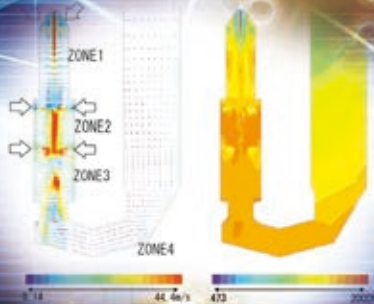


三井 造船 技報

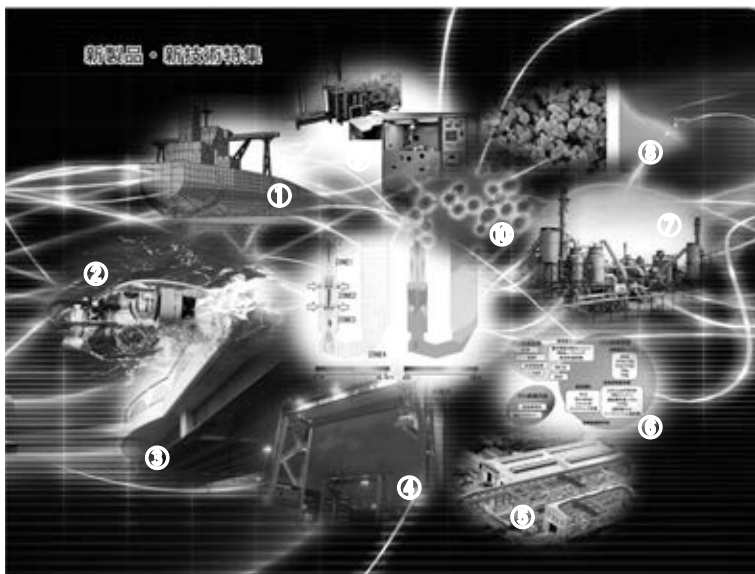
平成 22 年 6 月 第 200 号

MITSUI ZOSEN TECHNICAL REVIEW No. 200 2010

新製品・新技術特集



創刊200号記念特集号



- 船舶の構造設計における数値解析技術 (p. 2)
 振動解析 FEM モデル
 特機・水中関連機器の開発 (p. 8)
 RTV・N-Hyper200
 ライフサイクルコストを考えた橋梁構造の合理化と技術開発 (p. 16)
 複合橋梁 MD ブリッジ第 1 号橋
 環境対応型コンテナ荷役機器 (p. 22)
 ハイブリッドトランスターナ
 ディーゼルエンジン - 設計・製造関連技術 - (p. 26)
 ディーゼルエンジン組立て工場内配置図
 ディーゼルエンジン - 環境対応関連の技術開発 - (p. 35)
 NOx・SOx・CO₂ 排出削減技術
 最新技術に基づく三井造船の硫酸プラント (p. 41)
 モロッコ王国向硫酸設備
 低炭素被覆・高性能リン酸鉄リチウム正極材料の開発と量産化 (p. 46)
 新開発のリン酸鉄リチウム正極材の SEM/TEM 像
 成膜技術開発への取り組み (p. 51)
 熱 ALD 装置外観, ECR 成膜装置外観図
 環境・エネルギー製品を支えるバイオ技術 (p. 58)
 酵母細胞の顕微鏡観察写真
 バイオカスケード事業を支える熱分解・ガス化技術 (p. 65)
 ガス化炉部分燃焼ゾーン CFD 解析結果

三井造船技報

2010年(平成22年)6月・第200号

目次

創刊200号記念特集号

巻頭言

| | |
|--------------------|---|
| 創刊200号発行を迎えて | 1 |
| 取締役技術本部長 入江 泰雄 | |

技術解説

| | |
|------------------------------------|----|
| 船舶の構造設計における数値解析技術 | 2 |
| 船舶・艦艇事業本部 今北 明彦 | |
| 特機・水中関連機器の開発 | 8 |
| 船舶・艦艇事業本部 松嶋 正和 | |
| ライフサイクルコストを考えた橋梁構造の合理化と技術開発 | 16 |
| 鉄構・物流事業本部 小林 潔 | |
| 環境対応型コンテナ荷役機器 | 22 |
| 鉄構・物流事業本部 小川 寛 | |
| ディーゼルエンジン - 設計・製造関連技術 - | 26 |
| 機械・システム事業本部 東條 温司 | |
| ディーゼルエンジン - 環境対応関連の技術開発 - | 35 |
| 機械・システム事業本部 田中 一郎 | |
| 最新技術に基づく三井造船の硫酸プラント | 41 |
| 環境・プラント事業本部 山關 八重美 | |
| 低炭素被覆・高性能リン酸鉄リチウム正極材料の開発と量産化 | 46 |
| 事業開発本部 坂口 善樹 | |
| 成膜技術開発への取り組み | 51 |
| 技術本部 宮武 直正 | |
| 環境・エネルギー製品を支えるバイオ技術 | 58 |
| 技術本部 闇岡 一栄 | |
| バイオカスケード事業を支える熱分解・ガス化技術 | 65 |
| 技術本部 宮地 健 | |

製品・技術ニュース

県道高速名古屋新宝線西郊通工区上部工事

- 鋼桁橋 6 連，鋼製橋脚 10 基，鋼製フーチング 6 基の設計・施工 - 70

断面修復材“ なおしタル ”の試験施工

- 橋脚および水路の断面修復 - 71

トピックス

「三井の 56」シリーズ 100 隻竣工を達成 72

Home Page News

世界初の天然ガスハイドレート(NGH)陸上輸送の実証研究が完了 73



創刊 200 号発行を迎えて

取締役 入江 泰雄
技術本部長

三井造船は、会社創立以来 93 年、ものづくり企業として、人に信頼され社会に貢献する製品を提供して参りました。そのものづくりを支える技術の結集というべき三井造船技報が、創刊以来本号にて 200 号となる節目を迎えました。ここに至るまで長きに亘り頂戴しましたご指導・ご支援に対し、お客様、大学・関係各官庁・研究機関の方々に厚くお礼申し上げます。

技報は、当社の技術の軌跡であり、過去を振り返りますと製造関連技術、流体関連技術、強度関連技術等の基盤技術開発から始まり、技術進歩・社会変化に合わせ、数多くの技術開発・製品開発を実施し、それらが当社の事業を支え発展させて参りました。

しかし、最近の技術進化、社会ニーズの変化は多種多様でかつ急速です。一方、リーマンショック以降の世界経済収縮は、完全回復にはまだ暫く時間が掛かる様相であり、この収縮した市場において、韓国、中国、国内企業との競争も一層厳しさを増しております。このような環境下で、当社がものづくり企業として、今後も発展して行くためには、技術力の強化が必須であります。中核製品においては、技術基盤を強固にすると共に差別化を目指した開発を推進して行くこと、また、将来ニーズをにらみ、新規事業創生の礎となる新たな技術を開発・獲得して行くことの重要性が益々増大しています。

この状況を踏まえ、当社は、基盤技術から新技術に至るまで、種々の技術開発に取り組んでおります。特に、環境・エネルギー分野においては、船型開発技術、ディーゼル機関排熱利用技術、システム制御技術等、当社の総合力を結集して CO₂ 排出量 30% 削減船の開発に注力中であり、ディーゼル機関では CO₂ 排出削減のみならず、有害物質排出削減技術の開発も推進しています。

また、バイオカスケード構想のもとバイオエタノール関連の技術開発を推進すると共に、新分野への取り組みとして天然ガスの次世代の貯蔵・運搬方式を目指した天然ガスハイドレート技術 (NGH) 実用化開発、高性能の次世代リチウム電池正極材料開発を実施中です。更に、自然エネルギー活用として、太陽エネルギー利用技術、波力発電技術、洋上風力発電用浮体の開発等にも取り組みを開始しております。

当社は、これからも人に信頼され社会に貢献する製品を提供し続けるために、新たな技術を常に取り入れ、将来を見据えた技術開発を推進して参ります。そのためには、自社に止まらず、大学、研究機関を初めとして関係各位との連携を更に強化して行く所存です。

今後も三井造船の「確かな技術」を皆様のニーズに遅れること無くタイムリーにお届けすることを念頭に、本技報の編集・発行を進めて参りますので、どうぞよろしくお願い申し上げます。

船舶の構造設計における数値解析技術

船舶・艦艇事業本部 今北明彦

1. まえがき

三井造船では液化天然ガス(LNG)運搬船、油タンカー、ばら積貨物船、鉱石運搬船、護衛艦、巡視船、練習船、高速船など多種多様な船舶を開発、建造している。その構造設計に当たっては、船級協会規則などの適切な規則に従って種々の解析を実施し安全性を確保する。更に、新しい形式の船舶や LNG 船のように高度な信頼性が要求される船舶に対しては、最新の数値解析技術を適用して、より合理的な船体構造の開発に努めている。船舶の構造設計に用いる数値解析としては船体に作用する荷重を算定するものと、変位、応力、振動などの構造応答を算定するものがある。荷重を算定する数値解析手法としてはストリップ法が代表的であり、波浪中の船体運動を解析し、船体に作用する波浪変動圧や曲げモーメントなどを算定する。構造応答を算定する手法としては有限要素法(FEM)が代表的である。算定された荷重を構造解析モデルに負荷し、船体の各部材に生じる応力、変形などを解析する。解析の手法は種々あり、通常の荷重解析においては、波は非圧縮性流体の微小波高と仮定され、船体は剛体として取り扱われる。構造応答解析は微小変形の弾性問題として取り扱われる。特殊なケースとしては、大波高を高速走行する船舶のスラミング解析、水中爆破を受ける船体構造の応答解析などがあり、大波高、圧縮性流体、空気と液体の複数流体などの影響を考慮した解析がなされる。構造解析においても大変形、弾塑性解析などが適用される。更に、近年の計算環境の著しい進歩の結果、並列計算機を使用しての大規模解析も可能となり、動的、大変形、弾塑性といった非線形現象を直接解く陽解法による解析が可能となっている。当社でも最新の数値解析技術を取り入れ、船舶の安全性、信頼性、快適性を高める努力を常に行っている。本報では、船体構造設計、構造解析で用いているそれら数値解析技術を紹介する。

2. 一般商船構造設計における数値解析技術

当社では、大ヒット商品 5 万 6 千トン型ばら積み貨物船「三井の 56」から世界最大級の鉱石運搬船「ぶらじる丸」に至る多様な商船に対して数値解析を駆使することにより、構造安全性とコストの両立を実現している。

貨物船に対する構造設計は船級協会規則の評価基準に従って、主として貨物倉構造に対する強度解析を実施しており、一般的には

- ・貨物倉中央部強度解析
- ・全船応力解析
- ・詳細疲労解析

等を実施する。入力となる波浪荷重は船級協会が就航実績、

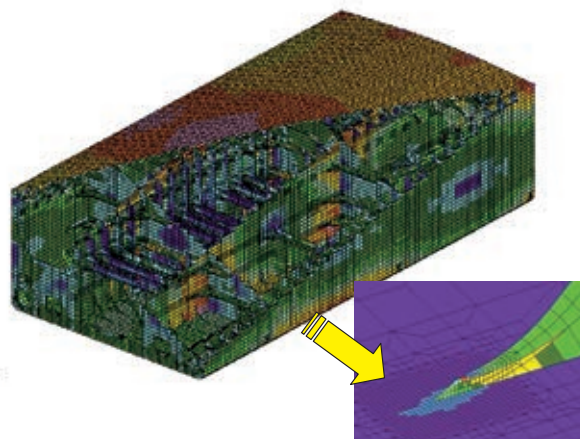
数値解析、実験等から規定した算式によって得られた値を用いるが、高度な信頼性が要求される船舶では建造会社でストリップ法、特異点分布法、ランキンソース法等の波浪荷重解析により算出することもある。

以下では、一般商船に関する最近の設計事例を中心に構造設計における数値解析技術の活用事例を紹介する。

2.1 油タンカー、ばら積貨物船の構造解析(CSR)

油タンカー、ばら積貨物船に対しては近年、共通構造規則(CSR)¹⁾と称する規則が適用されることとなった。CSR は構造安全性を向上させることを目的とし、従来と比較して多数の荷重条件、多数の評価箇所に対して解析を実施し、評価することを要求している点が特徴である。ここでは 30 万トンの油タンカー(VLCC)における事例を紹介する。貨物倉中央部の強度解析では船体中央部の 3 タンクを取り出した要素数 20 万程度の FEM 解析モデルを用い、26 ケースの荷重条件に対して強度評価を実施している。図 1 に VLCC の強度解析モデルを示す。

応力解析は汎用構造解析プログラム MSC NASTRAN によって実施し、解析によって得られた応力値と評価基準応力の比較による降伏強度評価、座屈応力との比較による座屈強度評価を行うことによって安全で合理的な部材形状、寸法、防撓材の配置等を決定する。各船級協会は独自の解析評価システムを開発しており、ここにあげる例は財団法人日本海事協会が作成した解析評価システム PrimeShip - "HULL"²⁾を適用した解析である。更に応力が集中する強度上の重要箇所に対しては、別途 50 mm × 50 mm 程度の要素を用いて詳細形状を正確に表現したモデルを用いて評価を行っている。



詳細構造の強度解析

図 1 VLCC の強度解析モデル(CSR)

2.2 詳細疲労解析(「ぶらじる丸」)

2007年に就航した世界最大級の32万トン鉱石運搬船「ぶらじる丸」では、規則要求に加えて更なる構造信頼性の向上を図るため、独自に詳細な疲労強度評価を実施している。当社で開発したストリップ法プログラム“PLOW”³⁾により算出した波浪荷重の周波数応答関数とFEM解析によって算出した単位荷重に対する応力応答値から規則波中の応力応答を求める。更に、波スペクトルと就航海域の波浪頻度テーブルから25年間で発生する応力応答の長期予測値を算出し、S-N線図により疲労寿命を推定している。強度上厳しい箇所については形状、寸法の変更を行い、安全性の向上を図っている。評価対象近傍は応力集中を正確に把握するため、板厚程度に分割した要素を用いたFEM解析により応力応答を算出している。図2に解析モデルを示す。ここで述べた疲労解析は一般的に設計で行われている解析であるが、研究開発中の疲労解析技術については4.に述べる。

2. LNG船の構造解析

高付加価値船の典型例であるLNG船では客先においても構造信頼性に対する関心が高く、高度な解析を実施することが多い。一例として、スノービットプロジェクト向けMOSSタイプLNG船で実施した事例を紹介する。本船は波浪荷重解析を含めた詳細な強度評価を実施した船舶に与えられるDNV(Det Norske Veritas)の船級符号CSA-2を取得しているが、その要求の一つとして最大波高時の強度評価がある。設計寿命中に北大西洋海域で最大波高に遭遇した際の強度評価を実施するため、波浪荷重は大波高時の非線形性を考慮したDNV船級協会のランキンソース法プログラム“WASIM”⁴⁾によって算出し、全船をモデル化したFEMモデルにこの荷重を負荷することにより強度評価を実施している。図3に波浪荷重解析モデルと構造モデルを示す。

ぶらじる丸の例、LNG船の例に示すように、波浪荷重は構造強度に直接影響するため、その推定精度の向上は非常に重要である。当社では(株)三井造船昭島研究所と協力し、波浪荷重の解析手法の開発、船級協会の解析プログラムの導入等、波浪荷重の推定精度向上という観点からも構造信頼性の向上に努めている。

2.4 数値解析業務の効率化

構造設計では、構造信頼性と軽量化などの経済性を両立させるべく多数の解析を繰り返し実施し、最適解を求めることが必要である。また、近年の計算機性能の向上により、大規模かつ高度な解析もパーソナルコンピュータ上で可能となった。このため、膨大な解析結果からいかに必要な情報を引き出し、設計に生かすかが課題となっている。解析業務は主として解析モデルの作成、解析の実行、解析結果の評価、ドキュメントの作成に分けることができるが、当社ではそれぞれの作業において効率的なシステムの採用、開発を実施し、短期間で作業を可能としている。膨大な解析が要求されるCSRでは、汎用FEM解析プリポストプログラムMSC PATRANをカスタマイズすることにより、解析結果の自動出力、補強寸法の画面表示などを可能とし、更に画面表示形式の変更などの機能を追加し、解析結果の評価、文書作成業務の効率化を図っている。

近年、造船用3次元CADの開発、普及が著しく、FEM解析モデルの作成にも活用されつつあるが、手軽にかつ短期間にCADモデルを作成できるとは言いがたい。一方、商品の開発時には詳細な構造図面が存在しない段階で、船体の主寸法、構造配置について短期間で最適化を図ることが要求される。このため、汎用3次元CADとAltair Engineering社製の汎用FEM解析プリポストプログラム“HyperMesh”をカスタマイズし、開発初期段階において短期間で解析モデルを作成するシステムを開発し、活用している。図4にシステムの画面イメージを示す。本システムの特徴は以下の通りである。

- ・汎用FEM解析プリポストプログラムのカスタマイズ
 - ・ユーザーが使い慣れた安価な汎用3次元CADによる形状データの作成
 - ・汎用CADフォーマットを介したシステムへの取り込み
 - ・シェルのみならずビーム、トラス等の線要素に対しても自動要素分割が可能
 - ・独自メニューによりユーザーフレンドリーな操作環境を実現
- 本システムでは市販されている汎用ソフトウェアをカスタマイズしているが、これは入手性、メンテナンス性、継続性を考慮しているからである。本システムは今後とも使い易さを向上させ、設計者自身が育てていく予定である。

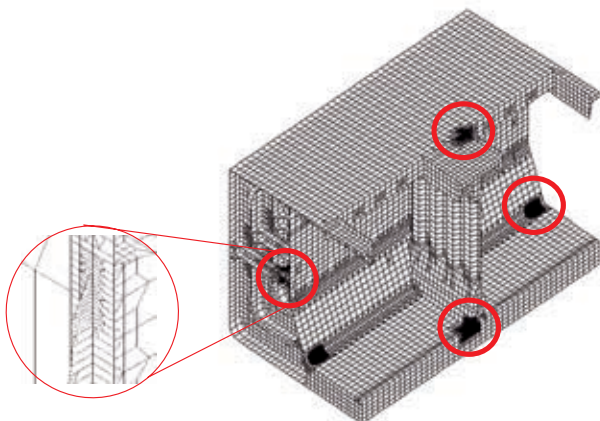


図2 鉱石運搬船の疲労解析モデル

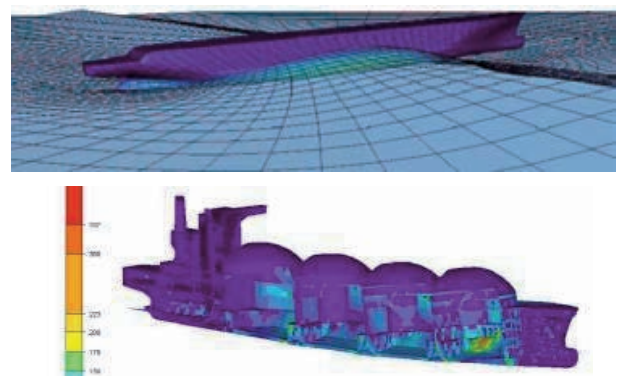
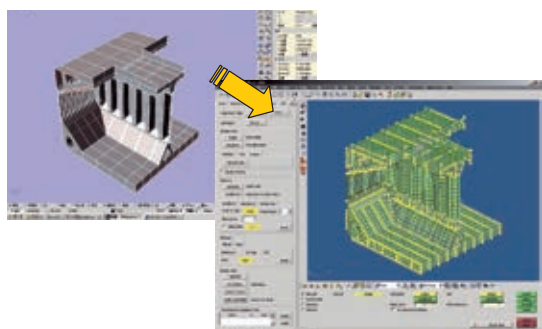


図3 大波高時の強度評価モデル(LNG船)

汎用 3D CAD による船体データ



船体構造解析メッシュ作成システム

図 4 解析モデル作成システム

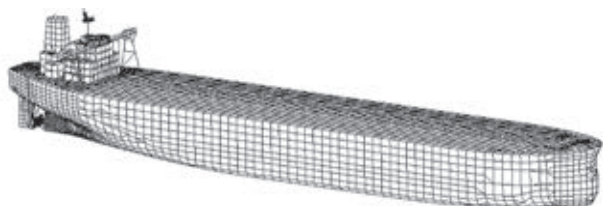


図 5 VLCC の振動解析モデル(全体構造モデル)

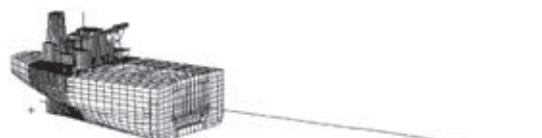
防振設計における振動解析

船体振動の検討は乗心地，搭載機器保護の観点から，設計時の重要課題となっている．当社では，開発船については原則 FEM 解析による振動検討を実施して振動レベルを確認し，過大な振動が予想される場合には必要な対策を実施することとしている．様々な振動モードが発生する船体の防振設計を行うには，簡易式による評価では十分な精度を得ることが困難であるため，FEM 解析を用いている．

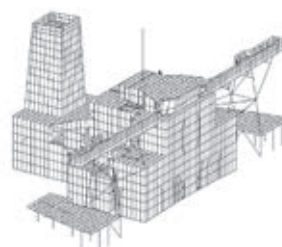
1 振動固有値解析

図 5 に振動解析用 FEM モデルの例を示す．この例は載荷重量 30 万トンの VLCC の全体をモデル化したもので，船体の上下，水平，縦方向の振動及びねじり振動の他に，上部構造などの局部振動の評価にも使われる．水面下外板に NASTRAN の MFLUID 機能を適用することにより，付加水質量の影響を解析的に考慮することが可能となっている．このような全船のモデル以外に，梁モデルと船尾構造と上部構造を組み合わせたハイブリッドモデル，部分構造を取り出した部分構造モデルなどが解析対象に応じて使用される．図 6 にそれぞれのモデルを示す．

計算結果の例として，図 7 にブリッジ・ウィングの上下固有振動モードの例を示す．(a)は左右逆対称モード，(b)は左右対称モードである．その他 (c)に示すような居住区，煙突，レーダマストと連成したモードなど，多数の固有振動が存在する．ブリッジ・ウィングの前後方向振動モードについても左右逆対称，対称，各種連成モードが存在する．推定されたモードの固有振動数が起振力と共振すると判断される場合には必要な補強を考案し，共振を回避することになる．しかし，解析精度などを考慮し，共振回避が困難と判断される場合に

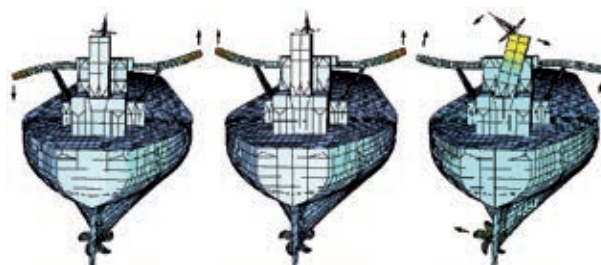


(a)ハイブリッドモデル



(b)部分構造モデル

図 6 VLCC の振動解析モデル(ハイブリッド及び部分構造モデル)



モード (a) 5.55Hz モード (b) 5.64Hz モード (c) 6.38Hz

図 7 VLCC ブリッジ・ウィングの振動モード

は応答解析を行い，振動振幅を算定し評価することになる．

2 振動応答解析と評価

応答振幅は構造モデルに起振力と減衰を付加し，FEM 振動応答解析を実施することにより推定する．起振力としては，プロペラに起因するものと主機に起因するものがある．プロペラに起因する起振力は，プロペラが船尾における不均一な流れを横切ることで生じる力とキャピテーションによる力がある．それぞれ簡易的な手法，CFD を利用した手法などを用いて算定する．主機に起因する起振力は，主機シリンダ内の燃焼，クランク軸の回転による力などがあり，主機メーカーからの情報などにより算定する⁵⁾．船体構造 FEM モデルとこれら外力及び船体構造の減衰係数を入力データとして応答解析を実施し，着目する部位の応答を計算する．算出された応答は ISO6954⁶⁾などの評価方法を用いて評価する．応答解析結果の例を図 8 に示す．

4 溶接継手の疲労寿命評価システム

船体構造の疲労強度は，溶接部の疲労強度により決まる．現状の疲労設計では，応力振幅 S と疲労寿命 N の関係を表す S-N 線図を用いて，マイナーの線形疲労被害則によって寿命評価するのが一般的である．しかし，この方法では，溶接部の詳細な形状，溶接残留応力，荷重の履歴などの影響を評価することは困難である．また，実構造物に生じた疲労き裂に

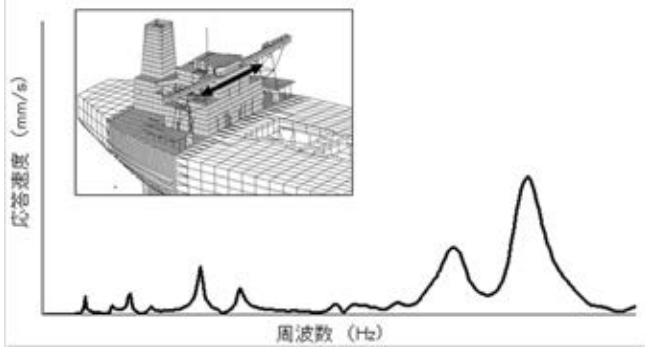


図8 VLCCの応答解析結果例(操舵室中央部左右方向)

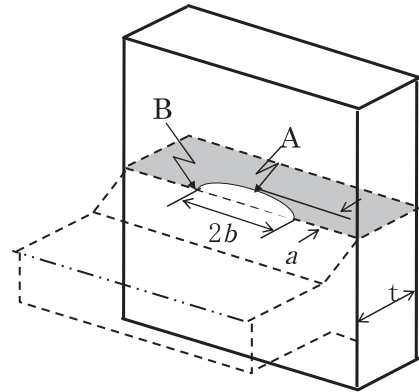


図10 疲労き裂進展解析モデル

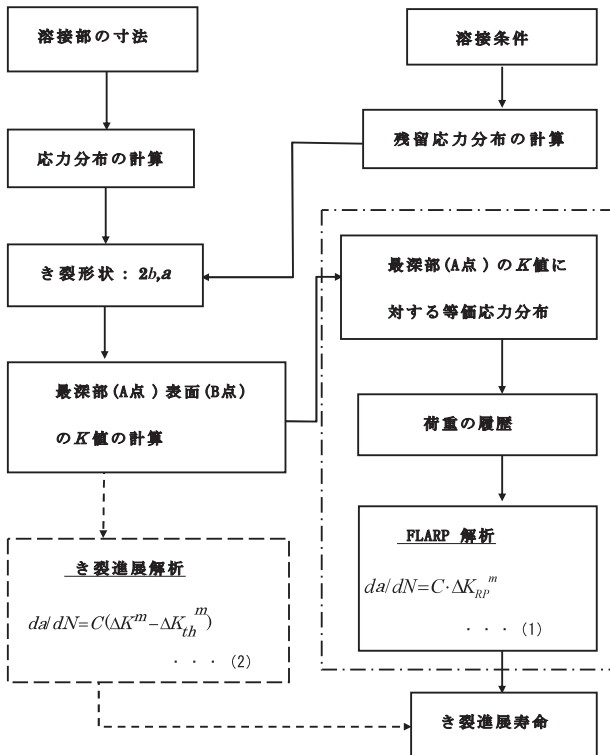


図9 疲労き裂進展寿命推定フロー

て、き裂先端部で再降伏が生じ始めるRPG荷重(Retensile Plastic zone Generating load)から最大荷重に至る荷重の変動幅(Pmax-PRP)に対応した応力拡大係数の変動幅 K_{RP} を導入することにより、き裂進展速度は次式のように表される。

$$da/dN = C K_{RP}^m \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 da/dN は $m/cycle$ 、 K_{RP} は $MPa \cdot m^{1/2}$ の単位系で、 $C = 3.52 \times 10^{-11}$ 、 $m = 2.692$ である。

K_{RP} は、き裂の開閉口挙動を平均応力と残留応力及び過去の荷重履歴の影響を考慮して算定されるので、これらの影響は自動的に考慮されている。また、き裂の進展の下限界値も K_{RP} が0となることにより評価されている。

更に、き裂先端の塑性挙動とき裂がない状態における溶接止端における塑性挙動を評価することにより、止端に位置する結晶粒内におけるき裂の発生寿命までも統一的に取り扱うことが可能である。

4.2 解析事例

解析事例として、疲労き裂の形状変化及びき裂深さと繰返し数の関係を図11に示す。FLARP解析ではき裂発生($a = 0$)からのシミュレーションとなっている。点線は最初のピーチマークが得られた時点からのき裂の進展を、図9中の式(2)で与えられるき裂進展速度により計算したものである。図中のプロットは、破面及びびびり計測の結果から推定したき裂の深さを示している。残留応力を考慮したFLARP解析によるシミュレーションの結果は実験結果と良く一致しており、荷重履歴による遅延現象や残留応力の影響を考慮した本解析手法の有効性を確認することができた。今後、本手法を設計において活用していく予定である。

対する余寿命の評価ができないなどの限界が指摘され、疲労き裂進展解析に基づいた疲労寿命評価法が提案されている⁷⁾。

当社では、溶接止端部に発生するき裂が荷重の繰返しによって徐々に大きくなり、最終的には部材の破断あるいは隔壁の貫通による内容物の漏洩に至るまでの寿命を疲労き裂進展解析によりシミュレーションする手法を構築した⁸⁾。

4.1 疲労き裂進展解析の概要

溶接部の疲労き裂進展解析に基づく疲労寿命推定の手順を図9に示す。図10に示すように、止端部における表面き裂を半楕円形で近似し、最深部(A点)と表面(B点)における応力拡大係数(K値)を計算し、その変動幅 K とき裂進展速度 da/dN の関係より、A、B点におけるき裂の進展量を算出する。

一方、図9中の一点鎖線で囲った範囲の手順では、豊貞らによって開発された K_{RP} による疲労寿命評価法(FLARP解析)を適用している⁹⁾。FLARP解析では、負荷過程におい

5. 流体解析

船体構造に働く荷重の推定において、海水や貨物である液体などの流体からの影響は重要である。船体周囲の流体の激しい挙動は船体構造に対して衝撃的な荷重として作用し、ときには船体構造を変形もしくは破損させる場合もある。大変形あるいは材料塑性を伴う構造の変形挙動を流体の影響も含めて検討するためには、非線形有限要素解析と流体解析との連成解析が必要である。近年においては流体構造連成解析が

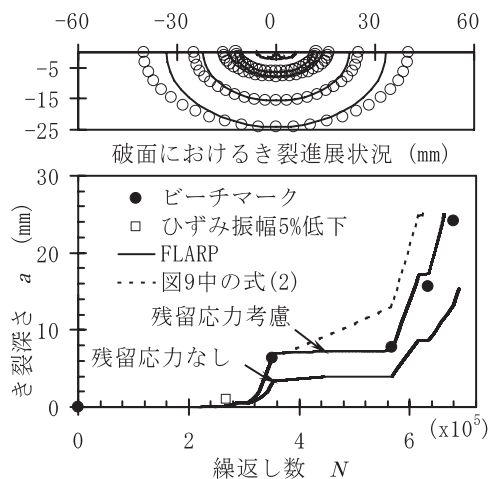


図 11 疲労試験結果と解析結果の比較

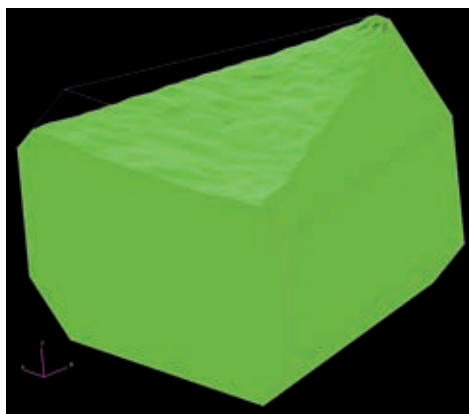


図 12 スロッシングの解析モデル

一部の現象については可能となり、当社においても基礎的解析から設計に主眼をおいた応用的解析まで幅広く実施している。そこで本章では、これまでに当社が実施した流体解析例としてスロッシング解析、流体構造連成解析例として水中爆発解析について紹介する。

5.1 スロッシング解析

LNG 船などの液体貨物の輸送においては、タンク内における液体貨物が船体運動により揺り動かされ、タンク内において激しい運動をする場合がある。このような液体の運動をスロッシングと呼んでいる。例えば、タンク内液体が半載状態で、その自由表面の波動の固有周期とタンクの動揺周期が近い場合には共振現象が生じ、激しい自由表面の打ち込みによる衝撃荷重がタンク壁に作用し、凹損や変形が生じる場合がある。特に、衝撃荷重がロンジやブラケットなどの補強部材に繰り返されることによる溶接接合部の疲労損傷を避けることが重要である。このようなスロッシングによる損傷を回避するためには、線形計算では把握できないタンク内の液体の挙動、構造に作用する圧力、さらに部材に生じる応力応答を正確に予測することが重要であり、実験¹⁰⁾ならびに高度な流体構造連成解析による検討が必要となる。

図 12 は LNG 船タンクを模擬した試験タンクの数値解析

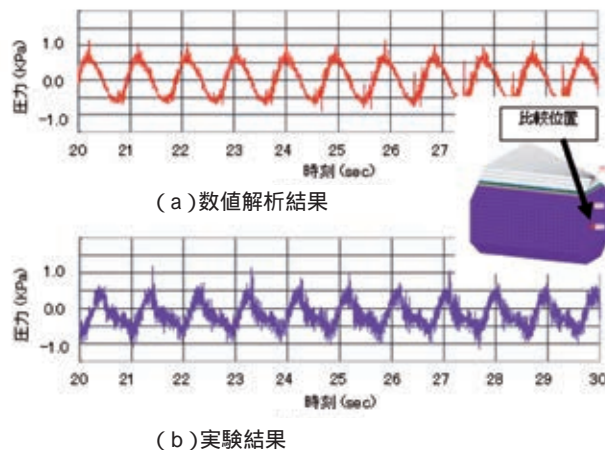


図 1 スロッシング実験結果と解析結果の比較

モデルである。本モデルはタンク内の流体領域をオイラー要素で、タンク壁を剛体要素でモデル化しており、タンクを強制的に周期運動させたときに生じるスロッシング現象を MSC DYTRAN を用いた数値解析により再現した。図 1 はタンク壁に作用する圧力の時刻歴であり、実験結果と数値解析結果の比較を示している。図から分かるように、タンク壁に作用する圧力を正確に再現できている。

このように、線形計算では把握できない現象が問題となる場合には、高度な数値解析技術を適用することにより船体構造の信頼性を確保することに努めている。

5.2 水中爆発解析

艦艇などに関しては、スラミングに加えて機雷や魚雷が爆発した際に発生する衝撃の影響を考慮することも大変重要である。例えば、艦艇の近傍で爆発が生じた場合には、急速なエネルギー放出による初期衝撃波の発生に加えて、炸薬の燃焼による水中爆発気泡が発生する。初期衝撃波は非常に短時間で船体に到達して衝撃を与える。一方、気泡は時間をかけて膨張収縮し、船体に曲げ運動を誘起する場合もある。更に、気泡が収縮する際には船体に向かって非常に高速な流れ(ジェット)が発生し、船体に対して大きな損傷を与える可能性がある。こうした衝撃荷重を精度良く予測するためには、流体と構造の連成解析による予測が必要となる。

写真 1 は水中爆発試験の供試体であり、船体を模擬した箱型試験体となっている。本試験体の直下で水中爆発を発生させた際の気泡及び試験体の挙動について比較を行った。なお、実験では細線爆発装置により爆発を生じさせた。図 14 は実験結果と解析結果の比較である。図から分かるように、気泡は膨張から最大径を経て収縮に至り、試験体に向かってジェットを発生させる。数値解析と実験は良好に一致している。一方、構造の応答に関しては、試験体の曲げ変位および試験体底面の局部ひずみに関する比較を行った。図 15 から分かるように、試験体全体の挙動から局部的な変形まで実験と数値解析は良く一致している。なお、本手法を船体構造初期設計に適用した手法については文献¹¹⁾を参照されたい。

こうした一連の流体構造連成問題に対して、当社では高度



写真1 水中爆発試験供試体

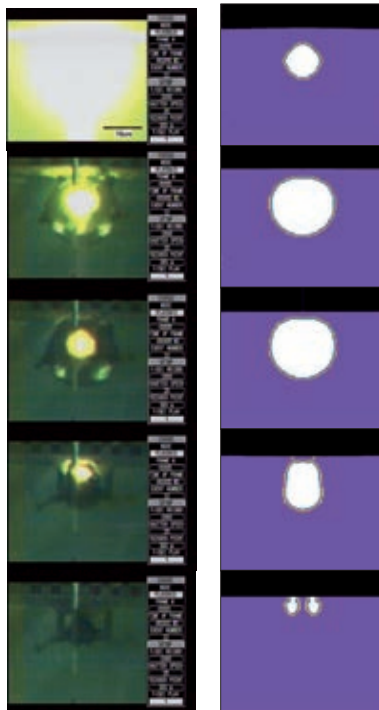


図14 実験結果と解析結果の比較(爆発バブル形状)

な解析技術を適用した予測を行い、安全で信頼性の高い船体構造を設計できるよう努力している。

6. あとがき

以上、紹介した例は、設計で日常的に使用されている数値解析から特殊な現象についての数値解析までである。しかし、現在特殊と呼んでいる数値解析も、近い将来日常的に設計で行う作業になる可能性は非常に高い。20年前は静的応力解析ですら設計の日常作業ではなかった。当社ではこのような数値解析技術を今後とも更に向上させ、製品の安全性、信頼性、快適性向上とともに、軽量化などの経済性との両立に活用していく所存である。

参考文献

- 1) IACS : Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers , Common Structural Rules for Bulk

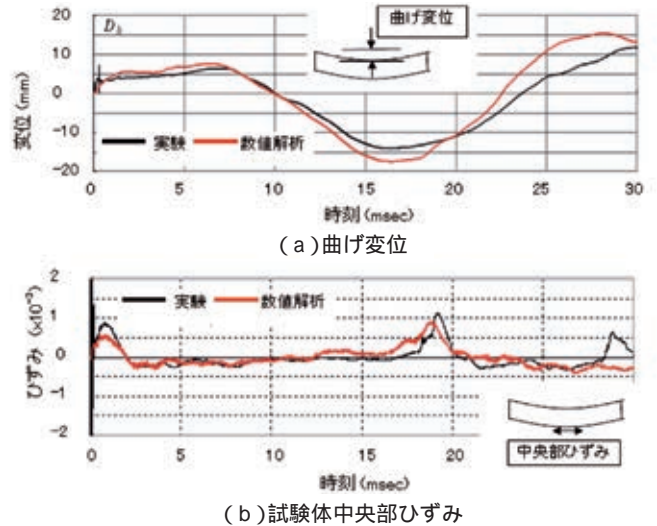


図15 実験結果と解析結果の比較

Carriers ,(2006-1)

- 2) ClassNK : PrimeShip-HULL (CSR) User's Guide to Direct Strength Assessment System
- 3) 西村 . ほか : 波浪荷重解析の精度向上に関する研究 , 三井造船技報 , 174 (2001-10) , p. 1
- 4) Det Norske Veritas : Sesam User Manual, Wasim, Wave Loads on Vessels with Forward Speed, September 15th, (2006)
- 5) 梶原 : 大型 2 サイクルディーゼル機関の振動 , 平成 17 年日本マリンエンジニアリング学会 技術セミナー講演予稿集 ,(2006-2) , p. 29
- 6) 遠山 : ISO6594 : 2000 による船体居住区振動評価のための FFT 振動解析 , 日本造船学会誌 , 866 ,(2002-3) , P. 173
- 7) M. Fujino, et al. : A study on the advanced lifecycle fatigue management, WMTC, (2003-10)
- 8) 福岡 . ほか : 溶接継手の疲労寿命評価システムの開発 , 三井造船技報 , 191 (2007-6) , p. 31
- 9) 豊貞 . ほか : 鋼構造物の疲労寿命予測 ,(2001) , p.171 , 共立出版
- 10) M. Arai, et al. : Numerical and Experimental Study of 3-D Sloshing in Tanks of LNG Carriers, Proceedings of OMAE2006, OMAE2006-92235,(2006)
- 11) A. Yasuda, et al. : Estimation Method for Longitudinal Bending Strength of a Damaged Ship due to a Close-in UNDEX Bubble, Proceedings of the 76th Shock and Vibration Symposium,(2005)

共同執筆者 : 福岡哲二 田中 茂

[問い合わせ先]

船舶・艦艇事業本部 基本設計部
TEL 03 - 5202 - 3529 今北 明彦

特機・水中関連機器の開発

船舶・艦艇事業本部 松嶋正和

1. はじめに

三井造船における特機・水中機器の歴史はおよそ35年で、当社の90年余りの歴史からすると、比較的新しい技術分野と言える。1970年代に世界で遠隔無人機(Remotely Operated Vehicle: ROV)の有用性が認識され、海洋石油生産に関連する作業機能を有する大型ROVからテレビカメラによる観察主体の小型ROV(Low Cost ROV: LCROV)まで一気に花開き、当社はこの技術潮流に乗り遅れることなく、ほぼ同時進行で製品開発を行ってきた。更に、1990年代に入ると自律型水中ロボット(Autonomous Underwater Vehicle: AUV)が研究用途から実用へと発展したが、これに対しても産学の連携を取りながら先進的な技術開発対応を行い、「AUV=三井」を目標として地歩を築いてきた。

一方、操船装置については、1970年代に官民協同で始まった自動位置保持装置の研究開発に参加したことから端を発し、当社はこれまで官公庁船を対象に操船装置や自動船位保持装置(Dynamic Positioning System: DPS)の開発を行い、数多くの納入実績を上げている。

本報では、特機・水中機器の最新製品の技術について紹介すると共に、今後の製品及び技術開発動向について述べる。

2. これまでの開発動向

1970年代のROVの技術潮流に対してほぼ同時進行で技術開発を行ってきた成果は、国産初の深海用ROV“ドルフィン-3K”¹⁾や世界最深潜航記録をもつ“かいこう”²⁾として結実した。この過程で、超高水圧世界におけるさまざまな現象やそれに対する材料、水密、通信、投入回収、ケーブル等の技術開発を行い、知見と技術を獲得した。そして、続いて起こったLCROV潮流では、これらの基本技術を応用する形でRTVシリーズ³⁾として深度50mから500mまでの小型ROVを開発し、300台以上を送り出している。特にMK型では、トリムコントロールという当社独自の方式により優れた運動性能を実現した。

AUV開発は、当初、長さわずか1.5mのプログラム式無索航走体から始め、CCDE(Closed Circuit Diesel Engine)搭載の“R-One”⁴⁾を経て“r2D4”⁵⁾へと発展し、湖沼探査用AUV“探淡”⁶⁾を含めて海洋から陸水まで対応できるAUVのラインアップを提供してきている。

最近では、これらの機器の運用やデータ解析技術へも範囲を広げ、ハード開発のみではなく、システムとしての開発も実施してきている。

一方、操船装置については、1970年代半ばに運輸省船舶局(当時)及び日本船用機器開発協会(当時)における位置保

持装置の研究開発に参画し、DPSの開発を始めた⁷⁾。そして、10年後の1985年には、国産初のDPSを防衛省の潜水艦救難母艦“ちよだ”及び独立行政法人海洋研究開発機構の海洋調査船“かいよう”へ搭載したのを始め、これまで特殊船向けに計7式を搭載している。DPS技術をベースとした操船装置を含むと、計60隻以上の船舶に搭載している。

当社では、これらの技術を墨守するのではなく、これらの技術を基礎として日進月歩する新たな技術を吸収して、省力化、社会インフラ保守や安全保障といった近年の社会要請に答えられる技術開発を目指しており、ここで新製品及び新技術について紹介する。

新製品及び新技術

1 RTV.Nシリーズ

RTV.Nシリーズは、過去300台を超える小型ROV製作の実績、700件を超える運用実績を踏まえ、より使い易く、特に海洋の幅広い海象条件で使用できるROVを目指して開発した高機能型小型ROVである。このシリーズの標準型である“RTV.N-100EXY”を写真1に示す。RTV.Nシリーズは、潮流の早い海域でもスムーズに動くことができる高出力スラスト(推進器)を装備し、トリムコントロール⁸⁾に代表される高機能なデジタル制御と高性能カラーソナーの採用をはじめ、一つのモニタに必要な情報を同時表示し、タッチパネルの採用で画面を触るだけで各種機能の切り替えが可能となっている。また、ソナー画面上の目標物をタッチするだけで目標物の方位を維持するソナートラッキング機能など、操縦者が運用し易いように操縦支援機能を有し、豊富なオプションも取り揃え、使用場所、目的に応じた機能を取り付け可能となっている。

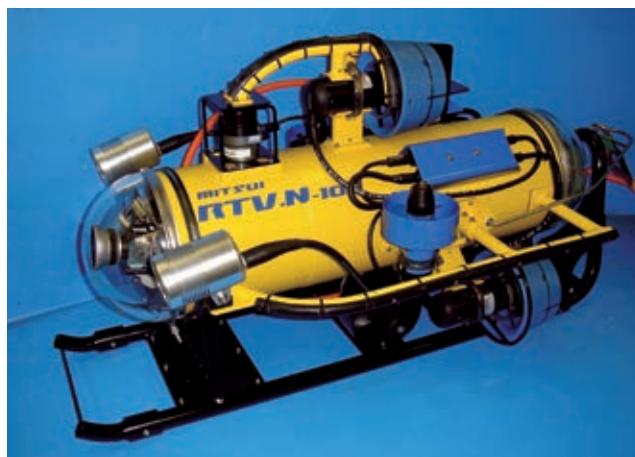


写真1 高機能小型ROV“RTV.N-100EXY”

1.1 トリムコントロール

トリムコントロールとは、前進用スラスト3台をロボット正面から見て三角形に配置し、このスラストの推進力を制御することにより機首の上げ下げ(トリムコントロール)を行うものである。図1にトリムコントロールの特徴的な動きを示す。

機体のトリムコントロールにより、機首を海底に向け抵抗の少ない状態で三台のスラストの前進力で潜降することができるため、下降速度が速く、素早く潮流層を突き切って海底に達することができ、また機首を上下左右自在に操作できることから、曲線的な運動が可能で起伏の多い海底の探査に適している。

1.2 ソーナートラッキング

ソナーは水中探査に非常に有用な機器であるが、ソナー画面上の対象物まで到達するためにはROVの操縦に熟練が必要である。そこで操縦者の負担を軽減し、目標物への到達を容易にするためにソーナートラッキング機能を開発した。その機能はソナー画面上に表示された目標物を画面上でタッチするだけで、その目標物までの方位を自動的に計算・保持する機能であり、あとは操縦者が前進操作をするだけで目標物に近づけるものである。

1. 自動操縦支援機能

RTV.Nシリーズではデジタル制御を採用し、操縦者支援機能として以下の自動操縦支援機能を装備している。

自動水平姿勢保持機能

ロール角及びトリム角を水平に自動的に保持する機能

自動トリム角保持機能

トリム角操作ジョイスティックレバーで指定した任意のトリム角を自動的に保持する機能

自動方位保持機能

旋回操作ジョイスティックレバーを中立位置に戻した時の方位を自動的に保持する機能

自動深度保持機能

潜航浮上操作ジョイスティックレバーを中立位置に戻した時の深度を自動的に保持する機能

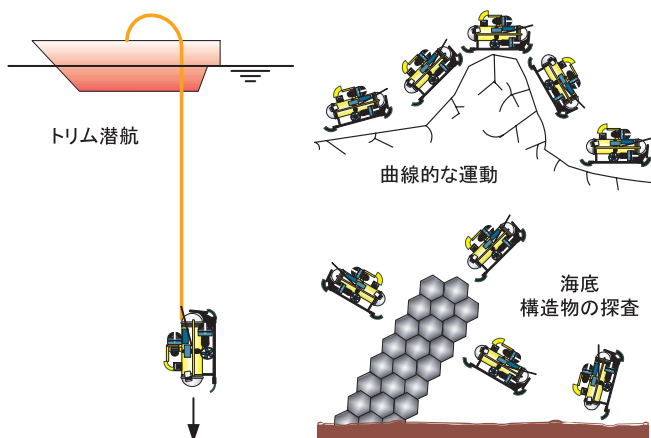


図1 トリムコントロールの特徴

以上の自動操縦支援機能を様々な状況で組み合わせて使用することにより、操縦者の負担が軽減できる非常に有効な機能である。

1.4 操作画面

操作画面の例を図2に示す。従来の機種ではカメラ用モニター、ソナー用モニターと別れており、観察や監視にわずらわしい面があった。RTV.Nシリーズでは一つの画面上にカメラ映像、ソナー画面を表示すると共に、操縦に必要な情報である方位、深度、ピークル姿勢を同時に表示してそのわずらわしさを解消している。特にピークル姿勢については数値と共にアニメーションでも表示し、一目で分かるようになっている。そのほか時刻、アラーム、カメラ情報、カメラ方向も表示している。このモニターにはタッチパネル機能が備えてあり、自動操縦支援機能のON/OFF、ソナーの各種設定、カメラ映像の静止画取り込み(スナップショット)等の操作が画面をタッチするだけでできるようになっている。

1.5 豊富なオプション

RTV.Nシリーズでは、ロボットと船上装置の通信に光ファイバを採用しており、長距離かつ大容量のデータ伝送が可能となっているので、水中位置検出装置などの超音波センサ類の搭載はもちろんのこと、ハイビジョンカメラや環境データ計測用の各種センサなど大容量データ伝送が必要な機器を搭載することができる。また、軽作業用に小型コンピュータやロープカッター、長距離探査用に長尺ケーブルも装備可能である。更に高出力のスラストを搭載することにより、より対潮流性能を向上させたHyperシリーズも取り揃えている。

2 水道管内点検ロボット“Pipescope-500”

近年、高度成長期以後急速に配備が進んだ上水道、工業用水、農業用水などの管路は、老朽化による事故が多発しており、点検調査手法の確立、点検調査機材の整備と開発が緊急の課題となっている。このような中で、10年後には全体の4割近くが耐用年数を超えると言われていた水道管に着目し、以下の条件のもとで点検可能なロボット“Pipescope-500”を開発した。

- ・全国的に設置数の多い口径75mmの補修弁を通過することができる。



図2 操作画面

- ・ 地方中核都市で採用の多い管路口径 500 mm 以上の水道管路が点検可能である。
- ・ 水圧及び流れのある不断水状態で点検可能である。
- ・ 投入箇所から 300 m の距離が点検可能である。

2.1 “Pipescope-500”の構成

図 3 に、開発した水道管内点検ロボット“Pipescope-500”のシステム構成を示す。水道管内点検ロボットは、水中ロボット本体と水中ケーブル、操縦・記録装置、不断水挿入装置から構成される。

(1) 水中ロボット本体の機能

図 4 にロボット本体の一般配置を示す。ロボット本体には、側方カメラ、側方照明灯、前進用スラスト、浮力調整装置が装備される。

側方カメラと側方照明灯は、管内全周の継手や腐食部分などを撮影するため、ロボット本体の中心軸周りに 360 度回転する旋回機構上に設置されている。映像は、水中ケーブルを通じて操縦・記録装置へ伝送される。

ロボット本体は、水圧の変動で比重が変化する水中ケーブルの影響を受け、浮き沈みや姿勢の傾きが変化する。これを補正するために、ロボットの体積を変化させることで浮力を増減する浮力調整装置がロボット本体の前後に配置されている。

(2) 操縦・記録装置の機能

操縦・記録装置は、TV モニタ、映像記録装置、電源装置・制御装置、不断水挿入装置制御装置で構成される。

TV モニタ、映像記録装置は、ロボット本体から送信された側方カメラの映像を TV モニタに出画すると共に、記録する。

電源・制御装置は、側方カメラの旋回角、フォーカス、照明灯の照度、前進用スラスト、浮力調整装置の操作を行う。

不断水挿入装置制御装置は、水中ケーブルの繰り出し・巻き取りの操作、水中ケーブルの繰り出し長の表示を行う。

(3) 不断水挿入装置の機能

水道管(加圧側)と陸上(大気圧側)との間に設け、ロボット本体を格納すると共に、水中ケーブルの繰り出し・巻き取りを行う装置である。不断水挿入装置は、耐圧容器と内部の

水中ケーブル収納用のドラム機構、格納管収納部と内部のロボット本体格納管から構成される。不断水挿入装置は、不断水状態で点検を可能にするため、1 MPa の水圧に耐えられる構造である。

2.2 水道管の点検方法

水道管の点検にあたっては、図 5 に示すように、マンホールに設置されている空気弁・消火栓などを取り外し、補修弁の上に不断水挿入装置を取り付ける。挿入ロッドを押すことにより、ロボット本体を格納したロボット格納管が水道管内に挿入される。ロボット格納管は、一方向に一定の半径で屈曲が可能な構造で、比重が 1 より小さな材質で作られているため、水中で浮力が発生すると同時に水の流れを受けて水道管軸と平行になる。ロボット本体は、前進用スラストの推力と水中ケーブルを繰り出す力、更に管内に流れがある場合には水流を利用して、ロボット格納管から発進する。

格納管から発進後、水流の力によってロボット本体は管の中央付近に寄せられ管軸と平行な姿勢を維持し、水中ケーブルの繰り出し長に応じて前進していく。管内に流れが無い場合は、ロボット本体の前進用スラストの推力で前進する。

管の長さ方向の点検を実施する場合、側方カメラを上方や下方など一定の方向に向けておき、水中ケーブルを一定の速度で繰り出しや巻きこみを行いながら点検を実施する。一方、

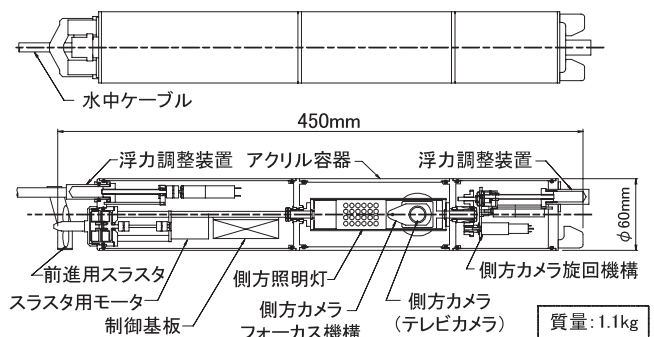


図 4 水中ロボット本体の一般配置図

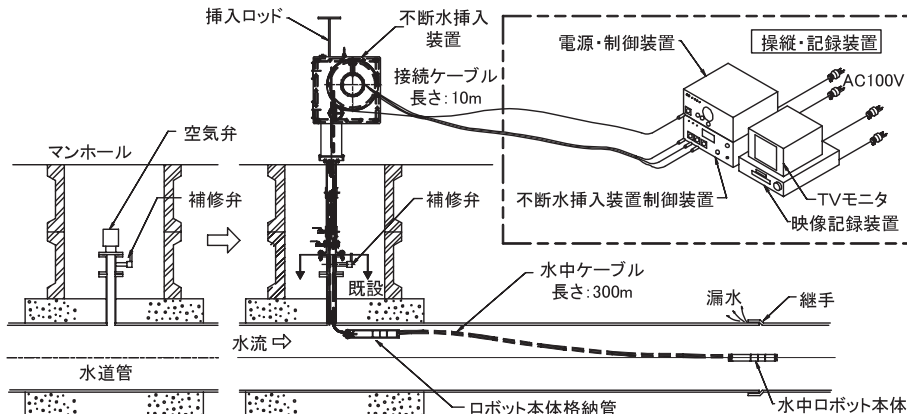


図 5 水道管内点検ロボット“Pipescope-500”のシステム構成図

管の円周方向の点検を実施する場合は、水中ケーブルの繰り出しや巻き込みを止め、側方カメラを中心軸回りに回転させることにより、点検部分にカメラ本体を向け、カメラのフォーカスや照明灯の照度を調整しながら実施する。ロボットの位置は、繰り出された水中ケーブル長をケーブルドラムの回転数から算出し、不断水挿入装置の制御盤面に表示する。

管路内部では、管路の分岐や曲がり部でロボット本体の身動きがとれない状況になることが想定される。そのような場合には、水中ケーブルの許容張力(破断張力1000N)以内でケーブルの繰り出し・巻き込み操作を行い、脱出する。

2. 実証運用

開発した水道管内点検ロボットは、東北地方の口径600mmの導水管で実証運用を行った。導水管に圧力がかかっており、流れのある不断水状態で152m、及び流れのない断水状態で52mの管内調査を実施し、操縦者一人で操作が可能なこと、側方カメラで継手部分の観察が可能なることを確認した。今後は、水道管内のみならず、工業用水・農業用水管内の点検調査へも活用の幅を広げていく予定である。

操船装置

近年、科学技術の発達と共に世界各地で海洋開発が盛んに行われており、これらの多様多様な作業に従事するための調査船、掘削船、潜水作業船などをはじめ、物資の補給を行う作業船などが次々と建造されている。また、海底ケーブルの敷設、メンテナンスを行うためのケーブル敷設船や海難救助

船などの特殊船舶も国内外で建造、運用されている。これらの船舶は、様々な気象、海象下において自船の運動を、それぞれの運用に応じて高度に制御することが求められる。

1. 統合操船制御装置

各種海洋調査船などにおいては、調査時に高度な操船を要求されることから、通常の推進システム(舵及びプロペラ)に加えてバウスラストなどを装備する機会が多い。また、近年では内航商船においても、主に離着岸時の省力化、運用の柔軟性確保のために、バウスラストを装備する例が多く見られる。更に、ポンプジェットスラストやアジマススラスト、ポッドプロペラ等のアクチュエータを装備する船舶も建造されている。

これらの、同一船上に搭載された、特性がそれぞれ異なる複数のアクチュエータを統合制御するための装置が統合操船制御装置であり、当社ではこれをシステム操船装置(Mitsubishi Maneuvering control System: MMS)と呼んでいる。

また、この統合操船制御装置の中でも、海洋掘削船や海難救助船など、厳しい海象下でも特に精度良く位置や船首方位の保持が求められる場合や、システムとして十分な冗長性を有することが求められる場合には、DPSが搭載される¹⁰⁾。

(1) システム操船装置(MMS)の構成

図5にMMSの標準的な構成例を示す。システム操船装置は海洋調査・観測及び離着岸操船を容易に行うために、ジョイスティック、回頭ダイヤルにより、船を任意の方向に操船するものである。

調査・観測においては、観測機器と船の相対位置の確保、離着岸操船においては、船首を自動方位保持することによる横移動、斜め移動による高度な操船を実現することが可能となる。

(2) 自動船位保持装置(DPS)のシステム構成

図6にDPSのシステム構成例として、独立行政法人 海洋研究開発機構の地球深部探査船“ちきゅう”に搭載しているDPSのシステム構成を示す¹¹⁾。このシステムでは、信号系統、電源系統は全て二重化されており、一方の系統に不具合が生じた場合でも、他方の系統に自動的に切り替わることにより、引き続き正常に制御を続行することが可能である。また、操船者が各種設定、操作及び監視を行うためのDP操作卓が3台搭載されている。それぞれのDP操作卓が個別に制御演算用のCPUを装備しており、各CPUが並行して制御演算を実施し、その演算結果をお互いに常時比較、監視することによる多数決判定を行っている。

2. 制御機能

MMS及びDPSの主な制御機能は以下のとおりである。

(1) 定点保持制御機能

設定された目標位置及び目標方位を維持するようにアクチュエータを統合制御する。洋上の定点で観測する場合や、海中機器などの運用において有効な機能である。

また、特に大きな外乱の下でも高い精度で定点保持を行うことが要求されるDPSでは、必要な推力が最も小さくなる方位(最小推力方位)を常に演算し、その情報を画面に表示して操船者へ提供している。

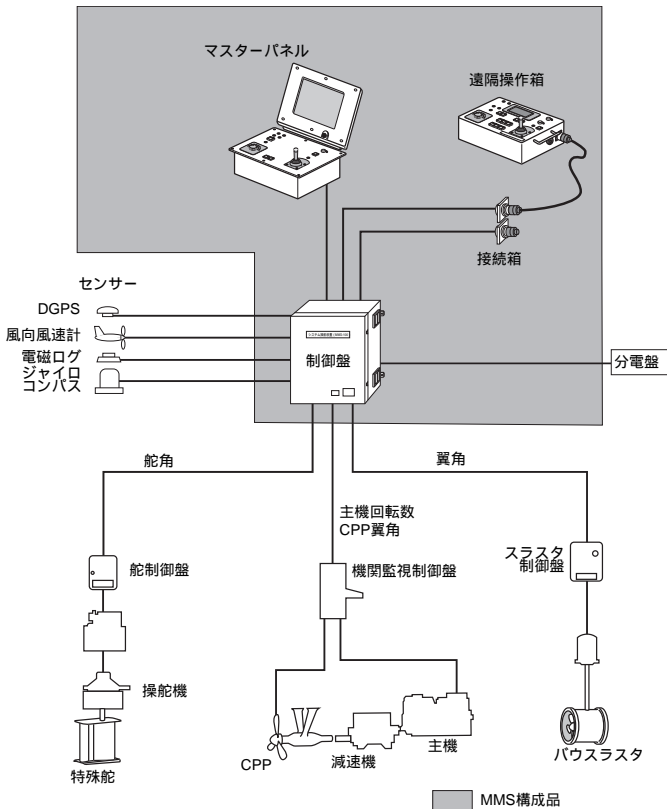


図5 システム操船装置(MMS)の構成例

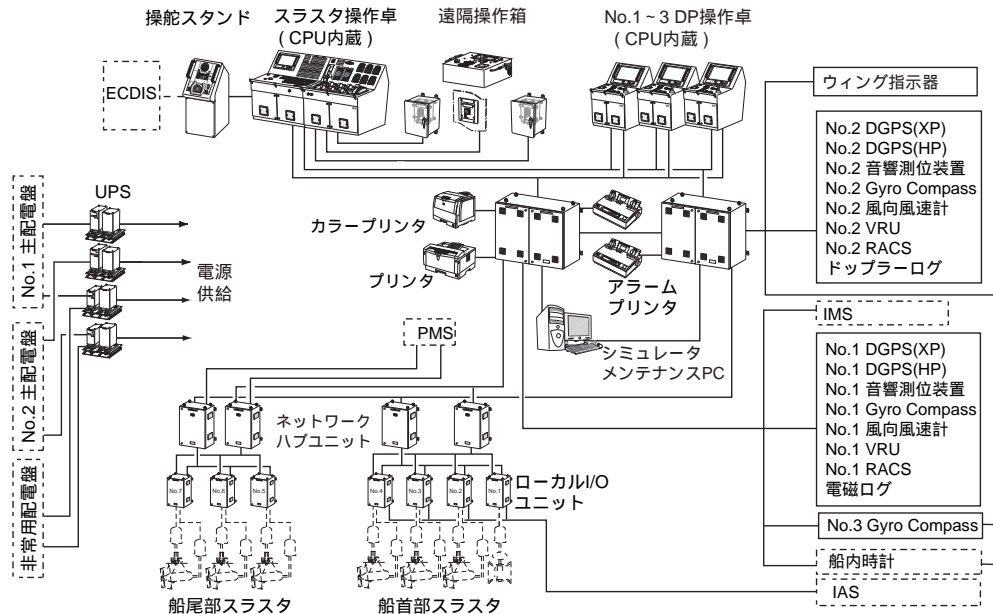


図6 DPSシステムの構成例

(2) 方位保持制御機能

船首方位を一定方向へ自動制御し、操船者が手動操作する任意の方向へ自船が移動するように、アクチュエータを統合制御する。離着岸の際などにおいて、岸壁方位を設定することにより、操船に大きく寄与する有効な機能である。

(3) 対風姿勢保持機能

風向・風速計からの風向と船首方位を一定に、かつ対水速度をゼロに保持する機能であり、スパンカー機能及び船の横揺れを軽減する方向に自動的に保持することが可能である。

(4) 方位船速保持機能

船の船首方位と船速を自動的に保持する機能であり、観測機器の曳航調査及び観測機器との相対距離を保持するのに有効である。

(5) トラッキング機能

自船を予め設定した航路、船速にて自動航行する機能であり、ソーナーなどによる海底地形調査などに有効である。

制御ロジック

MMS や DPS にて行う制御演算では、まず各種センサにて自船位置や方位、速度などを計測する。次に、これらのセンサデータをフィルタリング処理することにより、含まれているノイズの影響を除去し、正確な自船位置と方位の算出を行っている。更に、これらの推定された自船位置や方位、移動速度とそれぞれの目標値との間の偏差を常に監視し、その大きさに応じて制御力を算出している。これがフィードバック力である。

しかし、洋上では常に存在する風や波、潮流などの外乱のため、このフィードバック力だけでは安定した精度良い位置保持制御ができない。従って、位置偏差や方位偏差などの大きさによらず、外乱に対抗するための制御力としてフィードフォワード力も常に推定演算している。フィードバック力に加え、このフィードフォワード力も考慮することにより、様々

な海気象条件下で安定した制御を実現している。

4 MMS, DPS の船級対応

MMS に関しては、ジョイスティック制御システムとして日本海事協会 (NK) 及び韓国船級協会 (KR) において、それぞれ型式認定を取得している。

また、DPS に関しては、搭載される艦船によっては、何らかの故障が発生しても位置保持能力を喪失することがないように冗長性が求められ、“ちきゅう”では日本海事協会における DPS Class-B に則って設計されている。更に、2007 年に新たに開発した標準型 DPS では、英国船級協会 (LR) 及び米国船級協会 (ABS) において、それぞれ型式認定証及び設計評価証を取得している。

4 海底地形観測 AUV

当社では 1990 年から東京大学生産技術研究所と共同で海嶺探査用自律型海中ロボット “R-One” の開発に着手し、その成功を受けて 2001 年度には AUV “r2D4” による熱水鉱床探査計画 (r2 プロジェクト) を開始した。“r2D4” はその前身である “R-One” と比較して大幅な小型軽量化と高性能化が図られており、最大潜航深度 4000 m と熱水鉱床や中央海嶺の観測調査に十分な性能を保有すると同時に、小型化によって機動性、運用のし易さも大幅に改善された。更に、艇体前部にペイロード格納部を配し、常用センサの他にも適宜観測機器を装備できるようにするなど、拡張性も考慮し設計されている。“r2D4” はこれまで 60 回を超える潜航と調査を経て科学的、技術的側面から多くの成果を挙げてきており、この開発と運用を通して得られた知見は、今後の AUV を用いた鉱物資源探査における大きな試金石になるものと考えられる。

4.1 海底地形観測装置

“r2D4” は熱水地帯観測用に、現場型化学分析装置である GAMOS (Geochemical Anomalies Monitoring System) や

CTD 計(Conductivity Temperature Depth profiler)などの化学センサと、写真 2 に示す地形探査用サイドスキャンソナー(Side Scan Sonar:SSS)や測深用インターフェロメトリックソナー(Inter-Ferometric Sonar:IFS),3成分磁力計など熱水鉱床を物理的に探査するセンサを搭載している。

現在、最も一般的に用いられている測深器としてマルチビーム音響測深機(Multibeam Echo Sounder:MBES)があるが、近年では浅海域におけるIFSの広い計測スワ幅や高いデータ密度,SSSデータとの相性の良さやシステムの簡易さなどが注目され始め、センサプラットフォームとしてのAUVの登場に従い、多くの研究がなされ始めている。

当社では“r2D4”の開発と同時に搭載型海底観測用音響ソナーの開発に着手し、既存のSSSとそれとは別に、図7に示すように配置した片舷3つのハイドロホンとの組み合わせによりスワ幅測深(一度に幅広い範囲の測深を行うこと)が可能なL字型配列IFS(L Array-IFS:LA-IFS)の開発を行ってきた。IFSは送波器から照射されたファンビームの海底からのエコーを複数の無指向性ハイドロホンで受信し、受信時間ごとに計算した位相差からその計測時間におけるエコーの到来角を求めて測深を行う。LA-IFSは従来片舷2個のハイ

ドロホンを装備することが一般的であったIFSに対し、ハイドロホン間隔を広くすることで到来方向計測分解能を上げ、それにより生じる位相差の2の整数倍の曖昧さ(アンビギュイティ)を、3つのハイドロホンをL字型に配置することにより効率的に解くことを目指して開発を行ったシステムである。これによりLA-IFSは既存システムに対し、約30倍の計測分解能を実現した。

4.2 データ解析技術

当社では計測機器の開発のみにとどまらず、LA-IFSにより得られたデータをもとに、慣性航法装置(Inertial Navigation System:INS)や超短基線方式(Super Short Base Line:SSBL)音響位置検出装置から得られるAUV位置情報、モーションセンサから得られる動揺、音速度、AUV深度や潮汐の補正を加えて、海底地形図の作成や地形解析を行っている。

図8は得られた海底地形図とSSSで得られる地質や凸凹などの定性的な海底地形情報とを組み合わせることで熱水鉱床地帯の地形的、地質的な詳細な情報を示したものである。

4. 今後の製品開発と技術開発の予定

4.1 管路点検事業

上水道、工業用水、農業用水の他にも火力発電所、原子力発電所、製鉄所、化学プラント工場等、日本全国にはさまざまな管路設備があり、同様に耐用年数や老朽化、地震等の自然災害による事故という問題を抱えている。管路の維持管理がクローズアップされている中、水の流れが止められない、水が抜けにくい、管路の入り口と出口の距離が長い、管路の断面が小さく人間が入れない等の条件により、人間が直接点検できない設備も多くある現状で、水中ロボットによる管路内部の点検調査が注目を集めている。

4.1.1 三井造船の管路点検事業

水中ロボットRTVシリーズを用いた水中点検事業は、1985年より全国展開し、現在まで700件以上の点検調査工事を行っている。昭和63年に関西電力株式会社と共同で開発した発電所管路点検ロボット“RTV-KAM”^{12)~14)}は、火力

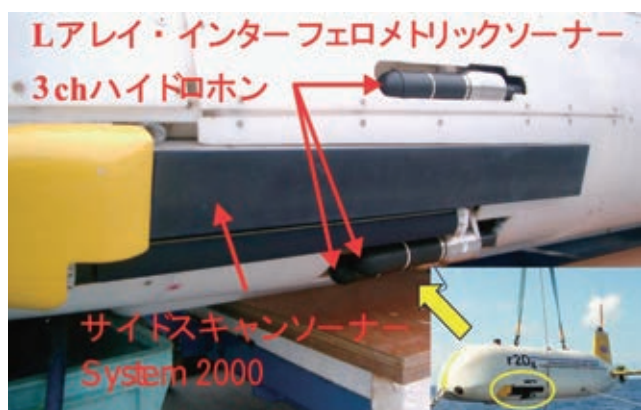


写真 2 “r2D4”搭載の海底地形計測ソナー

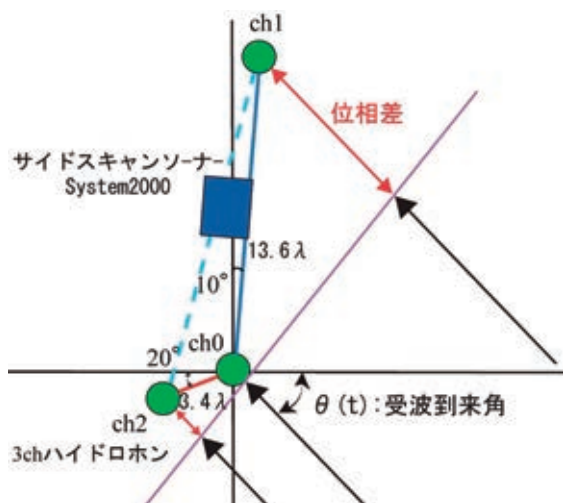


図7 インターフェロメトリックソナーの構成

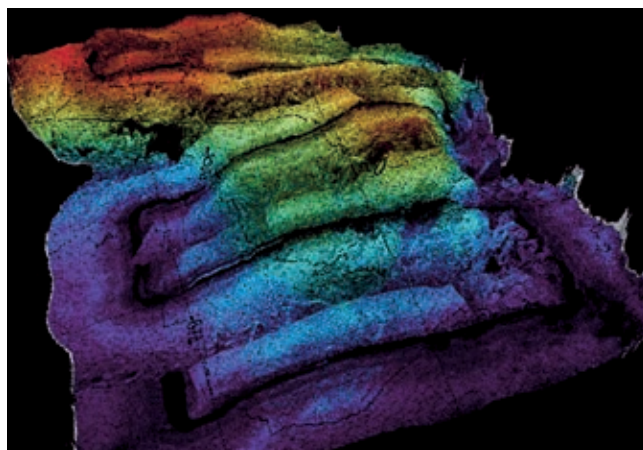


図8 LA-IFSで得られた海底地形図の解析例

発電所や原子力発電所の冷却海水取水路や放水路の点検用として開発され、1号機から進化を続け、現在では写真に示す4号機が活躍している。“RTV-KAM”は、2009年10月、関西電力株式会社舞鶴発電所において、これまでの最長点検距離1500mを超える全長2500mの取水路・放水路(高さ、幅6.2mの馬蹄形)の点検を実施した^{15),16)}。この成功で、関西電力株式会社管内全ての火力発電所の水路点検が可能となり、また、これまで点検不可能とされた長距離水路へ適用範囲が広がるため、管路点検事業拡大に向けて期待されている水中ロボットの一つである。

4.1.2 今後の管路点検システムの開発

水中ロボットは、水中ケーブルの長さに比例してケーブルの流体抵抗が増加するため、長距離点検になるほど強力な推進力が必要になり、ロボット本体が大型化する。一方、水中ロボットを管路に入れるための投入口は、点検対象の管路径よりも小さいことが多い。したがって、点検距離(ケーブル長)と投入口の大きさによって使用できる水中ロボットが限定される。図9に当社において使用している水中ロボットの種類と管路の適用範囲を示す。当社では斜線部の管路に対応できるように投入口500mm以上で管径800mm以下の管路を対象とした水中ロボットの開発に注力し、2で紹介した水道管内点検ロボット“Pipescope-500”を開発した。現在、投入口500mm以上、90度曲り管の通過も可能とする小型長距離点検ロボットの開発に着手している。また、現在は見ることが主体であるが、管路の維持管理に必要なデータ取得も

欠かせない機能であり、ニーズにあったセンサを随時開発していく予定である。

4.2 海底資源開発用ロボット

中国の経済及び産業の発展を機に、先端技術に必要な希少金属元素(レアメタル)などの偏在と今後の供給逼迫が懸念される中、2007年海洋基本法が成立して以来、これらレアメタルをはじめとする鉱物資源を多く含む海底熱水鉱床、コバルトリッチクラストなど海底金属資源の開発機運が国内に盛り上がりつつあり、これらの資源調査の必要性が現実感を持って重要視されるようになった。更に、将来的には海底資源産業としての育成が期待されている。このような状況の中、海中と海底は当社の得意とする分野であり、すでに紹介した海底熱水鉱床探査のための“r2D4”による海底調査や写真4に示す自航式深海底サンプル採取システム¹⁷⁾の建造実績を有する。この国家的な取り組みに対して、更に探査精度を上げるためのAUV搭載探査機器の開発や深海底ボーリング装置など技術貢献できる部分は大きく、当社でも各種産官学との連携に参画して、水中機器メーカーとしてその知見と技術力を発揮していくことにしている。

4. 防衛用ロボット(UUV, USV)

当社では、防衛用ロボットとして水中無人機(Unmanned Underwater Vehicle: UUV/防衛関係ではAUV, ROVを含めてUUVと言う)及び水上無人機(Unmanned Surface Vehicle: USV)を開発中である。

防衛用ロボットへの要求には、兵士に人的被害が及ばないように危険を伴う作業の代行や長時間、正確に継続した作業をすることが求められる。特に水中無人機には機雷への対応(機雷戦)が、水上無人機には機雷(機雷戦)、潜水艦(対潜戦)、だけでなく、テロリストなどへの対応(非対称戦闘)が求められている。次に開発中のそれぞれの製品について紹介する。

4.1 水中無人機

当社では、既に活躍している海洋調査用無索型AUVの建造技術をもとに、機雷戦用UUVを計画している。この

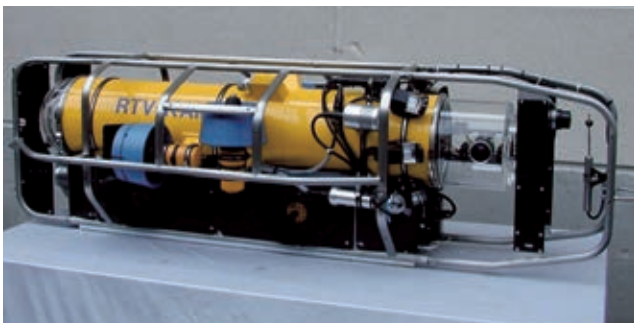


写真 水中点検ロボット“RTV-KAM”

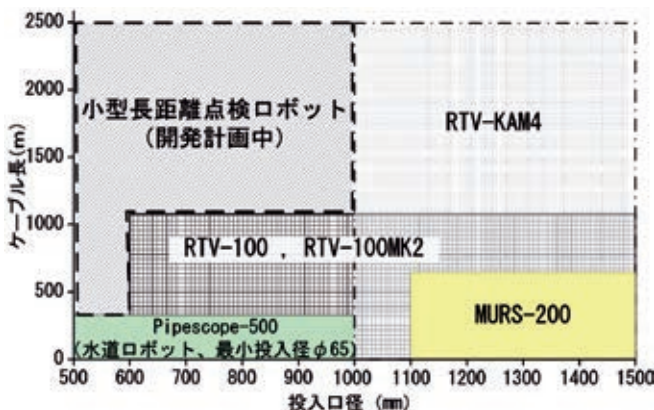


図9 水中ロボットの種類と適用範囲

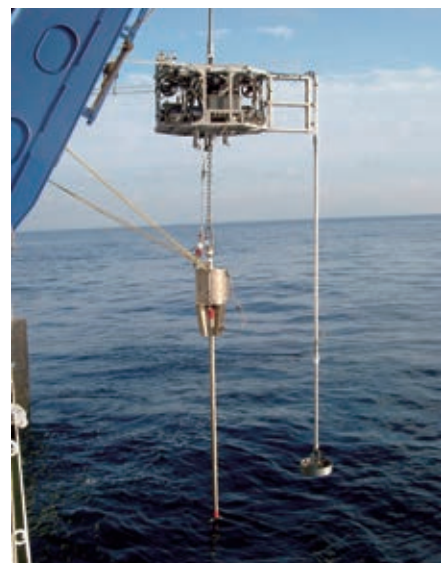


写真4 自航式深海底サンプル採取システム



写真5 水上無人機(USV)の試験状況

UUVには、広域の海底マッピングが可能なサイドスキャンソナーなどを装備し、海底下に敷設された機雷の位置を高精度で探知・類別できる機能を持たせる計画である。

一方、探知できた機雷に対し、処分する機能を持たせたROVとして自走処分用弾薬(Expendable Mine Disposal system: EMD)の自社開発を進めている。これは光ファイバでリモートコントロールするROVであり、低感度高性能炸薬を装備している。その自由な運動性能をもって機雷に接近し、相手の爆発を誘発(殉爆)することで機雷を処分する機能を有する。

4.2 水上無人機

水上無人機の特徴には、監視情報のリアルタイム伝送や高速移動があり、多用途な任務が期待されている。中でも、2001年9月11日に発生した同時多発テロ事件以来、テロの抑止は安全保障上最大の課題であり、危険な地域でどこから出現するのかわからないテロなどへの長時間監視は、無人機の導入が期待される任務であるといえる。

USVの開発は、当社が保有する船舶建造技術や、. . .1のDPSに代表される自律航走のための操船制御技術を活用し、多用途な任務への対応を目指している。2009年度には、空中通信技術に加え、リモートコントロール及び計画した航路を航走するプログラミング航走技術を確認すると共に、陸上から自由にコントロール可能なピークルの製造技術を取得した。USVの試験状況を写真5に示す。今後、更なる技術の確立により製品化を目指す。

これら防衛用ロボットの早期装備化は、防衛関係者から大きく期待されるところであり、その期待にこたえるべく、技術開発を進めている。

5. おわりに

当社は、特機・水中機器に対して豊富な技術開発実績をもちつつ絶えず新たな技術開発を行っており、それらの技術は端的に言い表せば水中及び深海という高水圧に対応する技術、そしてROV、AUV等々に示される無人を目指す技術及び操船制御技術と言える。海底資源調査、水道管路など社会インフラの保守点検、テロ脅威に対する海上安全保障など今後増え続ける社会ニーズに対して高水圧、無人をキーワードとして「AUV = 三井」「水中点検 = 三井」「DPS 操船装置 = 三井」

を目標に、社会ニーズにこたえるべく技術開発、製品開発を行っていく方針である。

参考文献

- 1) 船舶・海洋プロジェクト事業本部：3 000 m 級有索自航式無人深海探査機「ドルフィン - 3K」, 三井造船技報, 134(1988-6), p. 32
- 2) 大田 . ほか：10 000 m 級有索自航式無人探査機「かいこう」, 三井造船技報, 158(1996-6), p. 1
- 3) 松嶋：カメラロボの進化, 日本造船学会誌, 883(2005), p. 26
- 4) 大田 . ほか：閉鎖式ディーゼル機関を搭載した自律航行型無索無人探査機「アールワンロボット」の開発, 三井造船技報, 161(1997-6), p. 1
- 5) 永橋 . ほか：海底熱水地帯を調査する4 000 m 級 AUV “ r2D4 ”を建造, 三井造船技報, 181(2004-2), p. 1
- 6) 佐々木 . ほか：琵琶湖湖水観測水中ロボットの開発, 三井造船技報, 170(2000-6), p. 1
- 7) 野々瀬 . ほか：自動船位保持装置, 三井造船技報, 120(1983-10), p. 49
- 8) 松嶋 . ほか：水中無人機の姿勢制御技術, 防衛技術ジャーナル, 25, 20(2005), p. 4
- 9) 小川：水道管内点検ロボットの開発, 三井造船技報, 197(2009-6), p. 1
- 10) 村田：様々な船用制御に対するニーズと技術 - 操船支援技術と海洋環境保護への取り組み例 -, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 42, 5(2007-9), p. 63
- 11) 村田 . ほか：地球深部探査船“ちきゅう”の船体部及び自動船位保持システム, 三井造船技報, 186(2005-10)p. 18
- 12) 玉置 . ほか：流のある長い管路内の水中点検ロボットの開発, 電力土木, 211(1987), p. 82
- 13) 阿倍 . ほか：水中点検用ロボット(RTV-KAM)の実用化及び運用実績について(第2報), 電力土木, 239(1992), p. 53
- 14) 阿倍 . ほか：水中点検用ロボット(RTV-KAM)の機能高度化開発研究について(第3報), 電力土木, 241(1992), p. 51
- 15) 野口：2 500 m 管路対応水中点検ロボット「RTV-KAM」4号機の開発, 作業船, 291(2008-4), p. 31
- 16) 三井造船：水中ロボットRTV-KAMを用いた2 500 m水路内部点検を実施, プレスリリース, (2009-12)
- 17) 池田 . ほか：自航式深海海底サンプル採取システムを建造, 三井造船技報, 182(2004-6), p. 1

共同執筆者：福島裕之 小池敏和
村田 航 小山寿史

〔問い合わせ先〕

船舶・艦艇事業本部 艦船・特機総括部 特機・水中機器部
TEL 0863 - 23 - 2246 松嶋 正和

ライフサイクルコストを考えた橋梁構造の合理化と技術開発

鉄構・物流事業本部 事業開発部 小林 潔

1. はじめに

社会基盤建設の一つである橋梁事業は厳しい事業環境にある。発注者の国民(納税者)への説明責任のなかにコスト縮減の要請があり、橋梁供用期間での建設コストの総計であるライフサイクルコストを考慮した技術開発が必要となっている。また、総合評価入札方式においては、公共工事における品質確保の面から、価格のみでなく技術提案力が評価される市場となっている。

本報では、橋梁構造の新製品・新工法に関する技術開発として、ライフサイクルコストの観点から取り組んだ、鋼とコンクリートの複合構造(コンクリート合成鋼床版桁橋、MDブリッジ、MESLAB)、溶接継手部の疲労耐久性向上策、補修・補強工法(アウトプレート工法、なおしタル工法)について紹介する。

2. 橋梁構造におけるライフサイクルコストの評価

持続的な発展が求められる社会基盤の建設マネジメントにおいて、供用期間にわたり要求された水準以上の機能または性能を維持しながら、トータルコストを最小化する方法として、ライフサイクルコスト(LCC)の概念がある^{1)~3)}。

$$LCC = I + M + R$$

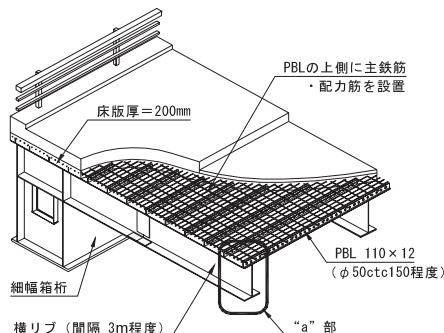
ここに、LCC：建設から更新までの全供用期間におけるコストの総計

I：初期建設コスト

M：維持管理コスト

R：更新(撤去)コスト

従来、橋梁建設では、初期建設コストの最小化を基本としてきたが、ライフサイクルコストを考慮してトータルコストを評価する場合には、維持管理コストや更新コストも含めて総合的に検討する必要がある。維持管理コストでは、劣化や変状が顕著になってから対応する対症的な「事後保全」ではなく、顕著になる前から適切に対策を講じる「予防保全」



が求められている。また、更新コストは一般に大きく、交通止めへの影響等を考慮すると、小規模橋梁以外では現実的でないといわれている。さらに、交通ネットワークへの影響の考慮や環境負荷への対応、社会基盤を資産として捉えるアセットマネージメントの概念を導入する試みも行われている。

こうした枠組みの精度向上のための研究や整備は重要であるが、一方、定量的評価の基本となる各項目の技術開発は十分とはいえない。現状での効果的な対応としては、建設時には、耐久性が高く、できるだけ初期コストの少ない、また、維持管理のしやすい構造の設計・施工を可能にする技術開発が必要であり、既設橋梁の補修・補強工法の開発も重要となる。こうした観点から、以下、.1~.4では、新設橋梁のコストダウンと長寿命化に着目した高耐久性に関する技術開発、.5、.6では既設橋梁の延命化に関する新補修工法・補強工法について記述する。

. 耐久性の高い橋梁構造及び補修・補強工法の技術開発

.1 コンクリート合成鋼床版桁橋

都市高速や湾岸地域などの重交通路線では、鋼床版桁橋の疲労損傷が顕在化している。鋼床版のデッキプレートに補剛している縦リブと横リブの交差部や縦リブ支間部において、それらの溶接部から縦リブあるいはデッキプレートへ進展する疲労き裂や、また、デッキプレート部と垂直補剛材の溶接部からデッキプレートへ進展するき裂が問題となっている。最近では、デッキプレートを通るき裂も一部で生じており、疲労耐久性の高い新しい橋梁形式の実現が望まれている。

この目的を達成できる構造として、デッキプレート上面に縦リブを配し、鉄筋コンクリートと合成させた“コンクリート合成鋼床版桁橋”を開発した。本橋の概要図を図1に示す。

デッキプレート上面に配置された縦リブには、鉄筋をこの上に配する貫通鉄筋のないタイプの孔あき鋼板ジベル(PBL、独：Perfobond Leisten)を採用しており、コンクリート打込み時の補剛材であるとともに、コンクリート硬化後には、鋼

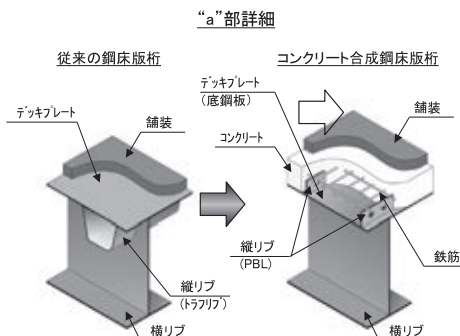


図1 コンクリート合成鋼床版桁橋の概要図

とコンクリートのずれ止めの役割を果たしている。

縦リブをデッキプレートの上面、横リブを下面に配置して両者を分離することは、交差溶接部の疲労の問題を解消するだけでなく、製作を大幅に簡素化できる利点を有している。鉄筋コンクリート床版の損傷過程で生じる「梁状化」現象は、縦リブとデッキプレートにより回避できる構造としている。また、合成鋼床版のデッキプレートが主桁の上フランジを兼ねるため、死荷重に対して床版部分を有効断面として活用でき、主桁高の減少が図れる。従来の鋼・コンクリート合成床版にみられるハンチ構造や桁との接合ジベル等がなく、シンプルかつ合理的な構造であることも特長である。さらに、床版剛性の向上による舗装のひび割れの低減、熱容量の増加によるコンクリート系床版と同程度の耐凍結性能の向上が考えられる。

この構造を実現させるために、以下の試験と数値解析による検討を行った。まず、PBLの設計にあたり、従来のパラメータの範囲外のため、補剛材及びずれ止めとしての性能確認試験とFEM解析による独自の仕様規定を設定し、合理的な構造を実現させるための設計法を提案した。また、輪荷重に対する疲労耐久性の検討を目的に、本形式の床版構造に着目した写真1に示す輪荷重走行試験及び定点疲労試験を実施し、有害な損傷が発生しないことを確認した。さらに、3次元の非線形FEM解析を実施し、疲労試験結果との比較から、床版構造の疲労耐久性の検討を行った^{4),5)}。

本形式は、縦リブと横リブをデッキプレートの上下面に分離し、縦リブの設置間隔に配慮して、製作を大幅に簡素化したことにより、当社比で製作費を約10%削減できる構造となっている。

疲労耐久性の評価では、上記疲労試験と数値解析の結果から、鋼道路橋の疲労設計指針⁶⁾の基となった重交通路線の車重実態調査データにより評価した。その結果、従来の鋼床版桁では30年程度で疲労き裂を生じた事例に対して、本形式では供用設計期間である100年以上の疲労耐久性の確保が検証できた。本形式は初期建設コストを削減しながら、高耐久性を実現して維持管理コストを減少させ、設計供用期間中の更新を回避できる構造といえる。

なお、本形式について、三井造船は特許の共同出願人である首都高速道路株式会社と技術情報の共有を別途進めている。

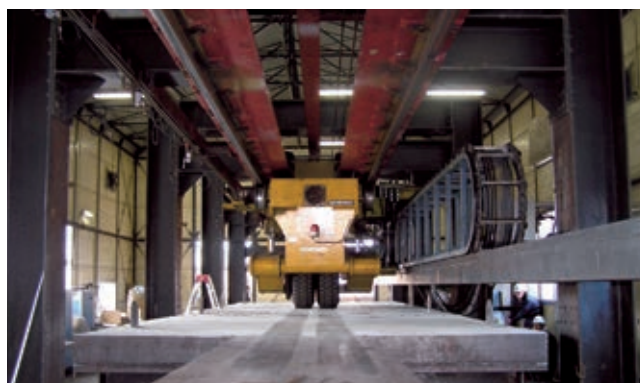


写真1 輪荷重走行試験(大阪工業大学)

2 低コスト・低桁高の中小支間橋梁“MDブリッジ”

支間長が40m程度以下の中小支間橋梁において、河川改修による橋梁の架け替えや市街地の高架橋建設では、桁高制限を受けることが多く、低桁高の橋梁形式が必要となる。これまでの低桁高の橋梁形式は、特別な製作方法や材料を用いたものが多く、コスト高となり、低コストで低桁高が可能な橋梁形式が求められている。そこで、鋼とコンクリートの使用材料の利点を活かした桁断面を考案し、低桁高で経済的な複合橋梁“MDブリッジ”を開発した。

“MDブリッジ”は、図2に示すように桁と床版を工場で一体化したプレキャスト製品で、現場ではこの桁を並べてPC鋼材で橋軸直角方向に連結する。プレキャスト桁は下フランジとウェブを鋼部材で形成し、桁作用の圧縮力が作用する上フランジはコンクリート部材としている。コンクリート部材は、鋼ウェブの上端に設けたPBLで鋼部材と結合して、ずれせん断に抵抗する構造としている。主な特長は、以下のとおりである。

引張側を鋼部材、圧縮側をコンクリート部材で抵抗する力学的に合理的な合成構造である。支間長23mでは、従来形式に対して5～15%程度の桁高の低減が図られる。鋼上フランジを省略して、圧縮フランジと床版をコンクリート部材で兼用し、ウェブを無補剛とすることで、鋼部材を削減しコストの縮減を図っている。H形鋼橋梁と比較して5～10%程度のコスト削減が可能である。また、鋼部材の溶接部が少ないことから、疲労耐久性にも優れている。自重が減少するため運搬上有利となり、プレテンション方式PCT桁と比較してプレキャスト桁の幅を大きくすることが可能で、例えば、主桁本数は10本から7本に減り、下部工反力は25%程度の低減も可能となる。また、支承数の減少などにより施工コストの縮減も図れる。桁の分割が可能で、搬入道路が狭い市街地や山間部にも輸送できる利点がある。

材料は一般的な橋梁に使用するもので、特殊な材料は用いていない。また、特別な製作方法を必要としない単純構造で、製作性や施工性に優れている。

桁の製作コストを低減し、設計時における桁断面や桁配置の設定を簡易にするため、試設計により桁断面の標準化を図っている。

“MDブリッジ”の実用化に当たって、技術的な課題と実施した性能確認試験を図3に示す。

鋼ウェブのPBLは、合成効果が高いずれ止めとして様々な複合構造物に採用され、設計に用いる強度評価式が数多く提案されているが、本新形式では材料強度や構造的な条件が異なる。そこで、主桁作用に対するPBLのせん断耐力に対して押抜きせん断試験を実施し、既往の強度評価式の適用性を検証した。

実橋では、PBLに対して主桁作用と床版作用により立体的な断面力が作用する。実橋と同じ荷重状態での結合部や桁の断面性能を確認するため、コンクリートの寸法効果の影響を受けない、実橋を想定した2本の桁を有する20m支間実物大桁試験体で写真2に示す曲げ載荷試験を実施した。試

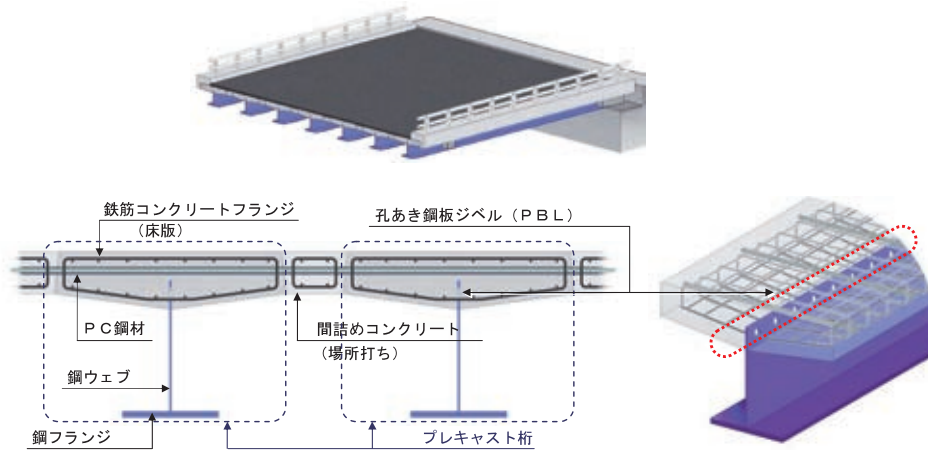


図2 MDブリッジの概要図

| 試験 | 確認事項 |
|-------------------------------------|--|
| PBL 要素試験体 押抜きせん断試験 | <ul style="list-style-type: none"> ・PBL のせん断耐力 ・PBL の破壊形態 |
| PBL・部分析試験体 静的載荷試験 | <ul style="list-style-type: none"> ・面外力に対するPBL部の挙動 ・鉛直方向せん断力に対するPBL部の挙動 |
| 20m 支間実物大桁(2本桁)試験体 静的曲げ載荷試験・疲労試験 | <ul style="list-style-type: none"> ・主桁作用と床版作用が同時に作用した場合の桁の健全性 ・PBL 部の疲労耐久性 |
| 23m 支間実物大桁(1本桁)試験体 静的曲げ載荷試験 | <ul style="list-style-type: none"> ・桁の耐力及び破壊形態 ・継手構造の施工性、安全性 |

図 MDブリッジの性能確認試験



写真2 実物大2主桁の疲労試験

験では、活荷重相当の曲げモーメント荷重を3回載荷した後、定点載荷による疲労試験を行った。変動荷重範囲を設計荷重相当とした200万回載荷の疲労試験では変状は確認されなかった。また、幾何学的非線形性と材料非線形性を考慮したFEM解析も実施した。以上より、桁やPBL部は劣化せず、桁は合成桁としての挙動を示し、使用性・疲労耐久性に問題が無いことが確認された。

桁の終局耐力や破壊モードを確認するために、1本桁の23m支間実物大桁を用いた静的曲げ載荷試験を行った。その結果、合成桁断面の土木学会の曲げ耐力の計算値と同等以上であり、実験結果と解析結果は良く一致している。

“MDブリッジ”は、上述の性能確認試験やFEM解析により、使用性・耐久性・安全性が十分に確保されており、構造性能や設計方法に問題が無いことが確認された^{7),8)}。現在、2橋の工事実績があり、その一例を写真に示す。今後は、更なる合理化構造の検討、連続桁化やインテグラルアバウト形式への適用の検討を行う予定である。なお、本形式は、当社とドーピー建設工業(株)、三井造船鉄構工事(株)で共同開発したものである。

鋼・コンクリート合成床版 “MESLAB”

鋼橋における鉄筋コンクリート床版は昭和40年代に、交通量の増大や設計法の課題により損傷が発生し、床版の高耐久性が求められた。その一つの解として、PC床版を有する構造が採用され、床版の長支間化が可能になり、少数主桁形式の



写真 MDブリッジ(東京都、町田橋)

橋梁の開発に繋がった。この形式は初期コスト縮減にも効果があり実績が拡大したため、長支間床版のメニューの拡大を求め、鋼橋製作メーカーの各社において鋼・コンクリート合成床版が開発された。この合成床版の特長として、構造面では底鋼板を構造部材にした床版厚の低減による死荷重の減少、長支間床版、斜橋や曲線桁への対応可能性、施工面では安全性の確保、省力化による工期短縮、さらに、維持管理面では高い疲労耐久性によるライフサイクルコストの低減、コンクリート剥落の第三者被害対策などがあげられる。底鋼板の支保工としての補強方法とコンクリートとのずれ止めの違いにより各種の合成床版が開発されているが、図4に示す“MESLAB”

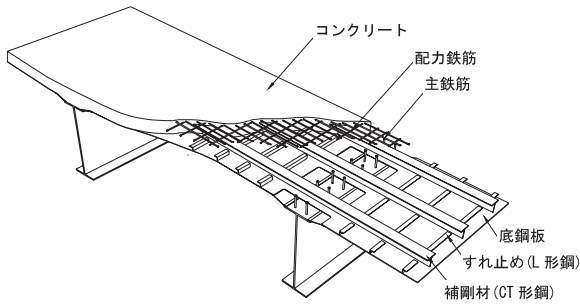


図4 MESLABの概要図



写真4 輪荷重走行試験(土木研究所)

は補剛材にCT形鋼を用い、ずれ止めにL形鋼ジベルを採用している。技術開発としては床版の疲労耐久性の確認を中心に、連続合成桁における適用性、構造の更なる合理化などを進めてきた。

“MESLAB”は旧土木研究所において、その载荷プログラムによる写真4に示す輪荷重走行試験を実施して、コンクリート面のひび割れ、ずれ止め性能、たわみ性状を把握し、構造全体として包括的な疲労耐久性の確認を実施し、市場への早期導入に注力した。また、桁構造を含めた負曲げ試験により、連続合成桁におけるひび割れ制御や断面の平面保持等を確認した⁹⁾。さらに、底鋼板の現場継手の高力ボルト化や、L形鋼やCT形鋼の配置検討など構造の合理化を行い、現在19橋、52500m²の施工実績がある。

一方、床版構造の合理的な疲労設計や構造の改良に向けては、上記の包括的な確認のみではなく、部材の疲労強度を明確にし、着目部に発生する応力度などの情報から疲労照査ができることが望ましい。

合成床版において鋼部材の疲労照査が必要な箇所は、ずれ止めや鋼板の溶接部、開口による応力集中部等である。後者は比較的簡単に公称応力が算出でき、鋼道路橋の疲労設計指針⁶⁾を用いて、鋼部材単体として疲労照査が可能である。一方、応力状態が複雑となるずれ止めの溶接部について適用できる疲労照査法の報告は見あたらない。そこで、L形鋼ジベルの溶接継手部の応力状態と疲労強度を明らかにし、その疲労強度評価方法を構築することを目的とし、実橋を対象とした図5に示すFEM解析と载荷試験、図6に示す押抜きせん断モデル試験体及び梁試験体の応力・変位測定試験とFEM

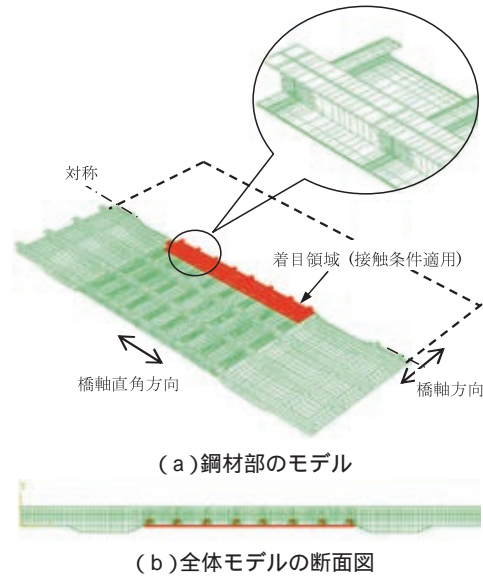


図5 FEM解析モデル

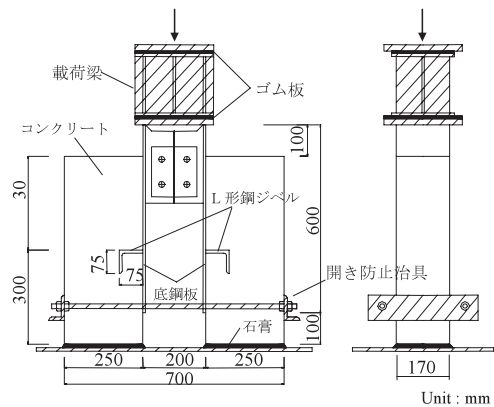


図6 押抜き疲労試験体

解析、疲労試験を行った¹⁰⁾。

その結果、鋼とコンクリートの付着が切れた状態では、L形鋼ジベルの溶接部付近で底鋼板の面外変形が生じ、局部的な応力集中が発生することを確認した。また、溶接止端部のホットスポット応力により疲労強度が予測でき、設計荷重レベルでは鋼構造物の疲労設計指針¹²⁾のE等級を満足することを確認した。

また、疲労設計手法を確立するために、溶接部付近の局部的な応力集中の発生メカニズムを解明し、比較的簡易な計算によってL形鋼ジベル溶接部の応力集中を推定できる手法を検討した¹¹⁾。

4 面外ガセットの溶接継手仕上げによる疲労耐久性向上策の検討

プレートガータ形式橋梁の主桁・横桁交差部などに用いられる面外ガセット溶接継手の廻り溶接部の溶接止端部は、高い応力集中が生じるために疲労強度上の弱点とされている。疲労強度の向上策として、グラインダを用い溶接止端部の形状を滑らかにして応力集中を軽減させることが多い。疲労設計の指針等^{6),12)}でも、完全溶込み溶接を行ってグラインダ仕上げを施すことにより設計上の疲労強度等級を上げることが認められている。しかし、これらの基準には、溶接止端部に

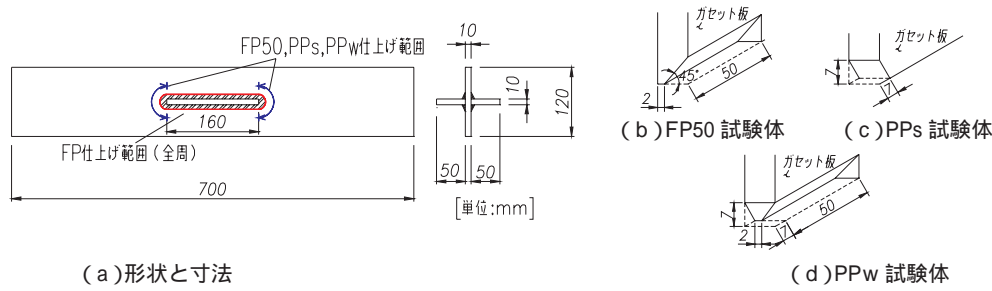


図7 疲労試験体

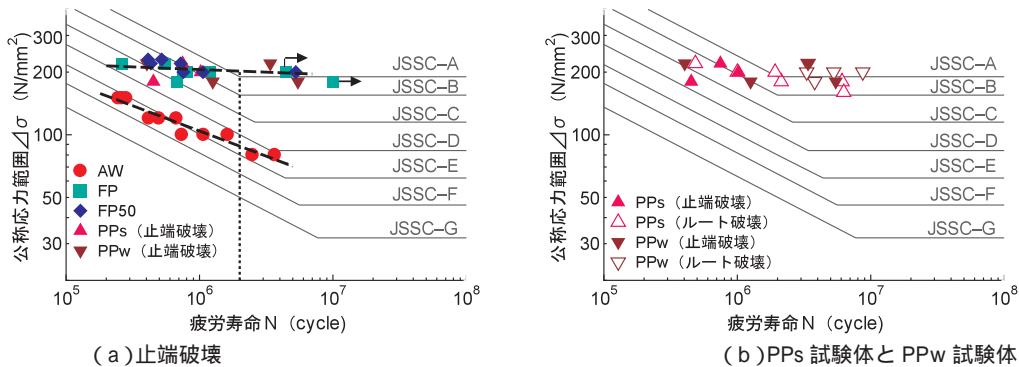


図8 疲労試験結果

おける範囲と仕上げの程度が明記されていないため、過剰な仕上げが行われている可能性もある。

また、完全溶込み溶接にする要求は、検出が容易でない溶接ルート部からの疲労破壊を避けるためと考えられるが、部分溶込み溶接でも溶接ルート破壊防止に有効であったという報告もある。

効率的な施工を行うためには、グラインダ仕上げを施した面外ガセット溶接継手の疲労強度や破壊起点について、仕上げ範囲、仕上げの程度、溶込み量の相互関係に着目し、適切な仕上げ方法と溶接溶込み量を把握することが必要である。そこで、完全溶込み溶接あるいは部分溶込み溶接を行った面外ガセット溶接継手を対象とし、グラインダの一種である超硬バーで仕上げた試験体を用い、疲労強度に対する溶接止端半径と溶接仕上げ範囲、溶接溶込み量と疲労破壊起点の関係について、小型試験体を対象とした疲労試験とFEM解析により検討した¹³⁾。試験体と疲労試験結果を図7及び図8に示す。本検討で得られた主な結果は、以下のとおりである。

面外ガセット溶接継手のグラインダ仕上げを行なう範囲は、廻し溶接部のみとしても、溶接線全長を仕上げた場合と同等の疲労強度向上効果が得られる。

面外ガセット溶接継手の廻し溶接を行う際に、鋼道路橋の疲労設計指針⁶⁾に図示されたガセット端部カット形状(開先形状)では、溶接ルート部からのき裂の発生を防ぐための溶接溶込み量を確保できない可能性がある。

面外ガセット溶接継手について、溶接止端の曲率半径を5 mm程度に仕上げた場合、ガセット端から完全溶込み溶接とする領域を主板厚の2倍以上とすることでルート破壊を防止できる可能性を示した。

今後は主板厚や仕上げの程度に関する検討を加え、当社の鉄構運搬機工場の基準に反映していく予定である。

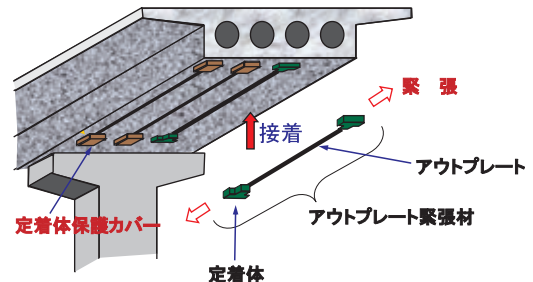


図9 アウトプレート工法の概要図

5 新緊張材による“アウトプレート工法”

炭素繊維プレートは高強度で軽量な、かつ、優れた耐腐食抵抗性を有する材料であり、構造物を補強する工法では引張抵抗材として用いることが一般的である。“アウトプレート工法”は、これを緊張材として用いてプレストレスを導入する新たな工法である¹⁴⁾。本工法は定着部に対する負荷が小さいことから、図9に示すように既設の構造物に容易に配置でき、コンクリート構造物の補強に適したプレストレス導入工法であり¹⁵⁾、鋼橋の補強にも用いられている。本工法は補強工法として、橋梁の延命化に適用でき、維持管理コストの縮減に有効である。特長は以下のとおりである。

高い曲げ補強効果により、終局曲げ耐力の向上や鉄筋応力度の低減が図れる。

ひび割れ制御効果が高いことにより、既存ひび割れを閉じ、ひび割れ発生荷重を向上させる。

死荷重に対するたわみの回復にも有効である。

ひび割れ拘束による有害物質の浸透抑制、疲労耐久性の向上に効果がある。

優れた耐腐食抵抗性を有する炭素繊維プレートを採用し、定着体には十分な防錆措置を講じている。

プレストレスによる二次モーメントを有効利用し、連続桁の支点上の補強が下面から可能である

実用化に際して、定着体の性能確認試験、コンクリート試験体による耐力確認試験、鋼部材試験体による耐力確認試験、補強効果確認のための実橋載荷・振動試験を実施した。また、補強効果確認のための固有振動解析を行った。

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術研究所、ドーピー建設工業(株)が共同開発したものであり、「アウトプレート工法研究会」により工法の推進を図り、実績は現在 26 件である。

6 新断面修復材による“なおしタル工法”

断面修復材には、ひび割れが発生せず、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る。現在、一般的な断面修復材にはポリマー系の材料が使用されているが、高粘性を示すため作業性が悪化し、また耐火性の課題などが指摘されている。これに対して、“なおしタル工法”は、高チクソトロピー（レオロジー特性の一種で、せん断応力の増加により粘度が可逆的に減少する性質）タイプのノンポリマー無収縮断面修復モルタル材を使用した工法である¹⁶⁾。このため、高いチクソトロピー性を有し、ポリマーを使用せずにポリマーセメントモルタルと同等の付着性能、高強度性能、厚付け性能を發揮する。本工法は橋梁の補修工法としてその延命化に適用でき、維持管理コストの縮減に有効である。

性能評価試験や施工試験から、以下の本工法の特長が確認されている。

高いチクソトロピー性により、容易に厚塗り施工が可能で工期短縮が可能である。吹付け試験において、壁面で 120 ~ 150 mm 程度、天井面で 60 mm 程度以上の吹付け施工が可能であった。

吹付け施工、コテ施工でいずれも可能である。

初期乾燥によるひび割れ抵抗性に優れ、乾燥収縮も小さいため長期に渡り、ひび割れ抵抗性にも優れている。

ポリマーを使用していないため耐火性に優れ、高強度性能を持っている。

建築、土木にかかわらず、かぶり補修から断面修復まで幅広い場面で使用することができる。

本工法は、宇都宮大学、株式会社ニューテック、ドーピー建設工業(株)で共同開発したものである。

4. おわりに

我が国の橋梁は昭和 40 ~ 50 年代に集中的に建設され、約 10 年後に供用年数が 50 年を越える橋梁が急増することになる。社会基盤の一つであり、交通ネットワークの基点を形成する橋梁について、その機能を要求水準以上に維持しながら次世代に引き継ぎ、トータルコストを最小化する方法として、ライフサイクルコストの概念が有効である。また、この大きな枠組みを考慮しながら、新規建設の初期コストの合理化や長寿命化による維持管理コストの低減や分散化のため、その基本となる個別の要素技術の開発も必須である。

各技術開発において、大阪工業大学 松井教授(コンクリート合成鋼床版桁橋)、大阪工業大学 栗田教授(MD ブリッジ)、

山口大学 浜田名誉教授(MESLAB)、名古屋大学 館石教授(MESLAB)、法政大学 森教授(溶接継手疲労耐久性)、宇都宮大学 藤原教授(断面修復材)の各先生にご指導をいただき、また、共同開発等における各社の関係各位にご協力をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 西川：道路橋の寿命と維持管理，土木学会論文集，501，-29，(1994-10)，p. 1
- 2) 西川：ライフサイクルコストを最小にするミニマムメンテナンス橋の提案，橋梁と基礎，(1997-8)，p. 64
- 3) 土木学会メンテナンス工学連合小委員会：社会基盤メンテナンス工学，(2004-3)，p. 9，東京大学出版会
- 4) 浅野・ほか：コンクリート合成鋼床版の床版耐久性評価，第 8 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム，(2009-11)，p. 33-1
- 5) 浅野・ほか：疲労耐久性に優れたコンクリート合成鋼床版桁橋の開発，三井造船技報，199(2010-2)，p. 42
- 6) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，(2002-3)，p. 81
- 7) 皆田・ほか：中小支間複合橋梁に関する実験的研究，第 7 回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，(2007-11)，p. 22-1
- 8) 皆田・ほか：低桁高・低コストの中小支間複合橋梁“MDブリッジ”の開発，三井造船技報，193(2008-2)，p. 1
- 9) 深沢・ほか：鋼・コンクリート合成床版橋 MESLAB の疲労耐久性と連続合成桁への適用性について，三井造船技報，176(2002-6)，p. 8
- 10) 館石・ほか：L 形鋼をずれ止めに用いた鋼・コンクリート合成床版の疲労耐久性，鋼構造論文集，14-55，(2007-9)，p. 123
- 11) 館石・ほか：鋼・コンクリート合成床版の L 形鋼ジベル溶接部の局部応力挙動と疲労設計法に関する研究，鋼構造論文集，16-63，(2009-9)，p. 57
- 12) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，(1993. 4)，技報堂出版。
- 13) 森・ほか：止端仕上げした面外ガセット溶接継手のルート破壊防止法の検討，鋼構造論文集，16-63，(2009. 9)，p. 27
- 14) 「投稿中」高橋・ほか：炭素繊維プレート緊張材(アウトプレート工法)を用いた構造物の補強，三井造船技報，201(2010-10)
- 15) 藤田・ほか：調布高架橋のアウトプレート工法による補強工事と実橋載荷試験，橋梁と基礎，(2004. 10)，p. 15
- 16) 「投稿中」立神・ほか：高チクソトロピー性ノンポリマー無収縮断面修復材，三井造船技報，201(2010-10)

〔問い合わせ先〕

鉄構・物流事業本部 事業開発部
TEL 03 - 5202 - 3901 小林 潔

環境対応型コンテナ荷役機器

鉄構・物流事業本部 小川 寛

1. まえがき

地球温暖化防止対策として、1992年に先進国を対象に、温室ガスの排出量削減目標数値を定めた京都議定書が採択された。その後、2009年にデンマークで開催されたCOP15では、先進国と中国やインドなどの新興国との間にあつれきはあるものの、温室効果ガスである二酸化炭素(CO₂)の削減や省エネルギーへの取組みへの更なる加速が人類の大きな課題であり、その重要性についての世界的な共通認識が必要であるとの提言がなされた。このような環境に関わる動きは、広い範囲で、今後も引続き行われると考えられる。かかる状況で、荷役機械についても例外でなく、2003年の原油高騰を引き金とした低燃費・消エネルギーの実現、前述のCO₂に代表される排気ガス及び騒音などの低減が必須の技術開発課題となっている。

本報では、これらの社会的なニーズにこたえるために、三井造船がコンテナ荷役機器を対象に取組んできた技術開発の経緯を記述する。まず、環境対応型荷役機器として、自家発電機を搭載したタイヤマウント式トランステーナ(Rubber Tired Transtainer[®]: RTT)の環境対策、省エネ技術及び電動化の新技术を述べ、次にレールマウント式トランステーナ(Rail Mounted Transtainer[®]: RMT)への取組みを併せて紹介する。

2. これまでの製品開発状況

当社の主力製品であるコンテナ荷役機器、特に自家発電機を搭載したRTTにおいても、厳しい環境要因に対する要請があり、環境対応機能を装備した製品へのニーズが市場より強く要望されている。当社ではこれらの開発要請をチャンスととらえ、市場のニーズにこたえたと共に、競合他社との差

別化を積極的に図ってきた。まず初めに、環境対応機能については、1999年に当社のライセンサーである米国のパセコ社で回生エネルギーの利用による省燃費システムの特許取得を皮切りとして、数々の環境対応技術・製品の開発を行ってきた。

具体的には、従来、抵抗器によって吸収していた、吊荷の巻下や横行時・走行時に発生する回生電力をフライホイール、キャパシタなどを利用して蓄える蓄電装置があり、これらの装置に蓄えた電力を、従来の電源であるディーゼルエンジン発電機(Diesel Generator: DG)セットからの電力と併せて使用することにより、燃料消費量の低減を可能とする。パセコ社ではフライホイール式蓄電装置に関する米国特許を1999年に、キャパシタ式蓄電装置に関する米国特許を2007年にそれぞれ取得した。

また、クレーン上の発電機セットから排出されるNO_x、粒子状物質(Particulate Matter: PM)等の有害物質の削減を目的とする排ガスフィルタ(PM除去フィルタ)(写真1)を製品化した。これはNO_xについて70%、PM40%以上の削減を実現し、従来型マフラーの代わりに取付けて使用される。近年、米国西海岸では大気汚染防止に関する規制が厳格化され¹⁾、それに伴い本装置に対する関心も高まっている。この排ガスフィルタは米国環境保護局(Environmental Protection Agency: EPA)の認証を取得している。

さらに、“MES ecoTT”の製品名で、CO₂排出量を大幅に削減した、環境に優しい様々な製品ラインナップを提供してきた。その内の一つである“MES Hybrid”は、当社独自で開発した、エンジン回転数を可変にコントロールする技術(Engine Variable Speed Control: EVSC)をベースに、蓄電装置(キャパシタ)を装備することにより、既存標準トランステーナと比較して燃料消費量を50%削減し、CO₂排出量も同様に削減して、他社製品との差別化を実現した。削減量を数値で定量的に公表している東京都のホームページの資料²⁾によれば、従来型RTTの排出するCO₂は、ターミナル全排出量のおよそ31%(3100t)を占めており、“MES Hybrid”の採用で、年間およそ1550tの削減が可能となる。しかし、当社ではこの削減数値に満足することなく、多方面にわたる技術開発動向に注目しながら、更なる差別化を目指した環境対応機器の開発に取り組んでおり、09年度には、引き合い案件をターゲットに、60%の省燃費が可能なりチウム電池搭載新型ハイブリッドRTTを開発し、また、さらに外部給電型電動式RTTの製品化を進めている。

新製品について

前述のとおり、当社では環境対応型荷役機器の製品開発を、



写真1 トランステーナ用排ガスフィルタ

社会的なニーズに対応し、競合他社に先んじて行ってきた。環境に関わる市場の要求は、今後もより厳しくなり、時流に乗った、迅速な製品開発が要求されている。以下に現在取組んでいる新製品の開発状況について述べる。

1 ハイブリッド式トランステーナ

“MES Hybrid”は、2007年に、初号機を世に送り出し、その後も順調な出荷実績を誇っている。蓄電装置としてキャパシタを用いた“MES Hybrid”は、EVSCの能力を発揮するため、エンジンの増減速時にキャパシタより電力を供給し、エンジンの負荷を一時的に抑制することで、EVSCに加えて、一層の省燃費性能を実現した。全体のシステムは、図1に示すように、回転数最適制御システムを搭載したエンジンと発電機のセットにキャパシタを付加した構成である。燃料の削減率は、取り扱われるコンテナの平均重量、及び時間当りの本数によって左右されるが、設計上50%である。実際に出荷した実機の追跡調査では、おおむね当初のもくろみどおりの省燃費を達成している。

新たに開発した新型“MES Hybrid”は、大容量のエネルギーを蓄えて、その大容量蓄電装置から積極的にエネルギーを供給し、エンジンの負担を大きく低下させている。その結果、エンジン出力が、従来のおよそ半分の小型化が可能となり、燃費性能が大幅に改善される。また、蓄電可能なエネルギーが大容量となるため、再生エネルギーを積極的に回収し、荷役作業、巻上げ時の大容量のエネルギーを蓄電装置からの電力で大きくまかなうことが可能となる。これにより計算上、8リットル毎時の燃費となり、60%の省燃費が達成される。この計算結果を裏付けるべく、工場において、リチウムイオン蓄電装置及び小型発電機を実機に搭載して、実機ベースでの実証実験を行っている。

なお、蓄電装置については、現在、乗用車で主に使用されているニッケル水素電池や、リチウムイオン電池など様々な選択肢があり、ユーザのニーズに適したものを選択できるよ

うになっている。

ここで、採用している大容量の蓄電装置は、後述する地上給電型RTTに機動性を持たせるために重要な装置となる。具体的には、ディーゼル発電機セットに代わって蓄電装置を動力源として用い、地上給電設備から離脱した状態で、コンテナターミナルの蔵置ブロック間を自由に移動する。その結果、環境負荷を最低限に抑制することが可能となる。

2 地上給電型電動式トランステーナ

地上給電によってRTTのゼロエミッション化を図ることは以前より着目されており、2002年にはノルウェーのオスロ港でケーブルリール式電動RTTが登場している。当社も、2008年、台湾の高雄港の当社製トランステーナにケーブルリール方式を、改造・取り付けを行った。また、2009年末には、博多港電動化の入札が国交省より行われ、当社が受注した。これは、バスパー式地上給電を採用し、バスパー自動脱着装置及び蓄電装置を装備することで、蔵置コンテナブロック間を自由に移動し、最適なクレーンの配置で荷役できる特徴を有する、日本初のバスパー式電動RTTである。以下に当社製品の各方式の特徴を述べる。

2.1 バスパー方式

バスパー方式の概念は図2に示したとおり、ヤード内コンテナブロックに沿って、地上の給電柱に支持された三相電力と接地の合計4条の絶縁トロリー線で構成されるバスパーから供給される、低圧電圧(AC440V)でRTTを駆動する。クレーンの走行レーン変更時には、自動脱着装置付き給電トロリーにより、給電方法をバスパーから蓄電装置へ切替える、完全なエンジンレス方式であり、運用時にCO₂、NO_x、PM等を全く排出しないゼロエミッションを実現する。

2.2 ケーブルリール方式

ケーブルリール方式は写真2に示したとおり、ケーブルリールをクレーン上に設置し、地上の分電盤からキャブタイヤケーブルを介して電力を給電する。送電ロスを減らすため

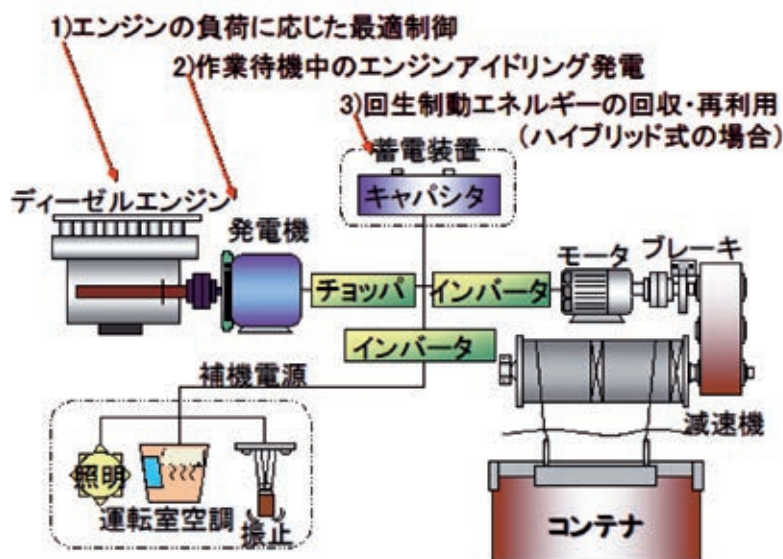


図1 ハイブリッド式のシステム構成図

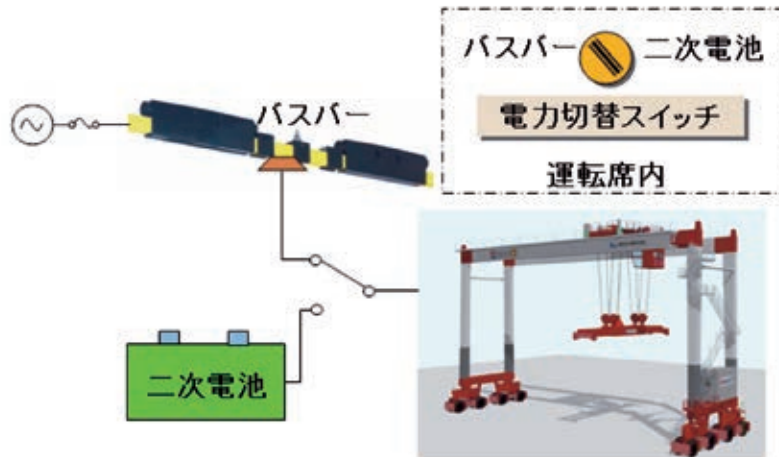


図2 バスバー方式



写真2 ケーブルリール方式

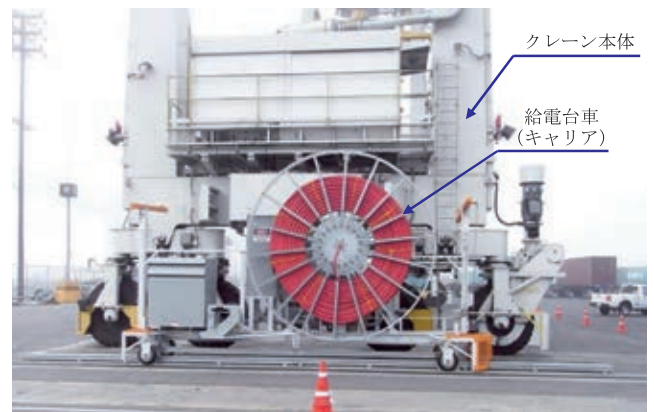


写真 給電台車方式

に、AC6 600 V や AC3 300 V 等の高圧電力を供給し、クレーン上に設置したトランスで AC460 V に降圧する方式である。基本的に蔵置コンテナブロック間の移動は行わず、所定のレーンで荷役を行う。

2. 給電台車方式(パセコ社製品)

給電台車方式は、写真に示したとおり、ケーブルリールをクレーンにけん引される台車(キャリア)上に設置し、地上の分電盤からキャブタイヤケーブルを介して電力を供給する。キャリアはけん引用接続棒によりクレーンと結合され、クレーンと共に走行する。キャリア上にはケーブルリール、変圧器(高圧電力 AC460 V)などが装備されている。地上側には給電ケーブルの収納とキャリア走行用ガイドレールを兼ねた簡便なレールと、キャリア走行区域を囲うフェンスを設置する。クレーンへの供給電源が低圧(AC460 V)であるため、蔵置コンテナブロック間の移動が、給電ケーブルのつなぎ替えで可能となる。また、クレーン側の改造が比較的軽微で済む。ただし、本方式の採用にはキャリアが走行するためのスペースの確保が必要となる。2010年初めにロサンゼルス(WBC)向けに初号機として2台が納入される予定である。

4. 今後の製品・技術開発動向

CO₂ 排出量、燃料消費量の削減はコンテナターミナルにおいても大きな課題となっており、米国や国内コンテナターミナルでも法的な規制として、CO₂ 排出量削減目標が設定され、義務付けられるケースが見受けられる。既に米国カリフォルニア州では、環境保護庁が制定したノンロードディーゼルエンジンに関する Tier4 基準の適用を決定しており、原則として基準に満たないクレーンは、2011年以降州内のターミナルでは使用できなくなる。今後、この社会的な傾向はより顕著となり、環境対応に関連する技術開発は、続けていく必要がある。前述のとおり、他社に先駆け、排ガスフィルタ、ハイブリッド式トランステナ、及び電動化の商品化を実現し、世に送り出してきた。

環境対応型荷役機器としての RTT の将来の姿としては、一般の車両と同様に、ケーブルリールやバスバーなどの外部からの給電方式から解放された、環境に優しく、かつ荷役効率の高いコードレスタイプの全電動化された形になると考えられる。その製品化のためには、蓄電施設の価格の適正化、

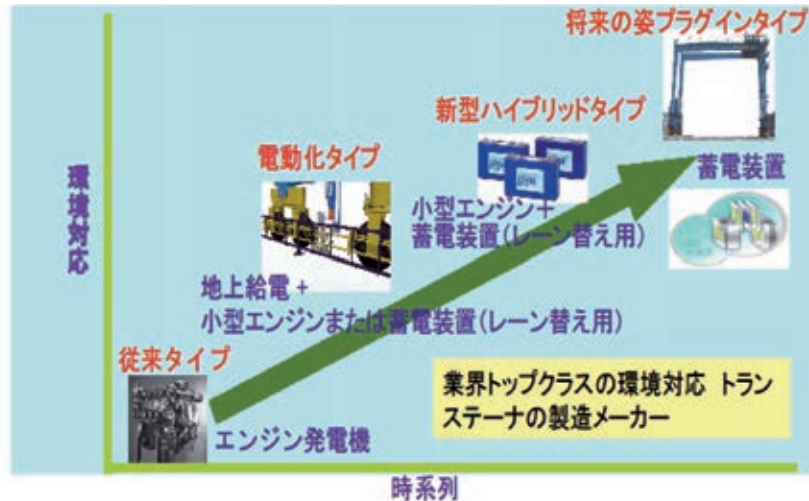


図 環境対応型トランスレーナの開発の流れ

能力の向上やコンパクト化を待つ必要があるが、技術的な実現に向けて、非接触給電方式のような、必要な項目の検討を引続き行っていく。図に環境対応型トランスレーナの開発の流れを示す。

一方で、RTTの電動化の流れとは別に、コンテナ蔵置量の比較的多い大規模のターミナルを対象にレールマウント式トランスレーナ(RMT)の導入が見られる。2006年をピークに発注台数が低下傾向にあるRTTに対して、RMTの発注台数は小幅ではあるが右肩上りの傾向を示している。RTTと比較した場合のRMTの特徴として、レールや基礎電源設備設置のための費用などの初期投資が必要であること、ヤードレイアウト変更の際の柔軟性が低いなどの短所が挙げられる。一方、大量の蔵置に対応したクレーンの大型化が可能であり、また基本的にゼロエミッションで、環境負荷低減やオペレーションコストの削減に有効であるといった長所を有する。近年はその長所に対する注目が高まっており、それが発注台数の増加につながっているものと考えている。しかし、ターミナルの規模や特徴によっては、費用対効果を考慮した場合、必ずしもRMTの導入が有効であるとは言えない場合もある。このため、新しい荷役システムの一つとして、遠隔運転や、自動運転を装備したRMTを中核とする将来的な荷役システムの開発を、今後はRTTの全電動化の開発と平行して行っていく。

5. あとがき

環境問題に対する解決手段としてトランスレーナのゼロエミッション化が究極の対応策となるが、RTTの場合、現時点での技術的、経済的な制約条件から、当面は、地上給電による電動式RTTが普及すると考える。しかし、蓄電設備が安価となり、適切な充電方法が実現すれば、プラグイン方式

の電動化に順次移行すると予想される。

一方、RMTは、環境対応機器としては、上記の地上給電型RTTと同様な位置付けではあるが、中小規模のターミナルを対象とするRTTとは別に、大型ターミナルを対象に需要が出てくると考える。ただし、クレーン単体だけでは差別化が図れないため、RMTを使ったトータルシステムを開発して客先へ提案していく必要があると考える。

上述のような市場予想に基づいて、今後とも、営業部及び米国のパセコ社と情報を共有しながら、必要な技術・製品の開発を迅速に行っていく。

なお、本報の執筆に当り、資料提供や、内容の吟味に多大なる協力を得た関係者に、この紙面をお借りして感謝の意を表する。

参考文献

- 1) The Port of Long Beach and Los Angeles, San Pedro Bay Ports Clean Air Action Plan, <http://www.cleanairactionplan.org/>, (2010-6-4)
- 2) 東京都ホームページ：報道発表資料2004年4月掲載 コンテナターミナルにおける地球温暖化防止対策調査(報告)資料2.

共同執筆者：

鉄構・物流事業本部 営業部 市村 欣也
PACECO CORP. 高原 超士

〔問い合わせ先〕

鉄構・物流事業本部 鉄構運搬機工場 運搬機設計部
TEL 097 - 593 - 3135 小川 覚

ディーゼルエンジン - 設計・製造関連技術 -

機械・システム事業本部 東 條 温 司

1. はじめに

1.1 製造実績

三井造船のディーゼルエンジン部門では1926年、B&W社(当時)とのライセンス契約締結以来、今日に至るまで一貫して大型低速ディーゼルエンジンを製造している。1928年完成の“高見山丸”主機である4サイクル単動トランク型機関6125M(950馬力×160rpm)が当社としては記念すべき1番機である。

その後、エンジン重量低減にこたえるため、2サイクルエンジンへと移行した。1953年～1959年に過給機導入時代となり、過給機の出現により出力が増大し、1958年には三井船舶株式会社“大峰山丸”主機1274VTBF160の完成により、三井-MAN B&Wエンジンの累計生産馬力は100万馬力に到達した。

1960年～1971年は高出力化・大型化の時代となり、VT2BF型、続いてK-FF、K-EF型を製造した。この間には、当時、世界で類例の少ない3基3軸推進プラントとした大阪商船三井船舶株式会社向け大型コンテナ船主機として12K84EF×1基+9K84EF×2基、合計出力84600馬力のエンジンを完成させた。

更に、性能と信頼性・保守整備の省力化、製造設備の高度化にこたえるべくK-GF型が開発され、1973年にその世界一番機となった7K90GF(23200馬力×114rpm)が当社工場にて完成した。

1976年には、三井-MAN B&Wエンジンの累計生産馬力が1000万馬力という大記録を達成した。その後も新機種の開発が続き、1978年に過給方式が動圧から静圧方式へと変わり、その1号機6L55GFQ(8040馬力)が同年末に完成した。

1983年には、L-MC/MCEエンジンの1号機である6L60MC型(12480馬力)が完成した。

MCシリーズは、現在に至るまでベストセラーとなっている。1994年には、MCシリーズにより、千葉事業所内にガス・インジェクション・ディーゼルエンジン発電設備(12K80MC-GI-S、発電出力40MW、天然ガスを燃料とする)を完成させた。

更に、カム軸がない電子制御エンジンへと発展し、2010年度には電子制御エンジン7S65ME-Cを7台製造する予定である。

図1に製造実績の推移を示す。2008年に単一ブランドの累計生産馬力としては世界初となる6000万馬力を達成し、2010年6月には7000万馬力となる見込みである。

MAN B&Wエンジンは世界及び国内シェアが75%を超えており¹⁾当社の国内マーケットシェアは約50%²⁾であり、更なる飛躍を目指している。

1.2 工場概要

当社のディーゼル関係工場配置の変遷を図2に示す。

ディーゼルエンジンの組立・試運転工場は、1920年代には新川北側の組立・試運転工場(現(株)三造エムテック)で行っ

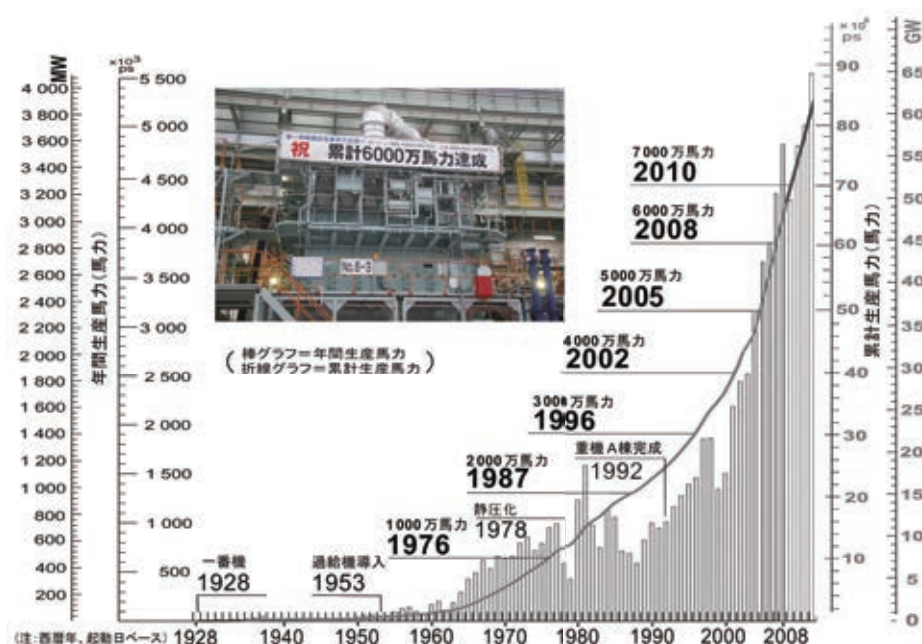


図1 ディーゼルエンジンの製造実績



図2 ディーゼル関係工場の配置変遷



写真1 ディーゼル組立・試運転工場(重機 A 棟(奥側)と重機 D 棟(手前))

ていたが、1938年に現在の新川工場D棟を増設し、本格的な量産を行えるようになった。当初はクランク軸専用の旋盤などまで自社製造した。第3及び第4実験工場として現存する建物は、1919年の玉造船所建設当時の建物である。

その後、1960年にC棟、1966年にA棟、1992年に南(深井地区)に新組立工場(現重機A棟)が完成した。当時としては珍しく、試運転終了した機関を工場内に設けた出荷バースから、直接輸送できるようにした工場であった。以降、2005年に重機A棟、2007年に重機C棟を延長した。

そして、更なる増産体制を整えるため、2009年5月に、重機D棟が小型エンジン用組立・試運転工場として稼働を開始した。

過給機については回転機工場の一角に、過給機組立・試運転工場を持っており、ここで従来のNA型と2003年からは最新のTCA型を製造している。溶接、機械加工については従来の工場以外に、重機C棟に大型機種用の台板の溶接ロボットなどを導入し、作業効率向上を図っている。機械加工では、重機C棟に超大型ガントリーミラー、B棟には超大型プラ

ノミラー、横中ぐり盤を新たに導入した。

また、プラスト工場、燃料弁工場も増設され、年間600万馬力の生産体制を整えた。写真1は2010年1月時点の重機A棟、D棟の工場内配置である。

2. 三井-MAN B&W エンジンにおける構造及び製造の変遷

2.1 骨組構造

当初、骨組構造は、台板、架構、掃気箱、シリンダージャケットとも鋳鉄製で、貫通ボルトで一体に締付けることによってシリンダー内爆発力による引張りを受け持つ構造であった(図(a))。

1952年、74VTF型エンジンで初めて台板、架構、掃気箱を鋼板溶接製とし、この部分の貫通ボルトを廃止し、引張りを鋼板自身にもたせた軽量構造とした。これは造船部門で発達した溶接技術をエンジンの構造に応用したものである(図(b))。

過給度の上昇に伴う大きな爆発力に対処するため、VT2BF型エンジンでは、再び貫通ボルト構造が復活した(図(c))。

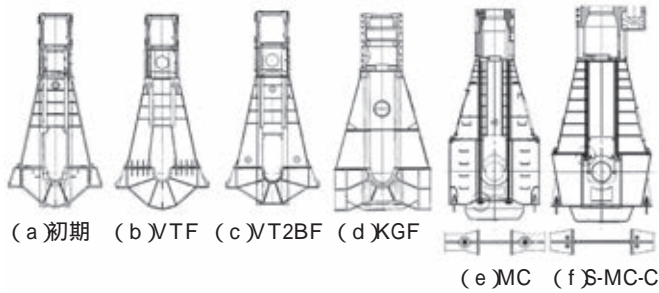


図 3 骨組構造の変遷

KGF 型エンジンでは、剛性アップを図るため、高脚型台板としたほか、架構は大きな溶接ブロック構造とした(図 3(d))。MC 型エンジンでは、超ロングストローク化に対応して幅、高さの増加を極力抑えるため、クランク軸中心に対して台板と架構の分割位置を従来より高くした。更に、据付ボルトはロングガーダの内側に配置し、オイルトレイは据え付け面より下に設けた(図 3(e))。

S-MC-C 型エンジンでは、貫通ボルトを片側 1 本から 2 本へ増やして小径化し、両ナット締めから台板上面へのねじ込み式とした。これに伴い、台板、架構の支柱管を廃止し、ロボット溶接が適用し易い形状となった。また、貫通ボルトを台板上面へのねじ込み式に変更したことにより、貫通ボルト締め付けによる軸受周辺の変形量が抑えられ、軸受性能が向上した(図 3(f))。

その後、S-MC-C 型エンジンにおいて、これまで複数枚あったガイドプレート背面の水平リブを、縦リブ 1 枚とした三角プレート型架構を採用した。これにより貫通ボルト締め付け時のガイドプレートの変形が低減され、またリブの剛性が上から下まで一様になったことにより、ガイドシューの摺動性能も改善された。

2.2 台板

当初は、鋳鉄構造の台板は、鋳鉄製のクロスガーダの両端を鋳鉄製のロングガーダにボルト締めする構造であった(図 4(a))。

溶接構造の導入により、鋼板溶接製のクロスガーダとロングガーダとが溶接で結合され、大ブロック化が図られた(図 4(b))。

貫通ボルト構造が復活し、応力の高いクロスガーダ部は鋳鉄製とした(図 4(c))。

KGF 型エンジンでは剛性アップを図り、高脚型構造を採用した(図 4(d))。

MC 型エンジンでは機関サイズを抑えるため、クランク軸中心に対して架構との分割位置を従来より上げ、据付ボルトケースをロングガーダの内側に配置し、オイルトレイを据え付け面より下に設けた。また、クロスガーダのリブを廃止し、シンプルな形状とした(図 4(e))。

S-MC-C 型エンジンでは、貫通ボルトが台板上面へねじ込み式となり、支柱管を廃止した。また、据付ボルトがロングガーダの外側へ移動した結果、据付ボルトケースが無くなり、外側の小さなリブのみとなった(図 4(f))。

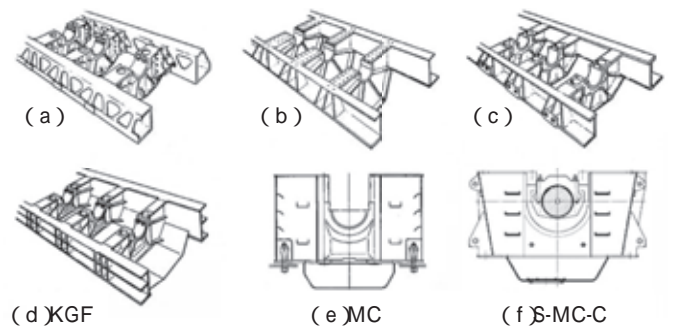


図 4 台板構造の変遷

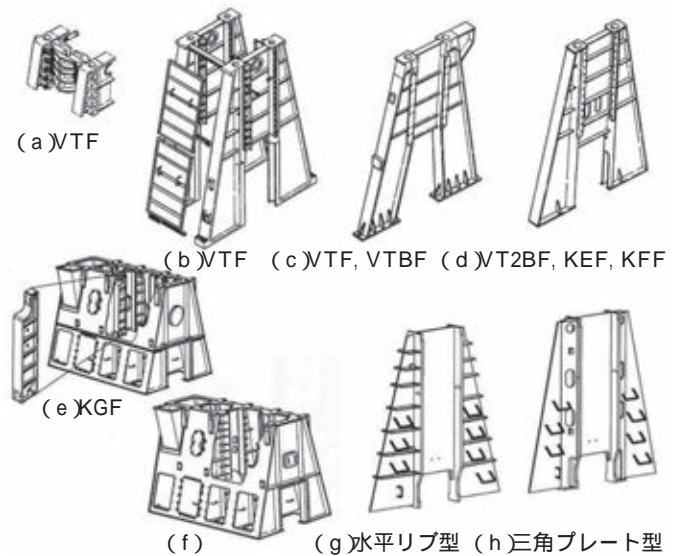


図 5 架構構造の変遷

2. 架構構造

当初は、鋳鉄製の A フレーム間の右舷側上部に鋳鉄製のガイドプレートを配置し、これで A フレーム間を結合した構造であった(図 5(a))。その後、4 本の鋳鉄製ガイドプレートをボルト締めする構造に簡略化された(図 5(b))。

貫通ボルトを廃止し、爆発力を溶接製架構自体で受け持たせる構造とした(図 5(c))。

VT2BF 型エンジンでは貫通ボルト構造が復活し、架構には支柱管を配した(図 5(d))。

KGF 型エンジンでは、骨組全体としてのねじり剛性を増加させるとともに、油密な構造とするために溶接箱形構造を採用し、分割面は中央のチェンケース部だけの首尾 2 ブロックよりなる大ブロック構造とした。ガイドプレートは、加工能力の制約から従来の取付方法が適用できなくなり、それ自体で十分な剛性をもたせたうえ、熱変形による湾曲防止を配慮した複雑な重構造の梁となった(図 5(e))。

新鋭工作機械の導入により、箱形構造に直接ガイドプレートを溶接付けしても摺動面の加工ができるようになり、重量軽減、工数軽減が図られただけでなく、ガイドプレート自身も剛性が約 3 倍に増加した(図 5(f))。

S-MC-C 型エンジンでは、貫通ボルトがクロスガードを挟む 2 本デザインとなり、支柱管を廃止した(図 5(g))。

三角プレート型架構が採用され、従来の水平リブ型と比べ、構造が格段にシンプルとなり、ロボット向きのデザインとなった。縦リブの溶接は片側からのみで、力のかかる部位としては特殊な溶接となることから、事前に種々検証を行った(図 5(h))。三角プレート型架構において、高応力部のグラインダがけの実施により、焼鈍を廃止した。

生産性向上のためのシステム開発

1 システム変遷

1942 年に、生産情報をシステムティックな流れに一元化して、設計、製造手配の機能の分化を図り、加工手順の帳票による指示の徹底等により、進捗状況把握とその統制が図られた。これが工程管理のシステム化の芽生えであった。1968 年、IBM S360/40 の導入に伴い、電子計算機を用いた設計から組立に至る総合管理システムが完成した。

その後、更なる生産量の拡大に伴い、1972 年に PTPS (Planning Total Production System) の開発を行った。本システムは、データベースの開発による設計・製造情報の一元化、各工場の進捗把握、作業優先指示及び原価管理までを行うものとして計画されたが、情報収集のオンライン化が必要であるなどの問題で、小規模な実施にとどまった。

このような個別工程管理では、その管理は限界にきていること、また協力工場での管理業務が重複していること、更にはコスト低減のためには部品単位の集約が必要であることなどから、1975 年にコストを最小に抑えるためのシステムとして、部品中心生産システム M-POPS (Mitsui-Parts Oriented Production System) を開発した。

当初はバッチ型であったが、1982 年に工事量急増・顧客の短納期要求に対応するために、部品製作手配から工程管理処理・進捗管理を可能とするオンライン管理システム POPS-II に移行した。この時に、設計において Reg. No. (Register number) という画期的な考え方を導入した。

その後、トータルコスト低減のために、生産管理システムの更なるレベルアップが必要となった。POPS-K プロジェクトにより、設計の Reg.No. と手配マスターを連携させるなどの改善が図られ、大幅な省力化を実現した。

2 将来構想へ向けたシステム開発

近年、ディーゼル工場では生産規模が急拡大し、顧客要求の変更にフレキシブルに対応するには、POPS システムを使った手配管理・工程管理ではもはや限界となりつつある。

一方、設計では 2 次元設計から 3 次元設計へ移行する中で、複雑で大きな 3 次元 CAD データをスムーズに管理運用し、なおかつこれらのデータを有効活用するために、POPS に代わる新たな設計情報管理システムを検討してきた。

このような状況から、長年使われてきた POPS システムに置き換わる、ディーゼル工場全体の基幹システムとして将来を見据えた新たなシステムを構築することになった。

こうして「リードタイムの 1 ヶ月短縮」、「在庫数の半減」及び「間接工数の半減」を目標とし、次世代対応の新生産管

理システムを構築するための ATOM プロジェクトが 2009 年 4 月に発足した。プロジェクトでは、三つの S「Speed (情報伝達高速化)、Suitable (全体最適化)、Simple (情報の見える化)」をコンセプトに掲げて、以下に示す課題の実現に向け、新システムの開発を行っている。

システムの刷新

設計 / 手配 / 製造 (溶接 / 加工 / 組立) の全工程に亘る生産管理に関わる全ての情報は、新生産管理システムで一元管理する。また、情報の一元化により、情報精度の向上、見える化による情報の共有、複数部署で行われている重複業務の撤廃を図る。

設計情報及び 3 次元 CAD データの有効活用

設計システムと新生産管理システムで新しいインタフェースを構築する。また、3 次元 CAD データの製造部署での活用、機関仕様情報の手配・製造部署への利用を可能とする。

工程の最適化

生産の全工程において計画情報を共有し、工程の進捗状況を把握することにより、納期情報の精度を向上させ、設計変更、日程変更などに柔軟に対応できるシステムとする。業務改善・コストダウン

- ・要求書、注文書等の業務遂行に関わる書類を自動生成することにより、事務処理の効率化を図る。
 - ・インターネットの活用により、外注メーカーとの情報の連携を推進する。
 - ・在庫管理を一元化し、正確な在庫量を把握することにより、通常部品の在庫、余品・流用部品の管理精度を上げる。
- 技術・ノウハウの継承

Reg.No. は踏襲し、手配業務のノウハウをシステム化することにより、共有できる仕組みを構築する。

2011 年度からの稼働に向け、生産管理側システム、設計側システムをそれぞれ並行して鋭意開発中である。図 6 に将来構想を示す。

4. 生産効率向上のための施策と具体例

4.1 1 個流し生産

4.1.1 取り組みの目的と考え方

1 個流し生産とは、工程順に 1 個または 1 台ずつ加工・組立を行い、1 個ずつ次工程に流す生産方式であり、1 個流しで生産するためには、各工程の作業時間・加工時間や材料部品の供給等を一致させて同じピッチで作る(平準化する)必要がある。

各工程の作業時間を一致させるためには、工程間の区切りを変えることも必要となってくるため、作業員の多能工化も必要になる。1 個流し生産は、多品種少量生産に対応でき、1 ロットが 1 製品なので仕掛品が少なくなり、在庫が減るといった利点がある。また、1 個流しを行うことにより、各作業の遅れ・進みが目で見えるようになり、製造場所での異常も分かりやすくなる。

すなわち 1 個流しにすることにより、今まで見えていなかった多くの問題を「オモテ」に出し、改善をしないと生産

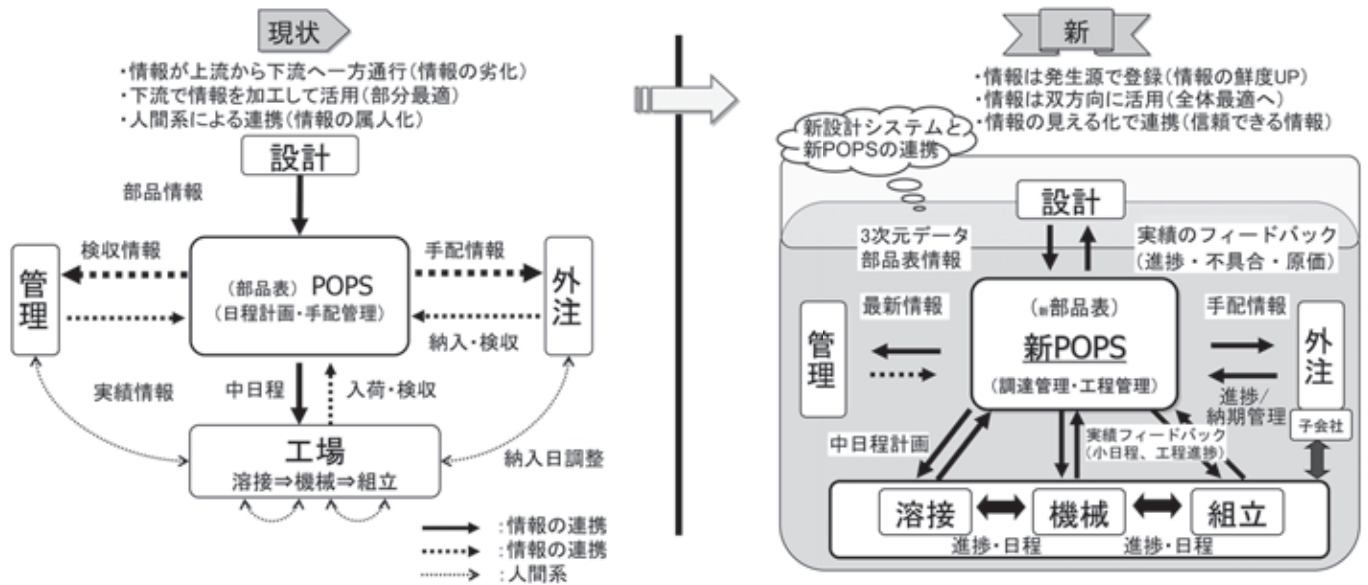


図6 基幹システムの将来構想

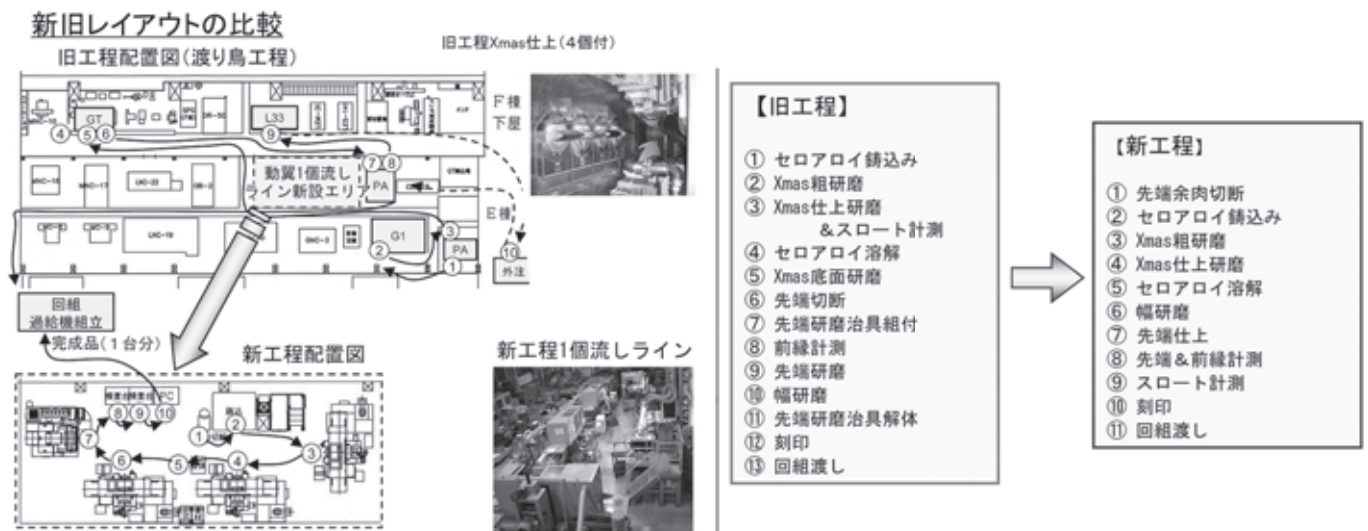


図7 過給機動翼の1個流し生産ラインレイアウト

が先に進まない状況に全員を追い込むことがねらいである。リードタイムの短縮、仕掛品・在庫品の低減、生産性向上による原価低減等は結果として当然付いてくる成果であり、問題点を顕在化させ、現地・現物で改善していくことにより、全員の体質を強化することこそが「1個流し」の真の目的である。以下に加工部での適用事例を紹介する。

4.1.2 適用事例

(1) 過給機動翼の1個流し生産

a 背景

過給機動翼は船用エンジンに使用される過給機のタービン側口元に装着される部品で、41枚/台使用される。近年のエンジン増産に伴い、2006年当時、151台の生産実績(動翼は約20台分をメーカーから購入)であったものを、2008年度には240台生産可能な増産体制を確立することが加工部の課題となっていた。

特に、動翼は生産能力不足からネック部品となっており、生産能力年間240台以上達成を目標に生産体制を革新する活動を開始した。2006年下期より計画を開始し、2008年5月に運用を開始した。活動は、主にライン計画・導入及び加工技術を担当した工作技術課が3名、現場で実際に作業を行いラインを立ち上げた第二機械課が2名の計5名により進めた。

b 1個流しラインの導入

従来の加工工程の現状調査後、問題点抽出、原因分析、対策立案、検証・シミュレーションを繰り返しながら、1個流しラインの設備構成、工程設計、目標タクト、リードタイム等を検討し、ラインレイアウトを決定した(図7)。従来生産エリアの一角(6m x 15mのエリア)にコンパクトなラインを設置し、運用を開始した。

準備・計画、運用開始の過程にも納期・工数・設備能力・部品の滞留・日程管理・コスト・品質他様々な問題点が顕在

化し、現場観測による改善、段取替え・計測作業・治具改善、作業要領書の整備等の対策を進め、運用開始から半年後の2009年1月にはほぼ計画値を達成し、その後も更に改善を進め、工数削減を継続している。

c 導入後の成果(2009年6月現在)

- ・生産能力増加 : 130台 242台/年
- ・リードタイム短縮
- ・原価低減
- ・平均工数減少(図8)
- ・不具合発生率減少
- ・問題点の顕在化 : 改善せざるを得ない環境の実現
- ・工程管理の省力化: 工程間の調整が不要
- ・工事に応じた柔軟な操業調整: 初心者でも短時間で技能習得可能な上、生産量の変動に対し、直変更により対応可能。現在は2直(2人)体制だが、増産の場合は3直(3人)に、減産の場合は1直(1人)に切り替えて対応できる。

d 今後の課題

本ラインは、減少傾向であったNAタイプ過給機動翼は従来設備にまかせ、現在主力のTCAタイプ過給機を対象としていた。今後まだ未着手のNA動翼にも適用していくと同時に、組立工程で行われている手入れ、ショットピーニング、単品重量計測等残工程の取り込み、その他製品への展開等他部署も巻き込んだ更なる改善活動に取り組んでいく。

(2)燃料ポンプ組立工程の1個流し生産

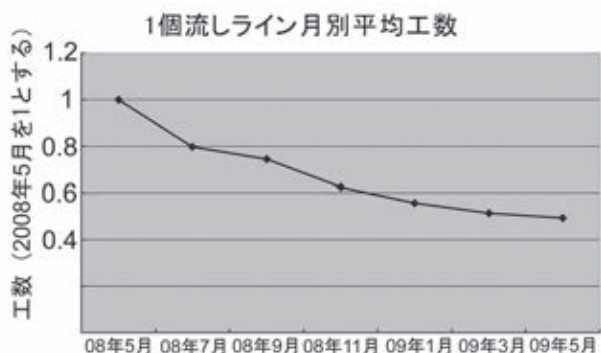


図8 加工工数の実績推移

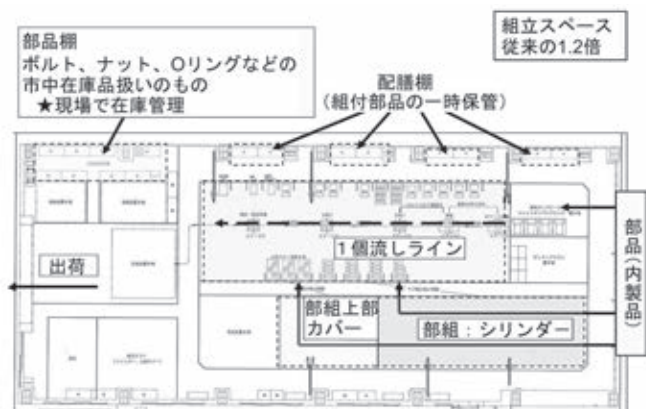


図9 燃料ポンプ組立工程の1個流し生産ラインレイアウト

a 背景

燃料ポンプは、ディーゼルエンジンのシリンダー内に燃料を噴射させるための高圧ポンプで、ディーゼルエンジンの心臓部である。本製品も(1)の動翼と同様に、2006年度に対し2010年度には2倍となる急激な工数増加が予想されており、増産体制構築が急務の状況であった。機械加工工程は改善活動が進んでいたが、組立工程は当時改善活動が進められておらず、現状調査により「問題山積」であることが分かった。

この状況を解決するため、生産体制の革新が必要であるという結論に至り、2008年度生産予想800万馬力(2007年度当時)生産体制確立を目標に、「組立の1個流し生産」に挑戦することとなった。2006年7月頃から計画を開始し、2006年11月から1個組立を開始した。活動は、工作技術課から4名、第三機械課から4名、生産計画部から3名と、他部署も含め計12名にて開始した。本活動は加工部での初めての1個流し生産体制への取り組みであった。

b 1個流し生産ラインの導入

従来の組立工程の現状調査後、ライン原案を職制が計画作成し、現場作業員への説明及び協力要請後、1個流し生産の連続観測から開始し、問題点抽出、原因分析、対策立案、検証・シミュレーションを繰り返しながら、1個流しラインのステージ構成、工程設計、目標作業、リードタイム等検討し、ラインレイアウトを決定した(図9,写真2)。

1個流し生産ライン周辺には、部品組立場、配膳棚及び小物部品棚を配置し、運用を開始した。運用開始後、外注部品・内製品の遅れ、小物部品の手配もれなど様々な問題が顕在化し、現地・現物による原因究明、連続観測による改善、フォローアップによる問題点抽出など、全員参加で地道な改善対策を繰り返し進め、運用開始から1年後の2007年11月には、ほぼ目標の年間800万馬力の生産ペースを達成した。

c 導入後の成果

- ・800万馬力/年生産達成(2007年11月以降): コンポーネント急増に伴う800万馬力/年を超えるペースの工数消化が可能となった(図10)。
- ・工程細分化(標準作業化)による未経験者の活用:
1ステージの教育期間: 最低半年 約1週間

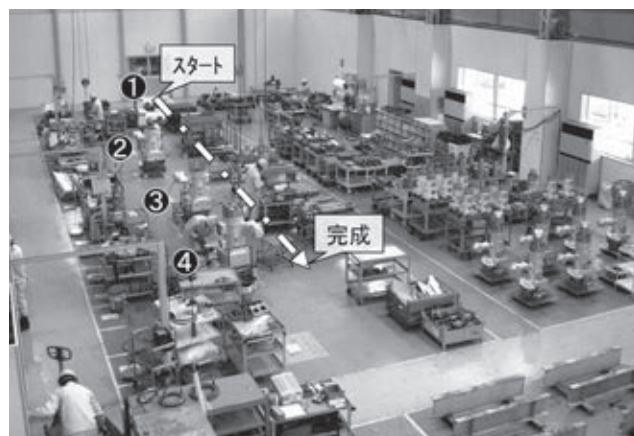


写真2 1個流し生産ラインの全景

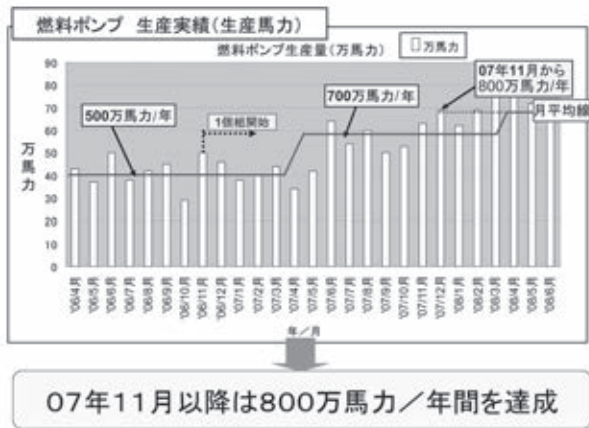


図 10 燃料ポンプの生産実績

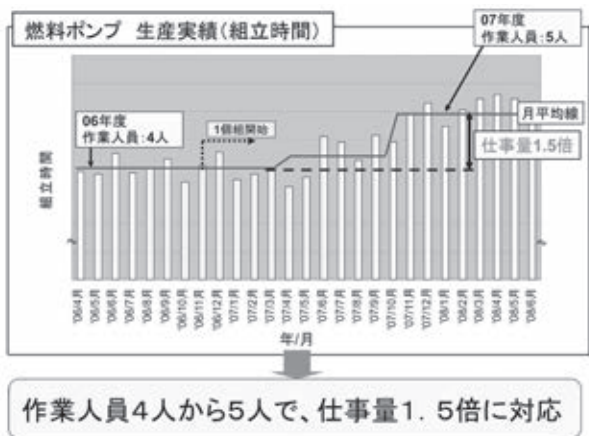


図 11 燃料ポンプ組立工数の実績

- ・ 仕掛品の削減と在庫量の適正化：
 - 1) 組立仕掛品：従来は最大 4 工事分で 20 ~ 30 個であったが、改善後は 4 ~ 7 個に減少した
 - 2) 外注完成部品：タイムリーな納品
 - 3) 小物部品(ボルト・ナット類)：適正在庫量での管理
 - ・ ムダ、ムリ、ムラの顕在化及び排除の仕組み作り実現：
 - 1) 小日程作成による山ならし
 - 2) 連続観測による組立時間短縮及びネックマシン対策
 - 3) フォローアップ会議での問題点抽出及び対策
- により、作業員は 4 人から 5 人になり、仕事量は 1.5 倍消化可能となった(図 11)。

d 今後の課題

機械加工等、他工程についてはまだ 1 個流し生産体制に至っていない。第 3 機械課の部品は機械加工工程の途中で熱処理で外注に出ていくものがほとんどで、熱処理工程の内製化が重要な課題となっているが、これまでの活動を継続していくと同時に、他部署とも連携し、組立工程以外の流れ化も推進していきたい。

4.2 組立工法・ラインの最適化，タクト生産

1992 年に、深井地区に年間 150 万馬力、100 台以上の生産が可能な組立・試運転工場(重機 A 棟)を建設し、主力工場としての位置付けを新川工場から移行した。その後の受注量の増加に対応するため、同工場の延長など様々な取り組みを



図 12 運転台占有期間

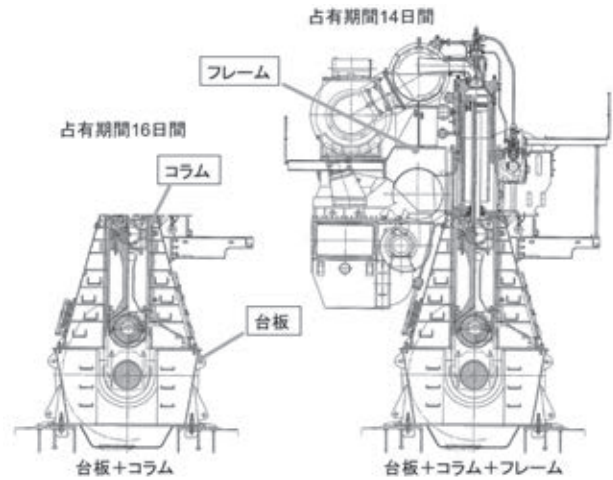


図 1 ディーゼルエンジンの一体化

行なってきたが、その主なものを以下に述べる。

4.2.1 台板サブ組立

エンジンの生産能力を上げるためには、リードタイムの短縮を行なう必要があるが、特に重要なことは試運転台の占有期間を短縮することである。

その 1 つが、試運転台とは別のステージで組立を行なう台板サブ組立の充実である。中小型エンジンでは、台板サブ組立で可能な限り作業を行い、試運転台での作業を減らすことで、試運転台の稼働率を上げてきた(図 12)。

(1) 量産化対応の変遷

1995 年頃、50/60 エンジンでは台板、架構ブロックまでの組立を行っていた。その後、50 エンジンに関しては、フレームまで搭載して台板サブでエンジンを一体化し、試運転台の占有期間を更に短くすることにした(図 1)。

60 エンジンに関しては、遅れて 2003 年頃に台板サブで一体化させることになった。導入が遅れた理由は、60 エンジンを一體にした場合は 400 t を超え、天井クレーン 2 基による相吊りをしなければならず、手間が増えるためであるが、それでも十分な効果があると判断された(写真)。

2000 年以降、造船所各社の揚重能力が上がり、600 t を超える 6S70MC エンジンの一體納入を要求された。これにこたえるために、2003 年に天井クレーンを 300 t から 350 t へ能力アップし、最大 640 t (350 t × 2 基 - 相吊りビーム自重 60 t) までの揚重が可能となった。更に 2006 年には年間 500 万馬力生産を目指し、70 エンジンの台板サブ組立をテスト

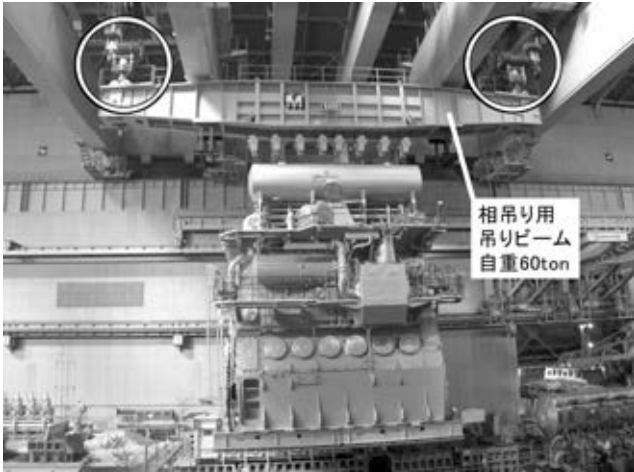


写真 ディーゼルエンジンの相吊り

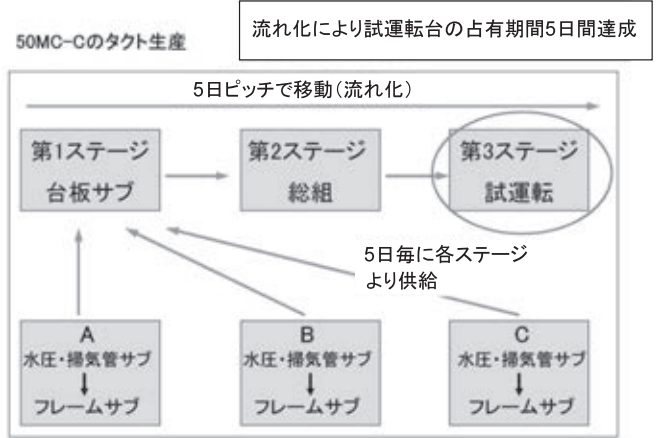


図 15 タクト生産



図 14 台板サブの変遷

表 1 年間生産台数の比較

| | 1995 年度 | 2009 年度 |
|---------|---------|---------|
| 50 エンジン | 15 台 | 24 台 |
| 60 エンジン | 15 台 | 24 台 |
| 70 エンジン | 10 台 | 24 台 |

実施した。現在では、50 エンジンから 70 エンジンまでの中小型エンジンを台板サブ組立て一体化している。台板サブ及びリードタイムの変遷を図 14 に示す。

(2) 試運転台あたりの中小型エンジンの生産台数

台板サブ組立の改善により、現在の 1 試運転台あたりの 50, 60 及び 70 エンジンの年間生産可能台数は、1995 年度と比較して表 1 に示す。

4.2.2 50 エンジンのタクト生産ライン

(1) タクト生産ラインの導入

年間 400 万馬力生産体制に対応するため、2005 年に重機 A 棟を北へ 100 m 延長し、ここに 50 エンジンのタクト生産ラインを導入した。

導入した目的は、以下である。

- ・同一機種のライン化により、作業内容・区切りが明確になる(図 15)

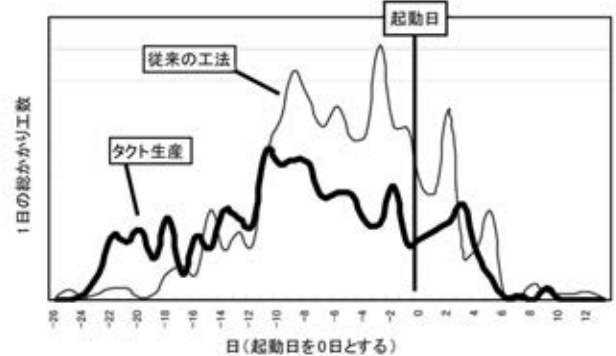
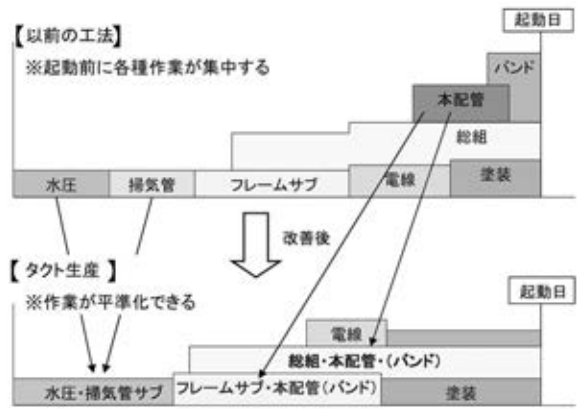


図 16 タクト生産による平準化

- ・作業改善が容易
- ・作業者の習熟による工数ダウン
- ・設備改装の省略
- ・同機種の特化による道具段取りの効率化
- ・工数の平準化(図 16)など

また、50 エンジンを選択したのは、設備が稼働する翌年 2006 年度の実績生産台数 195 台の内、3 割以上の 69 台が同機種であることによる。

(2) クレーンを使用しないエンジン移動手段の採用

第 1 から第 3 までであるステージのうち、第 1 から第 2 ステージ、第 2 から第 3 ステージへの移動には、クレーンを使用せ

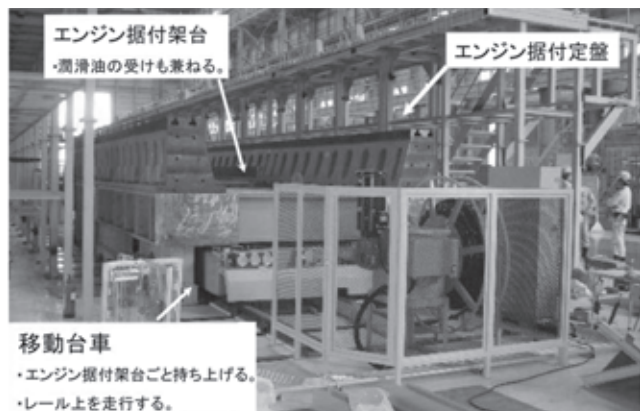


写真4 移動台車

ず、移動台車でエンジンを運転台ごと持ち上げて移動する方式を採用し、ステージ移動の際のクレーン作業を不要とした(写真4)。1回の移動に要する時間は以下のとおりである。

- ・クレーンで移動：4人×4h = 16人・h
(作業内容: 吊金物取付・取外, 吊上スリング等準備, 吊上げ・移動)
- ・移動台車で移動：4人×1h = 4人・h
(作業内容: 台車操作, 安全対策・移動中の見張り)

タクト生産を導入し、様々な改善を行なった結果、50エンジンでは大幅な工数削減の効果を得ることができた。

(3) タクト生産ラインの展開

2009年に立ち上げた重機D棟には、50エンジンのタクト生産ラインを導入し、今まで培ってきた経験を元に、更に効率アップを目指した3日タクトを行い、年間100万馬力、80台の生産が可能なラインへと発展させた(図17)。

また、重機A棟にあった50エンジンタクト生産ラインは、60エンジンのタクト生産ラインへと変更し、現在、様々な改善を進行中である。

4.2. 現在の生産能力

2009年度現在、重機A棟は、年間450万馬力、エンジン台数200台以上の生産能力があり、50~98エンジンまでの組立が可能である。試運転台は9面あり、そのうちの6面を台板サブの組立で賄っている。その他は、2面を80/98エンジンの大型エンジンに使用し、直接試運転台で組立を行なっている。もう1面は、60エンジンのタクト生産ラインである(図18)。

重機D棟も含めると、年間生産能力は600万馬力に達する。

4.2.4 部品の納入について

エンジン部品の納期は、「100点部品」という形で機種ごとにリスト化され、台板据付日を基準に設定されている。

部品は、取り付け日に納入されること(ジャストイン・タイム)が理想であり、それを目指した取り組みも実施してきた。その結果、工場内で場所の占有率が高い大物部品(ピストン完備品, シリンダカバー, 接続棒, 排気レシーバ, 過給機等)に関しては、取り付け日もしくは前日納入が可能となった。

これは、作業手順の見直しを行い、組立時期の精度をあげたことと、協力会社の努力と協力によるところが大きい。

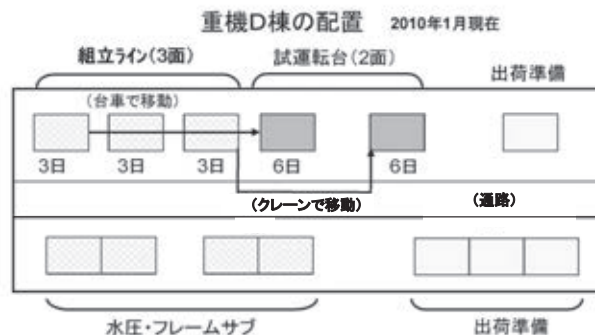


図17 ディーゼル工場重機D棟の配置

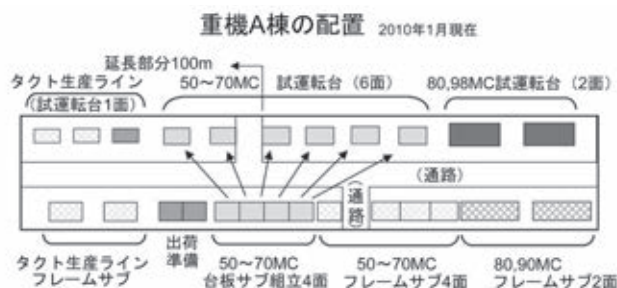


図18 ディーゼル工場重機A棟の配置

このことで工場内に滞留する部品が少なくなり、場所が有効に使用できるようになったため、無駄な横持ち等が減少された。今後は、更に「100点部品」を「1000点部品」とすべく、細かい部品までの納入精度を上げていく必要がある。

5. おわりに

1926年のライセンス契約締結以来、80年以上に亘って低速ディーゼルエンジンを製造してきたが、2009年には年間600万馬力の生産体制を整えるとともに、生産性向上のためのきめ細かな改善活動を行う中で、この2010年6月には累計生産馬力が7000万馬力に到達する見込みである。更には、ディーゼル工場全体の基幹システムとして、次世代を睨んだシステムを構築するなどのソフト面からの業務改革にも鋭意取り組んでいる。ディーゼルエンジンを取り巻く環境が厳しさを増す中で、低コスト化を進めながら環境性・信頼性に優れた機関を市場に投入し、顧客の期待にこたえていく所存である。

参考文献

1) MAN Diesel : Market Shares Contracting(2010-4)私信
2) 海事プレス : KP DATA, 30, 3 (2010-1), p. 217, 海事プレス社

共同執筆者: 前川 浩司 一ノ瀬和久
杉浦 公彦 遠藤 雅博

[問い合わせ先]

機械・システム事業本部 機械工場 ディーゼル設計部
TEL 0863 - 23 - 2533 東條 温司

ディーゼルエンジン - 環境対応関連の技術開発 -

機械・システム事業本部 田中 一郎

1. はじめに

人類の発展には今や石油製品は欠かせないが、低速ディーゼルエンジンに用いる燃料は石油製品を精製した後の残渣油である重油が主であり、この点で地球資源を最大限有効に活用していると言える。その反面、硫黄(S)分を多く含む重油燃料の使用は、NO_x (窒素酸化物)とともに酸性雨の原因と考えられている SO_x (硫黄酸化物)の排出に繋がる。

また、PM (Particulate Matter: 粒子状物質)の主成分は煤および SO_x の一種である Sulfate (SO₄)であるため、燃料中の S 分を削減することは PM の抑制にも繋がる。そこで、すでに、国際海事機関 (International Maritime Organization: IMO)により、NO_x 及び SO_x の排出規制が開始されている。

一方、1893 年ドイツのディーゼル博士 (Dr. Rudolf Diesel) が「合理的熱機関の理論と構造」という論文で、ディーゼルサイクルの原理を発表して、100 年以上が経過した。この間の開発の主体は、エンジン単体熱効率の向上・出力増大・信頼性の向上であった。その結果、エンジン単体の熱効率は 50% を超え、他の熱機関に比べても非常に高い効率を有しており、現在ではほとんどの大型商船にディーゼルエンジンが採用されている。従って、船用ディーゼルエンジンは CO₂ 排出削減に大きく寄与していると言える。

しかしながら、温室効果ガスの排出削減は人類全体の課題であり、船舶に対する CO₂ 排出規制の動きも始まっている。もはや、より一層の CO₂ 削減はディーゼルエンジンメーカーにとっても社会的な使命となっている。一方、従来技術の延長上では、熱効率 (CO₂ 排出量と関連) と NO_x 排出量はトレードオフの関係にあるため、高効率化は NO_x 排出量増加に繋がる。更に、その効率は理論サイクル効率に近づきつつあり、効率向上のスピードは鈍化している。

これらの背景より、今後はエンジンからのあらゆる排出物を抑制することが最も重要な開発テーマとなる。三井造船は、この観点から、NO_x、SO_x 及び CO₂ 排出削減技術の開

発に取り組んでいる。SO_x 排出削減に関しては、燃料油中の S 分濃度の規制が今後段階的に強化されるため、NO_x 及び CO₂ 排出削減のためのエンジン側での仕様変更や技術開発に比べ、SO_x 排出削減の技術開発的な要素は少ない。

以上を踏まえ、本報では、主に NO_x 及び CO₂ 排出削減の両立を目指し、エンジン単体のみならず、排熱回収システムや脱硝装置も含めた総合的な環境対応技術の開発について、当社の取り組み状況を紹介する。

2. 排気ガス規制の動向

2.1 NO_x 排出規制

現状の NO_x 排出規制は 1997 年 IMO 条約締結国会議にて議定書が採択され、2005 年 MARPOL 条約付属書 として発効後、2000 年から遡及適用されている。一次規制として、2008 年 10 月海洋環境保護委員会 (MEPC58) 会合にて、改正付属書 が承認された結果、図 1 に示すように、今後、規制は段階的に強化される。2011 年から二次規制 (低速エンジンの場合、一次規制値の 15% 減) が 2016 年から三次規制 (同、特定海域にて同 80% 減) が適用される。

なお、三次規制では、ECA (Emission Control Area) に設定された特定海域では、一次規制値の 80% 減、ECA 域外では二次規制値となる。ECA としては、北海・バルト海や北米沿岸が議論されているが、更に拡大するものと予想され、外洋を航行する大部分の船舶は、出入港時には ECA 域内を航行するものと予想される。

2.2 SO_x 排出規制

NO_x 排出規制と同様に、SO_x 排出に関しても IMO により、今後段階的に規制が強化される。燃料油中 S 分の濃度規制の動向を図 2 に示す。今後は、より S 含有量の少ない A 重油 (国際規格 ISO8217 では DMB に相当) や軽油 (同 DMA に相当) の使用頻度が増すものと思われる。

特に、ECA 域内では、低硫黄燃料である MGO (Marine Gas Oil) が用いられる可能性が高いが、MGO の粘度は低く、

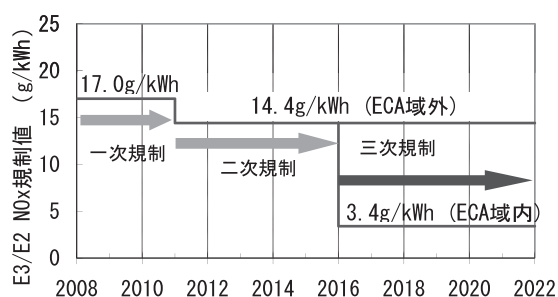


図 1 NO_x の IMO 年次規制値

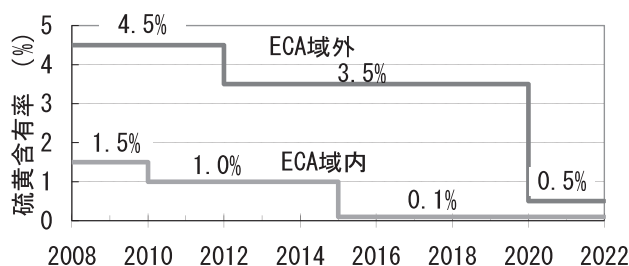


図 2 SO_x の IMO 年次規制値

特に燃料ポンプや燃料弁のしゅう動部分に関し、十分な信頼性を確保するよう、主機及び補機での対応が求められている。

2. CO₂ 排出規制

IMOによれば、国際海運からのCO₂排出量は年間約8.7億トンと言われており、世界の総排出量に占める割合は約2.7%である¹⁾。これはドイツ一国分からの排出量に相当する。国際海運における温室効果ガス(Green House Gas: GHG)の排出削減について、京都議定書では国際海運市場の特殊性により対象外となっているが、IMOを通じGHG排出量の抑制を迫及することとなっており、IMOでの検討が始まっている。

しかしながら、GHG削減対策の原則については、各国の立場の違いがあり合意に至っていない。そこで、まず、GHG削減のため、船舶のCO₂排出性能(燃費性能)を示す指標を定義し、その試行を行なうことについてのみ承認された。

なお、主要な指標は次の二つである。

(1) エネルギー効率設計指標(デザイン・インデックス)

船舶の設計・建造段階で、船舶の仕様に基づいて、トン・マイル当たりのCO₂排出量を事前評価して各船に付与するもので、各船に対する指標は一つである。

(2) エネルギー効率運航指標(オペレーショナル・インデックス)

強制措置としてではなく、自主的な活用を促すもので、船舶の効率的な運航を目指している。エンジンメーカーとして運航面においても支援・提案することにより、当社のLSS(Life Cycle Solution Service)事業拡大に繋がる。

これらの指標は船舶全体からのCO₂排出の抑制を迫及するものであり、主機関の改良のみならず、船体や他の船用機器の改良等、さまざまな対応策が考えられる。以上のような規制強化の動きに対する当社の具体的な対応は、で詳しく紹介するが、各船舶毎に運航パターンを把握し、一航海全体におけるCO₂排出削減のため、部分負荷を含むエンジン性能改善に加え、廃熱回収システムの活用も組み合わせ、最適な推進装置を提案することがエンジンメーカーに求められている。

環境対応技術

当社が取り組んでいる環境対応技術として、NO_x、SO_x及びCO₂排出削減に関する技術を纏めたものを図に示す。定量的な削減効果は、.1及び.2で述べるが、電子制御エンジン等の高効率エンジンや低炭素燃料であるLNGを燃料とす

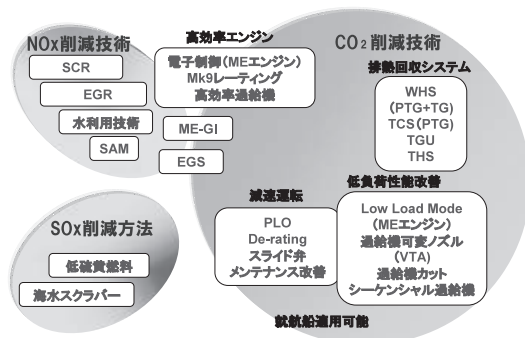


図 NO_x、SO_x 及び CO₂ 排出削減技術

ることが可能なME-GI(電子制御式ガスインジェクションエンジン)は、NO_x削減とCO₂削減の両立を目指しているものである。

.1 NO_x 排出低減技術

.1.1 NO_x 二次規制への対応

従来技術の延長では、NO_x排出とCO₂排出との関係はトレードオフとなる。そこで、まず二次規制対応には、燃焼温度の低下を狙い、ミラーサイクル化を進め、高効率過給機の適用により掃気圧力を高める。更に、電子制御技術を活用し、燃料噴射パターンを二段階噴射的に行なう“Rate Shaping”と称する技術を用い、NO_x排出を抑制する一方、燃費の改善も行なっている。

この結果、電子制御エンジンでは、機械式エンジンに対し、3g/kWh程度の燃費改善が図られており、CO₂排出抑制に寄与している。

.1.2 NO_x 三次規制への対応

一次規制比80%減という大幅なNO_x低減は従来技術の延長では困難であり、選択的触媒還元装置(Selective Catalytic Reduction: SCR)、排気ガス再循環(Exhaust Gas Recirculation: EGR)、水利用技術の適用などが必須と考えられる。現時点では、各技術ともに開発課題がある。本報ではこれらのうちSCRとEGRについて、その開発動向について述べる。

(1) SCR

化学反応によりNO_xをN₂とO₂に分離し、NO_xを削減する技術であり、発電プラントでは多くの実績がある。燃費の悪化を伴わず、NO_x三次規制を満足できる技術として有望視されているが、以下に述べるように、過給機後へのSCR設置のための技術開発が課題である。

船用低速エンジンでは過給機出口排気ガス温度が約250と低く、過給機の後にSCRを設置した場合、SCRが十分に機能しない(図4)。そこで、一般的には過給機の上流にSCRを配置している。この場合、SCRの熱容量が大きく、エンジン動特性に悪影響を及ぼす可能性がある。当社はテストエンジンにおいて、過給機の後にSCRを設置した開発を実施中である。

なお、国家プロジェクトとして「スーパークリーンマリンディーゼルの研究開発」が開始されており、上記課題の克服のため、当社を含め多くのエンジンメーカーが参画している。

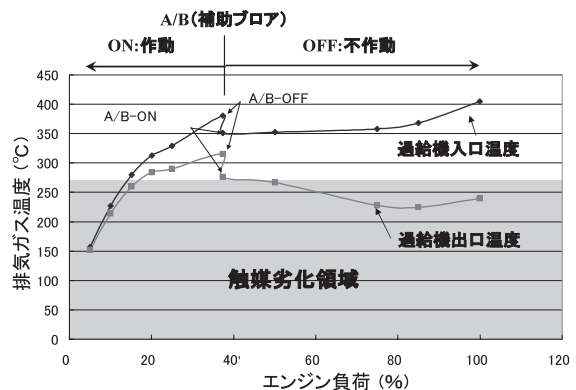


図4 排ガス温度(11K98MC(Mk7))/ISO条件

更に、当社はエンジン性能へ悪影響を及ぼすことなく過給機出口排気ガス温度をSCRが充分機能するレベルまで上昇させる技術として、4.で述べる排気ガス分離システム(EGS: Exhaust Gas Separation System)の開発に取り組んでいる。

(2)EGR

EGRは酸素濃度が低く、CO₂濃度の高い排気ガスの一部を再び掃気に導入することにより、NO_xを大幅に削減する技術であり、自動車用小型ディーゼルエンジンでは実用化されている。

現状の課題は以下のとおりである。

a NO_x低減率の改善

これまでの低減率は70%程度に過ぎなかったが、2010年に入り、MAN Diesel & Turbo社から、80%削減にほぼ到達したとの報告があり、今後、プロトタイプ機の実船試験を開始する段階である²⁾。

b 掃気系部品の信頼性

排気ガスの一部を掃気に再び導入するため、排気ガスに含まれるばい塵、PM及びS分を水を用いて除去する設備としてスクラバを装備するが、このスクラバに用いる水の処理方法を検討する必要がある。また、排気ガスの一部が掃気に導入されることによる掃気系の信頼性検証が必要である。

c 総合効率

スクラバを通過した排気ガスを昇圧して、掃気へ導入するためのプロア動力やスクラバへの水供給のための動力が必要となる。CO₂削減の観点から、EGRシステム全体の効率改善が求められる。

2 CO₂削減技術

2.1 部分負荷性能の改善

燃料費の高騰や世界経済の激変により、最近、特にコンテナ船において、燃料費を削減するための減速運転の採用が増えつつあり、部分負荷性能の改善は一層のCO₂削減にも繋がる。ディレイト等エンジン仕様の変更での対応も考えられるが、就航船への適用も可能な過給機側での対応技術が有望と思われる。代表的な技術として、過給機カット、シーケンシャル過給機、過給機可変ノズルがある。

当社はこれらの技術を適用した陸上での性能試験を実施し

ており、いずれの技術も部分負荷域ではおよそ数g/kWhの燃費改善を確認している。過給機カットは、主に3台から4台搭載した大型エンジンに適する技術であり、部分負荷時に1台以上の過給機をカットすることにより、掃気圧を高め燃費改善を図る。

シーケンシャル過給機は容量の異なる二台の過給機を装備し、部分負荷では小型過給機をカットし、同じく掃気圧を高め燃費改善を図る。これに対し、過給機可変ノズル(VTA: Variable Turbine Area)では、写真1に示すようにノズルの角度を任意に変更することが可能で、部分負荷ではノズルの開度を絞ることにより掃気圧を高める。当社が製造しているTCA過給機に搭載可能なシステムである。

過給機可変ノズルの開度調整には電子制御を採用しており、幅広い制御方法が考えられる。当社の試験結果では最大4g/kWh程度の燃費改善が見られた(図5)。

なお、いずれの技術を適用した場合も、エンジン毎にNO_x規制準拠のためのNO_x排出と燃費の最適化は必要となる。

2.2 排熱回収システム

WHR(Waste Heat Recovery)システムとも呼ばれ、NO_xを大幅に増やすことなくエンジン単体のみならず、推進プラントとしての総合効率を高めるのに効果的なシステムである。エンジンヒートバランスの一例を図6に示す³⁾。放出される排気ガスエネルギーとしては約28%あり、この排気ガスエネルギーの有効活用のため、様々なシステムが提案されている。

排気ガスの熱エネルギーを利用し、蒸気タービンを駆動させ電力回収するシステム(Turbo Generator: TG)はコンテナ船等では普及している。また、余剰の排気ガスにより直接パワータービン(PT)を駆動させ、エネルギー回収を行なうシス

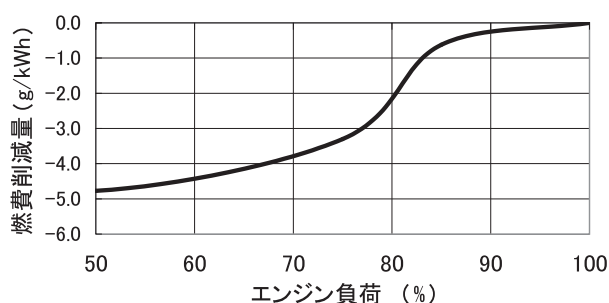


図5 過給機可変ノズル適用時の燃費削減量

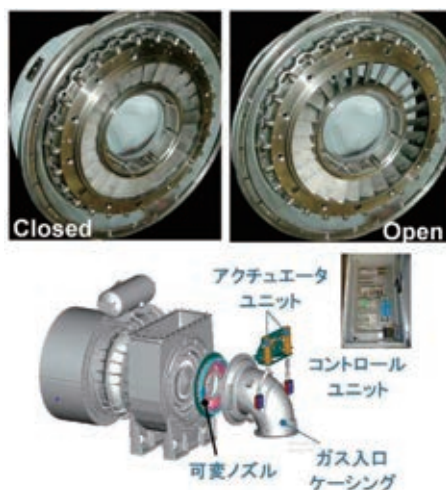


写真1 過給機可変ノズル

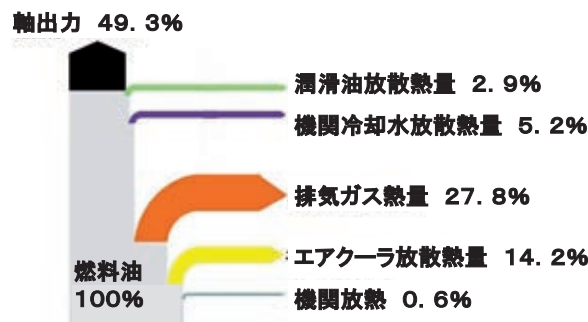


図6 大型船用2ストロークディーゼルエンジンのヒートバランス

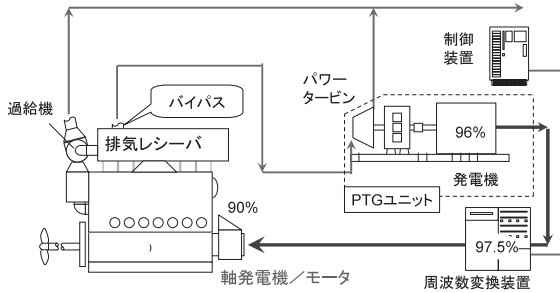


図7 パワータービン発電及び軸モータ装備例

テムも実用化されている。PT 動力を減速機を介して直接クランク軸に回収させるシステムと PT に発電機を結合し電力として回収するシステムがある。

前者は大形減速機や継手が必要となることから、広く普及するには至っていない。最近の過給機効率はエンジンが要求する以上の性能を有しており、余剰排気ガスエネルギーの回収がより容易となってきた。そこで、後者による電力回収システムが注目されており、TG とパワータービン発電 (PTG) を組み合わせたシステムも一部実用化されている。

一方、冷凍コンテナ船等の船内消費電力が多い船を除き、多くの船舶においては、排熱エネルギーにより得られた回収電力は船内需要電力を上回ることが多い。そこで、船内需要に供した後の余剰電力をクランク軸もしくはプロペラ軸に装備した軸モータへ供給し、回収電力を有効に活用するシステムも提案されている(図7)。

この場合、PT 発電装置、排気バイパス管等の配置スペースが必要である。そこで、当社では省スペース化が可能なシステムとして、高速発電機を直接過給機に結合するシステム (Turbo Generator Unit: TGU) も開発中である³⁾。過給機直結により減速機が不要になるため、発電効率も向上する。すでに小型ガスエンジンでは実用化を終え、10 000 h 程度の稼働実績がある。

また、コンテナ船用大型エンジンに搭載される TCA88 型過給機に 1 300 kW 級の高速発電機を搭載したシステムを独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 及び西芝電機株式会社と共同開発し、陸上試験を終えた。エンジン出力相当の出力に対し、4% の回収率が得られている。

一般的に、電気機器費用は船舶の大きさには必ずしも比例せず、小型商船では相対的に割高となる傾向であるため、投資回収期間が長くなる傾向にある。そこで、バルクキャリア等の中小型商船向への排熱回収システムとしては、廉価版システムの需要もあると思われる。特に 中小型商船向けを意識し、投資回収期間の短縮を狙い、図8に示した油圧による排熱回収システム (Turbo Hydraulic System: THS) も提案している⁴⁾。高速発電機に替わり、過給機に装備した油圧ポンプで油圧を発生させ、クランク軸に装備した油圧モータへ油圧を供給し、推進力として回収するシステムである。

本システムは、例えば、電動モータから発生した油圧を過給機付油圧ポンプへ送ることにより、油圧ポンプを油圧モータとして活用することが可能である(ポンプモード)。これに

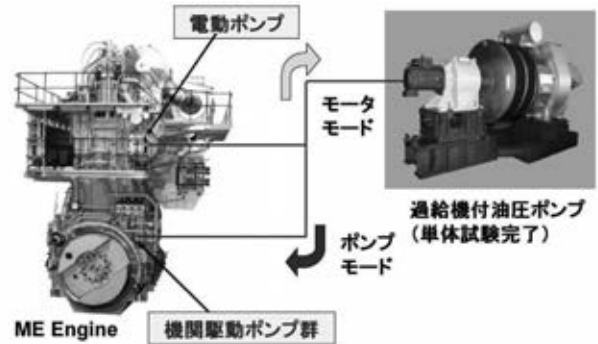


図8 電子制御エンジンと THS との組合せ例

写真2 ガスインジェクション発電設備
(12K80MC-GI-S 40 680 kWm x 103.4 min⁻¹)

より、起動時の補助プロア機能の補助やエンジン運転状況に応じた掃気圧力のコントロールが可能となるため、船内消費電力の削減や部分負荷性能の改善に繋がる(モータモード)。当社の電子制御エンジン (ME-C) には、作動油圧発生用の油圧ポンプがクランク軸に装備されており、また、電動油圧ポンプも装備されている。従って、THS は電子制御エンジンとの組合せが効果的と考えられる。過給機付ポンプの小型化や MC-C エンジンへの THS の適用等の開発を継続中である。

2. 低炭素燃料への置換

メタンを主成分とする LNG 又は都市ガス燃料を使用することにより、CO₂ 排出は 20% 強低減する。当社は、ガス燃料エンジンとして、高压のガスを燃焼室に噴射するガスインジェクション (Gas Injection: GI) 方式を採用した低・中速エンジン及び中速リーンバーンガスエンジン (Gas Engine: GE) の製造・稼働実績がある。実施例を写真2に示す。

この GI 技術と電子制御技術を合体させた ME-GI エンジンも提案している。ME-GI では、若干のパイロット油を必要とするが、重油専燃モード運転も可能であり、このパイロット油の割合を調整することにより、図9に示すように、デュアルフェューエル (DF) 化が可能である。

また、ガス運転の場合の NO_x 排出量は重油燃料使用時に比べ、約 10% 程度低下する。最近、LNG 船の主機に中速 DF エンジンや低速油焚ディーゼルエンジンが採用されているが、ME-GI も LNG 船の主機に適応したエンジンと考えている。

2.4 NO_x 三次規制下での CO₂ 削減技術

これまで述べた各種技術について、NO_x 及び CO₂ 排出低

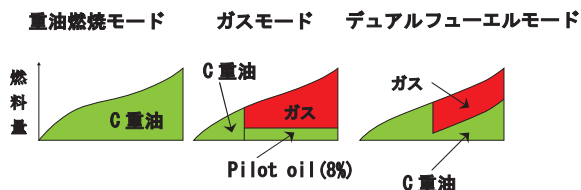


図9 ME-GI 運転モード



図10 各技術の NO_x 及び CO₂ 排出削減への影響度

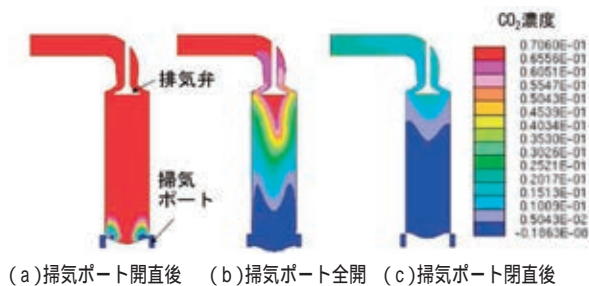


図11 3次元流体解析による CO₂ 濃度分布

減への影響度を示したものが図10である。図10において、右上に位置するほど、NO_x 及び CO₂ ともに削減割合が大きい。なお、NO_x 削減率については一次規制対応仕様に対する効果を示したものである。現時点では、中速ガスエンジン(GE)がその位置に最も近いが、港湾におけるガス設備等のインフラ整備、エンジン出力、メンテナンス性などの観点から外航船主機としての普及にはまだ相当時間を要すと考える。

従って、CO₂ 排出量を増やさずに、三次規制を満足する有望な技術はSCRである。SCR搭載に対する最大の課題は「過給機後へのSCRの設置」である。解決策の一つとして、脱硝反応を活発にさせるために排気ガス温度を上昇させることが考えられるが、温度上昇による燃費の悪化やエンジン燃焼室の信頼性悪化が懸念される。

そこで、当社は、エンジン燃費及び燃焼室信頼性を悪化させることなく、過給機出口排気ガス温度の上昇を図る技術として、4.で述べるEGSを提案し、開発中である。

4. EGS

低速ディーゼルエンジンのユニフロー掃気式では、シリンダ内の流れが層状に近く、特に超ロングストローク化でその傾向は著しい。当社試験エンジン MTE40 で行った CO₂ 濃

表1 MTE40 エンジンの主要目

| | | |
|---------|-----|------|
| シリンダ径 | mm | 400 |
| ストローク | mm | 1360 |
| エンジン回転数 | rpm | 171 |
| エンジン出力 | kW | 865 |
| 正味平均有効圧 | MPa | 1.72 |

表2 解析条件

| | | | |
|---------------|--------------------|-----|------|
| 掃気 | 掃気圧 | MPa | 0.35 |
| | 掃気温度 | | 40 |
| 排気 | 排気レシーバ内圧力 | MPa | 0.33 |
| | ガス圧力 | MPa | 1.37 |
| 排気弁開時燃焼室内ガス条件 | ガス温度 | | 700 |
| | CO ₂ 濃度 | wt% | 7 |

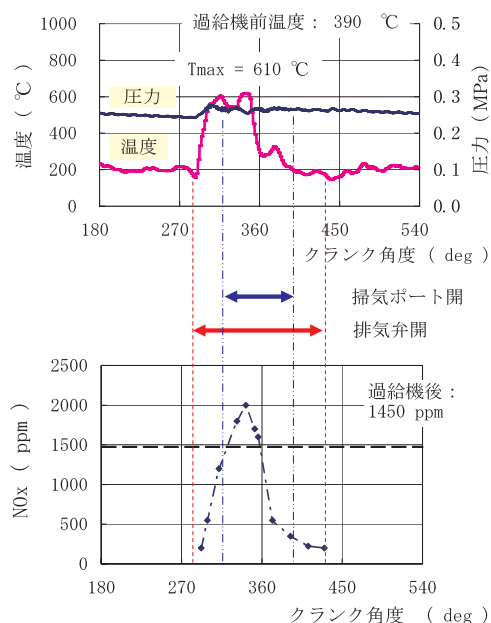


図12 排気ガス測定結果(MTE40 75% 負荷)

度分布のシミュレーション結果を図11に示す。MTE40 エンジンの主要目を表1に、解析条件を表2に示す。シリンダ内掃気が層状に行われ、排気出口でも同様の層状分布となっているのが分かる。

次に、MTE40にて、従来の排気方式の場合の排気ガスの温度、圧力、NO_x 濃度の過渡的な変化を計測した結果を図12に示す。排気弁が開いた直後の排気工程では、NO_x の含有率及びガス温度が高く、燃焼後の排気ガスが主であることが分かる。

一方、排気弁が閉じる直前の掃気工程では NO_x 濃度及びガス温度は低く、掃気が多く含まれていると考えられる。現状の排気方式では、この2種類のガスが、排気レシーバ内で混合され、中温のガスとなり過給機に供給されている。従って、この2種類のガスを適切に分離できれば、より高温の排気ガスを過給機に供給するとともに、掃気を多く含んだ低温ガスは掃気に導入することが可能となる。その概念図を図1に示す。

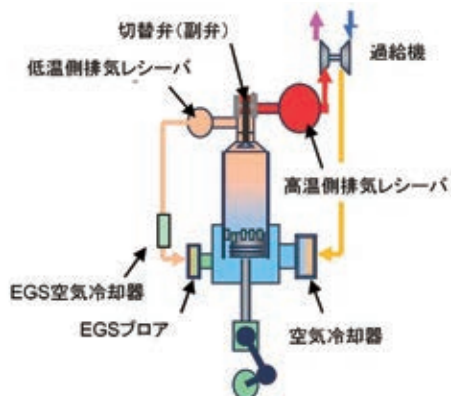


図1 排気ガス分離システム概念図

EGSでは、ガス分離のため、排気通路を2箇所設置し、通路切替用の弁(副弁)を新たに装備する。従来の排気弁に相当する主弁と新設される副弁ともに電子制御により開閉する。従って、主弁の開閉タイミング及び副弁の切替えタイミングは任意で変更可能である。

図14に開発中のシステムの断面図を示す。この技術は、当社中速エンジンに採用し、実績のある一弁式給排気弁方式を踏襲した。簡易的に当社で実施した性能シミュレーション結果を図15に示す。

これより、EGS適用時、下記結果が得られた。

過給機出口排気ガス温度は、従来温度に比べ約100上昇し、360となる。この温度は過給機後へのSCR装備が可能となるレベルである。

高温側排気ガスを活用した排熱回収率は、約1~2%増加する。これはCO₂削減に寄与する。

過給機での所用動力は減少する。排気ガス流量の減少によるもので、過給機及びSCRの小型化が可能となる。これは機関室設計上も有利となる。

また、低温ガスが混合された掃気は、新気に比べO₂濃度は低く、CO₂濃度は高くなるため、若干のEGR効果も期待され、更なるNO_x低減の可能性も考えられる。

上記検討の結果、EGSは、NO_x三次規制への対応を採りつつ、CO₂削減に寄与するシステムとしての可能性を秘めていると考えられ、実用化開発に着手したところである。一方、低温側ガスを掃気へ戻すには、EGR同様、補助プロアが必要である。従って、EGR開発と同様、プロア動力への対応や掃気系の信頼性検証などが今後の開発課題に含まれる。

5. おわりに

今後は、エンジンからの大気汚染物質及び温室効果ガスの排出削減を目指し、経済性及び信頼性を有したエンジンを含めた推進装置としての開発がますます重要となる。本報ではNO_x及びCO₂削減技術に関し、当社の取組みについて述べた。

NO_x三次規制達成のためのシステムとして、EGSとSCRの組合せを、CO₂排出抑制には、様々な顧客の要望にこたえるため、電子制御エンジンの採用に加え、排熱回収率を重視した電気エネルギーでの回収システムとしてのTGU及びより

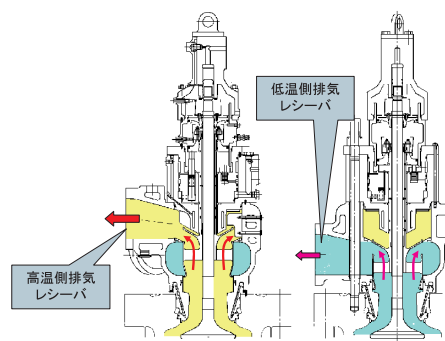


図14 排気ガス分離システムの断面図

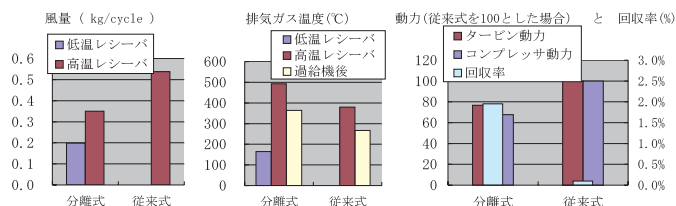


図15 性能シミュレーション結果

経済性を重視したTHS等の排熱回収システムも提案した。

また、エンジン単体でのCO₂の大幅削減が可能なME-GIエンジンにも取り組んでいる。今後もさまざまな研究開発に意欲的に取り組み、エンジンのみならず推進装置としての環境対応型システムを早期に市場投入し、顧客の期待にこたえていきたい。

なお、THS及びEGSの開発は国土交通省の支援を受け、日本海事協会との共同開発事業として実施中である。

参考文献

- 1) IMO: PREVENTION OF AIR POLLUTION FROM SHIPS Second IMO GHG Study 2009, MEPC 59/INF.10 (2009), p. 7, http://www.imo.org/includes/blastDataOnly.asp/data_id%3D26047/INF-10.pdf (2010-6-4)
- 2) MAN Diesel & Turbo: Exhaust Gas Recirculation, http://www.mandiesel-greentechnology.com/category_000539.html (2010-6-4)
- 3) 近藤. ほか: 中型及び大型エンジン用ターボチャージャ直結型発電システムの開発, 三井造船技報, 199(2010), p. 1
- 4) M.Ohtsu, et al.: Utilization of Excessive Turbocharger Efficiency, CIMAC 2007, (2007)

共同執筆者: 高橋 元幸 島田 一孝
大塚 厚史

〔問い合わせ先〕

機械・システム事業本部 機械工場 ディーゼル設計部
TEL 0863 - 23 - 2524 田中 一郎

最新技術に基づく三井造船の硫酸プラント

環境・プラント事業本部 山 関 八重美

1. はじめに

戦後 1950 年代前半になると、我が国の化学工業は、技術も市場も戦争から平和への転換が進み、特に技術面においては海外からの技術導入によって、先進国との技術格差を埋める方向へと急速に進んでいった。この時期になると、ほとんどの硫酸製造プラントは五酸化バナジウム(V_2O_5)を触媒とする接触法となっており、従来行われていた室素酸化物を触媒とする鉛室法は姿を消していった。

三井造船においても、米国セントルイスのモンサント・エンパイロ・ケム社(現在の MECS Inc.、以下「モンサント社」という)と 1952 年に接触式硫酸製造技術に関する技術導入の契約を締結し、それ以降現在までその契約は継続している。当社は技術導入以来、硫酸の原料に応じてその時代の最新技術を取り込みながら日本国内及び海外を合わせて 60 以上の硫酸製造プラントを建設しており、製造能力は 30 ~ 2500 t/d まで、また、原料としては硫黄、硫化水素、銅製錬・亜鉛製錬及び鉛製錬の非鉄製錬並びに硫化鉄焙焼由来の亜硫酸ガス、アルキレーションガソリン製造時の廃硫酸など多種にわたる。図 1 に当社が建設した主な硫酸製造プラントを製造能力ベースで年代別に示す。

最近の我が国の硫酸工業においては、ほとんどのプラントが建設後 25 年から 40 年経っており老朽化が進んでいるが、経済的理由等でスクラップ・アンド・ビルドでのプラント全体を更新することがほとんどなく、老朽化の激しい単体機器の更新で対応している状態である。当社は機器更新にあたり、最新技術を加味した最適設計に基づいた仕様で提供することに努めてきた。

本報では、当社がこれまでに提供してきた硫酸プラントの技術の変遷や現在提供できる最新技術を、硫酸製造に関する

一般的な事項や当社が行ってきた硫酸プラント建設と併せて紹介する。

2. 硫酸製造原料の変遷及び製品硫酸の用途

2.1 硫酸の原料

2.1.1 硫黄

硫黄には石油精製からの回収硫黄、採掘硫黄、フラッシュ硫黄、酸性天然ガスからの回収硫黄がある。

大正から昭和にかけて、我が国の松尾鉱山に見られるように、山から掘られた不純物を含む硫黄を精製し、それを原料としていた。しかし、化学原料が石油に代わっていくにつれ石油精製からの回収硫黄が増加し、採掘硫黄は経済的に採算が取れず、廃れていった。現在、我が国では行われていない。フラッシュ硫黄(過熱水溶融法)は地下深部 100 ~ 400 m 位に存在する硫黄鉱床から硫黄井によりくみ上げる方法で、米国やポーランドで行われている。酸性天然ガス中の硫化水素からのクラウス法による硫黄回収がカナダ、米国、フランスで行われている。現在の我が国の硫黄燃焼の原料は全て石油精製からの回収硫黄である。

2.1.2 非鉄製錬由来の亜硫酸ガス

非鉄製錬においては天然の硫化鉱を焙焼しているため、その亜硫酸ガス(SO_2)を含む排ガス中には、ダスト及び水銀、砒素、フッ素等の有害な物質が含まれている。そこで、硫酸製造設備に送られる前にガス精製設備で水洗浄によりこれらの不純物は除去される。

銅、亜鉛及び鉛製錬においては、次のような炉が使用され、100 ~ 2350 t/d の硫酸プラントが併設されている。

- ・銅 製 錬：反射炉，自熔炉，転炉，連続炉
- ・亜鉛，鉛製錬：流動焙焼炉，焼結機

2.1. 硫化鉄焙焼由来の SO_2

以前は、硫酸と共に製鉄用原料としての鉄を回収していたプラントもあったが、現在、我が国においては運転されていない。中国やスペインにおいては硫化鉄を多く産出し、硫黄源として使用している。

2.1.4 その他の原料となる SO_2

フマックス法やロダックス法による石炭乾留ガス(Coke Oven Gas : COG)の脱硫からの硫黄分を含む廃液の燃焼時に SO_2 が発生する。また、アルキレーションガソリン製造時の触媒として使用される硫酸の使用済み廃硫酸の熱分解時に SO_2 が発生する。これらの排ガスを原料とした硫酸生産も国内で行われているが、比較的規模が小さいプラントとなっている。

2.2 硫酸の用途

平成 14 年から 19 年における我が国の硫酸需要の平均比率を図 2 に示す¹⁾。

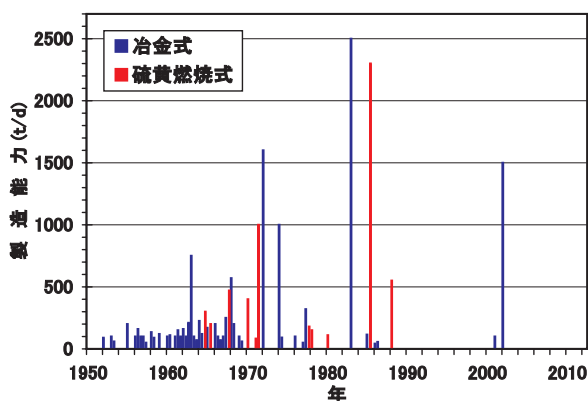


図 1 三井造船の硫酸プラント建設実績

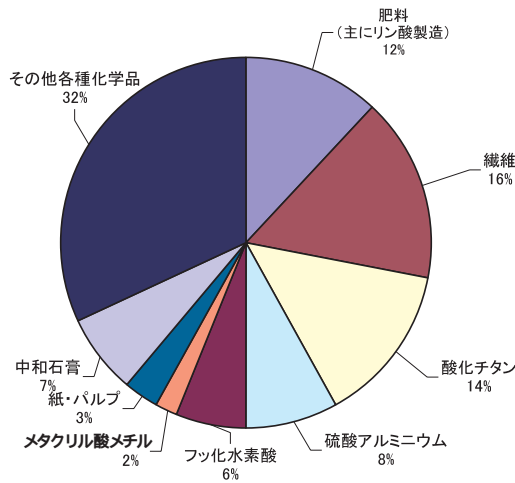


図2 硫酸の用途

硫酸製造プロセスフロー

1 硫酸製造工程の種類

接触法硫酸製造は主に次の3つの工程から成り立っている。
 硫黄燃焼式での空気乾燥工程、または、非鉄製錬、硫化鉄焙焼等由来のSO₂ガス乾燥工程
 触媒によるSO₂からSO₃への酸化工程
 SO₃の濃硫酸による吸収工程

2 酸化工程の変遷

1960年代までは吸収塔が1塔の1段接触式が主に採用されていた。1970年代に入ると、硫酸工業界においても技術の効率化が叫ばれると共に公害問題がクローズアップし、吸収塔が2段ある2段接触式が採用されるようになった。その結果、SO₂からSO₃への転化率が97%から99.5%まで向上した。その一方で、硫酸プラントの下流側に未反応のSO₂を除去するための脱硫装置が追加された。2段接触式プロセスは、ドイツのバイエル社が1963年に開発したものであるが、現在はほとんどの硫酸プラントで用いられている。

硫酸製造プロセスには、硫黄を原料とする硫黄燃焼式と非鉄製錬、硫化鉄焙焼等由来の排ガス中のSO₂を原料とする冶金式がある。これらのプロセスフローについて以下に述べるが、説明は最近の主流である転化率(反応率)の高い2段接触式とする。

硫黄燃焼 2 段接触式硫酸製造プロセス

溶融硫黄は、図3に示すとおり、濃硫酸により乾燥された空気により燃焼され、高温のSO₂ガスになる。SO₂ガスは転化器内で、V₂O₅触媒によりSO₃ガスとなる。このSO₂からSO₃への酸化反応は発熱を伴い、SO₃は濃硫酸中の水分と反応して製品硫酸となる。濃硫酸による空気の乾燥及びSO₃の濃硫酸中の水分による吸収は発熱を伴うため、それぞれ冷却する必要がある。また、硫黄燃焼による燃焼熱は高圧スチーム発生に、SO₂からSO₃への酸化に伴う反応熱は高圧スチーム発生と中間吸収塔からのSO₂ガスの反応適正温度までの昇温に使用される。

4 冶金 2 段接触式硫酸製造プロセス

非鉄製錬設備等からのSO₂を含む排ガスは、ガス精製設備

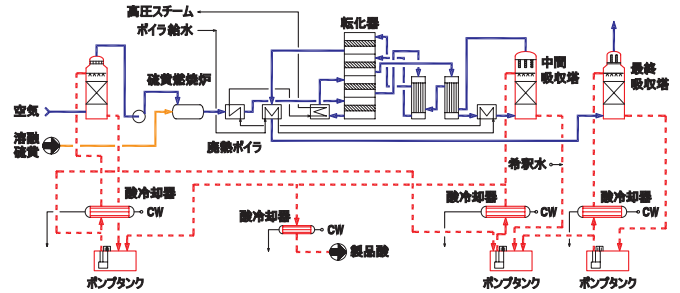


図3 硫黄燃焼 2 段接触式硫酸製造プロセスフロー

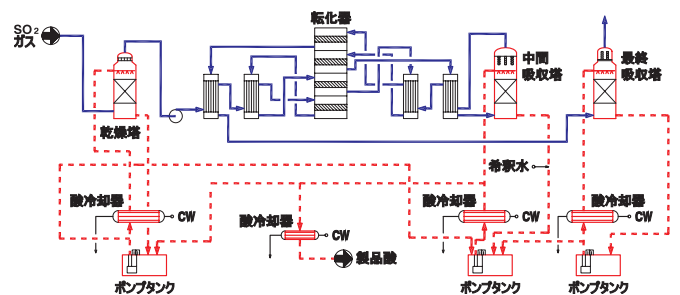


図4 冶金 2 段接触式硫酸プロセスフロー

表1 触媒の形状による圧力損失比率の変化

| | ペレット型 | リング型 | 雛菊型 |
|---------|-------|------|-----|
| 圧力損失の比率 | 1 | 0.55 | 0.5 |

内で不純物除去されSO₂ガス濃度及び温度が調整された後、図4に示すとおり、硫酸での乾燥、V₂O₅触媒によるSO₂からSO₃への酸化、SO₃の硫酸での吸収が行われる。SO₂からSO₃への酸化に伴う反応熱は乾燥塔からのSO₂ガス及び中間吸収塔からのSO₂ガスのそれぞれの反応適正温度までの昇温に使用される。

4. 当社における接触式硫酸製造技術の変遷と最新技術

4.1 触媒

従来のペレット型からリング型に、さらに最近になって、雛菊型へと、触媒活性を低下させることなく触媒の形状を変えて圧力損失の低減を図っている。圧力損失の変化を表1に示す。

従来型V₂O₅触媒はカリウムを主体とするアルカリ金属の硫酸塩類を助触媒とし、活性化させるためには転化器内のプロセスガス温度を420~440まで上げる必要があった。しかし最近、従来型にセシウム(Cs)を加えた低温活性触媒を使用することにより、活性に必要な温度を360~390程度まで下げることが可能となった。この結果、ガス熱交換器のコンパクト化、通常運転時の転化率向上、運転開始時の転化率改善などが図れた。

4.2 省エネルギー

第1次石油ショック以降の原油価格の高騰により、熱回収を含めた以下の省エネ対策が採用された。

SO₂濃度を上げることでガス流量を減らし、効率

的な熱回収を行うと同時に装置のコンパクト化を図る。エコマイザー出口 SO_3 ガスについて露点を監視し、ガス温度を極力下げることにより回収熱量を増やす。

硫黄燃焼式硫酸プラントにおいて、空気ブロワの位置を従来の乾燥塔入口側から出口側に移すことにより、乾燥塔冷却器の交換熱量を減らして冷却水量を減らすと同時に空気ブロワでの圧縮熱を回収し高圧スチームの発生量を増加させる。

低圧力損失触媒及び低圧力損失ミストセパレータを採用し、プロセスガスの圧力損失を低減させることによりガスブロワの圧力を下げ必要動力を減らす。

4. SO_2 濃度

設備のコンパクト化及び省エネ化を目的に SO_2 濃度は以下のように高濃度に設計されるようになってきている。

硫黄燃焼式では、 SO_2 濃度は従来 10% であったが、最近では 11.5% が標準(最大 12%)となっている。

銅製錬用冶金式では、 SO_2 濃度は従来 10% であったが、最近では酸素プラントを設け、酸素を使用した製錬により 15% 程度まで上がっている。従来 10% で運転していた硫酸プラントにおいては、15% にすることにより、部分的な改造で硫酸製造能力が 50% 増となった事例もある。

4.4 材質

材質の合理化として FRP (強化プラスチック) 及び Si を含むステンレス鋼が採用されている。

希硫酸に対して、従来、鉛が使用されていたが、環境規制による鉛使用量の減少と共に製造メーカーが不足し、現在はほとんど使用されていない。これに代わり耐食性が鉛と同等である FRP が使用されるようになった。

濃硫酸に対して、従来、炭素鋼に耐酸煉瓦ライニングの機器及び CrFC の鋳物配管が使用されていたが、硫酸に対する耐食性の優れたステンレス鋼が多種開発された。従来は、300 番代のステンレス鋼が一般的であったが、最近では SUS310S や Si を含むステンレス鋼も使用されるようになった。

4.5 要素機器

4.5.1 ダイナーウェーブ(DynaWave)

デュポン(DuPont)社が 1970 年代に開発し特許を得た技術で、1987 年以降、モンサント社がデュポン社との契約に基づいて硫酸プラント用として適用したものである。

ダクト上部から下方向に流れているガス中に、下部から上方向に液を噴射することにより直接接触伝熱効率及びダスト捕集効率を高めることができ、従来の増湿塔及び冷却塔システムに代わるものである。

4.5.2 モンサントミストエリミネータ(Monsanto Mist Eliminator : MME)

吸収塔内で SO_3 を 98% H_2SO_4 で吸収するとき、 SO_3 と H_2SO_4 の微細なミストが発生する。2 段接触式では、中間吸収塔出口ガスは、転化器の最終層に入る前に、再度、熱交換器を通り反応に必要な温度まで加熱される。この場合、ガス中に硫酸ミストが存在すると腐食の問題が起こる。また、最終吸収塔においても出口ガス中に硫酸ミストが存在すると、この出口ガスが大気に放出され白煙の問題が生じる。そこで、

それぞれの吸収塔頂部に MME を取り付け、微細なミストまでほぼ完全に除去するようにしている。

MME にはミストの粒子径、許容圧力損失及び捕集効率の面から多種類あり、それらの諸条件により使い分けている。

4.5. 酸分散器

以前は鋳物製皿型が使用されていたが、これが鋳物製トラフ型に代わり、さらに最近では Si を含むステンレス鋼製トラフ型となっている。単位面積当たりの滴酸ポイント数が鋳物製では 13.5 ポイント / m^2 程度であったものが、最近の Si を含むステンレス鋼製では 43 ポイント / m^2 まで増加することが可能となった。このように、滴酸ポイントを増やすことにより酸分散の均一性が増し、充填高さを下げることが可能となった。

4.5.4 酸冷却器

(1) 希硫酸冷却器

従来カーボン熱交換器を使用していたが、最近では安価で熱交換率の良いプレート式熱交換器が使用されている。

(2) 濃硫酸冷却器

従来 CrFC 製イリゲーション式熱交換器を使用していたが、最近では据付面積が少なくコンパクトで熱交換率の良い信頼性の高いプレート式熱交換器や多管式熱交換器が使用されるようになり、酸冷却熱を利用して温水を作るなど熱回収も行われている。多管式濃硫酸冷却器においては、陽極防食付きと Si を含むステンレス鋼を使用した陽極防食の付かないものがある。

4.5.5 転化器

従来の炭素鋼製転化器では、触媒各層について鋳物製グリッドプレートとデイビジョンプレートを鋳物製コラムで支え、これが積み重なる構造となっていた。プラントの大型化に伴い、転化器の径が大きくなると、この構造では次のような問題が生じてくる。

- ・重量の増加による底板のふくらみ
- ・ガス内圧によるシェルのふくらみ
- ・高温によるクリープ強度の低下

これらを改善するため、底板から屋根までをコラムで溶接した支柱構造とし、全体がステンレス鋼製の転化器が使用されるようになった。ステンレス鋼製転化器では次の利点がある。

- ・触媒第 1 層を最下段に配置可能となり、触媒ふるい分け作業が容易となる。
- ・触媒各層の上からの順番を自由に取れるため、ガスダクト計画が容易となる。
- ・各触媒層を区切るデイビジョンプレートのガス漏れがなくなり、従来炭素鋼製転化器で発生した内部ガス漏れによる転化率低下が防げる。
- ・機器寿命が長くなり、メンテナンス費用が低減する。
- ・煉瓦及び鋳物グリッドが不要となることにより、重量が 40% 程度軽くなる。

4.6 熱回収システム

熱回収システム(Heat Recovery System : HRS)は、従来 100 程度であった吸収塔系の酸冷却器を通る循環硫酸の温度を 200 以上に高め、冷却水であった酸冷却器の冷媒をス

チームに代えて、最高 1 MPa までの中圧で使用することにより熱回収を行う技術である。本技術は、モンサント社により開発された。硫黄燃焼式では、HRS での発生蒸気量は、条件によっては 0.5 t - スチーム / t - H_2SO_4 となる。これを加味すると、従来の熱回収ボイラシステムだけの熱回収率 70% を 85% 程度まで高めることが可能である。

近年 地球温暖化防止に向けて CO_2 削減が必須となっている。従来の硫酸プラントでは、高压スチームによる高温の SO_2 ガスからの熱回収は行われているが、酸冷却器での熱回収は、小規模な温水としてのみの回収で、ほとんどの熱は捨てられていた。今後は酸冷却器からの熱回収や HRS による中圧スチーム発生及び大規模な温水としての熱回収が行われ、場合によっては、地域暖房等にも利用されていくことが考えられる。 CO_2 を発生しないで熱源を得ることにより CO_2 の排出権を獲得でき、この CO_2 排出権売却により収益を増やすメリットが出てくる²⁾。

硫黄燃焼方式の硫酸プラントにおいては、以前は硫酸そのものの生産を目的に運転されていたが、原油価格が高騰してからは硫黄燃焼式硫酸プラントの特徴である多量の高压スチームが発生できるという利点を生かして、スチーム供給を主目的に運転されている硫酸プラントもある。

4.7 近年の環境対応技術

銅製錬を含む非鉄製錬からの排ガス中の SO_2 を原料としている冶金式硫酸プラントにおいては、公害対策処理としての役目が強く、生産される硫酸は副製品の意味合いがある。また、最近では産業廃棄物処理が問題になっているが、焙焼炉等の炉内で鉱石と共にシュレッダーダスト等の可燃性廃棄物を焙焼処理している非鉄製錬所もある。一方、非鉄金属を含む産業廃棄物を焙焼炉等で処理すると高濃度の NO_x が発生する場合がある。この NO_x は、硫酸プラントではほとんど除去されず、硫酸プラントの後段の脱硫設備の煙突から放出され、公害の原因となる。最近、ハルダー・トプソー社は硫酸プラントの転化器群に、 V_2O_5 、 TiO_2 、 WO_3 を主成分とする触媒を設置する脱硝プロセスを開発した。当社は、国内の実プラントにおいて、この脱硝設備設置を実施済みであり、公害防止の観点から硫酸プラントにおける NO_x 除去の対応が可能である。

4.8 硫酸製造プラントの超大型化への対応

1998 年にモンサント社がオーストラリア西部地区のマリン・マリン (Murrin Murrin) にニッケル及びコバルト製造用の硫酸向けに、硫黄燃焼方式 4 400 t/d 硫酸プラントを建設して以降、サウジアラビアの硫黄燃焼方式 4 500 t/d × 3 系列を含め、大型化によるコストメリットから、世界的に超大型硫酸プラントが建設されつつある。超大型化するためには、強度及びガス 酸の分散等の問題より、単に従来の方法をスケールアップするだけでは不十分であり、特に、乾燥塔・吸収塔及び転化器のコンパクト化を図る必要がある。

このため、モンサント社は濃硫酸塔用 Si を含むステンレス鋼製トラフ型酸分散器と低圧力損失触媒を採用し、超大型化を実現した。

従来の鋳物製トラフ型酸分散器から Si を含むステンレス鋼製トラフ型に代えることにより、単位面積当たりの滴酸ポ

イント数を増やすことができ、酸分散が改善され、充填高さを下げることが可能となる。これにより、結果的に圧力損失を増加させずにガス流速を増加することが可能となり、塔の内径を小さくすることができるようになった。

また、硫酸プラントにおける転化器は 600 を超える過酷な運転温度条件下で使用されるため、熱応力を考えると超大型化に踏み切れなかった。従来は、触媒としてペレット型を使用していたが、これを低圧力損失タイプのリング型、さらには、雛菊型にすることにより単位流速当たりの圧力損失を低下することが可能となり、その結果、圧力損失を増加させずに転化器の内径を小さくすることができた。

5. 主な納入プラント

当社がこれまでに納入してきたプラントの中で、特に注目すべきプラントについて以下に述べる。

5.1 モンサント社の 2 段接触式プロセスの第 1 号

当社は、1967 年に東邦亜鉛株式会社安中製錬所向けに亜鉛焙焼からの排ガス処理としての 250 t/d 硫酸プラントを建設した。この硫酸プラントは、当社のプロセスライセンスであるモンサント社にとって 1 段接触式に代わる 2 段接触式として第 1 号プラントとなっている(写真 1)。試運転時にはモンサント社のエンジニアと共に性能確認を行った。

なお、モンサント社の 2 段接触式の第 2 号プラントも当社が建設した東邦亜鉛株式会社小名浜製錬所向け亜鉛焙焼からの排ガス処理としての 570 t/d 硫酸プラントである。

5.2 日本国内初の硫黄燃焼式大型硫酸プラント

日本燐酸株式会社は 1969 年に千葉県袖ヶ浦において硫酸全量買酸による燐酸及び燐安肥料の生産を開始した。当社は、1970 年に溶融硫黄を原料とする 2 段接触式の製造能力 1 000 t/d 硫酸プラントを受注し、実質 8 ヶ月という短期間で建設を完了した(写真 2)。このプラントは我が国における最初の硫黄燃焼式 1 000 t/d の大型硫酸プラントである。

5. 100% SO_3 ガス製造設備

当社は、1980 年に徳山ソーダ株式会社徳山東工場向けにクロールスルホン酸用としての 100% SO_3 ガス製造設備を建設、納入した。このプラントは、硫黄燃焼 2 段接触式硫酸プラントを基本とするもので、発煙硫酸を生成した後に



写真 1 東邦亜鉛株式会社安中製錬所向け 250 t/d 硫酸プラント



写真2 日本燐酸株式会社向け 1000 t/d 硫酸プラント



写真4 モロッコ王国 / OCP 向け 2300 t/d x 6 系列硫酸プラント



写真 フィリピン / パサル向け 2500 t/d 硫酸プラント

これを転化器内で発生した反応熱を利用して加熱蒸発させて 100%SO₃ ガスを発生させるものである。SO₃ 蒸発で濃度が 20% まで下がった発煙硫酸は発煙硫酸吸収塔に戻され、再度、SO₃ 吸収用として循環使用される。製造能力としては 100% 硫酸として 110 t/d 相当であり、内訳は 100%SO₃ が 72 t/d (100% 硫酸として 88.2 t/d) で、98.5% 硫酸が 22.1 t/d (100% 硫酸として 21.8 t/d) である。生産される SO₃ の比率が高いため、発煙硫酸吸収塔を 2 塔方式にするなどの工夫をした。

5.4 世界最大サイズの硫酸プラント

フィリピンのパサル向けに銅製錬(自熔炉、転炉及び脱砒焙焼炉の組み合わせ)からの排ガス処理用としての 2 段接触式 2500 t/d 硫酸設備を 1984 年に建設 納入した(写真)。

これは、転化器内径が 14 000 mm あり、建設当時世界最大サイズの硫酸プラントであった。

採用された技術は従来型のもので、硫酸冷却器は海水を冷却水とするイリゲーションタイプを使用している。

5.5 世界最大規模硫酸製造設備

モロッコ王国 OCP (Office Cherfien des Phosphates) 向けに肥料製造用を目的とする硫酸設備をジョルフ・ラスファーに 1985 年に建設、納入した(写真4)。

この設備は建設当時、同時期に建設したものの中では世界最大の規模の硫酸設備であった。

設備としては、固形硫黄の溶融、液体硫黄の貯蔵及び硫酸製造が含まれ、概略仕様を表2に示す。

5.6 省エネルギーを考慮した硫酸製造プラント

2002 年に小名浜製錬株式会社小名浜製錬所に 1500 t/d の硫酸設備を納入した。この硫酸設備は反射炉と転炉から構成され

表2 モロッコ王国 / OCP 向け硫酸プラント概略仕様

| エリア | 設備 | 設備能力 |
|--------|--------|-------------------------------|
| 固体硫黄溶融 | 硫黄溶融 | 67.5 t/h x 8 基 |
| | 硫黄ろ過 | 145 m ² / 基 x 16 基 |
| 液体硫黄貯蔵 | 硫黄タンク | 15 000 t x 5 基 |
| | 硫黄タンク | 18 000 t x 12 基 |
| 硫酸製造 | 2 段接触式 | 2 300 t/d x 6 系列 |
| 硫酸貯蔵 | 硫酸タンク | 13 500 t x 6 基 |

る銅製錬の転炉のみの亜硫酸ガスを原料としており、乾燥塔及び吸収塔を含む硫酸循環系は既設設備を流用し、SO₂ から SO₃ への反応系からの余剰反応熱を低圧蒸気として回収している。

6. おわりに

硫酸技術においては緩やかであるが時代と共に改善が加えられ、新技術が導入されてきた。当社は硫酸プラントの設計建設に関し、技術導入以来現在もモンサント社のライセンサーであり、本報で述べてきた新技術を含めたモンサント社が有する全ての硫酸技術の使用が可能である。

我が国においては、新規に建設される硫酸プラントはまれであるが、老朽化した機器の更新等を行なわれている。この場合、既設設備との関係や場所的な制限もあり、必ずしも本報で述べた最新技術を採用できるとは限らない。しかし、当社は長年の硫酸プラント建設で培われた経験を基に、このような限定された条件下でも、最新技術を含めた最適設計で今後も設備を提供し、顧客から満足がいただけるよう努めている。

参考文献

- 1) 硫酸協会：2009 年版硫酸手帳，p. 18
- 2) NEDO：共同実施等推進基礎調査 モロッコ国における燐系肥料プラント廃熱有効利用プロジェクト 平成 13 年度調査報告書，NEDO-IC-01ER41 (2002)

[問い合わせ先]

環境・プラント事業部 プロセス設計部
TEL 03 - 3675 - 4352 山崎 八重美

低炭素被覆・高性能リン酸鉄リチウム正極材料の開発と量産化

事業開発本部 坂口善樹

1. はじめに

コバルト酸リチウム(LiCoO₂)を正極に採用し、1991年に円筒型二次電池の量産が始まってから(「リチウムイオン二次電池」の名はこの時に生まれた)20年になる¹⁾。この間、ノート型パソコンや携帯電話等の小型民生用の電池として飛躍的に需要が拡大し、経済産業省機械統計によると、初めて現れた、1995年の販売量約3000万個に対して5年後には4.6億個、10年後には9.3億個と増加を続けている。既存の自動車用鉛電池販売量が横ばいであるのとは対照的である²⁾。しかし、リチウムイオン二次電池採用による高容量化・軽量化という利便性に対して、パソコン使用時の発火事故に端を発した安全性に対する懸念、あるいはレアメタルの一種であるコバルトの採用による資源的需給の逼迫や原料価格高騰への懸念もあり、中大型電池、例えばハイブリッド自動車や電気自動車(EV)用途への展開はなされていない。この用途向けの電池としては、負極を炭素電極からチタン酸リチウム(LTO)電極に変えて安全性、信頼性を高めた電池³⁾(ただし、電圧は2V系となる)やマンガン系(正極材はスピネル構造)を採用したEV用電池⁴⁾が開発され製品化されている。

一方、現在三井造船が開発を進めているリン酸鉄リチウム(LiFePO₄)は、オリビン型結晶構造を有し、熱力学的に非常に安定で、400程度まで酸素放出や発熱がほとんどないため、有機電解液を使用するリチウムイオン二次電池の正極材として、安全性確保の上で好ましい材料である。しかも、鉄原料はコバルトと異なり資源的な制約を受けることがないため、大量使用に大きな問題はない。これら長所に対して、リン酸鉄リチウムは下記に示す短所も有しており、これらを克服して使用に耐える材料に仕上げることが開発の技術的課題である。

結晶構造に由来する非常に低い導電性(25において導電率 10^{-6} S/cm)及びリチウムイオンの低拡散性(25において最大粒子径 $D = 10^{-17}$ m²/s)のため、このままでは良好な出力特性が得られない。

LiCoO₂等の酸化物系活物質に比べ密度が低い(3500~3600 kg/m³)ため体積エネルギー密度が低くなる。

これまでの実験室レベルからパイロットプラントレベルに至る開発を通して課題に対する改良を行い、現在セミコマーシャルプラントにおいて、その実証を試みているところである。

2. これまでの製品開発動向

リン酸鉄リチウムの長所を活かし、実用化に向けた開発を進めるためには、上述の低い導電性とリチウムイオンの拡散速度を格段に改善する必要がある。当社では、下記に述べる3つの手法を駆使し、実用レベルで使用可能な高性能リン

酸鉄リチウムを開発を実施してきた^{5),6)}。

2.1 活物質の超微粒子化

活物質一次結晶粒子の超微粒子化により、活物質内のリチウムイオン拡散距離を短くさせることで拡散分極を低減させ、レート特性の向上を図った。副次効果として、電池を作製する際に正極材料に混合添加される導電性助剤(導電性炭素材)との混合度が向上して、導電性が高くなった。パイロットプラントでは、正極材料の一次結晶粒子径が70~100 nmになるように、原料調整、炭素材混合(製品の炭素含有率:4~6 wt%)、焼成等のプロセス制御を行った。

2.2 ナノハイブリッド化(活物質への導電性助剤の析出)

リン酸鉄リチウムのナノ粒子一つ一つの表面に、導電性を有する熱分解炭素を析出させることにより、充放電特性の大幅な改善を図った。透過型電子顕微鏡(Transmission Electron Microscope: TEM)観察から、炭素層の厚みは2~3 nmで、どの微粒子も均一に被覆されていることを確認している。炭素被覆はリン酸鉄リチウムの実用化にとって、極めて重要な処理であるが、その含有量は極力減らす必要がある。炭素それ自体は活物質ではないため、添加した分、電池重量当たりのエネルギー密度が下がること、活物質を大気開放した場合に被覆炭素が吸湿する水分により、電池の品質に影響を及ぼす恐れがあること、等の理由による。そこで、添加する炭素前駆物質を改めて選定した結果、後述のように従来必要とした含有量の1/4~1/5の含有量で、同等の電池充放電特性が得られる材料を見出した⁷⁾(後述)。炭素含有量の低減により、活物質のかさ密度、タップ密度も大きくなり、電極密度(kg/m³)も大きく取れるという、副次効果が得られている。

低炭素被覆・高性能リン酸鉄リチウム正極材料の量産化

2.1 セミコマーシャルプラント(6 t/y)の建設

当社は、2007年に12 t/yの生産能力を有する、リン酸鉄リチウム正極材料のパイロットプラント(Pilot Plant: PP)を建設し、サンプル製造を開始し、サンプルワークを行い、ユーザーより高い評価を受けてきた。

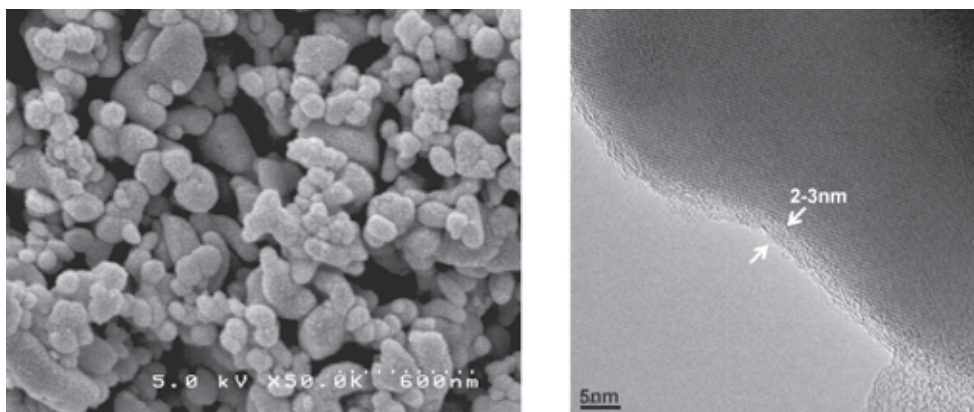
その後、さらなる高性能な「低炭素被覆リン酸鉄リチウム正極材料」を開発し、その量産化を進め、2009年には36 t/yのセミコマーシャルプラント(Semi-Commercial Plant: SCP)を建設して運転を開始した。

現在、約30社のユーザーに対して、1回当たり数kgから数百kgのサンプルワークを行っている。

2.2 低炭素被覆・高性能リン酸鉄リチウム正極材料

2.2.1 LCC品の粉体物性

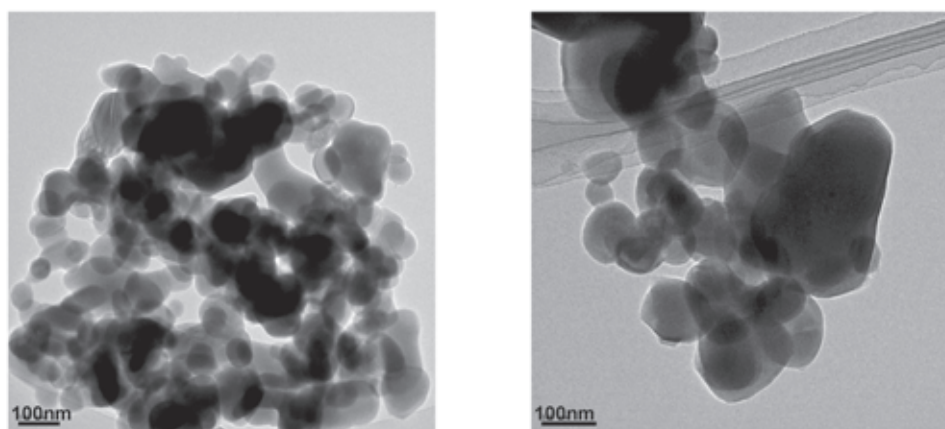
写真1に今回新たに開発し、商品ラインナップ化された



(a)SEM 写真

(b)TEM 写真

写真1 新開発のLCC品のSEM/TEM像



(a)従来品

(b)LCC品

写真2 従来品及びLCC品のTEM観察

表1 従来品及びLCC品の製品仕様

| | 従来品 | LCC品(暫定) |
|---------------------------|-----------|-----------|
| 被覆炭素量(wt%) | 5.0 - 6.0 | 0.9 - 1.4 |
| 比表面積(m ² /g) | 20 - 26 | 9 - 18 |
| 一次粒子径(nm) | 100 - 200 | 100 - 200 |
| 中心粒径D ₅₀ (μm) | 1.0 - 1.5 | 0.5 - 1.0 |
| 最大粒径D _{max} (μm) | 10以下 | 3以下 |
| 水分(ppm) | 2000 | 1000未満 |
| 極板密度(g/cc) | 1.7 - 1.8 | 2.0 - 2.1 |

「低炭素被覆リン酸鉄リチウム正極材料(Low Carbon Coat 品:LCC品)」のSEM/TEM像を示す。走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope:SEM)写真では一次粒子径が100nm程度であることが観察され,TEM(Transmission Electron Microscope)写真では活物質表面に2~3nmの薄く均質な炭素皮膜が存在していることがわかる。これらにより高レート特性等優れた特性が発現するものと考えられる。以下,新規開発であるLCC品の粉体物性の特徴を述べる。

表1に製品仕様(暫定)を示す。従来品に比べてLCC品

は,被覆炭素量を約1/5にまで減少させ,1.2wt%程度とした。またSCPにおいては,新たに開発したプロセスにより,添加炭素量を大幅に減らしても炭素が微細に分散し,被覆される。これにより十分な電子伝導性を付与することが可能となった。

写真2に従来品とLCC品のTEM像を示す。従来品では数十μmの活物質間に炭素が介在し,全体として一次粒子がネットワーク化した二次粒子を形成していた。このような特徴から,業界トップレベルの良好なレート特性が得られる半面,相当量の炭素の存在の影響で,水分含有量の増大,電極密度の低下,比表面積増大による塗工性不良を招くことが懸念された。

一方,LCC品の一次粒子は100~200nmとやや大きく,活物質間は従来品ほど顕著な炭素の介在は認められなかった。添加炭素が少ないために,焼成時に粒成長して比表面積が最大粒子径10m²/g台に減少し,かつ一次粒子のネットワーク化が抑制されたと考えられる。結果として,水分含有量の減少,電極密度の向上,簡便なスラリー作製と塗工性向上が実現された。

また,図1に示すように,粒度分布においても従来品に比

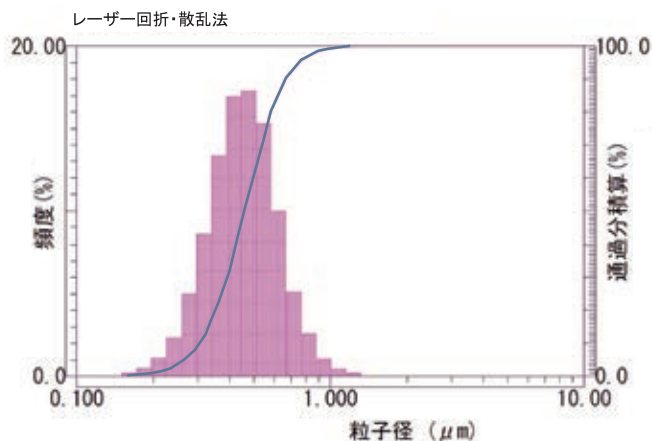


図1 LCC品の粒度分布測定結果

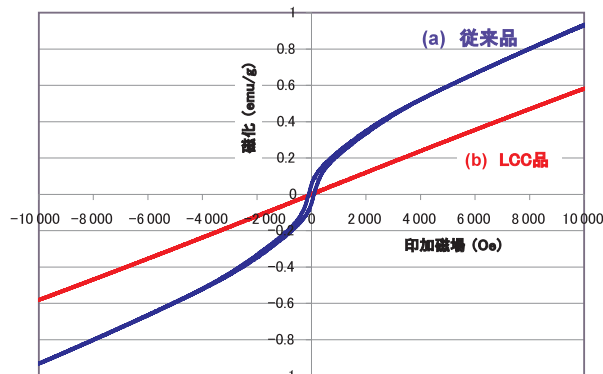


図 従来品及び LCC 品の磁性特性

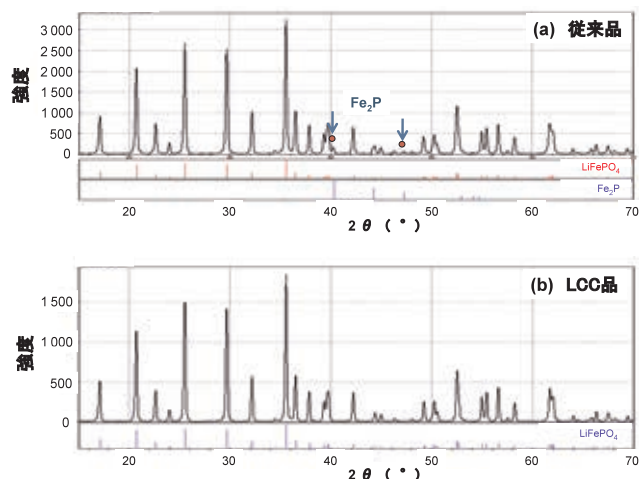


図2 従来品及び LCC 品の X 線回折結果

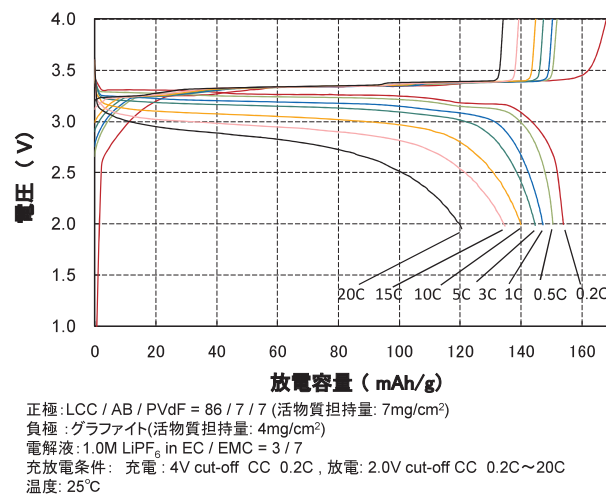


図4 LCC品のレート特性

べて細粒側に調整し、最大粒子径 Dmax が 3 μm 程度になっている。これにより粗粒による塗工不良のリスクを低減させている。ユーザーによる評価においても、塗工性が格段に向上したとの報告を受けている。また、塗工液調整等のハンドリング性も向上することにより、ユーザーにおける歩留りの向上、さらにはコストダウンも可能にさせる副次的効果もある。

低炭素量に適合した熱処理条件を設定することにより、リン化鉄 (Fe₂P) や他の鉄系磁性不純物量も従来品の約 1/10 にまで減少できた。また、図 2 に示す X 線回折結果では LCC 品が単相であることを示している。図 3 は世界各社のリン酸鉄リチウム正極材料を振動試料型磁力計 (Vibrating Sample Magnetometer : VSM) にて磁性不純物量を定量したデータであるが、当社の LCC 品はこの中で最も含有量が少ない。鉄系磁性不純物の存在は、長期保存中に鉄が電解液中に溶解し、これが負極表面に析出して短絡要因になるとされており、電池の安全性を脅かすものである。鉄系磁性不純物の制御は、品質保証・信頼性の観点から非常に重要である。詳細については、後述する。

2.2 LCC 品を用いた正極電極特性

図 4 に当社 LCC 品を用いて作製したラミネート電池のレー

ト特性を示す。添加炭素量が 1.2 wt% 程度と少ないにもかかわらず 20 C の高レートでも 120 mAh/g もの容量が取り出せ、かつ電圧が高く比較的平坦である。電子伝導性が良好に付与されていることを示している。この高レート特性は、特に瞬発力を要する電動工具やハイブリット車 (Hybrid Electric Vehicle : HEV) 用途に最適と言える。ユーザーによっては、さらに高いレートでも充放電可能との報告を受けている。「低炭素かつ高レート」は当社リン酸鉄リチウムの特長の一つである。

図 5 に LCC 品の 25 及び -30 における DC-IR 特性 (直流内部抵抗測定) を示す。これは横軸に充放電の電流密度、縦軸に充放電 10 秒後の電圧変化 V をプロットしたものである。図 5 の第 1 象限は充電を、第 3 象限は放電を示す。このプロットの傾きは抵抗を表しており、小さいほど入出力特性に優れることを意味し、特に、HEV 用途に非常に重要な特性である。HEV では、エンジン始動時及び発進時に瞬間的な急速放電を必要とし、また、ブレーキ時に回生エネルギーとして瞬間的な急速充電が必要とされるからである。

一方、-30 の極低温環境における DC-IR 特性も重要である。自動車大国である米国のニューヨーク、ボストン、デ

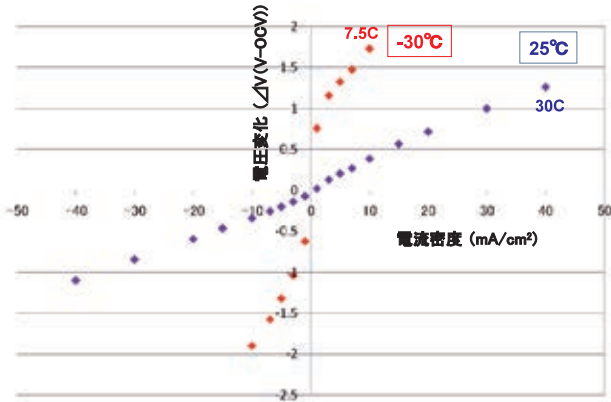


図5 LCC品のDC-IR特性(25 と -30)

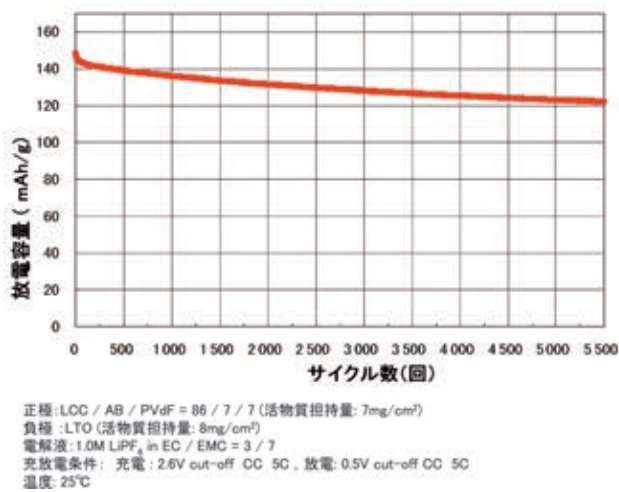


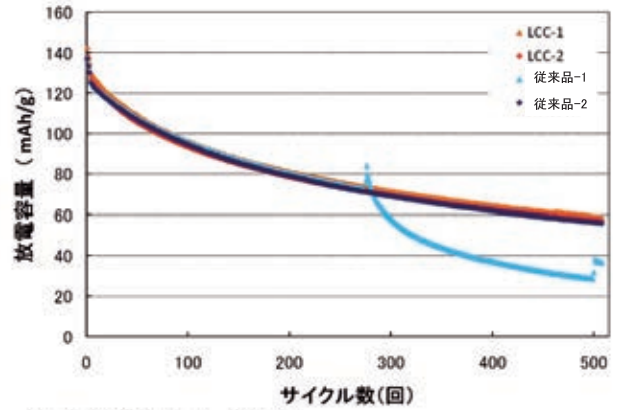
図6 LCC品のサイクル特性

トロイト等主要都市は冬には - 20 の極寒となる．そのような厳しい環境でも問題なく自動車が動くことは必須条件である．

当社リン酸鉄リチウムのDC-IR特性をみると，25 ても30 C 以上の入出力が可能であり， - 30 ても7.5 Cの入出力が可能であった．この結果は，HEV用途として十分極寒冷地でも適用できることを示唆している．さらに，電池メーカーにおける電解液及び電池構成の改良により，入出力特性がより向上する余地がある．

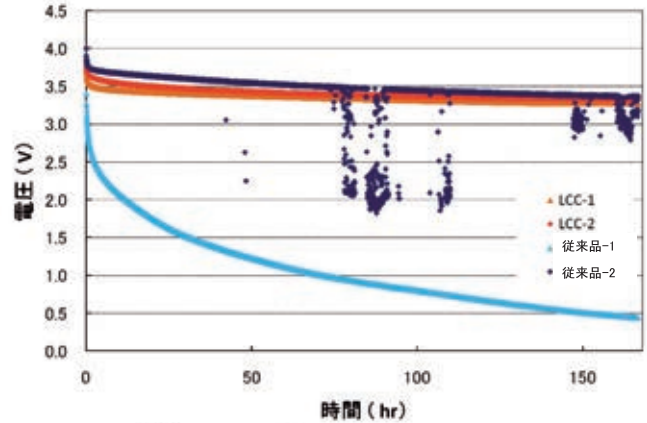
図6にLCC品のサイクル特性を示す．1000サイクル以上の評価では負極も正極同様，耐久特性が要求されるため，評価に用いた電池の負極にはサイクル特性に優れるLTO（チタン酸リチウム）を採用した．LCC品は5500サイクル後も容量維持率80%以上を示し，極めて長寿命特性を有するといえる．通常，携帯用リチウムイオン電池は500サイクル，EV用途でも3000サイクルで容量維持率80%以上が必要と言われているが，それよりもはるかに優れている．電池設計次第ではキャパシタ並の数十万サイクルも可能と期待される．

次に，電池の長期の安全性を評価するために高温負荷試験を行った結果を示す．図7では60 での高温500サイク



セル：単層ラミネート 5cmX5cm (25mAh)
正極：従来品 / LCC品
負極：グラファイト (MCMB)
電解液：1M-LiPF₆ EC/EMC=3/7
充放電条件：充電:4V Cut-off CC 1C, 放電:2.0V Cut-off CC 1C
温度：60°C

図7 従来品とLCC品の高温耐久評価



セルの状態：500∞(1C, 60°C)後
試験：満充電後(4V Cut-off) OCV変化測定
保持時間：168Hr (1Week)
温度：25°C

図8 従来品とLCC品の高温耐久後評価(OCV変化)

ル試験，図8では高温500サイクル後の満充電状態での開回路電圧(Open Circuit Voltage：OCV)変化の結果である．磁性不純物の多い従来品はサイクルの途中で短絡した電池が認められた．さらに60 500サイクル後の満充電状態OCV変化では，LCC品は電圧が安定しているのに対し，従来品は大きく電圧降下したり，電圧がふらつく現象が認められた．これらの現象は図に示した通り強磁性成分の含有率が高いため，従来品の鉄系磁性不純物が時間と共に次第に電解液中に溶解し，充電時に負極表面で鉄が析出することによりセパレーターを突き破り，短絡もしくは微小短絡したものと推測される．LCCは磁性不純物が非常に少ないため，上記のような現象が抑制されたものと推測する．

しかし，より確実性あるデータとするためにはさらなる実証試験の蓄積，不純物量の許容値の特定，他要因の調査，ユーザーとの連携が必要である．

一般的には，モジュールに安全保護回路を搭載することに

表2 LIBの代表的正極材料の特性一覧

| 正極材料 項目 | LFP(当社) | LiCoO ₂ | LiMn ₂ O ₄ | LiNiO ₂ | MNC |
|-------------|---------|--------------------|----------------------------------|--------------------|-----|
| 放電電位(V) | 3.4 | 3.7 | 3.8 | 3.6 | 3.7 |
| 実行容量(mAh/g) | 150 | 150 | 110 | 200 | 150 |
| 体積エネルギー密度 | | | | | |
| サイクル特性 | | | | | |
| レート特性 | | | | | |
| 高温保存 | | | | | |
| 自己放電 | | | | | |
| 安全性(過充電) | | x | | x | |

：極めて優れている

：良好な特性

：やや劣る

x：悪い特性・対策が必要

よって、システムとしての安全性を確保しようと試みている。しかし、内部短絡は活物質自体の状態に大きく左右されるため、システムのみで制御することは非常に難しい。リン酸鉄リチウムは結晶構造上、酸素を放出せず安全な材料と言われているが、酸素源は活物質の他に電解液、結着剤にも含まれているため、リン酸鉄リチウムを正極材料として使用する場合でも、電池として安全性を評価する必要がある。

表2に代表的正極材料の特性比較表を示す。リン酸鉄リチウム正極材料は、その物質固有の性質によりエネルギー密度が低いという短所があるが、レート特性、耐久性、安全性において他材料より優れている。

現在、1991年のリチウムイオン電池登場時の2倍以上のエネルギー密度の電池が市販されているが、一方で、2000年以降リチウムイオン電池の発火事故が頻発した。このため、最近では安全性が最優先事項の傾向にある。特に、これから巨大な市場を形成するであろうEV分野において、安全性は必須項目であり前提条件となる。リン酸鉄リチウム正極材料は、この条件に合致した材料といえる。

当社には、企業・大学を合わせると30以上の研究機関からサンプル要請があり、非常に精力的に研究開発が行なわれており、近い将来、急激な市場形成がなされると予測される。

その中で当社はトップグループに位置できるように量産化を鋭意進めているところである。

4. 今後の技術開発動向

これまで品質優先で、リン酸鉄リチウムの技術開発と量産化を行ってきた結果、レート特性、耐久特性についてユーザーから高い評価を受けることができた。この特長ある材料の普及を目指し、今後とも品質管理技術と量産化技術の改良を進めて行く所存である。

また、ナノ粒子の合成技術や炭素との複合化技術を始め、本開発で培った技術をベースに、次世代正極材料の開発を進めて行く予定である。

参 考 文 献

- 1) 芳尾．ほか 編：リチウムイオン二次電池，日刊工業新聞社，(1996)，p. 179
- 2) 経済産業省機械統計：電池工業会 統計データ，電池工業会 HP.
- 3) 高見．ほか：安全，高出力性能に優れた急速充電電池「SciB™」の開発と製品化，電池技術 21，(2009)，p. 41
- 4) 北野．ほか：電気自動車用大形リチウムイオン電池「LEV50」とそのバッテリーモジュール「LEV50-4」の開発，GS YUASA Technical Report，5，1，(2008)，p. 21
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 小柴．ほか：新規カーボンコート法を用いた磷酸鉄リチウムの合成と充放電特性，電気化学会第76回大会講演要旨集，(2009)，P. 328

共同執筆者：橋本 聡司 濱中 義孝
浜崎 顕一

〔問い合わせ先〕

事業開発本部 LIB 事業室

TEL 03 - 5202 - 3984 阿部 一雄

成膜技術開発への取り組み

技術本部 宮 武 直 正

1. まえがき

三井造船で行っている成膜に関連した技術開発の位置づけを図1に示す。成膜技術の開発目的の一つは、既存の中核製品の差別化による高付加価値化である。これは当社の製品に成膜技術を応用することで差別化を図り、高い競争力を持つ製品にすることである。また、もう一つの目的は、成膜技術を用いた新規製品の開発であり、当社にこれまでなかった新たな製品を生み出し、半導体関連装置分野における事業を拡大することである。図1の当社100周年ビジョンにも、半導体関連装置を成長事業と位置付けている。成膜技術を応用した新規製品開発の方向性として二つある。一つは成膜した膜を用いた製品を作り出していくことであり、もう一つは成膜技術そのものを成膜装置として製品化することである。当社では既に半導体・液晶分野向けにフラットパネルディスプレイ(Flat Panel Display: FPD)用イオン注入装置、液晶検査装置及び FPD 用熱処理装置を商品化しており、新たに成膜装置をラインナップに加えることで、半導体・液晶関連装置事業を拡大させていく方針である。

このように、既存製品の競争力強化と新規製品の開発に対して成膜技術を活用しており、既存製品の競争力強化では、セラミックスのプラズマ溶射技術を活用したディーゼルエンジンの高付加価値化、新規製品の開発では、高純度 SiC セラミックスの成膜技術を活かしたダミーウエハなどの新しい製品の創出や電子サイクロトロン共鳴(Electron Cyclotron Resonance: ECR)プラズマ成膜技術及び原子層堆積(Atomic Layer Deposition: ALD)成膜技術を用いた成膜装置の製品化などを進めている。以下に、これらの成膜技術について紹介する。

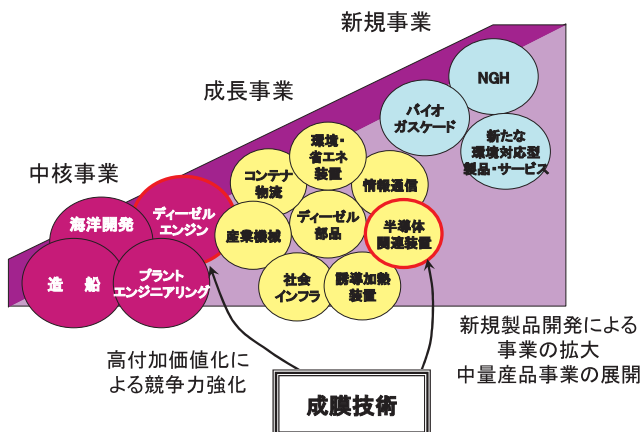


図1 三井造船 100 周年ビジョンにおける成膜技術の位置づけ

2. セラミックス溶射技術

当社の代表的中核製品の一つであるディーゼルエンジンの出力向上には、耐摩耗性に優れたピストンリング、シリンダライナが求められており、これを実現することでディーゼルエンジンを高付加価値化することができる。この実現方法として、ピストンリングやシリンダライナ全体を耐摩耗性に優れたセラミックスで作製する方法が考えられるが、船舶で使用するエンジンは大型であるため、全体をセラミックスで作製することは技術的に困難である。この対策として、金属の母材表面に耐摩耗性の高いセラミックスを減圧プラズマ溶射でコーティングする成膜技術を開発し、当社のディーゼルエンジンに適用している^{1),2)}。

2.1 セラミックス溶射技術の特長

図2にプラズマ溶射ガンの構造を示す。円筒状の陽極と先端が円すい状の陰極との間で放電が起こり、このエネルギーによってガスの原子が電離され、電子温度が10000を越えるプラズマ状態となる。プラズマ放電用ガスはガス導入管から供給され、高速でノズルから噴出する。成膜に用いる粉末状の原料は、供給管からガス流に乗せてプラズマの流れに投入される。原料の投入はガス流れと直角に近い角度でなされ、プラズマの中心部に原料が到達するように供給角度や速度を調整する。プラズマで加熱溶解され、加速された粒子は母材に衝突し、コーティング膜を形成する³⁾。

耐摩耗性改善のために使用した材料は、酸化クロムとモリブデンの複合材料である。溶射原料の製造工程で単に2種類の粉末を混合する方法ではなく、図3に示す溶射原料粉末の製造工程を開発した。まず、溶射原料を溶解して酸化クロムとモリブデンが微細に混合した鋳塊を作る。次にこれを粉

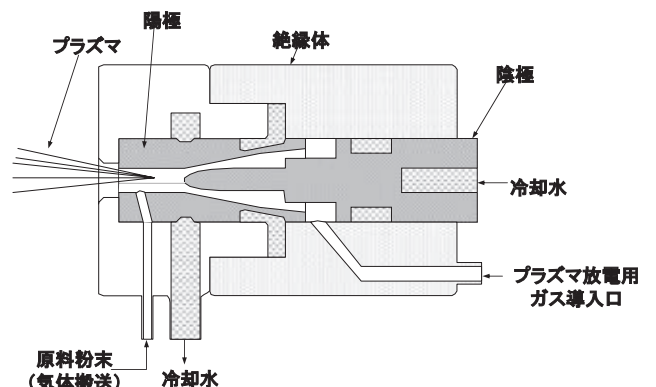
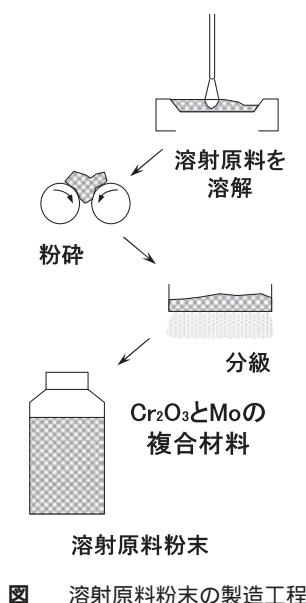


図2 プラズマ溶射ガンの構造



砕，分級することによって原料粉末とする．単に混合した場合は，各粒子は酸化クロム又はモリブデンのどちらかであるが，一度溶解し粉碎することで，原料粉末粒子は酸化クロムとモリブデンの複合材料となる．原料粉末はプラズマ流とほぼ直角に近い角度で投入されるため，質量の異なる粒子を投入すると，原料粒子の慣性とプラズマ流による加速度の違いによって粒子の飛行する軌跡が異なってくる．そのため，単に混合した場合は，粒度分布が同じでも質量が異なるため，粒子の飛行軌跡に差が発生し，溶射皮膜の組織にむらが生じる．これに対して，一度溶解し粉碎した粒子を使用する場合は各粒子の組成に差がないため，均質な溶射膜を形成できることが特長である³⁾．

耐摩耗性改善のために，溶射材料として酸化クロムとモリブデンの複合材料を使用しているが，母材の上に直接溶射すると，膨張差が原因でセラミックスが主体の被膜にクラックが入る．そこで，金属であるモリブデンを中間層として溶射することで，母材の伸縮に対応でき，表層の溶射皮膜にクラックが生じなくなる．また，線膨張係数の差も小さいため，表層の被膜に大きな応力が生じることもない²⁾．

2.2 ディーゼルエンジンへの適用

新しい部品の耐久性評価としては，長時間のエンジン試験が最も望ましい．長時間試験で発生する予期しない現象が，エンジンの耐久性に重大な影響を及ぼすこともあるからである．そこで，開発した材料を実機用のピストンリング，シリンダライナに溶射し，これを商用の発電用ディーゼルエンジンに装着して2年間の運転を行い，耐久性を評価した．試験に使用したディーゼルエンジンは発電用の定置型であり，全12シリンダの内，1シリンダに溶射部品を装着した．溶射を適用した部位は，シリンダライナ内面とピストンリング外周側面である．試験の結果，溶射ピストンリングと溶射シリンダライナの摩耗量は，鋳鉄部品と比較して3分の1以下であり，耐摩耗性が大幅に向上することが確認できた¹⁾．このセ

表1 CVD-SiC膜の不純物濃度

| 元素 | 不純物濃度 (ppm) |
|----|-------------|
| Na | <0.002 |
| K | <0.06 |
| Cr | 0.026 |
| Mn | <0.009 |
| Fe | 0.035 |
| Co | 0.0013 |
| Cu | <0.1 |
| Zn | <0.009 |
| Mo | <0.04 |
| Ag | <0.0008 |
| La | <0.0008 |
| Hf | 0.00032 |
| W | <0.004 |
| Au | <0.00009 |
| Sc | <0.00001 |

ラミックス溶射技術は，一部の船用ディーゼルエンジンで実用化されている．

高純度 SiC (炭化ケイ素) 成膜技術

当社では従来よりファインセラミックスの研究に着手しており，SiC 成膜技術の開発を行ってきた．開発した成膜法は気体から直接セラミックス膜を得るもので，化学蒸着法 (Chemical Vapor Deposition : CVD) と呼ばれるものである．CVD 法で合成された SiC 膜 (以下，CVD-SiC 膜) は不純物が ppb レベルの超高純度で，引張強度が 600 MPa と高強度であり，厚膜化が容易で，形状が複雑なものにも適用できるなど種々の優れた特長を有している．CVD-SiC 膜は基材中の不純物の拡散バリアとして働くばかりでなく，優れた耐食性を発揮するなど基材の性能を飛躍的に向上させるものである．当社では本 CVD 技術を単なる被膜技術としてだけでなく，膜単体で構造体を形成する製造技術についても開発を行っており，半導体分野において，SiC 製ダミーウエハという新たな市場を作り出すことに成功した^{4),5)}．

1 高純度 SiC 成膜の特長

CVD 法により SiC をつくる利点は，助剤を必要とせず高純度の SiC に近い緻密な組織が得られやすいということである．表1に，CVD-SiC 膜の不純物測定例を示す．Na, K 等のアルカリ金属，Fe 等の重金属などシリコンデバイス作製上問題となる不純物元素が極めて少ないのが特長である．また，CVD-SiC 膜は X 線回折プロファイルから結晶構造が型であり，ピークが非常にシャープであることから結晶性が高い膜である．膜単体にした CVD-SiC 膜は黄色透明であり，本来の 3C 構造の型 SiC 結晶の色を呈しており，電気的にも高抵抗である⁶⁾．

2 高純度 SiC 成膜技術の応用

CVD-SiC 膜の応用例として，ダミーウエハがある．ダミーウエハとは，半導体デバイスの製造プロセスにおいて製品と

ならないシリコンウエハのことで、その比率は50%近くあり、一般的には繰り返し使用ができない。例えば、シリコンウエハ上に窒化ケイ素膜などを形成するCVD工程において、炉内の均熱性を高めたり、ガス流れを調整したりする目的で、炉内の上下で15～20枚程度のシリコンウエハがダミーウエハとして使用されている。当社ではCVD-SiC膜の高純度、耐薬液性という特長を活かし、シリコンウエハの代替材料となり、再利用可能なSiC製のダミーウエハという新たな製品を生み出した。ダミーウエハの代替材料に求められる特性は、1)加熱されても不純物や異常な放出ガスを発生しない、2)薬液洗浄に耐え、繰り返し使用できる、3)膜との付着性がよく剥離しにくいことなどがあげられる。当社のCVD-SiC製ダミーウエハは、高純度、耐薬液性、膜との付着性などに優れており、現在多くのデバイスメーカーで使用されている⁷⁾。写真1に製品例を示す。

また、半導体拡散工程において、1000～1300の温度でシリコン基板にホウ素やリンを熱拡散する工程や拡散マスクとなる絶縁酸化物をSi基板上に形成する工程がある。これら拡散炉構成部材は、従来石英製品が用いられてきたが、ウエハサイズの大口径化に伴い、高強度なSiC製ウエハポートの使用が進んでいる。当社のCVD-SiC製ウエハポートは超高純度、高強度であるため拡散炉部材として適しており、デバイスメーカーからも高い評価を受けている⁴⁾。写真2に製品例を示す。

その他にも、CVD-SiC技術を様々な製品に応用している。例えば、コーティングとしては、シンクロトロン用ミラーや繊維質断熱材などがある。また、膜単体構造での応用例としては、オーディオ用スピーカ振動板、ピンセット、熱電対保護管、高温用構造部材などがある⁶⁾。このように、CVD-SiCは半導体分野をはじめ、様々な分野で応用されている。

4. ECR プラズマ成膜技術

当社では、ECR プラズマを利用した成膜装置の開発に取り組んでいる。マイクロ波の分岐結合や固体ソース型スパッタ技術を開発するなど装置を改善することで、半導体レーザ

の端面コートや磁気ヘッドのギャップ絶縁膜向けなどの成膜装置を製品化している。今後ともこのECR プラズマ技術を活かした応用先を研究し、新たな展開を図って行く。

4.1 ECR プラズマ成膜の特長

ECR プラズマ源の基本構造を図4に示す。円筒状のプラズマ室を真空中に排気し、その周囲に配置した磁気コイルに電流を流して図の上下方向に磁力線を発生させる。この状態でプラズマ室内にガスを導入し、マイクロ波を印加するとプラズマが発生し、プラズマは瞬時に連鎖的にプラズマ室全体に広がった後、成膜室に流れ出す。ECR プラズマ中の電子は磁力線に巻き付くようにらせん運動しながら移動し、イオンは遅れながらこれに引き寄せられ、プラズマ全体が試料台に流入する。基板に照射されるイオンのエネルギーは、20～30eV程度である。ECR プラズマ下で薄膜を形成した場合、成膜基板は低エネルギーかつ高密度のイオン照射を受け続けることになり、このイオンから得た適切なエネルギーによって高品質な薄膜が形成される。最も一般的な薄膜形成法であ



写真2 CVD-SiC製ウエハポート

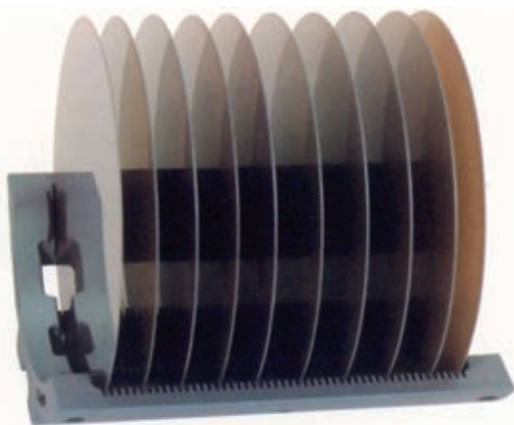


写真1 CVD-SiC製ダミーウエハ

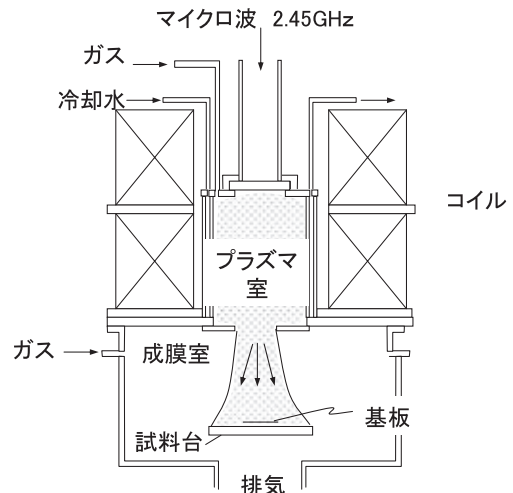


図4 ECR プラズマ源の基本構造

る真空蒸着法では、基板に飛来する粒子のエネルギーは熱エネルギーのみであるためエネルギーが小さく、基板上で十分な移動距離が得られないために、欠陥の多い薄膜になりやすい。また、スパッタリング法では、一部に数 100 eV 以上のエネルギーを持つ粒子があり、基板に損傷を与えてしまうことがある。これに対し ECR プラズマ成膜では、20 ~ 30 eV の適切なイオン照射を受けて薄膜が成長するため、基板上で十分に粒子が移動し、基板に飛来する粒子が安定な位置に留まることができる。このように ECR プラズマでは理想的な成膜環境となり、基板に損傷を与えることなく、緻密・平滑で高品質な薄膜の形成が可能である^{8),9)}。

図 5 に各種の ECR プラズマ成膜方式を示す。(a)の CVD 方式は、成膜室に原料ガスを、プラズマ生成室に O₂ などのガスを供給して成膜を行う方式である。また、(b)の固体ソース方式は、固体ターゲットからスパッタにより原料を供給しながら、酸素や窒素などを含む活性な ECR プラズマを用いて成膜を行う方式である。さらに、(c)のプラズマ酸化方式は、ECR プラズマを用いシリコン基板などの酸化を行う方式である。

4.2 ECR プラズマ成膜装置とその特性

写真 に当社で開発した固体ソース方式 ECR プラズマ成

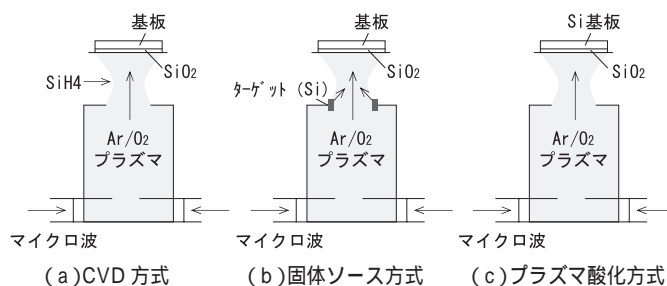


図 5 ECR プラズマ成膜の各種方式



写真 固体ソース方式 ECR プラズマ成膜装置

膜装置の外観を示す。本装置は半導体レーザの端面コートや磁気ヘッドのギャップ絶縁膜向けなどの成膜装置として使用されている。代表的な固体ソース方式 ECR 成膜装置の模式図を図 6 に示す。固体ソース方式の成膜装置では、ECR プラズマの周囲に円筒状のターゲットを配置した構造となる。一般のスパッタ成膜では、ターゲットに電圧を印加して初めてプラズマが発生するが、ECR の場合、磁場とマイクロ波を供給するだけで ECR 放電が始まり、同数のイオンと電子が発生する。この状態でターゲットに電圧を印加すると、プラズマ中のイオンが電場で加速され、ターゲットに入射し、ターゲットの金属粒子をスパッタして基板上に薄膜を形成する。放電ガスとして Ar のほかに O₂ や N₂ を導入すると、成膜基板上の金属が酸化または窒化されて化合物薄膜となる。ECR プラズマの活性度が高いため、基板を加熱することなく金属酸化物、窒化物を形成できるという大きな特長を有する^{8)~11)}。

酸化膜を成膜する場合、金属ターゲットの表面が酸化した状態で材料を供給するモード(オキサイドモード)とターゲット表面からは金属の状態を供給して基板表面で酸化させるモード(メタルモード)がある。図 7 に酸素流量に対する Al₂O₃ の成膜速度と屈折率の関係を示す。酸素流量が多いオキサイドモードの場合は、ターゲット表面が酸化されてスパッタ効率が低くなり、堆積速度は遅くなる。一方、酸素流量を減らしていくと、あるところで堆積速度が大幅に向上しメタルモードの状態になるが、オキサイドモードと同様な屈折率を有する Al₂O₃ 膜を成膜できる。ECR プラズマ成膜では、このメタルモードを安定に使用することが可能であり、Al₂O₃ ターゲットを用いたスパッタに比べ、堆積速度が速く実用的な成膜が可能である^{10),12),13)}。

5. ALD 成膜技術

近年、半導体分野で、新たに ALD という成膜技術がトランジスタの絶縁膜やキャパシタ膜の成膜に応用され始めている。半導体素子向けには既に多くの装置メーカーが参入し、ALD 成膜技術の製品化が進められている。一方、当社の特長は大型の装置であり、開発当初から大型基板向け

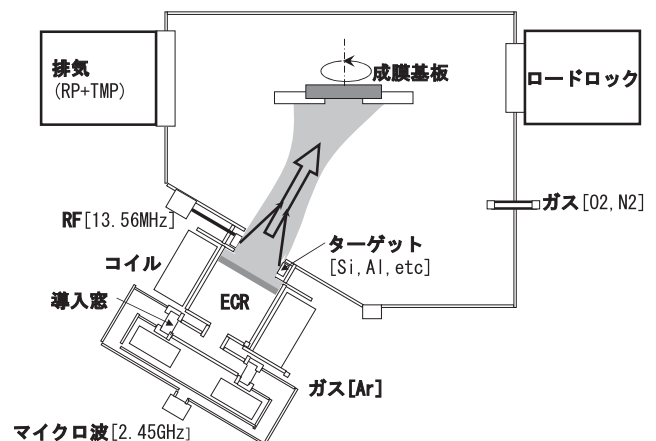


図 6 固体ソース方式 ECR プラズマ成膜装置の模式図

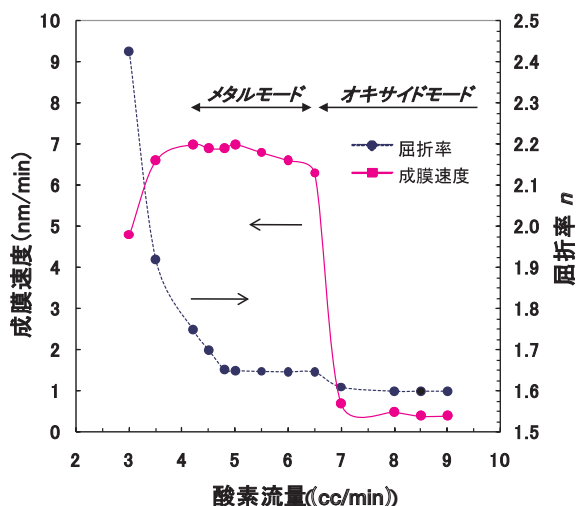


図7 固体ソース方式 ECR プラズマ成膜装置における Al₂O₃ 膜の成膜特性



写真4 熱 ALD 成膜装置

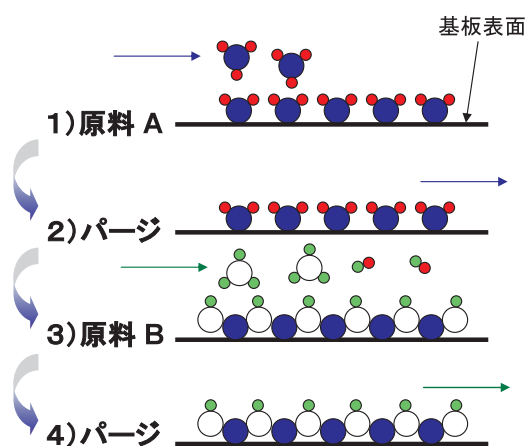


図8 ALD の成膜メカニズム

に ALD 成膜技術の開発を進めてきた。現在、開発機として 370 mm x 470 mm ガラス基板対応の装置を保有し、装置開発や顧客向けのデモ成膜を行っている。半導体以外の様々な分野から関心が寄せられており、用途に応じた成膜装置の製品化を進めている。

5.1 ALD プロセスの特長

ALD 成膜法は他の成膜方法とは異なり、原子層単位で薄膜を形成していく技術である。図8にALDの成膜メカニズムを示す。2種類の反応物を原料として膜を作製する場合には、1)形成しようとする薄膜の構成元素を含有する第1反応物を基板へ供給し、化学吸着させる、2)過剰な第1反応物及び副生成物を排気する、3)第2反応物を基板へ供給し、基板に吸着した第1反応物と反応させる、4)過剰な第2反応物及び副生成物を排気する。以上の一連の動作を1サイクルとし、サイクル数によって膜厚を制御することができる。反応過程において、表面反応の自己停止機構が作用するため、5.2で述べるように、膜厚制御性、膜厚均一性、段差被覆性

に優れた膜を作製することが可能となる¹⁴⁾。

ALD プロセスは、CVD と同様に基板表面でガスを反応させ、化学反応により薄膜を形成するものであり、熱 ALD 方式とプラズマ ALD 方式がある。熱 ALD 方式は、装置の簡略化、低コスト化などが可能であるが、使用する反応ガスによっては反応活性に乏しく、プラズマ ALD 方式と比較し、成膜速度が遅いことや緻密な膜ができにくい欠点がある。プラズマ ALD 方式は熱 ALD 方式と比較して、装置構成の複雑化や高コスト化などの欠点もあるが、成膜速度、低温での成膜、膜の緻密化などの特長がある。100℃以下のような低温成膜を要求される有機 EL ディスプレイ向けの薄膜形成においては、プラズマ ALD 方式は有効な手段である^{14) - 16)}。

5.2 ALD 成膜装置とその特性

5.2.1 ALD 成膜装置

写真4及び写真5に、当社で開発中の 370 mm x 470 mm ガラス基板対応の ALD 成膜装置の外観を示す。写真4は熱 ALD 成膜装置で、写真5はプラズマ ALD 成膜装置である。表2に各方式の成膜装置の仕様を示す。各方式とも、成膜室とロードロック室から構成されている。成膜を行うガラス基板は、プラズマ ALD 成膜装置ではホットプレート型ヒータの上に基板を置き、450℃まで加熱することができる。また、熱 ALD 成膜装置ではガラス基板を上下に挟むようにプレート型ヒータを置き、基板を加熱する。現在の熱 ALD 成膜装置は枚様方式で、処理基板枚数は1枚である。しかし、バッチ方式の開発も進めており、将来的にはバッチ方式での成膜が可能な装置をラインナップする予定である。図9にプラズマ ALD 成膜装置の模式図を示す。原料ガスは上部電極の端から供給し、成膜室に供給されたガスはガラス基板上を通過して排気される。この間に第1の反応供給物は基板上に吸着する。次に第2の反応供給物を供給し、基板上に吸着している第1反応供給物と反応させるが、このときに上部電極と下部電極との間に高周波を印加しプラズマを発生させる。これにより第2反応供給物は活性化し、第1反応供給物との反応が促進し、プラズマを用いないときと比べ、緻密な膜が形成でき、またより低温での膜形成も可能となる。

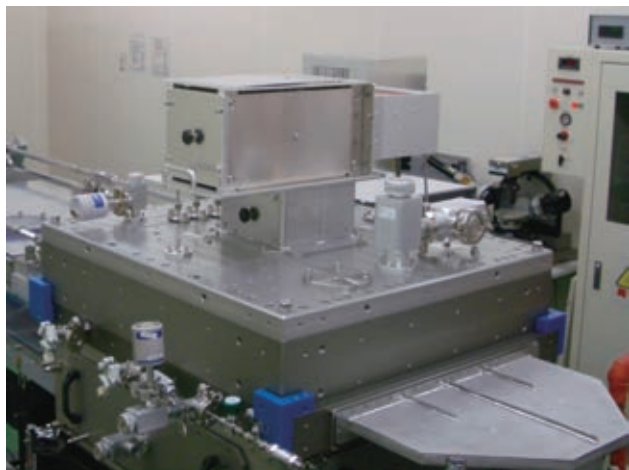


写真5 プラズマ ALD 成膜装置

表2 ALD 成膜装置の仕様

| 項目 | 熱 ALD 装置 | プラズマ ALD 装置 |
|-------|---|---|
| 装置構成 | 成膜室 1, ロードロック室 1 | 成膜室 1, ロードロック室 1 |
| 成膜室 | 最大基板サイズ: 400 mm x 500 mm 基板加熱: 最大 400 | 最大基板サイズ: 400 mm x 500 mm 基板加熱: 最大 400 |
| 成膜材料 | SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , ZnO | SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , ZnO |
| 成膜方式 | 熱 ALD | プラズマ ALD |
| プラズマ源 | - | 容量結合型 13.56 MHz |
| 真空排気系 | 成膜室: ドライポンプ2基 ロードロック室: ドライポンプ1基 | 成膜室: ドライポンプ2基 ロードロック室: ドライポンプ1基 |

5.2.2 膜厚制御性

図 10 に、プラズマ ALD 成膜装置で Al₂O₃ 膜を成膜した場合のサイクル数と膜厚の関係を示す。サイクル数と膜厚の関係は原点を通る直線であり、成膜速度はおよそ 0.10 nm/cycle である。これはサイクル数を決定することにより、膜厚を正確に制御できることを示しており、優れた膜厚制御性を有することが分かる¹⁴⁾。

5.2. 膜厚均一性

成膜装置の仕様上、膜厚の分布は非常に重要な指標であり、特に微細な素子になると、膜厚の不均一が素子特性に影響を与えることになる。図 11 に、プラズマ ALD 成膜装置で 370 mm x 470 mm ガラス基板上に成膜した Al₂O₃ 膜の膜厚分布を示す。膜厚の分布は ± 5% 以下であり、当社の ALD 技術が、大面積成膜が要求されるディスプレイ等へ適用できることを確認できた¹⁷⁾。

(4) 段差被覆性

半導体やディスプレイ分野などでは素子の微細化や複雑化が進み、凹凸のある面に、均一に膜を形成する技術が求められている。段差被覆性評価のためにシリコンウエハの上に溝幅 100 nm、深さ 200 nm 以上のトレンチ構造をポリシリコンで作製したウエハを用いて、その上に Al₂O₃ の ALD 膜を成膜

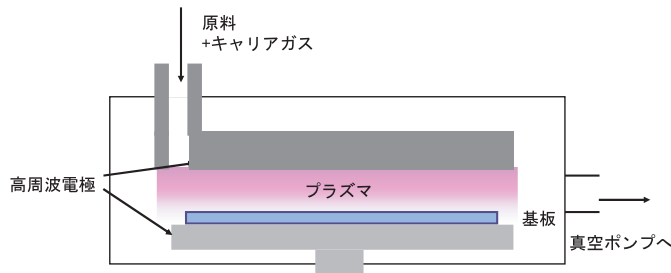


図9 プラズマ ALD 成膜装置の模式図

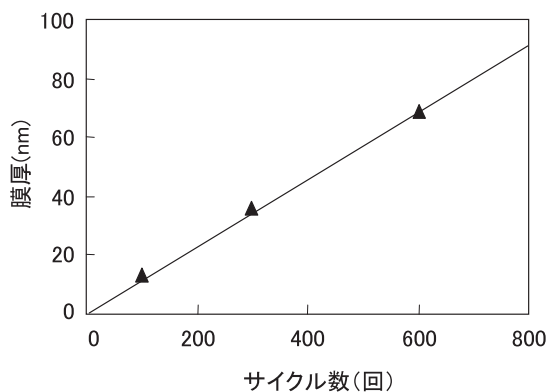


図10 ALD 成膜法のサイクル数と膜厚の関係 (Al₂O₃ 膜)

した。写真 6 にプラズマ ALD 成膜装置で成膜した ALD 膜断面の透過電子顕微鏡 (TEM) 像を示す。ウエハの表面、溝の底部、側部ともに同じ膜厚であり、ALD 成膜法は段差被覆性に優れているのが分かる^{17), 18)}。

6. あとがき

プラズマ溶射技術そのものは古くからの技術であるが、使用原料や手法を対象製品に適合するように工夫することで、当社の主力製品であるディーゼルエンジンに応用できた。膜の厚さは 0.5 mm 以下であり、シリンダー内径が 50 cm を越える大型ディーゼルエンジンから見れば極めて薄い膜が、ディーゼルエンジンの主要部品の耐久性を大きく向上させており、成膜技術の重要性を改めて認識させられる事例と言える。

また、高純度 SiC 成膜技術は当社で開発した手法であり、その成膜技術を用いて様々な製品を生み出している。中でも CDV-SiC 製ダミーウエハは無駄になるシリコンウエハを低減することができ、大きな経済的効果だけでなく環境にも配慮された技術である。

ECR プラズマ成膜技術は実用化が困難であったが、独自の工夫を加えることで、半導体レーザや磁気ヘッドなどの分野で応用されるようになった。今後はガラス基板やプラスチック基板上に高品質膜を形成する展開が想定され、低温で高品質な膜形成が可能な ECR プラズマ成膜技術は幅広い利用が期待できる。

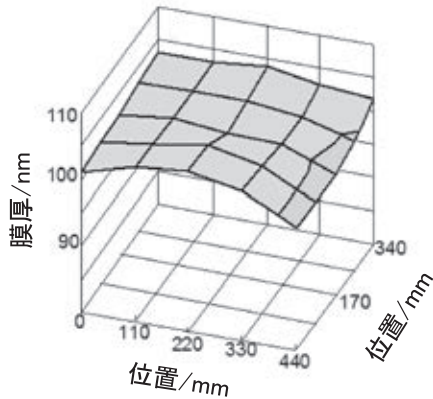


図 11 ALD 成膜法の膜厚分布 (Al₂O₃ 膜)

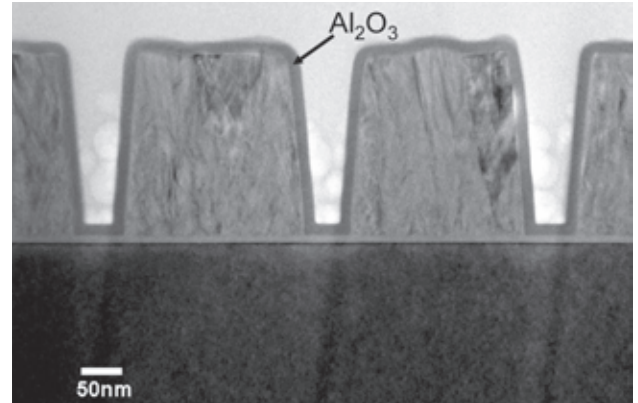


写真 6 ALD 膜断面の TEM 像 (Al₂O₃ 膜)

ALD 成膜技術は 30 年以上も前に考え出された技術ではあるが、注目されるようになったのはここ数年のことである。半導体素子などの微細化が進み、ALD 成膜法の特長である膜厚制御性及び段差被覆性が注目されるようになった。主に半導体分野での実用化が進められているが、FPD や太陽電池などの大型基板対応が必要な分野でも注目され始めており、当社では ALD 成膜装置の大型化へ向けた開発を進めている。

このように、当社は耐摩耗性セラミックス膜製造技術、高純度 SiC 成膜技術、ECR プラズマ成膜技術、ALD 成膜技術など多様な成膜技術を有している。今後は当社の成膜技術の特長を活かして、顧客のニーズに応えられる製品を開発していく。

参 考 文 献

- 1) 田中．ほか：セラミックス系複合材料を溶射したピストンリング、シリンダライナの開発，三井造船技報，160(1997)，p. 20
- 2) 田野倉：特集 溶射は使える！，日経メカニカル，439(1994)，p. 22
- 3) 田中．ほか：セラミックスを溶射したピストンリングシリンダライナの大型ディーゼル機関への適用，トライボロジスト，37，7(1992)，p. 556
- 4) 茅根：高純度炭化けい素セラミックスコーティング製品，三井造船技報，132(1987)，p. 50
- 5) 茅根．ほか：シリコンの科学，(1996)，p. 890，リアライズ社
- 6) 茅根：化学蒸着法による超高純度炭化けい素セラミックス単体製品，三井造船技報，136(1989)，p. 49
- 7) 茅根．ほか：半導体製造に重用される CVD 炭化ケイ素製ダミーウエハ，月刊「ニューセラミックス」，10，5(1997)，p. 11

- 8) 天沢．ほか：ECR プラズマを用いた高品質薄膜形成，精密工学会誌，66，4(2000)，p. 511
- 9) 松尾．ほか：ECR プラズマプロセス，半導体研究 28，p. 223，工業調査会
- 10) 天沢．ほか：ECR プラズマによる光学薄膜，光技術コンタクト，42，10(2004)，p. 17
- 11) 天沢．ほか：ECR プラズマの光半導体プロセスへの応用，精密工学会誌，73，9(2007)，p. 975
- 12) Y. Jin, et al. : Using electron cyclotron resonance sputtering in the deposition of ultrathin Al₂O₃ gate dielectrics, J. Vac. Sci. Technol., B21, 3(2003) p. 942
- 13) T. Amazawa, et al. : Ultrathin oxide films deposited using electron cyclotron resonance sputter, J. Vac. Sci. Technol., B17, 5(1999) p. 2222
- 14) 鷲尾．ほか：大面積 ALD 成膜装置の開発，三井造船技報，194(2008)，p. 7
- 15) M. D. Groner, et al.: Gas diffusion barriers on polymers using Al₂O₃ atomic layer deposition, Appl. Phys. Lett., 88(2006) p. 051907
- 16) T. M. Mayer, et al. : Atomic-layer deposition of wear-resistant coatings for microelectromechanical devices, Appl. Phys. Lett., 82(2003) p. 2883
- 17) 宮武．ほか：FPD 用ゲート絶縁膜成膜装置の開発(第 2 報)，三井造船技報，189(2006)，p. 6
- 18) 村田．ほか：FPD 用ゲート絶縁膜成膜装置の開発 膜質の検証，三井造船技報，186(2005)，p. 32

〔問い合わせ先〕

技術本部 玉野技術開発センター
TEL 0863 - 23 - 3001 宮武 直正

環境・エネルギー製品を支えるバイオ技術

技術本部 関岡 一 栄

1. まえがき

近年、バイオ技術は医療分野・食品分野のみならず環境・エネルギー分野への適用が進み、研究開発が盛んに行われている。

環境分野では、土壌浄化、水処理、メタン発酵などへの微生物活用技術が既に実用化されており、更なる改良研究が進められている。特に、これらの微生物活用技術の中で、これまで把握できなかった微生物を特定・分離し、その機能や作用機構を明らかにする研究は大きな進歩を遂げている。

一方、エネルギー分野ではバイオマス利用が進められる中で、燃料用エタノール製造に酵母や細菌の代謝機能を活用した例がある。そのほかにも、微生物のエネルギー獲得の仕組みである酸化還元反応や電子の授受機構を燃料電池やそれによる発電へ応用する研究が行われており、その適用範囲は広がりを見せている。

三井造船においても、バイオ技術を活用し、環境・エネルギー分野の製品群の高度化や新製品開発に取り組んでいる。

本報では、当社におけるこれら製品群を支えるバイオ技術の一端を紹介する。

2. 環境分野におけるバイオ技術

2.1 複合微生物系の活用

2005年3月に告示された「微生物によるバイオレメディエーション利用指針」によれば、複合微生物系とは「複数の種類の微生物が混在している状態のもの」と定義づけられ、浄化機能を果たす主役として機能している。このほかにも、複合微生物系は水処理やメタン発酵などにおいて、古くから環境分野で重要な役割を果たしている。

微生物の利用は、コッホが1881年から着手した結核菌の研究で確立した純粋培養の技法から発展してきたと言える¹⁾。純粋培養とは、ある一定条件の培地に生育する微生物をコロニーとして分離するもので、この技法で分離された微生物による生産物が、薬品や食品産業においてなくてはならない役割を果たしている。しかし、培養が可能な微生物は、自然界に生息する微生物の1%以下と言われており、いまだに99%以上の微生物は、分離や培養が困難と考えられている²⁾。このような分離や培養が困難な微生物を含む集合体を活用することは、古くから廃水処理分野で行われている。

下水処理は、1855年頃にイギリスで行われた例があるが、これは主に薬品を用いた沈殿処理であった。その後、1891年頃に米国ローレンス研究所で散水ろ床法が開発され、活性汚泥法へと引き継がれ、実用的な生物処理法として普及していった³⁾。

活性汚泥法の処理槽の操作は、経験的に導かれた滞留時間

や溶存酸素濃度などの因子に基づいた方法が中心であり、生物学的アプローチとしては、活性汚泥中に観察された原生動物を中心とする生物構造の変遷を指標として処理結果との関係を論じることが行われてきた。また、細菌に関しては、活性汚泥からの分離について数多くの報告があり、リン蓄積機能や脱硝機能など具体的な機能に直結した研究も進められてきた。一方、分離・培養できない微生物を含む複合微生物系としての検討は、遺伝子解析技法の適用や微生物分離技法の発達により、10年程前から始まったばかりであるが、このような分析・解析技法を活用して複合微生物系の作用機構を解き明かし、微生物構造を制御した実用的な利用に向けての高度化が試みられている。

2.2 複合微生物系の解析技術

複合微生物系の解析技術として、当社が取り組んだキノプロファイル法及び末端蛍光修飾制限酵素断片多型性(Terminal Restriction Fragment Length Polymorphism: T-RFLP)法、並びにこれらにより得られたデータの解析を紹介する。

2.2.1 キノンとキノプロファイル法^{4)~6)}

イソプレノイドキノン(以下、キノン)は、代表的な天然テルペノイド脂質であり、呼吸鎖や光合成電子伝達鎖の必須成分として生物界に広く分布している。Jeffriesらや山田らによるキノンの細菌分類への適用が契機となって以来、化学分類学的見地からのキノン研究が行われ、この菌体成分が細菌、酵母、カビなど微生物全般の分類・同定に利用できることが分かるようになった。特に、属レベルでの分類に有用な指標として利用されている。キノンには、主にユビキノン(UQ)、メナキノン(MK)、プラストキノン、ビタミンK(フィロキノン)などがあり、ユビキノンは好気性呼吸、メナキノンは嫌気性呼吸に使われている。個々の微生物は、特定のキノンを保有することから、複合微生物系ではキノン分子種の数とその存在比により複合微生物系の微生物構造を定義づけることができる。キノン分子種とその存在比で微生物構造を表すことをキノプロファイル法と言い、生物学的技法による微生物分析のように手間がかからず、簡便であることから利用されている。

キノプロファイル法で微生物の特徴を表す手法としては、以下に示すものも含めて種々報告されている。

キノンの数(n)、種類

キノン分子種の多様性(DQ)と分布の均一性(EQ)

優占キノン種とその存在比

ユビキノンとメナキノンとのモル比(UQ/MK)

キノン種ごとの存在比によるD値解析(D)

当社では特に、及び を適用した複合微生物系のモニタ

リング技術開発に取り組んだ。

2.2.2 T-RFLP 法⁷⁾

細菌の 16SrDNA を対象とした T-RFLP 法の概略を図 1 に示す。16SrDNA は、地球上に現存するすべての生物細胞内のたんぱく質合成の場となる細胞小器官リボソーム中に含まれる RNA の遺伝子である。原核生物では 70S のリボソームは、50S と 30S のサブユニットで構成されており、16SrDNA は、30S サブユニットに含まれる RNA に相当する DNA を指す。16SrDNA は、微生物分類の項目の一つであり、微生物を同定する指標として広く利用されている。当社は、土壌中に生息する細菌群からなる複合微生物系を対象に、その微生物構造を把握するため、全細菌の 16SrDNA をターゲットとするユニバーサルプライマで PCR (Polymerase Chain Reaction) 増幅させ、得られた PCR 産物の解析を行った。特に、T-RFLP 法の特徴は、PCR 増幅時に蛍光標識した 5' 末端側プライマを使用することにある。得られた PCR 産物を特定の制限酵素で断片化すると、微生物の由来に応じて断片化物の塩基数が異なる。この断片化物のうち、蛍光標識された 5' 末端側断片(以下、5' 断片)の分布とその比率を解析し、対象サンプル中の微生物構造を捉えることができる⁷⁾。

2.2. 非類似度解析法⁶⁾

キノプロファイル法及び T-RFLP 法で得られたデータの解析技法として、平石らが報告したオーバーラップ法による数量解析を適用した。この技法では、異なる環境に生息する複合微生物系試料 *i* 及び *j* の微生物構造の違いが非類似度 (D 値) の大きさとして、式(1)で表される。

$$D(i, j) = 1/2 \sum_{k=1}^p |x_{ki} - x_{kj}| \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで x_{ki} , x_{kj} は、それぞれの *i* 及び *j* におけるキノ分子種 *k* あるいは 5' 断片の含有率を表す。ただし、式(1)において

$$x_{ki} = x_{kj} = 100 \quad \dots\dots\dots (2)$$

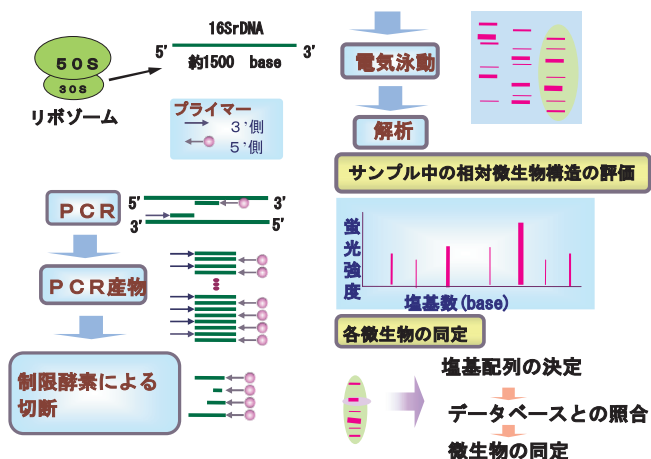


図 1 DNA による微生物モニタリング (T-RFLP 法)

となる。各キノ分子種の含有率 (mol%) あるいは塩基数の同じ 5' 断片の含有率 (%) が両試料間で全く一致しない場合、D 値は 100% となり、逆に完全に一致する場合、D 値は 0% となる⁵⁾。D 値は試料間のプロファイルの違いであり、微生物構造の違いを表すパラメータとして用いることができる。得られた D 値に、最短距離法 (各要素をそれぞれクラスターとみなし、距離の近い近接クラスターを徐々に統合することでクラスターリングを行う技法) を適用すれば、複合微生物系における微生物構造の違いを定量的に可視化することができる。

2. 当社での適用例

2.1 汚染土壌浄化への適用

(1) ダイオキシン分解コンポスト⁸⁾

当社は、比較的低濃度の有機塩素系化合物で汚染された土壌や焼却灰などに含まれる有機塩素系化合物の分解・除去に適した、ダイオキシン分解コンポストを用いた浄化方法を開発した⁹⁾¹⁰⁾

微生物によるダイオキシン生分解機構としては、芳香族化合物の分解酵素であるジオキシゲナーゼ系酵素を用いたダイオキシン骨格の酸化反応による分解、多塩素化ダイオキシンの還元反応による脱塩素・低分子化及び担子菌などで知られるリグニンペルオキシダーゼによる分解の三つが挙げられる。これまでに高濃度ダイオキシン汚染土壌、湖沼底土、コンポスト化過程などにおけるダイオキシンの微生物分解の特性と分解機構については、環境中にポリ塩化ジベンゾパラジオキシン / ポリ塩化ジベンゾフラン (PCDD/Fs) の脱塩素化を起こす嫌気性細菌と低塩素化合物の分解を行う好気性細菌が共存していることが報告されている¹¹⁾。これらの知見から、生物学的ダイオキシン分解技術開発のアプローチとして、脱塩素化を行う嫌気性細菌と酸化的分解・無機化を行う好気性細菌を組み合わせた複合微生物系による分解処理が有望であると考へた。

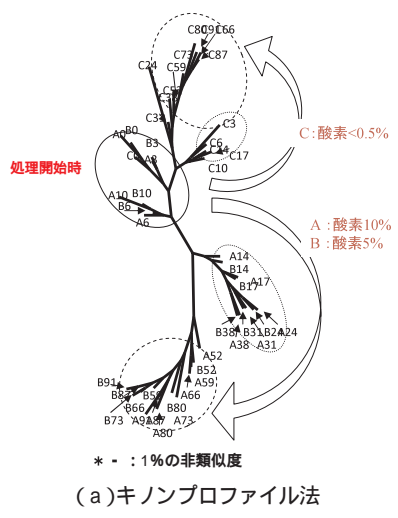
(2) モニタリング結果

ダイオキシンを含有した土壌に木チップと有機物を混合して馴養を継続すると、ダイオキシン分解能を有するコンポストが製造できる。このコンポストに含まれる複合微生物系の特徴の一例は、

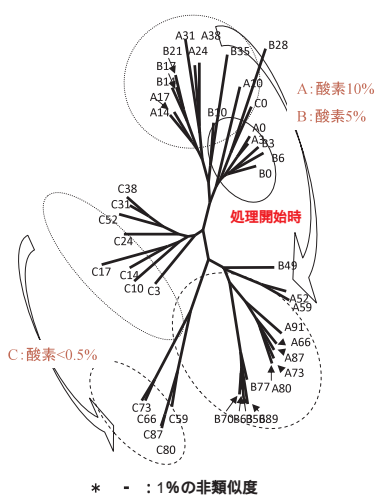
メナキノ (MK) 含有微生物が 70% 以上を占める

MK-7, MK-8 (H2), MK-8 (H4), MK-9 (H2) のいずれかの分子種 2 種類の組み合わせが全体の 40% 以上を占めることなどである。このようにキノプロファイル法は、複合微生物系を質的、量的に示す指標の一つとして利用できる。

更に、ダイオキシン分解コンポストの複合微生物系に関して、気相酸素濃度の違いによる微生物構造の変化を把握するために、キノプロファイル法及び T-RFLP 法に基づき算出した D 値を用い、最短距離法を適用して図 2 に示すデンドログラムを得た。ここで、図中の線の長さは 1% の非類似度を表す。微生物構造が類似している場合は、近隣にクラスターを形成し、D 値が低いことを表す。酸素濃度にかかわらず、処理開始時は A0, B0 及び C0 が接近しており、D 値も低く、コンポスト複合微生物系の微生物構造は非常によく類似したものであることを示す。一方、時間を経るごとに酸素



(a) キノンプロファイル法



(b) T-RFLP 法

図 2 気相酸素濃度条件の違いによる微生物構造のデンドログラム
 処理条件：気相酸素濃度 A10%，B5%，C<0.5%。図中のローマ字は処理条件を表す。また、数値は処理経過日数(d)を表す。

濃度の違いに応じて D 値は高くなり、酸素濃度 0.5% 未満の条件下における微生物構造は、酸素濃度 5% 及び 10% の条件下の微生物構造と比べて、大きく異なることを数値化、視覚化して捉えることができた。また、酸素濃度 0.5% 未満の場合、ダイオキシン分解速度定数は大きく、この微生物構造の違いがダイオキシン分解速度に関係していることが示唆された(図)。

なお、ダイオキシン分解速度定数は式(3)で与えられる。

$$k_{DXN} = -dC_{DXN}/dt/C_{DXN} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

C_{DXN} ：ダイオキシン類総濃度(pg/g - 乾土)

k_{DXN} ：ダイオキシン類分解速度定数(d⁻¹)

である。

キノプロファイル法及び T-RFLP 法の解析結果は、いずれも同じ傾向を示し、いずれの技法においても、複合微生物

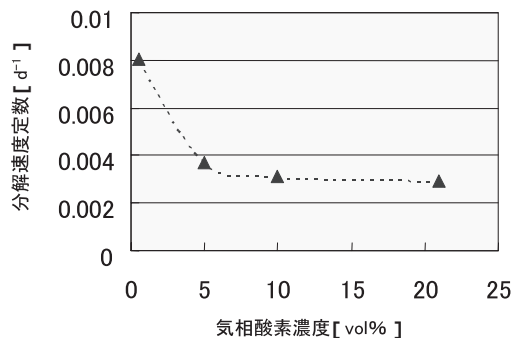


図 気相酸素濃度条件によるダイオキシン分解速度定数

表 1 下水処理施設の処理方式と地域別サンプル数

| 処理方式 | 北海道 | 関東 | 九州 | 計 |
|--------------------|-----|----|----|----|
| 標準活性汚泥法(標準法) | 2 | 2 | 2 | 6 |
| 嫌気無酸素好気法(A2O法) | - | 1 | - | 1 |
| オキシデーションディッチ法(OD法) | 2 | 3 | 2 | 7 |
| 膜分離活性汚泥法*(膜分離法) | - | 1 | - | 1 |
| 計 | 4 | 6 | 4 | 14 |

標準法, OD 法, 膜分離法は各施設について四季各 1 回, 計 4 回採取。その他は夏と冬の 2 回採取。

*は実験施設, 表示のないものは実処理施設から採取した活性汚泥サンプル

物系の微生物構造の変遷と処理条件による微生物構造の変化の違いを示すことが確認された。

2.2 下水処理への適用

活性汚泥法による下水処理は、複合微生物系を利用した実用技術の一つであり、その微生物構造を解析した事例を紹介する。

(1) 下水処理施設の汚泥調査

複合微生物系である活性汚泥の処理場、処理方式及び地域差の実態を微生物構造の側面から把握するために、2003 年 2 月から 12 月にかけて地方共同法人 日本下水道事業団と共同で国内各地の下水処理施設を対象に調査を行った。調査対象処理施設の処理方式と地域を表 1 に示し、その処理条件を表 2 に示す。

(2) モニタリング結果

採取した全活性汚泥サンプルのキノプロファイルの D 値をデンドログラムとして示した結果を図 4 に示す。

この結果より、気節変動よりも処理方式でクラスタを形成する傾向が示された。個々のキノ割合をみると標準法ではユビキノ(UQ)の占める割合が高く、OD 法はメナキノ(MK)の占める割合が高い傾向を示した。一般的に、OD 法は標準法より汚泥滞留時間が長く、処理槽内の単位活性汚泥量に対する廃水中の処理有機物量を意味する BOD-SS 負荷が低い。また、BOD-SS 負荷の低い場合、MK/UQ は高くなる傾向があることが知られている。このことは図 5 に示す解析結果からも確認でき、SRT の短い標準法は MK/UQ 比が低く、SRT の長い OD 法はこの比が高くなっている。

また、T-RFLP 法の非類似度に基づくデンドログラムでも、同一処理施設では季節に関係なくクラスタを形成しており、微生物構造は、処理方式や廃水性状により大きく影響を受けることが分かった。

表2 下水処理施設の活性汚泥濃度と処理条件

| 処理方式 | MLSS (mg/ℓ) | | MLVSS (mg/ℓ) | |
|-------|-------------|--------|--------------|-------|
| | 最少 | 最大 | 最少 | 最大 |
| 標準法 | 872 | 1 770 | 722 | 1 480 |
| OD 法 | 1 550 | 4 120 | 1 240 | 3 440 |
| A2O 法 | 1 540 | 1 800 | 1 260 | 1 470 |
| 膜分離法* | 8 210 | 10 500 | 6 420 | 7 880 |

| 処理方式 | HRT (h) | | SRT (d) | |
|-------|---------|------|---------|---------|
| | 最少 | 最大 | 最少 | 最大 |
| 標準法 | 6.0 | 24.0 | 3.1 | 7.3 |
| OD 法 | 21.0 | 67.0 | 14.0 | 118.0 |
| A2O 法 | 10.0 | 11.0 | 8.4 | 13.0 |
| 膜分離法* | 15.0 | 33.0 | 251.0 | 1 297.0 |

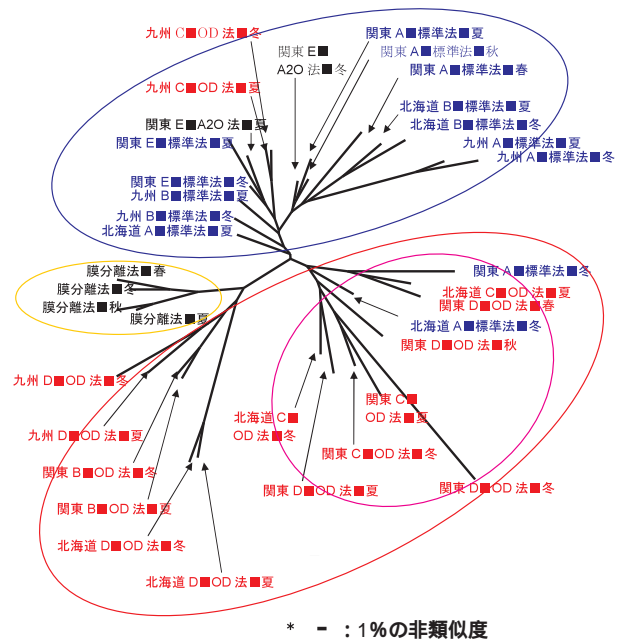
* は実験施設、表示のないものは実処理施設から採取した活性汚泥サンプル

MLSS : 活性汚泥浮遊物質量 (Mixed Liquor Suspended Solids)

MLVSS : 活性汚泥有機性浮遊物質量 (Mixed Liquor Volatile Suspended Solids)

HRT : 水理学的滞留時間 (Hydraulic Retention Time)

SRT : 汚泥滞留時間 (Sludge Retention Time)



** サンプルの名称は順に地域、処理方式、季節を示す。

図4 下水処理施設から採取した活性汚泥のキノプロファイル法によるD値デンドログラム

2.4 今後の課題

キノプロファイル法や T-RFLP 法により、処理条件や処理方式の違いが複合微生物系の微生物構造に影響を与えることが分かった。しかし、微生物構造の詳細な把握、個々の構成微生物の相互作用や処理との関連究明はこれからの課題である。

最近、複合微生物系のモニタリングでは「メタゲノム解析」と呼ばれる技法が報告され、ヒトの腸内細菌の研究などで大きな成果を上げている。この技法は単一菌種の分離や培養過程を経ずに、微生物の集団から直接そのゲノム DNA を調製し、複合微生物系をそのままゲノムシーケンシングする新しい技法である。このシーケンス情報を解析する技法も多く提唱されており、複合微生物系の全体的な解析が可能となってきた¹²⁾。当社としても新たな技法を取り入れ、複合微生物系の微生物構造に迫り、環境分野における新しいソリューションを提供していきたいと考えている。

エネルギー分野におけるバイオ技術

バイオマスからのエタノール生産には、酵母や細菌を利用する方法がよく知られている。当社においても、高い生産性を有し、経済性に優れたエタノール発酵プロセスを目指して、酵母や発酵プロセスの開発に取り組んできている。更に、糖質原料に限定されず、多種多様なバイオマスを原料とできるエタノール生産プロセスを目指して一酸化炭素、二酸化炭素、水素の合成ガスからエタノールを生成できる微生物の利用技術開発にも取り組んでいる。

ここでは、当社が保有する凝集性酵母を適用した連続式エタノール発酵プロセスと九州大学と共同で分離した合成ガスからエタノールを生産できる細菌の研究開発事例について紹介する。

1 連続式エタノール発酵プロセス¹⁾

当社は、凝集性酵母 AM12 を用いたでんぷん質系バイオ

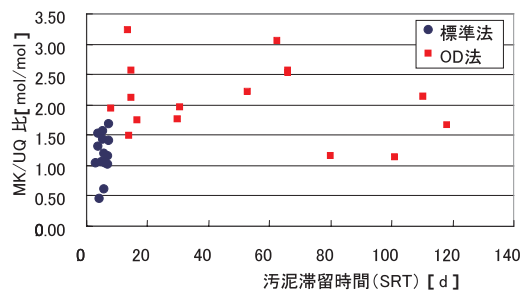


図5 下水処理施設から採取した活性汚泥中に含まれるMK/UQ含有モル比と汚泥滞留時間の関係

マスからの連続式エタノール発酵プロセスを開発した。本プロセスの特長は、AM12の優れた凝集沈降性を活用し、従来の高コストな遠心分離機に代わって、凝集沈殿槽を菌体濃縮工程に採用することで設備のコンパクト化やランニングコストの低減を図ることができる。

1.1 エタノール発酵プロセスの課題

エタノール発酵プロセスは、回分式と連続式に大別されるが、主流は回分式である。これは、連続式では長期連続運転下で雑菌汚染や微生物活性の低下などのリスクが大きいとの判断による。一方、連続式は、連続運転による生産性向上や運転人員の削減、あるいは製品品質の一定化などの利点がある。

このため、連続式のリスクを抑止できれば、優れたエタノール発酵プロセスを提案できる。

1.2 AM12の基本性能

当社が保有する凝集性酵母 AM12 (写真1)は以下の特長を有している。

(1) 凝集沈降性

AM12を含むエタノール発酵液の攪拌を停止し、静置する

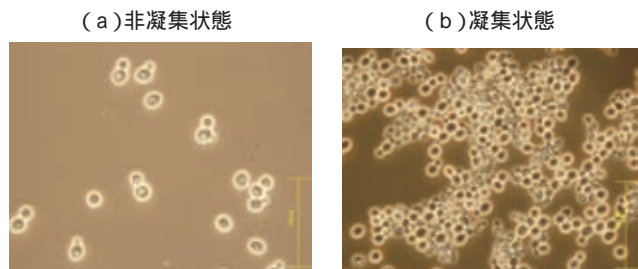
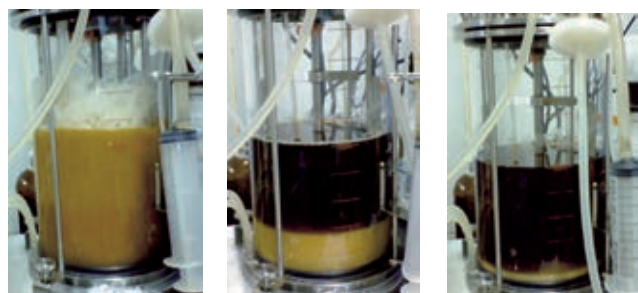


写真1 凝集性酵母 AM12(*Saccharomyces cerevisiae* AM12)の顕微鏡写真



(a) 攪拌停止前 (b) 攪拌停止 2 分後 (c) 攪拌停止 30 分後

写真2 AM12 の凝集性, 沈降性

と, AM12 は静置直後から凝集沈降性を示し, 30 分以内に発酵槽底部に集積する。静置 30 分後には, 発酵槽液面の菌体数は静置直後の 1.5% までになり, 底部の菌体数は静置直後の 3.6 倍に濃縮された。このように, 静置操作のみで菌体が高濃度に濃縮する特長がある(写真2)。

(2) 高濃度エタノール耐性

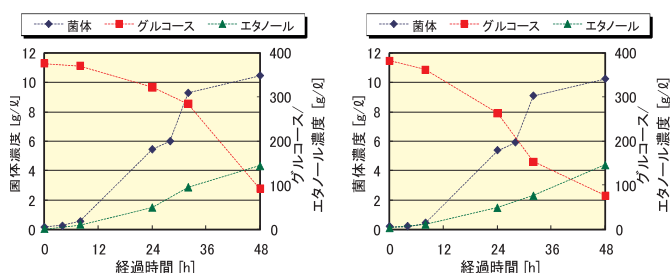
一般的な酵母は, 100 g-ethanol/槽程度のエタノール濃度環境下では増殖・発酵が困難な状況になる。これに対し, AM12 は, 200 g-ethanol/槽のエタノール濃度環境下でも増殖・発酵が可能である。回分式発酵終了後, 沈降分離により培養液から菌体のみを回収し, 新たな原料を供給して次の発酵を繰り返し行う, 繰り返し回分式発酵試験を 45 日継続した。この結果, 繰り返し利用にもかかわらず, 最大 160 g-ethanol/槽の高濃度エタノール発酵を達成した(図7)。

(3) 高エタノール発酵収率

回分式発酵試験データをもとに生物工学的パラメータを取得し, 従来酵母(*Saccharomyces cerevisiae* JCM7255)と比較した。この結果を表に示す。同一エタノール濃度の発酵液を製造する場合, AM12 の菌体基準のエタノール発酵収率 $Y_{p/x}$ が高いため, 菌体量は従来酵母より 35% 低く設定できる。また, 糖基準の菌体増殖収率 $Y_{x/s}$ が従来酵母より低いことから, AM12 は菌体増殖よりもエタノール発酵に基質を利用する効率が高く, 従来酵母に比較して AM12 のエタノール発酵性能の高さが示された。

1. AM12 の連続式エタノール発酵プロセスへの適用

連続式発酵プロセスでの菌体リサイクルの効果を検証し, 菌体リサイクルにより菌体濃度は 3.5 倍の 70 g-cell/槽とすることができた。



(a) 繰り返し回分式発酵開始時 (b) 繰り返し回分式発酵 45 日目開始のエタノール発酵試験結果

図7 繰り返し回分式発酵によるエタノール発酵性の安定性

表 AM12 と従来酵母との微生物工学的パラメータの比較

| 記号 | 名称[単位] | 数値 | |
|-------------|-------------------------------------|------|------|
| | | AM12 | 従来酵母 |
| μ_{max} | 最大比増殖速度 [h ⁻¹] | 0.32 | 0.41 |
| K_s | 飽和定数 [g-glucose/槽] | 0.25 | 0.22 |
| μ_{max} | 最大比エタノール発酵速度 [g-ethanol/g-cell · h] | 1.16 | 0.96 |
| $Y_{x/s}$ | 糖基準の菌体増殖収率 [g-cell/g-glucose] | 0.14 | 0.16 |
| $Y_{p/s}$ | 糖基準のエタノール発酵収率 [g-ethanol/g-glucose] | 0.50 | 0.37 |
| $Y_{p/x}$ | 菌体基準のエタノール発酵収率 [g-ethanol/g-cell] | 3.62 | 2.34 |

さらに AM12 が有するエタノール発酵性能の長期安定性を検証するために, ラボ試験を実施した。試験結果を表4に示す。なお, 原料には糖源としてグルコースを用いた。

菌体リサイクルを適用した連続式発酵試験では, エタノール生産性は, 13 g-ethanol/槽/h から 22 g-ethanol/槽/h と 1.7 倍向上し, 従来酵母を遠心分離機利用で菌体リサイクルを行う連続式発酵試験と比較し, 3.6 倍の生産性を達成することができた。

1.4 今後の課題

AM12 は, 1.2 で述べた凝集沈降性, 高濃度エタノール耐性, 高エタノール発酵収率のほかに低 pH 耐性, 高糖濃度耐性, 高温耐性の特長を有する酵母である。特に, その凝集沈降性は, 大きな塊を形成することなく短時間に沈降する性質であり, 発酵槽内で菌体濃度を高めることができ, 高いエタノール生産性をラボレベルで検証できた。今後は, スケールアップした試験装置で実証を進め, 製品化を目指していきたい。

また当社では, この凝集沈降性に注目し, その遺伝子解析にも着手している。今後は, この凝集沈降性機能を他の有用微生物に適用し, 新たな展開を推進したい。

2 合成ガスを基質とする細菌¹⁴⁾

一部の嫌気性細菌は, 二酸化炭素や一酸化炭素などのガスを基質として物質生産を行うことが知られている。当社は九州大学と共同でこの性質を有する嫌気性細菌の *Veillonella* 属を分離・評価した。ここでは, 写真に示す *Veillonella*

表4 発酵操作法の違いによるエタノール生産性能の比較

| プロセス名 | 菌体濃縮法 | 発酵時間 [h] | 連続運転実績 [d] | エタノール生産性 [g-ethanol/種/h] |
|-----------------------------------|-------|-----------------|------------|--------------------------|
| AM12 回分式 | - | 48 | 2 | 1.7 |
| AM12 繰り返し回分式 | 凝集沈降槽 | 24(発酵サイクル1回あたり) | 45 | 5.7 |
| AM12 連続式 (菌体リサイクルなし) | - | - | 30 | 13.0 |
| AM12 連続式 (菌体リサイクルあり) | 凝集沈降槽 | - | 30, 60 | 20.4 ~ 22.7 |
| 従来酵母連続式 ⁵⁾ (菌体リサイクルあり) | 遠心分離機 | - | 60 ~ 90 | 6.0 |

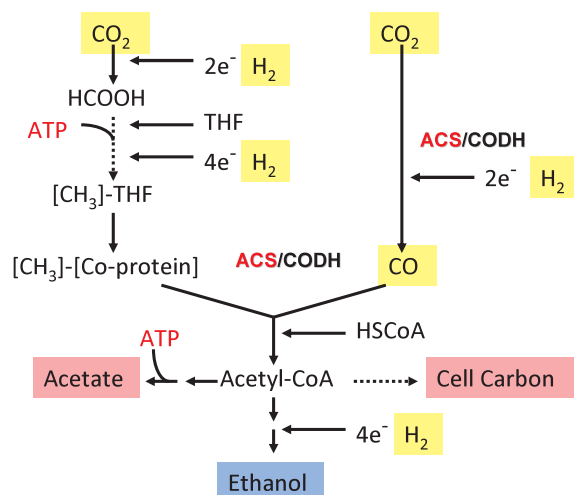


図8 G11株の有するエタノール発酵の代謝経路



写真 G11株の顕微鏡写真

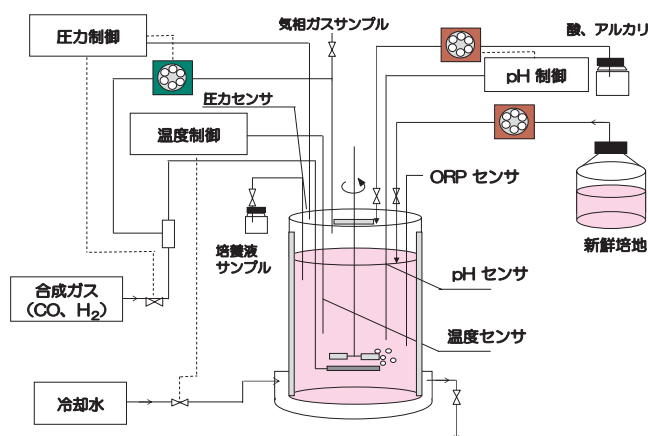


図9 加圧ガス実験装置(発酵槽)の構成

属細菌 G11 株の合成ガスを基質とする培養・発酵試験結果について述べる。

2.1 合成ガスからのエタノール発酵

G11 株が有する二酸化炭素や一酸化炭素を炭素源としたエタノール生産の発酵機能は、図8に示す代謝経路によるためと推定されている。この代謝経路ではアセチル Co-A を經由して Na⁺ 駆動力を利用し、ATP 生産を伴った酢酸合成に進むことが知られている。また、稀にエタノール合成能をもつものが報告されているが、エタノールへの転換率は非常に低い。G11 株のエタノール発酵性能を検証した結果、乾燥菌体 1g につき、1 日当たり 0.46 g のエタノールを得ることができた¹⁴⁾。

2.2 加圧ガス実験装置によるエタノール生産性向上の検討

G11 株を適用した発酵プロセスの生産性向上を図る手段の一つとして、基質である一酸化炭素や水素ガスの溶解量を増やすことが考えられる。このために、0.25MPa の加圧条件下で操作できる発酵槽を製作し、発酵試験を行った。試験装置の構成を図9に示し、本試験結果を図10に示す。この図に示されるように、G11 株の加圧によるエタノール生産性向上を確認できた。この結果加圧により、G11 株のエタノール生産性は約 2.4 倍に向上した。

2. 添加剤効果の検討

エタノール生産量を増やす方法として、還元剤の添加により代謝反応の化学的あるいは電氣的の平衡を調節する技法が報告されている¹⁵⁾。G11 株についても同様の効果を期待し、いくつかの還元剤を適用して、G11 株のエタノール生産性向上を検討した。その結果、4-ジメチルアミノベンゼン-2-カルボン酸が高い効果を示すことを見出した。

更に、加圧ガス実験装置を使用して同剤の効果の検証を行った。その結果、図11に示すとおり酢酸の発酵性能は抑制され、エタノール濃度は 7.7 g/種まで増加し、エタノール濃度が酢酸濃度を上回る結果が得られた。

2.4 今後の展望

合成ガスの溶解量増加や還元剤の添加により、G11 株のエタノール生産性は向上するが、酵母のエタノール生産性と比べると、さらなる改良が求められる。このためには、化学工学的アプローチだけでなく、菌体そのものの性能改良も必要である。今後は、これまでに得られた培養技術を活かすと共に、菌体性能改良にも取り組み、実用性のあるプロセスへの完成を目指したい。

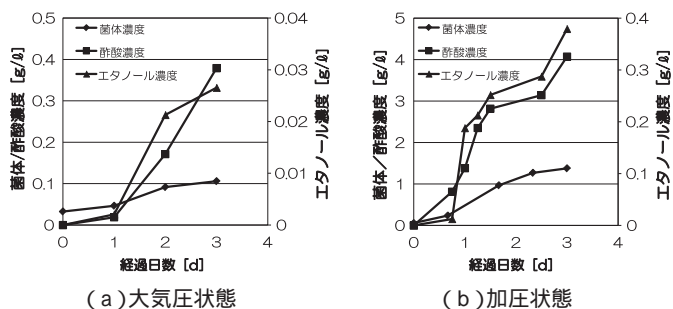


図 10 加圧ガス実験装置の効果検証結果

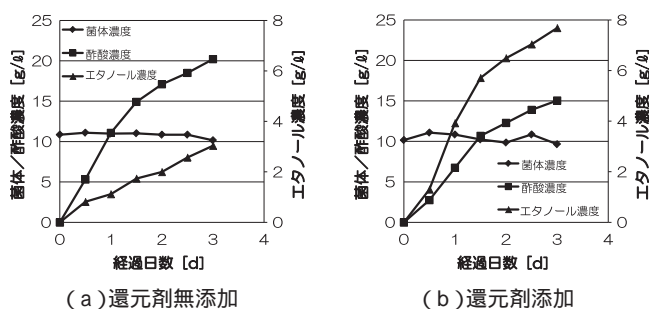


図 11 加圧ガス実験装置を使用した酸化還元物質 (4-ジメチルアミノベンゼン-2-カルボン酸)添加効果の試験結果

4. あとがき

近年、環境・エネルギー分野の研究開発にバイオ技術を適用するアプローチは、学術的には大きな成果を挙げているが、製品化・実用化に向けては、解決すべき課題を多く抱えている。環境分野においては、微生物のモニタリングでさえハードルの高い課題である。今後更に、特定の微生物の分離、微生物間の相互関係や微生物構造の理解が進むことによって、実用技術として確立して行くと考えられる。一方、エネルギー分野でバイオ技術が活用されるためには、物理・化学技術に基づく競合プロセスに対して経済的競争力を有する必要がある。これまでに培ってきた解析技術や培養技術を活用し、考察を深めることで今後の製品開発に活かしていきたい。

なお、本報で報告したダイオキシン分解コンポストの微生物モニタリングに関する研究については、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 生物機能活用型循環産業システム創造プログラム 生分解・処理メカニズムの解析等制御技術の開発における受託研究の成果の一部である。研究の実施にあたっては、豊橋技術科学大学 平石明教授のご指導を得た。また、下水処理施設の汚泥調査に関する研究については、地方公共法人 日本下水道事業団との共同研究の成果の一部である。研究の実施にあたっては、同事業団技術開発部 橋本敏一氏のご協力・ご助言を得て実施した。更に、*Veillonella* 属新種の分離及び *Veillonella* 属に関する合成ガスからのエタノール発酵に関する研究は九州大学 吉野貞藏准教授のご指導を得て実施したものである。ここに厚く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 室伏・ほか 監訳：Brock 微生物学，(2003)，p. 20，オーム社
- 2) 倉根：複合微生物系の何培養微生物新規分離技法と福剛微生物系有効活用利用法，難培養微生物の利用技術，(2010)，p. 20，シーエムシー出版
- 3) 村田：編：下水道の高度処理，(1992)，p. 10，理工図書出版

- 4) 中村・ほか：クラスタ分析によるキノプロファイルデータ，統計数理，52，2(2004)，p. 343
- 5) 平石：微生物菌対キノ系系の分析法と生態学的研究への応用，微生物の生態 18，(1992)，p. 35，学会出版センター
- 6) 平石：キノンをバイオマーカーとして用いる環境微生物群集の解析，難培養微生物の利用技術，(2010)，p. 45，シーエムシー出版
- 7) 本郷：環境サンプルの 16SrDNA クローン解析法と T-RFLP 解析法，難培養微生物の利用技術，(2010)，p. 33，シーエムシー出版
- 8) NEDO：生物機能活用型循環産業システム創造プログラム，生分解・処理メカニズムの解析等制御技術の開発，平成 14 年～平成 18 年成果報告書，(2006)，p. 317
- 9) 平石・ほか：複合微生物製剤の製造方法，特許第 4401832 号
- 10) 二瓶・ほか：ダイオキシン類分解活性評価方法及びこれを用いた浄化方法，特許第 4399384 号
- 11) 平石・ほか：生物学的ダイオキシン分解技術の開発研究，廃棄物処理等科学研究総合研究報告書，(2002)
- 12) 大熊：理研ニュース，338(2009-8)，p. 3
- 13) 遠山・ほか：凝集性酵母を用いたバイオマス原料からの連続式エタノール発酵プロセスの開発，三井造船技報，192(2007-11)，p. 1
- 14) 遠山・ほか：合成ガスを原料とするエタノール製造技術の開発，三井造船技報，197(2009-6)，p. 23
- 15) R. Covind, et al. : Altered electron flow in continuous cultures of *Clostridium acetobutylicum* induced by viologen dyes, *Appl. Environ. Microbiol.*, 53, 6(1987) p. 1232

共同執筆者：遠山 正幸

〔問い合わせ先〕

技術本部 千葉技術開発センター
TEL 0436 - 41 - 1102 関岡 一栄

バイオカスケード事業を支える熱分解・ガス化技術

技術本部 宮 地 健

1. まえがき

三井造船は、環境保全をテーマに、廃棄物、水、大気、土壌などの分野で独自の技術を開発し、ごみ熱分解溶融プロセスや家畜ふん尿からのバイオガスプラント等の製品を提供してきた。近年になり地球温暖化防止や持続可能な循環型社会形成がますます叫ばれる中、風力、太陽光、バイオマスなどの再生可能エネルギーの有効利用の促進が求められている。中でもバイオマスは他の再生可能エネルギーに比べて、エネルギー供給に安定性があり期待が大きい。また、エネルギー利用にとどまらず、化学品原料としても注目されている。当社は、「100周年ビジョン」の中で、新規事業の一つにバイオカスケード事業¹⁾を掲げ、バイオマスをカスケード的に有効利用する事業構築を目指しており、バイオマスを中心とした新規事業開発及びそのための技術開発を進めている。

バイオマスのエネルギー転換技術²⁾は、大きく直接燃焼、熱化学的変換、及び生物化学的変換に分けられる。この中で、熱化学的変換は、扱える原料の多様性があり、かつ得られる製品が燃料や化学原料と多岐にわたっており、バイオカスケード事業の中核を成す技術の一つである。本報では、この熱化学的変換の技術開発に関する当社の取り組みを、主に熱分解・ガス化利用技術に焦点を当てて紹介する。

2. 熱分解・ガス化装置の概要

バイオマスの熱化学的変換とは、バイオマスを間接的に加熱、もしくはバイオマスの一部を直接燃焼させて熱分解やガス化反応を起こし、固体であるバイオマスをより利用しやすい液体や気体及び炭化物(チャー)に変換することである。熱化学的変換を行う反応器(熱分解炉やガス化炉)としては、**図1**に示す固定床型、流動床型、噴流床型³⁾の反応器、**図2**に示すロータリーキルン型⁴⁾の反応器などがある。

固定床型反応器は、原料のバイオマスを反応器内に充てんし、約1000のチャー層に向けて原料がゆっくりと降下するため、原料の温度は、緩やかに上昇する。また、原料を充てんしているため、容積当たりの炭素濃度が高いという特徴がある。流動床型反応器はバブリング方式(気泡流動床)から循環流動床などの方式があるが、これらは600~1000に加熱した流動砂が踊るベッド部にバイオマスを投入して急速に昇温することで、水分と揮発成分が放出され、これらがフリーボード部で二次ガス化反応を起こす。ベッド部に残ったチャーは、流動化ガス(一次ガス化剤)によって発熱反応を起こして流動砂の熱源になるとともに、流動砂の粉碎効果によって微細化した炭化物がガス流れに乗ってフリーボード部に飛来し、そこでガス化する。噴流床型反応器は、粉碎し

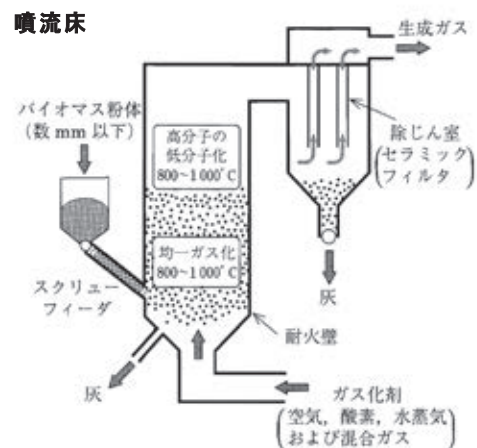
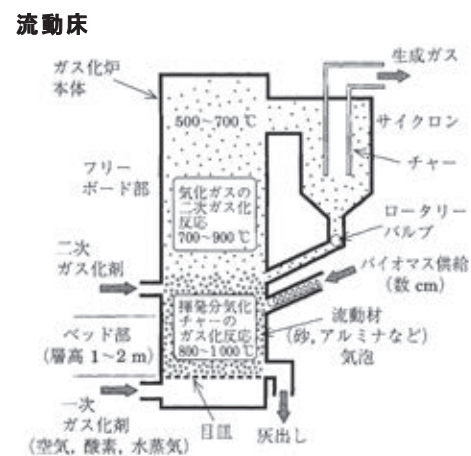
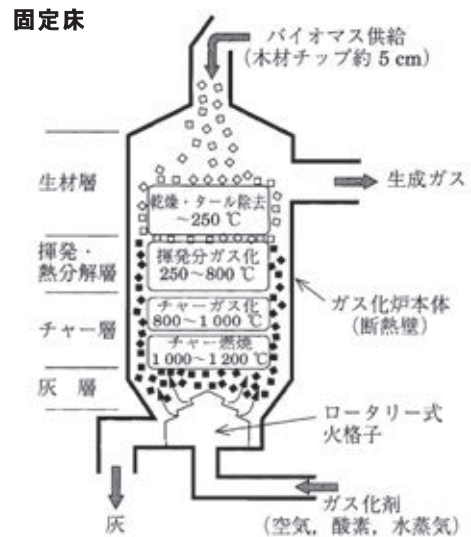


図1 代表的な熱化学的変換装置³⁾

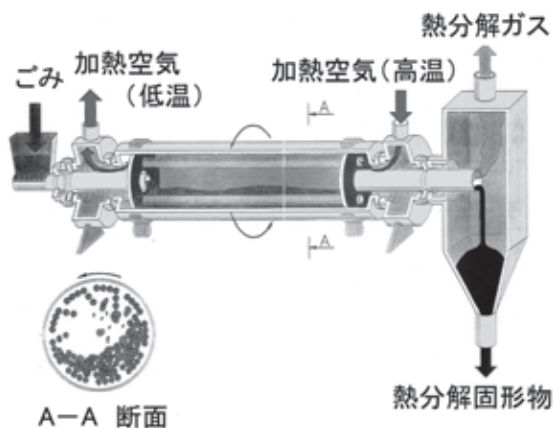
図2 R21 ロータリーキルン⁴⁾

写真1 要素試験装置

た原料を1000 近い炉内へ投入するため急速に昇温し、バイオマス由来の揮発成分と炭化物が、共に雰囲気ガスによってガス化する。ロータリーキルンは、外熱式と内燃式の2種類があるが、外熱式は間接加熱によりゆっくりと昇温し、炭化物と揮発成分を分離して回収することができる。いずれの方式も、バイオマスの昇温速度や熱分解温度、滞留時間や雰囲気ガス組成が異なるため、効率的な熱化学的変換を実現させるためには、それぞれの装置に応じたバイオマスの熱化学的変換特性を把握して、装置設計や操作条件へ反映させる必要がある。

効率的バイオマス利用のための熱分解・ガス化特性の把握

1 バイオマス熱分解・ガス化利用技術の課題

バイオマスの熱化学的変換プロセスの開発では、熱分解時に発生する粘ちょうな凝縮性高分子量炭化水素(以下タールと称する)を、どのようにして有用なガスや軽質油などの取り扱いやすい物質に変換するか、またはこのタールによる配管閉そくトラブル等をいかに回避し、装置の安定運転継続を確保するかということが大きな課題となっている。その理由は、ガス化原料として代表的な石炭が通常千数百 以上でガス化されるのに対して、バイオマスは通常1000 以下のガス化としては低温で処理され、したがってタールの発生量が多いことによる。これは、バイオマスは石炭や廃プラスチックに比べて発熱量が低いため、有用なガス(水素、一酸化炭素から成るいわゆる「合成ガス」等)や炭化物をより多く得るには、熱源として使用するバイオマスの量を最小限に抑える必要があるためである。

このタールの効率的利用、及び同時に生成する炭化物の有効利用を図るためには、一つには、タールに含まれる化学種を特定することや、タール及び炭化物の熱分解・ガス化特性を把握することが重要である。また、同時に、それら分析結果に基づく反応解析技術及び反応器設計手法の高度化も重要である。

次節以降では、バイオマス熱分解・ガス化に関する当社の実験・分析結果及び解析技術の一例を紹介する。

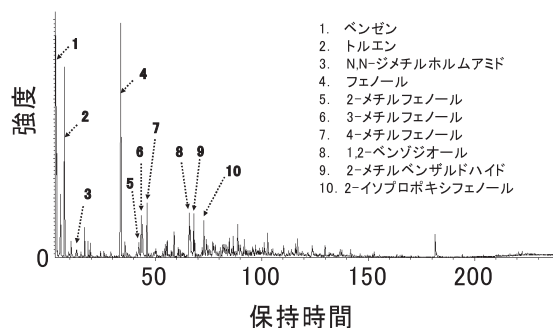


図 熱分解タールのガスクロマトグラム

2 バイオマス由来揮発成分特定のための分析技術

写真1にバイオマスの熱分解特性を把握するためのラボスケールの要素試験装置を示す。この試験装置では、電気ヒータ式の加熱炉を用いて、実機反応器の昇温特性を模擬した熱分解実験を行い、タール及び炭化物を採取することが可能である。タール採取方法としては六つの連続した冷却トラップを用いた方式⁵⁾などが提案されているが、当社ではタールに含まれる化学種をガスクロマトグラフ質量分析計(Gas Chromatography Mass Spectrometer: GC-MS)にて分析することを念頭に置いて、提案された捕集方法を参考にして、タール発生量の定量的把握の実現、生成水氷結によるライン閉そくの回避、タール捕集漏れ防止、タール回収溶媒の最少化を図っている。

捕集したバイオマスの熱分解タールには、主に沸点が60 ~ 300 程度までの多種多様な化学種が含まれている。図に、草本系バイオマス熱分解タールのGC-MS分析結果の一例を示す。ここでは100 ~ 200 留分に注目して、中程度の極性カラムと非極性溶媒との組合せで、昇温速度をかなり遅くして分析したことにより、四重極MS検出器で大部分のピークを同定できた。

また、タールに含まれる化学種は多様であり、標準物質として入手できるものは非常に限られているため、特定した化学種の定量には代替物質の検量線を用いた半定量を行っている。これは化学種をその分子構造から、飽和直鎖系、不飽和

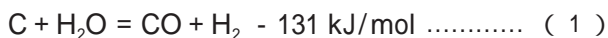
直鎖系，環状系，ベンゼン環の環数等によって分類し，その分類ごとに代表物質の感度係数を用いて定量する方法である．このように，タールに含まれる化学種について，定性的な化学種の特定のみならず，半定量的にも把握している．

このほか，揮発成分に含まれる常温で凝縮しないガス成分については，熱伝導度検出器付きガスクロマトグラフ，及び水素炎イオン化検出器付きガスクロマトグラフによって， H_2 ， CO ， CO_2 などの無機ガス及び炭素数4までの炭化水素ガスを分析している．

バイオマス由来熱分解炭化物のガス化特性解析技術

熱化学的変換によってガスやタールのほかに固体の炭化物が生成される．この炭化物は原料バイオマスに比べて性状が安定で発熱量も高いことから，そのまま固体燃料を製造し，ボイラなどで燃焼利用する場合がある．また，バイオマスから液体燃料や化学原料の合成を目指す場合，これらの原料となる合成ガスを多く生産するために，この炭化物をガス化する場合もある．

当社では，**図4**に示すベンチスケール実験装置を用いて，バイオマス由来熱分解炭化物の H_2O 及び CO_2 高温ガスとのガス化反応実験を行い，式(1)の水性ガス化反応と，式(2)の発生炉ガス反応の吸熱反応を，熱分解ガスの部分燃焼で得られた高温ガスの顕熱を有効活用して促進するとともに，水噴霧などの冷却工程無しにガス温度をほぼ即座に数百度降下できることを確認した⁶⁾．



また，**図5**に示した炭化物投入前後のガス組成比較から，炭化物ガス化反応の主反応が水性ガス化反応であることを確

認し，水蒸気が一定条件の範囲内でガス化率や燃料転換効率の向上に寄与することを確認している(**図6**)．この実験結果は，名古屋大学大学院工学研究科板谷研究室との共同研究によるものである．また，熱重量測定装置を用いた炭化物の反応速度解析についても同研究室との共同研究を行っており，これら実験や解析で得られた知見を，次章で示す数値シミュレーションに活用している．

4. 数値シミュレーション技術

図7は，当社の都市ごみ向け熱分解ガス化溶融プロセスの溶融炉の装置設計に，汎用数値流体力学(Computational Fluid Dynamics: CFD)解析ソフトであるFLUENTやStar-CDを活用し，燃焼用空気投入方法の検討を行った結果の一例である⁷⁾．溶融炉のガス燃焼では，1200以上の高温燃焼で，燃料(熱分解ガス)と燃焼用空気が別々に供給され，混合して行く過程で燃焼する乱流拡散燃焼反応が生じる．この場合，相対的に反応速度が大きく，燃焼速度は乱流混合によって支配されると考えられる．この仮定に基づいて，乱流場における燃焼速度を推算するモデルの一つが渦消散モデル⁸⁾であり，**図7**の結果はこの手法を用いて得られたものである．一方，で説明したように，バイオマスの熱分解・ガス化反応は1000以下の比較的低温で行われるため，相対的に反応速度は小さく，炉内の反応速度を単に混合律速で表現することには無理があり，反応速度を考慮したCFD解析が必要となる．

4.1 反応速度を考慮したCFD解析

実用的な炉内の反応場を予測するには，乱流と反応を連成した解析が必要となる．本項では，反応速度を考慮したバイオマスの熱分解・ガス化反応と乱流を連成した解析事例を紹介する．CFD解析に反応速度を組み込むために，**写真1**で示した

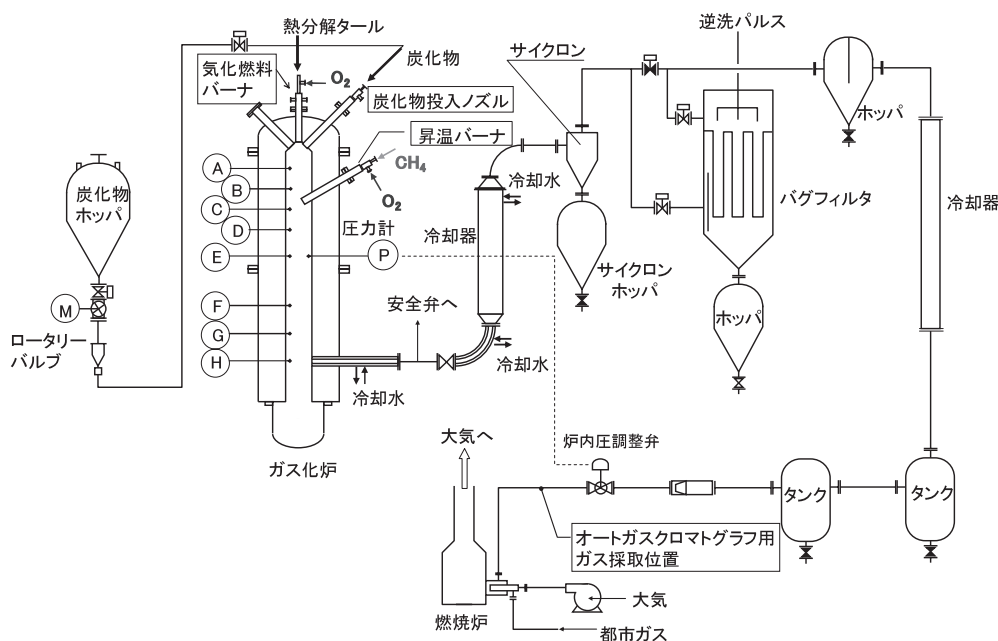


図4 ベンチスケール試験装置フロー図

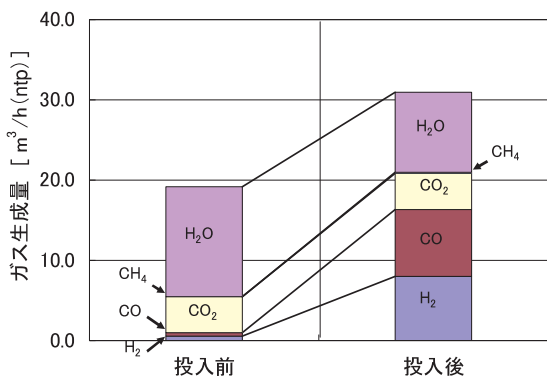


図5 炭化物投入前後のガス組成変化

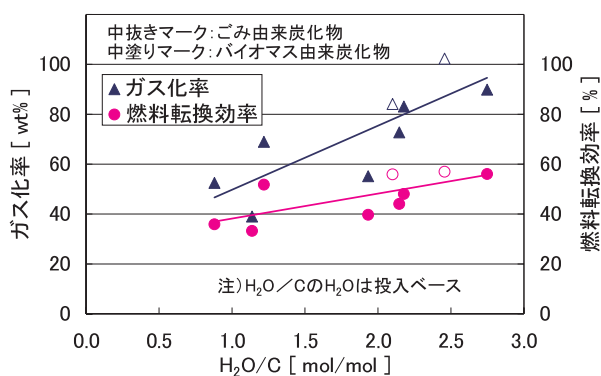


図6 ガス化特性向上への水蒸気の影響

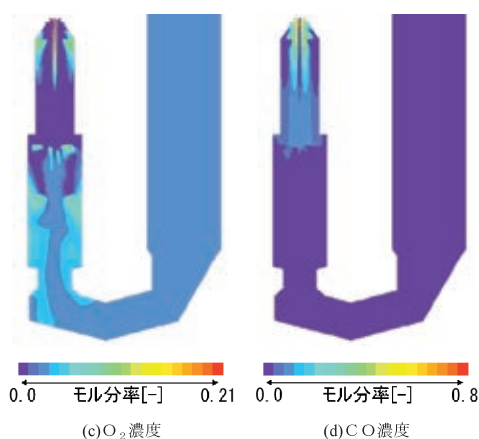
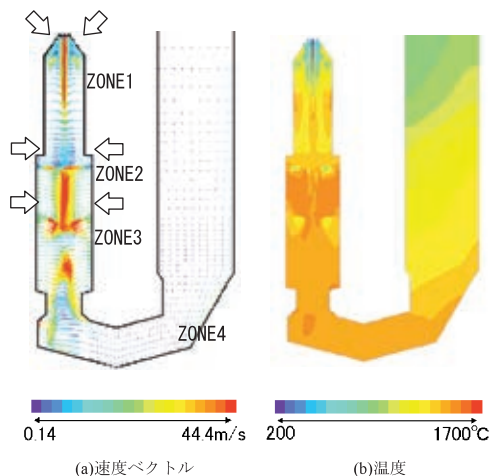


図7 ガス化溶融炉のCFD解析結果

要素試験装置を用いた反応実験から、滞留時間の違いによる生成物量変化を求め、これらから数個ないし十数個の総括反応速度式を構築し、数値フィッティング手法で各反応式の反応速度定数を求めた。図8は、FLUENTで実施した、流動床ガス化炉のフリーボード部の3次元CFD解析結果の一例である。フリーボード部へ投入するガス化剤(酸素,水蒸気)の投入方法の違いにより、炉内の温度分布や各化学種の濃度分布が異なる。そのため、最適な炉内反応状態になるガス化剤の投入方法を設計する際に、本解析のようなケーススタディによる最適化検討が重要となる。

また、FLUENTが用意している標準機能は気相反応を対象としているため、固体とガスとの固気反応等を考慮する場合は、ユーザ関数を用いたサブルーチンを追加する。このように気相反応に固気反応も加えて解析精度の向上に取り組んでいる。

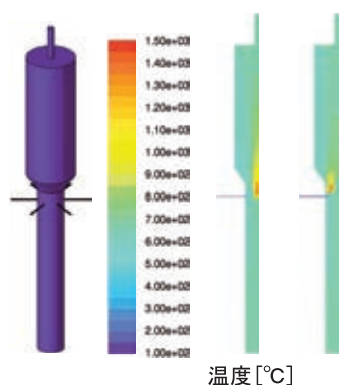
4.2 素反応解析

総括反応式や数個の化合物群にグループ化するランピング法による反応速度モデルは、実測値のフィッティングによって反応速度定数が与えられるため、その適用範囲が限定される。一方、素反応解析は反応をラジカル反応まで細分化し、数千の素反応式で反応をモデル化する。素反応の速度パラメータは、原則的には個々の素反応に固有の定数であり、準理論的に反応解析を行うことができるためその適用範囲は広く、反応機構の分子レベルでの理解も可能となる。筆

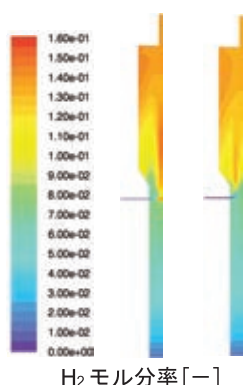
者らは九州大学先端物質化学研究所先端素子材料部門則永研究室との共同研究を通して、バイオマスの初期熱分解生成物の二次気相反応に適用できる素反応解析技術の確立に取り組んでいる。素反応解析の実施方法は、素反応式の集合体である詳細化学反応機構と、化学種の熱力学データに基づき、CHEMKINに代表される汎用の化学反応シミュレーションソフトウェア⁹⁾を用いて解析する。

木質系バイオマスであるスギヤコーヒー残渣の熱分解生成物二次気相反応において、適用の妥当性が検証できた詳細化学反応機構¹⁰⁾¹¹⁾を、当社では草本系バイオマスにも適用できるように拡張を進めた。2に示したバイオマスの熱分解タールに含まれる化学種の特定結果¹²⁾などから、詳細化学反応機構に含めるべき化学種を定め、その反応機構を追加することで詳細化学反応機構の適用範囲を拡大した。図9は、草本系バイオマス3種のガス化反応特性(原料種による生成ガス組成の違い)を比較したものである。

このように各種バイオマスを取り扱うことができる詳細化学反応機構を構築できれば、原料の熱分解実験をラボレベルで最低一回実施し、初期熱分解生成物を特定することで、反応条件と得られる合成ガス組成の相関などのケーススタディを、素反応解析によって行うことができる。これによって、対象とする原料が目的のシステムに適しているか、ある



温度 [°C]



H₂ モル分率 [-]

図8 ガス化炉のCFD解析結果

いは複数の原料を比較評価して原料選択の一次スクリーニングに利用できる。また、複数原料の混合使用を検討したり、あるいは選定原料から目的とする合成ガスを得るための必要滞留時間、ガス化剤の種類や量を推算することに活用することが可能となる。

5. あとがき

バイオマス資源は、エネルギー分野だけでなく、化学製品の中間原料分野においても今後ますます需要が拡大することが見込まれる。このようにバイオマスから燃料や化学品を製造する、いわゆるバイオリファイナリなどにおいて、現在のオイルリファイナリのような工業的生産速度を維持するには、熱化学的変換プロセスは欠かせない。バイオマス資源は化石資源以上にその性状の幅が広く、かつ重量当たり保有するエネルギー量が少ないことから、より効率的に変換できる装置やプロセスが必須である。そのために、当社は、装置化開発やプロセス開発だけでなく、それら先導する評価技術や設計支援技術の開発も並行して進め、今後もバイオカスケード事業の拡大・発展を目指していく。

参考文献

- 1) 三井造船：2008年度中期経営計画，(2008-4)，p. 11，<http://www.mes.co.jp/investor/reports/pdf/08mid-termplan.pdf>，(2010-6-4)

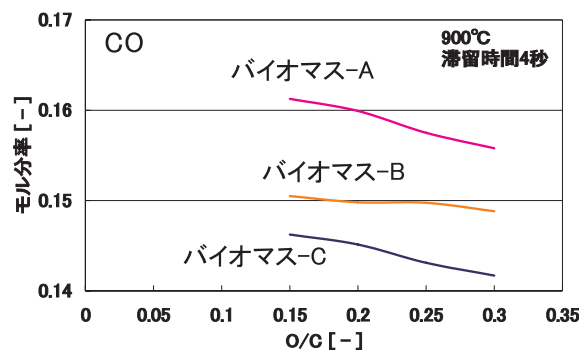


図9 素反応解析によるCO濃度ケーススタディ

- 2) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー技術開発部：バイオマスエネルギー転換要素技術開発パンフレット，2(2010)，表紙裏次頁
- 3) 社団法人 日本エネルギー学会 編：バイオマスハンドブック(第2版)，(2009)，p. 100-102，オーム社
- 4) 山本．ほか：熱分解ガス化溶融炉“八女西部クリーンセンター”が4年間の安定稼働を達成，三井造船技報，183(2004)，p. 1-7
- 5) 堤．ほか：バイオマス発電の最新技術，(2006)，p. 98-114，シーエムシー出版
- 6) 宮地．ほか：バイオマス等由来熱分解炭化物のガス化技術の検証，三井造船技報，197(2009)，p. 16-22
- 7) 須山．ほか：三井リサイクリング 21 (R21) の燃焼熱流動シミュレーション，三井造船技報，184(2005)，p. 32-37
- 8) B.F.Magnussen, et al. : On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. In 16th Symp. (Int) on combustion, (1976) p. 719
- 9) 菱化システム：CHEMKIN 詳細反応解析支援ソフトウェア，http://www.rsi.co.jp/kagaku/cs/reaction_design/index.html，(2010-6-4)
- 10) 則永．ほか：木質バイオマス迅速熱分解生成物の in-situ 気相部分酸化反応機構 第 17 回日本エネルギー学会大会要旨集，(2008)，p. 98-99
- 11) 櫻井．ほか：バイオマス初期熱分解生成物化学組成の詳細分析と二次気相反応シミュレーション，第 18 回日本エネルギー学会大会要旨集，(2009)，p. 200-201
- 12) 宮地．ほか：草本系バイオマス由来熱分解タール含有化学種の特異性，三井造船技報，199(2010)，p. 47-53

共同執筆者：杉本 富男 宮川 満
片桐 学 藤田 理人

【問い合わせ先】

技術本部 千葉技術開発センター
TEL 0436 - 41 - 1102 宮地 健

県道高速名古屋新宝線西郊通工区上部工事
- 鋼桁橋 6 連，鋼製橋脚 10 基，鋼製フーチング 6 基の設計・施工 -



写真1 全景

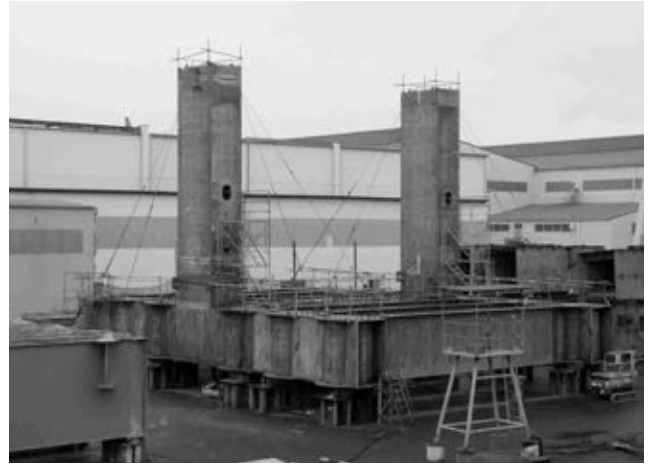


写真2 仮組立状況

県道高速名古屋新宝線は、愛知県名古屋市中川区の山王ジャンクションから東海市の東海ジャンクションに至る延長約 12 km の都市高速道路である。

この路線は、名古屋市中心部と名古屋市南部地域、東海市、知多方面とを結び、朝夕ラッシュ時の渋滞が激しい 3 号大高線に代わる中部国際空港へのアクセス道路として期待されており、現在、平成 24 年度末の全線供用開始を目指して整備が進められている。

本工事区間(写真1)は、上記路線のうち、名古屋市熱田区西郊通五丁目から同区六番一丁目に位置し、鋼桁橋 6 連，鋼製橋脚 10 基，鋼製フーチング 6 基の詳細設計，工場製作から現地架設までを，また合成床版の詳細設計からコンクリート打設・壁高欄の施工までを行った。

特徴

本工事の主な特徴は以下のとおり。

(1) 鋼製フーチング

橋脚直下に地下鉄名城線のボックスカルバートがあり、一般的な RC フーチングでは地下鉄ボックスカルバートとの離隔が十分に確保出来ない箇所が発生する。そのため、フーチング高を低く抑え総重量を軽減することができ、地下鉄ボックスカルバートへの影響を抑えられる鋼製フーチング(写真2)が採用された。

(2) 合成床版

S87CD 及び CU の 6 径間連続非合成鋼桁橋は、合成床版を使用することで床版支間を大きくし主桁本数を削減することができる少数鋼桁橋が採用された。

合成床版とは、鋼板による底板とコンクリートを底板上のずれ止めにより一体化させた床版のことで、橋梁全体の死荷重の

低減が図れ、桁架設との連続施工が可能などの特徴を持つ。

なお、合成床版は橋梁 2 連に使用されたが、そのうち 1 連(S87CU)は、当社製品の合成床版である“MESLAB(エムイースラブ)”が採用された。

主項目

工事名：県道高速名古屋新宝線西郊通工区上部工事

発注者：名古屋高速道路公社

請負者：三菱・日立・三井特定建設共同企業体

工事場所：愛知県名古屋市熱田区西郊通五丁目から同区六番一丁目まで

形式：S87CD 6 径間連続非合成鋼桁橋

S87CU 6 径間連続非合成鋼桁橋

SR87C 4 径間連続非合成鋼桁橋

S92CD 5 径間連続合成箱桁橋

S92CU 5 径間連続合成箱桁橋

SR92C 3 径間連続非合成箱桁橋

P88 ~ 90, 91-1, 91-2, 92 ~ 96 鋼製橋脚

P88 ~ 90, 91-1, 91-2, 92 鋼製フーチング

工事延長：412 m

数量：鋼重 約 6 800 t

合成床版 約 5 800 m²

工期：平成 16 年 12 月 21 日 ~ 平成 22 年 3 月 15 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 志熊 隆

断面修復材“なおしタル”の試験施工
- 橋脚および水路の断面修復 -



写真1 橋台の断面修復(コテ塗り工法)



写真2 水路の断面修復(吹付け工法)

“なおしタル”を用いた断面修復工法は、現在、建築物については着実に実績を増やし、施主、施工者から高い評価を得ている。近年、土木分野への適用範囲を拡大し、以下の試験施工を行った。

橋台の断面修復(写真1参照)

本橋梁は、北海道・網走地方に架かる橋梁で、塩害および凍害の影響で橋台に劣化が生じた。断面修復は、“なおしタル NF”を用いたコテ塗り工法で行った。

水路の断面修復(写真2参照)

本水路は、夕張地方に設置された水路で、流水部の磨耗および凍害により断面に劣化が生じた。断面修復は、“なおしタル NF”を用いた吹付け工法で行った。

特徴

“なおしタル”とは、付着性に優れ、ひび割れの発生が無く、作業性および厚塗り性に優れるという条件を同時に備えた断面修復材である。“なおしタル”は、これらの条件を満足させるために、『チクソトロピー性』を付与させている。『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。また、だれの発生がなくなるため厚塗りが可能となる。

主要目(なおしタルシリーズ)

“なおしタル N”

- ・厚塗り施工ができ工期短縮につながる。
- ・吹付け工法、コテ塗り工法が可能。
- ・ポリマーエマルジョンを使用していないため、高強度性能($\sigma_{28} = 40 \text{ N/mm}^2$ 以上)、耐火性に優れる。
- ・高い無収縮性能を有する。
- ・特殊ポリマーの使用のため、修復部とコンクリートとの電位差による耐マクロセル腐食に優れる。

“なおしタル H”

なおしタル N の特徴に加え、

- ・高強度性能($\sigma_{28} = 60 \text{ N/mm}^2$ 以上)。

“なおしタル NF”

なおしタル N の特徴に加え、

- ・高強度性能($\sigma_{28} = 50 \text{ N/mm}^2$ 以上)。
- ・寒冷地における凍結融解抵抗性等の耐久性に優れる。

“なおしタル”は、ドーピー建設工業(株)、宇都宮大学工学部、株式会社ニューテック3者の共同開発である。

(ドーピー建設工業(株)技術部)

〔問い合わせ先〕

ドーピー建設工業(株)技術部 北海道グループ
TEL 011 - 221 - 1571 青木 正行
ドーピー建設工業(株)技術部 東京グループ
TEL 03 - 3918 - 6176 立神 久雄

「三井の56」シリーズ100隻竣工を達成



写真1 シリーズ1番船“NORDHVAL”(ノルドヴァル)



写真2 シリーズ100隻目“IKAN SELIGI”(イカン セリジ)

三井造船は、3月10日に玉野事業所において竣工した“IKAN SELIGI”(イカン セリジ 当社第1770番船)をもって、当社56000重量トン型ばら積み貨物運搬船シリーズの、通算100隻目の竣工・引き渡しを達成した。

当社では従来よりハンディマックス型ばら積み貨物運搬船(ハンディマックスバルクキャリア)を主力商品の一つと位置付けており、近年では1993年に販売を開始した46000重量トン型(46型：計27隻受注)からシリーズ建造への新たな段階に取り組んできた。

46型は、船主及びオペレーターのニーズに応え、港湾事情による船型寸法の諸制限を満足させながら載貨重量及び貨物倉容積を当時の主流船型より一回り大型化した最新船型として開発したものである。本船型は海運マーケットにおいて高い評価を得て、ハンディマックスバルクキャリアにおける当社ブランドの礎を築く存在となった。

その後1998年にはより多くの貨物を積載できる50000重量トン型(50型：計33隻受注)を開発した。

46型、50型の竣工後の実航海に基づく顧客の評価を反映する形で、トラブル・フリーとさらなる大型化を求めるニーズに応え、一段と推進性能を向上させた現行の56000重量トン型シリーズの開発を進め、2001年より市場に投入した。本シリーズは、「三井の56」の呼び名で国内外の船主及び用船者に幅広く認知され、海運マーケットにおいて高い評価を獲得することになる。当時の好調な海運市況にも支えられて受注隻数を順調に伸ばし、2003年2月6日のシリーズ1番船“NORDHVAL”(ノルドヴァル 当社第1565番船)の竣工・

引き渡し以来、およそ7年を経て、このたび100隻目の竣工・引き渡しという記念すべき大きな節目を迎えた。

当船型の具体的な特長としては、主に以下の点が挙げられる。

1. 顧客ニーズに応えるため、貨物倉寸法を大型化し、従来のハンディマックス型バルカーに比べて大きい70000m³を超える積載容積を有している。
2. ばら積み貨物運搬船は、石炭や鉄鉱石、穀物、鋼材など多様な原料、半製品を積載し、また不定期航路での運航が多いためにその都度荷物も港湾条件も変わる。こうした状況で荷物の出し入れをスムーズに行うために、貨物倉の開口部寸法を大きく設定し、荷役効率を高めている。また、より能力の大きい荷役用クレーンを搭載して、港湾荷役装置のない港でも制約を受けることが少ない。
3. 主機関として、コンパクトで高出力かつ高い信頼性で定評の当社製ディーゼルエンジンを搭載している。また、運航スケジュールにフレキシブルに対応できる余裕のある馬力設定で十分な速力性能を有している。

上記に加え、推進性能や燃費といった性能面の良さ、また荷役上の使い勝手の良さなど客先から好評を得て、同一船型のシリーズ船として造船業界では異例の竣工数となった。

本シリーズは現在もおおよそ50隻の受注残があり、玉野・千葉の両工場では建造が続いている。当社は当船型をはじめとして種々の船型について、引き続き顧客ニーズに応える高品質の船舶を建造すべく全力を注いで行く。

(船舶・艦艇事業本部)

世界初の天然ガスハイドレート(NGH)陸上輸送の実証研究が完了



三井造船は、中国電力株式会社と共同で、天然ガスハイドレート(NGH)の製造、配送、利用設備の開発・実証研究を完了しました。

実証研究では、液化天然ガス(LNG)を燃料として使用する中国電力株式会社柳井発電所に NGH 製造試験設備を設置し、製造した NGH ペレットを、ローリーなどで同社エネルギー総合研究所および広島ガス株式会社技術研究所に設置した需要試験設備まで輸送し、利用することにより、NGH 陸上輸送チェーンの実証を行いました。

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構から両社が共同研究として受託したもので、NGH を製造し、需要試験設備まで輸送、再ガス化して、利用する一連の実証は、今回が世界初の試みとなりました。

天然ガスが水分子の中に包蔵された固体状の NGH は、 -162 の極低温で製造・輸送・貯蔵を行う LNG 方式に比べて、常温付近で製造が可能で、大気圧下、約 -20 という穏やかな条件で安定する特性を持つことから、設備全体を簡便にすることが期待されています。

今回の実証成果を踏まえ、並行して実施している NGH 製造プラントの大型化および、NGH 輸送船開発などを推進することで、海外の多数の中小ガス田から需要地へ向け、クリーンな天然ガスを NGH で安全かつ経済的に輸送する、新しい天然ガスのサプライチェーンの実用化へ向けた開発を加速していきます。

[担当] 事業開発本部 NGH プロジェクト室 神田 肇, 中井 郷越 電話: 03 - 5202 - 3980

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 200 号

2010年(平成22年)6月30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

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 200 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 200 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，ホーパークラフト，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

100
SHIPS



56,000重量トン型ばら積み貨物運搬船 100隻目の竣工・引き渡しを達成！

三井造船は2010年3月に主力商品のひとつである56,000重量トン型ばら積み貨物運搬船の記念すべき100隻目の竣工・引き渡しを行いました。

本船型は、お客様のニーズを的確に把握し、貨載容量の大型化、大型クレーン搭載による荷役効率の向上、当社製のコンパクトなディーゼルエンジンの搭載による低燃費と運航自由度を増す馬力余裕、広口ハッチなど操作性の良さを実現し、2003年に同型一番船が就航して以来、海運業界から「三井の56」と呼ばれるほどの高い評価を受け、短期間で異例の実績を積みあげました。

現在も本船型は約50隻の受注残があり、世界の海に150隻を超える「三井の56」が活躍する日もそう遠くはありません。