

所 外 発 表 論 文 等 概 要

<推進性能部>

自航状態における舵付き船体周り流れの数値
シミュレーション

Numerical Simulation of Flow around Ship Hull
with Rudder in Self Propulsion Condition

日夏宗彦、日野孝則、児玉良明、

藤沢純一、安東 潤

平成7年5月

西部造船会々報

Flow Computation for Three-Dimensional Wing
in Ground Effect Using Multi-Block Technique

マルチブロック法を用いた3次元地面効果翼

まわりの流れ計算

平田信行、児玉良明

平成7年5月

日本造船学会論文集第177号

先に著者らは、舵がない場合の、船体の自航状態の数値シミュレーションを行い、数値的に自航要素が推定できることを示した。しかし、自航要素に及ぼす舵の影響は無視しえないことが実験的研究から明らかにされており、舵を考慮した自航状態の数値シミュレーションは残された課題であった。

本研究において、舵の影響を考慮した自航シミュレーションを行い、より完成度の高い推進性能シミュレータを開発することができた。

船体・舵周りの粘性流場の計算には、疑似圧縮性の仮定に基づくナビエ・ストークス方程式を有限体積法で離散化した式を、近似因数分解して陰的に解く手法を用いた。プロペラ力の評価には無限翼数理論を用い、これでも得られたプロペラ力を等価な体積力とみなして、船体・舵周りの流れの計算に組み込んだ。自航状態の計算を行うためには、プロペラ計算と船体・舵周りの計算を交互に繰り返して、プロペラ力と船体抵抗が釣り合うまでプロペラ回転数を変更しながら計算を進めればよく、両者が釣り合った状態で自航時のシミュレーションが達成される。

船体・舵周りの計算を行うためには、従来の船体単独の計算で用いた計算格子トポロジーは利用できない。今回、改めて舵付き状態の格子トポロジーを開発した。新しいトポロジーによれば、プロペラ設置部分の格子がプロペラ面とほぼ平行に設定されるため、粘性流場計算に設定されるプロペラ体積力の位置の精度が、従来の手法に比べ向上する。また、舵のような揚力体まわりの計算精度を上げるため、局所細密格子法 (Method of local grid refinement) の計算の適用を試みた。

計算は $C_b=0.83$ のタンカー船形を用い、舵ありなしの2状態の計算を行い、舵が自航性能にどのように影響を及ぼすかを調べた。この結果、推力減少係数 $1-t$ 及び伴流係数 $1-w$ はともに舵の影響で小さくなり、実験結果に近づく方向に変化することが確かめられた。これより、本手法は推進性能評価に有効な手法であることが示された。

次世代の超高速船として期待されている WIG は、空気力学的には空力中心の後方移動と高い揚抗比で特徴づけられ、これらを正確に求めることは設計や安全性評価の上で肝要である。本研究では、翼端板付きの矩形翼まわりの流れ場をナビエ・ストークス方程式の数値実験により求め、地面と翼との空気力学的な干渉問題について検討を行った。

数値解法は、疑似圧縮性を考慮したナビエ・ストークス方程式を有限体積法で離散化して解くものであり、対流項は Flux Difference Splitting による3次上流差分で評価した。形状が複雑であるため、流れ場を複数のブロックに分けて解く汎用のマルチブロック法を開発した。これにより、各ブロックの境界上での情報 (境界条件及び他のブロックとの接続方法) を容易に変えることが可能となった。乱流モデルは Baldwin-Lomax が提唱した代数モデルを用いた。

用いた翼は、翼断面形状が NACA6409、アスペクト比0.6の矩形翼に翼端板を取り付け、レイノルズ数は 2.4×10^6 、翼後縁での地面からの高度は翼弦長の2~10%、迎角は 6° とした。地面における境界条件として、Case 1) 実際の航行状態 ($u=1$)、Case 2) 風洞実験で用いる地面の状態 ($u=0$) を課し、数値実験と風洞実験との比較を行った結果、全ての高度域にわたり空気力を正確にシミュレートすることができた。また、高度が高いときには、Case 1 と Case 2 の差はほとんど無いが、高度が下がると、Case 2 において翼前縁付近の地面上に剝離が生じて翼下部の堰止め効果が弱まって Case 1 に比べて揚力が小さくなり、地面上に発達する境界層が翼の空力特性に大きく影響を与えることがわかった。

マルチブロック法を用いた3次元WIG
まわり流れの計算

Multi-block Computation of Flows around
Three-Dimensional WIG

平田信行

平成7年6月

第13回航空機計算空気力学シンポジウム論文集

船舶流体力学の分野においても、高速船や副部等の複雑形状まわりの流れの解明が求められてきている。本研究では、このような実用的な問題に対応可能なマルチブロック法を用いたナビエ・ストークスコードを開発し、次世代の超”超高速船”として有望視されているWIGまわりの流れを検討した。

数値解法は、疑似圧縮性を考慮したナビエ・ストークス方程式を有限体積法で離散化して解くものであり、対流項はFlux Difference Splittingによる前処理付きの3次上流差分で評価した。粘性項には2次中心差分を用い、時間進行をオイラー陰解法とした。形状が複雑であるため、流れ場を複数のブロックに分けて解く汎用のマルチブロック法を適用した。ここで、ブロックとブロックとの境界面で格子点は一対一対応しており、ずれは許されない。このため、格子の自由度は減るが、境界面を横切ったsweepが可能になり、計算効率を上げている。また、各ブロックの境界面上での情報(境界条件及び他のブロックとの接続方法)を入力データで与えることにより、同じ格子でも様々な境界条件で計算することが容易にできるようになり、汎用性を高めている。乱流モデルは、Spalart-Allmarasが提唱した1方程式モデルを用いた。渦動粘性係数に関する輸送方程式を解くことにより、複雑形状まわりの高レイノルズ数流れにも活用できる。

計算に用いた対象翼は、翼断面形状がNACA6409、アスペクト比0.6の矩形翼に翼端板を取り付けたものであり、レイノルズ数を 2.4×10^5 、翼後縁における地面からの高度を翼弦長の2~10%、迎角を 6° とした。計算と風洞実験との比較を行った結果、揚力、抗力、ピッチングモーメント等の空気力は今回計算した高度域において良く合致し、地面が翼に与える空力的な影響を把握することができた。また、このコードがかなり複雑な流れ場にも応用できることがわかった。

Implicit Geometrical Methodによる物体表面
スプライン・ネットの生成

Generation of Body-surface Spline Net
Using the Implicit Geometrical Method

児玉良明

平成7年6月

第13回航空機計算空気力学シンポジウム論文集

物体まわり流れの精密なCFD計算のためには、物体形状の精密な表現が不可欠である。物体形状は、通常、離散的なオフセット点の集合として与えられる。例えば船体形状は、船首尾方向座標 x が一定のいくつかの断面上の点列と、船首尾プロファイルによって与えられる。この離散的な情報は、オフセット点を通るスプライン曲線をメッシュ状に生成する(つまりスプライン・ネット)ことによって平滑曲面に拡張され、物体形状は連続的に一意に定められる。

スプライン曲面の満たすべき条件は、(1)オフセット点を通ること、(2)不要な変曲点が無い等できるだけ滑らかなこと、の大きく2つである。本報告では、これらの条件を満たす方法の一つとして、Implicit Geometrical Method(以下IGM)を示している。IGMは著者によって開発された格子生成法で、平滑性・直交性等の観点からメッシュを反復的に改良する方法である。IGMで用いられる平滑性の要請は、1列に並んだ節点の x, y, z 座標のそれぞれが[4階差分]=0を満たすように節点を移動させるが、その結果得られる点列は、3次のスプライン関数曲線に極めて近い関係にあることが分かった。従って、IGMにより得られる点列はスプライン曲線と同等な性質をもち、それらを結んで生成するメッシュは、スプライン・ネットとして利用することができる。

IGMをスプライン・ネットの生成に用いた例として、適当な方法で生成した初期スプライン・ネットをIGMによって100回の反復修正を行った結果が示された。初期ネットに見られたギザギザが、反復修正の結果、極めて滑らかな分布に変化した。すなわち、条件(2)が満たされている。また、条件(1)も任意の精度で満たすことが可能であることも示された。

このように、IGMがスプライン・ネットの生成法として有望であることが示された。今後は、条件(2)について曲率分布などさらに詳細に検討すると共に、局所平面等の拘束条件の導入を行なう予定である。

船船の流体力学的性能と乱流問題

Hydrodynamic Performance and Turbulent

Flow Problems of Ships

野沢和雄、児玉良明

平成7年7月

日本流体力学学会 第27回乱流シンポジウム論文集

船船の流体力学的性能課題として、推進性能、操縦性能、耐航性能、居住性があるが、排水量型の大型肥大船船に着目すると、推進性能が、経済性の観点から最も重要な課題である。最近のCFD (計算流体力学) 技術は、推進性能推定の基礎となる船体周囲流場の新しい推定法として急速に発達してきた。

船型設計の観点から、CFD を用いて推定すべき船船の流体力学的性能は、船体抵抗要素・プロペラ流入伴流分布・船体効率要素などであり、また、実用の観点からCFD が満たすべき条件は、計算精度・頑丈さ・簡便性・短い計算時間などである。代表的な船型についてCFD 計算のパラメータスタディを実施し、乱流モデルが計算結果に最も大きな影響を与えることが分かった。そこで、風洞実験による模型船周囲流場の計測を行い、計算結果と比較しながら乱流モデルの改良を試みた。

対象船型は肥大タンカー船型であるSR196a 船型とした。改良のベースとなる乱流モデルとして、比較的簡便なモデルである Baldwin-Lomax 乱流モデル (以下 B-L モデル) を用いた。B-L モデルは、船体抵抗値をかなり正確に推定することができる一方、船尾での流れの強い3次元性によって発生する1対の縦渦の強度が不十分であり、その結果、伴流分布における等高線のくびれが弱く、プロペラ流入流速分布の推定精度が低いという問題がある。その原因は、B-L モデルが船尾の厚い境界層で渦粘性係数を過大評価し、縦渦を減衰させることにあることが既に分かっているので、本研究では、船尾境界層の3次元性を考慮しながら渦粘性係数を合理的に小さくするチューニングを行った。

開発されたチューニング・モデルは強制減衰モデルと呼ばれる。そこでは、縦渦の内部では渦粘性係数が小さいという実験的事実に基づき、局所的な渦が縦渦に近づくに従って渦粘性係数が小さくなるようにした。強制減衰モデルは、船体抵抗値は殆ど変化しないままで、基の B-L モデルに比べて船尾縦渦をかなり強く評価し、プロペラ流入伴流分布の実験との一致度が改善され、CFD による肥大船の推進性能の推定精度を大幅に向上させることが示された。

地面効果翼の空力特性に関する実験的検討

—実験手法と計測例—

Experimental Investigation on

Aerodynamic Characteristics

堀利文、塚田吉昭、平田信行

平成7年11月

日本航空宇宙学会 第33回飛行機シンポジウム

講演論文集

従来の高速船を越える速度を持ち、航空機より効率的な輸送ができる海面効果翼船 (WISES) が期待され実用化に向けて研究が進められている。

翼が地面近くを飛行すると、翼と地面の間に囲い込まれた気流がせきとめられ、翼下面の圧力が高まり揚力が発生する。これは地面効果、あるいは海面の場合は海面効果と呼ばれている。WISES は海面効果を利用することで水面を掠めて超高速で航行する船舶である。

本論文は、船研で実施中の WISES の安全評価に関する研究の一環として、地面効果の基礎的な特徴の把握と、その現象の解明を目的として行った風洞試験と水槽試験について、その手法を計測例と共に紹介したものである。

実験は、WISES を単純化した低アスペクト比の矩形翼に、翼端板を取り付けた模型を用い、風洞では、パラメトリックな試験、および高速で長時間の計測を必要とする等の試験を行っている。試験種類は、流体力計測、地面板表面と翼下面の圧力、地面板上の流れの可視化、および翼端渦の可視化である。

水槽試験では、航走波が発生し、実際の WISES と同じような航行状態が実現できる。よって、流体力の計測に加えて、水面変化に関わる実験を主体に行っている。論文に掲載したものは、曳引台車の引き起こす波にトラバサーを自動追尾させ、相対高度を一定に保つこと、および、新しく考案した光学式波高計による翼下面の水面変化計測等があげられる。

今回行った多種多様の試験結果は、WISES の安全評価を行うための基礎データの蓄積、航行シミュレーションへの応用、安全基準づくり、および、理論計算の結果の検証に活用され、WISES の研究に重要な役割を果たしている。

船用プロペラへのキャビテーション性能の予測
Prediction of Cavitation Characteristics on
Marine Propellers
右近良孝
平成7年12月
日本学術会議、水力学・水理学研究連絡委員会
キャビテーションに関するシンポジウム
(第8回) 前刷集

この論文はキャビテーションに関するシンポジウム(第8回)におけるパネル・ディスカッション”水理機械のキャビテーション予測について”のうちの船用プロペラ分野について発表したものである。表題のうちの”キャビテーション性能”についての定義は研究者によって異なるが、ここではキャビテーションが発生することによってプロペラの性能ばかりでなく、付随して起こる振動・騒音や浸食(エロージョン)を含むものとしている。ここでは船用プロペラの分野におけるキャビテーション性能の予測およびその関連技術をレビューし、船舶の分野以外の人を念頭に解説している。

まず、プロペラにキャビテーションがどの程度発生するか予測する方法にどのようなものがあるかについて述べている。これに関連して、キャビテーション予測のベースとなるプロペラの圧力分布の計算法については詳しく述べた。キャビテーションの発生範囲やキャビテーションの発生に伴い生じるスラストなどのプロペラ性能変化を予測する方法については、最近、スーパーキャビテーション・プロペラ(SCP)に関して著しい研究の進捗があったので、これについて述べた。キャビテーションの発生により派生する問題である振動・騒音に関しては、実験的予測法は基本周波数成分に関しては良い相関があるが、高次成分に関しては試験法を新たに開発する必要がある。これに対して、理論予測法に関しては全く有効な定量的方法がないといえるのが現状であり、今後の研究の必要性を訴えた。

PAR-WIG まわり流れの数値シミュレーション
Numerical Simulation of Flow around PAR-WIG
平田 信行
平成7年12月
第9回数値流体力学シンポジウム講演論文集

WIG (Wing In Ground effect) の大型化には離着水速度の低速化が必須であり、翼の高揚力化という技術課題を克服する必要がある。この問題の解決策の一つが、PAR (Power Augmented Ram) の概念である。これは、翼の前方に推進器を配置し、その推進器で加速された気流を翼下部に流し込むことにより、翼下面での圧力を高くして大きな揚力を得ることである。この概念を導入すると低速での離着水が可能になり、構造重量、エンジン重量を小さくし、ペイロードを増やすことができる。

本研究では、前方にプロペラを配置した翼端板付き矩形翼まわりの流れ場をCFD手法により求め、プロペラ、地面、翼の空気力学的な干渉について検討を行った。

数値解法は、疑似圧縮性を考慮したナビエ・ストークス方程式を有限体積法で離散化して解くものであり、対流項はFlux Difference Splittingによる3次上流差分で評価した。形状が複雑なため、流れ場を複数のブロックに分けて解くマルチブロック法を適用した。プロペラはHough-Ordwayが提唱した体積力分布で表現し、乱流モデルはBaldwin-Lomaxの代数モデルを用いた。

対象とした翼は、翼断面形状がNACA6409、アスペクト比0.6の矩形翼に翼端板を取り付け、レイノルズ数は 2.4×10^5 、翼後縁での地面からの高度は翼弦長の2~10%、迎角は 6° にした。プロペラは、翼前縁より一翼弦長前に下向き 33° の角度をつけて固定した。境界面での地面条件は、風洞実験とあわせて滑り無しの条件とし、上記の手法を用いた数値実験を行い、翼下面の圧力分布と空気力に関して風洞実験の結果と比較した。いずれも計算結果と実験値とは良く一致しており、本手法がPAR-WIGまわりの計算に適用可能であることを確認した。また、スパン方向に圧力分布がほぼ一定の2次元的な流れになっており、翼端板の有効性が確かめられた。次に、高度が空力特性に与える影響を調べた。高度が低い時には、地面板上で流れが大きく剥がれるため、翼下部での圧力が上がりきらず、大きな揚力を得ることが明らかになった。

On Free Surface Boundary Conditions
near Solid Wall

固体境界近傍の自由表面境界条件について

児玉良明、塩谷茂明

平成8年2月

Office of Naval Research 1996 ONR
Workshop on Free Surface Flows None

自由表面を伴う船体まわり流れの、NS方程式に基づく数値計算において、自由表面において課される境界条件が、計算結果に大きな影響を及ぼす。特に、もう1つの境界面である船体表面に近接した自由表面では、船体表面における境界条件が、速度ゼロで動かないという粘着条件であるのに対して、流場の速度や圧力の分布に応じて形が動くという条件が課されており、2つの境界面の交線では、両者の矛盾が顕在化する。その結果として、船体表面近傍の自由表面において、表面形状に鋭い折れ曲がり (kink) が発生し、計算精度が低下し、甚だしいときには計算が発散し、解が得られないこともある。

この問題に対する対策として、何通りかの方法を試みた。第1番目は、船体表面最近傍の格子間隔を大きくとることである。用いられている計算スキームでは、速度の値は格子セルの中心で定義されており、格子セルの面の1つである船体表面とは格子の半幅だけの距離があり、その距離を大きくとることによって、境界条件の矛盾を和らげる。ただし、船体表面最近傍の格子間隔は、船体表面に沿って発達する境界層を表現するために必要な解像度をもたなければならないため、実際はかなり小さくとらなければならない。この2つの要請を満たすために、自由表面が大きく動く計算の初期段階では粗い格子を使用し、自由表面の動きが或る程度収まった後期には細かい格子にスイッチした。この処理によって、自由表面の折れ曲がりは半分程度に小さくなった。

第2番目の対策としては、自由表面において課される境界条件を、より厳密に計算アルゴリズム内で実現することである。自由表面における境界条件には2種類あり、1つは動力学的条件とよばれる運動量の保存則であり、もう1つは運動学的条件とよばれる、ある時刻に自由表面上に存在する流体粒子は永久に自由表面上に留まるという、幾何学的条件である。これらの条件を計算アルゴリズムとして実現する過程において、従来は簡略化されていた部分を改良し、上記の問題がどの程度改善されるかを調べたが、小さな改善にとどまった。

<運動性能部>

A Nonlinear Simulation Method of
3D Body Motions in Waves

波浪中3次元浮体の非線形数値計算法について

谷澤克治

平成7年11月

日本造船学会論文集

荒天波浪中にある船体や海洋構造物などに作用する波浪外力や、それに対する動揺を正確に求めることは、耐航性能研究の目標とする研究課題である。従来、この研究は主に微小波高、微小動揺を仮定する線形理論を拡張する形で進められてきた。しかし、線形理論では大振幅動揺や極端な例では巻波による転覆等への応用は困難であり、微小変位を仮定しない非線形計算法の開発が望まれている。そこで本報では理想流体の仮定だけに立脚し、微小変位を仮定しない非線形耐航性能理論の研究に資するため、流体と浮体との運動方程式を連立させて解いて波浪中の任意形状三次元浮体の大振幅動揺を時間領域でシミュレートするための新しい方法を提案し、主にその数学的な定式化を行った。本報で提案する方法の最大の特色は流体と浮体の連立運動方程式を加速度場を支配する積分方程式に変換して解く点で、このため流体と浮体の運動量やエネルギーの保存則を高精度で満たす解が得られるのが特徴である。従って、本計算法を用いれば、浮体に作用する非線形の波浪外力や浮体運動を高精度でシミュレートすることが可能であり、従来の計算法では精度が上がらなかった波浪中による漂流力等についても高い計算精度が期待できる。本報ではこの手法の数学的な定式化として、まずオイラーの理想流体の運動方程式を L. Prandtl の非線形加速度ポテンシャルを導入することで、加速度ポテンシャルに関する積分方程式に帰着させた。次いで、浮体の加速度と流体加速度との幾何学的な関係を明確にし、浮体表面で成り立つ加速度ポテンシャルの幾何学的境界条件式を導いた。さらに浮体表面での圧力分布と浮体加速度の関係式を用いて幾何学的境界条件式から浮体の加速度を消去し、浮体表面で成り立つ幾何学的かつ力学的境界条件、すなわち理想流体のオイラーの運動方程式と3次元浮体のオイラーの運動方程式を連立させるための陰条件式を導いた。また、加速度ポテンシャルの非線形項を支配方程式から境界条件へ移すことで、境界要素法等の数値計算により適した定式化を示した。本報では2次元の計算ではあるが、以上の定式化に基づいた数値計算例を示し、本計算法の精度ならびに有効性も検証した。

< 構造強度部 >

大型高速船の構造安全評価について

On the Evaluation of Structural Safety of
a Large High-Speed Vessel

竹本博安、宮本武、足達宏之、大村靖夫、
鈴木 実、山崎寿久、瀬部充一

平成 7 年 9 月

Third International Conference on Fast Sea
Teansportion (Fast '95) Proceedings of Fast '95

我国で研究開発されている TSL は、従来の高速船の概念を超えた次世代の超高速の貨物船である。通常船と異なり設計や建造の実績もないために、直接計算による設計法が採用されている。直接計算による設計は LNG 船での実績があるが、新形式の高速船では皆無である。

このような船舶の安全性の規定については、各国政府あるいは船級協会が基準の作成が検討されている。国際的な安全基準としては IMO の場で HSC コードが作成された。しかし、本基準は安全設備等が主体であり、構造安全については具体的な規定はなく、各国監督官庁で対応せざる得ない状況である。

TSL は、荷重から強度評価まで設計の全ての段階を直接計算による新しい設計性 (AddA: ADvanced Design by Anlyis) で設計・建造された船舶であり、その安全性については広範な実海域実船試験による検証試験がおこなわれているところである。

本報告では、このような直接計算により設計される高速船の構造安全性を確保するために必要な検証法について報告する。

< 機関動力部 >

CO₂ 分離を目的とする SOFC 複合サイクルの研究

Combined Cycle of SOFC and Turbines

with the Aim of Separating CO₂ Gas

汐崎浩毅、波江貞弘、熊倉孝尚、川越陽一、野村雅宣

平成 7 年 12 月

SOFC 研究会 第 4 回 SOFC 研究発表会講演要旨集

固体電解質燃料電池 (SOFC) は第三世代の燃料電池として注目されており、近年のセラミック技術の急速な進歩にともなって、実用化の可能性が高まっている。

一方、最近の地球温暖化問題に対する関心の高まりにつれ、その原因物質の一つである二酸化炭素 (CO₂) の大気への排出抑制の必要性が指摘されている。これに対し永続的な重要課題は、エネルギー利用効率の向上である。また、長期的には、炭素固定化技術の確立、化石燃料以外のエネルギー源への転換などが必要と考えられる。しかしながら、中期的に化石燃料に依存せざるを得ない期間においては、エネルギー変換時に生じる CO₂ の分離回収技術の確立が必要と思われる。

以上の背景から、本報告では、エネルギー変換効率の向上と同時に、CO₂ の効果的な分離回収を目的とする SOFC 複合サイクルを提案し、その性能特性についてモデル計算を中心とする検討を行った。その結果は以下の通りである。

- (1) 燃料電池内での発熱が改質熱として有効に利用されるため、電流密度の比較的広い範囲に対して、総合熱効率は 60% (LHV) 以上の値となる。
- (2) 総合熱効率は、燃料利用率の増加につれて上昇し、空気過剰率、蒸気/炭素比、空気循環率の増加とともに低下する。系圧力が増加すると、電池本体の効率は増大するが、システム全体としては補助燃焼量が増し効率は低下する。
- (3) 本システムでは大気中に放出される二酸化炭素濃度が、在来の熱期間に対して 1/10 以下に減少する。一方、CO₂ 分離装置入口の濃度は、燃料蒸気改質/CO₂ 分離後での熱機関利用に対して 3 倍、在来機関の排気ガスに対して 10 倍程度に濃縮される。このため CO₂ 分離効率の向上が期待されると同時に、単位プラント出力に対する処理ガス量が 1/3~1/10 に減少し、装置が小型化するため実用上極めて有利になると考えられる。

セル発電性能に及ぼす塩分の影響 (第1報)

Effect of airborne seasalt on the SOFC performance

熊倉孝尚、野村雅宣、波江貞弘、
汐崎浩毅、川越陽一

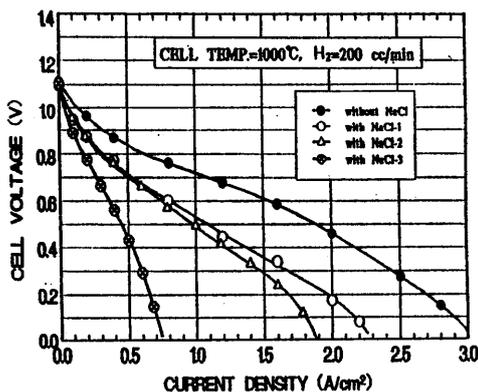
平成7年12月

SOFC 研究会 第4回 SOFC 研究発表会講演要旨集

燃料電池は省エネ性と環境保全性に対し良好な性能が期待される発電媒体である。これを船舶や沿岸部に設置する発電装置に適用する場合、解決すべき課題の一つに海上大気に含まれている塩分の影響の検討があげられる。即ち、燃料電池を作動するときを使う空気に多量の塩分が存在すると電池の発電体であるセルに影響を及ぼし、発電性能の劣化が速まることが考えられる。本研究は燃料電池の形式として固体酸化物型 (SOFC) について調べる。SOFC の作動温度は1,000℃と燃料電池形式のなかで最も高い。この温度ではセル (発電体) 部に入る塩分 (空气中に浮遊する海塩粒子の大部分は塩化ナトリウム) は熔融し蒸気となる。実験では、セルに送る空气中の塩分濃度を変えセル発電性能の変化を測定した。使用したセルは平板型の YSZ 電解質の両面に電極材を焼成した単板で、これを試験体に組み込み電気炉で1,000℃に保持した。空気に加える塩分は NaCl を使用し、1,000℃で飽和蒸気の状態となる濃度とこれより低い濃度について調べた。今回はいずれの濃度も実際の大气中の塩分濃度に比べ非常に高濃度であり、塩分加速試験に相当する。塩分蒸気の検出はセル部に設置した静電探針センサーで行い、センサーの電位の変化から塩分濃度を調節した。燃料は水素である。

セルの電流・電圧特性の測定結果を図に示す。この図はセルから電流を取り出したときの電圧の変化を示し、図中黒丸の曲線は空気に塩分を含まないときの特性曲線、その他の白抜ききの3本の曲線は同じセルに飽和蒸気の NaCl を3回、それぞれ12時間晒した後の特性の変化である。塩分無添加のときの特性に比べ塩分に晒される時間が長くなると発電性能の低下が著しくなっている。また、塩分濃度が更に低い場合もこの図ほどではないが

性能の低下が測定された。発電性能低下の要因についてはセルインピーダンス及び材料組成面から検討している。



電解質・電極界面粗面化の発電性能に及ぼす影響

Effect on Roughness at the Interface Between Electrolyte and Electrodes on the Cell Performance

川越陽一、波江貞弘、熊倉孝尚、
汐崎浩毅、野村雅宣

平成7年12月

SOFC 研究会 第4回 SOFC 研究会講演要旨集

燃料電池は燃料の持つ化学エネルギーを直接電気エネルギーに変換するため、より高い効率を持つ発電装置として有望視されている。当所においては、電解質に固体酸化物の YSZ を使用した、固体酸化物燃料電池 (以下 SOFC と省略) を船用機関に適用する際の技術的な問題点の抽出およびその対策の検討を目的に実験的研究を行ってきた。厚さ 100 μm の電解質板の燃料側表面に NiO-YSZ サーメットを、空気側表面に LSM を塗布焼成し製作した板型セルを実験に使用してきた。今回、性能の向上を目的として電解質表面を酸によって粗面加工した後に電極を焼成したセル (加工後の電解質厚 150 μm) を製作し、その発電性能を測定した。発電性能を測定する際には、空気側に大気を、また燃料側に燃料として水素と窒素の混合気をそれぞれ一定の流量で供給し、定電流法により電流を変化させた際の電圧の変化を測定する方法を用いた。その結果、ほとんどの発電可能電流値 I の範囲で、得られた電圧 V の値は、表面処理を行ったセルの方が未加工の物より高い値が得られた。この傾向は電流密度が高い領域でより顕著で、発電可能な電流の範囲も未加工の場合と比較して約1.5倍の 3.0 A/cm² 以上にまで広がった。これは、電解質と電極との接触面積が広がったことが理由と考えられ、SEM (走査型電子顕微鏡) を用いてセル発電部の断面を観察し、界面の凹凸形状を確認した。電流の負荷変動に対しては、電圧が指数関数的に漸近しつつ安定していく現象があるが、未加工セルの場合、電圧値が安定値の 95%まで回復する時間が120分という極端に遅い例も見られたが、加工セルでは1.8分~2.8分と、大幅な改善が見られた。

干渉 CT による火炎温度分布測定
 (空間キャリア法を用いた干渉縞の解析)
 Interferometric Tomography Measurement of
 Flame Temperature Profiles
 (Fringe Pattern Analysis by
 Spatial-Carrier Phase Shifting Method)

佐藤誠四郎、熊倉孝尚

平成 8 年 3 月

日本機械学会 関西支部第71期定時総会講演会講演集

管路内高温域噴霧流による冷却技術に関する研究
 ー冷却特性の実験的算定及び解析結果との比較ー
 Two-phase Mist Flow Cooling in the Tube with
 High Wall Temperature -Experimental
 Estimation of the Cooling Characteristics
 Compared with the Analytical Results-

波江貞弘、汐崎浩毅

平成 8 年 4 月

日本船用機関学会誌 第31巻第 4 号

干渉 CT による火炎の空間的な温度分布を測定するため、干渉縞の解析に空間キャリア位相シフト法を適用した。空間キャリア位相シフトはフーリエ変換法など他の位相解析法と比べ、正確なキャリア周波数を知る必要がないこと、判断を要する処理がなく適用が簡単であることなどの特徴がある。

本報では、干渉縞の処理の自動化と簡略化のため、これまで提案されている空間キャリア位相シフト法の主な解析法についてシミュレーションを用いて測定精度を比較した。これらの結果を用いてバーナ火炎の希薄燃焼状態における空間的な温度分布を測定した。

空間キャリア位相シフト法はフーリエ変換法などと同様に干渉写真撮影の際、参照光を傾けることによってキャリアと呼ばれる等間隔の直線縞を加え、変調した干渉写真から位相（縞次数）を測定するもので、CCD カメラで取入れた画像ピクセル上の連続したサンプルデータを用いる方法である。

ここでは通常の位相シフト法のアルゴリズムが空間キャリア位相シフト法にも適用できるとし、測定精度向上およびランダムノイズの最小化を考慮した解析法に、本法で用いるためキャリア分を除くための項を加えた。シミュレーションではオリジナルの位相として二次曲線分布を与え各解析法の誤差を求め、それぞれの特徴を調べた。

空間キャリアシフト法は、正確なキャリア周波数を用いなくても周波数の広い範囲で 1% 以内の誤差で測定できること、データ処理時間は、他の干渉縞の位相解析法の 5~6 分の 1 以下であることなどを明らかにした。これらの結果を用いて希薄層流火炎の温度場の構造を明かにした。

噴霧流伝熱に関して、対象とする伝熱面が比較的高温度の場合については、貫流ボイラや原子炉の蒸気発生器などでのポストドライアウト伝熱として多くの研究がなされている。一方、伝熱面が低温度で液相流体によって濡らされる場合については、空気熱交換器の小型化等を目的とした研究がなされている。しかしながら、高温壁面を弱冷却し、しかも広い面積で等温度に保持できる可能性の高い噴霧流伝熱の特性を、冷却手法として積極的に活用するという視点から検討した研究例は見受けられない。本研究は、高温燃料電池の冷却や大型ディーゼル機関のセラミック利用による弱冷却高温化など、等温度(均一)冷却を必要とする分野への応用を目的として、管路管内の高温域噴霧流による冷却特性、特に従来検討されていない温度上昇の抑制効果すなわち見掛け熱容量の大きさに注目し検討を行うものである。

著者らは以前、等温度冷却性の指標として二相噴霧流体中の気相の温度上昇係数を定義し、その特性を解析的に検討した。本報告では、解析結果の検証を目的として噴霧流伝熱実験を実施した。そして、気相温度特性の計測時に必要な壁面衝突液滴によって直接除去される熱量を求めた。また、壁面温度が高い場合を対象として気相温度上昇係数を実験的に算定するとともに解析結果と比較検討し、冷却特性に関してつぎの結論を得た。

- 1) 壁面に衝突する液滴により直接除去される熱量の総熱流束に占める割合 f を求め、壁面温度が比較的低温度域のデータに基づく実験整理式を得た。 f 値には、一般に気相レイノルズ数、壁面温度、気相質量流量比の各因子が影響を及ぼす。
- 2) 壁面温度が高い場合を対象として、気相流体の温度上昇係数 F を実験的に算定するとともに、解析結果との比較検討によって、高温域噴霧流による伝熱特性を明らかにした。 F 値は液滴の質量流量比の増加につれて減少し、気相流速にはあまり依存しない。この実験データの傾向は解析によって得られる結果と定性的に一致する。本実験データならびに解析結果との比較によって、現象の基本的な理解は得られたものと考えられる。今後、安定な噴霧液滴の生成や気相流との混合方法など装置上の工夫および液滴量の計測精度の向上が必要である。

<材料加工部>

き裂を有するセラミックスの腐食雰囲気中での
高温強度Strength of Cracked Silicon Nitride in Hot
Corrosive Environments

宗像良幸、千田哲也

平成7年11月

日本機械学会論文集 第61巻590号 A 編

セラミックスの利用は内燃機関の効率向上に寄与すると期待されるが、船用機関で高温腐食の原因となる成分を含む低質燃料を使用したときを想定して、燃料自身および海塩雰囲気による高温腐食が材料強度に及ぼす影響を明らかにしておく必要がある。ここでは、窒化ケイ素セラミックスについて、1200°Cまでの曲げ試験と1000°Cにおけるバーナーリグによる引張試験を行い、材質、表面損傷の様式、腐食方法等の強度への影響を考察した。

バーナーリグによる燃焼ガス中での引張強度試験では、腐食性雰囲気による強度の向上がみられた。清浄な燃料を使用した場合でも、その試験の前に腐食性物質を含む燃焼ガスを使用したときには強度が高かった。900°Cから1200°Cの範囲で3点曲げ試験では、表面に欠陥を与えると強度は大幅に低下した。欠陥のない材料では、腐食環境は強度低下をもたらしたが、欠陥を有する材料では、腐食環境にあった場合に逆にいくらかの強度向上があった。曲げ試験では、平滑材にくらべ表面欠陥材の強度は低下したが、バーナーリグでは強度の差はなかったが、これは、バーナーリグではガス流路壁面の断熱材などの破片が飛来して表面損傷を与えるためビッカース圧痕のない試料でも表面欠陥を有していたこと、および清浄な燃焼ガス中でもいくらかの腐食性物質を含んでいることによると考えられる。

腐食による強度向上のみられた材料では試料内部に伸びるメディアン亀裂の先端までイオウが浸透しており、イオウを含む腐食性物質の亀裂先端への浸透が強度向上に寄与することが推定された。これらの結果は、高温腐食雰囲気で使用される材料ではコストの高い表面仕上げは不要であり、使用中のエロージョン損傷などにもそれほど敏感ではなくなることを示唆している。

アルミナの高温すべり摩擦摩耗
Sliding Wear and Friction of Alumina at
Elevated Temperatures

千田哲也

平成7年12月

日本セラミックス協会

第14回高温材料基礎討論会要旨集

アルミナ (Al_2O_3) は高融点・高硬度で化学的に安定であり、耐熱・耐摩耗材料としての応用が期待される。アルミナに関して、800°C以上の高温において摩耗量が非常に低くなることが報告されている。これは、高温での摺動材料としての可能性を示唆するだけでなく、セラミックスの摩耗メカニズムを知るうえでも重要な現象であるが、摩耗と関係の深い物性値である硬度や破壊靱性値からは説明できない。

アルミナの1000°Cレベルまでの摩擦摩耗試験を行い、摩擦面とその近傍を走査型および透過型電子顕微鏡で観察した。室温では、摩擦面の近傍に塑性変形がみられず、主な摩耗メカニズムは脆性破壊と推定された。一方、1000°Cでの摩擦面は非常に平滑であり、粒径 0.1 μm 程度の微細な粒子の表面層が厚く形成され、その直下は高密度の転位と双晶が存在する変形粒子であった。このような微細構造は、動的再結晶組織と考えられている金属の摩擦面の構造によく似ており、動的再結晶が起きていることが推測される。

温度を800°Cから1200°C、すべり速度を 0.002 m/s から 0.2 m/s、接触面圧を 0.4 MPa から 1.2 MPa の範囲で変えて形成した表面層の結晶粒径を計測したところ、粒径は摩擦条件により変化した。摩擦面温度を推定して Zener-Hollomon parameter (Z) を求め、 Z と粒径の関係を両対数プロットすると負の勾配の直線となり、その傾きは、いくつかの鋼の動的再結晶組織について報告されている文献値に近かった。このことは摩擦面の微細粒子の組織が動的再結晶により形成されたことを示すものである。

セラミックスにおける動的再結晶を伴う塑性変形の結果として、摩擦面での微細粒径の組織が形成されるが、この表面層は変形抵抗が小さく容易にせん断変形する。変形により、摩擦面での脆性破壊や塑性切削が抑制され、結果として摩耗量が低下することになったと考えられる。

ホウ化チタンの高温酸化挙動
Oxidation Behavior of Titanium Boride at
Elevated Temperatures

千田哲也

平成8年1月

第34回セラミックス基礎科学討論会講演要旨集

ホウ化チタンは高融点、高硬度の材料であり高温での耐摩耗性材料として有望である。ホウ化チタンの1000°Cレベルまでの摩擦試験では、400°C付近で摩擦係数の上昇が、800°C以上で減少がみられた。前者は高粘度の酸化物による凝着の増加によるもので、後者は酸化物の粘性の低下による潤滑効果と推定された。ホウ化チタンの酸化は高温摩擦摩耗特性に重要な影響を与えるが、酸化挙動は示差熱分析結果や摩擦面のX線回折結果から推定されているものの必ずしも明確ではない。そこで、ホウ化チタン粉末の高温X線回折と加熱条件を変えた場合の示差熱、熱天秤分析を行った結果から、高温酸化挙動について考察した。

示差熱分析では、10°C/min 昇温速度の場合には400°C以上で3つの発熱ピークしたが、2°C/min では第1と第2のピークの区別がなくなりピークは2つになった。一方、重量変化はほぼ発熱ピークに対応して重量増加がみられた。高温X線回折では10°C/min で加熱して400°Cから850°Cの範囲で計測した。490°C以上で二酸化チタン（アナターゼ）が同定されたが、500°C付近ではピークはいずれも小さくなり550°Cですべてのピークが消滅した。さらに加熱するとホウ化チタンのピークはなくなり、二酸化チタン（ルチル）が現れ、アナターゼは800°Cでみられなくなった。

450°C付近から550°Cにかけての変化はホウ化チタンの酸化によるアナターゼの生成であり、昇温速度が高速の場合、急激な酸化により粉末表面に酸化皮膜を形成して一時的に反応が停止するものと推定される。X線回折の550°Cにおけるピークの消失は、熱分析の発熱ピークの谷間に対応し、試料が粘性の高い酸化ホウ素融液に覆われたものとみられる。さらに加熱されると、酸化ホウ素の粘性が低下して表面コーティングの効が失われ酸化反応が再び起き、アナターゼからルチルへの相転移も同時に起きる。厳密な検証のためには酸化ホウ素の粘性に関するデータが必要であるが、酸化物によるコーティングの効果を想定した解釈は摩擦試験における酸化の解釈ともよく対応する。

垂直探触子における音場測定と数値実験について
Sound Field Measurements and Numerical
Evaluation of Normal Beam Probes

勝又健一、星野充宏、高橋雅和、山田尚雄

平成8年1月

日本非破壊検査協会 超音波による非破壊評価
シンポジウム講演集（第3回）

円形平面振動子を有する垂直探触子の音場を水浸法の鋼球（直径：5 mmφ）反射体によって測定した。探触子は周波数5 MHz、直径10 mmの振動子のものである。これらは広帯域型及び狭帯域型の2種類で、実験の際のパルス波数は前者が2程度に調整、後者は9波となっていた。音場の測定値と比較するための音場計算はパルス伝搬を扱い、時間領域で合成する方法で行った。数値計算において、振動子から放射される超音波は、微小面積に分割してその微小部分を無指向性として全面積で積分する。これらは伝搬媒質中の任意の各点で求める。ただし、媒質による散乱減衰は無視した。

音軸上の測定では単調減少する遠距離音場と、干渉する領域の近距離音場が生ずるが、近距離音場内で狭帯域の探触子の方がよく干渉する結果を示した。すなわち、干渉領域が広く、数値計算においても、波数が多い振動子は同様な結果が得られた。音軸と垂直な面、断面の振幅分布は近距離音場で干渉は波数によって異なった。断面分布について、実験値と計算とを比較した場合、狭帯域の探触子では近距離音場の音軸付近の一部を除いて、遠距離音場まで良く対応した。広帯域の場合、断面分布の特性は実験と計算とも前者と同じような対応であったが、近距離音場で感度的にシフトしていた。遠距離音場ではビームの拡がり、計算の方が僅かに鋭かった。

近距離音場では観測された波形に、パルスが分離する現象が測定できた。この現象は振動子中央部と振動子周辺からのパルスが分離することを物語っている。両者の間では伝搬パルスが打消し合い、距離の短い中央部と最も長い周辺部からの波が残ることによる。ただし、パルスの分離による波形は振動子の形状に依存されると考えている。

軟鋼板の電磁応答解析による板厚測定手法の検討

Investigation on Thickness Measurement
Using Electro-Magnetic Response of Mild Steel

成瀬健、島田道男、吉井徳治

平成8年3月

日本非破壊検査協会 平成8年度春季大会講演概要集

船舶検査では船体構造部材の腐食衰耗量を超音波板厚計によって測定している。しかし腐食の程度の著しい部材では、測定に必要な安定した接触を得るために表面処理に多大の労力を要する点が問題となっている。そこで表面状態に影響されない計測法として、電磁誘導法による板厚測定の実用性をFEM解析により検討した。解析結果から、鋼板の磁化コイルと反対側空間で板厚による磁束密度の分布の変化を確認した。この結果をもとに交流磁化による実験を試みたが、交流磁化では鋼板を透過した磁界と試験片を回り込んだ磁界が合成されて検出されるため、板厚計測に適さないことが分かった。以上をふまえて本実験ではステップ励磁電流による実験を試みた。

ステップ励磁電流による鋼板の電磁応答を計測したところ2つのピーク出力が得られた。出力波形と周波数分析から、最初に現れたピークは試験片の外側を回り込んだ磁界によるピークであり、2番目に現れたピークは鋼板を透過した磁界によるピークであることを推定した。2番目に現れたピークの波形から抽出した3種類の特徴量である「ピーク振幅」、「遅れ時間」、「半値幅」はいずれも板厚と相関関係にあった。特に「遅れ時間」はリフトオフ、励磁電流値変化の影響を受けにくく、板厚測定に有効な特徴量であることが確認された。

< 装備分 >

SEA法による高周波振動伝搬予測理論と模型実験
Experimental Investigations for High Frequency
Vibration Prediction with a SEA Theoretical Model

木原洗、宮田修

平成5年12月

日本機械学会 第2回交通・物流部門大会講演論文集

船舶のような大型構造物の振動・騒音の伝搬予測手法としてSEA (Statistical Energy Analysis) 法⁽¹⁾が最近利用されている。SEAのパラメータは、構造物を構成する各パネル(要素)のモーダル密度と内部損失係数、接続し合うパネル(要素)間の結合損失係数である。モーダル密度はパネルの幾何学的形状で決定される。内部損失係数は実験的に求めなければならないが、実験法や実験精度で大きく左右される。結合損失係数は理論的に計算が可能であるが、結合部の溶接隅肉や、ばりの存在などで理論値と一致するとは限らない。本論文では、29の鋼材パネルで構成されるモデルについて、振動伝搬の実験を実施し、同モデルのSEA理論の計算結果と比較した結果を示し、次の結論を導いた。

- イ) 理論と比較する場合、モデルの工作精度は非常に重要である。
- ロ) SEA法は高周波の振動伝搬の予測に適しているが、模型実験を行なう場合、模型の大きさに留意し、実験可能な周波数範囲をつかんでおくことが重要である。
- ハ) パネル(要素)の振動を計測する場合、パネルの中心一点のみを計測し、そのパネルの振動としてはならない。なるべく多くの計測点を取り、積分平均の値をそのパネルの振動とする必要がある。
- ニ) 今回の実験結果は定性的に、理論と比較して良い結果が得られた。定量的にも比較的良い結果と言える。

Leaching and Degradation of Antifouling
Paints in Seawater

船底防汚塗料の海洋への溶出と分解について

長田修、内藤正一

平成7年9月

The Society of Naval Architects of Japan,
International Conference on Technologies for
Marine Environment Preservation

船底防汚塗料中の有機スズは、船体外表面の生物付着防止と平滑化に長期間にわたり効果があるため、運航エネルギーの節約に貢献する物質として評価されてきた。

しかし、有機スズの魚介類への毒性が社会問題になり、日本では、世界に先駆けてその使用を自主規制しており、国際的にも、有機スズ化合物を含む防汚塗料の適用船舶、含有量、溶出速度等を将来制限しようとする動きがある。

本研究では、現在船舶に使用されている防汚塗料と防汚成分を減らした試験用防汚塗料を用いて、航海試験、実海域浸漬試験、回流水槽試験等を実施し、有機スズ含有量と防汚効果及び溶出速度との関係を調査し、防汚塗料として必要な所要有機スズ含有量の最小値を求めた。また、溶出した有機スズの水中での分解速度を光、微生物の試験条件を変えて調査検討し、海洋環境影響評価に関連する知見を得た。

その概要は次のとおりである。

- 1) 防汚塗料の溶出速度は、水温、航海速度等、試験方法により異なることを具体的に示した。
- 2) コポリマータイプ塗料の溶出速度は、塗料中の初期TBT濃度が高い程大きくなる。
- 3) 船底等の日陰部分の防汚塗料の分解は、日射による影響が殆どないため、少ない。従って、船底部分では、防汚成分量を少なくしても生物付着を防止できる。
- 4) 光、微生物、空気の有無によるTBTの分解速度への影響を定量的に示した。

安全と環境保護が最優先の現代社会においては、防汚塗料への有機スズ化合物の使用は順次制限され他物質に移行していくものと予想される。日本では、最近、20種類の化学物質に対して防汚塗料としての効果と生物毒性等が調査された。

本報告で示した有機スズの溶出・分解試験評価方法はこれらの新規物質にたいしても適用可能と考える。

救命艇の信頼性 —救命システムの安全性—

Reliability of Lifeboat

(Safety of Life-Saving System)

長田 修

平成7年10月

日本造船学会造船設計委員会 「艦装設計に関する
安全性・信頼性」シンポジウム
—造船設計委員会 第2回シンポジウム—

大きな海難事故が発生すると、事故原因ならびに脱出・救命状況が調査され、船舶の救命設備の積付・性能要件は改善されたきた。しかし、それが使用される環境条件や、マンマシン・インターフェイス、他の救命設備等との関連性にたいしての考慮はあまりされなかった。

最近、エストニア号等の人命喪失を伴う海難事故の発生を契機として、船舶及び救命設備の規則を長期的に検討しようという機運が国際海事機関で高まってきた。即ち、個々の海難事例毎に事故要因を系統的に分類・明確化し、経済性も含めて総合的且つ合理的に船舶・設備を評価しようとする新しい概念（FSA）が英国、日本等より提案された。乗員にやさしい船舶・運航システムを構築するには、

①船舶・設備（ハード）個々の要素技術の高度化に加えて、②ハードと乗船者とのマンマシンシステムと ③事故・避難時における乗員の不安定行動等のヒューマンファクターに対する配慮、及び、④事故発生確率と ⑤信頼性、経済性を考慮した船舶・救命設備の設計・評価手法を確立する必要がある。

船舶及び乗員の多様化にともない、海難及び脱出・救助の形態は変化していくものと考えられる。本稿では、救命艇を救命システムを構成する最も重要な一要素として位置付け、その安全性・信頼性について述べた。

一般に、事故原因の80%以上は人的原因で、残りが物的原因といわれている。

しかし、人的原因を、システムが人間に適していないために誤った行動をするというシステムエラーと、人間が定められた作業手順等を行わなかったという人間本来の過ち、即ち人間エラーとに分け、事故原因を詳細に分析すると、システムエラーのほうが人間エラーより多い。特に、海難等の極限状態における人間行動は、情報取得・処理能力の減退、更に進むとパニック状態に陥り、また、混乗船の場合、情報伝達等の意志の疎通が重要であり、より安全なシステムの設計と、常時、Managementに対する配慮が必要である。

救命艇の安全性・信頼性の評価は、環境（海・気象、海難事故による本船損傷状況の推移、救難体制）、人間、他の救命設備等からなる救命システムの一環として考えるべきであることを事故例解析等をもとに述べた。

二重船殻モデルタンクよりの油流出-IV

—傾斜タンクからの油流出実験—

Oil Spills from Model Tanks with Double Hull-IV

—Effects of Tank Inclination on Oil Outflow—

山口勝治、山之内博

平成7年10月

日本航海学会第93回講演会講演予稿集

1989年3月に起こったエクソンバルディーズ号の海洋油汚染事故を契機として、座礁・衝突などの事故時で環境影響の少ないと考えられている二重船殻構造がIMOによって義務づけられ、二重船殻構造タンカーの建造が行われるようになった。

二重船殻構造タンカーは貨物油タンク壁がその外側の外板によって保護されており、事故によって外板が破損しても貨物油タンク壁が損傷しなければ環境への油流出は防止できる。しかし、外板、貨物油タンク壁ともに損傷する事故は起こり得ると考えられており、従って、本格的な二重船殻構造タンカー時代を迎えつつある現在、二重船殻構造タンカー事故時での油流出に関する検討や対応策の構築が必要とされている。このためいくつかの研究が行われ、ダブルハルタンクからの油流出の基本的特性が明らかにされつつあるものの、現実の事故に対応できる十分な資料は得られていない。

本研究ではダブルハルタンカーが座礁して外板、貨物油タンク壁とも破損し、さらにこれまで研究があまり行われてこなかった船体が横傾斜して拘束された状態で油流出が発生する事故を想定した。

事故を模擬するため静水水槽中(幅0.8m、深さ1.0m、長さ5m)のダブルハルモデルタンク(幅1.2m、高さ0.6m、長さ0.45m)に一定の高さまで油を搭載して20°まで横傾斜させ、一定の喫水にしてタンク底部の外板、貨物油タンク壁に設けた円形模擬破孔を同時に急速に開け、タンクから破孔を通して静水中へ流出する油量の測定と流出油の挙動観察を行った。

油流出は二つの異なる機構、すなわち、①破孔でのタンク内外の差圧による、②差圧による流出終了後、破孔より下部空間に滞留油がある場合は滞留油が水と置換することにより起こることが観察された。また、非傾斜タンクの場合と同様、傾斜タンクの場合においても、油流出とともにダブルハル内への水流入が起こり、油流出量を求めるためには、既知な値である積み荷条件、タンクの形状、寸法に加え未知な値である破孔でのダブルボトム内水膜厚さが与えられなければならないこと、および、水膜厚さは非傾斜タンクの場合と同様な方法によって整理でき、傾斜タンクからの油流出量は十分な精度で予測できることを確認した。また、傾斜タンクからの油流出量を低減できる条件を示唆した。

本研究の結果、船体が横傾斜して拘束された状態での油流出に関する資料が得られたことになり、より現実に対応できる流出量の予測が可能となった。

アルデヒド類の蛍光寿命測定

Measurements of Fluorescence Life

Time of Aldehydes

山岸進、土屋正之

平成7年11月

第33回燃焼シンポジウム前刷集

LIF (Laser Induced Fluorescence: レーザ誘起蛍光) は極めて高感度な検知法として燃焼計測にも広く用いられている。これを計測に応用するためには対象物質の蛍光スペクトルとその時間履歴に関する特性を把握することが必要となる。しかし、蛍光発生機構や大気圧下でのクエンチングについて、特に多原子分子については未解明な部分が多い。筆者らは、炭化水素炎の火炎面近傍を YAG THG (354.7 nm) で励起したときのスペクトルを分析し、ホルムアルデヒド (H₂CO) の蛍光が主な部分を占めていることを確認しその特性を調べた。

本報告では蛍光の時間履歴をストリークカメラで測定して、これに伴うエネルギー遷移について検討した。実験に用いたストリークカメラの時間分解能は 50 psec 以下であり、レーザは、繰返し数 10 HZ、半値幅は 7 nsec でニアガウシアンモードである。観測は入射レーザービームに対して 90° の方向から行い、f = 250 mm、分解能 0.221 nm/ch の分光器 (CHROMEX 250IS) でスペクトル分解した。減衰解析には Iterative convolution 法を用いた。大気圧下において YAG THG で H₂CO を励起した蛍光履歴を測定した結果、広範なスペクトルにわたって類似した時間履歴を持つパターンが観測されることから、振動準位間のエネルギー遷移は非常に速く行われており、この遷移は衝突による影響を受けていないと考えられる。指数関数で近似して観測値をラインフィッティングすると曲線は短い時間で減衰するものと比較的長い時間をかけて減衰する 2 つの要素が混合したものと考えられる。次に、H₂CO と同様の CO 基を持つアセトアルデヒドとアセトンを YAG THG で励起すると、両者ともに H₂CO と類似した蛍光を発することが確認され、これは構造的に類似した折れ曲がり振動が関係していると考えられる。しかし、その強度は H₂CO に比べて非常に弱いことが分かった。

<システム技術部>

Plant Operation Support Fitted with Human
Perception and Sense

人間の知覚および感覚に適合したプラント運転支援

沼野正義、宮崎恵子、福戸淳司、

三友信夫、平尾好弘

平成7年7月

Proc. of 6th Int. Conf. on Human-Computer
Interface (HCI'95)

シミュレータを用いた長時間運転の
安全性評価について

Safety Assessment of Longterm Operation
Using Simulator

伊藤泰義、田中邦彦、平尾好弘、

村山雄二郎、中村保博、池田重樹

平成7年9月

日本航海学会論文集 第93号

原子力プラント等の大規模プラントの運転においては、ヒューマンエラーを防止するために様々な自動化が取り入れられている。しかし、設計時に考慮していない「想定外事象」が生じた場合は、人間の運転員が適切な対応を行うことが求められている。様々な自動化によって、プラントがブラックボックス化しないように、また、人間である運転員が、プラントの状況を的確に判断し、的確な操作ができるように、人間の知覚や感覚に適合したプラント状態の表示や、プラント操作入力システムが必要である。

プラント状態表示に、人間の空間把握機能を利用するものとして、プラント状態を3次元表示として表現する手法および、遠隔のアクチュエータの動作およびプラント状態の変化を反力、振動等の形で、プラント操作を行う人間にフィードバックする手法について、その概念および有効性を、例示を基に論じる。

プラント状態の3次元表示として、プラントの形状表現上に温度分布等の状態量を色分布として表現したものを作成し、立体視表示の効果等を検討した。また、バルブによる管路の開閉操作へのフィードバックを行うための感覚フィードバック入力装置を試作し、その効果等を検討した。これらの運転支援は、全く新しい運転システムを構築するだけでなく、個々の機能毎に、従来の運転装置にマルチメディアとして取り入れることが可能と考えられる。

近年、大型高速船の運転が現実化しつつあるなか、高速長時間運転の経験は乏しく、事前に安全性評価法を策定する必要がある。また、船員の高齢化と人手不足の対策としてワンマンブリッジと改良された支援機器を搭載する内航タンカー近代化船においても同様に長時間航行のための安全性を確立する必要があるが、長時間航行における当直体制、備えるべき支援機器の機能等は明確になっていない。

このため、大型高速船及び内航タンカー近代化船の長時間航行の安全性を航行シミュレータを用いて、操船作業における余裕のレベルの考え方に沿って、主として疲労要因について評価し、長時間航行の安全を担保するための方策について考察した。その結果は以下のようである。

適当な支援があれば、高速船、内航タンカー近代化船ともに一名当直で航行できるが、疲労は複数当直よりも大きい。

高速船の当直作業では航行環境情報取得作業に多くの時間をかけ、内航タンカー近代化船では避航判断作業に多く時間をかけている。

高速船用の ARPA は、相手船の位置等、航行環境を正しく短時間で把握できるように支援することを主目的に、また、内航タンカー近代化船用の ARPA は、避航判断と避航の実行を正しく短時間でできるように支援することを主目的とする。

一名当直の場合、内航タンカー近代化船では当直員がダウンしていても、危険船等の外乱の発生を機械側が警報を発生し、控えの当直員がブリッジにきて避航等の処置をする時間的余裕があるように警報発生条件の設定ができるが、高速船で当直員がダウンした時には、外乱発生警報で控えの当直員がブリッジにきて処理をする時間的余裕は十分とは言えない。

Navigation Support Based on
Voice Control and Announcement

音声制御による航行支援

宮崎恵子、沼野正義、福戸淳司、田中邦彦

平成7年9月

International Conference on Technologies
for Marine Environmental

Preservation Proceedings of MARIENV '95

日本の産業界において、内航海運は大きな役割を果たしている。内航海運業界では、航行と荷役の支援を行う先進的なシステムを含んだ、安全で、効率の良い、良好な労働環境を目指した近代化船の開発が計画されている。船舶技術研究所では、全国内航タンカー海運組合と近代化船開発の共同研究を実施し、操船シミュレータを用いて、内航タンカー近代化船の実現に不可欠な、航行支援装置が持つべき機能要件について検討を行い、有用な結果を得た。

操船シミュレータ実験では、瀬戸内海の来島海峡を実験海域として選定し、地形、景観、交通流、潮流などを実測データに基づいて模擬した。来島海峡は、在来の航行支援の手法では1人当直で航行することが難しい海域であり、通常3人で航行するこの海域を操船者1人でも航行できる支援装置を求めて、あらかじめ船舶技術研究所で構築した操船支援装置を用いて航行実験を開始した。強潮流と船舶幅転によって航行が難してシミュレーションシナリオにそって実験を繰り返し、当海域を熟知した内航タンカーの船長と意見交換を行いながら、同支援装置に逐次改良を加え、実験シナリオで想定したような困難な状況の中でも有効に支援できる航行支援装置の機能要件を、次のように明らかにすることができた。

①操船支援装置は、その使用に当たって、操船者にとって重要な船橋からの目視による情報収集を妨げてはならない。

②操船支援装置の主な機能は、3人当直体制の操舵手とレーダ監視者の役割を担うことである。

③要件①と②を満たした航行支援装置の実現のための具体的方策として、音声による入出力支援機能が必要である。

④非常時のために、音声によるコントロールとアナウンスの代替装置として、従来の操船装置およびCRT表示支援装置を備えておき、容易に切り替えて使用できるようにしておくことが重要である。

⑤内航タンカー近代化船が目指す一人当直体制による運航が可能となるためには、航行支援装置が3人当直体制の操舵手とレーダ監視者の役割を完全に果たすことが必要である。複数人当直においても本支援装置を用いることにより、難航路の航行の安全性がさらに向上する。

通達文書データベースの曖昧検索について

A Fuzzy Document Retrieval System for

Ship Inspectors

染谷 実

平成7年10月

日本航海学会論文集

船舶検査のような船舶関連業務においては、法規類や通達文書の参照や整理のために、ハードウェアおよびソフトウェアともにめざましい進歩を遂げている情報処理技術の利用が有効であると考えられる。

パソコン等にデータベース化された大量の文書の中から必要な時に、所望の通達を速やかに参照したいというユーザーの要求に応えるためには、従来のようなキーワードのみによる検索方法には限度がある。

本報告では、文書の書誌的属性に関する漠然とした知識を有効に活かして、検索効率を上げるためにファジーデータベースの技術を応用することを検討した。

構築したシステムの概要は次のようなものである。

①発行時期および伺い出地域について、ユーザーの曖昧要求にあったメンバーシップ関数が、全てのデータについて予め定義されている。

②機器名や造船所名等のキーワードに加えて、「かなり古い」や「西の」のような自然言語を用いて属性に関する曖昧な知識を入力し、問い合わせを行う。

③システムは、キーワードに一致したデータの中から、曖昧な問い合わせ要求に対する一致度の高い順に、検索結果をユーザーに回答する。

③において、例えば発行時期と伺い出地域の両属性に対する一致度が(0.9、0.1)と(0.3、0.1)の二つのデータがある場合、単にAND和のMIN値を用いると各々の総合評価値が0.1と等しくなってしまう、ユーザーの直感に合わなくなる。そこで各種の平均値と重み付けを用いた新しいファジー結合演算子を用いて、二つの属性の一致度の合理的な総合評価を行い、できるだけユーザーの検索意図を忠実に反映するようにした。

ユーザーインターフェースに自然言語を利用した曖昧検索方式により、コンピュータを操作する上であまり負担を感じることがなく、かつ、ユーザーの意図を適切にくみ取ることのできる柔軟な船舶関連業務支援システムを実現することができた。

Development of the GO-FLOW Reliability
Analysis Methodology for Nuclear Reactor Systems

原子炉システムのためのシステム信頼性解析手法

GO-FLOW の開発

松岡猛、小林道幸

平成 7 年 11 月

International Conference on Probabilistic
Safety Assessment Methodology and Applications

船舶技術研究所で開発を進めている GO-FLOW システム信頼性解析手法の体系についての発表である。

講演においては、まず GO-FLOW 手法の概要を述べ、次にパーソナルコンピュータを基本とした GO-FLOW 解析実施のための支援システムについて説明している。このシステムを使用すると、GO-FLOW チャートの作成から解析結果の図表作成までが手元にある PC により手軽に実施できる。また、GO-FLOW チャートを図化器を用いて多色図として出力する事も可能である。

時間経過とともに要求されるシステム動作が変化していくフェイズドミッション問題を取り扱う方法について述べてある。この解析のために導入したフェイズドミッションオペレータの働きが説明されている。

共通原因故障解析法においては、まず一般的な算出方法を説明し、次に GO-FLOW 解析における取り扱い方法が説明されている。

不確かさ解析においては、最初に最小切断集合を求め、それを基にモンテカルロ法を用いて不確かさ巾を算出する方法となっている。サンプル・フォールトツリーについて解析を実施した結果のグラフが掲載されている。

共通原因故障を考慮して不確かさ解析を実施する場合は、同時に故障する機器の種々の組み合わせを考慮する必要があり、考慮すべきミニマル・カット・セットも異なってくる。また、近年の計算機能力の向上もあり、従来困難であった長時間を要する計算も実施可能となった。そこで、ミニマル・カット・セットを求めることなく共通原因故障を考慮した GO-FLOW 解析を故障確率を変化させて多数回実施し、それらの結果を最後に集計し全システムの信頼度分布を求める方法を採用した。解析手順が論文中の図で示してある。解析対象としては、加圧水型原子炉補助給水系 (AFWS) を取り上げた。共通原因故障機器群としては、(1){ポンプ駆動用の 2 台の電動機の起動失敗}、{3 台のポンプの起動失敗}の 2 群を選び、 β ファクタ法を適用した。故障確率の分布としては、チェック弁故障、タンク漏洩には正規分布、タービン起動失敗には対数正規分布、電動機・ポンプの運転中の故障にはヒストグラム分布を与えた。試行回数として、5000 回について実施し、共通原因故障を考慮し

た場合としない場合の不確かさ巾をグラフにより示してある。

GO-FLOW 解析の結果をレーザープリンターにより高品質の図表で出力する機能についても説明してある。

本報告により GO-FLOW 手法の優れた機能と使い勝手が紹介された。

船用機器の故障発生と安全

(船舶信頼性データベースにおける重故障発生の状況)

The Failure Occurrence and The Safety on
Ship Equipment —The Occurrence State of
Serious Failure in SRIC database System—

桐谷伸夫

平成7年12月

日本機械学会 交通・物流部門大会講演論文集

船用機器の故障情報を収集・解析するために実施されている船舶信頼性調査は1982年の開始以来、現在に至るまでの長期の期間を経て、約11万件にも及ぶ故障情報を有する大規模なデータベースを構築する成果を得た。このような規模の情報は世界にも類を見ることがないのであり、船用機器の信頼性解析に大きく寄与するものとなっている。現在の船舶を取りまく環境は少人数化や混乗化の進行、低質油の使用など、信頼性向上の実現に対して厳しいものとなっているが、航海の安全を確立するためにも船用機器の高信頼度化は今後もさらに重要な課題であると考えられる。

故障の発生は直接的に航海の安全を阻害するものであるが、故障機器の修復に費やされる人的、あるいは時間的影響も航海の安全を間接的に阻害するものである。このような故障修復処置の大半は6 man*hour以下の処置工数を持つものであるが、約20%の故障においては6 man*hour以上の工数を必要とするもの(重故障と定義する)となっている。間接的な不安全要素ではあるが、少人数化の進んだ近代化船においては過大な人員の長時間に及ぶ投入は運航の安全に対する重大な問題と考えられる。1982年の調査開始以来、重故障の発生割合は20%程度の値で推移しており、ほぼ横這いの傾向を継続している。このような重故障の発生割合を低減することは、質的な意味における故障発生の改善であり、航行の安全を高めるものである。

大分類による機器別の重故障は、主機系の機器や補機系の機器で発生割合が多い。このような重故障の発生を低減し、航行の安全を確立するためにも、長大重量物に関わる船内作業の回避を実現するような船用機器の高信頼度化や適切な予防保全作業の検討が重要となっている。

航海支援システム

Navigation Support System for
Advanced Coastal Tanker

沼野正義、松田和生

平成8年1月

(社)日本造船学会 日本造船学会誌 第799号

日本の経済を支える内航海運の経済性や安全性と乗組員の快適な作業および住環境を実現すべく、近代化船の開発が検討されている。特に、全国内航タンカー海運組合では、実証船の建造に向けてブレイクスルー技術の洗い出しとその開発について検討してきた。航海の分野では、経済性、安全性と快適な作業環境を両立するために、経済性の面から少数の船橋当直による運航を想定し、安全性と快適性を担保するための航海支援システムについて検討した。

船長、操舵員およびレーダ監視員の3人からなる船橋での航海作業の役割分担が航海の安全を担保する上でどのような機能を果たしているかをモデル化し、航海支援機器がこれらの機能を肩代わりすることができるようにその仕様を詰める必要がある。3人の役割分担の内には、おもてだった主機能の他に、指令、要求および報告の中に隠れた情報を認識・確認する作業や、人間にとって不可避である、「思いこみ」や「見落とし」等のエラーを相互に補完する機能が重要である。支援機器を設計する上でこれらの機能を考慮することが必要である。

人に優しい高度な航海支援システムは、高い安全性と快適性の両方を満足するものでなくてはならない。高い安全性を担保するために、航海のそれぞれの局面において、操船者に十分な余裕を確保するとともに、「見逃し」や「思いこみ」によるヒューマンエラーを防止する必要がある。また、高い快適性を担保するためには、易しい操作性に分かりやすい情報の提示が必要である。

この基本理念に則って、音声入出力を基本とした航海支援システムの機能要件を洗い出し、近代化船の実証船に搭載することを想定した高度航海支援システムの概念設計を行った。

この高度航海支援システムは、音声入出力とワンタッチオペレーションを併用し、計画航路に沿った航路保持、音声による適時・適切な情報支援、航海計画に基づいた自動航路保持や船速制御、安全かつ人に易しい緊急時対策を実現するものである。

船舶信頼性調査における電気電子系機器の故障
Failure of Electric and Electronic Equipments
on Ship Reliability Investigation

桐谷伸夫

平成8年3月

日本船用機関学会誌3月号, 1996

船舶信頼性調査は、その成果として約11万件にも及ぶ故障情報を有する大規模なデータベースを構築するに致っている。本報告は、この船舶信頼性データベース(SRIC)に集積された船用機器故障情報の内、電気及び電子系機器に関するものに注目して、その故障発生の現況と特性を検討したものである。

SRICにおける機器大分類により、電気系機器を「電気機器」区分のものとし、電子系機器を「自動化機器Ⅰ」区分のものとした。故障発生の構成比の経年変動では、「電気機器」区分の故障発生は1982年の調査開始当初の4%から9%までの増加傾向を示している。他方、「自動化機器Ⅰ」区分の故障発生は、15%余りの構成比率が10%程度までに減少している。これらの経年変動の傾向は、「自動化機器Ⅰ」がコンピュータや各種のセンサー類を代表するものであることから、近年における電子部品の高品質化による結果と考えられる。これは故障率の変動においても、「電気機器」の故障発生が「自動化機器Ⅰ」故障の減少傾向に比して、若干の増加傾向からほぼ横這いに推移している点にも現れている。換言するならば、電気そして電子系機器として分類されていた、これら機器の同質化傾向が推測されるものである。

「自動化機器Ⅰ」故障の特徴として、故障修復に費やされる処置工数が小さな場合においても機関の停止や減速などの影響の大きいことがある。これは、船舶の近代化に伴い電子系機器の運航に関わる役割が重要なものとなっていることを示すものと考えられる。このような機器に対しては、長大重量物の故障に対するような対処手法ではなく、機器自体のモジュール化などによる簡便な交換作業の確立や機能の多重化が、「運航の安全」に重要であると考えられる。

<海洋開発工学部>

大規模柔軟構造物の設計における動的弾性応答の
取り扱いについて

Evaluation of Dynamic Elastic Responses
in the Design of Large Compliant Structures

藤久保昌彦、渡辺喜保、尾崎雅彦、真鍋英男、
箕浦宗彦、岩田節雄、杉本広憲

平成7年7月

日本造船学会 第13回海洋工学シンポジウム論文集

現在、日本造船学会海洋工学委員会構造部会では、大規模浮体の設計指針の作成を目標として検討を行っている。その一環として、現在建設中の超長大吊橋である明石海峡大橋の耐風設計、およびジャッキアップリグの構造設計について、設計における弾性応答の取り扱いについて調査を行うと共に、その結果を通じて大規模浮体の設計で考慮すべき点について考察し、以下を得た。

(1)長大橋梁やジャッキアップリグの設計では、静的応答がまず基本にあり、これに動的補正が行われる。これに対し大規模浮体では、広い周波数範囲で動的影響を無視できないため、動的弾性応答を基本とした設計が必要になる。

(2)大規模浮体では、構造の柔軟化によって、係留システムが弾性応答や構造強度に及ぼす影響が大きいが、したがって、係留方式および配置は、構造の弾性応答と一体で検討する必要がある。

(3)簡易構造モデルとしては、弾性床上一様梁あるいは板で十分であり、各種特性が判明すると思われる。しかし、現実には上部構造が搭載される箇所や滑走路など場所によって喫水や質量、剛性が異なる。このような多様な構造を実用的に解析する方法の展開が必要である。

(4)既存の簡易解析法では、入射波が通り抜ける仮定が設けられており、波力は場所によらず一定の振幅で分布することになっているが、大規模浮体では実際的ではない仮定と考えられる。流体力の推定に、理論解と数値解のハイブリッドのような手法の開発などの新たな工夫が必要である。

(5)同調時を始めとして、構造の弾性変形は流体力に大きく影響すると考えられる。このような流力弾性応答の影響を設計で合理的に考慮できるよう、現象を整理する必要がある。

(6)大規模浮体では、粘性減衰などを除くと、一般に非線形影響は少ないと考えられる。時刻歴解析法よりも、以上の諸点を考慮した定常周波数応答解析法をまず充実させるべきと思われる。

大波高時の波浪の統計的性質について
On Statistical Properties of Wave Amplitude
in Stormy Sea States

吉元博文

平成7年7月

日本造船学会 第13回海洋工学シンポジウム論文集

実際の海域で船舶あるいは海洋構造物が遭遇する海洋波は極めて不規則な変動をする。その特性の解明は、海洋波を線形確率過程として扱うことによって飛躍的に進展してきた。しかしながら、これはいわゆる微小振幅波理論を基礎とするものであり、海洋波の非線形が無視できない状態、例えば、大波高の波が発生するような厳しい海象状態については適用することができない。本論文は、こうした海洋波の非線形性が無視できない場合の確率論的予測法の確立を主眼とするものである。

本論では、まず、非線形性を有する海洋波が、Volterra 汎関数級数の2項までで表現(海洋波の2次の非線形性を考慮することに相当)できるとし、Kac & Siegert の手法に従い、海洋波の水位変動の特性関数、さらに特性関数のフーリエ変換から水位変動の確率密度関数を求めている。本手法によれば、海洋波の2次非線形性を厳密に考慮することができるが、実際には、特性関数のフーリエ変換は、解析的あるいは数値的に行うことが非常に難しく、ここでは鞍点法と呼ばれる近似解法を用いて行っている。さらに、本手法の妥当性について、数値シミュレーション、ならびに1986年から1990年にかけて当所で行われたPOSEIDON号による実海域実験で取得された大波高時の波浪データをもとに検討を行った。結果の一例を図-1に示す。図は、波の山側の振幅のN波中の最大期待値について検討した結果であり、本手法による予測結果はほぼ観測値を説明できていることがわかる。

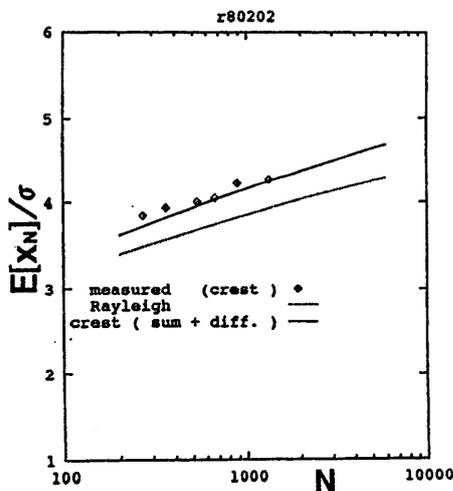


図-1 山側の振幅のN波中の最大期待値
(◇:観測値、鎖線:線形理論、実線:非線形理論)

海水によるワイヤロープの腐食劣化の研究(その1)
Study on Corrosion Degradation of
Wire Rope in Sea Water (Part 1)

山川賢次、築田凌一、西村貴伸、木津和富夫、
早崎清志、鯖江俊彦、守谷敏之、甲斐康幸

平成7年9月

資源・素材学会 平成7年度資源・素材関係学協会
合同秋季大会 分科研究会資料 [0]ワイヤロープ

海洋構造物や船舶では係留、曳航、荷役などにワイヤロープが多用されている。これらのワイヤロープの使用環境は、海塩粒子を含んだ空气中、波による飛沫や潮汐による乾湿状態の繰り返す飛沫帯・干満帯、常時海水中に没した状態など厳しい腐食条件下である。特に海洋構造物の係留索は、定位置保持のため長期間厳しい腐食環境下で使用される。しかし、ワイヤロープの腐食と強度に関する資料は、摩耗や疲労による劣化に関する資料のように豊富ではなく、とりわけ係留に使用されるような大径ロープに関する資料は皆無に等しい。これは供試体が膨大な量になること、長期間これらの供試体を管理できるような試験環境が得難く、実施が困難なことなどが考えられる。

著者らは、海洋環境下で使用されるワイヤロープの腐食による劣化に関するデータを得るため、供試体の管理と環境制御の可能な室内で実海水を用いてワイヤロープの浸漬試験を実施することとし、1994年10月から開始した。この研究は供試ロープを30ヶ月間(2.5年間)無荷重状態で試験海水に浸漬して、0月(新品)から6ヶ月毎に一組ずつ試料を採取して腐食の進行と強度低下の関係を明らかにし、海洋構造物等の係留に関する安全性の向上を図るための資料を整えるものである。浸漬試験は船舶技術研究所で実施し、諸試験は供試ロープを担当した各社で実施することとした。供試ロープは、3種類のより方[交差より(6×37)、平行より(IWRC×WS(36))、スパイラル(A級1種)]3段階のロープ径[60φ、30φ、16φ]である。平行より30φでは亜鉛メッキの付着量の影響を、同16φではロープグリースの影響とめっきの有無の相違を調べるための供試ロープを準備した。供試ロープの数量は、1試験期に14本、総数70本である。

この研究は第1期の結果について検討をはじめたばかりであるが、試験装置と試験の方法および試験の経過等について報告する。

Estimation of Encounter Directional Wave
Spectra from Motions of a Floating off shore
Structure and a Running Ship
海洋構造物及び航走する船舶の応答からの
出会い方向波スペクトルの推定
吉元博文、渡辺巖
平成7年9月
Soc. of Naval Architects of Japan, Int.
Conf. on Technologies for Marine Environment
Preservation, Proc. of MARIENV '95

近年、海洋構造物及び船舶の設計において、海洋波の方向波スペクトルに対する関心が高まりつつある。しかしながら、方向波スペクトルの観測には多大な費用がかかること、さらに、その観測自体も非常に難しいことなどの理由から、これまで実測されたデータが極めて少ないのが現状である。本論文では、こうした方向波スペクトルの観測にかかわる問題を背景として、簡便なかつ安価な方向波スペクトルの観測方法として、既存の海洋構造物あるいは実際の海域を航走する船舶の応答を利用した方法を取りあげ、推定理論ならびにその推定精度について述べるものである。

まず、本論では、浮遊式海洋構造物の動揺から方向波スペクトルを推定する方法について述べる。入射波と海洋構造物の応答が線形であると仮定すれば、推定法として既往の方向波スペクトルの推定理論が使えることを述べている。推定精度に関して、当所で行われた POSEIDON 号による実海域実験のデータを用いて、POSEIDON の応答から推定された結果と波高計アレイから推定された結果を直接比較することによって言及している。

次に、航走する船体の応答を利用した推定法について述べている。航走する船体の応答から推定する場合、船体が前進速度を有するために、ドップラー効果により、追波状態では船体上で観測された物理量（例えば、船体動揺、加速度など）に3つの出会い波浪の周波数成分の影響が重畳してくるという問題を生じる。そのために、海洋構造物の場合のように既往の推定法を適用することができない。そこで、パラメーター法と呼ばれる方法をもとに新たな推定法を提案する。本推定手法の妥当性の評価のために、数値シミュレーション、水槽実験を行い、本推定法が高い推定精度を有することを示している。

3次オーダーの波力計算のための
2次ポテンシャルの有効な計算法
An Effective method for second order potential
towards the calculation of third order forces
加藤俊司、Bin Teng
平成8年3月
第11回水波と浮体に関する国際ワークショップ

緊張係留構造物 (TLP) は、テンドンと呼ばれる鋼管で海底から緊張状態で係留された構造物である。現在までに5基 (1984年 Hutton (北海)、1990年 Jolliet (メキシコ湾)、1992年 Snorre (北海)、1994年 Auger (800 m水深; メキシコ湾)、1995年 Heidrun (北海)) の TLP が稼働している。TLP の魅力は何と云っても、上下動が他の浮体構造物に比べて極端に小さい事である。そのため、日本においても、緊張係留技術は、浮体式海上空港のような超大型浮体構造物の半固定係留技術として注目されている。一方で、その特殊な係留方式ゆえにライン等の弛緩係留構造物では特に問題とならなかった現象が設計及び構造物の安全性を左右する重要な要因になる可能性がある。それはリングング現象である。リングング現象とはバースト現象を伴う高次の振動現象である。こうした現象は、テンドンの疲労損傷、破壊さらには係留系の全壊を引き起こす可能性があるため、その振動の発生メカニズムの解明及び応答の予測は非常に重要である。リングング現象の発生原因は、まだ明確になっていないが、3次オーダーの波力が引き金になっているのではないかとされている。3次オーダーの波力を計算する為には、線形及び2次のオーダーまでのポテンシャルの流場全域にわたる情報が必要である。2次ポテンシャルは、通常、特異点分布法等により数値的に求められるが、3次ポテンシャルを求めるには、その数値的に与えられた2次ポテンシャルの空間偏微分が要求される。この操作を数値的に行うのは、非常に精度が悪くなる。そこで、本論では、こうした欠点を避ける為に、2次ポテンシャルの準陽的表現式を理論的に導き、流場全域にわたるポテンシャル計算に対し、既存の数値的な手法に比べて非常に計算時間が早くかつ偏微分値も準解析的に求められる等その有効性を示したものである。

< 水海技術部 >

On the Policy to Prevent Marine Oil
Pollution due to Tanker Accident

タンカー事故による海洋油汚染防止策について

在田正義、足達宏之、松岡一祥、
上田浩一、山岸 進

平成7年9月

Proc. of 9th Asian-Pacific Corrosion Control Conf

タンカー事故による海洋の油汚染を防止するための総合的な政策について、主として日本を対象として論じた。はじめに、大規模な油流出事故の実例と問題点、IMO、日本、米国、カナダの対策、国際油濁基金の動き、国際的な研究の動向を概観した。さらに、総合対策を立てる場合の前提事項を述べ、総合対策の分類を示した。最後に、事故が発生した場合の緊急対策について考察し、3つのセンターを提案した。

油流出事故としては、トレー・キャニオン号、ジュリアアナ号、エクソン・バルディス号を取り上げた。IMOの動きとしては、今年5月に開催された第2回国際油濁研究開発フォーラムについて紹介し、ここで行われた研究開発への優先順位付けにふれた。そして、この順位付けが限られた研究資金の効率的な使用のためであることを示した。そして、国際的な研究協力が必要であり、そのために果たすべきIMOの役割がますます大きくなってきたことを述べた。国際油濁基金については、参加国が順次増大している傾向は歓迎すべきことであるが、米国が独自の基金を創設したことは、油濁事故の国際的性格から好ましくないことを指摘した。

我が国のとるべき総合的政策を立てる際の前提条件としては、必要な原油の輸入を継続する、海洋全体としての汚染物質負担能力は十分で、問題は湾、内海、局所海面・海岸の汚染であること、外航船舶の旗国・船員の問題については言及しないこと、事故処理の選択肢として焼却も含めるが空気汚染も考慮する、とした。また、事故時の緊急対策を立てる場合については、緊急処理期間を定義する、緊急処理では経済的損失最小を基準としつつも、長期的視点から問題のある処理は採用しない、緊急処理終了の判断をする必要がある、経済的損失の算定・責任関係の特定を行うべきことを述べた。

総合対策に関する研究として、事故をいかに少なくするか、事故が起こった場合の油流出をいかに少なくするか、流出した油をいかに安全に処理するか、事故処理で得られた教訓をいかにフィードバックするかに分類し、その各々について具体的研究項目を示した。事故時の緊急対策としては、油濁の発見と緊急処理を行うためのセンター、緊急処理の終了時点を決めるためのセンター、補償関係を決めるためのセンターを提案した。

Development of Ultra High Build Coatings and
Their Effects on Corrosion Fatigue Life
Prolongation of Metals超厚膜型塗膜の開発とその腐食疲労寿命延長に
及ぼす効果について在田正義、田村兼吉、内藤正一、柴田俊明、
田辺弘往、永井昌憲、松野浩志、佐々木徹

平成7年11月

Proc. of 9th Asian-Pacific Corrosion Control Conf.

海洋構造物の長期防食を可能とするための超厚膜型塗膜用の塗料を開発した。この塗膜が歪みの大きい部分に適用されることを想定し、この塗膜によって腐食疲労寿命がどの程度延長されるかを実験的に検証した。

開発した超厚膜塗料は、エポキシ樹脂塗料(塗膜厚3000 μm まで)、ポリウレタンエラストマー塗料(塗膜厚2500 μm まで)およびビニールエステルガラスフレック入り塗料(塗膜厚3000 μm まで)である。従来塗膜との比較を行うため、タールエポキシ樹脂塗膜についても各種の実験を同時に行った。

単離塗膜について、水蒸気浸透試験、衝撃試験を行った。また、腐食疲労試験終了後、塗膜の付着力、交流インピーダンスを調べた。

腐食疲労試験は、構造用軟鋼の隅肉溶接試験片に、開発した塗膜及びタールエポキシ樹脂塗膜を施したものである。これを、人工海水の入ったタンク中に固定し、定変位型の繰返し曲げ荷重を加えた。人工海水を $25\pm 1^\circ\text{C}$ に保ち、荷重繰返し速度は1/6 Hzとした。塗膜の種類による隅肉溶接部の塗膜厚分布を調べるため、この部分を精密切断、研磨し、その場顕微鏡により膜厚測定を行った。

水蒸気浸透試験、衝撃試験から、エポキシ樹脂塗膜やポリエステルエラストマー塗膜は、防食性は高いが変位への追従性が悪い可能性があること、ビニールエステルガラスフレック塗膜は、防食性、変位追従性とも高い可能性があることが推測できた。

平均膜厚が1000 μm を越す塗膜の隅肉溶接部周りの厚さ分布は、塗料の種類によるよりも隅肉部の形状により決まり、理想的な形状の隅肉部形状の場合、最大/最小比が1.6程度におさまることがわかった。

腐食疲労試験によると、エポキシ、ポリエステルを厚膜塗布した試験片の、比較的高応力領域での強度は、塗膜厚が厚くなるほど低下することが判った。これは、厚膜部分に追加の曲げ変形が生じ、塗膜の変位追従性の不足から割れを生じ、疲労強度の低下につながったと考えられる。変位追従性のあるビニールエステルガラスフレック塗膜の場合には、強度低下は生じなかった。厚膜塗膜では、適用部分の応力に注意すべきことがわかった。

船上観測による北海道沿岸オホーツク海域の
氷況について 一氷厚分布の計測一

On-Board Measurement of Sea Ice Conditions
in the Sea of Okhotsk off the Coast of Hokkaido.

—Ice Thickness Distribution—

下田春人、宇都正太郎、田村兼吉、成田秀明

平成8年2月

第11回北方圏国際シンポジウム

「オホーツク海 & 流水」講演要旨集

船舶技術研究所では海上保安庁装備技術部と共同で巡視船「そうや」の氷海域航行性能に関する研究を実施しており、この一環として1990年より冬季オホーツク海における氷海域実験を実施中である。本実験では水中操縦性能等の航行性能データのみならず、その評価データとして航行海域の氷況データ、すなわち氷厚、氷盤密接度、海水塩分濃度、水温及び各種強度に関する計測を行っている。

海水の厚さは密接度とともに、氷海域における船舶の航行性能を支配する最も重要な因子であるばかりではなく、氷海域の熱収支を考える上で必要不可欠な情報である。しかし、海水の厚さのデータは、衛星リモートセンシング技術の発達によって大量のデータが入手可能となった氷盤密接度に比べて情報の質、量ともに不足しているのが現状である。そこで本研究では氷海域を航行する巡視船の船体まわりの砕氷現象を利用した簡便な手法を用いて1991年から1994年の4年間に得られたオホーツク南部海域の氷厚データを解析し、流水接岸前後の2月上旬における氷厚分布の特性について考察した。

氷厚計測は、船側部上部にVTRカメラを設置し、船首部で曲げにより破壊された氷盤が船体側面に沿って回転運動をして氷盤破断面(=氷厚面)が真上を向いたところを氷厚として計測した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 本手法による氷厚計測の95%信頼度範囲は氷厚20 cmでは5 cm程度、50 cmでは10 cm程度である。
- (2) 計測1日毎にまとめたデータの平均氷厚は20.7 cmから47.7 cmの範囲にある。
- (3) 氷厚の薄い部分は低密接度の氷縁海域で顕著に認められる傾向がある。
- (4) 氷厚50 cm以上の氷厚分布の確率密度関数は、氷厚に対し指数関数的に減少する傾向がある。
- (5) 氷厚は緯度1度あたり約4 cm増加する。

研究動向 海洋構造物の保守管理

Trend of Research: Maintenance of
Offshore Structure

在田正義

平成8年2月

日本造船学会誌 800号

海洋構造物が高齢化する傾向が進んでいること、近い将来に超大型浮体構造物の建造が予想されること、この場合、安全上から保守管理が重大な問題となること等から、海洋構造物の保守管理が関心を呼んでいる。そこで保守管理の研究の動向を概観した。全体構成は、海洋構造物保守管理の特徴、保守管理の現状、保守管理に関する法規、保守管理に関する要素技術の記述、最後に超大型浮体構造物の保守管理の考え方となっている。

海洋構造物の保守管理は船舶のそれと較べ、ドックに入れられないことがあること、長期の安定した防食が必要なこと、潜水夫による作業を伴うこと、付着生物対策が必要なことで異なり、これらに関係した研究がある。

1994年時点で日本には、100基/隻に近い浮遊式/着底式のリグ及びドリルシップ、36隻の係留船がある。また、浮消波堤は35基程度設置されている。これらの保守管理の現状を調査した結果によると、構造が大型化することで、ドックに入れずに検査をロボットで代行させようとの方向および、生涯に受ける荷重を考慮して設計および保守管理を行うという方向に進められつつあることがわかる。

保守管理に関する法規には、船舶安全法、船級協会規則、港湾法、鉱山保安法、さらにはIMO(国際海事機構)のコードなど様々な法規があり、各々目的が異なる。しかし違いは必ずしも明確ではない。法規を巡る新しい動きとしては、英国におけるSafety Caseがある。これは、海洋構造物の設置者、又は所有者に対し、施設の設置前に、設計から廃棄に至る全段階で予想される危険について、それを回避するための方針、最終目標、管理システム、さらには事態の改善強化策を作り、これを監督官庁へ提出することを義務付けるものである。今後の保守管理の方向として注目される。

保守管理の要素技術の研究としては、寿命評価に関する研究、塗膜防食・電気防食の研究、付着生物に関する研究、検査ロボットに関する研究を取り上げて、関係論文の内容を紹介した。

超大型浮体構造物では、従来寸法から桁違いに巨大化すること、予定稼働期間を100年としていることから、従来手法の単なる延長ではなく、全く新しい保守管理の方法が必要であるとし、一つの方法を示した。

極低温用複合材の落錘多軸衝撃試験

Multi-axial Impact Test by Falling
Weight Method on FRP for Cryogenic Use

前田利雄、桜井昭男

平成8年3月

日本材料学会 第25回 FRP シンポジウム講演論文集

液体水素や超電導技術の利用開発に伴い、経済的で信頼できる極低温用構造部材の開発が必要となっている。筆者らはカーボン、アラミド繊維等による先進複合材を極低温用構造部材に利用するため、極低温における諸特性の研究を行っている。これまでに、低温落錘三点曲げ衝撃試験を行い、極低温用構造物の安全設計に不可欠な先進複合材等の動的強度特性を明らかにした。また、動的荷重を考慮した有効な複合構成を求めた。

本報告では先進複合材の低温域における実機応力状態に近い特性評価が可能な落錘多軸衝撃試験を行い、衝撃破壊挙動に及ぼす温度の影響、動的強度と複合構成との関係について調べた。

本試験に供したFRPは強化材にガラスロービングクロス、カーボンクロス、アラミドクロスの3織布を用い、樹脂には低温靱性に優れたビニルエステル樹脂を使用した。供試複合材はこれらの資材を用いて、織布の方向を揃えた直交積層材、織布を所定の角度で積み重ねた斜交積層材、2種の織布を方向を揃えて交互に積層したハイブリッド積層材の3種類を使用した。試験機は有効落下高さが2mで、落錘は1.5kgから5.5kg間の範囲で使用できるもので、試験片支持台の周囲には液体窒素で冷却する断熱槽を取り付け、 -190°C までの雰囲気温度で試験ができるようにした低温落錘多軸衝撃試験機を使用した。

試験の結果、強化材にガラスロービングクロスを使用したGFRPの場合は最大荷重、弾性変形エネルギーおよび全吸収エネルギーとも温度の低下に伴い大きくなる傾向を示し、ハイブリッド材としたAGFRPおよびCGFRPの場合でもその傾向がうかがえる。これに対し、アラミドクロスおよびカーボンクロスを用いたAFRP、CFRPおよびそれらのハイブリッド材のACFRPは比較的值は小さいが温度の影響は殆ど見られなかった。これらの結果はこれまでの落錘三点曲げ試験の場合の極低温域で減少する傾向とは大きく異なっている。それは試片形状、応力状態、破壊様式等の違いによるものと思われる。また、衝撃特性の積層方向依存性では斜交角度を0、15、30、45度に変化させても衝撃特性は変化しないことがわかった。

このほか、衝撃荷重に対してのじん性を表す指標となる全吸収エネルギーを弾性エネルギーで除した値のエネルギー指数の温度依存性、複合構成の影響を調べ、供試した複合材は動的荷重の作用する極低温域でも充分使用できることがわかった。

代替フロンを使用したウレタン発泡材の熱的特性

Study on Thermal Properties of Urethane-Foam
Using Substitutive Flon

前田利雄、桜井昭男

平成8年4月

FRP 漁船研究会 「FRP 漁船」第190号

船舶等の低温から極低温用の断熱材として広く用いられている硬質ウレタンフォームは、その発泡剤として主にCFC-11が使用されている。しかしながら、1992年11月にコペンハーゲンで開催された第4回モントリオール議定書締結国会議において、CFCフロンの1996年全廃が決定した。このため、代替品の開発研究が盛んに行われているが、今のところ冷媒関係が中心であり、発泡剤関係の研究開発は緒についたばかりである。

本研究では、CFC-11の代替発泡剤として現在、最も有力な候補であるHCFC-141bを使用した硬質ウレタンフォームを製作するとともに、サンプル材として塩化ビニルフォームを入手し、常温から極低温までの断熱特性および熱収縮特性を明らかにするとともに、既存品との比較検討も行った。また、実機への応用に際して重要な条件となる経年変化の有無を明らかにするための試験も行った。

得られた結果の主なものは次の通りである。

- (1) 発泡材の基材および発泡剤の違いによる断熱特性の差異では、硬質ウレタンフォームは気泡内に留まっているフロンガスが雰囲気温度の変化に伴って状態変化し、断熱効果が増減するため、熱伝導率は温度変化に対して極大値、極小値を持つ3次元的挙動を示す。これに対して、塩化ビニルフォームの熱伝導率は温度の変化に対してほぼ一様に変化する。
- (2) 熱伝導率の発泡剤による違いでは、それぞれの沸点の違いにより極小値を示す温度が異なる。しかしながら、極低温域では、気泡内のフロンガスが凝縮・凝固するため、熱伝導率の違いは顕著でなくなることがわかった。
- (3) 熱伝導率はかさ比重に大きく依存し、かさ比重の増加に伴いほぼ直線的に大きくなる。
- (4) 硬質ウレタンフォームの経年変化では、製造2年で気泡内のフロンガスの散逸により常温付近での断熱性能に著しく劣化が見られた。しかし、低温域では気泡内ガスが殆ど影響を及ぼさないため顕著な変化は認められず、極低温で連続して使用する場合には、それほど大きな問題ではないことがわかった。
- (5) 熱収縮特性に及ぼす基材の影響では、塩化ビニルフォームの熱収縮率は温度の低下に伴いほぼ直線的に増加する。これに対して、硬質ウレタンフォームの熱収縮率は $0\sim-80^{\circ}\text{C}$ 付近までの変化が大きく、その後は塩化ビニルフォームに近い勾配で変化する。すな

<大阪支所>

Solubility of Carbon Dioxide in Hydrate
Region at 30 MPa

30 MPa クラスレート生成域における

二酸化炭素の溶解度

山根健次、綾威雄

平成7年9月

日本造船学会 Proceedings of MARIENV '95

わち、極低温域では両者の線膨脹係数がほぼ等しくなることがわかった。

- (6) また、発泡剤の異なる硬質ウレタンフォームの熱収縮率は殆ど差異がなく、発泡剤は熱収縮率には殆ど影響を及ぼさないことがわかった。

地球温暖化抑制対策の一つとして、回収した CO₂ を広大で高圧・低温下の深海に貯留する方法が有望とされているが、その実現性を評価するために、深海に送り込まれた CO₂ の挙動を詳しく知る必要がある。しかしながら、CO₂ が海水と反応してクラスレートとなる高圧・低温下 (4.5 MPa 以上、8.7°C 以下) では、これまで、物性値の計測がほとんど行われていない。中でも、CO₂ 溶解度は、溶解海水の密度を決定する主要な因子であり、密度は CO₂ 溶解海水の安定性ひいては貯留海層の構造に深い関わりを持つ物性値である。

そこで、当所にある深度 3000 m (30 MPa) 対応の高圧回流水槽を用いて、クラスレート生成域における CO₂ の溶解度を測定した。まず、非クラスレート領域 (例えば、15°C) で、満水状態の回流水槽内に大量の CO₂ を注入し、数日かけて高濃度 CO₂ 溶解水をつくる。次に、循環させつつ、熱交換器を通して、CO₂ 溶解水をゆっくりと冷却すると、濃度に依存したある温度で、過飽和状態となった CO₂ がクラスレートとして析出する。クラスレート生成には、氷の融解熱の約 2 倍の反応熱を伴うため、析出と同時に溶解水温度が急上昇する。この温度上昇後は、CO₂ 溶解水とクラスレートが平衡しており、濃度は飽和状態にあると考えられる。クラスレートを取り込まないように注意しつつ、飽和溶解水の一部を大気圧下の密封サンプル袋に採取すると、溶解 CO₂ のほとんどは気化する。サンプル重量とガス容積をそれぞれ天秤と目盛り付き注射器で測り、大気による浮力と大気圧下の溶解度を補正して、溶解度を求めた。

その結果、クラスレート領域の溶解度は、平衡温度で非クラスレート領域の従来の値と一致し、温度の低下とともに、直線的に減少することが判明した。このクラスレート領域における溶解度の温度依存性は、溶解度が温度の低下とともに増加する非クラスレート領域の温度依存性と傾向が逆となっている。また、この温度依存性は、低温ほどクラスレート膜の溶解速度が小さくなるという、これまでに当所で得た実験事実の説明に有用と思われる。

配置設計

Arrangement Design

岸光男、稲津昌平、井上富雄、黒龍英之、
多賀謙治、舟橋宏樹、細田龍介、寶田直之助

平成7年10月

日本造船学会 造船設計委員会
第2回シンポジウム講演集

船の設計において変更が生じやすくかつ問題解決の手順をアルゴリズム化しにくいブリッジの配置設計では、経験の蓄積とともに時代の変化により設計仕様は変化し続け、それに見合った新形式の船室配置に対応する必要がある。室配置設計では室配置群を決める概念化と、各室通路等の諸元、詳細化と言うステップから成る。ブリッジの船室配置設計への概念化と詳細化への発想ステップの適用を目指し、設計システムの構築を試みる。

ブリッジの室配置設計ではブリッジを二層として、大まかな位置関係を遺伝的アルゴリズムにより求め、各室の大まかな面積、形状を局所的ルールによって求める。各デッキに縦横均等分割幅の格子系を割り当て、先ず室の大きさの標準面積だけを与える。各室の種類別に室面積、形状変化の許容限度はファジィ集合とメンバーシップ関数を定めフレキシブル制約で与える。室群の大まかな位置関係はスライディング木を用いて割り当てる。位置関係をコード化した染色体に対し、遺伝的アルゴリズムのプロセスで染色体コードに矛盾が生じないようにして室群の位置関係を配置条件に適應する様にして求める。局所ルールでは許容領域の設定、室配置、室面積の調整、および許容限度、変化に対する硬度に従い室面積、形状の調整を行う。評価基準は各室の標準面積保持率、特定の室の配置制約満足度など4項目の評価項目を設定し、重み付き加法和とした。本報告では室配置要素数10、2層構造、およびいくつかの隣接条件を設定して最良と評価される例を示した。

以上の室配置設計への設計支援システムは熟練者の行う設計手順とは異なる。生成された代替案について設計者が主観的評価に基づき創造性を発揮し再構築するための支援ツールとして役立つことが設計支援システムとして相応しい。

FRPの疲労損傷の非破壊評価

Nondestructive Evaluation of Fatigue

Damages for FRP

津島聰、吹上紀夫、小野正夫

平成8年3月

日本材料学会 第25回記念FRP
シンポジウム講演論文集

FRP船体の信頼性や安全性のためには疲労損傷の状態を監視し、き裂の進展を未然に防ぐ必要がある。引張疲労を受けるFRPの損傷は樹脂層のマイクロクラックの発生、樹脂、繊維界面の剥離、繊維の破断と進展する。このような疲労によって発生する損傷を超音波のエコー高さ(減衰量: dB)の変化から評価した。

試験体は、FRP船体に用いられているチョップドストランドマット(M)とロービングクロス(R)を交互に積層したMR構成のGFRPを用いた。樹脂は、繊維と同様FRP船体に用いられている不飽和ポリエステルと耐食性に優れたビニルエステルの二種類とした。

形状・寸法は長さ250mm、幅16mm(平行部)、板厚4.4~5.8mmのダンベル型である。試験体の疲労度は引張疲労試験によって、疲労寿命(N_F)の30、60及び90%とした。これらの試験体を用いて次の実験を行った。

- 1) エコー高さの比較: 疲労試験前後の試験体を用い、第一R層(R1)からのエコー高さの比較を行った。測定範囲は試験体中央部39mmとし、測定間隔は1.5mmとした。
- 2) き裂密度の測定: 疲労試験後の試験体の表面き裂密度(本/cm)をエッジワイズ方向から光学顕微鏡(100倍)で測定した。

実験の結果、次のことがわかった。

疲労の進展とともにFRP樹脂層のマイクロクラックの密度が増加するため、R1エコー高さの累積分布は疲労回数の増加とともに小さい方(減衰)に移行する。これはき裂密度とエコー高さ変化の間には良い相関関係があることから確認された。