

三菱電機技報

8

2024

Vol.98 No.8

先進デジタル技術(前編)

No.8

特 集	先進デジタル技術(前編)	Advanced Digital Technology (The first part)
巻 頭 言		
社会課題解決に貢献する先進デジタル技術……………	1-01	Advanced Digital Technology Contributing to Solution of Social Issues Toru Oka
岡 徹		
触診デジタル化による遠隔検査技術……………	2-01	Digitization of Palpation for Mechanical Instruments' Remote Inspection Kotaro Fukui, Shoichi Kobayashi, Toshihiro Wada, Takahide Hirai, Keishi Nishikawa
福井孝太郎・小林翔一・和田敏裕・平井敬秀・西川敬士		
発電所放流を考慮した低水管理向け		
河川流量予測技術……………	3-01	River Flow Prediction for Low Flow Management Considering Power Plant Discharge Kei Akama
赤間 慶		
安心・安全を支えるテラヘルツ波センシング技術……	4-01	Terahertz Wave Sensing Technology Supporting Safety and Security Shusaku Umeda, Michiya Hayama, Takuma Nishimura, Kazuaki Ishioka, Ichiro Somada
梅田周作・早馬道也・西村拓真・石岡和明・杣田一郎		
AIの安心・安全を守る		
セキュリティ技術とプライバシー技術……………	5-01	Security and Privacy Technologies for Safe and Secure Artificial Intelligence Yoshihiro Koseki, Tsunato Nakai
小関義博・中井綱人		
OSSデータベースPostgreSQLへの取組みと		
OSSコミュニティへの貢献 ……………	6-01	Case Studies of Extending Open-Source Database Software PostgreSQL and Contributing to Open-Source Communities Masashi Tatedoko, Yuki Fujii, Naohiro Kakimura, Shingo Oidate
立床雅司・藤井雄規・柿村直拓・追立真吾		
偏波SAR画像の高感度な時系列分析 ……………	7-01	Maximization of Sensitivity to Time-series Polarimetric SAR Image Motofumi Arai
有井基文		
最先端プロセスの特性を基にした		
リアルタイム誤り訂正回路の低電力設計……………	8-01	Low Power Design of Real-time Forward Error Correction Circuit Based on Characteristics of State-of-the-art Processes Kenji Ishii, Hideo Yoshida, Susumu Hirano, Yoshiaki Konishi
石井健二・吉田英夫・平野 進・小西良明		

執筆者の所属は執筆時のものです。

三菱電機では、サステナビリティ経営を実現する4つのビジネスエリアとして、「インフラ」「インダストリー・モビリティ」「ライフ」「ビジネス・プラットフォーム」を設定しています。

三菱電機技報ではこの4つのビジネスエリアに分類し特集を紹介しています。

今回の特集では全エリアを支える基盤となる“先進デジタル技術(前編)”をご紹介します。

巻頭言

社会課題解決に貢献する先進デジタル技術

Advanced Digital Technology Contributing to Solution of Social Issues



岡 徹 Toru Oka

上席執行役員 知的財産担当 開発本部長(博士(工学))

Executive Officer, In charge of Intellectual Property, Vice President, Corporate Research and Development

三菱電機グループでは、事業を通じた社会課題の解決による持続的な社会への貢献を中心に、サステナビリティの実現を目指しています。“循環型 デジタル・エンジニアリング企業”として、先進デジタル技術の活用による価値の高度化を推進しています。循環型 デジタル・エンジニアリングとイノベーションによる価値創出で、事業成長と社会・環境を豊かにする“トレード・オン”に挑み、サステナビリティを実現します。

循環型 デジタル・エンジニアリングは、顧客から得られたデータをデジタル空間に集約・分析するとともにグループ内が強くつながり知恵を出し合うことで、新たな価値を生み出し社会課題の解決に貢献するものです。具体的には、当社のコンポーネントやシステムを利用することで生まれる多様なデータを集約・分析し、顧客の潜在課題やニーズを把握します。その潜在課題やニーズを基に、コンポーネント、システム、統合ソリューションを進化させた新たな価値を創出し、更に幅広い顧客に還元することで顧客とともに社会課題の解決に貢献します。

新たな価値の実現には、サービスや製品を実現するための技術と安心して使えるための技術の両方が必要です。そのために、個々のサービスや製品に向けた技術開発と並行して、AIの安心・安全を守るセキュリティやプライバシー保護などの先進デジタル技術開発も推進しています。

先進デジタル技術の具体的な取組みとして、三菱電機技報8月号では主に安心・安全な社会を実現する技術、9月号では主に労働力不足解決に資するものづくりに関連する技術を紹介します。

人工衛星画像からわずかな違いも見逃さず地表対象の変化を推定できる“偏波SAR(Synthetic Aperture Radar)画像時系列分析技術”、大容量化で増加する通信システムの消費電力を低減できる“誤り訂正回路低電力化設計技術”によって、防災・減災や環境負荷低減に貢献しグリーンで安心・安全な社会の実現を目指します。

河川の正常流量維持管理を支援する“河川流量予測技術”、隠れたモノを解像度高く検出できる“テラヘルツ波センシング技術”、さらに急速に活用が進んでいるAIを安心して利用するための“セキュリティ・プライバシー技術”など、安心・安全な生活に貢献します。

“触診デジタル化技術”は部材の緩み状態の確認作業を遠隔支援で省力化し、“製造設備向けローコード開発技術”は設備設計データを活用した制御プログラム生成で製造設備開発を効率化し、“熟練者技能評価AI技術”は熟練技能の若手技術者への早期伝承を実現し、自動化・効率化による労働力不足の解消だけでなく、働く人自身の快適な暮らしの実現にも寄与します。また、ものづくりに関するデジタルツイン、シミュレーション、AIへの取組み事例や、デジタル技術の実現に必要な不可欠なソフトウェアで全世界で活用されているOSS(Open-Source Software)やそのコミュニティに対する当社の取組み事例も紹介します。

私たち三菱電機グループは、“循環型 デジタル・エンジニアリング企業”を目指し、先進デジタル技術によるイノベーションを通じて、より深刻化・多様化する社会課題解決に取り組んで、活力とゆとりある社会の実現に貢献していきます。

触診デジタル化による遠隔検査技術

Digitization of Palpation for Mechanical Instruments' Remote Inspection

*情報技術総合研究所(博士(工学))

†先端技術総合研究所

‡情報技術総合研究所

要 旨

機械設備のメンテナンスに関する業界では作業員不足への懸念が高まっており、その対策として、点検・検査業務の遠隔化が検討されている。しかし、点検・検査業務のうち、触覚情報を用いる業務の遠隔化に取り組んだ事例はほぼなかった。そこで三菱電機は、機器の緩みの確認作業をターゲットに、現地の作業員の触覚情報をデジタル化し、それを基に遠隔地から熟練作業員が判定する遠隔化方式を開発した。さらに、現地作業員用のセンサーグローブと、熟練作業員による判定を容易にするための予備判定アルゴリズムを試作し、評価実験を通じて、予備判定として十分な性能を持つことを確認した。この技術は、点検・検査業務の遠隔化だけではなく、触診による遠隔医療など、様々な用途への適用が期待できる。

1. ま え が き

我々の生活は様々な機械設備に支えられている。これらを安全に使用し続けるためには、適切なメンテナンスが行われる必要がある。特に重要な機械設備に対しては、熟練作業員が、法令で定める状態を維持できていることを確認する定期検査が義務付けられている。近年、働き方改革や少子高齢化の進行によって、メンテナンス業界での作業員不足の懸念が高まっており、デジタル技術の導入による効率化が求められている。政府のデジタル臨時行政調査会でのアナログ規制の見直し⁽¹⁾でも、遠隔化技術の導入可能性が議論されていた。

視覚情報や聴覚情報を遠隔地に伝送する技術は既に普及しており、検査業務への適用も検討されているものの、作業員の触覚情報に基づいて状態を判定する検査項目(触診)の遠隔化は実現されていない。定期検査では、一度の訪問で複数の検査をまとめて実施するため、全ての検査項目の遠隔化がされていないと、現場訪問に要する時間の短縮にはつながらない。このような背景から当社は、触覚情報を利用している検査をデジタル化し、熟練作業員の現地訪問をなくす技術に取り組むことにした。また、遠隔医療の観点から触診の遠隔化について検討された事例があり⁽²⁾、今回の検討の成果も将来的に医療を含む様々な業界へ展開できると考えた。

今回の検討でのターゲットの検査項目は、機械設備の検査で触覚情報を利用する項目の多くを占める、機器の緩み状態の確認とした。この検査は、現地で機器を加振する際の手の力や動きをセンサーで取得し、そのデータを遠隔地の熟練作業員に提示することによってデジタル化できると考えた。現地での加振とデータ取得の方式を検討した結果、現地で複数の検査対象物がある場合に対象物間の移動が必要であり、また、作業空間が限られることが多いことから、非熟練である現地作業員がセンサーグローブを着用し機器の加振を行う方式を選定した。今回、この仕組みの実現性を確認するために、現地作業員によるデータ取得用のセンサーグローブの試作と現地での予備判定を行うアルゴリズムの試作と評価に取り組んだ。また、予備判定の後、遠隔地の熟練作業員が、センサーデータを確認し、経験を生かした総合的な見地から本判定を行うことで、効率的かつ信頼性の高い検査業務を実現できると考えた(図1)。

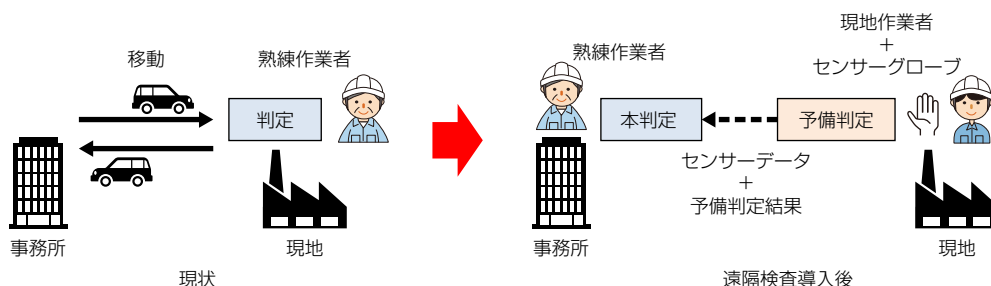


図1-触診のデジタル化による遠隔検査の導入

2. 現場でのデータ取得用センサーグローブの試作

提案方式の実現性を確認するために、まず現地作業者が装着するセンサーグローブを試作した⁽³⁾。

2.1 評価対象事象の選定

センサーグローブの試作に先立って、具体的な対象事象について検討した。機械設備の検査で触覚情報を活用する項目の大部分は、機器の緩みの有無の判定で、対象となる部材は、センサーやカバーなど指で把持して加振できるサイズのものが多い。そこで、図2のようにボルトで固定された検査対象物を親指と人差し指で両側から把持して加振する検査を評価対象の事象とした。

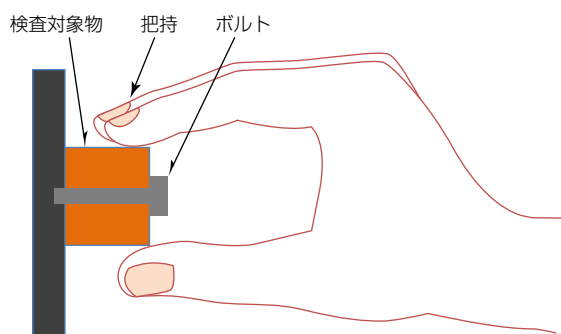


図2-評価対象とする検査のイメージ

2.2 センサーの選定とセンサーグローブの試作

加振中のデータ取得に利用するセンサーを選定し、センサーグローブを試作した(図3)。

緩みの判定のために必要なセンサーデータは、加振対象物への加振中の動きとその元になった指からの力の大きさと向きである。作業の対象が変わるたびにセンサーの設置・固定を行うと作業性が低下することから、手側にセンサーを配置することにした。加振中は、検査対象物とは指先だけで接触した状態になるため、指先との“接触力”と“加速度”情報の取得を重視することにした。この配置の制約とシステム構築の容易性を考慮して、検査対象物との接触面である親指と人差し指の先に圧力センサー①、②、人差し指の先に加速度センサー③を配置した。

これらのセンサーを指先に配置する際、作業者が装着する手袋と一体化することで、作業性を損なわず、装着負担も低減できると考えて、作業用手袋にセンサーを固定したプロトタイプを製作した。さらに、センサーグローブはBluetooth^(注1)でパソコンやスマートフォンと接続できるようにすることで、センサー用の配線が作業者の動作を制約しない構成にした。

(注1) Bluetoothは、Bluetooth SIG, Inc.の登録商標である。



図3-センサーグローブのプロトタイプでの三つのセンサー

3. 予備判定アルゴリズム

センサーグローブの試作と併せて、熟練作業者による判定の前段階として、緩みの有無の予備判定を行うアルゴリズムの試作を行った。このアルゴリズムは、3.1節に述べる加振良否の判定と3.2節に述べる緩み有無の判定の2段階から成る。加振が適切と判定された場合にだけ、緩み有無の判定に進む。予備判定の後の本判定では、通常と異なる複雑な応答を示した場合や、緩みが小さい場合などに、熟練作業者の経験を基にした総合的な見地からの判定を行う。

3.1 加振良否の判定

加振が適切でないケースには、適切に“把持”できていない場合と、把持できているが“加振動作”の向きや力の大きさが不適切な場合があることから、それぞれの判定を行う。

“把持”の判定は、親指と人差し指それぞれの指先の圧力センサーの値としきい値の関係によって行い、両方とも圧力のしきい値を超えている場合を適切に把持できていると判定する。

“加振動作”の判定は、二つの指の圧力センサーの変動の位相差が、あらかじめ設定した位相差のしきい値を超えている場合を適切な加振と判定する。適切な方向にタイミング良く加振動作を行っている場合、二つの波形が逆位相になる一方、加振方向が異なる場合や十分に把持できていない場合は、周期的な波形が崩れて、逆位相にはならない。図4にタイミングの良い加振によって逆位相が発生している場合と、比較用に同位相になるように開閉動作を行った場合の波形を示す。位相差は、二つの波形に対して、バンドパスフィルター(1～5 Hz)を適用して交流成分を抽出した後、単一周波数の正弦波フィッティングを行うことで周波数を特定し、算出する。

これらの“把持”と“加振動作”、両方の条件を満たす場合を適切な加振として判定し、不適切な場合にはもう一度加振を指示することにした⁽⁴⁾。

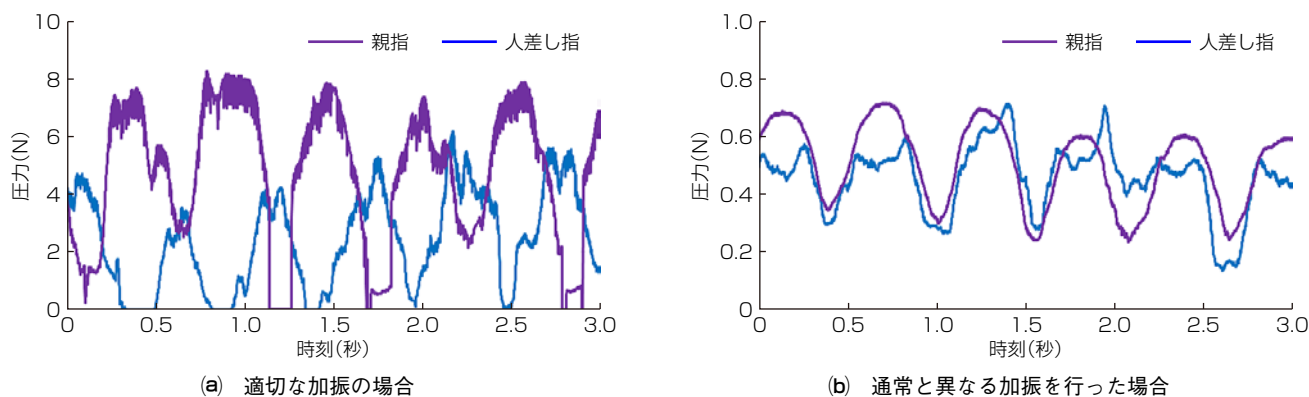


図4-加振時の圧力センサー波形の変化

3.2 緩み有無の判定

加振良否判定によって適切な加振と判定されたデータに対して、緩みの有無を判定する。緩みの有無は、指先の加速度波形での最大振幅を用いて判定した。これは、図5に示すように、金属ブロックのボルト用の穴とボルトの間には遊びがあり、緩みがある場合には加振によってブロックが移動し、遊びの端に衝突する際にパルス状の加速度波形が発生することを利用している。具体的には、1秒ごとの加速度変動の最大振幅を算出し、さらにその最大振幅の計測期間(約10点)の平均を算出し、この値と実験的に設定したしきい値(0.5)を比較し、しきい値を超えた場合に、緩みありと判定することにした。

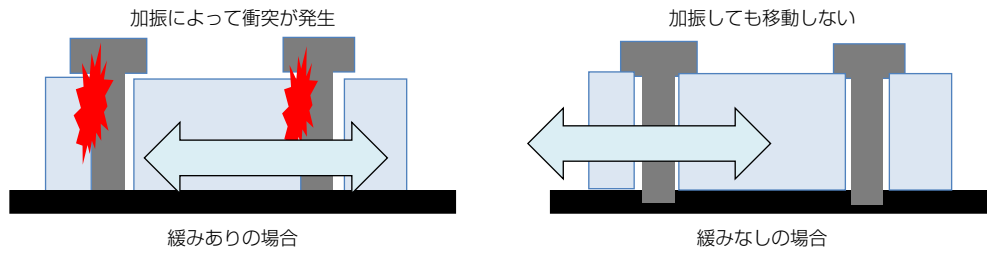


図5-緩みによるパルス状の波形の発生

4. 評価実験

センサグローブと予備判定アルゴリズムの有効性を確認するため、治具を製作し、データの取得及び判定を試行した。

4.1 評価実験の条件

評価実験のために検査対象物のサイズに合わせた金属ブロックを2本のボルトで固定する形の治具を製作した(図6)。このボルトにはコイルばねを挟んで、ボルトの締め付けをトルクレンチで行うことで、締め付け力を再現可能な形で緩みあり／なしの状態を設定した。評価実験では、センサグローブを着用した被験者に10秒程度加振してもらい、加振良否判定で適切な加振と判定されたデータだけを取得し、緩みあり61件、緩みなし61件の評価用データを取得できた。

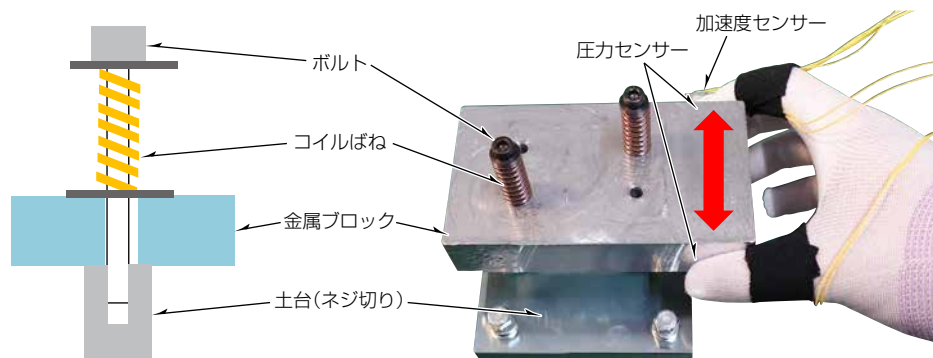


図6-評価用データ取得用治具

4.2 実験結果

取得した評価用データを用いて、予備判定アルゴリズムの判定性能の評価を行った。評価用データでは、図7に示すように、緩みありの場合に加速度のピークが大きくなり、緩みなしの場合に加速度のピークが小さくなる傾向を確認した。

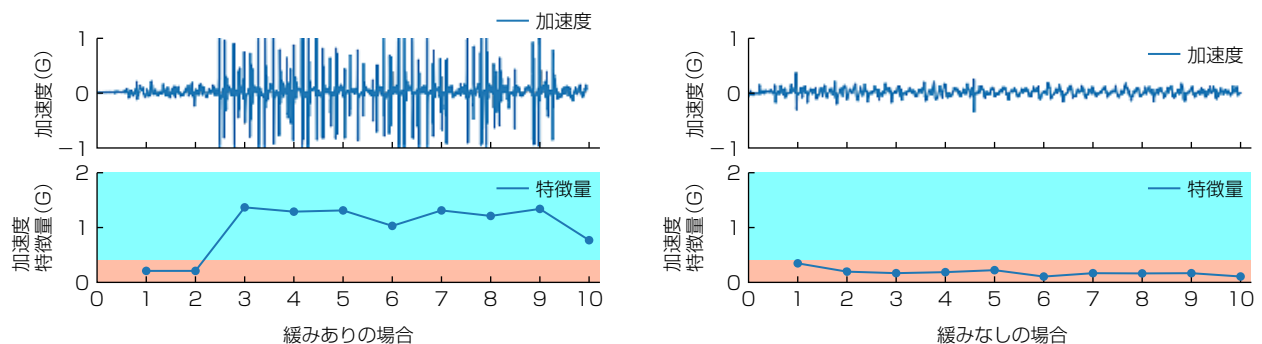


図7-緩み有無による波形の違い

さらに、各データの判定特徴量を算出したところ、図8に示すように全てのデータに対して、治具の設定と完全に一致した判定結果(正答率100%)が得られた。このように予備判定で高い精度が得られれば、熟練作業による本判定では、緩みが小さい場合などの難易度の高い判定に集中することが可能になる。これらの結果によって、今回開発した予備判定アルゴリズムは機器の緩みの検査の遠隔化と効率化に有効であることを確認できた。

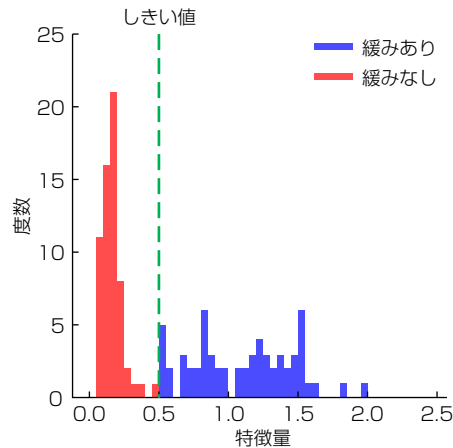


図8-加速度波形から算出した特徴量の分布

5. む す び

触覚情報を活用する検査の遠隔化に向けて、現地作業員の触覚情報をデジタル化するために、センサグローブと予備判定アルゴリズムを試作するとともに、緩みの予備判定として十分な性能を持つことを確認した。今後は、形状・サイズ・固定方法が異なる検査対象物に対しての有効性の確認、作業員や環境に対するロバスト性の確保や、データの保護・管理の仕組みについて検討していく。触覚情報を含めた作業遠隔化技術の開発を通じて、機械設備のメンテナンスを始めとした様々な業界で、世界中のどこにいても熟練作業員による信頼性の高いサービスを容易に利用できる未来の実現を目指す。

参 考 文 献

- (1) デジタル庁：デジタル臨時行政調査会
<https://www.digital.go.jp/councils/administrative-research/#decision>
- (2) 田中由浩：触覚研究の動向，システム／制御／情報，**64**，No.4，119～120（2020）
- (3) 福井孝太郎，ほか：センサグローブを活用した遠隔検査システムの検討，第40回日本ロボット学会学術講演会，2C3-06（2022）
- (4) 小林翔一，ほか：締結状態検査の自動検出方式の開発，2023年電気学会 電子・情報・システム部門大会，GS10-5（2023）

発電所放流を考慮した低水管理向け 河川流量予測技術

River Flow Prediction for Low Flow Management Considering Power
Plant Discharge

*情報技術総合研究所

要 旨

河川管理者は、ダムの放流などによって、河川の正常な機能を維持するために必要な河川流量を確保する“低水管理”を行っている。低水管理では、河川の正常な機能を維持するために必要な正常流量を目標として定めている。また、水資源の効率的な利用という観点では、今後の流量逡減量を予測しダム放流量を適切に決定する必要もある。今回は、低水管理向け流量予測の考え方、具体的には荒川上流での低水管理の特徴、予測システムの予測アルゴリズム、そして、過去実績データを用いた流量予測結果についてまとめた。開発した予測アルゴリズムは、①ダム放流量変化など対処可能な現象は予測する、②データ不足のため正確な予測が難しい発電用水の影響は除去する、という特徴を備える。このアルゴリズムによって、荒川上流の複雑な水収支環境下でも、予測の上振れを抑制しつつ高精度な流量の予測が可能であることが確認できた。

1. ま え が き

河川管理には、洪水時の洪水調節を行う“高水管理”と、平常時の環境や利水の面での流水管理である“低水管理”がある。低水管理では、河川の正常な機能を維持するために必要な流量が規定されており、それを正常流量という。具体的には、動植物の保護、漁業、景観、流水の清潔の保持等を考慮して定める維持流量、及び水利流量から成る流量であり、低水管理上の目標として定める流量である。河川管理者は、ダム放流などによって、河川流量が正常流量を下回らないように管理する必要がある⁽¹⁾。また、水資源の効率的な利用という観点では、今後の流量逡減量を予測しダム放流量を適切に決定する必要もある⁽²⁾⁽³⁾。

河川上流では、瀬切れの防止等の河川環境の保全、都市用水及び農業用水等の安定供給など、流水の正常な機能を維持することを目標に、利水基準地点での正常流量を設定している⁽⁴⁾。荒川上流の利水基準地点は、寄居地点(埼玉県)で、現状は寄居地点の流量を職員が昼夜問わず確認し、流量の逡減量を予測している。そして、ダム放流量を経験的に判断し、放流の指示を出している。降雨予測、河川流量予測等を考慮し、適切な放流量を自動算出することで、より効率的なダムの統合運用及び職員の負担軽減が可能であると考えられる。そのため、利水基準地点付近の用水補給量の判断根拠になり得る河川流量を試算できる河川流量予測システムが求められている。

本稿は、荒川上流の低水管理支援向けの河川流量予測システムの開発状況をまとめたものである。このシステムは、現状職員がダムや河川流量の観測データから経験的に予測している、利水基準地点での流量の逡減量を自動算出し、低水管理の負荷軽減、及び低水管理の効率化を目的とするものである。なお、低水管理の目的に照らして、このシステムは流量逡減時の予測に主眼を置いて、流量増加時の予測精度は重要視しないこととした。

2. 荒川上流での低水管理と低水管理向け流量予測アルゴリズム

この章では、低水管理向け流量予測の考え方と、低水管理向け流量予測アルゴリズムについて述べる。低水管理では、利水基準地点の流量が正常流量を下回らないように運用する必要がある。したがって、予測流量が実績流量を上回らない(上振れしない)条件を、アルゴリズム検討の目標とする。

図1に、荒川上流の水系概況図を示す。荒川では、河川管理者である荒川上流河川事務所が、寄居地点の流量が正常流量を上回るように、上流ダム群の放流量を決定している。寄居地点の直上には玉淀ダムがある。玉淀ダムは統合管理外(指示権がない)施設であるため、親鼻地点(埼玉県)を流量予測地点とした。低水管理では、まず、各ダムへの流入状況から貯水量の回復状況を把握し、流量予測地点での流量の逡減量を予測する。そして、それぞれのダム放流水の流量予測地

点までの到達時間を考慮して、複数のダム、図1では二瀬ダム、滝沢ダム、浦山ダムの放流量を一体的に管理することで効率的な低水管理を実施している。しかし、現状は低水管理向けの流量予測システムが導入されていないため、運用判断は熟練の職員の経験やノウハウに依存しており、負荷が過大になっている。荒川上流では、ダム放流水の流量予測地点までの伝搬遅延時間がおおよそ10時間程度であるため、この予測システムでは12時間先までの流量予測地点(親鼻地点)の流量を予測することにした。

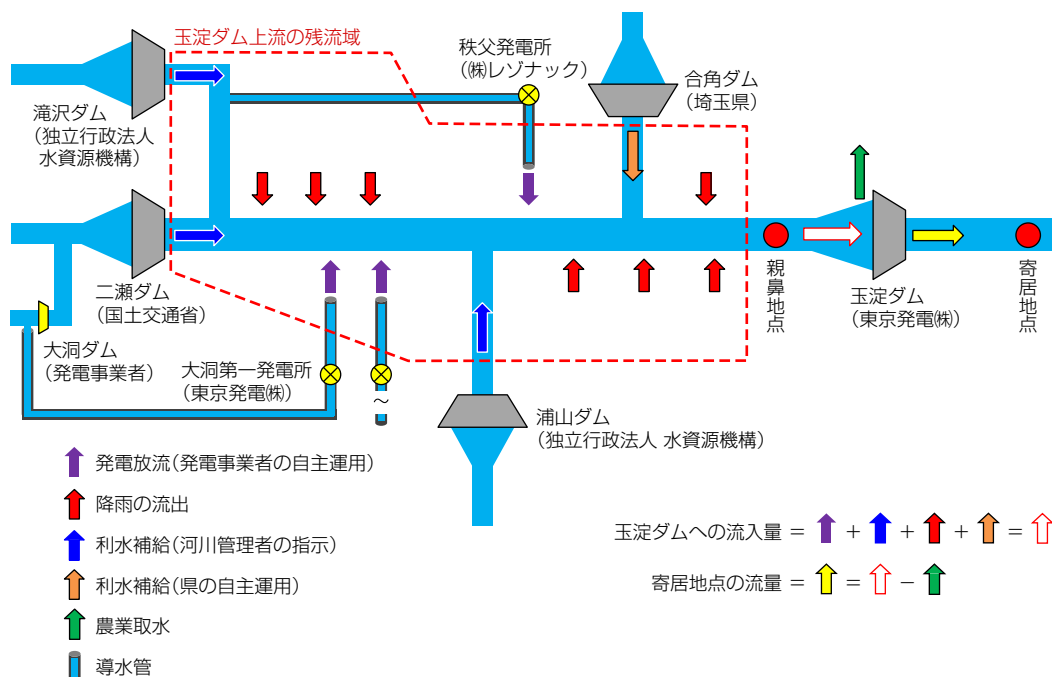


図1-荒川上流の水系概況

図2に、発電用水による影響の概念図を示す。図1に示したとおり、荒川上流には複数の発電所と導水管がある。それらを通る発電用水が、数時間～半日程度の間隔で不規則に荒川本流に注水(還元)されるため、流量予測地点である親鼻地点の流量も不規則に変動する。今回予測するのは図2に示すとおり、人為的な操作を除いた荒川本来の水量である荒川自流であるため、発電用水と荒川自流は分離する必要がある。しかし、発電用水量の決定は発電事業者の自主運用になっており、発電用水量データは入手できない。そこで、予測のできない発電用水による流量変動は考慮に入れず除去し、データ入手可能なダム放流による流量変動は予測する構成を検討した。発電用水による流量変動は、まず予測地点(親鼻)の流量の変曲点を抽出し、一時的な流量変動の開始時刻と終了時刻を推定する。そして開始時刻～終了時刻間の流量を線形内挿することによって取り除く。これによって、流量予測地点の流量データだけを用いて発電用水による流量変動を除去することを可能にした。

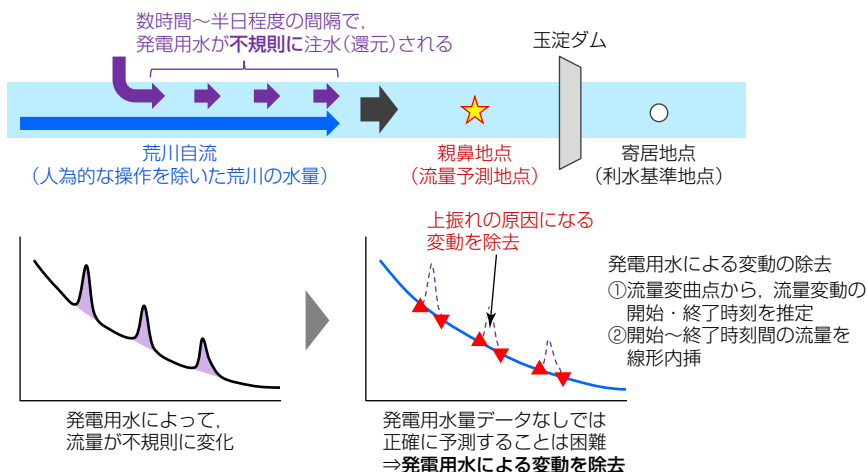


図2-発電用水の影響

3. 流量予測結果

2017～2022年の流量予測地点(親鼻地点)の実績流量, 各ダムの実績放流量を入力して, 流量予測アルゴリズムを用いて流量予測地点の流量の推定及び予測を行った。図3に, 流量予測地点の流量の推定・予測結果を示す。図中水色線が流量予測地点の実績流量, 赤線が流量予測地点の荒川自流の推定値・予測値である。縦赤点線が入力データの最新時刻を表しており, これ以前は推定値, 以降は予測値になる。図から, 発電用水による短期的な流量変動を除去し, 予測流量(赤線)が実績流量(青線)を上回らないで推定・予測できていることが確認できた。また, ダム放流量変化時の流量変動も正しく推定できていることが確認できた。

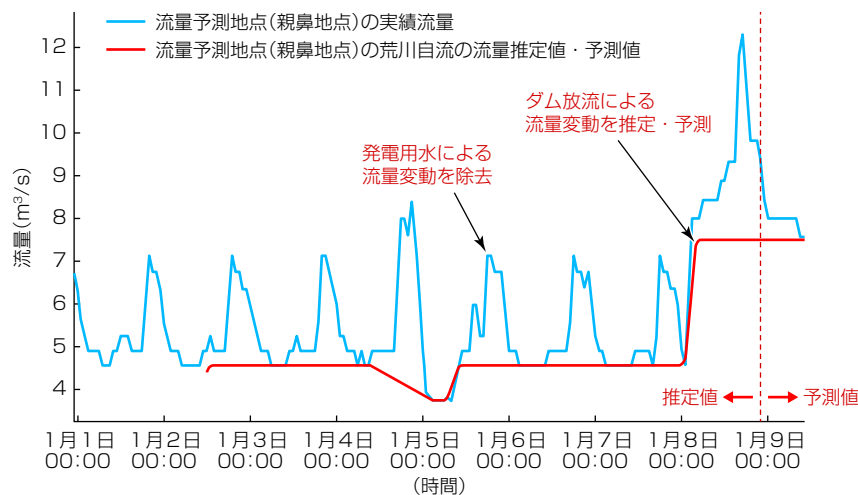


図3-流量推定・予測結果例(2021年1月)

次に, 予測誤差評価結果について示す。灌漑(かんがい)期である6月18日～7月1日と非灌漑期である12月1～31日で評価した。図4, 図5に12時間先の流量予測誤差を示す。図中赤点線は実績流量との誤差範囲を表し, 上側は $+1 \text{ m}^3/\text{s}$, 下側は $-2 \text{ m}^3/\text{s}$ である。誤差が正になるのは, 予測流量が実績流量を上回る上振れ予測, 負になるのは下振れ予測を表す。図から, 灌漑期, 非灌漑期共におおむね予測誤差が $-2 \sim +1 \text{ m}^3/\text{s}$ に収まっており, 予測の上振れを抑制しつつ高精度に流量の予測が可能であることが分かった。

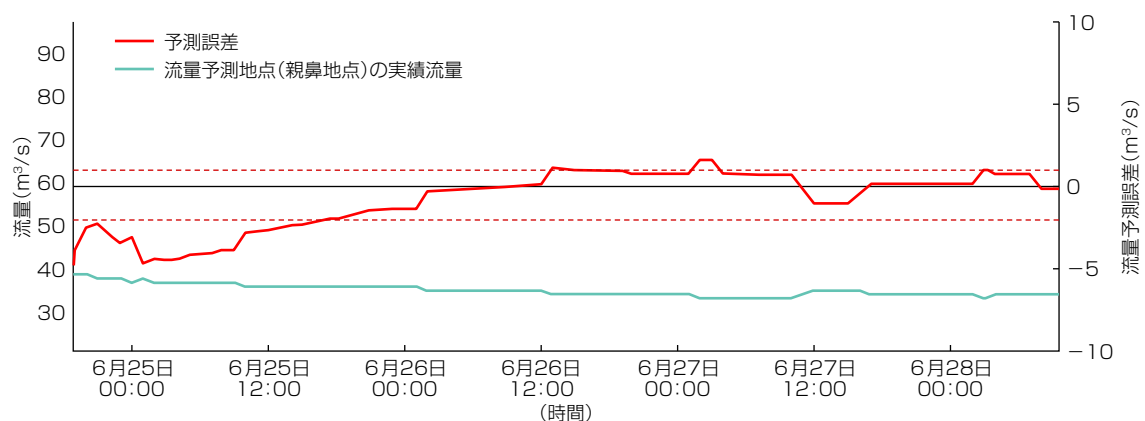


図4-12時間先流量予測誤差(2021年6月)

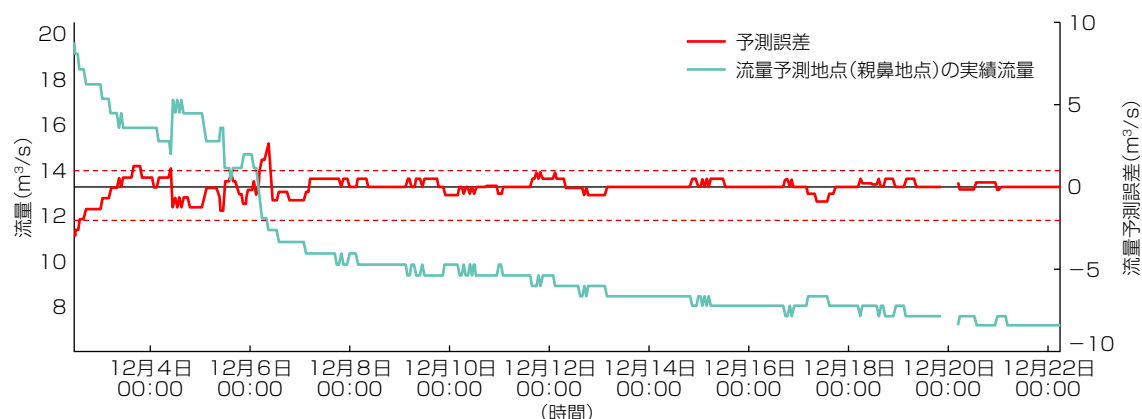


図5-12時間先流量予測誤差(2019年12月)

4. む す び

低水管理向け流量予測の考え方と、荒川上流での低水管理上の特徴、予測システムの予測アルゴリズム、そして、過去実績データを用いた流量予測結果について述べた。低水管理では、基準地点の流量が正常流量を下回らないように運用するため、予測流量が実績流量を上回らない(上振れしない)が必要になる。しかし、荒川上流では、複数のダムや発電所・導水管で複雑な水収支が形成されているため、予測対象地点である親鼻流量も複雑に変化する。そこで、①ダム放流量変化など対処できる現象は予測し、②データ不足によって正確な予測が難しい発電用水の影響は除去するアルゴリズムを開発した。これによって、予測の上振れを極力抑えて、高精度に流量予測が可能であることが確認できた。この流量予測システムを低水管理に活用することで、熟練の職員に集中している負荷を分散し、低水管理の効率化が可能になる。

参 考 文 献

- (1) 国土交通省河川局 河川環境課：正常流量検討の手引き(案)(2007)
https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/ryuuryoukentou/tebiki.pdf
- (2) 金山拓広，ほか：AI強化学習を活用した利根川上流ダム群の低水統合管理への現場適用，建設コンサルタント業務・研究発表会論文集，22，77～80(2022)
- (3) 金山拓広，ほか：利根川上流ダム群を対象とした低水管理へのAI強化学習の適用，土木学会論文集B1(水工学)，78，No.2，I_1249～I_1254(2022)
- (4) 国土交通省関東地方整備局 荒川上流河川事務所：荒川上流河川維持管理計画【国土交通大臣管理区間編】(2017)
https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000687781.pdf

安心・安全を支える テラヘルツ波センシング技術

Terahertz Wave Sensing Technology Supporting Safety and Security

梅田周作*
Shusaku Umeda
早馬道也†
Michiya Hayama
西村拓真*
Takuma Nishimura

石岡和明*
Kazuaki Ishioka
杣田一郎*
Ichiro Somada

*情報技術総合研究所
†同研究所(博士(工学))

要 旨

光波と電波の中間の周波数であるテラヘルツ波は、透過性能を確保しながら高分解能のセンシングが実現できるため、安心・安全の実現に必要な様々なアプリケーションへの適用が期待される。一方で、テラヘルツ波センシングは、近傍界での反射係数計算や歩留りの確保など、様々な技術課題が存在する。三菱電機は、300GHz帯テラヘルツ波を用いたセンシングシステムのコア技術となるデジタル信号処理技術とデバイス技術の開発、及びその有効性を明らかにするための実証実験を行った。ミリメートル級のイメージング、マイクロメートル級の変位推定を実現できた。

1. ま え が き

近傍空間に存在する対象物の形状や動きをセンシングする際、これまではその媒体として光波と電波を用いてきた。光波はカメラやToF(Time of Flight)センサーなど、高解像度のセンシングを実現できるセンサーがある。しかしながら、光波は遮蔽に弱く、障害物の影響を大きく受けるため、隠れたモノをセンシングすることは難しい。一方、電波は光波よりも透過性能に優れているが、波長が長く、解像度の確保が困難である。

そこで近年、光波と電波双方の特長を併せ持つセンシング媒体として、テラヘルツ波が注目を集めている。テラヘルツ波は、100GHz～10THzという光波と電波の中間に位置する周波数を持つ電磁波で、障害物の背後に存在する対象も高精度・高精細にセンシングできるため、特にボディスキャナーやインフラ検査など安心・安全に関わる分野への適用が期待される。本稿では、テラヘルツ波センシングの適用が期待されるアプリケーションに触れつつ、これらのアプリケーション実現に寄与する当社の300GHz帯テラヘルツ波を用いたセンシング技術開発及びその実証実験結果について述べる。

2. 300GHz帯テラヘルツ波センシングの活用が期待されるアプリケーション

300GHz帯テラヘルツ波は、波長が約1mmと短いことから高い分解能が得られるため、同波を用いたセンシングは光波に迫る高分解能でのセンシングが期待できる。また、テラヘルツ波は電波と同様に、センチメートル級のプラスチック、フッ素樹脂などの誘電体や布、皮、木材などを透過するため、カメラでは映らない障害物背後のセンシングも可能である。X線と異なり、金属を透過することはできないが、生体への影響は小さく、安全性の高いシステムを実現できる。

300GHz帯テラヘルツ波を用いたセンシングアプリケーション例を図1に示す。これらのアプリケーションはどれも安心・安全に関連するアプリケーションであり、低遅延画像伝送を除いて、イメージング系アプリケーション及び動き検出系アプリケーションの二つに大別できる。

イメージング系アプリケーションは電波や光波の反射から対象を可視化(イメージング)するものであり、表面だけをイメージングするのであれば解像度の高い光波を用いるのが一般的だが、遮蔽物の背後に隠れるモノを高解像度にイメージングする用途では、高解像度・高精細なイメージングに加えて、透過性が必要になる。そのため、ミリメートル級の解像度とセンチメートル級の障害物透過性能を併せ持つテラヘルツ波の活用が期待される。具体的にはカバンの中や服の下に金属を検出するボディスキャナー、生産工程での製品に混入した不純物・異物検出する非破壊検査などが挙げられる。

動き検出系アプリケーションは、測定物の微細な動きを検知するアプリケーションである。先に述べたとおり、300GHz帯テラヘルツ波は波長が1mmのため、 μm オーダーの微小な動きを検知できる。そのため、体表面の振動から呼吸、脈拍、人の動作など微小な動きを検出するバイタルセンサー、道路やトンネルなどの経年劣化状態を測定するインフラ検査などで活用が期待される。



図1-300GHz帯テラヘルツ波センシング技術の活用が期待されるアプリケーション例

3. テラヘルツ波センシングシステム

テラヘルツ波センシングシステムでは、MIMO(Multiple Input Multiple Output)レーダーの原理を基本に、測定対象空間をビームスキャンし、センシングを行う。MIMOレーダーでは、送信アレーアンテナから信号を送信し、測定対象物で反射した信号を受信アレーアンテナで受信する。受信信号から、測定空間各部の反射係数を算出することによってセンシングを行う。

テラヘルツ波は距離減衰が大きく、テラヘルツ波センシングシステムは近傍領域(フレネル領域)を観測環境とすることが想定されるため、従来のMIMOレーダーのように反射波を遠方界(平面波)とみなすことができない。そのため、従来のビームフォーミングによる指向性制御では、測定したい空間上の座標(注目点)を特定した上でアンテナ素子との距離に応じて焦点制御を行うため、測定に時間を要する。また、テラヘルツ波を送受信するアレーアンテナの製造にはアンテナを高密度に配列するため微細加工が必要になり、製造時の歩留り確保が困難になる。これらの問題を図2に示すようなバーチャルフォーカスセンシング技術及びBox型配置MIMOアンテナによって解決している。

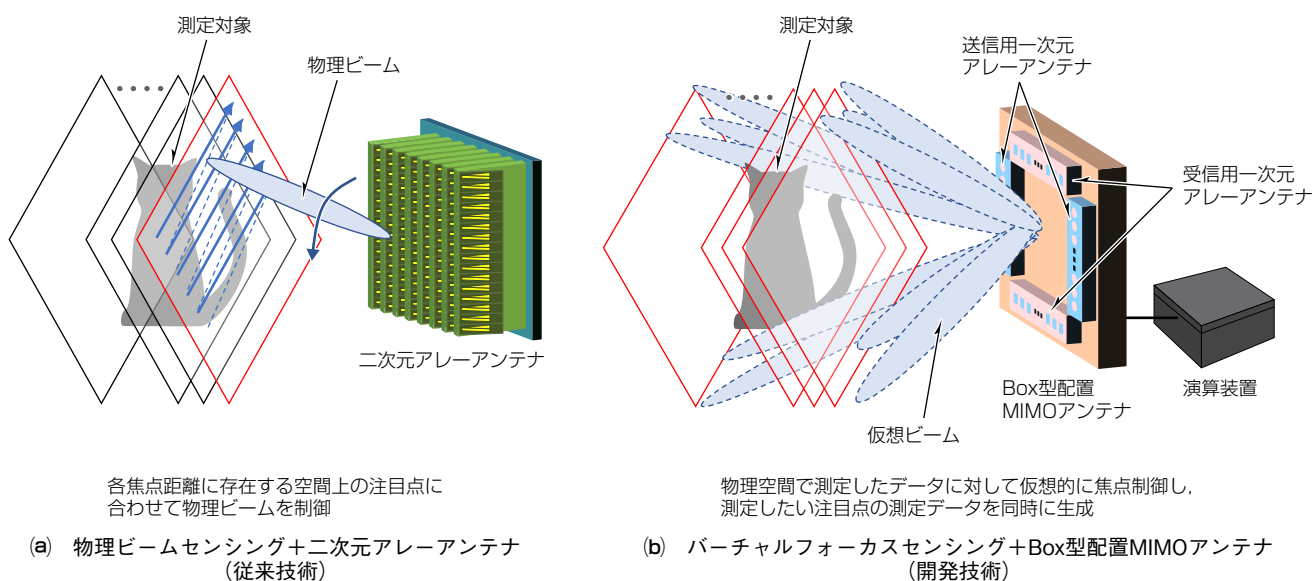


図2-テラヘルツ波センシングシステム

広く普及している二次元アレーアンテナレーダーでは、アンテナ素子からの信号位相を調整することによって指向性のある物理ビームを形成し、ビーム方向を変えながら測定対象をセンシングするため、一度に一つの注目点しかセンシングできない。一方、バーチャルフォーカスセンシング技術は指向性制御を行わず反射波を測定し、仮想空間上で複数の注目点に焦点を合わせたバーチャルビームを形成することで、測定したい注目点を同時にセンシングできる。

テラヘルツ波センシングシステムで、製造の歩留り確保可能なMIMO構成としてBox型配置MIMOアンテナ方式を開発している。この方式は、直線状にアンテナ素子を並べた送信用一次元アレーアンテナを垂直方向に、同受信用一次元アレーアンテナを水平方向に配置し、全ての送信アンテナ素子-受信アンテナ素子の組合せで測定したい注目点との距離を計算し、反射係数を推定し、等価的に二次元アレーアンテナを実現する。さらに、送信用一次元アレーアンテナ2本と受信用一次元アレーアンテナ2本をBox配置にすることによって、アンテナを二次元に高密度配置した場合と等価の開口面積が得られ、高い解像度でのセンシングが実現可能になる。

4. テラヘルツ波デバイス技術

3章に述べたBox型配置MIMOアンテナを実現するため、当社では300GHz帯で動作する一次元アレーアンテナを開発している。アレーアンテナ実現に必要な要素技術は(1)RFIC(Radio Frequency IC)、(2)アンテナパッケージの二つに大別される。この章では当社が持つこれらの技術について述べる。

開発している300GHz帯送信用RFIC及び受信用RFICの構成を図3に示す。今回の開発では、集積性と高出力化の両立が期待できる45nm SOI-CMOS(Silicon On Insulator-Complementary Metal Oxide Semiconductor)プロセスを採用している。

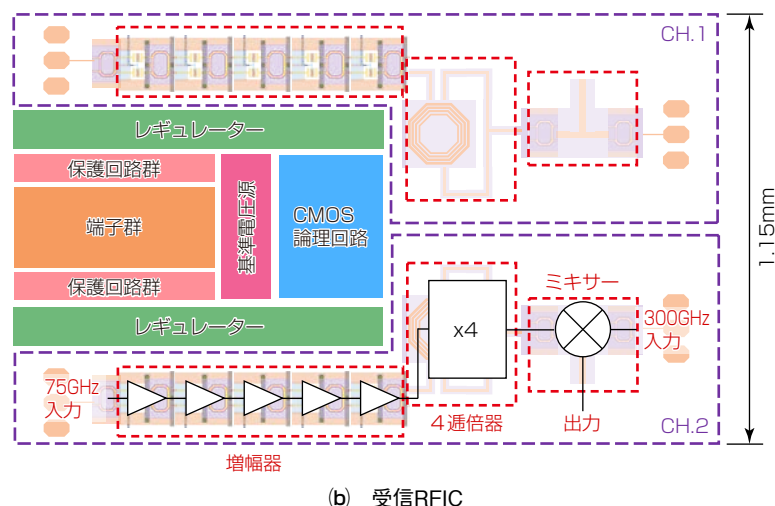
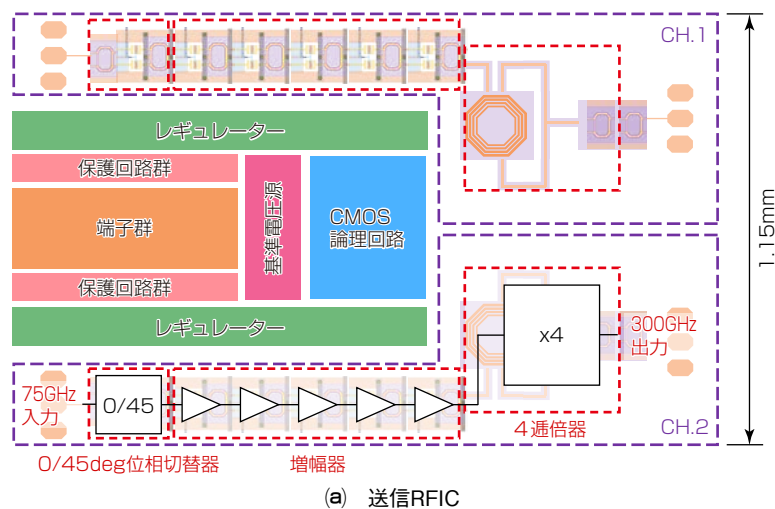


図3-300GHz帯RFIC構成

送受信RFICは1/2波長間隔で並べる必要があり、図3に示すように1.15mm以下に2系統を配置する高密度配置が必要である。従来には高密度配置のため極力回路数を減らす必要がある。そのため送信RFICは一般的な2通倍器を2段重ねる構成でなく、図3(a)に示す0/45deg位相切替器と75GHz帯増幅器及び4通倍器を、受信RFICも図3(b)に示すように75GHz帯増幅器と4通倍器及び基本波ミキサーという従来とは異なる回路構成によって300GHz帯送受信RFICを構成している。

300GHz帯アンテナパッケージの基本構成、試作図面及びその試作サンプルを図4に示す。この構造は、ICの後工程技術である再配線プロセスを用いた二重パッチアンテナである。構成要素は、IC配線層(基材:SiO₂(二酸化ケイ素))、再配線層、片面のフィルム基板から成る。円形パッチから成るアンテナ励振素子は再配線層最上層に形成した。アンテナへの給電は、IC配線層に形成した整合回路を介して、再配線層からIC配線層を接続する給電ピン(スタックVIA)による背面給電で行う。

一方、無給電素子は片面フィルム基板上に形成し、導電性テープを用いて無給電素子が下向きになるように実装した。実装した結果、図4(b)、(c)に示すとおり、アンテナ励振素子のパターン製造誤差1μm以下を実現し、このプロセスで高精度な製造ができることが確認できた。これらのことから、高精度な製造や実装を可能にしながら、二重パッチアンテナを採用したことによる広帯域化が可能になり、所望のアンテナ特性の実現が容易になる。

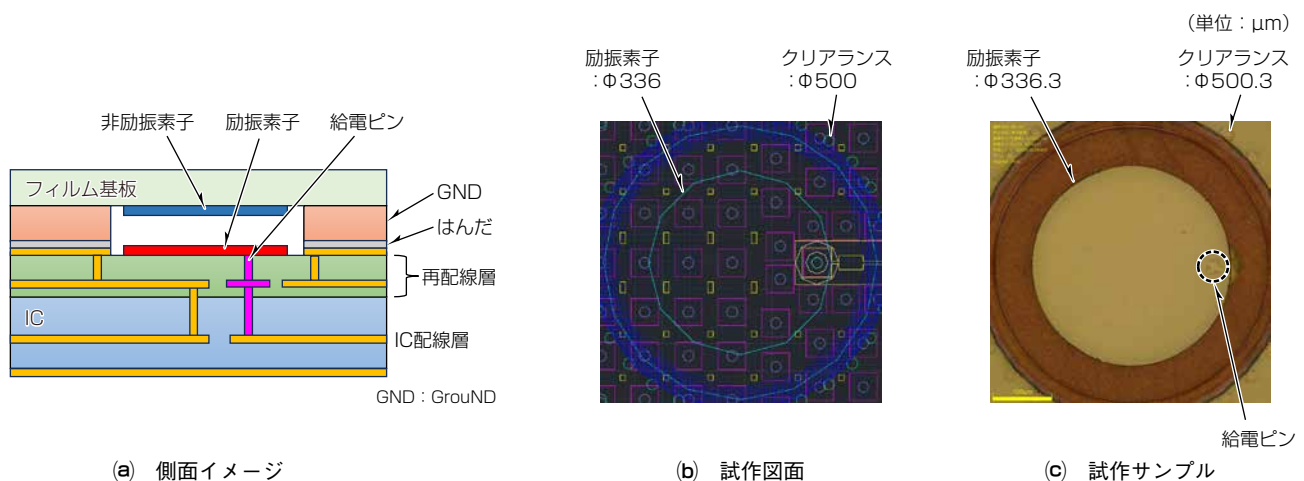


図4-300GHz帯アンテナパッケージの基本構成

5. テラヘルツ波センシング実証実験結果

300GHz帯テラヘルツ波センシングシステムの有効性を確認するため、断層イメージング⁽¹⁾及びバイタルセンシング⁽²⁾の実証実験を実施した。使用した測定系及びその測定結果を図5に示す。3章及び4章に述べた一次元アレーアンテナは現在開発中のため、単一の送信ホーンアンテナと受信ホーンアンテナをXYステッパーに乗せて動かして、静体をセンシングすることによって、二次元アレーアンテナを模擬している。スーツケースの中身に発泡スチロールの板を敷き詰めて、模造ナイフとモデルガンをそれぞれ別々の板に埋め込んで、断層イメージング撮像を行った。この結果、模造ナイフとモデルガンをそれぞれ配置した層でミリメートル精度で対象の輪郭及び表面をイメージングできることを確認した。

次に、動き検出アプリケーションの一例として、人体の心拍情報を取得するバイタルセンシングを実施した。測定イメージ、及び実施結果を図6に示す。断層イメージング撮像とは異なり、今回の検証では動体に対してセンシングするため、レンズを用いて指向性を模擬して実験した。実験した結果、心拍起因で発生したマイクロメートル級の胸部変位を推定でき、医療分野で心拍間隔の推定に用いられる心電図(ECG: Electrocardiogram)に対して誤差0.5%で推定できることを確認した。

これらの検証から、300GHz帯テラヘルツ波の特長を生かして、非破壊検査やインフラ監視などへの活用も期待される。

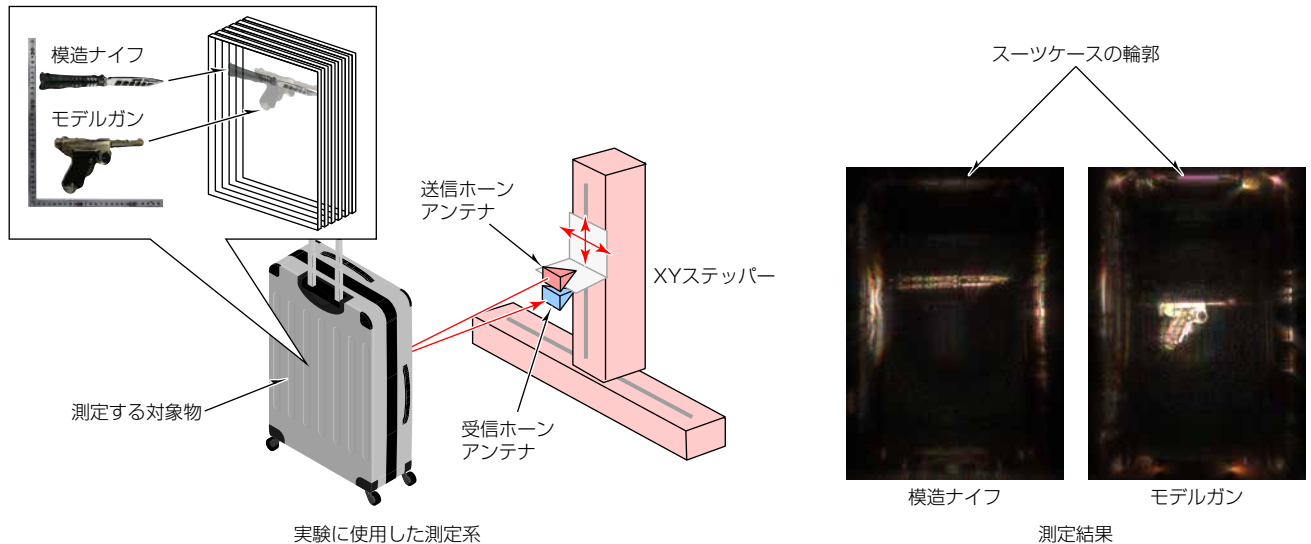


図5-断層イメージング撮像結果

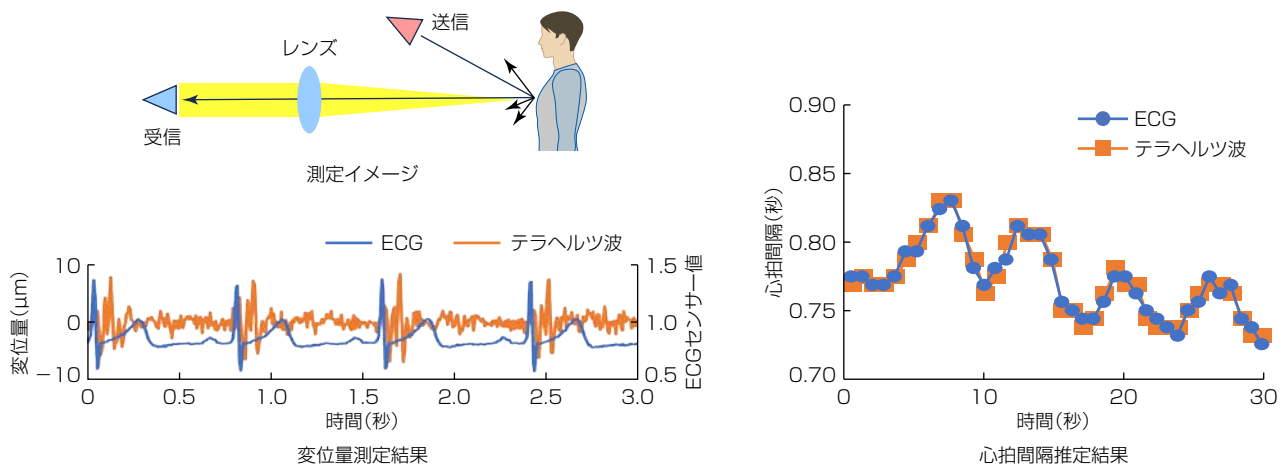


図6-バイタルセンシング測定結果

6. む す び

隠れたモノの高解像度センシングを実現する300GHzテラヘルツ波センシングシステムの当社技術及び実証実験結果を述べた。300GHz帯テラヘルツ波のコア技術であるバーチャルフォーカスセンシング技術、300GHz帯RFIC及びパッケージング技術によって高分解能と透過性を実現し、セキュリティゲートやバイタルセンサーなど様々な分野のアプリケーションへの活用を期待できることを示した。

参 考 文 献

- (1) 平 明德, ほか: 300GHz帯サブテラヘルツ波を用いた高解像度イメージング向けセンシング技術, 電子情報通信学会技術研究報告, 123, No.76, RCS2023-77, 288~293 (2023)
- (2) 梅田周作, ほか: 300GHz帯サブテラヘルツ波の生体情報測定への応用～遠隔での拍動検知性能評価～, 電子情報通信学会技術研究報告, 123, No.108, RCS2023-100, 109~114 (2023)

AIの安心・安全を守る セキュリティ技術とプライバシー技術

Security and Privacy Technologies for Safe and Secure Artificial Intelligence

*情報技術総合研究所
†同研究所(博士(工学))

要 旨

深層学習の発展によって、AIをビジネスに活用する取組みは、近年ますます活発になってきており、三菱電機でも様々な分野での活用検討が行われている。一方で、AIが組み込まれたシステムの活用が広がるにつれて、悪意を持った攻撃者がAIの持つ脆弱(ぜいじゃく)性を突いて攻撃してくる機会も増加していく。当社では、AIの性能向上や活用検討といった取組みだけではなく、たとえAIが悪意のある攻撃にさらされる環境にあったとしても、安心・安全に活用するためのセキュリティ技術・プライバシー技術の研究開発を行っている。その取組みの中で、物体検知のAIが入力に細工をされても正しい結果を出力する技術と、AIのモデルから学習データに関する情報の漏洩(ろうえい)を防ぐ技術を開発した。

1. ま え が き

2010年代前半に再注目されたニューラルネットワークでの深層学習は、その圧倒的な精度によって画像・映像、言語、音声や時系列データなど様々な分野でのAIに革命をもたらした。近年では、大規模言語モデルを用いた対話型AIや拡散モデルを用いた画像生成AIなどの生成AIが単なる研究対象としてだけでなく、ビジネスへの適用まで含めた大きなブームになっており、AIの実社会での活用は今後も加速度的に進んでいくことが予想される。一方、AIの活用範囲が拡大していくにつれて、AIを用いたシステムへの攻撃機会もまた増加していく。特にAIを用いたシステムでは、ITシステムに対するOSやアプリケーションの脆弱性などを突いたこれまでのサイバー攻撃手法だけでなく、AI固有の脆弱性を突いた攻撃手法についても考慮しなければならない。

本稿では、AIの安心・安全な活用を実現するためのセキュリティ技術やプライバシー技術の研究開発に関する当社の取組みについて述べる。

2. AIでのセキュリティとプライバシー

近年活発に研究が行われている深層学習は、機械学習というAI技術の一種である。機械学習の利用に当たっては図1に示すとおり、学習データを入力してモデルを生成する学習フェーズと、生成されたモデルを用いて入力された画像やテキストなどに対して物体検知や翻訳などのタスクを実行する推論フェーズの二つのフェーズが存在する。この学習フェーズや推論フェーズで、モデルに入力されるデータに細工をすることで意図しない結果を出力させたり、モデルが出力するデータを観察することで学習データに含まれる個人情報などの意図しない漏洩を引き起こしたりする手法などがAIを対象とした攻撃である。AIを対象とした攻撃については、近年精力的な研究が行われており、例えば攻撃手法の一種である敵対的サンプル攻撃に限定しても、2024年3月の時点で8,000本以上の論文が公表されている⁽¹⁾。

総務省によるAIセキュリティ情報発信ポータル⁽²⁾で、AIを対象とした攻撃の手法がまとめられたAIセキュリティ・マトリックスが提供されている。AIセキュリティ・マトリックスでは攻撃の分類として、データ汚染、モデル汚染、敵対的サンプル、データ窃取、モデル窃取の5分類が定義されている。各分類のイメージと概要を図1と表1に示す。

データ汚染、モデル汚染、敵対的サンプルの3種類の攻撃は、主にモデルの正しい動作に関連するものであり、データ窃取とモデル窃取は、学習データやモデルのプライバシーに関するものである。本稿では、これらのAIを対象とした攻撃手法に対抗するためのセキュリティ技術・プライバシー技術の当社研究開発での取組みの中から、3章では敵対的サンプル攻撃の一種である敵対的パッチ攻撃への対策技術について述べて、4章ではデータ窃取攻撃の一種であるメンバーシップ推論攻撃への対策技術について述べる。

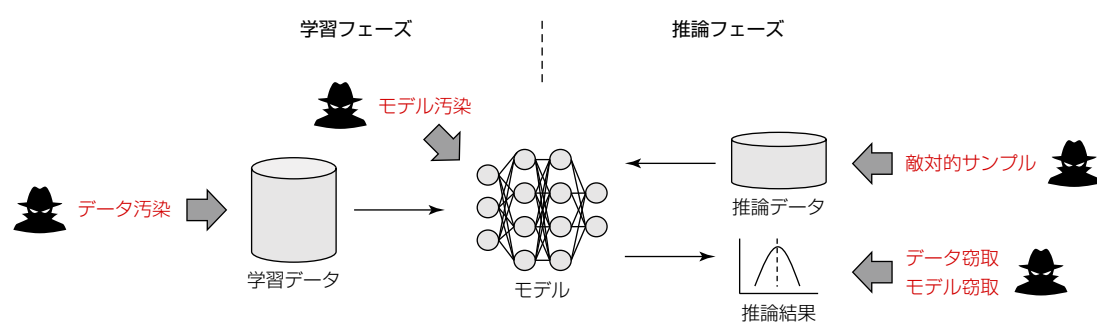


図 1 -AI を対象とした攻撃のイメージ

表 1 -AI を対象とした攻撃の概要 (AIセキュリティ・マトリックス⁽²⁾ から引用)

分類	概要
データ汚染	汚染データと呼ばれる特殊なデータを学習データに注入することで、特定の入力データに対して攻撃者が意図した動作をさせるバックドアの設置やモデルの精度低下を引き起こす
モデル汚染	学習後のモデルに細工を行うことで、事前学習済みモデルとして利用者に配布するモデルに、特定の入力データに対して攻撃者が意図した動作をさせるバックドアを設置する
敵対的サンプル	モデルへの入力データに摂動と呼ばれる改変を加えることで、画像の分類や音声認識の結果などを間違えたものに変更する
データ窃取	モデルに複数のデータを入力し、その出力を観測することによって学習に使われたデータの情報を盗み出す
モデル窃取	モデルに複数のデータを入力し、その出力を観測することによってモデルの構造やパラメーターなどの内部情報を盗み出す

3. 敵対的パッチ攻撃への対策技術

物体検知とは、入力された画像に写っているそれぞれの物体に対して、物体の位置を示す囲みの座標と、その物体の種類を示すラベルを出力する技術であり、自律走行車での歩行者の検知や監視カメラでの不審人物の検知などに活用されている。物体検知を対象とした敵対的パッチ攻撃は、特殊な方法によって作成されたパッチ画像を入力画像に写った物体の近くに配置することで、その物体の検知を阻害する攻撃であり、物体検知を活用したシステムへの脅威になる。図2は既存研究⁽³⁾での敵対的パッチ攻撃を実施した例である。左側の人物は囲みと人物であることを示すpersonというラベルが表示されており、正しい検知が行われている。その一方で、右側の人物については囲みとラベルが表示されておらず、配置されたパッチ画像によって正しい検知ができていないことが分かる。またこのパッチ画像は、画像上にデジタル的に配置されているのではなく、印刷して実際の人物の近くに配置した状態でカメラに入力されても効果を発揮している。このような敵対的パッチ攻撃は、物理的敵対的パッチ攻撃と呼ばれ、特に重要な脅威として認識されている。



図 2 -敵対的パッチ攻撃の例 (既存研究⁽³⁾ から引用)

当社は、敵対的パッチ攻撃が行われた場合であっても、正しく物体を検知するための対策技術を開発した⁽⁴⁾。この技術では、入力された画像に対して、まず通常の物体検知を行う。このとき物体検知の出力には、入力された画像での各物体の位置を示す囲みの座標とともに、そこに物体が存在する確率が物体度スコアとして出力される。物体検知では、この物体度スコアがしきい値以上の値を持つときに、その場所に物体があるとして検知される。一方で、敵対的パッチは周囲の物体の物体度スコアを低下させる効果を持っており、パッチを配置された物体の物体度スコアをしきい値以下にすることで、物体の検知を阻害する。今回の対策技術では、物体度スコアがしきい値未満まで低下している囲みに着目する。図3左の画像で点線で示した囲みが、しきい値を下回る物体度スコアを持った囲みであり、この技術では、それぞれの囲みを黒く塗りつぶして複数の塗りつぶし画像を生成する。そして生成された塗りつぶし画像のそれぞれに対して、再度物体検知を行う。敵対的パッチの一部又は全部を塗りつぶした画像では、物体度スコアを低下させる効果が失われ、配置された物体の物体度スコアがしきい値以上になり、正しく物体として検知することが可能になる。複数の塗りつぶし画像それぞれに対して出力された検知結果と、塗りつぶし前の画像に対して行った検知結果に対して、最後に統合処理を行うことで物体検知としての最終的な出力が得られる。

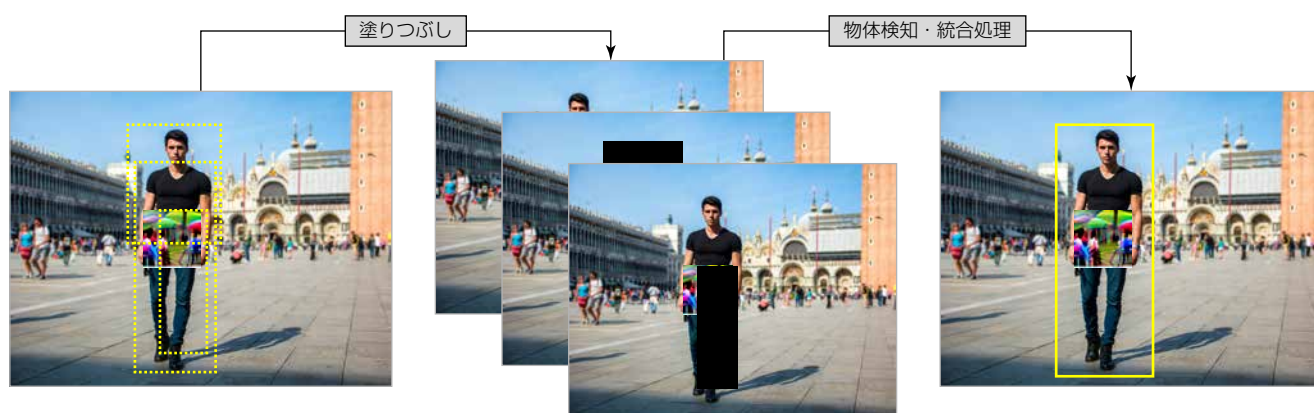


図3-敵対的パッチ攻撃の対策技術での塗りつぶし処理

4. メンバーシップ推論攻撃への対策技術

メンバーシップ推論攻撃は、サンプルデータがモデルの学習に使用されたかどうかを識別する攻撃であり、攻撃者は、サンプルデータに対するAIの推論結果から、データの持ち主が学習データの提供者かどうか特定できる。図4にメンバーシップ推論攻撃の概要を示す。メンバーシップ推論攻撃そのものは、学習データに関する情報漏洩として比較的軽微な内容ではあるが、メンバーシップ推論攻撃に耐性を持つ学習モデルは、学習データの情報漏洩に関する他の攻撃に対しても耐性を持つ。そのため、メンバーシップ推論攻撃に対抗する技術は、モデルのプライバシーを実現するために重要になる。

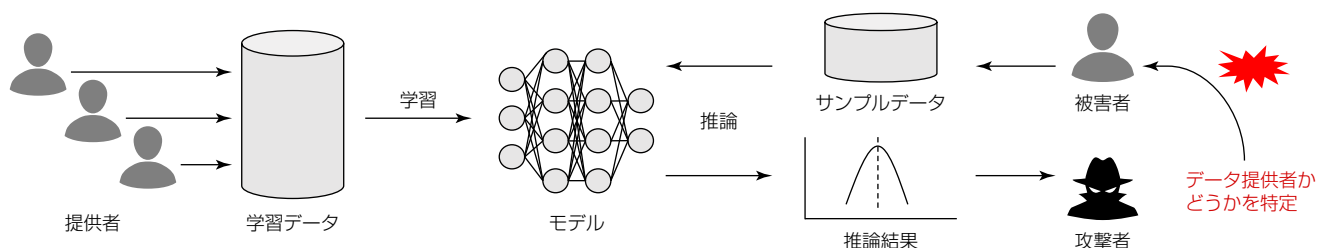


図4-メンバーシップ推論攻撃の概要

メンバーシップ推論攻撃が成功する要因は、モデルが学習データに含まれるデータに対して、他のデータよりも高いスコアを出力するような、強い反応を示してしまうオーバーフィッティング(過剰適合)だと考えられている。当社は、メンバーシップ推論攻撃に対抗する技術として、過剰適合を抑制する学習方式SEDMA(SELF-Distillation with Model Aggregation

for Membership Privacy)を開発した⁽⁵⁾。図5にSEDMAの概要を示す。SEDMAは、学習データのラベルを、その学習データを学習に用いていないモデルの推論結果(ソフトラベル)に置き換えて、ソフトラベル付き学習データを新たに生成する。ソフトラベル付きの学習データで生成した対策済みモデルは、元の学習データに対する過剰適合が発生しにくいいため、メンバーシップ推論攻撃に強い。ソフトラベルの生成に必要なモデルは、学習データを分割し、それぞれの分割学習データで学習したモデルの集約(モデル間でのパラメーターの加重平均)によって生成した集約モデルを用いる。各集約モデルは、集約された各モデルの学習データに含まれていない学習データにソフトラベルを付与する。このモデルの集約にSEDMAの特長があり、既存の対策方式に比べて、対策によるモデルの精度劣化と対策強度の優れたトレードオフ性能を少ない計算コストで実現している。

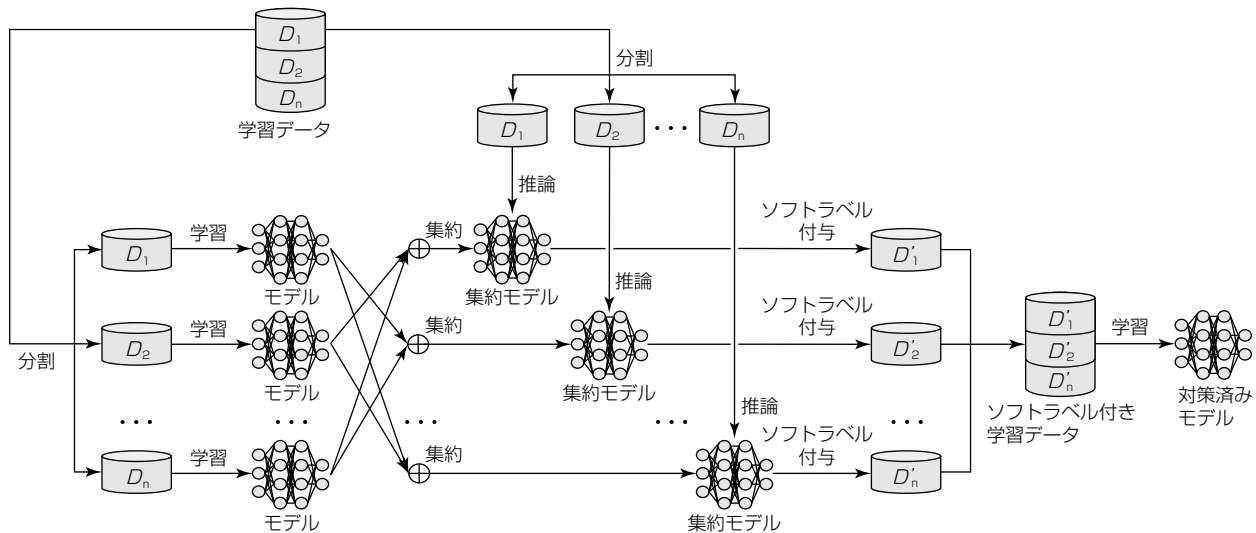


図5-SEDMAの概要

最近では、膨大な学習データを必要とする大規模言語モデルの学習に対して、学習データに関する情報漏洩のリスクが懸念されている。当社は、大規模言語モデルに対しても、メンバーシップ推論攻撃による学習モデルからの情報漏洩リスク評価、既存対策(差分プライバシーなど)の効果検証や新たな対策方式の検討を進めている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

5. む す び

AIを対象とした攻撃に対して、物体検知での敵対的パッチ攻撃への対策技術や、メンバーシップ推論攻撃への対策技術についての当社の取組みを述べた。今後は、生成AIとして注目されている大規模言語モデルや、画像や音声なども同時に扱うマルチモーダル大規模言語モデルなども対象として、セキュリティ技術やプライバシー技術の研究開発を更に進めていくことで、AIの安心・安全な活用とその促進に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) Carlini, N.: A Complete List of All (arXiv) Adversarial Example Papers (2019)
<https://nicholas.carlini.com/writing/2019/all-adversarial-example-papers.html>
- (2) 総務省, ほか: AIセキュリティ 情報発信ポータル
https://www.mbsd.jp/aifsec_portal/
- (3) Thys, S., et al.: Fooling Automated Surveillance Cameras: Adversarial Patches to Attack Person Detection, 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 49~55 (2019)
- (4) 小関義博: 物体検知における敵対的サンプルパッチ攻撃の無効化技術について, 第37回人工知能学会全国大会論文集, 2A6-GS-2-01 (2023)
- (5) Nakai, T., et al.: SEDMA: Self-Distillation with Model Aggregation for Membership Privacy, Proceedings on Privacy Enhancing Technologies, 494~508 (2024)
- (6) 中井綱人, ほか: プロンプト・チューニングは大規模言語モデルの安全性を高めるか?, 情報処理学会コンピュータセキュリティシンポジウム, 4F2-4 (2023)
- (7) 東 拓矢, ほか: 大規模言語モデルのファインチューニング手法LoRAにおいて差分プライバシーは有効か?, 電子情報通信学会暗号と情報セキュリティシンポジウム, 2F2-3 (2024)

OSSデータベースPostgreSQLへの取組みとOSSコミュニティへの貢献

立床雅司*
Masashi Tatedoko
藤井雄規*
Yuki Fujii
柿村直拓*
Naohiro Kakimura

追立真吾*
Shingo Oidate

*情報技術総合研究所

Case Studies of Extending Open-Source Database Software
PostgreSQL and Contributing to Open-Source Communities

要 旨

近年、OSS(Open-Source Software)の重要性がますます高まってきている。三菱電機はOSSの利活用に加えて、その価値向上と持続性のためOSSコミュニティへの貢献を重視しており、活動を拡大させる計画である。当社は、OSSのRDBMS(Relational DataBase Management System)であるPostgreSQL^(注1)の外部データ連携への取組みを通じて、PostgreSQL内部動作への理解を深めることで分散構成での集約処理速度を12倍高速化できる余地を見だし、開発成果の一部をOSSコミュニティに提案した。さらに、OSSの普及と発展に向けて、様々なOSSコミュニティに対してパッチ投稿、ドキュメント翻訳、カンファレンス発表等による貢献活動を行った。

(注1) PostgreSQLは、PostgreSQL Community Association of Canadaの登録商標である。

1. ま え が き

産業界では、DX(Digital Transformation)が急速に進展している。このような潮流の中、当社では循環型 デジタル・エンジニアリング企業に向けた企業変革を加速させている。当社の経営戦略では、持続的な成長を実現するため、技術力と創造力でオープンなイノベーションを推進する戦略を掲げている。これはグループ内外での知見の融合、共創によって、未来をデザインし新しい価値をタイムリーに創出することを目指したものである。この戦略での重要な取組みの一つにOSSコミュニティへの貢献がある。OSSとは、グローバルなインターネット上のコミュニティ(これをOSSコミュニティと呼ぶ)で、世界中のエンジニアによる知見の融合と共創によって、高品質かつスピーディーに開発されるソフトウェアである。OSSの利用は世界中で拡大しており、世の中のソフトウェアプロジェクトの96%がOSSを含んでおり、ソフトウェアプロジェクトのソースコード全体のうちの77%がOSSであると言われる⁽¹⁾。当社を含めた世界中のソフトウェア開発で必要不可欠なものになっている。これらOSSの価値向上と持続性のために、当社がOSSコミュニティに参画、貢献することは社会的な責務と考えている。当社は2014年に“OSS活用ガイドライン”を策定して、2018年に“社内OSSマネージャー連絡会”を設立し、OSSの思想やライセンスに則(のっと)った活用を進めてきた。OSS RDBMSのPostgreSQLは、データ操作や定義に用いられる標準SQL(Structured Query Language)をサポートし、高い拡張性を備えていることから、当社では独自のデータベース製品のフロントエンド部分に採用している。PostgreSQLの外部データベース連携機能を用いて当社データベース製品を接続するに当たって、当社データベース製品のインターフェースによる制限を回避するためPostgreSQLの内部動作の理解が必要であった。その過程で、外部データベース連携機能でPostgreSQL同士を接続した分散構成で並列集計処理を行わせる場合、大きな性能向上の余地が残されていることを見だし、PostgreSQLコア機能に対するパッチを作成してOSSコミュニティに提案するに至った。

本稿では、2章でPostgreSQLの機能拡張への取組みとして、外部データベース連携機能の活用と分散構成での集約処理高速化の詳細について述べて、3章で他のOSSでの貢献への取組みについて述べる。

2. PostgreSQLの機能拡張への取組み

PostgreSQLは、データの操作や定義に標準的に用いられるSQLをサポートし、データ型、関数、演算子などを追加可能な高い拡張性を備えている。この拡張性を用いて、PostgreSQLと連携する様々な拡張機能がOSSとして公開されている。また、PostgreSQLは、BSD(Berkeley Software Distribution)やMIT(Massachusetts Institute of Technology)ライセンスに類似した使用、複製、改変、配布の自由が保証されているPostgreSQLライセンスで提供されている。そのため、ソースコードを改変することでカスタマイズを行った商用又はOSSの派生製品が多数提供されている。PostgreSQL

は特定の企業が開発の主体になるような一部のOSSにみられる開発体制ではなくグローバルなコミュニティによって開発されており、誰でもインターネット上の議論に参加し開発に貢献できる。データ活用技術分野でも同様に活発な開発コミュニティが存在し、信頼性の高いソフトウェアが継続的に開発され続けている。

当社では、機能拡張を始めとしたPostgreSQLに関する様々な取組みを行っている。その一例を図1に示す。その中の機能拡張について、2.1節～2.3節で述べる。

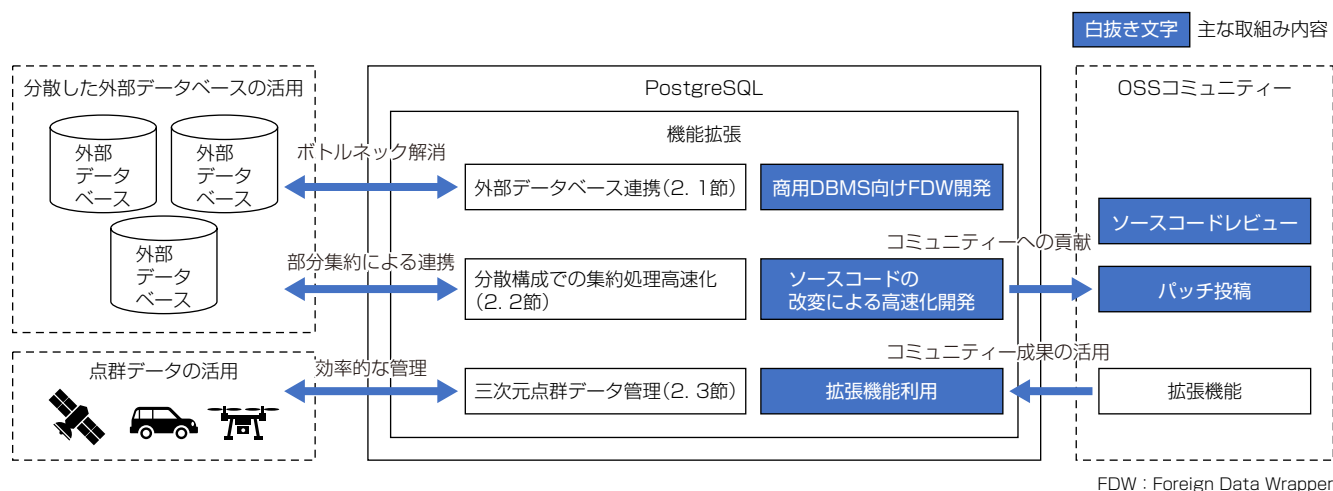


図1 - PostgreSQLへの機能拡張を始めとした様々な取組みの一例

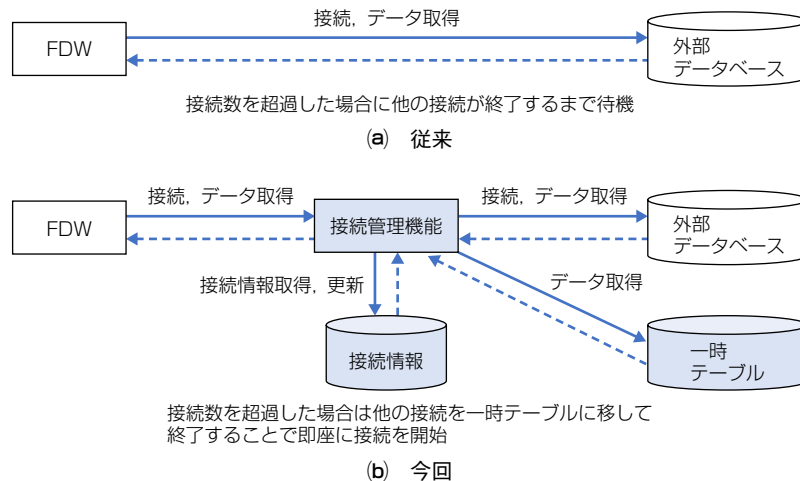
2.1 外部データベース連携

大量のデータを管理する場合、書き込み、読み出しの性能向上のために複数のデータベースにデータを分散し、データの特성에応じて様々なデータベースを使い分けることが多い。分散したPostgreSQLの外部データベースをPostgreSQLの外部データ連携機能であるFDWを用いて連携する場合に、外部データベースとPostgreSQLのインターフェースの違いに起因する性能のボトルネックや、処理を外部データベースに委譲できないことによる処理の非効率性が課題になる。

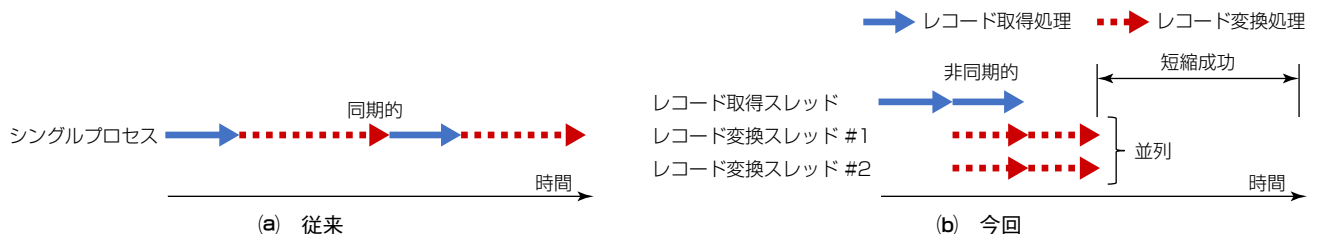
FDWは、あらかじめ連携する外部データベースのテーブルを外部テーブルとしてPostgreSQLに登録しておくことで、外部テーブルに対する問合せを透過的に行うことができる。PostgreSQLはクライアントから外部テーブルに対する問合せを受け付けると、はじめにFDWに外部データベース側で実行可能な処理の切り分けを依頼し、PostgreSQL側で実行する処理と外部データベース側で実行する処理の分担を決定する。このとき、FDWは外部データベース側で実行する処理について外部データベースが認識できる問合せに変換する。その後、PostgreSQLはFDWに対して、①外部データベースに接続し、問合せを開始する処理、②外部データベースからレコードを取得して、PostgreSQLが扱える形式にレコードを変換する処理、③問合せ完了後に外部データベースと接続を終了して後処理を行う処理、の三つを依頼する。PostgreSQLは1件ずつレコード要求して処理するため、②の処理は全てのレコードを取得するまで繰り返し行われる。

外部データベースの特性によっては、FDWを単純に実装しただけでは問題が発生する場合がある。これまでに直面した課題を二つ述べる。

一つ目は接続数の制限が厳しい外部データベースとの連携を行うときに発生する課題である。FDWは問合せ完了まで外部データベースとの接続を保持する必要があるため、外部データベースへの問合せを複数同時に実行したり、多数の外部テーブルが含まれる問合せを実行したりすると、接続数が制限を超過し、接続待ちのデッドロックが発生して問合せ全体の処理が停止してしまうことがある。この課題を解決するため、FDWに外部データベースの接続情報管理機能を追加し、接続数制限を超過した場合に既存の問合せ処理を続行しつつ新たな接続を開始するようにした⁽²⁾(図2)。接続情報管理機能は外部データベースとの接続時に新しい接続先等の情報を接続情報へ追加し、接続制限に達しているか確認する。達している場合は既に確立している接続のうち一つを選んで処理待ちレコードを全て一時テーブルに移して接続を終了し、新たな接続を開始する。接続を終了した問合せの処理は、一時テーブルからレコードを取得することで続行する。このように処理の大部分を変えることなく接続数制限の課題を解決できた。



二つ目はFDWの処理がボトルネックになって、外部データベースの高速性が発揮できないという課題である。PostgreSQLは問合せに対して、シングルプロセスで処理を行うため、PostgreSQLとFDWが同期的に実行されるとPostgreSQLの処理実行中にFDWの処理が実行できず非効率になる。また、PostgreSQLが内部でデータを扱うときの形式と外部データベースの出力形式に乖離(かいり)がある場合はレコード変換の処理時間が長くなることがある。この二つの課題に対してはPostgreSQLの処理、レコード取得処理、レコード変換処理を非同期化し、レコード変換の処理を並列化することで高速化を実現した⁽³⁾(図3)。これによってPostgreSQLが問合せ結果の作成等の処理をすると同時にFDWが次に要求されるレコードを用意できる。さらに並列化によってレコード変換時間を短縮することで、問合せ全体の実行時間を短縮することに成功した。これらの開発成果は三菱電機インフォメーションネットワーク(株)の商用データベース製品である“AnalyticMart”に適用されている⁽⁴⁾。このような技術開発を通じて、当社ではPostgreSQLの内部処理の知見を蓄積しており、必要に応じて適切な拡張機能を開発している。



2.2 分散構成での集約処理高速化

大量データ処理を高速化する手法として、複数サーバーを連携して並列処理するスケールアウトが標準的になっている。PostgreSQL開発コミュニティは、FDW等の標準機能だけでスケールアウトを実現するビルトインシャーディングの開発を進めている。既存のビルトインシャーディングでは、並列処理可能な演算は行の選択や結合等であり、集約の並列処理はサポートしていない。当社は、ビルトインシャーディングを協調領域と位置付けて、2.1節に述べた開発で蓄積した外部データベース連携のノウハウを基に改善策を提案した。

ビルトインシャーディングでは、ワーカーを制御するコーディネーターで、FDWが各ワーカーに要求する処理をSQL文で表現してワーカーへ発行し、各ワーカーのSQL文の結果を使って最終結果を生成する前提である。こうした前提と整合させるため、ワーカーがコーディネーターに渡す集約関数の状態値の生成処理(部分集約処理)の内容をSQLの集約関数で表す必要がある。ただし、一部の集約関数は部分集約を既存の集約関数で表現できない問題がある。例えば数値の平均処理の場合、ワーカーがコーディネーターに渡す状態値は合計とデータ件数の配列であるが、このような状態値を返す既存の集約関数は存在しない。

この課題に対して、部分集約処理を実行する集約関数(部分集約関数)をワーカーにインストールして、各ワーカーで実行するパッチをPostgreSQL開発コミュニティへ投稿した。並列処理可能な全ての集約関数に対して、部分集約処理を既存の仕組みで関数化し、コーディングを行うことなく簡単な定義文によってインストール可能にした。大規模データベースの分析向けクエリの国際標準ベンチマークであるTPC-Hを用いた性能評価の結果、集約処理速度がワーカー数に比例して増加することを確認した。ワーカー数が5件の場合、集約並列化と部分集約によるデータ転送オーバーヘッドの回避によって、従来のPostgreSQLと比較して集約処理速度が12倍高速になることを確認した。

パッチに関して採択権者であるコミッターからレビューを受けて議論した結果、大きく二点の課題に対応するよう要請された。一点目は、状態値の形式がサーバー間の設定やPostgreSQLのバージョン差異によって変わっていたり、通信経路で変更される場合への対策が不十分であったりする点であり、安全性や互換性を保証するよう要請されている。二点目は、既存の集約関数ごとに対応する部分集約関数を追加・管理することによる、開発者の負担や改修ソースコード量の増加の問題であり、部分集約処理の表現を簡素化するよう要請されている。今後は、これらの課題に対して対応策を検討し、同コミュニティへ再提案する予定である。

2.3 三次元点群データ管理

センサー技術の発展に伴い、LiDAR(Light Detection And Ranging)などによる高精度の測定が安価に実施可能になり、三次元点群データの事業活用が進んでいる。点群データは点数が膨大なため、一つの点をPostgreSQLのレコードとして扱うと非効率になる。この課題を解決するため、PostgreSQLの拡張機能pgpointcloudがOSSコミュニティから提供されている。pgpointcloudは、PcPatchと呼ばれる複数の点をまとめたデータ型を追加することで扱うレコード数を減らしつつ、点群に高速にアクセスできる機能を提供している。また、pgpointcloudは、地理空間情報が扱えるようにPostgreSQLを拡張するPostGISと組み合わせることで、点群データを他の地理空間情報と連携可能である。さらに、点群処理に特化したツールであるPDAL(Point Data Abstraction Library)にpgpointcloudを介して容易に連携でき、ノイズ除去や形式変換といった点群データの操作が可能である。当社は、これらを用いた大規模な三次元点群データ管理の実現の可能性について検証を進めている。外部データベース連携の事例と同様に、検証によって有用な知見や課題解決手段が得られた場合はOSSコミュニティにフィードバックしていく。

3. 様々なOSSコミュニティへの貢献活動

当社は、2章で述べたPostgreSQL以外にも様々なOSSコミュニティへ参加し、パッチ投稿による機能強化・品質改善、ドキュメントの翻訳、カンファレンスでの発表などの活動を通じてOSSの普及と発展に貢献している。これら当社の貢献活動は立ち上がったばかりであるが、当社内で“OSS貢献ポリシー”“OSS貢献ガイドライン”の策定を進めており、これらの指針の下で活動を拡大させていく計画である。PostgreSQLのほか、AIフレームワークで最も利用者の多いAIフレームワークの一つであるPyTorch^(注2)、AI処理を最適化し高速化するコンパイラーのApache TVM^(注3)、HummingbirdなどのOSSに対して、機能拡張やバグフィックスのためのパッチ投稿の実施や、パッチ投稿に対するレビューを実施することによってOSSコミュニティへ貢献している。Hummingbirdでは当社エンジニアの平森将裕がコミット数No.3(2024年7月現在)であり、コントリビューターから提供されるソースコードをメインラインへ統合する権限を持つコミッターとしてOSSコミュニティの発展・持続に貢献している。また深層学習コンパイラーに関するカンファレンス“TVMCon”では数少ない日本企業として発表した。パッチ投稿以外にも、ブロックチェーン・プラットフォームであるHyperledger^(注2)では、公式ドキュメントの英語原文から日本語への翻訳作業といった形でも貢献している。また、この翻訳作業に関しては、Hyperledgerカンファレンスで発表した。

これらのPyTorchやHyperledgerを始めとした主要OSSコミュニティを数多く取りまとめてOSSの発展を推進する非営利組織The Linux Foundationに参画し、OSSのエコシステム全体にも貢献している。当社は、今後もOSSを利用して高品質かつスピーディーに開発するとともに、OSSコミュニティ貢献によって社会的な責務を果たしていく。

(注2) PyTorch, Hyperledgerは、The Linux Foundationの登録商標である。

(注3) Apache TVMは、Apache Software Foundationの登録商標である。

4. む す び

PostgreSQLの拡張開発事例とOSSコミュニティとの関わり、及び当社がこれまでに実施したAIフレームワーク分野、データ管理分野での貢献について述べた。当社は、OSSコミュニティに参画、貢献することを社会的な責務ととらえて、PostgreSQL、Apache TVM、Hummingbirdなどへパッチ投稿している。今後は社内のOSS貢献ポリシー、OSS貢献ガイドラインの整備とともに、OSSコミュニティへの貢献を拡大させていく。

参 考 文 献

- (1) 日本シノプシス合同会社：2024 オープンソース・セキュリティ&リスク分析レポート
<https://www.synopsys.com/ja-jp/software-integrity/resources/analyst-reports/open-source-security-risk-analysis.html>
- (2) 藤井雄規, ほか：PostgreSQLのForeign Data Wrapperにおけるリモート問合せの同時実行数制御方式, WebDB Forum 2019論文集, 45～48 (2019)
- (3) 柿村直拓, ほか：PostgreSQLの外部連携機能におけるレコード変換処理の高速化, 第16回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム(DEIM2024), T2-A-3-05 (2024)
- (4) データ分析フレームワーク“AnalyticMart”とPostgreSQLとの連携による高速データ分析システム, 三菱電機技報, 96, No.1, 84 (2022)

~~~~~

# 偏波SAR画像の高感度な 時系列分析

Maximization of Sensitivity to Time-series Polarimetric SAR Image

\*情報技術総合研究所(博士(工学))

## 要 旨

グローバルな気候変動対策や災害時の復興支援のために地球の日々の変化を把握することは、人類にとって喫緊の課題である。三菱電機が長年開発に携わってきた合成開口レーダー(SAR: Synthetic Aperture Radar)は、昼夜天候問わず観測可能であり、定期的な観測を通じて地表面の変化を差分として検出することに優れている。さらに、SARの送受信アンテナの偏光性を利用した偏波SAR画像は、観測対象の構造や材質等の推定を可能にする。当社は、時系列に観測された偏波SAR画像群から、対象の状態の変化に対する感度を高めて、わずかな違いも見落とすことなく定量的に測定する技術を開発した。この手法を人工衛星だいち2号で撮影した偏波SAR画像に適用し、北海道の広葉樹林の季節変化を定量的に計測できることを示した。

## 1. ま え が き

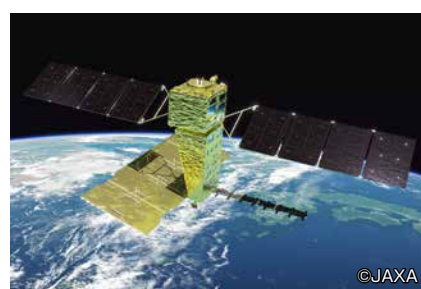
宇宙から地球を観測する場合、一度の観測から得られる絶対量よりも、軌道の再帰性を利用した時系列画像から得られる日々の相対変化の方が重要である。光学カメラと異なり、昼夜天候問わず観測可能なSARは、地上の観測対象が変化しなければ同じ電力を受信できる可能性(再現性)が高いことに加えて、送受信時に偏波特性を切り替えることで観測対象の形状や材質への感度も向上する。特に人工衛星に搭載された偏波SARは、地表面の微細な変化を捉えることに優れている。当社は、これまでに国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA)による偏波SAR機能を搭載した全ての人工衛星開発に携わってきた(図1)。偏波SAR観測の最大のメリットは、一旦直交する二偏波で観測すれば、オフラインで任意の送受信偏波に対応する受信電力を再現できることにある。当社は、このような偏波SAR画像の基本特性に改めて着目し、観測対象の微細な変化を、これまでにない感度で定量的に計測する技術を開発した。



だいち1号



だいち2号



だいち4号

図1-偏波SAR衛星

## 2. 偏波SARの受信電力

電磁波の基本特性である偏光性は、その伝搬方向に直交する面内での電場や磁場の規則的な振る舞いのことである。そのような電磁波は、偏波と呼ばれ、一般に楕円(だえん)の形になる(図2)。図2で、伝搬方向は、紙面垂直である。

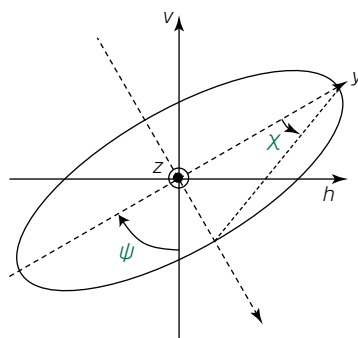


図2-偏波状態を規定する二つの角度

偏波状態  $\vec{p}$  は、楕円を特徴づける傾き角  $\psi$  と楕円率角  $\chi$  を変数として次のように表現できる。

$$\vec{p}^i = \begin{pmatrix} p_h^i \\ p_v^i \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi^i & \sin \psi^i \\ -\sin \psi^i & \cos \psi^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j \sin \chi^i \\ \cos \chi^i \end{bmatrix} \quad i = t, r \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $t$  と  $r$  は、送信と受信を表し、レーダー装置を構成する送信アンテナと受信アンテナのそれぞれについて、偏波状態を定めることができる(図3)。図3の“ $v_1, v_2, \dots$ ”は、観測対象の物理量(土壌水分や植物の生育状況等)を示す。

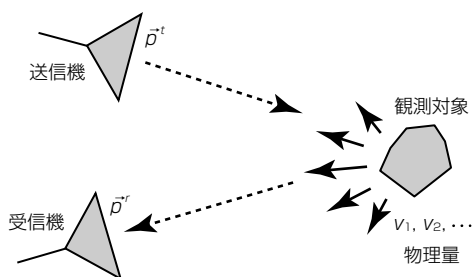


図3-偏波SAR観測の様子

すなわち、観測に用いる偏波状態は、四つの角度( $\psi^t, \chi^t, \psi^r, \chi^r$ )を変数として規定できる。実際の偏波SAR観測では、水平偏波と垂直偏波(図4)が広く用いられ、送受信の際に偏波状態を逐次切り替えながら観測する。

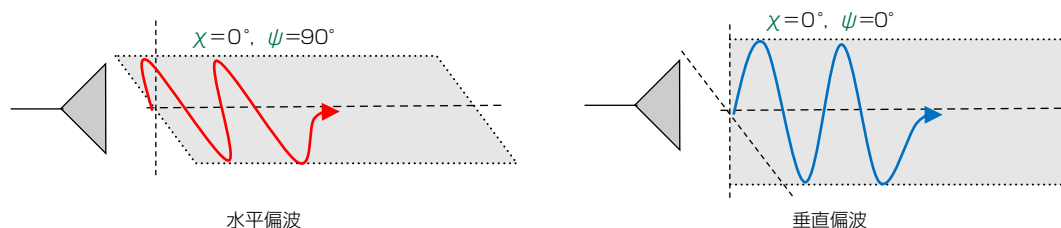


図4-直交する二偏波の例

例えば、垂直偏波を送信し、観測対象からの散乱を水平偏波で受信した信号は、HV偏波と呼ばれ、偏波SAR観測を通じて、HH, HV, VH, 及びVV偏波(以下“標準偏波”という。)を記録する。なお、従来のSARは、どれか一つの偏波だけを記録する。受信電力 $P$ は、送受信偏波状態を表す( $\psi^t, \chi^t, \psi^r, \chi^r$ )で構成される四次元のアンテナベクトル $\vec{A}$ と、観測対象の電波散乱情報で構成される4行4列の共分散行列 $C$ を用いて、次のように記述できる。

$$P = \vec{A} (\vec{p}^t(\psi^t, \chi^t), \vec{p}^r(\psi^r, \chi^r))^T C(v_1, v_2, \dots) \vec{A} (\vec{p}^t(\psi^t, \chi^t), \vec{p}^r(\psi^r, \chi^r))^* \quad \dots\dots\dots (2)$$



スカラーである $P$ は、偏波SAR画像の各画素の明るさと考えてよい。観測によって構成される共分散行列を、偏波シグネチャー<sup>(1)</sup>で可視化できる。今回、送信と受信の偏波状態が同じ(Co-Pol)場合( $\vec{p}^t = \vec{p}^r$ )、及び直交する(Cr-Pol)場合( $\vec{p}^t \cdot \vec{p}^r = 0$ )について、 $\psi^t$ と $\chi^t$ を変えながら $P$ を次々と算出することで可視化した(図5)。

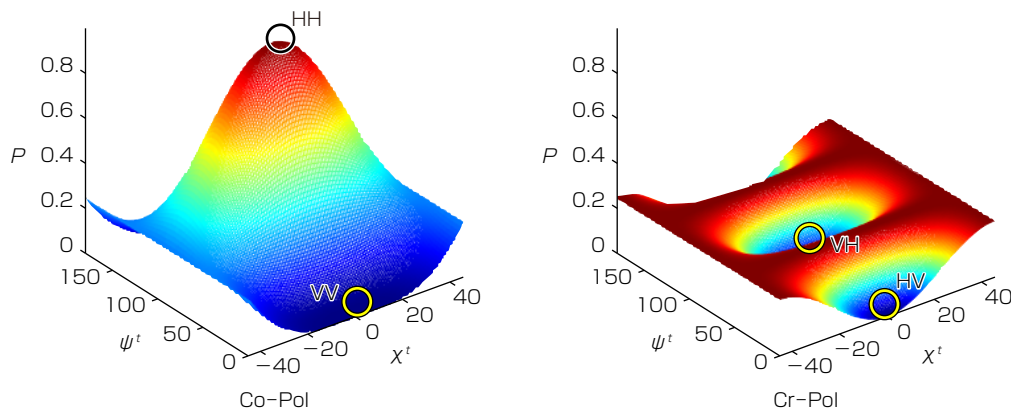


図5-90°傾いた双極子の偏波シグネチャー

標準偏波は、図5の4点に対応する電力である。従来のSARでは、どれか1点だけを観測する。しかし、偏波SARで得られる共分散行列は、それ以外にも多くの情報を含んでいる。すなわち、一旦直交する二偏波で共分散行列を構成すれば、机上で任意の送受信偏波状態の電力を再現できることを示している。この性質は、偏波SARの最大の特徴の一つであり、例えば、同じ画像中の2種類の観測対象(船舶と海面など)のコントラストを強調する手法<sup>(2)</sup>として活用されてきた。本稿では、この性質を時系列偏波SAR画像の高感度で定量的な変化検出に応用する。なお、図5では、偶然HH偏波( $\chi^t = 0^\circ$ ,  $\chi^r = 90^\circ$ )で電力最大値を捉えているが、観測対象の状態によっては、必ずしもそうではない。

### 3. 差分への感度最大化手法

3章では、観測時期の異なる2シーンの偏波SAR画像で検討する。この期間の観測対象の状態変化に伴う電力差分を次のように記述できる。

$$\Delta P = P(t_1) - P(t_0) = \vec{A}(\psi^t, \chi^t, \psi^r, \chi^r)^T \{C(t_1) - C(t_0)\} \vec{A}(\psi^t, \chi^t, \psi^r, \chi^r)^* \dots\dots\dots (3)$$

これは、観測対象に変化がある限り、適当に $\vec{A}$ を選択することで、次のように電力差分を最大化できることを示している。

$$(\psi_{opt}^t, \chi_{opt}^t, \psi_{opt}^r, \chi_{opt}^r) = \max_{\psi^t, \chi^t, \psi^r, \chi^r} \left| \frac{\partial P(\psi^t, \chi^t, \psi^r, \chi^r, \dots)}{\partial t} \right| \dots\dots\dots (4)$$

最適な偏波状態は、Lagrange未定乗数法を適用して求めることができる。

この原理を適用した具体的な処理方法について、同一地域を $t_0$ から $t_3$ の期間で4回観測したケースを例に示す(図6)。

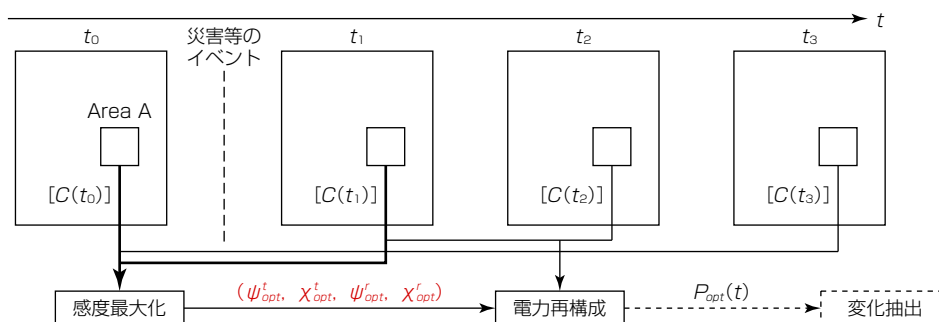


図6-偏波感度最大化手法の実現手法

$t_0$ と $t_1$ の間で、災害等のイベントで大きな変化が発生し、その後、 $t_2$ 、 $t_3$ と徐々に復旧が進み、イベント発生前 $t_0$ の状態に戻ることを仮定する。まず、最大の変化を伴う $t_0$ と $t_1$ の偏波SAR画像から、差分を最大化する最適角( $\psi_{opt}^t$ ,  $\chi_{opt}^t$ ,  $\psi_{opt}^r$ ,  $\chi_{opt}^r$ )を求めて、画素ごとに登録する。次に、登録した最適角を2章の式(2)に適用することで、各時期の電力を再構成する。このように全期間で同じアンテナベクトル $\vec{A}(\psi_{opt}^t, \chi_{opt}^t, \psi_{opt}^r, \chi_{opt}^r)$ を使用することで、変化の比較基準を定め、対象の変化を $\{C(t_1) - C(t_0)\}$ に局在化できる。再構成された4枚の偏波SAR画像の任意の画像間の差分は、対象の状態変化として定量分析可能である。一方、最適角そのものは、観測対象の状態を表す新たな物理パラメータになり得る。

#### 4. 妥当性検証～森林の成長に対する感度最大化～

北海道の苫小牧市にある広葉樹林を3時期( $t_0$ :2018年12月30日,  $t_1$ :2019年1月27日,  $t_2$ :2019年8月11日)にわたってだいち2号で観測した。その偏波SAR画像に、3章で検討した手法を適用する。この地域は、図7のスナップ写真のとおり、落葉樹特有の顕著な時系列変化を確認できる。



図7-苫小牧市広葉樹林帯のスナップ写真

同地域のHH偏波画像を図8に示す。 $t_0$ から $t_1$ にかけては、冬季のひと月分の差であり微小な変化にとどまるが、 $t_1$ から $t_2$ にかけては、冬から夏にかけての葉の成長に伴い、明るさが顕著に増加している。

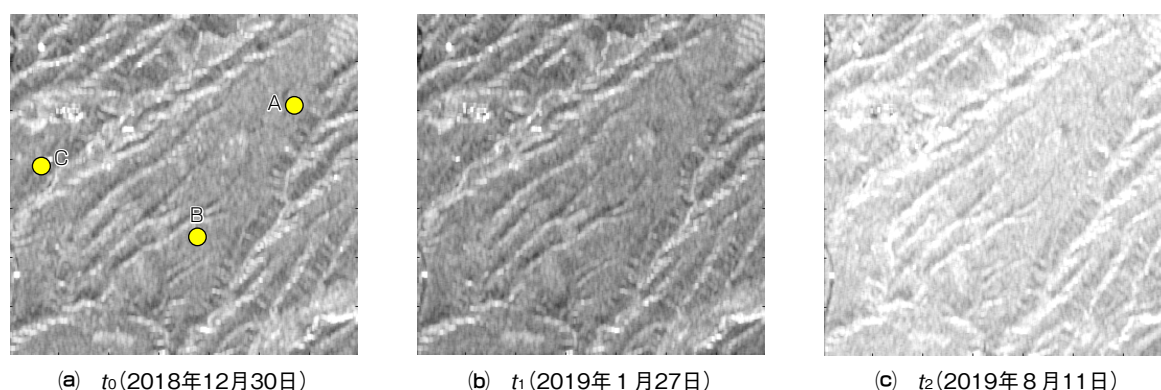


図8-だいち2号による時系列偏波SAR画像(HH偏波)

ここでは、最大の変化が期待される $t_0$ と $t_2$ で感度最大化を行う。図8(a)に示すA～C地点について、感度最大化後の電力再構成した結果を図9に示す。なお、感度を強調するため、任意時刻と $t_0$ での電力差分として図8(b)(c)を図示する。

どの地点でも、成長に従って受信電力が増加傾向を示す。また、再構成された電力( $P_{OPT}$ )は、 $t_2$ で最大になり、 $t_1$ を含めて自然な変化を見せており、妥当な結果が得られている。この手法は、期間中の比較基準が同じであるため、任意のペアの差分から対象地域の物理的变化を定量的に分析できる。

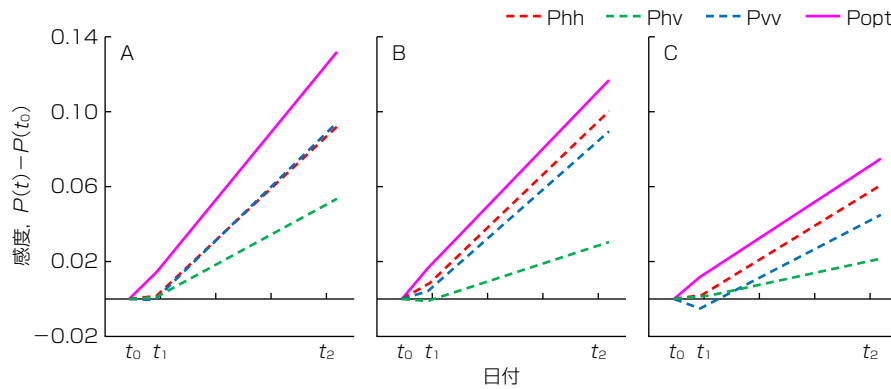


図9-苫小牧市のA～C点(図8(a))での感度最大化結果

この手法の画像全体での妥当性検証のため、電力再構成後の $t_0$ と $t_2$ の差分画像を図10に示す。

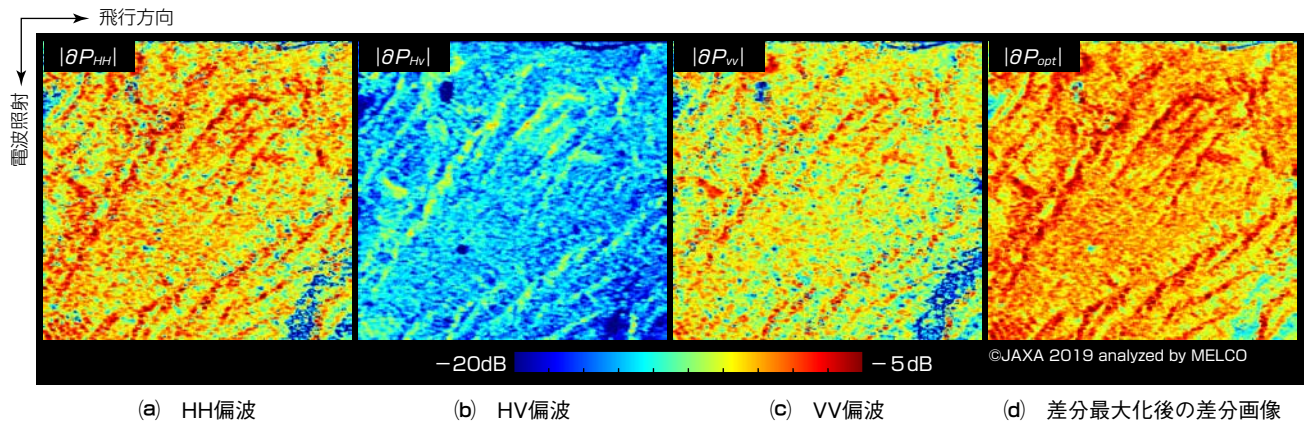


図10-電力再構成後の $t_0$ と $t_2$ の差分画像

HH画像(図10(a))は、図8(a) $t_0$ と(c) $t_2$ の差分である。画像の領域全体にわたり、提案手法による変化の大きさ(図10(d))が最大であることが分かる。また、得られた最適角を新たな物理量として送受信偏波状態の成す角を次のように定義する。

$$\cos\gamma_{opt} = \frac{\vec{p}_{opt}^t \cdot \vec{p}_{opt}^r}{|\vec{p}_{opt}^t| |\vec{p}_{opt}^r|} \dots\dots\dots (5)$$

だいち2号画像(図8)の画像領域内の $\psi_{opt}$ 、 $\chi_{opt}$ 、及び $\gamma_{opt}$ のヒストグラムを図11に示す。

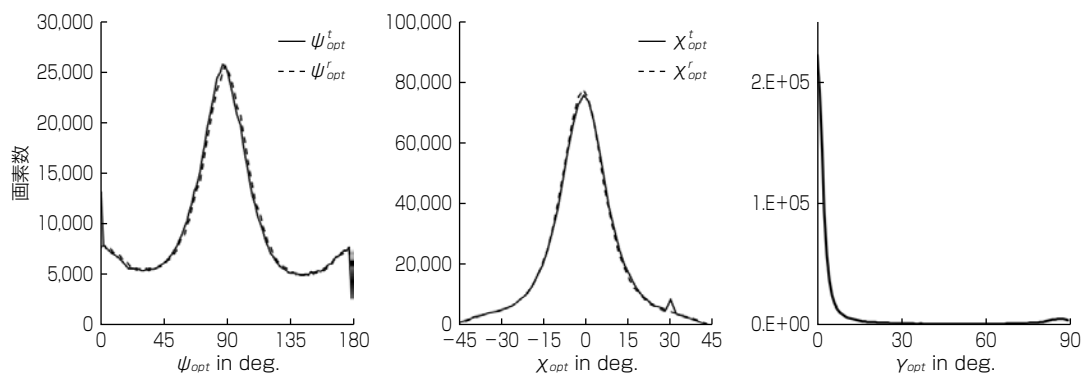


図11-だいち2号画像(図8)の $\psi_{opt}$ 、 $\chi_{opt}$ 、及び $\gamma_{opt}$ のヒストグラム

$\psi_{\text{opt}}$ と $\chi_{\text{opt}}$ は、送信と受信ではほぼ等しい分布を示しており、それぞれ $90^\circ$  (水平偏波)と $0^\circ$  (直線偏波)付近を平均値に持つ。また、 $\gamma_{\text{opt}}$ は、ほとんどの画素が $0^\circ$  (送受信の偏波状態が等しい)を示しており、当該地域は全体としてHH偏波( $90^\circ$ )に感度が高いが、それ以外の傾き角にも相当分布していることが、定量的に明らかになった。

## 5. む す び

偏波SAR画像について、時系列感度を最大化し、任意の観測対象に対する変化を定量的に計測する手法を述べた。提案手法について、だいち2号で時系列観測された偏波SAR画像に適用し、差分を最大化できることを確認した。また、各画素について得られた最適偏波状態そのものを利用して、より多面的な観測対象の分析ができることも示した。当社は、地球温暖化対策に向けた森林生育状況の把握や、近年急増する線状降水帯による洪水等に伴う被災域の抽出などにこの技術を適用し、培ってきた偏波SAR衛星開発技術と組み合わせることで、地球規模のグローバルな地表の変化を定量的かつ精緻に把握できる技術の提供に引き続き取り組んでいく。

## 参 考 文 献

- (1) Jakob, J. van Zyl : On the Importance of Polarization in Radar Scattering Problems, Ph. D. Thesis, California Institute of Technology (1985)
- (2) Swartz, A. A., et al. : The Optimal Polarizations for Achieving Maximum Contrast in Radar Images, Journal of Geophysical Research, **93**, No.B12, 15252~15260 (1988)

~~~~~


最先端プロセスの特性を基にしたリアルタイム誤り訂正回路の低電力設計

石井健二*
Kenji Ishii
吉田英夫*
Hideo Yoshida
平野 進*
Susumu Hirano

小西良明*
Yoshiaki Konishi

*情報技術総合研究所

*Low Power Design of Real-time Forward Error Correction Circuit
Based on Characteristics of State-of-the-art Processes*

要 旨

デジタル社会の実現で、デジタル信号処理の高速化と低消費電力化は避けて通ることのできない課題である。この相反する特性を同時に実現するには、デジタル信号処理技術の高度化と半導体プロセスの微細化による集積技術の進展だけでなく、システムやアプリケーションの特性を考慮した低電力化デジタル設計技術が重要になる。三菱電機は、大容量光通信向け誤り訂正回路のASIC(Application Specific Integrated Circuit)開発を通して、最先端微細化プロセスを適用した低電力化設計技術を開発した。プロセスの特性を前提とした物理合成結果に基づく符号と回路アーキテクチャの最適化によって実現性の高い回路設計を実現するとともに、装置運用上の特性を考慮した回路制御によって最大動作時から40%以上の低電力効果が得られた。

1. ま え が き

デジタルトランスフォーメーション(DX)に代表されるデジタル技術を活用した社会の変革が進んでいる。このようなデジタル技術の活用で、デジタル信号処理の大容量化とともに低消費電力化が恒久課題になっている。通信業界では、5G(第5世代移動通信システム)の商用化やDXサービスの普及によって、通信トラフィック需要が急拡大している。そのようなトラフィック需要に対応するため、光通信では400Gbpsを超えるシステムの導入とともに、更なる高速化として800Gbps以上のスループットを実現する通信方式の研究開発が進められている。通信速度の向上には、誤り訂正技術を始めとする信号処理技術の進展と半導体プロセスの微細化による集積技術の恩恵に帰するところが大きく、これまでに並列化や動作周波数の向上による大容量化とともに、プロセスの微細化による低消費電力化が進められてきた。しかしながら、近年では動作周波数の向上が限界に達しており、高速処理の実現を並列処理に頼らざるを得ない状況である。並列化による消費電力の増大に対してプロセス微細化による消費電力の削減効果が小さく、消費電力の要求を満足できなくなっている。特に、誤り訂正回路の消費電力は装置の電力消費の中でも大きな比重を占めており、近年その低電力化が重要視されている。本稿では、まず低電力化の対象とする誤り訂正符号回路のあらましについて述べた後、回路素子実装とアルゴリズム処理のそれぞれの観点から開発を行った低電力化技術について述べる。

2. 光通信向け誤り訂正符号の技術動向

長距離で大容量伝送を誤りなく実現するために、光通信網での誤り訂正符号には訂正能力に優れた符号が使用される。そのような訂正能力向上への要求から、Low-Density Parity-Check(LDPC)符号などの訂正能力に優れた軟判定符号と、軟判定符号に比べて訂正性能は劣るものの実装性及び消費電力に優れた硬判定符号を組み合わせた接続符号が採用されることが多い。この章では、このLDPC符号について述べる。

2.1 LDPC符号

LDPC符号は1960年代にGallagerによって提案されていた⁽¹⁾。しかし、演算量が非常に大きな符号であったため実用化には至らなかった。しかし、近年の半導体集積化技術の向上によって、性能に見合うだけの集積回路が実現できるようになったことから、衛星デジタル放送や無線通信の規格などで採用されるようになった。LDPC符号は軟判定繰返し復号によって、シャノン限界に迫る性能を得られることが理論的な数値計算で実証されており、高いスループットを持つ回路実装ができる点が特徴である。LDPC符号は、図1に示すようなパリティビット数×符号長の二次元行列で、疎("0"が

多く“1”が少ない)なパリティ検査行列によって定義される符号である。受信信号のデジタル値が正しい符号語であった場合、検査行列とかけ合わせることで全零のベクトルが生成され、誤りの有無を検出できる。

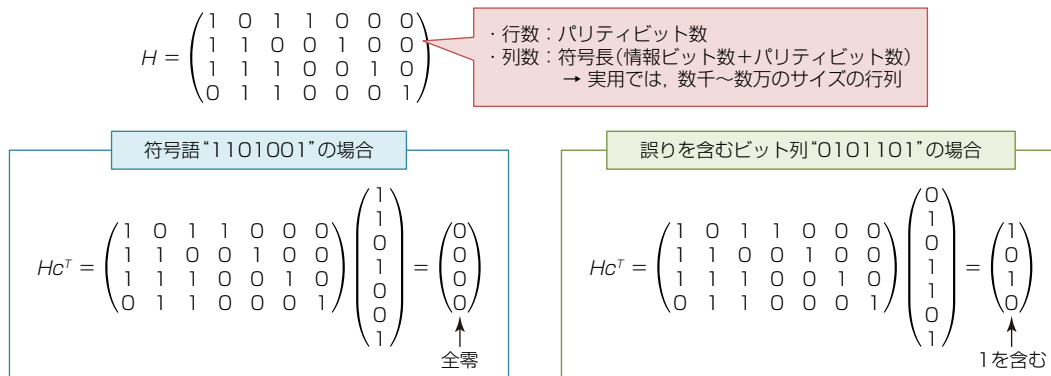


図1-LDPC符号のパリティ検査行列の例

2.2 LDPC符号の復号アルゴリズム

LDPC符号の復号処理は、パリティ検査行列を2部グラフで表現したタナーグラフによって表現される。検査行列の列方向に対応したビットノードと、行方向に対応したチェックノードを設けて、検査行列で“1”が記載された箇所に枝を設ける。図2は、図1のパリティ検査行列のタナーグラフを示したものである。復号処理はタナーグラフの接続関係を利用し、行演算と列演算によって各ノードに入力された枝に紐(ひも)づく α と β を交互に更新していく。行演算では、チェックノードに入力される枝の値 α を更新する。よく知られた復号方法としてSum-Product法があり、式(1)及び式(2)に基づいて値を更新する。

$$\alpha_{mn} = (\prod_{n' \in A(m) \setminus n} \text{sign}(\beta_{mn'})) f(\sum_{n' \in A(m) \setminus n} f(|\beta_{mn'}|)) \quad \cdots \cdots (1)$$

$$f(x) = \ln\{(\exp(x)+1)/(\exp(x)-1)\} \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで、 $\text{sign}(\cdot)$ は符号関数を意味している。また、列演算では式(3)及び式(4)によって、各枝の値 β を更新していく。

$$\beta_{mn} = \sum_{m' \in B(n) \setminus m} \alpha_{m'n} + \lambda_n \quad \cdots \cdots (3)$$

$$\lambda_n = \ln\{(P(y_n|x_n=0))/(P(y_n|x_n=1))\} \quad \cdots \cdots (4)$$

各ビットノードの復号結果については、

$$X_n = \lambda_n + \sum_{m' \in B(n)} \alpha_{m'n} \quad \cdots \cdots (5)$$

の符号によって決定される。

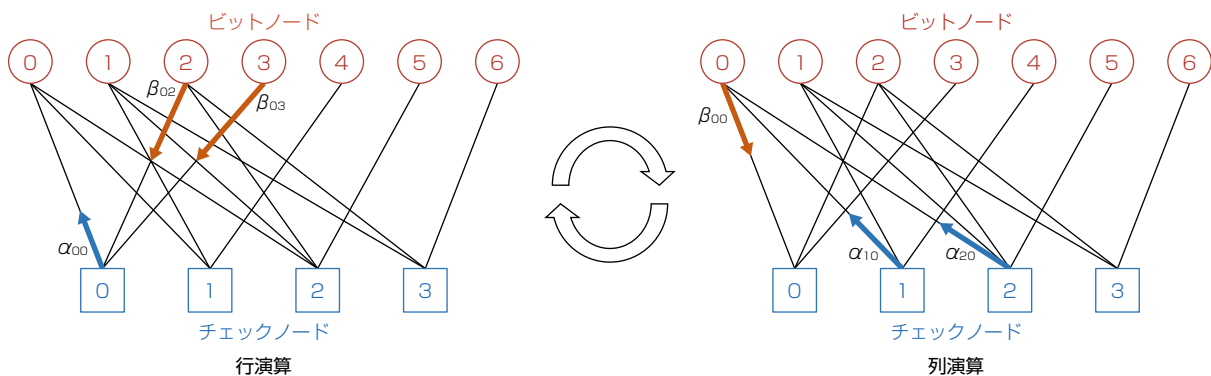


図2-タナーグラフを用いたLDPC符号の復号処理

2.3 Quasi Cyclic-LDPC

LDPC符号は定義が広い符号であり、パリティ検査行列の設計は自由度が高い。検査行列の“1”の位置を特定の規則に基づいてランダムに配置し、誤り訂正性能の良い検査行列を探索する方法なども知られているが、実用的な符号長を持つLDPC符号ではタナグラフの配線が膨大かつ不規則になることから、復号回路の実装設計難易度は非常に高い。LDPC符号を設計する上では、誤り訂正性能だけでなく、回路化が容易で、さらに低演算量で高性能を実現できる検査行列の設計が重要になる。

誤り訂正性能と回路実装性を兼ね備えた符号としてQC(Quasi Cyclic)-LDPC符号の検討が進められている。QC-LDPC符号は、パリティ検査行列の非零成分が、単位行列の巡回シフトによって得られる巡回行列で構成された符号である。図3にQC-LDPC符号の復号回路のRTL(Register Transfer Level)構成図を示す。LDPC符号のパリティ検査行列が巡回行列によって構成されず、ランダムに構成された場合、第1階層のLDPC復号回路の直下に数千から数万の行演算コアや列演算コアのモジュールが配置され、それぞれがランダムに接続されることで配線混雑やタイミング違反の温床になる。しかしQC-LDPC符号の構成を取ることで、巡回行列サイズ単位で行演算ブロック、列演算ブロックをまとめることが可能であり、配線もブロック単位で取り扱うことが可能になる。またこのようにブロックでまとめることによって、このブロック単位での回路レイアウト最適化やレイアウト配置調整が可能であり、問題が発生した際の原因特定も容易になる。QC-LDPC符号のパリティ検査行列の設計では、この巡回行列の大きさやシフト量も重要なパラメータであり、復号回路アーキテクチャ及びプロセスルールに整合するよう最適化していく必要がある。

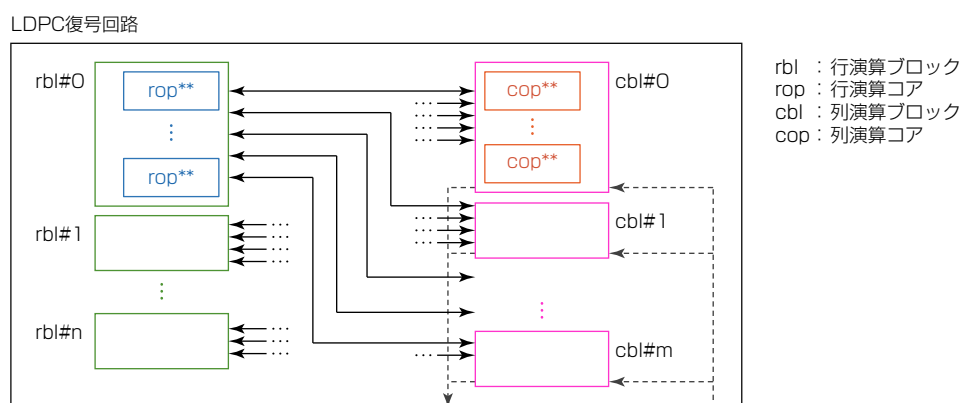


図3-QC-LDPC符号 復号回路のRTL構成例

3. 回路特性を考慮したQC-LDPC符号と復号回路アーキテクチャの探索

ハードウェア化に適した符号であるQC-LDPC符号であっても、配線数は削減できず、依然としてレイアウト設計難易度が高いことから、要求仕様を満たすには試行錯誤が必要になる。近年の微細化プロセスではセル単体が小型化／高速化することで、小型になったセルへと配線が集中することによる配線混雑や、混雑回避のための配線遅延によるタイミング違反を生じやすくなっている。タイミング違反を解決するための最も容易な手段は、回路高速化の実現のために用意される高速セルを使用することである。しかし、このセルは電流を多く流すことで高速化を実現しており、リーク電流（動作に関係なく流れる電流）によって消費電力が増加するというデメリットを持っている。さらに、チップ一つ一つのセルは微細化によって高速化されているものの、プロセスの製造ばらつき、電圧、温度によってそれらの特性が変動し、動作周波数に対する振る舞いが変わることから、実際に高速化するためには考慮すべき条件が多く複雑になってきている。プロセスルールによっても条件が変わるため、適用するプロセスルールや符号、復号アルゴリズムに応じて、動作周波数や回路アーキテクチャを最適なものに設計していく必要がある⁽²⁾。また、パリティ検査行列が、誤り訂正性能だけでなく回路規模にも影響を与えることから、復号回路の物理合成結果に基づいた符号設計を行うフィードバック設計もまた必要である。

表 1 に、光通信用 ASIC を志向した 800Gbps スループットの誤り訂正回路について、設計最適化の試行結果を示す。この設計では、符号設計と回路設計の両面から目標性能を満たすことを目標とした。方式 1 では、誤り訂正性能と消費電力は目標を満たしたが、タイミング違反や配線混雑が発生し、実現性の低い結果になった。方式 2 では、配線混雑を回避するためにパイプライン化を行ったが回路実現性に目途が得られないことから、符号長や巡回行列のサイズを一新した符号 B や符号 C といった新たな符号設計と復号回路アーキテクチャへのフィードバックがかかった。最終的には方式 3 で策定した回路アーキテクチャに再設計した符号 C と動作周波数の最適化を加えた方式 6 によって、目標を全て満足した誤り訂正符号の設計を実現した。

表 1 - 800Gbps スループットの誤り訂正復号回路設計結果

方式	改訂内容概要	符号 (巡回行列サイズ)	訂正 性能	消費電力(W) (800Gbps)	軟判定復号回路 ゲート数(MG)	誤り訂正回路 全体ゲート数(MG)	タイミング 違反(ns)	配線混雑 (%)	高速セル 使用率(%)
目標値	-	-	○	2.3W以下	11MG以下	-	-0.01	0.1%以下	10%以下
方式 1	1 blk 当たり 400G, 2 並列構成	符号 A (96)	○	1.92	11.5	54.3	-0.19	39.00	32.36
方式 2	パイプライン復号処理	符号 A (96)	○	2.13	13.4	60.8	-0.54	1.24	29.69
方式 3	QC-LDPC 符号の短符号長化 1 blk 当たり 100G, 8 並列構成	符号 B (64)	△	2.88	10.6	78.6	-0.40	0.10	37.72
方式 4	方式 3 の復号演算ビット幅削減	符号 B (64)	×	2.48	8.9	67.2	-0.27	0.15	30.94
方式 5	QC-LDPC 符号の短符号長化 連接硬判定符号の高性能化	符号 C (64)	○	2.75	8.7	82.0	-0.11	0.12	22.08
方式 6	動作周波数 1/2 適用 1 blk 当たり 100G, 8 並列構成	符号 C (64)	○	2.30	10.9	105.2	0	0.09	0.27

4. 装置特性を考慮した復号回路制御による動的低電力手法

誤り訂正復号処理回路は対応する伝送容量の増加と動作周波数や並列展開数との間にトレードオフがあり、最先端の微細化プロセス技術の適用を前提としても、近年の大容量化に対する要求を低電力で実現することは難しく、復号処理の簡易化や回路実装技術単体による静的な低電力化には限界がある。そこで、装置の運用上の特性を考慮したアルゴリズムと協調した動的な回路制御による低電力が必要になる。

2 章で述べたとおり、光通信に適用される QC-LDPC 符号は、軟判定の繰り返し復号によって高い誤り訂正性能を実現する。高い誤り訂正性能を持つことによって、伝送路での誤りの発生を許容でき、伝送距離の延伸が可能になるが、光通信装置の運用を考慮した場合、誤り訂正限界に対してマージンを持った領域で運用することが一般的である。また、ネットワークポロジーに応じて伝送距離が異なり、最大伝送距離より短い伝送距離の通信路も多く存在する。実際の運用領域では、誤り訂正限界付近に比べて信号品質の高い受信信号が得られることから、毎符号で必ずしも全回数の復号処理を必要とするわけではない。そこで、符号語単位で信号劣化状態を監視し、不要な演算を避けるよう復号回路を動的に停止することによって、消費電力を低減することが可能になる⁽³⁾。図 4 に信号品質に応じた復号演算制御による電力

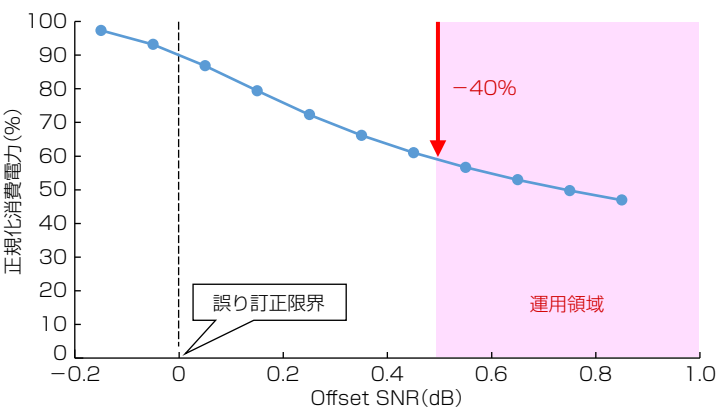


図 4 - 信号品質に応じた復号演算制御による電力削減効果

削減効果を示す。横軸は誤り訂正限界を基準にしたOffset SNR(Signal to Noise Ratio), 縦軸は復号回路の動的停止がない場合の電力を基準とした正規化消費電力を示す。誤り訂正限界やそれよりも特性の悪い(負側)の伝送路では誤り訂正復号回路が最大の繰り返し復号動作を行うことから100%に迫る消費電力になる。それに対して, 誤り訂正限界に対して0.5dB程度以上のマージンを持った領域で運用することで, 最大動作時から40%に迫る消費電力の削減が可能な結果が得られている。

5. む す び

800Gbps大容量光通信向けLDPC符号を例に, 最先端微細化プロセスによる誤り訂正回路の低電力化設計技術を述べた。通信網の大容量化に従って, 訂正性能の向上と同時に低消費電力化の相反する特性が求められる中, これまでの処理の簡易化や微細化プロセスの進展だけでは, 低電力化に対する要求が満足できなくなっている。それらを実現するため, 本稿で述べた装置運用上の特性を生かした動的な低電力化がますます重要になってくると考えられる。

また, 本稿では最先端微細化プロセスによる光通信用誤り訂正回路のASIC開発を例としたが, 微細化が進むFPGA(Field Programmable Gate Array)による誤り訂正回路の低電力化でも有効である。FPGAでは, デバイスごとに使用可能な回路リソースが限られており, 3章に示す符号設計と回路設計の両面からの最適化とともに, システム/アプリケーション特性と実装特性とを統合したデジタル設計技術の更なる高度化で実現が可能となる。

参 考 文 献

- (1) Gallager, R. G. : Low-Density Parity-Check Code, Research Monograph series, Cambridge, MIT Press (1963)
- (2) 平野 進, ほか: LSI開発の下流工程での性能・回路規模・消費電力改善技術, 三菱電機技報, **96**, No.9, 336~339 (2022)
- (3) 小西良明, ほか: 通信向け高速・低電力誤り訂正符号化技術, 電子情報通信学会技術研究報告, **120**, No.137, PN2020-18 (2020)

三菱電機株式会社