

NTT 技術ジャーナル

ISSN 0915-2318 平成2年3月5日第三種郵便物認可
令和8年3月1日発行 毎月1回1日発行 第38巻第3号(通巻444号)

3 MARCH
2026
Vol.38 No.3

特集

ウルトラワイドバンドギャップ半導体材料研究の最前線 持続可能なインフラ設備の実現をめざす研究開発

トップインタビュー

兼清 知之 NTTサービスイノベーション総合研究所 所長

グループ企業探訪

NTTスマートトレード

from NTTドコモソリューションズ

画像認識AI「Deeptector」による産業DX推進と市場拡大に向けた取り組み

from NTT西日本

NTTの研究開発技術を融合しAIフェイク解決に挑む, VOICENCE (ヴォイセンス) カンパニー始動



4 トップインタビュー

豊かな「知の泉」を活かし、
情熱を持って「高い山」を築き上げ、
イノベーションを起こそう

兼清 知之

NTTサービスイノベーション総合研究所 所長



8 特集1

ウルトラワイドバンドギャップ
半導体材料研究の最前線

10 NTTにおけるウルトラワイドバンドギャップ半導体研究の概要

14 超高温環境で動作するAlN系トランジスタ

18 AlN系分極ドーパントランジスタの高周波動作

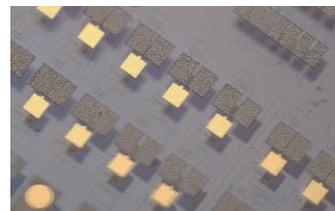
23 AlN系半導体を用いた深紫外レーザーダイオード

27 AlN圧電薄膜を用いたギガヘルツ弾性波素子

31 新規ウルトラワイドバンドギャップ窒化物半導体の創製

35 ダイヤモンド半導体のスピンドバイス応用に向けた取り組み

39 主役登場 河野 慎 NTT物性科学基礎研究所



40 特集2

持続可能なインフラ設備の
実現をめざす研究開発

42 インフラを持続可能にする研究開発

46 通信インフラの適切な維持管理を実現するための設備個々の状態に基づく腐食劣化予測の試み

50 通信インフラの長寿命化に向けたプラスチック材料の加速劣化試験に関する取り組み

54 通信インフラの長寿命化を実現するレーザー-鋳-鋼材間の現象解明の試み

59 通信基盤設備の研究開発と社会インフラへの展開

63 主役登場 木内 康平 NTT先端集積デバイス研究所



64 For the Future

美容×テクノロジーが生む新市場：
ビューティテックの成長メカニズム（前編）

69 挑戦する研究者たち

岡本 龍明

NTT社会情報研究所 フェロー

暗号理論研究の方法論をベースに
コンプレキシティ増大の法則を定式化



特集

74 挑戦する研究開発者たち

菅原 康友

NTTデータグループ 技術革新統括本部
AI技術部 シニアR&Dスペシャリスト

Smart AI Agent[®]で未来を創る
プロジェクト管理システムのエキスパート



For the Future

79 明日のトップランナー

西巻 陵

NTT社会情報研究所 特別研究員

未来の安心・安全な情報通信を実現する
「耐量子暗号」と「消去証明」技術



特別企画

83 グループ企業探訪

NTTスマートトレード株式会社

多様な決済・送金サービスを
ワンストップで提供するFinTech企業



挑戦する研究者たち

87 From NTTドコモソリューションズ

画像認識AI「Deeptector」による産業DX推進と市場拡大に向けた取り組み

91 From NTT西日本

NTTの研究開発技術を融合しAIフェイク解決に挑む、
VOICENCE(ヴォイセンス)カンパニー始動

明日のトップランナー

94 Webサイト オリジナル記事の紹介

4月号予定
編集後記

グループ企業探訪

本誌掲載内容についてのご意見、お問い合わせ先
NTT技術ジャーナル事務局
問い合わせページ <https://journal.ntt.co.jp/contact>

本誌ご購入のお申し込み、お問い合わせ先
一般社団法人電気通信協会 ブックセンター
TEL (03)3288-0611 FAX (03)3288-0615
ホームページ <http://www.tta.or.jp/>

NTT技術ジャーナルは
Webで閲覧できます。
<https://journal.ntt.co.jp/>





NTTサービスイノベーション総合研究所
所長

兼 清 知 之 Tomoyuki Kanekiyo

PROFILE

1992年日本電信電話株式会社入社。2017年NTTサービスイノベーション総合研究所 企画部長, 2021年NTT研究企画部門 R&Dビジョン担当 統括部長, 2023年NTT研究開発マーケティング本部 研究企画部門 R&D戦略担当 統括部長を経て, 2025年6月より現職。



豊かな「知の泉」を活かし、情熱を持って「高い山」を築き上げ、イノベーションを起こそう

最先端技術を「サービス」という具体的な価値へと昇華させ、社会実装へとつなぐ極めて重要な役割を担うNTTサービスイノベーション総合研究所。未来社会×デジタル情報により生まれ得る、果てしない可能性とその実現に挑んでいます。NTTサービスイノベーション総合研究所の兼清知之所長に特筆すべき成果と2026年度における新たな挑戦について伺いました。

社会実装の「真ん中」で、デジタルとフィジカルをつなぐ使命

NTTサービスイノベーション総合研究所について教えてください。

NTTサービスイノベーション総合研究所(SV総研)は、急速に進化するAI(人工知能)技術を先導し、サイバー世界(デジタル)とフィジカル世界(実世界)の両面で技術革新を起こすことをミッションに掲げています。私たちは単に技術を深掘りするだけでなく、その技術によっていかにして社会にイノベーションを起こすかに強い責任を持っています。

組織は大きく3つの研究所で構成されています。

1番目は人間情報研究所です。人の理解を中心に大規模言語モデル「tsuzumi」や、実世界を理解するワールドモデルなどを追っています。

2番目は社会情報研究所です。ここでは情報セキュリティやサイバーリスク対策を強化し、倫理、法律、プライバシー保護な

どの融合型研究により、安全な社会実装を支えています。

3番目はコンピュータ&データサイエンス研究所(CD研)です。音響メディア処理や量子コンピュータ、ソフトウェア工学、そして生成AI等が求める膨大な計算資源に対応するためのマルチコンピューティング基盤の研究を担っています。

NTTの研究所全体を見渡すと、ネットワーク・サービス・デバイスの各領域を担う組織がある中で、私たちは「サービス寄り」の位置にあります。また基礎研究、応用研究、実用化の各フェーズを担う中で、主に応用研究を中心に、基礎から、実用化の直前、あるいは実用化そのものに近い領域まで踏み込んでいくのが私たちのユニークな特徴です。

私たちは国内で、研究と実装の両面で「トップの研究所」とであると自負しています。現在のAI開発は「資本力」で決まる側面も多分にありますが、全く新しい発想による発明や、軽量性や特定領域での性能の追求による資本の量だけではない「次の何か」

を生み出すことに注力しています。

そして、NTT研究所全体の最大の強みは、デバイスからAI、ネットワークまでを1つの会社で幅広くカバーしている「総合力」にあります。GAFAsのようなグローバル企業はトレンドに応じて頻りに人員を入れ替えますが、NTTのようにこれほど広範な専門の研究者が連携し、知を蓄積し続けている組織は世界的にも希有です。量子コンピュータの研究においても、光デバイスの専門家、量子の理論家、そして私たちのようなソフトウェアの人間が所内で一堂に会して仕事ができるという、この圧倒的なシナジーがNTTの誇るべき競争力です。

2025年度は生成AIの爆発的進化など、非常に動きの激しい一年でした。特筆すべき研究成果をお聞かせいただけますでしょうか。

2025年度の大きな成果は、まず10月にリリースした言語モデル「tsuzumi2」です。これは初代が持つ「軽量・純国産・セキュ

ア]という特徴を継承しつつ、同じパラメータサイズのモデルの中では世界最高水準の日本語性能を実現しました。特定の業務領域においては、GPT-5級の巨大モデルとも互角の性能を発揮できるレベルに到達しており、これから事業会社での活用を本格化させていきます。

そして、IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) を「体現」する最大の舞台となったのが、大阪・関西万博のNTTパビリオンへの出展協力です。ここでは単なる展示ではなく、半年間にわたる大規模な実運用を伴う技術実証をやり遂げました。

具体的には4つの革新技術を披露しました。

最初は「空間伝送」。IOWN APN (All-Photonics Network) の低遅延特性を活かし、女性音楽ユニットPerfumeのライブ空間を映像・音声だけでなく「足元の振動 (ステップ)」や空間の「存在感」まで含めて遠隔地に伝送し、同じ場所にいるような体験を提供しました。次に「ふれあう伝話」。通信では難しかった「触感 (触覚)」を伝え合う、情緒的なコミュニケーションを実現しました。そして、「Another Me[®]」。自分自身の分身との対話を通じて新たな可能性に気付くことで、さまざまな機会を拡大するというコンセプトを体験いただきました。最後に「クロスリンガル音声合成技術」。有名アスリートの一言語の音声から、その人の声質のまま多言語の音声を生成し、6カ国語での紹介アナウンスを実装しました。

万博という厳しい環境下で、これらの技術を半年間動かし続けたことは、SV総研の「実装力」を示すことにつながったと思います。

2026年度への展望：自然な対話と実世界理解への挑戦

万博で披露した技術は実際に体験させていただき本当に感動しました。NTT技術は歌舞伎座12月公演、超歌舞伎でも披露され、人気を博しましたね。次年度はどんな重点領域に取り組みられるのかとても楽しみです。

これまでの成果をさらに深化させ、「AIがより人間に寄り添い、実世界で動く」フェーズに移行します。注力領域の筆頭は、生成AIの進化、とりわけ「Human-like AI対話」です。これまでのAI対話は、人間が話し終わってから一拍置くような不自然さがありましたが、会話の合間に自然な「相づち」を打ち、適切な「間」を取りながら人間とキャッチボールができるモデルを磨き上げ、社会実装をめざします。

そして、「ワールドモデル」、つまり実環境を理解するモデルの追究です。これはモビリティやロボティクスの「目であり脳」となる機能であり、フィジカルAIの中核をなします。ここも世界的に競争が激しい領域ですが、NTTが長年培ってきたメディア処理の蓄積を武器に、真剣に勝負してい

きたいと考えています。さらに、これらを支えるセキュリティ、ロボティクス、AI社会科学といった領域も、バランスよく進めていきます。

このような研究テーマを決定する際、私がおっとも大切にしているのは「問いの質」です。技術的に新しいことを見つけるだけでなく、それが「誰に、どのように使われるのか」「どのようなビジネスモデルで成立するのか」という、社会実装に向けた具体的な問いを最初から持っていなければなりません。研究して終わりではなく、最初の計画段階から「展開 (サービス化)」までを「自分ごと」として見据える姿勢が大切です。正解が分からない不確実な領域だからこそ、細かい仮説を立て、短いサイクルで検証と実装を回していく。このスピード感ある「問い」の連鎖が、イノベーションを引き寄せると考えます。

所長に就任されて半年が経ちました。入社されてからの歩みを踏まえてどのような姿勢で仕事に臨まれているのか、教えていただけますでしょうか。

私は1992年に入社しました。ISDN端末





の開発やIPTVプラットフォームの立ち上げなど、主に「世の中に出す側」をメインに従事し、技術がサービスとなり、お客さまがお金を払って使いたくなるかたちになるまでを見届けることに、大きな価値を感じながら歩んできました。

所長として研究所に着任して実感しているのは、研究所に対する周囲の期待の大きさです。それを裏切らないためには、研究成果を確実に「外へ出していく」ことが不可欠です。「外へ出していく」ために私は所長としてマネジメントに勤しむわけですが、その私のマネジメントの根幹にあるのは、現場経験から得た「責任感と覚悟」です。実用化の現場では、期限までに必ずつくり上げ、リリースしなければならぬという厳しい責任が伴います。その責任を果たすためには、計画を立てる段階での「これで行くんだ」という強い覚悟が必要です。かつての開発の中で、短期間で要件を組み立て、スケジュールをやり遂げた経験は、今も私の血肉となっています。

また、「答えをすぐに言わない」ことを信条としています。所長が安易に答えを与

えてしまえば、研究者が自ら考え、試行錯誤し、失敗から学ぶという、もっとも重要なプロセスを奪ってしまいます。私は研究者が自ら気づき、動き出すことを「支援する」姿勢を大切にしています。

そして、組織運営においてはリモートワークが普及する中でも、横須賀、武蔵野、品川、大手町といった各拠点を自ら精力的に回り直接メンバと話し、彼らの悩みや「ひらめき」を肌で感じることに。さらには「問い」を投げかけ続けること。そうした密なコミュニケーションを通じて、組織の志を1つにしていきたいと考えています。

すべての研究者に贈りたい 吉田五郎氏の志と石井裕氏が 提唱する「造山力」

多様な専門性を持つ数百人規模の研究者を抱えるトップとして、どのようなマネジメントスタイルで臨まれていますか。

研究所という組織は、トップが強引に引っ張って動くものではありません。素晴らしい個性や才能を持つ研究者の皆さんが、自由に、かつ正しい方向へ進めるように見守り、後押しをする。指示命令によって管理するのではなく、支援と伴走によって研究者の主体的な挑戦を促すことが、多様な才能を活かすのではないかと思います。

研究的な発想は自由であるべきです。しかし、その進め方や「外へのメッセージの出し方」については、私たちトップの経験やテクニックで支援できる部分が多くあります。研究者がやりたいことをどうすればイノベーションに近づけられるか。その「意味付け」や「整理」を手伝うことが、私の仕事だと思っています。

加えて、私は研究者に研究所の中に関心をもつだけではなく、事業会社の方や外部のステークホルダーと対話することで、自分たちの技術が社会でどう機能するのか、何が足りないのかを肌で感じてほしいとも考

えています。外部との接触は、研究の「素材」を「価値」に変えるきっかけになると思うからです。

変化の激しい現代において、これからの研究者にはどのような姿勢で研究に臨んでほしいですか。

私はすべての研究者に、2つの重要な言葉を贈りたいと思います。まずは、通信省電気通信研究所の初代所長、吉田五郎氏の言葉です。「知の泉を汲んで研究し実用化により世に恵みを具体的に提供しよう」。この言葉は私たちの原点です。「研究・開発・展開」の三位一体こそがイノベーションであり、企業研究者である以上、「お客さまがお金を払って使いたくなる技術」を世に出すことにこだわってほしい。技術が生まれた瞬間は、まだ何物でもありません。それを磨き上げ、社会に届けるまでを「自分ごと」として楽しんでほしいのです。

もう1つは、MITメディアラボの石井裕先生が提唱する「三力の造山力（ぞうざんりょく）」です。「誰も登ったことのない山を自らつくり、自ら登り、他者が登りたくなる道を示す」。既存の山を登るだけでなく、自ら高い山を描き、それを社会実装まで含めて切り切る覚悟を持ってほしいのです。

これからの研究者の皆さん、次のような姿勢でバランス感覚を活かして研究に臨んでください。まずは自分の研究に誇りを持ち、自ら問いを立てて動きましょう。そして、スピード感も大切です。じっくりつくり込むだけでなく、クイックに外に出し、フィードバックを得ることに努めましょう。

続いて、社会実装への意識です。技術を素材で終わらせず、社会価値に変えるまでを責任を持ちましょう。さらに、高い山を描く造山力ですね。独自のビジョンを掲げ、未踏の領域を切り拓きましょう。

最後に、外の世界と接続しましょう。研



研究所の内側に閉じこもらず、常に外の視点とスピードを意識したいですね。

NTTには長い歴史の中で積み上げられ

た膨大な知の蓄積があります。この豊かな「知の泉」を活かし、情熱を持って「高い山」を築き上げ、社会にイノベーションを共に

起こしていきましょう。

(インタビュー：外川智恵／撮影：大野真也)

インタビューを終えて

「最近のもっとも幸せな時間は、4歳になるポメラニアンとの散歩ですね。朝、散歩に連れていけと叩き起こされるんです(笑)。週末に犬との散歩に専念している時間は、仕事のことを完全にリセットできる貴重なひと時です」と語る兼清所長。

趣味はスポーツ観戦。特にモータースポーツが大好きで、一昨年、仕事の関係でインディカーの会場に研究所の技術を届ける機会があり、現地へ行けたのは本当にラッキーな経験だったとおっしゃいます。

「造山力」の言葉を引用した石井裕先生

とは、兼清所長が入社した際に部屋が向かい合わせだったという不思議な縁があるそうです。当時、石井先生がつくられていた「クリアボード」のデモを見て、「研究所ってすごいところだな」と衝撃を受けたことが、所長のキャリアの大きな原動力になっているとか。当時の感動を忘れず、今の若い研究者たちを導き、誰かを驚かせ、社会を震わせる研究開発に従事する兼清所長に初心の大切さを実感したひと時でした。



ウルトラワイドバンドギャップ 半導体材料研究の最前線

ウルトラワイドバンドギャップ半導体は、サステナブル社会の実現と将来の革新的デバイス・システム創出を支える基盤材料として注目を集めている。

本特集では、NTT物性科学基礎研究所が先導的な研究を展開してきた窒化アルミニウム(AIN)、立方晶窒化ホウ素(c-BN)、ダイヤモンドなどのウルトラワイドバンドギャップ半導体研究について、結晶成長技術からデバイス応用、さらには新規物性開拓に至る最新成果を紹介する。

NTTにおけるウルトラワイドバンドギャップ半導体研究の概要 ——— 10

長年の材料基礎研究により培ってきた高度な結晶成長技術を基盤とし、ウルトラワイドバンドギャップ半導体材料の結晶成長とそのデバイス応用の研究開発を推進してきた。本稿では、主要な研究成果を紹介するとともに、今後の研究展開を概説する。

超高温環境で動作するAIN系トランジスタ ——— 14

AIN系半導体は、その優れた物性により、高周波デバイス、パワーデバイス、耐環境デバイスなど幅広い応用が期待されている。本稿では、超高温環境下においても安定動作が可能なAIN系トランジスタの研究成果を紹介する。

AIN系分極ドープトランジスタの高周波動作 ——— 18

AIN系半導体のユニークな電気伝導制御手法「分極ドープング」を用いることで実現したAIN系トランジスタの高周波電力増幅動作について、その動作原理と最新の成果を中心に紹介する。

AIN系半導体を用いた深紫外レーザーダイオード ——— 23

高度な結晶成長技術により低抵抗化構造を実現し、これによって達成されたAIN系レーザーダイオードの深紫外レーザー発振について紹介する。

ワイヤレス通信

パワーエレクトロニクス

紫外フォトニクス

弾性波エレクトロニクス

スピントロニクス

AIN圧電薄膜を用いたギガヘルツ弾性波素子 ————— 27

本稿では、圧電トランスデューサとして高品質なAIN薄膜を用いた超高速バルク弾性波デバイス、さらにAIN圧電膜を利用したギガヘルツ表面弾性波素子を用いて、磁性スピンや電子と機械振動が結合する新しい物理現象を探究する研究について紹介する。

新規ウルトラワイドバンドギャップ窒化物半導体の創製 ————— 31

次世代パワーデバイス材料として期待されている立方晶窒化ホウ素（c-BN）を母体とする新規半導体材料〔立方晶窒化ホウ素スカンジウム（c-BScN）〕の結晶成長を世界で初めて成功した成果について紹介する。

ダイヤモンド半導体のスピndeデバイス応用に向けた取り組み ————— 35

ダイヤモンドは、半導体の中でもっとも長いスピン拡散長を有しているため、スピン流の長距離輸送を設計指針としたスピndeデバイスへの応用に適している。本稿では、ダイヤモンド半導体のスピン機能開拓に向けた取り組みを紹介する。

主役登場 河野 慎 NTT物性科学基礎研究所 ————— 39

ダイヤモンド半導体の新機能開拓への挑戦



NTTにおけるウルトラワイドバンドギャップ半導体研究の概要

ウルトラワイドバンドギャップ半導体は、高耐圧・高周波・高耐環境特性を兼ね備え、サステナブル社会の実現と将来の革新的デバイス・システム創出を支える基盤材料として注目されています。NTT物性科学基礎研究所では、長年の材料基礎研究で培った結晶成長技術を基盤に、窒化アルミニウム (AlN)、立方晶窒化ホウ素 (c-BN)、ダイヤモンドを中心とした研究開発を推進しています。本稿では、ウルトラワイドバンドギャップ半導体の最新成果と展望について紹介します。

キーワード：#窒化アルミニウム、#立方晶窒化ホウ素、#ダイヤモンド

谷保 芳考
ひらま かずゆき
平間 一行
おぐり かつや
小栗 克弥

NTT物性科学基礎研究所

半導体の“伸びしろ”

半導体は、情報やエネルギーの「処理」「変換」「伝送」を担う基盤技術として、現代社会のあらゆるところで利用されています。スマートフォンやPCに搭載される集積回路は情報処理を担い、発光ダイオード(LED)やレーザーは電気エネルギーを光へ変換し、太陽電池は光エネルギーを電気へ変換します。また、電力変換やモータ駆動などに用いられるパワーデバイスは、社会全体の省エネルギー化に直結する重要技術です。

近年はAI(人工知能)技術の急速な発展に伴い、データセンタを中心とした計算資源が増大し、半導体の重要性は一段と高まっています。さらに、IOWN(Innovative Optical and Wireless Network)に代

表される光電融合が進むにつれて、光と電気の境界で機能する半導体デバイスの役割も拡大していきます。

半導体の世界には、まだ大きな「伸びしろ」があります。その1つが本特集で扱う「ウルトラワイドバンドギャップ半導体」です。材料そのものが半導体として新しく、基礎物性からプロセス技術、デバイス設計まで未開拓な領域が多く残されています。言い換えれば、物性の理解と技術の積み上げ次第で、これまでの常識を覆すデバイスやシステムが生まれ得る領域です。そこで本稿では、まず半導体の基本概念である「バンドギャップ」と材料選択の考え方を整理したうえで、ウルトラワイドバンドギャップ半導体の意義と、NTTにおける研究開発を紹介いたします。

ウルトラワイドバンドギャップ半導体

■バンドギャップ：性能を決める“物差し”

半導体の性質を決める基本量の1つが、バンドギャップエネルギー (E_g) です。半導体材料はそれぞれ固有のバンドギャップエネルギーを持っています(図1)。バンドギャップエネルギーが0 eV(エレクトロンボルト)に近い材料は電気が流れやすい導体となり、バンドギャップエネルギーが大きくなるほど電気が流れにくくなって絶縁体に近づきます。半導体はその中間のバンドギャップエネルギーを持ち、さらに、不純物(ドーパント)を混ぜることで、電気伝導性を広い範囲で制御できる点が特長です。

不純物によって電子(負電荷)が伝導す

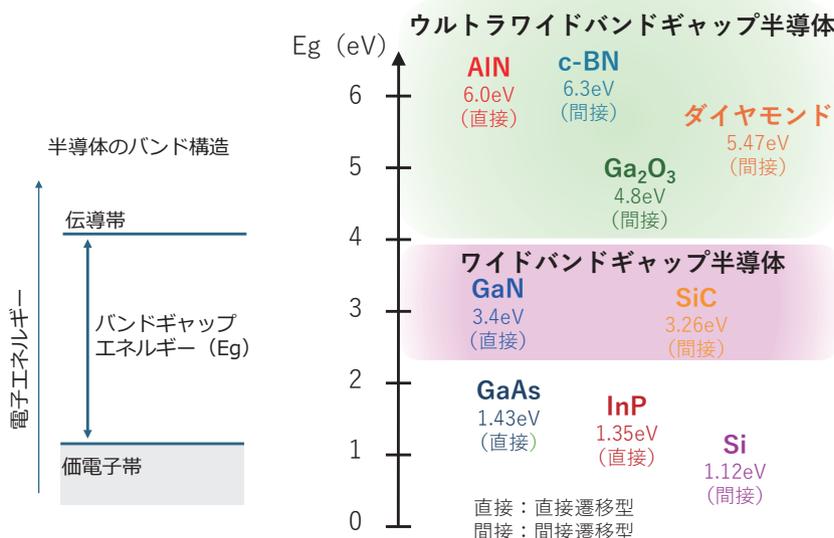


図1 半導体のバンドギャップ

る材料はn型半導体、正孔（正電荷）が伝導する材料はp型半導体と呼ばれます。このようなキャリア制御により、トランジスタやダイオードなどが動作し、情報処理や電力制御が可能になります。

光機能においてもバンドギャップエネルギーは重要です。LEDやレーザーでは、半導体内で電子と正孔が再結合する際に光が放出されますが、その光の波長はバンドギャップエネルギーで決まります。太陽電池のように光を吸収して電気に変換する場合も、吸収できる波長域はバンドギャップエネルギーによって決まります。バンドギャップエネルギーが大きいほど、発光・吸収する光の波長は短くなります。

現代エレクトロニクスの基盤材料であるシリコン (Si) のバンドギャップエネルギーは1.12 eVです。この値は半導体として電気伝導制御がしやすい領域です。炭化ケイ素 (SiC, 3.26 eV)、窒化ガリウム (GaN, 3.4 eV) はより広いバンドギャップを持つことからワイドバンドギャップ半導体と呼ばれます。バンドギャップが広がるほど電気伝導制御は難しくなりますが、半世紀近い長年の研究開発によりLEDやパワーデバイスとして社会実装が進んでいます。さらに広いバンドギャップを持つ材料として、酸化ガリウム (Ga_2O_3 , 4.8 eV)、ダイヤモンド (5.47 eV)、窒化アルミニウム (AlN, 6.0 eV)、立方晶窒化ホウ素 (c-BN, 6.3 eV) があり、これらはウルトラワイドバ

ンドギャップ半導体と呼ばれ、今まさに世界的に研究が加速しています。

半導体材料はそれぞれ固有のバンドギャップエネルギーを持っているため、用途に応じて使い分けられます。また、半導体を構成する元素や結晶構造 (図2) が異なると、バンドギャップエネルギーだけでなく、絶縁破壊電界 (どれだけ高電圧に耐えられるか)、熱伝導率 (どれだけ熱を逃がせるか)、電子飽和速度 (高周波でどこまで速く動作できるか) などの物性が変化し、得意とする応用領域が変わります。用途に応じた材料選択とは、これらの「物性の設計」と言い換えることができます。

■ウルトラワイドバンドギャップ半導体が切り拓く応用領域

ウルトラワイドバンドギャップ半導体は、バンドギャップエネルギーが特に大きい材料群であり、「高い電圧に耐える」「高い周波数で動く」「過酷環境でも性能を保つ」「紫外域で発光する」といった特長が期待されます。ここでは、その価値が現れやすい4つの応用領域を整理します。

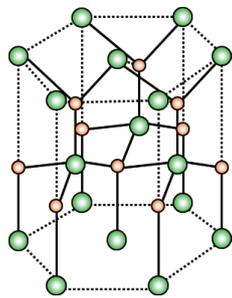
第一に、パワーデバイスです (図3)。パワーデバイスは、家電、PC、サーバ、電気自動車、鉄道、太陽光発電など広範囲で利用され、カーボンニュートラルの実現に向けてさらなる低損失化が重要課題です。一般に、バンドギャップエネルギーが大きい半導体ほど絶縁破壊電界が高くなり、高耐圧化と低損失化に有利です。現在はSiC

やGaNといったワイドバンドギャップ半導体の商用化が進んでいますが、さらに絶縁破壊電界が高いウルトラワイドバンドギャップ半導体 (AlNやc-BNなど) を活用できれば、電力変換時の損失を一段と低減できる可能性があります。

第二に、高周波トランジスタです。無線通信、衛星通信、レーダなどの高周波電力増幅器の中核となるのが高周波トランジスタであり、アンテナから出力される信号の周波数と出力が高いほど、通信エリアの拡大や通信速度の向上につながります。このため半導体材料には、高い絶縁破壊電界と高い飽和電子速度を両立することが求められます。5G (第5世代移動通信システム) 通信ではGaNが広く利用されていますが、ポスト5Gに向けては、より高出力化が可能なウルトラワイドバンドギャップ材料が注目されています。とりわけAlNやc-BNは、高い絶縁破壊電界と高い飽和電子速度を併せ持ち、高出力・高周波用途において大きなポテンシャルを持ちます。

第三に、環境エレクトロニクスです。Siのような一般的な半導体では、高温になると熱励起によって真性キャリア (熱で生じる電子・正孔) が増加し、オフ状態でも電流が流れやすくなるため、電子回路の安定動作が困難になります。そのため、データセンタでは冷却に莫大なエネルギーを要しています。バンドギャップエネルギーが大きい材料ほど真性キャリアの発生が抑えら

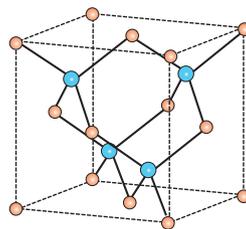
窒化アルミニウム (AlN)



● Al原子
● N原子

六方晶
ウルツ鉱構造

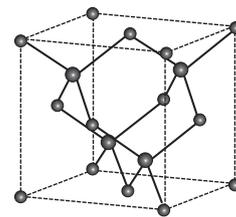
立方晶窒化ホウ素 (c-BN)



● B原子
● N原子

立方晶
閃亜鉛鉱構造

ダイヤモンド



● C原子

立方晶
ダイヤモンド構造

図2 各ウルトラワイドバンドギャップ半導体の結晶構造

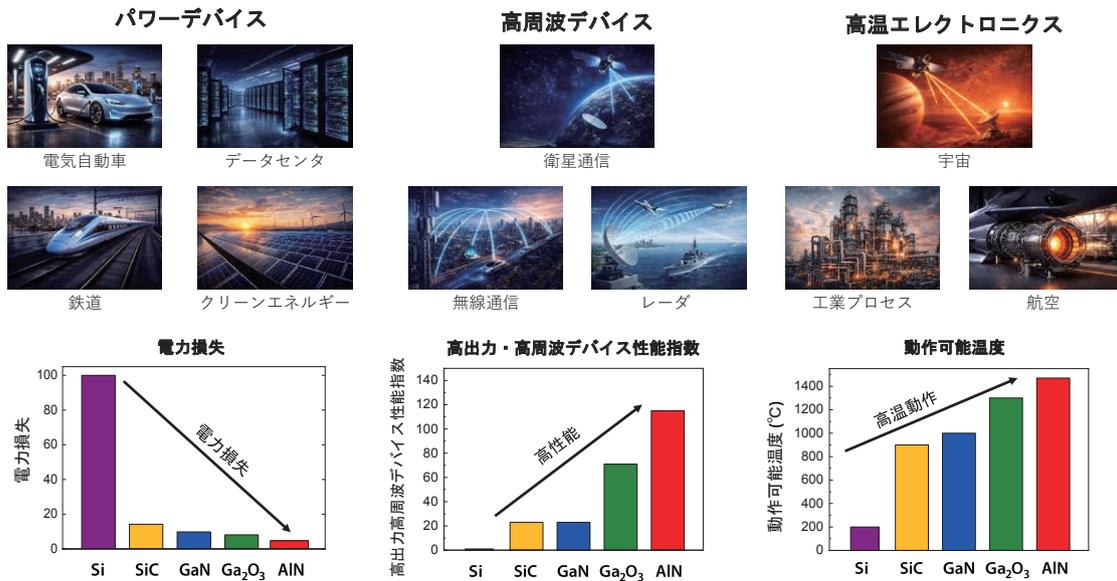


図3 各半導体の性能比較 (理論予測)

れるため、高温環境でも動作可能な高温エレクトロニクスの開拓につながります。さらに、材料によっては放射線に対する安定性も期待でき、航空宇宙、原子力エネルギー、深地層、廃炉といった極限環境での応用を拓げる可能性も秘めています。

第四に、紫外フォトニクスです。紫外域、とりわけ深紫外域は、従来の半導体光源にとって到達が難しい「未開拓領域」でした。しかしバンドギャップエネルギーの大きい材料は短波長発光に適しており、紫外LEDやレーザーダイオードによる新しい光源技術の基盤となります。紫外光は、衛生・医療、環境浄化、材料・化学分析、微細加工に加え、太陽光の影響を受けにくいソーラーブラインド通信・センシングなど、応用範囲が広いことも特徴です。

さらに、未開拓材料には既存半導体の延長線上では見えにくい新しい物理や機能が潜んでいる可能性があります。NTT物性科学基礎研究所では、現代エレクトロニクスの基盤材料であるSiやGaAs、GaNなどの結晶成長、デバイスプロセス、材料物理、光機能研究で培った技術と知見を基盤として、次世代半導体の創製をめざし、AlN、c-BN、ダイヤモンドというウルトラワイドバンドギャップ半導体の研究開発を進めています。

NTTのウルトラワイドバンドギャップ半導体技術

■窒化アルミニウム (AlN)

AlNはNTT物性科学基礎研究所が世界で初めて半導体化に成功した材料であり、いわば「NTT発の半導体」です⁽¹⁾。AlNはバンドギャップエネルギーが約6.0 eVと大きく、また、ウルトラワイドバンドギャップ半導体で唯一発光デバイスにも向いている直接遷移型の半導体です。結晶構造はGaNと同じ六方晶ウルツ鉱構造であり、AlNとGaNの固溶体であるAlGaIn混晶は全組成域で安定に形成できます。このため、組成によりバンドギャップエネルギーをAlN (6.0 eV) からGaN (3.4 eV) まで広範囲に制御でき、デバイス設計の自由度を高めるヘテロ構造、超格子、量子井戸、組成傾斜層を用いたバンドエンジニアリングが可能です。

AlN系半導体は紫外領域に対応するバンドギャップエネルギーを持つことから、紫外LEDやレーザーへの応用開発が進められてきました⁽²⁾。加えて、AlNは高い絶縁破壊電界、高い熱伝導率、高い飽和電子速度といった優れた物性を持つため、高耐圧・高周波・高温電子デバイスとしても魅力的です。NTTでは、高品質AlN結晶成長技術と伝導性制御技術を基盤に、AlN系デバイス応用を段階的に拡大してきました。

本特集記事『超高温環境で動作するAlN系トランジスタ』では、AlN系トランジスタの超高温動作を扱います。高温環境では、熱励起によって半導体内のキャリアが増加し、オフ状態でも電流が流れやすくなるため、スイッチ性能指標である電流オン・オフ比が低下します。AlNはその大きなバンドギャップエネルギーから、超高温でもトランジスタのオン状態とオフ状態を明確に維持できることが理論的に予測されていました。記事では、AlNトランジスタが1000℃という超高温環境でも動作することを実証し、他材料と比較して大きな電流オン・オフ比を示した成果を紹介しします。

本特集記事『AlN系分極ドーピングトランジスタの高周波動作』では、分極ドーピング技術によるAlN系トランジスタの高周波動作を扱います。AlN系半導体では高Al組成領域で不純物ドーピングが効きにくく、低抵抗チャンネル形成が長年の課題でした。そこで、窒化物半導体特有の分極を利用した「分極ドーピング」により、従来困難であった高Al組成AlGaInでも高濃度キャリアを得て、高周波電力増幅動作を実証しました。記事では、分極ドーピングの原理と、ミリ波帯に至る高周波特性を中心に解説します。

本特集記事『AlN系半導体を用いた深紫外レーザーダイオード』では、AlN系半導体により実現した深紫外レーザーダイオードを

扱います。深紫外光源は、衛生・医療、環境浄化、分光分析、さらにはソーラーブレインド通信などへの応用が期待されます。深紫外レーザーダイオードでは、発光層への高効率キャリア注入と低抵抗化が性能を左右します。記事では、高度な結晶成長技術により低抵抗構造を実現し、深紫外レーザー発振を実証した成果を紹介します。

本特集記事『AIN圧電薄膜を用いたギガヘルツ弾性波素子』では、ギガヘルツ帯で高速に動作するAIN弾性波素子を扱います。AINは半導体であると同時に圧電材料でもあり、電圧印加により機械振動（弾性波）を励起・検出する圧電トランスデューサとして機能します。記事では、高品質AIN薄膜を用いたギガヘルツ弾性波デバイスの創出に加え、弾性波と電子・スピンの相互作用する新規物理現象の探究まで含め、デバイスと物性開拓の広がりをご紹介します。

■立方晶窒化ホウ素 (c-BN)

c-BNはウルトラワイドバンドギャップ半導体中で最大のバンドギャップエネルギー（約6.3 eV）を持ち、絶縁破壊電界も非常に高い値が予測されています。このため、AINと同様にパワーデバイスや高周波デバイスとして高いポテンシャルを有します。一方で、c-BNは準安定相であり合成が難しく、単結晶薄膜の実現自体が大きな技術課題でした。

NTTでは、独自のイオンビームアシスト分子線エピタキシー法を開発し、c-BN単結晶薄膜のエピタキシャル成長を実現するとともに、Siドーピングによる電気伝導性制御も可能とし、c-BNの半導体応用之道を拓いてきました⁽³⁾。

本特集記事『新規ウルトラワイドバンドギャップ窒化物半導体の創製』では、c-BNを母体とする新規三元混晶半導体である立方晶窒化ホウ素スカンジウム (c-BScN) の結晶成長を扱います。c-BN系混晶は、組成によって物性を設計できる利点を持ち、将来のヘテロ構造デバイスに向けた基盤の材料系となります。新材料の創製がデバイス概念の自由度を押し広げる点に、この研究の面白さがあります。

■ダイヤモンド

ダイヤモンドは、ウルトラワイドバンドギャップ半導体としての高耐压・高熱伝導

といった特性に加え、スピン物性にも優れる点が大きな特徴です。ここでいうスピンとは、電子が持つ磁石の向きに相当する自由度であり、それを情報担体として利用する技術がスピントロニクスです。ダイヤモンドは、スピンの乱れにくい可能性を秘めた材料として注目しています。NTTでは、プラズマCVD (Chemical Vapor Deposition) を中心とした薄膜合成技術を基盤に、ドーピングのノウハウや電極形成プロセス技術を蓄積し、スピンドバイス応用に向けた研究を推進しています。

本特集記事『ダイヤモンド半導体のスピンドバイス応用に向けた取り組み』では、ダイヤモンド半導体中にスピンを注入するため、強磁性金属とダイヤモンド半導体の接合界面に形成されるショットキー障壁をトンネル障壁として活用するアプローチに着目しました。代表的な強磁性金属であるパーマロイ合金をショットキー電極としたダイヤモンドショットキーバリアダイオードにおける電流輸送機構を解明した成果を紹介します。これにより、ダイヤモンドへのスピン注入の実現に向けた技術基盤が確立され、スピン物性解明から量子機能創出への展開が期待されます。

今後の展開

ウルトラワイドバンドギャップ半導体は、優れた物性が期待される一方で、基礎物性には未解明の点が多く残されており、材料・界面・欠陥に関する理解の深化が不可欠です。また、未解明な点が多い材料であるがゆえに、既存技術の延長や組合せだけでは不十分で、新技術を開発しながら、結晶成長からデバイスプロセス、回路・システム設計までを一体で構築する必要があります。その過程では、基礎研究の継続的な積み重ねに加え、大学・研究機関・企業との連携も重要になります。

ウルトラワイドバンドギャップ半導体は、紫外発光デバイス用途に加え、ハイパワー・高周波・耐環境電子デバイスへの応用に有望な次世代材料です。特にAIN系デバイスは、動作実証に至った初期段階ではあるものの、GaN系デバイスで培われた技術と知見を活用できる点、その既存設備を活

用できる点、さらにAINウエハの大口径化や高品質化が着実に進展している点から、今後の研究開発が加速すると期待されます。同時に、c-BN系混晶やダイヤモンドスピントロニクスといった新領域では、材料創製と物性解明を両輪として進め、ウルトラワイドバンドギャップ半導体の潜在能力を最大限に引き出すことが重要です。今後も、応用領域の開拓とデバイス技術の高度化を通じて、サステナブルな社会と将来の革新的デバイス・システムの創出に貢献していきます。

■参考文献

- (1) Y. Taniyasu, M. Kasu, and T. Makimoto: "An aluminium nitride light-emitting diode with a wavelength of 210 nanometres," *Nature*, Vol.441, pp.325-328, 2006.
- (2) 谷保・嘉数・牧本: "世界最短波長210 nmの遠紫外発光ダイオード," *NTTジャーナル*, Vol.19, No.2, pp.64-67, 2007.
- (3) 平間・谷保・山本・熊倉: "新機能ワイドギャップ半導体材料の開拓," *NTTジャーナル*, Vol.31, No.8, pp. 29-34, 2019.



(左から) 谷保 芳考 / 平間 一行 / 小栗 克弥

ウルトラワイドバンドギャップ半導体は、未知の部分が多く残された材料であり、同時に大きな可能性を秘めています。「材料を深く理解することが、将来の技術につながる」という考えのもと、基礎研究を重視しながら挑戦的な研究を進めてきました。本特集を通じて、こうした研究の広がりや将来性を感じていただければ幸いです。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
多元マテリアル創造科学研究部
薄膜材料研究グループ



超高温環境で動作するAlN系トランジスタ

窒化アルミニウム (AlN) は超高温環境下でも動作する半導体デバイス材料として期待されています。本稿では高温エレクトロニクス応用分野とAlNの有効性を解説し、NTTにおけるAlN系トランジスタの開発と1000℃での動作実証、ならびにすべての半導体材料中で最高の電流オン・オフ比が得られた成果を紹介します。

キーワード：#窒化アルミニウム (AlN)，#高温エレクトロニクス，#ウルトラワイドバンドギャップ半導体

ひろき まきのぶ
廣木 正伸
 ひらま かずゆき
平間 一行
 たにやす よしたか
谷保 芳孝

NTT 物性科学基礎研究所

高温環境で求められる半導体デバイスと応用分野

近年、エレクトロニクス分野において、高温環境でも安定に動作する半導体デバイスへの期待が高まっています。高温エレクトロニクスの代表的な応用として、まず計測用途が挙げられます。高温下で温度や圧力などの物理量を直接計測できれば、装置状態やプロセス状況をより正確に把握することができます。従来は、センサや信号処理回路を高温領域から離れた位置に設置する必要があり、長い配線を介した計測が一般的でした。その結果、応答遅れやノイズの影響を受けやすく、高精度な計測には制約がありました。高温環境でも安定に動作する半導体デバイスを実現できれば、その場で遅延なく高精度の計測が可能となり、センサ応用の広がりが期待されます。

さらに、高温環境に加えて放射線が存在する極限環境では、半導体デバイスに対する要求は一層厳しくなります。宇宙や原子力の分野では、温度条件に加えて放射線による特性劣化や誤動作が問題となります。このような環境においても安定して動作す

る半導体デバイスが実現すれば、極限環境下での計測や監視、さらには制御機能の高度化につながります (図1)。

これら極限環境での応用を考えると、計測に加えて、装置を駆動するための電力制御も重要な要素となります。高温下で動作するモータやアクチュエータを安定に駆動するためには、制御回路だけでなく、電力を制御するパワーデバイスも不可欠です。例えば、原子力発電所の廃炉作業や極限環境におけるロボット運用では、高温かつ放射線環境下で機器を遠隔操作する必要があります。アクチュエータ駆動や電力供給を担うエレクトロニクスが装置の性能や信頼性を左右します。しかし、シリコン (Si) などの従来の半導体材料では、高温になるとデバイス特性の劣化や動作不安定が生じ、高温環境に近い位置で半導体デバイスを動作させることは困難でした。

ウルトラワイドバンドギャップ半導体AlNの特徴

前述したような高温や放射線など極限環境下で半導体デバイスを動作させるために

は、従来材料とは異なる特性を持つ半導体材料が求められます。その有力な候補として、窒化アルミニウム (AlN) が注目されています。

従来の半導体材料では、高温になると熱エネルギーにより価電子帯の電子が伝導帯へ励起され、半導体内で電子や正孔が増加します。このように熱によって生成されるキャリアは真性キャリア*1と呼ばれ、その濃度は温度の上昇とともに増加します。例えば、印加する電圧 (ゲート電圧) によって駆動する電流値 (ドレイン電流) をコントロールする電界効果トランジスタの場合、真性キャリア濃度が高くなると、ゲート電圧で制御できる電流範囲が狭くなり、トランジスタとして正常な動作が困難になります (図2)。こうした現象が、高温環境で従来の半導体デバイスが使用できなくなる主な要因の1つです。

これに対し、AlNはバンドギャップエネルギー (Eg)*2が6.0 eVと極めて大きいウルトラワイドバンドギャップ半導体*3です。

*1 真性キャリア：熱エネルギーによって半導体中に生成する電子や正孔。



図1 高温環境における半導体デバイスの応用イメージ

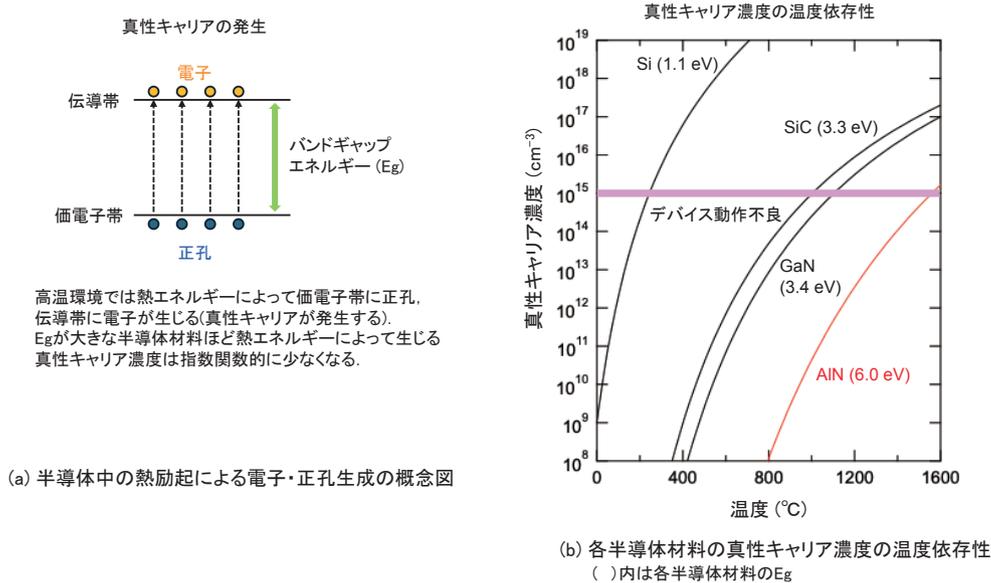


図2 半導体中の真性キャリア

E_g が大きいほど、電子の熱励起に必要なエネルギーが大きくなるため、高温環境においても真性キャリアの発生が抑制されます。その結果、高温においても、AlNを用いたトランジスタではゲート電圧によるドレイン電流の制御性を維持できることが期待されます。

図2に示すように、Siでは200℃程度で真性キャリア濃度が $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ を超え、デバイス動作が困難になります。これに対し、AlNは1400℃においても真性キャリア濃度は $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以下であることから、従来材料では理論的に困難であった極めて高温でのデバイス動作が可能であることが予測されています。さらに、AlNは高温でも酸化や劣化が起こりにくい高い化学安定性を持っています。このため、極めて過酷な温度環境においても材料特性が変化しにくく、高温でも安定に動作できる半導体材料として期待できます。

また、AlNは原子間の結合が強いことから、放射線照射によって特性劣化の原因となる結晶欠陥は生成されにくく、耐放射線性にも優れた半導体材料であることが理論的に予測されています。これは、宇宙や原子力エネルギーなどの耐放射線が求められる分野において、AlNが半導体デバイスを安定に動作させるうえで重要な特徴を持っていることを示しています。加えて、AlN

は非常に高い絶縁破壊電界^{*4}を持つことから、高電圧にも耐えられるため、パワーデバイス材料としての応用も期待されています。これらの優れた特性により、AlNは高温・放射線・高電圧といった厳しい条件を同時に耐えられる半導体材料であり、広範な応用が期待されます。

AlN トランジスタの開発

前述したAlNの優れた材料特性を実際の半導体デバイスとして活用するためには、いくつかの技術的課題を解決する必要があります。AlNはウルトラワイドバンドギャップ半導体であるがゆえに、従来材料とは異なるデバイス設計やプロセス技術が求められます。ここでは、AlNを用いた金属-半導体電界効果トランジスタ (MESFET: Metal-Semiconductor Field-Effect Transistor)^{*5}において重要となる技術要素について説明します。

AlNを用いた電界効果トランジスタ開発における大きな課題の1つは、AlNチャンネル層とソース電極およびドレイン電極との間に低抵抗な電氣的接触を形成することが難しい点です (図3(a))。AlNは E_g が大きく、電極金属との界面に高いエネルギー障壁が形成されるため、電極金属からAlNに電流を効率良く注入することが困難です。

このため、良好なオーミック接触^{*6}を実現することが、AlNデバイス開発における重要な技術課題となっていました。

この課題に対して本研究では、ソース領域とドレイン領域に組成傾斜AlGaIn コンタクト層を導入しました (図3(b))。組成傾斜AlGaIn コンタクト層は、Al含有率をAlNからAl含有率の低いAlGaInへと連続的に変化させており、電極金属からAlNチャンネル層に至るエネルギー障壁を低下することができます。この構造により、金属から半導体への電流注入が促進され、AlNチャンネル層への効率的な電流供給が可能となります (図3(c))。その結果、AlNをチャンネル層とするMESFETにおいて良好なオーミック接触が得られました。

*2 バンドギャップエネルギー：半導体中で電氣伝導に寄与する電子と正孔が存在できないエネルギー領域 (禁制帯) の幅。

*3 ウルトラワイドバンドギャップ半導体：バンドギャップエネルギーが4eV以上と非常に大きい半導体材料の総称。高温や高電圧環境での動作に適しています。

*4 絶縁破壊電界：材料が電氣的に破壊されず耐えられる最大の電界強度であり、この値が高いほど高耐圧デバイスに向きます。

*5 金属-半導体電界効果トランジスタ：金属-半導体界面のショットキー接触を利用したトランジスタ構造の一種。

*6 オーミック接触：電圧の向きにかかわらず電流がオームの法則に従って印加電圧に対して直線的に増加する半導体-電極材料間の電氣的な接触。

AlN MESFET の実現にあたっては、オーミック接触だけでなく、ゲート電極における良好なショットキー接触^{*7}の形成も重要な技術課題となります。ゲート電極から AlN チャンネル層に流れるリーク電流が大きい場合、高温環境においてデバイスの制御性や信頼性が著しく低下します。本研究では、ニッケル金属を AlN 表面に直接形成することで、高いショットキー障壁を持つゲート電極を実現しました。その結果、ゲート電極-チャンネル層間の意図しないリーク電流が極めて小さく、ゲート電圧による良好

な整流性が得られます。

以上のように、組成傾斜 AlGa_n コンタクト層によるオーミック接触の実現と、良好なショットキー接触を持つゲート構造の確立により、AlN の材料特性をデバイスとして引き出すことが可能となりました⁽¹⁾。

AlN トランジスタの高温動作

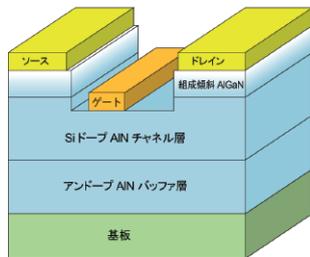
前述した電極構造を用いて作製した AlN MESFET について、高温環境における動作特性を評価しました。本研究では、AlN の

高い耐熱性を実デバイスとして検証するため、1000 °C まで昇温可能な高温測定系を構築し、AlN MESFET のドレイン電流-ドレイン電圧特性の評価を行いました。

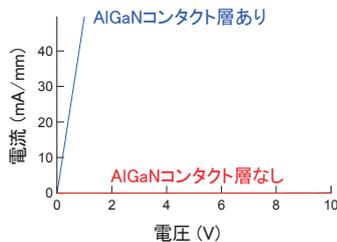
図 4 (a) は、1000 °C において AlN MESFET を評価している様子を示しています。加熱炉内にデバイスを形成したウエハを設置し、高温環境下で MESFET の電極に直接プローブを接触させることで、ドレイン電流やゲート電流をその場で測定しています。このような極めて高温な条件下での評価は、測定系の構築自体が難しく、従来の半導体デバイスではほとんど行われてきませんでした。

この測定系を用いた評価の結果、AlN MESFET は 1000 °C に達する高温においても、トランジスタとしての基本的な動作を維持していることを確認しました (図 4 (b))。1000 °C でのデバイス動作実証は、従来の半導体材料では例がなく、AlN が持つ高温安定性を実デバイスとして示した重要な成果です。

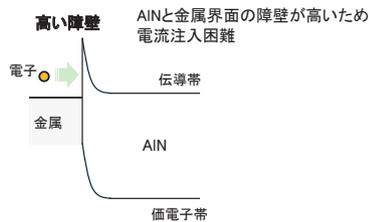
AlN MESFET の特徴の 1 つとして、温度の上昇に伴ってドレイン電流が増加する特性が挙げられます。図 5 (a) に示すように、



(a) AlN MESFET の断面構造

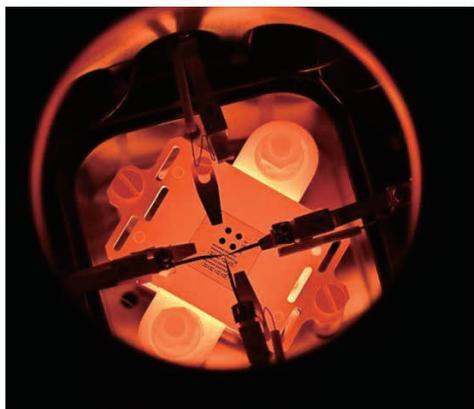


(c) 組成傾斜 AlGa_n コンタクト層の有無での電流-電圧特性の比較

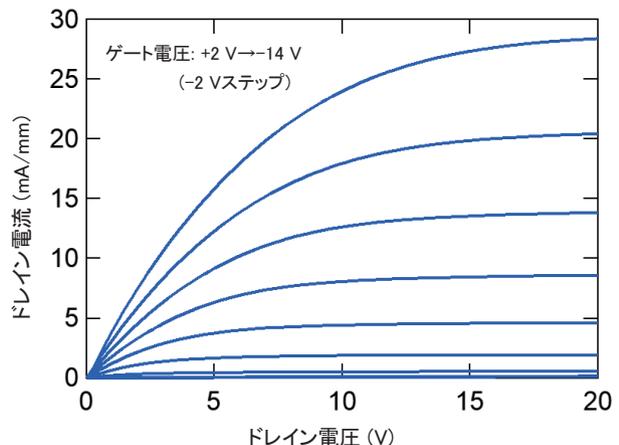


(b) 組成傾斜 AlGa_n コンタクト層のバンド模式図

図 3 AlN MESFET



(a) 1000 °C でのデバイス動作試験の外観



(b) 1000 °C におけるドレイン電流-ドレイン電圧特性

図 4 1000 °C における AlN MESFET 動作試験

* 7 ショットキー接触：金属と半導体を直接接触させた際に形成される電氣的接触の一種。金属と半導体のエネルギー構造の違いにより接触界面に障壁（ショットキー障壁）が形成され、電流が一方向に流れやすい整流特性を示します。この特性を利用して、トランジスタのゲート電極では電流を制御する役割を担います。

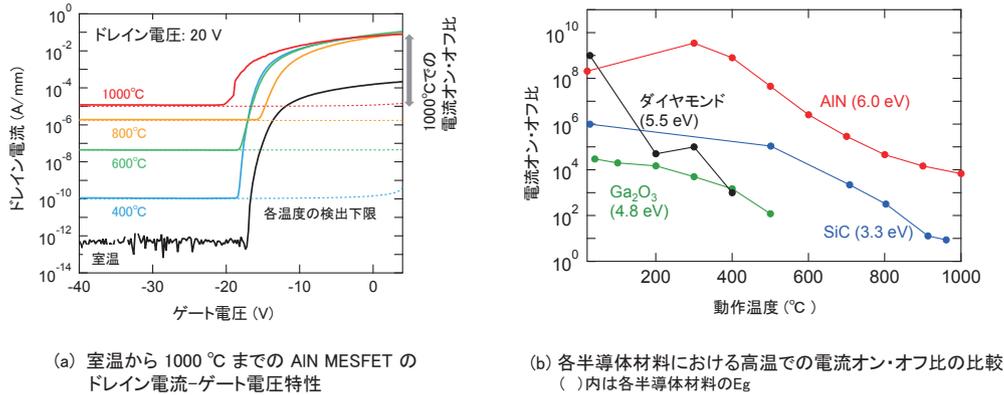


図5 AlN MEFETの高温特性

温度を上げるにつれてドレイン電流は顕著に増大し、高温においても十分な電流が得られます。一般的な半導体デバイスでは電流を担う電子の濃度は高温ではほぼ変化しないのに対して、電子の移動度は高温ほど低下するため、ドレイン電流は単調に減少する傾向にあります。一方、AlNでは高温になるにつれて電子濃度が増加します。この電子濃度の増加が高温下での移動度低下の影響を上回る結果、高温環境においても高いドレイン電流を維持できるという、AlNに特有の高温動作特性が現れることを明らかにしました。

もう1つの重要な特長は、高温環境においてもトランジスタのオフ状態のドレイン電極-ソース電極間のリーク電流が低く抑えられ、明確な電流オン・オフ動作が維持される点です。図5(a)に示すように、温度の上昇に伴ってリーク電流は増加するものの、1000 °Cにおいてもトランジスタのオン状態とオフ状態のドレイン電流の比（電流オン・オフ比^{*8}）がおよそ 10^4 と十分に大きいことが確認されました。高温環境では、半導体内部で熱によって不要な電流が流れやすくなり、多くの材料では電流オン・オフ比が大きく低下します。これまでに、ダイヤモンド（E_g: 5.5 eV）、酸化ガリウム（Ga₂O₃）（E_g: 4.8 eV）、SiC（E_g: 3.3 eV）などの材料を用いた半導体デバイスの高温動作が報告されていますが、高温下

ではリーク電流の増加により電流オン・オフ比が低下する傾向が知られています。これに対し、AlN MEFETは高温においてもリーク電流の増加が比較的緩やかであり、図5(b)に示すように、他の半導体材料と比較して、高温側まで高い電流オン・オフ比を維持していることが分かります。なお、高温測定では測定系由来のバックグラウンド電流が増加し、高温領域では、トランジスタ自体のリーク電流ではなく、測定装置のバックグラウンド電流が観測されています。このことから、実際のAlN MEFETの電流オン・オフ比は、図に示された値よりもさらに大きいと考えられます。以上の結果から、AlNは半導体の中で最高の高温デバイス特性を実際に持つことを実証しました。

まとめ

本稿では、NTTにおけるAlN MEFETの開発とその高温動作実証について紹介しました。AlNは大きなバンドギャップエネルギーと高い化学安定性を有し、高温デバイス材料として大きな可能性を持ちます。私たちは、これまでのAlN研究で培った結晶成長技術を基盤として、組成傾斜AlGaInコンタクト層を導入したAlN MEFETのデバイス動作を実現し、1000 °Cでのトランジスタ動作も確認しました。AlN MEFETは、高温で十分なドレイン電流が得られることに加え、低いリーク電流により高い電流オン・オフ比を維持できることから、他材料では実現が難しい高温動作特性を示し

ました。将来、こうしたAlN系トランジスタは、航空宇宙、エネルギー、深地層、原子炉廃炉など、多様な極限環境での利用が期待されます。

参考文献

- (1) M. Hiroki, Y. Taniyasu, and K. Kumakura: "High-temperature performance of AlN MEFETs with epitaxially grown n-type AlN channel layer," IEEE Electron Device Lett., Vol. 43, No. 5, pp. 350-353, 2022.



(左から) 廣木 正伸/ 平間 一行/
谷保 芳孝

本稿では、AlN MEFETの開発の経緯と高温動作の実証について紹介しました。1000 °Cという極めて高温でのデバイス動作は他の半導体材料では例がなく、高温や放射線環境下でのエレクトロニクス応用に新たな可能性を示すものです。

◆問い合わせ先

NTT 物性科学基礎研究所
多元マテリアル創造科学研究部
薄膜材料研究グループ

*8 電流オン・オフ比: トランジスタのオン状態とオフ状態のドレイン電流の比。トランジスタのスイッチング動作における性能指標の一つ。



AIN系分極ドープトランジスタの高周波動作

窒化アルミニウム (AIN) 系窒化物半導体は、極めて高い絶縁破壊電界を持ち、次世代無線通信に向けた高出力・高周波デバイス材料として注目されています。しかし、高Al (アルミニウム) 組成領域では従来の不純物ドーピングによる伝導性制御が困難となり、高周波トランジスタ動作の実現は長年の課題でした。本稿では、窒化物半導体に特有の分極を利用した、新しい伝導性制御手法である分極ドーピングについて解説し、本手法によりAIN系トランジスタの高周波動作を実証した最新の研究成果を紹介します。

キーワード：#窒化アルミニウム、#高周波増幅器、#分極ドーピング

かわさき せい や ひろ き まきのぶ
川崎 晟也 / 廣木 正伸
 ひら ま かずゆき たにやす よしたか
平間 一行 / 谷保 芳孝

NTT 物性科学基礎研究所

情報社会を支える高周波半導体デバイス

誰も一度は、スマートフォンを家に忘れた、充電がない、といった状況に陥り、困り果てた経験があるのではないのでしょうか。メッセージ送受信や情報検索だけでなく、娯楽や金融、商品の売買等々、いまや身の回りのありとあらゆるモノ・コトがインターネットに接続され、情報通信技術は私たちの生活とは切っても切り離せないものになっています。

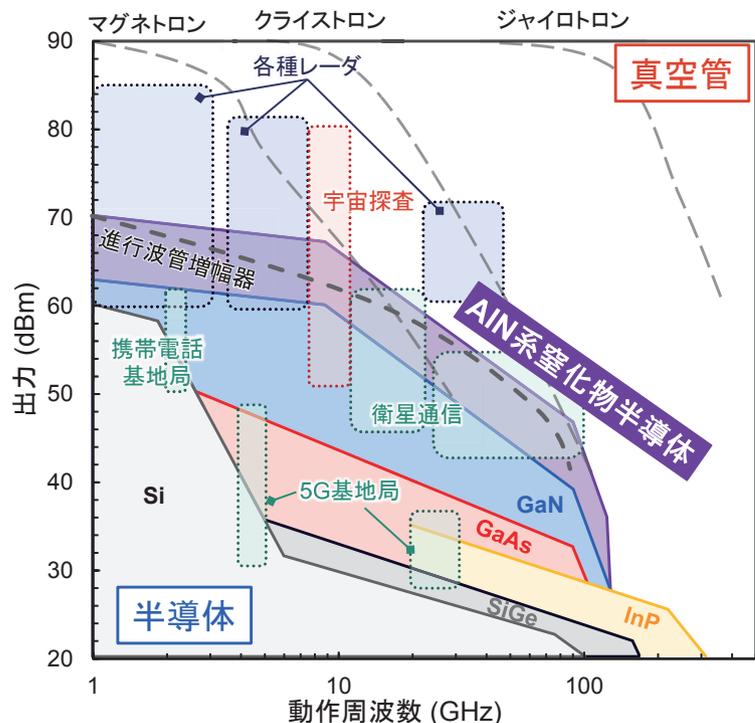
こうした情報は光ファイバ等を用いた有線通信ネットワークあるいは、電波^{*1}を用いた無線通信ネットワークによってやり取りされています。特に無線通信においては、2019年から5G (第5世代移動通信システム) サービスが開始され、モバイル端末でやり取りされるデータ量は増加の一途をたどっています。2030年代には現在 (2025年) の約2倍になると予想されています。このため、2030年以降の社会・産業を支えるべく、さらなる無線移動通信システムの高度化がBeyond 5Gとしてめざされています。

Beyond 5Gでは、陸上だけでなく空・海・宇宙を含むあらゆる場所での利用を想

定し、これまでの無線通信ネットワークではカバーできなかったエリアへのカバレッジの拡張が求められています。そうした背景から、静止軌道衛星 (GEO) や、低軌道衛星 (LEO)、成層圏プラットフォーム (HAPS) を用いて陸・海・空・宇宙の通信ネットワークを構築する非地上系ネットワーク (NTN: Non Terrestrial Network) が注目されています。NTNでは長距離無線伝送技術が必須となります。電波は伝搬損失により距離とともに減衰するため、

NTNの実現には、高周波で高出力を得られる増幅器が重要な役割を担います。

図1は半導体、および真空管を用いた増幅器の動作周波数と出力を示したものです。窒化ガリウム (GaN) 半導体を用いた HEMT (High Electron Mobility Transistor)^{*2}は、高出力半導体増幅器として優れた特性を示しています。GaN系 HEMTは携帯電話の基地局向けデバイスとして、広く普及しており、また、一部のLEO衛星の送信用増幅器として用いられて



※実線が半導体増幅器、点線が真空管増幅器の動作領域を表しています。周波数・出力ごとの主な用途も合わせて示します。

図1 半導体および、真空管を用いた増幅器の動作周波数と出力

*1 電波：電波法では周波数300MHz以上、つまり3THz以下の電磁波と定義されています。数100MHz-30GHzまでをマイクロ波帯、30-300GHz帯をミリ波帯、それより高い周波数帯をテラヘルツ帯と呼び分ける場合もあります。これまでの通信はマイクロ波帯が中心でしたが、今後はミリ波帯、テラヘルツ帯の活用がめざされています。

*2 HEMT：高電子移動度トランジスタ。半導体高周波トランジスタとして広く用いられています。

います。一方で、より高出力が求められる衛星通信用途では、進行波管増幅器といった真空管増幅器が依然として用いられています。しかしながら、真空管増幅器は大型、短寿命、衝撃に弱い等々の課題があります。したがって、GaN系HEMTを凌駕する超高出力・高周波半導体増幅器を実現できれば、既存の真空管デバイスを置き換えることが可能となり、増幅器の小型化、長寿命化を通じて、堅牢な無線通信ネットワークの構築が期待されます。

AIN系窒化物半導体への期待

高出力な高周波半導体増幅器を実現するためには、高い周波数で動作し、かつ高い電圧を印加できるトランジスタが求められます。そのためには、絶縁破壊電界^{*3}と飽和電子速度^{*4}が高い半導体材料が適しています。

本研究では、従来の半導体材料では実現

* 3 絶縁破壊電界：半導体材料に電圧をかけた際に、電気的な絶縁を保てなくなり急激に電流が流れ始める電界強度です。この値が高いほど高電圧・高出力で動作します。

* 4 飽和電子速度：強電界下で電子が到達できる最大速度です。電子速度が速いほど高い周波数（高速）で動作します。

し得なかった超高出力動作が可能な高周波増幅器を実現し得る材料として窒化アルミニウム (AlN) 系窒化物半導体、AlNおよびGaNとの混晶で、Alの組成が50%を超えるAlGaNに着目しています。AlNは少なくとも7 MV/cm以上、期待値としては12 MV/cmもの半導体中で最大級の絶縁破壊電界を持っており、電子飽和速度も 10^7 cm/sと高い値を持っています。そのため、高出力・高周波トランジスタとしての性能指数であるJohnson性能指数は図2で示すように半導体中で最大級であり、SiやGaAsと比較すると桁違いであることはもちろん、GaNと比較しても5倍の高い性能が期待されます。つまり、同一周波数にてGaNの5倍の高出力化が見込まれます。このようにAlNは高出力・高周波デバイス材料として非常に魅力的な材料といえます。

しかしながら、AlN系窒化物半導体は、電子デバイスとして利用するうえで、伝導性制御が困難である、という欠点を持っています。そのためトランジスタでの電流の通り道であるチャンネル層のAl組成を高めると、抵抗が高くなるという問題を抱えています。そうした背景から、Al組成が75%を超えるような高Al組成では、高周

波トランジスタの作製・動作は困難と考えられていました。

これに対して私たちは、分極ドーピングという、従来の半導体とは異なる伝導性制御手法を用いたAlN系分極ドーピング電界効果トランジスタ (pol-FET: polarization-doped Field-Effect Transistor) に注目し、高Al組成のAlGaNでも低抵抗なチャンネル層を実現、AlN系高周波トランジスタの作製・動作に成功しました⁽¹⁾。

AIN系窒化物半導体の分極ドーピング

半導体材料は用途に合わせて、電流の担い手となる電子（負電荷）や正孔（正電荷）のキャリア濃度を非常に広い範囲でかつ精密に制御する必要があります。その際に不純物と呼ばれる元素を結晶中に導入するドーピングを行います。高電圧を印加するパワーデバイスであれば 10^{14} – 10^{16} cm⁻³、ここで取り上げている高周波デバイスであれば 10^{18} cm⁻³を超えるようなキャリア濃度（不純物濃度）の制御が求められます。不純物はそのままでは電気的には働かず、キャリア生成にはある程度の熱エネルギーを必要とします。この目安をイオン化エネルギーといい、Siでは50 meV、GaAsでは数meV–30 meVであり、室温（25℃）の熱エネルギー25.7 meVと同程度です。このため、SiやGaAsでは不純物は十分にイオン化し、導入した不純物濃度とほぼ同じキャリア濃度を得られます。

しかしながら、AlN系窒化物半導体は、高Al組成領域でイオン化エネルギーが100 meVを超え、室温では不純物のほとんどがイオン化しません（図3）。例えば、n型のAlNでは不純物を 10^{18} cm⁻³ドーピングしても生成されるキャリアはそのうちわずか0.1%の 10^{15} cm⁻³程度です。これでは高周波デバイスに求められる低抵抗な半導体膜を得られず、AlN系窒化物半導体本来の特性を發揮できません。

そこで、私たちは従来の不純物ドーピングによらない、新しい伝導性制御手法を用いています。それが分極ドーピングです。

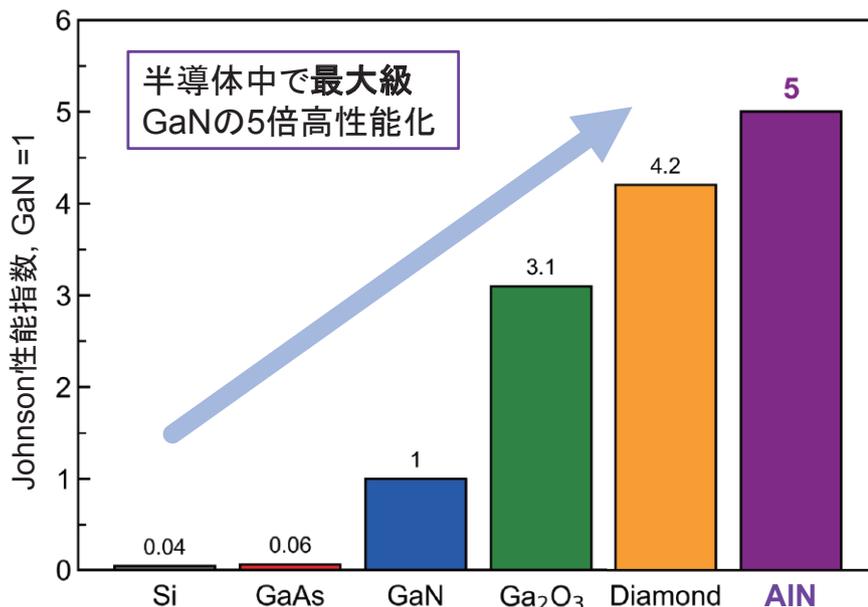
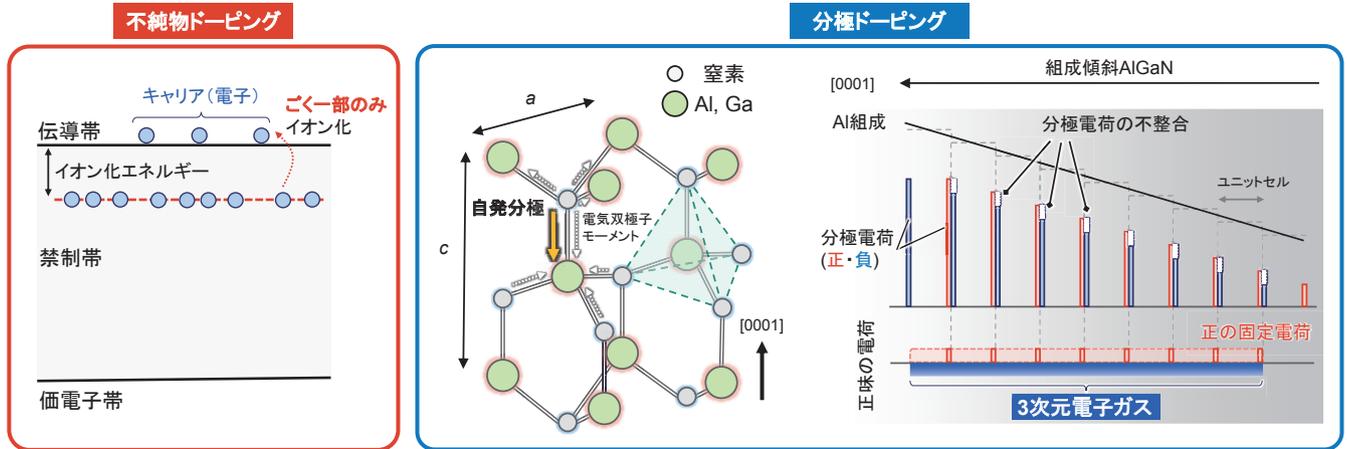


図2 各種半導体材料のJohnson性能指数の比較



※AlN系窒化物半導体の結晶構造も合わせて示します。ここでは、[0001]方向(c軸方向)にAl組成が上昇する組成傾斜AlGaNを例としています。

図3 AlN系窒化物半導体の不純物ドーピングと分極ドーピングの模式図とその比較

GaNも含めAlN系窒化物半導体は、窒素原子の強い電気陰性度により、イオン結合性を示します。その結果、結晶中ではGaやAlのⅢ族原子は正に、窒素原子は負に帯電しています。結晶構造は図3中に示すようにⅢ族原子と窒素原子が四面体構造をとりますが、その格子定数の比(図3中のcとaの比)が1.626-1.601と正四面体の1.633から変位しています。そのため、イオン結合による電気双極子モーメントが打ち消されず、結晶内で自発分極と呼ばれる電荷の偏りが生じます。また、GaN上にAlGaN層やAlN上にAlGaN層など、格子定数の異なる半導体材料を積層すると、上層は下層の影響を受け、引張や圧縮の応力が印加されます。この歪により、結晶構造がさらに変位するため、 piezo分極として追加で分極が誘起します。分極ドーピングはこうした窒化物半導体の分極効果を利用した伝導性制御手法であり、その基本原理はJenaらによって2002年に提案されました⁽²⁾。

図3に分極ドーピングによるAlGaNのn型伝導性制御の例を示します。ここでは、[0001]方向(c軸方向)にAl組成が上昇する組成傾斜AlGaN層を考えます。

AlNはGaNよりも大きい分極を持っているため、AlGaN中の分極はAl組成が高くなるほど大きくなります。そのため、ユ

ニットセルごとに分極の大きさに不整合が生じ、それが組成傾斜層全体に分布します。この場合はユニットセル界面で隣り合う正・負の分極電荷を比較すると正の分極電荷のほうが多いため、正味の電荷として、その差分に対応する正電荷が組成傾斜AlGaN層中に分布しているとみなせます。ただし、この正電荷は半導体結晶中を自由に動けない固定電荷であるため電気伝導には寄与しません。これは分極電荷が半導体結晶を構成する原子そのものに紐付いているためです。一方で、半導体は正と負の電荷がつり合い、電気的に中性となっている必要があります。そのため、この正の固定電荷と釣り合うように組成傾斜層に負の電荷を持つ電子が誘起されます。この電子は組成傾斜層全体に3次元上に一様に分布することから3次元電子ガス(3DEG: 3-Dimensional Electron Gas)と呼ばれ、半導体結晶中を自由に動き回ることができます。そのため、半導体の電気伝導に寄与し、この組成傾斜AlGaN層はn型伝導性を示します。また、この3DEG濃度は組成傾斜の勾配、つまり組成の差(分極の差)と膜厚により容易にかつ精密に制御可能です。

このように、分極ドーピングは、不純物を一切用いない伝導性制御手法です。そのため、前述したイオン化エネルギーに縛られることなく、AlN系窒化物半導体におい

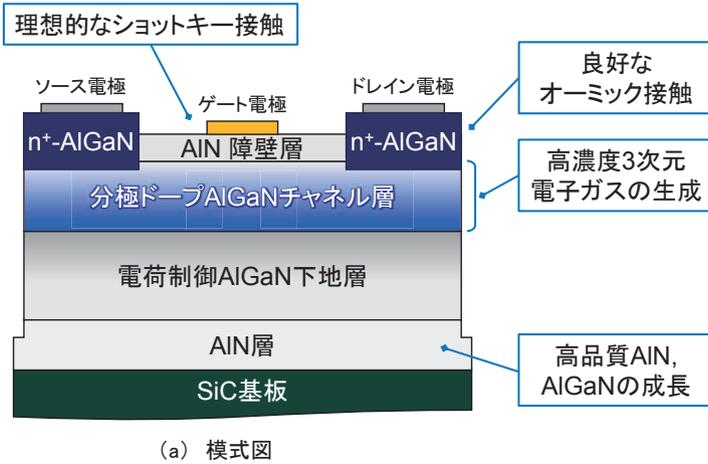
ても 10^{18} cm^{-3} を超えるキャリア密度を容易に得ることができます。したがって、分極ドーピングはAlN系窒化物半導体デバイスの高性能化に非常に有用な手法となります。

AlN系窒化物半導体の分極ドーピングFET

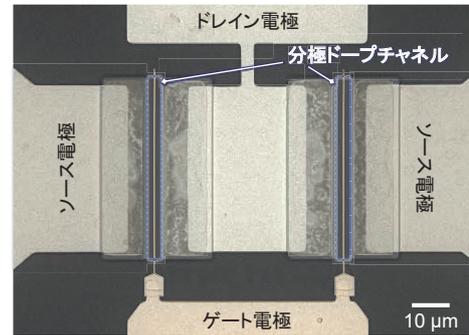
図4に分極ドーピングAlGaNをチャンネル層としたAlN系pol-FETのデバイス構造の模式図と、その電子顕微鏡像を示します。デバイス構造は炭化ケイ素(SiC)基板上に有機金属気相成長法(MOVPE法)^{*5}により成長させました。

本構造では、分極ドーピングによる3次元電子ガスの生成を最大化させるための独自構造として、チャンネル層の下部には電荷制御AlGaN下地層を、上部にはAlN障壁層を形成していることがポイントです⁽³⁾。電荷制御AlGaN下地層はチャンネル層以外で発生する余計な固定電荷の影響を抑える働きが、AlN障壁層はチャンネル層がデバイス最表面に露出することによる悪影響を抑える

*5 有機金属気相成長法: 窒化物半導体薄膜を成長する手法の1つです。Ⅲ族原料としてトリメチルアルミニウムやトリメチルガリウムなどの有機金属を、窒素原料にはアンモニアを用います。高品質な薄膜を大面積に均一性良く得られるため、量産性に優れ、広く用いられています。



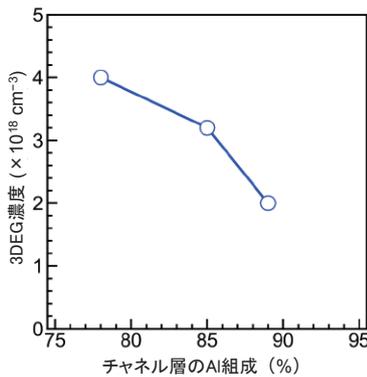
(a) 模式図



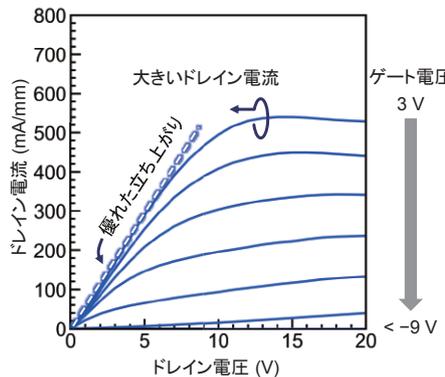
(b) 電子顕微鏡写真

※分極ドーピング以外にもさまざまな技術が盛り込まれています。

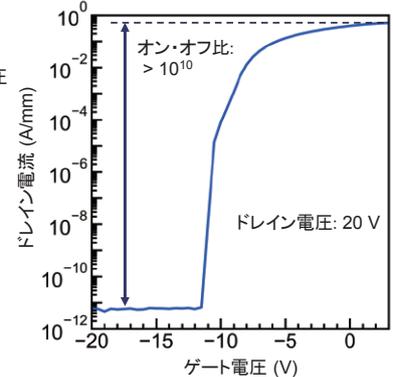
図4 AlN系分極ドーピング電界効果トランジスタ (pol-FET) のデバイス構造



(a) チャンネル層の3DEG濃度のAl組成依存性



(b) 出力特性(チャンネルのAl組成85%)



(c) 伝達特性(チャンネルのAl組成85%)

図5 AlN系分極ドーピングFETの電気特性

働きがそれぞれあります。容量—電圧特性から見積もった分極ドーピングAlGaInチャンネル層の3DEG濃度を図5(a)に示します。75%を超える非常に高いAl組成においても、 $2-4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の高濃度3DEGを形成できており、分極ドーピングによる低抵抗なチャンネルを実現しました。

このデバイスには先ほど述べた高濃度3DEGを得られる分極ドーピングチャンネル構造以外にも、

- ① “高品質なAlN系窒化物半導体の成長技術”
- ② “電極からチャンネルへの良好な電流注入を実現するオーミック接触技術”
- ③ “注入した電流を制御するための理想的なショットキー接触技術”

といった、私たちのグループでこれまで培ってきたさまざまな独自技術が盛り込まれています^{(4)~(6)}。

図5(b)に作製したAlN系pol-FET(チャンネルのAl組成85%)の電流—電圧特性(出力特性)を示します。これらの技術により、高Al組成85%のAlGaInチャンネルにおいても、線形性の優れた電流の立ち上がり、500 mA/mmを超える大きなドレイン電流を実現しました。一方、トランジスタは大電流を流すだけでなく、ゲート電圧により、それをオフすることも求められます。作製したAlN系pol-FETは図5(d)に示すように漏れ電流のない良好な伝達特性を示しており、 10^{10} を超えるオン・オフ比を得られています。この高いオン・オフ比はトラン

ジスタをより高い周波数で動作させられる1つの指標となります。

図6(a)に高周波特性を示します。高周波増幅器としては、電力増幅が可能な最大動作周波数(f_{max})^{*6}が重要な性能指標であり、今回作製したAlN系pol-FETではミリ波帯に対応する79 GHzを得ました。

これにより、図6(b)に示すように、従来は困難であった75%を超える高Al組成の

*6 電力増幅が可能な最大動作周波数(f_{max}): トランジスタが電力増幅器として働ける限界の周波数(電力ゲインが0 dBとなる周波数)です。高周波増幅器や無線通信回路の設計で重要な指標となります。正確には最大発振周波数, maximum oscillation frequencyの略ですが、分かりやすさを優先してこのように表現しています。

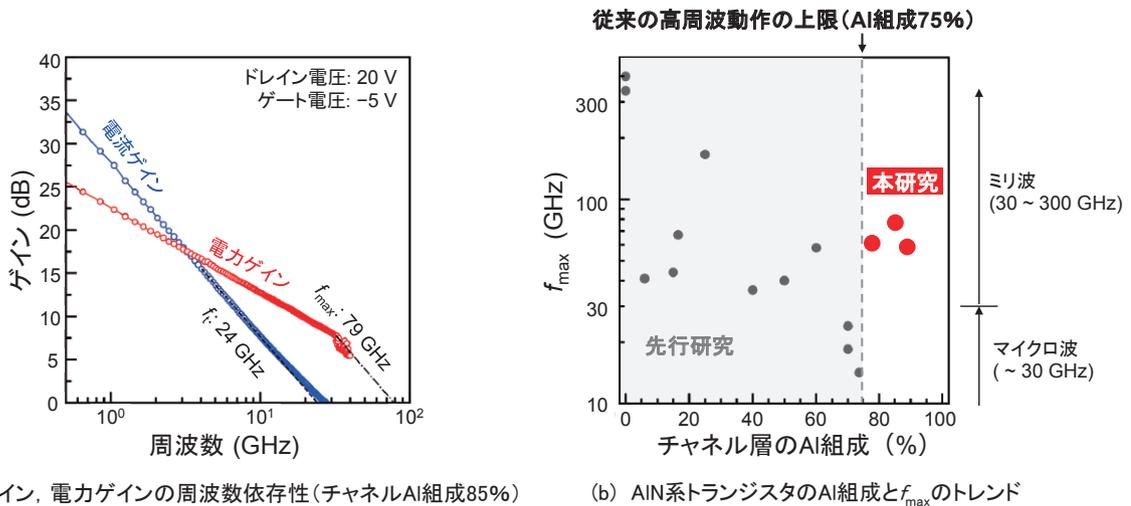


図6 AlN系分極ドーピングFETの高周波特性

AlGa_Nチャンネルを持つ高周波トランジスタの電力増幅動作を世界で初めて、かつ実用的な周波数帯にて実現しました。また、得られた f_{max} はこれまで報告されているAlN系高周波トランジスタの中で最高値です。したがって、今回考案したAlN系pol-FET構造は、AlN系窒化物半導体が本来持つ高いポテンシャルを十分に引き出すデバイス設計指針を与えるものであり、AlN系高出力高周波トランジスタの応用に向けて重要な成果となります。

さらに、より高いAl組成89%においても、 $f_{max}=61$ GHzの電力増幅動作が得られました。Al組成89%のAlGa_Nの禁制帯幅(バンドギャップエネルギー)は約5.6 eVであり、これは、従来高周波電力増幅動作が報告されている半導体材料の中でもっとも大きい値です。本成果は、従来デバイスよりも高出力動作が期待できるウルトラワイドバンドギャップ半導体高周波増幅器として、AlN系pol-FETが有望であることも示しています。

今後の展望

本稿では、AlN系窒化物半導体を用いた高周波トランジスタについて紹介しました。分極ドーピングにより高Al組成領域でも大電流動作および高周波動作が可能なることを示しました。

今後は高電圧動作も同時に実現できるよう、デバイス構造の改善・提案に取り組んでいき、AlN系窒化物半導体のポテンシャルを100%引き出すことで、従来半導体を凌駕する高出力動作の実現をめざします。

高出力・高周波増幅器は通信だけでなく、レーダや宇宙探査など幅広い領域で利用されています。したがって、日常生活に近いところから遠いところまで、さまざまな場面でAlN系高周波トランジスタの活躍が期待できます。その期待を実現できるよう研究に取り組んでいきます。

参考文献

- (1) S. Kawasaki, M. Hiroki, K. Hiram, and Y. Taniyasu: "First RF Operation of AlGa_N-channel Polarization-Doped FETs with Average Al-content over 0.75," IEDM 2025, San Francisco, U.S.A., Dec. 2025.
- (2) D. Jena, S. Heikman, D. Green, D. Buttari, R. Coffie, H. Xing, S. Keller, S. DenBaars, J. S. Speck, U. K. Mishra, and I. Smorchkova: "Realization of wide electron slabs by polarization bulk doping in graded III-V nitride semiconductor alloys," Appl. Phys. Lett., Vol. 81, No.23, pp.4395-4397, 2002.
- (3) M. Hiroki, K. Hiram, K. Kumakura, and Y. Taniyasu: "AlN-based polarization-doped field-effect transistors with downward-graded AlGa_N underlayers," Appl. Phys. Lett., Vol. 126, No.20, 202108, 2025.
- (4) Y. Taniyasu, M. Kasu, and T. Makimoto: "An aluminium nitride light-emitting diode with a wavelength of 210 nanometres," Nature, Vol. 441, No.7091, pp. 325-328, 2006.
- (5) M. Hiroki and K. Kumakura: "Ohmic contact to AlN:Si using graded AlGa_N contact layer," Appl. Phys. Lett., Vol. 115, No.19, 192104, 2019.
- (6) T. Maeda, Y. Wakamoto, I. Sasaki, A. Munakata, M. Hiroki, K. Hiram, K. Kumakura, and Y. Taniyasu: "Thermionic Field Emission in a Si-Doped AlN SBD with a Graded n+-AlGa_N Top Contact Layer," IEDM 2024, San Francisco, U.S.A., Dec. 2024.



(左から) 川崎 晟也/ 廣木 正伸/ 平間 一行/ 谷保 芳孝

窒化物半導体は従来の半導体では到達不可能であった光波長、動作温度、高出力を実現し、半導体デバイスの動作領域を拡大してきました。高出力・高周波という真空管デバイスの最後の牙城を崩し、半導体デバイスの動作領域をさらに拡大すべく取り組んでいきます。

◆問い合わせ先

NTT 物性科学基礎研究所
多元マテリアル創造科学研部
薄膜材料研究グループ

AIN系半導体を用いた深紫外レーザーダイオード

深紫外レーザーダイオードは、ウイルス不活化や分光分析、次世代通信などへの応用が期待されている光源です。本稿では、深紫外発光に適したAIN（窒化アルミニウム）系半導体に着目し、当該材料をレーザーダイオードへ適用する際に顕在化する技術課題を整理します。さらに、n型コンタクト層の形成による電子注入特性の改善を目的としたNTTの技術的取り組みについて紹介し、深紫外レーザー発振の実証を通じて、深紫外光源の性能向上に向けた方向性を示します。

キーワード：#窒化物半導体、#紫外光、#レーザー

えばた かずあき たての こうた
江端 一晃 / 舘野 功太
ひらま かずゆき たにやす よしたか
平間 一行 / 谷保 芳孝

NTT 物性科学基礎研究所

特集

深紫外光源への期待

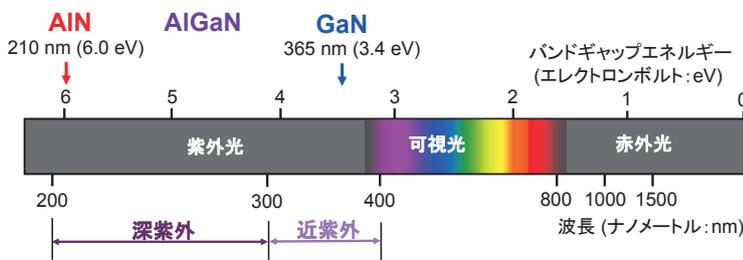
深紫外（波長200~300 nm）光源は、医療・衛生、環境浄化、化学分析、産業プロセスなど、幅広い分野で重要性が高まっています。図1に深紫外光の波長領域とその応用例について示します。深紫外光はDNAやRNAといった核酸が強く吸収する波長帯に位置しています。深紫外光の照射によって核酸塩基に光化学反応が誘起され、細菌やウイルスは増殖や感染に必要な機能を失い、不活化します。この性質は、水処理、環境浄化、医療施設や公共空間における感染対策など、衛生管理が重視される用途において高い有効性を示します。また、深紫外域のうち280 nm未満の波長帯

は「ソーラーブラインド領域」と呼ばれており、大気中のオゾンによって太陽光がほぼ完全に吸収されます。そのため、屋外環境下においても背景光雑音が極めて小さく、安定した光通信が可能となります。ソーラーブラインド光通信は、防災・インフラ監視用センサーネットワークや秘匿性の高い短距離通信などへの応用が期待されています。

従来、深紫外光源としては水銀ランプやエキシマレーザーが用いられてきましたが、大型・高消費電力・短寿命、さらには環境負荷の観点から課題が多く、代替技術が求められてきました。このような背景のもと、小型・高効率・長寿命を特長とする窒化物半導体を用いたレーザーダイオードが、次世

代の深紫外光源として期待されています。レーザーダイオードは、自然放出光^{*1}を利用する発光ダイオード（LED）と比べて、高い指向性と高出力を持ち、波長幅の狭いコヒーレント光^{*2}を得られる点に特徴があります。窒化物半導体では、図1に示すようにGaN（窒化ガリウム）が365 nmの近紫外域に対応するバンドギャップエネルギー3.4 eVを持つのに対し、AIN（窒化アルミニウム）は210 nmの深紫外域に対応する大きなバンドギャップエネルギー6.0 eVを持っています。AINを基盤としたAlGaIn（窒化アルミニウムガリウム）混晶材料では、組成を調整することで発光波長を広い範囲で制御できます。特に300 nm未満の深紫外波長域を実現するためには、高いAl組成を持つAlGaInを含むAIN系材料の利用が不可欠です。

NTTでは、AINの材料ポテンシャルに早期から着目し、半導体の紫外光応用の開拓をめざした材料やデバイス研究に取り組んできました。2006年には世界初となる最短波長210 nmの深紫外AIN LED動作に成功し、深紫外デバイス材料としてAIN系半導体の有望性を実証しました^{(1),(2)}。本稿では、深紫外レーザーダイオードの実用化に向けた技術課題を整理するとともに、NTTにおける最新の研究成果について紹介します。

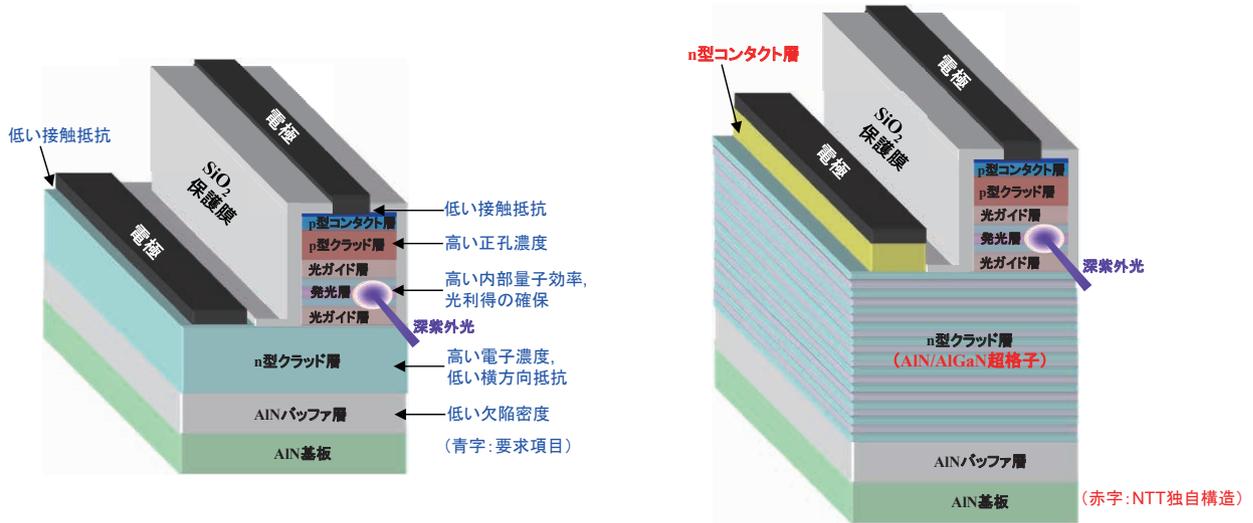


深紫外光の応用例



図1 深紫外光の波長領域と応用例

*1 自然放出光：自然放出光とは、半導体中で励起された電子と正孔が自発的に再結合する際に放出される光であり、放出される光の波長や方向がそろわず、幅広い波長成分を含むという特徴があります。
*2 コヒーレント光：光の波の位相や波長がそろった規則性の高い光を指します。レーザー光は代表的な例で、高い指向性と単色性を持つ光が特徴です。



(a) 深紫外レーザーダイオードの構造と各層における要求項目

(b) NTTのレーザーダイオード構造

図2 AlN系深紫外レーザーダイオードの構造

深紫外レーザーダイオードの研究動向と技術的課題

深紫外半導体レーザは、技術的難易度が極めて高く、長年にわたり実現が困難と考えられてきました。それでも、2000年代以降、AlNの物性研究、高品質AlN基板の開発、AlGaInエピタキシャル成長やドーピング技術が着実に進展し、これら研究分野における長年の蓄積により、近年、深紫外波長域（271.8 nmや298 nm）におけるレーザ発振の成功が報告されました^{(3),(4)}。

一方で、短波長化に伴い、レーザ発振に必要なしきい値電流の増大、直列抵抗の増加に起因する自己発熱といった課題が顕在化してきました。特にUV-C（波長280 nm未満）領域に近づくにつれて、材料物性、光学構造、電流輸送の各要素が相互に強く制約し合い、デバイス設計の自由度は低下します。このため、深紫外レーザーダイオードの実用化には、複数の技術課題を総合的にとらえる視点が重要となっています。

図2(a)は、AlN系深紫外レーザーダイオードを構成する各層に対する主な要求項目を整理したものです。また、表に深紫外レーザーダイオードの課題を、材料物性、光学構造、電流輸送の観点からまとめました。以下、深紫外レーザーダイオードの各課題を説

表 深紫外レーザーダイオードの主要課題

分類	主な課題	影響
材料物性	高Al組成化による導電性低下、分極電荷による内部電場、結晶欠陥に起因する非発光再結合	キャリア注入効率低下、利得低下
光学構造	光モード分布と散乱・吸収源の重なり	内部光学損失の増大
電流輸送	電極・半導体界面の接触抵抗増大、n型クラッド層における横方向抵抗の増大	動作電圧上昇、熱負荷増大

明します。

AlN系深紫外レーザーダイオードの短波長化には、高いAl組成を持つAlGaInが不可欠です。一方で、Al組成の増加に伴い、材料物性に起因する制約が顕著となります。代表的な課題として、p型導電性の低下、分極電荷^{*3}に起因する内部電場による発光再結合の低下、ならびに結晶中に存在する転位や点欠陥などの結晶欠陥に起因する非発光再結合の増大が挙げられます。p型AlGaInにおいては、Al組成の増加とともにMgアクセプタのイオン化エネルギーが大きくなり、イオン化率が低下するため、正孔濃度が低下します。同様に、n型AlGaInにおいても、高Al組成化に伴いSiドナーのイオン化率の低下が生じ、電子濃度の低下が問題となります。このようなp型およびn型層におけるキャリア濃度の低下は、発光層へのキャリア供給を制限し、

レーザーダイオードのキャリア注入効率を低下させます。

光学構造の観点では、AlN系深紫外レーザーダイオードにおいて、光閉じ込めのための導波路構造の屈折率差はAlGaIn層の組成設計によって制御可能であるものの、レーザ発振波長における結晶品質および電気特性との両立という制約から、組成を大きく変えることはできません。波長280 nm帯の深紫外レーザーダイオードにおいて、光閉じ込め係数は数%程度確保可能ですが十分ではなく、さらに、光モード分布の制御が難しいためクラッド層にドーパされたドナー

*3 分極電荷：分極電荷とは、結晶中の原子配列や歪によって材料内部で自然に生じる電荷のことを指します。AlGaIn系材料では、量子井戸界面に形成される分極電荷により発光層内に電場が生じ、発光効率に影響を及ぼすことがあります。

やアクセプタ不純物に起因する散乱・吸収の影響を受けやすくなります。その結果、内部光学損失が顕在化し、しきい値電流の増大や発光効率を制約する要因となります。このため、AlN系レーザダイオードでは、光閉じ込めの確保に加えて、光学損失を抑制する観点からの光学構造設計が重要です。

電流輸送は、材料物性に加えてデバイス構造に強く依存します。メサ構造^{*4}を採用したレーザダイオード構造では、電極配置や電流経路が電氣的損失に影響します。AlN系深紫外レーザダイオードのn型側では、メサ構造により電流がn型クラッド層内を面内方向に流れ、この横方向抵抗が直列抵抗を増大させます。横方向抵抗は電流経路の有効断面積に反比例することから、n型クラッド層の厚みや電流経路の設計が重要となります。また、電極の接触抵抗は半導体との界面特性に依存します。このように、電流輸送に関する課題は、接触抵抗を含めてデバイス構造と密接に関係しています。

NTTの深紫外レーザダイオード構造

NTTでは、これらの課題を踏まえ、材料物性、光学構造、電流輸送を総合的に考慮し、深紫外レーザダイオードの研究開発を進めています。本稿では、その中から電流輸送、特にn型AlGaInコンタクト層に関する最新の取り組みを紹介します。

図2(b)は、本研究で作製したAlN系深紫外レーザダイオード構造を模式的に示したものです。本デバイスはAlN基板上にAlNバッファ層を介して成長しており、高い結晶品質を確保しています。発光層にはAlGaIn多重量子井戸構造を採用し、その上下にAlGaIn光ガイド層およびクラッド層を配置することで、深紫外光の発生と光閉じ込めを実現しています。p型側にはAlGaInからなるクラッド層およびGaInコンタクト層を形成しています。n型側には、SiドープAlN/AlGaIn超格子からなる約3 μm 厚のクラッド層を用いています。本超格子構造を用いることにより、従来の

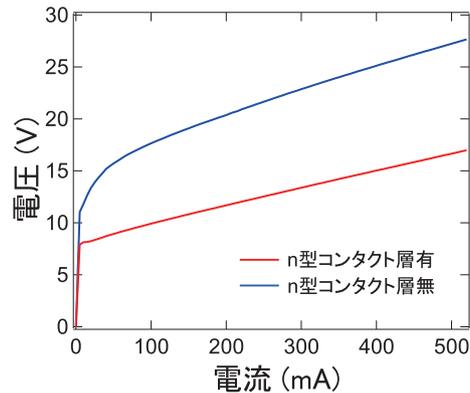


図3 レーザダイオードの電流-電圧特性

AlGaIn単層からなるn型クラッド層よりも厚くすることが可能になり、デバイスの横方向抵抗の低減と光閉じ込めを両立しています⁽⁵⁾。さらに本構造では、NTT独自のアプローチとして、n型クラッド層表面の電極形成領域にn型コンタクト層としてAl組成を徐々に減らしたSiドープ組成傾斜AlGaIn構造を導入しており、電極との接触抵抗の低減を図っています。レーザ共振器は、AlN基板を結晶方位に沿って劈開することで形成した端面ミラーにより構成しています。

上述のNTT独自のn型コンタクト層の詳細について説明します。従来のAlN系深紫外レーザダイオードでは、図2(a)のように、高Al組成AlGaInのn型クラッド層の表面に直接電極を形成する構造が一般的でした。この場合、電極とn型クラッド層の界面に大きなエネルギー障壁が形成され、電極からn型クラッド層への電子の注入が妨げられたため、低抵抗なオーミック接触^{*5}を得ることが困難でした。これに対し、本研究では、電極とn型クラッド層の間に、n型コンタクト層としてAl組成を徐々に低下させたSiドープ組成傾斜AlGaIn層を導入することで、電極はAl組成の低いAlGaInと界面を形成します。本構造により、界面のエネルギー障壁は低下し、電極からn型クラッド層への電子注入が円滑に行われるようになります。さらに、本構造では高濃度のSiドープを併用することで、十分なn型キャリア濃度を確保するとともに、ドープ層をコンタクト層に限定す

ることで、光学特性や結晶品質への影響を抑制しています。材料組成とドーピングの同時最適化により、深紫外域におけるn型コンタクトの低抵抗化が可能であることを示している点が、本アプローチの特長です。

図3は、本研究のn型コンタクト層を形成したレーザダイオード(図2(b))と、同層を形成していない従来構造のレーザダイオード(図2(a))について、電流-電圧特性を比較した結果を示しています。n型コンタクト層を導入したデバイスのほうが、同一電流条件における動作電圧が低く、すなわち素子抵抗が低いことが分かります。これは、n型コンタクト層を導入することで、電極とn型クラッド層との間のエネルギー障壁が低下し、オーミック接触抵抗が低減されたためです。一方、n型コンタクト層を導入していないデバイスでは、電極と半導体界面における非オーミック(ショットキー的)接触特性に起因する抵抗が、動作電圧の増加に影響していることが分かります。以上より、n型コンタクト層を用いた形成技術は、非オーミック接触に起因する電圧上昇の抑制に寄与し、デバイスの低消費電力化に有効であることを示しています。

*4 メサ構造: メサ構造とは、半導体デバイスの一部を周囲よりも高く残すように加工し、AlGaInレーザダイオードでは主にn型層を表に出して電極を形成するために用いられる構造を指します。

*5 オーミック接触: 金属と半導体の接合界面において整流特性を示さず、オームの法則に従って電圧と電流が線形関係を示す接触状態を指します。

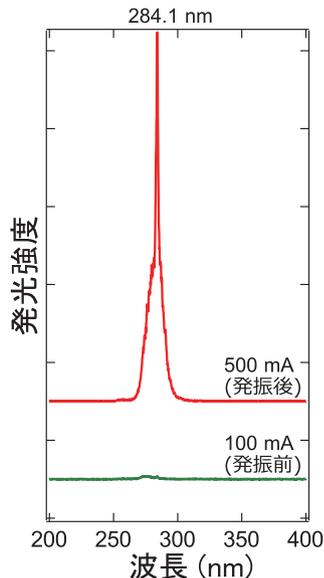


図4 レーザダイオードの発光特性

図4は、本研究のn型コンタクト層を形成したレーザダイオードについて、室温・パルス電流注入条件下で測定した発光スペクトルを示しています。注入電流の増加に伴い、深紫外域に発光ピークが現れ、高電流領域では284.1 nm付近に鋭いピークが観測されました。低電流領域では自然放光が支配的な広いスペクトルを示しますが、電流増加に伴って特定の波長成分が急激に強まり、スペクトル幅が著しく狭くなることが確認されます。この挙動は、共振器内での光増幅が進み、誘導放出^{*6}が支配的な状態へ移行したことを示しています。図5は、本研究で作製した深紫外レーザダイオードが実際に動作している様子を示した写真です。通電するとデバイス端面から発光していることが確認できます。これらの結果は、n型コンタクト層の導入によって電子注入効率が向上し、図3で示した動作電圧低減の効果が光学特性にも反映されていることを示しています。以上のことから、n型コンタクト層の最適化が、深紫外レーザダイオードにおいて安定したレーザ発振

*6 誘導放出：励起状態にある半導体中のキャリアが、同じエネルギーの光が存在する状態のもとで、入射光と同じ波長・位相・進行方向を持つ光を連鎖的に放出し、光が増幅される現象です。

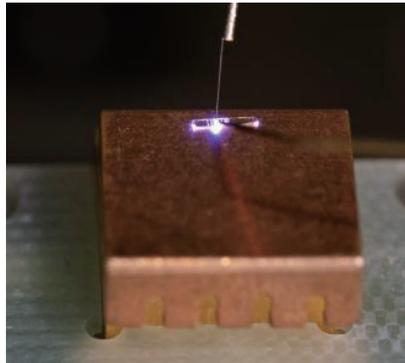


図5 レーザダイオードの発光測定の様子

を実現するうえで重要であることが分かります。

今後の展開

深紫外レーザダイオードの性能向上、そして実用化に向けて、今後は電極界面や電流経路に関する設計のさらなる最適化に加え、発光層へのキャリア注入効率および内部光学損失の低減を含めた設計が重要であると考えられます。深紫外レーザダイオードでは、高Al組織AlGa_NにおけるMgアクセプタの低いイオン化率に起因して正孔注入効率が低下しやすく、また結晶欠陥やドーピング層に起因する内部光学損失が大きい値電流の増大や効率低下の要因となります。従来のMgドーピングに加え、分極電荷を利用したドーピング手法や超格子構造を活用したキャリア制御など、正孔注入特性の改善に向けた材料・構造設計が重要となります⁽⁶⁾。これと併せて、発光層内でのキャリア閉じ込めや高効率発光のため、量子井戸構造や障壁層の設計最適化も有効なアプローチの一つと考えられます。また、光モードと散乱・吸収源との重なりに起因する内部光学損失を低減するための構造設計、結晶成長およびプロセス技術の高度化を通じた欠陥低減も不可欠です。一連の検討を通じて、深紫外レーザダイオードの性能が向上し、深紫外光源の社会実装と応用分野の拡大が期待されます。

参考文献

- (1) Y. Taniyasu, M. Kasu, and T. Makimoto: "An aluminium nitride light-emitting diode with a wavelength of 210 nanometres," *Nature*, Vol.441, pp.325-328, 2006.
- (2) 谷保・嘉数・牧本: "世界最短波長210 nmの遠紫外発光ダイオード," *NTTジャーナル*, Vol.19, No.2, pp.64-67, 2007.
- (3) Z. Zhang, M. Kushimoto, T. Sakai, N. Sugiyama, L. J. Schowalter, C. Sasaoka, and H. Amano: "A 271.8 nm deep-ultraviolet laser diode for room temperature operation," *Appl. Phys. Express*, Vol.12, No.12, 124003, 2019.
- (4) K. Sato, S. Yasue, K. Yamada, S. Tanaka, T. Omori, S. Ishizuka, S. Teramura, Y. Ogino, S. Iwayama, H. Miyake, M. Iwaya, T. Takeuchi, S. Kamiyama, and I. Akasaki: "Room-temperature operation of AlGa_N ultraviolet-B laser diode at 298 nm on lattice-relaxed Al_{0.6}Ga_{0.4}N/AlN/sapphire," *Appl. Phys. Express*, Vol.13, No.3, 031004, 2020.
- (5) K. Ebata, K. Tateno, K. Hirama, K. Kumakura, and Y. Taniyasu: "n-type AlN/AlGa_N Superlattice Cladding Layer for Ultraviolet Laser Diodes," *Phys. Status Solidi A*, Vol.222, No.23, 2500027, 2025.
- (6) K. Ebata, J. Nishinaka, Y. Taniyasu, and K. Kumakura: "High hole concentration in Mg-doped AlN/AlGa_N superlattices with high Al content," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.57, No.45, 04FH09, 2018.



(左から) 江端 一晃/ 館野 功太/
平間 一行/ 谷保 芳孝

深紫外光は、人々の安全や環境を支える分野を中心に、幅広い応用への展開が期待されています。本稿で紹介した技術的知見が、深紫外光源の社会実装と応用領域の拡大に向けた議論の一助となれば幸いです。

◆問い合わせ先

NTT 物性科学基礎研究所
多元マテリアル創造科学研部
薄膜材料研究グループ

AlN 圧電薄膜を用いたギガヘルツ弾性波素子

ウルトラワイドバンドギャップ半導体の1つである窒化アルミニウム (AlN) は、優れた電気絶縁性に加え、高い圧電性を持ちます。さらに、他の圧電材料と比べて軽量であることから、ギガヘルツ帯の高速な弾性波を電氣的に励起・検出できる圧電トランスデューサとしての利用が期待されます。本稿では、高品質な AlN 圧電トランスデューサを用いたギガヘルツ弾性波素子の創出と、高速弾性波を用いた新規物理の探究に取り組む NTT の研究を紹介します。

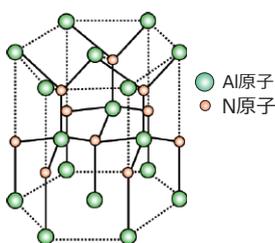
キーワード：#窒化アルミニウム、#圧電性、#弾性波

おかもと はじめ ころす
岡本 創 / 黒子 めぐみ
 はたなか だい き あさの もと き
畑中 大樹 / 浅野 元紀
 たにやす よしたか やまぐち ひろし
谷保 芳孝 / 山口 浩司

NTT 物性科学基礎研究所

AlN 結晶の圧電特性

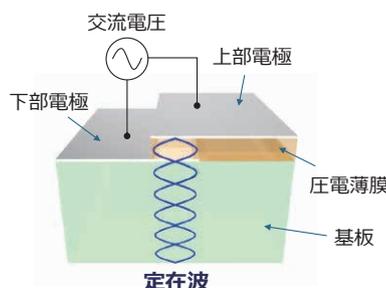
AlN (窒化アルミニウム) は六方晶ウルツ鉱構造と呼ばれる結晶構造を持っています (図 1 (a))。この構造の特徴は、結晶内の原子配置に上下方向の非対称性、すなわち極性が存在する点です。この結晶に外力が加わり変形が生じると、Al原子とN原子の相対位置が変化し、内部の電荷分布が偏ることにより、電圧が発生します。これが圧電効果です。一方、結晶に電圧を印加すると、原子配置が極性軸方向に変位し、結晶が伸縮します。これは逆圧電効果と呼ばれます。このように、ウルツ鉱構造に由来する結晶の極性が AlN を優れた圧電材料としています。さらに、結晶を構成する原子が軽量であることから、弾性波が結晶中を高速に伝搬する点も AlN の特徴です (伝達速度は表面弾性波で 6300 m/s、バルク弾性波で 10000 m/s 以上)。このため、AlN はギガヘルツ帯域で動作する高周波デバイスに適した圧電材料といえます。



(a) AlN のウルツ鉱構造

AlN 薄膜を用いた超高速バルク弾性波素子

図 1 (a) の AlN 結晶に上下方向の交流電圧を印加すると、結晶は同じ方向に伸縮します。この性質を利用し、AlN 薄膜を上部電極と下部電極で挟んだ構造を基板上に形成することにより、厚さ方向に進行する弾性波を電氣的に励起することが可能となります。例えば、図 1 (b) に示す構造では、圧電薄膜により励起された弾性波が基板内部へ伝搬し、基板最下部に到達したバルク弾性波が裏面で反射されて再び上部へ戻ります。この反射が繰り返される中で、波の節 (振幅がゼロとなる位置) が反射面と一致する条件が満たされると、弾性波は定在波となり、安定した信号が得られます。この定在波の形成は、電極を介した反射信号測定によって検出でき、定在波が励起される際には反射強度が大きく減少します。このように電氣的にバルク弾性波を励起・検出できる素子は高倍音バルク音響共振器 (HBAR : High-overtone Bulk Acoustic Resonator) *1 と呼ばれ、ギガヘルツ帯域の高速な弾性波を扱えるデバイスとして近年注目されています。しかしながら、図 1 (b) に示す従来の HBAR 構造では、圧電薄膜と基板の間に金属電極層が介在するため、弾性波の反射や減衰が生じ、基板への伝搬ロスが発生するという課題がありました。この問題を解決するため、私たちの研究チームは下部金属層を必要としない新しい HBAR 素子を提案・実証しました。その鍵となるのが「基板材料の工夫」です。AlN と格子整合し、かつ導電性を持つ材料を基板として使い、その上に AlN 薄膜を直接形成する新しい HBAR 構造を提案しました。この構造では、基板自体が下部フローティング電極として機能するとともに、格子整合によって弾性波の伝搬ロスを抑えることが可能となります (図 2 (a))。具体的には、窒素ドーピングした n 型 6H-SiC *2 を基板として使い、その上に有機金属気相成長法 (MOCVD) により高品質な AlN 薄膜をエピタキシャル成膜しました。これにより、

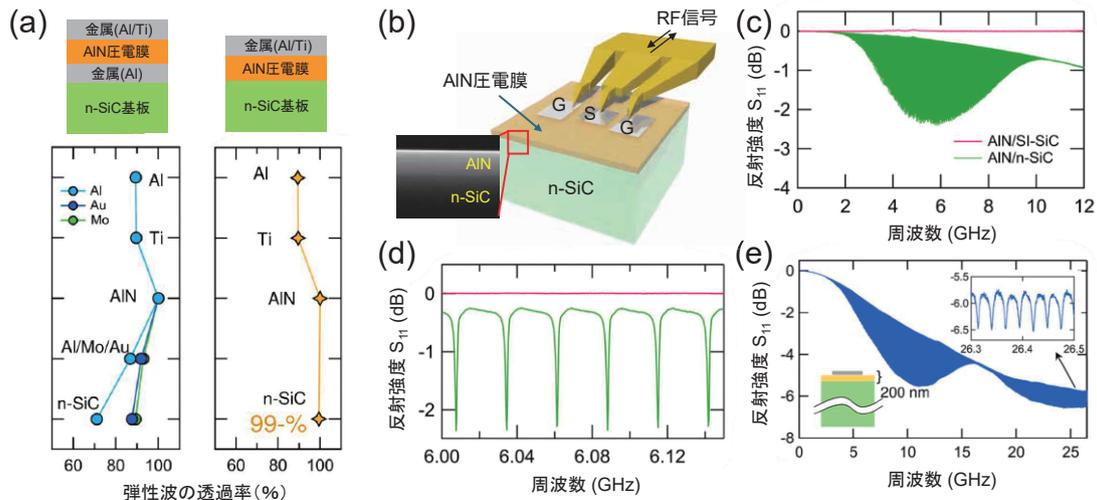


(b) 一般的な高倍音バルク音響共振器 (HBAR) の構造

図 1 AlN の圧電特性を利用した一般的な高倍音バルク音響共振器

Resonator) *1 と呼ばれ、ギガヘルツ帯域の高速な弾性波を扱えるデバイスとして近年注目されています。しかしながら、図 1 (b) に示す従来の HBAR 構造では、圧電薄膜と基板の間に金属電極層が介在するため、弾性波の反射や減衰が生じ、基板への伝搬ロスが発生するという課題がありました。この問題を解決するため、私たちの研究チームは下部金属層を必要としない新しい HBAR 素子を提案・実証しました。その鍵となるのが「基板材料の工夫」です。AlN と格子整合し、かつ導電性を持つ材料を基板として使い、その上に AlN 薄膜を直接形成する新しい HBAR 構造を提案しました。この構造では、基板自体が下部フローティング電極として機能するとともに、格子整合によって弾性波の伝搬ロスを抑えることが可能となります (図 2 (a))。具体的には、窒素ドーピングした n 型 6H-SiC *2 を基板として使い、その上に有機金属気相成長法 (MOCVD) により高品質な AlN 薄膜をエピタキシャル成膜しました。これにより、

*1 高倍音バルク音響共振器：薄い圧電膜と厚い基板を組み合わせることで、多数の高次バルク音響共振 (倍音) を得るデバイスです。一般的には、圧電薄膜を上下電極で挟んだ構造を結晶基板上に形成した素子構造を持ちます。圧電膜で励起された弾性波は厚い基板内で多重反射し、その結果として高い周波数密度を持つ多数の共振モードが現れます。一方で、圧電薄膜と基板の間に金属電極層が介在するため、弾性波の反射や減衰による伝搬ロスが課題となっていました。本研究では、この問題を回避するため、n 型 SiC 基板上に圧電薄膜を直接形成した独自の HBAR 構造を採用しています。なお、HBAR 素子に用いられる圧電材料としては、AlN のほかに ZnO (酸化亜鉛) などが知られています。



(a) AlN薄膜とn-SiC基板の間に金属電極層を挟む場合(左)と、挟まない場合(右)における弾性波の基板への透過率の計算結果。(b) 作製した高倍音バルク音響共振器の模式図と断面透過型電子顕微鏡像。(c) 厚さ0.24 mmのn-SiC基板上に膜厚800 nmのAlN圧電薄膜を形成した素子の反射スペクトル。(d) (c)の6 GHz付近を拡大したスペクトル。(e) AlN膜厚を200 nmとした場合の反射スペクトル。

図2 本研究で用いた下部金属電極を必要としないAlN高倍音バルク音響共振器

超高速な弾性波が効率的に基板へ伝搬する、優れたインピーダンス整合特性を有したHBAR素子を実現しました⁽¹⁾(図2(b))。

前述のとおり、HBAR素子では弾性波が厚さ方向に反射を繰り返して、 $m\lambda = 2L$ (m は整数、 λ は弾性波の波長、 L は素子の厚さ)を満たす条件で定在波が形成されます。例えば、厚さ0.24 mmのn-SiC基板上に膜厚800 nmのAlN圧電薄膜を直接形成した素子では、6 GHz付近を中心とするブロードなスペクトル(図2(c))と、その内部に等間隔で現れる多数の鋭いHBARモード(図2(d))が観測されます⁽¹⁾。各HBARモードの周波数は $f_m \sim m \times v_s / 2t_s$ (v_s はSiC中の音速、 t_s はSiC基板の厚さ)で与えられ、Q値が 10^3 を超える高品質な共振が得られ

ます。また、HBARモード間隔の揺らぎを評価することにより、インピーダンスの不整合が極めて小さな素子となっていることを確認できます。なお、図2(c)のブロードなスペクトルの中心周波数はAlN膜厚(t_p)における弾性波の共振条件で決まり、 $f_n \sim n \times v_p / 2t_p$ (n は整数、 v_p はAlN中の音速)で与えられます*3。したがって、より高周波で動作させるためには、AlN膜厚のさらなる薄膜化が有効となります。

このようにインピーダンスが高度に整合したHBAR素子は、従来にない高性能な発振器や高周波信号フィルタとしての利用が期待されます。特に、100 GHzに迫る超高速領域で動作可能な超高速HBAR素子の実現が今後の重要な研究課題です。近年、5G(第5世代移動通信システム)に代表される無線通信技術は急速に進展しており、Beyond 5Gと呼ばれるミリ波帯域(30~300 GHz)を用いた高速通信時代が目前に迫っています。その実現には、ミリ波帯で動作可能な高品質弾性波デバイスの開発が不可欠です。これに向けた取り組みとして、私たちはAlN圧電膜の超薄膜化による素子の高周波化を進めています。図2(e)にはAlN膜厚を200 nmとした場合の反射スペクトルを示しています。この場合、10 GHz付近に1次のブロードなスペクトルが現れ、さらに25 GHz付近に高次のブロー

ドなスペクトルが観測されます(高次スペクトルも多数の鋭いHBARモードから構成されます)。このようにAlNの薄膜化や高次スペクトルの活用により、ミリ波帯域で利用可能なHBAR素子の実現が期待されます。

AlN表面弾性波素子による電子とフォノンのハイブリッド状態の創出

10 GHzを超える超高速な弾性波の励起には前述したバルク弾性波素子が必要となりますが、10 GHz未満の弾性波であれば、次に紹介する表面弾性波素子により、電気的に励起・検出することが可能です。例えば、結晶基板上に形成したAlN薄膜の上に櫛型電極を配置し、電極間に交流電圧を印加すると、表面近傍を横方向に伝搬する表面弾性波(SAW: Surface Acoustic Wave)が励起されます(図3(a))。この際の表面弾性波周波数は電極間隔とAlN中の音速によって決まり、例えば0.8 μ m間隔の櫛型電極を用いることにより、2.1 GHzの表面弾性波を励起できます。励起された表面弾性波による振動歪はAlN薄膜より下部の基板内部へ浸透しますが、その強度は深さに対して指数関数的に減衰していきます(図3(b))。

上述した表面弾性波素子を利用すること

*2 SiC結晶：原子の積層様式の違いにより複数の結晶多型が存在します。3C-SiCは立方晶構造をとるのに対し、4H-SiCおよび6H-SiCは六方晶構造を持ちます。このうち、4H-SiCはABCBC...の4層周期構造、6H-SiCはABCACB...の6層周期構造をとります。本研究では、六方晶構造のうち、AlNとの格子定数差がもっとも小さい6H-SiCを基板として用いています。

*3 厚さ t_p の圧電薄膜内における弾性波の共振条件は $f_n \sim n \times v_p / 2t_p$ で与えられます。ここで、 n は共振次数、 v_p は圧電材料中の音速を表します。なお、 n が偶数の場合には、圧電体内の歪分布と電界分布の積がゼロとなり、電気機械結合が生じないため、弾性波は基本的に励起されません。そのため、実際に観測される共振は奇数次に限られます。

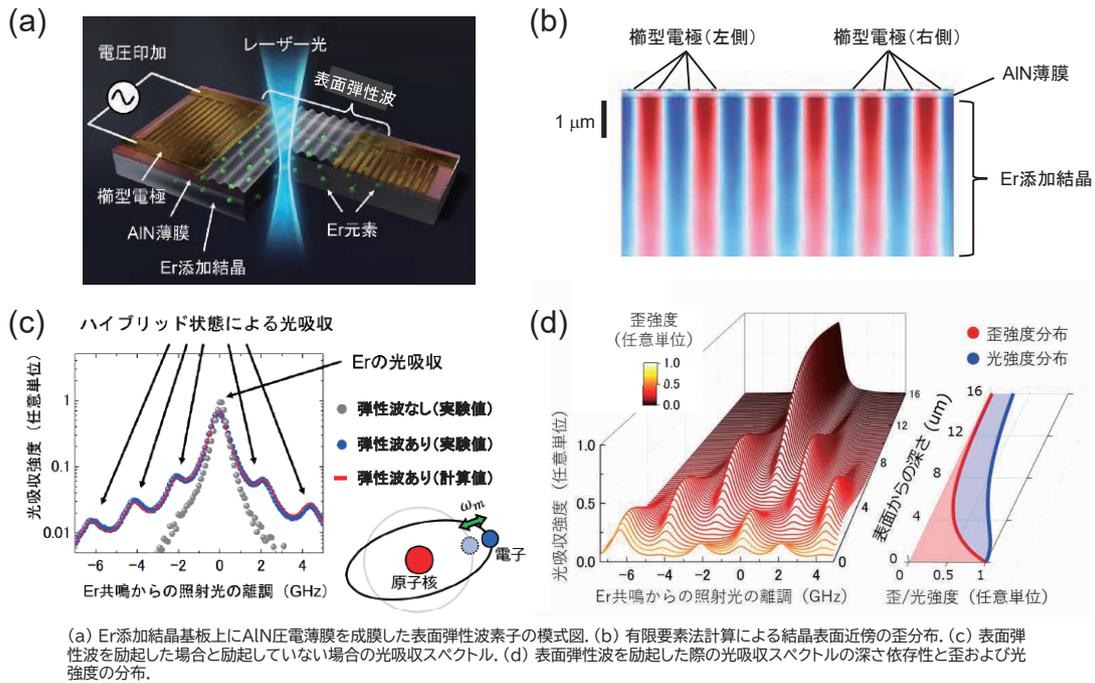


図3 AIN表面弾性波素子による電子とフォノンのハイブリッド状態

により、基板内部に埋め込まれた機能性物質に歪を加えることが可能となります。例えば、数ミリ秒の励起電子寿命を持つ希土類元素エルビウム (Er)^{*4} を添加した希土類酸化物結晶 (Y₂SiO₅) 基板上に、厚さ200 nmのAlN薄膜をスパッタ成膜した構造 (図3 (a)) では、2.1 GHzの表面弾性波による高速歪をEr電子に与えることができます⁽²⁾ (図3 (b))。この歪の振動速度はErの電子寿命よりも速いため、電子状態は振動歪の影響を顕著に受け、電子とフォノン (弾性波) が相互作用したハイブリッド状態を形成します。このような従来にないハイブリッド状態を実験的に観測するため、Er電子の共鳴周波数近傍に対応する波長 (約1.54 μm) のレーザー光を素子中央部に照射し (図3 (a))、Erの発光を介した光吸収スペクトル測定を行いました。表面弾性波を電氣的に励起した状態で測定した光吸収スペクトルには、Er本来の吸収線に加えて、表面弾性波周波数の間隔で複数のサイドピークが現れます (図3 (c))。これらのサイドピークは、Erの電子状態とフォノンがハイブリッド化した状態の吸収に対応します。さらに、厚さ方向の歪分布を考慮した解析を行うことにより、基板内部のどの深さにおいて、どの程度のハイブリッド化

が生じているかを見積もることができます。その結果、結晶表面から12 μm以上深い領域ではサイドピークが現れない一方で、歪の影響をもっとも強く受ける結晶最表面付近ではハイブリッド化の度合いが大きく、多数のサイドピークが現れていることが明らかになりました (図3 (d))。この結果は、結晶表面近傍に位置するErを、サイドピークを介して光励起することにより、弾性波を用いて励起電子の数や位相を操作できる可能性を示しています⁽²⁾。

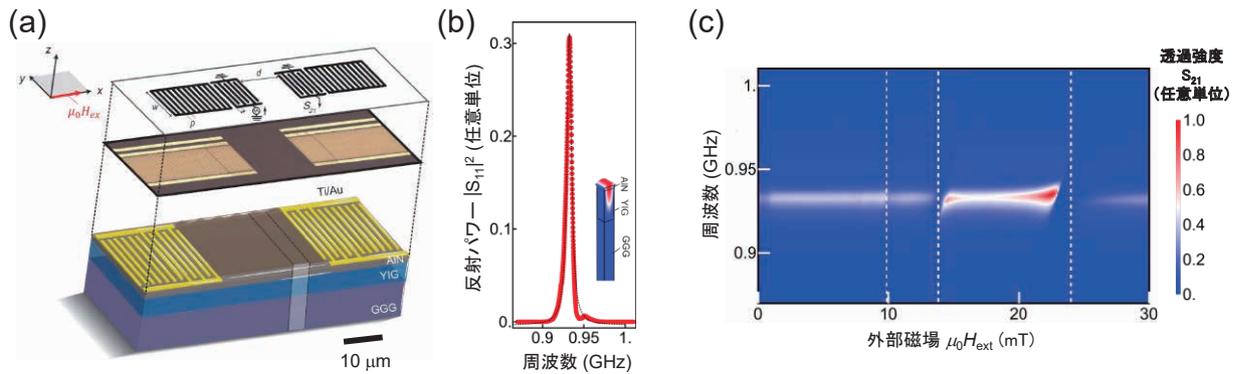
Erは、Cバンドと呼ばれる代表的な光通信波長帯に共鳴する内殻電子を有する点で、他の希土類元素とは異なる特徴を持ちます^{*4}。内殻電子は外殻電子によって遮蔽されているため外界の影響を受けにくく、高い量子コヒーレンスを実現できることから、Erは量子光メモリへの応用が期待されています。一方で、この遮蔽効果は内殻電子の外部制御性を低下させるというトレードオフも伴います。実際、外部電界によってErの共鳴周波数を変調するには高電圧が必要であり、制御性が課題となっていました。これに対して、本研究で示した表面弾性波によるEr電子の変調手法は高い制御性を持っており、弾性波を用いて情報の書き込みや読み出しを行う新しい量子光メモリ素

子の実現に道を拓くものと期待されます。

AIN表面弾性波素子による マグノンとフォノンの 強結合状態の実現

前述した表面弾性波技術は、発光材料に限らず、さまざまな物質系へ拡張することが可能です。例えば、基板に磁性材料を含む構造を用いることで、表面弾性波による歪を介してスピン波 (マグノン) と弾性波 (フォノン) を強結合させることができます。ガドリニウム・ガリウム・ガーネット (GGG) 基板上に形成したイットリウム鉄ガーネット (YIG) 単結晶薄膜では、長寿命なマグノンが励起されることが知られています。このYIG/GGG基板上にAlN圧電膜を成膜し、その上に櫛型電極を配置することにより、AlN下部に浸透した表面弾性波の振動

*4 希土類元素は4f軌道の電子に由来する特有の物性を示します。4f軌道の電子は、外側に位置する5sおよび5p軌道電子によって遮蔽されているため、光で励起されても外界の影響を受けにくく、長い電子寿命を持ちます。中でもエルビウムは、長距離光通信で用いられる代表的な通信波長帯であるCバンド (1.530~1.565 μm) の光に共鳴吸収する特異な性質を持ち、通信波長の光で操作できる点が大きな利点です。



(a) YIG/GGG基板上にAlN圧電薄膜をスパッタ成膜した表面弾性波素子の模式図(下), 光学顕微鏡像(中), および楕型電極の設計図(上). (b) 楕型電極を介して励起された表面弾性波の透過スペクトル. (c) 外部磁場を印加した際の表面弾性波透過スペクトルの磁場強度依存性.

図4 AlN表面弾性波素子によるマグノンとフォノンの強結合状態

歪をYIG中のマグノンに作用させることが可能となります。私たちは、GGG基板上に形成した厚さ5.7 μm のYIG単結晶薄膜に、厚さ400 nm のAlN圧電膜をスパッタ成膜し、その上に2 μm 間隔の楕型金電極を配置した構造を作製しました⁽³⁾ (図4 (a))。この構造では0.93 GHzの表面弾性波を励起することができます (図4 (b))。この素子において楕型電極に直交する方向に面内磁場を印加すると、磁場強度に応じてマグノンの共鳴周波数を連続的にチューニングすることが可能となります。そして、マグノンの共鳴周波数が表面弾性波周波数と一致したとき、マグノンとフォノンの間に強結合が生じ、表面弾性波の透過スペクトルに顕著なディップ、すなわちモード分裂が現れます。例えば、磁場を24 mTとした場合には、弾性波の透過強度がほぼゼロとなり、フォノンとマグノンが完全に結合した状態が形成されていることが分かります (図4 (c))。同様の現象は、14 mT付近および10 mT付近でも観測されており、これらはそれぞれ厚さ方向にノードを持つ1次および2次の高次マグノンモードがフォノンと強結合した状態に対応しています⁽³⁾。

このようなマグノンとフォノンの強結合状態は、弾性波によるスピン波制御 (音響駆動スピントロニクス)、スピン波による弾性波制御 (磁性駆動フォノニクス)、弾性波を介した長距離スピン波伝搬など、幅広い応用が期待されます。また、磁性体を持つ情報保持機能を活用した従来にはない

マグノフォニックデバイスの創出も見込まれます。さらに、本稿前半で紹介したバルク弾性波構造と同様の強結合を達成できれば、ミリ波帯域で動作可能な超高速マグノフォニックデバイスの実現も視野に入ります。

まとめ

本稿では、窒化アルミニウムの優れた圧電特性を活用したギガヘルツ弾性波素子について紹介しました。窒化アルミニウム圧電薄膜を用いたギガヘルツ弾性波技術は、超高速・高品質なバルク音響共振器の実現にとどまらず、電子とフォノンのハイブリッド状態や、マグノンとフォノンの強結合といった多様な物理現象の開拓へと広がりをみせています。これらの成果は、高速通信、量子情報処理、省エネルギー信号処理などの次世代技術を支える基盤技術として、大きな可能性を秘めています。

参考文献

- (1) M. Kurosu, D. Hatanaka, R. Ohta, H. Yamaguchi, Y. Taniyasu and H. Okamoto: "Impedance-matched high-overtone bulk acoustic resonator," *Applied Physics Letters*, Vol.122, 122201, 2023.
- (2) R. Ohta, G. Lelu, X. Xu, T. Inaba, K. Hitachi, Y. Taniyasu, H. Sanada, A. Ishizawa, T. Tawara, K. Oguri, H. Yamaguchi and H. Okamoto: "Observation of acoustically induced dressed states of rare-earth ions," *Physical Review Letters*, Vol.132,

036904, 2024.

- (3) D. Hatanaka, M. Asano, M. Kurosu, Y. Taniyasu, H. Okamoto and H. Yamaguchi: "On-chip magnon polaron generation in mode-matched cavity magnomechanics," *Physical Review Applied*, Vol. 24, 064053 2025.



(上段左から) 岡本 創 / 黒子 めぐみ / 畑中 大樹
(下段左から) 浅野 元紀 / 谷保 芳孝 / 山口 浩司

窒化アルミニウムは、光・電子デバイスのみならず、弾性波デバイスなど多彩な応用可能性を秘めた材料です。その特長である顕著なワイドバンドギャップは、デバイスの可能性を広げるだけでなく、まさに“ワイド”な研究展開を切り拓いています。

◆問い合わせ先

NTT 物性科学基礎研究所
フロンティア機能物性研究部
ナノメカニクス研究グループ



新規ウルトラワイドバンドギャップ窒化物半導体の創製

NTT 物性科学基礎研究所では、持続可能社会の実現に貢献することをめざし、省エネルギー電子デバイス向けの新規半導体材料の結晶成長技術開発にも取り組んでいます。本研究では、ウルトラワイドバンドギャップ半導体である立方晶窒化ホウ素 (c-BN) に着目し、その機能拡張を目的として c-BN 系新規混晶材料である立方晶窒化ホウ素スカンジウム (c-BScN) のエピタキシャル成長に世界で初めて成功しました。これらの c-BN 系半導体は、次世代パワーデバイスへの応用が期待できます。

キーワード：#立方晶窒化ホウ素スカンジウム、#パワーデバイス、#新材料探索

まえだ りょうた
前田 亮太
たにやす よしたか
谷保 芳孝
ひらま かずゆき
平間 一行

NTT 物性科学基礎研究所

次世代パワーデバイス応用に向けた新規窒化物半導体材料研究

ホウ素 (B) と窒素 (N) は、周期表上で炭素 (C) の両隣に位置する元素です。炭素原子は、原子どうしが強い共有結合をつくることで、極めて硬い結晶であるダイヤモンドになります。同様に、B と N も共有結合を形成し、ダイヤモンドと同じ立方晶構造^{*1} (図1 (a)) をとります。このときにできる材料が、立方晶窒化ホウ素 (c-BN: cubic Boron Nitride) です。

c-BN は、ダイヤモンドに次ぐ硬さを持ち、電気の流れを制御できる半導体としての性質も併せ持っています。この c-BN は半導体では最大級のバンドギャップエネルギー (6.25 eV) を持っており、ウルトラワイドバンドギャップ半導体^{*2}と呼ばれています。このバンドギャップエネルギーが大きいほど、半導体材料が耐え得る電圧の指標であ

る「絶縁破壊電界」も高くなる傾向があります。c-BN では約 17.5 MV/cm の絶縁破壊電界が予測されており、この値は既存材料と比べても非常に高く、c-BN が高電圧動作を必要とするパワーデバイスに適した材料であることを示しています⁽¹⁾。

パワーデバイスとは、電気の直流と交流の変換や直流の電圧レベル制御といった電力変換を行う電子デバイスであり、電気駆動製品の「心臓部」の役割を担っています。こうしたパワーデバイスは、家電製品の電源回路から電車や電気自動車のモーターを制御するインバータまで、身の回りのいたるところで使われています。そのため、こうしたパワーデバイスの動作時の損失電力の低減は、地球規模での省エネにつながり、持続可能社会の実現に大きく貢献します。これまでパワーデバイス材料としてシリコン (Si) 半導体が主に利用されてきましたが、近年では、Si よりも絶縁破壊電界

が高い炭化ケイ素 (SiC) や窒化ガリウム (GaN) といったワイドバンドギャップ半導体^{*2}を利用したパワーデバイスの研究開発が加速しており、電車や電気自動車を含めて幅広い分野で用いられるようになっていきます。これは絶縁破壊電界が高い半導体を利用したパワーデバイスほど、高電圧動作が可能であることに加えて、損失電力が小さい (高効率な) 電力変換が可能であるためです。絶縁破壊電界が SiC や GaN よりも 5 倍以上高いことが予測されている

*1 立方晶構造: 原子が三次元に規則正しく並び、単位となる原子の並び (単位格子) が立方体の形をしている結晶構造です。

*2 ウルトラワイドバンドギャップ半導体, ワイドバンドギャップ半導体: Si (1.1 eV) よりバンドギャップエネルギーが大きい半導体材料。バンドギャップエネルギーが 4 eV まではワイドバンドギャップ半導体, それ以上のバンドギャップエネルギーを持つ半導体材料はウルトラワイドバンドギャップ半導体と呼ばれます。

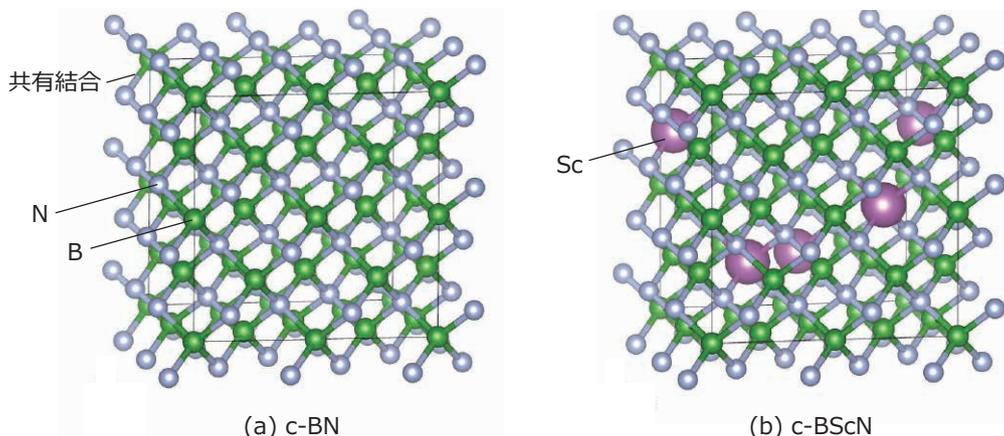
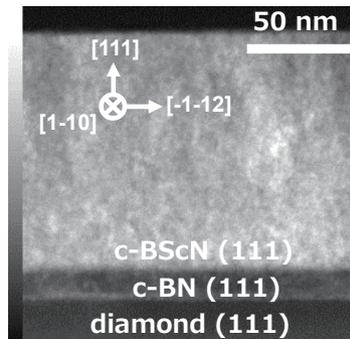


図1 c-BN と c-BScN の結晶構造の模式図

c-BNは、SiCやGaNよりもさらに損失電力が小さく、より高効率なパワーデバイスへの応用が期待できます。さらに、c-BNは化学的に非常に安定であり、高温や放射線にも強いという特長を持っています。このため、通常の使用環境に限らず、宇宙や原子力発電所などの過酷な環境における応用の可能性もあります。

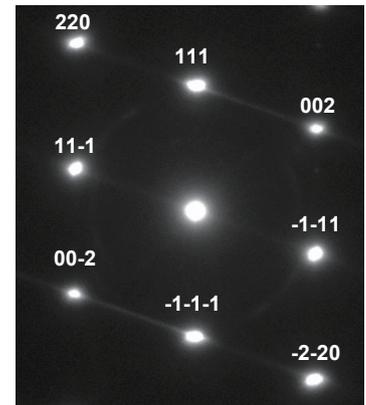
NTT物性科学基礎研究所ではこうした将来的な応用を見据えて、c-BNの結晶成長研究に長年取り組んでいます。c-BNは優れた半導体特性を持つ一方で、結晶成長が極めて難しい材料として知られていましたが、私たちは独自の結晶成長手法を考案することで、これまでにc-BN薄膜のエピタキシャル成長^{*3}とその電気伝導性の制御に成功しています⁽²⁾。c-BNの電子デバイス応用には、c-BN系の「三元混晶材料」の結晶成長も重要です。このc-BN系三元混晶材料とは、c-BNの立方晶構造を維持したまま、B原子の一部を別の原子で置換し、異なる3つの元素からなる半導体材料のことで、混晶は原子の組成を変えることで物性を連続的に調整できるという大きな利点があります。そのため、こうした三元混晶材料を含む半導体ヘテロ構造^{*4}は、その有用性から電子デバイスや発光デバイス、センサデバイスなど、さまざまなデバイスで用いられています。

このような背景から、私たちはc-BN系の三元混晶材料の候補である立方晶窒化ホウ素スカンジウム(c-BScN)の結晶成長に取り組んでいます(図1(b))。窒化スカンジウム(ScN)は、c-BNと同じく立方晶系の材料で、閃亜鉛鉱構造と岩塩構造という2種類の結晶多形を持ちます。これらは電気的な性質が大きく異なり、閃亜鉛鉱構造では約2.5 eV、岩塩構造では約0.9 eVのバンドギャップエネルギーを示します。c-BNとScNの混晶である三元混晶のc-BScNでは、BとScの割合を調整することで、バンドギャップエネルギーを6.25~0.9 eVの広範囲で連続的に調整できる可能



エピタキシャル関係
c-BScN[111] // diamond[111]
c-BScN[1-10] // diamond[1-10]

(a) c-BScNの透過型電子顕微鏡像
[]は結晶方位, ()は結晶面を表す



(b) c-BScN領域の電子線回折像
数字は各回折スポットに対応する結晶面を表す

図2 c-BScN薄膜のエピタキシャル成長

性があります。さらに、c-BScNとc-BNを積層したヘテロ構造の界面近傍に電気伝導を担うキャリア(電子または正孔)を閉じ込めてその通り道(チャンネル)として利用できれば、c-BN系半導体の特長を活かした損失電力が小さいパワーデバイスへの応用も期待できます。

立方晶窒化ホウ素スカンジウム(c-BScN)のエピタキシャル成長

近年私たちは、これまで培ってきたc-BN結晶成長技術を基盤として、世界で初めてc-BScN薄膜のエピタキシャル成長に成功し、さらに、その組成制御も実証しました⁽³⁾。c-BScN薄膜を成長するための基板材料には結晶構造が同じで、格子定数が近いダイヤモンドを用いました。成長方法には薄膜材料の産業応用で広く利用されているマグネトロンスパッタリング法^{*5}を用いています。また、本研究では、ダイヤモンド基板上にc-BN薄膜を成長させ、その上にc-BScN薄膜を成長させる段階的なプロセスを採用しました。

c-BScN薄膜がどのように成長しているのかを調べるため、透過型電子顕微鏡(TEM)を用いた観察を行いました。TEMは、非常に薄くした試料に電子線を透過さ

せることで、原子レベルで結晶構造や各層の重なり方を直接観察できる手法です。図2(a)のTEM像では、ダイヤモンド基板の上に、c-BN薄膜、c-BScN薄膜が順に積み重なって成長している様子が確認できます。図2(b)はc-BScN薄膜領域の制限視野電子線回折像^{*6}です。この結果から、c-BScN薄膜がダイヤモンド基板の結晶構造を引き継いでエピタキシャル成長していることが分かります。c-BScN薄膜中のScの分布状態は、走査透過型電子顕微鏡とエネルギー分散型X線分析(EDS)を組み合わせた元素マッピングにより評価しました(図3)。

- *3 エピタキシャル成長: 下地となる結晶(基板)の原子の並びと同じ向き・同じ並び方を保ったまま成長することです。結晶の向きがそろわないため、欠陥が少なく、高品質な薄膜をつくりやすいという利点があります。
- *4 ヘテロ構造: 異なる半導体材料を接合してつくられる構造です。
- *5 マグネトロンスパッタリング法: 真空中で原料にプラズマ中のイオンを衝突させ、その際に叩き出された原子を基板上に堆積させる薄膜成長法です。磁場を用いてプラズマを安定化・高密度化することで、低温でも成膜が可能で、膜厚や組成を精密に制御しやすいという特徴があります。
- *6 電子線回折: 結晶に電子線を透過させたときに、結晶中の規則正しい原子配列によって電子線が特定の方向に散乱し、点やリング状の模様(回折パターン)が現れる現象です。この回折パターンを解析することで、結晶の構造や結晶の向き(方位)が分かります。

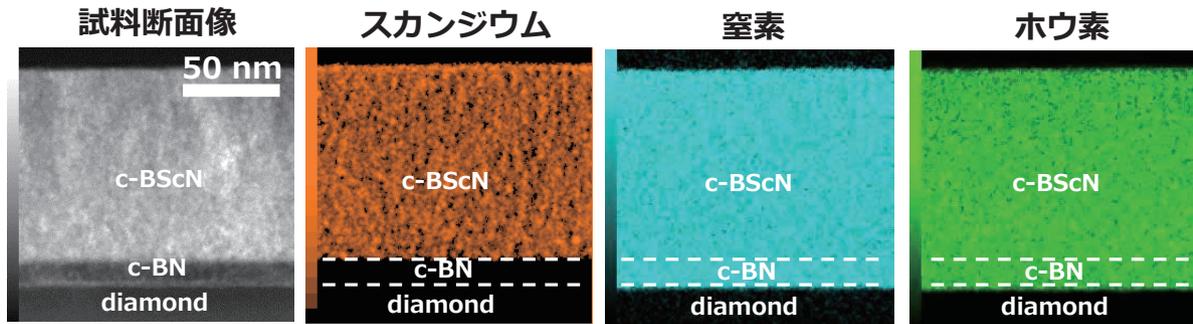


図3 c-BScN薄膜の断面TEM像とEDSによるSc, N, Bの元素マッピング像

EDSは、電子線を照射した際に試料から放出される元素固有のX線を検出する手法であり、元素ごとの存在を調べることができます。その結果、ダイヤモンド基板からはC、c-BNバッファ層からはBとN、c-BScN薄膜からはB、Sc、およびNがそれぞれ検出され、層構造に対応した元素分布が確認されました。また、Scはc-BScN薄膜全体にわたって均一に分布しており、特定の領域への偏在はありません。以上の結果から、Scが均一に取り込まれたc-BScN薄膜がダイヤモンド基板上にエピタキシャル成長していることを確認しました。

図4にSc組成の成長温度依存性を示します。各温度で、Scの供給量は同じにしています。Sc組成は図5のようにX線逆格子空間マッピングと呼ばれる結晶構造解析手法を用いて見積もりました。その結果、成長温度が低いほど、c-BScN薄膜中に取り込まれるScの量が多くなることが分かりました。860℃で成長した試料におけるSc組成は約1.1%です。このように成長温度によって、c-BScN薄膜中のSc組成を制御できることが分かりました。組成制御は、材料の電氣的・機械的な性質を意図的に設計するうえで重要であり、将来的なデバイス応用に向けて基盤となる重要な知見です。一方で、1100℃以上の成長温度では、c-BScNとして混ざり合うのではなく、c-BNと岩塩構造を持つScNがそれぞれ別々の結晶として成長しました。このよう

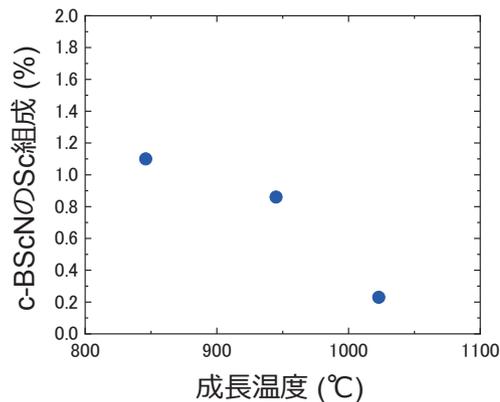


図4 c-BScN中のSc組成の成長温度依存性

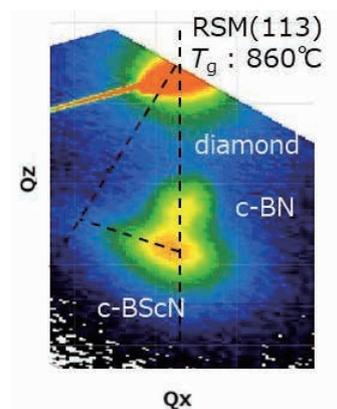


図5 典型的なc-BScN薄膜のX線逆格子空間マッピング像

な「相分離」が起こると、Scはc-BScNの結晶中に取り込まれにくくなり、結果として薄膜中のSc組成が低下したと考えられます。

放射光によるc-BScNの結合状態の評価

c-BScN薄膜中におけるSc原子の結合状態を詳しく調べるために、高輝度放射光施設「ナノテラス (NanoTerasu)」におい

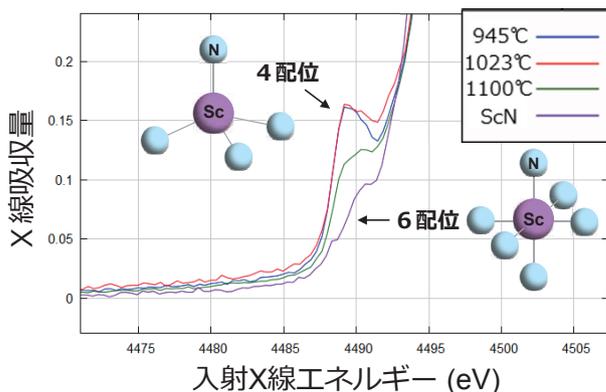


図6 c-BScNのScの内殻電子に対応するXANESスペクトル

て XAFS (X-ray Absorption Fine Structure) 測定を行いました。XAFSは、特定の元素に注目し、その原子の周囲にどのような原子が、どのように配置されて結合しているかを調べることができる手法です。中でも XANES (X-ray Absorption Near Edge Structure) は、原子の結合の仕方や配位数の違いに敏感であり、新材料 c-BScN 中で Sc 原子がどのように結晶へ取り込まれているかを明らかにするためには非常に有効です。こうした評価には、高輝度かつ入射する X 線のエネルギーを可変できる放射光が不可欠となります。よって、このナノテラスの高輝度放射光を用いることで、ナノメートルオーダーの極薄膜中の元素に対しても、高い信号対雑音比で精密な XANES 測定が可能になりました。

図6に示すように、Scの内殻電子に対応するXANESスペクトルを測定したところ、4490 eV付近に特徴的なピークが確認されました。このピークは、Sc原子が4配位構造をとる場合に現れることが知られており、Scが岩塩構造を持つScNのような6配位構造とは異なる結合状態にあることを示しています。さらに、Sc原子がc-BScN結晶中のどの位置に取り込まれているのかをより詳しく理解するために、第一原理計算を用いた解析も行いました。第一原理計算とは、実験データに頼ることなく、量子力学に基づいた物理法則から、原

子や電子の振る舞いを計算する理論手法です。この計算を用いることで、「どの原子位置に入るとエネルギー的に安定か」や、「どのような結合状態をとるか」を理論的に予測することができます。本研究では、Sc原子がc-BScN結晶中でN原子の位置に置換した場合と、B原子の位置に置換した場合について、それぞれXAFSスペクトルのシミュレーションを行いました。その結果、Sc原子がN原子の位置にあると仮定した場合のシミュレーションでは、ピークの強度やエネルギー位置が実験結果と大きく異なるのに対し、Sc原子がB原子の位置にあると仮定した場合では、実験結果と近い特徴的なピーク形状が見られました。これらの実験結果と理論計算を総合すると、c-BScN薄膜中のSc原子は、閃亜鉛鉱構造の結晶格子中でB原子の位置を置換して取り込まれていることが示唆されます。本研究で得られたこうした知見は、c-BScNに限らず、他のc-BN系三元混晶材料を探索する際にも有効です。準安定相材料において、異種元素を結晶格子中へ安定に取り込むための条件設計は、新材料探索を進めるうえで重要な指針となります。

まとめと今後の展望

本研究ではマグネトロンスパッタリング法により、ダイヤモンド基板上への

c-BScN薄膜のエピタキシャル成長と、成長温度によるSc組成制御を世界で初めて実証しました。また、放射光によるXANES測定と第一原理計算を組み合わせることで、Scがc-BN格子中のBサイトに置換して取り込まれていることを明らかにしました。今後は、c-BScNのSc高組成化による物性変調およびc-BN系ヘテロ構造を用いたパワーデバイス応用に取り組みます。

参考文献

- (1) J. Y. Tsao, et al. : "Ultrawide-Bandgap Semiconductors: Research Opportunities and Challenges," Adv. Electron. Mater., Vol.4, No.1, 1600501, 2018.
- (2) 平間・谷保・山本・熊倉: "新機能ワイドギャップ半導体材料の開拓," NTT技術ジャーナル, Vol.31, No.8, pp.29-34, 2019.
- (3) 前田・谷保・熊倉・平間: "立方晶窒化ホウ素スカンジウム(c-BScN)薄膜のマグネトロンスパッタリング成長," 第72回応用物理学会春季学術講演会予稿集, 17a-K401-9, 2025.



(左から) 前田 亮太 / 谷保 芳孝 / 平間 一行

自らの手と頭を使い新たな物質を創り出し、その物理的特性を評価することは、たくさんの困難にも直面しますが、それが基礎研究の醍醐味でもあり、世界で初めての実験結果が得られたときには、何ものにも代えがたい喜びを感じます。

◆問い合わせ先

NTT 物性科学基礎研究所
多元マテリアル創造科学研究部
薄膜材料研究グループ



ダイヤモンド半導体のスピンデバイス応用に向けた取り組み

ダイヤモンド半導体は、半導体物性とスピン物性が共に優れていることから、スピントロニクスにおける次世代基盤材料として期待されています。本稿では、ダイヤモンド半導体へのスピン注入の実現という課題に対し、強磁性金属とダイヤモンド半導体の接合界面に形成されるショットキー障壁をトンネル障壁として活用するアプローチに着目し、パーマロイ合金をショットキー電極としたダイヤモンド半導体ショットキーバリアダイオードにおける電流輸送機構の解明に取り組んできた成果について紹介します。

キーワード：#ダイヤモンド、#ショットキーバリアダイオード、#トンネル効果

スピントロニクスにおけるダイヤモンド半導体の魅力

ダイヤモンドは誰もが知る宝石であり、その輝きは古くから人類を魅了し続けてきました。このような宝飾品としての魅力に加え、ダイヤモンドは半導体としても優れた物性を持っており、近年では「究極の半導体」としても大きな注目を集めています。そもそもダイヤモンドは炭素からなる絶縁体であり、そのままでは半導体として利用することはできません。しかし、高温高压合成法や化学気相成長（CVD）法によって人工的にダイヤモンドをつくる過程で、炭素の一部をボロンで置換する高度な不純物制御を行うことで、ダイヤモンドはp型（正孔が多い）半導体としての機能を獲得します。ダイヤモンド半導体は、バリガ性能指数*1がすでに産業的成熟が進んでいるSiC（炭化ケイ素）やGaN（窒化ガリウム）を凌駕しており、パワーデバイス用の次世代基盤材料としての応用が期待されています。

上記の魅力に加え、ダイヤモンドはスピン物性も優れているため、スピントロニクスへの応用も期待されています。「スピン」とは磁性の起源となるスピン角運動量を指し、「スピントロニクス」とはスピンとエレクトロニクスの融合により、電荷を情報担体とする従来のデバイスでは実現困難な新機能の創出をめざす研究分野です。一般に、スピンは時間の経過や伝播の過程で失われる非保存量であるため、電荷と比べて取り扱いが難しいという課題があります。ダイヤモンドは、小さなスピン軌道相互作用や低い核スピン密度など、他の半導体と

比べてスピンのデコヒーレンス源が少ないため、半導体の中でもっともスピンを長寿命に扱える可能性を秘めています。実際に、ダイヤモンド中に存在する窒素と原子空孔の複合体であるダイヤモンドNVセンタは単一スピンを持っており、固体材料の中で最長クラスであるミリ秒オーダーの室温スピンコヒーレンス時間を示します。この特性を活用した量子センサや量子ネットワークの研究は、ダイヤモンドスピントロニクスの先駆的研究として位置付けられます。一方で、ダイヤモンドNVセンタに束縛されたスピンではなく、偏極したスピンを持った電荷の流れ、すなわちスピン流をダイヤモンド半導体中に生成できれば、スピン流を媒介として空間的に離れたダイヤモンドNVセンタ間のスピン状態を操作できるようになる可能性があります⁽¹⁾。ダイヤモンド半導体は、スピン拡散長*2が半導体中でもっとも長いと期待されており、このような量子機能を室温で実現し得る数少ない基盤材料の1つです。しかし、ダイヤモンド半導体のスピン拡散長の真の値はまだまだ明らかになっておらず、スピン拡散長をはじめとする基礎的なスピン物性の解明はスピンデバイス応用を見据えたうえで不可欠です。したがって、ダイヤモンド半導体は、産業的にも学術的にも極めて価値の高い研究対象であるといえます。

半導体中にスピン流を生成し、検出するための信頼性の高い測定法として、非局所スピンバルブ測定法があります（図1）。スピンバルブとは、スピン注入・検出電極とスピンチャンネルで構成されるデバイスであり、通常、スピン注入・検出電極には強

か 野 慎
た に や す よ し た か
谷 保 芳 孝
ひ ら ま か ず ゆ き
平 間 一 行

NTT 物性科学基礎研究所

磁性金属が用いられます。また、半導体のスピンチャンネルへのスピン注入のためには、強磁性金属と半導体の間にトンネル障壁を挿入し、トンネル効果*3によってトンネル障壁を通過するスピンを持った電荷の量、言い換えると界面抵抗を制御する手法が定石となっています⁽²⁾。そこで、私たちは、強磁性金属とダイヤモンド半導体の接合界面に形成されるショットキー障壁*4をトンネル障壁として利用することに注目し、ニッケルと鉄を8：2の割合で混合した強磁性パーマロイ合金をショットキー電極としたダイヤモンド半導体ショットキーバリアダイオードの評価を行ってきました。本稿では、その成果について紹介します。

p型ダイヤモンド半導体のマイクロ波プラズマCVD成長

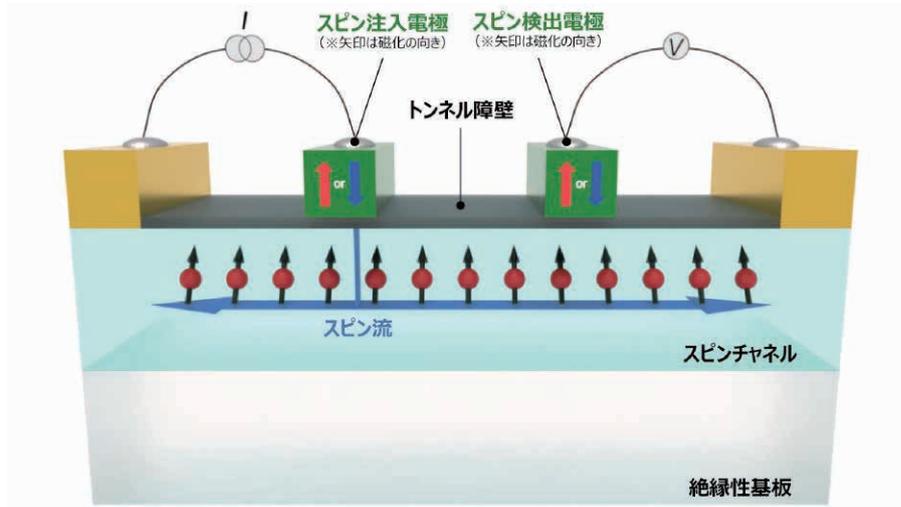
p型ダイヤモンド半導体の結晶成長法の中でも、マイクロ波プラズマCVD法は不純物濃度を高精度に制御したp型ダイヤ

*1 バリガ性能指数：パワーデバイス用途の半導体の性能指数。キャリア移動度、絶縁破壊電界、誘電率によって決まります。

*2 スピン拡散長：偏極したスピンの物質中を伝播する過程で減衰して消失するまでの距離。

*3 トンネル効果：量子力学において、粒子の波動関数が古典的には越えられないポテンシャル障壁を有限の確率で透過する現象。半導体および超伝導体におけるトンネル現象の研究は1973年のノーベル物理学賞の対象となり、巨視的量子系におけるトンネル現象の研究は2025年のノーベル物理学賞の対象となりました。

*4 ショットキー障壁：金属と半導体を接触させたとき、両者のフェルミ準位が一致するまで電荷移動が生じ、その結果として半導体側に形成されるポテンシャル障壁。



スピン注入電極とスピン検出電極の磁化が平行配置（↑↑または↓↓）のとき、スピン検出電極で検出されるスピン電圧が小さく、反平行配置（↑↓または↓↑）のとき、スピン電圧が大きくなる。この差異が、いわゆる非局所磁気抵抗（ $\Delta V/I$ ）であり、スピン注入・検出の証左となる。

図1 非局所スピンバルブ測定のご概念図

ンド半導体をつくるのに適した手法です。私たちは、マイクロ波プラズマCVD装置を用いて、高品質なp型ダイヤモンド半導体をダイヤモンド基板上に成長させる技術を持っています（図2）。結晶成長開始前のCVDリアクタ内は、真空度を約 1.0×10^{-7} Torr（大気圧の約76億分の1）以下に保っており、結晶成長に影響を及ぼすH₂O（水蒸気）やO₂（酸素分子ガス）などの意図しない不純物ガスが気相中にほとんど存在しないクリーンな環境を実現しています。結晶成長開始時には、CVDリアクタ内に原料ガスとしてH₂（水素分子ガス）、CH₄（メタンガス）、およびC₃H₃B（トリメチルボロンガス）を導入します。結晶成長中の真空度は約25 Torrに保持されており、周波数2.45 GHz・最大出力1.5 kWのマイクロ波を投入することで、ダイヤモンド基板上にプラズマが生成されます。このプラズマによって、原料ガスはラジカルと呼ばれる反応性の高い活性種に分解されます。これらのラジカルが800℃～1000℃に加熱されたダイヤモンド基板表面に供給されると、ダイヤモンドを構成する炭素のsp³結合成分だけが基板表面で選択的に成長し、

CVDリアクタ

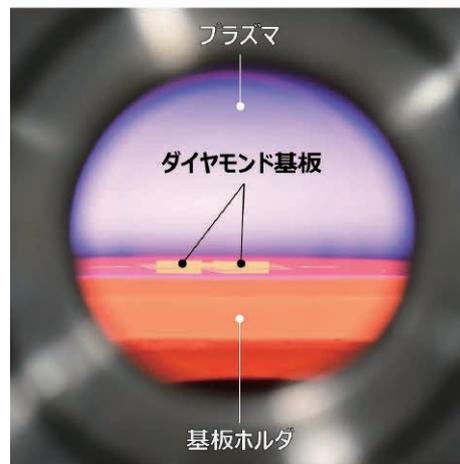


図2 覗き窓から観察したp型ダイヤモンド半導体の結晶成長中の様子

その炭素の一部がボロンで置換されることでp型ダイヤモンド半導体がダイヤモンド基板上に形成されます。

パーマロイ合金をショットキー電極としたダイヤモンド半導体ショットキーバリアダイオード

続いて、p型ダイヤモンド半導体上にパー

マロイ合金を電子線蒸着法により堆積し、パーマロイ合金とダイヤモンド半導体の接合界面付近の結晶構造やパーマロイ合金の磁気特性を評価しました。図3(a)は、作製した構造を断面方向から観察した透過型電子顕微鏡（TEM）像を示しています。p型ダイヤモンド半導体は、炭素原子がsp³結合によって規則正しく配列した結晶構造を持っていることが分かります。また、パー

マロイ合金とダイヤモンド半導体の接合界面はナノメートルレベルで急峻であり、スピン注入効率の低下を引き起こす界面反応層の形成は確認されませんでした。図3(b)は、パーマロイ合金の磁気ヒステリシス曲線を示しています。十分に大きな正磁場を印加した場合、磁化は約820 emu/cm³で飽和しています。これは、パーマロイ合金中のスピンが同一方向にそろい、材料全体として大きな磁気モーメント（磁石としての強さと向き）を持っていることを示しています。一方で、正磁場から負磁場へと磁場を徐々に変化させると、負磁場に転じた後に磁化が急峻に正から負へ反転する挙動

が観測されました。これは、パーマロイ合金中のスピンの向きが一斉に反転したことを意味しており、スピンバルブに用いられるスピン注入・検出電極として不可欠な磁気特性を持っていることを示しています。

続いて、パーマロイ合金とダイヤモンド半導体の積層構造を、図4(a)に示すショットキーバリアダイオードに加工しました。図4(b)は、ボロン濃度が $8.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ （炭素原子約22万個に対してボロン原子がわずか1個）となるように制御されたp型ダイヤモンド半導体を用いたショットキーバリアダイオードの電流密度-電圧特性を示しています。順バイアス下 ($V < 0$) では電

流密度が急峻に増加しており（電流オン）、逆バイアス下 ($V > 0$) では電流密度がほぼゼロに抑えられています（電流オフ）。つまり、本デバイスは電子回路の教科書に載っているような典型的なショットキーバリアダイオードの整流特性を示しています。さらに、このデバイスの静電容量-電圧特性から、ショットキー障壁高さは約1.96 eVと見積もられました。以上の結果から、図4(c)のエネルギーバンド図に示すように、パーマロイ合金とダイヤモンド半導体の良質な接合界面に起因したショットキー障壁が形成されていることが確認されました⁽³⁾。

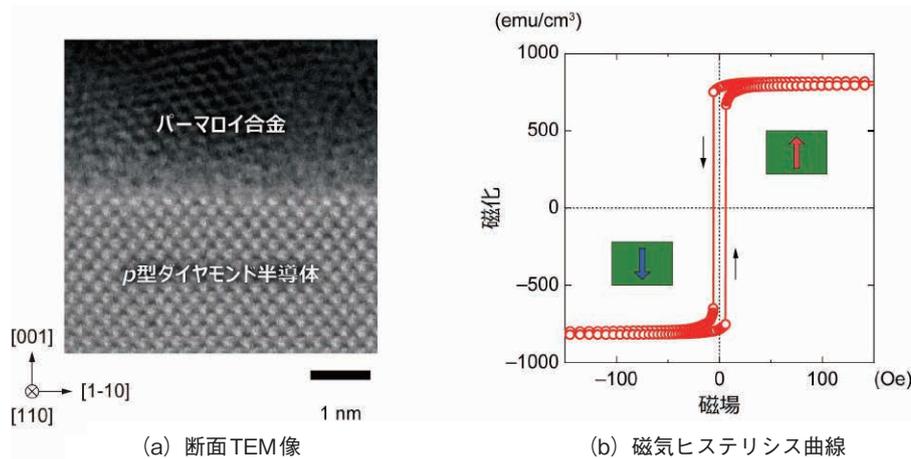


図3 パーマロイ合金とダイヤモンド半導体の積層構造の結晶構造および磁気特性

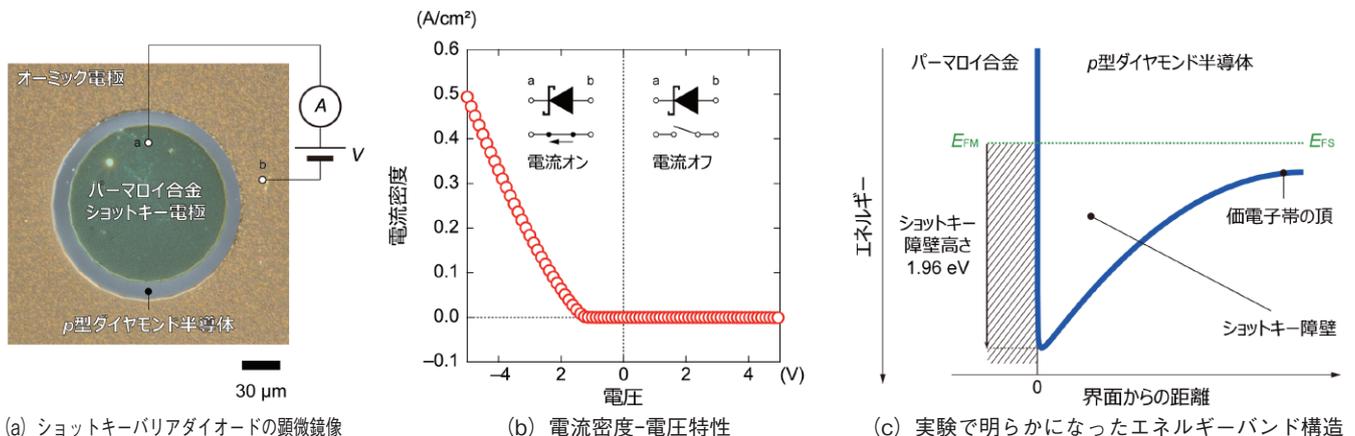


図4 パーマロイ合金をショットキー電極としたダイヤモンド半導体ショットキーバリアダイオードの実現

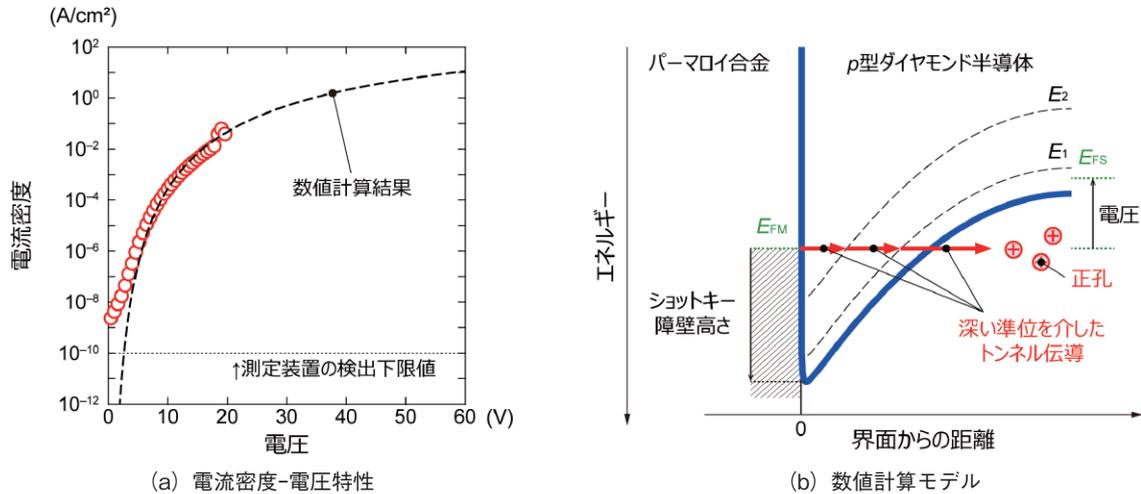


図5 逆バイアス下における電流輸送機構の解明

ショットキー障壁を介した電流輸送機構の解明

続いて、スピンのパーマロイ合金からp型ダイヤモンド半導体へと注入される方向に相当する逆バイアス下 ($V > 0$) における電流輸送機構を調べました。図4 (b)と同じショットキーバリアダイオードに高い逆バイアスを印加したところ、図5 (a)に示すように電流が徐々に流れ始めることが分かります。この電流の起源を検討するため、図4 (c)のエネルギーバンド構造を基にして、図5 (b)の数値計算モデルを構築しました。このモデルでは、p型ダイヤモンド半導体の価電子帯の頂よりも上に存在する深い準位を介したトンネル伝導の寄与を考慮しています。深い準位には、ボロンのアクセプタ準位 ($E_1 = 0.37$ eV) および先行研究で報告されているボロンダイマーに起因した準位 ($E_2 = 1.21$ eV)⁽⁴⁾を仮定しました。このモデルを用いて計算した逆方向電流密度-電圧特性を図5 (a)の黒破線で示していますが、実験結果とよく一致していることが分かります。すなわち、パーマロイ合金からp型ダイヤモンド半導体へと流れる電流の支配的な輸送機構は、深い準位を介したトンネル伝導であることを初めて見出しました。以上の結果から、パーマロイ合金と

ダイヤモンド半導体の接合界面に形成されたショットキー障壁は、スピン注入用のトンネル障壁として利用の可能性が期待されます。

今後の展開

本稿では、ダイヤモンド半導体のスピンデバイスへの応用に向けた取り組みの一環として、パーマロイ合金をショットキー電極としたダイヤモンド半導体ショットキーバリアダイオードにおける逆バイアス下の電流輸送機構の解明に関する成果を紹介しました。今後、得られた構造をスピバルブへと加工し、スピン注入の実証や、それに伴うダイヤモンド半導体のスピン物性解明に向けて取り組んでいきます。

参考文献

- (1) M. W. Doherty, C. A. Meriles, A. Alkauskas, H. Fedder, M. J. Sellars, and N. B. Manson: "Towards a room-temperature spin quantum bus in diamond via electron photoionization, transport, and capture," *Phys. Rev. X*, Vol. 6, No. 4, 041035, 2016.
- (2) A. Fert and H. Jaffrès: "Fundamental obstacle for electrical spin injection from a ferromagnetic metal into a diffusive semiconductor," *Phys. Rev. B*, Vol. 64, No. 18, 184420, 2001.
- (3) M. Kawano, C. Cunha, K. Hirama, K.

Kumakura, and Y. Taniyasu: "Ferromagnetic permalloy/p-type boron-doped diamond Schottky barrier diodes," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 126, No. 1, 012107, 2025.

- (4) P. Muret, J. Pernot, A. Kumar, L. Magaud, C. Mer-Calfati, and P. Bergonzo: "Deep hole traps in boron-doped diamond," *Phys. Rev. B*, Vol. 81, No. 23, 235205, 2010.



(左から) 河野 慎 / 谷保 芳孝 / 平間 一行

ダイヤモンド半導体は、私たちの豊かな未来を支えるうえで鍵を握る次世代半導体材料です。NTT物性科学基礎研究所では、スピンの活用も視野に入れた基礎研究を通じて、世界が驚くようなエポックメイキングな成果の創出をめざしていきます。

◆問い合わせ先

NTT 物性科学基礎研究所
多元マテリアル創造科学研究部
薄膜材料研究グループ

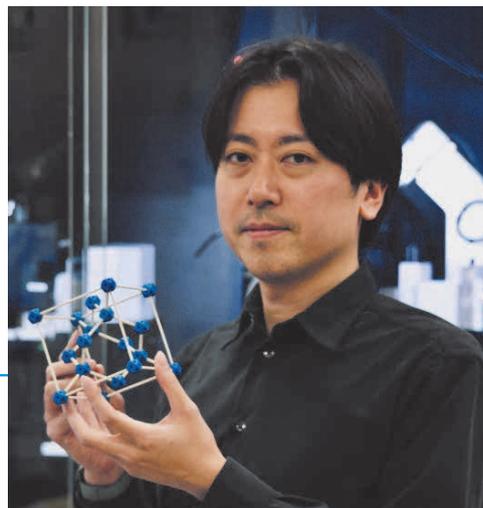


主役登場

ダイヤモンド半導体の新機能開拓への挑戦

河野 慎 Makoto Kawano

NTT 物性科学基礎研究所
多元マテリアル創造科学研究部
薄膜材料研究グループ
研究主任



小学生時代の理科の授業で、誰もが磁石を片手に砂場で砂鉄を集める経験をしたのではないのでしょうか。当然ながら、磁石は電池を使わずに砂鉄を集めることができますが、この磁石の性質の担い手が、「スピン」です。スピンは「上向き」や「下向き」といった向きの情報（磁石のN極やS極に相当）を持ち、これを古典情報の「0」や「1」に対応させることで、消費電力ゼロでも失われない不揮発性の情報として扱うことができます。例えば、ハードディスクドライブの基本要素であるプラッタには微小な磁石がコーティングされており、その配列によって「00110101…」のような二進数の情報が記録されています。これらの情報は磁気ヘッドによって読み書きされますが、この性能向上に大きく貢献した巨大磁気抵抗効果は、スピントロニクスを代表する現象であり、2007年にはノーベル物理学賞に輝いています。スピントロニクスはあまり聞きなじみのない研究分野かもしれませんが、実は多くの皆さんが、すでにスピントロニクスの恩恵を受けているのです。

現在、実社会で活躍しているスピンデバイスの機能を支える材料は、主に磁石の性質を持つ金属、すなわち強磁性金属です。もし半導体においてもスピンを自在に制御できるようになれば、電荷を情報担体とした従来の半導体デバイス（例えば、メモリや論理回路）では避けられない電力消費問題の解決だけでなく、スピンの量子的性質

を活用した新しい量子機能デバイスの実現も期待されます。しかし、これまで約70年間エレクトロニクスを支えてきたシリコン半導体でさえ、スピンの活用は依然として基礎研究段階にとどまっており、新たな基盤材料の探索が求められています。

私は、もともと強磁性金属や半導体から程遠い情報工学を学んでいましたが、古典情報の根源が固体物理学にあることに魅せられて、学生時代に思い切って分野を転向しました。大学院時代の所属研究室では、強磁性金属やゲルマニウム半導体の結晶成長やそのスピンデバイスに関する研究に従事し、博士（工学）の学位を取得しました。NTT入社後に配属された研究グループは、ダイヤモンドや窒化物などのウルトラワイドバンドギャップ半導体の結晶成長やそのパワー・高周波デバイス应用に関して豊富な知識と優れた技術を持っていました。ウルトラワイドバンドギャップ半導体の中でも、ダイヤモンド半導体はスピンを長寿命に活用できる基盤材料としての高いポテンシャルを持っていることから、自身のこれまでの経験がグループの強みであるウルトラワイドバンドギャップ半導体研究に新たな応用展開をもたらすと考え、ダイヤモンド半導体スピントロニクスという研究テーマを立ち上げました。本テーマを遂行するにあたって、ダイヤモンド半導体の結晶成長のためのマイクロ波プラズマCVD装置の立ち上げや、磁性材料の評価

のための測定装置の導入など、環境構築の段階から泥臭く研究を進めてきました。研究を軌道に乗せるまでには多くの試行錯誤を要しましたが、現在ではパーマロイ合金とダイヤモンド半導体の良質な接合界面に形成されたショットキー障壁を介したトンネル伝導を観測できるまでに至りました。特に、p型ダイヤモンド半導体中の深い準位を介したトンネル伝導はこれまで十分に解明されていなかった現象であり、本成果はスピントロニクスにとどまらず、パワーエレクトロニクスにおけるデバイス設計に対しても重要な指針を提供するものです。これにより、ダイヤモンド半導体研究分野のさらなる発展に寄与できると自負しています。

最後に、「Pressure makes diamonds」という言葉を紹介します。美しい輝きを放つ天然のダイヤモンドは、地中深くの超高压・超高温という過酷な環境下で生成されます。この言葉は、困難を乗り越えることで人は成長し、輝ける存在になれることを象徴しています。私はこの言葉を座右の銘として、ダイヤモンド半導体の新しいスピン機能の開拓をめざした「Zero to one」の基礎研究に挑むとともに、NTTにおけるダイヤモンド半導体研究の面白さを世界に向けて発信し続けていきたいと考えています。

持続可能なインフラ設備の実現をめざす研究開発

本特集では、社会インフラの老朽化が進む一方で維持管理の費用と人員が減少傾向にあるという課題に着目し、安心・安全の確保が困難化しつつある現状を踏まえて、持続可能性に配慮した材料・デバイス技術の創出により安全性と経済性を両立した持続可能なインフラの実現をめざすNTTの研究開発について紹介する。

インフラを持続可能にする研究開発 42

老朽化が進む社会インフラに対し、スマートメンテナンスと材料技術を組み合わせ、安全性と経済性を両立するインフラ技術の研究開発について紹介する。

通信インフラの適切な維持管理を実現するための設備個々の状態に基づく腐食劣化予測の試み 46

設備環境に応じた維持管理の高度化を目的に、マンホール内金属部材を対象とした加速試験と電気化学測定による腐食劣化評価の取り組みを紹介する。

通信インフラの長寿命化に向けたプラスチック材料の加速劣化試験に関する取り組み 50

通信インフラで用いられるプラスチック材料であるポリプロピレンを例として、劣化現象の再現性と加速性を両立する加速劣化試験の取り組みを紹介する。

インフラ

メンテナンス

レーザ

サステナブル

材 料

通信インフラの長寿命化を実現するレーザ-錆-鋼材間の現象解明の試み

54

通信インフラの補修周期延伸に向けて、レーザによる錆除去と表面改質に着目し、酸化鉄形成の理解に基づく長寿命化技術の研究開発を紹介する。

通信基盤設備の研究開発と社会インフラへの展開

59

通信を支える基盤設備を対象に進めてきた劣化評価や被災予測、AI（人工知能）を活用した点検・維持管理技術について、社会インフラ分野への展開を含めた研究開発の取り組みを紹介する。

主役登場 木内 康平 NTT先端集積デバイス研究所

63

インフラを原子から理解し、未来を守る



インフラを持続可能にする研究開発

NTT先端集積デバイス研究所 サステナブルデバイス研究部では、化学、物理の基礎知見をベースとする多種多様な技術分野の人材が、エンジニアリングやプログラミングなどのスキルをシームレスに組み合わせ、持続可能な社会の実現に資するサステナブル技術の研究開発に取り組んでいます。その1つがサステナブルインフラ技術です。NTTグループ内の通信インフラだけでなく社会インフラ全体を対象に、維持管理における安全性と経済性を両立したインフラの実現をめざしています。

キーワード：#インフラ, #スマートメンテナンス, #材料

つだ まさゆき
津田 昌幸
もちづき しょうじ
望月 章志
みねた しんご
峯田 真悟

NTT先端集積デバイス研究所

サステナブルインフラ技術

2025年はインフラの老朽化による大きな事故として、埼玉県八潮市の下水道管崩壊による道路の陥没（設置後42年）、沖縄県での導水管（ダムから浄水場へ水を送水する導水管）破裂による広域での断水（設置後59年）がありました。これら事故は社会インフラの老朽化が一斉に進んでいる一方で、維持管理費用や人員の減少傾向で安心・安全の担保が困難になっていることが目の当たりにされた例でした。もちろん、NTTグループが通信インフラを真摯に維持管理しているのと同様に、これら現場の方々も維持管理を怠っていたわけではありません。しかし、今後も老朽化とリソース減少が重なっていくと、このような事故が起きるリスクは無視できないものとなります。

老朽化したインフラを新しくしても40年後には劣化します。インフラを事故なく使い続けていくこと、つまり持続可能にしていくためには、ただ新しく構築するだけで

はなく、適切に維持管理し、劣化を進みにくくすること、そして劣化していたら即座にメンテナンスすることが重要です。しかし、限られた費用と人員では維持管理を完璧にこなすことには限界があります。

NTT先端集積デバイス研究所 サステナブルデバイス研究部では、維持管理の費用削減、安全性向上の事業ニーズにこたえ、スマートなメンテナンス、サステナブルな材料の開発による、安全性と経済性とを両立した持続可能なインフラの実現を図るべくサステナブルインフラ技術の研究開発を行っています。

持続可能なインフラをめざして

持続可能なインフラとは何かを、私たちは以下のように考えています。まず前述のとおり、事故なく使い続けられること、つまり「安全性」の確保です。これにはインフラ設備そのものが壊れないことはもちろん、現場で維持管理を行う方々も安全に作業できること、例えばマンホールなど密閉

空間での酸欠や高所からの落下などの発生がないことです。次に維持管理の「経済性」です。維持管理には当然費用がかかります。たとえ優れた設備であっても、維持管理の費用が高すぎるとは使い続けていくことは難しくなります。また最近では循環型経済（サーキュラーエコノミー）^{*1}の考え方も重要であり、インフラ自体やインフラに使用する資源、材料について、リユースやリサイクルなど「資源循環」を考えていくことも重要です。さらに加えるなら、インフラの維持管理にロボットやAI（人工知能）といった新たな技術の導入は必須ですが、同時に人による作業が引き続き必要となる工程も多々残ると思います。そのため、作業者が容易に維持管理できる技術開発も持続可能なインフラの実現には必要だと考えています。

図1に、私たちの考える持続可能なイン

*1 循環型経済：資源を効率的に循環させ、持続可能な社会をつくとともに経済的な成長もめざす経済システム。

持続可能なインフラ

- 安全性** ・事故なく使い続けられ、安全に作業ができる
- 経済性** ・維持管理にかかる費用が少ない
- 資源循環** ・設備、材料のリユースやリサイクルができる
- 作業満足** ・作業が無理なく維持管理を行える

図1 持続可能なインフラの4つの要件

フラの4つの要件をまとめました。次に、この持続可能なインフラを実現するために、どのような研究開発をしているのか、しようとしているのかを紹介します。

4つの研究開発分野

図2に、サステナブルインフラ技術での研究開発において技術創出する4つの分野を俯瞰的に示します。

私たちは、インフラの維持管理に向け2つのアプローチを考えています。1つは、現在劣化しているのか、いつごろ寿命を迎えるのか、という状態を「知る」ことです。そしてもう1つが、対処方法となる「変える」というアプローチです。

また、時間軸も2つに分けて考えています。既存のインフラについて「今」どうするかと、「未来」はどうしていくべきか、また「未来」に導入するインフラはどうあるべきかの、「今」と「未来」です。

2つのアプローチと2つの時間軸を組み合わせたものが4つの分野です。

1番目の分野は「今を変える」ための「メンテナンス」です。既存の設備を長く使い続けるために、維持管理の作業を効率化したり、設備自体を延命化することをめざします。作業の効率化では、例えば自動化な

どで維持管理に必要な時間や人員を削減します。設備の延命化では、より長く使用できる補修方法の導入で、点検の周期を延伸あるいは更改の頻度を削減することで、維持管理にかかる費用や時間を削減します。また、使いやすいメンテナンス方法やツール開発は作業者の満足につながります。

2番目の分野が「今を知る」ための「センシング」です。優れたメンテナンス技術があっても最適なタイミングでメンテナンスを行わず、短い周期のままでは効率は悪いまです。また逆に、劣化しているのにメンテナンスを長期間行わなければインフラの故障につながり、結局は短時間での更改が必要になってしまいます。そのために定期的に点検作業を行っていますが、例えば遠隔でインフラの状態を知ることができると、この点検にかかる費用や人員を削減することが可能になります。またインフラの劣化や異常をリアルタイムに検知することができれば、インフラの故障を未然にかつ効率的に防ぐことができるでしょう。

3番目の分野は「未来を知る」ことです。設置されたそれぞれの自然環境下において、インフラの劣化が、どのように、どれくらいの期間で進行していくのかを予測することです。既存のインフラについて劣化の進行を予測することができれば、劣化が早い

設備は早期にメンテナンスすることで、劣化させずに長期間使い続けることが可能になります。ただしメンテナンスコストと更改コストを考慮したライフサイクルコストの最適化は必要です。劣化の遅い設備を明確に判別することができれば、メンテナンスの周期をぎりぎりまで伸ばすことで、維持管理にかかる費用や時間を削減できます。

最後の4番目が、「未来を変える」ことです。「未来を知る」ための劣化予測とは、すなわち、インフラが劣化する環境要因や構成材料の特性を明らかにすることです。逆にいえば、このような知見を蓄積していくことで、将来導入していく新規のインフラへ劣化に耐性のある材料を採用したり、劣化しにくい設計を実施することも可能になり、究極的にはメンテナンスフリーのインフラの実現も期待できるかもしれません。また、リサイクルしやすい設計や環境負荷の低い材料を考慮した設計を行うことで、資源循環にも貢献できます。

劣化の進行予測に基づいて設計され導入されたインフラとはいえ、メンテナンスフリーでない限りは、効率的なメンテナンス方法、劣化や異常のセンシングが必要になります。新たなインフラ設備の導入に合わせて4つの分野それぞれの技術開発を進めていくことで持続可能なインフラを実現していきます。

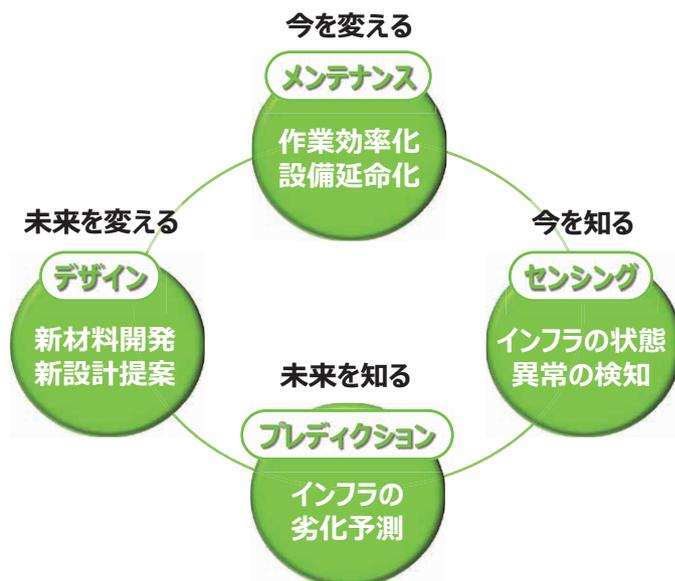


図2 サステナブルインフラ技術を創出する4つの分野

スマートメンテナンス技術研究グループ

スマートメンテナンス技術研究グループでは、主に「今を変える」「今を知る」ための技術開発を担っています。レーザ工学と電磁波工学を基盤に、物理学と化学に基づく現象把握と現場適用の知見を活かすことによって、省力化・省人化および安心・安全な労働環境の提供を可能とする次世代メンテナンス技術の創出を目標としています。その中で、劣化物を非接触で除去可能な高出力レーザを活用したインフラクリーニング技術を軸に、設備の状態把握や異常検知、作業の効率化や設備延命化に資する

研究開発を推進しています。

鋼材で構成されている通信用鉄塔の長寿命化には、錆の発生を抑制する技術とともに除去する技術が重要です。錆の除去には電動工具や金属ブラシを使っていますが、人手による作業が必須です。また狭い場所やボルト周りの錆を除去しにくいという問題もあります。狭い部分での錆を除去する技術として、砂を高速に打ち込むサンドブラスト法が挙げられますが、砂を回収する手間がかかるため利用が困難です。このような作業を効率化し、省力化や安全性の向上につなげていくためには、錆除去作業を担う機器は小型軽量で反動を小さくする必要があり、将来的にロボティクスやAIを組み合わせ、作業の高度化が図れる可能性があります。この観点で、私たちはハイパワーレーザーを用いた錆取り工具（除錆レーザー）に注目しています。

なお、スマートメンテナンス技術研究グループでは、図3に示すように、除錆レーザー、レーザー素地調整、LiDAR (Light Detection and Ranging : レーザ測距)*²

* 2 LiDAR : レーザ光が物体に当たって跳ね返ってくるまでの時間を計測し、物体までの距離や方向を測定する測距方法。

の3つの技術領域を中心に研究開発を進めています。

これまでに、回折素子と呼ばれるデバイスを活用し、小型で軽い除錆レーザーの開発に取り組んできました。回折素子は基板上の微細構造で入射光の位相を変調するホログラム技術を応用したデバイスで、数gと軽量の素子ながら入射するレーザー光の形状を所望の形状に変換できます⁽¹⁾。この特長を活かして、レーザー光を点から線に広げることで作業の高速化に挑戦してきました。このような検討を重ねてきた中で、効率良く錆を除去するための適切なレーザー照射条件を探り、鋼材の表面を劣化が発生しにくい安定状態にするレーザー処理の可能性を見出すなど、除錆作業の効率化や省力化に寄与する中核技術として、ハイパワーレーザーと鋼材の反応に関する幅広い知見を蓄積してきました。さらに、これらの知見は、錆を除去するだけでなく、鋼材表面の化学的な状態を制御して再劣化を抑制するという新たな方向性にもつながっています。特に、補修後の再塗装が確実にいえるよう鋼材表面を適切な状態へ整える素地調整作業において、レーザー照射で形成される酸化物や表面状態を活用することで、長期間劣化しにくい表面を実現する研究へと展開しています。

また、このような省力化・高度化に向けた基盤技術の1つとして、LiDARを用いた高速・高精度の測距技術にも取り組んでいます。波長掃引光源と干渉計によって得られる干渉信号を一定時間間隔でサンプリングした後、独自のアルゴリズムで処理することで、高速かつ高精度な距離計測の実現を進めています。対象物までの距離をリアルタイム（ミリ秒オーダー）かつ高精度（マイクロメートルオーダー）に把握することで、ハイパワーレーザーを安全かつ確に扱うことができます。具体的には、作業対象となる構造物の位置や形状の把握、作業領域の確認などに活用でき、レーザー照射時の安全性確保に寄与します。

これらの技術開発は、除錆作業の効率化、高度化して「今を変える」技術を実現するべく、「今を知る」センシング技術についても研究開発を行っている事例であり、「経済性」「安全性」そして「作業者の満足」につながる技術開発をめざしています。

サステナブルマテリアル研究グループ

サステナブルマテリアル研究グループは、主に「未来を知る」「未来を変える」ための技術開発を担っています。各種インフラ

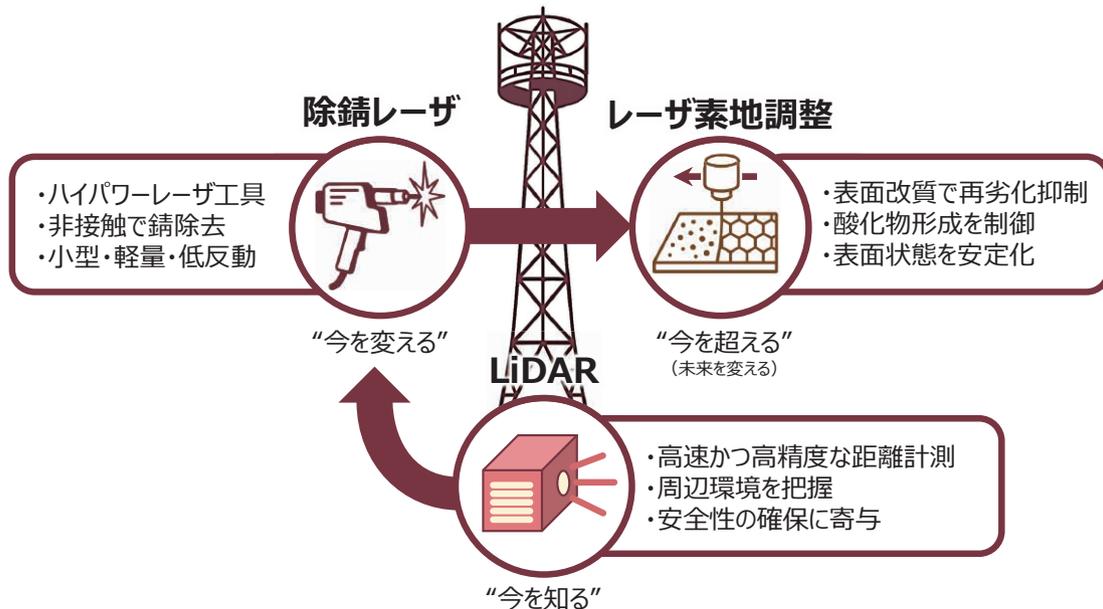


図3 スマートメンテナンス技術研究グループの主要技術領域（概念図）

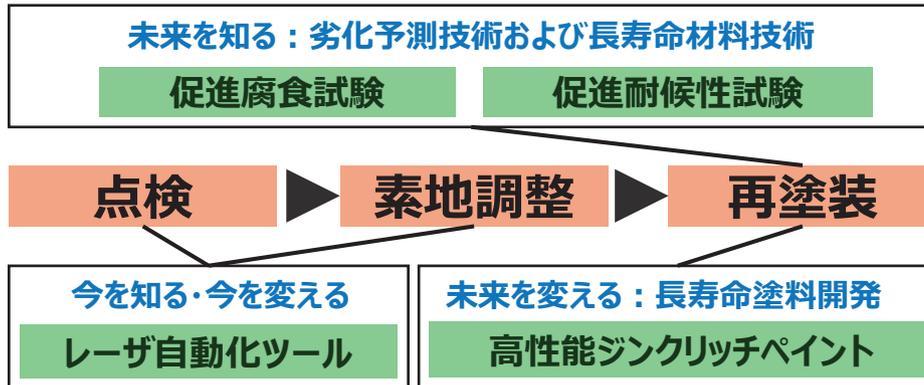


図4 通信用鉄塔のメンテナンスと開発技術

材料の化学分析技術、加速試験技術、劣化予測技術、データ分析技術を基盤技術として、劣化予測・環境予測に基づく効率的な設備保全や、補修による延命化、材料変更による長寿命化に資する研究開発を推進しています。

インフラ設備には、多種多様な材料が使用されています。例えば、鉄塔などに用いられる鋼材などの金属材料、電柱やマンホールなどに使用されるコンクリートが挙げられます。またクロージャや下部支線カバールに用いられるプラスチックなどの有機系材料もあります。設備で使用されるこれら材料は単独で用いられることは少なく、コンクリート構造物中には鉄筋が設置されますし、マンホール内部には各種金物や外被が高分子材料のケーブルがあり、また鉄塔などの鋼材設備には防錆のために有機系材料の1つである塗料がぬられています。またインフラ設備は屋外に設置されていることもあるため、さまざまな環境に晒されています。太陽光や降雨など気象変化のほか、平均気温も違えば、降雪地域や台風の多い地域、沿岸部など塩害を受けやすい地域などさまざまです。

このように、種々の材料がさまざまな環境に晒されるインフラ設備について、その安全性を高め持続可能にしていくためには、インフラ材料を適切な方法で評価・分析し、劣化機構の解明や優れた材料の選定による対策技術の提案につなげていくことが重要です。

劣化機構の解明には、実際の環境で生じ

る劣化と近い現象をより短時間で再現する加速試験方法を開発することで、環境や劣化要因（水や酸素、紫外線など）の違いにより、それぞれ異なる劣化の進行状況を明らかにしています。加えて、現場から回収した劣化部材や加速劣化させた部材について分析・評価したり、劣化進行中の状態を評価することにより、劣化機構の解明に取り組んでいます。

図4に、通信用の鉄塔を例に、劣化予測技術および長寿命材料技術に関するこれまでの取り組みを紹介します⁽²⁾。鉄塔は鋼材できており、この保護のために塗装されています。維持管理では、塗料が劣化していないか、鋼材が錆びていないかを点検する工程、錆びていた場合は次に古い塗料や生成した錆を落とす素地調整、そして最後に再塗装の工程で行われます。点検や素地調整にはスマートメンテナンス技術研究グループによるレーザを活用した省力化・高度化の技術が期待されます。一方で再塗装の工程において、劣化予測技術や長寿命材料技術の適用に取り組んでいます。また、促進腐食試験や促進耐候性試験など加速試験方法を、長寿命な塗料をスクリーニングする評価技術として開発しています。さらに、長寿命材料としてジンクリッチペイント（高濃度亜鉛粉末含有塗料）という塗料について、添加剤の工夫による性能向上を図る技術開発にも取り組んでいます。

これらは、インフラ設備がどのように劣化をしていくのか「未来を知る」ことで、適切な材料選択や設計を可能にし、持続可

能なインフラを実現し、「未来を変える」ことをめざす研究開発の一例です。「経済性」「安全性」に加えて、これからは「資源循環」も考慮した技術開発もめざしていきます。

参考文献

- (1) 川村・坂本・赤毛・上野・岡：“ハイパワーレーザデバイスを用いた錆取り技術の実現に向けて,” NTT技術ジャーナル, Vol.33, No.4, pp.56-58, 2021.
- (2) 木坂・清水・佐々木・津田：“IOWN実用化に向けたデバイス技術開発の取り組み,” NTT技術ジャーナル, Vol.37, No.5, pp.10-14, 2025.



(左から) 津田 昌幸 / 望月 章志 / 峯田 真悟

サステナブルデバイス研究部では、持続可能なインフラの実現だけでなく、炭素・資源のニュートラル化もミッションとし、持続可能性に配慮した材料・デバイス技術の創出によってサステナブル社会発展に貢献する研究開発に取り組んでいきます。

◆問い合わせ先

NTT先端集積デバイス研究所
サステナブルデバイス研究部



通信インフラの適切な維持管理を実現するための設備個々の状態に基づく腐食劣化予測の試み

持続的に通信インフラを維持管理するためには、個々の環境下における腐食挙動を正しく理解し、劣化を予測することが大切です。本稿では、マンホール内に設置された金属部材を対象とし、マンホール内の環境を模擬した加速試験の検討を行うことで、マンホール内金属の劣化を予測する取り組みを紹介します。
 キーワード：#金属腐食、#加速試験、#マンホール

とよた しん
豊田 新
 たけうち ようすけ
竹内 陽祐

NTT先端集積デバイス研究所

社会インフラの維持管理と腐食

社会インフラを構成する構造物には、鉄塔や橋梁、プラント設備など鉄を主体とする鋼構造物に加え、建築物の躯体や橋脚、擁壁に代表される鉄筋コンクリート構造物が数多く存在します。これらの長大な構造物は、主要部材だけでなく、それを支える多様な金属製部材や付属品によって機能が維持されています。鉄は高い力学特性に加え、経済性や加工性に優れ、さらにリサイクル性も高いことから、構造物の規模にかかわらず社会インフラを支える材料として広く利用されています。一方で、長期にわたる供用環境下では、こうした鉄材が腐食による劣化を受けるおそれがあります。腐食の進行は構造物の安全性や機能性を低下させるだけでなく、補修や更改の頻度を高め、社会的・経済的な負担の増大につなが

ります。腐食挙動を正しく理解し、劣化を抑制・予測する技術の高度化は、社会インフラの安全性と信頼性を支える基盤であると同時に、企業が保有する設備の維持管理費の低減にも寄与する重要な課題です。このような背景のもと、社会インフラを構成する個々の部材に着目し、その腐食挙動を把握することが重要です。

腐食挙動の評価の流れ

腐食挙動を評価するためには、実設備・暴露試験・加速試験^{*1}、それぞれに対して分析を行うことが重要です。まず実設備では、装置や構造物が実際に置かれている環境条件を明らかにするとともに、腐食の形態や分布を把握します。これにより、実環境と腐食の実態を踏まえた暴露試験や加速試験の設計が可能となります。暴露試験は、

実設備で生じるさまざまな腐食の進み方を把握するとともに、実環境に曝される初期状態から継続的に腐食挙動を観察できる点が特長です。ただし、評価には長い試験期間を要します。加速試験では、実設備での腐食要因の一部を強めることで劣化を加速させ、短期間でその影響を評価することができます。ただし、実環境とのずれが一定量生じることには注意が必要です。一方で、部材表面での腐食生成物の分析、断面の観察や電気化学測定などの分析を組み合わせることで多角的に評価することにより、腐食メカニズムの解明や腐食速度の把握、劣化過程の追跡、劣化予測につなげることが可能です。腐食評価の流れを図1に示します。

*1 加速試験：材料の耐久性・寿命・品質変化を、通常より厳しい条件下で短期間に評価し、長期的な性能や腐食挙動を予測する手法。

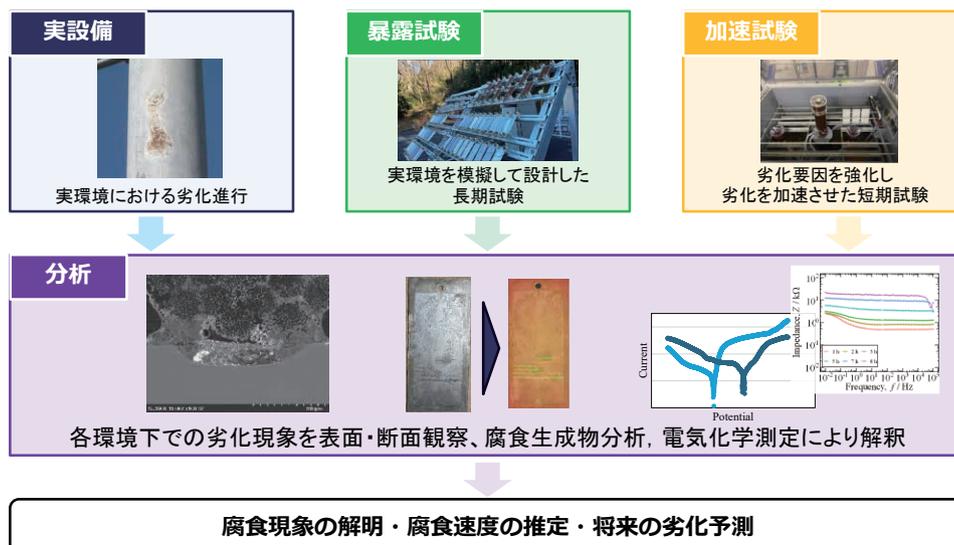


図1 腐食評価の流れ

NTTが保有する所外の通信構造物として、とう道、地下管路、マンホール、電柱などがあります。従来、それぞれの設備に対する現地調査、暴露試験、加速試験を実施し劣化予測することで、適切な維持管理を実現してきましたが、本稿では特にマンホール内に設置された金属部材を対象とした加速試験の検討事例を紹介します。

マンホールの維持管理

街中の道路や歩道で見かける鉄蓋をマンホールと呼ぶことがありますが、正確には、鉄蓋の下に構築された構造体をマンホールと呼びます。マンホールは水道設備として上水道や下水道の出入り口となります。一方、通信設備としてはケーブルの接続点となります。NTTは全国に約68万個の通信用のマンホールを保有しています。図2のようにNTTの通信ケーブルはマンホールを通して電柱へ架設されユーザ宅へ引き込まれます。この通信ケーブルは、私たちの日常生活に欠かせない通信インフラを支えるためにも、常に安定して稼働することが求められています。

現在、マンホールに対しては、360度カメラを用いて定期的にマンホール空間内の状態を記録し、劣化状況を確認する方法で点検を実施しています。今後、維持管理に携わる人員の減少に対応しつつ、維持管理費を抑制し、安心・安全な通信インフラを保つためには、点検稼働のさらなる効率化が必要です。そこで、NTTでは劣化予測により、劣化リスクの高いマンホールは早期に点検し、劣化リスクが低いマンホールは点検周期を延伸するなど、設備個々の状態に応じたメリハリのある維持管理手法の開発に取り組んでいます。

マンホール内部の付属金物が果たす役割

マンホールの維持管理では、マンホール躯体の管理のほか、管路と接続するためのダクトや通信ケーブルの牽引や保持するための金属部材が点検・補修対象となっており、点検の効率化には、それぞれの劣化を効率良く把握する必要があります。私たち

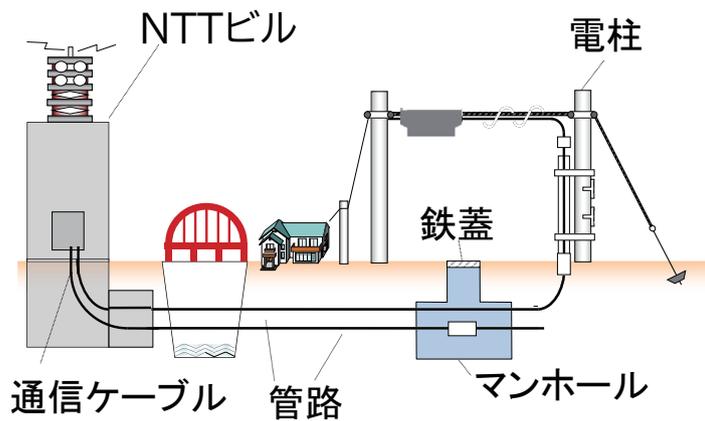


図2 NTTの通信設備



図3 マンホール内部での金物の設置状況と劣化事例

は、ケーブルを保持するためにマンホール内部に設置された付属金物に着目しています。マンホール内部では、敷設された通信ケーブルはコンクリート壁面に取り付けられた金物により支えられており、これにより作業員のケーブル接続や点検作業を容易にしています⁽¹⁾。そして、通信ケーブルは移動や落下を防ぐため、付属金物と紐で固定されています。

マンホール内部の腐食環境

マンホール内部には鉄蓋の隙間やダクトから流れ込んだ雨水、地下水が溜水となり、金属が腐食しやすい環境を形成することがあります。付属金物が腐食によって劣化し破損してしまうと、通信用ケーブルが落下し通信への影響を引き起こすおそれがあります。そのため、付属金物の劣化傾向を把握し適切に維持・管理することが求められています。しかし、マンホール内部の環境は十分に解明されているとは限らず、付属金物の腐食挙動も明らかにされていない現

象もあります。マンホール内部はほぼ密閉された空間であるため、外部から水が流れ込んだ場合には、マンホール内の空間は湿度100%に近い高湿度環境となります。流れ込む水量が多い場合には、付属金物は溜水に水没します。溜水中の金物は水面に近い位置で腐食しやすいことが報告されています⁽²⁾。このように溜水の水位により付属金物の環境が異なるため、腐食傾向もその環境ごとに変化すると予想されます。加えて、溜水の水位は水の流入量により変動するため、水面に近い付属金物は高湿度条件と水没条件が交互に入れ替わる環境（気液交番環境）にも曝されます。実設備からは、図3のように、ケーブルが紐により固定されていたと推測される位置で局所的な腐食が発生した事例が確認されていることから、紐が接触する部分で進行する特異な腐食挙動も明らかにする必要があります。そこで私たちは、もっともマンホール内で腐食劣化が著しいと考えられる気液交番環境における紐接触部近傍での腐食に着目し、①加速試験による長期的な劣化推定と、

②電気化学測定による挙動解明に取り組むことで、付属金物の劣化予測をめざしています。

■加速試験による長期的な劣化推定

(1) 加速試験方法

加速試験に用いるサンプルを、熱間圧延軟鋼板 (SPHC) と SPHC に溶融亜鉛メッキ処理を行った亜鉛メッキ鋼板の2種類としました。それぞれ腐食範囲をそろえるため、サンプルの背面と四辺をマスクングしました。また、紐接触部の腐食を模擬するため、鋼板の露出部に紐を6回巻きしたサンプルを作製しました。

加速試験には複数の方法、条件がありますが今回は塩水噴霧試験 (SST: Salt Spray Testing)、複合サイクル試験 (CCT: Cyclic Corrosion Testing)、気液交番試験の3つの試験を選択しました。SST、CCTは標準的な試験であり、大気中の腐食を評価するためによく利用されています。SSTは常時塩水噴霧 (5% NaCl) を行う試験です。CCTは今回、塩水噴霧 (2時間) と乾燥 (温度60℃、湿度20%) 4時間、湿潤 (温度50℃、湿度95%) 2時間のサイクルとしました。マンホール環境は前述したように大気中の環境とは腐食挙動が異なります。そこで、私たちはよりマンホー

ル環境の腐食を模擬できる加速試験として、気液交番試験を行いました。気液交番試験は、水中と気中を交互に繰り返す加速試験です。今回は、水中状態144時間、気中状態24時間のサイクルを繰り返しました。水中状態で用いた溶液は5%塩化ナトリウム水溶液、気中状態の環境は湿潤状態と同じく、温度50℃、湿度95%に設定しました。各加速試験の試験時間は、SST、CCTは480時間、気液交番試験は672時間としました。

加速試験終了後、JIS規格 (JIS H 8502) に準拠した方法でサンプルに付着した錆を取り除き、腐食減肉量を求めました。また、錆を除去したサンプルを乾燥させたのち、3D形状測定機を用いて表面の凹凸形状を測定しました。

(2) 加速試験結果

加速試験後のサンプル (紐あり) を除錆し、その表面の凹凸を示すコンター図*2を図4に示します。加速試験前のサンプル (紐あり) の外観を(a)に、CCT_480時間後のSPHCのコンター図を(b)に、CCT_480時間後の溶融亜鉛メッキ鋼板のコンター図を(c)に示しています。そして、SST_480時間後のSPHCのコンター図を(d)に、気液交番試験_672時間後のSPHCのコンター図を(e)に

示しています。コンター図はサンプル上部のマスクングされた個所を0µmとしてカラスケールで表示しています。マスクングされていない個所では腐食減肉による鋼板表面の板厚減少がみられました。図4の(b)と(c)から、SPHCのほうが溶融亜鉛メッキ鋼板よりも板厚減少が大きいことを確認しました。図4の(b)と(d)から、CCTとSSTのサンプルでは、紐接触部の大部分は露出部よりも板厚減少が発生していませんが、最上段の紐直下に露出部と同等以上の板厚減少が生じていることを確認しました。また図4の(e)から、気液交番試験では露出部よりも紐接触部で板厚減少が生じていることを確認しました。さらに、CCTやSSTと異なり、紐接触部の最上段だけでなく、紐接触部の6本すべての紐直下に板厚減少がみられました。

各サンプルの全体の腐食減肉量変化を図5に示します。グラフの値は、各加速試験後の複数のサンプルの平均 (CCT、SST: N=4、気液交番: N=3) をプロッ

*2 コンター図: 連続的な値で変化するスカラー変数の空間分布を、同じ値を持つ点を結んだ線 (等高線・等値線) で表現した図で、値の分布傾向を色分けして可視化する手法。

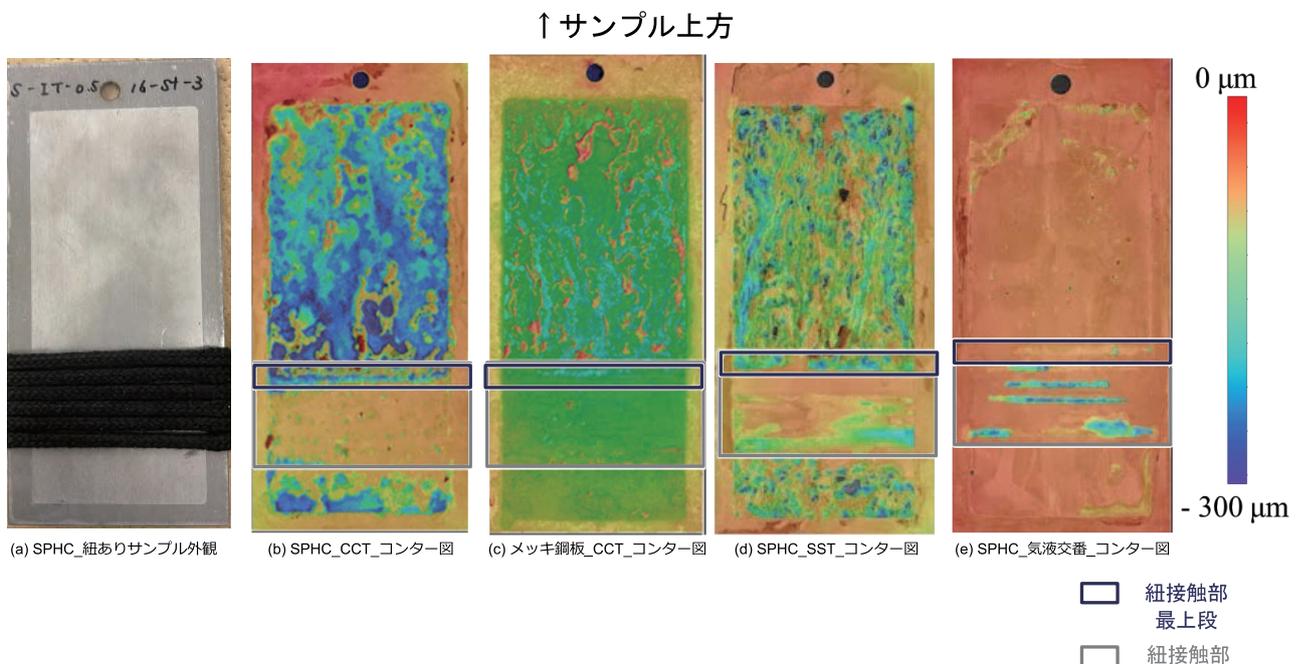


図4 サンプルの外観と加速試験後のコンター図

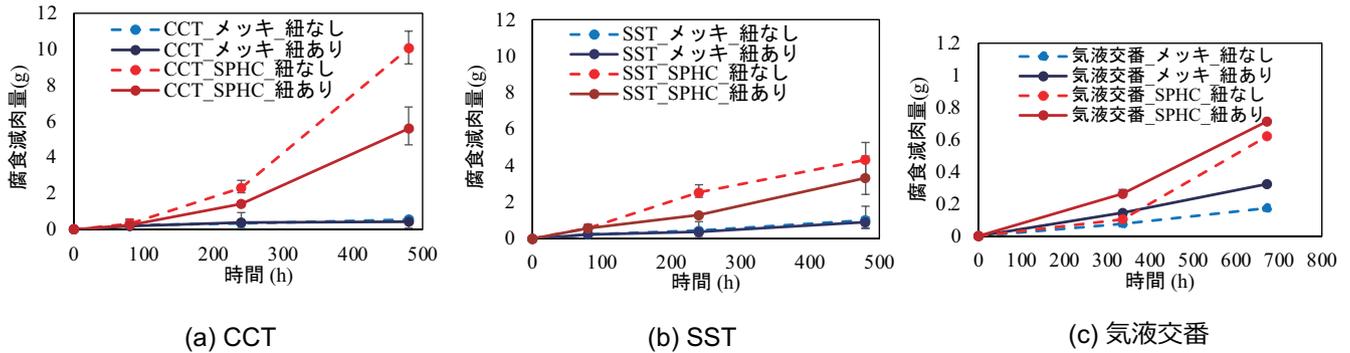


図5 各加速試験の腐食減肉量

トしています。全体の腐食減肉量は、CCT、SST、気液交番試験のすべての加速試験でSPHCのほうが溶融亜鉛メッキ鋼板よりも多くなる傾向を示しました。また、SSTよりCCTのほうが、気液交番試験よりも全体の腐食減肉量が大きくなる傾向を示しました。紐の有無による全体の腐食減肉量の傾向は、CCTとSSTではSPHCと溶融亜鉛メッキ鋼板ともに紐なしのサンプルが大きくなる傾向がみられましたが、気液交番試験では紐ありのサンプルのほうが大きくなる傾向を示しました。

■電気化学測定による挙動解明

(1) 電気化学インピーダンス分光法による評価

金属の腐食は、金属が電子を失う反応（アノード反応）と、溶液中で電子を受け取る反応（カソード反応）が同時に起こる電気化学反応です。そのため、腐食の進みやさや速さを調べるには電気化学測定が有効です。この測定では、腐食に伴って流れる微小な電流をとらえることで、初期の腐食挙動も評価できます。一般に、測定対象である作用電極、基準となる電位を与える参照電極、そして測定に必要な電流を流すための対極からなる三電極系を用います。ポテンショスタットにより電位を制御しつつ電流を測定することで、腐食速度や反応特性を定量的に理解することができます。

腐食評価に用いられる代表的な電気化学測定手法には、自然電位測定、分極曲線測定、分極抵抗法、電気化学インピーダンス分光法（EIS）があります。このうちEISでは、交流信号の周波数を変えながら応答を測定するため、電荷移動、拡散、腐食生成物皮膜の影響を分離して評価できます。さ

らに、試料の状態をほとんど変えずに、腐食過程や皮膜の変化を時間的に追跡できる点が大きな利点です。私たちは、紐を接触させた状態の金属試料に対してEISを適用する手法を開発し、腐食環境が水中から気中に移行し金属表面の水分が蒸発する過程での腐食速度の定量評価をめざしています。現在、水分減少過程で腐食速度が上昇する傾向を確認しており、加速試験で観察された紐接触部における局部腐食の主要因であると考え、検討を進めています。

(2) まとめ

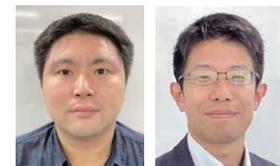
CCTとSSTでは紐直下の局部腐食を再現することはできませんでした。これは、紐によって噴霧された塩水が紐接触部の鋼板に触れることを防いでしまったためと考えられます。ただし、最上段の紐直下に関してはサンプルの上部から流れてきた塩水が紐に吸収されたため、局部腐食が生じたと考えられます。SSTよりCCTで腐食が進行していたことから、マンホール内での付属金物の局所腐食は、高湿度条件と十分な水分が紐に吸収される水没条件が交互に入れ替わる環境にある金物に発生しやすい可能性を示唆しています。

一方、気液交番試験では紐直下の局部腐食を再現することができました。これは、気液交番試験はサイクル間隔が長いいためマスキングされていない箇所では腐食劣化の進行が緩やかでしたが、紐接触部では水中状態で十分な水分がすべての紐に吸収され、気中状態で乾燥することにより、紐直下で局部腐食が進み、図4(e)のように紐を取り付けていない箇所より減肉量が多くなったためと考えられます。したがって、気液交番試験により紐と金物の接触部における局

部腐食を再現できる可能性があります。

■参考文献

- (1) Y. Takeuchi, A. Ito, H. Kasahara, Y. Okamura, and J. Tamamatsu: "Degradation Characteristics of Glass Fiber Reinforced Plastics Using Unsaturated Polyester as Matrix in Weak Alkaline Aqueous Solution," MATERIALS TRANSACTIONS, Vol.65, No.2, pp.159-166, 2024.
- (2) 伊藤・若竹・, 田中: "通信用管路の腐食状況とMH内環境との関係性に関する調査," 土木学会第70回年次学術講演会発表講演概要集, Vol.5, No.83, pp.165-166, 2015.



(左から) 豊田 新/ 竹内 陽祐

通信インフラの維持管理の効率化に向けて、材料分野からのアプローチにより、持続可能な社会の実現に貢献していきます。

◆問い合わせ先

NTT先端集積デバイス研究所
サステナブルデバイス研究部



通信インフラの長寿命化に向けたプラスチック材料の加速劣化試験に関する取り組み

屋外で使用されるプラスチック材料は、光・熱・水・応力が複合的に作用して劣化が進むため、インフラ設備の長寿命化には、耐候性に優れた材料を適切に選定できる評価技術が不可欠です。本稿ではポリプロピレンを例に、耐候性を適切に評価する加速劣化試験の確立に向けた取り組みを紹介します。

キーワード：#プラスチック材料、#耐候性、#加速劣化試験

ね ぎ し か お り
根 岸 香 織
こ う の あ き ひ ろ
鴻 野 晃 洋
み な た し ん ご
峯 田 真 悟

NTT先端集積デバイス研究所

通信インフラにおけるプラスチック材料と劣化

通信インフラでは、ケーブル被覆、支線カバー、クロージャ筐体、結束材など、数多くの部位にプラスチック材料が使われています。プラスチック材料は、軽量で成形性に優れ、耐食性や電気絶縁性などに利点を持つ一方、金属やセラミックス、ガラスといった無機材料に比べて、光や熱などにより化学構造が変化し、外観や特性が劣化しやすい特徴を持っています^{(1),(2)}。特に屋外環境では、紫外線、気温、降雨・結露、風、汚染物質などの因子が複合的に作用するため、材料の劣化の進みは、使用される環境条件に強く左右されます⁽³⁾。したがって、通信インフラを長寿命化するためには、使用環境を踏まえた適切な性能の評価試験を行いながら、要求特性を満たす材料開発や効果的な劣化対策を講じることが重要です。そこで私たちは、屋外環境に曝されることを想定したプラスチック材料を対象に、実環境で生じる劣化現象の再現性と劣化の加速性を両立させ、材料特性を適切に評価できる独自の加速劣化試験の確立をめざして研究を進めています。本稿では、通信インフラにも幅広く用いられるポリプロピレン (PP) をケーススタディとした加速劣化試験の取り組みを紹介します。

代表的な劣化因子

プラスチックの劣化では、酸化、分解、架橋などの分子レベルの化学反応を伴って、さまざまな物性や特性の変化（脆化、白化、

亀裂、強度低下など）が進行します。前述のとおり、屋外環境では光・熱・水などが相乗的に作用して劣化が進むため、個々の現象を切り分けることは困難ですが、ここではその中で代表的な劣化因子を概観します。

まず主要な劣化因子として挙げられるのが太陽光（紫外線）です。紫外線は材料中の化学結合を切断します。酸素存在下では、化学結合切断によって生成したラジカル^{*1}と酸素が反応し、化学結合の切断が連鎖的に進む光酸化を生じます。ポリプロピレンなど多くの汎用プラスチックは、理想的には太陽光をほとんど吸収しませんが、微量の不純物や触媒残渣^{*2}、あるいは微量のカルボニル基 (C=O) 等が起点となって光エネルギーを吸収し、光劣化が生じます⁽¹⁾。高分子の分子結合エネルギーと比べて、紫外線領域の光エネルギーは結合切断に十分な大きさとなり得るため、紫外線が多く存在する屋外環境では酸素を介した光酸化反応が進行しやすく、表面の変色、チョーキング^{*3}、脆化、亀裂などにつながります。

次に熱です。熱は化学的な反応速度を高めるため、光を起点とした参加反応を加速させ、光と熱が同時に作用すると相乗的に劣化が進むことが報告されています^{(1),(2)}。また、大気中で高温に長時間曝せられると、熱と酸素の作用で自動酸化反応が進み、ヒドロペルオキシド (ROOH) 基やカルボニル (C=O) 基、ヒドロキシ (OH) 基などの酸素を持つ官能基を生成しながら連鎖的に進行します。こうした反応は温度が高いほど進みやすく、材料表面から内部へ熱が拡散することで、厚みのある部材でも劣化が進行します⁽¹⁾。

水（湿潤）も重要な因子の1つです。降雨、霜、結露、あるいは浸漬のように水分と接触する環境では、表面近傍の添加剤が水とともに徐々に流出し、安定化機能が低下することがあります。添加剤が枯渇すると、同じ紫外線量・温度条件でも劣化速度が急に上がり、表面脆化や微小亀裂が顕在化しやすくなります^{(1)~(3)}。

また、上記の化学的な要因だけでなく、物理的な因子として材料に加わる応力も考慮すべき対象です。応力は光・熱・水のように化学反応を直接進める因子ではありませんが、劣化で生じた微小欠陥を起点にマクロな亀裂を発生・進展させます。曲げや振動などの繰り返し応力が作用すると、応力集中部^{*4}でクラックが生じ、先端で損傷が蓄積して亀裂が成長し、破断に至ることもあるため、応力は材料の寿命を大きく左右する因子といえます⁽²⁾。

加速劣化試験による耐候性評価

光や熱、水などの環境因子による劣化への抵抗力は耐候性と呼ばれ、材料選定や寿命推定における重要な評価特性となっています。材料の耐候性を評価する場合、実際の使用環境下で自然暴露する方法をとることがもっとも確かな情報を与えると考えら

- * 1 ラジカル：不対電子を持つ化学種で反応性が高く、連鎖酸化などの開始・進展に関与。
- * 2 触媒残渣：重合触媒に由来し微量に残る成分で劣化反応の起点となります。
- * 3 チョーキング：樹脂表面が劣化して白い粉が生じ、触れると付着する現象。
- * 4 応力集中部：形状や欠陥で局所応力が高まり、亀裂発生・進展が起こりやすい状態。

れますが、この方法では検証に多大な時間を要してしまうため、材料開発や改良サイクルの速さに適合しにくいのが実情です⁽¹⁾。そこで、光・熱・水などの環境条件を制御し、室内で加速的に劣化を進めることで、短期間で材料の耐候性を適切に評価できる加速劣化試験が不可欠となります。

既存の加速劣化試験として、試験条件や結果の比較可能性を確保するために国際的に標準化された手法が整備されています。代表例として、プラスチック材料の耐候性評価の試験方法を規定するISO 4892があり、光源としてキセノンアークランプを用いる試験法 (ISO 4892-2) や、紫外線蛍光ランプを用いる試験法 (ISO 4892-3) などが規定されています。また、日本ではこれに対応する規格としてJIS K7350が整備されています。これらの規格では、照射光強度、温度・湿度、濡れ時間等の試験パラメータを管理しながら暴露する枠組みが示されており、国内でも、材料の相対比較や品質管理、スクリーニングなどに広く用いられています。

加速劣化試験の手順や条件は、材料の課題抽出や特性評価、あるいは寿命推定など、評価の目的によっても異なると考えられますが、いずれであっても、その評価目的に合った劣化機構の再現を重視し、単に材料に与えるストレスを強めるだけにならぬよう注意が必要です。加速条件を単に強めるだけでは、例えば、実環境とは異なる劣化現象を副次的に誘発する場合もあり得るため、評価対象における実際の使用環境を十分に考慮したうえで適切な加速試験条件を設定し、外観変化や機械特性、化学指標の分析と組み合わせで総合的に評価することが重要です。私たちは、この点を考慮しながら、使用環境で生じる劣化現象の再現性を高め、かつできるだけ短期間に材料の耐候性を評価できるように検討を進めています。

プラスチック材料の添加剤と分析指標

ポリプロピレンなどの汎用プラスチック材料は、一般に主原料である高分子そのものだけでは耐候性に課題があるため、耐候性を補完するために酸化防止剤（一次：ラ

ジカル捕捉、二次：過酸化分解）、光安定剤などの添加剤が配合されています。表には、プラスチック材料の主な添加剤について、種類と配合目的を示しました⁽²⁾。添加剤は、材料の耐候性だけでなく、成形加工性や機械特性、コスト等にも強く影響するため、主原料が同じであったとしても、添加剤の配合量や組合せによってその特性は実に多様です。そのため、通信インフラのさらなる長寿命化のためには、多様な材料の中から必要な耐候性を備えた最適な材料の選定、あるいは配合の最適化等を進めることが重要です。この検討において、加速劣化試験による耐候性評価は必須のプロセスであり、適切な試験条件の設定が肝要です。私たちは、実環境での劣化現象の再現性と劣化の加速性とを両立する加速劣化試験を確立するためには、材料の劣化メカニズムを把握し、加速条件が材料特性にどのような影響を及ぼすのかを十分に理解することが重要と考え、添加剤量の異なるポリプロピレンを例に、種々の条件で耐候劣化させた際の分析データの蓄積を進めています。

試験条件が材料の劣化に及ぼす影響を確認する分析として、もっとも代表的で直接的な情報を与えるのは外観観察ですが、そのほかに外観に表れない劣化状態の分析も重要です。例えば、カルボニル指標や酸化誘導時間などの化学的指標や、引張・伸び・弾性率などの機械強度、衝撃強度、硬さなどの物理指標等があります。カルボニル指標は、フーリエ変換赤外吸収分光 (FT-IR) を用いて測定し、おおむね 1700~1750 cm^{-1} 付近に表れるカルボニル基の吸収強度を基準ピークで規格化した値です⁽²⁾。プ

ラスチック材料が紫外線や熱で耐候劣化すると、材料表面の紫外線吸収から始まる一連の劣化反応の過程でカルボニル基が生成・増加します。図1は、ポリプロピレンのサンプルに対して紫外線+熱+水噴霧の条件で加速劣化試験を実施したときのFT-IRの測定結果の例です。加速劣化させる試験期間が長いほどカルボニル基の吸収ピークが大きくなっていることが分かります。カルボニル指標は、基準ピークで規格化した相対指標にはなりますが、FT-IRを用いて非破壊で測定可能であり、酸化劣化の進行度を示す有用な指標として広く用いられています。

また、酸化誘導時間は、示差走査熱量計 (DSC) で一定温度下においてサンプルが酸素雰囲気曝されてから、酸化反応（発熱）が検出されるまでの時間を示す指標です⁽²⁾。DSCだけではなく、例えばケミルミネッセンス (CL) 法を用いて、酸化過程で生じる発光をとらえる方法でも酸化誘導時間を評価することが可能です。酸化誘導時間を測定することで、プラスチック材料に添加される酸化防止剤の効果や酸化への抵抗力などを相対評価することができます。図2は、酸化防止剤の添加量が異なるポリプロピレンサンプルの酸化誘導時間についてCL法を用いて測定した結果の例です。AよりもBのほうが酸化防止剤量の多いサンプルですが、実際にサンプルBのほうが酸化反応までの時間が長く、材料の耐酸化性に添加剤が効果を発揮していることを読み取ることができます。このような化学指標に加え、機械特性などの物理指標も重要です。例えば、引張試験によって得られる応力-歪み曲線からは弾性率や引張強度、

表 主な添加剤と配合目的⁽²⁾

種類	配合目的
酸化防止剤	成形時・使用中の熱酸化劣化の抑制
光安定剤	光酸化の連鎖反応抑制
紫外線吸収剤	紫外線を吸収し劣化を抑制
帯電防止剤	静電気の発生・帯電の抑制
可塑剤	軟質化、低温柔軟性・加工流動性の向上
滑剤・離型剤	摩擦低減、離型性・滑り性・成形安定性向上
難燃剤	難燃化
核剤	結晶化促進・結晶粒微細化

破断歪みや靱性などのマクロな特性を評価することができます。このほかにも劣化状態を把握するための指標はさまざまありますが、これら指標の分析をとおして、材料の劣化メカニズム解明や加速劣化条件との関係を詳細に調査していくことが、最適な加速劣化試験の確立に直結すると考えています。

加速劣化試験の検討例

ここで、加速劣化試験の検討例を紹介しましょう。例えば、紫外線+熱+水の因子に加えて応力の影響も評価できるように、折り曲げにより引張・圧縮応力を繰り返し発生させることで、応力が定期的に加わることを想定した加速劣化試験を実施しています。

図3は、加速劣化試験のサイクル条件を表

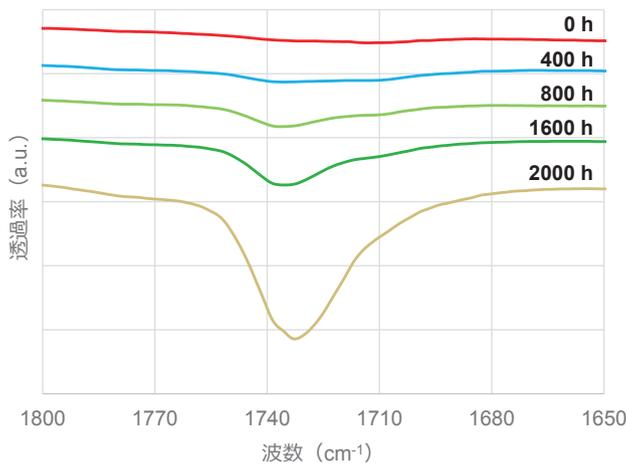


図1 紫外線+熱+水噴霧の条件で加速劣化試験に供したポリプロピレン表面のFT-IR分析の例

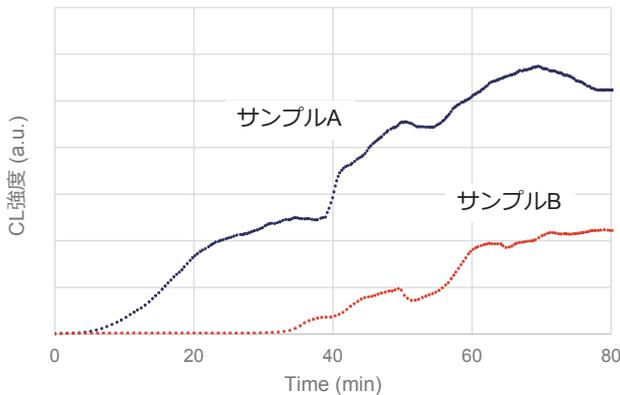


図2 ポリプロピレンサンプルの酸化誘導時間の比較例

す概念図です。紫外線+熱+水+応力が同時に作用する環境下で使用されるプラスチック材料の選定や優劣を評価する場合には、紫外線+熱+水の加速条件で耐候劣化させ、劣化後のサンプルに対して評価目的や破壊様式に合致する力学的負荷を与え、機械特性を評価する方法が考えられます。ただし、この場合は、紫外線+熱+水の因子と応力によるストレスとが別々に付与されているため、紫外線+熱+水+応力が同時に作用する環境下での劣化機構とは厳密には異なります。そこで、図3のように、紫外線+熱+水の耐候劣化ブロックと応力ブロックとを交互に繰り返す加速劣化試験を考案しました。この試験方法は、紫外線+熱+水+応力の同時付与ではないものの、各ブロックを交互に繰り返すことで、耐候劣化による脆化や微小亀裂の生成と、応力による亀裂進展とを段階的に重ね合わせることを意図しています。図4は、図3のサイクル条件で加速劣化試験に供したときのポリプロピレン試料の外観観察結果です。時間経過とともに試料表面に微小なクラックが発生しており、折り曲げ部位に近い領域でその傾向がより顕著であることが分かります。本試験は、折り曲げの工程が入ることで通常の耐候劣化よりもさらに劣化が促進されますが、屋外で繰り返し応力が加わる環境を想定した材料選定や性能評価をより正確かつ短期間に評価できる加速劣化試験とするため、耐候劣化条件や折り曲げ条件、各ブロックの時間比などの条件の最適化を進めていきます。

次に、温水への浸漬を組み合わせた加速劣化試験についても紹介します。温水への浸漬は、プラスチック材料の添加剤が降雨や結露などの水で溶出する現象を加速する

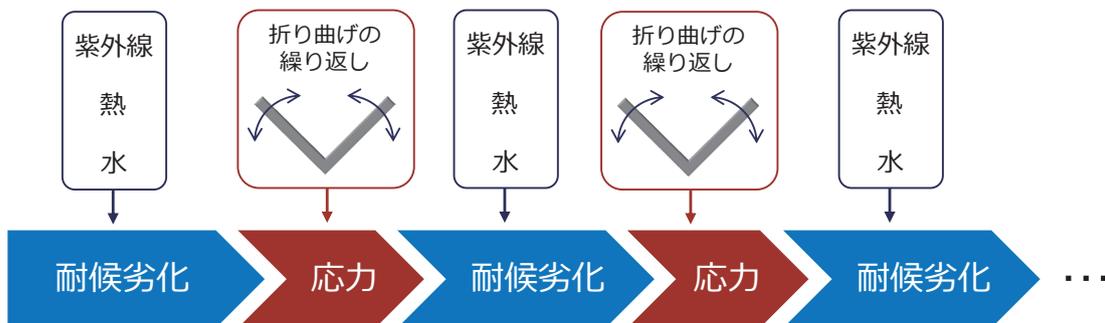


図3 紫外線+熱+水+応力環境を想定した加速劣化試験のサイクル例

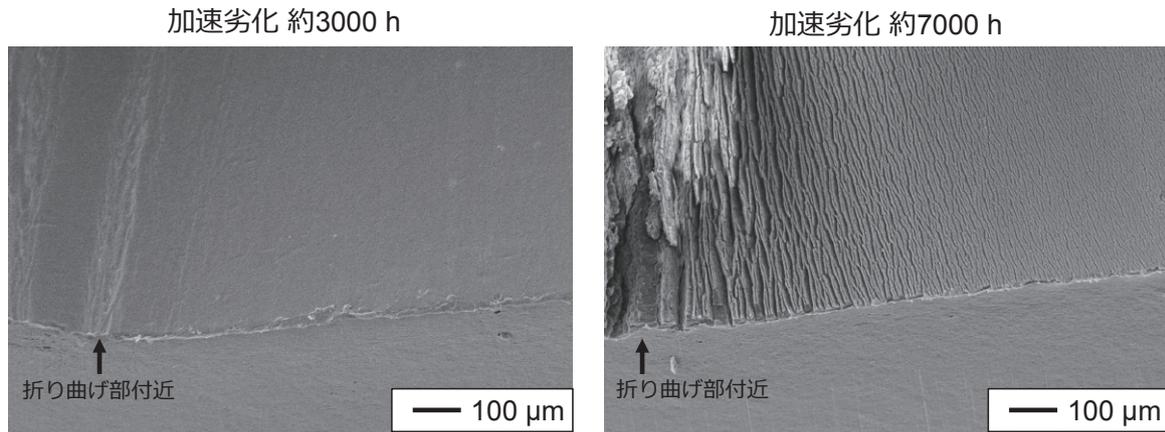


図4 紫外線+熱+水+応力付与環境の加速劣化試験に供したサンプルの外観写真の例

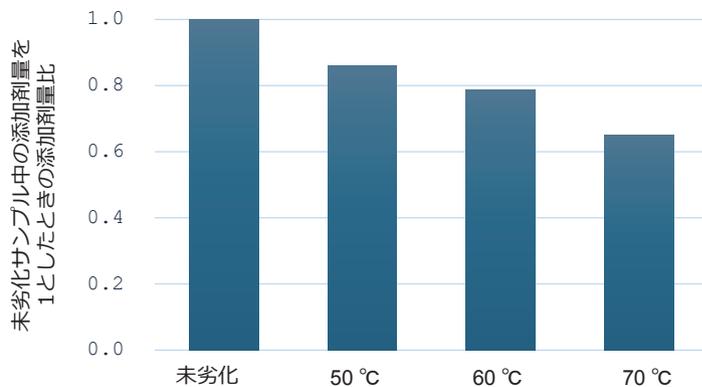


図5 50～70 °Cの温水に2カ月浸漬した際の添加剤量の減少傾向

意図で実施しています。前述のとおり、ISOやJIS規格の試験方法でも紫外線や熱に加えて水による劣化を付与していますが、例えば降雨の激しい環境などを踏まえ、より添加剤の溶出現象を加速させたい状況においては、浸漬の工程を組み合わせた加速劣化試験が有効ではないかと考えています。図5は、添加剤が配合されたポリプロピレンに対して、50～70 °Cの温度に保った水に一定期間浸漬させたときの添加剤の減少傾向です。未劣化のときの添加剤量を1として減少比率を示しています。一定期間後の溶出量と比較すると、温度が高いほど顕著な溶出が生じていることが分かります。この溶出過程を加速劣化試験に取り込み、例えば一定期間の浸漬により添加剤量を減少させた後のサンプルを耐候劣化させることで、ある程度の添加剤流出が生じた後のサンプルの劣化を再現・加速できると考えています。あるいは、折り曲げ試験と同様に、耐候劣化ブロックと浸漬による添加剤

溶出ブロックとを交互に組み合わせた加速劣化試験とする方法も考えられます。耐候劣化と水による添加剤の溶出現象を段階的に重ね合わせることで、降雨の激しい環境での劣化の再現や加速に適用できると考えています。

今後の展望

通信インフラの長寿命化に資することを目的に、プラスチック材料の耐候性を評価する加速劣化試験の取り組みについて紹介しました。私たちはこれまでも、屋外環境における塗装の耐食性や耐候性を評価するために、独自の加速劣化試験を確立してきました⁽⁴⁾。今後も、これらの知見を活かしながら、プラスチック材料の劣化現象の解明や、加速劣化条件と実環境でのデータとの相関付け等を進めつつ、再現性と加速性が高く、材料特性を適切に評価することができる加速劣化試験技術の確立をめざして

いきます。

参考文献

- (1) 飯塚：“促進暴露試験によるPPの光劣化に関する研究,”九州大学学位論文, 2018.
- (2) 本間：“プラスチック材料大全”, 日刊工業新聞社, 2015.
- (3) 大武：“ゴム・プラスチック材料の原因別トラブル事例と対策,”日刊工業新聞社, 2024.
- (4) 三輪・竹下・石井・澤田：“吸水挙動を模擬した防食塗膜の促進腐食試験に関する取り組み,” NTT技術ジャーナル, Vol.29, No.11, pp.15-18, 2017.



(左から) 根岸 香織 / 鴻野 晃洋 / 峯田 真悟

プラスチック材料をはじめとする種々の材料の劣化現象解明や加速劣化試験などの材料研究を推進し、社会インフラ全体の長寿命化への貢献をめざします。

◆問い合わせ先

NTT先端集積デバイス研究所
サステナブルデバイス研究部



通信インフラの長寿命化を実現する レーザー- 錆 - 鋼材間の現象解明の試み

通信インフラ設備の長期的な健全性維持には、再劣化を抑える確実な補修が重要です。本稿では、レーザー照射による錆除去と鋼材表面の改質に着目し、形成される酸化鉄の特性評価とその生成過程の理解を通じて、補修後の状態を長期間維持するための素地調整技術の確立に向けた取り組みを紹介し、

キーワード：#補修周期の延伸、#レーザー素地調整、#第一原理計算

きのうち こうへい かわむら そうはん
木内 康平 / 川村 宗範
さかもと たかし もちつき しょうじ
坂本 尊 / 望月 章志

NTT先端集積デバイス研究所

通信インフラを支える鉄塔補修の課題

現代の生活に欠かせないものとなっている通信サービスの安心と安全を守るためには、鉄塔をはじめとするさまざまな通信インフラ設備が必要です。これらの設備は、屋外に設置されることが多く、風雨にさらされることで劣化し強度が低下するおそれがあるため、定期的な点検と補修を繰り返す、長期にわたって利用することが重要です。これらの鉄塔は小型のものも含めると、NTTが所有するだけでも国内におよそ2万基存在し、多くが建設から数十年が経過して老朽化が進んでいるため、点検・補修に必要なコストや作業員数は年々増加しています。一方で、持続可能な通信サービスを提供するためには、これらのコストや作業員数を抑制する必要があります。

鉄塔を例にすると、現在は定期的に点検して塗膜が剥離している、また錆が進行している箇所を把握し、基準値以上に錆が進行していると判断した場合に、錆を除去する素地調整と、素地調整後に錆の再発を抑制するために塗装を施す再塗装を行っています。したがって、錆の進行を抑制することができれば、補修作業の回数を減らして作業員の減少に対応することができますし、コストを抑制することもできます。

そこで、NTT先端集積デバイス研究所(先デ研)では、錆を除去するいわゆる素地調整の方法を改善することで、錆の再発と進行を抑制して補修周期を延伸して作業回数を抑制し、作業員数とコストの削減をめざしています。

そこで注目しているのが、レーザーを使った素地調整です。

現在は一般的に、素地調整に電動工具や金属ブラシなどを使っていますが、レーザーを使えば鋼材表面の性質を変化させることも可能で、錆びにくい状態をつくることができます。さらに、塗装が剥がれにくい状態をつくることで、素地調整後の鋼材表面を長期にわたって大気や水への曝露から保護することができると考えられます。

これにより、錆の再発や進行を抑制して素地調整の作業周期を延伸し、作業回数を減らして作業員が減少してもコストを抑えて鉄塔を維持していくことが可能になります。

さらに、レーザーを使えば非接触で錆を除去できるため、電動工具のような反力が発生せず、作業員の負担を軽減できる可能性

があります。

本記事では、作業周期延伸に必要な技術のうち、レーザーによる素地調整に範囲を絞って紹介します(図1)。

錆の再発を抑制し補修周期を延伸するレーザー素地調整

レーザーを用いて補修周期を延伸する素地調整を実現するためには、レーザー照射によって鋼材表面に形成可能でかつ錆の再発や進行の抑制に効果のある物質を選定し、さらにその物質が形成される現象を解明し、その物質の形成に適したレーザー照射条件を明確にすることが近道であると考えています。

そこで、解明までのステップを以下のように設定しています。

- ・ステップ①：レーザーで錆を除去したと

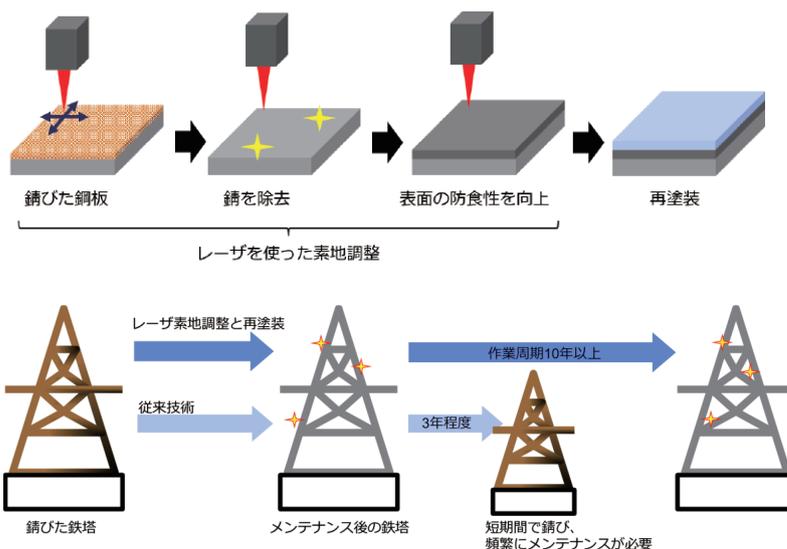


図1 NTTがめざす素地調整のイメージ図

- きに鋼材表面に形成される物質を把握
- ・ステップ②：形成される物質から錆の抑制に適した物質を選択
- ・ステップ③：選択した物質が形成されるメカニズムを解明してレーザー照射条件を明確化

ステップ①では、表面が錆びた鋼板にレーザーを照射し錆を除去後、鋼材表面を分析し形成された物質を分析します。

ステップ②では、レーザー照射により形成されたそれぞれの物質の仕事関数と反応障壁を分析し、これら2つの値が大きい物質を選定します。

仕事関数は、真空準位と物質のフェルミ準位の差で定義され、仕事関数が大きいほど錆びにくく腐食電位も大きくなることが知られています⁽¹⁾。

反応障壁は物質がある状態から別の状態へ変化する際に必要なエネルギーの大きさであり、反応障壁が大きいほどその反応、ここでは錆の発生が起こりにくいことを示しています。

したがって、仕事関数と反応障壁の両方が大きい物質を選択的に形成することで、錆の再発を抑制する効果が期待できます。

仕事関数は実験と第一原理計算で、反応障壁は第一原理計算で求めることができます。

続くステップ③では、錆が除去されて酸化鉄が形成される過程を第一原理計算を用いて再現し、所望の物質を形成するために必要な温度とその温度を維持する時間を解明することで、レーザーの照射時間などを明らかにし、最終目的であるレーザー技術を確認します。

第一原理計算とはシミュレーション科学の方法の1つで、電磁界・流体・力学計算などの現象論的シミュレーションとは異なり、量子力学の基本原則に基づいて物質の構造やエネルギー、電気的・磁気的性質などを実験データに依存せずに予測できる、高精度な計算手法です。原子核がある中で多数の電子の相互作用をシュレーディンガー方程式^{*1}で扱い、その数値解から物質の安定構造やバンド構造、自由エネルギーなどを求めます。代表的な方法である密度汎関数理論 (DFT) は、電子密度を基にエ

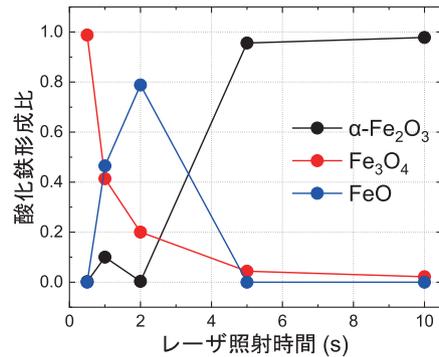


図2 レーザ照射によって形成される酸化鉄の例

ネルギーを評価することで高精度な計算を可能にし、材料科学・化学・半導体デバイス研究の中心的ツールとなっています。実験が難しい極限条件や界面・欠陥のような微視的構造の解析にも適しており、新材料の探索やデバイス特性の理解、反応機構の解明にも広く活用されています。

しかしながら、第一原理計算を用いてレーザーと錆、鋼材の相互作用、さらに、それに起因した錆の抑制効果を議論した例は非常に少なく、後述するように、いくつか課題があり工夫が必要です。

以下、それぞれのステップについて、実験例と計算例を説明します。

■ステップ①：レーザーで錆を除去したときに鋼材表面に形成される物質を把握

このステップでは、レーザー照射によって鋼材表面にどのような酸化鉄が形成されるかを把握します。

先行研究により、レーザー照射による急激な温度上昇で錆が分解し、その後の急冷によって鋼材表面で新たな酸化鉄が形成されることが知られています⁽²⁾。

レーザー照射時間と生成される酸化鉄の割合との関係を把握するため、波長1.07 μm のCWレーザーを出力300 W、ビーム径50 μm に集光して鋼材に照射し、照射部をラマン分光法^{*2}で分析しました。図2にレーザー照射時間と形成される酸化鉄の割合を示します。

図2から、レーザー照射時間が短い場合はFe₃O₄ (四酸化三鉄) の形成比率が大きく、レーザー照射時間が長くなるにつれてFe₃O₄が減少する傾向があることがわかります。一方で、レーザー照射時間が長くなると

FeOが増加し、照射時間が一定以上になると α -Fe₂O₃が多く形成されていることが分かります。このことから、レーザーの照射時間を制御することにより、鋼材表面に形成される酸化鉄を選択できる可能性があります。

実際の鉄塔では錆の厚さや組成など表面状態が大きく異なるため、表面条件およびレーザー条件を多様に変化させた実験を行い、照射条件と形成物質の対応関係を体系的に整理しています。

■ステップ②：形成された物質から錆の抑制に適した物質を選択

- (1) 形成された酸化鉄の仕事関数の測定例

図3は、鋼材にレーザーを照射した時間とレーザーが照射された部分の仕事関数を調べた例です。仕事関数の測定にはケルビンプローブ^{*3}を使いました。

レーザーの照射時間を長くすると仕事関数が増加して一定値になる傾向がみられました。図2のレーザー照射時間と形成される酸化鉄の関係と比較することで、Fe₃O₄は相対的に仕事関数が小さく、 α -Fe₂O₃は相対的に仕事関数大きいと推測できます。し

*1 シュレーディンガー方程式：量子力学において、電子などの微小な粒子の状態や振る舞い(波動関数)を記述するための基本方程式。物質の電子構造や性質を理論的に理解する際に用いられます。

*2 ラマン分光法：物質に光を照射した際に生じる散乱光を解析することで、分子構造や化学結合の状態を調べる分析手法。非破壊で材料の情報を得られることが特徴。

*3 ケルビンプローブ：試料表面と探針との電位差を測定することで、表面の仕事関数や電気的特性を評価する測定手法。半導体や薄膜材料の表面特性評価などに用いられます。

たがって、 Fe_3O_4 と $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ を比較した場合、レーザーの照射時間を長くして鋼材表面に $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ を多く形成したほうが、錆を抑制できる可能性があることを示唆しています。

さらに、図4に示すように、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ はいくつかの異なる終端構造を示し、この構造によって仕事関数が異なることが第一原理計算による解析で分かっています。したがって、形成される酸化鉄の結晶構造も制御することで錆の抑制効果を向上させることができると考えています。

(2) 反応障壁の計算例

前述したように、物質がある状態から別の状態に変化するのに必要なエネルギーを反応障壁と言います。反応障壁が大きい変

化はゆっくり進み、逆に反応障壁が小さい場合は速く進みます。したがって、反応障壁が大きな物質を選択することで錆を抑制する効果を大きくできます。

反応障壁のほかにも、反応の進みややすさを調べる方法があります。例えば、大気中での錆の進行を観察したり、錆が進行する際の電流を測定したりすることによって、反応の進みややすさを比較することができます。その一方、鋼材表面における錆の発生では、最初の反応を起点にして連鎖的に錆が拡大して進行すると考えられますが、上記の方法では、複数の反応の効果を観察、あるいは測定することになり、起点となる反応の特定や、その反応の進みややすさや反応障壁を比較するのは困難です。

そこで、先デ研では、この錆の進行の起点となる反応を調べ、その反応障壁を比較するために第一原理計算を採用しています。

しかしながら、鋼材のような固体表面における分子の反応について、複数の分子が存在している系での反応障壁計算は例がなく、計算やモデリング方法に工夫が必要です。

起点となる反応を見つけるためには、例えば鉄と水と酸素で構成される系で起こり得るすべての反応を記述する必要があり、そのためには、多くの分子が存在する系で反応を再現する方法が適しています。その一方で、多数の分子が存在する系で、注目する1つの反応障壁を正確に計算するのは困難です。

そこで、先デ研では、多数の原子や分子が存在する状態ですべての反応を調べて、最初に起こる主要な反応を見つけ出してから、単純な系でその反応を再現して反応障壁を計算する方法を考案しました。

ここでは、説明を簡便にするために鉄(Fe)と水分子(H_2O)と酸素分子(O_2)で構成される単純なモデルを使った反応障壁の計算例を紹介します。

まずは最初に起こりやすい主要な反応を見つけ出すために、図5のように、Feと H_2O と O_2 が多数存在する系での反応を見ていきます。第一原理により、起こり得る反応を網羅的に記述しました。

この反応の初期には、図5に示すFe-O結合を起点として2つのFe-OH結合が形成される反応であることが分かりました。

次に、その反応障壁を解析していきます。

図6は、より単純な系でFe-O-O結合からFe-OH結合の形成を再現するために、多数のFe原子と、 H_2O 分子と O_2 分子をそれぞれ1つずつ配置した例です。第一原理計算によってこの反応を詳細に調べると O_2 分子の結合が解離した後、Feと結合してFe-O-Oの結合が形成されました。その後、 H_2O のO-H結合が切れ、残ったOH基がFeに吸着することで、2つのFe-OH結合が形成されることになりました。

Fe-O-Oの結合からFe-OHの結合への反応障壁を計算した結果は0.40 eVで、他の物質の反応障壁と比較して妥当であるこ

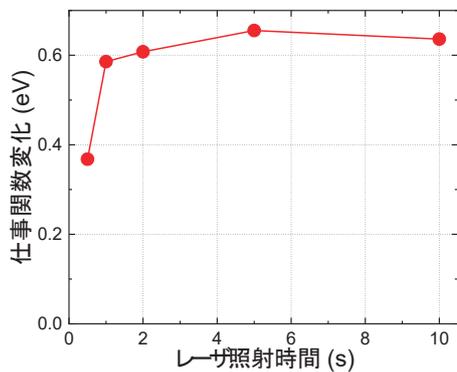


図3 鋼材へのレーザー照射時間と鋼材の仕事関数変化の測定例

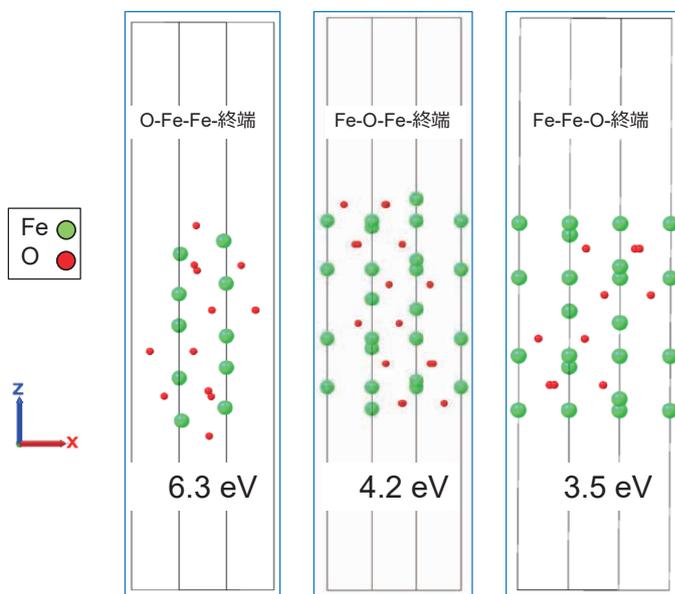


図4 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の終端構造の例とそれぞれの構造の仕事関数の計算例

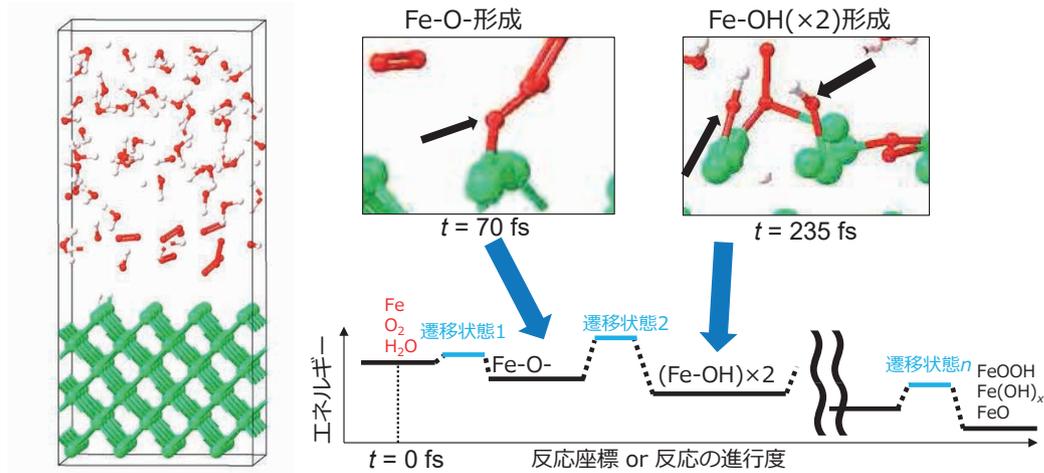


図5 FeとH₂OとO₂が多数存在する状態での反応の初期モデル(左)と注目した反応(右上)と反応過程(右下)

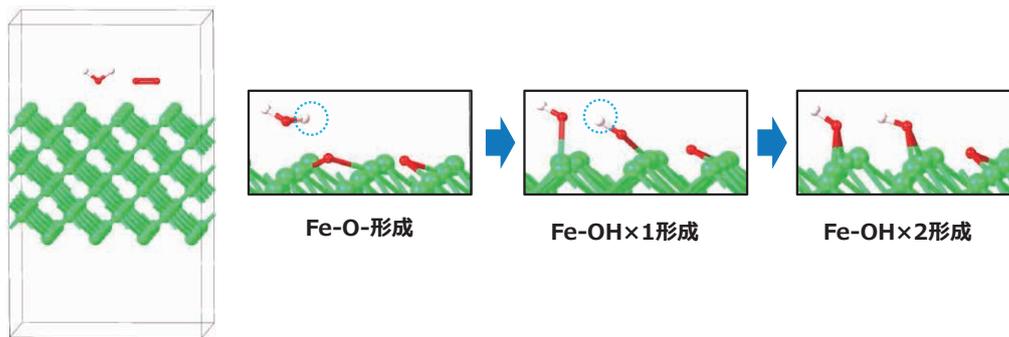


図6 第一原理計算によって解明した鋼材、酸素分子、水分子の間の初期反応の例

とが確認されています。これまで、このように2つ以上の分子が存在する系において、複数の結合の解離や形成を計算することは困難でしたが、図5のような多分子系での反応を調べることで、注目する反応障壁を正確に計算できる方法を確認しました。

現在、この計算方法を用いることで、レーザー照射で形成される物質について反応障壁計算を進めており、仕事関数の測定結果と合わせて、錆の抑制に適した物質を選定できる見通しを得ています。

■ステップ③：選択した物質が形成されるメカニズムを解明してレーザー照射条件を明確化

ここでは、所望の物質を選択的に効率良く形成するために、物質が形成されるメカニズムを解明する取り組みについて紹介します。

レーザー照射で形成される酸化鉄は、急激

な加熱と冷却により非平衡状態で形成されますが、このような現象は、一般的に第一原理で計算できる時間スケールと空間スケールを超えています。したがって、非平衡状態の現象を効率的に再現するための新しいアプローチが必要となります。

図7は、レーザーを鋼材に照射したときの温度変化とその温度変化に伴う鋼材の状態変化についてのイメージ図です。

レーザーが照射されて錆の温度が急激に上昇し、錆の分解、蒸発などが起こります。その後、鋼材表面が加熱されて、レーザーの停止に伴い急激に冷却されて非平衡状態で液相から固相へ相転移する過程で空気中の酸素分子と反応して酸化鉄などが形成されると考えられます。

この過程で形成される酸化鉄を選択するために私たちがレーザーを使って制御できるのは錆や鋼材の温度です。しかし、温度は

レーザーのパワーや照射時間、外部環境などさまざまな条件で変動するため、実験によって現象を解明するには多くの手間と時間が必要です。したがって、先デ研ではより効率的に現象の解明を進めるために、計算による現象の解明に取り組んでいます。

具体的には、第一原理計算を用いて、ステップ②のようなマイクロな現象を明らかにしつつ、これらの現象を組み合わせることでマクロな現象を再現する技術を確立して、所望の現象を解明します。

図7の中でも重要なのは、レーザー照射を停止した後に溶融した鋼材表面が大気中で急冷されて酸化鉄を形成する過程です。

この過程での酸化鉄の生成を再現するには、10 nm オーダー以上の周期構造が形成される過程を計算することが必要で、そのためには100 ps以上の時間にわたる現象を計算する必要があります。しかし、前述し

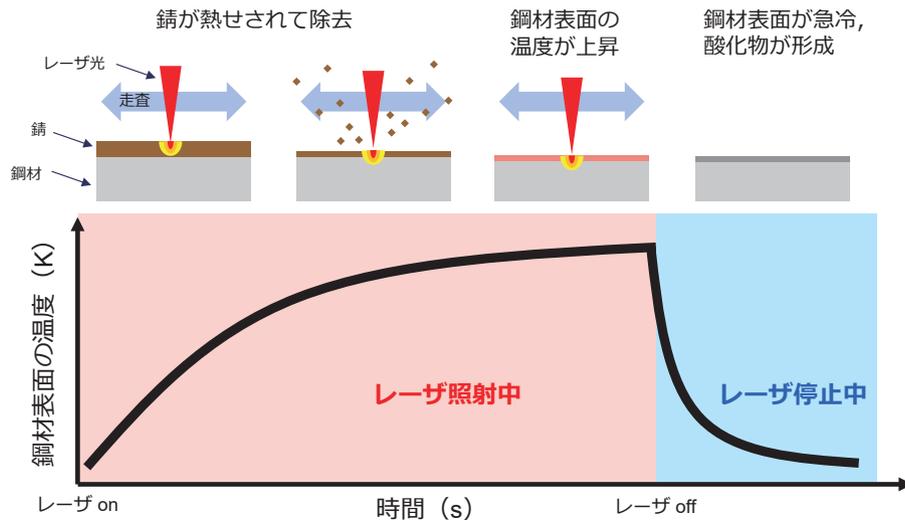


図7 レーザ照射時の鋳および鋼材の温度変化と鋼材表面で生じる現象の概略図

たように第一原理計算では1 nmオーダーの系で数10 ps程度での現象に対する計算が一般的であり、上記のような大規模かつ長時間の非平衡現象を直接再現することは困難です。そこで先デ研では、第一原理計算の結果を学習したポテンシャルを用いることで計算量を小さくしつつ第一原理に近い精度を保ち、大規模かつ長時間の計算を可能とする機械学習分子動力学法⁽³⁾の活用を検討しています。

このような計算技術を確立することで、所望の酸化鉄の形成条件をレーザー照射で制御するための基盤が整います。

将来的には、この知見を応用して通信インフラをはじめとするさまざまな設備の鋳の進行抑制に寄与するレーザー技術へ展開できると考えています。

まとめと展望

通信サービスを持続可能にするためには、鉄塔など通信インフラ設備の維持管理のための作業数やコストを低減する必要があります。先デ研では、レーザーを用いて鋳を除去する技術を活用して、レーザーで鋳をとりつつ、鋼材を錆びにくくすることで作業周期を延伸して必要な作業者とコストを抑制する技術の開発をめざしています。

これまでの実験で、レーザーを照射することにより、鋳の再発や進行を抑制できる酸

化鉄を形成できることが分かっています。現在は、酸化鉄の形成過程を明らかにするために、第一原理計算による現象の再現技術の確立に取り組み、この知見に基づいて、所望の酸化鉄を形成するためのレーザー制御技術を確立したいと考えています。

本記事で紹介した取り組みは、レーザーによる素地調整と表面改質の観点から、補修周期の延伸に貢献するための基盤技術の1つです。

今後は、塗装の剥がれにくさや再塗装も含めた施工プロセスとの連携も視野に入れながら、通信インフラ設備の長寿命化に貢献できるレーザー技術の確立をめざします。

参考文献

- (1) S. Shimodaira: "On the Relation between the Work Function and the Corrosion Rate of the Metals," JIMM, Vol.23, No.4, pp.243-246, 1959.
- (2) S. Zhuang, S. Kainuma, M. Yang, M. Haraguchi, and T. Asano: "Characterizing corrosion properties of carbon steel affected by high-power laser cleaning," Constr. Build. Mater., Vol.274, No.2, 122085, 2021.
- (3) K. Nomura, S. Hattori, S. Ohmura, I. Kanemasu, K. Shimamura, N. Dasgupta, A. Nakano, R. K. Kalia, and P. Vashishta: "Allegro-FM: Toward an Equivariant Foundation Model for Exascale Molecular Dynamics Simulations," J. Phys. Chem. Lett., Vol.16, No.25, pp.6637-6644, 2025.



(左から) 木内 康平/ 坂本 尊/
川村 宗範/ 望月 章志

通信インフラの維持管理の効率化に向けて基礎研究から応用研究、実用化まで一貫通貫で取り組み、持続可能な社会の実現に貢献していきます。

◆問い合わせ先

NTT先端集積デバイス研究所
サステナブルデバイス研究部

通信基盤設備の研究開発と社会インフラへの展開

NTTアクセスサービスシステム研究所シビルシステムプロジェクトでは、通信を支える基盤設備を対象に、材料・構造に基づく劣化メカニズムの解明から、耐震対策、被災予測、AI（人工知能）を活用した点検・維持管理技術の研究開発を進めてきました。近年は、これらの知見を社会インフラ分野へ展開し、維持管理の高度化や効率化に貢献する技術の創出にも取り組んでいます。本稿では、通信基盤設備における研究開発の変遷とともに、画像診断や被災予測、SAR（Synthetic Aperture Radar）衛星を活用した予兆検知技術を紹介します。

キーワード：#インフラ, #AI, #レジリエンス

ほんだ なつき
本田 奈月

NTTアクセスサービスシステム研究所

はじめに

通信ネットワークは、交換機や伝送装置といった情報通信機器や光ファイバのような通信媒体とともに、それらを収容・支持する通信基盤設備によって支えられています。特に地下の通信設備を支えるとう道*¹やマンホール、管路などは長期にわたり外部環境に曝され、かつ更改が容易ではないという特性を持っています。そのため、これらの設備では建設後の維持管理を前提とした長寿命化、高信頼性が重要であり、保守運用では劣化の把握と適切な対応が通信サービスの安定提供に直結する大きな課題となります。また、災害等の外乱下でも機能を維持・早期復旧できるレジリエンスの観点から、設備の状態把握と予測に基づく保守運用の高度化が求められています。近年、設備の老朽化の進行や災害リスクの高まりを背景に、点検・補修の効率化に加え、材料や劣化現象に関する基礎的な研究の蓄積を通じて、劣化の進行そのものを精密にとらえ、将来を見据えた予測や社会インフラの維持管理にも展開可能な技術の創出に取り組んでいます。

本稿では、NTTアクセスサービスシステム研究所シビルシステムプロジェクトが取り組む通信基盤設備の研究開発の変遷とともに、近年の設備運用を支える技術、さらには研究開発の将来に向けた取り組みについて紹介します。

通信基盤設備と研究開発技術の取り組み

NTTの通信用設備の外観を図1に示します。通信網におけるアクセスネットワークとは、各利用者の端末や建物と通信事業者のビルとをつなぎ、通信サービスを提供する通信網のことで、シビルシステムプロジェクトではとう道、マンホール、管路、橋梁添架設備の研究開発を行ってきました。1970～1980年代の研究開発では、物品開発や開削を中心とした施工技術が主な対象でしたが、阪神・淡路大震災を契機として耐震機能の向上および耐震性確保の必要性に関する研究へと重点を移し、さらに近年では、老朽化が進行する設備を対象に、効率的かつ持続的な保守・管理手法の研究へと重点対象を移しています⁽¹⁾。

NTTでは、通信を安心・安全に支える基盤の研究開発を材料や構造の検討から、設計、施工、維持管理に至るまでを一体としてとらえて進められてきました。新たな物品や構造を開発する段階だけでなく、実際に長期間使用された設備の状態を分析し、その結果を次の設計や改良に反映するという循環的な取り組みを行っています。ここでは近年の物品開発の一例として、マンホール（MH）鉄蓋の開発を紹介します。

■テーパーダイヤ鉄蓋開発における設計改良と維持管理性向上

MHの鉄蓋は地下に設置された通信・インフラ設備へのアクセス機能を担うと同時に、地上露出部でもあり、交通荷重や第三者影響から設備と人の安全を確保する重要な構造要素として位置付けられます。「テーパーダイヤ鉄蓋」は、点検しやすく、かつ

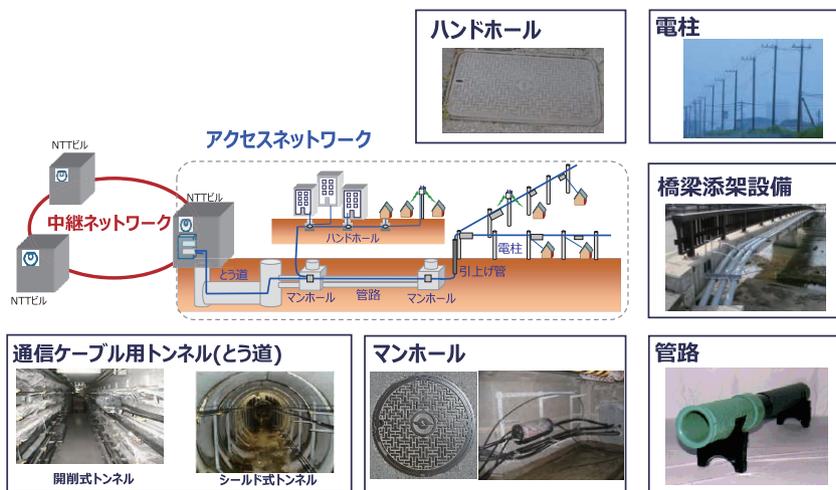


図1 NTTの通信用設備

*1 とう道：通信ケーブルや管路を収容するために地下に設置された専用の通路構造物。

耐摩耗性に優れた鉄蓋として改良開発された物品の一例です⁽²⁾。図2に外観と改良点を示します。異なる形状(四角形と六角形)の二段構成を持つ模様とする工夫が適用されています。これは摩耗の進行によって、四角形から六角形へと変化する構造とすることで、残存する溝を計測せずとも、模様形状の変化を目視するだけで摩耗状態を把握可能となり、カメラ画像による点検を容易にするなど、維持管理業務の簡易化および迅速化を実現しました。さらには、模様の配置を工夫することにより、摩耗原因となる砂などを効率的に排出して蓋自身の耐摩耗性を高め、取り換えまでの期間を改良前の約3倍へと延伸することができました。これらの研究開発は、物品や構築コストだけでなく、維持管理コストまで見据えた設計によるものであり、またMH鉄蓋においては摩耗が発生する際のメカニズムを分析して新規開発にフィードバックすることで、長期に管理可能な通信基盤設備を強化していくものです。

基盤設備に関する研究開発は、単一の分野にとどまらず、材料、構造などの基礎技術から、実際の施工、そして長期にわたる維持管理、さらには災害対策までを含む幅広い領域にわたる取り組みが必要です。次に、維持管理における課題や劣化メカニズムの理解、さらにはその先の高度な取り組みについて紹介します。

維持管理における点検診断技術

従来の維持管理では、定められた周期で設備を点検し、ひび割れや錆などの劣化状態を目視して、点検者の報告を元に補修や更新を判断する方法が中心です。しかし、この方法では点検者による評価のばらつきが生じやすく、また劣化の外観が類似していても、原因や進行速度が異なる場合には、経験則だけでは適切な判断が難しいという課題があります。

こうした課題に対して重要となるのが、劣化を「現象」としてとらえるだけでなく、「なぜ起こるのか」「どのような条件で進行するのか」といった劣化メカニズムに着目した分析です。過去の事例や点検結果から、材料の性質、周囲の環境条件、構造的な特徴などが関係し、劣化は時間とともに進行

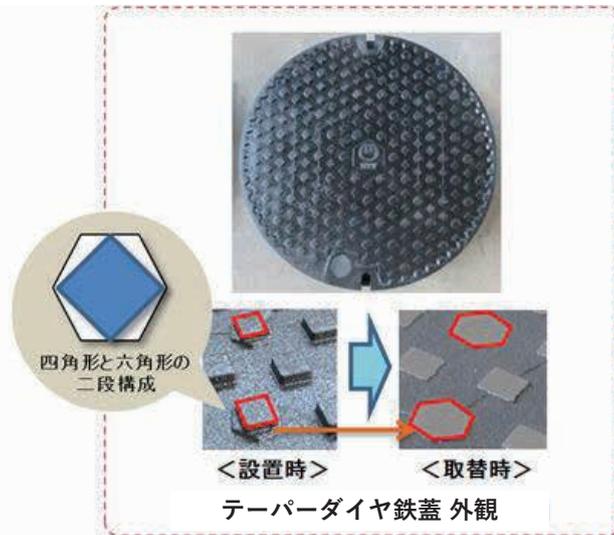


図2 マンホール鉄蓋の開発

することが分かっています。これらの要因を整理し、メカニズムとして理解することが、劣化を予測し、維持管理稼働を適切化する第一歩となります。ここでは設備の劣化に対する画像診断技術を紹介します。

■画像による劣化診断・推定技術

点検診断においては、目視による点検項目が多くを占めており、今日ではAI(人工知能)による画像診断技術の活用が急速に進んでいます。AIによる撮影画像をひび割れや変状を抽出・評価する技術が導入され点検の効率化が図られています。点検データをデジタルカメラなどで取得し、集約した後、各々の画像の診断を一括実施することで稼働を効率化します。またAIによる画像診断は効率化だけではなく、各点検者による評価のばらつきを抑制します。さらに点検データのデジタル化は点検履歴を蓄積して、経年変化としてとらえることが容易になり、診断の精度向上やさらには将来の劣化進行の予測を可能とします。

近年NTTではデジタルカメラにより撮影した道路橋等のインフラ施設の画像から数年後の鋼材腐食の進行を高精度に予測する技術を確立しました。画像認識AIによる点検・診断・劣化予測の取り組みを図3に示します。腐食の進行予測技術は、長年にわたって研究されてきたとおり、点検する対象物の抽出、対象物における劣化エリアの算出、エリアと鋼材の減肉との相関性評価、そして腐食エリアの拡大を推定する技術へと進化させてきました。実際の撮影

画像から将来の腐食の広がりを予測した画像を生成することができる検査技術は世界初であり、腐食進行した実際の施設の画像と、設置環境のデータを学習させることにより高精度な予測画像の生成を可能にしました⁽³⁾。この技術は道路橋に添架された通信用管路設備に対する検証の結果、数年後における腐食領域の増加率を平均誤差10%未満(9.9%)の精度で予測できることを確認しています。

一般的にAI画像診断の実用化に課題となる主な原因は、実環境のばらつきとAIの学習情報との不整合にあります。特に、所外環境設備の画像は、照明条件や汚れ、撮影角度、劣化の進行形態が学習データと異なると、精度の誤差につながります。さらにAIは劣化の因果ではなく見た目の相関を学習するため、背景などに影響されて誤判定を起こすことがあります。劣化状態の区別が連続的であいまいなため、正解レベルの揺らぎがあることも判断精度を低下させます。画像診断の研究においては、これまで画像から劣化を精度良く分析するために、劣化の主要素となる個所の適切なセグメンテーションが鋼材の減肉などの定量的データと相関性を分析することで、高精度な分析や予測につながっています。

これらの技術開発に共通しているのは、劣化や損傷を単発の事象として扱うのではなく、材料や構造、環境条件に基づくメカニズムとして理解し、その知見を実用的な技術へと落とし込んでいく点です。これら

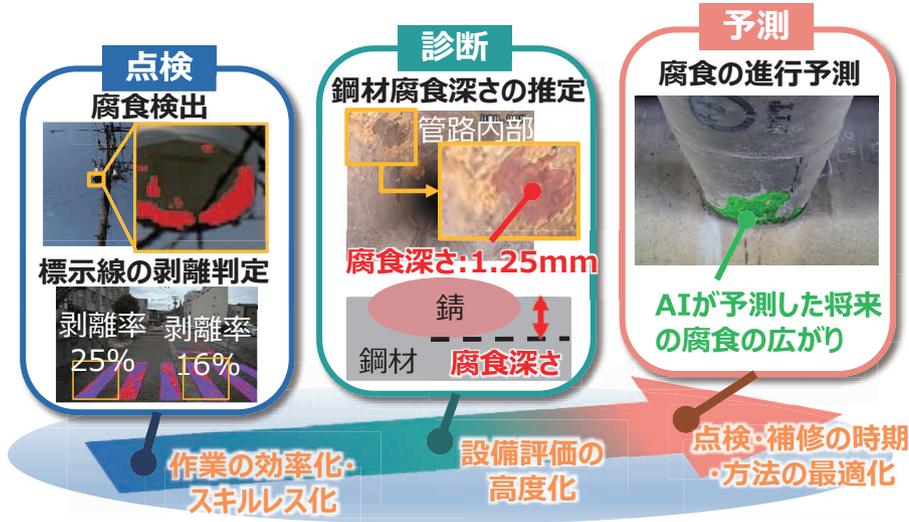


図3 画像認識AIによる点検・診断・劣化予測

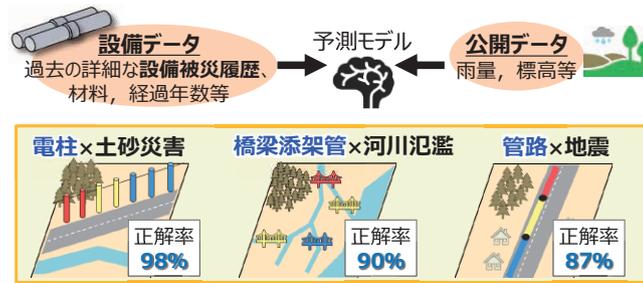
の取り組みは、設備の安全性と信頼性を高めると同時に、次で述べる社会インフラ維持管理への発展につながる重要な基盤となっています。

社会インフラへ拡大する通信基盤技術

橋梁・道路・トンネル・上下水道などの社会インフラ設備は老朽化が進んでおり、トンネル崩落や道路における重大な事故も増加しています。さらに、2045年には設備保全費が2018年度比で約40%増加する一方、生産年齢人口は大幅に減少すると予測されており、インフラ維持管理を取り巻く環境は一層厳しさを増しています。加えて、大地震や集中豪雨などの激甚災害が頻発する中、限られたリソースでいかに効率的かつ的確にインフラを維持していくかが喫緊の課題となっています⁽⁴⁾。

社会インフラは、コンクリートや鋼、樹脂などの材料で構成され、経年により腐食やひび割れといった劣化が進行する点で、通信基盤設備と多くの共通性を持っています。耐震対策や被災予測、点検・メンテナンス技術はいずれも、設備の構造特性や材料特性、外力の作用を踏まえた分析を基盤とするものであり、通信設備で培われてきた劣化評価やデータ解析の知見を社会インフラへ展開することが期待されます。ここでは、こうした背景に基づき、被災予測および劣化の予兆検知に関する取り組みを紹

(a) 通信設備の被災予測技術



(b) 豪雨に対する道路の被災予測技術



図4 設備データに基づく被災予測技術

介します。

■設備データに基づく被災予測技術

膨大な既設設備を限られたリソースの中で効率的に更新・補強していくためには、更改の優先順位を合理的に判断する手法が不可欠です。管路などの設備を主な対象として、NTTにおいては被災した設備データの傾向を分析し、研究開発を進めてきました。過去の設備における被災事例に加え、地盤条件や設備構造に関するデータを統合することで、地震や豪雨などの大規模災害時に、設備が受ける影響の程度を事前に推定する技術が構築されています。これにより、被災リスクの高い設備をあらかじめ把

握し、重点的に対策を講じるべき対象の選定や復旧計画の高度化が可能となり、限られた人的・物的リソースの効率的な活用に寄与します。

図4に被災予測技術の概要を示します⁽⁵⁾。長年にわたり蓄積してきた設備被災時の点検データを用いることで、例えば電柱を対象として豪雨起因の被災リスクを評価すると、高精度(正答率約98%)で推定するAIモデルの構築に成功しました(図4(a))。さらに、この技術を応用し、地図上に仮想的に配置した電柱データを用いて道路沿線の被災リスクを面的に評価する手法にも応用を展開しています(図4(b))。本手法に

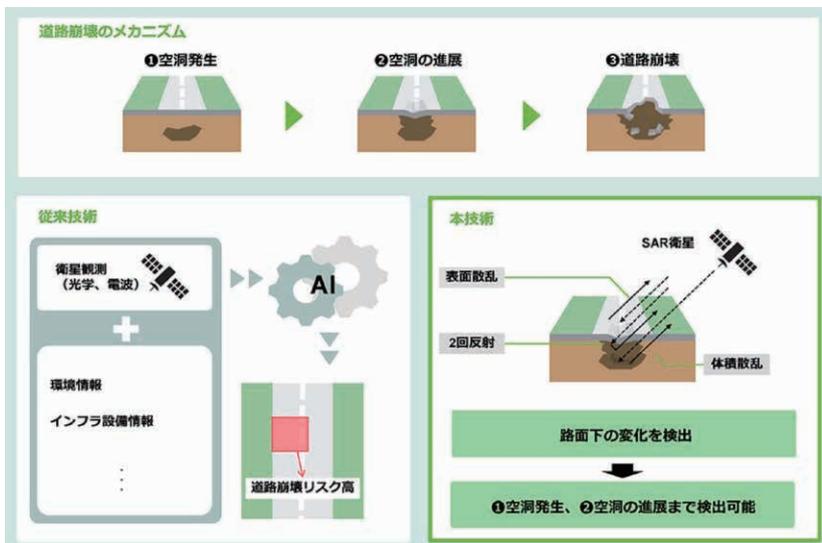


図5 衛星データに基づく道路下空洞の予兆検知

より、詳細な現地調査や道路固有のデータがなくても、全国どこでも短時間で豪雨時の道路被災リスクを推定し、ハザードマップが整備されていない地域においても、迅速な被災リスクを評価できます。こうした設備単位の被災予測技術を応用するカタチが、道路の被災リスクを面として評価する技術の一例です。本技術は道路の避難ルートや物流ルートの検討、事前防災計画の策定など、地域の防災・減災や復旧計画の構築に資するものと期待されます。

■衛星データに基づく地中空洞の予兆検知

社会インフラを対象とした維持管理は、設備単位の評価に加え、広域に状況を把握する視点が重要となります。その有力な手段の1つが、衛星データを活用した広域観測です。本技術の概要を図5に示します。一般に、SAR (Synthetic Aperture Radar) *2衛星を用いたインフラ監視では、地表面の凹凸や沈下といった形状変化をとらえる手法が用いられてきました。これに対し、NTTでは地表面に現れる変状だけを対象とするのではなく、アスファルトへの浸透性を有する電波の散乱特性や偏波成分に着目することで、地表に顕在化する前段階の地盤内部の変化をとらえる手法を実証しました⁽⁶⁾。また、衛星データを時系列で取得し変化を分析することで、空洞変状

の進展状況を把握することが可能となります。これにより、道路陥没の予兆を、地表変状が顕在化する以前の段階からとらえることができると考えます。従来の地中空洞は道路上から地中レーダを用いて現地点検することで特定していましたが、本技術を適用することで、広域を対象とした効率的なスクリーニングが可能となり、点検に要するコストや稼働を大幅に削減できると期待されます。

今後は、衛星データを、地上・地下で得られる点検データ、さらには同じくNTTで研究が進められている既設の通信用光ファイバで検知する振動分析による地盤モニタリング手法と組み合わせることで、道路陥没のような社会課題に対して予兆をとらえ、社会インフラの安心・安全に貢献していきます。

おわりに

本稿では、通信基盤設備を対象として、劣化メカニズムの理解から耐震対策、被災予測、AIを活用した点検・維持管理技術、さらに衛星データを用いた広域観測技術までを概観しました。これらの取り組みはいずれも、劣化や損傷を進行過程としてとらえ、将来の対策や設計へとつなげる共通の考え方に基づいています。

通信基盤設備は、長期使用や更新制約といった特性において、道路や橋梁、上下水道などの社会インフラと多くの共通点を

持っています。通信で培われてきた劣化評価やデータ駆動型予測の知見は、社会インフラ全体の維持管理にも応用可能な価値を持っています。一方で社会インフラの維持管理は国、自治体、各企業などインフラごとで個別に実施されているため、相互の連携により全体最適や効率的な維持管理を進めていく必要があります。こういった連携と、設備データに基づく予測技術や広域・継続観測を可能とする計測手段を組み合わせることで、インフラ維持管理の合理化と高度化は一層進むと考えられます。シビルシステムプロジェクトでは、これらの研究開発をより一層推進し、通信基盤設備を支えるとともに同様の課題を抱える社会インフラ事業へ技術と知見を還元することで社会全体の課題解決へ貢献していきます。

■参考文献

- (1) <https://www.tsukuba-forum.jp/50th/chronology.html>
- (2) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2017/10/04/171004a.html>
- (3) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2025/04/30/250430a.html>
- (4) https://www.rd.ntt/research/JN202507_34714.html
- (5) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2025/05/12/250512c.html>
- (6) <https://group.ntt.jp/newsrelease/2025/11/07/251107b.html>



本田 奈月

通信基盤設備を対象とした研究を通じて、劣化や変状のとらえ方、将来の見通しに関する検討を進めてきました。今後は、分野を越えてNTTだけでなく社会インフラにも資する技術の創出に取り組んでいきます。

◆問い合わせ先

NTTアクセスサービスシステム研究所
シビルシステムプロジェクト

* 2 SAR：電波を照射し、その反射特性を解析することで、天候や昼夜の影響を受けずに地表や地盤の状態を観測できるレーダ方式。



主役登場

インフラを原子から理解し、 未来を守る

木内 康平 Kohei Kinouchi

NTT先端集積デバイス研究所
研究員



通信鉄塔などのインフラ設備は、風雨や海塩に長年さらされ続けています。高度経済成長期に集中的な整備が行われた結果、建設50年以上の設備が膨大な数に達し、老朽化は社会全体の課題となっています。記憶に新しい道路陥没事故が象徴するように、インフラは目に見えない部分から静かに傷み、突然、事故として表面化します。中でも腐食によって生じる錆は、構造物の安全性を蝕む存在です。従来の補修現場では、工具や薬品などで錆を除去してきましたが、粉塵や廃液に加え、高所作業のための足場設置など、現場では大きな負担となっています。

この解決手段として、近年レーザークリーニング技術が注目されています。高出力レーザーを照射して錆や塩分を蒸発させることで、鋼材下地を残しつつ腐食物を選択的に除去できる技術であり、薬品フリーで環境負荷を低減できる点や、非接触施工のため自動化に適している点が特長です。さらに鋼材の単なる「洗浄」だけにとどまらず、レーザー照射で生じる酸化鉄の性質を活用し、防食性向上につながる表面改質を行える可能性も指摘されています。研究途上ではありますが、私たちはこの「表面の設計」としての応用性に着目し、レーザー照射後の酸化鉄形成メカニズムの解明を進めています。また、この酸化鉄の防食性を解明し、照射条件によって酸化鉄を選択的に形成できれば、耐久性向上につながると期待しています。

では、どのような酸化鉄が望ましいのでしょうか。防食性の高い酸化鉄の理解には、

原子レベルでの反応をミクロな視点でとらえる必要があります。ミクロな反応性を評価できる手法として第一原理計算が有効です。一方、対象となるインフラ劣化はミリメートル程度のもので秒～年単位で変化するマクロ現象であり、ミクロの知見がマクロ現象の理解に直結するとは限りません。ミクロの集合体がマクロであり、ミクロどうしの相互作用が現象を支配することも多いためです。さらに、第一原理計算は当初、完全結晶の物性物理分野で大きく発展した手法で、土木分野への適用は少なく、スケールのギャップを埋めるアプローチが必要となっています。近年は、第一原理精度を保ちながら計算の高速化・大規模化を可能にするMLP-MD (Machine Learning Potential Molecular Dynamics: 機械学習分子動力学法) などが登場し、インフラ材料の現実スケールの課題とミクロな理解をつなぐ研究が現実味を帯びつつあります。

私たちスマートメンテナンス技術研究グループでは、現場でのレーザークリーニングのメカニズムを、ミクロとマクロをつなぐかたちで理解することに取り組んでいます。レーザー加工を電子・原子レベルで解明し高度化する研究の多くは、フェムト秒程度の超短パルスレーザーを対象に、非熱的な極短時間現象を扱う第一原理手法(時間依存密度汎関数理論)が検討されています。一方、実現場では、コストを重視し連続波レーザーが用いられ、長時間にわたる温度上昇と構造変化が支配的な熱的な状態変化が起こります。こうした現場特有の制限は、既存の

超短パルスレーザー向けの理論とは異なるアプローチを必要とします。

こうした中で私は、原子の振る舞いを解析できる理論がありながら、実構造物で起こる現象を理解できていないと痛感しました。この理論と現実の隙間を橋渡しすることこそ、インフラ業界に身を置きながら原子に興味を持つ自身が取り組むべきテーマだと確信しました。さらに、MLP-MDを知ったとき、これならミクロとマクロの壁を越えられるかもしれないと強く惹きつけられました。

そこで私は、第一原理計算で得られたミクロな反応性を基盤にしつつMLP-MDを組み合わせることで、現場条件に対応した現象の解析に挑戦しています。こうした取り組みにより、レーザー照射による材料の表面改質を理解し、インフラ長寿命化に貢献できると考えています。

インフラ事業への実装を考えると、施工手順や装置には制約が生じます。一方で、制限の中で、あるいは意図的にルール境界を押し広げながら解決策を探し出していくことに、企業研究ならではの面白さがあると最近強く感じています。

現場の課題を出発点に、原子レベルの見えない世界から根本を理解しつつ、今見えているインフラの現状と未来に寄り添うことを使命に、インフラを守る研究を進めていきます。同じように、世の制約と理想の間とで悩みながらも両者をつなごうとしている皆さんと、一緒にこの橋渡しに挑戦できれば嬉しく思います。



美容×テクノロジーが生む新市場：ビューティテックの成長メカニズム（前編）

2010年代後半、IoT（Internet of Things）やデジタル技術の社会実装を背景に「〇〇テック」が世界的に拡大し、産業構造そのものを変革してきました。その潮流の1つが「ビューティテック」です。美容・化粧品分野にデータやAI（人工知能）を導入し、商品開発や顧客体験を再構築する動きは、2016年のCES（Consumer Electronics Show）で本格化し、2024年の資生堂初出展に象徴されるように大手企業の経営戦略へと組み込まれました。本レポートでは、ビューティテックを産業再編の一事例として考察します。

キーワード：#ビューティテック、#美容、#顧客理解



はじめに

2010年代後半、デジタル技術やIoT（Internet of Things）の社会実装が進むにつれ、既存産業をデジタル技術によって再定義する動きが世界的に加速しました。その象徴が、「フィンテック」「アグリテック」「スポーツテック」「アドテック」「フードテック」といった「〇〇テック」と総称される新産業群です。これらは、単なる技術導入ではなく、産業構造や価値創出のあり方そのものを変革する潮流として注目を集めてきました。

その流れで登場したのが、ビューティテック（Beauty Tech）*です。美容・化粧品産業にデジタル技術やデータ活用を持ち込み、商品開発、顧客接点、サービス提供のあり方を再構築しようとする試みは、2010年代後半から徐々に顕在化されてきました。

この潮流を象徴する場の1つが、毎年1月に米ラスベガスで開催される世界最大級のテクノロジー展示会CES（Consumer Electronics Show）です。2016年のCESでは、ビューティテック関連の展示が本格的に登場し、美容分野におけるデジタル活用が「周辺の試み」から「産業トレンド」へと移行しつつあることを示しました。

その後、海外スタートアップやテクノロジー企業を中心に関連展示は拡大し、日本企業の関与も徐々に強まってきました。象徴

的なのが、日本の大手老舗化粧品メーカーである資生堂が2024年にCESへ初出展したことです⁽¹⁾。これは、ビューティテックが実験的領域から、大手企業の経営戦略に組み込まれる段階へと移行したことを示す出来事といえます。

本稿では、このビューティテックを単なる「美容×IT」の話題としてではなく、データ、AI（人工知能）、UX（User Experience）設計を軸に再編される産業構造の一事例としてとらえ、その本質と経営への示唆を整理します。

ビューティテックの定義と概念

■ビューティテックとは何か

ビューティテックとは、化粧品や美容機器といった既存の美容製品に、単にデジタル技術やITを付加したものを指す言葉ではありません。むしろその本質は、「美」をどのようにとらえ、どのように顧客に価値として届けるかというプロセス全体を、データとアルゴリズムを起点に再構築する点にあります。

従来美容産業では、製品開発者の経験や勘、あるいは市場全体の平均値を前提に商品が設計され、広告やブランドイメージを通じて消費者に訴求されてきました。一方、ビューティテックでは、個々の消費者の肌状態、生活習慣、年齢、環境要因など

をデータとして取得・分析し、その結果に基づいて1人ひとりに最適化された提案や体験を提供することが中核となります。

このとき重要なのは、AIや画像解析、センシング技術といったテクノロジーそのものではなく、それらを用いて「診断」「提案」「使用後の変化」「継続的な改善」という一連の流れを設計する点です。つまり、ビューティテックとは、製品中心のビジネスから、データを介した継続的な顧客関係を軸とするビジネスへの転換を促す産業領域と位置付けることができます。

言い換えれば、ビューティテックは「美容×IT」という技術の組合せではなく、美容産業における価値創出の仕組みそのものを再設計する試みであり、商品、サービス、顧客体験、さらには事業モデルまでを含めた構造的な変化を伴う概念です。

ビューティテックは、表1のとおり、具体的には、価値を受け取る対象が消費者と企業になります。

消費者については、直接消費者に提供しているサービスと、化粧品ブランドや美容

* ビューティテック：消費者が最終的な購買判断を行う前に、美容・パーソナルケア分野に特化したソフトウェアを利用して購入される化粧品、スキンケア製品、パーソナルケア製品を指します。美容・パーソナルケア向けソフトウェアには、スマートフォンやタブレット向けのモバイルアプリ（例：化粧品を仮想的に試すことができるアプリ）や、AIを搭載したデバイス（例：スマートミラー、メイクを個別に最適化するデバイス）が含まれます。

表1 ビューティテック市場とは

価値を受け取る対象	主なサービス	ビジネスモデル（取引構造）
消費者	美容アプリ、家庭用美容機器（スマート美容デバイス）、定期的なスキンケア	B2Cモデル ※企業→消費者
	AI肌診断、AR試着（コスメ・ネイル）パーソナライズ接客	B2B2Cモデル ※企業→化粧品ブランド・美容サロン・小売→消費者 (体験を提供)
企業	CDP（Customer Data Platform：顧客データ基盤）分析プラットフォーム、AI/AR SaaS	B2Bモデル ※企業→企業（化粧品ブランド・美容サロン） (技術・基盤・仕組みを提供)

表2 従来型美容産業とビューティテックの違い

観点	従来型美容産業	ビューティテック
価値の起点	製品（成分・ブランド）	顧客データ（肌状態等）
顧客理解の方法	市場調査・セグメント分析	個人データの取得・解析（AI）
提供価値	機能・効能・イメージ	診断+継続的な改善体験
商品設計	マス向け・平均値ベース	個別最適化・パーソナライズ
顧客接点	店頭・EC・広告が中心	アプリ・デバイス・オンライン診断
企業と顧客の関係	購入時点で完結しやすい	継続的・双方向の関係
収益モデル	単発販売（売切型）	LTV重視・継続課金
競争優位の源泉	ブランド力・広告投資・流通網	診断精度・UX・データ蓄積力
技術の位置付け	補助的（製造・販促の効率化）	中核的（価値創出そのもの）
事業成長のドライバー	新商品投入・販路拡大	データ学習・顧客理解の深化
経営課題	ヒット商品の継続創出	データ戦略・顧客体験の設計

出典：各種情報より、筆者作成

サロン等を介して消費者に提供されるサービスがあります。

主なサービスとしては、前者は、美容アプリ、家庭用美容機器で、後者は、AI肌診断AR（拡張現実）でのコスメやネイルの試着（バーチャルメイクアップ）です。

企業向けには、化粧品ブランドや美容サロン向けの顧客データ基盤サービス等があります。

■従来の美容産業との違い

ビューティテックと従来の美容産業を比較したものが表2です。

従来の美容ビジネスは、「製品」を中心に設計された産業構造でした。企業は市場調査や過去の販売実績を基に商品を開発し、

広告やブランド力によって需要を喚起し、店頭やECを通じて販売します。消費者との関係は基本的に「購入時点」で完結し、企業側が把握できる情報は、売上や購買履歴といった限定的なものにとどまっています。

これに対し、ビューティテックでは、価値創出の起点が「製品」から「顧客データ」へと移行します。肌状態の画像データ、利用頻度、環境要因、使用後の変化などが継続的に蓄積され、それらをAIやアルゴリズムが分析することで、次の提案やサービス改善につながっていきます。企業と顧客の関係は単発の売買ではなく、診断・提案・フィードバックを繰り返す継続的な関係へ

と変化しています。

また、競争の軸も大きく異なります。従来はブランド力や広告投資、流通網の強さが競争優位を左右してきましたが、ビューティテックにおいては、診断精度、UX、データの蓄積量と活用能力が差別化要因となります。つまり、「どの商品を持っているか」よりも、「どれだけ顧客を理解し、その理解をサービスに反映できているか」が問われるのです。

この違いは、ビジネスモデルにも影響を及ぼします。従来型が「売って終わり」の売り切り型モデルであったのに対し、ビューティテックは継続課金といったかたちで、顧客との長期的関係から価値を回収するモデルと親和性が高いです。結果として、LTV（顧客生涯価値）を最大化する経営が可能となり、単価競争からの脱却にもつながります。

このように、ビューティテックは単なる技術革新ではなく、美容ビジネスの前提そのものを変える構造変化であり、企業に対して経営の考え方を見直すことを求めています。

なぜ今、ビューティテックなのか

ビューティテックが注目された背景としては、①消費者行動の変化、②技術の進展、③事業者の置かれた経営環境の3要因が主に挙げられます。

■消費者行動の変化

第1の背景は、消費者意識の変化です。SNSやレビューサイトの普及により、消費者は「何が売れているか」よりも、「なぜ自分に合うのか」を重視するようになりました。とりわけ美容領域では、肌質・年齢・生活環境など個人差が大きく、一律の仕様では、個々の消費者の期待に十分こたえにくくなっています⁽²⁾。

この結果、これまでのイメージや感覚に訴える説明よりも、データや根拠に基づいて「なぜ自分に合うのか」を示す提案を求



める動きが急速に強まっています。AIによる診断や画像解析は、こうしたニーズにこたえやすく、1人ひとりに納得感のある選択を可能にする手段として注目されています。

■技術の進展

第2に、技術基盤が十分に成熟したことが挙げられます。スマートフォンのカメラ性能の向上や、クラウド上で利用できるAI、画像認識技術の進化により、これまで研究機関や一部の専門家しか扱えなかった高度な分析が、一般の消費者向けサービスとして実用化できる段階に入りました。

特に生成AIの進展により、単に肌状態を数値や結果として示すだけでなく、「なぜこの結果になったのか」「次に何をすればよいのか」を分かりやすく説明することが可能になりました。例えば、店頭スマートミラーで肌状態を可視化したり、スマートフォンの肌診断アプリが日々の変化に応じてケア方法を提案したりするサービスは、一部のブランドや店舗を中心に導入が進み、消費者がこうした体験に触れる機会が徐々に増えています。

こうした技術の進化によって、AIやアル

ゴリズムは前面に出る存在ではなく、特別な知識がなくても自然に使える仕組みとして組み込まれるようになりました。その結果、消費者は技術を意識することなく、「使いやすい、結果的に納得感できる体験」として提供されるようになったのです。

■事業者の構造的危機

広告費の高騰やECプラットフォームへの依存が進む中、従来の美容ビジネスでは、商品を一度売って終わるモデルでは十分な収益を確保しにくくなっています。ブランド力だけの差別化も難しくなり、収益性は全体として低下傾向にあります。

このような環境では、単発購入に依存したビジネスではLTVを伸ばすことが難しく、顧客と長期的な関係をどのように築くかが経営上の重要な課題となっています。

例えば、AIによる肌診断を起点に、利用状況や季節変化に応じたスキンケア提案を継続的に行うことで、単なる商品販売にとどまらず、定期利用や追加購入へとつながる関係を構築できます。

ビューティテックは、顧客データを活用して1人ひとりに最適な提案を行い、継続

的な接点を生み出すことで、こうした課題に対する極めて合理的な解決策となっています。

市場動向と見通し

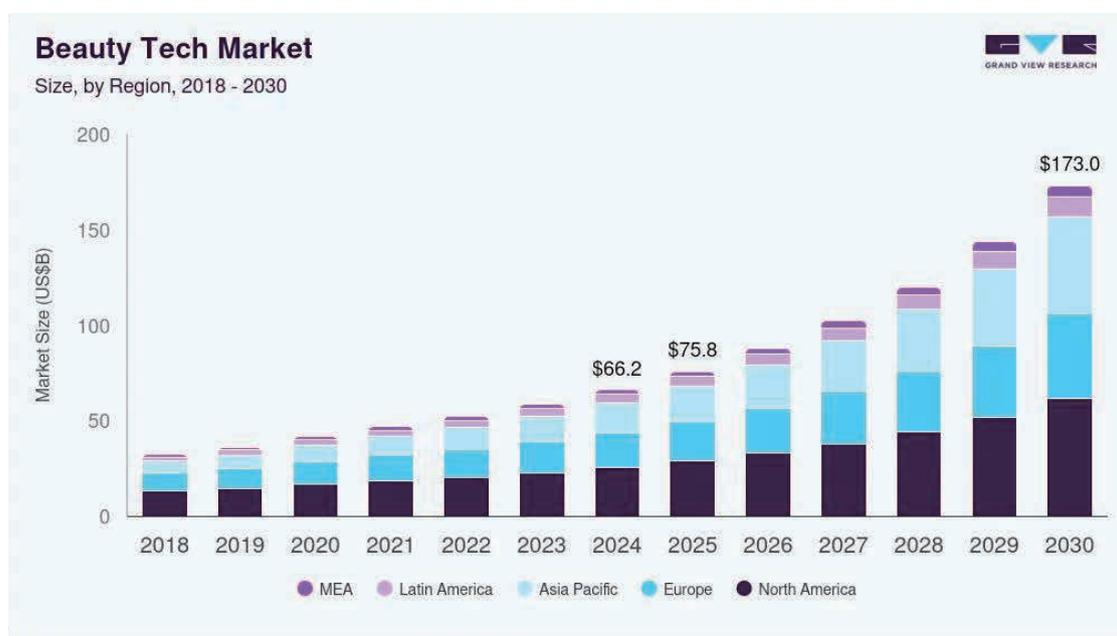
■世界市場の概況

次に、市場規模やその見通しをみていきます。Grand View Research, Inc.が公表した世界のビューティテック市場の2018年から2024年までの実績値と2025年から2030年の予測を示したものが図1です。図1によると2025年から2030年の年平均成長率は17.9%の成長が見込まれており、化粧品市場全体の成長率を大きく上回っています。

特に図2に記載の4領域(①AI・画像解析による肌診断、②パーソナライズ化粧品・スキンケア、③美容機器とアプリの連動サービス、④オンライン美容カウンセリング)が成長を牽引しています。

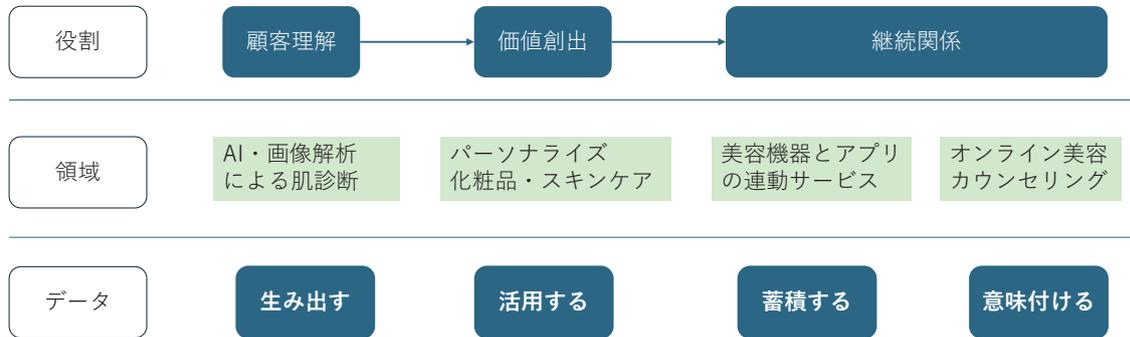
その理由を次に記載します。

- ① AI・画像解析による肌診断：肌状態を客観的に可視化できる技術への需要



出典：Grand View Research, Inc. (<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/beauty-tech-market-report>) より転載。

図1 ビューティテック市場予測（地域別）



出典：各種情報より筆者作成

図2 ビューティテックの4領域

が高まっています。スマートフォンの高性能化とAI・画像解析技術の進展により、専門機関レベルであった分析が一般消費者向けサービスとして実用化されたことが貢献しています。

- ② パーソナライズ化粧品・スキンケア：個人データに基づく「自分専用」提案が付加価値として評価されています。診断結果と連動することで、価格競争に陥りにくくなっています。
- ③ 美容機器とアプリの連動サービス：美容機器単体では把握できなかった使用状況や効果を、アプリ連動によってデータ化できるようになっています。これにより、「売って終わり」から「使い続ける関係」への転換が可能となっています。
- ④ オンライン美容カウンセリング：対面接客に依存せず、場所や時間の制約なく相談できる点が評価されています。AIやオンラインツールを活用することで、人的なコストを抑えつつ継続的な顧客接点を確保できるようになっています。

これらの4領域は役割とデータの観点で整理することができます。①から④にかけて、①ではデータを生み出すことにより、顧客理解を深め、②ではそのデータを活用して価値創出し、③、④ではデータを蓄積して、意味付けることにより、顧客との継

続的な関係構築につなげています。

■日本市場の特徴

日本市場でビューティテックのサービス化やデータ活用が相対的に進展しているわけではありません。その背景には、いくつかの構造的な要因があります。

第1に、製品中心の成功体験が強く残っていることが挙げられます。日本の化粧品産業は、処方技術や品質管理、製造プロセスにおいて世界的にも高い評価を受けてきました。一方、長年にわたり店頭での対面接客や製品中心の価値提供を重視してきたため、デジタル技術の活用やデータ駆動型のサービス設計が他国に比べて進みにくい土壌があったと指摘されています⁽³⁾。

第2に、データ活用を前提とした組織・人材・意思決定の不足です。AI診断やパーソナライズサービスを展開するには、IT、データ分析、UX設計を横断する体制が不可欠ですが、日本企業では部門間の分断や内製人材の不足により、実証実験（PoC）止まりになりやすいです⁽⁴⁾。結果として、事業化・スケールまで到達しないケースが多いと考えられます。

第3に、個人データの取り扱いに対する慎重な姿勢も影響しています。美容分野では、顔画像や肌状態といったセンシティブなデータを扱うため、企業側がリスクを過度に意識し、データ活用に踏み出しにくい傾向があります。一方、欧米ではルール整

備と活用を並行して進める動きが先行してきました。

もっとも、こうした制約は裏を返せば、既存プレイヤーにとっての成長余地にもなります。製品力やブランド資産、顧客基盤をすでに持つ日本企業が、データ活用とサービス設計に本格的に取り組めば、後発であっても十分に競争力を確立できる余地は大きいといえます。

ビジネスモデルの変化

■物売りから診断×継続へ

ビューティテックの本質は、美容分野でデジタルを活用するという意味にとどまらず、ビジネスモデルの転換にあります。

従来モデルは、「商品開発→販売→購入」という販売したら終わりというモデルが主流でした。顧客との関係は購入時点で一区切りとなり、その後の利用状況や満足度を企業側が把握することは難しかったのです。これに対して、ビューティテック型のビジネスモデルでは、価値創出のプロセスが大きく変わっています。

「診断→提案→購入・使用→データ取得→再診断→再提案」という循環により、企業と顧客の関係は一度きりの取引から、継続的な関係へと移行します（図3）。AIによる肌診断や利用状況の把握を起点に、顧

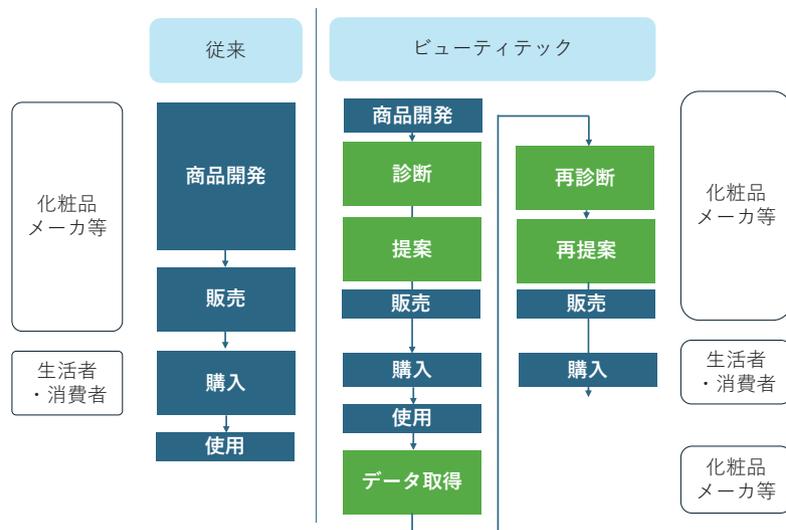


図3 ビューティテックがもたらすビジネスモデルの変化

客1人ひとりに合わせた提案を継続的に行うことで、企業は顧客理解を深めながらLTVを高めることが可能になります。

このモデルの重要な点は、製品そのものよりも「診断」と「継続利用」が価値の中核になることです。商品は、顧客との関係を深めるための1つの接点に位置付けられるようになっていきます。

■データが価値を生み出す構造

この診断を行って継続性が担保されるモデルを支えているのが、データが価値を生み続ける構造です。顧客データが蓄積されるほど、AIによる診断制度が向上し、提案の的確さが高まります。結果として顧客満足度が向上し、サービスの利用頻度や継続率が高まり、さらに多くのデータが集まるという好循環が生まれます。

この構造は、検索サービスやEC、金融分野などでみられるプラットフォーム型ビジネスと共通する競争特性を持ちます。つまり先行してデータを蓄積した企業ほどサービスの品質が高まり、後発企業が追い付きにくくなるという性質です。ビューティテックにおいても、データは単なる副産物ではなく、次の価値を生み出すためのコアな資産となります。競争力とは、製品単価や広告投資ではなく、データを用いて顧客

理解とサービス内容を継続的に良くしていくことです。

まとめ

ビューティテックは、単に新しい技術や市場が登場したという話にとどまりません。そこには、美容という身近なテーマを通じて、企業が顧客とどのように向き合い、どのように価値を届けていくのかという、経営の本質的な変化が表れています。

これまでのように、優れた製品を開発し、広告やブランド力によって売だけのモデルでは、成長を続けることが難しくなりつつあります。ビューティテックが示しているのは、顧客1人ひとりを理解し、そのデータを基に提案やサービスを磨き続けることで、体験として価値を提供するアプローチです。ここでは、「顧客理解」「データ活用」「UX設計」が切り離されることなく、1つの流れとして機能しています。

言い換えれば、ビューティテックは、こうした新しい経営のあり方を考えるうえで参考になる市場といえます。経営者に求められるのは、最新技術を導入することそのものではなく、どのデータを将来の資

産として育てるのか、技術をどうやって顧客価値に変えていくのか、そして商品ではなく体験をどう設計していくのかを考えることです。

後編では、ビューティテックを取り巻く企業やスタートアップの動き、新たな技術の活用動向、競争のルールがどのように変わりつつあるのかなど、今後を展望するうえで役立つ視点を整理していきます。

■参考文献

- (1) https://corp.shiseido.com/jp/newsimg/3758_v8e74_jp.pdf
- (2) https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2023/06/consumer-vulnerability-in-the-digital-age_85b498eb/4d013cc5-en.pdf
- (3) https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/bio/cosme/cosme_vision2021.pdf
- (4) https://www.meti.go.jp/policy/it_policy/dx/20180907_03.pdf



株式会社情報通信総合研究所
(左から) 主席研究員 手嶋彩子/
主任研究員 イータンダーウィン

NTT社会情報研究所
フェロー

岡本 龍明 Tatsuaki Okamoto

暗号理論研究の方法論をベースに コンプレキシティ増大の法則を 定式化

世界を代表する暗号理論研究者、NTT社会情報研究所の岡本龍明フェローは、これまで構想を温めてきた「組織化された複雑さ」の問題について、ご自身が長年専門としてきた暗号理論の方法論も活かし、このたび「コンプレキシティ増大の法則」として定式化しました。この法則により宇宙や生物、人間社会など多くの対象において、その集団が長期的に複雑化していく現象を統一的な方法で初めて説明することができるようになりました。今回、定式化の考え方、法則が成立している具体例、そして法則に従った場合、未来の地球や人間社会は一体どういった方向に向かっていくのか伺いました。



世の中で複雑さが増大する現象とは 一体何だろう

3年ぶりのご登場ですね。「組織化された複雑さ」の研究について進展状況をお聞かせください。

前回のインタビューでは「組織化された複雑さ」を定義しました。今回、これをコンプレキシティ⁽¹⁾と命名し、それが世の中の多くの対象において時間とともに増大していく現象「コンプレキシティ増大の法則」を定式化⁽²⁾しました。さらにこの法則が具体的にどのような対象で成り立ち、どういった分野で役立つのかといった応用例も含め、これから詳しくお話していきます^{(2)。(3)}。

世の中の複雑さが時間とともに増大しているという考え方が、この「複雑さ」を大きく2つに分けることができます。1つは、組織化されていない「無秩序な複雑さ」で「乱雑さ」ともいえるものです。もう1つは、本研究の主なテーマである「組織化された複雑さ」です。孤立系で前者（乱雑さ）が時間の経過とともに増大していく現象は、19世紀に「エントロピー増大の法則」として定式化され、熱力学第2法則とされています。一方、後者（組織化された複雑さ）はエネルギーや物質のやり取りがある開放系（地球など宇宙の部分系）などで見られるような多くの要素が有機的に関係づけられた系の持つ複雑さで、これまで物理学ではほとんど対象とせず、どちらかといえば生物学や人文学など、人間がかかわる現実的な領域と深く関連します。したがって、後者については物理学で行われてきたような「法則化」はほとんど検討されていませんでした。

この組織化された複雑さについて実際の例をあげてみますと、まず1つが物理学的な話で宇宙の成り立ちについてです。現在、宇宙は約138億年前にビッグバンで誕生したといわれています。このビッグバンの直後に素粒子が出現し、それらが集まり原子に、さらに原子が集まり分子へとかたちづくられてきました。このように、宇宙には素粒子という単純なものから徐々に複雑なものが誕生したという歴史があります。

さらに水素原子が多数集まり太陽をはじめとする恒星ができ、恒星を起源とした重い原子が集まり惑星ができ、さらに銀河ができ、銀河団、超銀河団がかたちづくられてきました。このように宇宙を眺めると、小さなものが徐々に大規模な構造を持つようになり、それが時間とともにかたちを変えていく現象、つまり「組織化された複雑さ」が増大している現象を見ることができます。

次に生物学的な話になります。地球が約46億年前に誕生し、バクテリア（原核生物）が約40億年前に最初の生命として誕生しました。そこから、単細胞の真核生物が生まれ、それら細胞が集まってできた多細胞生物が出現し、さらにその生物自身が進化し、それら生物たちが集まった生物圏という組織が生まれました。そして今、生物圏そのものも複雑化してきています。

また、私たちの祖先にあたるホモサピエンスが約20万年以上前に地球上で誕生しました。ホモサピエンスが誕生してから、とても小さな規模で人が集まり、組織をつくり、社会をつくり、文明が発達し、今、私たちが見るような非常に高度で複雑な人間社会へと発達してきました。

このような組織化した複雑さの増大について、エントロピー増大のように、法則化することはできないものかと長年熟考してき

ました。今まで、そのような考察をしている研究者はあまりいなかったのですが、最近少しずつその動きが出てきました。

「機能的情報 (FI: ファンクショナル・インフォメーション)」という考え方が一例です。これはある機能が生まれる確率の逆数の対数で定義されています。生まれてくる確率が低いものほど、より機能が低い (複雑) といえ分かりやすいでしょうか。これは生物系の研究者が定義したもので、例えばRNAが全くランダムな配列であるケースに比べて、よりレアな配列を持つ度合いを表したものです⁽⁴⁾。また、彼らは鉱物研究者とも共同研究し、地球上の鉱物がさまざまな理由で複雑化・進化してきた事実をFIの視点で調べています⁽⁵⁾。

次に、アセンブリ理論 (MA: 分子アセンブリ指標) があります⁽⁶⁾。これは水素、酸素など単純な分子から出発し、それらを組み合わせ、より複雑な分子が生成されるという考え方に基づいています。惑星からの光スペクトルを観測・分析することで、そこに存在する分子を特定し、その分子がつくられる過程にどの程度手間がかかるのかを解析しています。つまり、分子を生成するのに必要な最小ステップ数から、その分子がどの程度組織化された複雑さを持っているかを調べようとしています。

この2例のように、長年私自身が問題意識を持っている「組織化された複雑さ」の研究は徐々に進んできています。

コンプレキシティ増大の法則について教えてください。

前述の既存研究^{(5), (6)}は生物や分子といったある特定の対象に限定した「組織化された複雑さ」の理論でした。一方で、私の研究で定義したコンプレキシティはより一般的で、ありとあらゆるものを対象とすることができ、前述の既存研究が対象とした生物や分子も含んでいます。

では、あらゆる対象をコンプレキシティとして計測するには一体どうするのか、それはさまざまな方法で「観測」することです。観測とは、見て、触って、感じることです。目で直接観測するこ

ともあれば、顕微鏡や望遠鏡、さまざまな大掛かりの観測装置なども用い、世の中のありとあらゆる対象を観測します。ものが手に触れた際にも手が感じるセンサが反応し、脳に電気信号を送って対象を観測しています。要するに、私たちはさまざまな方法で対象を観測し、それを経てその存在を認識しているのです。観測データにはその裏に必ず情報源があり、これは確率分布として表わすことができますので、コンプレキシティは確率分布に対して定義することになります。

私のアプローチ方法は普遍的で、観測する対象の情報源 (確率分布) を表現する最小の記述量を、論理回路によりシミュレーションする最小の回路サイズとすることにより、原理的にどのような対象に対しても定義することが可能です。しかし、最小の記述量を定義することができても、それを具体的に決定することは簡単ではありませんので、観測対象に応じた近似方法があると便利です。

そういった意味で、観測対象を生物などの機能に限定した場合において、前述のFI (機能的情報を表す最小情報量) は私のコンプレキシティに良い近似値を与えてくれます。また、観測対象を分子とした場合、そのコンプレキシティを厳密に定めることは難しいところを、前述のMAでは単純な分子から積み上げる際の最小ステップ数で計算しており、これもコンプレキシティに良い近似値を与えてくれます。このように、コンプレキシティはあらゆる対象を網羅するように定義していますが、これら既存研究は個別の対象における近似値を与えていると考えています (表)。

このように、コンプレキシティ増大の法則の定式化は、いつか誰かが挑戦しなくてはいけない問題に対して初めて1つの解を与えたという点で価値のある成果ではないかと思っています。

コンプレキシティの増大は地球上のあらゆる営みの中で起こっているのですね。

どのような系でコンプレキシティ増大の法則が成り立つのか、それを特徴付けるために検討した結果、自由エネルギーの流れて

表 組織化された複雑性理論の既存研究との比較

	対象	本研究との関連
本研究 (コンプレキシティ: OC)	対象の観測データの情報源をシミュレーションする (論理回路による) 最小記述量	すべて 本研究の対象は、機能や分子を含む (宇宙の) すべてのもの
機能的情報 (FI)	機能 (対象) がランダムなものから生まれる確率の逆数の対数	機能 機能的情報 (FI)は、機能を表現する最小情報量に相当し、対象を機能に限定したときのOCの近似値を与える
アセンブリ理論 (分子アセンブリ指標: MA)	分子 (対象) を基本的な構成要素 (単純な分子) から構成するときの最小ステップ数	分子 分子アセンブリ指標 (MA)は、対象を分子に限定したときのOCの近似値を与える

いる動的な系（非平衡系）で成立するという仮説を提示しました。この仮説は私たちが観測可能な宇宙、生物圏や人間社会を含む地球においてコンプレキシティ増大が成立しているのではという直観とも合致しています。そこで次に、コンプレキシティ増大の法則の応用例について触れていきます。

現在、物理の世界では光速、重力定数、電気素量、プランク定数などさまざまな定数が存在していますが、なぜその値であるのかは誰も分かっていません。たまたまその値になっているとしか言いようがないのです。しかし、この値を少しでもずらすと、私たち人間を含めた生物は誕生しなかったことが分かります。例えば、核力や電磁気力を定める物理定数が少しずれるだけで原子核内における構成要素間の結合力が変化し複雑な原子が形成されず、人間を含め複雑なものが存在しないことが起こります。すなわち宇宙の物理定数は非常に微妙なバランスで、地球上の生命を生み出すのに都合がいい値に調整されており、これをファインチューニングと呼んでいます。

これは非常に不思議な事実ですので、さまざまな学者が説を唱えており、現在もっとも多く支持されているのは人間原理というものです。しかしこれは「物理法則を観測する人がいれば、その観測者と宇宙の物理法則が整合していないと、そもそも観測者は存在しない」といった自明のような議論なのです。この物理定数が人間の存在に合うように定められているとの説は極めて主観的で、そもそも物理学ではないのではとも思えます。

ところが、私の仮説に基づく、この問題はリーズナブルに説明ができます。つまり、この宇宙では「コンプレキシティ増大の法則が成立するように物理定数が定められている」と説明したらいかがでしょうか。コンプレキシティは純粋に数学的に記述されるため、人間原理でいうところの「人間の存在」とは無関係ですし、すべて客観的かつ理論的に議論できるのです。

次に、生物圏を眺めると、多くの生物には、私たち人間も含めて雌雄の区別がありますし、寿命も持っています。なぜ雌雄や寿命が生まれたのかという疑問に対しては、さまざまな研究が進んできてはいますが、その根源の解明はなかなか難しいといわざるを得ません。その説明に、コンプレキシティ増大の法則が成立しているから、つまり生物圏において雌雄や寿命があったほうがよりコンプレキシティが増大するといった論法で導くと、分かりやすく納得感もあると考えるのです。

具体的にみていきましょう。もし生物が親となる2つの個体に雌雄がなく生物としての違いが存在しないと、個体には1つの構造しか存在しなくなりますが、一方で雌雄がある場合は生物種に2つの異なる生物的構造の個体が存在するため、構造の違いによる雌雄間の多様な相互関係が構築されるでしょう。

また、有性生殖の生物では、子は両親の遺伝子が混ざり合うので、子世代では親世代よりも多様性が増大します。もし生物の寿命が数十世代にもわたるような超長期間であれば（寿命が実質上なければ）、競争上優位な立場にある旧世代が支配的で世代の交代が順調に進みません。一方で寿命が現在のように数世代内に限られれば、世代交代が順調に繰り返され多様化が進むでしょう。このように生物に雌雄の区別や寿命があることは、いずれもコンプレキシティ増大の法則に従って生まれた現象として説明することができるのです。

人間社会における社会規範についてはどうでしょう。例えば、「自分にしてもらいたいと思うことを他人にせよ」という利他行為を勧める社会規範がみられます。こういった社会規範のあるほうが、より人間社会のコンプレキシティを増大させるといった説明ができるのです。利他的な社会規範がないと、助けを必要としている人がいても助けを受けられず、社会的弱者を守る制度もできないため、人や社会は損傷し多様性は減少していく、一方で、この社会規範があれば、人や社会を安全に守る行動や制度化が促進され多様性は増加していくでしょう。これもコンプレキシティ増大の法則に従って生まれた現象と説明できます。

人類はコンプレキシティをさらに高め 拡張人間へと進化していく

提唱されたコンプレキシティ増大の法則に従っていくと、人間社会の未来はどのような世界になると想像されますか。最近ではAIの急速な発展も気になります。

AI（人工知能）は私も大変興味を持っている分野です。ただ、人間社会のコンプレキシティを考えるうえで重要なのは人間と人間との関係です。人間社会は人と人との関係の複雑さを土台にして、複雑化してきました。例えば原始時代では社会といっても数人程度の小さな集団でしたが、農耕社会になるにつれて大規模化し、さらに現代ではインターネットが生まれたことで人間関係は一気に複雑になりました。よくAIは「人間の仕事を奪うのではないか」と言われていますが、それは一理あると思います。しかし、私はAIが人間と人間関係をより複雑にし、進化させてくれる良いツールになるのではと思っています。

そもそも人間は自分自身を「進化」させてきた生物で、例えば道具をいろいろ発明してきました。道具とはある種、人間の機能を拡張するものだと思います。そう考えると、人間は1人ひとりが単独で完結した生物であるというよりも、コンピュータをはじめとした何らかの道具を体の拡張機能とした生物になってきたの

ではないでしょうか。脳にある記憶についても外部媒体として本やクラウドに記録を残したり、車やブルドーザー、クレーンに関しても、人間の手足としての機能が拡張されていると考えられます。私たちはすでに単なる人間ではなく、さまざまな機能を外部へ拡張して自らを進化させた生物になっているのです。AIも同様のイメージで、人間の脳を拡張してくれる存在だと考えています。

今後、AIが人間社会で上手に活用されるとすれば、まずは手間のかかる知的な作業ですね。プログラミングにおいては面倒なコーディングを大量にこなす作業などでしょうか。これらがAIに取って代われば、仕事における階層や主従関係も改善し、より対等な人間関係がより高度なレベルで形成され、結果としてより高度な拡張人間によるコンプレキシティの高い人間社会になっていくのではないのでしょうか。さらに将来は、より能力アップした人間どうしが、一層高いレベルで複雑な関係を持った社会を構築していくのではないかと予想しています。

生物の中で自身の生物集団のコンプレキシティをここまで高めてきたのは人間だけだと思いますので、生物圏の中でも極めて特殊な存在だと考えています。最近、人類が果敢にチャレンジしている例が小惑星衝突への対応です。地球では太古の昔、これにより恐竜や多くの生物種が絶滅したことがありますが、人類は今、あらゆる小惑星の動きを観察し、次に衝突しそうな候補を調査し、実際、何十年後に衝突する可能性が高まったら、どう対応するかまで考え実験しています。数年前NASAでは、小惑星に探査機をぶつけて軌道を変える実験も実施しています。これを地球の外から見ると、「地球全体が1つの生物」のようにみえるのではないのでしょうか。例えば、自分に向かって飛んでくる敵に対して、飛行体を衝突させて防御する。その姿は、まるで生物が外敵から身を守っているようです。コンプレキシティを高めた人間という特殊な生物は、いつのまにか地球全体を守るべく活動をするようになっているのです。

地球温暖化の問題に対しては、気温を下げようと努力していますね。こうした取り組みは今後100年以上を経てさらに進化していくはずですし、何100年先には、人間が地球環境をある程度コントロールするかもしれないですね。つまり、生物圏が複雑化する中で人間という不思議な生物が生まれたわけですが、生物が進化（複雑化）する中で「脳」が生まれたように、人間社会が地球（生物圏）においてある種の「脳」の機能を担い、地球を守るために攻撃したり、地球環境を制御しようと行動する役割を持つようになるのではないのでしょうか。

近年では、イーロン・マスクが火星への移住計画を進めていますが、私の構想の中にも同様の考え方があります。人間はいつしか宇宙へ進出し、地球上の自然環境を移植しようとするのではな

いか。生物が子孫をつくり命を永続させようとするように、私たち人間は、宇宙の中に地球上の生物圏（生命）の子孫を残そうとしていくのではないのでしょうか。

また人間は、地球上に存在するあらゆる生物を調査・研究しています。多くの生物が限られた種との共生や捕食関係を基盤に生きているのに対し、人間は地球規模で生物全体を研究し、絶滅危惧種の保護などにも取り組んでいます。つまり生物圏に傷が生じたとき、それを修復しようとする機能を担っているといえます。地球全体を1つの新しい生命体ととらえたとき、人間社会はその調整や回復を担う機能としてコンプレキシティを高め進化していく方向に向かっているのではないのでしょうか。

FuncCPA 安全性において新たな関係性を証明

長年のご専門である暗号理論の研究について最近の成果をお聞かせください。

私は公開鍵暗号の研究に長年携わってきましたが、その安全性についてはかなり以前から標準的な定義が確立していました。ところが最近の新しい応用環境において、より新しい安全性を定義する必要が出てきたのです。これまでのように暗号を通信の安全のためだけに使うのとは異なり、例えば完全準同型暗号などデータを暗号化したまま処理するような利用環境においては安全性を拡張し定義する必要がでてきました。それがFuncCPA (Functional Chosen-Plaintext Attack) 安全性であり、それにはいくつかのバリエーションがあります。このバリエーション間の等価性、非等価性を明確にすることは今後の公開鍵暗号理論の発展のためにも重要ですので研究を推進しています。

図ではFuncCPAを中心に各バリエーションの概念的な強弱レベルを示しており、下方向や右方向が弱くなります。まず図の左に、中心的な位置付けのFuncCPA、それを強めたFuncCPA⁺、弱めたOW-FuncCPA、そして右にはFuncCPAを弱めたWeak FuncCPAなどがあります。そこで、各バリエーション間で概念上の強弱はあっても、実際はどうかと赤字で記したバリエーション間の強弱について調べたところ、FuncCPAとOW-FuncCPAが等価であることや、FuncCPA → Weak FuncCPA → FuncCPA⁺ → FuncCPAと3つのバリエーションの間を→が一周して閉じることを解明し、これら4つのバリエーションがすべて等価（同等の安全性）であることを証明しました。この結果について当初は予想しておらず私どもにとっても驚きでした。

次に図の右では、標準的な公開鍵暗号での安全性として、もっ

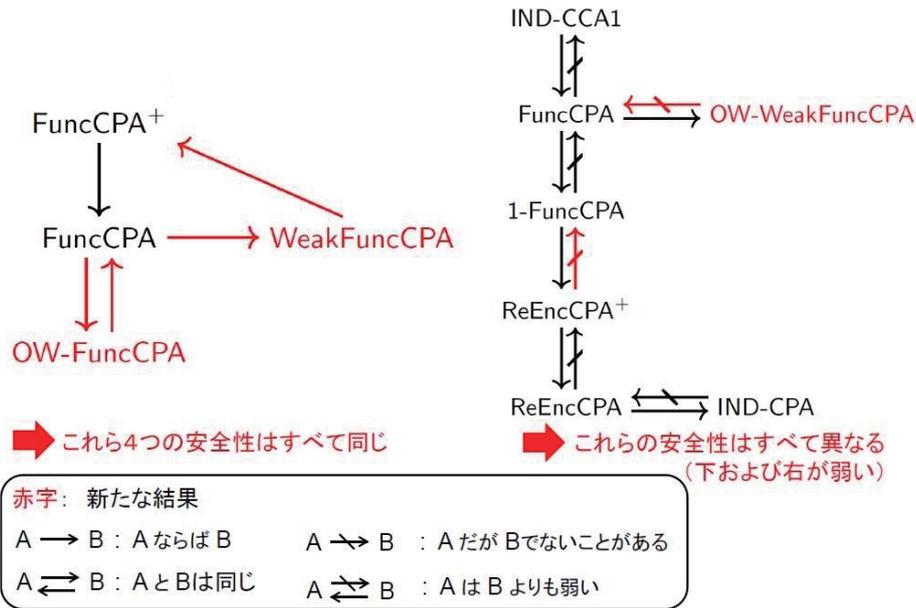


図 暗号安全性の関係 (FuncCPA安全性)

とも上にIND-CCA1 (強い), もっとも右下にIND-CPA (弱い) があります。この2つの間にはより細分化された安全性の概念が提案され、中間的なさまざまな安全性レベルが存在しています。従来は「このくらいのレベルで考えれば十分であろう」としたところを、より細分化する必要がある利用環境が出現したのです。今回赤字で記した対象を検証した結果、ここに記載のすべてのバリエーションで強さが異なり、階層的になっていることが証明されました。

研究活動で大切にされていることや現状の課題についてお聞かせください。

私は常に新しい観点や斬新な方法など独創性を出していくこと、そして理論としても価値があり世の中へインパクトを与える研究をしたいという気持ちを大切にしています。さらに、この研究が価値あるものだと自分で思えることが何より重要だと思っています。

今回の複雑性については30~40年ほど前から個人の興味として考え続け、長い間、温めてきた研究対象です。興味深いことに、長く携わってきた本業である暗号研究の方法論や知識が、このコンプレキシティの研究に大変役立っているのです。確率分布で考える発想などは、もしかすると暗号を研究していなかったら出てこなかったかもしれません。そう考えると、私の基盤である暗号研究はさまざまなところで役立っているといえます。

前述したとおり、私は最近のAIの発展に大いなる興味を持っていますが、「AIはどうして大量のデータを学習することで飛躍的に賢くなったのか」といった根本的な疑問への答えはまだよく分かっていないようです。現時点では、多くの人はAIというブラックボックスを「どうやっていち早く使いこなしていくか」といったエンジニア視点で取り組んでいます。確かにこのAIの応用は新たな産業革命を引き起こすような大きなインパクトがありますが、18世紀の産業革命をもたらした蒸気機関の研究から熱力学という物理理論が生まれたように、「AIの飛躍」の疑問に答えるような研究から新たな科学理論が生まれるのではないのでしょうか。私は、この疑問は物理における相転移などでみられる集団的現象として「創発」の観点でとらえるべきだと考えており、それはコンプレキシティ増大とも密接に関連していると思っています。斬新な発想で大胆に取り組める若い研究者をはじめ、世の中の誰かがこのような問題から新たな理論を切り拓いてくれることを期待しています。

■参考文献

- (1) <https://doi.org/10.1155/2022/1889348>
- (2) <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.07123>
- (3) 岡本：“複雑化する宇宙と生物圏そして人間社会—創発とコンプレキシティが解き明かす世界,” 近代科学社, 2025.
- (4) <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgae248>
- (5) <https://doi.org/10.1073/pnas.0701744104>
- (6) <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23258-x>

挑戦する
研究者たち



NTTデータグループ 技術革新統括本部
AI技術部 シニアR&Dスペシャリスト

菅原 康友 Yasutomo Sugahara

Smart AI Agent[®]で未来を創る プロジェクト管理システムの エキスパート



「担当業務に集中したい」「面倒くさい定常業務から解放されたい」「上司に効率良く報告をしたい」「プロジェクトの進捗を効率的に把握したい」「トラブルの要因を正確、スピーディに理解したい」。このような要望と真摯に向き合うNTTデータグループの菅原康友氏は、プロジェクト管理の効率化を支援するソリューション開発のエキスパートです。今回のインタビューでは、昨今急速に発展した生成AI（人工知能）を搭載したシステムにおいて、どの機能まで実現できるようになったのか、将来どこまで発展させることができるのか、そしてAI時代に必要な技術者育成とは何かをお伺いしました。

高まる生成AI×プロジェクト管理への期待にNTTデータグループのノウハウを結集し、最新のソリューションを創出

現在手掛けている開発テーマについて教えてください。

本誌2025年7月号「挑戦する研究開発者たち」正野勇嗣のインタビューでは、Smart AgentをNTTデータグループの取り組みとして掲げ、今後積極的に展開していく旨の話をさせていただきました。その後、このSmart AgentはNTTデータグループがめざす「AIエージェント」の世界観、コンセプトとして、Smart AI Agent[®]*1として商標化されました。そのような中、私は現在

このSmart AI Agent[®]のプロジェクト管理分野を所掌しています。当社には、システム開発に必要な、開発手順・フレームワーク・開発支援ツールをパッケージ化したTERASOLUNA[®]*2という総合ソリューションがあります。現在、TERASOLUNA Suite 2.0 powered by Smart AI Agent[®]として、こちらのAI化に取り組んでおり、私の活動もその1つに位置付けられています（図1）。

一般的に、開発業務におけるプロジェクト管理が占める割合は、バグの報告等、開発者の管理にかかわる作業も含めると2割弱といわれていますが、私たちはガートナーのレポート、すなわち「2030年までにプロジェクト管理タスクの80%がAIで代替される」とい

*1 「Smart AI Agent[®]」は、株式会社NTTデータグループの英国および日本国内における登録商標、米国、欧州連合における商標です。

*2 「TERASOLUNA[®]」は、株式会社NTTデータグループの登録商標です。



図1 TERASOLUNA Suite 2.0 powered by Smart AI Agent[®]の概要

う予測に着目し、自社のプロジェクト管理システムへいち早くAIを搭載していく方向へと舵を切りました。そういった流れで上述の2030年の80%達成に向けたロードマップを策定し、まずは2027年に40%のマイルストーン達成に向けた取り組みを開始しました(図2)。

また、プロジェクト管理工数全体において各管理分野が占める割合をAI技術部にて調べた結果、進捗管理が38%、品質管理が27%と判明し、まずはこの2つの分野を重点的に進めています。一方で、問題・課題管理やリスク管理など、その他のプロジェクト管理の分野へのAI適用についても、各開発プロジェクトの現場で進められており、私たちはこうした開発現場で蓄積されたノウハウも吸収し、本取り組みへ反映することで、AI活用の高度化・展開のスピードアップを図っていきます。

次に当社が開発したプロジェクト管理向けソリューションの

内容について触れていきたいと思ひます。プロジェクト管理をサポートする観点から大きく2つのソリューションに大別されます(図3)。1つはプログラマーやテスターといった現場で実際作業をされている「開発者向けのソリューション」です。もう1つはプロジェクトの活動情報を集めて、分析・判断していく「管理者・リーダー向けのソリューション」です。

まず「開発者向けのソリューション」について説明します。本ソリューションは、進捗管理と品質管理の両面から開発者の作業を支援し、その結果として管理者が活用する情報の質を高めることを目的としています。

進捗管理では、例えばスケジュールに不整合が生じた場合、タスクの計画や実績を基に、AIが客観的に指摘を行います。どの部分に無理が生じているのか、どのように修正すべきかといった点についてヒントを提示することで、開発者自身が早い段階で課題

**FY2030までにAI活用を一般化し、PM/PMO業務の抜本的な生産性向上達成をめざす
品質管理・進捗管理の2領域を中心に取り組み、3年後に40%の工数削減を実現する**

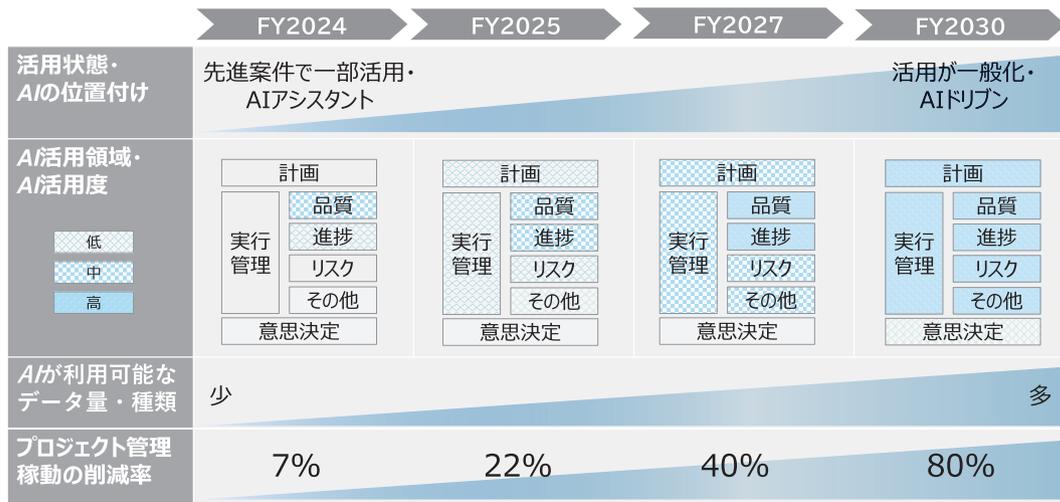


図2 ガートナーレポートに基づくプロジェクト管理×AI活用の取り組み方針

- 品質管理や進捗管理など、プロジェクト管理業務の効率化を支援するNTT DATAのノウハウを活用したソリューションです
- “現場”と“マネジメント”の両面で活用でき、標準機能の利用はもちろん、プロジェクトに合わせたカスタマイズも可能です



図3 プロジェクト管理向けソリューションの概要

に気づき、軌道修正できるようサポートします。

品質管理では、AIの力を借りながら正確な情報をスピーディにバグチケットに記入できるようサポートします(図4)。開発者もベテランのエキスパートから新人の初心者までスキルや経験はさまざまです。正しく故障原因を記入しないと、その後に深い分析ができませんし、後続のアクションも正しく取れないでしょう。内容が分からずチケット起票者に改めて問い直すなど、手戻りが生じ無駄な工数がかかってしまうことも多々あります。このようなとき、このソリューションが記述の問題点を指摘し修正してくれるのは、品質向上と業務効率化の両面で大きなメリットとなり

ます。

このように、開発者の段階から情報の質を高め、最終的に管理者が分析に活用する情報の質を上げていくことがこのソリューションに期待されるところなのです。

次に「管理者・リーダー向けのソリューション」について説明します。このソリューションは「開発者向けのソリューション」を用いて登録されたタスクの情報やバグの情報を自動的に収集し、開発プロジェクトの進捗やプロダクトの品質について、AIの力を借りて重要な点の把握とその後の意思決定をサポートします(図5)。



開発者のために プロジェクト管理情報の入力・更新のストレスをゼロへ

概要

開発者の管理情報の記入をAIで支援

記入内容の自動生成や品質チェックを行い、入力ミスやばらつきを防ぎます。現場で使える実用性を追求。負担を減らしながら、品質の高いチケット起票を実現します。

品質管理や進捗管理を高精度に支援

起票内容の正しさのチェックは高い精度であり、書き直し作業低減や、各種分析の精度向上が期待できます。品質管理では、チャットによる品質分析の深掘りサポートします。また進捗管理では、タスク間の整合性チェックや、リスケ時のタスクの修正対応をサポートします。

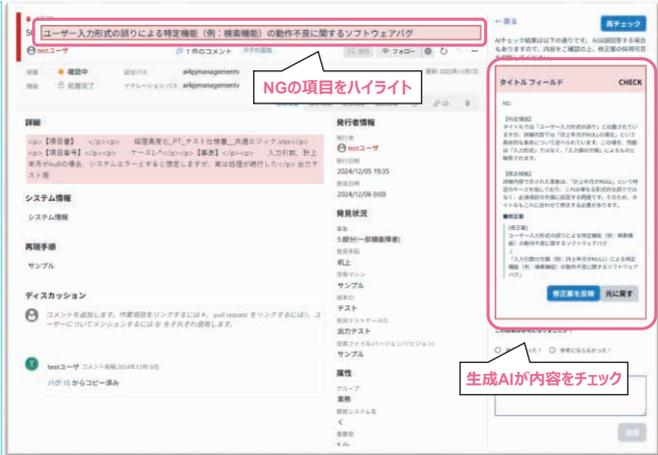


図4 開発者向けソリューションの概要



管理者のために 今を可視化し、次の一手へ

概要

プロジェクト情報を一目で把握

進捗・品質・リスクをAIダッシュボードで統合・可視化し、プロジェクトの“今”をすぐ把握できます。属人的な判断に頼らず、管理の抜け漏れや判断のばらつきを抑えます。

分析と報告のAIにおまかせ

週次・日次の進捗・課題のサマリレポートはもちろん、品質報告書も作成します。AIとの対話により、報告内容の背景の確認や分析の深掘りもできます。情報収集・分析・報告の工数を大幅に削減します。

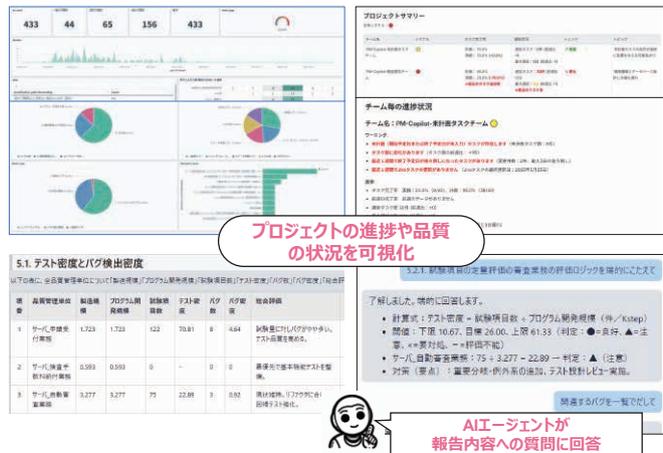


図5 管理者・リーダー向けソリューションの概要

プロジェクトは複数のチームで構成されていますので、進捗管理では各チームそれぞれにおけるタスクのトレンドや遅延の有無などをサマリーとしてレポートします。加えて、進捗が滞っている場合には、その原因として想定される要因の考察や、改善に向けた対策案についてもAIが提示してくれます。これにより、管理者は状況把握に多くの時間を割くことなく、対応方針の検討に集中することができます。

一方、品質管理では、日々の品質状況についても進捗管理と同様にサマリーをレポートしますが、加えて、開発工程の節目で実施される、「リリース可否」を判断する品質判定会議向けに、報告書を自動で作成する機能も備わっています。

このソリューションでは定量的な分析と定性的な分析の両方に対応しており、定量分析では、テスト密度やバグ検出密度を機能単位や処理単位で数値化し、それらの値を評価したうえでAIが見解を示します。

また定性分析では、当社が保有する品質分析の仕組みに基づき、バグを「発見手段」「発生工程」「現象の内容」など複数の視点で分類し、その分類パターンごとにAIが深く分析を行います。例えば特定の分類において特定機能で多くのバグが発生している場合には、それらのバグから想定される構造的・本質的な問題点についても指摘することができます。

こうした分析はこれまで人間が取り組んでいたわけですが、このプロセスを網羅的に実行するには莫大な工程が必要であり、人間の手だけでは現実的な時間内で分析を完結することは実質不可能でした。そのため、実際には大量の情報の中から、特定の機能やモジュールにおいてバグ件数が多く報告されている箇所など、影響が大きいと判断される一部の領域に分析対象を絞らざるを得ない状況でした。しかし、AIを活用できるようになったことで、こうした定性分析に対しても、網羅的かつ短時間で実施することができるようになりました。その結果、従来は見過ごされがちであった潜在的な問題や構造的な課題についても把握できるようになり、システム開発のプロセスにおける真の問題点を迅速に見つけ出せる世の中がやってきたと実感しているところです。

さらにこのソリューションでは、報告書を作成するだけでなく、管理者はレポート内容についてAIと対話しながら詳細を確認することもできます。これまでは、管理者が疑問点を分析担当者に確認し、必要に応じて差し戻しを行うといったやり取りが必要でしたが、このソリューションのおかげで、管理者は必ずしも担当者を介することなく業務を進めることができるようになります。

不具合の発見から修復までAIにすべて任せる時代がやってくる

今後の展望についてお聞かせください。

まず、本ソリューションの導入効果として、2027年にプロジェクト管理に要する稼働の4割削減を目標としています。前述のとおり、プロジェクト全体に占める管理業務の稼働割合は2割弱で

ですので、仮に総額100億円規模のプロジェクトを想定した場合、管理業務に相当するコストは約20億円となります。このうち4割を削減できれば、金額換算でおよそ8億円の削減効果が見込まれます。さらに2030年度には、最終目標としてプロジェクト管理稼働の8割削減をめざしていきます。

システムにおけるAI化の将来については、AIに任せられるタスクをさらに見つけ出し、そしてAIにできるだけ任せられるようシステムも一層進化させ、従来人間が実施してきたタスクを随時AIに移行していく運用を推進します。具体的には以下のとおりです。

まず現在、データの集計といった定型的なタスクは、すでにAIで実現できていると認識しています。一方、現在では一部の実現にとどまっているものの、近い将来に実現できそうなタスクの例として、先ほどお話ししたバグの情報を分類するタスクが挙げられます。現在、このタスクは人間がバグの内容を読み取り、原因や特徴を判断したうえで、どの分類に属するかを判断しています。このような熟練者に委ねられてきた高度な判断を伴うタスクもAIが担える段階に入りつつあります。

将来的には、単にバグを整理・分析するだけでなく、過去の発生傾向や構造的な課題を踏まえ、「どこに重点的にテスト資源を投入すべきか」「どの品質リスクに先手を打つべきか」といった戦略的な品質判断までをAIが提示する世界をめざしています。人間は、その結果を基に最終判断を行う立場へと役割を進化させていきます。

また、現在は主にバグチケットの情報を基にAIが動作していますが、今後は計画書や設計書、プログラムといったプロジェクト全体の一次情報を包括的に利用し、より高度な回答が得られるよう取り組みを加速していきたいと考えています。

さらに一歩進めば、AIは「分析する存在」から「実行する存在」へと進化します。品質上の課題を検知するだけでなく、その報告を製造やテストのエージェントと連携し、不具合のある箇所をAI自らが修正する。そういった品質改善のサイクルそのものをAIが回し続ける世界になればと考えています。

また開発現場においても、人手による進捗報告やチケット起票に依存しない姿を描いています。設計書やプログラムといった一次情報がリアルタイムにAIへ共有されることにより、進捗、品質、リスクが自動的に可視化され、プロジェクトの状態が常に「今」の姿として把握できるようになります。

現在、プロジェクト全体を管理するうえでPM (Project Manager) の判断は必要ですが、その判断のための情報収集・分析・資料作成をPM配下のPMO (Project Management Office) やSEPG (Software Engineering Process Group) といった役割の組織が担っています。将来的にはこれらの機能そのものをAIが吸収していきます。人は「情報を集め、整える」役割から解放され、より本質的な意思決定に集中できるようになります。

このビジョンを突き詰めた先には、AIが課題の発見から是正までを一気通貫で実行する、極めて自律性の高いプロジェクト運営の姿があります。人が介在しなくても回り続けるプロジェクト管

理基盤の実現は、決して遠い未来の話ではありません。

とはいえ、プロジェクト管理全体でみれば、お客さまとの合意形成やリリースの最終判断といった、人間ならではの役割は必ず残ります。しかし、管理業務の大部分をAIに委ねることで、人はより創造的で価値の高い仕事に集中できるようになります。私たちはこのソリューションを通じて、プロジェクト運営そのもののあり方を根本から変革していきたいと考えています。

後進の教育や育成についてどうお考えですか。また具体的な取り組みを教えてください。

後進の教育や育成について、私が大切にしている考え方は、「AIやツールはあくまで手段であり、目的はプロジェクト管理を進化させることにある」という点です。これまでAIソリューションについて述べてきましたが、重要なのは技術そのものではなく、それを使って現場の何を变えたいのか、どんな価値を生みたいのかという視点だと考えています。

まず後進のメンバに伝えたいのは、「今よりもっと良くできる余地はないか」と前向きに考え続ける姿勢の重要性です。日々の業務を確実に遂行することはもちろん大切ですが、それだけではプロジェクト管理の本質的な課題には辿り着けません。現場で生じる遅延や品質低下の多くは、ルールと実運用の乖離や暗黙知への依存といった構造的な要因に起因しています。だからこそ、「なぜこの問題が起きているのか」「別の視点で見ると何が見えるのか」と立ち止まって考え、課題を探し続ける習慣こそが、成長の出発点になると考えています。

この姿勢は、私自身が現在担当しているプロジェクト管理高度化のコンサルティング案件でも一貫して重視している点です。単なるツール導入にとどまらず、ヒアリングや業務観察、データ分析を通じて、課題が生まれる仕組みそのものを明らかにします。そのうえで、課題の本質に適した手法や技術を選択・適用するアプローチを取っています。また、こうした取り組みを個人の力量に依存させないために、判断観点や進め方を整理して標準化し、知見のあるメンバであれば再現できるかたちで展開してきました。

そして、こうした課題を自ら発見できることを前提として、次に重要になるのが「技術」の力です。後進の育成において技術面で重視しているのは、改善手段の「幅」と「深さ」を自ら広げていく力です。過去の成功事例は貴重な資産ですが、それに頼り過ぎると新たな課題や環境変化への対応力を失いかねません。複数の選択肢を比較し、「この現場に最も適した手段は何か」を考え抜くことで、本質的な改善につながります。技術が急速に進化・多様化している今だからこそ、特徴や限界を理解し、文脈に応じて使い分けの力が求められています。

そのため、新しい技術やツールに触れる機会づくりにも力を入れています。具体的には、全社向けの技術セミナーや後進メンバとの勉強会を通じて、案件終了後の振り返りや次の改善につながる議論を行うとともに、最新技術のキャッチアップを進めています。技術は導入して終わりではなく、現場で「使い続けられるかたち

に落とし込むことが重要であり、その取り組み自体が人材育成につながると考えています。

例えば、プロジェクト管理に利用できるツールには「Redmine (レッドマイン)^{*3}」「Jira (ジラ)^{*4}」「Backlog (バックログ)^{*5}」など多くの選択肢があります。しかし、「有名だから」「社内標準だから」といった理由だけで選定してしまうと、現場の目的や制約とズレた運用になりやすいです。「なぜこの現場にはこのツールが適しているのか」を自分の言葉で説明できるようになることが重要であり、ツールの得意・不得意を整理し、背景とともに語れるようになる一連の経験が、技術理解を深める良いトレーニングになります。

近年は、プロジェクト管理ツールにもAI機能が次々と組み込まれています。すべてを1人で理解しようとするは大変ですが、メンバそれぞれが関心分野を分担して調査し、知見を持ち寄ることで効率的に学びを深めることができます。実際にツールを操作しながら検証することで理解が深まり、技術力の向上にもつながります。

後進のメンバには、技術的な専門性を「武器」として身につけることを意識してほしいと考えています。AIの進化によって自動化は確実に進みますが、その仕組みや限界を理解し、現場に適用して成果につなげられる人材の価値はむしろ高まります。AIを便利な道具で終わらせず、「なぜそう動くのか」「どこにリスクがあるのか」説明し判断できる人材が競争力の源泉です。さらに、プロジェクト管理の知見とこうした技術理解を組み合わせた「ハイブリッド人材」が組織内に一定数いることは、研究開発だけでなく事業面でも不可欠です。そのためにも、難易度の高い技術に挑戦し続ける人材を育てることが、個人の成長のみならず、組織全体の競争力向上につながると考えています。

今後も、メンバ1人ひとりが自身の強みを伸ばし、互いに学び合いながら成長できる環境を整え、現場の本質的な課題と最適な技術を結びつけることで、持続的に価値を生み出し続けていきたいと考えています。

*3 Redmine：オープンソースで提供される無料のプロジェクト管理ツールで、チームでのタスク管理、進捗状況の可視化、情報共有を効率化します。チケットシステムによるタスク管理が中心で、ガントチャート生成、Wiki機能、バージョン管理システムとの連携など豊富な機能で、ソフトウェア開発だけでなくさまざまな業務に利用され、カスタマイズ性が高いのが特徴。

*4 Jira：プロジェクト管理の効率化を図るために、世界約30万社の企業で導入しているITツール。2024年、進化を遂げてクラウドベースのSaaS型となり、日々さまざまな機能がアップデートされています。

*5 Backlog：開発だけでなくマーケティングや総務など多様な業務で利用されており、Wiki機能やGit連携など豊富な機能が特徴。



NTT社会情報研究所
特別研究員

西巻 陵 Ryo Nishimaki

未来の安心・安全な情報通信を実現する「耐量子暗号」と「消去証明」技術

量子コンピュータの実用化は、現在使用されている暗号の多くが解読されてしまうという危険性がある半面、量子コンピュータの能力を用いることで初めて可能になる暗号技術の実現という恩恵ももたらします。今回、量子コンピュータ時代の情報セキュリティシステムにおいて中核となり得る「暗号技術」のトップランナー、西巻陵特別研究員にお話を伺いました。

◆PROFILE：2007年京都大学 情報学研究科 社会情報学専攻 修士課程修了。同年、日本電信電話株式会社入社。暗号理論の研究に従事。2010年東京工業大学（現 東京科学大学）大学院 情報理工学研究科 数理・計算科学専攻 博士後期課程修了 博士（理学）取得。東京科学大学特定教授。2008年電子情報通信学会 SCIS 論文賞。2013年電子情報通信学会 SCIS イノベーション論文賞。2023年 The ACM Conference on Computer and Communication Security トップレビューアー賞受賞。



クラウド上の個人情報保護する最新暗号技術とは

■まず「暗号技術」の要となる「暗号化鍵と復号鍵」について教えてください。

「暗号化鍵」と「復号鍵」というのは、それぞれデジタルデータの暗号化と復号に用いられるデータのことです。情報セキュリティにおいて重要な役割を果たします。物理的な鍵のようにデータを暗号化して施錠し、正しい鍵を持つ人だけが復号できるようにするため、データの保護や機密性を保つために使用されます。オンライン・ショッピングやネットバンキングで口座番号やパスワードなどの個人情報を取り扱う際、第三者による悪用を防ぐための

ものです。ところが現在、量子技術の発展が著しく2030年には実用的な量子コンピュータが実現するといわれています。この量子コンピュータが登場すると、情報処理能力は飛躍的に上昇し、従来使用されてきた「RSA (Rivest-Shamir-Adleman)」や「楕円曲線」などと呼ばれる暗号は、容易に解読されてしまうことが判明しています。そのため、こうした量子技術による情報処理能力の向上に対応可能な新しい暗号技術の研究・開発が、私の研究グループを含めて世界各国で盛んに行われています（図1）。

ところで、現在の暗号技術でできることについても、1例を挙げておきましょう。現在は従来の「1対1」の通信ではなく、クラウド環境でみられるような「1対多」、あるいは「多対多」の通信が頻繁に行われるようになってきました。複数人で行われるオ

量子コンピュータの実用化とともに急上昇する量子時代の危険性（イメージ）

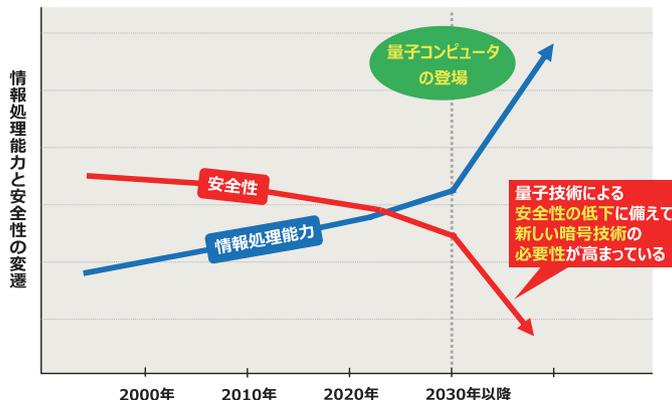


図1 コンピュータの情報処理能力と安全性



オンライン会議などがその例といえますが、こうした「1対多」「多対多」の通信の際、各参加者に渡す情報を同じものにできない場合があります、「1対1」の通信に対応した通常の暗号では不十分なケースが起こり得ます。例えば、ある企業内で重役から一般社員まで、立場や役職の異なる参加者による“企業秘密を含む”重要な社内会議がオンラインで行われたとします。すべての参加者に“暗号化された同じ会議用資料データ”を配布し、役職に応じて異なる復号鍵を渡すことで、情報開示を細かく制御できます。具体的には、部長以上の管理職にはすべて内容を復号できる鍵を、それ以外の社員には機密情報が復号されない制限付きの鍵を付与することで、秘匿したい情報を隠すことが可能になります(図2)。

このように各参加者が持つ復号鍵に応じて、1つのデータから得られる情報を細かく制御できるものを「関数型暗号」といい、「1対多」「多対多」の通信に適した暗号になります。

また、現在コンピュータやスマートフォンなどを活用する際のほとんどは、写真などを含めた個人情報をクラウドに保存されていると思います。こうしたクラウド内に保存された情報やデータについて、セキュリティ対策の必要性が現在非常に高まっています。

■クラウド内でのデータセキュリティについて教えてください。

サブスクリプションのアプリケーションなどを申し込むと、IDやパスワードなどの長い文字列を支給され、その文字列を入力し認証することでサービスの使用を許可されますが、すでにクラウド(外部ストレージ)を使用していれば、こうした煩雑な情報はクラウド内に保存して自動入力のかたちで使用していることがほとんどだと思います。しかし、こうした外部ストレージ上に保存されたデータが悪用される危険性は常に存在します。具体的には、ネットショッピングで使用するためにクラウドに保存していたクレジットカード番号をハッキングされるなどといった危険性は否定できません。契約期間が切れて削除したと思っても、どこかにコピーが残っている可能性は排除できないのが現実です。

従来の古典コンピュータでは、データや情報を完全に消去することは不可能です。前述のクラウド内に保存していた“消去済み

データ”であっても、企業サイドは定期的に全データのバックアップを保存していますから、何かシステム全体に問題が起きて、予告なしにバックアップデータ(消去以前のデータ)と置き換えられた場合に、消去したはずのデータが復活してしまうなどということも可能性としてはゼロではありません。現在の古典コンピュータでのデジタル情報は、コピーをいくらでもつくるのが可能ですから、どこにもコピーが残っていないことを証明することは、俗にいう「悪魔の証明」となります。

しかし、量子情報技術を利用すると、この状況は一変します。あくまで量子コンピュータの存在が前提となりますが、量子状態の暗号文や秘密鍵(復号鍵)を生成することで、量子の特性を利用した完全な「消去証明」の可能な復号鍵や暗号文が実現できるようになります(図3)。

量子コンピュータの実用化が徐々に近づいてきている現在、量子コンピュータの能力を活用することで初めて実現できる暗号技術が今後は非常に重要になってくると考えられます。

■量子情報技術を使用した「消去証明」について教えてください。

基本的に現在利用されている暗号というのは、計算能力がものすごく高ければ破れてしまうものです。現在の暗号技術は、計算をすることが非常に難解でその計算に膨大な時間がかかる、という理由で成立している技術になります。ところが、元の暗号文を「完全に消去」できれば、将来無限大の計算能力を持つコンピュータができたとしても、その暗号文の内容は、消去した後では全く分からないようになります。

私は情報の「消去証明」や「情報の安全な貸し出し」というアプローチで、量子コンピュータ時代の暗号技術を研究していますが、古典コンピュータを用いている限り、情報を消去したことを証明することや情報(復号鍵など)を返却したことを証明する手段は前述のとおり存在しません。しかし、量子物理の不確定性原理を応用した技術では、ある情報量を観測すると、対となる別の情報量を同時に十分な精度では観測できなくなるという特性を利用することができます。この特性を応用して、量子状態の暗号文

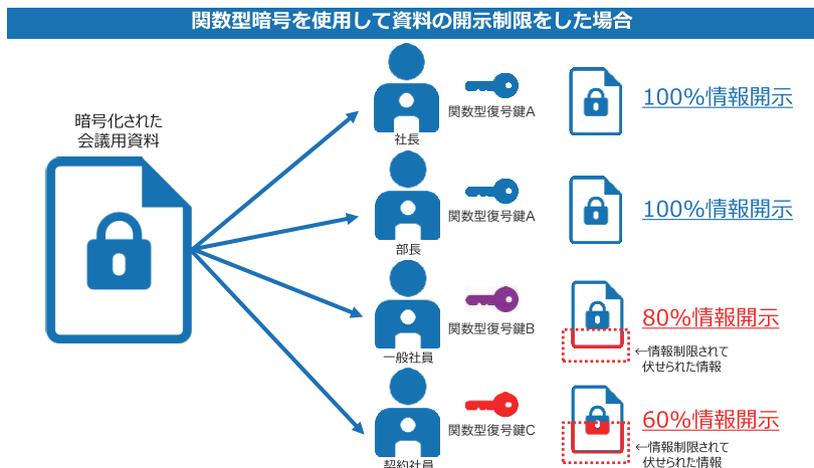


図2 関数型暗号の使用例

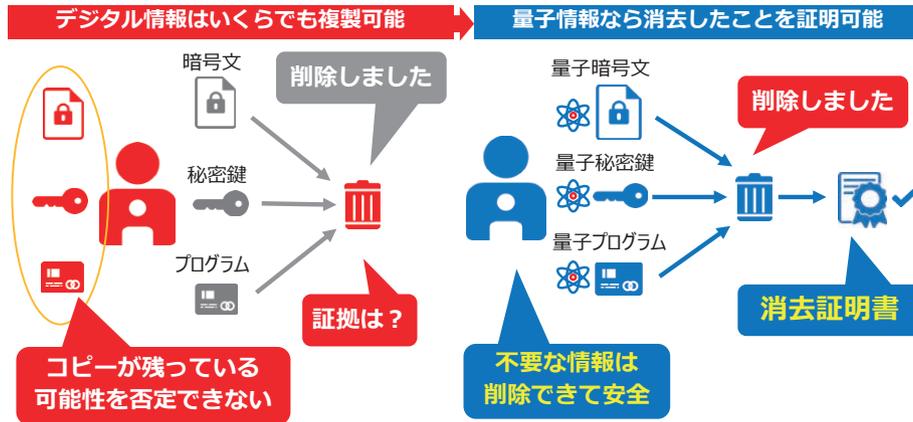


図3 量子情報技術+暗号技術で可能となる消去証明

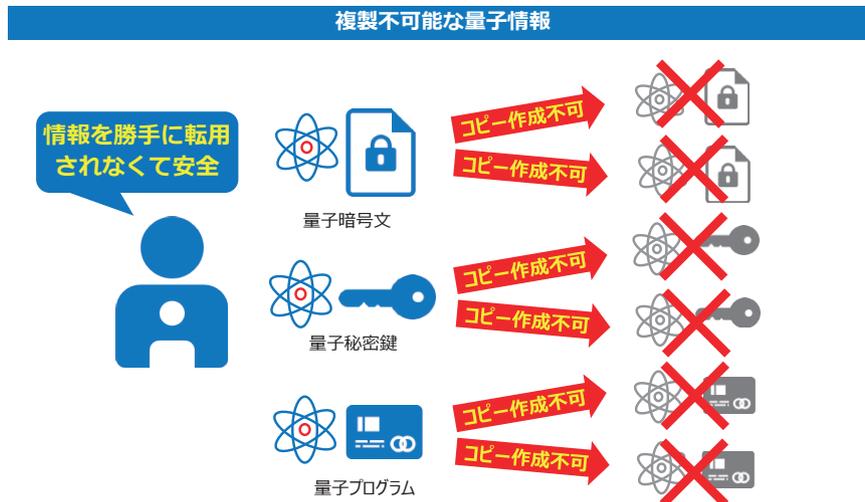


図4 量子物理の特性でコピー不可能

を生成した後にその暗号文を消去すると、そのデータが確実に消去されたことを証明する「消去の証明書」を得ることが可能になります。この証明書が正しいことを確認できた場合は、元のメッセージに関する情報を一切得られないことが保証できます。また、量子状態の復号鍵を生成することでユーザに貸し出し、ユーザは返却するときに消去した証明書を送り、確かに返却したことを証明可能にもなります。このような量子コンピュータの存在を前提として、初めて実現できる暗号機能という観点から研究を進めています（図4）。

■研究で苦労された点や今後のご研究に向けた課題点を教えてください。

昨今、暗号技術の分野では、さまざまな研究論文が急速に増えて発表されています。私自身、STOC (Symposium on Theory of Computing: 理論計算機科学の国際会議) やCRYPTO (クリプト), EUROCRYPT (ユーロクリプト) などの暗号理論のトップ会議で多数の研究論文を発表しています。具体的にはCRYPTOでは「公開鍵暗号」などを8件、EUROCRYPTでは「量子暗

号」をはじめ9件、STOCでも「プログラム電子透かし」を含む2件、Journal of Cryptology (暗号理論のトップジャーナル) では「プログラム難読化」など8件（その他、多数の特許も含む）という数多くの論文が採録されていますが、当初はこうした最先端の研究スピードにどうついていくか、最先端の研究の進め方のサイクルを身につけるまで少し戸惑いました。また、以前は研究が思うように進まないときなど、気持ちを切り替えるのに時間が必要でした。しかし今では、学生時代から続けている水泳などで体を動かし、気持ちを切り替える方法を見つけることで、この課題を克服しています。

技術的な問題としては、私の研究はあくまで理論研究であり、2030年に実用化されるといわれている量子コンピュータに対応した耐量子暗号なども、まだ実証実験できる実機が存在しない状況です。私の「消去証明」も理論的に可能であることは分かっていますが、実証実験が可能になった段階でより完璧な方式にするために、どのように修正実用化していくかということが今後の課題になります。



情報にかかわるすべての業界のイノベーションに貢献するために

■この研究によって実現されることや将来の応用先を教えてください。

具体的にはまず、動画配信サービスや音楽配信、ソフトウェア配信のほか公共サービスなどといった、各種のサブスクリプション・サービスで利用が見込めると考えています。現在、各社で運用しているサブスクリプション・サービスのほとんどは、システムでユーザの利用を制御しています。そこで例えば、有料動画自体を暗号化してユーザサイドに秘密鍵（復号鍵）を渡すことで視聴を可能にするかたちにすれば、違法ダウンロードや違法のデータ頒布が減少し、より健全なユーザ視聴が可能になりますし、契約期間が切れた場合でも、秘密鍵の返却や消去証明によって配信側の利益も保証される可能性が高まります。また消去の証明を応用してプログラム（アプリ）を安全に貸与することも可能になり得ます。例えばアプリをお試しで利用してもらい、お試し期間後に返却してもらえればユーザの手元にアプリの情報は残らず、アプリの海賊版が流通する可能性が減り、アプリ提供元の利益を保護しつつアプリの柔軟な提供が可能になり得ます。これが実現すれば、著作権保護はもとより、世界中のあらゆるコンテンツ業界への貢献につながる可能性があります。

また、NTTの提案している「IOWN (Innovative Optical and Wireless Network)」構想によって、拡大の一途をたどる通信の世界はもちろん、ソフトウェアの開発やアプリケーションやゲーム開発の分野など、「暗号技術」は情報のやり取りをする環境ではどこであっても必要とされる技術です。暗号技術はネットワーク環境の発展に応じて、これからもかたちを変えて進歩していくはずで、私はこれからも進歩していくこのネットワーク環境に対応した、新しいインパクトのある暗号技術を研究・開発し続けていきたいと考えています。

■研究に対する想いや大事にされていることを教えてください。

私は大学時代からNTT入社後も、すでに20年近く暗号理論について研究を続けてきました。私が研究テーマを選ぶ観点は2つあります。1つは基本的に自分がワクワクする内容であること。「これは絶対面白い」と心で感じるのが一番です。そしてもう1つが将来「役に立つ」と自分で信じていることができる技術であることです。そして、もし選択肢があって迷うようなら、より困難なこと、難しいほうに挑戦することです。この考え方は私の研究グループの中でも共有し、実践しています。

■所属されているNTT社会情報研究所について、どのような研究所かをご自身の印象を交えてお願いします。

NTT社会情報研究所を端的に表現すると、主にセキュリティ全般に関しての研究をしている研究所になります。研究内容は多岐にわたるもので、非常に多様な観点からセキュリティに取り組んでいます。ネットワークセキュリティやOSセキュリティといっ

た体系的なセキュリティの研究者はもちろん、中には人間の「安心」や「安心感」という観点からセキュリティを扱うような研究を行っている部署もありますし、法律的な観点から声優や俳優などの「声」の権利に関するセキュリティを扱う部署もあります。そのため、各研究員たちの専門分野も、通信はもとより、法学、心理学などと多彩なバックグラウンドを持った研究者たちの集まりです。

実際の勤務や就業環境については、非常に柔軟な働き方ができる環境の研究所です。基本的に勤務はリモート業務が主体ですが、私の研究グループでは週1回、全員で出社して会議や打ち合わせなどを行っています。私は研究関連の「雑談」をすることも大事だと考えているので、この週1回の出勤は、皆で顔を合わせてあえて行う雑談時間ともなっています。実際にこの雑談の中から、新しい発想や研究テーマが見つかったり、抱えている問題の解決の糸口が掴めたりしているので、大変実効性のある試みです。

■読者の方や研究者・学生・ビジネスパートナーへのメッセージをお願いします。

NTTの暗号研究は、世界的にトップクラスです。そのため、毎年のように海外から私の研究グループへのインターン希望がありますし、実際に一定期間滞在する海外の学生も多くいます。また、海外の第一線で活躍する研究者が、ゲストとして来訪することも珍しくはありません。そうしたゲストの方々には、必ず参加自由の講義をしていただいています。私自身も東京科学大学（旧東京工業大学）で特定教授をしていて、年に数回、学生たちに講義させていただくこともあり、そのときに知り合った学生たちやさまざまな大学の研究室に声がけして、この海外研究者が開いてくれる講義に招いたりもしています。実は現在、私の研究グループに所属している研究者は、私がこのようにして知り合った人たちがほとんどです。こうして海外の著名な研究者たちと直接コミュニケーションを取ることで、視野を広げて、世界的にインパクトのある研究がしたいと思う学生や研究者の方は、ぜひNTTにいらしてください。前述の海外研究者による講義は、どのような方でも参加自由ですので、そのきっかけになっていただけたら嬉しく思います。最後に、ご協力いただいているビジネスパートナーの方たちとは、今後も良い関係で研究を進めていければ幸いです。これからもよろしくお願いたします。



（今回はリモートにてインタビューを実施しました）

NTTスマートトレード株式会社

<https://www.nttsmarttrade.co.jp/>



NTTスマートトレード株式会社

多様な決済・送金サービスをワンストップで提供するFinTech企業

FinTech業界はデジタル通貨やブロックチェーンの普及等、急速な技術革新と規制環境の変化により、金融サービスのあり方を根本から変革し続けています。特に日本市場においてもキャッシュレス決済やデジタルバンキング、資産管理アプリ、デジタル給与などのサービスが急成長し、従来の金融機関との協業や競合が活発化しています。そういった市場環境の中、決済ゲートウェイサービスにより、法人・個人に各種決済・送金サービスとその周辺業務をワンストップで提供することで成長し続けてきたNTTスマートトレードの福田直亮社長に提供するサービスの特長と今後の展開について伺いました。



NTTスマートトレード
福田直亮社長

「エッジの効いた決済・送金ソリューション」を信頼性高く、迅速で、安全な金融サービスとして提供

■設立の背景と会社の概要について教えてください。

NTTスマートトレードは、2006年にNTTドコモビジネス（旧NTTコミュニケーションズ）の100%子会社として設立されたFinTech^{*1}企業です。私たちは、法人および個人のお客さまに対して、エッジの効いた決済・送金ソリューションを信頼性高く、迅速で、安全な金融サービスとして提供することを使命としています。主な事業は「決済代行」「送金」「電子マネー」の3つを柱で展開しており、特に多様な決済手段をワンストップで提供する決済ゲートウェイを活かした決済代行は当社の主力事業です（図1）。現在、幅広いお客さまにご利用いただいております。業界経験豊富なプロフェッショナルが集う精鋭組織として、内製による高い開発力ときめ細かなサポートを強みとして活動しています。

■どのような事業展開をしているのでしょうか。

当社の主力である決済代行サービスは、法人向けと個人向けに大別されます。個人向けには電子マネー「ちょコムマネー」や「ちょコムポイント」、オンライン送金サービス「ちょコム送金」や「学

費公共スマート払い」を提供しています。一方、法人向けには「クレジットカード決済」や「コンビニエンスストア決済」「口座振替」「電子マネー（ちょコム）決済」といった決済・送金サービスを中心に展開し、お客さまにさまざまな決済手段を提供するだけでなく、個別ニーズに対応できるソリューションも提供しています。その中の電子マネー（ちょコムeマネー）を活用した独自サービス「ちょコムクレジット支払い」は、ネットショップでカード情報を渡すのが怖いといった利用者の不安を解消しつつ、加盟店にとっては決済コストを抑えやすい仕組みとして高い評価をいただいています。加えて、「学費公共スマート払い」は、高額な学費や公共料金を、セキュアかつ簡単にオンラインでクレジットカード

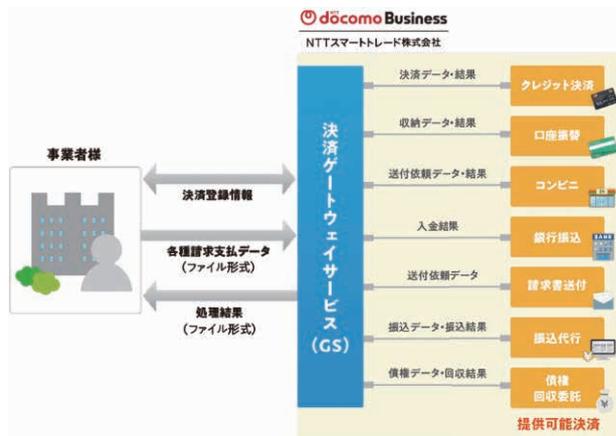


図1 決済ゲートウェイサービス

*1 FinTech：金融（Finance）と技術（Technology）を組み合わせた造語で、金融サービスと情報技術を結びつけたさまざまな革新的な動きのこと。



図2 学費公共スマート払い

ド決済できるサービスで、クレジットカード利用による資金負担の軽減や窓口に行く手間を省く利便性を提供しています。このように、当社は“かゆいところに手が届く”実用的なサービスで独自価値を創出しています（図2）。

「決済・送金を取り扱う企業」として、経済の“血液”を流す役割を担う

■市場環境はどのような状況でしょうか。その中で、どのような点に注力されていますか。

決済・送金市場にはメガPSPをはじめとした強力な競合が多数存在し、業界の競争は激しさを増しています。当社は大手と同じ土俵で戦うのではなく、専門性と機動力を活かし、独自性の高いソリューション提供によって存在感を発揮しています。サービスをご利用いただいている中小企業は、日本企業の99.7%を占める日本経済の屋台骨です。地域の雇用や生活を支える存在である一方で、紙の請求書や銀行振込に依存した業務は長年にわたり時間・コストの負担を強いてきました。こうした課題を背景に、DX（デジタルトランスフォーメーション）推進や資金繰りの改善は中小企業における重要テーマとなっています。デジタル送金やキャッシュレス決済は、業務効率化だけでなく、災害時の非接触取引や資金移動の透明性向上といった社会課題の解決にも寄与する、いわば現代のインフラです。当社は、年間6000億円に上る決済・送金を取り扱う企業として、経済の“血液”を流す役割を担っていると考えています。

現在、特に力を入れているのが、第一種送金免許の取得であり、2025年度中の取得を目標としています。この免許は取得難易度が極めて高く日本国内でもわずか4社しか保有していないものです。取得すれば送金額の上限が撤廃され、銀行と同等レベルの送金業務が可能になるため、サービス展開の幅が飛躍的に広がります。同時に、マネーロンダリング・テロ対策を含んだ厳格な運用体制を構築することで、企業ブランドや信頼性の向上にもつながります。

社内においては、2025年11月に新オフィスへ移転し、コミュニティスペースを整備するなど職場環境の刷新を図りました。当社はリアルコミュニケーションを重視したオフィススタンダードの勤務形態（必要に応じてリモートワーク可）を採用しており、行

間まで伝わる密度の濃い対話が高い生産性を生み出す基盤となっています。AI（人工知能）活用と業務のDX推進にも積極的に取り組み、幹部自身がAIで競合分析レポートを作成したり、日常業務への活用を促すための勉強会を開催したりと、組織全体でデジタル・リテラシー向上を進めています。業務プロセスの可視化からAI-OCR導入、Business Intelligenceツール整備まで、具体的な改革も着実に実行されています。加えて、オフィシャルサイトのリニューアルを通じたデジタルマーケティング強化も進行中で、「仕組みで売る」体制の構築によって事業のレバレッジを高めていきます。

■今後の展望についてお聞かせください。

当社は今後も、FinTechの力を通じて日本の中小企業の成長を支え、NTTドコモビジネスにおける金融領域の強化にも貢献していくことを事業の大きな方向性としています。中小企業にとって「DX推進」や「資金繰り」は依然として大きな課題であり、当社の決済・送金サービスがその改善を後押しできる余地は広がり続けています。第一種送金免許の取得は、今後の事業展開を左右する重要なマイルストーンです。このライセンスを活用した新たな送金サービス・ソリューションにより、顧客提供価値を高めてビジネスを拡大していきます。

また、既存の事業においては価格競争に巻き込まれることなく、当社ならではの機動力と独自性を武器に堅実かつ着実に事業拡大させていきます。デジタルマーケティングの強化によって汎用サービスを効率的に拡大し、直営のリソースは深い課題解決に集中できる体制へと変革を進めていきます。キャッシュレス決済比率が42.8%へと伸びる中、日本のキャッシュレス化や地域経済の活性化に貢献する企業として、これからもNTTドコモビジネスグループとともに日本を元気にする存在であり続けたいと考えています。

担当者に聞く

顧客ニーズへ柔軟に対応できる内製化されたアプリケーションを開発

情報システム部 部長

岡 泰之 さん



■どのような業務を行っているのでしょうか。

システム開発・運用を中心に、法人のお客さまとの連携に関する技術支援や自社の情報セキュリティ対策など、幅広い業務を担当しています。特にアプリケーション開発は内製化を強みとしており、顧客のニーズを迅速に反映できる柔軟な対応力が自慢です。また、運用面では細やかなサポートを提供し、信頼を積み重ねています。一方、少人数で多様な業務を担うため、効率化とマネジメントの強化は課題です。これに対しては、AIを補助的に活用し、業務支援や自動化を進め、負荷軽減と品質向上をめざしています。

■今後の展望についてお聞かせください。

今後は、開発力の強化と社内業務の効率化の二軸を推進していきます。開発面では、アプリケーション開発のスピードと品質を高めるため、開発プロセスの見直しや標準化を進め、生成AIはコードレビューやテスト補助などのサポートに活用していきます。これにより、第一種資金移動業における送金サービスの拡張やワンストップでのサービス提供を加速し、顧客体験を向上させます。一方、社内業務では経理や営業活動の効率化をめざし、請求書処理や入金確認の自動化、BIツールによるデータ活用を進めます。これらの取り組みにより、業務スピードと精度を高め、全体の生産性向上を実現していきます。

法的視点からのビジネスリスクの見極め

管理部 部長

佐々木 孝 さん



■どのような業務を行っているのでしょうか。

当社は決済ビジネスおよび送金ビジネスを営んでおり、常にシビアな法的視点を持ちながら事業を展開しています。その中

で管理部は、法令遵守を中核とし、ビジネスリスクの見極めおよび金融庁への対応など、コンプライアンスの推進・維持・管理を行っています。管理部が特に注力しているのはAML (Anti-Money Laundering) /CFT (Countering the Financing of Terrorism)*²等法令に対する適応強化です。決済および資金移動業は金融犯罪リスクを伴い、社会的責任が大きい業態であるため、国内規制の強化に対応することが不可欠です。このため、常に課題として挙げられるのが、金融を含めた法的な規制改正への迅速な対応、システムや人材の高度化、そして社内全体へのコンプライアンス意識の浸透です。こうした課題に対して、管理部では金融庁や業界団体との情報連携を強化し、最新の規制動向を迅速に把握する体制を整えています。さらに、外部専門家との協働やシステム改善を通じて、コンプライアンス体制の強化を進めることで、現状のリスクを最小化し、安定した事業運営を行っています。

■今後の展望についてお聞かせください。

法令遵守の徹底を基盤としながら、より高度なガバナンス体制を構築し、事業の信頼性を一層高めることです。そのためには、リスク管理の精度向上と規制動向を先取りした柔軟な対応力が不可欠と考えています。具体的なアプローチとして、AIやデータ分析を用いた取引モニタリングの高度化により、リスク検知の効率と精度を高めるとともに、業務負荷の軽減を図ります。また、社内全体でのコンプライアンス意識をさらに浸透させるため、教育・研修の強化にも注力していきます。

最適な決済・送金スキームを提案し、他社にはない差別化した付加価値を提供

アライアンス営業部

マネージャー

萩原 浩司 さん



■どのような業務を行っているのでしょうか。

アライアンス営業部に所属し、主に「決済・送金事業」を担当しています。具体的には、新規加盟店や販売パートナーの獲得、既存加盟店・販売パートナーへのリテンション活動、調達事業者(クレジットカード会社・収納代行事業者)の拡大・対応、新規ビジネスの企画・立案など、幅広い営業活動を行っています。クレジットカードや口座振替、コンビニ決済、電子マネー、BPO

* 2 AML/CFT：マネーロンダリングとテロ資金供与を防止するための組織的な仕組みのこと。

(Business Process Outsourcing) など多様な商材やサービスをワンストップで提案し、顧客のニーズに合わせた最適なソリューションを提供しています。

現在、特に注力しているのは「新規加盟店の獲得」「既存加盟店のリテンション強化」「調達コストの最適化」です。これらに注力する背景には、サービスの差別化が難しい領域での価格競争、顧客要望の多様化・高度化、そしてコスト構造の変化といった課題が挙げられます。これらの課題への対応として、NTTブランドの信頼性、システム開発やBPO運用の柔軟なカスタマイズによる対応力を活かし、顧客ごとに最適な決済・送金スキームを提案することにより、他社にはない付加価値を提供し差別化を図っています。また、カード会社やBPO事業者などとの継続的な交渉を通じて、調達コストの低減にも努めています。

■今後の展望についてお聞かせください。

今後は、決済・送金事業のさらなる拡大と顧客満足度・収益性の両立をめざします。また、公共サービスやサブスク型ECなど、継続的な決済が見込める加盟店獲得のために販売パートナーやNTTグループ、サービスプロバイダとの連携を強化し、案件発掘力をさらに高めます。SEO対策やインバウンド施策も継続的に強化します。新たに始まる第一種資金移動業をベースとした送金サービスにおいては、パイロットユーザの獲得をめざします。今後も市場環境や顧客ニーズの変化へ柔軟に対応し、営業活動の質と効率を高めることで、持続的な成長と収益拡大をめざしていきます。

NTTスマートトレード ア・ラ・カ・ル・ト

■15年ぶりのオフィス刷新、新しい働き方へ

創業から15年間、拠点にしていたオフィスビルが、周辺の再開発計画に伴い取り壊されることになりました。これを機に、NTTスマートトレードは新しいオフィスへ移転しました。旧オフィスでは、NTTドコモビジネスから譲り受けた古い什器を使い続け、会議室不足や休憩スペースの欠如、デスクトップPCと有線LAN、電話はビジネスフォンという、ひと昔前の環境でした。社内ではNew Officeプロジェクトを立ち上げ、「Flexible」「断捨離」「DX」をキーコンセプトとして、誰もが働きやすい環境づくりを検討してきたようです。

新オフィスでは、コミュニケーションを促すデスク配置や打ち合わせスペース、充実した会議室と休憩室を整備。全員がノートPCを使用し、社内ネットワークはWi-Fiへ、電話はクラウドフォンへ刷新したとのこと。さらに、植栽を取り入れた癒しの空間演出も加えています。こうして2025年11月、真新しいオフィスが完成し、NTTスマートトレードは新たな一歩を踏み出しました。「新生NTTスマートトレード」として、この場所から事業拡大をめざしています(写真1)。新しいオフィスにはソファや小上がりのあるラウンジ(休憩室)をつくり、お昼休みにはくつろぎながら昼食や休憩がとれます(写真2)。オフィスの周辺にはランチに使えるお店が豊富です。神保町はカレーで有名ですし、ラーメン激戦区でもあり、中華料理店も多数あります。また、九段下周辺では複数個所にキッチンカーが出店しており、お昼の楽しみの1つとなっているようです。

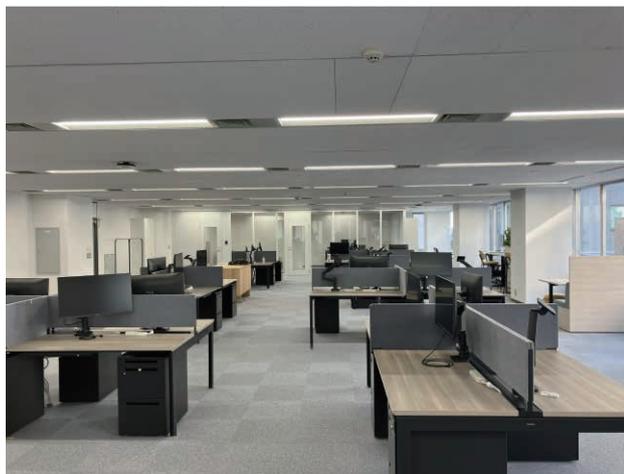


写真1 事務所内

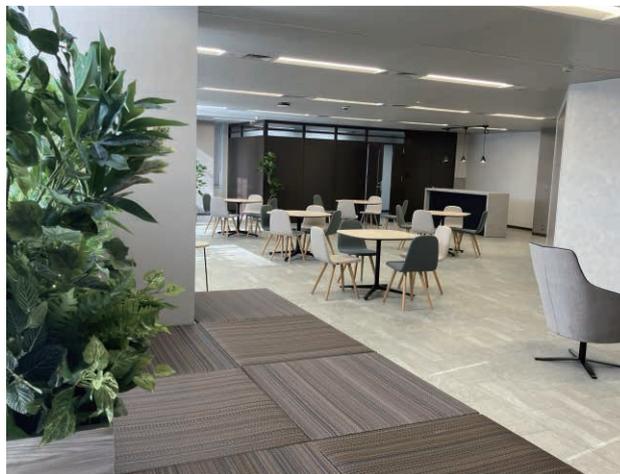


写真2 ラウンジ

画像認識 AI「Deeptector」による 産業 DX 推進と市場拡大に向けた取り組み

画像認識 AI (人工知能)「Deeptector (ディープテクター)」は、2017年の販売開始以来、産業分野における外観検査や設備点検の高度化に貢献してきました。NTTドコモソリューションズでは、近年、AIの高度化と社会的ニーズの高まりを背景に、さらなる市場拡大に向けて技術による差異化やソリューション化を推進しています。本稿では、画像認識市場の動向、Deeptectorの技術・活用事例、そして今後の展開について解説します。

はじめに

近年、AI (人工知能) の急速な発展に伴い、さまざまな産業分野でデジタルトランスフォーメーション (DX) が加速しています。中でも画像認識 AI は、製造業、インフラ管理、医療、小売など幅広い領域で実用化が進み、業務効率化や品質向上に大きく貢献しています。日本においては、少子高齢化に伴う労働人口の減少、熟練技術者の退職による技能継承の難しさ、さらには品質管理の高度化ニーズの高まりが重なり、画像認識 AI への関心が一層高まっています。従来、人の目と経験に依存してきた外観検査や設備点検において、AIによる自動化・高精度化は喫緊の課題となっています。産業領域における画像認識 AI 市場の潮流と日本市場特有のニーズを整理したうえで、Deeptector^{*1}の特長、そして市場拡大に向けた取り組みと今後の展開について述べます。

画像認識 AI 市場と Deeptector の位置付け

■産業領域における画像認識 AI の潮流

産業領域の画像認識 AI は、単なる「画像を分類する技術」から、現場の判断や運用を支える業務基盤へと役割を拡大しています。背景には、現場の人手不足や熟練者減少に加え、検査対象や設備が高度化・複雑化し、従来のルールベースでの画像処理では追従が難しくなったことがあります。さらに、検査品質の均一化やトレーサビリティ確保、予防保全の推進など、検査結果をデータとして蓄積・活用する要求が高まっている点も重要です。

適用領域を俯瞰すると、大きく3つの方向性がみられます。

第1に、インフラ点検です。高所や狭隘部など目視が困難な箇所を、ドローンやロボットで撮影し、AIで損傷や劣化兆候を抽出する取り組みが進んでいます。ひび割れ検出などでは深層学習と従来手法を組み合わせた実装も進み、維持管理コストの抑制と安全性向上が期待されています。

第2に、製造ラインにおける品質検査です。畳み込みニューラルネットワーク (CNN)^{*2}を中心とする深層学習の進展により、

*1 「Deeptector」はNTTドコモソリューションズ株式会社の登録商標。
<https://www.ntt.com.co.jp/deeptector/>

*2 畳み込みニューラルネットワーク：画像の局所的な特徴 (エッジや模様など) を畳み込み演算で段階的に抽出し、分類・検出などを行う代表的な深層学習モデル。

微細欠陥や複雑形状、照明変動などの条件下でも高精度な判定が可能になってきました。欠陥領域を精緻に抽出するセグメンテーションや、正常品中心の学習で異常を検出するアプローチなど、現場条件に応じた多様な実装が実用化されつつあります。

第3に、安全管理への応用です。高速物体検出や姿勢推定を用い、危険エリア侵入、転倒、保護具未着用などをリアルタイムに検知することで、事故リスク低減とコンプライアンス対応を支援します。このような状況から、熟練者の経験に依存していた判定を定量化し、判断根拠を可視化し、運用プロセスに組み込む取り組みが広がっています。

■日本市場の技術課題とニーズ

画像認識 AI の普及が進む一方で、日本市場には固有の導入障壁があります。これらは単独の課題ではなく、相互に関連しながら運用定着の難しさを生みます。

第1の課題は、低不良率に起因する学習データ不足です。日本の製造現場は工程能力が高く、不良品発生率が極めて低いため、深層学習に必要な不良画像が集まりにくく、導入初期の学習が進まないという逆説が生じています。従来手法では欠陥タイプごとに大量のサンプルを必要とし、データ収集だけで長期間を要することが導入障壁となっています。

第2の課題は、現場環境の個別性と判定基準の多様性です。同じ検査対象でも企業ごとに品質基準やしきい値は異なり、同一企業内でも工場やラインによって照明、設置スペース、搬送姿勢などが異なります。そのため、環境変動に強く、かつ現場ごとの条件差へ柔軟に適應できるロバスト性が求められます。

第3に、ソリューション志向の高まりがあります。スクラッチ開発は要件定義から開発・調整まで長期化しやすく、PoC (Proof of Concept) で終わるリスクもあります。これに対して、実証済みのパッケージを短期間・低コストで導入し、導入後も継続的な改善支援を受けられるソリューション型開発への期待が強まっています。

上記以外にも、専門人材不足と運用性の要求があり、ノーコード・ローコード、直感的な UI (User Interface)、現場主体での再学習や改善が可能な運用性が求められます。また、判定根拠を可視化し、品質管理部門や検査員が納得・検証できる仕組みの構築も重要です。加えて、セキュリティ観点から、秘匿性の高い画像を外部クラウドへ送信できない現場も多く、ネットワークにお

ける分離環境やオンプレミスでの閉域運用ニーズが根強く存在します。

■Deeptectorの特長について

Deeptectorは深層学習に基づく多様な判定パターンに対応しており、物体検出（領域検出）、分類、レベル判定、正例判定など、業種・用途に応じて最適なパターンを選択できます。また、オプションとしてアナログメータの読み取り機能やPLC（プログラマブルロジックコントローラ）*3との接続により産業機器と連携可能な業務アプリケーションを用意しており、柔軟な適用が可能です。また、利用形態としては、セキュリティ要件の高い現場向けのオンプレミス型と、初期投資を抑えたい企業向けのクラウド型を提供しており、システム構成に合わせて選択できます。GUI（Graphical User Interface）による直感的な操作性、API（Application Programming Interface）による外部システムとの連携、学習から推論、運用までの一貫したサポートなど、現場の利便性を重視した設計となっています。

また、判定結果を画像とともにデータベースへ記録できるため、後から検証可能なトレーサビリティを確保できます。これは説明可能性と運用定着の観点では重要で、品質保証部門や監査対応においても有効です。Deeptectorは、日本市場で求められるソリューション志向、説明可能性、運用性、セキュリティに対応する製品として位置付けることができます（図1）。

市場拡大に向けた取り組み

■市場トレンド

画像認識AI市場では、技術の成熟とともに適用領域が拡大しており、以下の4つのトレンドが顕著になっています。

第1に、少量省データでの学習技術の進展です。Few-Shot学習*4やZero-Shot学習*5といった、少数サンプルや未知クラスにも対応可能な技術が注目されています。また、VAE*6やGAN*7を用いた合成データ生成により、学習データ不足を補完する取り組みも進んでいます。

第2に、AIの高度化です。Vision Transformer*8やSwin Transformer*9など画像認識への適用が進んでいます。また、

- *3 PLC：センサ入力（画像等）に基づき機械動作を高速制御する装置。
- *4 Few-Shot学習：1枚～数枚程度のサンプルからドメインに合わせた特殊な欠陥状態を学習し、基盤モデルの汎用表現を活かして高い汎化性能を実現します。
- *5 Zero-Shot学習：学習データが全くない未知の欠陥クラスに対しても、基盤モデルの事前学習済み知識とテキスト記述などの属性情報を活用します。例えば「表面に細かい亀裂がある」といった言語記述から画像中の該当箇所を特定できます。
- *6 VAE：入力データを潜在変数へ圧縮し再構成する生成モデルで、確率的表現を用いて類似データの生成や異常度算出に利用されます。
- *7 GAN：生成器と識別器を競わせ学習し実画像に近い合成データを生成する手法。
- *8 Vision Transformer：画像をパッチ化し自己注意で全体関係を学習する画像認識モデル。
- *9 Swin Transformer：画像を固定サイズの「窓（Window）」ごとに自己注意で処理し、次段で窓位置をずらす（Shift）ことで窓間の情報も統合する階層型Transformer。計算量を抑えつつ高精細画像にも適用しやすくなっています。



図1 Deeptector運用イメージ例

自己教師あり学習により、ラベルなしデータからも有用な特徴表現を学習する手法が実用化されつつあります。

第3に、マルチモーダル化の加速です。画像情報だけでなく、音響センサ、赤外線カメラ、振動センサなど、複数のモダリティを統合することで検査精度を向上させる取り組みが拡大しています。

第4に、エッジAIの普及です。クラウドとの通信遅延を回避し、リアルタイム性を確保するため、エッジデバイスでのAI推論が普及しています。

■Deeptectorの差別化ポイント

市場トレンドと日本市場特有のニーズを踏まえ、Deeptectorは以下の3つのテーマを軸に機能強化に取り組んでいます。

(1) 少量データ学習技術による導入障壁の低減

日本の製造現場では不良品発生率が極めて低く維持されているため、AIの学習に必要な大量の不良サンプルを収集することが困難です。この課題に対し、以下の3つのアプローチで導入初期段階から実用的な精度を実現する技術開発を進めています。

第1に、正常品のみから学習する異常検知手法です。この手法では、正常画像から得られる「いつもの見え方」をあらかじめ学習しておき、そこから外れた個所や状態を異常として検出します。具体的には、画像を細かな領域に分けて各部分の見え方を覚える方法や、画像全体としての見え方のばらつきを学習して、通常範囲から外れるものを異常とみなす方法があります。いずれも学習時に見たことのない新たな欠陥パターンでも、「通常との違い」として検出できる点が特長です。不良サンプルが全く入手できない状況でも実用システムを構築できることが最大の利点です。

第2に、基盤モデルを活用したFew-Shot、Zero-Shotのような学習技術です。従来の深層学習では、欠陥タイプごとに数百～数千の不良サンプルが必要でしたが、近年は基盤モデルを活用した少量のデータ学習技術(1)により、学習データの収集負担を大幅に軽減できます（図2）。

これらにより、従来は学習データ収集に要していたプロセスを短縮し、導入期間短縮と初期投資の削減を実現します。また、新製品の投入時にも追加データの収集を最小限に抑えながら迅速に対応できるため、製造現場の柔軟性と生産性向上に貢献します。

(2) マルチモーダル化による検査精度の向上

画像情報だけではとらえきれない異常に対応するため、テキスト・画像・音声・動画など複数のデータ形式を同時に処理し、統合的に理解するマルチモーダル技術の適用を推進しています。異

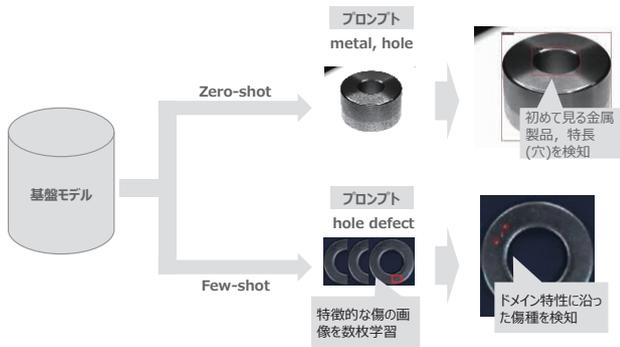


図2 省データ学習技術イメージ

なる形式の入力を組み合わせて分析することで、単一モデルでは得られない状況の把握や因果の手掛かりを補完でき、より包括的な判断が可能になります。近年は大規模な基盤モデルを起点に、現場要件に合わせて検査・診断・予兆検知などの各タスク向けモデルへ落とし込む手法が一般化しており、Deeptectorでもこの考え方を踏まえた技術拡張の検討を進めています。

製造現場では、外観変化に現れにくい初期異常や、温度・振動・音響など複合的な兆候として現れる事象が増えており、画像認識単独では限界があります。そこで、画像に加えて設備ログや作業記録（テキスト）、マイクによる異音（音声）、温度・振動などの各種センサーデータなどを統合し、設備状態を多角的にとらえるアプローチを強化します。また、製造工程の生産管理においても、画像以外のセンサーデータを併用することで、稼働状態・品質・歩留まりの関係を一体で分析し、原因推定や対策の優先付けを支援します。

さらに、画像と3次元情報を組み合わせることで、複雑形状の外観検査や、微小欠陥・反射・陰影の影響を受けやすい高難易度検知領域への適用拡大もねらいます。こうしたマルチモーダルな統合（センサフュージョン）により各モデルの長所を活かし、検査の高度化と自動化を両立することで、従来では検出が難しかった複合的な異常への対応力を高めていきます（図3）。

(3) ソリューション化による得意分野への深掘り

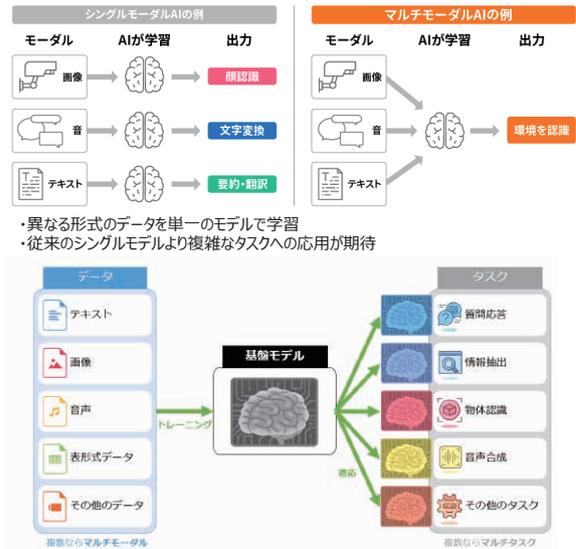
個別カスタム開発から、業種共通課題をテンプレート化したパッケージソリューションへ移行し、導入前コンサルから運用保守までワンストップで支援することで、実運用の定着を加速します。

Deeptectorの導入事例

■巡視ソリューション

前述した技術強化を統合した業種特化型ソリューションとして、電力会社向け「巡視ソリューション」を紹介します。

電柱設備の巡視点検は、広範囲かつ設備数が膨大なため従来の人手による点検では業務負担の増大と品質のばらつきが課題となっています。本ソリューションは、走行映像から停電リスクの要因を自動検出し、点検の省人化と品質の均一化を実現します。位置情報付きで記録・共有することで、現地での対応方針の早期



さまざまなデータを学習した基盤モデルを構築し、個別タスクを落とし込んだモデルを作成する

図3 マルチモーダル技術例

決定や保守計画の効率化にも寄与します。

特にカラスの営巣や、つる植物の繁茂は停電要因となりますが、網羅的な確認が難しい領域です。「巡視ソリューション」では、車両搭載カメラの映像から、AIが停電リスクの高い異常を自動検出します。具体的には、カラスの巣、電線に絡みつくる植物（クズ、フジ等）、電柱設備（変圧器、高圧アーム等）について、走行しながらリアルタイムに異常を判定し、対象個所の位置情報とともに記録します。業界横断的な学習データの活用により、各社から提供された多様な環境・季節条件下での画像を集約し、地域特性や気象条件に左右されにくい高精度なAIモデルの継続的な開発をするとともに、電柱管理システムと連携し、検出結果を設備情報に紐付けて表示することで、優先度に応じた効率的な保守計画の立案を支援します。

従来は車両1台につき運転手と点検者の2名体制でしたが、本ソリューションの導入により、運転手1名のみでの巡視点検が可能となるため、省人化による人的コスト削減が見込めます。また熟練度に依存しない均一な点検品質を実現しており、早期発見による予防保全の推進で停電事故のリスク低減に寄与します（図4）。

■化学プラント向け分液操作自動化ソリューション

化学プラント向けの業種特化型ソリューションとして、「分液操作自動化ソリューション」を紹介します。化学プラントにおける分液操作は、二層に分離した液体の境界面を目視で確認しながら、適切なタイミングでバルブを操作して各層を分離回収する作業です。この操作は医薬品・化学品の製造工程において頻繁に発生しますが、従来は熟練作業者がサイトグラスやタンクの界面位置を目視で監視し、手でバルブを開閉する必要がありました。Deeptectorでは、化学プラントの現場ニーズを踏まえ、画像認識AIによる界面検出とバルブ制御を組み合わせた「分液操作自動化ソリューション」を開発しました。本ソリューションでは、分液槽に設置したカメラ映像からAIが二層の界面位置をリアル

from



図4 巡視ソリューション概要

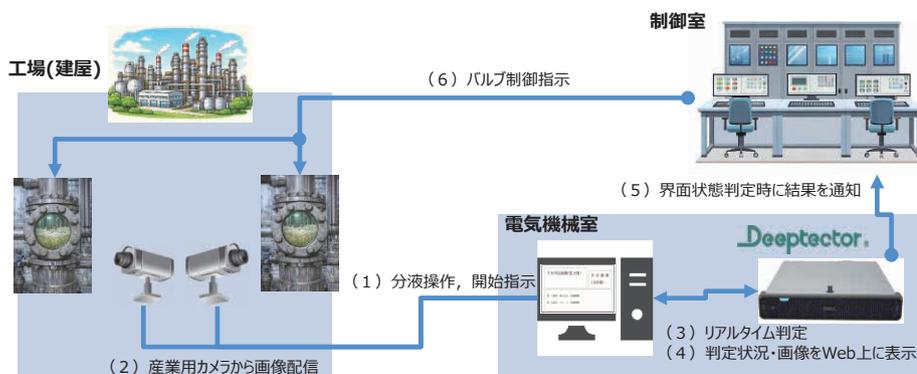


図5 分液操作自動化ソリューション概要

タイムに検出し、段階的に自動的にバルブを制御し分離操作を実行できるようにしていきます。

これにより、界面確認とバルブ操作の省力化に加え、操作タイミングのばらつきや誤操作リスクを抑え、回収品質の安定化が期待できます。

本ソリューションの特長として界面の位置状態を複数クラスに分類することにより、バルブ開閉を高精度に判定できることが挙げられます。PLCとの連携によりバルブ制御を自動化し、検出からバルブ操作までをシームレスに実行します。今後は、少ないデータで高い性能を発揮させる省学習技術による学習の効率化や温度センサ等の各種データによるマルチモデル化を進め、より高精度な自動化をめざしています(図5)。

今後の方向性と事業展開

NTTグループが国内外のパートナーとともに推進しているIOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想との連携により、低遅延・大容量通信を活かした品質データの統合やモデルの共有を視野に入れています。拠点ごとに蓄積される検査データや改善知見を循環させることで、現場最適を拠点最適、

さらには全社最適へ拡張することが期待できます。さらに、グループでの協業や共創の枠組みを活用し、製造業で培った検査DXの知見を社会課題の領域などへ展開していきます。

おわりに

NTTドコモソリューションズがめざすのは、検査DXを通じて省人化、安全性向上、作業品質均一化を同時に実現し、人とAIが協調する現場運用を確立することです。検査結果をデータとして蓄積し、説明可能性とトレーサビリティを担保しながら継続改善につなげることで、日本の産業が抱える構造的課題の解決に貢献し、画像認識AI市場の拡大に貢献します。

参考文献

(1) <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.05499>

◆問い合わせ先

NTTドコモソリューションズ
ネットワーククラウド事業本部
プラットフォームサービス部
DPS-BU AI Service担当

NTTの研究開発技術を融合しAIフェイク解決に挑む、VOICENCE (ヴォイセンス) カンパニー始動

生成AI(人工知能)による音声合成の普及とともに、声の無断利用やフェイク音声が生産的課題となっています。日本では法制度上、声そのものを直接保護する明文規定がなく、このギャップが新たなリスクを生む中、NTT西日本は音声AI事業「VOICENCE(ヴォイセンス)」を立ち上げました。本稿では、NTT人間情報研究所の音声処理技術とNTT西日本が独自開発した真正性証明「トラスト技術」を組み合わせた新市場創造への挑戦とその社会的意義について解説します。

AI 音声が直面する新たな社会課題

生成AI(人工知能)の普及に伴い、「声」の無断利用やフェイク音声拡散という社会問題が深刻となっています。こうしたリスクは、著名な声優や俳優、タレントなどの実演家の声が、自身の意思とは無関係にデジタル上で拡散される“フェイク音声”問題としてマスメディアでも取り上げられています。

一方、日本の現行法制では声そのものを直接保護する明文規定が存在せず、肖像権やパブリシティ権の一部でしか対応できません。実演家の活動領域はグローバルに広がる一方で、無断生成や不正利用によるブランド毀損・機会損失が拡大している中、この制度的なギャップを放置したままでは、クリエイターや実演家が自らの声をデジタル時代において安全に活用することが困難となり、生成AIによって生まれる新たな価値とリスクのバランスが欠如してしまいます。

この課題認識を背景として、NTT西日本は2025年10月27日、音声AI事業「VOICENCE(ヴォイセンス)」*1の開始を発表しま

した⁽¹⁾。公式プラットフォームを介して“公認AI”を生み出し、声の権利保護とAI音声の健全なビジネス活用を実現し、AI音声の活用促進をめざします。

VOICENCEとは——音声IPの保護・活用基盤

VOICENCEの核心は、「音声IP(Intellectual Property)としての声の保護と活用」にあります。

実演家本人や権利者が提供した音源データを基にAI音声モデルを生成し、そのモデル自体と生成されたAI音声コンテンツを「音声IP」*2として統合的に管理できるプラットフォーム基盤を構築します(図1)。これにより、声のライセンス情報、生成モデル、

- *1 VOICENCE(ヴォイセンス): NTT西日本が開始した音声AI事業。名称は「Voice(声)」「License(権利)」「Essence(本質)」を組み合わせた造語。
- *2 音声IP: 声を知的所有権としてとらえ、話者本人の同意に基づき権利化・管理・活用する概念。音源データ、AI音声モデルおよび生成した音声コンテンツを含みます。



図1 VOICENCEプラットフォーム

コンテンツ利用権が一元的に整理され、実演家本人により公認されたAI音声である真正性と利用履歴が追跡可能となります。

VOICENCEという名称は、Voice（声）、License（権利）、Essence（本質）の3つの意味を含めた造語であり、声の価値を守りつつその本質的な可能性を拡張する事業であることを示しています⁽²⁾。

技術的基盤——合成音声と音声印象制御技術

VOICENCEの合成音声は、NTT人間情報研究所で研究・開発されてきた技術を基盤としており、少量の音声データから話者の声質や口調の特徴を抽出し、本人らしい音声を高精度に生成する技術が用いられています。

本事業では、NTT人間情報研究所の研究成果として、Zero/Few-shot^{*3}およびクロスリンガル音声合成技術^{*4}を活用し、日本語話者モデルから英語、中国語、韓国語、フランス語、スペイン語といった複数言語の音声を、声質を保ったまま生成することが可能となっています⁽³⁾。

さらに、同研究所が開発した音声印象制御技術^{*5}を実装している点も特徴です(図2)。声質を維持したまま、抑揚や話し方のニュアンス、口調の強弱といった表現特性を制御することで、同一話者モデルから用途に応じた複数の発話表現を生成できます。

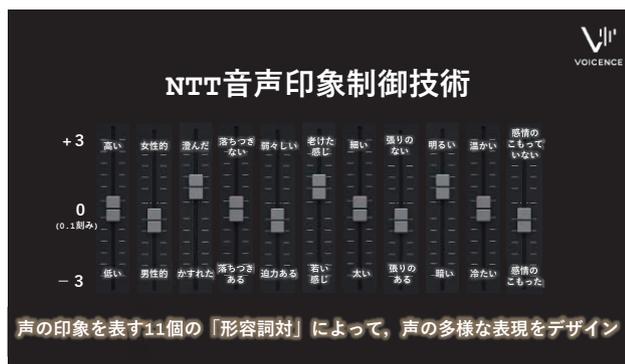


図2 NTT音声印象制御技術

これらの技術により、VOICENCEは単なる音声生成にとどまらず、話者の個性を保持しつつ多言語・多用途に適応できる「コンテンツプロデュース事業」を展開しています。

トラスト技術——NTT西日本開発の真正性証明技術

VOICENCEの最大の技術的な特色は、NTT西日本が独自開発した「トラスト技術」^{*6}と呼ばれる真正性証明機能^{*7}の実装です。単に音声を生成するだけでなく、それが「誰の声であるか」「どのモデルから生成されたか」「どのような契約条件で使われるか」を、ブロックチェーンとVC (Verifiable Credentials: 検証可能資格情報)^{*8}によって記録・管理する仕組みを持ちます(図3)。

この仕組みは次の3層構造で提供されます。

- ① 改ざん耐性のある分散台帳（ブロックチェーン）による真正性情報の保管
- ② 階層型VCによるコンテンツとモデル、音声データとの関係性の記録
- ③ 利用条件・契約情報（用途証明）の付与

これにより、無断生成された類似音声データとVOICENCE正規生成音声を識別可能にし、利用者企業・実演家双方が安心して活用できる信頼基盤を提供します。

また、本技術は2025年度NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）懸賞金活用型プログラム「GENI-AC—PRIZE」領域03のトライアル審査で採択されるなど、外部評価も得ています。

権利保護から流通までを一貫して担い“声の経済圏”を創出

NTTは電話からはじまり、「声」を大切にしてきました。そのDNAと積み重ねてきた国産技術を活かし、“声の経済圏”を生み出すことで、ジャパンコンテンツ産業の中にある「声」という資産が新たな価値を生み出すことを推進し、グローバル展開を含む

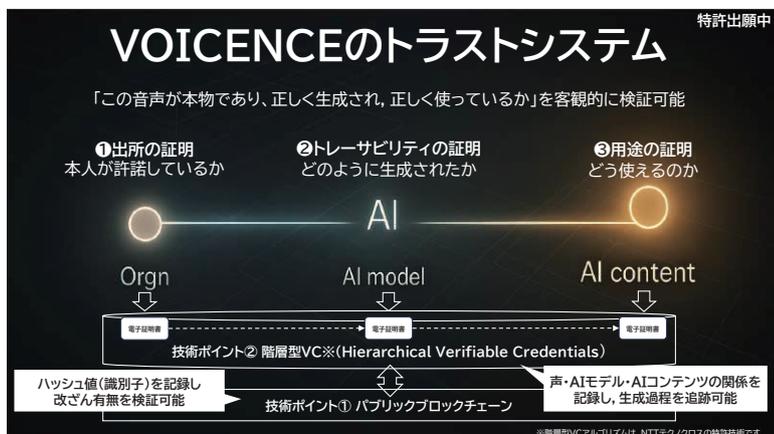


図3 VOICENCEのトラストシステム

- *3 Zero/Few-shot: 少量または数秒程度の音声データから話者の声の特徴を学習し、新たな発話をその話者らしい音声として生成する技術。
- *4 クロスリンガル音声合成: 単一の話者モデルを用いて、声質を保持したまま複数言語の音声を生成する技術。多言語対応の音声対話や国際展開用途に用いられます。
- *5 音声印象制御技術: 話者の声質を保持したまま、抑揚、話速、口調、感情表現などのパラ言語的特徴を制御する音声生成技術。用途に応じた発話表現の生成が可能。
- *6 トラスト技術: 生成データの真正性や利用条件を暗号的に証明・管理するための技術群。ブロックチェーンやVCなどを使用。
- *7 真正性証明: 生成音声が正規の話者モデルおよび契約条件に基づいて作成されたものであることを技術的に証明する仕組み。改ざん防止および追跡可能性を担保。
- *8 VC: 発行者・保持者・検証者の三者モデルに基づき、データの真正性や属性を暗号的に検証可能とするデジタル証明方式。



図4 連携するNTTグループ各社との集合写真

さらなる成長へ貢献したいと考えています。音声IPの真正性・契約情報・生成技術が統合されることで、企業はブランドボイスやナレーション、広告音声などを安心して活用でき、実演家は自らの声を安全に収益化できる市場環境が整います。

いち早く市場を創造していくためにVOICEENCEカンパニーという社内独立組織を立ち上げ、機動的な事業推進体制を整えます。これにより、ライツマネジメント機能と音声コンテンツ企画・制作機能を備えたコンテンツプロデュース事業を行い、実演家と企業やブランドの双方に対して、権利保護から流通まで一貫したサービスを提供します。

VOICEENCEがめざす姿

VOICEENCEがめざすのは、「声の真正性が担保されたAI音声コンテンツ」のデファクトスタンダードを確立することです。トラスト技術によって付与される証明データや利用ログを、ステークホルダーの要請に応じて提供することで、誰もが正当に声の権利を行使できる社会基盤の整備を進めていきます。さらに、音声コンテンツの保護に関する事例を継続的に蓄積し、社会的な抑止力を育むとともに、市場における「声の権利」への認識定着を図ります。

併せて、声の権利研究をリードするNTT社会情報研究所と連携し、同研究所が創出した研究成果である「声の権利を保護し適切に扱うための解説資料」を活用することで、法的・社会的観点からの権利保護の普及を推進します。また、知的財産権を専門とする法律家、行政・業界団体、アカデミアなどの有識者と連携しながら、ルール整備と運用基盤の構築を段階的に進めていきます。

VOICEENCEカンパニーは、こうしたルールに準拠したサービスを提供することで、AI音声の信頼基盤を社会に実装します。これにより、実演家、企業、クリエイターが、より自由かつ安全にAI音声ビジネスへ参入できる環境を整え、「声の経済圏」の創出をめざします(図4)。

VOICEENCEカンパニーはNTTグループ各社と協力してビジネ

イベント名：The Unknown City ～時を超える広島の記憶とスパイミッション～
開催期間：2026年1月23日(金)～3月29日(日)
開催場所：広島市中央公園エリア付近
参加費：無料
参加方法：以下記載のQRコードを読み取って、ARG型謎解きデジタルラリーの導入体験や、最新情報の取得を行います。



<https://www.ntt-west.co.jp/news/2601/260116a.html>



図5 NTTアーバンソリューションズ主催イベントでのAI音声を活用したコンテンツ事例

図5 NTTアーバンソリューションズ主催イベントでのAI音声を活用したコンテンツ事例

ス活用に注力していきます。

- ・NTT人間情報研究所：合成音声
- ・NTT社会情報研究所：声の権利保護
- ・NTTテクノクロス：AI音声モデル制作、AI音声コンテンツ制作、トラストシステムへの技術提供
- ・NTT ExCパートナー：AI音声コンテンツ制作
- ・NTTアーバンソリューションズ：AI音声を活用した施策オーナー

■コンテンツ事例

AI音声を活用したコンテンツ事例として、NTTアーバンソリューションズ主催のイベントを紹介します(図5)。概要は下記のとおりです。

- ・イベント名：The Unknown City ～時を超える広島の記憶とスパイミッション～
- ・開催期間：2026年1月23日(金)～3月29日(日)
- ・開催場所：広島市中央公園エリア付近
- ・参加費：無料
- ・参加方法：公式ティザーサイト (https://www.hiroshima-theunknowncity.com/trial?utm_source=pr) より、ARG型謎解きデジタルラリーの導入体験や、最新情報の取得を行います。

■参考文献

- (1) <https://www.ntt-west.co.jp/news/2510/251027b.html>
- (2) <https://voicence.jp/>
- (3) https://www.rd.ntt/research/JN202504_33343.html

◆問い合わせ先

NTT西日本
VOICEENCEカンパニー