Sumitomo Heavy Industries Technical Review

Nov.2026
No.220 ISSN 2760-8018

住友重機械 技報



ロボティクス･自動化特集

Special Issue for Robotics and Automation Technology

住友重機械技報 No. 220 2026

巻頭言

「ロボティクス・自動化特集号」に寄せて　中條晃伸

ロボティクス・自動化特集

論文・報告

単船倉型内航ばら積み貨物船向け連続式アンローダの自動化技術開発　茶屋道　暢，原　孝介，宮澤宣嗣，　臼井道太郎　1

SDV 実現のためのロボット開発用クラウド基盤の構築　中尾拓真，藤井北斗　5

コンパクト・高減速比遊星ローラ機構の設計と試作評価　南雲稔也，長谷川豪太　9

磁束変調型磁気ギヤを用いた磁気柔軟アクチュエータの基礎検証　小泉　光，水野博之，山本泰三　13

技術解説

生成 AI を活用した建設機械の取扱説明書検索アプリ InCab@Nav　原　孝介，上甲　隼　17

壁面走行ロボットによる鋼構造物非破壊検査の実用化に向けた取組み　衞藤晴彦，豊嶋　崇，村田勇樹，Mohak VYAS　19

新製品紹介

分散制御用インバータ DX-620シリーズ　21

論文・報告

カルシウムスルホネート系複合トライボフィルムの耐摩耗性向上メカニズム　林　優美，菖蒲祐輔，石塚正幸　23

技術解説

系統インフラとしての LAES と運用高度化技術　秋元慎介　27

新製品紹介

SH250-8 金属リサイクル機械　29

Sumitomo Heavy Industries Technical Review

No. 220 2026

Message for "Special Issue for Robotics and Automation Technology" Terunobu NAKAJYO

Special Issue for Robotics and Automation Technology

T/PAPER

Automation of Continuous Ship Unloaders for Single-Hold Coastal Bulk Carriers
Toru CHAYAMICHI, Kosuke HARA, Noritsugu MIYAZAWA, Dotaro USUI 1

Building Cloud Platform for Robot Development to Realize SDVs
Takuma NAKAO, Hokuto FUJII 5

Design and Evaluation of Compact, High-Reduction-Ratio Planetary Roller Drive
Toshiya NAGUMO, Gota HASEGAWA 9

Basic Verification of Magnetic Flexible Actuator Using Flux-Modulated Magnetic Gear
Hikari KOIZUMI, Hiroyuki MIZUNO, Taizo YAMAMOTO 13

T/INVITATION

InCab@Nav: Generative AI-Based Manual Search Application for Construction Machinery
Kosuke HARA, Hayato JOKO 17

Toward Practical NDT of Steel Structures Using Wall-Climbing Robot
Haruhiko ETO, Takashi TOYOSHIMA, Yuki MURATA, Mohak VYAS 19

NEW PRODUCT

Distributed Control Inverter DX-620 Series 21

T/PAPER

Mechanism of Enhanced Wear Resistance in Calcium Sulfonate-Based Composite Tribofilms
Yumi HAYASHI, Yusuke AYAME, Masayuki ISHIZUKA 23

T/INVITATION

LAES for Grid Infrastructure and Advanced Operation Technologies
Shinsuke AKIMOTO 27

NEW PRODUCT

SH250-8 Material Recycle Machine 29

「ロボティクス・自動化特集号」に寄せて



技術研究所長　**中 條 晃 伸**

近年，世界はさまざまな社会課題に直面しています。少子高齢化による労働力不足，物流需要の拡大，インフラの老朽化，さらには災害対応など，年々複雑さも増すばかりです。こうした課題の解決に向けて，ロボティクス・自動化技術への期待はかつてないほど高まっています。従来，ロボティクス・自動化技術は生産現場を中心に活用されてきました。現在ではその役割が大きく拡大し，社会インフラの維持，安全で安心な作業環境の実現，人手不足への対応など，社会そのものを支える重要な基盤技術となりつつあるといっていいでしょう。

住友重機械グループは，長年にわたり培ってきた機械技術，制御技術，駆動技術を強みとして，多様な産業機械やシステムを提供してきました。特に減速機やアクチュエータに代表される駆動技術と制御技術は，ロボットの性能を支える重要なコア技術です。ロボティクス・自動化技術は，センサ，制御，駆動，ソフトウエアを統合したプラットフォーム技術であり，当社の保有する技術資産が大きな価値を発揮する分野といえます。

近年，このロボティクス・自動化技術に大きな変革をもたらしているのがAIの進展です。特に生成AIの発展により，ソフトウエア開発の生産性向上や設計・検証プロセスの高度化が進み，機械システムの開発手法そのものが変わり始めています。これまでの機械システムは，人が定義したルールや制御モデルに基づいて動作していましたが，今後は環境を認識し，データを活用しながら自律的に判断するシステムへとさらなる発展が期待されています。

この潮流は，自動車業界で進展するSDV（Software Defined Vehicle）にも象徴され，ソフトウエアによって継続的に機能や価値を向上させる考え方が，今後ロボティクス分野にも広がると想定されます。ロボットや産業機械も，導入時点で完成する製品ではなく，運用データを活用しながら進化し続ける存在へと変化していくでしょう。

一方で，AIやソフトウエアの重要性が高まるほど，それらを現実世界で確実な価値へと結びつける機械技術や制御技術の重要性も増しています。ロボティクスの本質は，機械・制御・ソフトウエア・AIの融合にあります。住友重機械グループならではの機械技術，制御技術，駆動技術を基盤に，社会課題の解決に貢献するロボティクス・自動化技術・製品の創出に取り組んでいく所存です。

本特集では，自動化システム，AI活用技術，駆動技術など，住友重機械グループが取り組む最新のロボティクス・自動化技術を紹介しています。これらの技術が社会課題の解決と新たな価値創造につながることを期待するとともに，本特集がロボティクス・自動化技術により変わっていく未来社会を考える一助となれば幸いです。

単船倉型内航ばら積み貨物船向け連続式アンローダの自動化技術開発

Automation of Continuous Ship Unloaders for Single-Hold Coastal Bulk Carriers

●茶屋道　暢*　原　孝介*　宮澤宣嗣*　臼井道太郎*
Toru CHAYAMICHI　Kosuke HARA　Noritsugu MIYAZAWA　Dotaro USUI

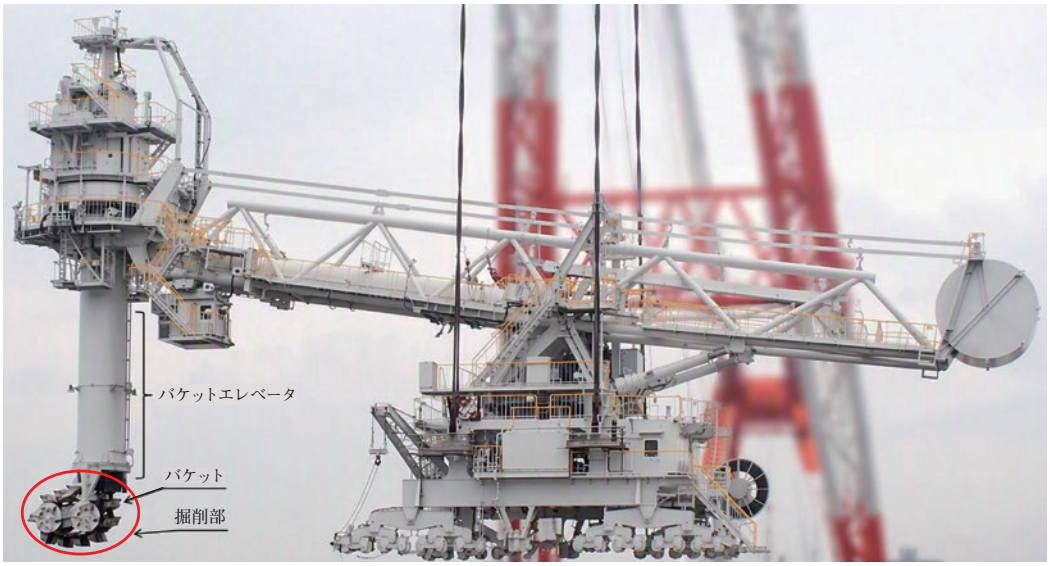


図1　CSU外観
External view of CSU

単船倉型の内航ばら積み貨物船向けに連続式アンローダ（CSU：Continuous Ship Unloader）の自動化システムを開発した。CSUは高効率な荷役が可能である一方，船倉壁面近傍での精密な操作を要することから，高度な技能が要求される。本システムは，既設CSUへのレトロフィットを前提とし，LiDARによる船位置・荷山高さ検出，船体との衝突監視，センサ自己診断，荷役軌道生成および荷役量一定制御を組み合わせることで，自動荷役を実現した。実荷役試験では，船倉壁面への安全な接近，安定した荷役量の維持，底荷工程終了時の残荷量低減を達成するとともに，手動運転と同等もしくはそれ以上の荷役効率を確認した。本システムは2026年３月に上市され，オペレータ負荷の軽減や将来的な熟練者不足への対応に寄与することが期待される。

An automated continuous ship unloader (CSU) system was developed for single-hold coastal bulk carriers. Although CSUs enable highly efficient cargo handling, their operation near hold walls requires precise machine control and a high level of operator skill. The developed system can be retrofitted to existing CSUs and integrates LiDAR-based vessel position and cargo-surface height detection, collision monitoring, sensor self-diagnostics, unloading trajectory generation, and constant unloading-rate control. Full-scale cargo-handling tests confirmed safe operation near hold walls, stable unloading performance, and reduced residual cargo after the bottom-cargo handling stage. The system also achieved unloading efficiency equivalent to or higher than that of manual operation. Commercialized in March 2026, the system is expected to reduce operator workload and help address the anticipated shortage of skilled operators.

1　まえがき

連続式アンローダ（CSU）は，電力会社や製鉄会社の岸壁で使用される大型機械であり，ばら積み貨物船から石炭や鉄鉱石などの貨物を陸揚げする荷役機械である。**図1**に，CSUの外観を示す。掘削部およびバケットエレベータ部は，チェーンで連結された複数のバケットが循環する構造となっており，バケット内に荷をかき入れることで，バケットエレベータ，機内コンベヤなどを通過して地上コンベヤへと搬送される。また，CSUは多関節リンク構造になっており，それらを動作させて周回軌道を形成することで，船倉内の荷を陸揚げする。

CSUが荷役対象とするばら積み貨物船は大別すると，単一の船倉を有して国内輸送を行う単船倉型の内航ばら積み貨物船と，複数の船倉を有して国際輸送を行う多船倉型の外航ばら積み貨物船の２種類に分けられる。

住友重機械搬送システム株式会社（SHI-MH）と当社技術研究所は，単船倉型の内航ばら積み貨物船向けCSUの自動化技術を開発し，2026年３月にSHI-MHより上市した。本報では，その自動化システムについて紹介する。

2　自動化の背景と求められる性能

CSUと別方式であるグラブバケット式橋形アンローダが，グラブバケットを投入した箇所を点として荷役するのに

＊技術本部

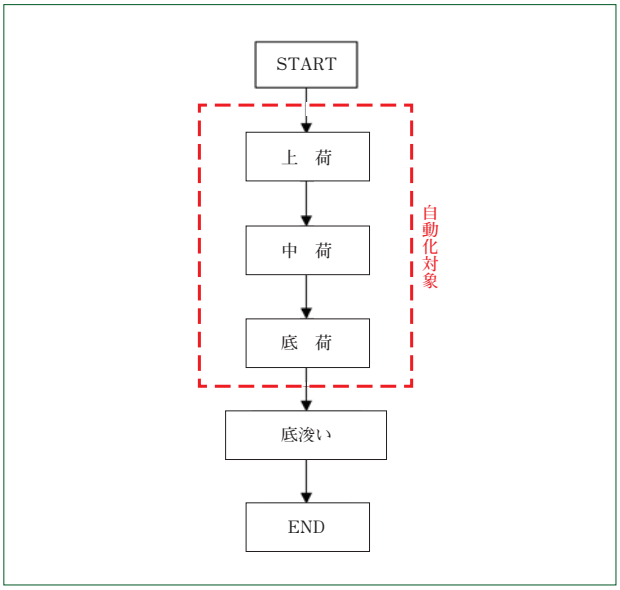


図２　CSUの荷役工程と自動化対象範囲
CSU cargo-handling stages and scope of automation

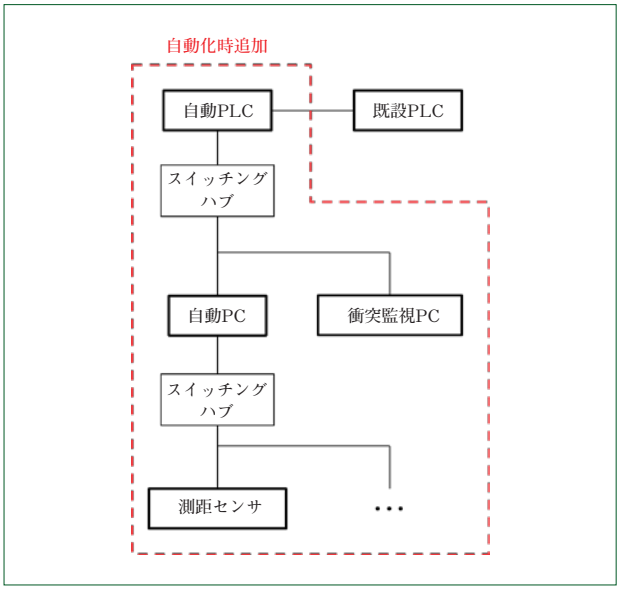


図３　自動化システムの構成
Automation system configuration

対して，CSUは連続するバケットにより，面として荷役を行う。故に，荷役方式の観点では，CSUは高効率な荷役を実現しやすいといえる。一方で，船倉壁面に接近した荷役を行う場合には，高い技能が要求されるので，習熟には長い期間を要する。加えて，高さ数十メートルに及ぶ巨大な機械を数十センチの精度で操作することが要求されることから，オペレータへの負荷が大きい作業となっている。そのため，労働人口の減少に伴い，将来的に熟練オペレータが不足する懸念や，肉体的・精神的負荷の高い作業からオペレータを開放するといった観点から，CSU荷役の自動化に対する要求が高まりを見せている。

図２に，ばら積み船からの荷役工程と本システムの自動化対象範囲を示す。荷役は上荷，中荷，底荷，底浚いの手順で進められ，荷役最終盤の底浚い作業では，残り少なくなった荷を集約する目的で船倉内にブルドーザーなどの重機が投入される。CSU荷役における要点の一つとして挙げられるのは，周回荷役による荷の取り切りである。底浚い作業は，ほかの工程と比較して荷役効率が悪いことから，可能な限り底浚いより前の周回荷役工程で残荷量を少なくすることが肝要となる。本システムは，上荷から底荷までの工程を対象とし，重機やハッチ内作業員など，ほかの作業が交錯する底浚いは対象外としている。

また，CSU本体は，船倉の壁面に対して数十センチの距離まで接近して荷役することが求められる。なぜなら，壁面から離れた荷役は，壁際の荷の取り残しが生じるだけでなく，周回を重ねて蓄積した荷が崩落し，CSUの掘削部が荷で埋まるという懸念があるからである。埋まった場合，CSUは過負荷となりインターロック停止し，復旧動作が必要となる。これは荷役効率に悪影響を与える。

さらに，荷役量にムラがあってはならないので，地上コンベヤなど，搬送設備全体への影響を考慮した均一な荷役が求められる。

CSUを自動化するには，これらの荷役要点を手動オペレータと同等以上に実現することが求められる。したがって，求められる性能はおおむね次の通りとなる。

・船壁に接近しながら衝突せずに荷役すること
・底荷後の残荷量が規定値以下であること
・一定かつ高効率に荷役すること

これらの要求仕様を満たすべく，要素機能に分解して自動システムを構築した。

3　自動化範囲とシステム構成

本自動化は，既存のCSUに対してレトロフィットするかたちで実現した。**図３**に，自動化システムの構成を示す。本システムは，既設CSUに自動運転用の制御装置，計算機，測距センサおよび監視装置を追加することで，自動荷役を実現するとともに，船倉形状，荷山高さおよびCSUの自己位置を用いて，荷役軌道の生成，荷役量の調整，船体との接近監視を行う。

追加した計算機は自動PLC，自動PC，衝突監視PCである。自動PLCは，軌道生成などの自動運転に関するロジックが組み込まれたものであり，自動PCは，高い計算能力を要するLiDARの点群処理を担いながら船の位置を計算する。衝突監視PCは，自動PCで得られた船の位置とCSUの自己位置から，お互いの距離を計算する。LiDARはバケットエレベータ部に設置され，船位置検出および荷山高さ検出，LiDAR自身の健全性を監視する自己診断機能に利用される。

4　要素機能

本システムの機能は，船倉および荷山の状態を把握する認識機能，荷役動作を生成する判断機能，荷役量を調整する制御機能，安全を確保する監視機能に大別される。船位置検出および荷山高さ検出は認識機能に，衝突監視および自己診断は安全監視機能に，軌道生成および荷役量一定制御は判断・制御機能に位置付けられる。本章では，これらの主な要素機能について述べる。

4.1　船位置検出

本システムには，LiDAR点群を利用した船位置検出機能を

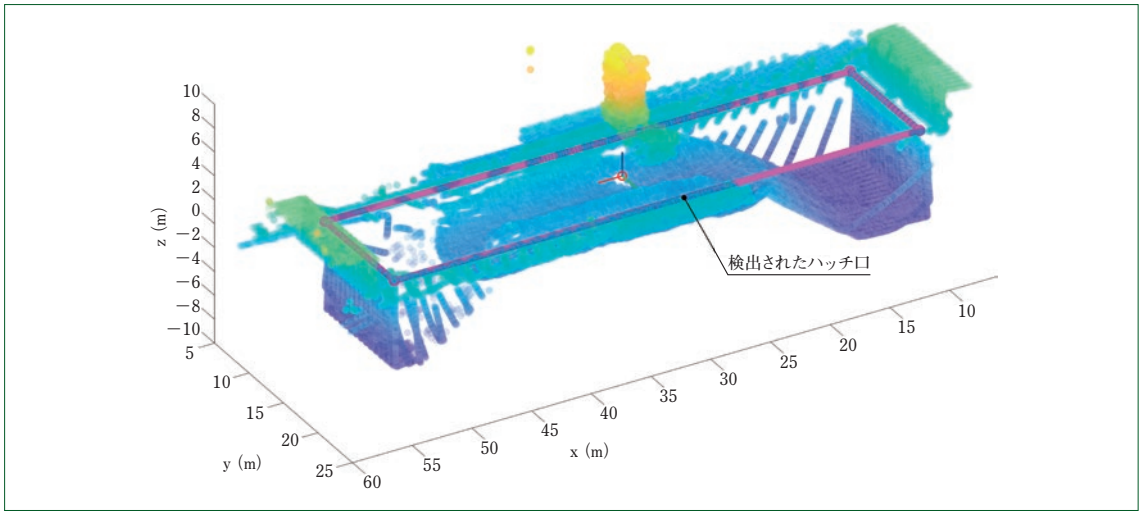


図4　船位置検出
Vessel position detection

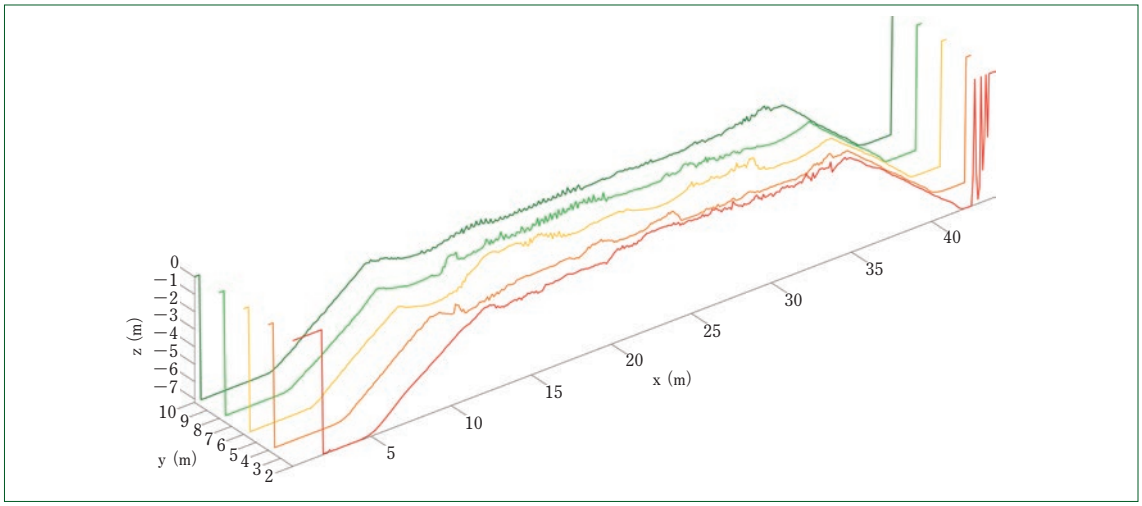


図5　荷山高さマップ
Cargo-surface height map

実装した。安全のため異なる２つの検出方式を並列実行するシステムを採用しており，それぞれが点群処理を実時間で実行している。１つ目は，間接検出と呼称している方式である。**図４**に検出の様子を示す。同方式は，ハッチ口と呼ばれる船倉の開口部のエッジを検出し，時間経過に伴うハッチ口の姿勢変化を非線形モデルに基づく逐次的な状態推定手法によりトラッキングするものである。算出されたハッチ口の姿勢は，後述する衝突監視機能に反映され，従来技術では困難であった船の揺動を考慮したCSUと船倉との距離計算を可能にした。

２つ目は，直接検出と呼称している方式である。間接検出はハッチ口周辺のみの点群を検出に利用していたのに対し，直接検出は，ハッチ口および船倉壁面の点群を利用し，統計モデルに基づく反復的なパラメータ推定手法により船の姿勢を算出する。２手法のいずれかが検出に失敗した場合や，検出結果に大きな齟齬が生じた場合には，自動運転を停止するシステムとなっている。

4.2　荷山高さ検出

船位置検出と同様にLiDARを利用して，船倉内の積荷の点群を取得し，高さマップを形成する機能である。**図５**に，その概略図を示す。マップは規定のグリッドで区切られており，各グリッド高さは，そこに含まれる点群をもとに代表値が算出される。また，点群情報を時間方向にスムージングすることで湯気や舞い上がる粉塵など，外乱の影響を抑制したマップ生成を可能とした。得られたマップは，後述する衝突監視装置に表示されるとともに，自動運転の軌道生成において掘削開始位置や周回動作における反転位置を決定することに利用される。

4.3　衝突監視

与えられた船の寸法情報とCSUの自己位置から，船とCSU本体の間の距離を計算し，接近距離に応じて警報などを発信する安全機能である。**図６**に，衝突監視画面の概略図を示す。同機能は，手動CSUにおいてもオプションとして搭載され多くの実績がある。また，自機や船体により遮蔽されることの多い視野を補助する可視化装置としての役割も担う。自動化システムとして，船位置検出および荷山高さ検出機能と連携することで，インターロック停止を未然に防ぐような衝突回避軌道を生成することが可能となり，安全面や情報量の点でより重要度の高い要素機能となった。

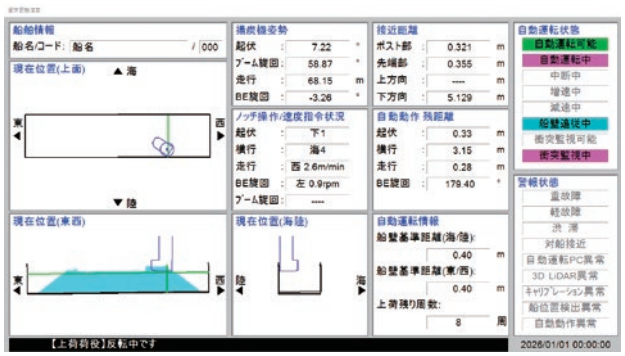


図6　衝突監視画面
Collision monitoring screen



自動荷役開始前　　自動荷役終了後

図7　自動荷役試験
Automated cargo-handling test

4.4　自己診断

LiDAR自身の健全性を診断する機能である。同機能により異常判定された場合は，自動荷役を開始できないようインターロックが作動する。自己診断機能の担う役割の一つは，性能劣化の検出である。万一LiDARが完全に故障し，点群データを送信しなくなった場合は，船位置検出機能の成否判定に基づき自動運転を安全に停止することが可能である。一方，LiDAR内の部分的な測距不良や喪失は，実際の船の姿勢変化と区別することが困難であるが，この自己診断機能により正常時の状態との比較を行い，センサ単体での異常を判定する。

4.5　軌道生成

船位置検出および荷山高さ検出で得られた情報を用いて，周回荷役におけるCSUの動作を決定する機能である。船倉形状，荷山高さおよびCSUの自己位置に基づいて，掘削開始位置や周回動作の範囲を設定し，船倉壁面への接近，残荷量の低減，荷役量の安定化を両立するよう荷役動作を生成する。

4.6　荷役量一定制御

CSUによる荷役は搬送設備全体を考慮した均一さが要求される。一方で，荷表面の凹凸や船の揺動など，これを阻害するさまざまな要因が挙げられる。本システムでは，荷役量一定制御として，バケットへの荷の充填量に応じてCSUの動作を最適化することで高充填かつ一定な荷役を実現した。これによりバケットエレベータ，ブームコンベヤを通過した荷は過不足なくホッパに蓄積され，払い出しコンベヤにより後方設備へ安定的に搬送される。また，バケット内の荷の量が一定となることで，CSU本体への負荷変動が抑制され，寿命の延長も期待できる。

5　試験

要素機能の開発および実機実装を順次行い，自動荷役を実現した。具体的には，センシング部分の機能開発およびオフライン試験，手動オペレータによる荷役中のセンシング部分のオンライン試験および精度検証，自動運転による実荷役試験の順で実装した。

このうち実荷役試験では，自動荷役の成立性を確認するべく，船体との接近監視，荷山高さ検出に基づく周回荷役，荷役量の安定性，底荷終了時の残荷量を主な評価項目とした。特に，最終段階の実荷役試験では約２年間にわたり試験と改良を繰り返し，荷役軌道の高度化や残荷量削減に取り組んだ。また，適用対象として定めた複数の船に対し，船倉寸法や一部形状の違いを考慮した調整および検証を実施した。さらに，雨環境下での運転試験を通じて，所定条件下での自動荷役の継続性を検証した。

性能指標には，荷役効率と残荷量を用いた。荷役効率に関しては，上荷および中荷は，手動運転と比較して掘削深さを浅く，周回数を多く行う方策をとり，高効率な荷役を実現した。また，浅い掘削を行うことにより，バケットチェーンへの負荷が低減され，寿命の伸長が期待される。さらに，船位置検出や衝突監視機能により適切な離隔距離を維持した荷役を行うことができ，衝突によるインターロック停止を起こさずに荷役可能である。

残荷量としては，重量ベースで自動運転開始時，自動運転終了時，手動による底浚い終了時それぞれの荷役量から積荷の除去率を算出した。除去率は最大で96.6％であった。**図7**に，試験時の様子を示す。左側が自動運転開始前，右側が終了後である。これは，次工程の重機による底浚いを開始するのに十分な除去率である。

これらの結果から，本システムは船倉壁面への接近，残荷量の低減，荷役量の安定化というCSU荷役で重要となる要求に対して，実荷役環境で有効に機能することが確認できた。特に，手動オペレータと同等の所要時間を達成したことは，自動化による作業負荷低減と荷役効率の両立を示す結果といえる。

6　むすび

(1) CSU自動化システムの開発により，手動と同等以上の荷役効率での自動荷役を実現し，2026年にSHI-MHよりこれを上市した。
(2) 測距センサによる船位置検出機能をはじめとする各種要素機能を開発し，実装している。
(3) 上荷から底荷までの工程を自動化し，手動荷役と同等の除去率および荷役時間を達成した。
(4) 自動荷役の実現でオペレータの高負荷作業からの解放，将来的な人員不足対策へ貢献する。

SDV実現のためのロボット開発用クラウド基盤の構築

Building Cloud Platform for Robot Development to Realize SDVs

●中　尾　拓　真*　　藤　井　北　斗*
Takuma NAKAO　　Hokuto FUJII

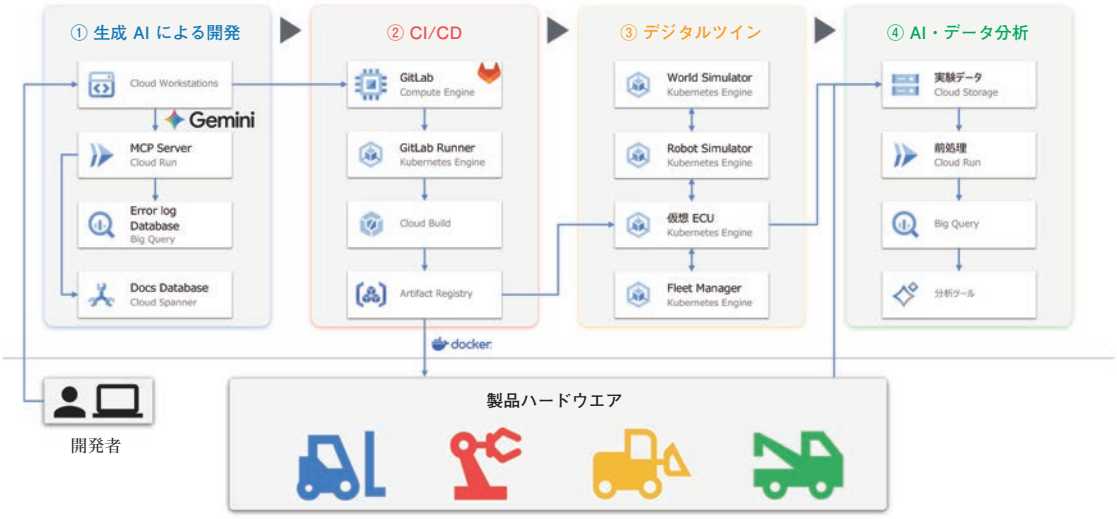


図 1　全体アーキテクチャ
System architecture overview

物流・搬送現場の労働力不足を背景に，ソフトウエアアップデートによって製品機能が進化し続けるSDV（Software Defined Vehicle）の実現が求められている。当社はSDV検証用自動搬送フォークリフト（AGF：Automated Guided Forklift）の開発のための，生成AIとGoogle Cloud*1を用いた次世代のロボット開発基盤を構築した。本基盤は生成AIによる開発支援，CI/CD，デジタルツイン，データ分析の４層を備えている。具体的には，チーム全体でソフトウエア開発環境を統一できるCloud Workstations，エラー解決ナレッジデータベース，CI/CD管理基盤，コードとドキュメントのグラフRAGなどを開発した。また，シミュレータによるAGF動作の机上検証機能も備えており，実機のみでの開発と比較して開発効率が向上した。本クラウド上の開発基盤の構築事例および，SDV検証機であるAGFの開発事例を解説する。

Against the backdrop of labor shortages in logistics and material handling, there is a growing demand for Software-Defined Vehicles (SDVs) whose functionality evolves through continuous software updates. To address this need, we developed a next-generation robot development platform that leverages generative AI and Google Cloud to build an Automated Guided Forklift (AGF) as a vehicle for SDV verification. The platform comprises four layers: generative AI-assisted development support, CI/CD, digital twins, and data analytics. Specifically, it integrates Cloud Workstations to unify the development environment across the team, a knowledge database for error resolution, a CI/CD management infrastructure, and a Graph-RAG system for code and documentation retrieval. Furthermore, the platform enables simulator-based desk verification of AGF behavior, thereby improving development efficiency compared to conventional methods relying solely on physical hardware. This paper describes the architecture of this cloud-based development platform and presents a case study on developing the AGF for SDV verification.

1　はじめに

SDVの価値は，ソフトウエアを通じて製品価値を継続的に高め，新たな収益機会を創出できることである。たとえば，スマートフォンは購入後もアプリ追加やOS更新ができる。これを自動車で実現したものがSDVで，OTA(Over The Air)ソフトウエアの更新によって，自動運転機能の追加や燃費の向上などを実現する事例が見られるようになった(1)。製品の販売後も，ユーザが機能の購入やサービスの契約を継続できることで，新たな付加価値が生まれる。

SDVの場合，ソフトウエアの開発サイクルを短い間隔で実行することが，ユーザの満足度に直結する。常に魅力的な機能やサービスが手元に届き，製品が進化し続けるという体験をユーザに提供することで納入後の顧客満足度向上につながる。

しかしながら，重工業ではソフトウエアの開発サイクルを高速化することは難しい場合が多い。ソフトウエアの開発サイクルは実装，検証，配信，フィードバックの収集からなっており，ハードウエアを伴う開発では，実機検証がそのボトルネックとなる。場所や安全への制約によって実機検証には時間がかかるので，単にソフトウエア実装だけを高速化しても開発サイクルの全体の高速化にはつながりづらい。

＊技術本部

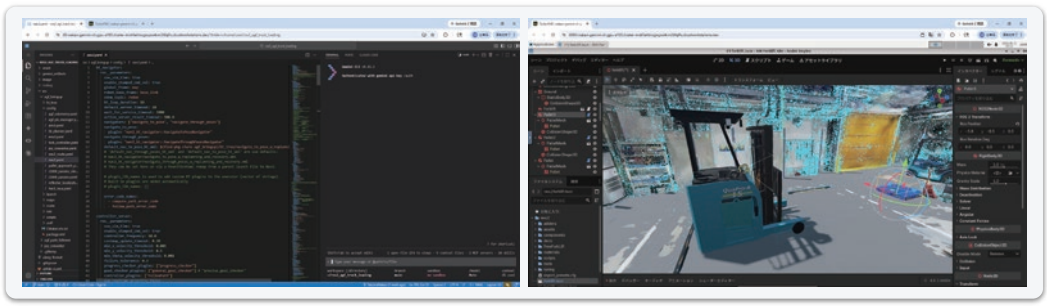


図2　クラウド上の統合開発環境
Integrated development environment in cloud

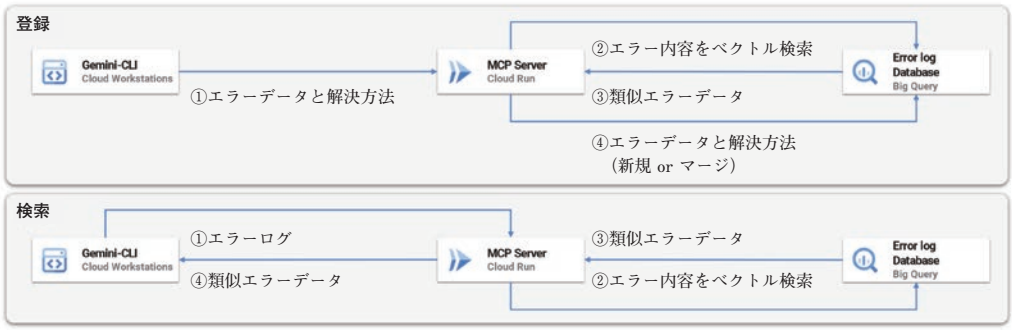


図3　エラー解決ナレッジベースの処理フロー
Workflow of error resolution knowledge base

そこで，SDV実現のためのロボット開発用クラウド基盤を構築し，実際のロボット開発に使用することで有用性を検証した。この開発基盤には，ソフトウエア実装の高速化を目的としたAIコーディングエージェントやCI/CDに加え，実機検証の省力化のためのシミュレータ環境が含まれる。本報ではAGFを検証の対象とした。

2　次世代ロボット開発基盤の全体アーキテクチャ

開発プロセス全体をGoogle Cloud上で安全かつ高速に循環させ，開発全体のリードタイムを短縮することをロボット開発基盤の基本方針とした。

本基盤は，開発加速に向けた要求・要件を満たすべく，次の①～④の機能層から構成される。**図1**に，全体アーキテクチャを示す。

① 生成AIによる開発支援層：コード生成やエラー修正の支援を行い，開発者のアイデアを迅速にソースコードへ変換する役割を担う。

② CI/CD管理層：ビルド，テスト，およびドキュメント作成などの定型業務を自動化・標準化し，開発者が本質的な作業に注力できる環境を提供する。

③ デジタルツイン層：3Dシミュレータを活用したテスト自動化環境を構築し，物理的な場所や安全性の制約を受けることなく，高速な検証イテレーションを可能にする。

④ データ分析層：シミュレーションおよび実機検証から得られた実験データを集約・分析し，次の改良フェーズにフィードバックするためのデータパイプラインを形成する。

これら各機能層をGoogle Cloud上で統合することにより，ハードウエアへのソフトウエアインテグレーションや実機検証などを効率化するロボット開発基盤を実現した。

3　実装した要素技術および機能

2章で定義した各機能層における具体的な要素技術および機能について解説する。

3.1　生成 AI とクラウドによる開発支援層の機能詳細

本層は，開発者におけるコーディングおよびエラー解決プロセスを支援し，要求機能を迅速にソースコードへ変換することを目的とする。開発環境の提供から知見の構造化に至る3つのシステムを包括的に実装している。次に開発した3つのシステムについて説明する。

3.1.1　Cloud Workstations による開発環境の一元化と標準化

ソフトウエア開発環境を組織内で一元管理するべく，Google Cloud のクラウド上の統合開発環境である「Cloud Workstations」を導入した。Cloud Workstationsは，事前に定義した開発環境を実行できるサービスである。本基盤では，開発ツールや，コーディングエージェント (CA) をあらかじめインストールした開発環境を作成して展開した。これにより，チーム内の開発者は開発環境導入時のインストールや複雑なセッティングをすることなく，CAを含む複数の開発ツールを利用できる。本環境はクラウド上に構築されているため，インターネットにアクセスできる場所であればどこでも開発することが可能となる。また，開発環境のCPU性能やメモリ容量やGPUの有無などを自由にスケールさせることもできる。クラウド上の開発環境のセキュリティ面においては，Google

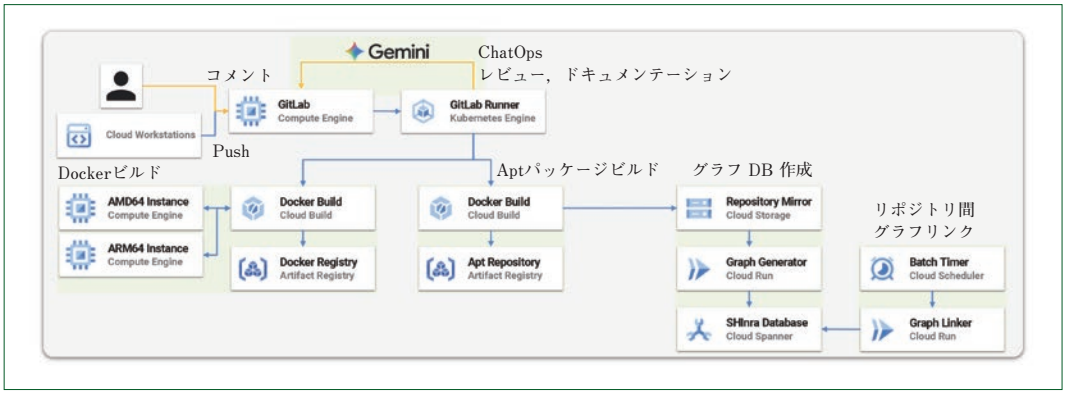


図4　CI/CD管理基盤
CI/CD Management platform



図5　ハードとソフトのデカップリング
Decoupling of hardware and software

CloudのIAP (Identity-Aware Proxy) およびIAM (Identity and Access Management) を適用し，不正アクセスの防止と適切な権限管理を両立した。**図2**に，Cloud Workstationsの利用例を示す。

Cloud Workstationsの導入によって，従来は数週間かかっていたオンプレミス環境における開発用ワークステーションの調達から情報システム部門でのセッティング，および個別の環境構築が不要になり，開発開始までの工数を削減できた。

3.1.2　エラー解決ナレッジデータベースによる知見の共有

本システムは，開発および実行時に生じるエラーログをキーとして，解決策の知見を蓄積・検索する機構である。**図3**に，処理フローを示す。開発中にエラーが発生した際，CAが自動的に本システム上でエラー内容のベクトル検索を行うことで，過去の類似事例およびその解決策を取得できる。また，解決されたエラー事例はCAによって自動でナレッジデータベースに追加される。

これらの機能によって，従来は個々の開発者や単一のCAのセッション内に閉じていたエラー解決の知見を，複数の開発者やその開発者が使用するCAに共有することが可能となった。また，CAが事前に学習していないエラーであってもナレッジデータベース上で解決方法を検索することができる。

3.1.3　コードとドキュメントのグラフデータベース

本システムは，社内の膨大なソースコードおよび関連ドキュメントの依存関係を，グラフデータベース(Cloud Spanner)上で構造化したグラフRAG (Retrieval-Augmented Generation)である。CAは，外部に公開されていない内製ライブラリの仕様を学習していない。そこで，本システムでは内製ライブラリのコードとドキュメントをグラフ構造化して，CAが内製ライブラリの仕様を検索可能とする。

情報検索においては，意味的な類似性を捉えるセマンティック検索と，関数やモジュール間の静的な依存関係を追跡するグラフ検索を複合的に組み合わせ，関連情報を的確に抽出するアプローチを採用した。

3.2　CI/CDによる開発プロセスの標準化

本層は，CI/CDにおける自動化ワークフローをテンプレートとして一元管理する基盤である。各開発者が個別にパイプラインを構築し記述する手間を省き，標準化されたテンプレートを再利用することで，設定工数の削減とビルド・検証品質の均一化を実現している。具体的には，コンテナイメージのビルドおよびデプロイ機能，ならびにコードレビューやドキュメント生成を担うAIによるサポートチャット機能を備える。

また，ロボット開発においては，さまざまなプロセッサアーキテクチャに対応したCIによるビルドプロセスを有している。

さらに，ドキュメンテーションに関しては生成AIを用いてソースコードから仕様書を自動生成する。これら一連の処理は，GitLab[*2]の更新履歴上のコメントからコマンド実行が可能であり，コードとドキュメントの乖離を防ぐ仕組みとなっている。**図4**に，CI/CD管理基盤の動作概要を示す。

3.3　デジタルツイン層およびデータ分析層の機能詳細

物理的な制約を持つ実機検証を省力化するべく，デジタルツイン層およびデータ分析層に次の機能を実装した。

3.3.1　SIL (Software-In-the-Loop) シミュレータの構築

本SILシミュレータは，車両の形状や機構の動作，センサ

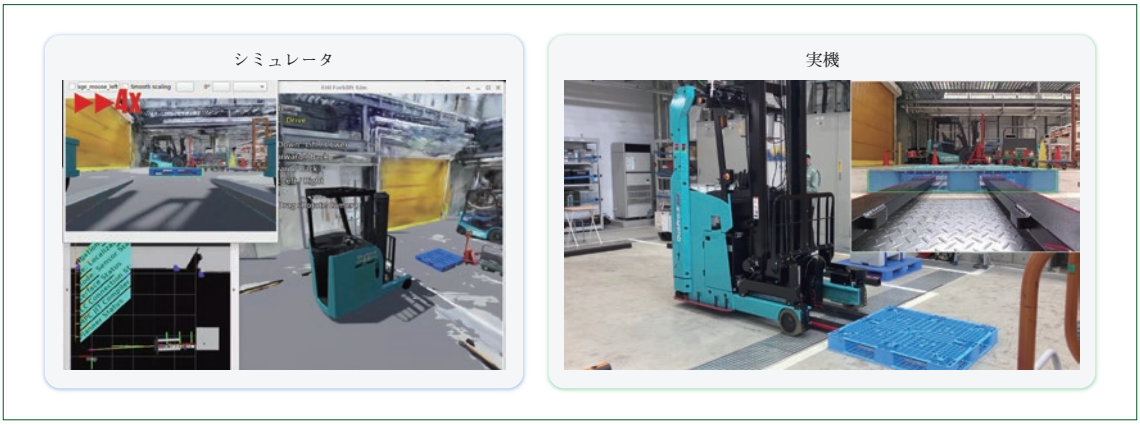


図6　シミュレータとAGF実機での実験
Experimental snapshots: simulator vs. real AGF

や車両運動モデル，動作環境の形状を3D仮想空間上に再現した。実ハードウエアと同一の通信プロトコル(UDP，HTTPなど)で仮想ハードウエアと通信するSIL構成を採用した。通常はシミュレータで検証したコードにハードウエアドライバなどを追加して実機検証する。しかし，本構成のシミュレータであれば，通信プロトコルが実機と同一であることから，ドライバを含むソースコードの机上検証が可能である。すなわち，机上検証で動作を確認済みの信頼性の高いコードを変更することなく実機にデプロイできる(**図5**)。

3.3.2　Google Cloud を活用した統合データ分析パイプライン

データ分析層は，シミュレータによる検証および実機走行試験のログデータを収集し，アルゴリズムの定量評価とバグの早期発見を可能にする。シミュレータや実機上で計測された車両の自己位置，速度ベクトル，アクチュエータの制御指令値などのログデータをクラウド上に保存し，可視化ツールを用いてブラウザ上でデータの確認と検証を可能とした。

4　AGF実機での実験

本開発基盤の効果検証をAGFで行った。具体的には，自己位置推定，ナビゲーション，荷役操作などの基本自律化機能と，単体機能として開発されていたパレット検出アルゴリズムとの統合を検証対象とした。検証シナリオは，指定されたパレット近傍まで移動したAGFがパレット検出アルゴリズムの認識結果に基づき，パレットに対して正対するようにアプローチ経路を生成し，フォークを挿入してパレットの運搬をするというものである。

事前にシミュレータを用いて，経路生成やフォーク動作のシーケンスに論理バグや不具合がないかを検証してから実機実験へ移行した。その結果，初回の実機実験において，パレットの自動検出からアプローチ，フォーク挿入，運搬にいたる一連の荷役機能を動作させることに成功し，実機実験中のバグ修正も抑制できた。**図6**に，シミュレータおよび実機を用いた実験環境を示す。

5　ロボット開発基盤の成果と今後の展開

5.1　3つの成果

1つ目は，開発プロセスの高速化である。CAの活用によりコード生成，デバッグおよびドキュメント自動生成にかかる時間を短縮した。これにより，開発者のアイデアを迅速にコード化でき，実装スピードが向上した。

2つ目は，実機開発における安全性と信頼性の両立である。物理的制約の大きい実機検証において，シミュレータ上での事前検証によって時間のかかる実機検証を減らした。

3つ目は，チーム開発の実現である。従来，開発環境が開発者ごとに異なっていたが，Cloud Workstationsによる開発環境の統一，GitLabによるソースコードの管理などによってチーム開発が可能となった。

5.2　今後の展開

今後は，本基盤による開発プロセスをさらに発展させ，製品ライフサイクル全体に拡張していく。具体的には，SDV実現に向けて，安全で耐障害性の高いOTA配信技術の開発を進めるほか，データの収集とその分析機能を発展させ顧客体験の向上につなげる。また，より高度な自律化機能開発を目的に，シミュレータをフィジカルAIのVLA(Vision-Language-Action)や，VLM (Vision-Language-Model)などに活用する。

6　むすび

(1) 生成AIとGoogle Cloudを用い，SDV実現に向けた次世代のロボット開発基盤を構築した。
(2) コーディングエージェントとCI/CDによって開発工程全体の効率化を実現した。
(3) シミュレータの活用によって新機能を安全に検証しつつ，実機検証の工数短縮を実現した。
(4) 大規模なロボットシステム開発において，チーム開発が可能な開発基盤を整備した。

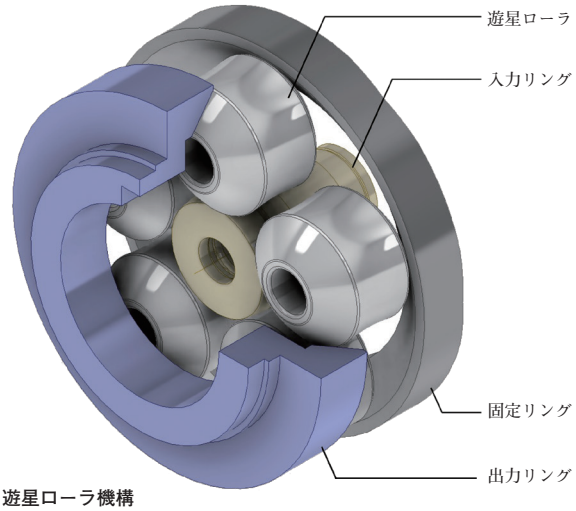
＊1　Google Cloud（およびかかる資料で使用されるその他の Google Cloud 商標）は，Google LLCの商標
＊2　GITLAB is a trademark of GitLab Inc. in the United States and other countries and regions.

(参考文献)
(1)　経済産業省ウェブサイト,「モビリティDX戦略」を策定しました, 経済産業省, https://www.meti.go.jp/press/2024/05/20240524005/20240524005.html, 参照 2026年7月9日.

コンパクト・高減速比遊星ローラ機構の設計と試作評価

Design and Evaluation of Compact, High-Reduction-Ratio Planetary Roller Drive

●南　雲　稔　也*　　長谷川　豪　太*
Toshiya NAGUMO　　Gota HASEGAWA



遊星ローラ機構
Planetary roller drive

歯車駆動機構は高いトルク伝達能力，高効率などの優位性を有する一方，バックラッシや振動・騒音，また固定速度比に起因する制約がある。本報では，これらの課題に対応するため，トラクションドライブを用いたコンパクト・高減速比遊星ローラ機構を提案する。遊星ローラと各リングの接触条件および転動面形状を設計することでコンパクト，高減速比，無段変速および変速比無限大の構成を可能にした。さらに，本機構を用いた試作IVT（Infinitely Variable Transmission; 変速比無限大変速機）を製作し，出力特性，変速応答性，位置決め精度を評価した。その結果，速度比制御に応じた正逆転・停止動作，良好なトルク出力，約0.2秒の変速応答，±５arcsec以下の位置決め精度を確認した。併せて，機械式変速機およびトラクション減速機への応用可能性を示した。

Gear drives provide high torque capacity and efficiency, but suffer from backlash, vibration, noise, and fixed-ratio limitations. To address these issues, this paper proposes a compact, high-reduction-ratio planetary roller drive based on traction drive principles. By designing the contact conditions between the planetary rollers and each ring and the rolling-surface profiles, the mechanism enables compactness, high reduction ratio, continuously variable speed control, and an infinite variable-speed ratio. A prototype of Infinitely Variable Transmission (IVT) was fabricated to evaluate output performance, speed-ratio response, and positioning accuracy. The results confirmed forward, reverse, and zero-speed operation by speed-ratio control, favorable torque output, a response time of about 0.2 s, and positioning accuracy within ±5 arcsec. Applications to mechanical variators and traction reducers are discussed.

1　まえがき

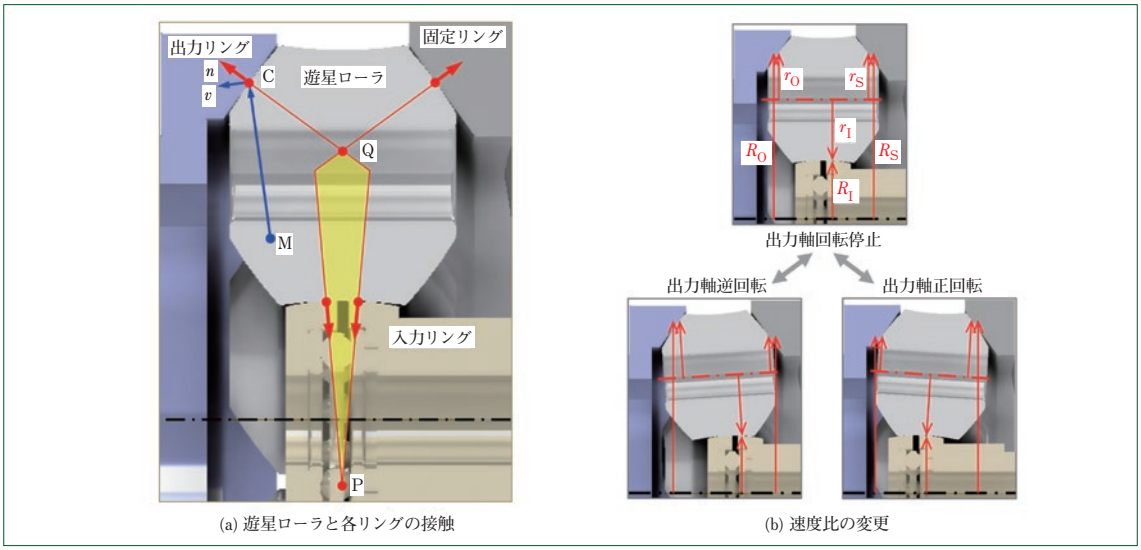
歯車駆動機構は高いトルク伝達能力，確実な回転速度伝達，高効率，高剛性といった特長があり，さまざまな産業で広範囲に使用されている。一方，歯のかみ合いに起因するバックラッシや振動・騒音の発生，固定速度比に起因するトルクや回転速度といった運転条件の変化への対応のしにくさといった課題も存在する。AIやロボティクスの普及，カーボンニュートラルへの対応などを背景に，駆動技術への要求は急速に高度化・多様化しており，用途によっては歯車駆動機構だけで最適な構成を実現しにくい場合がある。

こうした課題の解決策として，歯車駆動機構とは異なる原理で動力伝達するトラクションドライブが期待されている。トラクションドライブは，ローラを押し付けた接触部に生じる油膜のせん断抵抗によって動力伝達することで，バックラッシレスで振動・騒音が非常に小さいうえ，無段変速の構成ができ，運転条件の変化に対応可能といった特長がある。一方，コンパクト化や高減速比化がしにくい無段変速の構成では，特殊な専用部品によって複雑な構造になり大型化する，変速比（速度比の上限と下限の比）・制御性に制約があるといった課題も大きく，使用用途がかなり限定されている。

しかし，これらの課題を克服できれば，歯車駆動機構では対応が難しい要求への有効な解決策になり得る。そこで「コンパクト」「高減速比」「無段変速」「変速比無限大」を可能にする新しい遊星ローラ機構を開発した。

本報では，この遊星ローラ機構の設計および本機構を用いた試作IVTの特性評価，およびその応用例の検討について報告する。

＊技術本部



(a) 遊星ローラと各リングの接触　　(b) 速度比の変更

図1　**遊星ローラ機構の仕組み**
Operating principle of planetary roller drive

2　遊星ローラ機構の設計

図1に，遊星ローラ機構の仕組みを示す。遊星ローラ機構は，固定リングが外部に固定され，入力リングを回転させることによって遊星ローラに自転と公転が生じ，それらの回転成分が伝達され，出力リングが回転する。

本機構では，従来必要となる高精度・高剛性の遊星キャリアによる遊星ローラの支持構造を簡略化することでコンパクト化を実現した。これは遊星ローラと各リングとの接触によって遊星ローラの姿勢を安定させ，自転と公転の運動ができるように遊星ローラおよび各リングを設計することで達成した。

図1 (a) において任意の回転中心Mに対する遊星ローラの半時計方向の回転運動を考察する。出力リングとの接触点Cにおける遊星ローラの法線のベクトルnと回転運動による速度のベクトルvとのなす角が90 degより小さいとき，遊星ローラの回転運動は出力リングとの接触部によって制限された状態になる。さらに，どの位置の回転中心でも，反時計方向，時計方向どちらの回転に対しても，遊星ローラが少なくとも1個以上のリングとの接触によって拘束された状態になるとき，遊星ローラの姿勢は一意に定まり，安定した自転と公転の運動ができるようになる。

上記を満たした状態では，4つの接触部で法線ベクトルを延長した直線が凸形の四角形を形成する。**図1** (a) にこの四角形が黄色で示されている。

本機構では，3K型遊星機構の構成にすることで1段減速構造での高減速比化を実現している。**図1** (b) に，遊星ローラ機構の速度比について示す。遊星ローラと各リングとの間に滑りがないと仮定したとき，入力リングの回転速度N_Iと出力リングの回転速度N_Oの関係は式(1)で表される。

$$N_O = R N_I \quad \cdots\cdots (1)$$

ここで，速度比Rは遊星ローラの自転軸および各リングの中心軸から接触点までの半径によって式(2)で表される。

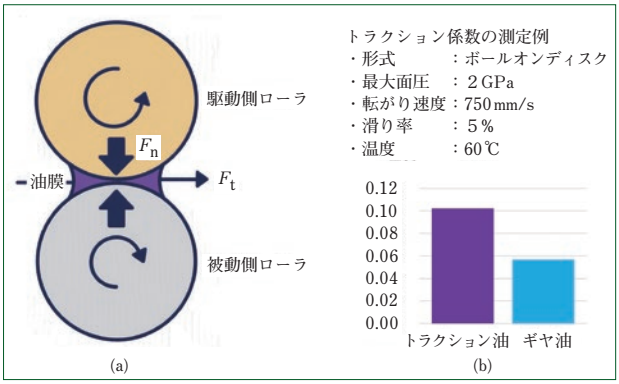


図2　**トラクションドライブの原理**
Principle of traction drive

$$R = \frac{\dfrac{r_S}{R_S} - \dfrac{r_O}{R_O}}{\dfrac{r_S}{R_S} + \dfrac{r_I}{R_I}} \quad \cdots\cdots (2)$$

式(2)で表される関係により，本機構では，固定リング側の遊星ローラとリングの半径の比r_S/R_Sと出力リング側の半径の比r_O/R_Oを近い値に設定することで，高減速比化が可能となる。さらに，遊星ローラと各リングの転動面の断面形状を次のように設計することで，無段変速や変速比無限大の構成が実現できる。

入力リングの転動面の断面形状を凸形の円弧とし，遊星ローラの入力リングと接触する転動面の断面形状を法線ベクトルの交点Pを中心とした凹形の円弧とする。これにより遊星ローラは接触部が離れたり食い込んだりすることなく一定の接触を維持した状態で，交点Pを中心に入力リングに対して傾く運動が可能になる。

固定リングおよび出力リングの転動面の断面形状を一定の傾斜角を持った直線とする。遊星ローラの固定リングおよび出力リングと接触する転動面の断面形状は，法線ベクトルの交点Pを基礎円の中心として，交点Qを接触点の法線が通過する瞬間中心としたインボリュート曲線とする。これにより遊星ローラは接触部が離れたり食い込んだりすることなく一定の接触を維持した状態で法線ベクトルの交点Qを瞬間中心として固定リングおよび出力リングに対して転がる運動が可能

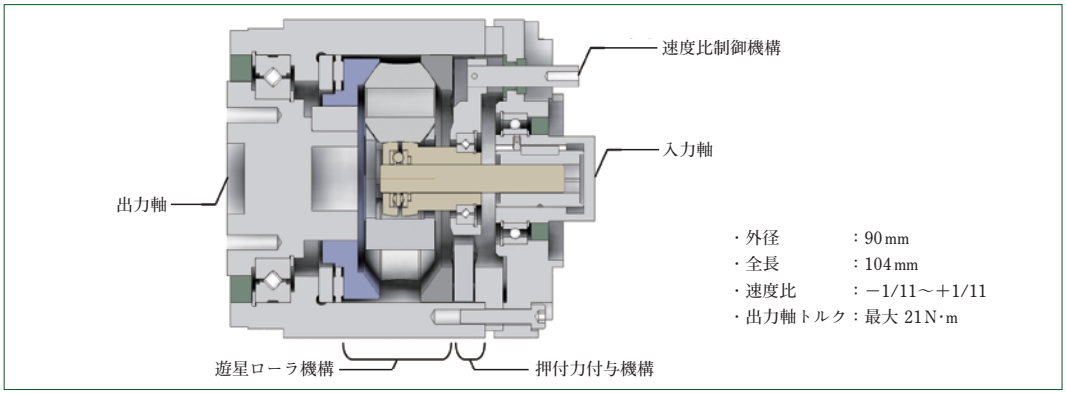


図３　試作IVTの断面図
Cross-sectional view of prototype IVT

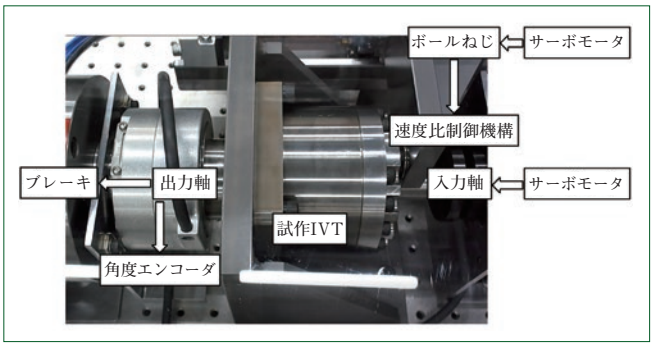


図４　試作IVTの実験装置
Experimental setup for prototype IVT

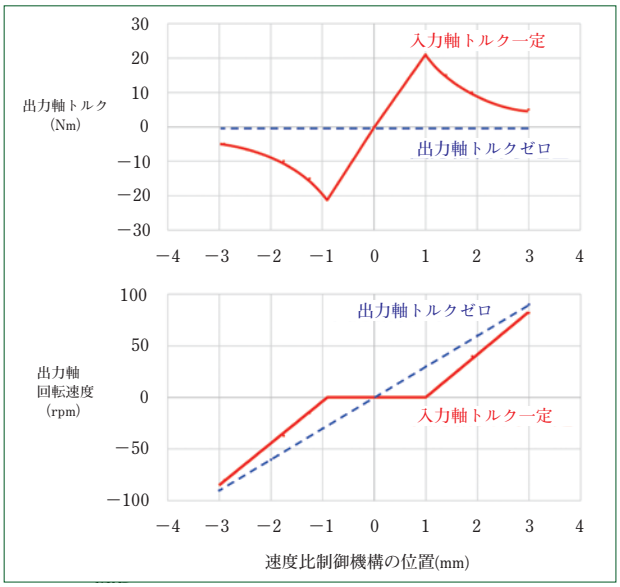


図５　試作IVTの出力特性評価
Output performance evaluation of prototype IVT

となる。

このように遊星ローラおよび各リングの転動面の断面形状を決めることによって，固定リングおよび出力リングの位置を固定した状態で入力リングを中心軸方向に動かしたとき，遊星ローラは各リングとの接触部が離れたり食い込んだりすることなく一定の接触を維持した状態で傾き角が生じる。そして各リングとの接触部の位置が移動し，速度比Rが変化する。

図１ (b) に，その入力リングの中心軸方向の位置を変更したときの遊星ローラの動きを示す。入力リングの位置が出力リングと固定リングの中間にあるとき，速度比Rが０となり出力リングは回転が停止した状態になる。入力リングが出力リングに近い位置にあるとき，速度比Rは正の値となり，出力リングは減速されながら入力リングと同じ方向に回転する。入力リングが固定リングに近い位置にあるとき，速度比Rは負の値となり，出力リングは減速されながら入力リングと反対方向に回転する。このとき，速度比Rの最高値と最低値の比を変速比とすれば，提案する遊星ローラ機構の変速比は±∞となる。

本機構は，トラクションドライブの原理によって動力伝達を行う。**図２**に，トラクションドライブの原理を示す。トラクションドライブは，駆動側と被動側のローラを法線力F_nで強く押し付けて回転させ，ローラの弾性接触部に高圧下での油膜を形成し，ローラ間の相対滑りに対する油膜のせん断抵抗力で接線力F_tを発生させて動力を伝達する。

法線力F_nに対する接線力F_tの比はトラクション係数μとし式(3)で表される。

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad \cdots\cdots (3)$$

遊星ローラ機構の出力トルクは，遊星ローラの数をZとして式(4)で表される。

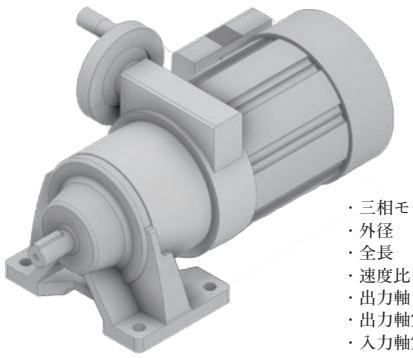
$$T_O = ZR_O F_t \quad \cdots\cdots (4)$$

トラクション係数μを大きくすることで大きなトルクを伝達できることから，トラクションドライブでは専用の潤滑油としてトラクション油が使用される。**図２** (b) に，一般的なギヤ油とトラクション油について，トラクション係数を測定した例を示す。

３　試作IVTの評価

図３に，試作IVTの構造を示す。入力軸は入力リングにスプライン接続され，出力軸は出力リングにキー接続されている。速度比制御機構はケースから突出したシャフトを外部アクチュエータから操作することで，入力リングの中心軸方向の位置を変更して速度比Rを制御する。押付け力付与機構は，カムとローラを用い，押付け力（固定リングと出力リングを中心軸方向に押し付ける力）を出力トルクの大きさに応じて適切に付与する。

図４に，試作IVTの実験装置を示す。入力軸はサーボモータによる回転速度制御で駆動される。速度比制御機構は，サ



・三相モータ容量　：0.2kW
・外径　：124mm
・全長　：325mm
・速度比　：−1/8〜+1/8
・出力軸ピークトルク：34N·m
・出力軸定格トルク　：10N·m
・入力軸定格回転速度：1800rpm

図6　機械式変速機への応用検討例
Conceptual application to mechanical variator



・外径　：91mm
・中空径　：19mm
・全長　：70mm
・減速比　：1/20，1/50
・出力軸ピークトルク：51N·m
・出力軸定格トルク　：15N·m
・入力軸定格回転速度：2000rpm

図7　トラクション減速機への応用検討例
Conceptual application to traction reducer

ーボモータに接続されたボールねじによる位置制御で駆動される。出力軸に接続したブレーキの負荷を調節することで出力トルクを制御し，出力軸に接続した角度エンコーダにより出力軸の回転速度と角度を計測して，遊星ローラ機構の滑りを評価する。

図5に試作IVTの出力特性評価を示す。ここでは入力軸回転速度を1000rpmで一定とした。出力軸トルクゼロの条件では出力軸トルクを0N·mと一定にした。速度比制御機構が0mmの位置では出力軸回転速度が0rpmになり，出力軸停止状態になっている。速度比制御機構が+3mmの位置では出力軸回転速度が90rpmになり，出力軸は入力軸と同方向に回転し，速度比Rは+1/11である。速度比Rは，速度比制御機構の位置に対してほぼリニアに変化している。逆転方向の特性については，正転方向に対してほぼ対称の特性を示している。このように本機構は出力軸トルクゼロの条件において良好な出力特性を示した。

入力軸トルク一定の条件では入力軸トルクを2.25N·mと一定にした。速度比制御機構の位置0mmから+1mmまでの範囲では出力軸回転速度が0rpmになり，出力軸が回転停止状態では速度比を制御することにより出力軸トルクが増加する特性となっている。速度比制御機構の位置を1mmとし，出力軸回転速度が0rpmから増加し始める点で出力軸トルクが最大20N·mになる。速度比制御機構をさらに動かすと，出力軸回転速度は直線的に増加しつつ出力軸トルクは低下していくという一定出力特性を示す。逆転方向の特性については，正転方向に対してほぼ対称の特性を示している。このように本機構は入力軸トルク一定の条件において良好な出力特性を示した。

また，入力軸回転速度一定の条件では，速度比を0から上限まで変化させる変速時間が0.2秒程度となり，良好な速度比制御の応答性を示した。さらに，出力軸に接続したエンコーダ信号をフィードバック制御した場合の位置決め精度は±5arcsec以下となり，精密制御用途として良好な精度を示した。

4　遊星ローラ機構の応用検討

本機構を用いることでコンパクト，高減速比，無段変速，変速比無限大，静音，低振動，バックラッシレスといった特長を備えた変・減速機を構成できる。ここでは本機構の応用検討の例として，機械式変速機とトラクション減速機について説明する。

図6に，機械式変速機への応用例を示す。産業用の機械式変速機は電気制御なしで連続的な速度調整，低速での高トルク出力，過負荷に対する耐性といった特長があり，化学・食品プロセス機械や搬送機械など特定領域で使用されている。しかし一方で，特殊な専用部品を使用した複雑な構造による大型化，変速比・制御性の制約などが課題となっている。遊星ローラ機構を機械式変速機に応用することで，これらの課題解決につながる可能性がある。

図7に，トラクション減速機への応用例を示す。トラクション減速機は，低振動で滑らかな動力伝達，静音，バックラッシレスといった特長があり，自動搬送装置や精密位置決め装置など特定領域で使用されている。しかし，既存のトラクション減速機は高減速比化しにくい，出力トルクが低いといった点が課題となっている。遊星ローラ機構をトラクション減速機に応用することで，1段減速構造のコンパクト化・高減速比化，さらに押付け力付与機構により高トルク化したトラクション減速機を構成できる。

5　むすび

(1) コンパクト，高減速比，無段変速，変速比無限大を達成可能にする遊星ローラ機構の提案とともに，その設計についてまとめた。
(2) 遊星ローラ機構を用いた試作IVTの出力特性を実験的に評価し，良好な出力特性が得られることを確認した。
(3) 遊星ローラ機構の応用例として，産業用機械式変速機とトラクション減速機について検討し，従来技術の課題に対する有効性について確認した。

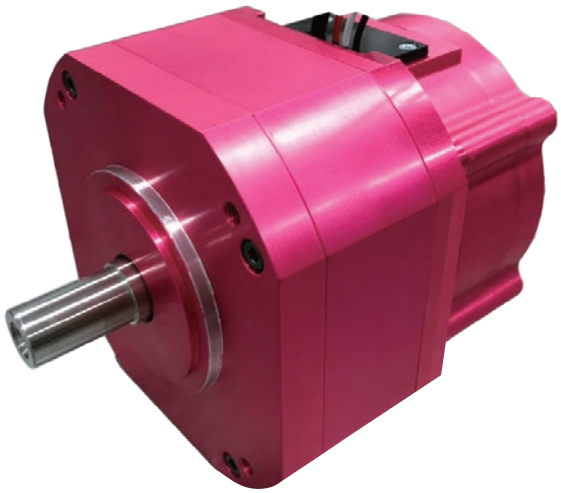
本機構の適用検討，共同評価・開発に関心をお持ちの企業・研究機関は当社ウェブサイト(https://www.shi.co.jp/)の問い合わせフォームより技術本部宛てに連絡いただければ幸いである。

(参考文献)
(1)　III Heilich, F. W. and Shube, E. E., TRACTION DRIVES, (1983), MARCEL DEKKER INC.
(2)　田中裕久，トロイダルCVT，(2000)，コロナ社.

磁束変調型磁気ギヤを用いた磁気柔軟アクチュエータの基礎検証

Basic Verification of Magnetic Flexible Actuator Using Flux-Modulated Magnetic Gear

●小　泉　　光*　　水　野　博　之*　　山　本　泰　三*
Hikari KOIZUMI　　Hiroyuki MIZUNO　　Taizo YAMAMOTO



MFA（磁気柔軟アクチュエータ）試作機の外観
Prototype MFA (Magnetic Flexible Actuator)

磁束変調型磁気ギヤ（FMG：Flux-Modulated Magnetic Gear）は，従来の磁気式可変伝達機構と比較して，著しく高いトルク伝達密度を実現できることが広く報告されている(1)。この性能向上については，FMGの動作原理そのものが持つ利点だけでなく，近年の高エネルギー積永久磁石の発展によってFMGシステムのトルク伝達能力が大幅に向上したことにも起因する。

FMGは，摩擦のない駆動，柔軟性（コンプライアンス），静粛性，低バックラッシ，脱調トルク（ステップアウトトルク）など，機械式伝達機構には見られない独自の特性がある。故に，既存の機械式ギヤを置き換える可能性があるだけでなく，新たな価値を創出する可能性も持っている。本報では，FMGにモータおよびセンサを組み合わせた新しいアクチュエータ「磁気柔軟アクチュエータ（MFA：Magnetic Flexible Actuator）」を提案し，その基本特性について述べる。

本報は，日本機械学会の許可を得て，注記の文献の内容を改変するとともに，新たな内容を一部追加したものである。

Flux-Modulated Magnetic Gear (FMG) has been widely reported to achieve substantially higher torque transmission density than conventional magnetic variable transmission mechanisms. This improvement stems not only from the inherent advantages of the FMG operating principle but also from recent advancements in high-energy product permanent magnets, which have markedly enhanced the torque transmission capability of FMG systems. It has some unique characteristics not found in mechanical transmissions such as frictionless drive, compliance, quiet drive, low backlash, step-out torque and so on. Therefore, it has potential not only to replace existing mechanical gears but also to create new value. This paper proposes a new actuator, the Magnetic Flexible Actuator (hereinafter called "MFA"), which combines the FMG with a motor and sensor, and describes its basic characteristics.

This report is based on the referenced publication and has been adapted and supplemented with additional content, with permission from the Japan Society of Mechanical Engineers.

1　まえがき

近年，少子高齢化に伴う労働人口の減少が社会課題となっており，その代替労働力として協働ロボットの開発が進んでいる。協働ロボットは人と同一空間で稼働するため，安全性や静粛性に加え，柔軟な外力応答性が求められる。一方，現在広く用いられる機械式ギヤは摩擦やバックラッシを伴うため，これらの要求を高水準で満たすことは容易ではない。

そこで筆者らはFMGにモータおよびセンサを一体化したMFAを提案する。FMGは磁気結合による非接触動力伝達機構であり，機械的接触に起因する摩擦やバックラッシを本質的に排除できる。そのため，静粛かつ柔軟な力学応答を実現でき，協働ロボット用アクチュエータとして有望である。本報では，協働ロボットへの適用を見据え，MFAのトルク制御手法を検討し，実験によりその有効性を検証する。

2　FMG の構成と動作原理

図 1 に，FMGの構造を示す。FMGは，内極磁石および内極

＊技術本部

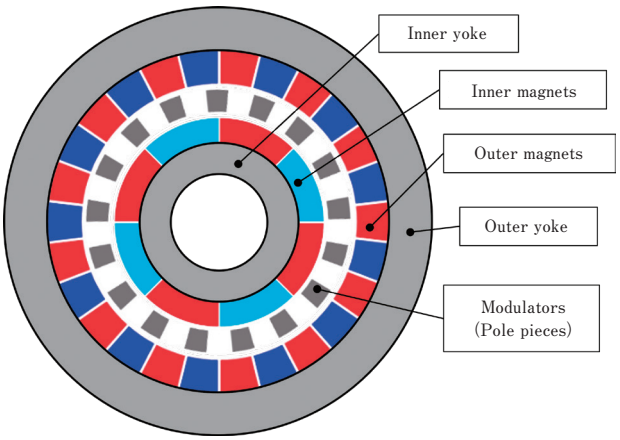


図１　FMGの断面図
Cross sectional view of FMG

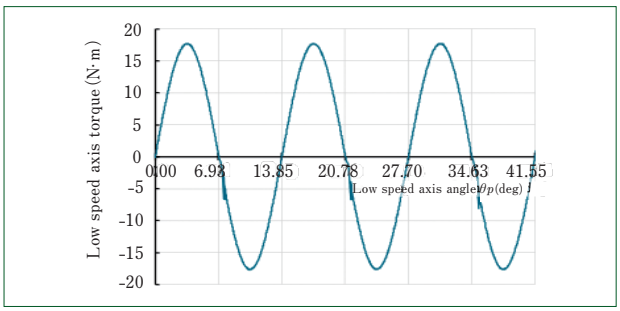


図２　FMGの低速軸のトルク−角度特性
Torque-angle curve of low-speed axis

ヨーク，外極磁石および外極ヨークの径方向中間に位置し，円周方向に等間隔で配置された変調子から構成される。内極軸，外極軸，および変調子軸は同心円状に配置されており，軸受を除き互いに非接触である。磁石には希土類永久磁石（Nd磁石）を用い，強力かつ安定した磁束の供給が可能である。一方，変調子は磁性体で構成され，磁気回路内におけるパーミアンス（磁束の通りやすさ）の周期的変化を生み出す役割を果たす。

次に，FMGの動作原理について述べる。FMGにおけるトルク伝達は，内極磁石および外極磁石のそれぞれが生成する起磁力に，変調子による変調磁束が同期することで起きる。ここで，内極磁石および外極磁石の周囲には，それぞれの磁極対数に対応した空間周波数を有する起磁力分布F_{in}，F_{out}が形成される。これらは空間的に周期性を有することから，本報では余弦波を用いて表現する。

$$F_{in}=F_a\cos(N_i\theta) \quad \cdots\cdots(1)$$

$$F_{out}=F_b\cos(N_o\theta) \quad \cdots\cdots(2)$$

ここで，F_a，F_bはそれぞれ内極磁石・外極磁石の起磁力振幅を，N_i，N_oはそれぞれの磁極対数を表す。

変調子は円周方向に均等に配置され，パーミアンスPも空間的な周期性を有することから式(3)のように表される。

$$P=P_o+P_1\cos(N_p\theta) \quad \cdots\cdots(3)$$

ここで，P_0はパーミアンスの平均値を，P_1はその振幅，N_pは変調子数を表す。

磁束はパーミアンスと起磁力の積として計算され，変調子により変調された内極側の磁束ϕ_{in}は式(4)で表される。

$$\phi_{in}=F_{in}P=P_oF_a\cos(N_i\theta)+P_1F_a[\cos\{(N_p-N_i)\theta\}+\cos\{(N_p+N_i)\theta\}] \cdots(4)$$

一方，外極磁石周辺に生じる磁束ϕ_{out}は，空気のパーミアンスを一定値P_{air}として，式(5)で表される。

$$\phi_{out}=F_{out}\,P_{air}=P_{air}\,F_b\cos(N_o\theta) \quad \cdots\cdots(5)$$

ここで，外極側磁束の空間周波数N_oと，内極側磁束に含まれる空間周波数N_i，N_p-N_i，N_p+N_iのいずれかが一致すると，両者は同一極数の磁石が対向した状態と等価となる。その結果，磁気的な吸引・反発力により動力伝達が生じる。この磁気的なかみ合い条件を満たす磁極対数と変調子数の関係，および各部の回転角速度（ω_i，ω_o，ω_p）の関係は式(6)(7)で与えられる。

$$N_o=N_p\pm N_i \quad \cdots\cdots(6)$$

$$N_o\omega_o=N_p\omega_p\pm N_i\omega_i \quad \cdots\cdots(7)$$

3　磁気柔軟アクチュエータの構造とトルク推定原理

FMGは磁気的な歯のかみ合いで動力を伝達する機構である。理想的な条件下においては，変調子の回転角度θ_pは，内極磁石軸の回転角度θ_iに減速比の逆数を乗ずることで求められる。

$$\theta_p=\frac{N_i}{N_p}\theta_i \quad \cdots\cdots(8)$$

一方，外部から負荷が加わり，変調子の回転が理想関係から遅れを生じる場合には，軸間のエアギャップ中の磁気エネルギーに勾配が生じ，結果としてトルクが発生する。新口らの文献[2]を参考に仮想変位法を用いて導出すると，FMGの出力トルクTは式(9)で表される。

$$T=\frac{F_a^2P_1N_i}{4}\sin(-N_o\theta_o+N_p\theta_p-N_i\theta_i+\phi) \quad \cdots\cdots(9)$$

ここで，θ_i，θ_p，θ_oはそれぞれ内極磁石，変調子，外極磁石の回転角度を，ϕは初期位相差を表している。さらに，式の簡略化として，固定軸である外極磁石の回転角度θ_oは0とする。また，初期位相差ϕは角度原点の設定により0として省略し，トルクの振幅をK_tとして整理すれば，トルクは式(10)で示される。

$$T(\theta_p)=K_t\sin(N_p\theta_p-N_i\theta_i) \quad \cdots\cdots(10)$$

図２に，試作したFMGの高速軸固定時におけるθ_pに対するトルク特性を示す（式(10)においてθ_i=0）。試験に用いたFMGは，減速比8.67，トルク波高値17.7N·mである。同図よりトルク−出力軸角度特性は，式(10)の理論式の通り正弦波形状を示すことが確認された。トルクが正の値から負の値に切り替わる瞬間に，負のスパイクトルクが認められるが，これは強制回転を与えるための減速機のバックラッシが要因であり，FMGの特性ではない。FMGの詳細試験結果は，文献[3]を参照されたい。式(10)および**図２**より，内極磁石軸（高速軸）と変調子軸（低速軸）の位置が判明すれば，FMGの出力トルクが検出でき，この情報を用いれば，FMGの出力トルク

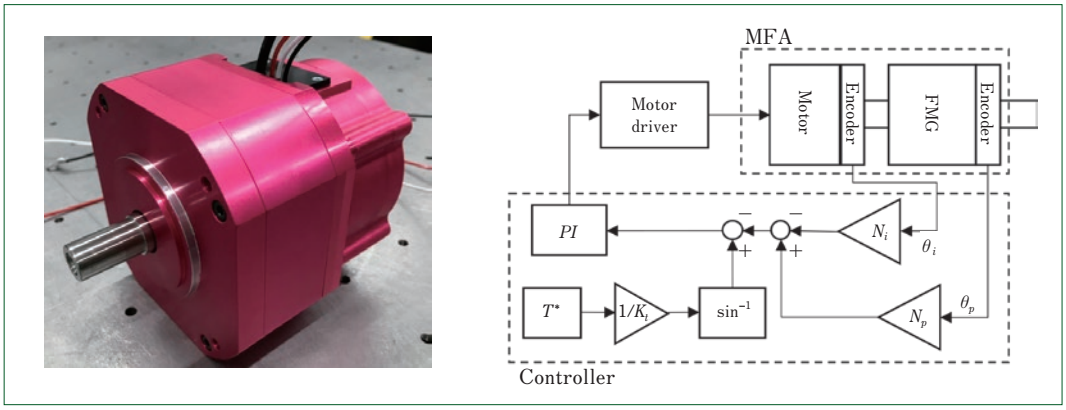


図３　**MFA試作機の外観と概略図**
Prototype MFA and its schematic configuration

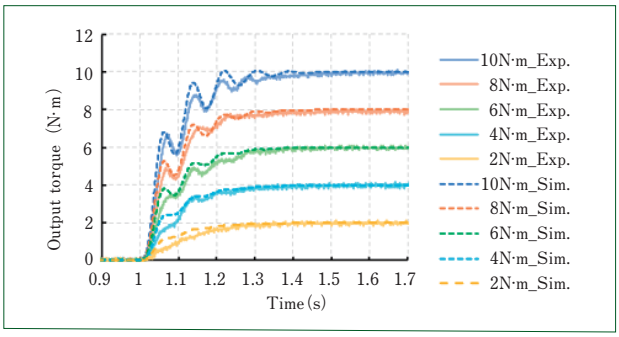


図４　**出力軸拘束時のステップ応答**
Step response with output shaft fixed

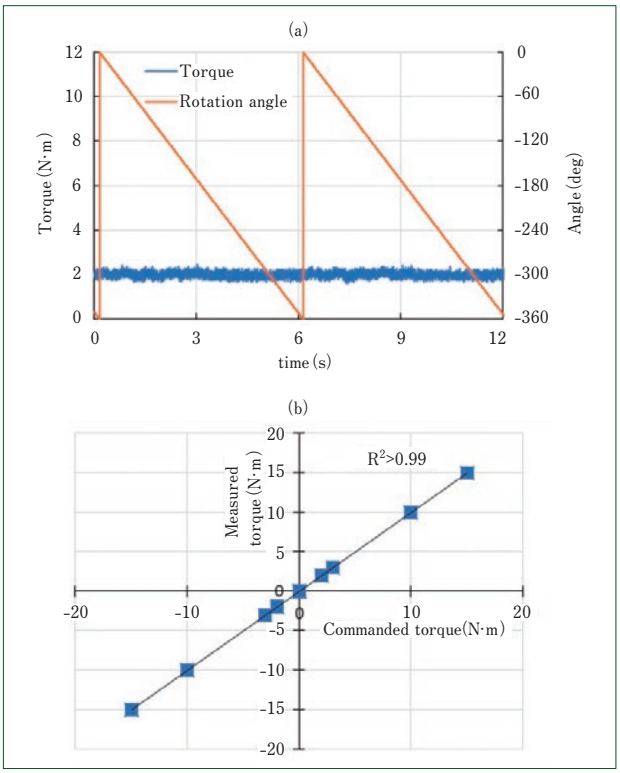


図５　**出力軸回転時のトルク制御性能**
(a) 負荷モータ回転角度と出力トルクの関係
(b) 指令トルクと実測トルクの関係
Torque control performance during output shaft rotation
(a) Load motor rotation angle and output torque
(b) Commanded torque versus measured torque

を制御することが可能であると推測した。

そこで，モーターFMG－角度センサを一体としたMFAを考案した。**図３**に，MFAの外観と概略図を示す。FMGの高速軸，低速軸のそれぞれに位置（回転角度）検出器を配置し，高速軸にモータを接続した構成とした。位置検出には高速軸，低速軸ともに光学式エンコーダ（26 bit/rev）を用いた。また，高速軸側の検出器はモータ制御と併用可能である。トルクの式(10)より，磁気的位相差は出力トルクの逆正接を取ることで得られる。本システムのトルク制御は，ここで得られた磁気的位相差を指令とし高速軸，低速軸の回転角度検出値から磁気的位相差の実際値を求め，これをフィードバックすることで，モータドライバへの制御指令を生成する構成とした。

4　実機検証結果

続いてMFAの動作検証を実施した。**図３**に示すように，本来は高速軸とモータエンコーダは共通化可能であるが，本検証では簡易的な試験構成とし，それぞれ独立したセンサを用いて評価を行った。また，FMGを一般的な減速機のモデル化で用いられる，２慣性系モデルで表現したシミュレーション解析も併せて実施した。

図４に出力軸（FMGの低速軸）を拘束した場合のステップ応答試験の結果を示す。トルクの定常誤差は0.1 N·m以下であり，シミュレーション結果とも良好に一致している。一方で，定常状態において微小ながら誤差のばらつきが確認された。この要因として，FMGに存在するコギングトルクなどの影響が考えられる。

次に，動的条件下におけるトルク制御性能を評価するべく，FMGの出力軸に負荷モータを接続し，MFAにトルク指令を与えた状態で出力軸を強制回転させた。**図５**に，出力軸回転角度および出力トルクの測定結果を示す。同図より，出力軸回転時も実測トルクは指令値に追従し，適切なトルク制御が可能であると認められた。また，10～100 rpmの範囲において，平均トルクは指令値と良好に一致し，回転速度によらず所望のトルクを出力できることを確認した。

5　インピーダンス制御

MFAに用いたFMGは磁束のかみ合いによりトルクを伝達する非接触動力伝達機構である。このため，機械式ギヤで必要となる歯面間の隙間を要さず，バックラッシの影響をほとんど受けない。また，歯面接触がないことから摩擦や摩耗に

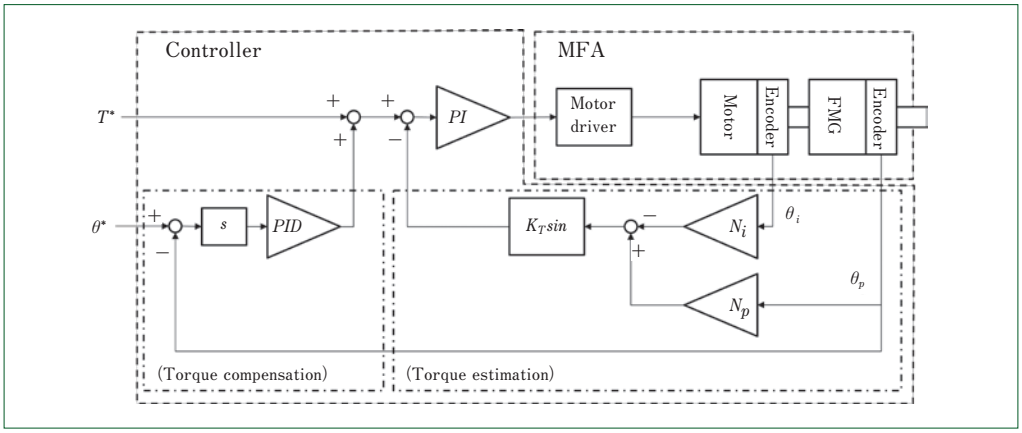


図6　**トルク補償を適用したMFAの構成図**
Configuration of MFA with torque compensation

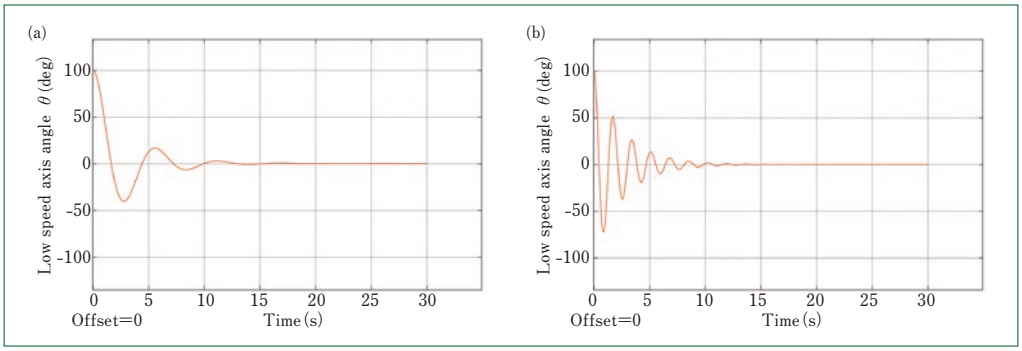


図7　**仮想剛性Kの違いによる出力軸応答シミュレーション結果 (a) K=0.5 (b) K=5.0**
Simulation results of output shaft responses for different virtual stiffness values K (a) K=0.5 (b) K=5.0

起因する特性変化も生じにくい。その結果，MFAはこれらの非線形的な影響を受けにくく，シミュレーションと実験結果が精度良く一致している。このことから，MFAはトルク特性を理論的に把握しやすく，出力軸トルクの推定および制御が比較的容易であると考えられる。この特性を利用することで，仮想的な運動状態の模擬や，直感的な装置の動作・調整の実現が期待できる。

MFAの力学特性が，慣性モーメントJ，粘性係数cおよび剛性Kを有する仮想的なばね・マス・ダンパ系となるよう制御することを考える。すなわち，

$$T=J\ddot{\theta}+c\dot{\theta}+K\theta \quad \cdots\cdots (11)$$

目標位置θ^*とすると，トルク計算式は，ラプラス変換を用いて変数sで表すと，

$$T=-(Js^2+cs+K)(\theta^*-\theta)=-s\left(Js+c+\frac{K}{s}\right)(\theta^*-\theta) \cdots (12)$$

となるので，この外力Tと釣り合うように目標トルクT^*を補償すればよい。**図6**に，トルク補償をMFAへ適用したときの概略構成例を示す。**図3**のトルク検出およびトルク制御の制御部を基に，トルク補償部を追加した構成となっている。**図7**に，出力軸挙動をシミュレーションした結果の一例を示す。高速軸を仮想的に固定し，出力軸を100°回転させた状態から解放したときの出力軸の回転角度θの挙動である。なお，出力軸を開放したときの時刻を0 sとし，剛性Kは0.5および5.0とした。同図より，仮想モデルの剛性Kの特性を変更することで，MFAの挙動が変化し，想定した制御が可能であることを確認した。

6　むすび

(1) FMGを用いた磁気柔軟アクチュエータ (MFA) を提案し，トルク推定および制御原理を示した。
(2) 出力軸拘束試験の結果，トルク誤差0.1 N·m以下の高精度なトルク制御を可能とし，また，シミュレーション結果と実測結果が良好に一致することで，提案モデルの妥当性を確認した。
(3) 出力軸回転試験の結果，回転中においても指令トルクへの追従を確認し，動的条件下でのトルク制御が可能であることが確かめられた。
(4) トルク制御系にトルク補償器を付加することで，仮想ばね特性を模擬した制御系が構成できることを示した。

今後は，より高度な制御性能を実現するアクチュエータの開発を目指し，ハードウェアおよびソフトウェアの両面から改良を進めていく。

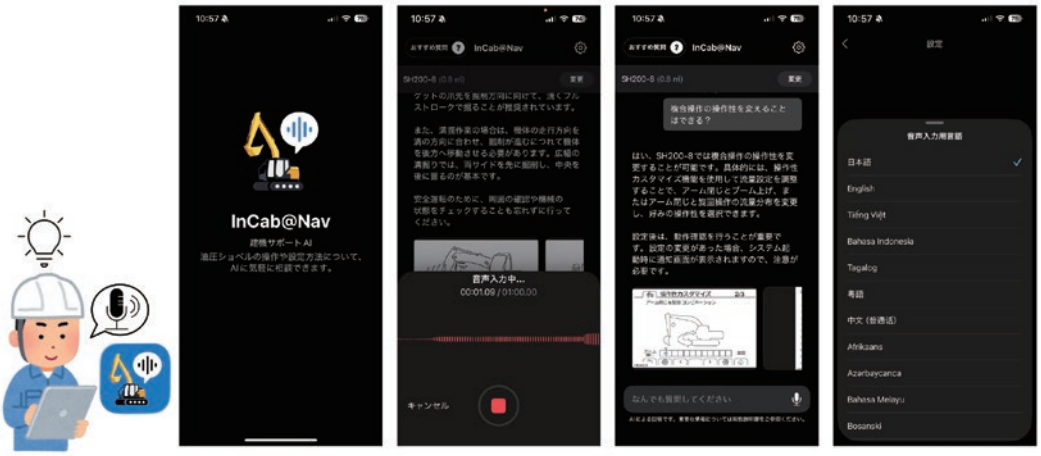
※山本泰三，水野博之，磁束変調型磁気変速機を用いた磁気柔軟アクチュエータの基礎検証，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集，26-2 (2026)，1A1-F01.

(参考文献)
(1) Atallah, K. and Howe, D., "A novel high-performance magnetic gear," IEEE Transactions on Magnetics, 37-4 (2001) , 2844-2846.
(2) 新口昇，平田勝弘，早川裕一，表面磁石型磁気減速機の伝達トルク特性に関する研究，電気学会論文誌D，131-3 (2011)，396-402.
(3) 山本泰三，三成貴博，中川博貴，磁束変調型磁気変速機の基礎特性，日本機械学会論文集，89-924 (2023)，23-00066.

生成AIを活用した建設機械の取扱説明書検索アプリ InCab@Nav

InCab@Nav: Generative AI-Based Manual Search Application for Construction Machinery

●原　孝介*　Kosuke HARA
上甲　隼**　Hayato JOKO



自然な言葉で必要な情報をすばやく検索
Quick access to manual information using natural language

1　はじめに

建設業界では熟練オペレータの高齢化や人材不足が進んでいる。さらに現場の環境，作業内容，人員構成が多様化する状況で，近年の建設機械は高機能化・多機能化が進み，オペレータに求められる知識も増えてきている。通常，機械の操作方法や各種機能を確認する際には分厚い取扱説明書のなかから該当箇所を探し出す必要がある。とりわけ使用頻度の少ない機能について調べる場合，専門用語や索引項目を把握していなければ，目的の情報にたどり着くことは容易ではない。他方で，近年は生成AIをはじめとする人工知能技術が急速に進展し，自然言語を用いた情報検索や対話型インタフェースの実用化が広がっている。

そこで，当社および住友建機株式会社は生成AIを活用し，建設機械の取扱説明書から必要な情報を自然な言葉で検索できるスマートフォンやタブレット端末向けアプリ「InCab@Nav（インキャブナビ）」を開発した。本アプリは，オペレータが日常会話に近い表現で機械の操作方法や機能について質問することで，必要な情報へ迅速にアクセスできる環境の実現を目的としている。

2　取扱説明書検索アプリ InCab@Nav

InCab@Navは，建設機械の取扱説明書を情報源とし，利用者の質問に関連する情報を検索して提示するアプリである。従来のキーワード検索では，取扱説明書に記載されている用語を正確に入力しなければ，目的とする情報を見つけにくいことがある。これに対して本アプリでは，「操作方式を切り替えるにはどうすればよいか」「シートの高さはどのように調整するのか」「フィルタはどのくらいの間隔でメンテナンスするのか」といった，自然な文章による質問が可能である。質問はテキストだけでなく，音声でも入力できるので，利用者は現場で確認したい内容をスマートフォンに向かって発話すれば，その場で回答を得ることができる。

入力された質問に対して，AIが取扱説明書のなかから関連する情報を抽出し，回答として画面上に表示する。操作手順や対象部位など，文章のみでは把握しにくい内容については，必要に応じて図表も併せて提示し，利用者が操作内容や確認対象を視覚的に理解できるよう支援している。さらに，回答の根拠として参照した掲載ページも表示する。利用者は提示されたページを手掛かりとして，詳細な説明や安全上の注意事項を紙面または電子版の取扱説明書で容易に確認できる。

本アプリは，取扱説明書そのものに代わるものではなく，必要な情報を見つけるまでの時間を短縮するための検索支援ツールとして位置付け，安全に関わる重要事項や詳細な作業手順については，必ず取扱説明書本文を確認することを前提としている。

また，日本語，英語，中国語，ベトナム語などの複数言語に対応しており，外国人技能者も母国語で質問し，機械翻訳された回答を得ることができる。スマートフォンやタブレットを用いて場所を選ばず利用できるほか，複雑な設定やユーザ登録を必要としない簡潔なインタフェースを採用することで，初めて利用する場合でも扱いやすい設計とした。

本アプリのベータ版は2026年６月に公開し，第８回 国際建設・測量展（CSPI 2026）に出展した。建設会社，建設機械レンタル会社，メーカーなどの来場者からは，「分厚い取扱説明書を調べる負担を減らせる」「顧客からの問い合わせ対応や現場での操作確認に活用できる」「外国人技能者が多い現場では多言語対応が有用である」といった意見が寄せられた。

3　回答生成の仕組み

本アプリの回答生成処理は，スマートフォン端末内ではなくクラウド上のサーバで実行する構成とした（**図１**）。この構

＊技術本部　＊＊住友建機株式会社

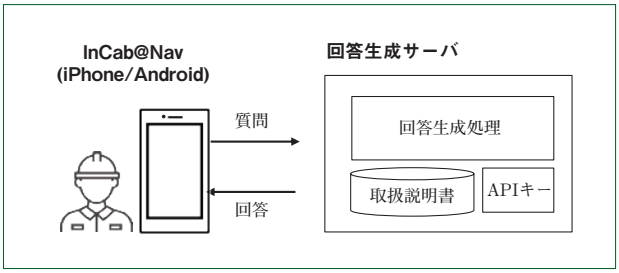


図１　回答生成の構成
User query and answer generation process in InCab@Nav

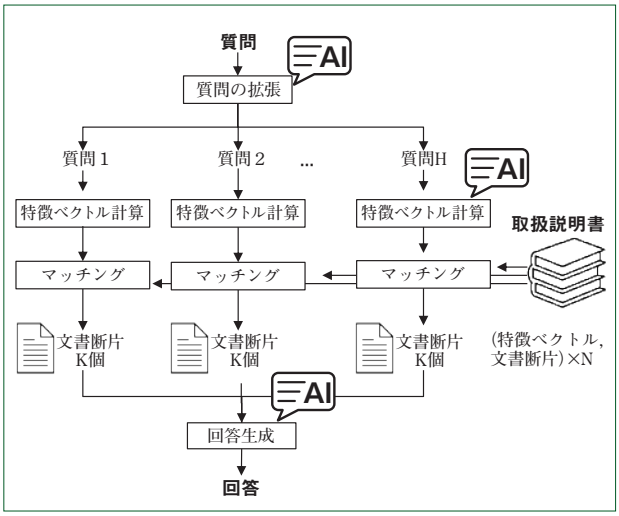


図２　RAG による回答の生成
RAG-based answer generation process

成により，大容量の取扱説明書データをアプリ内に保存する必要がなくなり，アプリ自体の容量を小さく抑えることができる。また，取扱説明書に追加や改訂が生じた場合でも，サーバ側のデータベースを更新することで，その変更をすべての利用者が共有できるので，システムの保守性および運用性の向上が期待できる。さらに，生成AIサービスの利用に必要なAPIキーを端末側に保持しない構成であることから，セキュリティ面においても信頼性が高い。

利用者が入力した質問はサーバへ送信される。音声で入力した場合は，音声認識によってテキストへ変換された後，大規模言語モデル（LLM：Large Language Model）を用いて処理される。しかし，一般に公開されている情報を中心に学習したLLMだけでは，非公開で専門性の高い取扱説明書の内容や，機種ごとに異なる仕様，操作方法などを正確に回答することは難しい。

そこで本アプリでは，検索拡張生成（RAG：Retrieval-Augmented Generation）[1] を採用した（**図２**）。RAGは，利用者の質問に関連する外部文書を検索し，取得した情報を参照しながら回答を生成する手法である。本アプリでは，油圧ショベルの取扱説明書をRAGの知識源として利用することで，機種固有の仕様や操作方法に基づく回答を可能にしている。事前処理では，取扱説明書を章，節，段落などの意味的なまとまりに沿って複数の文書断片に分割し，検索用データベースへ登録する。利用者から質問が入力されると，まず質問拡張を行う。たとえば「油圧ショベル」と「バックホー」のような同義語や関連語を質問に追加するとともに，元の質問と意味が近い複数の質問文を生成する。したがって，現場や利用者によって機械や部品の呼び方が異なる場合でも，関連情報の検索漏れを抑えることができる。次に，拡張した質問文とデータベース内の各文書断片との類似度を計算し，質問との関連性が高い文書を抽出する。この検索では，単純なキーワードの一致だけでなく，使用されている単語が完全には一致していない場合でも，意味的に近い文書を取得できる意味検索を利用している。検索された文書は，質問との関連度に基づいて順位付けされる。その後，内容の重複した文書や回答に不要な冗長部分を除去し，回答生成に必要な情報として統合する。最後に，抽出・整理された文書をLLMへ入力し，提示された情報を根拠として自然言語による回答を生成する。このとき，生成AIには検索で得られた文書のみを根拠として回答するよう指示を与えている。その結果として，存在しない情報を生成する「ハルシネーション」を低減し，取扱説明書に基づいた信頼性の高い回答を実現している。



図３　InCab@Nav のインストール
Installing InCab@Nav application

4　今後の展開

現在公開しているものは，最新機種の取扱説明書を対象としたベータ版であり，サービスの基本的なコンセプトや操作性を紹介するとともに，利用者から意見を収集する段階にある。今後は，新旧さまざまな機種を保有する利用者のニーズに対応するべく，検索対象となる機種を順次拡大する予定である。また，生成AIの特性を考慮しつつ，利用者の質問意図に応じた情報や図表を，より的確に提示できるよう改善を進める。具体的には，検索アルゴリズムの精度向上や回答表示方法の見直しに取り組み，正式なサービス提供に向けて実用性を高めていく。

5　おわりに

（1）建設機械の高機能化・多機能化が進むなか，必要な情報を必要なタイミングで確認できる環境を整備することは，現場作業の円滑化と人材教育の両面において重要である。

（2）InCab@Navは，生成AIを活用して取扱説明書内の情報の検索を行い，必要な情報への迅速なアクセスを実現する。

（3）本アプリは，iPhoneおよびAndroid端末にインストールして利用できる（**図３**）。

（参考文献）

（1）Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., Petroni, F., Karpukhin, V., Goyal, N.Küttler, H., Lewis, M., Yih, W., Rocktäschel, T., Riedel, S. and Kiela, D.,Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks, Advances in Neural Information Processing Systems, 33 (2020) , 9459-9474.

壁面走行ロボットによる鋼構造物非破壊検査の実用化に向けた取組み

Toward Practical NDT of Steel Structures Using Wall-Climbing Robot

●衞藤 晴彦* Haruhiko ETO　豊嶋 崇** Takashi TOYOSHIMA　村田 勇樹*** Yuki MURATA　Mohak VYAS***

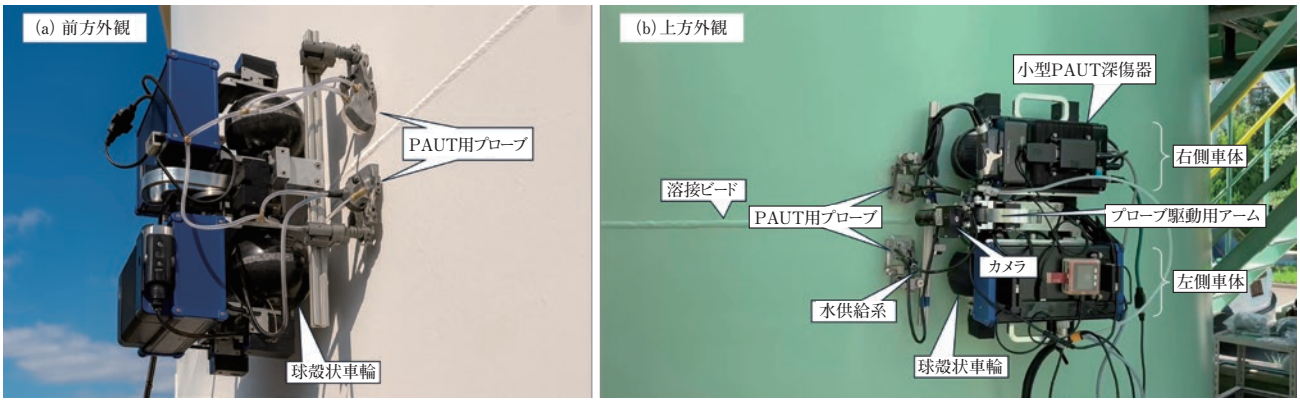


図1　PAUT 用検査装置を搭載した磁気吸着型壁面走行ロボット
Magnetic adhesion wall-climbing robot equipped with PAUT inspection system

1　はじめに

当社は，ボイラ，圧力容器，クレーン，船舶などの大型鋼構造物を手がけている。これらの建造・保守・解体に伴う各種作業の効率化と安全性向上を目的として，多用途への活用が可能なうえ，曲面や段差等を有する複雑な鋼製壁面も移動できる磁気吸着型壁面走行ロボットの開発を進めている(1)(2)。

現在は車体性能の向上を進めながら，適用先の一つである非破壊検査に着目し，本ロボットを共通の走行プラットフォームとするロボット検査ソリューションの実用化を目指している。本ロボットの活用により，高所・狭隘部における検査の効率化と安全性の向上に加え，従来は困難であった部位の検査が可能になることが期待される。

現在，高所・狭隘部の点検にはドローンの活用が進んでおり，非接触の広域計測や局所的な板厚計測が行われている。一方，本ロボットは壁面上で安定した姿勢を保持でき，精密な位置決めや連続走査を要する接触式検査に適している。ドローンと壁面走行ロボット，それぞれ異なる特長を相補的に組み合わせることで，設備状態をより効率的かつ詳細に把握できると期待されている。

2　磁気吸着型壁面走行ロボットの概要

図1に，後述するフェーズドアレイ超音波探傷(PAUT)用検査装置を搭載した本ロボットの外観を示す。本ロボットは４つの球殻状車輪と，左右に分割された車体から構成されている。左右の車体フレームはピッチ方向に相対回転し，壁面形状に受動追従する。この機構と球殻状車輪により，曲面上でも四輪の接地を維持できる。

図2に，車輪の内部構造を示す。球殻状車輪には，車軸およびこれと直交する軸の周りに受動回転可能な永久磁石ユニットを内蔵している。磁石ユニットは，鋼製壁面との磁気吸引力により壁面方向へ向きを変え，曲率が変化する面においても特別な制御を必要とせずに吸着力を維持できる。

また，磁石ユニットの車軸周りの回転角度は，アクチュエータによって能動的に制御できる。吸着力の作用方向を変えることで壁面から天井への面間遷移が可能となるほか，磁石ユニットを壁面から遠ざけ吸着力を低減させることで，ロボットを容易に取り外すことができる。こうした曲面への適応性に加え，磁石ユニットの受動追従と能動制御を選択できることが，本ロボットの特長である。

3　非破壊検査への適用と実環境検証

本ロボットは，検査対象および検査目的に応じて各種検査装置を搭載できる。本章では，実用化に向けて機能高度化を進めている各検査システムの実環境検証事例を示す。

3.1　溶接部および広域面の探傷・肉厚計測

本ロボットにPAUT用プローブまたは渦電流アレイ探傷(ECA)用プローブを搭載し，溶接部や広域面の非破壊検査を行う。PAUTでは，内部きずの探傷と肉厚計測が可能であり，壁面を連続走査することで，それぞれの計測結果を面状に把握できる。一方，ECAでは，表面および表層部のきずや腐食を検出できる。

図1に示すように，本ロボットには小型PAUT探傷器，PAUT用プローブ，その押付け・退避を行うプローブ駆動用アームを搭載している。PAUT計測システムは，これらの装置を搭載したロボット，プローブと検査面との間に接触媒質として水を供給する水供給系およびオペレータ側に設置した計測データ処理用PCから構成される。

溶接部の探傷検査では，ロボット前方に設置したカメラの画像から溶接ビードを自動検出し，これに沿って走行する。**図1(b)**に，タンク側板の溶接ビードを追従走行する様子を示す。溶接ビードの検出にはAIによる画像認識を用いており，溶接種別，塗装色，付着物，表面劣化および陰影等による外観変化に対応できる。溶接部探傷検査は，タンク以外の各種

＊メカトロニクスセグメント　＊＊住重アテックス株式会社　＊＊＊技術本部

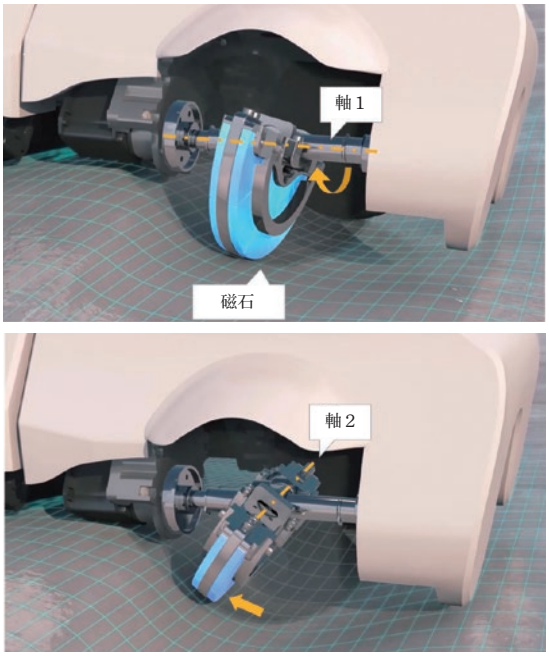


図2　可動磁石ユニットを内蔵した球殻状車輪の内部構造
Internal structure of spherical-shell wheel with movable magnet unit



図3　各種鋼構造物における非破壊検査の実環境検証
Field validation of nondestructive testing on various steel structures

鋼構造物にも可能である。**図3 (a)** に，風力発電設備の塔体溶接部を対象とした検証試験の様子を示す。

図3 (b) に，タンク側板を面状に連続走査する様子を示す。溶接ビードのように走行の基準となる特徴物がないことから，外部計測器で取得した壁面上のロボット位置に基づいて走行軌道を制御している。走行軌道は，上下方向の直線走行と左右方向への所定ピッチの移動を繰り返すラスタ状とし，所定領域を隙間なく走査する。結果，検査位置と計測データを関連付けた探傷・肉厚分布のマップを作成することが可能である。

3.2　CFB ボイラ火炉水管の局所減肉計測

当社製品の一つであるCFBボイラの火炉水管減肉検査に，本ロボットの適用を進めている。**図3 (c)** に，CFBボイラ火炉水管検証試験の様子を示す。火炉水管の減肉検査は，通常，定期修繕工事では火炉内に足場を設置した後に行われるが，本ロボットを用いることで，足場設置前に減肉状況や補修要否を把握できる。このことから補修計画の早期策定と修繕工事期間の短縮が期待できる。

本システムでは，火炉水管に生じるさまざまな減肉のうち，水管外表面の局所的な溝状減肉を対象としている。肉厚は一般に超音波厚さ計のプローブ (UTプローブ) を管外表面に接触させて計測する。しかし，こうした溝状減肉では，溝の形状や寸法によってUTプローブを最深部に密着させられず，最小残存肉厚の直接計測が難しい。そこで，ロボットにはUTプローブに加えてレーザプロファイルセンサを搭載し，レーザプロファイルセンサで計測した溝深さと，UTプローブで計測した溝近傍の健全部における肉厚との差から，溝直下の最小残存肉厚を算出する。

3.3　ばら積み船の船体板厚計測

鉄鉱石，石炭，穀物等を運搬するばら積み船の船体板厚計測に，本ロボットの適用を進めている。船体構造の板厚計測は，ばら積み船に限らず，船級規則に基づく検査や船主による自主検査において，健全性評価の重要な項目である。本ロボットにより，従来の人手検査で必要となる足場や高所作業車などのアクセス設備が削減され，作業の効率化と安全性の向上が期待できる。

図3 (d) に，貨物を積載する船倉を対象とした走行試験および板厚計測試験の様子を示す。ロボットには，UTプローブ，プローブ駆動用アームおよびUT用接触媒質 (グリセリンペースト) の供給装置を搭載している。また，前述した車輪機構の特長を生かし，船倉内の角部や隅部を越えて走行できる。本システムは，海事・海洋分野における革新的取組みとして評価され，一般財団法人日本海事協会のInnovation Endorsement認証を取得した[3]。

4　おわりに

(1) 本報では，磁気吸着型壁面走行ロボットの機構と，非破壊検査への適用について紹介した。
(2) タンク側板や風車塔体溶接部の探傷および肉厚分布計測，CFBボイラ火炉水管の局所減肉計測，ばら積み船の船体板厚計測について，実環境での検証事例を示した。

今後も機能高度化と現場検証を進め，安全で効率的な非破壊検査ソリューションを実用化し，大型鋼構造物の保全に貢献していく。

(参考文献)
(1) Eto, H. and Asada, H. H., Development of a Wheeled Wall-Climbing Robot with a Shape-Adaptive Magnetic Adhesion Mechanism, 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), (2020), 9329-9335.
(2) 衞藤晴彦，蔡麗佳，村野賢一，坂井郁也，鉄鋼壁面走行ロボットの開発，住友重機械技報，208 (2022)，15-20.
(3) 住友重機械工業株式会社，鉄鋼壁面走行ロボットが一般財団法人日本海事協会のInnovation Endorsement認証を取得 – ロボット技術で船舶保全のイノベーション，乗組員の安全性向上を推進 –，(2024-4-2)，https://www.shi.co.jp/info/2024/6kgpsq000000n139.html
(参照日：2026年8月25日)

分散制御用インバータ DX-620シリーズ

Distributed Control Inverter DX-620 Series



近年，空港搬送分野では，市場ニーズの変化に柔軟に対応するべく，将来の増設や改修を見据えた柔軟なシステム構成が求められている。従来の集中制御方式は，設備変更時の対応負荷が大きいという課題が顕著になってきていることから，分散制御方式への要求が高まっている。分散制御方式は，制御機器を設備の各所に分散配置する構成である。この方式により，制御盤の小型化や盤レス化を実現できるほか，設備の増設・改修や立上げ作業を効率的に行うことが可能である。

当社ではこれらのニーズに応えるべく，分散制御用インバータのDX-620シリーズ(1)の開発を市場投入に向けて進めている。本シリーズは配線の簡素化を実現するとともに，搬送システムにおける増設・改修作業の効率化に貢献できる。

DX-620シリーズには，モータ周辺に設置する「据付型」と，モータへ直接搭載する「搭載型」の２種類がある。作業性を重視する場合は接続工数を削減できる搭載型，また，高容量モータの駆動や，モータ付近のスペースに制約がある場合はコンベヤへの据付けが可能な据付型を推奨している。

主要仕様

据付型インバータ容量	三相200V(2.2kW，4.0kW) 三相400V(2.2kW，7.5kW)
搭載型適用モータ容量	IE３三相誘導モータ(0.4～3.0kW) IE５三相同期モータ(0.55～4.0kW)
対象ギヤモータ	ハイポニック減速機シリーズ ベベル・バディボックス減速機シリーズ
対応フィールドネットワーク	Ethernet/IP，PROFINET
制御入力	センサ入力　最大6チャンネル(カスタマイズ可) セーフティ入力(STO)
保護構造	据付型：IP65　搭載型：IP55
海外規格対応	UL，CE，Safety規格
その他機能	ブレーキ制御回路内蔵可 コネクタ配線による配線時間の短縮

特　　長

(1) 従来の集中制御方式では，搬送物の位置を検出するセンサ信号をPLCで取り込み，PLCからインバータへ駆動指令を出力していた。一方，DX-620はセンサ信号を直接入力し，その信号に基づいてコンベヤを駆動することが可能となり，各コンベヤにおける省配線化を実現できる。また，DX-620はEtherNet/IPおよびPROFINETに対応しており，搬送システム全体を管理する上位システムとの連携が可能である。

(2) IP55以上であり，一般的なインバータよりも，ちりなどの固形物および水に対する保護性能が高く，コンベヤなどの装置の近傍に制御盤なしで直接取り付けることが可能である。

(3) 各種パラメータ設定には，PCソフトウェア「DX-studio」を使用する。さらにUSB Type-C端子を標準装備しており，PCと接続するだけで本体への給電とパラメータ設定ができるので，外部電源を必要とせずに，立ち上げ時や保守作業を効率的に行うことができる。

（参考文献）
(1)　分散制御用インバータ DX-620シリーズ，住友重機械技報，218(2026)，2.

※「ハイポニック減速機」および「バディボックス」は，住友重機械工業株式会社の登録商標です。

（ドライブテクノロジーズ SBU　瀧田 延弘）

T/PAPER

論文･報告

T/INVITATION

技術解説

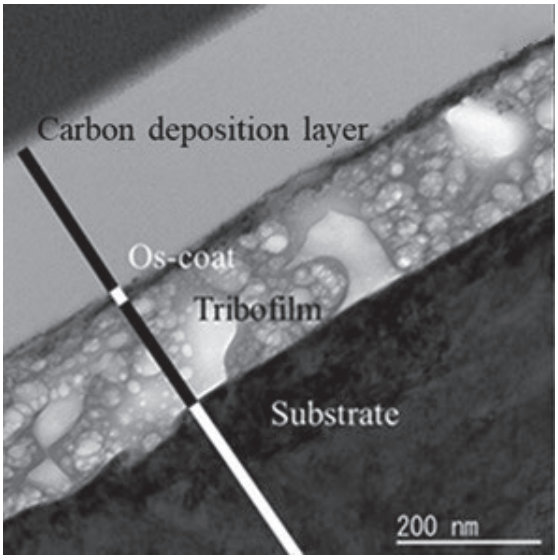
NEW PRODUCT

新製品紹介

カルシウムスルホネート系複合トライボフィルムの耐摩耗性向上メカニズム

Mechanism of Enhanced Wear Resistance in Calcium Sulfonate-Based Composite Tribofilms

●林　優美*　菖蒲祐輔*　石塚正幸*
Yumi HAYASHI　Yusuke AYAME　Masayuki ISHIZUKA



トライボフィルムの断面観察結果
Cross-sectional image of tribofilm

生産年齢人口の減少を背景とした産業機械の高負荷化・長寿命化に伴い，減速機用潤滑剤には高い信頼性が求められている。本報では，カルシウムスルホネートが潤滑剤の耐摩耗性向上に及ぼす影響を明らかにするべく，摩擦・摩耗試験と表面分析を組み合わせて潤滑剤に由来する保護被膜（トライボフィルム）の形成挙動を評価した。潤滑油系では，耐摩耗剤であるジアルキルジチオリン酸亜鉛（ZnDTP）および摩擦調整剤であるモリブデンジチオカーバメイト（MoDTC）にカルシウムスルホネートを併用することで，厚く平滑なトライボフィルムが形成され耐摩耗性が向上した。また，カルシウムスルホネートコンプレックスグリースでは，耐摩耗剤を含まない条件でもカルシウム化合物を主体とする厚いトライボフィルムが形成され，優れた耐摩耗性を示した。これらのことから，カルシウムスルホネートはトライボフィルム形成を促進し，その結果として耐摩耗性向上に寄与することを明らかにした。

With the increasing demand for higher load capacity and longer service life of industrial machinery driven by the decline in the working-age population, highly reliable lubricants are required for gear reducers. In this study, the effect of calcium sulfonate on improving the wear resistance of lubricants was investigated by evaluating tribofilm formation behavior through a combination of friction and wear tests and surface analyses. In lubricating oils, the addition of calcium sulfonate to formulations containing zinc dialkyldithiophosphate (ZnDTP) and molybdenum dithiocarbamate (MoDTC) promoted the formation of a thick and smooth tribofilm, resulting in improved wear resistance. In calcium sulfonate complex grease, a thick tribofilm mainly composed of calcium compounds was formed even in the absence of antiwear additives, exhibiting excellent wear resistance. These results demonstrate that calcium sulfonate promotes tribofilm formation and thereby contributes to improved wear resistance.

1　まえがき

近年，日本をはじめとする先進国では生産年齢人口の減少が進行しており，製造現場においては省人化・自動化のニーズが急速に高まっている。このような背景のもと，協働ロボットをはじめとする産業機械の高度化が進展しており[1]，それらの駆動を担う減速機には，高負荷条件下における長寿命化および高信頼性が求められている。減速機には歯車，オイルシール，軸受など多くのしゅう動が存在し，なかでも摩擦・摩耗特性を制御する潤滑剤が重要な役割を担っている。たとえば，オイルシールでは，弾性体と金属との異種材料接触における潤滑不良がグリース漏れやしゅう動面の摩耗に直結する。さらに，実用される潤滑剤には複数の添加剤が配合されており，摩擦面における添加剤の反応挙動は極めて複雑である。添加剤間の競争吸着や反応阻害により，期待される潤滑性能が十分に発現しない場合があり，そのメカニズムには未解明な点が多い[2]~[4]。

また，従来の潤滑剤評価は実機試験に依存した経験的評価

＊技術本部

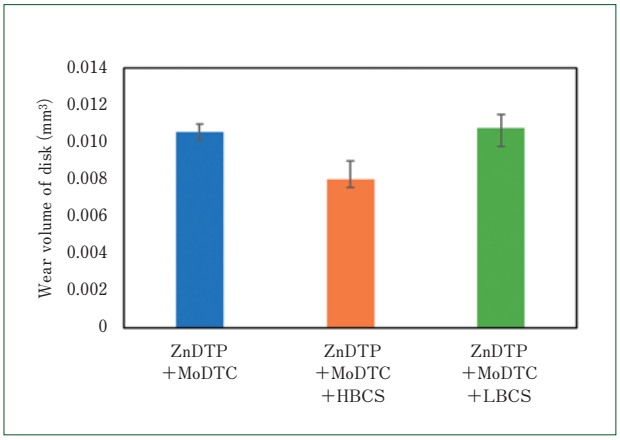


図1　各潤滑油の摩耗量算出結果
Wear volumes of steel disks lubricated using different lubricants

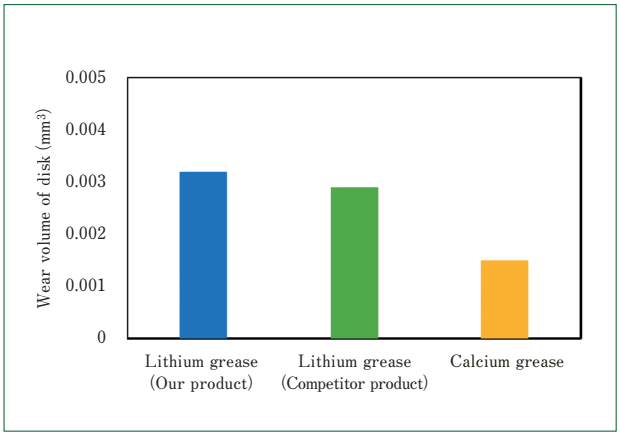


図2　各グリースの摩耗量算出結果
Wear volumes of steel disks lubricated using different greases

が主流であったが，試験コストや期間の観点から効率的な開発には限界がある。これらのことから，実機試験に依存しない潤滑剤の評価と潤滑メカニズムの理解に基づく潤滑設計が求められている。

2　研究目的

本報では，カルシウムスルホネートによる複合添加剤由来トライボフィルムの耐摩耗性向上メカニズムに関する研究結果を報告する。本研究では，摩擦・摩耗試験により得られた摩擦・摩耗特性と，各種表面分析によるトライボフィルムの形成挙動および微細構造評価を組み合わせることで，トライボフィルム構造と耐摩耗性との関係を調査した。さらに，減速機用グリースの分離・分析結果をもとに，本来は防錆剤として用いられてきたカルシウムスルホネートに着目し，複合添加油およびカルシウムスルホネートコンプレックスグリース(CSCG)におけるトライボフィルム形成挙動を検証した。その結果，カルシウムスルホネートがトライボフィルム形成を促進し，耐摩耗性向上に寄与するメカニズムが明らかになった。

3　試験方法

3.1　評価対象とした潤滑剤

減速機用潤滑剤としての有効性を検討するべく，潤滑油およびグリースを評価対象とした。潤滑油には，基油としてポリ-α-オレフィン(PAO)を用い，耐摩耗剤であるZnDTPおよび摩擦調整剤であるMoDTCを添加した油に加え，防錆剤であるカルシウムスルホネートを併用した複合添加油(高塩基性はHBCS併用油，低塩基性はLBCS併用油と称する)を対象とした。また，グリースは，カルシウムスルホネートを増ちょう剤とするCSCGについて評価を行った。

3.2　摩擦特性試験

摩擦特性の評価には，潤滑剤の摩擦・摩耗特性評価に広く用いられる往復動型摩擦試験機(SRV 5，Optimol Instruments, DE)を用いた。試験形態は，ボールオンディスクとし，試験片には軸受鋼(AISI 52100)製のボールおよびディスクを使用した。試験荷重は，潤滑油系では100 N，グリース系では50 Nとし，試験温度はいずれも50℃，振幅は1 mm，周波数は50 Hzとした。これらの条件下で，試験中の摩擦係数を連続的に測定した。

また，摩耗量の評価には，試験後のディスクおよびボールの摩耗痕を観察し，共焦点レーザ顕微鏡を用いて摩耗断面形状を取得した。得られた摩耗幅ならびに断面積から摩耗体積を算出することで，各潤滑剤における耐摩耗性を比較評価した[5]。

3.3　トライボフィルムの形成挙動および断面分析

摩擦試験後に形成されたトライボフィルムの構造を評価するべく，摩擦面表面および断面を分析した。摩擦面に形成されるトライボフィルムの形成過程は，原子間力顕微鏡(AFM：Atomic Force Microscope)を用いた摩擦面その場観察法[6]により評価した。この分析方法により，試料表面に潤滑油を供給した状態でカンチレバーを用いて微小領域を繰り返ししゅう動させ，所定のしゅう動サイクルごとに同一領域の表面形状像を取得した。この方法でトライボフィルムの生成，成長挙動をナノスケールで連続的に観察し，膜厚および表面形状の変化を分析した。また，摩擦試験後のディスク片から，対象とする摩耗痕領域を集束イオンビームにより加工し，摩擦面に対して垂直方向の断面試料を作製した。断面観察には透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて，トライボフィルムの層構造および膜厚を調査した。さらに，エネルギー分散型X線分光法(EDS)および電子エネルギー損失分光法(EELS)により，トライボフィルムの断面組成を分析した。

4　評価結果

4.1　摩擦・摩耗特性

摩擦・摩耗試験の結果，HBCS併用油はカルシウムスルホネート非併用油(ZnDTP＋MoDTC)に比べて良好な耐摩耗性を示した(**図1**)。さらに，HBCS併用油ならびにLBCS併用油の比較結果から，塩基価の高いカルシウムスルホネートであるほど，摩耗低減効果が大きいことが認められた。また，グリースについては，カルシウムスルホネートを増ちょう剤としたCSCGを用いた場合，耐摩耗剤を含むリチウム系グリースに比べて摩耗量が大幅に低減されることが示された(**図2**)。これらの結果から，カルシウムスルホネートは潤滑油およびグリースのいずれにおいても耐摩耗性向上効果を示すことが

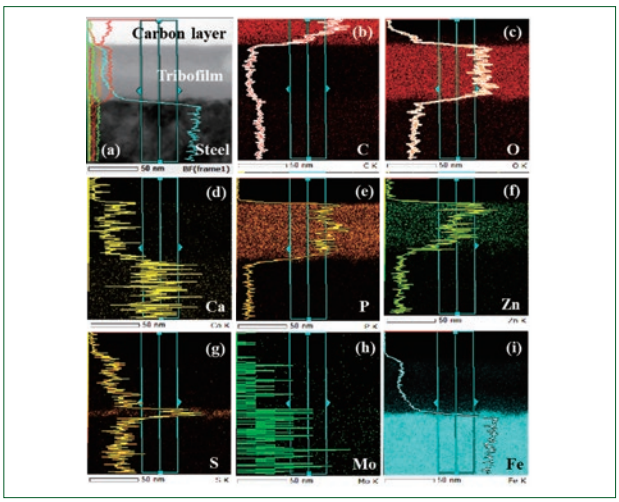


図3　カルシウムスルホネート非併用油由来トライボフィルムの膜厚および断面組成分析結果
Film thickness and cross-sectional composition analysis for tribofilms derived from calcium sulfonate-free oil

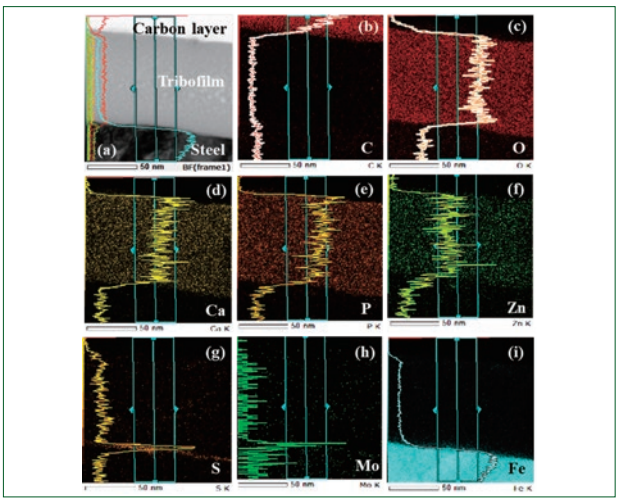


図4　HBCS併用油由来トライボフィルムの膜厚および断面組成分析結果
Film thickness and cross-sectional composition analysis for tribofilms derived from calcium sulfonate combined oil

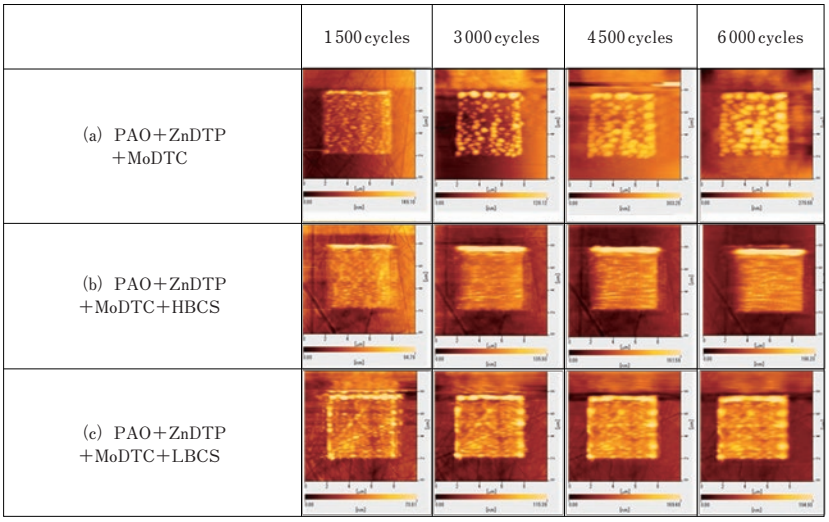


図5　AFM摩擦面その場観察により得られた各潤滑油由来トライボフィルムの形状像比較
Tribofilm formation in different lubricants as observed by in situ atomic force microscopy

確認できた。

4.2　トライボフィルムの断面分析結果

潤滑油系において，カルシウムスルホネート非併用油とHBCS併用油のトライボフィルム断面組成分析結果を**図3**，**図4**に示す。カルシウムスルホネート非併用油（**図3**）ではトライボフィルムの膜厚が約50 nmであるのに対し，HBCS併用油（**図4**）では膜厚が約100 nmまで増大した。また，膜厚全体にわたってCa（カルシウム）が分布していることが元素分析より明らかになった。また，**図5**に示すAFM摩擦面その場観察より得られたトライボフィルム形状においても，カルシウムスルホネート併用油（**図5** (b)，(c)）では厚く，さらに平滑な膜が形成されていることが分かった。一方，CSCG潤滑後のトライボフィルム断面の観察結果（**図6**）より，トライボフィルム断面の膜厚は約170 nmもの厚い膜が形成されていることが確認された。さらに，トライボフィルムの構成元素はC（炭素），O（酸素），Ca（カルシウム）であり（**図7**），トライボフィルム領域の高倍率観察結果（**図8**）から，トライボフィルム中には数nm程度の微粒子が無数に取り込まれていることが判明した。

5　本研究の成果と考察および適用展開

カルシウムスルホネートは単なる防錆剤またはグリース増ちょう剤としてだけでなく，摩擦面におけるトライボフィルム形成に直接寄与することが示された。潤滑油系では，カルシウムスルホネートを併用することで，ZnDTPおよびMoDTCを含む摩擦調整剤由来の摩擦特性を損なうことなく耐摩耗性が向上した。断面分析では，カルシウムスルホネート併用油において膜厚が増大し，膜全体にCaが分布することが確認されたことから，Ca化合物を含む複合膜が摩擦面を保護したものと考えられる。特に，高塩基性カルシウムスルホネートでは摩耗低減効果が大きく，炭酸カルシウムを主とするカルシウム化合物がトライボフィルム形成に寄与したと推察される。

一方，CSCGでは，耐摩耗剤を含むリチウム系グリースと比較して低い摩耗量を示し，そのトライボフィルムはC，O，Caを主成分とし，無数の微粒子を取り込んだ厚い膜であっ

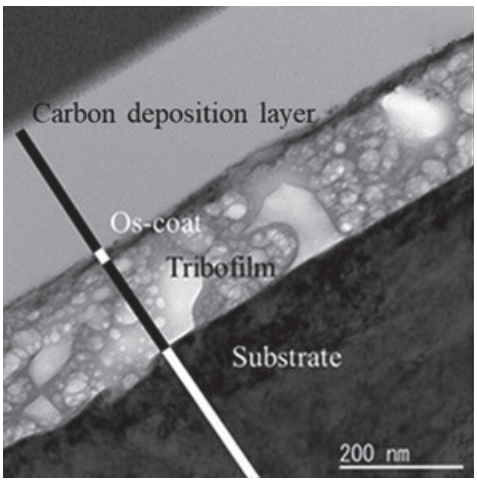


図6　CSCG由来トライボフィルムのTEM観察結果
Cross-sectional TEM image of CSCG-derived tribofilm

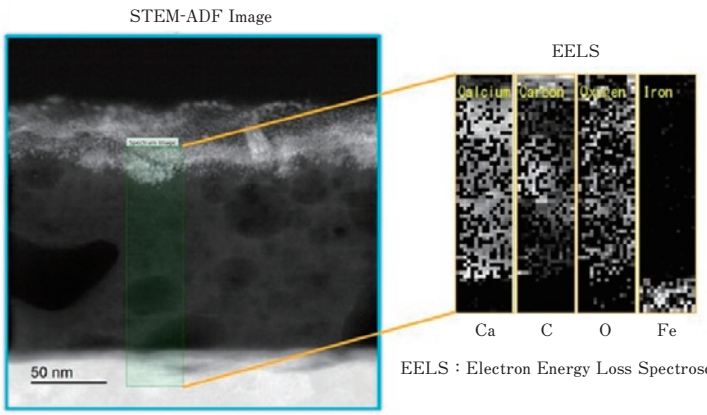


図7　CSCG由来トライボフィルムのEELSマッピング結果
EELS mapping of CSCG-derived tribofilm

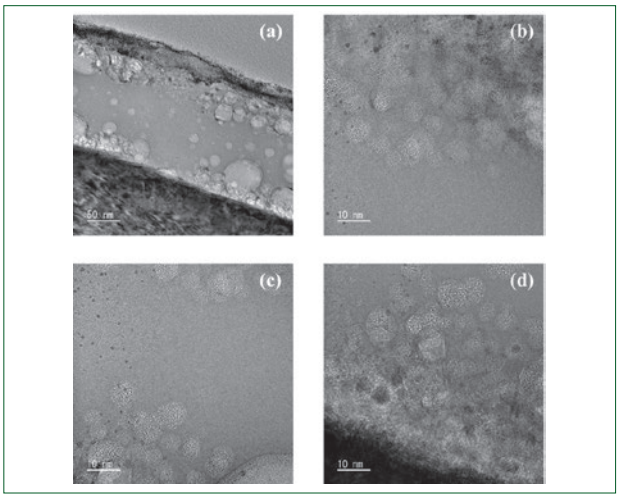


図8　CSCG由来トライボフィルム領域の高倍率観察結果
High-magnification TEM images of CSCG-derived tribofilm region

た。これらの結果から，増ちょう剤由来のカルシウムスルホネートが摩擦面でトライボフィルムを形成し，しゅう動面を保護することが認められた。

このように，摩擦・摩耗試験に加えて種々の分析手法を組み合わせることで，潤滑剤の性能を摩擦面の現象と関連付けて評価することが可能となった。この分析手法は，添加剤配合およびグリース組成の設計指針を得るうえで有効であり，減速機の長寿命化に向けた潤滑設計の効率化に貢献できる。特にCSCGは，耐摩耗剤を含まない条件においても優れた耐摩耗性を示したことから，長寿命化が求められる各種産業機械用潤滑剤への適用が期待される。また，リチウム資源への依存低減の観点からも，リチウム系グリースの代替技術としての可能性を有している。本研究で得られた成果は，STLE Annual Meeting & Exhibitionおよびトライボロジー会議において発表実績があり，日本トライボロジー学会では学会奨励賞を受賞した。これらの社外発信を通じて，本研究における評価技術の有用性を示した。今後は，一連の研究で得られた知見を活用するとともに，実機耐久性との相関を見極めることで，潤滑メカニズムの理解に基づく潤滑剤開発を推進し，当社製品の長寿命化および高信頼性化に貢献していく。

6　むすび

(1) 摩擦・摩耗試験および各種表面分析により，トライボフィルムの微細構造と耐摩耗性との関係を評価した。この分析手法は，添加剤配合およびグリース組成の設計指針を得るうえで有効である。

(2) ZnDTPおよびMoDTCを含む潤滑油にカルシウムスルホネートを併用することで，厚く均一なトライボフィルムが形成され，耐摩耗性が向上することを確認した。

(3) カルシウムスルホネートコンプレックスグリースでは，カルシウム化合物を主体とする厚いトライボフィルムが形成され，従来のリチウムグリースと比べて優れた耐摩耗性を示すことを明らかにした。特に，耐摩耗剤を含まない条件下でも優れた耐摩耗性が認められたことから，長寿命化を求められる各種産業機械用潤滑剤への適用が期待される。

(参考文献)

(1) Robots and robotic devices-Collaborative robots, ISO/TS 15066, International Organization for Standardization, 2016.

(2) 林 優美，添加剤由来トライボフィルムの耐摩耗性評価技術に関する研究，東京理科大学博士学位論文，2026.

(3) Hayashi, Y., Sato, K. and Sasaki, S., The Effect of Lubricity of Calcium Sulfonate on ZnDTP and MoDTC, Tribology Letters, 72-62 (2024)

(4) Hayashi, Y., Sato, K. and Sasaki, S., In Situ AFM Observation of Tribofilms Derived from Antiwear Additives: Formation and Wear Resistance, Tribology Transactions, 68-4 (2025) , 727-738

(5) ASTM International, ASTM D6425-19: Standard Test Method for Measuring Friction and Wear Properties of Extreme Pressure (EP) Lubricating Oils Using SRV Test Machine, ASTM International, 2019.

(6) Gosvami, N. N., Ma, J. and Carpick, R. W., An in situ method for simultaneous friction measurements and imaging of interfacial tribochemical film growth in lubricated contacts, Tribology Letters, 66-154 (2018)

系統インフラとしてのLAESと運用高度化技術

LAES for Grid Infrastructure and Advanced Operation Technologies

●秋　元　慎　介*
Shinsuke AKIMOTO



SHI 廿日市エネルギー貯蔵発電所
Sumitomo Heavy Industries, Ltd. Hatsukaichi LAES power station

1　はじめに

カーボンニュートラルに向けた再生可能エネルギーの導入拡大に伴い，電力システムは大きな転換期にある。太陽光や風力発電は出力が自然条件に左右されることから発電と需要の間には時間的なずれが生じる。また，火力発電所等の同期発電機の稼働低下により，慣性力や無効電力といった系統安定化機能の確保も課題とされている。

こうした背景のもと，将来の電力システムには「電力を必要な時間帯に供給する機能」と「系統を安定的に維持する機能」の双方を担う新たなインフラが求められている。当社はこの課題の解決に向け，2020年２月，液体空気エネルギー貯蔵（LAES）技術の開発を手掛ける英国Highview Power社（旧Highview Enterprises社）に出資した。さらに，広島県廿日市市に出力4.99MW，貯蔵容量約20MWh（４時間）の実証プラントを建設し，2025年12月より商用運転を開始した[(1)]。本報では，LAESの概要ならびに電力システムにおける役割やシステム構成について概説し，自動起動停止機能および運転支援システムIZANAを活用した運用高度化の取組みについて紹介する。

2　系統インフラとしてのLAES

2.1　電力システムにおけるLAESの役割

LAESは，電力を液体空気のかたちで貯蔵し，必要な時間に放電するエネルギー貯蔵技術である。「プラント規模の蓄電池」のようなものと捉えると理解しやすい。

本技術には大きく２つの役割がある。

（1）余剰電力を需要の高い時間帯へ移動する役割（エネルギーシフト）

太陽光発電などにより余った電力を貯蔵し，需要が増加する時間帯に放電して供給することで，発電と需要の時間的なずれを調整し，再生可能エネルギーの有効利用を促進する。

（2）系統を安定化する役割

回転体である同期発電機を用いた発電システムによって，慣性力や無効電力の供給が可能となり，電圧および周波数の安定化に寄与する。

これらの役割からLAESは，単なる蓄電設備ではなく，エネルギーシフトと系統安定化の双方を担うインフラとして位置付けられる。

2.2　LAESの仕組み

図１に，LAESの基本構成を示す。

LAESは充電，貯蔵，放電の３つのプロセスで構成される。充電時には，空気を圧縮・冷却することで液化空気を生成し，タンクに貯蔵する。圧縮過程で発生する熱は回収して蓄熱する。放電時には，液化空気を気化・加熱してタービンへ供給し発電する。気化時に発生する冷熱を回収して蓄冷する一方，充電時に回収した熱を再利用することで，プロセス全体の効率向上を図っている。

また，LAESは圧縮機，熱交換器，タービン等の既存技術を組み合わせた設備なので，大規模化が容易であるうえに立地の柔軟性に優れている点も大きな特長である。

2.3　商用実証プラント概要

広島県廿日市市に4.99MW×４時間（約20MWh）の実証プラントを設置し，2025年12月から商用運転を開始した。本設備は，世界初（当社調べ）の液化空気の製造および貯蔵，発電までを一つのシステムで構成したフルパッケージであり，容量市場，卸電力市場，需給調整市場への対応を想定して実運用データの蓄積を進めている。この実証プラントにより，LAESが実際の電力系統において供給力および調整力として機能することが明らかになりつつある。

3　LAES運転上の特徴と課題

3.1　充放電タイミングの重要性

LAESは，電力が余っている時間帯に充電し，需要が高ま

＊エネルギー環境 SBU

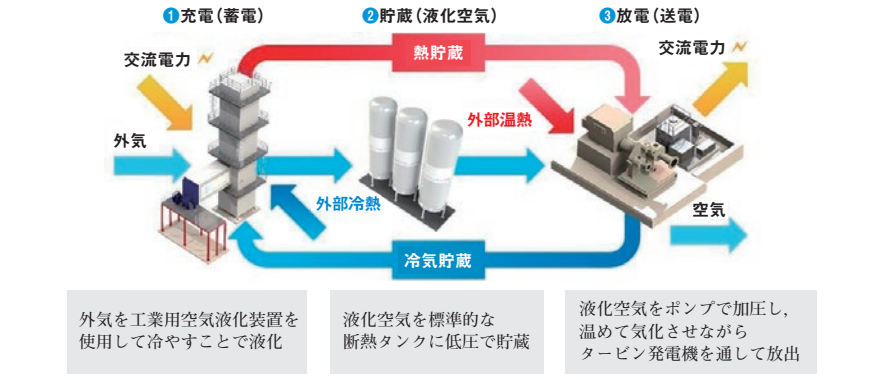


図１　LAES のプロセスイメージ
Schematic diagram of LAES process

る時間帯に放電することで，電力を時間的に融通する機能を十分に発揮できることから，いつ充電し，いつ放電するかが重要となる。

また，充電，放電，待機の各モードを切り替えながら運転するので各モードでの確認すべき設備状態が異なり，温度，圧力，流量，貯蔵量など多くの情報を踏まえた判断が必要となる。したがって，LAESを安定して活用するには，充放電のタイミングを適切に判断し，設備状態を把握しながら運転する仕組みが重要となる。

3.2　従来運用の限界

LAESプラントでは，液化空気タンク残量，蓄熱・蓄冷設備の状態，圧縮機や発電設備の運転状態など，多くの状態量を監視する必要がある。さらに，起動停止を判断する際には，設備の状態だけでなく，電力需要や市場動向も考慮することが求められる。

これらを人手だけで常に把握し，適切な判断につなげることは容易ではないことから，運転状態の可視化や判断支援を行うデジタル技術の導入が重要となる。

4　運転を支援する自動化・デジタル技術

4.1　自動起動停止

LAESの起動時には，液化空気製造設備，熱・冷熱貯蔵設備，発電設備など複数の設備を相互に状態を確認しながら所定の順序で立ち上げる必要がある。しかし，本実証設備では，これらの起動・停止シーケンスを自動化することにより，オペレータは起動指令を与えるのみで，設備状態を監視していれば自動的にフル負荷まで立ち上がる。

その結果，起動停止操作の標準化やオペレータ依存の低減が図れるとともに，確実な起動と安定した運転が可能となる。

4.2　IZANA による運転支援（図２）

IZANAは，当社が循環流動層（CFB）ボイラ向けに開発してきたプラント運転支援システムである[(2)]。運転データを収集・解析し，プラント状態の可視化，異常兆候の検知，運転判断に必要な情報提供を行う機能を有する。CFBボイラで培った知見をLAES設備にも適用することで，運転の高度化を図っている。

LAESプラントでは，液化空気の貯蔵量をはじめ，蓄熱・蓄冷設備の状態や発電設備の運転状況など，多数の状態量を監視・管理する必要がある。IZANAを適用することによって，



図２　IZANA による運転支援イメージ
Example of operation support using IZANA

これらの情報を一元的に把握し，起動停止や充放電タイミングの判断を支援するとともに，将来的には設備異常の早期検知への活用も期待される。

4.3　自動化・運転支援による効果

自動化とIZANAの組み合わせにより，「起動・停止操作の標準化」「設備状態の監視・管理の容易化」「充放電タイミングの判断支援」といった効果が期待できる。

これによりオペレータは，設備状態や運転履歴を容易に把握でき，より適切な運転判断が可能となる。

5　おわりに

本報では，LAESの基本概念と電力系統における役割，および自動起動停止機能と運転支援システムIZANAによる運用高度化の取組みについて紹介した。

(1) LAESはエネルギーシフトと系統安定化機能を同時に提供する技術である。

(2) 将来の再生可能エネルギー大量導入を支える電力インフラとして期待される。

(3) 自動化および運転支援技術により，オペレータの判断を支援し，安定した運転に寄与できる。

今後は，運転データの活用や自動化技術の発展により，設備状態の把握と，運転判断の高度化を図り，より安定したプラント運転を目指していく。

(参考文献)
(1)　液化空気エネルギー貯蔵（LAES）商用実証プラント，住友重機械技報，218 (2026)，9.
(2)　IZANA™（プラント運用支援システム）の開発，住友重機械技報，202 (2022)，25-26.

※「IZANA」は，住友重機械工業株式会社の登録商標です。

SH250-8 金属リサイクル機械

SH250-8 Material Recycle Machine



近年金属リサイクル業界では，脱炭素社会の実現に向けた資源循環の重要性が高まる一方で，慢性的な人手不足やオペレータの高齢化など，現場を取り巻く環境も大きく変化している。加えて，作業量の増加や高効率化への要求から，マテリアルハンドリング機には高い生産性のみならず，長時間連続作業における快適性や扱いやすさも求められてきている。特にスクラップ処理や仕分け作業では，旋回やアタッチメント操作の繰返しで，キャブの振動や後揺れがオペレータ疲労につながり，作業リズムや操作性にも影響を及ぼしていた。また，作業内容や熟練度によって求められる操作フィーリングもオペレータごとに異なることから，誰もが扱いやすい機械づくりが重要となっている。

住友建機株式会社は「オペレータファースト」の思想をもとに，疲労低減による快適性向上と安定した作業性の両立を目指して本機の開発を進めてきた。エレベータキャブの振動低減においては，構造剛性の向上や，アシストシリンダの追加によるリンク支持剛性向上を織り込み，振動の発生や伝達，収束までを含めた総合的な見直しを行いながら，長時間でも快適に作業できる環境づくりに取り組んでいる。また，キャブマウント特性や操作応答特性の最適化を進めるとともに，お客様試乗会を含む実機検証や評価を繰り返し実施し，振動低減と操作性の両立を追求した。操作応答特性については，好みに応じて変更可能な機能を採用し，熟練者から経験の浅いオペレータまで幅広いユーザが扱いやすい操作特性となっている。干渉防止装置についてもキャブ近接作業時の扱いやすさに着目し，新型バケット角度センサを採用した。その効果は，キャブ近接時の角度検出精度を高めるとともに，従来機で課題となっていた手前作業領域での作業性を改善し，仕分けや清掃作業時におけるスムーズな近接操作を実現している。こうした一連の取組みにより，オペレータの負担軽減だけでなく，連続作業時における安定した作業リズムの維持にも配慮し，実作業における扱いやすさと高効率作業の両立を図っている。

特　　長

(1) 新型エレベータキャブ構造を採用し，メインシリンダに加えて左右にアシストシリンダを配置したリンク構造とすることでリンク支持剛性をさらに高めている。
(2) キャブマウント特性を見直し，振動入力に対する減衰性能を最適化した。
(3) 振動減衰性能の最適化でキャブ振動を低減し，振動収束性の改善により作業性が安定した。
(4) 干渉防止装置に新型バケット角度センサを採用し，キャブ近接時における角度検出精度を向上させている。
(5) キャブ近接作業時の高精度な操作性で，仕分け作業時の扱いやすさと効率化を実現した。
(6) レバー応答特性を５段階で設定し，作業内容やオペレータの好みに応じた操作フィーリングを選択できる。

（住友建機株式会社　小野 琢人）

住友重機械技報第220号発行に当たり

住友重機械技報第220号をお届け致します。

本誌は，当社が常々ご指導いただいている方々へ，最近の新製品，新技術をご紹介申し上げ，より一層のご理解とご協力をいただくよう編集したものです。

本誌の内容につきましては，さらに充実するよう努めます。今後ともよろしくご支援下さるよう，お願い申し上げます。

2026年11月

〒141-6025　東京都品川区大崎2丁目1番1号（ThinkPark Tower）
住友重機械工業株式会社
技術本部　技報編集事務局

製品・ソリューション

メカトロニクス

- ギヤモータ
- 大型ギヤボックス
- 精密制御用減速機
- モータ・インバータ
- ドライブシステム
- AGV/AMR ドライブソリューション
- 自律移動ロボット
- 極低温冷凍機
- クライオポンプ
- 真空ロボット
- 精密位置決め装置
- モーションコンポーネント

インダストリアル マシナリー

- イオン注入装置
- レーザ関連装置
- イオンビーム照射技術サービス
- PET 用サイクロトロンシステム
- PET 用薬剤合成システム
- 陽子線治療システム
- BNCT
- 電子線照射サービス
- 検査診断技術サービス
- 真空成膜装置
- 鍛造プレス
- STAF (Steel Tube Air Forming)
- リフティングマグネット
- 圧延用ロール
- クーラント処理装置
- 航空機ジェットエンジン用ブレード
- 射出成形機
- ラミネータ装置
- スピニングマシン
- クリーンルームシステム
- 集塵装置
- 混練機
- クーリングタワー

STAF は，住友重機械工業株式会社の登録商標です。

ロジスティックス&コンストラクション

- 運搬荷役機械
- 物流システム
- クローラクレーン
- 基礎工事用機械 (アースドリル、地盤改良機など)
- 移動式クレーン
- 油圧ショベル
- 道路機械
- フォークリフト

エネルギー&ライフライン

- 液化空気エネルギー貯蔵 (LAES)
- 流動床ガス化炉
- 循環流動層 (CFB) ボイラ
- バブリング流動床 (BFB) ボイラ
- 廃棄物発電プラント
- 廃熱ボイラ
- 電気集じん機
- バグフィルタ式排ガス処理装置
- 灰処理設備
- 蒸発・晶析装置
- CFB スクラバ
- 排煙脱硝装置
- デジタルサービス(プラント運用支援システム)
- ロータリーキルン式再資源化設備
- 撹拌槽
- 蒸留・抽出設備
- プラントエンジニアリング
- コークス炉機械
- コークドラム・反応容器
- 鋼構造物
- 下水処理施設
- 用水・純水処理設備
- 産業排水処理施設
- 食品機械
- 洋上風力事業
- 風力推進コンポーネント

その他

- IT ソリューション
- 警備業務

事業所

本　　社　〒141-6025　東京都品川区大崎2丁目1番1号(ThinkPark Tower)
関西支社　〒541-0041　大阪市中央区北浜4丁目1番1号(淀屋橋ゲートタワー)
中部支社　〒461-0005　名古屋市東区東桜1丁目10番24号(栄大野ビル)
九州支社　〒812-0025　福岡市博多区店屋町8番30号(博多フコク生命ビル)
田無製造所　〒188-8585　東京都西東京市谷戸町2丁目1番1号
千葉製造所　〒263-0001　千葉市稲毛区長沼原町731番1号
横須賀製造所　〒237-8555　神奈川県横須賀市夏島町19番地
名古屋製造所　〒474-8501　愛知県大府市朝日町6丁目1番地
岡山製造所　〒713-8501　岡山県倉敷市玉島乙島 8230番地
愛媛製造所
　新居浜工場　〒792-8588　愛媛県新居浜市惣開町5番2号
　西条工場　〒799-1393　愛媛県西条市今在家1501番地
技術研究所　〒237-8555　神奈川県横須賀市夏島町19番地
技術研究所　〒792-8588　愛媛県新居浜市惣開町5番2号
　(新居浜)

本号に関するお問い合わせは，技術本部技報編集事務局(電話番号は下記)宛お願い致します。

住友重機械工業株式会社のホームページ https://www.shi.co.jp/

技報編集委員

委員長　牧野　健一
委　員　梶井　宏樹
　　廣田　真人
　　井上　千晶
　　梶谷　純平
　　小宮山隆幸
　　有吉　政博
　　石川　賢治
　　諏訪　義和
　　幾島　悠喜
委　員　金　鐘剛
　　阿部　昌博
　　宮島　司
　　藤本　典之
　　加藤木　暸
　　田中　哲平
　　前田　憲男
　　山崎　勝彦
　　光永　尚生
　　山室　征也
事務局　技術本部
編集協力　(株)千代田プランニング

住友重機械技報
第220号　非売品
2026年11月20日発行
発　行　住友重機械工業株式会社
〒141-6025　東京都品川区大崎2丁目1番1号
(ThinkPark Tower)
お問い合わせ電話　横須賀 046-869-2300
発行人　山本　章

無断転載・複製を禁ず　©

住友重機械工業株式会社
Sumitomo Heavy Industries, Ltd.