

所 外 発 表 論 文 等 概 要

〈構造強度部〉

Expected Effectiveness of Double Side Structures in Ship Collision

船舶衝突時の二重船側構造の有効性

有田喜久雄、庄司邦昭

平成7年9月

Proceedings of MARIENV'95

(International Conference on Technologies for Marine Environment Preservation)

海難事故のうちで衝突事故は、船舶の安全だけでなく海洋環境に大きな影響を与える。そのため、特に使用済み核燃料運搬船などの特殊船では、衝突事故に対する防護として二重船側が採用されてきた。また、一般のタンカーにおいても、海洋汚染防止の観点から船体を二重船殻にするようになったが、衝突に対して船側を二重にすることの有効性の評価については必ずしも十分なされていなかった。

本研究は、衝突に対する二重船側の有効性を船体構造の三つの面から検討した。第一は船側構造における吸収エネルギーの大きさについてである。対象衝突船を決め、その運動エネルギーに相当する吸収エネルギー量を設定したときに、衝突船突入量の累積分布により、船側における衝突防護の比較を行った。被衝突船幅の1/20以下の通常の二重船側幅に相当する船首突入量の確率値でみると、防護構造間で差が大きくなることがわかった。第二として、船側の強度特性（荷重-船首突入量関係）を変えた時に、衝突船首突入量の確率密度がどのように変わるかを示した。これにより、荷重がほぼ一定になる強度特性のものでも、船側において船首突入による損傷を限定できる可能性が高くなることがわかり、二重船側の衝突に対する有効性が大きくなることがわかった。第三は船側に生じる破口の大きさの問題である。破口の大きさを損傷データから累積分布として示した。そして、いくつかの累積値に対する破口の大きさの二重船側幅による減少率を示し、二重船側幅により内板に生じる破口を小さくできることを示した。

〈機関動力部〉

タービン内再燃水素燃焼ガスタービンの研究(第4報)

Internal Reheat Gas Turbine with Hydrogen Combustion(4th Report)

春海一佳、菅進、平岡克英、

井亀優、城田英之、森下輝夫

平成7年9月

日本ガスタービン学会、第10回ガスタービン
秋期講演会（新潟）講演論文集

タービン内で水素を燃焼させて作動ガスを再熱することによって、近似的に等温膨脹が可能となる。これを著者らはタービン内再熱と名付け、これを実証するために単段のタービン内再燃水素燃焼タービンを試作し、運転試験を行ってきた。

既に、設計流量である主空気流量 2.6 kg/s 及びそれを約10%下回る 2.3 kg/s の条件下で水素による再熱運転を行い、水素燃焼効率、排出ガスの組成、タービン出力等を計測し、この条件下においては100%の水素の燃焼効率が得られることを示しているが、今回、設計流量を約10%上回る主空気流量 2.9 kg/s の下で追加実験を行い、この条件においても、再燃水素流量の広い範囲に渡ってほぼ100%の再燃用水素の燃焼効率を得ることができていることを確認した。また、水素再熱によって、発生する NO_x 総量は変わらないが、 NO/NO_x 比は低下し、またその値が残存水素濃度と明瞭な相関関係を有することがわかった。

出力計測の結果、すべての実験条件下において再熱による比出力の上昇が見られた。一方、得られる比出力は設計値よりかなり小さい。その主たる原因として、主空気のタービンケーシング内部への流入に伴うノズル通過流量の減少などにより、設計時の膨脹比が得られなかったことが挙げられる。

述べ11時間35分にわたる再燃水素燃焼運転の後に、内視鏡によりタービン内部を観察した結果、水素燃焼による過熱が心配されたノズル翼、ロータ翼及び両者の間の高温通路部において特に深刻な熱的損傷は見られなかった。

干渉CTによる燃焼場の空間分布計測

Interferometric Tomography Measurement of Spatial Temperature Fields in Combustion Flame

佐藤誠四郎

平成7年9月

日本機械学会 第73期全国大会講演資料集

Vol. IV No.95-10

本稿は、日本機械学会全国大会行事の先端技術フォーラムでの話題提供の講演資料として、干渉CTを用いた燃焼温度計測法について、これまでの研究成果を含めてまとめたものである。

光の干渉を利用した計測法の特徴は、対象とする物体の情報が二次元的に一度に得られること、干渉縞という形で直接目で見るので、全体的な情報の把握に適していることである。さらに干渉法とCT（計算機トモグラフィ）を組合せた測定では、燃焼温度の瞬時に於ける完全な三次元分布が得られるので、二次元計測法の補間法として、また現象の解明や数値解析などで得られる結果の評価やモデルの検証、構築などに有力な手法になると考えられる。

本稿では、レーザ干渉法とCTを用いた火炎温度の三次元空間分布測定法について、温度の測定原理、干渉CT法の適用に必要な多数の干渉像を撮影する多方向干渉光学系について、これまで提案されている方法のうちから代表例をあげ、光学系の配置例や問題点などを述べた。また屈折率や温度の求め方の手順、ガス組成の取り扱いなどの基礎的事項、干渉縞の測定精度向上と自動解析のためフーリエ変換法を中心とした位相解析法、温度分布の形状が規則性をもたない場合の適用例としてアルコール火炎の三次元温度計測、バーナ火炎などへの適用例、干渉CT法の将来の可能性についてまとめ、本測定法は現状では燃焼のような非定常高速現象の三次元温度分布の計測が可能でほとんど唯一の方法であり、燃焼に限らず空気力学、伝熱の分野でオンライン計測としての使用が期待できることなどを明らかにした。

今後の課題として、光ファイバーや半導体レーザの利用による撮影光学系のコンパクト化、振動などの外乱を実時間で補正できる帰還システムの導入、干渉縞測定のハードウェアによる処理法の検討などがある。

〈材料加工部〉

溶融金属液滴の形状変形解析

Numerical Simulation of Melted Metal Droplet Deformation

高井元弘

平成7年8月

(社)日本機械学会 材料力学講演会講演論文集

材料の加工プロセスでは材料は溶融状態で大きな変形を伴うことが多い。材料の溶融状態における変形挙動をあらかじめ予想できれば、材料製品内の熱応力の発生、表面状態、内部のポロシティの分布などの定量的評価も可能と考えられる。溶融材料は自由表面や境界面の移動を伴った変形の場合が多く、溶融材料を粘性流体として取り扱えば、その挙動はNavier-Stokes (N-S) 方程式により記述される。本報告では、N-S 方程式の解法にはLagrange座標系を用い、FEMの要素分割が物質の変形と共に移動、変形し、FEM計算が不可能とならないよう要素再分割 (remeshing) を行い、同時にN-S方程式における対流項の影響を取り入れるLagrange-Euler混合法を用いた解法の検討を行った。非定常FEMによる本解法では以下の2つの段階の計算過程を繰り返す。

- ①Lagrange座標系で速度と圧力を計算し、物質の移動位置を求める。有限要素は物質と共に移動する。
- ②要素再分割を行い、対流項の影響を取り入れ、新しい要素節点の速度と圧力を求める。

FEMを解くためのN-S方程式と連続の式の安定化はガラキン法により行い、有限要素は3角形のP2-P1要素（速度：2次の補間関数、圧力：1次の補間関数）を用いた。

解析法の有効性を検討するため、平面上に置かれた溶融材料の球状液滴に体積力と表面張力が働き、初速度がない時の変形挙動について計算を行った。液滴の自由表面に働く表面張力 γ は、局部的に平衡状態にあると仮定し、式で得られる大きさの圧力(P)が表面に働いていることと等価とした。

$$P = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

R_1 、 R_2 は境界表面位置で直交する2平面との交線の曲率半径である。モデルを軸対称要素として計算した結果と、平面上（炭素鋼鏡面仕上げ）に置かれた水銀液滴についての測定値とは比較的良く一致した。溶融材料の変形挙動は温度に大きく依存すると考えられることから、今後、熱伝達解析も含め検討を進める予定である。

レーザー照射による気孔率の異なる
ホウ化チタンの熱衝撃強度評価

Estimation of Thermal Shock Resistance of
Titanium Boride Ceramics with
Different Porosities by Laser Irradiation

秋山繁、島田道男、千田哲也、吉井徳治、天田重庚
平成7年9月

(社)日本機械学会論文集 第61巻第589号A編

海洋・宇宙の分野における原子力の利用は、施設の重量・スペースの制約が厳しく、信頼性、経済性の面からも放射線遮蔽性能だけでなく機械的強度、耐熱性等にも優れた新しい遮蔽材料の開発が必要である。中性子吸収機能の優れたホウ化チタン (TiB_2) は、遮蔽材料の一つとして検討されているが、熱衝撃強度特性についての検討は十分ではない。本研究では、有限要素法による準定常弾性熱応力解析を行い、レーザー熱衝撃強度特性の定量的評価及び実想定欠陥の検討の前段階として、気孔率による熱衝撃強度特性への影響の検討を行った。レーザー熱衝撃試験に用いた試験片は、 $30 \times 30 \times 8$ mmの平板で、気孔率が3、8及び15%の3種類のホウ化チタンである。有限要素法モデルは、半無限体を想定した直径300mm、高さ50mmの円柱とし、四辺形軸対称要素を用いた。熱衝撃強度特性は、材料に照射するレーザービームのスポット径と発生する熱応力及びレーザーの出力密度との関係を明らかにし、材料に割れが発生する最小臨界出力密度をもって材料の熱衝撃強度特性とする手法で求めた。本研究の結果、次の結論を得た。

- (1) 弾性熱応力解析により、最大引張応力は、スポット径が20mmまでの範囲ではスポット径の大きさが大きくなるにつれて直線的に増大し、出力密度20 W/mm²以下ではスポット径30mm以上ではほぼ一定値となる。
- (2) ホウ化チタンが、引張強さで破壊すると仮定して熱衝撃破壊臨界曲線が得られ、スポット径約30mm以上で一定の熱衝撃破壊臨界値となった。
- (3) 計算では、気孔率が3、8及び15%の3種類のホウ化チタンのレーザー熱衝撃強度特性値は、それぞれ16.5W/mm²、15.0W/mm²及び14.0W/mm²となり、微小き裂で評価したアルミナの熱衝撃強度特性値約2.9W/mm²の約4.8~5.7倍大きい耐熱衝撃強度を示すことがわかった。
- (4) 気孔率の小さいホウ化チタンでは、スポット径10mmにおいて熱衝撃破壊臨界値の試験結果と計算結果がほぼ一致した。また、気孔の熱応力緩和効果は、気孔率の増大に伴って低下する。

Estimation of Thermal Shock Resistance of Al_2O_3
Ceramics by Laser Irradiation

レーザー照射によるアルミナの熱衝撃強度の
評価に関する研究

秋山繁、島田道男、吉井徳治、天田重庚
平成7年10月

The Japan Society of Mechanical Engineers JSME
International Journal, Vol.38, No.4, October 1995
SERIES A, Mechanics and Material Engineering

近年、セラミックス材料の熱衝撃特性をレーザーパルスを用いて評価する方法が提案され、各種材料について熱衝撃特性評価研究が行われている。レーザー熱衝撃特性評価試験法は、従来から行われているクエンチング法と比較して、試験法が簡便なこと、高い熱流速が得られること、熱伝達係数の変動が小さいことなど、多くの利点を有するが、各種セラミックスへの適用可能性や定量的評価の研究が不十分である。

本研究は、レーザー照射による熱衝撃強度評価試験法の定量的評価技術の確立と各種セラミックスへの適用可能性を検討する目的で行った。円柱形モデルのアルミナセラミックスにレーザーが1秒間照射される場合について、有限要素法を用いて準定常弾性熱応力解析を行い、出力密度、レーザービームのスポット径及び熱応力の関係を求め、炭酸ガスレーザー熱衝撃試験結果と比較して、次の結論を得た。

- (1) 引張強さ又は圧縮強さでアルミナが破壊すると仮定して、最大引張応力及び最大圧縮応力とスポット径の関係より熱衝撃破壊臨界曲線が得られた。
- (2) 試験より得られた破壊臨界出力密度が、計算により求めた引張応力による熱衝撃破壊臨界曲線に近い値になることが判明した。よって、アルミナセラミックスは、レーザー熱衝撃試験によって引張強さが割れが生じたと考えられる。
- (3) 最大引張強さの生じる場所は、レーザービーム照射表面よりも深く、スポットの境界より内側の位置となった。よって、最初の亀裂発生位置は、レーザー照射表面ではなく、材料の内部であると考えられる。
- (4) アルミナセラミックスのレーザー熱衝撃強度特性値は、引張強さで評価して約2.9W/mm²、圧縮強さで約3.6W/mm²となり、セラミックス材料の一種であるマコールの圧縮強さで評価した熱衝撃強度特性値約0.6W/mm²と比較して、高い熱衝撃強度特性を持つことがわかった。
- (5) 本試験法によりセラミックス材料の熱衝撃強度の推定は十分可能であり、破壊臨界出力密度の最低値をもって、セラミックス材料の熱衝撃強度の指標とすることができる。

〈装備部〉

海洋汚染物質のリモートセンシングに関する研究

A Study on the Remote Sensing of
Marine Pollution.

山之内 博、山岸 進

平成7年5月

(社)日本リモートセンシング学会

第18回(平成7年度春季)学術講演会予稿集

油及び有害液体物質の海上輸送中に流出事故が発生した場合、環境に及ぼす影響ははかり知れないものがあるため、早急に拡散範囲を予測し、防除処置を施さねばならない。観測点の少ない海域を迅速に調査するにはリモートセンシング技術が極めて有効な手段となる。しかし、海面情報に関する放射輝度値は一般に小さいために、海面放射輝度に関する基本的なデータを蓄積し、汚染識別のための処理法の検討を行う必要がある。

本報では、地球観測衛星であるランドサットに搭載されたThematic Mapper (TM) センサーで取得されたデータについて、海面の基本的な汚染情報を調べるために、東京湾の海面と、大量に油が流出した海面上の油による放射輝度変化を比較した結果について述べる。

まず、使用した各データファイル毎に輝度値の頻度分布を表すヒストグラムを作成し、ヒストグラムを基にしてコントラスト増幅により画像表示を行う。表示した画面上で指定した領域についてのデータの輝度値の範囲について調べた結果を図示した。

次にTMセンサーで取得された7つの波長帯(バンド)のデータについて、各バンドの組合せ毎のデータの相関関係を調べるために、分布データの回帰直線を求め、その傾き係数を比較した。

その結果、バンド間の傾き係数のパターンの変化を調べることによって定性的な海面情報を識別できると考えられる。

定量的な汚染情報の把握のためには、エアロゾルの影響の度合も含め、今後現場の情報との突き合わせを行い海面放射輝度に関する基本的なデータの蓄積が必要であると考えられる。

液膜流による洗浄

Washing with Water Filmflow over a Plane

上田浩一

平成7年8月

日本機械学会 液体工学部門講演論文集

ケミカルタンカーのタンク洗浄廃水は海洋汚染防止上、有害性に応じて処理される。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ている。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下水膜流によっても十分洗浄される。この落下水膜流によってどの程度洗浄されるかを把握することは、洗浄機の設計上必要である。落下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概要を述べる。

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 1.1mPas からグリセリンの 1500mPas の範囲で実験を行った。粘性係数が 1.1mPas から 1500mPas 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。安定した落下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 $Re_l = q/\nu = 1.9 \times 10^3$ 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。以上のように水溶性の付着膜を水で洗浄する場合について、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。この結果から水噴流によりタンク洗浄する場合に必要な水量、走査間隔および走査速度等を求めることができる。

新方式防振内装法に関する一実験

Experiment on a New Floating Lining
System in a Cabin

原野勝博、金丸貞己

平成7年9月

(社)日本騒音制御工学会

平成7年度技術発表会講演論文集

船舶の騒音対策に関する研究は一段落した感があり最近その方面の研究は活発ではないようであるが、技術的な課題が全て解決されている訳ではない。例えば、以前に筆者らがその設計概念を提案した一括防振内装法は、従来の防振内装法の欠点を改善する有力な手法と考えているが、実船に施行された例はないようである。

やや時機を逸した感はあるが、筆者等はその実用化をめざして再び研究に取り組んでいる。今回、実用性の重要なポイントである内装壁面の振動レベルが、提案した方法でどの程度低減できるのかを確認する実験を行い、実用化につながる結果が得られた。新方式の防振内装法の第一ステップの実験として、実物に近いスケールモデルの甲板上に浮床と、浮床上に設置された船室モデルを製作し、振動実験によりその特性を調べた。得られた主な結論や知見は以下の通りである。

- (1) 浮床上に設置された合板製の船室囲壁は、浮床面に比べ広い周波数帯域に亘って振幅が増幅され、浮床面より約10dB振動レベルが高くなった。
- (2) 船室の振動レベルはダンピングを付加することで大幅に低減でき、壁面のほぼ全面にダンピングシートを貼ることにより、広い周波数帯域に亘り約10dB振動を低減できた。この結果内装壁・天井面の振動レベルを浮床面と同程度に押さえる技術的見通しが得られた。
- (3) ダンピングの付加効果が高い理由は、内装壁・天井面への振動の伝達経路が分散してないため、振動(パネルの曲げ波)の伝搬経路が長くて効果的に振動が減衰されるからである。
- (4) 内装壁体を載せた場合、浮床面の防振効果は、マス・スプリングモデルによる計算値より若干小さくなった。今回の実験では浮床面の防振効果がマイナスになる帯域はなく、共振周波数は明瞭には認められなかった。これは、浮床上層版のダンピングが大きかったためと考えられる。

〈原子力技術部〉

低エネルギー電子に対するエネルギー沈積計算

Calculations of Energy Deposition
by Low Energy Electron Beams

成山展照

平成7年7月

第5回E G S 4研究会

E G Sコードはもともと高エネルギー領域の光子、電子の輸送計算を目的につくられたが、その後低エネルギー計算用にESTEPEやPRESTAなどのアルゴリズムが加えられ、特にPRESTAによってESTEPEへの依存性がなくなりユーザの負担が軽減された。しかし、あるステップサイズを用いて多重散乱を計算すること自体は変更されていないので、ステップサイズがあまり小さくなるとその輸送計算がE G Sで用いられている多重散乱理論の適用外になってしまう問題点は残されたままである。そこで、低エネルギー電子によるエネルギー沈積を計算することによって、PRESTAの使用時におけるステップサイズと多重散乱の関係を調べた。

解析は、200keVから30keVのエネルギーをもつ電子ビームを厚さ1.5R (Rは電子飛程)の水に入射させ、エネルギー沈積を1次元平板体系で計算した。領域は75分割し、電子のカットオフは $A E = 1 \text{ keV}$ 、 $E C U T = 10 \text{ keV}$ の条件で計算を行った。その結果、40keVまではピーク位置がほとんど同じで、なめらかに変化する曲線が得られたが、30keVのグラフは他のエネルギーとはピークの著しくずれた曲線になった。次に、ステップサイズを大きくするため、領域を30分割にして同様な計算を行ったところ、30keVに対して他のエネルギーと同じグラフ位置にピークがくる結果が得られた。この75分割と30分割の間でどの程度多重散乱がスキップされた割合が違うかを見るため、COMMONブロックMISCのNOSCATの値からその割合を計算したところ、75分割で32%、30分割で6%となり、分割が細かくなると多重散乱理論を適用できない小さなステップサイズの割合が増加し、その結果、異常な曲線が現れたことがわかった。すなわち、低エネルギー領域ではPRESTAにおいても適切な領域幅を設定する必要があることが明らかになった。NOSCATのような値をユーザー自身がモニターし、常にプログラムの動作を「診断」することが必要と思われる。

〈海洋開発工学部〉

Study of Various Static Analysis for Offshore
Pipelining Based on the Pipeline Experiment

パイプライン模型実験による海底パイプライン
敷設の種々な静的解析に関する研究

原 正一、山川賢次、
Hyunkyoungh Shin, Jongbae Kim

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

浅喫水箱型浮体式大規模海洋構造物に
働く定常漂流力について

Mean Drift Force on a Huge Shallow
Drafted Floating Barge

Bin Teng, 加藤俊司、齋藤昌勝
平成7年7月

(社)日本造船学会海洋工学委員会
第13回海洋工学シンポジウム論文集

海底パイプラインの敷設に関して、波浪中においてパイプライン各部に働く変動応力の推定が最も重要な課題である。理論的にはこれまで多くの研究者が、静的及び動的な解析法を公表している。静的解析では、一般的に剛性カテナリー法、有限梁分割法、有限要素法、有限差分法などの解析法がある。動的解析については、有限要素法及びランブドマス法による解析が一般的である。パイプラインを扱った実験については、これまでClaussら及び神宮によるものがある。筆者らは、固定式のスティンガーを有する敷設船を用いて、神宮らと同様に敷設船にパイプラインを付けた状態での強制動揺実験及び波浪中の動揺実験を行い、敷設船の動揺とともにパイプライン各部に働く静的及び動的曲げ応力の計測を行った。ここで取りあげるのは、種々な敷設位置、すなわち敷設船のデッキ上のパイプラインの初期張力の変化に対するパイプラインの静的形状及び静的曲げモーメントの計測と理論計算の比較である。

静的曲げ応力の計測は、パイプラインの35箇所歪みゲージを貼付して防水加工して行った。歪みゲージは、応力が大きくなると予想されるスティンガーオーバーバンド部とサグバンド部に集中させた。また、パイプライン形状については、釣り糸と浮きを使用してアンカー部からスティンガー付近までの12点において計測した。理論解析については、有限要素法、カテナリー法、大撓みによるTimoshenko beam法について検討を行った。

パイプライン模型実験から次の結論を得た。

- (1) パイプの静的曲げ応力の実験結果は、パイプライン両端部とサグバンド部付近でばらつきはあるが理論計算とよく一致した。
- (2) 本論文で得られた静的曲げ応力は、動的曲げ応力の推定あるいは相似則によって実際のパイプラインの敷設に応用することができる。

超大型浮体式海洋構造物の係留システムを設計する為には、風、波、流れによる定常外力を推定する必要がある。特に波漂流力と風荷重は、係留装置の初期設計に対し必ず考慮されなければならない重要な定常外力である。一般に、波漂流力を計算する場合、コンスタントパネルによる3次元特異点分布法が用いられる。これは、構造物の表面を4角形要素で近似し、各要素中央に1つの特異点(ソース)を分布させ、流体をポテンシャル流と仮定し、その支配方程式及び境界条件を満足するようにその特異点の強さを決定する方法である。通常海洋構造物の場合は、この方法はかなり有効な方法であるが、巨大な底面積と浅喫水を有する大型箱型浮体の短い波長域での漂流力を計算する為には、たとえ軸対称性を利用しても、浮体全表面では膨大な要素が必要になり、かなり計算時間がかかる欠点がある。

本論文では、こうしたコンスタントパネルに代わり、アイソパラメトリック要素(2次要素)を用いた特異点分布法による波漂流力計算法について述べたものである。この方法は、要素内の特異点の強さを2次曲面上に連続分布させる方法で、要素の特異点の強さを一定値で近似するコンスタントパネル法よりも少ない要素数で高精度の計算ができる利点を有している。しかしながら、本手法では特異積分の扱いが問題になる。これを解析的に除去するために新しい手法を開発した。本方法を長さ300m、幅60m、喫水0.5mの箱型浮体の波漂流力推定に応用した。浮体は軸対称を有している為、その1/4に対し要素分割した。要素数を63から216まで変化させその時の漂流力の推定精度を調べた。推定精度は、物体表面の圧力積分から直接求めるNear field法と遠方での波の情報から求めるFar Field法による結果が一致するかどうかで調べた。その結果、200要素分割すればほぼ十分である事が判明した。この事実を確認するために水槽試験を実施して、計測結果と比較したところ計算結果は良く実験結果と一致した。