

三井 造船 技報

平成 25 年 2 月 ■ 第 208 号

MITSUI ZOSEN TECHNICAL REVIEW No. 208 2013



三井造船の新たな船型開発技術



表紙説明

三井造船の新たな船型開発技術

三井造船昭島研究所は、各種水槽試験や数値シミュレーション技術などにより船型開発に貢献している。技術論文・報告で紹介する水槽試験は、当社の曳航水槽で行われたものである。これをベンチマーク問題として、三井造船と九州大学との組織対応型連携研究で開発したコンピュータシミュレーションコード“RIAM-CMEN”の解析結果を評価した。大型商船の波浪中抵抗増加問題を大規模数値シミュレーションで解析することはこれまで困難であったが、今回の開発により水槽試験結果を再現するために必要な解析条件が明らかになると同時に、コンピュータシミュレーションによる数値解析が実用レベルまで到達していることが確認された。

Cover

New Technology for Developing Ship Hull Forms in Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. (MES)

Mitsui Akishima Laboratory has been contributing to the development of ship hull forms by various kinds of tank tests and numerical simulation techniques. The experimental tank test which we introduce in this technical paper and report has been carried out in MES's towing tank. The result of this test was offered as a benchmark test of the computer simulation code “RIAM-CMEN” which had been developed by a collaboration research by MES and Kyushu University. It has thus far been difficult to analyze the added resistance in waves for the large merchant ships by a large scale numerical simulation. However, research and development of this time have revealed the condition of the simulation for reproducing the experimental tank test result. At the same time, it has been proved that the numerical analysis by the computer simulation has reached to the level of practical use by virtue of this research and development activity.

三井造船技報

2013年(平成25年)2月・第208号

目次

技術論文・報告

平水面上船体形状を考慮した波浪中 CFD の開発	1
胡 長洪 三上 隆 山本 虎卓	
半導体製造装置用 ZCIH の商品化.....	8
岡崎 良弘 阿尾 高広 尾崎 一博 船路 俊介	
低温排熱回収のための熱電発電技術の開発.....	14
加藤 寿仁 鎌田 勤也 北川 裕之	
保温材下の腐食検査技術の現状と適用事例	
- 見えない腐食を検知する音響検査技術 -	20
石原 修二 玉川準之介 中原 亮一	
佐藤 功一 中田 成幸	

製品・技術ニュース

国道 20 号新宿高架橋架替工事	
- 交通車両共用下での旧橋撤去及び新設橋梁の架設 -	25
中低温熱エネルギー回収システム“ VPC(Variable Phase Cycle)”を開発	
- 10 kW 級及び 200 kW 級試験機で実証 -	26
オフラインティーチングソフトウェア“ RoboTrue Laser ”	
- 三次元レーザー切断加工の生産準備期間短縮に貢献 -	28
濃煙熱気実火災訓練装置	
- MP8 型消防訓練装置として採用され、好評！ -	30

Home Page News

ディーゼルエンジンの累計生産，8 000 万馬力を達成	
- 三井-MAN B&W ディーゼルエンジン -	31

MITSUI ZOSEN TECHNICAL REVIEW

No. 208 FEBRUARY 2013

CONTENTS

Technical Paper and Report

Development of CFD Method for Study of Above Waterline Hull Form Effect on Added Resistance	1
<i>Changhong HU, Takashi MIKAMI, Koutaku YAMAMOTO</i>	
Development of Zone Control Induction Heating for Semiconductor Industry	8
<i>Yoshihiro OKAZAKI, Takahiro AO, Kazuhiro OZAKI, Syunsuke FUNAJI</i>	
Development of Thermoelectric Energy Conversion for Exhaust Heat Recovery	14
<i>Toshihito KATO, Kinya KAMATA, Hiroyuki KITAGAWA</i>	
Corrosion Inspection Technology for Invisible Corrosion under Insulation	20
<i>Shuji ISHIHARA, Junnosuke TAMAGAWA, Ryoichi NAKAHARA, Koichi SATO, Shigeyuki NAKATA</i>	
Products and Technology News	25, 26, 28, 30
Home Page News	31

平水面上船体形状を考慮した波浪中 CFD の開発

胡 長 洪* 三 上 隆** 山 本 虎 卓***

Development of CFD Method for Study of Above Waterline Hull Form Effect on Added Resistance

Changhong HU, Takashi MIKAMI, Koutaku YAMAMOTO

This paper reports a part of the collaboration research results between Mitsui Engineering & Shipbuilding Co. Ltd. and Kyushu University on CFD development for prediction of added resistance in waves for large merchant ships. The added resistance in waves is influenced by the above waterline hull form, which is very difficult to find in the calculation by using a linear theory based method. In this collaboration research, the CFD code, RIAM-CMEN (Research Institute for Applied Mechanics, Computation Method for Extremely Nonlinear hydrodynamics) which has been developed for strongly nonlinear wave-ship interactions, is extended and applied to the prediction of the added resistance. Emphasis of the research is placed on high-resolution numerical simulation of the local wave reflection and wave breaking phenomena on the bow flare. An experiment with a VLCC model is carried out for verification of the extended RIAM-CMEN code. In this paper, at first the fundamental theory about RIAM-CMEN is described, then numerical results are presented and compared to the experiment. Finally, as an example of practical use, a numerical study is presented about the influence of the above-waterline bow shape on the added wave resistance.

本研究は、九州大学と三井造船との組織対応型連携の一環として行われたもので、九州大学が開発してきた CFD コード RIAM-CMEN に対して拡張・改造を行うことにより、大型商船の船首における反射波・砕波を考慮できる高精度な波浪中抵抗増加推定法を確立し、初期段階の船型開発に用いることを目指している。本報では、まず RIAM-CMEN の主な特長について述べる。そして、VLCC の模型を用いた水槽実験と対応する数値計算を実施したので、計算と実験の比較により波浪中抵抗増加の推定精度を検証する。さらに、初期段階の船型開発を念頭に、平水面上形状を変更した場合に得られる波浪中抵抗増加の変化について述べる。

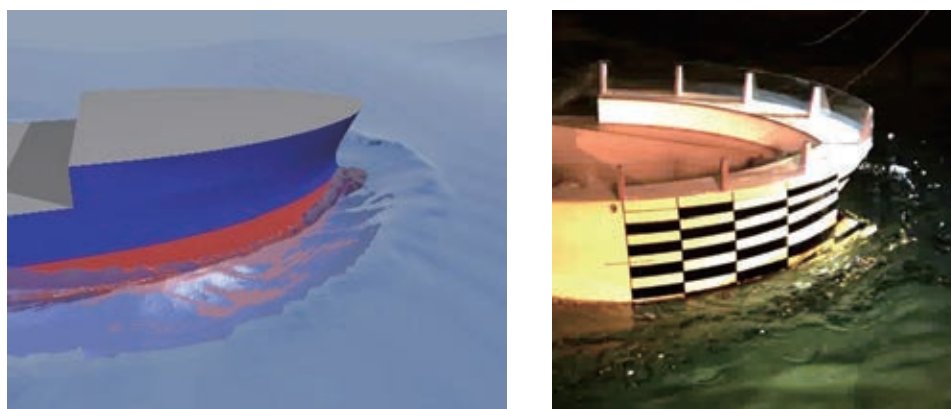


図1 RIAM-CMEN の計算結果(左)と水槽実験(右)の比較
Comparison between RIAM-CMEN Computation and Experiment

* 九州大学 応用力学研究所

** 株式会社三井造船昭島研究所

*** 船舶・艦艇事業本部 基本設計部

1. 緒言

大型肥大船の波浪中抵抗増加の大部分は船首部での反射波及び砕波による抵抗増加であり、これまでの研究は線形理論に基づく推定法の開発がほとんどである。しかし、このような抵抗増加は水面より上のフレア形状に影響される可能性が多分にある一方で、従来の波浪中推定法では平水面下の船型しか考慮できないため、フレアの影響を評価できなかった。近年コンピュータの性能の飛躍的な発展により、数値流体力学(CFD)的手法を用いた大規模数値シミュレーションによって、砕波を含む複雑な自由表面現象に対する定量的な予測が可能になりつつある。

本研究では、九州大学応用力学研究所で開発されてきた直交格子ベースのCFDコードであるRIAM-CMEN(Research Institute for Applied Mechanics, Computation Method for Extremely Nonlinear hydrodynamics)に対して拡張・改造を行うことにより、大型商船の船首における反射波・砕波を考慮できる高精度推定法を確立し、初期段階の船型開発に用いることを目的としている。

RIAM-CMENの開発では、CIP(Constrained Interpolation Profile)法¹⁾、THINC(Tangent of Hyperbola for INterface Capturing)法²⁾など最新の計算手法が応用され、さらに直交格子で運動する複雑形状の物体を計算する仮想粒子法が開発されたことで、荒天下船舶に加わる強非線形波浪荷重に関する高精度予測ができるようになり、多くの成果を挙げてきた³⁾⁻⁵⁾。しかし、大型商船における波浪中抵抗増加を高精度に評価するには、グローバルな船体運動の計算もさることながら、船首部での複雑な自由表面形状の変化を正確に捉える必要があり、船首部分における高解像度化が必要となってくる。また、初期段階の船型開発に応用するためには、計算時間をできるだけ短くする必要があり、高速化が必要となってくる。そこで、本研究開発ではRIAM-CMENの更なる高解像度化と高効率化に重点を置くことにした。

本報では、まずRIAM-CMENの主な特長について述べる。そして、三井造船船島研究所で行った水槽実験(VLCC模型)に対応する数値計算を実施し、計算と実験の比較により波浪中抵抗増加の推定精度を検証する(図1参照)。さらに、初

期段階の船型開発を念頭に、平水面上形状を変更した場合に得られる波浪中抵抗増加の変化について述べる。

2. RIAM-CMEN 概要

RIAM-CMENの主な特長は以下のとおりである。

- 空間固定の直交格子を用いている。
- 流体に対する差分解法にC-CUP(CIP Combined Unified Procedure)法を用いている。
- 自由表面の捕捉にTHINC法を用いている。
- 動揺する浮体表面の境界条件を差分解法に組み入れるために仮想粒子法を用いている。

計算の対象となる物質は液体(水)、気体(空気)及び固体(船及び円柱)であり、その空間分布をそれぞれ図2に示すように密度関数 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 で表す。ただし、 $\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 1$ である。

2.1 流体に対する差分解法

RIAM-CMENでは、水と空気は非圧縮性流体として取扱っている。粘性・非圧縮性流体の非定常流れに対する支配方程式は、流速を $u_i (i = 1, 2, 3)$ 、圧力を p として次のように表される。

$$\frac{u_i}{x_i} = 0 \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{u_i}{t} + u_j \frac{u_i}{x_j} = - \frac{1}{x_i} \frac{p}{x_i} + \frac{1}{x_i} (\mu S_{ij}) + F_i \dots (2)$$

ここで、 ρ は流体の密度、 μ は粘性係数、 $S_{ij} = u_i / x_j + u_j / x_i$ はせん断応力、 F_i は重力を含めた体積力である。乱流モデルはSGSモデルを使用している。自由界面張力については、取り扱う問題に影響が小さいと考えて無視している。式(2)については、移流項の計算($u^n \rightarrow u^*$)、拡散項及び体積力の計算($u^* \rightarrow u^{**}$)、圧力の計算と速度修正($u^{**} \rightarrow u^{n+1}$)、の3段階に分けるFractional Step Methodで計算する。ここで n は時間ステップ数で、時間刻みは $t = t^{n+1} - t^n$ である。

第1段階の移流項計算では、Yabeら¹⁾が提案したCIP法を適用している。第2段階の拡散項及び体積力計算では、中心差分を用いたオイラーの陽解法を適用している。第3段階の圧力項計算では、 p と u_i の連成を陰解法によって取扱い、その結果、圧力は次に示すポアソン方程式を解くことによって求めている。

$$\frac{1}{x_i} \left(\frac{1}{x_i} \frac{p^{n+1}}{x_i} \right) = \frac{1}{t} \frac{u_i^{**}}{x_i} \dots \dots \dots (3)$$

式(3)は、原理的には、液相、気相、固相のすべてに適用することができ(C-CUP法)、異なる相の界面において圧力に関する境界条件を課す必要がない。

2.2 自由表面の捕捉法

自由表面(水・空気の界面)の捕捉は、水に関する密度関数 ϕ_1 の移流方程式をTHINC法²⁾によって計算して行う。ここでTHINC法の概要を1次元の移流方程式を使って説明す

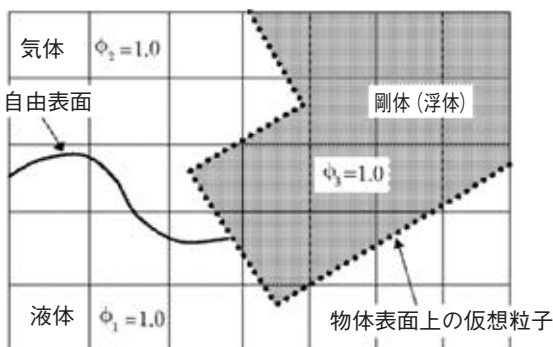


図2 浮体と水波相互作用に関する多相流体計算のコンセプト
Multi-phase Computation Model for Wave-Body Interactions

る。なお、多次元の問題については、方向分離法 (Directional splitting) により数値計算することになる。

1 次元密度関数は (x, t) とし、そのセル平均値を式 (4) で定義する。

$$\bar{\phi}_i = \frac{1}{x_{i+1/2} - x_{i-1/2}} \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} \phi(x, t) dx \quad (4)$$

に関する支配方程式を保存形で表すと、式 (5) となる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial (u \phi)}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

式 (4) を考慮して、式 (5) を空間 $[x_{i-1/2}, x_{i+1/2}]$ 、時間 $[t, t + \Delta t]$ にわたって積分すると式 (6) が得られる (図 3 参照)。

$$\bar{\phi}_i^{n+1} = \bar{\phi}_i^n + \frac{1}{x_{i+1/2} - x_{i-1/2}} (g_{i-1/2} - g_{i+1/2}) \Delta t \quad (6)$$

ただし、上付き n と $n+1$ は時間レベル $t = t$ と $t = t + \Delta t$ を意味する。セル境界の流量 (flux) は式 (7) で表される。

$$g_{i\pm 1/2} = \int_t^{t+\Delta t} (u \phi)_{i\pm 1/2} dt \quad (7)$$

したがって、セル境界における流量を適切な方法で計算できれば、セル平均密度関数の時間前進が計算できる。THINC 法では、境界の風上側セルの密度関数分布を双曲正接関数で近似して境界を通過する流量を計算するという Semi-Lagrangian 法を採用している。 $g_{i+1/2}$ の計算に関して、境界での速度方向により風上セルが左右どちらにある場合に対しても計算式が必要である。

ここで、 $u_{i+1/2} \geq 0$ の場合について、THINC 法を説明する。図 3 に示すように左のセル $[x_{i-1/2}, x_{i+1/2}]$ は風上セルとなる。セル内の密度関数の分布は以下の双曲正接関数を用いる。

$$F_i(x) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \tanh \left[\left(\frac{x - x_{i-1/2}}{\Delta x_i} - \frac{u_{i+1/2} \Delta t}{\Delta x_i} \right) \right] \right\} \quad (8)$$

ただし、 $\Delta x_i = x_{i+1/2} - x_{i-1/2}$ である。式 (8) には 4 つのパラメータ $\bar{\phi}_i$, $\bar{\phi}_i$, $\bar{\phi}_{i+1}$, $\bar{\phi}_{i+2}$ があり、それぞれ以下の方法で決める。

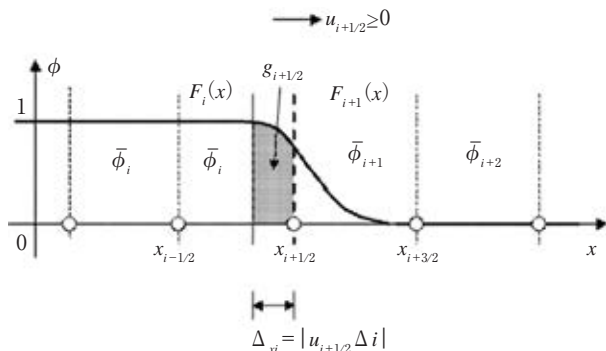


図 3 THINC 法 の 概 念 図
Concept of THINC Scheme

と は数値拡散を抑えるために設けたパラメータである。隣接セルの中に密度関数の大きい方を使ってセル内のプロファイルを決める。

$$\beta = \begin{cases} 1 & \text{もし } i+1 \geq i-1 \text{ ならば} \\ -1 & \text{それ以外} \end{cases}, \quad \gamma = \begin{cases} 1 & \text{もし } i+1 \geq i-1 \text{ ならば} \\ -1 & \text{それ以外} \end{cases} \quad (9)$$

β は密度関数が 0 から 1 までの変化の度合いを決めるパラメータである。 β は大きいほど ϕ の変化はより急激になるが、数値安定性とのバランスから、一般に $\beta = 3.5$ を使うことが多い。

パラメータ γ は以下の式により求める。

$$\frac{1}{x_{i+1/2} - x_{i-1/2}} \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} F_i(x) dx = \bar{\phi}_i \quad (10)$$

$g_{i+1/2}$ が決められたら、Semi-Lagrangian 法で流量の計算を行う (図 3 の影の部分)。

本研究では、THINC の最新バージョンである THINC/SW (Tangent of Hyperbola for Interface Capturing with Slope Weighting) を使用した。

2.3 物体表面の処理法

浮体に働く流体力を圧力積分によって求める必要性から、浮体表面の位置、すなわち液相あるいは気相と固相の界面の位置は特にシャープに求めなければならない。また差分法による流体の計算においては、浮体表面での流速に関する境界条件を精度良く満足させなければならない。

RIAM-CMEN の計算では、図 2 に示すように、浮体表面に仮想粒子を置き、各粒子位置での法線ベクトル、局所面積の情報を保持させる。また各粒子点での圧力は、時間ステップごとに直交格子を用いて計算される各セルの圧力の値から内挿することによって求められる。

それらを用いると、浮体に働く流体力・モーメントが計算でき、浮体の運動方程式を時間積分すれば、浮体の直線運動の速度、回転運動の角速度が求められる。したがって、浮体表面上に置かれたすべての仮想粒子の新しい時間ステップにおける速度及び位置 (すなわち、計算領域内における固相の密度関数 ϕ_3 の値) が求められる。

時刻 $t = t^{n+1}$ における仮想粒子での速度成分を U_{Pi}^{n+1} と表すと、浮体境界面を含む計算セルの格子点における速度成分は式 (11) によって与えることができる。

$$U_i^{n+1} = \phi_3 U_i^{n+1} + (1 - \phi_3) U_i^{**} \quad (11)$$

ここで U_i^{**} は、C-CUP 法における第 3 段階で計算される各格子点での流速成分であり、 U_i^{n+1} は仮想粒子点での速度 U_{Pi}^{n+1} から内挿によって求めた各格子点での速度成分である。

固相の密度関数 ϕ_3 は上記のようにして求まるので、気相 (空気) での密度関数 ϕ_2 は $\phi_2 = 1 - \phi_1 - \phi_3$ から求められる。そしてこれらを用いれば、計算領域内の任意のセルにおける物理量 (q と表す) は各相の値 q_m を用いて式 (12) によって計算することができる。

$$q = \sum_{m=1}^3 m q_m \dots \dots \dots (12)$$

2.4 CFD 計算コード RIAM-CMEN

これまで述べた CIP・直交格子法の計算手順を図 4 に示す。また、CIP・直交格子法を応用して開発された CFD コード RIAM-CMEN の概要を図 5 に示している。

2.5 RIAM-CMEN の並列化

直交格子ベースの CFD の計算精度は、基本的に格子解像度、すなわち総格子数に比例している。CPU 時間及びメモリ制限より、PC クラスの計算機で単一 CPU を前提とした場合、RIAM-CMEN が使える格子数は 1600 万程度が限界である。より高い格子解像度による高精度計算を設計段階で利用するためには、プログラムを並列化し PC クラスタを利用することが現実的である。

RIAM-CMEN は直交格子を用いているため計算空間全体も直方体となるが、PC クラスタによる並列計算では図 6

のように計算空間を領域に分割する。このとき、各領域での CFD 計算は各計算ノードで担当し、各領域の境界情報を MPI ライブラリを用いて交換している。並列化に際し、最も計算時間のかかる圧力計算に多くの工夫を行った。

3. 波浪中抵抗増加の推定精度検証

開発した RIAM-CMEN の波浪中抵抗増加推定の有効性を水槽実験との比較を通して検証する。

3.1 水槽実験

波浪中抵抗増加に関する RIAM-CMEN の計算精度を検証する目的で、三井造船昭島研究所の小水槽において水槽実験を実施した。供試船型としては一般公開されている KVLCC 船型⁷⁾を用いた。模型船の主要目を表 1 に、実験条件を表 2 に示す。実験では、船首付近の挙動を高速ビデオカメラで撮影するとともに、surge 方向の流体力及び surge, heave, pitch の運動を計測した。

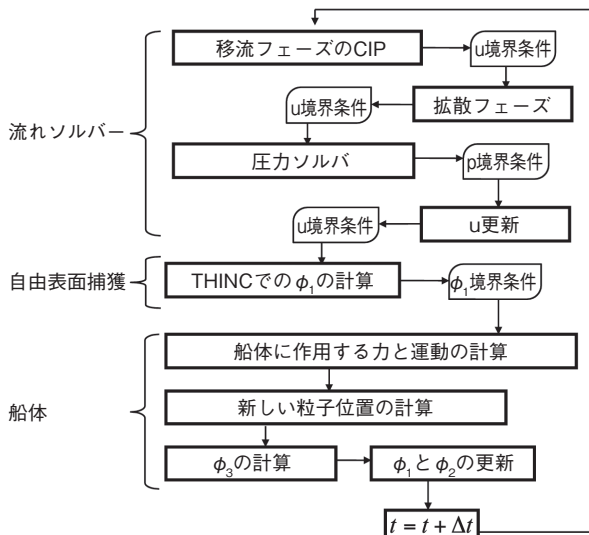


図 4 CIP・直交格子法計算手順
Flow Chart of CIP-based Cartesian Grid Method

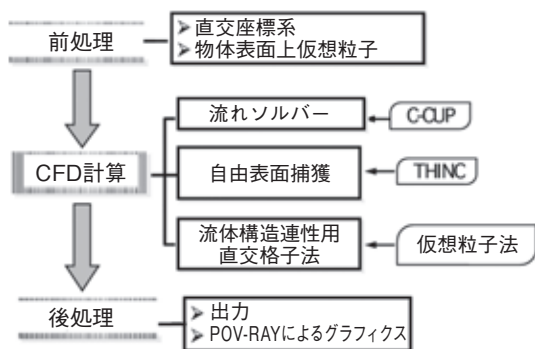


図 5 RIAM-CMEN の概要
Outline of RIAM-CMEN

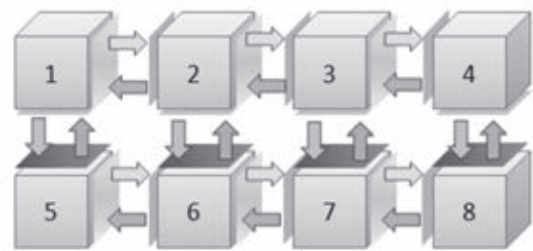


図 6 並列計算概念
Concept of Parallelization

表 1 供試模型の主要目
Principal Dimensions of the Ship Model

項目	単位	値
長さ(垂線間長): L_{pp}	m	3.500
幅: B	m	0.634
喫水: d	m	0.227
実験における乾舷: f	m	0.045
排水容積:	m^3	0.408
重心高さ: z_G	m	0.126
縦揺慣動半径: k_{yy}/L_{pp}	-	0.242

表 2 実験条件
Experiment Conditions

項目	値
フルード数: Fn	0, 0.144
波種類	規則波
波幅 / 船長: λ/L_{pp}	0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6
波高 / 船長: H/L_{pp}	9.06×10^{-3} (実海域 3 m 相当) 1.81×10^{-2} (実海域 6 m 相当)
波向き	向波

3.2 数値計算

水槽実験に対応する RIAM-CMEN による数値計算は、図 7 に示す数値水槽で行った。計算領域は、x 軸方向に $-2.6 L_{pp} \sim 4.9 L_{pp}$, y 軸方向に $-2.1 L_{pp} \sim 2.1 L_{pp}$, z 軸方向に $-1.3 L_{pp} \sim 1.3 L_{pp}$ とした。(ただし座標系の原点は、模型船の中央で静止水面に置かれ、x 軸の正方向は船の進行方向としている。)

ここでは、大型商船にとって実海域で遭遇頻度が高く燃費を論じる上で重要な短波長域的を絞り、表 2 の実験条件のうち $\lambda/L_{pp} = 0.5, 0.6, 0.7$ に対し計算を実施した。

短波長域では船体動揺が極めて小さくなるため、波浪中抵抗増加に対する船体動揺に起因する成分も極めて小さくなる。したがって、船体を動揺させる場合に適した比較的均等な計算格子を用いる必要がなくなり、総格子数を抑えたまま船首部解像度を上げることが可能となる。これは船首部における反射波・砕波を詳細に捉えることが可能な計算格子としたことを意味し、実用上の利点が向上された。

3.3 計算結果

6 種類の解像度で計算を実施した。計算格子の条件を表 3 に示す。なお、表 3 の No.6 の計算格子に対しては、並列化した RIAM-CMEN 用い 32CPU で計算を実施した。

図 8 に波浪中抵抗増加の比較を示す。横軸は波長 / 船長 (λ/L_{pp}) であり、縦軸は波高で無次元化した波浪中抵抗増加を示す。なお、参考のために図中には破線で反射波成分に対する半実験式から求まる値を示してある。動揺の影響がはじめる $\lambda/L_{pp} = 0.7$ で僅かに異なるが、 8×10^6 以上の格子数では実験値と良く一致しており、RIAM-CMEN での波浪中抵抗増加の推定が妥当であることが分かる。

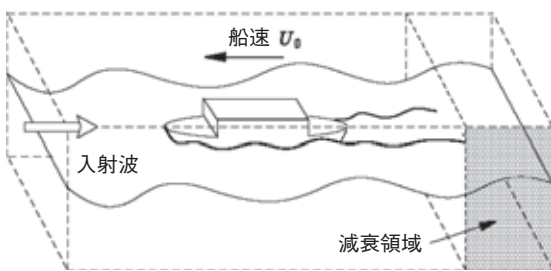


図 7 3次元数値水槽
3-D Numerical Wave Tank

表 3 計算格子
Computation Mesh

番号	メッシュ数	x_{min}/L_{pp}	y_{min}/L_{pp}	z_{min}/L_{pp}
1	1×10^6	0.010	0.010	0.005
2	2×10^6	0.005	0.005	0.002
3	4×10^6	0.004	0.004	0.002
4	8×10^6	0.003	0.003	0.0015
5	16×10^6	0.002	0.002	0.0015
6	24×10^6	0.0007	0.0007	0.0007

表 4 に出会い波 10 周期分に必要な計算時間を示す。図 8 で水槽実験結果と良好な一致を示した 8×10^6 以上の格子数では波浪中抵抗増加の値がほぼ収束している。表 4 から分かるように、 8×10^6 から 16×10^6 に格子数を 2 倍にすると約 3 倍の計算時間の差があり、実用的観点からは 8×10^6 の格子数を用いれば良いことが分かる。なお、 24×10^6 格子の計算は 1CPU での計算の限界を超えているため、32CPU で計算を行っているが、同様に 8×10^6 格子に対しても適用可能であり、その場合の計算時間は 7 時間となり船型改良に用いることのできるレベルにあることが分かる。

これまで船体運動を拘束した場合の比較を示してきたが、短波長域ではあるものの $\lambda/L_{pp} = 0.7$ の場合には動揺の影響が出始めているため、実験値では値が増加するのと比較して、運動を拘束した場合の計算結果は半実験式から求まる値と同じく減少傾向となっている。

動揺の影響についても評価できるか調査するため、船体の動揺を許した場合(総格子数は 16×10^6)の比較計算を行った。結果を図 9 に示す。

動揺を非拘束とした場合は船首部での格子数が相対的に少なくなっているため、推定精度そのものは拘束時と比較して低いと思われるが、 $\lambda/L_{pp} = 0.7$ で値が増加する傾向を捉えることができている。 $\lambda/L_{pp} = 0.7$ における船首部での水

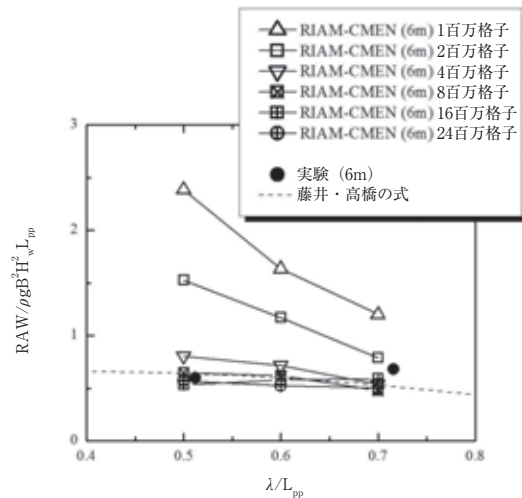


図 8 波浪中抵抗増加の比較
Comparison of Added Wave Resistance

表 4 計算時間(出会い波 10 周期分)
CPU Time for 10 Encounter Wave Periods

番号	メッシュ数	CPU 数	所用時間(時間)
1	1×10^6	1	7
2	2×10^6	1	12
3	4×10^6	1	23
4	8×10^6	1	58
5	16×10^6	1	170
6	24×10^6	32	40

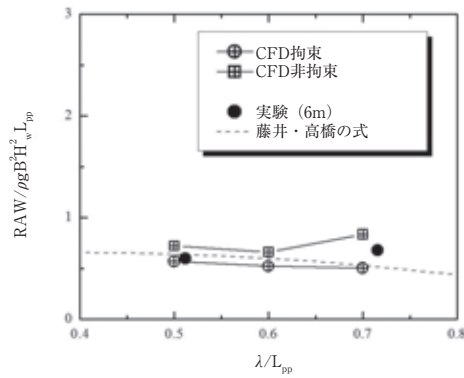
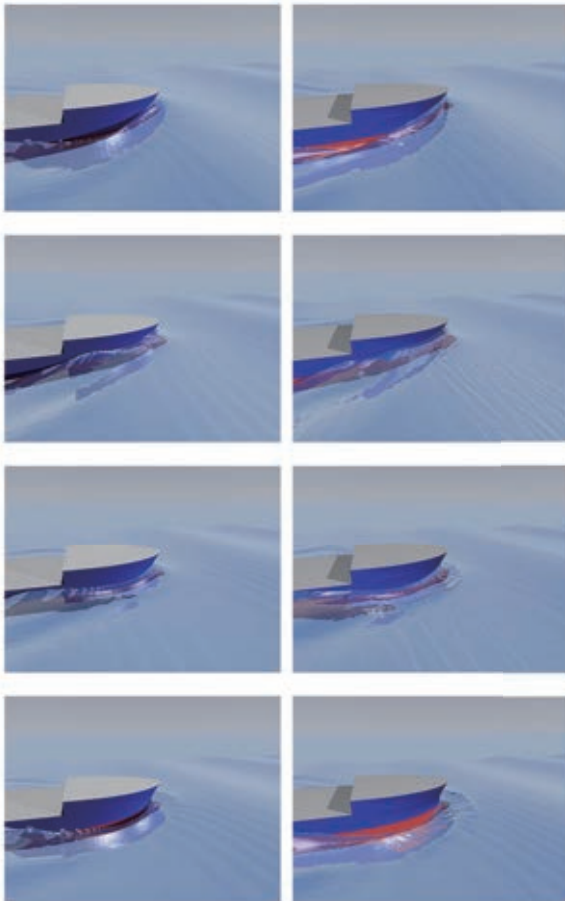


図9 動揺拘束条件による波浪中抵抗増加の変化
Change of Added Wave Resistance due to Constraint Condition of Motion



(a) 動揺拘束 (b) 動揺非拘束

図10 波面の比較
Comparison of Free Surface

面形状を可視化し、動揺拘束・非拘束を比較して図10に示す。動揺を非拘束とした場合は、反射波に加え、動揺に伴う船首部からの造波の影響も見取れる。以上から、RIAM-CMENは動揺影響を考慮した場合にも、妥当な結果が得られることが示された。

表5 計算条件
Calculation Condition

タイプ	A, B, C, D	
船速	Fn = 0.15	
運動	固定	
波条件 (規則波)	向き	向波
	λ/L_{pp}	0.5, 0.6, 0.7
	H/L_{pp}	0.0241

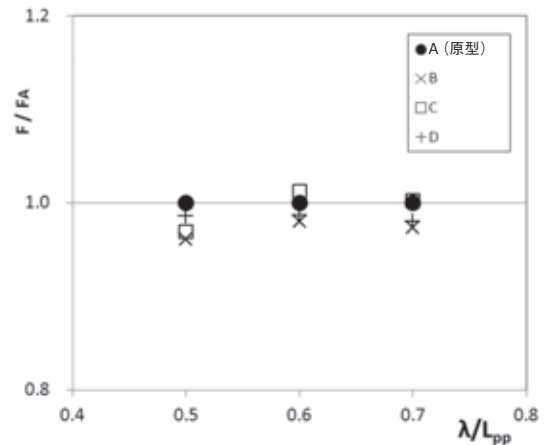


図11 計算結果
Calculation Results

4. 水面上形状を変更した場合への適用

ここでは船型開発への応用を念頭に、RIAM-CMENが水線面よりも上の形状の変更に対し、波浪中抵抗増加の変化を捉え得るかということを確認する目的で比較計算を実施した。

具体的には、水線面よりも下の形状は同一として、水線面よりも上に関しては、原型、船首フレアを原型よりも細くした場合、船首フレアを無くした場合、原型のフレアよりも高い位置にフレアを移動させた場合の4つの船型について計算を実施した。計算条件を表5に示す。総格子数を 15×10^6 とした。計算結果を図11に示す。波長によらず、水線面よりも上の形状を細くした場合のフレア形状であるB船型が全ての船型の中で最も波浪中抵抗増加の値が小さくなることが分かる。

これまでに著者らが得ている経験に照らしても、船型による差を有意な差として表現できており、ここで行った試計算によって、水線面よりも上の形状を変更した場合の波浪中抵抗増加の変化を十分に捉えることができ、波浪中抵抗増加の低減を目的とした船型改良に利用可能であることが確認された。

5. 結言

九州大学と三井造船との組織対応型連携の一環として行われた波浪中抵抗増加推定法の確立と本推定法による計算結果について紹介した。

CFD コード RIAM-CMEN に対して拡張・改造を行うことで、大型商船の船首における反射波・砕波を考慮できる高精度な波浪中抵抗増加推定法を開発した。

水槽実験結果と RIAM-CMEN により得られた推定値の比較を行い、波浪中抵抗増加の推定値が精度良く実験値と一致しており、推定結果が妥当であることを示した。さらに、計算の並列化に対する改造も行い、計算時間が船型開発に用いることができるレベルにあることを示した。また、船型開発に用いることを念頭に、水面上形状を変更したことに対する検討の適用例を示した。

今後は、開発された計算コードの更なる高度化・検証を続けるとともに、実際の船型開発に適用していく予定である。

参 考 文 献

- 1) Yabe, T., et al. : The Constrained Interpolation Profile Method for Multiphase Analysis, Journal of Computational Physics, 169,(2001) p. 556
- 2) Xiao, F., et al. : A Simple Algebraic Interface Capturing Scheme Using Hyperbolic Tangent Function, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 48,(2005) p. 1023
- 3) Hu, C., et al. : A CIP-based Method for Numerical Simulation of Violent Free-Surface flows, Journal of Marine Science & Technology, 9, 4(2004) p. 143
- 4) Hu C, et al. : Application of CIP Method for Strongly Nonlinear Marine Hydrodynamics, Ship Technology Research, 53, 2(2006) p. 74
- 5) Hu, C., et al. : Numerical Simulation of Strongly Nonlinear Wave-Ship Interaction by CIP/Cartesian Grid Method, Int. Journal of Offshore and Polar Engineering, 20, 2(2010-6) p. 81
- 6) Xiao, F., et al. : A simple algebraic VOF algorithm. Journal of Computational Physics, 230,(2011) p. 7089
- 7) 例えば、独立行政法人海上技術安全研究所 : Modified KRISO TANKER (KVLCC2M), http://www.mmri.go.jp/cfd/cfdws05/Detail/KVLCC/kvlcc_g&c.htm, (2013-2-12)

〔問い合わせ先〕

船舶・艦艇事業本部 基本設計部
TEL 042 - 545 - 3121 山本 虎卓



胡 長洪



三上 隆



山本 虎卓

半導体製造装置用 ZCIH の商品化

岡崎 良弘* 阿尾 高広* 尾崎 一博* 船路 俊介*

Development of Zone Control Induction Heating for Semiconductor Industry

Yoshihiro OKAZAKI, Takahiro AO, Kazuhiro OZAKI, Syunsuke FUNAJI

In this paper, we introduce Zone Control Induction Heating system(ZCIH)that has been developed in our company. The ZCIH system is consisted of multi heating coils and the same number of inverter units. The core technical point of ZCIH is to have the ability to control closed located multi heating coils independently. The conventional IH system cannot do it. The newly established ZCIH system enables to control the temperature of multi zones independently by this ability. For instance, when you heat the board that it easily distorted by a little temperature non-uniformity, this ability is useful. In this paper we focus to introduce the application of ZCIH to semiconductor-fabrication equipment. We explain the precaution point, design procedure , and the actual experimental data.

本報では、三井造船で開発したゾーン制御方式誘導加熱(Zone Control Induction Heating : ZCIH)システムについて紹介する。ZCIH システムは、複数の加熱コイルと、それと同じ数のインバータで構成される。ZCIH の技術的な核心は、複数の加熱コイルを独立して制御する技術を確立することである。従来タイプの誘導加熱装置では近接して設置された複数の加熱コイルを別々に制御することができなかった。ZCIH で確立した技術により、複数の加熱コイルを複数のゾーンに配置し、複数ゾーンの加熱状態、すなわち温度を独立して制御することが可能となった。例えば、場所により温度が異なると熱応力による歪が発生するため、特に薄板を加熱する場合にこの技術を活用することができる。本報では半導体製造装置への適用を中心として、基礎技術、実際の装置に適用を図るための注意点や設計手順、磁界 - 熱解析、当社内テスト装置により取得した実験結果などについて示す。

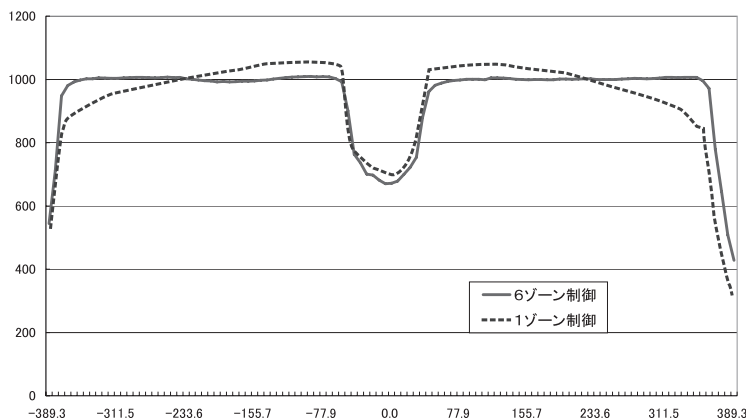


図1 ゾーン制御なし(1ゾーン制御)と6ゾーン制御の温度分布比較
Comparison between One Zone Control and Six Zone Control

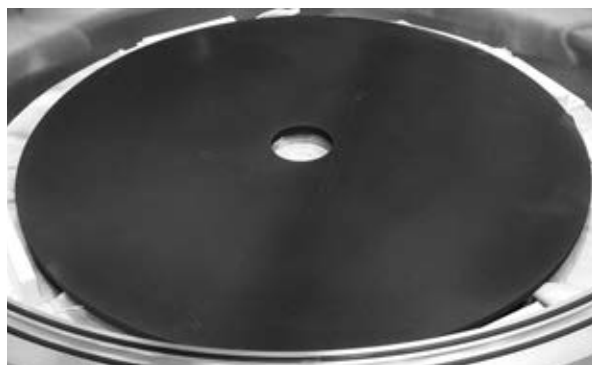


写真1 図1の加熱対象グラファイト
Graphite to be Heated in the Fig1

* 機械・システム事業本部 事業開発部

1. はじめに

誘導加熱 (Induction Heating : IH) による加熱方式は、クリーンで安全、高効率という特長がある。近年では産業用のみではなく、一般家庭においても IH キッキングヒータや IH 炊飯器などが幅広く普及している。三井造船では、鍛造用を中心として半世紀以上に渡り、社内で設計・製造した誘導加熱装置を提供し続けて来た。累計生産台数は 1200 台を超えている。これに加えて、ゾーン制御可能という特色を持った誘導加熱装置の独自開発に成功している。本報では、最近注力している半導体製造装置向け ZCIH (Zone Control Induction Heating) の開発状況を報告する。

2. ZCIH の基礎

2.1 誘導加熱の弱点と対策

誘導加熱は IH キッキングヒータ等で実用化されており、その原理は広く知られている¹⁾。しかし、これら従来型の誘導加熱装置は、複数の装置を近接して設置することができないという弱点を持っている。これは、複数の誘導加熱装置、すなわち複数の加熱コイルを近傍に設置した場合、各コイル間に発生する相互誘導の影響によりそれぞれが干渉するため、独立して制御することができないことが原因であった。図 2 は全く同一の縦型ソレノイドコイルを縦に 3 段重ねとし、真ん中の coil2 だけを、20 kHz, 100 A で駆動した時の電流密度のシミュレーション結果である。電流密度の最大値が矢印のベクトルと、その色で示されており、右側の棒グラフに電流密度の値を示している。この例では、駆動した

coil2 は 1×10^7 A/m² 程度の電流密度となっているが、上下の coil1 と coil3 には、全く駆動していないにも関わらず、 2×10^4 A/m² 程度の電流密度が発生している。これが相互誘導により流れる電流を示しており、コイルを近接して設置したときに隣のコイルに流れる電流の影響を受けて、自己のコイルに電流が流れることを示している。

このため、従来方式の誘導加熱は、加熱対象が広範囲に渡る場合、その全領域の温度を精密に制御することが非常に困難となる。

当社ではこの弱点を解決する手法として、ゾーン制御方式誘導加熱の独自開発に成功した。この方式により、複数の加熱コイルが隣接して設置される環境下でも、それぞれのコイルを独立制御することが可能となる。なお、これら技術面の詳細については 4. で説明する。

2.2 ZCIH の特色

図 1 に、同一の試験装置で、同一の加熱対象物を、ゾーン制御なし (1 ゾーン制御) と 6 ゾーン制御の 2 種類の制御方式により、目標温度 1000 として加熱した場合の実計測温度を比較して示す。加熱対象物は写真 1 に示すように、内径 80 mm, 外径 800 mm の真ん中に穴の空いた円板状のグラファイトであり、図に示した温度は径方向の表面温度である。従来方式 (ゾーン制御なし) の場合は中心穴の周囲が最も高く、外周に向かって温度が下がっているが、ゾーン制御を行った場合は、内周から外周まで均一な温度に制御されていることがよく分かる。

3. ZCIH の半導体製造装置への適用

3.1 ZCIH の構成

ZCIH を含めた誘導加熱装置は、電源と加熱コイルで構成され、電源は入力部と出力部 (インバータ) で構成される。誘導加熱装置を利用した加熱炉の加熱特性は、加熱コイルの構造や形状により決定される。加熱コイルの最も典型的な形状は、ソレノイド (縦型螺旋) タイプと写真 2 に示すフラット (渦巻型) タイプの二つのタイプである。なお、他にも加熱対象に最適化させた様々な形状が可能であり、当社では

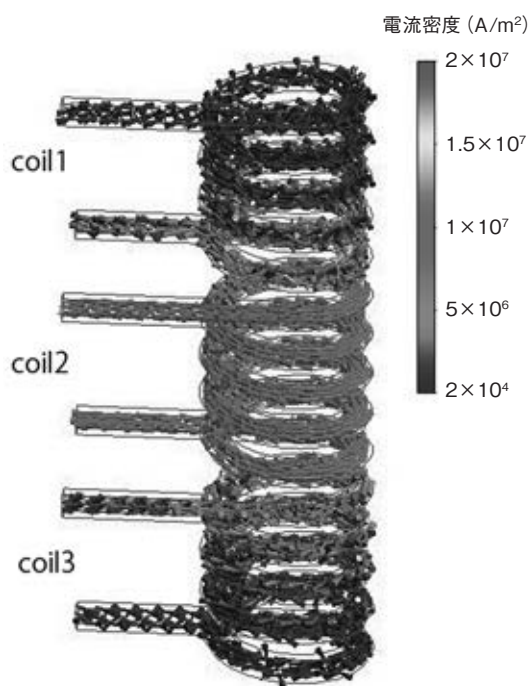


図 2 相互誘導による干渉
Interference by Mutual Induction

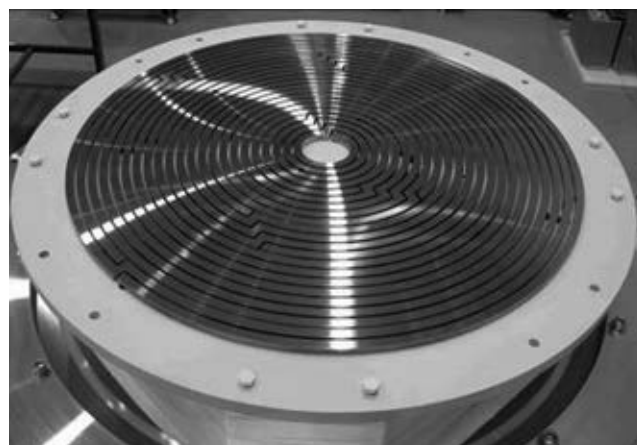


写真 2 渦巻型加熱コイル
Flat Spiral Type Heating Coil

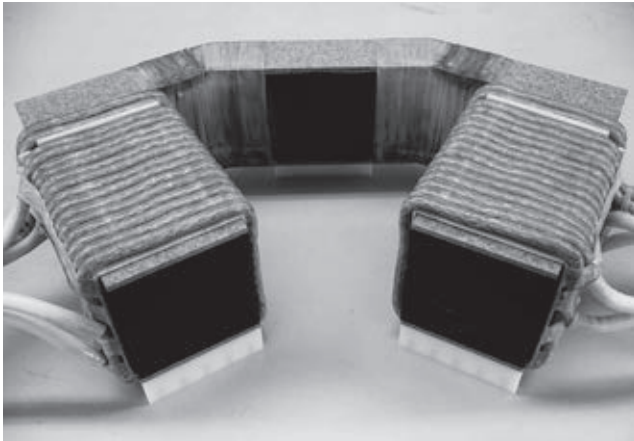


写真3 横側面加熱コイル
Side Heating Coil

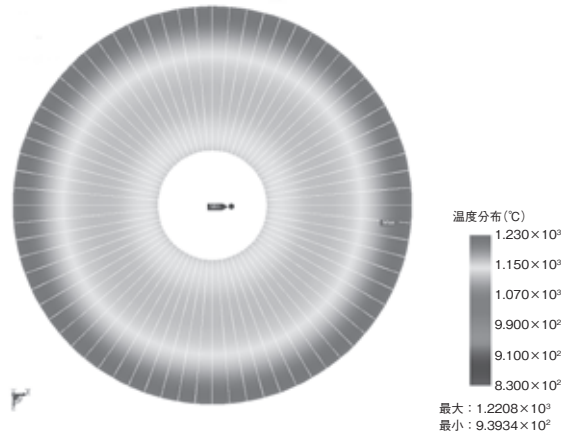


図3 磁界 - 熱解析の例
Example of Electromagnetic Field Analysis

表1 加熱方式別の特徴
Feature of Each Heating Method

No.	比較対象	抵抗加熱	ランプ加熱	誘導加熱	ZCIH
1	温度範囲				
2	ゾーン制御			×	
3	急速昇降温	×			
4	初期コスト				×
5	ランニングコスト	×	×		
6	寿命	×	×		

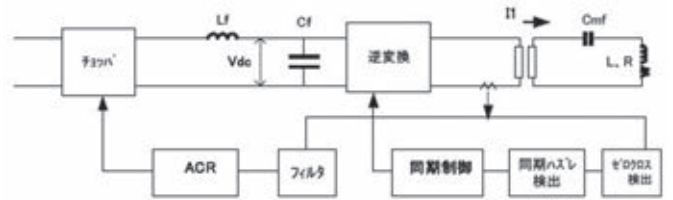


図4 ZCIHの制御構成
Control Block Diagram of ZCIH

写真3に示す横側面加熱タイプ等も手がけている。

ZCIHと従来型IHとの大きな違いは、ZCIHでは分割されたゾーンごとに別々の加熱コイルを持つことであり、これに応じてインバータもゾーンごとに別々のモジュールが用意される。

3.2 ZCIHの特色

表1に、半導体加熱装置でよく用いられる抵抗加熱、ランプ加熱、従来型の誘導加熱とZCIHの特色を比較して示す。

3.3 磁界 - 熱解析

ZCIH加熱炉設計では磁気結合の影響が複雑で、従来の誘導加熱装置設計で用いてきた誘導加熱計算手法だけでは高い完成度を期待できない。このため最近では、パーソナルコンピュータ(PC)を利用して、対象物と磁界の相互作用を解析し、その結果を使って誘導加熱による発熱を解析する磁界 - 熱解析を行い、最適なコイル寸法、コイル分割、運転周波数、電流密度などの決定を行っている。これにより、従来の加熱計算では算出が難しかったコイル内の磁束、発熱及び温度分布を精度よく予想できるようになった。また、一度構築した解析モデルは、パラメータの変更により加熱条件の違いによる比較が容易にでき、従来は予備加熱試験などで実際に確認していた内容を大幅に簡略化することができる。図3に、目標温度1000としたサセプタ(ウエハなど本来の加熱対象物を間接的に加熱するための中間加熱物で、半導体分野ではグラファイト等を使用)の加熱を解析した例を示す。

4. ZCIH技術の詳細と評価

4.1 ZCIH技術の詳細

4.1.1 ゾーン制御の原理

ZCIHの最終的な目標は、加熱対象物の温度を制御することであるが、直接温度を制御するのではなく、出力電流を制御することにより間接的に温度を制御している。したがって、制御のベースとなっている電流に外乱を受けると、正確な制御が困難になる。ZCIHでは、全ゾーンの出力電流を高速監視し、その測定データを様々な演算処理で解析することにより相互誘導の影響を排除している。これまでの評価により、相互誘導環境下でも安定に作動すること、各加熱コイルが指令値に高速に応答し高精度温度制御が可能であることが確認できている。

図4はZCIHの制御構成の一例である。ZCIHは常時全ゾーンの出力を監視し、計測データの大きさや推移などを総合的に解析してインバータの動作を微調整することにより、装置全体として相互誘導の影響下におけるゾーンごとの安定した出力制御を実現している。これら膨大な量の計測データを解析するためには、高速処理能力が必要となる。最新のFPGA(Field Programmable Gate Array)は、動作内容をユーザが設定できる電子回路LSIである。PCなどで使われているプロセッサに比べて、更に高速処理が可能である。これを使用した専用の制御モジュールを開発することにより、高度な処

理能力を持つ装置を実用化することができた。

なお、ゾーン制御の原理に関する更に詳しい内容は、当社技術報^{1)~3)}に掲載されている。

図5はZCIHの実動作中に、オシロスコープで実測した出力電流と出力電圧の波形の一例である。CH1, CH2, CH3, はゾーン1, 2, 3の出力電圧, CH4はゾーン2の出力電流を測定している。この波形により、ゾーン1~3の出力電圧で、CH1だけが僅かに大きく、CH2と3はほぼ同等という動作指令通りに出力されていること、出力電流と出力電圧が完全に同期しており、かつ安定的な状態にあることを読み取ることができる。これは、ゾーン制御が有効に働いており、系全体が安定して動作していることを意味する。

4.1.2 開発履歴

ZCIHは、2003年に開発を開始して約10年が経過した。その間に手がけた様々なタイプの装置の仕様範囲を下記に示す。

- ・出力：30 kW ~ 300 kW
- ・ゾーン数：2ゾーン ~ 12ゾーン
- ・周波数：20 kHz ~ 200 kHz
- ・コイル形状：縦型ソレノイド、楕円形ソレノイド、渦巻形フラットなど
- ・加熱温度：300 ~ 1800
- ・用途：LCD ガラス基板アニール、ウエハアニール、ウエハ RTP, MOCVD など
- ・目的：実験・評価装置、量産装置

4.2 実験と評価

加熱対象物はZCIHの制御下に置かれているが、その到達温度は、ZCIH以外の周辺構造物の温度状態や周囲の気体の流れなど、様々な影響を受ける。これにより、加熱対象物の温度によりZCIHの性能を保証することができないため、ZCIHでは、各ゾーンの出力電力密度により性能を保証している。ただし、ZCIHシステムの加熱実験を行い、サセプタや加熱コイル周辺の温度を実測することは、技術開発を進める上では必要不可欠なことである。以下に、実際に加熱実験を行なって取得した計測結果を示す。これらの計測結果は、

写真4に示す下記仕様のテスト装置で実験した場合の計測結果である。

- ・300 kW, 20 KHzの6ゾーン ZCIH 電源
- ・722 x t10 mmの6ゾーン・フラットタイプ加熱コイル
ゾーン番号は最内周がゾーン1, 外側に向かって1ずつ増え、最外周がゾーン6
- ・728 x t12 mmの円板形フラットグラファイトサセプタ
- ・320 x 240 mmのサーモグラフィ

図6は、ZCIHの特色を顕著に示すことができるように、ゾーン1, 2と5, 6を600に、真ん中のゾーン3, 4だけは50 高い650にゾーン制御した場合、すなわち内周と外周を凹、真ん中を凸の形に制御した場合の計測結果である。左上に表示されている図は測定対象領域全体の温度分布、右側と下側に表示されている図は中心点を通るY軸とX軸上の断面温度である。真ん中のゾーンが、内側及び外側のゾーンに比べて高温に制御されていることが良く分かる。

図7に、常温 600 への昇温 600 温度保持 1000 への昇温 1000 温度保持 600 への降温 600 温度保持というパターンで制御した時の各ゾーンのサセプタの表面温度と、ZCIH電源からの出力電力の変化を示す。X軸は経過時間で単位は秒、Y軸左側は表面温度で単位は℃、Y軸右側は出力電力で単位は%である。出力電力の%は、各ゾーンの最大出力を100%と規定した場合の、それに対する割合を意味している。温度は、ほぼ1本の直線に見えているが、実際には6ゾーン分、すなわち6本の測定値が示されている。6ゾーン分の計測値が、ほとんど均一の温度に制御されているため、グラフ上では重なり合っており、良好な制御結果が確認できた。また、他の方式では困難となる昇温中、降温中とも全ゾーンの温度均一性が保たれていることが確認できた。

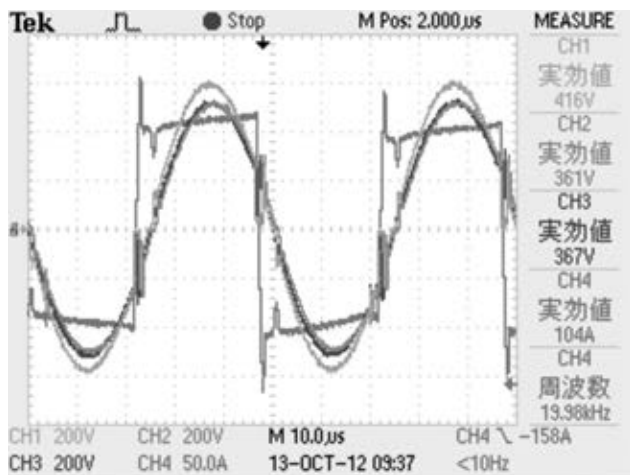


図5 インバーターの実測波形例
Example of Inverter Output Waveform



写真4 テスト装置
Test Equipment

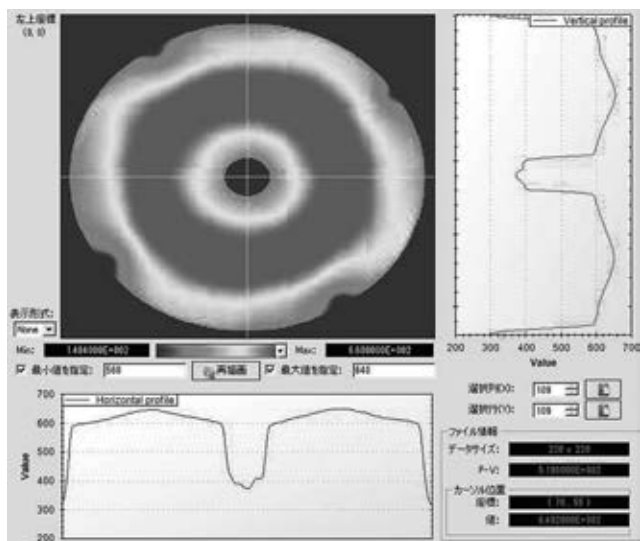


図6 凹凸に制御したときの温度分布
Temperature Distribution that Raises Center Zone

これに対して、出力電力は、常に変動を続けている波形として示されており、6ゾーン分が全く別々に、独立して変動している。これにより、ゾーン制御機能が有効に機能しており、常時温度を均一化しよう動作していることが確認できる。

5. 実装置への適用手順

ZCIH の特性を最大限に活かすための注意事項、推奨使用案などについて示す。

5.1 加熱計画時に留意すべき点

5.1.1 直接加熱と間接加熱

誘導加熱炉には、加熱対象物を直接発熱させる「直接加熱方式」と、サセプタと呼ばれる中間的な受け皿を介して間接的に加熱対象物を加熱する「間接加熱方式」の2種類の方式がある。どちらの方式を選ぶかは、被加熱物の形状・材質や必要な加熱温度・温度精度などを総合的に判断して決定する。

5.1.2 処理方式

加熱炉内の処理方法は、「バッチ型炉」と「枚葉型炉」の2種類に分けることができる。バッチ型炉は1度に複数の加熱対象を加熱処理するタイプで、複数枚の加熱に適したソレノイドタイプの加熱コイルを使用したものが多い。一方、加熱対象を1枚ごと加熱処理する枚葉型炉では、平板状の加熱対象に対し平板状の加熱コイルを対面して配置させた平板コイルタイプの炉が多い。

5.1.3 磁気結合に対する配慮

ZCIH では相互誘導環境下での運転を可能とするため、各ゾーンコイルの自己インダクタンスとコイルユニット間の相互インダクタンスを正確に把握しておくことが不可欠である。基本的に加熱コイルは狭い金属チャンバー内に配置されるため、コイル単体での自己・相互インダクタンスだけではなく、サセプタや周囲の構造物までを考慮に入れた磁気影響と、実際の使用温度領域の下限から上限までの物性値を考慮に入れた自己・相互インダクタンスを把握しておくことが重

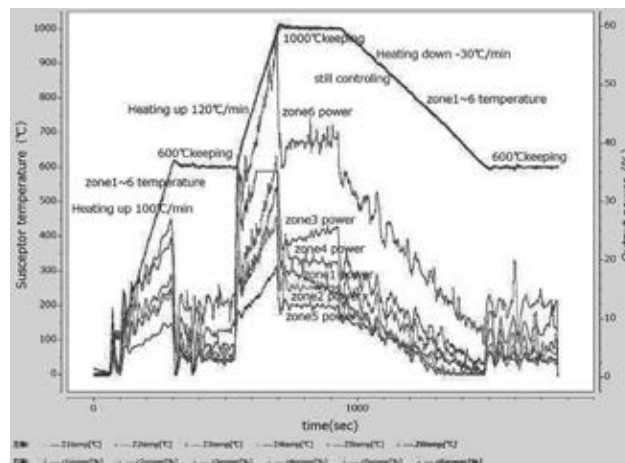


図7 サセプタの表面温度と電源出力電力の変化
Temperature and Output Power Chart

要である。

5.1.4 放電防止対策

大気中では通常、放電は発生しない。ただし、誘導加熱装置の使用環境では、容易に放電が発生する可能性がある。放電するか否かは、下記の三つの条件のバランスで決まる。

電位差が高いほど放電しやすい。

気体圧力が低いほど放電しやすい(極低圧は除く)。

電極間距離が短いほど放電しやすい。

これに対して、誘導加熱装置では下記の要件により、放電発生の可能性が高まる。

目標加熱温度を高くすればするほど、加熱コイルの駆動電圧も高くなる。すなわち、1000 以上の高い加熱温度を目指す場合、加熱コイルにも高い電位差が必要となるため、放電の可能性が高くなる。

半導体製造装置では、真空雰囲気でのプロセスが多い、すなわち、大気圧より低い圧力で加熱処理をする場合が多くなり、放電の可能性が高くなる。

半導体製造装置では、コンタミネーション(汚染物=半導体の劣化を招くゴミ等)の発生を防止するため、加熱コイルに対する十分な絶縁処理ができない場合がある。これにより実質的な電極間距離を稼ぐことができなくなり、放電の可能性が高くなる。

放電が発生すると、加熱コイルが損傷し、使用できなくなる。放電発生の限界条件を超えることがないように、十分に注意して設計を行う必要がある。また、誘導加熱では、加熱コイルを加熱対象物のできるだけ近くに配置した方が効率が良いが、放電のことも考慮して、最終的な配置を決定する必要がある。

5.1.5 加熱能力の計画

半導体熱処理・製造炉においては、チャンパー構造や反応プロセスにノウハウを含む部分が多いため、詳細な情報はメーカーの社外秘として開示されない場合が多い。一方、ZCIH を利用した加熱炉を計画する場合、昇温速度、到達温度、温度分布、必要電力などの性能を高い精度で計画するた

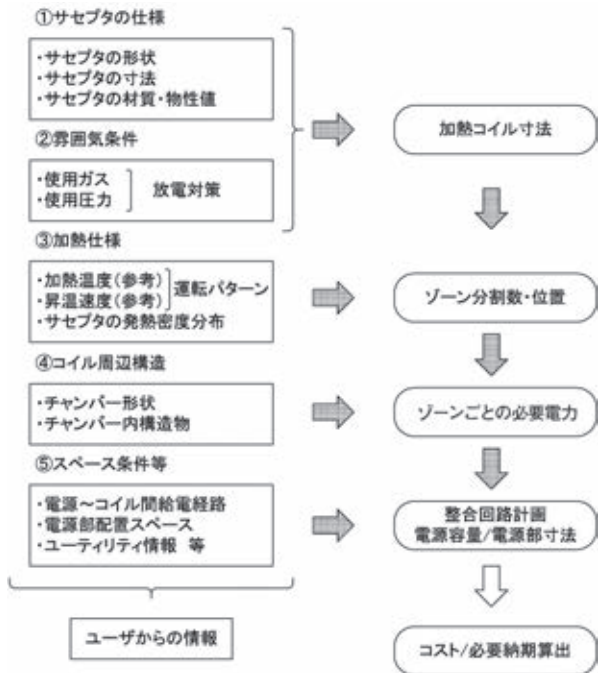


図8 システム仕様検討の流れ
Flow of System Specification Examination

めには、被加熱物周辺の構造を、できる限り詳しく検討する必要がある。でき上がった装置の到達性能に対するお互いの認識の食い違いをなくすためにも、柔軟な情報交換の促進が重要である。

5.1.6 ローカルヒートに対する配慮

誘導加熱による加熱では、加熱コイル周辺に置かれた金属物は全て加熱される。この場合、加熱対象として想定されていない金属物が加熱されることを「ローカルヒート」と言う。また、ローカルヒートを引き起こす誘因となる非加熱対象物へ向かう磁気を「漏れ磁束」と言う。通常、ローカルヒートによる非加熱対象物の加熱は、システム全体に対して有害に作用する。これは、抵抗発熱体などを使用した炉では起きなかった現象であり、注意が必要である。

加熱コイル近傍への金属製の導電性構造物の配置は、極力避けることが望ましい。一般的に、コイル巻き径と同等程度の距離まではローカルヒートの影響を受けると考えられる。また、加熱コイルの周囲に配置する金属製のチャンバーや隔壁についても、ローカルヒートに対する配慮が必要である。距離を離せば漏れ磁束による影響は小さくできるが、配置上対応が困難な場合は、水冷や磁気シールドなどの対策が必要となる。

他方式を使った炉を転用する場合、金網や金属ボルトなどは材質を変更するのが望ましい。構造上の理由などで変更ができない部品は、ローカルヒートにより加熱されても使用上

問題にならないという確認を取る必要がある。詳細については、事前のすり合わせによる調整が必要である。

5.2 システム計画手順

実際の装置に ZCIH を加熱パーツとして組み込む場合に、システムの仕様検討を行うための手順例を図8に示す。一般的には、まず最初に図8の「サセプタ仕様(形状、寸法など)」を決定し、次に「加熱仕様(発熱密度分布等)」を決める。加熱仕様の基礎数値が決まると、それを元に加熱コイル寸法及びゾーン分割数を決定する。次に、加熱コイル周辺構造を考慮してゾーンごとの必要電力を算出する。5.1.3で述べたが、ZCIHでは磁気結合に配慮する設計が重要になるので、コイル周辺の構造物の情報は必須である。次に整合回路や通電経路でのロス、電圧降下などを考慮し、必要となる電源出力容量を算出する。また半導体製造装置向け用途では、設置スペース最小化に対する要求が強く、製造装置内部に組込む加熱装置についても、組込みスペースの事前検討が重要となる。

6. おわりに

本報で示した半導体製造装置向け以外にも数多くの引き合いが寄せられており、自動車業界や鉄鋼業界で使用される各種製造装置に向けた応用開発も進めている。

今後も ZCIH 関連の製品群の更なる拡大を目指し、コストダウンや信頼性の向上を中心として、商品価値を向上させるための開発を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 内田・外：ゾーンコントロール誘導加熱装置の開発，三井造船技報，181(2004)，p. 15
- 2) 坪川・外：ゾーンコントロール誘導加熱を用いた第4世代対応 FPD 用高速熱処理装置の開発，三井造船技報，189(2006)，p. 17
- 3) 内田・外：半導体加熱モジュールの開発，三井造船技報，194(2008)，p. 25

〔問い合わせ先〕

機械・システム事業本部 産業機械第二営業部
TEL 03 - 3544 - 3221 河原 史朋



岡崎 良弘 阿尾 高広 尾崎 一博 船路 俊介

低温排熱回収のための熱電発電技術の開発

加藤 寿仁* 鎌田 勤也** 北川 裕之***

Development of Thermoelectric Energy Conversion for Exhaust Heat Recovery

Toshihito KATO, Kinya KAMATA, Hiroyuki KITAGAWA

From a view point of carbon dioxide reduction, the power generation from the waste thermal energy of 100-200 degrees C is an appropriate technology in the internal combustion engine's bottoming cycle or energy recovery of the plant waste heat, and is also attractive to the renewable energy like solar thermal or geothermal applications. The waste-heat-driven power generating systems such as low-temperature Rankine cycle or Stirling engine are also in the course of development, however, thermoelectric energy conversion (TEC) is a method for generating electricity directly from heat energy. TEC is a kind of solid-state energy conversion, in which electrons and holes work like a working fluid of Rankine cycle, and it does not require any mechanical rotary motion fluid circuit within the energy conversion unit. TEC makes neither noise, vibration nor requires consumable parts. TEC, therefore, can propose a reliable power generating system with an easy maintenance.

This report gives a brief overview of TEC material development conducted by Shimane University and Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. in 2010 and 2011, and the TEC module evaluation in 2010.

CO₂ 排出削減の社会的要請が高まるなか、低温排熱発電は内燃機関のボトムサイクルとして、あるいは工場排熱を有効利用したエネルギー回収技術として注目されている。また、太陽熱や地中熱を熱源とした再生可能エネルギー分野でも期待されている。低温排熱発電技術として、ランキンサイクルやスターリングエンジンなどが研究開発されているが、熱電変換は材料中の電子やホールがランキンサイクルの作動媒体のように動く、固体型エネルギー変換技術であるため、エネルギー変換部分には機械的な可動要素がない。したがって、騒音や振動や部品の消耗がなく、信頼性の高い発電システムを構築することができる。

本報では、島根大学と共同でスライドボード法により製作した熱電材料が高い性能指数を示す特長と、これまでに製作した一部の熱電材料を用いて試作した、熱電発電モジュールの性能評価結果について報告する。

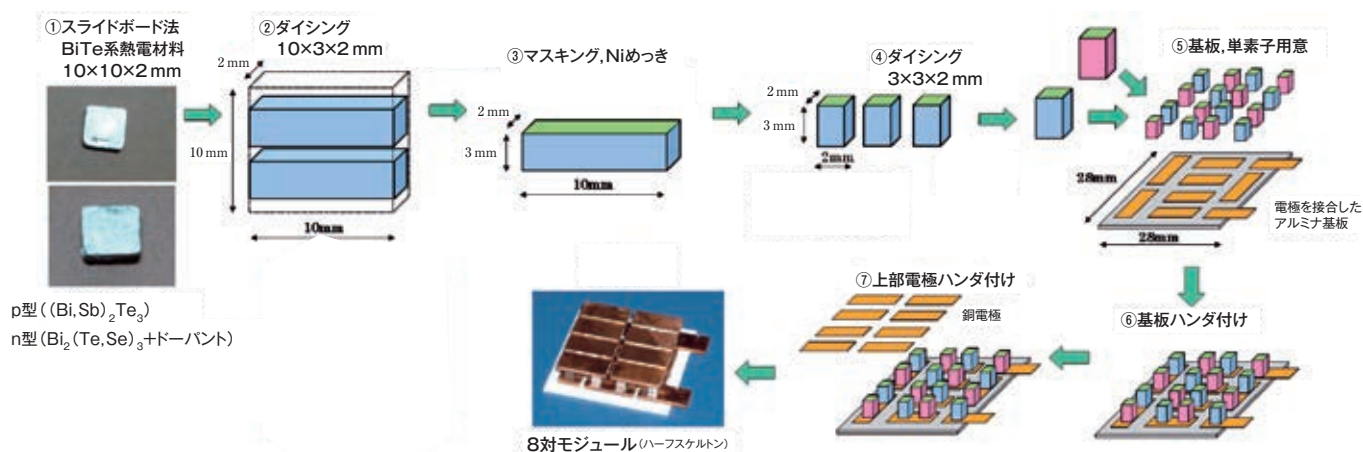


図1 熱電発電モジュール
Thermoelectric Energy Converter Module

* 技術開発本部 千葉技術開発センター

*** 島根大学 大学院 総合理工学研究科

** 技術開発本部 玉野技術開発センター

1. はじめに

熱電発電とは、温度差のある材料の両端に起電力が生じる現象を利用して、これを回路の一部に用いることで電気を取り出す技術である。材料両端に定常的に温度差を付加するためには両端を加熱及び冷却し続ける必要があるが、材料内部に温度勾配さえあれば、可動部が一切なくても発電することができる。すなわち、熱から電気へと直接変換するデバイスである。

熱電発電の発電効率は概して高くはない。しかし、発電器本体に関しては流体や回転部が存在しない直接エネルギー変換方式であるため、信頼性が大変高く、メンテナンスコストを低減することが可能である。また、ほぼ温度差に比例した起電力を得ることができるため、他の発電方式では発電できない小さな温度差に対しても適用することができる。一方、熱電発電の出力は、適用対象の温度差が決まっている場合には熱伝導面積に支配されるため、出力を増大するためには発電モジュールの面積あるいは枚数を増やす必要があり、大規模な発電を行う場合のスケールメリットを得にくい。総括すると、小規模で温度の低い熱源、例えば排熱回収用途に適する発電技術である。

熱電変換の原理であるゼーベック効果は1821年に、ペルチエ効果は1834年に発見され、また1851年にはこれらの効果が表裏一体であることが理論的にも実験的にも確認された。1921年、ヨッフエの提唱した化合物半導体の理論によって、熱電発電や熱電冷却の幕が開けた¹⁾。

近年では高温で使用可能な酸化物²⁾、低い熱伝導率を得ることができるクラスレート³⁾、高温使用が前提で安価なシリサイド⁴⁾、硫化物⁵⁾、高分子⁶⁾など、様々な熱電材料が開発されている。しかし、実用化された熱電材料は重金属を含んだ半導体材料が主流であり、中でも常温から200の温度域で高い性能を示す材料はBiTe系に限定される。この熱電材料は、熱起電力が高く、一方で熱伝導率が低いという、優れた電気物性・熱物性を有する。BiをSbに、またはTeをSeに置き換えた材料も同じ結晶構造を持つため、これらの混晶を作ることで熱伝導率を更に下げることが可能である⁷⁾。

本報ではBiTe系の熱電材料に関して、鳥根大学と三井造船とで実施した新たな材料開発への取り組みを報告する。

2. 熱電材料開発

2.1 性能指数

熱電材料の性能を示す指標として性能指数Z、あるいはZにその時の温度を乗じた無次元性能指数ZTが一般に用いられる。式(1)に示すように、Zはゼーベック係数、導電率及び熱伝導率の関数である。

$$Z = \frac{S^2}{\kappa} = PF / \dots\dots\dots (1)$$

Z : 性能指数 (K⁻¹)

S : ゼーベック係数 (V/K)

κ : 導電率 (S/m) 1/ ρ = 抵抗率または比抵抗 (Ω m)

α : 熱伝導率 (W/m・K)

$$PF : \text{出力因子} = \alpha^2 \rho \quad (\text{W/m} \cdot \text{K}^2)$$

α 、 ρ 及び ρ は電荷のキャリアである電子又は正孔の濃度の関数である。キャリア濃度pを増加させると、 α は大きくなるが、 ρ が小さくなり ρ が大きくなるため、材料物性と使用温度域にも依るが、一般にpが10²⁵から10²⁶個/m³の範囲でZが最大値を取る。

2.2 スライドポート法による熱電素子の製作

図2に示すように、BiTeは菱面体晶系に属する層状化合物であり、六方晶で表示したときにc軸方向にBiとTeが積層している。層間の結合はファンデルワース結合(Te-Te)、共有結合(Te-Bi)、共有+イオン結合(Te-Bi)であり⁸⁾、ファンデルワース結合を横切るc軸方向の導電率が小さいため、c軸に垂直な面内のZ(Z_a)はc軸方向のZ(Z_c)に比べて大きくなる⁹⁾。しかし、Te-Te間のファンデルワース結合の結合力が弱いため、この部分で劈開による割れが生じやすい。BiTeの一方方向性凝固材あるいは単結晶材である溶製材は、ブリッジマン法等によって製作することは可能であるが、溶製材は熱電物性こそ高いものの強度的には扱いにくい材料である。また、結晶成長中の過冷却によって偏析を生じやすく、キャリア濃度が変化して性能低下を生じやすい¹⁰⁾。そこで、組成制御して製作した溶製材を細かく砕いた粉末を高温高压成形することで、熱伝導率の低減に加え、組成の均一化と材料強度を高めた焼結材の開発が進められており、大きなZT値も報告されている¹¹⁾。

一方、BiTe系熱電材料の強度と熱電物性を両立させるために高压成形時に塑性変形させる方法¹²⁾⁻¹⁴⁾、巨大遠心力下で凝固させる方法^{15)、16)}などにより、結晶方位をそろえた多結晶を構成する開発が行なわれている。このように、簡便な手法で高性能方向に配向した材料の作製技術と開発は重要である。スライドポート法^{17)、18)}は鳥根大学が開発したこの中の一つの技術であり、当社は共同で熱電素子の開発を行った。

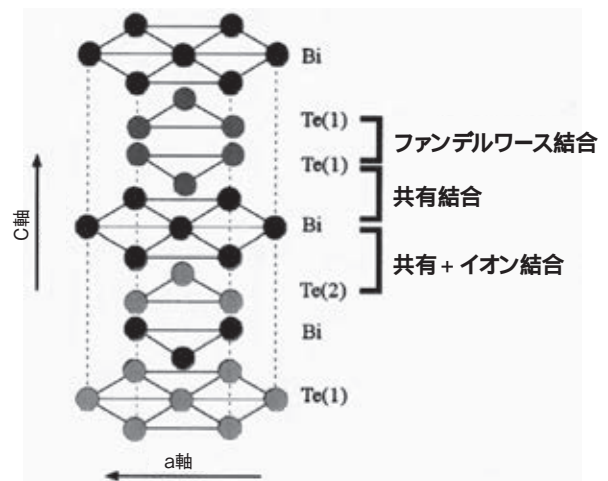


図2 Bi₂Te₃結晶構造
Crystal Structure of Bi₂Te₃

スライドポート法の概要を図3に示す。ブリッジマン法等で製作した溶製材を粗粉碎した原料インゴットを試料室に充填し、サファイア等の基板上で、700℃、10分間の溶融後に黒鉛製スライダをスライドさせて、密閉された成長室内で冷却することにより、図3の縦方向(スライド方向と直角方向)にc軸がそろった(図2と同じ方向の)多結晶材料を創製することができる。試作材料を図4に示す。融解した原料融液に荷重をかけながら成長室に送り込む手法により、任意形状の材料を製作することが可能となった¹⁹⁾。

2.3 p型熱電材料の開発と熱電特性

p型の基本材料として、Bi₂Te₃とSb₂Te₃を1:3の比率で混晶化したBi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃を用いた²⁰⁾。

式(1)より、Zを決める3パラメータはキャリア濃度の関数であるため、電気的物性と熱的物性のバランスを取るようキャリア濃度を適正化することで高い性能を得ることができる。具体的には100℃程度に性能ピークを持つ材料を求めているため、ノンドープで9×10²⁵個/m³程度であるキャリア濃度を、4~5×10²⁵個/m³に下げることが目指す。

スライドポート法でBiTe系熱電材料を製作した場合、原料が融解している図3のステップの状態において蒸気圧が高いTeが揮発することで、成長結晶からのTe欠損が生じる。Teが欠損し、空孔が生成すると、Te空孔はドナーとして働くと考えられ、p型半導体の伝導に寄与する正孔が減少することが考えられる。しかしながら、本材料系においては、TeサイトをSbあるいはBiが占有する逆構造型欠陥が多数形成されることが指摘されている。この逆構造型欠陥及びこ

れに伴い生成が予想されるSbあるいはBi空孔は、共にアクセプタとして働くことが考えられる²¹⁾。この場合、Te欠損により正孔濃度は増加することになる。したがって、スライドポート法においてキャリア濃度を現状よりも低減するためには、Te揮発を抑制することが望ましい。

このため、スライドポート装置のチャンバー内に原料粗粉末以外に追加の純Te粉末を加えることで、チャンバー内を高いTe蒸気圧で満たし、原料合金融液からのTe揮発を抑制あるいは、揮発損失分を補償する手法をとった。試作した試料は、追加Te量が0~10mass%の6サンプルである。

Te添加量とキャリア濃度の関係を図5に示す。Te添加量とともにキャリア濃度は減少傾向にあることが分かる。一方、Teを6mass%以上添加しても、キャリア濃度の低下は見られなかった。図6にTe過剰条件での断面SEMの一例を示すが、粒界にTeのほぼ単相が見られた。また、X線回折の結果からもTe単相ピークが確認されたことから、本プロセスに6mass%を越えるTeを添加すると過剰なTeが析出することが分かった。

図7に36℃(309K)付近におけるTe添加量と、 ρ 、PFの関係を示す。キャリア濃度の減少(Te添加量の増大)に従って ρ が向上したが、6mass%以上では大きくは変化しなかった。一方で、 ρ はTe添加量の増加に伴って低下した。 ρ とPFのバランスから、Teを4mass%添加した材料のPFが最も大きくなった。図8にPFの温度依存性を示す。200℃(473K)以下の領域では、Teを4mass%添加した材料が最も高い性能を示し、例えば80℃(353K)においてZT=1.03に達した。なお、試作した材料の熱伝導率 κ を測定していないため、代わりに単結晶材の値⁹⁾約1.4W/m・Kを用いた。しかし、多結晶材である本試作材料の κ は単結晶材よりも10%以上は小さいと考えられるため、実際のZTは1.03よりも高いと予測される。

2.4 n型熱電材料の開発

Bi₂(Te, Se)₃などのn型BiTe系熱電材料のドーパントとして、HgBr₂やSbI₃などの形でハロゲン元素を導入することが一般的である。しかし、これらドーパントには強い毒性や潮解性があるため、扱いにくいという欠点があるが、取り扱いが容易なドーパントをスライドポート法に用いることで、ZTが1を超えるn型の開発に目処を立てた。

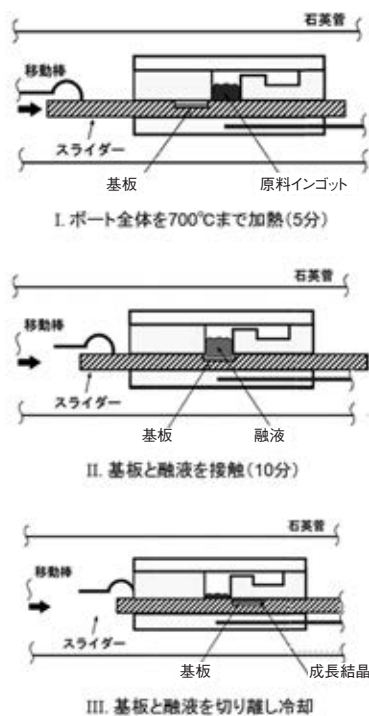


図3 スライドポートを用いた液相成長法
Liquid Phase Growth Process using Sliding-Boat

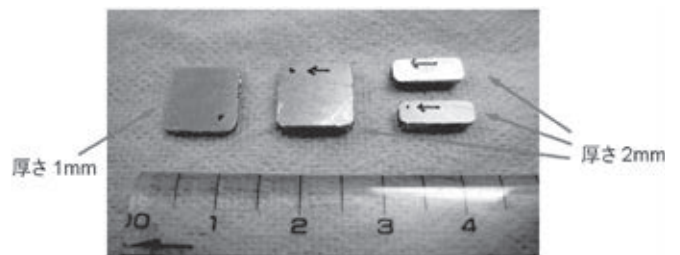


図4 液相成長試料(厚さ1mmと2mmの板及びびロッド)
Typical as-grown Samples;
Thick Sheets and Bars of 1 and 2 mm in Thickness

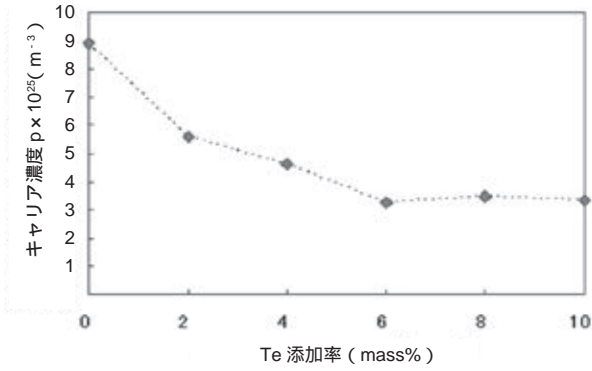


図5 Te 添加量とキャリア濃度の関係

Hall Carrier Concentration at near 300 K plotted against Additional Amount of Te, x mass%

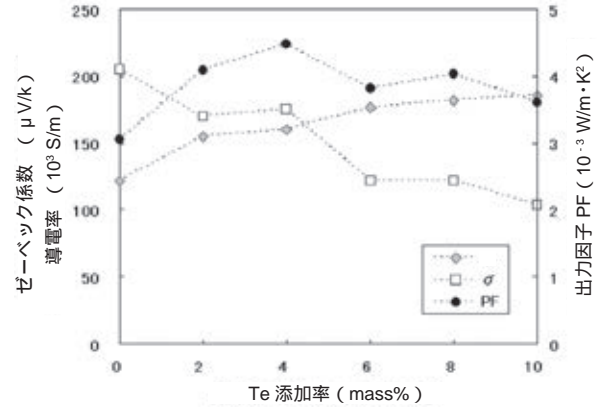


図7 p型BiTe系熱電材料の電気物性
Seebeck Coefficient, Electrical Conductivity and Power Factor of p-type $(\text{Bi, Sb})_2\text{Te}_3$

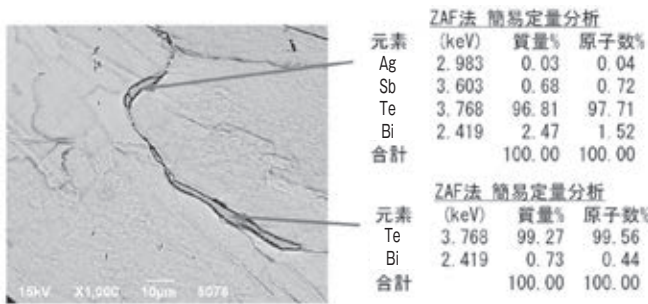


図6 p型BiTe系熱電材料のミクロ組織
Typical microstructure of $(\text{Bi, Sb})_2\text{Te}_3$

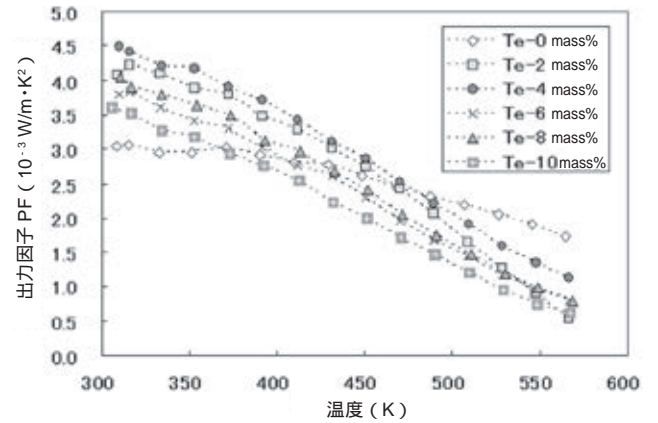


図8 p型BiTe系熱電材料の性能指数の温度依存性
Temperature Dependence of Power Factor
(p-type $(\text{Bi, Sb})_2\text{Te}_3 + 0, 2, 4, 6, 10 \text{ mass\% Te}$)

3. 試作モジュールによる発電効率測定試験

熱電材料の開発は固体物理の領域であるが、最終的には材料を発電モジュールや発電システムといった形にまで上げる必要がある。用いた熱電材料は、キャリア濃度の最適制御前のp型 $(\text{Bi, Sb})_2\text{Te}_3$ とBr等をドーパントとして用いたn型 $\text{Bi}_2(\text{Te, Se})_3$ である。この材料のZTは常温付近においてp型が0.8~0.9程度、n型が0.6程度である。なお、発電モジュールの試作及び評価は、(独)産業技術総合研究所エネルギー技術開発部門 熱電変換グループの指導の下で実施した。

3.1 発電モジュールの試作

発電モジュールの製作手順を図1に示す。島根大学にて $20 \times 20 \times 2 \text{ mm}$ のp型及びn型の熱電材料を製作した。これらの材料を当社で検査、切断、メッキを施し、 $2 \times 2 \times 3 \text{ mm}$ のp型及びn型の単素子を製作した。メッキを用いる理由は、はんだとの接合性向上、熱応力緩和、電極材料の拡散防止バリアである。試作モジュールでは、メッキ層として無電解Niメッキ、厚さ $5 \mu\text{m}$ を施した。

次いで、厚さ $100 \mu\text{m}$ の熱伝導性樹脂層の上に厚さ $35 \mu\text{m}$ のCu製電極パターンを形成済みの $28 \times 28 \times 1 \text{ mm}$ のアルミナ基板と単素子16個を真空中ではんだ接合し、更

に $11 \times 5 \times 1 \text{ mm}$ のCu電極8枚をはんだ接合して、発電モジュール2個を製作した。製作した発電モジュールは片面の電極が絶縁基板で覆われていない、ハーフスケルトンと呼ばれるタイプである。発電を行うためには、熱源を介した電極の短絡を防ぐために、スケルトン側にも絶縁板を設けることが一般的である。

3.2 発電性能評価

(独)産業技術総合研究所の設備²²⁾を用い、熱的及び電気的に定常な状態における発電性能を評価した。モジュールの一端は 30°C に設定し、他端を $120 \sim 180^\circ\text{C}$ に設定した状態で、電流-電圧特性及び熱流計測を行った。測定結果を図9及び図10に示す。高温側温度 180°C において、発電効率3.44%が得られた。なお、試作した発電モジュール2個は、測定の結果ほぼ同一の結果が得られたため、図9及び図10は一方の結果のみを示している。

3.3 試作モジュールの考察

試作・評価した発電モジュールの性能に悪影響を与える要

因について考察した．これらの要因については，はんだ層，メッキ層の形成方法や材質を適性化することにより解決可能と考えられ，発電効率の向上が期待される．

(1) 接合部の電気抵抗

スライドポート法により製作した熱電材料は比抵抗が小さいことが特長である．用いた材料の比抵抗が $3.5 \sim 4.0 \mu \cdot m$ であることから，発電モジュールの熱電材料部分のみの抵抗値は常温で約 45×10^{-3} と見積られる．その結果，発電モジュールの全抵抗は，モジュールサイズの割には小さく， 70×10^{-3} であった．差分の 25×10^{-3} はメッキ層，はんだ層，Cu 電極などに起因するものと思われる．これら要因を分離した性能解析や評価を行っていないが，メッキ層に関しては，成膜後に SEM 観察と蛍光 X 線測定にて健全性と膜厚を確認しており，また Cu 電極の抵抗率は熱電材料の $1/200$ 以下であるため， 25×10^{-3} の主因は接合のために塗布した SnSb 系ペーストはんだ層にあると考えている．試作したモジュールは，全抵抗の $1/3$ 以上が接合界面で発生し

ており，ここに改善の余地がある．

(2) 熱抵抗

図 9 及び図 10 に示した温度は，モジュールの上部と下部に接触させた熱流測定用の Cu ブロックがモジュールと接触する端面の推定温度である．実際には Cu ブロックとアルミナ基板の接触部に塗布する熱伝導ペースト，アルミナ基板，熱伝導性樹脂層，Cu 電極，はんだ層，メッキ層の熱抵抗が存在するため，発電に寄与する温度差，すなわち高さ 3 mm の熱電素子の両端に付加される正味の温度差は減じられる．例えば，厚さ 1 mm のアルミナ基板の厚みだけを考えても，高温側 $180^\circ C$ ，1.5 A 条件において，高温側で約 $12^\circ C$ ，低温側で約 $7^\circ C$ の温度差が生じている．ハーフスケルトンタイプのモジュールであるため，合計 3ヶ所の接触熱抵抗による影響も大きいと思われる．

仮に，高温側で $25^\circ C$ ，低温側で $15^\circ C$ の発電に寄与しない温度低下があったとすると，熱電素子は高温側 $155^\circ C$ と低温側 $45^\circ C$ の間で発電していることになる．比較として，Hi-Z 社が公表している HZ-14 の設計データ²³⁾にこの温度条件を当てはめると，発電効率は 3.24% となり，試作した発電モジュールと同等であった．仮に，HZ-14 に高温側 $180^\circ C$ - 低温側 $30^\circ C$ の正味の温度差を与えると発電効率は 4.41% になる．高効率発電のためには，熱源温度を可能な限り減ずることなく素子に伝えることが重要である．しかし，接触熱抵抗を小さくするために発電モジュールを高い圧力で伝熱部材に挟み込むことがあるが，その場合には熱電材料に高い機械的強度も求められる．

(3) 熱放射損失

用いた $28 \times 28 \times 1 t mm$ のモジュール基板と $11 \times 5 \times 1 t mm$ の Cu 電極は 本来は断面 $5 \times 5 mm$ の単素子用であった．図 11 に示すように，断面 $2 \times 2 mm$ の単素子を用いた場合には，発電モジュール内部に無駄な空間ができる．真空中で発電性能試験を行ったため，熱伝達による口は無視できるが，高温面と低温面の形態係数が大きいため，大きな熱放射損失が発生している．高温側が $180^\circ C$ ，1.5 A 条件での高温側から低温側への全熱移動量が実測 8.4 W であったのに対して，発電モジュール内部の熱放射損失(熱電材料を通らない熱移動量)は，概略計算によると約 0.8 W であった．

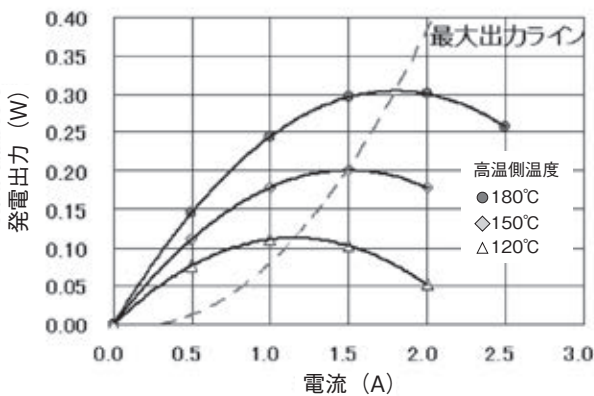


図 9 試作発電モジュールの電流・出力特性
Graph of Output Power vs Current at Hot Side Temperatures of 180, 150 and 120 Degrees of C for a Trial Thermoelectric Converter

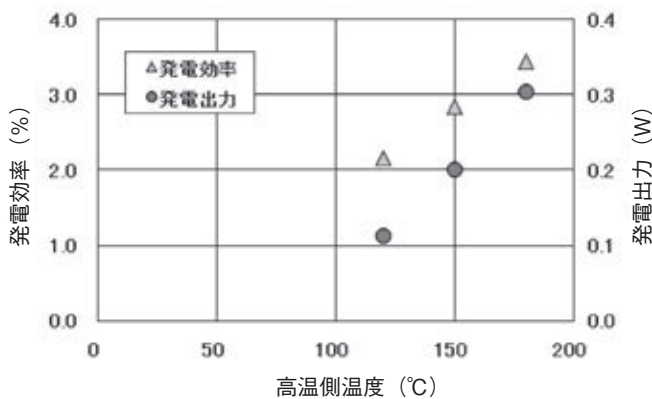


図 10 試作発電モジュールの効率と出力の温度依存性
Variation of Efficiency and Output Power with Temperature Difference for a Trial Thermoelectric Converter

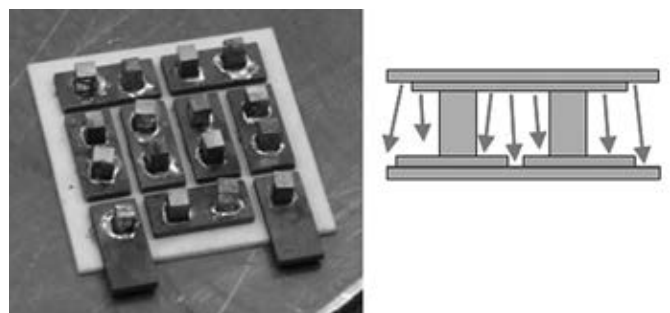


図 11 試作モジュールからの熱放射ロス
Schematic Image of Heat Loss from Trial Thermoelectric Converter

4. おわりに

島根大学との共同研究により、スライドボート法を用いた BiTe 系熱電材料の開発を行った。開発途中段階における材料を用いて発電モジュールを試作し、(独)産業技術総合研究所の設備によって発電性能を評価した。得られた発電効率率は、高温側温度 180 において 3.44% であった。しかし、その後の開発で材料の性能指数が向上し、試作モジュール構造にも改善の余地があることから、発電効率の大幅向上が期待できる。

なお、島根大学と当社は、n 型の熱電材料の開発も進めており、無次元性能指数 ZT が 1 を超える見通しを得ている。したがって、スライドボート法は、p 型と n 型のいずれの熱電材料の製作にも適していることが分かった。

参 考 文 献

- 1) 上村．外：熱電半導体とその応用，(1988)，1，日刊工業新聞社
- 2) K. Sugiura, et al. : Thermoelectric Properties of the Layered Cobaltite $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_9$ Epitaxial Films Fabricated by Topotactic Ion-Exchange Method, Mater. Trans., 48, 8(2007), p. 2104
- 3) K. Koga, et al. : First-Principles Study of Electronic Structure and Thermoelectric Properties for Guest Substituted Clathrate Compounds $\text{Ba}_6\text{R}_2\text{Au}_6\text{Ge}_{40}$ (R=Eu or Yb), Mater. Trans., 48, 8(2007), p. 2108
- 4) S. Sugihara, et al. : Improved Thermoelectric Performance of Oxide-Containing FeSi_2 , Mater. Trans., 52, 8(2011), p. 1526
- 5) M. Ohta, et al. : Preparation of Single-Phase Pb-Filled Chevrel-Phase Sulfide and Its Thermoelectric Properties, Mater. Trans., 52, 8(2011), p. 1535
- 6) N. Toshima, et al. : Organic Thermoelectric Materials Composed of Conducting Polymers and Metal Nanoparticles, J. E. Mat., 41(2012), p. 1735
- 7) W. M. Yim, et al. : Compound Tellurides and their alloys for Peltier cooling-A review, Solid-State Electron, 15(1972), p. 1121
- 8) J. R. Wiese, et al. : Lattice constant of Bi_2Te_3 - Bi_2Se_3 solid solution alloys, J. Phys. Chem. Solids, 15(1960), p. 13
- 9) T. Caillat, et al. : Thermoelectric properties of $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$ single crystal solid solutions grown by the T.H.M. method, J. Phys. Chem. Solids, 53(1992), p. 1121
- 10) R. B. Horst, et al. : Preparation and properties of high-performance $(\text{Bi,Sb})_2(\text{Te,Se})_3$ alloys, Proc. 4th Int. Conf. Thermoelectrics,(1982), p. 119

- 11) 例えば, B. Poudel, et al. : High-Thermoelectric Performance of Nanostructured Bismuth Antimony Telluride Bulk Alloys, Science, 634(2008), p. 320
- 12) 例えば, S.S. Kim, et al. : Thermoelectric properties of anisotropy-controlled p-type Bi-Te-Sb system via bulk mechanical alloying and shear extrusion, J. Alloys Compd., 375(2004), p. 107
- 13) 例えば, J. Seo, et al. : Fabrication and thermoelectric properties of p-type $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ compounds by ingot extrusion, Mater. Res. Bull., 35(2000), p. 2157
- 14) 例えば, J. T. Im, et al. : Microstructural refinement of cast p-type Bi_2Te_3 - Sb_2Te_3 by equal channel angular extrusion, Acta Mater., 52(2004), p. 49
- 15) 産業技術総合研究所：新東ブイセラックス，遠心焼結装置，特願 2002-382579，日本国特許庁(2002)
- 16) Y. Kinemuchi, et al. : Deposition of Bismuth Telluride Thick Film by Solidification under Centrifugal Pressure, J. Electron. Mater., 38(2009), p. 1089
- 17) 島根大学：熱電変換材料製造方法及びその装置，特許第 3586712 号，日本国特許庁(2004)
- 18) H. Kitagawa, et al. : Liquid Phase Growth of $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ by Sliding Boat Method, Scripta Mater., 49(2003), p. 309
- 19) 三井造船，島根大学：熱電変換材料製造装置及び熱電変換材料製造方法，特願 2011-103693 出願中，日本国特許庁(2011)
- 20) H. Kitagawa, et al. : Thermoelectric Properties of $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ Prepared by Liquid Phase Growth using Sliding-Boat, J. Electron. Mater., to be published.
- 21) P. Pecheur, et al. : Tight-binding studies of crystal stability and defects in Bi_2Te_3 , J. Phys. Chem. Solids, 55(1994), p. 327
- 22) 小原．外：熱電発電モジュールの性能評価技術，熱電発電フォーラム 2006,(2006), p. 33
- 23) Hi-Z Technology, Inc. : <http://www.hi-z.com/>

〔問い合わせ先〕

技術開発本部 千葉技術開発センター
TEL 0436 - 41 - 1930 加藤 寿仁



加藤 寿仁 鎌田 勤也 北川 裕之

保温材下の腐食検査技術の現状と適用事例 - 見えない腐食を検知する音響検査技術 -

石原修二* 玉川準之介** 中原亮一*
佐藤功一* 中田成幸*

Corrosion Inspection Technology for Invisible Corrosion under Insulation

Shuji ISHIHARA, Junnosuke TAMAGAWA, Ryoichi NAKAHARA, Koichi SATO, Shigeyuki NAKATA

In an infrastructure management, age-related deterioration of facilities has caused serious problems. For maintaining chemical, petrochemical plants, refineries and so on, the effective countermeasures to corrosion under insulation (CUI) are matters of urgency. CUI cannot be confirmed from the outside because it develops under the insulation. Although the visual inspection is the most reliable method, such inspection is highly expensive because of costly removal/restoration of the whole insulation and scaffoldings. Under these circumstances, the non-destructive inspection is considered to be one of the solutions. Among the various non-destructive inspections, we examined the reliable and inspection diagnosis techniques to satisfy the facility owner request considering the future facility maintenance trend.

多くのインフラ設備において、設備の経年劣化が深刻な問題となってきた。特に、化学プラントや石油化学プラント、精油所などでは、保温材下腐食(CUI)に対する効果的な対策に大きな関心を持たれている。この腐食は保温材の下で発生するため、外観からは確認することができない。信頼性の点では目視検査が最も好ましいが、保温材の解体/復旧や足場工事が必要となり、多大な付帯費用が発生する。この状況下において、非破壊検査が問題解決の一つの方法であると考えられている。多様な非破壊検査技術の中から、将来の設備保全の方向性を考慮し、エンドユーザの要求を満足できる信頼性の高い検査診断技術について検討した。



写真1 配管に発生した保温材下腐食(CUI)の例
Examples of Corrosion under Insulation(CUI) on the Piping

* 技術開発本部 玉野技術開発センター

** 三井造船プラントエンジニアリング株式会社

1. 緒言

1.1 背景

日本国内において、社会インフラ及び産業インフラの多くは建設から数十年が経過しており、劣化と寿命の問題が顕在化している。例えば、高圧ガス保安協会が公表している事故統計資料¹⁾によると、最近19年間(平成4年～平成22年)における高圧ガス製造事業所の事故原因は、設備上事故が590件(72%)、運転・操作上事故が146件(18%)、その他が83件(10%)となっている。更にその内容を精査すると、劣化・腐食等による事故が458件(56%)と大部分を占め、製作不良によるものが68件(8%)、認知確認ミスによるものが55件(7%)と続いている。また、平成23年のみの統計を見ると、設備の設計、製作不良によるものが41件(12%)、設備の維持管理によるものが148件(42%)、組織体制の不良によるものが4件(1%)、ヒューマンファクターによるものが27件(8%)となり、同様に精査すると、腐食管理不良による事故が全体で58件(16%)と多くを占め、以下、検査管理不良54件(15%)、誤操作・誤判断26件(7%)、設計不良18件(5%)の順となっている。

このように、腐食に起因する事故の発生割合が大きいことは明らかである。しかし、高度経済成長期とは異なり、新規の投資が大幅に縮小された現在においては、いかに効率よく維持管理を行い、延命化を図っていくかが求められている。

1.2 保温材下腐食(CUI)

使用される環境や材料によって様々な腐食が発生するが、プラントなどで特に憂慮されているのが保温材下腐食(Corrosion Under Insulation: CUI)である。保温材を施工した配管や機器類において、何らかの原因で保温材中に侵入した水分によって引き起こされる外面腐食であり、一例を写真1に示す。大気中で使用される炭素鋼などの全面腐食と比べると、比較的早い腐食速度で、局所的に進行するという特徴がある。

保温材内部への水分の供給は、外装鉄板のはげの部分より雨水として侵入することが多い。このはげは、点検等に伴う解体復旧の繰り返しによって変形し空隙を生じやすい。そのほかにも、ノズルやセンサの取付座における外装鉄板のシール部でも、シール材の劣化によって雨水浸入の経路となり得る。侵入した雨水は保温材に浸透し、運転温度に応じた湿潤環境を形成することで腐食が進行する。外面温度が80程度で運転される保温配管や機器で、最も腐食速度が大きくなる傾向がある。また、プラントの多くは沿岸地域に建設されていることから、海塩粒子が雨水に溶解して侵入することにより、腐食が促進される傾向もある。

1.3 CUIに対するガイドライン

このような状況に対応するために、プラントメンテナンス協会及びエンジニアリング協会から、CUI対策のガイドラインが発行されている^{2),3)}。前者は、設備の保有者であるエンドユーザの視点に立ち、技術だけでなく、経営的に説得力を持つ「保全」に立脚点を置いた、保全現場で真に有効なガイドラインとして作成されている。参加企業で得られた実際

のデータ、経験・ノウハウを最大限に生かし、目視点検をもとにした指針が示されている。一方、後者は石油精製業や石油化学工業を対象とし、数年間にわたって行われた研究実績に基づく指針となっている。前者と異なり、スクリーニング検査として目視点検に加えて非破壊検査を効果的に用いることが推奨されている。

これらのガイドラインは保温配管を対象にまとめられているが、保温が施工されるのは配管だけではなく、化学プラントにおける蒸留塔や反応器などの塔槽類も該当する。保温が施工された塔槽類においても配管と同様のメカニズムでCUIが発生・進行していることから、プラント全体を含めたCUI対策を検討していく必要があると考えられるため、機器の設計・製造、プラントの建設及びメンテナンスの視点で、CUIの検査診断技術を調査した。

2. CUIの検出に適合する非破壊検査技術

2.1 CUIへの適用が見込める検査技術

CUIに適用可能な検査技術の条件として、第一に保温材の撤去を必要としない、若しくは最小限の保温材撤去で保温材下の鋼材の腐食状況を評価できることが必要である。現在、一般的に使用されている非破壊検査技術について、CUIへの適用性を検出メカニズム別に表1にまとめた。大別すると、超音波、音響、放射線、電磁波などに分けることができる。

配管においては、ガイド波超音波探傷が一般的に認知されている。しかし、センサを配管の周囲に巻きつけるように設置する必要があるため、塔槽類に対しての適用は難しい。一方、パルス渦流探傷は、保温材上から残存肉厚を計測できるため、塔槽類への適用も期待できる。しかし、センサの直下しか計測できないなど、検査対象によっては足場の設置のために多大な付帯工事が必要となる場合もある。

このように、CUIに適用できる非破壊検査技術はいくつかあるものの、すべての要求を同時に満足させる性能・機能を持つ技術は存在しないのが現状である。

2.2 CUI検査に対するエンドユーザのニーズ

非破壊検査によるCUIの検査診断が一般化していない理由として、エンドユーザのニーズとのマッチングに問題があると考えられる。そこで、三井造船、三井造船プラントエンジニアリング及び三造試験センターの三井造船グループは、エンドユーザへのインタビューなどにより、CUIに対して非破壊検査に要求される条件として以下の4点を抽出し、各検査技術を精査した。

不連続部に対応できること

不連続部とは、配管においてはフランジやノズル、塔槽類においては保温リングのような突起物など、構造の不連続部のことを意味する。このような場所は、雨水等が侵入する起点や滞留部になりやすく、最もCUIが発生しやすいと考えられている。しかし、CUIに対して、まずチェックすべきポイントであるにもかかわらず、この部位の検査が可能な検査技術は限定されている。

運転中に計測することが可能であること

重大な損傷が想定される場合を除き、CUI検査のためだ

表1 CUI に対応可能な非破壊検査技術の一覧
List of Non-destructive Inspection Technologies Available for CUI

検査技術	原理	定量評価 (残厚)	適用性		不連続部 への対応	運転中の 検査診断	付帯工事 の削減
			配管	塔槽類			
超音波技術							
ガイド波超音波探傷	長手方向に伝播するガイド波を用いて、長距離の探傷を行う						
ロングレンジ UT	ガイド波を板厚全体に伝播させ、反射エコーより損傷の位置、大きさを測定する						
音響診断技術							
アコースティックエミッション (AE)	材料の破壊によって発生した弾性波 (AE) を圧電素子により電気信号に変換し計測する						
光ファイバ AE	FOD センサの周波数変調を利用して AE を検出する						
放射線技術							
デジタルラジオグラフィ	X 線フィルムの代わりに IP(イメージングプレート)を用いて画像をデジタル化し、腐食状況を視覚的にとらえる			×			
中性子水分計	中性子線源が水(水素原子)との接触により発生する熱中性子量を測定する	×					
電磁気 / 電気技術							
パルス渦流探傷	渦電流により発生した磁界の減衰により、肉厚変化をとらえる						

注) : 可, : 一部で可, x : 不可を表わす.

けに設備を停止させることは現実的ではない。運転中に検査が可能なのは、設備停止を伴わない生産面へのメリットだけでなく、損傷の早期発見、事故の未然防止など安全面でも多大な効果が見込める。また、メンテナンス計画の策定においても時間的な自由度を得ることができる。

足場などの付帯工事を最小限にできること

保温材を撤去して目視点検する場合、特に高所では足場の設置など付帯工事にかかる費用が高額となる。CUI 検査が後手に回ってしまう原因がこの付帯工事の費用にある。CUI 検査には、この付帯工事を低減することが必須的に要求される。

検査自体が低コストであること

CUI 検査に非破壊検査を適用するに当たって、一番のネックとなり得るのが検査費用である。検査にかかる費用で対象物の交換・補修ができてしまうケースもあり、わざわざ検査まで行う必要はないとのエンドユーザの声もある。現状では、検査会社の保有する設備、検査会社の保有するノウハウに依存しているが故に、どの非破壊検査においても実施に高額な費用が発生する。これら検査技術が汎用的に使用されていくためには、技術的また体制的な改善によってコストダウンを実現していく必要がある。業界全体で考えていかなければならない課題であるとも言える。

ここで挙げた要件について、各検査技術の対応状況を表1に併せてまとめた。～の要件の多くを満足する技術として、当社グループでは、アコースティックエミッション(以下

AE)に着目した。配管や塔槽類など適用対象の幅広さ、CUI 発生の可能性の高い不連続部への対応など、多くの特長に期待が持てることから、その実用性について評価を行った。

3. AE による腐食検出特性の検証

3.1 AE による腐食検出の手順

ここで言う AE は、材料の破壊に伴って発生する弾性波のことであり、発生した AE の検出により材料の破壊挙動を評価できる。腐食の場合は、腐食反応や腐食生成物の剥離などに伴って AE が発生するため、この AE の検出によって、腐食検知が可能であると言われている。AE の大きな特長は、複数のセンサの使用によって、損傷部の位置を標定できることである。検査対象が配管の場合、被検査部を挟むように二つの AE センサを設置する。塔槽類の場合、周方向及び高さ方向に数 m ピッチで AE センサを設置することで位置標定が可能になる。そこで、モックアップによる屋内試験及び実設備を対象にフィールド試験を実施し、AE による検査の実用性について検証を行った。

3.2 モックアップによる検証

配管を対象とした計測用のモックアップを製作し、AE の検証を行った。モックアップは複数の径のパイプ(STPG370 Sch40)を連続的に接続した構造で、任意の位置に模擬腐食を設けた。模擬腐食はグラインダーで管表面の一部を削った後に、3 wt%NaCl 水溶液に浸漬した不織布を貼付すること



写真2 モックアップに導入した腐食部の外観
Appearance of the Corrosion on the Mock-up

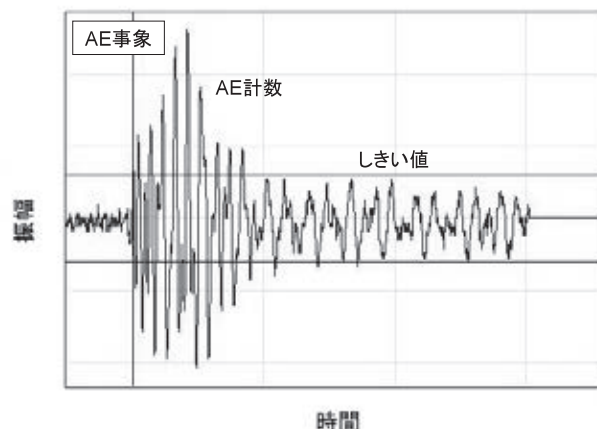


図2 AE波形の例
Example of AE Waveform



図1 AEセンサの配置
Set-up of AE Sensor

表2 AEパラメータにおける位置標定の精度
Accuracy of Estimation of Corrosion Location by some AE Parameters

A Eパラメータ	位置標定の精度
A E 計数	×
A E 事象数	
最大振幅	
A E エネルギー	

注) : 優れている, : 誤差が大きい, × : 不可を表わす.

で湿潤状態を維持し腐食を進行させた。この方法で発生させた腐食部の外観を写真2に示す。

腐食部はいずれも管上面に形成した。AEセンサを図1に示すように腐食部を挟んで直線上に設置することによって、腐食部の位置標定を試みた。

計測されるAEは、腐食生成物の剥離等によって生じる突発型AEと考えられる。計測されたAE波形の一例を図2に示す。このAE信号を処理して得られるAE特性パラメータのうち、以下の四つの指標にて評価を行った。

AE 計数：AE 信号が設定したしきい値を超えた回数

AE 事象数：AE の生起回数

最大振幅：一つのAE 事象中における信号電圧の最大値

AE エネルギー：AE 事象の包絡線での積分値

各パラメータにおける腐食位置の標定結果と実際の腐食位置との整合性を表2にまとめた。四つのパラメータのうち、AE エネルギーによる評価が、最も位置標定の精度が高いことが確認できた。その位置評定の誤差は、本計測条件においては100～200mm程度であったが、実用上は問題ないレベルであると考えられる。ただし、AEはパッシブな検査手法であり、検査結果は腐食部からのAE発生に依存している。したがって、腐食速度(AE事象率)と関係の深い温度や、腐食生成物の割れ・剥離を誘発する応力の大きさは、計測結果に大きく影響する。そのため、運転中もしくは相応の環境での計測が必要となる。

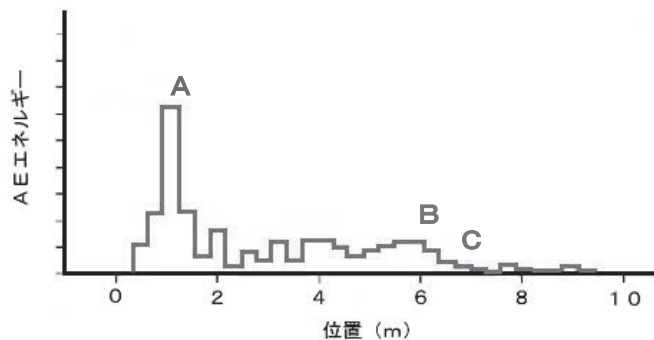
モックアップ試験の結果、AEは測定環境に大きく依存するものの、十分な精度で腐食を検出可能であることを確認した。

3.3 フィールドによる検証

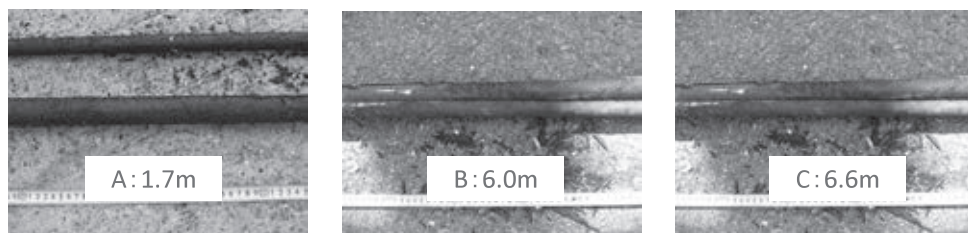
図3に、実プラント設備における計測結果を示す。計測対象は設置から約20年を経過した原料移送配管であり、材質はSGP、表面には錆止め塗装が施されている。AE計測はフランジ間の約11mにおいて、両端に二つのAEセンサを設置して設備稼働中に実施した。

AEによる腐食位置標定は、AEエネルギーをパラメータとしてまとめた。全体的に大きなAEエネルギーが計測されており、特に左端部から約1mの地点において極大値を示している。開放点検の結果、左端から1.7mの地点で大きな腐食減肉があり、その他にも外観での顕著な腐食は、それぞれ左端から6.0m、6.6m付近の位置に確認できた。AEの計測データでは1m近傍のAEエネルギー値が大きいため他が目立っていないが、左端から2～6mまでの間においてもAEエネルギーは大きな値を示している。また、位置評定の誤差としては若干大きいように思えるが、検査対象の配管が11mと長めであることや、左端から1.7mの腐食損傷部には管内からの漏えいの様相が見られることから、これらによる減衰が位置標定の精度に影響を及ぼしたものと考えられる。

そのほかにも幾つかのデータを検証した結果、実際の運転環境においても、十分に評価可能なレベルの精度を備えていることが分かった。



(a) AE 計測データ



(b) 腐食損傷部の位置と外観

図3 フィールドにおける AE 計測結果
Results of AE Measurement in the Actual Plant

4. 結言

最近になって、設備の経年劣化に伴う爆発火災などの事故の発生も増えている。その原因の一つとして、ベテラン保全員の退職が影響しているとも言われるが、企業の社会的信頼を維持するためにも、設備の維持管理は更に重要な位置付けになっていくことが予想される。特に、CUIのような目視確認の難しい場所においては、これまでのベテラン保全員の経験による判断だけでなく、非破壊検査を効果的に活用していくことが不可欠になると考えられる。

当社グループでは、各検査技術の特性を活かし、最適な検査診断を含めた補修工事の提案などにより、全体最適化を考慮した設備の維持管理に貢献していく所存である。

最後に、フィールド試験は、本州化学工業株式会社技術部 白井部長、吉留グループリーダー、乾担当、中山担当のご協力により実施することができた。ここに感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 高压ガス保安協会：高压ガス関連事故年報，(2012)，p. 2
- 2) プラントメンテナンス協会：外面腐食対策ガイド，(2010)

3) エンジニアリング協会：石油精製業及び石油化学工業における保温材下配管外面腐食(CUI)に関する維持管理ガイドライン，(2012)

〔問い合わせ先〕

技術開発本部 玉野技術開発センター
TEL 0863 - 23 - 3021 石原 修二



石原 修二



玉川 準之介



中原 亮一



佐藤 功一



中田 成幸

国道 20 号新宿高架橋架替工事
- 交通車両共用下での旧橋撤去及び新設橋梁の架設 -



写真 1 3期施工部の旧橋撤去作業状況



写真 2 架替完了後の新宿高架橋

本工事は、新宿駅南口基盤整備事業のうち、老朽化した新宿跨線橋の取り付け高架橋部を撤去し、耐久性と耐震性を有する新橋に架け替える工事である。

特長

- (1) 新宿駅南口に面する跨線橋の交通量は、1日当たり車両が約6万台、歩行者が約14万人と多いため、幅員27m(一般部)に対し、車道4車線(約14m)、歩道1.75mを、架替中は常時確保するという施工条件が課せられた。このため、幅員を約10mずつ、下り線側、中央分離帯側、上り線側と3期に分けて架け替え工事を行った。写真1は3期施工時の旧橋の撤去状況を示しており、架替が完了している1期、2期施工部は車両が通行している。
- (2) 旧橋の撤去に当たり、旧橋上にクレーンを配置することや、旧歩道の一部に車両を走行させる必要があったため、それらの荷重に対して旧橋の耐荷力を照査した。耐荷力照査に当たっては、旧橋建設時やその後の補強工事の設計図書の一部が残っていなかったため、旧橋の保有耐荷力の算定を目的に、断面計測、コア抜きによるコンクリート圧縮強度の確認、鉄筋探査による配筋状態の調査などを実施した。
- (3) 耐荷力の照査の結果、旧橋上へのクレーンの配置、旧橋歩道部への車両走行などにより、一部で旧橋の強度が不足することとなり、仮支持構造の追加や炭素繊維シートによるRC床版の補強などを行った。
- (4) 新橋の架設は、トラッククレーンベント工法により施工した。基本的に単ブロック架設としたが、桁下に車道や歩行者用の連絡通路があり、ベントの設置が困難な場所は、

一部地組立架設を行った。また、既に架設した新橋の桁上や既設桁上に架設用クレーンを配置することになったため、クレーン据え付け時のアウトリガー反力受け点に対して安全性の確認を行った上で、新橋を架設した。

主要目

工事名：国道20号新宿高架橋架替工事
 工事場所：東京都新宿区新宿4丁目地先
 発注者：国土交通省 関東地方整備局 東京国道事務所
 工期：平成21年11月14日～平成24年9月28日
 撤去桁橋梁形式

A1～P4間	4径間連続RCラーメン橋	1連
P4～P5間	単純鋼桁橋	1連
P5～P6間	単純RC桁橋	1連
P6～P7間	単純鋼桁橋	1連

新設橋梁諸元

橋梁形式：3径間連続鋼床版鈹桁橋
 橋長：82.1m
 支間割：33.050m + 31.500m + 16.600m
 幅員構成：27.700m～30.700m
 鋼重：861.5t

(三井造船鉄構エンジニアリング株式会社)

〔問い合わせ先〕

技術本部 技術部 東部技術室
 TEL 0436 - 43 - 1853 浅野 浩一

中低温熱エネルギー回収システム“VPC(Variable Phase Cycle)”を開発
 - 10 kW 級及び 200 kW 級試験機で実証 -

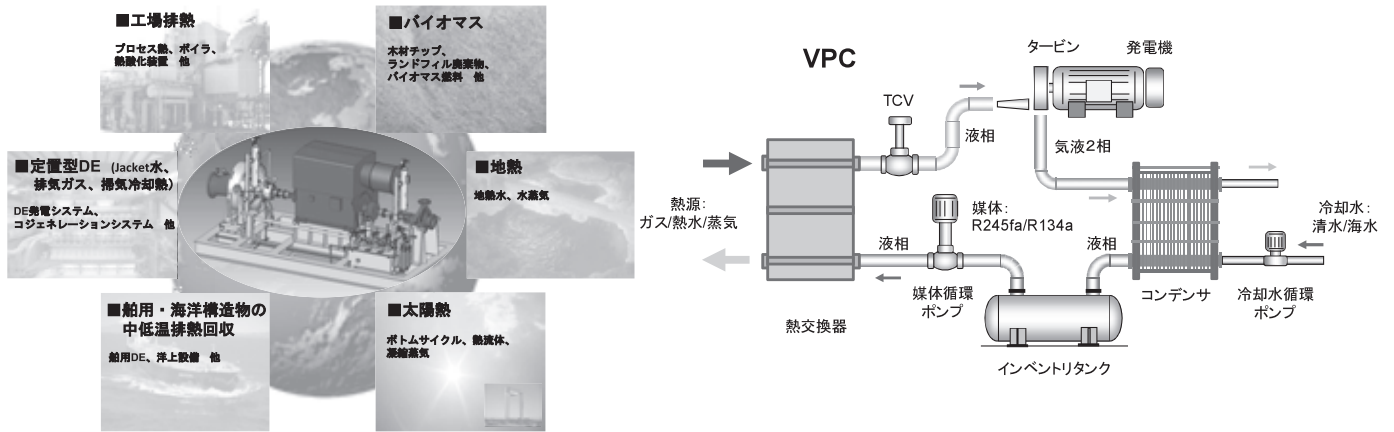


図1 中低温熱エネルギー回収システム“VPC”

三井造船は、70 から 250 程度の熱源である中低温熱エネルギーを回収するシステム“VPC(Variable Phase Cycle)”を2013年度の事業化を目指し開発、実証を進めている。VPCは、図1に示す基本システムで構成され、発電性能をより高効率とすることができる。

当社は、本システムをVPCパイナリー発電装置として2011年度から開発に着手し、10 kW 級 VPC 試験装置(写真1)で性能を確認するとともに、プロトタイプ機である船用200 kW 級 VPC (写真2)の実機による機能及び性能確認試験を2013年1月から開始した。

この200 kW 級 VPC は、日本海事協会及び東京海洋大学と共同で開発し、当社の船用テストエンジン 4S50ME-T の掃気冷却系からの熱源によりタービンを駆動するシステムである。本システムは陸用への転用が可能のため、中低温熱エネルギー回収システムの中核となるシステムである。

特長

- (1) VPC は、一般的に開発が行われている ORC (Organic Rankine Cycle) が低沸点媒体を気化させてタービンを駆動するのに対し、気体、気液 2 相及び液相 (Variable Phase) によりタービン駆動が可能なシステムである。このため、対象とする温水、蒸気、排気ガス等を熱源に、最適化されたサイクルを構成することが可能である。
- (2) VPC 基本サイクルを図2に示す。基本サイクルは、加熱器による媒体加熱において、媒体を気化させず、ノズルを介して気液 2 相として衝動タービンを駆動させる方式である。熱源用の熱交換器は 1 器であり、制御も比較的容易であるとともに、熱源負荷変動に対してもノズル



写真1 10 kW 級 VPC ラボユニット

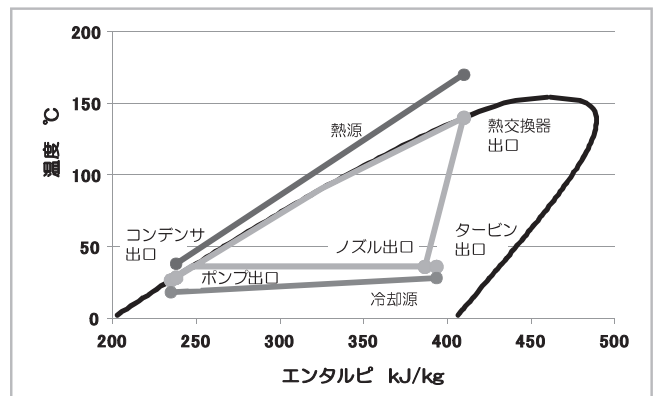
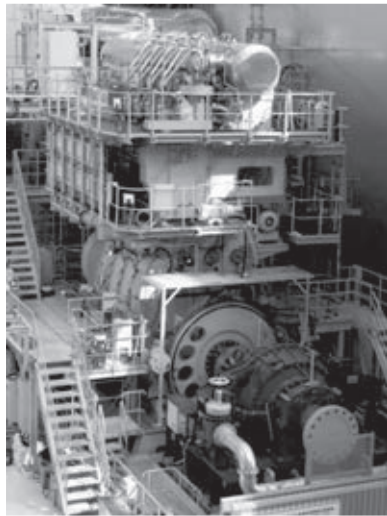


図2 Variable Phase Cycle



エンジン 4S50ME-T
出力 7120 kW
回転数 117 min⁻¹

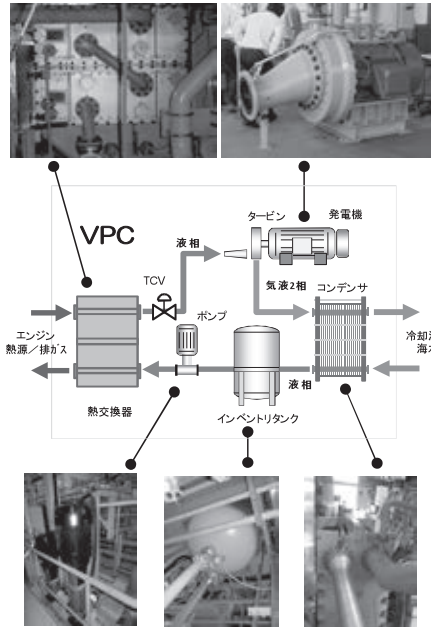


写真2 船用200kW級VPC実証・検証主要機器

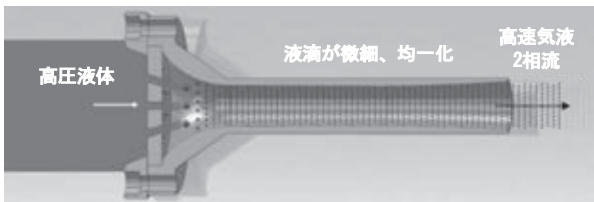


図3 高速気液2相流発生ノズル

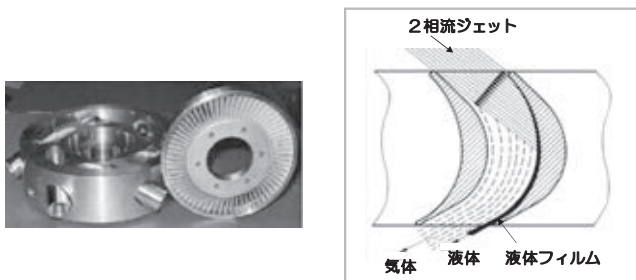


図4 VPCタービン

制御により高効率で追従することができる。

- (3) 通常のORCと比較して、熱源の出口温度をより低く設定することができ、より多くの熱量を回収し、発電に利用することができる。これは、ORCにおける熱交換器でのピンチ温度による制約を最大限回避できるためである。
- (4) 比較的高圧の媒体(液相)は、図3に示すノズルを介して断熱膨張し、ノズル内で高速の気液2相流として微細、均一化され、図4に示す衝動タービンを駆動する。2相流速度は、タービン翼にエロージョンを起こさせないレ

ベルに制御される。実証・検証用VPCの主要目を表1に示す。

表1 実証・検証用VPCの主要目

VPC		10 kW 級	200 kW 級
タービン	軸パワー (kW)	0-12	0-250
	効率 (%)	68	68
	回転数 (rpm)	0-4 500	0-3 600
誘導発電機 (3相)	電圧 (V)	230	440
	電気出力 (kW)	12	250
	効率 (%)	95	95

VPC 事業化に向け3タイプのモデルの提供を計画しており、発電端出力はパートナーである米国エナージェント社が開発した1500kWまで対応可能である。

形式：M-VPC10, M-VPC200, M-VPC1500

発電端出力：10, 200, 1500 kW

熱源：ガス、熱水または蒸気

設置方式：縦または横型

作動媒体：R245fa または R134a

2012年度に、事業化準備を完了し、ユニット構成の拡充、カスタム仕様への対応を含め、2013年度から本格市場参入する予定である。

〔問い合わせ先〕

機械・システム事業本部 事業開発部

TEL 03-3544-3043 川鍋 知晃

オフラインティーチングソフトウェア“RoboTrue Laser” - 三次元レーザ切断加工の生産準備期間短縮に貢献 -

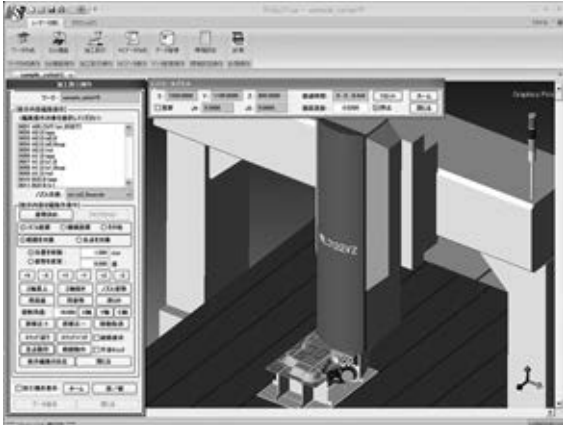


図1 “RoboTrue Laser”操作画面

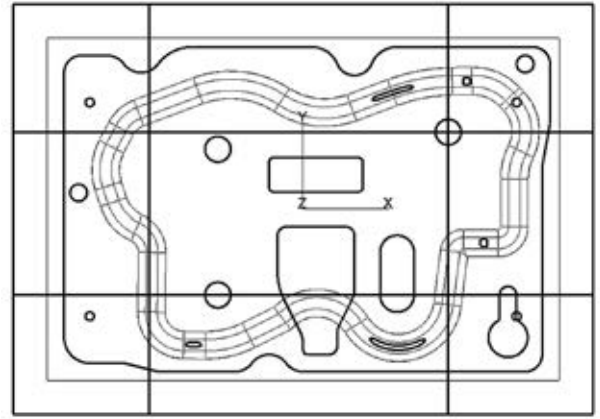


図2 二次元スケッチャー

三井造船システム技研は、2012年7月より三次元レーザ切断加工オフラインティーチング*ソフトウェア“RoboTrue Laser”の販売を開始した。本ソフトウェアは、オフラインティーチングソフトウェアとして多くの加工現場への納入実績を持つ“CimStation Laser”の後継ソフトウェアであり、『多様化する三次元CADデータ』、『新OS』及び『三次元レーザ加工機の新機能』に対応して、低価格、高機能を実現している。

従来、プレス成型品の切断加工で用いられている三次元レーザ加工は、治具設計・製作、ケガキ、実加工機での教示作業など、多くの工程を経て作業が行われていた。しかし、この方法では、作業への負荷集中、加工機の教示占有時間の増加等の問題が発生し、納期の短縮、コストダウンが困難となっていた。そこで、これらの問題に対処するため、オフラインティーチングソフトウェアの導入が急速に進んだ。

オフラインティーチングのメリットは、コンカレントエンジニアリングによる作業工程短縮であり、プレス成型品が作成されていない状況でも、コンピュータ上で三次元CADデータを使用することによって、詳細な事前検討とNCプログラム作成を行うことが可能となる。すなわち、実加工機を使用した教示作業を減少させ、実加工機の稼働率を上げることが可能となる。

特長

(1) 強力なモデリングカーネルとCADインターフェイス

本ソフトウェアは、三次元幾何処理部に仏ダッソー・システムズ社CATIA V5のモデリングカーネルと同じカーネルであるCGM (Convergence Geometric Modeler)を採用した世界初のアプリケーションである。CATIA V5と同じ

*)コンピュータ上の仮想環境で、製品の三次元CADデータと仮想の加工機モデルを用いて、加工位置の教示、加工シミュレーションや加工用NCプログラムを作成すること。

カーネルを採用しているため、CATIA製品で培われた堅牢性、高品質ジオメトリ、パフォーマンスをそのまま享受することができ、そのためCATIA V5との親和性が高く、製品のCADデータファイルに含まれる形状データを変換することなく、高速で取り込むことができる。三次元CADデータ交換フォーマットとしては、CATIA V5, Pro/E, NX, Parasolid, IGES, SAT, STEPなどの最新データフォーマットに対応している。

(2) 強力な教示支援機能

実加工機での教示作業は、プレス成型品にケガキされた線に合わせて、加工ヘッドの位置、姿勢、動作補間モードなどをポイントごとに教示し、NCプログラムを作成していたため、ケガキ作業での誤差、目視教示作業での誤差など、累積された誤差の手直しは作業者の負荷を増大させていた。

本ソフトウェアを使用することにより、作業者は、実加工機を忠実に模擬した仮想の加工機モデル、治具やワークなどの三次元モデルから、教示位置、面直姿勢、機械動作補間モードを容易に選択、自動決定することができ、実加工機を用いて教示を行うよりも、簡単、正確に、NCプログラムの作成を行うことができる(図1)。すなわち、実加工機で教示するよりも、短時間で高精度な教示作業が可能となる。

(3) 板治具設計

本ソフトウェアでは、板治具作成機能を使用して、レーザ加工に適切な板治具を「簡単に」「素早く」「自動で」設計することができる。

板治具作成は、最初に二次元スケッチャーで行う(図2)。二次元スケッチャーでは、ベースプレート寸法、縦方向・横方向のサポートプレート数や位置などを設定する。

次に、治具の板厚、ワーク形状の板内までのオフセット量、軽量化用残し幅などのパラメータを設定することにより、組付け状態の治具形状を自動作成する(図3)。サポート板の

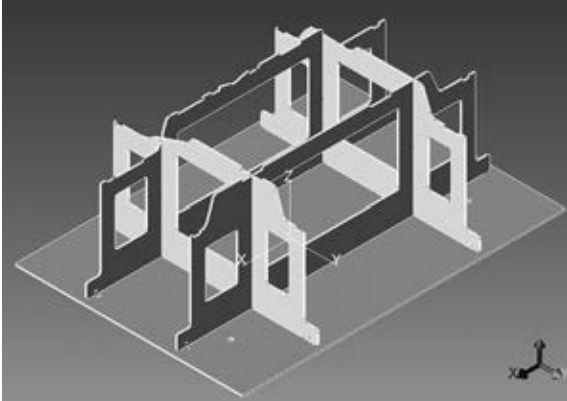


図3 組み上がった板治具

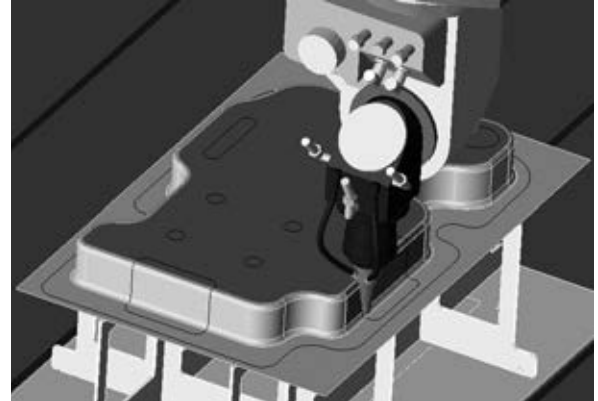


図5 シミュレーションで干渉を確認

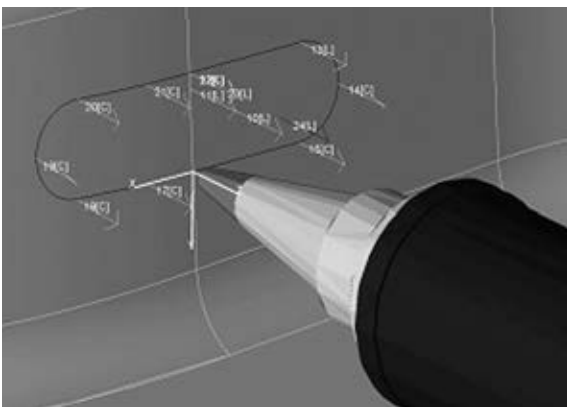


図4 面直に作成された教示ポイント

はめ合い形状や肉抜き、ベースプレートとの組み付け位置ナンバリング、フラッシュバック防止用の逃がし形状は、自動で計算・作成される。

最終的に、組み付け状態の板治具を材料板から切り出すためのネ스팅処理と加工パス作成により、三次元レーザ加工機に応じた NC プログラムを作成する。

(4) 製品の加工パス作成

異形穴や外周トリムの教示ポイントは、製品の三次元モデル上のトリムライン曲線をグラフィックスウィンドウ内でマウス選択し、画面で認識させる。許容値を指定することにより、認識された線要素から直線補間ポイントと円弧補間ポイントが自動作成される。作成された加工ポイントに接する曲面の法線情報により、加工ノズルの姿勢は面直となるように自動計算される(図4)。しかし、三次元モデル上のトリムライン曲線に忠実なポイント作成を行うと、教示点の数が增加することになり、実加工機においての微調整に時間がかかることが問題となる。本ソフトウェアでは、加工精度を考慮した許容範囲パラメータを指定することにより、作成される教示点の数を減少させることができる。

穴加工は、丸穴、長穴、角穴、鍵穴などのマクロ定義が標準で用意されており、接近点、逃げ点及び加工方向の指定に必要なサポート点が自動作成される。加工位置の設計変更があった場合には、三次元モデル上のトリムライン形状を上流の CAD システムで修正して再読み込みすることなく、移動

や回転、寸法変更といった修正が可能である。

外周トリム等の複雑なトリムライン教示もトリムライン曲線の1ヶ所を選択することにより、連続した線データを認識し、教示ポイントを自動で作成する。

また、作成された教示点は、豊富な教示点編集機能により、任意に編集可能である。編集は、教示点ごと、あるいは加工パス内の任意範囲を指定して行うことが可能であり、面直方向の取得、教示姿勢の変更、教示点間の姿勢を滑らか補間するなどの編集機能を提供する。

(5) 加工シミュレーション

本ソフトウェアは、実加工機を忠実に模擬し、その動作特性を定義した仮想の加工機モデルを有し、その加工機モデルの動作をシミュレートできる。加工パスのレーザ切断動作をシミュレートすることで、加工ヘッドの到達できない教示点や、加工ヘッドの回転軸が動作範囲を超える教示点などを容易に確認して編集することができる。また、事前に加工機モデルと製品モデルが干渉する部位を検知することができ、干渉した教示点の姿勢を干渉しない姿勢に修正することで、実加工機での干渉による破損を回避できる(図5)。

(6) NC プログラム自動作成

三菱電機製三次元レーザ加工機及びコマツ NTC 製三次元レーザ加工機に対応した NC プログラム変換機能を有しており、完成された加工パス情報から、製品を切断加工するための NC プログラムを自動作成することができる。

主要目

[動作環境]

- CPU : Intel Pentium 2 GHz 以上の Intel , AMD プロセッサ
- メモリ : 4 GB 以上推奨
- HDD : 5 GB 以上推奨
- OS : Microsoft Windows XP , Vista , 7
- グラフィックス : 3D OpenGL 対応グラフィックアダプタ

(三井造船システム技研株式会社)

[問い合わせ先]

- 製造ソリューション事業部 第一営業部
- TEL 043 - 274 - 5687 飯田 真吾

濃煙熱気実火災訓練装置

- MP8 型消防訓練装置として採用され、好評！ -



写真1 鳥取県消防学校向け濃煙熱気実火災訓練装置

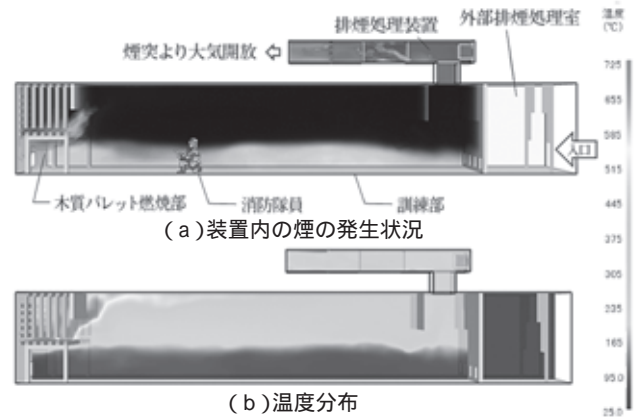


図1 火災シミュレーションソフトウェアによる解析結果

三井造船プラントエンジニアリングは、濃煙熱気実火災訓練装置を、2012年度に3基納入予定である。本装置は、2005年に東京消防庁夢の島訓練所での採用を皮切りに、各都道府県の消防署及び消防学校で採用され、本年度は、鳥取県消防学校、総務省消防庁消防大学校及び東京消防庁から受注した。中でも2012年11月に完成した写真1の鳥取県消防学校向け濃煙熱気実火災訓練装置は、鳥取県知事出席のもと完成披露式典が盛大に開催された。

昨今、災害が多様化、複雑化する状況下で、全国的に消防職員の世代交代が急速に進んでおり、現場経験不足の若年隊員が増加し、消防活動力の低下が危惧されている。

これより、消防機関の消防力を維持向上させるために、消防職員がより安全で効果的な消防活動訓練を行うことができる施設の導入が急務であった。このようなニーズを満足するため、当社では2005年から研究開発を開始し、消防隊員の消防活動能力を向上させるために、実際の火災に近い高温環境や火災の性状を再現できるような実火災訓練装置を開発した。（特許：第4917131号）。

本装置は、訓練室内で木材（パレット）を燃焼させることにより、実火災に近い火災及び濃煙熱気を作り出す装置であり、装置内に突入した消防隊員は、「濃煙と熱気」、「急激な火災拡大の前兆現象」、「熱環境変化」などを体験・体感することができる。

本装置開発に当たり、火災シミュレーションソフトウェアPyroSimを活用し、実際の炎と煙の流動、熱変化、圧力や温度変化を解析し、より火災現場に近い状況を作り出すことができた（図1）。

特長

- (1)可動フラッパーと排煙量のコントロールで、訓練装置内部に煙と熱の二層流を形成・維持することを可能とした。
- (2)市街地にも設置が可能なように、隊員が出入りする際に外部に極力煙を漏らさないための外部排煙排気室を設けた。
- (3)発生した煙は800以上の燃焼装置で二次燃焼させ、無煙・無害化して大気へ放出する独自の排煙処理装置を装備した。
- (4)訓練部本体は、40フィートコンテナ（長さ約12m）を利用することにより低価格を実現した。

現在、各都道府県の消防署及び消防学校を中心に、主要商品として営業展開している。

主要目

装置サイズ：幅7×長さ15×高さ6m

装置装備品：訓練装置本体、排煙処理装置、
装置制御盤

装置重量：12t

（三井造船プラントエンジニアリング株式会社）

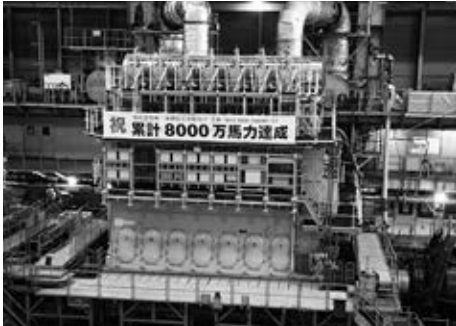
〔問い合わせ先〕

プロジェクト部 ENソリューション室

TEL 043-351-9137 大古 宏治

ディーゼルエンジンの累計生産、8000万馬力を達成

- 三井-MAN B&W ディーゼルエンジン -



三井造船株式会社は、このほど単一機種によるディーゼルエンジンの累計生産8000万馬力を達成しました。

玉野事業所(岡山県玉野市)にて製造した常石造船株式会社(社長:川本 隆夫氏)向け三井-MAN B&W ディーゼルエンジン「7S65ME-C」をもって達成。本エンジンは、常石造船株式会社が建造中の18万重量トン型ばら積み貨物運搬船(船主:株式会社商船三井)に搭載されます。また、本エンジンは、当社製造の電子制御ディーゼル機関(ME機関)の累計50台目となります。

当社のディーゼルエンジン生産量は、2010年6月に累計生産7000万馬力を達成してからわずか2年5ヶ月で1000万馬力を上乗せし、1928年の1号機製作からの累計生産8000万馬力を達成しました。また、2012年度の生産量は約400万馬力の生産を予定しています。

三井造船は、1926年にデンマーク・B&W社(現:MAN Diesel & Turbo社)とディーゼルエンジンに関する技術提携を結んで以来、世界のトップメーカーとして生産実績を積み重ねています。また、今年度は、玉野事業所内に設置された世界最大級のテスト用ディーゼルエンジン(4S50ME-T)を用いて、世界初のビルトイン方式による排ガス再循環システム(Exhaust Gas Recirculation: EGR)によりNOx(窒素酸化物)排出3次規制に対応できることを確認しております。さらに、2013年春に実施予定の電子制御式ガスインジェクションディーゼルエンジン(以下ME-GI)のデモ運転に連動して、ME-GIの工場運転設備の整備を行うなど、次世代エンジンへの対応及び、環境対策技術開発を本格化させております。

[担当] 機械・システム事業本部 ディーゼル営業部 咲本 裕介, 丹 誠二 電話: 03-3544-3475

[問い合わせ先] 広報室 乾(いぬい) 電話: 03-3544-3147

三井造船技報編集委員会

委員長 中谷 龍男
委員 木澤 厚夫
神永 肇
倉山 潔
速水 礼
奥 幸之介
穴倉 進
鎌田 勤也
佐野 健一
兼本 浩

三井造船技報

第208号

2013年(平成25年)2月28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 技術開発本部
〒104-8439 東京都中央区築地5丁目6番4号
TEL 03-3544-3266
印刷 株式会社 三造ビジネスクリエイティブ
〒261-7128 千葉県千葉市美浜区中瀬2-6-1

三井造船株式会社

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

本 社	〒 104-8439	東京都中央区築地 5 丁目 6 番 4 号	TEL 03-3544-3147
幕張センター	〒 261-7128	千葉県千葉市美浜区中瀬 2 丁目 6 番 1	TEL 043-351-8000
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
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
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	大分県大分市末広町 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	大分県大分市日吉原 3 番地	TEL 097-593-3111
技術開発本部			
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
基盤技術センター	〒 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	〒 104-8439	東京都中央区築地 5 丁目 6 番 4 号	TEL 03-3544-3266
海外事務所	シンガポール, 北京, 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		
	三井造船(上海)商貿有限公司		

三井造船技報 第 208 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 - 3544 - 3125

三井造船株式会社 技報編集委員会 事務局 行(TEL. 03 - 3544 - 3266)

三井造船技報 送付先の確認と第 208 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 03-3544-3318 FAX 03-3544-3031

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，鉾石運搬船，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，深海探査ロボット（AUV，ROV），小型水中ロボット，水道管点検ロボット

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

水中ロボット / 水道管点検ロボットを用いた点検サービス

橋梁，ハイブリッド構造物（浮波堤，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，ジャケツト），浮体式海洋設備

機械・システム事業本部 TEL 03-3544-3950 FAX 03-3544-3055

船用ディーゼル機関

往復動圧縮機，バイナリー発電設備，蒸気タービン，炉頂圧回収タービン，軸流・遠心式圧縮機

鍛造前誘導加熱装置（ピレットヒータ，バーヒータ，ピンヒータ他），鉄鋼・非鉄分野向誘導加熱装置（薄板加熱装置，銅管焼鈍装置，線材加熱装置），高周波電源装置（PWM インバータ，サイリスタインバータ，トランジスタインバータ，ゾーンコントロール用電源）

遠隔操作マニピュレータおよびその周辺機器，センシング機器（地中埋設物・建築物探査レーダ，太陽追尾採光システム，複合材剥離検査器），レーダ探査サービス，水理実験設備，塔，槽，熱交換器，回転式乾燥機

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・機器の包括ノ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），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）SiC ウェハー，CVD-SiC コーティング，SiC 製半導体装置用部品

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

エンジニアリング事業本部 TEL 043-351-8000 FAX 043-351-8111

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，分解ガスケンチャー，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

三井リサイクリング 21（キルン式ガス化溶解システム），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，PCB 処理），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）

ガスタービン発電設備，ガスエンジン発電設備，ディーゼルエンジン発電設備，太陽熱発電設備，各種コージェネレーションプラント

海外土木・建築工事全般，特殊構造物，風力発電設備工事，海外橋梁

事業開発本部 TEL 03-3544-3280 FAX 03-3544-3982

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

天然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，バイオエタノール事業の開発，次世代リチウムイオン電池正極材事業の開発，太陽熱発電事業の開発，波力発電事業の開発，集光型発電事業の開発

船舶運航支援のポータルサービス

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

Metrolog X4

[メトロログX4]

Universal 3D Inspection Solution

測定システムの統合

■ ANY DEVICE



Laser Tracker



Arm



CMM



Portable Device

CADシステムとの連携

■ ANY CAD

CATIA V5, CATIA V4, Pro-ENGINEER, Unigraphics, I-DEAS, NX, STEP, IGES...

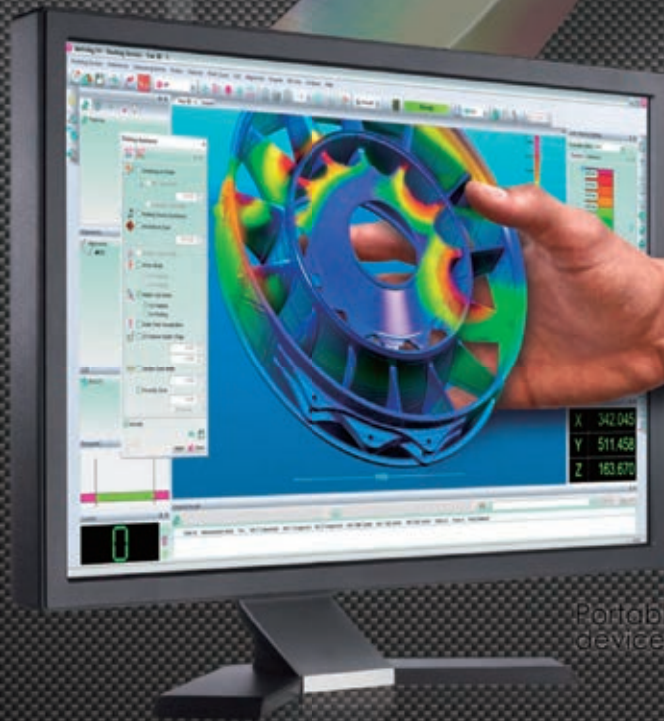
グローバルスタンダードへの適合

■ ANY APPLICATION

GD&T幾何公差 (ISO, ASME), Blade, Gear, Ship building, Aerospace, Automotive

3D CADデータを利用したリアルタイム測定を実現する測定機制御・結果評価ソフトウェアです。

マニュアル3次元測定機からCNC3次元測定機、非接触レーザー測定に至るまで、多種多様な測定機に対応しています。



メトロログX4の販売代理店である三井造船システム技研は、お客様のご要望にあわせた開発、カスタマイズを行い、計測関連データを統合管理し有効利用するためのトータルソリューションをご提案致します。

【ご提案例】

- 計測関連データ管理システム/3Dビューワ/検査成績書自動作成ソフト
- 船舶用プロペラの計測評価・解析システムetc.

Contact !

【販売代理店】三井造船システム技研(株)
製造ソリューション事業部 第一営業部 メトロログ担当



043-274-5687



xg@msr.co.jp



<http://www.msr.co.jp/solution/manufacturer/inspect/index.html>