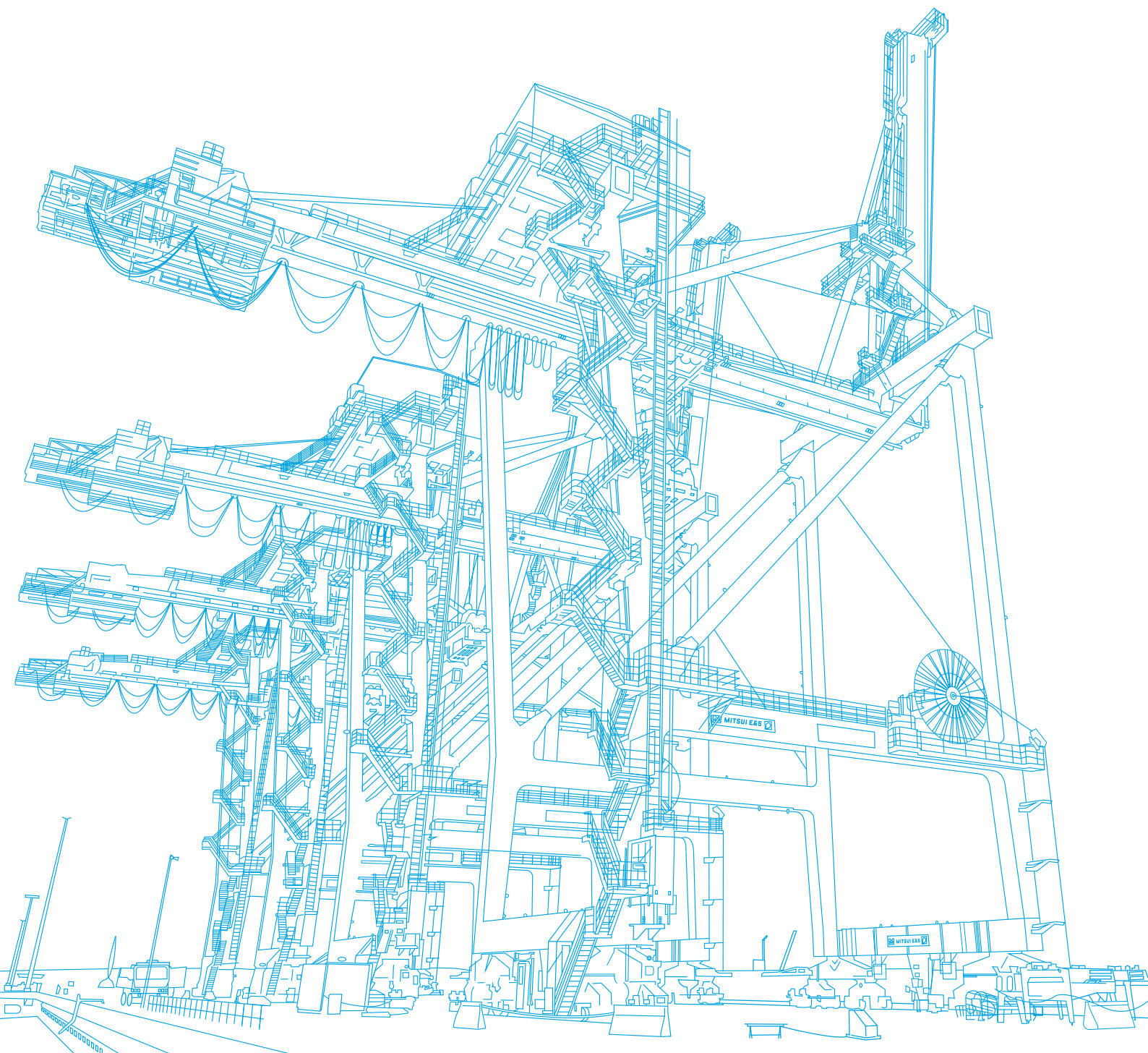




三井E&S技報

MITSUI E&S GROUP TECHNICAL REVIEW

第1号



目 次

▶ REPORT

遠隔操作によるドローンポートを活用したプラント点検の実証試験報告 —点検業務のさらなる効率化と自動巡視点検実現に向けた技術検証—	1
水中船体点検および推進性能解析の実証試験報告書 —船体汚損に関する課題に対応した新規事業開発—	4
エッジ AI のトライアル —RTG の位置制御における画像認識技術の試行—	6
ロータリーウォッシャー デモ機の試作 —ロータリーウォッシャーの内部洗浄のデモンストレーション（顧客向け）—	8

▶ 論 文

大型船用 2 ストローク水素焚き機関における燃焼試験および数値シミュレーション	9
船用燃料としてのメタノール	18
コンテナ荷役の作業環境改善と生産性向上 —自動化ターミナルおよび遠隔自動運転に関する（株）三井 E&S の取り組み—	24
タイヤ式門型クレーンの地震時応答に関する模型振動実験	31
港湾の脱炭素化のための水素駆動型荷役機器デバイスの開発と運用管理	39
大規模コンテナ物流時代に適応したコンテナターミナル作業計画法の概念設計	47
画像認識による大型クレーンインフラ設備の錆検知とその腐食度評価方法の検討	57

巻 頭 言

株式会社三井 E&S 代表取締役社長

高橋 岳之



三井 E&S は、創業以来 100 年を超える歴史の中で、社会の発展を支える技術の創造に取り組み、モノづくりを通じて人々の豊かな暮らしに貢献してまいりました。

現在、世界は脱炭素化やデジタル化といった大きな潮流の中にあり、産業構造や価値観がこれまでにないスピードで変化しています。

当社はこうした変化を新たな成長機会と捉え、マテリアリティとして「脱炭素社会の実現」と「人口縮小化社会の課題解決」を 2 つの柱として掲げています。

そのもとで“グリーン”と“デジタル”を軸とした技術開発に挑戦し、環境負荷低減と生産性向上の両立を図りながら、持続可能な社会に貢献する価値創造を推進しています。

さらに、当社が長年にわたり培ってきた設計・解析・製造・制御・保守に関する技術基盤を横断的に融合させ、掛け合わせることで、新たなイノベーションの創出に取り組んでいます。

多様化・高度化する社会課題の解決に向け、産業界や地域社会、そして次世代にどのような価値を提供できるか、市場・顧客の現場課題を起点とする「マーケットイン」の視点を徹底し、既存の枠組みにとらわれない新たな挑戦を続けています。

前身である三井造船時代に第 220 号まで、三井 E&S ホールディングスとなってから第 3 号まで技報を刊行してまいりました。通算すれば本号は第 224 号にあたりますが、新生・三井 E&S として初の技報であることから、本号を「新・三井 E&S 技報 第 1 号」と位置づけております。

本技報が、当社の最新の技術開発および実証成果を広く共有するとともに、産業界・行政・学界の皆様との対話と連携を深める契機となり、ここに掲載された研究や事例が新たな発想や協創を生み出し、より良い未来をともに築く一助となることを心より願っております。

遠隔操作によるドローンポートを活用した プラント点検の実証試験報告

—点検業務のさらなる効率化と自動巡視点検実現に向けた技術検証—

1. はじめに

クラサケミカル株式会社は、2025年1月に株式会社レゾナックから石油化学事業を分社化して誕生した化学メーカーであり、大分に主力製造拠点である大分石油化学コンビナートを有している。本報では、この大分石油化学コンビナートにおいて実施した「遠隔操作によるドローンポートを活用したプラント設備点検」に関する実証試験の結果を報告する。

本試験では、三井E&Sが開発したドローン点検支援アプリケーション「ドローンスナップ」を用いて、点検業務の効率化と自動巡視点検の実現を目的とした技術検証を行った。

2. 背景および課題

プラント設備の定期点検は、法令に基づき外観目視を中心に実施しているが、設備の数が多く、高所・狭所も多いため、網羅性や安全性の確保、点検効率の向上が課題となっていた。

特に、法定点検対象外の設備については長期間未点検となる事例もあり、全体的な点検の平準化も必要とされていた。

また、高所点検には足場設置が必要であり、費用負担（数百万円規模）や作業リスクも発生していた。実際には補修不要な箇所も多く、足場設置の効率化も課題であった。

さらに、同社では4年ごとに全プラントを停止し、2か月間にわたる「定修（定期修理）」を実施しているが、点検・補修作業がこの期間に集中することによる生産影響も懸念されていた。そのため、通常稼働時から効率的に設備点検を実施できる仕組みの導入が求められていた。

3. 技術選定理由

従来のドローン点検PoC（概念実証）では、外部委託による操縦・撮影が中心であり、コストおよび操縦技量依存性が高かった。また、安全面や法規制の課題もあり、お客様の運用には至っていなかった。またドローンを飛行させる際には、現地にて機材を準備する必要があり、大変手間であった。

今回採用した「ドローンスナップ」は、PC上で3Dモデルを用いた飛行ルートおよび撮影ポイントの事前設定が可能であり、操縦者の熟練度に依存せず、同一条件で再現性の高い撮影が可能に優位性があると判断した。また、ドローンポートとして、「DJI Dock3」は、遠隔地からの飛行指示と操作、映像確認ができ、離陸から飛行及び撮影、着陸と給電まで自動で実施できることから、機材準備の手間を省けるという点において優位性があると判断した。



図1 ドローンポート「DJI Dock3」

4. 実証試験の概要

(1) 実施場所

クラサケミカル株式会社 大分石油化学コンビナート様（大分県）

(2) 実施時期

2025年4月

(3) 使用機器・システム

- ・ドローンスナップ
- ・DJI Dock3（ドローンポート）
- ・点検対象：ナフサタンク外面腐食確認，フレアスタックの点火状況確認，計器メータ数値確認

(4) 実施内容

1. 点検対象設備の3Dモデルをドローンによる写真測量により生成
2. アプリ上で飛行ルート・撮影ポイントを設定
3. 自動飛行による画像取得
4. 撮影結果の比較・評価（画角，再現性，安全性）
5. 撮影画像のAI分析適用

5. 結果および考察

ドローンスナップを用いた自動飛行により，事前に設定したルート通りに安定した飛行を確認した。

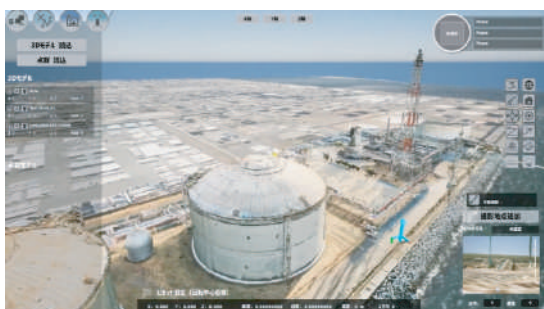


図2 ドローンスナップによる飛行ルート作成例

ナフサタンク外面腐食確認に関しては，従来，タンクに上り目視で行っていた点検を，ドローンの自動飛行で安全で，迅速かつ高精度に実施できることを確認した。

フレアスタックの点火状況に関しては，高所作業というリスクを排除し，点火状況を確認することができることを確認した。



図3 ナフサタンク外面腐食確認



図4 フレアスタックの点火状況確認



図5 計器メータの数値確認

計器メータの数値確認は，対象のメータを正確に撮影でき，その画像をAIによる画像認識により，針の角度を判別できることを確認した。

これらの結果から，本システムを活用することで，外部委託によらずお客様でのドローン点検実施が可能であり，点検コストおよび作業負荷の低減，安全性の向上が期待できると判断された。またドローンポートを活用することで，手間であった準備作業が不要で，いつでも簡単にドローンに

よる点検・巡視飛行が実現できると判断された。

6. 今後の展望

今後は、赤外線（サーマル）カメラによる温度異常検知や、画像解析による腐食範囲の変化検出などの機能拡張を検討している。

また、画像データと温度情報を組み合わせ、錆進行や減肉の推定にも応用できる可能性を探る。

段階的に対象エリアを拡大し、将来的にはドローン・ロボットを主体とした自動点検体制の確立を目指す。

7. まとめ

本実証試験を通じて、「ドローンスナップ」を用いた自動飛行点検が、プラント設備点検の**再現性・効率性・安全性**を高める有効な手段であることを確認した。

同技術は、プラント保全業務のDX推進およびコスト最適化に寄与することが期待される。

参考情報

ドローンスナップ 概要

大型構造物の3Dモデルをもとに、3DCG空間上で点検箇所を設定し、自動飛行ルートを生成することで、同一画角・高精度な撮影を実現するアプリケーション。

主な特長は以下の通り：

- ・点検時間・コストの大幅削減
- ・同一画角での撮影再現性
- ・構造物の低コスト3Dモデル化
- ・複数機種のドローンに対応
- ・専門操縦者を必要としない運用性

担当部署：成長事業推進事業部マーケティング部

水中船体点検および推進性能解析の実証試験報告書

—船体汚損に関する課題に対応した新規事業開発—



1. はじめに

株式会社フレッシュキャリアーズ（以下 FCC）所有船“KAKARIKI”を対象として実施した新規事業開発を目的とした実証試験の結果を報告する。

本試験では、定期的な水中船体点検と継続的な推進性能解析により、水中船体汚損が推進性能に及ぼす影響の定量的な把握を試みた。

加えて、ニュージーランド（以下 NZ）入港承認に関わる点検レポートの作成と船体汚損管理計画（BFMP）の策定を実施した。

2. 背景および課題

水中船体汚損とはフジツボや藻類等の生物が船体に付着した状態を指し、様々な問題が存在する。

まず、船体汚損は船舶の摩擦抵抗を増加させ、推進性能（燃料消費効率）の悪化を招く。船舶の年間重油使用量は数万トンにもなるため、燃費への影響は甚大である。また近年は GHG 排出削減に関する国際規制・条約の強化も課題となっている。船体洗浄により推進性能は回復可能であるが、実海域においては気象海象による外乱が大きいため、実際の推進性能の把握が難しいという課題があった。

さらに、近年 NZ をはじめとした環境先進国において、外来生物越境阻止を目的とした入港基準の厳格化が進んでいる。規制対象国に入港する船舶は基準を満たした汚損管理計画や点検レポート等を用意する必要があり、準備書類に不備があったり、点検結果がしきい値を超過していると、入港を拒否される場合があるため、船社にとっては大きなリスクとなっている。

3. 技術選定理由

推進性能（燃料消費効率）を推定するための解析技術としては、MESDU 特許技術の推進性能解析手法を採用した。本技術は統計学的手法によって外乱影響を除去した平水無風相当の推進性能を得ることが出来るため、汚損影響による性能変化を定量的に把握することが可能と期待された。

4. 実証試験の概要

(1) 実施場所（対象船）

FCC 所有リーファー船“KAKARIKI”

(2) 実施時期

2024 年 4 月～2025 年 3 月

(3) 使用機器・システム

- ・水中ドローン（BlueROV2）
- ・データ収集装置（FleetTransfer）
- ・推進性能解析システム（MESDU 特許技術）

(4) 実施内容

1. 水中ドローンにより船体水中部分の各箇所を撮影
2. データ収集装置からの運航・運転データを用いて推進性能解析を実施
3. 汚損蓄積による性能悪化およびプロペラ洗浄による性能回復の確認
4. NZ 規制に対応したレポート作成・BFMP の策定。それらを用いた入港承認取得

5. 結果および考察

水中ドローンによる撮影により、十分な品質の点検画像が得られることを確認した。

取得した画像から汚損度判定を行う機械学習モデルを生成し、汚損の定量評価が可能なことを確認した。

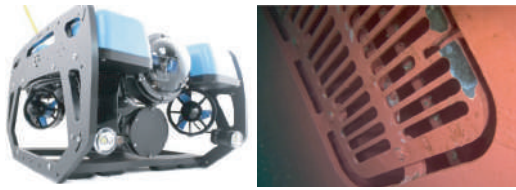


図 1. 水中ドローンおよび撮影画像

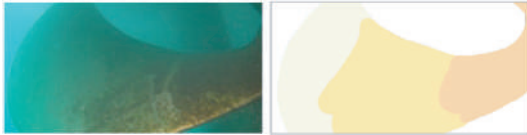


図 2. 点検画像および汚損判定画像

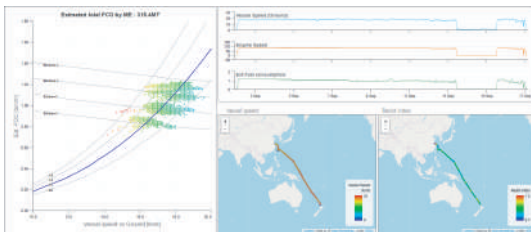


図 3. 解析結果画面

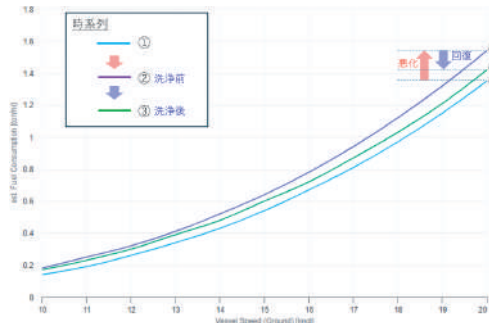


図 4. 汚損蓄積による推進性能の悪化と洗浄による回復

データ収集装置を本船に取り付け、運航・運転データを陸上送信する仕組みを整えた。1 航海ごとの蓄積データを用いて推進性能解析を行い、平水無風相当の推進性能が得られることを確認した。

推進性能解析により、汚損蓄積による推進性能の悪化と、実証期間中に実施したプロペラ洗浄による性能回復を定量的に捉えることができた。

点検画像を用いて NZ 規制に準拠した点検レポートを作成。入港承認に求められる基準に達していることを確認した。

推進性能解析による性能モニタリング、定期的

な水中ドローン点検等を含んだ IMO ガイダンスに基づく BFMP を策定した。策定した BFMP は NZ 規制当局の定める船舶リスク管理基準に適合していることが認められた。

本実証試験による成果は船体汚損管理サービス「FALCONS」の要素技術として用いられている。

6. 今後の展望

今後は新規事業「FALCONS」として、事業運営と拡販を行っていく。引き続きデータ蓄積を行い、汚損判定および汚損進展予測モデルの高精度化に取り組む。推進性能解析については様々な船種、主機関への対応を進める。

7. まとめ

本実証試験で用いた推進性能解析手法が汚損影響を定量的に把握するのに有効な手段であることを確認した。また、定期的な水中点検と推進性能解析による汚損管理が NZ 規制に適合したものであることを確認した。本実証試験により開発された「FALCONS」が水中船体汚損に関する様々な課題解決に寄与することが期待される。

参考情報

船体汚損管理サービス「FALCONS」概要

AI を活用した「船体汚損の定量評価」と運航・運転データを用いた「推進性能解析」をひも付けることで、「最適な洗浄時期と場所の特定」・「洗浄による燃料消費量・CO₂ 排出量削減の定量化」を行う。

主な特長は以下の通り：

- ・船体汚損の定量評価・進行予測
- ・外乱影響を除去した推進性能解析
- ・洗浄パターンごとの燃費改善量予測
- ・洗浄による燃料・CO₂ 削減効果の定量化

担当部署：成長事業推進事業部マーケティング部

エッジ AI のトライアル

— RTG の位置制御における画像認識技術の試行 —

1. 背景および課題

遠隔 RTG の運転のニーズが高まってきており、それに伴い、RTG の位置制御において、現状では、複数のカメラを用いて、正しい位置に停止できるように停止位置目安として白線の位置を認識する手法を用いている。この白線認識において、カメラからの高解像度映像を伝送して高性能 PC へ集約して高速で処理している。そのため、PC の計算能力は十分と見込まれるが、RTG 各部からの高解像度映像伝送に課題がある。既存の通信状態では LAN 帯域不足や、リアルタイム性の喪失が発生してしまい、そのため、遠隔 RTG の制御の安定性や安全性への影響が懸念される。

2. エッジ AI

エッジ AI は、画像解析での適用開発事例が報告されている。クラウド AI (従来)で行うと、膨大な画像データなどを随時クラウドに送信し、クラウド AI が解析した結果を車両に戻す必要があるが、このタイムラグは決して小さくなく、しかも通信環境によって左右される。自動運転では瞬時の判断が重要であり、コマ数秒の遅延が重大事故につながる恐れもあるためだ。これらの作業を各部カメラに搭載した AI、つまりエッジ AI が行うことで、通信のタイムラグのばらつきをなくすることができる。センサーカメラ自ら画像を解析、判断を下すことが可能になる。



図 1. AI による画像処理のフロー
(左図：クラウド AI ①, 右図：エッジ AI ②)

3. 実証試験の概要

遠隔 RTG を画像により制御する際、クレーンの各部から AI 処理用 PC に高解像度画像を転送する難しさに直面しており、セキュリティやリアルタイム性の観点から、エッジ AI の適用性評価を PoC (技術検証) した。

(1) 評価試験

現在、NPU (Neural Processing Unit) を統合した高性能なマイコンは、スタンダードパックとして安価で購入することができる。評価試験では、マイコンに簡易な AI 推論モデルをポーティングして、実際撮影した画像を用いて、白線を認識するまでの推論時間を評価した。精度に関しては mm オーダを目標とした。

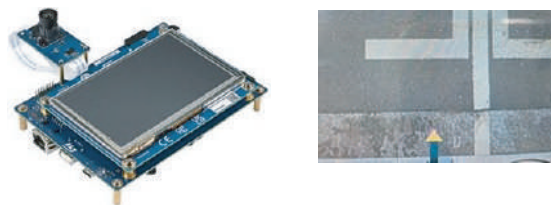


図 2. エッジ AI を搭載したマイコン基盤と、参考画像 (遠隔クレーンにて撮影した白線の画像)

(2) 結果

エッジ AI 上で白線認識を実行することができた。推論時間としては、PC を用いた従来方式 (①) と同等の 33msec である (目標 100msec)。ただし、今回ポーティングした AI 推論モデルは簡易モデルであるため、実際に実機据え付けした際には、センサや用途次第に必要な処理速度は変化すると考えられる。今後、AI 推論モデルは学習を重ねて精度面の向上を図ることが可能である。

4. ま と め

白線認識の精度と推論時間については、汎用的なスタンダードパックにて一様の結果を得る事が出来た。

今後実機 RTG で活用進める為に、事前学習済

みモデルのポータリングや機械学習や組み込み機器の選定を進める。

担当部署：成長事業推進事業部デジタル・ソリューション部

ロータリーウォッシャー デモ機の試作

—ロータリーウォッシャーの内部洗浄のデモンストレーション（顧客向け）—

1. 背景および課題

2050年のカーボンニュートラル実現に向け、リサイクルの需要は増加傾向にある。現在のリサイクル技術ではリサイクル素材は高額にならざるを得ず、リサイクル素材の一般流通化に向けて運転コストの削減が大きな課題となっている。リサイクルプロセスにおいては前処理として洗浄を行う場合が多く、従来手法として堅型攪拌機を使用したバッチ式の処理が行われている。

2. ロータリーウォッシャー

当社では、「連続式固液処理装置」（以下、ロータリーウォッシャーと呼ぶ）の開発を行っている。酢酸セルロース製造プロセス向けの洗浄機として使用してきた実績があり、以下の特徴を持つ。

- ・洗浄対象物（固体）と洗浄液（液体）を対向方向に流し、連続処理下で固体を段階的に清浄な液体で洗浄すること可能。
- ・攪拌軸を要しないため、崩壊、絡み付きし易い固体に対しても適用可能。

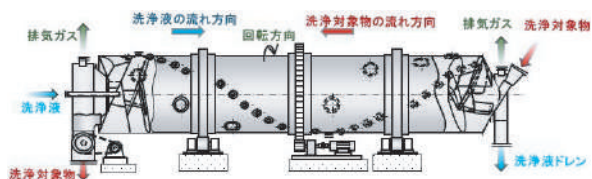


図1. ロータリーウォッシャーの概要

3. 実証試験の概要

(1) 概要

リサイクルプロセスへの適用検証として固体の洗浄・固液分離に利用できるロータリーウォッシャーの円筒内部での、マテリアルハンドリングを目視観察できるように、円筒部は、透明塩ビにて製作した。製作したデモ試験装置を図2に示す。



図2. デモ機（円筒部：直径φ400 mm, 長さL 600 mm）

(2) 結果

リサイクルの対象候補として下記のマテリアルハンドリングの状態監視した結果を示す。浮遊性のあるPEパイプを除き、円筒内にてバッフルにより固体が均一に掻き揚げられ、良好に固液分離が連続的にできることを確認できた。

固体名	PLA	PEパイプ	布
粒径	6.0 mm	6.5 mm	約 20 mm
流体名	水	水	水
結果	○	×	○

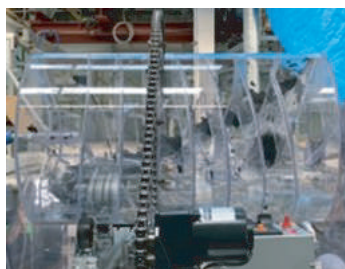


図3. デモ実証による円筒内部でのマテハン状況

4. まとめ

今回の対象物以外にも、複数会社の洗浄・固液分離プロセスへの適用性もデモ運転した。洗浄対象（固体）のサイズが異なるため、今後、円筒内のバッフルの設計・最適化の検討は必要であるが、連続での固体の洗浄（リサイクルの前処理）の要望をヒアリングすることは出来た。

担当部署：成長事業推進事業部脱炭素ソリューション部

大型船用 2 ストローク水素焚き機関における 燃焼試験および数値シミュレーション

阿部 優大¹・須山 達夫¹・石橋 亮佑¹

¹ 株式会社三井 E&S (〒706-8651 岡山県玉野市玉 3 丁目 1 番 1 号)

Key Words Carbon neutral, Hydrogen, Marine two-stroke engine, Diffusive combustion, CFD

1. 緒 言

2050 年カーボンニュートラルの実現に向けて、脱炭素化への技術開発が各産業界で加速している。海事分野では、2023 年に採択された国際海事機関 IMO の GHG 削減戦略において、2050 年頃までに GHG 排出量をネットゼロとする目標を掲げており (IMO, 2023)、従来の化石燃料から水素やアンモニアといったゼロカーボン燃料への転換に向けた取り組みが行われている。本稿で着目する水素は、CO₂ を排出しないだけでなく、毒性がないことや再生可能エネルギーから生成可能といった利点を持つが、燃焼速度が非常に大きく最小着火エネルギーが極めて小さいといった従来の燃料とは著しく異なる燃焼特性を持つ。水素燃料エンジンの開発では、その燃焼特性への対応が課題の一つとなっており、船用機関においても中速 4 ストローク機関や低速 2 ストローク機関を対象とした研究開発が進められている (Takasaki, et al., 2023)。しかし、外航船の主機として一般的な、ボア径 500 mm 以上の大型船用 2 ストロークエンジンを使用した燃焼試験、数値シミュレーションに関する取り組みについては、ほとんど報告されておらず水素の適用可能性を明らかにする必要がある。

当社は、ライセンサーである MAN Energy Solutions と共同で、所有する 4 気筒 500 mm ボアのテストエンジン 4S50ME-T9.7 を使用して、1

気筒を水素焚き、残りの 3 気筒を重油焚きとした水素燃焼試験を実施した。さらに、3 次元 CFD を用いて当試験結果に基づいた合わせ込みを行い、水素の燃焼を再現するシミュレーションモデルを構築し、従来の船用燃料である重油との燃焼特性の比較をするとともに、大型船用 2 ストローク機関における水素燃料の可能性について検討した。

2. 燃 焼 試 験

2.1 試験機関

水素の燃焼試験の実施に際し、当社テストエンジンの 4 気筒重油焚き機関 4S50ME-T9.7 の 1 気筒を水素燃焼シリンダにするため、シリンダカバー周辺機器の改造を実施した。具体的には、水素ガス噴射弁、パイロット噴射弁、筒内への水素ガス供給を制御するガスコントロールブロック等の追加変更を行った。当シリンダは、天然ガスと重油の両方を燃料として使用できる船用低速ディーゼル機関 (電子制御式ガスインジェクションディーゼル機関、以下 ME-GI) をベースにデザインされている。図 1 にテストエンジンのシリンダ上部 (手前が水素燃焼シリンダ) を、表 1 に当機関の諸元を示す。ここで、MCR は連続最大出力 (Maximum Continuous Rating) を指す。

水素の燃焼は ME-GI と同じ拡散燃焼方式で、シリンダ内の圧縮空気にパイロット燃料の重油を噴射し着火させ、直後に高圧 (最大 30 MPa) の水素ガスを噴射することによって燃焼させる。図 2 にガス噴射、パイロット噴射のイメージを、図 3 に ME-GI の作動原理を示す。天然ガス焚きの船用 2 ストローク機関には、ピストン上昇前に低圧



Fig. 1 4S50ME-T9.7

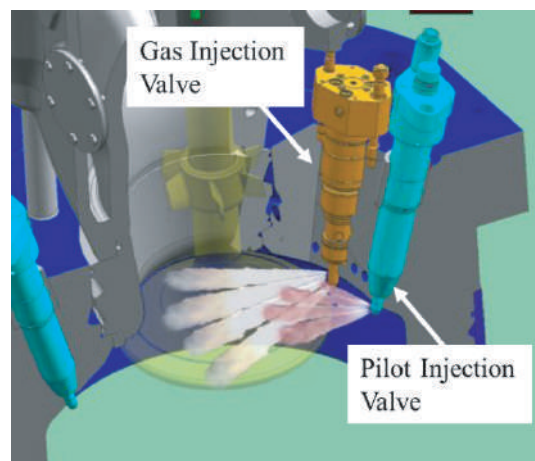


Fig. 2 Gas injection and Pilot injection

Table 1 Engine specifications

Engine type	4S50ME-T9.7
Number of cylinders	4
Bore	500 mm
Stroke	2214 mm
Output (MCR)	7120 kW
Speed (MCR)	117.0 min ⁻¹

(約 1 MPa) の燃料ガスを筒内に供給し、圧縮された混合気をパイロット燃料によって着火させて燃焼させる予混合燃焼方式も存在するが、水素の最小着火エネルギーの低さから過早着火が懸念されること、熱発生率を燃料噴射率によって制御できないことから、前者の拡散燃焼方式を採用した。

水素燃焼シリンダは、主燃料に水素、パイロット燃料に重油を使用するガスモードと、重油のみを燃料とする重油モードの二つの運転モードが選択でき、両モードの試験を実施した。なお、ガスモードでパイロット噴射弁として作動する重油燃料弁は、重油モードでは主燃料弁として作動する。また、水素燃焼シリンダ以外のシリンダについては、通常の重油焚き機関と同様の運転を実施した。

2・2 燃料ガス供給システム (FGSS)

燃料ガス供給システム (FGSS) の燃料供給方式には、液化水素を蒸発させてからガス圧縮機によってエンジンの要求圧力まで昇圧させるガスコ

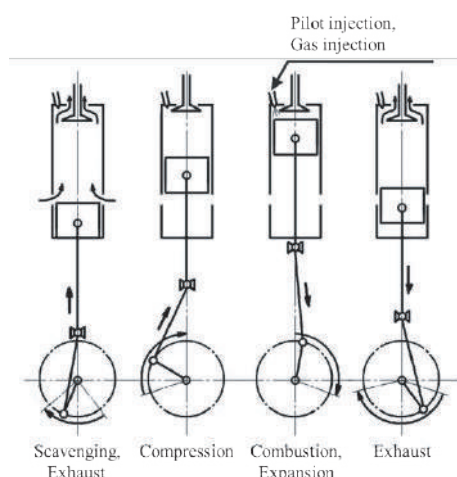


Fig. 3 Working principle of ME-GI

ンプレッサ方式 (島田他, 2016) を採用した。図 4 に FGSS の簡易系統図を示す。液化水素タンクに充填されている液化水素はタンク内圧力低下時、加圧蒸発器によって液化水素を気化させてタンクに戻すことで、タンク内圧力が維持される。タンク内圧力によって液化水素はタンクから排出され、送ガス蒸発器によって気化した水素はバッファタンクへと貯められる。バッファタンクに到達した水素ガスは、前段圧縮機 (MK-A-2) により最大 13.1 MPa まで昇圧され、さらに後段圧縮機 (VS-140GH-OL) によって最大 35 MPa まで昇圧される。表 2 に各圧縮機の諸元を示す。昇圧された水素ガスは、圧縮機稼働時の生じる脈動を抑制するための蓄圧器と、エンジンへの水素供給をコントロールするガスバルブトレイン (GVT) を経由し、エンジンへと供給される。

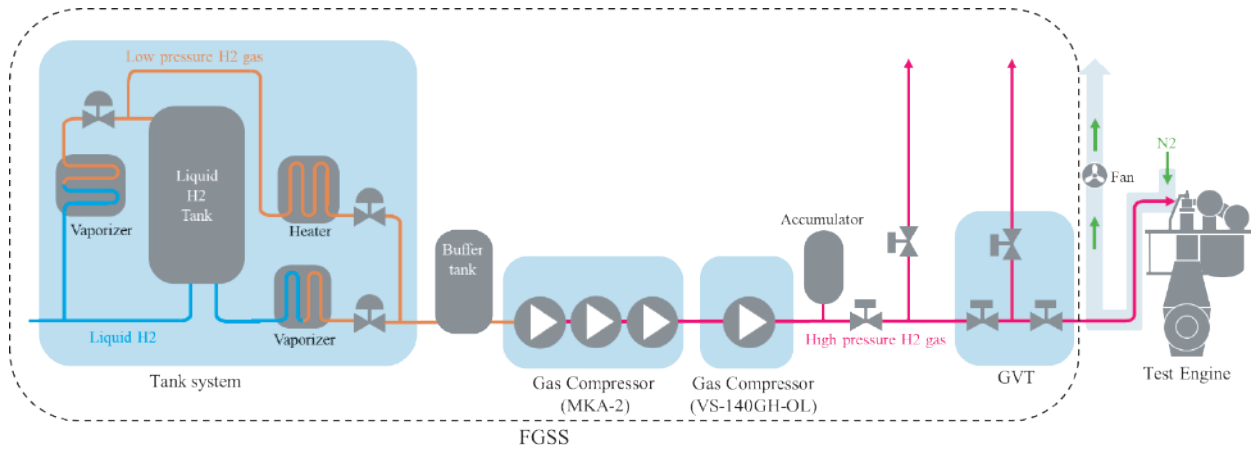


Fig. 4 FGSS schematic

Table 2 Compressor specifications

Compressor type	MK-A-2	VS-140GH-OL
	Horizontally opposite type	Vertical type
Number of cylinders	2	1
Number of steps	3	1
Suction pressure	0.6 MPaG	13 MPaG
Suction temperature	40 degC	40 degC
Discharge flow rate	1100 Nm ³ /h	1100 Nm ³ /h
Discharge pressure	13 MPaG	35 MPaG
Rated power	160 kW	70 kW
Speed	500 min ⁻¹	500 min ⁻¹

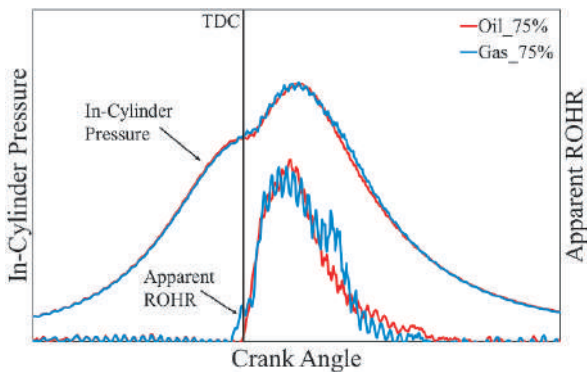


Fig. 5 In-cylinder pressure (75%MCR)

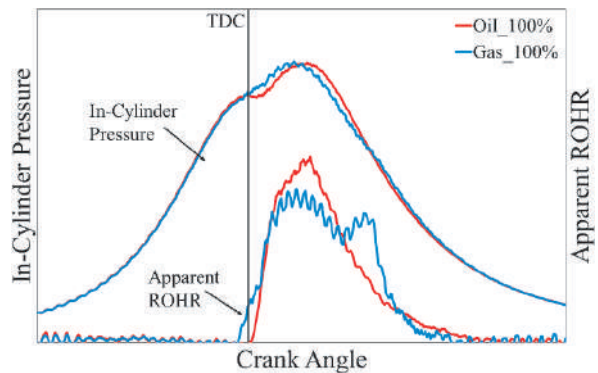


Fig. 6 In-cylinder pressure (100%MCR)

2・3 試験結果

図 5, 6 に各機関負荷率の筒内圧力, 筒内圧力から求めた見かけの熱発生率を示す。主燃料を水素とするガスモードでも, 重油モードと同等の筒内圧力が得られ, 水素を燃料とする大型船用 2 ストローク機関に ME-GI をベースにしたデザイン

が適用可能であることが確認できた。

3. 数値シミュレーション

水素燃焼シリンダ内の流動, 噴霧, 燃焼シミュレーションを, 汎用解析ソフト CONVERGE (Convergent Science 社) を用いて実施した。図 7

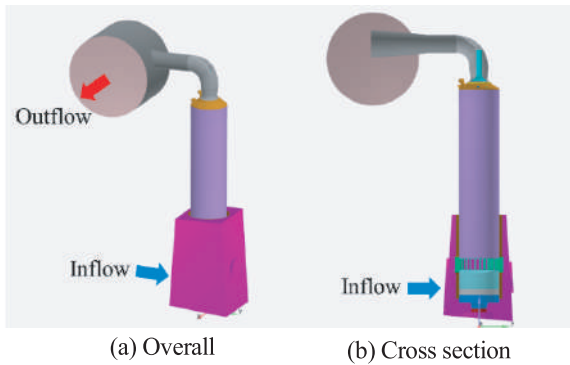


Fig. 7 Computation domain

に計算領域を示す。掃気レシーバとシリンダフレームの境界から、シリンダを通り排気レシーバに至るまでを計算領域とし、水素燃焼シリンダのみの単気筒モデルとした。計算期間は、排気弁開弁から掃気、圧縮、燃焼、膨張行程を経て、再度排気弁が開弁するまでの 1 サイクルとした。初期条件および境界条件については、試験で得られた計測データから決定した。図 8, 9 に各機関負荷率の燃料噴射率の概形を示す。重油モードに対しガスモードにおける水素燃料は、低噴射率で長時間噴射した。

表 3 に使用した物理モデルを示す。乱流計算

はレイノルズ平均モデル (RANS) によって行い、RNG $k-\epsilon$ モデルを使用した。パイロット噴射については、離散液滴モデル (DDM) を用いた。DDM のサブモデルとして、分裂モデルには Modified KH-RT モデルを、蒸発モデルには Frossling モデルを使用した。

燃焼試験にて使用しているパイロット燃料は A 重油であるが、シミュレーションにおいては計算負荷低減のため、液滴で存在するときは JIS 2 号軽油相当の燃料 (DIESEL 2) とし、蒸発するとノルマルヘプタン (C_7H_{16}) に移り変わるよう設定した。さらに、 C_7H_{16} の低位発熱量を、試験にて使用した A 重油の値になるよう熱力学関数の係数を調整した。燃焼モデルは詳細化学反応ソルバー SAGE を使用し、 C_7H_{16} の詳細反応機構 Nordin モデル (Nordin, 1998) と、水素と NO_x の詳細反応機構 Zhang モデル (Zhang, et al, 2017) の混合メカニズムを用いた。計算格子のベースサイズは 40 mm とし、壁面形状が複雑な領域や、燃料噴射によって流速が大きくなると予想される領域については、計算格子を精細化した (局所メッシュ細分割)。さらに、流速や温度の勾配に応じて、該当する計算格子が精細化される設

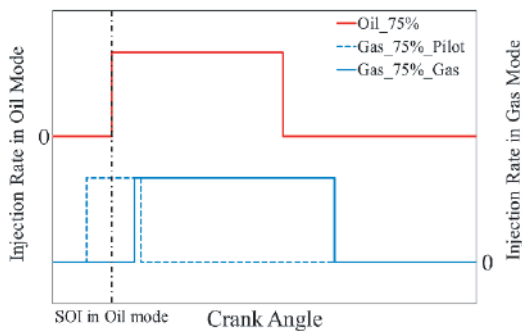


Fig. 8 Approximate shape of injection rate(75%MCR)

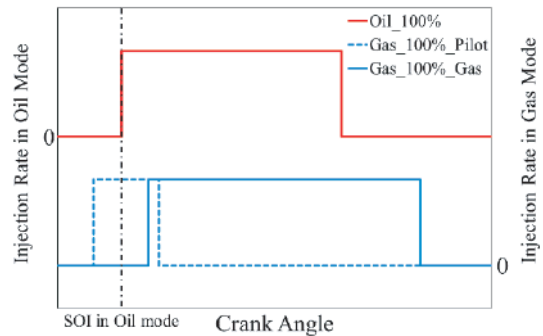


Fig. 9 Approximate shape of injection rate(100%MCR)

Table 3 Physical model

Turbulence	RNG $k-\epsilon$ model
Droplet breakup	Modified KH-RT model
Combustion	SAGE detailed chemical kinetics solver
Reaction mechanism	Merged mechanism of H_2 and C_7H_{16} (69 Species, 388 Reactions) (H_2 : Zhang, C_7H_{16} : Nordin)

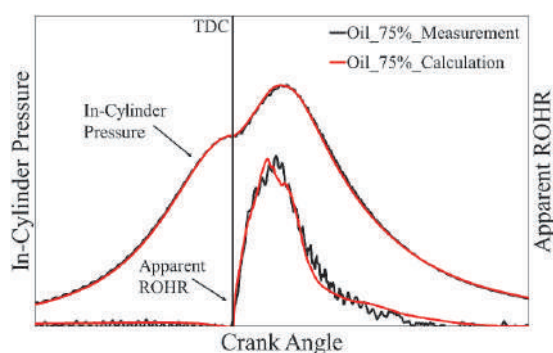


Fig. 10 In-cylinder pressure and Apparent ROHR (Oil 75%)

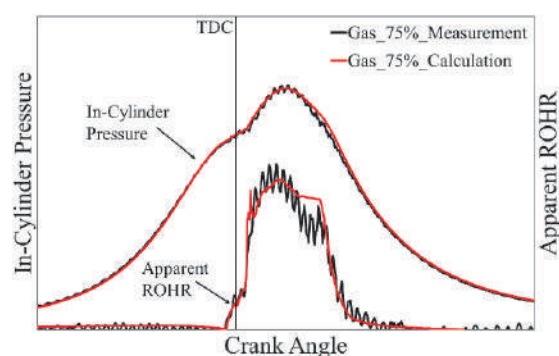


Fig. 11 In-cylinder pressure and Apparent ROHR (Gas 75%)

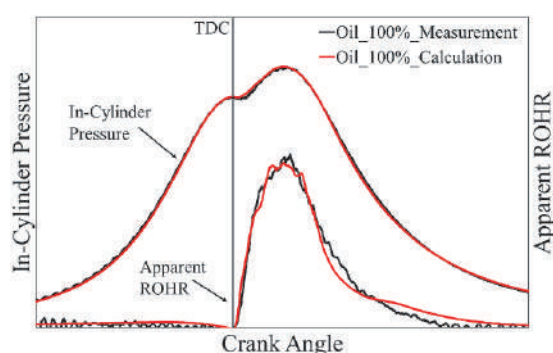


Fig. 12 In-cylinder pressure and Apparent ROHR (Oil 100%)

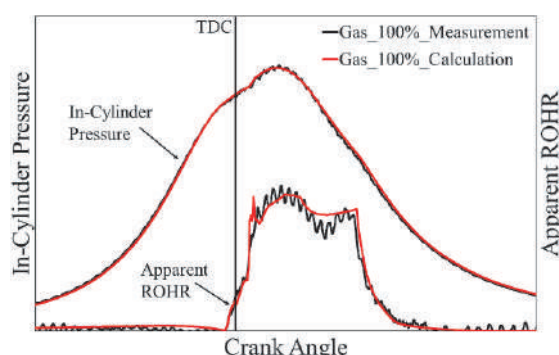


Fig. 13 In-cylinder pressure and Apparent ROHR (Gas 100%)

定（解適合格子）も併せて行った。本シミュレーションは、ピストンと排気弁の移動を考慮した非定常解析であり、計算格子数は最大で360万メッシュに達する大規模な計算となる。そのため、計算機には計算科学振興財団（FOCUS）のスーパーコンピュータを用いて、計算時間の短縮を図った。以上の設定のもと、重油モードとガスモードの両運転モードにて、機関負荷率2パターン（75, 100%MCR）の4ケースの解析を実施した。

4. 計算結果と考察

4.1 計算結果と試験結果の比較

各ケースの燃焼試験の結果に基づいて、回転数や境界条件、燃料噴射率等を設定し、3次元CFDへの合わせ込みを実施した。図10から図13に、試験結果および計算より求めた筒内圧力と、筒内圧力から求めた見かけの熱発生率を示す。各ケースともに計算結果は、圧縮圧力（上死点における筒内圧力）や最高圧力、熱発生率の立

ち上がり、立ち下りのタイミング、傾き等、試験結果を定量的に再現している。

重油モード、ガスモードといった主燃料が異なる条件においても、NordinモデルとZhangモデルの混合メカニズムを用いて試験条件の筒内圧力を精度よく再現できることが確認できた。したがって、重油の代替燃料として C_7H_{16} を使用しても、妥当な計算結果が得られると考える。

4.2 熱発生率と積算熱発生量

図14, 15に各負荷率における熱発生率、供給した燃料の熱量 Q_f に対する積算熱発生量 Q の比率 Q/Q_f を示す。ここで示す熱発生率は、燃焼室壁面の冷却損失が差し引かれる前の熱発生率を指しており、 Q/Q_f もそれを用いて算出した。これは前節の見かけの熱発生率とは異なり、シミュレーションの反応過程で得られる熱発生率であるため、試験結果からは算出できない。したがって、計算結果を用いて重油モードとガスモードの

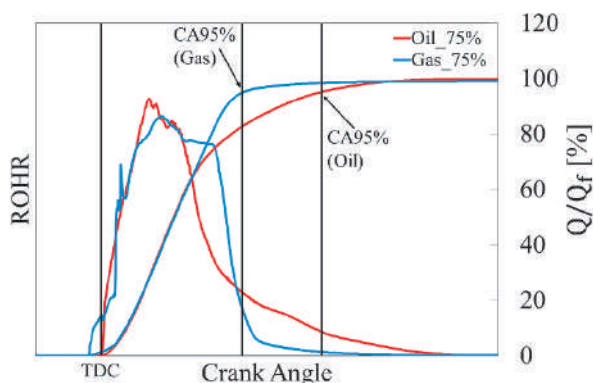


Fig. 14 ROHR and Q/Qf (75%MCR)

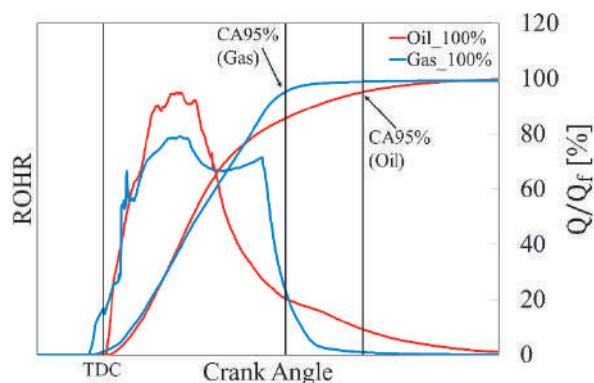


Fig. 15 ROHR and Q/Qf (100%MCR)

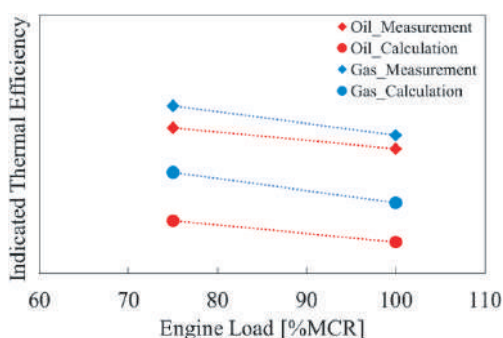


Fig. 16 Indicated thermal efficiency

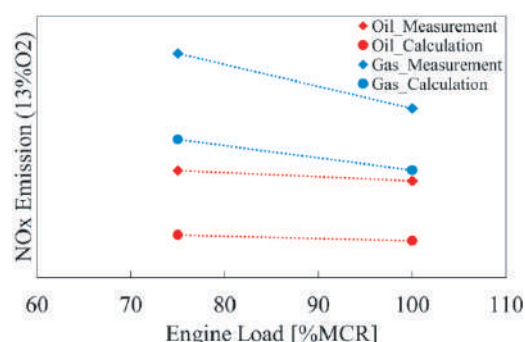


Fig. 17 NOx emission

比較を行う。

各モードの熱発生率の形状を比較すると、重油モードは立ち上がり、立ち下がりが緩やかな山型であるのに対し、ガスモードはパイロット燃料のみの燃焼期間は同様に山型であるが、水素噴射期間における立ち上がり、立ち下がり急峻で矩形に近い形状を示す。水素噴射開始時の立ち上がりについては、水素噴流がパイロット燃料の燃焼による高温場に到達するまでの期間に形成される予混合気が、着火時に急速に燃焼することが要因と考えられる。この時、水素の燃焼速度は重油よりも大きいため、熱発生率が急激に増大する。

供給熱量に対する積算熱発生量の比率 Q/Q_f を比較する。燃料噴射期間はガスモードの方が重油モードよりも長く設定しているが、 $Q/Q_f=95\%$ に到達するクランク角度 CA95% に着目すると、両負荷率においてガスモードの方が重油モードよりも早期に燃焼が終了していることが分かる。これは、重油と比べて水素は、筒内へ噴射されてから急速に燃焼することを示唆しており、後燃えが非常に少ないといえる。

4・3 熱効率と NOx 排出量

図 16 に機関負荷率に対する図示熱効率を示す。試験結果、計算結果ともに、各機関負荷率にて図示熱効率は重油モードよりガスモードが高い。これは、ガスモードの後燃えが少なく、重油モードと比べて燃焼後期の等容度が高くなったことが要因と考えている。また、各運転モードにて 75%MCR よりも 100%MCR の方が図示熱効率は低くなった。図 17 に機関負荷率に対する NOx 排出量を示す。ここで、NOx 排出量は O_2 濃度を 13% へ換算した値を使用した。試験結果、計算結果ともに NOx 排出量は、各機関負荷率にてガスモードの方が多く、また各運転モードにて 100%MCR の方が多くなった。よって、図示熱効率と NOx 排出量について、本シミュレーションモデルによって運転モード、機関負荷率を変更した場合の定性的な評価が可能といえる。

図 18, 19 に燃焼室における 2500K 以上の計算格子の質量分率を示す。両負荷率にてガスモードは、重油モードよりも多くの燃焼ガスが 2500K 以上の高温になっており、Thermal NO が発生し

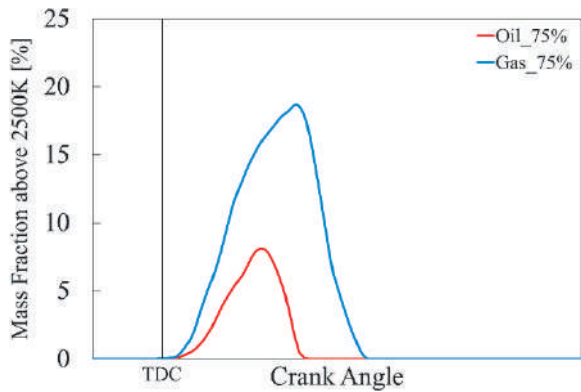


Fig. 18 Mass fraction of combustion chamber above 2500K (75%MCR)

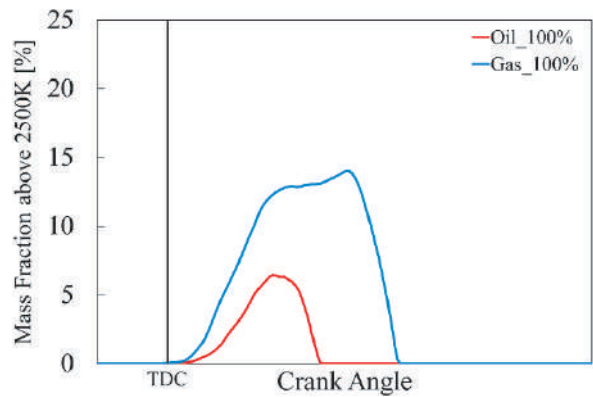


Fig. 19 Mass fraction of combustion chamber above 2500K (100%MCR)

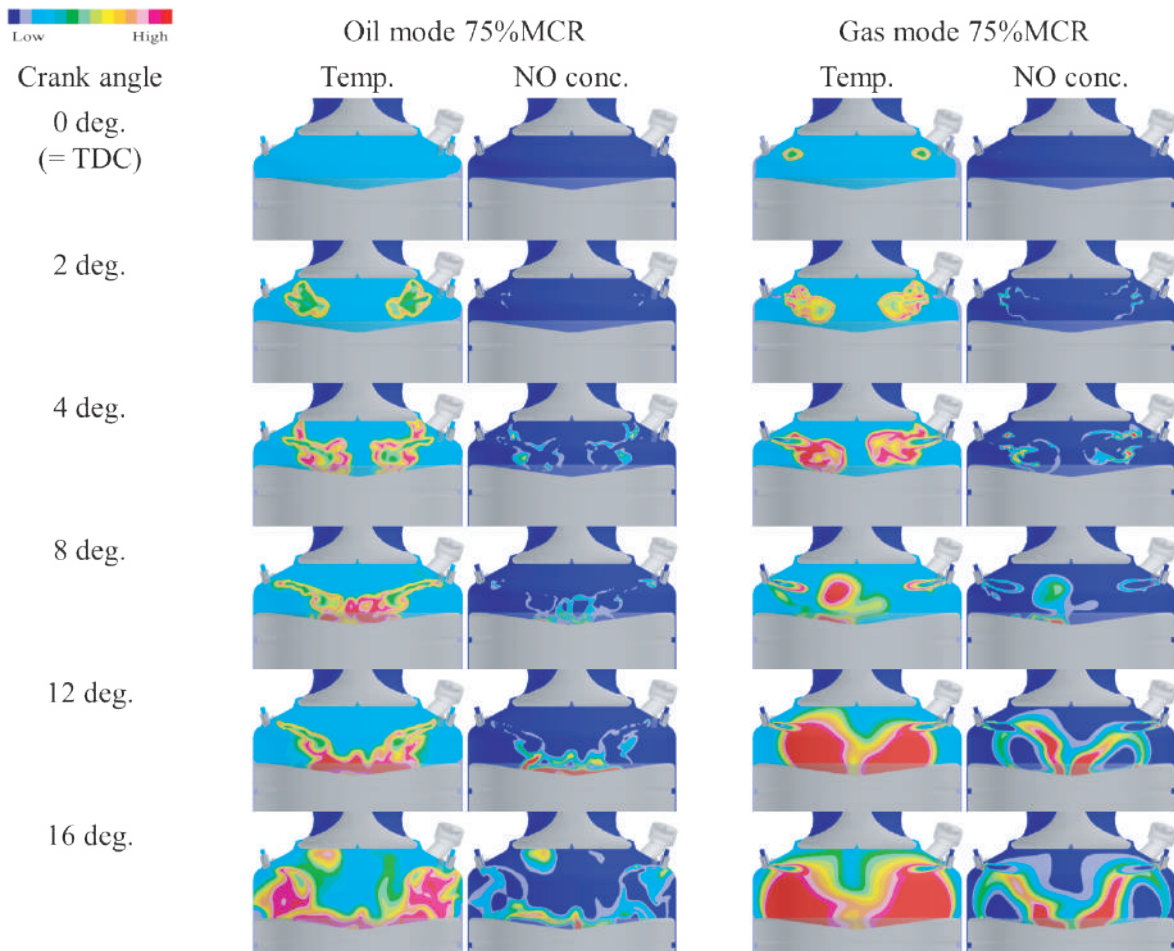


Fig. 20 Changes in spatial distribution of Temperature and NO concentration in combustion chamber (75%MCR)

やすい環境となっていることが分かる。これは、水素は重油と比べ、燃料噴射後急速に燃焼することで、燃焼ガス温度が上昇して Thermal NO の発生が促進されたためと考えている。以上より、水素焼き機関は重油焼きよりも高効率である一方

で、その燃焼特性により NO_x の排出量が多くなることが分かった。

4・4 筒内の温度分布と NO 濃度分布

図 20, 21 に各機関負荷率の筒内の温度分布と

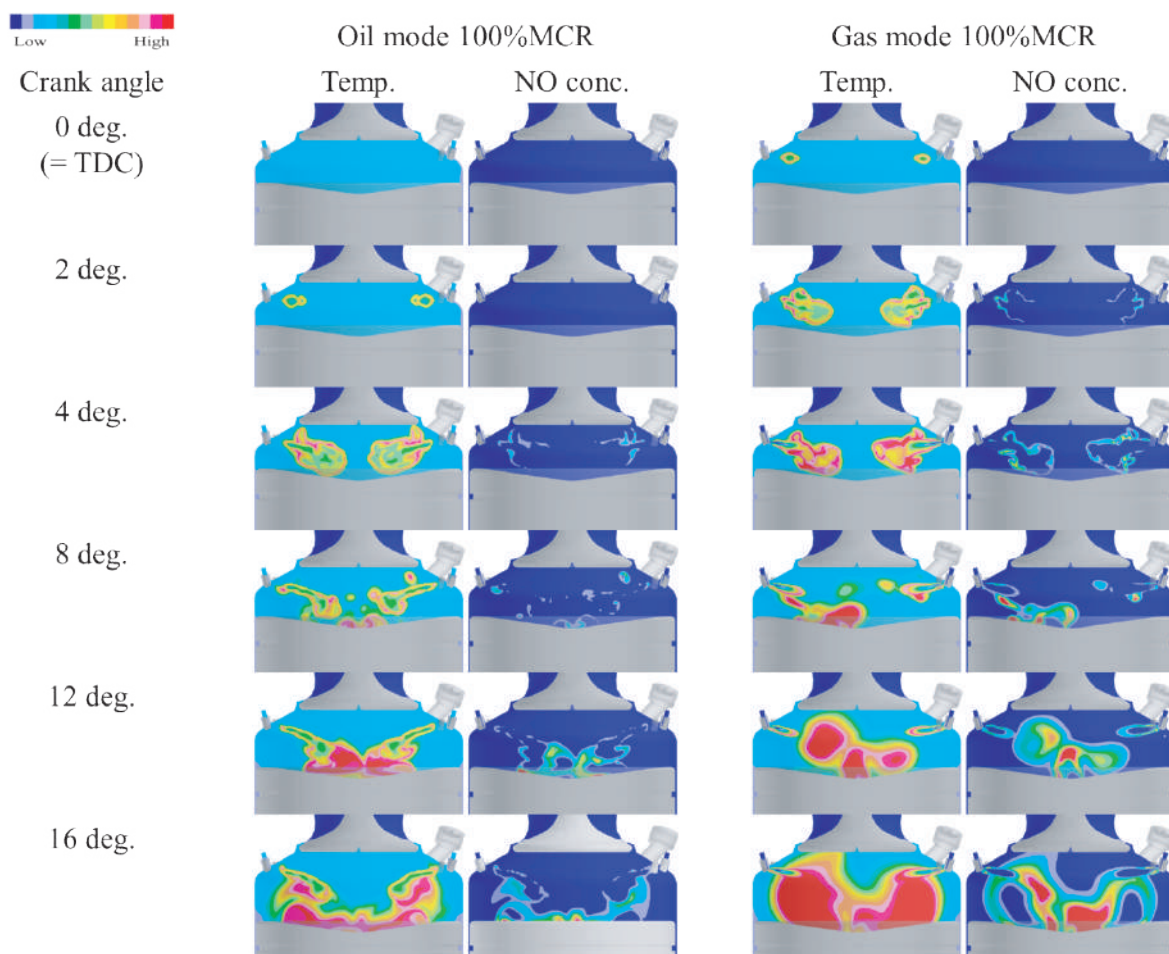


Fig. 21 Changes in spatial distribution of Temperature and NO concentration in combustion chamber (100%MCR)

NO の濃度分布を示す。重油モードの場合、重油燃料弁（パイロット燃料弁）から燃料が噴射されて着火、燃焼と進んでいくが、ガスモードの場合は、上死点周辺でパイロット燃料弁からパイロット燃料を噴射し、それによって生じた高温場に、ガス噴射弁から噴射された水素噴流が突入することで燃焼が継続されていることが確認できる。ガスモードは重油モードと比べて、火炎の拡がりが高く、高温場が広範囲にわたって分布しており、それに伴って Thermal NO が多く発生している。

5. 結 言

大型船用 2 ストローク機関を使用した水素燃焼試験を実施した。併せて、3次元 CFD を用いて試験結果に基づいた合わせ込みも行った。その結果、以下の内容が確認された。

1. 水素焚きでも重油焚きと同等の筒内圧力を得

られることが確認され、水素を燃料とする大型船用 2 ストローク機関に ME-GI をベースにしたデザインが適用可能であることが明らかになった。

2. 合わせ込みによって構築したシミュレーションモデルは、主燃料（重油、水素）や機関負荷率が異なる条件において、筒内圧力と熱発生率について試験結果を定量的に再現することが確認された。
3. 本モデルは、主燃料（重油、水素）や機関負荷率が異なる条件にて、熱効率と NO_x 排出量について試験結果を定性的に再現することが確認された。
4. 水素は重油よりも燃料噴射後急速に燃焼するため後燃えが少ない。したがって、水素焚き機関は熱効率において有利であるが、燃焼温度が高温となり Thermal NO が多く生成され

ることが明らかになった。

謝 辞

本研究開発は国土交通省の「海事産業集約連携促進技術開発支援事業」に採択された事業の一環として実施されたものであり、深く謝意を表す。

文 献

- IMO, 2023 IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships, MEPC 80/WP.12, Annex 1 (2023).
- N. Nordin, Numerical simulations of non-steady spray combustion using a detailed chemistry approach, Thesis for the degree of licentiate of engineering, Dept. of Thermo and Fluid Dynamics, Chalmers University of Technology (1998).
- 島田一孝, 村上高弘, 排ガス規制対応代替燃料利用技術, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 51, No. 3 (2016), pp. 20-23.
- Takasaki, K., Kawauchi S., Tsuru D., Progress and prospect of combustion studies on low- and zero-carbon fuels, CIMAC Congress 2023 Busan, Paper No. 103 (2023).
- Y. Zhang, O. Mathieu, E.L. Petersen, G. Bourque, H.J. Curran, Assessing the predictions of a NOx kinetic mechanism using recent hydrogen and syngas experimental data, Combustion and Flame 182 (2017), pp. 122-141.

References

IMO, 2023 IMO strategy on reduction of GHG emissions

from ships, MEPC 80/WP.12, Annex 1 (2023).

- N. Nordin, Numerical simulations of non-steady spray combustion using a detailed chemistry approach, Thesis for the degree of licentiate of engineering, Dept. of Thermo and Fluid Dynamics, Chalmers University of Technology (1998).
- Shimada K., Murakami T., Technologies to comply with exhaust emission regulation using alternative marine fuels, Journal of the JIME, Vol. 51, No. 3 (2016), pp. 20-23 (in Japanese).
- Takasaki, K., Kawauchi S., Tsuru D., Progress and prospect of combustion studies on low- and zero-carbon fuels, CIMAC Congress 2023 Busan, Paper No. 103 (2023).
- Y. Zhang, O. Mathieu, E.L. Petersen, G. Bourque, H.J. Curran, Assessing the predictions of a NOx kinetic mechanism using recent hydrogen and syngas experimental data, Combustion and Flame 182 (2017), pp. 122-141.

著者紹介

■ 阿部 優大

・株式会社三井 E&S 船用推進システム事業部 R&D センター

■ 須山 達夫

・株式会社三井 E&S 船用推進システム事業部 R&D センター

■ 石橋 亮佑

・株式会社三井 E&S 船用推進システム事業部 R&D センター

船用燃料としてのメタノール

福島 健史¹・渡邊 学²

¹株式会社三井 E&S (岡山県玉野市玉3丁目1番1号)

²ENEOS 株式会社 (神奈川県横浜市中区千鳥町8)

1. はじめに

地球温暖化や気候変動に対して、世界が一致団結して取り組む必要があるという認識の下、1992年に国連で気候変動枠組条約 (UNFCCC) が採択され、1994年に発効した。これに基づき必要な国際的取り組みを行うために「国連気候変動枠組条約締約国会議 (Conference of the Parties : COP)」が開催されている。2015年に開催された COP21 では「パリ協定」が採択され、世界全体の長期目標として、「世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて2度より十分低く保つ (2度目標) とともに、1.5度に抑える努力を追求する (1.5度目標)」ことが示された。さらに2018年に発表された「IPCC 1.5°C 特別報告書」では、世界の気温上昇を1.5°C未満に抑えるためには2050年前後にネットゼロが必要であることが示され、各国政府がカーボンニュートラルの実現を目指した取り組みを発表し、わが国でも2020年8月に国会にて2050年までにカーボンニュートラルの実現を目指すことを宣言した。

海事分野においても2018年4月に開催された第72回海洋環境保護委員会 (MEPC72) においてGHG削減目標を盛り込んだIMOのGHG削減初期戦略が採択された。このなかで2050年までに2008年比でGHG排出総量を最低半減することと、今世紀の早いうちにカーボンニュートラルを目指すことが示された。その後2023年7月に開催されたMEPC80では、2023年版IMO GHG削減戦略が採択され、目標として2040年までにGHG総排出量の最低70%削減 (2008年比) と遅

くとも2050年頃までにGHG排出量ネットゼロが合意された。

GHG削減という観点から様々な対策が検討されている中で、燃料の炭素排出強度を下げることも検討されており、水素やアンモニアといったいわゆるゼロエミッション燃料の利用についても検討が進んでいるが、これらを使うエンジンが主機として船舶に搭載されるには至っていない。

一方で、再生可能エネルギーによる電力で水を電気分解して得られた水素と二酸化炭素を原料として合成された「再エネ合成燃料」もGHG排出量はゼロとみなせることから注目を浴びている。メタノールもこの再エネ合成で製造することができること、およびすでにメタノールを燃料とするエンジンが実用化されていることから、海運における早期のカーボンニュートラルを実現する手段として、船用燃料としての“メタノール”への関心は高い。本稿では、船用燃料としてのメタノールについて、その特徴について紹介するとともに船用主機への適用性についても検討し、既に実用された例 (ME-LGI 機関) のシステム概要等を紹介する。

2. メタノールの特徴

2.1 メタノールの物性

メタノールとその他の主要な燃料の物性値を表1に示す^{[1]~[9]}。メタノールがカーボンニュートラル船用燃料として期待されている大きな理由が常温で液体であることである。表より明らかなように、水素やアンモニアに比べて沸点 (蒸発温度) が高く、加圧することなく液体として扱うことができる。そのため、従来の燃料供給システムをわずかな改造で利用できる可能性があり、早期のカーボンニュートラル実現へのハードルが低いとみなさ

表 1 各種燃料の物性値^{[1]~[9]}

化学名		メタノール	軽油	メタン	アンモニア	水素
分子式		CH ₄ O	炭化水素混合物	CH ₄	NH ₃	H ₂
分子量		32.04	平均 190	16.04	17.03	2.02
CAS 番号		67-56-1	68476-31-3	74-82-8	7664-41-7	1333-74-0
融点, 凝固点, 流動点	℃	-97.8	-29~-18	-182.0	-77.7	-259.4
沸点	℃	64.7	160~360	-161.6	-33.4	-252.9
引火点	℃	12.2	71 以上	-188	132	データなし
自然発火温度	℃	464	254~285	537	651	500~571
爆発範囲 (燃焼限界)	vol.%	5.5~44	1.0~5.0	5~15	15.4~33.6	4~76
蒸気密度 (空気=1)	—	1.11	データなし	0.555	0.5967	0.0695
液体密度 (20℃)	g/cm ³	0.7914	0.810~0.936	0.422 (-33.4℃)	0.72	0.0708 (-253℃)
蒸気圧	kPa	12.3 (20℃)	0.28~0.35 (21℃)	—	0.857×10 ³ (20℃)	—
オクタン価 (RON)	—	112	—	約 130 (メタン価=100)	約 130	(メタン価=0)
セタン価	—	2~5	40~70	—	—	—
低位発熱量	MJ/kg	19.8	43.20	50.02	18.6	120.0

れている。

また燃焼性の観点から見ると、メタノールは自然発火温度が高く、自着火性を示すセタン価が低い。このことから拡散燃焼をさせる CI 燃焼（ディーゼル燃焼）機関に使用する際には単独で自着火させることが難しく、何らかの着火源が必要となる。一方で沸点が低いことから容易に気化させやすく、アンチノック性を示すオクタン価が高いことから、予混合燃焼をさせる SI 燃焼機関のほうが燃焼のコントロールはたやすい。しかし船用主機として用いる場合は、拡散燃焼ゆえの燃焼の安定性と未燃スリップが少ない点や高圧縮比ゆえの高熱効率などの理由から、さらには従来の船用燃料と併用する二元燃料とする観点からもディーゼル燃焼方式が採用されている。

また、メタノールは軽油などと比べても蒸気圧が高く、沸点も低いことから容易に気化しやすく、劇物に指定されているように暴露時の急性毒性もあることから貯蔵時の取り扱いに関しては、従来の MGO やバンカー油、さらには LNG などのガス燃料などとは異なった管理が必要となる。

2.2 メタノールの製造

メタノールは一酸化炭素と水素を原料として合成することにより工業的に製造されており、その

製造プロセスは完成されている。現在、メタノールを製造する際の原料となる一酸化炭素と水素は天然ガスや石炭などの化石燃料を改質することで得られる合成ガス (Syngas) を使用しており、これによって製造されたメタノールはグレイメタノールやブラウンメタノールと呼ばれている。これらはカーボンニュートラル燃料ではない。

一方で、バイオマスをガス化・改質して得られた合成ガスや再生可能エネルギーにより得られた水素と二酸化炭素を原料に合成されたメタノールはカーボンニュートラル燃料であり、グリーンメタノールと呼ばれている。さらには化石燃料由来の原料であっても、Carbon Capture and Storage (CCS) と組み合わせることでカーボンニュートラルとしたメタノールはブルーメタノールとよばれている。これらの関連を図 1 に示す^[10]。

世界のメタノール生産量は過去 10 年間で 2 倍以上となり、2019 年には約 9,800 万トンに達している (図 2)。メタノールは化学製品の製造に使用される基礎化学物質の 1 つで、メタノールの生産量の約 3 分の 2 は化学物質の製造に使用されており、残りは燃料として使われている。メタノールの需要は今後も増加すると見込まれ、2050 年までに 5 億トン以上に達すると予測されている^[10]。

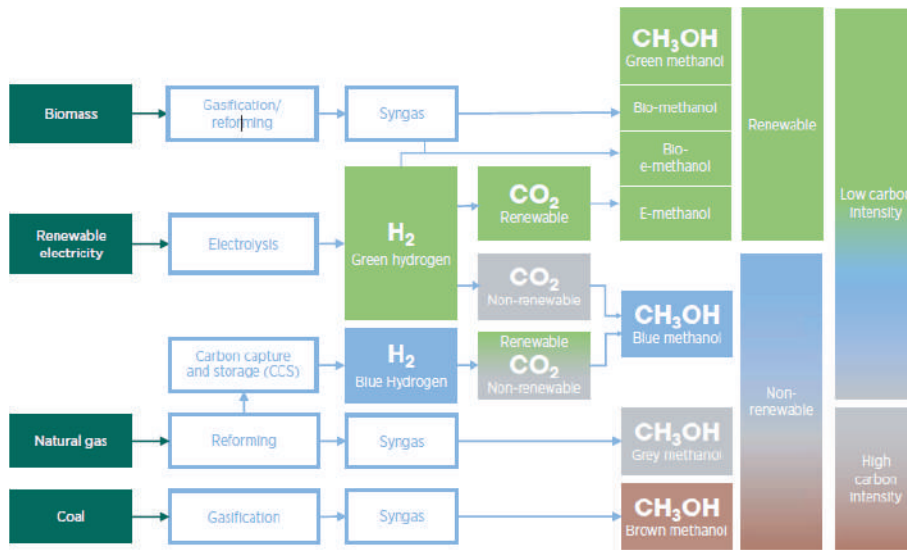


図1 メタノールの製造プロセスの区分

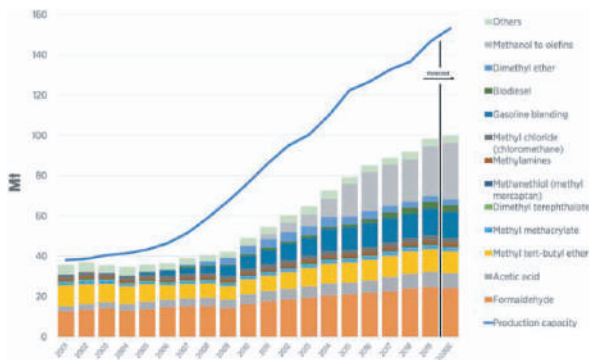


図2 メタノールの生産量

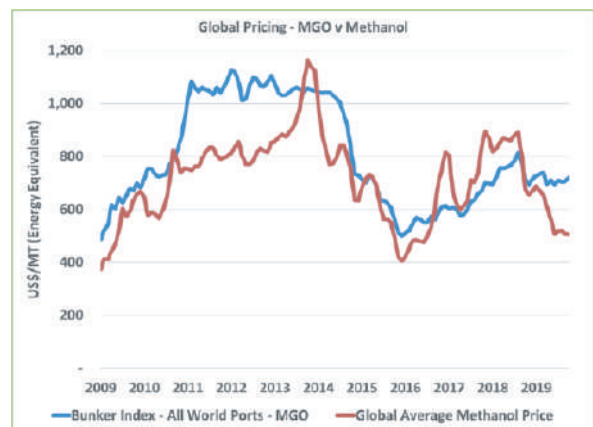


図3 燃料用メタノールの価格推移

2.3 メタノールの価格

メタノールは現在化石燃料から製造されていることから、燃料用途の場合は化石燃料価格に連動している (図3)^[11]。しかしながら今後グリーンメタノールが増加すると価格は増加すると見込まれており、その主な要因はグリーン水素と二酸化炭素の価格である。特に再エネ電源で作るグリーン水素のコストが大きいのが、2050年に向けて低下することが期待されている (図4)。

3. ME-LGI 機関のコンセプト

ME-GI 機関同様、ME-LGI 機関は電子制御式低速ディーゼル機関に二次燃料 (代替燃料) 関連部品を追加することによって、重油での運転と二次燃料での運転の両方を可能とした二元燃料機関で

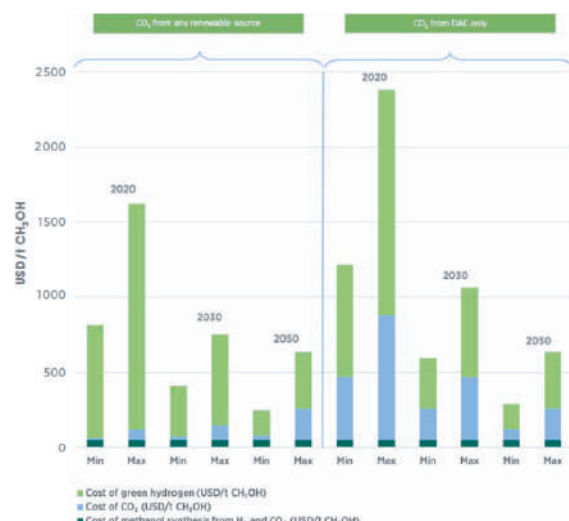


図4 グリーンメタノールの価格予測

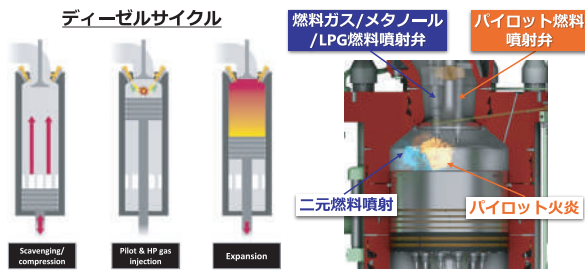


図5 ディーゼル燃焼行程

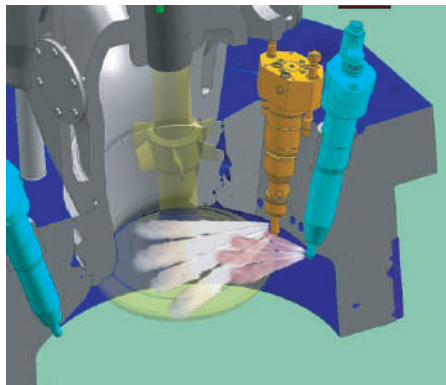


図6 ME-GI 機関の燃料噴射弁配置

ある。燃費特性が優れるディーゼル燃焼方式を採用しており、二次燃料での運転の際は少量の重油をパイロット燃料として噴射することで着火の安定性を得ている。このため、シリンダカバーには重油燃料用と二次燃料用の2種類の燃料噴射弁が搭載される(図5, 図6)。

ME-LGI 機関では比較的低压で液化し易い燃料の特性を活かし、低压のまま液体として主機関へ供給し、液体で噴射する形態を採用している。二元燃料噴射に際し、ME-LGI 機関では省スペース化も兼ねて、燃料昇圧機能を持つ燃料弁(Fuel Booster Injection Valve : FBIV)を採用している。FBIVは次世代機関での重油燃料噴射弁としてMAN Energy Solutionsで開発された技術であり、ME-LGI 機関では液体としての二次燃料の使用を想定した改造を加えたものを使用している。

4. ME-LGI 機関システム概要

4.1 船体側 ME-LGI 関連機器

図7にME-LGIシステムの概要を示す。船体側に追加される主要機器は、メタノールサービスタンク、LFSS (Low flush point liquid Fuel Supply

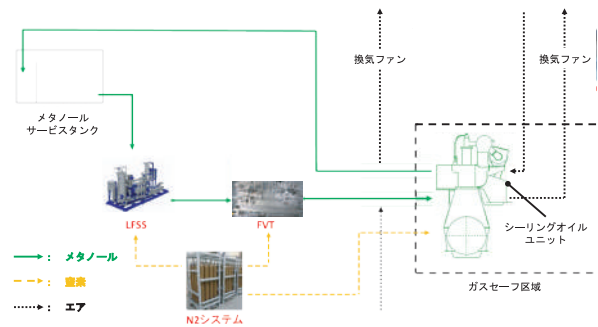


図7 ME-LGI 機関システム概要

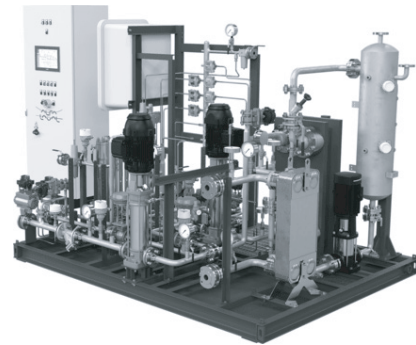


図8 メタノール供給システム (LFSS)

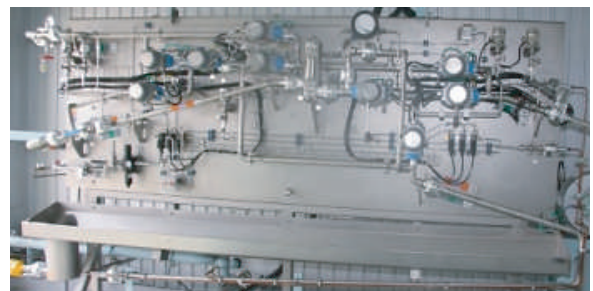


図9 バルブユニット (FVT)

System), FVT (Fuel Valve Train) の主に3つであり、メタノールサービスタンクには主機関で燃料として使用するメタノールを、船体のストレージタンクより移送して貯蔵する他、パージ先としての機能を兼用する場合には、メタノールとシーリングオイルの分離機構も有する。LFSSはポンプや熱交換器を持つユニットであり、タンクから供給されたメタノールを約1.3 MPaに昇圧して主機関へ圧送する(図8)。FVTは主機関とLFSSの間に設置されるバルブユニットであり、メタノール運転終了時にFVT上のメタノールラインに設けられる2つのブロックバルブが閉じることで主機関へのメタノール供給を遮断する。ま

た、FVT には窒素タンクより接続される窒素ラインがあり、後述する主機関および LFSS のパージ実施時の窒素供給を制御する (図 9)。

4.2 主機関側 LGI 関連機器

主機関側の LGI 関連機器は主にシリンダカバー周辺に集中し、各シリンダには FBIV やメタノール噴射を制御するためのブロック類が追加される (図 10, 図 11, 図 12)。FBIV は重油用燃料噴射弁に加えてシリンダカバーに追加される。FBIV に供給された約 1.3 MPa のメタノールは、作動油で駆動されるプランジャにより昇圧され、約 55 MPa でシリンダ内に噴射される。また、図 12 に示すように FBIV 内ではメタノールが作動油ラインへ漏れ出ることを防止するため、摺動部であるプランジャとスピンドルに 4 MPa 程度のシーリングオイルを供給しており、更にこれはメタノールの潤滑性の低さを補う役割も担う。シーリングオイルはシーリングオイルユニットより各シリンダの FBIV へ供給される。シーリングオイルユニットにはシステム油が供給される。

FBIV へのメタノール供給および噴射制御のための作動油供給はシリンダカバー付きのブロックにて制御されている。メタノールと作動油の接触を避けるため、ブロックは作動油制御を行う LGI 油圧制御ブロックとメタノール供給制御を行うメタノールブロックに分かれている。各シリンダのメタノールブロックはチェンパイプと呼ばれる配管で数珠繋ぎとなり、図 11 に示すように一端のシリンダに供給されたメタノールは、このチェンパイプを通して隣接するシリンダへ供給されていく。また、上記 2 つのブロック下方にはパージブロックが設置され、メタノール運転終了時には FBIV、ブロック、配管内のメタノールがこのブロックを介してドレンラインへ排出される。

4.3 安全性

メタノールは人体に有害であり、かつ引火性の高い燃料であるため、安全性を考慮したシステムおよび制御設計が必要である。構造面では、機関室内のメタノール配管に二重管構造を採用することで漏洩を防止しており、二重管の内外管間のア

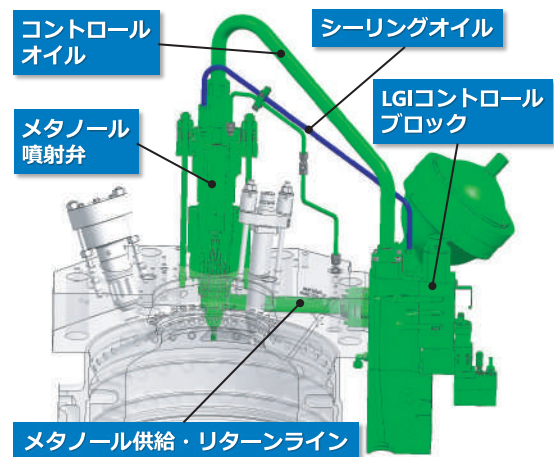


図 10 ME-LGI 機関シリンダカバー

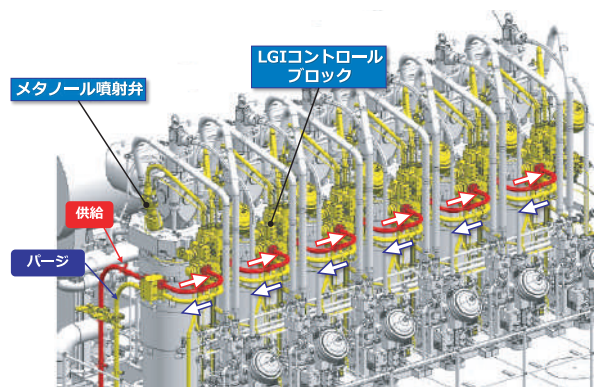


図 11 メタノールの流れ

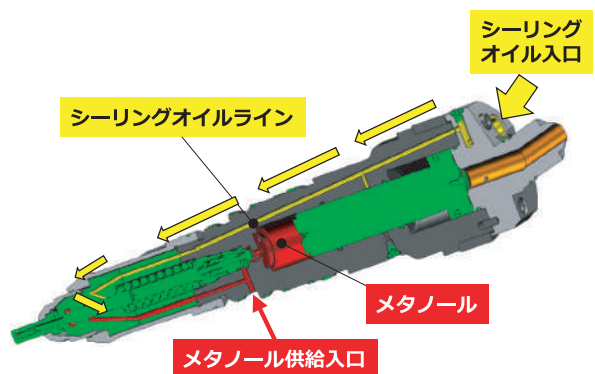


図 12 メタノール噴射弁 (FBIV)

ニュースペースには HC センサによるメタノール漏洩監視機能や、ファンによる換気機能を持たせることで安全性を高めている。また、FVT から主機関へのメタノール供給配管は全て一意の箇所への勾配を持たせることでメタノールが滞留することを防止している。

制御面では、メタノール運転中にメタノール系

続に異常が発生した際はメタノール運転を停止し、即座に重油運転へ切り替えるシーケンスを適用しており、更にメタノール運転停止時には機関室内の配管や機器中のメタノールを窒素でパージすることで完全にメタノールを排出し、機関室をメタノールフリーの状態とする。また、メタノール運転開始前にはメタノールラインの自動耐圧試験実施によりシステムの健全性を確認するシーケンスを適用している。主機関側だけでなくLFSSにおいても同様に安全性を考慮しており、LFSS停止の際は自動でパージを行うことでシステム内のメタノールを排出する機能を持たせている。

5. メタノール燃料の排ガス規制対応

5.1 窒素酸化物 (NOx)

ディーゼル燃焼サイクルを採用するME-LGI機関では、NOx三次規制に対応するために、主燃料と同じEGR (Exhaust Gas Recirculation) を装備する必要がある。

5.2 硫黄酸化物 (SOx)

二次燃料は、硫黄分を含まない燃料であり、SOx排出はパイロット燃料の硫黄分のみとなるため、大幅な削減が可能となる。ただし、ME-LGI機関は、起動時及びメタノール燃料系異常発生時には、主燃料への切り替えが自動的に行われるため、主燃料およびメタノール燃料両方の運転モードにSOx規制対応が求められる。

6. 就航後の改造

船用燃料としてのメタノールがカーボンニュートラルを視野に注目を浴びていることを背景に、大きな船隊を所有している船主を中心にレトロフィットの需要も高まりつつある。メタノールは常温常圧で液体であり、他の代替燃料と比べて取扱いが容易であるため、他の代替燃料への改造と比べ改造も容易であることが考えられる (図13)。

7. おわりに

メタノールに限らず代替燃料一般の共通課題として、グリーン燃料としての価格やそのインフラ整備が挙げられる。特にメタノールやアンモニアは

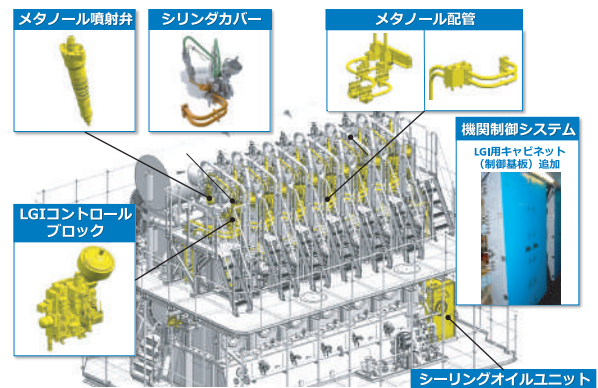


図13 ME-LGI 機関追加部品

低位発熱量が重油と比較し、半分程度であるため、従来の燃料タンク容積では船舶の航続距離は制限されることになる。定期航路で用船される船舶にとっては、燃料補給の頻度が多くなる程度の問題であるものの、不定期航路で用船される船舶にとってはより一層のインフラ整備が求められる^[12]。

参考文献

- [1] 厚生労働省「モデル SDS 情報」サイト、
https://anzeninfo.mhlw.go.jp/anzen_pg/GHS_MSD_FND.aspx (参照日 2024年2月12日)
- [2] Methanol Health and Safety Guide, WHO, 1997
- [3] 日本内燃機関連合会シンポジウム資料, WIN-GD, 2021
- [4] “Knocking Characteristics of Pure Hydrocarbons”, ASTM, 1958
- [5] “Compendium of Experimental Cetane Numbers”, NREL, 2017
- [6] SIP「アンモニア直接燃焼」終了報告書, JFE エンジニアリング (株), 2019
- [7] 水素の物性, 阿部他, 水素エネルギーシステム Vol. 27, No. I (2002)
- [8] CRC Handbook of Chemistry and Physics. 95th Edition (2014).
- [9] エネルギー源別標準発熱量, 資源エネルギー庁
- [10] INNOVATION OUTLOOK RENEWABLE METHANOL, International Renewable Energy Agency, 2021
- [11] “Methanol as a Marine Fuel”, Methanol Institute, 2020
- [12] 谷口, 岡崎, メタノール焚き低速ディーゼル機関「ME-LGIM」の紹介, 日マリ学誌, 58-4 (2023), 106-109

著者紹介

福島 健史

・株式会社三井 E&S 船用推進システム事業部 R&D センター

コンテナ荷役の作業環境改善と生産性向上

—自動化ターミナルおよび遠隔自動運転に関する (株) 三井 E&S の取組み—

中田 成幸¹・星島 一輝¹・宮田 淳也¹

¹ 株式会社三井 E&S (〒870-0395 大分県大分市日吉原 3 番地).

1. はじめに

コンテナ 58 個が海上輸送に初めて使用された 1956 年から 2 年後の 1958 年, 米国カリフォルニア州アラメダ港に世界初のコンテナ用岸壁クレーンが設置された。以来, 海上コンテナ輸送は, 2022 年の世界上位 10 港の取扱量が 2.7 億 TEU (Twenty-foot Equivalent Units: 20ft 換算個数) となるなど, 大きく発展し, 現在もその取扱量が増加傾向にある¹⁾。

このように, 世界貿易の重要な輸送形態となったコンテナ輸送を担う主要なクレーンは, コンテナ船とシャーシトラックとの荷役を行う岸壁クレーン (STS: Ship to Shore Crane) と蔵置ヤードにてシャーシトラックとの受渡しを行うトランスファークレーンである。トランスファークレーンは, ゴムタイヤで無軌道路面上を走行し, 運用柔軟性の高い RTG (Rubber Tired Gantry Crane) と自動化が容易なレール走行型の RMG (Rail Mounted Gantry Crane), ASC (Automated Stacking Crane) を中心に発展してきた。これらクレーンへの黎明期から発展期の要求は, 経済性の追求のためのコンテナ船大型化に伴うクレーンの大型化, 大容量化, 高速化が中心であった。また, トランスファークレーンにおいては古くから自動化のニーズがあり, RMG や ASC を中心に自動化クレーンが実用化されてきた²⁾。

三井 E&S (以下, 当社) は, 前身の三井造船時代の 1961 年に, 上記アラメダ港の岸壁クレーンの設計製造を行ったパシフィック・コースト・エンジニアリング社 (PACECO Corp.) と技術提

携し, 日本初の STS を 1967 年に, 日本初の RTG を 1968 年に納入している。以来, 国内外約 200 か所以上の港に, STS (商品名 Portainer[®]) を累計 470 基, RTG (商品名 Transtainer[®]) を累計 1702 基 (ともに 2024 年 4 月 1 日現在) 提供してきている。図 1, 表 1 に STS の初号機と近年の大型機の比較を, 図 2, 表 2 に RTG の初号機と近年の標準機の比較を示す。

安定成長期となった近年では, 経済性の追求とともに, 安全で安定した荷役, 作業員の作業環境改善を目的とした STS や RTG の遠隔自動運転化や, 環境負荷低減を目的とした RTG のディーゼルエンジンの小型化, 水素駆動化が求められるようになってきている。特に我が国においては, 港湾労働者不足が顕著となりつつあり, その主な理由として労働環境が厳しいことが挙げられてい



初号機 (1967 年) 近年大型機 (2014 年)

図 1 STS (商品名 Portainer[®]) の変遷

表 1 STS (商品名 Portainer[®]) 仕様比較

仕様	初号機	近年大型機
定格荷重 (ton)	25.4	65
アウトリーチ (m)	33.5	67
揚程 (横行レール) (m)	19.5	52
巻上速度 (m/min)	30~50	90~180
横行速度 (m/min)	120	240

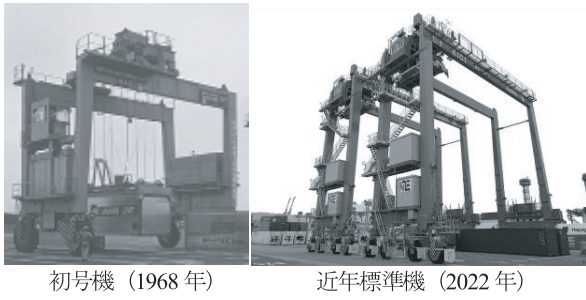


図2 RTG (商品名 Transtainer[®]) の変遷

表2 RTG (商品名 Transtainer[®]) 仕様比較

仕様	初号機	近年標準機
定格荷重 (ton)	40.6	40.6
スパン (m)	10.97	23.47
揚程 (横行レール) (m)	7.87	18.1
巻上速度 (m/min)	5.5~12.2	23~52
横行速度 (m/min)	27.4	70

る³⁾。その様な中、国土交通省港湾局においては、良好な労働環境と世界最高水準の生産性を確保するため、「ヒトを支援するAIターミナル」の実現に向けた取組みを行っており、その一環として2019年より遠隔操作RTG導入に係る事業の支援を行っている⁴⁾。

また、環境負荷低減においては、国土交通省がカーボンニュートラルレポート (CNP) の形成に

取り組んでおり、荷役機器、特にディーゼルエンジンを使用したRTGの脱炭素化に注目が集まっている⁵⁾。当社では、これまでにRTGの電池採用によるディーゼルエンジン小型化や燃料電池駆動によるゼロエミッション化などに取り組んできている⁶⁾⁷⁾。本稿では、近年の労働環境の改善、生産性向上、それによる港湾荷役の安定化のニーズに応えるべく、広がりつつある自動化ターミナルについて概説し、その中で重要な要素となるRTGの遠隔操作化について、当社の取組を紹介する。

2. 自動化ターミナル

1993年にオランダにて初めて自動化ターミナルが実運用され、現在までに約60を超えるターミナルが自動化されている⁸⁾。ここで、一般的に蔵置ヤードの荷役を自動で行うものが半自動ターミナルとされ、それに加えて岸壁クレーンとの間の水平搬送も自動で行う形態が全自動ターミナルと定義されている⁹⁾。

図3に半自動ターミナルを例に、2種のターミナルのレイアウトと代表的なヤード荷役の組合せを示す。並行蔵置型ではRTGが、垂直蔵置型ではASCが頻繁に使用され、岸壁荷役はSTS、水平搬送はトラックシャーシの構成とした。両レイアウトの特質を表3に示す。自動化の黎明期か

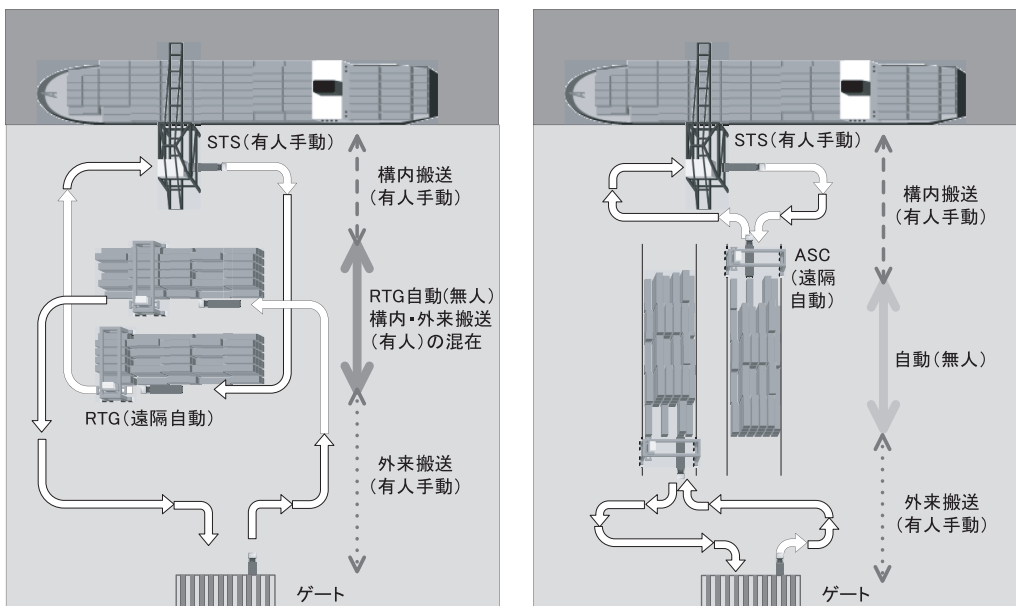


図3 代表的なターミナルレイアウト (左：並行蔵置型、右：垂直蔵置型)

表3 レイアウトの特質

項目	並行蔵置型 (RTG)	垂直蔵置型 (ASC)
利点	<ul style="list-style-type: none"> ✓従来ターミナルで多く採用→自動への移行が容易で低コスト ✓レーンの繁忙に合わせた RTG の配置可 	<ul style="list-style-type: none"> ✓水平搬送の距離を短くできる ✓自動と手動のエリア分離容易→完全自動化し易い
制約	<ul style="list-style-type: none"> ✓自動と手動のエリア分離が困難→安全配慮増 	<ul style="list-style-type: none"> ✓岸壁法線距離を長く取れる土地が必要 ✓土木費用（レール基礎）が高価

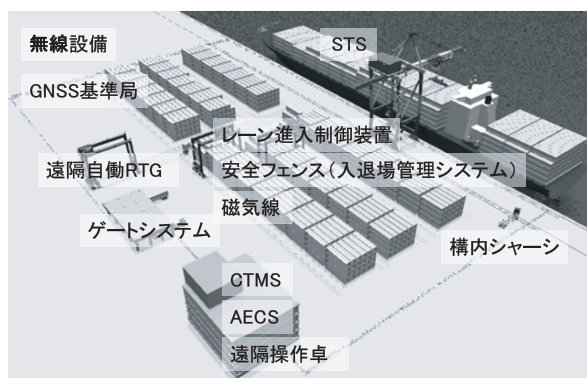


図4 並行蔵置型自動化ターミナル

ら発展期においては、自動化し易い ASC を用いた垂直蔵置型の自動化が欧州を中心に広まったが、近年では従来のターミナルを自動化改造し易い並行蔵置型がアジアを中心に増加している。我が国の従来ターミナルも並行蔵置型レイアウトがほとんどであり、RTG を用いた半自動化が増加している。

ここでは、RTG 方式の並行蔵置型半自動化ターミナルを例に挙げ、表3に示した制約に対応しつつ、遠隔自動荷役を実現する機能について述べる。

図4に並行蔵置型自動化コンテナターミナルを構成する機器・システムの概略を示す。ここで、CTMS (Container Terminal Management System) は当社製ターミナルオペレーティングシステム (TOS) であり、AECS (Automated Equipment Control System) は CTMS、遠隔自

動 RTG (以下、a-RTG)、遠隔操作卓 (Remote Operating Console: 以下、ROC) などの間を取り持つ当社製ミドルウェアである。

1) 自動・手動エリアの混在

混在は主に蔵置ヤードで発生する。レーン入り口に設置したレーン侵入制御装置で荷役指示の出ているシャーシを誘導し、不要な走行路変更（追い越し）を減少させる。a-RTG に設置される走行路障害物センサにより、障害物を検出した場合は減速・停止させる。これにより、図3に示す混在領域の安全を確保する。また、シャーシに対して a-RTG がアクセスする場合は、ROC と a-RTG を接続し、オペレータによる遠隔操作で荷役作業を行う。

これらにより、自動・手動エリアの分離の難しい並行蔵置型レイアウトにおいても、安全な荷役作業を実現する。

2) レーンチェンジ、遠隔操作を可能にする通信

a-RTG は表3の利点に書いたように、レーンの繁忙に合わせて作業レーンを変更する。また、シャーシに対して荷役作業を行う時は、映像を見ながら遠隔操作を行う。スムーズな遠隔操作には高品質な映像が必要で、高速で大容量な通信が必要となる。そこで、5 GHz 帯無線システムやローカル 5G などの無線設備を設置し、活用している。

3) a-RTG の自動走行

RTG は、レーンチェンジを行う時、レーン端から外に出て、タイヤを 90 度旋回させ縦走行を行い、レーンに入るときはタイヤを元に戻して侵入する。別レーンに移動して作業できるのが RTG の特徴となる。

このような自由な走行に対応するために、a-RTG では RTK 方式の全球測位衛星システム GNSS (Real Time Kinematic-Global Navigation Satellite System) による走行制御を採用し、測位精度を数 cm にしてヤード内の走行を可能にしている。ただし、この精度を得られるのは、GNSS アンテナ取り付け位置が適切であった場合である。RTG の場合はガーダー上、約 20 m 高さにアンテナを取り付けることになり、作業ベイでの地面に対する停止精度を得ることは難しい。そこで、走行路に作業ベイ中心を示す棒状の磁石

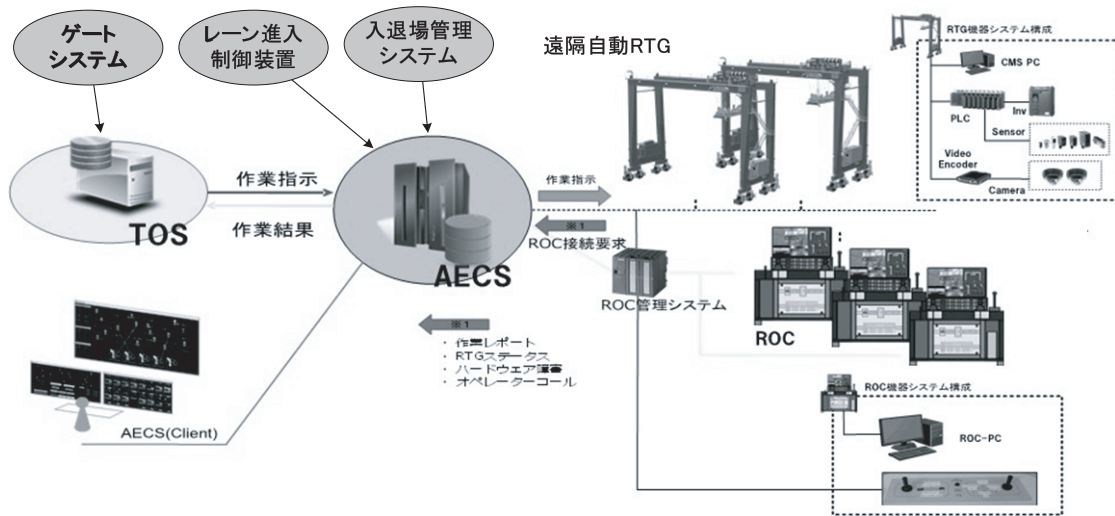


図5 遠隔自動 RTG (a-RTG) システム

(磁気線)を埋設し、a-RTGの足元に磁気センサを配置し、停止時はこれを用いて位置合わせをし、高い停止精度を達成している。

4) 自動荷役指令と安全制御

自動化コンテナターミナルは、様々な機器・システムが連携して、ターミナル全体で荷役作業を行っている。機器・システムの接続イメージを図5に示す。

AECSはコンテナターミナル内の各機器の情報を受け取り、指令や登録情報として適切な機器へ伝送する役割を担う。例えば、「CTMSから出たあるレーンの荷役指示を、当該レーンの作業に最適なa-RTGを選択して指令を送る」、「入退場管理システムからの作業員入場指示を受け取り、当該レーンのa-RTGに対して停止指令を送り、安全確保を行う」などを行う。このように、AECSが機器・システムの間に入って関係動作を行う。これにより、安全に自動荷役作業が行えるようにしている。

3. RTGの遠隔自動化

a-RTGおよびROCの社内試験機を図6に示す。RTGは、ゴムタイヤで立脚した構造を持つため、構造体本体が低周波で揺動し易いことや、コンテナ偏荷重や路面の傾斜、荷役動作の進行に従って構造体の姿勢が変化することにより、吊具やコンテナの位置決めが容易でない特性を持っている。このため、レール上を鉄車輪で走行する



図6 a-RTGとROC(社内試験機)

ASCの遠隔自動化とは、異なる制御方策が必要である。

ここでは、これらの困難さを克服し、生産性を落とすことなく遠隔自動運転を実現する機能を紹介する。

3.1 自動走行

荷役作業がAECSより指示され、作業ベイが異なっていた場合はa-RTGを自動走行により移動させる。図7に示すように、ヤード内における走行は、GNSS座標に基づく仮想的な走行線として設定し、GNSS測位を用いて、自動直進走行制御を行い作業ベイの座標付近まで移動する。作業ベイに近づくとき脚部設置の磁気センサにより路面に埋設されている停止用磁気線が検知されたこ

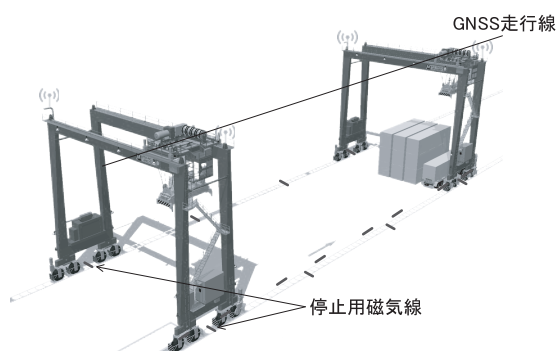


図7 自動走行イメージ

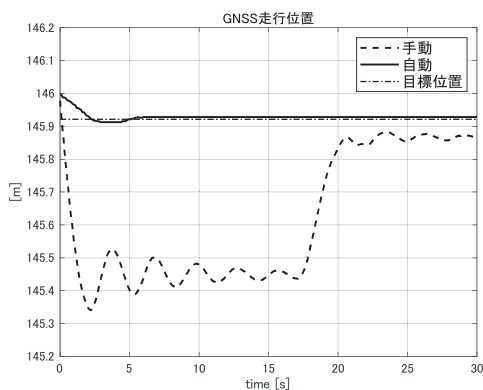


図8 走行位置決め比較（手動，自動）

とをトリガーに、磁気線基準の停止制御に切換え、作業ベイの蔵置コンテナの中心に平行で位置決めし、自動荷役が容易な位置・姿勢で停止する。

GNSS 測位から磁気線測位へスムーズな移行ができるように、GNSS 測位値から脚部の位置を推定し遷移している。また、次の荷役動作に素早く移行できるように、走行が停止した時点でRTGのピッチング揺動が残らないような加減速制御を行っている（図8）。

3.2 自動横行

AECSにより指示された荷役作業に従い、ヤードの蔵置スタックエリアとシャーシエリアとの往復移動を行うのが自動横行である。生産性を維持するためには、吊具／コンテナの振れ止めを行いながら、素早く指定された位置に位置決めする必要がある。

この自動横行制御は、当社従来のものから新しく開発し、緩やかな動きであるが時間は短く、吊荷の揚程（ロープ長）が異なっても横行距離が同じであれば同じ横行時間で位置決めできる特長を

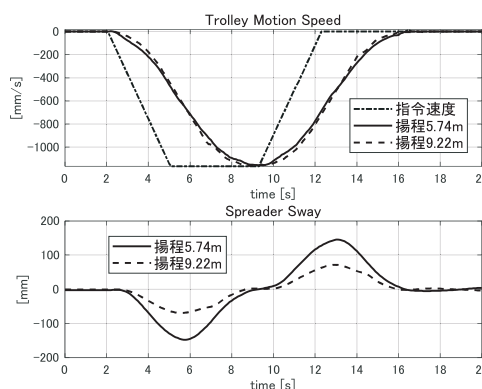


図9 自動横行位置決め制御特性

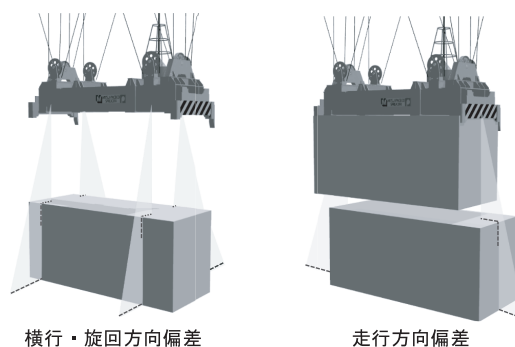


図10 レーザセンサによる偏差検出

有する（図9）。

また、トロリを加減速することによる構造体の揺動が制御を難しくしているが、この影響を減ずる方策を制御に含め、この限界を上げることに成功している。

3.3 自動コンテナ把持・着床

AECSの作業指示により指定された荷役場所付近に自動横行で接近した後、荷役場所にコンテナがある場合、図10に示すように巻下げながらスプレッド設置のレーザセンサにより、蔵置コンテナとスプレッドの偏差を検出する。同時に図11に示すように、クレーン上の各種センサの計測値を統合し、作業場所の地面に固定した基準座標系のスプレッドの座標値を算出しており、目論見のターゲット座標値・軌道との偏差（スプレッド基準座標偏差）を認識する。これら2種の計測値及び、吊具マイクロモーション機能（ワイヤー操作によるスプレッドの位置・姿勢操作）を利用することにより、次の動作を実現している。

- 1) コンテナの無い蔵置スペースへの1段目の

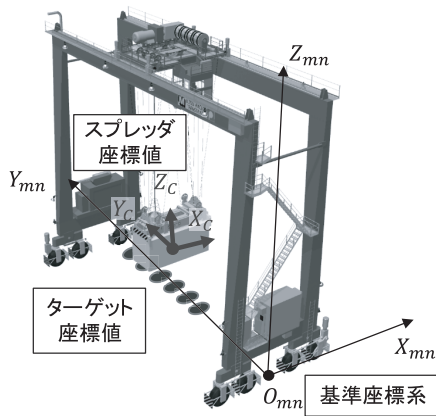


図 11 スプレッド座標値による1段目着床

着床は、スプレッド基準座標偏差を0にするように制御して着床。必要に応じて吊具マイクロモーション機能で調整する。地面にターゲット設備を必要としない着床が可能である。

- 2) 蔵置スペースにコンテナが存在し、コンテナの段積み着床を行う場合は、スプレッド基準座標偏差を基にアプローチして行き、蔵置コンテナとの偏差が検出でき始めた段階で偏差情報も加味し、偏差を0にするように着床する。必要に応じて1)と同様な吊具の位置調整を行う。
- 3) 蔵置スペースのコンテナを把持する場合は、2)と同様な制御を行う。

下段コンテナとスプレッドの偏差情報は、スプレッドがコンテナに近づかないと得られない情報であり、着床直前に吊具の位置・姿勢を調整すると時間ロスが発生する。もう一つの情報であるスプレッドの基準座標値は、荷役プロセス全体に亘って得られる情報であり、これらを組み合わせることで、生産性、着床精度及び信頼性を上げることができる。

蔵置スタックヤードからシャーシへ搬出する一連の荷役のスプレッド中心の軌跡の一例を図12に示す。

3.4 遠隔操作

a-RTG下のシャーシエリアに到着した有人シャーシとの荷役は、安全確認をオペレータが行

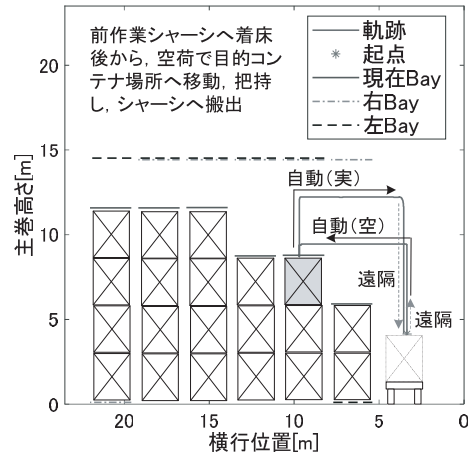


図 12 遠隔操作、自動荷役の軌跡例

う必要があり、遠隔操作で行う。RTG脚部設置のシャーシ検出センサでシャーシの到着を検出すると、AECSがROCと接続して遠隔操作による荷役を開始する。この時、高速大容量無線通信により、スプレッドカメラ、トロリーカメラ、地切りカメラなどを作業状況に応じて自動的に切り替え表示しながら、荷役の状況を示す補助情報とともにコンソール画面に表示し、オペレータはこれらを参照しながら荷役操作を行う。遠隔操作のしやすいシステムとするため、当社では、カメラ画像の提示のタイミング、遠隔操作と自動荷役間のスムーズな移行ロジック、遅延の少ない画像転送を目指し、工夫を重ねている。

3.5 安全施策

自動荷役を行うクレーンは、オペレータが搭乗しておらず、また遠隔オペレータの負担を軽減するためにも、a-RTG側で安全を確保するため、様々な対策を実施している。

2章で述べた自動・手動の混在エリアの走行障害物検知のほか、自動走行開始前にROCに監視要求を出し、走行路監視カメラの映像で目視による安全確認が行えるようにしている。

その他、蔵置エリアにおいては、トロリおよびスプレッド(図10)に設置したレーザーセンサで周囲の物体との距離を検出し、その距離に応じて動作を制限することで安全確保を行っている。この機能は、シャーシエリアの遠隔操作時にも使用可能である。

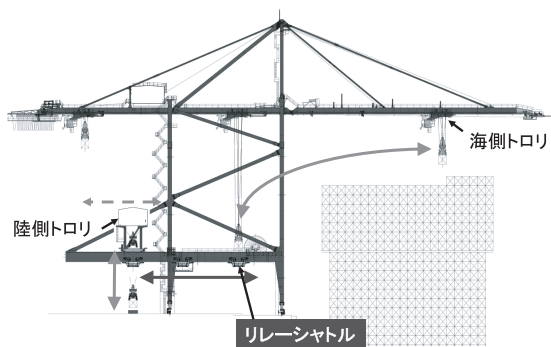


図 13 リレーシャトル方式ダブルトロリ STS

4. ま と め

本報では、自動化ターミナルの概要例とその一つのキー要素である RTG の遠隔自動機能について、当社の取組みを紹介した。

自動化されたターミナルは、作業の予測可能性が高まり、安全が強化される。結果として、生産性は高まり、運営コストの削減と同時にターミナルの信頼性と作業者の安全が改善される。ただし、それらを達成するためには検討課題も多いとの報告がされている⁹⁾。

当社では、今回紹介した a-RTG を発展させ、有人シャーシとの遠隔操作の運転支援機能や、全自動に向けた無人シャーシとの自動荷役機能の開発を進めている。また、STS については、横行主巻の荷役パス自動生成を含む半自動横行運転を実用化しており、遠隔操作化のニーズにも対応できる準備が完了している。さらに、生産性向上に寄与するリレーシャトル方式のダブルトロリ STS (図 13) のコンセプト提案を行っている。

その他、TOS についても、1973 年の初納入以来、数多くの納入実績を有しており、a-RTG との連携ミドルウェアである AECS も自社開発している。これらの技術蓄積を活用し、今後も全自動化ターミナルへのニーズに対応できるよう、荷役機械やシステムの拡張を行っていくほか、各ターミナルの事情に合わせ、システムと荷役機械を統合した製品の提案を行っていく予定である。

参考文献

1) 国土交通省, 世界の港湾別コンテナ取扱個数ラン

キング, <https://www.mlit.go.jp/statistics/details/content/001517678.pdf> (参照日 2024 年 11 月 25 日)

2) 市村欣也, 黎明期から発展期のコンテナクレーンとターミナルシステム (1/2), マリンエンジニア, No 830 (2016) 18-26

3) 国土交通省, 2020 年度港湾労働者不足に関する実態調査, <https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001405656.pdf> (参照日 2024 年 11 月 25 日)

4) 国土交通省国土技術政策総合研究所, コンテナターミナルにおける遠隔操作 RTG 導入に対応したレイアウト及びオペレーションに関する基本的考察, <https://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn1212pdf/ks1212.pdf> (参照日 2024 年 11 月 25 日)

5) 国土交通省, カーボンニュートラルポート (CNP) の形成に向けた施策の方向性, <https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001448303.pdf> (参照日 2024 年 11 月 25 日)

6) 市村欣也, 荷役機械の省エネルギー化技術について, 港湾 93 (2016-8) 12-13

7) 市村・浅見, 水素駆動型 RTG の開発, KANRIN, 108 (2023), 7-10

8) 高橋浩二, 世界の自動化コンテナターミナルの動向分析, 港湾空港技術研究所報告, 56-4 (2018), 3-67

9) PIANC, PLANNING FOR AUTOMATION OF CONTAINER TERMINALS, PIANC REPORT No. 208, p. 12, March 2021

著者紹介



中田 成幸
・株式会社三井 E&S 物流システム事業部 制御システム部



星島 一輝
・株式会社三井 E&S 物流システム事業部 制御システム部



宮田 淳也
・株式会社三井 E&S 物流システム事業部 制御システム部

タイヤ式門型クレーンの地震時応答に関する 模型振動実験

小濱 英司¹・久保 博司²・小浜 優²・菅野 高弘³

¹ (国研) 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

² 株式会社三井 E&S 物流システム事業部 (〒870-0395 大分県大分市日吉原 3 番地)

³ 関東学院大学 工学総合研究所 (〒236-8051 神奈川県横浜市金沢区六浦東 1-50-1)

港湾におけるタイヤ式門型クレーン (Rubber Tired Gantry crane, RTG) は、1995 年兵庫県南部地震において被害が無かったことが報告されているものの、その地震時挙動についてはまだあまり明らかにされていない。そこで、RTG の模型振動実験を行って挙動および安定性を検討した。その結果、振動中の加速度応答は脚部において大きな値が見られたものの、破壊に至るような大きな部材応力値は確認されず、兵庫県南部地震において RTG の被害が見られなかったことに整合するものとなった。高次のモードの影響により大きな加速度応答値が見られたが、部材曲率では高振動数成分はあまり見られず、振動数の低いモードの寄与が大きいことが確認された。

Key Words rubber tired gantry crane, seismic behavior, model shake table test

1. はじめに

港湾のコンテナターミナルにおけるタイヤ式門型クレーン (Rubber Tired Gantry crane, 以下、RTG) は、コンテナの整理、トレーラーシャーシへの積み下ろしに用いられる荷役機械である。近年はコンテナターミナルの荷役能力の向上と労働人口減少や高齢化への対応を図るために RTG の遠隔操作化も図られており、港湾の施設の技術上の基準の対象施設として「自動化・遠隔操作化された移動式荷役機械」が定められている¹⁾。

RTG は、労働安全衛生法体系上「クレーン」に分類されるものである。その耐震設計においては、一般的にはクレーン構造規格 (平成 7 年労働省告示第 134 号) が用いられ、設計水平震度 0.2 を用いた設計が行われている²⁾。

一方で、現行の港湾基準では各港湾において工学基盤でのレベル 1 地震動波形が定められ¹⁾、荷役機械等の設計において用いられる地表での加速度時刻歴を算定した場合には 200Gal (設計震度 0.2) を超える加速度が生じることも考えられる。

1995 年兵庫県南部地震においては神戸港において多くの港湾施設が被害を受け、船舶一陸上間の荷役を行うコンテナクレーンでは多くの被害が生じたが、コンテナターミナル荷捌地内における RTG には損傷が無かったことが報告されている³⁾。よって、RTG は耐震性が高い構造であることが想像されるが、これまで運転時の動特性が検討されているものの⁴⁾、その地震時挙動についてはあまり検討がされておらず、不明な点は多い。コンテナクレーンにおいては兵庫県南部地震以降に多くの研究がされて地震時挙動が明らかにされており、港湾基準での地震動に対応した耐震性能照査手法が示されている⁵⁾。そこで本研究では RTG の模型振動実験を実施して、その地震時における基礎的挙動、安定性について検討する。

2. 模型振動実験

(1) 実験模型

RTG の模型製作においては、実規模のタイヤ式門型クレーン (RTG) の部材長さ、断面等の構造諸元を考慮して各部材の諸元を設定した。長さの縮尺を 1/10 とし、相似則にはフルード則を用いた (表-1)。地盤を含めた模型における 1G 場振動台実験では地盤の剛性の拘束圧依存性を考

表-1 相似率

	縮尺
長さ	1/10
質量	1/10 ³
加速度	1
変位	1/10
応力	1/10
ひずみ	1
時間	1/10 ^{0.5}
断面二次モーメント	1/10 ⁴
曲げ剛性	1/10 ⁵
曲率	10
軸剛性	1/10 ³

慮するために井合による相似則⁶⁾が用いられるが、本検討では構造部材のみの実験であるため、フルード則を用いている。

RTGの主構造はガーダー、脚、シルビーム、脚水平材からなる。ガーダー上には横行方向に移動できるクラブフレームが載り、ワイヤーでコンテナをつかむスプレッドを吊り下げる。シルビーム下には4つの走行装置があり、模型での各走行装置には2輪の車輪（タイヤ）を装着した。シルビーム上には制御盤やエンジンセットが載せられ、また、一つの脚にはクラブフレームにある運転台に上るための階段が取り付けられており、模型においてはそれら重量を考慮した錘を載せることとした（図-1）。

RTG 模型の主部材の断面諸元設定において、

ガーダー、脚、シルビームは曲げ剛性（EI）、脚水平材は軸剛性（EA）を考慮した。実構造物での曲げ剛性や軸剛性から相似率（曲げ剛性 1/10⁵、軸剛性 1/10³）を用いて模型における目標値を算出し、それらに近い値となるように部材断面諸元を設定した。

クラブフレーム、スプレッド、定格荷重の錘については、実規模における大きさと質量を考慮した。特に質量について相似率（1/10³）を考慮して目標値を定め、一般的な板厚の鋼板を用い、その目標値に近くなるように鋼板寸法を設定した。エンジンセット、制御盤、付帯物は、実物における質量から相似率（1/10³）を考慮して目標値を定め、それに近い値となるように質量を定めた錘としてシルビーム及び脚に配置した。

結果として、高さ 2138 mm、幅 2366 mm の RTG 模型を製作した。質量については、目標値 177 kg（実スケール 177 t）に対してやや重い 207 kg となった。これは、特に、ガーダー、脚、シルビームについて目標よりも 23 kg 重く、走行装置部（ボギー、車輪）においても 7 kg 重いことによる。

加振波には、1995年兵庫県南部地震の神戸港ポートアイランドの地表で観測された地震動（NS成分）（以下、PI波）と、港湾L1地震動の地表での地震動波形（以下、L1波）を用いた（図-2）。図においては、時間と振動数について実スケールと模型スケールで示している。前述のように、1995年兵庫県南部地震の神戸港ではRTGの被害は報告されておらず、その要因を検討するために用いた。L1波は、PI波と比較して最大加

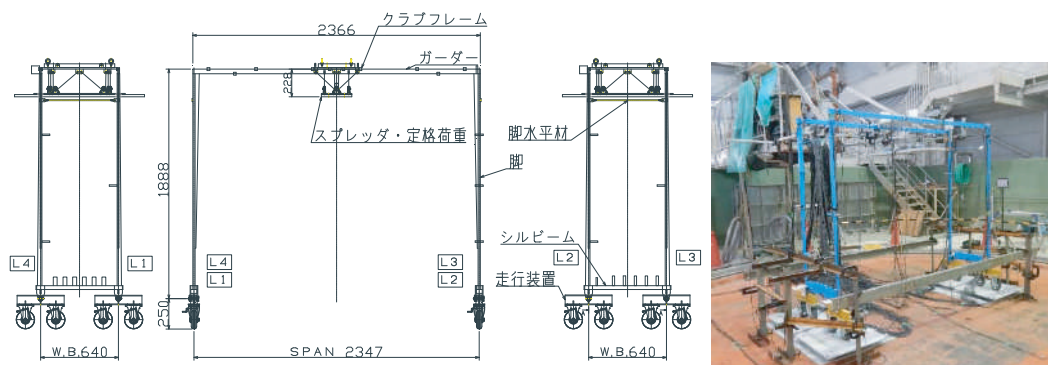


図-1 RTG 模型

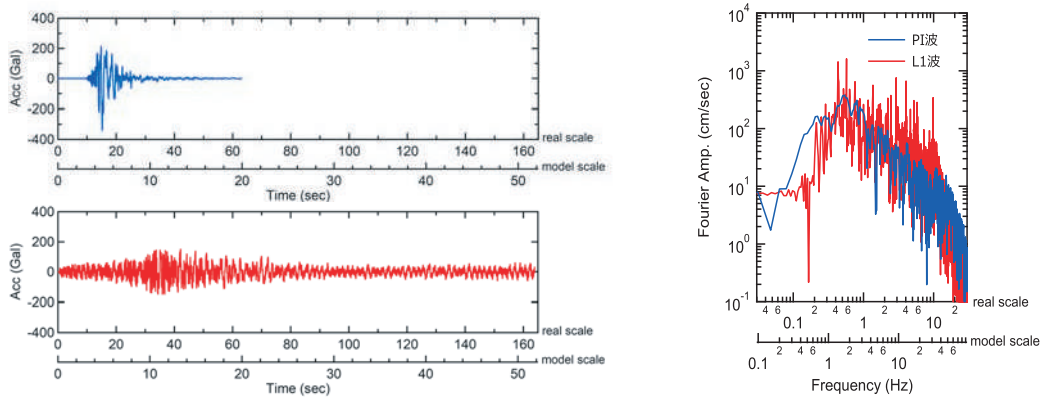


図-2 加振波 左上：PI波，左下：L1波，右：フーリエスペクトル

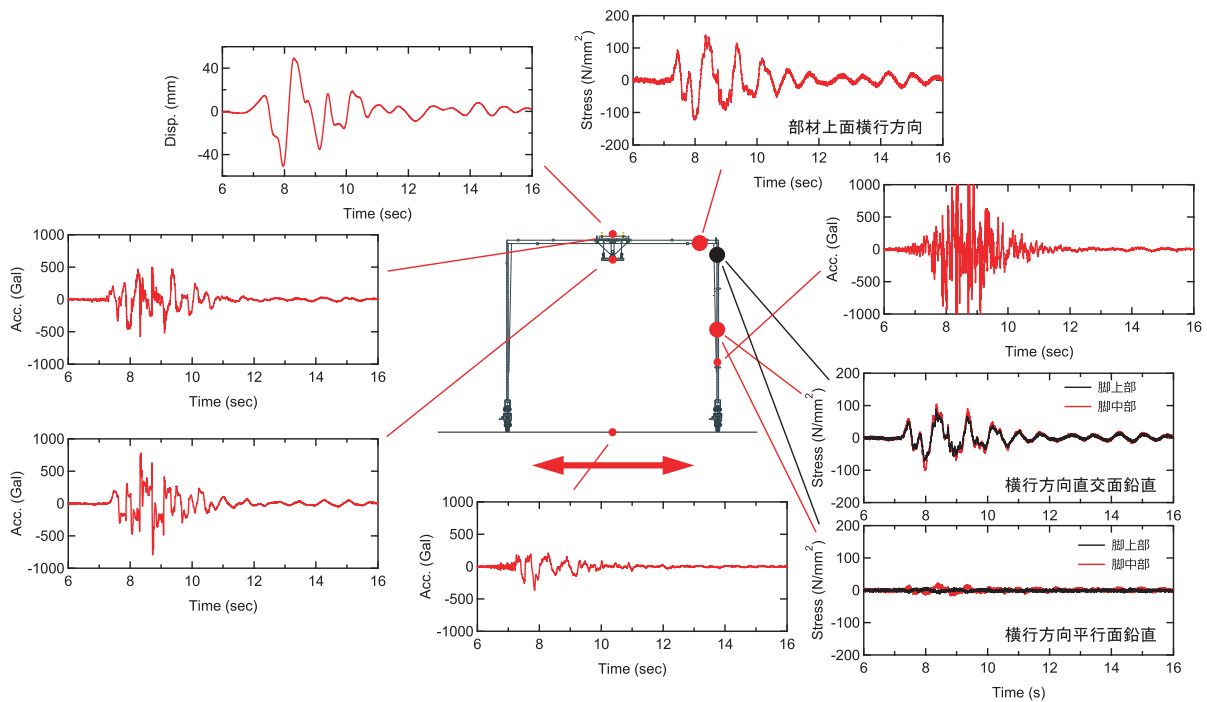


図-3 加速度，変位，断面縁応力時刻歴（横行方向加振，PI波）

速度は小さいものの継続時間は長い。振動数特性については、模型スケールで約 10 Hz 以上（実スケールで約 3 Hz 以上）の高振動数成分は L1 波がやや大きい。これらの違いが RTG 応答に与える影響を検討する。なお、港湾 L1 地震動は、工学基盤上の地盤を想定し、1次元地震応答解析により工学基盤で設定された港湾 L1 地震動を入力して地表地震動波形を算出している。なお、ここでの地盤は、工学基盤上の層厚 40 m 程度の粘性土を主体としている。加振方向については、RTG 模型に対して横行方向および走行方向に加振した。

(2) 実験結果

a) 時刻歴

横行方向加振（PI 波，L1 波）と走行方向加振（PI 波）の加速度，変位，部材断面縁応力の時刻歴応答の結果を図-3，図-4，図-5 に示す。ここで、脚およびガーダの部材断面縁応力は、実スケール換算したものである。これは、測定されたひずみ値から軸ひずみ，曲率を算出し，それらを相似率で実物スケールに換算し，実物における部材断面高さおよびヤング率を考慮して実物スケール相当としたものである。実験模型においてそれら部材は曲げ剛性を相似率を考慮して合わせるよ

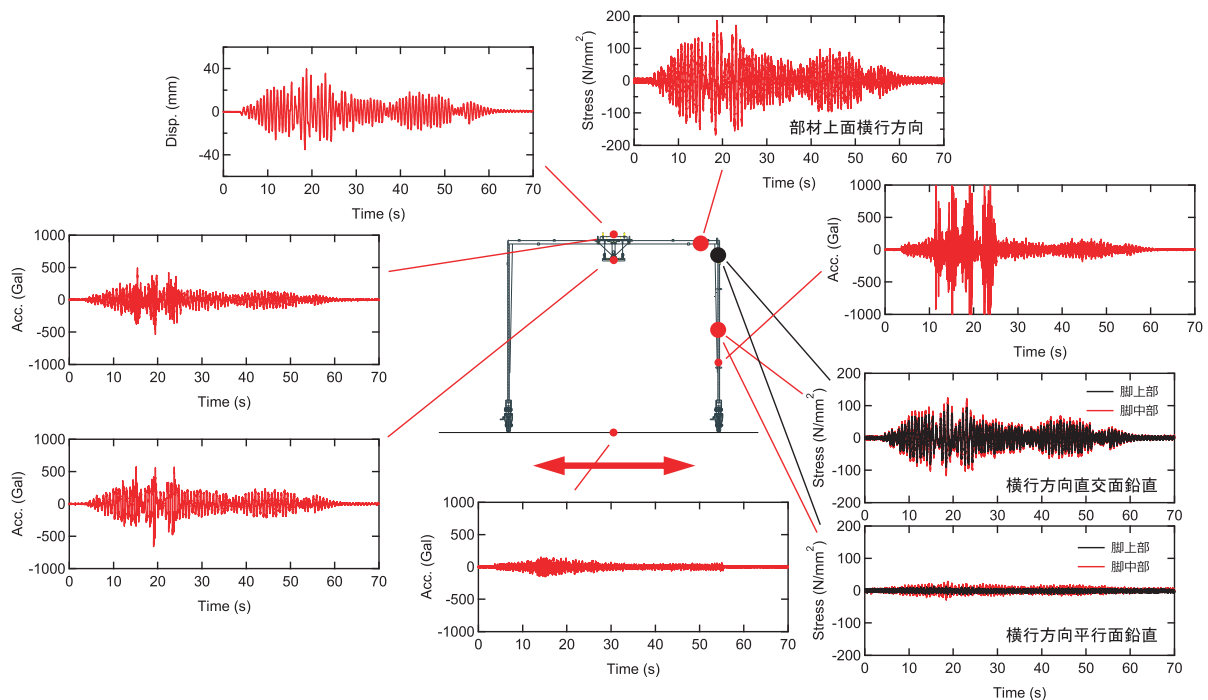


図-4 加速度，変位，断面縁応力時刻歴（横行方向加振，L1波）

うにしており，部材断面寸法までは考慮されていないため，模型での縁応力に応力の相比率を掛けただけでは実断面での縁応力にはならないため，そのような方法を用いた．時間及び振動数については，これ以降，模型スケールで表示する．

図-3より，横行方向加振（PI波）では，振動台最大加速度約360 Galに対して，RTG頂部のクラブフレームで約580 Gal，脚下方中間部では2000 Galを超える大きな加速度応答が見られた．脚およびガーダーの部材断面縁応力の最大値は，ガーダーで約140 N/mm²（部材上面横行方向），脚中間部で約110 N/mm²（横行方向直交面鉛直）となった．図中には脚中間部の横行方向平行面鉛直の断面縁応力も示しているが，ほとんど変動はない．これは加振方向（横行方向）に対して曲げが生じる方向ではなく，その変動は軸方向の圧縮伸張により生じるが，加振中にほぼ変動していないことから，脚に対して部材の圧縮伸張はほぼ生じておらず，曲げ変形が卓越していることが認識できる．この傾向はガーダーに対しても同様であった．実機RTGの主要構造はSM490Y，SM490で製作されることが多く，これらの実スケール換算応力値は，それら鋼材のク

レーン構造規格での許容圧縮応力（曲げ圧縮）275 N/mm²，245 N/mm²よりも小さい．よって，PI波の横行方向加振においてRTGに大きな被害は生じないと考えられる．

図-4より，横行方向加振（L1波）では，振動台最大加速度約160 Galに対して，RTG頂部のクラブフレームで約540 Gal，脚下方中間部では1100 Galを超える大きな加速度応答が見られた．脚およびガーダーの部材断面縁応力（実スケール換算）の最大値は，ガーダーで約180 N/mm²（部材上面横行方向），脚中間部で約120 N/mm²（横行方向直交面鉛直）となり，PI波加振と同様に，実機RTGで用いられる鋼材での許容圧縮応力275 N/mm²，245 N/mm²よりも小さかった．PI波加振と同様に，脚やガーダーの変形は曲げで生じており，軸方向の圧縮伸張はほとんど生じていなかった．

図-5より，走行方向加振（PI波）では，振動台最大加速度約360 Galに対して，RTG頂部のクラブフレームで約550 Gal，脚中間部では約630 Galの加速度応答が見られた．脚およびシルビームの部材断面縁応力の最大値は，シルビームで約100 N/mm²（部材上面走行方向），脚中間部

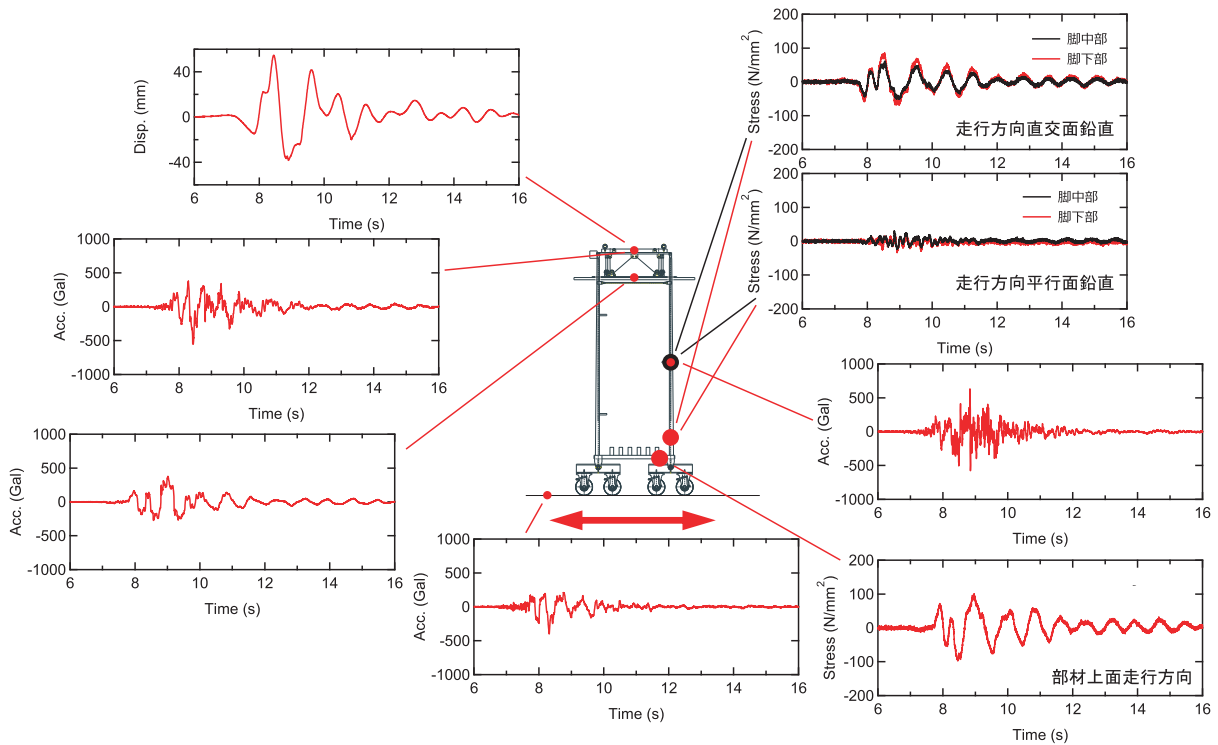


図-5 加速度，変位，断面縁応力時刻歴（走行方向加振，PI波）

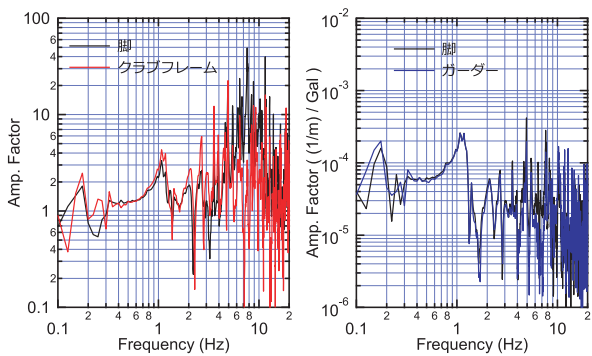


図-6 加速度，曲率/加速度スペクトル比（PI波横行方向）

左：赤：クラブフレーム，黒：脚
右：青：ガーダー，黒：脚

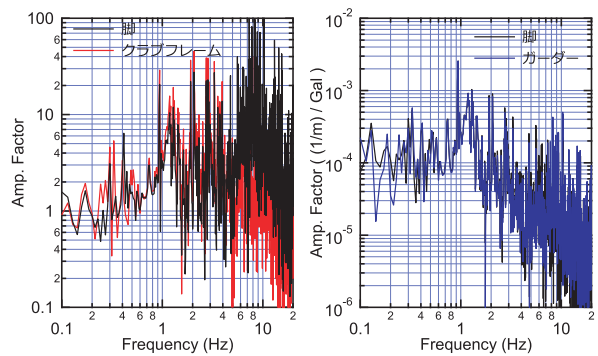


図-7 加速度，曲率/加速度スペクトル比（L1波横行方向）

左：赤：クラブフレーム，黒：脚
右：青：ガーダー，黒：脚

で約 90 N/mm^2 （走行方向直交面鉛直）となり，横行方向加振と同様に，実機 RTG で用いられる鋼材での許容圧縮応力 275 N/mm^2 ， 245 N/mm^2 よりも小さかった。また，横行方向加振と同様に，シルビーム，脚での変形は曲げで生じており，軸方向の圧縮伸張はほとんど生じていなかった。

以上より，PI波，L1波の加振において実機スケールでの許容応力を超えるような大きな部材応力は生じておらず，PI波加振の結果については1995年兵庫県南部地震でRTGの被害が無かった

ことに整合するものと考えられる。

b) 周波数特性

PI波横行方向加振でクラブフレームおよび脚の加速度，また，ガーダーおよび脚の曲率のフーリエスペクトルについて，振動台加速度フーリエスペクトルで除したスペクトル比を図-6に示す。また，L1波横行方向加振でのそれらスペクトル比を図-7に示す。PI波横行方向加振では加速度と曲率ともに1.1 Hz付近でスペクトル比が大きくなり，L1波加振でもやや高いものの同様の振動

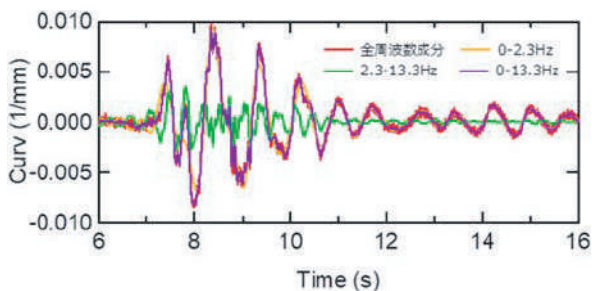


図-8 ガーダー曲率時刻歴 (PI波横行方向)
赤：全周波数成分，橙：0-2.3 Hz，緑：2.3-13.3 Hz，
紫：0-13.3 Hz

数でスペクトル比が大きくなっており，RTG 模型の横行方向の応答卓越振動数と認識される。また，脚加速度は，PI波加振，L1波加振ともに7.5 Hz付近でもスペクトル比が大きく，横行方向の高次モードと考えられるが，クラブフレーム加速度や部材曲率においてはその付近の振動数成分はあまり大きくない。このスペクトル比を参考に，脚の曲率の時刻歴において1.1 Hz付近 (0~2.3 Hz)，7.5 Hz付近 (2.3~13.3 Hz)，それら振動数帯を合わせたもの (0~13.3 Hz) を抽出したもの (PI波横行方向加振) を図-8に示す。0~13.3 Hzの成分により元の曲率の時刻歴とほぼ同等であるが，0~2.3 Hzにおいても元の時刻歴と大きな違いは無い。よって，部材変形に対する7.5 Hz付近の高次のモードの寄与は小さいことが確認できる。

PI波横行方向加振について，クラブフレームおよび脚の水平加速度について，1.1 Hz付近 (0~2.3 Hz) の成分を抽出したのでは，スプレッダ以外は同位相となっている (図-9)。7.5 Hz付近 (2.3~13.3 Hz) の成分では，加速度値が大きい場合にはずれも見られるが，横行方向に対面する脚の時刻歴の位相はおおよそ反対となっており，また，クラブフレームでは鉛直動が大きい (図-10)。これらをもとに1.1 Hz付近と7.5 Hz付近でのRTG模型の応答を模式的に示すと図-11のようになる。1.1 Hz付近では高い部分が大きく揺れるモードとなっており，7.5 Hzの高次モードではクラブフレームの鉛直動とともに脚がたわむ挙動が見られた。L1波横行方向加振では，1.1 Hz付近の成分はPI波横行方向加振と同様に脚とクラブフレームはほぼ同位相となっている (図-12)。7.5 Hzの高次モードでは，(図-13) 横行方向に対

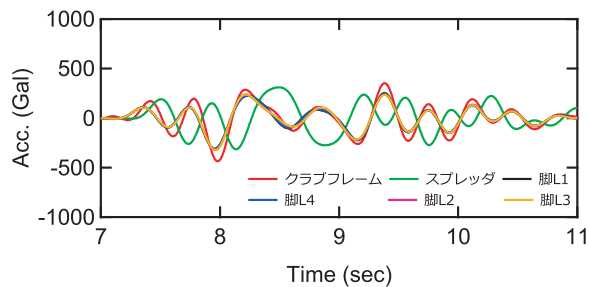


図-9 加速度時刻歴 (PI波横行方向, 0-2.3 Hz)
赤：クラブフレーム，緑：スプレッダ
黒，青：脚 (L1, L4)，桃，橙：脚 (L2, L3)

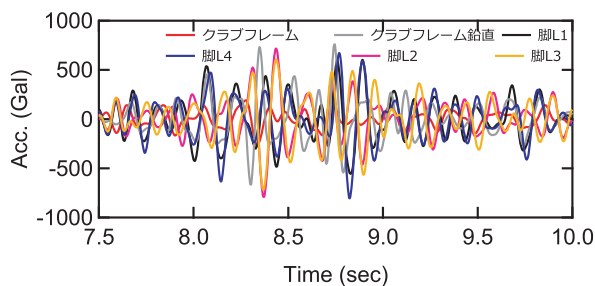


図-10 加速度時刻歴 (PI波横行方向, 2.3-13.3 Hz)
赤：クラブフレーム，灰：クラブフレーム (鉛直)，
黒，青：脚 (L1, L4)，桃，橙：脚 (L2, L3)

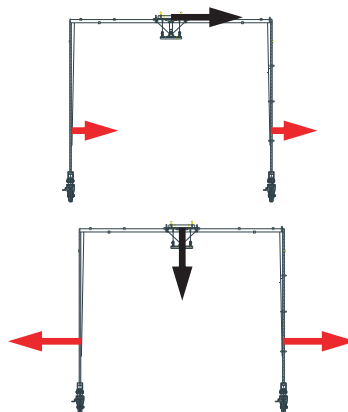


図-11 各振動数成分の応答模式図 (PI波横行方向)
上：1.1 Hz 付近，下：7.5 Hz 付近

面する脚の時刻歴の位相は同位相となったり逆位相となったりしており，明確な傾向は見られない。

PI波とL1波の横行方向加振について，ガーダーの曲率とクラブフレームと振動台の相対変位の時刻歴を重ねて示す (図-14)。図より，どちらにおいてもクラブフレーム相対変位とガーダー曲率の波形はよく似ている。10 Hz以上の高振動数成分を多く含むL1波においても，部材曲率の波形は高振動数成分があまり含まれない変位波形と

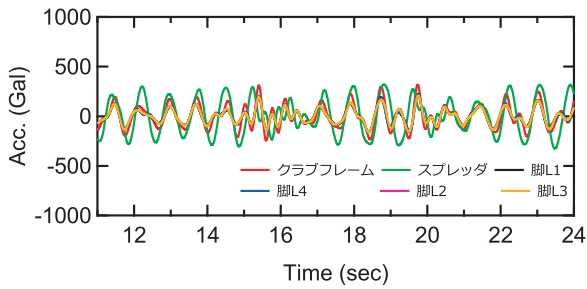


図-12 加速度時刻歴 (L1 波横行方向, 0-2.3 Hz)
赤：クラブフレーム, 緑：スプレッダ
黒, 青：脚 (L1, L4), 桃, 橙：脚 (L2, L3)

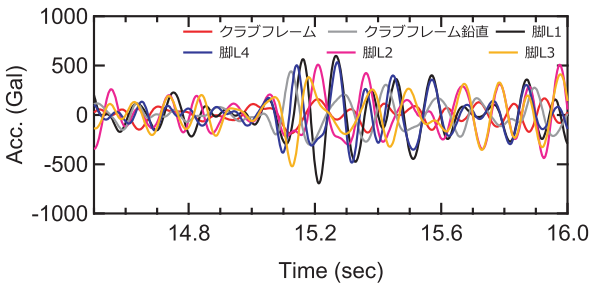


図-13 加速度時刻歴 (L1 波横行方向, 2.3-13.3 Hz)
赤：クラブフレーム, 灰：クラブフレーム鉛直,
黒, 青：脚 (L1, L4), 桃, 橙：脚 (L2, L3)

よく合うことから、部材曲率への低次モードの寄与が大きく、高次のモードの影響はあまり大きくないことが認識できる。

PI 波走行方向加振におけるクラブフレームおよび脚の加速度、また、シルビームおよび脚の曲率のフーリエスペクトルについて、振動台加速度フーリエスペクトルで除したスペクトル比を図-15 に示す。PI 波走行方向加振でも加速度と曲率ともに 1.1 Hz 付近でスペクトル比が大きくなり、RTG 模型の走行方向の応答卓越振動数と認識される。また、脚加速度は 8 Hz 付近でもスペクトル比が大きく、走行方向の高次モードと考えられるが、クラブフレーム加速度や部材曲率においてはその付近の振動数成分はあまり小さくなく、横行方向と同様に、部材曲率への高次モードの寄与は小さいと考えられる。

3. ま と め

1995 年兵庫県南部地震観測波と港湾 L1 波を用いた模型振動実験を行い、RTG の地震時挙動を確認した。加速度応答は脚部において大きな値が

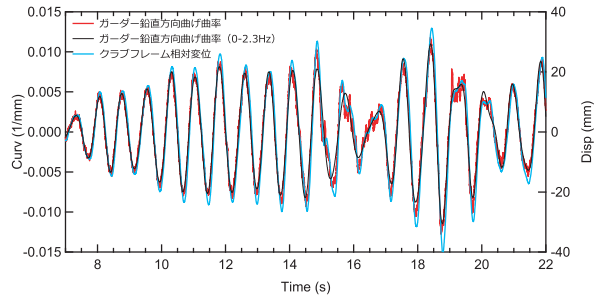
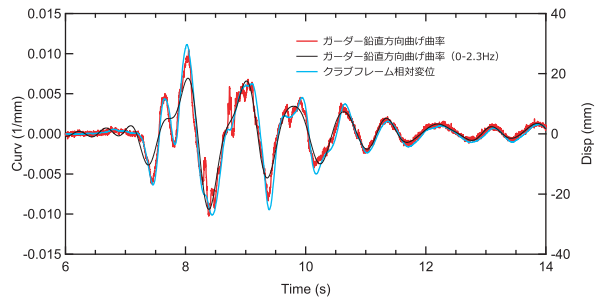


図-14 ガーダー曲率, 変位時刻歴

上：PI 波横行方向加振

下：L1 波横行方向加振

赤：ガーダー曲率, 黒：ガーダー曲率 (0-2.3 Hz)

水色：クラブフレーム相対変位

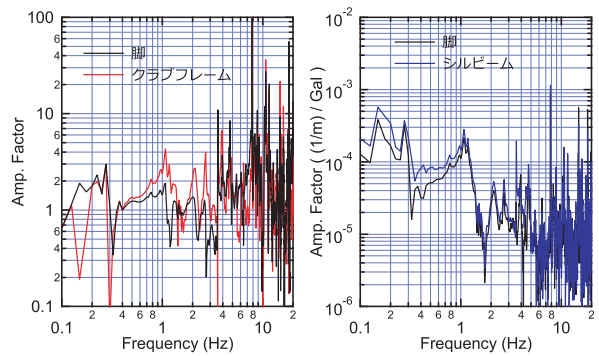


図-15 加速度, 曲率/加速度スペクトル比 (PI 波走行方向)

左：赤：クラブフレーム, 黒：脚

右：青：シルビーム, 黒：脚

見られたものの、実スケール換算値において破壊に至るような部材応力値は確認されず、兵庫県南部地震において RTG の被害が見られなかったことに整合するものと考えられる。脚での 2000 Gal を超えるような大きな加速度応答値は高次のモードの寄与が見られたが、部材曲率では高振動数成分はあまり見られず、RTG 構造の損傷には振動数の低いモードの寄与が大きいことが確認された。よって、今後、RTG の耐震性能照査を行う場合において、RTG の高次の応答モードはあま

り考慮せず、低次の応答モードに着目して評価できることの可能性を示すことが出来た。

REFERENCES

- 1) 公益社団法人日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2018。[The ports and harbours association of Japan: Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan]
- 2) 日本クレーン協会：クレーン等各構造規格の解説，改訂4版，2017。[Japan Crane Association: Explanation of Structural Standards for Cranes, revised 4th Edition, 2017.]
- 3) 藤本健幸：兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察（その2）被害状況—港湾荷役施設—，港湾技研資料，運輸省港湾技術研究所，港湾施設被害検討委員会編，No. 813, pp. 77-94, 1995。[Fujimoto, T.: Mechanism of Damage to Port Facilities during 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, (Part 2) Damages, -Cargo Handling Facilities-, Technical Note of the Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport, Japan, No. 813, pp. 77-94, 1995.]
- 4) 竹原亨，市村欣也，阿部雅二郎，伊藤廣：タイヤ式門型クレーンの動特性：第2報，機体挙動と走行性能，日本機械学会論文集，C編，65巻637号 pp. 3723-3730, 1999。[Toru TAKEHARA, Kinya ICHIMURA, Masajiro ABE, Hiroshi ITO: Dynamic Behavior of Rubber Tire-mounted Gantry Cranes : 2nd Report, Body Behavior and Travelling Performances, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C, Volume 65 Issue 637 Pages 3723-3730, 1999.]
- 5) 宮田正史，吉川慎一，竹信正寛，菅野高弘，小濱

英司，久保哲也：耐震強化施設としてのコンテナクレーンの耐震性能照査手法に関する研究（その3），国土技術政策総合研究所資料，No. 563, 2010。[Miyata, M., Yoshikawa, S., Takenobu, M., Sugano, T., Kohama, E., and Kubo, T.: Study on the Seismic Performance-based Design Methods for Container Cranes (Part 3), Technical Note of National Institute for Land and Infrastructure Management, No. 563, 2010.]

- 6) IAI, S.: Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in 1g Gravitational Field, Report of the Port and Harbour Research Institute, Report 027-03-01, 1988.

(Received February 6, 2024)

(Accepted May 13, 2024)

著者紹介



久保 博司
・株式会社三井 E&S 物流システム
事業部 製造部



小浜 優
・株式会社三井 E&S 物流システム
事業部 設計部

港湾の脱炭素化のための水素駆動型 荷役機器デバイスの開発と運用管理

市村 欣也¹・村山 哲郎²・犬塚 秀世³・杉村 佳寿⁴・篠田 岳思⁵

¹ 株式会社三井 E&S (〒104-8439 東京都中央区築地 5-6-4), 九州大学大学院

² 株式会社三井 E&S (〒104-8439 東京都中央区築地 5-6-4)

³ 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

⁴ 神戸大学大学院海事科学研究科 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南 5-1-1)

⁵ 九州大学大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

コンテナターミナル (CT) の脱炭素化において、ディーゼルエンジンを搭載した荷役機器の脱炭素化が重要項目のひとつである。現時点では、駆動エネルギー源の電動化が最も効果的な対策であるとされているが、タイヤ式門型クレーン (RTGC) は運用の自由度を維持したいニーズや、費用面あるいは面積的制約から地上給電化のためのインフラ整備を行えない CT もある。RTGC を水素駆動型にすることで、従来の運用パターンを変えることなく大きな脱炭素効果が期待できるが、現時点では水素の利用に対して技術面と運用面での課題が認識されている。

本研究では、水素駆動型 RTGC 実証機を製作し、実荷役を模した試験を実施することで従来型同様の荷役作業に使用できる運転条件と水素消費量の特性を検証する。更に水素充填における課題を抽出し、その管理方法を提案する。

Key Words container terminal, hydrogen, fuel cell, rubber tired gantry crane, carbon neutral

1. はじめに

現在、日本ではカーボンニュートラルポート (CNP) 政策が推進されており¹⁾、各港湾において脱炭素化推進計画が順次策定されている。また、米国ロサンゼルス港およびロングビーチ港では 2030 年までに港湾地区からの排出ガスをゼロにするクリーンエア・アクションプラン (CAAP) が推進されている。本研究で対象とするコンテナターミナル (CT) では、ディーゼルエンジンや系統電力を駆動エネルギー源として作業を行う複数種類の荷役機器が使用されており²⁾、荷役機器の脱炭素化が港湾脱炭素化推進計画や CAAP 対応における重要項目のひとつである。

CT で使用される荷役機器の駆動エネルギー源を表-1 に示す。岸壁クレーン (STSC) やレール式門型クレーン (RMGC) は、一部電源インフラが整っていない CT を除き、系統から直接給電さ

れるものが主流である。これらは、再生可能電力の導入による脱炭素化が可能である。一方 CT における CO₂ 排出源の大きな割合を占めているのは、タイヤ式門形クレーン (RTGC)、ストラドルキャリア (S/C)、トップハンドラー (T/H)、構内用シャーシトラクター (CHAy) 等、ディーゼルエンジンを搭載した荷役機器であり³⁾、現時点でこれらの脱炭素化には、駆動エネルギー源の

表-1 CT 内の荷役域の駆動エネルギー源

エネルギー源	ディーゼルエンジン			地上給電	蓄電池
	E.D.	H.D.	M.D.	E.D.	E.D.
STSC	※			◎	
RTGC	◎			※	
RMGC	※			◎	
S/C		◎			※
T/H		◎			※
CHAy			◎		※

E.D. 電気駆動

H.D. 油圧駆動

M.D. 機械駆動

◎ 主流

※ 対応可能

電動化が最も効果的な対策であるとされている⁴⁾。ケーブルリールや剛体線を介して系統から給電する RTGC が実用化されており⁵⁾、また蓄電池を搭載した S/C、T/H、CHA が市場投入され始めている。しかし、CT 内のスペースや費用面から給電設備の設置が困難な場合があり、また充電式の荷役機器は蓄電池の重量、充電時間、連続稼働時間等が課題となっている。水素駆動型荷役機器は、従来の運用パターンを変えることなく大きな脱炭素効果が期待できるが、現時点では水素の利用に対して技術面と運用面での課題が認識されており⁶⁾、特に、水素駆動型荷役機器の荷役パターンと水素消費量の関係や、水素充填が CT 荷役作業に及ぼす影響に配慮した運用管理方法は先行研究においても明らかにされていない。更に RTGC の水素駆動化では、限られたスペース内で水素消費量を抑制しつつ必要な電力量を確保することと、電源部の運転条件と蓄電池容量のバランスを考慮したハイブリッドシステムの最適化が課題である。

本研究では水素駆動型 RTGC の導入に向け、従来型同様の CT 荷役作業に使用できる実証機を設計、製造し、荷役模擬試験を通して RTGC 固有の水素燃料電池パワーパック (FCPP) の運転方法とそれに伴う水素消費量の特性を検証する。模擬試験から得られた結果を元に水素充填間隔における課題を抽出し、その管理方法を提案する。

2. タイヤ式門形クレーン

(1) トランスファークレーン

トランスファークレーンはコンテナ船への積込み積下ろし、あるいは外来シャーシトラクター (CHAr) による搬出入のため、蔵置ヤードでコンテナを荷役する荷役機器で、走行装置の違いにより RMGC と RTGC に分類される。ラバータイヤ式走行装置を有している RTGC は機動性が高く、作業の繁忙度に応じて必要な蔵置エリアに配置出来るため、より少ない設備投資で効率的な CT の運営が可能となり、世界中で広く使用されている。一方、機動性を維持するため、機上にディーゼルエンジン発電機セット (DGset) を搭載することで、荷役を行うための各種電動モータ

駆動用電源を得ている。現在日本国内には約 480 機の RTGC が稼働しており、年間約 89,000 t の CO₂ を排出しているという試算があるが⁷⁾、これは、2021 年度の船舶 (貨物) 輸送部門からのエネルギー起源 CO₂ 排出量 6,900,000 t の約 1.4% に相当する⁸⁾。

(2) RTGC の寸法的制約

RTGC の外観と寸法を図-1 に示す。RTGC はスプレッダと呼ばれるコンテナ専用吊具を装着しており、標準的な 5 段積み (荷を吊ったトロリが 5 段のコンテナの上を横行可能) 型の場合、揚程 18,000 mm で全高は約 25,000 mm である。また、6 列 + シャーシレーンというレイアウトが世界的に一般的で、23,470 mm スパンの RTGC が広く普及している。スパンからの内側張り出し寸法 L₂、L₃ は、850 mm 程度が一般的である。外側張り出し寸法 L₁ も 850 mm 程度が一般的であるが、L₄ は階段、梯子等の乗込み用設備が設置されるため、1,400 mm 程度である。

CT 内により多くのコンテナを蔵置するため、隣接クレーンや蔵置コンテナとの隙間は最小限に設定されており、隣接の走行路との間隔が 3,200 mm になることもある。自動直進制御装置を搭載した RTGC では走行基準線から ±300 mm 以上ずれると非常停止する。すなわち、隣接する 2 機の RTGC は最大 600 mm 近寄る可能性があり、走行路間隔が 3,200 mm であったとしても 2 機の間隔は 350 mm まで狭まる。ヤード水切り勾配や経年劣化による走行路の沈降の影響も考慮すると、張り出し寸法を厳守しなければ隣接クレーン

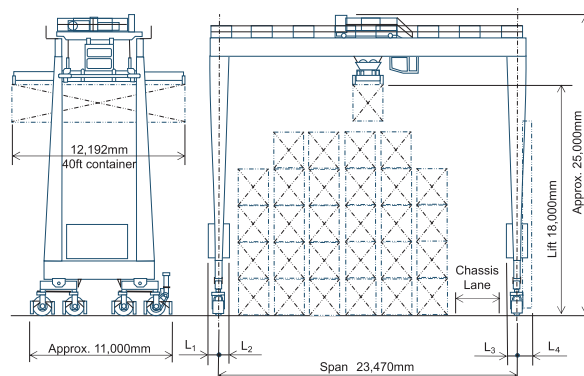


図-1 RTGC の外観と寸法

との衝突事故を招く。

(3) RTGC の電機駆動系機器構成

インバータ制御の RTGC における電機駆動系には、直流電気を DC バスに供給する電源部、DC バスの電気を PWM 変換しモータを回転させるインバータ、保護抵抗器等が含まれている (図-2)。電源部の DGset が交流発電機の場合、整流器と組み合わせることで直流電気を得ている。また近年のハイブリッド RTGC では、充放電制御装置とリチウムイオン蓄電池からなる回生電力再利用システムが DC バスに接続されており、電源部と蓄電池のハイブリッドで電力を供給している。

定格重量のコンテナを吊り巻上げ加速する際には、300 kW 程度のピーク電力が必要になる。一方、コンテナの位置エネルギーにより巻下げ時にモータが発電して発生する回生電力は、回生電力再利用システムに回収するか保護抵抗器で熱エネルギーとして大気放出するか、あるいはそれらを併用しなければならない。

非ハイブリッド RTGC は、ピーク電力に対応した出力 400 kW 程度の DGset を搭載し回生電力のほとんど全てを放出している。ハイブリッド RTGC では、搭載する蓄電池の性能 (蓄電容量、充放電速度) により回生電力の一部を回収している。標準的なハイブリッド RTGC は出力 200 kW 程度の DGset を搭載し、巻上げ時には DGset で得られる電力を蓄電池に蓄積していた電力がアシストする。回生電力の再利用により、ハイブリッド RTGC の燃費は非ハイブリッド RTGC に比べ約 50% 削減されているものの、なお 1 時間あたり 10 L 程度の軽油を消費する。

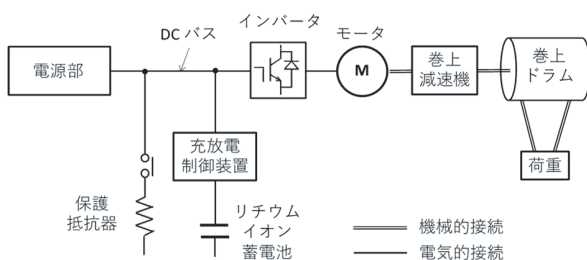


図-2 RTGC 駆動システムの機器構成

3. FCPP の計画検討

(1) RTGC 水素駆動化の課題

前章で説明した特徴から、RTGC を水素駆動化する際の課題として、限られたスペース内で水素消費量を抑制しつつ必要な電力量を確保すること、電源部の運転条件と蓄電池容量のバランスを考慮したハイブリッドシステムの最適化が挙げられる。これらは相互に影響を及ぼし合うものであり、独立した課題として検討できるものではなくバランスを取りながら計画検討する必要がある。

FC モジュールと蓄電池の出力、設置スペース他、全てで要求を満たすバランスを見つけなければ水素駆動 RTGC の実用化はできない。

(2) 電源部

水素をエネルギー源として電力を得る方法として FC と水素内燃機関発電機セットがある。前者は水素と酸素の電気化学反応でエネルギーを得るため、内燃機関に比べエネルギー効率が高いことが特徴である。また水素内燃機関が開発の途上であるのに対し、燃料電池自動車 (FCV) では最大出力 110 kW を超えるものが市販されている。更に、FCV の基幹部品を使うことで費用対効果に優れ、高い信頼性が期待できる燃料電池が一般産業用 FC モジュールとして販売されており⁹⁾、今回の RTGC 水素駆動化ではこれを採用した。

FCV では急激なピーク出力に対応することが求められるが、負荷変動を抑え定常連続運転を行えば FC の性能低下を抑制し寿命を伸ばすことが可能となる。更に、最大出力に対して定常出力を低く抑えることで熱効率の向上も図ることができる。RTGC の FCPP では、後述のハイブリッドシステムとバランスを取ることで、60 kW 以下の定常連続運転を行う仕様とし、設計出力値から水素消費量を 4 kg/h と設定し計画検討を進めた。

(3) ハイブリッドシステム

2-(3) で述べた通り、現行のハイブリッドシステムは出力 200 kW 程度の DGset を搭載し、巻下げ時に蓄積した回生電力の一部を巻上げ時にアシストする構成である。電源部の最大出力を 60

kWとした場合、巻上げ加速におけるピーク負荷を賄えず蓄電池の充電率（SOC）が徐々に低下し、荷役作業を継続することが困難になる。ピーク負荷に対応し、FCPPの出力によらず荷役作業を可能にするためには蓄電池を大型化しなければならないが、蓄電池費用の増大のみならず、RTGC上に相応の設置スペースを確保する必要がある。電力シミュレーションによる検討の結果、150 Ahのリチウムイオン蓄電池を搭載し、FCモジュール出力と再生電力再利用システムとのバランスについて計画検討を進めた。

(4) 水素タンクと燃料供給システム

RTGCへの水素の充填頻度を抑え、連続稼働時間を確保するため、RTGC機上に連続稼働時間相当量の水素を貯蔵する水素タンクを設置する必要がある。CTにおいて荷役作業を中断せず運用を継続するには、最低でも1日のオペレーションの間は水素を補充することなく作業を継続する必要がある。1日のRTGC作業時間を16時間（8時間×2シフト）に設定し、水素貯蔵量を70 kgとした。

水素タンクの貯蔵量は充填圧力が大きな影響を与える。具体的には、70 MPaの充填圧力を持つタンクは同じ大きさの35 MPaのタンクよりも約1.7倍多くの水素を貯蔵できる。今回のFCPPではスペースの制約に対応するため、有効水素量8 kgの70 MPa充填が可能な水素タンク8本を搭載することとした。図-3に燃料供給システムの基本構成を示す。タンクに充填されている水素は、燃料供給システム内の減圧弁とFCモジュール内のインジェクタにより二段階で減圧され、FCモジュールに供給される。

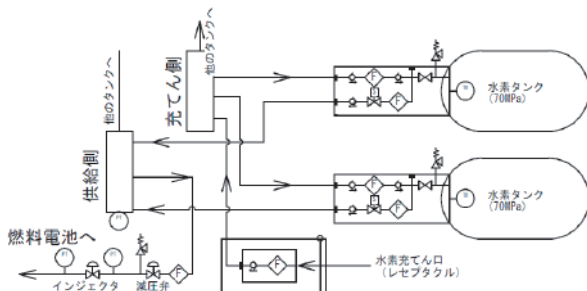


図-3 燃料供給システムの基本構成

(5) エンクロージャ

2-(2) で述べた通り、RTGCは積上げられたコンテナの間を走行しているため、機上に搭載される機器の張り出し寸法が大きい場合、隣接RTGCや蔵置コンテナと接触する可能性があり、制限寸法を守ることが必須となる。

FCPPはFCモジュールおよびその冷却用放熱ユニット、有効水素搭載量を確保した燃料供給システム（水素タンクを含む）で構成されており、計画検討の結果選定された機器を配置したFCPPの外観図を図-4に、主仕様を表-2に示す。水素

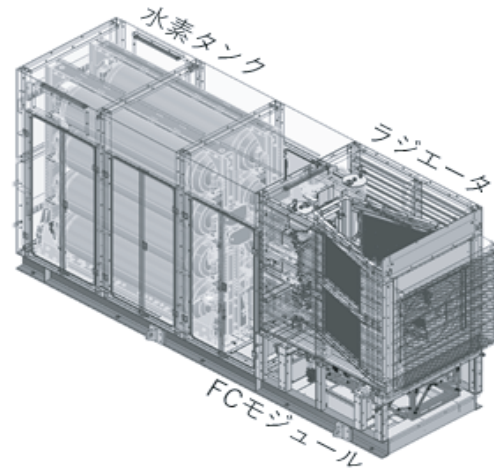


図-4 FCPPの外観

表-2 FCPPの主仕様

項目	値	
定格出力	kW	60
使用電圧範囲	V (DC)	400~750
外形寸法	mm	5,000 L×1,400 W×2,500 H
重量	kg	6,800
使用外気温	℃	-40~50
使用外気圧	kPa	60~105
水素タンク 許容圧力・温度	MPa, ℃	0.98~87.6 MPa. abs/ -55~85℃
水素貯蔵量	kg	75.2*
水素品質	-	ISO 14687-2: 2012 (Type 1, Grade D)
通信	-	SAE J2799 (赤外線通信)
充填プロトコル	SAE J2601-1, JPEC-S0003 H35, H70	

*水素有効搭載量は残圧により異なる

タンクは横置き4段で2ユニットとすることによりRTGCに搭載可能なサイズに収めることができ、FCPP内の必要なメンテナンススペースも確保した。

4. 実証機での検証試験

(1) RTGC 実証機および試験サイクルパス

三井E&S大分工場に設置されていたDGset搭載型RTGCを、前述の設計に基づいて製作したFCPPおよびハイブリッドシステムに換装した。検証試験を行うためのRTGC実証機の主仕様を表-3に示す。なお、クレーン外形寸法は図-1に示すものと同じである。

実際のCTで行われている、CHAyからコンテナを蔵置エリアに移動する荷役を模擬し、実荷役に用いられているCHAyとコンテナを使用して工場内での検証試験を実施した。図-5に示すサイクルパスを採用し、1時間あたり20回連続的に模擬荷役しデータを収集した。すなわち、Cycle 1開始180秒後にCycle 2を開始し、その180秒後にCycle 1を開始する荷役を繰り返すものである。試験用コンテナ重量は40tとした。

表-3 RTGC 実証機の主仕様

項目	値
定格荷重	t 40.6
主巻速度	
定格荷重コンテナ吊り	m/min 23
スプレッドのみ	m/min 52
横行速度	m/min 70
走行速度	m/min 90
車輪数	8

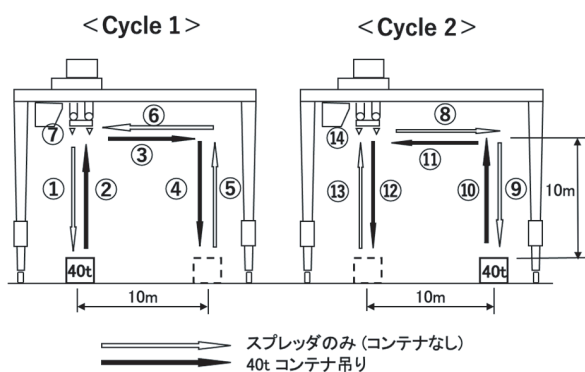


図-5 連続荷役試験の荷役サイクル

(2) 1サイクルあたりの電力時刻歴

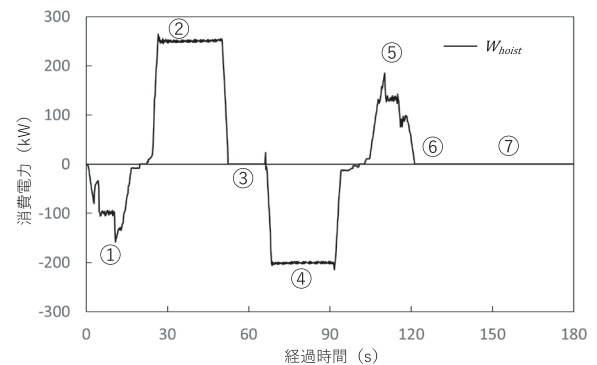
RTGC実証機の主巻装置には2つのインバータが搭載されており、主巻の消費電力 W_{hoist} (W)は式(1)で得られる。また蓄電池の充放電電力 W_{LIB} (W)は式(2)で得られる。

$$W_{hoist} = \sqrt{3} \cdot (E_{inv1} \cdot I_{inv1} + E_{inv2} \cdot I_{inv2}) \quad (1)$$

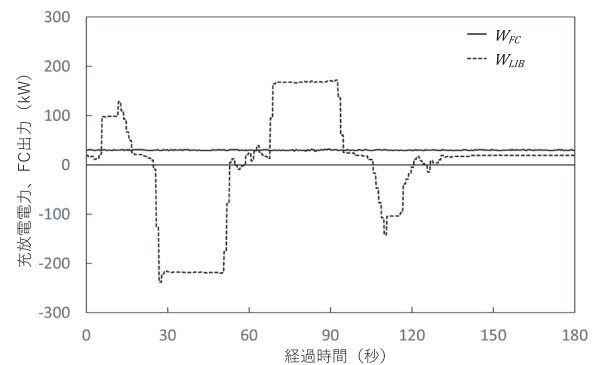
$$W_{LIB} = E_{LIB} \cdot I_{LIB} \quad (2)$$

ただし、 E_{inv1} , E_{inv2} : インバータ1および2(三層交流)の電圧(V), I_{inv1} , I_{inv2} : 同電流(A), E_{LIB} : 蓄電池(直流)の充放電電圧(V), I_{LIB} : 同電流であり、いずれも計測値である。FCモジュールの出力 W_{FC} (W)も計測値で得られる。

Cycle 1で運転したときの W_{hoist} の時刻歴変化を図-6(a)に示す。図中の丸囲み数字は図-5の動きに対応している。①と④は巻下げ動作であり負の電力、すなわち回生電力の発生を示している。②と⑤は巻上げによる電力の消費を示しているが、②が40tコンテナの巻上げに対して⑤はスプレッドのみの空荷であるため、発生する最大



(a)主巻の消費電力



(b)蓄電池充放電電力・FC発電量

図-6 RTGC 駆動系の電力時刻歴変化

電力、消費電力量（時刻歴図では面積に相当する）とも②のほうが大きな値を示している。

このサイクルにおける $WLIB$ と W_{FC} の時刻歴を図-6 (b) に示す。 W_{FC} の出力設定値は 30 kW であるが、必要な電力が不足すると出力を上げるロジックになっている。ここで $WLIB$ は放電時を負、充電時を正としている。図-6 (a) と比較すると、巻上げによる電力消費が発生すると同時に蓄電池が電力を供給している。巻上げのピーク部分のエネルギーを $WLIB$ で供給することにより W_{FC} をほぼ一定に保っており、今回設計したハイブリッドシステムが FC モジュールの定常運転に対して適切な能力を有していることを示している。一方、巻下げが始まると同時に $WLIB$ は正の電力を発生しており、蓄電池に充電し SOC を向上させている。更に作業待ち時間となる⑦のタイミングに、FC モジュールで発電した電力を蓄電池に充電している。ここで $WLIB$ が 30 kW より低いのはエアコンや照明、制御機器といった補機が電力を消費しているためである。

(3) 連続運転下での蓄電池 SOC 変化

今回設計したハイブリッドシステムは、1 サイクルの荷役の中で蓄電池が適切なタイミングで充放電していることが確認されたが、1 サイクル間の充電量が放電量より少なければ蓄電池 SOC が減少し続け、最終的に巻上げ時に必要なピーク電力を供給できなくなる。今回のシステムでは、荷役頻度が高い CT や様々な荷役条件を想定して出力 60 kW の FC モジュールを搭載しているが、平均的な荷役負荷における蓄電池 SOC の変化量を確認する目的で、 W_{FC} に 30 kW と 40 kW の出力制限をかけて連続模擬荷役試験を行った。 W_{FC} の違いによる蓄電池 SOC の時刻歴変化を図-7 に示す。20 サイクル/h で 1 時間の連続荷役を行った後の SOC 変化量は $W_{FC}=30$ kW で 0.7% ポイント減少、 $W_{FC}=40$ kW では 9.3% ポイント増加であった。

この試験結果より、平均的な荷役負荷の CT では、 W_{FC} の出力設定値を 30 kW としておき、必要な電力が不足すると出力を上げるロジックとすれば良いことが確認できた。本試験は実際の荷役

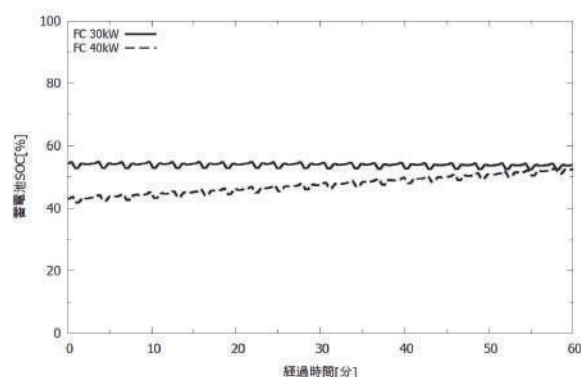


図-7 蓄電池 SOC の時刻歴変化

を模した負荷条件であるが、従来の RTGC と同等の荷役能力を達成していると言える。

5. 水素充填の管理

(1) 水素消費量と充填の頻度

連続試験中の平均水素消費量は 1.72 kg/h ($W_{FC}=30$ kW)、2.45 kg/h ($W_{FC}=40$ kW) であったが、回生電力の回収が減る本船積下ろし作業が連続する場合等では、この数値を上回ることが想定される。しかし、FC モジュールの出力設計値 60 kW よりも十分低いところで平均的な連続荷役が可能であることを検証できたので、水素消費量が設計値の 4 kg/h を超えることは無いと想定され、今後、実荷役作業を通して水素消費量のデータ検証を継続する。

従来型 RTGC の軽油タンク容量では 45 時間程度の稼働が可能であるが、給油方法は一例として、数日に 1 度、残量によらず満タンにするという運用がある。一方、今回開発した水素駆動型 RTGC が繁忙状態で稼働した場合 16 時間毎の水素充填が必要である。現在は FCV 用の充填プロトコルを用いており、充填時間は 30 分程度を要するため、今後は大型水素バス・トラック用に開発されている、より高速で充填可能なプロトコルの採用が必要である。

(2) モニタリングシステムによるデータ収集と水素充填最適化

RTGC はプログラマブル・ロジックコントローラ (PLC) により制御されおり、リミットスイッチや各種センサの状態量を読み込んだり、アクチュエータに作動信号を与えたりする。PLC

が有している情報をモニタースクリーンにグラフィカルに表示するモニタリングシステム (CMS) を搭載している RTGC も多い。また、近年の CMS は機上で情報を確認できるのみならず、メンテナンスショップ等に設置された PC やクラウドサーバに情報を送信し、遠隔地で監視できるものがある。FCPP のデータも CMS を経由して集約し、全 RTGC の水素残量を一括監視しながら計画的に充填する必要がある。

一方、CT 荷役シミュレーションによる CHAY の走行距離に基づいて燃料消費と CO₂ 排出量を算出する手法が提案されている¹⁰⁾。将来的には RTGC も同様に CT 荷役シミュレーションに基づく水素消費量の算出と管理を行い、効率的な充填管理を行う必要がある。

6. おわりに

本稿では水素駆動型 RTGC に求められる要求項目を整理し、それらに対応した設計を示した。水素駆動型 RTGC の導入可能性を高めるためには、水素消費量を抑制しつつ必要な電力量を確保することと、CT 内の作業クリアランスを確保するための FCPP の寸法制限を守ることが必要となる。このため、FCPP と回生電力再利用システムを併用した構成として、性能や寸法制限を満足する使用水素量と高圧水素タンクの仕様の組合せを検討した。

更に、実機と同一仕様の実証機を製作し、実際の荷役パターンを想定した工場内での検証荷役模擬試験による電力計測を実施し、定常運転時の消費電力や蓄電池 SOC を検証した。20 サイクル/h で連続的に模擬荷役を実施し、FC を 30 kW で定常運転すれば蓄電池の SOC は減少せず運用上問題ないこと確認した。また、開発した RTGC の水素充填間隔や時間から効率的な運用管理方法を提案した。今後、実際の CT での実荷役作業に投入し、そこから得られるデータを水素消費の原単位として用いる予定である。

謝辞：

本報の成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業「燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業」により得られた。ここに謝意を示す。

REFERENCES

- 1) 国土交通省港湾局：「カーボンニュートラルポート (CNP) 形成計画」策定マニュアル，2021。
- 2) Wilmsmeier, G., and Spengler, T.: Energy consumption and container terminal efficiency, *FAL Bull*, Vol. 350, pp. 1-10, 2016.
- 3) Wang, L., Peng, C., Shi, W., and Zhu, M.: Carbon dioxide emissions from port container distribution: Spatial characteristics and driving factors, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 82, 2020.
- 4) Sifakis, N. and Tsoutsos, T.: Planning zero-emissions ports through the nearly zero energy port concept, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 286, 2021.
- 5) 小川 覚, 市村 欣也, 高原 超士：環境対応型コンテナ荷役機器, 三井造船技報, No. 200, pp. 22-25, 2010.
- 6) Iris, Ç., Lam and J.S.L.: A review of energy efficiency in ports: operational strategies, technologies and energy management systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 112, pp. 170-182, 2019.
- 7) 村山 哲郎, 市村 欣也：世界初、燃料電池を動力源としたラバータイヤ式門型クレーンの開発と実証試験に成功, 建設機械施工, Vol. 75 No 12, pp. 43-47, 2023.
- 8) 環境省：2021 年度 (令和 3 年度) の温室効果ガス排出・吸収量 (確報値) について, 2023. <https://www.env.go.jp/content/000150033.pdf>
- 9) 今西啓之, 矢橋洋樹, 浜田成孝, 渡辺祐介, 折橋信行: Supporting the Development of a Hydrogen-Energy Based Society by Expanding Fuel Cell Application, *TOYOTA Technical Review*, Vol. 68, pp. 16-21, 2023.
- 10) 篠田 岳思, 杉村 佳寿, T. N. MATHIAS, 鶴野 佑馬, 阿野 貴史：コンテナターミナルの脱炭素化に向けたビッグデータ分析と荷役シミュレーションの活用可能性, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 78, No. 2, I_319-I_324, 2022.

(Received February 6, 2024)

(Accepted May 13, 2024)

著者紹介



市村 欣也
・株式会社三井 E&S 成長事業推進
事業部 マーケティング部



村山 哲郎
・株式会社三井 E&S 物流システム
事業部 設計部

大規模コンテナ物流時代に適応した コンテナターミナル作業計画法の概念設計

市村 欣也¹・篠田 岳思²

¹九州大学大学院, 株式会社三井 E&S (〒104-8439 東京都中央区築地 5-6-4)

²九州大学 名誉教授

I. はじめに

コンテナ貨物輸送は荷役や輸送の効率を飛躍的に向上させると共に、製造業における国際分業を加速させた。製造業の国際分業化と共にグローバルサプライチェーンが発展し、貿易貨物量の増加に対応して、輸送効率を高めるためコンテナ船が大型化し、現在、積載量が24,000 TEUを超えるものも就航している。これらの大型コンテナ船では1回の寄港で積み下ろしするコンテナ数が多くなるため、コンテナターミナル(Container Terminal, CT)は生産性の向上が求められており、各CTは、生き残りをかけて新技術導入への投資を競わなければならなくなっている¹⁾²⁾。APMT TERMINALSは2023年5月2日、オランダ・ロッテルダム港のMAASVLAKTE-II自動化ターミナルにおいて、コンテナ船Monaco Maerskに対する9,233個のコンテナ荷役を36時間で完了した、すなわち1時間あたり256個のコンテナを荷役したと報じた³⁾。

荷役能率向上に対応するため、CTでは複数コンテナの同時荷役や動作速度の高速化に対応した高能率型荷役機器を導入しているが、ソフト面、すなわち運用の効率を向上させる作業計画を立て

なければハード的に高めた能力を十分に発揮することはできない。CTの生産性は荷役の順番や蔵置の場所等を指示する作業計画により左右されるが、CT内では複数のコンテナ船に対する作業やゲート搬出入作業等の様々な作業が同時進行しており、複数の最適化指標がトレードオフになっていることも多い。このため、熟練ノウハウを持つプランナーがバランスを考慮しながら作業計画を立てている。また、COVID-19による物流混乱の影響が発生する以前から、コンテナ船の到着遅れが大きくなっていることが指摘されており、赤倉(2020)によると欧州・北米基幹航路全体の2018年の東アジア・欧米輸入港での定時到着率は7割を切り、平均遅延日数は概ね0.7~1.1日であった。コンテナ船の到着遅れはCTに対して短時間での計画変更を要求することが多く、作業計画の立案をいっそう複雑なものにしている。

大型コンテナ船により大量の貨物が輸送され、CTで大量のコンテナを短期間に荷役する今日の状況を、著者は「大規模コンテナ物流時代」と呼び、荷役業務の質⁴⁾や量が大きく異なるため、これまでのノウハウに基づいて作業計画を立てる方法では生産性の高いCT運用ができなくなっていると考える。すなわち、プランナーの熟練ノウハウは定量的評価が難しい暗黙知であり、変化する環境の中で最良という確証も得難く、さらに条件の異なる複数の計画で荷役した結果を比較評

日本海運経済学会 海運経済研究 第58号 2024より転載

1) R. マルク, 村井章子訳『コンテナ物語 増補改訂版』, 日経BP, 2019, 354~363ページ。

2) 松田琢磨『コンテナから読む世界経済』, KADOKAWA, 2023, 250~258ページ。

3) APM TERMINALS "News & Updates", 2023.5.2 (<https://www.apmterminals.com/en/maasvlakte/practical-information/news-and-updates/2023/230502-new-record-in-container-handling> 2024.1.19 最終アクセス)

4) 例えば、大型コンテナ船の荷役では、より多くのギャングが同時に荷役作業を行うことになり、作業の交錯による効率低下を最小限にする管理も必要となる。

価値することもない。大規模コンテナ物流時代に適応した作業計画では定量的かつ多面的な検討を行うため、CT内の蔵置や作業に関する情報を一元的に管理するターミナルオペレーティングシステム（Terminal Operating System, TOS）のデータと人工知能（AI）による最適化をデジタルツイン（DT）領域で連携させ、条件の異なる複数の計画を立て、物流シミュレータでシミュレーションし、エミュレータにより結果の比較をプランナーにフィードバックしたうえでヒトによる最終判断を行うという方法が必要となると考える。

近年、港湾DTの導入に関する研究やCT作業計画にAIを適用する研究が増えてきたが⁵⁾、CTにおける実際の荷役作業に沿った手法を示した手法にまで言及したものは見当たらない。そこで本研究では、前述のCT作業計画方法を実現するために、DT領域においてTOSのデータベースが持つデータをAIと連携させる方法や、得られた結果をどのように実際の荷役作業に反映するかというプロセスに着目し、様々な環境のCTにおいても汎用的に利用できる作業計画方法と、そのシステムの構成について概念設計を行った。

II. TOSを用いて行うCT作業計画とAIの適用

1. CTにおけるTOSの役割

CTでは、輸出入、サイズ、実入り・空、常温・冷凍冷蔵等、様々な種類のコンテナが保管されており、それらはクレーンやシャーシトラックを使用して移動を繰り返している。さらにコンテナ船の動静を基に岸壁の使用計画を立てたり、船社の代理人として各種の貿易に関わる手続きを執行したりとCTオペレータの業務は多い。このようにCTは規模が大きく複雑なシステムであり、システムを円滑に運用するためにTOSが活用されている。TOSはコンテナの在庫情報や搬出入情報、輸出入情報を一元的に管理するコンピュータシステムで、情報機器ハードウェアの進歩と共

に機能も進化してきた。本船計画、ヤード蔵置計画、荷役機器管理等を行うサブシステムを有し、荷役作業計画の立案や作業進捗の管理を行う作業者の判断を支援している⁶⁾。

2. CT作業計画の例

(1) 蔵置座標計画

CT内のコンテナ蔵置ヤードにおいて、何処にどのコンテナを蔵置するかはヤード蔵置計画システムで管理、計画されている。同システムは、コンテナ蔵置状況のリアルタイム表示、輸出入コンテナ/空コンテナのヤード割当、コンテナシフト計画の登録、蔵置コンテナ情報の管理といった作業を行う。

コンテナの蔵置座標を計画する場合、輸入コンテナでは、CT外の陸運事業者が手配するシャーシトラック（外来シャーシトラック）が引き取りに来る順番が早いものほど上に積む必要がある。また、輸出コンテナでは、コンテナ船への積み込み順と逆に積む必要がある。図1(a)に示すように、先に出すコンテナ（星印の付いているもの）が下に積まれている場合、その上のコンテナを一旦別の列に退避させた後で対象となるコンテナ荷役を行う必要がある。この作業を「荷繰り」と呼び、CTの運営上は無駄な作業である。

図1(b)に示すように、早く取り出すコンテナほど上に積まれるよう計画することが、CT運営において求められる項目のひとつである。ここで輸入コンテナの場合、外来シャーシトラックが引き取りに来る日時を事前に知ることが計画時の重要なファクターとなるため、予約システムを用いて到着日時を管理したり、AIにより到着予測日時を推定したりする必要がある。

(2) 荷役機器配置計画

荷役機器作業管理システムは、蔵置ヤードのスタッキングクレーンや構内専用のシャーシトラックといった荷役機器に対し、車載端末を通して次の荷役作業場所や荷役するコンテナの情報を指示

5) Wangら（2021）は港湾DTのシステム構成を提唱し、それに必要な技術を整理している。Klarら（2023）は、港湾DTの構成を説明したうえで港湾外のDTとの連携を検討している。Gaoら（2022,2023）はDT領域のCT上で蔵置ヤードクレーンのシミュレーションを行い、クレーンの荷役待ち時間を削減する手法について発表している。

6) 例えば、Inutsukaら（2024）の4章など。

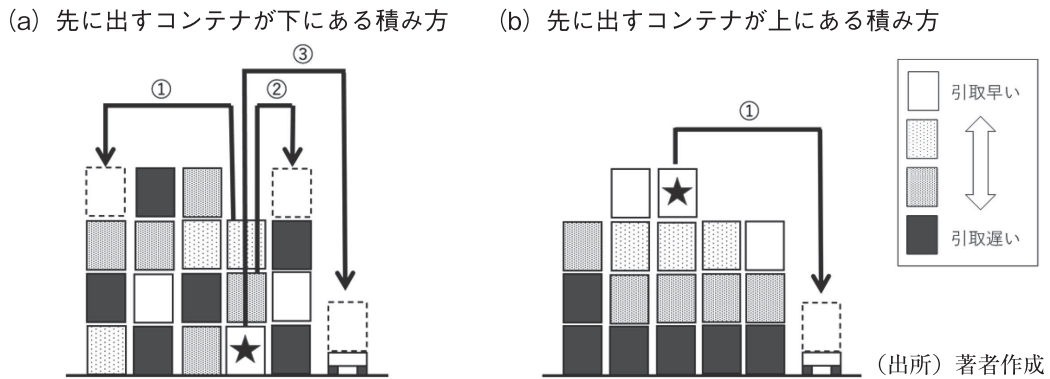


図1 コンテナ蔵置ヤードでの積み順

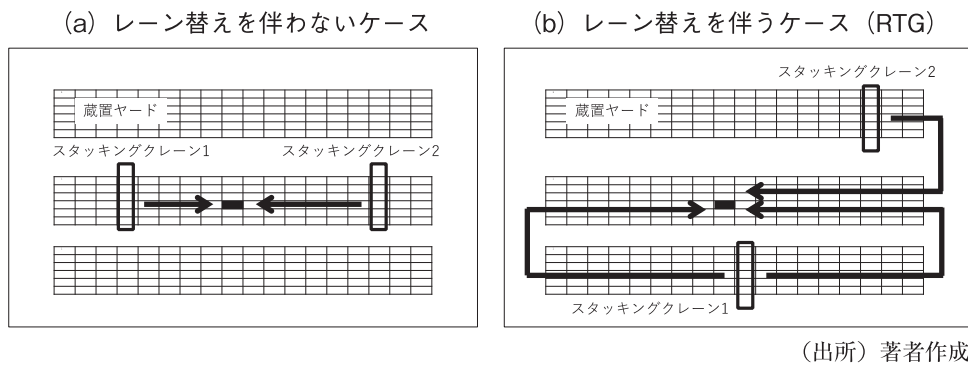


図2 スタッキングクレーンへの作業割付

する。同システムでは、CT内作業状況のグラフィカル表示、荷役機器への作業指示管理、荷役機器の配置管理、荷役機器車載端末の管理、無線ネットワークの監視といった作業を行う。

蔵置ヤードの特定座標に荷役作業指示が発生した場合、いずれのスタッキングクレーンで作業を行うか指示、管理する必要がある。作業座標に対し最も近いクレーンに作業を割り付けることが基本であるが、図2(a)に示すようにスタッキングクレーン1とスタッキングクレーン2の間に作業が発生した場合、いずれのクレーンに作業を割り付けるかは、作業座標までの距離のみならず、当該作業に続く作業を勘案したうえで総合的に判断する必要がある。

スタッキングクレーンとして世界中で広く使用されているタイヤ式門形クレーン(Rubber Tired Gantry Crane, RTG)はラバータイヤで走行する構造で、タイヤを90度回転させることにより蔵置ヤードのブロック間を移動できるという特徴から、フレキシブルな荷役機器配置を可能と

なり、少ない台数のクレーンで運用することができる。RTG方式のCTにおいて、図2(b)に示すようにスタッキングクレーンのいないブロックに作業が発生した場合、スタッキングクレーン1, 2いずれのクレーンに作業を割り付けるか、またスタッキングクレーン1に作業指示を出す場合でも、左右いずれの走行路を経てレーン替えするかも指示、管理しなければならない。レーン替えを行う場合、ラバータイヤの回転時間を含め、数分間にわたって走行路を閉鎖する必要があり、本船作業を行うシャーシトラックの走行にも影響がでる。

スタッキングクレーンの移動時間を短縮することは、CTの生産性を向上することに寄与する。しかし前述の通り、発生した作業に対してどのスタッキングクレーンを割り付けるかは、単純に作業座標までの距離のみならず、後続の作業や走行路の閉鎖等、CT内の運用状態を総合的に判断して決定しなければ生産性の向上を図ることは難しい。

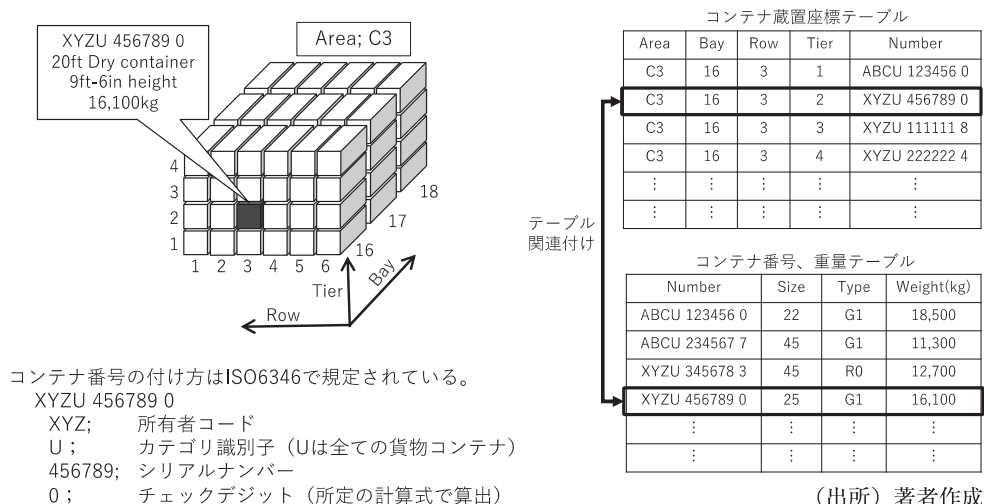


図3 TOSにおけるRDBの使用例

3. 作業計画へのAIの適用

これまで、CT独自の運用ルールをロジック化して取り込むことが可能なTOSが存在していたが、これらは限定的なルールの積み重ねであり、全体のバランスを見て最終的にヒトの判断による計画を優先することも多かった。これに対し、荷役計画にAIを適用する動きも出てきた。

2019年度より、国土交通省港湾局は「ヒトを支援するAIターミナル」の取組を開始、その一環としてコンテナ搬出入日時予測等の機能を有するAIを構築し、TOSと連携したうえで従来の運用とAIを活用した運用を比較する現場実証を実施した。その結果、最大約83%の荷繰り回数削減や実運用可能な速度での計画立案が可能であったとしている⁷⁾。国土交通省の実証では、II-2-(1)節で記載した蔵置座標計画へのAIの適用を中心に検証しており、RTGが荷役する順番の検証までは実施しているものの、複数のRTGのうち、いずれが作業する方が効率的かまでは言及していない。

Ⅲ. TOSにおけるデータ管理

1. TOSとリレーショナル型データベース 一部の小規模のものを除いて、TOSは共通の

データベースを介して互いに情報連携するサブシステム群（本船計画システム、ヤード蔵置計画システム、荷役機器管理システム等）で構成される。TOSのように、整合性や一貫性が重視される多種多様なデータをリアルタイムで取り扱うシステムでは、リレーショナル型データベース（Relational Database, RDB）を用いることが一般的である。RDBは表形式のデータテーブルにデータを格納し、複数のテーブルを組み合わせてデータを取得するもので、データの整合性や一貫性を保ちやすく高度な検索が可能であるというメリットがあるため、現在、様々な情報サービスの基幹システムとして広く活用されている。

TOSにおけるRDBの使用法の例として、コンテナ番号とサイズや重量を保管するテーブルと、蔵置場所とコンテナ番号の関係を保管するテーブルを連携させ、特定の場所にあるコンテナの情報を示すことが挙げられる（図3）。各テーブルの構成、テーブル間の関連付けやデータ内部処理方法といったRDBの構造は、データの整合性や一貫性を担保したり、処理速度を高めたりするためメーカー独自の工夫がなされている。通常TOSメーカーは、データベース構造を自社のノウハウとしてブラックボックス化している。

7) 国土交通省港湾局港湾経済課港湾物流戦略室「AI等を活用したターミナルオペレーション最適化の実証と効果検証を行いAIシステム導入の際のガイドラインをとりまとめました」2023.5.26 (https://www.mlit.go.jp/report/press/port02_hh_000181.html 2024.1.19 最終アクセス)

2. CT内で使用するデータの規格化

(1) CT内データ通信

CT内で扱う情報は、TOSが管理するコンテナ蔵置座標や作業の順番といったデータの他に、クレーンやシャーシトラック、自動搬送台車 (Automated Guided Vehicle, AGV) 等の荷役機器状態データがある。既に一部のクレーンにはモニタリングシステムが搭載されており、クレーンの状態情報やエラーメッセージを、メンテナンスショップや遠隔監視施設等に設置された端末との間でデータ通信しているが、これらはメーカーの独自通信フォーマットを採用している。Ⅲ-1節で述べた通り、TOSのデータベース構造がメーカー独自のものであるためデータフォーマットの統一化が進んでいないことに加え、クレーンモニタリングデータも各社独自のデータフォーマットなので、これまでTOSと荷役機器状態のデータは一元化して活用されてこなかった。

近年、デジタル技術の普及・発展に伴ってCTのDTが注目され始めており、CT内を行き来するあらゆるデータを一元的に扱うための規格化の動きが出てきた。これらのデータフォーマットは階層構造を持つものとなっている。これらのデータを保管するにはドキュメント指向型データベース (Document Database, DDB) との親和性が高く、TOSとAIが連携するシステムにおいては、コンテナの蔵置場所や次の荷役作業の種別といった整合性や一貫性を保つ必要のあるデータと、予測や最適化を行うための多種多様で多量のデータの双方を扱う必要があるためRDBとDDBが併用されるようになると思われる。

(2) PortML

PortMLは、シンガポール国立大学の次世代港湾モデリング・シミュレーション研究拠点 (The Centre of Excellence in Modelling and Simulation for Next Generation Ports, C4NGP) が、スマート港湾のDT構築のために開発を進めている構造化データフォーマットである⁸⁾。モデリング

およびシミュレーション用に記述するため、埠頭、荷捌き地、岸壁クレーン、AGV等のアセットをマークアップ言語で表記している。将来的には、アセットに加えて荷役作業指示といったイベントも記述できるようになる計画である。

PortMLを使用することで、海事・港湾産業のすべてのステークホルダーが港湾内のアセットの設計、構成、情報を互換性のある構造化データフォーマットで管理、開発できるようになることを目指している。現在、6ヶ国12の大学や研究機関、コンサルがアライアンスを組んで活動しており、PortMLを使用するためのアプリケーションとして、C4NGPはCTシミュレータおよびそのツール群であるSINGAPort Studioを発表している⁹⁾。

(3) Terminal Industry Committee 4.0

Terminal Industry Committee 4.0 (TIC4.0) は、2019年にベルギー・ブリュッセルで登録された非営利で活動する業界団体で、CTオペレータ、港湾コンサルタント、荷役機器メーカー、TOSメーカー、電機メーカー等52社が参画している。港湾ターミナルで使用されるあらゆる機器とプロセスを表現できる共通言語の定義を目的としており、その活動は欧州民間港湾会社およびターミナル連盟 (Federation of European Private Port Companies and Terminals, FEPORT)、ならびに港湾機材製造業者協会 (Port Equipment Manufacturers Association, PEMA) によって推奨されている¹⁰⁾。

TIC4.0では、独自に定めたセマンティックルールに基づいて、人間の言語に近い状態で理解できるようになっており、JSON (JavaScript Object Notation) やXML (Extensible Markup Language) 他いくつかの構造化データフォーマットでの記載が可能である。セマンティックとはコンピュータにデータの意味を理解させ処理する技術であり、TIC4.0のセマンティックルールでは機器やプロセスを6つの基本要素の組み合わせ

8) PortML "About PortML" (<https://portml.io/about-portml/> 2024.1.20 最終アクセス)

9) National University of Singapore "A Port Digital Twin Software: SINGAPort Studio v1.0 and Toolkit" (<https://cde.nus.edu.sg/c4ngp/wp-content/uploads/sites/17/2020/12/The-Port-Digital-Twin-Toolkit-SINGAPort-Studio.pdf> 2024.1.20 最終アクセス)

10) Terminal Industry Committee 4.0 "About" (<https://tic40.org/#/about> 2024.1.20 最終アクセス)

せにより表現する¹¹⁾。

IV. 大規模コンテナ物流時代の CT 作業計画

1. デジタルツイン (DT) の活用

大型コンテナ船により大量の貨物が輸送され、CTで大量のコンテナを短期間に荷役する大規模コンテナ物流時代は、多量のデータが時々刻々発生するため、生産性の高い荷役を実現するために検討しなければならない条件は莫大な組み合わせになる。また、急な条件変更や計画変更にも即座に対応しなければならず、従前の荷役業務とは質や量が大きく異なり、これまでのノウハウに基づく作業計画方法では生産性の高い運用ができなくなってきている。大規模コンテナ物流時代に適応した荷役計画を行うには、TOSとAIによる最適化をDT領域で連携させ、条件の異なる複数の計画を立て、AIで最適化された荷役計画に基づいてシミュレーションし、結果の比較をプランナーにフィードバックしたうえでヒトによる最終判断を行う必要があると考える。

初期のDTは、実際のCTの状態をリアルタイムにエミュレータで忠実に再現する機能のみであったが、大規模コンテナ物流時代のCTに適応したDTでは、AI最適化の結果に基づいたシミュレーションを行い未来の状態をエミュレータで表示することが求められる。すなわち、使用するヤードクレーンの台数を変えるなど、異なるパラメータでAIがそれぞれ最適化した荷役作業指示に基づくシミュレーションを行う。その結果を比較し、いずれの荷役作業指示がそのCTの目指す全体最適バランスに近いか見比べ、最良と判断したパラメータの作業指示のみを実際の荷役作業指示としてTOSに取り込むことにより作業計画を立てる。

CT内を行き来するあらゆるデータを一元的に扱い、DT領域に取り込むためにはデータの規格化が不可欠である。Ⅲ-2節で述べた通り、現在、

構造化データフォーマットに規格化の動きが出てきている。大規模コンテナ物流時代におけるCTのDT構築には規格化されたデータを活用する必要がある。DTの活用により、ますます複雑化するCT作業計画立案を効率的かつ多面的な検討に基づく判断を行うことが可能になる。

2. TOS・AI間でのデータ連携方法

Ⅱ-3節で述べた国交省の事例やGaoら(2022, 2023)の研究により、CTの荷役作業の生産性を向上するためのAIに関する研究は進みつつある。一方でⅢ-1節に述べたように、TOSメーカーはノウハウの流出を恐れデータベースの詳細、特にRDBの構造を公開しない。このため、TOSメーカー自身が自動計画や生産性向上のロジックを開発しTOS内に組み込む場合は、直接データベースからデータを読み込み、加工、処理することが可能になるが、別のメーカーが開発する場合は契約を結んでRDBの構造を開示してもらう必要がある。ただし、その場合でも開示される情報は部分的なものになることがほとんどである。様々なメーカーが提供する自動計画や生産性向上のロジックを様々なメーカーのTOSに組み合わせるようにするため、市村らは、[図4](#)に示すTOSデータベース内のデータをインターフェイス(Interface, I/F)経由でDT領域と共有するシステム構成を提案している¹²⁾。

CTにおいて、TOSデータベースに収納されている情報は本船計画システム、ヤード蔵置計画システム、荷役機器管理システム等のサブシステムを介してプランナーと呼ばれる作業員に伝えられる。プランナーはTOSサブシステムが表示する情報と経験に基づくノウハウにより、CT全体のバランスを考慮し、全体効率が最高になるようにコンテナ蔵置座標やスタッピングクレーンの配置等の作業計画を立て、TOSデータベースの情報をアップデートする。クレーン運転手他現場の

11) ① HEADER:メッセージの出所、宛先、基準時刻等を記載、② SUBJECT:CONCEPTを行う対象・主体、③ CONCEPT:SUBJECTの状態または行動、④ OBSERVED PROPERTY:CONCEPTの大きさや量、⑤ POINT OF MEASUREMENT:CONCEPTが実行される時間と場所、⑥ VALUE:単位の6つ (<https://tic40.atlassian.net/wiki/spaces/TIC40Definitions/pages/8618041/TIC4.0+Semantic> 2024.8.25 最終アクセス)

12) 市村欣也、多田淳一、「荷役作業指示支援システム」、特許第7309133号、2023.7.7

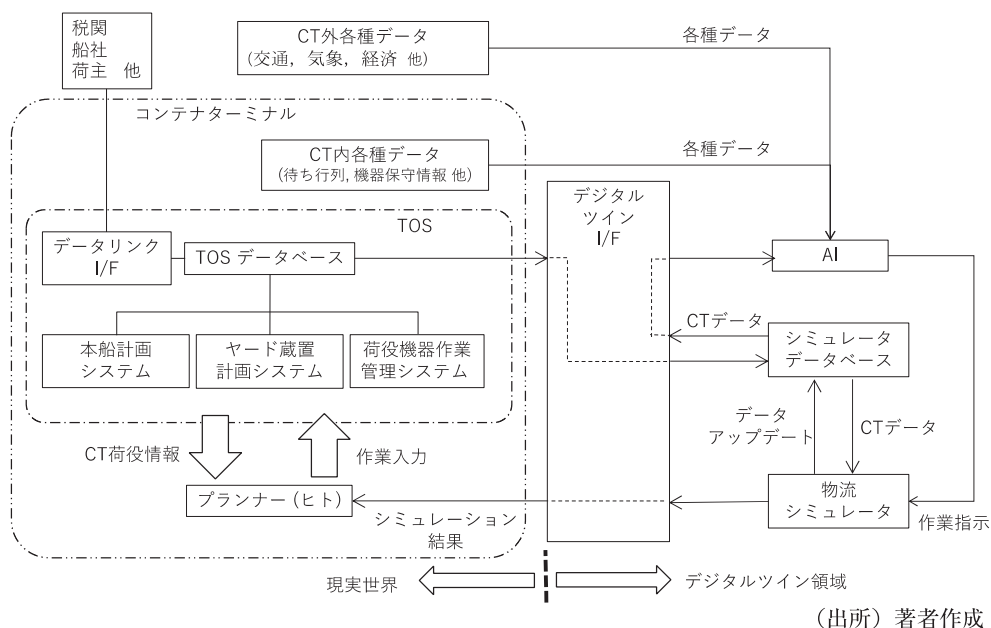


図4 AIと連携したTOSの構成

作業員は、プランナーが立てた計画を荷役機器管理システムの車載端末を介して入手し、それに沿って荷役作業を進めていく。

近年のTOSは外部システムと連携しており、税関が保有する通関情報や船社が保有するコンテナ船内の積付け情報等を取り込めるようになっている。さらに、荷主あるいはその代理人に対してCT内の貨物の状況に関する情報を提供している例もある。日本においては、2018年度より「官民が連携した港湾の電子化（サイバーポートの実現）」に向け、港湾における行政手続きや民間事業者間取引の電子化、ペーパーレス化と港湾インフラの管理、利用情報のビッグデータ化を通じた港湾ビジネスイノベーションを目標とする「Cyber Port（サイバーポート）」の構築を開始している¹³⁾。

図4に示す構成では、TOSのデータベースが保有するデータをDT領域に取り込み、物流シミュレータ上に仮想CTを再現し、再現されたCT上でAIによる最適化を適用するものである。この構成には以下の特徴がある。

- TOSデータベースからシミュレータデータベースへ方向でデータが受け渡され、AI自身がTOSデータベースを書き換えることがない。

- AIが最適化した計画に基づき物流シミュレータに荷役指示を出す。
- 物流シミュレータによりAIが最適化した計画に基づくCTの動き再現し、結果をプランナーが確認し、ヒトが了承したときのみTOSデータベースに反映する。

3. DT領域における物流シミュレータの適用

例えば、輸入コンテナの蔵置座標決定を最適化するAIを構築する場合、図5(a)に示すようなコンテナ船に対する岸壁クレーン荷役と蔵置ヤードでのスタッキングクレーン荷役を構内用シャーシトラックによる水平搬送で1対1に結んだモデルでは不十分である。すなわち、実際のCTでは図5(b)に示すように複数のコンテナ船、複数の岸壁クレーンが同時に作業をしており、さらにゲートから入ってくる外来シャーシトラックもあるので構内用シャーシトラックとの導線が交錯し、複数の作業が相互に影響を及ぼし合っている。このような複雑な作業の組み合わせを評価するには、物流シミュレータを用いて、実際の動きを再現することが有効であると考えられる。

13) 小野憲司「日本の港湾の情報化のこれまでの歴史とサイバーポート政策の今後の展望」、『港湾経済研究』, No.61, 2022, 3~18ページ

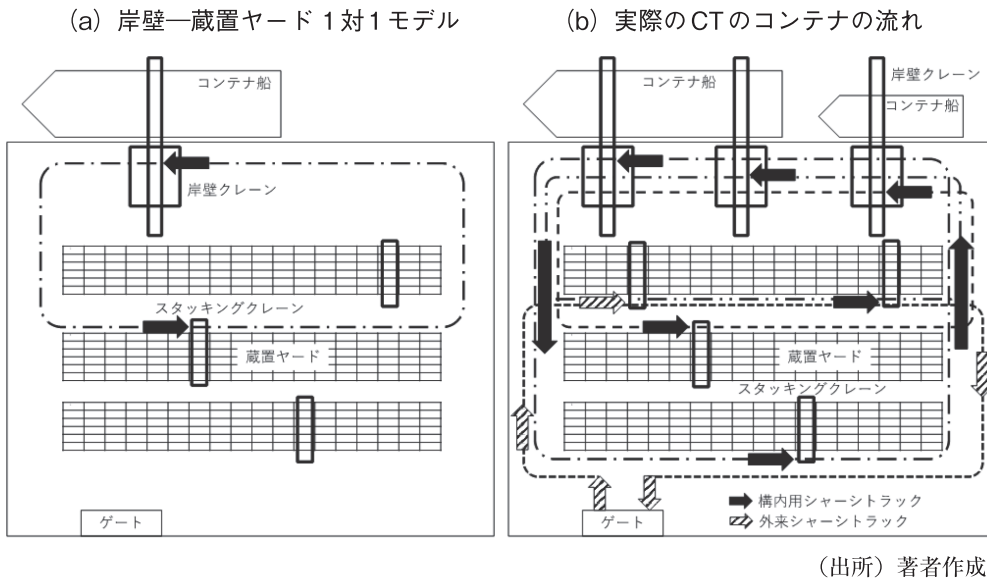


図 5 最適化ロジックを構築するための CT モデル

4. AI 解析結果のフィードバック

DT 領域において AI が最適化した作業計画を、実際の CT 作業計画にフィードバックする際、自動的に直接 TOS へ取り込み作業指示を生成すると CT 内の業務が全体最適になっているか評価できない。一般的な CT が重要視する指標として、本船着岸時間が短いこと、荷役作業が平準化していること、少ないエネルギー（電気、軽油）で作業できること等が挙げられるが、これらはトレードオフになっているものも多い。例えば、本船作業中は外来シャープトラックのスタッキングレーンへの進入を一切受け付けなければ本船荷役作業の最適化は図られるが、これに反して、外来シャープトラックの待ち時間が長くなり CT としてのサービスレベルは低下するといったように、個別の荷役作業を部分最適しても CT として全体最適になっているとは限らない。全体最適は互いにトレードオフとなっている事象のバランスを取ることであり、どの様なバランスを最良とするかは各 CT の方針により異なる。

AI の判断基準に、全体最適のためのバランスを数値設定して組み込むことは可能であるが、トレードオフとなっている作業は多種多様であり正解を一つに導き出すことは困難である。その対策として、AI が生成した作業指示に基づくシミュレーションの結果を表示し、ヒトが最終判断した

ものを実際の作業指示に取り込むことが有効であると考えられる。IV-2 節で AI による最適化と物流シミュレータの連携について述べたが、総荷役時間や平均荷役能率といった最終結果のみならず、荷役状況の過程をグラフィカルに示すことで CT 内作業の滞留や待ち状態を評価しやすくなると考える。この際、TOS の情報を含め、DT 領域に集約したデータを全て表示できるグラフィックエミュレータを使用することで効率的に判断できる。

V. おわりに

大型コンテナ船により大量の貨物が輸送され、CT で大量のコンテナを短期間に荷役する大規模コンテナ物流時代は、多量のデータが時々刻々発生するため、生産性の高い荷役を実現するために検討しなければならない条件は莫大な組み合わせになるうえ、急な条件変更や計画変更にも即座に対応しなければならない。本報では、大規模コンテナ物流時代に適応した CT の荷役作業計画方法の概念設計について以下を論じた。

- DT の活用；複雑化する CT 作業計画立案を効率的かつ多面的な検討に基づく判断を行うためには、DT 領域において TOS と AI を連携させる必要があると考える。条件の異なる複数の計画を立て、シミュレーション結果を比

較したうえで作業計画を確定する。CT内を行き来するあらゆるデータを一元的に扱い、DT領域に取り込むためにはデータの規格化が不可欠である。現在、構造化データフォーマットに規格化の動きが出てきている。大規模コンテナ物流時代におけるCTのDT構築には規格化されたデータを活用する必要がある。

- 独立したTOSとAIの高度な連携；TOSのデータベースにはRDBが使用されているため、メーカ独自ノウハウであるデータベース構造は外部に開示されない。より多くのベンダーがTOSとは独立してAIによる最適化ロジックを開発するため、TOSとAIをI/Fを介して連携させる必要があると考える。TOSはCyber Port等を通じて、税関が保有する通関情報や船社が保有するコンテナ船内の積付け情報等を取り込み、AIに引き渡すことで最適化の精度が向上する。TOSとAIが連携するシステムにおいては、コンテナの蔵置場所や次の荷役作業の種別といった整合性や一貫性を保つ必要のあるデータと、予測や最適化を行うための多種多様で多量のデータの双方を扱う必要があるためRDBとDDBが併用されると考える。
- 物流シミュレータを利用したAIによる最適化；実際のCTでは複数のコンテナ船、複数の岸壁クレーンが同時に作業をしており、さらにゲートから入ってくる外来シャーシトラックもあるので構内用シャーシトラックとの導線が交錯している。このような、複数の作業が相互に影響を及ぼし合う複雑な作業の組み合わせを評価するには、物流シミュレータを用いて実際の動きを再現することが有効であると考え。
- エミュレータによるヒトへの結果フィードバック；AIが最適化した作業計画を自動的に直接TOSへ取り込むのではなく、AIが生成した作業指示に基づくシミュレーションの結果を表示し、ヒトが判断したうえで実際の作業指示に取り込むことが効果的と考える。そのため、シミュレーション結果をエミュレータで表示し、最終結果のみならず荷役状況の過程をグラフィカルに示すことでCT内作業の滞留や待ち状態

を容易に評価することができるようになる。多様な評価基準が混在するCTにおいて、個別の荷役作業を部分最適してもCTとして全体最適になっているとは限らない。全体最適は互いにトレードオフとなっている事象のバランスを取ることであり、どの様なバランスを最良とするかは各CTの方針により異なる。

大規模コンテナ物流時代におけるCT作業計画法として、AIによる単なる部分最適を達成するのではなく、AIが提供する結果をヒトが比較、最終判断を行うことで、そのCTが重要視するバランスの全体最適を達成できるプランを選択する手法を提唱した。今回提案した手法の有効性を、実際のCTにおける荷役データを用いて今後検証していく。

謝 辞

本研究の一部は、令和5年度より国土交通省の港湾技術開発制度の支援を受け実施した。ここに謝意を示す。

参考文献

- 赤倉康寛「東西基幹コンテナ航路の定時制の把握と遅延要因の分析」、『土木学会論文集D3(土木計画学)』, Vol76-1, 2020.
- Wang, K., Hu, Q., Zhou M., Zun, Z. and Qian, X., "Multi-aspect applications and development challenges of digital twin-driven management in global smart ports" Case Studies on Transport Policy, 9, 1298-1312, 2021.
- Klar, R., Fredriksson, A. and Angelakis, V., "Digital Twins for Ports: Derived from Smart City and Supply Chain Twinning Experience", IEEE Access, Volume 11, 71777-71799, 2023.
- Gao, Y., Chang, D., Chen, C.-H. and Xu, Z., "Design of digital twin applications in automated storage yard scheduling", Advanced Engineering Informatics, 51, 2022.
- Gao, Y., Chang, D., Chen, C.-H., "A digital twin-based approach for optimizing operation energy consumption at automated container terminals", Journal of Cleaner Production, 385, 2023.
- Inutsuka, H., Ichimura, K., Sugimura, Y., Yoshie, M. and Shinoda, T., "Study on the Relationship between Port Governance and Terminal Operation System for Smart Port: Japan Case", Logistics, 8, 59, 2024.

著者紹介



市村 欣也
・株式会社三井 E&S 成長事業推進
事業部 マーケティング部

画像認識による大型クレーンインフラ設備の錆検知とその腐食度評価方法の検討

○Zixin Li¹, 滝澤 一樹¹

¹株式会社三井 E&S (〒706-8651 岡山県玉野市玉 3 丁目 1 番 1 号)

概要：港湾クレーンの腐食点検では錆の状態を熟練技師が目視で判断している。この点検作業をドローンで撮影された画像から画像認識により自動的に判断する方法について検討した。最近の深層学習を用いた手法である Mask2Former によるセマンティック・セグメンテーションで、錆とクレーンの溶接部、一般構造物の検出を行うことで、腐食面積に基づく腐食の重篤度のスコアリングに部位の重要度を加味した評価方法の提案を行い、熟練技師の判断との比較を行った。本手法の開発により、従来技師が行っていた危険を伴う高所作業の一部をドローン点検に置き換えることが期待できる。

キーワード ドローン点検, セマンティック・セグメンテーション, 腐食度のスコアリング

1. はじめに

大型クレーンは、製鉄所や組立工場、港湾ターミナルにおいて、鋼材などの大型重量物や海上コンテナの荷役のために用いられるインフラ設備であるが、法令で義務付けられている定期点検では、点検員が危険を伴う高所作業により構造物の健全さを目視にて確認している。近年、少子高齢化による労働力や熟練技師の不足のため、ドローンの自動飛行により撮影した点検個所を画像認識により自動で判別する手法に期待が高まっている。

厳しい腐食環境下での長時間の供用が求められるクレーン構造物における錆の判定は重要な点検項目である。錆による腐食の評価は、浮桟橋などでは錆汁の有無をコンクリート劣化の判定基準としているが [1]、クレーン構造物では明確な指針はなく、錆の色合いや面積等に基づいて重篤度の判定がなされていた。しかしながら、従来の画像認識手法により得られた腐食の重篤度が熟練技師の判断と異なることがあり、自動化した場合には重篤な損傷部分を見逃すリスクが問題視されている。

本報告では、大型クレーンの錆等の腐食評価を

深層学習を用いた画像認識手法であるセマンティック・セグメンテーション法を用いて行った。錆、構造物の領域をピクセル単位で検出することで、構造物における錆領域の割合を算出し、評価基準との比較を行った。また、大型クレーン点検では溶接部等における錆の発現を特に重要視するため、クレーン点検に特化した評価手法についても独自に検討を行った。

2. データセットと検知モデルの作成

錆の検出、及びクレーンの各部位の判定精度も腐食度の診断精度に大きく関わってくるため、高精度にピクセル単位で検出が可能な画像認識モデルが必要である。

近年、画像のセグメンテーションタスクにおいて、Vision Transformer を用いた手法に注目が集まっており、高い認識精度が得られることが報告されている。本研究では代表的な手法である Mask2Former [2]、KNet [3]、SegFormer [4]、DeepLab v3+ [5] を用いて検出対象である錆とクレーンの溶接部、一般構造物のそれぞれのマスクを推論する検出モデルを学習し、認識率の比較を行った。学習に用いたデータセットは、ドローンを用いて異なるクレーンの様々な部位を撮影した約 680 枚の画像に対して、社内の熟練技師がアノテーションして独自に作成したものをを用い

表1 検証セットとテストセットで評価した各モデルの平均IoU (%)と推論速度.

Method	Backbone	mIoU-test	mIoU-val	fps (img/s)
Mask2Former	Swin-L	71.29	70.49	2.23
KNet	Swin-L	70.07	70.86	1.92
SegFormer	MIT-B5	66.59	67.25	3.18
DeeplabV3+	R-101-D8	55.01	59.55	2.96

た。作成したデータセットは学習用に477枚、検証用に136枚、テスト用に68枚をランダムに分割してモデルの学習と評価を行った。検出モデルはImageNetデータセット [6] で事前学習された重みパラメータに対してファインチューニングすることで構築した。デコードヘッドに位置するクラス分類の損失関数における重みパラメータは、錆、溶接部という重要なクラスに対しては高くなるように設定することで認識率改善の工夫を行った。

また、データセット規模が大きいことを考慮して、学習では2万回のイテレーションをオプティマイザにAdamWを用いて行い、学習プロセスにおいて検証用データでの平均IoUが最も高い重みを採用した。

同じデータセットを用いて作成した画像認識モデルの精度評価を行った結果を表1に示す。テスト用データの結果を比較するとMask2Formerの平均IoU値は71.29%となり最も高くなる結果となった。この時の学習におけるステップ数と各指標値との関係を図1に示す。図から学習ステップが進むにつれて認識精度がほぼ右肩上がりの傾向を示すことがわかる。また、学習用データ数をそれぞれ2割と4割減らしてMask2Former

を学習して同じテスト用データで推論したところ、平均IoU値は68.78、68.26となり顕著な低下は見られなかった。これらの結果から作成したモデルは比較的少ないデータ数であっても過学習していないと考えられる。

本報告では、テスト用データにおいて最も平均IoU値が高かったMask2Formerを検出モデルとして採用した結果を用いた。

3. 実験結果

3.1. 推論マスクの出力

前記で作成した画像認識モデルを大型船舶用品の組立工場のクレーン等に適用した結果を図2に示す。推論対象クラスとしては、「錆」「クレーンの溶接部」「一般構造部」である。ドローン撮影画像中に判定対象であるクレーン構造物が写っている範囲は一部であるため、錆の割合を評価するためには構造物部分と錆の領域を精度良く判定する必要がある。Mask2Formerではインスタンスレベルの分類情報を十分に有しており、各Queryベクトルが元画像の各位置とのクロスアテンション機構によりターゲットに関連する情報を画像全体の特徴から捉えることができる。形状が複雑な物体や重なり合う領域に対しても精密なセグメンテーションが実現可能であるため、本件のような錆の小さく細かいパターンを捉えるには有利に働いていると考えられる。

図中の錆領域周辺には錆と同じ色合いである錆汁や防錆塗料が存在するが、社内の熟練技師の判断基準では文献 [1] の港湾施設の点検の場合とは異なり、屋外で使用するクレーンに対しては錆汁は錆の判定対象とはせずにクレーンの構造物強度に直接影響するとみられる錆領域のみをカウントするようにしている。このように似通った色合いをもつ対象に対しても本モデルを適用することで

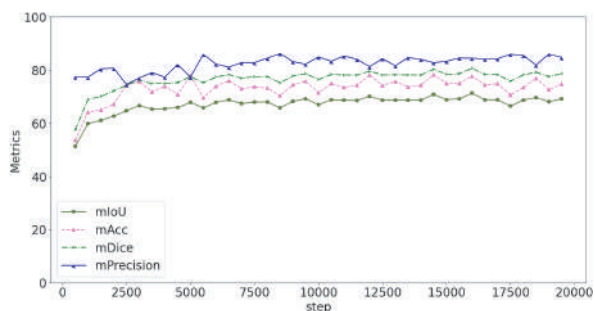


図1 Mask2Formerにおいて検証用データでのパフォーマンス指標。各種指標はほぼ右肩上がりに向上しており、顕著な低下がない。

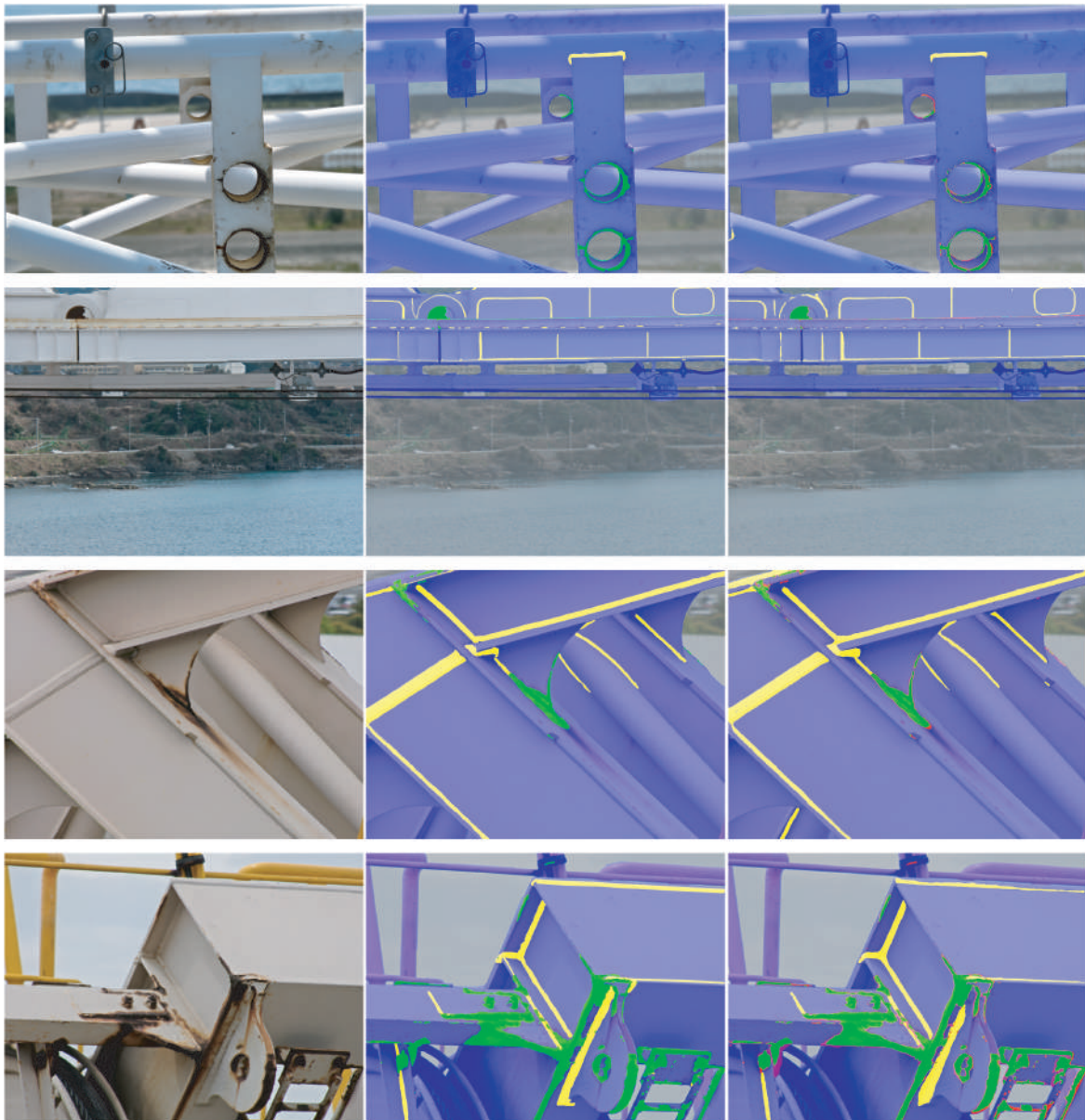


図2 工場クレーンの各点検個所の画像の比較。元画像（左）、Ground Truth（中）、推論マスク（右）を示す。Ground Truthと推論マスクの各クラスについて、緑色は錆、黄色はクレーンの溶接部、青色は一般構造部、を示す。推論マスク中に示した赤色は検知できなかった錆であり、紫色は錆として誤認知された箇所を示す。

錆領域のみが忠実に検出されていることがわかる。

3.2. 錆面積計算

JIS K 5600-8-3「塗膜劣化の評価 第3節：さびの等級」では錆面積の割合により錆の等級付けの基準（表2）が示されている。本手法を用いれば、錆領域のピクセル数とクレーン各部位のピクセル総数の比率から、錆面積の割合を容易に算出することができる。図2の画像に対して本評価指

表2 さびの等級及び面積

等級	錆の面積 A (%)
Ri 0	$0 \leq A < 0.05$
Ri 1	$0.05 \leq A < 0.5$
Ri 2	$0.5 \leq A < 1$
Ri 3	$1 \leq A < 8$
Ri 4	$8 \leq A < 40$
Ri 5	$40 \leq A \leq 100$

表3 当社の判断基準

ランク	判定結果
0	異常なし
1	経過観察
2-1	直接目視で詳細点検必要
2-2	非破壊検査で詳細点検必要
3	直ちに補修

標に基づいて判定を行った錆の等級はそれぞれ Ri 3, Ri 3, Ri 3, Ri 4 であった。

3.3. 腐食の重篤度のスコアリング

一般的な塗膜環境における腐食の評価には JIS で規格化された表2の指標が用いられる。しかしながら、クレーンの構造物強度の劣化で重要視されるのは単純に錆領域の面積ではなく腐食している部位である。同じ錆面積であっても腐食している場所が異なれば重篤度のスコアも異なるべきである。例えば、図2の1枚目の画像の腐食は重要度の低い箇所が存在しており、同じく Ri 3 にランク付けされた3枚目の画像の腐食箇所とは補修の要否等の判断が異なってくるため、クレーンの構造物の点検では錆面積以外の要素も取り入れた新たな評価システムを構築する必要がある。屋外的大型クレーンの点検における当社熟練技師の基準では、錆だけでなく溶接部の位置も重要な情報として判断の際には考慮される。溶接部は形状に不連続性があるため応力が集中しやすく、その領域が腐食により欠損すると、構造物の強度を著しく低下させること、溶接部は鋼材が3次元的に重なり合い、面に囲まれた領域は雨水や塩化物などの滞留により腐食しやすい状態になっていること、がその理由である。つまり、大型クレーン構造物においては、部材同士が溶接された部位に錆が発現する可能性が高く、発現した場合の危険性も高い。また、溶接部を跨ぐ広範囲の錆が存在する場合には、溶接部が検出されない可能性がある。その場合においても過小評価とならないように、溶接部に隣接する一定範囲内の部材については、溶接部に次ぎ重要度が高いと考えて一般構造部と区別する。そこでクレーンの各部位について、構造部、溶接部、および溶接部に隣接する一

定範囲内の部材という三つの領域に分け、これらに異なる重みを付与する手法を検討した。

具体的な重篤度のスコアリングに関する計算方法はいくつか考えられるが、ここでは一例を示す。最も重要な溶接部には最大の重み $w_{welding}$ を付与し、溶接部に隣接するピクセル範囲内の領域には $w_{adjacent}$ 、一般構造部の重みは $w_{structure}$ とする。この重み付けに基づいて、標準化されたスコアとして式(1)が得られる。

$$Scaled\ Score = \sum_i \frac{R_i}{P_i} w_i \tag{1}$$

式(1)において、 R_i は部位 i に錆が存在するピクセル数、 P_i は部位 i のピクセル数、 w_i はそれぞれの重みであり、部位 i の腐食が構造物全体に与える影響を意味する。

評価の結果を表4と図3に示す。表3には社内の熟練技師の評価基準が示されている。安全側の評価とするため、各ランクにおける最小のスコアをランク付けの基準の下限として設定する。この基準に基づいて判定すると、ほとんどの点が技師による評価と同等となる範囲に収まっていることがわかる。一方、3.2節のJISで規格化された判定基準では同じ評価ランクであっても技師は異なるランクと判断している場合が多く、本研究で開発したスコアリング手法の方が妥当であると考えられる。これらの結果から、本手法を熟練技師の判断・評価をある程度自動化することが期待できる。

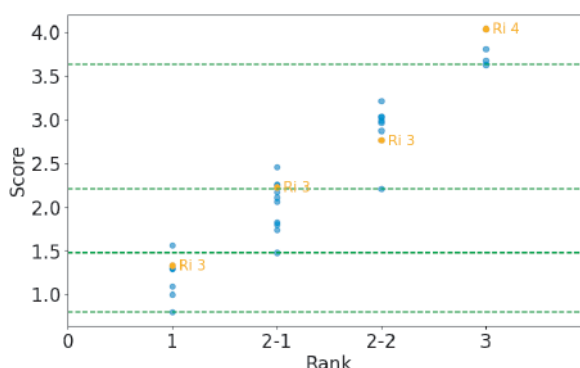


図3 重篤度スコア(式1の計算結果)と技師の当社基準(表3)によるランク付け。緑の点線は各ランクにおける最小のスコア。オレンジ点は図2の画像の判定結果。(スコア, ランク)はそれぞれ(1.335, 1), (2.227, 2-2), (2.764, 2-2), (4.042, 3)である。

表4 ドローンで撮影された各画像に対して3.2節と3.3節の方法を用いた結果の比較

錆割合	錆の等級	重篤度スコア	技師の判定	錆割合	錆の等級	重篤度スコア	技師の判定
0.38%	Ri 1	0.802983	1	1.06%	Ri 3	2.22718	2-2
1.99%	Ri 3	1.000738	1	1.75%	Ri 3	2.252042	2-1
0.82%	Ri 2	1.091922	1	1.53%	Ri 3	2.260053	2-1
0.32%	Ri 1	1.296537	1	1.81%	Ri 3	2.461926	2-1
0.54%	Ri 2	1.305491	1	1.30%	Ri 3	2.764232	2-2
0.67%	Ri 2	1.306935	1	1.94%	Ri 3	2.873994	2-2
1.23%	Ri 3	1.33531	1	0.94%	Ri 2	2.969192	2-2
0.34%	Ri 1	1.480685	2-1	1.25%	Ri 3	2.991886	2-2
0.83%	Ri 2	1.561507	1	1.51%	Ri 3	3.029192	2-2
1.51%	Ri 3	1.738203	2-1	6.33%	Ri 3	3.033548	2-2
1.11%	Ri 3	1.800447	2-1	2.11%	Ri 3	3.211675	2-2
4.09%	Ri 3	1.823315	2-1	4.15%	Ri 3	3.628622	3
0.65%	Ri 2	2.068004	2-1	3.72%	Ri 3	3.676298	3
2.49%	Ri 3	2.109426	2-1	3.43%	Ri 3	3.809193	3
1.22%	Ri 3	2.174273	2-1	10.87%	Ri 4	4.041985	3
1.46%	Ri 3	2.214142	2-2				

しかしながら、まだ一部技師の判断と異なる結果も存在しているため、スコアリング方式のさらなる改善と、溶接線以外で技師が重要と判断していることを取り入れていくことが今後の課題となる。

4. ま と め

ドローンを用いて大型クレーンの点検の自動化を行うために、撮影画像から発現する錆、クレーンの溶接部、一般構造部を認識し、クレーンの腐食度合いを定量評価する手法を検討した。また、実際にドローンで撮影した点検画像に対して本評価手法を適用して腐食度のスコアリングを行い、熟練技師の判断基準との比較を行った。提案手法を用いた場合の評価結果は従来の評価手法と比較して、より技師の判断に近い腐食度の評価結果が得られるようになった。

参考文献

[1] 里村大樹：AIによる海面等の推定と錆汁・鉄筋露出の検出—港湾の施設の点検診断効率化を目指して—、AI・データサイエンス論文集, Vol. 3, No. J2, p. 360-371, 2022.

[2] Bowen Cheng, Ishan Misra, Alexander G. Schwing, Alexander Kirillov, and Rohit Girdhar: Masked-attention Mask Transformer for Universal Image Segmentation, CoRR, Vol. abs/2112.01527, 2021.

[3] Wenwei Zhang, Jiangmiao Pang, Kai Chen and Chen

Change Loy: K-Net: Towards Unified Image Segmentation, CoRR, Vol. abs/2106.14855, 2021.

[4] Enze Xie, Wenhai Wang, Zhiding Yu, Anima Anandkumar, José M. Álvarez and Ping Luo: SegFormer: Simple and Efficient Design for Semantic Segmentation with Transformers, CoRR, Vol. abs/2105.15203, 2021.

[5] Liang-Chieh Chen, Yukun Zhu, George Papandreou, Florian Schroff and Hartwig Adam: Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation, CoRR, Vol. abs/1802.02611, 2018.

[6] Olga Russakovsky, Jia Deng, Hao Su, Jonathan Krause, Sanjeev Satheesh, Sean Ma, Zhiheng Huang, Andrej Karpathy, Aditya Khosla, Michael Bernstein, Alexander C. Berg, and Li Fei-Fei: ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge. IJCV, 2015.

著者紹介



Zixin Li
株式会社三井E&S 成長事業推進事業部 デジタル・ソリューション部

滝澤一樹

株式会社三井E&S 成長事業推進事業部 デジタル・ソリューション部