

三井 造船 技報

平成 22 年 10 月 第 201 号

MITSUI ZOSEN TECHNICAL REVIEW No. 201 2010



新技術・新製品小特集号



表紙説明

新技術・新製品小特集

本号は、200号に引き続き新技術・新製品小特集として発行する。本号では、6編の小特集記事を掲載しており、表紙にはそれぞれを象徴する図・写真を示した。

：“水槽試験模型と船首部曲率分布”

近年の船型開発における最新省エネ技術 - CO₂ 排出量30%削減を目指して - ... (p.1)

：“デジタルガバナ運転監視画面”

蒸気タービン・炉頂圧回収タービン用デジタルガバナ (p.6)

：“e-GICS, MES-EPOCH, Fleet Monitor とのデータ連携”

グローバルインターネット利用によるリモート船用主機関保守・診断関連システム (p.12)

：“就航船解析サービスのイメージ”

就航船解析サービス (p.19)

：“バイオエタノール製造パイロットプラントの主要機器”

木質系原料からのバイオエタノール製造プロセス (p.24)

：“鉄系リチウムイオン二次電池用正極材料、電池セル、電池モジュール及びこれらを搭載した電気自動車”

鉄系リチウムイオン二次電池用正極材料の電気自動車への適用 (p.30)

Cover

Special Issue on New Technologies and New Products

This special issue, following No. 200, introduces six reports. The cover shows peculiar figures and photographs to these reports.

：“ Model Ship Hull Form and its Curvature Distribution ”
Newest Energy Saving Technologies on Recent Ship Model Development Toward 30% Reduction of CO₂ Emission- (p.1)

：“ Graphic Screen for Operation and Monitoring of Digital Governor ”
Digital Governor of Steam Turbine and Top Pressure Recovery Turbine (p.6)

：“ Combination with e-GICS, MES-EPOCH and Fleet Monitor Data ”
Remote Performance and Maintenance Diagnosis for Marine Engine using Global Internet (p.12)

：“ Schematic Image of Navigation Analysis Service ”
Navigation Analysis Service (p.19)

：“ Main Process Equipment of Bio-Ethanol Production Plant ”
Development of Bio-Ethanol Production Process from Wood Chips (p.24)

：“ Lithium Iron Phosphate as Cathode Material of Lithium-Ion Battery, Battery Cell, Battery Module and Electric Vehicle mounting these Components ”
Application of Lithium Iron Phosphate as Cathode Material of Lithium-Ion Battery to Electric Vehicle (p.30)

三井造船技報

2010年(平成22年)10月・第201号

目次

新技術・新製品小特集/技術解説

近年の船型開発における最新省エネ技術 - CO ₂ 排出量 30% 削減を目指して - ...	1
船舶・艦艇事業本部 松村 竹実	
蒸気タービン・炉頂圧回収タービン用デジタルガバナ	6
機械・システム事業本部 梶川 誠	
グローバルインターネット利用による リモート船用主機関保守・診断関連システム	12
機械・システム事業本部 笠原 公一	
就航船解析サービス	19
事業開発本部 山本 敏明	
木質系原料からのバイオエタノール製造プロセス	24
環境・プラント事業本部 木本 浩介	
鉄系リチウムイオン二次電池用正極材料の電気自動車への適用	30
事業開発本部 橋本 聡司	

技術論文・報告

炭素繊維プレート緊張材を用いた構造物の補強工法(アウトプレート工法)	35
立神 久雄 長谷川 剛 栗田 幸治 井上 浩男	
コンクリート構造物における 高チクソトロピー性無収縮断面修復材“なおしタル”の開発	41
青木 正行 仲光 友浩 立神 久雄 井上 浩男	
高圧ガス保安法の適用を受ける超高压設備の強度評価について	47
児玉 嘉弘 木村 陵介	

製品・技術ニュース

衣浦港 3号地廃棄物最終処分場整備事業浮棧橋建設工事 - 処分場用浮棧橋の照査設計・製作・据付 -	55
拾六町高架橋上部工(5P308 ~ P7)工事 - 大ブロック相吊架設工法による鋼箱桁橋 3連の施工 -	56
大分県 貝殻岳橋(仮称:野津原4号橋) - 平面曲線 180R, 6% 下り勾配での送り出し架設 -	57

トピックス

EGS が国際燃焼機関会議で最優秀論文賞を受賞	58
-------------------------	----

MITSUI ZOSEN TECHNICAL REVIEW

No. 201 OCTOBER 2010

CONTENTS

Special Issue on New Technologies and New Products	1 ~ 34
Technical Paper and Report	
Strengthening and Application of Prestressing CFRP Plate for Concrete Structure	35
<i>Hisao TATEGAMI, Tsuyoshi HASEGAWA, Kouji KURITA, Hiroo INOUE</i>	
Development of Cross Section Repairing Material with High Thixotropy in the Concrete Structure	41
<i>Masayuki AOKI, Tomohiro NAKAMITU, Hisao TATEGAMI, Hiroo INOUE</i>	
Strength Evaluation for Ultra High Pressure Facility subjected to HPGSL	47
<i>Yoshihiro KODAMA, Ryosuke KIMURA</i>	
Products and Technology News	55, 56, 57
Topics	58

近年の船型開発における最新省エネ技術 - CO₂ 排出量 30% 削減を目指して -

船舶・艦艇事業本部 松村 竹実

1. はじめに

1.1 CO₂ 排出量の規制化

船舶における省エネ技術に関しては、その性能向上が燃費に直結するため現在に至るまで様々な努力がなされてきている。化石燃料の消費には温室効果ガス(Greenhouse Gas: GHG)である二酸化炭素(CO₂)の排出が伴うため¹⁾、省エネ技術は地球温暖化防止の観点からも近年重要視されている。

このため、国際海事機関(International Maritime Organization: IMO)を始めとする海運造船業界でも二酸化炭素排出削減の機運が高まり、規制化を始めとする枠組みが検討され始めてきた²⁾。

具体的には、輸送量トン・マイル当たりの排出CO₂グラム数として、新造船エネルギー効率設計指標(Energy Efficiency Design Index: EEDI)³⁾及び既存船エネルギー効率運行指標(Energy Efficiency Operation Indicator: EEOI)⁴⁾がIMOの場において制定された。前者は新造船の船舶性能を差別化するカタログ燃費に相当し、後者は既存船の実燃費に相当する。今後の船舶の設計や運航は、何らかの意味でこれらの指標に基づいた影響を受けることになる可能性が高い。以下に両者の概念化した算出式を掲げておく。ここでCFは燃料消費量とCO₂排出量の換算係数を表し、 \sum_i は航海*i*の総和を表す。原則として、EEDIは個船毎に付与される一定不変の数値となる一方、EEOIは年間実績等の平均値として算出され、運航の仕方次第では毎年変化することになる。

$$EEDI = \frac{\text{単位時間当たりの燃料消費量} \times CF}{\text{積載貨物量} \times \text{平水中速力}}$$

$$EEOI = \frac{\sum_i \text{燃料消費量}_i \times CF}{(\sum_i \text{輸送貨物量}_i \times \text{輸送距離}_i)}$$

船舶の省エネ性能というのは、これまで運航者と造船所との間の経済観点からの契約協議事項であったが、今後は公的機関が介入する規制制約事項へとシフトする可能性が高い。その場合には、設計、建造、試運転の段階を経てEEDIが個船ごとに確定し、各船舶はEEDIで評価されるようになる。さらに実運航の段階でEEOIを自己モニタリングしながら、CO₂排出削減のために最も効率的な運航管理がなされるようになり、減速航行、最適航路選定、最適メンテナンスサイクル等の適否を通じて、運航も評価されるようになる。

1.2 省エネ技術の開発戦略

このような規制環境変化に伴い、当社でもCO₂ 30%削減

船プロジェクト⁵⁾が発足し、タンカーやバルクキャリアを中心とした省エネ技術開発が本格的に開始された。

通常、省エネ技術開発という要素技術的な開発が連想されることが多く、基本的には抵抗低減やエネルギーロスの回収をテーマにしたものが多い。しかし、画期的な改善を望む場合にはコンセプトの段階から省エネを意識する必要がある。

船舶の基本は、図1に示すように抵抗推進力系とエネルギー供給系に分かれ、それぞれ船型と推進、及び機関と発電からなるコンセプトにより構成される。これらは主船体、推進器、主機関、発電機などの基本ハードウェアに対応し、船舶の基本仕様性能を決定する一方、省エネ余地となる材料を提供する。各種材料は要素技術開発の対象として低減、回収、若しくは利用が図られることになるが、抵抗推進力系の効率改善のためにエネルギー供給系に過度な負担を強いるコンセプトや、省エネ材料の低減と回収が干渉して全体効果が低くなる要素技術の組合せは避ける必要がある。

このためCO₂ 30%削減船プロジェクトでは、コンセプト開発と要素技術開発の多段階方式が考慮された。具体的にはコンセプトモデルを構築した時点で商品化設計を行い、その後要素技術開発に重点を移した開発をステップアップ方式で実施する。商品化設計の段階で成立可否を確認するほかに、経済性、安全性、環境性の評価を実施しておき、コンセプトや要素技術同士の相互干渉を防ぐ目的がある。本報では、まずコンセプト開発事例として、省エネ・バルクキャリアの開

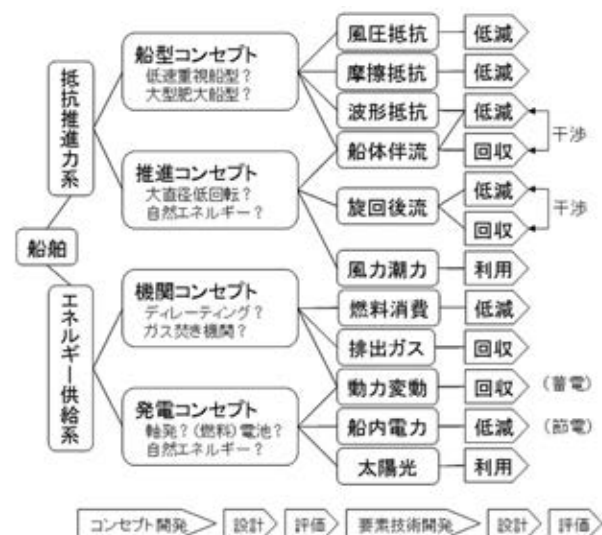


図1 省エネに向けたコンセプト開発と要素技術開発

発事例を紹介する。

次に、要素技術の開発事例として、低速ガス焼きディーゼル機関を搭載した液化天然ガス(Liquid Natural Gas : LNG)輸送船の2軸推進船型、大型油槽船(Very Large Crude oil Carrier : VLCC)及びばら積み貨物運搬船(Bulk Carrier : BC)における低風圧抵抗上部構造物並びに代表的な省エネ機器として排ガスエネルギー回収装置と新形式省エネ舵を簡単に紹介する。

2. コンセプト開発事例

2.1 次世代スープラマックスバルカー

ここでは汎用船型のコンセプト開発事例として、当社が最近開発した載荷重量 66 000 t 型バルクキャリア(通称 66BC)を取り上げる。

一般に、船舶は試作が不可能な商品であるため、ソフトウェア業界で採用される版や大量生産製品における試供品に相当する評価版が存在しない。すなわち、顧客などに性能や機能、使い勝手などを事前に評価してもらう仕組みが存在せず、新造船コンセプトのテストマーケティングをする機会がない。

しかし、類似実績のフィードバック情報が豊富にあれば、このような不利を補うことが可能になる。幸い、当社には 56BC の名で親しまれた載荷重量 56 000 t 型ハンディマックスバルカーの 150 隻を超える受注⁶⁾があり、これらの顧客からのフィードバック情報やモニタリング情報は実に多種多様にわたる。写真 1 に当社建造の 56BC を掲げる。

このような情報は、実質的に次期開発船のテストマーケティングの役割を担うことが可能であり、市場における汎用性のポイントを浮き彫りにすることができる。同一種の製品に対する多様な船主アンケートや運航モニタリングを通じて、最大公約数的な仕様や運航のパターンを把握することができるからである。

66BC の開発に際しては、この点に着目し、当社 56BC の顧客調査ヒアリングおよび運航モニタリング等をコンセプト構築の初期の時点で丁寧を実施した。得られた知見の概略を以下に示す。

・インドや中国は経済成長率が高く、特に石炭や鉄鉱石の

短距離輸送を中心とした物流が今後期待される。ただし中小規模の港湾整備がまだ不十分な面があり、船型としては浅喫水、カーゴギア装備、そして既存港湾荷役設備利用の 3 点が重視される

- ・昨今の不透明な経済状況下では、いたずらに積載量の大きい船型よりも、汎用性の高い中規模船型の方が、荷動きトレンドに適合する場合がある。特に従来のパナマックス型やカムサマックス型と呼ばれるカテゴリーと、ハンディマックスと呼ばれるカテゴリーの狭間に位置するニッチ領域は、今後(市場)拡大の可能性が注目される。
- ・バルカーの航路パターンは、図 2 に示すようにインド洋及び大西洋を中心とするものが多く、パナマ運河を通航する事例は比較的少ない。しかもパナマ運河は 2014 年に拡張される予定であることから⁷⁾、今後は、港湾事情に適したオーバパナマックス幅船型の展開が予想される。
- ・機関部動力の常用出力設定は船主の嗜好や時代のトレンドによって変化する。操業回転率を重視すれば荒天時も速力維持が図られるが、低燃費運航を重視すれば出力維持が図られることが多い。
- ・操作が過度に複雑な装置は、乗組員や航路が多様なバルカーの世界では採用が難しい。

コンセプトの構築に際しては以上の知見に加え、世界中の 600 以上の港湾制限を調査し、船長(L)、船幅(B)、喫水(d)、載荷重量(DW)の最適組み合わせを検討した。その結果、従来ハンディマックスのカテゴリーとは別に、特に大西洋及びインド洋での活躍を想定した新ジャンルに潜在的なニーズがあることが判明した。これを次世代スープラマックスバルカー(neo Supramax BC)と称し、66BC コンセプトの開発へとつなげている。表 1 に 66BC と従来の 56BC との仕様比較を掲げる。

開発に際しては、幅広浅喫水船型の基本性能を把握するため、早期に数値計算及び各種水槽試験を実施した。幅広になるため、波浪中の抵抗増加に留意する必要があるが、船首部の水線入射角は従来の 56BC とほぼ同等とすることにより、波浪中のみならず平水中の抵抗低減にも寄与したプロトタイプを開発している。図 3 に船首部形状と水槽試験の状況を示す。

2.2 CO₂ 30% 削減船への展開

66BC のコンセプトは環境性と汎用性と経済性の 3 点に集約される。まず、NO_x 2 次規制対応の主機を標準装備しているほか、低硫黄燃料(硫黄分 0.1% 以下)専用タンクを標準装備している。また、整備の不十分な港湾でも自船のカーゴギアによる荷役効率向上を図っているほか、従来パナマックス船型に適合した既存の荷役設備にも対応できるようにハッチ開口サイズを最適化している。そして、多くの中小港湾の水深に対応する喫水 12 m で載荷重量 60 000 t を確保し、代表的な石炭の比重を考慮した大カーゴ容積 82 800 m³ を確保できる点が経済性を著しく向上させている。一般配置図を図 4 に示す。

以上の 66BC コンセプトに対し、CO₂ 削減のための要素技術を段階的に適用していき、最終的には当社建造の従来



写真 1 当社建造 CSR-56BC "NORD PROGRESS"

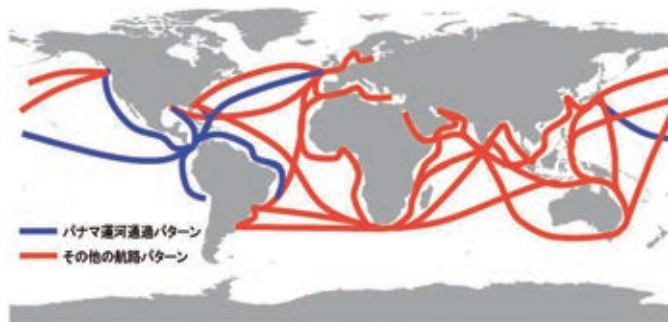


図2 当社ハンディマックスバルカーの航路調査事例

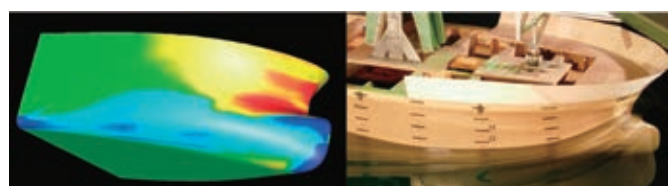


図3 66BC 船型の船首部曲率分布と水槽試験状況

表1 66BC と 56BC の概略仕様比較

項目	ハンディーマックス BC CSR-56BC	次世代スーブラマックス BC CSR-66BC
環境性	NO _x 対応	1次規制 / 2次規制に対応
	SO _x 対応	低硫黄燃料用タンク : 25 m ³ / 低硫黄燃料用タンク : 450 m ³
汎用性	カーゴギア	30 T x 26 m クレーン x 4
	ハッチカバー幅	18.92 m / 20.60 m
経済性(主要目)	全長 : Loa(m)	189.99 m / 199.99 m
	型幅 : B(mld)	32.25 m / 36.00 m
	型深さ : D(mld)	18.10 m / 18.45 m
	満載喫水 : ds(mld)	12.69 m / 12.90 m
	計画喫水 : dd(mld)	11.20 m / 11.20 m
	載荷重量 : DWT at ds	56 000 t / 66 180 t
	載荷重量 : DWT at dd	47 660 t / 54 930 t
	貨物倉容積	71 200 m ³ / 82 800 m ³
	主機関	6S50MC-C7 / 6S50MC-C8
	航海速力	約 14.5 kts / 約 14.5 kts

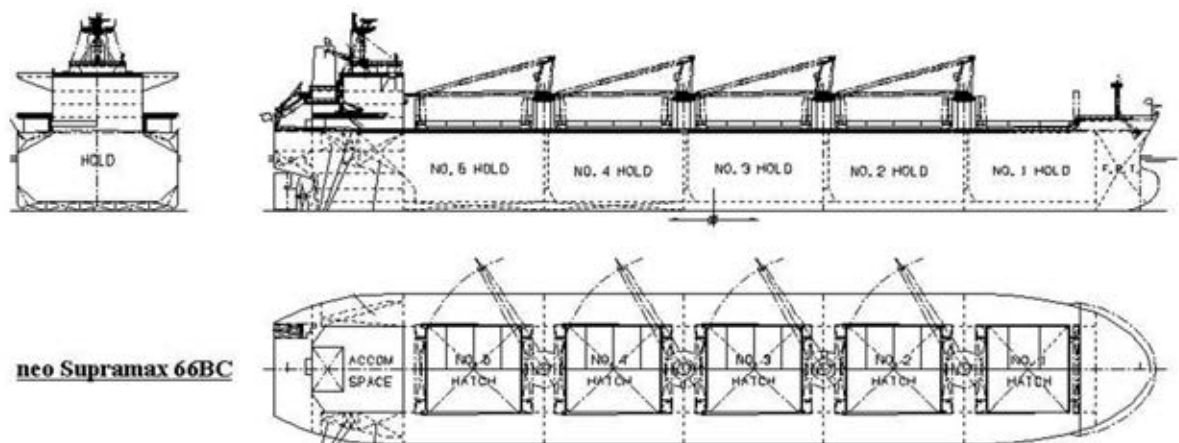


図4 次世代スーブラマックス 66BC の概略一般配置図

56BC より EEDI の指標にて約 30% 削減する目処を立てている。開発は削減テーマを 3 段階に分け、それぞれコードネームを設けて、その都度設計を完結させるように進めた。第 1 段階(STANDARD)で約 20%、第 2 段階(PREMIUM)で約 27% の削減を達成している。

第 1 段階 : STANDARD- 風圧抵抗や水面下の摩擦抵抗低減をテーマとする。上部構造物の流線型化や親水系塗料に着目した抵抗低減に着目する。

第 2 段階 : PREMIUM- 主機関に新型電子制御エンジンを搭載し、大幅なディレーティングを施すことによる燃費削減効果をテーマとする。低回転大直径プロペラによる効率改善効果と排ガスエネルギーの回収装置にも着目する。

第 3 段階 : ULTIMATE- 自然エネルギーの利用をテーマとする。最近では「たこ」の原理を応用したシステムも実用化されており⁸⁾、定期航路の往復が主となる場合には採用の可能性が高い。このほか、太陽電池パネルの導入を試みる。

同じテーマ内における要素技術の開発は互いに干渉しやすく、個々の成果は著しくてもシステムとして組み上げると互いに干渉して機能として成立しないことが多い。コードネーム方式は省エネのテーマごとに段階を分け、段階ごとに設計を一度完結させるステップを踏むため、このような弊害を防ぐのに効果的である。

3. 要素技術開発事例

本章では要素技術開発事例の紹介として、2 軸推進 LNG 船型、低風圧抵抗上部構造物、排ガスエネルギー回収装置 (Turbo Hydraulic System : THS)、及び新小型省エネ舵(トリプレット舵)の研究開発事例を紹介する。

3.1 2 軸推進 LNG 船型

一般に、LNG 船は港湾対応の都合から浅喫水と高速性が要求される。プロペラの作動状態は高荷重状態になるため、カーゴ容積が 150 000 m³ 以上になると、1 軸推進よりも相対

的に大直径低回転になる2軸推進の方が推進効率上有利になることが多い。180 000 m³ クラスともなれば、安全冗長性確保の点からも、2軸推進のツインスケグ船型が実現性の高い選択肢となる。

ツインスケグ船型の場合、**図** に示すように内側から外側へと回りこむ強い旋回流が生じる。このため、伴流分布の均一化に留意する必要があるが、プロペラを内回りで動作させると著しい推進効率向上が得られる。

さらに、液化ガスの蒸発ガス(Boil Off Gas : BOG)を燃料としながらも、低速ディーゼル機関の高い燃焼効率を得られる低速ガス焚きディーゼル機関⁹⁾を採用すれば、BOGと重油の混焼が可能なシステム構成とすることができ、燃焼効率を更に向上させることができる。

当社は2003年頃からこの船型開発に着手しているが、**図** の左に小型コンテナ船に本船型を適用した建造実績船を示す。同図の右にはMOSS型LNG船への適用イメージ

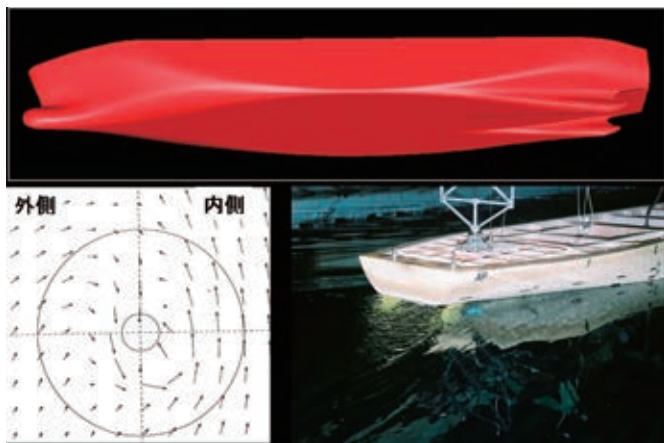


図 ツインスケグ船型の実験と旋回流の様子



図 2軸船型適用事例：小型コンテナ船(左)とLNG船(右)



図 VLCCの風圧抵抗計算および風洞模型

図 を掲載したが、安全性と効率性の両立が可能な本船型は、LNG船への今後の展開が期待される。

3.2 低風圧抵抗上部構造物

居住区構造物の風圧抵抗低減は、以前から省エネルギー研究の材料として注目されている¹⁰⁾。特にVLCC等ではブリッジウィングやドジャーが大型長大構造物となり、その風圧抵抗も無視できない。**図** にVLCCの居住区風洞試験モデルと数値流体力学(Computational Fluid Dynamics : CFD)による数値計算結果例を示す。居住区前縁両端部やウィング前面のラウンドフォルム化が、風圧抵抗低減に効果的なことが判明している。

また、ギア付バルカーではギアの風圧抵抗も無視できず、特に風波の強い実海域では、ギアの形状工夫が少なからず燃費低減に寄与することが期待される。

図 には66BCでギアを交互に向い合せて格納する方式(ツーウェイ)と、同じ向きに格納(ワンウェイ)した上でギア背面をラウンド形状にしたものとの風圧抵抗係数の比較を示す。後者の方が向かい風で風圧抵抗低減に効果的なことがうかがわれる。

3.3 排ガスエネルギー回収装置(THS)

主機の排ガスエネルギー利用も、従来からの省エネアイテムであるが、**図** に示す油圧による排ガスエネルギー回収装置(Turbo Hydraulic System : THS)と呼ばれる装置¹¹⁾は、主機の排ガスエネルギーを油圧動力として回収し、油圧モ-

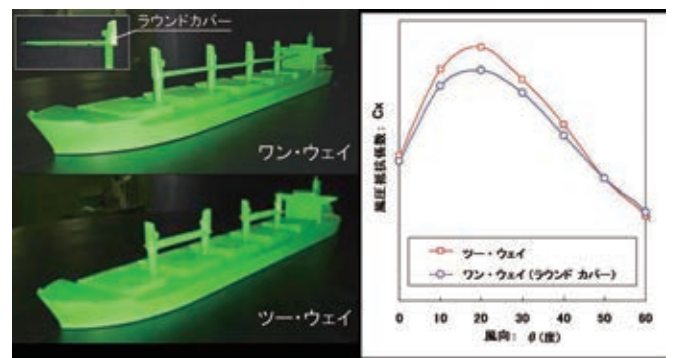


図 66BCのギア格納方向と風圧抵抗係数比較

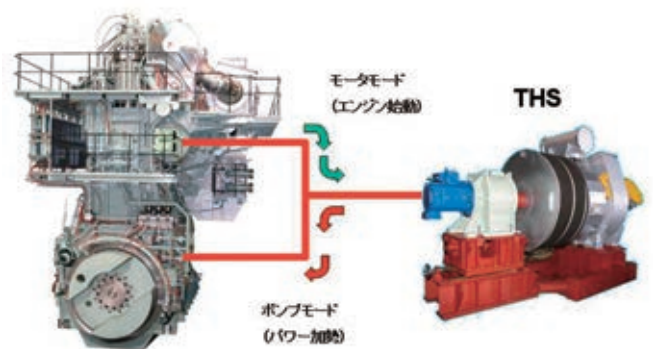


図 排ガスエネルギー回収装置 : THS



図 10 新小型省エネ舵：トリプレット舵

ターを介してクランク軸動力を補助するシステムである。比較的シンプルな既存技術の応用で実現可能なシステムであり、今後の利用が期待される。

3.4 新小型省エネ舵(トリプレット舵)

船型計画に際しては、船体全長の制約条件下でカーゴ容積と機関室長を確保する必要がある。カーゴ容積の増大は性能優位性に直結し、機関室長の増大は機関部設計の自由度に關係するため、船首垂線(FP)より前部のバルブ、若しくは船尾垂線(AP)より後部の舵の長さを短くすることが課題となる。

船首バルブの突出量を小さくした船型は近年の流行とも言えるが、中小型バルカーの速力域では造波抵抗が全抵抗に占める割合も比較的大きい。船首突出バルブは、その低減に効果的であり、ある程度の突出量は確保しておく必要がある。

また、舵のコード長を短くすることも、操縦性能の観点からある程度の限界がある¹²⁾。ただし、舵と船尾形状のデザインを工夫すれば、操縦性と推進性の向上を両立させることができる。

図 10 に、コード長の短縮化とプロペラ後流の捕そく面積増大を両立させることを試みた舵のプロトタイプを示す。金魚の三つ尾ひれを連想させるこの舵はトリプレット舵と称され、側面はコンパクトながらもプロペラ後流を3翼で受ける。一般に、プロペラ作動状態における舵付近の流場は、軸心付近の強い旋回流と船体伴流に起因する上昇流、それにビルジから流れ込んでくる縦渦から構成される。トリプレット舵は、3翼と片舷に設けられた小型フィンにより、これらのエネルギーをモレなくダブリなく回収し、推進性能と操縦性能の同時向上を試みている。

4. おわりに

IMO にて現在議論されている CO₂ 排出規制は、EEDI や EEOI に代表される指標を軸に展開されつつある。途上国の反対等も予想されることから、実際の強制要件が発効するまでには時間のかかる可能性もあるが、これらの指標が今後の船型開発に影響を及ぼすことは確実と言える。

当社は、これを機会に CO₂ 30% 削減船プロジェクトを立ち上げ、その開発をコンセプト開発と要素技術開発の2段階で実施している。本報ではそのプロセスの一端を紹介したが、今後、同様な開発アプローチを、各種船型の開発に取り入れていく予定である。

参 考 文 献

- 1) 環境省地球環境局: STOP THE 温暖化 2008, リーフレット(2008)
- 2) 国土交通省: 国際海事機関(IMO)第 59 回海洋環境保護委員会(MEPC59)の開催結果, Press Release(2009)
- 3) IMO: INTERIM GUIDELINES ON THE METHOD OF CALCULATION OF THE ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX FOR NEW SHIPS, MEPC.1/Circ.681(2009)
- 4) IMO: GUIDELINES FOR VOLUNTARY USE OF THE SHIP ENERGY EFFICIENCY OPERATIONAL INDICATOR (EEOI), MEPC.1/Circ.684(2009)
- 5) 三井造船株式会社: 第 106 期平成 20 年度中間報告書, <http://www.mes.co.jp/investor/reports/pdf/106intbuzreport.pdf>, (2010-8-26)
- 6) 三井造船株式会社: プレスリリース, 56 000 重量トン型ばら積み貨物運搬船「ノルドエンペラー」引き渡し, <http://www.mes.co.jp/press/2010/20100624.html>, (2010-6-24)
- 7) ACP: The New Panama Canal -A Better Way to Go- "PANAMA ANNOUNCES EXPANSION", FOR IMMEDIATE RELEASE(2006)
- 8) SkySails: TECHNOLOGY INFORMATION, Technical Brochure(2009)
- 9) 南喜山. ほか: 天然ガス焚き大型低速 2 サイクルガスインジェクションディーゼル機関, 日本造船学会誌 TECHNOMARINE(1995)第 789 号, p. 15
- 10) H. O'Mahony ed.: Emissions are a drag, THE NAVAL ARCHITECT, January(2009), p. 28
- 11) 桑田. ほか: 三井-MAN B&W 低速ディーゼル機関の最近の技術動向, 三井造船技報, 191 (2007-6), p. 3
- 12) 森: 船型設計, 船舶技術協会(1997), p. 245

共同執筆者: 大庭 直樹 渡邊 貴士
木村 校優 秋林 秀聡

〔問い合わせ先〕

船舶・艦艇事業本部 基本設計部
TEL 03 - 5202 - 3525 松村 竹実

蒸気タービン・炉頂圧回収タービン用デジタルガバナ

機械・システム事業本部 梶川 誠

1. まえがき

ガバナ(調速装置)とはタービンなど回転機製品の速度制御を行う制御システムの総称で、本報では汎用プログラマブルコントローラ(Programmable Logic Controller: PLC)に自製化したプログラムを搭載し、三井造船が自社製 PLC ガバナとして実績を積んでいるデジタルガバナについて記述する。

回転機制御においては、多様な顧客要求に対し、機能的でかつ価格競争力のあるタービン制御システムを提供することが回転機メーカーには求められている。自社製 PLC ガバナの開発以前は、タービン制御システムの中核制御機器であるガバナは、アナログ回路によって構成されており、ガバナの製作には、アナログ回路技術が不可欠な要素であった。アナログ回路で構成されたガバナは、顧客要求への柔軟な対応という点では、満足できるものではなかったが、アナログ回路技術を有していない当社としては、専門メーカーからのガバナ購入を余儀なくされていた。しかし、PLC が高機能化することとなり、ガバナ構築にアナログ回路技術を必要としない時代を迎え、顧客要求に対し柔軟にかつ機敏にこたえられるガバナの登場を待ち望んでいた当社にとって、顧客のニーズを実現することが可能な時代が到来した。そこで、高機能化した PLC の機能を活用したガバナの自社開発に取り組み、2001 年に PLC を使った自社製ガバナを開発、完成させることに成功した。

以下では、このガバナの自社開発に成功した経緯とその機能について述べる。



写真1 ガバナ搭載パネル

2. 自社開発の経緯と実績

2.1 自社開発以前

1. に記載したとおり、10 年前までは、ガバナは専門メーカーから購入し、全体制御システムの構成に必要なガバナ以外の部分については、自社製ソフトウェアを PLC に搭載して、ガバナと PLC の二つを組み合わせることによりタービンの制御システムを構築していた。当時の専門メーカー製ガバナは大きく下記の 2 種類に分類された。

- ・レディーメイド(コンパクト型)
- ・オーダーメイド(高級仕様型)

これらガバナは、システム作りをする立場から見ると、それぞれに下記の長所、短所を有していた。

- ・レディーメイド(コンパクト型)

(長所)汎用品であり、コスト的には魅力がある。

(短所)機能が固定されているため、顧客要求に対し柔軟に対応できない。

- ・オーダーメイド(高級仕様型)

(長所)顧客の個別要求への対応が可能

(短所)仕様確定までに時間を要し、仕様変更の機動性に欠ける、また、コスト的にも高価となる。

当社には、以上のようなそれぞれの短所を補完できるようなガバナを、自社で自由に設計したいとの強い願望があった。

2.2 ガバナ自社開発に必要な四要素

PLC を使ってガバナを開発するために必要な要素としては以下の四要素を挙げることができる。

- 速度検出部(PLC 入力)
- ソフトウェア(PLC プログラム)
- ハードウェア(PLC 本体)
- 制御弁操作部(PLC 出力)

速度検出部はガバナにとっての心臓部分であり、この部分の製作が一番の難関であった。速度検出機能を確認させるために、稼働中の実機において、まず、制御とは切り離れた速度表示機能として実証テストを重ね、PLC に確実に速度信号を認識させる技術を確認していった。

ソフトウェアはガバナ機能構築の最もノウハウとなる部分であるが、過去複数の専門メーカー製ガバナを使っての制御システム構築の経験やトラブル事例などの諸経験により、ガバナの機能構築に必要なノウハウが蓄積され、ガバナ構築に必要とされる知見は十分に保有されていた。

デジタル時代の到来により、PLC が高機能化、高信頼化し、演算速度もガバナ機能として、要求される高速演算が実現できるレベルに到達していた。また、PLC の使用実績の増加に伴い多くのユーザに PLC が認知され、実用範囲が拡大していた。

ガバナの制御弁操作部については、アナログアンプ(制御弁位置制御)の老朽化更新工事で、自社製 PLC アンプに置き換えを実施し、要求される応答性の実現を実証していった。負荷遮断時の早い応答が求められる発電用タービン制御には特に速い弁動作が必要とされるため、この自社製 PLC アンプ技術の完成が、ガバナ自製化の実現へ向けての大きな一歩となった。

このように汎用 PLC を使用して、ガバナを構成する各要素の部分部分の実証試験を積み重ねることによって、ガバナを自社開発することができた。

2.3 自社製 PLC ガバナの誕生

ガバナ構築に必要な四要素が確立されていた時期に、国内のある顧客から、炉頂圧回収タービン発電設備のアナログガバナを更新したいとの要求をいただき、当社がかねてより温めていた PLC ガバナを提案する機会に恵まれた。実績を重要視する発電設備の顧客ではあったが、当社の提案に理解を示していただける進取的な顧客でもあり、2001 年に自社製ガバナを完成させることができた。この新開発の PLC ガバナに対する顧客からの評価は高く、その後同社に更に 2 台の PLC ガバナを納入した。

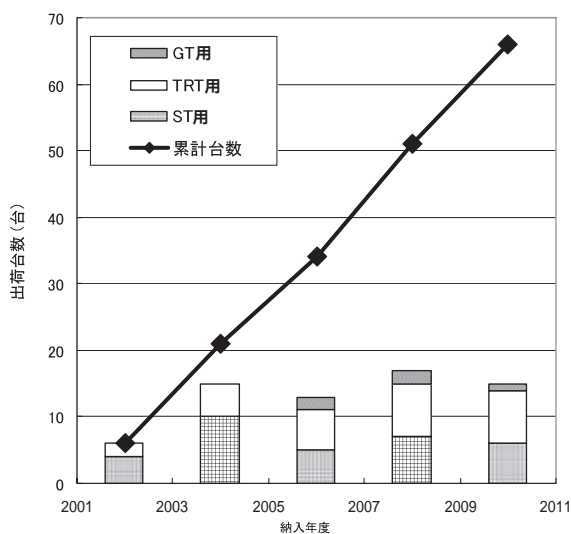


図1 自社製 PLC ガバナの納入実績の推移

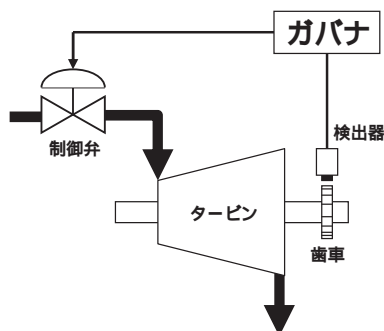


図2 ガバナの基本システム構成

2.4 実績

一号機誕生後、アナログガバナ老朽化によるデジタルガバナ更新工事で納入実績を積み、次第に新規受注工事にも受け入れられることとなった。図1は、2年ごとの受注実績を示したものである。ここに示したとおり、2010年6月現在までの納入実績は、更新工事と新規受注工事を合わせて67台となっている。炉頂圧回収タービン(Top pressure Recovery Turbine: TRT)からスタートした PLC ガバナであるが、現在では、蒸気タービン(Steam Turbine: ST)、ガスタービン(Gas Turbine: GT)用のガバナもそろい、多機種の更新工事と新規受注工事に採用されている。

この自社製 PLC ガバナの実現により、顧客要求に対し柔軟性と機敏性を兼ね備え、コストメリットも有したタービン制御システムを提供することが可能となった。

3. ガバナ機能

3.1 基本機能

ここではまず、一般的なガバナ機能について説明する。

図2にガバナ機能の基本である回転速度制御ループを示す。タービン軸に取り付けた回転速度検出用歯車と検出器の組み合わせにより、パルス信号を PLC に取り込み回転速度信号に変換し、PLC 内部の設定値と比較演算して制御弁を開閉することによりタービン速度を制御する。回転速度制御をベースとしたガバナだが、他機種のタービンに展開するための様々な制御機能の追加が可能で、工事ごとの個別要求にも随時バージョンアップが可能である。タービンの種類に対するガバナの機能については、個別に記述する。

3.2 回転速度信号処理技術

発電タービン用ガバナは、回転速度を時間遅れなく検出し、その変化に応じた演算結果を制御弁に伝える応答性が重要となる。

図3に PLC を使用したガバナ盤の構成を示す。

PLC の型式選定に当たっては、高速演算処理ができるだけでなく、信頼性を確保するため CPU と電源については二重化ができるモデルを選定している。ガバナ機能としての主たる中核技術は速度制御の機能であり、この部分について PLC を使用し実現できたことが自社製 PLC ガバナ開発の要点であった。回転速度検出器は、近接タイプと電磁ピックアップ

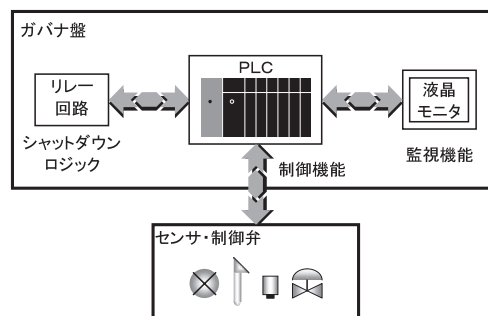


図3 PLC を使用したガバナのハード構成

ブタイプを併用することにより周波数の低い領域から高い領域までに対応が可能である。タービンが定格速度(電源周波数)で同期運転されている時に電気故障などで負荷が急に遮断された(負荷遮断)場合、回転速度上昇傾向をいかに早く検出し、素早く制御弁を閉めるかという性能がガバナには必要とされている。蒸気タービンの例では制御弁の全開から全閉までの動作時間は約0.5秒で、これを制御するPLCの動作時間は、スキャン速度としては数十ミリ秒の演算処理スピードが要求される。負荷遮断時の実例を図4に示す。負荷遮断が発生すると同時に、制御弁が閉動作し回転速度上昇を防止している。

4. 自社製ガバナの特長

4.1 顧客要求に応える柔軟性

自社開発ガバナのソフトウェア構成は、ガバナの核となる基本制御機能(速度制御)と、その周辺の応用制御部分(電力制御、プロセス制御などのアプリケーション)から成っている。これらの基本制御と周辺応用制御を、自由に結合させることにより、顧客要求に対し、高い柔軟性を持ったソフトウェア設計を実現することが可能となっている。

また、当社が自作したプログラムは、ファンクションブロック化されたPLCメーカーのサブルーチンを使用していないことが特長である。つまり、プログラムは四則演算を使って構築されているため、ブラックボックスの部分が存在せず、機

能実現に制限や制約のない作りを実現している。プログラムを自製化することで、信号の細かい部分まで思い通りに操作することができる。このことは、PLCメーカーに依存しない柔軟なシステムを構築できることを意味しており、PLCメーカー、モデルなどの制約を受けないという意味でも非常に大きなメリットとなっている。PLCを使用することにより、自由度が広がった実例について説明する。

図に專業メーカー製ガバナを使用した機器構成を示す。ガバナを專業メーカーから購入した場合、機能的な制限があるため、不足機能については下流側に周辺機器として、を追加することでシステムを構築することになる。～の間の情報交換は、それぞれの周辺機器とのハードウェアを使っての信号取り合いとなるので物理的な制限が発生し、これが制約となり、要求機能をすべて満たすことが困難である。

これに対して、図に示す自社製ガバナの例では、要求機能が全てPLC中にソフトウェアとして内蔵されるため、制約される部分がなく自由な信号交換が可能となり、ユーザ要求機能に対して柔軟に対応できるようになった。また機能的に～が一つのPLC内のソフトウェア構成となるため、部品点数が減少し、ガバナから加減弁までの信号伝達時間も短縮され、性能も信頼性も向上したシンプルなシステムとなる。

4.2 改善要求に応える機敏性

変更、改善要求に対し、自社だけで対応できる機敏性もメリットとして挙げることができ、ソフトウェアを自製するこ

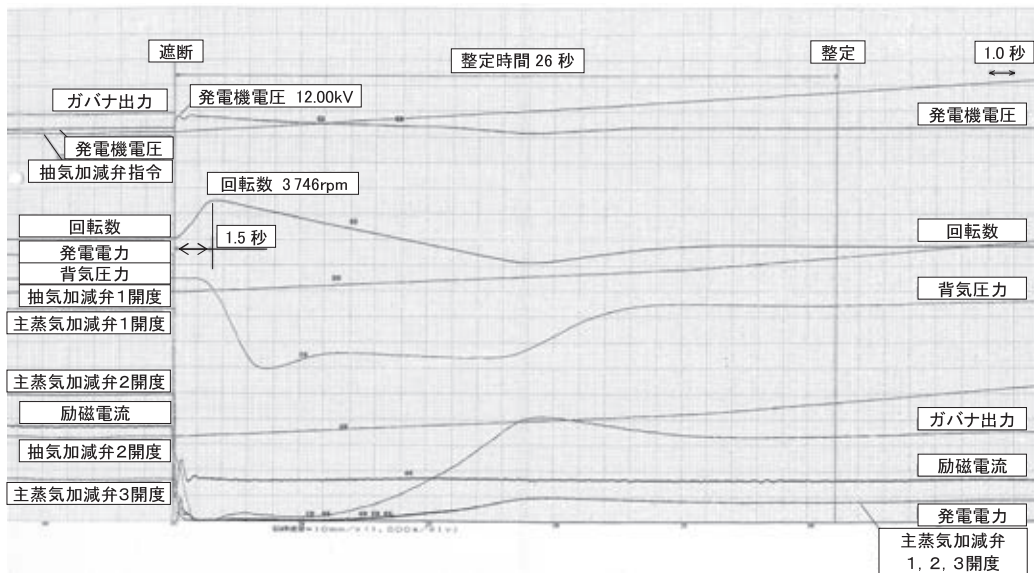


図4 負荷遮断タイムチャート

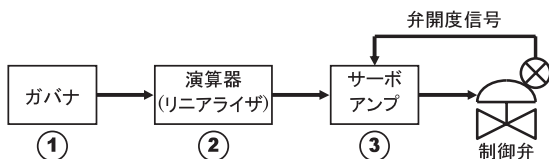


図 專業メーカー製ガバナを使用した機器構成

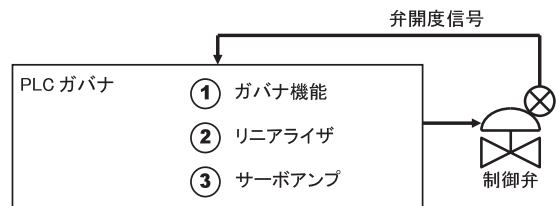


図 自社製ガバナを使用した機器構成

とにより実現できる範囲も広がりを見せた。また、機械が要求する具体的な機能を容易に追加できるようになり、各所に調整用パラメータを追加し、それらのパラメータを液晶モニタ(タッチパネル)からタービン運転中に数値変更できるようになった。パラメータが数値入力できる利点としては、デジタル数字として扱えるために現地調整員の技量に左右されず、結果がよくない場合は元の状態に戻すことができ、再現性も確保できるという点が挙げられる。トライアンドエラーを実践的に行うことにより、高いレベルの改善要求(新機能実現)に挑戦できるようになった。また、ガバナ専門メーカーの現地調整員も不要となり、当社の現地調整員で対応できるようになったことにより、メンテナンス費用が削減された。

4.3 プログラム自製化に伴うメリット

自社製ガバナの言語は、前述の通りデジタル技術を基礎とした四則演算によるアルゴリズムで構成している。自社製ガバナのプログラムはバージョンアップを続けており、価格的にも、機能的にも競争力を持ったガバナとなっている。プログラム自製化によるメリットを以下に列挙する。

4.3.1 設計作業の効率化

基本のプログラムは、固定化することにより流用が可能となってきた。また、タービン種類別のプログラムの標準化作業も進行中である。標準プログラムと工事固有プログラムを明確にさせたうえで設計作業の効率化を進めている。

4.3.2 フィードバックし進化するプログラム

プログラムそのものが改善され、進化しているのだから、技術の蓄積の場所となってきた。現地での不具合、改善をフィードバックできる手段として、プログラムそのものが有効的に活用されつつある。履歴の整理など、確実なフィードバックの仕組み作りが今後の課題である。

4.3.3 可視性及び操作性の向上

操作面では、マンマシンインターフェースとしてタッチパネルを使用しているため、高い可視性、操作性を実現し、ユーザの高い評価を得ている。タッチパネルの画面表示ソフトウェアも自製化しているため、画面構成、ボタン配置、表示

方法など、オペレータの目線で自由に設計計画できるようになってきている。個々の工事要求に対しきめ細かく対応していくことが可能であり、ガバナの調整及びメンテナンス性の向上にもつながっている。以下に標準的に設けられている操作画面について説明する。

(1) 運転監視画面

図 9 に蒸気タービンの運転監視画面の一例を示す。タービン運転中にどの制御モードが選択されているか、またスタンバイしている制御モードの状態なども一目で把握できるように計画されている。

(2) 制御調整画面

図 10 に制御調整画面の一例を示す。試運転調整用の画面を専用用意し、調整パラメータとプロセス値が同一画面上に表示されることにより、過渡的な応答を見ながら安全に試運転調整ができる環境が提供されている。調整パラメータについても顧客により異なる要求に合わせて修正可能である。また、使い易さに配慮がなされているうえ、調整パラメータは数値入力となっているため、調整データの管理も容易である。また調整パラメータは重要度に応じてパスワードを3グループ(通常監視モード、顧客メンテモード、調整員モード)に分け誤操作防止の配慮もなされている。

(3) 弁動作操作画面

図 11 に弁動作調整画面の一例を示す。制御弁のメンテナンス時に電流発生器や記録計などの特殊な装置がなくても、油圧制御機器を含めた制御弁の動作テストが容易にできるテスト機能が装備されている。必要に応じ本体ガバナ機能と切り離して、制御弁のテストとしてステップ応答、周波数応答などの応答テストが容易にできるような模擬信号発生機能を有している。このテスト機能はメンテナンス目的のバルブ動作テスト時に便利な機能である。

(4) 警報画面

図 10 に警報画面の例を示す。プロセス警報監視だけでなく、制御弁の健全性を常時監視しており、制御弁を含めたガバナシステムの自己診断機能を有している。

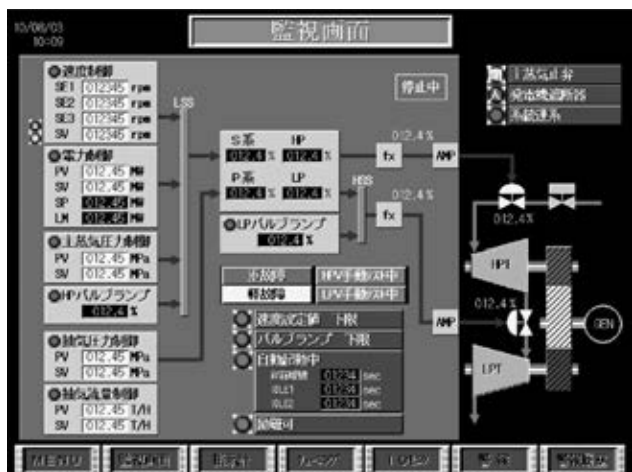


図 9 運転監視画面

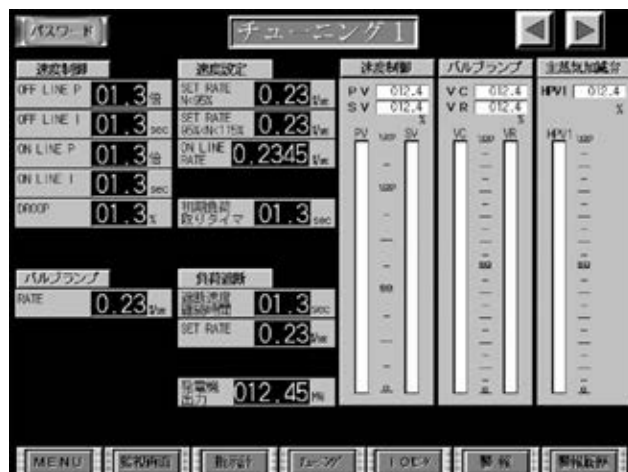


図 10 制御調整画面

また、図 11 に警報履歴画面を示す。この画面には警報発生時刻及び警報解除時刻の履歴が表示され、運転操作の管理ツールとしての機能も有している。

4.4 汎用 PLC の採用

PLC ガバナのハードウェアは産業用の汎用 PLC を使用している。現在の PLC はデジタル信号処理技術の飛躍的な進歩により、ON-OFF によるシーケンス制御はもとより、ア

ナログ制御も含めて総合的な制御を、PLC のソフトウェア処理で実現できるようになっている。そのため、その時代の最新技術のハードウェアに自社製ソフトウェアを載せることで、顧客の要求にこたえと共にハードウェアとして高い信頼性を持ったシステムを構築することが可能となっている。

ここでハードウェアとして汎用 PLC を使用するメリットを以下に示す。

信頼性の高い高速演算機能のハードウェアを比較的低コストで購入可能

大量に生産されているため、短納期

ハードウェアに関わる開発費、維持費が不要

要求レベルに応じたシステム規模の変更が容易(シングルまたは二重化対応, I/O 点数など)

豊富な通信プロトコル対応

汎用 PLC は通信についても豊富な実績を持っているので柔軟な対応が可能である。近年、通信機能は重要な要素となっている。既存顧客ネットワークとの通信の可能性可否が機械本体の受注活動に大きく影響する場面もある。

自社製 PLC ガバナの種類

ここでは、自社製ガバナのラインアップを紹介する。自社製ガバナは 2.4 で述べたとおり 3 タイプがあり、それぞれの制御機能を表 1 に示す。

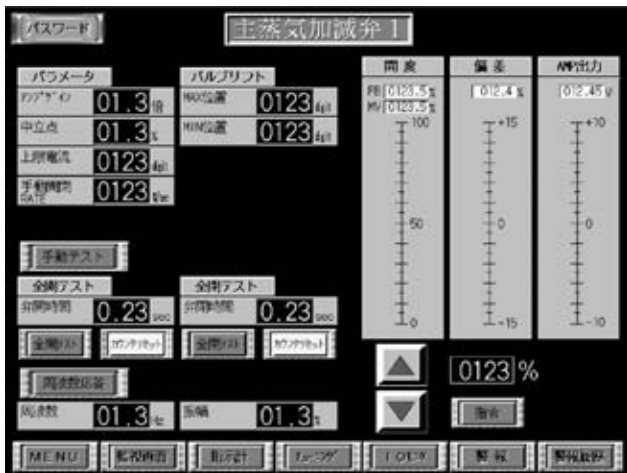


図 9 弁動作調整画面



図 10 警報画面



図 11 警報履歴画面

表 1 タービン機種別ガバナ搭載機能

ガバナ種別	蒸気タービン用ガバナ	炉頂圧回収タービン用ガバナ	ガスタービン用ガバナ
制御項目	回転速度制御 電力制御 / 電力リミッター制御 主蒸気 圧力 / 流量制御 抽気・混気 圧力 / 流量制御	回転速度制御 電力制御 / 電力リミッター制御 圧力制御	回転速度制御 電力制御 / 電力リミッター制御 排気ガス温度制御 アクセルスケジュール制御
制御 弁機能	弁流量特性補正リニアライザ 制御弁開度制御	弁流量特性補正リニアライザ	弁流量特性補正リニアライザ 制御弁開度制御
付加機能	自動昇速 / 自動負荷取り	自動昇速 / 自動負荷取り 調速弁, 静翼角度分配演算 バイパス弁制御	自動昇速 / 自動負荷取り 複数燃料切替機能 火炎検出機能

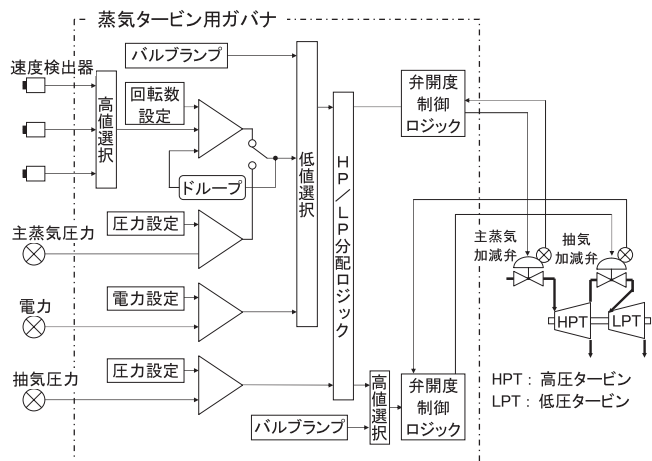


図 12 蒸気タービン用ガバナのブロック図

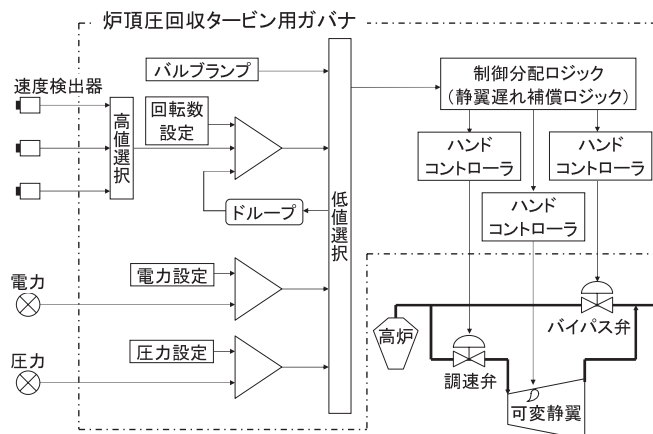


図 13 炉頂圧回収タービン用ガバナのブロック図

1 蒸気タービン用ガバナ

図 12 に蒸気タービン用ガバナのブロック図を示す。回転速度制御を中心として電力制御(電力リミッター制御)、主蒸気の圧力(または流量)制御、抽気(または混気)の圧力(または流量)制御などの機能を有している。制御弁本体は油圧駆動であり、制御弁開度制御機能についてもガバナに内蔵している。この機能を内蔵することで、システム構成部品点数を低減している。

2 炉頂圧回収タービン用ガバナ

図 13 に炉頂圧回収タービン用ガバナのブロック図を示す。制御の種類は、回転速度制御、電力制御(電力リミッター制御)、圧力制御、调速弁・可変静翼分配回路、バイパス弁制御などである。当社の炉頂圧回収タービンは、调速弁と可変静翼の二つの操作端を最適制御し、タービンバイパス流量を最小にすることで高い発電効率を実現している。現在は PLC ガバナの中に调速弁・可変静翼分配機能をソフトウェアで組み込んだため、制御レスポンスの高速化を実現し、タービンの制御性を向上させることができた。また、炉頂圧回収タービンの调速弁は口径が 1m を超す大形パタフライバルブで特殊な流量特性を有しており、それらの制御性を高める補償機能もガバナ内部に標準装備している。

3 ガスタービン用ガバナ

制御の種類は、圧縮機入り口圧力(CDP)によるアクセルスケジュール制御、点火位置制御、失火防止制御、回転速度制御、電力制御(電力リミッター制御)、排気ガス温度制御、複数燃料切替機能、制御弁開度制御機能、蒸気比率制御などである。また、火災検出器のように製造が中止されるおそれのある機器への対応として、温度変化により着火を判定する火災検出機能など、適用タービン機種に応じて機能を追加している。ガスタービン用のガバナは更新工事で主に使用されている。

今後の課題

顧客の既設ネットワークとの通信形態、日進月歩の国内外規格への対応、タッチパネルの現地言語への対応などを考えると、PLC メーカーとの情報交換を密にし、複数メーカーの PLC 及びタッチパネルを臨機応変に採用して対応していくことを検討している。また、今後は海外での使用が多くなることが予想され、国際規格(特に欧州規格)に対応した海外製 PLC を採用してガバナを製作する予定である。

あとがき

本報では、自製化プログラムによる自社製 PLC ガバナに関し、タービンの制御システムとしての適用例を紹介したが、ガバナ以外に PLC を使った自製化プログラムによる自社製品として、過速度検出器、軸停止検出器などの保護装置も製作している。デジタル化の時代にあって、計装制御もソフトウェアの時代に入ってきており、日々進化する PLC を活用し、多様化するユーザのニーズに的確に対応できる「ソフトウェアで応えるエンジニアリング」が今必要とされている。今後も関連技術についてさらなる機能充実を図り進化させ、顧客満足度の向上のため自社の回転機製品の付加価値向上に貢献していきたい。

共同執筆者：山河 靖児 藤田 純一郎

〔問い合わせ先〕

機械・システム事業本部 機械工場 システム技術部
TEL 0863 - 23 - 6315 梶川 誠

グローバルインターネット利用による リモート船用主機関保守・診断関連システム

機械・システム事業本部 笠原 公一

1. まえがき

地球規模で激変する経済環境の中で、船舶及び船用機関を継続的にご愛顧頂き、市場での競争力を維持・向上していくためには、コスト・品質は当然のことながら、アフターサービスの充実によって顧客に満足して頂くことが重要である。特に、船用機関に関しては、従来、トラブル発生後や顧客からのクレームに対応する形でのアフターサービスを実施してきたが、予防保全すなわち、トラブル未然防止による信頼性・稼働率向上を追求するための有益な情報を顧客に提供することが望まれる。

一方、情報通信技術(ICT)の発達と通信基盤の充実により、すなわち、陸上においてはブロードバンド環境下でのインターネットの普及、船陸間通信においては、通信衛星経由での通信高速化、料金低減化によるインターネット(特にeメールサービス)の利用普及により、分散している船用機関の運転情報をリアルタイムで入手することが可能になった。

このような環境変化に対応すべく、三井造船は、LSS (Lifecycle Solution Service) 事業の一環として、インターネット経由による三井・MAN B&W 主機関リモート診断サービス“ e-GICS ”(electronic Global Internet Customer Support) システムを開発し、2004年秋からサービスを開始してきた¹⁾。本報では、このサービス概要とそれに関連した各種センサ製品の紹介及び導入効果、更に運航船舶を支援するため将来に向けた当社の展開について述べる。

2. e-GICS システムの開発概要

e-GICS システム開発の背景として、図1に顧客を取り巻く環境と顧客の目的、それに対応した当社の取り組みについてまとめた。運航スケジュールを守り、信頼性の高い輸送業務を実現するためには、船用機関の状態監視に基づく適切なメンテナンスを実施することが極めて有効である。一方、当社は、船舶及び船用機関メーカーとして製造時からの情報を収集、保持しており、これに稼働状態を示す運転・保守データを加えれば適切な診断をすることが可能となる。システム開発に当たった課題と問題解決策を以下に示す。

2.1 e-GICS の課題と問題解決策

[課題] 管理隻数の増加、工務監督(SI)の要員不足による相対的な業務量の増加に対処する診断業務、書類管理業務の効率化・省力化、設備投資費用の削減。

[問題解決策] インターネットを利用したワンポータルシステムとすることにより、顧客の船用主機関情報が一元管

理できる。診断情報はもとより、製品技術情報の閲覧、写真、文書他関連情報を含む当社技術者との質疑応答の登録・履歴検索、船用機関部品の注文などのサービスを提供する。

顧客は、インターネット利用環境以外のシステム費用が不要となる。

[課題] 診断業務の処理時間短縮、緊急時での即時対応。従来は診断依頼から診断結果回答まで約1週間要していた。

[問題解決策] システムは24時間365日稼働とし、性能診断、メンテナンス診断は自動診断・自動返信機能によりデータ登録後、即時(約5分) に診断結果が閲覧可能とする。

自動診断機能は、船用機関メーカーとして長年にわたって蓄積してきた技術、ノウハウを整理、体系化したもので、本船から送信されてくる性能・メンテナンス診断データを自動分析・診断するものである。

[課題] 異常診断時の当社技術者のフォローアップ。全てコンピュータ任せでは不安との顧客の声がある。

[問題解決策] 性能診断、メンテナンス診断結果に何らかの異状が発見された場合、自動診断に加え、当社の技術専門家による詳細診断の上、結果に診断所見が付加される。

[課題] 船員の経験不足による運転計測データの信頼性低下対策及び作業省力化のため運転データを自動計測したいとの顧客の要望。

[問題解決策] 3. に示す当社開発センサーシステムの併用により性能診断データ及びメンテナンス診断データのe-GICS システムへの自動連携を可能とする。本機能は、誤入力防止、データ精度向上の観点からも有効である。

[課題] システムの設備投資、運用費用の低減。

[問題解決] e-GICS システムは ASP (Application Service

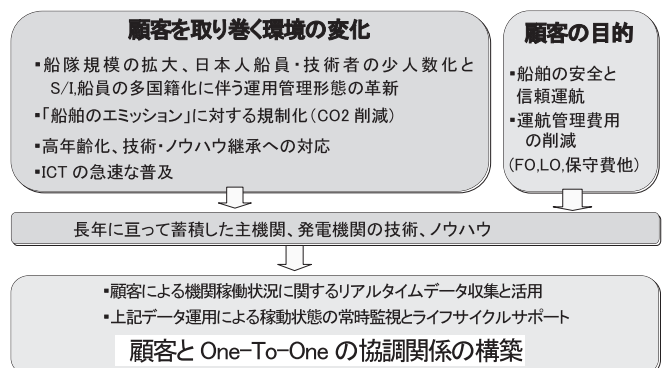


図1 サービス事業提案の背景

Provider)による会員制サービスとし、低額の年会費で利用できる。顧客側での特別なシステム設備、運用要員は不要である。

[課題]診断等の技術的なこと、操作方法等の体系的なことについての問い合わせ先が分らない。

[問題解決策]総合受付窓口(ヘルプデスク)を設け、顧客からの各種問い合わせ、クレーム対応及びシステム運用上のお知らせなど、顧客対応業務を行う。

また、2.3で後述するとおり、ダイハツディーゼル株式会社(以下、DDK)と船用発電機関の性能診断・メンテナンス診断サービスシステムとして“e-GICS w”を共同開発した。e-GICSとe-GICS wは各々独立したWebサイトであり、当社が総合窓口を担当している。運用形態を図2に示す。

また、図3にe-GICS及びe-GICS wのコンテンツの開発経緯

発経緯を示す。共に、サービス開始後、基本機能の拡張と改良を重ね、オプション機能(ハード、ソフト)も順次開発し、リリースしている。

2.2 e-GICSの機能概要

2004年11月からサービスを開始し、以下の4種類の基本メニューと3種類のオプションメニューを提供している。メインメニュー画面を図4に示す。

2.2.1 基本メニュー

(1) Electronic Carte System(診断システム)

本メニューはe-GICSシステムの最も核となる機能であり、2.1の課題～の問題解決策に対応し、以下の二つの診断機能を有する。

- ・性能診断機能：船用主機関のシリンダ圧力、ポンプマーク、過給機の回転数、排ガス温度などの運転データをもとに主機関運転性能の解析、経年変化の把握などを行う。

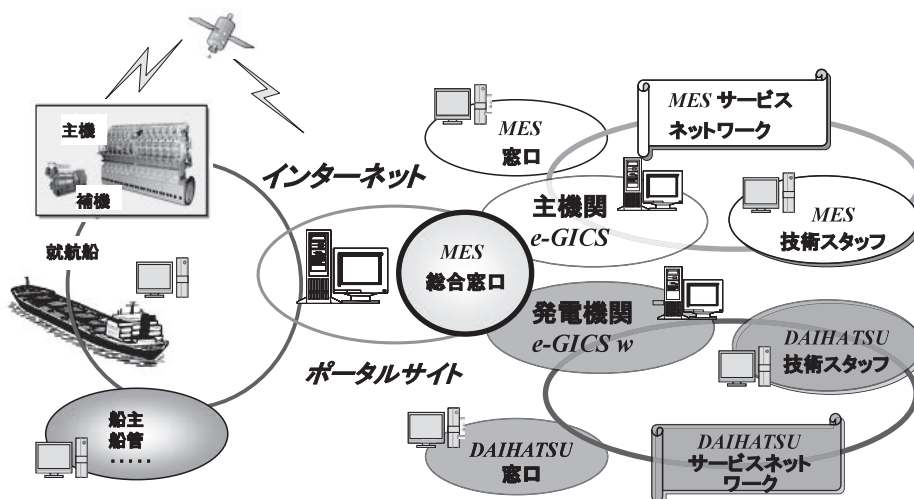


図2 e-GICS / e-GICS w の運用形態

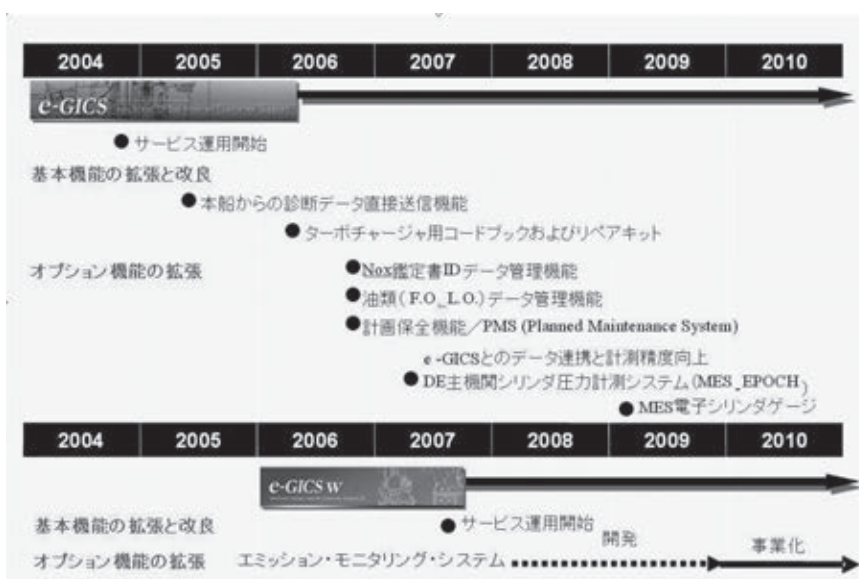


図3 e-GICS / e-GICS w のコンテンツ開発経緯

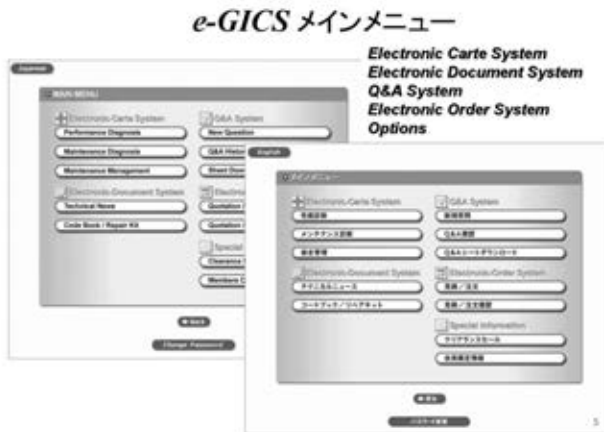


図4 e-GICSのメインメニュー画面



図 Q&A/新規入力画面

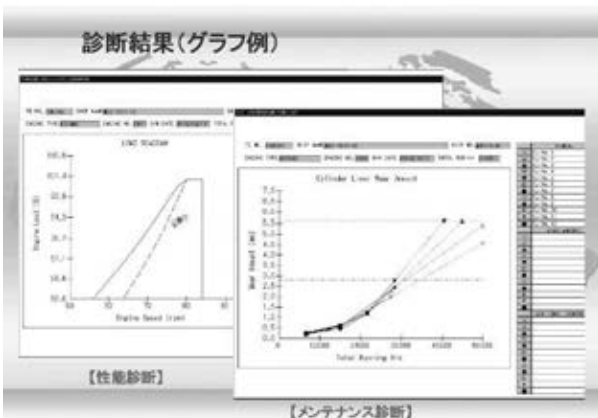


図 診断結果のグラフ例



図 技術情報参照画面

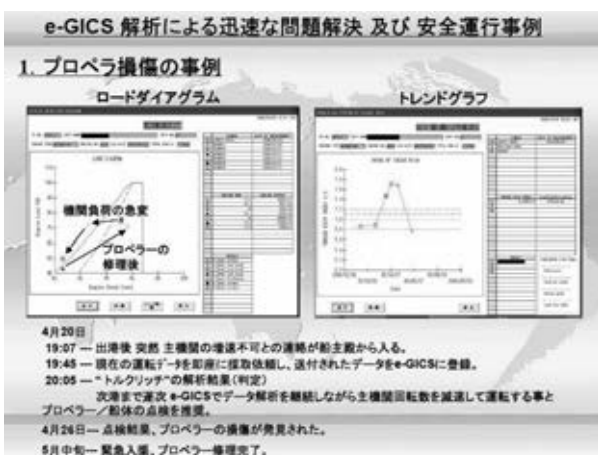


図 性能診断事例

・メンテナンス診断機能：開放点検時に収集した計測データからシリンダライナ、ピストン冠、ピストンリング、排気弁、燃料弁など主要部品の摩耗状態など経年変化を診断し、部品交換等保守作業の支援を行う。
診断結果のグラフ例を図に示す。また図には、重大事故を早急に発見し、適切な処置ができた性能診断事例とし

て、プロペラ損傷の事例を示す。

以下の三つのメニューは、2.1の課題の問題解決に対応するものである。

(2) Q&A System(問い合わせシステム)

各種問い合わせにおける顧客と当社のコミュニケーションツールであり、やりとりの際に添付した写真、図面などのデータも含めた過去履歴のファイリング・検索機能が利用できる。図にQ&Aの新規入力画面を示す。

(3) Electronic Document System(技術情報閲覧システム)

当社発行の「サービスノート」、「サーキュラーレター」、「ミニニュース」及び「テクノニュース」の4種の技術情報をインターネット経由で閲覧できる。図に技術情報参照画面を示す。

(4) Electronic Order System(主機関部品発注システム)

電子化されたコードブック/リペアキットを利用し、主機関部品の見積/発注業務をサポートする。図にコードブック/リペアキット画面例を示す。

2.2.2 オプションメニュー

サービス開始後の顧客要望、環境変化に対応するため、以下の3種のオプションメニューを2006年9月からリリースした。

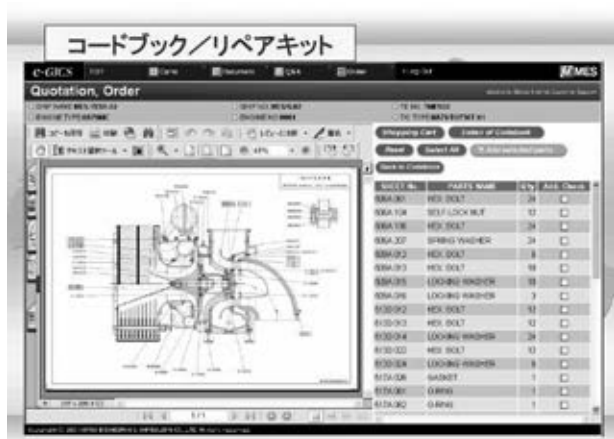


図 コードブック / リペアキット図



図 11 油類データ管理画面例



図 10 NOx ID 管理画面例

(1) NOx 鑑定書 ID データ管理機能

環境保護の立場から、排出規制が法制化しつつあり、法令順守が船主等使用者へ強く求められている。一方、船主等使用者は船級への検査手続き等の対応に苦慮している。

そのため、下記の IMO/NOx 規制に関連した NOx 鑑定書 ID データ管理支援ツールを開発した。

a 本船用スタンドアロン版

- ・ 部品交換、調整履歴記録用レコードブック、パラメータチェック法に準拠したサーベイコードによるベリフィケーションレポート作成ツール、テクニカルファイル(含、NOx 鑑定書等)

b 陸上事務所用 Web 版

- ・ NOx 鑑定書オリジナルデータの閲覧機能、部品交換、調整履歴管理機能(本船からのレコードブックデータと連動)
- ・ 検査提出ベリフィケーションレポートの登録 / 履歴管理機能、テクニカルファイル(含、NOx 鑑定書等)の閲覧機能

図 10 に NOx ID 管理画面例を示す。

(2) 油類(FO, LO)データ管理機能

昨今の原油の高騰、燃費削減の動きから、低品質の燃料使用によるトラブルが増加している。そのため、油類の品質・

性状の履歴管理が重要となってきた。その解決策として、FO(燃料油)と LO(潤滑油)を対象とした油類データ管理機能を開発した。

FO, LO の性状、金属成分ごとのグラフ表示及び当社技術者による総合所見サービス、診断履歴管理、診断レポート出力機能を有する。図 11 に FO, LO の分析結果画面例を示す。

(3) 計画保全機能

船舶の安全運航のため、例えばタンカーでの TSM (Tanker Safety Management) 等、計画保全(Planned Maintenance System:PMS)の重要性が増大している。一方、市販の汎用 PMS ソフトは、高機能、高価格でかつ、初期の保守作業データ整備 / 入力作業にかなりの費用 / 労力を要しているため導入のハードルが高い。その解決策として、当社製主機関限定ではあるが、操作容易性(機能簡素化)、即時使用可(標準的保守作業データベースの提供)を考慮した PMS 作業支援ツールを開発した。

a 本船用スタンドアロン版

- ・ 作業登録機能、作業スケジュールリング機能、作業ドキュメント作成 / 登録機能、作業履歴管理 / 閲覧機能

b 陸上事務所用 Web 版

- ・ 作業ドキュメント管理機能(作業ドキュメント登録、作業履歴管理 / 閲覧)

図 12 に PMS(計画保全)画面例を示す。

2.2.3 他システムとのデータ連携機能

e-GICS システムは、2.1 の課題 の問題解決に対応すべく、以下の当社システム製品とのデータ連携機能により、計測データ取得の省力化・精度向上が図れる。適用例を図 13 に示す。

(1) "Fleet Monitor"

船舶運航を支援するためのトータルソリューションの提供を目的としたポータルサイト Maritime-SOL を 2006 年 10 月に立ち上げ、当社事業開発本部マリタイム・ソリューション事業室がサービスを提供している。その中の、リモートモニタリングサービス Fleet Monitor により、主機関運転状態を記録している各種設備・機器であるデータロガ、VDR (Voyage Data Recorder), ECDIS (Electronic Chart

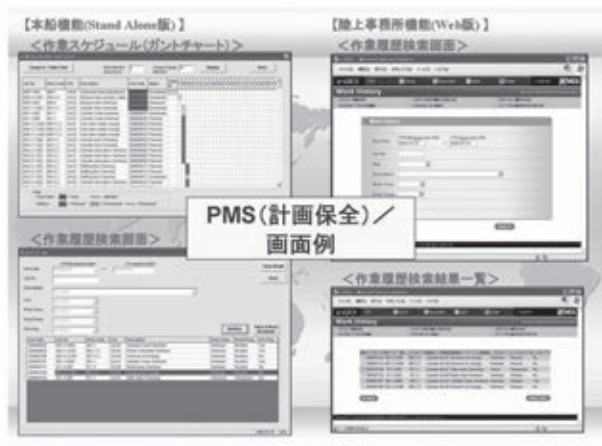


図 12 PMS(計画保全)画面例



図 14 e-GICS w のオンボードエミッションモニタリング画面例

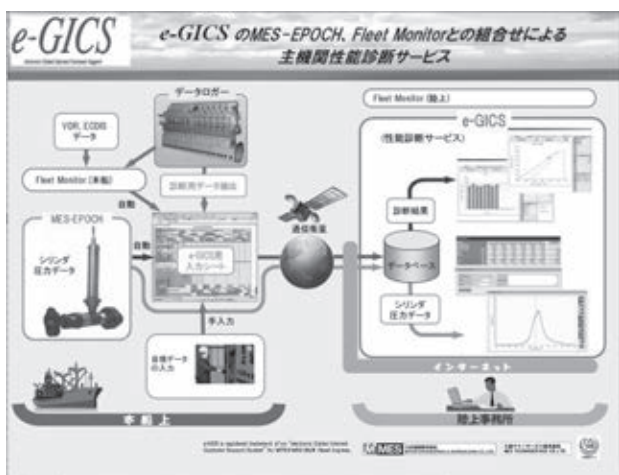


図 13 e-GICS, MES-EPOCH, Fleet Monitor とのデータ連携

Display and Information System)のデータが e-GICS 性能診断用データとして自動取得可能である。

(2)“ MES-EPOCH ”

2006年7月に販売開始したオンボード用センサーシステム MES-EPOCH(主機関シリンダ圧力計測システム)により、Pmax, Pcomp などのシリンダ圧力データが e-GICS 性能診断用データとして自動取得可能である。製品の詳細は、3.1 に示す。

(3)“ MES 電子シリンダゲージ ”

2009年1月に販売開始したシリンダライナ内径計測センサーシステム MES 電子シリンダゲージにより、シリンダライナ内径摩耗データが e-GICS メンテナンス診断用データとして自動取得可能である。製品の詳細は 3.2 に示す。

2.3 e-GICS w の概要

機関室内発電機関への e-GICS 基本機能(性能診断, メンテナンス診断など)の展開を図るべく DDK と共同開発を行い, 2007年10月より e-GICS w サイトの運用を開始した。また, 環境対策・対応設備として, 排気ガス計測装置, 脱硫装置, 脱硝・脱塵装置の開発, 導入検討を実施中である。

図 14 にオンボードエミッションモニタリングシステムの画面イメージを示す。排気ガス(CO₂, NO_x, SO_x)の常時計測と機関データログ, VDR, GPS データなどの入力により計測データの保管, トレンド表示, IMO/ECA (Emission Control Area)評価を行うものである。

3. 計測ツールの開発

2. では, e-GICS の主機関診断機能である性能診断とメンテナンス診断の二つについて述べた。これらの診断では, 船上で計測された各種のデータを入力値として利用している。したがって, 正確な診断結果を得ようとする, 入力データについても精度・確度の高いものが求められることは明らかである。一方, いかにデータの精度が高くとも, 作業に熟練を要したり, 長時間を要したりする計測法は, 船上では採用しにくいと思われる。当社では, このような観点から, 船上での使用を想定した計測ツールの開発にも積極的に取り組んでいる。本報では, MES-EPOCH と MES 電子シリンダゲージの二つを紹介する。

3.1 MES-EPOCH

MES-EPOCH は, 運転中の主機関からシリンダ内圧力とクランク角度を取得し, 燃焼解析を行うシステムである。MES-EPOCH のシステム概要を図 1 に示す。シリンダ内圧力は, 各シリンダのインジェクター弁に取り付けた圧力センサから取得し, クランク角度はクランク軸端部に取り付けたロータリーエンコーダから得る。各信号は, 信号中継箱を経由してノートパソコンに入り, パソコン上で解析と表示が行われる。

従来, この圧力計測は, 機械式の指圧器を用いて行われてきた。すなわち 紙に写し取った圧力波形の大きさを, スケールを用いて読み取る方法である。この方法には一定の実績があるものの, 計測者の違いによって生じる読み値の差を, 完全には無くせないという問題があった。一方, MES-EPOCH では, 一連の作業を電子機器で置き換えており, 取得した波形は, 直接パソコンに取り込まれる。したがって, 本システムを用いることで, 計測者間の差異は発生しなくなり, データの客観性が保証されることになる。加えて, 誤読, 誤記な

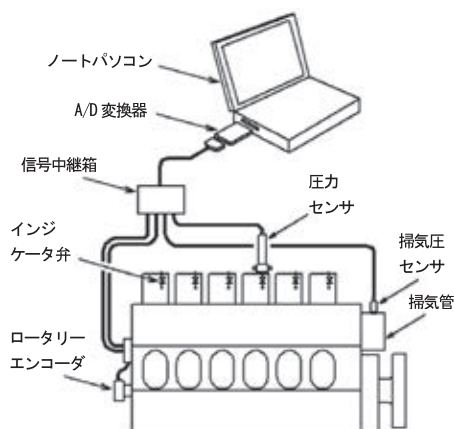


図1 MES-EPOCH(シリンダ圧力計測システム)の概要

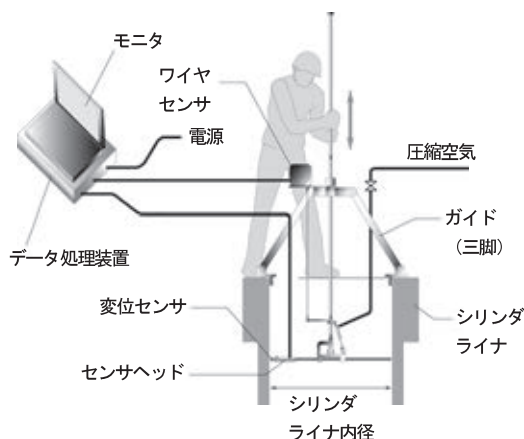


図1 MES電子シリンダゲージの概要

表1 MES-EPOCHの主な出力項目

(1)圧力波形
クランク角度 - 圧力(山形線図)
シリンダ容積 - 圧力(たび形線図)
シリンダ容積 - 圧力(対数表示たび形線図)
クランク角度 - 圧力勾配
(2)パラメータ
最高圧力 P_{max}
圧縮圧力 P_{comp}
図示平均有効圧力 P_i
掃気圧 P_s
図示仕事 W_i
主機回転速度
計測日時
(3)パラメータのシリンダ間偏差量
(4)パラメータの経時変化



写真1 従来の計器による計測の様子

どのヒューマンエラーも防止することができる。

作業性の面では、計測シリンダの判別を自動化することで、計測中のパソコン操作を大幅に省いたほか、各種パラメータの計算を自動化することで作業時間の短縮を図った。

表1にMES-EPOCHの主な出力項目を示す。e-GICSでは、主機関の性能診断において、パラメータの欄に示した最高圧力 P_{max} 、圧縮圧力 P_{comp} 、図示平均有効圧力 P_i 、掃気圧 P_s 、図示仕事 W_i 、主機回転速度、計測日時を利用する。例えば、 P_{max} 、 P_{comp} の2値については、 P_s 対 P_{comp} の関係、シリンダ間 P_{max} 偏差量、シリンダ間 P_{comp} 偏差量などの判定材料として利用されている。したがって、e-GICSとMES-EPOCHを組み合わせて使用することにより、これらの診断項目の判定精度の向上が期待できる。

3.2 MES電子シリンダゲージ

MES電子シリンダゲージは、シリンダライナの内径を計測し、その経時変化からライナの摩耗量を把握するための装置である。本装置の概要を図1に示す。装置は、変位センサとワイヤセンサの二つのセンサを備えており、ライナ内径

は、変位センサによって計測される。ワイヤセンサは、計測点の位置情報を得るために用いている。各センサからの出力は、シリンダ外部に置いたデータ処理装置に入り、電子データとして記録される。

運転中の主機関内部では、各シリンダ内でピストンが上下運動を繰り返しており、ライナ内壁とピストンリングは絶えずしゅう動状態にある。そのため、ライナは徐々に摩耗していく。通常、ライナとリングの間は、適当な注油によって潤滑されているため、その進行速度は非常に遅い。しかし、潤滑、燃焼状態、燃料などに異常があると、ライナは急速に摩耗することがある。このような異常を早期に発見するため、シリンダカバー、または排気弁箱を開放する際に、ライナの内径計測が行われている。

従来の計測法は、写真1に示す棒状の計器を用いるものである。計器の先端には、ダイヤルゲージあるいはマイクロメータが取り付けられており、計測者は手で計器を揺動させながら直径位置を探り当て、その目盛を読み取る。この方法の場合、計器そのものの精度は十分に高いものの、計測者の

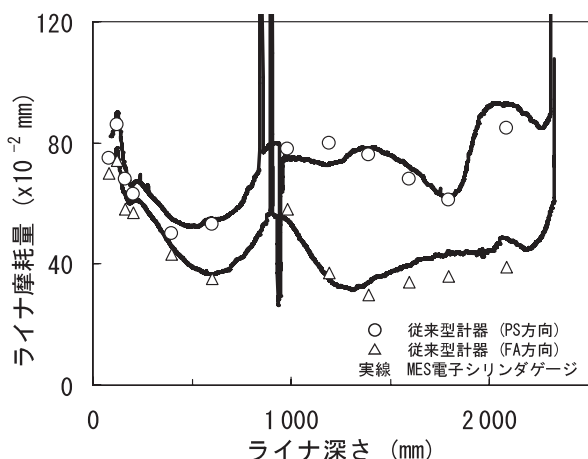


図1 ライナ摩耗量の計測結果の例

技量によって結果に差を生じ、問題となることがあった。

一方、MES電子シリンダゲージは、ライナ上部から計器を下ろすだけで直径位置を計測できるようになっており、計測者間の差異が出ない仕様となっている。具体的には、図1中に示すガイド(三脚)とセンサヘッドにより、計器の支持方法を工夫することでこれを実現している。

また、従来の計器は、測定値を外部に出力できないため、ライナの深い位置を計測する際、目盛を読むために、人がライナ内に入る場合があった(写真1)。人が入れないような小口径機関の場合には、遠く離れた位置から目盛を読む必要が生じ、読み取りに困難を生じていた。新しい計器では、この対策として、各センサを外部出力可能な形式に変え、測定値は、シリンダ外部に置いたモニタ上で確認する仕様とした。これにより、目盛読み取り上の問題が解決されるとともに、安全性・作業性を大幅に改善することができた。

図1は、三井-MAN B&W 7K90MCディーゼルエンジンで約156000時間使用したライナの摩耗量を、本計器を用いて測定した結果である。測定は、ライナ断面内の直交する2方向(PS:船幅方向, FA:船首尾方向)で実施し、同時に従来の計器による測定も行った(図中の○, △印)。同図より、両計測法の結果はよく一致しており、本計器の測定精度は満足できるものであることを確認している。なお、ライナ深さ800~900mm及び2300mmの付近でMES電子シリンダゲージの測定値が大きく振れているのは、変位センサが、ライナ表面の注油溝及びポート孔を通過したためである。

計測結果は、横軸をライナ深さ、縦軸を摩耗量とした連続データと、あらかじめ設定した計測点における数値データの二つを取得できる。e-GICSは、後者のデータをWebサーバ上に保管する機能を有している。本機能により、陸上・海上のいずれからもアクセス可能な場所に計測記録を置き、一元管理することが可能となっている。

したがって、MES電子シリンダゲージは、MES-EPOCHと同様、e-GICSと組み合わせることで、より大きな効果を期待できるツールと言える。

4. システム導入成果と今後の展開

実績

e-GICSは、2004年11月からサービスを開始し、入会会社数144社、入会隻数1843隻(2010年8月現在)である。

定例業務への浸透

船主/船舶管理会社では、船舶の安全管理に関する国際条約ISM(International Safety Management)コードで規定されているSMS(Safety Management System)が重要業務の一つである。e-GICSの性能診断サービスをSMSに組み入れて定期的に利用するケースが増えてきており、船舶管理業務への浸透、定着化が進んでいる。

新造船(保証期間中)への利用拡大

当初は保証期間満了後の就航船アフターサービスとしてスタートしたが、近年の建造ブーム、安全運航の高まりとあいまって、新造船(保証期間中)からのサービス適用拡大を望まれる顧客の要望にこたえるべく、準会員制度(保証期間中の無料サービス)も実施している。

今後の展開

引き続き、顧客の関心の高い燃費改善関連の診断機能の高度化、燃焼診断機能の開発、本船作業省力化につながる各種計測センサーの開発、機能改善を予定している。

あとがき

CO₂削減、省エネ、排ガス規制等顧客を取り巻く環境の変化に呼応した顧客の目的実現を、船舶及び船用機関メーカーとして支援すべくインターネットによるサービス提供を実施してきた。一昨年から船陸間通信のプロードバンドサービスが開始され、今後本船での導入が一層本格化することが期待できる。したがって、本船上でインターネットが常時利用可能となれば、ポータルサイトサービスの重要性及び利便性は飛躍的に高まるものと思われる。

当社は、今後もe-GICSシステムの機能、サービスの拡充はもとより、船舶運航支援ポータルサイトMaritime-SOLとの緊密な連携を図り、船舶運航トータルソリューションの提供という形で、来るべき環境調和型社会へ貢献して行きたい。

参考文献

- 1) 今井・ほか: インターネットによる船用機関の性能診断, メンテナンス診断サービス, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 44, 1(2009), p. 12

共同執筆者: 田中 正紀 今井 兼久

〔問い合わせ先〕

機械・システム事業本部 テクノサービス事業室
TEL 0863-23-2381 笠原 公一

就航船解析サービス

事業開発本部 山本 敏明

1. 開発の背景

昨今の燃料油価格の高騰や海上における製品輸送の低迷により航海中の船舶における経済性の追求に加え、地球温暖化の観点から温室効果ガス(Greenhouse Gas : GHG)の一種である二酸化炭素(CO₂)の排出削減が重要視されている。

そのなかで、国際海事機関(International Maritime Organization : IMO)をはじめとする海運造船業界においてCO₂排出削減に向けた取り組みが検討され、既存船の実運航に対する運航指標(Energy Efficiency Operational Index : EEOI)がIMOの場において策定された。

また、実運航の段階でEEOIを自己モニタリングしながら、CO₂排出削減のために最も効率的な運航方法を取るよう、減速、最適航路選定、最適メンテナンスサイクルなどを管理

する船舶エネルギー効率マネジメントプラン(Ship Energy Efficiency Management Plan : SEEMP)も策定され、今後は運航も格付け評価されると考えられる。

このように燃費削減に対する意識の高まりと、CO₂排出削減への規制強化から、就航船舶の運航性能についてモニタリングを行い、評価及び改善という管理サイクルを、従来以上により精度良く効率的に実行できる就航船解析技術の向上が強く要望されている。

従来の就航船解析では、運航船で乗員が計測値を記入したアブログ(Abstract Log)、及びヌーンレポートを用いて、習熟した海技技術者による解析が主体であった。実際の解析作業では、アブログ及びヌーンレポートからの計測データの収集・整理に手間取るため、管理船舶数の増加や運航形態の変化へのタイムリーな対応が困難であった。また、運航者側が実施する対象船の実績追求が主体であるため、建造者側にとって引き渡し後の実海域性能の把握と新船型開発への検討には適用が難しかった。

2. 就航船解析サービスの提供

これらに対応するため、実海域性能を高精度にモニタリングし、タイムリーな解析・診断と、効率的な運航計画を支援する「最適運航支援サービス」(図1)の提供を予定している。これは、効率的な運航計画を支援する“Fleet Monitor”(図2)、就航船解析サービス“Fleet Cal”(図3)及びウェザールーティン“Fleet Navi”から構成される¹⁾。

本報で紹介する「就航船解析サービス」は、既にサービス中のFleet Monitorに加え、このFleet Calを三井造船の運営するポータルサイトwww.maritime-sol.com(図4)からインターネット経由で、運航者及び建造者に対し、就航船解析ソリューション・サービスとしてより簡便に提供するため開発したものである。

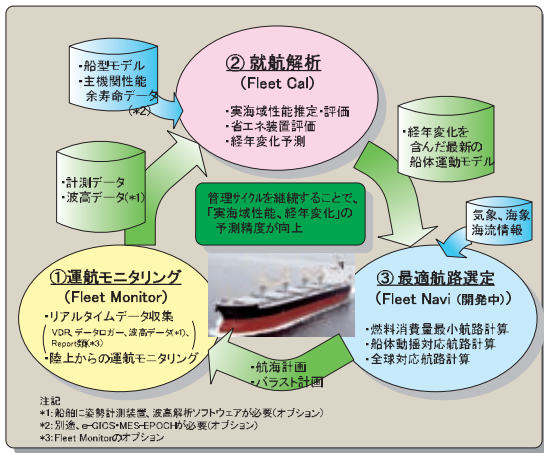


図1 最適運航支援サービス



図2 Fleet Monitor

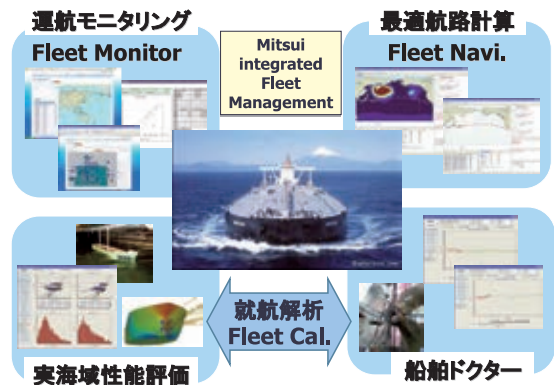


図3 就航船解析サービスのイメージ

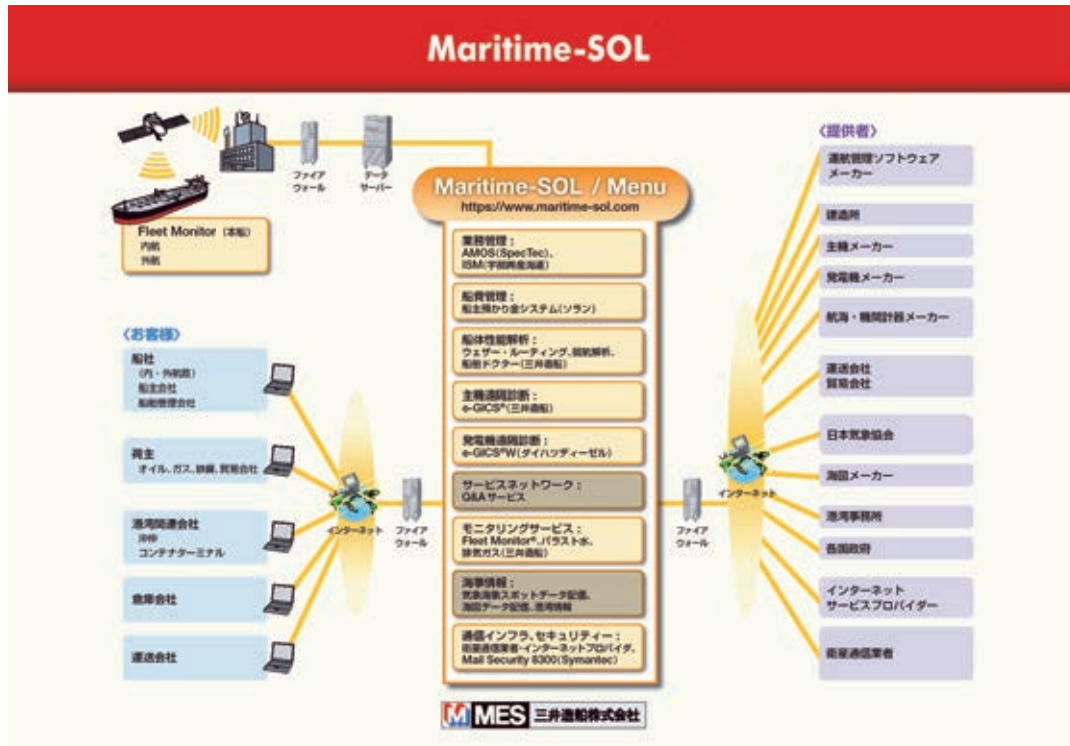


図4 ポータルサービス概念図

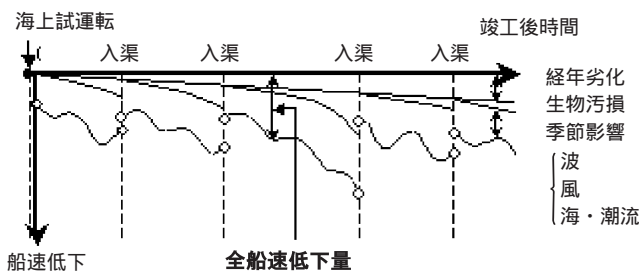


図 実海域における船速低下の概念

3. 就航船解析サービスの構成

3.1 全体構成

当社では、海洋におけるインターネット通信の高速化・低価格化により船陸間での情報共有・発信の利用が急速に進むものと考え、これらの情報提供の統合的な受け皿となるポータルサイトを開設し、広くシステム提供会社の参加を募りながら、運航支援サービスの開発・提供に取り組んでいる。

就航船解析サービスは、図4に示すように、当社の運営するポータルサイト上からASP方式で提供される。就航船解析サービスは、対象船舶に搭載されたFleet Monitorにより収集され、ポータルサイト上のデータベースに蓄積された運航データを使用して実海域における船体運航性能の分析・診断を、インターネット経由で提供するサービスである。

また、当社製の主機関(三井MAN B&Wディーゼルエンジン)の遠隔診断サービスである“e-GICS”を搭載した船舶では、主機関の運転データを加味した総合的な就航船解析ソリューションの提供が可能である。

就航船解析サービスの利用者は、事前に取得したポータルサイトのアクセスIDを用いて手元のWeb端末からインターネット経由でポータルサイトにアクセスしてこのサービスを利用することができる。

3.2 基本機能の構成

就航船解析サービスは、図3に示すように、基本機能として、船型登録、就航解析、実海域性能評価及び船舶ドクターで構成されている。また、Fleet Monitor及びe-GICSから収集・蓄積された就航データの取り込みと、解析された船型モデルをウェザルーチンへ転送する、データ入出力インタフェース機能を有している。

3.3 就航船解析サービスを構成する技術

3.3.1 就航船解析システムの構成と機能

実海域における船舶の性能を把握して、船舶の一生にわたる期間の実海域性能を評価することは重要な課題であり、遭遇する海象の中で、環境負荷特性と燃費低減を考慮した高度な運航を実現するためには総合的な船舶性能の評価が必要となる。

図5は、実海域における船舶性能の重要な要素である船速低下の時系列的な概念図である。実海域における船速低下の要因は、船体、プロペラなどの表面粗度の増加や主機の経年変化による船速低下(経年劣化)、船体外板スライム、海洋生物が付着することによって生ずる船速低下(生物汚損)、波、風、潮流などの外乱により生ずる船速の変化(季節変動)に大別される²⁾。

就航船解析システムは、このような実海域における船速低下要因を総合的に評価し、実際の就航状況に即した実海域性能をより高精度で把握した、実海域性能モデルに基づいた新しい運航支援サービスとして提供するために開発されている。

就航船解析システム(図6)は、顧客から概略の船舶の諸

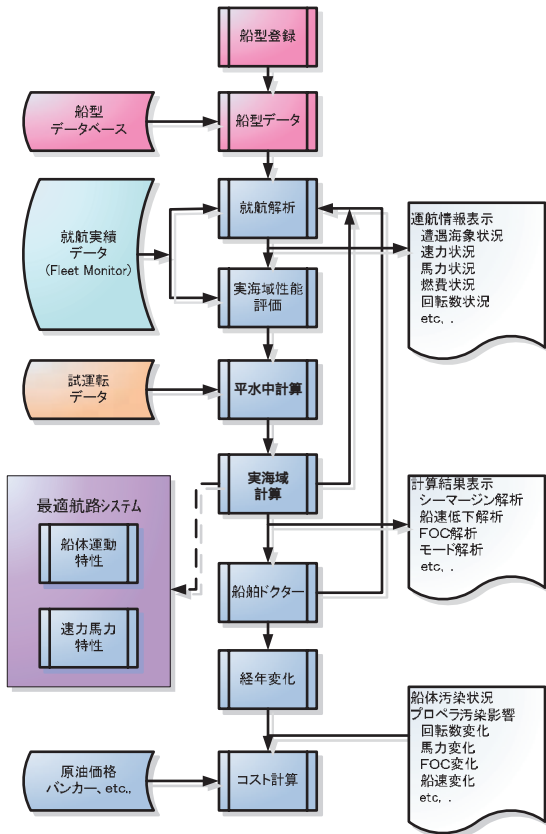


図 就航船解析システム

元情報、就航実績データ(アブログ、ヌーンレポートなど)を提供いただき、類似船の船型データベースより船型モデルを作成する。この船型モデルに対し、Fleet Monitorで自動収集された就航実績データを統計的に解析することにより、波、風などの外乱影響による実海域性能特性、経年変化などの分離とチューニングを行う。このように、対象船のより高精度な実海域性能(船速低下、燃費、回転数など)推定システムを構築すると共に、航路の季節変動など外乱影響のトレンドを把握することにより、運航支援、新船型開発などへ貴重なデータを提供することができる。

3.3.2 実海域性能評価

実海域性能評価では、写真1に示すような水槽試験の豊富な船型性能実績データベース、図に示すような数値流体力学(Computational Fluid Dynamics: CFD)技術及び実海域の波浪中における抵抗増加や船体運動の応答予測を行う性能解析技術を活用し、試運転結果等をベースに対象船の実海域性能を精度良く推定、評価している^{3),4)}。

3.3.3 船舶ドクター

船舶ドクターシステムは、船体性能を維持させるための診断機能であり、回転数、燃料消費量(Fuel Oil Consumption: FOC)、馬力、船速の経年変化など、対象船の健康状態(船体性能)を逐次モニタリングしながら将来の変化を予測シミュレーションすることで、コスト予測や最適な修繕計画などの運航管理機能を提供する。

3.3.4 有効性の確認

実海域性能評価機能により、就航後の船速低下について就

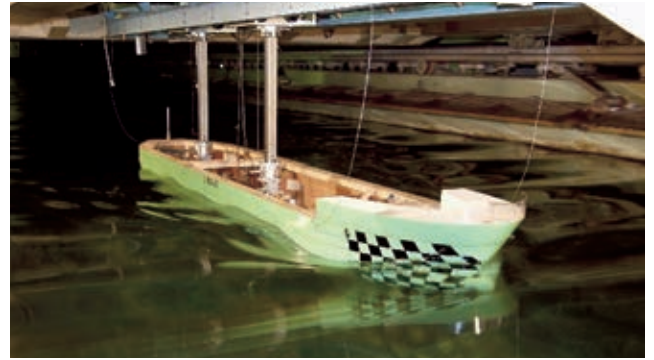


写真1 波浪中水槽試験

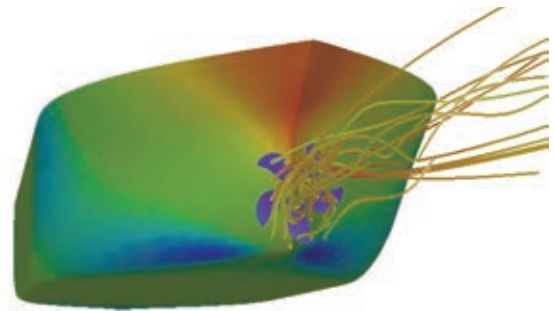


図 CFDによる自航解析

航実績と解析結果との比較を行った。図に船速低下推定結果と就航データとの比較を示す。横軸は海象条件を示すビューフォート風力階級、縦軸は新造時の平水中での船速から各ビューフォート風力階級での船速低下量を示している。船速低下の推定計算は、平水中抵抗、波浪中抵抗増加及び上部構造物による風圧力抵抗を考慮し、波浪中での全抵抗を求め、平水中と同様の推力一致法により所要馬力を計算し、得られた速力と所要馬力の関係から、所定の主機出力に対する船速低下を求めている。図に示したとおり、船速低下推定結果と就航実績は良く一致している。

このように、船舶の実海域性能特性を理論計算と就航実績の両面から総合的に解析評価することで、新造時の平水中性能に対する就航後の実海域性能の増加率として定義される馬力シーマージン(図)や、船速低下などの実海域における船舶性能特性を精度良く把握することができ、本システムの有効性が確認できた。

4. 就航船解析サービスの特徴

4.1 解析精度の向上

本解析サービスでは、本船上のFleet Monitorに1時間ごとに自動収集され、船陸間インターネット回線を経由して、ポータルサイトに転送・蓄積された生の運航データを使用するため、従来の1日1回乗員が記入するアブログ及びヌーンレポートと比較すると、計測データの精度及び計測回数が多さから、経年変化や傾向分析に明らかな解析精度の向上が見られる。更に、当社で開発した、本船の船体運動から波浪情報を自動計算する、波浪計測システムの搭載により運航中の波浪情報を高精度に把握することができる。

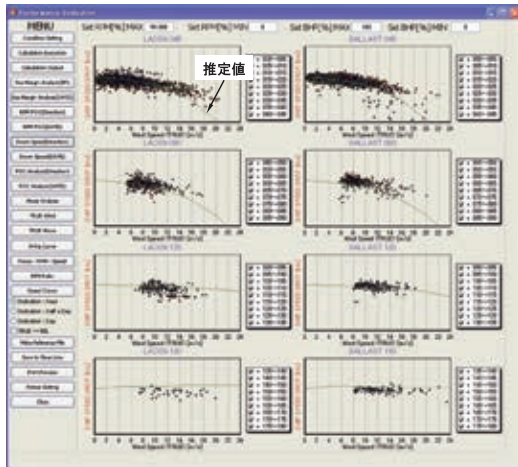


図 9 船速低下推定結果と就航実績の比較

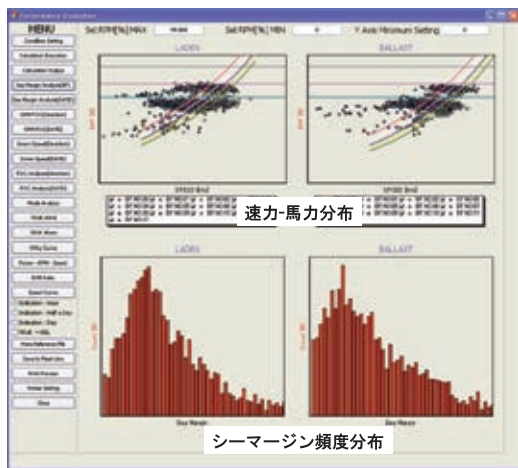


図 10 シーマージン解析

このように各運航データは、船位、船速、積載状態、エンジン出力・回転数など、本船の運転データと同時に、運航時の風、波、海流などの外乱を示すデータも自動収集され、ポータルサイト上の就航データベースに総合的に蓄積されることで、実海域における外乱要素の影響を考慮した高精度の就航船解析が可能である。

4.2 任意の解析タイミング

ポータルサイトの就航データベースに蓄積された時系列データを用いることにより、任意のタイミングでの解析が可能になり、従来見逃していた異常値の早期発見が可能になる。

例えば、修繕ドックでの船底クリーニングの効果、長期停船による船底汚濁の影響、推進性能向上の付加物の取り付けによる効果、障害物への衝突による損傷事故の影響など、イベント発生前後における就航性能の変化が容易に分析可能になり、事後の対応のための適切な情報が取得できる。

4.3 本船上での就航解析の利用

近年、船舶数の増加による船員不足から、経験豊富な船員数の低下が問題となっており、これらへの対策として陸上オフィスから海技技術者による運航支援情報の提供が求められている。

船陸間インターネット回線を通じて、本船から直接就航船

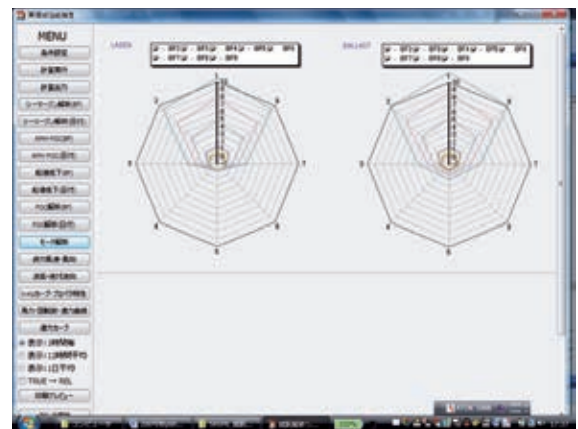


図 11 モード解析情報

解析サービスを利用することで、本船の実海域における運航特性をリアルタイムで船上から把握することができ、本船の実海域における運航性能を示すモード解析情報(図 10 参照)の提供などにより、遭遇海域における適切な運航計画の策定が可能である。

4.4 船体及びディーゼルエンジン主機の統合解析

当社製の主機関(三井 MAN B&W ディーゼルエンジン)の遠隔診断サービスである e-GICS の導入船については、ディーゼルエンジンのメンテナンス履歴情報が e-GICS の就航データベースに蓄積されており、このエンジンデータが船体の就航船解析データベースに自動取り込みされ、船体とエンジンの経年変化情報が一元管理される。

船舶ドクターシステムでは、この船体運動とエンジン運転情報が一元化された就航データベースを使用することで、対象船の経年変化を予測する際に、船体性能とエンジン性能の両面からの統合的な診断サービスが提供できる。

図 11 に主機関の運用状況、図 12 に回転数と主機馬力の経年変化について、実測値とシミュレーションを比較した結果を示す。

4. ウェザールーティンとの連携

就航船解析システムは、Fleet Monitor から入力された運航データと基本船体性能から実海域での性能評価を行い、船体汚損や主機劣化などを含んだ最新の船体運動モデルを更新し、ウェザールーティン(図 13)に出力する。ウェザールーティンは、就航船解析システムから入力された情報、ユーザから入力される目的地、概略航路、航法計算モードなどの情報、また航海予定海域の気象、海象及び海流の実況値と予測値から、計算モードに沿った最適航路を計算し、CO₂削減を考慮した運航や安全運航を支援することが可能である⁵⁾。図 14 に日本近海とインド洋の海流データを示しているが、海流を考慮することにより、より効率的な運航計画を支援できる。

また、積載貨物へのダメージを考慮して、船体動揺値にしきい値を設定した最適航路計算が可能である。

4. 種々の船舶への適用

このサービスは、3.3.1 で説明したように、船型データモデルの生成を汎用化することで、運航データの収集システム

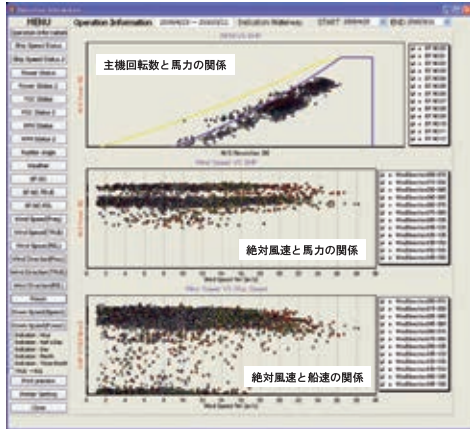


図 11 主機関の運用状況

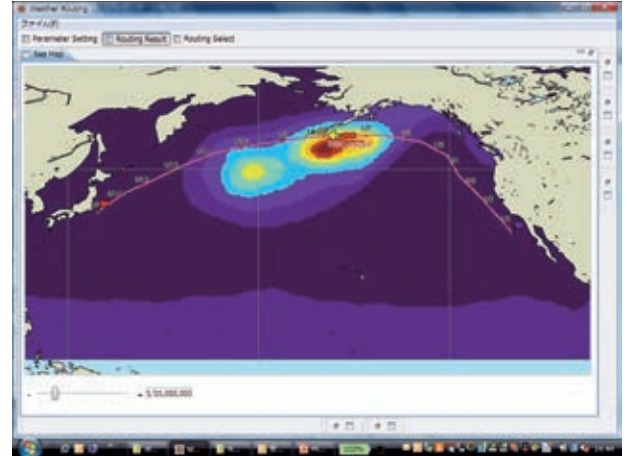


図 13 ウェザールーティンの一例

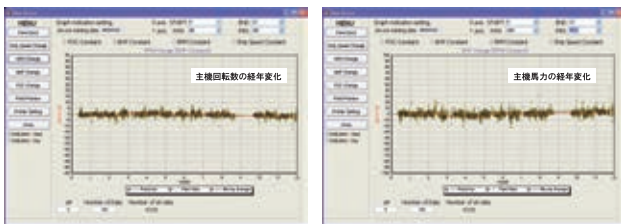
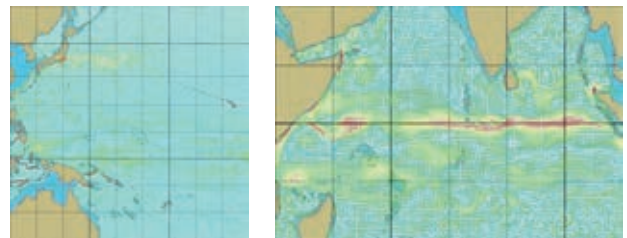


図 12 回転数と主機馬力の経年変化



a)日本近海

b)インド洋

図 14 海流データ

として Fleet Monitor を搭載している船舶であれば、当社建造船のみならず他社建造の就航船を含めたすべての船舶への適用が可能である。したがって、船主が保有する、種々の造船会社で建造した就航船舶に対しても、容易に高精度の就航解析を提供できる。

4. CO₂ 削減運航への適用

現在、燃料油価格の高騰による運航コストの上昇に加え、船舶から排出される温室効果ガスを削減する規制強化の動きがある。

これらに対応するためには、船舶の運航効率を向上させる必要があり、燃費効率の良い船型や主機プラントを開発する「技術的手法」と、減速運航、最適ルートを選定など「運航的手法」が検討されている。

当社では、前者への対応として当社建造船を対象に CO₂ 排出量削減船の開発に取り組んでいる。

一方、後者については、運航船舶を自己モニタリングしつつ、CO₂ 排出削減のために最も効率的な運航方法(減速、海流・気象を考慮した最適な運航ルート選定、適切なメンテナンスなど)をとるように、運航計画、モニタリング、解析、評価及び改善というサイクルを継続して管理することが求められる。この対応として、ウェザールーティン(Fleet Navi)、就航船解析サービス(Fleet Cal)及び Fleet Monitor から構成される最適運航支援サービスの提供を予定しており、今回開発した就航船解析サービスにより、解析、評価の機能を提供する考えである。

まとめ

経済運航の追求や地球温暖化ガスの排出削減の規制への対応など、就航船舶における実海域性能の把握がますます重要

となってきた。これらに対応するため、当社では長年培ってきた船体性能解析ノウハウを、ポータルサイトからの就航船解析サービスとして提供することで、顧客の要望にこたえていく考えである。

参考文献

- 1) 村上．ほか：船体性能解析サービスの開発，海洋関連技術特集，三井造船技報，195(2008-10)
- 2) 内藤：実海域性能評価法の現状について，日本造船学会試験水槽シンポジウム，(2003)，p. 1
- 3) 中村．ほか：波浪中における船速低下及び推進性能について，関西造船協会誌，166(1977)，p. 25
- 4) 柏木．ほか：波浪中推進性能解析システムの開発，関西造船協会論文集，241(2004)，p. 67
- 5) K. Igarashi, et al. : Optimal Ship Operation System using a High-Accuracy Mathematical Model, Proceedings of 3rd PAAMES and AMEC2008, p. 383

共同執筆者：木村 校優

〔問い合わせ先〕

事業開発本部 マリタイム・ソリューション事業室
TEL 03 - 5202 - 3985 山本 敏明

木質系原料からのバイオエタノール製造プロセス

環境・プラント事業本部 木本浩介

1. はじめに

地球温暖化防止に向けた取り組みが世界規模で広がる中、バイオマスエネルギーを活用する動きもさまざまな分野において進んでいる。バイオマスは我が国においても豊富な賦存量がある資源であり、カーボンニュートラルの新しいエネルギーとして認められてきた。バイオマスのエネルギー変換技術には、単なる燃焼による発電や熱利用から、熱化学変換によるガス化や炭化、熱分解による燃料製造、生物化学変換による家畜排泄物のメタン発酵など、バイオマス原料に応じた転換技術が幅広く開発されてきている。既に実用化されたものもあるが、バイオマス利用によるCO₂削減実績はまだ少なく、未利用のバイオマス活用の加速が大きな課題となっている。

このような状況で、バイオマスの転換後の利用に関する戦略の中で「輸送用燃料としての利用」が取り上げられ、特に運輸部門で大きな効果が期待されている利用法として、バイオエタノール燃料が注目されている。バイオエタノールは、とうもろこし、サトウキビ、廃木材などの植物を原料とし、糖化、発酵させることによって得られる。世界的には、既にアメリカをはじめ多くの国々で、自動車用代替燃料として使用されており、図1に示すように2005年以降急激に生産量を伸ばしている。特にブラジル、アメリカでは、農業政策、エネルギーセキュリティの観点からも導入が進んでおり、両国で世界生産量の約9割を占めている。

国内においては、2005年4月に閣議決定された「京都議定書目標達成計画」で、2010年度に輸送用燃料のうちバイオ燃料として50万kの導入が決定されている。また環境省「エコ燃料利用推進会議」や経済産業省「新・国家エネルギー戦略」

でも将来の導入目標が示され、政策上の位置付けがなされたところであり、今後その普及が本格化する見込みである。

一方で、現在、エタノールの原料として使用されているデンプンや糖蜜は食料としての価値があることから、食物価格の高騰を招くことが問題視されている。更に、食物系原料を用いた場合、製品エタノールの保有するエネルギーよりも、エタノールを製造するために消費される化石燃料のエネルギーの方が大きくCO₂削減効果がない、あるいは非常に小さいといった議論もある。このような背景のもと、原料がより豊富で食料と競合しない上、CO₂削減効果も高いとされている、セルロース原料である稲わら等の草本系植物や間伐材などの木質系バイオマスからの有望なエタノール転換技術の開発が望まれている。

2. 木質系バイオマスからのバイオエタノール製造方法

バイオエタノールの製造方法は、基本的には酒造りと同じであり、バイオマスを糖化し、その糖を酵母によりエタノール発酵した後、精製する。しかし、糖質・デンプン系原料とセルロース系原料では、糖化方法が大きく異なる。糖質原料の場合、糖はサトウキビ、テンサイなどをさく汁することで簡単に得ることができる。また、デンプン系原料の場合も、簡単な前処理を施した後に、アミラーゼ等の酵素を極少量添加することで容易に糖化することができる。これに対して、セルロース系原料は、セルロース、ヘミセルロース、リグニンの三つの主要な成分から構成されているため糖化には工夫が必要になる。

通常、セルロース、ヘミセルロースを糖に変換して利用するが、セルロースはグルコースが強固に結合した結晶構造を有し、また、セルロースをリグニンとヘミセルロースが取り囲むように複雑に形成されているため、分解(糖化)することが困難で、セルロース系原料を利用する場合は、糖化工程の前に何らかの処理が必要となる。前処理には物理的(粉碎、すりつぶしなど)、化学的(アルカリ、酸、酸化剤、有機溶剤など)、物理化学的(蒸気爆砕/自己加水分解等)、生物的(酵素、木材腐朽菌など)、あるいはこれらを組み合わせたさまざまな方法が現在開発中である。しかし、糖質・デンプン系原料と比較してエタノール収率が低い上、プラント建設費や運転費が高くなることから、エタノールへの転換コストを下げするために、高効率で廉価なプロセスの開発・確立が、商業化に向けた課題となっている。

3. 三井造船のバイオエタノール技術

当社が開発実証したバイオエタノール製造プロセスの特長は、次のとおりである。

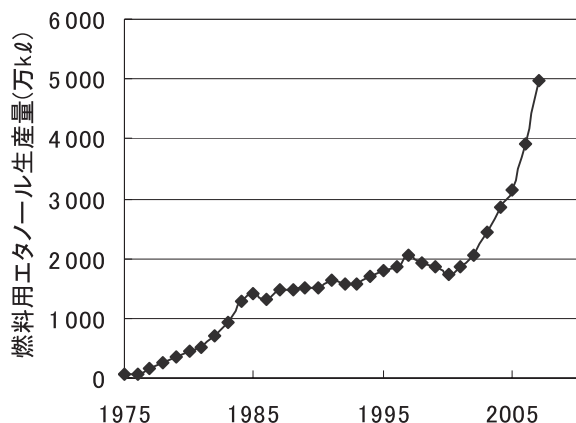


図1 世界の燃料用エタノール生産量の年次推移¹⁾

3.1 希酸糖化(前処理)

本工程の目的は、ヘミセルロースを構成するキシラン、アラビナンなどを糖へ加水分解すると共に、後段で行う酵素によるセルロース糖化のための前処理を行うことにある。数パーセントの希硫酸に浸した原料を、160～200℃で5～15分間蒸気処理するもので、糖化法としては開発歴史が古いことから信頼性が高く、設備費も安価とされている。更に、セルロース酵素糖化の前処理としても、処理後原料の基質の細孔径が大きくなるなど、他の前処理法である物理的前処理や生物的处理と比べて効果が高いとされているため、当社プロセスに採用した。

3.2 酵素糖化

酵素糖化は、希酸法でヘミセルロースを糖化した工程の後に続く、セルロースを酵素によって糖化する工程である。セルロースは、ヘミセルロースと同様に希酸法で糖化することも可能であるが、ヘミセルロースの糖化と比べ、より高温高圧での処理が必要で、酸の添加量も多くなる。このような条件下で処理をすると、生成した単糖が同時に分解を始めるため、収率の低下を引き起こす上、発酵に有害なフルフラール等の阻害物質が副生される。酵素糖化法では、低温(50℃程度)、常圧での処理が可能のため耐圧容器が不要な上、酸等の薬品を使用しないので、容器の材質も耐酸腐食材を使用する必要がない。また、薬品の処理が不要な点から、廃棄物発生面で環境負荷が少ないといったメリットがある。更に、生成糖の過分解が起らないため、発酵に阻害となる物質が生成しない。ただし、結晶構造のセルロースに酵素を働かせるためには前処理が不可欠で、前処理法によっては大量の酵素を必要とし、処理に時間がかかるなど効果的な前処理法の選定が重要となる。

3.3 C 糖発酵

デンプン系原料は、糖化により、従来の酵母でエタノール発酵可能なグルコース(C6糖)となるのに対し、木質系原料は、糖化するとキシロース(C5糖)とマンノース(C6糖)に

なるヘミセルロースを多く含んでいる。しかし、従来の酵母ではC5糖をエタノール発酵できないため、糖化してもエタノール収率が低いという問題があった。この問題を解決するため、当社の発酵工程では遺伝子組換え酵母を利用し、C5糖の発酵を可能とすることでエタノール収率の向上を図った。

4. 実証設備の概要と実証試験結果

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)との共同事業「木質系バイオマスを主原料とするエタノール製造技術実証試験事業」の一環として、平成16年度に、岡山県真庭市に2t/d規模の実証設備を建設し、17年度から20年度までの4年間実証試験を実施した(写真1)²⁾。

4.1 目的と目標

針葉樹端材の木チップを主原料としたバイオエタノール製造技術の実証を目的とし、主な目標は以下の通りである。

- 運転条件の最適化と運転コストの把握
- 装置的技術課題の抽出、大型化に展開できる技術ノウハウの蓄積
- 製品エタノールの品質確認、副生成物の有効利用先の検討

4.2 実証設備の仕様

実証設備の概略プロセスフローを図2に、主要機器の仕様を表1に示す。

本実証設備は、バイオマス供給、希酸糖化、中和、酵素糖化、発酵、酵母培養、蒸留脱水、廃水処理及び各種ユーティリティ供給設備から構成される。設備能力は、原料処理能力2t/dである。1日の運転時間は、発酵・酵素糖化工程では、24時間であるが、その他の工程は、8時間の日中運転で処理可能な設計となっている。

以下の工程に使用されている装置は、攪拌機を組み合わせたタンク、スラリーを扱うポンプ、フィルタープレスなど従来から使用されている一般的な機器から構成されており、新たに開発を要する機器は不要となっている。

4.2.1 希酸糖化工程

原料となる木チップは、まず、供給ホッパーに充填され、スクリーフィーダーで希硫酸を添加後、希酸糖化機に定量供給される。希酸糖化機は、機内に直接蒸気供給することで高温処理するスクリーフィーダータイプであり、そこに供給された原料は所定時間滞留した後、原料の一部(主にヘミセルロース)が溶解し、スラリー状となり減圧タンクに排出される。未分解の固形分中には結晶化度が低下したセルロースとリグニンが存在している。処理後のスラリーは、フィルターで固液分離され、糖液を中和工程へ、固形分は酵素糖化槽へと送られる。

4.2.2 中和工程

希酸糖化工程で得られた糖液は、硫酸を含んだ強酸性であり、このままでは発酵原料として使用できない。後段の発酵工程に適したpHに調整するため石灰を加え、硫酸を中和する。この工程で中和後もかく拌を続けることで、硫酸と石灰の反応を促進し石膏を析出させ、さらに遠心分離機で石膏を系外に排出することで、発酵の阻害となる硫酸由来の硫黄分をプロセス系外へ排出する。



写真1 バイオエタノール製造パイロットプラント

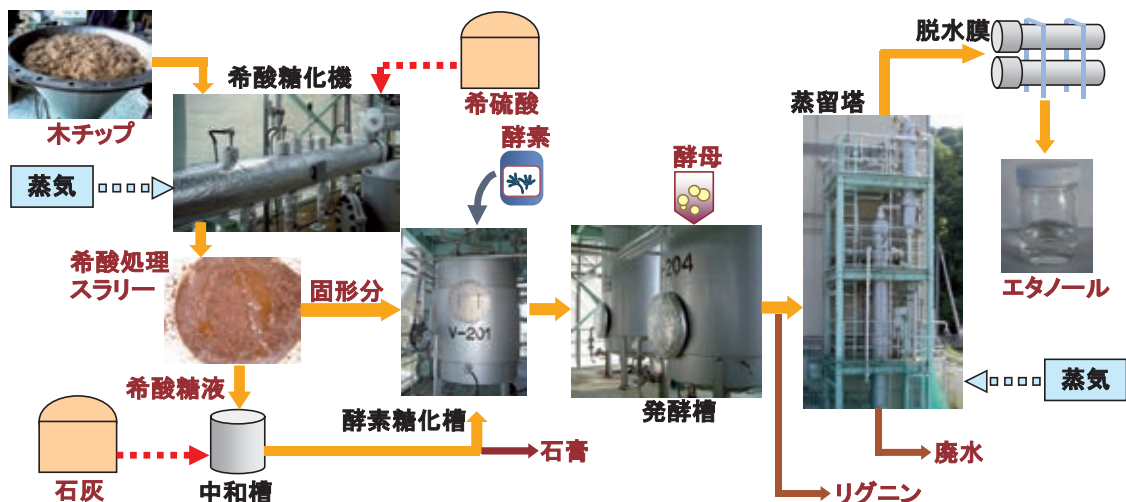


図2 パイロットプラントの概略プロセスフロー

表1 パイロットプラントの主要機器の仕様

設備名称	仕様
希酸糖化機	装置型式 : スクリューコンベア 容積 : 0.26 m ³ 使用温度 : 最大 200
酵素糖化槽	装置型式 : 円筒型タンク(攪拌機付き) 容積 : 2.8 m ³
C6 液回収装置	装置型式 : フィルタープレス ろ過面積 : 15 m ²
発酵槽	装置型式 : 円筒型タンク(攪拌機付き) 容積 : 5.1 m ³ × 2 基
酵母培養槽	装置型式 : 回分式培養槽(攪拌機 通気管付き) 容積 : 0.8 m ³
アルコール濃縮装置	装置型式 : 加圧式蒸留塔 蒸留塔寸法 : 内径 0.3 m, 高さ 6.2 m
アルコール脱水装置	装置型式 : ゼオライト膜 膜面積 : 2.5 m ²



写真2 試験に用いた木チップ

4.2.3 酵素糖化工程

前処理後、酵素糖化槽に集められた固形分は、pH と温度を調整後、酵素を添加し 24 ~ 48 時間程度攪拌することにより、セルロースをグルコースに分解する。

4.2.4 発酵工程

酵素によって分解されたセルロース由来の糖液と希酸糖化によって分解されたヘミセルロース由来の糖液を発酵槽へ投入し、温度と pH を所定の条件に調整後、酵母を添加する。

発酵時間は、24 ~ 48 時間程度である。発酵槽内で酵母増殖を必要とする場合は、酵母添加後、ろ過によって無菌にした空気を発酵槽内に吹き込んで酵母を培養後、発酵を開始する。また、窒素やリン等からなる栄養素を添加する場合もある。

4.2. エタノール蒸留、脱水工程

本工程は、発酵工程だけでは濃度が数 % のエタノールを、燃料として使用可能な濃度まで高める工程である。発酵液は、

予熱器を通して、蒸留塔に供給される。蒸留塔で 85% 程度まで濃縮されたエタノールは、更に水分を除去するために、蒸留塔からの留出蒸気をゼオライト膜脱水装置に供給し、最終的に 99% 以上に無水化する。蒸留塔は 1 塔の連続処理式充填塔で、蒸気を直接吹き込んで加熱する方式である。ゼオライト膜脱水装置では、膜のチューブの外側にエタノール蒸気を供給し、チューブ内を減圧することで、水分のみが膜を通して引き抜かれ脱水される。脱水後の製品エタノールは、岡山県が行う E3 ガソリン走行試験用として使用された。

4.3 木チップのバイオエタノール製造実証試験

本節では、製材屑の木チップのエタノール化試験の結果について紹介する。

4.3.1 原料

原料となる木チップは、近隣製材所から発生するヒノキあるいはスギの新鮮な製材屑を使用した。皮や葉などは含まれておらず、形状は長辺が 10 mm 程度、短辺が 2 ~ 3 mm の針状である。含水率は受け入れ後、実証試験に使用するまで

の数日間は、約 50% のままでほとんど変化はなかった。

木チップの概観を写真 2 に、乾燥原料当たりの組成分析結果の一例を表 2 に示す。セルロース、ヘミセルロースは、糖に分解しエタノールの原料となる。残るリグニンは、ほとんど分解されず副産物として回収する。商業プラントではボイラで燃焼し、熱源として再利用する計画である。本原料のような針葉樹は、リグニンの含有量が草本系のバイオマスと比較して非常に多いことが特徴である。セルロースは、分子式 $(C_6H_{10}O_5)_n$ で表され、加水分解すると式(1)で示されるように、C6 糖であるグルコースを生じる。



セルロースはグルコースのみから構成された多糖類であるが、ヘミセルロースは、キシロース等の C5 糖やマンノース等の C6 糖など、さまざまな糖から構成されている。表 3 は、ホロセルロースを構成する糖の割合を示したものである。ホロセルロースとは、セルロースとヘミセルロースの総称で、これら原料中の糖の含有量が、糖収率を求める際のベースとなる。

4.3.2 希酸糖化

表 4 に希酸糖化試験の処理条件と各糖の回収率の一例を示す。このとき 表中の糖回収率は成分ごとに式(2)で定義する。

$$a = \frac{c \times 100}{b} \dots \dots (2)$$

ここで、

- a : 糖回収率(%)、
- b : 原料中の糖の量(kg)、
- c : 回収された糖の量(kg)

である。

表 4 中に示す CS 値は、酸によるセルロース系の糖化を評価するために一般的に用いられる指標で、処理時間 t (min)、

処理温度 T () と酸濃度 pH の関数として式(3)で表される。

$$CS = \log[r \cdot \exp\{(T - 100)/14.75\}] - pH \dots \dots (3)$$

ここで pH は、材料の水分と材料に添加した硫酸、蒸気量から計算される。CS 値は温度が高く、処理時間が長く、酸濃度が高いほど大きくなり、より厳しい条件で処理することを意味する。

図 3 は、希酸糖化結果を CS 値と各糖の回収率との関係を示したものである。

ヘミセルロース由来の糖となるキシロース、マンノースの回収量は、乾燥原料 100 g あたり 2.1 g ~ 7.5 g の範囲で変化した。これは 13 ~ 53% の糖回収率に相当する。CS 値が 2.82(ケース 2) で最大の糖回収率となり、それ以上厳しい条件で処理すると生成した糖が分解を起こすため、糖回収率が減少する。グルコースの糖回収率は 9 ~ 28% の間で変化した。これは原料 100 g 当たり 4.8 g ~ 14.3 g のグルコース回収量に相当する。キシロース、マンノースを含むヘミセルロースと比較して分解速度が遅いセルロースは、CS 値が 3.01(ケース 5) で最大回収率となった。しかし、更に CS 値が大きくなると、ヘミセルロースと同様に生成糖の過分解による回収率低下を引き起こすことが分かる。全ての回収糖を合わせた総糖回収率は、CS 値が 3.09(ケース 3) で最大の 28% に達し、原料 100 g から 20 g の糖を生成できた。

表 4 希酸糖化試験の処理条件と結果

		ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6
処理条件	温度()	170	170	170	200	200	200
	時間(min)	10	10	10	5	5	10
	硫酸濃度(%)	1.08	2.80	3.40	0.42	1.13	1.93
	CS 値	2.4	2.82	3.09	2.58	3.01	3.47
糖回収率	キシロース(%)	43	54	52	30	22	11
	マンノース(%)	30	43	35	35	27	14
	グルコース(%)	9	16	26	14	28	9

表 2 木チップの組成分析結果

分析項目	含有率(wt%)
セルロース	51.7
ヘミセルロース	12.1
リグニン	33.9
灰分	0.4
アルコール・ベンゼン可溶分	1.9

表 3 ホロセルロースを構成する糖成分

分析項目	含有率(wt%)
グルコース	51.4
ガラクトース	2.1
マンノース	11.6
キシロース	4.6
アラビノース	未検出
フルクトース	未検出

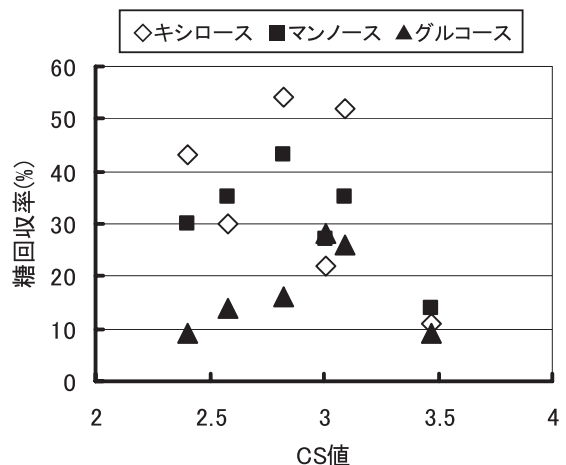


図 3 希酸糖化試験結果

4.3.3 酵素糖化

表 に酵素糖化試験の処理条件と糖回収率を示す。前処理(希酸糖化)による効果を評価するために、酵素糖化試験の条件は全て同じとし、前処理条件を変化させた。前処理条件(ケース1~ケース6)は、4.3.2で示した表4の条件と同じである。このとき、糖回収率は式(4)で定義する。

$$a = \frac{e \times 100}{d \times 1.1} \dots\dots\dots(4)$$

ここで、

d: 原料中のセルロース量(kg),

e: 酵素糖化で回収された糖の量(kg)

である。

また、図4に前処理条件(CS値)と糖回収率との関係を示す。

酵素糖化工程では、前処理条件により糖回収率が4~34%で変化したが、前処理条件CS値が3.01(ケース5)で、最大の糖回収率を得た。これは、乾燥原料100g当たり20gのグルコースを回収したことになる。酵素糖化による糖回収率を高めるためには、セルロース繊維に酵素を接触させなくてはならないことから、より厳しい前処理条件で、ヘミセルロースを除去し、セルロースの結晶化度を下げた基質にすることが望まれる。そのため、CS値が3程度までは、前処理(希酸糖化)条件を厳しくすることで糖回収率が向上する。しかし、CS値が3以上の条件下で前処理を行うと、前処理時に多くのセルロースがヒドロメチルフルフラール(Hydroxymethylfurfural: HMF)などに分解され、酵素糖

表 酵素糖化試験の処理条件と結果

		ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6
処理条件	温度()	50					
	時間(h)	48					
	酵素	セルラーゼ					
	前処理条件(CS値)	2.4	2.82	3.09	2.58	3.01	3.47
糖回収率(%)		12	25	24	29	34	4

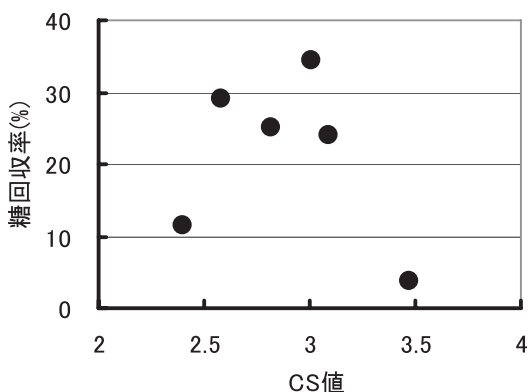


図4 酵素糖化試験結果

化工程前に糖量が減少する。そのため、CS値が3.47のように厳しい条件下で前処理した場合、酵素糖化で回収できた糖量が逆に低下する結果となった。

4.3.4 発酵

発酵に供される希酸糖化液、酵素糖化液中には、硫酸や希酸糖化工程で生成した糖以外の物質が含まれている。これら糖以外の成分の中には発酵に影響を与えるものが含まれている。よって、さまざまな条件で糖化された糖液中の発酵阻害になると予測される物質(酢酸、硫黄、HMF、フルフラール)の濃度を測定し、発酵収率との関係を調べた。その中で、関がみられた硫黄、フルフラールの結果を図に示す。このとき、発酵収率とは式(5)で定義する発酵糖への投入糖ベースの理論収率である。

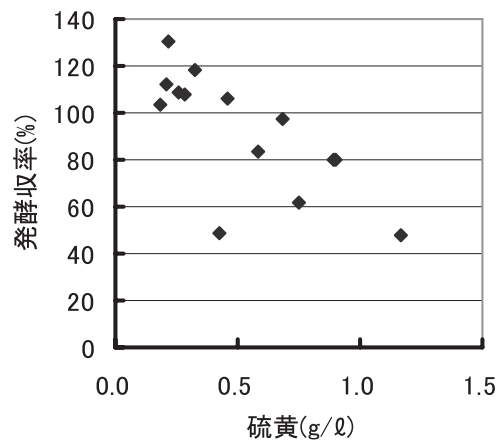
$$f = \frac{h \times 100}{g \times 0.51} \dots\dots\dots(5)$$

ここで、

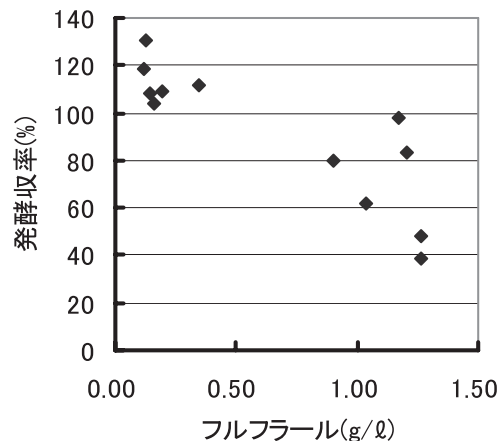
f: 発酵収率(%),

g: 投入糖量(kg),

h: 生成エタノール量(kg)



(a) 硫黄と発酵収率の関係



(b) フルフラールと発酵収率の関係

図 発酵阻害物質濃度と発酵収率の関係

である。

図で発酵収率が100%を超えているものがある理由は、発酵中に酵素によって生成された糖からのアルコール生成量が含まれているためと考えられる。式(5)中の0.51は、糖からエタノールと二酸化炭素を生成する反応式(6)に基づく、糖の分子量に対するエタノールの総分子量の比である。



酢酸、HMFが、その濃度と発酵収率に相関がみられなかったのに対して、硫黄、フルフラールは濃度が高くなるにつれて、発酵収率が下がることが確認された。共に0.5g/以上になると発酵収率が80%以下になり、発酵の阻害となっていることが分かる。

これは、希酸糖化工程で使用される硫酸が中和・脱硫されず、硫黄が酵素糖化工程に送られる希酸糖化後の固形分に含まれることに起因するもので、希酸糖化工程での硫酸添加量を一定以下にすることや、希酸糖化後の固液分離時の固形分洗浄を強化することなどの対策を考える必要がある。

一方、フルフラールは、希酸糖化時に加水分解されたヘミセルロース由来の糖が、分解されて生成するものであることから、希酸処理での条件を調整することで低減可能である。また、希酸糖化液を石灰で中和する際に、発酵に適したpHよりもアルカリ側になるようにするオーバーライミングを行うことで、フルフラールなどの阻害物質を低減できる。

4.3. エタノール収率

バイオマス原料から得られるエタノールの生産量は、ホロセルロースから糖への加水分解式(1)と糖からエタノールへの生成反応式(6)から導くことができる。このとき、理論エタノール収率は式(7)によって求められる。

$$j = k \times 1.1 \times 0.51 \dots\dots\dots(7)$$

ここで、

j : 理論エタノール収率(%),
 k : 原料中のホロセルロースの含有率(%)

である。

式(7)から今回の木チップ原料の理論エタノール収率は35%となり、乾燥木チップ1t当たり最大約350kgのエタノールが生産可能である。これに対して実際に製造されるエタノールは、式(4)、(5)及び固液分離などの装置上の効率を考慮した式(8)となる。

$$m = j \times \frac{a}{100} \times \frac{f}{100} \times \frac{n}{100} \dots\dots\dots(8)$$

ここで、

m : エタノール収率(%),
 n : 装置効率(%)

である。

本実証試験の結果では、最大糖回収率51%、発酵収率100%、装置効率85%であった。したがって、エタノール収率は15.2%となり、乾燥木チップ1tから最大155kg(約200)のエタノールを生産可能であることが実証された。

おわりに

木質系原料に対して酵素を利用した糖化法を適用することにより、エタノールを生成するプロセスを実証試験に基づき確立した。エタノール収率の面では、理論値の43%にとどまっているものの、これは実証の目的である安価な製造コストを目指した結果、現状で比較的高価な酵素の添加量を低く抑えたためである。しかし、近年、高活性の酵素が次々と開発されており、また大規模なオンサイトでの酵素生産によるコスト削減で、酵素価格は低減すると予想されている。今後、価格に応じて酵素の添加量を増やすことでエタノール収率も向上し、エネルギー回収の面からも、より効率的な転換技術となる。これにより、国内に豊富に存在するものの、これまで未利用または、熱源程度の利用にとどまる林産廃棄物(間伐材、製材屑など)から、汎用的で利用しやすい液体燃料を製造することが可能となる。

「バイオマス・ニッポン総合戦略推進会議」では、2030年ごろまでに国産バイオ燃料600万kの生産を図る目標が立てられており、そのためには、稲わら等の草本系原料はもちろん、木質系原料からのエタノール生産は必須である。今後、当社としてもこれら新たなバイオマス市場を視野に入れ、早期にビジネス展開を図る所存である。

最後に、本実証試験は、NEDOの補助金を得て、岡山県、真庭市の協力のもと実施したものであり、ここに深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) F. O. Licht : World Ethanol and Biofuels Report, (2007-5)
- 2) NEDO : バイオマス等未活用エネルギー実証試験事業・同調査事業、木質系バイオマスを主原料とするエタノール製造技術実証試験事業、成果報告書、(2009)

[問い合わせ先]

環境・プラント事業本部 事業開発部
 TEL 03 - 3675 - 6245 木本 浩介

鉄系リチウムイオン二次電池用正極材料の電気自動車への適用

事業開発本部 橋本 聡 司

1. はじめに

近年、温室効果ガスの一つである二酸化炭素(CO₂)の排出量が著しく増加し、それに起因すると言われる地球温暖化が深刻な問題として顕在化し、世界的な対策が急務となっている。その対策の一つとして、エネルギー源の転換、すなわちガソリンや軽油などの化石燃料から電気エネルギーへの転換に大きな注目が集まっており、既に我々の生活に広く行き渡っているリチウムイオン二次電池を中・大型化し、蓄電デバイスとして電気自動車(EV)、プラグインハイブリッド電気自動車(PHEV)、自然エネルギー発電(太陽光、風力、波力など)の電力平準化、産業機器用途などへの展開が図られている。

本報では、三井造船の鉄系正極材料を使用したリチウムイオン二次電池の電気自動車への適用例について述べる。

2. リチウムイオン二次電池と正極材料について

リチウムイオン二次電池は、正極材料にリチウムを含む遷移金属複合酸化物、負極材料に黒鉛系炭素材料、非水系電解液、正極と負極の間に挟むセパレータにより構成され、充電時に正極から負極へ、放電時に負極から正極へリチウムイオンが移動することにより作動する(図1)。これらの構成材料の中で電池特性を決定するのは、従来から主に正極材料であると言われてきた。代表的な正極材料の特性を表1に示す。コバルト酸リチウム(LiCoO₂)の実効容量は150mAh/gであり、エネルギー密度(Wh/kg)が高いため、携帯電話やノートパソコンなどの小型民生用途向けに広く使用されている。しかしパワー密度(W/kg)が比較的低く、希少金属で

あるコバルトを含むため、高価で資源的制約を受けるという欠点がある。マンガン酸リチウム(LiMn₂O₄)は安価で安全性が高いが、実効容量が110mAh/gとコバルト酸リチウムに比べ低く、パワー密度も低い。ニッケル酸リチウム(LiNiO₂)は実効容量が大きく200mAh/gに達するが、過充電時の安全性に問題がある。また、上記のコバルト、マンガン、ニッケルを組み合わせた三元系正極材料では、高価なコバルトの比率を減らしつつ、高い容量が得られるニッケルの比率を増やし、最適な比率にすることで実効容量を増やす試みが進められている。

これらに対し、当社が開発中のリン酸鉄リチウム(LiFePO₄)は実効容量がコバルト酸リチウムと同程度(150mAh/g)であり、オリビン型結晶構造を有するため、熱的・化学的安定性において優れている(写真1及び図2)。充放電に伴う結晶構造の変化も比較的小さいため、優れた充放電サイクル寿命と安全性が期待できる。一方、材料そのものの構造に起因する導電性の低さ、リチウムイオンの拡散性の悪さが欠点であり、そのままでは高いパワー密度を得ることができない¹⁾。

当社では、リン酸鉄リチウムの超微粒子化と炭素析出技術でパワー密度と導電性の低さを克服し、長期充放電サイクル寿命、急速充放電、高安全性を得ている²⁾³⁾。これらの特性から、当社の正極材料は中・大型リチウムイオン二次電池への適用が可能となり、蓄電デバイス用途への展開が期待できる。

3. 電気自動車普及への取り組み

現在、電気自動車普及を進める上での二次電池の課題は、充電1回当たりの走行航続距離が短い、充電時間が長

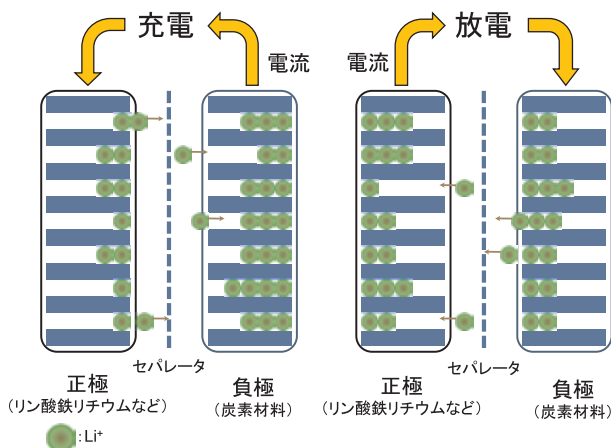


図1 リチウムイオン二次電池の作動原理

表1 代表的な正極材料の特性

項目	当社リン酸鉄 リチウム (LiFePO ₄)	コバルト酸 リチウム (LiCoO ₂)	マンガン酸 リチウム (LiMn ₂ O ₄)	ニッケル酸 リチウム (LiNiO ₂)	三元系 材料 (MNC)
放電電位(V)	3.4	3.7	3.8	3.6	3.7
理論容量(mAh/g)	170	273	148	274	277
実効容量(mAh/g)	150	150	110	200	150
充放電サイクル特性					
急速充放電特性					
高温保存			×		
自己放電					
安全性(過充電)		×		×	

○：極めて優れている
 ○：良好な特性
 ○：やや劣る
 ×：悪い特性・対策が必要



写真1 リン酸鉄リチウム

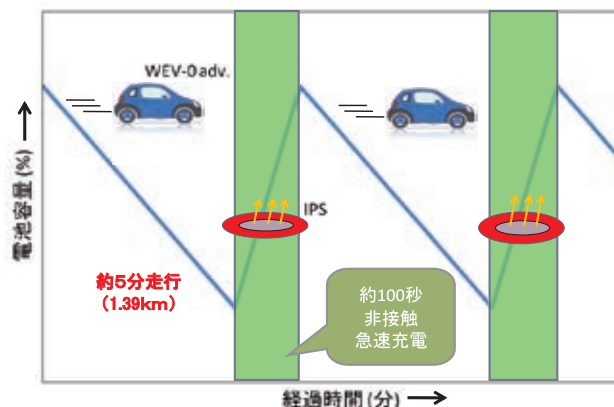


図3 短航続距離・頻繁急速充電の概念図

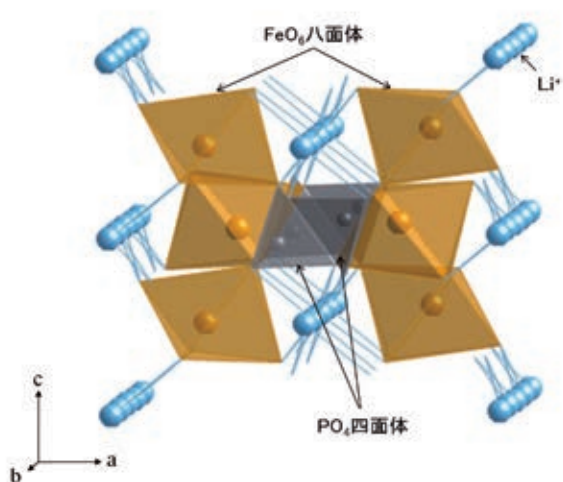


図2 リン酸鉄リチウムの結晶構造

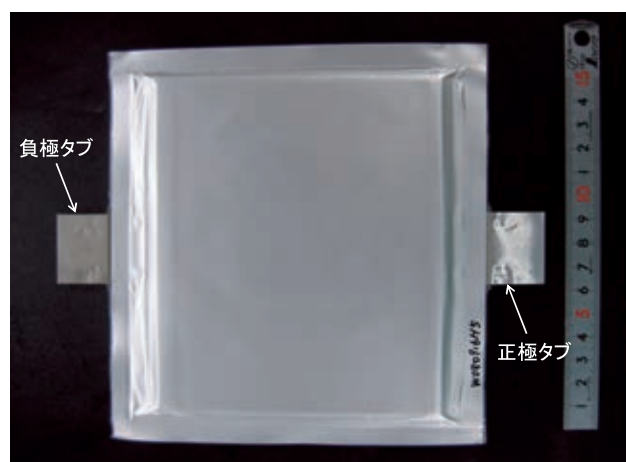


写真2 電池セルの外観

い、コストが高いという点にある。これらを解決し、電気自動車の普及を推進するため、WEV-0 adv. Project*が立ち上がった。主宰である早稲田大学の紙屋 雄史教授は、短航続距離・頻繁急速充電コンセプトの電気自動車を提唱している。頻繁充電することにより、少ない電池搭載量での市街地走行が可能となり、従来に比べて、電池インシャルコストの低減、車重軽減による電費向上、車内空間の拡大が図られる。なお、公表されている電気自動車1台当たりの電池容量は20～24 kWhであり、携帯電話1台当たりの2～3 Whに対し1万倍もの電池容量となる⁴⁾⁵⁾。

また、頻繁充電時にその都度車から降りてプラグイン充電作業を行う手間を省くため、電磁誘導方式の非接触給電システム (Inductive Power Supply System: IPS)を採用した。IPSの概要は4.3に示す。走行及び充電の概念は、図3に示したとおりであり、道路に埋め込んだ送電ポイントの上に停車し、車内からの制御で5分間の走行に必要な充電を、IPSにより100秒で行う。開発対象とした車両は、決まったルートを走行する電

動マイクロバスや、構内運搬用車両などのショートレンジ型のコンセプト車である。

当社は、本プロジェクト向けに長期充放電サイクル寿命、急速充放電、高安全性を特長とするリン酸鉄リチウムを急速充電タイプのリチウムイオン電池用正極材料として提供した。

4. WEV-0 adv. Project の概要

WEV-0 adv. Projectの参画各社は、以下のとおりである。

- 蘆エレクトロニクス株式会社：電池セル製造
- 蘆株式会社電源設計：電池モジュール製造
- 蘆昭和飛行機工業株式会社：IPS製造
- 蘆当社：リン酸鉄リチウム正極材料製造
- 蘆早稲田大学：実証試験及び評価

4.1 電池セル

電気自動車の動力源には、積層ラミネート型リチウムイオン電池をモジュール化した電源を使用した。電池の正極電極は、リン酸鉄リチウムを溶剤中に分散してアルミ箔の両面に塗布・乾燥後、プレスして電極密度を上げて作製する。負極電極も正極電極と同様なプロセスを用いており、銅箔の両面に炭素材料を塗布・乾燥後、プレスして電極密度を上げて作製する。電極を所定の形状に裁断した後、セパレータを介し

* WEV-0 adv. Project (Waseda advanced Electric Vehicle-0 advanced Project): 早稲田大学電動車両研究所の研究テーマである環境調和型電動車両に関する包括的研究の中の一つである。

表2 電池セルの仕様

電池セルタイプ	積層ラミネートセル
正極材料	リン酸鉄リチウム
電池容量	6.3 Ah
作動電圧	2.0 ~ 4.0 V
公称電圧	3.2 V
エネルギー密度	85 Wh/kg
電池寸法	155 ^W × 160 ^D × 6 ^t mm

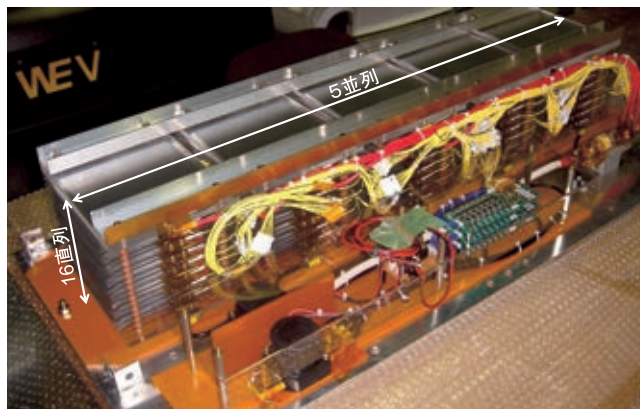


写真3 電池モジュールの外観

表3 電池モジュールの仕様

モジュール構成	16直列 × 5並列
電池容量	31 Ah
電池電圧	51 V
保護回路作動電圧 (各電池セル)	上限 4.25 V 下限 1.80 V

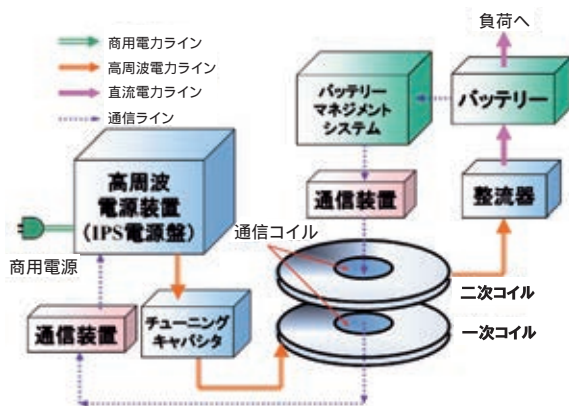
て正極電極と負極電極を交互に積層し、電解液を注入してアルミラミネートフィルムで密封する。作製した電池セルの外観を写真2に、仕様を表2に示す。

4.2 電池モジュール

電池モジュールは4.1の電池セルを直列に16個、並列に5組接続し、上限電圧を超えた充電(過充電)と下限電圧を下回る放電(過放電)を防止する保護回路を組み込んだ。リチウムイオン二次電池では、過充電状態の場合には電解液の分解によって電池内圧が上昇し電池破損に至るおそれがある。一方、過放電状態の場合には金属リチウムの電析や集電体(銅箔)の溶解・析出による内部短絡発生のおそれがある。このため、電池モジュールの安全性を保つためには、電圧監視は極めて重要である。電池モジュールの外観を写真3、主な仕様を表3に示す。

4.3 非接触給電システム(IPS)

IPSとは、コネクタやパンタグラフなどの物理的な接触を介さずに車などの移動体に充電するシステムである。現在、電磁誘導方式(非放射型)、磁界共鳴方式(非放射型)、マイクロ波方式(放射型)などの方式で開発が進められているが、昭和飛行機工業株式会社では電磁誘導方式による



出典: 昭和飛行機工業株式会社

図4 非接触給電システムの原理



写真4 非接触給電(6 kW)二次コイル



(a) (b)

写真 短航続距離・頻繁急速充電小型電気自動車

IPSの開発を進めている。この方式の原理は、一次コイルと二次コイルを対置させ、その間(エアギャップ)を介して磁気結合させることにより、10 kHz ~ 30 kHzの高周波電流によって一次コイルに電磁エネルギーを発生させ、それを二次コイルで電気エネルギーに変換することにより電力の伝達を行うものである(図4)。6 kWの非接触給電二次コイルを製作し、電気自動車に搭載した(写真4)。

4.4 短航続距離・頻繁急速充電対応の電気自動車

短航続距離・頻繁急速充電対応の電気自動車(以下、WEV-0 adv.)として、市街地走行も想定し、小回りの利くスズキ株式会社製のTwinをベースとした改造車をプロトタイプとした。開発した車の外観を写真に、諸元を表4に、電池モジュール等の車内配置を図に示す。

表4 主要諸元

車体	車体ベース	SUZUKI・Twin
	全長×全幅×全高	2.73 × 1.47 × 1.45 m
	乗車定員	2名
電動機	最大出力	4.3 kW
	最大トルク	65.3 Nm
	最大回転数	3 350 rpm
	インバータ電圧	48 V
電池	種類	リチウムイオン二次電池
	総電圧	51 V
	総電力量	1.59 kWh
非接触充電システム	短径×長径×厚さ	500 × 500 × 31 mm
	最大出力	6.25 kW
	最大効率	77%
	エアギャップ	31 mm

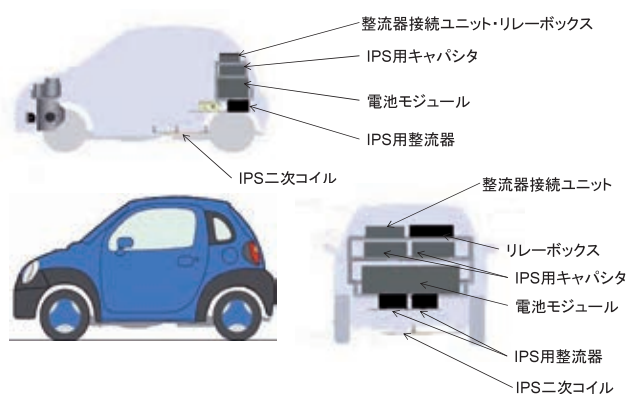


図 車内配置図

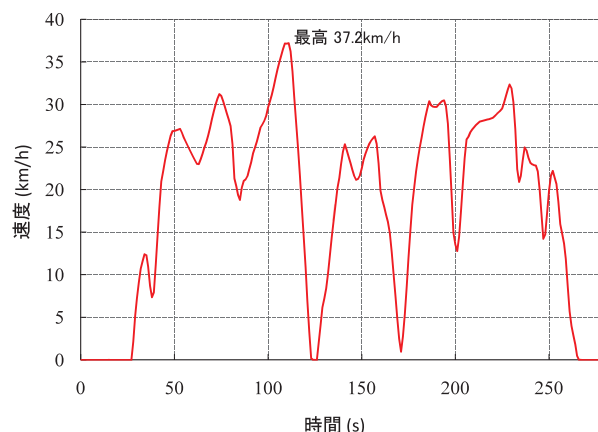


図 走行モードの例

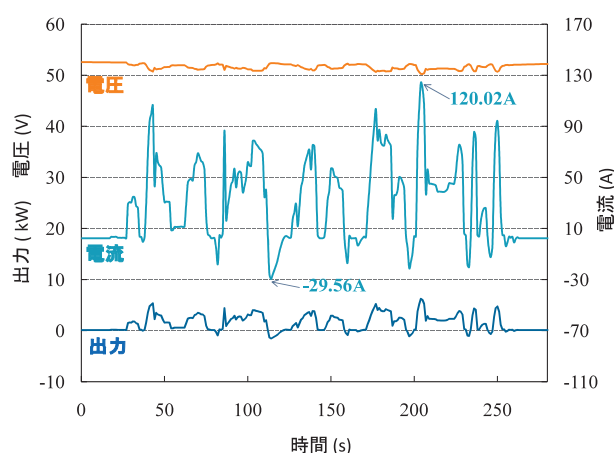


図 走行時の電池モジュール電流、電圧及び出力特性

実証試験および評価

1 走行試験

WEV-0 adv. の電気自動車としてのポテンシャルを確認するため、昭和飛行機工業株式会社構内の走行ルートで走行試験を実施した。試験における走行モード(走行距離 1.39 km)の一例を図に示す。モード走行時の平均時速は 21.4 km/h、最高速度は 37.2 km/h である。このときの走行中の電流、電圧及び出力特性を図に示す。走行時の最大電流は 120.02 A (約 4C レート**), 回生時の電流は -29.56 A (約 1C レート)であることを確認した。

2 連続走行および非接触急速充電試験

連続モード走行と IPS による非接触急速充電を組み合わせた試験を行った。WEV-0 adv. の電池容量(Stage of Charge: SOC)を 75% に調整した状態から 40% となるまで連続走行した後、1C レート非接触充電で再び電池 SOC を 75% とした。その後、この行程に沿って 2C, 3C, 4C レートの非接触充電を順次行い、各充電レートの電圧特性を確認した。図より、

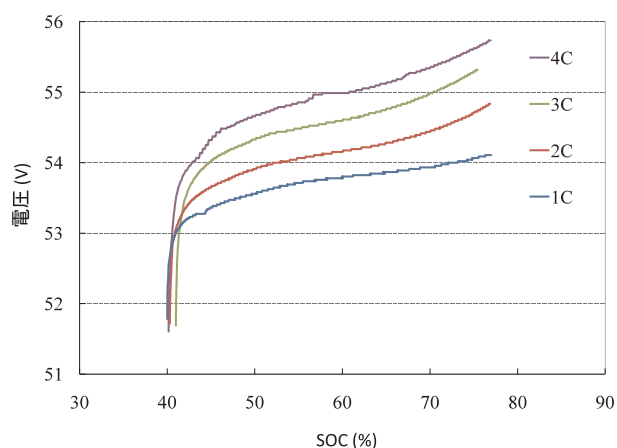


図 各レートにおける非接触充電の電圧特性(SOC40% ~ 75%)

SOC40% ~ 75% の範囲では、4C レート充電においても内部抵抗上昇による急激な電圧上昇は見られず、上限電圧(64 V)に対し、非接触急速充電が可能であることを確認した。

次に、SOC 範囲を広げた試験、すなわち SOC を 90% に調整した状態から 10% となるまで連続走行した後、上限電圧(64 V)まで IPS による 4C レート非接触急速充電を行った。電圧特性を図に、SOC 推移を図 10 に示す。図に示すよ

** C: 電池の容量を表す記号で、全容量を 1 時間で充(放)電させる電流量が 1C レートである。nC レートでは、その電流量が n 倍の充(放)電となる。

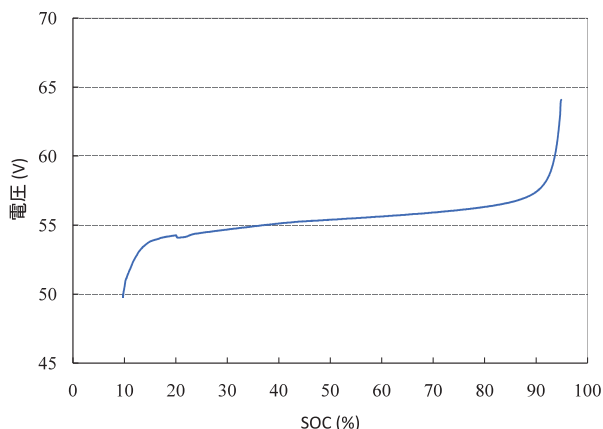


図 9 4C レートにおける非接触充電の電圧特性 (SOC 10% 95%)

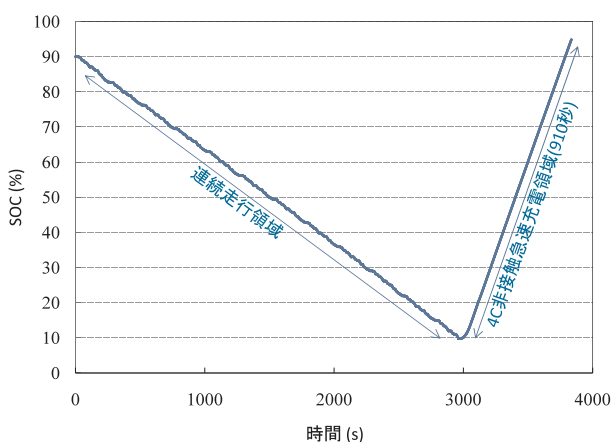


図 10 走行試験における SOC 推移 (SOC 90% 10% 95%)

うに、SOC 範囲 10% ~ 95% の 4C レート急速充電が十分可能であることを確認した。また、4C 非接触急速充電領域は比例直線形を示し、充電に要した時間は 910 秒 (15 分 10 秒) であった (図 10)。これより、4C レート (約 120 A) でも安定的に充電されることを確認した。

また、連続走行領域 (SOC 90% ~ 10%) における航続距離は 16.18 km、電力消費量は 1.24 kWh、電費は 13.06 km/kWh となった。以上の結果より、1 モード走行 (走行距離 1.39 km) 当たりの電力消費量は平均 106 Wh、4C レート非接触急速充電の 100 秒当たりの電力量は約 136 Wh と算出され、図 3 に示した WEV-0 adv. の設計概念が満足されていることを確認した。

今後は、走行試験を継続し、電池劣化の検証を行う予定である。また、電池モジュールの軽量化による電費向上と電池モジュール容積の削減についても検討を行う予定である。

今後の展開

実用性が確認された電池モジュールと非接触急速充電の組合せによるシステムは、電気自動車にとどまらず、他の移動体、コードレス機器、産業機械などへの展開が可能であると思われる。当社では、写真 に示すコンテナ用ヤードクレーン (トランステーナ)、コンテナ搬送台車 (AGV) などの港湾設備の電動駆動化を検証する予定である。



写真 トランステーナの外觀

また、経済産業省が公募した「低炭素社会に向けた技術発掘・社会システム実証モデル事業」の中で、閉鎖系水域で船舶のディーゼルエンジンがもたらす騒音、振動、二酸化炭素排出を電力駆動化で大幅に削減することを目標とした「電池駆動船を用いた若狭三方五湖における実証モデル事業」にリチウムイオン二次電池用リン酸鉄リチウム正極材料を提供しており、環境負荷の低減の面でも有効性を実証していきたい。

おわりに

当社リン酸鉄リチウムを使用した 31 Ah-51 V のリチウムイオン二次電池モジュールは、非接触充電システムと組み合わせた WEV-0 adv. の走行試験において、安定した急速充電走行を実証した。今後は、走行データを蓄積し、電池モジュールの耐久性を検証する予定である。

最後にデータの提供と掲載許可を頂いた早稲田大学 紙屋雄史教授、エレクセル株式会社、昭和飛行機工業株式会社、株式会社電源設計の関係者に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 小川：EV はチャンスかリスクか、日経 Automotive Technology, (2009-11), p. 44
- 2) 八田：ほか：リチウムイオン電池用リン酸鉄リチウム正極材料の開発、三井造船技報, 188(2006-6), p. 21
- 3) 阿部：ほか：次世代 LIB 用リン酸鉄リチウム正極材料の製造プロセスの開発、三井造船技報, 192(2007-11), p. 13
- 4) 紙屋：ほか：電動車両用非接触急速充電システム、電気化学誌, 128, (2008), p. 804
- 5) 狩集：ほか：特集 Li イオン電池新時代へ、日経エレクトロニクス, (2010-1), p. 34

〔問い合わせ先〕

事業開発本部 LIB 事業室

TEL 03 - 5202 - 3984 阿部 一雄

炭素繊維プレート緊張材を用いた構造物の補強工法(アウトプレート工法)

立 神 久 雄* 長 谷 川 剛* 栗 田 幸 治* 井 上 浩 男**

Strengthening and Application of Prestressing CFRP Plate for Concrete Structure

Hisao TATEGAMI, Tsuyoshi HASEGAWA, Kouji KURITA, Hiroo INOUE

CFRP plate is an excellent corrosion resistance material of high-strength and lightweight. Recently, this material is applied not only as a tensile resistance material but is also as a prestressing material, which is a newly developed technique for strengthening concrete structure. In this technique, the amount of prestress in one plate is small, but it is a suitable prestressing technique for strengthening, due to its simplicity in arrangement requiring small space in the anchorage zone. The aims of this report are to confirm the safety of this method and to examine the strengthening effect.

炭素繊維プレートは、高強度で軽量な優れた耐腐食抵抗性を有する材料である。近年、この材料を引張抵抗材として接着するだけでなく、緊張材として用いる新たなプレストレス導入工法が開発され、コンクリート構造物の補強工法として適用されている。この工法は、1本当たりの導入プレストレス量は小さいが、既設の構造物に簡易に配置でき、定着部に対する負荷も小さいことから、補強に適したプレストレス導入工法である。本報では、この補強工法の概要を示すとともに、安全性や補強効果の確認のために行った実験概要及び実験結果を示す。また、適用の現状についても報告する。

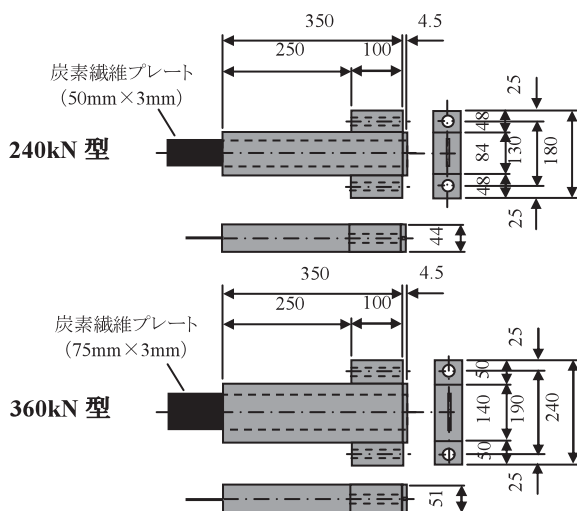


図1 鋼製定着体(緊張材の端部)の構造
Steel Anchorage(End of Tension Plate)



写真1 炭素繊維プレート緊張材
CFRP Plate

* ドーピー建設工業(株)

** 技術本部技術総括部

1. はじめに

橋梁における耐力力の向上のための曲げ補強方法は、コンクリート部材の引張縁に鋼板や炭素繊維連続シート等の補強材を配置するか、外ケーブルによるプレストレスで補強している例が多い。どちらの方法も構造物の損傷状態に対して必要な補強量を求め、経済性に配慮した上で構造物の設計条件と合致した方を選択している¹⁾。

一方、純粋な曲げ補強の性能のみに着目すると、プレストレスを導入する補強方法の方が、死荷重状態から耐力力及び変形を改善でき、優れているのではないかと考えられる。しかしながら、本来、構造物の補強にプレストレスが必要な場合においても、比較的外ケーブルの容量が大きいいため、定着部に高い耐力が要求され、全体の装置も大型となることから、簡易な引張補強材のみで補強することのできる工法開発が必要と思われる。

このような状況の中で、コンクリート構造物の補強用のために、耐腐食抵抗性の高い炭素繊維プレートを緊張材として用いるプレストレス導入工法が開発された。本工法は、1本当たりのプレストレス量は小さいが、定着部に対する負荷が小さいため、既設橋の補強に適したプレストレス導入工法である。

この緊張材は、写真1に示すように一本ごとに約1.5mの直径で巻かれた状態で梱包され、現場に搬入される。緊張材は工場生産時に、炭素繊維プレートの両端に図1に示す鋼製定着体を設け、定着用膨張材料を用いて炭素繊維プレートと一体化している。現在、炭素繊維プレート緊張材は、引張耐力別に2種類ある。

本報では、本工法の現状を踏まえ、炭素繊維プレート緊張材の安全性や補強効果を確認するために実施した試験及び適用事例について報告する。

2. 炭素繊維プレート緊張システムの開発

2.1 緊張材の材料特性

表1に引張耐力が異なる2種類の炭素繊維プレート緊張材の材料特性値を示す。

炭素繊維プレートは、工場で炭素繊維とエポキシ樹脂を、ブルトレーション法による引抜き成形で製造される。炭素繊維プレート緊張材の有効プレストレス量は、PC鋼材と同様に引張耐力の60%としている。

2.2 緊張システム

本工法の緊張システムの概要を図2に示す。定着装置は、緊張材の定着体、固定プレート、固定アンカー及び定着用のボルト・ナットで構成され、コンクリート構造物では、樹脂製の固定アンカーを用いて鋼製の固定プレートを取り付け、緊張材の中間には、約3mの間隔で中間定着体を設けることにより、既設の構造物と一体化を図っている。接着樹脂と中間定着体を併用することにより、炭素繊維プレート緊張材のはく離が防止あるいは遅延される。

写真2に240kN型用の緊張ジャッキを示す。緊張材に直接プレストレスを導入するつめ部と電動ポンプからの圧力を伝達するシリンダー部を偏心させた構造を採用した。この緊張ジャッキの開発により、緊張材をコンクリート面より30mm程度離れた位置での緊張が可能となった。表2に緊張ジャッキの仕様を示す。

表1 炭素繊維プレート緊張材の設計用材料特性値
Design Value of CFRP Plate

緊張材の呼称	240kN型	360kN型
補強繊維	高強度カーボン・ガラス繊維	高強度カーボン・ガラス繊維
幅 (mm)	50.0	75.0
厚さ (mm)	3.0	3.0
公称断面積 (mm ²)	150	225
引張耐力 (kN)	240	360
引張弾性率 (MPa)	1.20 × 10 ⁵	1.20 × 10 ⁵
純リラクセーション	6.0%	

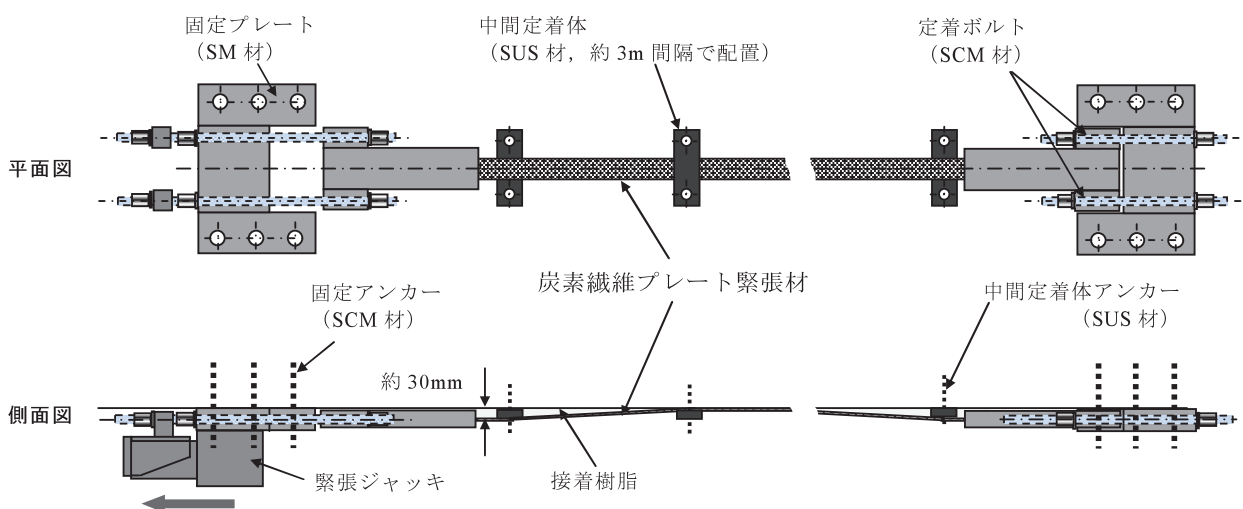


図2 緊張システムの概要(炭素繊維プレートを偏向させた場合)
Summary of the CFRP Plate(When the Plate is biased.)

2.3 補強概念

アウトプレート工法による補強概念を図3に示す。本工法は、炭素繊維プレートにプレストレスを導入してコンクリート部材に定着し、接着樹脂で接着することで、主に曲げ耐力の向上を図る補強工法である。また、定着部に対する荷荷が小さいため、定着に伴う支圧、割裂、背面引張応力に対する補強が定着部に不要である。

本工法では、既往のプレストレス導入工法と同様にプレストレス力により、死荷重による応力や変形を改善することができ、ひび割れを積極的に制御することが可能である。また、連続桁構造の中間支点では、プレストレスの不静定力を利用することにより、上面からの補強に依存することなく、下面からの補強で補強効果を得ることができる。

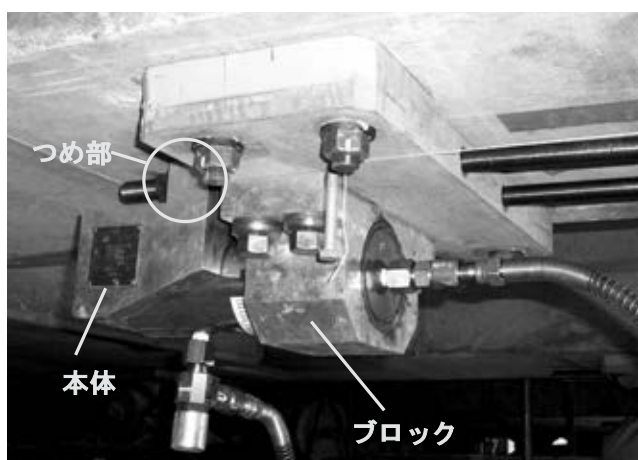


写真2 緊張ジャッキ(240kN型用)
Tension Jack(for 240kN type)

表2 緊張ジャッキの仕様
Specification of the Tension Jack

緊張材の呼称		240 kN 型	360kN 型
緊張能力	(kN)	250	400
最大ストローク	(mm)	50	65
圧力	(MPa)	65.0	62.9
受圧面積	(cm ²)	38.48	63.62
本体重量	(kg)	約 20.0	約 34.0
ブロック重量	(kg)	約 6.1	約 11.0

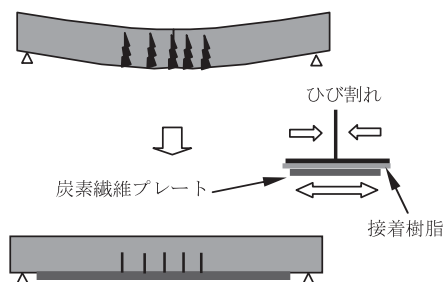


図3 補強作用のメカニズム
Mechanism of Reinforcement

2.4 適用の現状

本工法の適用実績は、開発以来、コンクリート橋の補強に適用された実績が29件、鋼橋の補強に適用された実績が1件である。当初、本工法による補強対象は、既設の鉄筋コンクリート(Reinforced Concrete: RC)構造物に適切なプレストレスを与えて補強するRC橋と考えていた。写真3に示すような経年劣化したRC橋に対して本工法を適用した結果、定着部への荷荷が小さく、高い補強効果を発揮している。

しかし、現状では、プレストレス導入材若しくはプレストレスコンクリート(Prestressed Concrete: PC)橋の補強としても多く適用されている。特に、本工法は1本当当たりの導入可能なプレストレス量が小さいことから、写真4に示す主桁1本当当たりの補強量が比較的小さい多主桁構造のPC橋への採用が増えている。

以下に、適用例を示す。

3. 適用事例

3.1 ポストテンション方式PC単純T桁橋

3.1.1 橋梁概要

補強を適用した橋梁は平和橋と呼ばれ、1級河川菩提仙川



写真3 RC中空床版橋への適用
Application to RC Hollow Slab Bridge



写真4 プレテンションPCI桁橋への適用
Application to Pretension I Girder Bridge

に架かる全長約 30 m のポストテンション方式 PC 単純 T 桁橋(1980 年 3 月竣工)である。本橋は大型車の交通量が増加しており、交通環境は竣工当時と大きく変化し、大きな経年劣化が現われていた。

そこで、建設当時の活荷重(TL - 20)を B 活荷重へ対応させるため、アウトプレート工法を採用し、主桁補強工事を行った。補強完成状況を写真 に示す。

3.1.2 施工概要

使用した炭素繊維プレート緊張材(以下 単にアウトプレートと呼ぶ)は、240kN 型である。

補強工事の施工フローを図 4 に示す。

(1)鉄筋探査工及び定着体アンカー削孔工

定着体固定プレート用のアンカーボルト(M22)を 6 本設置するため、RC レーダーにより鉄筋及び主ケーブルの探査を行った。

(2)アンカーボルト設置工

アンカーボルトは、樹脂アンカーを用いて設置した。アンカーボルト設置後に定着体固定プレートを取り付けるため、

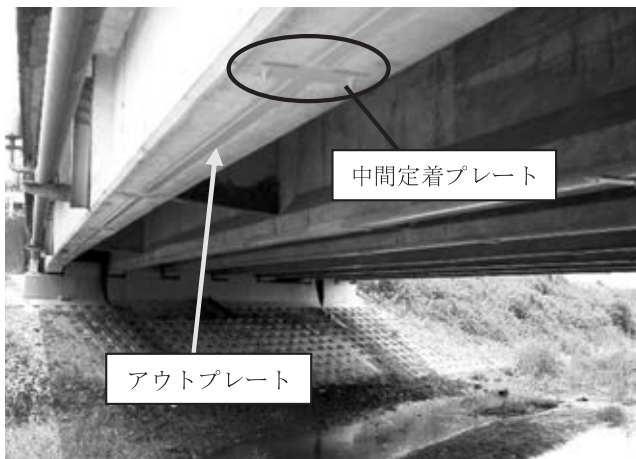


写真 補強完成状況
Completion of Reinforcement

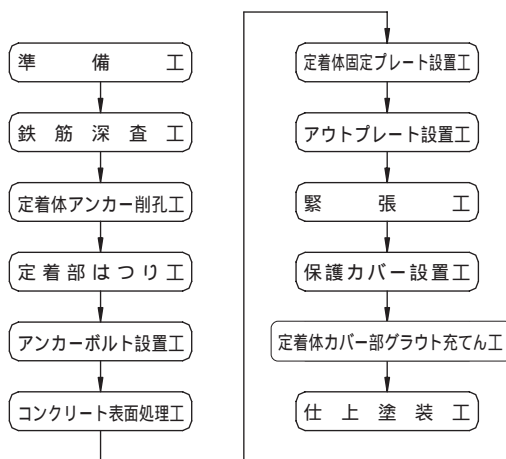


図 4 施工フロー
Flow of Construction

アンカーボルトの設置には精度が要求された。そのため、厚さ 4.5 mm の鋼板でテンプレートを製作して施工精度の向上を図った。設置状況を写真 に示す。

(3)コンクリート表面処理工

緊張作業時にアウトプレートと躯体の摩擦による損傷防止とエポキシ樹脂接着剤の接着力向上を図るために、コンクリートサンダーによる表面処理を行った。表面処理後には、エポキシ樹脂プライマーを塗布した。

(4)定着体固定プレート設置工

定着体固定プレートと躯体接合面には不陸調整のため、エポキシ樹脂シール材を充てんした。また、定着体固定プレートのアンカーボルト用孔とアンカーボルトとの隙間にも、緊張時に定着体固定プレートがずれを起こさないように、エポキシ樹脂シール材を充てんした。

(5)アウトプレート設置工

アウトプレートは、梱包した状態で足場上の木製ターンテーブルにセットし、ターンテーブルを回転させながら引き出し、折れやねじれが起きないように細心の注意を払いながら定着体固定プレートにセットし設置した。また、アウトプレートと足場板との擦れによる損傷を与えないように、足場板上に養生シートを全面に敷いて作業を行った。設置状況を写真 に示す。

(6)緊張工

アウトプレートは、油圧式ポンプと 240 kN 型つめ付きジャッキを使用して両引きで緊張させた。緊張管理の方法は、伸び・荷重計示度管理とした。管理限界は、伸びと荷重計示度の規定値に対して 10% とし、アウトプレート 1 本につき 134 kN の緊張力を導入した。

(7)定着体保護カバー設置工

ガラス繊維強化プラスチック製の定着体保護カバーをリベットアンカー(4.8 ステンレス製)を用いて取り付けた。また、定着部を防錆する目的で、グラウトを定着体保護カバー内に充てんした。保護カバー設置状況を写真 に示す。

(8)仕上塗装工

アウトプレート及び定着体保護カバーは、景観性の確保及び変色防止のため、ウレタン樹脂塗装を行った。



写真 アンカーボルト設置状況
Setting of Anchor Bolt



写真 アウトプレート設置状況
Setting of CFRP Plate



写真 補強の完成
Completion of Reinforcement



写真 保護カバー設置状況
Setting of Protective Cover

3.2 3径間連続 RC 箱桁橋

3.2.1 橋梁概要

補強を行なった橋梁は調布高架橋と呼ばれ、供用後 28 年間に経過した全長約 64 m の 3 径間連続 2 室 RC 箱桁橋である。本橋では、近年の車両大型化に対応するため、B 活荷重補強の実施を計画していた。しかし、事前の調査により、下床版に橋軸直角方向のひび割れや漏水が、多数発生していることが分った。さらに、交通車両による主桁のたわみも大きく、剛性低下が明らかであったため、耐荷力を向上するとともに、ひび割れを抑制して主桁剛性を改善する必要があった。

このため、RC 橋で初めてアウトプレート工法が採用されることになった。本工事では、写真に示すように、炭素繊維プレート緊張材(240kN 型)を各径間の主桁下面に 2 本ずつ 3 箇所配置した。

3.2.2 設計概要

プレストレスの補強量は、既往の死荷重と B 活荷重に、プレストレスによる軸力、偏心モーメント及び不静定力を加算した断面力に対して、通常の RC 部材と同様な設計手法で

算出した。ただし、中央径間では、他径間と同本数のアウトプレートでは、曲げ耐力が不足し、道路上に対するコンクリートのはく落対策も講じる必要があることから、炭素繊維シート接着工法を併用した。

3.2.3 載荷および振動実験概要概要

以降、本橋の損傷評価と補強効果を確認するために、補橋前後で行われた実橋載荷及び振動実験について紹介する。

本橋の載荷及び振動実験は、既知重量 45 t のラフタークレーンを使用し、所定の位置への載荷及び下り線を 50 km/h で走行させることにより行い、静的及び振動性状の計測により補強効果を評価した。

3.2.4 振動解析

本橋の載荷及び振動実験に先立ち、有限要素法(Finite Element Method: FEM)による 3 次元 FEM モデル及び 3 次元梁理論モデルによる固有値解析を行った。ここで、健全時の剛性評価は建設図書を基に主桁寸法及び曲げ剛性を決定した。ひび割れ調査の結果、ひび割れ深さは 100 mm ~ 150 mm 程度であったことから、下床版側コンクリートの 100 mm 及び 150 mm を無視した断面が損傷時の剛性に寄与するものとした。

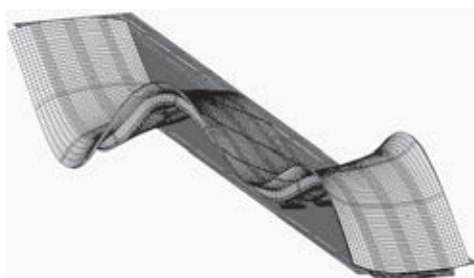
3.2. 損傷評価と補強効果

橋梁上部工の損傷の有無を診断する手法として、構造物の振動特性を評価する手法がある。これは、点検時などに実橋振動実験で確認した振動特性を、構造物の完成時など健全であると評価できる状態で、常時微動観測若しくは起振機試験や車両走行試験を行う実橋振動実験で確認しておいた振動特性と比較して、全体剛性の変化や損傷位置の推定を行うものである。一般に、損傷が進行して主桁の剛性低下があれば、固有振動数の低下、固有振動モードの変化、減衰定数の増加などの変化^{2),3)}が現れる。

アウトプレート工法による補強前後の実橋振動実験からは、曲げ 1 次モードの固有振動が特定でき、補強前の固有振動は 4.4 Hz であり、補強後の固有振動は 5.2 Hz となり、主桁の補強効果が確認された。図に 3 次元 FEM 解析により求めたモード図を示す。



(a) 曲げ1次モード : 5.39 Hz : 解析値
5.2 Hz : 実験値



(b) 曲げ2次モード : 7.00 Hz : 解析値

図 3次元 FEM 解析結果
Result of 3 Dimension FEM Analysis

健全時を想定した FEM 解析値とアウトプレート工法による補強後の実験値の固有振動数を比較すると両者はほぼ一致しており、補強後は健全時程度の主桁剛性が確保できたと考えられる。

3.3 鋼部材への適用

アウトプレート工法の特徴は、1本あたりの補強容量は小さいが、緊張材を補強面にほぼ接した状態で配置でき、定着部に特別な補強が必要ないため、鋼構造物の補強への適用も期待されている。240kN型の炭素繊維プレート緊張材が最近鋼橋補強に適用されており、この施工状況を写真10に示す。

4. おわりに

本工法は、1本あたりの補強容量は小さいが、比較的簡易な装置で実施できるプレストレス導入工法である。最近、補強容量が小さい点を補うため、複数の緊張材を重ねて配置する方法も試みており、適用範囲が広がりつつある。しかしながら、既設構造物には様々な仕様があるため、本工法は、安全性を確保した上で、その仕様と合致するような施工方法を検討することとしている。

本工法は、日鉄コンポジット株式会社、株式会社国際建設技

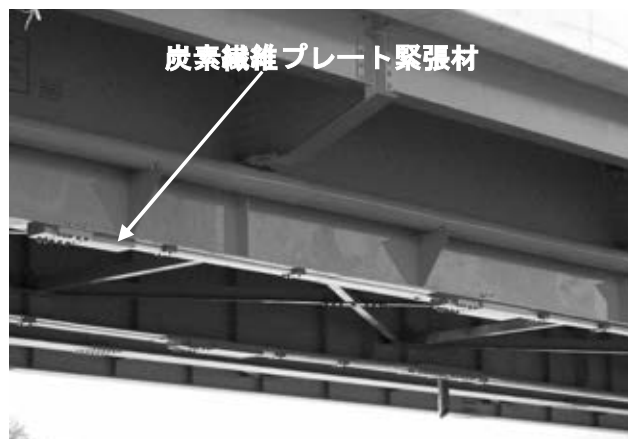


写真 10 鋼橋補強への適用例
Application to the Reinforcement of the Steel Bridge

術研究所とドーピー建設工業(株)の共同で開発を行った。また、工法研究会(アウトプレート工法研究会 : <http://www.outplate.com/>)を設立し工法の普及に努めている。

最後に、本工法の適用に際し、多大なご協力をいただいた工事の関係各位に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 濱田 譲 . ほか : 緊張した炭素繊維プレートによる既設コンクリート部材の補強に関する研究, 土木学会論文集, 56, 711(2002-8), p. 27
- 2) 加藤 . ほか : PC 橋梁の破壊に伴う振動性状の変化に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 341 (1984-1), p. 113
- 3) 宮本 . ほか : 既存コンクリート橋の損傷に対応する動的挙動の感度特性と損傷評価への適用, 土木学会論文集, 16, 442(1992-2), p. 61

〔問い合わせ先〕

ドーピー建設工業株式会社 本社営業部
TEL 03 - 3918 - 6174 森田 英一



立神 久雄 長谷川 剛 栗田 幸治 井上 浩男

コンクリート構造物における 高チクソトロピー性無収縮断面修復材“ なおしタル ”の開発

青木正行* 仲光友浩* 立神久雄* 井上浩男**

Development of Cross Section Repairing Material with High Thixotropy in the Concrete Structure

Masayuki AOKI, Tomohiro NAKAMITU, Hisao TATEGAMI, Hiroo INOUE

The performance required for cross section repairing materials in the concrete structure includes excellent bonding, workability, and the ability to be applied in thick coatings without causing crack. At present, polymer materials are normally used as cross section repairing materials. The problems with these materials include high viscosity, such that both workability and durability are poor. In this research, high thixotropy materials were developed without using polymer, and their performance were evaluated. These materials have good workability due to their high thixotropy. Spray test has shown the spraying on a wall surface to about 120 ~ 150 mm thickness is possible, and a ceiling surface to about 60 mm thickness. Moreover, they have higher or equal bond and compressive strengths, and lower drying shrinkage compared with state-of-the-art materials, proving higher durability.

コンクリート構造物における断面修復材には、ひび割れ抵抗性、付着性、作業性及び厚塗り性に優れるという性能が要求されている。現在、一般的な断面修復材は、ポリマー系の材料が多く使用されているが、これらの材料は、高粘性に起因する作業性の悪化や長期耐久性における問題などが指摘されている。そこで本研究では、ポリマーを使用せず、高チクソトロピー性を付与した材料を開発し、諸性能を評価した。チクソトロピー性とは、「硬く見えるが、ある力を加えると動き出す性質」で、マヨネーズもこの一種である。この材料は、従来のポリマー系断面修復材に比べ、高いチクソトロピー性により良好な作業性を有し、吹付け試験において壁面で 120 ~ 150 mm 程度、天井面で 60 mm 程度の厚塗りが可能であることを確認した。また、高性能と評価される従来材料に比べ、同等以上の高い付着強度と圧縮強度を示し、良好な収縮抑制性能による高い耐久性を有していることが明らかとなった。



写真1 チクソトロピー性状の材料の例
High Thixotropy Material



写真2 “なおしタル”施工状況
View of Spraying with NAOSHITARU

* ドーピー建設工業株式会社 技術部 東京技術グループ

** 技術本部 技術総括部

1. まえがき

高度経済成長期に作られた多くのコンクリート構造物は、建造後 50 年を経過し、耐用年数を迎つつある。また、これら社会資本の管理手法は、財政的な制約から従来の「スクラップ & ビルド」から「維持管理・長寿命化」へと移行しつつある。

高齢化したコンクリート構造物には、種々の劣化現象(コンクリートのひび割れ、鉄筋腐食など)が見られる。この現象では、劣化因子である塩分や炭酸ガスがコンクリート表面から内部に浸入するため、まずコンクリート表面の劣化が顕在化する。

劣化現象が顕在化した場合、これ以上の劣化因子の浸入及び構造物の耐久性低下を抑制するため、劣化部分の除去及び補修が行われる。

補修工法には様々な種類があり、現在一般的には、断面修復工法が用いられ、材料の多くは、有機高分子材料であるポリマーを含むコンクリートやモルタルである。しかし、コンクリート構造物の補修に、ポリマーを含むモルタルを使用するといくつかの欠点がある。このため、ポリマーを含まない断面修復材を開発した。

本報は、開発した新材料の性状試験を行い、それらの結果を取りまとめ、ポリマーを含有する従来材料との比較を行ったものである。

2. チクソトロピー性断面修復材の開発背景

2.1 断面修復工法の要件

断面修復工法とは、コンクリート構造物が劣化により元の断面が欠損した場合や、劣化因子を含む表面コンクリートを撤去した場合の断面修復を目的とした工法である。断面修復工法の手順としては、発錆している鉄筋の裏側までコンクリートをはつり取り、鉄筋の錆を除去し、鉄筋の防錆処理、コンクリートへのプライマーの塗布を行った後に、補修材にて塗付け、充填、若しくは吹付けを行う。この工法に使用される断面修復材の種類には、セメント系、ポリマーセメント系及び有機系(樹脂系)のものがあり、補修断面の大きさ、打継方向、早強性の要否及び施工方法などの用途や目的に適合する品質の材料を選定する必要がある。ここで、断面修復材には、以下に示す 5 つの品質が要求される。

- 圧縮、曲げ及び引張強度が、既存コンクリートと同等以上であること。
- 熱膨張係数、弾性係数、ポアソン比などが既存コンクリートと同等であること。
- 乾燥収縮や硬化収縮が小さく、付着性が高いこと。
- 収縮に伴うひび割れの発生がないこと。
- 施工後に自重や振動の影響によるはく落及びはく離が発生しないこと。

実際の施工現場では、上向きや横向き、狭い箇所など比較悪条件での作業が多いため、作業性に優れた材料が要求される。また、一度で行う施工量を多くし、工期を短縮させることで、コストを低減するために、厚塗り性に優れた性能も

要求される。そのため、断面修復材は、付着性に優れ、ひび割れの発生がなく、作業性及び厚塗り性に優れるというすべての条件を同時に満足する必要がある。

2.2 従来の断面修復材の問題点

断面修復材にポリマーを使用するモルタルの利点として、接着性、防水性、耐薬品性、耐摩耗性などの向上が挙げられる¹⁾。

一方で、このモルタルは、粘性が高くなることが知られている。また、本材料中のセメントに対するポリマーの割合の増加に伴い、高温下では圧縮強度、曲げ強度の低下が著しいこと、収縮量が増加することなど、耐久性に関する指摘がある²⁾。また、耐火性についても不明確な点が多く、トンネルや建築物の火災時の安全性について疑問視されている。

そこで本研究開発では、ポリマーを使用せず、付着性に優れ、ひび割れの発生がなく、作業性及び厚塗り性に優れるという条件を同時に満足するとともに、ポリマーを使用しないため、耐火性に優れた材料の開発を行った。そのための手法として、断面修復材にチクソトロピー性状を付与させることとした。

2.3 チクソトロピー性断面修復材の特長

チクソトロピー性とは、レオロジー特性の一種で、せん断ひずみ速度の増加によって粘度が可逆的に減少する現象のことである。せん断変形において、せん断応力 τ とせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma} = d / dt$ との間に、式(1)のニュートンの法則が成り立つ粘性流体は「ニュートン流体」と呼ばれる。

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \dots \dots \dots (1)$$

ニュートン流体に相当するものは水等である。ここで、 η は一定の定数で、粘度を表わす。また、非ニュートン流体の中で、式(2)のビンガム流の方程式が成り立つ粘性流体は「ビンガム流体」と呼ばれる。

$$\tau = \tau_f + \eta \dot{\gamma} \dots \dots \dots (2)$$

ビンガム流体に相当するものは、フレッシュコンクリートや通常のプレストレスト・コンクリートグラウトなどがある。ここで、 τ_f を降伏応力または降伏値とすると、作用するせん断応力が τ_f を上回らないと流動しないことを示す。

式(2)において粘度 η が一定とならず、せん断ひずみ速度の増加に伴い、 η が減少するような流体は「チクソトロピー

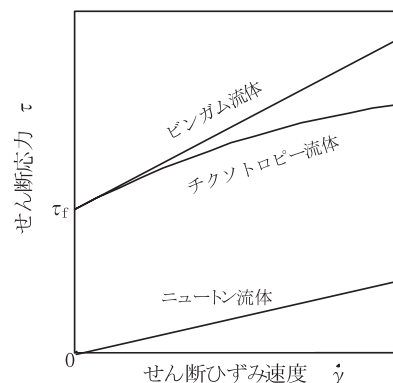


図1 ニュートン流体、ビンガム流体及びチクソトロピー流体の比較
Comparisons among Newtonian Fluid, Bingham Fluid, and Thixotropic Fluid

流体」と呼ばれる。チクソトロピー性を有する材料としてマヨネーズがある(写真1)。これら3者の比較を図1に示す。

このチクソトロピー性を断面修復材に付与することにより、コテ塗り時には、コテによる圧力を受けることで断面修復材の粘度が低下し、コテ塗り作業性が向上する。また、ポンプ圧送時にも粘度の低下により流動性が向上するためポンプ圧送性が良好となる。一方で、非加圧時では、粘性が回復し、材料の跳ね返りが防止されるため、材料のロスが低減されると考えられる。また、だれの発生が少なくなるため、厚塗りが可能となる。従来の断面修復材を使用した場合、その厚塗り性は一度に10～40mm程度であるが、チクソトロピー性を付与した材料であれば、それ以上の厚塗りが可能となり、工期が短縮されるものと推測される(写真2)。

3. 実験概要

3.1 概要

本報で報告するものは、チクソトロピー性を有する強度の異なる2種類の断面修復材である。一つは、普通強度(材齢28日圧縮強度45MPa以上)を有する材料(以下、「なおしタルN」と言う)、もう一つは高強度(材齢28日圧縮強度75MPa以上)を有する材料(以下、「なおしタルH」と言う)であり、それぞれに関してフレッシュ性状(硬化前の性状)及び硬化性状の試験を行った。

まず、普通強度を有する材料「なおしタルN」について概要を示す。材料構成は、質量比で普通セメント：セメント系混和材：砂 = 28：24：48で混合し、混和材としては、粘土質混和材に加え、シリカヒューム及び高炉スラグ微粉末を使用し、所定のチクソトロピー性状を有するように化成品等を混合したものである。また、ひび割れ抑制効果に優れる有機系短繊維を使用している。

一方、高強度を有する材料「なおしタルH」は、「なおしタルN」の粉体構成を元に、セメント系混和材の一部を変更し、さらに水/結合材比を「なおしタルN」と比較して低減し、高強度を発現できるようにしたものである。粉体の構成上、高強度を発現する反面、「なおしタルN」と比較し粘度がやや増加する可能性があり、その作業性に留意する必要がある。

表1 水 / 粉体比
Water / Powder Ratios

材料名	従来品A	なおしタルN	なおしタルH
水 / 粉体比 (%)	16.0	14.8	13.3

表2 試験項目及び目標値(室内試験)
Test Items and Target Values(Laboratory Tests)

性能	試験項目	目標値
流動性	モルタルスランプ試験	-
作業性	加圧JP漏斗流下試験	-
強度	圧縮強度試験	なおしタルN 45MPa以上(材齢28日) なおしタルH 75MPa以上(材齢28日)
	曲げ破壊試験	7MPa以上(材齢28日)
	付着強度試験	1.5MPa以上(材齢28日)
乾燥収縮性	長さ変化率試験	0.05%以下

ここでは、これら2種類の新材料の他に、市販品において高性能と評価されるポリマーモルタル系断面修復材(以下、「従来品A」と言う)を用い、作業性、強度、付着性、長さ変化率など満たすべき性状を有しているか室内試験によって確認し、諸性能を比較した。

3.2 水と粉体との質量配合

プレミックスされている粉体全体に対する水の質量割合を示す水 / 粉体比を表1に示す。

3.3 試験項目

表2に室内試験における試験項目及び目標値を示す。

3.3.1 流動性及び作業性の評価

断面修復材の流動性及び作業性の評価として、モルタルスランプ試験(JIS A 1171)及び加圧JP漏斗流下試験を行った。ここで、加圧JP漏斗流下試験とは、これまでの研究開発³⁾においてチクソトロピー性を評価する試験として考案されたものであり、図2に示す試験装置及び空気圧縮用コンプレッサーを用いて行う。試験手順を以下に示す。

加圧JP漏斗流下試験装置内の漏斗に水を通し、内側を湿った状態にする。

コックを閉め、JP漏斗に試料を空隙の無いように詰め、蓋を閉める。圧力弁を調節して、容器内を所定の圧力(0.1MPa)にする。

コックを開いて試料を流出させ、流出開始から試料が流れきるまでの流下時間を測定し、10分の1秒の単位で表す。容器内を減圧し、蓋を開けて漏斗内の試料がほぼ全量流出したことを確認する。

一回の測定が終了するごとにコック、漏斗などを水で洗浄する。

ここで、スランプが同等な修復材の場合、加圧JP漏斗流下試験において流下時間が短いほど、チクソトロピー性及び作業性に優れていると言える。ただし、チクソトロピー性の評価は加圧JP漏斗流下試験のみではなく、モルタルスランプ試験及び吹き付け試験の3試験を総合して評価している。

3.3.2 硬化体の強度、付着性、乾燥収縮性の評価

断面修復材の強度の評価として、圧縮強度試験(JIS A 1108)及び曲げ強度試験(JIS R 5201)を行った。また、コンクリートとの付着性の評価として付着強度試験(JSCE K 561)を、乾燥収縮性の評価として長さ変化率試験(JIS A

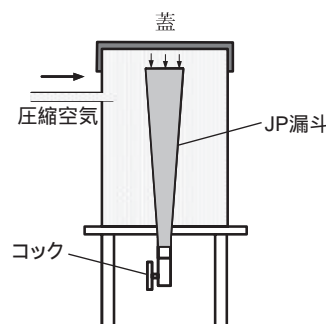


図2 加圧JP漏斗流下試験装置
Instrument Used for the Measurement of Discharging Time of a JP-funnel under Pressure

1129 - 3)を行った。

3.3.3 吹付け試験

開発した材料の現場への適用性を評価するため、吹付け試験を行った。試験は一般に使用されているスクイズ式モルタルポンプを使用し、直径40mmのホースにより50m圧送し、壁面及び天井面に設置したコンクリート平板に吹付けた。その後、吹付け直後の材料の吹付け厚を測定した。機材の配置図を図3に示す。

3.4 練混ぜ方法

室内試験における練混ぜには、回転数が自転140rpm、公転62rpmで練混ぜ容量2のホバート型モルタルミキサーを用いた。練混ぜ量は、1バッチあたり1.2程度とした。室内試験における練混ぜ方法を図4に示す。あらかじめ材料をミキサー内に投入し、ミキサブレードを回転させた状態で注水後、3分間練混ぜた。

室外試験における練混ぜには、回転数1000rpmのハンドミキサーを用いた。室外試験における練混ぜ方法を図に示す。容器内にあらかじめ水3.7kgを用意し、プレミックスポ粉体材料25kgを投入後、3分間練混ぜた。

3. 養生条件

強度試験用供試体の養生方法は気中養生とし、温度20±

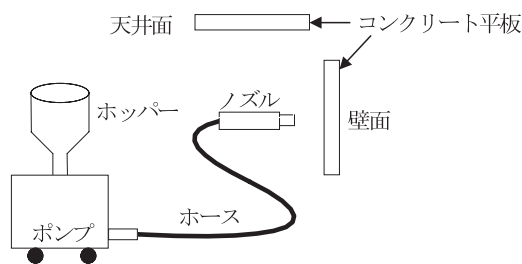


図3 吹付け試験用機材の配置図
Equipment Arrangement (Spray Tests)

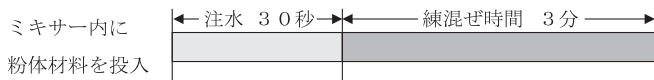


図4 室内試験における材料投入および練混ぜ手順
Adding Materials and Mixing Procedure (Laboratory Tests)

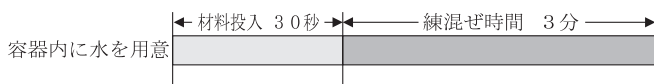


図 室外試験における材料投入および練混ぜ手順
Adding Materials and Mixing Procedure (Spray Tests)

表3 流動性および作業性の試験結果
Test Results of Fluidity and Workability

評価材料	練り上がり温度()	モルタルスランプ(cm)	加圧JP漏斗流下時間(s)
従来品A	23.3	5.3	5.4
なおしタルN	20.8	3.9	4.9
なおしタルH	21.5	5.9	11.5

2 湿度60±5%の恒温恒湿室にて、所定の材齢を養生した。

4. 試験結果および考察

4.1 流動性及び作業性

流動性及び作業性の試験結果を表3に示す。チクソトロピー性を考察するため、表3の加圧JP漏斗流下試験結果のみを図に示す。表3及び図より、本開発材の「なおしタルN」では、ポリマーを含有する「従来品A」に比べて加圧JP漏斗流下時間が短くなった。従って、「なおしタルN」は「従来品A」に比べてチクソトロピー性が向上した。また、本開発材の2種類の比較では、「なおしタルN」のモルタルスランプは「なおしタルH」と比較し小さな値を示しているが、加圧JP漏斗流下時間は「なおしタルN」の方が短縮された。したがって、「なおしタルN」は、「なおしタルH」に比べてチクソトロピー性が高いと考えられる。

一方、「なおしタルH」の加圧JP漏斗流下時間の増加は、粉体構成を変えたことで、材料の粘度が増加したためと考えられる。

4.2 硬化体の強度、付着性及び乾燥収縮性

硬化性状試験結果を表4に示す。また、圧縮強度試験結

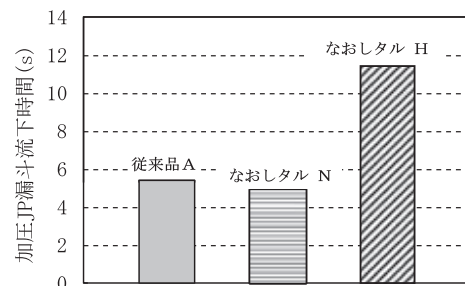


図 加圧JP漏斗流下試験結果
Test Results of Discharging Time of a JP-funnel under Pressure

表4 硬化性状試験結果
Test Results of Hardened Property

評価材料	圧縮強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	付着強度 (MPa)
従来品A	44.1	9.84	3.70
なおしタルN	50.8	7.88	3.14
なおしタルH	79.8	9.90	3.86

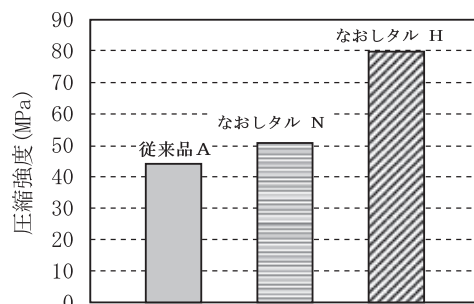


図 圧縮強度試験結果
Test Results of Compressive Strength

果を図 9 に、曲げ強度試験結果を図 10 に、付着強度試験結果を図 11 に、長さ変化率試験結果を図 10 に示す。

まず、圧縮強度に関しては、表 4 及び図 9 より、本開発材のいずれもが「従来品 A」より高い値を示し、それぞれの目標値「なおしタル N」: 材齢 28 日圧縮強度 45 MPa 以上、「なおしタル H」: 材齢 28 日圧縮強度 75 MPa 以上) を満足していることが分かる。また、「なおしタル H」の圧縮強度は、「なおしタル N」を 30 MPa 程度上回り、高強度化されたことが分かる。

次に、曲げ強度に関しては、表 4 及び図 10 より、「なおしタル N」は「従来品 A」より若干低い値を、「なおしタル H」は「従来品 A」と同程度の値を示した。ただし、いずれの開発材も、旧日本道路公団試験方法⁴⁾の規格値である 7 MPa を満足している。

また、表 4 及び図 11 より、付着強度に関しても、「なおしタル N」は「従来品 A」より若干低い値を、「なおしタル H」は「従来品 A」と同程度の値を示した。ただし、いずれの開発材も、

目標値(材齢 28 日付着強度 1.5 MPa 以上)を満足している。また、長さ変化率は絶対値が小さい方が優れるが、図 10 より、本開発材の「なおしタル N」、「なおしタル H」とも同程度の値を示すとともに絶対値に急増はなく、ポリマーを含有する「従来品 A」に比べ優れた寸法安定性を有しているという知見が得られた。

4.3 吹付け試験結果

吹付け試験結果を表 5 に、壁面における吹付け厚を図 11 に、天井面における吹付け厚を図 12 に、吹付け試験状況を写真 3 に示す。吹付け試験において、「なおしタル N」の作業性は非常に良好で、吹付け厚は壁面で 120 mm 程度(写真 4)、天井面で 60 mm 程度可能であり、その吹付け性能は非常に優れていると評価できる。これは、高いチクソトロピー性を付与したことにより、圧送下では粘度が低下し流動性が向上したこと、及び、吹付け後の非加圧状態では粘度が回復するため厚付けが可能になったことに基づく、と考えられる。

「なおしタル H」による吹付け後の壁面の状態を写真 5 に示す。懸念されたポンプ圧送性は、ポンプに過大な負荷をかけることなく良好であった。ここで、「なおしタル H」の吹付け厚は、壁面で 150 mm 程度であった。本材の天井面への施工は、写真 6 に示すように、90 mm 程度可能であった。これにより、「なおしタル N」の吹付け厚と比較しても、同等以上の厚塗り性を有していることが明らかとなった。

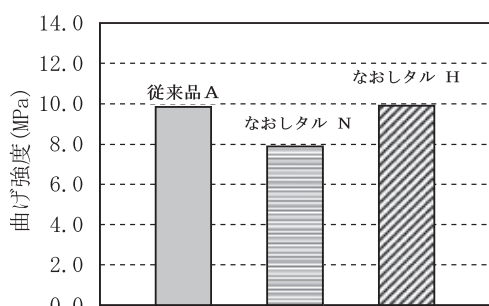


図 9 曲げ強度試験結果
Test Results of Bending Strength

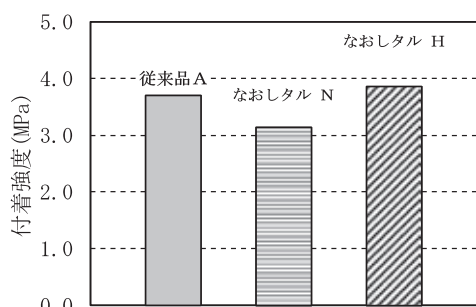


図 10 付着強度試験結果
Test Results of Adhesion Strength

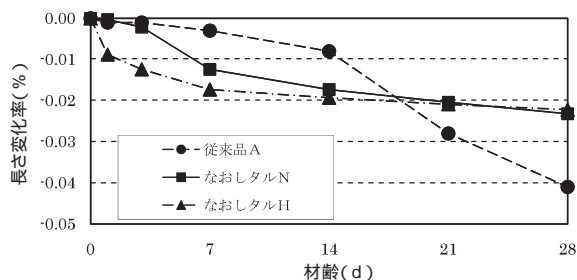


図 11 長さ変化率試験結果
Test Results of Shrinkage

表 5 吹付け試験結果
Spray Test Results

評価材料	吹付け厚さ (mm)	
	壁面	壁面天井面
従来品 A	70	30
なおしタル N	120	60
なおしタル H	150	90

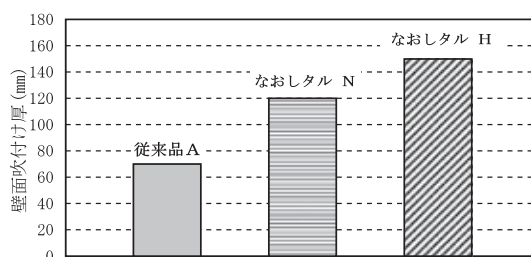


図 12 吹付け試験結果(壁面)
Spray Test Results(Wall Surface)

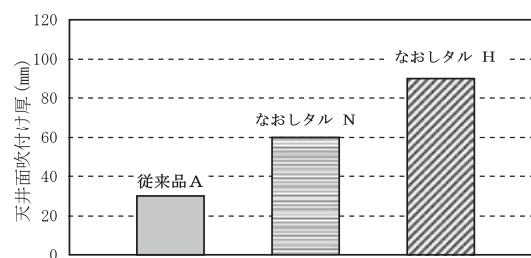


図 13 吹付け試験結果(天井面)
Spray Test Results(Ceiling Surface)



写真3 吹付け試験の様子
View of Spray Test

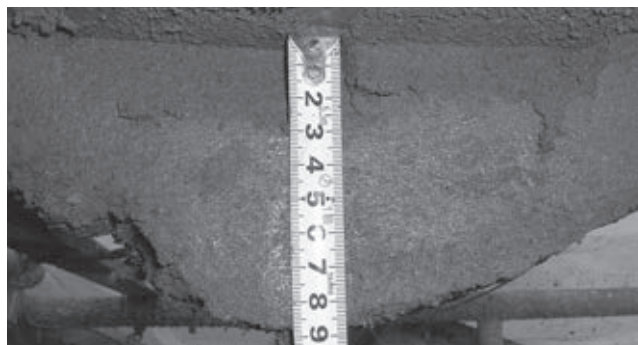


写真 吹付け後の天井面(なおしたルH)
Ceiling Surface after Spraying(NAOSHITARU-H)



写真4 吹付け後の壁面(なおしたルN)
Wall Surface after Spraying(NAOSHITARU-N)

あ と が き

本研究では、コンクリート構造物における断面修復材として、ポリマーを使用せずに高チクソトロピー性を付与した材料を開発し、ポリマーを含有する従来材と共に各種性能を評価し、比較を行った。その結果、以下のような知見が得られた。

本開発材の一つである「なおしたルN」に関して、所要の圧縮強度、曲げ強度を有し、コンクリートとの付着性も良好であることが明らかとなった。特に、長さ変化率においてはポリマーを含有する従来材に比べ高い収縮抑制性能を有し、寸法安定性に優れているという知見が得られた。また、その高いチクソトロピー性により、吹付け試験において、吹付け厚は壁面に120mm程度、天井面に60mm程度可能であり、その吹付け性能は非常に良好と評価された。

もう一つの本開発材である「なおしたルH」に関しては、「なおしたルN」に比べ若干粘性が増加するものの、圧縮強度、曲げ強度、コンクリートとの付着強度は「なおしたルN」より優れることが明らかとなった。また、長さ変化率においては「なおしたルN」と同様、ポリマーを含有する従来材に比べ高い収縮抑制性能を有し、寸法安定性に優れているということが分かった。また、良好なポンプ圧送性を示し、その吹付け性能も「なおしたルN」同様、非常に良好であった。

以上のように、高チクソトロピー性を有する断面修復材は、必要性能を十分に満足することが認められ、その実用性が確認された。

現在、建築分野においては着実に実績を増やし、施主及び

施工者より高い評価を得ている。また、土木分野においては、遮塩性能、耐凍害性能が要求されることから、これらの性能を付与した改良品を開発し、橋台の部分的な補修やボックスカルバートの大断面補修等、施工実績を徐々に増やしている。

本製品が、今後増え続ける老朽化したコンクリート構造物の長期耐久性確保のための一助となり、我が国の社会インフラ整備に貢献できれば幸いと考える。

なお、本研究開発及び性能試験実施に際して、宇都宮大学大学院工学研究科 藤原浩巳教授、丸岡正知助教、小野友彰氏、株式会社ニューテック 笹倉博行氏、笠原秀夫氏、有限会社タフ技研 田中宏之氏、札幌市建設局土木部道路課 市川聖芳氏(元ドーピー建設工業株式会社)に多大なるご協力をいただいた。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1)大浜．ほか：ポリマーセメントモルタルの難燃性，コンクリート工学年次論文集，2(1980)，p. 169
- 2)王．ほか：ポリマーセメントモルタルの高温加熱後の曲げ強さ及び圧縮強さ性状，日本火災学会研究発表概要集，(2006)，p. 30
- 3)藤原．ほか：高チクソトロピー性を有するPCグラウト材の実物大充填実験，セメント・コンクリート論文集，60，(2006)，p. 609
- 4)旧日本道路公団：旧日本道路公団試験方法 第4編構造関係試験方法「断面修復材料品質規格試験方法」(JHS416-2004)

〔問い合わせ先〕

ドーピー建設工業株式会社 本社営業部
TEL 03-3918-6174 塘 和寿



青木 正行



仲光 友浩



立神 久雄



井上 浩男

高圧ガス保安法の適用を受ける超高压設備の強度評価について

児玉嘉弘* 木村陵介**

Strength Evaluation for Ultra High Pressure Facility subjected to HPGSL

Yoshihiro KODAMA, Ryosuke KIMURA

In the high pressure polyethylene plant having an ultra high pressure facility with the design pressure higher than 100 MPa, the special design based on the bursting pressure had been used in the past to secure the safety, because general design sometimes conduces to unreasonable wall thickness which poses a problem for manufacturing. Recently, the safety factor for strength evaluation has showed a tendency to reduce and the evaluation method has been developed. The facility subjected to High Pressure Gas Safety Law (HPGSL) shall be according to the code issued by The High Pressure Gas Institute (KHK). The strength evaluation using not only simple calculation but also FEM analysis, stress analysis or crack propagation must meet the requirement of KHK code. The code does not always give the evaluation method to be applied for all shapes designed as pressure parts. We must understand the philosophy of KHK code and carefully evaluate them to meet such code. From our experiences of making the documentation for KHK, this report shows some of the characteristics of the code and introduces some of the evaluation methods of shapes which are not simply calculated by the code.

超高压設備と呼ばれる 100 MPa 以上の設計圧力を有する高圧ポリエチレン製造設備などでは、従来から特別な設計を行ってきた。即ち、超高压であるがゆえに耐圧強度上の必要板厚は厚くなる一方、製作可能な寸法制限があるため、破壊圧力を基準とした計算式で評価してきた。しかし、最近では安全係数低減の傾向にあり、評価方法も変わってきた。高圧ガス保安法の適用を受ける超高压設備の強度評価は、高圧ガス保安協会基準に従う必要があるが、有限要素法(FEM)解析を含めた応力解析あるいは破壊力学的検討など専門的な知識が要求される。また、あらゆる形状に対して評価式が与えられているわけではないので、その基準を理解し、その思想に従って評価を行う必要がある。本報では、超高压設備の強度評価式の特徴を示すとともに、高圧ガス設備の事前審査資料作成の実績より例を用いて、評価方法を紹介する。

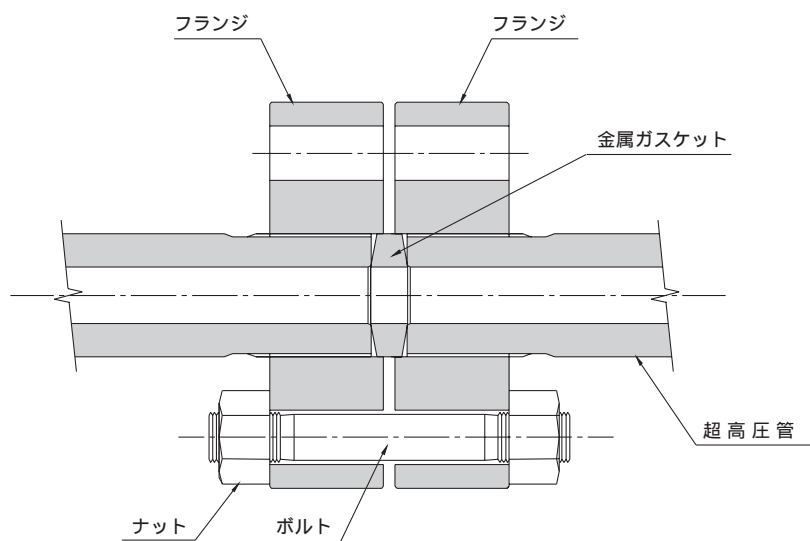


図1 超高压管継手の構造
Structure of Ultra High Pressure Piping Joint

* 環境・プラント事業本部 玉野プラントセンター

** 技術本部 CAE センター

1. はじめに

一般的な石油化学プラントなどの設計では、高圧ガス設備の強度評価は安全係数 4.0 又は 3.5 が採用されており、例示基準で示された強度評価式により算定される。しかし、超高圧ガス設備に対して、例示基準を適用した強度評価では、耐圧強度上必要な板厚は厚くなる。一方、製作上可能な寸法が制限されるため、合理的な設計に向けて、特殊な設計を行っている。

高圧ポリエチレン製造設備については、当初海外より技術導入され、旧通商産業省により認可を受け建設されてきた。当時は破壊圧力に対して安全係数 3.0 が採用されてきたが、世界的な規格間の競争もあり ASME 規格¹⁾などでは安全係数が小さくなる傾向にあり、国内でも従来の安全係数が緩和されてきている。このような安全係数低減に伴う信頼性向上のため材料の規定も厳しくなり、強度設計に対してもより精度の高い評価が要求されている。これまで考慮されなかった評価方法が導入され、従来の手法で評価を行ってきた技術者にとっては非常に難しい内容となっており、破壊力学などの専門的な知識が必要となっている。

高圧ガス保安法の適用を受ける設備において、例示基準以外の強度評価方法を採用する場合、高圧ガス保安協会の事前評価審査を受ける必要があり、一般的な同法適用の強度評価の様式とは異なり、法規・基準に従えない理由を明記し、十分な強度があることを証明しなければならない。

本報では、100 MPa 以上で設計される超高圧設備の強度評価について、高圧ガス保安協会の「超高圧ガス設備に関する基準 KHK S 0220」(以下、KHK 基準と称す²⁾)における強度評価式の特性を示すとともに、評価実績を踏まえ仮想円筒モデルでは評価が困難な部分の評価方法を述べる。

2. 超高圧設備の強度評価

2.1 概要

超高圧設備の強度評価を行う場合、耐圧部に対して以下の事項を満足することを示す必要がある。

- 耐圧試験時に脆性破壊が起こらないこと。
- 十分な静的強度があること。
- 十分な疲労強度があること。
- 破裂前漏洩が成立すること。

使用される設備の耐圧部は、すべて評価の対象となる。その対象例を表 1 に示す。参考までに、図 1 に超高圧管の継手構造図を示す。なお、例示基準により評価されるものは、事前評価審査の対象外である。

2.2 材料

代表的な超高圧設備である高圧ポリエチレン製造設備等に使用される超高圧部の材料として、高強度低合金鋼、冷間引き抜きステンレス鋼、析出硬化系ステンレス鋼等が使用される。表 2 に超高圧設備で使用される耐圧部材料の例²⁾を示す。なお、ここで高強度低合金鋼は、材料の最小引張強さが 895 N/mm² 以上の低合金鋼を言う。

2.3 静的強度評価

2.3.1 強度計算式

円筒モデルに対する従来からの強度評価式では、次式に示すファウベルの破壊圧力の式が用いられ、安全係数 3.0 が設定されていた。²⁾

$$P_b = \frac{2}{\sqrt{3}} S_y (2 - \ln K) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 P_b は破壊圧力、 S_y は設計温度における材料の降伏点又は 0.2% 耐力、 f は材料の降伏比 (S_y/S_u)、 S_u は設計温度における材料の引張強さ、 K は内外径比 (D_o/D_i)、 D_o は外径、 D_i は内径である。

KHK 基準では、内圧を受ける円筒胴に対して流動応力に基づく評価式が採用されるとともに、シェークダウンの評価も考慮されている。

(1) 流動応力に基づく最大許容圧力及び計算厚さ

$$P_{all} = \frac{2}{\sqrt{3}f} \frac{S_y + S_u}{2} \ln K \dots \dots \dots (2)$$

$$t_r = \frac{D_i}{2} \left[\exp \left\{ \frac{\sqrt{3}fP}{(S_y + S_u)} \right\} - 1 \right] \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 P_{all} は最大許容圧力、 P は設計圧力 ($P < P_{all}$)、 f は安全係数で 2.4、 t_r は円筒胴の計算厚さである。

(2) シェークダウン評価

$$M_D = \frac{2K^2}{(K^2 - 1) S_y} P \dots \dots \dots (4)$$

表 1 評価対象例
Example of parts to be evaluated

区分	設備内容	評価対象部位
特定設備	反応器・熱交換器 圧力容器等	胴、管、カバー、 フランジ等
	配管類 (管、配管継手等)	管 継手(ブロック)、 フランジ等
高圧ガス設備	配管付属品 (バルブ等)	バルブ本体、カバー、 フランジ等
	回転機械類 (圧縮機等)	シリンダ、シリンダ カバー、フランジ等

表 2 超高圧設備に使用される材料例
Materials for Ultra High Pressure Facility

材料	引張強さ (N/mm ²)	降伏点 (N/mm ²)	降伏比	備考
SNM439	980	885	0.90	JIS G 4053
SCM440	980	835	0.85	JIS G 4053
SA723Gr3Cl2	930	830	0.89	ASME Sect.
DIN 1.6958	900	760	0.84	26NiCrMo146
AISI4340H	980	885	0.90	(SAE4340H)
A276 Type316	860	690	0.80	ASTM
SUS630 H1150	930	725	0.78	JIS G 4303

ここで、 M_D は設計圧力とシェークダウン限界圧力との比である。

M_D 1.0 であることが必要であるが、1.0 を超える場合には弾塑性解析により、運転荷重条件下でシェークダウンが生じ、ラチェット変形が進行しないこと、シェークダウンが起こるまでに生じる変形が指定の限界を超えないこと、シェークダウン後に繰り返される応力が疲労に対する許容限界内にあることなど、十分な疲労強度があることを証明する必要がある。

KHK 基準では、高強度低合金鋼、SUS304 冷間加工材、SUS316 冷間加工材、SUS630、インコネル 718 の材料について、温度に対する強度低下係数が用意されている。高強度低合金鋼の強度低下係数を図 2 に示す。

また、式(1)のファウベルの式と流動応力に基づく式(2)を比較するため、設計温度 300 において、次に示す条件下で最大許容圧力を求めた結果を図 3 に示す。

- ・ 材質：高強度低合金鋼
- ・ 材料強度(常温)： $S_u = 980 \text{ N/mm}^2$, $S_y = 885 \text{ N/mm}^2$, $\lambda = 0.9$
- ・ 材料強度(300)： $S_u = 870 \text{ N/mm}^2$, $S_y = 716 \text{ N/mm}^2$, $\lambda = 0.823$
- ・ 安全係数：流動応力の式に対して $f = 2.4$ 、従来のファウベルの式に対して $f = 3.0$

図 3 より、ファウベルの式より流動応力の式の方が厚さは薄く、また、同じ厚さであれば 15% 高い許容圧力を設定することができる。最大許容圧力が 374 MPa 以下では、 M_D 1.0 となるが、最大許容圧力が 374 MPa 以上では、シェークダウン限界圧力を超えて設計圧力を設定する場合、(2)のシェークダウンにかかわる変形、疲労強度等の検討が必要である。

2.3.2 四角形断面の評価例

配管フィッティングのブロック・配管付属品のバルブなどは断面が四角形となっている場合が多く、実際の評価では安全側となるように、ボルト穴などの穴を避けた内接円を外径とした円筒モデルを想定する。このように想定したモデルに対して静的強度評価を行った場合、強度不足となることもあるが、実際には仮想円筒モデルの外周にかなりの余肉が存在

するので、強度上問題のないケースもある。円筒胴に対する流動応力に基づく式(2)は、最大許容圧力 P_{all} と安全係数 f の積で求められる値を内圧としてかけたときに、評価断面すべてが流動応力状態になるまでは許容できることを意味している。有限要素法(Finite Element Method: FEM)解析を用いて設計を行う場合、設計圧力と安全係数の積で求められる値を圧力としてかけたときに、想定した仮想円筒モデルのすべてが流動応力状態にならず、流動応力になっていない領域が残っていれば、設計圧力に対して十分な強度を有していると言える。

以下に、バルブ本体を例として、仮想円筒モデルでは厚さ不足となるが、全体モデルとした FEM 解析により十分な静的強度を有する例を紹介する。評価の結果を図 4 に示す。このとき、設計圧力は 250 MPa、設計温度は 300 であり、そのほかの全体モデルの FEM 解析条件は、以下の通りである。

- ・ ブロック寸法： 300 mm、穴内径：82 mm
- ・ ボルト穴のピッチ円直径：200 mm、ボルト穴：48 mm × 8 個
- ・ 材料強度(常温)： $S_u = 980 \text{ N/mm}^2$, $S_y = 885 \text{ N/mm}^2$
- ・ 材料強度(300)： $S_u = 870 \text{ N/mm}^2$, $S_y = 716 \text{ N/mm}^2$

なお、仮想円筒モデルでの計算結果は、次の通りであり、厚さ不足となった。

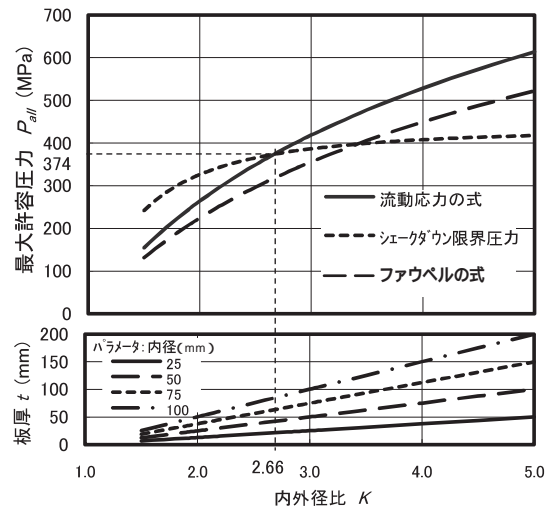


図 3 最大許容圧力の比較
Comparison for Maximum Allowable Pressure

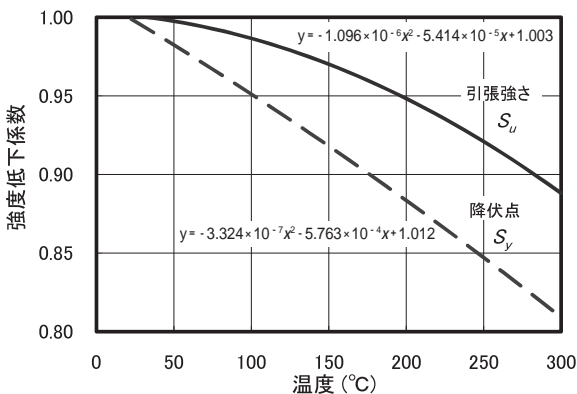


図 2 高強度低合金鋼の強度低下係数
Strength Reduction Factor for High Strength Low Alloy Steel

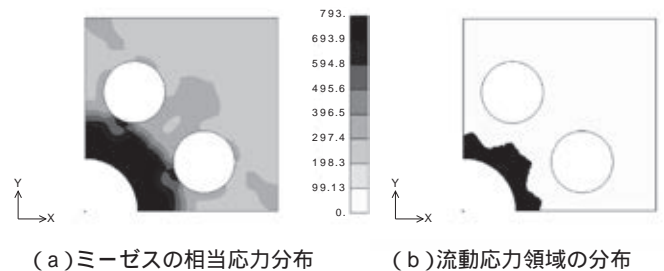


図 4 四角形断面の静的評価例
Static Analysis for Quadrangle Section

・ 仮想円筒モデル

$$D_i = 82 \text{ mm}, D_o = 152 \text{ mm}, K = 1.854$$

・ 計算結果

$$\text{最大許容圧力 } P_{all} = 226 \text{ MPa}$$

$$\text{必要厚さ } t = 37.95 \text{ mm} > \text{仮想円筒モデルの厚さ } 35 \text{ mm}$$

2.4 平面ひずみ破壊靱性 K_{IC}

材料の平面ひずみ破壊靱性 K_{IC} は以下の評価で用いられる。

耐圧試験時に脆性破壊しないことの確認

破裂前漏洩の評価

疲労き裂進展解析

KKH 基準では、高強度低合金鋼に対してはシャルピー吸収エネルギー値 CVN からの換算式が用意されている。

$$K_{IC} = 22 + \exp[0.655 \arctan\{(CVN - 84)/66\} + 4.124] \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 $K_{IC} \geq 200$ とする。

ここで、 K_{IC} は平面ひずみ破壊靱性 ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$)、 CVN はシャルピー吸収エネルギー (J) である。

また、ASME 規格¹⁾、HPI 規格³⁾などで示されているように、最小設計金属温度 (MDMT) が上部欄にある場合には、次式を使うことができる。

$$(K_{IC}/S_y)^2 = 0.64(CVN/S_y - 0.01) \dots\dots\dots (6)$$

式(5)、式(6)などにより K_{IC} を求めることができない場合には、 K_{IC} 試験、き裂先端開口変位 (CTOD) 試験、 J_{IC} 試験などを実施し、 K_{IC} を求める必要がある。

2. 破裂前漏洩の評価

破裂前漏洩 (Leak before Burst: LBB) とは、内部流体を含んだ構造物が繰返し荷重により疲労破壊に至る場合、き裂が進行して厚さを貫通するまでは破壊することなく、ある期間内部流体の漏れが生じた後に破壊へと移行するという概念をいう⁴⁾。このような現象が確実に生じれば、漏れが検知された時点で設備全体は損傷することなく、安全に停止することができることになる。このような状況が成立するかどうか

を破壊力学的に評価するものであり、表面き裂の最深点で、厚さ t の 0.8 倍のき裂深さにおいて、以下の二つの式が満足されれば、LBB が成立するとしている。

$$K_I < K_{IC} \dots\dots\dots (7)$$

$$0.2t < \left(\frac{K_{IC}}{S_y} \right)^2 \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 K_I は応力拡大係数で、 t はき裂進展方向の部位の厚さである。なお、円筒内面の場合、アスペクト比は 1/3 とする。

LBB 評価を行う場合の評価対象は、設備全体の耐圧部となる部品のすべてであり、同一部品でも異なる寸法を持つ場合には多数の評価ポイントを設定する必要がある。式(8)について、 S_y をパラメータとして使用厚さ t と最小 K_{IC} の関係を図に示す。 t 及び S_y が大きくなれば、要求される K_{IC} も大きくなる。式(7)については、評価する部位及び条件の数だけ K_I の値を求めなければならない。ここで、同じ設計条件下にある多数の部位の評価を行う場合の一つの方法を示す。

破壊力学より、 $K_I = \sqrt{a}$ であり、円筒モデルの場合、深さ $0.8t$ までき裂が進展した時の評価を行うため、応力拡大係数 K_I は内外径比 K 、厚さ t 及び運転圧力 P の関数となる。

$$K_I = f(K, t, P) \dots\dots\dots (9)$$

式(9)において、 K_I/P 及び K をパラメータとして厚さ t を求め、 K_I/P をパラメータとして内外径比と厚さの関係を整理したものを図に示す。この図は、厚さ t が大きくなるにつれて、また内外径比 K が小さくなるにつれて、要求される K_{IC} は大きくなることを意味している。実際に使用する場合には、運転圧力を乗じた K_I をパラメータとして圧力ごとに図を作成する必要があるが、このようにして作成した図に想定した t と K をプロットすることにより K_I の値が算出できる。求められた K_I が K_{IC} より小さければ、LBB は成立することになる。

LBB 評価を行う場合には、一つの部品でも複数の仮想内

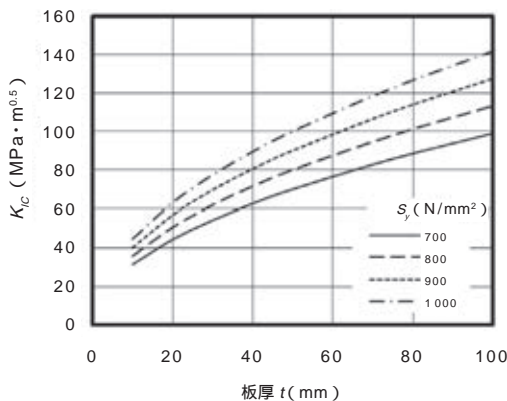


図 LBB 評価における厚さと平面ひずみ破壊靱性の関係
Relation between Thickness and K_{IC} on LBB Evaluation

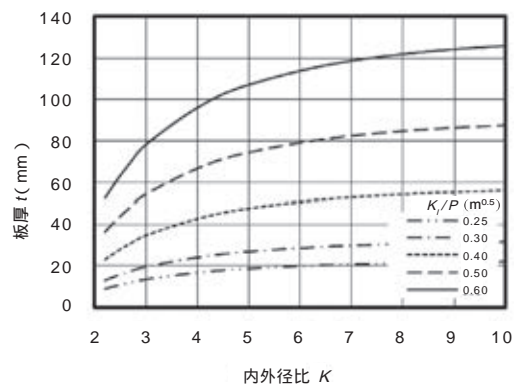


図 LBB 評価における内外径比と厚さの関係
Relation between K and t on LBB Evaluation

径と仮想外径を持つとき、応力拡大係数の最大値を一義的に求めることはできないため、あらゆる組合せで評価を行う必要がある。

2. 疲労き裂進展解析と評価

2.1 応力拡大係数の算出式

応力拡大係数 K_I は、想定するき裂面に垂直な応力を3次式で示し、その係数を使用して求める。その算出式を表3に示す。

2.2 想定するき裂面に垂直な応力の近似式

KHK 基準では、内外径比が $1.2 \leq K \leq 3.0$ の範囲で円筒モデルに対する計算式が用意されているが、その範囲以外のものは、別途3次式を作る必要がある。内外径比 K が3以上になると、3次式で近似することが難しくなるため工夫が必要である。

K が3以上では、近似式を求めるための4点法も採用されている⁵⁾。この方法は、内面、厚さの1/2、厚さの3/4及び外面に対応する応力値をプロットし、これらの4点を通る3次式の近似曲線を作るものである。この4点法では K の値が大きいくほど、内面付近での応力値と近似曲線とのかい離が大きくなる。一方、複数の区間に分けて区間ごとに3次式で近似する区間分割法では、応力分布にかなりの精度で近似する3次式を得ることができる。ただし、分割した境界では

K_I が不連続となるため、 K_I の差 K_I だけ調整する必要がある(図 参照)。

図 に、 $a/t = 1/3, K = 4, 10$ として計算した4点法と区間分割法の比較を示す。4点法は簡単に近似式を求めることができ、比較的安全側の計算となるが、区間区分法に比べ K_I が大きくなる傾向にある。精度を要しない簡便法での計算では、4点法が採用できる。一方、区間分割法は精度を要する場合に採用されるが、計算は複雑となる。

2.3 応力拡大係数の特性

表3に示される全き裂深さにわたって応力分布が一つの近似式で表される場合の式を変形すると、式(10)のように無次元化できる。

$$K_I/(P \cdot t) = [(A'_0/P + 1)G_0 + A'_1/P(a/t)G_1 + A'_2/P(a/t)^2G_2 + A'_3/P(a/t)^3G_3] \sqrt{(a/t)/Q} \dots\dots\dots (10)$$

無次元化された応力拡大係数は、き裂深さ比 a/t 、き裂アスペクト比 a/l の関数となる。

き裂アスペクト比 a/l を $1/3$ とし、内外径比 K をパラメー

表3 応力拡大係数の計算式
Basic Equation for K_I Calculation

<p>・ 応力拡大係数</p> $K_I = [(A_0 + A_p)G_0 + A_1G_1 + A_2G_2 + A_3G_3] \sqrt{a/Q}$ <p>・ き裂面に垂直な応力分布の3次式</p> $= A_0 + A_1(x/a) + A_2(x/a)^2 + A_3(x/a)^3$ <p>ここで、 x: 表面からの距離 ($0 \leq x \leq a$) A_p: き裂面に作用する圧力 Q: き裂形状パラメータ $Q = 1 + 4.593(a/l)^{1.65}$ $G_0 \sim G_3$: 自由表面補正項 ($a/t, a/l$ の関数) a: き裂深さ l: き裂長さ ($= 2c$) c: き裂の半長</p> <p>・ 全き裂深さにわたる応力分布が一つの式で近似できる場合</p> $= A'_0 + A'_1(x/t) + A'_2(x/t)^2 + A'_3(x/t)^3$ $A_0 = A'_0$ $A_1 = A'_1(a/t)$ $A_2 = A'_2(a/t)^2$ $A_3 = A'_3(a/t)^3$ <p>単肉円筒の場合 ($1.2 \leq K \leq 3$)</p> $A'_0/P = (K^2 + 1)/(K^2 - 1)$ $A'_1/P = 1.051 - 2.318K + 0.3036K^2 - 0.004417K^3$ $A'_2/P = -1.7678 + 0.9497K + 0.9399K^2 - 0.2056K^3$ $A'_3/P = -0.2798 + 1.3831K - 1.2603K^2 + 0.2138K^3$
--

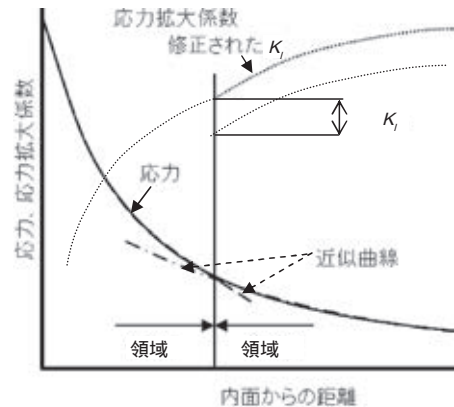
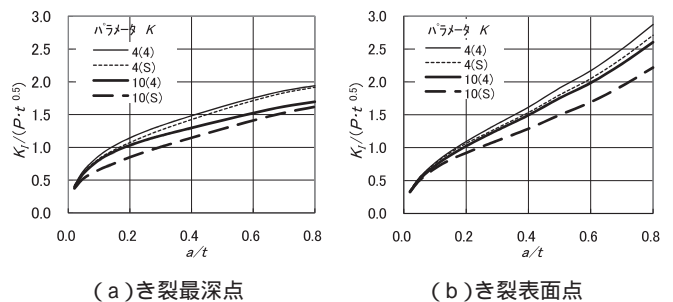


図 区間分割法による K_I の修正
Method Correcting K_I -Value at Discontinuities between Regions



パラメータの () 内の値は、4: 4点法, S: 区間分割法を示す。

図 4点法と区間分割法における応力拡大係数の比較 ($a/l = 1/3$)
Comparison between 4 Point Method and Region Split Method on $K_I(a/l = 1/3)$

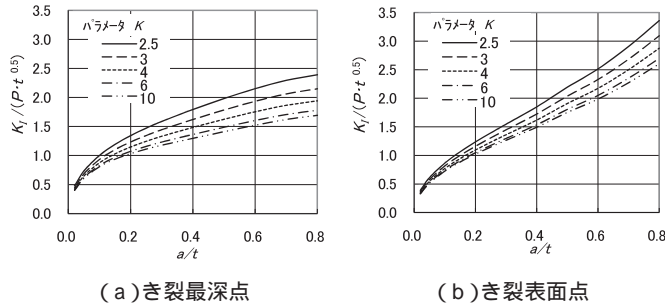


図 9 き裂深さ比と無次元応力拡大係数の関係 ($a/\ell = 1/3$)
Relation between Ratio of Crack Depth and Nondimensional K_I ($a/\ell = 1/3$)

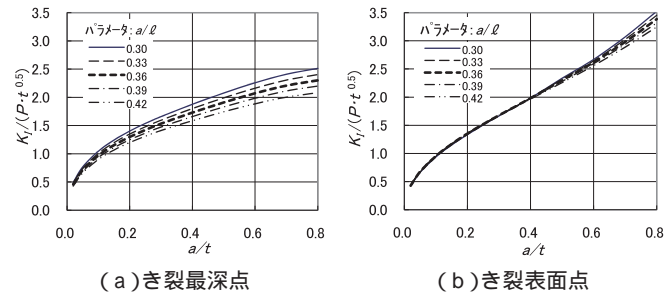


図 10 き裂深さ比と無次元応力拡大係数の関係 ($K = 2.5$)
Relation between Ratio of Crack Depth and Nondimensional K_I ($K = 2.5$)

タとした場合の無次元応力拡大係数のき裂深さ比に対する変化を図 9 に示す。なお、 $K > 3$ の場合、3 次の近似式は 4 点法で求めたものである。 K_I については、内外径比 K が小さい方が大きくなり、き裂が浅い時は最深点の方が表面点より K_I が大きくなり、進展が進むと表面点での K_I が大きくなる。

次に、 $K = 2.5$ とし、き裂アスペクト比 a/ℓ をパラメータとした場合の無次元応力拡大係数のき裂深さ比 a/t に対する変化を図 10 に示す。また、表 4 にき裂深さ比とき裂アスペクト比の変化を示す。表中の + はアスペクト比が大きくなることを示し、- はその逆を示す。 a/ℓ が小さい場合、き裂深さが浅い時、 K_I は最深点の方が表面点より大きくなるため、 a/ℓ が大きくなるが、その後は逆転して a/ℓ は小さくなる傾向にある。

2.4 疲労き裂進展の計算

疲労き裂進展の計算について、KHK 基準にその手順が規定されている。毎回のき裂進展量を精度よく計算するには非常に時間がかかるため、比較的簡便な方法を示している。図 11 の解析フローに示すように、計算する予想き裂進展増分を与え、その増分の範囲内では応力拡大係数は一定であるとして、き裂進展を計算する。き裂進展計算に関して、以下の点について注意が必要である。

(1) き裂進展増分の設定

大きなき裂進展増分を予測すると K_I が大きくなり、結果として繰返し回数が小さくなるため、良い結果を得ることができないことがある。き裂の増分は、 K_I に影響を与えるので適正な量を設定する必要がある。

表 4 き裂深さ比とアスペクト比の変化 ($K = 2.5$)
Change of Aspect Ratio corresponding to a/t ($K = 2.5$)

a/t	アスペクト比 a/ℓ					
	0.3	0.33	0.36	0.39	0.42	0.45
0.02	+	+	+	+	-	-
0.05	+	+	+	+	-	-
0.1	+	+	+	-	-	-
0.15	+	+	-	-	-	-
0.2	+	+	-	-	-	-
0.25	+	-	-	-	-	-
0.3	-	-	-	-	-	-
0.4	-	-	-	-	-	-
0.5	-	-	-	-	-	-
0.6	-	-	-	-	-	-
0.7	-	-	-	-	-	-
0.8	-	-	-	-	-	-

(アスペクト比: + は増加, - は減少)

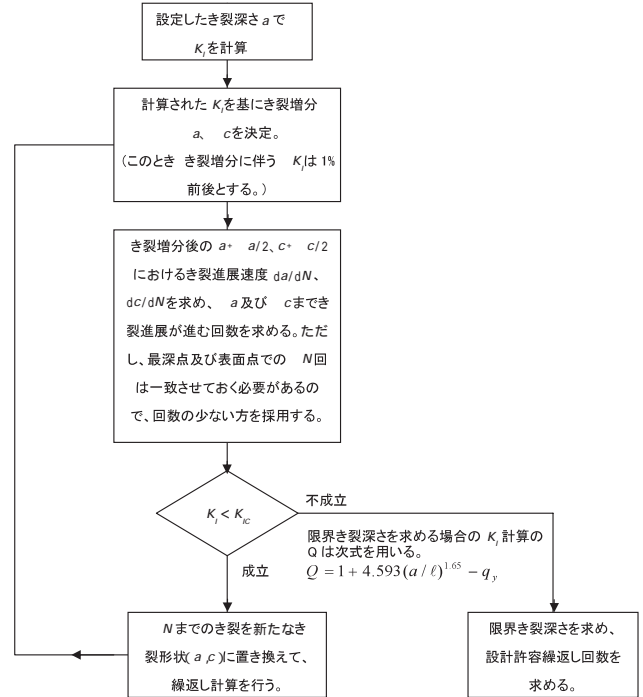


図 11 疲労き裂進展解析のフロー
Flow Chart for Crack Growth Analysis

(2) 表面点におけるき裂増分量の予測

き裂深さ及びアスペクト比は K_I に影響を与えるため、最深点におけるき裂進展の増分 a 及び表面点におけるき裂進展増分 c を適切に設定する必要がある。初めに a を設定し、次に c を予測する。き裂進展速度は K_I の関数であり、次式のように表面点におけるき裂進展量を求めることができる。

$$c = a \left(\frac{K_{Is}}{K_{Id}} \right)^m \dots \dots \dots (11)$$

ここで、 m は材料定数であり、添字 d は最深点、 s は表面点を表す。

2. 疲労き裂進展の簡易評価方法

図 10 及び表 4 に示すように、き裂の最深点及び表面点における K_I の値が異なるため、アスペクト比 a/t が変化する。初期 a/t を $1/3$ とした場合、き裂進展の初期段階は a/t が大きくなるように進展し、その後小さくなるが、き裂深さ比 a/t が 0.2 以下では計算過程で a/t が $1/3$ 以下になることはない。許容繰返し回数を求める場合、 K_I はアスペクト比が小さい方が大きな値となるので、 $a/t = 1/3$ で固定して計算した場合は安全側の値となる。

き裂限界深さ a_c は、 $K_I = K_{IC}$ となるき裂深さ又は厚さの 0.8 倍の深さのどちらか小さい方である。2.3 の応力拡大係数の特性より、アスペクト比を固定することにより容易に a_c を求めることができる。許容繰返し回数は、き裂深さが a_c に達する時の繰返し回数の $1/2$ 又はき裂深さが a_c の $1/4$ に達する時の繰返し回数と比較することで評価を行うことはできるが、使用繰返し回数に対して a_c の $1/4$ までの回数及び使用繰返し回数の 2 倍に対するき裂進展深さと a_c の比較を行うことにより、き裂進展評価を行うこともできる。

2. 疲労き裂進展解析例

配管部品のブロックをモデルとして、き裂進展解析を行った例を示す。この場合、図 12 に示すような評価部位とき裂サイズを想定し、評価を行った⁶⁾。解析条件を表 5 に示す。FEM 解析は $1/4$ 対称モデルを作成し、応力解析を行い、評価ラインを決定した。その結果を図 13 に、評価ライン 1 (き裂評価タイプ B) の応力分布と 4 点法作成の近似式を図 14 に示す。また、評価ライン 1 及び評価ライン 2 の繰返し回数

とき裂深さの関係を図 1 に、き裂進展解析結果のまとめを表 6 に示す。複数の変動荷重がある場合、例えば運転状態で一番大きな荷重となる繰返しに注目して評価することが重要であり、本例の場合には運転条件 1 の回数がポイントとなる。また、評価に際しては、運転条件における運転サイクルに注目する必要があるが、表 5 に示す解析条件では、1 年ごとの運転サイクルの繰返し回数が重要であり、表 6 の下段 () 値はその値を示す。

表 5 超高压配管ブロックのき裂進展解析の条件
Condition of Crack Growth Analysis for Block

1)	名称	T ブロック
2)	サイズ	300 × 350 × 300 mm 内径：50 mm コーナ部：R = 3 mm
3)	材質	高強度低合金鋼 常温 $S_u/S_y = 980/885 \text{ N/mm}^2$ 250 $S_u/S_y = 902/749 \text{ N/mm}^2$
4)	K_{IC}	$70 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$
5)	繰返し荷重	(1) 運転条件 1 (常温) 0 225 MPa, 1 回 / 年 × 30 年 (2) 運転条件 2 (250) 0 200 MPa, 50 回 / 年 × 30 年
6)	初期き裂	$a = 0.8 \text{ mm}$ a/t : コーナ部 $1/2$ ストレート部 $1/3$

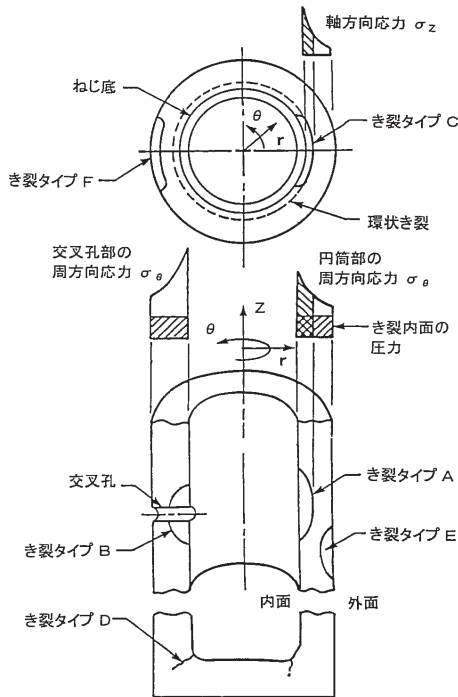


図 12 き裂のタイプ
Categories of Crack Types

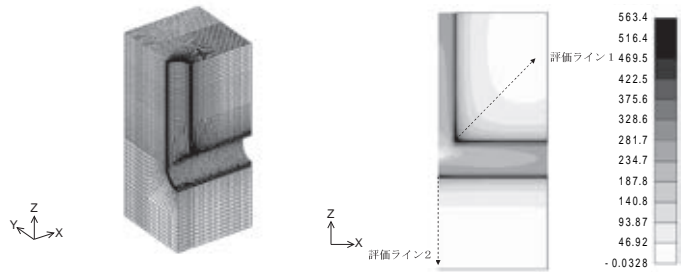


図 13 ブロックの FEM 解析結果とき裂進展の評価ライン
Result of FEM Analysis for Block and SCL for Crack Growth Analysis

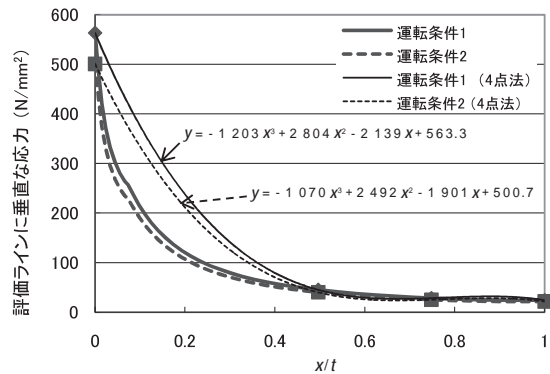


図 14 評価ライン 1 の応力分布
Stress Distribution for SCL 1

表 き裂進展評価結果
Result of Crack Growth Analysis

評価 ライン	限界き裂 深さ a_c (mm)	N_c (a_c に対する 繰返し回数)	$N_c/2$	$a_c/4$	N_q ($a_c/4$ に対する 繰返し回数)	許容繰返し回数 Min($N_c/2, N_q$)	設計繰返し 回数
1	4.54	7 191 (141)	3 595 (70)	1.135	2 228 (43)	2 228 (43)	1 530 (30)
2	11.41	30 906 (606)	15 453 (303)	2.851	19 027 (373)	15 453 (303)	1 530 (30)

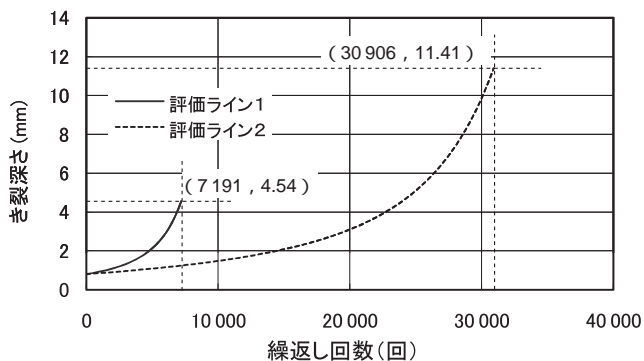


図1 き裂進展解析結果
Result of Crack Growth Analysis

3. おわりに

本報では、KHK 基準について具体的に強度評価を行って
いくうえでのポイントを挙げ解説を行った。超高压設備の評
価に際しては、耐圧部構造の理解、材料選定、圧力・温度及
びその繰返し荷重条件の設定、評価要領の決定などについて
多々考慮すべき事項がある。これらの要件は設備計画を行う
使用者とともに協議を行い、お互いに理解し慎重に決めてい
く必要がある。ここでの記述は一例であり、評価の対象によ
り問題点は異なってくるが、本報で指摘した点については大
筋で強度評価上のポイントになるため、参考にしていただき
たい。

超高压設備の強度評価は、設計技術者のみでは難しく、解
析技術者とのコラボレーションが必要で、お互いに協力して
作業を行っていくことも大切である。幸いにも、当社では社
内関係部署が連携して業務を行う体制が整っており、今後更
に顧客の要請にこたえていきたい。

参 考 文 献

- 1) ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section VIII
Division 3, 2009 Addenda ,(2009)
- 2) 高压ガス保安協会: 高压ガス設備に関する基準 KHK S
0220 ,(2010)
- 3) 日本高压力技術協会: 高压容器規格 HPIS C106 ,
(2005)
- 4) 早川 . ほか : ASME 規格 Sect.VIII, Div.3 に基づく超高
压機器の設計法(第2報),三井造船技報 ,170(2000-6),
p. 30
- 5) 高压ガス保安協会: 推奨による応力分布近似式
- 6) 早川 . ほか : ASME 規格 Sect.VIII, Div.3 に基づく超高
压機器の設計法(第3報),三井造船技報 ,170(2000-6),
p. 45

〔問い合わせ先〕

環境・プラント事業本部玉野プラントセンター
TEL 0863 - 23 - 2352 児玉 嘉弘



児玉 嘉弘



木村 陵介

衣浦港 3 号地廃棄物最終処分場整備事業浮棧橋建設工事
- 処分場用浮棧橋の照査設計・製作・据付 -



写真 1 浮棧橋全景(左:管理型,右:安定型)

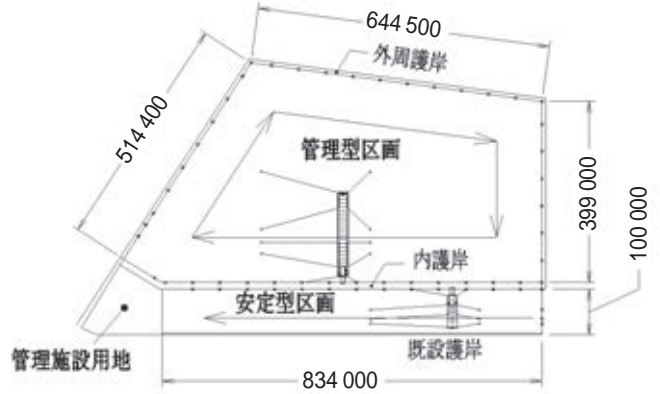


図 1 処分場全体図

衣浦港 3 号地廃棄物最終処分場は、愛知県の新たな最終処分場の確保を目的として整備中で、管理施設用地、管理型区画、安定型区画に分けられる。

本工事は、管理型区画、安定型区画に対応する移動式浮棧橋・他付帯設備の照査設計・製作・据付工事で、2010 年 6 月 30 日竣工、引き渡しを行った。

特徴

- (1) 当処分場の埋立工法は、廃棄物運搬車両が陸地から浮棧橋に直接乗り入れて、連続的に廃棄物を投棄する薄層埋立工法である。この方法は、浮棧橋を移動することにより、同一箇所からの廃棄物投入ではなく、海底面に平行に廃棄物の薄層を積み重ねることができる。
- (2) 浮棧橋は、操作装置、渡船橋を載せる渡船橋台船、操作装置を載せる先端台船、廃棄物投入設備部の中間台船で構成される。各台船は上部で連結して通路及び作業構台が形成され、この作業構台には廃棄物を検査するための展開検査場、廃棄物投入のための土捨板が配備された。その他の付帯設備として、浮棧橋の係留装置、移動装置、廃棄物運搬車両誘導設備(信号機、監視カメラ、拡声器、行先表示盤)及び監視室、照明、衛生設備、発電機、内部倉庫が配備された。
- (3) 浮棧橋の組立は、大分事業所で製作した各種構造物を海上輸送し、現地海上で行った。
- (4) 浮棧橋の移動は、移動距離 4 m でウインチ操作によるワイヤリングのみを行う小移動と、60 m に 1 回の割合で陸上アンカーと水中アンカーの振替作業を行う中移動、浮棧橋の向きを変えて護岸間を移動させる大移動に分けられる。

尚、移動の方向は、図 1 に示される矢印の方向で、安定型は直線的に移動し、管理型は区画内を周回移動する。

主要目

- ・工事名：衣浦港 3 号地廃棄物最終処分場整備事業
浮棧橋建設工事
- ・発注者：財団法人愛知臨海環境整備センター
- ・工事場所：愛知県知多郡武豊町旭地先
- ・工事範囲：浮棧橋の照査設計～製作～据付
- ・工期：2009 年 2 月～2010 年 6 月
- ・総延長：管理型 201.9 m, 安定型 90.0 m
- ・幅員：台船 22.0 m
作業構台 20.0 m
渡船橋車道 8.0 m, 歩道 1.0 m
- ・総鋼重量：管理型 2 535 t, 安定型 1 001 t
- ・主要鋼材：SS400, SM400A
- ・対象車両：25 t 車(主要は 10 t ダンプ)
- ・揚錨船：10 t(総トン数)×2 隻

(鉄構・物流事業本部)

なお、厳しい工期にも拘らず予定通り完成したことが評価され、財団法人愛知臨海環境整備センターより感謝状を頂きました。

〔問い合わせ先〕

鉄構運搬機工場 鉄構設計部
TEL 097 - 593 - 3062 川村 善郎

拾六町高架橋上部工(P30 ~ P)工事
 - 大ブロック相吊架設工法による鋼箱桁橋 3 連の施工 -



写真 1 全景



写真 2 夜間架設の状況

本工事は、福岡外環状道路と今宿道路の自動車専用道路部分を接続する箇所位置する。本工事で架設した拾六町高架橋の供用開始により、西九州自動車道と九州縦貫自動車道が自動車専用道路で結ばれることになり、福岡市を中心とした都市間ネットワークの強化、高速性、定時性確保、福岡市西南部地域の交通混雑の緩和が期待されている。

三井造船は、2008年9月に本工事を国土交通省九州地方整備局より受注し、4径間連続非合成箱桁橋1連、3径間連続非合成箱桁橋2連の工場製作、輸送及び現地架設を行い、2010年3月竣工、引渡しを行った。

特徴

- (1) 本工事は製品質量は3橋合計で3752tであり、一般的な橋梁工事と比べると非常に大規模であった。そのため、工場製作時の桁精度確認のための仮組立検査を7回に分けて実施した。
- (2) 本工事は架設地点は国道202号線、福岡外環状道路の交通量の多い道路の交差点付近であった。10径間ある橋梁の内、8径間はこれらの道路上に位置したため、夜間作業にて施工した。
- (3) 福岡都市高速道路が上架されている箇所が2径間、交差点が2径間、河川が1径間と、架設上の障害物が多かったため、架設中の仮支点であるベント設置位置に制約があり、地組立を行い大型搬送車による横持ち 大型クレーン(650t、400t)2台による相吊一括架設を行った。
- (4) 本橋は曲線桁で、かつ箱桁断面が逆台形断面であるため、相吊架設中に桁が不安定状態になる恐れがあった。そのため、事前に架設状態の解析を行い、不安定と評価した大ブロックには、桁上にカウンタウェイトを載せ、アン

バランスを解消させて架設する工夫を行った。

主要目

- 1) P308 橋脚 ~ P1 橋脚

形式	鋼4径間連続非合成箱桁橋
橋長	226.179 m
支間長	43.479 m + 65.5 m + 61.5 m + 54.3 m
有効幅員	11.338 m ~ 16.420 m
主要鋼材	SM490Y, SM400A
鋼材質量	1 523 t
- 2) P1 橋脚 ~ P4 橋脚

形式	鋼3径間連続非合成箱桁橋
橋長	195 m
支間長	53.3 m + 82.5 m + 57.8 m
有効幅員	16.420 m ~ 13.533 m
主要鋼材	SM570, SM490Y, SM400A
鋼材質量	1 533 t
- 3) P4 橋脚 ~ P7 橋脚

形式	鋼3径間連続非合成箱桁橋
橋長	135.5 m
支間長	41.3 m + 42.0 m + 50.9 m
有効幅員	13.533 m ~ 11.870 m
主要鋼材	SM490Y, SM400A
鋼材質量	696 t

(鉄構・物流事業本部)

[問い合わせ先]

鉄構運搬機工場 鉄構設計部

TEL 097 - 593 - 3773 松田 秀一

大分県 貝殻岳橋(仮称：野津原4号橋)
- 平面曲線 10R, % 下り勾配での送り出し架設 -



写真1 完成時全景



写真2 送り出し架設状況

国道442号は、福岡県大川市と大分県大分市を結ぶ約146kmの幹線道路であり、九州を横断する重要な路線である。中でも大分県内の旧野津原町から国道57号(旧朝地町)への接続区間は、道路幅員が狭く、かつ小半径のカーブが連続するため、走行性・安全性を改良する整備が進められている。野津原バイパスは、大分市大字下詰から大字今市まで4.2km区間の道路改良事業であり、貝殻岳橋(仮称：野津原4号橋)は、このバイパスに位置する橋梁である。

特徴

本橋の架設は、送り出し架設工法が採用された。工法選定の理由は、橋梁は山谷部に架設されることから、地表面からの高さが30m以上となり、ペントの設置、トラッククレーンの設置が困難であったためである。送り出し架設は、平面曲線180R、縦断下り勾配6%での送り出し条件となり、全国でも実例が少なく、難易度の高い架設工事となった。

(1) 小半径180Rでの送り出し

本橋の平面線形は、S字曲線を有し、最小半径は180Rに達していたため、送り出し中の位置調整は難易度の高いものとなった。そのため、超音波センサーを各橋脚上に設置し、桁の面外方向の移動量を常時モニタリングし、桁平面位置の調整・管理を行いながら、送り出しを行った。これにより、複雑な線形下での桁送り出し時の位置精度を高めると共に、転倒による桁上、桁下の作業員の安全性を向上させることができた。

(2) 6%下り勾配での送り出し

本橋の縦断勾配は6%を有している。一般的に送り出し架設は、安全面より上り勾配で桁を送り出すことが多い。しかし本橋は、縦断勾配の低いA1橋台の背面に桁を地組

するスペースが無かったため、縦断勾配の高いA2橋台から下り勾配で送り出す条件となった。そこで、送り出し架設の安全性を高めるため、以下の対策を行った。

6%下り勾配での送り出し実績はないため、架台を組むことで、3%に縦断勾配を緩和し、安全性を高めた。

送り出し構台と桁を、プレーキジャッキを通してPC鋼線で繋ぎ、異常時にはジャッキを作動させることで桁の移動を制止する逸走防止装置を設置した。

レールクランプジャッキの使用により、常に台車と軌条を連結した状態で送り出しを行うことで、安全性を高めた。

以上の対策により、無事故、無災害で工事を完工することができた。

主要目

工事名：平成20年度道改国第14-3号橋梁整備工事
発注者：大分県大分土木事務所
工事場所：大分県大分市大字上詰
橋梁形式：3径間連続非合成鋼桁
橋長：124m 支間長：40.3m + 42.0m + 40.3m
幅員：10.5m(有効幅員：9.5m)
平面線形：R=160 ~ A=80 ~ ~ A=80 縦断勾配：6%
主要鋼材：SMA490W, SMA400W, S10TW 鋼重：309t
工期：平成20年9月20日 ~ 平成22年4月20日
(鉄構・物流事業本部)

[問い合わせ先]

鉄構運搬機工場 鉄構設計部
TEL 097-593-3773 太田 真二

EGS が国際燃焼機関会議で最優秀論文賞を受賞

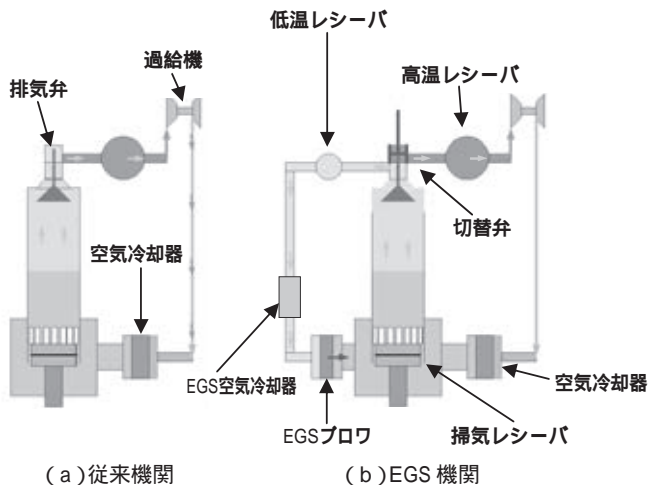


図1 従来機関とEGS機関の比較

本年6月ノルウェーで開催された第26回国際燃焼機関会議(CIMAC)ベルゲン大会において、当社の玉野事業所機械工場ディーゼル設計部高橋元幸が発表した「Study of Exhaust Gas Separation System on 2-stroke Diesel Engine¹⁾ (排ガス分離装置: EGS)」が最優秀論文賞に輝いた。本会議は第1回のパリ大会(1951年)以来60年に及ぶ歴史を持ち、世界から900名近い参加者を集め、発表論文数180件を超える大規模な国際会議である。

当社が製造する2ストローク船用ディーゼル機関は、その優れた燃費性能(熱効率)から多くの商船に採用されている。しかしながら、近年、地球環境問題から船舶からの有害汚染物質放出量の削減が求められ、主に温室効果ガスのCO₂と大気汚染物質のNO_xがその対象となっている。一方、2ストロークディーゼル機関の熱効率は、既に50%を超え理論熱効率に近く、もはや機関単体での燃費改善(CO₂削減)は多くを期待できない状況にある。今回受賞のEGSは、全体を一つの熱機関と見なして有害物質の削減を図るものである。EGS²⁾は図1に示すように、従来の排気弁に加え、その後流側に切替弁を装備している。排気弁開弁期間において、開弁初期の高温で多くの有害物質を含んだ排気ガスを高温レシーバから過給機へ導いたのち、掃気(新気によるシリンダ内のガス交換)が始まったあとの低温で有害物質の少ない排気ガスを低温レシーバ、EGS空気冷却器及びEGSプロワを介して掃気レシーバへ再循環させる。これにより、EGS機関は以下の利点を持つことになる。

写真1 国際会議参加者
(左より大津, 高崎教授(九大), 高橋(受賞者), 杉浦, 田中)

排気ガスの高温化で過給機タービン動力が大幅に余剰となり、その余剰動力を電気や油圧に変換して回収することで船内総合熱効率が向上する。

過給機通過後の排ガス温度も大幅に上昇するためNO_xを無害化する選択的触媒還元装置(Selective Catalytic Reduction: SCR)を機関から分離し過給機後に設置し小型化が可能となる。

同様に過給機後段に設置される排ガスボイラー(WHR)の効率が向上する。

大気からの導入風量の減少により過給機が小型化する。今回の受賞は、これらのEGS構想の新規性が高く評価されたものと思われる。このシステムは、国土交通省、日本財団及び日本海事協会からの補助事業である「船用大型低速ディーゼル機関のCO₂削減技術の研究開発」において、4気筒電子制御式ディーゼル機関で実証試験が行われ、将来機関(EGS機関)として製品化する計画である。

参考文献

- 1) M. Takahashi, et al.: Study of Exhaust Gas Separation (EGS) System on 2-stroke Engine, CIMAC Congress 2010, Paper No. 108
- 2) 田中. ほか: ディーゼルエンジン - 環境対応関連の技術開発 -, 三井造船技報, 200(2010-6), p. 39

お詫びと訂正

三井造船技報 第198号(2009-10)p.17の表5中の項目とp.18の表7中の数値に誤りがありましたので、お詫びして訂正いたします。

(誤)

表 試験装置仕様
Main Specifications of NGH Reactor

項 目		仕 様
内寸法	mm	390 × 575
内容積		22
材質	-	SUS304
かくはん機	rpm	0 ~ 1 000

(正)

表 試験装置仕様
Main Specifications of NGH Reactor

項 目		仕 様
内寸法	mm	249 × 489
内容積		22
材質	-	SUS304
かくはん機	rpm	0 ~ 1 000

(誤)

表 計算条件
Calculation conditions

原料ガス	-	表 6 と同
初期反応器気相	-	原料ガスと同
気相容積		0.5
生成圧力	MPa abs	5.5

(正)

表 計算条件
Calculation conditions

原料ガス	-	表 6 と同
初期反応器気相	-	原料ガスと同
気相容積		12
生成圧力	MPa abs	5.5

三井造船技報編集委員会

委員長	中 谷 龍 男
委 員	木 澤 厚 夫
	福 岡 哲 二
	小 野 純 二
	川 島 幸 司
	速 水 礼
	大 橋 弘 隆
	尾 角 敏 宣
	松 本 正 文
	神 田 伸 靖
	馬 場 茂 利

三 井 造 船 技 報

第 201 号

2010 年(平成 22 年)10 月 29 日発行
(年 3 回発行)

発行人	入 江 泰 雄
発行所	三井造船株式会社 技術本部 〒103 - 0027 東京都中央区日本橋 1 丁目 3 番 16 号 TEL 03 - 5202 - 3600
印 刷	株式会社 三造ビジネスクリエイティブ 〒134 - 0088 東京都江戸川区西鑑西 8 丁目 4 番 6 号

万一、落丁・乱丁がありました節は、お取り替えします。

(非売品、無断転載を禁ず)

三井造船株式会社

<http://www.mes.co.jp/>

本社	〒103-0027	東京都中央区日本橋1丁目3番16号	TEL 03-5202-3147
鑑西センター	〒134-0088	東京都江戸川区西鑑西8丁目4番6号	TEL 03-3675-2819
北海道支社	〒060-0807	札幌市北区北七条西4丁目5番地1(伊藤110ビル)	TEL 011-736-0036
東北支社	〒980-0811	仙台市青葉区一番町2丁目7番17号(朝日生命仙台一番町ビル)	TEL 022-262-3481
中部支社	〒450-0003	名古屋市中村区名駅南1丁目24番30号(名古屋三井ビル)	TEL 052-582-0145
関西支社	〒550-0004	大阪市西区靱本町1丁目11番7号(信濃橋三井ビル)	TEL 06-6447-2001
岡山支店	〒700-0903	岡山市幸町8番29号(三井生命ビル)	TEL 086-233-4131
中国支社	〒730-0051	広島市中区大手町2丁目7番10号(広島三井ビル)	TEL 082-248-0311
呉営業所	〒737-0045	広島県呉市本通3丁目5番18号(メゾンロイヤル)	TEL 0823-25-7837
四国支店	〒760-0050	高松市亀井町5番地1(百十四ビル)	TEL 087-833-4111
松山営業所	〒790-0002	松山市二番町3丁目3番8号(伊予石油ビル)	TEL 089-947-7060
九州支社	〒812-0011	福岡市博多区博多駅前1丁目1番1号(博多新三井ビル)	TEL 092-411-8111
東九州支店	〒870-0027	大分市末広町1丁目1番18号(ニッセイ大分駅前ビル)	TEL 097-537-9260
沖縄支店	〒900-0033	沖縄県那覇市久米2丁目4番16号(三井生命那覇ビル)	TEL 098-869-3135
玉野事業所	〒706-8651	岡山県玉野市玉3丁目1番1号	TEL 0863-23-2010
千葉事業所	〒290-8531	千葉県市原市八幡海岸通1番地	TEL 0436-41-1112
大分事業所	〒870-0395	大分市日吉原3番地	TEL 097-593-3111
技術本部			
玉野技術開発センター	〒706-0014	岡山県玉野市玉原3丁目16番1号	TEL 0863-23-3001
千葉技術開発センター	〒290-8531	千葉県市原市八幡海岸通1番地	TEL 0436-41-1110
CAEセンター	〒706-0014	岡山県玉野市玉原3丁目16番1号	TEL 0863-23-3101
昭島研究センター	〒196-0012	東京都昭島市つつじが丘1丁目1番50号	TEL 042-545-3111
つくば研究センター	〒103-0027	東京都中央区日本橋1丁目3番16号	TEL 03-5202-3600
海外事務所	シンガポール, 北京, 上海, ジャカルタ, ハノイ, クアラルンプール		
海外現地法人	三井造船ヨーロッパ株式会社(ロンドン) 三井造船(U.S.A.)株式会社(ニューヨーク)		

三井造船技報 第 201 号の発行に当たって

「三井造船技報」をご高覧いただき、ありがとうございます。

本誌は、当社が平素ご指導いただいている方々へ、最近の当社の新製品や、それを支える技術についてご紹介するものです。本誌の内容につきましては、更に充実を図る所存ですが、忌憚のない御意見を賜りましたら、大変幸甚です。

送付先の貴組織名、ご担当部署、所在地などにつきましては正確を期しておりますが、変更などがございましたら、以下にご記入の上、FAX でお知らせ頂きたくお願い申し上げます。

敬具

キ リ ト リ 線

FAX : 03 - 5202 - 3610

三井造船株式会社 技報編集委員会 事務局 行(TEL. 03 - 5202 - 3600)

三井造船技報 送付先の確認と第 201 号へのご意見等について

1. 送 付 先 : 従来通り 変更 削除 (いずれかに V を付けてください)

a) 旧送付先

所在地 〒 _____

組織名称 _____

担当部署 _____

旧送付先は、現在の宛先ラベルのコピーをここに貼付して頂いても構いません。

b) 新送付先

所在地 〒 _____

組織名称 _____

担当部署 _____

ご担当者 _____

TEL No. _____

FAX No. _____

2. 今後の編集に反映させていただくため、下記アンケートにご協力をお願いします。

(1) 本号で興味のある記事をお知らせください。(最初のページ No. で可。複数回答可)

技術論文・報告では

製品・技術ニュースでは

その他の記事では

(2) その他、ご意見・ご要望あれば、お聞かせください。

キ
リ
ト
リ
線

主要営業品目

船舶・艦艇事業本部 TEL 03-5202-3510 FAX 03-5202-3599

液化天然ガス（LNG）運搬船，液化石油ガス（LPG）運搬船，原油輸送船，石油精製品運搬船，ばら積貨物船，オープンハッチ型貨物船，鉱石運搬船，石炭運搬船，コンテナ船，自動車運搬船，FSO，FPSO，超高速貨物船，超高速カーフェリー，各種特殊船
修繕船，各種改造船工事，M & R エンジニアリング
護衛艦（DD），潜水艦救難母艦（AS），潜水艦救難艦（ASR），音響測定艦（AOS），輸送艦（LST），補給艦（AOE），掃海母艦（MST），海洋観測艦（AGS），巡視船，練習船，海洋気象観測船，漁業調査船，漁業取締船，海洋調査船，研究調査船，物理探査船，環境整備船，視察船，測量船，交通艇，消防艇，高速旅客船，ホーバークラフト，高速カーフェリー，深海探査ロボット（AUV，ROV）
自動艦位保持装置（DPS），システム操船装置，艦橋情報表示装置（ABS / IBS），舵減揺装置，船体運動状態表示装置（SMACS），航海情報表示装置，フィンスタビライザー，中折式デッキクレーン，赤外線低減装置，弾薬搭載機材，補機制御表示装置，機関操縦装置，水中放射雑音シミュレータ，防火防水実習場，各種訓練水槽，操船シミュレータ
水中点検 / 作業ロボット，水中探査ロボットを用いた水中点検サービス

鉄構・物流事業本部 TEL 03-5202-3900 FAX 03-5202-3937

橋梁，ハイブリッド構造物（浮筒波堤，浮消波堤，浮棧橋，浮体式係船岸，ケーソン），海洋構造物（シーバース，ケーソン，沈埋函，ジャケット），浮体式海洋設備，海外土木・建築工事全般，特殊構造物，風力発電設備工事
岸壁用コンテナクレーン，ヤード用コンテナクレーン，船用ガントリークレーン，ローダー，アンローダー（連続式，グラブバケット式），ジブクレーン，天井クレーン，コンテナターミナルマネジメントシステム

機械・システム事業本部 TEL 03-5202-3950 FAX 03-5202-3977

船用ディーゼル機関，ディーゼル発電プラント
プロセス用圧縮機（往復動式，軸流式，遠心式），蒸気タービン発電設備，炉頂圧回収タービン発電設備，一般機械装置
塔槽，熱交換器，反応器，回転式乾燥機，重合機，攪拌槽，LNG 船用熱交換器，PV 膜分離装置
ディーゼルコージェネレーション発電プラント，ガスタービンコージェネレーション設備，複合発電設備，ガスエンジン
省力化機器（清掃ロボットなど），センシング機器（地中埋設物・建築物探査レーダ，太陽追尾探光システム，複合材剥離検査器），レーダ探査サービス，水理実験設備，訓練用シミュレータ
誘導加熱装置（バーヒータ，ピレットヒータ，ピンヒータ），薄板加熱装置，高周波電源装置（PWM インバータ，サイリスタインバータ，ゾーンコントロール用電源），銅管焼鈍装置，電磁プロセッシング応用機器（電磁攪拌，電磁モールド）
SiC ウェハー，CVD-SiC コーティング，スパッタリング用ターゲット材
LSS（ライフサイクルソリューションサービス：陸・船用ディーゼルエンジン，ガスタービン，各種ボイラ，プロセス用圧縮機，蒸気タービン発電設備，炉頂圧タービン発電設備，プロセス機器，誘導加熱装置，各種クレーンの保守，改造用部品・機器の供給，性能改善・改造工事・延命工事などのエンジニアリング・サービスと施工）
IT を活用した各種設備・機器のリモートモニタリングサービス・診断サービス・情報サービス
各種設備・機器の包括 / 一括メンテナンスサービス，各種技術サービス（運転及びメンテナンスにかかわる技術指導・工事指導・工事施工）
低温ポリシリコン TFT 用イオン注入装置，ゾーンコントロールヒータ利用液晶・半導体加熱処理装置，FPD 用各種検査装置，その他半導体・液晶パネル用各種製造装置製造受託

環境・プラント事業本部 TEL 03-3675-6984 FAX 03-3675-6429

プラントのエンジニアリング及び建設工事（石油化学，化学繊維，合成樹脂，石油精製，ガス製造・精製，無機化学，化学肥料，石炭化学，発酵関連，ファインケミカル，代替エネルギー関連），プラント要素技術（加熱炉，分離炉，分解ガスクエンチャー，高粘度流体脱揮装置，PSA 装置），エンジニアリング支援システム，フィージビリティスタディ，プラントメンテナンス，SDM 工事
原子燃料サイクル関連，放射性廃棄物処理関連
三井リサイクルリング 21（キルン式ガス化溶融システム），廃棄物処理関連（流動床式焼却炉，粗大ごみ処理施設，リサイクルセンター，加熱脱塩素化装置，ダイオキシン分解触媒，炭化炉），ガス処理関連（脱塩，集塵）
水処理関連（産業排水，汚泥），ガス処理関連（排煙脱硫，排煙脱硝，脱臭），廃棄物再資源化システム（焼酎廃液，有機性廃棄物からのメタン発酵，コンポスト及び乾燥装置），バイオガスプラント（生ごみ・汚泥バイオガスプラント，油温減圧乾燥式食品廃棄物再資源化システム，家畜糞尿再資源化システム）

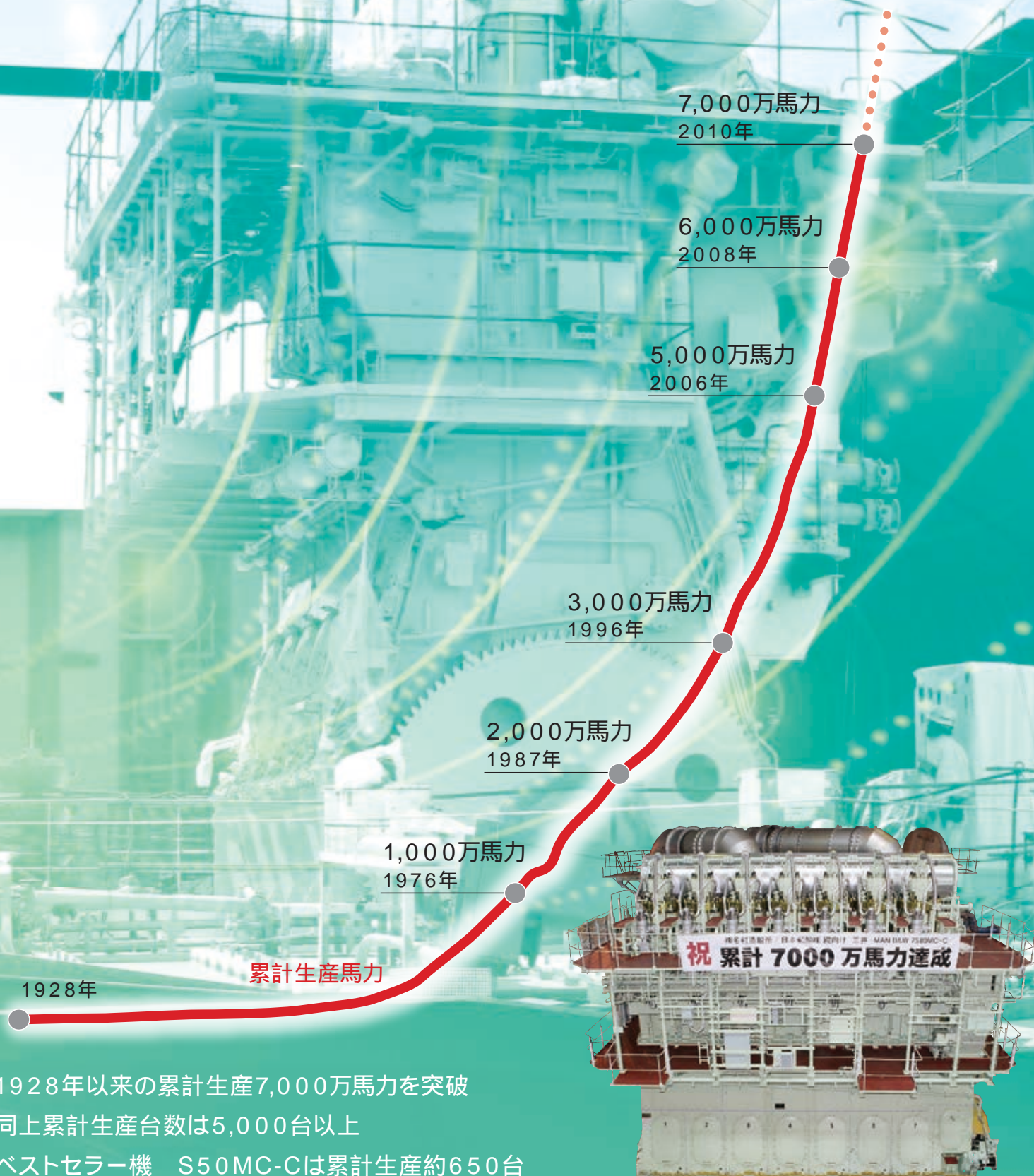
事業開発本部 TEL 03-5202-3981 FAX 03-5202-3989

新規事業の発掘・立案・計画・事業化推進，全社の事業開発の統括・推進，社内向け事業開発関連情報の発信，新規事業のフィージビリティスタディ，新規事業のプロジェクトの推進
ガスハイドレートの製造・貯蔵・輸送・ガス化技術の開発，ガスハイドレートの特性を生かした各種事業開発，海底資源メタンハイドレートの探査・掘削技術の開発，PCB 処理プロジェクト
船舶運航支援のポータルサービス，フリートモニター

営業総括本部 TEL 03-5202-3940 FAX 03-5202-3125

CS（顧客満足）向上活動の推進，全社にかかわる営業戦略の企画・立案・推進，各事業本部の営業支援及び社内横断プロジェクトの推進，新規事業の発掘と事業化推進，国内・海外営業拠点（支社，支店，営業所，海外駐在員事務所）の統括と受注活動の推進
海外プロジェクトの推進（ODA 案件），海外新規案件の発掘及び支援

三井-MAN B&Wディーゼルエンジン 累計生産7,000万馬力を達成！



- ・1928年以来の累計生産7,000万馬力を突破
- ・同上累計生産台数は5,000台以上
- ・ベストセラー機 S50MC-Cは累計生産約650台