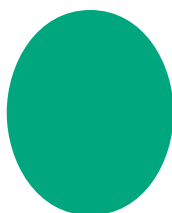




アンリツ テクニカル

ANRITSU
TECHNICAL
BULLETIN



101 Mar.
2026

● 講演録

6Gとその先の社会：
NICTの研究成果と未来の通信技術

● 論文

次世代eCall(emergency call)向け試験ソリューション開発
200G/Lane用60 GHz光サンプリングオシロスコープの開発
多層グラフェンの光学特性
画像認識AIにおける評価技術の動向と紹介
公開鍵暗号概要
プロセス分析技術向け近赤外分光モジュールの開発
省人化・省力化を追求したX線検査機の開発
シミュレーションと実電源を融合したEVパワートレイン評価の技術実証
Prism: An Open-Source Framework for
Building XAML Applications in WPF for Instrumentation

アンリツテクニカル 101

2026年3月

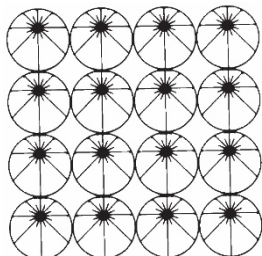
講演録

6Gとその先の社会: _____	情報通信研究機構(NICT)ネットワーク研究所
NICTの研究成果と未来の通信技術 _____	研究所長 原井洋明 _____ i

論文

次世代 eCall(emergency call)向け試験ソリューション開発 _____	中村彰一・藤田研二・竹本健二・井上若菜 山本竜司・奈良真治・市川悠斗 _____ 1
200G/Lane 用 60 GHz 光サンプリングオシロスコープの開発 _____	横山裕樹・松田修一・岸田桂輔・高須涼太 ____ 6
多層グラフェンの光学特性 _____	鎌田雅博・松井朋裕 _____ 12
画像認識 AI における評価技術の動向と紹介 _____	城所 龍・カランダン ローレンス _____ 19
公開鍵暗号概要 _____	森 隆 _____ 26
プロセス分析技術向け近赤外分光モジュールの開発 _____	笈田大輔・山崎教明・腰原 勝・斉藤崇記 ____ 34
省人化・省力化を追求した X 線検査機の開発 _____	小松原樹・斎藤直也・北林遼太郎・金井貴志 中山和規 _____ 41
シミュレーションと実電源を融合した EV パワートレイン評価の 技術実証 _____	依田拓也・新地雄太 _____ 46
Prism: An Open-Source Framework for _____	Tom Roberts _____
Building XAML Applications in WPF for Instrumentation _____	_____ 52
社外寄稿論文の紹介 _____	_____ 58

講演録



6G とその先の社会： NICT の研究成果と未来の通信技術

情報通信研究機構(NICT) ネットワーク研究所 研究所長

原井 洋明

本講演録は、2025年7月10日・11日開催のアンリツ テクノプラザ 2025 で実施された特別講演の内容をもとに、編集事務局が加筆・整理して掲載したものです。

1 はじめに

情報通信研究機構(NICT)の原井です。まずはアンリツ様の創業130周年、誠におめでとうございます。この場でNICTの研究成果と未来の通信技術についてご紹介する機会をいただき、大変ありがたく思います。

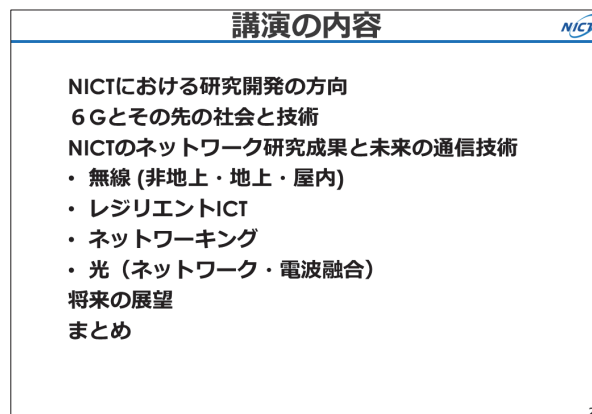
本日は「6G とその先の社会」というタイトルで NICT の研究成果と未来の通信技術について、どのようなものを開発し、どのような方向を目指しているかをご紹介します。



スライド 1

本日の講演では、まず NICT における研究開発の方向性について、ネットワークだけでなく全体としてどのような取り組みを行っているかを簡単にご紹介します。次に、私たちが「Beyond 5G」というキーワードで呼んでいる 6G, そして 7G へと向かう中で、私たちの社会がどのように変化し、それを支えるためにどのような技術が必要とされるのかについてお話しします。その後、私が研究所長を務めるネットワーク研究所の具体的な研究成果、すなわち「無線通信」、障害からの回復を可能にする「レジリエント ICT」、さまざまなも

のをうまくつなぎ合わせて情報を提供する道を作る技術としての「ネットワーキング」、そしてネットワークや電波と融合して使われる「光技術」の各分野で、どのような未来の技術が生まれつつあるのかをできるだけ分かりやすく説明します。最後に、これらの研究開発を踏まえた将来の展望を述べ、まとめとします。



スライド 2

2 NICT における研究開発の方向

NICT には戦略 4 領域があります。30 秒程度の動画にまとめてありますのでご覧ください。

(動画上映)

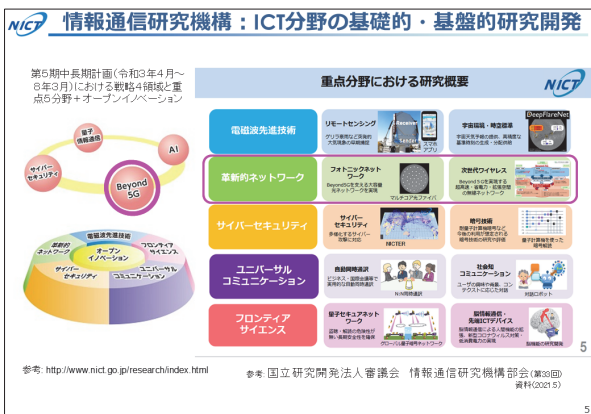
「これからの未来を作る。私たち NICT は、Beyond 5G, AI, 量子情報通信, サイバーセキュリティをはじめ、心を動かす次世代の研究と技術開発で、感動とワクワクの未来を作っていきます。」



スライド 3

「心を動かす」研究というのはなかなか緊張する言葉ですが、動画にありました 4 つの戦略領域、すなわち「Beyond 5G」「AI」「量子情報通信」「サイバーセキュリティ」を支える形で 5 つの重点分野を定めて研究開発を推進しています。具体的には「電磁波先進技術・リモートセンシング」「革新的ネットワーク」「サイバーセキュリティ」「ユニバーサルコミュニケーション」「フロンティアサイエンス」です。

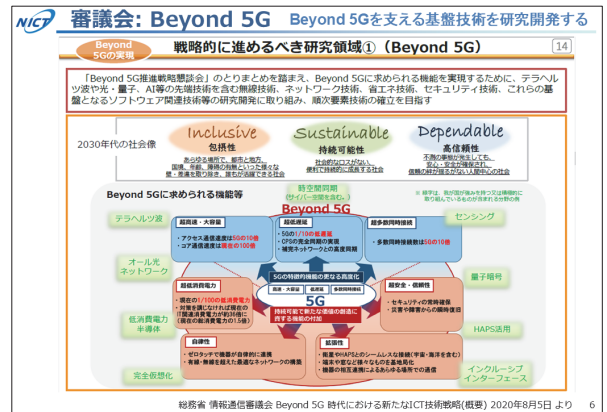
電磁波先進技術・リモートセンシング分野ではさまざまな量をセンシングする技術を開発しています。サイバーセキュリティ分野では日本国内のコンピュータに対する海外からの不正アクセスを試みる動きをリアルタイムで可視化する「NICTER」というシステムを構築・運用しています。また、ユニバーサルコミュニケーション分野では AI を活用した多言語音声同時通訳システムを開発し、国際会議などで実用化を進めています。また、フロンティアサイエンス分野として量子通信も研究しています。そして、私たちの研究所が担当しているのが、「革新的ネットワーク」の研究開発です。



スライド 4

なぜ私たちがこの分野に注力しているかと言いますと、もちろん前から通信やネットワークの研究を続けてきたという歴史的経緯もありますが、最も大きなきっかけとして総務省の情報通信審議会から「Beyond 5G の研究開発を戦略的に進めていくべきだ」という答申

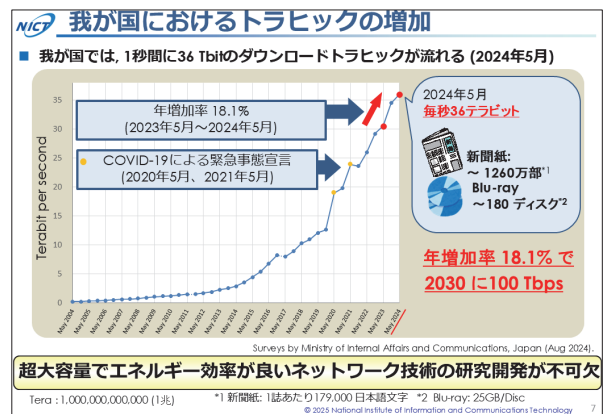
が出されたことが挙げられます。この答申では 5G が掲げた「高速・大容量」「低遅延」「多数同時接続」という 3 つの特徴をさらに高度化させるとともに、それに加えて「自律性」や「拡張性」など、ここに示された 7 つの項目をキーテクノロジーとして 5G を根本から超えていくような研究開発を進めるべきだとされています。私たちは国が掲げたこの大きな方針に基づいて研究開発に取り組んでいます。



スライド 5

大容量通信がなぜ必要かについて、具体的にどれだけのデータトラフィックがあるかという観点から見てみましょう。総務省のデータによれば、2024 年 5 月時点で日本国内のダウンロードトラフィックは毎秒 36 テラビットに達しています。半年ごとにプロットしていくと、年増加率 18.1%という驚異的なペースで伸び続けています。COVID-19 の緊急事態宣言下にあった時期でさえ着実に増加し、現在では新聞に換算すると約 1260 万部を超えるデータが 1 秒間に流れている状況です。

このペースで増加すると、2030 年には 1 秒間に 100 テラビット、2040 年にはさらにその 10 倍以上のデータが流れることが予想されます。そのため、大容量でエネルギー効率の良い、1 ビットあたりの消費電力を削減するネットワーク技術の研究開発が不可欠となっています。

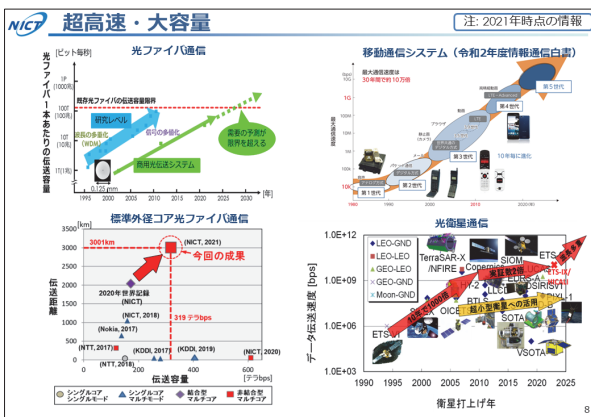


スライド 6

大容量通信を実現するための技術として、まず光ファイバ通信があります。現在、光ファイバ通信では1本のファイバで伝送できる容量は毎秒100テラビットが限界とされてきましたが、需要の予測はその限界をはるかに超えようとしています。そこで、「マルチコア」という新たな技術を用いた光伝送の研究開発を進めています。

無線通信においては、世代が進むにつれて必要な通信容量は増加し続けています。第4世代、第5世代では1ギガビット、10ギガビットというデータ通信が必要になっています。

後ほど詳しく説明しますが、衛星通信への光技術の導入も重要な取り組みです。NICTでは約30年にわたって取り組んでいます。衛星の数が増加し、通信容量も増えています。1本のチャンネルの速度が向上するだけでなく、波長を束ねて多重化することで容量を増やす動きもあります。また、従来のように1トンを超える大型衛星だけでなく、小型衛星を多数打ち上げて活用し、面としてネットワークを提供する動きも活発化しています。



スライド 7

こうした状況の中、私たちは第5世代の先である第6世代、第7世代に向けた研究開発を進めています。私たちの基本的な目標はネットワークを使いたい人がしたいことに確実に応えていくことです。これは世代が変わっても不変ですが、要求される数値の大きさが世代ごとの違いとなります。

ユーザの要求は普遍的です。「より多くのデータを送りたい」、「より速くデータを届けたい」、「どこでもデータを配信したい」、「どこからのデータでも受信したい」、「安心してネットワークを使いたい」、「思うままに使いたい」という要求は変わりません。

これに対してネットワーク側は、技術革新により部品を更新しながら快適な環境を提供し、省力化を進めて運営コストを削減して、継続的な接続性を確保する必要があります。ユーザの要求に見合った回線を提供する必要がありますが、要求されるまま設備を増強してはコストが膨大になるため、ネットワークを仮想的に切り貼りし、

動的に資源を割り当てるような効率的な運用も不可欠です。



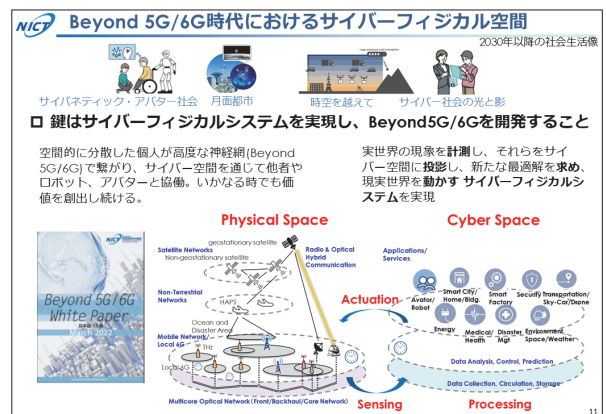
スライド 8

3 6G とその先の社会と技術

では、こうした背景のもと、具体的にどのような未来社会が描かれるのでしょうか。NICTは2021年にBeyond 5G/6Gに関するホワイトペーパーを公開しました。その中で私たちは、未来社会の鍵となるコンセプトとして「サイバーフィジカル空間」を高度に活用する世界を提唱しています。

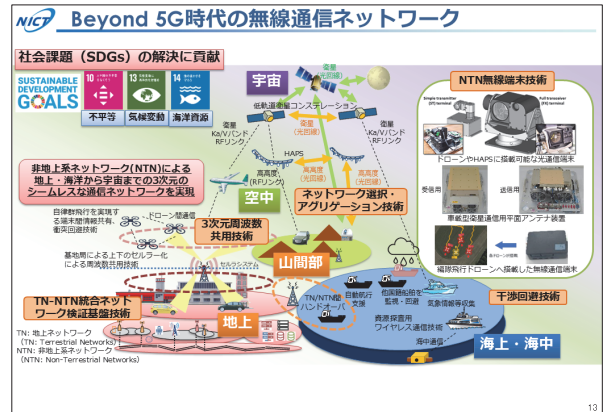
これにはサイバネティックアバターで遠隔ロボットを制御して人の代わりにする技術、これを使って月面都市を作ったり、時や場所を越えてさまざまな形態のコミュニケーションを実現したりする技術が含まれます。また、このようなサイバー社会で生まれる新たな脅威にも対処します。そうしたシステムを実現するために、Beyond 5G/6Gを開発するというのが私たちの主張です。

フィジカル空間(=現実世界)で起こっている現象、例えば車の動きや天気の変化などあらゆるものをセンシングし、それをサイバー空間に投影して最適解を求め、それによって現実世界を動かしていく。そうした「サイバーフィジカルシステム」を実現するために必要な通信やネットワーク技術の研究開発を行っています。



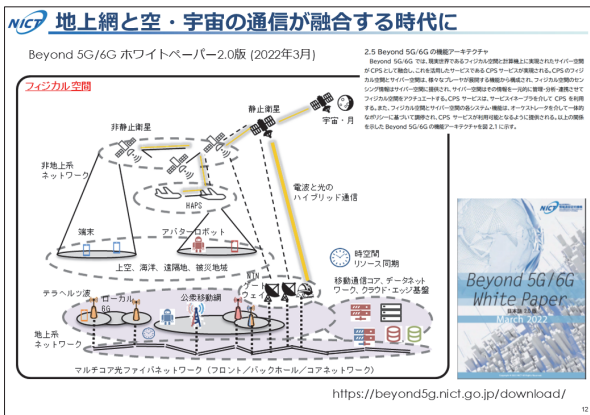
スライド 9

この構想をより具体的に描いたのがこちらの図です。フィジカル空間の上空には、静止衛星、非静止衛星、HAPS(高高度プラットフォーム)といったさまざまな飛翔体が飛び交っています。これらの飛翔体が地上と通信するだけでなく、互いに直接通信することで、地球上のあらゆる場所に情報を届けるネットワークを構築します。さらには、その通信網を月まで延伸させていきます。上空の通信を充実させるだけでなく、地上においても無線通信の革新や、光ファイバ通信の大容量化を進めていく。こうした研究開発を私たちは進めています。



スライド 11

地上の光ファイバ通信ネットワークはユーザからは見えにくい部分ですが、スマートフォンの1歩奥には光ファイバが巡らされており、データセンター内も光ファイバで接続されています。現実世界のデータ通信だけでなく、サイバー空間でのデータ通信を支える基盤として、さらなる大容量化が必要ですので、それについても研究しています。

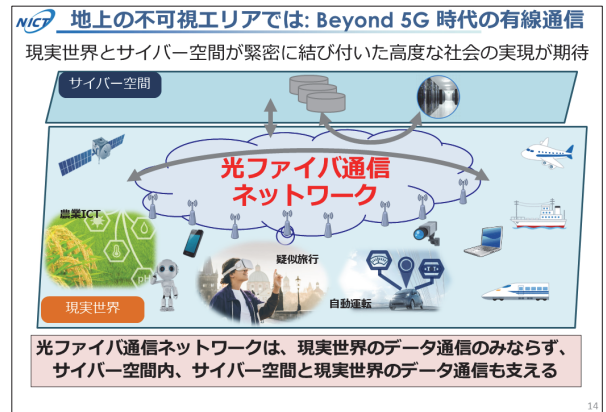


スライド 10

Beyond 5G 時代の無線通信ネットワークでは、従来の電波による通信に加えて光通信を導入し、大容量化を図ります。また、信号が流れるエリアを 1000 分の 1 程度に狭めることで効率的な通信を実現します。

現在は陸上の 2 次元方向で周波数を調整していますが、これに高さ方向も含めた 3 次元で調整する 3 次元周波数共用技術を開発しています。さらに、上空に通信の「面」を構築し、雲があっても光が届かない場合は変調方式を変えながら雲を通す電波を使う経路を選択するなど、状況に応じて最適な通信手段を自律的に選ぶ「ネットワーク選択」技術も開発していきます。

衛星による通信範囲の拡大により、海上や山間部など、これまで通信が困難だった地域にも安定したサービスを広げ、SDGs の目標である「不平等の是正」や気象情報の収集による「気候変動への対応」、さらには海中通信による「海洋資源の保全」といった社会課題の解決に貢献できると考えています。そのために必要な無線通信技術として、光通信あるいはドローンの編隊飛行などの研究開発も行っています。



スライド 12

4 NICT のネットワーク研究成果と未来の通信技術

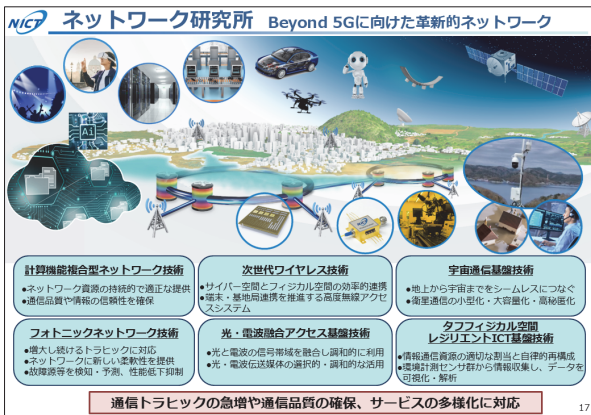
ここからは、2030 年代に期待される社会の実現を目指して、私たちネットワーク研究所が具体的に進めている研究開発の成果をご紹介します。

私たちは Beyond 5G/6G の先を見据え、より広くより速くどこでも通信できる「広帯域・広域」、即座の応答を実現する「低遅延」、つながり続けて安心して使える「高信頼」のネットワークを目指しています。そのため光通信、無線通信(地上・衛星)、そしてそれらを統合するネットワークングの基礎技術からシステム技術までの研究開発を産業界や大学の皆さまと連携して進めています。これにより技術革新、標準化、社会実装を目指しています。



スライド 13

主要な研究テーマは、データ流通に AI の計算機能を組み合わせる「計算機能複合型ネットワーク技術」、地上中心の無線技術「次世代ワイヤレス技術」、地上から宇宙までシームレスにつなぐ「宇宙通信基盤技術」、光通信を高度化する「フォトニックネットワーク技術」、光と電波をアクセス系で融合する「光・電波融合アクセス基盤技術」、災害時など環境変化にも対応するネットワーク「タフフィジカル空間レジリエンス ICT 基盤技術」です。こうした研究開発によって、通信トラフィックの急増やサービスの多様化に対応していこうと考えています。



スライド 14

4.1 無線ネットワーク技術（非地上，地上，屋内）

それでは無線のネットワークを、非地上系ネットワーク，地上系ネットワーク，屋内ネットワークの 3 つに分類して研究例をご紹介します。

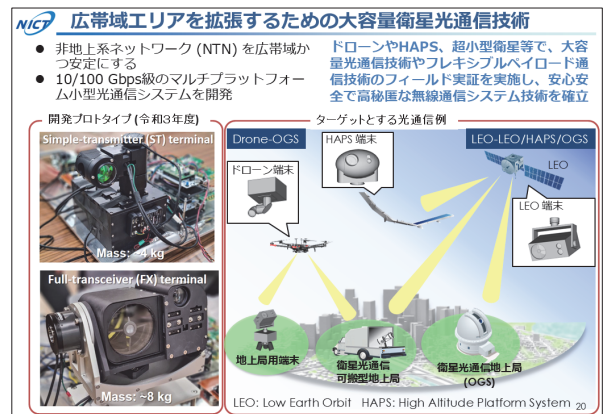


スライド 15

4.1.1 [非地上] 非地上系ネットワーク (NTN) に向けた光空間通信

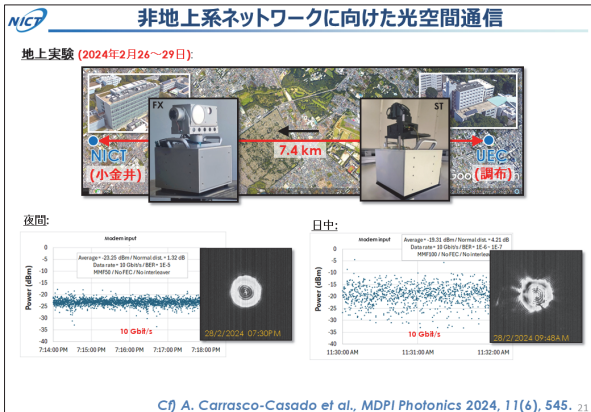
低軌道衛星の増加に伴い、衛星の大量生産時代が到来しています。NICT では、機器を共通化・汎用化して衛星光通信を普及させるため、小型の光送受信端末の研究開発を進めています。

プロトタイプは 10 キログラム以下で、HAPS (高高度プラットフォーム) という航空機の 2 倍の高度を飛行する飛翔体、LEO (低軌道周回衛星)、ドローンなど、マルチプラットフォームに搭載可能です。これらの光通信端末により、空のネットワークの大容量化を実現し、3次元ネットワークの拡大を目指しています。



スライド 16

将来的には HAPS や非静止衛星と地上との通信を視野に入れているのですが、大気中で光空間通信をすると信号が揺らぎます。この影響を確かめるために、2024 年 2 月に東京都内で約 7 キロメートルの距離で実証実験を行いました。毎秒 10 ギガビットの信号伝送において夜間は安定的に、また日中も若干の受光信号強度のばらつきはあるものの信号伝送が可能であることが確認できました。高度 20 キロメートルの HAPS と地上との通信を想定し、大気の揺らぎは地表付近で大きいことを考慮して、地表の 7 キロメートル程度の伝搬で模擬実験を行ったものです。



スライド 17

昨年のワイヤレス・テクノロジー・パークでは、同じ機材を用いて約 2 メートルの距離で 10 ギガビット毎秒の映像伝送実験を行い、3 日間実演しました。現在、この技術を段階的に空中プラットフォームへ搭載する準備を進めています。

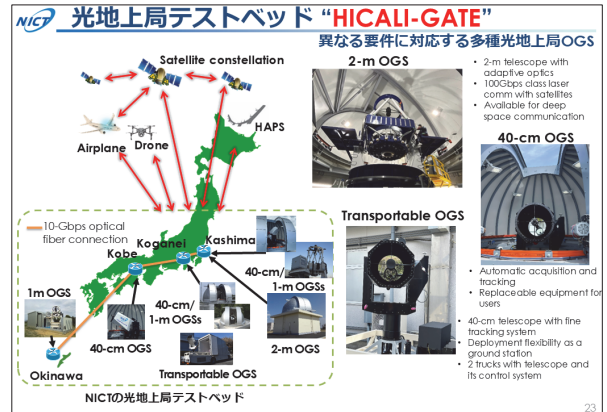


スライド 18

4.1.2 [非地上] 光地上局テストベッド “HICALI-GATE”

総務省から令和 3 年度の補正予算をいただき、光地上局 (OGS: Optical Ground Station) の整備を進めています。茨城県鹿嶋市の NICT 拠点には、私たちの背丈を超える直径 2 メートルの光学系(主鏡)を持つ OGS を設置しました。また、小金井、神戸、沖縄には直径 1 メートルまたは 40 センチメートルの OGS を設置し、さまざまな場所で衛星や HAPS の信号を受信できる環境を用意しています。

さらに、トランスポータブル OGS というトラックに搭載可能な移動型地上局も開発しました。これにより、信号を受けたい場所まで移動し、例えば小金井から都心まで移動して信号を受け、そこから地上のネットワークを経由してサービスを提供するような実験も可能になっています。



スライド 19

4.1.3 [地上] サイバー空間とフィジカル空間を効率的に連携する無線システム評価技術

先ほどご紹介したサイバーフィジカルシステム (CPS) の実現に向けて無線通信システム評価技術の研究開発を進めています。低コスト・短時間で次世代システムを評価・検証するため、実際に無線システムを設置してサービスを提供する際の手間を大幅に削減する取り組みを行っています。

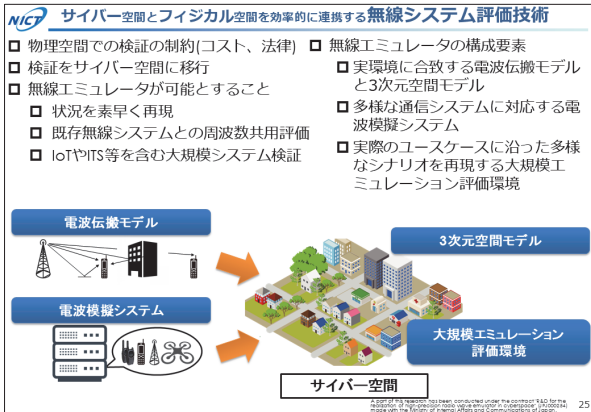
従来は、簡易的な電波伝搬モデルを使った評価やさまざまな条件での評価を行った上で試験局を申請し、人手をかけてさまざまな場所に機器を設置して評価するという手順を繰り返す必要がありました。これをモデルの精緻化と計算機内での検証により、設置回数を最小限に抑えるような無線システム評価技術の研究開発を行っています。現在のところ、ワイヤレスエミュレータや電波エミュレータという技術により、100 を超える無線局への対応や、コンピュータ上での 1 万規模の仮想無線局構築が可能になりました。



スライド 20

このように物理空間での検証の制約をサイバー空間での検証に移行することで、時間とコストの大幅な削減を実現しようとしています。そのためには電波の伝搬モデルを精緻化する必要がありますので、さまざまな場所で測定を行い、それに合わせたモデルを作成し

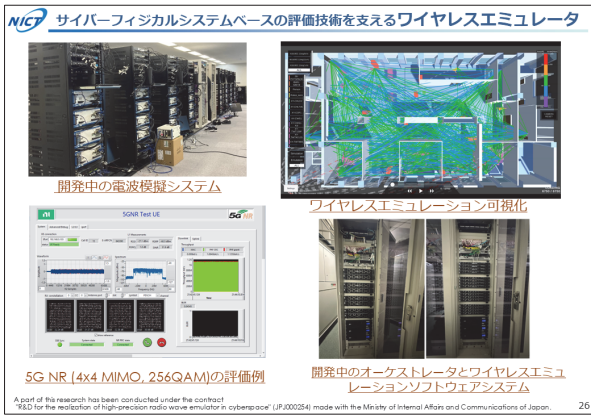
ています。3次元空間モデルでは、ビルや反射の多い建物などの環境をコンピュータ内に再現しています。



スライド 21

USRP(Universal Software Radio Peripheral)というソフトウェア無線モジュールを用いた電波模擬システムや、Linux サーバー上での再現環境を構築しています。

実験結果として、5G NR(New Radio)の256QAM評価を実現し、コンステレーションを確認できるようになりました。また、ビルフロアでのデータ転送シミュレーションでは、メガビットから10メガビット級のデータ転送を可視化し、人とアクセスポイント間の電波強度をリアルタイムで模擬しながら最適解を見つけることが可能になっています。



スライド 22

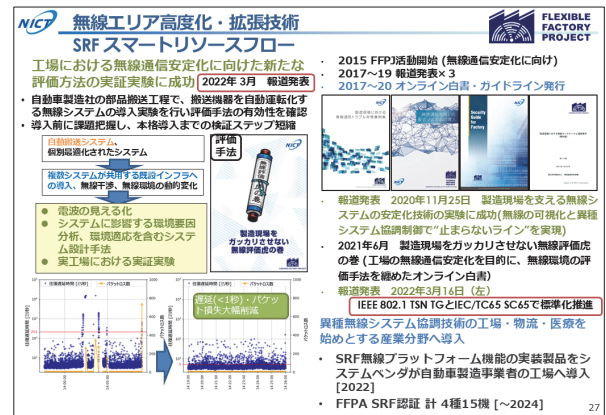
4.1.4 「屋内」無線エリア高度化・拡張技術 - スマートリソースフロー (SRF)

工場や建物内の無線通信の高度化を目指し、「スマートリソースフロー(SRF)」技術の研究開発を約20社と共同で進めています。屋内の無線通信環境では、持ち込み機器を禁止することで、ある程度きれいな電波環境を作ることには可能ですが、障害物があるために想定どおりの環境を作れないことがあります。そうした場合に、アクセスポイントや機材を最適に配置することで思いどおりのデータ

通信を実現する研究です。その研究成果として、無線レイアウトの配置方法やトラブル対処法をまとめた資料を公開し、世の中の役に立つような取り組みも行っています。

スマートリソースフローの具体的な成果としてスケジューリングの最適化により遅延時間のばらつきを大幅に削減することに成功しています。従来は遅延が大きくなる時間帯がいくつも存在していましたが、適切なスケジューリングにより安定した通信を実現できるようになりました。

これらの技術はIEEEやIECでの標準化活動を通じて、安定化技術として広く利用されることを目指しています。



スライド 23

4.1.5 「非地上」空モビリティの安全・安心を支える無線技術

私たちはモビリティの安全安心を支える無線技術としてドローンの安定した飛行を支えるドローン間通信技術の研究開発も行っています。基地局とドローン間で山を越えると見通し外になり、4G/5Gの電波も届かない場所が存在します。そのような環境においては、中継ドローンを配置してマルチホップ通信を行い、通信範囲を拡大する取り組みを進めています。

さらに、ドローン同士の直接通信により、ぶつかりそうになったら避けたり、複数のドローンが一つのドローンに追従して群飛行したりといった協調動作を実現しています。

実証実験では見通し外になる位置関係で2キロメートルずつ離れた地点にドローンを配置し、ダムの撮影映像を中継伝送しました。地上との通信に頼らず、機体同士の通信により、電波が届かない場所でも危機回避や効率的な物資輸送を可能にすることを目指した研究開発です。

NICT 空モビリティの安全・安心を支える無線技術

高度無人機 HAPS : High-altitude platform station

機体間通信 (ドローンマッパ) ドローン同士の直接通信

機体間通信技術

ドローン見通し外長距離通信実験 (コマンドホッパー)

自律追従群飛行

コマンドホッパーによるマルチホップ見通し外通信実験 (株)建設技術研究所様との共同実験の例

スライド 24

NICT 空モビリティの安全・安心を支える無線技術

機体間通信による衝突回避 (大宮)

機体間通信による編隊飛行 (大宮)

コマンドホッパーを用いた見通し外ドローン中継通信技術 (新燃岳)

ドローンが上空を飛行

ヘリコプターとの衝突回避 (福島ロボットテストフィールド)

スライド 25

4.2 レジリエント ICT

通信が困難な場所や状況下でもネットワーク通信手段を確保するための「レジリエント ICT」技術の研究開発も進めています。

4.2.1 タフフィジカル空間レジリエント ICT 基盤技術

大規模災害時でも通信手段を確保するため、タフな物理環境下におけるレジリエント ICT 基盤技術の研究開発を進めています。東日本大震災から 14 年が経過しましたが、そのような大規模災害時でも、建物が壊れて人が立ち入れない場所でも通信を活用した作業ができる環境づくりを目指しています。

協調型ロボットサービスでは、安全な場所から人が出した指示に従い、ロボットが協調してサービスを提供します。電波が届かない場所にロボットが行ってしまうと作業ができなくなるため、電波のある場所を予測して移動指示を出し、電波状況のデータを作成しながら作業を進めます。もし一度通信が途切れても、別のロボットが近くまで行って通信を回復させることも考慮しています。目指しているのは、**make before break** (通信が切れる前に別の経路を確保) です。

この他にも、火山などの異常な動きをカメラで捉え、無線通信で伝送して解析する「映像 IoT 技術」や、インフラサウンド (人が聞こえ

ない低周波音) を検知し、気圧の変化から地殻変動を察知して地震や津波の早期発見を目指す「レジリエント自然環境計測技術」などを研究しています。

NICT タフフィジカル空間レジリエント ICT 基盤技術

大規模な災害やネットワーク障害による急激で非連続な環境変化にも適用して持続的にサービスを提供する

タフフィジカル空間情報通信基盤技術

協調型サービス

- 通信が切れる前に make 回線を確立してのサービスの継続
- データ中心の実時間通信

映像IoTとインフラサウンドの融合によるレジリエント環境計測を通じた基礎技術を確立

- さまざまな自然現象の予兆検知技術
- データを可視化、解析

レジリエント自然環境計測技術

スライド 26

レジリエント ICT の活用場面としては、プラントやトンネル、橋梁など、人の立ち入りが困難な場所でのロボット遠隔制御によるインフラ点検・補修を目指しています。そのためには、限られた環境で自律的にネットワークを構築し、不要な場所にロボットが行かないようサービス範囲を確保する必要があります。そのため、状況をセンシングし、AI 技術により最適なネットワークを構築して無線通信を実現する取り組みを進めています。

NICT タフな無線通信環境における適応無線アクセス

適用イメージ

ロボットが備えるカメラ・ライダーで制御回線の電波強度を予測

制御用無線

群ロボット

タフな環境 (人の立ち入りが困難な環境) における作業

ユースケース

- 人の立ち入りが困難な場所でのロボット遠隔制御
- プラントやインフラ (トンネル・橋梁) の点検保守
- 災害時におけるロボットを利用した作業・調査

安全なロボット制御を実現するためには、遠隔制御回線が途切れないよう、ロボットの移動経路を決める・制御回線を切り替える必要がありますが、電波は目に見えないことから難しい課題となります。

- 自律的にネットワークを構築する
- サービス範囲を自ら確保する

(適応無線アクセス・電波強度予測・低遅延中継・コヒーレント信号合成)

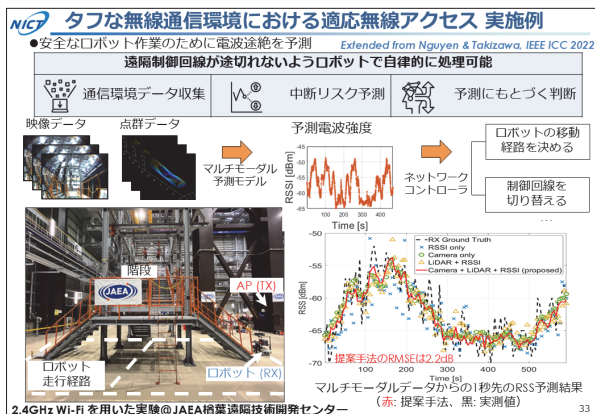
センシング + AI + 無線通信

スライド 27

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の檜葉遠隔技術開発センターでの実験では、階段近くの反射が多い複雑な環境でも通信の確立に成功しました。ロボットからの映像データや LiDAR で撮った点群データを無線通信で別の場所に送り、そこで解析して動作指示を出すシステムを実証しています。

そのために必要となるのが「予測電波強度」です。右側に複雑な図がありますが、右下のグラフで赤い線が予測結果を示しています。その他の線はカメラのみなどによる結果です。黒い波線は実測値ですが、予測結果はそれと大きく変わらない、あるいは、カメラのみ

の場合よりもしっかりと予測できていることが分かります。現在はこのような実験を通して手応えを感じているところです。



スライド 28

4.2.2 低遅延無線のカバレッジを拡大する非再生中継通信技術

「タフフィジカル」という要素の中に、もう一つ「低遅延無線」というキーワードがあります。これは、途中で弱くなった信号を中継局で増幅する際に生じる遅延に関するものです。従来の再生中継では、いったん信号をデジタルに変換し、再びアナログに戻す処理を行うため、遅延が増えてしまいます。これに対して、すべてを非再生方式とし、デジタルに戻さずに増幅を行うことで遅延を低減します。その結果、例えば 1 ミリ秒という制約がある場合でも、通信のカバレッジを広げることが可能になります。このような低遅延化のための研究開発を進めています。

これには自己干渉抑圧を確実にしながら、低遅延の信号処理を実現する技術も含まれています。赤字で示しているように、中継処理が 3.2 マイクロ秒の中継器を開発した事例や、5G NR 信号において 2 マイクロ秒未満の処理遅延を確認した事例があります。これにより、本来であれば直接通信ができないトンネル内でも、外側に中継器を設置することで通信が可能になります。しかも外側に設置するため通信距離が長くなり、その分カバレッジを広げることができます。

右下のヒストグラムをご覧ください。中継がない場合は横軸の電波強度が非常に小さい領域の数値(赤)が高くなっていますが、中継を行うことで電波強度がある程度高い領域の数値が増加していることが分かります。

さらに、この技術は作業や点検用途に限らず、3GPP において「network-controlled repeater」という項目があるため、企業の方々と協力して文書を作成し、標準仕様策定に向けた取り組みも行っています。



スライド 29

4.3 ネットワーキング

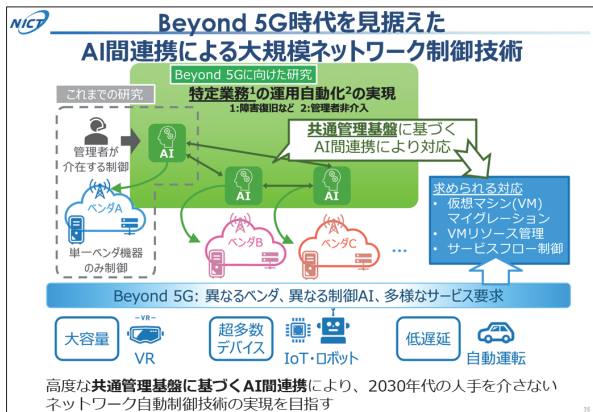
続いて、無線の話から少し離れてネットワークングについてお話しします。

4.3.1 計算機能と AI を融合したネットワークアーキテクチャ

将来的に、ネットワークのオペレータは減少していきます。人員も減っていく一方で、IoT 機器は増加し続けています。その結果、1 人あたりが操作・監視しなければならぬ機器の数は膨大に増えていくという現状があります。そこで、省力化を目指して、複数の AI を組み合わせることで協調作業させ、通信品質を安定させる取り組みを進めています。

安定化の一つの方法として、障害が発生したときの復旧を自動化しています。ネットワークサービスを提供する機能をコンピュータにインストールしていますが、障害時には別の場所に移す必要があります。これを事前に予測し、実際に事故が起きたときには迅速に回避する仕組みを過去のデータを見ながら適切に判断して実行します。こうした運用自動化によって、オペレータの負担を徐々に軽減し、AI 中心の運用へと移行していくというストーリーを描いています。そして、その AI を中心に据えたオペレーションを企業の方々と共同で実施していく取り組みを進めています。

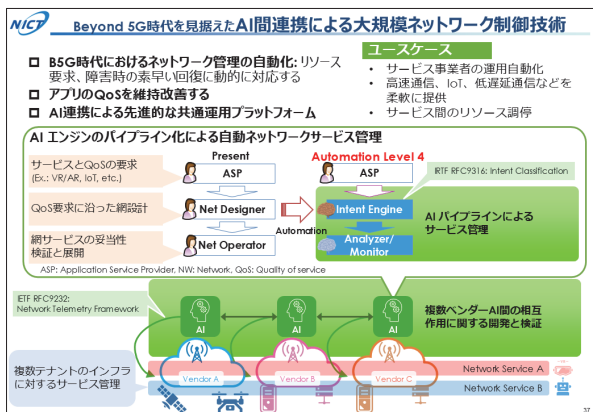
目指しているのは、5G や Beyond 5G において提供される、大容量・低遅延・超多数デバイス接続といった異なる特徴を持つ多様なサービスに対して、それぞれに最適化されたネットワークオペレーションを実現することです。



スライド 30

自動ネットワークサービス管理も重要な要素です。ここではインテントエンジンの実現が必要になります。お客さまが VR サービスや IoT サービスをやりたいと言っても、通信の詳細な要求まで指定することは困難です。組織内でもネットワークに詳しくない人から「どうにかしてほしい」という要求が多く寄せられます。そこで、人の意図（インテント）を理解してネットワークサービスにマッピングする作業を自動化する取り組みが必要だと考えています。

さらに、インテントエンジンについては IRTF (Internet Research Task Force) で標準化に向けて議論しています。また、ネットワークのテレメトリ（混雑状況、故障、機器の障害などの情報収集）についても IETF (Internet Engineering Task Force) などの場で標準仕様策定を進めています。



スライド 31

4.4 光ネットワーク・電波融合技術

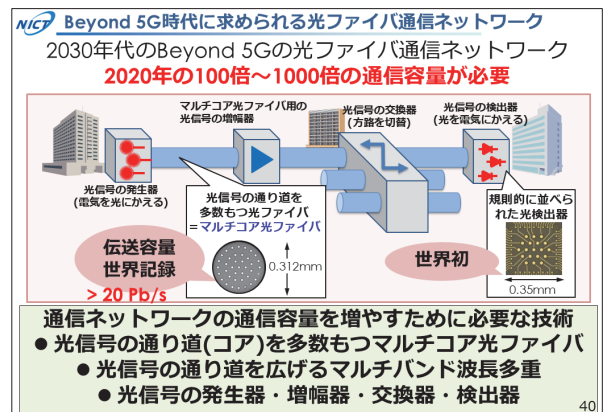
最後が光技術です。光通信技術を用いたネットワークと、光と電気、光と電波を融合する技術を紹介します。

4.4.1 マルチコア光ファイバ通信

光ファイバ通信において、2030年には現在の100倍以上、さらに2030年代から2040年代にかけては1000倍のデータが流れると予測されています。現在の技術では対応できないため、1000

倍規模の研究開発を進める必要があります。

NICT が取り組んでいる方法の一つが、マルチコア光ファイバです。これは、からしレンコンのようなイメージで、ファイバの中に複数のコアがある構造です。それぞれのコアに別々の信号を入れることで、単純に言えばコアの数だけ通信容量を増やすことができます。受信側では、空間的に分離された信号を同時に一つのデバイスで検波して電気に戻すアレイ型検出器を開発しています。これにより、大容量化と同時に省電力化、小型化を実現しています。



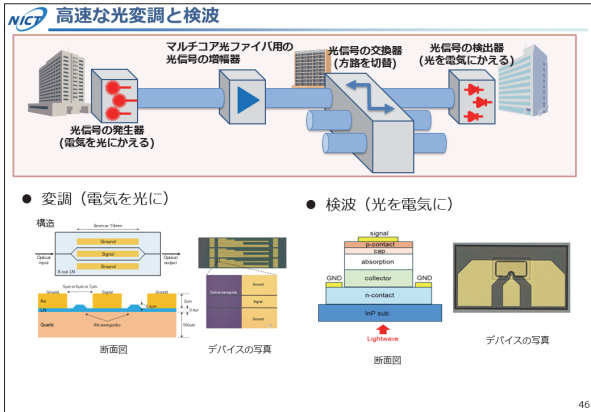
スライド 32

波長多重を用いた場合の光ファイバ通信の伝送容量と、商用サービスでの容量の推移を見ると、研究レベルと商用システムは徐々に差が縮まっていますが、ある時点を超えると、1本の光ファイバで送れる限界を上回る予測になります。ファイバの中に大量かつ強力な光を投入すると、発熱によってファイバが損傷したり、人にとって安全性の問題が生じたりするため、この課題を解決する必要があります。そこで私たちは、先ほども触れたマルチコア光ファイバ通信の研究開発を進めています。

この分野では、私たちの研究所や NICT のファンディングを受けた研究者たちが、別々に、あるいは共同で研究開発を行っており、毎秒のビット数で 100 テラ、1 ペタ、10 ペタといった大きな節目の記録は日本から発信してきました。そして現在、赤い星印で示した 20 ペタの世界記録を私たちが保持しています。

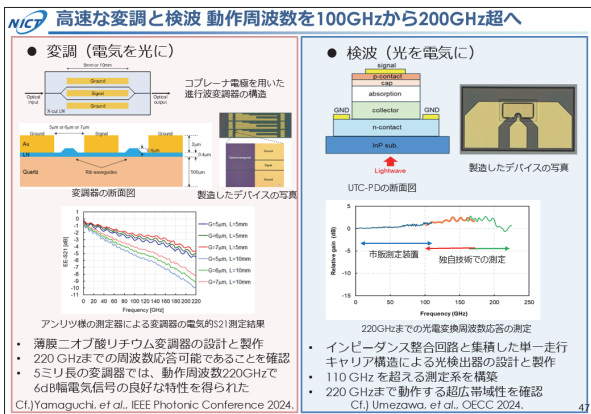
ただし、この光ファイバは現在世の中に敷設されている直径 0.125 ミリメートル (125 ミクロン) のファイバよりも太く、そのため現時点では実用化に至っていません。そこで、この直径を既存の細さと同等にしながらかコアを高密度に詰め込むことで、実用化を早める取り組みを国内で進めています。

換し、光ファイバ中を伝送させています。途中で信号を増幅し、経路を切り替え、端点で検波して電気信号に戻します。この過程で使用される光変調器や検波器といったデバイスの動作周波数を速くすれば、より多くの信号を流すことができます。



スライド 38

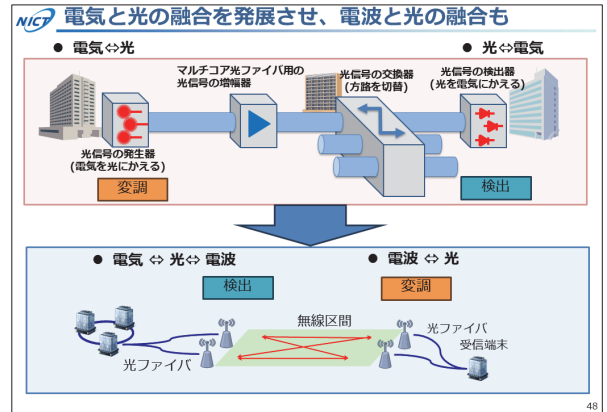
現在の商用製品は約 60GHz で動作していますが、これを 200GHz まで高速化する研究開発を進めています。光変調器についてはアンリツ様の測定器を使用して電気特性を評価し、200GHz での動作を実証しました。検波器についても独自技術により 200GHz までの検波を実現しています。自分たちで測定系を組んで確認できてはいますが、より安定な測定システムが望まれます。このような送受信デバイスの高速化により、さらなる大容量通信が可能になると考えています。



スライド 39

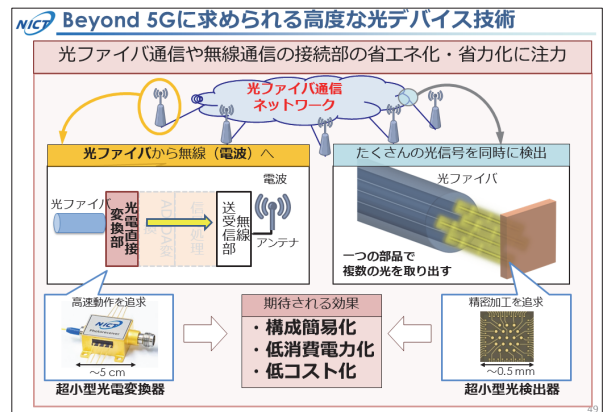
4.4.4 電気と光の融合から電波と光の融合へ

変調と検出について光ファイバを中心にお話してきましたが、途中に無線区間が挟まる場合もあります。具体的には、まず信号を検出し、電気信号を光ファイバに乗せ、さらに電波に変換し、再び光に戻すといった流れになります。このように光と電波を自在に変換・制御する取り組みを進めています。



スライド 40

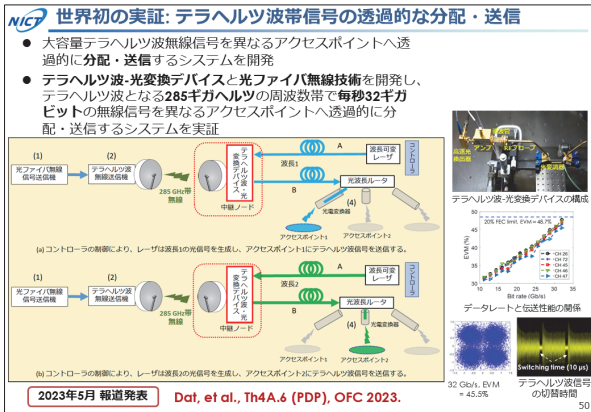
光ファイバ信号を無線に変換する方法には「デジタル処理を行わない方式」を採用しています。光电直接変換によってアナログ信号のまま無線信号へと変換することで、変換器の小型化を実現しようとしています。できるだけ多くの信号を同時に取り出す部品を内製し、構成の簡易化、消費電力の削減、コストの削減を進めています。



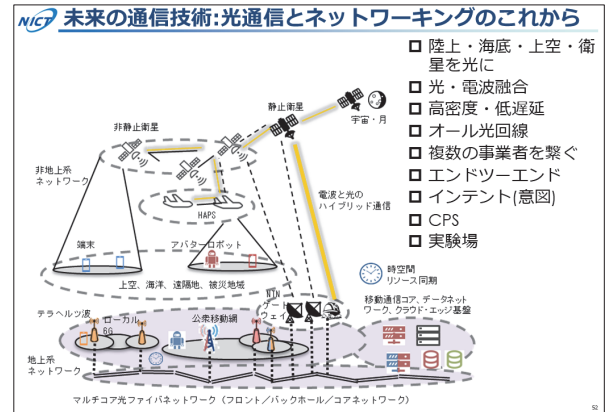
スライド 41

周波数を高めれば通信速度は向上しますが、一方で到達距離が短くなり、障害物があると通信できないという課題があります。これは 100GHz を超える場合に限らず、数十 GHz 帯でも同様です。そこで、中継区間で光ファイバ通信に切り替えて距離を伸ばして、障害物のない場所まで信号を運び、最後に電波に変換するという方法も検討しています。

光波長ルータという技術では、波長の違いにより異なる方向に信号を出力するアレイドウェーブガイドグレーティング (アレイ導波路型回折格子:AWG) というデバイスを使用しています。例えば、波長 A のときは斜め 7 時の方向に、異なる波長のときは 6 時の方向に信号を出力することで、空間的に信号を振り分ける実験を行っています。



スライド 42



スライド 43

5 将来の展望

将来の展望について、これまでお話してきた内容をまとめながら、今後の方向性を述べます。

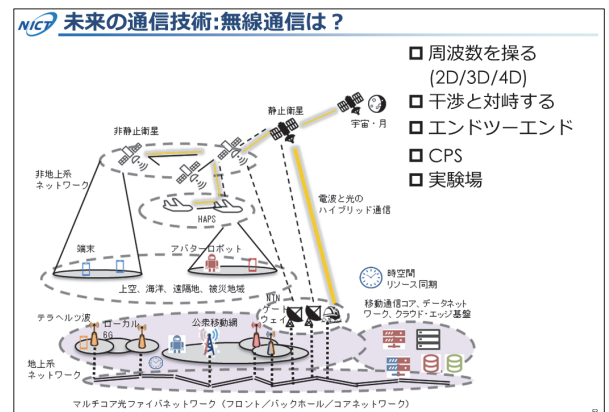
まず光通信とネットワークングについてですが、電波の技術は今後も引き続き発展させていく必要があります。その一方で、光を利用できる場面では積極的に光通信を導入していくことが重要だと考えています。具体的には、陸上や海底だけでなく上空や衛星通信にも光を適用し、最終的には「月まで通信」を目指します。また、電波との組み合わせも不可欠であり、末端部分では電波が必要となるため、光と電波を簡単に相互変換できる技術の開発が求められます。

高密度化や低遅延化も大きなテーマです。一つの光ファイバ内にできる限り多くの信号を詰め込むこと、また光ファイバよりも空間伝送のほうが早いという物理的特性を活かし、低遅延を実現することが必要です。さらに、途中で電気変換を省くことも有効です。こうした取り組みは一つの事業者内だけでは限界があるため、複数の事業者を連携させ、エンドツーエンドでネットワークを最適化していく必要があります。その際には利用者の意図を理解してネットワーク構成に反映させる仕組みを整え、サイバー空間で検証できる環境を構築することが重要です。加えて、現実世界での実験場の整備も欠かせません。

無線通信に関しては周波数の適切な運用が鍵となります。必要な場面で必要な周波数を使い分ける「適材適所」の考え方が重要です。さらに、3次元の周波数制御(地上・上空を含む空間的な周波数運用)に加え、時間軸を含めた4次元的な制御も視野に入れるべきです。

また、干渉への対応も課題です。現在は時間や場所を分けて異なる事業者が周波数を利用する仕組みですが、将来的には同一周波数を動的に共有しながら干渉を抑えつつ、双方が利用できる技術が求められます。

光と電波を組み合わせたエンドツーエンド通信は今後も変わらず重要です。ただし、この分野の実証実験は光通信以上に検証コストが高くなるため、サイバー空間を活用してコストを削減する仕組みを整える必要があります。ただし、サイバー空間だけでは把握できない課題も多いため、現実の実験場との両立が不可欠です。



スライド 44

6 まとめ

本日は、光、無線、ネットワークングの領域における私たちの研究開発について紹介しました。

NICT Beyond 5G 時代に向けたネットワーク研究

ネットワーク研究所は、SDGsなど2030年代に期待される社会を実現するため、Beyond 5Gで望まれる広帯域広域通信や低遅延、高信頼を叶えるべく、光・無線（地上・衛星）・ネットワーク等の基礎・システム技術を高める研究開発をしています。産官学連携で技術革新を進め、新たな技術の標準化や成果の普及、社会実装を目指しています。

スライド 45

私たちの研究所だけでは実現できないことばかりですので、産業界の皆さま、学术界の皆さまとの協力をより一層強化しながら、NICTの役割を果たしていきたいと考えています。もし私たちが独りよがりな研究をしているように見える部分があれば、ぜひご指摘ください。その理由をしっかりと学び、改善しながら、私たちの役割を果たしていきます。皆さまとのコミュニケーションを通じて相互理解を深められれば幸いです。

技術の芽を確かな流れにしていくためには皆さまとの連携が不可欠です。基礎の段階から分野全体を推進していけるよう、これからも取り組みを続けていきます。

NICT 最後に: Beyond 5G 時代に向けたネットワーク研究

- Beyond 5G、6Gの時代に向けて産業界・学术界の皆様との協力をいっそう強化しながら、NICTの役割をしっかりと果たしていきたい
- さらに先を見据えた技術の芽をしっかりとした流れにしていくために産学官の皆様と連携しながら基礎基盤の段階から分野推進をしていきたい

スライド 46

講演者紹介



原井 洋明（はらい ひろあき）

大阪大学大学院 基礎工学研究科 物理系情報工学分野で博士号(工学)を取得

- 1998年 郵政省通信総合研究所(現・NICT)に入所
ネットワークアーキテクチャや光ネットワーク、
モバイルネットワーク分野の研究開発と推進に従事
- 2008年 NICT ネットワークアーキテクチャグループリーダーに就任
- 2011年 同研究室長に就任
- 2016年 ネットワーク基盤研究室長に就任
- 2018年 総合テストベッド研究開発推進センター長に就任
- 2021年～ NICT ネットワーク研究所長

次世代 eCall(emergency call)向け試験ソリューション開発

中村彰一 Shoichi Nakamura, 藤田研二 Kenji Fujita, 竹本健二 Kenji Takemoto, 井上若菜 Wakana Inoue,
山本竜司 Ryoji Yamamoto, 奈良真治 Shinji Nara, 市川悠斗 Yuto Ichikawa

[要 旨] 欧州および各国では、自動車事故発生時に緊急通報を行うことで人命救助活動の迅速化を目的とした eCall(emergency call)システムが以前より運用されている。モバイルネットワークが W-CDMA/GSM から LTE/NR へ移行する流れの中で、NG eCall(Next Generation eCall)規格が新たに策定され、欧州では 2026 年 1 月より NG eCall による型式認定が義務化される。車載モジュールは型式認定に対応するため、NG eCall 適合試験(EN17240:2024 規格)に合格する必要がある。eCall は緊急通報を用いる仕組みであるため、実際のモバイル通信回線を使用した事前確認が困難であり、試験用シミュレータ環境が不可欠となる。アンリツは、NG eCall 適合試験(EN17240:2024 規格)に準拠した NG eCall 試験ソリューションを提供してきた。一方、欧州ではカバレッジ拡大を目的として、NG eCall と従来の eCall を組み合わせた Hybrid eCall への需要が高まっている。これに伴い、試験用シミュレータ環境に対する要求も増加している。アンリツは業界で初めて、Hybrid eCall 適合試験(EN18052:2025 規格)に対応した試験ソリューションを提供した。

1 まえがき

eCall システムは欧州で開発が始まり、その後、各国が欧州規格をベースに独自のシステムを構築してきた。eCall システムには複数の規格が存在するが、基本的な流れは以下のとおりである。eCall 実行時、車載システム(IVS)と緊急通報センター(PSAP)の間では緊急通報が使用される。

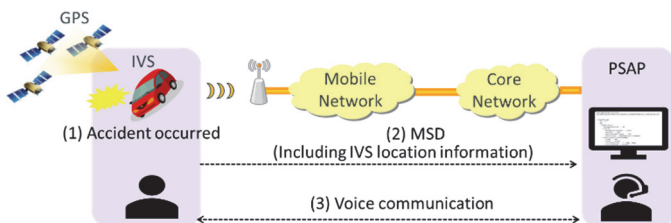


図1 eCall 概要

(1) 事故発生

事故発生時、eCall 搭載車両は強い衝撃などをトリガーに、自動的に緊急通報センターへ緊急通報を開始する。

(2) MSD 送信

車両の位置情報を含む事故情報 MSD(Minimum Set of Data)を緊急通報センターへ送信する。緊急通報センターは、受信した情報を救助活動に活用する。

(3) 音声通話

MSD 送信完了後、車両に搭載されたマイク・スピーカを用いて、緊急通報センターとの音声通話を開始する。

欧州 eCall では、通信方式として W-CDMA/GSM を使用し、MSD や音声データの送受信には PSTN(公衆交換電話網)が利用される。欧州では 2018 年 1 月から、新規登録車への eCall 搭載

が義務化されている*。

次世代システムである NG eCall(Next Generation eCall)は、従来の eCall に代わる仕組みとして開発が進められ、2026 年 1 月から NG eCall での型式認定が義務化される。NG eCall では、通信方式に LTE(Long Term Evolution)/NR(New Radio)を採用し、緊急通報センターとの通信に SIP(Session Initiation Protocol)および RTP(Real-time Transport Protocol)を使用する。これにより、音声品質やデータの信頼性が向上している。

一方、欧州では LTE ネットワークの未整備地域が残っていること、さらに W-CDMA/GSM の停波が延伸していることから、NG eCall と従来の eCall を組み合わせた Hybrid eCall 技術への注目が高まっている。

eCall は緊急通報を扱う性質上、実際のモバイル通信回線を使用した事前確認が困難であるため、自動車メーカー、車載器ベンダー、モジュールベンダーから試験用シミュレータ環境が強く求められている。

こうしたニーズに応えるため、以下に記載する eCall 試験ソリューションを開発・提供してきた。eCall, NG eCall, Hybrid eCall はいずれも欧州で規格化されたシステムであるが、欧州規格をベースに各国独自のシステムも開発されている。その一例として、韓国の South Korean eCall が挙げられる。

表1 eCall 試験ソリューション Support 状況

地域	名称	Support 状況
欧州	eCall	Supported
欧州	NG eCall	Supported
欧州	Hybrid eCall	Supported
韓国	South Korean eCall	Supported

近年特に注目されている欧州の NG eCall および Hybrid eCall に焦点を当て、これらの開発の詳細について説明する。

※ 2026年1月 欧州NG eCall義務化開始により、欧州eCall搭載義務は廃止

2 規格

欧州における eCall, NG eCall, Hybrid eCall の規格は、CEN (欧州標準化委員会)と ETSI (欧州電気通信標準化機構)によって策定されている。車載モジュールベンダーは、モジュールに実装された eCall 機能がこれらの規格に適合していることを証明するため、CEN/ETSI が定める適合試験(Conformance Test)に合格する必要がある。適合試験の規格は、車載システム向け試験項目と緊急通報センター向け試験項目に分かれている。NG eCall および Hybrid eCall 試験ソリューションを開発するにあたり、これら両方の試験項目を満たす製品を実現した。

2.1 EN17240:2024 規格

EN17240:2024 は、欧州 NG eCall の適合試験規格である。2026 年 1 月から新規登録車への NG eCall 搭載が義務化されるため、車載システムは、車両の型式認定試験までに EN17240:2024 の車載システム試験項目に合格する必要がある。

2.2 EN18052:2025 規格

EN18052:2025 は、欧州 Hybrid eCall の適合試験規格である。2025 年 12 月現在、Hybrid eCall はまだ義務化はされていないが、カバレッジ拡大に対して効果があることからメーカーの関心は高く、試験需要も増加している。EN17240:2024 の試験は LTE セルのみが存在する環境で実施されるのに対し、EN18052:2025 の試験は、LTE セルと、W-CDMA セルまたは GSM セルのどちらかが存在する環境で実施される。

3 市場・顧客

eCall 試験ソリューションは、主に車載システム適合試験(例: EN17240, EN18052)を目的として利用されている。

ユーザー:自動車メーカー、車載器ベンダー、モジュールベンダー

使用目的 1:車載システム適合試験(EN17240, EN18052)

使用目的 2:車載システム eCall 機能試験(モビリティ、準正常試験)

使用目的 3:車両型式認証試験

4 eCall 試験ソリューション全体構成

eCall 試験ソリューションは、緊急通報センターとしての機能をシミュレーションする MX703330E と、モバイル通信回線の挙動をシ

ミュレーションする疑似基地局装置(MD8475A/B, MT8000A, MX800070A), および試験実施を自動化するツールである MX847503A で構成される。

MX703330E は、各種 eCall 規格に対応した試験機能を備えており、ユーザーは対象となる eCall 規格を選択することで、指定された規格に基づく試験を実施することができる。

疑似基地局装置として、W-CDMA/GSM/LTE に対応した MD8475B と、LTE/NR に対応した MT8000A を使用している。

MX847503A は、試験のマニュアル操作や PASS/FAIL 判定を自動化するツールであり、各種テストシーケンスをパッケージ化したテストパッケージを実行することで、試験実施を自動化できる。NG eCall や Hybrid eCall を含む車載システム適合試験に対応したテストパッケージ製品を開発している。

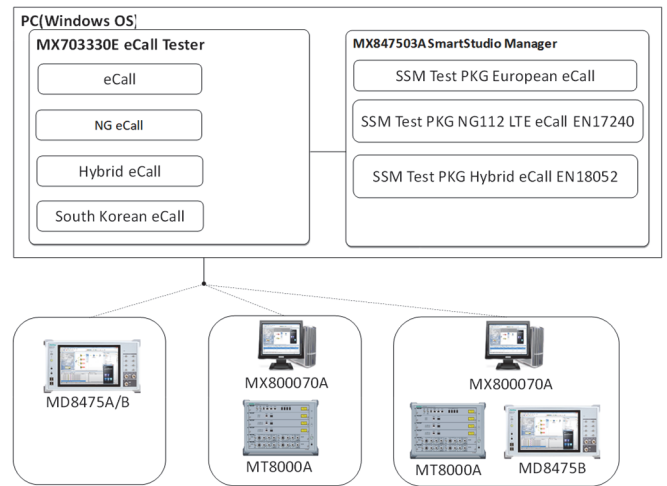


図2 eCall 試験ソリューション全体図

5 NG eCall 試験ソリューション

NG eCall 適合試験(EN17240:2024 規格)に準拠した NG eCall 試験ソリューションを実現するためには、以下の 3 つの機能が技術的要件となる。

- ・疑似基地局機能
- ・緊急通報センター NG eCall 準正常機能
- ・緊急通報センター NG eCall In-band 機能

5.1 疑似基地局機能

車載システムが LTE セルに接続する際、基地局は車載システムに対して、LTE セルとの接続に必要な制御信号を送信する。この制御信号は、報知情報(Broadcast Information)と呼ばれている。報知情報には、3GPP TS36.331 Release14 以降で定義される「eCall over IMS Supported(ECL)」というパラメータが含まれてい

る。ECL パラメータは、LTE セルが NG eCall 接続をサポートしているか否かを示す。NG eCall 適合試験では、この ECL パラメータの値に応じて車載システムの動作が変化することを確認する試験項目が存在する。これに対応するため、疑似基地局装置に対して、ECL パラメータを設定した報知情報を送信できる機能を実現した。

車載システムが LTE セルに対して接続を要求した際に、LTE セル側から接続が拒否される場合がある。NG eCall 適合試験では、この接続拒否が発生した場合の車載システム動作を確認する試験項目がある。この試験機能に対応するため、疑似基地局側で接続要求を拒否する機能を実現した。図 3 は参考例である。車載システムからの接続要求 (NAS: PDN Connectivity Request メッセージ) に対して、疑似基地局側で接続拒否 (NAS: PDN Connectivity Reject メッセージ) を返すことで、接続を拒否している。

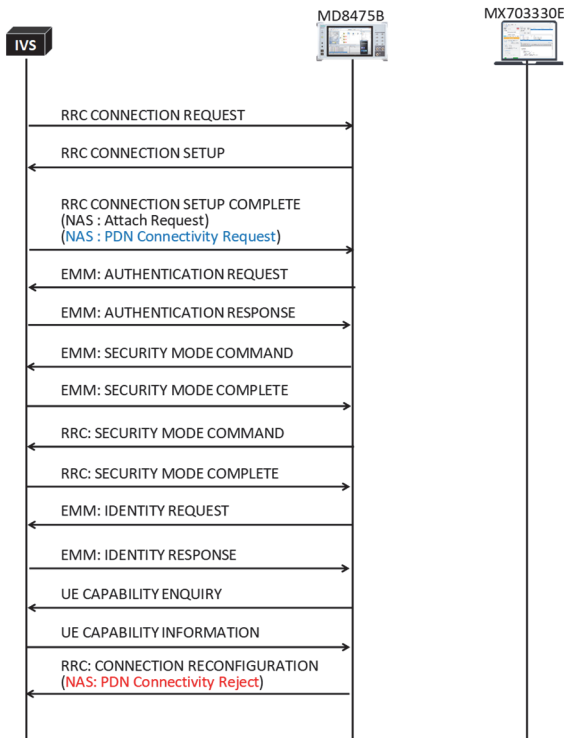


図 3 接続拒否機能

5.2 緊急通報センター NG eCall 準正常機能

車載システムが緊急通報センターに対して NG eCall 接続を要求した際、緊急通報センター側から接続が拒否される場合がある。NG eCall 適合試験では、この接続拒否が発生した場合の車載システム動作を確認する試験項目があり、この試験は「NG eCall 準正常試験」と呼ばれている。車載システムから緊急通報センターへの NG eCall 接続要求は SIP で行われる。この試験機能に対応するため、MX703330E において NG eCall 準正常試験機能を実現した。図 4 は、NG eCall が正常に接続する際のシーケンス図である。

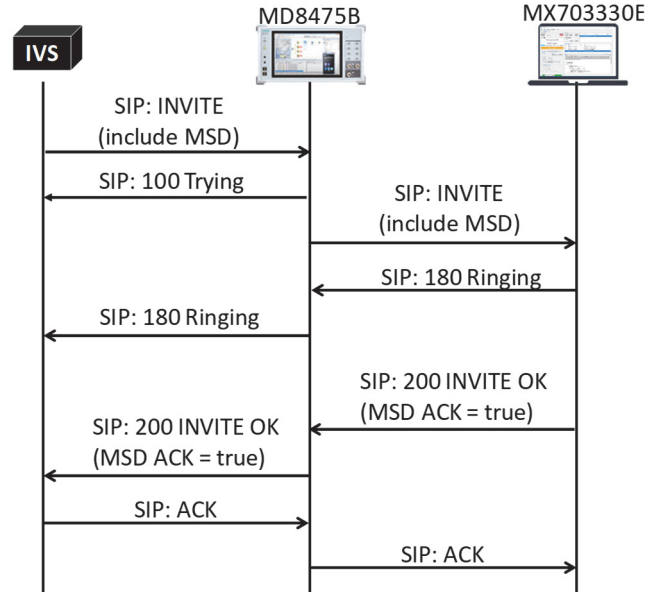


図 4 NG eCall 正常シーケンス

図 5 は、NG eCall 準正常機能を用いた場合のシーケンスの参考例である。車載システムからの NG eCall 接続要求 (SIP: INVITE) に対して、緊急通報センター側が SIP: 486 Busy を返すことで、接続を拒否している。

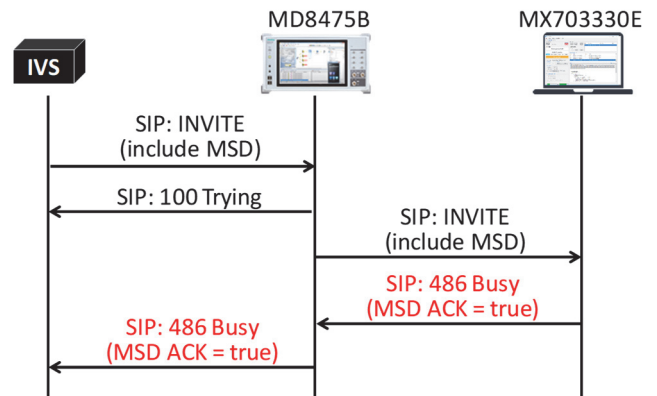


図 5 NG eCall 準正常シーケンス

5.3 緊急通報センター NG eCall In-band 機能

車載システムは従来型 eCall と NG eCall の両方に対応している一方で、緊急通報センター側は従来型 eCall のみ対応している場合がある。車載システムは、まず NG eCall を用いて緊急通報センターとの接続を試みるが、緊急通報センターから特定の接続拒否メッセージを受信すると、LTE ネットワークを使用しつつ、従来型 eCall に切り替えて通信を継続しようとする。この場合、車載システムおよび緊急通報センターは、従来型 eCall で使用される「in-band modem」を用いて MSD を音声データに変調し、RTP にマッピングして送信する。この動作は「NG eCall In-band」と呼ばれる。

NG eCall 適合試験には、車載システムの NG eCall In-band 機能が正しく動作することを確認する試験項目が含まれている。この試験項目に対応するため、MX703330E では NG eCall In-band 機能を実現した。図 6 に、NG eCall から NG eCall In-band に移行する際の車載システムと MX703330E の動作を示す。

6 Hybrid eCall 試験ソリューション

Hybrid eCall 適合試験 (EN18052:2025 規格) をシミュレーション環境で実施するためには、LTE, W-CDMA/GSM, NR に対応した疑似基地局装置が必要である。W-CDMA/GSM/LTE 対応の MD8475B と、NR/LTE 対応の MT8000A を組み合わせることで、規格を満たすシミュレーション環境を構築した。

Hybrid eCall では、車載システムから緊急通報センターに対して eCall 接続要求と NG eCall 接続要求が混在する。そのため、緊急通報センターとして必要な要件は、両方の接続要求を同時に待ち受けることである。この要件に対応するため、MX703330E において同時待ち受け機能を実現した。また、ユーザーが緊急通報センターの接続状態を分かりやすく確認できるようにするため、MX703330E の PSAP Status 画面に接続状況を表示する機能を実現した。



図 7 MX703330E PSAP Status 画面

7 NG eCall/Hybrid eCall 適合試験 テストパッケージ

NG eCall 適合試験 (EN17240:2024 規格) および Hybrid eCall 適合試験 (EN18052:2025 規格) には多数の試験項目があり、各試験手順は複雑である。試験自動化ツール MX847503A は、MX703330E を外部制御することができる。

MX703330E の GUI 操作手順および試験確認手順をテストケースとして作成し、MX847503A 上で実行することで、eCall 試験の自動化が実現できる。この MX847503A 用テストケース集をテストパッケージと呼んでいる。NG eCall 適合試験 (EN17240:2024 規格) および Hybrid eCall 適合試験 (EN18052:2025 規格) に対応したテストパッケージ製品を開発した。

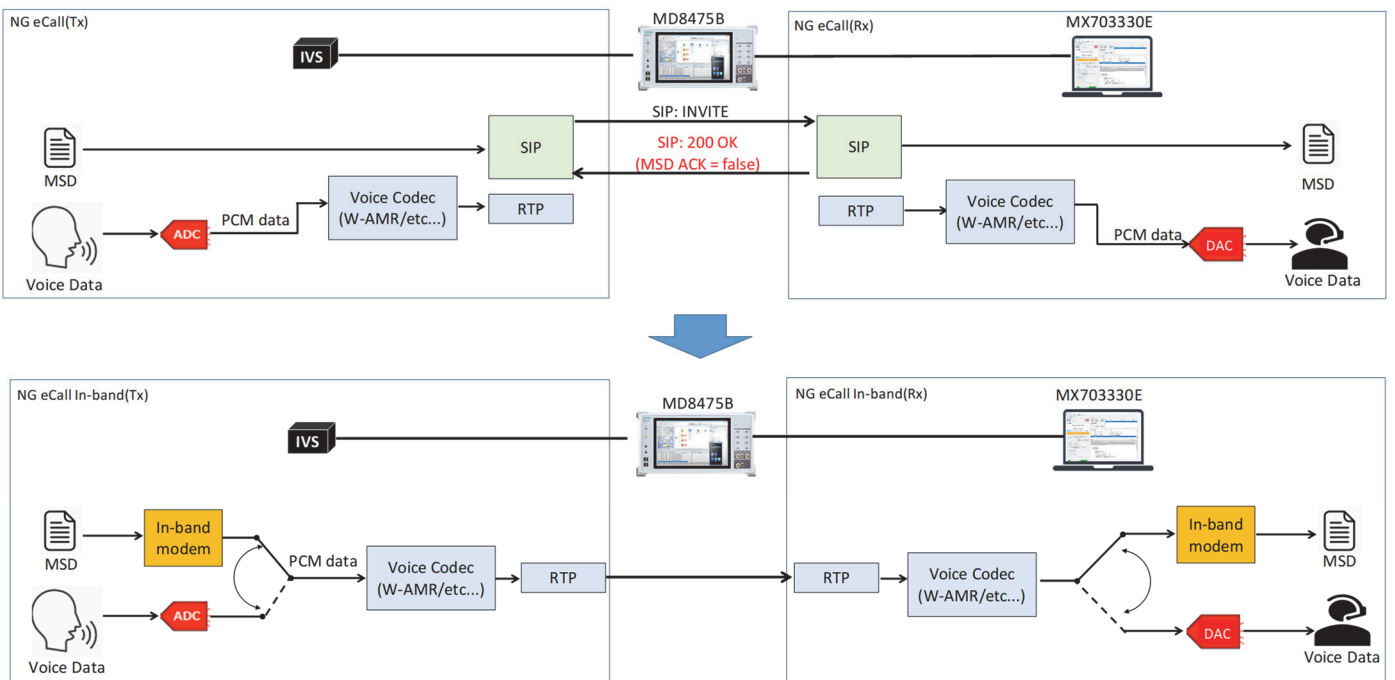


図 6 NG eCall In-band 動作

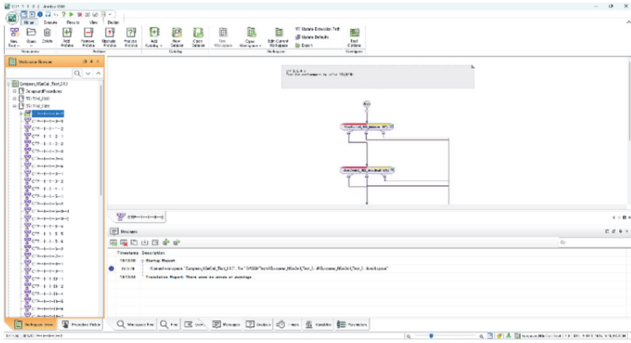


図8 テストケース実行画面(EN17240:2024)

テストパッケージ製品では、テスト結果をログデータとして保存し、そのログデータからテストレポートを生成することができる。レポートはPDF形式で出力・保存することができる。

TS17240_2024 Test Report

Test Title:CTP--1-1-18--7
 Model Name:
 Test Date:2025/07/25 11:43:04
 Author:
 Test Result:FAIL

No.	Test Item	Result	Remark
1	Initiate an automatic eCall	-	-
2	IVS sends a SIP INVITE message, which contains MCD with additional data from Euro NCAP TB 040:2022	-	-
3	Answer the call	-	-
4	format for the additional data complies with Euro NCAP TB 040:2022, clause 6.3.2 and Annex A 2	Pass	
5	content of the oid field is set to 8.1	Pass	MSD No.1
6	contents of the named mandatory additional data fields are correct and comply with Euro NCAP TB 040:2022, clause 6.3.2 and Annex A 2 contents of the named optional field is correct (if included) and complies with Euro NCAP TB 040:2022, clause 6.3.2 and Annex A 2	Fail	MSD No.1

MSD Items:

Field	Data	Remark
msdVersion	3	
messageIdentifier	1	
automaticActivation	TRUE	
testCall	FALSE	
positionCanBeTrusted	TRUE	
vehicleType	passengerVehicleCategoryM1	
isocm1	NNP	
isocvda	VDEVDG	
isocvismodelyear	Y	
isocvisgeplant	A123456	
gasolineTankPresent	TRUE	
dieselTankPresent	FALSE (Default)	
compressedNaturalGas	FALSE (Default)	
liquidPropanGas	FALSE (Default)	
electricEnergyStorage	FALSE (Default)	
hydrogenStorage	FALSE (Default)	
otherStorage	FALSE (Default)	
timestamp	1574205301	
positionLatitude	473882268	
positionLongitude	41822528	
vehicleDirection	30	
latitudeDeltaM1	0	
longitudeDeltaM1	0	

図9 テストレポート(EN17240:2024)

8 むすび

欧州で主流となる NG eCall および Hybrid eCall の試験需要に応えるため、アンリツは、NG eCall 適合試験 (EN17240:2024 規格) および Hybrid eCall 適合試験 (EN18052:2025 規格) に対応した eCall 試験ソリューションを開発した。さらに、ユーザーが容易に適合試験を実施できるよう、試験自動化ソリューションであるテストパッケージ製品を開発した。

eCall は、自動車事故発生時の迅速な救助活動を実現する重要な仕組みである。今後は、世界各国で交通インフラの高度化が進む中、新たな規格の策定・導入が一層加速することが予想される。

アンリツは、こうしたグローバルな安全要求と規格動向を先取りし、試験ソリューションを提供することで、モビリティ社会における安全性の実現に貢献していく。

参考文献

- 1) EN17240:2024 Intelligent transport systems - ESafety - ECall end to end conformance testing for IMS packet switched based systems
- 2) EN18052:2025 Intelligent transport systems - ESafety - ECall end to end conformance testing for eCall H LAP in hybrid circuit switched/packet switched network environments

執筆者



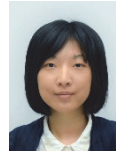
中村 彰一
 通信計測カンパニー
 IoT テストソリューション事業部
 商品開発部 第1 チーム



藤田 研二
 通信計測カンパニー
 IoT テストソリューション事業部
 商品開発部 第1 チーム



竹本 健二
 通信計測カンパニー
 IoT テストソリューション事業部
 商品開発部 第1 チーム



井上 若菜
 エンジニアリング本部
 ソフトウェア技術部



山本 竜司
 エンジニアリング本部
 ソフトウェア技術部



奈良 真治
 エンジニアリング本部
 ソフトウェア技術部



市川 悠斗
 エンジニアリング本部
 ソフトウェア技術部

告知

200G/Lane 用 60 GHz 光サンプリングオシロスコープの開発

横山 裕樹 Yuki Yokoyama, 松田 修一 Shuichi Matsuda, 岸田 桂輔 Keisuke Kishida, 高須 涼太 Ryota Takasu

[要 旨]

データセンタの大容量化に伴う高速な伝送に対応するため、800GbE や 1.6TbE の高速イーサネット規格に対応した光トランシーバ試験の需要が急速に高まっている。IEEE 802.3dj で規格化が進む最大 120 Gbaud の PAM4 信号を 4 レーン同時に測定可能な 60 GHz 光サンプリングオシロスコープ MP2110A-080 を開発した。評価の結果、光リファレンスレシーバに要求される周波数応答に対する振幅偏差は 0.22 dB であった。また、-1 から -4 dBm の入力パワー範囲における主要測定項目の変化は、TDECQ で 0.25 dB 以下、Outer ER で 0.07 dB 以下、Linearity で 0.5% 以下であった。理想特性への高い追従性と高精度な試験を実現する。

1 まえがき

AI や機械学習を活用したクラウドコンピューティングサービスの普及に伴い、データセンタで取り扱う情報量は急速に増大している¹⁾²⁾。これに対応するため、データセンタにおけるサーバやネットワーク機器の伝送容量拡大が急務となり、高速イーサネットでは従来の速度を超える 800GbE や 1.6TbE への移行が進んでいる。特に、1 レーンあたり 106.25 Gbaud PAM4 (以下、本文では 106 Gbaud と記載) で動作する OSFP (Octal Small Form Factor Pluggable) フォームファクタを採用した光トランシーバの需要が、2025 年以降急増すると予測されている。物理レイヤの総ビットレートは約 212.5 Gbit/s であり、イーサネット規格では、FEC などのオーバーヘッドを考慮して 1 レーンあたり 200 Gbit/s 級 (200G/Lane) として扱われる。

高速光トランシーバの開発・製造においては、信号波形の品質評価や製造試験のために光サンプリングオシロスコープ (以下、Scope と記載) が用いられている。アンリツは 2017 年、光トランシーバの開発・製造用途に向けて、25 Gbit/s 4 チャンネル BERT (Bit Error Rate Tester) と Scope を一体化した MP2110A BERTWave™ を開発した³⁾。その後も、PAM4 (4 Pulse Amplitude Modulation) 信号解析機能や、53 Gbaud 対応の CRU (Clock Recovery Unit) オプションを商品化するなど、製造市場を中心に高速光トランシーバ試験の需要に対応するソリューションを提供してきた⁴⁾。

しかし、従来の Scope は最大 60 Gbaud までの測定に限られており、より広帯域が求められる 106 Gbaud の信号を出力する 800GbE や 1.6TbE 用光トランシーバには対応できていなかった。そこで筆者らは、MP2110A の Scope を帯域拡張し、最大 120 Gbaud の PAM4 信号を 4 レーン同時に測定可能な 60 GHz

帯域の 4ch Scope オプション (以下、本文では MP2110A-080 と記載) を開発した。

本オプションの開発にあたり、106 Gbaud 信号の測定を実現するため、光帯域 60 GHz の O/E (Optical to Electrical) 変換モジュールと電気帯域 80 GHz のサンプラモジュールを新規設計した。これらの技術により、106 Gbaud の高速光トランシーバにおいても、光出力波形測定を 4 レーン同時に実施できるようになった。

本稿では、これら要素技術の設計における要点を解説するとともに、高速光トランシーバで用いられる PAM4 信号の解析手法を示す。あわせて、本オプションによる測定結果の妥当性を報告する。

2 装置概要

2.1 概要と構成

図 1 に、開発した MP2110A-080 の外観を示す。従来の MP2110A の筐体をベースに設計されており、正面から見て上段に MP2110A-080 の Scope ボード、下段に MP2110A-055 の 53 Gbaud CRU ボードを搭載可能である。筐体構造は MP2110A を踏襲しているが、Scope ボードに搭載された FPGA (Field-Programmable Gate Array) の発熱を抑制するため冷却機構を強化し、高速信号処理に伴う熱負荷に対応しつつ、安定した測定性能を確保している。



図 1 MP2110A の外観 (080 オプション搭載モデル)

図 2 に、MP2110A-080 のブロック図を示す。Scope は、4ch のデータ信号を入力するデータ入力端子(Ch A~D Input)と、測定の同期を取るためのトリガクロック入力端子(Trigger Clock Input)を備えている。CRU は、クロック再生の対象となる信号を入力する Data Input 端子と、内部で分岐した信号を取り出す Data Output 端子を備えている。さらに、入力データ信号から再生したクロック信号を出力する Recovered Clock Out 端子を有し、Scope へのトリガ供給に利用される。CPU はイーサネットを介して Scope System および CRU System を制御し、測定条件の設定やデータ転送を行うことで、システム全体の動作を管理する。

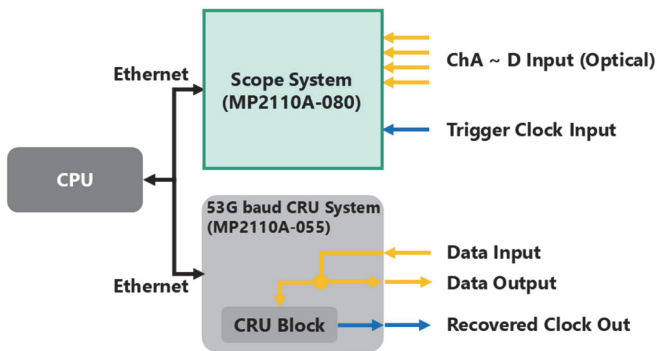


図 2 MP2110A-080 のブロック図

2.2 Scope の構成

図 3 に、MP2110A-080 Scope の詳細ブロック図を示す。Ch A ~D の各光チャンネルに入力された信号は、まず O/E 変換モジュール(以下、O/E モジュールと記載)において電気信号に変換され、サンプラモジュールに入力される。サンプラモジュールは、トリガシステムから供給されるタイミング信号に基づき、各チャンネルの入力信号をサンプリングする。サンプラモジュールの出力信号は、IF (Intermediate Frequency)回路によって増幅された後、ADC (Analog to Digital Converter)によりデジタルデータへ変換される。変換されたデータは、FPGA および CPU によるソフトウェア処理により解析され、最終的にアイパターン解析結果として表示される。

Trigger System は、Ch A~D の入力信号に同期したクロック信号を Trigger Clock Input 端子から受け取る。初段の Pre-Scaler 1 は、供給されたトリガクロック周波数を DDS(Direct Digital Synthesizer)の入力範囲に調整する。トリガクロック周波数が DDS 入力範囲より低い場合には、PLL(Phase Locked Loop)を用いて逡倍する。DDS は出力周波数を調整し、サンプリングタイミングを制御する。DDS 出力に含まれるイメージ成分や高調波成分などの不要波は、後段の Band-Pass Filter によって除去される。その後、Pre-Scaler 2 を用いて、サンプラモジュールが動作可能な周波数

に変換する。最後に、SRD (Step Recovery Diode) Driver によって高速パルスを生成し、サンプラモジュール駆動用のタイミング信号として出力する。この一連の構成により、MP2110A-080 は 106 Gbaud の高速信号に対するサンプリングを実現している。

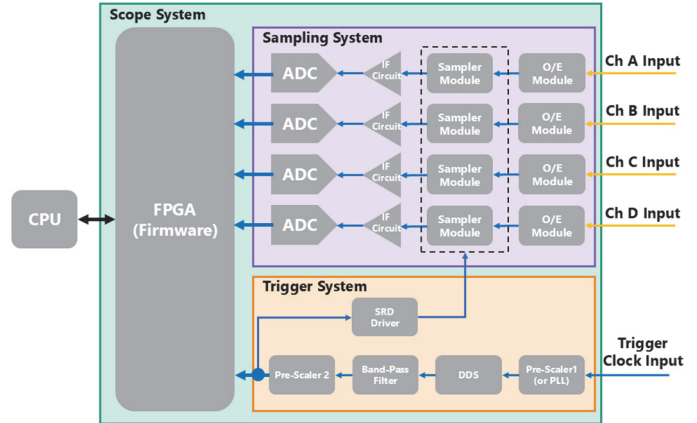


図 3 MP2110A-080 Scope の詳細ブロック図

3 設計の要点

IEEE 802.3dj⁵⁾では、106 Gbaud 光信号の測定基準となるリファレンスレーバの特性として、3 dB 帯域幅が 53.125 GHz の 4 次ベッセル・トムソン応答を規定している。しかし、現実的に 60 GHz の広帯域特性をハードウェアで精度よく近似することは困難であり、規格では理想応答からの逸脱についてはソフトウェアで補償可能であると記載されている。Scope ハードウェアには、補償精度を考慮して、3 dB 帯域より広い入力帯域が必要である。これを実現するため、MP2110A-080 では、3 dB 帯域 60 GHz の O/E モジュールと 3 dB 帯域 80 GHz のサンプラモジュールとを新規に自社開発し、システム全体として 60 GHz を確保できるようにした。以下、開発した O/E モジュール、サンプラモジュールについて説明する。

3.1 60 GHz O/E モジュールの開発

図 4 に、60 GHz O/E モジュールの内部ブロックを示す。既存の O/E モジュールの帯域は 35 GHz であり、106 Gbaud 信号の測定には帯域が不十分であった。最大 120 Gbaud の信号を測定するためには、ナイキスト周波数を考慮して、60 GHz まで帯域を拡張する必要がある。

広帯域化を実現するため、光ファイバからの光学系、PD(Photo Diode)、および TIA(Transimpedance Amplifier)を一体化した高周波モジュール構造を新規に開発した。光学系においては、レンズ構造を採用することで、受光径 12 μm の PD を使用可能とした。受光径の小径化により、PD の容量が低減するとともに、電荷の

移動距離も短くなるため、応答時間が短縮される。これにより、従来の $\phi 20\ \mu\text{m}$ のPDと比較して、PDの帯域は約1.9倍に拡張された。

また、後段のTIAについては、社内の超高速InPプロセスを用いて、本モジュール専用のMMICを新規設計した。さらに、PDベアチップとTIA MMICチップを最短距離で配置し、最短ワイヤーボンディング配線により実装することで、寄生要素を低減した。TIAチップの出力は、石英薄膜基板上で配線し、Vコネクタを採用することで、広帯域の電気信号出力を実現している。

これらの設計により、60 GHz超の帯域を達成し、53 GHzにおける雑音特性は $8.4\ \mu\text{W}(\text{typ.})$ 、光入力4 mW時の歪特性は0.7 dB (typ.)という性能を実現した。

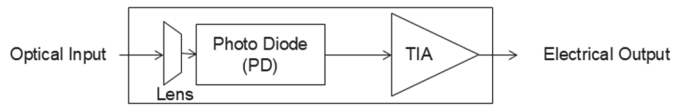


図4 60 GHz O/E モジュールのブロック図

3.2 80 GHz 広帯域サンプラモジュールの開発

図5に、開発したサンプラモジュールの等価回路図を示す。本モジュールは、高周波対応の構造を採用しており、主に薄膜基板とMMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)で構成される。前段のO/Eモジュールで電気信号に変換された入力、サンプラモジュールのRF入力に送られる。

LO入力には、外部トリガ回路から供給されるサンプリング周期に応じたストロブパルスが印加され、内部のサンプリングMMIC回路でトラックアンドホールド動作を行う。その後、IF出力の電圧は後段で増幅され、ADCによってデジタル変換され、最終的に波形として処理される。

従来の40 GHzサンプラモジュールから80 GHzへの広帯域化を実現するため、以下の技術的取り組みを行った。

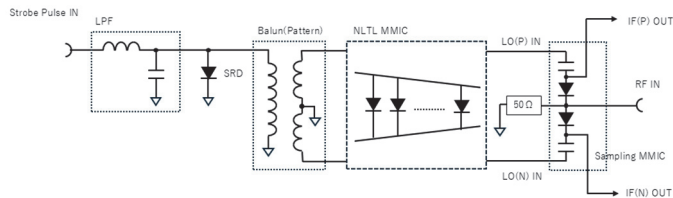


図5 80 GHz 広帯域サンプラモジュールのブロック図

(1) NLTL MMIC の新規設計

NLTL(Nonlinear Transmission Line)は、伝送線路に非線形素子を周期的に配置した構造を持つ回路であり、入力波形の伝搬時に、電圧依存性により位相速度が変化する。高電位では容量が増大して位相速度が低下し、低電位では容量が減少して位相速度

が上昇する。結果として、後続の低電位側が先行する高電位側に追いつき、エッジが時間的に圧縮されることで、波形の立ち下がりが急峻化する。

この非線形効果により、高調波成分が生成され、高周波パルスや広帯域信号を得ることが可能となる。本開発では、社内のNLTL技術を応用し、サンプラモジュール用にMMICを新規設計した。従来はSRDのみでストロブ入力パルスを短パルス化していたが、NLTL MMICを追加することで、より短パルス化と高調波成分の拡張を実現し、広帯域化に寄与した。

(2) 低寄生容量サンプリング回路 MMIC の新規設計

サンプリング回路 MMIC は、高速スイッチとして動作するトラック用ダイオードと、サンプル電荷を保持するホールドキャパシタで構成される。サンプリング帯域を拡張するためには、寄生容量の低減が重要となる。このため、アンリツのGaAsプロセスを用いてダイオード素子セルを小型化し、寄生容量を最小化した。

(3) 薄膜基板への MMIC フリップチップ実装

従来のサンプラモジュールでは、MMICを薄膜基板上にワイヤーボンディングで接続していたが、この方法では、ワイヤー長に起因する寄生インダクタが発生し、帯域拡張を阻害する要因となっていた。そこで、MMICをフリップチップ実装に変更し、寄生インダクタ成分を大幅に削減した。

図6に、NLTL出力パルスの波形および周波数スペクトルの解析結果を示す。NLTL出力パルスは、立ち下がり時間が10 psと急峻なパルスとなり、対応する周波数スペクトルは100 GHzを超えて広がっている。これらの取り組みにより、サンプリング出力の変換効率を向上させつつ、寄生容量を最小限に抑え、雑音特性を悪化させることなく、80 GHz帯域を実現した。

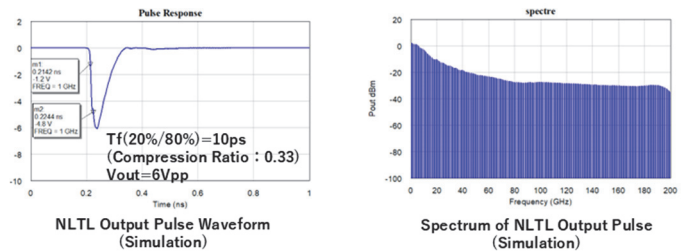


図6 NLTL出力パルス波形および周波数スペクトラム

3.3 PAM4 解析について

106 GbaudのPAM4信号の測定要件は、IEEE 802.3djにおいて規定されている。主要な評価パラメータとしては、53 GbaudのPAM4信号と同様に、TDECQ(Transmitter and Dispersion Eye Closure Quaternary)が用いられる⁴⁾。表1に、IEEE

802.3bs⁶⁾で規定される 53 Gbaud 信号と比較した場合の、IEEE 802.3dj Draft 2.2 で規定される 106 Gbaud 信号におけるパラメータ差分を示す。

高速化に伴い、単なる帯域拡張では通信品質を確保できず、チャンネル劣化やシステムマージンの低下が顕著となる。このため、IEEE 802.3dj では、システム全体の信号品質を保証するために、測定要件はより高度化された。なお、IEEE 802.3dj は Draft 版の値であるため、今後内容が改訂される可能性がある。

表 1 IEEE 802.3dj Draft 2.2 と IEEE 802.3bs で定義される測定要件の違い

要件	IEEE 802.3dj	IEEE 802.3bs
3 dB 帯域	53.125 GHz	26.5625 GHz
Target SER ^{*1}	4.56E-4	4.8E-4
イコライザ規定	15 Tap FFE ^{*2} + DFE ^{*3}	5 Tap FFE
タップ係数の制限	より厳密で数値的な上限制約の追加	基本的制約のみ

*1: SER: Symbol Error Ratio
 *2: FFE: Feed Forward Equalizer
 *3: DFE: Decision Feedback Equalizer

IEEE 802.3 規格では、高速イーサネット通信に用いられる光トランシーバの相互接続性を確保するため、複数の評価指標が規定されている。TDECQ は、PAM4 信号を用いた光トランシーバの送信性能を評価する代表的な指標の一つである。図 7 に、PAM4 波形と TDECQ の測定イメージを示す。理想的な受信器のモデルを用いて、送信信号に対して雑音を付加しながら、Target SER に到達するまでの雑音量を評価する。TDECQ 値が小さいほど光送信波形の品質が高いことを示し、下記の式(1)で定義される。

$$TDECQ = 10 \log_{10} \left(\frac{Outer\ OMA}{6} \times \frac{1}{Q_t R} \right) (dB) \dots (1)$$

Q_t : IEEE 802.3dj で規定された SER (Symbol Error Rate)

4.56×10^{-4} では $Q_t = 3.428$

R : SER = 4.56×10^{-4} にするために必要な付加雑音

測定では、規格で定義されたリファレンスレーザ特性(4 次ベッセル・トムソン応答)やリファレンスイコライザ(FFE および DFE)を適用し、実システム動作を模擬した条件で測定することが求められる。これにより、測定器特性による評価の乖離を抑えつつ、受信器レベルへ正規化し、受信器の視点から送信器品質を公平に評価できる。あわせて、ベンダが異なっても同一基準の結果が得られ、相互接続性を確保できる。

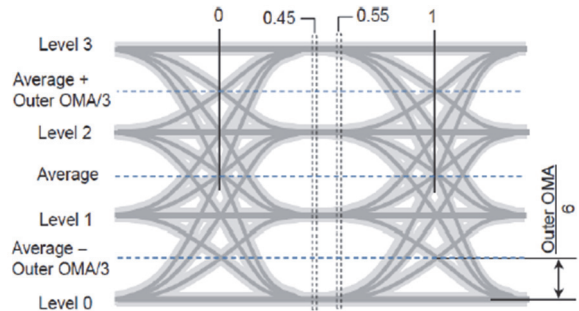


図 7 PAM4 波形と TDECQ 測定イメージ

図 8 に、TDECQ 測定プロセスの概要を示す。まず、送信器から出力された信号を 1 周期分取得する。測定に用いるパターンは、IEEE 802.3 規格で定義された SSPRQ (Short Stress Pattern Random Quaternary) である。これは、ISI (Inter-Symbol Interference) や非線形歪みの影響を短い周期で再現することを目的としたパターンであり、規格では TDECQ 測定に SSPRQ を使用することが明記されている。

次に、取得した信号波形に対して、規格で定義された 4 次ベッセル・トムソンフィルタを適用し、その後、FFE のタップ係数を算出する。タップ係数は、規定された制約条件の範囲内で TDECQ 値が最小となるように最適化する必要がある。しかし、タップの分解能は非常に高く、すべての組み合わせを探索することは計算コストが膨大となるため、IEEE 802.3 では MMSE (Minimum Mean Square Error) アルゴリズムを用いた最適化が規定されている。MMSE は、受信信号と理想信号の誤差二乗平均 (MSE: Mean Square Error) を最小化する手法であり、MSE は式(2)で定義される。

$$MSE = E[|y(n) - d(n)|^2] \dots (2)$$

$y(n)$: FFE 適用後の出力信号

$d(n)$: 理想信号

実際の計算では、行列演算により MMSE が最小となるタップ係数を求めることができ、式(3)で表される。

$$w = R^{-1}p \dots (3)$$

w : 求めるタップ係数のベクトル

R : 自己相関行列 ($X^T X$)

p : 相互相関ベクトル ($X^T d$)

X : データ行列

d : データ行列に対応する理想信号

タップ係数を求めた後、信号波形に対して FFE を適用する。その後、ガウス分布に従うランダムノイズを付加する。図 7 に示すように、PAM4 信号の 4 レベルに対応するしきい値は、各アイ開口の中心

値を基準に決定する。このしきい値を用いて、Target SER に到達するために必要なノイズ量を探索し、最終的にそのノイズ量に基づいて TDECQ を算出する。

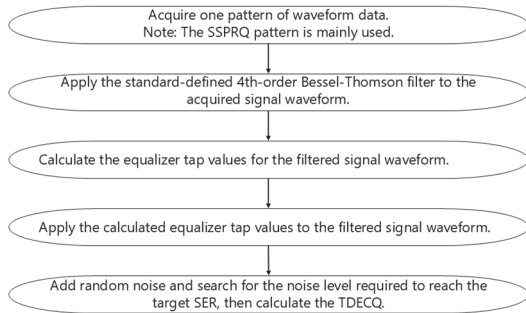


図 8 TDECQ の測定プロセス

4 性能検証

4.1 システムの周波数特性

図 9 に、080 オプションのシステム全体の周波数応答を実測した結果と、理想的な 4 次ベッセル・トムソン応答を比較した結果を示す。ここで、システム応答は、3 dB 帯域が 53.125 GHz の 4 次ベッセル・トムソン応答を近似するようにソフトウェア補正されている。システム応答は、低周波領域では理想特性に近いフラットな応答を示し、高周波領域においても緩やかなロールオフで 60 GHz まで追従している。各周波数ポイントにおける理想特性に対するシステム応答の振幅誤差の標準偏差は 0.22 dB であった。

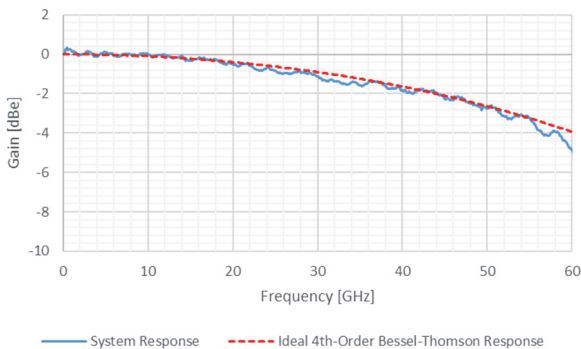


図 9 デジタルフィルタ適用時のシステム周波数特性(53.125 GHz)

4.2 光信号波形および感度性能

今回開発した 080 オプションを実装した Scope を用いて、光信号波形および感度性能の妥当性を検証した。図 10 に検証時の測定系を示す。測定条件は、Baud Rate が 106.25 Gbaud、入力パターンは SSPRQ、イコライザは 15 Tap FFE のみを適用している。

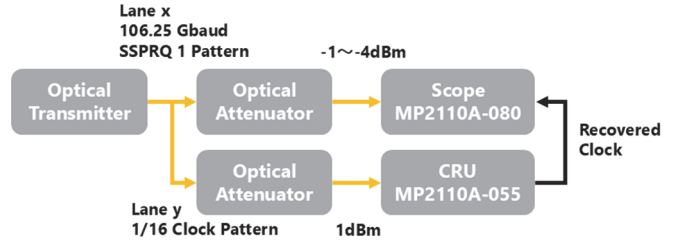


図 10 システムの評価系

図 11 に測定波形の一例として、Scope への光入力パワーが -2 dBm 時の波形を示す。使用した光信号に波形歪みは少なく、TDECQ は 2.11 dB と優れた値を示している。図 12 には主要測定項目として、TDECQ、Outer ER(Extinction Ratio)、Linearity の各測定項目について、光入力レベル依存性を評価した結果を示す。Scope 光入力レベルは、外部の可変光アッテネータで調整された。

理想特性を持つ Scope であれば、測定結果は光入力レベルに依存せず、グラフは平坦となる。測定結果は、各条件で 10 回繰り返して測定した平均値を示している。-1 dBm から -4 dBm までの入力レベルにおける各測定項目の変化量は、Peak to Peak で TDECQ が 0.25 dB、Outer ER が 0.07 dB、Linearity が 0.5% と、入力レベルに関わりなく安定した結果を得ることを確認した。

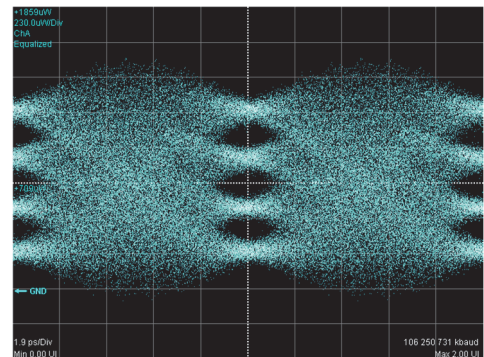


図 11 観測光波形の一例(106.25 Gbaud)

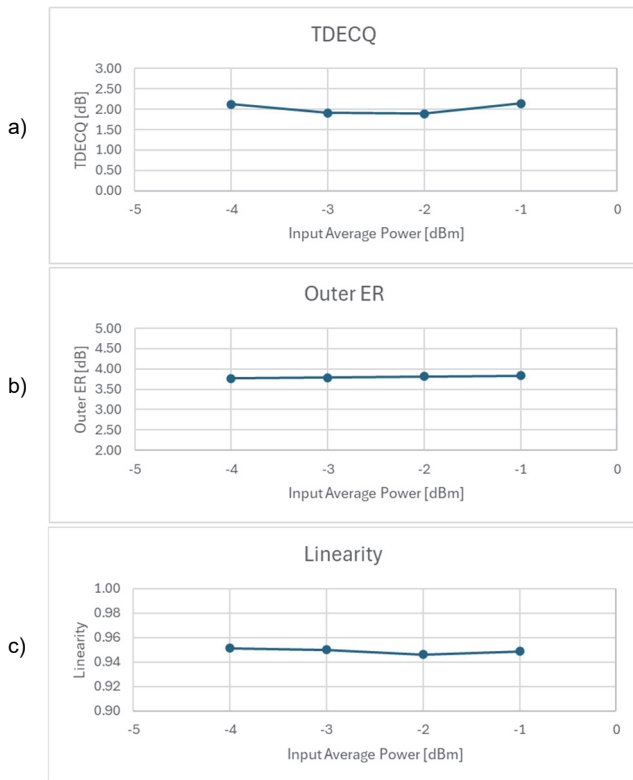


図 12 各測定結果の光入力レベル依存性
a) TDECQ, b) Outer Extinction Ratio, c) Linearity

5 むすび

データセンタで取り扱う情報量の急速な増大に伴い、800GbE や 1.6TbE イーサネットに対応した光トランシーバの需要が高まっている。これらの試験要求に応えるため、MP2110A の Scope を帯域拡張し、最大 120 Gbaud の信号を 4 レーン同時に測定可能なオプションである MP2110A-080 を開発した。主要な測定項目である TDECQ, Outer ER, Linearity において、-1 dBm から-4 dBm の範囲で入力パワーへの依存が少ない安定した性能を実現した。これにより、800GbE や 1.6TbE に対応した 4 チャンネルオシロスコープを提供し、高精度な測定が可能となった。

今後も、光トランシーバ試験に最適なソリューションを提供することで、高速・大容量通信インフラを支える光トランシーバの生産効率の改善や評価品質の向上に貢献していく。

参考文献

- 1) Ethernet Alliance 2025 Ethernet Roadmap-Digital Version
- 2) IEEE Transmitter™ AI Is Changing The Landscape of Data Centers
- 3) 村上崇, 横山裕樹, 神園隆司, 平林文人: “MP2110A サンプリングオシロスコープの開発”, アンリツテクニカル 93 号(2018.3)

- 4) 横山裕樹, 村上崇, 岸田桂輔, 吉野創: “400GbE に向けたマルチチャンネル高精度 TDECQ 測定”, アンリツテクニカル 96 号(2021.3)
- 5) IEEE Std 802.3dj™ Draft 2.2
- 6) IEEE Std 802.3bs™

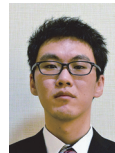
執筆者



横山 裕樹
通信計測カンパニー
サービスインフラストラクチャーソリューション事業部
商品開発部



松田 修一
通信計測カンパニー
サービスインフラストラクチャーソリューション事業部
商品開発部



岸田 桂輔
通信計測カンパニー
サービスインフラストラクチャーソリューション事業部
商品開発部



高須 涼太
通信計測カンパニー
サービスインフラストラクチャーソリューション事業部
商品開発部

公知

多層グラフェンの光学特性

鎌田雅博 Masahiro Kamada, 松井朋裕 Tomohiro Matsui

[要 旨]

多層グラフェンは優れた光学特性を層数によって制御できるため、光学素子への応用が期待されている。本研究では、単層から 107 nm までの厚さの多層グラフェンに対して光学コントラスト・反射率・ラマン散乱を測定し、これらの特性の相関も含めて光学特性を包括的に明らかにした。光学コントラスト測定により、定性的な理解にとどまっていたグラフェンの層数と色の関連を初めて定量化し、厚さ 40 nm 程度までコントラストから ± 1 nm の精度で厚さを決定できることを示した。反射率は、多層グラフェンの層状構造を無視した一様媒質とみなすことでフレネルの公式により説明できることを示した。一方、ラマン分光測定からは、ラマン散乱光の多重反射に加えて干渉効果も重要であることを示した。これらの測定を同一試料に対して行うことで、各特性の関係性を明らかにした。

1 はじめに

グラフェンは炭素原子ひとつ分の厚さのシート状物質であり、さまざまな面で優れた物性を有し、広い分野への応用が期待されている。原子レベルの薄さでありながら優れた電気・熱伝導性をもち、外界に露出して得られるという特徴から、単層グラフェンは電子デバイスや分子センサー等への応用が期待されている。一方、グラフェンを多層化することで、層間相互作用によって本来の特性を強化したり、新たな性質が得られたりすることから、多層グラフェンの応用研究も進められている。中でも注目されているのが光学素子への応用である。グラフェンは単層で波長によらず 2.3% という大きな吸光率を示すが¹⁾、その層数や積層構造を変えることで吸光率を制御することができる^{2) 3)}。これにより、例えば電磁場や光のアンテナへの応用研究が進められている。

多層グラフェンを利用するためには、その層数(厚さ)を正確に知ることが重要である。グラフェン 1 層分の厚さは約 0.334 nm であり、これを正確に測定するには原子間力顕微鏡(AFM)や走査トンネル顕微鏡(STM)といった装置が用いられるが、これらの装置は高い分解能が得られる反面、測定に時間がかかる。そこで、より簡便な厚さ決定法として、グラフェンの“色”を利用した方法がある。グラフェンは単体では透明であるが、適切な厚さの酸化膜(SiO₂)を形成した Si 基板上に置くことにより、光学顕微鏡で“見る”ことができる⁴⁾。光学顕微鏡画像から抽出した RGB やグレースケールの基板とのコント

ラストを用いることで、6 層程度までであれば 1 原子層分の厚さの違いを判別できる⁵⁾。このように、AFM のような高価な装置を用いずとも簡便に層数を判別できることは、グラフェン研究とその利用が爆発的に広まった要因のひとつと言える。

一方で、10 層を超えるような厚さでのグラフェンの色の変化については、定性的な理解にとどまっている。すなわち、広く用いられている厚さ 300 nm の SiO₂ を表面にもつ Si 基板では、厚さが増すにつれてグラフェンは赤系から青系、最終的にはグラファイト(黒鉛)の色であるメタリックグレーへと変化する。このように、厚さがわずかに 0.334 nm である単層グラフェンが光学顕微鏡で観察でき、さらに厚さに応じてさまざまな色を示すことは、層数決定という実用的観点に加えて、純粋に興味深い事実である。

RGB よりも直接的な物理量である反射率スペクトル測定の結果によると、9 層まではフレネルの公式で説明でき、波長約 550 nm における反射率から層数が決定できるとの報告がある⁶⁾。また、グラフェンの光学特性を利用した層数決定法として、ラマン分光による手法も知られている。1~3 層程度のごく薄い領域では、ラマン散乱スペクトルに現れる、2 次の格子振動過程に由来する 2D バンドと炭素原子ハニカム格子の面内振動に由来する G バンドの強度比から精度よく層数を決定できるが、より厚い領域ではこの強度比による層数決定法は不向きである。G バンド強度の層数依存性は、厚さ 30 nm (約 90 層)程度まで調べられており^{7~9)}、厚さとともに増加した後に減少へ転じ、最終的には一定値に収束することが知ら

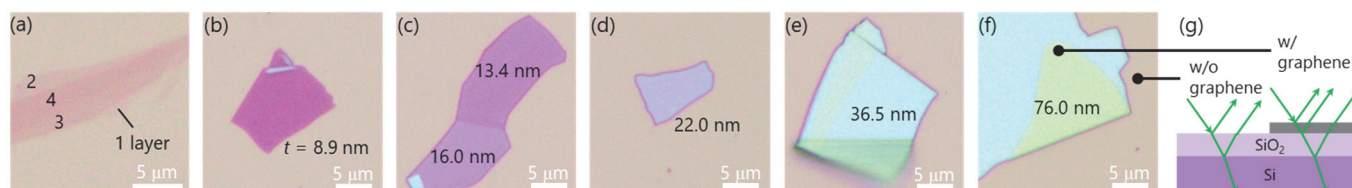


図 1 (a)~(f) さまざまな厚さの多層グラフェンの光学像¹⁰⁾。図中の数字は、(a) グラフェンの層数。(b)~(f) AFM で測定した厚さ。(g) 基板に入射した光の経路の、グラフェンの有無による違いの模式図。

れている。しかし、強度が増加から減少に転じる厚さは研究グループによって異なっており、定量的理解には至っていない。

このように、グラフェンの RGB コントラスト、反射率、ラマン散乱といった光学特性については層数依存性が研究されているものの、定性的な理解にとどまるものが多く、さらに各研究が別々のグループによって独立に行われてきた。そのため、各特性間の相関も含めた統一的理解には至っていない。そこで我々は、単層から 107 nm (約 319 層) までの厚さの多層グラフェンに対して、厚さと色の関係性に始まり、RGB、反射率、ラマン散乱スペクトルを同一試料に対して測定した。これにより、各特性の厚さ依存性を直接比較できるようになり、特性間の関係性も含めた包括的研究が可能となった¹⁰⁾。その成果を本稿にて紹介する。

本研究では、厚さ 268 nm の SiO₂ を表面にもつ Si 基板上にグラファイトを劈開して作製したグラフェンを用いた。SiO₂ の厚さは、後述するように反射率スペクトルから求めた。一方、グラフェンの厚さ(t)は AFM(Dimension XR, Bruker)測定から決定した。光学顕微鏡(BX53M, オリンパス株式会社)による画像取得では、露光時間や絞りといった撮影条件は、特記する場合を除き、すべての測定で統一した。反射率測定には分光反射率計(TohoSpec3100, 東朋テクノロジー株式会社)を用いた。また、ラマン分光測定にはレーザーラマン顕微鏡(inVia Raman microscope, Renishaw plc)を用い、励起光の波長は 532 nm を使用した。

以下に本稿の構成を述べる。第 1 章では、原子レベルの薄さの物質であるグラフェンが光学顕微鏡で観察できるという興味深い事実と、グラフェン光学特性の層数依存性に関する現状での理解について概説した。第 2 章では、我々が行った多層グラフェンの光学特性研究として、2.1 節では RGB コントラスト、2.2 節で反射率、2.3 節でラマン散乱の測定結果を示し、2.4 節でそれらの関係性について議論する。

2 多層グラフェンの光学特性

2.1 RGB コントラスト

図 1(a)~(f)に光学像を例示するように、グラフェンは厚さによって多彩な色を示す。これは、後述するように図 1(g)に示す各界面での光の反射とその干渉効果によって説明される¹⁰⁾。図中の数値は、図 1(a)ではグラフェンの層数、図 1(b)~(f)では AFM により測定した厚さを表す。

図 2(a)に、図 1(a)中の 1~4 層のグラフェンの光学像から抽出した 256 段階の RGB 値($X_{R,G,B}$)をグラフェン層数に対してプロット

した結果を示す。挿入図には X_G のヒストグラムを示している。挿入図から、 X_G はグラフェン層数に応じて離散的な値をとり、1 原子層の分解能があることが分かる。実際、図 2(a)に示すように、 $X_{R,G,B}$ は層数に対して線形に変化しており、 $X_{R,G,B}$ からグラフェンの層数を決定できることが分かる。

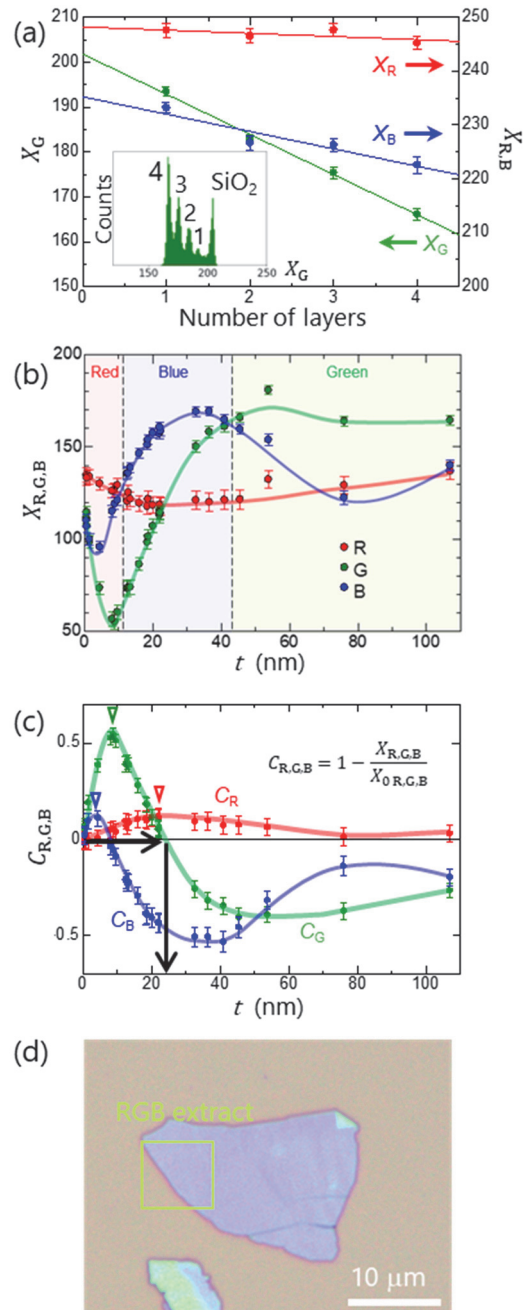


図 2 (a) 図 1(a)に示す 1~4 層グラフェンの RGB 強度 $X_{R,G,B}$ ¹⁰⁾。挿入図は X_G のヒストグラム。(b) 光学像から抽出した多層グラフェンの $X_{R,G,B}$ ¹⁰⁾。(c) 光学コントラスト $C_{R,G,B}$ ¹⁰⁾。(d) 多層グラフェンの光学像。緑枠で囲った領域から $C_{R,G,B}$ を求め、(c) から厚さを推定した。なお、図 2(a) はごく薄い領域での分解能を良くするため、後述する測定よりも長めの露光時間で取得した光学像から求めた $X_{R,G,B}$ である。そのため、図 2(b) とは数値が対応していない点に注意されたい。

測定した厚さ t の全領域にわたってプロットした $X_{R,G,B}$ を図 2(b) に示す。 t を増加させるにつれて、最も強くなる成分は $t \sim 10$ (nm) で赤 (X_R) から青 (X_B) に、 $t \sim 40$ (nm) で緑 (X_G) に切り替わることが分かる。このように、これまで定性的な理解にとどまっていたグラフェンの色の変化を定量的に評価したのは、本研究が初めてである。

原子スケールの物質であるグラフェンが光学顕微鏡で観察でき、さらに厚さによってさまざまな色を示すことは、光の干渉効果によって説明できる。図 1(g) に模式的に示すように、入射光は大気、グラフェン、 SiO_2 、 Si の各界面で反射され、それらの反射光が外部に放出される。実際には、多重反射により図に示した経路よりも複雑なものを含め、さまざまな経路が無数に存在し、それらの光が干渉する。干渉により光が強め合うか打ち消し合うかは、光路差と波長の比によって決まる。そのため、干渉光の強度は t に対して周期的に変化し、その周期は波長の長い光ほど長くなる。このように、光の波長によって t 依存性が異なることから、グラフェンの厚さに伴って色が変化する。

しかし、 SiO_2 厚さは同じ公称値の製品であっても個体ごとに ± 20 nm 程度のばらつきが存在するため、この違いにより SiO_2 と Si の界面で反射する光の光路長が変化し、同じ厚さのグラフェンであっても基板によって $X_{R,G,B}$ の値は異なってしまう。図 2(b) 中のデータはすべて同じ基板上で測定されたものであるが、異なる基板上的グラフェンを統一的に評価する指標としては、 $X_{R,G,B}$ の絶対値よりも、基板に対する強度比、すなわちコントラスト ($C_{R,G,B}$) の方が SiO_2 厚さの差異に影響されにくく、実用的である。

本研究ではグラフェンと基板の RGB コントラスト $C_{R,G,B}$ を次式で定義した。

$$C_{R,G,B} = 1 - \frac{X_{R,G,B}}{X_{0,R,G,B}}, \quad (1)$$

ここで、 $X_{R,G,B}$ はグラフェンの RGB 値、 $X_{0,R,G,B}$ は基板の RGB 値である。図 2(c) に、図 2(b) の $X_{R,G,B}$ を基に得られた $C_{R,G,B}$ の t 依存性を示す。 $C_{R,G,B}$ は t の増加とともに増大するが、ある t を超えると減少に転じ、 $t > 40$ (nm) では変化が小さくなる。 $C_{R,G,B}$ が増加から減少に転じる厚さを、図 2(c) 中に白抜き三角で示しているが、各色でそれぞれ異なる値をとる。この違いは、前述した光の干渉と波長の関係から理解できる。すなわち RGB 各色の波長は短い方から $B < G < R$ であるため、 t が小さい側から $C_B < C_G < C_R$ の順に最大値を示す。

図 2(c) を用いて、 $C_{R,G,B}$ による層数決定法が、先行研究⁵⁾で示された 6 層よりも厚い領域に適用可能であるかを検討した。光学像から抽出した C_R 、 C_G 、 C_B の値を組み合わせることで、 t を一意に決定

できる。決定精度は $C_{R,G,B}$ の t に対する変化の傾きに依存するため、実質的には傾きが最も大きい C_G によって決まる。その結果、 $t = 40$ (nm) 程度までは、この傾きと C_G の誤差から ± 1 nm (およそ 3 原子層) 程度の精度が得られる。例えば、図 2(d) の枠内に示した多層グラフェンは $C_G = -0.01$ であり、このとき t は 24 ± 1 (nm) と推定される。この値は、AFM による測定値 $t = 23.6$ (nm) とよく一致している。

2.2 反射率

ここまで見てきたように、 $C_{R,G,B}$ は光学顕微鏡から簡便に取得できるにもかかわらず、高い精度で層数を推定できる実用性の高い指標である。しかし、 $C_{R,G,B}$ は物理的には反射光強度にレンズやフィルターの分光透過率、カラーセンサーの分光感度特性を掛け合わせた量であるため、直接的な物理量とは言えない。また、撮影条件にも大きく依存する。そこで、より詳細に物性を評価するため、可視光領域における反射率 (R) の t 依存性を測定した。

図 3(a) に、単層から $t = 107$ (nm) までの多層グラフェンの反射率 R スペクトルを示す。黒の太線は SiO_2/Si 基板の反射率である。この図から、特に薄いグラフェンでは R が波長に対して大きく変化するが、厚くなるにつれてその変化が小さくなり、最終的にはほぼ波長に依存しない一定値になることが分かる。

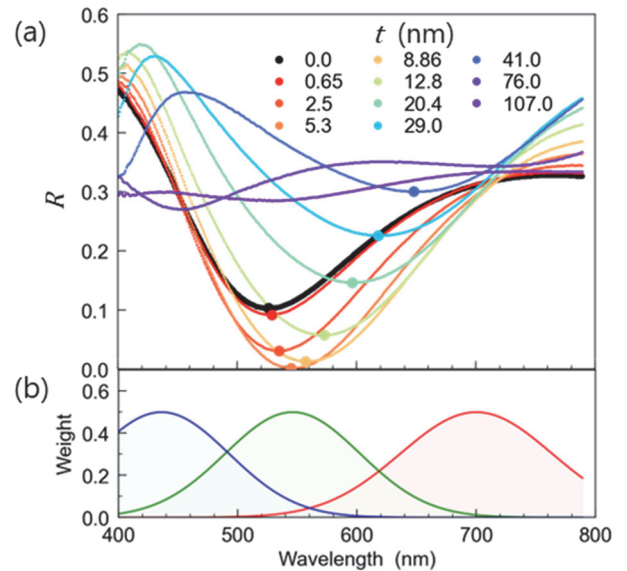


図 3 (a) さまざまな厚さの多層グラフェンの可視光領域における反射率 R ¹⁰⁾。丸印は各 t における R の極小値。(b) R から仮想的な $X'_{R,G,B}$ を計算する際に用いた R, G, B の重み関数¹⁰⁾。

図 3(a) 中に丸印で示した各 t における R の極小値に注目すると、 $t \sim 5$ (nm)、波長 $\lambda \sim 550$ (nm) において $R = 0$ になることが分かる。これは、ある厚さ ($t \sim 5$ (nm)) のグラフェンに特定の波長 ($\lambda \sim 550$ (nm)) の単色光を入射した場合、グラフェンは真っ黒であり、“見え

ない”ことを示している。ただし、このとき基板とのコントラストは最大となるため、グラフェンは基板とのコントラストによって視認可能である。一般に、反射光には物質表面での反射光のほか、ラマン散乱光のようなグラフェン各層からの放出光などの成分も含まれる¹¹⁾。しかし、このゼロ反射率は、そのような放出光成分の影響が R の大きさに対して無視できるほど小さいことを示している。

次に、実験で得られた R から仮想的な RGB 値 $X'_{R,G,B}$ を計算し、光学像から抽出した $X_{R,G,B}$ との比較を行った。具体的には、各色に対応する波長域において、図 3(b) に示すようなガウス分布の重みを考慮して R を積分し、 $X'_{R,G,B}$ を算出した。ガウス分布の中心波長および半値全幅は、R が 700 nm と 90 nm、G が 546.1 nm と 80 nm、B が 435.8 nm と 80 nm とした。ただし、 R の測定波長域が 400~800 nm であるため、それより外側の波長成分は切り捨てている。図 4 に、 $X_{R,G,B}$ と R から計算した $X'_{R,G,B}$ を示す。実際の各色センサーの分光感度は単純なガウス分布よりも複雑であるため、実測値と計算値は完全には一致しないものの、 $X_{R,G,B}$ は $X'_{R,G,B}$ により定性的に再現できていることが分かる。

次に、実験で得られた R と、フレネルの公式による理論計算との比較を行った。ここでは簡単のため、図 5(a) に示すように、多層グラフェンの層状構造を無視し、一様媒質であると仮定したモデルを用いて、以下の式から R を計算した。

$$R = \frac{[r_1 e^{i(\varphi_1 + \varphi_2)} + r_2 e^{-i(\varphi_1 - \varphi_2)} + r_3 e^{-i(\varphi_1 + \varphi_2)} + r_1 r_2 r_3 e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)}]^2}{[e^{i(\varphi_1 + \varphi_2)} + r_1 r_2 e^{-i(\varphi_1 - \varphi_2)} + r_2 r_3 e^{-i(\varphi_1 + \varphi_2)} + r_1 r_3 e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)}]} \quad (2)$$

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}, \quad r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}, \quad r_3 = \frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3} \quad (3)$$

$$\varphi_1 = \frac{2\pi n_1 t}{\lambda}, \quad \varphi_2 = \frac{2\pi n_2 d_{\text{SiO}_2}}{\lambda}, \quad (4)$$

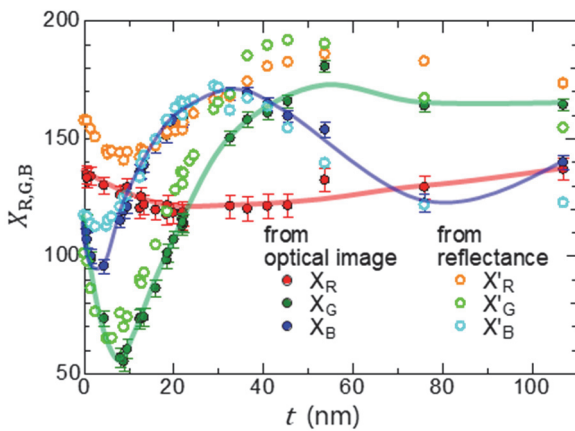


図 4 光学像から抽出した $X_{R,G,B}$ と、反射率 R から計算した $X'_{R,G,B}$ との比較¹⁰⁾。実線は $X_{R,G,B}$ のガイド線。

ここで、 n_i ($i = 0,1,2,3$) はそれぞれ大気、グラフェン、 SiO_2 、Si の複素屈折率、 λ は光の波長、 d_{SiO_2} は SiO_2 の厚さである。この計算において、大気の屈折率は $n_0 = 1$ 、多層グラフェンの屈折率 n_1 は単層グラフェンの文献値¹²⁾を、 SiO_2 、Si の屈折率 n_2, n_3 は文献値¹³⁾、¹⁴⁾を用いた。 n_1, n_2, n_3 は波長に依存し、単純な数式では表現できないが、例えば $\lambda = 550 \text{ nm}$ では $n_1 = 2.64 - 1.38i$ 、 $n_2 = 1.46$ 、 $n_3 = 4.07 - 0.03i$ である。 d_{SiO_2} は図 5(b) に示した SiO_2/Si 基板の反射率 R の実測値のフィッティングから、 $d_{\text{SiO}_2} = 268 \pm 1 \text{ (nm)}$ とした。

代表的な厚さの多層グラフェンにおける、反射率 R の実測値とフレネルの公式による計算結果との比較を図 5(c)~(f) に示す。測定した厚さおよび波長の全域において、実測値と計算結果が非常によく一致していることが分かる。このことから、可視光領域における反射率 R については、多層グラフェンであっても層構造を無視した一様媒質として考えてよく、また 107 nm に至る厚さまで、単層グラフェンの屈折率を用いた多層グラフェンの評価が有効であることが分かった。これは、 R に対するラマン散乱などの放出光の影響が無視できるとする結果とも一致する。

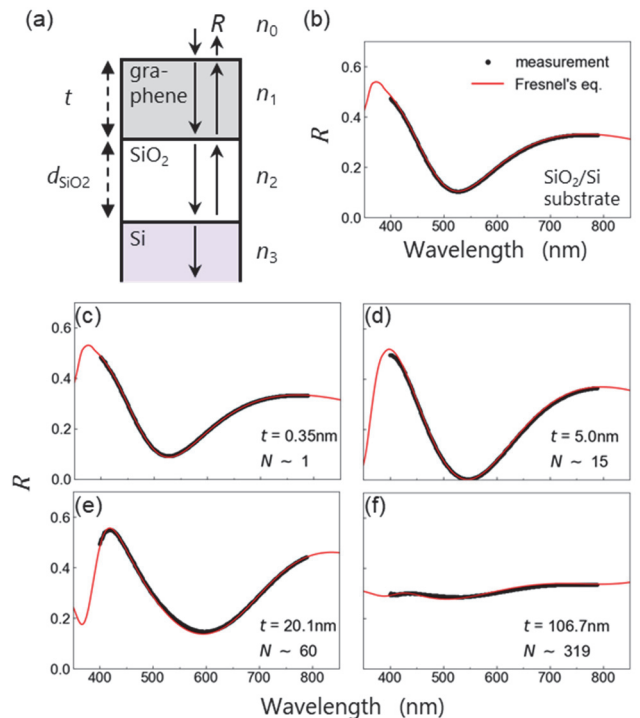


図 5 (a) 反射率 R の理論計算に用いたモデルの模式図。(b) SiO_2/Si 基板、および(c)~(f) さまざまな厚さの多層グラフェンにおける R の実測値と、フレネルの公式による計算結果との比較¹⁰⁾。黒丸は波長分解能 1 nm で測定した実測値、赤線は計算値。

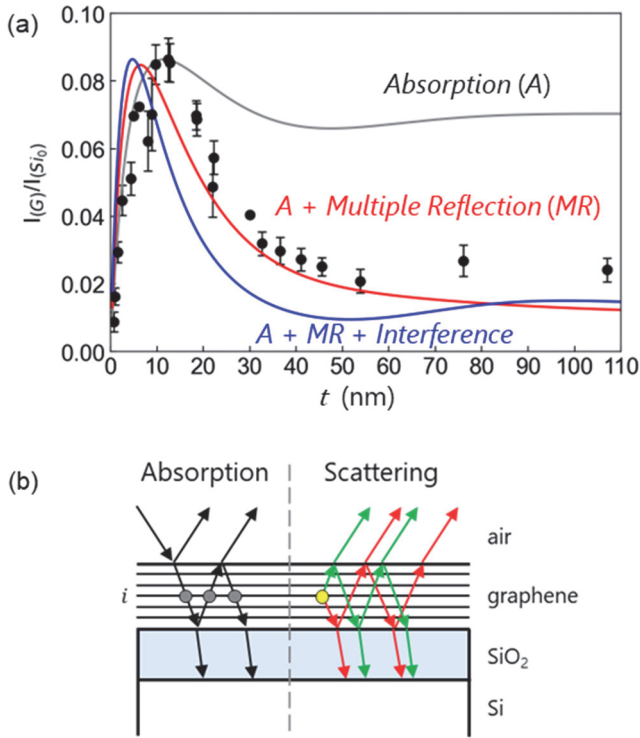


図 6 (a) G バンド強度 I_G/I_{SiO_2} のグラフェン厚さ依存性¹⁰⁾。黒丸は実測値、実線は高さ方向に規格化した各理論計算結果を示す。灰色線はグラフェンの吸収(Absorption, A)のみを考慮した結果、赤線はそれにラマン散乱光の多重反射(Multiple Reflection, MR)を加えた結果、青線はさらにラマン散乱光の干渉(Interference)を加えた結果である。(b) グラフェンに吸収(破線左)および散乱(破線右)される光の経路の模式図。

2.3 ラマン散乱強度

ここまでは、グラフェンへの入射光のうち反射光について見てきたが、そのほかにも透過光やグラフェン各層に吸収される成分が存在する。このうち、吸収された光の一部はラマン散乱光として放出される。そこで、ラマン分光測定から多層グラフェンによる光吸収を評価した。グラフェンのラマン散乱スペクトルには、波数の小さい順に D, G, 2D バンドと呼ばれる三つのピークが知られているが、ここでは層数によってピーク構造が変化しない G バンド強度 (I_G) の層数依存性に注目する。ラマン分光測定では、測定ごとのレーザー出力の揺らぎなどによりシグナル強度のばらつきが生じる。そのため、各測定はグラフェンフレークと SiO_2 表面の両方を含む領域をマッピングして行い、 SiO_2 表面で測定される SiO_2 下の Si に起因する散乱ピーク強度 (I_{SiO_2}) で規格化した強度 (I_G/I_{SiO_2}) を用いて評価した。

図 6(a) に I_G/I_{SiO_2} の t 依存性を示す。 t の増加に伴い、 I_G/I_{SiO_2} は $t \sim 12$ nm までは厚さとともに増加するが、それを超えると減少に転じ、最終的にはおおよそ一定の値となる。このような振る舞いは先行研究⁷⁻⁹⁾でも報告されているが、本研究ではさらに厚い領域まで測定を行うことで、 $t \sim 30$ (nm) では単調に一定値へ収束するので

はなく、強度がわずかに変動することが分かった。

この振る舞いを理解するため、実験結果といくつかのモデルに基づく理論計算との比較を行った。まず、フレネルの公式から求められる吸収量 (A) の t 依存性を計算した。図 6(b) の破線左側には、グラフェンへの入射光の経路を黒矢印で図示している。入射光の一部は界面で反射されながら何度もグラフェン内を通過し、そのたびに光の一部が各グラフェン層に吸収される。図では、上から数えて i 番目の層における吸収を灰色の丸印で示している。グラフェンが吸収する光の総量を、 i 番目の層での吸収量の総和として計算すると、

$$A = \sum_{i=1}^N |a_i|^2 \quad (5)$$

$$a_i = \frac{t_1 (e^{-2\pi k_1 z_i / \lambda_0} e^{-i2\pi n_1 z_i / \lambda_0} + r' e^{-2\pi k_1 z'_i / \lambda_0} e^{-i2\pi n_1 z'_i / \lambda_0})}{1 + r_1 r' e^{-i4\pi n_1 t / \lambda_0} e^{-4\pi k_1 t / \lambda_0}} \quad (6)$$

$$t_1 = \frac{2n_0}{n_0 + n_1} \quad (7)$$

$$r' = \frac{r_2 + r_3 e^{-i2\varphi_2}}{1 + r_2 r_3 e^{-i2\varphi_2}} \quad (8)$$

と表される。ここで、 N はグラフェンの層数、 k_1 はグラフェンの消光係数 (複素屈折率の虚部)、 $\lambda_0 = 532$ nm は入射光の波長、 $z_i = 0.334 i$ (nm) は i 番目の層の表面からの深さ、 $z'_i = 2t - z_i$ である。式(5)の計算結果を図 6(a) の灰色線 (A) で示す。薄い領域において I_G/I_{SiO_2} が t とともに増加する振る舞いは再現できているものの、 $t > 12$ (nm) では I_G/I_{SiO_2} は減少するのに対し、 A はほぼ一定となり、吸収のみでは十分に説明できないことが分かる。

そこで次に、ラマン散乱光の経路も含めた計算を行った。図 6(b) 破線右側には、あるグラフェン層から放出されたラマン散乱光の経路を示している。図中の黄色の丸印からラマン散乱光が放出された場合、緑矢印で示すように外側 (図中上方向) に向かう成分だけでなく、赤矢印で示すように基板側 (図中下方向) に向かう成分も存在する。これらの光は各界面で多重反射を繰り返すため、複雑な経路が無数に存在するが、最終的にグラフェン表面から外部へ放出された成分のみがラマン分光測定により検出される。このように散乱された光がすべて測定される訳ではないため、実験値は A より小さい値に収束する¹⁵⁾。ラマン散乱光の多重反射を考慮した場合、G バンド強度は、上から数えて i 番目の層からのラマン散乱光のうち外部へ放出される成分の割合を b_i とすると、

$$I_G \propto \sum_{i=1}^N |a_i b_i|^2 \quad (9)$$

$$b_i = \frac{t'_1(e^{-2\pi k_1 z_i/\lambda'} + r'_1 e^{-2\pi k_1 z'_i/\lambda'})}{1 + r'_1 r'_1 e^{-2\pi k_1 t/\lambda'}} \quad (10)$$

$$t'_0 = \frac{2n_1}{n_0 - n_1} \quad (11)$$

と表される¹⁵⁾。ここで λ' は、励起光波長 532 nm に対する G バンドのラマン散乱光の波長であり、約 580.8 nm である。この計算では、ラマン散乱光が独立した位相で放出され、干渉が生じないと仮定し、式(10)では複素屈折率 n_1 ではなく、位相項を除いた k_1 を用いている。式(9)の計算結果を図 6(a)の赤線(A+MR)で示す。ラマン散乱光の多重反射を考慮することで、 I_G/I_{Si0} が増加から減少へ転じる振る舞いが再現できている。しかし、 $t > 30$ (nm)において観測された I_G/I_{Si0} の変動は再現できていない。これは、式(10)において n_1 ではなく k_1 を用いることにより、異なる経路を通ったラマン散乱光間の干渉を無視したためであると考えられる。

そこで、ラマン散乱光の干渉を含めた計算を行った。具体的には、式(10)の k_1 を複素屈折率 n_1 に置き換え、

$$I_G \propto \sum_{i=1}^N |a_i b'_i|^2 \quad (12)$$

$$b'_i = \frac{t'_1(e^{-2\pi n_1 z_i/\lambda'} + r'_1 e^{-2\pi n_1 z'_i/\lambda'})}{1 + r'_1 r'_1 e^{-2\pi n_1 t/\lambda'}} \quad (13)$$

から G バンド強度を計算した。これは、同じグラフェン層から散乱され、異なる別経路を通して外部へ放出された光同士の干渉のみを考慮することに相当する。その計算結果を図 6(a)に青線(A+MR+Interference)で示す。 I_G/I_{Si0} が減少へ転じる振る舞いに加え厚い領域における強度変動も再現できていることが分かる。この結果は、多層グラフェンのラマン散乱を理解するには、ラマン散乱光の多重反射だけでなく、干渉効果も重要であることを示している。

なお、図 6(a)に示した各計算結果は、厚さ依存性の議論に注目するため、最大値が一致するように規格化している。散乱強度の絶対値については、さらなる考察が必要である。

最後に、実験結果では $t = 10$ nm 付近で I_G/I_{Si0} のばらつきが大きくなっている。同様の特徴は、いくつかの先行研究^{8), 9)}でも報告されているが、その原因については明らかになっておらず、今後の課題である。

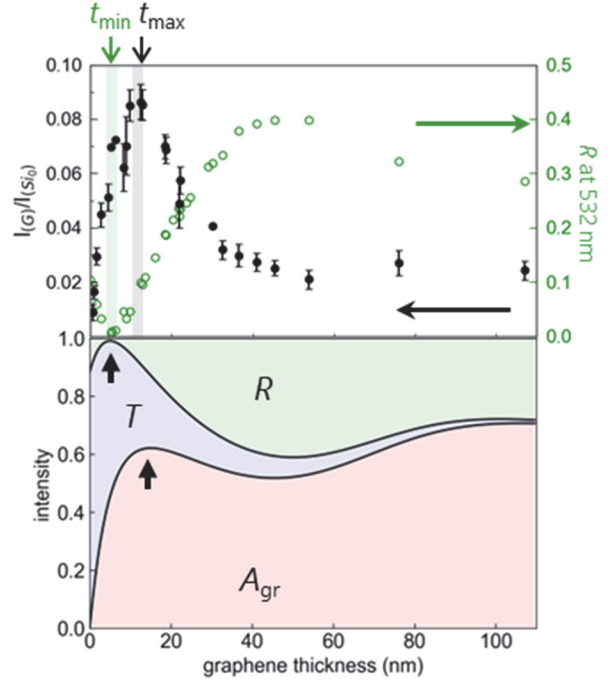


図 7 上段は I_G/I_{Si0} と、ラマン励起光波長 532 nm における反射率 R の比較¹⁰⁾。下段は、フレネルの公式により計算した入射光に対する反射 R 、透過 T 、およびグラフェンでの吸収 A_{gr} の割合¹⁰⁾。

2.4 反射率とラマン散乱強度の比較

最後に、吸収光に疑似的に対応する I_G/I_{Si0} と、ラマン分光に用いた波長と同じ 532 nm の反射光に対する反射率 R を比較した。両者の t 依存性を図 7 上段に示す。 t が増えるとともに、 I_G/I_{Si0} は上昇したのち $t_{max} \sim 12$ nm から減少に転じる一方、 R は減少したのち $t_{min} \sim 5$ nm から増加に転じるのが分かる。直感的には、 R が小さいときには吸収量が増加しており I_G/I_{Si0} が増加すると考えられ、実験値は定性的にはそれに従っているものの、観測された t_{min} と t_{max} は同じ値ではない。これは、反射されなかった光がすべてグラフェンに吸収されるのではなく、グラフェンを透過して SiO_2/Si 基板に侵入する成分 T が存在するためであると考えられる。図 7 下段に、フレネルの公式から計算した多層グラフェンの反射率 R 、透過率 T 、および $A_{gr} = 1 - R - T$ から求まるグラフェンへの吸収 A_{gr} の t 依存性を示す。 T は以下の式で計算した。

$$T = \left[\frac{t_1 t_2 t_3}{e^{i(\varphi_1 + \varphi_2)} + r_1 r_2 e^{-i(\varphi_1 - \varphi_2)} + r_2 r_3 e^{-i(\varphi_1 + \varphi_2)} + r_1 r_3 e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)}} \right]^2 \quad (14)$$

$$t_2 = \frac{2n_1}{n_1 + n_2}, \quad t_3 = \frac{2n_2}{n_2 + n_3} \quad (15)$$

ここで、式(7)、(15)より式(14)の分母は定数であり、式(4)より φ_1 は t に比例することから、 T は t に対しておおそ指数関数的に減少する。この成分が存在することで、 R の最小値と A_{gr} の極大値を示す t

がずれていることが分かる。このずれが、 t_{\min} と t_{\max} の違いとして観測されたと理解できる。

3 まとめ

我々は、多層グラフェンの色が厚さによって大きく変化することに注目し、単層から 107 nm までの厚さの多層グラフェンについて、光学コントラスト、反射率、ラマン散乱といった光学特性を測定した。さらに、これらの測定を同一試料に対して行うことで、各特性間の相関も含めた包括的な研究を行った。

まず、これまで定性的に知られるのみであった多層グラフェンの色の厚さに対する変化を、光学像の RGB コントラストを用いて初めて定量的に評価した。また、RGB コントラストによる簡便なグラフェン層数決定法が、 $t \sim 40$ (nm) に至る厚いグラフェンに対しても ± 1 nm (3 原子層) 程度の精度で有効であることを示した。

次に、RGB よりも直接的な物理量として反射率を測定し、単層から 107 nm (約 319 層) までの厚さにおいて、フレネルの公式によりほぼ完全に再現できることを示した。これは、多層グラフェンは反射率の観点では層構造を無視して一様媒質として取り扱えることを意味している。さらに、単層グラフェンの屈折率が、厚さ 107 nm に至るまで適用可能であることを示した。また、特定の厚さのグラフェンの反射率が、特定波長の入射光に対してゼロになることも明らかにした。これらの結果から、ラマン散乱光のようなグラフェン各層からの放出光は、反射光強度に対しては無視できる程度であると結論づけられる。

グラフェンによる光吸収の観点からラマン分光測定を行ったところ、グラフェンの厚さとともにラマン散乱強度が増加した後に減少へ転じることに加え、厚さ 30 nm 以上で強度が変動することを初めて観測した。この結果は、ラマン散乱光においては、多重反射のみならず干渉効果も重要であることを示している。

最後に、これらの光学特性の厚さ依存性を直接比較し、それらの関係性を明らかにした。反射率が最小になる厚さと、ラマン散乱強度が最大となる厚さは一致しないが、これは反射、透過、吸収の各成分を考慮することで理解できることを示した。

本研究により、多層グラフェンの実用的な層数決定法を示すとともに、光学的な基礎物性を明らかにした。これらの成果は、多層グラフェン光学素子の実現に向けた今後の応用研究に貢献するものと期待される。

謝辞

本研究は、NTT 物性科学基礎研究所の佐々木健一博士との共同研究として行ったものです。この場を借りて感謝申し上げます。また、本研究で行った多層グラフェンの反射率測定は、文部科学省「ナノテクノロジープラットフォーム」事業（課題番号：JPMXP09F22UT1064）の支援を受けて、東京大学 武田先端知ビルクリーンルーム微細加工拠点で実施されました。

参考文献

- 1) R. R. Nair *et al.*, *Science* **320**, 1308 (2008).
- 2) M. Shimatani *et al.*, *Appl. Phys. Express.* **12**, 122010 (2019).
- 3) K. Sasaki and K. Hitachi, *Commun. Phys.* **3**, 90 (2020).
- 4) P. Blake *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **91**, 063124 (2009).
- 5) B. Ma *et al.*, *Carbon* **109**, 384 (2016).
- 6) Z. H. Ni *et al.*, *Nano Lett.* **7**, 2758 (2007).
- 7) D. Yoon *et al.*, *J. Korean Phys. Soc.* **55**, 1299 (2009).
- 8) X.-L. Li *et al.*, *Nanoscale* **7**, 8135 (2015).
- 9) Y.-S. No *et al.*, *Scientific Report* **8**, 571 (2018).
- 10) M. Kamada *et al.*, *Carbon Trends* **16**, 100389 (2024).
- 11) K. Sasaki *et al.*, *C* **10**, 18 (2024).
- 12) M. A. El-Sayed *et al.*, *Nanomaterials* **11**, 1230 (2021).
- 13) I. H. Malitson, *J. Opt. Soc. Am.* **55**, 1205 (1965).
- 14) D. E. Aspnes and A. A. Studna, *Phys. Rev. B* **27**, 985 (1983).
- 15) Y. Y. Wang *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 043121 (2008).

執筆者



鎌田 雅博
先端技術研究所
松井研究室



松井 朋裕
先端技術研究所
松井研究室

公知

画像認識 AI における評価技術の動向と紹介

城所 龍 Ryu Kidokoro, カランダン ローレンス Lawrence Earl Carandang

[要 旨]

人工知能(AI)の急速な進化と、医療や品質検査など精度が重要な分野への応用拡大に伴い、AI モデルおよびその開発プロセスの包括的な評価が必要である。本稿では、画像認識 AI の評価における実践的手法を概観し、精度だけでなく解釈性や信頼性を含む評価フレームワークの中で、説明可能 AI(XAI)の役割を示す。パイプラインレベルでの評価の必要性を示し、Local Interpretable Model-Agnostic Explanations(LIME)、Class Activation Maps(CAM)などの代表的な XAI 手法による推論解釈やモデル改善への応用を紹介する。また、テスト時拡張やベイジアンネットワークを用いた不確実性の定量化によるロバスト性評価についても論じる。さらに、評価手法の多様なタスクや実データへの適用、評価指標と開発目標の統合に向けた課題について展望する。

1 はじめに

近年、ディープラーニングの進展により AI はビジネスや医療など幅広い分野で急速に普及し、特に生成 AI や LLM は企業 IT 戦略の中核を担っている。一方、AI の意思決定の不透明性は信頼性確保において課題であり、公平性や説明責任を担保する評価技術の確立が急務である。こうした背景を踏まえ、説明可能 AI(XAI)を中心とした包括的評価フレームワークの重要性が高まっている。

XAI は、AI のブラックボックス問題を解消し、判断根拠を理解可能にする技術として注目されている。医療や金融など重要領域では、AI の判断根拠の可視化が法規制や倫理面で不可欠である。しかし、現状の AI モデルの評価は精度や速度に偏り、誤判断やバイアスの原因特定は困難である。LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations)¹⁾や SHAP (SHapley Additive exPlanations)²⁾などの XAI 手法が寄与度分析を可能にしているが、説明の忠実度や安定性評価は発展途上である。信頼できる AI には、性能だけでなく説明の質や不確実性を統合した包括的評価技術が必要である。

本稿では、XAI による解釈性、公平性、説明の信頼性を定量化する新たな評価指標と手法を紹介する。

検出モデルの学習データとして Microsoft COCO データセット (© 2014 Microsoft. Licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License.)を使用した³⁾。

2 AI モデルの評価

第 1 章で述べた AI の信頼性の課題を踏まえ、本章では AI モデルの評価技術を紹介する。

評価には量的および定性的な多様な観点が存在する。例えば、精度は分類等のあるタスクに対するモデルの性能を定量的に評価する。学習時間は、AI モデルをどれだけ迅速に作成できるかを示し、時間制約のある業務において重要な要素となる。また、判断根拠の妥当性は AI が出力する結果の信頼性や説明可能性を定性的に示す観点である。これらの観点は、AI の性能を総合的に判断するために不可欠である。

2.1 AI 開発パイプラインの評価

第 2 章では「AI モデル」の評価について述べたが、評価対象はモデル自体に限られるわけではない。本節では、評価対象として「AI 開発パイプライン」を紹介する。AI 開発パイプライン(単に「AI パイプライン」とは、AI モデルの開発から運用直前の一連の流れを指し、開発者、データセット、AI モデル、推論結果の 4 つの構成要素と、データ収集、前処理・後処理、学習、推論、性能計算の 6 つのプロセスから成り立っている。図 1 では、それぞれの要素とプロセスがどのように連携しているかを示している。

従来の機械学習では、モデルを構築してから精度を評価し、その結果に応じて改良を加える後追型の開発が一般的だった。しかしこの方法は、特にデータ準備の段階で必要な特徴量の選定が不十分な場合、無駄なデータ収集や前処理が発生し、開発効率性が低下する。この課題に対応するには、モデル評価を通じて、性能に貢献しない、あるいは悪影響を与える特徴量やノイズの多いデータを特定することが重要である。これにより、特徴量の取捨選択を含むデータ設計を最適化でき、限られたデータでも高精度なモデル構築が可能になる。

従って、モデル評価は単なる性能確認ではなく、データ設計とモデル改善のための重要な指針となる。

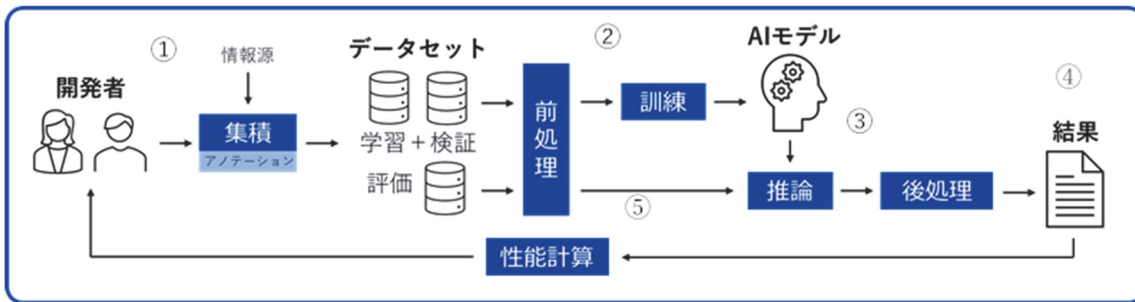


図1 AIパイプライン。① 開発者がさまざまな情報源からデータを取得し、必要に応じてデータにラベル(アノテーション)を付けてデータセットを作成する。データセットを学習用、検証用、または評価用データの3つのサブセットに分ける。② 学習用データと検証用データを前処理にかけ、あるAIモデルを訓練する(AI学習)。③ 評価用データを前処理にかけ、②で訓練したモデルに推論させる。④ 必要に応じて③の結果を後処理にかけ、最終結果を求めてモデル性能を測定する。⑤ 必要に応じて、モデル性能に基づいて条件を変えて実験をやり直す。

2.2 説明可能 AI「XAI」

近年、モデルの信頼性と性能の向上を目的に、ブラックボックスの AI モデルを解釈するための研究が世界中で数多く行われている。こうした研究の成果の 1 つが、いわゆる「Explainable Artificial Intelligence (XAI)」や「説明可能 AI」である。XAI とは、AI の判断や予測の根拠を人間が理解できる形で提示する技術や手法を指す。AI が注目する特徴と人間の視点を比較することで AI の評価手法の 1 つになる。

本稿では、広く用いられている XAI 技術をいくつか紹介する。

2.2.1 大局説明と局所説明

XAI は、その説明範囲に基づいて大局説明と局所説明の 2 つに分類される¹⁾。大局説明は、AI モデルの全体的な振る舞いや内部の支配的な傾向を分析するものであり、複数のテストデータを用いてモデルの挙動を評価する。代表的なものとして決定木が挙げられる。

局所説明は、個々の予測結果の判断理由を理解し、入力の中の成分が最も貢献したかを把握するものである。大局説明と違って局所説明では、1つのテストデータのみを用いてモデルの挙動を評価する。代表的なものとして顕著性マップ¹⁾が挙げられる。本稿では、局所説明に焦点を当てるとともに、その代表的手法である顕著性マップについて、第 3.1 節「顕著性マップとは」にて詳述する。

2.2.2 モデル依存手法と非依存手法

XAI 手法は、モデルの内部パラメータ(重み、勾配など)にアクセスできるかで分類できる。

モデル依存(model-specific)手法は内部パラメータを利用してネットワーク層間の出力を解析するため、特定のモデル構造にしか適用できない。例えば、リカレントニューラルネットワーク(RNN)の出力は

畳み込みネットワーク(CNN)とは異なる。

一方、モデル非依存(model-agnostic)手法は、入力と出力の変化を解析することで、内部構造に関係なく幅広いモデルに適用できる。

モデル依存手法は内部パラメータを用いるため、AI の特定の部分を見ることでより細かい説明や評価ができる。例えば、画像認識ニューラルネットのある層を見ることで、AI が物体の形、色、サイズなどが適切に学習されているか確認できる。一方、モデル非依存手法は内部構造に関係なく、あらゆるモデルに適用可能という利点がある。そのため、モデルの仕組みや内部パラメータが取得できるかに応じて、使い分ける必要がある。なお、不確実性の具体的な定量化手法については、第 4 章「不確実性計算を用いたモデル堅牢性の評価」にて詳述する。

2.3 評価指標

精度は性能を測る上で最も重要で第一の評価指標だが、唯一の評価基準ではない。AI モデルとその開発パイプラインも、その透明性、一貫性、データの品質、計算効率といった観点から評価できる。これらの評価観点は、モデルの精度と直接的または間接的に関連に関連するため、考慮する価値がある。

推論論理の解釈(透明性)は、正しい予測であっても誤った情報に基づく可能性を評価する。例えば、画像分類モデルが背景の雪を見てホッキョクグマと予測するケース(Clever Hans 効果⁵⁾)。前述のとおり、XAI などの手法を使えば、モデルが注目している特徴を特定し、人間が見ている特徴と一致しているかが確認できる。これにより、学習手法の有効性を評価し、ユーザの信頼性も向上する。

モデルの堅牢性の定量化(一貫性)はカメラ画像のような入力データにおいて、照明や角度といった不可避な要因によるばらつき

¹⁾ 顕著性マップの可視化には、ヒートマップがよく使われる。実際、多くの場合、顕著性マップは「顕著性マップ」ではなく、「ヒートマップ」と呼ばれることがある。

を評価する。人間はこうした変化にも対応できるが、AI モデルは画素値のわずかな違いにも影響を受けやすい。優れたモデルは、条件の変化に左右されずに安定した検出ができる必要がある。堅牢性(ロバスト性)はこの安定性を測る指標であり、モデルがどのような条件下で信頼できるかを評価する手がかりとなる。

学習データの帰属(Training Data Attribution, TDA)は、誤ったラベル付けや冗長なデータが与える影響を分析し、データの品質を評価する。例えば、画像分類問題で猫の写真に「犬」というラベルを誤って付け、その画像にモデルを学習させると、性能低下を招く可能性がある。こうした問題に対処するため、TDA を活用し、モデルのパラメータ更新時に各学習データの重要性(重み)を算出する。この重要性に基づき、モデル学習に寄与しない、あるいは学習を阻害する可能性のあるデータを特定し、データセットから除外することが可能となる。

モデルの計算効率の測定(効率性)は、精度を維持しつつモデルのサイズの最適化ができるかを評価する。モデルが高性能になるほどファイルサイズや必要な実行環境も大きくなる。量子化⁶⁾や蒸留⁷⁾などの手法は精度を保ったままモデルを簡素化する手段となり、これらの前後でサイズを比較することで計算効率を評価できる。

2.4 性能向上への XAI 技術の応用

本稿ではハイパーパラメータの調整に関するアイデアを開発者に提供することに加えて、評価結果を AI パイプライン内で何らかのフィードバックループとして直接活用する方法をいくつか紹介する。例えば、物体検出モデルの作成中に、特定の学習用画像に対する顕著性マップ(詳細は第 3 章)を計算し、ground truth(正解データ)と比較することができる(図 2)。この比較結果を逆伝播に使用する追加の損失値として利用することが可能であり、これは XAI 手法による損失/特徴量/勾配の拡張の一例となる。顕著性マップは推論結果の補正にも活用でき、例えば、検出されたバウンディングボックスが顕著性マップ上の高顕著性領域と一致しない画像に対しては、信頼度スコアを下げるといった処理が可能である。

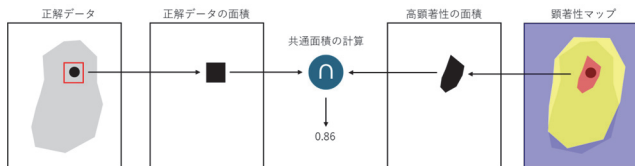


図 2 正解データと顕著性マップの比較方法の例。正解データとなるバウンディングボックスの面積と、顕著性マップによる抽出される高顕著性の面積の共通面積(Intersection over Union, IoU)を取る。

一方、前節で述べたように、TDA はデータセットの設計に活用で

きる。学習用データの選定がモデル性能に大きく影響することは広く知られており、TDA を用いたデータセット設計は、学習用サンプルの品質と情報量を定量的に評価する手段を提供する。これにより、モデルにとって最も有益なデータを明確に選定することが可能となる。

3 顕著性マップを用いた推論論理の解釈

本章では、物体検出の XAI を評価するために顕著性マップを紹介する。

3.1 顕著性マップとは

顕著性マップとは、推論時に最も注目されているデータの特徴を示す画像のことである。ここでいう「注目」とは、モデルが推論結果を出すときに寄与している特徴量のことである。図 3 は犬の画像に対して Eigen-CAM(Eigenvalue-based Class Activation Mapping)⁸⁾で可視化した顕著性マップである。このように、犬と判定した根拠は犬の中心の特徴量から判定したとわかる。



図 3 (左⇒右)対象画像, 顕著性マップ, 対象画像に顕著性マップを重ねた画像

3.2 顕著性マップ生成技術

顕著性マップ生成技術には多くの手法が存在するが、本稿ではモデル非依存の LIME、モデル依存の Eigen-CAM、および D-CLOSE(Detector-Cascading multiple Levels of Segments to Explain)⁹⁾の 3 つを紹介する。

3.2.1 LIME

LIME とは、入力データの一部をランダムに摂動させたサンプル群を生成し、それらに対するモデルの確信度を取得することで、局所的な説明モデルを構築する手法である。具体的には、摂動後のデータを説明変数、モデルが予測した確信度を目的変数として線形回帰を行い、各特徴の重要度を推定する。摂動箇所が予測に重要であれば確信度は低下し、重要でなければ確信度は維持される。

物体検出モデルに対して、LIME で可視化した画像作成には、摂動として対象領域の画素値をすべて 0 に置き換えたピクセルでマスクする手法が採用できる。その結果の例は図 4(b)であり、顔や頭、足から犬と判断していることが示唆されている。

3.2.2 CAM/Grad-CAM/Eigen-CAM

CAM(Class Activation Mapping)とは、CNN(畳み込みニューラルネットワーク)の構造を活用して、画像内のどの領域が分類に寄与したかを可視化する手法である⁹⁾。アルゴリズムとしては、CNNの最終畳み込み層の出力に対して、分類層の重みを乗じることで、画像内の重要領域を強調したマップ(アクティベーションマップ)を生成する。

CAMの弱点としては、モデル構造に制約がある点が挙げられる。具体的には、グローバル平均プーリング(GAP)を用いた分類層を持つCNNにしか適用できず、既存の多くのモデルに対して柔軟に利用できないという課題がある。そこで提案されたのがGrad-CAM(Gradient-weighted Class Activation Mapping)である。Grad-CAMは、モデルの出力に対する勾配を利用して、最終畳み込み層の特徴マップを重み付けし、画像内の注目領域を可視化する手法である¹⁰⁾。これにより、モデル構造に依存せず、幅広いCNNベースのモデルに対して適用可能となった。

物体検出などのタスクにおいては、Eigen-CAMが有効である。Eigen-CAMは、特徴マップに対して主成分分析(PCA)や特異値分解(SVD)を行い、固有ベクトルを抽出して可視化する手法である。これにより、クラスに依存しない形で、モデルが注目する領域を抽出することが可能となる。

CAMはさまざまな派生や改良が加えられており、例えばCluster-CAM¹¹⁾やExpected Grad-CAM¹²⁾などが提案されている。これらの手法は、特徴量をクラスタリングする、勾配計算を改良することで処理時間や精度の向上を目指している。CAM系の手法は、説明可能AI(XAI)の技術として、モデルの判断根拠を人間に理解可能な形で提示する重要な手段であり、現在も注目され続けている技術である。

Eigen-CAMで可視化した画像は図4(c)であり、顔周辺の特徴から、犬であると判定している。

3.2.3 D-CLOSE

D-CLOSEは、複数の異なるサイズの摂動領域を用いて対象画像に対するモデルの予測を繰り返し取得し、それらの結果を統合することで、可視化を実現する手法である。LIMEでは、単一の分割粒度で摂動を加え、局所的な線形モデルにより説明を行うが、D-CLOSEでは、粗い分割から細かい分割まで複数のスケールで摂動を加えることで、広域的かつ詳細な特徴の影響を同時に捉えることが可能となる。D-CLOSEで可視化した画像は図4(d)であり、顔や頭から犬と判断していることが示唆されている。

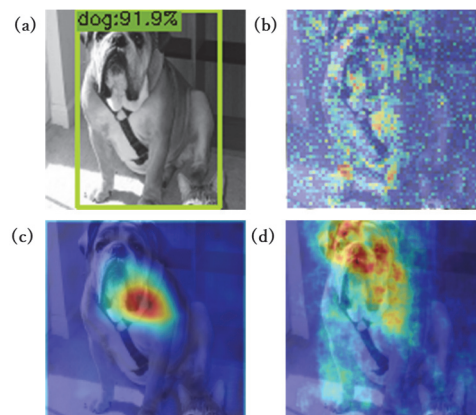


図4 (a) 推論結果付き入力画像。(b) LIMEで作成した顕著性マップ。(c) Eigen-CAMで作成した顕著性マップ。(d) D-CLOSEで作成した顕著性マップ。

4 不確実性計算を用いたモデル堅牢性の評価

本章では、モデル予測の信頼性を示す不確実性という指標の定量化手法を紹介する。

人間と異なり、AIモデルは学習していない入力に対して「わからない」とは答えられず、常に何らかの予測を返す。例えば、猫と犬のみに学習させた画像分類モデルにライオンの画像を与えると、学習していないにもかかわらず「猫」と高い確信度で誤分類する可能性がある。

予測の信頼性を評価する指標の一つに「不確実性」がある。物体検出では、確信度が物体の存在確率を示す一方、不確実性はその予測自体の信頼度を表す。前述の例にならえば、根拠(ライオン画像)のない推論(ライオンに対する「猫」という予測)は、たとえモデルの確信度が高くても、不確実性が高くなる可能性がある。

不確実性を測定する最も簡単な方法は、入力データの本質を変えない条件下で、同じ入力に対して複数回予測を行わせることである。例えば、入力画像の色を変更したり、サイズを変更したりすることで予測のばらつきを観察し、不確実性を定量化することができる。一般的な不確実性の指標には、信頼区間、変動範囲、分散、標準偏差などがある。

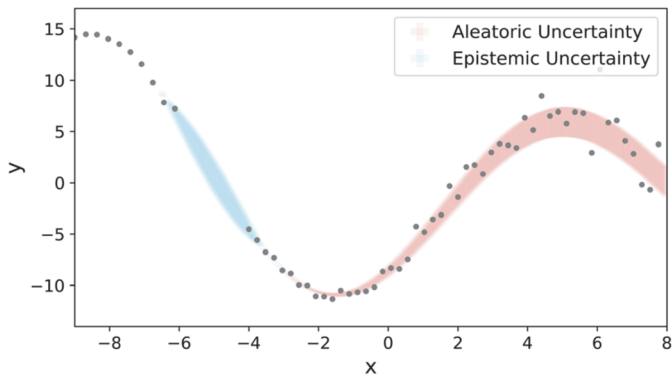


図5 認識論的不確実性(epistemic)と偶然的な不確実性(aleatoric)¹³⁾。データ不足で-6~-4の間の振る舞いがモデル化できなくなり、認識論的不確実性が発生する。一方、ばらつきのため、実際の振る舞いがわからなくなる。これにより、モデルの予測は決めた値ではなく範囲になり、偶然的な不確実性が発生する。

不確実性は、認識論的不確実性(epistemic)と偶然的な不確実性(aleatoric)の2つに大別される¹⁴⁾。前者は、学習用以外のデータや不適切なモデル選択によって生じ、データの追加やモデル改善で軽減可能である。後者は、環境に内在するノイズやランダム性に起因し、環境を変えない限り軽減は困難である。図5は、回帰課題における両者の可視化を示している。

不確実性を定量化する一般的な方法は、同じテスト入力に対して複数の推論結果を得ることである。以下に、ネットワーク内部を変更する必要があるかどうか(モデル依存/モデル非依存)で分類して、いくつかの手法を紹介する。

4.1 モデル非依存手法

不確実性を評価する一般的な方法は、同じデータセットに対して初期値やハイパーパラメータ、アーキテクチャを変えて複数のモデルを作成する手法で、Deep Ensembles(深層アンサンブル)と呼ばれる¹⁵⁾。学習条件を変えることで、各モデルが異なる学習経路をたどり、収束点が異なれば推論結果も変わる可能性がある。学習用データに矛盾がない場合、未知データに対する高い不確実性は、モデルが重要な特徴を正しく捉えられていないこと、すなわち認識論的不確実性(epistemic uncertainty)を示す。

関連手法としてブートストラップ集約(bagging)があり、これはモデル構成を変えずに、学習用データから復元抽出した異なるサブセット(ブートストラップセット)を使って複数のモデルを作成する方法である¹⁶⁾。

ただし、複数のモデルを作成することが常に現実的とは限らない。単一モデル手法としては、テスト時拡張(Test-Time Augmentation, TTA)があり、追加の学習過程を必要とせずに既存モデルの評価が可能となる¹⁷⁾。TTAでは、評価対象の入力に対して複数の

変換(移動や回転などのアフィン変換、またはコントラスト拡張などの再着色)を施し、それぞれの変換結果をモデルに通すことで複数の推論結果を得る。図6には、そのような変換のいくつかの例が示されている。

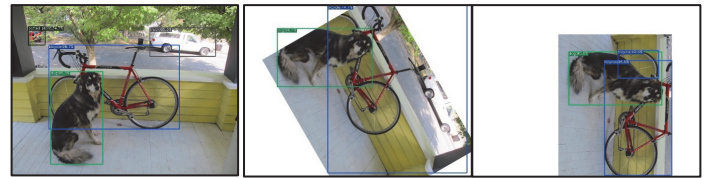


図6 元画像, 変換画像#1, 変換画像#2

変換パターンの範囲を探索し、検出信頼度を2次元配列として記録することで、モデルの不確実性の広がりグラフとして可視化することができる。これにより、モデルの弱点を特定し、学習方法を適切に調整することが可能となる。

図7は、図6左の画像における「犬」の検出確信度が、画像の回転角(-150°~150°)によって変化の様子を示している。0°(元画像)では確信度は0.95だが、78°回転で0.64に低下し、~100°では検出不能になる。これは、モデルが回転に対して不変でなく、性能に影響を与える可能性を示している。

このような変動自体は不確実性として扱えるが、単一の指標が必要な場合は、標準偏差や最大傾斜などの「平坦さ」指標が有効である。本研究では、標準偏差を用いる。確信度は区間[0,1]に有界であるため、その標準偏差は区間[0,0.5]に制限される。そこで、不確実性をパーセンテージとして表すための式(1)を次のように定義する。

$$\text{不確実性} = 2\sigma \times 100\% \quad (1)$$

図7の確信度の標準偏差を求めると、 $\sigma=0.2689$ となり、式(1)より不確実性は53.78%となる。従って、図6左の画像における「犬」の確信度0.95に対しては、約53.8%の不確実性が存在すると評価できる。

不確実性はモデルの性能ではなく、安定性や一貫性を示す指標である。正確な評価には両者の考慮が要る。高性能でも不確実性が高いモデルは、本質的特徴を捉えられず背景に依存している可能性があり、その原因としては、データの多様性不足をはじめ、さまざまな要因が考えられる。一方、性能・不確実性ともに低い場合、モデルが単純であることが示唆され、構造の見直しが重要である。最良のモデルは、高性能かつ低不確実性を両立している。

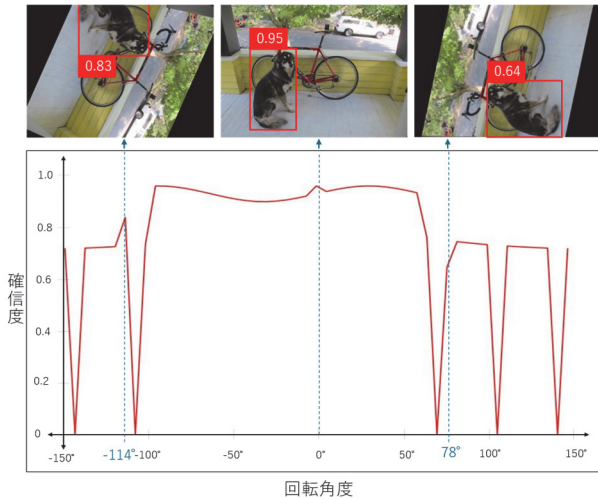


図7 画像回転度対「犬」の検出確信度グラフ

4.2 モデル依存手法

モデル非依存の手法と比較して、モデル依存の手法は、モデルのソースコードへのアクセスが必要となるため、実装が高度かつ困難である。しかし、これらの手法はより精緻な評価を可能にし、開発者がモデルの改善すべき具体的な箇所を特定することを可能にする。以下では、そのような手法のうち2つについて簡単に説明する。

従来のニューラルネットワークでは、各ニューロンまたはノードに対して正確な重みが計算され、学習過程で調整される。一方、ベイジアンネットワーク¹⁸⁾では、ネットワークの重みは確率変数であると仮定され、学習の目的は、これらの変数を記述する確率分布(通常はガウス分布)の平均と分散を予測することである。データを入力する際の順伝播では、これらの確率分布からサンプリングを行い、特定の重み値を取得する。ある入力データに対する不確実性を計算する際には、複数回の順伝播を実行し、それぞれ異なる重み値の組み合わせがネットワーク内で使用される。ベイジアンニューロンの数式を式(2)に示す。

$$y = f(\sum_i w_i x_i + b), \text{ where } w_i \sim N(\mu_i, \sigma_i^2) \quad (2)$$

y :ニューロン出力

$f(\cdot)$:活性化関数(activation function)

w_i :重み

x_i :入力特徴量

b :バイアス値

μ_i, σ_i^2 :分布 N の平均, 分散

モデルに Dropout 層²⁾が含まれている場合、それをを用いて不確実性を計算する手法として Monte Carlo Dropout¹⁹⁾が存在する。Dropout は本来、訓練時に過学習を防ぐために使用されるが、こ

の手法では推論時にも Dropout 層を有効化し、ランダムな重みにゼロを割り当てることで、重みパターンを変化させる。これは事実上、該当する重みを無効化することになり、ベイズネットワークと同様の効果を生み出す。これにより、複数の推論結果を取得することが可能となる。

5 まとめ

AIモデル開発においては、モデル構築後に精度を評価し、その結果に基づいて改良を行うことが重要である。しかし従来は、モデルの改良には大量のデータ追加が必要となり、多大なコストがかかっていた。これは、AIの判断根拠がブラックボックスであり、効果的なデータの特徴が人間には分かりにくいことが一因である。本稿では、こうした課題に対し、XAI技術の紹介と実施例を通じて、効果的な追加データの選別方法の可能性を示した。さらに、これらのXAI技術をAIパイプラインの性能評価に組み込むことで、過不足なデータの存在を可視化し、理解を促進できることを示した。なお、本稿の研究では物体検出モデルの評価を行ったため、他のタスクに対しては別の評価手法が必要となる。今後は、異なるAIモデルや実データへの適用、不確実性を求める関数によるさらなるXAI技術の開発・評価を進める予定である。また、これらの評価技術をAIパイプラインに組み込む際には、目的に応じた評価指標の設計を行う必要があり、これらについても今後の研究課題となっている。

参考文献

- 1) M. T. Ribeiro *et al.*, ACM SIGKDD **22**, 1135–1144 (2016).
- 2) S. Lundberg *et al.*, Neural Inf. Process. Syst. **31**, 4768–4777 (2017).
- 3) T.-Y. Lin *et al.*, Eur. Conf. Comput. Vis. **13**, 740–755 (2014).
- 4) V. B. Truong *et al.*, Proc. Mach. Learn. Res. **222**, 1385–1400 (2023).
- 5) J. Kauffmann *et al.*, arXiv:2006.10609 (2020).
- 6) N. Wang *et al.*, Adv. Neural Inf. Process. Syst. **32**, 7686–7695 (2018).
- 7) G. Hinton *et al.*, NIPS Workshop (2014).
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1503.02531>
- 8) M. B. Muhammad *et al.*, arXiv:2008.00299 (2020).
- 9) B. Zhou *et al.*, IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit., 2921–2929 (2016).
- 10) R. R. Selvaraju *et al.*, Int. J. Comput. Vis. **128**, 336–359 (2019).

²⁾ Dropout 層: 学習中に、一部のニューロン(計算ユニット)をランダムに無効化する層。

- 11) Z. Feng *et al.*, arXiv:2302.01642 (2023).
- 12) V. Buono *et al.*, arXiv:2406.01274 (2024).
- 13) C. Yang *et al.*, J. Cheminform. **15**, 13 (2023).
- 14) A. Kendall *et al.*, Adv. Neural Inf. Process. Syst. **30**, 5574–5584 (2017).
- 15) B. Lakshminarayanan *et al.*, Adv. Neural Inf. Process. Syst. **30**, 6402–6413 (2017).
- 16) L. Breiman, Mach. Learn. **24**, 123–140 (1996).
- 17) G. Wang *et al.*, Med. Image Anal. **54**, 154–162 (2019).
- 18) D.J.C. MacKay, Neural Computation, **4**, 448-472 (1992).
- 19) Y. Gal *et al.*, Proc. Mach. Learn. Res. **48**, 1050–1059 (2016).

執筆者



城所 龍
先端技術研究所
第三研究室



カラندان ローレンス
先端技術研究所
第三研究室

公開鍵暗号概要

森 隆 Takashi Mori

[要 旨]

盗聴されうる通信路を用いて秘密情報を安全にやりとりするための暗号は、古くは第一次世界大戦の軍事外交用途に用いられ、長い歴史をもつ。暗号通信では鍵に基づいて暗号化および復号を行うが、暗号化用の鍵と復号用の鍵が等しい共通鍵暗号では、どのようにして安全に共通鍵を送受信者で共有するかが課題となる。つまり、盗聴されうる通信路を用いて共通鍵を送信することはできないため、安全な別の手段で共通鍵を配送する必要があった。この課題を解決するのが公開鍵暗号であり、暗号化と復号で異なる鍵を用意して、暗号化用の鍵は公開鍵として公開し、復号用の鍵は秘密鍵として秘密にする方式である。また、盗聴されうる通信路を用いて安全に秘密鍵を共有する鍵共有方式もあり、これも広義の公開鍵暗号である。公開鍵暗号は、インターネット上の暗号通信に広く用いられ、現代の情報化社会において必要不可欠な技術となっている。本稿では、現在の公開鍵暗号として RSA 暗号、DH 鍵共有、楕円曲線暗号の基本原理解説し、次世代の公開鍵暗号として量子コンピュータを用いても解読が困難な耐量子計算機暗号の概要について紹介する。

1 はじめに

通信により秘密情報を安全にやりとりしたいという要求に対して、実際の通信では第三者に盗聴される可能性がある。特に無線通信は第三者による傍受が容易で、かつ傍受されたことが正規の送受信者には分かりにくいという問題がある。このため、第三者に通信を盗聴されても秘密情報が分からないようにする暗号が必要となり、古くは第一次世界大戦の軍事外交用途に用いられ、長い歴史をもつ¹⁾。つまり、暗号の目的は盗聴されうる通信路を用いて安全に秘密情報を送信することである。

例えば古典的な暗号では、**図 1** のように送信者(Alice)は平文「hello」の各アルファベットを 4 文字ずらして暗号文「lipps」を受信者(Bob)へ送信する。盗聴者(Eve)は暗号文「lipps」を盗聴しても意味が分からないのに対して、受信者(Bob)は受信した暗号文「lipps」の各アルファベットを 4 文字戻して平文「hello」を得ることができる。この暗号を「方式」と「鍵」に分けて考えると、方式はアルファベットを n 文字ずらすことであり、鍵は $n = 4$ となる。暗号を解読するには方式と鍵の両方が必要となるが、古典的な暗号では方式が分かると暗号の解読が容易になるため、方式と鍵の両方を秘密にしていた。上記の例では、アルファベットを n 文字ずらす方式が分かれば、26 通りの n を調べると必ず解けてしまう。

一方、現代の暗号では、方式が既知でも鍵が未知であれば暗号の安全性が保たれるようにしており、鍵のみを秘密とし方式は公開している。方式を秘密にするより公開する方が広く研究され、むしろ安全性が高くなると考えられている。



図 1 古典的な暗号の例

前述の古典的な暗号では、暗号化でずらす文字数 n と復号で戻す文字数 n' は等しくする($n = n'$)必要がある。このように、暗号化用の鍵と復号用の鍵が等しいものを共通鍵暗号と言う。共通鍵暗号では、どのようにして安全に共通鍵を送受信者で共有するかが課題となる。つまり、盗聴されうる通信路を用いて共通鍵を送信することはできないため、安全な別の手段を用意して共通鍵を配送する必要があった。この課題を解決するのが公開鍵暗号である。**図 2** に示すように、受信者(Bob)は暗号化と復号で異なる鍵を用意し、暗号化用の鍵は公開鍵として公開し、復号用の鍵は秘密鍵として秘密にする。送信者(Alice)は公開鍵を用いて平文を暗号化して暗号文を送信し、受信者(Bob)は秘密鍵を用いて暗号文を復号して平文を得る。暗号化用の公開鍵では暗号文を復号できないため、盗聴者(Eve)が公開鍵と暗号文を入手しても平文を得ることはできない。公開鍵暗号の発明により、盗聴されうる通信路のみを用いて安全に秘密情報を伝送できるようになった。本稿では、現在広く用いられている主な公開鍵暗号の基本について解説するとともに、次世代の公開鍵暗号である耐量子計算機暗号の概要について紹介する。

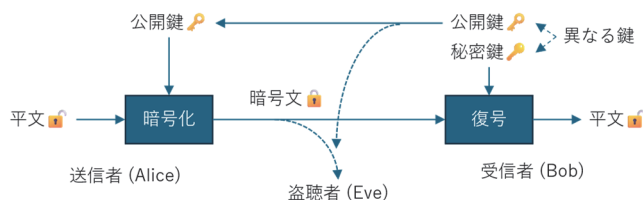


図 2 公開鍵暗号の手順

2 公開鍵暗号の特徴

多対多の暗号通信に必要な鍵の数を考える。共通鍵暗号では、鍵を共用すると共用した鍵で暗号文を復号できるため、暗号通信のすべての組み合わせに対してそれぞれ異なる鍵が必要となる。これに対して公開鍵暗号では、複数の送信者が暗号化用の公開鍵を共用しても、公開鍵では暗号文を復号できないため安全性が保たれる。このため多対多の暗号通信を行う場合でも、必要な鍵の組は受信者の数だけで良い。例えば8対8の通信では、**図3**に示すように、共通鍵暗号では28個の鍵が必要となるのに対して、公開鍵暗号では8組の鍵で良い。

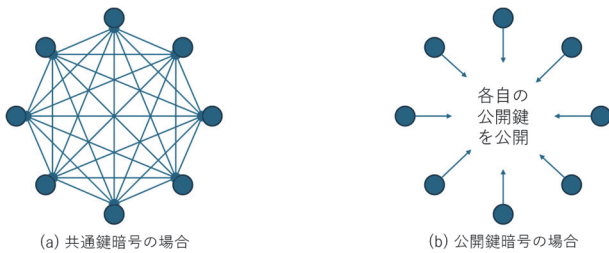


図3 8対8の暗号通信に必要な鍵の数

公開鍵暗号は、秘密鍵の共有が不要で多対多の暗号通信も容易であるという利点を持つが、暗号化および復号の計算量が多いという欠点がある。よって、大量のデータを公開鍵暗号で送信するのは負荷が大きいという課題がある。一方、共通鍵暗号は、共通鍵を安全に共有する必要があり、多対多の暗号通信には多数の共通鍵が必要であるという欠点があるが、暗号化および復号の計算量が少ないという利点を持つ。このため、最初に公開鍵暗号を用いて送受信者で鍵を共有し、次にその鍵を用いて共通鍵暗号でデータを送信する手法が、インターネット上の暗号通信に広く用いられている。公開鍵暗号を用いた鍵の共有はデータ量が少ないため計算量は大きな問題にならず、大量のデータは共通鍵暗号により効率的に送信されるとともに、共通鍵の共有は公開鍵暗号によって安全に行われるため、両暗号の欠点を巧妙に回避した手法である。

3 現在の公開鍵暗号²⁾

3.1 RSA暗号

RSA暗号は、1978年に Rivest, Shamir, Adleman の3者によって発表された公開鍵暗号であり(RSAは3者の頭文字)、大きな数の素因数分解が難しいことに基づいている。つまり、2つの素数 p, q が与えられたとき、それらの積 $n = p \times q$ を求めるのは容易であるが、積 n が与えられたときに p, q を求める素因数分解

は計算量が膨大になる。

RSA暗号の手順を図示すると**図4**のようになる。

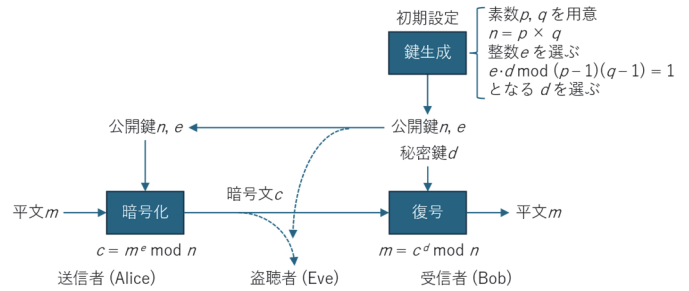


図4 RSA暗号の手順

まず受信側にて以下の初期設定を行う。

- 2つの素数 p, q を用意する
- 素数の積 $n = p \times q$ を求める
- $(p-1)(q-1)$ と互いに素な、 $(p-1)(q-1)$ より小さい正の整数 e を選ぶ
- $e \cdot d \bmod (p-1)(q-1) = 1$ となる d を選ぶ(modは除算の余り)

- n と e を公開鍵として公開する
- d は秘密鍵として秘密にしておく

小さな数で数値例を示すと、

- 2つの素数 $p = 3, q = 5$ を用意する
- 素数の積 $n = 3 \times 5 = 15$ を求める
- $(3-1)(5-1) = 8$ と互いに素な、8より小さい正の整数 $e = 3$ を選ぶ
- $e \cdot d \bmod (3-1)(5-1) = 1$ となる $d = 3$ を選ぶ($e \cdot d = 3 \times 3 = 9, 9 \bmod 8 = 1$)
- $n = 15, e = 3$ を公開鍵として公開する
- $d = 3$ は秘密鍵として秘密にしておく(この数値例では e と d が等しいが、実際には異なる値)

RSA暗号では、 $\bmod n$ におけるべき乗計算の性質、具体的には整数 m を $\bmod n$ で $(p-1)(q-1) + 1$ 乗すると元の m に戻るという性質を利用している。例えば**表1**の数値例のように、いずれの m も $\bmod 15$ で $(p-1)(q-1) + 1 = 9$ 乗すると元の m に戻ることが分かる。

表1 mod 15におけるべき乗計算

m	べき乗数								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	4	8	1	2	4	8	1	2
3	3	9	12	6	3	9	12	6	3
4	4	1	4	1	4	1	4	1	4
5	5	10	5	10	5	10	5	10	5
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
7	7	4	13	1	7	4	13	1	7
8	8	4	2	1	8	4	2	1	8
9	9	6	9	6	9	6	9	6	9
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
11	11	1	11	1	11	1	11	1	11
12	12	9	3	6	12	9	3	6	12
13	13	4	7	1	13	4	7	1	13
14	14	1	14	1	14	1	14	1	14

送信したいメッセージを m とすると、送信側では公開鍵 n, e を用いて次式によりメッセージ m を暗号化し、暗号文 c を送信する。

$$c = m^e \bmod n \tag{1}$$

受信側では秘密鍵 d を用いて次式により受信した暗号文 c を復号する。

$$m = c^d \bmod n \tag{2}$$

暗号化と復号により、メッセージ m を $\bmod n$ で $e \cdot d$ 乗することになるが、初期設定にて $e \cdot d \bmod (p-1)(q-1) = 1$ となるように e, d を選んでおり、 m を $\bmod n$ で $(p-1)(q-1) + 1$ 乗すると元の m に戻るから、復号により元のメッセージ m が得られる。例えば表2の数値例のように、 m を $e = 3$ 乗して暗号化し、暗号文を $d = 3$ 乗して復号すると元の m になる。

表2 べき乗による暗号化と復号の例

m	暗号化 べき乗数			復号 べき乗数		
	1	2	3	1	2	3
1	1	1	1	1	1	1
2	2	4	8	8	4	2
3	3	9	12	12	9	3
4	4	1	4	4	1	4
5	5	10	5	5	10	5
6	6	6	6	6	6	6
7	7	4	13	13	4	7
8	8	4	2	2	4	8
9	9	6	9	9	6	9
10	10	10	10	10	10	10
11	11	1	11	11	1	11
12	12	9	3	3	9	12
13	13	4	7	7	4	13
14	14	1	14	14	1	14

このように RSA 暗号では、 n と e が公開されているが、復号には d が必要となる。もし p と q が分かれば、 $e \cdot d \bmod (p-1)(q-1) = 1$ より d を求めることができ、解読されることになる。

n が分かっているときに $n = p \times q$ となる素数 p, q を求めるのは素因数分解であり、 p と q を非常に大きな数にすると素因数分解が困難になることから、RSA 暗号の解読は困難となる。ただし計算機の能力向上により、素因数分解の計算速度も年々速くなるため、定期的に p と q を大きくする必要がある。なお、受信側での初期設定では、2つの素数 p, q を用意した後に積 $n = p \times q$ を算出するため、大きな数の素因数分解を行う必要はない。

RSA 暗号の問題点として、鍵長増加に伴う問題と鍵生成の運用面の問題が挙げられる³⁾。鍵長増加に伴う問題は、安全性を確保するため計算機性能の向上に応じて鍵長を長くする必要があるのに対して、IC カードや組込機器など処理性能に制限がある環境では、長い鍵の処理が難しい点である。鍵生成の運用面の問題は、RSA 暗号では2つの大きな素数を使用するが、一方の素数が異なる利用者で同じ場合、秘密鍵を比較的簡単に導出できる点である。無作為に素数を選択すると異なる利用者が同じ素数を使用する確率は無視できるほど小さいが、乱数発生器の不具合や管理者のミスなどにより、同じ素数を使用する可能性があり、一方の素数が同じでも2つの素数の積である公開鍵は異なるため、重複を見つけにくい点が問題となる。

3.2 DH 鍵共有

DH 鍵共有は、1976年に Diffie と Hellman の2者によって発表された鍵共有方式であり(DH は2者の頭文字)、大きな数の離散対数問題が難しいことに基づいている。つまり、整数 g 、素数 p 、整数 a が与えられたとき、べき乗 $g^a \bmod p$ を求めるのは容易であるが、整数 g 、素数 p 、べき乗 $g^a \bmod p$ が与えられたときに整数 a を求める離散対数問題は計算量が膨大になる。

べき乗 $g^a \bmod p$ の計算は、 a 回の乗算を行うのではなく、次のようにして少ない乗算回数で計算することができる。 $x_2 = g^2 \bmod p$ 、 $x_4 = x_2^2 \bmod p = g^4 \bmod p$ 、 $x_8 = x_4^2 \bmod p = g^8 \bmod p$ 、 $x_{16} = x_8^2 \bmod p = g^{16} \bmod p$ 、 \dots を計算し、例えば22乗を求めたいときは $x_{16} \cdot x_4 \cdot x_2 = g^{16} \cdot g^4 \cdot g^2 \bmod p = g^{22} \bmod p$ のようにして、大きな数のべき乗も効率的に求めることができる。同様に、 $y_a = g^a$ の y_a と g が分かっているときに a を求める対数問題は、次のようにして容易に解くことができる。 $x_2 = g^2$ 、 $x_4 = x_2^2 = g^4$ 、 $x_8 = x_4^2 = g^8$ 、 $x_{16} = x_8^2 = g^{16}$ 、 \dots を計算し、例えば $x_{16} \cdot x_4 > y_a \geq x_{16}$ のように範囲を絞り込んでいくことで、効率的に a を求めることができる。このように $\bmod p$ なしの対数問題は効率的に解けるものの、 $\bmod p$ ありの離散対数問題ではこの計算方法が使えないため、 a を求めることは困難となる。

DH 鍵共有の手順を図 5 および以下に示す。

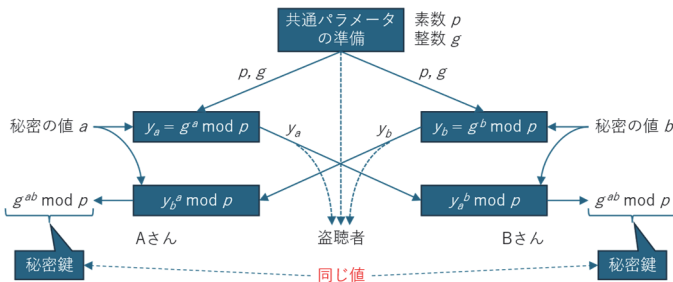


図 5 DH 鍵共有の手順

- ・ 共通パラメータとして素数 p と整数 g を公開する
- ・ Aさんは秘密の値 a を決めて、 $y_a = g^a \bmod p$ を計算して公開する
- ・ Bさんは秘密の値 b を決めて、 $y_b = g^b \bmod p$ を計算して公開する
- ・ Aさんは自分の秘密の値 a と Bさんの公開情報 y_b を用いて秘密鍵 $y_b^a \bmod p$ を計算する
- ・ Bさんは自分の秘密の値 b と Aさんの公開情報 y_a を用いて秘密鍵 $y_a^b \bmod p$ を計算する
- ・ 両者の秘密鍵は共に $g^{ab} \bmod p$ となる

小さな数で数値例を示すと、

- ・ 共通パラメータとして素数 $p = 23$ 、整数 $g = 9$ を公開する
- ・ Aさんの秘密の値は $a = 17$ とし、 $y_a = 9^{17} \bmod 23 = 3$ を公開する
- ・ Bさんの秘密の値は $b = 5$ とし、 $y_b = 9^5 \bmod 23 = 8$ を公開する
- ・ Aさんは秘密の値 $a = 17$ と Bさんの公開情報 $y_b = 8$ を用いて秘密鍵 $8^{17} \bmod 23 = 13$ を計算する
- ・ Bさんは秘密の値 $b = 5$ と Aさんの公開情報 $y_a = 3$ を用いて秘密鍵 $3^5 \bmod 23 = 13$ を計算する
- ・ 両者の秘密鍵は共に 13 となる

このように、盗聴される通信路で秘密鍵を送信することなく、両者で秘密鍵を共有することができる。盗聴者においては、素数 p 、整数 g 、 $y_a = g^a \bmod p$ 、 $y_b = g^b \bmod p$ が公開されているため、もし a の値が分かれば $y_b^a \bmod p$ により秘密鍵を算出可能であり、もし b の値が分かれば $y_a^b \bmod p$ により秘密鍵を算出可能である。しかし、 $y_a = g^a \bmod p$ から a の値を求める、もしくは $y_b = g^b \bmod p$ から b の値を求めるのは離散対数問題であり、 p を非常に大きな素数にすると離散対数問題を解くのが困難になることから、DH 鍵共有の解読は困難となる。ただし計算機能力向上により離散対数問題を解く速度も年々速くなるため、定期的に p を大きくする必要がある。なお、DH 鍵共有の手順では秘密の値 a 、 b を用意した後にべき乗 $y_a = g^a \bmod p$ 、 $y_b = g^b \bmod p$ を算出するため、離散対数問題を解く必要はない。

前節の RSA 暗号は任意のメッセージを伝達することができるため、秘密鍵をメッセージとして送信することにより鍵共有も可能であり、データの暗号化と鍵共有の両方に使用可能である。それに対して DH 鍵共有は、両者で何らかの秘密鍵を共有することができるが、任意のメッセージを伝達することはできないため、鍵共有専用の方式である。

3.3 楕円曲線暗号

楕円曲線暗号は、1985 年頃に Miller と Koblitz によってそれぞれ独立に提案された公開鍵暗号であり、楕円曲線上の離散対数問題が難しいことに基づいている。つまり、楕円曲線上の点 G と自然数 s が与えられたとき、楕円曲線上の乗算 $T = s \times G$ を求めるのは容易であるが、楕円曲線上の点 G 、楕円曲線上の乗算 $T = s \times G$ が与えられたときに自然数 s を求める楕円曲線離散対数問題は計算量が膨大になる。

楕円曲線は $y^2 = x^3 + ax + b$ で表される曲線であり、例えば $a = -1$ 、 $b = 1$ の場合の楕円曲線は図 6 のようになる。楕円曲線上の点を $G = (0.5, 0.790569)$ とし、図 7 に示すように点 G における接線と楕円曲線の交点 A を求め、点 A の y の符号を反転した点を B とする。これを楕円曲線上の加算および乗算 $B = G + G = 2 \times G$ とする。同様に図 8 に示すように、点 G と点 B を結ぶ直線と楕円曲線の交点 C を求め、点 C の y の符号を反転した点を D とする。これを楕円曲線上の加算および乗算 $D = B + G = 3 \times G$ とする。また図 9 に示すように、点 A と点 B を結ぶ直線と楕円曲線の交点がない場合 $A + B = O$ とし、楕円曲線上の減算を $B = O - A = -A$ とする。楕円曲線上の乗算 $T = s \times G$ の計算は、 s 回の加算を行うのではなく、次のようにして少ない加算回数で計算することができる。前節のべき乗の計算と同様に、 $A_2 = G + G = 2 \times G$ 、 $A_4 = A_2 + A_2 = 4 \times G$ 、 $A_8 = A_4 + A_4 = 8 \times G$ 、 $A_{16} = A_8 + A_8 = 16 \times G$ 、 \dots を計算し、例えば 22 倍を求めたいときは $A_{16} + A_4 + A_2 = 16 \times G + 4 \times G + 2 \times G = 22 \times G$ のようにして、大きな数の乗算も効率的に求めることができる。

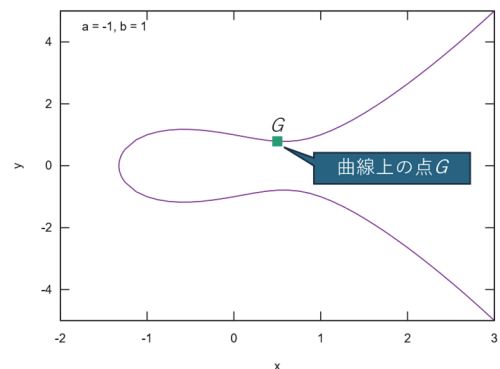


図 6 楕円曲線の例

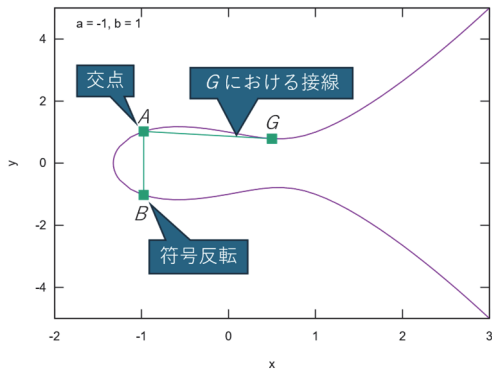


図7 楕円曲線上の加算の例1

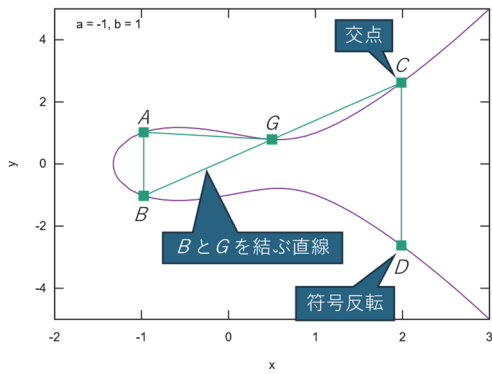


図8 楕円曲線上の加算の例2

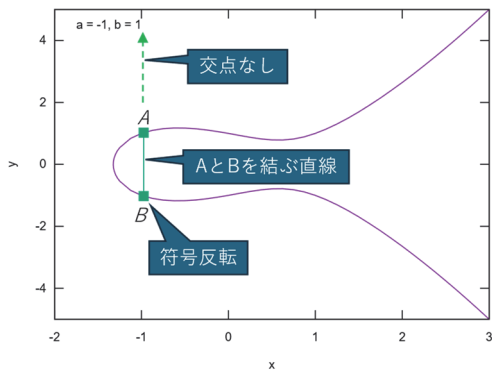


図9 楕円曲線上の減算の例

公開鍵暗号に用いられる離散的楕円曲線は、上記の楕円曲線を整数化したものである。素数を p とし、 x, y, a, b は 0 から $p-1$ までの整数とする。離散的楕円曲線は $y^2 = x^3 + ax + b \pmod{p}$ で表される離散的な整数値である。離散的楕円曲線上の点 G を決めると、自然数 s が既知の場合、離散的楕円曲線上の乗算 $T = s \times G$ は前述と同様に効率的に求めることができる。逆に $T = s \times G$ から自然数 s を求める離散対数問題は解くことが難しい。

楕円曲線暗号の手順を図10および以下に示す。

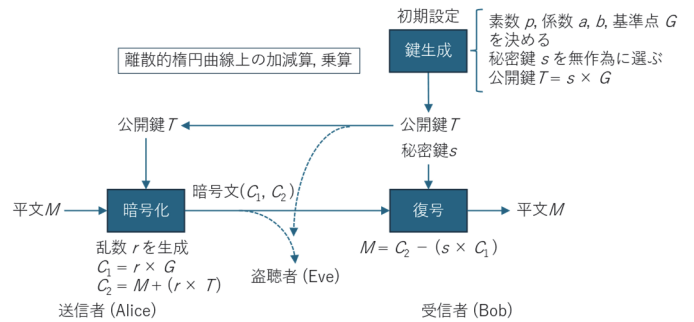


図10 楕円曲線暗号の手順

鍵生成:

- 共通パラメータとして素数 p , 係数 a, b , 基準点 G を公開する
- 受信側で秘密鍵 s を無作為に選び、 $T = s \times G$ を公開鍵として公開する

暗号化:

- 送信側で乱数 r を生成し、 $C_1 = r \times G$ を計算する
- 送信するメッセージ M に対して $C_2 = M + (r \times T)$ を計算し、 (C_1, C_2) を暗号文として送信する

復号:

- 受信側では、暗号文 (C_1, C_2) と秘密鍵 s を用いて $C_2 - (s \times C_1)$ を計算する
- その結果、 $C_2 - (s \times C_1) = M + (r \times s \times G) - (s \times r \times G) = M$ となり、メッセージ M が得られる

小さな数の数値例を示すと、

鍵生成:

- 共通パラメータとして素数 $p = 263$, 係数 $a = 2, b = 3$, 基準点 $G = (200, 39)$ を公開する
- 受信側で秘密鍵 $s = 13$ を選び、 $T = s \times G = (114, 104)$ を公開鍵として公開する

暗号化:

- 送信側で乱数 $r = 35$ を生成し、 $C_1 = r \times G = (219, 39)$ を計算する
- 送信するメッセージ $M = (88, 84)$ に対して $C_2 = M + (r \times T) = (250, 161)$ を計算し、 $(C_1, C_2) = ((219, 39), (250, 161))$ を暗号文として送信する

復号:

- 受信側では、暗号文 (C_1, C_2) と秘密鍵 $s = 13$ を用いて $C_2 - (s \times C_1)$ を計算する
 - その結果、 $(250, 161) - (13 \times (219, 39)) = (250, 161) - (201, 155) = (88, 84)$ となり、メッセージ M が得られる
- 楕円曲線暗号の利点として、短い鍵長と鍵生成の運用面の利点

が挙げられる³⁾。楕円曲線暗号は、RSA 暗号と比較して 1/10 程度の鍵長で同等の安全性が得られるため、IC カードや組込機器など処理性能に制限がある環境での利用にも適している。楕円曲線暗号では、秘密鍵として利用者ごとに異なる自然数 s を選択するが、もし異なる利用者間で同じ自然数 s を選択すると、公開鍵 $T = s \times G$ も同じになるため、重複を見つけやすい。これにより、脆弱な鍵を発行する問題が生じにくいという鍵生成の運用面の利点を持つ。

3.4 楕円曲線 DH 鍵共有

楕円曲線 DH 鍵共有は、楕円曲線を用いて DH 鍵共有を行う方式であり、略称は ECDH (Elliptic curve Diffie-Hellman key exchange) である。楕円曲線暗号と同様に、楕円曲線上の離散対数問題が難しいことに基づいている。

楕円曲線 DH 鍵共有の手順を図 11 および以下に示す。

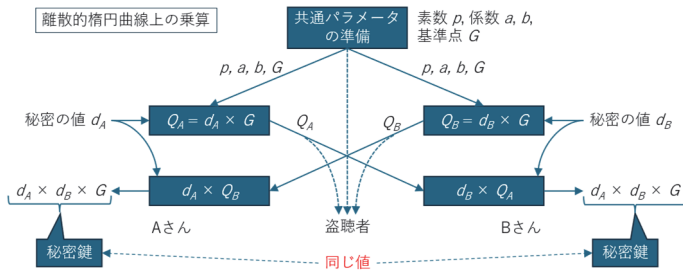


図 11 楕円曲線 DH 鍵共有の手順

- ・ 共通パラメータとして素数 p 、係数 a, b 、基準点 G を公開する
- ・ A さんは秘密の値 d_A を決めて、 $Q_A = d_A \times G$ を計算して公開する
- ・ B さんは秘密の値 d_B を決めて、 $Q_B = d_B \times G$ を計算して公開する
- ・ A さんは自分の秘密の値 d_A と B さんの公開情報 Q_B を用いて秘密鍵 $d_A \times Q_B$ を計算する
- ・ B さんは自分の秘密の値 d_B と A さんの公開情報 Q_A を用いて秘密鍵 $d_B \times Q_A$ を計算する
- ・ 両者の秘密鍵は共に $d_A \times d_B \times G$ となる

小さい数の数値例を示すと、

- ・ 共通パラメータとして素数 $p = 263$ 、係数 $a = 2$ 、 $b = 3$ 、基準点 $G = (200, 39)$ を公開する
- ・ A さんは秘密の値 $d_A = 23$ を決めて、 $Q_A = d_A \times G = (198, 95)$ を公開する
- ・ B さんは秘密の値 $d_B = 79$ を決めて、 $Q_B = d_B \times G = (129, 9)$ を公開する
- ・ A さんは自分の秘密の値 $d_A = 23$ と B さんの公開情報 $Q_B = (129, 9)$ を用いて秘密鍵 $d_A \times Q_B = 23 \times (129, 9) = (133, 138)$ を計算する

- ・ B さんは自分の秘密の値 $d_B = 79$ と A さんの公開情報 $Q_A = (198, 95)$ を用いて秘密鍵 $d_B \times Q_A = 79 \times (198, 95) = (133, 138)$ を計算する

- ・ 両者の秘密鍵は共に $d_A \times d_B \times G = (133, 138)$ となる

このように、盗聴されうる通信路で秘密鍵を送信することなく、両方で秘密鍵を共有することができる。

前節の楕円曲線暗号は任意のメッセージを伝達することができるため、秘密鍵をメッセージとして送信することにより鍵共有も可能であり、データの暗号化と鍵共有の両方に使用可能である。それに対して楕円曲線 DH 鍵共有は、両方で何らかの秘密鍵を共有することができるが、任意のメッセージを伝達することはできないため、鍵共有専用の方式である。

3.5 公開鍵暗号の強度

前述の公開鍵暗号の安全性は、大きな数の素因数分解や離散対数問題を解く計算量が膨大になることに基づいている。世界 1 位のスーパーコンピュータの演算性能と、素因数分解および楕円曲線上の離散対数問題を 1 年間で解くのに必要な演算性能の比較が CRYPTREC から報告されており⁴⁾、現在使用されている 2048 ビット RSA や 256 ビット ECDH を解読するためには、1000 年以上の非現実的な時間を要することになる。ただし、スーパーコンピュータの演算性能はムーアの法則に従って年々向上しているため、定期的に暗号の鍵長を長くして解読に要する計算量を増やす必要がある。逆に言うと、定期的に鍵長を長くすることにより、ムーアの法則に従ったスーパーコンピュータの演算性能向上に対抗して、公開鍵暗号の安全性を維持することができる。

一方、量子コンピュータを用いて素因数分解および離散対数問題を効率的に解く「ショアのアルゴリズム」が存在する。このため、RSA 暗号と楕円曲線暗号は理論的には解読されたことになる。しかし、実際の暗号を解読するには大規模な量子コンピュータが必要であり、現在の量子コンピュータでは規模が全然足りず、実際には解読されていない。ただし、攻撃者が盗聴した暗号文を保存しておき、将来量子コンピュータの性能が向上した頃に暗号文を解読する「Harvest now, decrypt later 攻撃」が知られている。時間経過により陳腐化しない機密データにおいては脅威となるため、事前の対策が必要となる。

4 耐量子計算機暗号

4.1 CRYSTALS-Kyber

現在の RSA 暗号および楕円曲線暗号の後継として、大規模な量子コンピュータを用いても解読が困難な耐量子計算機暗号

(PQC: Post-Quantum Cryptography)の研究開発が活発に行われている。米国 NIST は 2016 年から PQC 標準化の公募を開始し、鍵交換アルゴリズムとして格子問題に基づいた CRYSTALS-Kyber が採択され、標準化文書 FIPS 203 として公開されている⁵⁾。耐量子計算機暗号で用いられている格子問題は、

$$\begin{cases} a_{11}s_1 + a_{12}s_2 + \dots + a_{1n}s_n \approx t_1 \pmod{q} \\ a_{21}s_1 + a_{22}s_2 + \dots + a_{2n}s_n \approx t_2 \pmod{q} \\ \vdots \\ a_{m1}s_1 + a_{m2}s_2 + \dots + a_{mn}s_n \approx t_m \pmod{q} \end{cases} \quad (3)$$

上式の素数 q の剰余の連立線形近似方程式において、 $\mathbf{A} = (a_{ij})$ と $\mathbf{t} = (t_i)^T$ から $\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_n)^T$ を求める問題である。誤差が無い“=”の連立方程式の場合は効率的に解けるが、誤差がある“ \approx ”の連立方程式の場合は解くのが難しい。

CRYSTALS-Kyber の手順を図 12 および以下に示す⁶⁾。

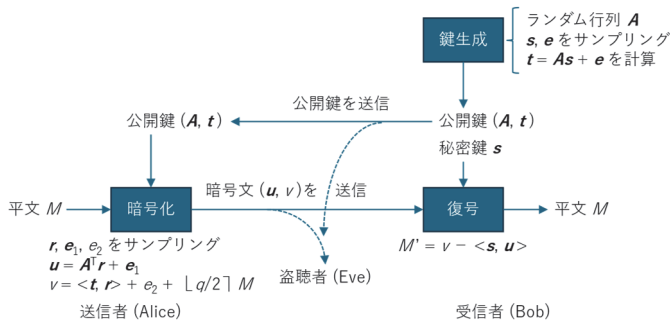


図 12 CRYSTALS-Kyber の手順

鍵生成:

- ・ ランダムに行列 \mathbf{A} を生成する
- ・ q に比べて十分小さい \mathbf{s}, \mathbf{e} を 2 項分布からサンプリングする
- ・ $\mathbf{t} = \mathbf{A}\mathbf{s} + \mathbf{e}$ を計算し、 (\mathbf{A}, \mathbf{t}) を公開鍵、 \mathbf{s} を秘密鍵とする

暗号化:

- ・ q に比べて十分小さい $\mathbf{r}, \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ をサンプリングする
- ・ 平文 M に対して $\mathbf{u} = \mathbf{A}^T \mathbf{r} + \mathbf{e}_1$, $v = \langle \mathbf{t}, \mathbf{r} \rangle + \mathbf{e}_2 + [q/2]M$ を計算し、 (\mathbf{u}, v) を暗号文とする ($[a]$ は整数への丸め、 $\langle \mathbf{t}, \mathbf{r} \rangle$ は \mathbf{t} と \mathbf{r} の内積)

復号:

- ・ 暗号文 (\mathbf{u}, v) と秘密鍵 \mathbf{s} を用いて $M' = v - \langle \mathbf{s}, \mathbf{u} \rangle$ を計算し、 $|M'|$ が $q/4$ より小さければ 0, それ以外は 1 が復号文となる

4.2 耐量子計算機暗号への移行

耐量子計算機暗号への移行において、データ保護期間(暗号による保護が期待される期間)を X 年、インフラ移行期間(暗号処理の置き換えに要する期間)を Y 年、量子技術による暗号解読までの期間を Z 年とすると、図 13 に示すように $X + Y > Z$ の場合は

暗号が解読される。現代社会において公開鍵暗号は、さまざまな情報を保護するために広く利用されており、耐量子計算機暗号への移行は長い期間(Y 年)と労力を要する。暗号解読可能な量子コンピュータが近い将来に登場する可能性は低いと考えられているが、量子技術の革新的な発展が起こり得ることから、量子技術による暗号解読までの期間(Z 年)を見積もることが困難である。このため、耐量子計算機暗号への移行を可能な限り早期に開始する、インフラ移行期間(Y 年)とデータ保護期間(X 年)を短縮するような施策を行う、量子技術の開発動向を見守る等の対応が求められる⁷⁾。

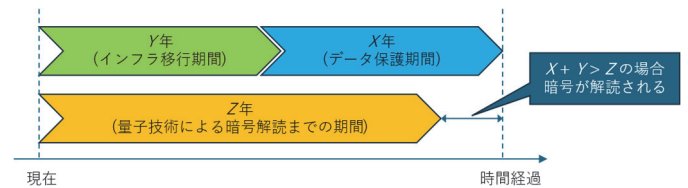


図 13 Mosca の定理

近年、耐量子計算機暗号の社会実装が進んでおり、例えば Apple 社はメッセージングアプリ iMessage に耐量子計算機暗号を導入することを発表している⁸⁾。iMessage では、従来の楕円曲線暗号と耐量子計算機暗号を併用することにより、もしどちらか一方の暗号が解読されても安全性が保たれるようにしている。

5 まとめ

盗聴されうる通信路を用いて安全に秘密情報をやりとりするために暗号が必要となる。しかし、共通鍵暗号では送信者と受信者の間で共通鍵を共有する必要があり、どのようにして安全に共通鍵を配送するかが課題である。この課題を解決したのが公開鍵暗号であり、暗号化と復号で異なる鍵を使用することにより、盗聴されうる通信路を用いて暗号化用の公開鍵を配送することができる。公開鍵暗号は多対多の通信にも適していることから、現在のインターネット上の暗号通信に広く用いられており、本稿では現在の公開鍵暗号として RSA 暗号、DH 鍵共有、楕円曲線暗号の基本原則を解説した。ただし、これらの暗号は将来、大規模な量子コンピュータが実現すると効率的に解読できることが知られており、時間経過により陳腐化しない機密データにおいて脅威となる。このため、現在の RSA 暗号および楕円曲線暗号の後継として耐量子計算機暗号(PQC)の研究開発が行われており、鍵交換アルゴリズムとして格子問題に基づいた手法が NIST の PQC 標準に採択された。現代の情報化社会において公開鍵暗号は広く利用されており、インフラ移行には多大な労力を要するが、すでに PQC の社会実装が始まっており、今後 PQC への置き換えが進むものと考えられる。

参考文献

- 1) 辻井重男, “暗号の発展——軍事外交から社会基盤へ・隠す暗号から認証安号へ——,” 信学誌, vol.106, no.11, pp.971-976, Nov. 2023.
- 2) D.R. Stinson, Cryptography Theory and Practice, second edition, Chapman & Hall/CRC, 2002.
- 3) 清藤武暢, 四方順司, “公開鍵暗号を巡る新しい動き:RSA から楕円曲線暗号へ,” 日本銀行金融研究所/金融研究, July 2013.
<https://www.imes.boj.or.jp/research/papers/japanese/kk32-3-2.pdf>
- 4) CRYPTREC Report 2024, “暗号技術評価委員会報告,” March 2025.
- 5) National Institute of Standards and Technology, “Module lattice-based key-encapsulation mechanism standard,” Aug. 2024.
<https://doi.org/10.6028/NIST.FIPS.203>
- 6) 安田雅哉, “NIST 標準化の格子暗号方式の紹介,” 信学誌, vol.106, no.11, pp.982-987, Nov. 2023.
- 7) 伊藤忠彦, “耐量子計算機暗号への移行へ向けた課題と社会実装への論点整理,” 信学誌, vol.106, no.11, pp.1026-1030, Nov. 2023.
- 8) Apple Security Engineering and Architecture, “iMessage with PQ3: The new state of the art in quantum-secure messaging at scale,” Feb. 2024.
<https://security.apple.com/blog/imessage-pq3/>

執筆者



森 隆
先端技術研究所
技術企画部

公知

プロセス分析技術向け近赤外分光モジュールの開発

笈田大輔 Daisuke Oida, 山崎教明 Noriaki Yamasaki, 腰原 勝 Masaru Koshihara, 齊藤崇記 Takanori Saitoh

【要 旨】 慢性的な医薬品の供給量不足により、安定して高品質な医薬品を製造できる連続生産方式の導入が検討されている。当社は、連続生産方式を支えるプロセス分析技術向けの近赤外分光モジュールを開発した。本論文ではまず、この分光モジュールの基本構成、特長、データ解析手法について述べる。次に、実際に医薬品で 사용되는添加剤を用いた評価によって、分光モジュールが高い濃度推定精度を有し、連続生産方式に適用可能であることを実証した。

1 まえがき

2020年頃から医薬品の供給量不足が続いている。発端はこの年に起こった医薬品の異物混入問題であり、服用した患者の健康被害が多数報告された。調査の結果、承認された製造手順の不遵守、品質試験の捏造など、品質管理体制の不備が明らかになった。この事案を受けて、医薬品の製造管理および品質管理の基準(GMP: Good Manufacturing Practice)が見直された。その結果、他の医薬品製造会社でも品質管理に問題が見つかり、業務停止処分などを受けた影響で、多くの医薬品が出荷停止に陥った。また、同年に起こった COVID-19 のパンデミックにより、風邪薬など一部医薬品の需要が急増し、医薬品の供給不足が深刻化した。現在でも、コロナウイルスやインフルエンザの再流行時に医薬品の供給不足が発生している。これらの背景から、高品質な医薬品を安定して供給できる製造体制の確立が急務となっている。

医薬品は以下に述べる工程を経て製造される。最初に薬剤を正確に量り取る(秤量工程)。次に、水などの液体を混ぜて粒状にした後で乾燥させる(造粒工程)。続いて、添加剤などを混合し(混合工程)、最後に圧縮して錠剤の形に成型する(打錠工程)。これらの工程では、次の工程に進む前に薬剤をすべて製造装置から取り出して品質検査を行う。検査に合格した場合、薬剤を次の工程の製造装置に移す。現在主流となっているこの製造方式は、バッチ生産方式と呼ばれる。この方式では、工程間での薬剤の移動や検査を人の手で行うため、手間がかかるとともに、異物混入リスクが発生するというデメリットがある。

そこで、各工程をつなげて連続的に医薬品を製造する連続生産方式の導入が検討されている。この方式では、秤量から打錠工程までを一気に行うことで、コスト削減や時間短縮、異物混入の防止が期待できる。連続生産方式では、薬剤を取り出して検査する代わりに、インラインで薬剤の品質をモニタリングする必要がある。例えば、

造粒工程では薬剤に含まれる水分量が、混合工程では薬剤の混合均一性が重要な指標となる。これらをインラインで計測する技術は、プロセス分析技術(PAT: Process Analytical Technology)¹⁾と呼ばれている。PATで最も広く用いられている手法が近赤外分光^{2)~4)}である。

近赤外分光は、試料に照射した近赤外光(波長 800~2500 nm)の透過または反射スペクトルを解析して試料成分を分析する手法である。試料に近赤外光が照射されると、主に水や有機物に含まれる分子(O-H, N-H, C-H など)が振動し、光が吸収される。この光の吸収量は試料の成分に依存するため、スペクトルを解析することで成分の情報を得ることができる。

近赤外分光では、白色光を試料に照射し、その透過または反射光を分光した後、受光器を通してスペクトルを得る。近赤外分光で用いられる白色光源は、一般的に照射強度が弱いので、試料を非破壊で測定できる。また、高速な光検出器によってスペクトルを高速で取得できるので、リアルタイムな解析を実現することができる。これらの特長から、近赤外分光は PAT に最適なインライン検査技術であると言える。

PAT に用いられる近赤外分光装置は、既存の医薬品製造ラインに直接組み込まれる。そのため、限られたスペースに収まるように小型であることが求められる。また、メンテナンス時に持ち運びが容易になるよう、軽量であることも求められる。さらに、混合工程では装置自体が回転しながら薬剤を混合するため、高い耐振性が要求される。

我々は、これら PAT に求められる特長を持ち、医薬品製造ラインに容易に組み込める近赤外分光モジュールを開発した。本論文では、近赤外分光モジュールの構成や特長について述べる。さらに、スペクトル測定および解析方法についてその詳細に言及する。最後に、実際の医薬品で用いられる添加剤を混合して作成した試料を測定し、成分を分析した結果を示すことで、医薬品の成分分析に適用可能であることを明らかにする。

2 近赤外分光モジュール

2.1 外観および内部構成

開発した近赤外分光モジュールの外観を図 1 に示す。本モジュールは直径 44.6 mm、長さ 111 mm の円筒型で、重さは約 550 g、材質はステンレスである。モジュール上面には M25 のねじ加工が施されており、医薬品製造装置に直接取り付けることができる。

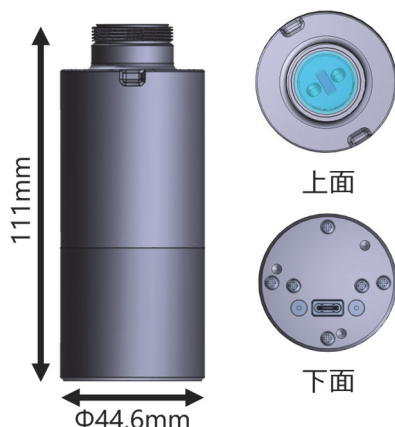


図 1 近赤外分光モジュールの外観

近赤外分光モジュールの内部構成図を図 2 に、仕様を表 1 に示す。本モジュールは主に、近赤外光を照射するタングステンランプ、試料からの反射光を分光する LVF(Linear Variable Filter)、分光した光を電気信号に変換してスペクトルを得るラインセンサから構成されている。タングステンランプは出力波長が近赤外域の広い範囲にわたり、また安価で出力パワーが安定しているため、近赤外分光で広く使用される。

LVF は分光用の光学フィルタであり、その特性を図 3 に示す。LVF を透過した光の波長は、LVF の位置と線形な関係にある。したがって、LVF の下にラインセンサを配置することで、波長ごとの光強度、すなわちスペクトルを測定できる。この LVF の特性を用いることで、装置をシンプルかつ小型に設計できる。また、干渉計を用いてスペクトルを得る FT-NIR(Fourier Transform Near-Infrared) のように可動部を必要としないため、耐振性にも優れている。

LVF の波長分解能は、単色光が入射したときの FWHM(Full Width at Half Maximum) で定義される。本製品の LVF の波長分解能は中心波長の 2% である。例えば、1500 nm の単色光が入射した場合、透過したスペクトルの FWHM は 30 nm になる。ラインセンサには近赤外域で高感度な InGaAs センサを用いており、ピクセル数は 256 である。

近赤外分光モジュールは、下面の USB ポートから PC に接続することで給電およびモジュールの制御を行うことができる。本製品に

付属して提供するスペクトル測定用のソフトウェアを使用することで、ユーザーはスペクトルの取得タイミングを調節し、積分時間(6 μs 以上)やタングステンランプの点灯/消灯を設定できる。

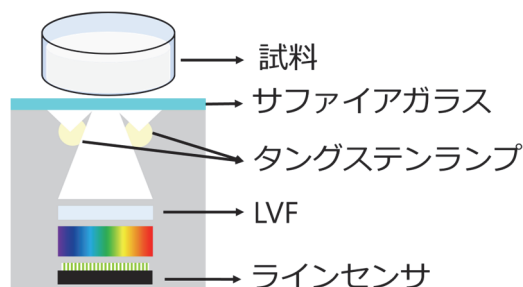


図 2 近赤外分光モジュールの内部構成図

表 1 近赤外分光モジュール仕様

製品	標準波長モデル	長波長モデル
波長範囲	1000~1700 nm	1250~2100 nm
波長分解能	波長の 2%(30 nm@1500 nm)	
ピクセル数	256	
積分時間	> 6 μs	
最大接続数	8 台/PC(PC の給電容量に依存)	
測定速度	> 1 kHz(@接続数 1 台, 積分時間 100 μs)	
重量	< 550 g	
寸法	φ44.6×111 mm	
材質	SUS316	
筐体保護等級	IP67 相当	
インタフェース/給電	USB3.0	
消費電力	2.5 W (5 V, 500 mA)	
環境温度	0~40°C	
対応 OS	Windows 10, 11	

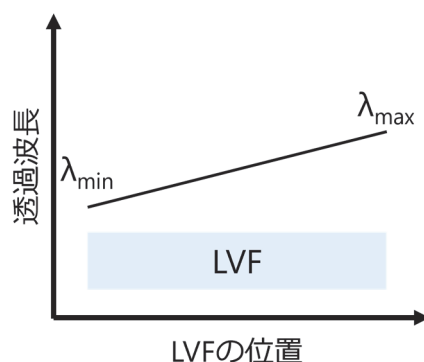


図 3 LVF の特性

2.2 特長

近赤外分光モジュールには、波長範囲の異なる二つのモデルがある。一つは標準波長モデルで、波長範囲は近赤外分光で一般的に用いられる 1000~1700 nm である。もう一つは、標準波長モデル

ルより長波長側の 1250~2100 nm を使用した長波長モデルである。この長波長モデルは、標準波長モデルに比べて水分量測定に適している。近赤外域における主な水分子の吸収ピークは 1450 nm および 1940 nm 付近に存在するが、1940 nm 付近のピークの方がより吸収量が多い。そのため、このピークを含む長波長モデルの方が、より高い精度で水分量を測定できる。

波長範囲の違いに加えて、近赤外分光モジュールの両モデルは、医薬品製造装置に簡単に組み込めるように小型かつ軽量で、耐振性にも優れた設計になっている。また、スペクトルの測定速度は 1 kHz と高速であり、リアルタイムな成分推定を可能にしている。さらに、1 台の PC で最大 8 台の近赤外分光モジュールを制御できるため、1 台の PC で複数の製造工程をモニタリングできる。

3 医薬品製造ラインでの使用例

前述の特長を持った近赤外分光モジュールが、医薬品製造ラインでどのように用いられるのかを述べる。図 4 に造粒工程および混合工程での使用例を示す。

造粒工程では、薬剤に水などの液体を混ぜて均一な粒にする。そのために、近赤外分光モジュールで水分量を測定し、その値に基づいて攪拌時間や液体の排出量を制御することで、薬剤に含まれる水分量を一定に保つことができる。

次の混合工程でも同様に、近赤外分光モジュールによって薬剤

と添加剤の成分濃度を測定し、その値に基づいて攪拌時間や添加剤の量を制御することで、成分が均一な薬剤を製造することができる。このように近赤外分光モジュールを使用することで、各工程の品質を維持することが可能となる。

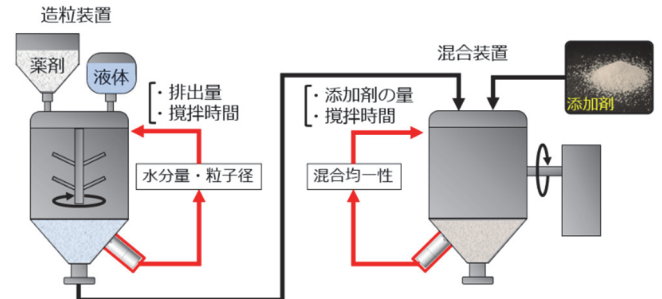


図 4 造粒工程、混合工程での使用例

4 スペクトル測定、解析方法

図 5 にスペクトル測定および解析のフローを示す。まず、近赤外分光モジュールで 3 種類のスペクトル、すなわち試料スペクトル(図 5(a))、リファレンススペクトル(図 5(b))、オフセットスペクトル(図 5(c))を測定する。次に、スペクトル解析では得られたスペクトルを用いて、前処理(図 5(d))と成分推定(図 5(e))の二つの処理を行う。前処理はスペクトルのノイズを低減し、ピークを強調することで、後段の成分推定の精度を向上させる。成分推定では、部分最小二乗法(PLS: Partial Least Square)⁵⁾を用いて検量データを作成することで、試料の成分を推定できる。

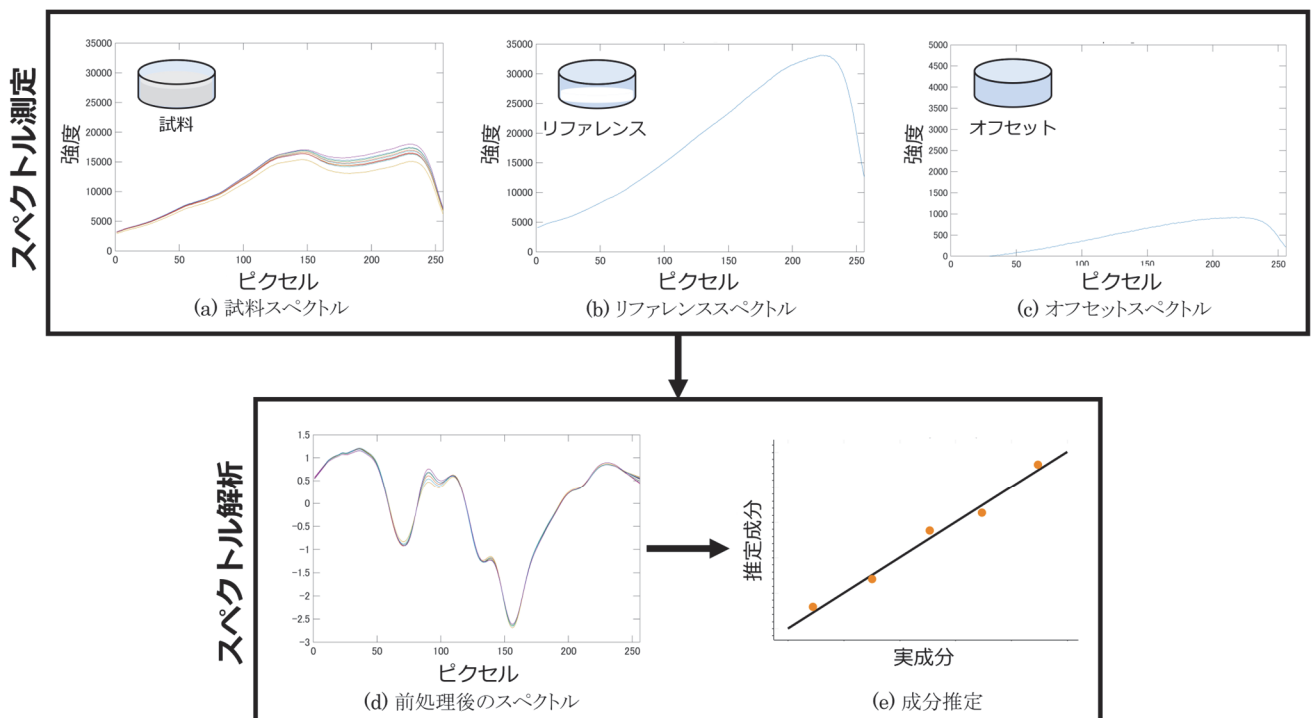


図 5 スペクトル測定、スペクトル解析のフロー

4.1 スペクトル測定

試料スペクトルは、成分の異なる複数の試料を測定して得られる。リファレンススペクトルは、近赤外域で反射率が高く、波長依存性が小さい標準反射体を測定して得られる。また、オフセットスペクトルは、試料がない状態で測定されたスペクトルである。

スペクトル測定時には積分時間を考慮する必要がある。積分時間が短いとスペクトルのピークがノイズに埋もれてしまい、長いとセンサが飽和してしまう。スペクトル強度は、試料の種類や近赤外分光モジュールと試料の距離にも依存するため、測定環境に応じて積分時間を設定する必要がある。

4.2 スペクトル解析

4.2.1 前処理

前節で取得したスペクトルを用いて前処理を行う。前処理では、スペクトルに対して四つの処理、すなわち時間平均、反射率変換、平滑化・微分、標準化を行う。それぞれの処理後のスペクトルを図6に示す。

最初に、複数回取得したスペクトルを平均する(図6(a))。これにより、センサ感度などによるランダムなノイズを低減できる。

次に、式(1)を用いて反射率 R への変換を行う(図6(b))。

$$R = \frac{I_S - I_O}{I_R - I_O} \quad (1)$$

ここで、 I_S , I_R , I_O はそれぞれ試料スペクトル、リファレンススペクトル、オフセットスペクトルである。スペクトルを反射率に変換することで、ランプやセンサの個体差によるスペクトルのばらつきを補正することができる。

次に、平滑化および微分を行う(図6(c))。平滑化はノイズを軽減し、微分はスペクトルのピークを抽出する役割を持つ。これら二つの処理は、Savitzky-Golay 法⁶⁾によって一度に実行できる。この手法では、設定したウィンドウ内で多項式近似を行い、その中心値をウィンドウ内のデータとする。ウィンドウを移動させながら同様の処理を行うことで、全スペクトル領域を平滑化できる。また、近似した多項式を用いることで微分を行うことも可能である。

最後に、標準化を行う(図6(d))。これにより、温度変化などによって生じるスペクトルのドリフトを補正することができる。標準化したスペクトル X は、式(2)を用いて求められる。

$$X = \frac{I - \mu}{\sigma} \quad (2)$$

ここで、 I は微分後のスペクトルデータ、 μ は平均値、 σ は標準偏差である。標準化によって、すべてのスペクトルデータが平均 0、標準偏差 1 のデータに規格化される。図6(d)の拡大図に示すように、前処理によって異なる試料成分に起因するピーク変化を強調することができる。

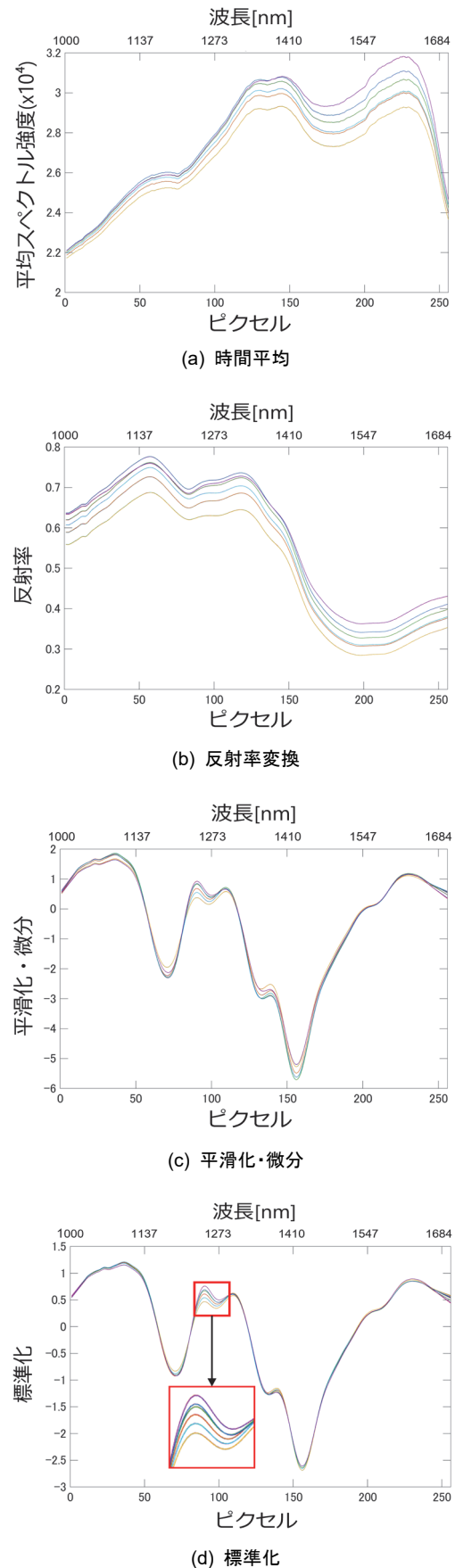


図6 前処理におけるスペクトル変化

4.2.2 成分推定

成分推定では、前処理後のスペクトルデータから検量データを作成する。検量データ B は、以下の重回帰式を満たす。

$$y = XB + D \quad (3)$$

ここで、 y は成分行列、 X は式(2)で得られた標準化スペクトル、 D は残差である。検量データ B は、残差 D が最小となる条件で解析的に求めることができる。しかし、近赤外分光で得られるスペクトルは波長間で高い相関を示す多重共線性を持つため、式(3)に基づく検量データでは成分推定が不安定になる。

そこで、前処理後のデータから成分推定に寄与する新しい変数(潜在変数)を作成する PLS を用いる。この手法により、成分推定を安定させることができる。

PLS では、式(3)の X と y を以下の式で表す。

$$X = \sum_{n=1}^N t_n P_n^T + E = TP^T + E \quad (4)$$

$$y = \sum_{n=1}^N t_n q_n + f = Tq + f \quad (5)$$

ここで、 N は主成分数、 t_n は n 番目の主成分、 T は潜在変数、 P 、 q はそれぞれ X 、 y のローディング行列、 E 、 f はそれぞれ X 、 y の残差である。また、添え字の T は行列の転置を表す。潜在変数 T は、成分行列 y との共分散が最大になるように求められ、

$$T = \frac{XX^T y}{|X^T y|} = XW \quad (6)$$

となる。ここで、 W は重みベクトルである。 P 、 q は式(4)、(5)で E と f を最小にするという条件で解析的に求められる。これらを用いると、潜在変数を用いた場合の検量データ B は、

$$B = W(P^T W)^{-1} q \quad (7)$$

と表される。図 7 に、図 6 の前処理後スペクトルを用いて作成した検量データを示す。この検量データと前処理後スペクトルの内積を計算することで、成分を推定できる。

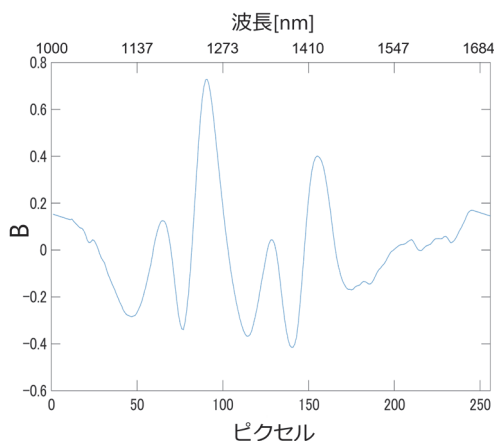


図 7 検量データ

4.2.3 検量データの評価

作成した検量データを実際の医薬品製造ラインに適用する前に、成分推定精度を評価する必要がある。そのため、前処理後のスペクトルを教師データとテストデータに分割する。次に、教師データを用いて検量データを作成し、成分推定精度を評価する。最後に、同じ検量データを用いた場合のテストデータの成分推定精度を評価する。

検量データの成分推定精度を評価する指標は二つある。一つは決定係数 R^2 であり、以下の式で求められる。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

ここで、 n はサンプル数、 y_i は実成分、 y'_i は推定成分、 \bar{y} は実成分の平均値である。決定係数は 1 に近いほど、推定精度が高いことを示す。図 8 は、主成分数による決定係数の変化を示している。主成分数を増やすことで決定係数が 1 に近づくことが分かるが、主成分数が多くなると、教師データでは精度が向上する一方で、テストデータの精度が低下する過学習が生じるため注意が必要である。実際には、教師データとテストデータの双方で決定係数が 1 に近づくように、パラメータ(主成分数や微分次数など)を調整する。

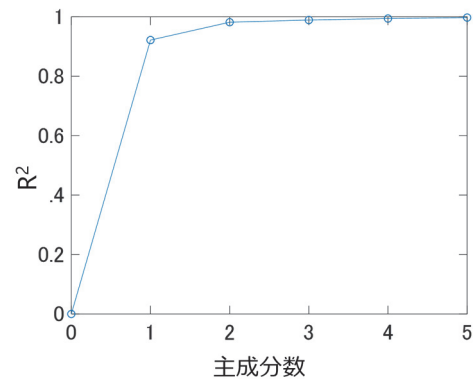


図 8 主成分数による決定係数 R^2 の変化

もう一つの指標は、二乗平均平方根誤差(RMSE: Root Mean Square Error)であり、以下の式で求められる。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2} \quad (9)$$

ここで、 n 、 y_i 、 y'_i は前述と同様である。RMSE は、推定濃度が実際の濃度とどの程度の誤差を持つのかを示す指標である。

5 成分推定精度の評価

開発した近赤外分光モジュールの成分推定精度を評価するために、3 種類の添加剤を混合した試料を作成し、濃度推定を行った。また、すべての試料を効率よく測定するために、自動検証装置を作製した。

5.1 試料

3種類の添加剤は、ラクトース、セオラス、ステアリン酸カルシウムであり、医薬品で広く用いられている。今回の評価では、ステアリン酸カルシウムの濃度推定を行った。このため、ステアリン酸カルシウムの濃度が異なる試料を10個作成した。濃度はそれぞれ0, 1, 2, 3, 3.5, 4, 5, 6, 8, 10%である。また、測定に影響が出ないように、他の2種類の添加剤の濃度は、すべての試料で一定になるようにした。試料は、厚さ1 cm程度になるようにシャーレに移した。

5.2 自動検証装置

サンプルを測定する自動検証装置の外観を図9に示す。装置上部の回転テーブルには12個の穴が等間隔に空いており、それぞれの穴の上に、試料を入れたシャーレ(10個)、リファレンススペクトル測定用の標準反射体を入れたシャーレ(1個)、オフセットスペクトル測定用の空のシャーレ(1個)が置かれる。回転テーブルの下部には近赤外分光モジュールが取り付けられており、シャーレの底面側からスペクトルを測定できる。自動検証装置には回転ステージが内蔵されているため、12個のサンプルを連続的に測定することができる。

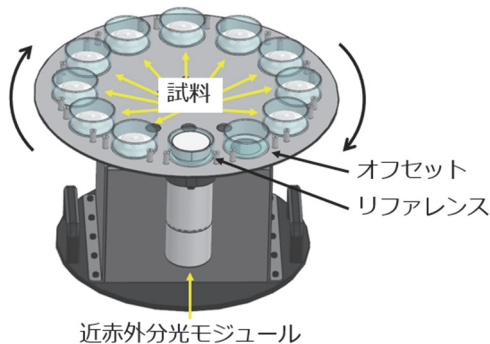


図9 自動検証装置の外観

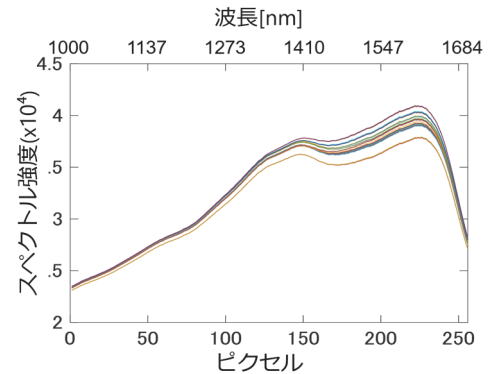
5.3 測定条件

測定には、標準波長モデルおよび長波長モデルの両方を用いた。測定したスペクトルは、1サンプルあたり800個とした。また、積分時間は、標準波長モデルで1280 μs、長波長モデルで1270 μsとした。これらの値は、リファレンススペクトルの最大値がセンサの最大強度の80%になるように設定した。

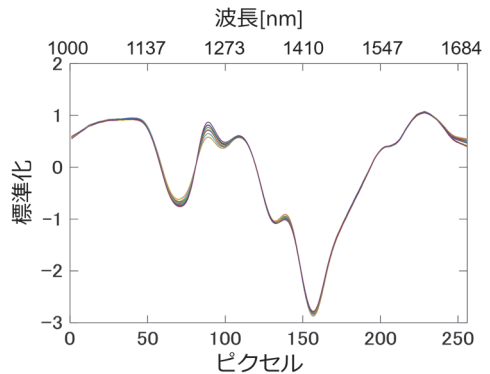
また、サンプル位置によるスペクトルのばらつきも含めて学習させるため、回転ステージを動かしながら、サンプルの広い範囲でスペクトルを測定した。1サンプルあたりの時間平均回数は80回とした。その結果、時間平均後のデータ数は、1サンプルあたり10個となった。さらに、平滑化のウィンドウサイズは13、微分次数は1とした。

教師データには0, 2, 4, 6, 8, 10%の6サンプルを、テストデータには1, 3, 3.5, 5%の4サンプルを用いた。両モデルで測定し、前処

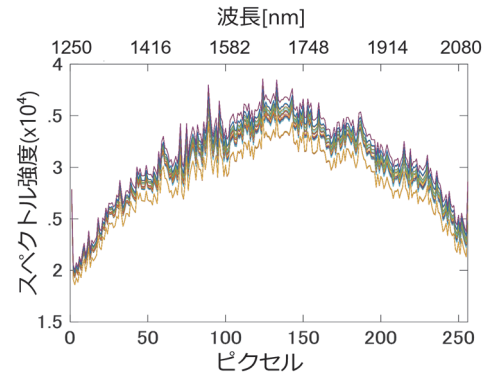
理したスペクトルを図10に示す。図10(c)の長波長モデルのスペクトルは、センサの感度特性によりピクセル間の強度変動が大きくなっているが、前処理によってこの感度特性の影響を除去することができる。



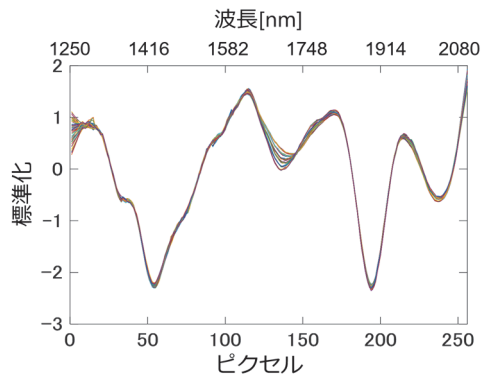
(a) スペクトル(標準波長モデル)



(b) 前処理後のスペクトル(標準波長モデル)



(c) スペクトル(長波長モデル)



(d) 前処理後のスペクトル(長波長モデル)

図10 標準波長モデルおよび長波長モデルで測定したスペクトルと前処理後のスペクトル

5.4 濃度推定結果

ステアリン酸カルシウムの濃度推定結果を図 11 に示す。図 11(a)が標準波長モデル、図 11(b)が長波長モデルの結果を示す。縦軸は濃度、横軸は時間平均後のデータ番号を表し、オレンジの線が実濃度、青い丸が各サンプルの推定濃度を示している。標準波長モデルおよび長波長モデルの濃度誤差(RMSE)は、それぞれ 0.20%、0.24%となり、高い濃度推定精度が得られた。また、推定速度は 1 秒あたり数回であり、リアルタイムな濃度推定を実現できた。

6 結び

当社は PAT の中でも近赤外分光に着目し、医薬品製造ラインに容易に組み込める近赤外分光モジュールを開発した。分光に LVF を用いることで、小型、軽量かつ耐振性に優れたモジュールを実現した。医薬品で使用される添加剤を用いた評価によって、分光モジュールが高い濃度推定精度を持ち、リアルタイムに濃度推定を行えることを実証した。これらの結果から、開発した近赤外分光モジュールは医薬品の成分分析に適用可能であり、連続生産方式への導入が期待できる。

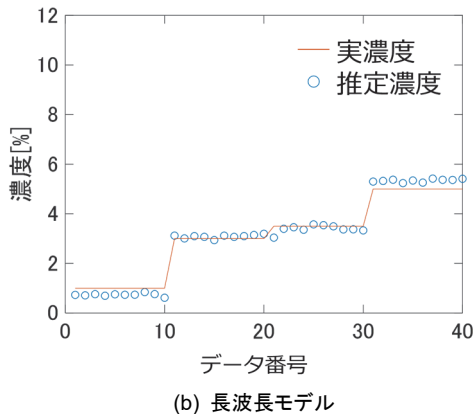
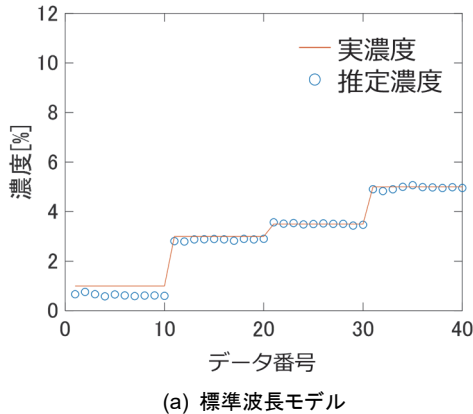
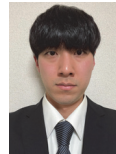


図 11 ステアリン酸カルシウムの濃度推定結果

参考文献

- 1) Wu S, Liu Y, Fan X, Shen Y, Qu H. Trends and new process analytical technologies in pharmaceutical manufacturing. *Int J Pharm.* 2025 Sep 15;682:125957.
- 2) 尾崎幸洋, :“近赤外分光法”分光法シリーズ 第 2 巻, 講談社(2015)
- 3) Sierra-Vega NO, Karry KM, Romañach RJ, Méndez R. Monitoring of high-load dose formulations based on co-processed and non co-processed excipients. *Int J Pharm.* 2021 Sep 5;606:120910.
- 4) Kiricenko K, Klinken S, Kleinebudde P. Proof of a LOD prediction model with orthogonal PAT methods in continuous wet granulation and drying. *J Pharm Sci.* 2025 Jan;114(1):176-184.
- 5) Rosipal, R., Krämer, N. (2006). Overview and Recent Advances in Partial Least Squares. In: Saunders, C., Grobelenik, M., Gunn, S., Shawe-Taylor, J. (eds) Subspace, Latent Structure and Feature Selection. SLSFS 2005. Lecture Notes in Computer Science, vol 3940. Springer, Berlin, Heidelberg.
- 6) Savitzky, A., & Golay, M. J. E. (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, 36(8), 1627–1639.

執筆者



笈田大輔
センシング&デバイスカンパニー
開発本部
第 1 開発部



山崎 教明
センシング&デバイスカンパニー
開発本部
第 1 開発部



腰原 勝
センシング&デバイスカンパニー
開発本部
第 1 開発部



斉藤 崇記
センシング&デバイスカンパニー
開発本部
第 1 開発部

公知

省人化・省力化を追求した X 線検査機の開発

小松原樹 Tatsuki Komatsubara, 齋藤直也 Naoya Saito, 北林遼太郎 Ryotaro Kitabayashi, 金井貴志 Takashi Kanai, 中山和規 Kazunori Nakayama

〔要 旨〕 最新の検出器と画像処理技術を用いて、省人化・省力化を追求した X 線検査機を開発した。高解像度な画像を使用した検査アルゴリズムにより、誤検出率を従来の 7 分の 1 にまで低減し、歩留まり率の向上に寄与する。高品質の検査により再検査や手戻りが減少することで、ユーザーへの作業負荷が大きく軽減される。また、自動設定の比率を増やすことにより、検査設定にかかる工数の低減に成功した。1 回のテスト搬送で異物検査の設定が可能な「簡単設定」では、準備に必要な手間を最小限に抑え、より効率的に検査を始めることが可能となった。

1 まえがき

現在アンリツが販売している X 線検査機 XR75 シリーズの開発から 10 年が経過した。この間、アンリツでは噛み込み検査特化の検査機や、主に食肉市場向けの検査機など、幅広い検査対象やニーズに応えるべく、さまざまな装置を開発してきた。

食品業界を取り巻く法制度もこの 10 年で大きく変化している。2018 年に公布された「食品衛生法等の一部を改正する法律」により、2021 年には HACCP に基づく衛生管理が食品衛生法上で義務化された。また、2025 年 5 月には食品用器具・容器包装に関するポジティブリスト制度の経過措置期間が終了するなど、食の安全を確保するための制度整備が年々進められている。こうした法制度の変化が示すように、「食の安全」は時代を超えて重要視されるテーマであり、近年はその関心が高まっている。

同時に、食品製造業では以前から人手不足が深刻な課題となっており、近年ではさらに原材料費や人件費の高騰も加わり、状況は一層厳しさを増している。そのような環境下では、品質管理の徹底と安定した生産体制の両立が求められ、現場では大きな負担を強いられている。実際、食品製造業は労働生産性が製造業平均の 6 割程度にとどまり、製造業の中でも低い業種である。その背景として、自動化が進んでいないことによる労働者への依存度の高さが指摘されている²⁾。

今回、アンリツではこのような課題解決に貢献すべく、作業者によらず簡単に高精度な検査が可能となる装置を開発した。

X 線検出器の性能向上や当社独自の画像処理技術の進化により、ステンレス素材において最高約 40%の検査能力向上を実現し、これまで検出することが困難だった微小金属異物や石などの低密度な異物も検出可能となる。異物混入のクレームが減ることで、対応にかかるコストの削減が期待できる。誤検出率も従来機と比較して 7 分の 1 にまで低減されており、フードロスや歩留まり率の向上

にも貢献する。また、本検査機は従来機で検出可能であった異物に対しても、安定した検査品質を提供することが可能である。

検査性能が向上したことで、検査パラメータの調整に余裕を持たせることができるようになった。この強みを活用し、調整の大部分を自動化することで、作業者の熟練度に依存することなく、高い検査品質を維持できる設計となっている。結果として、生産現場における作業負担の軽減と、歩留まり率向上の両立を可能とした。

具体的な機能としては、簡単設定や検出リミット設定による作業者の負担軽減、画面に搭載しているタッチパネルの改善による操作性向上が挙げられる。本稿では、本装置の概要を説明する。



図 1 X 線検査機の外観

2 X 線検査の原理

X 線検査装置は、X 線を使用して製品内部の状態を非破壊で検査する装置である。アンリツが製造している X 線検査機は、主に食品などの製造ラインで使用され、被検査品の中に混入した異物や被検査品の欠陥を検出するために使用されている。これらは食品工場の生産ライン中にインラインで配置され、生産の流れを止める

ことなく、次々に検査を行うことが可能である。X線検査機は、被検査品が装置内部を通過する構成となっており、装置内を通過している間に、X線を用いた検査を行っている。

X線は電磁波の1種であり、直進性や透過力が高いことで知られている。X線発生源から照射されたX線は被検査品を通り、その先のX線検出器にて検出される。被検査品の内部構造により、X線の透過量は変化するため、透過して検出されたX線の強さを濃淡として表すことで、被検査品の形状や内部構造などの情報を捉えることができる。X線の透過量は、物質の種類や密度に応じて変化するため、異物が混入している箇所では画像に大きな濃淡差が生じ、影となって表れる。この濃淡を基に、異物の有無を判定することができる。

X線検査において、検出器は検査画像の出力に直接関わる重要な構成要素であり、その性能は検査結果の精度に直結する。X線検出器は、シンチレータ、フォトダイオードアレイ、読み出し回路から構成されており、これらは以下のような流れでX線を検出する。はじめに、検出器に入射したX線はシンチレータに吸収される。シンチレータ内の電子は、吸収したエネルギーによって励起され、高いエネルギー状態へ移動する。その後、電子が基底状態へ戻る際に、エネルギー差に対応した可視光を放出する。このようにしてX線は可視光に変換され、フォトダイオードアレイで検出可能となる。次に、フォトダイオードにより、可視光は電荷に変換され、内部のコンデンサに蓄積される。最後に、蓄積された電荷を読み出し回路によって順次読み出すことでX線を検出し、その強度の違いを画像として出力することができる。

シンチレータによりX線を可視光に変換し、それをさらに電荷へと変換してX線を検出する方法を間接変換方式と呼び、X線検査機に搭載するX線検出器としては、材料の入手性等の観点から、間接変換方式が主流となっている。ただし、この方式は2段階の変換過程で損失が発生するため、出力画像の鮮明さが低下しやすいという課題がある。X線検査機の高感度化と安定性向上を実現するためには、シンチレータなどの構成要素の選定と最適な設計が重要であり、これらの技術的工夫が装置開発の方向性を決定づけている。

3 高速画像処理による生産効率の向上

今回、X線検出器のシンチレータ、フォトダイオードアレイ、読み出し回路、およびX線光学系を見直すことにより、低ノイズかつ高解像度の画像を用いた検査が可能なX線検査装置の開発に成功した。より高精細な画像を使用することで、これまで検出が困難で

あった微小異物の識別が可能となる。実際、特定の食品を対象に搬送速度 40 m/min における検出性能を検証した結果、従来モデルでは直径 0.6 mm のステンレスワイヤまでが検出可能であったのに対し、XR76 では直径 0.2 mm まで検出が可能になったことを確認している。

一方で、X線検出器の高解像度化には課題も存在する。画素数が増えることで画像データの容量が大きくなり、画像処理にかかる負荷が増加する。その結果、処理時間が伸び、製品が装置を通過している間に異物判定を完了させることが難しくなる。この課題に対して、装置の機長を長くすることで処理時間を確保する方法もあるが、その場合、装置自体が大型化してしまい、設置には広いスペースが必要となる。また、被検査品の搬送速度が速くなるほど、処理すべき画像データ量が増え、同様に処理時間の制約が厳しくなる。

従来機である XR75 シリーズでは、搬送速度が 40 m/min を超える場合、処理を軽くするために、取得データを意図的に軽量化した上で検査を行っている。この工夫により、装置の機長を延長することなく高速搬送での検査が可能となっているが、その代わりに画像が圧縮されたように縮み、異物検査の精度が低速時と比較して大きく低下する傾向がある。

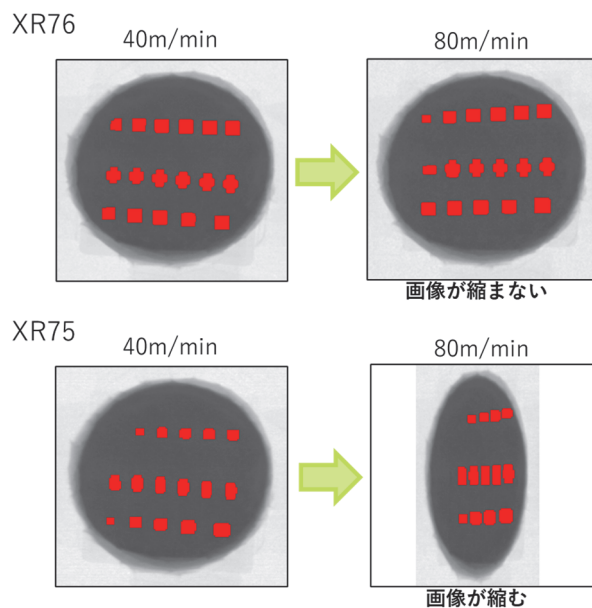


図2 画像比較

これに対し、XR76では、X線検出器に加え、ソフトウェアおよび異物検出アルゴリズムの改良により、画素数の多い画像に対しても高速な処理が可能である。これにより、高速な検査条件下においても、画像の縮みを生じることなく検査を実施することが可能となり、高速生産ラインにおいても高画質な画像を用いた安定的な異物検査を実現する。

図 2 は、ハムにテストピースを乗せて X 線検査機に搬入したものであり、異物は、上から SUS(ステンレス)球, SUS ワイヤ, セラミック球である。従来機である XR75 では、搬送速度 80 m/min の条件で画像が搬送方向に縮んでおり、SUS 球の検出個数は 5 個から 4 個に減少した。一方、今回開発した XR76 では、搬送速度 80 m/min でも画像が縮まず、高速搬送条件下においても 6 個すべての SUS 球を検出可能であり、検出精度も低下していないことを確認した。搬送速度の速い生産ラインに対しても高感度検査が可能であり、生産効率の向上とクレームの削減に貢献する。

4 自動化と操作性向上による省人化・省力化の実現

4.1 検査設定の属人性低減

昨今の省人化動向に伴い、本検査機は属人性が低く、X 線検査機に慣れていないユーザーでも簡単に異物検査設定が可能となる機能が多く搭載されている。

図 3 に示すように、従来の検査機では異物検査を開始する前の準備として、X 線出力を決定する、異物が含まれていない被検査品(OK 品)を 10 回程度回流す、誤検出低減のためにパラメータを微調整するなど、いくつかの手順を踏む必要がある。これらの作業は煩雑であることに加え、パラメータの調整度合いなど、ユーザーの操作に依存する部分が多い。

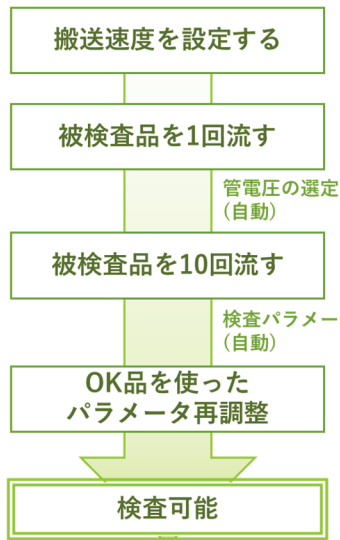


図 3 検査開始までの準備

XR76 では、高感度化に伴う誤検出低減によって検査の安定性が向上したことで、検査パラメータの設定に余裕が生まれ、自動設定の比率を増やすことに成功した。属人的な要素を減らし、誰でも簡単に検査を開始できるよう、本検査機はいくつかの機能を搭載している。これらをまとめたものを表 1 に示す。

表 1 検査モードの比較

	従来操作: 感度重視	検出リミット 設定モード: バランス	簡単登録
画面遷移回数	12 回	12 回	5 回
管電圧設定	あり	あり	無し
テスト搬送	10 回推奨	10 回推奨	1 回
検査パラメータ の再調整	調整量: 従来機同等	調整量:少	調整不要
パフォーマンス	装置の 最高感度	従来機同等以上 の感度	異物検査のみ 検査可能*

※ 管理感度を満たしていることの確認が必要。

4.1.1 パラメータ調整回数の削減

誤検出低減のため、通常は被検査品を使用して品種登録を行った後に、検査に必要なパラメータを再調整する必要がある。このとき、余裕を持ったパラメータ調整を行えば、被検査品の形状や状態、重なりの際らつきによる誤検出を減らすことができるが、被検査品と異物との差を判別しづらくなり、検出精度は低下してしまう。誤検出を抑えつつ精度の良い検査を行うためには、適切なパラメータに調整するための経験やノウハウが必要となってしまうのが現状である。

XR76 で実装している「検出リミット設定モード:バランス」は、誤検出の少ない余裕を持ったパラメータ設定により、自動設定後に手でパラメータを再調整する回数を減らすことが可能である。本来であれば、このような設定方法は検査精度の低下を招く要因となる。しかし、高解像度の検出器や画像処理技術の進化により、異物を鮮明に捉えられるようになったため、従来機で細かな調整を行った場合と同等以上の精度での検査が可能となった。

また、本検査機では「1 タッチ調整」のボタンが、パラメータ再調整時の画面に表示されている。これまでは複数のパラメータを一つずつ手作業で再調整する必要があったが、このボタンを押すことで、複数のパラメータを同時に再調整でき、誰でも余裕を持った設定で検査を開始できる。

4.1.2 検査準備の簡略化

これまでの検査機では、被検査品を 10 回程度流すことで、被検査品の X 線透過画像からその製品の特徴を多角的な画像処理アルゴリズムによって装置内部で解析し、異物検査に使用するノイズ除去値などのパラメータを決定している。

一方、新たに実装された「簡単登録」モードでは、異物検査での使用に限り、被検査品を 1 度流すだけで、誤検出の少ないパラメータが自動設定される。検査精度は被検査品の特性に影響を受けるため、管理感度を満たしていることの確認は別途必要となるが、検出リミットの調整に加え、X 線出力の設定も不要であり、被検査品を

1 度流せば、ほとんどの項目が自動で設定可能なことから、必要最低限の労力で検査の準備が可能である。

4.2 操作性の向上

今日、スマートフォンは生活に欠かせないものとなっていることから、UI デザインにおいては、ユーザーが日常的に慣れ親しんでいるスマートフォンの操作感や機能性を意識した設計が求められる。

XR76 では、画面に搭載されたタッチパネルとソフトウェアを刷新することで、タッチ感度の向上とともに、スマートフォンに近い操作性を実現した。具体的には、スワイプによるスクロールや、X 線透過画像のピンチイン/ピンチアウトによる拡大・縮小など、直感的なジェスチャー操作が可能となっており、ユーザーにとって、より快適な操作環境を提供している。



図 4 検査画面における透過画像条件の設定画面

図 4 に検査画面における透過画像条件の設定画面を示す。この画面では、透過画像の確認時に使用頻度の高いパラメータを集約して表示することで、少ないタップ数で効率的に画面表示の調整が可能となっている。また、画面遷移を最小限に抑えることで、ユーザーが操作中に画面遷移に迷うことなく、目的の設定にアクセスできる構成となっている。

一方で、ボタン配置などの基本的な操作体系は既存機の UI を踏襲しており、ユーザーが操作手順を一から覚える必要がないようになっている。これにより、従来機を使用していたユーザーも、新しい装置への移行が容易となっている。

4.3 長寿命設計と省メンテナンス

過去の開発で培ってきた高度な熱設計による装置内のエアフローの最適化や、低出力による X 線タンク長寿命化の技術は、XR76 シリーズの検査機においても継承されている。長寿命化のための主要な要素は、X 線検出器、X 線発生源、特殊密閉構造放熱

ユニットの 3 つである。

高感度の X 線検出器を使用することで、X 線タンクの出力を下げる事が可能となっており、X 線タンクおよび X 線検出器の消耗を低減することに成功している。流体解析シミュレータを用いたクーラーレスの特殊な密閉構造により、消費電力が抑えられる。外気が装置内に流入しない構造のため、主要電気部品の故障率も低減される。

これらの技術により X 線検査機としての設計寿命は 3 万時間を実現しており、寿命や故障による交換頻度が低く、ランニングコストの低い、省力化に対応した装置となっている。実績として、本技術を取り入れた XR75 シリーズにおける X 線タンクおよび X 線検出器の寿命は、それ以前のシリーズと比べて 2.5 倍以上となっている。このデータは、予防保全による寿命前の交換も含めた数値であるため、実際はさらに長い寿命を持つと推定される。

5 主要規格

図 5 に装置の寸法を、表 2 に X 線検査機の主要規格を示す。

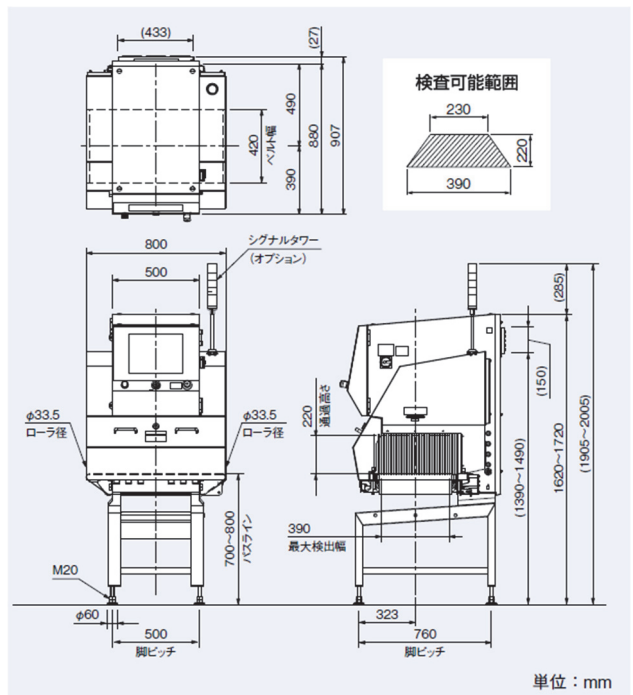


図 5 外観図

6 むすび

食の安全に対する関心が高まる中、食品工場では人手不足や材料費、人件費の高騰など、さまざまな課題が深刻化している。これらの課題を解決するため、我々は省人化・省力化に焦点を置き、新たな X 線検査機を開発した。最新の X 線検出器と画像処理技

表 2 主要規格

形名	KXS7622AVCTV	KXS7634AVCTV
X線出力	管電圧 30~80 kV, 管電流 0.4~3.3 mA, 最大 100 W	
安全性	1.0 μSv/h 以下 安全装置による X 線漏洩防止	
表示部・操作部	15 インチ 静電容量式 タッチパネル LCD	
検査可能範囲	最大幅 240 mm 最大高さ 120 mm	最大幅 390 mm 最大高さ 220 mm
ベルト幅	270 mm	420 mm
品種数	200 品種または 999 品種(切替式)	
コンベア速度/搬送能力	10~60 m/min 最大 5 kg	10~60 m/min 最大 5 kg
	61~90 m/min 最大 2 kg	
電源/消費電力	AC100~240 V, 単相, 50/60 Hz, 700 VA 以下, 電圧変動許容範囲±10%	
質量	230 kg	290 kg
使用環境	温度 0~35℃, 湿度 30~85% ただし結露しないこと	
保護等級	IP66 相当	
外装	ステンレススチール(SUS304)	

術により、高感度かつ低誤検出の検査が可能となったことで、クレーム削減や再検査時間の削減による省力化が期待できる。多品種生産の顧客に対しては、異物検査設定の手間を大きく減らす「簡単登録」等の機能を搭載しており、作業者の負担を軽くすることで、省人化・省力化が可能となっている。

本検査機は生産現場において省人化・省力化を追求すると同時に、食品の品質を保証し、消費者へ安心・安全な食品を届けるためのものである。アンリツでは、検査の効率化により生産現場にゆとりと安心をもたらし、持続可能な社会の実現に向けて貢献できる検査機を開発していく。

参考文献

- 1) 八木, 木場, 菊池, 斎藤, 井上, 永塚, 三谷: “XR75 シリーズ X 線検査機の開発”, アンリツテクニカル 91 号, pp.109-115(2016.3)
- 2) 食品製造業における 労働力不足克服ビジョン(令和元年 7 月 農林水産省)P. 8

執筆者



小松原 樹
インフィビスカンパニー
開発本部
商品開発部



斎藤 直也
インフィビスカンパニー
開発本部
商品開発部



北林 遼太郎
インフィビスカンパニー
開発本部
商品開発部



金井 貴志
インフィビスカンパニー
開発本部
商品開発部



中山 和規
インフィビスカンパニー
開発本部
商品開発部

公知

シミュレーションと実電源を融合した EV パワートレイン評価の技術実証

依田 拓也 Takuya Yoda, 新地 雄太 Yuta Shinchi

【要 旨】 地球温暖化対策の 1 つとして、自動車分野では xEV シフトによる脱炭素化に取り組んでいる。将来の主流と期待される BEV の普及に向け、自動車メーカーはパワートレインをモータシステムへ移行する取り組みを加速している。我々は、BEV 社会実現に貢献するため、自動車開発の手法として用いられる HILS と双方向直流電源を融合した「Power HIL」の技術実証を実施した。これにより、システム評価の一部として、実車相当のパワートレイン性能評価が可能となり、開発効率化、コスト削減、実車評価の手戻り低減に寄与することが期待できる。今後は、実車部品を用いた検証を進め、BEV 開発の効率化、品質向上および他分野への応用拡大を目指す。

1 まえがき

近年、地球温暖化に起因する気候変動が顕著となっており、日本国内においても集中豪雨による洪水や土砂災害が頻発し、対策の必要性が高まっている。持続可能な社会の構築に向け、温室効果ガス、特に二酸化炭素(CO₂)の排出抑制が重要な課題である。

我々は、この課題に対して EV 開発の効率化を促進するため、シミュレーションと実電源を融合した EV パワートレイン評価の技術実証に取り組んできた。本稿では、第 3 章までで課題の背景を比較的詳しく説明し、第 4 章以降で技術実証の状況を示す。

2 xEV が求められる社会課題

2023 年度に国土交通省が調査した国内の CO₂ 総排出量のうち、自動車全体では約 16.5% を占めており、脱炭素化の推進が求められている。自動車市場においては、CO₂ 排出量削減を目的として、電気を動力源とする xEV(x Electric Vehicle)へのシフトが進んでおり、代表的な車両として、BEV (Battery EV: 電気自動車)、HEV (Hybrid EV: ハイブリッド車)、PHEV (Plug-in Hybrid EV: プラグインハイブリッド車)、FCEV (Fuel Cell EV: 燃料電池車)が挙げられる。政府は普及促進の目標を設定しており、各自動車メーカーは、技術開発や生産手法の確立・体制構築などに取り組んでいる。将来、BEV の普及拡大が見込まれるが、そこには、充電インフラの整備やバッテリー充電時間の短縮、航続距離の延長などの社会的・技術的課題がある。

3 BEV 開発における課題

3.1 モデルベース開発とシミュレーション技術

自動車開発において、効率化および品質向上を目的とし、シミュレーション技術を活用した開発手法である MBD (Model-Based

Development: モデルベース開発)が広く採用されている。制御仕様や自動車部品の構造をモデル化し、シミュレーションすることで、設計段階において動作の検証が可能である。

図 1 に示すように、MBD の工程は、要件定義から実車評価までを V 字モデルで表すことができ、各工程に合わせて用いるシミュレーション手法として、主に MILS, SILS, HILS が挙げられる。

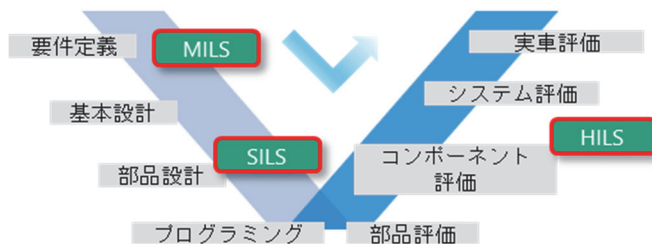


図 1 MBD V字モデル

表 1 に各手法の概要を示す。

表 1 シミュレーション手法一覧

名称	概要
MILS Model-in-the-Loop Simulation	実機レス、モデルベースで制御ロジックを検証
SILS Software-in-the-Loop Simulation	PC 仮想環境で実装コードを使い制御アルゴリズムを検証
HILS Hardware-in-the-Loop Simulation	H/W(ECU)と専用のプラットフォーム装置で動作を検証

これらの中でも HILS は特に重要な役割を担っている。シミュレーション動作環境である専用のプラットフォーム装置(以下、HIL シミュレータ)と、車両に搭載される複数の ECU (Electronic Control Unit: 電子制御ユニット)をハネスで接続し、シミュレーション結果に基づき、制御信号(I/O, CAN, Ethernet など)をやり取りする。これにより、ECU 間の複雑な連携動作の検証や、実環境では再現困難な異常系・故障モードなどの繰り返し試験が可能となる。

しかし、電力を扱うパワートレインの性能を検証・評価するには、モデルの継続的な緻密化が必要である。

3.2 パワートレイン評価

BEV のパワートレインは、従来の内燃機関車におけるエンジンと燃料(ガソリンなど)から、モータ/インバータおよびバッテリーを中心としたモータシステムへ移行している(図2)。そのため、新規部品に対する性能評価項目の変更など、新たな取り組みが必要となっている。

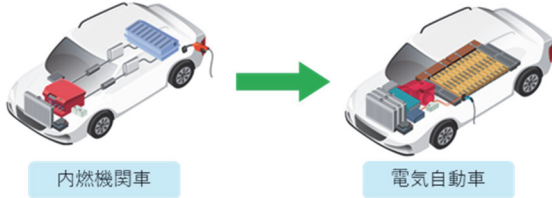


図2 モータシステムへの移行

一方、国内外を問わず、自動車市場における競争は激化しており、開発をより効率化し、新型車を早期投入することが求められている。しかし、実車完成後にパワートレイン評価で問題が発生すると、手戻りが大きく、開発スケジュールの遅れやコスト増加を引き起こす。このようなリスクを低減・回避するため、実車評価前に、実電力を用いて実車相当のシステム評価を行うことが有効である。

3.3 シミュレーションと実電源の融合

BEV 開発の効率化に向け、我々は、HILS と双方向直流電源(以下、電源装置)を融合した、パワートレイン性能の評価手法である「Power HIL」の実現に向け、取り組んでいる。

本手法は、環境・車両・部品・制御モデルを組み合わせた HIL シミュレータで、充電や走行(加速、減速、登坂、悪路走行など)の動作を模擬して電源装置を制御し、モータ/インバータやバッテリーに実車相当の電力授受を加えた性能評価を実施できる点が特徴である。図3に、実バッテリーを用いた Power HIL システム構成例を示す。

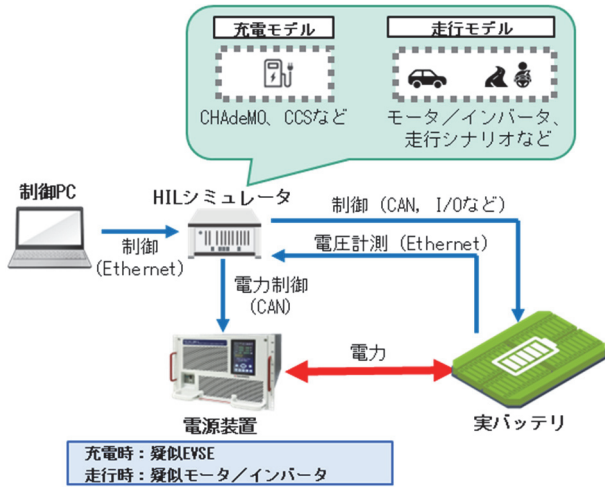


図3 実バッテリーを用いた Power HIL システム構成例

また、図4に示すように、評価データを前工程にフィードバックしてモデルを緻密化することで、MILS, SILS の検証精度が向上する。

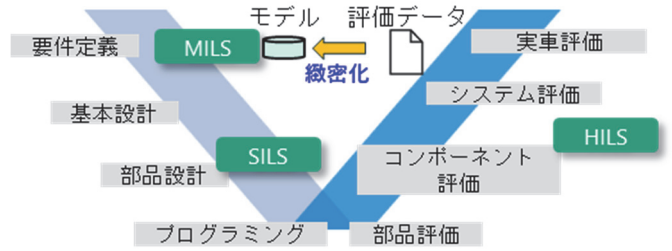


図4 評価データによるモデルの緻密化

4 技術実証

2024 年度に国内自動車メーカーと協働し、現有設備を活用した Power HIL の実証を行った。その取り組みについて紹介する。

4.1 システム概要

システムは、制御 PC(表4)、HIL シミュレータ(表5)、電源装置(表6)を組み合わせて構築した。なお、シミュレーションモデルの構築中に実車部品を用いることは安全上のリスクを伴うため、疑似バッテリーとして電源装置を採用した。

図5にシステム基本構成を示す。

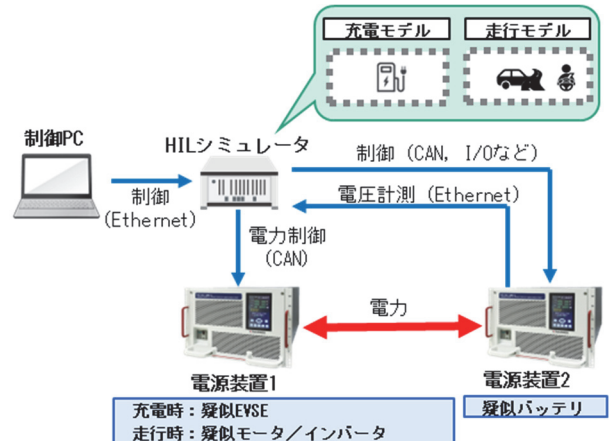


図5 システム基本構成

本実証では、HIL シミュレータで実行するモデルの妥当性と、電源制御の実現性確認を主目的とし、電源制御は安全面を考慮して、実電力(=実車両で扱う電力)の約 1/20 スケールで行うこととした。

表2に、システムを構成する各機器と役割を示す。

表2 機器と役割

機器	役割
制御 PC	HIL シミュレータの動作を制御
HIL シミュレータ	充電や走行を模擬するシミュレーションモデルの実行および電源装置の制御
電源装置 1	充電: EVSEとして電力を供給し充電を模擬 走行: 電力の供給と回収で力行・回生を模擬
電源装置 2	電力を供給・回収してバッテリーを模擬

電源装置には、高砂製作所製 RZ-X2-10K を採用した。理由は、実証に十分な電力容量と充放電機能を備えており、高効率・低ノイズ性能に加えて、電圧・電流の急激な変化への応答性と安定性に優れ、国内自動車メーカーに多数の導入実績を有するためである。

HIL シミュレータと電源装置間のインターフェースには、CAN(Controller Area Network)および Ethernet を使用した。

本実証では、EVSE(Electric Vehicle Supply Equipment: 充電ステーション) 動作を模擬してバッテリーの充電性能評価を行う「充電模擬(4.2 節)」と、車両走行時のモータ/インバータ動作を模擬してパワートレインの性能評価を行う「走行模擬(4.3 節)」を実施した。

また、HIL シミュレータや電源装置など、各機器の統合制御やデータモニタリング機能を備えたソフトウェアを試作した。以下、このソフトウェアを「Power HIL プラットフォームソフトウェア」と呼ぶ。GUI を介して、模擬条件の作成、実行制御、状態表示を提供する。

4.2 充電模擬

BEV への充電方法として、普通充電や急速充電があり、その中でも、さまざまな充電規格が存在する。表 3 に、急速充電の主要な規格と普及地域を示す。

充電性能評価において、各規格に対応した EVSE を揃えるには、多くの設備投資や設置スペースを要する。そこで、充電模擬では、各規格を 1 つの評価システムで再現し、バッテリー制御 ECU を含めた充電性能を評価することを目的としている。本実証実験では、日本で普及している CHAdeMO を対象とした。

表 3 急速充電の主要な規格と普及地域

充電規格	CHAdeMO	CCS	NACS	GB/T
普及地域	日本	Type1: 北米 Type2: 欧州	北米	中国

充電模擬は、疑似 EVSE、疑似 EV それぞれに、HIL シミュレータと電源装置を 1 台ずつ配置し、(1)~(4)に示す流れで行った(図 6)。

- (1) 疑似 EVSE と疑似 EV 間で充電シーケンスを開始
- (2) 疑似 EVSE は(1)で疑似 EV から指示された電流値に従い、電源装置 1 の出力を制御
- (3) 疑似 EV 内の電源装置 2 の電圧を測定し、SoC(State of Charge: バッテリー充電率)と次の電流指示値を算出し、(1)の通信を介して疑似 EVSE に通知
- (4) SoC が 100%になるまで、(3)を繰り返す

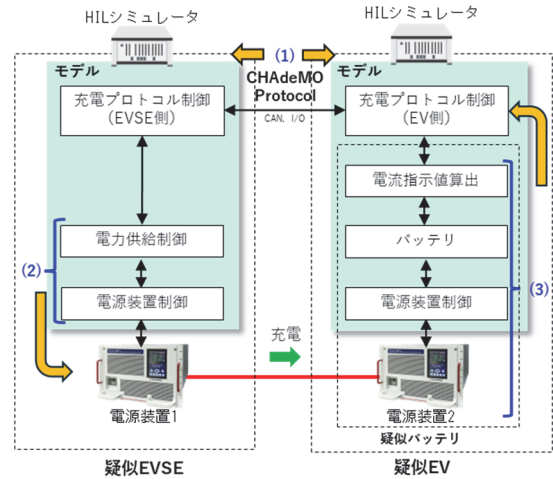


図 6 充電模擬の実証システム構成

図 7 に、充電模擬中の疑似バッテリー SoC の計測結果を示す。

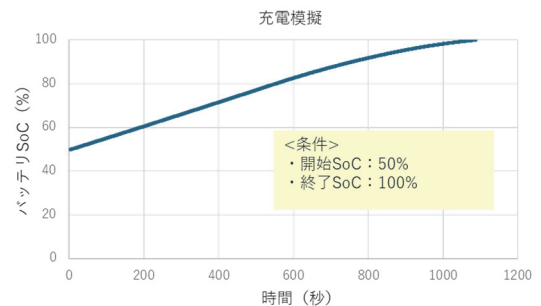


図 7 充電模擬中の疑似バッテリー SoC の計測結果

充電時間の経過とともに、疑似バッテリーの SoC が増加していることがわかる。この結果から、充電プロトコルの制御を含めたモデルの妥当性や、バッテリーの充電性能評価が可能であることを実証した。また、Power HIL プラットフォームソフトウェアの充電モニタ画面では、充電中の電力量やバッテリー SoC の計測データを表示し、正常・異常を 1 画面で把握でき、適切な判断・対処を促す(図 8)。

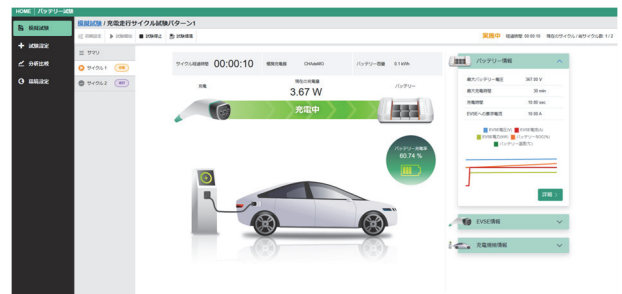


図 8 Power HIL プラットフォームソフトウェアの充電モニタ画面

本実証では CHAdeMO を対象としたが、その他の充電規格についても、充電プロトコル制御を行うモデルと、HIL シミュレータの I/O を変更するだけで、基本構成を変えずに充電模擬が可能である。

4.3 走行模擬

BEV は、走行時のアクセル/ブレーキ操作により、駆動用モータとバッテリー間で、力行および回生動作に応じた電力の授受を行う。力行は、アクセル操作による加速時に、モータ駆動のためにバッテリーから電気を使う状態である。回生は、ブレーキ操作による減速時に、モータが発電機として動作し、バッテリーへ充電を行う状態である。走行模擬は、この一連の動作を再現し、実際の走行に近い条件下でのパワートレインの性能評価を目的とする。

本実証では、走行パターンに、国際的な燃費・電費評価基準であるWLTC(Worldwide-harmonized Light vehicles Test Cycle)を採用した。WLTCは、低速、中速、高速、超高速の4つのフェーズから構成され、市街地、郊外、高速道路などの走行条件を含む。

シミュレーションで使用する車両モデルは、HILS ベンダ提供の標準モデルを使用した。モータ/インバータモデルの力行/回生動作に基づき電力量を算出し、力行時には、疑似バッテリーの放電を模擬するため、負の値(-)となるよう、電源装置を制御した。

一方、回生時には、充電を模擬するため、正の値(+)となるよう、電源装置を制御することで実現した。

走行模擬は、HIL シミュレータ 1 台と、電源装置 2 台を配置し、(1)~(3)に示す流れで行った(図 9)。

- (1) HIL シミュレータ内の標準車両モデルが、WLTC パターンで走行した状態をシミュレーションで再現
- (2) モータ/インバータの力行/回生電力量(-/+)を算出し、電源装置 1 を制御
- (3) 疑似バッテリーである電源装置 2 の電圧を測定し、SoC を算出

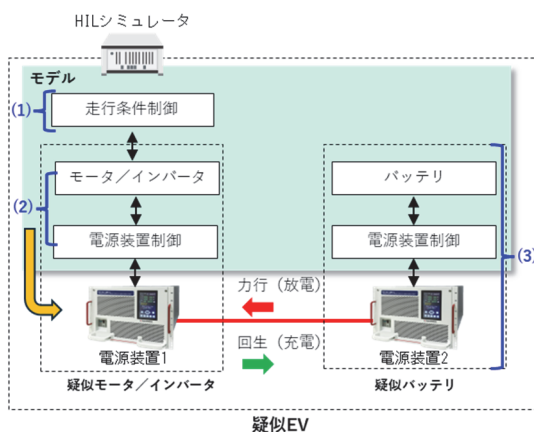


図 9 走行模擬の実証システム構成

図 10 に、走行模擬中の WLTC 各フェーズにおける、車速、力行/回生時の電力量、疑似バッテリー SoC の計測結果を示す。

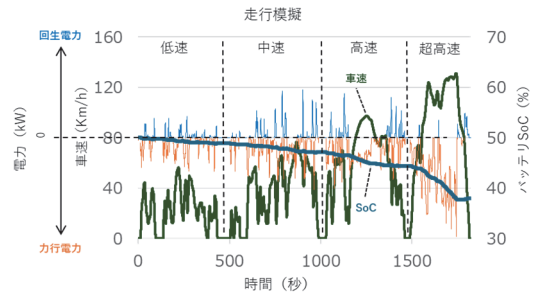


図 10 走行模擬中の疑似バッテリー SoC の計測結果

この結果から、各フェーズのモータ駆動による電力消費と、減速によるモータ発電に応じた、実車相当の電力変動が再現できており、実車を使わずに、走行状態におけるパワートレイン性能を評価できることが実証された。この走行模擬により、評価指標の1つである電費を求めることが可能である。また、Power HIL プラットフォームソフトウェアの走行モニタ画面では、車速やアクセル/ブレーキ開度、モータ/インバータによる力行/回生状態に伴う電力量、SoC の計測データを表示することで、走行時の充電、放電の正常・異常を 1 画面で把握でき、適切な判断・対処を促す(図 11)。

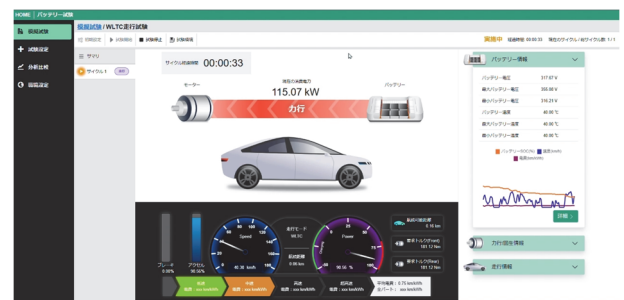


図 11 Power HIL プラットフォームソフトウェアの走行モニタ画面

本実証では、走行模擬の車両モデルとして、HILS ベンダ提供の標準モデルを使用した。各自動車メーカーの車両にカスタマイズしたモデルに差し替えることで、より実車の走行に近い状態で、パワートレインの性能評価が可能となる。

4.4 電力システムの切り替え

本システムにおけるパワートレインの性能評価では、充電模擬と走行模擬を交互に行い、SoC の推移確認や電費算出を行う。しかし、各模擬では、電力授受の系統が分かれており、バッテリーへの接続先が異なる。ケーブルの繋ぎ変え作業を不要とするため、図 12 に示すように、電源装置とバッテリーの間に挟み、シームレスな電力システムの切り替えを目的としたジャンクションボックスを試作した(表 7)。

また、電源装置とバッテリーが直接接続されないため、意図しない電力が流れた際にも、ジャンクションボックスで切り離しが可能となり、安全性が向上する。

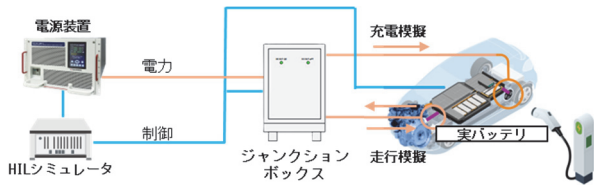


図 12 電力系統切り替えイメージ

試作したジャンクションボックスは、電力系統の切り替えに必要な部品の選定や構造設計を含めた、実現性の確認を主目的とし、実証システムに合わせて、実電力の約 1/20 スケールとした。

図 13 に、ジャンクションボックスの内部構造を示す。

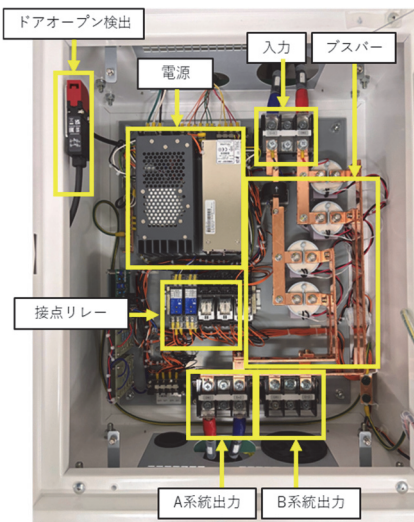


図 13 ジャンクションボックスの内部構造

実証環境で検証し、部品や回路の妥当性、および安全性を考慮したシステム制御の流れを確認できた。実電力向けには、印加電圧や通電電流の仕様を満たす部品に変更することで対応可能である。

5 今後の課題と展望

本実証では、モータ/インバータモデルと疑似バッテリーを用いて、Power HIL の実現性を確認した。次のステップとして、実車部品を用いて同様の実証を行い、モデルや手法の妥当性を確認していく。

今後、自動車市場は、xEV の普及や完全自動運転の実現に向けて、さらなる発展が見込まれる。また、SDV(Software Defined Vehicle)や OTA(Over-The-Air)といった技術の進展により、車両の乗り心地や機能をソフトウェアで変更可能とするなど、市場投入後も、長期的にユーザ満足度を維持する取り組みが拡大していく。

開発現場では、設計や評価の効率化が一層重要視され、シミュレーションの活用比率を高める傾向が強まっている。そのような中でも、パワートレインは、実電力を用いた効率的な性能評価が必要と考える。この手法は、自動車市場だけでなく、農機、建機、船舶、

航空、宇宙など、広い業界に有効であるため、適用範囲を広げていきたい。

6 むすび

BEV 開発の効率化に向け、シミュレーションと実電源を融合した EV パワートレイン評価の技術実証を行った。電源装置に対し、HIL シミュレータから、EVSE を模擬した充電時の電力制御や、走行時のパワートレインを模擬したモータ駆動・発電による電力制御を行うことで、期待したバッテリー SoC の推移が確認できた。この結果から、実車相当の評価が可能であることがわかった。

我々は、本実証で得られた知見に基づく Power HIL の早期市場投入を通じ、BEV 社会実現に向けて加速する自動車開発の支援を目指す。

7 参考文献

- 1) 国交省 HP 「運輸部門における二酸化炭素排出量」
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html
- 2) 経済産業省 HP 「自動車・蓄電池産業 主な今後の取り組み」
https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/05_jidosha.html
- 3) 高砂製作所 HP: 双方向直流電源 RZ-X2-100K 製品情報
https://www.takasago-ss.co.jp/products/power_electronics/dc/rzx2_100k/01.html

執筆者



依田 拓也
環境計測カンパニー
ソリューション開発部



新地 雄太
環境計測カンパニー
ソリューション開発部

表 4 制御 PC 主要諸元

項目	仕様
OS	Windows 10 Pro for Workstations Plus (64 bit)
CPU	Intel® Xeon® Gold 5222 Processor × 2 (Dual-processor)
グラフィックス	NVIDIA® TITAN RTX (GDDR6 24 GB)
メモリ/ストレージ	96 GB (DDR4-2933) / 1TB (SATA 6 Gb/s)
ネットワーク(LAN)	1 × RJ45 (10GBASE-T, 1000BASE-T, 100BASE-TX)
電源	1125 W / AC 100 V (50/60 Hz)
寸法/質量	約 216 (W) × 556 (H) × 445 (D)mm / 約 23.7 kg (標準構成)
動作環境	温度 10～35℃, 湿度 10～90% (結露なきこと)

表 5 HIL シミュレータ 主要諸元

項目	仕様	
OS	RTOS	
CPU	Intel® Core™ i7 Processor	
メモリ/ストレージ	4 GB (DDR4) / 8GB flash memory	
インタフェース	Gigabit Ethernet	1 × RJ45 (10BASE-T, 100BASE-TX, 1000BASE-T)
	RS232 interface with standard UART	1 × Dsub-9P
I/O ボード	Ethernet	4 × RJ45 (10BASE-T, 100BASE-TX, 1000BASE-T)
	CAN	8 (CAN, CAN-FD)
	Multi-I/O	Analog, Digital
電源	350 W / AC100～240 V (50/60 Hz)	
寸法/質量	約 250 (W) × 400 (H) × 200 (D) mm / 約 7.5 kg (ボード除く)	
動作環境	温度 0～50℃, 湿度 5～95% (結露なきこと)	

表 6 電源装置(RZ-X2-10K) 主要諸元

項目	仕様		
出力仕様	定格出力電圧/定格出力電流/定格出力電力	+100 V / ±300 A / ±10 kW	
入力仕様	動作電源	AC180 V～AC250V 三相・45 Hz～65 Hz	
定電圧特性(CV)	設定範囲(レンジ)	Hi / Lo	+0.00 V～+102.00 V / +0.000 V～+30.600 V
定電流特性(CC)	設定範囲(レンジ)	Hi / Lo	-306.00 A～+306.00 A / -30.600 A～+30.600 A
定電力特性(CP)	設定範囲	電圧:Hi / 電流:Hi	-10.200 kW～+10.200 kW
		電圧:Hi / 電流:Lo	-3.060 kW～+3.060 kW
		電圧:Lo / 電流:Hi	-9.180 kW～+9.180 kW
		電圧:Lo / 電流:Lo	-918.0 W～+918.0 W
直並列運転	拡張性	最大接続台数	直列:5 台/並列:10 台
	最大定格出力電圧/最大定格出力電流		+500 V / ±3000 A (10 台並列時, 直列なし)
	最大定格出力電力		±200 kW
その他機能	外部通信インタフェース	LAN / CAN CAN FD (オプション)	
動作環境	周囲温度/湿度	0～40℃ / 20～85% (結露なきこと)	
寸法/質量		430 (W) × 355 (H) × 650 (D) mm / 約 70.0 kg	

表 7 ジャンクションボックス(電力系統切り替え器)主要諸元

項目	仕様	
入力数/出力数	1 系統/2 系統 (A, B)	
定格電圧/定格電流	定格印加電圧:DC100 V/定格通電電流:±DC100 A	
電圧モニタ出力	スケール/確度	+10 V / +100 V (内部回路との絶縁電圧 DC500 V) / 100 V の±3%以内
電流モニタ出力	スケール/確度	±10 V / ±100 A (内部回路との絶縁電圧 DC500 V) / 100 A の±3%以内
出力系統の切り替え	信号仕様	無電圧接点入力, DC24 V, 20 mA 以上
入力および出力電線		1500V MLFC60SQ × 2 本撚り, 10 m (圧着端子 M8, M12) × 3
動作電源入力		単相 AC90～110 V, 50 / 60 Hz, 約 10 A 以下
寸法/質量		約 600 (W) × 500 (H) × 300 (D) mm / 約 40 kg

公知

Prism: An Open-Source Framework for Building XAML Applications in WPF for Instrumentation

Tom Roberts

[Summary]

This paper examines the Prism framework as a foundational open-source solution for building large-scale, modular WPF applications in instrumentation and scientific software. It discusses the architectural challenges inherent in WPF and MVVM development and explains how Prism addresses these challenges through standardized infrastructure such as dependency injection, modularity, region-based composition, navigation, and loosely coupled communication. Key Prism features—including the ViewModel Locator, Region Manager, Event Aggregator, and Dialog Service—are explored in the context of scalability, testability, and long-term maintainability. Finally, the paper considers Prism's evolution as an open-source project and its continued relevance for enterprise-grade instrumentation applications.

1 Introduction

Open-source frameworks are essential for instrumentation and scientific software as they provide pre-built, community-vetted foundations that allow developers to skip complex infrastructure tasks and focus on specialized features. These frameworks accelerate development cycles by offering modular, reusable components for large-scale enterprise applications, ensuring they can scale efficiently to meet the demands of timely feature additions without breaking existing ones. Furthermore, the inherent transparency of open source fosters a culture of collaborative problem-solving and rigorous peer review, which enhances software reliability.

Over the past 10–15 years, there has been a shift from Windows Forms (WinForms) to Windows Presentation Foundation (WPF) for enterprise line-of-business applications. WPF offers a more modern User Interface (UI) framework with powerful data binding, Model-View-ViewModel (MVVM) support, and styling/templating, which makes large applications easier to maintain and scale. WPF has a

significant learning curve because it requires mastering several advanced concepts simultaneously, including XAML^(1,2), a declarative markup language for UI design that is distinct from traditional C# code. WPF's core architectural pattern, MVVM^(3–5), demands a major shift in thinking from simpler event-driven models like WinForms to a more decoupled approach. Additionally, understanding complex internal mechanics such as dependency properties, routed events, and data binding^(6–9) can be daunting for beginners. Unlike older frameworks, WPF also introduces sophisticated and powerful layout systems, templates, and styles but adds significant verbosity and initial confusion. Finally, debugging can be difficult because runtime errors in the XAML object tree often produce abstract or unhelpful messages.

Implementing the MVVM pattern is essential for professional WPF development because it decouples the UI from the application's core logic, enabling applications to scale without becoming unmanageable. By moving state and behavior into a separate ViewModel, developers create logic that is unaware of the View and communicates through data

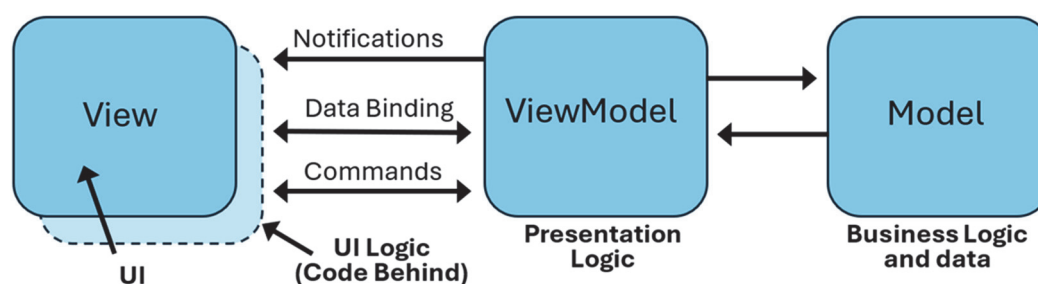


Figure 1 Relationships and interactions between MV

binding, commanding and notifications. As illustrated in Figure 1, the View and ViewModel interact indirectly through well-defined mechanisms, while the Model remains isolated from UI concerns. This separation allows designers to modify the visual experience in XAML without risk of breaking underlying functionality, while also facilitating comprehensive unit testing of business logic in complete isolation from the UI thread.

While the core WPF framework provides the raw building blocks for MVVM, such as data binding and commands, it lacks the high-level infrastructure required to handle complex application-wide concerns. Professional MVVM frameworks fill these gaps by providing standardized "plumbing" for common tasks like message-based communication between disconnected components, integrated dependency injection (DI) for managing object lifetimes, and automated property change notification. Without these frameworks, developers often resort to writing repetitive "boilerplate" code for every new screen, which increases the likelihood of human error and significantly slows development cycles.

Scaling a WPF application to an enterprise level requires a robust modular architecture that frameworks simplify through advanced navigation and composition systems. These frameworks allow large teams to build and maintain independent features as separate plug-ins that can be dynamically loaded at runtime. This modular approach ensures that a change in one functional area of the application does not inadvertently cause a failure in another, making the entire system more resilient and easier to maintain.

Ultimately, leveraging an established MVVM framework standardizes the development process and enforces architectural best practices across a project. By providing a common language and set of conventions, these tools help teams avoid the "spaghetti code" that frequently plagues long-lived desktop applications. As applications evolve, built-in support for sophisticated features—such as automatic View-to-View-Model discovery and cross-component event systems—enables a level of agility and maintainability that is difficult to achieve through manual implementation alone.

2 Prism Library Evolution

The Prism MVVM Framework was established in 2008 by Microsoft's patterns & practices team, originally under the name Composite Application Library. It was developed to

provide official guidance and a set of libraries for building "composite applications" - complex, large-scale WPF software that requires a modular and loosely coupled architecture^{10,11}. By implementing the MVVM pattern along with other architectural principles like DI and Event Aggregation, Prism was designed to solve the challenges of maintaining and testing sophisticated XAML-based applications. It allows multi-disciplinary teams to develop, test, and evolve individual application components independently, ensuring the UI remains separate from business logic to improve long-term flexibility and code re-use. In 2015, Microsoft transitioned the project to the open-source community^{12,13}.

As of 2026, the Prism Library remains a dominant framework for building modular XAML applications. Its core package, Prism.Core, has surpassed 19.5 million total downloads on NuGet, with a daily average of approximately 8,600 downloads. The user base is extensive and well-established, supported by a mature ecosystem of community-driven documentation and active development targeting the latest .NET environments.

Prism¹⁴ fundamentally simplifies the MVVM pattern by offering built-in components which ensure a clean separation between UI and business logic. Prism's integration with common DI containers allows developers to manage object lifetimes and resolve dependencies effortlessly, promoting a loosely coupled system. This separation of concerns enhances testability, allowing ViewModels and services to be verified independently using design-time mocks or automated tests without a live UI. Modularity is a core strength, enabling large applications to be decomposed into independent modules that can be developed, tested, and updated by separate teams in parallel. The framework further supports a composite UI approach through regions and navigation services, allowing dynamic content loading into specific placeholders. Advanced communication between these decoupled parts is facilitated by the Event Aggregator, which provides a thread-safe, loosely coupled publisher/subscriber mechanism. By standardizing these architectural patterns, Prism reduces technical debt and ensures that applications remain scalable and maintainable as requirements evolve.

A trend among open-source maintainers is the shift toward tiered licensing models to address the long-term sustainability of open-source projects and prevent maintainer burnout.

In 2025, Prism migrated from a community to a dual community / commercial license model. These licensing structures are beneficial because they create a more sustainable financial model by allowing open-source maintainers to earn directly from commercial use while keeping the code accessible for community use. By balancing commercial interests with open-source principles, these frameworks can secure the funding necessary for professional-grade support, dedicated maintenance, and faster feature development. Ultimately, this trend helps stabilize the software supply chain, ensuring that the essential infrastructure upon which 96% of organizations¹⁵⁾ now rely remains actively supported into the future.

3 Integration of Dependency Injection (DI) containers in Prism

DI is a critical design pattern that decouples the creation of an object from its usage, facilitating a separation of concerns that is vital for scalable software. By centralizing the management of instances, developers can avoid hard-coded dependencies, making applications more modular and significantly easier to unit test through mock injections. The Prism MVVM framework streamlines this process by integrating with popular DI containers like Unity or DryIoc, providing a dedicated ViewModel Locator to automatically resolve and wire up dependencies at runtime. Prism further enhances instance management by handling object lifetimes, ensuring that services and components are properly registered as singletons or transient instances based on application needs. Without DI, developers often resort to the Singleton pattern or manual instantiation, which can lead to severe pitfalls such as tight coupling and rigid codebases that are difficult to modify. A lack of centralized management frequently causes memory leaks, as long-lived objects may hold onto references of short-lived components, preventing the garbage collector from reclaiming memory. These leaks are notoriously difficult to track because they often manifest as gradual performance degradation rather than immediate crashes. Identifying these hidden references can be extremely difficult and time consuming to track down and resolve. Prism's structured approach ensures that dependencies are explicit and lifecycle-managed, mitigating the risk of memory leaks and the extreme debugging challenges associated with manual instance control.

4 Loose coupling benefits

In software design, loose coupling refers to components interacting through well-defined interfaces rather than direct references. Building features with loose coupling in Prism offers several critical benefits:

- **Independent Evolution:** Features can be developed, updated, or replaced in isolation, ensuring that changes in one module do not cause cascading failures or require re-deploying the entire application.
- **Enhanced Testability:** Because components are not tightly bound, they can be easily mocked or stubbed, allowing for more reliable unit testing in isolation.
- **Improved Maintainability:** With a clear separation of concerns, bugs are easier to isolate, and the codebase remains more manageable as the application scales.
- **Scalability:** Different teams can work on separate functional areas simultaneously without blocking each other, speeding up the overall development lifecycle.

5 Modules

A Prism module is a self-contained, feature-focused unit in a Prism application that bundles related views, ViewModels, services, and registrations. It allows developers to build and load application functionality independently, making large WPF apps easier to scale, test, maintain, and evolve over time. When an application has many modules, it is best to locate them outside the main Prism (shell) project. Typically, the shell project contains only the application startup, shared infrastructure, and layout, while each module lives in its own separate class library project. This keeps features isolated, reduces coupling, and allows teams to work on modules independently.

Figure 2 shows sections of a typical instrument application window: MenuBar, ToolBar, SideBars, StatusBar, Chart area etc. The MenuBar may have many defined Regions such as: FileMenuRegion, TraceMenuRegion, DisplayMenuRegion, etc. The ToolBar could have similar or related regions to the MenuBar regions: FileToolBarRegion, TraceToolBarRegion, DisplayToolBarRegion, etc. with shared functionality. For example, views, ViewModels, services, and registrations serving the TraceMenu and TraceToolBar regions would most likely be co-located in the same Prism Module.

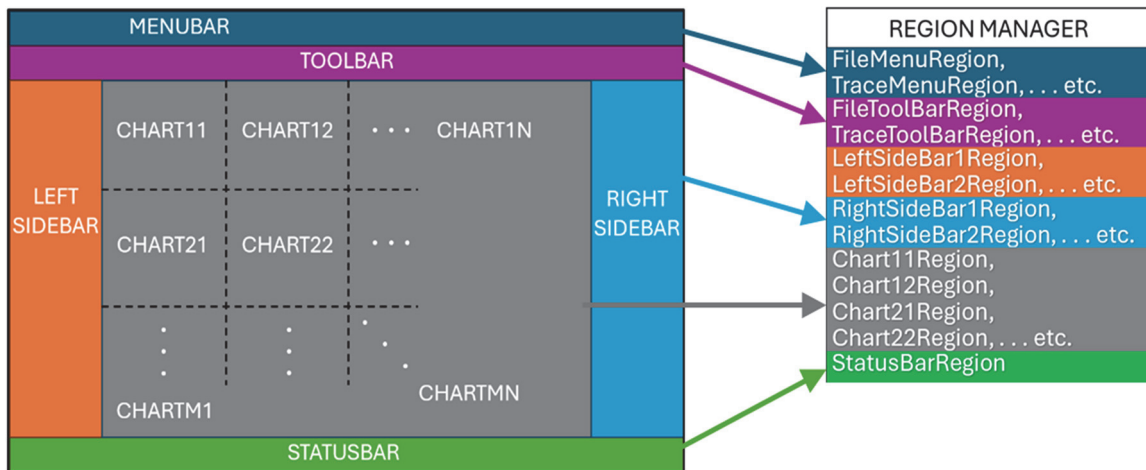


Figure 2 Application Main Window sections and Region names

6 Custom Controls for Instrumentation

Standard controls provided by WPF are usually insufficient for applications developed for instrumentation products. Interactive custom chart controls (e.g. Tabular, Rectangular, Smith, Polar, Gage, Vector Constellation, Eye Diagram, 3D surface¹⁶, etc.) with their own properties are required. Many of these charts are available from third-party vendors but rarely satisfy all customer UI requirements so custom controls are often developed internally. Custom controls are another modular component that can be developed independently and evolve with customer requirements. These interactive custom controls can be treated like any other standard control and injected into regions as an instance or instances using Prism. The development of custom controls is not discussed in this paper, but resources are available at Pluralsight¹⁷. From a Prism perspective, custom controls function as modular components and are often packaged within feature modules.

7 The ViewModel Locator

When using the MVVM pattern, a way to connect to the Views DataContext to the instance of the View's ViewModel is necessary. Prism's `ViewModelLocator` simplifies making this connection. While several approaches exist, Prism's `ViewModelLocator` avoids manual wiring by automatically creating and assigning the ViewModel to the view's `DataContext`. Prism's implementation is lightweight and container driven. It works by setting a single attached property on the view, which triggers Prism to resolve the ViewModel using dependency injection. Prism relies on naming conventions to locate the correct ViewModel, expecting views to live

in a Views namespace and ViewModels in a ViewModels namespace. The default rule appends "ViewModel" to the view name to find the corresponding ViewModel. Developers can override the naming convention or register ViewModels explicitly to fully control the mapping.

8 Regions and Region Manager

Regions are the primary mechanism to inject or display views to users throughout the application. A Region is simply a placeholder for dynamic content and can be created in XAML or in code. Regions have no knowledge of the Views that will be moved in and out of the Region. The Region Manager maintains the collection of the regions and allows access to them. A Region is defined in a Region Adapter which is host control for the Region. Prism supports various Region Adapters: `ContentControl`, `ItemsControl`, and `Selector` controls such as `ComboBox`, `ListBox`, `Ribbon` and `TabControl`. Prism's supported region adapters cover almost all scenarios needed; however, custom region adapters can be constructed. For example, defining a Region in a `StackPanel` would require a custom `StackPanel Region Adapter`¹⁴. The chart area in Figure 2 has $m \times n$ chart regions with grids hosted in a `TabControl`, for example. Any chart type instance could be moved in or out of any $m \times n$ chart regions using Region Navigation.

9 Region Navigation

Region (or View) Navigation in Prism provides a loosely coupled way to move views into and out from regions, making it ideal for MVVM scenarios where ViewModels should not reference view types directly. Region Navigation manages the full navigation lifecycle, including activating and

deactivating views and maintaining back and forward navigation stacks. Navigation is performed using URIs, which act as unique keys mapped to view types, eliminating direct dependencies on views. To enable navigation, views must be registered with Prism using the container registry, typically by calling `RegisterForNavigation`, which by default uses the view's name as the key. Once registered, navigation can be triggered through the `IRegionManager` by calling `RequestNavigate` with a region name and navigation key. Alternatively, navigation can be requested directly on an `IRegion` instance retrieved from the region manager. The region manager is usually accessed through constructor injection. This approach allows ViewModels to participate cleanly in navigation while preserving MVVM principles. Additionally, Region Navigation supports passing parameters and tracking where a view is within the navigation process.

10 Communicating between different areas of the application

Prism helps WPF applications become more decoupled, making them easier to build, maintain, extend, and test, but this decoupling can make communication between application areas more complex. One common challenge is enabling Views and ViewModels to communicate with different areas of the application without tight dependencies. Prism addresses this problem through the `IEventAggregator` interface which provides a loosely coupled, event-based communication mechanism. The Event Aggregator works using publishers and subscribers, where one part of the application publishes an event and other parts subscribe to receive it. Multiple publishers and subscribers can exist for the same event as shown in Figure 3. Subscribers must register for an event before publishers send it, and once published, the Event Aggregator routes the event to all subscribers. Events can also carry data objects, known as a payload, allowing information to be passed between application areas. Subscribers can filter events based on payload values to ensure they only handle relevant messages. The EventAggregator uses weak references by default to prevent memory leaks, but subscribers that opt into strong references must be manually unsubscribed.

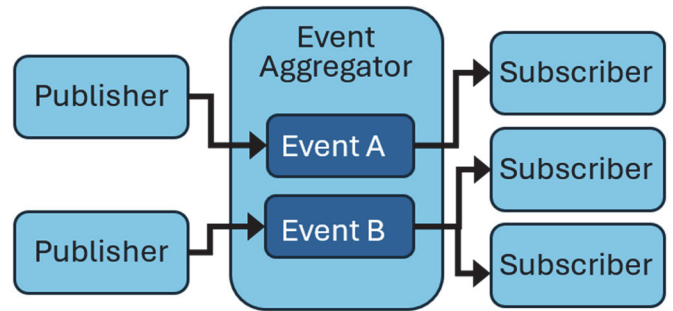


Figure 3 Event Aggregator¹¹⁾

11 Dialogs and the Dialog Service

Applications frequently need to prompt users for input or display notifications, which is typically done through dialogs. A dialog in Prism is a `UserControl` designed to display information, request confirmation, or collect user input. In Prism, dialogs are shown without directly tying ViewModels to UI elements. Prism uses the `IDialogService`, which allows dialogs to be invoked from ViewModels without referencing views. Dialogs can be shown in either modal mode, which blocks interaction with the rest of the application, or non-modal mode, which allows continued interaction and even multiple dialog instances.

Dialogs in Prism have a ViewModel that implements the `IDialogAware` interface. This interface provides key features such as setting the dialog title, controlling whether it can close, responding when it opens or closes, and receiving parameters for initialization. Dialogs are triggered by commands in the ViewModel, keeping business logic decoupled from the UI. Dialogs must be registered with the Prism DI container. Once registered, the `IDialogService` can be used to display the dialog in a clean, testable, and maintainable way. The dialog service can also be used to show multiple shells¹⁸⁾ or what is sometimes called detached windows.

12 Conclusions

This paper highlights the main features of Prism and its benefits in providing a standardized infrastructure to accelerate front-end software development for instrumentation. The Prism MVVM framework is indispensable for large-scale applications because it provides a robust, modular architecture that allows independent teams to develop, test, and deploy features simultaneously without conflict. Its core features - such as Dependency Injection, Event Aggregation, and region management - are essential for managing the high complexity of modern enterprise software by ensuring

components remain loosely coupled. Prism eliminates the need for developers to write repetitive boilerplate code or redesign foundational infrastructure. This pre-built functionality significantly reduces overall development time, allowing teams to focus exclusively on business logic rather than boilerplate plumbing. Furthermore, Prism's navigation and modularity features provide a standardized "common shell" that ensures consistent UI behavior across large codebases. Ultimately, using this established framework future-proofs applications by making them easier to maintain and evolve as business requirements grow over time.

13 References

- 1) Huber, T. C. (2024, June). XAML layout in depth [Video]. Pluralsight. www.pluralsight.com
- 2) Nathan, A. (2014). XAML unleashed. Sams Publishing.
- 3) Noyes, B. (2021, October). WPF MVVM in depth [Video]. Pluralsight. <https://www.pluralsight.com/courses/wpf-mvvm-in-depth>
- 4) Huber, T. C. (2022, October). WPF and MVVM: Advanced model treatment [Video]. Pluralsight. www.pluralsight.com
- 5) Huber, T. C. (2022, October). WPF and MVVM: Test driven development of ViewModels [Video]. Pluralsight. <https://www.pluralsight.com/courses/wpf-mvvm-test-driven-development-viewmodels>
- 6) MacDonald, M. (2012). Pro WPF 4.5 in C#: Windows Presentation Foundation in .NET 4.5 (4th ed.). Apress. doi.org
- 7) Noyes, B. (2022, October). WPF Data Binding in Depth [Video]. Pluralsight. <https://www.pluralsight.com/courses/wpf-data-binding-in-depth>
- 8) Noyes, B. (2022, October). Extending XAML applications with behaviors [Video]. Pluralsight. <https://www.pluralsight.com/courses/extending-xaml-applications-behaviors>
- 9) Noyes, B. (2022, October). WPF Productivity Playbook [Video]. Pluralsight. <https://www.pluralsight.com/courses/wpf-productivity-playbook>
- 10) Brumfield, B., Cox, G., Hill, D., Noyes, B., Puleio, M., & Shifflett, K. (2011). Developer's guide to Microsoft Prism 4: Building modular MVVM applications with Windows Presentation Foundation and Microsoft Silverlight. Microsoft Press.
- 11) Microsoft Patterns & Practices. (2014, April). Developer's guide to Microsoft Prism Library 5.0 for WPF, Microsoft Press. <http://download.microsoft.com/download/5/2/6/52627B2B-AE05-4781-AA5D-7EBCC4C86D9B/Prism5forWPF.pdf>
- 12) Prism Library. (2024). Prism (Version 9.0) [Computer software]. GitHub. <https://github.com/PrismLibrary/Prism>
- 13) Prism Library. (2024, February). Prism Library [Website]. <https://prismlibrary.com/>
- 14) Lagunas, B. (2022, May). Introduction to Prism 7 for WPF [Video]. Pluralsight. <https://www.pluralsight.com/courses/prism-wpf-introduction>
- 15) OpenLogic by Perforce, Eclipse Foundation, & Open Source Initiative. (2025). 2025 State of Open Source Report. <https://www.openlogic.com/resources/state-of-open-source-report>
- 16) Xu, J. (2016). Practical .NET chart development and applications: Advanced chart programming for real-world .NET 4.5 applications using C#, WPF, and MVVM. UniCAD Publishing.
- 17) Lagunas, B. (2024). Introduction to WPF custom controls [Video]. Pluralsight. <https://www.pluralsight.com/courses/wpf-custom-controls-introduction>
- 18) Lagunas, B. (2021, July). Prism problems & solutions: Showing multiple shells [Video]. Pluralsight. <https://www.pluralsight.com/courses/prism-showing-multiple-shells>

Author



Tom Roberts
Service Infrastructure Solutions
US Division
Test & Measurement Company

Publicly available

社外寄稿論文の紹介

社外寄稿 (2025年4月～2026年3月)

著者	所属	論文名(著書名)	寄稿先
Ryota Kaji Kodai Ishida Kazuyoshi Inoue Takuya Oda Katsuhiro Takenaga Kentaro Ichii	*1 M M *1 *1 *1	Comparison of Crosstalk Measurement Methods for Weakly-coupled Multicore Fibers	OECC/PSC2025 (30th OptoElectronics and Communications Conference/ International Conference on Photonics in Switching and Computing, 29 June - 3 July 2025)
K. Komatsu K. Ishida S. Beppu D. Soma S. Sumita T. Fukushima K. Inoue H. Takahashi Y. Wakayama T. Tsuritani	*2 M *2 *2 *2 M M *2 *2 *2	Impact of Inter-Core Crosstalk on Coherent Optical Time-Domain Reflectometry in Repeated Multicore Fibre Systems	ECOC 2025 (The 51st European Conference on Optical Communication, 28 Sep. - 2 Oct. 2025)
横澤峻元 松井朋裕	R R	Unconventional thermal conductivity of suspended zigzag graphene nanomesh	arXiv.2601.10935
柴田弘 渡邊紘平 山本宏 伊藤健 伴野洋 森本晋 神田曜昭	*3 *3 *3 *3 M M M	GSNR 推定手法を用いた光通信中継網の異常検知評価	2025年電子情報通信学会 ソサイエティ大会 B-6-65
柴田弘 渡邊紘平 山本宏 伊藤健 伴野洋 森本晋 神田曜昭	*3 *3 *3 *3 M M M	DCO トランシーバを用いた GSNR 推定手法の実用性評価	電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会 2026年3月 (信学技報 NS2025-285)
河村尚志	M	テラヘルツ波技術の現状と今後の展望(監修 橋本 修)	(株情報機構, 第1章第4節第1項 (pp.59-69), 2025年7月)
谷口英治 佐野純一 金野有真 鈴木康平	I I I I	リアルタイム透過型近赤外分光分析装置(Ariphas)による製剤内部の全数品質分析	PHARMA TECH JAPAN, Vo.42, No.2 (2026)
Motoki Inoue Eiji Taniguchi Jyunichi Sano	*4 I I	Real-Time Total Content Uniformity Assessment of Solid Dosage Forms Using Near-Infrared Transmission Spectroscopy	Analytical Chemistry 2025, 97, 11, 6111-6117
K. Komatsu K. Ishida S. Beppu D. Soma S. Sumita T. Fukushima H. Takahashi Y. Wakayama T. Tsuritani	*2 M *2 *2 *2 M *2 *2 *2	Repeater Fault Detection and Localization Using Coherent OTDR for Multicore Fiber Submarine Cable Systems	OFC2026 (Optical Fiber Communication Conference & Exhibition, 15 - 19 March 2026)
堀野春都 松田崇弘 菅沼碩文 瀬川真一	*5 *5 M M	1回反射点分布に基づく IRS 配置手法の最適性検証	電子情報通信学会 コミュニケーションクオリティ研究会 2026年3月 (信学技報 CQ2025-119)

R : 先端技術研究所

M : 通信計測カンパニー

I : インフィビスカンパニー

D : センシング&デバイスカンパニー

E : 環境計測カンパニー

H : エンジニアリング本部

*1 : 株式会社フジクラ

*2 : 株式会社 KDDI 総合研究所

*3 : NTT 株式会社(日本電信電話株式会社)

*4 : 星薬科大学

*5 : 東京都立大学

アンリツテクニカル編集委員

編集委員長／野田華子

編集副委員長／花立将実

編集事務局／塩入 健

編集委員／塚本日出春 松井朋裕 若狭聡史 中尾健一 佐藤 剛

土井 剛 宮崎 格 齊藤崇記 秋山智宏 青木和典

アンリツテクニカル

101

©アンリツ株式会社 2026 本誌からの無断転載・複製はご遠慮ください。

本誌に記載した名称の中には、それぞれの会社が商標として使用している場合があります。

問合せ先 アンリツテクニカル編集事務局
〒243-8555 神奈川県厚木市恩名 5-1-1
アンリツ株式会社 先端技術研究所技術企画部
TEL (046)296-6594

2026年3月31日 発行
発行人 野田華子
発行所 アンリツ株式会社
〒243-8555 神奈川県厚木市恩名 5-1-1
TEL (046)223-1111



アンリツ株式会社

<https://www.anritsu.com>