との利害関係を有しない複数の外部有識者で構成される「消防ロボットの研究開発事業に係る評価会」おいて企画競争の内容について審査し、最も優れた提案を採択する方式により、競争性を担保した。さらに、平成 27 年度以降は、年度毎の契約として毎年度の業務請負者を公募し、「消防ロボットの研究開発事業に係る評価会」でその応募内容を審査し、業務請負者を決定した。 以上より、本研究開発には公平性があったと認められる。
優先性	平成 23 年 3 月に発生した東日本大震災においては、震源地から離れた東京湾岸の千葉県市原市に立地する、我が国のエネルギー・産業基盤の一翼を担う石油化学コンビナートにおいて大規模火災・爆発が発生した。この災害により、周辺地域の住民の安全・安心が大きく脅かされたばかりでなく、国内のエネルギー・サプライチェーンに大きなダメージを与え、震災後の復旧・復興に遅れを生じさせる一因ともなった。 現在、首都直下型地震や南海トラフ地震の発生が危惧されており、その被害を抑え、早急に復旧・復興を進めることが、人命の保護を最大限に図り、国民生活の安心・安全を実現するために喫緊の課題とされている。このため、「国土強靭化基本計画」に基づき「首都直下地震緊急対策推進基本計画」及び「南海トラフ地震防災対策推進基本計画」が策定されているところである。 本研究開発を実施し、研究開発の成果物である消防ロボットシステムを活用することにより、人命の保護、住民の安全・安心の向上はもとより、より早いエネルギー・サプライチェーンの復旧、ひいては災害後の国民生活のより早い復旧・復興に貢献することが期待される。 なお、研究開発した実戦配備型消防ロボットシステムは、消防本部のニーズが高く、そのまま消防本部へ実証配備された。 以上より、本研究開発には、優先性があったと認められる。

5　政策評価の結果（総合評価）

エネルギー・産業基盤における大規模な火災や爆発等の特殊な災害に対して、災害を早期に抑制するためには、緊急消防援助隊の装備として、高い耐放射熱性能、情報収集活動や放水活動を自律的かつ協調連携する性能を有する高度な資機材が必要である。なお、実災害に対応するためには、これらの性能を有し実戦において活用できるレベルの消防ロボットシステムが必要であり、本研究開発には必要性があったと認められる。

平成 26 年度～平成 30 年度の 5 年間において、協調連携技術、自律移動技術、耐熱技術についての基礎技術の開発を行い、消防ロボットシステムを構成する単体ロボットの試作機を製作した。製作した試作機について消防本部における試験評価を実施し、その結果を基に、実戦配備型の消防ロボットシステムを開発した。研究開発した実戦配備型消防ロボットシステムについては消防本部から配備要望があり、また、研究開発の成果である消防ロボットシステムは、実際に配備した上で、運用上の実用性の向上を実現すべきであるとの「消防ロボットの研究開発事業に係る評価会」の提言を受け、令和元年度～令和２年度の２年間、消防本部での実証配備を実施した。実証配備においては、消防本部での運用における現場目線での実用上の意見・要望の聴取を実施し、また、並行して新技術等の導入検討も行った。これらの意見聴取及び新技術の導入検討を基に実戦配備型の改良を実施した。最終的に、改良した実戦配備型消防ロボットシステムを消防本部に通常配備し、石油化学コンビナート等における爆発が想定される災害や大規模な火災に対して、災害拡大抑制等の実戦対応が可能となり、当初の目標を達成することができた。

よって本研究開発には、有効性、効率性等があると認められる。

＜今後の課題及び取組の方向性＞

消防本部の状況に応じた３種類の仕様をまとめた。また、より簡便に消防ロボットシステムの操作を習熟できるシミュレータなどの周辺機器も開発し、飛行型偵察・監視ロボットについては技量維持確認プログラム等も整備した。今後の課題は、研究開発した技術の活用、広範な社会実装である。今後は、災害の発生状況、消防本部のニーズを勘案し検討を進めていくものと考える。

６　学識経験を有する者の知見の活用

平成 26 年１月～２月、この分野の有識者と面談、意見交換を実施した。また、同時期に消防本部へ導入されたロボット開発においてアドバイザーを務めた有識者と面談、意見交換を実施し、研究開発計画、研究開発の仕様のとりまとめを行った。

さらに、大規模石油化学コンビナート等を管轄する複数の消防本部において意見交換を行い、現場の要望を把握した。また、大規模石油化学コンビナート等事業者とも意見交換を実施し、現場の状況等を把握した。これらの意見・要望や現場の状況を検討し、消防ロボットシステムの試作機及び実戦配備型の仕様に取り入れた。

「消防ロボットの研究開発事業に係る評価会」を平成 26 年度～平成 30 年度の５年間、毎年度３回の計 14 回（平成 30 年度に限り２回）開催し、災害対応のための消防ロボットの研究開発事業について、研究開発目標をより高度な次元で達成するため、消防本部の意見、社会的ニーズ、科学的及び技術的観点等から、研究進捗及び計画について意見等を聴取し、評価等を受けた。なお、研究開発する消防ロボットシステムは、最終的に消防本部での実運用されることが目的であり、消防本部のユーザーとしての意見も重要であることから、学識経験者ばかりでなく消防本部職員を委員に含め、その知見を活用した。評価会の概要は以下の通り。

・委員構成　外部有識者として、消防本部職員４名、学識経験者５名、計９名が参画
・オブザーバーとして、消防庁関係課室、消防本部、関係省庁
・評価　Ｓ（優）／Ａ（良）／Ｂ（可）／Ｃ（不可）の４段階で評価を実施
・令和元年 3 月に開催した最終評価会では、完成した実戦配備型の実演を実施。5 年間の全体評価として、Ｓ：５名、Ａ：４名の評価であった。
・「研究開発にとどまらず、社会実装についても取り組むべき」との提言あった。
・本評価会での評価及び提言、消防本部のニーズ及び配備要望等を踏まえて令和元年度～令和２年度に実証配備及びこれに基づく改良等を実施することとし、最終評価会において実証配備計画についての了承を得た。

「国の研究開発に関する大綱的指針（平成 28 年 12 月 21 日　内閣総理大臣決定）」に基づき、「消防研究センター研究評価委員会」において、研究開発が国民の安心・安全な生活の実現に対する貢献性を考慮し、消防防災活動に資する戦術、資機材等への転化が可能な技術であるかという観点から、事前評価では研究開発の実施計画について意見等を聴取し評価を、また中間評価では研究開発の進捗と計画に基づく研究開発の継続について意見等を聴取し、以下の通り評価を受けた。さらに、研究開発終了後において、研究開発が当初の目標通りの成果を達成し、有効な研究開発であったか否かについての評価を受ける。

委員構成　有識者１２名、うち第１分科会６名

評価　Ａ：このまま実施／継続して研究を続ける、Ｂ：一部修正して実施／研究を続ける、Ｃ：研究の実施を見直し／収束に向かわせる、Ｄ：研究を中止／中断する　の４段階で評価。

・事前評価

2014/03/14　平成 25 年度消防研究センター研究評価委員会　第１分科会

平成 26 年～平成 30 年の事前評価　Ａ：６名

主な意見

・消防ロボットの研究開発は、今後の災害対応においての活用が期待される。
・各機関での連携により有意義な研究開発とすべき。

・中間評価

2017/06/23　平成 29 年度第１回消防研究センター研究評価委員会　第１分科会

2018/02/22　平成 29 年度第２回消防研究センター研究評価委員会　第１分科会

平成 26 年～平成 28 年の中間評価　Ａ：６名

令和元年～令和２年の事前評価　Ａ：６名
主な意見
・人間とロボットの分担は重要な課題。ロボットに完璧な機能を求めるべきではない。
・研究成果を実戦配備できるレベルで完成させ、配備すること期待する。

・事後評価
2021/07/13　令和３年度第１回消防研究センター研究評価委員会　第１分科会
研究の経過及び研究成果の説明
2022/02　令和３年度第２回消防研究センター研究評価委員会　第１分科会（予定）
研究の評価と意見への対応

7　評価に使用した資料等

○世界最先端 IT 国家創造宣言（平成 25 年６月 14 日閣議決定)、工程表（平成 25 年６月 14 日高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部）
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20130614/siryou1.pdf
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20130614/siryou4.pdf
○世界最先端 IT 国家創造宣言（平成 26 年６月 24 日閣議決定)、工程表改訂（平成 26 年６月 24 日高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部）
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20140624/siryou1.pdf
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20140624/siryou3.pdf
○世界最先端 IT 国家創造宣言（平成 27 年６月 30 日閣議決定)、工程表改訂（平成 27 年６月 30 日高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部）
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20150630/siryou1.pdf
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20150630/siryou3.pdf
○世界最先端 IT 国家創造宣言（平成 28 年５月 20 日閣議決定)、工程表改訂（平成 27 年６月 30 日高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部）
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20160520/siryou1.pdf
○「世界一安全な日本」創造戦略（平成 25 年 12 月 10 日閣議決定）
https://www.kantei.go.jp/jp/kakugikettei/2013/__icsFiles/afieldfile/2013/12/09/h251210_1.pdf
○南海トラフ地震防災対策推進基本計画（平成 26 年３月中央防災会議）
http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/34/pdf/34_siryo1-5.pdf
○南海トラフ地震防災対策推進基本計画（令和元年５月 31 日中央防災会議）
http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/pdf/nankaitrough_keikaku.pdf
○南海トラフ地震防災対策推進基本計画（令和３年５月 25 日中央防災会議）
http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/pdf/nankaitrough_keikaku_honbun.pdf
○国土強靭化基本計画（平成 26 年６月３日閣議決定）
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/pdf/kk-honbun-h240603.pdf
○国土強靭化アクションプラン 2014（平成 26 年６月３日国土強靭化推進本部決定）
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/pdf/kkap-honbun-h240603.pdf
○国土強靭化アクションプラン 2015（平成 27 年６月 16 日国土強靭化推進本部決定）
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/pdf/ap2015.pdf
○国土強靭化アクションプラン 2016（平成 28 年５月 24 日国土強靭化推進本部決定）
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/pdf/ap2015.pdf
○国土強靭化アクションプラン 2017（平成 29 年６月６日国土強靭化推進本部決定）
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/pdf/ap2017.pdf
○国土強靭化アクションプラン 2018（平成 30 年６月５日国土強靭化推進本部決定）
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/pdf/ap2018_0605.pdf
○国土強靭化年次計画 2020（令和２年６月 18 日国土強靭化推進本部決定）

https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/pdf/nenjikeikaku2020_02.pdf

○科学技術イノベーション総合戦略 2014～未来創造に向けたイノベーションの懸け橋～（平成 26 年６月 24 日閣議決定）本文、詳細工程表

https://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/2014/honbun2014.pdf

https://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/2014/kotei-3-infra.pdf

○ロボット新戦略（2015 年２月 10 日日本経済再生本部）

https://www.kantei.go.jp/jp/singi/robot/pdf/senryaku.pdf

○首都直下地震緊急対策推進基本計画（平成 27 年 3 月 31 日閣議決定）

http://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/pdf/syuto_keikaku_20150331.pdf

○科学技術イノベーション総合戦略 2015（平成 27 年６月 19 日閣議決定）

https://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/2015/honbun2015.pdf

○科学技術イノベーション総合戦略 2016　（平成 28 年 5 月 24 日閣議決定）

https://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/2016.html

○科学技術イノベーション総合戦略 2017　（平成 29 年 6 月 2 日閣議決定）

https://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/2017.html

○統合イノベーション戦略（平成 30 年６月 15 日閣議決定）

https://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/index.html

○統合イノベーション戦略 2019（令和元年６月 21 日閣議決定）

https://www8.cao.go.jp/cstp/togo2019_honbun.pdf

○統合イノベーション戦略 2020（令和２年７月 17 日閣議決定）

https://www8.cao.go.jp/cstp/togo2020_honbun.pdf

○「日本再興戦略」改訂 2015　－未来への投資・生産性革命－（平成 27 年６月 30 日閣議決定）本文（第二部）、行程表

https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/dai2_3jp.pdf

https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/kouteihyo.pdf

○日本再興戦略 2016－第 4 次産業革命に向けて－（平成 28 年６月２日閣議決定）本文、行程表

https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/zentaihombun_160602.pdf

https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/kouteihyo_160602.pdf

○未来投資戦略 2017－Society　5.0 の実現に向けた改革－（平成 29 年６月 9 日閣議決定）（具体的施策）

https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/miraitousi2017_sisaku.pdf

○未来投資戦略 2018―「Society　5.0」「データ駆動型社会」への変革―（平成 30 年６月 15 日閣議決定）（第２　具体的施策）

https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/miraitousi2018_d2.pdf

○成長戦略フォローアップ（令和元年６月 21 日）

https://www8.cao.go.jp/cstp/togo2019_honbun.pdf

○経済財政運営と改革の基本方針 2016　～600 兆円経済への道筋～（平成 28 年６月２日閣議決定）

https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/cabinet/2016/2016_basicpolicies_ja.pdf

○経済財政運営と改革の基本方針 2017～人材への投資を通じた生産性向上～（平成 29 年６月９日閣議決定）

https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/cabinet/2017/2017_basicpolicies_ja.pdf

○経済財政運営と改革の基本方針 2018～少子高齢化の克服による持続的な成長経路の実現～（平成 30 年６月 15 日閣議決定）

https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/cabinet/2018/2018_basicpolicies_ja.pdf

○AI 戦略　2019　~人・産業・地域・政府全てに AI~（令和元年６月 11 日、統合イノベーション戦略推進会議決定）

https://www8.cao.go.jp/cstp/ai/aistratagy2019.pdf

○国の研究開発評価に関する大綱的指針（平成 28 年 12 月 21 日内閣総理大臣決定）

https://www8.cao.go.jp/cstp/kenkyu/taikou201612.pdf

令和３年度事後事業評価書

政策所管部局課室名：国際戦略局　通信規格課

評価年月：令和３年８月

１　政策（研究開発名称）

狭空間における周波数稠密利用のための周波数有効利用技術の研究開発

２　研究開発の概要等

（１）研究開発の概要

・実施期間

平成 29 年度～令和２年度（４か年）

・実施主体

民間企業、大学、国立研究開発法人等

・総事業費

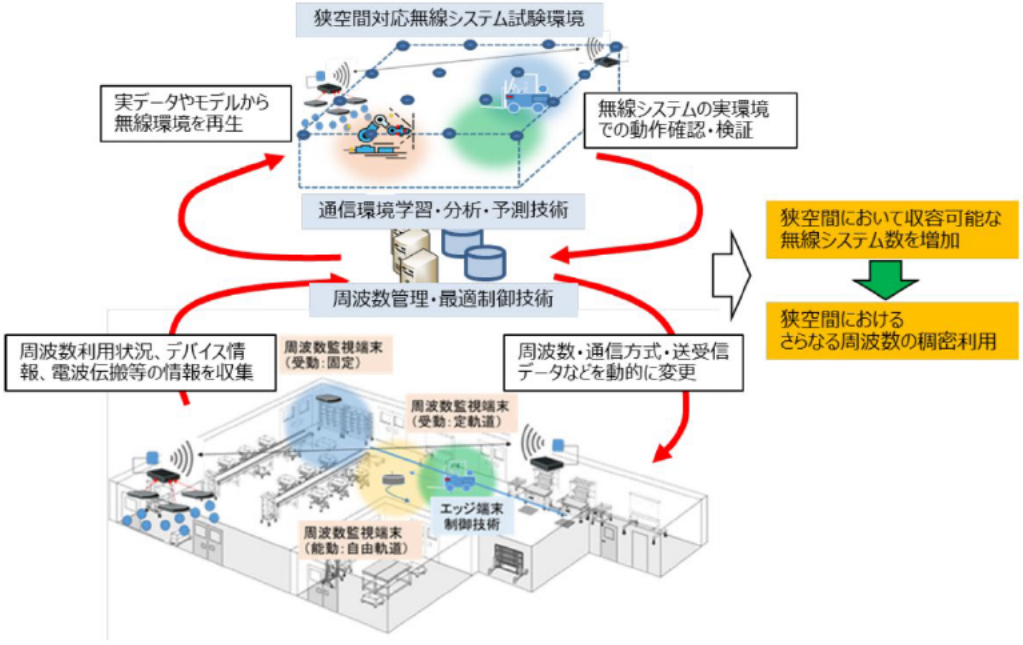
2, 163 百万円

平成 29 年度	平成 30 年度	令和元年度	令和２年度	総　額
609 百万円	547 百万円	505 百万円	502 百万円	2, 163 百万円

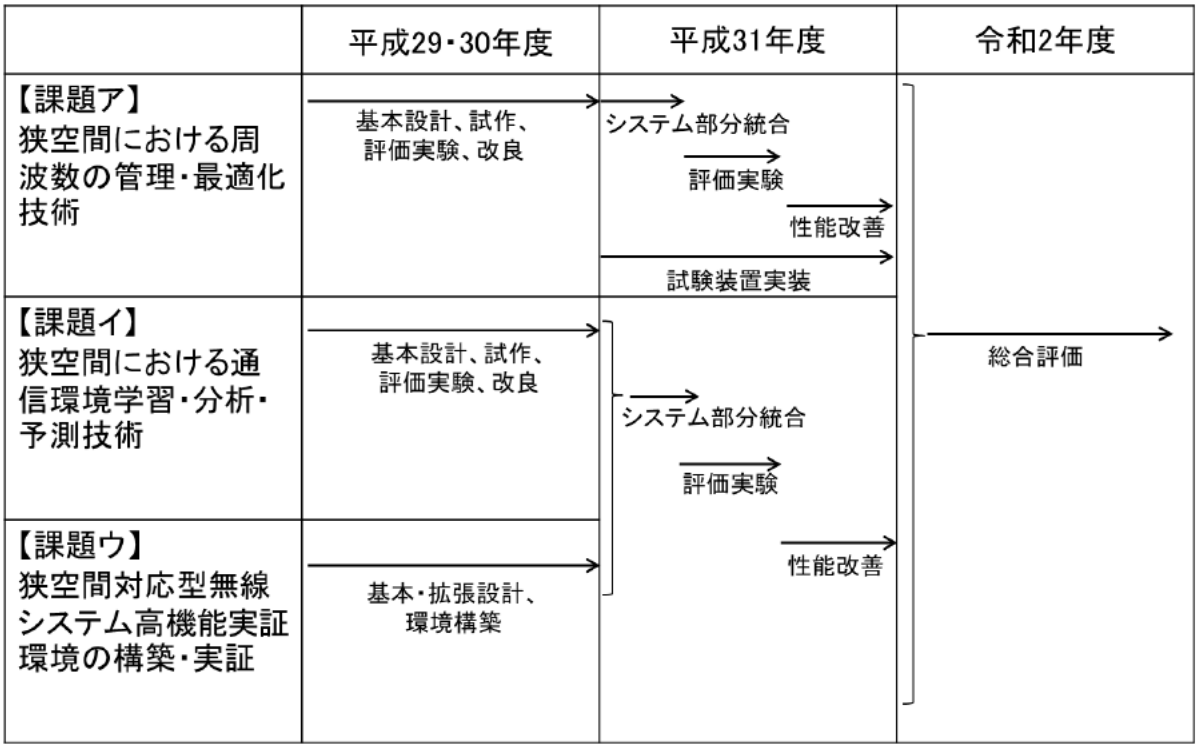
・概　要

施設内の狭い空間（倉庫、工場、病院、オフィス・テナントビルなど）においては、IoT による無線の利活用が活発化しており、狭空間内において無数の無線デバイスが一斉に通信を行うと電波の相互干渉やチャンネル不足などにより、安定した通信を維持することが困難となる。さらに今後、施設内等で IoT 化が一層進むことが想定されており、狭い空間内において更なる周波数の稠密利用を図るため、周波数の有効利用の一層の向上を実現する技術の確立が必要不可欠となる。

本研究開発では、狭空間における周波数の管理・最適制御技術、狭空間における通信環境学習・分析・予測技術の研究開発・実証及び狭空間対応型無線システム高機能実証環境の構築・実証を行い、無線システムの帯域の容量だけでなく、物理空間が通信に与える影響とその時間変動を考慮し、周波数や通信時間、送受信のタイミングの管理・最適制御を行い、複数の無線システムを制御することで、狭空間における複数の無線システム間の干渉を回避し、狭空間における無線システムの周波数利用効率を現在の３倍とし、狭空間における周波数の有効利用の一層の向上に資する。



技術の種類	技術の概要
狭空間における周波数管理・最適化技術	狭空間における電波伝搬に影響を及ぼす周辺環境は時々刻々と変化することから、リアルタイムで複数の周波数の利用状況、デバイス情報、電波伝搬等の情報を収集・管理し、無線環境に応じて周波数や無線通信方式を動的に制御し干渉を回避する技術を確立する。
狭空間における無線環境学習・分析・予測技術	狭空間における周辺環境は時々刻々と変化し、リアルタイムに収集できる周波数利用状況、電波伝搬状況等の情報には限りがあるため、データ収集が可能な限られた情報から無線環境を学習・分析し、狭空間内の任意の場所・時刻における無線環境を予測する技術を確立する。
狭空間対応型無線システム高機能実証型環境の構築・実証	狭空間において無線システム同士が相互に及ぼす影響等を評価するための試験環境を構築し、「狭空間における周波数管理・最適化技術」並びに「狭空間における無線環境学習・分析・予測技術」の実証を行う。



（２）達成目標

本研究開発では、狭空間における周波数の管理・最適制御技術、狭空間における通信環境学習・分析・予測技術の確立及び狭空間対応型無線システム高機能実証環境の構築・実証をすることにより、周波数・時間・空間を活用し多面的・統合的・適応的に複数の無線システムの周波数/無線通信方式を制御することで、狭空間における無線システムの周波数利用効率を現在の３倍とすることを目標とし、狭空間における周波数の有効利用の一層の向上に資する。

○関連する主要な政策

Ⅴ．情報通信（ＩＣＴ政策） 政策 13「電波利用料財源による電波監視等の実施

○政府の基本方針（閣議決定等）、上位計画・全体計画等

名称（年月日）	記載内容（抜粋）
第５期科学技術基本計画（平成 28 年１月 23 日）	第２章 未来の産業創造と社会変革に向けた新たな価値創出の取組 （２）世界に先駆けた「超スマート社会」の実現（Society 5.0） ② 実現に必要となる取組 国は、産学官・関係府省連携の下で、超スマート社会の実現に向けてＩｏＴを有効活用した共通のプラットフォーム（以下「超スマート社会サービスプラットフォーム」という。）の構築に必要とな

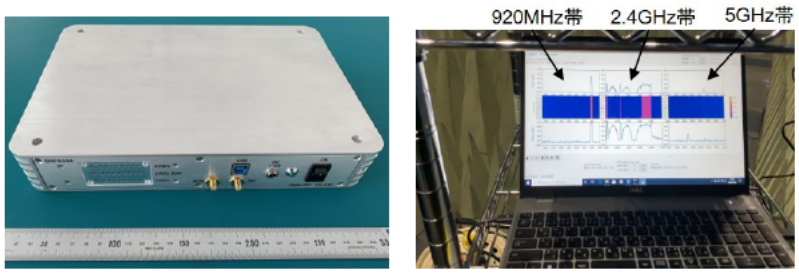
	る取組を推進する。 （3）「超スマート社会」における競争力向上と基盤技術の強化 ② 基盤技術の戦略的強化 ｉ）超スマート社会サービスプラットフォームの構築に必要となる基盤技術 ・ハードウェアとソフトウェアのコンポーネント化や大規模システムの構築・運用等を実現する「ＩｏＴシステム構築技術」 ・大規模化するデータを大容量・高速で流通するための「ネットワーク技術」
電波政策 2020 懇談会 報告書（平成 28 年７月 15 日）	電波利用料の見直しに関する基本方針 （2）電波利用共益事務の在り方 ② 次期における電波利用料の使途 (ii) IoT の社会展開に向けた電波有効利用技術の研究開発・実証 今後、IoT、ビッグデータ、人工知能等の技術の発展等により、多様な分野・業種において IoT 機器が爆発的に普及し、2020 年には IoT 機器は世界で 500 億台以上になるとの予測もされている。これにより膨大な数の IoT 機器が電波を使い、ネットワークに接続されることが見込まれており、IoT 機器の爆発的な普及に伴い、周波数のひっ迫や他のシステムとの混信への対応が必要となる。また、サイバー攻撃により十分にセキュリティを確保できない IoT 無線機器が不正使用され、大量の不要な電波を発生させるといったサイバー攻撃を原因とする周波数のひっ迫への対応が必要となる。 IoT システムは、超多数同時接続、超低遅延といった特性が求められるとともに、膨大な IoT 機器等が電波を使いネットワークに接続され、それらがネットワークを介して制御される巨大なシステムとなっており、周波数のひっ迫や他のシステムとの混信への対応に当たっては、単体の無線システムについての検討のみならず、このような IoT システムの特性を踏まえたシステム全体を通じた有無線一体となった周波数有効利用技術の開発が必須である。 このため、周波数のひっ迫や混信を回避し、IoT の超多数同時接続、超低遅延化に対応するため、ソフトウェアによる仮想ネットワークを構築し、仮想ネットワーク毎に最適な電波利用を実現する技術や、ネットワークのエッジ（末端）における周波数等の超低遅延制御技術、AI・ビッグデータ解析に基づく空間的・時間的に稠密な電波利用を実現する技術など、IoT 機器とネットワークの有無線一体となった IoT システム全体を最適に制御することにより周波数を有効利用する技術や、異なる電波利用システム間の混信を排除して周波数の共同利用を促進する技術の研究開発を実施することが必要である。 さらに、IoT 無線機器に関し、セキュリティ上の脆弱性が原因で発生する大量かつ不要な電波輻射を抑制する技術や周波数のひっ迫を低減するための軽量暗号・認証技術等の研究開発も必要である。 従って、次期においては、これらの研究開発を実施するとともに、研究開発を推進するにあたっては、オープンなテストベッド環境を構築し、産学官の連携により実証を行いつつ進めることが適当である。
「新たな情報通信技術戦略の在り方」第二次第２次中間答申（平成 28 年７月７	第 4 章 分野別の推進方策 第 1 節 先端的な IoT 分野の推進方策 （3） 公共・産業分野の先端 IoT の実現に向けた課題と推進方策 ① ネットワーク（同時多数接続、柔軟性）の高度化 ｉ）エリアネットワーク

ⅱ）	本格的な IoT 時代を支える基盤となるネットワーク環境については、今後、多種多様な IoT サービスの実現が期待される中で、ネットワークに求められる要求条件がサービス毎に異なるため、様々な通信方式が必要となってくる。 特に、公共・産業の様々な分野におけるサービスにおいて多種多様な情報収集を行う場合、これまでは、エリアネットワークでの情報収集の手段として携帯電話事業者が提供するセルラー網が中心的な役割を果たしてきたが、収集する情報の多様性が求められ、センサー等のデバイスの同時多接続性が要求される中で、低レートの通信速度ではあるが、電池の長寿命化や広範囲をカバーする通信技術の活用が求められる。 エリアネットワークにおけるこうした通信技術は、Wi-Fi や Wi-SUN を代表として、免許不要の形態で利用されることも多く、ネットワーク全体の運用・管理を適切に行うための研究開発を推進する必要がある。 ※Wi-SUN：Wireless Smart Utility Network の略。スマートメータなどに活用されている省電力無線通信規格。 【具体的な技術開発課題】 ⇒ エリアネットワーク内の超多接続環境における周波数有効利用や故障検出を可能とするネットワーク運用・管理技術の開発 ⅱ）コアネットワーク エリアネットワークが接続するコアネットワークについては、多様なサービス形態に対応するために柔軟なネットワーク構成が必要であり、加えて、エリアネットワークで収集された膨大な情報がコアネットワーク上を流通し、適時適切に分析・処理を行う必要がある。物理的なネットワークが対処できる能力を超えて、多様なサービスへの対応や膨大な情報の処理が必要となっている中で、ネットワーク仮想化技術を活用したネットワークソフト化やコアネットワークに送り込まれる膨大な情報を分散処理するエッジコンピューティング技術が必要となっている。 【具体的な技術開発課題】 ⇒ IoT の爆発的な増加に対応するために有無線一体で周波数を含めたネットワーク資源を最適制御可能な統合基盤技術の開発

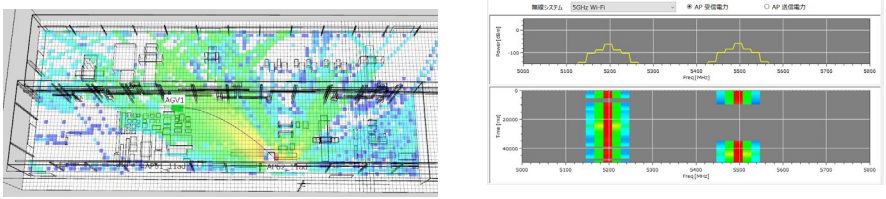
（３）目標の達成状況

４年間の研究開発を通じて、920MHz から 60GHz 帯までの狭空間における複数の無線システムを対象として、周波数管理・最適化技術及び無線環境学習・分析・予測技術を確立するとともに、各技術の実用化に向けた実証環境を構築した。これにより、各研究開発技術の実用性を総合的に評価した結果、複数無線システム間の輻輳・干渉回避を行いながら従来技術と比較して周波数利用効率３倍を実現し、当初の目標を達成することができた。

また、本研究開発を通じて得られた無線通信方式の制御技術、無線環境情報の収集技術等を基に、受託者である国立研究開発法人及び民間企業等が連携し、製造現場等の狭空間全体の無線通信の統合管理・可視化を実現する「SRF 無線プラットフォーム」の規格開発を行うとともに、同プラットフォームの普及展開を行う団体を立ち上げ、技術仕様の提供、認証プログラム事業の開始に向けた準備が行われており、製造現場等の狭空間における無線通信の円滑な利活用に向けた環境整備が進んでいる。

技術の種類	目標の達成状況
狭空間における周波数管理・最適制御技術	920MHz 帯、2.4GHz 帯、5GHz 帯、60GHz 帯等の複数の周波数における無線環境情報をリアルタイムで収集・管理し、時々刻々と変化する無線環境に応じて周波数や無線通信方式を動的に制御し干渉を回避する技術を確立し、従来技術と比較して周波数利用効率３倍を達成した。 周波数管理・最適制御の要素技術については、以下の成果を達成した。 ・用途の異なる複数の無線システム間の輻輳を回避するため、広帯域の無線通信環境情報をリアルタイムに取得可能なセンシング技術を開発した。具体的には、920MHz 帯、2.4GHz 帯、5GHz 帯の周波数帯においてミリ秒単位でバースト状に発生する通信信号・ノイズ状況を更新時間 10 ミリ秒で識別・監視可能な小型高周波受信機（スペクトラムモニタ）を開発した。  図. スペクトラムモニタ本体（左）、無線環境情報の表示状況（右） ・複数の無線通信を通信環境に応じて周波数軸上で細分化し、最適制御を行う技術を開発した。具体的には、通常の Wi-Fi の規格では 20MHz ごとに区切られている周波数を電波環境やデータサイズ、無線通信のトラフィックパターン等に応じて、複数の異なる周波数分割パターン（例えば 5MHz、10MHz、20MHz など）に適応的に切り替えて無線通信を制御する技術を開発した。これにより、従来の通信方式に比べ、本技術を用いることにより周波数利用効率 1.6 倍を達成した。 ・複数の無線通信を同一チャネル内で共存・協調させるため、通信を時間軸上で細分化し最適制御を行う仮想 TDMA[1]技術を開発した。具体的には、異なる無線システム間で時刻同期を行い、通信が衝突しないよう各システムの通信要件を満たす範囲内でパケット送信タイミングを時間的に制御することで、仮想的な時分割制御を実現する技術を開発した。これにより、各無線システムから瞬間的に通信が同時発生した際、従来の通信方式に比べ、２倍以上のパケット受信率となることを確認し、周波数利用効率２倍を達成した。 これにより、無線通信の周波数軸上及び時間軸上での最適制御技術を統合することで、従来の通信方式に比べ周波数利用効率３倍を達成した。 さらに、研究開発を通じて得られた無線通信方式の制御技術、無線環境情報の収集技術等を基に、受託者である国立研究開発法人及び民間企業等が連携し、製造現場等の狭空間全体の無線通信の統合管理・可視化を実現する「SRF 無線プラットフォーム」の規格開発を行うとともに、同プラットフォームの普及展開を行う団体を平成 29 年に立ち上げ、技術仕様の普及に向けた取組を開始した。今後は、複数の無線システムが混在する環境下での安定した通信を実現する協調制御

[1] Time Division Multiple Access の略。同一通信路を複数の通信主体で混信することなく共用するための多重接続技術の一つで、時間的に伝送路を分割して複数の主体で同じに通信する方式。

	技術の規格策定と標準化、および普及の促進を通じ、製造現場の IoT 化の進展を目指していく。
狭空間における無線環境学習・分析・予測技術	狭空間内で時々刻々と変化する無線環境情報を学習・分析し、製造現場等における任意の無線環境の予測・分析・可視化を可能とする統合シミュレータ技術を確立した。 無線環境学習・分析・予測の要素技術については、以下の成果を達成した。 ・無線環境を学習・分析し、無線システムの異常の有無や原因を事前に予測し、異常発生時に先立って無線ネットワーク管理者へ警報や異常原因を通知する技術を確立した。具体的には、各無線システムが要求する QoS[2]について、通常の QoS と直近の QoS の変化から無線環境の異常発生確率を予測する手法を考案した。本手法により、実際の工場を想定した無線環境情報を用いてシミュレーションを行った結果、想定される無線システムの異常の発生を 80%以上の確率で予測できることを確認した。 ・920MHz/2.4GHz/5GHz/60GHz 帯を対象とし、3 種以上の異なる無線通信が混在した無線環境を高速解析可能な統合シミュレータを構築した。具体的には、レイトレース[3]と統計モデルを用い、物体の移動ルートや構造物の簡略化、補間処理を併用した新たな計算手法により、複数の環境・条件において必要な解析精度を維持したまま、従来手法に比べ最大 80%程度の計算時間の削減を実現した。また、本技術の実用化を見据え、無線品質に加えて時間変動や工程ラインの稼働率等、製造現場のユーザが直接知りたい情報をシミュレータの評価指標として追加することにより、本シミュレータの使用感の向上を図った。これにより、実証実験の際に実施したアンケートの結果、無線の専門家でないユーザの 90%以上から従来型の無線シミュレータに比べ、本シミュレータの方が使いやすいとの評価が得られた。  図. 工場内無線環境の可視化・解析（左）、干渉状況の可視化（右）
狭空間対応型無線システム高機能実証型環境の構築・実証	製造現場等の狭空間における無線システム同士が相互に及ぼす影響等を評価するための試験環境を構築し、上記「周波数管理・最適制御技術」と「無線環境学習・分析・予測技術」の実証を行った。 無線システム高機能実証環境の構築・実証の結果、以下の成果を達成した。 ・実際の製造現場等で取得した無線環境情報を基に電波伝搬のモデル化を行い、狭空間における電波伝搬状況のバーチャルエミュレーション技術を確立した。具体的には、本研究開発技術の実用化を見据え、狭空間における無線伝搬モデルとして４つの利用シーン（金属加工現場、機械組立工場、高所・高温作業現場、物流倉庫）を模擬した 3D 空間のテンプレートを作成し、狭空

[2] Quality of Service の略。重要な特定の通信を優先的に伝送するなど、ネットワーク上を流れるデータの通す順番や量を調整することにより通信品質を確保する技術。
[3] 光線や電波などのシミュレート手法（Ray Tracing：光線追跡法）のこと。発信点から放たれた電波を仮想的に追跡し、任意の受信点における電波の伝搬特性や電界強度等を計算する。

	間における電波伝搬状況を大規模エミュレーション基盤（StarBED）上に構築した。本技術により、実環境では困難な無線環境パラメータを固定した任意の再現実験が実施可能となった。 ・製造現場等において無線通信の利活用を進める上では、既存の無線環境に新たに無線機器を追加導入した場合に、無線通信機器を含む製造装置が安定して動作可能かどうかの事前検証が重要である。これを踏まえ、製造現場における無線通信の導入等に向けた評価を行うため、無線通信機器の台数や使用状況を考慮し無線環境を模擬したフィジカルエミュレーション技術を確立した。具体的には、実際の製造現場等で取得した無線環境情報を基に、無線通信機器のビーコン送信タイミング、フレーム長等のトラフィック情報を再現することにより、複数の送信ノード及び制御ノードから成る任意の仮想トラフィックを生成し、無線環境への負荷テストを実行可能なエミュレーション環境を構築した。

3　政策効果の把握の手法

研究開発の評価については、各要素技術における目標の達成状況、論文数や特許出願件数などの指標が用いられ、これらを基に専門家の意見を交えながら、必要性・効率性・有効性等を総合的に評価するという手法が多く用いられている。この観点に基づき、「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和３年６月２５日）において、目標の達成状況等に関して外部評価を実施し、政策効果の把握に活用した。

また、外部発表や特許出願件数、国際標準提案件数等も調査し、必要性・有効性等を分析した。

4　政策評価の観点・分析等

○研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績からの分析

研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績から、合計３５件の論文発表及び合計１２５件の口頭発表に加え、合計３６件の特許出願を行った。さらに、合計３２件の国際標準提案を行った結果、IEEE802.1のWGの正式な活動としてタスクグループが立ち上がり、802.1QにAnnexを作成することが承認されるなど、国際標準獲得に向けて積極的に活動している。併せて、その一部機能を実装した製品がすでに販売開始していることなど非常に多くの成果を挙げており、本研究開発の必要性、有効性等が認められた。

主な指標	平成29年度	平成30年度	令和元年度	令和２年度	合計
査読付き誌上発表論文数	０件（　０件）	０件（　０件）	４件（　３件）	５件（　４件）	９件（　７件）
査読付き口頭発表論文数（印刷物を含む）	０件（　０件）	７件（　７件）	12件（11件）	７件（　６件）	26件（　24件）
その他の誌上発表数	０件（　０件）	１件（　０件）	０件（　０件）	１件（　０件）	２件（　０件）
口頭発表数	28件（　５件）	45件（　５件）	25件（　１件）	27件（　２件）	125件（13件）
特許出願数	８件（　０件）	11件（　１件）	９件（　４件）	８件（　２件）	36件（　７件）
特許取得数	０件（　０件）	２件（　０件）	０件（　０件）	０件（　０件）	２件（　０件）
国際標準提案数	６件（　６件）	12件（12件）	４件（　４件）	10件（10件）	32件（32件）
国際標準獲得数	０件（　０件）	０件（　０件）	０件（　０件）	０件（　０件）	０件（　０件）
受賞数	１件（　０件）	４件（　２件）	１件（　１件）	２件（　０件）	８件（　３件）
報道発表数	０件（　０件）	２件（　０件）	１件（　０件）	１件（　０件）	４件（　０件）
報道掲載数	０件（　０件）	０件（　０件）	０件（　０件）	０件（　０件）	０件（　０件）

注：各々の件数は国内分と海外分の合計値を記入。（括弧）内は、その内海外分のみを再掲。

○各観点からの分析

観点	分析
必要性	本格的な IoT 時代が到来し、製造、農業、流通、インフラなど様々な分野で IoT が利用されている。例えば、工場においては、製品の品質維持・管理等のため、ロボット、機械、工具などにセンサ等の IoT 機器を取り付け、機器や機械の稼働状況の把握や制御、作業の品質管理等が行われ始めており、一つの狭空間における無線システムの数は千以上に達している。一方で、工場内の狭い空間では IoT 機器間の電波の輻輳、産業機械が動作することによる雑音、電波遮蔽、運搬装置・無線システムの移動に伴う電波環境の変化等により、安定した通信を維持できなくなるなど、IoT の導入に向けた課題となっている。 また、こうした課題は、工場だけでなく、倉庫や病院、オフィス・テナントビルといった施設内の狭空間において、様々な IoT 機器がネットワークに接続され、多様かつ大容量の情報をやり取りするようになった場合にも発生する課題であり、狭空間における周波数の稠密利用を可能とする技術を確立し、狭空間でも安定した通信を実現することが必要不可欠であった。 よって、本研究開発には必要性があったと認められる。
効率性	IoT に関する専門的知識や研究開発遂行能力を有する企業、研究者等のノウハウを積極的に活用することにより、各社がそれぞれ得意な分野を担当し、効率的に研究開発が進められた。また、実施期間中も受託各社の研究代表者・実務者の定期的会合において各社の進捗状況や課題が調整・共有され、さらに外部の有識者と受託者から構成されるアドバイザリ委員会や、外部有識者による継続評価において、研究進捗や進め方等について助言を受けるなど、効率的な実施のため情報交換が積極的に行われた。 予算要求段階、公募実施の前段階、提案された研究開発提案を採択する段階、研究開発の実施段階及び研究開発の終了後における、実施内容、実施体制及び予算額等について、外部専門家・外部有識者から構成される評価会において評価を行い、効率的に実施した。 よって、本研究開発には効率性があったと認められる。
有効性	狭空間における周波数の管理・最適制御技術、狭空間における通信環境学習・分析・予測技術の確立及び狭空間対応型無線システム高機能実証環境の構築・実証をすることにより、無線システムの帯域の容量だけでなく、物理空間が通信に与える影響とその時間変動を考慮し、周波数・時間・空間を活用し多面的・統合的・適応的に複数の無線システムの周波数/無線通信方式を制御することで、狭空間における複数の無線システム間の干渉を回避することができるようになることから、狭空間における無線システムの周波数利用効率を現在の３倍とするとともに、狭空間における周波数の有効利用の一層の向上に資することができた。 また、本研究開発は、IoT 機器ベンダーや機器の利用者を構成員に含むコンソーシアムや外部有識者や専門家を含む研究開発運営委員会など、研究開発成果の利用者や情報通信業界に限らない多様な専門家や利用者との連携・協力を得つつ、研究開発と実証実験を一体的に推進することとしており、研究成果の実用化等へ向けた高い確実性が得られた。 さらに、特許出願や標準化に向けた活動なども着実に実施されるなど、国際標準化活動を積極的に行い、実用化への道筋を付けた。 よって、本研究開発には有効性があったと認められる。
公平性	本研究開発は、施設内空間における周波数の有効利用の一層の向上を可能とする技術を開発するものであり、研究開発成果は広く無線局免許人や無線通信の利用者の利益となる。 また、本研究開発の実施に当たっては、開示する基本計画に基づき広く提案公募を行い、提案者と利害関係を有しない複数の有識者により審査・選定した。 よって、本研究開発には公平性があったと認められる。
優先性	IoT の利活用の急速な拡大に伴い、膨大な数の無線デバイスが狭空間で使用されることによる無線システム間の混信等への対策は喫緊の課題となっている。さらに IoT 機器は 2020 年には全世界で 500 億台に達すると見込まれており早急に対策を講じる必要が

	あった。そのため、平成 29 年度から本研究開発を開始し、早急に技術の確立を図ることが必要であった。 　よって、我が国では、摺り合わせ型の設計・生産スタイルと現場の迅速な対応力を武器に競争力のある製品を提供してきたという強みを一層強化するため、各現場における問題を、サイバー空間を活用して設計・生産にフィードバックする技術、及び、各現場の対応を模擬するシミュレーション技術（製造機器動作、部品製造シミュレータ等）の開発を推進することとされていた。 　よって、本研究開発には、優先性があったと認められる。

５　政策評価の結果（総合評価）

狭空間における周波数の稠密利用を可能とする技術を確立し、狭空間でも安定した通信を実現した。

狭空間における周波数の管理・最適制御技術、狭空間における通信環境学習・分析・予測技術の確立及び狭空間対応型無線システム高機能実証環境の構築・実証をすることにより、無線システムの帯域の容量だけでなく、物理空間が通信に与える影響とその時間変動を考慮し、周波数・時間・空間を活用し多面的・統合的・適応的に複数の無線システムの周波数/無線通信方式を制御することで、狭空間における複数の無線システム間の干渉を回避することができるようになることから、狭空間における無線システムの周波数利用効率を現在の３倍とするとともに、狭空間における周波数の有効利用の一層の向上に資することができた。

よって、本研究開発には有効性、効率性等があると認められた。

＜今後の課題及び取組の方向性＞

現在、第５世代移動通信システムにおいて、IoT 時代に対応するため高密度・高信頼化が進められているが、限られた周波数資源の条件の下で、IoT 機器の増加や、発生する情報の増大に対して、ユーザの要件を満たすネットワークと、それを利用したサービスを柔軟に提供するという観点から、本研究開発で推進している狭空間で免許不要帯(920MHz 帯、2.4GHz 帯、5GHz 帯、60GHz 帯)での無線システムの高密度・高信頼化を推し進めることは、すみ分けや補完関係を維持・発展させるものである。限られた周波数資源の条件の下で、IoT 機器の増加や発生する情報の増大に対して、ユーザの要件を満たすネットワークと、それを利用したサービスを柔軟に提供することを可能とするため、標準化提案や対外発表を継続する。また、実用化段階においては、開発した方式の標準化を行い、事業化段階においては製品化を行うことで、社会実装を目指していく。

６　学識経験を有する者の知見の活用

「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和３年６月２５日）において、目標の達成状況や得られた成果等、実施体制の妥当性及び経済的効率性、実用化等の目途等について外部評価を実施し、外部有識者から以下の御意見等を頂いたため、本研究開発の評価に活用した。

- 達成目標は着実に達成されており、対外発表件数、申請特許件数ともに多い。高いレベルの多くの技術成果が得られている。また、それらの知財の獲得と標準化が戦略的に行われており、研究機関間の連携も有効であったと判断する。
- 本研究開発で推進している狭空間で免許不要帯(920MHz 帯、2.4GHz 帯、5GHz 帯、60GHz 帯)での無線システムの高密度・高信頼化は、すみ分けや補完関係を維持・発展させるものである。IoT 機器の増加や発生する情報の増大に対して限られた周波数資源を有効活用することにつながり有益であった。

７　評価に使用した資料等

○第５期科学技術基本計画　（平成 28 年１月 22 日閣議決定）

http://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/5honbun.pdf

○電波政策 2020 懇談会 報告書　（平成 28 年７月 総務省）

http://www.soumu.go.jp/main_content/000430220.pdf

○「新たな情報通信技術戦略の在り方」第二次第２次中間答申　（平成 28 年７月 情報通信審議会）

http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/02tsushin03_03000223.html

○電波利用料による研究開発等の評価に関する会合
http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/index.htm

令和３年度事後事業評価書

政策所管部局課室名：　国際戦略局　技術政策課研究推進室・通信規格課
総合通信基盤局　　電気通信技術システム課
評価年月：令和３年８月

１　政策（研究開発名称）

IoT 機器増大に対応した有無線最適制御型電波有効利用基盤技術の研究開発

２　研究開発の概要等

（１）研究開発の概要

・実施期間

平成 29 年度～令和２年度（４か年）

・実施主体

民間企業、大学、国立研究開発法人等

・総事業費

2,560 百万円

平成 29 年度	平成 30 年度	令和元年度	令和２年度	総　額
644 百万円	577 百万円	677 百万円	662 百万円	2,560 百万円

・概　要

本研究開発は、多種多様な規格かつ莫大な数の IoT 機器からなる無線ネットワークにおいて、様々な事業者による柔軟な IoT サービス提供を可能とするため、空間的・時間的に格段に緻密な電波利用を実現する有線・無線ネットワーク統合制御技術を確立する。これにより、サービス要件に合わせた有線・無線区間の最適制御を行い、周波数の有効利用の一層の向上を図る。

空間的・時間的に格段に緻密な電波利用を実現する有線・無線ネットワーク統合制御技術として、下記の３技術の開発を行い、さらに開発したテストベッド環境により各技術の実証を実施する。

①多数の IoT サービスを収容する有無線ネットワーク仮想化の自動制御技術

従来の管理者の手動によるシステム構成変更ではなく、IoT サービスの多様化に伴って煩雑となる品質・運用状況を把握し、有無線ネットワークシステムをデータ分析等の手段により状況に応じて仮想化し、自動制御するためのアルゴリズムの強化を図る技術

②多様な IoT サービスに適応する低遅延有無線プラットフォーム技術

同一システム・周波数で多種多様な IoT サービスを提供するため、サービスごとに異なる遅延等の要件に対応した有無線ネットワークのアーキテクチャを最適化することで、効率的な有無線統合を行い、低遅延な通信を実現するための技術

③実環境評価を併用する有無線エミュレーション[1]／シミュレーション技術

多種多様な IoT サービスに対応した迅速な開発サイクルを支援しつつ、無線周波数の有効利用につなげるため、実環境に設置した無線端末群によって得られた伝送特性を検証しながら蓄積・再生する技術

また、本研究開発で開発する有線・無線ネットワーク統合制御技術に関しては、ITU 等の国際標準化機関に有線・無線を考慮した標準化活動が広がりつつある。これらの動向を把握しつつ、

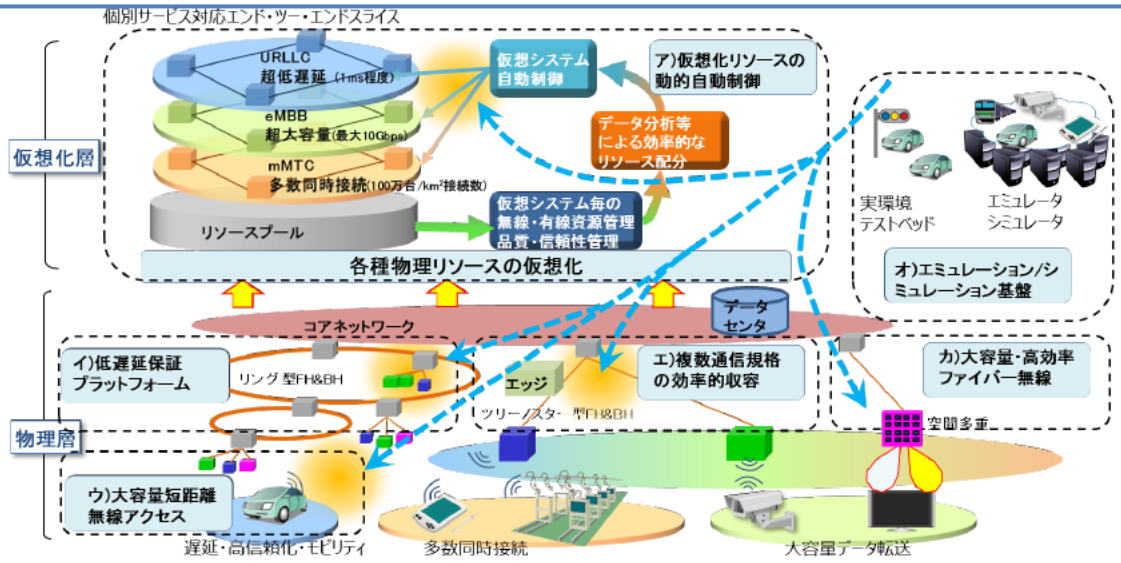
[1] ある装置やソフトウェア、システムの挙動を別のソフトウェアなどによって模倣し、代替として動作させること。

我が国から先手をとって積極的に提案し、国際標準を獲得することで、我が国の国際競争力の向上に資する。

研究開発概要

多種多様な規格かつ莫大な数（2020年には500億台以上と推測）のIoT機器が無線ネットワークに接続され、様々な事業者によるサービスの提供に対応するため、ネットワーク仮想化技術やプラットフォーム技術等を応用し、空間的・時間的に格段に緻密な電波利用を実現する有無線ネットワーク統合制御技術を開発・実証する。これにより、IoTサービスの収容数を増加させ、IoTサービス毎の要件に合わせた有線・無線区間の最適制御を実現することで、センサーネットワーク自体及びセンサーネットワークを収容する無線システムの周波数利用効率をそれぞれ3倍以上向上させる。

開発技術：・多数のIoTサービスを収容する有無線ネットワーク仮想化の自動制御技術
・多様なIoTサービスに適応する低遅延有無線プラットフォーム技術
・実環境評価を併用する有無線エミュレーション／シミュレーション技術



・スケジュール

技術の種類	平成 29 年度	平成 30 年度	令和元年度	令和２年度
課題（ア） 有無線ネットワーク仮想化の自動制御技術	→ 方式検討	→ 方式実装	→ 機能検証	→ 総合実証
課題（イ） 低遅延を保証する有無線プラットフォーム技術	→ 方式検討、基本系試作	→ 方式評価、機能拡張	→ システム検証	→ 統合実証
課題（ウ） 短距離無線アクセスネットワークの大容量化技術	→ 原理検証	→ 伝送信号の広帯域化（≧250MHz）	→ 伝送距離の延伸化（≧200m）	→ 実環境を模した実証実験
課題（エ） モバイル FH／BH[2]の通信リソース管理技術	→ 方式検討	→ 方式実装	→ 機能検証	→ 総合実証
課題（オ） 実環境評価を併用する有無線エミュレーション／シミュレーション基盤	→ 方式検討	→ 実環境整備 ｴﾐｭﾚｰﾀ整備	→ 疑似無線整備 ｴﾐｭﾚｰﾀ連動	→ 統合実証
課題（カ） 光ファイバ無線技術によるモバイルフロントホールの大容量化・高効率化技術	－	→ 方式検討 一次試作	→ 機能検証 二次試作	→ 統合検証

（２）達成目標

[2] モバイル FH（Front Haul）／BH（Back Haul）の略。Front Haul は無線基地局とアンテナ部をつなぐ回線網。Back Haul は無線基地局と最寄りの拠点施設をつなぐ回線網。

多種多様な規格かつ莫大な数（2020 年には 500 億台以上と推測）の IoT 機器からなる無線ネットワークにおいて、様々な事業者による柔軟な IoT サービス提供を可能とするため、センサーネットワークのアプリケーションの特徴に基づく空間的・時間的に格段に緻密な電波利用を実現する有線・無線ネットワーク統合制御技術を確立する。

この技術により、センサーネットワークの周波数利用効率を実効的に従来比３倍以上、かつ、センサーネットワークを収容する移動通信システムの周波数利用効率を実効的に従来比３倍以上達成することで、IoT サービス要件に合わせた有線・無線区間の最適制御を行い、周波数の有効利用の一層の向上に資する。また、国際標準を獲得することで、我が国の国際競争力の向上に寄与する。

○関連する主要な政策

Ⅴ．情報通信（ICT 政策）　政策 13「電波利用料財源による電波監視等の実施」

○政府の基本方針（閣議決定等）、上位計画・全体計画等

名称（年月日）	記載内容（抜粋）
世界最先端ＩＴ国家創造宣言（平成 28 年５月 20 日）	II.「国から地方へ、地方から全国へ」（IT 利活用の更なる推進のための３つの重点項目） II －２.【重点項目２】 安全・安心なデータ流通と利活用のための環境の整備 II －２－（１）利用者志向のデータ流通基盤の構築 [主な取組内容] （基盤を支える技術開発等） ・ データ流通基盤を支えるネットワーク等技術（第５世代移動通信システム（５Ｇ）、ソフトウェア制御、仮想化技術の活用等）の研究開発、国際標準化、総合実証及び社会実装を推進。また、低廉かつ高速のブロードバンド環境が利用できるよう事業者間の公正な競争条件の確保等、競争政策を促進する取組を推進。
世界最先端ＩＴ国家創造宣言 工程表（平成 28 年５月 20 日）	２.【重点項目２】 安全・安心なデータ流通と利活用のための環境の整備 （１）利用者志向のデータ流通基盤の構築 （基盤を支える技術開発等） 総合的な IoT 技術の研究開発等の推進【総務省】
電波政策 2020 懇談会報告書（案）（平成 28 年６月３日）	電波利用料の見直しに関する基本方針 （２）電波利用共益事務の在り方 ② 次期における電波利用料の使途 (ii) IoT の社会展開に向けた電波有効利用技術の研究開発・実証 今後、IoT、ビッグデータ、人工知能等の技術の発展等により、多様な分野・業種において IoT 機器が爆発的に普及し、2020 年には IoT 機器は世界で 500 億台以上になるとの予測もされている。これにより膨大な数の IoT 機器が電波を使い、ネットワークに接続されることが見込まれており、IoT 機器の爆発的な普及に伴い、周波数のひっ迫や他のシステムとの混信への対応が必要となる。また、サイバー攻撃により十分にセキュリティを確保できない IoT 無線機器が不正使用され、大量の不要な電波を発生させるといったサイバー攻撃を原因とする周波数のひっ迫への対応が必要となる。 IoT システムは、超多数同時接続、超低遅延といった特性が求められるとともに、膨大な IoT 機器等が電波を使いネットワークに接続され、それらがネットワークを介して制御される巨

	大なシステムとなっており、周波数のひっ迫や他のシステムとの混信への対応に当たっては、単体の無線システムについての検討のみならず、このようなIoTシステムの特性を踏まえたシステム全体を通じた有無線一体となった周波数有効利用技術の開発が必須である。 このため、周波数のひっ迫や混信を回避し、IoTの超多数同時接続、超低遅延化に対応するため、ソフトウェアによる仮想ネットワークを構築し、仮想ネットワーク毎に最適な電波利用を実現する技術や、ネットワークのエッジ（末端）における周波数等の超低遅延制御技術、AI・ビッグデータ解析に基づく空間的・時間的に稠密な電波利用を実現する技術など、IoT機器とネットワークの有無線一体となったIoTシステム全体を最適に制御することにより周波数を有効利用する技術や、異なる電波利用システム間の混信を排除して周波数の共同利用を促進する技術の研究開発を実施することが必要である。 さらに、IoT無線機器に関し、セキュリティ上の脆弱性が原因で発生する大量かつ不要な電波輻射を抑制する技術や周波数のひっ迫を低減するための軽量暗号・認証技術等の研究開発も必要である。 従って、次期においては、これらの研究開発を実施するとともに、研究開発を推進するにあたっては、オープンなテストベッド環境を構築し、産学官の連携により実証を行いつつ進めることが適当である。
周波数再編アクションプラン（平成27年10月改定版）（平成27年10月14日）	新しい電波利用の実現に向けた研究開発等 (2-2) 人を介しない機器間通信（M2M）の拡大 機器と機器の間の通信であるM2Mシステムやワイヤレスセンサーネットワークの飛躍的拡大により、人、様々な家電や設備、家、車、電車、インフラをはじめとしたあらゆる「もの」がワイヤレスでつながりうる社会が実現すると想定される

（３）目標の達成状況

４年間の研究開発を通じて、空間的・時間的に格段に緻密な電波利用を実現する有線・無線ネットワーク統合制御技術の確立を目的とした以下の各要素技術について、センサーネットワークの周波数利用効率を実効的に従来比３倍以上、かつ、センサーネットワークを収容する移動通信システムの周波数利用効率を実効的に従来比３倍以上という目標どおり達成することができた。これにより、多種多様な規格かつ莫大な数のIoT機器からなる無線ネットワークにおいて様々な事業者による柔軟なIoTサービス提供を可能とすることに寄与、周波数の有効活用の一層の向上、我が国の国際競争力の向上の寄与を実現した。

技術の種類	目標の達成状況
課題（ア）多数のIoTサービスを収容する有無線ネットワーク仮想化の自動制御技術	振舞い監視によりトラフィックを分類・分析し、その情報を利用して機能配置の最適化、データの自動集約・分配、送信タイミング調停といったリソース利用効率化を行うことで特定条件下で周波数利用効率を３倍達成した。 具体的には、東京大学の研究室内にsXGP[3]環境を設置し、IoT仮想ネットワークの有無線統合振舞い監視技術によりサービス毎に分割して粒度の細かい情報を収集し、その結果を用いてIoT指向ファンクション・オーケストレーション技術、IoT指向ネットワークオーケストレーション技術、IoT有無線ネットワークのスケーラブルリソースプーリング自動化技術の３つのリソース共有技術が連携して動作することを確認した。統合検証を通して、各技術を連携させリソース最適化を図ることで、周波数利用効率が約３倍向上することを確認した。

[3] shared eXtended Global Platformの略。自営PHSの後継規格であり、携帯電話等の国際標準規格であるLTE方式を利用したコードレス電話システム。

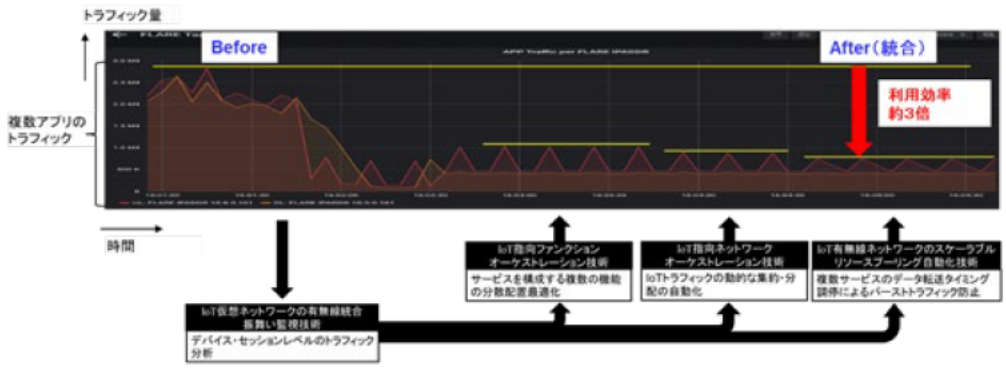


図１：検証結果

課題（イ）
低遅延を保証する有無線プラットフォーム技術

課題（イ）では、IoT ならびにモバイルフロントホール[4]（Mobile FrontHaul: MFH）トラヒックを、Layer-2 スイッチ[5]で構築される一つのネットワークで混在収容することを検討してきた。具体的には課題（イ）を 3 つに分け、課題イ-a で複数の IoT 端末の同時送信（マイクロバースト）に伴う過剰トラヒックを効率的に収容する技術、課題イ-b で MFH に低遅延を保証しながら効率的に IoT トラヒックを収容する技術、課題イ-c で MFH の所要帯域を圧縮して削減する技術、をそれぞれ確立した。これらの技術を用いることで、IoT トラヒックの再送回数（周波数資源の利用回数）が削減され、今回の評価条件では周波数利用効率を 3.8 倍に向上できることを机上と実証含めて示し、目標を達成した。具体的な内容を以下に示す。

最終年度にイ-b とイ-c の統合検証を行い、マイクロバースト[6]による同時通信発生時の収容可能な IoT 端末数を実機評価した。イ-c 技術により MFH 帯域を圧縮し、空いた帯域をイ-b 技術により IoT トラヒックへ割り当てることで、従来の 240 台から 1,000 台に向上することを示した。従来は 1,000 台の同時通信が発生しても 240 台しか収容できないため、複数回の再送が発生して周波数資源を何度も使うが、イ-b/イ-c 技術により再送無く（周波数資源を何度も使うことなく）収容できるため、周波数利用効率が 2.6 倍に向上する（計算式は図の通り）。また、このマイクロバーストによる過剰な IoT トラヒックを、イ-a 技術では複数の Layer-2 スイッチ間で連携してバッファリングすることで、従来よりもフレーム破棄を削減してさらに収容可能な IoT 端末数を向上できる。実験により、イ-a 単体で 1.6 倍に向上することを示した。イ-a/イ-b/イ-c 技術を併用した課題イ技術の統合効果を、同様に図の計算式で算出すると、今回の評価条件では 3.8 倍になることを確認した。

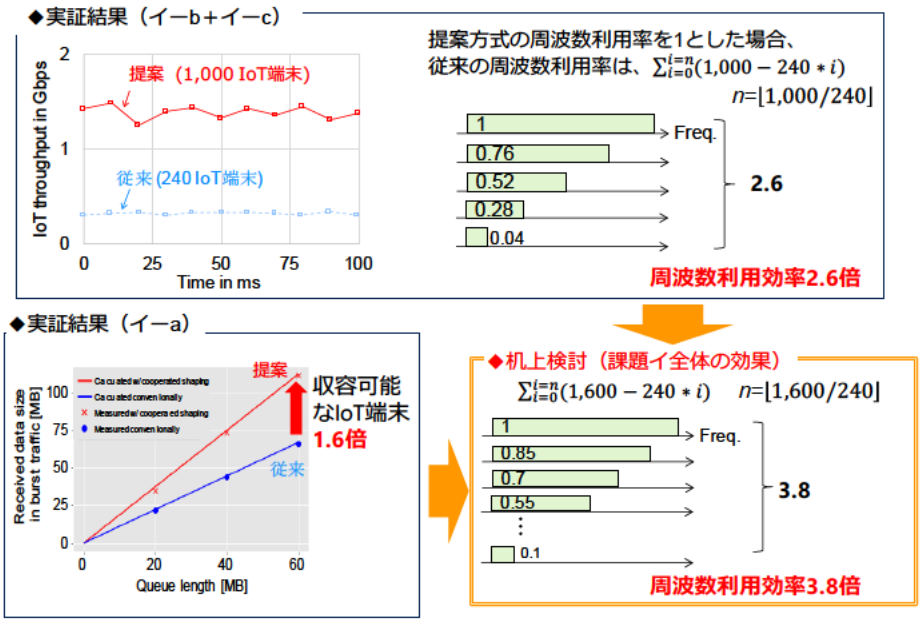
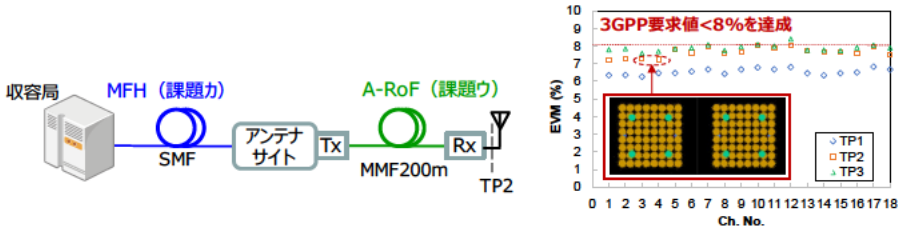
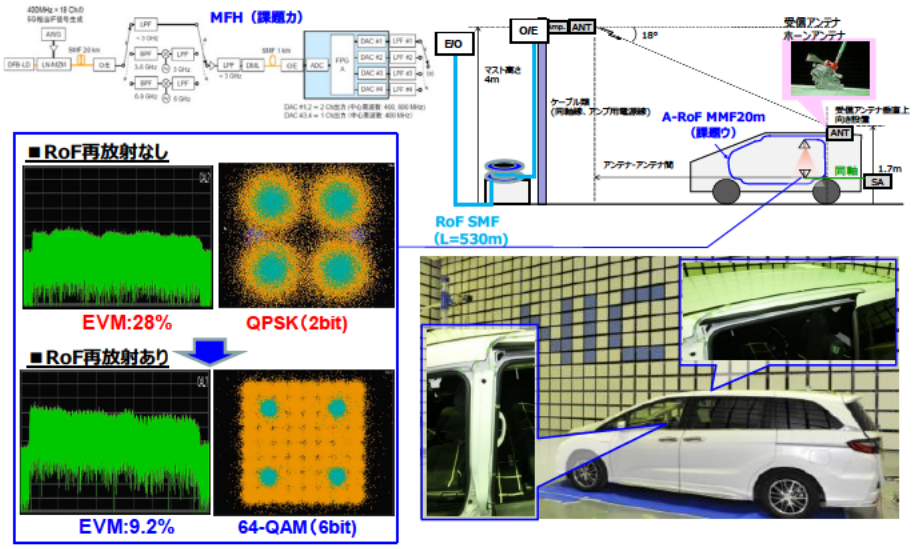


図２：検証結果と周波数利用効率向上効果

[4] 基地局と端末間における通信伝送路。
[5] 直接接続している機器同士の通信の行き先を振り分けるスイッチ
[6] 大量の端末が同時に信号送信した際に生じる突発的なトラヒックの増加

課題（ウ） 短距離無線アクセスネットワークの大容量化技術	直接変調-直接検波方式の 28GHz 帯向け光ファイバ無線(A-RoF[7])サブシステムを開発し、マルチモード光ファイバを用いて帯域幅 400MHz の 64-QAM[8] OFDM[9]信号を 2CC[10] (Component Carrier)で 200m 伝送、3GPP[11]で要求される信号品質（EVM<8%）を満たすことを確認した。これにより既存の 10Gbps の光アクセス系と CPRI 規格 [12]を用いた D-RoF[13]と比較し、周波数利用効率 3 倍以上の伝送を達成した。また実車両を用い車内の受信電力が低い領域に対し、車外（ルーフ上）で受信した無線信号を A-RoF で車内へ中継伝送し再放射することで、同一帯域幅における復調可能な受信状態を QPSK[14](2bit)から 64-QAM(6bit)へ向上させ、周波数利用効率を 3 倍にすることが可能であることを実証した。また、本課題は課題カの MFH と連携した実証実験でも同様の結果が得られており、課題間連携においても周波数利用効率 3 倍が達成可能であることを実証した。  図 3 ：試作 A-RoF を用いた 2CC 信号の MMF200m 伝送結果  図 4 ：A-RoF を用いた車内への無線信号再放射による受信状態の向上

[7] Analog-Radio-over-Fiber の略　無線信号の波形情報をそのまま光ファイバでアナログ伝送する方式

[8] Quadrature Amplitude Modulation の略　直交する 2 つの波を合成し、それぞれに振幅変調を施す方式

[9] Orthogonal Frequency Division Multiplexing の略　隣り合う周波数の搬送波同士の位相を互いに直交させて干渉を防ぎ、高密度な周波数分割を行う方式

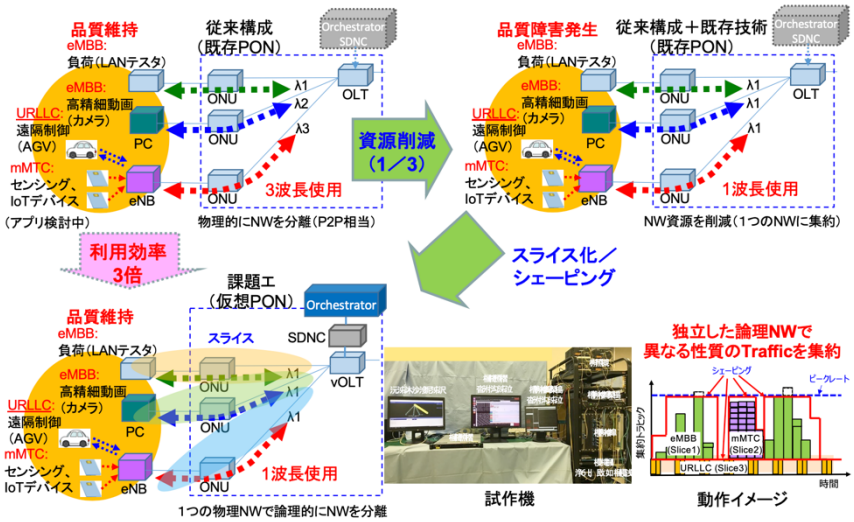
[10] 複数の周波数帯域の搬送波を束ねて使用する技術（キャリアアグリゲーション）のうち、2 つの周波数帯域を同時に使用するもの

[11] 第 3 世代（3G）以降の移動通信システムの標準規格の仕様の検討や調整を行う各国標準化機関によるプロジェクト

[12] Common Public Radio Interface の略　基地局内のインターフェースの標準規格

[13] Digital-Radio-over-Fiber の略　無線信号の波形情報をデジタル信号に変換し光ファイバでデジタル伝送する方式

[14] Quadraphase-shift keying の略　搬送波の位相を 90 度ずつ変化させ 4 値の情報を持たせる変調方式

課題（エ）モバイルFH／BHの通信リソース管理技術	5G無線アクセスネットワーク(RAN)の多数の小型基地局をPON[15]による光アクセスネットワークでフレキシブルかつ高効率に収容するための「PON リソース管理・割当制御技術」を開発した。開発したPONシステムは、オーケストレータ[16]/SDN-Controller[17]/VOLTHA[18]/vOLT[19]を試作・統合し、ネットワークスライシング[20]に対応したPONリソース管理制御を実現しており、サービス毎のトラフィック・データをもとに機械学習にて需要予測し、通信リソースを自動で割当制御する技術を、「PONリソース管理・割当制御技術」に適用し、スライス・リソース自動制御を実現した。これらの技術により3分の1の通信リソースでPONスライスを構築することにより、特定条件下で3倍の通信リソースと同等の品質を維持することを実現した。 更に、リソースプール（サービスのスケジューリング）に対応したインターフェースを実装した統合制御機能を試作し、課題アと連携した検証環境を構築したうえで、リソースプール機能によるSDNコントローラの抽象化リソースダイナミック割当管理技術、vOLTのダイナミックリソース制御及びダイナミックサービス割当制御技術を実現した。これにより、オーケストレータが指定するスケジュールに従ったダイナミックな通信リソース切替によりPONを用いたモバイルフロントホール/バックホールの通信リソース利用の場合においても特定条件下で3倍効率化を実現した。  図５：通信リソースの利用効率を3倍とするシナリオ
課題（オ）実環境評価を併用する有無線エミュレーション/シミュレーション基盤	実環境評価用テストベッドにおける計測結果を複数のエミュレータを連動させて再現する技術を確立することにより、目標とした100m×100mの空間領域における複数無線設備50台以上の通信環境において 80%以上の精度での再現を達成するとともに、他の課題と連携しそれぞれの課題の開発にも貢献した。具体的には横須賀YRP内においてITS[21]を対象とした実環境評価用テストベッドを構築するとともに、実環境計測とハードウエアエミュレーション共通に利用できる疑似無線設備を整備し、精密計測を行うことによりハードウエアエミュレータにおける再現を可能とした。一方、ハードウエアエミュレータの電波伝搬モデリング構築に際し、レイトレース[22]による伝搬結果を評価指標とすることにより実環境との差異を圧縮することができた。 さらに、横須賀にあるハードウエアエミュレータと北陸にあるソフトウエアエミュレータとを高速回線(JGN)で結んで、ハードウエアエミュレータでの計算結果を拡張することによって、任意の場所における伝搬状況を再現することが可能となった。

15 Passive Optical Network の略。光信号を複数に分岐させることで光ファイバを複数ユーザで共有する技術。

16 複雑なシステムやサービスの配備/設定/管理を行うソフトウェア。

17 Software Defined Network-Controller の略。下位の物理ネットワークを一か所で集中管理するソフトウェア。

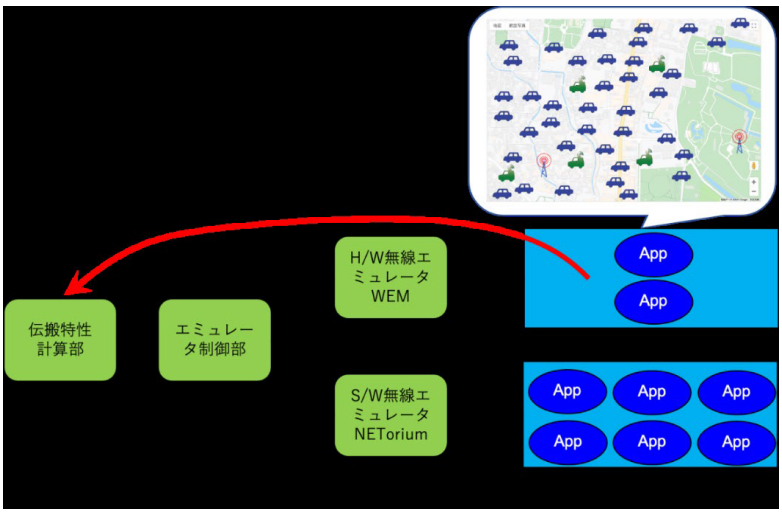
18 Virtual Optical Line Termination Hardware Abstraction の略。多様なアクセス方式、ベンダ仕様に対して共通的な管理インターフェースを提供する抽象化機能を実現するソフトウェア。

19 Virtual Optical Line Termination の略。PON 方式の加入者回線網において、通信会社の局側の仮想環境に設置される光回線の終端装置。

20 単一のネットワークインフラを仮想的に分割し、多様なニーズや用途に応じたサービスを提供できるよう複数の論理ネットワークとして提供・運用する技術。

21 Intelligent Transport Systems の略。高度道路交通システム。

22 電波を光に見立てて、直接波や反射波、回折などによる電波の伝搬状況をシミュレートする手法。

	 図６：ハードウェア・ソフトウェア無線エミュレータの統合実験環境
課題（カ）光ファイバ無線技術によるモバイルフロントホールの大容量化・高効率化技術	ハイブリッド型アナログ RoF[23]モバイルフロントホール技術により、従来のデジタル伝送方式と比べて所要光伝送帯域を 1/30 以下に高効率化するという目標、及び同モバイルフロントホール技術を前提としたフォトニックビームステアリング [24]技術により、周波数利用効率を 3 倍以上に向上するという目標を、当初予定通り達成することができた。 具体的には、ハイブリッド型アナログ RoF モバイルフロントホール技術については、ユーザーレート換算 27 Gbps の 5G 無線信号を 20km 伝送し、3GPP[25]で定める所定の信号品質を満足可能であることを実証した。従来のデジタル伝送手法の場合はユーザーレートの 13-16 倍程度の伝送帯域が必要であり、例えば 20Gbps のユーザスループットでは 260～320GHz が必要となるが、本手法の場合は 6.7GHz で伝送可能であり、1/30 以下の所要伝送帯域での高効率伝送を達成した。

[23] Radio over Fiber の略。無線信号を光信号の形で伝送する技術。
[24] 送受信したい電波の向きに合わせて最大の指向性を生成する技術。
[25] 移動通信システムの仕様の検討・作成を行う標準化プロジェクト。

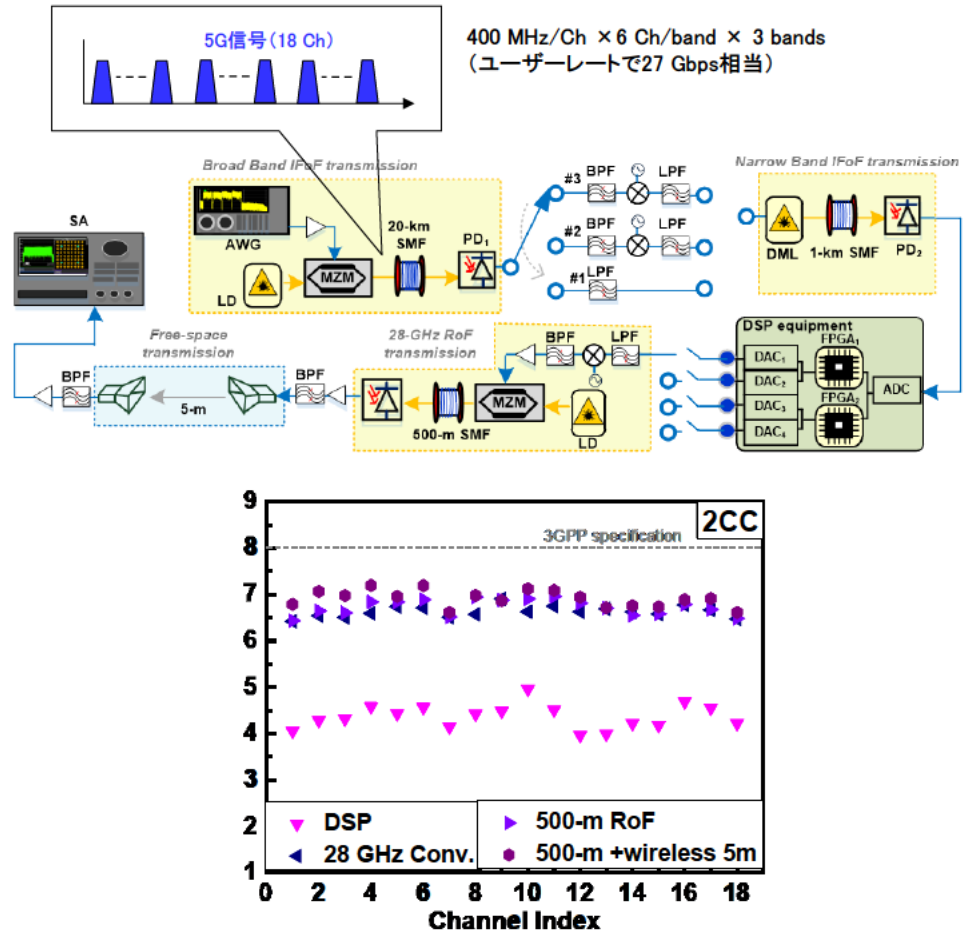


図７：ハイブリッド型アナログ RoF MFH を用いた 28 GHz 帯ダウンリンク無線伝送システムの実証実験構成（上段）および実験結果（下段）

また、フォトニックビームステアリング技術では、モバイルフロントホール伝送後のアナログ RoF 信号を試作したフォトニックアンテナデバイスに入力し、光強度および相対位相制御により、3 チャネルを同時伝送して 0° および±30° の三方向にビームを同時放射する空間分割多重無線伝送を行い、それぞれ 3GPP 規定の信号品質が満足されることを確認した。これにより、アンテナサイトにおいて同一周波数を空間的に繰り返し利用可能となることを実証し、3 倍以上の周波数利用効率の向上を達成した。

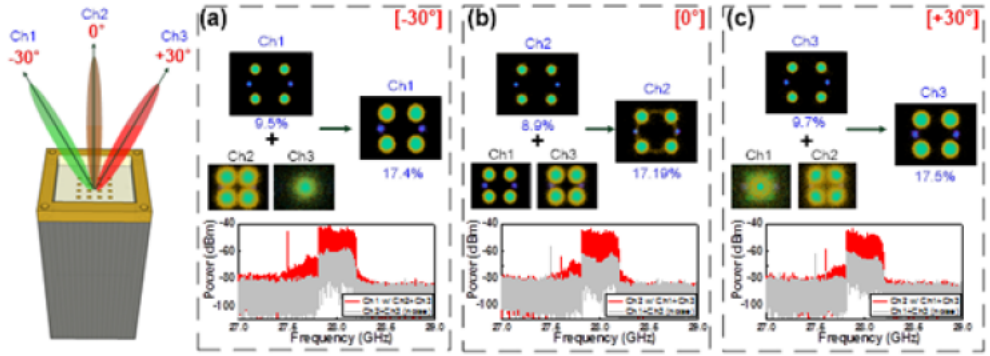


図８：空間分割多重無線伝送実験の概念図および実験結果

３　政策効果の把握の手法

研究開発の評価については、各要素技術における目標の達成状況、論文数や特許出願件数などの指標が用いられ、これらを基に専門家の意見を交えながら、必要性・効率性・有効性等を総合的に

評価するという手法が多く用いられている。この観点に基づき、「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和３年６月２５日）において、目標の達成状況等に関して外部評価を実施し、政策効果の把握に活用した。

また、外部発表や特許出願件数、国際標準提案件数等も調査し、必要性・有効性等を分析した。

４　政策評価の観点・分析等

○研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績からの分析

研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績から、合計 70 件以上の論文発表及び合計 200 件以上の口頭発表に加え、合計 70 件以上の特許出願（無線アクセスネットワークの管理装置に関する特許など）など、非常に多くの成果を挙げている。また、ITU-T SG13/SG15、ONF、APT 等、各技術の適用先を見極めながら、幅広く提案活動を実施し、その提案内容のうちいくつかが国際標準化された。今後は、PON スライス等の国際標準化提案を年３件程度実施予定である。さらに、受託機関の特に装置ベンダにおいては、具体的な製品化の予定策定に至った。以上より、本研究開発は特筆すべき成果を数多く上げており、その必要性、有効性等が認められた。

主な指標	平成 29 年度	平成 30 年度	令和元年度	令和２年度	合計
査読付き誌上発表論文数	２件（　２件）	４件（　４件）	４件（　０件）	１４件（１０件）	２４件（１６件）
査読付き口頭発表論文数（印刷物を含む）	１件（　０件）	１６件（１６件）	２１件（２１件）	１７件（１７件）	５５件（５４件）
その他の誌上発表数	１件（　０件）	２件（　０件）	１件（　０件）	１件（　０件）	５件（　０件）
口頭発表数	２９件（　３件）	100 件（３０件）	６３件（　５件）	４１件（　３件）	２３３件（４１件）
特許出願数	１６件（　４件）	２３件（　４件）	２０件（　４件）	１７件（　４件）	７６件（１６件）
特許取得数	０件（　０件）	０件（　０件）	１件（　０件）	６件（　２件）	７件（　２件）
国際標準提案数	２件（　２件）	１３件（１３件）	４件（　４件）	６件（　６件）	２５件（２５件）
国際標準獲得数	１件（　１件）	０件（　０件）	１件（　１件）	０件（　０件）	２件（　２件）
受賞数	０件（　０件）	１件（　０件）	１件（　１件）	２件（　０件）	４件（　１件）
報道発表数	０件（　０件）	０件（　０件）	０件（　０件）	９件（　０件）	９件（　０件）
報道掲載数	０件（　０件）	０件（　０件）	１４件（　０件）	１０件（　０件）	２４件（　０件）

注１：各々の件数は国内分と海外分の合計値を記入。（括弧）内は、その内海外分のみを再掲。

注２：「査読付き誌上発表論文数」には、定期的に刊行される論文誌や学会誌等、査読（peer-review（論文投稿先の学会等で選出された当該分野の専門家である査読員により、当該論文の採録又は入選等の可否が新規性、信頼性、論理性等の観点より判定されたもの））のある出版物に掲載された論文等（Nature、Science、IEEE Transactions、電子情報通信学会論文誌等および査読のある小論文、研究速報、レター等を含む）を計上する。

注３：「査読付き口頭発表論文数（印刷物を含む）」には、学会の大会や研究会、国際会議等における口頭発表あるいはポスター発表のための査読のある資料集（電子媒体含む）に掲載された論文等（ICC、ECOC、OFC など、Conference、Workshop、Symposium 等での proceedings に掲載された論文形式のものなどとする。ただし、発表用のスライドなどは含まない。）を計上する。なお、口頭発表あるいはポスター発表のための査読のない資料集に掲載された論文等（電子情報通信学会技術研究報告など）は、「口頭発表数」に分類する。

注４：「その他の誌上発表数」には、専門誌、業界誌、機関誌等、査読のない出版物に掲載された記事等（査読の有無に関わらず企業、公的研究機関及び大学等における紀要論文や技報を含む）を計上する。

注５：PCT（特許協力条約）国際出願については出願を行った時点で、海外分１件として記入。（何カ国への出願でも１件として計上）。また、国内段階に移行した時点で、移行した国数分を計上。

注６：同一の論文等は複数項目に計上しない。例えば、同一の論文等を「査読付き口頭発表論文数（印刷物を含む）」および「口頭発表数」のそれぞれに計上しない。ただし、学会の大会や研究会、国際会議等で口頭発表を行ったのち、当該学会より推奨を受ける等により、改めて査読が行われて論文等に掲載された場合は除く。

○各観点からの分析

観点	分析
必要性	本格的な IoT 社会の到来により、多種多様な規格かつ膨大な機器がネットワークに繋がることとな

	り、2003年に５億台だったネットワークに接続される機器数は、2020年には500億台まで増大すると予測されており、様々な事業者による柔軟なサービスの提供が必要であった。また、モバイルネットワークについても、多種多様なIoTサービスの要求を実現するためにスモールセル[26]が急増し、基地局とアンテナの接続は、これまでの光ファイバのPoint-to-Point接続[27]では非効率なネットワークであった。また、膨大数のスモールセルと既存の様々な無線通信が混在し、IoT機器が使用するISM帯[28]を中心に、ミリ波帯、４Ｇ、５Ｇで使用される周波数がひっ迫している。 また、今後はIoTの進展によるサービスの多様化に伴い、低遅延・大容量・多数同時接続等のサービスの要求条件に応じてサブキャリア[29]やタイムスロット[30]等を柔軟に割り当てる無線技術が進展しつつあり、有線・無線ネットワークトポロジー[31]の複雑化が見込まれている。これまでの研究開発（ネットワーク仮想化技術の研究開発等）により、ネットワークの構築や制御を柔軟に行う仮想化技術の確立に取り組んできたところであり、本研究開発では、こうした技術を活用するとともに、サービスの要求条件に応じて変化する有線・無線ネットワークトポロジーを最適化するために必要な要素技術を確立することで、マルチドメイン・マルチサービス環境[32]におけるIoTトータルシステムとして効率的に周波数を利用できるようにし、周波数のひっ迫状況を解消することが必要であった。 これらの課題を解決するため、センサーネットワークのアプリケーションの特徴に基づく空間的・時間的に格段に緻密な電波利用を実現する有線・無線ネットワーク統合制御技術の確立が早期に求められていたことから、本研究開発には必要性があったと認められる。
効率性	実施期間中、受託各社の研究代表者・実務者の定期的会合において各社の進捗状況や課題が調整・共有され、さらに外部の有識者と受託者から構成される運営委員会や、外部有識者による継続評価において、研究進捗や進め方等について助言を受けるなど、効率的な実施のため情報交換が積極的に行われた。 さらに、予算要求段階、公募実施の前段階、提案された研究開発提案を採択する段階、研究開発の実施段階及び研究開発の終了後における、実施内容、実施体制及び予算額等について、外部専門家・外部有識者から構成される評価会において評価を行い、効率的に実施した。 よって、本研究開発には効率性があったと認められる。
有効性	多数のIoTサービスを収容する有無線ネットワーク仮想化の自動制御技術、多様なIoTサービスに適応する低遅延有無線プラットフォーム技術及び実環境評価を併用する有無線エミュレーション／シミュレーション技術を確立することにより、センサーネットワークの周波数利用効率を実効的に従来比３倍以上、かつ、センサーネットワークを収容する移動通信システムの周波数利用効率を実効的に従来比３倍以上達成したことから、多種多様な規格かつ莫大な数のIoT機器からなる無線ネットワークにおいて様々な事業者による柔軟なIoTサービス提供を可能とすることに寄与することができた。また、空間的・時間的に格段に緻密な電波利用を実現する有線・無線ネットワーク統合制御技術を確立することにより、周波数の有効活用の一層の向上に寄与することができ、国際標準を獲得することで我が国の国際競争力の向上に寄与することができた。 モバイルキャリアやベンダー等の潜在顧客に対して、本研究開発で得られた成果を発表する成果共有会を開催し、出席者から「ユーザに提供したいと感じた」等の発言があり、研究成果の実用化等へ向けた高い確実性が得られた。 本研究開発で得られた成果の活用については、将来の自動運転やコネクティッドカーではIoTを活用した情報収集及びサービスが期待されており、光ファイバ無線によるIoT無線ネットワークの拡大により利便性の向上が見込まれる。更にモバイルネットワークの無線信号を自動車内機器や車内モバイル機器へ広帯域、大容量無線信号を届けるために光ワイヤハーネス[33]の普及が期待される。また工場でIoTの活用により広範囲な無線信号の伝達に光ファイバ無線が活用され生産性の向上が期待される。 よって、本研究開発には有効性があったと認められる。
公平性	本研究開発の成果は周波数の効率的な利用又は高い周波数への移行を促進するため、周波数の深刻なひっ迫の緩和に大きく寄与するものであることから、広く無線局免許人や無線通信の利用者の利益となる。

26 携帯電話の基地局の種類の一つで、通常の基地局を補完するために用いられる小出力でカバー範囲の狭い基地局。
27 ２点間を接続してデータ通信を行うための通信プロトコル。
28 Industrial Scientific and Medical 帯の略。産業科学医療用機器のための周波数帯。
29 データ伝送を周波数軸方向に分割する単位。
30 データ伝送を時間軸方向に分割する単位。
31 有線・無線を統合したネットワークの接続形態。
32 一つのデバイス等で複数のドメイン・複数のサービスを利用する環境。
33 自動車の車内配線などに用いられ、信号と情報を伝送する電線の束を光ファイバに置き換えたもの。

	また、本研究開発の実施に当たっては、開示する基本計画に基づき広く提案公募を行い、提案者と利害関係を有しない複数の有識者により審査・選定した。 よって、本研究開発には公平性があったと認められる。
優先性	本格的なIoT社会の到来により、500億台以上の多種多様な規格かつ膨大なIoT機器の普及が予測されているため、様々な事業者による柔軟なIoTサービス提供を可能とすることが喫緊の課題となっており、IoT機器とネットワークの有線・無線一体となったシステム全体を最適に制御する新たな周波数有効利用技術を早急に開発することが極めて重要である。 このような問題意識から平成28年5月20日に閣議決定された「世界最先端IT国家創造宣言」等において、喫緊の政策課題として明記されている。 また、ITU/3GPP/IEEE等の多数の標準化組織・団体においてIoTに関する国際標準化の検討が行われており、IoTに関する国際標準化活動が活発に行われているため、我が国が主導権を確保していくためには、本技術を早急に開発することが極めて重要であった。 よって、本研究開発には、優先性があったと認められる。

5　政策評価の結果（総合評価）

本研究開発は、多種多様な規格かつ莫大な数のIoT機器からなる無線ネットワークにおいて、様々な事業者による柔軟なIoTサービス提供を可能とするため、空間的・時間的に格段に緻密な電波利用を実現する有線・無線ネットワーク統合制御技術を確立する。これにより、サービス要件に合わせた有線・無線区間の最適制御を行い、周波数の有効利用の一層の向上を図るものである。

本研究開発において、空間的・時間的に格段に緻密な電波利用を実現する有線・無線ネットワーク統合制御技術を確立することにより、周波数の有効活用の一層の向上に寄与することができ、国際標準を獲得することで我が国の国際競争力の向上に寄与することができた。

よって、本研究開発には有効性、効率性等があると認められた。

＜今後の課題及び取組の方向性＞

今後は、本研究開発で確立した技術を発展させ、着実な社会実装を目指し、引き続き各受託者において、更なる技術開発、実証実験及び適用先の検討等を進めていく。また、ITU-T SG15等の会議において、国際標準化活動を推進していく。

総務省は、追跡調査等でフォローアップを行っていく。

6　学識経験を有する者の知見の活用

「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和３年６月25日）において、目標の達成状況や得られた成果等、実施体制の妥当性及び経済的効率性、実用化等の目途等について外部評価を実施し、外部有識者から以下の御意見等を頂いたため、本研究開発の評価に活用した。

・振舞い監視によるトラフィック情報を利用して機能配置の最適化、データの自動集約・分配、送信タイミング調停等によるリソース利用効率化、MFH帯域の圧縮・過剰IoTトラヒックの制御等によるIoTトラヒックの再送回数削減、アナログRoFによる64-QAMや同一周波数の繰り返し利用の適用、通信リソースのPON仮想化（スライス）技術による効率的な提供など、各課題で周波数利用効率３倍を達成し、それらの要素技術を疑似空間上で協働させて大規模環境での評価及び総合的な検証を可能としている。以上より、目標は達成されたと思われる。

・各課題の技術領域で、周波数利用効率３倍を達成し、IoT普及に伴う人からモノへの電波利用の変革を促進し、Beyond 5Gの着実な実現の足掛かりとしている。また、課題間連携も、スライス・セキュリティ・閉空間の改善の観点で実施し、連携実証に成功している。また、論文や国際会議に80件以上の論文投稿がなされており、多くの研究成果をあげている。よって、予算は効率的に使用されたと思われる。

・標準化活動として、ITU-T SG13/SG15、ONF、APT等で、各技術の適用先を勘案して提案活動を実施しており、PONスライスに関しては、実用化に向け議論が進んでいる。装置ベンダは、具体的な製品化の予定策定を始めている。

7　評価に使用した資料等

○世界最先端ＩＴ国家創造宣言　（平成 28 年５月 20 日閣議決定）
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20160520/siryou1.pdf

○電波政策 2020 懇談会 報告書　（平成 28 年７月　総務省）
http://www.soumu.go.jp/main_content/000430220.pdf

○電波利用料による研究開発等の評価に関する会合
http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/index.htm

令和３年度事後事業評価書

政策所管部局課室名：総合通信基盤局　電気通信技術システム課

評価年月：令和３年８月

１　政策（研究開発名称）

革新的ＡＩネットワーク統合基盤技術の研究開発

２　研究開発の概要等

（１）研究開発の概要

・実施期間

平成 30 年度～令和２年度（３か年）

・実施主体

民間企業、国立研究開発法人

・総事業費

1,895 百万円

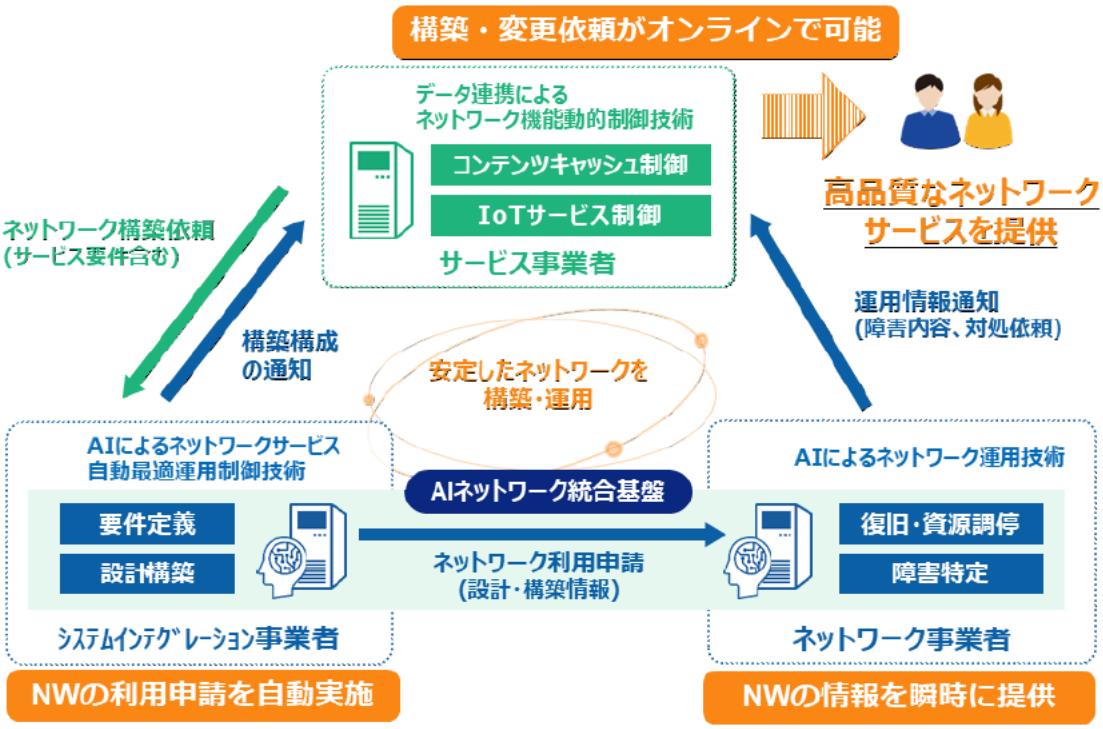
平成 30 年度	令和元年度	令和２年度	総　額
509 百万円	692 百万円	694 百万円	1,895 百万円

・概　要

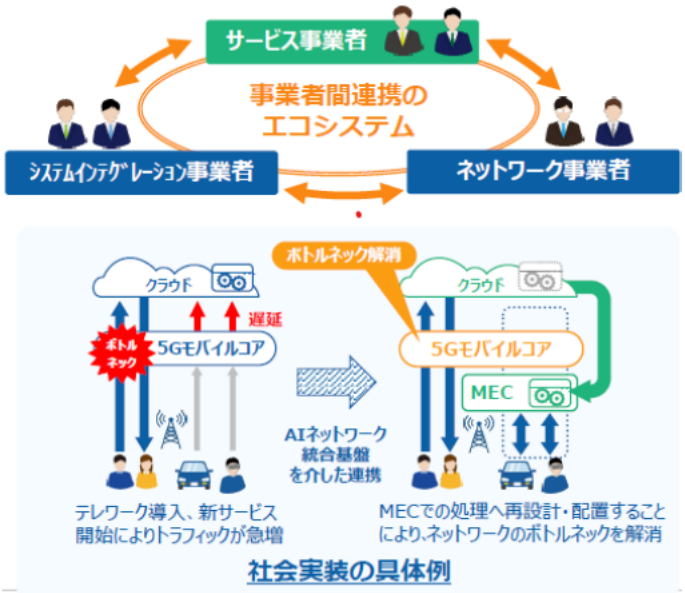
今後、５Ｇ（第５世代移動通信システム）の導入やIoT（Internet of Things）機器の急速な普及に伴い、通信量が爆発的に増加するとともに、様々な分野で通信を介した新たなサービスが創出され、それぞれのサービス毎に伝送速度、伝送遅延、同時接続数等の多種多様な要件がネットワークに求められることが見込まれる。また、ネットワークのソフトウェア制御・仮想化技術の進展により、運用面では品質を担保することが困難になると予想される。

本研究開発は、平成 30 年度から「AI によるネットワーク運用技術」、「AI によるネットワークサービス自動最適運用制御技術」を開発し、令和元年度よりこれらの技術で構築された AI ネットワーク統合基盤とサービス事業者のネットワークシステムがダイナミックに協調・連携する「データ連携によるネットワーク機能動的制御技術」の開発を実施し、安定したネットワーク環境を提供し、デジタルトランスフォーメーションの進展、我が国における世界に先駆けたSociety5.0[1]の実現に寄与するものと考える。

1 サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させることにより、地域、年齢、性別、言語等による格差なく、多様なニーズ、潜在的なニーズにきめ細かに対応したモノやサービスを提供することで経済的発展と社会的課題の解決を両立し、人々が快適で活力に満ちた質の高い生活を送ることのできる、人間中心の社会（この言葉には、こうした社会の実現に向けた取組を推進していく意味が込められている）。



また、３つの技術間の連携 API[2]仕様を実装することにより、サービス事業者・システムインテグレーション事業者・ネットワーク事業者が連携するエコシステムのユースケースを実証し、将来の事業者間連携のモデルケースの有効性を示すことができるとともに、社会情勢の変化や新たなサービスの提供が短期間で大きく変移する NewNormal 時代においても、エコシステムが機能することにより動的に構成を変更し、安定したネットワーク環境の提供が可能となる。



技術の種類	技術の概要
AI によるネットワーク運用技術	ネットワーク仮想化技術はネットワークアーキテクチャ [3]の柔軟性を向上させる一方、運用面において、ハードウェアとソフトウェアの分離による複合的な障害の増加や、原因特定の複雑化、ネットワークサービスを提供するサーバ資源の枯渇を招き、結果として、障害の検知や根本原因の特定に時間を要する事態に陥る恐れがある。

[2] Application Programming Interface の略。ソフトウェアコンポーネント同士が互いに情報をやりとりするのに使用するインターフェースを指す。

[3]ネットワークを構成する機器の論理的な構造。

	本研究開発では、ネットワーク運用業務（障害検知→原因特定→復旧手順作成→復旧対処）に AI 技術を活用し、100 台程度の通信機器で構成される大規模ネットワーク環境下において、電気通信サービスの重大事故が発生した場合においても、障害検知から復旧対処までに要する時間を 1 時間未満とするネットワーク運用自動化技術を実現する。
AI によるネットワークサービス自動最適運用制御技術	5G の導入や IoT 機器の普及に伴い、多種多様なサービスの創出が予想されており、そのサービスを支えるネットワークインフラにおいては、異なるサービス要件への柔軟な対応を目的として、SDN[4]/NFV[5]等のネットワーク仮想化技術の進展が見込まれる。これに伴い、ユーザ側から求められるサービス要件も多様化、複雑化するため、ネットワーク設計における工数の増大やサービス開始時期の長期化を招く恐れがある。 本研究開発では、ネットワーク設計業務（ネットワーク要件設計→ネットワーク設計→ネットワーク最適化）に AI 技術を活用し、サービス要件提示からネットワーク要件定義までにかかる時間を従来の 1/5 以下、ネットワーク要件からネットワーク設計完了までを 10 分で完了させるネットワークサービス自動最適運用制御技術を実現する。
データ連携によるネットワーク機能動的制御技術	5G の導入、IoT 機器の急速な普及や、4K8K 等の高精細映像コンテンツの増大に伴い、通信量が爆発的に増加するとともに、交通、医療・介護、農業等の様々な分野で新たなサービスが創出され、ネットワーク側にはサービス／時刻によって変化する多種多様な要求条件（伝送速度、遅延、同時接続数など）への対応が求められることになる。従来技術のみでは、最大需要の瞬間に合わせたネットワーク機器の増設やサーバ機器等の拡張が必要になる。 本研究開発では、「AI によるネットワーク運用技術」、「AI によるネットワークサービス自動最適運用制御技術」とサービス事業者のネットワークシステムがダイナミックに協調・連携するための AI－システム間データ連携基盤技術を確立することで、ネットワーク／サービス状態に応じたネットワーク機能動的制御技術を実現する。

・スケジュール

技術の種類	平成 30 年度	令和元年度	令和 2 年度
AI によるネットワーク運用技術	→	→	→
AI によるネットワークサービス自動最適運用制御技術	→	→	→
データ連携によるネットワーク機能動的制御技術	→	→	→

（2）達成目標

高信頼で効率的なネットワーク基盤の構築・運用及び我が国としての国際競争力の強化を図るため、ネットワーク制御やトラヒック状態等のネットワーク状態分析への AI の活用を行うための「AI によるネットワーク運用技術」及び AI によるサービス要件分析やネットワークリソースの最適配分を行うための「AI によるネットワークサービス自動最適運用制御技術」から成る革新的 AI ネットワーク統合基盤技術の確立に加えて、革新的 AI ネットワーク統合基盤技術とサービス事業者のネットワークシステムがダイナミックに協調・連携するための「データ連携によるネットワーク機能動的制御技術」を確立する。

なお、諸外国における研究開発動向や国際標準化動向等を踏まえつつ、AI 等の最先端の技術をより広く公募可能とするため、事前事業評価書における「ネットワークスライスの設計・運用・管理の自動最適化技術」を含む「AI によるネットワークサービス自動最適運用制御技術」及び「トラヒック変化の高精度予測技術」を含む「AI によるネットワーク運用技術」の確立に変更した。また、「秘匿化データの高速分析処理技術」については、予算編成過程で実施しないこととしているとと

[4] Software Defined Networking の略。ソフトウェアによって仮想的なネットワークを作り上げ、動的に制御する技術を指す。

[5] Network Functions Virtualization の略。ネットワークノード機能を仮想化し、接続または連携させて通信サービスを作成するネットワークアーキテクチャの概念を指す。

もに、令和元年度に「データ連携によるネットワーク機能動的制御技術」の確立を追加している。

○関連する主要な政策

Ⅴ．情報通信（ICT 政策）　政策９「情報通信技術の研究開発・標準化の推進」

○政府の基本方針（閣議決定等）、上位計画・全体計画等

名称（年月日）	記載内容（抜粋）
第５期科学技術基本計画（平成 28 年１月 22 日閣議決定）	第２章 未来の産業創造と社会変革に向けた新たな価値創出の取組 （３）「超スマート社会」における競争力向上と基盤技術の強化 ② 基盤技術の戦略的強化 ｉ）超スマート社会サービスプラットフォームの構築に必要となる基盤技術 超スマート社会サービスプラットフォームの構築に必要となる基盤技術、すなわちサイバー空間における情報の流通・処理・蓄積に関する技術は、我が国が世界に先駆けて超スマート社会を形成し、ビッグデータ等から付加価値を生み出していく上で不可欠な技術である。 このため、国は、特に以下の基盤技術について速やかな強化を図る。 ・IoT やビッグデータ解析、高度なコミュニケーションを支える「AI 技術」 ・IoT の高度化に必要となる現場システムでのリアルタイム処理の高速化や多様化を実現する「エッジコンピューティング」
科学技術イノベーション総合戦略 2017（平成 29 年６月 2 日閣議決定）	第２章 未来の産業創造と社会変革に向けた新たな価値創出の取組 （２）新たな経済社会としての「Society 5.0」を実現するプラットフォーム ［C］重きを置くべき取組 ② プラットフォームを支える基盤技術の強化 ｉ）サイバー空間関連の基盤技術の強化 大規模データをリアルタイム処理するためのエッジコンピューティング、仮想化・処理部最適化等のネットワーク技術、及び高速かつ高精度にデータから知識・価値を抽出するビックデータ解析技術の研究開発を推進する。
新たな情報通信技術戦略の在り方 第三次中間答申（平成 29 年７月 20 日情報通信審議会答申）	II．ICT データビリティ（ICT データ利活用環境整備）の推進方策 ４．Society 5.0 時代の新たなプラットフォーマー戦略の推進 （１）AI×革新的ネットワーク（5G、エッジ処理等）による Society 5.0 時代の新たなプラットフォーマー戦略 ④AI×革新的ネットワークによる新たなプラットフォームの構築 このように、従来のクラウド処理型プラットフォームから、超広帯域・超低遅延の革新的なネットワークによるエッジ処理プラットフォームを実現することにより、新たに創造される AI サービスの要件に合わせたプラットフォームを提供することが可能となる。これにより、ネットワーク事業者、ベンダは、クラウドまでの通信回線を単に提供するだけではなく、提供される AI サービスに最適な通信アーキテクチャを提案することにより、AI サービス提供者とネットワーク事業者、ベンダの協業によるプラットフォームの提供という新たな形態が可能となる。さらに、他の異業種のサービス提供者と連携することによりユーザ企業等に多様なサービスを提供することができる（B2B2X モデル）。 今後、2020 年代までには、5G や IoT 機器の急速な普及に伴い、通信量が莫大に増加することが見込まれるとともに、AI の技術革新を背景に交通、医療・介護、農業等の様々な分野で新たなサービスが創出され、

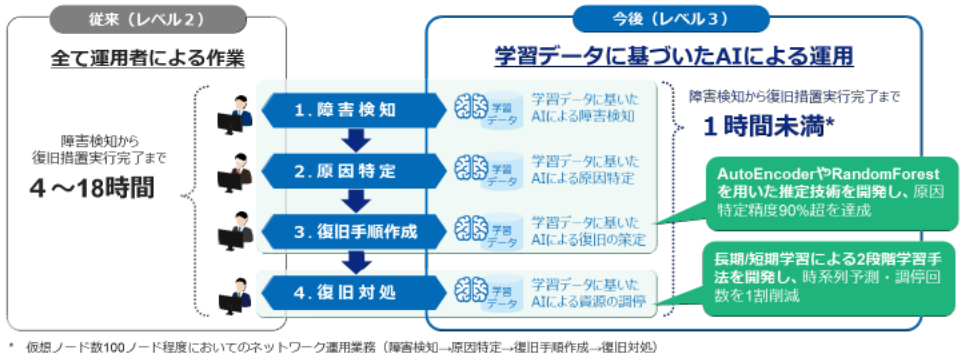
	それぞれのサービス毎に多種多様でハイレベルなサービス要件（リアルタイム、ダイナミック、リモート、セキュア等）が求められることとなる。 　上述の AI と革新的ネットワークの掛け合わせによるプラットフォームを構築するためには、通信ネットワークの大容量化に対応するための光通信技術の高度化に加え、「AI によるエッジの最適自動化技術」、「スライスの設計・運用・管理自動化技術」、「暗号化したままでの高速データ分析技術」の研究開発を実施し、革新的 IoT/BD/AI ネットワーク基盤の確立を図るとともに、多様な分野で AI サービス提供者、ユーザ企業等との協業を図っていくことが必要である。これにより、日本のネットワーク事業者、ベンダの Society5.0 時代の新たなプラットフォーマーとしての国際競争力の強化に寄与することが重要である。 【具体的な取組、今後の方向性】 ◎革新的 IoT/BD/AI ネットワーク基盤の確立を図るため、 ・ AI によるエッジ制御・ルーティングの自動最適化技術 ・ スライスの設計・運用・管理自動化技術 ・ 暗号化したままでの高速データ分析技術 の研究開発を推進 ◎ 革新的 IoT/BD/AI ネットワーク基盤をもとに、多様な分野で、AI サービス提供者、ユーザ企業等と協業することで社会実装を推進し、新たなプラットフォーム機能の提供を目指す
成長戦略フォローアップ 2019（令和元年 6 月 21 日閣議決定）	８．Society 5.0 実現に向けたイノベーション・エコシステムの構築 （２）新たに講ずべき具体的施策 ｉ）自律的なイノベーション・エコシステムの構築 ② 高等教育・研究改革 ウ）戦略的な研究開発の推進 ・「AI 戦略 2019」（令和元年６月 11 日統合イノベーション戦略推進会議決定）に基づき、人材育成や研究開発、社会実装に向けた取組等を推進する。
統合イノベーション戦略 2019（令和元年 6 月 21 日閣議決定）	第Ⅱ部 第５章　特に取組を強化すべき主要分野 （１）ＡＩ技術 ②目標達成に向けた施策・対応策 ＜研究開発＞ ○　ＡＩに関する中核研究プログラムを立ち上げ、ＡＩの基盤的・融合的な研究開発を推進する。
ＡＩ戦略 2019（令和元 6 月 11 日統合イノベーション戦略推進会議決定）	Ⅲ．産業・社会の基盤作り Ⅲ－２ データ関連基盤整備 （３）ネットワーク ＜具体目標２＞ 日本全国でＡＩの活用が可能となるためのネットワーク基盤の高度化と安全・信頼性の確保 （取組） 革新的ＡＩネットワーク統合基盤技術の研究開発（障害対応の自動化技術、ネットワーク設計の自動化技術）（2020 年度）

（３）目標の達成状況

ネットワークの設計・運用業務への AI 適用による AI ネットワーク統合基盤技術の確立を目的とした各要素技術について、当初の目標どおり達成することができた。

具体的には、AI によるネットワーク運用技術は AI ネットワーク基盤運用制御技術及びネットワーク状態分析技術を実現、AI によるネットワークサービス自動最適運用制御技術は AI ネットワークリソース最適化技術及びネットワークサービス設計制御・更新技術を実現、データ連携によるネットワーク機能動的制御技術は 2 つのユースケースをもとにデータ連携基盤技術及びデータ連携処理技術を実現した。

ネットワークサービスやネットワークの構築・運用業務の自動化に対して AI を最大限に活用するために、ユースケース、業務フロー、AI をシステムに実装し自動化を実現するための運用システムアーキテクチャ、システム間でデータを送受するデータフォーマット、インターフェース仕様、学習用データセットの生成方法を確立し、ITU-T[6]、TM Forum[7]、ETSI[8]において標準化活動を行った。ITU-T では、策定したアーキテクチャに関する寄書を 2 件提案し、2021 年 3 月と 5 月に勧告化が合意された。また、通信事業者とサービス事業者間におけるデータ連携を自律ネットワークの標準化課題検討グループに提言し、自律ネットワークの利用シーンの拡大の検討に貢献した。TM Forum では、AI 管理用の API の規約化に関する寄書を提案し、全体規約に反映されるとともに、標準化団体間の連携のために働き掛けを行い、ITU-T から TM Forum へリエゾン[9]を送付した。ETSI では、データ連携に連動するアプリケーション制御機構の標準化に向け、MEC（Mobile Edge Computing）システムと外部システム間のアプリケーション協調制御に関する調査を行うグループの発足に貢献するとともに、ユースケースや機能要件等の議論を主導した。研究開発成果を広く活用するための標準化の提案と推進といった標準的なアウトプットだけでなく、それを超える日本発の標準化検討の方向の提示という、将来の日本初の技術の展開に寄与できる可能性のあるアウトプットを各標準化団体に提案することができた。具体的な主要結果は以下のとおり。

技術の種類	目標の達成状況
AI によるネットワーク運用技術	100 台程度の通信機器で構成される大規模ネットワーク環境を NICT[10]テストベッド上に構築し、本環境上で電気通信サービスの重大事故を模擬した検証を行い、障害検知から復旧対処までに要する時間を 1 時間未満とするネットワーク運用自動化技術を実現した。  開発したネットワーク運用自動化技術は、AI ネットワーク基盤運用制御技術及びネットワーク状態分析技術で構成される。AI ネットワーク基盤運用制御技術は、運用システムの要求及びネットワーク制御ポリシに基づき、ネットワーク サービスが動作する SFC[11]基盤に

6 International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector の略。世界規模で電気通信を標準化することを目的として勧告を作成する国連機関。

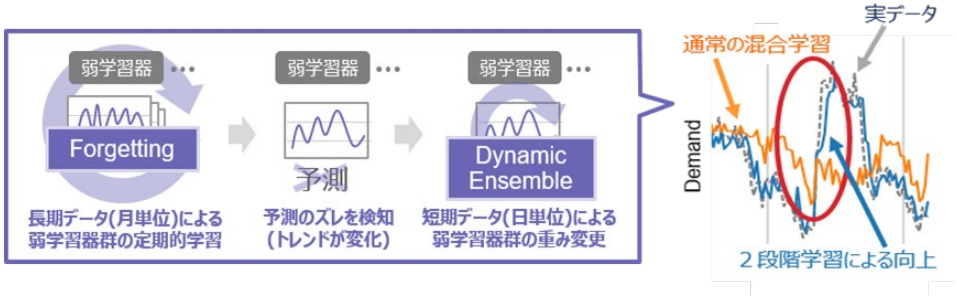
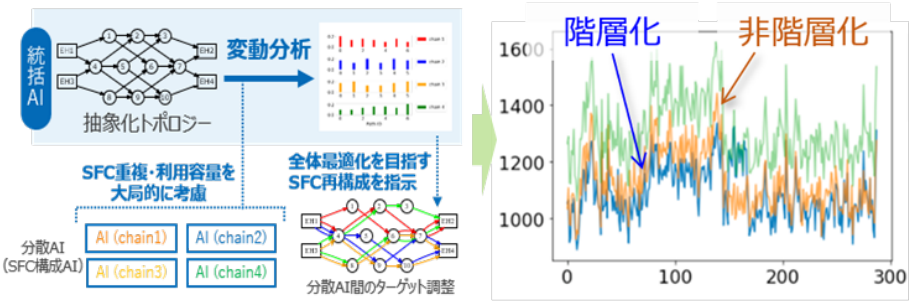
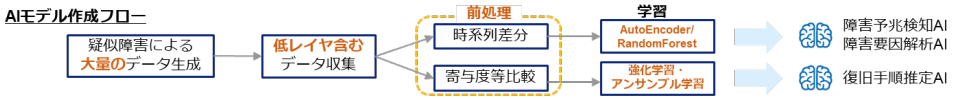
7 TeleManagement Forum の略。相互運用のできる「情報通信システムネットワーク管理」を達成するため、オペレーション分野の国際標準、業界標準を検討する情報通信事業者向けの団体。

8 European Telecommunications Standards Institute（欧州電気通信標準化機構）の略。ヨーロッパにおける通信機器ベンダーやネットワーク事業者など電気通信産業に関する独立非営利の標準化機関。

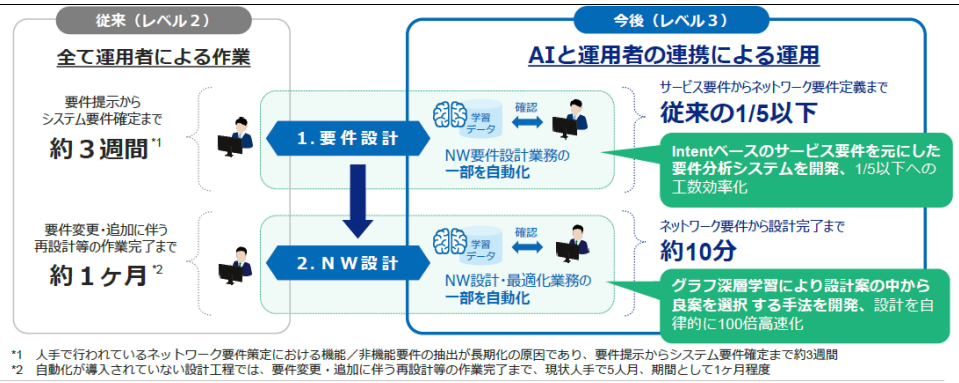
9 別の標準化組織間、または、1 つの標準化組織の別グループ間で、相互に連携して整合のとれた仕様を策定するために情報を交換すること。

10 国立研究開発法人情報通信研究機構（National Institute of Information and Communications Technology）。総務省所管の国立研究開発法人。

11 Service Function Chaining の略。仮想ネットワークにおいて、複数の仮想化されたネットワーク機能を分散配置し、特定の経路に沿って転送されるパケットに対して適切な順番でネットワーク機能処理を施すための仮想的なサービ

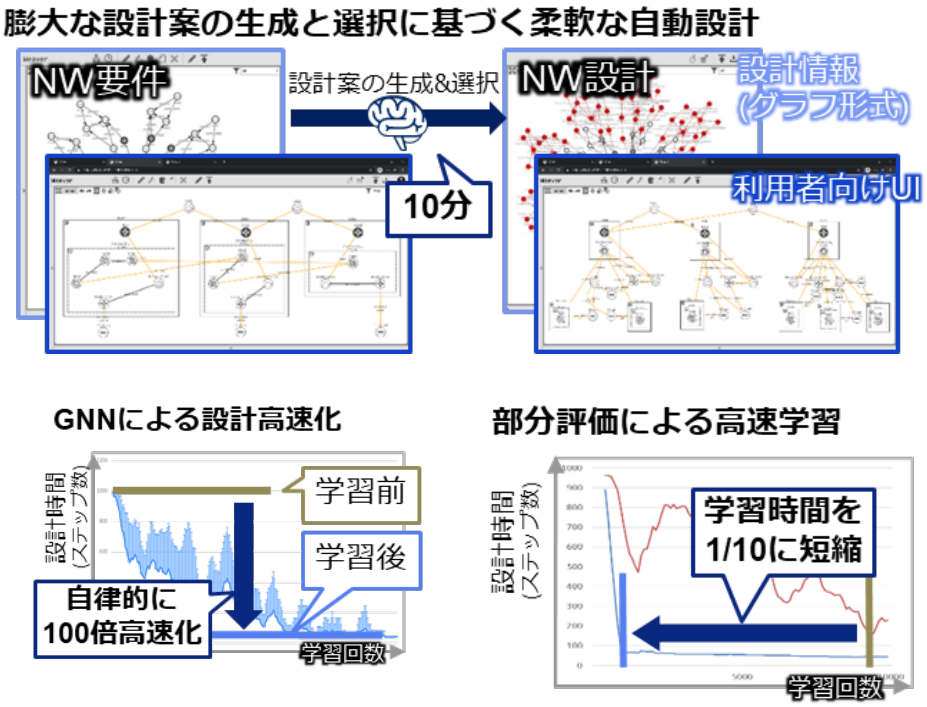
	おいて計算資源の調停・SFC 再構成案を自動的に算出する学習モデルを確立した。計算資源の自動調停では、長期・短期学習を連携した 2 段階学習を開発し、資源需要の過少予測を既存の学習より約 10%軽減して調停回数を 1 割削減した。また、事前のデータ重要度解析により学習データを削減することで、学習時間を 57%短縮させた。SFC の自動再構成では、注意機構(Attention)を備えた機械学習モデルでその解を学習することにより、既存手法に比べて、学習時間を 1/3 に短縮することができた。また、大規模 SFC 基盤では学習データの作成に時間を要するため、学習データを分割して複数の AI が分担学習することで学習時間の短縮を図るとともに、各 AI 間を調整する統括 AI を導入した移行/再構成技術を確立し、広域レベルにおける 20%の負荷分散を達成した。 **2段階学習：** 秒単位の再学習で計算資源の調停数を1割削減  **AI分散化：** 統括AI+SFC構成AIで階層化(計算資源の組合せ$O(k^n)$)  ネットワーク状態分析技術は、ネットワーク障害要因解析と障害予兆検出を実現する AI によるネットワーク品質分析技術並びにネットワーク障害要因解析と障害予兆検出を実現する AI による運用業務抽出・実行技術から成り、ネットワーク品質分析技術は、障害予兆検知 AI 及び障害要因解析 AI を開発し、大量のデータ生成、低レイヤ含むデータ収集、時系列差分によるデータ前処理を経て得られたデータセットを用いて分析エンジンに適用し、90%超の障害要因特定精度を確認した。運用業務抽出・実行技術は、復旧手順推定 AI を開発し、商用ネットワークへの適用時に再学習を発生させないために、AI モデルを復旧手順毎に作成する学習を適用し、さらに、学習データ前処理を加えることで正当率を向上させ、90%超の復旧手順正解率を確認した。 
AI によるネットワークサービス自動最適運用制御技術	全国 8 拠点を含む企業ネットワークを模擬した SD-WAN (Software-defined Wide Area Network) 環境を NICT テストベッドに構築して検証を行い、サービス要件提示からネットワーク要件定義までにかかる時間を従来の 1/5 以下、ネットワーク要件からネットワーク設計完了までを 10 分で完了させるネットワークサービス自動最適運用制御技術を実現した。

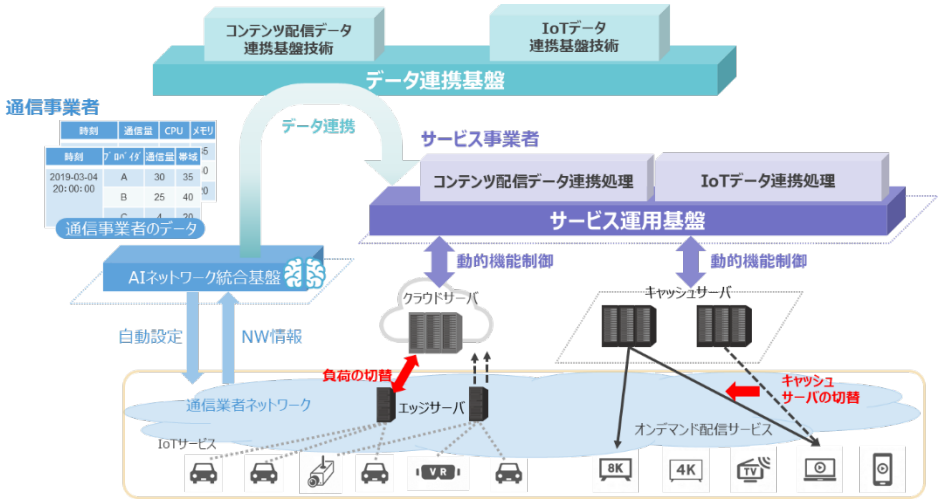
ス機能チェインを構築する技術。



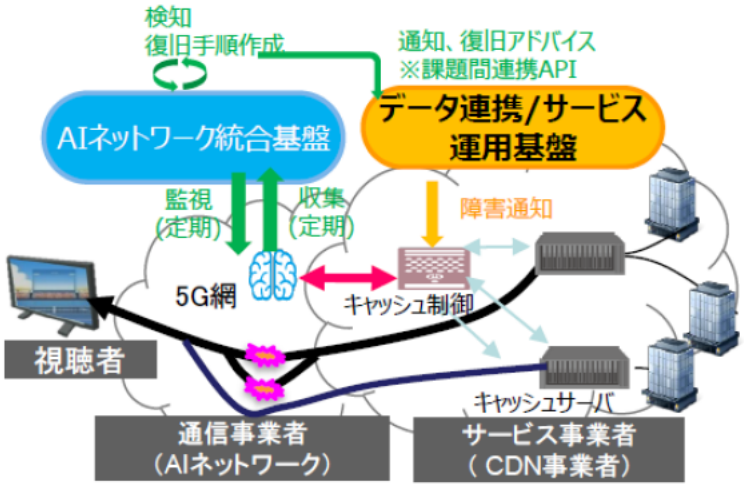
開発したネットワークサービス自動最適運用制御技術は、AI ネットワークリソース最適化技術及びネットワークサービス設計制御・更新技術で構成される。AI ネットワークリソース最適化技術は、ユーザが求めるサービス要件に対する要件定義を行うとともに、サービス品質の指標化を行い、変動する必要リソースとネットワークリソースとのギャップを分析し、柔軟にリソース配分を行う最適な協調制御モデルを確立することを目的としている。そのために従来技術にはないサービス要件をもとに、ナレッジベースで作られたネットワーク要件モデルから最も適したモデルを自動選定するサービス要件分析システムを開発し、複数 AI スタッキング方式を適用することで、80%以上のモデル選定率を達成することにより、従来の人手によって 3 週間を要したネットワーク要件策定を 1/5 以下の時間で完了させることを実現した。

ネットワークサービス設計制御・更新技術は、最適なリソース設計を自動的に行うことを可能とする設計制御モデルを構築するとともに、運用状況に応じた学習モデルとネットワーク設定の更新技術を実現すべく、ネットワーク要件の実現方法に関するパターンを組合せて数万種以上の設計案を生成し、多様な要件に対して柔軟に設計を導出する基盤技術並びに設計案の構造的な特徴を捉えて設計案の良さを推定して探索範囲を絞込み、ネットワーク設計を自律的に 100 倍高速化する AI 技術を確立した。また、設計結果全体だけでなく、各部分個別に評価を行いフィードバックする独自手法を開発し、学習時間を 1/10 に短縮させ、新規部品導入時の再学習を容易化するとともに、長期的なトラフィック変動の傾向分析結果に基づく再設計により、長期的なコスト対効果を改善させるオートヒーリングを実現した。これらの確立した技術により従来人手で 1 カ月を要していた SD-WAN の設計を 10 分程度で完了させることを実現した。

<table>
<tr>
<td></td>
<td>


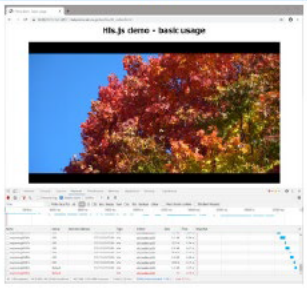
</td>
</tr>
<tr>
<td>データ連携によるネットワーク機能動的制御技術</td>
<td>
今後のトラヒック増加の主な要因と想定されるオンデマンド配信サービスと IoT サービスのユースケースを設定し、それぞれのユースケースにおいて NICT テストベッド上にデータ連携基盤技術及びデータ連携処理技術の環境を構築し、AI によるネットワーク運用技術及び AI によるネットワークサービス自動最適運用制御技術と連携した検証を行い、データ連携によるネットワーク機能動的制御技術を実現した。


オンデマンド配信サービスのユースケースでは、ネットワークの逼迫やサーバ処理能力の低下が起因してネットワーク上で通信遅延や損失が発生し、映像視聴が乱れる事象が発生する課題に対して、キャッシュサーバ切り替えに必要な連携 API を設計することにより、AI ネットワーク基盤とデータ連携するキャッシュ制御システムを確立した。本技術を用い、全国規模を模擬した検証環境を NICT・民間連携テストベッドに構築し、データ連携の実証を行った。その結果、新規視聴数のうち映像の乱れが発生する 93%に対し、映像の乱れの無い状態に改善できることを確認し、有効性を示した。
</td>
</tr>
</table>

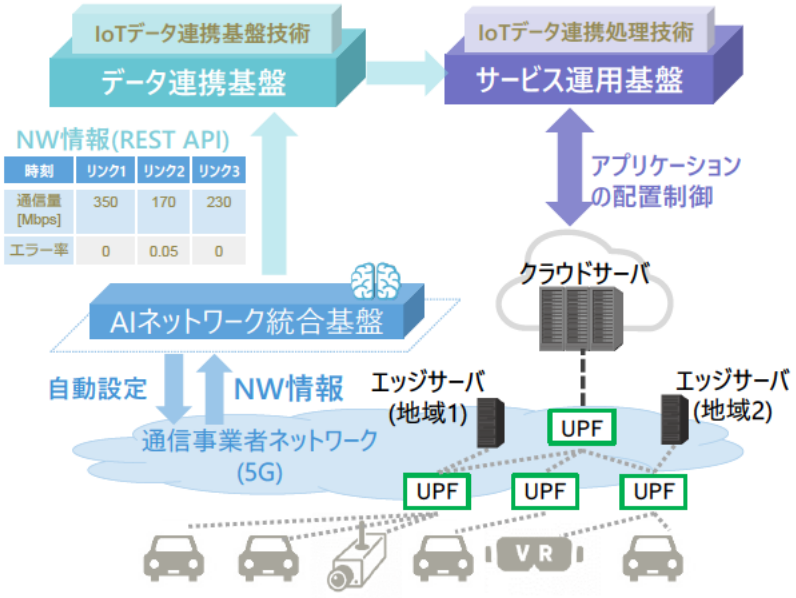


事業者間連携試験用検証機（OKI設置）

仮想視聴者の検証画面



IoT サービスでは、サービス品質を考慮した資源効率の高いアプリケーション配置を可能とするデータ連携インターフェースを策定し、サービス特性やネットワークの変動等に応じた柔軟性の高い動的アプリケーション配置最適化技術を確立した。本技術を NICT テストベッド上でデータ連携の実証を行い、クラウドサーバ及びエッジサーバを含む設備に対する処理負荷のピーク値の削減率を当初目標の 30%に対し、最大 75%、平均で 48%の削減を確認し、有効性を示した。



３　政策効果の把握の手法

研究開発の評価については、論文数や特許出願件数などの間接的な指標を用い、これらを基に専門家の意見を交えながら、必要性・効率性・有効性等を総合的に評価するという手法が多く用いられている。この観点に基づき、「情報通信技術の研究開発の評価に関する会合」（令和３年６月）において、目標の達成状況等に関して外部評価を実施し、政策効果の把握に活用した。

また、外部発表や特許出願件数、国際標準提案件数等も調査し、必要性・有効性等を分析した。

４　政策評価の観点・分析等

○研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績からの分析

研究開発による特許・論文・研究発表の実績から、各開発技術に関する特許を出願するなど、成果展開に必要な技術を確実に確立しており、本研究開発の必要性、有効性等が認められた。

なお、出願した特許に関してはすべて審査中であり、審査終了後に取得となる。また、国際標準については、令和３年度に提案に対する勧告化がされる見込みである。

主な指標	平成 30 年度	令和元年度	令和２年度	合計
査読付き誌上発表論文数	０件（　０件）	０件（　０件）	２件（　０件）	２件（　０件）
査読付き口頭発表論文数（印刷物を含む）	１件（　１件）	６件（　６件）	６件（　５件）	１３件（１２件）
その他の誌上発表数	０件（　０件）	０件（　０件）	１件（　０件）	１件（　０件）
口頭発表数	１６件（　０件）	１８件（　３件）	２５件（　０件）	５９件（　３件）
特許出願数	５件（　０件）	１０件（　１件）	１３件（　０件）	２８件（　１件）
特許取得数	０件（　０件）	０件（　０件）	０件（　０件）	０件（　０件）
国際標準提案数	１件（　１件）	６件（　６件）	２２件（２２件）	２９件（２９件）
国際標準獲得数	０件（　０件）	０件（　０件）	０件（　０件）	０件（　０件）
受賞数	０件（　０件）	０件（　０件）	１件（　０件）	１件（　０件）
報道発表数	１件（　０件）	１件（　０件）	１件（　０件）	３件（　０件）
報道掲載数	１０件（　０件）	２件（　０件）	１３件（　０件）	２５件（　０件）

注１：各々の件数は国内分と海外分の合計値を記入。（括弧）内は、その内海外分のみを再掲。

注２：「査読付き誌上発表論文数」には、定期的に刊行される論文誌や学会誌等、査読（peer-review（論文投稿先の学会等で選出された当該分野の専門家である査読員により、当該論文の採録又は入選等の可否が新規性、信頼性、論理性等の観点より判定されたもの））のある出版物に掲載された論文等（Nature、Science、IEEE Transactions、電子情報通信学会論文誌等および査読のある小論文、研究速報、レター等を含む）を計上する。

注３：「査読付き口頭発表論文数（印刷物を含む）」には、学会の大会や研究会、国際会議等における口頭発表あるいはポスター発表のための査読のある資料集（電子媒体含む）に掲載された論文等（ICC、ECOC、OFC など、Conference、Workshop、Symposium 等での proceedings に掲載された論文形式のものなどとする。ただし、発表用のスライドなどは含まない。）を計上する。なお、口頭発表あるいはポスター発表のための査読のない資料集に掲載された論文等（電子情報通信学会技術研究報告など）は、「口頭発表数」に分類する。

注４：「その他の誌上発表数」には、専門誌、業界誌、機関誌等、査読のない出版物に掲載された記事等（査読の有無に関わらず企業、公的研究機関及び大学等における紀要論文や技報を含む）を計上する。

注５：PCT（特許協力条約）国際出願については出願を行った時点で、海外分１件として記入。（何カ国への出願でも１件として計上）。また、国内段階に移行した時点で、移行した国数分を計上。

注６：同一の論文等は複数項目に計上しない。例えば、同一の論文等を「査読付き口頭発表論文数（印刷物を含む）」および「口頭発表数」のそれぞれに計上しない。ただし、学会の大会や研究会、国際会議等で口頭発表を行ったのち、当該学会より推奨を受ける等により、改めて査読が行われて論文等に掲載された場合は除く。

○各観点からの分析

観点	分析
必要性	5G や IoT 機器の急速な普及に伴い、通信量が莫大に増加することが見込まれるとともに、AI の技術革新を背景に様々な分野で新たなサービスが創出され、多種多様でハイレベルなサービス要件が求められることとなる。このような超スマート社会を我が国が世界に先駆けて実現し、これに対応していくために、IoT やビッグデータ解析、高度なコミュニケーションを支える AI 技術の基盤技術の強化及びリアルタイム処理の高速化や多様化を実現するエッジコンピューティングに係る基盤技術の強化が必要である。 また、エッジコンピューティングやビッグデータ解析技術にとどまらず、仮想化・処理部最適化等のネットワーク技術の基盤技術の強化に加え、多様な分野で AI サービス提供者、ユーザ企業等との協業を図り、日本のネットワーク事業者、ベンダの Society 5.0 時代の新たなプラットフォーマーとしての国際競争力の強化が必要である。 さらに、第５期科学技術基本計画（平成 28 年１月 22 日閣議決定）や科学技術イノベーション総合戦略 2017（平成 29 年６月２日閣議決定）においても、本研究開発の技術課題の重要性が明記されている。 本研究開発においては、通信ネットワークの運用におけるビッグデータ解析等を実現する基盤技術として「AI によるネットワーク運用技術」及び「AI によるネットワークサービス自動最適運用制御技術」の確立を行うとともに、多様な分野での協業を実現する基盤技術として「データ連携によるネットワーク機能動的制御技術」の確立を行っている。 よって、本研究開発には必要性があったと認められる。
効率性	本研究開発の実施に当たっては、各受託者が有する技術として、キャリアのネットワーク運用技術、民間企業のネットワーク設計技術、国立研究開発法人の基盤運用制御技術を結集することで効率的に研究開発を推進された。実証検証の面においても NICT のテストベッドに通信事業者の商用網を模擬した環境を構築することで、より効果的な検証を行っている。 また、早期に研究開発成果の社会展開を図るため、研究開発実施期間中から関係機関等と密接に連携し、実用化を見据えた社会実証の実施に向けた研究開発を推進するとともに、実施期間中も各受託者が参加する定期的会合において各者の進捗状況や課題が調整・共有され、さらに外部の有識者と受託者から構成されるアドバイザリ委員会や、外部有識者による継続評価において、研究進捗や進め方等について助言を受けるなど、効率的な実施のため情報交換が積極的に行われた。 委託経費の執行に当たっては、事前に予算計画書を確認するとともに、年度途中及び年度末に経費の執行に関する経理書類を提出させ、総務省担当職員が詳細な経理検査を行い、予算の効率的な執行に努めた。加えて、専門的知見を有した監査法人に経理検査の補助を依頼し、経費執行の適正性・効率性を確保している。 よって、本研究開発には効率性があったと認められる。
有効性	本研究開発において、通信ネットワークの設計・運用・管理の自動最適化技術やトラヒック変化の高精度予測技術を確立することにより、サービスが求める要件に合わせてリアルタイムかつ柔軟なネットワーク制御が可能となるとともに、計算機資源及びネットワーク資源の高速最適化制御を可能とする AI 学習技術を確立することにより、高速なネットワーク設計をすることが可能となる。これらの技術により、従来のクラウド処理型プラットフォームから、多様な分野における多種多様なサービスの創出に資する AI プラットフォームへ変革を実現することが可能となる。 また、ネットワークサービスにおけるサービス運用基盤の制御技術とデータ連携させることで、サービス事業者、システムインテグレーション事業者、通信事業者にまたがる、AI を利用した革新的なネットワークが実現することとなり、Society 5.0 時代の新たなプラットフォーマーとしての国際競争力の強化に寄与した。 よって、本研究開発には有効性があったと認められる。
公平性	本研究開発により、5G や IoT 機器の急速な普及やサービス毎に異なる伝送速度、伝送遅延、同時接性続数等の要求条件に適応した革新的な AI ネットワーク統合基盤を構築し、様々な分野において多様なサービスの提供が可能となることから、利便性の向上に繋がるなど、本研究開発の成果は、広く国民の利益になることが見込まれる。 また、研究開発委託先の選定に当たっては、公募を広く行い、応募者の提案について外部専門家・有識者から構成される評価会において最も優れた提案を採択する企画競争方式により、競争性を確保された。 よって、本研究開発には公平性があったと認められる。

優先性	経済・社会が大きく変化する中で、我が国が将来にわたり国際競争力を維持・強化していくとともに、社会的課題を解決していくため、我が国では Society5.0 を世界に先駆けて実現することとしており、Society5.0 の実現に向けて必要不可欠な基盤技術となる IoT やビッグデータ解析、高度なコミュニケーションを支える「AI 技術」や IoT の高度化に必要となる現場システムでのリアルタイム処理の高速化や多様化を実現する「エッジコンピューティング」を早急に確立することが求められている。そのため、本研究開発に早期に着手し、海外の大規模な事業者に利用者のデータを大量に取得され、データの独占による利用者の囲い込みがなされる前に日本のネットワーク事業者、ベンダの Society 5.0 時代の新たなプラットフォーマーとしての国際競争力の強化を図る必要があり、第５期科学技術基本計画等においても国が取り組むべき研究開発として記載されている。 よって、本研究開発には、優先性があったと認められる。

５　政策評価の結果（総合評価）

各受託者が有する技術を結集することで、AI ネットワーク基盤運用制御技術、AI ネットワーク状態分析技術、AI ネットワークリソース最適化技術、ネットワークサービス設計制御・更新技術、ネットワークサービス間データ連携基盤技術及びネットワークサービス間データ連携処理技術が確立した。各技術の連携実証により政策目標である AI 技術の基盤技術及びエッジコンピューティングに係る基盤技術の実現に向けた研究成果が確認されている。これら技術により我が国における Society5.0 の実現に向けた基盤整備に資することとなり、目標を達成することができたと認められる。

＜今後の課題及び取組の方向性＞

「革新的 AI ネットワーク統合基盤技術の研究開発」の波及効果について、以下のような継続した活動が想定されており、その実現に向けて今後も取り組む。

- 国際標準化されたアーキテクチャの勧告の更なる推進とデジュール標準だけでなくフォーラム等の幅広い国際標準化活動の継続
- 本格的な５G 時代に創出される様々なユースケースや他の業務への本研究開発の適用に向けた継続的な検討と実用化に向けた製品化検討
- 通信ネットワークの仮想化の進展を見込んだ後継の研究開発を通した、研究成果であるフレームワークやアーキテクチャの発展

６　学識経験を有する者の知見の活用

「情報通信技術の研究開発の評価に関する会合」（令和３年６月）において、目標の達成状況や得られた成果等について、研究開発の目的・政策的位置付け及び目標、研究開発マネジメント、研究開発成果の目標達成状況、研究開発成果の社会展開のための活動実績並びに研究開発成果の社会展開のための計画などの観点から、外部評価を実施し、以下の御意見等を頂いたため、本研究開発の評価に活用した。

- AI を定量的に利用するという目標を達成していることに加え、ネットワークの運用自動化に関する論文投稿や国際標準化に留まらず ITU AI/ML in 5G Challenge における活動を通じて運用自動化に関する国際的な発展に寄与していること、NICT テストベッドの有効活用策を示したこと及び今後商用網への成果展開も計画されていることは評価できる。なお、今後の継続的な研究開発や国際標準化活動に向けて課題間連携の国内外への見える化や５G SA 導入後の様々なユースケースへの対応に向けた検討等の本研究開発の継続的な発展に期待する。
- 課題Ⅰ、Ⅱと連携して研究開発を進めることにより、当初の目標を上回る定量的な成果が上げられていることに加え、論文投稿や国際標準化等が積極的に行われている点は評価できる。なお、国際標準化に関する継続的な活動やそれらを通じた研究内容の更なる検討が必要であり、本研究開発の継続的な発展に期待する。

７　評価に使用した資料等

○第５期科学技術基本計画（平成 28 年１月 22 日閣議決定）

https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/index5.html

○科学技術イノベーション総合戦略 2017（平成 29 年６月閣議決定）
https://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/2017.html

○新たな情報通信技術戦略の在り方 第三次中間答申（平成 29 年７月情報通信審議会答申）
https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01tsushin03_02000216.html

○成長戦略フォローアップ 2019（令和元年６月５日閣議決定）
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/fu2019.pdf

○統合イノベーション戦略 2019（令和元年６月 21 日閣議決定）
https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/index.html

○ＡＩ戦略 2019（令和元６月 11 日統合イノベーション戦略推進会議決定）
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ai_senryaku/pdf/aistratagy2019.pdf

○ 情報通信技術の研究開発の評価について
https://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/ictR-D/091027_1.html

令和３年度事後事業評価書

政策所管部局課室名：総合通信基盤局電波政策課

評価年月：令和３年８月

１　政策（研究開発名称）

異システム間の周波数共用技術の高度化

２　研究開発の概要等

（１）研究開発の概要

・**実施期間**

令和元年度～令和２年度（２か年）

・**実施主体**

民間企業、大学等

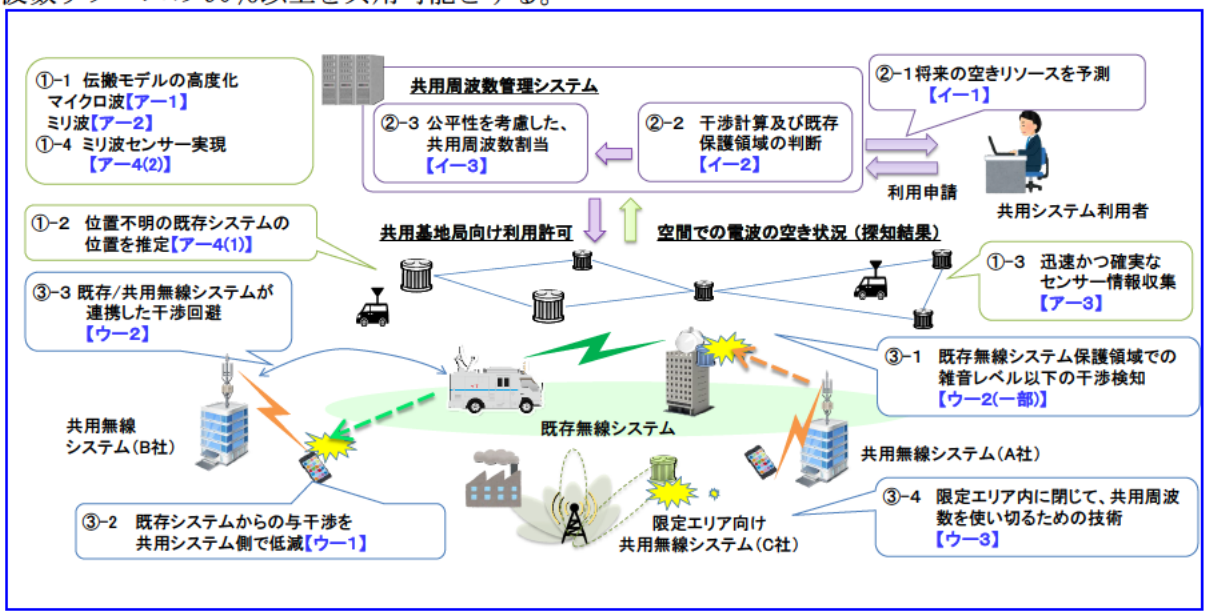
・**総事業費**

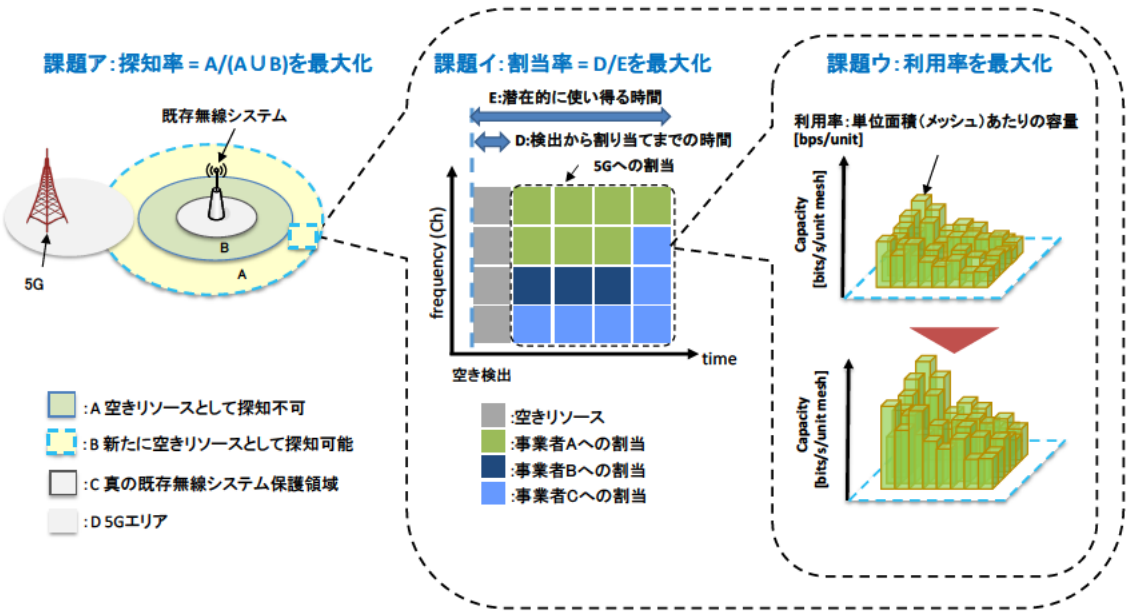
1,712 百万円

令和元年度	令和２年度	総　額
748 百万円	964 百万円	1,712 百万円

・**概　要**

本研究開発は、2020 年以降の５Ｇの普及に向けて、国際的な調和を保ちながら新たな周波数ニーズに対応すべく、５Ｇと、既存無線システム間の動的かつ稠密な周波数共用の実現が期待されている。従来の周波数共用では割当てが困難となっていた周波数について、既存無線システムとの間で空間的又は時間的に共用することで生み出される新たな周波数資源（以下、空き周波数リソースと呼ぶ）を活用する。その上で、既存無線システムが使用していない空き周波数リソースを空間的に高精度で探知する「空き周波数リソース探知技術」、時間で変化する空き周波数リソースを動的かつ公平に割り当てるための「共用周波数の管理技術」及び空き周波数リソースをより有効活用するための周波数の稠密かつ高効率利用を実現する「共用周波数の利用技術」を確立した。これらの技術の確立により、従来の周波数共用では割当てが困難と判断されていた空き周波数リソースの 90%以上を共用可能とする。



技術の種類	技術の概要
	
ア　空き周波数リソース探知技術	空き周波数リソースについて、周波数共用が想定される都市部及びルーラル地域の無線伝搬環境において、最小 75m 以下で、空間的な探知精度を 80%以上確保できることを実環境で検証した、動的かつ精緻な空き周波数リソース探知技術を確立する。
イ　共用周波数の管理技術	課題アより取得した空き周波数リソース情報に基づき、５Ｇへの空き周波数リソースの割当て判定を公平性に配慮しつつ効率的に行うことで、時間的に空き周波数リソースの85%以上を５Ｇへ割り当てることを実現可能な、共用周波数の管理技術を確立する。
ウ　共用周波数の利用技術	様々な状況で共用周波数の効率的な利用を実現可能な以下の個別目標を達成することで、空き周波数リソースに対して 20%以上の周波数方向での利用効率の向上を実現可能な、共用周波数の利用技術を確立する。 • 既存無線システムから５Ｇが干渉を受けた際に生じる通信品質の劣化幅を低減することで、割当てを受けた空き周波数リソースに対して 20%以上の利用効率向上を実現する「ウー１　共用周波数の干渉許容技術」を確立する。 • 既存無線システム、あるいは、５Ｇが移動することなどにより生じる重度な干渉発生を低減することで、空き周波数リソースに対する周波数利用効率を 20%以上向上可能な「ウー２　共用周波数の重度干渉回避技術」を確立する。 • ５Ｇが、共用利用を許可された空間内で、割当てを受けた空き周波数リソースの 20%以上の利用効率を向上可能な「ウー３　共用周波数の利用最大化技術」を確立する。

・スケジュール

技術の種類	令和元年度	令和２年度
ア　空き周波数リソース探知技術	基本検討・評価 →	機能拡張・評価 →
イ　共用周波数の管理技術	基本検討・評価 →	機能拡張・評価 →
ウ　共用周波数の利用技術	基本検討・評価 →	機能拡張・評価 →

（技術試験事務との連携）

本件研究開発成果を取り込んだ共用シナリオ検討・干渉調整自動化のためのシステム構築・実証試験を行う調査・実証（技術試験事務）と連携した実施体制を構築し推進。

（２）達成目標

2020 年以降の IoT や第５世代移動通信システム（５Ｇ）等の普及に向けて、新たな周波数を確保するため、既存無線システムとの高度な周波数共用など、限りある資源である周波数の有効利用の一層の推進が求められるなか、現在の周波数割当てにおいては、絶対に電波干渉が起こらないという安全マージンによる前提の下、人手による周波数調整によって、場所的な共用や日単位での運用調整といった限定的な共用がなされており、高度な周波数共用スキームの実現が望まれている。

このような課題の解決のために、従来の周波数共用では割当てが困難となっていた周波数について、既存無線システムとの間で空間的又は時間的に共用することで生み出される新たな周波数資源の活用、時間単位の周波数共用を前提とした干渉調整作業の自動化、共用周波数の利用手続きの簡素化等により、動的かつ稠密な周波数共用（ダイナミック周波数共用）の実現を目指す。

○関連する主要な政策

Ｖ．情報通信（ICT 政策）　政策 13「電波利用料財源による電波監視等の実施」

○政府の基本方針（閣議決定等）、上位計画・全体計画等

名称（年月日）	記載内容（抜粋）
規制改革実施計画（平成 29 年 6 月 9 日閣議決定）	「No.22 官官・官民共用化の推進」において、「周波数の官官共用・官民共用を推進する観点から、共用可能な場所、時間及び送信電力等の共用条件の決定をより効率的かつ効果的な技術を活用するなどした、よりダイナミックな共用方法の検討を行う。」旨、記載されている。
未来投資戦略 2017（平成 29 年 6 月 9 日閣議決定）	「第２ 具体的施策 Ⅱ Society 5.0 に向けた横割課題 Ａ．価値の源泉の創出 １．データ利活用基盤の構築 （２）新たに講ずべき具体的施策 ⅷ）電波周波数の調整・共用」において、「周波数の官官共用・官民共用を推進する観点から、共用可能な場所、時間及び送信電力等の共用条件の決定をより効率的かつ効果的な技術を活用する等した、よりダイナミックな共用方法の検討を行い、準備ができ次第、技術試験を行った上、平成 32 年度に結論を得る。」旨、記載されている。
規制改革推進会議 第２次答申（平成 29 年 11 月 29 日決定）	「Ⅲ 各分野における規制改革の推進 ２．電波制度改革 （２）具体的な規制改革項目 ⑤ 割当てに関わる制度の見直し オ 共用を前提とした割当て」において、「現在、公共部門や携帯電話システムなど使用頻度が高い無線システムに対する周波数割当に関しては、免許人に周波数を専有的に利用させているが、電波の有効利用のためには周波数共用の推進が必要であり、特に、５Ｇ向けの周波数帯等では複数の免許人による周波数共用が一層進むと見込まれる。この点、欧米では、ＬＳＡ（Licensed Shared Access）などの階層型認可やダイナミック周波数アクセスシステムなど、共有された周波数の割当てと運用の調整を機動的に行う仕組みが検討されており、我が国においてもこうした仕組みを早急に検討すべきである。したがって、周波数共有を機動的に行う仕組みを検討し、結論を得る。」旨、記載されている。

（３）目標の達成状況

従来の周波数共用では割当てが困難となっていた周波数について、既存無線システムとの間で空間的又は時間的に共用することで生み出される新たな周波数資源の活用、時間単位の周波数共用を前提とした干渉調整作業の自動化、共用周波数の利用手続きの簡素化等により、動的かつ稠密な周波数共用（ダイナミック周波数共用）の実現を目的とした本研究開発では、目標である空き周波数リソース探知精度 90%以上を達成した。

更に、本研究開発の要素技術（既存無線システムの保護を重視した電波伝搬モデル、保護判断のための干渉電力の計算手法等）を取り込んだ調査・実証（技術試験事務）の結果、2.3GHz 帯におけるダイナミック周波数共用を実現するために必要な周波数共用管理システムの要件定義、構築等を行った。

2.3GHz 帯におけるダイナミック周波数共用については、総務省において省令等の制度整備や割当てに向けた手続の検討等の必要な措置を講じ、実用化を図る予定。

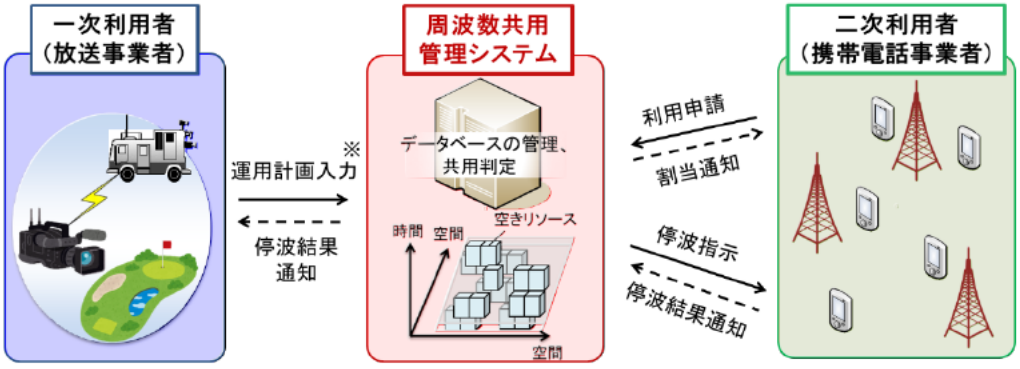
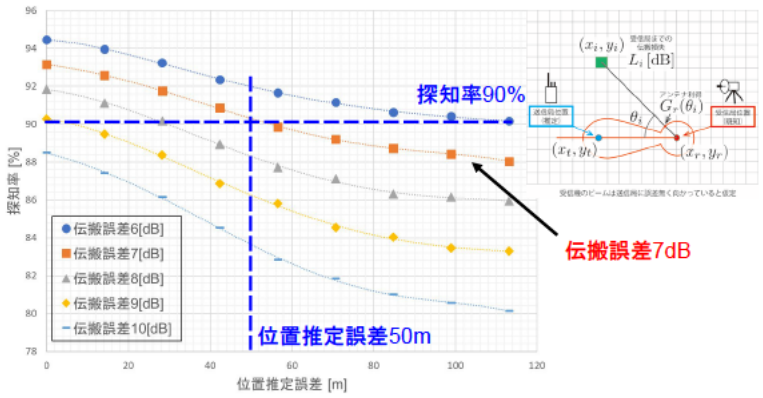


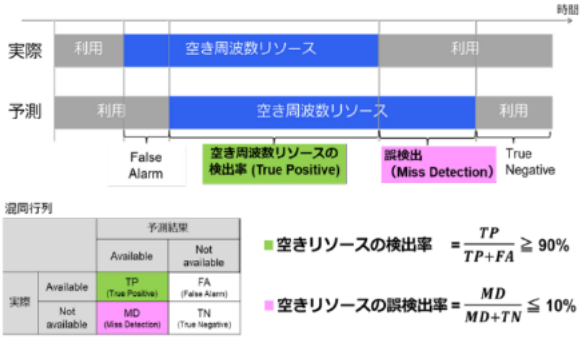
図　2.3GHz 帯ダイナミック周波数共用の運用スキーム

技術の種類	目標の達成状況
ア　空き周波数リソース探知技術	○マイクロ波に関する目標達成 課題アのマイクロ波帯では目標「最小 50m 以下で空間的な空き周波数リソース探知精度 90%以上を達成」に向けて、既存利用者を 2.3GHz 帯放送事業用 FPU（Field Pickup Unit）[1]、共用システム利用者として LTE/5G を想定し、FPU 受信位置が既知の環境で、電波伝搬モデルの高度化（ア－１）、送信局位置推定手法（ア－４（１））、および電波センサー情報の効率的な集約手法（ア－３）で連携した場合の効果を評価した。はじめに電波伝搬の推定誤差を変化させて。既存システム送信局の位置推定誤差と空き周波数探知率の関係を図ア-1 のように求めた。 この基本特性をもとに、各課題での成果を活用して目標達成を評価した。まず、課題ア－1 では、既存システムの受信局、送信局の位置を既知という条件で、AI・機械学習を活用した高精度伝搬推定による伝搬誤差が 5.35dB 程度に抑えられることを確認し、伝搬誤差改善により空き周波数探知率が 90%以上となることを確認した。次に、課題ア－４（１）では、既存システム送信局の位置が未知でもセンサー情報を活用することで、位置推定誤差を 50m 以下で推定可能なことを示し、電波伝搬誤差 7dB 以下の環境で空き周波数探知率が 90%以上となることを確認した。最後に課題ア－３では、既存システム送信局が移動する環境でも、センサー情報集約にかかる時間を 2.4 秒程度に短縮することで、位置推定誤差を 50m 以下に抑えられることを示し、電波伝搬誤差 7dB 以下の環境で空き周波数探知率が 90%以上となることを確認した。これらの成果から、既存システム送信局の位置情報によらず目標値である空き周波数探知率 90%以上が達成できることが確認できた。 ○ミリ波に関する目標達成 既存システムを 26GHz 帯固定無線アクセス（Fixed Wireless Access ： FWA）、共用システムを 5G システムとして周波数共用する場合を想定し、課題ア－２の電波伝搬モデルの高度化及び送信パラメータ推定手法、課題ア－４（２）のミリ波帯高度電波センサーを利用して、到達目標である空間分解能 10m での 90%の探知精度の達成を目指した。 電波伝搬モデルの高度化では、与干渉の発生を最小とするために、屋根超え回折モデルを用いて伝搬損失の下限を予測する最小伝搬損失モデルを提案した。これにより、既存システムおよび共用システムの送受信パラメータは既知という条件で、到達目標である 10m の空間分解能で、モデルにより予測した結果を、実運用局を用いた実測結果と比較し、提案手法で探知精度 90.2%を達成できることを確認した。 また、ミリ波帯高度電波センサーを利用した送信パラメータ推定手法を用いて、既存システムの送信パラメータは未知、位置は固定という条件での、ハイブリッドセンシングを確立し、既存システムの検出精度向上を実現した。ミリ波帯高度電波センサーとして、水平面内ビーム幅 4.5° の 2 次元および 3 次元探索用アレーアンテナを実現した。また、受

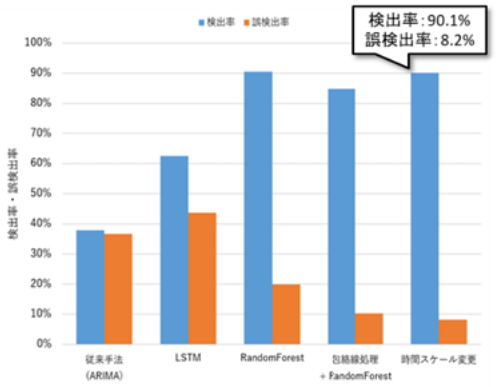
[1] 放送事業用 FPU（Field Pickup Unit）：マラソン中継のイベント等の番組素材の伝送を行う無線システム

	信機における整合フィルタの周波数、タイミング同期に伴う雑音信号の見掛け上の電力を考慮した検出閾値を設定し、SNR[2] -23dB において空き周波数リソースの検出率 90%を実現し、実受信機で -100dBm/MHz の信号検出を実現した。これらの技術を統合し、図 4- 4 に示すように高度電波センサーシステムを実装した。また、センサーシステムにより複数受信点で測定した到来角度および受信電力から、送信局の 3 次元設置位置や送信電力だけでなく、アンテナビーム方向、アンテナビーム幅を推定するハイブリッドセンシング法を提案し、屋根超え回折を考慮した推定モデルを導入することで、フィールド実験において位置推定精度 7.04m を実現した。  図ア- 1 位置推定誤差と探知率の関係 図ア-2 実現したセンサーシステム
イ 共用周波数の管理技術	○空き周波数リソース検出方式 伝搬環境の変化により、既存無線システムが利用していない空き周波数リソースは場所毎に時々刻々と変化する。周波数共用においては、既存無線システムの保護が原則であり、システム間干渉を回避するために、共用利用者の利用には場所的、時間的な制約が生じることとなる。そのため、共用利用者が計画的に共用周波数を利用するためには、将来において空き周波数リソースが生じる場所および時間を把握できるようにする必要がある。予測結果に基づき、共用利用者は将来の空き周波数リソースの状況を事前に確認することができ、効率的な周波数利用の促進が期待できる。 このような背景を鑑み、本技術課題では、将来の空き周波数リソースの予測技術の確立に取り組んだ。将来の空き周波数リソースを高精度に検出することにより、空き周波数リソースの時間軸における割当率向上に貢献する。一方で、実際には既存無線システムが利用しているリソースを、誤って空き周波数リソースであると検出してしまった場合、システム間干渉のリスクとなる。そのため、検出率の向上と誤検出率の低減を両立させることが必要である。そこで、図イ-1 に示すように、伝搬環境の変化によって生じる潜在的な空き周波数リソースの検出率 90%以上かつ誤検出率 10%以下を目標とした。機械学習を用いた予測手法を考案し、入力特徴量および予測の時間スケールを 5 分、10 分、15 分、30 分、60 分と変化させて評価を実施した。その結果、図イ-2 に示すように、15 分単位の入力特徴量を用いて 30 分単位の予測を行った場合に、検出率 90.1%かつ誤検出率 8.2%となり、本課題の到達目標の達成を確認した。

[2] SNR(Signal to Noise Ratio)：所望の信号と雑音の電力比のこと



図イ－１　空き周波数リソース検出率および誤検出率の定義

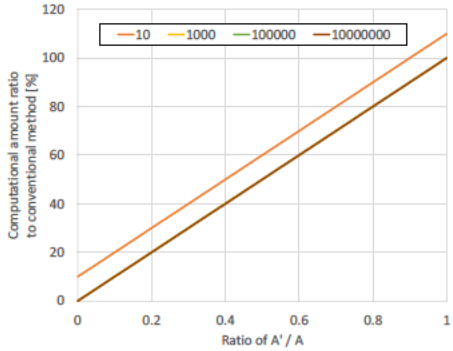


図イ－２　空き周波数リソース検出率および誤検出率の評価結果

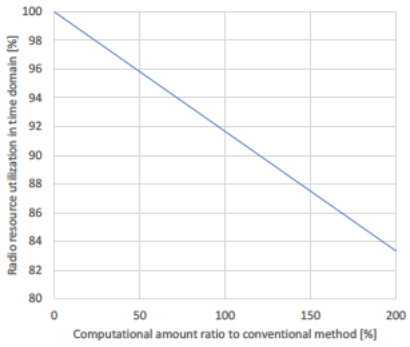
○ダイナミック共用に適した干渉計算手法

本課題では、共用システム(5G)のダイナミック周波数共用によって既存システムへ致命的な干渉を与えないために、共用周波数管理システムが高速、高信頼かつ必要最低限の安全マージンで計算可能な与干渉制御技術を確立した。その上で、共用周波数管理システムが実時間で干渉計算を実行し、共用システムのリソース利用開始時間および通信パラメータ更新待ち時間を削減して、空き周波数リソースの時間利用率 90%以上を達成することを目標に掲げた。

この目標に対して、ダイナミック周波数共用の導入が検討されている周波数帯域を想定した与干渉計算技術の検討評価を実行し、その計算量の見積を行った(図イ-３)。実際の運用条件(例えば、数千～数万の共用システム基地局数や、アンテナ回転範囲の削減量 50%など)を考慮すると、提案手法は、従来手法の計算量の 5%から 30%程度で実行できることが確認できた(図イ-３(a))。また、この結果を 2.3GHz 帯のダイナミック周波数共用の運用条件と照らし合わせると、提案手法は 90%以上の時間利用率が確保でき、目標達成が可能であることを確認した(図イ-３(b))。

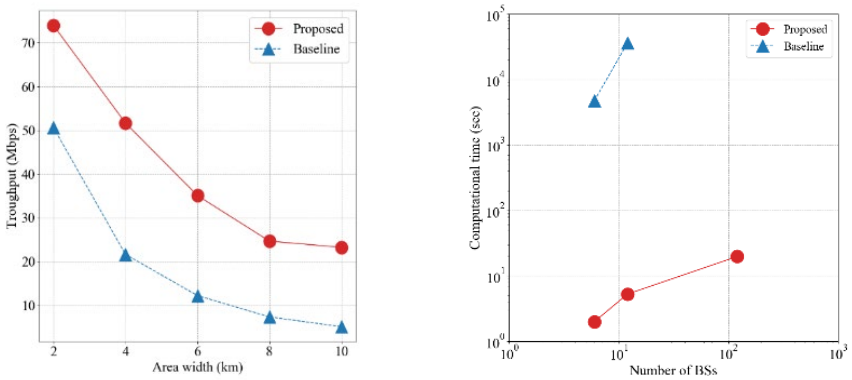


(a) アンテナ照準回転範囲に対する従来比計算量（パラメータ:共用無線システム局数).



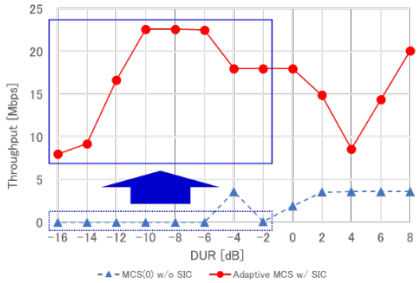
(b) 従来比計算量に対する空き周波数リソースの時間利用率.

図イ-３　空き周波数リソースの時間利用率見積もり

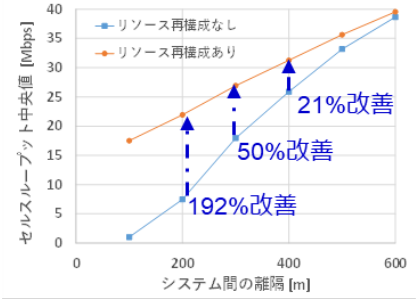
	○公平公正な共用周波数リソース割当方式 ダイナミック周波数共用において、空き周波数リソースは、複数の 2 次事業者間で共用されることが想定されるため、周波数管理システムは、共用周波数を 2 次事業者へ動的に割当る必要がある。また、共用周波数の利用効率を向上するには、2 次事業者の需要に基づいた速やかな周波数割当が必要である。そこで、本課題では、従来の 2 次事業者別に割当周波数帯を固定した方式と比較して、空き周波数リソースのうち共用利用者へ割当られる帯域における周波数効率を 30%以上増加させつつ、割当計算時間を抑制することで時間的な空きリソース周波数の 90%以上を公平に 2 次事業者へ割り当てることを目標とした。考案した周波数割当手法を、シミュレーション環境として、3 事業者が計 120 局の基地局を配置し、10 チャネル分の共用周波数を 24 タイムスロット分割り当てることを想定して、評価を行った。図イ-4 (a)に、基地局を配置する正方形エリアの 1 辺の長さに対する、周波数効率を示すエリア全体の平均スループット [3]の評価結果を示す。提案手法では、2 次事業者に共用周波数を固定的に割当する従来手法と比べ、目標値 30 %を上回る 43 %以上増加することを確認した。次に、同一評価条件下において、公平性を評価した。公平性の評価指標として Fairness Index (FI) を用いた。同指標は、1 に近づくほど、事業者間の需要帯域に対する割り当て帯域を示す獲得率の差分がなく、公平性が高いことを示す。2 事業者に固定的に割り当てる従来手法では、FI が 0.98 だったのに対して、提案手法でも同等の 0.98 となり、需要に応じた動的割当でも高い公平性を保つことを確認した。次に、割り当て基地局数に対する 2 タイムスロットあたりの計算時間を図イ-4 (b)に示す。基地局仮想化を実施しない場合と比べ、提案手法では、計算時間を 1/1000 以上圧縮した。また、計算時間は、米国での CBRS[4]の基地局制御の最短単位である 5 分を割当周期とした場合でも、割当計算によるロスは約 3%となり、到達目標である時間的な空きリソース周波数の割当率 90%以上を達成した。  (a) スループット　　(b) 計算時間 図イ-4　提案手法と既存手法の平均スループット及び計算時間の比較
ウ　共用周波数の利用技術	○共用周波数の干渉許容技術 本課題では、5G システム側で得られる既存システムに関するシステム情報の粒度によって干渉影響を低減するアプローチが異なるため、詳細な情報が利用可能な場合に適した技術として、「(1)共用システムにおける異システム対応型干渉除去手法」を、情報粒度が粗い場合に適した技術として、「(2)共用システムにおける適応的リソース再構成制御手法」の検討を行った。 (1)の干渉除去技術では、既存無線システムからの干渉信号を 5G 受信機で除去すべく、サンプリング周波数 [5]等のシステム差分および双方の信号の受信タイミング差分を補正し、5G 受信機側で異システムの受信レプリカ信号 [6]を生成して除去する技術を確立した。図ウ-1 に本技術を実装した試作装置の屋外無線伝送実験で得られた結果を示す。既存無線システムからの干渉が強く、これまで 5G 通信が利用できなかった状況において、提案する干渉除去技術を適用することで 8Mbps から 23Mbps 程度のスループットが得られた。この結果から、受信機の実装制約を考慮した条件においても、目標とする 30%以上の周波数利用効率改善に相当する特性を確認した。

[3] スループット：伝送路を通じて単位時間あたりに送受信できるデータ量
[4] CBRS(Citizens Broadband Radio Service)：3.55GHz から 3.70GHz を利用する、米国での周波数共用方式
[5] サンプリング周波数：アナログ信号をデジタル信号に変換する際、1 秒間にデータをサンプリングする回数
[6] レプリカ信号：所望の送信アンテナ信号を検出する際、他の送信アンテナからの干渉信号を予測して複製した信号

(2)リソース再構成技術の検討では、5G システムにおいて既存無線システムからの干渉影響を基地局が把握し、干渉影響の少ない端末に対してリソースおよび電力を集中的に割り当てる技術を確立した。具体的には、既存無線システムから各端末への干渉影響を把握するために 5G に信号を送信しないブランクシンボル区間を挿入し、ユーザが干渉影響を観測し、基地局に通知し、これに基づいてリソースの割り当てを行う。システムレベルの計算機シミュレーションによる評価を行い、図ウ-2 に示すように、既存無線システムからの離隔距離が小さい場合（300m 程度）において、ブランクシンボル挿入によるオーバーヘッドが発生する場合においても、目標とする 30%以上の周波数利用効率改善の実現を確認した。



図ウ-1　提案干渉除去方式の適用効果一例



図ウ-2　システム間の離隔に対するスループット特性

○共用周波数の重度干渉回避技術

重度な干渉の前兆となる、共用周波数利用時の干渉条件での信号検出方式に取り組んだ。サンプル点加算 CBM（Correlation Based Method）およびシンボル加算 CBM 方式を導入し、マルチパスフェージング[7]環境下であっても、既存無線システム（FPU）の信号、および 5G システムの信号が、I/N[8]= -10dB においても検出できる方式を確立し、電波センサーに実装した。実装した電波センサーを用いて、図ウ-3 に示すように、都内の実証フィールドで実際に 2.3GHz 帯 LTE 信号の検出実証試験を実施し、I/N=-10dB 付近でも検出可能であることを実証した。また、電波センサー回路規模削減に資する量子化待受信号方式を確立した。

既存システムから 5G システムへの制御情報を通知、もしくは相互に制御情報を交換し、双方の無線システムが、より密な連携により、重度な干渉を回避可能な周波数共用を実現する通信方式の検討を行った。制御情報の通知、交換する所要通信エリアを 5km とし、この通信エリアを最大送信電力 250mW で伝送可能な方式の確立を目標として取り組んだ。そして IEEE802.15.4g/4x 準拠の狭帯域 OFDM[9]をベースに、狭帯域 OFDM の特徴である少ないパイロット信号でも移動通信環境での利用に対応可能な送受信方式を提案し、図ウ-4 に示すように、目標値の 1/10 以下である送信電力 20mW で約 6km 伝送を達成する方式を確立した。

共用可能な周波数帯が可変する場合でも、5G システムでの利用が可能にするために、可変帯域制限型の 5G システムを想定している。空き周波数リソースの有効活用には帯域外輻射の抑圧が必要で、送信側で時間軸窓を適用し、受信側で LLR 調整[10]を実施することで、帯域外輻射の 1/1000 以下の抑圧を実現しつつ通信品質の劣化がない方式を確立した。本方式を異システム間共通連携制御干渉検出方式としても活用可能な商用 5G システムへ実装し、図ウ-5 に示すように、約 25dB の抑圧を実証した。

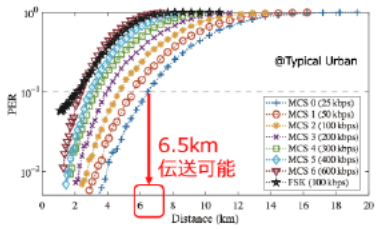
7 マルチパスフェージング：電波が地形や建物による反射や回折を繰り返し、複数の電波となって受信機に到達することにより、受信電力が大きく変動する現象

8 I/N：他システムからの干渉電力(I: Interference)と、自システム内の雑音電力(N: Noise power)とのレベル比

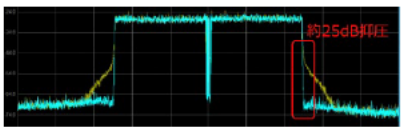
9 狭帯域 OFDM：狭いチャネル帯域幅において変調方式と符号化方式を可変することにより、省電力で利用環境に適応したデータレートを実現する通信方式

10 LLR 調整：ある受信信号に対し元の送信ビットが 0 もしくは 1 である確率の比の対数値(LLR)を補正し復号する手法

図ウ-3 電波センサーの実フィールド実証



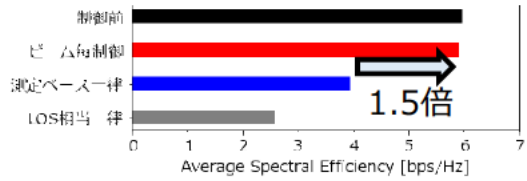
図ウ-4 異システム間制御情報利用干渉検出方式の PER 対距離特性



図ウ-5 可変帯域制限型5Gシステムの送信信号

○共用周波数の利用最大化技術

共用周波数の利用が許可された範囲内（限定エリア）において運用される 5G から、既存無線システムへの与干渉レベルに関して、共用周波数の利用条件下にあることを担保するための電波センシング（ローカル電波センシング）技術の研究開発、および 5G 側の運用パラメータ（ビームフォーミング伝送や送信電力制御など）を調整する無線リソース制御技術の研究開発を行った。建物影響などのサイトスペシフィックな条件を考慮したうえで与干渉レベルを評価し、ビーム毎の電力制御に反映させる提案方式について、計算機シミュレーション評価および実証実験を行った。この結果、目標とした限定エリアにおける周波数利用効率の 35%向上を上回る、約 50%の向上を確認した。



図ウ-6 限定エリア内の周波数利用効率評価結果

3 政策効果の把握の手法

本研究開発終了後には、外部専門家・外部有識者から構成される「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和３年６月 25 日）において、目標の達成度、実施体制の妥当性及び経済的効率性、実用化等の目処等について外部評価を行い、政策効果の把握を行った。

4 政策評価の観点・分析等

○研究開発による特許・論文・研究発表の実績、成果展開からの分析

研究開発による特許・論文・研究発表の実績から、２年間で合計 51 件の論文発表及び合計 100 件の口頭発表に加え、合計 74 件の多数の特許を出願する（特許審査期間もあり現時点では特許取得数は０件）など成果展開に必要な技術を確実に確立している。

各国における既存システムの利用状況によることから異システム間の周波数共用技術に係る国際標準化はそぐわない部分もあるが、査読付き口頭発表論文は海外のみであり、共用に係る要素技

術の国外への周知啓発にも努めており、更に、国内では本研究開発成果の要素を取り込み、2.3GHz帯におけるダイナミック周波数共用について、総務省において省令等の制度整備や割当てに向けた手続の検討等の必要な措置を講じ、実用化を図る予定である。

以上より、本研究開発の成果が着実に実用化に結びついており、本研究開発の必要性、有効性等が認められた。

主な指標	令和元年度	令和２年度	合計
査読付き誌上発表論文数	０件（　０件）	１４件（　５件）	１４件（　５件）
査読付き口頭発表論文数（印刷物を含む）	９件（　９件）	２８件（２８件）	３７件（３７件）
その他の誌上発表数	１件（　０件）	３件（　１件）	４件（　１件）
口頭発表数	４２件（　４件）	５８件（　４件）	１００件（　８件）
特許出願数	３１件（　１件）	４３件（　７件）	７４件（　８件）
特許取得数	０件（　０件）	０件（　０件）	０件（　０件）
受賞数	０件（　０件）	０件（　０件）	０件（　０件）
報道発表数	０件（　０件）	３件（　０件）	３件（　０件）

注：各々の件数は国内分と海外分の合計値を記入。（括弧）内は、その内海外分のみを再掲。

○各観点からの分析

観点	分析
必要性	我が国の移動通信トラヒックは、LTE 等のモバイルブロードバンドサービス等の普及により年々増加しており、高精細動画の伝送需要の増大や IoT の利用拡大等による更なる需要の増加が見込まれている。今後も増加が見込まれる移動通信トラヒックに対応するためにも新たな周波数の確保が期待されているところである。 移動通信システムの新たな帯域への導入にあたっては、従来、周波数再編等を行い必要な周波数を確保することが基本であったが、電波利用の進展等に伴い、既に種々の無線システムで利用されており、共用を前提とした周波数割当てが不可避となっている。 このような状況を踏まえ、異なる無線システムの動的な周波数共用（ダイナミック周波数共用）を可能とするための技術を確立したものである。 今後、本研究開発成果の要素を取り込み、2.3GHz 帯におけるダイナミック周波数共用について、総務省において省令等の制度整備や割当てに向けた手続の検討等の必要な措置を講じ、実用化を図る予定である。 よって、本研究開発には必要性があったと認められる。
効率性	研究開発については、実用化を見据え、プログラムディレクタのもと、周波数資源活用のための「研究開発」、研究開発成果を取り込んだ共用シナリオ検討・干渉調整自動化のためのシステム構築・実証試験のための「技術試験事務」を連携して実施し、無線システム、電波伝搬等の外部有識者を含めた実施体制を構築した。また、既存無線システム利用者との「ステークホルダー調整会議」を開催し、研究開発・技術試験事務の内容に関する検討を行った。さらに、外部有識者による継続評価において、研究進捗や進め方等について助言を受けるなど、効率的な実施のための情報交換が積極的に行われた。 経費執行の効率性については、予算要求段階、公募実施の前段階、提案された研究開発提案を採択する段階、研究開発の実施段階及び研究開発の終了時における、実施内容、実施体制及び予算額等について、外部専門家・外部有識者から構成される評価会において評価を行い、効率的に実施した。 よって、本研究開発には効率性があったと認められる。
有効性	従来、周波数再編等を行い必要な周波数を確保することが基本であったところ、本研究開発の実施により、既存無線システムが運用しない時間・空間において新たな無線通信システムの導入が可能となるものであり、有限希少な周波数の更なる有効利用が図られるものである。 2.3GHz 帯におけるダイナミック周波数共用について、今後、実用化を図る予定のところ、既存無線システムである放送事業用 FPU（マラソンやゴルフ等の番組素材を中継するシステム）の運用を確保しつつ、FPU の運用に影響が生じない時間・空間において、新たな移動通信システム（５Ｇ等）の導入が

	可能となる。 よって、本研究開発には有効性があったと認められる。
公平性	本件は、携帯電話等のトラヒック増加に伴う移動通信システムへの周波数確保のため、周波数の共同利用を促進する技術の研究開発であることから、電波利用料財源で実施する研究開発として、公平性があったと認められる。さらに、周波数の有効利用に大きく寄与するものであり、広く無線局免許人や無線通信の利用者の利益となる。 支出先の選定に当たっては、開示する基本計画に基づき広く提案公募を行い、提案者と利害関係を有しない複数の有識者により審査・選定をしている。 よって、本研究開発には公平性があったと認められる。
優先性	本件は、規制改革実施計画（平成 29 年 6 月 9 日閣議決定）において、「周波数の官官共用・官民共用を推進する観点から、共用可能な場所、時間及び送信電力等の共用条件の決定をより効率的かつ効果的な技術を活用するなどした、よりダイナミックな共用方法の検討を行う。」旨、記載されている。また、規制改革推進会議 第２次答申（平成 29 年 11 月 29 日決定）において、「現在、公共部門や携帯電話システムなど使用頻度が高い無線システムに対する周波数割当に関しては、免許人に周波数を専有的に利用させているが、電波の有効利用のためには周波数共用の推進が必要であり、特に、５Ｇ向けの周波数帯等では複数の免許人による周波数共用が一層進むと見込まれる。この点、欧米では、ＬＳＡ（Licensed Shared Access）などの階層型認可やダイナミック周波数アクセスシステムなど、共有された周波数の割当てと運用の調整を機動的に行う仕組みが検討されており、我が国においてもこうした仕組みを早急に検討すべきである。したがって、周波数共有を機動的に行う仕組みを検討し、結論を得る。」旨、記載されている。 本研究開発は、周波数がひっ迫している中で、既存無線システムとの共用を図りつつ、新たな移動通信システムの導入を図るものであり、今後も増加が見込まれる携帯電話等の通信トラヒックに対応するために急務である。 よって、本研究開発には、優先性があったと認められる。

５　政策評価の結果（総合評価）

我が国の移動通信トラヒックは、LTE 等のモバイルブロードバンドサービス等の普及により年々増加しており、高精細動画の伝送需要の増大や IoT の利用拡大等による更なる需要の増加が見込まれている。今後も増加が見込まれる移動通信トラヒックに対応するためにも新たな周波数の確保が期待されているところである。

移動通信システムの新たな帯域への導入にあたっては、従来、周波数再編等を行い必要な周波数を確保することが基本であったが、電波利用の進展等に伴い、既に種々の無線システムで利用されていることから、異なる無線システムの動的な周波数共用（ダイナミック周波数共用）を可能とするための技術を確立したものである。

今後、本研究開発成果の要素を取り込み、2.3GHz 帯におけるダイナミック周波数共用について、総務省において省令等の制度整備や割当てに向けた手続の検討等の必要な措置を講じ、実用化を図る予定である。

また、研究開発による特許・論文・研究発表なども着実に実施されるなど本研究開発の有効性、効率性等が認められた。

＜今後の課題及び取組の方向性＞

今後は、本研究開発で確立した技術を活用し、既存無線システムの運用実態等を考慮の上、他の周波数帯においてもダイナミック周波数共用を適用することで、周波数の有効利用を推進するとともに、その有効性を学術論文や国際会議等における口頭発表等を通じて広く啓蒙していく。

６　学識経験を有する者の知見の活用

「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和３年６月 25 日）における終了評価において、目標の達成状況や得られた成果等、実施体制の妥当性及び経済的効率性、実用化等の目途等について外部評価を実施し、外部有識者から以下の御意見等を頂いたため、本研究開発の評価に活用した。

・従来の周波数共用では割当てが困難と判断されていた空き周波数リソースの 90%以上を共用可能とすることで、５Ｇへの周波数割当てを加速させるための研究開発であり、合わせて時間単位での高度な周波数共用に関する技術的検討を実施し、技術的条件を取得する調査検討である。いずれの項目についても到達目標を達成していると判断する。
・達成目標は着実に達成されており、対外発表件数、申請特許件数ともに多い。高いレベルの多くの技術成果が得られている。また、それらの知財の獲得と標準化が戦略的に行われており、研究機関間の連携も有効であったと判断する。
・5G の普及に向けて、国際的な調和を保ちながら新たな周波数ニーズに対応すべく、5G と既存無線システム間の動的かつ稠密な周波数共用の実現を目指すために、研究開発と技術試験事務を合わせて行ない、「空き周波数リソース探知技術」、「共用周波数の管理技術」、「共用周波数の利用技術」により、それぞれ、探知率 90%以上、時間割当率 90%以上、周波数利用効率 30%以上改善と、目標値以上を達成している。また、技術試験事務「移動通信システムと他の無線システムとのダイナミックな周波数共用に関する調査検討」と連携し、研究開発の要素技術を反映させ、2.3GHz 帯の社会実装に向けた環境整備、26GHz 帯に対するダイナミック周波数共用の有効性の確認に貢献している。以上より、目標は達成され、予算も効率的に使用されたと思われる。

7　評価に使用した資料等

○規制改革実施計画（平成 29 年 6 月 9 日閣議決定）

https://www8.cao.go.jp/kisei-kaikaku/suishin/publication/p_index.html

○未来投資戦略 2017（平成 29 年 6 月 9 日閣議決定）

https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/miraitoshikaigi/dai10/index.html

○規制改革推進会議 第２次答申（平成 29 年 11 月 29 日決定）

https://www8.cao.go.jp/kisei-kaikaku/suishin/publication/p_index.html

○電波利用料による研究開発等の評価に関する会合　＜電波利用料＞

https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/

以上