

所 外 発 表 論 文 等 概 要

<推進性能部>

保存性を考慮した壁関数法

Wall Function Method with Conservation tiow

Property

日野孝則

平成2年6月

航空宇宙技術研究所第8回航空機計算空気力学

シンポジウム論文集

流体運動の支配方程式であるナビエ・ストークス方程式と連続の式は、それぞれ運動量と質量の保存則を表しているため、それらを離散化して数値的に解く場合にも、計算領域内で運動量と質量が保存されている必要がある。逆に保存性がどの程度満たされているかが数値スキームの収束性や精度と関連している。

一方、工学的に問題となる流れのほとんどは乱流状態であるが、既存の技術では乱流の直接シミュレーションが可能な場合は限られる。したがって乱流モデルの導入が不可避である。汎用性のある乱流モデルがまだ確立されていない点は重要な課題であるが、いくつかの乱流モデルでは壁面境界で壁関数法を用いることがある。これは壁面近傍での平均流の挙動が壁法則と呼ばれる一般的な形で表されることを利用したいもので、壁面近くでの格子間隔を大きくとることができるので、

特に工学的応用において計算コスト（CPU時間、記憶容量）の点で有利である。

しかし、壁関数法においては壁面近傍では支配方程式を解かないで、例えば対数則によって壁面近傍での流速とその点の壁からの距離を用いて壁面せん断応力を決める。このとき、この壁面応力は運動方程式（運動量の保存式）と直接関係づけられないので、計算領域内での運動量保存は必ずしも満たされない。

ここでは、壁面近傍での運動方程式を解く際に壁関数によって求められた壁面応力を考慮することで、上記の二つの概念、保存性と壁関数法の両者をとりいれた計算スキームを構成する。

まず、2次元の平行平板間の流れを対象に原理を説明し、次に2次元平板を過ぎる流れに対する応用を試みる。

計算結果は、運動量が保存されることにより精度のよい解が得られたことを示しており、本手法の有効性が確認された。

**Model Tests of Stepless and Stepped
Planing Boats with Deep Vee Hull**

ディーブV型ステップ無し及び
ステップ付き滑走艇の模型試験

平田信行, 堀 利文, 藤沢純一, 齋藤 勇, 長谷川純
牧野雅彦, 山口真裕

平成2年7月

PACIFIC CONGRESS ON MARINE SCIENCE &
TECHNOLOGY 1990

一般に、滑走艇は他船型と比べて抵抗は少ないが、耐航性は悪い。耐航性能を改善するにはデッドライズアングルを大きくとれば良いのだが、デッドライズアングルを大きくすると抵抗が大きくなるため、結局これまで抵抗と耐航性をにらんで適当なデッドライズアングルが選ばれて、ディーブV型はあまり採りいれられていなかった。

そこで本論文では、耐航性の良いディーブV型に抵抗軽減のためステップを付けることを提案した。そしてステップの位置と大きさを数種類変えて、平水中の抵抗と航走姿勢を計測し、ステップの最適位置と大きさについて考察を行った。

また、重心及び曳航点の位置と排水容積との変化による抵抗や航走トリムへの影響を確かめた。

次に、高速で航走中の模型の浮上量を解析すると、曳航台車の速度が静定した後も変化し続け、台車が造る波による影響があらわれた。この影響は三鷹第2水槽で、台車の速度が4 m/s 程度までは顕著では無く無視できるが、それ以上の速度になると波が次第に発達して定常な試験状態が得られなくなり、無視できないことがわかった。

今後、計測したデータの修正について検討を進めていく予定である。

<運動性能部>

MMGモデル

MMG Model

小川陽弘

平成2年9月

日本造船学会誌 735号

船の操縦運動を方程式に基づいて流体力学的に計算するための数学モデルの一つがMMGモデルである。船全体に働く流体力を、船体、プロペラ、舵のそれぞれ単体に働く成分と、それらの相互間に生ずる干渉項とに分離して表す。こうすることによって、実船と模型船との相関は勿論、設計上舵だけを変えた場合とか、外力があってプロペラの作動状態が通常と大きく異なる場合とかの、部分的な変化に容易に対応できるようになる。

ただ、あらゆる運動を単一のモデルで表すことは得策ではないので、モデルの計画に当っては、船の運動の範囲を通常の船の通常の操縦運動に限定している。離接岸などの特殊な運動や浅水域での問題等はこれの拡張として扱われることが多い。また、モデルに要求される基本的な性格として、できるだけ物理的に有意であること、実験が容易であること、等が配慮されている。

流力モデルによる操縦運動の計算は、コンピュータが比較的一般に使えるようになった1960年代半ば頃から少しずつ行われるようになってきた。同じ頃、模型船に働く流体力計測するのに、PMM(Planer Motion Mechanism)が考案され、それまでの斜航・旋回腕試験による方法に加えて、広く普及し始めた。ところが、これらの試験に際して、実験法や解析法が統一されておらず、実験相互の比較、他の実験結果の利用等は殆ど不可能な状況であった。そこで、筆者の提案で1976年、当時の試験水槽委員会第二部会にMMG(操縦運動の数学モデル検討グループ)を設け、実務を担当している人達で検討した。その数年間の活動の成果がMMGモデルである。MMGを契機としてわが国の操縦性研究は一段と加速したことは否めぬ事実である。現在、少なくとも我が国で用いられている操縦運動の数学モデルは、多かれ少なかれMMGモデルを基礎としていると言っても過言ではない。

＜構造強度部＞

可能性と確率（主観と客観そしてモデル）
Possibility and Probability
(Subjectivity, Objectivity and Modelling)

松岡一祥

平成2年4月

武蔵橋友会第2回講演会

18世紀ベイズに始まる確率論に対して、より主観的な取扱として、ファジイ測度論の可能性がある。主講演は、可能性についてその背景から応用までを簡略に紹介したものである。

まず、論理的推論および確率的推論を取り上げ、人間の推論方法の特徴、限界と利点について述べる。経験と主観により構築された個人的なモデルの適合性の検討が人間の推論であり、記憶の検索、組み立て、関連付けの容易さが大きな影響を与えていることが指摘される。また、純粋論理では答の出ない不十分な情報に対しても、主観で条件を追加して推論を進めて答えを得るなど、人間の推論は有効であるが反面、間違いもおこしやすいことが指摘される。

次に、人間的推論の道具としての可能性について、デンプスターとシェーファーの理論およびザデの可能性分布を取り上げ、その基礎理論を概説する。更に、例題として、デンプスターとシェーファーの理論では裁判における裁判官の心証形成過程を、可能性分布では鋼板の降伏応力に対する言明（規格値、製造者と使用者の思感に対する証言）と試行（引張試験）の関係を取り上げて解説する。

確率推論と可能性推論の比較のために、ベイズの方法とデンプスター／シェーファーの方法を用いて選挙の当落予想を行う。2つの方法による予想結果は矛盾しないが、その意味付けが全く異なることが指摘される。特に、ベイズの方法は全く同じ条件の選挙が数多く行われた場合の当落の確率を求めていること、および、当落予想のモデルと基礎情報には人間の主観が入らざるを得ないことが指摘される。

最終に、推論に用いるモデルについて検討する。現在、推論のための有効なモデルを構築できるのは、人間だけであり、人間的でない推論は存在しないのではないかとの疑問が示される。

スタッドせん断キーのファジイ評価
Evaluation of Stud Shear Connector with
Fuzzy Set
松岡一祥
平成2年5月
日本高圧力技術協会平成2年度春季講演会・
講演概要集

スタッドせん断キーはコンクリートと鋼材との一般的な接合部材である。コンクリート製原子炉格納容器の内部ライニング鋼板とコンクリート殻、あるいは、鋼／コンクリートハイブリッド耐圧殻などに使用される。スタッドによる鋼／コンクリート接合部のせん断荷重伝達能力は、スタッドの形状および間隔、コンクリートの強度、鉄筋の配置などの影響を受け、その評価方法は確立しているとはいいがたく、実験結果のばらつきも大きい。そこで、ファジイ集合によるスタッドせん断キーの荷重伝達能力の評価を試みた。

まず、スタッドによる接合部の3つの破壊形式、1)スタッド基部の延性破壊、2)スタッド前面のコンクリートの圧壊、3)スタッドの引抜 について、スタッド1本当たりの荷重伝達能力の上限および下限を求める方法を示した。次に、荷重伝達能力とこれらの破壊形式との関係、および3つの破壊形式相互の制約条件などを考慮して、これら3つの破壊形式にそれぞれファジイ集合とその帰属度を与えた。

3つの破壊形式による崩壊のファジイ集合の帰属度に、どのようなファジイ集合演算を行うと、実験結果と一致するか調べた。その結果、崩壊は破壊様式CDとPDのどちらか一方で排他的に生じることがわかった。ここに、CDはコンクリートの圧壊とスタッドの延性破壊が同時に生じる場合、PDはスタッドの引抜と延性の同時成立である。このことは、「コンクリートの圧壊と引抜とが同程度生じそうな場合には崩壊する可能性が小さい」ことを示している。2つの破壊機構が共存すると、荷重伝達機構が共に機能し、伝達される荷重が重畳して、想定した荷重よりも荷重伝達能力が大きくなるためと考えられる。

ハイブリッドバージの大型模型実験

Experiments on Strength of Hybrid Barge

松岡一祥

平成2年6月

日本造船研究協会，海洋コンクリート建造物の設計・
建造に関するシンポジウム

プラントを搭載，曳航して，稼動する場所にそのまま設置されるプラントバージは，そのままの状態でも長期間の使用が期待されるため，高い耐久性が求められる。そこで，接水部に鋼に比べ耐久性のあるコンクリートの使用が考えられる。本報告は，コンクリートバージの中でも，特に，接水部以外には鋼板を用いるハイブリッドバージを取り上げ，比較的大型の模型実験の紹介を行うものである。取り上げたものは，PC船底板の貫入実験とハイブリッドバージの横強度実験である。

(PC船底板の貫入実験)

局部強度の検討の側として，バージ外板に集中的な面外荷重が加わる場合を取り上げた。他の船舶との衝突，バージの座礁時あるいはプラントバージの設置，着底時の海底面の凸部など，貫入量，接触面積により荷重が変化する場合を想定して，鋼製円錐の貫入実験を行った。

実験結果に対し，押抜きせん断破壊，コンクリート破壊後の貫入抵抗，貫入量一貫入抵抗関係，衝突時の吸収エネルギーなどに検討を行い，強度算定方法を明らかにし，鋼製バージとの比較を行った。

(ハイブリッドバージの横強度実験)

船側下部および船底がコンクリートのハイブリッドバージの舷側タンクの模型を作り，横強度の検討を行った。崩壊機構を明らかにするために，集中線載荷を行った。コンクリートの局部的なひび割れの後，舷側ストラットの座屈から全体崩壊が始まるのが，鋼製の場合と異なり，ストラット座屈後の変形能力および残存耐荷力は大きかった。

崩壊機構について，塑性関節および最大せん断力の観点から検討し，鋼／コンクリート接合部で伝達可能なせん断力の大きさが，崩壊荷重に大きな影響を与えていることを示した。

浮遊式施設の地震時挙動

Seismic Responses of Floating Installations

松岡一祥

平成2年6月

日本造船研究協会，海洋コンクリート建造物の設計・
建造に関するシンポジウム

一般に，浮遊式建造物は地震の影響を受けないと考えられている。そこで，沿岸開発，原子力プラントなどに浮遊方式の検討が行われている。しかし，浮遊式建造物があっても，海底面の地震動の影響を受けるという明らかな証拠がある。本報告は，海における海底面の地震動の影響，沿岸での地震などを取り上げ，その浮遊式施設に与える影響およびその評価法を示す。

開放水域における鉛直震動はそのまま海水中を伝播する。この時，浮遊式建造物に加わる動液圧は，海底面の加速度，海水密度，および水面からの深さの積となる。動液圧の積分値としての荷重は，排水質量と海底面の加速度の積となる。浮遊式施設の設計には，この動液圧および荷重を考慮する必要がある。船舶のように排水質量の縦方向分布が変化している場合には，縦曲げが生じる。

防波堤，護岸などで囲まれた閉鎖水域でも，鉛を震動については前述と変えられない。閉鎖水域では更に，水平震動に対する検討も必要となる。浮遊式建造物の免震効果は，短周期水平震動に現れる。浮遊式建造物と境界との距離が大きくなるほど，短周期水平震動に対する応答倍率は小さくなる。長周期の水平震動に対しては，自由水面の形状と浮遊式建造物の関係で幾つかの，揺動（スロッシング）の同調周期が現れる。検討の結果，以下の提言を行っている。

閉鎖水域の水平震動については，短周期と揺動を含む長周期に分けて，応答倍率，動液圧分布などの検討を行うべきである。

短周期地震動の検討は浮体の運動を考慮した速度ポテンシャル理論を用いてよい。設計変数としては，閉鎖水域の深さ，自由水面寸法，浮体寸法，重心位置などがある。

長周期地震動に対しては揺動に対する浮体の同調運動についても検討する。速度ポテンシャル理論による時刻歴解析では，正弦6波入力法でよい。

荷重非伝達すみ肉断手の疲労強度に及ぼす板厚と入熱量の影響

Influence of Plate Thickness and Heat Input on Fatigue Strength of Non-load-carrying Fillet Weld Joints

松岡一祥, 高橋一比古, 吉井徳治,
飯高洪男, 藤井英輔

平成2年11月

日本造船学会論文集 第168号

海洋構造物溶接断手の疲労設計基準には「1/4乗則」と呼ばれる板厚効果が取入れられている。この板厚効果については、止端半径、アンダーカットなどの溶接止端部の局部形状がほぼ一定であることから、板厚の増加と共に応力集中係数が増加することにその理由を求めようとする研究が見られる。しかし、応力集中係数の板厚依存性だけでは板厚効果はうまく説明できない。また「1/4乗則」の妥当性についても議論が多い。

疲労強度に応力集中係数が影響を与えることは認められる。一方、残留応力も、平均応力の変化の形で疲労強度に影響を与える。本論文は、溶接残留応力が板厚により変化し、疲労強度に影響を与えているのではないかとの疑問を持ち、検討した結果を示すものである。検討対象としては、多くの実験結果が存在し、かつ、板厚の増加による疲労強度の低下が顕著な、荷重非伝達すみ肉溶接断手を取り上げた。

まず、すみ肉溶接止端部の溶接線直角方向残留応力が、板厚、入熱量および降伏応力を組み合わせた無次元量で表されることを示し、検証実験により、その正当性を確かめた。次に、公表された疲労試験結果で、溶接条件などが明らかなものを集め、溶接残留応力を平均応力に加え、実際の平均応力として評価すると、応力比と残留応力の関係、疲労強度の板厚依存性、および、T断手と十字断手の疲労強度の差異などがうまく説明されることを示した。更に、応力集中が影響を与える範囲を明らかにし、溶接残留応力と応力集中および応力化を考慮した疲労強度推定方法を示した。67組の疲労試験結果について、この疲労強度推定方法が有効であることを確かめた。

以上により、溶接断手の疲労強度の板厚依存性が、溶接残留応力の板厚、入熱量および降伏応力保存性と応力集中係数の板厚依存性の2つの要因からなることがわかった。

<機関動力部>

燃焼室高温化とエマルジョン燃料による微粒子、NOxの低減

Reduction of NOx and Particulate by High Temperature Combustion Chamber and with Emulsion Fuel

塩出敬二郎, 宮城靖夫, 西川和美

平成2年6月

日本機械学会, RC86 研究成果報告書・II

小型高速空冷4サイクルディーゼル機関の燃焼室表面をセラミック材料で断熱化し、燃焼室内ガス温度を高め、この高温化が燃焼や排気ガス組成に与える影響を軽油及びエマルジョン燃料に於いて調べた。燃焼室の表面を断熱化するために使用したセラミック材料は、窒化珪素 (Si_3N_4) と部分安定化ジルコニア (ZrO_2) である。断熱化によって燃焼室表面温度は金属材料の場合に比べて300-400℃程度高くなり、ガス温度は圧縮行程の終わりで約90-150℃程度上昇する事が分かった。このような高温燃焼室内では、軽油のような着火性の良い燃焼は着火遅れ期間が短すぎるために着火遅れ期間中に適量の混合気生成できないと、拡散燃焼中に噴霧束内への新気のエントレインメントが困難になるために、着火は早まるが燃焼が悪くなる。その結果として、NOx濃度は増加する。軽油のような着火性の良い燃料に比べて、エマルジョン燃料では着火性(セタン価)を添加する水の量によって変える事ができるので、着火遅れ期間を制御できる。さらに、燃料噴霧のモーメントが水を添加した分だけ増加するので、空気との混合が促進され、燃料期間が短縮される。また、燃焼時には燃料中の水の気化熱によって火炎が冷却される。このように火炎温度が下げられ、着火時期が遅れ、燃焼期間が短縮されるためにNOxの生成が大幅に抑制される。また、燃焼室表面の温度が高いために従来の機関では燃焼が困難であった隙間部分での燃焼が可能となり、スモーク、COの低減ができる。このように高温燃焼室とエマルジョン燃料によってディーゼル機関からのNOx、微粒子、スモークの排出量を燃費を犠牲にする事なく同時に、大幅に低減できる事が分かった。

定性モデルを利用したプラント状態の検出支援
 Intelligent Sensing Using Qualitative Modelling
 沼野正義, 福戸淳司, 奥住恵子, 村山雄二郎
 平成2年7月
 計測自動制御学会,
 第29回計測自動制御学会学術講演会予稿集

原子力プラントなどの大規模なシステムでは、プラントの動作状態を監視するために様々なセンサーが取り付けられており、運転員は、これらのセンサーからの情報を基にプラント状態を把握し、異常や故障を的確に発見して燃るべき処置を施している。しかし、異常や故障時には大量の情報を一時に判断する必要があるため、運転員に過大な負担を強いることもある。本研究では、プラントの定性的モデルを利用して、プラントからの大量の情報を集約し、運転支援情報とする方法について考察を行い、コンピュータシミュレーションを用いてその有効性を検討した。

オブジェクト指向の考えを応用した階層的な構造をもつプラントの定性的モデルが異常・故障診断などのプラント状態の推定に有効であることはすでに報告されている。この定性的モデルでは、その属性としてプラント各部の状態量を与えることができることから、このモデルは、状態量の推定のためのシミュレーションに用いるだけでなく、実際のプラントからの監視情報を集約するための格納場所としても有効に利用できると考えられる。

すなわち、個々の監視情報を、定性的モデルの対応するオブジェクトの状態量の観測値として蓄え、定性的モデルに組み込まれたプラントの機能を用いて上位の情報や一連の機能的な形態に編集することによって、大量のプラント監視情報の集約が可能である。

定性的モデルは、本質的に系統的、階層的に構築されているので、監視情報の系統的な表示や情報の階層的な表示を用いることができ、プラント状態の全体的な把握に有効である。

また、監視情報の時系列データを状態量とすることにより、プラントの過去の状態の推移や、将来の予測などの表示に対応することができると考えられる。また、判断結果の表示や運転操作のチェックとしても有効と考えられる。

Analytical Investigation on the Cooling of High Temperature Walls with a Two-phase Mist Flow in Advanced Marine Power Systems

将来の船用動力システムにおける
 高温壁の噴霧流冷却に関する解析的研究
 波江貞弘, 長内敏雄
 平成2年10月

日本船用機関学会, 第4回船用機関に関する
 国際シンポジウム講演集 1号

熱機関においては、その構造部材を熱応力などから保護する目的で種々の冷却手法が用いられており、機関の高温化に伴って、その重要性はますます高まっている。

本報告では、まずこれらの手法について、各々の特徴を定性的に比較検討している。すなわち、沸騰を含む水冷却では熱伝達率ならびに見掛けの熱容量が大きく、冷却性は高いが、場合によっては過剰冷却の可能性もある。また、部材温度レベルが高い場合には、系圧力の上昇、冷却不安定や壁面へのスケール付着などの欠点がある。一方、空気あるいは水蒸気による気体冷却は、高温壁面の冷却に使用可能であるが、冷却性が低く、また流体自体の温度上昇が著しい。さらに流体を駆動するための補助動力が大きくなる。この点、熱媒体曲（潤滑油を含む）は、冷却性、熱容量ともに中間的な値を持っている。しかしながら、一般には350~400℃以上の温度で性状が不安定となり、また通常高価である。

これらの背景から、セラミック・コーティングしたエンジンやタービンあるいは高温燃料電池（温度レベル：500~1000℃前後）などの将来型高温船用機関を適用対象とする冷却手法の1つとして、本研究では噴霧流冷却を提案している。噴霧流冷却は微小液滴を多く含む気体流による冷却を意味する。冷却性は水冷却より低い、見掛けの熱容量が大きく温度が容易に上昇しないこと、系圧力の上昇や冷却不安定、スケール付着を伴わないことなどの特徴を持っている。このため、高温の構造部材面を一律な温度に緩冷却する目的に適していることを述べている。

そして、噴霧流量、気液流量化、液滴径、液滴速度、気体温度や熱流束などの諸因子が流体温度上昇に及ぼす効果を数値解析的に検討している。結論として、新たに定義した温度上昇係数について簡易表示式に導きくとも、液滴径が200ミクロン以下で、入口乾き度が低い場合に、この係数の値が小さくなることを指摘している。また、気体温度と液滴速度は冷却開始点付近で温度上昇係数に影響することを述べている。

Dynamic Characteristics of Marine Stirling Engine by Computer Simulation

コンピューターシミュレーションによる
船用スターリング機関の動特性
塚原茂司, 桑原孫四郎, 一色尚次 (日大)
平成 2 年 10 月
4th International Symposium on
Mavine Engineering

本報では, コンピューターシミュレーションを用いて, 船用スターリングエンジンの出力制御と動特性について考察した。

この計算に使用したスターリングエンジンモデルは, 単働 2 ピストン-2 シリンダ形で, 通常 α 形エンジンといわれるものである。このエンジンの適用対象は船用主義であるので, エンジン出力は機関回転数の 3 乗に比例するものと仮定している。

エンジンの性能計算のために, ガスは理想気体とし, 作動空間を膨張室, ヒータ, 再生器, クーラそして圧縮室の 5 小空間に分け, それぞれに質量保存とエネルギー保存の式を適用した。ここでは計算時間の短縮化のためにガス流動による損失は無視した。スターリングエンジンには, この損失の他に機械摩擦損失, 熱伝導損失, その他の損失があるが, これらは軸トルクの算出の時に, 総合損失係数をかけて補正した。

本シミュレーションでは, エンジン出力, エンジン回転数, ヒータ管壁温, 膨張室及びヒータ内ガス温度そしてガス圧力を時間の関数として求めている。

スターリングエンジンの出力は, 作動空間内圧力と燃料流量を調整して制御しているが, この方法は現在一般的に採用されている方法である。ここでは, 機関回転数とヒータ壁温度を設定値にするように上記 2 パラメータを調整している。

計算は, 修正オイラー法を用い, 各パラメータに関して記述された多次元連立常微分方程式を, クランク角 1 度毎に数値積分して行った。

制御に際し, 作動空間内圧力と燃料流量の調整量を, 単純に機関回転数とヒータ壁温度のそれぞれの設定値と現在の値との差に比例するとして行うと, ある条件で振動するパラメータが出てくる。そのため, その制御法に, 調整されるパラメータの変動方向を考慮した項を加えると, 設定値に滑らかに到達できることが得られた。

Preventive Control of Marine Machinery Using Macroscopic Simulation

マクロシミュレーションを用いた船用機器の予防保全
沼野正義, 塩出敬二郎, 塚原茂司, 村山雄二郎
平成 2 年 10 月
4th International Symposium on Marine Engineering
Kabc '90 Proceedings of ISME '90

様々なオートメーションの採用によって, 船舶の省人化が進んでいる。それゆえ, 船上での機器の保守作業はできるだけ避けねばならない。船用機器の船上での保守作業を避けるためには予防保全が有用である。

機器の故障は, 「異常・故障原因モデル」, 「異常・故障発生モデル」, 「機器状態モデル」, 「異常・故障進展モデル」および「機器状態発現モデル」の要素によってモデル化できる。故障診断は, 観測データから「異常・故障発現モデル」の逆変換によって機器状態を推定し, 異常・故障が発見された場合に, 「異常・故障発生モデル」の逆変換によって「異常・故障原因」を推定することである。

故障はその発生状況によって, 2 つのタイプに分類できる。一つは, 徐々に劣化が進み故障にいたるタイプであり, もう一つは, 突然その機能が失われるタイプである。前者については, 機関状態マイクロシミュレーションらって故障予測を行い, 有効な保守計画を立てることにより予防保全が可能である。後者については, 故障のメカニズムを明らかにして, 故障発生過程をモデル化し, そのマイクロシミュレーションによって故障要因を抽出し, 適当な管理を行ってそれらの要因を排除することによって予防保全が可能である。

例として, 主機の主軸受の故障について日本船主協会および日本海事協会の協力を得て調査した結果, 後者のタイプであることがわかった。すなわち, 予防保全には, 故障予測を用いる方法では効果が期待できず, 故障モデルから故障要因を抽出し, これらを排除する適切な管理が有効であることがわかった。

予防保全によって, 機器の信頼性は向上するが, 安全を担保するために故障時の対策を準備することが重要である。

<材料加工部>

鋼の超音波減衰における磁場依存性について(第3報)
被試験材の大きさの影響

Study of Ultrasonic Attenuation of Steel Materials
in a Magnetic Field—Part 3 : Effects of
specimen size

勝又健一

平成2年7月

日本非破壊検査協会 非破壊検査 39巻7号

超音波減衰の磁場依存性は鋼の塑性変形等に影響されることが知られている。その変化量は弾性応力、塑性変形量で異なる。また、磁場の強さ、超音波の伝搬方向でも異なることを、第1、2報で報告した。本報告は本法の適用条件の1つとして、試験材の大きさの影響について調べたものである。

材料は引張り強さ40kg/mm²の軟鋼で、試験片の大きさは板厚12mm、長さ1m、幅54-436mmである。試験片の表面には特に機械加工をせず、黒皮付の状態である。試験片に磁場を加える磁石への磁化電流はDC、0-4 A (0-200 Oe)とした。探触子は周波数5 MHz、屈折角45°の横波斜角を2個用いた。超音波磁気感度(磁界がある場合とない場合の超音波音圧の比: MEAS)の測定は探触子と磁石とを試験片の同一表面に配置されて行った。超音波の伝搬方向は材料の圧延方向およびその直交方向の2種とし、磁界を回転させてその効果を調べた。MEASは磁界と超音波の方向が圧延方向に平行の時、最も低くなり、3者のいずれかが直交すると逆に大きくなることが分かった。これは前報で述べた横波の振動方向が磁界と直交の場合と同様の効果であると言える。

ここでは、試験片の幅の影響を調べるためには超音波は圧延方向に伝搬させ、磁界はそれと直交するように加えた。試験片の幅が大きくなるに従って、MEASは低下する。しかし、試験片幅が磁石幅(54mm)の4倍以上からは低下せず一定値となった。このとき、50-200 OeにおけるMEAS値は磁石と同等幅の試験片に対してほぼ1/4である。

本実験は板厚か12mmのみであるが、結果から試験片幅が436mmと大きな場合でもMEASは今回の条件で0.3dBと十分であった。仮りに反射法(探触子Rの代わりに反射体を使用)にすればMEASが2倍となり、本法は実用的に使用が可能であると思われる。ただし、実際には測定部の表面には凹凸がある場合も考えられるので、表面状態等の影響について検討する必要がある。

(624)

アルミナの高温摩擦特性

Friction of Alumina at High Temperatures

千田哲也, 飯野千織, 植松 進, 天田重庚

平成2年9月

日本機械学会第68期全国大会

セラミック材料は、硬度が高く耐摩耗性に優れている。また、高温での強度が高く、化学的にも安定である。これらの性質から、高温でのしゅう動部材への応用が期待される。しかし、高温でのトライボロジーに関する知見は少なく、データそのものが不足している。そこで、1000℃程度の高温で摩擦摩耗試験を行える装置を製作し、主として温度依存性の観点から焼結アルミナの乾性摩擦の諸特性について調べた。

摩擦面の形状が外径24mm、内径10mmのリング状となる一組の試料を金属製のホルダーに保持し、ホルダーを高周波加熱して最高1200℃までの摩擦試験を行った。

摩擦係数は室温では約0.8であったが、温度高くなるにしたがい単調に低下し、1200℃では約4になった。また、高温では荷重が高いほど摩擦係数は低く、したがって、温度依存性は荷重が大きいくほど顕著であった。摩擦係数のすべり速度依存性は明らかではなかった。

室温では少なくとも2つの異なる摩擦のモードが観察され、摩耗量は1ケタ違った。摩擦面のSEM観察から、比較的平滑な面が形成される場合と層状の剝離のみられる場合とあり、それぞれ摩耗量の少ない場合と多い場合に対応した。摩耗量は同じ条件の試験でも大きくばらついたが、2つのモードにわけることにより評価することができた。

800℃以上の高温では、600℃以下にくらべ摩耗量が1ケタ以上少なくなった。このとき、試験前よりも平滑な面が形成された。

レーザー処理したアルミナ溶射皮膜の構造 (第二報)

Structure of laser treated alumina coatings

飯野千織, 千田哲也, 植松 進, 天田重庚

平成2年9月

社団法人 日本セラミックス協会

第3回秋季シンポジウム講演予稿集

プラズマ溶射によるセラミックス皮膜には多くの気孔が存在しており, これは皮膜の熱遮蔽性・熱疲労性は向上させるが, 耐摩耗性・耐食性を劣化させる。そこで多孔質の持つ特性を生かすとともに耐摩耗性・耐食性を改善するこめの有効な手段としてレーザーによる表面改質が注目されている。これは被膜の表層のみをレーザー照射により再溶融させて, 表面の緻密化と平滑化をはかることを目的としている。本研究ではプラズマ溶射したアルミナ皮膜を用い, レーザー照射により処理パラメータを系統的に変化させた場合の皮膜構造の変化について検討を加えた。

皮膜厚さ約0.35mmのプラズマ溶射皮膜に対し, 1kw級の炭酸ガスレーザーを用いて, パルス発振モードで実験を行い, 前報の連続発振の場合の結果と比較した。ビーム径, 走査速度, レーザー出力, 周波数, デューティをパラメータとして1パスのみのレーザー処理を行った。

各種のパルス発振条件でレーザー照射したアルミナ皮膜の断面観察より, パルス発振の場合でも連続発振の場合と同様に, 皮膜の構造は溶融部領域, 熱影響部領域, もとの溶射皮膜と変わらない領域の3つの層に分けられた。また, 溶融部表面は平らではなく若干のハンプを有していた。パルス発振では連続発振に比べ, 広いレーザー出力条件で皮膜は損傷されずに処理できた。レーザー影響部幅はレーザー出力に比例して増大する。しかしながらレーザー影響部深さに関しては125Wまでは連続発振の場合とほぼ同じでそれ以上エネルギーを入力しても今回のパルス幅条件ではレーザー影響部深さは増加しなかった。レーザー出力, 周波数, デューティ等の変化は皮膜溶融部の微構造をに影響していた。これらの処理条件と皮膜構造の変化メカニズムについて考察を行った。

<装備部>

Reduction of Remaining Water in Horizontal Pipes by Line Blowing

気流による水平管内残留液の減少

山口勝治, 綾 威雄, 山根健次

平成2年10月

4th Int. Symp. Marine Engng. Kobe '90

有害液体物質をばら積み輸送するケミカルタンカーの荷揚げポンプによる荷揚げ後, 船内に残留した貨物液がタンク洗浄水やバラスト水等に混入し, 海洋は排出されれば海洋を汚染することになるため, 残留貨物液量を大巾に低減させる技術を開発することが必要となる。

一方, 法的には, 荷揚げ後の最終残留物液量の要求値が規定されているとともに, この値を確認するための実船水試験が義務づけられている。

揚荷ポンプによる揚荷後の実船での残留貨物液量の計測値は規制値を上回っているため, 残液量を低減させる装置又は操作が必要となるとともに, それらを適用した時の残留貨物液量を評価する手法について検討しておく必要がある。実船では, 管内液量を気流によって減少する方法でぐラインブローイングがよく適用されている。

本報告では規則に基づき10m垂直管および定圧弁によって背圧を維持した実験系に対し, ラインブローイング中の水平管内の流動解析を行った結果について述べた。解析対象は実験装置および実験方法に対応したものであり, 現象のモデル化は観察された管内流動に基づいて行った。

解析結果は, ラインブローイング全体の過度変化をよく再現しており, 水平管残水率は実験データとよく一致した。定圧弁の背圧値は残水率に大きく影響しないことを確認した。また, 10m垂直管と定圧弁解析結果の比較から, 背圧維持方法による水平管残水率の違いが少ないことが明らかとなり, 定圧弁は10m垂直管と等価な機能を有していることが解析からも裏付けられた。

以上の結果, ラインブローイングは管内水を減少するための優れた方法であることが明らかとなり, 効果的なストリップング装置の設計・操作法に関する有力な情報が得られた。

Spectrometric Oil Analysis of
Marine Diesel Engine

船用ディーゼル機関潤滑油の分光分析

山岸 進, (加藤 寛, 千葉 広)

平成2年10月

Fourth International Symposium on
marine Engineering Kobe '90

機関摩耗状態を感度よくモニタする事ができれば、未然に重大な損傷を避ける事ができ、かつ適切なメンテナンス時期の選択が可能となる。本報は数年に亘って実船試料による機関摩耗量モニタに関する研究によって得られた知見を分析方法、初期摩耗、異常摩耗、燃料特性について報告したもので、追跡したT船は竣工から約25,000hrs、A船は就航後8,950hrから、約38,000hrsまで調査した。主な結果は次のようである。

(1) 試料を王水処理抽出する事によりほぼ100%の回収率で鉄を測定できる。(2) 回収率の異なる処理法を用いて同一試料を測定することによって、試料中の粒径分布の変化が分かる。(3) 初期摩耗から安定期へ移行する過程が分かり、本例では2,000hr以上で安定期に入ることが明らかにされた。(4) 鉄濃度履歴に見られるピーク値は大別して、異常摩耗、清掃、平常の3種類に分類され、異常摩耗は他と明確に区別できることが分かった。以上によって分光によるシリンダドレインのもモニタリングは感度良く微妙な変化を追跡が明らかになり実用化の目処がたった。

また、実際の摩耗は多くの因子が複雑に関連した現象であり、多数の関連項目の相互関係を整理された少数因子で表現する方法を提案し、(5) 船用ディーゼル燃料の特性値を因子分析し、特性は少数の合成変数で表現できることを明らかにした。さらにこれ等の合成変数と鉄濃度の因子分析の結果から、残炭分とアスファルテンの比がシリンダ摩耗に関連していると推定される。

<システム技術部>

GO-FLOW手法による信頼性解析(9)

—副入力信号の従属性の考慮とその取り扱い方法—
Reliability Analysis by the GO-FLOW Methodology
(9)—Dependency between sub and sub,sub and
main input signals—

松岡 猛, 小林道幸

平成2年10月

日本原子力学会 秋の分科会 同要旨集

GO-FLOW手法による解析では、従来の副入力信号相互及び主入力信号と副入力信号とのあいだには従属関係はなく互に独立である場合を対象としてきた。しかし、共通原因故障の取り扱いをGO-FLOW手法において実施する場合は、副入力信号間の従属性を考慮する必要がある。

副入力信号は、タイム・ポイント間の時間経過量、弁の開閉等の動作指令を表わすために用いられる。従来、動作指令は確率1.0で与えられていたので従属性の考慮は不要であった。しかし、動作指令が1.0以下の確率で与えられる場合は、それらの指令間に従属性がある場合とない場合を区別して取り扱わなくてはならない。

二系統の主力信号線が互いに独立な場合と従属性のある場合のそれぞれについて、種々の副入力信号が組み合わさった場合に対して検討を行い、GO-FLOW手法における計算処理方法の一般的規則を求めた。

本報告においては、タイプ27オペレータ(通常開状態の弁をモデル化)が2個直列に繋がれたケースを取り上げて取り扱い方法の説明を行なった。副入力信号 P_1 が与えられた時、各オペレータは、 P_1 , \bar{P}_1 をそれぞれ含む項を並列処理し、出力信号は、この二項の和として表現して取り扱っていけば良い事となる。

本報告で検討した従属性の計算処理方法の一般的規則を基に、今後共通原因故障の取り扱いをGO-FLOW手法において実施する研究を進めて行く。

<海洋開発工学部>

浮遊式海洋構造物の実海域実験 その2
実験構造物の日射による温度分布について

The Field Tests of Proto-type Floating Offshore
Structure Part 2. On the distribution of temperature
by solar radiation for experimental structure

安藤定雄, 星野邦弘, 山岸直人

平成2年5月

日本造船学会論文集 巻167号

海洋空間の有効利用として海上情報都市, 海上空港, 海洋性レクリエーション施設などが考えられている。このような大規模な浮遊式海洋構造物の建造に際しては, 通常浮遊式海洋構造物で行なう波, 風および流れ等の自然環境条件に対する運動応答, 構造強度および係留システムの検討以外に日射によって生じる構造物の温度分布による変形や応力についても検討する必要がある。

本論文では, 大型浮遊式海洋構造物のプロトタイプ「POSEIDON」号において日射量, 気温, 湿度, 風向, 風速および上部構造物(ボックスガード)の温度分布の実測を行ない, 気象, 建築および空気調和の分野で既に確立している理論や実験式を用いて計算した値と比較・検討を行なったものである。その結果は次の通りである。

- (1) 実海域に設置された構造物の任意の面に入射する全日射量は, 既知の計算式の組み合わせにより, 実用的で十分な精度で推算できることがわかった。
- (2) 日射による上部構造物の温度分布も, (1) で求めた日射量及び熱流応答を求める簡便な手法として知られているレスポンス・ファクタ法を組み合わせることにより, 実用的で十分な精度で推算できることがわかった。
- (3) 実験構造物の壁体表面温度に影響を及ぼす外界条件としては, 日射が最も大きく, 次いで構造物周辺の風である。低速であっても風がある場合と無風の場合の差は大きい。
- (4) 壁体表面温度の推算には室内空気温度も必要であるが, その温度分布が推算結果に及ぼす影響は少ないことがわかった。

<氷海技術部>

プロペラ幾何形状の変化がプロペラ特性及び
キャビテーション性能に及ぼす影響 (その2)
—翼厚化及び翼数の変化—

The Effect of the Geometrical Feature of
Screw Propeller on Performance (Part 2)
—Variation of the Blade Thickness Ratio and
the Number of Blades—

門井弘行, 吉田三雄, 岡本三千朗, 鈴木 茂

平成2年5月

西部造船会 西部造船会会報 80号

著者らはSR I・B型プロペラの幾何形状の変化がプロペラ特性及びキャビテーション性能に及ぼす影響を模型試験及び理論解析によって検討しており, 前報で翼厚さ幅比及びキャンパー比の変化の影響を報告した。今回は翼厚比及び翼数の変化の影響を検討した結果を報告したものである。得られた主な結論は,

1. 翼幅及びキャンパーを一定として翼厚のみを20%増減させた場合, プロペラのスラスト, トルク及びプロペラ単独効率率はほとんど変わらない。また, 翼面上キャビテーションの発生面積, キャビテーションによって誘起される船尾水圧変動振幅及びキャビテーション騒音の変化はきわめて少ない。
2. 展開面積比及び翼厚比も一定として翼数を変化させた場合, プロペラ単独効率は翼数減少に伴い若干低下する。また, キャビテーション発生面積及び船尾水圧変動振幅は翼数の減少に伴い増大する。しかしキャビテーション騒音に大差は見られない。
3. 翼厚さ幅比を一定として翼数を変化させ大場合について理論解析によりプロペラ単独効率率及びキャビテーション発生面積を求めた。プロペラ単独効率率は翼数の減少に伴い若干増加する。また, キャビテーション発生面積は翼数の減少に伴い著しく増加する。
4. 翼強度及びキャビテーション基準にたいする条件を一定として翼数を変化させた場合についても理論解析によりプロペラ単独効率率及びキャビテーション発生面積を求めた。翼数が増加してもプロペラ単独効率率はほぼ一定の値を示す。また, キャビテーション発生面積は翼数の減少に伴い増加するが, 前二者の場合より少ない。
5. 翼数によって適切翼厚さ幅比が異なり, その値は翼数の減少に伴い小さな値となる。

**SRI・B型プロペラの不均一流中
キャビテーション性能**

Cavitation Characteristics in Non-uniform Flow
of the SRI・B Type Propeller

門井弘行, 吉田三雄, 岡本三千朗, 鈴木 茂

平成2年5月

西部造船会 西部造船会会報 80号

著者らは、キャビテーション性能及びプロペラ効率ともに優れたSRI・B型プロペラを開発し、プロペラ設計図表と発表した。また、SRI・B型プロペラ母型の幾何形状が変化した場合のプロペラ特性及びキャビテーション性能の変化を調べ、プロペラ効率及び船尾振動に直接関連するプロペラ翼面上のキャビテーション容積にたいする影響を明らかにした。

一方、キャビテーション発生に伴う主な弊害の一つとして、プロペラ翼に損傷を与えるおそれのあるキャビテーション・エロージョン（壊食）がある。

エロージョンは、船尾の不均一流中でプロペラが作動するさいに発生する非定常キャビテーションが原因で発生する。したがって、伴流分布の不均一性とエロージョン発生の有無の関連を把握しておくことが、最適プロペラを設計する上で重要な課題である。

今回、3種類の伴流分布模型と、幾何形状の異なる12個の模型プロペラを用い、エロージョンを模擬するペイントテストを実施し、プロペラ幾何形状及び伴流分布がエロージョン発生状況に及ぼす影響を検討した。さらに、プロペラ翼面上圧力分布の理論計算結果よりエロージョン発生を予測する新しいパラメーターを求め、試験結果と組合せて新しいキャビテーション・エロージョン発生判定基準を提案した。

氷海域での腐食・防食について

On the Corrosion Control Technique
at Arctic Sea Area

在田正義

平成2年7月

日本造船学会 日本造船学会誌 733号

経済活動が活発化しつつある北極海を中心とする氷海域について、その環境の特徴、そこでの腐食の実態、防食法を概説した。

北極海は、氷の存在すること及び海水の腐食性が極めて強いことが特徴である。腐食性の強さは、溶存酸素量が多いこと及び水中に混入するシルト（沈泥）が多いことに主として起因する。氷は、年間の形態上の変化から、極を中心とする永久固着氷ゾーン、陸地に固着した氷のゾーン及びこの両ゾーンにはさまれた遷移ゾーンの3つのゾーンに分けられる。

この海域の鋼材の損耗率（腐食及び摩耗による）は0.2～0.6mm/年に達し、通常海域の0.1～0.3mm/年に比し相当高い。特に溶接継手部は、氷により防食塗膜が損傷を受けた場合、2年の稼働中に2.5mmの溝状腐食ができた例が報告されている程である。

こうした鋼材の著しい腐食を防ぐ方法として、氷海用塗膜による方法と電気防食による方法がある。

氷海用塗膜による防食は、比較的最近実用化された。エポキシ系樹脂系及びこれにガラスフレークが入った塗料、ウレタン樹脂系塗料が開発されている。これらの塗膜を実氷海で用いた経験によると、エポキシ樹脂系ガラスフレーク入り塗料による塗膜は、2年間の氷海航行後も80～85%の塗膜が残っており、他の2種に比し耐氷性がすぐれていたと報告されている。

電気防食では、氷によって構造物に加わる巨大な力、氷の電気抵抗が海水に比べて極端に小さいということ及び海水の塩分濃度が水深や季節によって大きく変動することを考慮し、外部電源方式を採用する必要がある。この方式による船舶用の防食方式が開発され、すでに実船に適用されている。氷海用海洋構造物の場合は、構造物の構造方式、周囲につく氷及びその温度分布等を仮定して、構造物への流入電流を計算することが出来る。電極の数を工夫することにより流入電流の均一化をはかるが、冬季の防食を十分行うことはむづかしい。

<大阪支所>

**蒸気流中への冷水注入に伴う流動振動と
水撃に及ぼす系圧力の影響**

Effect of System Pressure on the Flow Oscillation
and Waterhammer Induced by Injection of
Cold Water into Steam Flow

綾 威雄, 村田裕幸, 山根健次, 成合英樹
平成2年10月

日本原子力学会「1990年秋の大会」予稿集

船用炉事故時の安全評価に資する資料を得るため、ECC水がコールドレグ部より注入される場合に生じる流動振動及びそれに伴うウォータハンマ現象に及ぼす各種パラメータの影響を調べてきた。今回、大気圧から0.4MPaまでの範囲内で、システム圧力の影響を実験的に明らかにした。

実験装置は、コールド・レグ部に当たる水平管、実炉の蒸気部を模擬したヘッダー、システム圧力調整のためのレシーバタンクからなる。所定の温度に保たれたサブクール水が耐圧4MPaの水平管のほぼ中央に設けられたノズルから注入される。ポイラからの蒸気は、ヘッダーを通り水平管に導かれ、途中、注入サブクール水との接触により凝縮し、注入水とともにレシーバタンク内へ流れ込む。流動振動を時の圧力変動は水平管の4点ヘッダーで、ウォータハンマ時の衝撃圧力は注水ノズル近傍の4点でそれぞれ計測した。実験データを整理し、以下の結果を得た。

注水温度が一定な場合は、大気圧では非ウォータハンマ領域にあっても、システム圧力の上昇とともにサブクール度が増すため、ウォータハンマ発生域に入り圧力振幅が急激に増加する。しかし、システム圧力に合わせて注水温度を調節し、サブクール度を一定に保てば、圧力振幅と周期へ及ぼすシステム圧力の影響をほぼ除去することができる。つまり、システム圧力の変化をサブクール度の違いと捕えれば、従来の大気圧実験から得られた様式図から本実験の範囲内における流動振幅様式の予測が可能となる。

一方、ウォータハンマ時の平均的なピーク圧力はシステム圧力によらず10MPa程度である。しかし、事故時の安全性に関わるピーク圧力の最大値は、0.3MPaまではシステム圧力とともに増加する(0.4MPaで減少するのは、データ数の少なさによる可能性である)。なお、5MPaを越える大きなウォータハンマの発生頻度はシステム圧力の上昇とともに顕著に増加する。

**A Rational Method for Numerical Design of
Marine Valves for Reducing Their Weight**

軽量化のための船用バルブの合理的数値設計法
伊飼通明, 綾 威雄, 天田重庚(群馬大学)

平成2年10月

Proceeding of ISME KOBE '90

船用バルブのISO規格導入に伴い、JIS規格船用バルブの設計見直しが迫られている。本研究は、ISO規格に適合した船用弁の合理的な設計法の確立を目指し、弁箱部分についてFEMに基づく強度解析を行い、その結果からバルブの軽量化を試みたものである。解析対象としては、铸铁製仕切弁のPN10-200型を選び、横リブの補強効果、一部弁箱胴の増肉の効果、及びボンネットフランジの形状変更の効果について検討を行った。さらに、FEM解析のみによる最適設計法を提案するとともに、従来から使用されてきた簡易強度計算法をこの手法と実験値から評価し、簡易強度解析法の信頼性をFEM解析法程度にまで高める上で問題点を洗い出した。

主な結論は以下の通りである。

- (1) 弁箱胴を取り巻く横リブによる補強は、変形を押える上で効果が認められるものの、補強の効果は小さい。補強に関しては、弁箱胴の角部の肉厚を部分的に厚くする方が有効である。
- (2) JISでは14mmの弁箱胴肉厚を11mmと薄くし、角部の肉厚のみを12mmにすることにより、安全率8以上を守りつつ、約10%の軽量化が可能となる。漏洩特性に悪影響を与える変形は若干増大するが、ボンネットフランジの形状を、重量一定の条件下で、高応力部分の幅を広くするよう変更することにより、JIS規格バルブの変形以内に押さえることができる。
- (3) 簡易強度計算法の値は、実験値とFEM解析値より相当大きくでる。従って、設計の経済性面で優れている簡易強度計算法の精度をFEM程度にまで改善するには、詳細なFEM解析との比較により得られる補正係数が必要となる。
- (4) 修正係数が求められていない現状では、ISO規格船用バルブの設計は、FEM解析により変形量と応力値を確かめておくことが望ましい。そのためのFEMによる合理的最適設計法の一例を示した。

<東海支所>

段付き円筒ダクトおよび角ダクト内中性子束分布
簡易経験式

Empirical Formulas of Neutron Flux Distributions
in Stepped Cylindrical Ducts and Square Ducts

三浦俊正

平成2年10月

日本原子力学会 1990年秋の大会予稿集

すでに報告した円筒ダクト内中性子束空間分布に関する簡易経験式を角ダクトに対して適用するとともに段付きダクトへ拡張しその評価を行なった。実験で使用したダクトは切口の一边が約5および10cmの角ダクトおよび第1脚と第2脚の口径 D_1 と D_2 が異なる4種類の段付き円筒ダクトである。後者は第1脚が120cm, 第2脚が170cmである。口径は4.9, 10.3, 20.6cmのものを組み合わせた。測定は炉心に対するダクト軸の角度が0度と45度について行った。測定器は裸あるいはカドミ被覆の金箔およびNiペレットを使用した。円筒ダクトに対する経験式は $\Phi(X)/\Phi(O)=f(X)+\{1-f(X)\} \cdot T(X)$ で, $f(X)=1/[1+(X/\sqrt{S_e}/\alpha)^\beta]$ である。 $\Phi(O)$ および $\Phi(X)$ はダクト入口および入口から X での中性子束, $T(X)$ は遮蔽体中にダクトがない場合の中性子束相対分布, α, β は中性子エネルギーおよび入射角度に依存する定数である。この式中の円筒ダクト断面積 S_e を角ダクトのそれでおきかえ, 計算した結果円筒ダクトの場合と同程度の良い一致がえられていることがわかった。段付きダクトの場合は, 円筒ダクトの式の中の $f(X)$ を次のように変更した。 $X/\sqrt{S_e}/\alpha \gg 1$ において $f(X) \sim 1/(X/\sqrt{S_e}/\alpha)^\beta = h_1 \times h_2$ とする。ここで $h_1=1/(X/\sqrt{S_s}/\alpha)^2$, $h_2=1/(X/\sqrt{S_c}/\alpha)^{\beta-2}$ 。 h_1 は直接線に対応するので, h_2 がアルベド線に対応することになる。そこで, h_1 中の S_s は計算点から見える線源面積とする。このようにすると $D_1 > D_2$ のときは, 計算点によっては S_s は第1脚の断面積 S_e とは必ずしも一致しない。また, h_2 中の S_c はダクト壁での散乱線の角度分布をコサイン分布と仮定することにより $(S_s+S_x)/2$ とする。ただし S_x は計算点でのダクト断面積である。これはアルベド線としては, 線源および計算点近傍の壁からの散乱線が寄与することによる。実験値と計算値は第2脚中でファクター2以内で一致した。