



[小特集]

ドローンと通信技術による 新たな価値創造を目指して

- 非地上系ネットワーク (NTN) におけるHAPSの研究開発
- B5G/6Gに向けた成層圏通信プラットフォーム (HAPS) の研究開発
- ドローンの仕組みと飛行のメカニズム
- 無線マルチホップネットワークによるUAV航行経路制御
- 複数のドローンや無線機の連携による空の
安全運航支援のための無線通信
- ドローンの運航管理システム

全研究会
対象

年間登録費割引 オプションの案内

通信ソサイエティでは、年間登録による研究会参加費
のまとめ払いとして、全研究会を対象とした
オプションを提供しています。

3研究会に年間登録した場合…

	学会員	非会員
一般	例) ¥6,600 + ¥6,600 + ¥8,800 合計 ¥22,000	例) ¥9,900 + ¥9,900 + ¥12,100 合計 ¥31,900
学生	3つの研究会まで無料	

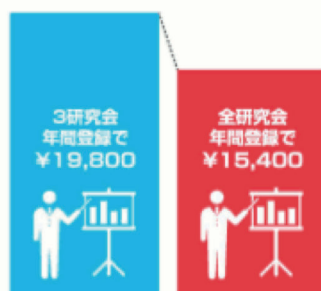
※価格はすべて税込です。※研究会によって価格が異なります。

通信ソサイエティ全研究会年間登録で…

	学会員	非会員
一般/学生	¥15,400	¥25,300

※価格はすべて税込です。

1 複数の研究会に参加する
場合に登録費が安くなる



登録費が
¥15,400に
減額になった!



2 通信ソサイエティ全研究会へ
自由に参加できるようになる



前から興味
があったけど、
試しに参加して
みよう!

詳細はWEBからも参照できます

技報完全電子化研究会の実施

検索



年間登録サイトはこちら ▶ <https://ken.ieice.org/ken/program/index.php>

お問合せ

通信ソサイエティ研専運営会議 技報照会窓口

✉ kensen-gihou_inquiry@mail.ieice.org

ドローンと通信技術による 新たな価値創造を目指して

本号の小特集は、ドローン及びドローンとソサイエティの技術領域である通信技術の交差領域をテーマとして編集致しました。ドローンは広義には地上や水中、水上の無人機を含む場合もありますが、本小特集では無人航空機を対象としています。

ドローンは従来の無人航空機より操縦が容易になったことで、空撮、物流など様々な分野での活用が始まっています。また、ドローン自体の技術的な進歩やユースケースの広がりに合わせて、制度や運用のためのシステムの検討や実装も進んでいます。本小特集ではドローンの仕組みや飛行のメカニズムとドローン運航管理システムについて、そして無線マルチホップネットワークを用いた新たなドローンの分散管理方式について解説しています。

ドローンと通信技術の交差領域については二つのテーマを取り上げました。一つ目はドローンの制御及び運航監視、管制における無線通信の活用です。ドローンはGPSなどによる測位を基に完全に自律で飛行することも可能ですが、サービスとして運用する場合や複数のドローンが近い空域で飛行する場合には、安全性の確保のための監視、管制が欠かせません。また、災害地での被災状況の確認などドローンからの映像を用いて遠隔制御を行うユースケースも多く存在します。このような場合、移動体であるドローンには無線通信が欠かせず、周波数帯や通信方式を含めて、様々な技術の活用が考えられます。本テーマについてはドローン運航における無線通信の課題と新たな制御用通信技術の取組みについて解説しています。

二つ目のテーマはドローンを活用した無線通信のカバレッジ拡大です。次世代のモバイル通信規格である6G（第6世代移動通信システム）では、通信カバレッジの拡張が大きなテーマの一つとなっています。既に商用サービスが始まっている低軌道の衛星同様に、ドローンは空から広域をカバーする無線通信の活用が期待されており、衛星よりも地上に近いことから様々な利点があります。本テーマについてはHAPS（High Altitude Platform Station）を中心に解説しています。

ドローンに限らず、自律的に移動する機械（ロボット）と通信の融合領域は今後ますます重要になると考えられます。活用が進むドローンを題材にした本小特集が、その領域について知識を得る起点となれば幸いです。最後に本小特集に解説論文を寄稿頂いた著者の皆様と査読・校閲で御協力頂いた皆様に感謝致します。

小特集編集チーム

金友 大、磯崎裕臣、伊藤暢彦、沢田健介、東野武史、山下泰輝



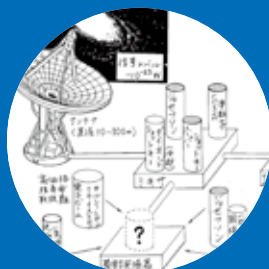
068



072



095



107

【小特集】

ドローンと通信技術による 新たな価値創造を目指して

001

巻頭言

編集チームリーダー

金友 大

006

－解説論文－

非地上系ネットワーク (NTN) における HAPSの研究開発

大津留 豪／辻 宏之／宗正 康／大倉拓也／
三浦 龍

016

－解説論文－

B5G/6Gに向けた成層圏通信 プラットフォーム (HAPS) の研究開発

長手厚史／表 英毅／太田喜元／星野兼次

026

－解説論文－

ドローンの仕組みと飛行のメカニズム

三輪昌史

036

－解説論文－

無線マルチホップネットワークによる UAV 航行経路制御

上田清志／三好 匠／山崎 託／山本 嶺

050

－解説論文－

複数のドローンや無線機の連携による 空の安全運航支援のための無線通信

三浦 龍／松田隆志／越川三保／松村 武

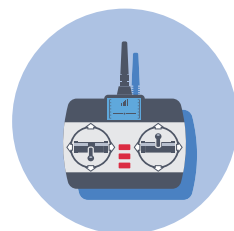
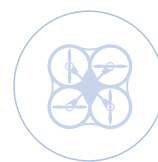
060

－解説論文－

ドローンの運航管理システム

西沢俊広

- 004 **ー子どもに教えたい通信のしくみ：ジュニア会員向けページー**
ヒートポンプの仕組み
東 朋寛
- 068 **ー街 plus 探訪ー**
55年ぶりの万博が開催される「大阪」の魅力
和田友孝
- 072 **ー街 plus 探訪ー**
岡山へこられー！
荒井伸太郎
- 075 **ー若者よ、世界に出よう！ー**
シリコンバレーで見つけた、研究と生活の新しいステージ
西川由理
- 080 **ー解説：技術と制度のおはなしー**
無線システムの上空利用に係る制度の現状と見直しの状況について
渡辺貴之
- 087 **ー開発物語ー**
電気製品とセラミックコンデンサの歴史
野口和馬
- 095 **ー科学館・博物館めぐりー**
科学技術館一夢と科学の国で冒険だー
山口実靖
- 098 **ーこんなツール、使っていますー**
Wolfram言語/Mathematicaでデータサイエンス
北村美穂子／金光安芸子／安井（今藤）紀子
- 107 **ー私の研究者歴ー**
いつしかライフワークになったミリ波・サブミリ波の研究
永妻忠夫
- 117 **ー巻末言ー**
電子情報通信学会の総合大会・ソサイエティ大会に参加しよう！
2025年度通信ソサイエティ会長
真田幸俊



ヒートポンプの仕組み

一般財団法人電力中央研究所 東 朋寛
Tomohiro Higashi

1. まえがき

暖房の効いた暖かい部屋から外に出ると寒く感じ、冷たいアイスを冷凍庫から出すと、やがて溶ける。このように、二つの物体を触れさせると、熱は暖かい物体から冷たい物体に移動する、というのが自然の摂理である。その摂理に逆らうように（実際には逆らっていないが）、冷たい物体から暖かい物体へ熱（ヒート）をくみ上げる（ポンプ）技術の一つがヒートポンプである（図1）。今回はこのヒートポンプ技術について簡単に説明する。

2. ヒートポンプの基本

図2に、ヒートポンプ（本稿では最も身近な「蒸気圧縮式ヒートポンプ」について述べる。）の概略図を示す。ヒートポンプは主に①圧縮機、②凝縮器、③膨張弁、④蒸発器の基本要素で構成されており、上記の順に内部を冷媒が循環している。

①圧縮機：ガス状態の冷媒を圧縮し、高温・高圧の状態にする。

②凝縮器：圧縮された冷媒は凝縮器に移動し、ここで外部に熱を放出して凝縮（液体に変化）する。放出された熱によって物体を加熱することができる。

③膨張弁：狭い隙間を通すことで冷媒の圧力を下げる。冷媒は低温・低圧の状態となる。

④蒸発器：冷媒が蒸発（気体に変化）する。周囲から

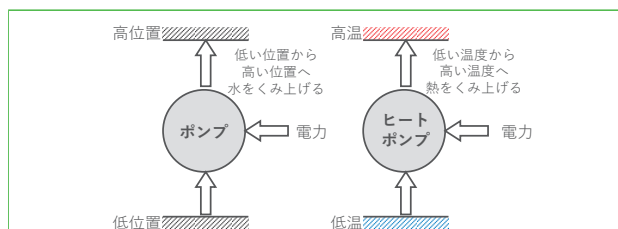


図1 ポンプとヒートポンプの相似性

熱を吸収し、物体を冷却することができる。

蒸発した冷媒は再び①の圧縮機に戻る。

冷媒は①～④の順に循環し、状態変化を繰り返しながら熱を輸送する。ここで重要となるのが、②の凝縮器では熱を与える（加熱する）物体より冷媒の方が高温であり、④の蒸発器では熱を奪う（冷却する）物体より冷媒の方が低温であるということである。このように冷媒の温度を変化させながら熱を放出・吸収することで、低温の物体から高温の物体へ熱を移動させることができる。「ヒートポンプ」と呼ばれるゆえんである。

3. ヒートポンプに用いられる冷媒

ここで、ヒートポンプの中を流れる冷媒が重要な構成要素の一つである。求められる特性の例として以下が挙げられる。

- ・性能：冷媒によって適した温度帯が異なるため、用途によって冷媒を使い分ける。また、蒸発や凝縮時に多くの熱を吸放出できる（蒸発潜熱が大きい）ことが好ましい。
- ・環境性：オゾン層破壊係数（ODP: Ozone Depletion Potential）や、地球温暖化係数（GWP: Global Warming Potential）が小さいこと。
- ・安全性：可燃性や毒性が低いこと。

現代のヒートポンプでは炭素、水素、フッ素、塩素な

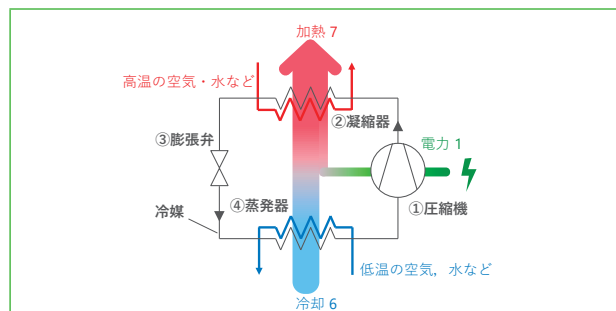


図2 ヒートポンプ概略図

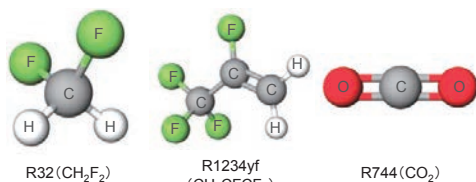


図3 冷媒の例

どを含む化合物であるフルオロカーボン（フロン）冷媒が主に使用されている。フロンは1920年代に開発され、当初は化学的・熱的安定性などの優れた性質から「夢の化学物質」とも言われた。しかし、オゾン層破壊効果や温室効果が高いことが近年明らかになり、より環境負荷の小さいフロンや自然冷媒への転換が進められている。

自然冷媒は、二酸化炭素やプロパン、アンモニアといった自然界に存在する物質を冷媒として使用するものである。オゾン層を破壊せず、温室効果も小さいという利点があるが、物質によって性能や安全性に課題があり、普及のための取組みが進められている。

図3に冷媒の例を示す。冷媒には全てRから始まる冷媒番号が付与されている。身近にヒートポンプ機器を見たら、どのような冷媒が使用されているか是非探してみてほしい。

4. 環境にやさしいヒートポンプ

ヒートポンプの特徴の一つに、エネルギー効率が高いことが挙げられる。ヒートポンプの効率を表す指標として、以下の式で定義されるCOP（Coefficient of Performance, 成績係数）がある。

$$\text{COP} = (\text{加熱 or 冷却量}) [\text{kW}] / (\text{投入エネルギー}) [\text{kW}]$$

燃焼式加熱や電気ヒータなど一般的な加熱機器の場合、COPが1を超えることはない。一方、ヒートポンプの場合は熱をくみ上げることによって加熱、冷却を行うため、COPが1を超えることが可能である。図2の例では投入エネルギー（電力）1に対し、蒸発器での冷却量は5、凝縮器での加熱量は6である。加熱COPは6であり、ヒートポンプは非常に省エネ性の高い技術であると言える。

5. ヒートポンプ技術を用いた機器

ここでは、ヒートポンプ技術を用いた身近な機器を紹介する。

① エアコン（図4）

冷房時は室内機が蒸発器となり、室内から熱を吸収することで冷房する。その熱は室外機を凝縮器として運転

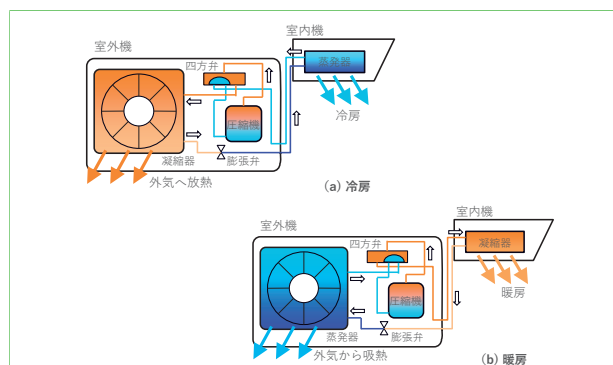


図4 エアコン

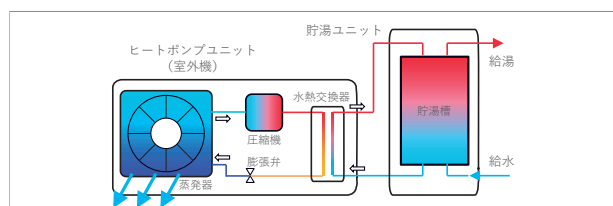


図5 ヒートポンプ給湯機

し、屋外に放熱する。暖房時は反対に室外機を蒸発器として運転することで、屋外の空気から熱を集め、蒸発器として運転する室内機から放熱し暖房を行う。冷暖房の切替は四方弁により行う。四方弁は冷媒の流れを切り換える部品であり、圧縮機から送られてきた高温・高圧状態の冷媒を、冷房時は室外機に、暖房時は室内機に送り込む。

② ヒートポンプ給湯機（図5）

外気の熱を集め、お湯を沸かす給湯機である。ヒートポンプで沸き上げたお湯を一度貯湯し、給湯する。冷媒として二酸化炭素を利用した場合はフロン冷媒を使用した場合より高効率となり、2001年に世界で初めて商品化された際は「給湯革命」と呼ばれた。

6. あとがき

本稿では、ヒートポンプの概略について紹介した。ここで紹介した以外にも、冷蔵庫、洗濯乾燥機など、ヒートポンプは身近なところで私たちの生活を支えている技術である。エネルギーの最終形態である熱をうまく利用するヒートポンプは、これからの地球環境を救う大事な技術であると言える。

東 朋寛

電力中央研究所。2014 東大・工・機械卒。2019 同大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻博士課程了。同年東大特任研究員。2020 から現職。主にヒートポンプ技術に関する研究に従事。



非地上系ネットワーク (NTN) における HAPS の研究開発

Research and Development of HAPS in Non-terrestrial Network

大津留 豪 Go Otsuru[†] 辻 宏之 Hiroyuki Tsuji[†] 宗正 康 Yasushi Munemasa[†]
大倉拓也 Takuya Okura[†] 三浦 龍 Ryu Miura^{††}

Summary

次世代移動通信システムでは、多様化するアプリケーションに対応するために、非地上系ネットワーク (NTN) へのスケーラビリティが重要な要件となる。高高度プラットフォーム (HAPS) は、地上系ネットワークのバックホール回線や、携帯端末との直接通信する“空飛ぶ基地局”として大きな期待を寄せられている。本論文では、これまでの HAPS に関連する研究開発の歴史を概説するとともに、HAPS 向けの技術開発要素について紹介する。

Key Words

HAPS, 非地上系ネットワーク (NTN), 光通信, 無線通信, 5G

1 HAPS とは

第 5 世代移動通信システム (5G: 5th Generation) に代表される地上系ネットワーク (TN: Terrestrial Network) の成熟は著しく、日本における携帯電話網の人口カバー率は 99.99 % を超えるものとして公称されている⁽¹⁾。しかしながら、山間部や海洋においては、地理的・経済的な観点から、バックホール回線としての光ファイバの敷設や基地局の整備が進まない不感地帯が存在し、TN によるエリアカバー率の改善には限界がある。また、水道・電気・ガスにも並び立つインフラとして、人々にとって通信が当たり前になりつつある現代社会の在り様を受けて、地震や豪雨といった大規模災害にも対応可能な、高いレジリエンス性を有する通信基盤の確立が急務である。総務省の令和 6 年度版情報通信白書では、令和 6 年の元日に発生した能登半島地震における課題及び今後の対応として、光ファイバの切断回避のための地中化による強じん化等に加えて、衛星回線の活用が挙げられており、SpaceX 社の低軌道 (LEO: Low Earth Orbit) 衛星通信サービス「Starlink」が応急的に活用されたことが取り上げられている⁽²⁾。

図 1 に Beyond 5G における非地上系ネットワー

ク (NTN: Non-terrestrial Network) の構想を示す。Beyond 5G における NTN は、静止軌道 (GEO: Geostationary) 衛星や非静止衛星、その他の多様な空中ノードにより構成され、携帯電話網などに代表される TN と比較して、三次元的に拡張されたネットワークである⁽³⁾。高高度プラットフォーム (HAPS: High Altitude Platform Station) は NTN における通信ノードの一つであり、高度約 20 km の気象条件が比較的安定した成層圏を飛行するプラットフォームとして、通信や地球観測、リモートセンシングなどの多様なユースケースでの活躍が期待されている。近年、HAPS に対する期待の高まりが顕著であるが、その構想は、30 年近く前から存在していた⁽⁴⁾。図 2 に示すのは、2000 年代における HAPS のユースケースを描いたものであり、現代におけるユースケースとしても囑望されている非常時における冗長回線や、HAPS 間の空間光通信なども既に検討されていた。現代では、主要なアプリケーションが携帯電話との直接通信に移り、更には IoT などの新たなユースケースが登場したことに加えて、HAPS 間のみならず、NTN における他ノードとの縦方向の連携を意識したマルチオービット構想がより強く押し出されている。

本論文の構成は次のとおりである。2. では、HAPS とほかの NTN ノードの比較について述べ、3. では周波数割当の観点から、近年の HAPS に対する期待の高まりについて述べた後に、これまでの研究開発の変遷、実用化に向けた動向を概説する。4. では、想定される HAPS のサービスタイプについて分類及び説明する。5. では、HAPS に

[†] 国立研究開発法人情報通信研究機構, 小金井市
National Institute of Information and Communications Technology (NICT), Koganei-shi, 184-8795 Japan

^{††} 国立研究開発法人情報通信研究機構, 横須賀市
NICT, Yokosuka-shi, 239-0847 Japan

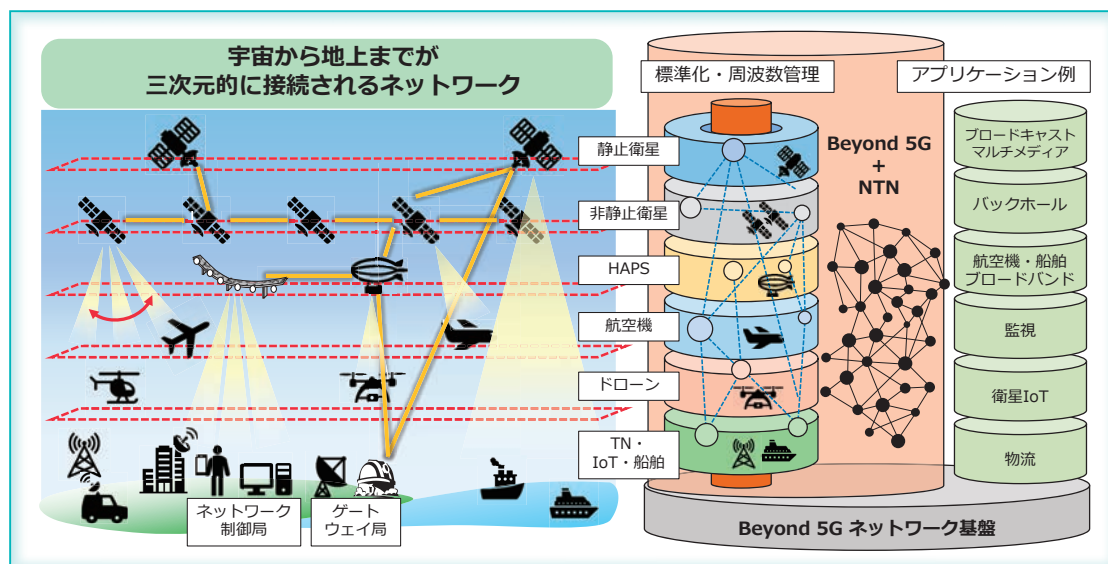
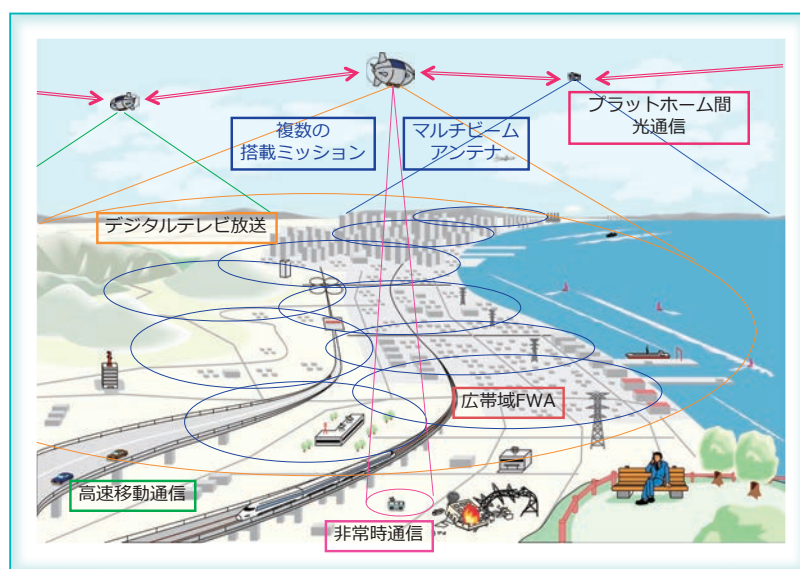
図1 Beyond 5Gにおける非地上系ネットワークの構想⁽³⁾

図2 2000年頃に想定されたHAPSのユースケース

期待される要素技術，6. では，最新の研究開発事例について紹介し，7. で本論をまとめる。

2 ほかの NTN ノードとの比較

表1に，HAPSを含む無人航空機システム（UAS: Unmanned Aircraft System）とほかの通信ノードとの比較を示す。通常のUASでは，頻繁に離着陸を繰り返し，短期間の飛行を行うものが多い。一方で，HAPSは，ユースケースやアプリケーションの観点から，成層圏において定点に長時間滞空することが求められ，太陽光発電や水素燃料などを用いた継続的な運用が設計に組み込まれている。また，UASの中では，高い高度に位置するプラットフォームであることから，そのカバレッジがほかのUASと比較して広いことが利点として挙げられる。

表1 HAPSとNTNにおけるほかの通信ノードとの比較^{(5)~(7)}

NTN ノード	高度	伝搬遅延	カバレッジ
GEO 衛星	約 36,000 km	約 550 ms	200-3,500 km
MEO 衛星	7,000-25,000 km	約 200 ms (高度 10,000 km)	100-1,000 km
LEO 衛星	300-1,500 km	約 20 ms (高度 1,500 km)	100-1,000 km
UAS (HAPS 含む)	8-50 km	1 ms 以下 (高度 20 km)	5-200 km

NTNにおいては，衛星やHAPSなどのNTNノードと移動端末や固定局といったユーザ間の無線リンクであるサービスリンクと，NTNノードと地上局間の無線リンクであるフィードリンクが存在している。

HAPSのアドバンテージとして，LEO衛星やGEO衛星と比較して低高度に位置しているために，

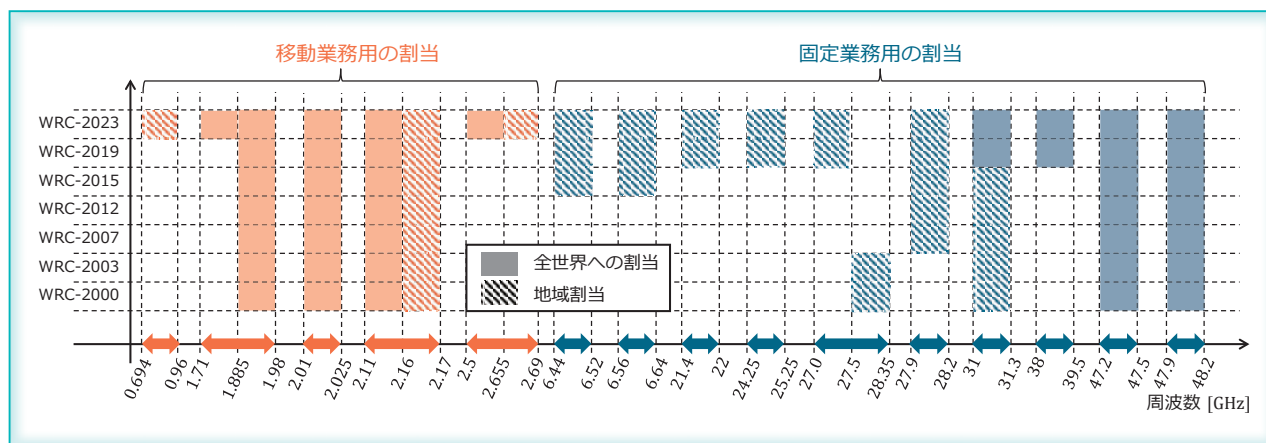


図3 HAPSに対する周波数割当^{(8)~(16)}

サービスリンクやフィードリンクにおける地上の移動端末や固定局との通信において、そのほかのNTN ノードよりも高い信号強度が得られる^{(5)~(7)}。特に、サービスリンクにおいて無指向、若しくは指向性の低い移動端末と NTN ノードが直接通信するユースケースにおいては、その優位性が顕著である。伝搬距離が抑えられることから、往復の伝搬遅延に関しても有利であり低遅延通信を実現できる。また、HAPS には運用上の利点も存在している。LEO 衛星を用いたサービスを展開するためには、多数の衛星により全球を覆うコンステレーションを構築する必要があるが、HAPS は、たとえ少数であったとしても、トラヒック需要の変動に合わせた即応的な運用を行うことが可能である。更に、衛星は一度打ち上げると整備困難であるが、HAPS は故障や障害が発生した場合には、地上に着陸して整備可能であるため、高いメンテナンス性を持つ。

一方で、HAPS は衛星と比較するとカバレッジが狭く、衛星相当のサービスリンクのカバレッジを確保するためには、複数機での運用が求められることになる。また、狭いカバレッジでは、フィードリンクにおける地上局との接続が限定されるため、HAPS と地上局間を直接結ぶフィードリンクが確保できないエリアにおける運用には、HAPS 間通信やほかの NTN ノードとの接続などのマルチホップ通信が必要となる。固定業務向けの通信においては、広帯域を確保できるミリ波帯が用いられるが、この帯域では降雨減衰の影響を強く受ける。また、気象条件により HAPS 機体に対して振動や動揺が生じるため、これらの要因に由来した瞬断や通信品質の低下に対応することが求められる。そのため、天候予測も含めたサイトダイバーシチ技術やほかの NTN ノードとの接続による冗長経路の確保などが必要になると考えられる。

3 HAPS の歴史

3.1 HAPS に対する周波数割当

国際電気通信連合 (ITU: International Telecommunication Union) において、HAPS が明記されたのは 1997 年に開催された世界無線通信会議 (WRC: World Radiocommunication Conference) であり、“High Altitude Platform Station” 若しくは “Stratospheric Repeater” として表記され、高度 20~50 km に滞留する局として定義されている⁽⁸⁾。この WRC-97 において、HAPS の固定業務用として、47.2-47.5 GHz 及び 47.9-48.2 GHz の周波数割当の検討が開始された。図 3 は HAPS に対する周波数割当を示しており、横軸に周波数 (幅は一定)、縦軸にその割当が行われた WRC を記載している。2000 年に開催された WRC-2000 において、WRC-97 で検討された帯域とともに、移動業務用として IMT-2000 (International Mobile Telecommunication 2000, いわゆる 3G) 端末との直接通信向けに 2 GHz 帯が HAPS に対して初めて割り当てられた⁽⁹⁾。また、WRC-2000 では、日本を含むアジア・太平洋電気通信共同体 (Asia-Pacific Telecommunity) が中心となり、HAPS の固定業務用に 27.5-28.35 GHz の HAPS-to-ground 方向 (以下、下り方向) と、31.0-31.3 GHz の ground-to-HAPS 方向 (以下、上り方向) の地域分配を得た。その後、後述する技術的課題により、HAPS の実用化に向けた動きが下火になった背景から、新たな周波数はしばらく割り当てられなかった。しかし近年、HAPS に対する期待が再度高まりつつあり、2015 年に開催された WRC-15 において、HAPS 固定業務用に 6.44-6.52 GHz が下り方向、6.56-6.64 GHz が上り方向として割り当てられ⁽¹³⁾、2019 年に開催された

WRC-19においては、更に多くの周波数がHAPSの固定業務向けに割り当てられた⁽¹⁴⁾。また、WRC-19においては、移動業務に対する需要の高まりに伴い、IMT 基地局としてのHAPS (HIBS: HAPS as IMT Base Station) が定義され、携帯電話やスマートフォンと直接通信を行う“空飛ぶ基地局”としての役割がより強く打ち出された。これらの割当において、日本は大きな役割を果たしている。更に、2023年に開催されたWRC-23では、日本が中心となり携帯電話向けの周波数として、698-960 MHz への新たな割当や、1.7 GHz 帯及び2.5 GHz 帯の追加割当を得ており、HAPS や HIBS の実用化に向けた国際的な動きが活発化している⁽¹⁵⁾。

3.2 HAPS に関する研究開発の変遷

HAPS は1997年にITU-Rにおいて定義されて以来、30年近く実用化に向けた研究開発が進められてきた。2000年代においては、飛行船をプラットフォームとして用いるユースケースが主軸であり、主なアプリケーションは、観測・通信・放送が検討されていたが、HAPS 機体に対する要求条件の厳しさから研究開発は下火になった。その後、バッテリーや太陽光発電技術の発展に伴い、再度注目を集めるようになった。携帯電話の爆発的な普及や利用形態の多様化により、NTNにおけるHAPSの重要性が見直され、2010年代以降は、携帯電話との直接通信が主要なアプリケーションとして挙げられており、現在の研究開発に至っている。以降で、その具体的な変遷について述べる。

国内におけるHAPSに対する研究開発は、1998年から2004年までの7年の歳月をかけて実施した「成層圏プラットフォームプロジェクト」が先駆的存在である(図4)。このプロジェクトでは、高度約20 kmの成層圏に、ヘリウムガスを利用して浮力を得る飛行船を滞空させることで、通信や放送、更には地球観測などの多様なユースケースに利用することを狙いとしていた^{(17), (18)}。航空宇宙技術研究所(現・宇宙航空研究開発機構、以下JAXA)が飛行船全体システムを、宇宙開発事業団(現JAXA)及び海洋科学技術センター(現・海洋研究開発機構)が地球観測ミッションを、通信・放送機構(TAO, 現・情報通信研究機構、以下NICT)及び通信総合研究所(CRL, 現NICT)が追跡管制システム及び通信・放送ミッションを担当していた。本研究開発の成果として、図5に示すように、2004年秋に全長68.4 mにも及ぶ大形の無人飛行船を用いた高度4 kmでの定点滞空飛行試験を



図4 成層圏プラットフォームコンセプト(文献(18)から引用)

JAXA と NICT が共同で実施し、飛行運用・制御及び通信・放送ミッションに関する目標データを取得した。通信・放送ミッションに関しては、広域放送による地上でのハイビジョン映像の受信、当時から着目はされていたが、実用化には至っていなかった空間光通信に関する捕捉追尾の成功などが含まれている⁽¹⁸⁾。

また、NICT (旧 CRL 及び TAO) では、独自にアメリカ航空宇宙局(NASA: National Aeronautics and Space Administration)との共同研究を通して、図6に示すように、2002年には、AeroVironment社が開発した固定翼型のソーラー無人機であるPathfinder Plusを用いて、世界初の高度20 kmの成層圏からのIMT-2000携帯端末との直接通信及び地上デジタル放送波の直接受信に成功している⁽¹⁹⁾。その後、成層圏プラットフォームプロジェクトにおいて、Pathfinder Plusの後継機であり、ペイロードの積載量が向上したHeliosを用いた実験が計画されたが、日米の共同実験前にNASAが実施した燃料電池試験時に機体が破損したため、実験は中止された。

また、当時、海外においてもHAPSに関する多数の研究開発が存在していた。例えば、欧州委員会の出資を受けて2003年から2006年までの約4年間で実施されたCAPANINAプロジェクトでは、2005年に気球を用いて高度23 kmから1.25 Gbit/sのダウンリンク光通信に成功している⁽²⁰⁾。



図5 成層圏プラットフォームプロジェクトにおける通信・放送ミッション (文献(18)を基に作成)



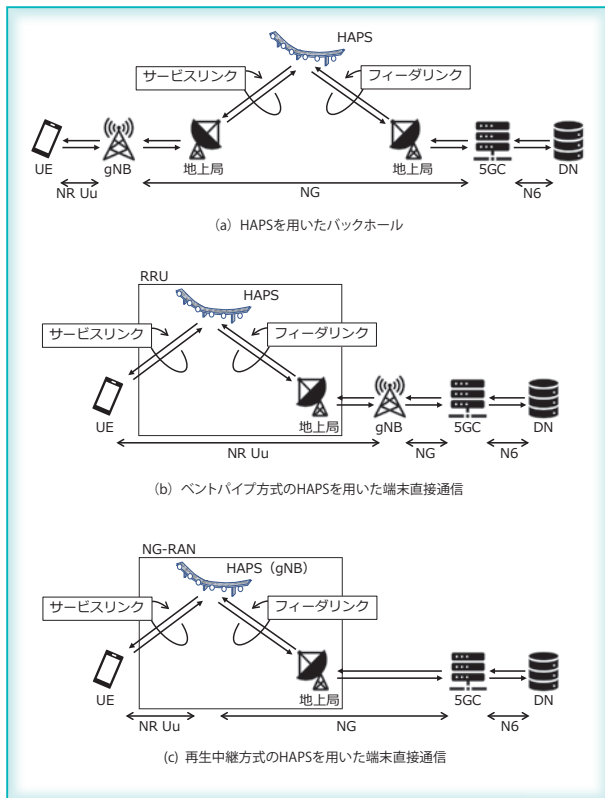
図6 Pathfinder Plus を用いた通信ミッション (文献(18), (19)を基に作成)

このような1990年代から2000年代にかけて得られた一定の成果の一方で、機体開発やバッテリー及び再生型燃料電池などの電源技術に課題を残しており、成層圏で長期間滞空して、サービスを提供することが求められるHAPSのプラットフォームとしての要件を満たすものではなかった。また、地上の携帯電話網の開発スピードに追い付けなかったこともあり、世界的にもHAPS研究開発に関する盛り上がりは次第に収束していった。国内では、それまでのプロジェクトのコンセプトを継承した航空機ミリ波通信システムや、小形UAVによる無線中継システム、小形ドローン用通信システムなどの研究開発に移行していった。海外では、軍事技術から民生転用により、小形UAVやドローン技術が急速に発達し、市場が拡大した。このような研究開発の停滞期におけるバッテリーやソーラーパネル技術における技術的進歩を経て、NTN技術の一つとして、HAPSに対して注目が再び高まるに至った。

近年では、2016年にソフトバンク株式会社（以下、ソフトバンク）がAeroVironment社との合併でHAPSモバイル株式会社を設立し（2023年にソフトバンクに吸収合併）、2020年9月には、固定翼型のHAPS機体であるSunliderを用いて成層圏からLTEでスマートフォンとの直接通信に成功している⁽²¹⁾。また、(株)NTTドコモ（以下、NTTドコモ）は、成層圏で長期間の連続飛行実績を有する固定翼型のAirbus社製のHAPS機体であるZephyrを用いて、携帯電話向けの2GHz帯を用いた電波伝搬試験を2021年11月に実施している⁽²²⁾。NTTドコモは(株)Space Compass（以下、Space Compass）とともに、AirbusとAALTO HAPS Limitedに対して最大1億ドルの出資を行い、2026年にはHAPSを用いた通信サービスの実用化を目指すとして発表している⁽²³⁾。ソフトバンクもまた、2026年にHAPS-LEO衛星間の実証実験を計画しており、2027年に機体の量産及び商用化の加速を目指すとしている^{(24), (25)}。

4 HAPSを用いたサービスタイプ及びユースケース

HAPSを用いたNTNのサービスには幾つかの構成が想定される。図7に示すのは、5GネットワークにおけるHAPSを用いた通信サービス構成例である。ここでは、UEとgNB（Next Generation NodeB）の間のアクセスリンクに相当する無線インタフェースであるNR Uuインタフェース、gNBと5GC（5G Core）の間のバックホールを担うインタフェースであるNGインタフェース、UPF

図7 HAPSを用いたサービスタイプ^{(6), (7)}

(User Plane Function) とDN (Data Network) の間の外部ネットワークとのインタフェースであるN6インタフェースに着目したアーキテクチャ例を示している。図7(a)に示すのは、HAPSをgNBと5GCとの間のバックホール回線として用いた構成である。本構成においては、フィードリンク及びサービスリンクでともに固定業務用の周波数を用いた広帯域通信を提供することが想定される。

図7(b), (c)に示すのは、HAPSと携帯電話端末が直接通信するユースケースである。サービスリンクにおいては携帯電話と直接通信可能な移動業務用の周波数を用いてマルチビームを形成し、フィードリンクにおいては、それらを束ねる固定業務用の広帯域通信を地上局との間で確立している。図7(b)

と図7(c)間の違いは、HAPSの役割であり、図7(b)ではHAPSは単なるリピータとして動作し、ベントパイプ方式で通信する構成となっている。これにより、HAPS機体に対する電力や通信ペイロードの積載量などの要求が抑えられることから、実用化時の初期段階におけるサービス形態であると考えられる。図7(c)では、HAPSはgNBとしての機能を有している。この構成の場合、HAPSの高機能化により、RTDの低減などを含む高性能化や柔軟な制御が実現される一方で、HAPS機体に対する電力や通信ペイロードの積載量などの要求が厳しくなるため、HAPSの機体開発の更なる進展が不可欠であると考えられる。

表2に示すように、災害時における冗長回線や遠隔地に対する通信以外にも、HAPS含むNTNには多様なユースケースが期待されている。ITU-R TR 38.821においては、このようなNTNに対する各シナリオに対して、厳密な要件ではないものの、表2に示すような値がAnnexとして与えられている。6 GHz以上の広帯域通信のダウンリンクにおいては、静止物体や車両などがVSAT (Very Small Aperture Terminal) などの指向性の強いアンテナを備えていること想定し、50 Mbit/sから数Gbit/sの伝送速度となっているが、6 GHz以下の狭帯域通信のダウンリンクにおいては無指向性、若しくは指向性の弱いモバイル端末を想定しており、2 Mbit/s以下の伝送速度となっている⁽⁵⁾。

5 HAPS に対して期待される技術

5.1 HAPS 機体

前章においても触れたように、電力や通信ペイロードの搭載量、飛行期間といったHAPS機体に依存する要件が、HAPSの取り得るサービス形態にもたらす影響は大きい。また、特に太陽光発電により長期間の飛行を目指す固定翼型HAPSにおいて

表2 NTNのユースケースごとに期待される通信品質⁽⁶⁾

シナリオ	体感伝送速度		1km ² 当りのUE数密度	UEのアクティブ率	最大移動速度	UE種別
	DL	UL				
歩行者	2 Mbit/s	60-250 Mbit/s	100	1.50 %	3 km/h	モバイル端末
車両接続	50 Mbit/s	25 Mbit/s	—	—	250 km/h	車両搭載端末
静止物体	50 Mbit/s	25 Mbit/s	—	—	0 km/h	建物設置端末
航空機接続	360 Mbit/s	180 Mbit/s	—	—	1,000 km/h	航空機搭載端末
IoT接続	2 kbit/s	10 kbit/s	400	1.00 %	0 km/h	IoT 端末
公共安全	3.5 Mbit/s	3.5 Mbit/s	—	—	100-250 km/h	モバイル端末／車両搭載端末

は、高緯度地域の冬季における短い日照時間による夜間のサービス継続性に課題があるため、HAPS 機体及びバッテリーの大容量化や太陽光パネルの高効率化及び軽量化といった各コンポーネントの進化、運用技術の成熟などが求められる。

5.2 通信ペイロード

HAPS 機体における厳しい電力・搭載量の制約のため、通信ペイロードにおいても低消費電力化は重要な要件であると言える。また、風やプロペラの振動などの環境に起因した機体動揺に対応するために、デジタル信号処理を用いることで、デジタルビームフォーミングによる地上に対して固定されたセル形成や、ドップラーシフト補償、アレーアンテナ素子の自動校正などの研究開発が行われている^{(26), (27)}。

また、更なる大容量化を実現するために、電波による無線通信のみならず、レーザ光による空間光通信の研究開発が進められている。空間光通信は大気の影響が少ない HAPS-HAPS 間や HAPS-衛星間のリンクとして期待されているほか、大気揺らぎの影響を受ける HAPS-地上局間についても、適用に向けた研究開発が進められている。図 8 に示すように、NICT では、HAPS を含むほかの NTN ノードに搭載可能な小形・高速な光通信端末に関する研究開発を実施している⁽²⁸⁾。

5.3 地上局

バックホール回線や直接通信時におけるフィードリンクでは、HAPS と地上局間において、固定業務用に割り当てられたミリ波帯を用いることで広帯

域通信を実現する。しかしながら、ミリ波帯は伝搬損が大きいことに加えて、電力制約や地上システムへの観点から HAPS 搭載局側において高い利得を得ることが困難であるため、地上局側には、高利得かつ他のシステムの干渉を抑える低サイドローブ特性が求められる。また、高い利得を得るためには先鋭なビームを形成する必要がある、安定した通信リンクの確立のためには、捕捉追尾技術の高度化も必要である。

5.4 ネットワーク制御技術

図 7 では、HAPS と地上携帯電話網との間を単一ホップで接続する構成について示したが、将来的な NTN 像においては、異なる高度やモビリティを有する多種多様な NTN ノードと連携したマルチホップやマルチオービットが想定されるため、ネットワークとしての制御が不可欠となる。各 NTN ノードの移動に由来した遅延やスループットなどの通信品質の変動を考慮した制御に加えて、降雨減衰の大きなミリ波を含む無線通信と、雲による遮蔽や大気揺らぎの影響を受ける空間光通信を適切に使い分けることが求められる。このような動的な環境下においては、ユーザの要求を満足させるための適切なリンク形成や経路決定、リソース割当などのネットワーク最適化が、全体のシステム性能に大きく影響する。

6 最新の研究開発事例

6.1 HAPS からの 5G による直接通信の実証

2023 年 9 月に、ソフトバンクがルワンダ領空に

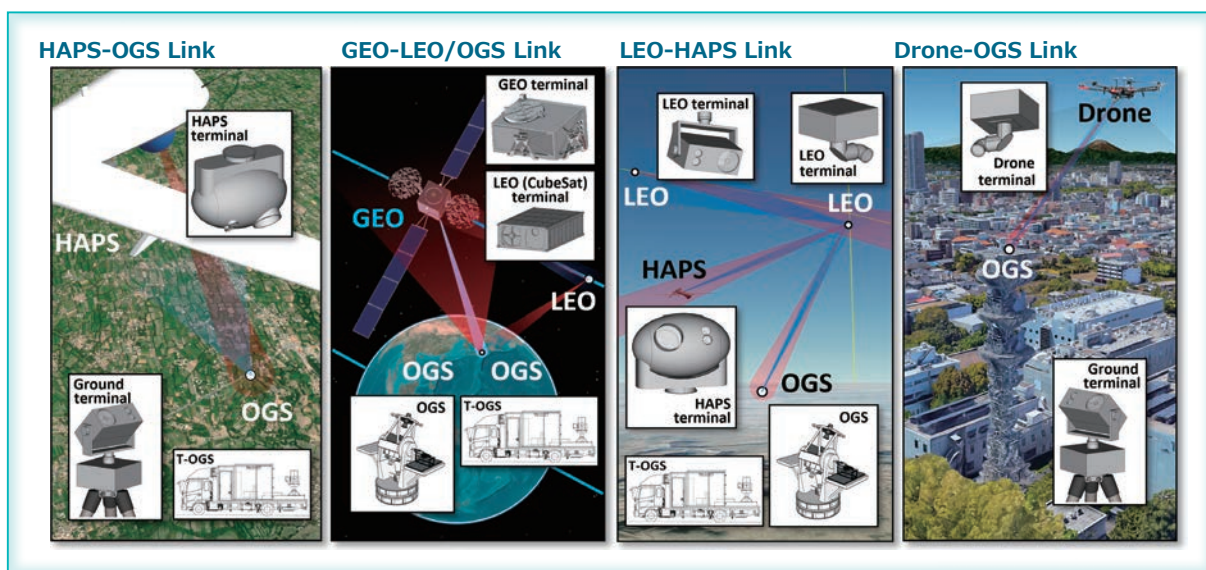


図 8 光通信端末の適用シナリオ例 (文献 (28) から引用)

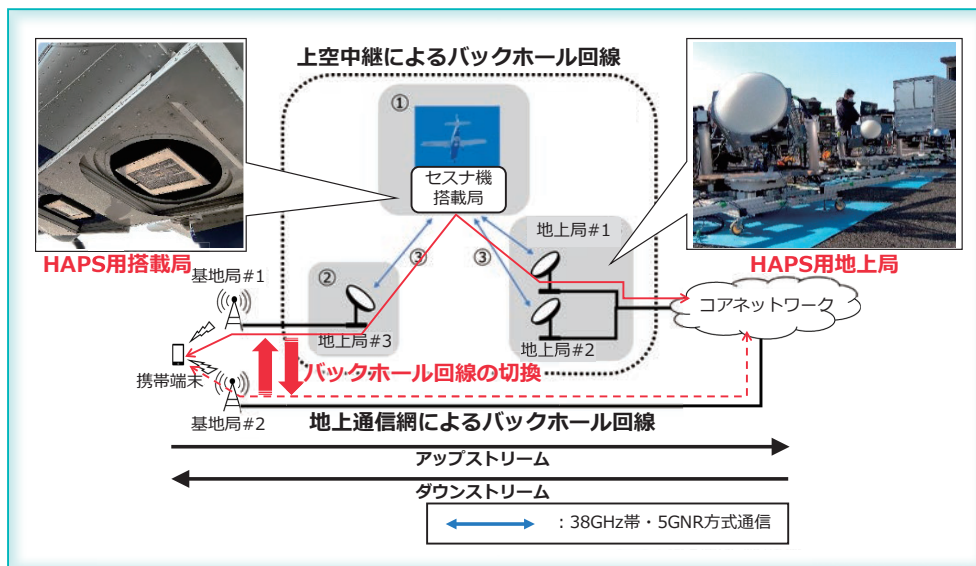


図9 38 GHz 帯電波を用いた上空からの 5G NR 方式の通信確立（文献(31)を基に作成）

において、成層圏を飛行する HAPS と市販の 5G 対応スマートフォンとの間で、5G での直接通信に世界で初めて成功している⁽²⁹⁾。なお、2022 年にはサウジアラビアにおいて、有人航空機を用いて高度 14 km からの 5G 通信実験が既に行われているが、実際に HAPS への搭載は行われていない⁽³⁰⁾。ルワンダで実施された試験においては、ソフトバンクが開発した 5G 対応の通信ペイロードを HAPS に搭載し、移動端末に対して割り当てられた既存の周波数を用いた 73 分間の連続通信において、ビデオ通話による実アプリケーションも利用されており、HAPS と端末との直接通信におけるサービスリンクの確立が実証されている。

6.2 ミリ波帯を用いた固定リンクに関する実証

図9に示すように、2024年3月に、スカパーJSAT株式会社（以下、スカパーJSAT）、パナソニックホールディングス株式会社、NTTドコモ、NICTから成るコンソーシアムが、高度約4 kmを飛行する小形セサナ機と地上局との間で、WRC-19においてHAPSに対して固定業務用に割り当てられた38 GHz電波を用いた5G NR（New Radio）方式での通信を世界で初めて確立しており、端末直接通信におけるフィードリンクや、バックホール回線としてユースケースについても、実用化に向けた技術実証が進展している⁽³¹⁾。また、本実験においては、上空中継回線と地上通信網回線の異なるバックホール回線によって形成されるセルラ間で、一般的な携帯端末を用いたハンドオーバーを行う実証実験に成功しており、TN-NTN統合に向けた成果としても有意であると考えられる。

6.3 サービスリンクにおける周波数共用及びフィードリンク大容量化

ソフトバンクは、HAPSに搭載する通信ペイロードの大容量化や、周波数利用効率の向上を狙ったサービスリンクにおけるセルの高密度化、更にはTNとの周波数共用及びフィードリンクの大容量化に向けた研究開発を2023年から実施しており、本研究開発では、通信容量の倍増や周波数利用効率の1.5倍向上を目指すとしている⁽³²⁾。

6.4 国内の成層圏におけるHAPS実証による早期実用化に向けた研究開発

Space Compass、NTTドコモ、日本電信電話株式会社、スカパーJSATは、端末との直接通信システムの早期実用化に向けた開発の促進、及び高速大容量化に向けた研究開発を2023年から実施しており、本研究開発では、これまで実証実績のない国内の成層圏環境におけるHAPS通信実験を計画しており、2025年度中のHAPSの早期実用化に貢献するとしている⁽³³⁾。

6.5 HAPSによるリモートセンシングを想定した機体・運行管理技術に関する研究開発

Space Compassと新明和工業株式会社（以下、新明和工業）、（株）三菱総合研究所は、HAPSによるリモートセンシングを用いた海洋状況把握システムと、その運行管理技術の開発・実証に向けて、2024年から研究開発を実施しており、本研究開発では、センシング技術や運行管理システムの開発を行うとともに、成層圏における実証環境構築のために、固定翼型のUAS機体であるXU-Sの研究開発

を行っている新明和工業が、HAPS 機体の設計及び開発を行うとしている^{(34), (35)}。

7 結言

実用化に向けた動きが加速し、注目を集める HAPS に関して、ユースケースや特徴・研究開発の歴史を概説するとともに、HAPS 機体や通信ペイロード、地上局やネットワーク制御技術など次世代の HAPS に期待される技術についてまとめた。

HAPS は NTN の中で地表に近い通信プラットフォームであることから、地上と HAPS 間のリンクにおいては、携帯電話と直接通信する基地局として非常に有望視されている。更には、雲の上に滞空していることから、衛星と HAPS 間リンクにおいては大気揺らぎの影響が少なく、大容量な空間光通信を適用することも可能である。このように、HAPS は高度 20 km の成層圏に滞留するという位置関係から、NTN と TN をつなげるプラットフォームとしての重要な役割を担う。HAPS の本格的な実用化までには、通信技術だけでなく、機体技術、電源技術、運用技術、運航管理技術、法制面の整備、周波数の更なる拡大などの課題があるが、これらを順次乗り越え、それほど遠くないうちに我々の身近な存在になっているであろう。

謝辞 本稿の一部は総務省「電波資源拡大のための研究開発 (JPJ000254)」によって実施したものである。

文献

- (1) 総務省 (編), 令和 2 年度版 情報通信白書, 2020.
- (2) 総務省 (編), 令和 6 年度版 情報通信白書, 2024.
- (3) 三浦 周, 関口真理子, 大倉拓也, 小竹秀明, 白玉公一, 斉藤嘉彦, カラスコ-カサド アルベルト, 阿部侑真, 辻 宏之, “衛星通信/NTN と 5G/Beyond 5G の連携の動向と研究開発の取組み,” 信学論 (C), vol. J106-C, no. 9, pp. 344-353, Sept. 2023.
- (4) 三浦 龍, “空に浮かぶ新しい通信インフラ「成層圏プラットフォーム」,” 計測制御, vol. 43, no. 6, pp. 496-501, June 2004.
- (5) ITU-R, “Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks (release 15),” 3GPP, TR 38. 811, V15. 4. 0, Sept. 2020.
- (6) ITU-R, “Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN) (release 16),” 3GPP, TR 38. 821, V16. 2. 0, March 2023.
- (7) M. A. Salas-Natera, G. L. Mace-n, and R. M. Rodriguez-Orsorio, “On the design of HAPs high throughput and flexible 5G communication payloads,” 16th European Conf. Antennas Propag. (EuCAP), March 2022.
- (8) ITU-R, “Final Acts WRC-97,” World

- Radiocommunication conf., 1997.
- (9) ITU-R, “Final Acts WRC-2000,” World Radiocommunication conf., 2000.
- (10) ITU-R, “Final Acts WRC-03,” World Radiocommunication conf., 2003.
- (11) ITU-R, “Final Acts WRC-07,” World Radiocommunication Conf., 2007.
- (12) ITU-R, “Final Acts WRC-12,” World Radiocommunication Conf., 2012.
- (13) ITU-R, “Final Acts WRC-15,” World Radiocommunication Conf., 2015.
- (14) ITU-R, “World Radiocommunication Conference 2019 (WRC-19) Final Acts,” World Radiocommunication Conf., 2019.
- (15) ITU, “World Radio Communication 2023 (WRC-23) Final Acts,” World Radiocommunication Conf., 2023.
- (16) G. K. Kurt, G. Khoshkholgh, S. Alfattani, A. Ibrahim, T. S. J. Darwish, M. S. Alam, H. Yanikomeroglu, and A. Yongacoglu, “A vision and framework for the high altitude platform station (HAPS) networks of the future,” IEEE Commun. Surv. & Tutor., vol. 23, no. 2, pp. 729-779, March 2021.
- (17) 竹田繁一, “成層圏プラットフォームプロジェクトについて,” 日本航空宇宙学会誌, vol. 54, no. 629, pp. 168-174, June 2006.
- (18) 独立研究開発法人情報通信研究機構 (編), 成層圏無線プラットフォーム研究開発最終報告書, 2005.
- (19) M. Oodo, H. Tsuji, R. Miura, M. Maruyama, M. Suzuki, Y. Nishi, and H. Sasamoto, “Experiments on IMT-2000 using unmanned solar powered aircraft at an altitude of 20 km,” IEEE Trans. Vehicular Technol., vol. 54, no. 4, pp. 1278-1294, July 2005.
- (20) J. Horwath, N. Perlot, M. Knappek, and F. Moll, “Experimental verification of optical backhaul links for high-altitude platform networks: atmospheric turbulence and downlink availability,” International J. Satellite Commun. and Netw., vol. 25, pp. 501-528, 2007.
- (21) ソフトバンク, “雲の上の基地局「HAPS」. 無人航空機の成層圏テスト飛行とスマホ同士の通信に世界で初めて成功,” ソフトバンクニュース, 2020 年 10 月 13 日. https://www.softbank.jp/sbnews/entry/20201013_01
- (22) NTT ドコモ, “ドコモとエアバス, 18 日間の飛行で HAPS から電波伝搬実験に成功,” 2021 年 11 月 15 日プレスリリース. https://www.docomo.ne.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/topics/2021/topics_211115_00.pdf
- (23) NTT ドコモ, “NTT ドコモ, Space Compass が AALTO, エアバスと資本業務提携, AALTO に最大 1 億ドルを出資,” 2024 年 6 月 3 日プレスリリース. https://www.docomo.ne.jp/info/news_release/2024/06/03_01.html
- (24) ソフトバンク, “成層圏から広がる通信ネットワーク: ギジュツノチカラ-HAPS 技術の進化編-,” 2024 年 5 月 22 日. <https://www.softbank.jp/corp/technology/research/story-event/049/?adid=sbn>
- (25) HAPS Alliance, “成層圏航空機が挑むデジタルデバイド解消,” 2021. https://hapsalliance.org/wp-content/uploads/formidable/12/SpA_Flight_

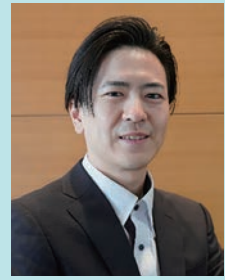
Communication_Tests_White_Paper_Japanese_Final_2021.pdf

- (26) M. Ouchi, T. Kimura, and Y. Chinda, "Study on full digital beamforming for HAPS backhaul system with base station on-board using 38 GHz band frequency," 24th International Symposium on Wirel. Personal Multimedia Commun. (WPMC), Dec. 2021.
- (27) K. Hoshino, S. Sudo, and Y. Ohta, "A study on antenna beamforming method considering movement of solar plane in HAPS system," IEEE 90th Vehicular Technol. Conf., Sept. 2019.
- (28) A. Carrasco-Casado, K. Shiratama, D. Kolev, F. Ono, H. Tsuji, and M. Toyoshima, "Miniaturized multi-platform free-space laser-communication terminals for beyond-5G networks and space applications," Photonics, vol. 11, no. 6, 545, June 2024.
- (29) ソフトバンク, "ソフトバンク, ルワンダ政府と協力して世界で初めて成層圏からの5G通信試験に成功," 2023年10月17日プレスリリース. https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2023/20231017_02/
- (30) Saudi Press Agency, "World-first trial of 5G HAPS technology takes place in saudi arabia in the Red Sea project," 2022年3月3日. <https://www.spa.gov.sa/2334089>
- (31) NICT, "世界初, 高度約4 km 上空から38 GHz 帯電波での5G通信の実証実験に成功," 2024年5月28日プレスリリース. <https://www.nict.go.jp/press/2024/05/28-1.html>
- (32) ソフトバンク, "NICTの「Beyond 5G 研究開発促進事業(電波有効利用型)」および「革新的情報通信技術(Beyond 5G (6G))基金事業」に係る令和5年度新規委託研究課題に採択," 2023年11月6日プレスリリース. https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2023/20231106_02/
- (33) NTTドコモ, "HAPSを介した携帯端末向け直接通信システムの早期実用化に向けた開発の加速と実用化後の利用拡大を見据えた高速大容量化技術の研究開発を開始," 2023年12月7日プレスリリース. https://www.docomo.ne.jp/binary/pdf/info/news_release/topics_231207_00.pdf
- (34) Space Compass, "NEDO 公募「経済安全保障重要技術育成プログラム」における「HAPSによるリモートセンシングを用いたMDAシステムと運航管理技術の開発・実証」プロジェクトの採択について," 2024年7月30日プレスリリース. <https://space-compass.com/news/000070.html>
- (35) 新明和工業 HP, "固定翼型無人航空機「XU-S」の研究開発." <https://www.shinmaywa.co.jp/rd/rd03.html>

(2024年11月6日受付, 2025年2月21日再受付)

大津留 豪 (正員)

平31 慶大・理工・電気電子卒. 令2 同大学院修士課程了. 同年国立研究開発法人情報通信研究機構入構. 以来, 非地上系ネットワークに関するリソース/ネットワーク制御の研究・開発に従事. 現在, 同機構ネットワーク研究所ワイヤレスネットワーク研究センター宇宙通信システム研究室研究員. 博士(工学).



辻 宏之 (正員:フェロー)

昭62 慶大・理工・電気卒. 平元同大学院修士課程了. 平4 同大学院博士課程了. 同年郵政省通信総合研究所(現情報通信研究機構)入所, 現在に至る. 以来, 非地上系通信等の研究に従事. 現在, ワイヤレスネットワーク研究センター宇宙通信システム研究室上席研究員. 平8 本会学術奨励賞受賞. 平22 第58回電気科学技術奨励賞. 博士(工学).



宗正 康 (正員)

平21 東京理科大学大学院工学研究科(電気工学専攻)博士後期課程了. 平21 (株)IHI マリンユナイテッド, 船舶電気システムの基本設計に従事. 平24 東北大研究員, 光MEMSデバイスの研究開発に従事. 平25 国立研究開発法人情報通信研究機構, 令4 総務省総合通信基盤局, Beyond5G 推進に従事. 令6 情報通信研究機構に復帰, 衛星通信, 特に光衛星通信システムの研究開発に従事. 平25 電気学会論文誌E 英文特集号優秀論文賞受賞. 現在, 同機構ネットワーク研究所ワイヤレスネットワーク研究センター宇宙通信システム研究室主任研究員. 博士(工学).



大倉拓也 (正員)

平28 横浜国大大学院博士課程了. 平29 国立研究開発法人情報通信研究機構入構. 以来, 非地上系通信用アンテナに関する研究開発に従事. 現在, 同機構ネットワーク研究所ワイヤレスネットワーク研究センター宇宙通信システム研究室研究員. 博士(工学).



三浦 龍 (正員)

昭59 横浜国大大学院修士課程了. 同年郵政省電波研究所(現情報通信研究機構)入所. 以来, 衛星通信, 成層圏中継, ITS, 無人航空機用通信等の研究に従事. 途中, 旧郵政省, 豪州 AUSSAT (現在の Optus), ATR に出向. 令2 上席研究員を最後に定年退職し, 現在 NICT ワイヤレスネットワーク研究センターワイヤレスシステム研究室主任研究員(非常勤). 博士(工学).



B5G/6Gに向けた成層圏通信プラットフォーム(HAPS)の研究開発

R&D of High Altitude Platform Station (HAPS) towards B5G/6G

長手厚史 Atsushi Nagate[†] 表 英毅 Hideki Omote[†]

太田喜元 Yoshichika Ohta[†] 星野兼次 Kenji Hoshino[†]

Summary

2023年11～12月に開催されたWRC-23 (World Radiocommunication Conference 2023)においてHAPS (High Altitude Platform Station) の携帯電話基地局向け周波数帯の追加が決定され、HAPSへの注目が世界的に高まっている。ITU-R (International Telecommunication Union Radiocommunication Sector)においても、6G (6th Generation mobile communication system) に向けて2023年11月にIMT-2030 フレームワーク勧告 (Recommendation ITU-R M.2160) が完成した。本勧告においてはデジタルディバイド解消のためのコネクティビティ強化がその包括的な要素として期待されている。HAPSは高度約20 kmの成層圏から最大で半径100 kmの超広域のエリアをカバーする通信プラットフォームであり、コネクティビティ強化の実現に向けて期待される。本稿では、成層圏通信プラットフォームの概要、WRC-23における周波数帯追加のための干渉調整や通信システム開発、エリア設計に不可欠となるHAPS電波伝搬モデルの研究開発、超広域のカバーエリアを実現するためのHAPS移動通信システムの研究開発、また、2023年9月に実施した世界初となる成層圏環境での5G実証実験について解説する。

Key Words

Beyond 5G, 6G, HAPS, 成層圏, 移動通信システム

1 はじめに

2023年11～12月に開催されたWRC-23 (World Radiocommunication Conference 2023) においてHAPS (High Altitude Platform Station) の携帯電話基地局向け周波数帯の追加が決定され、HAPSへの注目が世界的に高まっている⁽¹⁾。ITU-R (International Telecommunication Union Radiocommunication Sector) が規定する無線通信規則において従来、携帯電話向け周波数の電波の利用が国際的に認められている2 GHz帯に加え、WRC-23において新たに700-900 MHz帯、1.7 GHz帯、及び2.5 GHz帯の追加が決定した。これにより、各国・地域でHAPSによるモバイルブロードバンド通信を導入する際に、周波数帯の柔軟な選択が可能となる。

6G (6th Generation mobile communication system) に向けても、ITU-Rにおいて2023年11月にIMT-2030 (6G) のフレームワーク勧告 (Recommendation ITU-R M.2160) が完成した⁽²⁾。図1にIMT-2030の利用シナリオを示す。IMT-2020 (5G) における利用シナリオであるeMBB (enhanced Mobile BroadBand), URLLC

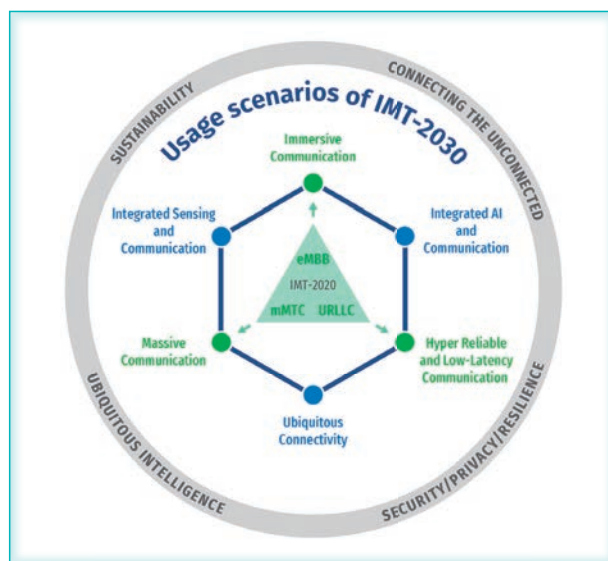


図1 6Gの利用シナリオ

(Ultra-Reliable and Low Latency Communications), mMTC (massive Machine Type Communications) をそれぞれ更に発展させる Immersive Communication, Hyper Reliable

* 本B-plusでは、用語は①文部省 (文部科学省) 学術用語集 電気工学編, ②本会編の改訂電子情報通信用語辞典, ③本会編のエンサイクロペディア電子情報通信ハンドブック、に基づき統一している。

本稿中の「プラットフォーム」は、上記①に従うと「プラットフォーム」であるが、ここでは著者の希望により「プラットフォーム」で掲載した。

[†] ソフトバンク株式会社, 東京都
SoftBank Corp., Tokyo, 135-0064 Japan

and Low-Latency Communication (HRLLC), Massive Communication の三つの利用シナリオに加え、分散コンピューティング、AI アプリケーションのサポートや AI の活用による IMT-2030 の高度化を目指す AI and Communication, センシングによる新たなアプリケーションやサービスの実現を目指す Integrated Sensing and Communication, 現在、十分にカバーされていないエリアの接続性の向上を目指す Ubiquitous Connectivity の新たな三つの利用シナリオを含む、計六つの利用シナリオが示されている。また、その包括的要素として、Sustainability, Ubiquitous Intelligence, Security and Resilience とともに Connecting the Unconnected が掲げられ、デジタルディバイド解消のための接続性強化が期待されている。

HAPS は高度約 20 km の成層圏から最大で半径 100 km の超広域のエリアをカバーする通信プラットフォームであり、6G で目指す接続性強化の実現に向けて期待されており、我が国の Beyond 5G (6G) の実現に向けた戦略においても、通信カバレッジの拡張性を実現する手段として位置付けられている⁽³⁾。

本稿ではまず成層圏通信プラットフォームの概要を述べた後に、HAPS 設計、開発の基盤となる成層圏からの電波伝搬、及び国際標準化動向を、次に HAPS 移動通信システムの全体像を現在の研究開発状況も踏まえて述べ、最後に 2023 年 9 月に実施した成層圏通信実証実験の概要を述べる。

2 成層圏通信プラットフォーム

HAPS は気流の安定している高度約 20 km の成層圏を飛行する気球、飛行船、飛行機などのプラットフォームに搭載される無線中継局である。図 2 に示すとおり、成層圏 (Stratosphere) は我々の生

活する対流圏 (Troposphere) のすぐ上に位置する。36,000 km 上空の静止衛星 (GEO Satellite: Geostationary Earth Orbit Satellite) はもとより、高度約 1,000 km に位置する低軌道衛星 (LEO Satellite: Low Earth Orbit Satellite) と比較してもはるかに低高度にある。また、成層圏は 1 年を通して風速が比較的低速であり、機体の安定した運用にも適している。

成層圏で長期間連続的なサービスを提供するためには機体として無人機が望ましい。無人機は軽航空機 (Lighter than air aircraft), 重航空機 (Heavier than air aircraft) に分類される。軽航空機としてはヘリウムガスによる浮力を利用する気球や飛行船があり、重航空機としては固定翼のソーラープレーンが代表的である。サイズや重量、通信装置などのペイロードへの許容重量や消費電力、機動性、定点滞空性能、コストなどについては機体ごとにそれぞれ特徴がある⁽⁴⁾。気球や飛行船は大形化により搭載可能な通信装置を大形化しやすい利点がある一方で、離着陸時やサービス提供場所への移動時に機体制御が容易ではなく、時間を要する点が課題である。これに対してソーラープレーンは災害時などに求められる機動性が高く、旋回飛行により半径数 km での定点滞空が可能である。機体サイズ (翼長) はおよそ 20 m から 80 m であり、機体サイズに応じて小形から大形まで様々なペイロードを搭載可能である。このような特徴から、ソーラープレーン型の成層圏プラットフォームには特に高い期待が寄せられており、多数の機体開発が行われている^{(4), (5)}。

成層圏は高高度であり、遠方に対しても高仰角となることから地上への見通しが良好である。このため、超広域のカバーエリアを期待できる。高度 20 km では、水平距離 50 km, 100 km における仰角はそれぞれ 22 度, 11 度であり、このような広域においても良好な見通し特性が得られることが分かる。一方、高高度ではあるが高々 20 km 程度

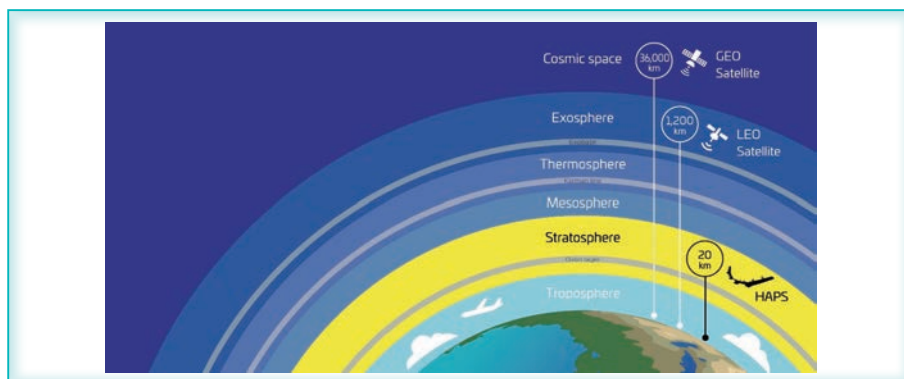


図 2 成層圏 (Stratosphere)

であることから、衛星通信とは異なり伝搬遅延時間は短い。特に、広域をカバーする場合には高度よりも水平距離の影響が大きくなり、地上移動通信とほぼ同等の遅延特性となる。このため、5G以降で期待される高信頼低遅延通信である URLLC、それを更に発展させる HRLLC を広域で実現するためのプラットフォームとしても有望である。

また、伝搬遅延時間と同様に伝搬損についても衛星通信と比較して小さい。低軌道衛星、静止衛星との伝搬距離の違いはそれぞれ約 30 倍、約 1,000 倍であり、自由空間伝搬損で約 30 dB、約 60 dB もの差が生じる。これらのことから、HAPS は最大 100 km と広域をカバーすることが可能でありながら、高度は高々 20 km と衛星通信と比較して地上に近く、低遅延通信や、低伝搬損に伴う高速大容量通信の実現が容易な上空プラットフォームであると言える。更に、多数の移動衛星から成る衛星コンステレーションによりサービス展開を行う低軌道衛星と異なり、HAPS は最小 1 機体からエリア展開を行うことが可能であり、カバーエリアやトラヒックのニーズに応じた柔軟な展開が可能であることも特徴である。

3 HAPS 電波伝搬モデル

本章では、まず HAPS で想定される電波伝搬環境と HAPS に必要な電波伝搬モデルとして、干渉検討用電波伝搬モデルとシステムデザイン用電波伝搬モデルについて述べる。次に、その国際標準化の状況について、昨今の進捗と併せて述べる。

3.1 HAPS で想定される電波伝搬環境と電波伝搬モデル

図 3 は HAPS ー地上間で想定される電波伝搬環境を示す⁽⁶⁾。まず大気ガス吸収や降雨減衰等の対流圏での電波伝搬特性が必要不可欠である。また、

HAPS のカバーエリアには、山岳地帯、森林地帯、市街地、郊外地、開放地等様々な電波伝搬環境が含まれるため、これらの電波伝搬環境に対応した電波伝搬モデルが必要不可欠である^{(7)～(10)}。

HAPS を通信ネットワークインフラとして運用する場合、成層圏から発信する電波伝搬特性を正確に推定する必要がある。その推定に必要な手法として HAPS 向けの「電波伝搬推定法」があり、この推定法は、主に「干渉検討用電波伝搬推定法」と「システムデザイン用電波伝搬推定法」で構成されている。これらの推定法は、図 3 に示した HAPS で想定される電波伝搬環境に応じて考慮される必要がある⁽¹¹⁾。

干渉検討用電波伝搬推定法は、隣国間や異なる無線通信システム間の電波干渉を調整するために不可欠な推定法である。隣国やほかの無線システム等へ与える影響を定量的に評価する干渉量は、主に場所率や時間率で評価されることが多いため、干渉検討用電波伝搬推定法は伝搬損特性を場所率や時間率で表す「干渉検討用伝搬損失モデル」で構成される⁽⁶⁾。一方、システムデザイン用電波伝搬推定法は、HAPS の通信エリアの設計を行う際に、機体数や配置を詳細に検討するための重要な推定法であり、主に送受信のポイントを特定して、その間の伝搬損特性を高精度に表す「システムデザイン用伝搬損失モデル」と電波伝搬遅延特性や電波到来角特性を表す「システムデザイン用時空間伝搬モデル」から構成されている。

3.2 HAPS 電波伝搬モデルの国際標準化状況

干渉検討用電波伝搬推定法は、2023 年の世界無線通信会議 (WRC-23) の議題検討のため、2019 年の世界無線通信会議 (WRC-19) において 2021 年 7 月までの完成が求められていたことから、筆者らは、HAPS 対応電波伝搬推定法の開発と国際標準化活動に取り組んできた。そして、2021 年 6 月に開催された電波伝搬を所掌する ITU-R SG3

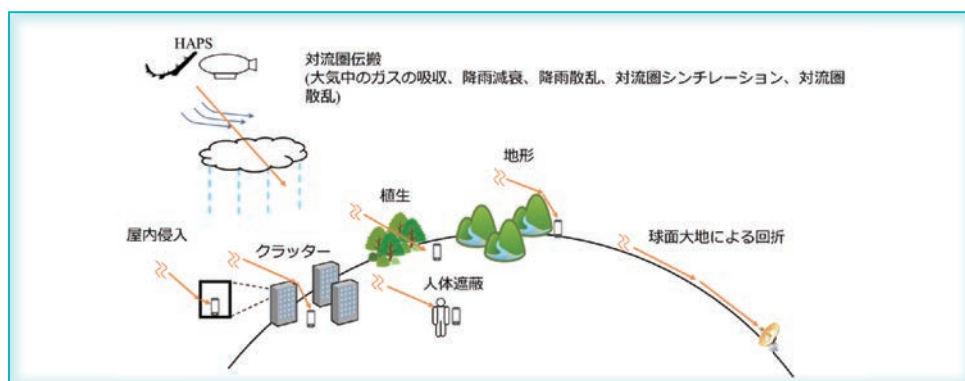


図 3 HAPS で想定される電波伝搬環境

ITU-R SG3	ベースライン	オプション (これらの減衰要因がある環境に対して適用可能)			
	対流圏+地形	クラッタ	屋内侵入	植生	人体遮蔽
干渉検討用 伝搬損失モデル 標準化進捗範囲	使用条件を整理 して標準化達成	新規追加(提案モデル 議長報告記載) 日本提案モデル	新規追加 (既存勧告参照)	新規追加(提案モデル 標準化達成) 日本提案モデル	
システムデザイン用 伝搬損失モデル	継続検討	新規追加(提案モデル 標準化達成) (今後周波数拡張予定) 日本提案モデル	将来の勧告化へ向けて 提案モデル議長報告 記載 (新勧告の策定予定) 日本提案モデル	新規追加(提案モデル 標準化達成) 日本提案モデル	新規追加(提案モデル 標準化達成) 日本提案モデル
システムデザイン 用時空間伝搬 モデル	測定・モデル 開発推進中	新規追加(提案モデル 一部標準化達成) (今後他の特性追加予定) 日本提案モデル	勧告改訂、新報告 作成に向けた 議長報告へ記載	測定・モデル 開発推進中	新規追加(提案モデル 一部標準化達成) (今後他の特性追加予定) 日本提案モデル

図4 HAPS 電波伝搬モデルの国際標準化状況 (2024 年 7 月時点)

(Study Group 3) 関連会合において干渉検討用電波伝搬推定法の国際標準化を達成した⁽¹²⁾。また、システムデザイン用電波伝搬推定法の一部についても国際標準化を達成した。なお、本成果はWRC-23でHAPS向け新周波数帯を追加する一助となった⁽¹⁾。その後も、主にシステムデザイン用電波伝搬推定法の国際標準化活動を推進している。図4は2024年7月時点でのHAPS電波伝搬モデルの国際標準化の状況を示す。日本は、HAPSで想定される各電波伝搬環境における各電波伝搬モデルの開発と国際標準化活動を主導しており、筆者らは残るシステムデザイン用電波伝搬推定法の研究開発と国際標準化活動を進めている。次に、その研究開発の一例を示す。

3.3 HAPS 電波伝搬モデルの研究開発の一例

植生環境におけるシステムデザイン用時空間電波伝搬モデルを開発するために、ヘリコプター（基地局）と森に囲まれた道路内にある電測車（移動局）の間で電波伝搬測定を実施し、移動局側電波到来角特性を取得した⁽¹³⁾。図5(a)に、測定結果の一例を示す。図5(a)の横軸は到来角度を示しており、その角度は図5(b)の立面図と一致している。0度は真下方向、180度は真上方向、90度は基地局と反対方向の水平方向、270度は基地局方向の水平方向を示す。図5(a)では基地局の方向は240度(270度-30度)であり、基地局の水平方向と移動局がある道路方向との間の道路角は90度である。また、図5(c)は測定結果から推察される電波の到来方向である。図5(a)から、基地局方向(240度)と基地局と反対方向(120度)から電波が到来していることが分かる。これらは、それぞれ図5(c)

の透過波と後方の植生による反射波または散乱波であると考えられる。また、上空(120度~240度の間)からも広く電波が到来している。これらは図5(c)における樹冠による散乱波であると考えられ、都市部などでは観測されない到来波である。今後、追加測定を実施して、これらの測定結果から得られた知見を基に植生環境における時空間電波伝搬モデルを開発し、国際標準化活動を推進する。また、ほかの環境における時空間電波伝搬特性も併せて解明する。

4 HAPS 移動通信システム

HAPSは1機で最大半径100kmの超広域エリアをカバーすることから、移動通信システムへの利用に向けては単位面積当りの通信容量の向上や端末収容能力の改善が求められる。本章では、HAPSの大容量化に向けて、デジタルビームフォーミング技術やMassive MIMO (Multiple Input and Multiple Output) 技術を応用した筆者らの取り組みについて説明する。

HAPS移動通信システムの構成例を図6に示す。HAPS移動通信システムはHAPSとゲートウェイ局(GW局)間のフィードリンク回線と、HAPSと端末(UE: User Equipment)間のサービスリンク回線から成る。端末は最大半径100kmで通信可能なLTEや5G NRに準拠した端末を使用できる。フィードリンクは広帯域なミリ波帯を用いるため大容量化が比較的容易である一方、サービスリンクは6GHz以下の狭い帯域で広域エリアをカバーするため大容量化が課題となる。サービスリンクにおいて単位面積当りの通信容量を改善する方法として、

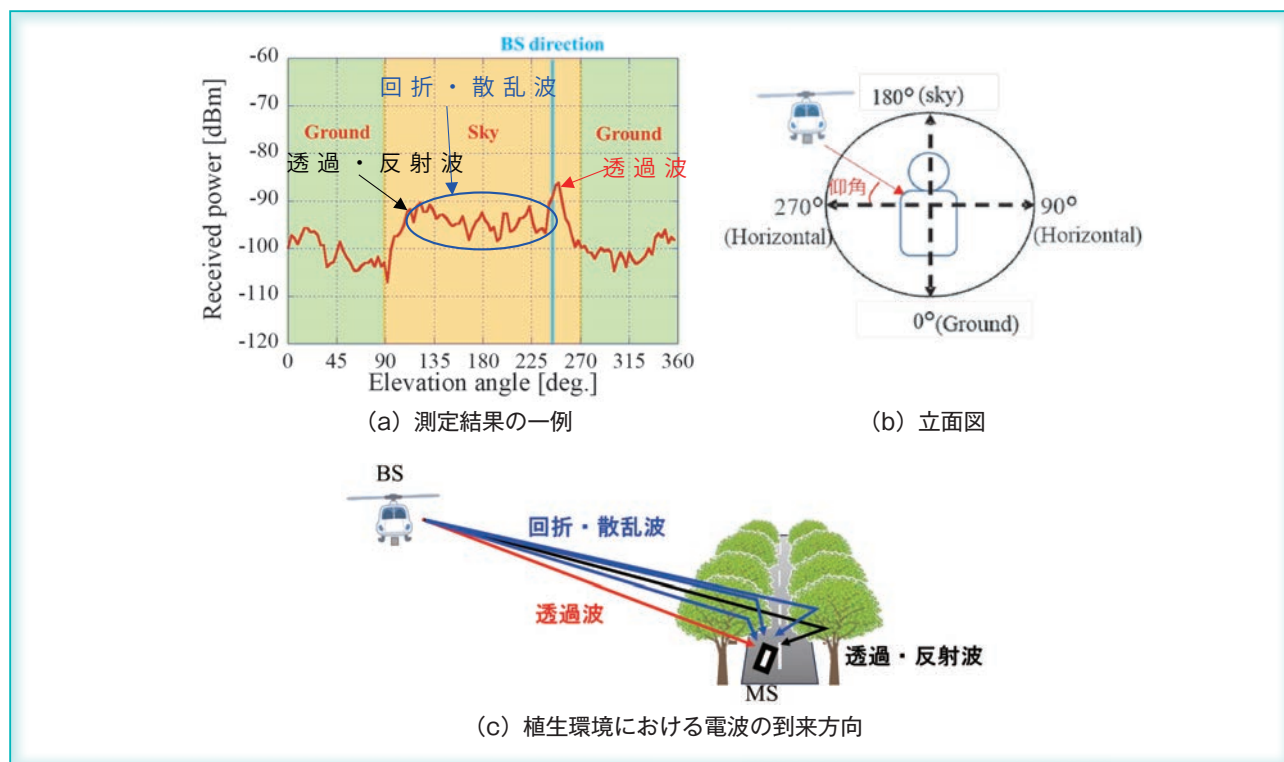


図5 植生環境における電波伝搬測定

地上基地局システムにおける複数セクタ局と同様にマルチセル構成が有効である。図6は7セル構成の例であるが、セル数を更に増やして1セル周波数繰り返しとすることで、周波数利用効率及び通信容量の向上が見込める。また、更なる大容量化に向けては Massive MIMO 技術の利用（マルチユーザ構成）も考えられる。端末のチャネル情報や位置情報等を用いてマルチユーザ MIMO 伝送を行うことで、アンテナ利得の向上とユーザ間干渉の低減により大幅な通信容量の改善も期待できる。

これらの構成を前提としたサービスリンクにおける高度化の取組みとして、筆者らは、主にマルチセル構成を対象として安定したエリア形成を行うフットプリント固定技術（4.1）、セル配置の最適化によりエリア内の通信容量等を最適化するビーム最適化制御技術（4.2）、マルチセル及びマルチユーザ構成を対象として HAPS の柔軟な展開を実現する周波数共用技術（4.3）の研究開発を行っている。本章では、以降それぞれの取組みについて説明する。

4.1 フットプリント固定技術

HAPS の機体はソーラープレーン、気球、飛行船等、様々検討されているが、いずれの機体においても鉄塔やビルの屋上に固定設置される地上基地局とは異なり、飛行に伴って位置や姿勢が変化する。こ

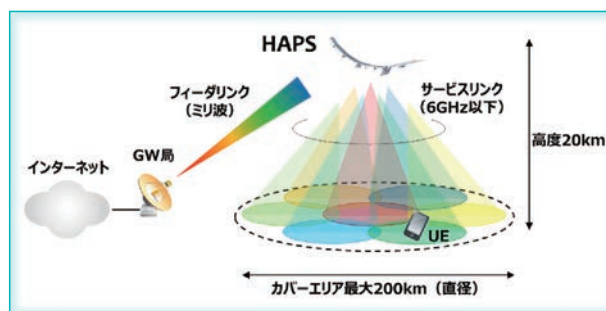


図6 HAPS 移動通信システムの構成例

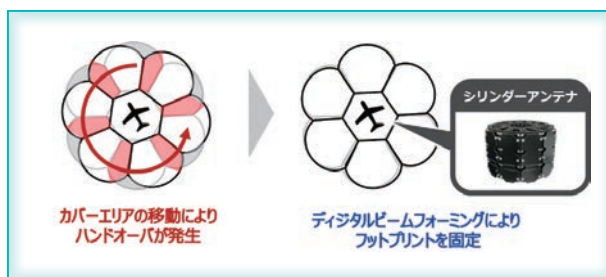


図7 フットプリント固定技術

れにより、地上の受信レベル等が大きく変動し、サービスエリア（フットプリント）が安定しないことが課題となる。また、マルチセル構成においては、在圏セルが頻繁に変わることでハンドオーバーが頻発することが課題となる。

この課題に対し、図7に示すシリンダ形状の多素子フェイズドアレーアンテナ（シリンダアンテナ）



(a) 係留気球



(b) アンテナ搭載の様子

図 8 上空プラットフォームを用いた屋外実証試験

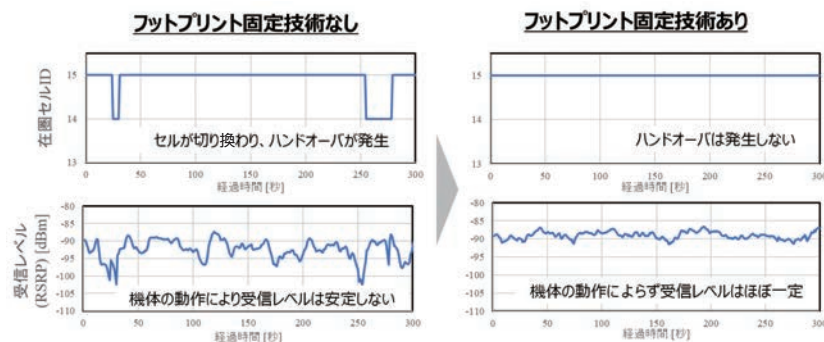


図 9 フットプリント固定制御の実験結果の一例

を用いて機体の旋回に応じたビームステアリング制御を行うフットプリント固定制御法を提案している⁽¹⁴⁾。同図は機体が方位角方向に左回転した場合の一例であるが、垂直及び水平方向の三次元的なビームステアリング制御により方位角の回転のみならず、移動や仰角方向の回転にも対応が可能である。

提案方式の有効性を確かめるため、試作装置を用いた屋外実証試験も行っている⁽¹⁵⁾。実証試験では図 8 に示すようにシリンダアンテナの試作装置を係留気球に搭載し、高度約 250 m まで上昇させて半径数十 km のカバーエリア内の通信品質の安定性を検証した。エリア内の定点での在圏セル ID 及び受信レベルの一例を図 9 に示す。上空の風の影響により機体が常に回転及び移動する環境下でも、フットプリント固定制御によりハンドオーバーの発生を防ぎ、受信レベルも安定化できることを確認した。

4.2 ビーム最適化制御技術

HAPS のカバーエリア内は人口密集地や人が少ない山間部等、ユーザやトラヒックの分布が地理的・時間的に偏在することが想定される。マルチセル構成において、この偏りを考慮して各セルの配置（水平・垂直ビーム方向及びビーム幅）を最適化するこ

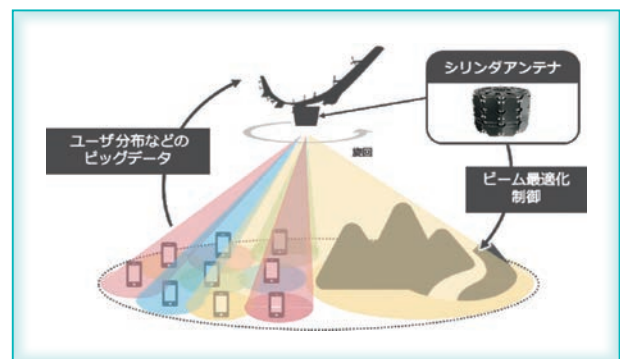


図 10 ビーム最適化制御技術

とにより、一様に配置する場合に対して大幅に通信容量を増大できる（図 10）。しかし、最適化対象のセル数が増えると制御すべきパラメータの組合せが指数関数的に増大し、現実的な時間内でのパラメータの探索が困難となる。

本課題に対し、遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithm) を用いた低演算量のビーム最適化法を提案している。例えば、文献 (16) では複数のセルをグループ化してグループごとに GA による最適化を行う共進化アルゴリズムを組み合わせることにより、20 セルを超えるセル数でも効率的に最適化が可能であることを明らかにした。

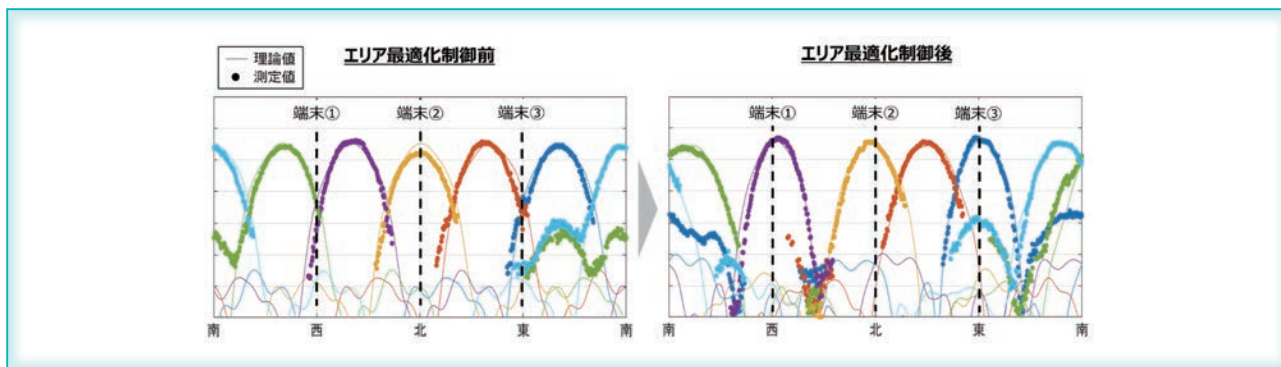


図 11 エリア最適化制御の実験結果の一例

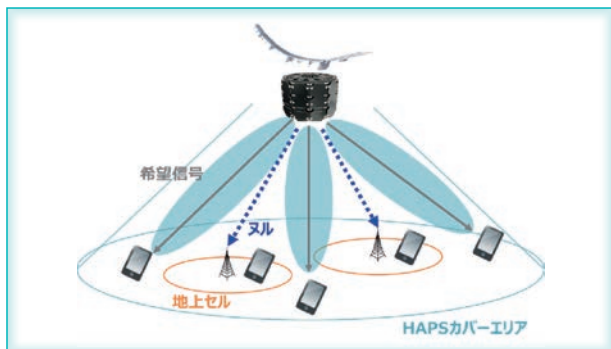


図 12 ヌルフォーミングによる HAPS－地上間周波数共有

ユーザの位置情報に基づくビーム最適化制御の基本検証を屋外にて行った⁽¹⁷⁾．ここではシリンドラアンテナを高さ 20 m の高所作業車の作業床に搭載し、アンテナを中心に 3 台の端末をそれぞれ西、北、東に配置した．エリア最適化前後における 6 セルのビームパターンの一例を図 11 に示す．合計スループットを目的関数として最適化制御を行ったところ、端末の位置情報に基づいて自動的に各ビームが端末方向を向き、合計スループットが大幅に改善することを確認した．

4.3 HAPS－地上システム間周波数共用技術

現在 HAPS 向け周波数として地上システムで広

く利用されている周波数帯が ITU-R において特定されている⁽¹⁾．この一部を HAPS 専用の周波数として割当ができれば HAPS 及び地上システムとで独立したエリア展開が可能だが、周波数有効利用の観点では同一の周波数帯域を使用することが望ましい．この場合、HAPS－地上システム間の同一周波数干渉による周波数利用効率の劣化が課題となる．そこで、同一周波数干渉を抑圧または回避することで周波数利用効率の劣化を抑える周波数共用技術の検討を行っている．

マルチセル構成においては、前節で示したビーム最適化方式を拡張して、地上システムに対する SI 比の劣化量等を制約条件に加えることで、地上システムと HAPS エリアの共存を図る方式を提案している⁽¹⁸⁾．一方、マルチユーザ構成向けには、図 12 に示すようにマルチユーザ MIMO 伝送と地上基地局の方向に対するヌル点の形成(ヌルフォーミング)を同時に行うことで、地上セルへの干渉を抑圧しつつ、高い周波数利用効率を実現する周波数共用方式を提案している⁽¹⁹⁾．

ヌルフォーミングを用いた HAPS－地上システム間の周波数共有の実証試験を 4.1 と同様の上空プラットフォーム及び高度で行った⁽²⁰⁾．図 13 の実験結果に示すとおり、ヌルフォーミング制御によ

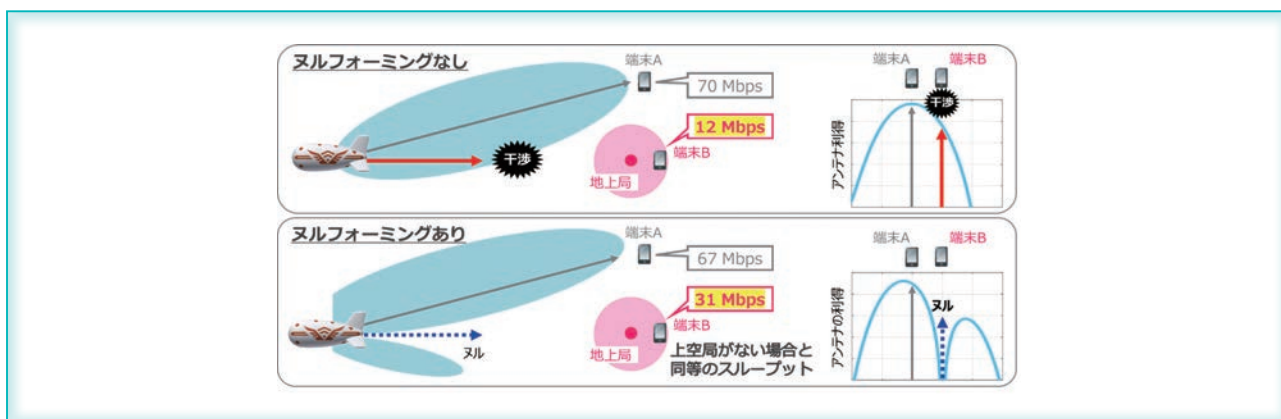


図 13 ヌルフォーミング制御の実験結果の一例

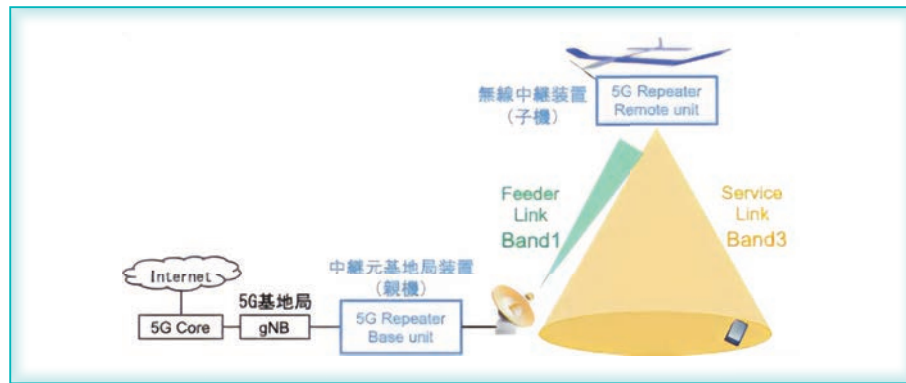


図 14 システム全体構成

り地上局エリアに対する干渉を抑圧することで、地上局在圏端末のスループットの劣化を回避し、HAPS-地上システム間で周波数共用が可能であることを確認した。

5 成層圏環境での 5G 実証実験

本章では 2023 年 9 月に実施した成層圏環境での HAPS 無線中継システムによる 5G 実証実験について説明する。

5.1 HAPS 無線中継システム

筆者らは、小形 HAPS に搭載可能な軽量・低消費電力の 5G NR 対応の HAPS 無線中継システムを開発し、高度約 16 km の成層圏において、HAPS と携帯端末との 5G モバイルダイレクト通信を実証した^{(21),(22)}。

図 14 に HAPS 無線中継システムの全体構成を示す。HAPS 無線中継システムは HAPS と携帯端末間を接続するサービスリンクと、HAPS と地上システム間を接続するフィーダリンクの二つの無線回線を有する。HAPS 無線中継装置は地上の 5G 基地局 (gNB: next Generation NodeB) に有線接続された中継元基地局装置 (親機) と HAPS に搭載された無線中継装置 (子機) で構成される。親機では 5G 基地局から送信された 5G NR 信号 (1.8 GHz 帯) を 2 GHz 帯のフィーダリンク周波数に周波数変換し、HAPS の子機に向けて送信する。子機では受信した 2 GHz 帯の信号を 1.8 GHz 帯の元の送信周波数に変換後、増幅して地上エリアに送信する。なお、HAPS は上空で傾き・旋回しながら定点滞空することから受信レベル変動が発生する。そのため、子機では 5G NR の同期信号 (PSS) を相関処理することでフィーダリンクの受信レベル変動を検出し、中継利得を補正している⁽²³⁾。

表 1 に HAPS 無線中継システムを構成する各装置の諸元を示す。本装置は 5 MHz 帯域の 5G NR

表 1 実験諸元

項目	中継元基地局装置 (親機)	無線中継装置 (子機) 対親機	
		対親機	対端末
通信システム	5G NR		
送信周波数	1,965-1,970 MHz	2,155-2,160 MHz	1,845-1,850 MHz
受信周波数	2,155-2,160 MHz	1,965-1,970 MHz	1,750-1,755 MHz
信号帯域幅	5 MHz		
送信電力	5 W × 2 port	1 W × 2 port	5 W × 2 port
アンテナ種別	パッチアレーアンテナ	パッチアンテナ	
アンテナ利得	18 dBi	6 dBi	9 dBi

信号をそのまま周波数変換して中継する非再生周波数変換方式のリピータである。親機及び子機に中継器を 2 系統実装することで、2×2MIMO 伝送に対応し、送信 2port の送信電力は各 5 W である。また、子機は成層圏環境で動作することから、複数の温度センサとヒータにより温度管理・制御を行っている。親機のアンテナは利得が約 18 dBi の VH 偏波共用パッチアレーアンテナを用い、HAPS に搭載する子機のアンテナは対親機向けと地上エリア向けにそれぞれ利得が約 9 dBi と 6 dBi の VH 偏波共用パッチアンテナを用いた。

5.2 実証実験

実証実験はアフリカのルワンダで実施した。HAPS 無線中継システムの地上局 (GCS: Ground Control Station) は Butare 空港の敷地内に設置し、HAPS は通信試験中、高度約 16 km の GCS 上空を旋回飛行した。HAPS は早朝に離陸し、約 4 時間 40 分かけて高度 16 km の成層圏に到達した。この日の Butare 空港上空の成層圏界面高度は、同時に実施した観測気球試験から 16.123 km であった。成層圏到達後は GCS を中心とした半径 2.5 km の円周上をおよそ 1 周 12 分の速度で旋回飛行を続け、

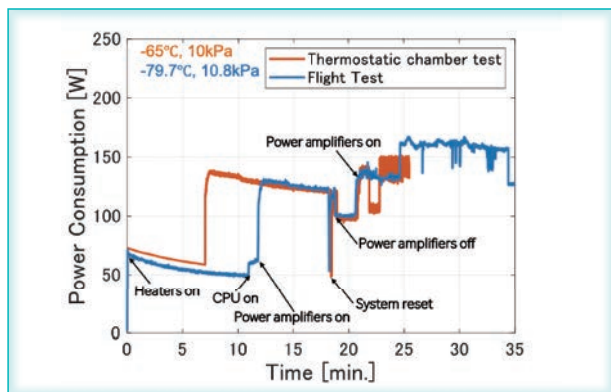


図 15 HAPS ペイロードの消費電力

約 73 分間、無線中継装置（子機）に電源供給を行い、その間コールドスタート試験や通信試験を実施した。

5.2.1 コールドスタート試験

HAPS 搭載機器（子機）への電力供給は電力消費低減のため、成層圏到達後に実施した。このときの外気温は約 -80°C 、気圧は 10 kPa 程度であった。子機では温度センサとヒータによる温度管理と各種制御を行っており、ヒータで装置各部を温め、各部の温度センサが動作温度に到達後、各部への電源供給を行っている。図 15 に成層圏での電源投入時間に対する子機の消費電力の推移を示す。図から、ヒータ動作後 11 分で CPU が動作し、12 分で電力増幅器、18 分で全ての温度センサが動作温度に到達しシステムを再起動後、21 分で起動完了している。その後、通信試験を実施することで消費電力が 160 W 程度に上昇していることが確認できる。また、同図には恒温槽（Thermostatic chamber）試験での子機の消費電力の推移も併せて示す。図から温度条件が異なるため CPU の動作開始時間は異なるが、電源投入 12 分後以降は消費電力の推移が成層圏環境と恒温槽試験環境でほぼ同一となっていることから、恒温槽試験の妥当性が確認できた。

5.2.2 通信試験

通信試験では HAPS 無線中継システムを用いて中心周波数 1847.5 MHz の 5G NR 信号（5 MHz 帯域幅）の無線中継を行い、通常の 5G NR 対応の携帯端末でデータ通信や Zoom 会議が良好に行えることを確認した。測定結果の一例として、図 16 に HAPS 旋回時における端末の受信スループット特性を示す。同図から 5 MHz 帯域幅、 2×2 MIMO 使用時のシステム上限となる 32 Mbit/s に対して平均 22 Mbit/s のスループットが得られており、 2×2 MIMO の 64 QAM で期待どおりに通信できてい

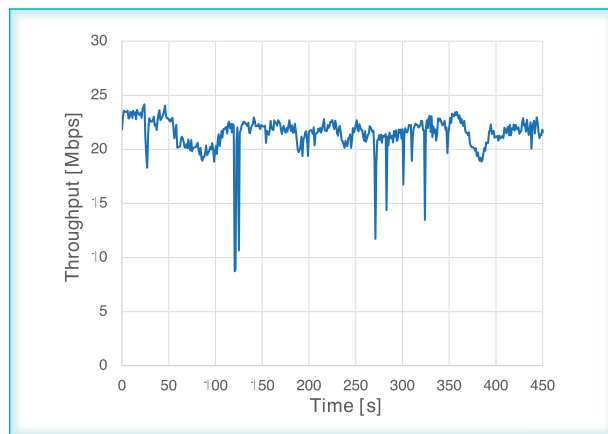


図 16 HAPS 旋回時のスループット

たことが確認できた。

6 まとめ

本稿では、WRC-23 における新規周波数の追加、6G におけるデジタルディバイド解消のためのコネクティビティ強化への期待を背景に、注目を集める HAPS について成層圏通信プラットフォームの概要、HAPS 電波伝搬モデルの研究開発と国際標準化、HAPS 移動通信システムの研究開発、及び成層圏環境における 5G 実証実験について述べた。HAPS の研究開発は着実に進められており、今後は早期の実用化によりデジタルディバイドの解消や迅速な災害対応の実現など社会課題の解決に貢献することが期待される。

謝辞 本研究成果の一部は、国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）の委託研究（JPJ012368C07701）により得られたものです。

文献

- (1) ソフトバンク，“2023 年世界無線通信会議（WRC-23）において HAPS の携帯電話基地局向け周波数帯の追加が正式決定～各国・地域で HAPS の導入時における周波数帯の柔軟な選択が可能に、” Dec. 2023. https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2023/20231228_01/
- (2) Rec. ITU-R M.2160-0, “Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond,” Nov. 2023.
- (3) 総務省，“令和 5 年版情報通信白書。”
- (4) S. Karapantazis and F. Pavlidou, “Broadband communications via high-altitude platforms: A survey,” IEEE Commun. Surv. Tutorials, vol. 7, no. 1, pp. 2-31, March 2005.
- (5) G. K. Kurt, M. G. Khoshkholgh, S. Alfattani, A. Ibrahim, T. S. J. Darwish, M. S. Alam, h. h. Yanikomeroglu, and A. Yonacoglu, “A vision and framework for the high altitude platform station

- (HAPS) networks of the future,” arXiv preprint arXiv:2007.15088, July 2020.
- (16) 表 英毅, 佐藤彰弘, 木村 翔, 田中翔馬, 林 合祐, 日景 隆, 山里敬也, “HAPS 対応電波伝搬モデルの開発と国際標準化,” 信学論 (B), vol. J106-B, no. 11, pp. 677-695, Aug. 2023.
- (17) Rec. ITU-R P.1812-4, “A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the VHF and UHF bands,” 2015.
- (18) M. Ghoraiishi, J. Takada, C. Phakasoum, T. Imai, and K. Kitao, “Azimuth and delay dispersion of mobile radio wave propagation through vegetation,” Proc. 4th European Conf. Antennas propag., April 2010.
- (19) 中村光貴, 佐々木元晴, 鷹取泰司, “4.7 GHz と 66.5 GHz 帯における複数人体遮蔽時の屋内伝搬損失推定式,” 信学技報, AP2018-20, pp. 19-22, May 2019.
- (10) 伊藤優希, 岩井誠人, 笹岡秀一, “室内環境におけるフレネルゾーンに基づく人体遮蔽損失特性の評価,” 信学論 (B), vol. J101-B, no. 9, pp. 696-705, Sept. 2018.
- (11) ワイヤレス電力伝送と 5G 通信の連携・融合に向けた干渉対策と今後の展望, 橋本 修 (監修), 16 章, シーエムシー出版, 2023.
- (12) Rec. ITU-R P.1409-2, “Propagation data and prediction methods for systems using high altitude platform stations and other elevated stations in the stratosphere at frequencies greater than about 0.7 GHz,” 2021.
- (13) S. Kimura, A. Sato, and H. Omote, “Arrival angle characteristics at MS in high BS and vegetation environment,” ISAP2024, Nov. 2024.
- (14) K. Hoshino, S. Sudo, and Y. Ohta, “A study on antenna beamforming method considering movement of solar plane in HAPS system,” IEEE VTC2019-Fall, Sept. 2019.
- (15) ソフトバンク株式会社, “フットプリント固定技術を活用した高高度係留気球基地局の実証に成功 (プレスリリース),” 2022 年 6 月 22 日. https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2022/20220622_01/
- (16) Y. Shibata, W. Takabatake, K. Hoshino, A. Nagata, and T. Ohtsuki, “Two-step dynamic cell optimization algorithm for HAPS mobile communications,” IEEE Access, vol. 10, pp. 68085-68098, June 2022.
- (17) ソフトバンク株式会社, “HAPS の通信容量の最大化を実現するエリア最適化技術の実証実験に成功 (プレスリリース),” 2023 年 12 月 20 日. https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2023/20231220_01/
- (18) Y. Shibata, W. Takabatake, K. Hoshino, A. Nagata, and T. Ohtsuki, “HAPS cell design method for coverage extension considering coexistence on terrestrial mobile networks,” IEEE Access, vol. 12, pp. 55506-55520, April 2024.
- (19) K. Tashiro, K. Hoshino, and A. Nagate, “Nullforming-based precoder for spectrum sharing between HAPS and terrestrial mobile networks,” IEEE Access, vol. 10, pp. 55675-55693, May 2022.
- (20) ソフトバンク株式会社, “HAPS と地上基地局との周波数共用を実現するヌルフォーミング技術の実証実

験に成功 (プレスリリース),” 2024 年 6 月 26 日. https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2024/20240626_01/

- (21) ソフトバンク株式会社, “ソフトバンク, ルワンダ政府と協力して世界で初めて成層圏からの 5G の通信試験に成功,” 2023 年 10 月. https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2023/20231017_02/
- (22) 太田喜元, 小西光邦, 松浦一樹, 高木裕貴, 長谷川拓哉, 長手厚史, “HAPS 無線通信システムの成層圏実証実験,” 信学技報, AP2024-25, pp. 19-24, July 2024.
- (23) T. Hasegawa, M. Konishi, Y. Ohta, and A. Nagate, “An experimental study on automatic gain control in HAPS wireless repeater system,” Wirel. Commun. Netw. Conf., March 2023.

(2024 年 10 月 29 日受付, 2025 年 1 月 17 日再受付)

長手厚史 (正員)

2001 阪大大学院基礎工学研究科博士前期課程了。同年日本テレコム株式会社 (現ソフトバンク株式会社) 入社, 情報通信研究所配属。以来, 4G, 5G, HAPS の無線伝送方式, 無線回線制御方式の研究開発に従事。2016 阪大大学院情報科学研究科博士後期課程了。現在, ソフトバンク株式会社基盤技術研究室室長。IEEE 会員。博士 (情報科学)。



表 英毅 (正員)

1997 名大・理卒。1999 同大学院理学研究科博士前期課程了。同年日本テレコム株式会社 (現ソフトバンク株式会社) 入社。移動体通信システムの電波伝搬に関する研究に従事。ITU-R SG3 にて移動体通信の電波伝搬の標準化にも携わる。2009 早大大学院スポーツ科学研究科博士前期課程了。2023 名大大学院工学研究科博士後期課程了。現在, ソフトバンク株式会社基盤技術研究室新技術研究開発部部長。平 17 年度本会学術奨励賞, 第 33 回電波産業会電波功績賞各受賞。博士 (工学)。



太田喜元 (正員)

2000 室蘭工大・工・電気電子卒。2002 同大学院修士課程了。同年日本テレコム株式会社 (現ソフトバンク株式会社) 入社。以来, 移動通信システム, 移動伝搬, 無線中継システム, 干渉キャンセラ, HAPS 無線通信システム, 無線電力伝送の研究開発に従事。現在, ソフトバンク株式会社基盤技術研究室システムデザイン研究開発部部長。2023 東工大 (現東京科学大) 特任准教授兼任。平 20 年度本会学術奨励賞受賞。



星野兼次 (正員)

2007 芝浦工大大学院工学研究科修士課程了。同年ソフトバンクテレコム株式会社 (現ソフトバンク株式会社) 入社。以来, 4G, 5G システムにおける無線伝送技術の研究開発, 及び HAPS 移動通信システムにおける通信ペイロードの研究開発に従事。2021 東工大大学院博士課程了。2023 ソフトバンク株式会社基盤技術研究室無線技術研究開発部部長, 現在に至る。平 23 年度本会学術奨励賞受賞。博士 (工学)。



ドローンの仕組みと飛行のメカニズム

Drone Mechanisms and Flight

三輪昌史 Masafumi Miwa[†]

Summary

ドローンとは無人機の総称であるが、現在は「マルチコプタ」を示すことがほとんどである。マルチコプタは多発型ヘリコプタのことであり、正多角形の頂点にプロペラロータを持つ形状をしている。各プロペラロータの回転数を制御することで、上下方向の移動、機体姿勢の変化とそれに伴う水平移動が可能である。そのため、ほかの航空機よりも制御が容易、製作費が比較的安いという特徴がある。マルチコプタ型ドローンは、搭載されたカメラから転送された映像を見ながら操縦したり、上空からの映像を楽しむといったホビー用途のほかに、撮影した画像やドローン搭載の機器を用いた計測、物資の運搬といった実務運用にもその用途が広がっている。しかし、用途や実飛行の増加に伴い、事故事例の報告も増加傾向にある。本稿ではドローンとしてマルチコプタを題材とし、ドローンに関する研究に関心がある方、新しくドローン関連研究の開始を検討している方に向けて、ドローンシステムの構成、飛行のメカニズム、ドローンの飛行に関する制御方法、ドローン運用に関する法規、ドローンの認定制度、ドローンの運用例について解説した。

Key Words

ドローン, UAV, UGV, UMV, フライトコントローラ

1 はじめに

現在、ドローンとして広く認知されているのはマルチコプタ（多発型ヘリコプタ）である。このドローンは駆動部が全て電動モータであり、機体構造も簡単なので制御もやりやすい。そのためコストも抑えることができて広まっている。マルチコプタ以外にも、シングルロータヘリコプタや固定翼の飛行機タイプなど、いろいろな飛行ドローン UAV (Unmanned Aerial Vehicle) がある。また、地上を走行する UGV (Unmanned Ground Vehicle) や水上を走行する UMV (Unmanned Marine Vehicle)、有線式水中機もドローンと呼ばれることがある。いずれの形式においても、自動的に姿勢制御や位置制御、自動操縦ができることが特徴となっている。本稿ではこれらドローンに共通する仕組みを、マルチコプタ型ドローンを例として解説する。また筆者が行った実験についても紹介する。

2 各種ドローン

以下に各種ドローンの例を示す。図1は4発型のマルチコプタ型ドローンである⁽¹⁾。マルチコプ

タは4, 6, 8と偶数の頂点を持つ正多角形をしており、各頂点にモータに取り付けられたロータを配置している。ロータは「時計回り」と「反時計回り」のものが同数取り付けられている。これは反動トルクの相殺・制御のためである。例外的に3発機であるトライコプタもあるが、この場合はサーボモータでロータを傾斜させることで、シングルロータヘリコプタのように反動トルクを相殺・制御する。

図2はシングルロータ型ドローンの例である⁽²⁾。いわゆる「ラジコンヘリコプタ」に制御を行うフライトコントローラを取り付けたものになる。図3は飛行機型（固定翼機型）ドローンの例である⁽³⁾。これもラジコン飛行機にフライトコントローラを取り付けたものである。図4はエアボート型の水上



図1 4発型ロータマルチコプタ RTK-GPS, LTE 通信装置を搭載した運搬用大形機。

[†] 徳島大学, 徳島県
Tokushima University, Tokushima-ken, 770-8506 Japan

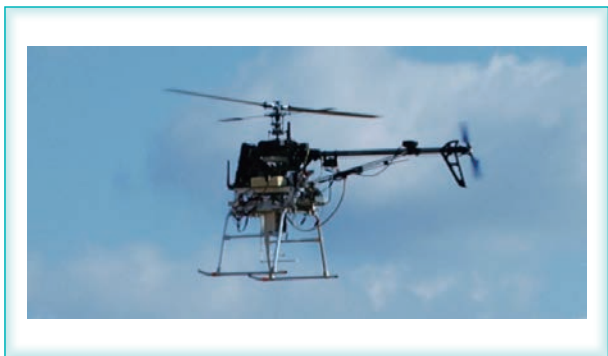


図2 シングルロータ型ヘリコプタ



図3 飛行機型ドローン 機上に地上との通信機とRTK-GPSのアンテナを搭載している。

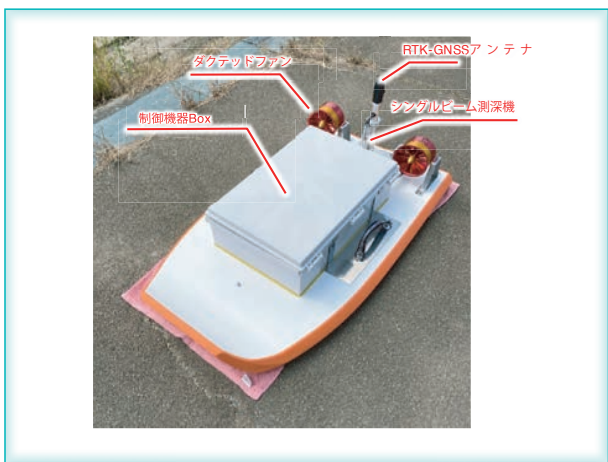


図4 エアボート型ドローン

ドローンである⁽⁴⁾。水中の浮遊物によるスラストの損傷を避けるために、船上にダクトファンを設置している。このように、いろいろなタイプのドローンがある。

3 ドローンシステム概要

3.1 ドローンの構成例

ここではマルチコプタを例としてドローンシステムの概要を説明する。図5はマルチコプタ型ドローンシステムの構成例を示す。まず、ドローン进行操作する装置としてラジコン送信機とGCS (Ground Control Station, 地上管制局) がある。ラジコン送信機とGCSは一体化したものもある。GCSはノートパソコンやタブレット、スマートフォン上で動作するアプリケーションソフトとして実装されることが多い。ラジコン送信機とドローンは専用電波や2.4 GHz帯で通信が行われる。GCSとドローンも専用電波や2.4 GHz帯, LTEを使った通信が行われる。これらの通信により自動操縦を含めた操作が行われる。

図6にマルチコプタ型ドローン内部の構成例を示す。ラジコン送信機からの操作はラジコン受信機からSBUS信号(双葉電子工業が開発したラジコン装置用のシリアル通信規格)としてFC (Flight Controller 4, フライトコントローラ) に伝えられる。FCはマイコンと3軸ジャイロセンサ, 3軸加速度センサ, 3軸コンパスなどから構成されており, 機体姿勢の検出とそれを用いた姿勢制御を行う。更に気圧センサ等を用いた高度制御やGPSを用いた位置制御を行う。また, フライトコントローラはXBeeといった無線通信機やLTE通信機を通じてGCSと通信する。フライトコントローラにはESC (Electric Speed Controller, モータドライバの別名) を介してモータが接続されており, モータには



図5 ドローンシステムの構成例

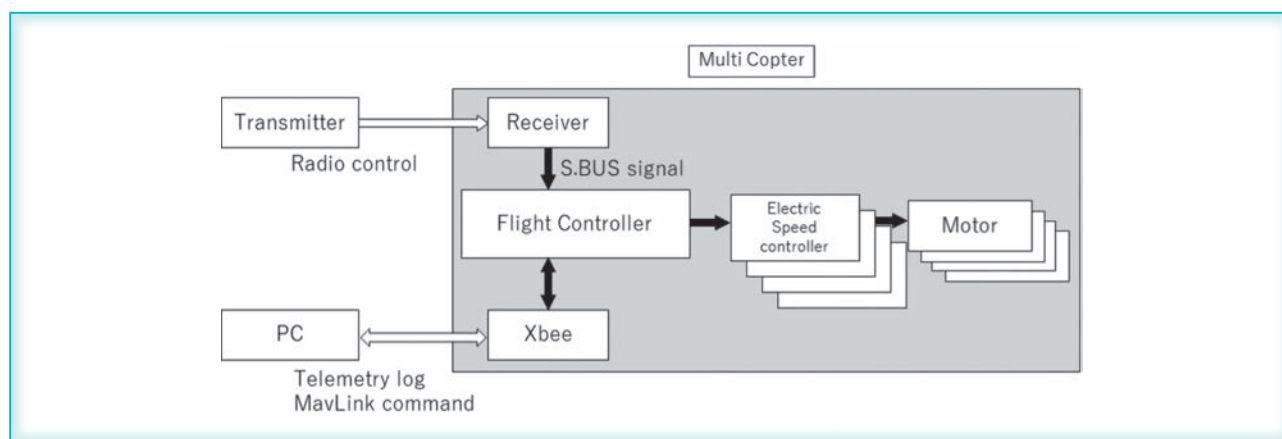


図6 マルチコプタの内部構成例



図7 ドローンの構成要素例

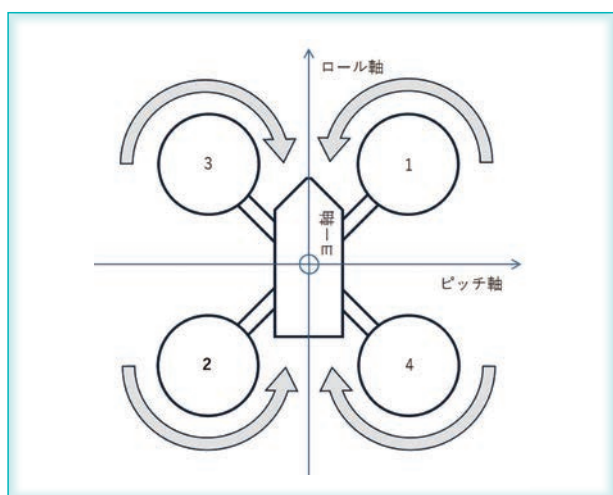


図8 クアッドコプタ（4発ロータ）のプロペラ回転方向

プロペラが取り付けられている。フライトコントローラはラジコン送信機や GCS からの操作と、姿勢や位置の情報から各モータの回転速度を決定し、PWM 信号として ESC に送信してモータを回転させ、推力を発揮して飛行する。図7に構成要素の例

を示す。

3.2 マルチコプタの飛行方法

3.2.1 マルチコプタの力学特性

図8に4発ロータマルチコプタのモデルを示す。機体の前後方向の軸をロール軸、機体の左右方向の軸を「ピッチ軸」、機体の上下方向の軸を「ヨー軸」と呼ぶ。

図中のプロペラは、上から見て1, 2がCCW（反時計方向）、3, 4がCW（時計方向）に回転する。プロペラの推力は、回転速度の二乗に比例する。図9(a)のように四つのプロペラの回転を同調させ、回転数を上げることで機体が上昇、回転数を下げると機体が降下する。四つのプロペラの推力の合力 F がドローンの重量と釣り合うと、ドローンは空中でホバリングする。

次に、姿勢制御について述べる。図9(b)のように機体の右側のプロペラの回転数を上げ、左側の回転数を下げる。このとき、推力の合力 F の大きさ

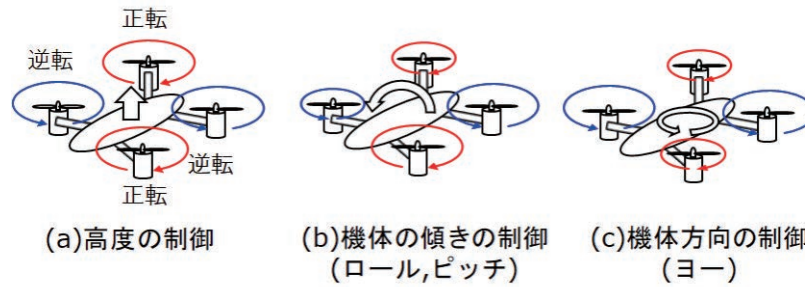


図9 マルチコプタの姿勢制御

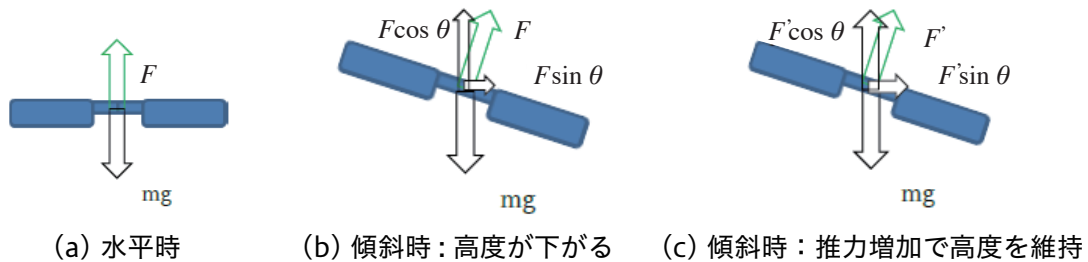


図10 機体の傾斜と水平移動

が変わらないように、例えば、右側のプロペラ回転数を上げて推力を Δf 上げ、左側のプロペラ回転数を下げて推力を Δf 下げる。そうすると、この推力の差分で機体はロール軸周りに左に回転する。逆に差分を付けると、ロール軸周りに右に回転する。同様に前後のプロペラの回転数に差動を付けることで、ピッチ軸周りの回転ができる。

次に、図9(c)に示すように、対角のプロペラをペアとして回転速度に差分を与える。このとき、推力の合力 F が変わらないように差動を付ける。右前と左後ろのプロペラの回転数を上げ、左前と右後ろのプロペラの回転数を下げる。前者のペアは回転方向がCCWなので、機体に働く反動トルクはCWである。後者は回転方向がCWなので、反動トルクはCCWである。回転数が一致しているときは、反動トルクは相殺しており、機体のヨー軸周りの回転は停止している。そして事例のように回転数に差動を与えると、CWの反動トルクが優位になり、機体はCWに回転する。反対にCCWの回転数を下げ、CWの回転数を上げると、機体はCCWに回転する。

次に、機体が θ だけロール軸周りに回転したところで左右の推力を同じにする。すると、機体は θ の傾斜を維持する。図10では、機体が θ 傾いているので、推力の合力 F も θ だけ傾く。その結果、

機体の左方向に $F \sin \theta$ の水平方向成分が発生し、それにより機体は左方向に移動し始め、最終的に空気抵抗と釣り合って一定速度で移動する。つまり、機体の傾きに移動速度が比例することになる。このとき、垂直方向成分は $F \cos \theta$ となる。 $F \cos \theta$ は機体重量より小さいため、機体は徐々に降下する。そこで、 $F \cos \theta$ が機体重量と等しくなるように、回転数を上げて F が大きくなるようにすることで、高度を保ちながら水平移動ができる。同様に、左側の推力を上げれば右方向に移動する。また、前後の推力に差動を与えれば前後方向に移動できる。このように、任意の方向に機体を傾斜させることで、その方向に機体は移動する。

以上、上下方向、ロール軸・ピッチ軸周りの回転、ヨー軸周りの回転、水平移動の方法について説明した。いずれも、プロペラの回転数により実現されている機動であり、モータ制御で実現できるのが、マルチコプタの特徴である。

3.2.2 マルチコプタの姿勢制御と高度制御

マルチコプタの姿勢制御について、PID制御を用いるブロック線図の例を図11に示す。ロール軸、ピッチ軸、ヨー軸の回転運動はそれぞれ独立だと考え、軸ごとに同様の制御系が組まれている。いずれの軸に関する回転も単純な回転角度に関する2階

微分の方程式で近似できる。

$$I\ddot{\theta} = T \quad (1)$$

ここで、 I は各軸周りの慣性モーメント、 θ は各軸周りの回転角度、 T は機体に作用するトルクであり、各プロペラ回転数の差動で生じるものである。

姿勢制御系は、現在の姿勢と目標姿勢との誤差を基に、まずはP制御で目標角速度を決定し、次に目標角速度と現在の角速度との誤差からPID制御にて出力を決定する。その出力からミキサと呼ばれるプログラムが各モータに配分する量を決定し、それにより機体（図中ではBody）の姿勢を制御している。ヨー軸に関しては、目標値が角度の場合と角速度の場合の二種類が用意されている。

以上の姿勢制御系により、マルチコプタの姿勢が安定化され、また目標値を与えることで操縦が可能となる。このとき機体の姿勢は安定するが、高度に

ついては手動操縦が必要である。

次に、同様の制御系を高度について行うことで、高度を維持することが可能になる。高度に関する運動も単純な2階微分の方程式で近似できる。

$$M\ddot{z} = F - Mg \quad (2)$$

ここで、 M は機体の質量、 z は高度、 F は機体に作用する推力、 Mg は機体に作用する重力、 g は重力加速度である。

図12に高度制御系のブロック線図の例を示す。この高度制御を姿勢制御と組み合わせることで、操縦が非常に楽になる。自転車に例えると、補助輪が付いた状態である。

3.2.3 マルチコプタの位置制御と自動操縦

姿勢制御と高度制御を同時に行うことで、マルチコプタの姿勢と高度は安定する。しかし、風などの

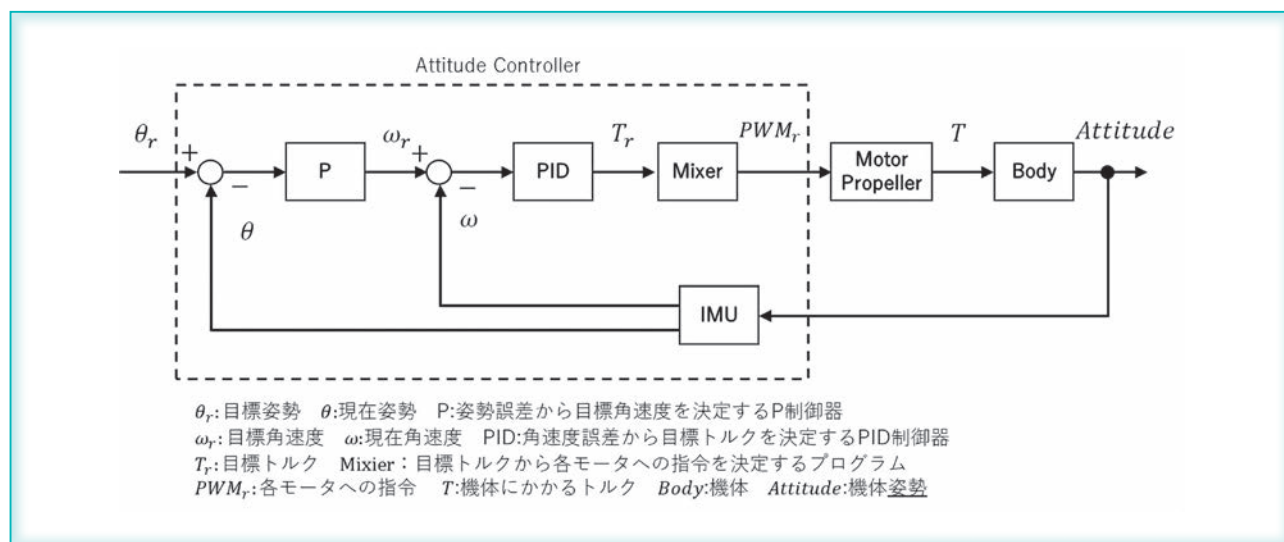


図 11 姿勢に関する制御系のブロック線図

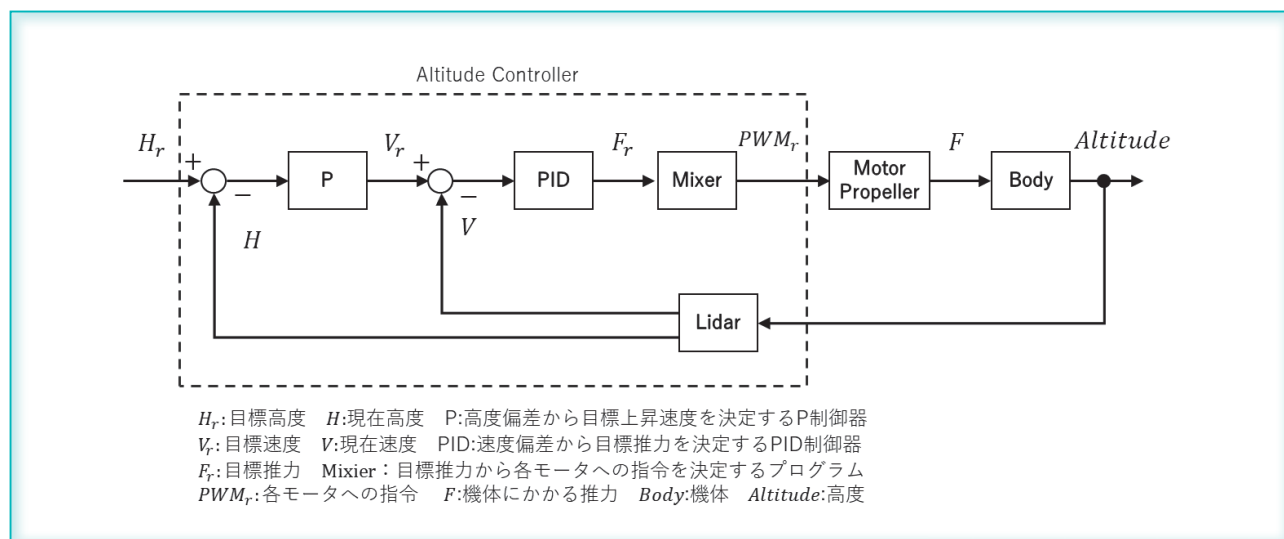


図 12 高度に関する制御系のブロック線図

外乱の影響で機体は流されるため、位置に関する補正が必要である。そこで、GPSを用いた位置制御系が構成されている。各軸の操作指令がニュートラルになったときの位置・高度をGPSや高度センサで測りし原点とする。次に、外乱による移動で発生した誤差をキャンセルするために、誤差に比例した目標速度をP制御で決定する。目標速度と現在速度（これもGPSで計測する）の誤差速度から目標加速度を決定し、これを前後方向（つまりピッチ軸・ロール軸周り）の目標姿勢角度として姿勢制御系に与えることで、位置を保持する位置制御が実施できる。図13に位置制御系のブロック線図例を示す。

次に、通過地点（WP: WayPoint）をリストとして、位置制御系に目標地点を渡していくことで、自

動操縦が可能となる。MavLink*コマンドでは、WPの緯度・経度・高度だけでなく、通過地点で停止、待機する時間なども設定することができる。WayPointの例を図14に示す。

以上述べたように、姿勢制御及び高度制御を基本とし、それに対して目標位置との誤差から目標角度を算出して与えることで、位置制御や自動操縦が実現できる。

* MavLink: Micro Air Vehicle Link. 小形無人機との通信プロトコル。主に地上管制局（GCS）と無人機間の通信、及び無人機のサブシステム間の通信に使用される。機体の向き、GPS位置情報、速度などの状態の通知やコマンドの送信に使用する。

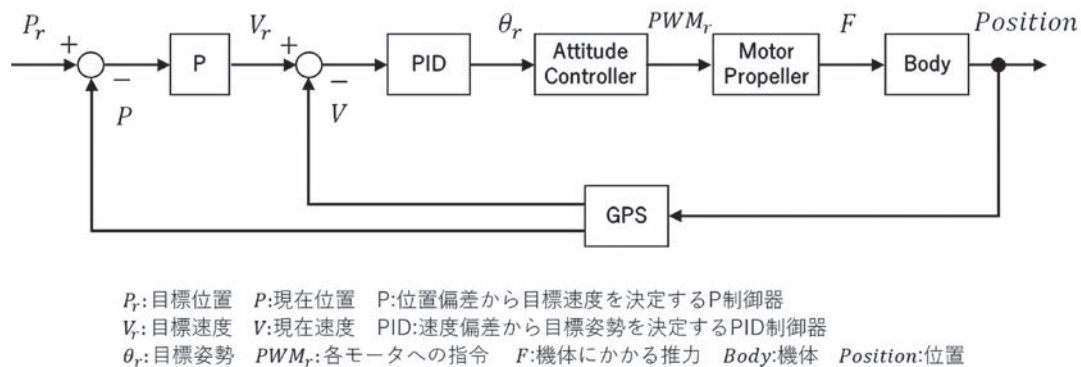


図13 位置制御系のブロック線図



図14 WayPointデータの例

徳島県立三好病院屋上ヘリポート〜ウマバコテージ運動場間の飛行コース。緯度・経度・高度で指定している。図中の緑のマークは、設定したWayPoint（通過点）、黄色の実線はWayPoint間を結んだ飛行コース、黄色の点線は離陸地点と着陸地点を結ぶ直線を示している。

3.3 フライトコントローラ

マルチコプタ、シングルロータヘリコプタ、固定翼機、VTOL機、車、船、潜水艦等において、ドローン化したものにはフライトコントローラが使用されている。フライトコントローラには、企業で製造・販売されているクローズドソースのものと、オープンソースで提供されているものがある。クローズドソースの例としては、DJI社のドローンがある。オープンソースの例としては、ArduPilot⁽⁵⁾やPX4AutoPilot⁽⁶⁾、BetaFlight⁽⁷⁾がある。オープンソースの場合、機体の製作方法から情報が公開されているので、参考にして頂きたい。

4 ドローン関係法規

飛行するドローンに関しては、電波法、航空法、地方自治体の条例といった法規が関連する。これらについて簡単に解説する。

飛行するドローンは、その操縦やモニタリングに電波機器が使用される。ドローンに使用できる電波としては、まず操縦用に2.4 GHz帯（特定小電力機器）や40, 72, 73, 920 MHz帯（特定小電力機器の飛行用ラジコン電波、73 MHzは産業用）が

用意されている。ドローンに搭載されたカメラの映像の伝送には、2.4 GHz帯（特定小電力機器）や5.8 MHz帯（専用波）が用意されている。データ通信には、920 MHz（特定小電力機器）や2.4 GHz（特定小電力機器）が用意されている（表1）。特定小電力機器を使用する場合は、使用者には免許が不要である。一方、5.8 MHz帯を使用するには、使用者の免許（例えば、陸上特殊無線技士3級以上）と使用機器についての携帯局無線局免許開設が必要である。また、開設にはJUTM（日本無人機運行管理コンソーシアム）に加入することが必要となっている。このように、使用する電波には制約があるので、気を付ける必要がある。違反した場合、電波法の規定に基づき「1年以下の懲役又は100万円以下の罰金」の罪に問われる。更に、重要な無線局に妨害を与えると、「5年以下の懲役又は250万円以下の罰金」に処せられることになる。

次に航空法について説明する。航空法では重量が100 g以上の機体を飛行させるためには、事前の機体登録が必要である。また、登録した機体には識別のためにRFIDを搭載することが定められている。（一部のメーカ品は内蔵している場合がある。）100 g未満の機体については機体登録が必要ないが、小

表1 ドローンに使用できる電波⁽⁸⁾

分類	無線局免許	周波数帯	最大送信出力	主な利用形態	備考	無線従事者資格
免許または登録を要しない無線局	不要	73MHz帯等	※1	操縦用	ラジコン用微弱無線局	不要
	不要※2	920MHz帯	20mW	操縦用	920MHz帯テレメータ用、テレコントロール用特定小電力無線局	
		2.4GHz帯	10mW/MHz ※3	操縦用、画像伝送用、データ伝送用	2.4GHz帯小電力データ通信システム	
携帯局	要※4	169MHz帯	10mW ※5	操縦用、画像伝送用、データ伝送用	無人移動体画像伝送システム(平成28年8月に制度整備)	第三級陸上特殊無線技士以上の資格
		2.4GHz帯	1W	操縦用、画像伝送用、データ伝送用		
		5.7GHz帯	1W	操縦用、画像伝送用、データ伝送用		
その他	不要※6	800MHz帯等	※7	操縦用、画像伝送用、データ伝送用	携帯電話（4G, 5G）	不要
※1： 500mの距離において、電界強度が200 μ V/m以下のもの。	※2： 技術基準適合証明等（技術基準適合証明及び工事設計認証）を受けた適合表示無線設備であることが必要。	※3： 変調方式や占有周波数帯幅によって出力の上限は異なる。	※4： 運用に際しては、運用調整を行うこと。	※5： 地上から電波発射を行う無線局の場合は最大1W。	※6： 携帯電話事業者の包括免許により運用。	※7： 基地局によって制御される。



図 15 無人航空機の飛行ルール⁽⁹⁾ <https://www.mlit.go.jp/common/001303822.pdf> から抜粋

型無人機等飛行禁止法により空港周辺など重要施設付近での飛行は禁止されている。

さて、登録された機体は、飛行条件に応じて許可申請をする必要がある。飛行の方法・場所(図15)により、許可が必要になる特定飛行が設定されている。例としては、夜間飛行や人口密集地での飛行がある。

特定飛行の条件は参考文献を参照されたい。また、飛行のカテゴリーも定義されている。カテゴリーI以外は、許可申請が必要になる⁽¹⁰⁾。

また許可を申請して特定飛行を行う場合、飛行前に飛行計画の通報と飛行日誌の作成が求められている⁽¹¹⁾。

機体登録・許可申請・飛行計画登録については、ドローン情報基盤システム2.0⁽¹²⁾から行うことになっている。機体を強固なロープ(長さ30m未満)で係留した場合、飛行範囲内への第三者の立入り管理等の措置を講じて飛行させる場合は、一部の飛行許可・承認申請が不要となる。

許可申請制度以外に、試験飛行登録制度がある。これは試作機などの実験飛行の実施で使用する制度である。筆者の場合、研究で使用する機体はほとんどハンドメイド機かカスタム機であり、ハード、ソ

フト面での改良を常に行っており、市販機向けの機体登録制度では対応できない。そこで試験飛行登録制度を使用している。この制度で機体を登録するが、このときに飛行場所を限定する。また、実験での飛行が特定飛行に相当する場合は、試験飛行登録番号を用いて許可申請を行う。これにより、試験飛行登録機体を用いた特定飛行が可能となる。また、試験飛行は飛行場所が特定されており、RFIDの登録は不要である。

さて、ここまではドローンに関する法規・制度を説明した。次は操縦者の資格制度について述べる。

基本的にドローンの操縦に資格は不要である。しかし、特定飛行を行う場合は許可申請を行うための条件として、10時間以上の飛行経験が必要である。

また、技能認定制度⁽¹³⁾が用意されており、型式認証制度及び機体認証制度⁽¹⁴⁾と合わせることで、特定飛行においても事前の許可申請が不要になる条件がある。しかし、従来の許可申請や試験飛行登録でも特定飛行は実施可能であり、技能認定が必須であるわけではない。ただし、技能認定を受ける過程で個々の操縦技量の向上や安全管理方法・法規に関する知識の習得ができるので、これからドローンの運用を考えている方には、よい訓練になると思う。



図 16 IMU を搭載した精密飛行ドローン「サルタヒコ」

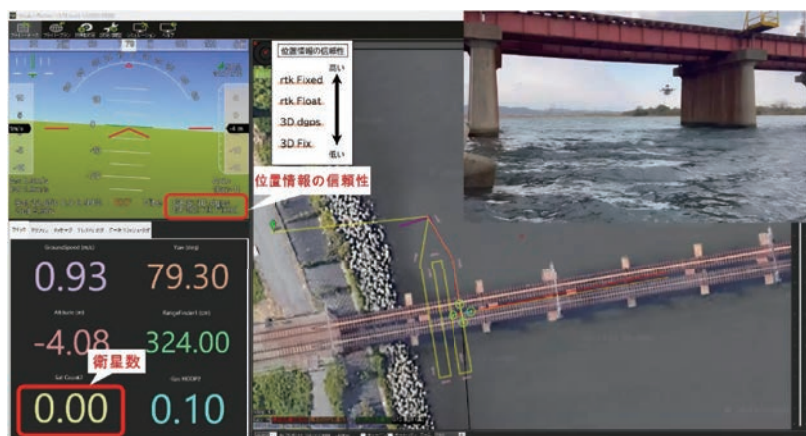


図 17 鉄橋直下を飛行中の「サルタヒコ」

筆者の場合、ラジコンも含めると 25 年以上無人機を扱っているため、今のところ技能認定の必要は余り感じていないが、資格の一つとして取っておいてもいいかな、という評価である。

5 運用例

ここでは筆者が関連したドローン関連の実験結果について説明する。

図 16 はインフラ点検用に試作した写真撮影用ドローンの「サルタヒコ」である⁽¹⁵⁾。この機体は RTK-GPS を搭載することで位置制御の精度を数 cm 以下まで向上させた機体である。更に、高精度 IMU を搭載している。高精度 IMU は常に RTK-GPS での計測結果を参照して自己位置推定の結果を修正している。この機体が橋りょうなどの下を飛行し、RTK-GPS が使用不可能になったときは、高精度 IMU が出力する推定位置で自動航行を継続する。この仕組みにより、約 1 分程度 RTK-GPS での計測が不能になったときでも、その推定誤差は 2

m 以内であり、安全に飛行を継続することができた。図 17 に鉄橋直下を飛行中の様子を示す。

同様に RTK-GPS を搭載することで、比較的長距離の自動航行による運搬実験も実施できた。実験では図 1 のドローンを使用した。この実験では、徳島県立三好病院の屋上ヘリポートから馬場集落の運動場までの約 4 km、高低差約 300 m の往復を自動航行で行った。このとき、RTK-GPS の計測結果を高度にも使用することで、安全な自動航行が実現できた。図 18 に飛行中の機体搭載カメラの映像と GCS でのモニタリングの様子を示す。飛行中の機体の維持・状態と機体搭載カメラの映像は LTE 回線を通じて GCS 上でモニタリングした。この実験では、離陸地点・中継地点・着陸地点の 3 か所に GCS を設置し、同時にモニタリングを行った。

6 おわりに

ドローンはフライトコントローラが姿勢制御、高度制御、位置制御で飛行をアシストするため、従来



図 18 運搬実験の様子

のラジコンに比べて容易に操作できる。今後、ドローンの用途は増えていき、身近で飛行を見掛けることも増えてくると思う。しかし、その容易さに慣れ、安全管理を忘れた操作・飛行での事故が続いている。

現在のドローンの発展は、2006 年頃に DIY で開発された 3 発機トライコプタが基になっている。その後 2015 年頃にはカメラ付きの 4 発機クアッドコプタが製品として発売されて一気に広まった。それから 10 年ほどたち、ホビーから本格的な産業まで用途が広まってきた。これらドローンの本質は空中での三次元機動であり、それをどう使うかが、今後の発展の方向になるであろう。しかし、空気よりも重いものを飛ばしているため、本質的にドローンには墜落の危険が伴う。安全に飛行させていても、バッテリーの消耗により飛行は終了する。そのとき機体が空中にあれば墜落につながる。この本質を忘れず、“ドローンは落ちるもの”“落ちる前に降ろす”“落ちて問題ない飛ばし方をする”といった安全に配慮した運用が必要である。

■ 文献

- (1) 三輪昌史, 白丸雅貴, 西川啓一, 荒木寿徳, “ドローンを用いた空中作業における精密飛行の重要性,” 第 32 回インテリジェント・システム・シンポジウム, 18, Sept. 2024.
- (2) M. Sonobe, M. Miwa, and J. Hino, “Effectiveness of delayed feedback control applied to a small-size helicopter with a suspended load system,” J. Robotics and Mechatronics, vol. 28, no. 3, pp. 351-360, June 2016.
- (3) 出原英幸, 三輪昌史, “力学的エネルギーに基づいた固定翼 UAV の最適経路飛行の検討,” 第 24 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 3F4-02, Dec. 2023.
- (4) M. Miwa, M. Shiromaru, K. Nishikawa, and T. Yamaguchi, “Automation of sediment surveying operations by unmanned boats equipped with RTK-GNSS,” SICE Festival 2024 with Annual Conf., ThAT7.1, 2024.
- (5) <https://ardupilot.org/ardupilot/index.html>
- (6) <https://px4.io/>
- (7) <https://betaflight.com/>
- (8) 総務省, “ドローン等に用いられる無線設備について .” <https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/others/drone/>
- (9) 国土交通省, “無人航空機（ドローン・ラジコン機等）の飛行ルール.” https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.htm
- (10) 国土交通省, “無人航空機の飛行許可・承認手続.” https://www.mlit.go.jp/koku/koku_fr10_000042.html
- (11) 国土交通省, “飛行計画の通報・飛行日誌の作成.” <https://www.mlit.go.jp/koku/operation.html>
- (12) 国土交通省, “ドローン情報基盤システム 2.0.” <https://www.ossportal.dips.mlit.go.jp/portal/top/>
- (13) 国土交通省, “無人航空機操縦者技能証明等.” <https://www.mlit.go.jp/koku/license.html>
- (14) 国土交通省, “機体認証等.” <https://www.mlit.go.jp/koku/certification.html>
- (15) 白丸雅貴, 三輪昌史, 荒木寿徳, 西川啓一, “写真測量のための IMU+RTK-GNSS を使用した UAV の精密自動飛行,” 第 24 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 3F4-06, Dec. 2023.

(2024 年 10 月 31 日受付, 2025 年 1 月 14 日再受付)

三輪昌史

徳島大大学院社会産業理工学研究部准教授。
1996 和歌山大・システム工・助手。
2007 徳島大大学院ソシオテクノサイエンス研究部講師。2016 同大学院理工学研究部准教授。2017 から現職。
1999 頃から無人航空機に関する研究に従事。



無線マルチホップネットワークによる UAV 航行経路制御

UAV Navigation Route Control Using Wireless Multi-hop Network

上田清志 Kiyoshi Ueda[†] 三好 匠 Takumi Miyoshi^{††}

山崎 託 Taku Yamazaki^{††} 山本 嶺 Ryo Yamamoto^{†††}

Summary

無人航空機 (UAV: Unmanned aerial vehicle) は、配送サービスなど様々な場面で活用が期待されている。それら様々なサービスが混在し UAV の密度が高い環境となった場合、航空機と同様に航空保安無線施設を用いた UAV 管制システムが必要になる。これに対し、パケット交換網に着想を得た、各家屋に設置した無線デバイスによる無線マルチホップネットワークを用いた UAV 分散管理方式について解説する。本方式の核となる、モバイルアドホックネットワーク (MANET) プロトコルをベースに、住宅が密集した危険な地区の上空 (集中地区) を極力避け、安全で効率的な航行経路を構築するルーチングプロトコルを示す。サービスが普及し複数 UAV が同時に航行する場合に対応し、経路の重複による衝突の危険性をなくす、構築した経路で使用するリンクを、他 UAV の経路に利用できないようにロックする方式を示す。本方式は、経路が占有されることによるリンク不足を解消するために、リンクが階層化されている。更にサービスが普及し大量の UAV が同時に航行する場合に対応し、送信先までの経路候補を複数構築し、動的に次ホップを選択することで空域の混雑を緩和し、空域の混雑に応じて UAV の流入を制限することで利用者間の公平性を担保する方式を示す。

Key Words

UAV 航行経路制御, 無線マルチホップネットワーク, MANET, ルーチングプロトコル

1 はじめに

近年、配送サービスやセンシング、災害対応など様々な場面で、無人航空機 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) の利用が期待されている。UAV は地上の交通網における渋滞などの制約を受けることなく、空域を有効に利用できる。

現状は UAV の数も少ないので、許可された空域を各機体が GPS で現在位置の緯度・経度を把握しつつ、送信先位置への設定されたルートで航行している。Dissanayaka らは、UAV のナビゲーションをレビューし、ビデオのリアルタイム処理に基づく Visual Lidar Odometry And Mapping (VLOAM) を使用した UAV のナビゲーション制御システムを提案した⁽¹⁾。しかし、この方法には、消費電力とリアルタイムでの大量の演算処理能力という大きな問題がある。そこで、Chen らは、地図の計算プロセスを認知、ローカル、グローバルの三つのレイヤに分割することで、計算プロセスと消費電力を最適化

することを提案している⁽²⁾。Rakesh らは、6G ネットワーク技術を活用した UAV 交通管理システムについて、大規模な UAV 運用における課題と解決策を提示している。特に、通信インフラとネットワーク設計の役割が強調されている⁽³⁾。Abdeljawed らは、複数の UAV を使用した配送ルートの最適化について論じている。UAV の経済性と環境負荷利用効率に焦点を当てている⁽⁴⁾。Hao らは、3D 環境における UAV のルート最適化のための Hybrid Differential Evolution (HDE) アルゴリズムを提案している⁽⁵⁾。

Yang らは、制約条件下で経路効率と適応性を最適化するために、経由地を個別に展開させる UAV のための新しい経路計画法を提案した⁽⁶⁾。Huang らは、UAV の経路計画効率を高めるために、全体最適経路の競争メカニズムを備えた改良型粒子群最適化アルゴリズムを導入した⁽⁷⁾。Roberge らは、固定翼の UAV の高速経路計画用に GPU 加速型の遺伝的アルゴリズムを開発し、計算性能と経路計画の質を最適化した⁽⁸⁾。Chen らは、UAV の 3D 経路計画問題を効率的に解決するために改良型 Wolf Pack Search アルゴリズムを提案し、障害物を回避しエネルギー効率を向上させた⁽⁹⁾。Yu らは、屋外ロボットや UAV に適用可能な、レーザ測定距計データと拡張サポートベクトルマシン (SVM) を組み合わせた動的ローカル経路計画手法を導入した⁽¹⁰⁾。

[†] 日本大学, 郡山市
Nihon Univ., Koriyama-shi, 963-8642 Japan

^{††} 芝浦工業大学, さいたま市
Shibaura Inst. of Tech., Saitama-shi, 337-8570 Japan

^{†††} 電気通信大学, 調布市
The Univ. of Elec.-Commun., Chufu-shi, 182-8585 Japan

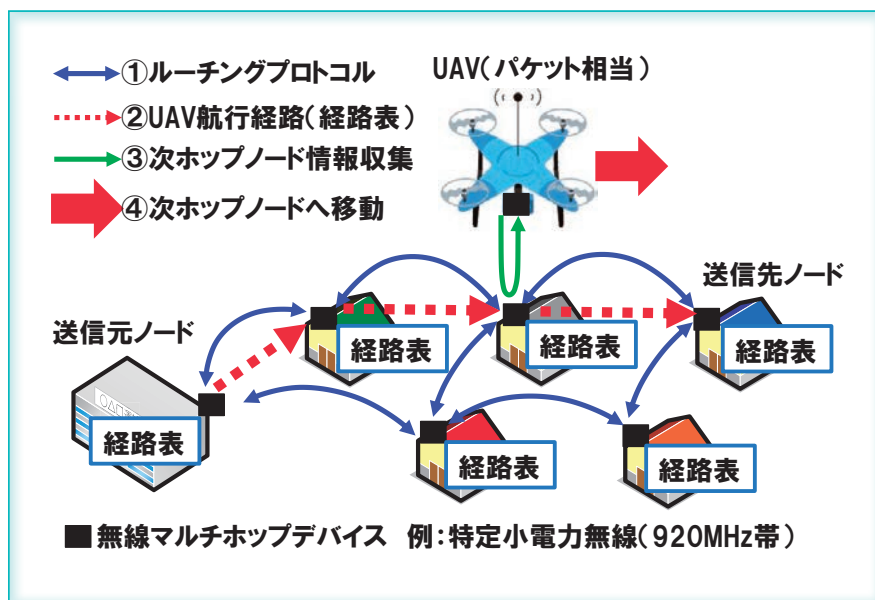


図1 無線マルチホップネットワークによる UAV 経路ナビゲーション

Wang らは、UAV の 3D 経路計画用に改良された バットアルゴリズムを示した。このアルゴリズムは、適応性と障害物回避に重点を置いている⁽¹¹⁾。Gautam らは、効率的な 3D UAV 経路計画のために遺伝的アルゴリズムとニューラルネットワークを組み合わせ、複雑な環境下での適応性を強化した⁽¹²⁾。Goncharenko らは、様々な制約条件下で効率的な UAV ルート構築を行うために、複数の手法を統合したハイブリッドアルゴリズムを提案した⁽¹³⁾。Ozlem らは、航空ナビゲーションシステムにおける飛行効率を改善するための到着ルート of 最適化手法を示している⁽¹⁴⁾。Schouwenaars らは、効率的な複数車両の経路計画のために混合整数計画法を適用し、経路最適化と衝突回避に取り組んでいる⁽¹⁵⁾。Evdokimenkov らは、協調ミッションのための分散制御システムに焦点を当て、UAV 群の飛行前計画アルゴリズムを調査した⁽¹⁶⁾。Ramesh らは、UAV ナビゲーションアルゴリズムの包括的なレビューを行い、傾向、課題を示した⁽¹⁷⁾。Sivakumar らは、農業、監視、災害管理における UAV の役割に焦点を当て、UAV の多様な民間利用について調査した⁽¹⁸⁾。Fu らは、経路の効率性と適応性に焦点を当て、UAV の経路計画に特化したヒューリスティックな進化アルゴリズムを提案した⁽¹⁹⁾。Danancier らは、脅威の多い環境における UAV の様々な経路計画アルゴリズムを比較し、その性能と堅ろう性を評価した⁽²⁰⁾。Hodge らは、UAV のナビゲーションに深層強化学習技術を適用し、センサデータを利用して知能意思決定を可能にした⁽²¹⁾。

将来的に UAV の本格的な利用が始まると、様々

なサービスが混在し高密度に UAV が飛行する環境が想定される。そのような環境では、航空機の通常の航空路のように航空保安無線施設を結んだ経路を航行する、各 UAV を管制するためのシステムが必要になる。これに対し、多数の UAV が飛行する空域を管制するシステム⁽²²⁾が提案されているが、事前にシステムへの参加を登録した事業者のみの利用を前提としており、個人や UAV の新規利用者などによるシステムへの自由かつ柔軟な参加は難しいと考えられる。

筆者らは、パケット交換網のバーチャルサーキット方式とデータグラム方式から着想を得た、UAV の分散管理システムを確立した⁽²³⁾。本システムでは、図1に示すように、各家屋に設置した無線デバイスで構成される無線マルチホップネットワークを用いて、各 UAV を自律分散的に制御する。その際、UAV をネットワークにおけるパケット、地上の無線デバイスをルータ、無線デバイス間の接続関係をリンクとして扱うことで、パケット交換網における制御を UAV の飛行経路制御に応用している。

(1) モバイルアドホックネットワーク (MANET) をベースにした最適経路構築方式

全ての家が UAV 配送サービスを利用しており、宛先 (荷物などの宅配先) になる必要があることを想定している。したがって、住宅が密集した危険な地区 (集中地区) の家屋のノードも含む無線マルチホップネットワークを構築する。従来の MANET 技術では最短経路が構築されるため、この方式で経路を構築すると、UAV の航行の安全性が考慮され

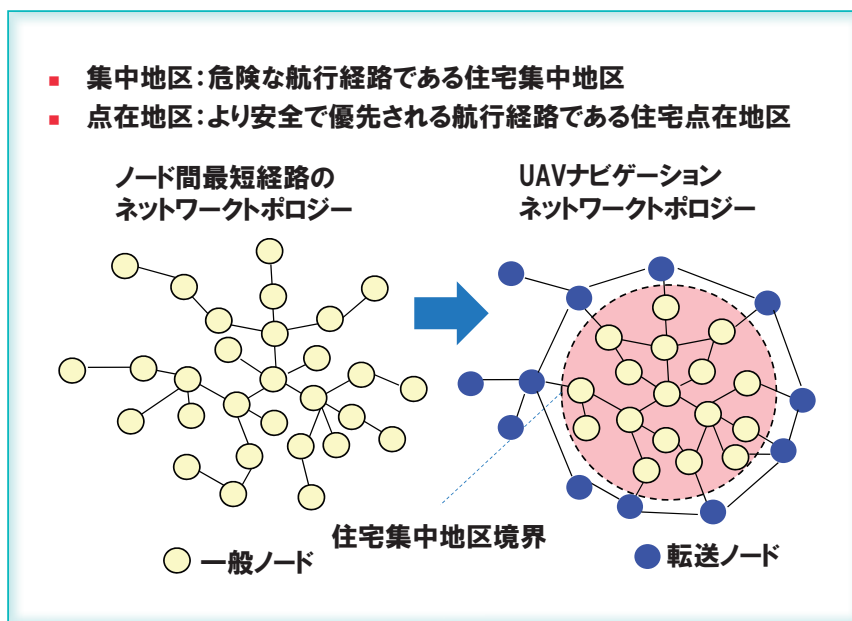


図2 UAV 経路となるネットワークトポロジー

なくなる。したがって、図2に示すように、住宅が密集した危険な集中地区の上空を極力避け、電池切れの危険を避ける移動時間が長過ぎない、安全で効率的な無線マルチホップネットワークを構築する必要がある⁽²³⁾。

(2) 高密度 UAV が安全に飛行する衝突回避経路構築方式

様々なサービスが混在し高密度に UAV が飛行する環境で、経路の重複（経路コンフリクト）による衝突の危険性をなくす必要がある。そのため、UAV が使用する経路のリンクを、ほかの UAV の経路に利用しない制御を行う。また、経路が占有されることによるリンク不足を解消するために、リンクを仮想階層化する。

(3) 空域の混雑に応じ利用者に公平な UAV の流入制限方式

空域の混雑と利用者の公平性を考慮し、送信先までの経路候補を複数構築し動的に次ホップを選択することで空域の混雑を緩和し、空域の混雑に応じて UAV の流入を制限し、利用者間の公平性を担保する。

2 MANET をベースにした最適経路構築方式

MANET のリアクティブ型プロトコルの代表例である Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing⁽²⁴⁾ とプロアクティブ型プロトコルの代表例である Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)⁽²⁵⁾ をベースに、集中地区を極力避けた安

全で効率的な経路を構築する。

2.1 AODV ベース最適 UAV 経路構築方式

送信元ノードが発信し、各ノードが受信した i 番目の RREQ メッセージを図3の式(1)で評価し、最適な RREQ メッセージを求める。集中地区上と点在地区上を移動する際の UAV の速度 v_1 , v_2 をあらかじめ設定し、ノード間ごとの移動時間を加算するため RREQ ヘッダに追加した集中距離と点在距離を割り移動時間を求める。 α は移動時間と安全性のバランスを調整する係数 ($0 \leq \alpha \leq 1$) であり、各ノード間の移動時間に重み付けすることにより、集中地区を避ける安全性の観点と移動時間が長過ぎない観点の両方を総合的に判断する。同時に得られた複数の RREQ を式(1)で評価した結果から、安全性を考慮した最適なルート選択方式が確立された⁽²⁶⁾, ⁽²⁷⁾。本経路構築の流れを図3に示す。

- (1) 送信元ノードは RREQ をブロードキャスト送信する。
- (2) RREQ を受け取ったノードは、自身が所属している地区と送ってきたノードの地区を確認する。
- (3) (2)で確認した地区により RREQ の集中距離、点在距離を加算する。また、事前に設定されている速度 v_1 , v_2 を用いて、移動時間を求める。
- (4) (3)の時間から、重み α を用いてコストを求める。
- (5) (4)で求めたコストが自ノードで保持するコストより小さければ最適 RREQ として記憶し転送する。
- (6) 送信先ノードは送られてきた複数の RREQ から

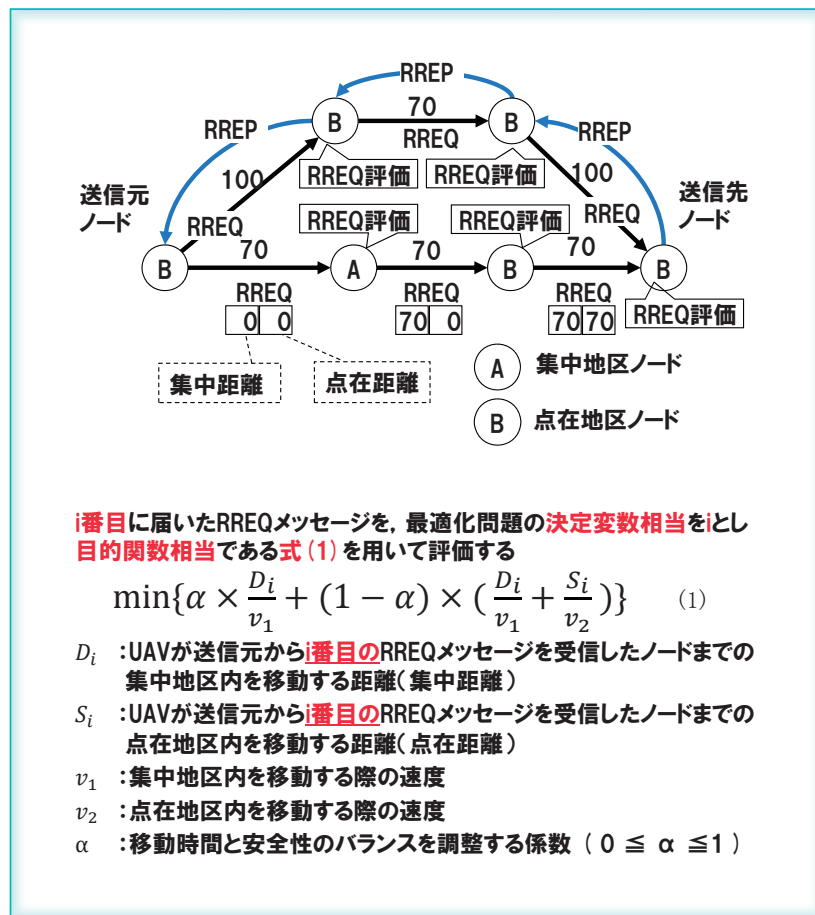


図3 AODV ベース最適 UAV 経路構築方式

最適ルートを選択する。

- (7) (6)をタイムアウトまで行い、タイムアウト時に送信先ノードが最適ルートを RREP として送信元ノードにユニキャスト送信する。
- (8) 送信元ノードに RREP が届き、最適ルートが構築される。

2.2 OLSR ベース最適 UAV 経路構築方式

OLSR では、各ノードで経路表が事前に作成される。そのため、OLSR は HELLO メッセージ・TC メッセージを定期的に送信し合い、ローカルリンク情報の更新を行う。

従来の OLSR ではホップ数を基に経路を選択するため、物理的に UAV が移動する距離を基にした最適経路にはならない。本方式では、最短経路探索アルゴリズムであるダイクストラ法⁽²⁸⁾を用いることで、UAV の移動距離を考慮した経路構築を行う。また、距離にリンク間の安全度合いの重みを付けることで、最短距離ではなく、集中地区を避け安全で、電池切れを避けられるよう移動距離が長過ぎない経路が確立できるような経路構築方式が確立されている⁽²⁹⁾。

あらかじめ、全てのノードに UAV が安全に移動できる点在地区か、航行が危険な集中地区かの情報を与えておく。各制御メッセージを受信したノードは、リンクの安全度によって重み付けされた距離をリンクコストとしたダイクストラ法により、各ノードの経路表を作成する。各ノードでの経路構築の処理の流れを図4に示す。

- (1) スタートノードの値(最小コスト候補)を0、他のノードの値を未確定(または ∞)に設定する。
- (2) 全ノードが確定ノードとなるまで以下を繰り返す。
 - ・未確定ノードのうち、最小の ID 値を持つノードを「確定ノード」とする。(確定フラグを立てる。)
 - ・確定ノードに接続するノードへのリンクコストを、集中地区へ向かうリンクは距離の3倍、点在地区へ向かうリンクは距離の0.6倍の重み付けを行う。
 - ・確定ノードに接続するノードに対して「確定ノードまでのコスト+接続リンクコスト」を計算し、そのノードのコスト値よりも小さければ

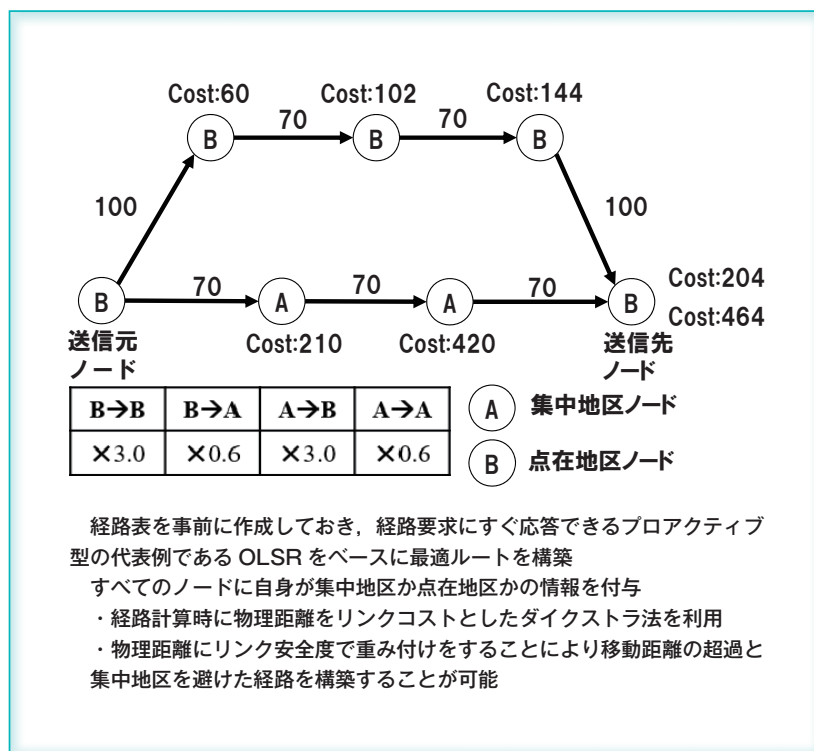


図4 OLSR ベース最適 UAV 経路構築方式

更新する。

- (3) 図4の場合、距離210でコスト464の集中地区ノードを通る経路よりも、距離340でコスト204の点在地区ノードを通る経路が選択される。

2.3 最適 UAV 経路構築方式による送信元から送信先への総移動距離と集中地区上の移動距離

送信元から送信先への経路の総距離と集中地区上の距離を、従来方式の AODV、OLSR と最適経路構築方式とで比較し、従来方式からの経路短縮率を確認した。

実環境に近いモデルで実験するために、NS-3⁽³⁰⁾ を利用してシミュレーションを実施した。図5に示すように、ノードの配置を3×3の9マスとして、中心に集中地区を配置する。中心以外は点在地区とした。各マスのノード数は集中地区が40個、点在地区は20個でランダムに配置し、ノードの通信可能距離を120mとし、1マスのサイズは縦333m×横333mとした。ノードの移動・追加・削除は行わない。実験を100回繰り返し、構築された経路の総距離と集中地区距離の平均を求めた。集中地区をまたぐように点在地区ノードから送信元・送信先を選択し、集中地区をう回する経路が構築できるかを検証した^{(26), (29)}。

総距離と集中距離の短縮率を図5に示す。最適経路構築方式は、AODV ベースも OLSR ベースも、

従来方式と比べて総距離が20%程度増加していることが確認できる。これに対して、集中地区距離の比較では約98%の改善が確認できた。集中地区ノードをう回して経路を構築した結果、総距離は伸びたものの大幅に危険領域の航行を削減できた。

3

UAV 衝突を回避する階層化 UAV 経路リンクロック方式

複数の UAV で経路構築を行うと、同じノード間のリンクが使用されることで UAV 同士が衝突する危険がある。そのため、図6に示すように、パケット交換網のバーチャルサーキット方式を応用し、同じリンクを使用しない、経路コンフリクトが発生しない経路を構築する方式が確立された。

また、同じリンクを使用しない経路構築方式では、試用できるリンクが減少し経路構築に失敗する確率が上がってしまう。そこで、航行高度の多階層ネットワーク構築方式が確立された。

3.1 AODV ベースの階層化 UAV 経路リンクロック方式

リアクティブ型の AODV ベースの経路構築手順を以下に示す。①, ②, ③, ④の手順を図7に、⑤, ⑥, ⑦の手順を図8に示す。各リンクの上空に UAV が同時に存在できる許容数(以下、階層高

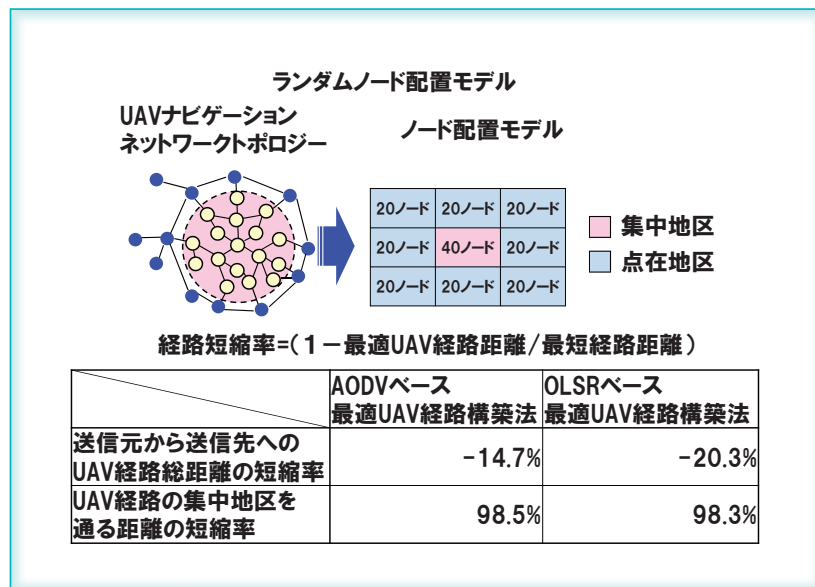


図5 最適 UAV 経路構築法による送信元から送信先への総距離と集中地区上の距離

度数) の情報を追加する。このリンクの両端ノードがリンク空塞表として管理する⁽²⁶⁾。

- (1) 送信元ノードは RREQ をブロードキャスト送信する。RREQ 送信時には高度を指定しない (図 7 ②)。
- (2) RREQ を受け取った中継ノードは経路表の作成、更新を行う。同時に空塞表を確認し、使用できる階層があるか確認する。式 (1) の評価式で最適な RREQ であれば送信する (図 7 ③, ④)。
- (3) 2. の経路構築の手順で送信先ノードに届くまで (2) を繰り返す (図 7 ⑤, ⑥)。
- (4) 2. の経路構築の手順で送信先ノードが最適な経路 RREQ を選択する (図 7 ⑦)。
- (5) 送信先ノードが RREP を送信元ノードにユニ

キャスト送信する (図 8 ②)。

- (6) 中継ノードは RREP を受信した際、空き階層を確認して使用階層を決め、ノード自身の経路表と空塞表に記入しその階層をロックする (図 8 ③)。
- (7) 経路表に従い RREP を転送する。これを送信元ノードが受信するまで行う (図 8 ④, ⑤, ⑥, ⑦)。

3.2 OLSR ベースの階層化 UAV 経路リンクロック方式

プロアクティブ型の OLSR をベースにしたプロトコルに、リンクをロックする Route Keep (RK) メッセージを追加し、多階層の仮想リンクを各ノード

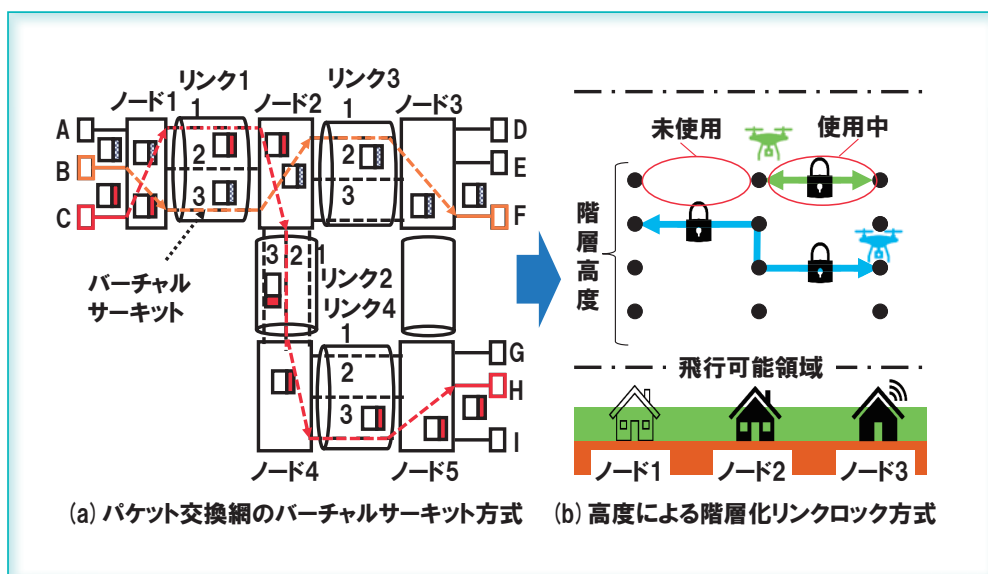


図6 パケット交換網のバーチャルサーキット方式を応用した階層化 UAV 経路リンクロック方式

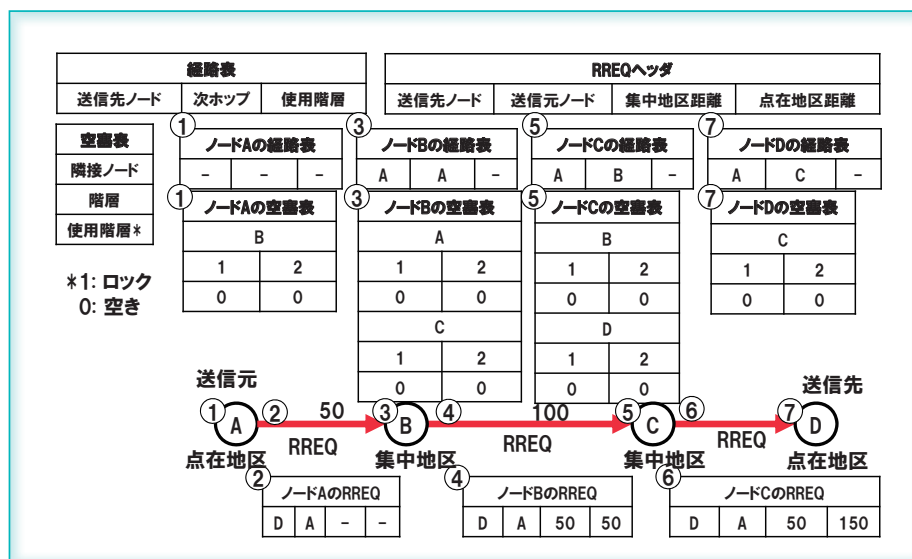


図7 各ノードの RREQ 受信時の処理

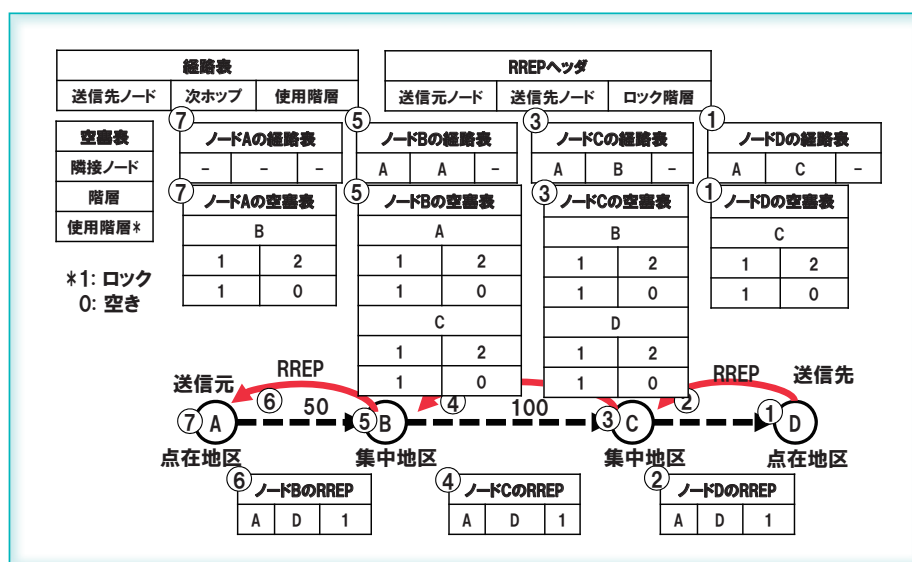


図8 各ノードの RREP 受信時の処理

ドが管理する方式が確立された⁽³¹⁾。RK 要求と RK 応答メッセージを使い分ける。RK メッセージによるリンクロック手順を図9に示す。

- (1) 送信元ノードから送信先ノードへ RK 要求メッセージをユニキャスト送信する。RK メッセージは既存の経路表を基に転送される (図9①)。
- (2) 中継ノードが RK 要求メッセージを受信した場合、リンクで空いている階層にロックフラグを立てる。その後、RK 応答メッセージを転送するための経路表を保存する (図9②)。
- (3) 送信先ノードが RK 要求メッセージを受信した場合、リンクで空いている階層にロックフラグを立てる。RK 応答を送信元ノードへユニキャスト送信する。その際に RK 応答メッセージヘッダの“使用する階層 (Lock)”に RK 要求メッセージ受信時にロックフラグを立てた階層を入

れる (図9③)。

- (4) 中継ノードが RK 応答メッセージを受信した場合、以下を繰り返す (図9④, ⑤)。
- ・受信したノードは、ヘッダにある“使用する階層 (Lock)”と同じ階層のリンクに空きがあるかを確認し、空きがあれば(2)によって保存された経路表を基に RK メッセージを転送する。その後、(2)で保存された経路表を UAV が使用する経路表に更新する。
 - ・RK メッセージの転送時、次の“使用する階層 (Lock)”を保存済み経路表と空塞表から指定する。RK メッセージの転送後に空いている階層がなくなった場合、TC メッセージを送信してリンクに空きがないことをネットワーク全体に広告する。TC メッセージを受信した各ノードは経路を再計算する。

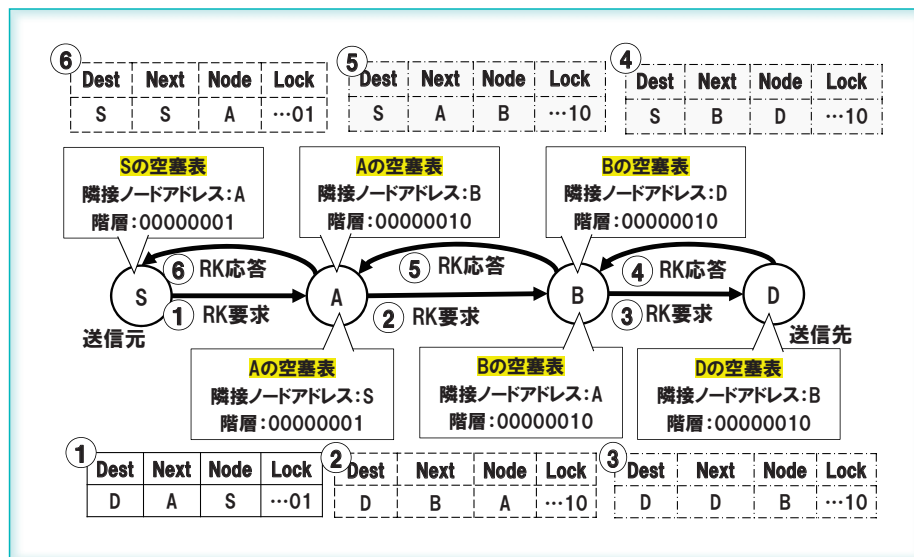


図9 Route Keep (RK) メッセージによる経路の確保

(5) 送信元ノードがRK 応答メッセージを受信した場合、ヘッダの“使用する階層 (Lock)”と同じに階層のリンクに空きがあるかを確認し、空きがあれば送信先ノードへの経路表を保存する(図9 ⑥)。

3.3 階層化リンクロック方式の有効性評価

リンクロックと階層化を用いない従来方式によって構築された経路を確認し、他 UAV と同一リンクを使用する経路コンフリクト率を求める。リンクロック方式で経路コンフリクト率が0となるので、リンクロックでの改善度合いを確認する。

また、リンクロックにより経路移動時に UAV の衝突が回避できる一方で、複数台の UAV が存在した場合に、使用できるリンクが減少することで経路が構築できなくなるデメリットも予想される。そこで、リンクロックのみを導入した際、経路構築に失敗する UAV 台数の指標である経路構築失敗率を評価した。また、経路階層化を用いたリンクロック方式での経路構築失敗率の改善を評価した⁽³²⁾。

ネットワークシミュレータの NS-3 に階層化リンクロック方式の信号処理、情報リポジトリを追加変更し、実際の福島県内の地域などをモデルにシミュレーション実験を行った。約 100 家屋を 1 クラスタとして、1 クラスタにつき 1 ノードが中継機能を有するとした。使用したノード配置モデルを図 10 に示す。各ノードの電波範囲は 1,500 m でノードの追加・削除、移動はない。送信元と送信先の組合せは点在地区ノードからランダムに決定し、同一ノードは複数回送信元には選ばれないようにした。10, 20, 30, 40 台で経路構築を行い、同条件の実

験を 100 回繰り返し経路構築失敗率の平均値を求めた。

リンクロック方式による経路コンフリクトの抑制効果の実験結果を図 11 に示す。10 台の実験でも、経路コンフリクトが発生しており、少ない UAV 台数であっても衝突の危険性があることが分かった。経路コンフリクト率はリンクロック方式の導入によって 0 % となるため、大幅なコンフリクト率の改善が確認できた。

ランダムノード配置モデルを用いて、AODV 及び OLSR ベースリンクロック方式における階層化の有無による経路構築失敗率を比較したグラフを図 12 に示す⁽²⁶⁾。階層化方式では全ての UAV 台数で経路構築失敗率が改善されていることが確認できた。

図 12 から、OLSR ベースの経路構築失敗率の方が AODV ベースの経路構築失敗率より低いことが分かる。AODV はリアクティブ型、OLSR はプロアクティブ型のプロトコルであるため、OLSRの方がロックされているリンクをう回する経路を発見しやすいと考えられる。一方、1 台当りの経路構築を行う時間は AODVの方が短い。そのため、UAV が少ない場合や即座に経路が欲しい場合は AODV を使用し、安全性の確保を優先する場合は OLSR のプロトコルを使用の方がよいと考えられる。

UAV の経路となる全てのリンクをロックする階層化 UAV 経路リンクロック方式は、トラヒック量、つまり UAV の交通量がより高密度となった場合、経路として使用可能なリンクが減少し、経路構築に失敗する可能性が非常に高くなることが懸念され

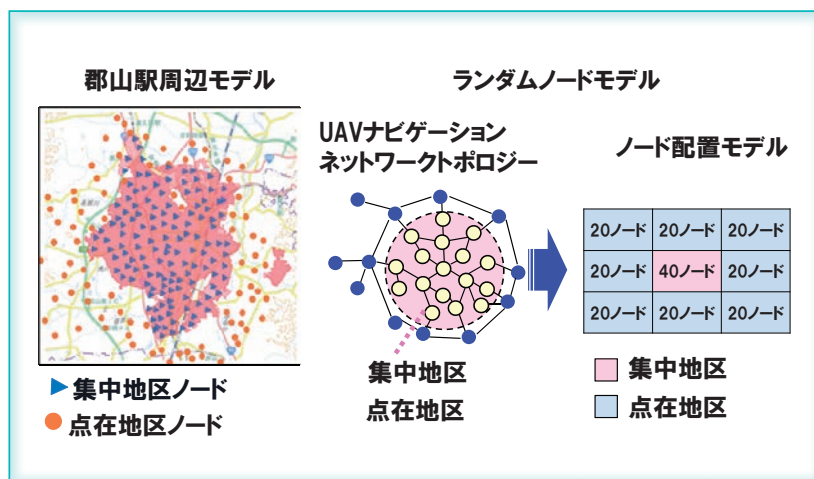


図 10 シミュレーション実験のノード配置モデル

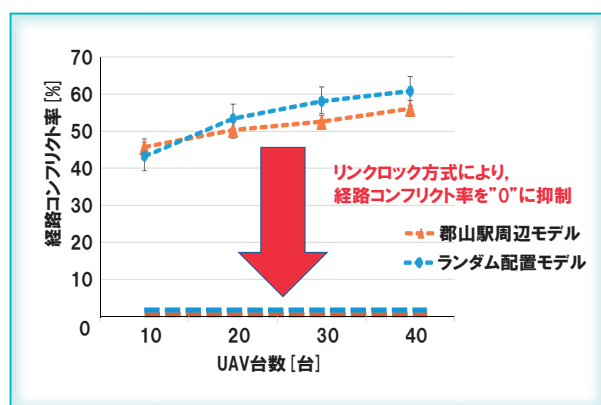


図 11 リンクロック方式による経路コンフリクトの抑制

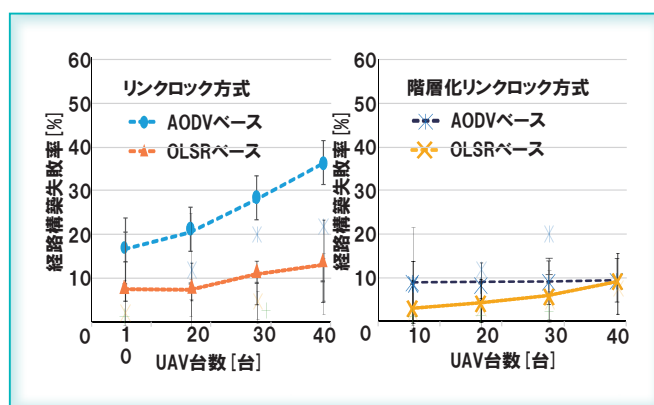


図 12 階層化リンクロック方式による経路構築失敗の抑制効果

る。UAV が航行中のリンクのみをロックする経路構築法などが必要である。

4 UAV の混雑を回避する UAV 管制制御方式

更に高密度な UAV 環境となると、図 13 に示すように、パケット交換網をより効率的に利用できるデータグラム方式を応用した UAV 管制制御が必要と考えられる。空域における UAV の混雑と利用者間における公平性を考え、複数経路候補を構築し動的に次ホップを選択する方式と、ルータが利用者による空域への UAV の流入を制限する方式が確立された⁽³³⁾。

4.1 複数経路候補構築方式

まず、ダイクストラ法⁽²⁸⁾を用いて各ルータ間の最短経路を一つ構築する。次に、このホップ数に基づく最短経路を 1 番目の経路とし、1 番目の経路を基にマルチパスアルゴリズムを用いて 2 番目以降の経路を構築する。ここでは、マルチパスアルゴリ

ズムに、ノード素な経路を構築するアルゴリズム、リンク素な経路を構築するアルゴリズム⁽³⁴⁾、Yen のアルゴリズム⁽³⁵⁾のいずれかを用いる。

4.2 次ホップ選択方式

ある UAV がある送信先 rd まで飛行するとき、UAV の現在地であるルータ ri に送信先 rd の情報を送信し、次ホップルータへの飛行許可を要求する。UAV から送信先 rd の情報を受信したルータ ri は、次ホップ候補となるルータ群 $N(ri)$ を経路表から抽出する。ここで、UAV の現在地が送信元ルータである場合は、ルータ群 $N(ri)$ から経路候補における 1 番目の経路に対応する次ホップルータの情報と、送信先ルータまでのホップ数を取得し、これらの情報を UAV に送信する。UAV は、送信先ルータまでのホップ数を保持しており、ルータが保持する送信先までのホップ数を用いて各ノードを経由する度に更新する。UAV の現在地が送信元以外である場合、ルータは次ホップ候補となるルータ群 (ri) に占有率 $crj(t)$ ($rj \in N(ri)$) を問い合わせる。占有率 $crj(t)$ は、ルータ rj 上空の混雑度を示す指標で、ルータの滞

留可能台数と、ルータの滞留台数 $qr_j(t)$ 及び隣接ルータから自身に向けてリンクを飛行中の台数 $br_k, r_j(t)$ ($rk \in N(r_j)$) から、式 (2) により導出する。

$$c_{r_j}(t) = \frac{qr_j(t) + \sum_{rk \in N(r_j)} b_{rk, r_j}(t)}{q_{r_j}^{\max}} \quad (2)$$

4.3 UAV の流入制御方式

空域の混雑に応じてルータが UAV の流入を制限することで、利用者間における公平性を担保する方式が確立されている。

パケット交換網のデータグラム方式における TCP (Transmission Control Protocol)⁽³⁶⁾ Reno におけるふくそう制御手順から着想を得ており、ふくそう制御におけるウィンドウサイズの動的な制御を、各利用者の同時飛行可能台数の制御に応用する。ここで、同時飛行可能台数とは、ルータが持つ情報で、自身を送信元とする利用者がある時刻において空域内を飛行可能な台数を指す。同時飛行可能台数の初期値は 1 台とし、送信先を経由し送信元までの往復を完了した UAV の連続台数が同時飛行可能台数と一致した場合にこれを増加させる。最初は 2 倍ずつ指数的に同時飛行可能台数を増やし、送信元における離陸中止と空域の混雑による UAV の不時着を確認した場合に、同時飛行可能台数を半分に減少させる。その後、各ルータは、同時飛行可能台数分連続で UAV の往復完了を確認した場合に、同時飛行可能台数を 1 台ずつ線形的に増加させる。UAV が往復を完了した連続台数と空域の混雑が原因で発生する UAV の不時着に応じて、各ルータが各利用者の同時飛行可能台数を増減させることで、

空域の混雑状況に応じた UAV の流入制限を行う。

これにより、システム利用者間で飛行させることが可能な UAV の台数が不公平となる状況を抑制できるようになると考えられる。

4.4 シミュレーションによる性能評価

複数経路の構築と次ホップの選択制御が空域内の UAV の飛行に与える影響を評価するため、一定の領域に複数台のルータを配置しシミュレーションを行った。シミュレーション環境を図 14 に示す。ここでは、芝浦工大犬宮キャンパスを中心とした 5 km 四方の領域に、132 個のルータを固定配置することを想定する。また、各ルータは、自身の通信可能範囲内に存在する、ほかのルータとリンクで接続しているものとする。ここで、各ルータやリンクは、地理的な要素を考慮し、鉄道路線や幹線道路に沿うように配置した。各ルータの通信可能範囲は 500 m、ルータの滞留可能台数は 4 台とし、リンクの通信方式は全て、常に双方向に UAV の移動が可能な全二重方式とした。UAV やルータの通信には、920 MHz 帯の通信規格 LPWA (Low Power Wide Area) を用いることを仮定し、伝送速度は 100 kbit/s とする。本シミュレーションでは、計 400 台の UAV をシミュレーション開始から 600 秒の間でランダムに生成し、送信元と送信先もランダムに設定する。ここで、各 UAV は送信先に到達後、即座に送信元を次の送信先とすることで、送信元と送信先間を往復するものとする。UAV は 10 m/s でリンクを移動し、電池の持続時間は 30 分、UAV 間の飛行間隔距離を 30 m とした。

UAV 流入制御方式の有無によるネットワークの混雑状況と利用者間の公平性を評価した。なお、UAV 流入制御方式を導入しない場合においては、

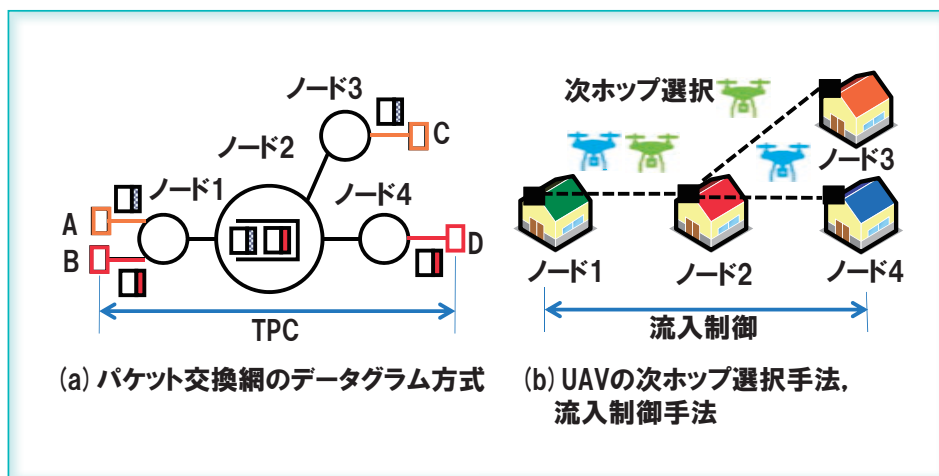


図 13 UAV の混雑を回避する UAV 管制制御方式

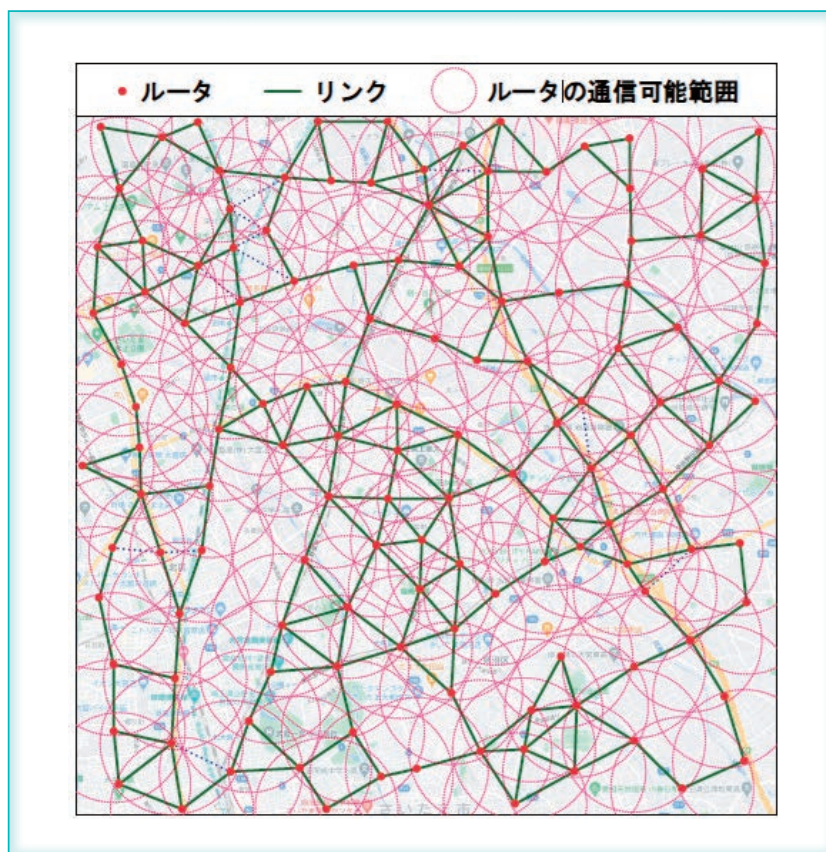


図 14 シミュレーションネットワークトポロジー

利用者は、UAV が送信元から次ホップへの移動を開始、若しくは空域の混雑による送信元での不時着を確認した場合に新たな UAV の飛行を開始するものとする。本シミュレーションでは、各ルータが持つ経路候補は Yen のアルゴリズムを用いて構築し、ルータが持つ各送信先までの最大経路候補数は 3 本とした。また、サービス利用者数が変化した場合においても、UAV 流入制御が機能するかを検証するため、利用者数を 40 人、60 人の 2 通りで変化させた。各利用者は、シミュレーション開始と同時に UAV の飛行を開始させ、UAV は送信元とランダムに設定した送信先間を往復する。なお、UAV は往復に要する十分な電池容量を持つと仮定する。

シミュレーション開始から 60 分の間で、各利用者がネットワークに流入させた UAV 台数の累積分布と送信元と送信先間の往復を完了した UAV 台数について、利用者数 40 人の場合を図 15、利用者数 60 人の場合を図 16 に示す。なお、この図では、累積分布と往復完了台数のプロットを制限の有無と利用者ごとに横軸方向で対応付けしている。結果から、UAV 流入制御方式を導入することで、各利用者がネットワークに流入させた UAV の台数が大きく減少している一方、往復を完了した UAV の台数が大きく増加している。したがって、空域への過剰

な UAV の流入を防ぐことで、空域の混雑に起因した UAV が往復に失敗することを抑制できていることが分かる。また、利用者間での UAV の往復台数を比較すると、UAV 流入制御方式の導入前に比べて、UAV の往復台数を増加させながら、その台数差を抑制することができており、公平性が担保できていると考えられる。

5 おわりに

筆者らは、パケット交換網に着想を得て、各家屋に設置した無線デバイスによる無線マルチホップネットワークを用いた UAV 分散管理方式を解説した。本方式の核となる、モバイルアドホックネットワーク (MANET) プロトコルをベースに、住宅が密集した危険な地区上空 (集中地区) を極力避けた、安全で効率的な航行経路を構築するルーティングプロトコルを示した。サービスが普及し複数 UAV 同時航行時に、経路の重複による衝突の危険性をなくすため、構築した経路で使用するリンクを、ほかの UAV の経路に利用できないようにロックする方式を示した。本方式は、経路が占有されることによるリンク不足を解消するために、リンクが階層化されている。更にサービスが普及し大量の UAV が同

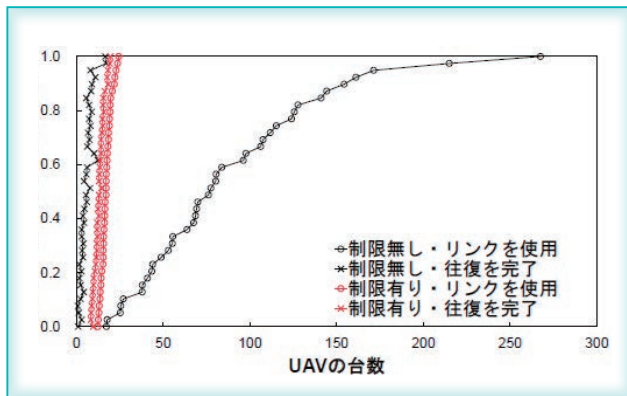


図 15 リンクの使用と往復を完了した UAV の台数（サービス利用者数 40）

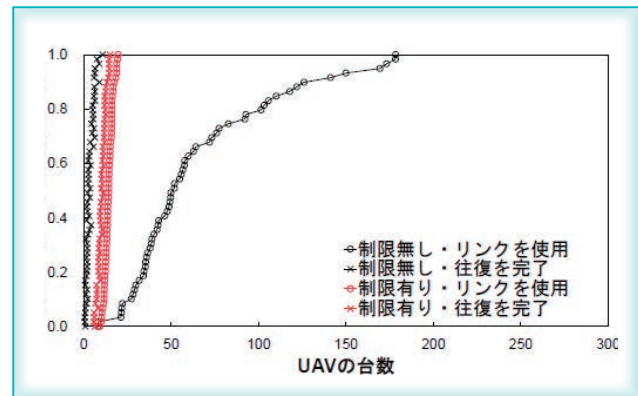


図 16 リンクの使用と往復を完了した UAV の台数（サービス利用者数 60）

時に航行する場合に対応し、送信先までの経路候補を複数構築し動的に次ホップを選択することで空域の混雑を緩和する。空域の混雑に応じて UAV の流入を制限して利用者間の公平性を担保する方式を示した。

様々なサービスでの運ぶ‘もの’、情報に応じて、最適な経路選択が変わってくると考えられ、地上系・非地上系を統合的に考慮したネットワークシステム・経路制御への発展が期待される。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP24K14922 の助成を受けたものです。

文献

- (1) D. Dissanayaka, R. T. Wanasinghe, D. O. Silva, A. Jayasiri, and K. I. G. Mann, "Review of navigation methods for UAV-based parcel delivery," *IEEE Trans. Auto. Sci. and Eng.*, vol. 21, no. 1, pp. 1068-1082, Jan. 2024.
- (2) S. Chen, H. Chen, C. W. Chang, and C. Y. Wen, "Multilayer mapping kit for autonomous UAV navigation," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 31493-31503, Jan. 2021.
- (3) S. Rakesh, B. Rojeena, and K. Shiho, "6G enabled UAV traffic management: a perspective," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 91119-91136, June 2021.
- (4) S. Abdeljawed, E. Jalel, and S. Patrick, "Vehicle routing with multiple UAVs for the last-mile logistics distribution problem: hybrid distributed optimization," Springer Nature, Berlin/Heidelberg, Germany, May 2024.
- (5) Z. Hao, D. Lihua, C. Chunxiao, and X. Bin, "Three-dimensional unmanned aerial vehicle route planning using hybrid differential evolution," *J. Advanced Comput. Intell. and Intelligent Informatics*, vol. 24, no. 7, pp. 820-828, Dec. 2020.
- (6) P. Yang, K. Tang, J. A. Lozano, and X. Cao, "Path planning for single unmanned aerial vehicle by separately evolving waypoints," *IEEE Trans. Robotics*, vol. 31, no. 5, pp. 1130-1146,

Aug. 2015.

- (7) C. Huang and J. Y. Fei, "UAV path planning based on particle swarm optimization with global best path competition," *Int. J. Pattern Recognition and Artif. Intell.*, vol. 32, no. 6, 2018.
- (8) V. Roberge, M. Tarbouchi, and G. Labonté, "Fast genetic algorithm path planner for fixed-wing military UAV using GPU," *IEEE Trans. Aerosp. and Electron. Syst.*, vol. 54, no. 5, pp. 2105-2117, Feb. 2018.
- (9) Y. Chen, Y. Mei, J. Yu, X. Su, and N. Xu, "Three-dimensional unmanned aerial vehicle path planning using modified wolf pack search algorithm," *Neurocomputing*, vol. 266, pp. 445-457, May 2017.
- (10) L. Yu and K. Zhou, "A dynamic local path planning method for outdoor robot based on characteristics extraction of laser rangefinder and extended support vector machine," *Int. J. Pattern Recognit. and Artificial Intell.*, vol. 30, no. 2, pp. 1-23, 2016.
- (11) G. Wang, H. C. E. Chu, and S. Mirjalili, "Three-dimensional path planning for UCAV using an improved bat algorithm," *Aerosp. Sci. and Technol.*, vol. 49, pp. 231-238, Feb. 2016.
- (12) S. A. Gautam and N. Verma, "Path planning for unmanned aerial vehicle based on genetic algorithm and artificial neural network in 3D," *Proc. 2014 Int. Conf. Data Mining and Comput. (ICDMIC)*, pp. 1-5, Feb. 2014.
- (13) V. I. Goncharenko and A. A. Dzekalo, "The algorithm for constructing the UAV route based on the combined method," *7th Int. Conf. Info., Cont., and Commun. Tech. (ICCT)*, Oct. 2023.
- (14) S. M. Ozlem, "Optimum arrival routes for flight efficiency," *J. Power and Energy Eng.*, vol. 3, pp. 449-452, Jan. 2015.
- (15) T. Schouwenaars, B. D. Moor, and E. Feron, "How J, Mixed integer programming for multi-vehicle path planning," *Proc. the European Control Conf*, pp. 2603-2608, Jan. 2001.
- (16) V. N. Evdokimenkov, M. N. Krasilshchikov, and D. A. Kozorez, "Development of pre-flight planning algorithms for the functional-program prototype of a distributed intellectual control system of unmanned flying vehicle groups,"

- INCAS Bulletin, vol. 11, no. 1, pp. 75-88, Aug. 2019.
- (17) A. Ramesh, P. Suseendhar, E. Venugopal, and V. Sivakumar, "An overview of navigation algorithms for unmanned aerial vehicle," Int. Conf. Intellig. Data Commun. Tech. and Internet of Things(IDCIoT), Jan. 2023.
 - (18) M. Sivakumar and N. Malleswari, "A literature survey of unmanned aerial vehicle usage for civil applications," J. Aerospace Technol. and Management, Jan. 2021.
 - (19) Z. Fu, J. Yu, G. Xie, Y. Chen, and Y. Mao, "A heuristic evolutionary algorithm of UAV path planning," Wirel. Commun. and Mob. Comput., Jan. 2018.
 - (20) K. Danancier, D. Ruvio, I. Sung, and P. Nielsen, "Comparison of path planning algorithms for an unmanned aerial vehicle deployment under threats," IFAC-Papers On Line, vol. 52, no. 13, pp. 1978-1983, Jan. 2019.
 - (21) V. J. Hodge, R. Hawkins, and R. Alexander, "Deep reinforcement learning for drone navigation using sensor data," Neural Comput. and Appl., pp. 2015-2033, March 2020.
 - (22) "ISO 23629-5 UAS traffic management (UTM) – part 5:UTM functional structure," ISO 23629-5:2023, pp. 1-14, April 2023.
 - (23) K. Ueda and T. Miyoshi, "Autonomous navigation control of UAV using wireless smart meter devices," J. Telecommun. and Inf. Technol. (JTIT), The National Institute of Telecommunications, Republic of Poland, no.2, pp.64-72, July 2019.
 - (24) C. E. Perkins, E. M. B.-Royer, and S. R. Das, "Ad hoc on-demand distance vector (AODV) Routing," IETF, RFC3561, July 2003.
 - (25) T. H. Clausen, and P. Jacquet, "Optimized link state routing protocol (OLSR)," IETF, RFC3626, Oct. 2003.
 - (26) Y. Kokubun, T. Yamazaki, R. Yamamoto, T. Miyoshi, and K. Ueda, "Reactive route construction for UAV delivery considering travel time and safety using wireless multi-hop network," IEICE Commun. Express, vol. 11, no. 7, pp. 405-410, April 2022.
 - (27) Y. Kokubun, T. Yamazaki, R. Yamamoto, T. Miyoshi, and K. Ueda, "AODV-based routing methods for UAVs travel time and safety," IEICE Commun. Express, vol. 12, no. 4, pp. 157-163, April 2023.
 - (28) E. W. Dijkstra, "A note on two problems in connexion with graphs," in Numerische Mathematik, vol. 1, no. 1, pp. 269-271, 1959.
 - (29) H. Gunji, T. Yamazaki, R. Yamamoto, T. Miyoshi, and K. Ueda, "Proactive route construction for UAV delivery considering distance and safety using wireless multi-hop network," IEICE Commun. Express, vol. 11, no. 7, pp. 411-416, April 2022.
 - (30) ns-3, "a discrete-event network simulator for internet systems." <https://www.nsnam.org/>
 - (31) H. Gunji, T. Yamazaki, R. Yamamoto, T. Miyoshi, and K. Ueda, "Methods for constructing collision avoidance route for multiple unmanned aerial vehicles using OLSR-based link hierarchization," IEICE Commun. Express, vol. 12, no. 1, pp. 7-12, Jan. 2023.
 - (32) S. Ohkawa, T. Yamazaki, R. Yamamoto, T. Miyoshi, and K. Ueda, "Method for constructing collision avoidance route for multiple UAVs using AODV-based link hierarchization," Proc. IEEE Int. Conf. Consumer Electron. - Asia 2023 (ICCE-Asia2023), IEEE, pp. 311-314, Oct. 2023.
 - (33) T. Haraguchi, H. Katada, T. Yamazaki, T. Miyoshi, R. Yamamoto, and K. Ueda, "A distributed UAV management system inspired by packet-switched networks," IEICE Commun. Express, vol. 13, no. 9, pp. 389-392, Sept. 2024.
 - (34) C.-L. Li, S. T. McCormick, and D. Simchi-Levi, "Finding disjoint paths with different path-costs: Complexity and algorithms," Networks, vol. 22, no. 7, pp. 653-667, Dec. 1992.
 - (35) J. Y. Yen, "Finding the K shortest loopless paths in a network," Manag. Sci., vol. 17, no. 11, pp. 712-716, July 1971.
 - (36) W. Eddy, Ed., "Transmission control protocol (TCP) ," IETF RFC 9293, Aug. 2022.

(2024 年 10 月 31 日受付, 2025 年 1 月 4 日再受付)

上田清志（正員：シニア会員）

昭 62 慶大・理工・電気工卒，平元同大学院理工学研究科修士課程了。同年日本電信電話株式会社入社。以来，交換システムソフト，特に分散交換ノード管理ソフト，P2P ネットワークサービスソフトの研究開発に従事。ITU-T SG11, SG4 にて TMN の標準化に貢献。平 26 年度から日大・工・教授，現在に至る。博士（工学，平 22 九大）。本会通信ソサイエティ優秀論文賞（平 20 年度），通信ソサイエティ活動功労賞（平 27 年度），IEICE ComEX Top Downloaded Letter Award（令 4 年度），IEEE ICCE Best Regional Paper Award（令 6 年度），IEEE ICCCT Best Presentation Award（令 6 年度）各受賞。

**三好 匠**（正員：シニア会員）

平 6 東大・工・電子卒，平 11 同大学院博士課程了。博士（工学）。平 11 ～ 13 早大国際情報通信研究センター助手を経て，現在，芝浦工大・システム理工・電子情報システム教授。主に，トラフィック分析，オーバーレイネットワーク，アドホック・センサネットワーク，スマートシティ，デジタルツインに関する研究に従事。東大・生研リサーチフェロー。平 22 ～ 23 仏ソルボンヌ大情報学研究所（LIP6）客員研究員。本会ネットワークシステム研専委員長，東京支部学生会顧問。平 16 本会学術奨励賞，平 22, 26, 令 3 本会ネットワークシステム研究賞，平 13, 16, 18 本会情報ネットワーク研究賞，平 23 本会コミュニケーションオリティ研究賞，平 31, 令 3 本会情報通信マネジメント研究賞，平 18, 19, 21, 22, 26, 令 2 本会通信ソサイエティ活動功労賞，平 26 CANDAR Best Paper Award of ASON Workshop, 平 28, 令 2 APNOMS Best Paper Award, 令 2 ICETC Best Short Paper Award, 令 6 IEEE ICCE Best Regional Paper Award, 令 2 ヒューマンインタフェース学会論文賞，令 4 関東工教賞（業績賞），平 29 日工教 JSEE Award, 平 14 エリクソン・ヤング・サイエンティスト・アワード各受賞。

**山崎 託**（正員）

平 24 芝浦工大・システム工・電子情報システム卒，平 26 同大学院修士課程了，平 29 早大大学院博士課程了。博士（工学）。平 28 ～ 30 早大・情報通信・助手を経て，現在，芝浦工大・システム理工・電子情報システム准教授。主に，IoT，スマートシティ，無線ネットワークに関する研究に従事。平 26 本会ネットワークシステム研究賞，平 26 CANDAR/ASON Best Paper Award, 平 27 本会学術奨励賞，平 28 本会ネットワークソフトウェア研究会優秀ポスター賞，平 30 本会ネットワークシステム研究会若手研究奨励賞，平 30 本会ネットワークシステム研究会活動功労賞，平 31 ICACCT Outstanding Paper Award, 令 2, 4, 6 本会通信ソサイエティ活動功労賞，令 2 APNOMS Best Paper Award, 令 2 ICETC Best Short Paper Award, 令 6 IEEE ICCE Best Regional Paper Award 各受賞。

**山本 嶺**（正員）

平 19 芝浦工大・システム工学・電子情報システム卒，平 21 同大学院修士課程了。平 24 早大大学院博士後期課程退学，同研究科助手。平 26 電通大大学院情報システム学研究科助教，平 31 同准教授。通信ネットワークに関する研究に従事。博士（国際情報通信学）。平 22 本会学術奨励賞，平 26 本会ネットワークシステム研究賞，令 6 本会情報通信マネジメント研究賞，平 29, 令元, 2, 5 本会通信ソサイエティ活動功労賞，平 26 CANDAR Best Paper Award of ASON Workshop, 令 6 IEEE ICCE Best Regional Paper Award 各受賞。



複数のドローンや無線機の連携による 空の安全運航支援のための無線通信

Air-to-Air Link for Safety Operation of Drones

三浦 龍 Ryu Miura[†] 松田隆志 Takashi Matsuda[†]
越川三保 Miho Koshikawa[†] 松村 武 Takeshi Matsumura[†]

Summary

ドローンの運航における無線通信の主な課題と国内制度の現状について整理するとともに、通信インフラに依存しない従来の自営網による制御用通信を拡張した方式として、複数のドローン同士や無線機を連携させ、より長距離で障害物を越えてドローンの飛行を把握し制御する技術、並びに地上を経由しない機体間相互の直接通信を自律追従スウォーム（群）飛行や自律衝突回避に应用する技術の取組みについて述べる。本稿は主に、ビジネスや災害対策の分野でドローンの活用を検討するサービス事業者やドローンメーカー及び関連する業界団体や自治体関係者、ドローン用無線通信機器の開発メーカー、ドローンの普及促進やその電波に関連した法制度整備に係る行政担当者、並びにこれからこうした業界での活躍を目指す若きエンジニア等を対象とする。

Key Words

ドローン、無人航空機、マルチホップ中継、機体間通信、スウォーム飛行、自律衝突回避

1 はじめに

空撮・災害調査・測量・設備点検・運送など幅広い分野での小形ドローン（UAV: Unmanned Aerial Vehicle, または Uncrewed Aerial Vehicle, 直訳は無人航空機）の活用や技術開発、実証実験が進んでおり、更なる普及とビジネスの拡大、安全性の確保に向け、「空の産業革命 レベル4 飛行の実現」など国による制度整備・規制緩和^{(1),(2)}も進められている。

こうした中、操縦者から見える範囲で地上局とドローンの間で直接無線リンクをつないでドローンを飛行させる方法には、通信範囲が1~2 km 以内にとどまるという課題があった。その後、電波法の改正に伴い、携帯電話網の通信インフラを経由することにより、サービス圏内であれば通信距離の制約から解放される方法が普及することとなった⁽³⁾。

ところが、ドローンの運用ニーズが高まるにつれ、山間部上空などでサービス圏外になる、災害時には通信障害で利用不能になる、また平時であっても周囲の通信混雑状況によって通信が不安定になる、などの問題が顕在化するようになってきた。

本稿では、こうしたドローンの運航における無線通信の主な課題と国内制度の現状について整理する

とともに、これまで情報通信研究機構（NICT）で取り組んできたテーマである、通信インフラには依存しない従来の自営網による通信を拡張した方式として、複数のドローン同士や無線機を連携させ、より長距離で障害物を越えてドローンの飛行を把握し制御する技術、並びに機体間相互の直接通信を、自律追従スウォーム（群）飛行や自律衝突回避に应用する技術の取組みについて述べる。

2 ドローンに使われる無線通信の課題

屋外を飛行するドローンは基本的に無線通信がなくても、GNSS（全地球航法衛星システム）による位置情報を頼りに自律的に予定されたプログラムどおりに飛行する機能を有している。しかし、操縦者から直接視認できない目視外飛行の場合、より安全な運航を図るためにはリアルタイムで飛行位置や飛行状態を確認し、必要なときにいつでも制御介入ができるようにするための無線通信が必要となる。ドローンの無線方式で最も普及しているのは無線 LAN と同じ 2.4 GHz 帯（ISM バンド）の帯域を使うもので、地上局からドローンに送る制御データであるコマンド、ドローンから地上局に送られる各種ステータスデータであるテレメトリー、並びにドローン搭載のカメラで撮影される画像の伝送に用いられる。免許が不要でコストも安く、ほぼ全てのドローンがデフォルトで備えている。

しかし、こうした自営無線系の制御通信を長距離

[†] 情報通信研究機構、横須賀市
National Institute of Information and
Communications Technology, Yokosuka-shi,
239-0847 Japan

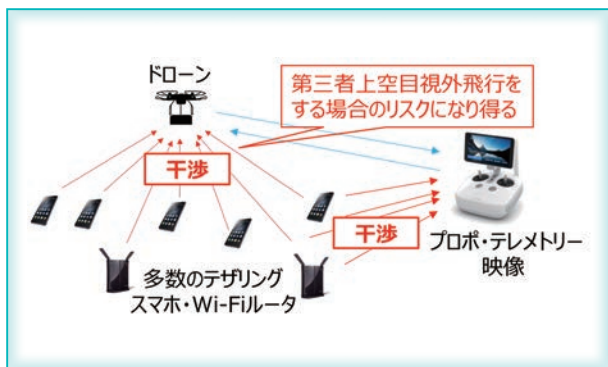


図1 2.4 GHz 帯における無線 LAN からの電波干渉

目視外飛行で使う場合、以下のような問題が課題として考えられ、飛行安全に直結する可能性がある。

(1) 他の無線機器との電波干渉の問題

ドローン側が同一または隣接チャネル干渉を受けると、操縦者からの制御信号が届かずコントロールができなくなり、ドローンは自動帰還や自動着陸モードに入ってしまうことがある。また、操縦者側ではドローンからの位置情報や映像信号がフリーズしたり途中で切れたりする。特に、2.4 GHz 帯は地上の無線 LAN 機器等の他システムからの干渉を受けやすく、都市部上空などで目視外飛行に使う上では必ずしも安全な周波数とは言えない（図1）。

(2) 電波の到達距離の問題

ドローンが遠方まで飛行し、ドローン側と操縦者側の双方、あるいは一方で受信電力が受信機の感度を下回ると当然ながら通信は途絶する。通常、2.4 GHz 帯等の無線局免許が不要な帯域の電波は送信出力が小さく制限されているため、長距離の無線通信は難しい。

(3) 障害物による電波途絶の問題

ドローンと操縦者の間に山、建物、樹木などの障害物があると、電波は大きく減衰して見通し外（BLOS: Beyond Line-of-Sight）となり、通信が途絶する確率が高くなる。特に周波数が1 GHz 以上になるとほぼ確実に障害物で電波が途絶する。

(4) 収容台数の問題

同時に同一の空域を飛行するドローンの数と密度が増えてくると、ドローンの電波同士が衝突する確率が増すため、飛行できるドローンの機体数が制限される。収容可能な機体数を越えた場合は、(1)と同じ電波干渉の問題が発生する。2.4 GHz 帯で20 MHz の帯域幅を用いて映像伝送を行う場合、同一空域で安全に飛行できるドローンは3機程度までと言われている。

(5) 電磁干渉の問題

カメラ、小形コンピュータ、電源分配回路等の電

子機器がドローンに搭載されると、その電磁干渉を無線機器が受けて通信可能な距離が著しく短くなり、あるいは、キャリアセンス機能を備えている場合には送信を止めてしまうことがある。また携帯電話の基地局や送電鉄塔などに近づき過ぎても、無線機感度抑圧の影響を受け、コマンド信号が受信できなくなることがある。

(6) ハッキング、なりすましの問題

正規の操縦者から送信される制御信号と同じ周波数・形式の信号が、非正規の操縦者から送信されると、そのドローンが正規・非正規の信号識別機能を持たない場合には、非正規の操縦者にコントロールを奪われハッキングされるリスクがある。なお、特殊なケースとして、非正規に飛行する、あるいは悪意のあるドローンを故意にハッキングして安全な場所に誘導することがある。

以上の自営系無線の制約は、免許が不要な無線局で課題になることが多く、これらを解決する手段として、携帯電話網の上空利用が2020年12月に全面解禁となった。携帯電話のサービス圏内においてはこれを利用する方法が一般的になってきている。しかし、2024年1月1日に発生した能登半島地震において、国内で初めて多数の民間ドローンが現地入りして被災状況の把握や物資の輸送を担った際、携帯電話網は途絶して使用できず、結局、目視内のみの飛行に限定されたと報告されている。平時においても、後述する山間部は依然として携帯電話のサービス圏外のため、安全なドローン運航ができない場所が多い。また、時間帯によって地上での携帯電話トラヒックが増加し、上空での通信が不安定になるといった現象も確認されている。更に将来、上空を飛行するドローンの数が増加したり、一つの事業者が一度に多数のドローンを飛行させたりする場合、地上ユーザへの影響を避けるため、携帯電話網につなげるドローンの数が制限される可能性もある。

今後はサービスエリアに制約のない低軌道衛星通信（LEO）等による通信インフラが手軽に使えるようになるという期待もある。そうなれば画期的だが、通信機器の重量や通信コストなどの面で課題があり、特に民生分野では全てのドローンに掲載されるにはまだかなりのハードルがあるものと考えられる。

以降の章では、我が国の地理的な特徴を考慮し、山間部でも利用できて災害にも強い自営系無線通信の実現を目指し、上記の課題のうち(1)～(4)の問題に対処する制度と技術の取組みについて述べる。(5)、(6)に関しては別の機会に譲ることとする。

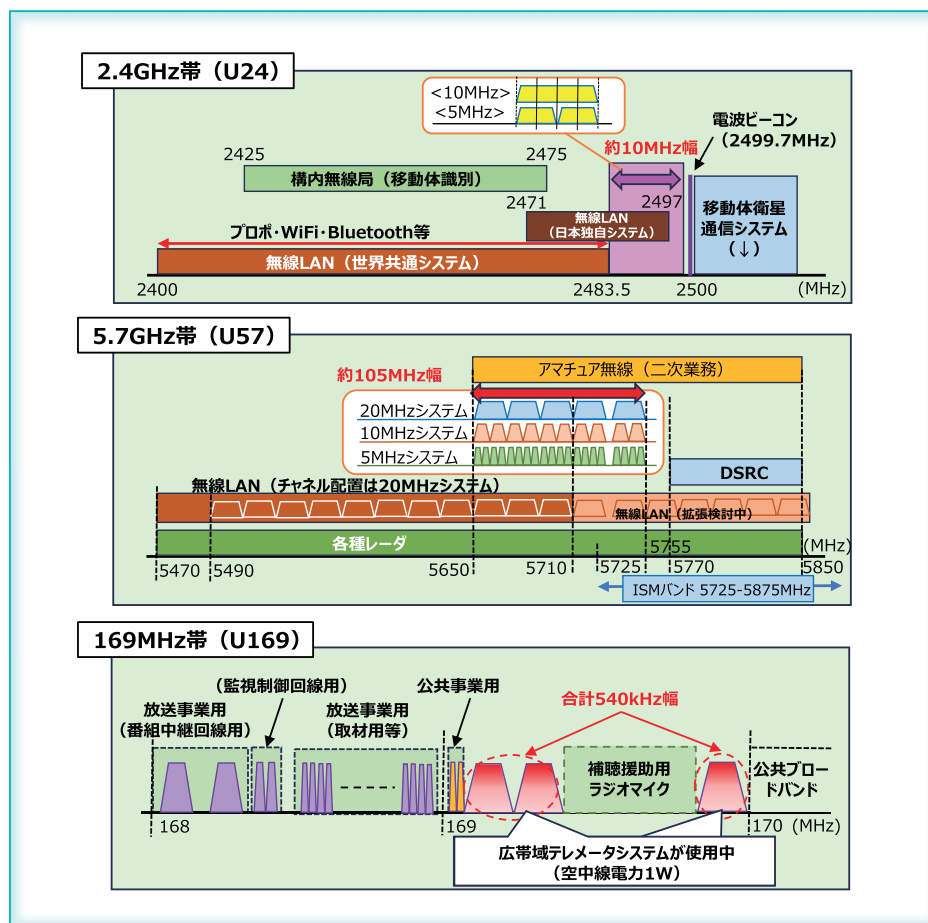


図2 無人移動体画像伝送システムの周波数帯⁽⁴⁾

3 ロボット用電波 「無人移動体画像伝送システム」

「無人移動体画像伝送システム」は、ドローンやロボット用の周波数割当に関するニーズの増大に対応し、総務省が2016年8月に制度化した自営系無線通信のための事業用周波数であり、通称「ロボット用電波」とも呼ばれている⁽⁴⁾(図2)。169MHz帯、2.4GHz帯、5.7GHz帯の三つのバンドがあり、ここではそれぞれ、U169、U24、U57と呼ぶこととする。コマンド・テレメトリ通信と画像伝送に使うことができ、地上局、上空局ともに送信出力は1Wまで許容されている。(ただし、U169のみ上空局は原則10mW以下。)このため、各バンドとも5km以上の通信距離の確保が可能であり、2.で述べた課題(2)(到達距離)への対応を図ることができる。

これらのバンドは、無線従事者免許(第三級陸上特殊無線技士以上)と無線局免許の取得が必要であり、ホビー用としては使えない。使用する前に免許人の間で運用調整を行うことが義務づけられており、他のユーザから干渉を受けることなく、一つのチャネルを申告した時間と場所で占有して利用できるこ

とを特徴としている。このためキャリアセンスなどは規定されていない。ただし、一部無線LAN等との共用バンドとなっている。利用可能なチャネル数はU169で4チャネルまで、U24で2チャネルまで、U57で20チャネルまで確保が可能のため、まだ十分ではないものの、前章で述べた課題(1)(干渉)、(4)(収容台数)への対応を図ることができる。

この無人移動体画像伝送システムを運用調整する団体は特に指定はされていないが、現在は実質的に日本無人機運航管理コンソーシアム(JUTM)がその役割を担っており、会員数は2024年8月時点で844団体となっている⁽⁵⁾。会員には、国内メーカー・運用事業者、海外メーカーの日本法人、警察・消防・自衛隊等の公的機関、研究開発機関、大学などが含まれている。無人移動体画像伝送システムの利用者(免許人)は、これを使ってドローンやロボットを運用する際、事前にJUTMのポータルサイトにログインして、地上局とロボット局の場所、使用日時、周波数、送信EIRP、免許番号等を入力し、会員相互間で競合がない場合にはそのままそのチャネルを利用できる。もし競合があった場合には自動的に利用者側にメールで連絡がいき、当事者同士で送信時間や送信チャネル等を調整することになってい

る。これにより、利用者は申告したチャネルを占有して干渉なく利用することができる。

なお、この運用調整システムは、今後のユーザ数増大に対応するため、詳細な地上局やロボット局の移動範囲、EIRP、与干渉局と被干渉局の受信電力比 (D/U 比) 及び地形などによる影響も考慮して高度化するための開発も始まっている。

4 複数のドローンや無線機を連携させる無線通信システム

本章では、2. で述べた自営系無線通信の課題 (3) (障害物による電波途絶) に対処するとともに、空の安全を確保し、更に長距離運用の場合の課題 (4) (収容台数) に対応するために NICT で開発と実証を行っている制御・監視用の通信技術として、複数のドローンや無線機を連携させるシステムについて述べる。なお、長距離・見通し外での画像伝送に関する取組みも一部行っているが、その報告は別の機会に譲ることとする。

4.1 マルチホップ中継制御通信システム

携帯電話網が届かない山間部上空や被災地等でドローンの長距離運用を行う際、従来の自営系無線通信で行われている地上局とドローンを直接つなぐ方法では、途中で障害物がある場合には2. に述べた (3) (障害物) の問題によって運用範囲が制限されることとなる。これに対処するため、中継局を経由してドローンに搭載した無線局 (端末局) と地上局の間でコマンド・テレメトリーの双方向リンクを時分割 (TDD) でつなぐマルチホップ中継制御通信システムを開発し、「コマンドホッパー」と名付け、その適用に関心を持つ将来のユーザとともに実証実験と性能改善を続けている (図3, 4)⁽⁶⁾。中継局は中継用のドローンに搭載して適切な場所にホバリングさせてもよいし (上空リレー)、地上の見通しの良

い鉄塔等に設置してもよい (鉄塔リレー)。周波数は、伝送速度は小さいが長距離伝搬が可能な U169 を使用しており、2. の課題 (2) (到達距離) への対応も図っている。なお、U169 は占有帯域幅 50 kHz で用いているため、画像伝送は行っていない。

各局の送信出力は、技術基準に従い、地上局が 0.5 W (制度上は最大 1 W が可能)、上空を飛行する端末局は 10 mW である。中継局については地上設置の場合は 0.5 W、ドローンに載せて飛行させる場合には 10 mW に設定する。

マルチホップの通信は地上局から発信されるビーコンで同期されたスーパーフレームの周期に従って双方向で行われ、その通信経路は 1 ホップ (直接通信) ~ 2 ホップ (中継局を一つ経由) ~ 3 ホップ (中継局を二つ経由) と通信状況によって自動的に切り換わる方式となっており、その状況は地上局に接続された PC でリアルタイムにモニタすることができる (図5)。また、データの通信レイテンシはスーパーフレーム周期に収まることが保証されており、データの鮮度を保つため、再送制御は行わない。

本無線機は 920 MHz 帯インタフェース (特定小電力無線通信システム、免許不要) も備えており、169 MHz 帯との間で地上局からのコマンドで切り換えることができる。この 920 MHz 帯インタ

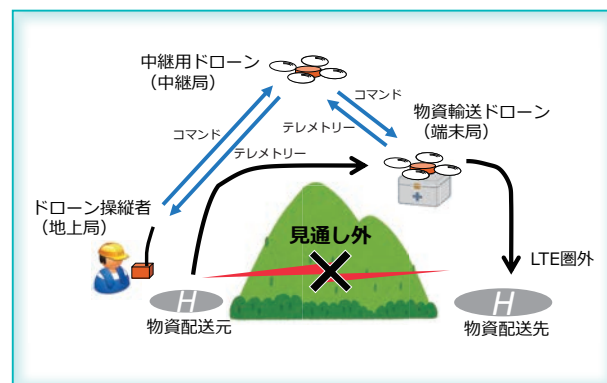


図3 障害物を越えてドローンをつなぐ
(救援物資配送ミッションでの上空リレーの例)

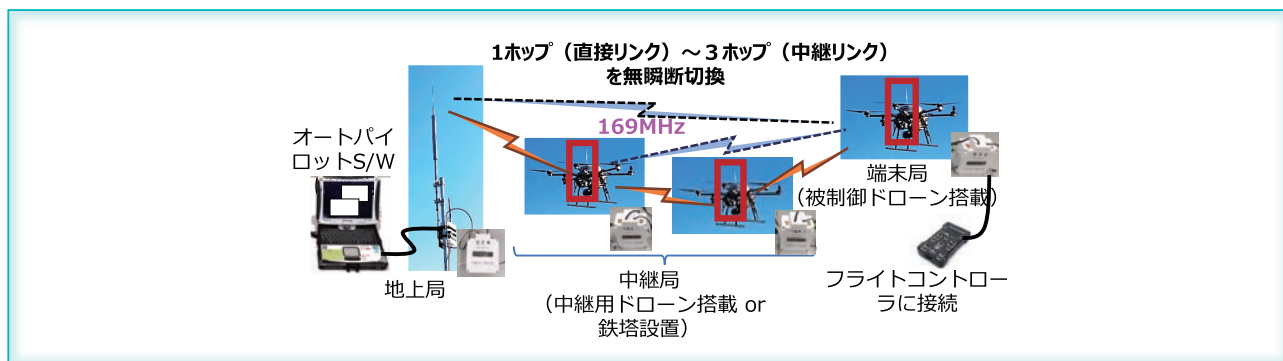


図4 マルチホップ中継制御通信システム「コマンドホッパー」



図5 地上局での通信状況モニタ画面の例

フェースは、200 kHz の単位チャネルを五つ束ね、帯域 1 MHz で利用できるようになっており、169 MHz 帯よりは到達距離が短いですが、伝送速度が速いため、主に比較的大きなデータ転送速度が必要なドローン搭載のフライトコントローラとの初期接続に使用している。

以下、U169 によるコマンドホッパーのフィールドでの三つの性能評価事例について述べる。

4.1.1 山間部での飛行への上空リレーの適用評価

人の立入りが制限される活火山調査のため、見通しの悪い場所で飛行させるドローンにコマンドホッパー端末局を搭載し、中継局を搭載したドローン 1

台を対地高度約 100 m にホバリングさせて 2 ホップ上空リレーを行った⁽⁶⁾ (図 6)。

図 7 は端末局を載せたドローンの飛行軌跡と中継局の位置、飛行区間の地形プロファイル Google Earth で示したものである。ドローンは発着地点を離陸後、対地高度を約 100 m に保持して上部の目標地点まで飛行し、そこで一旦着陸した後、同じルートをたどって発着地点に戻る。飛行軌跡上の各ドットは中継局を経由した 2 ホップのときの端末局での受信点と受信電力を示しており、目標地点での着陸時も含めて約 1 km の全区間にわたりリンクが維持されている。

図 8 では 1 ホップ (中継なし) と 2 ホップ (中継あり) で端末局の受信電力の変化を比較している。1 ホップの場合は目標地点での着陸時にリンクはロストしているが、2 ホップでは維持されていることが分かる。

このほか、携帯電話網が利用できない山中の沢筋 (尾根と尾根の間のくぼ地) に設けられている砂防ダムを点検するために見通しの悪い沢筋 (図 9) に沿って飛行するドローンでも評価を行い、1 台の中継ドローンを経由して約 4 km の全飛行区間で制御通信リンクが途絶せずに維持できることも確認して

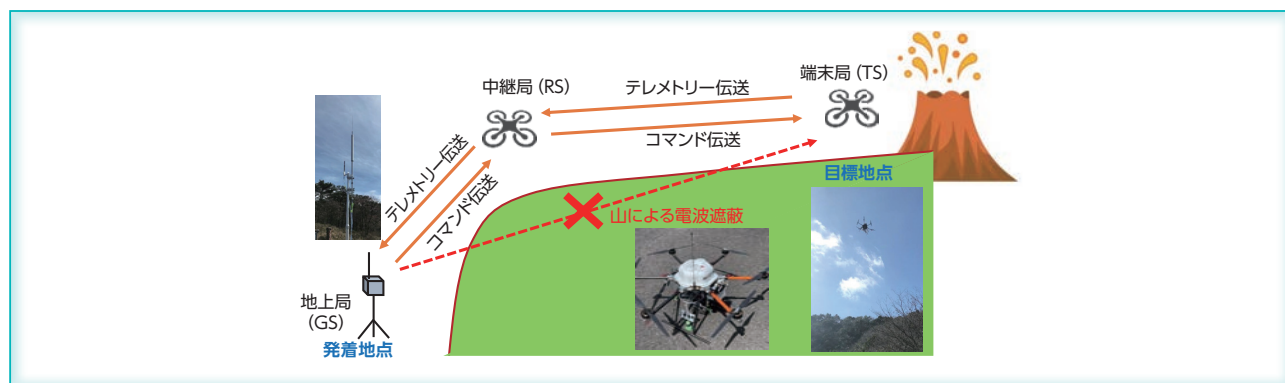


図6 活火山調査のための上空リレー飛行 (2022 年 4 月、霧島山新燃岳にて)

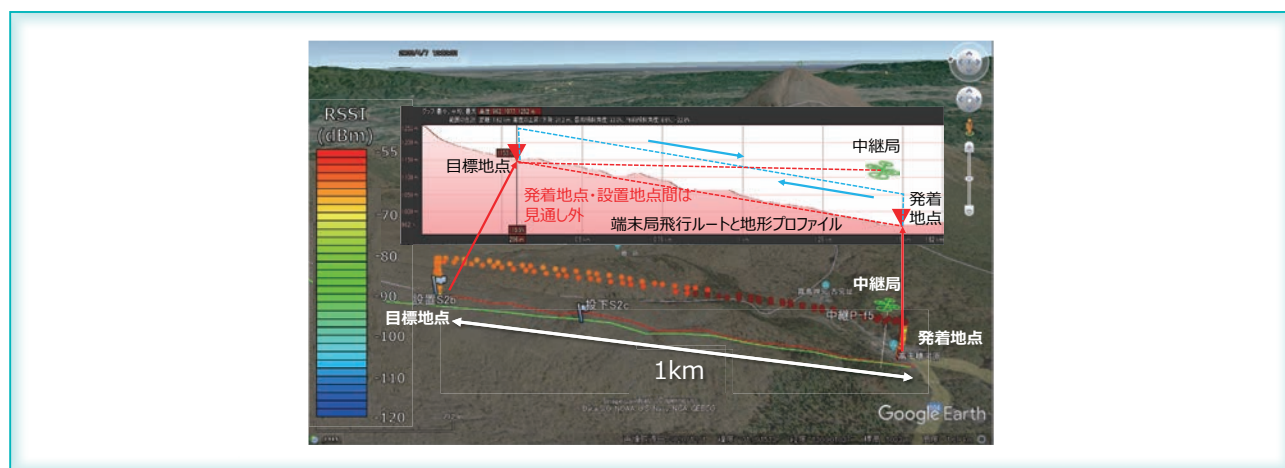


図7 上空リレーによる飛行軌跡と地形プロファイル

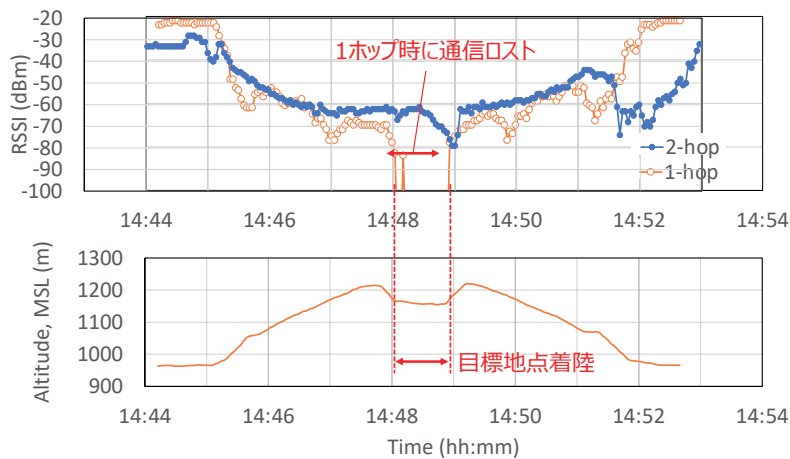


図8 1ホップと2ホップでの端末局受信電力の比較



図9 山中の沢筋に沿った飛行経路での検証

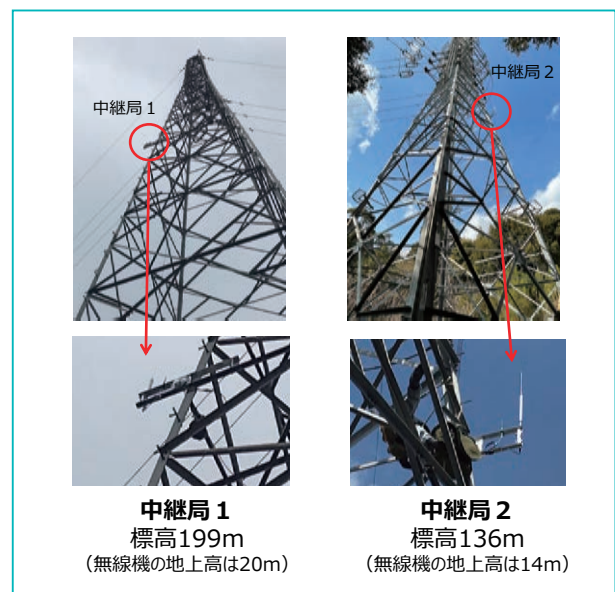


図10 送電鉄塔への中継局の設置

いる⁽⁷⁾が、詳細は別の機会に報告する。

4.1.2 山間部での飛行への鉄塔リレーの適用評価

山間部のインフラ設備等を点検するためのドローンを飛行させる場合、飛行経路の周辺に鉄塔などがある場合には、それを活用して中継局を固定設置して通信中継をすることも可能である。鉄塔に無線機を設置した場合は地上局として扱えるため、規則上は最大1Wまでの出力が可能である。

図10は、山中の送電線の点検を想定して実施した通信評価実験⁽⁸⁾において、飛行経路の途中、山の頂上付近にある2本の送電鉄塔にそれぞれ中継局を1局ずつ固定した様子である。実験ではこの二つの中継局により、最大3ホップの接続が構成できるようにした。

図11は、片道の飛行経路に沿って飛行するド

ローンが通信に成功した飛行位置と、そのときの端末局受信のRSSIの推移を表すヒートマップ、並びに離陸地点から着陸地点までの直線上の地形プロファイルである。飛行経路は送電線に沿って設定されている。中継局1付近から先は地上局からは完全に見通し外となり、山の背後にある着陸地点まで2km強の飛行となっている。図11から、見通し内から見通し外までほぼ全ルートで通信リンクが維持されていることが示されている。

4.1.3 洋上での長距離伝搬評価

コマンドホッパーの最後の事例は、長距離の測定が可能な洋上において、長時間飛行が可能な固定翼エンジンドローン2台に中継局と端末局をそれぞれ搭載して行った試験である⁽⁹⁾(図12)。

図13は端末局、中継局をそれぞれ搭載したド

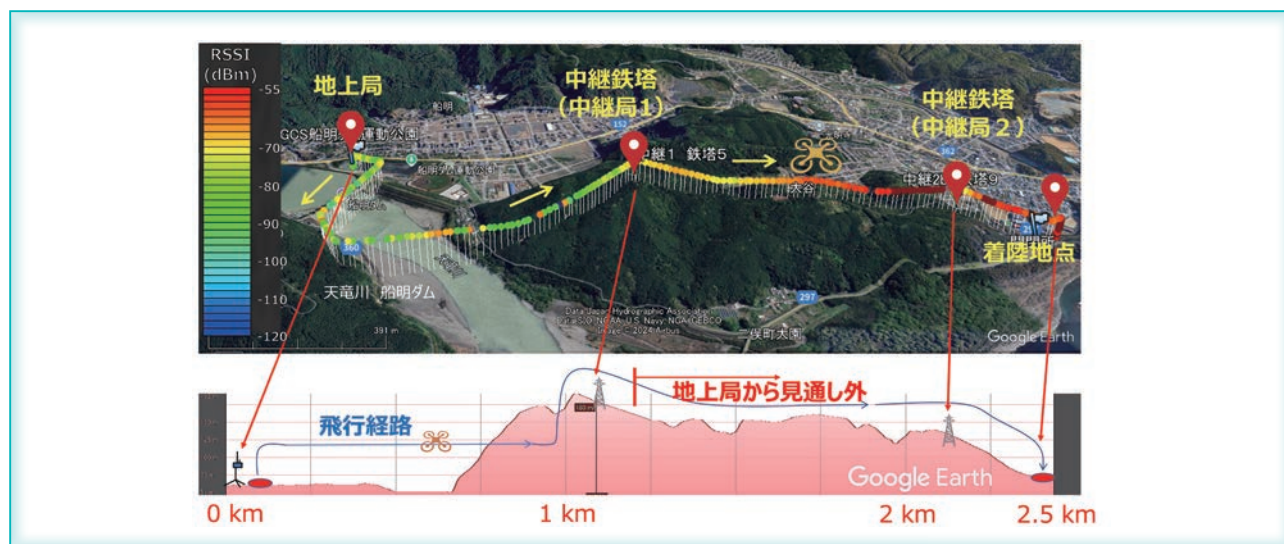


図 11 鉄塔リレーによる飛行の経路と端末局受信 RSSI のヒートマップ、並びに地形プロファイル
(浜松市天竜区船明ダム付近)

ローンの飛行軌跡と受信電力のヒートマップである。端末局搭載ドローンは地上局から最大 10 km ほどまで飛行しているが、U169 によるコマンド・テレメトリ通信の接続には成功していることが分かる。ただし、そのほとんどは地上局と端末局が直接つながる 1 ホップリンクであり、中継局は経由していない。また頻繁に短時間のリンクロストが発生している。この理由としては、ドローン機体内部の電源及びエンジンが発する雑音による受信感度低下によるものと推測されている。図 14 は、ドローンの電源オン、エンジンオンのときに胴体近傍で計測した雑音スペクトルを示しており、169 MHz 帯

近傍で約 9 dB ほどの雑音フロア上昇が見られている。この雑音フロアの上昇により上空局の受信条件が厳しくなっており、中継局と端末局の間の上空・上空間リンクの通信距離も 2 km 前後まで低下してしまっていることが確認されている。

図 15 は、1 ホップ接続時の端末局 (TS) 及び地上局 (GS) の各受信 RSSI の距離減衰特性である。ほぼ自由空間減衰となっており、ここでは海面反射によるフェージングの影響はほとんどなく、主にアンテナパターンによるレベル低下が見られている。グラフの下方に伸びている線は雑音の影響に伴う通信ロストを表している。端末局受信と地上局受信の

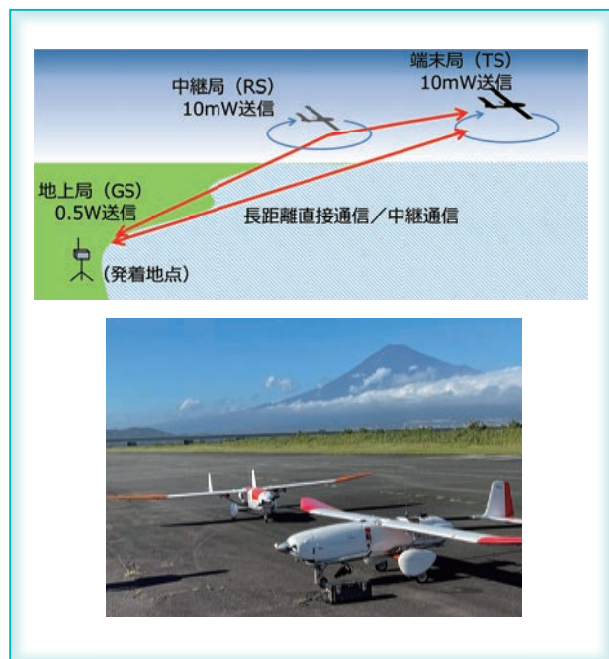


図 12 洋上での長距離伝搬試験と使用した固定翼エンジンドローン (2022 年、静岡県富士川滑空場)

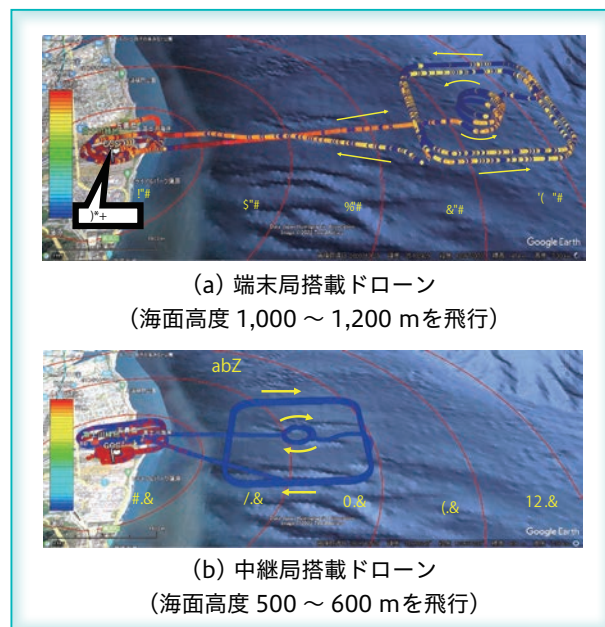


図 13 端末局及び中継局の各搭載ドローンの飛行軌跡と受信 RSSI ヒートマップ
(濃い色のドットはリンクロストを示す.)

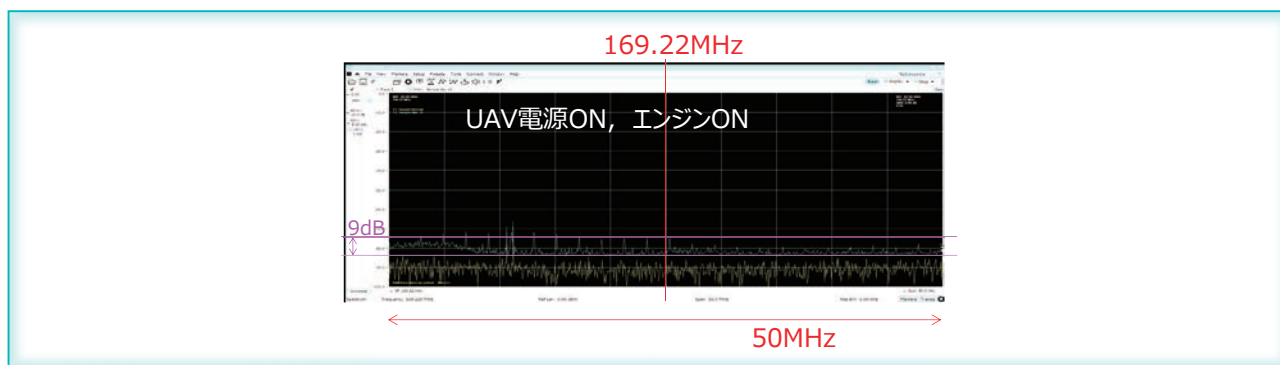


図 14 ドローン機体内部の雑音スペクトル

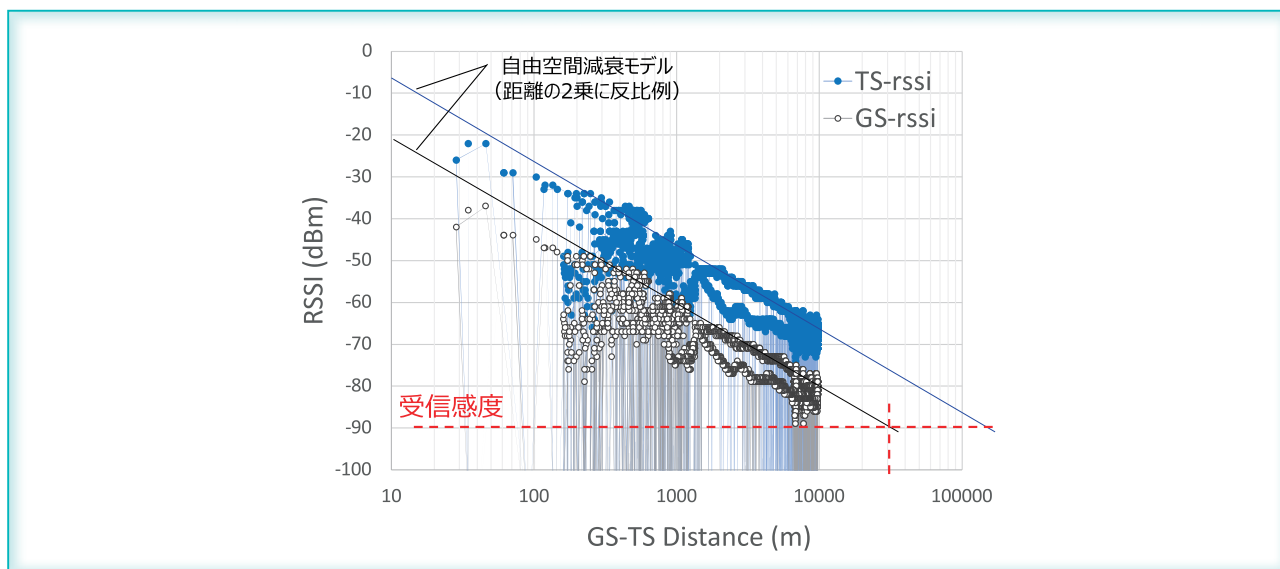


図 15 端末局と地上局の各受信 RSSI の距離減衰特性

RSSI の差は、送信電力の差によるものである。この減衰カーブを延ばしていくと、雑音の影響が排除できれば、無線機の受信感度は -90 dBm 程度と推定されているので、地上局－中継局、中継局－端末局の各通信到達距離は $20\sim 30$ km 程度が期待できることが分かる。

4.2 機体間通信 (V2V) リンクとその連携制御への応用

上空－上空間の連携に関するもう一つの技術として、地上局を経由せずに上空局同士 (V2V) で互いの位置情報等を共有する通信リンクを直接結び、これをドローン同士の自律的な連携制御に応用するシステム (図 16) の開発と実証について述べる。

NICT において開発した V2V 通信システム (「ドローンマッパー*」と呼んでいる。) ⁽¹⁰⁾ は、免許が不要な特定小電力無線局である 920 MHz 帯を利用しており、LPWA (Low Power Wide Area) 方式

の一つであるチャープ変調信号 (LoRa) あるいは従来の変調方式である FSK (Frequency Shift Keying) を通信距離やデータ速度の要求に応じて選択することができる。LoRa の場合、小形の端末でかつ送信電力も 20 mW ながら、電波の見通しが良ければ 10 km 程度以上届く能力を持つ。FSK でも 1 km 程度届く。この電波により、GNSS に同期した固定あるいはランダムな送信タイミングで、1 秒間に $1\sim 4$ 回の頻度で自機の位置情報等を周囲にブロードキャストし、周囲のほかの機体がそれをそれぞれ受信する。1 台の通信端末における送信と受信はタイミングをずらして行うため、相互に干渉 (自家中毒) することはなく、同一の周波数で行え、周波数利用効率が高い。

この V2V 通信システムをドローン間の連携制御に利用するため、ドローン上において V2V 通信端末を別の補助コンピュータを経由してドローンのフライトコントローラにシリアル接続する (図 17)。この補助コンピュータは、所定の連携飛行制御を行わせるため、V2V 通信端末で受信された他機の位

* ドローンマッパーは登録商標。

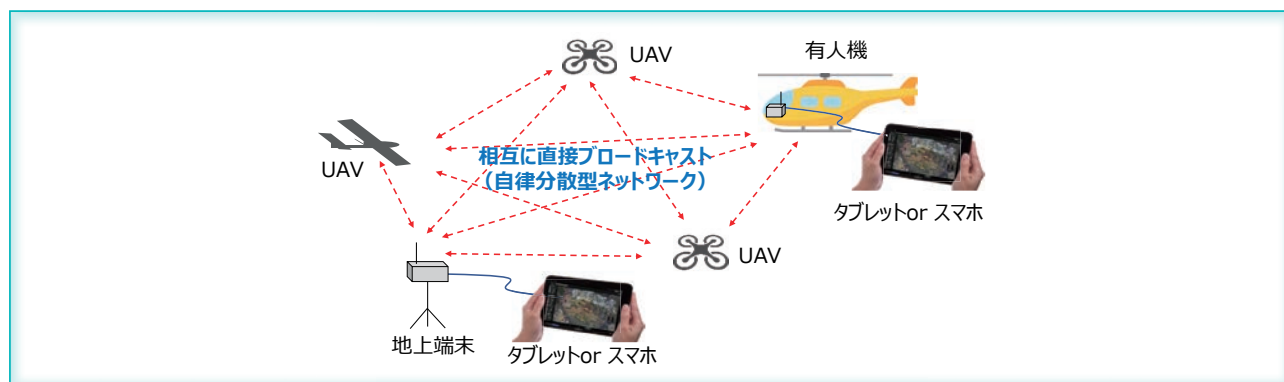


図 16 機体間 (V2V) 通信システム「ドローンマッパー*」

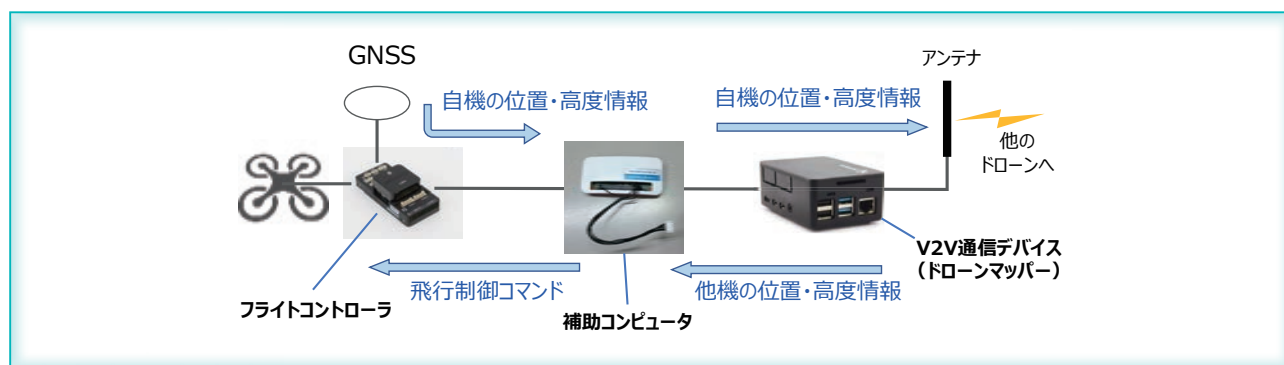


図 17 V2V 通信端末とドローンとの接続

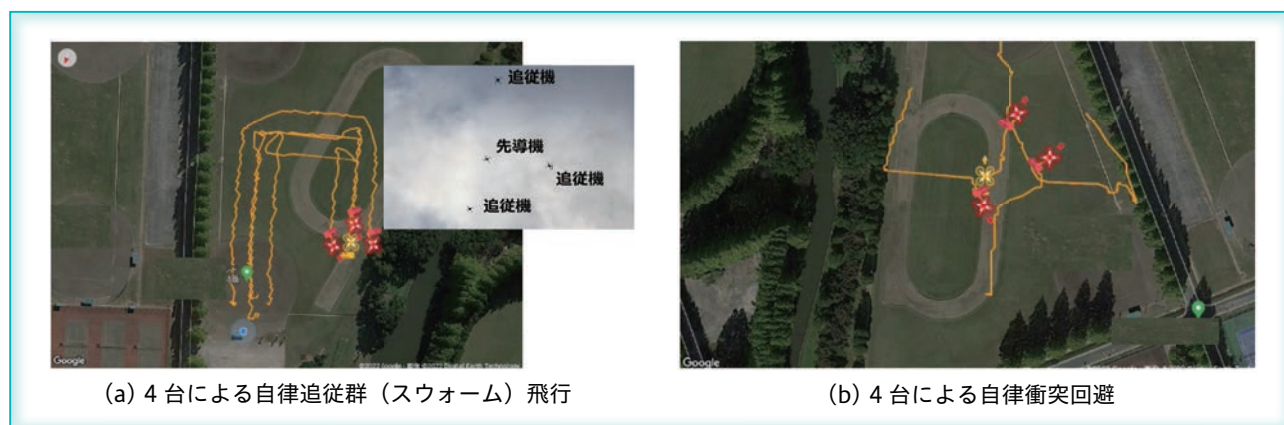


図 18 ドローン間の連携制御実験

(位置更新頻度 2 回 / 秒, 飛行速度 1 ~ 3 m / 秒, 2022 年, 大宮けんぼグラウンド)

置情報と自機の位置情報とから自機と他機の相対位置を計算し、適切な飛行制御コマンドを生成して自機のフライトコンピュータに与える役割を果たす。その飛行制御コマンドの内容によって、自律追従フォーメーション飛行や自律衝突回避等の機体間での協調連携飛行を行わせることができる。

このシステムを各ドローンに実装し、自律追従群 (スウォーム) 飛行と自律衝突回避に成功したコンセプト実証実験⁽¹¹⁾の飛行軌跡を図 18 に示す。

図 18 (a) はドローン 4 台による自律追従群 (スウォーム) 飛行を示し、地上からの制御は先導機のみに行い、追従機は先導機に一定の相対位置を保つ

て追従するプログラムを実装している。図 18 (b) は同じく 4 台による自律衝突回避を示し、他機に一定の距離まで接近したら、停止するか右に避けるかの選択を行い、地上の操縦者を介さずにドローンが自分で判断して自律的に衝突を回避するプログラムを実装している。

このシステムはドローン同士だけでなく、ドローンと有人ヘリの間の安全確保にも適用できる。まだドローンの上限速度、対応台数、様々な状況に対応できる柔軟性などに課題があり、引き続き機能向上に取り組んでいる。

このような複数機体の連携制御は、より多くのド

ローンが高密度かつ遠方まで飛行する等の状況において、空の安全性向上と地上側との無線リンクの数を減らして、周波数やコストを節減するために役立つものと期待される。

5 おわりに

ドローンを安全に飛行させるための制御通信に関して、課題と制度の現状を述べるとともに、課題解決に向けた取組みの一つとして、ドローン同士、無線局同士を連携させる技術と、そのフィールド試験評価で得られた性能について述べた。しかし、まだ雑音による干渉や飛行制御アルゴリズムなどに課題があり、引き続き今後のドローンの普及と社会貢献を目指して、無線通信の観点から取組みを進めていきたいと考えている。

謝辞 本研究の一部は、内閣府「革新的研究開発プログラム」、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP17004）の結果得られたものである。また、霧島での実験と砂防ダム点検を想定した実験は株式会社建設技術研究所、浜松での実験は中部電力、中部電力パワーグリッド及び日立製作所、固定翼ドローンによる実験は航空自衛隊航空開発実験集団との共同によるものである。

■ 文献

- (1) 国土交通省，“無人航空機レベル4 飛行ポータルサイト.” <https://www.mlit.go.jp/koku/level4/>
- (2) 国土交通省，“ドローンのレベル3.5 飛行制度の新設について,” 2023年12月26日. <https://www.mlit.go.jp/seisakutokatsu/freight/content/001716111.pdf>
- (3) 総務省，“無人航空機等における携帯電話等の端末の利 用.” <https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/others/drone/uav/index.htm>
- (4) 総務省情報通信審議会情報通信技術分科会陸上無線通信委員会（第28回）資料，“ロボットにおける電波利用の高度化に関する技術的条件（案）,” 2016年1月26日. https://www.soumu.go.jp/main_content/000397015.pdf
- (5) JUTM ホームページ. <https://jutm.org/>
- (6) R. Miura, T. Matsuda, F. Ono, L. Shan, and T. Matsumura, “Performance of multi-hop command and telemetry communication system in 169 MHz band for operation of drones beyond line-of-sight,” J. ARME, vol. 3, no. 5, pp. 468-479, Sept. 2022. <https://lupinepublishers.com/robotics-mechanical-engineering-journal/special-issue/ARME.MS.ID.000175.pdf>
- (7) NICT, “見通し外を飛行するドローンを安全に制御する実証実験に成功,” 2024年1月25日. <https://www.nict.go.jp/press/2024/01/25-1.html>
- (8) 三浦 龍, 松田隆志, 单 麟, 越川三保, 松村 武, 追良瀬利也, 小林健悟, 谷村和彦, “山中の送電鉄塔を中継する UAV の 169 MHz 帯通信実験,” 2022 信学ソ大, A-16-2, Sept. 2022.
- (9) 三浦 龍, 松田隆志, 越川三保, 松村 武, 古川 徹, 青木信磨, 菅沼好恵, “洋上飛行する UAV エンジン機との 169 MHz 帯長距離 C2 リンク実験,” 2024 信学ソ大, A-16-01, Sept. 2024.
- (10) L. Shan, R. Miura, T. Kagawa, F. Ono, H. B. Lee, F. Kojima, and S. Kato, “Field tests on ‘Drone Mapper’-location information and remote ID sharing network in the 920 MHz band for drones-,” WPMC2018, Nov. 2018.
- (11) NICT, “世界初, ドローン同士の直接通信で自動追従群飛行と自律接近回避に成功,” 2022 年 4 月 11 日. <https://www.nict.go.jp/press/2022/04/11-1.html>.

(2024 年 11 月 1 日受付, 2025 年 1 月 15 日再受付)

三浦 龍 (正員)

1984 横浜国大・院・修士課程了。同年郵政省電波研究所（現在の情報通信研究機構）入所。途中、ATR 等に出向。帰任後上席研究員を経て 2020 年定年退職。現在ワイヤレスシステム研究室主任研究員（非常勤）。無人航空機用の通信の研究や団体活動に従事。博士（工学）。



松田隆志 (正員)

2010 神戸大・院・博士課程了。情報通信研究機構入所。シート媒体通信、ワイヤレス給電、端末間通信、海中における電波通信に関する研究に従事。2024 ワイヤレスネットワーク研究センターワイヤレスシステム研究室研究マネージャ。無人航空機との通信に関する研究に従事。博士（工学）。



越川三保

2004 情報通信研究機構入所。以来、旧横須賀無線通信研究センター、ワイヤレスネットワーク研究センター等において電波伝搬、無人航空機及びサイバネティックアパタの通信に関する研究・実験支援に従事。現在同センターワイヤレスシステム研究室研究技術員。



松村 武 (正員)

1998 東北大・院・修士課程了。複数の企業で無線通信機器開発に従事。2007 情報通信研究機構入構。2010 東北大・院・博士課程了。2016 京大・院・情報学研究科准教授。帰任後 2021 からワイヤレスシステム研究室室長。B5G、ワイヤレスエミュレータ、サイバネティックアパタ遠隔操作高信頼化等の研究に従事。博士（工学）。



ドローンの運航管理システム

Unmanned Aircraft System Traffic Management

西沢俊広 Toshihiro Nishizawa[†]

Summary

本解説論文では、ドローンを安全に運用するために必要な情報共有や調整を円滑にするドローン運航管理システム（UTM: Unmanned Aircraft System Traffic Management）について、その必要性・目的、機能構造、研究開発状況及び制度整備状況を解説する。また、ドローンに加えて高高度プラットフォームシステム（HAPS: High Altitude Platform System）等の様々な航空機の運用についても取り上げ、複数種別の航空機の運航管理の課題について論じる。

Key Words

ドローン、無人航空機、運航管理、UTM、ドローン航路

1 はじめに

航空法では「人が搭乗しない航空機で、遠隔操作または自動操縦によって飛行するもの」を無人航空機と定義している。本論文では無人航空機のうち、100 g 以上 25 kg 未満の小形の無人航空機をドローンとして定義し、解説をする。

現在ドローンの利活用が進んでいる。農薬散布、測量、点検などの分野では、管理された土地の上空で利用することで普及が進んでいる。一方で、物流や警備、巡視といった分野では、長距離のドローンの活用となり、日本全国で実証が取り組まれている。

ドローンの普及には、次の三つの課題が挙げられる。一つ目は、ドローン運航者の情報共有や調整を円滑にし、安全な運航を実現することである。二つ目は、ドローンの機体自体の安全性を向上させることである。三つ目は、ドローンを活用したビジネスの経済的合理性を確立することである。これら三つの課題が解決されることで、ドローンが普及し、様々な分野で利活用が進むこととなる。空を見上げれば、至るところでドローンが飛行しているのを見るのが日常になると想定される。

将来、高密度に多数のドローンを安心・安全に運航するためには、ドローンの運航者に対し、安全にドローンを運航するために必要な情報を提供し、ドローンの飛行計画を管理し、ドローンが正常に飛行

しているかを管理する必要がある。そのため、ドローンの運航者に対して、ドローンを安全に運航するための情報提供やサービス提供をするシステムがドローン運航管理システム（UTM: Unmanned Aircraft System Traffic Management）である。

2 UTM の機能構造

UTM の機能構造については、標準化団体である国際標準化機構（ISO: International Organization for Standardization）において、筆者がプロジェクトリーダーとなり、世界のドローン分野のエキスパートと議論を重ね、規格文書「ISO 23629-5:2023 UAS traffic management (UTM) Part 5: UTM functional structure」としてまとめた⁽¹⁾。

UTM の機能構造を国際標準化したことで、世界各国のドローンに関わるステークホルダーが、運航管理に必要な機能を共通的に定義された言葉で議論できるようになる。UTM はドローンの運航を管理するための基盤となるシステムである。そのため、ドローンを活用したシステムに求められる具体的なサービス・機能要件や、システム全体のアーキテクチャの検討、ステークホルダー間の機能実装分担、システムの調達などの調整を齟齬なく実施できるようになる。本規格文書では UTM の機能を大きく六つに整理した、機能構造のブロック図を図 1 に示す⁽²⁾。以下にそれぞれの機能を説明する。

2.1 空域情報管理機能

ドローンが飛行可能な空域を設定し、関係者に情報を共有する機能を提供する。また、航空機の管制

[†] 公立はこだて未来大学、函館市
Future University Hakodate, Hakodate-shi,
041-8655 Japan

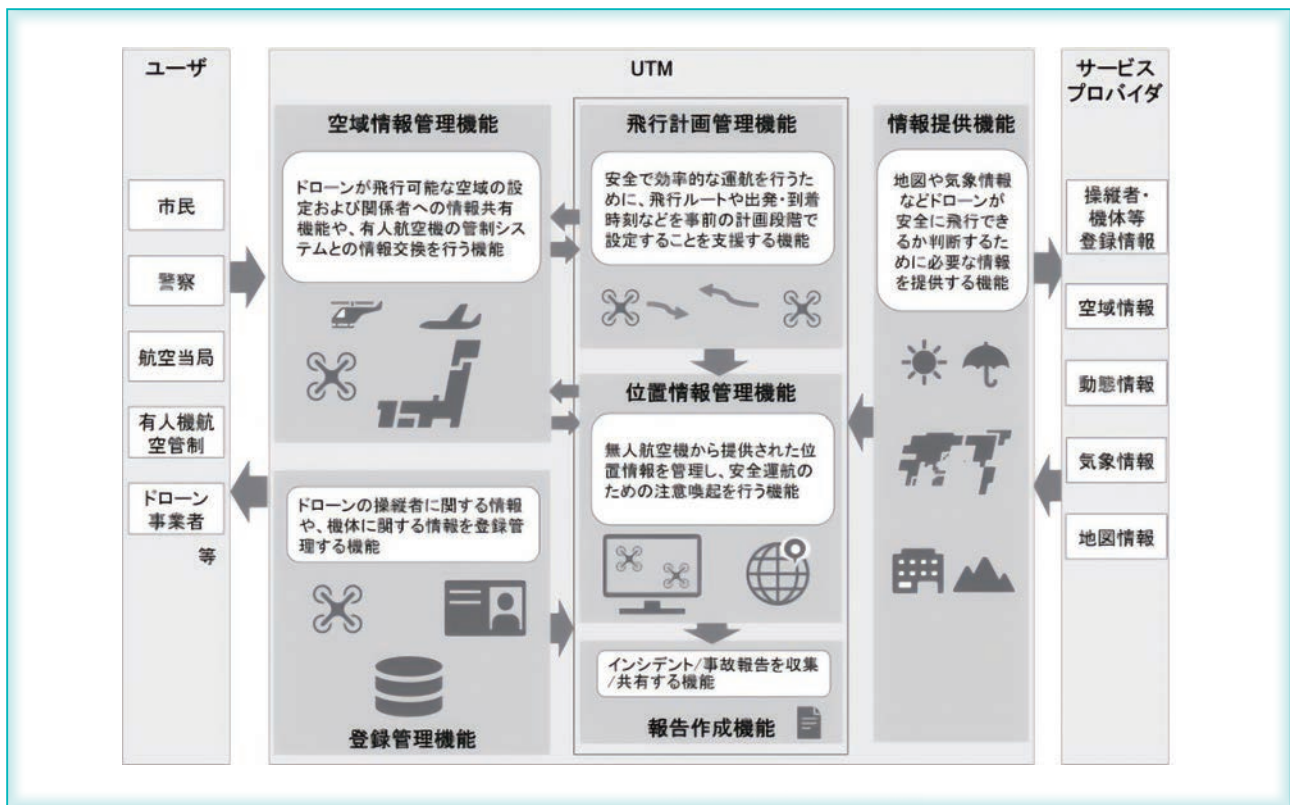


図1 UTMの機能構造 (NEDO プレスリリースから) (1), (2)

システムとの情報交換を可能にする機能も備える。

2.2 飛行計画管理機能

ドローンの安全かつ効率的な運航を実現するため、飛行ルートや飛行開始時刻・終了時刻を計画段階で設定することを支援する機能を提供する。

2.3 位置情報管理機能

飛行中のドローンから提供された位置情報を管理し、安全運航のための注意喚起を行う機能を提供する。

2.4 情報提供機能

地図や気象に関する情報など、ドローンを安全に飛行でき得るかを判断するために必要な情報を提供する。

2.5 登録管理機能

ドローンの操縦者や、機体に関する情報を登録管理する機能を提供する。

2.6 報告作成機能

ドローン運航中のインシデントや事故の報告を収集・共有する機能を提供する。

3 UTMの研究開発の動向

UTMの研究開発は日本においては国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が「ロボット・ドローンが活躍する省エネルギー社会の実現プロジェクト（DRESS プロジェクト）」を2017年から2022年まで実施した^{(3), (4)}。更に2022年からドローンだけでなく「空飛ぶクルマ」も統合する形で、NEDOが「次世代空モビリティの社会実装に向けた実現プロジェクト（ReAMo プロジェクト）」を5年計画で実施中である。

関連する技術としてドローン航路の整備について、NEDOが「産業DXのためのデジタルインフラ整備事業／デジタルライフラインの先行実装に資する基盤に関する研究開発」の一環で推進している。2024年度にドローンの特定のユースケースで、先行実装地域においてドローン航路の実証及び有効性の検証に取り組んだ。

これらのプロジェクトに関して研究開発の動向を解説する。

3.1 ドローン運航管理システムの相互接続試験

DRESS プロジェクトでは、2019年10月に、福島ロボットテストフィールド（福島県南相馬市、浪江町）において、ドローン事業者29社が参加した



図 2 2019 年に実施された NEDO の運航管理システムの実証 (NEDO プレスリリースから)⁽³⁾

ドローン運航管理システムの相互接続試験を実施した。筆者は本実証試験の責任者を務めた。

福島ロボットテストフィールド周辺で飛行したドローンの利用シーン及び飛行密度を図2に示す。同一空域で複数の事業者がドローンを安全に運航するためにUTMに相互接続し、1時間、1km²に100フライト以上の高密度のドローン飛行試験を成功させた。福島ロボットテストフィールドの総合管制室に、複数のドローン事業者が情報共有するための「運航管理統合機能」のサーバを設置した。運航管理システムのAPI及びAPI接続支援サービスを利用して、ドローン運航管理システムの相互接続試験を実施し、運航管理システムの実用性や相互接続に関するセキュリティ対策の有効性を実証した。

運航管理システムのうち、運航管理統合機能は複数のドローン事業者間で飛行計画（飛行を計画する経路やエリアの情報）や飛行状況（飛行させているドローンの位置、高度、速度などのリアルタイム情報）、空域情報（飛行禁止空域や地表障害物などの空域の安全に関する情報）などの情報を共有する

サービスを提供する。ドローン事業者により運用される「運航管理機能」は、運航管理統合機能が提供するサービスを活用しドローンの運航を管理する。これにより、同一空域で複数のドローン事業者がドローンを飛行させる場合でも、相互の情報を共有することができ、安全にドローンを運用することが可能となった。また、「情報提供機能」が地図情報、気象情報等、ドローンを安全に飛行させるのに必要な情報を提供した。

相互接続試験では一般のドローン事業者が参加できるように、ネットワークを介して運航管理統合機能と情報提供機能に接続可能とした。そのため、ネットワークの安全性を向上させるため、ファイアウォールとIDS（侵入検知システム）を設置し、接続する事業者には認証キーを配布し、認証された事業者のみが接続した。また、複数ドローンによる気象観測、複数ドローンを隊列飛行させた物流など、複数のドローンを同時に運用するケースを想定した飛行計画や飛行状態の管理を可能にするとともに、これらのドローンを安全に運用するための空域利用



図3 2021年に実施されたNEDOの運航管理システムの実証（NEDOプレスリリースから）⁽⁴⁾

方法や運航ルールについて、運航管理シミュレーションによる検証・評価を行った。

3.2 複数地域で同時飛行する運航の管理実証

DRESS プロジェクトにおいて、2021年10月に全国13地域で、合計52機を同時に飛行させる運航管理の実証実験を実施した⁽⁴⁾。

本実証では、東京都港区虎ノ門のKDDI株式会社のオフィス内に設置したドローン運航管理室から運航管理を行った。実際にドローンが飛行した地域は、北海道稚内市、宮城県仙台市、福島県南相馬市、石川県白山市、岐阜県美濃加茂市、静岡県富士市、三重県志摩市、兵庫県洲本市・姫路市・赤穂郡上郡町、高知県高岡郡四万十町、長崎県五島市・対馬市、大分県杵築市、宮崎県東臼杵郡美郷町の13か所であった。それぞれの地域で、物資配送、インフラ点検、災害を想定した被害の把握、スポーツの空撮等の利用シーンでドローンが活用された。

本実証により、遠隔地に設置した運航管理システムが機能・オペレーションの両面から全国で運用可能であり、複数のドローンが飛び交う上空で衝突回避などの運航管理業務を行えることが確認できた。また、各地域の抱える様々なニーズとドローンの活用方法についても検証した。

全国で実施されたドローンの実証の様子を図3に示す。

3.3 デジタルライフラインの先行実装に資する基盤に関する研究開発（ドローン航路）

NEDOは2024年7月に「産業DXのためのデ

ジタルインフラ整備事業／デジタルライフラインの先行実装に資する基盤に関する研究開発」の実施事業者の採択結果を公表した⁽⁵⁾。日本電気、KDDIスマートドローン、Intent Exchange、宇宙サービスイノベーションラボ事業協同組合、グリッドスカイウェイ有限責任事業組合、(株)トラジェクトリー、東大、(株)フジヤマの提案が採択された。

現在、ドローンを長距離にわたって飛行させる運用をする場合には、その飛行経路の安全管理をドローンを運航する事業者が実施する必要がある。そのコストを削減することが課題となっている。ドローン航路は、ドローンを安全に運航するための航路をあらかじめ設計し、複数の事業者がその航路を共用することで、コストの削減を目指すものである。更にドローン航路はUTMと連携し、ドローンを安全に運航するためのインフラとして整備されるものである。

ドローン航路システムは、地上及び上空のリスク等の制約要因に基づいて立体的な空域の航路を画定し、航路内部の安全かつ簡便な運航に必要な情報を配信するとともに、安全管理の支援を統合的に行う。本事業ではドローン航路システム、及びドローン関連のデータを流通するシステム等を構築する。更に、ドローン航路内の安全、効率的な運航のためのドローン航路に係る管理手法やルールの調査研究をする。

本稿執筆時点では、埼玉県秩父市と静岡県浜松市を先行実装地域として選定し、ドローンのマルチユースでの利用シーンで実証を行い、ドローン航路の有効性を検証する計画である。秩父市では送配電

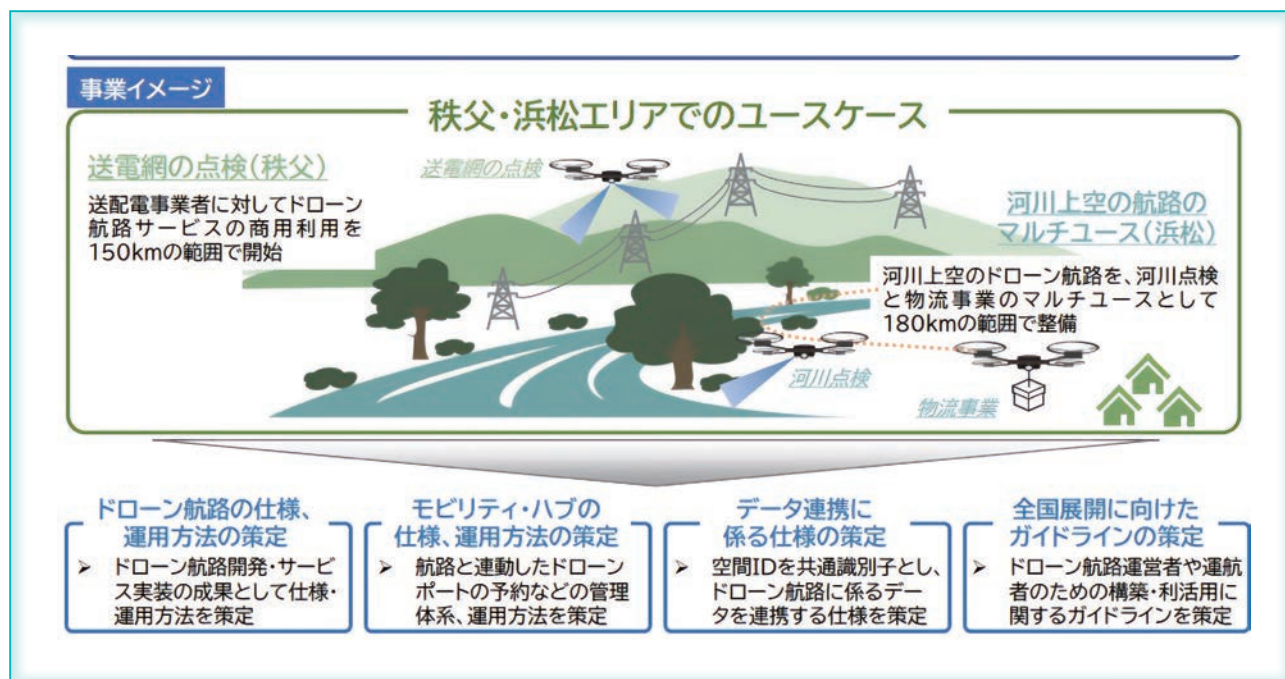


図4 NEDO ドローン航路の先行実装に関する研究開発（NEDO プレスリリースから）⁽⁵⁾

事業者に対してドローン航路サービスの商用利用を想定し、150 km のドローン航路を整備する。また、浜松市では天竜川水系の河川上空に 180 km のドローン航路を整備し、河川点検と物流のマルチユースの実証をする（図4）。

4 UTM に関する制度の動向

ドローンに関する制度については、政府が「小型無人機に係る環境整備に向けた官民協議会」を2015年12月に設置し、現在までに、航空法の改正に伴う飛行の許可・承認制度、機体の登録制度、機体認証制度、操縦ライセンス制度を整備してきた。更に、ドローン情報基盤システム（以下、DIPS）が構築され、現在、ドローンの運航者に利用されている。

UTM についての制度の議論については、2022年8月に開催された「小型無人機に係る環境整備に向けた官民協議会」第18回場で、国土交通省から空域の混雑度や運航形態に応じて、UTM の段階的導入を検討することが示された⁽⁶⁾。図5に空域の混雑度や運航形態に応じた UTM の段階的導入に関するスライドを示す。当面、空域の混雑度が低いことが想定されるため、STEP 1 としては単一の運航者がリスクの高い飛行を実施する際に UTM の利用を推奨としている。具体的な例として災害時の UTM の利用を想定している。STEP 2 の段階では、航空局が認めた UTM プロバイダ（以下、

USP）によるサービスを利用することにより、同一空域に複数の運航者がリスクの高い飛行を実施可能になることを目指す。更に空域の混雑度が高まる STEP 3 の段階では、指定空域内において、全てのドローンが航空局の認めた USP を利用することにより、高密度運航を可能にする。更に指定空域を飛行する有人機の位置情報の共有も可能にする。

現在、NEDO の ReAMo プロジェクトでドローン運航管理システムの研究開発が実施されている。これらの研究開発の動きに合わせ、UTM の制度整備に関する議論、合意形成が進められた。2024年4月に開催された小形無人機に係る環境整備に向けた官民協議会第19回場で、国土交通省から、無人航空機の運航管理（UTM）に関する制度整備の方針が示された⁽⁷⁾。

現状は STEP 1 として、USP のサービスの利用は限定的であり、航空局が整備した DIPS によりドローン運航者は飛行計画を通報し、飛行計画情報を共有する運用がされている状況である。

そこで、STEP 2 では国による USP の認定制度を整備し、UTM を利用してドローンの安全・効率的な運航管理が実施されることを目指す。UTM により飛行計画の重複の解消や、飛行中のドローンの位置情報を共有する。更に、飛行計画と実際の運航状況の適合性をモニタリングし、不適合が起きた場合や機体同士の干渉が発生したときにアラートがされるような機能が具備されることが望ましいと考えられている。また、USP の利用を一律に義務とせ

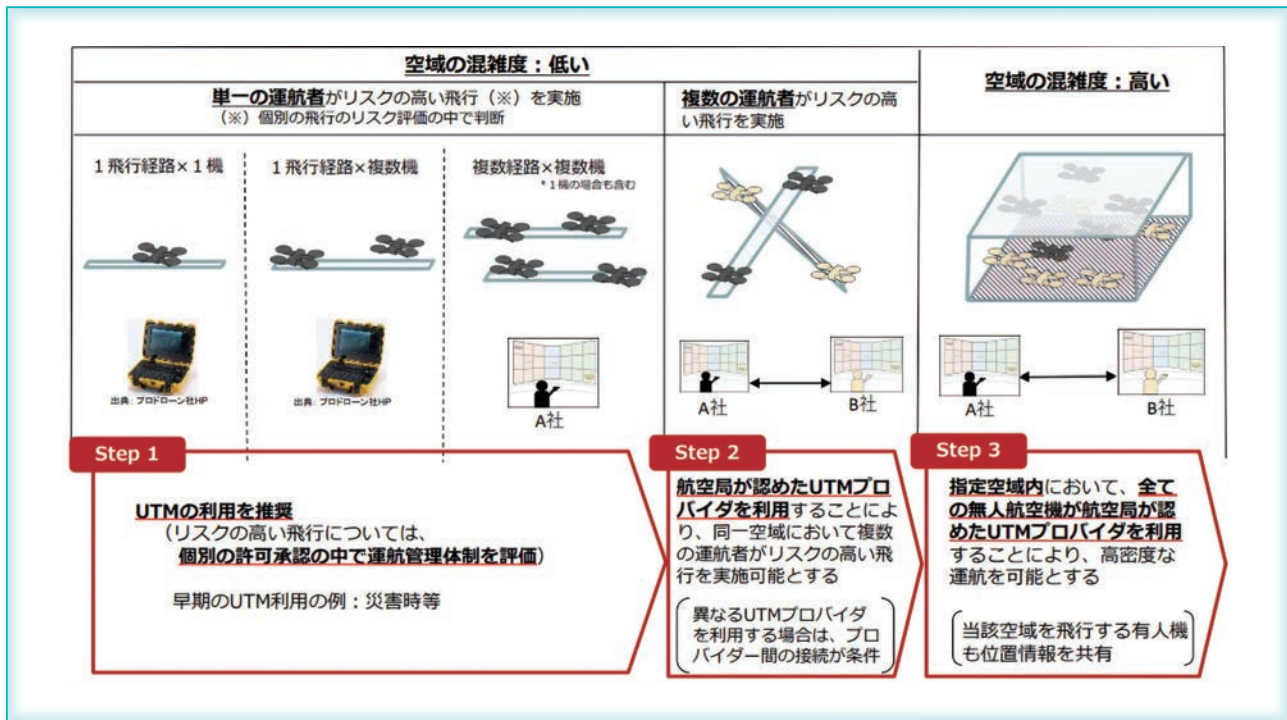


図 5 空域の混雑度や運航形態に応じた UTM の段階的導入
(小型無人機に係る環境整備に向けた官民協議会 第 18 回 国土交通省配布資料から ⁽⁶⁾)

ず、運航者が任意で利用することを想定している。

更に STEP 3 では、ドローンの運航頻度の一段の増加や、空飛ぶクルマの実用化による低高度飛行有人機の増加により航空機の衝突リスクが高くなることから、特定の空域を指定し、その空域で国が認定した USP の利用を義務化することが考えられている。

USP 認定制度の検討に当たり、ドローンの運航者、USP、航空局の役割分担に関する議論も進んでいる。ドローン運航者はドローンの安全な運航の責任を負い、USP は安全な運航を支援する情報提供などのサービスの提供に責任を負う。そして、航空局は航空法に基づき、機体登録、飛行の許可・承認、飛行計画の重複判定、飛行計画変更指示、事故調査を担うと整理された。

システムのアーキテクチャに関する検討も進んでいる。複数の USP が運用される場合には、USP 間の情報共有が課題となる。この実現のため、航空局が提供する DIPS を介して情報共有をする DIPS 拡張型、国が権限を与えた民間組織によるドローン飛行情報システムによる情報共有を実現するドローン飛行情報システム活用型のパターンが検討されている。

5 ドローンと他の航空機の安全な運用

本章では、ドローンとほかの航空機の安全な運用について、航空機の種別ごとの運用高度や管理方法を説明する。更に機体種別ごとの運航管理システムの連携について説明する。

5.1 航空機の運用高度と管理方法

航空機は種別に応じて運用高度を設定し、空域を分離することで航空機同士の衝突などの事故を防止している。図 6 に航空機の機体種別ごとの運用高度と管理方式を示す。

5.1.1 ドローン

航空法ではドローンは「150 m 未満」の低高度で運用するルールが定められており、それ以上の高度で運用する場合は個別に航空局の許可を得る必要がある。運航を管理するための UTM については 4. で述べたように研究及び制度設計が進んでいる。また、機体や操縦者の登録管理、飛行計画の共有などの機能については、航空局が提供する DIPS が運用されている。ほかの航空機との空域を分離するため、空港などの近辺でのドローンの利用は制限されている。また、ほかの航空機が接近した場合、運航者はドローンを直ちに安全な場所へ着陸させるか、飛行を中断する必要がある。

運用高度	機体種別	説明	管理システム	状況	イメージ
20,000m 付近	HAPS (High-Altitude Platform System)	成層圏で運用される。通信基地局などの応用に期待されている。	HATM (High Altitude Traffic Management)	研究中	
12,000m ～ 900m	計器飛行方式 (Instrument Flight Rules) で飛行する航空機 旅客機等	巡航高度は約 10,000m。	ATM (Air Traffic Management)	運用中	
900m ～ 300m	目視飛行方式 (Visual Flight Rules) で飛行する航空機 ヘリコプター、小型機等	航空法で300m以上で巡航することが求められる。	パイロットの責任で運用。管制空域ではATMに従う。	運用中	
600m ～ 150m	空飛ぶクルマ、UAM (Urban Air Mobility)	運用高度などのルールについて議論中。	UATM (Urban Air Mobility Traffic Management)	研究中	
150 m ～ 0m	ドローン	航空法で150m未満の高度で飛行することが求められる。	UTM (UAS Traffic Management) / DIPS (Drone Information Platform System)	研究中 ※一部機能はDIPSで運用中 登録管理、飛行計画共有等	

図 6 航空機の運用高度と管理方法 (イラストは Google Imagen3 を用いて AI により生成した)

5.1.2 空飛ぶクルマ

空飛ぶクルマは少人数が搭乗できる電動のマルチロータ機や VTOL 機（垂直離着陸機）である。制度設計に関しては政府が「空の移動革命に向けた官民協議会」を 2018 年に設置し、空飛ぶクルマの実用化に向けた運用ルールの策定や安全基準の整備等を検討している。更に NEDO ReAMo プロジェクトの「低高度空域共有に向けた運航管理技術の研究開発」において UATM (Urban Air Mobility Traffic Management) が研究されている。空飛ぶクルマの運用高度については、ドローンの運用高度より高い「150 m 以上 600 m 未満」の低高度空域を飛行することが検討されている。

5.1.3 目視飛行方式で飛行する航空機

目視飛行方式で飛行する航空機にはヘリコプターやセスナ等の小形航空機がある。パイロットが自身の責任で目視により安全確認を行いながら機体を運用する。航空法により巡航時の高度は「300 m 以上」で、離着陸時には「150 m 未満」の低高度空域に一時的に侵入することがある。特にドクターヘリは要救助者に合わせて、学校の校庭や河川敷等に緊急着陸をする運用がされる。空港近辺などの管制空域では ATM (Air Traffic Management) の指示に基づき飛行する。

5.1.4 計器飛行方式で飛行する航空機

計器飛行方式で飛行する航空機は一般的なジェット旅客機等の航空機である。国家をまたいで運用されるため、国際的なルールに基づき、機体には無線機やセンサなどが搭載され、ATM の管理下で運用される。主に「8,000 m から 10,000 m」の高度で巡航する。計器飛行方式に対応した設備が整備されている空港や飛行場に離着陸する。

5.1.5 HAPS

高高度プラットフォームシステムを HAPS と呼ぶ。HAPS は約 20,000 m の高度で長期間にわたり運用される航空機である。HAPS は通信サービスを提供し、1 機当たり直径 100～200 km の広いエリアをカバーする大容量・低遅延の通信を実現する。HAPS については NEDO の「経済安全保障重要技術育成プログラム／高高度無人機による海洋状況把握技術の開発・実証」が 2024 年 7 月にスタートした。本研究で HATM (High Altitude Traffic Management) の開発に取り組んでいる。

5.2 航空機種別ごとの管理システムの連携

航空機の安全な運用のためには、機体種別ごとの管理システムや航空管制システムを連携させることが重要である。2. の UTM の機能構造で述べたとおり、ドローンの運航を管理する重要な機能とし

て、飛行計画管理機能と位置情報管理機能がある。これらはドローンのみならず、ほかの種別の航空機でも管理される情報であり、これらの情報を連携することで安全な航空機の運航が実現できる。

例えば HAPS は離陸後、ドローンや空飛ぶクルマ、目視飛行方式及び計器飛行方式の航空機が運用される高度を通過し、最終的に約 20,000 m の高度に到達する。不慮の事故で墜落となると、ほかの航空機が運用される高度に落下することとなる。

また、空飛ぶクルマは都市部や郊外にポートが多数設置され、短距離での離着陸が頻繁に行われる運用が想定される。このため、離着陸時にドローンが運用される低高度空域に侵入する機会が多い。

ドローン、空飛ぶクルマ、目視飛行方式や計器飛行方式の航空機、HAPS を安全に運航するためには、各運航者が飛行計画や位置情報を共有する必要がある。更に、飛行計画の調整や、互いのリアルタイムの位置情報を活用した衝突回避が求められる。航空機種別ごとの管理システムが有する飛行計画や位置情報を共有する仕組みの構築が急務である。

6 まとめ

本解説論文ではドローンを安全に運用するために、ドローン運航者の情報共有や調整を円滑にする UTM について、その必要性、目的、機能構造、及び研究開発や制度整備の進捗状況について解説した。更に、ドローンとほかの航空機に関する運航管理の課題について解説した。

今後、UTM が整備されることで、物流や災害対応、農業など多様な分野でドローンが活用され、多数・高密度の運航が実現し、安心・安全かつ効率的な社会の実現が期待される。

謝辞 本解説論文の成果の一部は、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の委託業務（JPNP17004, JPNP22002, JPNP22006）の結果として得られたものである。

■ 文献

- (1) ISO, “ISO 23629-5:2023 UAS traffic management (UTM) Part 5: UTM functional structure,” April 2023. <https://www.iso.org/standard/78961.html>
- (2) NEDO, “ドローンの社会実装に向けてドローン運航管理システムの機能構造を国際規格化,” プレスリリース, 2023 年 4 月 27 日. https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101645.html
- (3) NEDO, “一般のドローン事業者も参画したドローン運航管理システムの相互接続試験に成功,” プレスリリース, 2019 年 10 月 30 日. https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101228.html
- (4) NEDO, “全国 13 地域で同時に飛行するドローンの運航管理に成功,” プレスリリース, 2021 年 11 月 24 日. https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101494.html
- (5) NEDO, “産業 DX のためのデジタルインフラ整備事業／デジタルライフラインの先行実装に資する基盤に関する研究開発に係る実施体制の決定について,” プレスリリース, 2024 年 7 月 23 日. https://www.nedo.go.jp/koubo/IT3_100319.html
- (6) 内閣官房小型無人機対策推進室 “レベル 4 の実現に向けた新たな制度整備等,” 小型無人機に係る環境整備に向けた官民協議会（第 18 回）配布資料 1, 2022 年 8 月 3 日. https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujinki/kanminkyougi_dai18/gijisidai.html
- (7) 国土交通省航空局安全部安全企画室, 経済産業省製造産業局次世代空モビリティ政策室, “無人航空機の運航管理 (UTM) に関する制度整備の方針,” 小型無人機に係る環境整備に向けた官民協議会（第 19 回）, 2024 年 4 月 5 日. https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujinki/kanminkyougi_dai19/gijisidai.html

(2024 年 11 月 17 日受付, 2025 年 1 月 30 日再受付)

西沢俊広（正員）

公立はこだて未来大・システム情報科学・複雑系知能学科准教授, Intent Exchange 株式会社兼務. 1996 筑波大大学院理工学研究科修了後, 日本電気にてロボット・ドローンの研究開発及び事業開発に従事. NEDO のドローン運航管理システムに関するプロジェクトの研究責任者, 国際規格 [ISO 23629-5: UTM functional structure] 作成プロジェクトリーダーを歴任. 2020 から独立行政法人情報処理推進機構に出向し, ドローン利活用社会, ドローン航路のアーキテクチャ設計を担当. 2024-04 から現職. 博士 (工学).



55年ぶりの万博が開催される 「大阪」の魅力

街plus
探訪



関西大学 和田友孝 Tomotaka Wada

1 はじめに

2025年4月に大阪で55年ぶりに大阪・関西万博が開催され注目されていますが、様々な魅力が詰まった大阪について、主な観光スポットや文化、おいしいものを中心に紹介したいと思います。

2 様々な魅力があふれる街

大阪には日本を代表する繁華街やランドマークなど、個性的な観光スポットがたくさんあります。その中でも人気のスポットの一つが「海遊館」(図1)で、世界最大級の屋内水槽があり、ジンベエザメを

見ることができます。大手旅行クチコミサイトでも、アジアNo.1の水族館に選ばれたほどです⁽¹⁾。

また、大阪を一望できる空中庭園と独特の建築美で世界に知られる「梅田スカイビル」(図2)が大阪の中心にあります。外国の方にはこのビルの形状がユニークで非常に人気があると聞きますし、実際に空中庭園を訪れてみると外国の方が日本人より多いくらいです。更に、この近くは大阪駅の北側に広がる「グランフロント大阪」だけではなく、昨年9月に「グラングリーン大阪」(図2)が新たにオープンしました。都会に“緑のある公園”を整備しているのが特徴です。敷地の約4割が先行オープンしただけなので、今後、更に新たなエリアの「まちびらき」を期待しています。

地上60階建て、高さ300mという日本で2番目の高さを誇る高層ビル「あべのハルカス」(図3)も、国内外から多くの人が集まるスポットです。このほかにも多くの百貨店や商業施設が集まる「梅田」(通称：キタ)エリアや、大阪らしいエネルギーとにぎわいにあふれた繁華街「道頓堀」(通称：ミナミ)エリア、2.6kmにわたって約600店もの店が軒を連ねる日本一長い商店街「天神橋筋商店街」(図4)があります。これらの繁華街は大阪のエネルギーを感じることができるエリアだと思いま

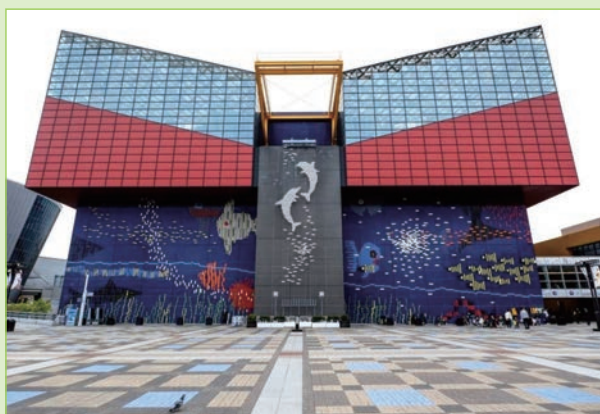


図1 海遊館



図2 梅田スカイビルとグラングリーン大阪 (JTB 提供)



図3 あべのハルカス



図4 天神橋筋商店街（大阪メトロ提供）



図5 なんばグランド花月



図6 太陽の塔（万博記念公園提供）



図7 プロジェクションマッピングのショー
（万博記念公園提供）

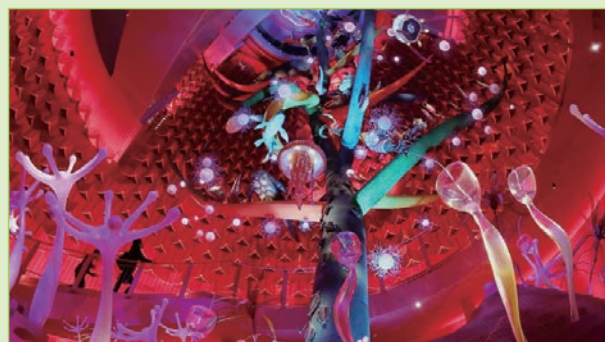


図8 太陽の塔の内側（万博記念公園提供）

す。お笑い文化も大きな特徴で、なんばにある「なんばグランド花月」（図5）では漫才や落語、よしもと新喜劇などで大いに笑って楽しんで、ストレス発散することができますよ。

そのほかにも、美しい緑とお堀に囲まれた「大阪城」、大阪のシンボルタワーとして知られる「通天閣」、世界有数のテーマパーク「ユニバーサル・スタジオ・ジャパン」など、バラエティー豊かで楽しめる場所が大阪にはたくさんあります⁽²⁾。

3 万博記念公園

今から 55 年前の 1970 年に大阪で開催された万博の跡地には万博記念公園があります⁽³⁾。大阪府吹田市に位置し、万博開催 2 年後の 1972 年 3 月に 264 ha の広大な敷地にオープンしました。万博のシンボルである太陽の塔（図6）を中心とした自然文化園、EXPO'70 パビリオン、日本庭園、国立民族学博物館など、様々な施設があります。最近では毎



図9 EXPO'70 パビリオン（万博記念公園提供）



図11 国立民族学博物館（万博記念公園提供）



図10 日本庭園（万博記念公園提供）



図12 エキスポシティにあるニフレルと大阪ホール（エキスポシティ提供）

年、年末に「イルミナイト万博」と「ラーメン EXPO」が開催されており、太陽の塔をバックにしたプロジェクションマッピングのショー（図7）を無料で楽しむとともに、その後に全国の様々な地域のラーメンを食べることができます。また、事前に予約すれば太陽の塔の内側（図8）にも入ることができます、神秘的な芸術を見ることができます。

EXPO'70 パビリオン（図9）は、万博開催当時のパビリオンであった「鉄鋼館」を利用して2010年に開設されたもので、当時の万博の映像や写真などを展示していますので、今年のお阪万博を訪れる前にでも是非とも訪れてみてはどうでしょうか。この55年の社会や技術の大きな変化を感じとることができると思います。

日本庭園（図10）は、万博出展のために日本の造園技術の粋を集めて造られた名園です。庭園の面積は26 ha、東西1,300 m、南北200 mの細長い地形に水の流れを造り、西から東に向かって流れるせせらぎに沿って、上代から中世、近世、現代へと四つの造園様式を取り入れ、「わび・さび」の世界に時を忘れる贅沢な散歩道が素晴らしいです。夏には蛍を見ることがもできます。数年前に海外の研究者を万博公園にお連れした際に、この日本庭園を非常に気に入ってもらった記憶があります。2024年に

は国登録記念物（名勝地関係）として文化財登録されています。

更に、国立民族学博物館（通称：みんぱく、図11）もお勧めです。ここは、人間文化研究機構を構成する大学共同利用機関であり、民族学・文化人類学を中心とした研究・展示を行っています。世界の様々な地域の文化や歴史を感じることができます。

また、万博公園の南側には、日本最大級の大型複合施設（ショップだけでなく水族館や観覧車などのエンターテインメント施設も併設）である「エキスポシティ」⁽⁴⁾があり、その中に最初に紹介した「海遊館」の姉妹施設に当たる「ニフレル」や日本一の高さ123 mを誇る観覧車「大阪ホイール」があります（図12）。床がガラス張りの広々としたゴンドラから大阪の景色が見渡せるので、お勧めです。更に、サッカーJリーグの「ガンバ大阪」の拠点である、「パナソニックスタジアム」もすぐ横にあるので、試合のある週末は多くの人でにぎやかになります。

4 おいしさ発見の食文化

2013年に「WASHOKU」がユネスコ無形文化遺産に登録されて、日本の食文化に世界から注目が集まっ

ています。大阪の人は、食を楽しむことにかけてとりわけ熱心で、大阪料理の特徴は、カツオや昆布からとった「出し」や、食材が元々持っている風味を生かした「UMAMI」文化です。大阪の出しは上品でまろやかなのが特徴で、うどんやお吸い物の澄んだ「つゆ」は、口に含むとあたたかくやさしい味わいが広がります。また、大阪には一年中、海山の食材が豊富に集まり、様々な旬の味覚を楽しむことができます。「くいだおれ大阪」とも呼ばれますが、これは食べ物にぜい沢して財産を失ってしまうというような意味で、それほど大阪は食の楽しみが豊かだと言えます。

大阪の名物はたくさんありますが、やはり、たこ焼きやお好み焼き（図13）は外せません。たこ焼きは生地、味付け、焼き加減で味が異なり、シンプルながら奥が深い料理です。ソースやマヨネーズ、青海苔、かつお節をかけて食べるスタイルは戦後、お好み焼きの影響を受けたものとされています。大阪では、各家庭に一つはたこ焼き器がある、と言われているほど、家庭でもたこ焼きを作ります。私の研究室でも学生と一緒にたこ焼きパーティーをするのが楽しみの一つでもあります。

お好み焼きは、目の前の大きな鉄板で焼いてもらうのがスタンダードで、キャベツを入れてボリュームを出し、山芋を生地に混ぜてふわっとした食感を作るのが特長です。また、安くておいしい串カツ（図14）なども「B級グルメ」と言われて親しまれる庶民的な食文化があります。串カツ店では、カウンターの気軽な雰囲気、バットに入ったソースは「二度漬けお断り」、これはソースを共有するので、一度口に付けた串は再度ソースに付けてはならないということです。また、横に置かれているキャベツは食べ放題です。具



図13 たこ焼きとお好み焼き（OSAKA-INFO 提供）



図14 串カツ
（OSAKA-INFO 提供）



図15 大阪すし（箱寿司）
（OSAKA-INFO 提供）

は牛肉、エビ、アスパラガス、卵にチーズなど、実にバラエティー豊かです。

そのほかにも、「551 蓬莱」で有名な豚まん、四角い木枠に寿司飯と具材を詰めて押してつくる大阪すし（箱寿司）（図15）、オムライスなども、おいしさ発見と言える食べ物ですので、是非とも試してもらえればと思います。

5 まとめ

大阪の魅力について簡単に紹介しました。この原稿が公開されているであろう6月には大阪・関西万博開催の真ただ中ですので、是非とも大阪を訪れてみて下さい。万博のテーマは「いのち輝く未来社会のデザイン」です。詳しくは公式Webサイト⁽⁵⁾を確認下さい。大阪ベイエリアの夢洲で開催され、新たに夢洲駅も開業しました。私の所属している関西大学でも万博に協力していますので、Webサイト⁽⁶⁾も御覧下さい。

文献

- (1) 世界最大級的水族館 海遊館. <https://www.kaiyukan.com/>
- (2) 大阪公式観光情報. <https://osaka-info.jp/>
- (3) 万博記念公園. <https://www.expo70-park.jp/>
- (4) エキスポシティ. <https://www.expocity-mf.com/expo/>
- (5) EXPO 2025. <https://www.expo2025.or.jp/>
- (6) 関大万博 GOTO2025. <https://www.kansai-u.ac.jp/expo/>

和田友孝（正員：シニア会員）

1999 阪大大学院博士後期課程了。和歌山大を経て関西大に着任。現在、システム理工学部教授。無線通信、高度交通システム、緊急救命避難支援システムなどの研究に従事。本会貢献賞、本会活動功労賞等を各受賞。IEEE シニアメンバー、情報処理学会、日本シミュレーション学会、日本災害情報学会各会員。



岡山へ こられー！

岡山理科大学 荒井伸太郎 Shintaro Arai

街plus
探訪



1 はじめに

「ぼっけえな!」「おえんじゃろ」「はよーしねー」。

これらの意味がすぐ分かるあなたはきっと岡山県人ですね。これらは岡山県の方言「岡山弁」で、岡山にいたら日常でもよく耳にする言葉です。意味はそれぞれ「すごい!」「だめでしょ」「早くしなさい」です。ちなみにタイトルにある「こられー」は「来てください・おいで」という意味です。初めて岡山弁を聞くと、言葉のインパクトに圧倒されると思います。(特に3番目のものはグョッとしますよね。)

このような癖のある方言を使う岡山県(の倉敷市)に筆者は中学校卒業まで住んでおりました。縁あって、2016年から岡山理科大に勤めることとなり、地元岡山の地に戻ってきました。そんな経緯もあったことに加え、2025年9月に岡山で電子情報通信学会ソサイエティ大会が開催されることから、筆者に岡山県を紹介する記事の執筆依頼がありました。せっかくの機会ですので、筆者がお勧めする岡山県の観光名所と名産を紹介します。

2 お告げ響く 「吉備津神社 鳴釜神事」

まず御紹介するのは「吉備津神社」です(図1)。岡



図1 吉備津神社

山駅からJR吉備線に乗って4駅先の吉備津駅で降り、そこから歩いて10分ほどのところにあります。岡山県内最古の神社であり、桃太郎伝説ゆかりの神社としても知られています。桃太郎にあやかつて七五三の時期には多くの参拝客が訪れます。(かく言う私も七五三は吉備津神社でした。)国宝に指定されている本殿と拝殿の屋根は特徴的で、全国で唯一の建築様式であることから「吉備津造り」とも呼ばれています。また、全長360mもある廻廊(図2)は圧巻で、最近では「映えスポット」としても注目を集めています。ここを訪れたら是非体験して頂きたいのが「鳴釜神事」です(図3)。これはその名のとおおり、釜の鳴る音の「大小長短」で吉凶を占う神事です。釜が鳴る音の聞こえ方や響き方をそれぞれがどう感じるかで占うので、神社の方が結果を言うのではなく、あくまで自分の心で判断するスタイルの占いです。その人が音や振動を心地良いと感じれば「吉」、音が聞こえなかったり、不快に感じた



図2 吉備津神社の廻廊



図3 鳴釜神事



図4 岡山城天守

りしたら「凶」のようです。私も一度体験したことがあります。釜が鳴っている時間はとても不思議な感覚に包まれます。単に耳から聞こえるだけでなく、身体全体で音の響きを受け止めているような感じで、終わった後は吉凶がどうだったかを考えるよりも、貴重な体験をした感動の方が大きかったです。罰が当たるかもしれませんが、誰かにこの神事を体験して頂いて、この現象の数理モデルを導出してほしいです。

3 輝く「岡山城」と「能楽堂 ホール tenjin9」で学会を

岡山県に来たら一度は訪れてほしいのが岡山城天守(図4)と岡山後楽園です。JR岡山駅から路面電車と徒歩で約20分のところに位置しており、交通アクセスがとてもいいです。外壁がカラスのように漆黒なことから「烏城」とも呼ばれる岡山城天守は、2022年11月に「令和の大改修」を得てリニューアルしました。天守内には体験型の展示や、映像による解説等が充実しており、岡山城の歴史を楽しみながら勉強できます。岡山城のすぐ横にある岡山後楽園は、日本三名園の一つに数えられる庭園として有名です。岡山城に来た際は続けて岡山後楽園を散策されることをお勧めします。

この岡山城天守、実は閉館後に夜間貸出をしています。つまり、お城を貸し切って利用できるのです。飲食を伴ったパーティーもお城の中で実施できるため、国際・国内会議の懇親会にピッタリです。実際、2024年10月に行われた電子情報通信学会革新的無線通信技術に関する横断型研究会(MIKA2024)の懇親会は岡山城天守で開催され、参加した方の記憶に残る盛大な会になりました。

岡山市内にはこのようなユニークな場所がほかにもあり、その一つが「能楽堂ホール tenjin9」です(図5)。tenjin9は三間四方の本舞台と三間の橋掛りを持つ、



図5 能楽堂ホール tenjin9

総桧造りの本格的な能舞台を備えたホールです。ここで伝統芸能の「能」ができるのはもちろんですが、講演会や展示会等にも対応できるホールになっています。つまり、能舞台で学会ができます！こちら他ソサイエティにはなりますが、電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティの大会が2025年6月にtenjin9で開催されます。(筆者が実行委員長を務めますので、よろしければ御参加下さい！)講演者の方に橋掛かり(図5の奥に見える通路)を通して舞台に登場して頂くこともできるので、講演者の発表に対する気分も高揚すること間違いなしです。能舞台での研究発表やお城での懇親会はきっと海外の方にも受けるはずですので、国際会議を日本で企画する際は是非岡山を候補地に考えて頂けたらと思います。

4 やはり美しい、倉敷 美観地区の白壁の街並み

岡山市の隣の倉敷市にある「倉敷美観地区」も是非訪れてほしい場所です(図6)。岡山駅からJR山陽本線(or JR伯備線)に乗って4駅先の倉敷駅で降り、そこから徒歩で15分ほど歩いた場所にあります。美観地区には江戸時代に建てられた白壁の蔵屋敷と明治時



図6 倉敷美観地区



代に建てられた洋風建築の両方が残っており、それらが調和した奇麗な街並みを楽しめます。映画やドラマで度々ロケに使われているので、美観地区に行ったことはなくても、その街並みを見たことはあるかもしれませんね。美観地区では、いわゆる「観光通り」的なところを歩くだけでも十分楽しめますが、至る所にある細い路地「ひやさい」に入って散策するのもお勧めです。ひやさいには「隠れ家」的なカフェやお店がたくさんあるので、ふらっと散策してお気に入りのお店を探してみてもいいですか？

倉敷美観地区の名所の一つが「大原美術館」です。大原美術館は1930年に設立された日本初の西洋絵画中心の私立美術館です。美術館では印象派を代表する画家クロード・モネの「睡蓮」や、ピカソにも影響を与えたと言われるエル・グレコの「受胎告知」など、数多くの名画・美術品等が展示されています。美観地区の散策の途中に是非立ち寄って、展示品を鑑賞して頂けたらと思います。

5 まるで宝石、岡山の新鮮な白桃とマスカット

「くだもの王国」とも称される岡山、その代表は何と言っても「白桃」と「ぶどう」です。

白桃(図7)の旬は6月下旬～8月で、上品な甘さが特徴です。一般的な桃は袋かけをしない無袋栽培で作られ、表面が赤みを帯びていますが、岡山の桃は直射日光を当てない有袋栽培で作られるため、果皮が薄くて白い桃ができるそうです。

岡山のぶどう(図8)の旬は盛夏から秋にかけての時期です。ぶどうの中でも大人気なのが「シャインマスカット」。種もなく、皮ごと食べられるシャインマスカットは甘くてみずみずしく、一度食べると手が止まらず、一房があっという間になくなってしまいます。ソサイエティ大会がある時期は正に旬の時期ですので、大会に来た際は是非マスカットを買って帰って下さい。

果物をそのまま食べるのもいいですが、岡山の白桃やぶどうを使ったスイーツを提供するお店もあるので、岡山に来たらそれらも堪能して下さい。

6 おわりに

本記事では岡山県の観光名所・名産品として、「吉備



図7 白桃



図8 ぶどう(マスカット)

津神社」,「岡山城天守・tenjin9」,「倉敷美観地区」,「白桃・ぶどう」を紹介しました。これ以外にも、岡山県にはまだまだ紹介したい場所、食べ物、名産がたくさんあります。(ぼらずし、デニム、雄町の日本酒,等々。)是非、インターネットでこれらのワードを検索して頂けたらと思います。

上述のとおり、2025年6月に電子情報通信学会NOLTAソサイエティ大会が、9月に電子情報通信学会ソサイエティ大会がどちらも岡山で開催されます。この記事を読んで、岡山面白そうだな、行きたいなと思って頂けたら幸いです。

謝辞 岡山紹介記事を執筆するに当たり、写真を提供して下さい、おかやま観光コンベンション協会森上とも子様と藤井大輔様に心からお礼申し上げます。

荒井伸太郎 (正員:シニア会員)

平16徳島大・工・電気電子卒。平18同大学院修士課程了。平21同大学院博士課程了。博士(工学)。同年愛知工科大ITS研究所研究員。平23香川高専・通信ネットワーク工学科・助教。平28岡山理科大・工・電気電子システム学科・講師。令3同准教授。現在に至る。可視光通信、非線形応用に関する研究に従事。平20本会学術奨励賞受賞。IEEEシニア会員。



シリコンバレーで見つけた、 研究と生活の 新しいステージ



若者よ、
世界に
出よう！

国立研究開発法人産業技術総合研究所 西川由理 Yuri Nishikawa

① はじめに

シリコンバレー——最先端の技術革新が生まれ、起業家精神にあふれたチャレンジングな土地。多くの方がこんなイメージを抱くのではないのでしょうか。渡米前の私も正にその一人で、日頃からシリコンバレーに関するニュースを耳にするたびに、圧倒されるような思いがありました。そんな私に、ある日、転機が訪れました。夫の海外赴任が決まったのです。その当時、私は産総研に入所して間もなく、日本で進めていた実証実験がようやく軌道に乗り始めたばかりでした。更に、当時30歳代後半というキャリアの節目を迎えていたこともあり、海外に行く決断には大きな葛藤が伴いました。

しかし、デジタルサービスの研究開発に携わる中で、自動運転サービスや生成AIといった技術革新の最前線にあるシリコンバレーに身を置き、リアルタイムでその変化を感じ取りながら、日本にその動向を伝えることも重要ではないか、と考えるようになりました。もし行かなかつたら、きっと後悔する。そこで、思い切って産総研の上長の方々に相談したところ、有り難いことに、理解を示して下さい、対話を重ねる中で、長期出張を認めて頂きました。

こうして、当時4歳の息子連れ、2023年4月に渡米しました。本記事では、研究員としての視点だけでなく、一市民、そして一母親の目線からも、シリコンバレーでの生活をつづっていきたいと思います。

② Stanford 大の Richard Dasher 教授

Stanford 大の Richard Dasher 教授は、私がシリコンバレーでの生活を送る中で、多くの示唆や新たな人との出会いをもたらして下さい、懐の深い魅力的な先生です。教授が所長を務める US-Asia

Technology Management Center (US-ATMC) は、日本やアジアの様々な国（中国、インド、東南アジア諸国など）から、幅広い業種の客員研究員、起業家、VCファームの関係者が集い、シリコンバレーでイノベーションを志す人々の交流拠点となっています。

Dasher 教授は春と秋に公開講義⁽¹⁾を担当し、その時々的重要な技術革新に関するテーマ（例えば、この秋はサプライチェーン）を扱うオムニバス形式で進行しています（図1）。ゲストスピーカーによる、日本やアジアのイノベーション事例に関するビジネス志向の強い内容が特徴で、誰でも受講可能です。センターのWebサイトやYouTubeで過去の講義を視聴でき、Zoomを通じて日本時間でのオンライン参加もしやすくなっています。

多彩な活動をされていて非常に多忙な方なのですが、Dasher 教授の語り口調は穏やかで、個室にはいつも落ち着いた空気が漂っています。私が都市サービス開発について相談した際、「ただの開発者」ではなく、血の通った一人の人間として市民や

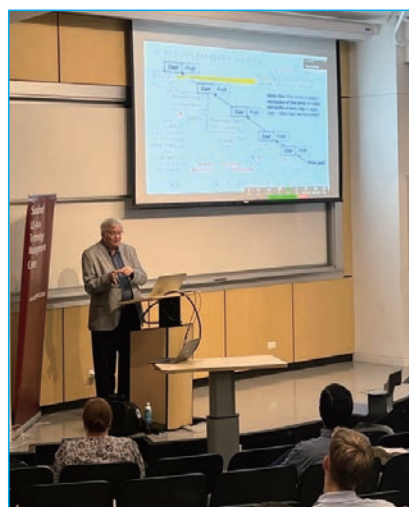


図1 Dasher 教授の公開講座（Public Lecture Series）の様子。学生や社会人が多く集まる。（写真提供：US-ATMC）

顧客と対話し、サービスを具体化することが大切」と、私の目を真つすぐ見つめながら、アドバイスして下さいました。

教授によれば、日本の会議では、参加者が淡々と自己紹介した後、形式的に進んでしまうことがあると指摘されていました。しかし、それでは本当の意味での共創は生まれにくいのだと — 自分がどんなバックグラウンドを持つ人間なのか、何に悩んできたのか、そうした人間的な側面を伝え、その上で「自分にとってこのテーマがどういう意味を持つのか」といった思いを対話の中ににじませること。そうしてこそ、市民や顧客も心を開き、共創が生まれるのだと、教授は話していました。

この言葉を聞いたとき、深く共鳴するものがありました。同時に、最近の私が、いつの間にか「大人」になって、こうした対話をおざなりにし、諦めてしまうこともあったことに気付かされました。「血の通った一人の人間として対話する」、それは共創やイノベーションに不可欠であり、同時に、人として生きていく上で、これからずっと大切にしていきたい、私の心の指針となっています。

③ Stanford 大の魅力

Dasher 教授の授業をはじめ、Stanford 大では、多様な公開講座・イベント⁽²⁾が提供されています。ある日、気候変動に関するランチセミナーに参加した際、本当に環境意識の高い市民が集まるのだろうかと半信半疑でしたが、会場は満席で、ディスカッションでは次々と質問が飛び交い、白熱した雰囲気でした。（無料のランチやコーヒーの提供がある影響もあるとは思いますが、）聴衆の関心の高さに驚かされました。

こちらに来て感じるのは、大学の講義に限らず、地域の集会や学校行事でも、質疑応答（Q&A）の

時間が長く、聴衆から積極的に手が挙がる点です。むしろ、発表内容には6～7割程度の情報しか盛り込まれておらず、不足分を質疑で補っていくスタイルとも言えそうです。発表者も聴衆も、このスタイルに非常に慣れているように感じますが、これは幼少期からの教育の影響も大きいのではないかと思います。この点については、記事の最後の方でも少し触れたいと思います。

Stanford 大は公開講座だけでなく、オンサイトで参加可能な有料の生涯学習講座「Continuing Studies」⁽³⁾や、オンラインで提供されるMOOC「Stanford Online」⁽⁴⁾も展開しています。特にStanford Onlineでは、修了証書（Certificate）や単位、更には学位を取得することも可能で、多くの選択肢が用意されています。こうしたオンデマンドコースを数多く提供する一方で、Stanford 大のキャンパスでの大学教育においては、学生との直接的な対話やライブ感に特別な価値があると感じています。

いわゆる学部生や院生向けの講義は、どの大学でも一般的にそうだと思いますが、基本的に履修している学生を対象に、オンサイトでクローズドに行われます。しかし、学生ではない私でも聴講できる講義が時にあり、幸運にもその一つを留学中の方に教えて頂き、データ分析の授業に特別に参加することができました。

そのときはちょうど「仮説検定」に関する講義が行われていました。先生はスライド資料をほとんど使用せず、ビジュアルなグラフツールを使いながら、「有意水準はどうやって決めるの？」「帰無仮説が棄却できたら対立仮説が“正しい”の？」といった学生からの質問に、楽しそうに時間を掛けて答えていました。そのやり取りは非常に活発で、学生とのインタラク션을重視している様子が印象的でした。

大学はとにかくキャンパスが広く、学生は多様な移動手段を使って移動しています（図2）。無料バ

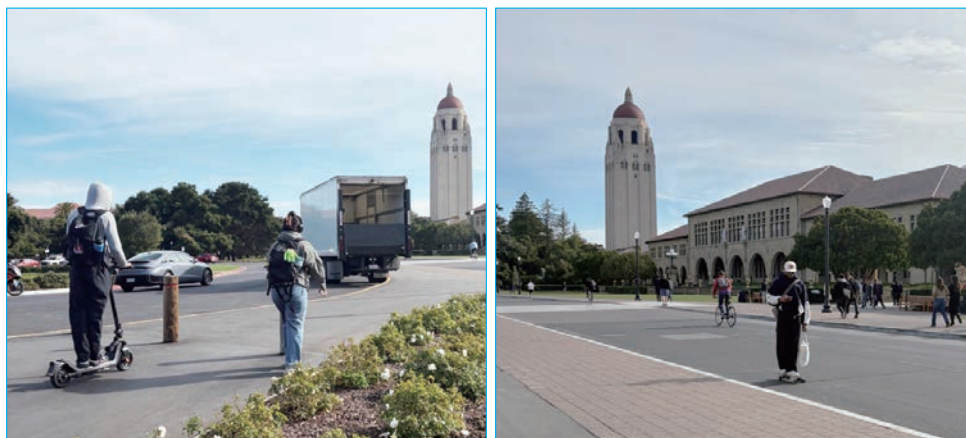


図2 様々なパーソナルモビリティで移動する学生たち（筆者撮影）



図3 キャンパス内には William (Bill) Gates や Jen-Hsun Huang (NVIDIA 社長) の名前を冠した建物もある (筆者撮影)

スもあり、更に自転車、電動キックボード、電動一輪車、スケートボード、ゴルフカートなども走っており、パーソナルモビリティの楽園のようです。このように自由で多様な学びの機会がある Stanford 大はシリコンバレーを象徴する存在だと感じます。実際、Stanford 大の卒業生の多く（約7割という説もあります。）がシリコンバレーにとどまり、その割合は米国内の他大学の卒業生よりも高い傾向にあるそうです（図3）。

4 シリコンバレーはモビリティサービスのメッカ

Stanford 大がパーソナルモビリティの楽園だとお伝えしましたが、シリコンバレー全体も「乗り物」がとても面白い地域です。特に、自動運転車と電気自動車（EV）については避けて通れない話題だと思います。

最近ニュースにもなっているので、御存じの方も多いかもかもしれませんが、自動運転タクシーで知られる Waymo は、本社がマウンテンビューにあり、サンフランシスコをはじめとする複数の都市で、サー

ビスを提供しています。サンフランシスコは坂道が多く、霧も頻繁に発生するため、決して運転が簡単な地域ではありません。しかし、実際に5時間ほど乗ってみたところ、急ブレーキは僅か1回だけで、乗り心地としては「普通のタクシー」といった印象でした。むしろドライバーがいない分、車内で寝ていても歌っていても？ 誰にも気にされない気楽さが魅力的だと感じました。現在、Waymo のサービスは24時間365日、悪天候の日も含めて提供されています。ジオフェンシング（走行範囲の制限）もなく、市内全域を対象に運行されており、週に15万件もの利用があるそうです（図4）。なお、シリコンバレー周辺では、Waymo のほかにも複数の企業が、自動運転車両の開発・運用を進めています。サンフランシスコに限らず、地域全体で、ライダー（LiDAR）を搭載した実験車両がデータ取得やテスト走行を行っている様子を、日常的に目にします。

一方、EV もこの地域では非常によく見掛けます。この原稿は2024年12月1日の締切りに向けて11月中旬に執筆していますが、体感的に15台に1台ほどがTesla ではないかと思うほどです。更に、地域のスーパーやショッピングセンターには、買い



図4 サンフランシスコ市内を走る Waymo の自動運転タクシー (筆者撮影)



図5 ショッピングセンターに設置された充電ステーション (筆者撮影)

物の間に充電を済ませられるよう、EV用の充電ステーションが複数台並んでおり、積極的に利用されている様子をよく見掛けます（図5）。シリコンバレー特有の光景かもしれませんが、このような、日常生活に自然に溶け込んだインフラを目の当たりにし、日本とは異なるモビリティ環境の成熟度を実感します。

自動運転タクシーやEVが、この先ますます普及していくのか、その場合にはどのような技術が主流となるのか—この分野の潮流は非常にダイナミックに変化しており、まだ予測がつきません。しかし、実際に自動運転車両に乗ったり、EVが街を走る様子を見たりと、こうした最前線の体験を日常生活の中で味わえることは、とても貴重だと感じています。

5 私生活とボランティア

息子が5歳になり、日本より半年早く小学校（Kindergarten）に通うようになりました。その小学校では、私も週に1回、朝食ボランティアをしています。ボランティアでは、マフィンやシリアル、牛乳とオレンジを配り、子供たちと話をした後、最後にお皿を洗っている間に授業が始まります。

授業では、子供たちが一人一人前に出て、昨日の出来事を話したり、簡単な発表をしたりする場面が多くあります。その際、ほかの子供たちも相互に質問するよう、先生が指導していました。人前で話すことや質問することは、どちらも訓練が必要なスキルです。前者は度胸が求められるだけでなく、話題の準備や聴衆を引き付けるテクニックも必要です。一方、質問するには、人の話を集中して注意深く聞

き、議論が深まるような質問をする力が求められます。こうしたスキルを幼少期から積み重ねていくことが、やがて大きな力となるのだと感じました。この光景を目にしたとき、Stanford大で見た講義の活発な質疑応答の様子とも重なる思いがしました。

シリコンバレーでの生活を支えてくれるもう一つの大きな存在が、日本人女性を中心とした参加者によって構成され、NPO法人として活動を展開する Japanese Women's Initiative in the Bay Area (JWIBA)⁽⁶⁾ です。このコミュニティでは、Stanford大を主拠点に、キャリアや海外生活に関する情報交換や定期的なワークショップを行うほか、日本人女性駐在員や帯同者に関する実態調査にも取り組んでいます。今年度、私もボランティアとしてこの調査に携わり、その成果を「JWIBA Summer Summit 2024」で発表する貴重な機会を頂きました（図6）。

シリコンバレーでは、日本人も女性も少数派であり、不安を抱えることが少なくありません。JWIBAは、その不安を言語化し、互いの経験を共有して力に変える場となっています。単なる「日本人同士の集まり」にとどまらず、アントレプレナーシップ精神に基づいたユニークで実践的な取組みが展開されるコミュニティである点が魅力です。今後は、理工系分野の女性を支援する活動などへの発展も期待されており、私自身もその一助になればと考えています。

6 おわりに

シリコンバレーと聞くと、華やかなイメージを持



図6 JWIBA Summer Summit 2024 には、シリコンバレーで活動する女性駐在員や帯同者を中心に200人以上が参加。著者（一列目の左から4番目）の右隣（左から5番目）は、JWIBA Co-Presidentの川邊万希子さん。二列目の右から6番目がDasher教授。（写真提供：Hiroyuki Inoue氏）

たれるかもしれません。ただ、実際には相当な競争社会であり、のどかな景色や澄み渡る青空とは裏腹に、多くの人がプレッシャーの中で生きていていると感ずることがあります。

生成 AI の急速な進展により、GAFAM をはじめとするテック大手の構図にも変化が生じ始めています。レイオフのニュースも増えました。一方、私の住む地域では、散歩しながら、ジョギングしながら、買い物をしてながら—多くの人が絶え間なくヘッドセットで電話し、何かの議論や交渉をしている様子を日常的に見掛けます。プライベートな時間でさえ仕事の一部分になっているのかもしれないと感ずることがあり、シリコンバレーの成果主義の厳しさを実感します。

また、シリコンバレーの物価は日本の3倍とも言われますが、実際に生活してみると、それが決して誇張ではないことを実感します。住居費や食費、生活に必要なあらゆるものが高騰し、経済的な格差が広がっています。その象徴のように、街にはホームレスが増え、長時間立ち止まる信号がある交差点には、「助けて、子供が3人います」と書かれた段ボールを抱えて寄付を求める人の姿が見られます。そんな彼らに、迷わずお金を渡す人も少なくありません。それは「明日は我が身かもしれない」という、この競争社会ならではの危機感と助け合いの精神が入り混じった行動なのだと思います。

この土地では、自ら何かを言わなければ誰も助けくれません。しかし「困っている」と声を上げれば糸口が見つかる、そんな文化が根付いていると感ずます。仕事を探している人が X や LinkedIn に投稿すると、それを見た人が自分のネットワークを通じて求人情報をシェアする場面をよく見掛けます。オンライン・オフラインともに、地域コミュニティも充実しています。個人主義社会でありながら、必要ときには、驚くほど素早く支え合いが生まれる、この柔軟さこそが、シリコンバレー独特の助け合いの文化だと思います。

また、日本にいたときは、互いの共通点よりも「違い」に目がいきがちでした。しかしこちらでの生活を通じて、違うことが前提である中で、むしろ共通点を見つけたときに嬉しさを感じるマインドセットへと変化しました。そして、少し大げさかもしれませんが、多様性の大きいシリコンバレーでは、この共通点を探す過程で、人類にとって普遍的な価値が

見いだされ、それが良いサービスや新たなアイデアの源になっているのかもしれないと思いつつあります。例えば、シリコンバレー発のスマートフォンやアプリは、特定の国向けにカスタマイズされていないにもかかわらず、直感的に使えるものが多いです。異なる文化圏の人が集まり、「普遍的な使いやすさ」を追求した結果、世界共通の UX（ユーザエクスペリエンス）が生まれたのではないかと思います。

こうしたことを日々感じるシリコンバレーでの生活は、やはり刺激に満ちています。しかし、シリコンバレーにいる人たちは、確かに競争社会の中にいますが、週末には「どこのラーメン屋がおいしいか？」（日本のラーメンは米国でも大人気）といった会話を交わし、家族と過ごし、普通の生活を送っています。そんな姿を見て、シリコンバレーで暮らす上で、自分以外の誰かにならなくても大丈夫なのだと実感し、その上で、自分らしく挑戦すればいいのだと思いました。Dasher 教授の客員研究員の方々も、男女を問わず、30 歳代後半から 50 歳代で初めて海外生活にチャレンジしている人も少なくありません。こうした体験を踏まえ、是非若者に限らず、「世界に出よう！」と強く伝えたいと思います。

■文献

- (1) “Entrepreneurship in Asian High-Tech Industries –US-Asia Technology Management Center.” <https://asia.stanford.edu/course/entrepreneurship-in-asian-high-tech-industries/>
- (2) “Events Calendar - Stanford University.” <https://events.stanford.edu/>
- (3) “Stanford Continuing Studies.” <https://continuingstudies.stanford.edu/>
- (4) “Stanford Online.” <https://online.stanford.edu/>
- (5) Silicon Valley Auto Dealers Association, “Silicon valley auto outlook.” https://www.svautodealers.com/pdf/SiliconValley_Covering_1Q_23.pdf
- (6) “JWIBA”, <https://www.jwiba.org/>

西川由理（正員）

国立研究開発法人産業技術総合研究所主
任研究員。

慶大・理工卒。同大学院理工学研究科博士課程了。2011 にパナソニック株式会社（当時）入社、本社研究部門でスマートホーム、音声対話インタフェース、クラウドサービスの研究開発に従事。2021 から現職。スマートシティ、モビリティ、サキュラーエコノミー分野等におけるデジタルアーキテクチャの研究開発に取り組む。博士（工学）。



無線システムの上空利用に係る制度の現状と見直しの状況について

総務省総合通信基盤局 電波部電波政策課

渡辺貴之 Takayuki Watanabe

1 はじめに

昨今、農業、インフラ点検、物流、災害対応、エンターテインメント等の様々な分野でドローン（UAV）の利用が進んでいる。農業分野では従来、大形の産業用無人ヘリコプターを用いた農業散布が行われていたが、小形軽量化されたドローンを使用することで利便性が向上した。インフラ点検分野では、例えば橋りょうやトンネル、ビルや鉄塔など、これまで高所で人が行ってきた作業をドローンに代替させることにより、安全性や作業効率の向上、コスト削減に資することが考えられる。また、ドローンは災害時に被災地へのアクセスに利点があることから、災害時における緊急物資輸送や土砂崩落調査等に利用されており、平時・災害時を問わず、ドローンの利活用が期待されている。

令和4年12月には改正航空法が施行され、レベル4飛行（有人地帯における目視外飛行）が可能となり、また、令和5年12月には、レベル3飛行（無人地帯における目視外飛行）の飛行要件が緩和されたレベル3.5飛行が導入される等、ドローンを使った事業を促進するための環境整備が行われている。

ドローンの利用に当たって電波を活用することは必要不可欠であり、例えば、ドローンの個体識別情報となるリモートIDの送信、地上からドローン機体を制御するためのコマンド送信、ドローンで撮影した映像を操縦者等に伝送するための画像伝送用通信等、それぞれの用途に適した各種の無線システムが利用されている。我が国では、ドローンの利用ニーズを踏まえ、2.4 GHz帯、5.7 GHz帯、携帯電話等をドローンで利用可能な無線システムとして制度化しており、運用者は利用用途等を勘案し、最適な無線システムを利用することが求められる。

本稿においては、令和6（2024）年12月現在、ドローンに利用されている無線システムの上空利用に係る

制度の現状と、更なる上空電波利用環境の向上に向けて総務省が取り組んでいる状況について解説する。

2 ドローンに利用されている無線システム

ドローンに利用されている無線システムとしては、無線局免許・無線従事者資格*が不要で、ほかの無線システムと周波数を共用して、競合したらお互いに譲り合いながら使用するシステム（73 MHz帯ラジコン操縦用微弱無線、920 MHz帯特定小電力無線局、2.4 GHz帯無線LAN等）がある。また、無線局免許・無線従事者を必要として、使用場所が同一時間帯で競合した場合に当事者間で運用調整を行うことにより、安定的・高信頼度で利用することができるシステム（無人移動体画像伝送システム）もある。これらはいずれも自営系の無線システムとして構築することが可能であり、地上のプロポ（操縦機）とドローンとの間で、直接電波が届く見通し範囲内の通信で利用されることが多い。見通し範囲外の広範囲にわたってドローンを飛行させる場合は、携帯電話の上空利用サービスを活用することが有用である（図1）。

2.1 無線LANの上空利用

無線LANの規格はIEEE（電気電子学会）により標準化されたものが世界で広く利用されており、我が国においても、IEEE規格を反映した形で2.4 GHz帯（2,400～2,483.5 MHz帯）、5.2 GHz帯（5,150～5,250 MHz帯）、5.3 GHz帯（5,250～5,350 MHz帯）、5.6 GHz帯（5,470～5,730 MHz帯）、6 GHz帯（5,925～6,425 MHz帯）において、無線LANの技術基準が整備されている。

* 無線設備の操作またはその監督を行う者であって、総務大臣の免許を受けたもの

無線システム名称 /無線局種	周波数帯	最大送信出力	(参考)※4 伝送速度	(参考)※4 通信距離	(参考)※4 利用形態	無線局 免許	特徴、利用用途
ラジコン操縦用 微弱無線	73MHz帯等	※1	5kbit/s	1km程度	操縦	不要	ホビー用途等で手軽に利用可能 産業では農業散布での利用が主体
無人移動体画像伝送 システム	169MHz帯	10mW	～数百kbit/s	5km程度	操縦 画像伝送 データ伝送	要	主に空撮、インフラ点検、測量等で利用 (操縦・制御のバックアップ等に使用)
特定小電力無線局	920MHz帯	20mW	～1Mbit/s	500m程度	操縦	不要※2	操縦用として利用
2.4GHz帯無線LAN (小電力データ通信 システム)	2.4GHz帯 (2400～ 2483.5MHz)	10mw/MHz (FH方式は 3mW/MHz)	～54Mbit/s	1km程度	操縦 画像伝送 データ伝送	不要※2	操縦・画像伝送等の用途で最も普及。 利用者が多いため混雑。
無人移動体画像伝送 システム	2.4GHz帯 (2483.5～ 2494MHz)	1W	～数十Mbit/s	10km程度	操縦 画像伝送 データ伝送	要	主に空撮、インフラ点検、測量等で利用
無人移動体画像伝送 システム	5.7GHz帯	1W	数十Mbit/s	5km程度	操縦 画像伝送 データ伝送	要	主に空撮、インフラ点検、測量等で利用
携帯電話 (4G/5G)	800MHz帯 等	200mW (基地局制御)	数十Mbit/s	携帯電話の エリア内	操縦 画像伝送 データ伝送	※3	見通し外通信や遠隔運用が可能 であり、インフラ点検、物流、映像配 信等で利用。ただし、携帯電話のエリア 外では利用不可。

※1: 500mの距離において、電界強度が200 μ V/m以下

※2: 免許を要しない無線局については、無線設備が電波法に定める技術基準に適合していることを事前に確認し、証明する「技術基準適合証明又は工事設計認証」を受けた無線設備を使用する場合に限る。

※3: 携帯電話事業者の免許で運用

※4: 法令に規定はなく、メーカー等のヒアリングによるもの

⇒ 右図の「技適マーク」が表示された無線設備のみ使用可能である。



図1 2024年12月現在、ドローンに利用されている無線システム

2.4 GHz 帯無線 LAN は、我が国では、無線局免許不要で屋外・上空でも使用が可能となっているが、チャンネル数が限られており、同一エリアで多数のドローンを同時に飛行させる場合には、ふくそうする可能性がある。このため、ほかの周波数帯を使用する無線システムと併用して使用されることが多い。

5.2 GHz 帯無線 LAN は、我が国では、屋内に限り無線局免許不要で利用が可能となっている。屋外で使用する場合は、同一周波数を使用する衛星システムと隣接周波数を使用する気象レーダとの共用を図るため、特定の地域に限定して登録局として使用が可能となっているが、これまで上空利用はできなかった。また、当該登録局をアクセスポイントとする子局については、無線局免許不要で利用可能となっている。一方、欧米諸国等では、5.2 GHz 帯において上空利用が可能となっており、5.2 GHz 帯に対応したドローン製品も流通している。このような中、我が国においても 5.2 GHz 帯無線 LAN の上空利用について、既存の無線システムとの共用条件を明らかにするため、令和 6 年 6 月から情報通信審議会において、5.2 GHz 帯無線 LAN の上空利用に係る技術的条件の検討を開始し、同年 12 月、情報通信審議会からその技術的条件について一部答申⁽¹⁾を受けた(図 2)。また、同一部答申を踏まえた省令改正案について、

令和 7 年 3 月、電波監理審議会から答申を受けて、同年 4 月に制度整備が行われた。

5.3 GHz 帯及び 5.6 GHz 帯無線 LAN については、我が国の技術基準でも同様に IEEE 規格の DFS 機能(同一周波数帯を利用するレーダシステムとの共用を図るため、無線 LAN 側でレーダ波を検出した場合、一定時間停波する機能)を具備することが求められており、ドローンの安全性の確保を考慮すると、ドローンに実装することは適当ではなく、諸外国においてもドローン用途には利用されていない。

2.2 無人移動体画像伝送システム

169 MHz 帯、2.4 GHz 帯、5.7 GHz 帯の三つの周波数帯において、主として画像伝送(制御信号の伝送を含む)を行うものである。無線局の運用に際しては、無線局免許を要するが、空中線電力 1 W (2.4 GHz 帯/5.7 GHz 帯においては EIRP 4 W、169 MHz 帯においては EIRP 3.25 W (地上から上空))を使用することができ、比較的大容量で安定した無線局の使用が可能である。なお、169 MHz 帯については、操縦コマンド用通信のバックアップとして制度設計されており、占有周波数帯幅も狭帯域(300 kHz 以内)であることから、大容量の画像伝送等による使用はできない。比較的大容量の通

5.2GHz帯無線LANの上空利用に係る技術的条件

項目	一般的条件
1. システム種別	5.2GHz帯高出力データ通信システム
2. 周波数帯の呼称	5.2GHz帯
3. 周波数帯	5150～5250MHz
4. チャンネル配置 (中心周波数)	20MHz幅以下 : 5180MHz、5200MHz、5220MHz、5240MHz 20MHz幅を超え40MHz幅以下 : 5190MHz、5230MHz 40MHz幅を超え80MHz幅以下 : 5210MHz
5. 周波数チャンネルの使用 順位	特段規定しない
6. 周波数の使用条件	登録局制度により管理される条件下において利用を可能とする。なお、上空で 利用される携帯局から制御を受けて通信する条件下において、登録不要での利 用を可能とする。
7. 伝送速度	20MHz幅以下 : 20Mbit/s以上 20MHz幅を超え40MHz幅以下 : 40Mbit/s以上 40MHz幅を超え80MHz幅以下 : 80Mbit/s以上
8. 変調方式	直交周波数分割多重 (OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplex) 方 式とする。 なお、1MHzの帯域幅当りの搬送波の数が1以上であること。

項目	5.2GHz帯小電力データ通信システム	5.2GHz帯高出力データ 通信システム (屋外利用)	5.2GHz帯高出力データ 通信システム (上空利用)
空中線電力	帯域幅	帯域幅	帯域幅
	20MHz	10mW/MHz以下	20MHz
	40MHz	5mW/MHz以下	40MHz
	80MHz	2.5mW/MHz以下	80MHz
等価平方輻射電力	帯域幅	帯域幅	帯域幅
	20MHz	10mW/MHz以下	20MHz
	40MHz	5mW/MHz以下	40MHz
	80MHz	2.5mW/MHz以下	80MHz
	帯域幅	帯域幅	帯域幅
	20MHz	8°未満	20MHz
	40MHz	8°以上40°未満	40MHz
	80MHz	40°以上45°以下	80MHz
	帯域幅	帯域幅	帯域幅
	20MHz	45°超	20MHz
	40MHz	8°未満	40MHz
	80MHz	8°以上40°未満	80MHz
	帯域幅	帯域幅	帯域幅
	20MHz	45°超	20MHz
	40MHz	8°未満	40MHz
	80MHz	8°以上40°未満	80MHz
混信防止機能	主として同一の機構において使用される無線局の無線設備であって、識別符号を自動的に送信し、又は受信するもの	識別符号を自動的に送信し、又は受信するもの	同左

*小電力データ通信システム及び高出力データ通信システムと異なる部分を抜粋

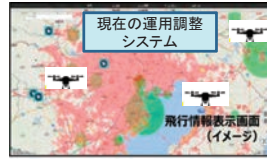
図2 5.2 GHz 帯無線 LAN の上空利用に係る技術的条件

信が可能である一方、同時に使用できるチャンネル数が限られているため、同一時間帯に同一エリアで複数のドローンを飛行させる場合は、運用調整が必要となり、日本無人機運航管理コンソーシアム (JUTM) がその運用調整を担っている。現在は、半径 10 km に 1 台の無線局を使用することを基本とした運用調整が行われているが、今後見込まれるドローンの利用増加に対応するた

め、運用調整手法の高度化や無線局の収容能力の向上が求められており、令和 6 年度から、総務省において、限られた周波数帯域内においてより稠密なドローンの運用を可能とするための高度な運用調整システムの実現や狭帯域化によるチャンネル増加に向け、技術的な見地から調査検討に取り組んでいる (図 3)。

【背景・課題】

- 現在、民間団体のデータベースによる運用調整により、ドローン等の無線局が混信の無いよう運用されているが、ドローンの利用が急速に増加して中、現在の手法では、無線局の収容が困難になることが想定。
- 限られた周波数帯域で、迅速かつ効率的に多数の無線局を収容・共用するための高度な運用調整技術の実現が必要。



現在の運用調整は、半径10km範囲内で、同一周波数・同一時間に使用可能な無線局は一律1局



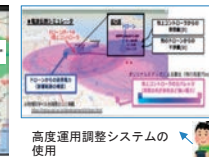
【実施内容】

国内外における運用調整に関する動向調査及び以下の運用調整と周波数共用の高度化に必要な技術の検討を実施。

- 上空を含む三次元空間電波伝搬モデルの調査検討
- 同一周波数帯を使用するシステム間の周波数共用技術の調査検討
- 周波数の効率利用を可能とする無線システム技術の調査検討



- ・ 三次元空間電波伝搬モデルの調査検討
- ・ 周波数共用技術の高度化検討
- ・ 運用調整手法の高度化検討
- ・ 狭帯域化システムの導入検討 等



高度運用調整システムにより、時々刻々の変化にあわせて使用可能な無線局を倍增

図3 ドローン用無線局等の高度運用調整技術に関する調査検討

2.3 携帯電話等の上空利用

携帯電話をドローンやヘリコプターに搭載し、携帯電話網を利用してドローン等の制御や画像・データ伝送を行いたいとのニーズがある一方で、携帯電話システムは地上での利用を前提に設計されていることから、携帯電話を無人航空機に搭載して上空利用すると、同じ周波数の電波を用いるほかの基地局との混信が生じ、地上の携帯電話網に影響を与えるおそれがある。

これらを踏まえ、総務省は平成28年7月、上空で利用される携帯電話の台数を監視し、地上の携帯電話網に影響を及ぼさないようにするため、ドローン等に搭載される携帯電話端末ごとに携帯電話事業者に無線局免許を与える「実用化試験局制度」を導入している。

その後、更なる無人航空機の利用拡大に対応するため、令和2年12月に手続きの簡素化等を、令和5年4月に高度制限の撤廃や5G方式の利用を可能とする制度整備を行っている。現在は800 MHz帯、900 MHz帯、1.7 GHz帯及び2 GHz帯のFDD帯域において、携帯電話事業者が整備するシステムにより、利用者がWeb経由等の簡易な続きにより、申請から1週間程度で利用可能となる環境が実現されている。

更に、ドローン等の目視外飛行の実現に向けて、①撮影動画データの高速アップロード、②高精細映像のリアルタイム中継、③高精細映像・3Dデータ伝送によるリアルタイムAI分析、④低遅延通信によるリアルタイム円滑操作等の高速・低遅延の通信が求められており、

携帯電話網のTDD帯域の上空利用の実現が期待されている(図4)。また、地域BWAやローカル5Gについても、防災、工場、農業及びインフラ管理等の様々な分野においてドローンからの映像伝送等を活用したユースケースが想定され、上空利用を可能とすることが期待されている(図5)。

このような状況を受け、総務省では、令和6年7月、携帯電話やローカル5G等で使用する2.5 GHz帯以上のTDD帯域の上空利用に係る技術的条件について、情報通信審議会において検討を開始し、同年12月、その技術的条件について一部答申⁽²⁾を受けた。同一部答申を踏まえた省令改正案について、令和7年5月に制度整備が行われた。

2.4 5.8 GHz帯ドローン用特定実験試験局

米国、欧州、中国、韓国等の諸外国においては、5.8 GHz帯を使用するドローンが広く普及している。5.8 GHz帯を用いることにより、比較的大容量の映像伝送も可能となるほか、2.4 GHz帯や5.2 GHz帯のトラヒックの緩和にもつながるものと考えられるが、我が国では、5.8 GHz帯はITS用の無線システムであるDSRC等に利用されており、現状、ドローンに無線局を開設する場合は、アマチュア業務及び実験等での利用に限定されており、実用に供することはできない。なお、5,725～5,875 MHz帯は国際的にISM (Industrial, Scientific and Medical) バンドとされており、同周波



図4 携帯電話等の上空利用に関する新たなユースケース（TDD-NR）

出典：情報通信審議会 情報通信技術分科会 新世代モバイル通信システム委員会 上空利用検討作業班（第10回）資料10-3 構成員提出



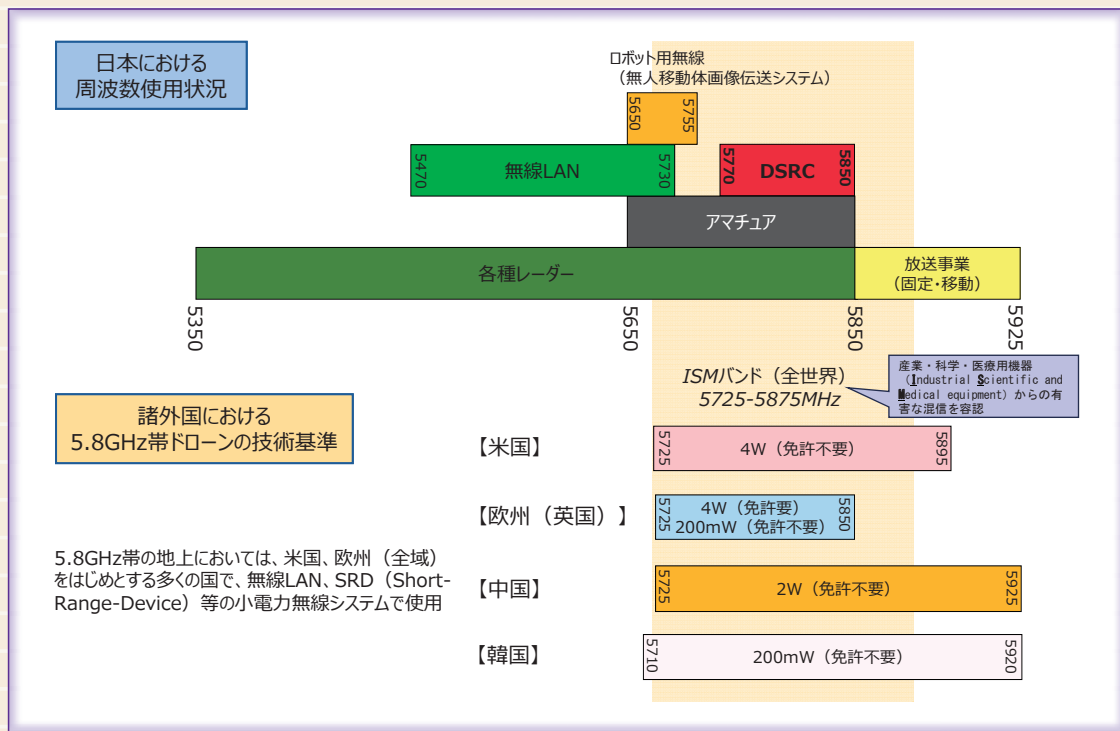
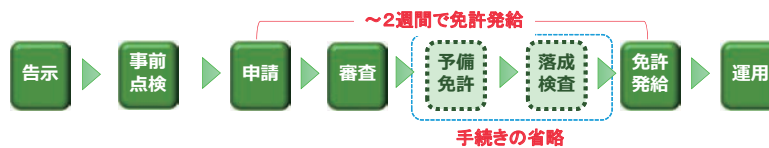


図6 5.8 GHz 帯の周波数使用状況

● 特定実験試験局の免許手続の流れ



● 特定実験試験局制度の概要

- 総務大臣が予め公示する特定実験試験局の使用可能な周波数、空中線電力及び使用地域の範囲内で、特定実験試験局を開設する場合、予備免許及び落成検査を省略することにより、免許申請から免許までの期間をおおむね2週間以内に短縮する制度。
- 特定実験試験局の免許申請においては、無線局免許申請書類(事項書・工事設計書)に加え、周波数等の範囲、無線設備の電波の質、無線従事者等について、登録検査等事業者における点検による確認した資料(事前データ等)を提出。
- 特定実験試験局の免許人においては、他の無線局の運用に混信を与えるおそれがある場合には、免許人間で運用調整を行うことが義務化。
- 無線設備の変更や設置場所の変更は、公示された周波数等の範囲内での変更であれば、電波の質が技術基準に合致することを登録検査等事業者における点検による確認を受けた場合には、届出事項で対応可能。

図7 特定実験試験局制度の概要

易な手続きで実験試験局を開設することが可能な特定実験試験局制度の対象とすることに取り組んできた。

既存の DSRC 等の無線局に影響を与えないように検討を進めていく必要があることから、総務省において、DSRC 等の既存無線局に影響を与えない周波数や使用地域等の条件の検討を行い、令和 6 年 11 月、5.8 GHz 帯

ドローン用特定実験試験局の告示⁽⁵⁾ が公布・施行された。これにより、告示の条件に従う実験試験局の開設申請があった場合は、落成検査を省略する等の簡易な手続きで、速やかに（おおむね 2 週間以内程度）実験試験局の免許が可能となった（図 7）。

3 まとめ

ドローン飛行にとって電波は不可欠であり、ドローンの利用環境の向上のためには、様々な無線システム（周波数帯）が、日本全国の上空で制限なく使用できることが望ましいが、昨今、様々な分野で電波利用ニーズが増大してきており、複数の無線システムで周波数を共用することが求められている。このため、各種無線システムが共存するため、一定の制約（周波数、空中線電力、使用地域等）を受けることもある。

ドローン航路の電波不感地帯を解消するため、将来は衛星通信システム等を活用することも想定されており、上空の電波利用環境の更なる改善に向けて、今後も継続して検討すべき要素がある。電波は有限希少な資源であり、国民共有の財産であることから、より一層の電波の公平かつ能率的な利用を促進していくことが肝要である。

■文献

- (1) 総務省, “5 GHz 帯無線 LAN の上空利用に係る技術的条件—情報通信審議会からの一部答申—,” 令和 6 年 12 月 17 日.
https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban12_02000167.html
- (2) 総務省, “「新世代モバイル通信システムの技術的条件」のうち「第 5 世代移動通信システム (5G) の高度化 (RedCap/eRedCap) に関する技術的条件等」—情報通信審議会からの一部答申—,” 令和 6 年 12 月 17 日.
https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban14_02000675.html
- (3) 総務省, “周波数再編アクションプラン (令和 5 年度版) の公表,” 令和 5 年 12 月 20 日.
https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban09_02000500.html
- (4) 内閣府, “規制改革実施計画,” 令和 6 年 6 月 21 日.
https://www8.cao.go.jp/kisei-kaikaku/kisei/publication/p_plan.html
- (5) 総務省, “特定実験試験局として開設可能な周波数の範囲等を定める告示案に関する意見募集の結果—5.8 GHz 帯ドローン用実験試験局の利用手続の簡素化—,” 令和 6 年 11 月 12 日.
https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban09_02000528.html

渡辺貴之

平 10 郵政省 (現総務省) 入省。入省後、各種無線システムの技術基準策定や無線局免許申請手続等に関する技術審査、国際標準化、電波監視等、電波・放送行政に幅広く従事。令 4-04 現職に着任し、日本国内における周波数割当ての総合調整等を担当。



電気製品とセラミックコンデンサの歴史

(株) 村田製作所 野口和馬 Kazuma Noguchi

1. はじめに

セラミックコンデンサの歴史は 1930 年代まで遡るが、18 世紀にコンデンサそのものの起源が発見されたことを踏まえると、コンデンサ商品の歴史の中では最近となる。

セラミックコンデンサの進化は、周辺に使用されるデバイスの進化（真空管からトランジスタ等）の影響を強く受け、近年では電気製品や電子機器には欠かせない部品の地位を確立した。

本開発物語では、セラミックコンデンサの活躍の歩みとそこにまつわる技術進化について、概要をまとめる。本稿が少しでもセラミックコンデンサへの興味や関心につながってくれればと考える。

2. コンデンサの紹介

セラミックコンデンサの本題を記載する前に、ま

ずコンデンサの役割と構造に関して紹介する。

2.1 コンデンサの役割

コンデンサは和名で「蓄電器」と記載されるように、電気を蓄えたり放電したりする電子部品である。具体的には誘電体を挟み込むように電極を設け、その電極間に電位差が生じることで、誘電体内部の電荷を蓄え、電極両端の電圧差（電位差）に起因して電荷の充放電を行う（図 1）。

電荷を蓄えるこのメカニズムを応用し、通信機器を中心に信号選別や、不要な信号（雑音）を取り除くフィルタとしての役割も果たしている（図 2）。

コンデンサの種類には、代表的なもので電解コンデンサやフィルムコンデンサ、近年ではシリコンキャパシタ等があり、コンデンサ、キャパシタの前に誘電体の種類の名前が付けられている。セラミックコンデンサはその名のとおりセラミックスを用いている。

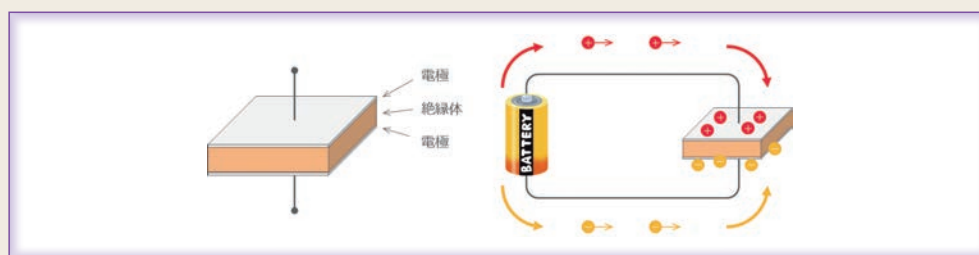


図 1 コンデンサの構造（左）と電気を蓄えるときの概略図（右）



図 2 コンデンサの役割例

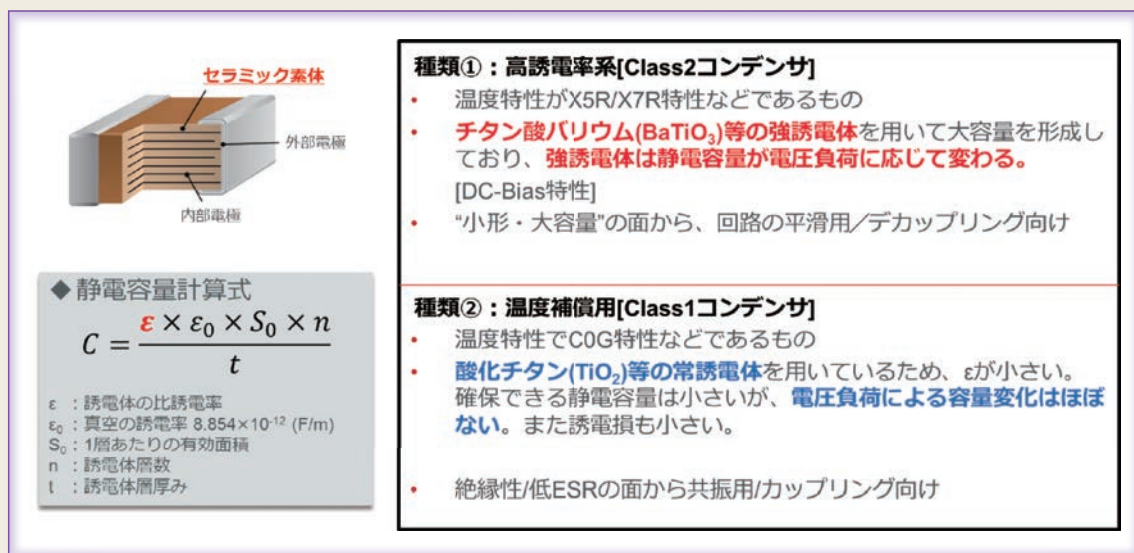
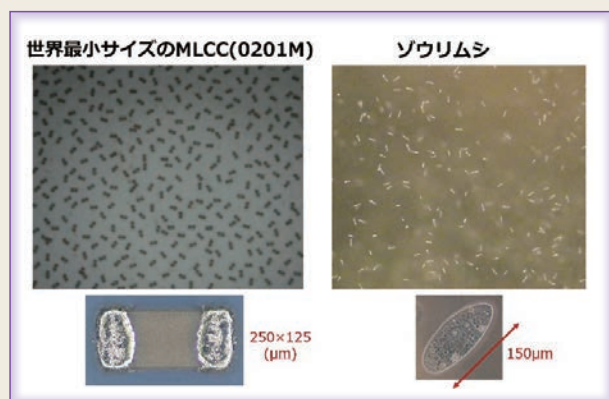
図3 セラミックコンデンサの種類と静電容量計算式⁽¹⁾

図4 0201Mセラミックコンデンサ(左)とゾウリムシ(右)比較

2.2 セラミックコンデンサの紹介

セラミックコンデンサと呼ばれるものは、その誘電体となるセラミックス材料によって性質や特性が大きく異なる(図3)。

また、セラミックコンデンサ製品は物理寸法が非常に小さいものが多く、図4のようにそのサイズはもはや微生物のゾウリムシと競うサイズにまで至っている。

このような超小形のセラミックコンデンサを開発する道のりは、多くの苦勞／挫折／ひらめきにより成り立っているが、その前段階として“ここまで小形品を作る必要が生まれた背景は何か”，これは皆様のお手持ちの電子機器に答えがあり、総じて生活環境や利便性の“向上”のためといった目的と、それに向けた研究者と開発者の使命感が背景にある。次章ではセラミックコンデンサを取り巻く環境について紹介する。

3. 電子機器の進化とセラミックコンデンサ

日本の高度経済成長期と重なるように、電子機器も大きく進化を遂げた。特に、電子の動きを能動的に制御する電子部品は、大形の真空管から小形のトランジスタに進化を遂げ、製品のデジタル化は加速的に進んだ。

コンデンサも上記進化に合わせて、従来型の大形リード付き部品(Through Hole Device)から小形高密度実装が可能な、表面実装部品(Surface Mount Device)への切換が進み、スペック面ではトランジスタに合わせた小形・大容量化が求められるようになった。これにより、セラミックコンデンサでは「誘電体の積層化」が大きな課題となった(図5)。

セラミックコンデンサの歴史的分岐点は1977年に松下電器産業(現パナソニック)が発表した携帯型ラジオ「R-012 ペッパーラジオ」であり、本製品が民生機器への積層セラミックコンデンサ搭載の先駆けとなった。

現在ではPCやデジタル機器はもちろん、近年ではパワーエレクトロニクス分野であるkWクラスの電源製品や移動体(自動車、二輪車)にまで、用途を広げている(図6)。

このたび、村田製作所はセラミックコンデンサ、中でも内部電極にNi(ニッケル)を用いたセラミックコンデンサの小形大容量化、それと合わせ高品質・低価格での生産を可能としたことで、IEEE Milestoneを受賞した。

Innovation of MLCC

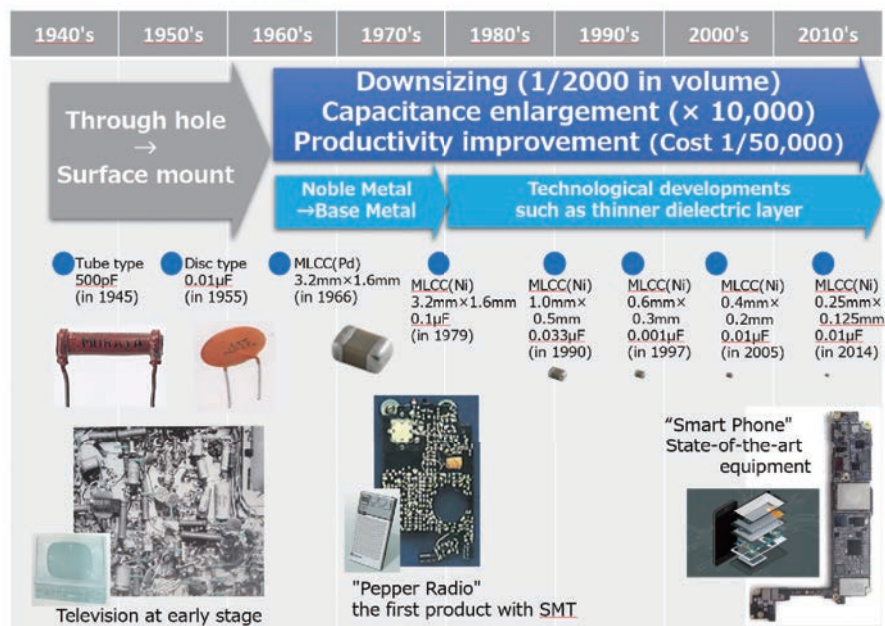


図5 セラミックコンデンサ進化の歴史

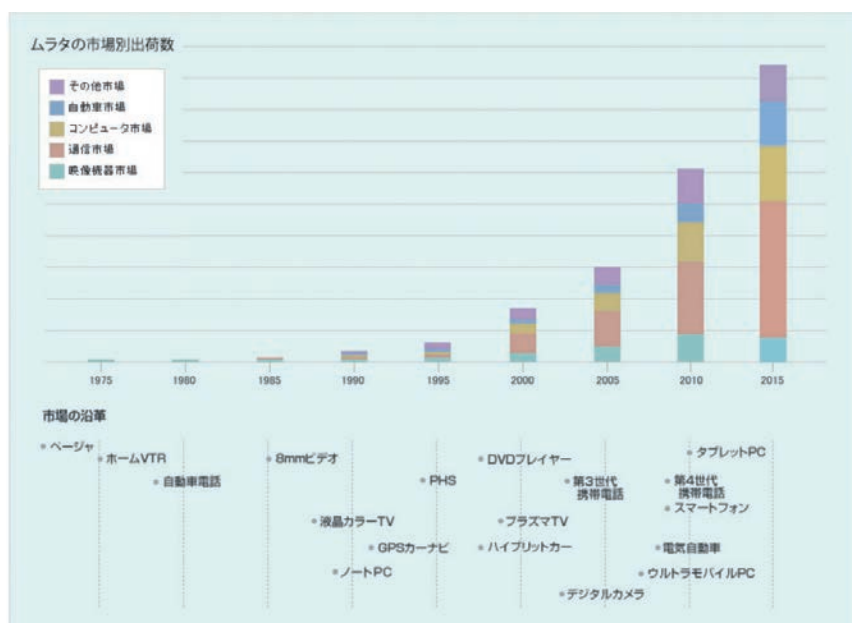


図6 セラミックコンデンサの市場別出荷台数 (村田製作所調べ)

1982年から今日に掛けて量産化し続けた本商品は、現在のセラミックコンデンサの主流の商品であり、図7のように数多の市場・技術領域にて御使用頂いている。

現在の“積層セラミックコンデンサ (MLCC)”に対する認識は電気・電子製品・業界における「コメ」のようなものであり、「あって当たり前のコモディティ商品」などと言われているが、その開発行

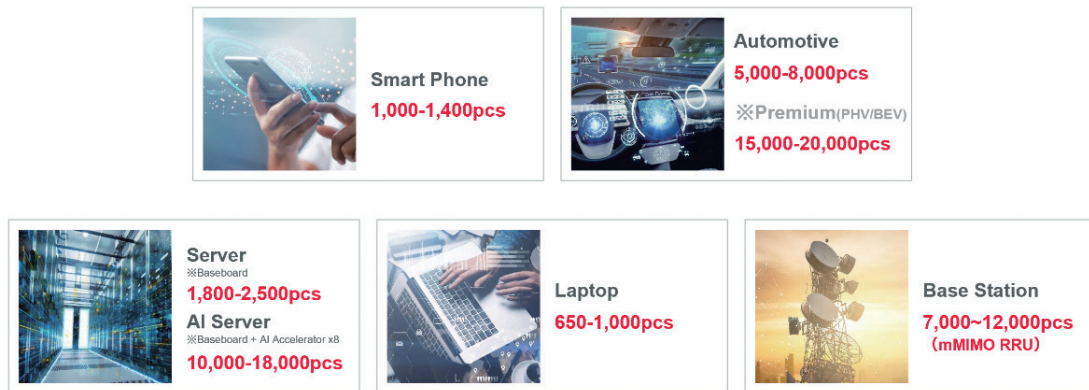
為は「職人技の積み重ね」と言っても過言ではない。

ここからは積層セラミックコンデンサの製造工程に基づき、開発の難しさや苦労話を述べる。ただし、セラミックコンデンサメーカーごとに苦労している内容が異なるため、本原稿では“積層セラミックコンデンサ”作りにおける一般的な内容でまとめる。

MLCCの代表市場と、市場別の平均使用個数

muRata
INNOVATOR IN ELECTRONICS

コンデンサは様々な電子機器で多数ご使用いただいています。



Copyright © Murata Manufacturing Co., Ltd. All rights reserved.

04 October 2024

図7 セラミックコンデンサの市場別平均使用個数（村田製作所調べ）

4. 積層セラミックコンデンサの開発物語

受動部品でエネルギーを取り扱うインダクタとコンデンサは、エネルギー密度が約1,000倍異なる（図8）。

積層セラミックコンデンサに視点を合わせると、昨今の小形・高性能化のトレンドに対応するためには、このエネルギー密度をサイズ当りでどれだけ大きく取れる商品なのかが求められ、製品価値の一つに“小形・大容量化”が挙げられる。大容量化の施策としては図3でまとめたとおり、「内部電極の有効面積部位を広げる」、「誘電体層を多く積む」、「誘電体層を薄くする」の3点が基本的な商品開発の

方向性となる。言葉としては非常にシンプルな項目だが、図5で示したように、積層セラミックコンデンサの場合はサイズが5.7 mm × 5.0 mm ~ 0.25 mm × 0.1 mm と非常に小さいため、その開発行為は決して容易ではない。

図9は積層セラミックコンデンサの製造工程図である。以下で、本図の「誘電体原料受入れから、内部電極印刷／積み重ね」と、「焼成」を述べる。

4.1 誘電体原料受け入れから、内部電極印刷／積み重ねについて

積層セラミックコンデンサは、誘電体セラミックをシート状に形成し、その上に内部電極を印刷する工程を繰り返し、積層していく。

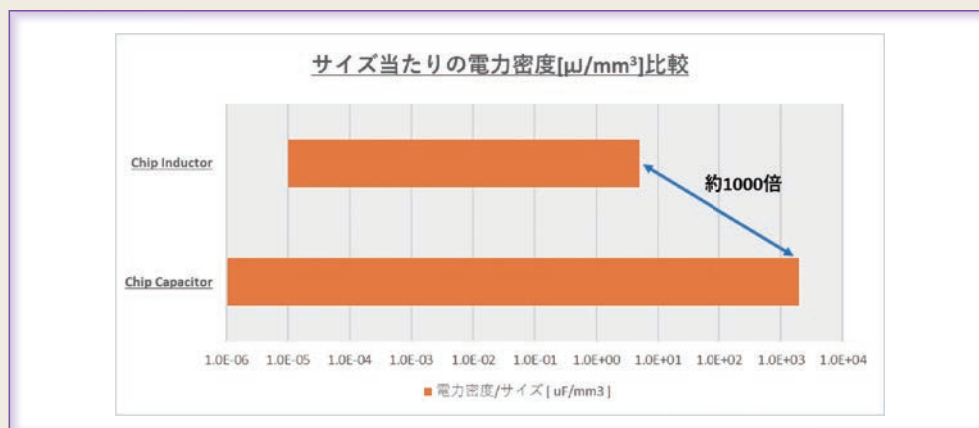


図8 インダクタとコンデンサのエネルギー密度比較（村田製作所調べ）

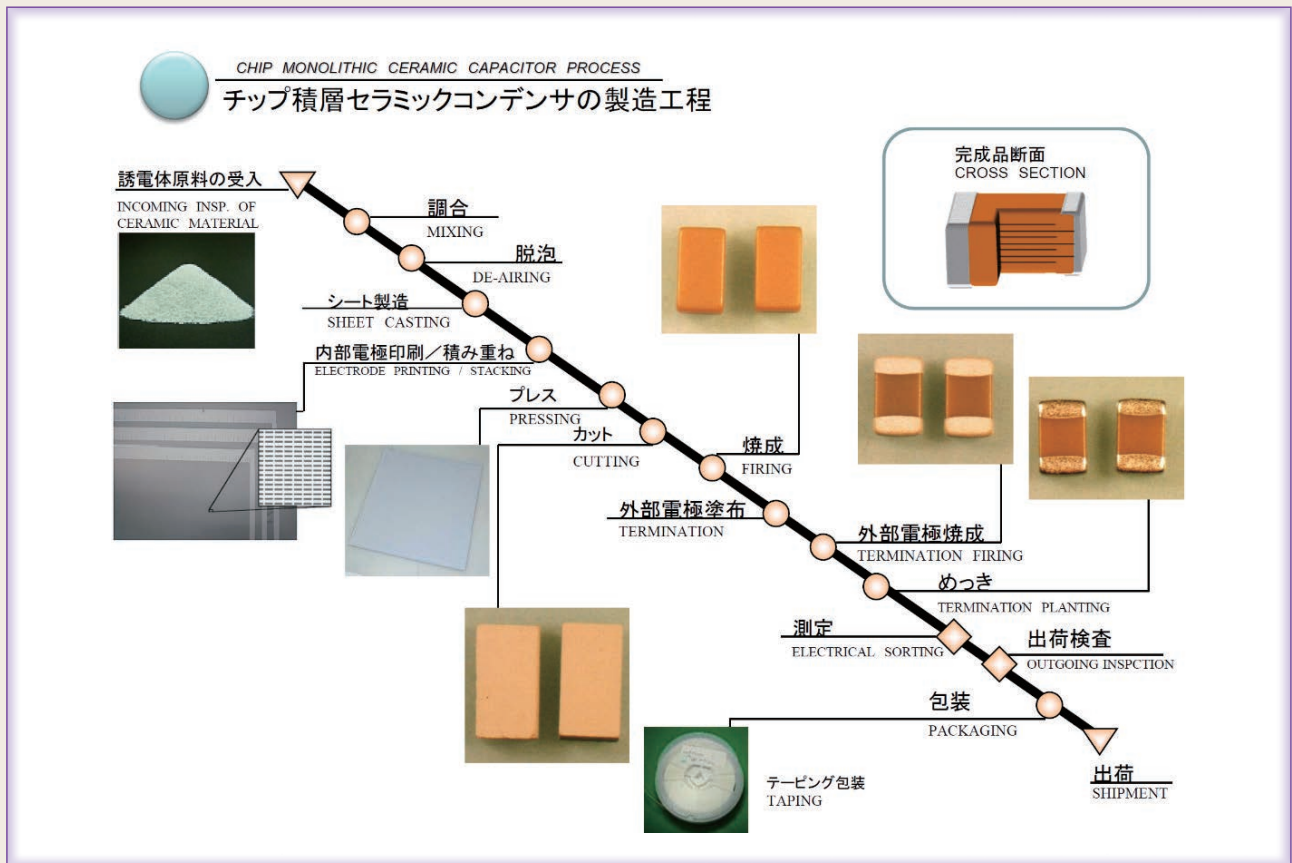


図9 積層セラミックコンデンサ製造工程図

図3で示したように、積層セラミックコンデンサの構造はシンプルなものだが、実際の‘もの’づくりにおいては誘電体セラミックも電極用金属も“粒”であるため、誘電体シートの厚みを均一に作ることと、薄く作することは非常に難しい。

また、図4で示した0201M (0.25 mm × 0.125 mm) サイズまでくると、誘電体セラミックスや電極の粒のサイズ管理は μm 未満の領域でありながら、なおかつ粒サイズを均一に作り込む(粒のサイズばらつきを抑え込む)ことが求められる。印刷工程では、誘電体層も内部電極層もそれぞれ“面内均一の厚み”になるように印刷しなければならない。

もし、不均一面が発生してしまうと、そこに電気(厳密には電界)が集中してしまい、電界が集中し

た部位を起点に製品の信頼性の低下や耐電圧の実力低下を招くなど、様々な問題が発生する(図10)。

また、商品として必要な静電容量を確保するために何層も“積層”する必要がある、材料となる誘電体セラミックスの加工技術だけでなく、積層技術も重要になる。サイズによって積層数は変わるが、近年では4532M (4.5 mm × 3.2 mm) サイズで1,000 μF を達成している積層セラミックコンデンサもあり、静電容量の公称値(μF)は4桁に突入している。

図11は、積層セラミックコンデンサに使用される誘電体セラミックスと内部電極材料Niの粒径変遷を示しているが、既にその粒一つのサイズは100 nmほどである。これは、SARS (120~170

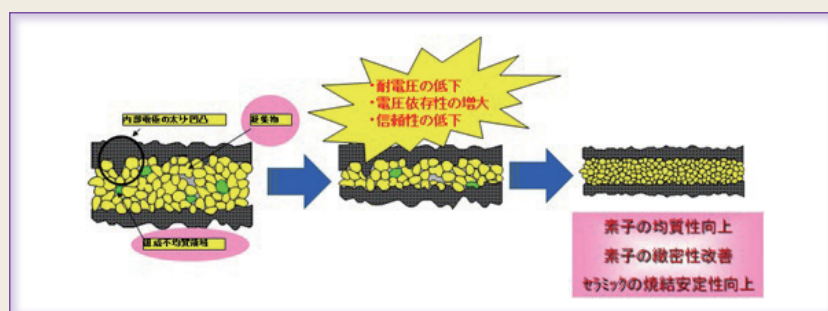


図10 誘電体素子と内部電極の薄層化と顕在化する課題

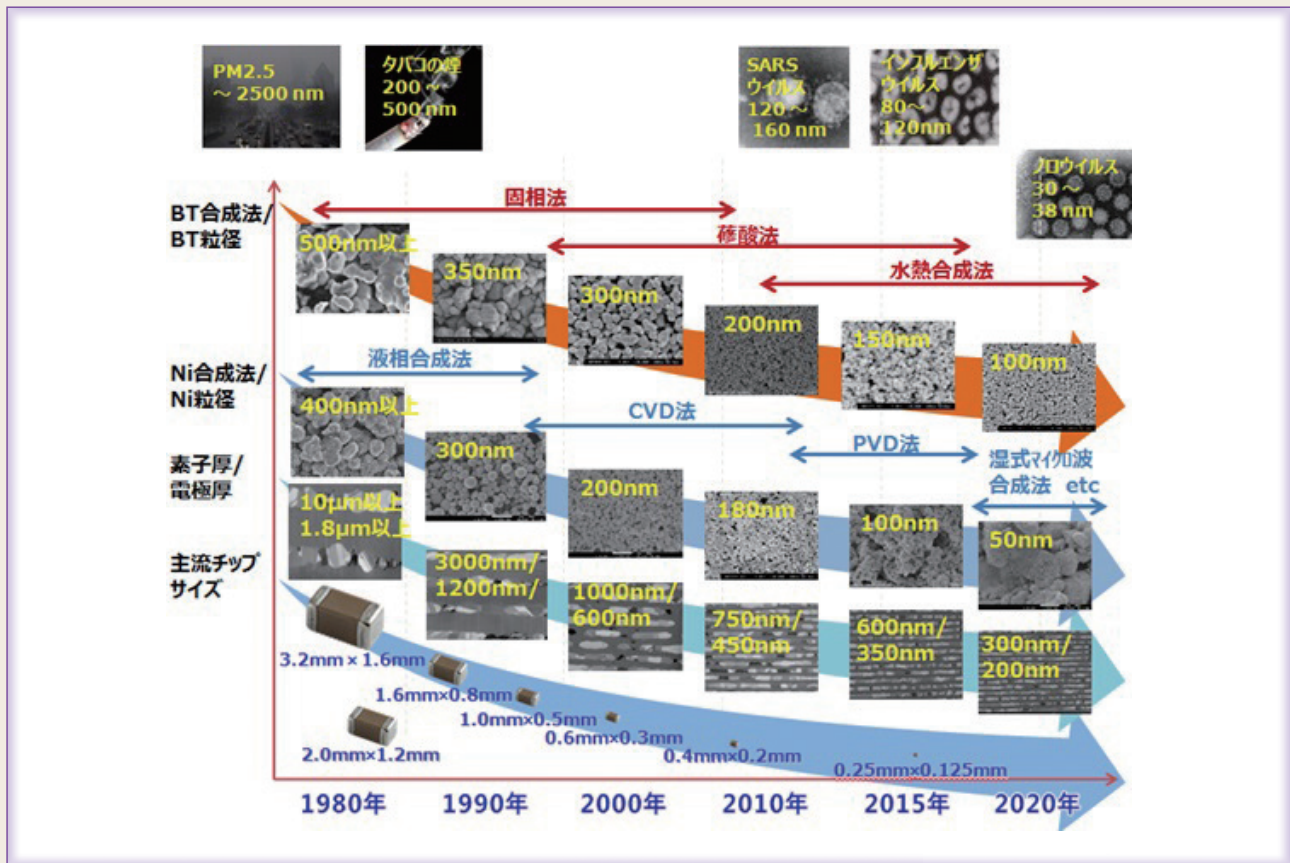


図 11 積層セラミックコンデンサの設計と誘電体セラミックスと内部電極粉末の変遷⁽²⁾

nm) やインフルエンザ (80~100 nm) などのウイルスと同等に近い値である。

これらの各サイズを管理し、シート面内に均一に印刷し、何層も同じ均質状態を保たなければならないところが、積層セラミックコンデンサの開発行為において根幹を成す部分である。

4.2 焼成について

セラミックコンデンサは越前焼や清水焼と同様“焼き物”である。そのため、焼成条件や焼成工程の管理条件次第では、コンデンサ製品として必要とされる各特性が発現しないという課題が発生する。

特に誘電体セラミックスと内部電極金属は、焼結温度が異なるため、二つの異なる物質を「各特性が発現できるように、過不足がないちょうど良い環境で焼く」という製造技術及び焼成環境管理技術は、商品開発を進める中でも重要な要素となる。

本稿では一例として、焼結挙動の差に関して図 12 を用いて紹介する。図 12 は誘電体セラミックスと内部電極材料 Ni の焼結温度と焼結時の面積拡散・収縮の度合いを示す。内部電極材料 Ni は焼結開始温度が約 400 °C 近辺にあるのに対し、誘電体セラミックスは 1,000 °C 超領域で焼結が開始する。

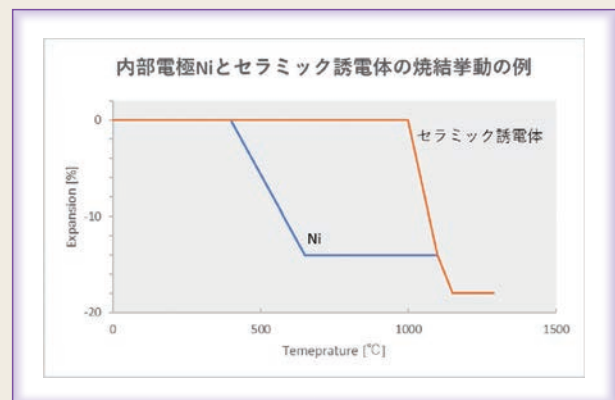


図 12 誘電体セラミックスと内部電極 Ni の焼結挙動の例

誘電体セラミックスの焼結がコンデンサの電気的特性を発現させるに当たり最も重要ではあるのだが、その一方で内部電極材料 Ni が過剰に焼結してしまうと Ni が酸化してしまい、電極としての役目を果たせなくなる、(酸化ニッケルは電気を通さない、) という問題が発生してしまう。

積層セラミックコンデンサはプラントンサイズから 5750M (5.7 mm × 5.0 mm) サイズ近くの大形チップまで存在する (図 13)。これら焼結温度や速度はサイズによっても変わるため、大量の商品が存在する積層セラミックコンデンサの世界で

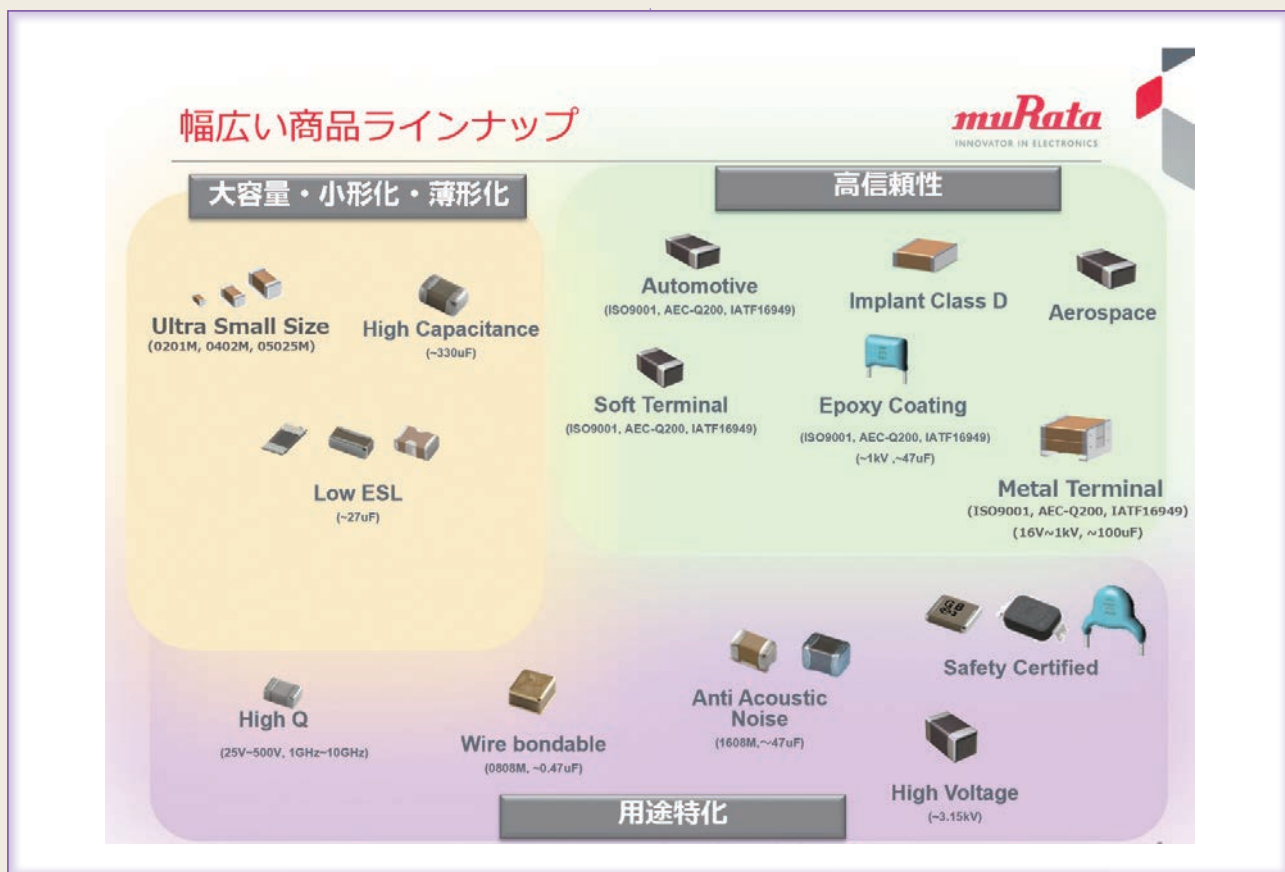


図 13 セラミックコンデンサのバリエーション

は、要素技術や勘所が商品の数だけ存在すると言っても過言ではない。

料理におけるクッキーやハンバーグ作り同様、適正な条件が見いだせずに作られたものは、生焼けのクッキーやハンバーグ、焦げてコゲコゲに炭化した苦い何かに変わるように、積層セラミックコンデンサもコンデンサとして求められる特性が発揮されないという課題がある。

ウナギ職人の格言で「串打ち 3 年、裂き 8 年、焼き一生」と言われるように、焼成というプロセスは今回の IEEE Milestone 受賞においても非常に重要な役割を有している。

市場ニーズに合わせた積層セラミックコンデンサを開発し続けるには、そのニーズに合った形状や特性を発現させなければならず、それに応じ続けるためにも、焼成の要素技術開発に終わりはない。

5. セラミックコンデンサの将来

約 40 年前から現在に至るまで、市場から愛される部品になるために積み上げた努力は、超小形部品の発展だけでなく、ユーザの完成品に特化した商品への進化も遂げてきた。また、その進化の過程にお

いては、図 3 とは外観が全く異なるものも商品として市場に投入され、様々な電子機器の小形化に寄与し、我々の日常生活の利便性改善に貢献してきた。

また、4.1 で紹介したように、定格電圧に制約があるものの、従来は電解コンデンサが主役であった 1,000 μ F 領域にセラミックコンデンサも追いついたため、“オールセラミックコンデンサ化”という概念が、2010 年中盤からデジタル機器業界以外からも出つつあり、この考えはモビリティ市場やパワーエレクトロニクス技術に波及している。

図 14 はその動きの一例で、フライングキャパシタにセラミックコンデンサを採用し、マルチレベルのインバータを試作・設計した事例である。図内にも記載があるように、フライングキャパシタ方式のマルチレベルインバータ回路を用いることにより、L や C を小さくできることから、小形大電力密度のインバータの可能性を示すものであり、高周波化スイッチング技術ともあいまって、セラミックコンデンサの新たな活躍の例として近年注目を集めている。

特に今後は、小形品開発で培った各種要素技術をどのように展開し、世の中のニーズに応えていくか

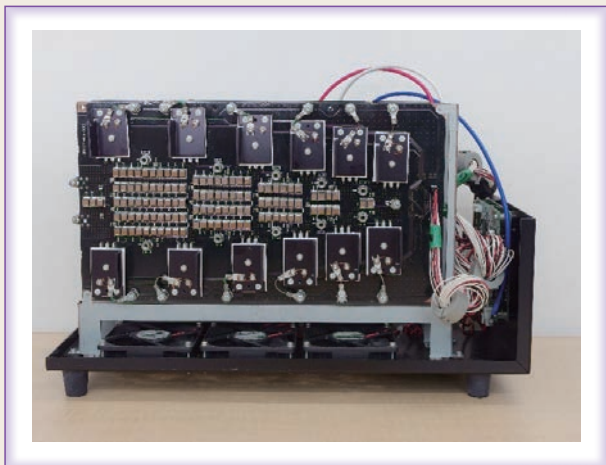
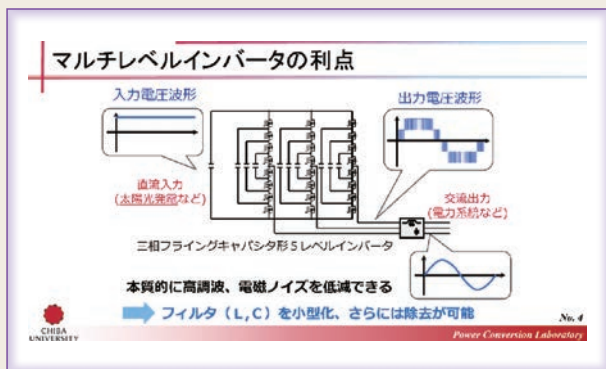


図 14 フライングキャパシタマルチレベルコンバータの
過去検討事例
(出典 千葉大電力変換教育研究分野研究室)

が重要となる。積層セラミックコンデンサメーカーは
今後とも顧客ニーズを先読みし、開発物語を紡いで
いく。

6. まとめ

図 15 は村田製作所の社是である。社是には創業者から始まる今日までのムラタの仲間たちの様々な
思いが込められている。今回寄稿させて頂いた内容は「技術を錬磨し」・「科学的管理を实践」の部分と
「文化の発展に貢献」の部分を中心にまとめさせて頂いた。

今回の IEEE Milestone の受賞はこの社是における
心構えの一つの結果ではあるが、我々の歴史の中
においては通過点の一つに過ぎない。

今後も受賞内容に甘んじることなく、皆様へ新たな
価値を提供し続け、積層セラミックコンデンサ商
品を御使用頂く皆様、並びに関係する皆様と共にあ
ることを喜びとし、これからも業界の発展に貢献し
続けていきたい。

社 是

技術を錬磨し
科学的管理を实践し
独自の製品を供給して
文化の発展に貢献し
信用の蓄積につとめ
会社の発展と
協力者の共栄をはかり
これをよろこび
感謝する人びとと
ともに運営する

図 15 ムラタの経営理念（社是）⁽³⁾

文献

- (1) パワーエレクトロニクスにおける受動部品に関する技術調査専門委員会委員, “セラミックコンデンサの種類と特徴,” 2023 電気学会産業応用部門大会シンポジウムパワーエレクトロニクスにおける受動部品の最新技術動向報告書 P.58 から抜粋。
- (2) 公益社団法人発明協会, “積層セラミックコンデンサ発明技術開発の概要,” 戦後の日本イノベーション 100 選. http://koueki.jiii.or.jp/innovation100/innovation_detail.php?eid=00047&age=high-growth&page=kaihatsu
- (3) (株) 村田製作所, “ムラタの経営理念 (社是),” 村田製作所 ホームページ から抜粋. <https://corporate.murata.com/ja-jp/company/philosophy>

野口和馬

(株) 村田製作所
セラミックコンデンサ事業本部事業企画部。2008 村田製作所入社。高周波インダクタ商品開発、MLCC 技術営業を経て、営業企画部に配属。





科学技術館 —夢と科学の国で冒険だ—

山口実靖 Saneyasu Yamaguchi 工学院大学

1 はじめに

あなたは子供とどこに遊びに行きたいだろうか？ 技術者や科学者であれば、子供の科学的な好奇心を育む場所に行きたいかもしれない。もしそうなら、旧江戸（現東京都）の旧江戸城北の丸（現北の丸公園）にある科学技術館⁽¹⁾が、いの一番に挙がるだろう。

そこは科学のテーマパークで、子供が触って科学を楽しめる夢の国である。筆者も、息子が楽しむ笑顔が見たく、今週末も遊びに行った、もとい、勉強に訪れた。本稿では、筆者自身も大好きな科学技術館の魅力を伝えたいと思う。「科学好き」の子供が増え、「技術立国日本」の復権につながれば幸いである。

2 園児が演示をエンジョイ

子供（幼稚園児～小学校低学年児童）が喜ぶ“演示”や展示を紹介しよう。筆者の調査によるものであり、先に紹介するものほど強く勧めたいものである。

2.1 5階メカ

直径 31.8 cm の巨大なステンレス球（SUS 球）を、歯車や滑車を利用して持ち上げて転がしていく装置を動かす（図 1）。巨大な球が転がる迫力に「科学っ子」が



図1 機械 ステンレス球転がし（5F メカ）



2.2 5階ワークス

巨大なシャボン玉の中に入ったり（図 2）、「空気砲」を打ったりできる。とても面白い部屋である。それもそのはず、サイエンスショーで有名な米村でんじろう先生のプロデュースである。竜巻や空気砲を視覚的に体感でき、流体などについて学べる。

2.3 3階ベアリング・ラボ

ベアリングで摩擦が極端に減ることを、物を滑らせて楽しみながら学ぶことができる。ベアリングの有無でどちらが遠くまで滑らせることができるかを競うゲームのようになっていて、当然ながらベアリングの方が圧勝する。所要時間は数分だが、うちの子はずっと学んでいる。

2.4 2階ワケエコ・モーターランド

乗用車やバイクやトラックの運転をシミュレータで



図2 でっかいシャボン玉（5F ワークス）

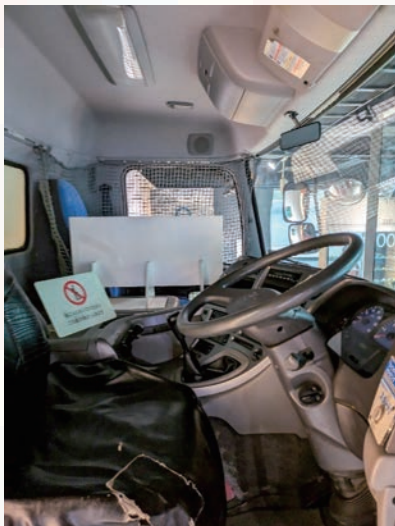


図3 ワインディングロードドライビング (2F ワクエコ・モーターランド)

体験できる (図3)。子供にはやはり大きいトラックシミュレータが人気だと思われる。大型で、本物そっくりに作られたトラック運転席に入り込むことができる。

2.5 4階建設館

タワークレーン (巨大なクレーン) を動かしたり、風の建物への影響を体験したり、吊り橋やアーチ橋の原理を学べる (図4)。ぱっと見て、タワークレーンが楽しそうだが、筆者はアーチ橋の原理を体験できるコーナーもお勧めしたい。

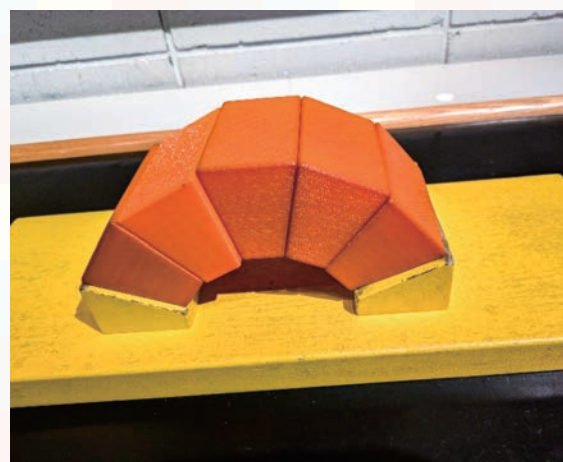


図4 吊り橋とアーチ橋の体験コーナー (4F 建設館)



図5 「情報の世界」を旅する (3F ニュー・エレクトロホール)

3 電子情報通信技術に御興味がある方へ

電子情報通信技術に御興味をお持ちの方には、3階のニュー・エレクトロホールへ行って頂きたい。IoTの展示を見ることができる。IoTはInternet of Things, ‘もの’のインターネットの略で、ネットワークに接続されたセンサから情報を収集したり、それを解析したりする技術である。図5は、IoTのコーナーで情報の世界の旅に興じる筆者であり、可視化された展示室の気温、湿度、気圧、音声検出回数、視線検出回数、入室者数の変化を楽しんでいる。

また、大変に地味な展示ではあるが、近年急増するデータセンター需要を支えている日本のケーブルの展示 (図6) も専門性を持つ人には感慨深いかもしれない。

4 体験型ミュージアム

科学技術館はほとんどの展示が体験型である。しかも、能動的に動かさないとうまくいかないものも多い。

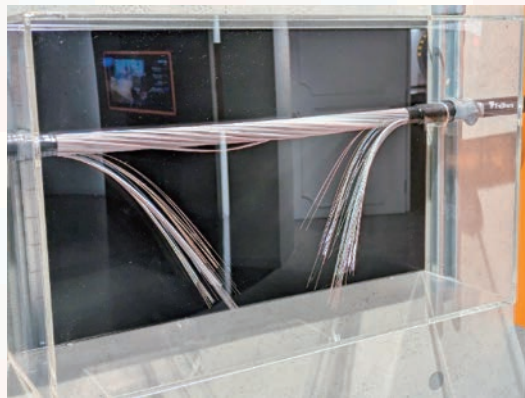


図6 データセンター用のラックやケーブル
(3F ニュー・エレクトロホール)

物理的に物を動かして、視覚的に結果を確認できるので、子供たちにはたまらない。一部には、非常に体験型にしづらい展示まで、無理やり体験型、参加型にしている（ように大人には見える）ものもある。スタッフの涙ぐましい努力を感じる。

著者は、建設館の吊り橋やアーチ橋の体験コーナーは、体験型科学展示の傑作だと思っている。

5 疲れ一た？ エレベータ！

館はエスカレータと階段が効率的に配置されており、エレベータを使う必要性がほとんどない。しかし、1回はエレベータに乗ってほしい。図7のように、とても広い。「籠」の中の広さが10.7m²（間口2.78 m×奥行き3.85 m）もあり、124人乗り（積載重量8,100 kg）で日本最大とのことである*¹。操作も専用のスタッフが行ってくれる。

6 科学技術館の成り立ちと運営

科学技術館は皇居の隣の公園にあり、国（省庁）が運営している科学館と思われるかもしれないが、1964年



図7 エレベータ

に財団*²により作られ、今も公益財団*³が運営している。この財団は産業界の支援で成り立っており、完全に民間の財団である。つまり、文科省などの省庁や教育委員会などの下にはない。それがほかの科学館と一線を画すところであり、面白いところでもある。展示は、学校で学ぶことの延長線上ではなく、産業で活用されている科学技術をベースとしている。館の経営は、館のスタッフの皆さんの集客の努力の上に成り立っており、科学技術は楽しくなくてはならない。毎週多くの子供が訪れているのもうなずける。

7 科学技術館から日本の科学と経済の発展へ

本稿では科学技術館の魅力を伝えてきた。小さな子供と訪れてみてはいかがだろうか。きっと、喜んでもらえると思う。子供が科学に興味を持つことが始まりであり、その後に原理や仕組み、科学の魅力を伝えて、立派な科学者の卵を育て、将来の我が国の繁栄に貢献するのは私たち大人の仕事であると思う。

■文献

- (1) Science Museum, “科学技術館.” <https://www.jsf.or.jp/>

*¹ ちなみに高さ2.98 mで、容積は31.9 m³となる。

*² 財団法人日本科学技術振興財団

*³ 公益財団法人日本科学技術振興財団

山口実靖（正員）

2002 東大大学院工学系研究科電子情報工学専攻博士課程了。博士（工学）。同年から東大生産技術研究所学術研究支援員、産学官連携研究員、日本学術振興会特別研究員。2006 工学院大・工・講師。2007 准教授。2016 同情報学部准教授。2021 同教授。専門はオペレーティングシステム、通信プロトコル。趣味は息子との科学館巡り。将来の夢は科学技術館の演示員。情報処理学会、日本データベース学会、IEEE、ACM 各会員。





こんなツール, 使っています

Wolfram 言語／Mathematica で データサイエンス

ウルフラムリサーチ

北村美穂子 Mihoko Kitamura 金光安芸子 Akiko Kanamitsu 安井(今藤)紀子 Noriko I. Yasui

1 はじめに

Mathematica は数式処理システムのイメージが強いが、現在は数式処理ソフトの範囲を超えて、知識処理、データ分析、機械学習、生成 AI との連携等、最新の AI 技術を取り込んだ知識ベースのプログラミングができる技術計算環境を提供するアプリケーションである。そしてこの Mathematica の基盤となっているプログラミング言語が Wolfram 言語である。本稿では、Mathematica の豊富な機能の中でも、最近需要が高まっているデータサイエンスに焦点を当て、その使い方を紹介する。

データサイエンスでは、様々な計算や手法を組み合わせ、問題を解決したり、データの可視化を繰り返す必要があるが、Mathematica が有する豊富な組み込み関数や Wolfram 知識ベースとの連携機能を使うことで、効率良いデータ分析が可能となる。

本稿では、最初に Mathematica の特徴や利用環境について説明し、データサイエンスでの活用に当たり、データ活用の手法から機械学習、ニューラルネットワークなど高度な機能を実際のコード例を交えながら紹介する。最後に、大規模言語モデル (LLM) との連携についても紹介する。Wolfram ID を作成すれば、Web ブラウザから Wolfram Cloud 環境にアクセスして無料で試せるようになっているので、Mathematica の初心者も、学生時代に数学や物理で使ったことがある人も、是非この機会に試して頂きたい。

2 Mathematica とは

Mathematica とは、関数型プログラミング言語の Wolfram 言語をベースとした技術計算アプリケーションである。イギリスの物理学者 Stephen Wolfram が自身の研究のために開発を始め、1988 年に最初のバージョン

がリリースされてから 30 年以上にわたって、世界中の高校や大学、研究機関、企業などで広く活用されている。Wolfram 言語は Mathematica, Wolfram|Alpha など Wolfram 社が提供しているアプリケーション全ての基盤となるプログラミング言語であり、数学や物理の専門的な計算はもちろん、信号処理や機械学習、地理計算など幅広い分野を扱う約 6,000 個の組み込み関数を有している (図 1)。

2.1 Mathematica の特徴

Mathematica の特徴と言えば、ほんの数行の短いスマートなコードで、難解な計算から可視化までを統合的な「Wolfram ノートブック」という環境で実行できることであろう。ノートに計算し、グラフを描き、答えを得る、といった人間の思考に沿った一連のプロセスを、そのまま同じように Wolfram ノートブック上で行うことができる (図 2)。

また、Wolfram 知識ベースには様々なタイプの実体 (Entity) という計算可能な知識データが用意されてお



図 1 Mathematica のコアとなる分野⁽¹⁾

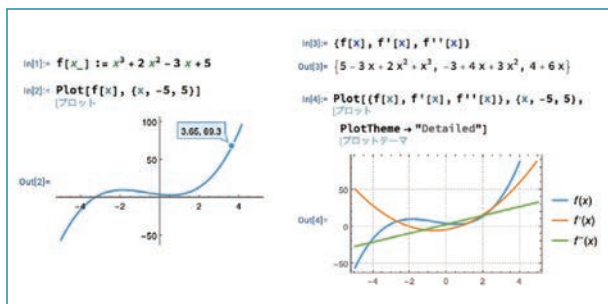


図2 数式を定義してグラフ描画した後、導関数を求めて可視化した例

り、これを使って計算や可視化を行うことができる。巡回セールスマン問題 (TSP) と地理情報を組み合わせて、ヨーロッパ各国の首都を最短で回るコースを可視化する。

まず、コントロールキーとセミコロン (;) を入力して自由形式入力ボックスを表示させ、そこに「ヨーロッパの首都」と入力すると、自然言語を解釈して Wolfram 知識ベースから「ヨーロッパの首都」のデータが取得できる。これらのデータには、各都市に関する地理データや人口や GDP などの社会・経済データなどがひも付いている。これを変数 `cities` にセットして `GeoListPlot` 関数に入れると、地図上に各都市が点で表示される (図3)。

次に、各都市を最短で回るコースを求めるため、`FindShortestTour` 関数を使う。総距離 22,660.3 km と、回る順番のリストが得られた。`GeoListPlot` 関数でこの順番を地図上でつないで表示すると、最短コースが可視化できる (図4)。

Mathematica と言えば微分方程式、という人も多いかもしれない。数理モデリング、解析の基本となる常・偏微分方程式の分野においては、これらをシンボリックに、あるいは数値的に解くための強力なソルバを搭載している。図5はローレンツモデルを三次元に可視化した結果である。微分方程式の数値解を求める `NDSolve` 関数で解いた結果を、3Dのパラメトリックプロットで可視化している。紙面では一方向からのイメージになってしまうが、Wolfram ノートブック上では、マウスで視点を変え、異なる角度から見ることもできる。

また、解析的に解くことが難しい問題については、数値解析的な手法も近年大幅に強化されている。例えば、小さな要素に分割し、要素ごとの挙動を計算し全体の挙動を求める「有限要素法 (FEM)」により、複雑な構造や物理現象のコンピュータによるシミュレーションができる。図6は円柱の周りの流れのシミュレーションである。流体の運動を記述する非線形偏微分方程式 (Navier-Stokes 方程式) を解いて可視化、更にアニメー



図3 Wolfram 知識ベースから取得したデータを使ってヨーロッパ各国の首都の位置を地図上にプロット

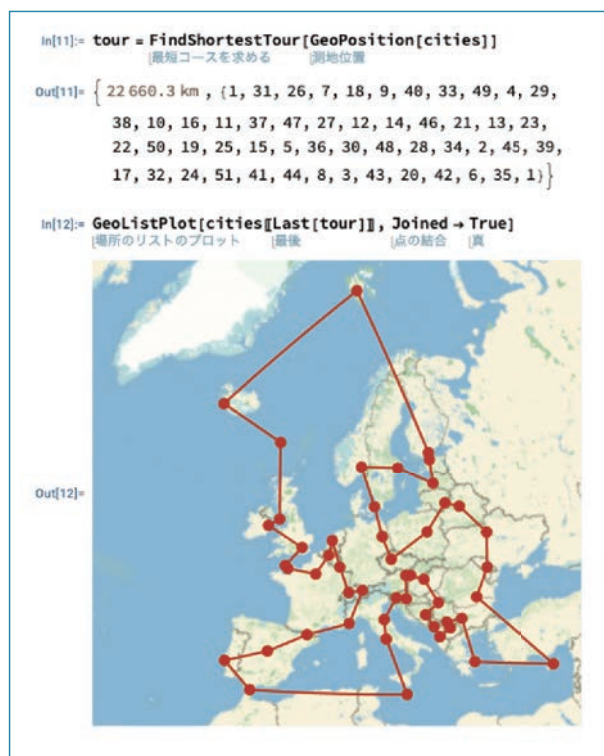


図4 ヨーロッパ各国の首都を最短で回るコースを地図上に可視化

ションの作成まで、全て Wolfram 言語のみのプログラムで実装されている。このプログラムを含むブログ「非線形偏微分方程式への有限要素法の適用」⁽²⁾ で詳しく説明しているので、そちらも是非参照されたい。

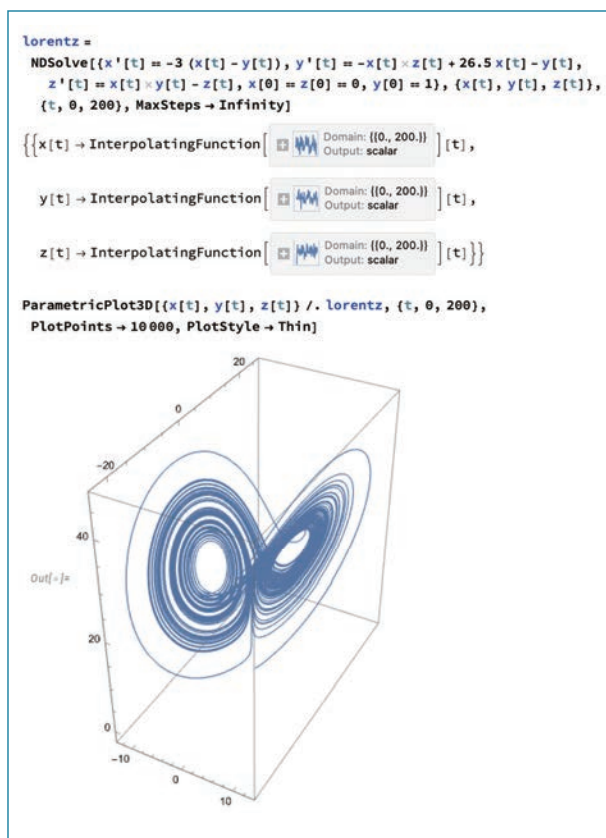


図5 ローレンツモデルの三次元可視化

2.2 Mathematica の利用環境

Mathematica は従来のデスクトップ版に加え、Wolfram Cloud というクラウド環境でも利用できる (図7)。インストールが不要なため、場所を問わずにPC、モバイル、スマートフォンなど様々な環境で利用できるメリットがある。クラウド版 Mathematica を利用するには Wolfram ID というアカウントでサインインする必要があるが、名前とメールアドレスを登録するだけで誰でも作成でき、Basic Plan のアカウントとして無料の範囲で使うことができる。

また、Mathematica のオンラインドキュメント⁽³⁾には全ての関数についての説明に加えて、具体的な例題が多数掲載されており、プログラムをコピー&ペーストし

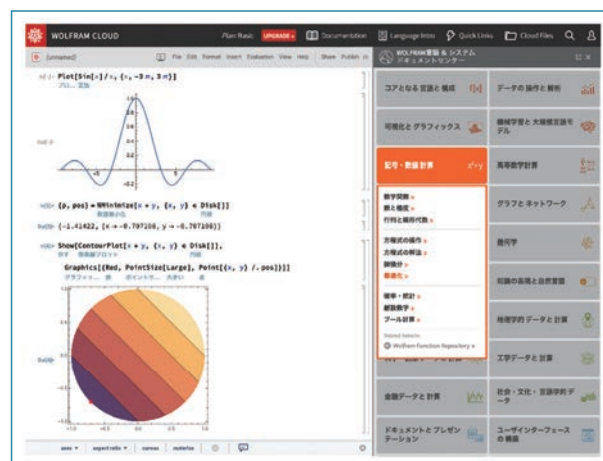


図7 Wolfram CloudでMathematicaを使用した画面。左がWolfram ノートブック、右はオンラインのドキュメントセンター。

て自分で実行したり、数値を変えて試したりすることができる。本稿では、紙幅の都合上、プログラムで使われている関数について個々に詳しく説明することができないが、気になる関数についてはオンラインドキュメントで調べて頂きたい。

3 データサイエンス

Mathematica は、簡単でシームレスなデータ分析が可能となっている。その主な理由は以下のとおりである。

- 組み込み関数が豊富：データサイエンスに関連する高度な組み込み関数や Wolfram Data Repository⁽⁴⁾ で紹介している事例を使うことによって、数学的な理論や統計手法の理解を前提としたプログラミングをすることなく、データ分析をすることができる。
- 整備された豊富なデータとの連携機能：自然科学、地理や経済等の膨大な現実世界のデータ Wolfram 知識ベースを簡単にインポートすることができる⁽⁵⁾。
- 可視化に優れる：プロットやチャート図の種類が多く、最適なものを選んで可視化することができる⁽⁶⁾。
- 一つの環境で分析作業が完結：Wolfram ノートブッ

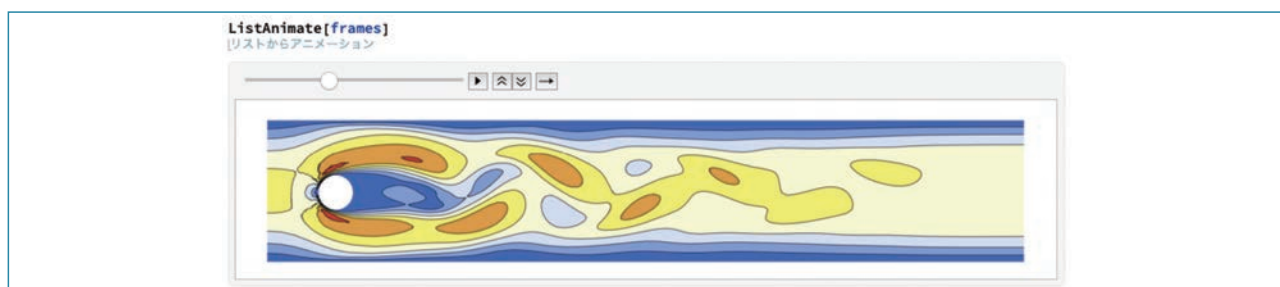


図6 非圧縮性流体の流れのシミュレーション
(上部のスライダを動かしてアニメーションとして見ることができる)

ク上で、データのインポート、解析、可視化、レポート作成、デプロイ（ツールの提供）の全てを行うことができる。

- 最新のアルゴリズムを継続的に提供：定期的なバージョンアップにより、最新のアルゴリズムや統計分布を利用することができる。

上記について、実際のプログラミング例を示しながら、関数の一部を紹介する。また、Wolfram のサイト⁽⁷⁾ではここで紹介する以外にもたくさんの事例が載っている。是非、そちらも参照してほしい。

3.1 組み込み関数の利用

Mathematica は、既に学習済みの精度の高い機械学習に関する関数が提供されている⁽⁸⁾。

例えば、ImageCases 関数を利用すると、画像に含まれるオブジェクトを確定し切り出すことができる (図 8)。

また ImageIdentity 関数は、与えられた画像が何の画像であるかを特定しようと試みた結果を返す。図 9 は画像を「魚」のカテゴリーに限定し、可能性の高い上

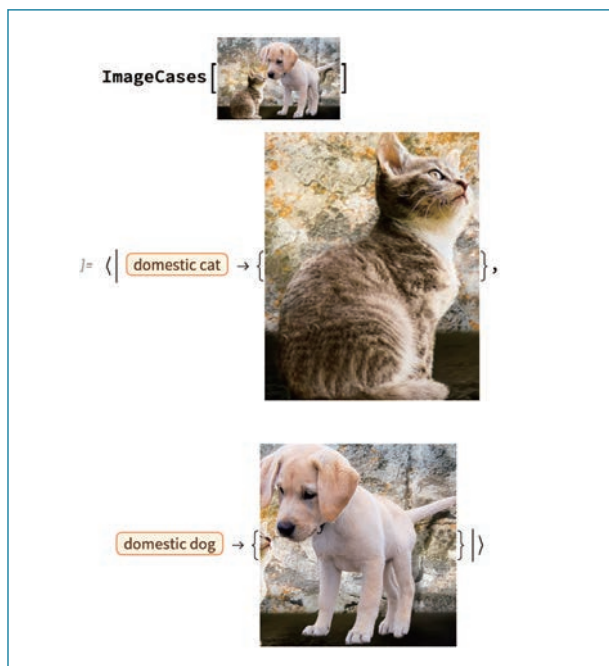


図 8 ImageCases による画像上のオブジェクトの切出し

位五つの魚の種類を予測確率付きで返す例である。

この画像は、spotted porcupinefish (ゴマハリセンボン), spiny puffer (ハリセンボン), plectognath fish (鱗甲魚), spiny-finned fish (棘鰭魚), teleostan (真骨魚類) であると出力された。

3.2 データの利用と可視化

ResourceObject 関数や ResourceData 関数を使うことによって、Wolfram が有する膨大で構造化された Wolfram 知識ベースのデータを Mathematica から読み込み、利用することができる。なお、利用可能なデータは WOLFRAM DATA REPOSITORY⁽⁴⁾で確認できる。

図 10 は、いん石の落下点データを読み込み、最初の 5 行を表示したものである。本データは「Name (いん石名), ID, NameType (名前タイプ), Classification (いん石種別), Mass (重量), Fall (落下), Year (落下年), Coordinates (落下点の座標)」から成っている。これらのデータは構造化されているので、Mathematica の関数でそのまま計算や可視化に利用することが可能である。

例えば、図 11 は、GeoGraphics 関数を利用して、いん石の落下点を地図上に表示する例である。いん石落下点のデータの中から、落下点の座標だけを取り出し、それをオーストラリアの地図上に表示している。

3.3 MNIST を使ったニューラルネットの構築例

ニューラルネット構築に関する関数も多数用意されている。ここでは正解付きデータとして有名な MNIST データ⁽⁹⁾ (手書きの 0 ~ 9 の数字 60,000 件) を使った畳込みニューラルネットワークの構築例を紹介する。

まず、ResourceObject 関数で MNIST のデータを取得し、学習データを trainingData、評価用データを testData とする。RandomSample 関数で trainingData からサンプルを六つ取り出すと、正解付きの手書き文字の数字が返され、trainingData の中身を見ることができる (図 12)。

次に、NetChain 関数を使って、畳込みニューラルネットワークを実装し、lenet にセットする (図 13)。

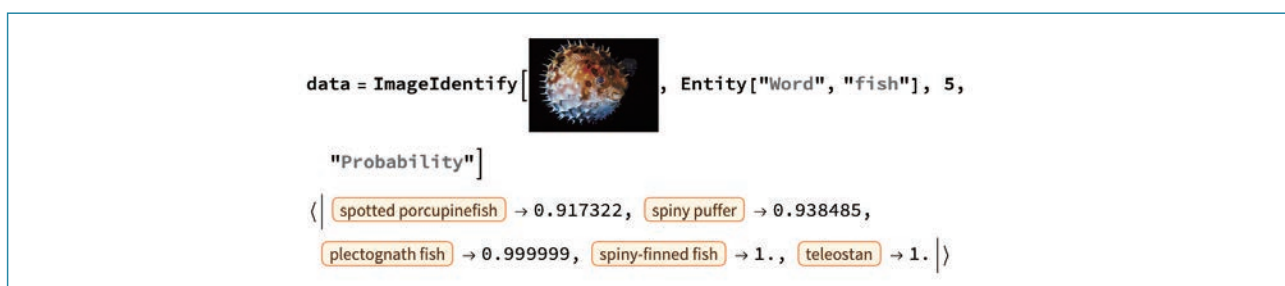


図 9 ImageIdentity による画像の特定

Take[ResourceData["Meteorite Landings"], 5]

Name	ID	NameType	Classification	Mass	Fall	Year	Coordinates
Aachen	1	Valid	L5	21 g	Fell	1880	50.78°N 6.083°E
Aarhus	2	Valid	H6	720 g	Fell	1951	56.18°N 10.23°E
Abee	6	Valid	EH4	107 000 g	Fell	1952	54.22°N 113.0°W
Acapulco	10	Valid	Acapulcoite	1914 g	Fell	1976	16.88°N 99.9°W
Achiras	370	Valid	L6	780 g	Fell	1902	33.17°S 64.95°W

図 10 いん石の落下点データ



図 11 Wolfram 知識ベースによるオーストラリアにおけるいん石落下点

実装された分類モデルは、以降 lenet として利用することができる。図 13 の NetChain 関数は、層の構成、出力の設定、入力の設定の三つの引数から構成されている。この例では、層の構成はその出力結果に表示されているように、1 から 11 の層を設定している。1 番目の ConvolutionLayer には、5 × 5 のフィルタを 20 個用いた畳込み層として設定し、2 番目の Ramp は活性化関数、3 番目には PoolingLayer で 2 × 2 のプーリング層を設定している。以降、同様に 11 層を設定している。出力層は、Output → [...] の部分で、0 ～ 9 のクラスラベル（数字）を設定している。入力層は、Input → [...] で、28 × 28 ピクセルのグレースケールと設定している。

次に、NetTrain 関数でこの分類モデル lenet を学習させる。第 1 引数は分類モデル名 lenet、第 2 引数は学習データ trainingData、第 3 引数の ValidationSet は評価用データで testData を設定している。第 4 引数の MaxTrainingRound は最大学習回数で、ここでは 3 回に設定している。

図 14 は、学習済みの分類モデル lenet の判定結果である。lenet に判定させたい値を与えることで判定結果

```
resource = ResourceObject["MNIST"];
trainingData = ResourceData[resource, "TrainingData"];
testData = ResourceData[resource, "TestData"];

RandomSample[trainingData, 6]
{3 → 3, 5 → 5, 6 → 6, 9 → 9, 9 → 9, 2 → 2}
```

図 12 MNIST データの読み込み

```
lenet =
NetChain[{ConvolutionLayer[20, 5], Ramp, PoolingLayer[2, 2],
ConvolutionLayer[50, 5], Ramp, PoolingLayer[2, 2],
FlattenLayer[], 500, Ramp, 10, SoftmaxLayer[]},
"Output" -> NetDecoder[{"Class", Range[0, 9]}],
"Input" -> NetEncoder[{"Image", {28, 28}, "Grayscale"}]
]

NetChain[
input image
1 ConvolutionLayer array (size: 1x28x28)
2 Ramp array (size: 20x24x24)
3 PoolingLayer array (size: 20x12x12)
4 ConvolutionLayer array (size: 50x8x8)
5 Ramp array (size: 50x8x8)
6 PoolingLayer array (size: 50x4x4)
7 FlattenLayer vector (size: 800)
8 LinearLayer vector (size: 500)
9 Ramp vector (size: 500)
10 LinearLayer vector (size: 10)
11 SoftmaxLayer vector (size: 10)
Output class
]

lenet = NetTrain[lenet, trainingData, ValidationSet -> testData,
MaxTrainingRounds -> 3];
```

図 13 ニューラルネットの構築と訓練

が得られる。2 番目のコードは、分類モデル lenet に testData（評価用データ）から抽出した任意の五つの手書き文字を与え、Thread 関数で「判定したい画像→判定結果」の形式で出力している。この五つに関しては、全て正しい結果が得られている。

更に、この分類モデル lenet の性能を評価したい場合には、ClassifierMeasurements 関数を用いる。第一引数に評価したい分類モデル、第二引数に評価用データを与えると、Accuracy（正解率）、Recall（再現率）、Precision（適合率）、F1 Score（F1 スコア）、Confusion Matrix（混同行列）等の評価結果を得ることができる。

3.4 データ分析ツールの Web サービス化

データ分析作業は、何度も同じコードを利用したり、複数人が同じコードで分析したりすること多い。ま

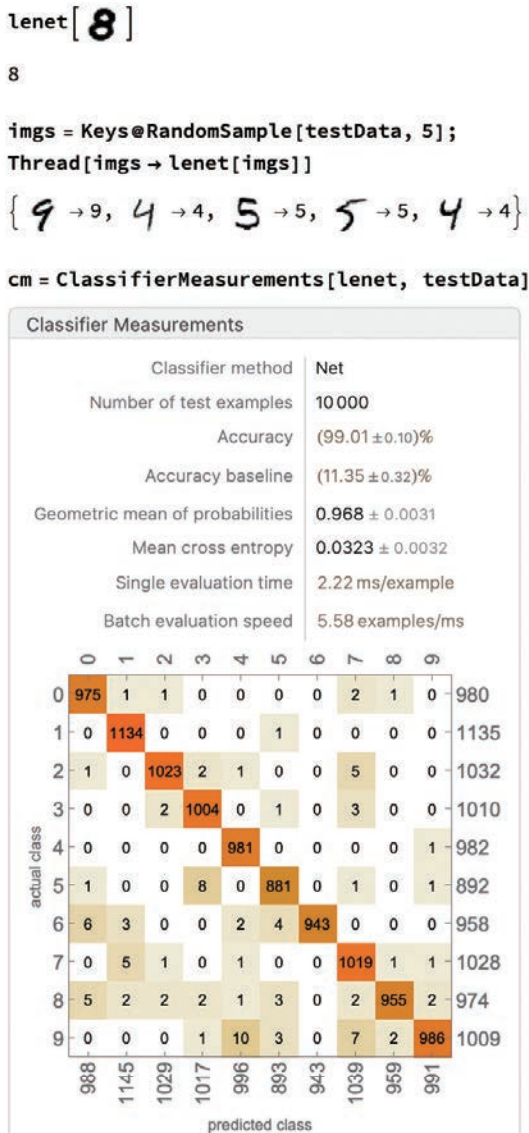


図 14 分類モデルの判定結果の出力と評価

た、品質の高い機械学習モデルができた場合、それを誰もが使えるように Web で公開したいこともある。Wolfram 言語では、自作の関数やツールを Web サービス化することができる。図 15 は画像処理の ImageEffect 関数を使って、画像にフィルタリングをかけるツールを作成し、Web サービスとしてクラウドにデプロイするコードである。

更に、BarcodeImage 関数で URL から QR コードを生成している (QR コードは省略)。

図 16 は、デプロイされた Web サービスの出力結果である。ユーザは QR コード等によって、この Web サービスにアクセスし、画像を与える。すると ImageEffect 関数が実行され、元の画像が指定された効果でフィルタリングされ、ユーザはその結果を得ることができる。

```
CloudDeploy[
FormFunction[{{{"image", "画像を選択:"} → "Image",
{"filter", "フィルタを選択:"} → "ImageEffect[[]]},
Grid[{{{"オリジナル", #filter}, {"#image", ImageEffect[#image, #filter]}}] &,
AppearanceRules → {"Title" → "写真にフィルタをかけてみよう"}],
Permissions → "Public"]
CloudObject[
https://www.wolframcloud.com/obj/4d910f15-11c2-4160-b89c-971d03ae825a]
BarcodeImage[
"https://www.wolframcloud.com/obj/4d910f15-11c2-4160-b89c-971d03ae825a"]]
```

図 15 画像処理を行う Web サービスを作成するコード

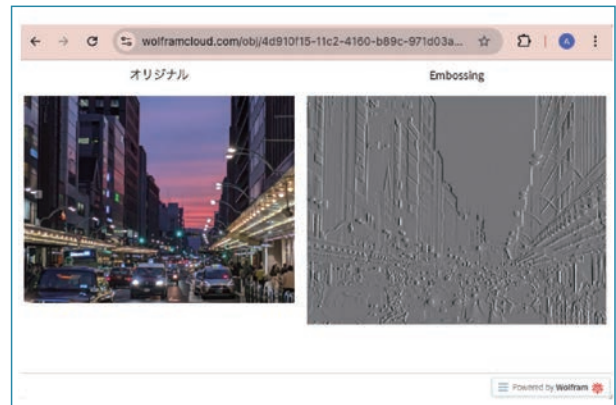


図 16 Web サービスの出力結果 (エンボス加工の例)。

4 大規模言語モデル (LLM) 機能の利用

2023 年 7 月にリリースされた Mathematica バージョン 13.3 からは、大規模言語モデル (LLM) 統合機能やチャット駆動型ノートブックが導入され、OpenAI などの LLM へのアクセスが可能になった。Mathematica で LLM 関連機能を使うには、以下のことが必要である。

- ・サポートされるチャット／生成モデルのサービスプロバイダのアカウントを作成する
- ・必要に応じてそのプラットフォームについての支払い情報を提供する
- ・サービスプロバイダの API プラットホームで API キーを作成する
- ・この API キーを Wolfram 製品に保存する

詳しい設定方法は文献⁽¹⁰⁾を参照されたい。また、以降の例における出力は、執筆時点で最新版の Mathematica 14.1 で実行したものである。LLM の性質上、同じ入力文を与えても必ずしも全く同じ結果が得られるわけではない、ということに注意されたい。

4.1 LLM 関数の構築と利用

種々の LLM 関連関数の中で LLM の最も本質的な役割を担う関数が、LLMSynthesize である。LLMSynthesize は、入力されたプロンプトに対してテキストを生成す

```

euCountries = #[["Name"] & /@]
Take[ReverseSortBy[EntityList[Europe COUNTRIES], #["Population"] &], 5];
(LLMSynthesize[#, "の人口と首都は？"] & /@ euCountries) // Column
人口：約8300万人
首都：ベルリン
Out[21]= 人口はおよそ67,000,000人であり、首都はロンドンです。
人口は約6,700万人で、首都はパリです。
イタリアの人口は約6,060万人で、首都はローマです。
スペインの人口は約4670万人で、首都はマドリッドです。

```

図 17 LLMSynthesize の利用例

```

In[19]:= countryInfo = LLMFunction["1`の首都と人口"]
Out[19]= LLMFunction[Content: 1の首都と人口
Parameters: 1]

```

図 18 LLMFunction の生成例

る。プロンプトは、テキスト、Wolfram 言語、画像等を組み合わせて構築することが可能である。図 17 はヨーロッパの人口が最も多い五つの国 euCountries に対して、その国の人口と首都を求めるプロンプトを LLMSynthesize に与え、テキストを生成する例である。

また、LLMFunction は、Wolfram 言語の“関数”を構築、利用することができる関数である。図 18 は、与えられた国名に対して首都と人口を求める LLM の関数 countryInfo を生成する。ただし、`1` は countryInfo に与えられる第 1 引数を意味する。

4.2 出力タイプを指定した LLMFunction の構築

図 19 の例のように、デフォルト設定では LLMFunction の結果はテキストで出力される。これは、直接結果を Wolfram 言語に与えて計算を行うには、少し扱いづらい。そこで、第 2 引数に出力データのタイプを設定することにより、出力結果が直接利用可能とな

る。図 20 では二つの都市の間にある五つの都市をセミコロンで区切ったリストを返す LLM の関数 cities を定義している。

この関数 cities に、“東京”、“広島”の二つの都市を引数として与えると、その間にある五つの都市が列举された結果がテキストで出力される。次に、Wolfram 言語で計算可能な Entity として出力されるように、関数 cities に第 2 引数 DelimitedSequence ["City"] を与える。ただし、DelimitedSequence [form] は、form で指定された形式の要素がセミコロンやカンマで区切られたシーケンスを意味している（図 21）。

これにより、セミコロンで区切られた五つの都市名のテキストが、五つの Entity の City として解釈され結果として出力される。この結果は Wolfram 言語で直接計算可能なので、GeoListPlot 関数を利用して図 22 のように地図上でプロットさせることができる。ただし図 22 における GeoListPlot の第 1 引数の %26 は、図 21 における Out [26] の出力を直接呼び込むことを意味する。

4.3 チャットノートブックの利用

チャットノートブック (Chat-Driven Notebook) は、従来の Mathematica ノートブックが持つ、数式の解析、

```

In[22]:= countryInfo[##] & /@ euCountries
Out[22]= {Germanyの首都はベルリンで、人口は約3,800万人です。
United Kingdomの首都はロンドンです。2021年時点での人口は約890万人です。
Franceの首都はパリで、人口は約2200万人です。Italyの首都はローマで、人口は約2860万人です。
Spainの首都はマドリッドです。2021年の推定人口は約3,336,000人です。}

```

図 19 LLMFunction の実行例

```

In[23]:= cities = LLMFunction["1`から2`の間にある5つの都市をセミコロンで区切ったリストで"]
Out[23]= LLMFunction[Content: 1から2の間にある5つの都市をセミコロンで区切ったリストで
Parameters: 1, 2]

In[24]:= cities["東京", "広島"]
Out[24]= 東京;名古屋;大阪;岡山;広島

```

図 20 LLMFunction の構築と実行例

```
In[25]:= cities = LLMFunction["`1`から`2`の間にある5つの都市をセミコロンで区切ったリストで",
    DelimitedSequence["City"]]

Out[25]= LLMFunction[Content: 1から2の間にある5つの都市をセミコロンで区切ったリストで
    Parameters: 1, 2]

In[26]:= cities["東京", "広島"]

Out[26]= {Tokyo, Nagoya, Osaka, Okayama, Hiroshima}
```

図 21 出力タイプを指定した LLMFunction の構築と実行例

計算、グラフ描画、及びドキュメント機能等に、LLM に基づいたチャット機能をサポートした新しい種類のチャット駆動型ノートブックである。チャットノートブックでは、チャットセルと呼ばれる新しい種類のセルで入出力が行われ、チャット入力セルに入力された言葉を理解し、それに応じて生成された適切な返答をチャット出力セルに出力し、LLM と会話のようなやり取りを行う。入力された文章は、4.1 で設定した LLM モデルだけでなく、Wolfram 言語 Evaluator、Wolfram 文書検索ツール、Wolfram|Alpha エンジン等のツールの

中から最適なツールにアクセスし処理され返答を生成する。

例えば、「積分 $x^2 \cos(2x)$ を途中計算も含めて計算して」と入力すると、図 23 のように、Wolfram|Alpha エンジンのステップごとの解説機能にアクセスし、入力された問題の解き方の解説が得られる。図中のボックス「Used Wolfram|Alpha」は、この回答が Wolfram|Alpha エンジンにアクセスして得られたことを意味している。

更に「元の関数と結果の関数のグラフを一緒に描いて」と聞くと、図 24 のように、Wolfram 言語 Evaluator にアクセスし、二つの関数のグラフ描画が得られる。

```
In[27]:= GeoListPlot[%26, Joined -> True]
```

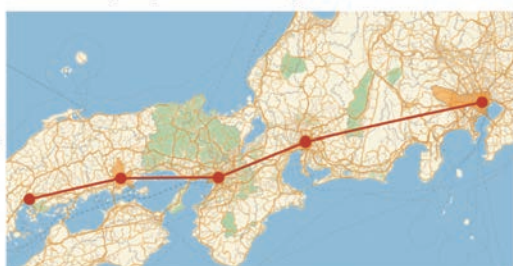


図 22 GeoListPlot による地図描画

5 おわりに

本稿では、データサイエンスや LLM との連携など、Mathematica が持つ「数式処理・数値計算ソフトウェア」のイメージとは離れた分野での使い方に焦点を当て、利用方法を紹介した。

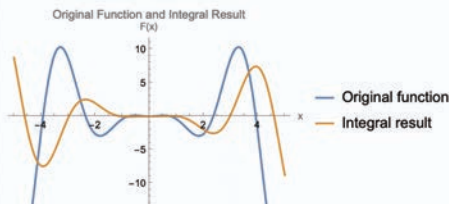
筆者らは、データサイエンス分野の Mathematica の豊富な組み込み関数を利用して、大学生の初学者を対象にし

元の関数と結果の関数のグラフを一緒に描いて

もちろんです。元の関数 $x^2 \cos(2x)$ と積分結果の関数を一緒にプロットしてみましょう。これには、Plot 関数の第一引数に複数の関数をリストとして渡すことで可能です。以下の Wolfram Language コードを実行します:

Used Wolfram Language Evaluator

以下は、元の関数 $x^2 \cos(2x)$ (青線) と積分結果 $\frac{1}{4}((2x^2 - 1)\sin(2x) + 2x \cos(2x))$ (オレンジ線) のグラフを一緒に描いたものです。x 軸は入力値 (-5 から 5 までの範囲)、y 軸は関数の値を表しています。



このグラフを生成するための Wolfram Language コードは以下の通りです:

```
Plot[{x^2 * Cos[2 * x], (1/4) * ((2 * x^2 - 1) * Sin[2 * x] + 2 * x * Cos[2 * x])}, {x, -5, 5},
    PlotLegends -> {"Original function", "Integral result"}, AxesLabel -> {"x", "F(x)"},
    PlotLabel -> "Original Function and Integral Result"]
```

このコードでは、PlotLegends オプションを使用して、各関数の凡例を表示しています。これにより、どの線がどの関数を表しているかがわかりやすくなります。

図 23 WolframAlpha エンジンが回答するチャット例

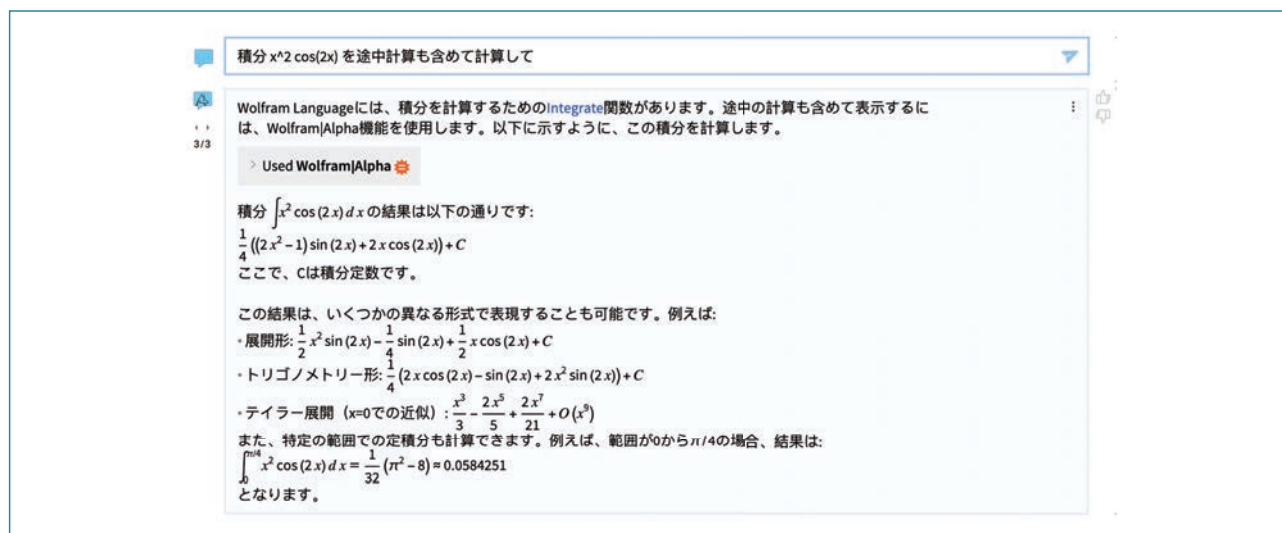


図 24 Wolfram 言語 Evaluator が回答するチャット例

たデータサイエンス教育の実践を行っている^{(11), (12)}。Mathematica 及び Wolfram 言語は、豊富な機能を持つがゆえに、何から始めるべきか、どのように使うべきかを迷われる方も少なくない。しかし、本稿で紹介したように、既に提供されている高度な組み込み関数を活用することで、様々な分野のデータ分析に利用したり、AI 機能を組み込んだりすることが手軽にできる。更に、大規模言語モデル (LLM) と連携することで、自然言語で指示することも可能になる。

本稿をきっかけとして、身近な問題解決のためのデータ分析ツールの一つとして、Mathematica を活用して頂ければ幸いである。

文献

- (1) Wolfram, “Wolfram 言語のコアとなる分野.” <https://www.wolfram.com/mathematica/core-areas/>
- (2) Wolfram, “Wolfram ブログ「非線形偏微分方程式へ有限要素法の適用」.” <https://blog.wolfram.com/2020/04/29/mathematica-12-nonlinearfem-in-japanese/>
- (3) Wolfram, “Wolfram 言語&システムドキュメントセンター.” <https://reference.wolfram.com/>
- (4) Wolfram, “WOLFRAM DATA REPOSITORY.” <https://datarepository.wolframcloud.com/>
- (5) Wolfram, “Wolfram 知識ベース.” <https://www.wolfram.com/language/core-areas/knowledgebase/>
- (6) Wolfram, “Wolfram 可視化.” <https://www.wolfram.com/language/core-areas/visualization/index.php.ja>
- (7) Wolfram, “データサイエンス.” <https://www.wolfram.com/featureset/data-science/>
- (8) Wolfram, “Wolfram 機械学習.” <https://www.wolfram.com/language/core-areas/machine-learning/>
- (9) Y. Lecun, L. Bottou, Y. Bengio and P. Haffner, “Gradient-based learning applied to document recognition,” Proc. the IEEE, vol. 86, no. 11, pp. 2278-2324, Nov. 1998.
- (10) Wolfram, “Wolfram デスクトップ製品の中でチャットノートブックを使う方法.” <https://support.wolfram.com/ja/50623>

com/ja/50623

- (11) 金光安芸子, 北村美穂子, 吉田智子, “体感しながら学ぶ AI とデータサイエンス入門授業の試み—Wolfram 言語によるプログラミング実践—,” PC カンファレンス論文集, pp. 169-172, Aug. 2023.
- (12) 吉田智子, 金光安芸子, 北村美穂子, “データビジュアライゼーションを用いた親しみやすいデータサイエンス教材の提案—Wolfram Cloud の利用—,” 情報処理, vol. 64, no. 10, pp. 537-541, 2023.

北村美穂子

Wolfram Alpha LLC / 京都ノートルダム女子大社会情報学環教授。長年、冲電気工業で機械翻訳などの自然言語処理の研究・開発に携わる。現在は Wolfram Alpha の日本語処理を担当する傍ら、大学では AI・データサイエンス教育の研究と実践を行う。



金光安芸子

2Wolfram Internationalization Specialist / Wolfram 認定インストラクター。Wolfram の国際化業務に従事する傍ら、大学や中学・高校のデータサイエンス教材を開発・実践するなど、Wolfram 言語を活用した STEAM 教育に取り組む。2024 年度から京都ノートルダム女子大社会情報学環客員教授。



安井(今藤)紀子

2001 奈良女子大博士後期課程了 (理学博士)。2001~2005 東大生産技術研究所にて博士研究員。2006~2008 イリノイ大アーバナ・シャンペーン校にて博士研究員。2008 から Wolfram Research にて主に Wolfram Alpha の開発に携わる。現在同社 Senior Developer。



いつしかライフワークになったミリ波・サブミリ波の研究

永妻忠夫（名誉員：フェロー）

1958生まれ。1986九大大学院工学研究科博士課程了。同年、日本電信電話株式会社入社、厚木電気通信研究所、LSI研究所、マイクロシステムインテグレーション研究所等を経て、2007から阪大教授。2024から阪大特任教授、東大特任研究員。主として、マイクロ波・ミリ波フォトニクス（光技術と電波技術の融合分野）の研究開発に従事。大河内記念技術賞、科学技術長官賞、本会業績賞、通信協会前島賞、文部科学大臣表彰科学技術賞、本会功績賞等を各受賞。IEEE フェロー。本会調査理事、副会長等を歴任。



大阪大学名誉教授

永妻忠夫

Tadao Nagatsuma



1. はじめに

マイクロ波と光波の中間に位置する電波は、ミリ波（30～300 GHz）、サブミリ波（300～3,000 GHz）と呼ばれ、21世紀になるまではほとんど開拓されておらず、人類にとって最後に残された電磁波領域として知られている。筆者は、当時大学院生であった1982年頃にこの電磁波に出会い、今もなお、その電磁波の産業応用を目指して研究を続けている。本稿では、40年余にわたる、私とミリ波・サブミリ波の研究との「不思議な」関わりを御紹介したい。



2. ミリ波・サブミリ波の研究をすることになったいきさつ

今も理工系の大学生にとって、4年生で行う卒業研究をどの先生の研究室で行うか、つまり「研究室選び」は、大学選び、会社選びに匹敵するくらい大きなイベントかもしれない。実際、世間知らずで多感な20歳代に、大学の研究室で体験した様々な刺激は、私のその後の人生に少なからず影響していると思う。

私が大学4年生になった1980年の研究室配属では、当初、生体の研究を行っている先生の下で卒業研究の指導を受けたいと希望した。ただし、その研

究室は（低温）超伝導体材料の研究の方が表看板だった。ちょうどジョセフソンコンピュータという超伝導集積回路を用いた高速計算機の研究開発が、国内外で盛んになりつつあったことから、超伝導デバイスの研究を行っているグループでの研究を強く勧められた。元々、半導体デバイスや集積回路にも興味があったので、超伝導エレクトロニクスの研究グループにお世話になることに決まった。卒業研究は、ジョセフソン素子（ダイオード）のスイッチング時に起こる「パンチスルー」と呼ばれる誤動作の計算機シミュレーションと解析の研究だったが、直接指導を行って頂いた助手（現在の助教）の先生から与えられた計算式を、大形計算機センターまで出向いて数値計算しては、その結果を先生に提示して議論する毎日だった。今思えば、先生からの指示にただ従うまじめだけが取り柄の学生だったように思う。先生の研究のお手伝いをしていただけなので、それが面白いものだとは思わなかったし、研究者になりたいという気持ちは芽生えなかった。

その後、大学院に進学し、自身の新たなテーマとして、超伝導マイクロ波伝送線に関する研究を行うよう指示された。しかし、デジタルからアナログ応用のテーマに急に変わったこと、研究の価値や新規性が理解できなかったことからモチベーションが上がりず、成果が何一つ出ないまま、あっという間に修士課程1年生の1981年が終わろうとしていた。

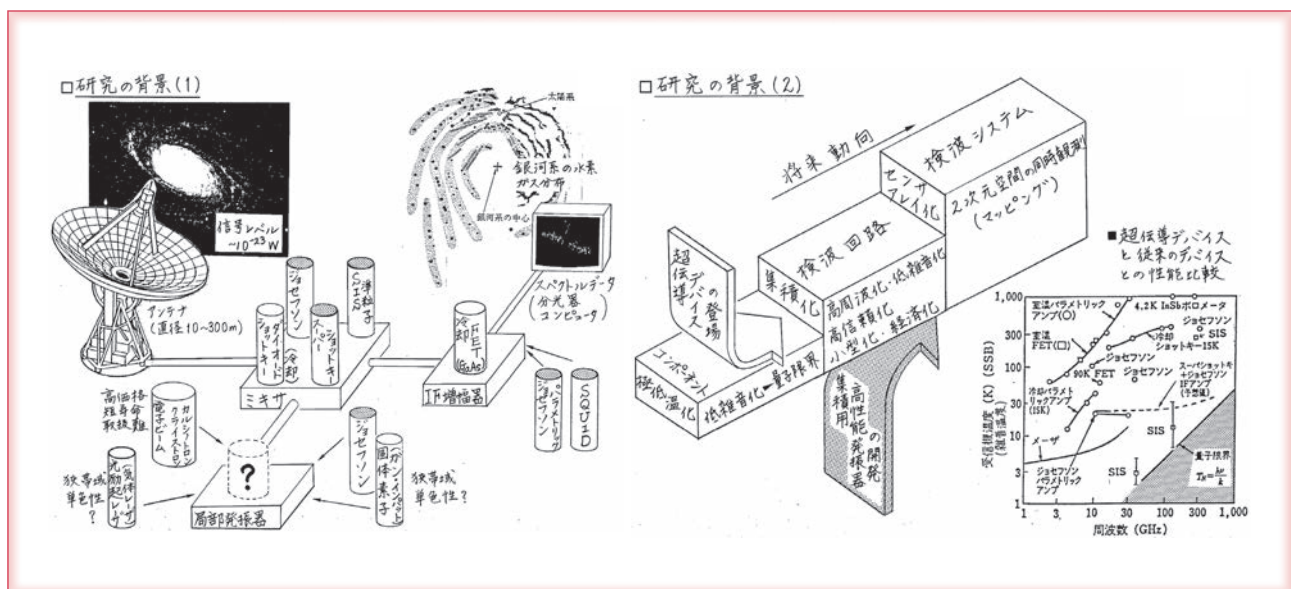


図1 ミリ波サブミリ波との出会い (博士論文公聴会のスライドから)

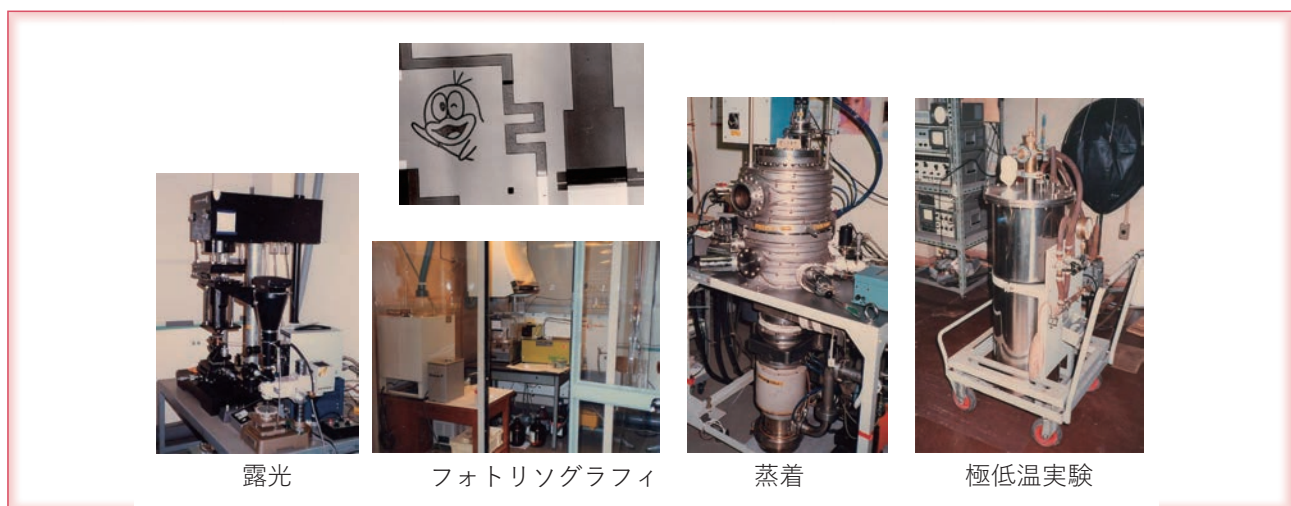
直接指導の先生から厳しいお叱りを受けた。研究の進め方はもちろん、私のパーソナリティまで御心配頂いた。負けず嫌いの私に火が付いた。自分にまだ実力がないことは分かっている、こんなことでは終われない、という思いが強くなった。そこで、失敗してもいいからもっと挑戦的な研究テーマがないか先輩方にも相談した。その結果、背水の陣で選んだテーマが「超伝導ジョセフソン素子を用いたミリ波・サブミリ波発振器」に関する研究であった。

このテーマにはニッチながら明確な出口(ニーズ)となる分野があった。それは、宇宙から地球に到来するミリ波・サブミリ波の電波を解析することで、宇宙の起源や星の誕生を研究する「電波天文学」の分野である。宇宙からの微弱な電波を観測するための装置は、電波望遠鏡と呼ばれている。ミリ波・サブミリ波電波望遠鏡では、直径が10~45 mもあるパラボラアンテナで電波を集め、ローカル発振器

(LO: local oscillator) からの信号と混合して超伝導検出器(ジョセフソン接合)でヘテロダイン受信を行っている。私が挑戦しようと決めた具体的なテーマは、超伝導検出器と同一チップ上に集積可能な、超伝導素子による高出力発振器を実現することであった。後々、このテーマで博士号を取得することになるのだが、図1は、私の博士論文の公聴会で使ったスライドの導入部で、それを説明したもの(手書き!)である。しかし、このテーマに着手した時点では、修士課程の残りの1年間を悔いのないように過ごし、就職しようと決めていた。

3. 研究に没頭

それからの私は週末も含め毎日、朝から晩まで研究に没頭するようになった。セミクリーンルーム(図2)で、実際に超伝導ジョセフソン素子を作製する



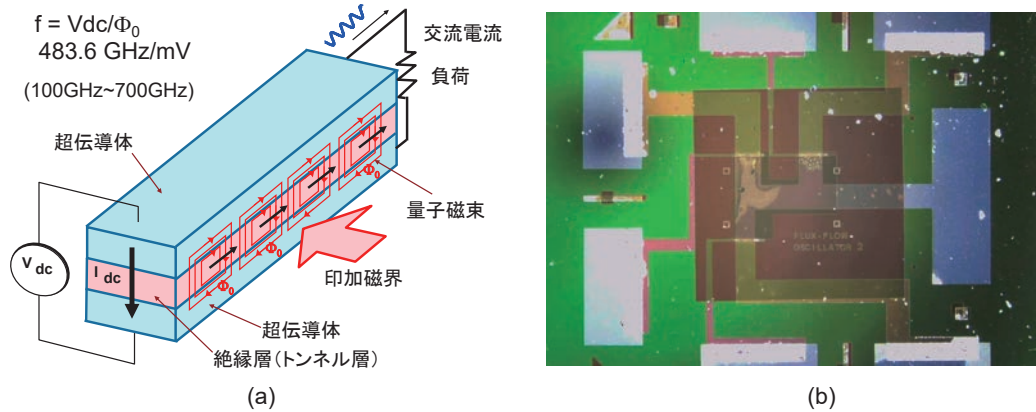


図3 磁束フロー発振器の動作原理 (a) と作製したチップの写真 (b)

修行が始まったからである。半導体デバイスと同様のフォトリソグラフィという手法を使って、鉛合金によるジョセフソン接合から成る発振器を半年以上作り続けた。

では、どんな発振器を作ろうとしていたのか、その模式図を図3 (a) で説明する。この発振器の特徴は、接合が一方に長い進行波型の発振器（幅：5~20 μm ，長さ：数百 μm から1 mm程度）で、接合面に平行に磁界を印加すると、量子化された磁束列（量子磁束）がジョセフソン接合内に生まれる。量子磁束は電流を流すと長さ方向に走行し、それに伴って電磁波も長さ方向に伝搬する。電磁波の速度と磁束列の走行速度が一致したときに最大の電力が得られるだろう、という理論的な予見はあったが、実験的な証明はもとより、発振器としての動作特性

の解明が全くなされていなかった。実験的な検証について言えば、接合品質が長さ方向に均一で、また電流密度の高いジョセフソン接合（図3 (b)）を作ることが難しかったこと、そして何よりも、発振器からの電力をいかにして検出するかが課題であった。

この課題に対し、発振器のためのジョセフソン接合ですら、まともに作れない状況であったにもかかわらず、発振器の横（正確に言えば出力側）に、もう一つ新たにジョセフソン接合で検出器を集積化するアプローチを選んだ。図4(a)にその構造を示す。（詳細は後述する。）しかし、これには多くの困難を伴う。その理由は、発振器用と検出器用のジョセフソン接合を2回のプロセスに分けて作製する必要がある、それぞれ求められるパラメータが異なることから歩留りが一挙に下がった。

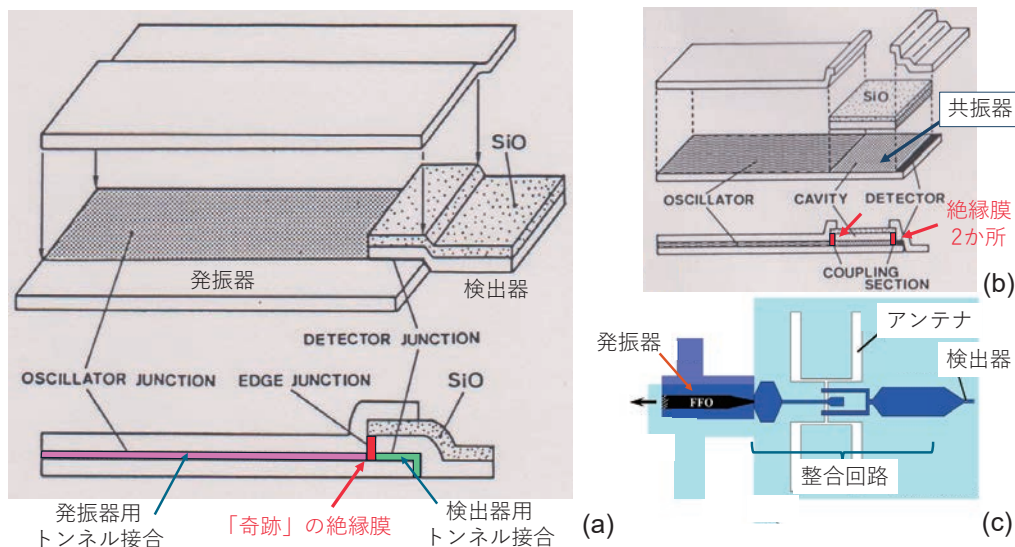


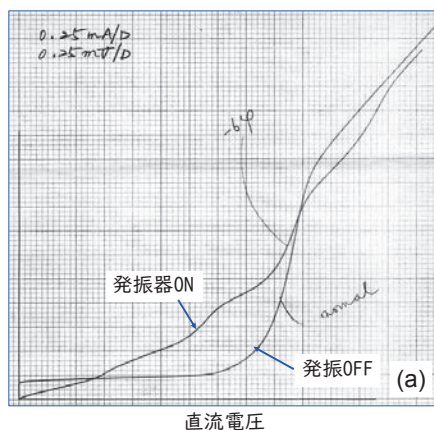
図4 ジョセフソン発振器からの出力をジョセフソン検出器に伝送するための構造：
(a) 直接結合 (b) 共振器を介した結合 (c) 整合回路を用いた結合例。

8月

August (年月)

日	月	火	水	木	金	土
1 大安	2 赤口	3 先勝	4 友引	5 先負	6 仏滅	7 大安
8 赤口	9 先勝	10 友引	11 先負	12 仏滅	13 大安	14 赤口
15 先勝	16 友引	17 先負	18 仏滅	19 先勝	20 友引	21 先負
22 仏滅	23 大安	24 赤口	25 先勝	26 友引	27 先負	28 仏滅
29 大安	30 赤口	31 先勝	1 先勝	2 先勝	3 先勝	4 先勝
5	6	7	8	9	10	11

直流電流



直流電流

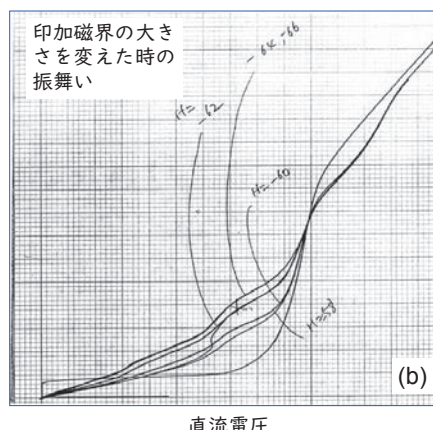


図5 発振器からの出力を初めて観測した実験



4. 茨の道を選択

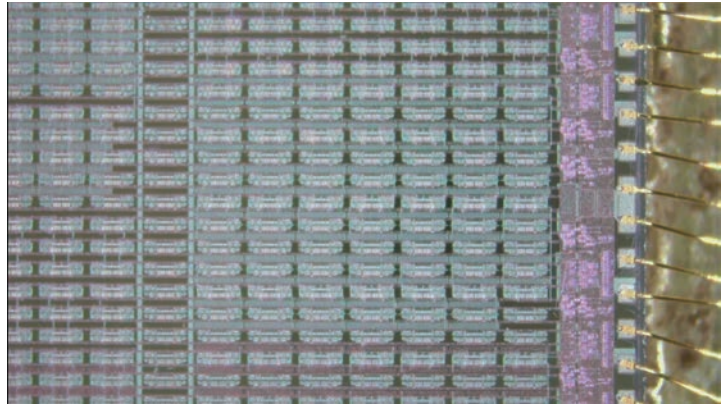
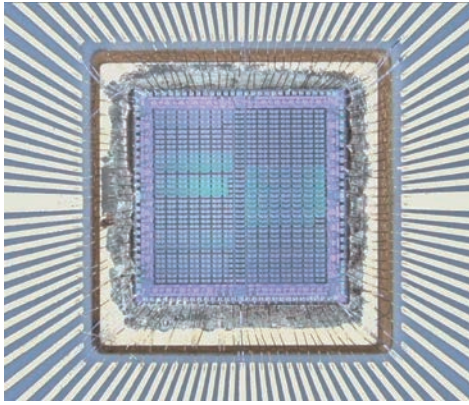
修士課程2年になった春もまだ結果は出なかったが、自分一人で誰もやったことのない研究テーマに挑戦することに、やりがいと面白さを感じ始めていた。そして夏が近づく頃、学校推薦による就職活動が始まった。就職するか、博士課程に進学するか、迷いに迷ったが、ある先生から「博士課程3年間を生き抜くことに意味がある」と言われ、少数派の道に進むことにした。結局、幼少の頃から人とは違うことをしたいという性格が背中を押したように思う。とは言うものの、8月になっても発振器からの出力が検出されない日々が続いた。超伝導素子は、液体ヘリウムの中で動作させるため、ヘリウムが気化してしまうまでの数時間から10時間程度しか実験ができない。徹夜での実験は当たり前だった。

1982年8月13日(金)。この日に体験したことは一生忘れないだろう。当時、不夜城だった大学の研究室もさすがにお盆休みの初日で、午前中には実験を終える必要があった。潔く実験を撤収する選択もあったが、液体ヘリウムが尽きるまでは頑張ってみようと思いを固めた。直流バイアスと磁界を印加して発振器を動作させ、検出器の直流電圧の変化から発振を検出したかどうかをペン式のレコーダで記録する、この「一連の体の動き」を、無意識下で繰り返すことができるくらいになっていた。すると突然、記録紙の上でペンがこれまでとは異なる動きをするのを体で感じた。検出器の電圧が大きく変化し、発振器からの出力が実際に検出されたのである。そして超伝導ミキサを駆動するためには十分なLO電力(～1 μW)が得られることも示された。戦慄が走った。図5はそのときの記録紙をコピーしたものである。かくして、100～500 GHzで周波数同調可

能な発振器が誕生した。

つまるところ、いろいろな「偶然」が重なり幸運を呼び寄せてくれたのだった。ここで、その偶然の幾つかを図4に戻って御紹介したい。マイクロ波回路の知識が少ない私が選んだ構造は、上述のとおり、検出器のすぐ横に発振器を配置する構造(図4(a))である。しかし、この構造のリスクは、発振器の電極と検出器の上部電極がショートしてしまい、双方が動作しないというものだった。ところが、運のいいことに、発振器のトンネル接合を形成する際に、検出器の上部電極のエッジが酸化され、これが絶縁膜として働き、両者を直流的に分離できた。まさに、奇跡の絶縁膜であった。加えて、検出器の寸法が丁度波長オーダだったため、検出器が共振器としても動作し、直接結合でも十分な電力が結合したことも功を奏した。その後、波長サイズのジョセフソン接合が効果的な共振器になるかどうかは、共振器、小形検出器、発振器の三つを結合した、図4(b)の構造で確認した。現在では、同様の発振器を図4(c)に示すように、整合回路を用いて検出器やアンテナ等の素子と効率的につなぐのが一般的になっている。

以上、たまたまの幸運に巡り合った瞬間の感動と喜びが、その後の私の研究者としての人生の「麻薬」になったことは間違いない。博士課程に進学後も、様々な苦行が待ち受けていたが、発振器の動作理論やモデリング、更には周波数の安定化についての研究を進め、この「量子磁束フロー型ジョセフソン発振器(FFO: Flux-flow oscillator)」の研究で博士号を頂き、博士課程を無事修了することができた。博士課程は茨の道だったが、私の人生の土台を形成してくれた。

図6 1 μ m ルール CBI-CMOS プロセス技術を用いた 2.1K ゲートアレー

5. リセット

博士課程を修了し、日本電信電話株式会社（NTT）に雇って頂くことになった。当時、NTT 研究所では、超伝導デバイスの研究開発が大幅に縮小されていたこともあって、半導体デバイス・集積回路の研究を希望した。化合物半導体に興味があったが、4月の社内研修後に言い渡された配属先は、今も“メジャーリーガー”である、シリコン半導体集積回路の設計を行う研究室（NTT 厚木電気通信研究所集積回路研究部）であった。学生時代に学んだ専門知識は、一旦ゼロリセットになったが、新たな領域に足を踏み入れることの方がモチベーションを高揚できた。当時、Bi-CMOS と呼ばれる、バイポーラトランジスタと MOS トランジスタを組み合わせた集積回路の研究が緒に就いたばかりで、NTT 研究所では、pnp 形と npn 形のバイポーラトランジスタと、n 形と p 形の MOS トランジスタを集積できる CBI-CMOS プロセスが存在した。訓練として私に与えて頂いたテーマは、それらを使った集積回路の設計であった。どのような回路構成で四つのタイプのトランジスタを組み合わせると、速度と消費電力を両立させた基本回路を構成できるのか検討を行い、諸先輩方の御支援を得て、図6のようなゲートアレーを試作した。これは、私が設計に関わった最初で最後のシリコン半導体集積回路チップである。

実は、配属直後、研究統括と室長から、博士入社の私には何か新しいことをやってほしいと思って採用したことを伝えられていた。研究部や研究室ではまだ誰もやっていないけれども、近い将来必要となる技術を立ち上げることが期待されていた。大変、光栄なことであった。1980年代、光ファイバ通信技術の進展と呼応して脚光を浴び始めた分野の一つ

に、光半導体を含めた化合物半導体とレーザ技術を主軸とする「超高速光エレクトロニクス」という学際領域があった。1983年にIBMが中止を発表した超伝導コンピュータプロジェクトをけん引していた研究者が、少なからずこの分野に移っていたこともあって、私自身も強い関心を持っていた。

研究室内での勉強会からスタートし、1年以上かけて立ち上がった研究プロジェクトが「超高速計測技術」の研究実用化であった。NTT 研究所で開発されていた世界最先端の半導体デバイスや集積回路は、市販の計測・評価技術の能力を超えつつあった。したがって、計測技術に対する確実な社内ニーズが存在した。また、今では当たり前になったが、マクスウェル方程式に基づく「電磁界解析技術」の研究も研究室で立ち上がっていた。「いつか半導体集積回路は、高速化・高周波化の進展とともに、波長がチップサイズよりも小さくなり、いわゆる電磁波回路として扱わなくてはならない日が来る」と予見し、チップの内部の信号波形を忠実に設計・計測するための技術を開発することとなった。



6. 計測システムの専門家に

半導体高速デバイスや集積回路のチップ内部の波形を測定する技術の原理を図7(a)に示す。上述の「超高速光エレクトロニクス」の分野で活躍していた米国の研究者により提案された「電気光学サンプリング (EOS: electro-optic sampling)」と呼ばれる技術である。電気光学結晶（電界により複屈折率が変化する性質を有する材料）を電界センサとして、電子素子の配線上に近接させ、フェムト秒パルスレーザ光を使って高速に変化する電気信号をサンプリング計測する。図7(b)は、集積回路内部

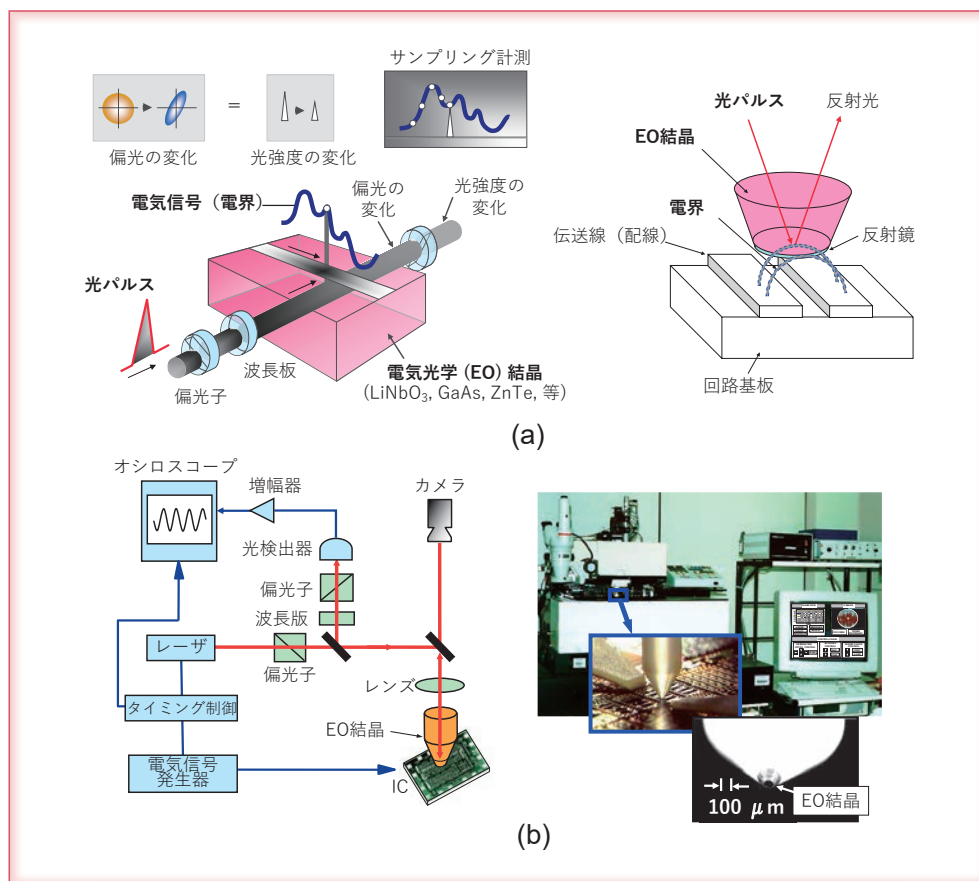


図7 超高速集積回路の内部の信号を測定するための技術の原理 (a) とシステム (b)



図8 高速電気信号測定器の商品化

の信号波形を測定するために開発したシステムの一例である。1 THz もの測定帯域を有していたことから、「テラヘルツ IC プローバ」と名付けた。

最終的に、NTT 研究所内のデバイス、回路研究者と連携して、最先端の半導体デバイスや部品の研究開発に使えるところまで完成度を高めた。もちろん社内の研究者の力だけで実用化は不可能である。材料メーカ、精密機器メーカ、計測機器メーカなど社外の企業の専門家の協力が不可欠だった。やがて、サンプリングオシロスコープ (図8) や、ネットワークアナライザにも応用展開し、商品化まで経験した。入社して10年たつと、部品材料の研究所の中では

異色の計測システムエンジニアになっていた。

もちろん、超伝導体から半導体研究者へ、そして計測システムの開発者への転身の道筋は決して楽なものではなかった。博士とは名ばかりで、入社後3年余にわたり主著の論文がゼロだった。「難産だけど、きっと大きなベビーが生まれることを期待しているよ」という上長の激励の言葉は今も忘れていない。その言葉に加えて、3年間も耐えられた理由は、博士課程の3年間に味わった「精神的に追い詰められた状況」を体験していたからだろう。

7. ふたたびミリ波・サブミリ波の世界に

1990年代に入ると、「計測システム屋」としてNTT 研究所の半導体デバイスの研究者とのつながりが一層深まり、入社前にあこがれていた化合物半導体デバイスについても学ぶことができた。例えば、InP-HEMT トランジスタ、共鳴トンネルダイオード (RTD: resonant-tunneling diode) や単一走行キャリアフォトダイオード (UTC-PD: uni-traveling-carrier photodiode) との出会いは、後述する「無線通信システム」の研究開発におけるキーデバイスとなった。

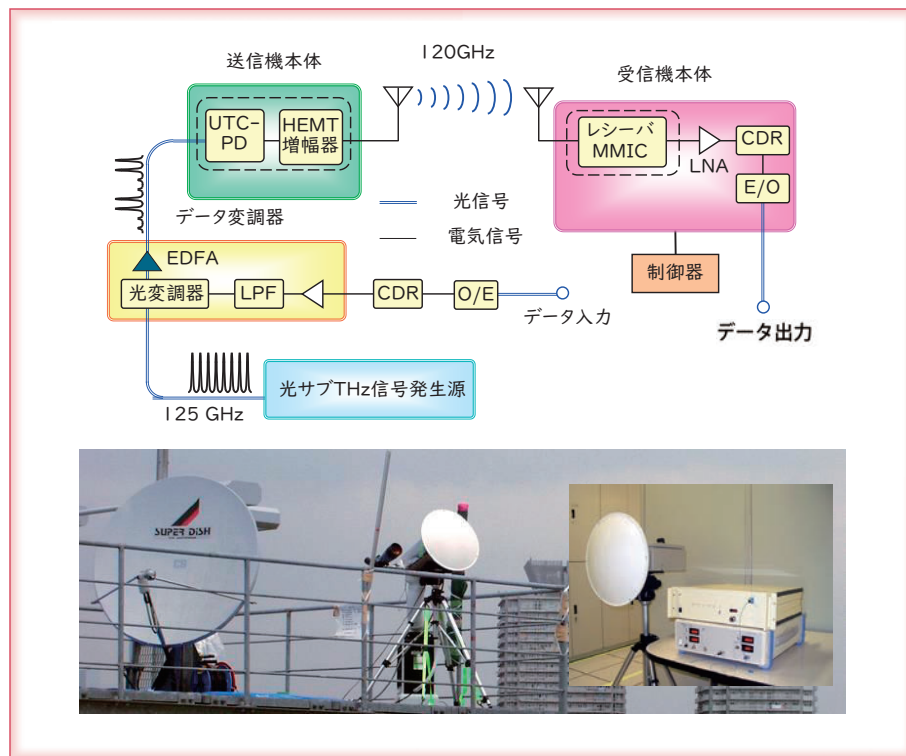


図9 最初のフィールド試験で開発した 120 GHz 帯無線システム

この1990年代、私の周辺では、一つの新たな研究分野が注目されるようになった。ミリ波・サブミリ波、そして遠赤外線を含めた0.1 THz (100 GHz) から10 THzの周波数の電磁波のことを「テラヘルツ波」と呼び、分光やイメージングへの応用を皮切りに、「テラヘルツ科学技術」と呼ばれる分野に多くの研究者が参入し始めた。ただし、当時のマジョリティはレーザー技術に詳しい研究者であったように思う。

1990年代の後半、私は、半導体デバイス・集積回路を計測するためのシステム開発の仕事から、NTT本来のミッションである通信サービスにつながる研究開発を経験したいという思いが強くなり、ミリ波・サブミリ波・テラヘルツ波を用いた通信・計測・センシング応用の研究プロジェクトを立ち上げたいと上司に提案した。幸いなことに、1999年から研究所長直属の特別研究員という職位の下、様々な自由裁量が与えられ、研究チームを増強していくことができた。

2000年代になって本格的に着手したテーマの一つが、100 GHzを超える周波数の電波を使った無線通信システムの研究開発である。当時NTTでは、60 GHz帯を使ったミリ波無線の研究開発について横須賀（研究所）の研究チームが力を入れており、時期尚早と猛反対される方もおられた。厚木（研究所）の部品材料の研究部隊に所属する素人が手を出せる電波ではない、との御指摘も受けた。しかし、

上述のパルスレーザを使った計測技術の研究開発に着手したときにも、素人が扱える技術ではないからやめた方がいい、というアドバイスを無視したという経験もあってか、いつしか反対の声は激励の言葉として頭にインプットされるようになった。もちろん、これはうまくいくかどうか誰一人分からない研究の世界では時々耳にする話である。

図9は、最初に本格的に開発した120 GHz帯の無線通信システムの構成である。送信機に光技術を用いているのが特徴である。120 GHz離れた波長の光波をレーザで発生し、光変調器でデータ変調を行った後、前述のフォトダイオード（UTC-PD）を使って、キャリア周波数120 GHzの電波としてアンテナから放射する。受信機は、当時、InP-HEMTを使った集積回路の研究開発を行っていた研究チームから提供を受けた。10 Gbit/sの伝送速度は当時としては世界最高のものであった。

このシステムを用いてフィールド試験とカスタマ探しを行い、幸運にも国内の複数の放送事業者との共同開発を進めることになった。目標は、2008年に開催された北京オリンピックのライブ中継であった。最終的に、遅延のない非圧縮ハイビジョン映像を現地のスタジアムから中継局まで無線で伝送、そこから光ファイバネットワークで国内のテレビ局までリアルタイムで伝送を行うことに成功した。その時点では、新たに開発したInP-HEMT集積回路による送信機を導入し、全電気技術によるミ

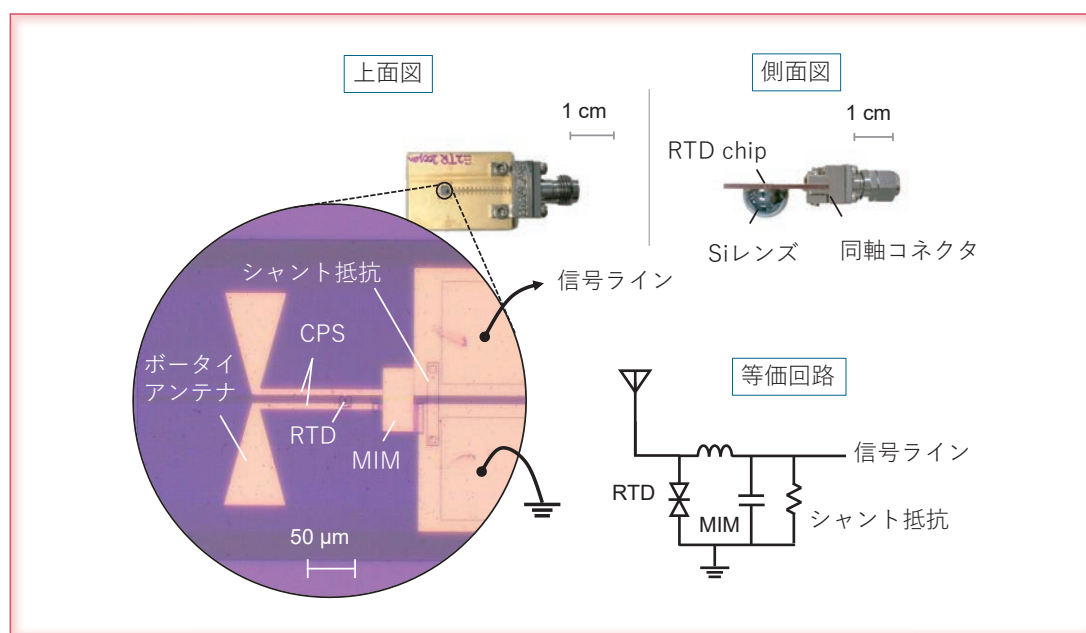


図 10 共鳴トンネルダイオードを用いた 300 GHz 帯受信機

り波無線システムが活躍した。

ミリ波・サブミリ波の世界に再び戻ったことを実感した出来事を紹介したい。それは、2000 年代の初め頃から、ALMA (Atacama large millimeter array) プロジェクトと呼ばれる、巨大ミリ波望遠鏡アレーの開発をけん引されていた国立天文台との共同研究である。奇しくも超伝導発振器ではなく、光技術を使って発生した基準信号をローカル信号源として、アレー状に配置された 60 を超える電波望遠鏡内の受信機に光ファイバで分配するというものであった。「フォトリック LO」と呼ばれ、そこに用いるフォトダイオードとして、UTC-PD の適用可能性を検討した。実際に、野辺山の 45 m の電波望遠鏡システムにフォトリック LO システムを持ち込んで実験を行った。

また、産業技術総合研究所の超伝導検出器とフォトリック LO を組み合わせ、200~500 GHz 帯の電波を使ったガスセンシングのプロジェクトにも参画し、上述の ALMA プロジェクトと合わせ、超伝導デバイスとの運命的な再会を果たした。



8. 更なる深化に向けた挑戦

2007 年 4 月、御縁あって阪大で研究室を主宰することとなった。NTT での研究プロジェクトの責任者でもあったことから、3 年間は NTT リサーチプロフェッサとして兼業しながら、一步一步大学での研究体制を構築していった。東京と大阪の行き来は大変だったが、「二足のわらじ」のおかげで、円滑なキャリアのトランジションができたと思う。

また幸運にも、テラヘルツ分野の研究開発が国内外で盛んになり、企業の研究者だった頃よりも、ヒューマンネットワークが格段に広がった。

大学で最初に立ち上げた研究テーマは、300 GHz 帯を利用した無線通信技術である。幸運にも、2008~2010 年に科研費基盤研究 (A) に採択され、光技術を用いた送信機を用い、300 GHz 帯で 20 Gbit/s の伝送速度を世界で初めて示した。その後の無線通信の研究では、JST や総務省関係のファンディングの支援を受け、2016 年には 100 Gbit/s (QPSK)、100 m 伝送 (70 Gbit/s) に到達した。

引き続き 2011~2013 年には科研費基盤研究 (A) の支援を受けて、300 GHz 帯と 600 GHz 帯を使った三次元イメージング (トモグラフィ) の研究開発に挑戦した。その後も、科研費や JST、総務省の競争的資金を頂き、600 GHz 帯で動作する UTC-PD の開発や、無線通信、トモグラフィ、タグ等への応用研究を行うことができた。

これも不思議な巡り合せか、1990 年代に計測技術の研究を行っていたときに出会った、共鳴トンネルダイオード (RTD) に 2010 年、再び出会うことになる。京都の半導体企業との共同研究で、RTD を用いた無線通信技術の研究を始めた。このダイオードは、テラヘルツ波の送信機 (発振器) としても受信機としても用いることができる極めてユニークな半導体デバイスである。図 10 は RTD 送受信チップの一例である。また、受信においては増幅機能があることも明らかになった。このデバイスの特徴は、トランジスタ回路に比べて圧倒的に低消費電力で小形であることであり、この特徴を生かした産

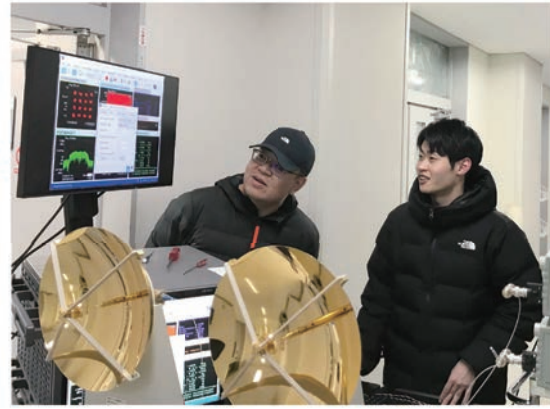


図 11 送受信機に光技術を用いた 300 GHz 帯無線通信実験の様子

業応用に期待している。

最後に、阪大を定年退職する前の 3 年間で挑戦した 300 GHz 帯無線通信システムとミリ波レーダの研究を御紹介したい。前者は、NICT Beyond 5G 研究開発促進事業の支援を受け、超多値変調による伝送速度の向上と伝送距離の長尺化を目指して行われたものである。多値化を阻む主要因の一つは、300 GHz 信号の振幅雑音と位相雑音である。そこで、送信機の RF 信号とヘテロダイン受信機の LO 信号の双方に、光技術による超低位相雑音発信機(ブリルアン発振機)を用いることで、64 QAM 変調で 252 Gbit/s, 256 QAM 変調で 120 Gbit/s (いずれも近距離)を達成した。また、32 QAM 変調 220 Gbit/s, 214 m を達成し、およそ 8 年の歳月を経て、200 Gbit/s, 200 m の壁を越えることができた。図 11 は、大学の廊下を使って、久しぶりに徹夜で無線伝送実験を行ったときの写真である。

もう一つは、ミリ波レーダシステムの開発である。電波を使った物体内部の可視化技術は、セキュリ

ティや非破壊検査の分野で様々な応用が期待されている。そこで、ビルなどの建物や橋りょう、トンネルといったインフラ構造物の内部診断のニーズに応えるために、ドローン搭載用の広帯域ミリ波レーダシステムについて述べる。一般的な構造物に対しては、おおむね 1~40 GHz の周波数の電波が適している。また、使用する電波の構造物に対する透過性や要求される分解能に応じて、周波数帯域を変えられることが望ましい。更に、ドローンに搭載できるペイロードの重量制限から、レーダシステムの軽量化が不可欠である。そのため、光技術を導入したミリ波電波の発生、制御、伝送方式を採用した。図 12 に開発したシステムの写真と構成を示す。



9. おわりに

大学と企業で、博士課程時代を含めると 40 年余りにわたって研究者としての人生を送ってきたが、偶然にも、ミリ波・サブミリ波という電波に関わる

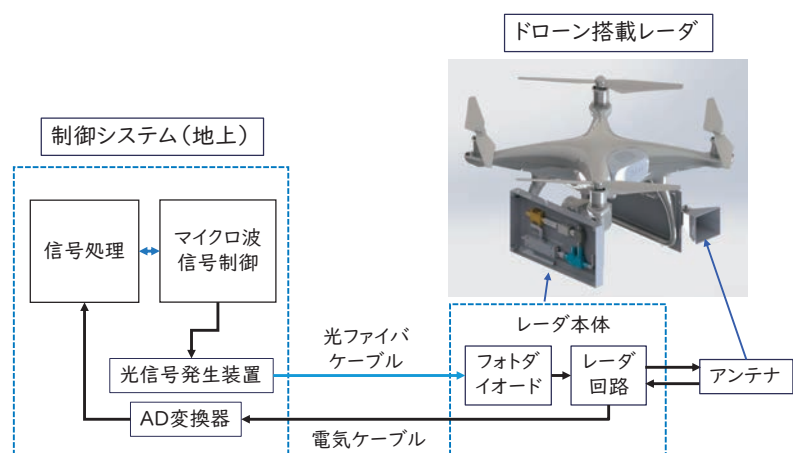


図 12 インフラ構造物の検査のためのドローン搭載ミリ波レーダシステム

	2000	2005	2010	2015	2020
Dバンド (110GHz~170GHz)	120GHz 光 Tx/電気Rx 10Mbit/s (2000) 120GHz 光 Tx/電気Rx 10Gbit/s (2002)	120GHz 電気Tx/Rx InP HEMT IC 2km (2007) 北京五輪 (2008)	120GHz 電気Tx/Rx InP HEMT IC 10Gbit/s 5km (2010) 130GHz 電気Tx/Rx Si-CMOS IC 11Gbit/s 3m (2014)	130GHz 電気Tx/Rx SiGe-BiCMOS 12.5Gbit/s (2017)	113GHz 電気Tx/Rx Si-CMOS 80Gbit/s (2020) 140GHz 電気Tx/Rx Si-CMOS phased array 30Gbit/s (2022)
Jバンド (220GHz~325GHz)		300GHz 光Tx/電気Rx 2Gbit/s OOK (2009)	220GHz 電気Tx/Rx 25Gbit/s OOK (2011) 300GHz 光Tx/電気Rx 24Gbit/s OOK (2012)	300GHz 光Tx/電気Rx 100Gbit/s QPSK (2016) 300GHz 光Tx/電気Rx 70Gbit/s QPSK 100m (2017) 300GHz 電気Tx/Rx Si-CMOS 80Gbit/s (2019)	300GHz 電気Tx/Rx 64Gbit/s 1km (2020) 300GHz 電気Tx/Rx InP-HEMT 120Gbit/s (2021) 300GHz 光Tx/光Rx >220Gbit/s 32QAM >200m (2024)
より高い周波数 (350GHz~800GHz)			625GHz 電気Tx/Rx 2.5Gbit/s (2011)	300-500GHz 光Tx/電気Rx 260Gbit/s (CA:6) (2016) 720GHz 光Tx/電気Rx 12.5Gbit/s (2019)	695GHz 光Tx/電気Rx 18Gbit/s (2020) 500-700GHz 光Tx/電気Rx 1Tbit/s (CA:14) (2023)

図 13 ミリ波・サブミリ波を用いた無線通信技術の発展と大学での成果

研究から離れることがなかった。就職して一旦リセットされたと思ったが、結局、つながっていた。修士1年生になって先生から与えられたものの、全く消化できなかったマイクロ波伝送線の知識は、いつしか私がこの分野の研究を進める上で必要不可欠なものとなった。懺悔の気持ちを込めて、世界的なマイクロ波の教科書である David M. Pozar 氏の「Microwave Engineering(4th Edition)」の共訳(マイクロ波工学: 森北出版)のお手伝いをさせて頂いた。一度巡り合った超伝導素子や半導体素子に何年か経て再びお世話になる場面もあった。アップルの創業者であるスティーブ・ジョブズが、2005年にスタンフォード大学の卒業式で語った「コネクティング・ザ・ドッツ (Connecting the dots)」は、過去の経験や行動が将来に役立つ可能性があることを示す有名な言葉である。過去の経験や行動が、その時点では何につながるか分からなくても、未来で何かにつながると信じるのが大切である、そして、直感や好奇心を信じて突き進むのが大切であることを伝えている。全く同感である。

今でも企業(21年間勤務)と大学(17年間勤務)の研究の違いについてよく尋ねられる。当然ながら、20代前半の学生と職業としての研究者には経験と知識量において大きな違いがある。大学に着任当時、大学での研究の進捗スピードはおおよそ3分の1に落ちたという体感だった。しかし、関連するテーマごとに上級生と下級生による2~3人のチームを編成して、お互いに連携してもらうと様子が変わって

きた。現代の学生は授業や試験で、私が学生の頃とは比べ物にならないくらい協力し合っているように思う。同様に研究における困難な課題に対しても、チームで考えながら試行錯誤してもらうと、私が予想しなかったような突破口や発見が得られることをしばしば経験した。研究室内でチームの枠を超えた協力も見られるようになった。みんな研究室で偶然に出会った仲間だが、その出会いを大切にしてお互いに惜しみなく助け合う、それこそが経験値は少なくとも数々のブレークスルーを生み出す、大学の研究の源泉だと実感した。図13は、ミリ波・サブミリ波(テラヘルツ)通信の研究において、学生の皆さんとフラグシップを守り続けてきた記録(白枠で囲んだ部分が、大学で達成したもの)である。

本稿では、冒頭で、私自身が研究者の道に進むようになった経緯について、昔の記憶をたどりながら少々詳しく紹介した。自分の適職は何なのか、学生の頃考えたことはあったが、永遠に答えは見つからないと思う。少なくとも言えることは、博士課程の3年間の経験があって今の自分があるということである。博士課程に進学し「3年間無事に生き抜く」ことの価値は、何十年も後になって理解できると思う。一人でも多くの学生の皆さんに、経済的な余裕があれば、国内外の博士課程、英語では PhD (Doctor of Philosophy) コースに進学し、専門分野だけでなく、人生哲学を学び、充実した人生を送ってほしいと願っている。

電子情報通信学会の総合大会・ ソサイエティ大会に参加しよう!

2025 年度通信ソサイエティ会長 眞田幸俊
Yukitoshi Sanada

通信ソサイエティ和文マガジン B-plusはアウトリーチを目的に創刊され、ジュニア会員や学生員もその読者層の一部として想定されているかと思っています。ジュニア会員・学生員は3月に開催される総合大会、9月に開催されるソサイエティ大会に参加して聴講することができます。また一部のセッションでは研究成果を発表することもできます。とはいえ、大会についてジュニア会員や学生員向けに説明している記事を余り見掛けませんでしたので、この巻末言で御説明したいと思います。

【大会の開催場所】大会は基本的に大学の校舎で行われます。総合大会は2年に一度関東近県で開催され、そのほかは日本全国のいずれかの場所で開催されます。ソサイエティ大会は4年に一度関東で開催されます。2025年は総合大会が東京（東京都市大）、ソサイエティ大会が岡山（岡山大）で開催されます。研究者は発表や聴講のために日本全国を旅するのです。

【大会のセッション構成】大会は大きく分けて2種類のセッション（特定のテーマの発表を集めた時間枠）に分かれます。その一つが公募セッションで、主に通信学会の各ソサイエティ傘下にある研究専門委員会が応募し、設定されるものです。その中でも一般セッションのように各専門委員会の主要研究分野に対応したセッションと、公募シンポジウムや公募ポスターセッションのように提案者が特にテーマを絞って企画するセッションに分かれています。もう一つがホットなトピックをソサイエティやグループ、大会委員会などの特定の組織が企画する企画セッションです。

企画されたセッションの中には通信学会を身近に感じて頂くような情報提供等のセッションがあり、数は限られますが一般の方々に無料公開されるものもあります。例えば2024年の総合大会では「社会インフラをささえる情報通信エンジニアリングを目指して」というセッションが一般無料公開され、特に能登半島地震の直後ということもあり、通信インフラ（基地局設備など）の災害復旧などのテーマが議論されました。

【大会と関連して開催されるイベント】大会期間の前日に日本に留学している学生を中心に GlobalNet Workshop が開かれています。英語で行うポスターセッションで自分の研究内容を紹介する場になっています。また、総合大会では若手会員や学生員及びジュニア会員に向けて、研究専門委員会がその専門分野を紹介する Welcome Party が開催されています。開催形態は年によって変わりますが、参加者には飲み物などが用意されることもあるようです。研究発表が行われる講義室の近くでは、「IEICE EXPO」と題して企業や研究機関の方々が研究開発を行っている技術を展示し、その内容を説明してくれます。更に企業な

どの大会スポンサーが開催するスポンサードセッションでは、研究者や学生向けの企画が組まれます。同様に企業スポンサーが開催するランチョンセミナーでは、製品・サービス紹介や学生向けのリクルーティングに関連した企画が行われます。そして大会が開催される場所にちなんだオプションツアーも企画されています。2024 年秋に日本工大で開催されたソサイエティ大会では学内ツアーとして蒸気機関車試乗体験が行われました。

【大会を開催する側の人々】大会を陰ながら支える側の方々についても御紹介しましょう。まず大会委員長は学会の副会長が担当します。開催校実行委員会は大会が行われる大学の教員が担当し、セッションが行われる講義室の手配や企画セッションのスケジューリング、学生アルバイトの手配、懇親会の手配などを行います。学生アルバイトは大学内を熟知されていて、また機材のトラブルにも対応して頂ける、学会にとって大変心強い方々です。そして事務局。学会の職員が大会日程の前から現地入りし、朝早くから夜まで各種事務作業を担当します。

各セッションは研究専門委員会などの各種委員会が担当します。研究専門委員会の委員はつつがなくセッションが進行するように全力で対応しています。思い出話ですが、2015 年 9 月に東北大で行われたソサイエティ大会では、台風で仙台市内の交通がマヒしてしまいました。しかし専門委員はセッションを開催するために、人によっては市内から大雨の中 1 時間近く歩いて（当時は地下鉄東西線開通前でした）会場に到着し、水浸しになった講義室を別の講義室に配置換えしてセッションを開催しました。発表の機会を提供することは、せっかく貴重な研究成果を投稿して頂いた発表者のために大会の規約で決まっていることです。

× × ×

さて本記事の冒頭部分で“一部のセッションではジュニア会員や学生員も研究成果を発表することもできます”と書きました。総合大会では「ジュニア&学生ポスターセッション」が開かれています。今年から大会全体の企画となりました。毎年多数のジュニア会員や学生員がポスターで研究発表を行っています。まだ大会に参加したことのない B-plus の読者の方々は、是非一度のぞいてみてはいかがでしょうか。本年 9 月 8 日（月）～12 日（金）のソサイエティ大会が岡山大で開催されます。同世代の方々や少し先輩の大学院生が研究発表の様子を見学し、交流をすることができるかと思っています。また毎年 1 月に発表申込みを行っていますので、応募することを考えてみてはいかがでしょうか。プロの研究者からいろいろなアドバイスを頂けるかもしれません。御応募をお待ちしております。

NEXT ISSUE

2025 年秋号（第 74 号）2025 年 9 月 1 日発行

小特集

カーボンニュートラルと分散電源と次世代エネルギー

若者よ、世界に出よう！：アナザースカイでの成長～スイス研究留学記～
こんなツール、使っています：GPU を利用した PyTorch 入門
街 plus 探訪：何度も訪れたい「いせ」

子どもに教えたい通信のしくみ：ジュニア会員向けページ
「電気」と「磁気」が織りなすコイルの不思議

……他、御期待下さい

Editors Note

今号で初めて小特集のリーダを務めました。とても興味深い応用事例の記事が都合により取下げになってしまったのは残念でしたが、読み応えのある解説論文が並んだ小特集とすることができました。ドローンを自分でも飛ばしてみたくになりました。(D.K.)

本小特集では、HAPS やドローンなどの非地上系プラットフォームを活用した次世代無線通信技術の最新動向を紹介しています。空の通信インフラや運航管理に関する多様な視点の研究成果を収録しました。是非御一読下さい。(N.I.)

子供の頃に見た未来都市のイラストでは未来的なビルの合間をタイヤのないクルマが飛んでいた。それから 50 年、未来的なビルと空飛ぶクルマと呼ばれる乗り物が登場した。「人間が想像できることは人間が必ず実現できる」という名言は本当らしい。(K.S.)

Mathematica には学生時代から興味があり、解説記事を書かれてうれしいです。IT 業界での活躍をほぼ独占しているシリコンバレーの活躍の源泉を、日本の方々にも読み取って頂けると嬉しいです。身近で使われているエアコンの仕組み、御理解頂けるとうれしいです。編集を 3 件も（それ以外にも 1 件を）担当させて頂き楽しい号でした。(S.Y.)

海上保安庁でもドローンが活躍しています。御紹介できなかったのが残念ですが、様々な分野で活躍しているドローンについて、身近に感じ、理解が深まると幸いです。(H.I.)

地形によって遮られる地上のワイヤレス通信の制約が HAPS によって解放され、広範囲に安定したサービスを提供できることを願っています。本号で読者の皆様にその一端を見て頂き、興味を持って頂ければ幸いです。(T.H.)



2025 年夏号(第 73 号)
2025 年 6 月 1 日 発行

EDITORIAL COMMITTEE

編集委員長 関屋大雄

編集副委員長 山口実靖 山本 嶺

編集委員

飯田裕之	磯崎裕臣	伊藤敬義	伊藤暢彦
内田大輔	太田真衣	金友 大	木下雅之
小南大智	沢田健介	関 裕太	道後千尋
中西孝行	中野雄介	中村光貴	長谷川直輝
羽多野一磨	早馬道也	東野武史	干川尚人
松室亮之	水野 修	村上靖宜	山下泰輝

本誌の愛称は「B-plus」、正式名称は「通信ソサイエティマガジン」、
「IEICE Communications Society Magazine」です。
本誌掲載論文を文献引用する際は、邦文略称「信学通誌」、英文略称
「IEICE Commun. Mag.」を用いて下さい。

通信ソサイエティマガジン B-plus へのお問い合わせ

- ☐ ご意見、ご要望：b-plus@ieice.org
- ☐ ホームページ ▶ <https://www.ieice.org/~cs-edit/magazine/index.html>
- ☐ B-plus 冊子体購入のお申込みはこちら ▶ https://www.ieice.org/~cs-edit/magazine/order_y.html.utf8

複写される方へ

一般社団法人電子情報通信学会は、本誌に掲載された著作物の複写複製に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。複写複製を御希望の方は、一般社団法人学術著作権協会 (<https://www.jaacc.org>) が提供している複製利用許諾システムを通じて申請して下さい。

なお、複写以外の許諾（著作物の転載、翻訳等）に関しては、委託しておりませんので、直接本会へお問い合わせ下さい。

〈問合せ先〉 一般社団法人電子情報通信学会
TEL (03) 3433-6691 FAX (03) 3433-6659
著作物利用許諾申請： <https://www.ieice.org/jpn/copyright/tensai.html>

発行人／白石 智
発行所／一般社団法人 電子情報通信学会 通信ソサイエティ
〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 機械振興会館
Tel：03-3433-6691（代表） 振替：00120-0-35300
制 作／株式会社 太平印刷社
東京都品川区東品川 1-6-16

© Copyright 2025 IEICE. All rights reserved.

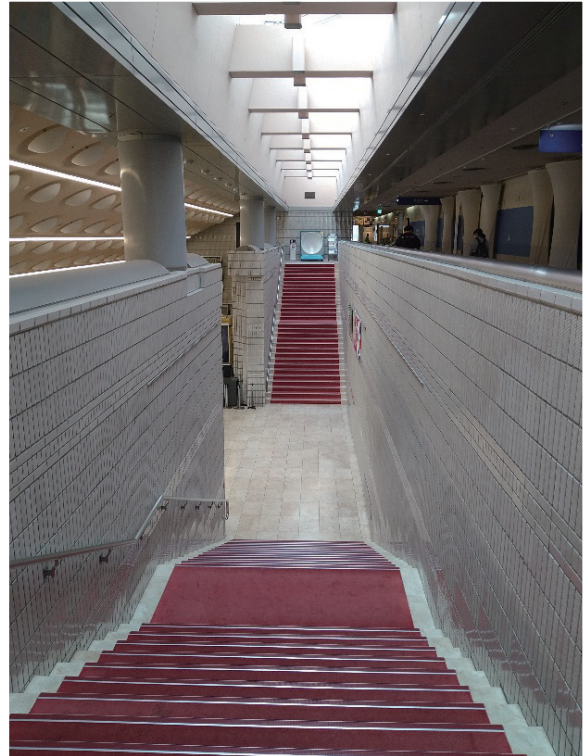
73
The photograph,
Communication can be seen.

通信がみえる一枚の写真



パラボラ電話 つくばエキスポセンター

千川尚人（正員）



パラボラ電話は、パラボラアンテナが音を一点に集める特性を利用し、遠く離れた相手と会話ができる「無線音声伝送装置」です。

なお、展示物の名称は「電話」ですが、実際には電気を使っていません。

つくばエキスポセンターでは、エントランスホー

ル正面をまっすぐ進むと、左右対称に赤いカーペットが敷かれた階段があり、2階の展示場へとつながっています。その階段を上りきった先には、向かい合うように二つのパラボラ電話が設置されています。両者の間隔は、およそ 30 mあるでしょうか。



写真を募集致します

マガジン編集委員会では、「通信がみえる一枚の写真」をテーマに写真（電子ファイル（jpeg）あるいはプリント）、タイトル、説明文（約 300 字）を募集致します。詳細は、通信ソサイエティマガジン HP（<http://www.ieice.org/~cs-edit/magazine/ieice/photo.html>）を御参照下さい。

送り先：

【郵 送】〒 105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 機械振興会館内 電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン担当

【メール】b-plus@ieice.org までお送り下さい。

IEICE Trans. Commun. & ComEX



in



IEEE Xplore

“OPEN ACCESS”
是非、ご投稿を！