

所外発表論文等概要

〈推進性能部〉

**Numerical Investigation on Submerged Downward Lifting Body and Its Optimization with Low Wave Resistance**

鉛直下向き揚力を発生する没水揚力体に関する数値解析および低造波抵抗のための最適化について  
長屋茂樹、茂里一紘、土井康明  
平成11年7月

Proceedings of Seventh International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics

鉛直下向き揚力を発生する揚力体が自由表面近くを没水走行するとき、それによって生じる波は上向き揚力を発生する揚力体による波より小さくなるのがこれまでの研究から示されている。茂里らは船体に取り付けられた翼が発生する鉛直下向き揚力によって主船体を没水させることで造波抵抗を低減し、高速走行を可能とする翼付き半没高速船の研究の中で、翼が発生する下向き揚力によって造波抵抗が軽減されることを実験的に見出した。これはこの高速船にとってメリットとなる現象である。

本研究は下向き揚力を発生する没水体の造波抵抗軽減効果に着目し、それを流体力学的に明らかにすることを目的として、境界要素法による3次元の没水揚力体周りの自由表面流れのシミュレーションを行い、抵抗軽減効果を検証した。本報告では下向き揚力と没水体の抵抗との関係を捉えやすいように、矩形翼を計算の対象とした。自由表面近くに没水させた矩形翼に働く抵抗と下向き揚力の関係について数値計算によって調べた結果、揚力の向きと大きさの違いに対して、浮力に応じた大きさの下向き揚力が生じているときに矩形翼に働く抵抗が極小となることが分かった。これは自由表面との干渉が影響していると考えられる。また抵抗が最小となる矩形翼の形状を求めるために、揚力体に働く抵抗を目的関数とする最適化手法を、矩形翼の断面形状に対して用いた。最適化計算の結果、得られた断面形状は下向き揚力を発生する形状であった。また最適化における初期形状に異なる形状を与えた場合でも、抵抗が極小となるときの下向き揚力の大きさは変わらず、ほとんど変わらない形状が得られた。今後はより3次元性の強い形状の没水体に対して、没水体形状が造波抵抗軽減効果に与える影響について検証することが課題である。

**SCP理論設計法の実機プロペラへの応用**

**Application of a Theoretical Design Method to Full Scale Supercavitating Propellers for High-Speed Boats**

右近良孝、藤沢純一、工藤達郎、黒部雄三  
平成12年5月  
西部造船会会報、第100号

現在、不審船対策として、現状より格段に高速の高速艇の開発に関心が持たれている。この種の高速艇用プロペラとして、ウォーター・ジェット・ポンプが用いられることが増えているが、スクリュープロペラは効率や価格の点で優れており、この形式の高性能なプロペラの開発の要望は強い。当所で超高速艇用のプロペラとして、高性能なスーパー・キャビテーション・プロペラ (SCP; Supercavitating Propeller) とその理論設計法及び性能解析法SC-VLMを開発し、模型試験で本設計法が有効なことを確認した。その後、このSRI-SCP理論設計法を競艇用プロペラに適用し、在来型プロペラ (CP; Conventional Propeller) や市販のサーフェスプロペラより大幅に高性能なプロペラとして設計できることを競艇場での速力試験で示した。

本論文では、SCP理論設計法を用いて、高速艇用プロペラを試設計し、実機プロペラを製作して建造艇の試運転時に装着し、速力試験を行った。その結果、SCPを装着した建造艇は要求艇速を越える速力で航走したが、プロペラが「軽く」設計されたため、本艇用に設計された在来型プロペラを装着した場合より速くなかった。

試運転後、設計されたプロペラの模型を製作し、当所の大型キャビテーション試験水槽でキャビテーション性能試験を行い、性能を評価するとともに実艇と模型との性能に関する相関を調べた。また、比較のために、本艇用に設計された在来型プロペラについても同様のキャビテーション試験を行った。これとともに、この高速艇の模型を用いて、有効馬力を推定するため当所の三鷹第2船舶試験水槽で抵抗試験を実施した。

この結果、有効馬力を過小評価してプロペラが設計されたが42ノットの艇速が得られたこと、試運転でCPでは生じたルート・エロージョンがSCPでは生じなかったことなど、新しい知見が得られたので報告する。

## 〈運動性能部〉

**On Steady Drifting Motion of a Ship in Waves**

波浪中の船の定常漂流運動について

上野道雄、二村 正

平成12年 8月

Proceedings of MCMC2000

(International Federation of Automatic Control)

船の漂流運動を考えるに当たって、最も重要なのはどちらの方向へどの程度の早さで流されるかを知ることであると考えられる。本報告ではこの点を明らかにするために外力として波のみを考えたときの定常漂流状態を求めた。斜航運動による流体力は斜航角が180度までを含む大偏角の斜航試験をおこなって求めた。また、波漂流力に関しては漂流運動の速度が小さいと仮定して、前進速度なしの場合の計算結果を用いた。この方法では定常状態のみを問題とするため、回頭運動に関する流体力特性が釣り合い方程式を解く段階においては必要ではなくなるという特徴がある。

波長船長比0.7、波振幅1 mの条件で釣り合い方程式を解いた例では、解は8つあることがわかった。このような複数解の存在は他の入射波条件においても一般的に予想される。

得られた解が物理的に安定な漂流状態を表しているかどうかを判定するためには、回頭運動に関する流体力特性がわからなくてはならないため、それが不明な現時点では安定不安定を判定することができない。しかし、得られた釣り合い点を調べると、波下側からかなり左右にずれた方向にしかもかなり速い速度で流されるという状態を示している点が含まれており、これらの釣り合い点が物理的に安定な漂流状態を意味するとすれば、漂流運動の推定にとっては非常に重要な問題になると考えられる。本報告では局所線形化による安定判別の方法のみを示したが、最終的にここで得られた解がどのような意味を持つかは、回頭運動による流体力特性を考慮してより詳細に検討をおこなう必要があると考えられる。

本報告で用いた定常漂流状態を求める方法による計算例が示すように、ある海象における漂流状態は複数存在する可能性がある。これは時間シミュレーションの方法では初期値の取り方によって漂流経路等が異なってくることに対応すると考えられる。本方法によれば漂流予測は複数の可能性を示すことになると考えられ、時間シミュレーションによる漂流予測とは異なる、複数の可能性を示す漂流予測の方法のあり方も検討されるべきと思われる。

**The State of The Art on Numerical Wave Tank**

数値造波水槽の最先端

谷澤克治

平成12年10月

Proceeding of OC2000

本論文は過去20年間の数値造波水槽に関する著者の研究ならびに国内・海外の研究成果を整理・解説したものである。数値造波水槽とは波浪、波浪荷重、波浪中浮体運動等を時間領域で非線形計算するコンピュータプログラムの総称で、英語ではNumerical Wave Tankの頭文字をとってNWTと呼ばれている。本論文では過去の研究成果を時間を追って解説するのではなく、計算法の基礎理論、数値計算上の種々の要素技術等に分類整理し、これからNWTを開発しようとする研究者・技術者が手引き書としても活用できるように、できるだけ具体的に数式を交えて記述した。従ってかなり専門的で盛り沢山の内容となっている。基礎理論関連では速度ポテンシャルと複素ポテンシャルによる境界積分方程式の定式化と境界要素法によるその離散化、混合オイラー・ラグランジェ法による自由表面の非線形計算法、加速度場において理想流体と浮体の連成運動を解くための4つの方法、安定性解析や精度検証法について解説した。また数値計算技術関連では、ルンゲ・クッタ等の高次時間積分法、二重・三重節点による自由表面と浮体との交線・交点の処理、スプラインによる曲線と曲面のフィッティング、メッシュ関数を用いた節点再配置、計算時間の節減法等について解説した。さらに、NWTに不可欠な要素技術として、造波方法ならびに水槽端での波吸収方法等についても解説した。論文の後半ではNWTと周波数領域の理論計算や数値計算との関連を明確にするため、NWTで計算した3次までの高次流体力を理論計算ならびに実験結果と比較した研究例を紹介した。本論文は耐航性能の分野の専門家にも興味深い内容が多く含まれていると考える。なお、本論文は会議主催者より依頼を受けて執筆したもので、会議では招待講演を行うことになっている。

**Probabilistic Estimation on Ship Performance in Actual Seas**

確率論に基づく実海域船舶性能推定法について

辻本 勝、日夏宗彦、塚田吉昭、南 佳成

矢吹英雄、斉藤重信、野田英夫

平成12年10月

Proceedings of the 4th Osaka Colloquium on Seakeeping Performance of Ships

本論文では船内にLANを持ち、自動的に航海データを収集するシステムを備えている運輸省航海訓練所練習船青雲丸の航海データを用いて、船速、燃料消費量、主機馬力の変化について確率論を基にした理論推定法の有効性を調べた。これからの航海データは10分に1度自動収集されたものであり、1998年及び1999年の世界一周航海並びに1998年4月から1999年12月の間の4時期に日本近海を航海して得られたデータの3種類に分類して解析を行った。

実海域における性能低下の主な要因は(1)経年劣化、(2)生物汚損、(3)波浪、(4)風、(5)海・潮流の5つが考えられる。このうち、青雲丸は平成9年に竣工した新造船であること、半年に1度入渠することから、経年劣化、生物汚損の影響は小さく、主要因から除くことができる。そして船速、燃料消費量、主機馬力の変化について理論推定して得られる確率密度関数と青雲丸航海データを統計処理して得られる確率密度関数との比較を行い、理論推定手法の検証を行った。その結果、両者が良く一致することから、確率論を基にした理論推定法の有効性が確認できた。

さらに船速、燃料消費量の確率密度関数から、定時性及び運航経済性に係る指標として船速維持率並びに航海時間及び総燃料消費量の期待値を求め、実海域性能を評価する手法を提案した。

**Bow Submergence Phenomenon during Surf-riding**

波乗り中の船首没水現象について

田口晴邦、石田茂資

平成12年10月

Proceedings of the Fourth Osaka Colloquium Seakeeping Performance of Ships

高速船が追い波中を航行する際に問題となる可能性があるBow Diving現象に関連して、波乗りを起こした船の船首相対水位を数値シミュレーションで調べた。波乗り状態では船体に働く力が静的に釣り合っているため、波乗り中に船首が没水すると、船は船首没水のまま航走することとなり、船の安全性にとって非常に危険な状態が長時間続くことになる。

今回の数値シミュレーションでは、surge方向に関しては、波乗りを記述できる非線形運動方式を用いた。そして、波乗りを起こすような状況では船と波との出会い周波数が低くなることを考慮して、時時刻刻の上下揺れ、縦揺れは船体重量と浮力を含めたフルードクリロフ力の静的釣り合いから求めた。このようなモデルを用いると、波乗り中の船首没水の発生は、波乗り中の船体と波との相対位置とその位置での静的な力の釣り合いから求まる船の姿勢によって決まることになる。

計算は、コンテナ船を対象に、平水中の船速、波長、波高をパラメータとして行い、波乗りを起こした船の船首相対水位に及ぼすこれらパラメータの影響を調べた。更に、船首楼の高さを変えた場合についても調べた。

その結果、

- (1) 平水中の船速が速くなると、波乗り状態で船首が没水する危険性が高くなること
- (2) 波乗り状態で船首が没水する危険性は、船長の1.2倍程度の波長の波が最も高いこと
- (3) そのような波長の波では、波乗りを起こして船首が没水した状態は、プロペラ回転数を下げて減速してプロペラ推力が0となった場合でも続くことがあること
- (4) 又、波乗り中の船首没水を防止する観点から見ると、船首楼は予備浮力としての役割より船首高さを確保することの意義のほうが大きいことが分かった。

### Assessment of Domestic Rule on Load Lines from the Viewpoint of Deck Wetness

海水打ち込みを指標とした内航船の満載喫水線の設定に関する研究

小川剛孝、田口晴邦、渡辺 巖、藤野正隆  
平成12年10月

Proceedings of 4th Osaka Colloquium on Seakeeping Performance of Ships

内航海運の効率率を図る観点から、近年、限定近海船というカテゴリーが設けられた。これらの船舶の満載喫水線規則は近海のものに適応されているため、海象の違い等を考慮した合理的な基準の策定が望まれている。

そこで合理的に満載喫水線基準を検討するためのツールとして、技術的な検討事項の一つである海水打ち込みによる甲板荷重の長期予測法を開発することを目的に内航貨物船及び内航タンカーを用いて波浪中模型実験を行なった。内航貨物船については母船型とフレア形状を変えた場合の2状態について実験を行った。船型要素の影響について、フレア形状の違いが甲板荷重等に及ぼす影響は極端に形状を変化させない限りあまり大きくないことがわかった。

さらに、これらの結果を用いて甲板荷重及び甲板水量の超過確率の推定法を提案し、不規則波中実験結果と比較を行ったところ、よく一致することがわかった。この超過確率を用いて長期予測計算を行ない、従来の方法と比較した結果、合理的に甲板荷重等の予測を行なうためには本研究で示した超過確率を用いる必要があることがわかった。

このように本研究で開発を行った推定手法等を用いて現行の内航船の打ち込み確率及び甲板荷重の長期予測計算を行い、航行区域の違いが及ぼす影響について検討を行った。さらに、これらの結果をもとに限定近海の船首高さの設定を行った。その結果、海水打ち込みの観点から限定近海を航行する船舶が必要となる最小船首高さは近海船に対する基準に船長の関数で表わされる修正係数を乗じることで設定が可能であることがわかった。

### Practical Prediction Methods for the Shipping Water Load

海水打ち込みにより甲板及び甲板上構造物に作用する荷重の実用的な推定法に関する研究

小川剛孝、田口晴邦、石田茂資  
平成12年10月

Proceedings of 4th Osaka Colloquium on Seakeeping Performance of Ships

満載喫水線基準を合理的に規定するためには、基準が担保している安全性を定量的に評価する必要があり、著者等は、現在行われている基準の見直し作業において、海水打ち込みに関連する安全性の評価について検討を行っている。海水打ち込みはよく知られているように、船体及び甲板上構造物への損傷や作業性の低下を引き起こす可能性がある。海水打ち込みに関する安全性を評価するためには、甲板水位及び甲板荷重を定量的に求める必要があるが、打ち込み水の挙動は複雑であり、これに関連する諸量を精度よく求めることは難しい。

そこで合理的に満載喫水線基準を検討するツールとして海水打ち込みにより甲板及び甲板上構造物に作用する荷重の実用的な推定法を開発することを目的に内航貨物船及び内航タンカーを用いて波浪中模型実験を行なった。内航貨物船については船首部形状の違いが甲板荷重等に及ぼす影響について調べることを目的として母船型、フレア形状を変えた場合及び乾舷高さを変えた場合の3状態について実験を行った。その結果、船首高さの違いは甲板荷重等に及ぼす影響は大きいものの、フレア形状の違いが甲板荷重等に及ぼす影響は極端に形状を変化させない限りあまり大きくないことがわかった。

さらに、これらの結果を用いて甲板上水位分布の実用的な推定法を提案した。これは、洪水の解析に用いるモデルを海水打ち込みに拡張したもので、このモデルを用いることにより従来のモデルと比べてかなり精度よく甲板上水位分布を推定することが可能となった。

また、甲板上水位分布を用いた甲板荷重の推定法について検討を行った。その結果、甲板水の運動量変化に考慮することで甲板荷重のピーク値を精度良く推定できることがわかった。

さらに打ち込んだ水塊が甲板上を流下することにより甲板上構造物に作用する衝撃水圧の推定法の開発も行った。これは、Wagnerの衝撃理論を拡張したもので、この手法により甲板上構造物に作用する衝撃水圧を精度良く求められることがわかった。

〈構造強度部〉

楔形物体の水面衝撃における限界速度の模型実験

On Critical Velocity in Water Impact of Wedges

竹本博安、岡 正義、佐久間正明

平成12年 5月

西部造船会会報 第100号

船舶に作用するスラミング荷重は、船体の局部損傷や全体強度に影響を及ぼすような損傷を引き起こすこともあり、構造設計においてスラミング荷重の推定、評価は依然重要な問題である。スラミング荷重は、船体が波面に突入する場合に生じ、荷重の大きさは波浪中での船体運動と波面の相対的關係により左右される。物体表面と水面のなす角度、相対速度が与えられる時、スラミング衝撃圧を計算することができるが、現象が衝撃的かどうかは相対速度が衝撃速度の限界値を越えているかどうかで決まる。

この論文は上記のような背景の下に水面衝撃の限界速度に注目して、水面衝撃現象の最も基本的なモデルである2次元楔形物体の水面衝撃における限界速度を実験的に検討したものである。デッドライズアングル $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ の3種類の2次元模型を用いて、水面落下試験を行い、水面の盛り上がり、模型底部の水圧、落下速度を調べた。その結果、落下速度が速い場合、水面の盛り上がりとスプレーを生じ、圧力が上昇すること、限界速度以下になると水面の盛り上がりは波となって模型から離れて行くことなどが観察された。この実験の観察、解析から限界速度を求めた。

さらに、Sellars等に従い「水面に物体が突入した場合、これにより生じる波が水面を伝播するが、この波の伝播速度より物体の接水幅の水平方向への広がりの速度が速い場合に、衝撃現象が起こる。」ものと考え、その限界速度の相似則を求めた。上記の実験から求めた限界速度は、この相似則と非常によく合うことが確認された。

- (1) この実験解析から楔形物体の水面衝撃のメカニズムが改めて確認された。
- (2) 2次元楔形物体の水面衝撃は、Wagner型と呼ばれる水面の盛り上がり考えたモデルにより表すことができる。
- (3) 相対速度が限界値以下では衝撃は起こらず、現象はいわゆるKarman型モデルとなり造波を伴うことになる。
- (4) 2次元楔形物体の水面衝撃の限界速度の相似則が明らかになった。

Corrosion Fatigue Crack Initiation Life of a Ship Structural Steel in Dilute Sulfuric Acids

希硫酸環境における船体構造用鋼の

腐食疲労き裂発生寿命

小林佑規、田中義久、後藤英信

平成12年 8月

The Fourth International Conference on Fracture & Strength of Solid Fracture and Strength of Solid, Key Engineering Materials Vol. 183~187

ばら積み石灰船倉の腐食は、石灰からの蒸発気体が船側外板で結露し、その結露液が希硫酸になっているためである。この環境は、船倉に激しい腐食を与え、船体腐食衰耗の大きな要因となっている。

本稿は、希硫酸環境における腐食疲労試験を実施し、腐食疲労き裂発生寿命および腐食衰耗と疲労き裂発生との関係について報告したものである。腐食疲労試験は、硫酸を蒸留水に希釈してpH4およびpH2とし、その酸性環境を切欠き試験片に付与した。繰返し負荷は正弦波の荷重制御であり、応力比0.1の部分片振り引張である。繰返し速度は0.17HZ、試験温度は $25^\circ\text{C}$ である。疲労き裂の発生(き裂発生寿命、 $N_c$ )は、直流電位差から求め、切欠き底の板厚貫通き裂深さが1mmの繰返し数とした。試験結果は、既報の海水腐食疲労試験結果と比較して検討した。以下に、本論文の要点を示す。

- (1) 希硫酸環境における切欠き底の等価応力 $Seq$ とき裂発生寿命との関係は、pH4およびpH2環境ごとに1本の折れ線で表される。折れ曲がりの等価応力は、最大応力が下降伏点に相当する等価応力 $Lly$ であり、この傾向は海水腐食疲労試験結果と同様の傾向にあった。 $Seq > Lly$ では、 $Seq-N_c$ 関係の勾配が、大気中、海水中および希硫酸中でほぼ等しく、腐食疲労き裂の発生は表面傷に腐食溶解が加わって生じるものと見られる。また、 $Seq < Lly$ では、き裂発生が腐食ピットの成長から生じるため、 $Seq-N_c$ 関係の勾配は腐食環境が厳しいほど大きくなった。
- (2) 腐食衰耗を考慮した疲労き裂発生寿命については、き裂発生に対する応力拡大係数範囲 $\Delta K$ と $N_c$ の関係でまとめた。 $\Delta K-N_c$ 関係の勾配は、き裂進展試験におけるParis則の指数から求め、腐食疲労の下限値を腐食疲労き裂発生の腐食ピットの形状に対する $\Delta K$ とした。さらに、環境に支配される腐食速度を考慮した $\Delta K-N_c$ 関係からは、腐食が進行するか疲労き裂が進展するかの $\Delta K$ を推定することができる。

### 構造安全性のための船体モニタリングシステムと 採取データ分析活用法に関する提案

Proposal on Advanced Monitoring System and Data  
Analysis for Ship Structural

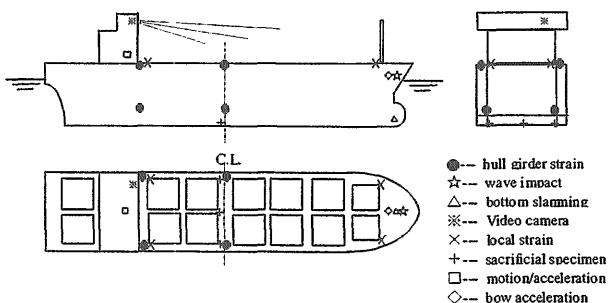
川野 始、末岡英利

平成12年9月

「海事工学と港湾工学Ⅱ」WITプレス社

船舶の安全運航を確保するための有力手段として、船体モニタリングを実施しながら、遭遇環境条件や応答データを採取分析して、航行支援や保守支援のために利用する手法が考えられている。特に、'93年11月のISMコード採択に伴い、船の運航者はSafety Management Systemの機能要件の充足を求められることとなり、航行支援や保守支援のための手段手法の必要性が強く認識される状況となった。そこで、運航支援のための船体モニタリング実現に向けた技術課題として下記を掲げ、実船テストを含む基礎研究を実施した（SR233共同研究）。

- (1) 無人遠隔監視システムにおけるセンサー設計と船陸データ通信の試行： コンテナ船を対象に、特徴ある先進センサーの効果的活用を含めて、センサー配置要領として下記の模式図の内容を提案した。また、毎夜の本船から陸へのデータ通信を含めて、大型コンテナ船による約1年間のフィールドテストを実施し、船載システムの有効性や機器の作動性について実地に確認した。
- (2) 採取データの分析活用法の研究： フィールドテストで得た本船データを題材に、計画的な保守メンテへの採取データ活用法および航行中の構造破損などを防止する観点からの分析評価法に関して考察検討を加え、試案として提示した。



### 〈機関動力部〉

#### 船用ディーゼル機関から排出される粒子状物質の 新規計測法の検討

Study on New Measurement Method of Particulate  
Matter from Marine Diesel Engines

中島康晴、高杉喜雄、菊地正晃、桑原孫四郎

西尾澄人、石村恵以子、張 潔

平成11年10月

日本船用機関学会 第63回マリンエンジニアリング  
学術講演会 講演論文集

船用ディーゼル機関から排出される粒子状物質（PM）の計測法として、高速応答型の水素炎イオン化検出器（FID）を利用した計測方法（高速FID法）を採り上げ、ISOにより規定された部分希釈法（PDM）との比較を行った。

実験では、4サイクル船用ディーゼル機関をA重油及びC重油を用いて運転し、高速FID法と部分希釈法によりPM計測を行い、その結果を比較した。

実験の結果、両者の間には正の相関関係の存在が伺え、概ね、比較するデータを細かく分類するにつれて両者の間の相関性が向上することがわかった。しかし、異なる運転特性で測定した場合、回帰直線の傾きが大きく異なる結果となった。このため、FIDの出力値を評価する上では、運転特性による影響を考慮する必要性が示唆される。また、いずれの計測方法においても、機関負荷率25%において高いPM排出濃度を示したが、負荷率50%以上ではPM排出濃度が低下し、負荷率による相違は顕著ではなかった。このため、低負荷域におけるPM排出濃度を正確に捉えることが、評価係数を求める上で特に重要になると考えられる。一方、PMには燃料中の硫黄分に応じて硫酸ミスト及び硫酸塩が含まれており、C重油を用いた場合には、これらの硫酸分の影響が無視できないほど大きくなると考えられる。しかし、FIDでは硫酸分は検出できないため、燃料中の硫黄分からPM中に含まれる硫酸分を推定し、これを元にFID出力値に適当な値を加えて補正する必要があると考えられる。

太陽水素エネルギーシステムの展望  
Prospect of Solar-Hydrogen-Energy System

平岡克英

平成12年9月

日本船用機関学会誌2000年35巻9号

人類はCO<sub>2</sub>等の温室効果ガスによる地球温暖化という未曾有の環境問題に直面し、今や温室効果ガス排出低減は国際的政治問題になっている。化石エネルギーの中でも石油はその有限性と偏在性を石油危機において認識させたが、現在は需給がゆるみ今後しばらく20年程度は安定して供給されるとも考えられている。しかし、今後はアジアでの経済成長とともにエネルギー需要が相当たかまることとアジア域内の石油エネルギー自給率の急速な低下もあって、エネルギーの安定供給確保は楽観視できないともされている。従って、石油代替エネルギー導入の必要性は依然下がっていない。

CO<sub>2</sub>排出量低減と石油代替エネルギー導入という課題に対しては、天然ガス、原子力、自然エネルギーという選択肢がある。原子力はCO<sub>2</sub>を排出しないエネルギー源であり、天然ガスは石炭や石油に比べればCO<sub>2</sub>排出係数が小さいエネルギー源であり、枯渇性エネルギー源ではあるが現在の妥当な選択肢であろう。一方、自然エネルギーは、エネルギー密度が低く、その導入には大きな初期投資と長い時間を必要とするなど多くの不利な条件を有している。しかしそれ自身はCO<sub>2</sub>を排出せず再生可能であり、究極的には選択しなければならないものである。

筆者らは運輸部門の省化石エネルギーとCO<sub>2</sub>排出低減を目的に、太陽エネルギーを利用して水素を製造し、火力発電所の排気ガスから回収したCO<sub>2</sub>とでメタノールを合成して運輸部門の自動車用燃料として供給する太陽水素メタノールエネルギーシステムを提案している。本稿では太陽水素エネルギーシステムの概念の背景となる地球温暖化・エネルギー資源問題および水素エネルギーシステム研究開発の現状を概観するとともに運輸部門用水素エネルギーシステムの概念設計を通して水素エネルギーシステムの将来展望を試みた。

本システムはライフサイクルで見れば省化石エネルギーとCO<sub>2</sub>排出低減が可能であり、CO<sub>2</sub>排出低減はCOP3目標の「-6%」がクリアできるレベルである。しかしエネルギー密度の低い太陽エネルギーを利用するため、巨大なシステムとなる。その構築には長期間を要すると考えられるので、残存化石エネルギーの余裕のある内に選択肢として考慮すべきであろう。また、システムを維持するためには最終的には廃棄物となる大量の素材をリサイクルすることも視野に入れておく必要がある。

An Experimental Study on Internal Hydrogen Reheat Gas Turbine and Combustion Characteristics in Reheat Process

タービン内再熱水素ガスタービンと再熱燃焼特性の実験的研究

平岡克英、井亀 優、春海一佳、城田英之

平成12年10月

Proceedings of The 4th JSME-KSME Thermal Engineering Conference

作動流体がタービン内で加熱されながら膨張するガスタービンをタービン内再熱ガスタービンと名付けている。作動流体の加熱はノズル翼の冷却に使用した水素を翼後縁から吹き出し、翼後流で燃焼させて行う。この加熱によりコンパクトに再熱が実現できるとともにロータ翼で回収される動力が増大する。さらに再生サイクルやコンバインドサイクルを採用することにより熱効率も大きく改善される。

タービン内再熱という概念は単段の試験タービンを運転して実現が可能であることを示した。試験条件はタービン入り口温度が900℃と現状のタービンとしては比較的低い温度でしかも再熱負荷が100℃上昇程度での実験であった。今後のタービンの高性能化を考慮すればより高温下でより再熱負荷の高い再熱器燃焼特性を把握しておくことが必要である。また、本ガスタービンの比較的早い実現性を考慮するならば水素の他にメタン燃料の利用も視野に入れなければならない。そのため1,200℃までの水素-空気燃焼ガスを発生できる高温風洞を使用して、高温燃焼ガス流中の水素およびメタン噴流拡散燃焼(再熱)を行い、再熱器の燃焼効率およびNO<sub>x</sub>排出特性を調べた。

水素は200℃上昇という再熱負荷条件でほぼ100%の燃焼効率が得られた。NO<sub>x</sub>はタービン入り口温度の上昇とともに増加するのが主熱燃器のNO<sub>x</sub>排出係数より大幅に少ないことが示された。NO<sub>x</sub>中のNOの割合は再熱によって小さくなるが、タービン入り口温度が低いほど小さくなる。

メタンは入り口温度が800℃程度では着火せず、1,200℃程度では着火するが燃焼効率が70~94%と不安定である。水素20% (vol)加えると燃焼効率がほぼ100%に改善された。NO<sub>x</sub>の排出係数は主熱燃器と同レベルの高い値を示した。

### Assessment and Treatment for Harmful Exhaust Emissions from Marine Diesel Engines

船用機関から排出される有害排ガスの評価及び処理  
西尾澄人、高杉喜雄、桑原孫四郎、石村恵以子  
中島康晴、張 潔、菊地正晃  
平成12年10月

Proceedings of Sixth International Symposium on  
Marine Engineering Tokyo 2000

今日、酸性雨、地球温暖化等地球環境問題が世界的に重大な関心事となっている。船舶から排出される酸性雨の原因物質については、国際海事機関（IMO）において検討され、その規制内容が決定された。一方、地球温暖化物質については気候変動枠組条約締約国会議において検討され、日本においては、2008～2012年に1990年レベルより6%削減することとなっている。このような状況の中、下記の4つの環境対策の研究を行ったので、これらを報告する。

1. 船用燃料は一般に残さ油が使用され、燃料性状が広範囲にわたっている。そのため同じ機関においても使用する燃料の性状が異なれば排ガス組成も大きく変わってくる。そこで、燃料性状が排ガス組成に与える影響を性状の異なる船用燃料を用いて燃焼実験を行ったところ、NO<sub>x</sub>は燃料性状より燃焼状態（筒内圧力）に大きく影響を受けること、Sootは燃焼中の硫黄分に大きく影響を受けることが分かった。
2. エマルジョン燃料は船用機関から排出されるNO<sub>x</sub>を低減する有効な手法であるが、これの使用により他の排ガス成分がどのように影響されるかについては不明な点がある。そこで、エマルジョン燃料が排ガス組成に与える影響を調べた結果、低負荷機関運転では他の有害排ガス成分（パティキュレート、CO、HC）を増加させるが、高負荷機関運転ではこれらを増加させないことが分かった。
3. 脱硝装置の使用は、大幅なNO<sub>x</sub>排出量の削減が可能であるばかりでなく、機関は燃費の良い状態に調整できるためCO<sub>2</sub>の削減にもつながる有効な手法である。しかし、脱硝装置の使用により他の有害排ガスがどのように影響されるかについては不明な点がある。そこで、脱硝装置を使用してこれらの有害排ガスがどのように影響を受けるかを実験により調べた結果、NO<sub>x</sub>に加えN<sub>2</sub>O、HCの低減も可能であることが分かった。
4. ディーゼル機関の燃料噴射系及び吸排気弁系の電子制御化は、機関の運転状況や使用燃料に応じて最適な燃焼が実現できるため、大気汚染物質の低減および燃費改善に有効な手法である。現在、3気筒全ての燃料噴射系及び吸排気弁系の電子制御装置を取り付け、試運転を完了した。

### Measurement and Analysis of Particulate Matter (PM) from Marine Diesel Engines

船用ディーゼル機関から排出される粒子状物質（PM）の計測及び分析

中島康晴、高杉喜雄、菊地正晃、桑原孫四郎  
西尾澄人、石村恵以子、張 潔、西川和美  
平成12年10月

Proceedings of 6th International Symposium on Marine  
Engineering (ISME2000)

4サイクル船用ディーゼル機関から排出される粒子状物質（PM）の排出特性及び化学的組成を検討した。PMは低負荷域で高い排出率を示すが、負荷率の上昇とともに低下し、負荷率75%において最小となった。この傾向は燃料油種や機関の運転特性が異なる場合でもほぼ同様である。さらに、PMの化学的組成の変化を検討するため、PM中の可溶性有機分（SOF）を抽出し、SOF/PM比を調べたところ、機関負荷率の上昇とともにSOF/PM比も低下することがわかった。一部の試料についてより詳細な分析を行った結果、機関負荷率の上昇とともにSOFの比率が低下するのに対して、スート、硫酸分（サルフェート）及び結合水の比率は増大すること、SOF中の成分分布の中心が重質な方向へと変化していくことがわかった。このように、機関負荷率はPMの排出率のみならず化学的組成にも影響を与えることが示された。また、ガスクロマトグラフ（GC）及びガスクロマトグラフー質量分析計（GS-MS）により、SOFの成分として、パラフィンに加えて芳香族炭化水素や複素環化合物も検出された。

次に、実験機関の燃料噴射装置を噴射タイミングの調整が容易な試作機に変更し、噴射タイミングを少しずつ変化させて燃料着火タイミングとPM排出率との関係を検討した。この装置では、従来のカム駆動方式に代えてコンピュータ制御による油圧駆動方式を採用している。低負荷域において燃料着火タイミングを上死点後0～10度の範囲で調整した結果、8度において排出率は最小となった。上死点から遅れたタイミングでPM排出率が最小となったことから、着火タイミングの適度な遅れにより、噴射された燃料が燃焼前に吸入空気と十分に混合し、PM排出率の低下をもたらすと示唆された。また、低負荷域から高負荷域まで燃料消費率が最小となるように着火タイミングを調整した結果、通常のカム駆動形式の燃料噴射系を用いた場合と比較して大幅にPM排出率が低下し、かつ機関負荷率に対してほぼフラットなPM排出特性が示された。この結果から、着火タイミングの調整によりPM排出率の低減が可能であることが示唆された。



〈材料加工部〉

Effect of Prior Particle Size on Spraying Behavior of  $Al_2O_3$  during Plasma Spraying

粒子径が異なるアルミナ粒子のプラズマ溶射特性

李 鋼、植松 進

平成11年11月

高温学会誌 Vol. 25 Supplement

プラズマ溶射中に溶射粒子が受ける加熱と冷却、基材上での偏平・凝固は非常に短時間でマイクロな現象であるため、これらを直接観察する方法はいまのところ見いだされていないのが現状である。

本研究ではプラズマ溶射に用いる原材料の粒度分布が溶射皮膜の品質に与える影響を調べるため、粒度分布が異なる3種類のアルミナ粉末を用いてその溶融状態を調べている。飛行粒子の捕集は、トーチ出口から100、150mm離れた位置の鋼基板(表面を研磨)とカーボン粘着テープ上で飛行粒子を捕らえ、それらの粒子状態をSEM観察した。なお、捕集テープの溶融を防ぐための熱遮蔽用スリット板を捕集装置の7mm前方に設けている。

実験結果は、いずれの粒度分布も溶融球形粒子の7割以上が原料粉末の相当径と比べて、1桁小さい球形粒子になっていた。10~20 $\mu$ m粉末はほとんど完全溶融しており、基材に衝突時の粒子径は10 $\mu$ m程度であるのに対して、38~63 $\mu$ mあるいは20~38 $\mu$ m粉末を用いた場合にはかなりの量の未溶融粒子が混在し、基材に衝突時の粒子径は20 $\mu$ m程度であった。表面を研磨した鋼基板では、完全溶融した粒子だけが捕集されるため、粒子の溶融度を調べるには有効であるが、基材到達までに表面の凝固が始まってしまった粒子、たとえば150mmの溶射距離では微少球形粒子のほとんどは基材に衝突する前に凝固していて、たとえ基材に到達しても跳ね返されてしまい、それらの粒子情報は基板を用いた場合には得られないことが明らかになった。一方、カーボン粘着テープ上で飛行粒子を捕らえた場合は、未溶融粒子、半溶融粒子であっても捕集することができ、しかも基材上で扁平して跳ね返された粒子をも捕らえることができること特徴を持つが、表面が球状粒子で覆われてしまうと、大きな粒子は捕らえにくいことがわかった。

## 船舶用チタン溶接継手の疲労強度

Fatigue Strength of Welding Joint of Titanium for Ship

岩田知明、松岡一祥

平成12年9月

溶接学会平成12年度秋期全国大会講演概要

チタンの、高い耐食性による維持コスト削減、高比強度による燃費向上などの、環境・経済効果が船舶分野で近年注目されて来ており、検査規準の緩い漁船においては、既に構造部材に使われ始めている。しかし、検査規準の厳しい客船・貨物船においては、実績が乏しく、設計、製造及び検査方法が確立されていないため、規準化のための基礎資料整備が望まれている。特に船舶では、船体構造特有の隅肉溶接箇所が多く、これらのデータ不足が検査規準の確立の妨げになっている。本研究では、チタン船開発を促進するため、溶接製チタン薄板構造の基礎資料整備として、突合せ溶接継手・横隅肉溶接継手の疲労試験を行った。

疲労試験結果からS/N関係を最小自乗法で求めると、母材 $\Delta S=517N_f^{0.07}$ 、突合せ $\Delta S=599N_f^{0.0876}$ 、横隅肉 $\Delta S=822N_f^{0.115}$ となった。ただし、突合せにおいて、溶接部から破断した試験片は除いてある。試験結果を200万回疲労強度で示される疲労等級FAT値を用いて鋼材と比較する。鋼材においては、突合せ溶接継手のFAT値は100、荷重非伝達型横隅肉溶接継手のFAT値は80となっている。これに対し今回のチタンでは、突合せは134、横隅肉は123となり、本試験の範囲では、鋼材の設計用疲労強度より強い。ただし、突合せの場合、溶接欠陥により疲労強度が低下する場合が存在している。

本試験では、板厚が2mmと薄いため残留応力が小さいと考えられること、及びTIG溶接で止端半径が大きく局所的応力集中が小さいことから、鋼材の場合とS/N曲線の勾配が異なっていると思われる。よって、今後は、更に厚い板の試験および角回し溶接継手のように構造的応力集中のある試験片での試験が必要である。チタンの疲労強度は、本試験の範囲では、突合せ溶接継手、横隅肉溶接継手共に、鋼材の設計用疲労強度を上回った。ただし、S/N曲線の勾配が異なった。その理由としては溶接残留応力や応力集中の違いが考えられる。これらについては更に試験が必要である。

〈装 備 部〉

ケミカルタンカーにおけるベンゼン輸送中の環境濃度  
Workplace Concentration of Benzene Gas during Marine  
Transfer Operations

山口勝治、藤井 忍、間島隆博、山之内博、坂本真二  
平成11年10月

日本船用機関学会

第63回マリンエンジニアリング学術講演会講演前刷

ベンゼンガスは数ppmの低濃度でも慢性的に暴露されると癌の原因になりうると懸念されており、また健康への影響は遅れて現出するため事後の対処は難しく事前の予防的対策が有効となる。このため、船舶でのベンゼンガス環境濃度を計測することにより実態を把握し、健康被害を未然に防止するための対策を検討する必要がある。本報告では、ベンゼンを輸送する船舶の作業を「積み荷役」「航海中の作業」「揚げ荷役」「タンククリーニング作業」に区分し、それぞれの作業区分において船内作業場所での環境ガス濃度を計測した結果および環境濃度における乗組員の健康影響を評価した結果について述べた。

計測対象船舶としては最も数が多く、よく用いられる、総トン数499トンおよび399トンの船を選定した。航海当たりのベンゼン輸送量は499GT船では約1000トン、399GT船では約500トンである。計測場所は乗組員が作業をよく行い、長時間過ごす甲板上(ベント管下)、居住区(食堂・操舵室)、ポンプ室とした。作業形態ごとに作業中一定流量で容積15Lのキャニスターにサンプリングし、採取したガスをガスクロマトグラフ質量計にて分析し、濃度を求めた。500トン積み船6隻、1000トン積み船6隻について計測し、総作業形態数は19回であった。作業内容、発生源や暴露要因等に関する情報を入手するため、現場調査、調査票による書面調査およびヒアリングによる調査を行った。

計測の結果、作業形態のうちではクリーニング中が最も濃度が高く、揚げ荷役中がこれに続き、航海中と積み荷役中は0.1ppm程度以下の低い濃度であった。また、計測場所と作業形態平均濃度は1ppmをやや超え、作業時保護具装着濃度と同程度であることが明らかとなった。乗組員の健康リスクの大きさは船上での作業方法、作業時間、輸送従事回数等によって大きく変わり、環境濃度以外のこれらの条件によってもリスクをコントロールできることが分かった。

これらの成果はベンゼン貨物海上輸送中の船内ガス濃度管理を行う上で役立つと期待される。

Minimization of Tank Washings on Chemical Tanker

ケミカルタンカーのタンク洗浄廃液の低減

上田浩一、山之内博

平成12年10月

第6回 船用機関国際シンポジウム東京2000

ケミカルタンカーのタンク洗浄廃水は海洋汚染防止上、有害性に依りて処理される。その処理の負担の軽減のため効率よく洗浄し、必要な洗浄水量の低減が望まれる。通常タンク内は水噴流によって洗浄されるが、タンク内の垂直壁面は直接の衝突水噴流でなく落水膜流によっても十分洗浄される。落水膜流で洗浄できることから、衝突噴流が液滴噴流の状態になっても洗浄できる。そこで細いノズルからの噴流についても射程距離を変えて、液滴流による洗浄状況を調べた。また落水膜流によってどの程度洗浄されるか把握することは、洗浄機の設計上必要である。落水膜流による洗浄効果について、着色した水、グリセリン、エチレングリコールおよびこれらの水溶液の供試液を付着液として用いて実験的に調べた洗浄除去効果について調べた。

口径 $\phi 2.5\text{mm}$ の細いノズルを用いて、ノズルからの近距離65cmの射程距離及び5mの射程距離での洗浄状況の違いを調べた。ノズルから5m離れたところでの液滴の分布状況についても調べた。さらに壁面としては外径 $\phi 60\text{mm} \times 2\text{m}$ の垂直円筒の外周を使用し、供試液の粘性係数は水の $1.1\text{mPas}$ からグリセリンの $1500\text{mPas}$ の範囲で実験を行った。粘性係数が $1.1\text{mPas}$ から $1500\text{Pas}$ まで大きくなるに従って供試液の付着膜の厚さは $15\mu\text{m}$ から $52\mu\text{m}$ 程度まで増加する。安定した落水膜流による洗浄効果を調べるため、比較的水量の多い単位幅当たりの流量 $q$ が $2.2 \times 10^3 \text{m}^3/\text{s}$ 、液膜流のレイノルズ数 $Re_l = q/v = 1.9 \times 10^3$ で実験を行ったが、平均して $18 \sim 29 \mu\text{m/s}$ 程度の割合で付着膜が洗浄された。この条件による洗浄では水のような低粘性の付着液の場合には約0.6秒で洗浄除去され、グリセリンのような高粘性で付着膜の厚い場合には約1.6秒程度の洗浄時間を要した。

水溶性の付着膜を水で洗浄する場合について、細いノズルを用いて、液滴状の流れになっても充分洗浄できることがわかった。付着膜の粘性係数と洗浄除去率の関係を実験的に求めた。

### Working Environment Level on Chemical Tanker Engaged in Benzene Transfer Operation

ベンゼン輸送船における作業環境濃度  
間島隆博、山口勝治、藤井 忍、山之内博  
坂本真二、山尾 崇

平成12年10月

ISME TOKYO 2000 Proceedings

ベンゼンは発ガン性物質であるが、塗料、薬、殺虫剤などの化学物質の基礎材料となるため大量に生産、消費されている。日本における年間生産量は400万トンを超えており、そのうち30%程度がケミカルタンカーにより海上輸送されている。乗組員の健康被害が懸念されるため、ベンゼンを輸送するケミカルタンカー上における作業環境濃度を測定し、現状の実態を把握した。海上輸送は積み荷役、航海、揚げ荷役、タンククリーニングの4つの作業からなり、各作業でベンゼンの排出形態が大きく異なる。このため、各作業ごとにガスの採取を行った。また、採取場所として、甲板上、ポンプ室、食堂の3カ所を選定した。測定された環境濃度はばらつきが大きいものの、平均化操作により各作業、測定場所でオーダーが異なる結果となった。もっとも高い濃度はタンククリーニング中に観測され、他の作業と比較して1桁程度高い値となり、場所によっては1ppmを大きく越える場合もあった。ただし、全作業を通じて居住区を代表する食堂では甲板上およびポンプ室より1桁程度低い環境濃度であった。また、全作業、全測定場所における平均濃度、つまりベンゼンを輸送する船舶上における作業環境濃度は1ppmをやや越える値となることが分かった。さらに、この濃度を用いて乗組員が従事するベンゼン輸送回数をパラメータにして発ガンリスクを求めた。この結果、生涯に1000回のベンゼン輸送を行うと、発ガンリスクが0.001のオーダーとなり、1/1000の確率でガンになることが示された。また、防護マスクによる対策の効果を考慮して発ガンリスクを計算した。その結果ポンプ室での作業中、およびタンククリーニング作業間の甲板上での作業中にマスクを装着するという現実的に可能な対処法により、平均暴露濃度を低く抑えることができ、80%程度の大幅な発ガンリスク低減が見込まれることが示された。

(システム技術部)

### ヒューマンファクターを考慮に入れた船舶での 避難行動シミュレーション

Simulation of Human Escape on Board Considering  
Human Factors

勝原光治郎

平成11年7月

日本学術会議 第29回安全工学シンポジウム

講演予稿集

避難行動における人間の心理を集団心理とみてモデル化しシミュレーションを行った。個々人は避難場所に早く着きたいという強い欲求をもっており、一方その目的遂行の上で必要な遠近・混雑などの入手情報は限られている。入手できない情報に関しては人々は想像活動をし、この想像内容が集団で共有されている、あるいはされているに等しい行動をするというモデルである。

実船実験を行い、その結果をシミュレーションで再現することができた。とくに夜間に相当する初期居室配置では全員が同一集団心理グループとして計算した結果と実験がよく一致した。昼間に相当する初期集中配置の場合は、集団心理グループが2つになると思われること、また人々が一箇所の階段などに集中するとき、実験では人々は予見して行動するが本シミュレーションは現状では予見行動はプログラム化されてなく計算と実験に若干の乖離があった。

最後に、このシミュレーションプログラムを使って、避難時間が最小となる最適避難経路を求める方法と、その逆の避難時間が最大になる最悪避難ケースを知る方法を示した。あらゆる心理状態を考慮すると、一般に避難行動はこの最適と最悪の間に位置するので、船舶の避難安全指標としてはこの最適ケースと最悪ケースの2つを考えるとよい。

交通事故について  
On Traffic Accidents

松岡 猛

平成11年7月

日本学会議 第29回安全工学シンポジウム  
講演予稿集

各種交通機関は現代の日常生活や経済活動において非常に重要であり、これら無くしては現代社会は成り立たない。陸上、海上、航空の各分野の事故件数は現在増加傾向にはないものの、輸送手段の高速化、大量化、複雑化に伴い一たび交通事故が発生した場合には大事故に至る可能性が高い。本論では交通事故の現状を概観し、今後パブリックサービスの安全を確保するためには交通事故について、どの様に対処していくべきか考察した。

我が国におけるここ数年の各種交通事故による死者数は、一番多いのが自動車事故で約10,000人／年である。次に鉄道事故の約400人／年、海上交通事故の約200人／年となり、航空交通事故は10人／年前後である。

これらの交通事故相互を、それぞれの利用機会毎の死者発生数(=発生頻度)を求めて比較すると、自動車事故による死者の発生頻度は1億人キロ当たり0.5人~0.7人となる。鉄道は1億人キロ当たり約0.1人、旅客船の場合は1億人キロ当たり約0.1人、全世界の民間公共用輸送機の場合は1億人キロ当たり約0.018人~0.03人の死者の発生頻度となる。これらの数値をみると、自動車事故によるものが圧倒的に大きく、鉄道、旅客船がほぼ同じレベルにある。航空機は大事故が発生すると自動車事故に匹敵する発生頻度となってしまうことがわかった。

各種交通事故の内容をさらに検討してみた結果以下の結論を得た。

自動車、鉄道、船舶、航空機を公共交通機関として総合的に捉えた場合自動車事故による死者発生頻度を一層低減する必要がある。

特に自動車事故にまきこまれてしまう一般歩行者のリスクは他の交通機関を利用している場合のリスクより大きくなってしまっているため、自動車道と歩行者道の分離が重要である。また、鉄道と道路を完全に分離すれば踏切事故はなくなり鉄道は大変安全な乗り物となる。しかし、駅ホームからの転落等による人身障害事故をなくすためには乗降のためのシステムを変更する必要がある。

航空機は平均的には高い安全性を保持していると言えるが、ひとたび大事故が発生すると犠牲者数が多いため、その年度のリスクは自動車に匹敵するほど上昇してしまう。大事故の発生を防ぐ一層の努力が必要と言える。

公共交通機関の範疇からは外れているが、漁船、プレジャーボートの危険性は高く、何らかの対策を講じる必要がある。

技術の進歩、施設整備、運用システムの改善等により確実に公共交通機関の安全性向上は実現できると考える。

## システム信頼性解析手法

System Reliability Analysis Method

松岡 猛

平成11年 7月

日本学会議 第29回安全工学シンポジウム  
講演予稿集

化学プラント等大規模システムの安全管理のためには確率論的安全評価 (PSA) が有用な手法と考えられ、既に原子力分野をはじめ種々の分野でPSAによる評価の考え方が検討・導入されている。この確率論的安全評価において主要な位置を占めるシステム信頼性解析手法のひとつであるGO-FLOW手法の説明およびJR新幹線の自動列車制御装置 (ATC) の信頼性解析をGO-FLOW手法により実施した結果について述べる。

GO-FLOW手法は当所において開発されたシステム信頼性解析手法で、時間依存性の解析、複雑な動作モードを持つシステムの解析、動的システムの解析等フォールト・ツリー解析にはない優れた機能を持っている。

GO-FLOW手法の理解のため、手法の概要、信号の意味、タイム・ポイント、オペレーター機能概略、信号の強度の説明を与えた。更に、解析支援システムを簡単に紹介した。

ATCとは、先行列車との間隔および進路の条件に応じて、運転室内に列車の許容速度を表示するとともに、列車がその制限速度以上となれば自動的にブレーキが働いて、列車を安全に停止させるものである。許容速度の決定、列車上における制限速度の検出には冗長系を用い信頼性の向上を図るとともに、万一制限速度が得られない場合はフェイル・セイフによりブレーキが働く機構となっている。

ATCの制御回路図をもとにシステム動作・故障をGO-FLOWチャートにモデル化した。システムを構成する機器・部品の故障率は、主として平成8年度の山陽新幹線における関連事故情報に基づき推定した。正常な制限速度信号が得られない場合は列車運転員による判断で正常運行が保持されると考え、その有効性を解析に取り入れた。また、特定の列車のATCシステムに不具合が発生した場合、同時に走行している他の列車への影響の考慮の必要性も指摘している。

解析の結果、ATCのシステム信頼度の時間に伴う推移がGO-FLOW手法により容易に求められることが示された。信号処理系は十分な信頼度を有していると考えられ、電源系、ブレーキ系、地震・降雪等の外部的要因のシステム信頼度に対する影響は大きいと考えられる。

事故を引き起こさない安全確保のためにはブレーキ系の動作の信頼度が重要であることが確認された。

## プラント状態 3次元画像表示システムの作成

Development of 3-D Graphic Display System for Plant State Expression

宮崎恵子、松岡 猛

平成11年 7月

第27回可視化情報シンポジウム講演論文集

将来型の自律型原子力プラントを実現するための研究が、原子力基盤総合的研究として進められてきた。自律型プラントは、ヒューマンエラーを可能な限り排除し、人工知能技術の応用により、自分自身で判断しながら自律的に運転継続、非常時対応策を実施していく。しかし、自律型プラントにおいても、プラント運転の責任は人間が持ち、臨機応変に人間がプラント運転に介入するものと考えられている。よって、自律型プラントでは、人間が、運転管理者の立場で使用し、ヒューマンインターフェース (HMI) が必要である。

本研究で検討した自律型プラントは、人間により与えられた規範に従って行動するものという定義のとり、機能構成は、階層型分散協調システムの概念を採用した。自律型プラントでは、高度な機能を持ったエージェント (人工知能要素: ロボット、部分システム等の形態をとる) がプラント内各所に分散配置され、自律的に動作するとともに、協調・統合動作をしながら目的とする運転を果たす。一方、運転対象として、自律機能を持つ、加圧水型原子力プラントを模擬したシミュレータを開発し、そのHMIについて研究を行った。

自律型プラントの状態監視用HMIの機能として「プラント機能モデル」「プラント状態自動分類」「3次元画像表示」「ロボット群動作状況表示」を検討してきた。本稿では、それらのうち、3次元画像表示システムについて報告する。本システムは、人間が本来持っている感覚を生かし、現場を直接観測しているかのように運転管理者がプラント状態を把握できることを目的に作成した。プラントを構成する機器をコンピュータグラフィクスでほぼ忠実に再現し、温度や圧力、流量などの状態量を直感的に認識できるよう、機器の形状に沿って、状態量をカラーに変換して表示している。これらの状態量は、プラントシミュレータからリアルタイムで送られてくる。値変化が激しい異常時には、対応する機器が振動、拡大表示等されるよう設定することにより、運転管理者に注意を喚起する。本システムのインターフェースは、マウスオペレーションを中心に操作できるように構築した。

安全指向型 単独当直航海支援システム開発と  
実証評価について (その1) から (その3)  
Development and evaluation of a navigation support  
system for one person bridge operation system  
下野雅生、福戸淳司、松島和夫  
平成11年8月号から10月号  
日本造船学会  
テクノマリン 8月号から10月号

全国航タンカー海運組合、運輸省船舶技術研究所、三菱重工は共同で内航タンカーの近代化船計画を実施してきた。本近代化研究の大きな要素技術である一名当直を目指した航海支援システム開発の共同研究は、平成5年から開始し、機器の開発から実船搭載を経て、実稼働をはじめすでに2年が経過し、この間システムの有効性と一名当直の安全性の確認を行った。さらに、このシステム開発後、一名当直に関するIMO、ISO/IEC等の国際動向や最近の安全性に対する考え方やその定義及び評価方法などの調査を行った。本解説では、それらの知見の概要を紹介する。

まず、2章では、安全についての国際的概念の紹介、3章にて約10年間にわたるIMO/MSAを中心に行われた夜間単独当直D-OPBO (Dark-One Person Bridge Operation) に関する動きを紹介する。2回目記事では、4章として、日本における単独当直航海支援システムの開発、実証について紹介し、3回目記事では、5章として、単独当直時の船舶設備要件に関するSTCWと開発システムの比較、6章にてヒューマンエラー防止システム、7章にて安全評価等について述べる。

A Study of Minimum Time Berthing Solution  
最短時間着岸操船に関する研究  
岡崎忠胤、大津皓平、水野直樹  
平成12年8月  
Proceedings of MCMC2000

さまざまな局面を迎える船舶の操縦において、着岸操船は最も難しい操船技術が要求される。パイロットや船長が着岸操船を行う場合、あらかじめ操船計画を立案する。この計画はほぼどの地点で舵をどのように操作し、機関をどのように操作するかという大体のイメージと経験に基づいて立案される。このようにして得られた操船計画は千差万別であるが、何らかの合理的評価基準を設定した数学的に最適な操船方法を示すことができれば、たとえその通り操船しなくても、パイロットや船長あるいは今後自動操船を考える場合、合理的な操船計画立案への参考となる。

そこで、操船の評価基準として最短時間操船を選び、共同研究先である東京商船大学の附属練習船汐路丸を対象に、“操縦運動の数学モデル検討グループ(MMG)”が推奨する非線形微係数モデルを利用して、着岸操船方法を導出した。本研究においては、最短時間着岸操船方法を、操船者へのガイドラインとして示すことを目的とし、操船開始地点と着岸点を幾何学的に系統づけて変更し、最短時間操船方法の解析を試みた。解析の結果、最短時間着岸操船は、2つのフェーズに分けることができた。1つは、着岸点の手前まで舵と機関を制御して誘導するアプローチフェーズ。もう1つは、着岸点の手前より、主にバウスラスターとスタンスラスターを利用し、着岸点での姿勢制御と停船制御を行うバーシングフェーズである。アプローチフェーズにおける舵と機関の制御にはそれぞれ1つの操船パターンが存在し、舵を取り始める点、舵を取り終わる地点、機関を使用する点は、幾何学的特性をもち、それらの地点は、着岸点までの距離と方位により表現する事ができた。また、バーシングフェーズにおいても、バウスラスターとスタンスラスターのコンビネーションで操船パターンを3つに分類することができた。そして、この操船パターンもまた幾何学的に分類し、その特性を着岸点への進入角度で示すことができた。

The Personal Computer-aided Engine Operation  
Support System  
Based on Oral Communication between Man and  
Machine

人間と機械との音声会話を用いたパソコンによる  
エンジン操作支援システム

松下邦幸、長尾和彦、沼野正義、引間俊雄

橋本 武

平成12年 8月

IMLA第11回海事教育・訓練会議論文集

船上での実務上の会話と技術を用いた、新しい概念に基づく船用機関の運転支援システムを提案し、これにより技術の伝承を図る。一般に、船用機関は、複雑なシステムとなっており、その扱いには高度な知的判断が必要とされる。機関の運転は、経験に基づく心的な行動によっているが、そのベースには、物理、基礎的な力学、電気・電子工学や自動制御などの広範な知識が必要である。しかし、近い将来には、いわゆる超近代化船において、機関の運転経験をもたない乗員が船舶の機関システムを運転する状況が想定される。そこで、このような際に有効な指示を与えることをパソコン上で実現するシステムとして、「機関長システム(C.E-SYS)」を提案する。C.E-SYSは、ベテランの機関長の運転に関する知識を集約してデータベース化し、人間との音声による対話によって機関の現状を推定し、これに適合した指示を人間に与えるものである。このシステムは、運転支援システムとして用いられるだけでなく、機関の運転訓練に用いることが可能である。プロトタイプを製作し、弓削商船高等専門学校の練習船「弓削丸」において機関運転訓練に用いることによりこれらの有効性を確認した。音声による会話を用いることによりC.E-SYSに人間性を感じるとのアンケート結果も得られており、運転支援ならびに教育訓練とこれによる技術の伝承を図ることができると考える。

冗長系のある推進動力システムの信頼性・安全性解析  
—JSRICデータに基づく運航実績と安全性評価—

Some Considerations on Studies of Dependability and  
Safety Analysis for Power Propulsive System

—Running Results and Their Safety Estimation on  
Information of JSRIC Database—

桐谷伸夫、橋本 武

平成12年 8月

技術研究報告

通常、多くの船舶の推進動力システムは、2・4サイクルディーゼル機関1台或いは複数台の設置によって構成されている。ここで冗長系の概念を広くとらえるならば、多機多軸構成の船用推進動力システムをひとつの冗長系と考えることは可能である。言うまでもなく、対象とする冗長度は本来の並列冗長系が有する「全てのブロックは同等であり、いずれか1つが機能を維持していれば、システム全体も機能を維持することができる」機能、換言するならば100%の機能冗長度を保証するものではないが、航行船舶において片舷機運転であっても自力航行を実現して目的港をめざす能力があるならば、船用主機システムを減速航行を保証した冗長度を持つシステムのひとつを考えることができる。本論は、このような考えを背景として、船用主機システムの冗長性評価を船用機器故障フィールドデータ解析によって実施したものである。

信頼性解析に使用したフィールドデータは、船舶信頼性情報データベース(SRIC Database System)によって得られるディーゼル主機に関する故障情報である。SRICは船用機器の信頼性向上を目的として構築されたデータベースであり、最新のシステムには約11万5千件の船用機器に関する故障及び警報発生に関わるフィールドデータが集積・整理されている。この膨大な情報によって、ディーゼル主機システムの信頼性評価を実施した結果、多機多軸化によるシステムの信頼度は運転状況により軽減され、結果としてシステムの冗長性が機能するが、乗組員の作業量は増加することが明らかとなった。すなわち、主機システムの信頼度は機器装備コストや保全作業量とのトレードオフの関係において成立していると指摘できる。また、2機システムにおける不稼働率すなわち航海時間に対する主機の停止や減速による航海への影響時間の割合は、1機システムとほぼ等しいことが明らかとなった。これは、装備の増加による信頼度を保全作業等により補い、結果としてシステムの機能目的を達成していることの表れであり、容認され成立したトレードオフの成果と考えられる。

自律分散協調機能監視システムの研究 (3)  
 -プラント模型を用いた統合管理システムの評価-  
 Research on Observation System for Autonomous,  
 Diverse and Cooperative Function (3)

-Assessment of Total Control System by a Model Plant-

松岡 猛、沼野正義、染谷 実、福戸淳司  
 三友信夫、宮崎恵子、松倉洋史、丹羽康之

平成12年9月

日本原子力学会 秋の大会講演予稿集

将来型の自律型原子力プラントを、「階層型分散協調システムの概念に基づき、プラント内各所に高度な機能を持ったエージェントが分散配置され、自律的に動作するとともに協調・統合動作しながら目標とする運転及び非常時対応を果たす」と設定し、このようなプラントに適合したヒューマンマシンインターフェース(HMI)について研究を行った。このような自律型プラントにおいても臨機応変に人間がプラント運転に介入できると考え、人間が運転管理者の立場で使用するHMIのプロトタイプを作成した。本報ではこのHMIシステムに加圧水型原子力プラントを模したプラント模型を接続し、被験者を用いた評価実験結果について報告する。

プラント状態監視用HMIの機能として、プラント状態判断、プラント状態自動分類、三次元画像表示、ロボット群行動表示を整備した。運転対象は、自律機能を持つ加圧水型原子力プラントPWRプラントシミュレータ、自律ロボット群、及び、加圧水型原子力プラントを模したプラント模型である。このプラント模型は想定外事象等に対応する研究のために準備した。

評価の目的は、将来型の自律型原子力プラントにおける運転管理者の監視のための支援機能の確認にある。今回、運転対象としては当研究所で作成したプラント模型を設定し、あらかじめシナリオ化されていない現実に発生する不具合事象を検討対象とした。被験者がHMIシステムを監視し、監視中に起こった異常事態の認識及び故障箇所を正しく同定できるかどうかという実験を行い、その結果を評価の指針とした。そのための事故状態として、①定常運転中に異常事態が発生するが異常の拡大を極力制限する、②定常運転中に異常事態が発生し異常が拡大していく、の2種を取り上げた。被験者の挙動については、実験中研究者がそばについて観察を行い、同時にビデオ撮影も行い記録し評価の資料とした。さらに被験者自身による発言も行ってもらった。各実験後に、被験者にはアンケート調査を行った。このアンケート調査票により、異常状態の認識、故障箇所の同定、さらに現在のHMIに不足している必要な機能についての調査を行い評価に用いた。

船用機器の信頼性と運航への影響

Reliability of Ship Equipment and Influence of Failures  
 on Navigation

桐谷伸夫

平成12年9月

日本航海学会論文集 第103号

「船舶信頼性調査委員会」(1981~1992年)により開始された船用機器の信頼性調査に関する調査研究活動は、運輸本省と当所の業務として引き継がれて継続実施されてきた。信頼性調査の実務に関しては社会情勢や関連業界そのものの変化もあり終了に至ったが、これまでに収集されたフィールドデータの解析・研究は当所において今もなお継続されており、研究成果の発表や情報公開として行政機関や関連団体へ情報の提供を行うことにより社会的な還元が図られている。

これまでに収集整理された船用機器の故障発生や警報発生に関わるフィールドデータは約11万4千件の膨大なものであることから、船舶信頼性情報データベース(SRIC Database System)として構築され当所において運用管理されている。データベース・システム自体はコンピュータ技術の進歩に伴い、高機能化を目的とした再構築が実施されてきた結果、最新のシステムはパーソナル・コンピュータをハードウェアとしたリレーショナル・データベース・システムとなっている。このSRICを利用して船用機器の故障発生と船舶の運航へ与える影響の評価検討を実施した。故障発生が本船に及ぼす影響には、機関の減速・停止あるいは出港遅延といった直接的な影響と同時に故障機器修復のために投入される作業負担によってもたらされる人的時間的損失に基づく間接的な影響が明かとなった。船舶は陸上の施設と異なり、外部からの支援を容易に得ることは困難である。すなわち、船舶の安全運航実現は人的時間的に総量の限られた固有の配員資源を効率的に使用することが前提となっている。特に頻出する機器故障を対象としたクラスタリングを実施した結果、人的時間的損失を多くもたらすものとして分類されたクラスターを代表する故障機器は、主機系付属機器や諸管弁、海水、蒸・排気系機器であることが明らかとなった。従って、これらの機器の信頼性向上の取り組みと共に、配員資源の効率的な使用による運航への影響軽減の立場からも最適保全計画の立案や修復作業の検討が重要と考えられる。



〈原子力技術部〉

**Shielding Design for Steam Generator of Advanced Marine Reactor MRX**

改良船用炉MRXの蒸気発生器に対する遮蔽設計

小田野直光、山路昭雄、石田紀久

平成11年10月

Special Issue of the Journal of Nuclear Science and Technology

船用炉にとって軽量小型化は経済性等の観点から重要な課題である。日本原子力研究所で工学設計が進められている改良船用炉MRXは一体型炉と水漬け格納容器を採用することにより、受動安全性と軽量小型化を兼ね備えた原子炉を達成している。MRXの遮蔽設計は、格納容器の厚さおよび直径、原子炉容器の軸方向長さの決定等に重要な役割を果たし、軽量小型化に大いに貢献している。すなわち、①水漬け格納容器の形状を主として遮蔽の観点から適切に決定することにより、通常格納容器外側に設置され原子炉プラント重量・容積の大きな部分を占めているバルク遮蔽を不要としたこと、②蒸気発生器に適切な遮蔽を施すことにより蒸気発生器を炉心近傍斜め上に設置して原子炉容器の軸方向寸法を短くし、プラントを小型化するとともに、蒸気発生器からの二次系配管が通じている機関室の線量当量率を配管遮蔽を施すことなしに周辺監視区域に設定できるまで低減させ乗組員の作業性の向上と被曝低減を図ったこと、等である。MRXでは遮蔽のみを目的としたバルク遮蔽体は設けず、遮蔽、受動安全性の確保、原子炉容器の支持等の役割を有する多目的の構造物として設け、プラント軽量小型化を図っている。蒸気発生器に対する遮蔽では、蒸気発生器内の二次系での<sup>16</sup>Nの発生を低減させる目的で炉心層を厚くするとともに炉心と蒸気発生器の間に鋼製遮蔽体を設け、蒸気発生器に到達する10MeV以上の高速中性子を低減させている。同遮蔽体は原子炉停止時に格納容器内作業を行う場合の被曝防止にも役立つ。MRXは熱出力が原子力船「むつ」の2.8倍であるが、原子炉プラントの重量は「むつ」の0.5倍、格納容器の大きさは0.7倍（「むつ」では格納容器の外側に大きな二次遮蔽体があり、MRXは格納容器外側の体積、「むつ」は二次遮蔽体外側の体積で比較すると、MRXは「むつ」の1/4となる）となり、大幅な軽量小型化が達成されている。

**Measurement of Dose-Equivalent Rates around Cask and Monte Carlo Analysys with Actual Configuration of Fuel Basket**

キャスク周囲の線量当量率の測定と実形状燃料バスケットを用いたモンテカルロ解析

植木紘太郎、成山展照、大橋厚人、山路昭雄

平成11年10月

Proceedings of the 9th International Conference on Radiation Shielding

本研究は、TN-12A使用済燃料輸送容器周囲のガンマ線及び中性子線量当量率を電離箱型サーベイメータ及び減速型中性子サーベイメータを用いてそれぞれ測定し、その結果をモンテカルロ法によって解析したものである。

モンテカルロ計算コードMCNP4Bを用い、アルミ合金製の燃料バスケットに関し、2つのモデル化を行った。一つは、12本の使用済燃料を収納するバスケットを詳細にモデル化した計算であり、もう一つは、SnコードDOT3.5で採用されている様な均質モデルである。さらに、両方の計算とも、使用済燃料集合体のZ-軸方向の燃焼度分布を考慮した中性子及びガンマ線線源の発生が考慮されている。例として、使用済燃料集合体の上下両端部燃焼度が中央の85%であれば、そのおける線源強度はガンマ線は中央の85%であるのに対し、中性子線源強度は1/2に低減する。

燃料バスケットの均質モデルと実形状モデルを用いてモンテカルロ計算を行ったところ、両者の計算結果に本質的な相違が見られた。そして、実形状モデルを用いた計算ではガンマ線線量当量率に対しては67%、中性子線量当量率に対しては80%それぞれ均質モデルよりも低い値を示した。この主な要因は、均質モデルでは線源の発生が使用済燃料とアルミ合金を均質に混ぜた全領域から一様に発生するのに対し、実形状モデルではアルミ合金で造られたバスケットの内側から発生するので、このアルミ合金の遮蔽効果が考慮されるからである。そして、アルミ合金の遮蔽効果は中性子よりもガンマ線に対してより大きいので、ガンマ線線量当量率に対しては67%、中性子線量当量率に対しては80%という相違が現れたものと推論される。

燃料バスケットの実形状モデルを用いた計算を行ったことにより、実験値と良い一致を得ることが出来た。輸送容器の中央におけるC/Eは中性子に対してはほぼ1.0であり、ガンマ線ではおよそ1.25であった。このように、中性子に対して特に優れた結果になっているが、これは、使用済燃料集合体のZ-軸方向の燃焼度分布を考慮したことに因るものと考えられる。

Measurements and Calculations of the Dose  
Distribution from Co-60 Gamma Rays in Multiple  
Straight Ducts through Iron Shields

Co-60  $\gamma$  線に対する鉄遮蔽体複数直円筒ダクト内の  
線量分布測定および解析

成山展照、植木紘太郎、友成英和

平成11年10月

第9回遮蔽国際会議プロシーディングス

遮蔽体内に配管が複数本接近して配置された場合の放射線線量を評価する場合、他の配管から散乱されてくる放射線を考える必要がある。点等方線源に対するこうした影響は明らかでなく、ストリーミング簡易式や計算コードの適用では多くが単一ダクトを仮定して行われる。本研究では、Co-60点等方線源を用いて、複数直円筒ダクト付き遮蔽体内の線量分布を測定し、モンテカルロコードMCNP点減衰核コードQADにより解析を行った。

照射は、船研原子力第2実験棟にて行った。用いた線源は、45度円錐方向内にコリメートされた強度 $6.13 \times 10^8 \text{Bq}$ の $^{60}\text{Co}$ である。遮蔽体は鋳鉄から成り、大きさは $50 \times 50 \times 25 \text{cm}$ 、縦横4cm間隔に直円筒ダクトが100本並んでいる。9.5、20mm種のダクト径を用意し、線源から30cmの位置に遮蔽体を設置した。ダクトはどれも線源を直視しない。また、線量計には、 $3 \times 3 \times 0.4 \text{mm}$ のLif:Mg、Ti、P熱蛍光線量計(GR-200)を用いた。照射前に $240^\circ \text{C}$ で10分間アニーリングし、電子平衡をとるため厚さ3mmのテフロン2枚の間に素子をはさんだ上、ダクト内の5cm深さごとに固定した。

計算は、モンテカルロ輸送計算コードMCNP4Bを用いて行った。25keVまでの光子輸送をシミュレーションし、検出器にはpoint detector estimatorを用いた。ダクト径9.5mmの場合、計算の統計誤差は最大8%であり、測定値と計算値は誤差内で一致した。ダクト間の相互影響、すなわち、他のダクト壁の散乱成分の影響はダクト1本のみ計算値と比較することにより最大30%程度であることが明らかになった。一方、ダクト径20mmの場合はダクト1本のみの場合と、すぐ近傍の8本のダクトまでを考慮した場合も計算した。その結果、後者と実験値との差はなかったが、前者と実験値との差は10cmより深い位置において次第に大きくなり、出口では最大60%ほどになることが示された。すなわち、他ダクト影響は、すぐ隣のダクトのみによることが明らかになった。さらに、MCNPの入力にFlagging Cellを用いることにより、他ダクトの影響はそのうち非散乱線が検出器を含むダクトのすぐ内側のダクト入り口を横切る場合に現れ、それ以外は無視できることを確認した。また、QADコードは、実験値を安全側に評価したが、出口では加小になる値も示した。

Research and Development of Nuclear Ship in Japan :  
Past and Present

日本における原子力船の研究開発：過去と現在  
山路昭雄、落合政昭

平成11年12月

Proceedings of Murmansk International Forum

日本における原子力船の研究開発は日本原子力船研究協会と当所とで開始された。両所で行われた調査・研究に基づいて、原子力第一船「むつ」を開発・建造する機関として日本原子力船開発事業団(以下、事業団)が1963年に設立された。「むつ」は総トン数8,241トン、長さ130m、幅19mの原子動力実験船である。原子炉は微濃縮ウラン(4.44wt%及び3.24wt%)を用いた加圧水型炉であり、熱出力は36MWである。1974年の出力上昇試験中に、上甲板にて放射線漏洩が検出された。この原因は原子炉容器と一次遮蔽体との隙間をストリーミングする中性子であることが判明した。遮蔽改修後に事業団は日本原子力研究所に統合された。1990年に出力上昇試験は再開され、1991年に成功裡に終了した。引き続いて実験航海が約1年行われ、全ての実験を1992年に終了した。出力上昇試験再開の大幅な遅れは政治的・社会的に難しい問題であることによる。現在、「むつ」は原子炉部分の解役を終了し、船体を再利用して通常動力による海洋観測船として活躍している。「むつ」プロジェクトに加えて、日本造船研究協会と当所は1970年代から一体型船用炉の研究を行い、事業団は1975年から次世代型船用炉の研究を開始した。原研は1985年に事業団の研究及び「むつ」プロジェクトを引き継いだ。この研究を通じてMRXとDRXと名付けた2つのタイプの船用炉が次世代炉として有望な炉型とみなされた。前者は極地観測船、超大型コンテナ船、超高速コンテナ船を含む大型原子力船用のプラントである。この原子炉の炉心損傷頻度は約 $10^{-7}$ /原子炉・年であり、陸上設置のPWR原子力発電所に比べて低い。コスト評価がMRXを搭載した高速大型コンテナ船の太平洋航路について行われ、ある条件の下では、原子力船はディーゼル船よりも経済的に優位であることが明らかにされた。後者は深海科学調査、審査、基地建設のための動力源用の原子炉プラントであり、バッテリー動力による深海調査船の深海における活動時間が数時間に限られていることの改善を図ること等を目的としている。

Utilization of Nuclear Power in Oceans and Its  
Perspective

海洋における原子力利用とその将来

山路昭雄

平成12年2月

Proceedings of International Workshop on Utilization of  
Nuclear Power in Oceans

1959年以来、ロシアは多く原子力砕氷船を有し、現在は新しいタイプの2隻の原子力砕氷船の建造を計画している。日本では、改良船用炉の設計研究とその基礎的研究が日本原子力研究所、当所および大学にて行われている。原研にて概念設計が行われた改良船用炉MRXは受動的崩壊熱除去システムを有する軽量・小型の一体型PWRである。日本造船協会および日本原子力産業会議は原研の委託により「実用原子力船の設計に関する検討」および「原子力船の運航に係る全体システムの検討」を行った。日本造船協会の委員会は次世代の実用原子力商船として、排水型大型高速コンテナ船を推奨した。日本原子力産業会議の委員会は改良船用炉MRXを搭載した大型高速コンテナ船のコスト評価を太平洋航路について行い、将来のある条件のもとでは原子力船はディーゼル船に比べて経済的に優位になることを示した。また、日本造船協会の委員会は、深海調査が地球の科学調査にとって極めて重要であることから、将来有望な特殊用途原子力船として深海調査船を推奨している。ロシア、日本、米国を含む多くの国で深海調査のための原子炉の研究が行われている。米国では、原子力潜水艦を海洋学術調査研究用に改造し、Scientific Ise Expedition (SCICEX) プログラムの中で、1995から1999年の間、北極圏の海洋調査に原子力潜水艦が使用された。

浮体式原子力発電所に関しては、ロシアにおいて遠隔地用コジェネレーション原子力プラント“Pevek”の設計が船用炉に基づく原子炉KLT-40Cを用いて完了しており、工場にて部品の製作が現在行われている。日本では造船技術を利用した浮体式原子力発電所の基礎的研究等が行われている。海水脱塩装置を備えた浮体式原子力発電所の設計は多くの国で行われている。

日本では、原子力発電所から青森県六ヶ所村の核燃料サイクル施設への使用済燃料および低レベル放射性廃棄物の海上輸送が行われている。また、1969年以来、日本から欧州への使用済燃料の海上輸送が160回以上行われている。高レベル放射性廃棄物は欧州から日本へ海上輸送されている。欧州から日本へのMOX新燃料輸送は昨夏開始された。

モンテカルロ法によるJCO臨界事故に伴う  
放射線被曝線量の推定Monte Carlo Estimation of Exposure Dose due to the  
JCO Criticality Accident

植木紘太郎

平成12年3月

日本原子力学会 2000年春の年会予稿集

平成11年9月30日、茨城県東海村のJCOにおいて臨界事故が発生し、付近住民が放射線被曝を受けた。本報告はモンテカルロ法により、線源から1,250mまでのスカイシャイン解析を行い、線源から95mの位置でサーベイメータによる測定値で規格化し、実際の被曝線量を推定した。

以下のような計算条件を設定した。

- ①線源条件 中性子源 :  $^{235}\text{U}$ のWatt核分裂スペクトルを持った点等方線源。  
ガンマ線源: ORIGEN82コード計算した使用済燃料の冷却時間ゼロにおけるガンマ線スペクトルの点等方線源。
- ②計算モデル 線源が一辺10mの立方体の中心に置かれ、その周囲に比重0.5の軽量コンクリートの壁(厚さ40cm)、床及び天井(それぞれ厚さ20cm)が設置されているものと仮定。大気は線源より半径1,500mまで考慮、また地面は厚さ25cmの土とし、同じく半径1,500mまでモデル化。
- ③線量当量率換算係数: 中性子及びガンマ線ともICRP51を使用。

連続エネルギーモンテカルロコードMCNP4Bを用い、線量当量率分布を線源から半径1,250mまで求めた。線源から95m地点において測定された中性子線量当量率 $3860\mu\text{Sv/h}$ で規格化すると、250m地点では $317.4\mu\text{Sv/h}$ となる。そして、450m地点では $27.5\mu\text{Sv/h}$ 、950m、1,250m離れると0.435、 $0.043\mu\text{Sv/h}$ にそれぞれ減衰する。また、モンテカルロ計算に関しては、計算値の相対標準偏差(fsd)はWeight Window Importanceを採用した結果、650m地点までが1%以内、1,250m地点においても2.5%であった。EstimatorにはRing Detectorを用い、計算時間はDEC alpha 500で6時間であった。

### 校正におけるTLD素子中の吸収線量評価

Estimation of absorbed dose in TLD materials at the calibration

成山展照

平成12年9月

日本原子力学会2000年秋の大会予稿集

放射光や重イオン等の加速器の建設、運転により、従来の原子力において扱われてきた放射線とはエネルギー、粒子の異なる放射線源が増加し、それにつれて放射線のLETの違いに起因すると思われる効果への関心が増大してきた。特に、放射線線量計は実用的にエネルギー応答の点からも重要なため、従来より多くの研究がなされてきた。そうした研究における照射実験は、実用的なエネルギー応答測定とは異なり、TLD素子材料自体が示す現象を対象とするため、素子自体に吸収されるエネルギーを求めなければならない点に特徴がある。たとえば、空気吸収線量 1 Gyの照射場において場合にTLD素子自体にはどれだけのエネルギーが吸収されるのか評価する必要がある。放射光やイオンは1次粒子が素子中に与えるエネルギーが大きく、また2次粒子は1次粒子に比べて飛程が極端に短いため、通常フィルターやケースから発生した2次粒子がTLD素子に与えるエネルギーは1次粒子が直接与えるエネルギーに比較して無視できる。しかし、Co-60やCs-137 $\gamma$ 線を用いた校正時には、TLD素子に与えられるエネルギーはほとんど周りから発生した2次電子によるものである。つまり、周りにあるフィルターやケースの影響あるいは電子平衡を達成するために用いるプラスチックやテフロン板から発生する電子を考慮しなければならない。

こうした $\gamma$ 線照射下における壁材料の影響は、電離箱の分野において詳細に研究がなされており、TLD中の吸収線量は、式 $D_{TLD} = f_{TLD,wall} (\mu_{en}/\rho)_{wall} / (\mu_{en}/\rho)_{air} D_{air}$ を用いて空気吸収線量 $D_{air}$ から求まる。ここで $f_{TLD,wall}$ の値は空洞理論から求まり、 $\mu_{en}/\rho$ は質量エネルギー吸収係数を表す。もし、壁の影響を無視できる場合には、空気吸収線量にTLD素子と空気のエネルギー吸収係数の比を単純に乗じるにより $D_{TLD}$ が得られる。しかし、無視できるかどうか不明の場合には $f$ の値を評価しなければならない。本研究の目的は、この $f$ の値を計算し、 $D_{TLD}$ と $D_{air}$ の関係を明らかにすることにある。

TLDとしてフッ化リチウム、壁材料としてテフロン、アクリル、ポリスチレン、パイレックスガラスを選択した。 $f$ 値はTLDの大きさに依存するので、厚さを変えて計算を行った。空洞理論計算には $f = df_1 + (1-d)$  $f_2$ で表されるBurlinの理論を用いた。 $f_2$ は小さい空洞に対する $f$ 値、 $f_1$ は大きい空洞に対する $f$ 値、 $d$ は重み関数を表す。 $f_2$ 値は、連続減速近似に基づいて計算を行った。また、モンテカルロコードを用いた $f$ 値の計算も行った。

た。

テフロン、アクリルなどは、そもそも空気やフッ化リチウムと比較的近い実効原子番号をもつため校正に用いられる。そのため、 $f_2$ と $f_1$ の差自体はそれほど大きくはなく、パイレックスガラスの差が3.4%、ポリスチレンの差が3.6%程度である。すなわちTLDの厚さに関わらず、 $f$ 値は $f_2$ とそれ以上異なることはない。この値は、Co-60、Cs-137ともほぼ同じであった。また、0.38 mm厚さのTLDに対して $d$ は0.437で、大きな空洞の成分と小さな空洞の成分は半々であった。しかし、薄くなるほど $f_2$ の寄与が大きくなり、単純に空気吸収線量にTLD素子と空気のエネルギー吸収係数の比を乗じるだけでは3-4%の誤差につながる事が明らかになった。この誤差は、放射線のエネルギーに依存してたとえばTL発光効率が20%増加する素子に対してよりも、従来効率が放射線により変わることはないとしてきた素子に対して重要であり、こうした厳密な評価が必要と考えられる。

モンテカルロ法によるJCO臨界事故時の  
中性子スペクトル計算

Monte Carlo Calculation of Neutron Spectrum at the JCO  
Criticality Accident

植木紘太郎、山野直樹

平成12年9月

日本原子力学会2000年秋の大会予稿集

平成11年9月30日、茨城県東海村のJCOにおいて臨界事故が起きた。本報告はモンテカルロ法を用い、JCO臨界事故現場周囲にある試験棟等の形状並びに線源から2,500mまでの大気層をモデル化した計算を行い、中性子エネルギースペクトルを求めた。沈殿槽から発生した核分裂中性子線源強度は、JCO事務棟2階の窓際に置いた中性子レムカウンターによる測定値、550 $\mu$ Sv/hで規格化した。

次のような計算条件を設定した。

- ①線源条件 中性子源：沈殿槽から<sup>235</sup>U Watt核分裂スペクトルを持った中性子が等方に発生する。
- ②計算モデル 沈殿槽が置かれた転換試験棟を始め、その周囲にある第一ウラン試験棟～第四ウラン試験棟、第一固体廃棄物保管庫～第四固体廃棄物保管庫、その他、コールド試験棟、事務棟等の建家の形状を出来るだけ詳細にモデル化した。大気は沈殿槽から半径2,500mまで考慮、また地面は熱さ25cmの土とし、同じく半径2,500mまでモデル化した。

一例として、連続エネルギーモンテカルロコードMCNP4Bで計算した沈殿槽から350mにおける中性子エネルギースペクトルを示す。本計算に際しては、転換試験棟付近の特定点における計算には点検出器を、300m以上離れた位置においてはリング検出器を用いた。また、モンテカルロ計算における分散低減のために、各建家等を詳細にセル化し、各セルにそれぞれ適切なWWI (Weight Window Importance) を設定した。その結果、ほとんどのエネルギービン (10<sup>-9</sup>~20 MeVを140ビンに分割) のFSDが10%以下になり、信頼性のある結果が得られた。

(氷海技術部)

サンドイッチ複合材の低温域における衝撃挙動  
Impact Behavior of Sandwich Composites at Low  
Temperatures

前田利雄、櫻井昭男

平成12年10月

第25回復合材料シンポジウム講演要旨集

地球温暖化現象などの地球環境問題がクローズアップされている中で、化石燃料の消費から脱却した将来のエネルギー源の一つとして、太陽光、風力、波力等を利用した水素エネルギーシステムが考えられている。この技術開発には、液化水素を効率よく輸送できるタンカーの開発が解決すべき重要な課題の一つとなっている。そこで、断熱性のある構造材として超低温域における使用を目的に、CFRPと硬質ウレタンフォームとのサンドイッチ複合材について低温落錘三点曲げ衝撃試験を行い、動的強度の温度依存性、衝撃破壊挙動等を調べた。本試験に供したサンドイッチ平板は、心材に発泡剤の異なる3種類の硬質ウレタンフォームを使用した。それらのかさ比重は約0.1g/cm<sup>2</sup>とし、厚さはすべて10mmとした。また、表面材のCFRPはカーボクロス (317g/m<sup>2</sup>) 及びビニルエステルを使用して厚さを1.5mmとした。したがってサンドイッチ平板の全厚は13mmとなる。動的強度の測定は、硬質プラスチックに関するJIS K7211、計装化衝撃試験のための報告書等を準用して製作した落錘衝撃試験機を用いて、エッジワイズ及びフラットワイズ方向の3点曲げ衝撃試験を行い、衝撃破壊時の最大荷重、たわみ量、吸収エネルギーを算出して比較検討した。その結果、サンドイッチ平板のエッジワイズ方向の荷重挙動は最大荷重後、破壊の進展にしたがい急激に低下するが、ある値で再度上昇した後、また低下上昇を繰り返しながら徐々に減少する。この時の破壊様相は支持側の引張りによる破壊と打撃側の圧縮による破壊が混在した様相が見られた。破壊挙動の温度依存性は、最大荷重が-150 $^{\circ}$ C付近までは温度の低下に伴いやや上昇するが、それ以下の温度では減少する傾向が見られる。これに対し、たわみは温度の低下とともにやや上昇する傾向を示した。吸収エネルギーはたわみと同様の傾向を示し、荷重よりたわみが依存していることがわかった。また、衝撃挙動の供試材による違いはそれほど見られなかった。

フラットワイズ方向の荷重挙動はたわみの増加と共に上昇し、最大荷重後ある値まで急激に減少し、その後も上下変動を繰り返しながら徐々に減少する。試験後の破壊様相は打撃側表面材が打撃部で完全に破断し、支持側の表面材も殆どが中央で層間剥離を伴って破断している。心材は表面材との界面あるいは界面近傍の心材内で破壊している。

〈大阪支所〉

**Stress Singularity of Edge - Bonded Dissimilar Elastic Wedges with a Slightly Undulating Interface**

接着界面に微小粗度を有する異種弾性接合体端部の応力特異性について

千秋貞仁

平成11年9月

第6回SAMPE先端材料技術国際会議講演論文集

異種材料を（接着）接合する場合、被着体接合部表面に予め機械研磨等で粗度を設けておけば、接着界面強度が向上することが実験的・経験的に知られている。特に疲労強度については、接着界面端部への応力集中が繰り返し荷重付加による疲労き裂発生寿命を支配する重要因子となる。本研究は、接合界面粗度が端部の応力特異性（応力の集中形態）と破壊力学パラメータに与える影響を理論的に考察したものである。

D. B. Bogyは、平坦な（接着）接合界面を持つ異種材接合体を、2次元半無限平面上の等方・均質弾性体の静的境界値問題にモデル化し、極座標表示のAiry応力関数を用いてその解を求め、端部応力特異性について詳細な議論を行った。接合界面形状が平坦でない場合は、理論解析を求めることが出来ない。そこで、界面に微小な粗度を有する剛体-弾性体接合体について、変位と応力場に以下の重ね合わせを適用した。

$$U_i(r, \theta) = U_i^0(r, \theta) + \eta V_i(r, \theta),$$

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \sigma_{ij}^0(r, \theta) + \eta \tau_{ij}(r, \theta)$$

ここに $U_i(r, \theta)$ 、 $\sigma_{ij}(r, \theta)$ は界面に微小粗度を有する剛体-弾性体接合体について、 $U_i^0(r, \theta)$ 、 $\sigma_{ij}^0(r, \theta)$ は平坦な接合界面を持つ剛体-弾性体について、 $\eta V_i(r, \theta)$ 、 $\eta \tau_{ij}(r, \theta)$ は界面の微小粗度に起因する攪乱変位、応力場のそれぞれについての極座標成分を表す。また、 $\eta$ は界面形状による微小な定数である。 $U_i^0(r, \theta)$ 、 $\sigma_{ij}^0(r, \theta)$ はBogyの基本解により既知なので、攪乱変位場 $V_i(r, \theta)$ のみを求めれば、トータルの変位場が得られる。次に、界面の粗度は微小であるとの仮定を導入し、界面上の完全接合条件をテーラー展開して線形項まで採用すると、以下の近似の接合条件が得られた。

$$V_r(r, 0) = -af^2(AN_1 + BT_1),$$

$$V_\theta(r, 0) = -af^2(CN_1 + DT_1)$$

これより、 $r \rightarrow 0$ （端部に近づく）場合の界面上の攪乱場の応力特異性は、代表長さ $a$ 、界面の形状を表す関数 $f$ 、基本解の強さ $q$ 、材料と接合端部形状による定数 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ と荷重モードによる定数 $N_1$ 、 $T_1$ によって定まることがわかった。また、右辺の-は、粗度による攪乱場が端部応力集中の強さを和らげるような場合の存在可能性を示唆している。

(618)

**Simulation Experiment of CO<sub>2</sub> Storage at 3500 m Deep Ocean Floor**

二酸化炭素の3500m深海底貯留模擬実験

綾 威雄、山根健次、小島隆志

平成12年8月

Proceedings of the 5th Int. Conf. on Greenhouse Gas Control Technologies

モンテレー湾海洋研究所のBrewer博士は、1998年、3,627mの深海底に設置した6リットルのピーカー内に液体二酸化炭素を貯留する実海域実験を行い、間欠的に液体二酸化炭素がピーカー外にあふれ出す膨張現象を発見し、Science誌（248巻5416号、1995-5）に発表した。

観察による体積膨張の推定値は元の液体二酸化炭素の10倍を越えることから、この現象は、当所が過去10年間にわたって基礎研究を続けてきた二酸化炭素深海底貯留法の実現性検討に大きな影響をもたらすものと考えられる。そこで、深度4,000m対応の深海底模擬装置を用いて再現実験を行い、その防止対策を検討した。著者らは、液体二酸化炭素がハイドレート化する際の体積膨張が、分子量と水和数（一つの二酸化炭素分子を包み込むために要する水の分子数）から、3.35倍となることを見出したが、この数値は実海域実験における体積膨張よりはるかに小さい。この事実は、液体二酸化炭素を押し上げているハイドレートには大量の海水が含まれていることを示唆している。

以上の考察を基に、実験は二つのケースについて行われた。一つは実海域実験と同様、ハイドレート膜で被われた二酸化炭素液泡を一つずつ上方から落としてピーカー内に溜める方法であり、もう一つは、液体二酸化炭素をピーカーの底から溜める方法である。前者では、実海域実験と同じような膨張現象が観察されたのに対し、後者では100日を越え、ハイドレート膜で被われた液体二酸化炭素が安定して存在し続け、体積膨張は一切見られなかった。前者では、液泡が一体化しないため、実海域実験で見られたのと同様の海水の通路ができ、ピーカー底部でハイドレートが生成するに要する大量の水分子が供給されたものと推論できる。つまり、後者の実験のように、海水の通路ができない方法で二酸化炭素を溜めると、貯留法にとって望ましくない膨張現象を防止できることが期待できる。

なお、当所が特許を取得した新二酸化炭素投入法COSMOSにおいては、直径1mという大液泡が海水通路を押しつぶすものと予想され、その実現は可能と考えられる。

## Two Types of Strength Abnormality of CO<sub>2</sub> Hydrate Membrane

CO<sub>2</sub>水素化物の2種類の強度異常について

山根健二、綾 威雄、小島隆司、成合英樹

平成12年 8月

Proceedings of the 5th Int. Conf. on Greenhouse Gas Control Technologies

地球の温暖化傾向を緩和する手段として注目されているCO<sub>2</sub>海洋処理法を評価するためには、液体CO<sub>2</sub>と海水との界面に生成する水素化物膜の性質を明らかにすることが不可欠である。中でも、CO<sub>2</sub>水素化物膜の力学特性の解明は深海底窪地に液体CO<sub>2</sub>を貯留する方法の実現可能性を評価するために重要である。著者らが最近、高耐圧のDu-Nouy型表面張力計を用いて高精度計測に成功したCO<sub>2</sub>水素化物膜強度データは、解離温度近傍での強度がそれより低温側における強度のおよそ10倍という異常を示していた。更に、飽和濃度直近において、解離温度近傍での膜強度異常に匹敵する、新たな強度異常が出現することが判明した。CO<sub>2</sub>水素化物のこの異常な強度特性は、深海底の窪地に貯留されたCO<sub>2</sub>表面の水素化物膜と海水との界面が飽和濃度となることから、海洋処理評価において考慮しなければならない事項である。

著者らは、これらの強度異常のメカニズムを説明するために、水素化物の生成・解離確率を与える基本モデルの提案を行ってきた。著者らが提案したモデルは、従来、定性的にこの強度異常の説明が可能であったが、定量的には未確定の項の存在によって未完成なものとなっていた。今回、このモデルの中に含まれる未確定項である生成・解離確率にFermi-Dirac分布関数の適用を試み、本モデルが定量的にも解離温度近傍における強度異常の説明が可能であることを示した。また、この事実は水分子とゲスト分子で構成されるどんな種類の水素化物にもおきる普遍的な強度異常の可能性がある。

また、新しく見つかった強度異常は、飽和濃度直近の水中ではストレスによって膜が成長しないということを示しており、未飽和水中における膜の自己再生を説明するために、著者らによって提案された「自由水分子モデル」の考えを支持するものである。

## 船用アングル弁の強度実験及び数値解析

Strength Experiments and FEM Analysis on Marine Angle Valve

伊飼通明、綾 威雄、猪野義隆、畑中哲夫、太田正博

平成12年 8月

(社) 日本バルブ工業会

「バルブ技報」第15巻第2号

ISO規格に適合した船用玉形弁の新規格作成のための各種強度実験等を行ってきたが、玉形弁と対をなす弁であるアングル弁についても造船業界よりISO規格に適合したJIS規格化の要望が出された。しかし、アングル弁についての強度実験・解析データがほとんど見られないことから、玉形弁と同様の方法により、アングル弁の新規格化の基礎資料を得ることを目的とした強度実験、外力作用実験、弁座漏れ実験及び数値解析を行った。そして、アングル弁は玉形弁と弁座近辺の弁箱形状が似ていることから玉形弁の結果と比較しつつ、これらの実験結果をまとめた。

これらの実験結果から、以下のことが解った。

アングル弁は、内圧が作用しても球状部ではほとんど応力が発生していないことが明らかとなった。また、圧力が作用しても球状部ではあまり応力が増加しないことが解った。このため、球状部の肉厚を薄くすることによる軽量化の余地が残されていると考えられる。バルブ閉止性能を示す漏れ実験結果については、一般的にアングル弁は内圧に対しては漏れにくい構造を有していると言われているが、これは内圧に対してだけあって、垂直方向の外力が作用した場合には、玉形弁より漏れ易い構造であることも解った。一方、玉形弁と異なり、アングル弁は内圧及び外力が作用するときに発生する応力は、球状部と円筒部の接続部分に集中しており、設計上この部分に発生する応力に注意する必要がある。

船用油こしの強度実験及び数値解析結果  
Discussion on Strength of Marine Oil Strainer  
—Experiment & FEM Analysis—  
伊飼通明、綾 威雄、花崎 襄、西岡成憲  
松本克也  
平成12年 8 月

(財) 日本船舶標準協会、「船舶標準」 8 月号

こし器は、燃料油、潤滑油、海水等に含まれる不純物を取り除く機器であり船舶に多く使用されている。こし器には、水こしと油こしの2種類あり、今回の実験に用いたこし器は油用のもので、船舶内の燃料油配管系に用いられているものである。油こしには、単式と複式があり、今回実験に用いたものは予備のこし筒が付いた複式のH形油こしと呼ばれるものである。本報告は、JISF7208船用H形油こしの見直し改訂時に口径25A~40Aについてメーカー間の統一した新規規格化の要望を受け、規格化原案を作成すべく、(財) 日本船舶標準協会機関部会配管ぎ装品専門分科会のこし器関係のメーカーが中心となって強度実験、破壊実験及び数値解析を行い、これらの結果をまとめたものである。

以上の実験結果から、安全率が1.55から2.22と言う低い値であったが、使用圧力0.4MPaの5倍の圧力である2MPaの圧力で実験を行っていること、さらに油こしを破壊するには22倍以上の圧力を作用させる必要性があることから、本実験で油こしの安全性が十分に確認された。