

テーパ接触部の力学的挙動に関する研究
第1報 接触部の表面粗さと摩擦係数の関係について
Stress Analysis and Experimental Study of Friction on
Tapered Joint Surface

1st Report, Effect of Surface Roughness

高井元弘

平成10年11月

日本船用機関学会

第61回学術講演会学術講演論文集

主機関からプロペラへ動力を伝達する軸系部材間の接続には、テーパ押込み式や焼嵌式など接触面の摩擦力を利用したトルク伝達方式が使われている。キーや継ぎ手ボルトを用いた方式に比べ、構造が簡単であり、応力集中が小さく、強度的な信頼性が期待できる。しかし、摩擦伝達部における現象を直接観察、検出することができないことなどにより結合部の設計、工程管理は経験的な手法により行われる傾向にある。ガスタービン主機のような高速機関では、高速かつ軽量の回転軸の採用が有利であり、また、軸系の軽量化のため内外径比の大きい中空軸が採用される傾向にある。さらに、ボス比の小さいプロペラ装置のキーレス化が進められている。これらの部材で十分な伝達能力と強度的な信頼性を確保するためには接触面における摩擦力と表面状態の関係や接触面の力学的挙動を明らかにし、より合理的な設計を行う必要がある。

本報告では、まず、テーパ接触部の表面粗さと摩擦挙動の関係を明らかにするため、テーパ接触部の表面粗さを変えたモデル試験片を用いて、押込み試験、ねじり試験を行い、FEM解析結果と合わせて、テーパ接触部の摩擦部の摩擦特性について検討した結果について述べた。モデル試験片のボス部はプロペラ材料であるAIBC3および軸材料であるSF440Aにより、また、テーパ軸部の材料はSF440Aにより製作した。ボスおよびテーパ軸のテーパ部はそれぞれ粒度の異なる3種類の研磨紙で最終仕上げを行い、レーザ顕微鏡により軸方向、円周方向の粗さを光学的に測定した。押込み試験時の摩擦係数は、ボス部接触部内面のFEM応力解析結果に基づき求めた。摩擦係数に関しては、表面粗さの影響は比較的少なく、ボス内面で塑性変形を起こすような大きな押込み量の場合は、摩擦係数が増加する傾向があるなどの結果が得られた。

鋼板上への鋼球落下における反発係数と板厚の相関について

Relationship between a Coefficient of Rebound and Plate Thickness

Measured by Steel Ball Drop on a Steel Plate

島田道男、吉井徳治、成瀬 健

平成11年5月

日本非破壊検査協会 平成11年春季大会講演概要集

高齢船舶の安全確保には、腐食した部材劣化度の定量把握が大切であり、超音波厚さ計測やハンマリングによる検査が行われている。前者は検査面を平滑化するためのグラインダ処理が必要で適用性が良くない。また、後者はハンマーで叩いたときの音響から経験的に判断するので、定量性に乏しい点に問題がある。適用性に優れた定量的評価法が求められている。

そこで、新しい板厚推定法を開発するため、鋼板上に落下させた鋼球の反発挙動を調べる計測装置を用いて、鋼球の反発係数や接触時間を実験的に求めた。鋼球径20、30、40、50mmの4種、鋼板厚さ10、16、22mmの3種、落下高さ8、16、32mmの3種で計測実験を実施した。鋼板は井桁状の補強材を裏面に隅肉溶接した1m×1m角のSS400鋼板である。

反発係数は、補強材位置では大きく、補強材から離れると低下した。補強材から100mm程度以上離れると、反発係数は板厚と鋼球径で定まる一定値に収斂した。ただし、鋼板が厚く、鋼球が小さいときには補強材位置と100mm以上離れた位置での反発係数がさらに小さくなる場合があった。

また、接触時間は一般に測定位置の影響が小さかったが、鋼板が薄く、鋼球径が大きい場合には、接触時間が増大する傾向が見られた。この現象を接触要素を用いた有限要素解析によってシミュレートしたところ、補強材から離れると、鋼板の鋼球に対する剛性が低下し、大きな鋼球を短時間で反発できなくなる現象が見られた。また、接触時間が最大の位置では、鋼板に誘起される振動成分が増し、鋼球を2度叩いてしまう現象が生じ、さらに補強材から離れた位置では、1回目の接触のみとなり、かえって接触時間が減少することが確かめられた。

予稿集では、紙面の節約のため紹介できなかったが、反発係数と測定位置の関係を有限要素解析でシミュレートし、実験と同傾向の関係が得られることを確かめた。ただし、反発係数の大きさは有限要素解析での値が大きかった。実験では、鋼板表層部に生じる塑性変形にエネルギーが消費されるためと考えられた。

反発係数は、測定位置および鋼球径を適当に選べば、補強材の影響から免れて板厚推定に利用できるパラメータであることが分かった。

**Effect of Grain Size on the SlidingWear and Friction
of Alumina at Elevated Temperatures**

アルミナの高温すべりの摩擦磨耗における結晶粒径の
影響

千田哲也、安田榮一

梶 正己

Richard C.Bradt

平成11年6月

Journal of the American Ceramic Society

Vol.82,NO.6

結晶粒径が3.4 μm から11.6 μm の範囲で異なる3種類のアルミナについて、室温から1000℃までの範囲で摩擦摩耗特性を調べた。アルミナは1000℃レベルの高温で摩耗がほとんどなくなり、これが表面層の塑性変形により脆性的な破壊が抑制されるためであることが知られている。摩擦係数を連続的に測定すると500℃から1000℃の範囲で温度が上昇するのにしたがって低下したが、その温度依存性は2つの領域に分かれた。すなわち、700℃までは温度の上昇に対して摩擦係数の低下は $10^{-3}/\text{℃}$ 程度と急激であったが、700℃以上では $10^{-5}/\text{℃}$ と緩やかになった。この変化は、脆性破壊から塑性変形への摩擦面挙動の変化に対応するものと考えられる。粒径の大きな試料の場合に摩擦係数が少し高いものの、脆性から塑性への挙動の変化を含め摩擦係数は粒径に強く依存することはなかった。

一方、脆性破壊領域である室温と600℃における比摩耗量は、結晶粒径が大きくなるほど増加した。摩耗面の詳細な観察から、摩耗機構はおもに粒界の微小破壊によるものと判明した。これは、ダイヤモンド圧子によるアプレシブ摩耗の傾向とも一致し、アルミナの磨耗が粒界のマイクロ破壊に支配されるというメカニズムを支持する結果であった。1000℃では比摩耗量は非常に小さくなり、したがって粒径依存性も明確ではなくなった。摩擦面には微細粒子からなる表面層が形成されていた。この表面層の粒径と、摩擦面温度とひずみ速度から求められる Zener-Hollomon パラメータとの関係をプロットすると前報で報告した対数表示での直線に一致し、前報で提案した動的再結晶による表面層の形成という高温摩擦機構を支持する結果が得られた。

**二振動子探触子による腐食部材板厚評価特性の検討
Investigation on Thickness Measurement Characteristics
of Corroded Steel Plates using a SE Probe**

島田道男、吉井徳治、成瀬 健

平成11年7月

日本非破壊検査協会

平成11年度第2回新素材の非破壊評価特別研究委員会
資料

高齢船舶の運行が世界的に増加傾向にあること、および海難事故が大きな環境破壊をもたらす恐れがあることなどのため、船舶の構造健全性を確保するための検査が強化される方向にある。高齢船舶では、腐食衰耗による板厚減小が船体構造劣化の大きな要因であり、船体の腐食部材に対する超音波厚さ測定の重要性も増している。

しかし、板厚測定は多くの手間・費用を要する作業であることが、十分な測定点数を確保する上での障害となっている。板厚測定は、超音波厚さ計によって行われるが、腐食生成物と腐食によって生じた凹凸を取り除くためのグラインダ掛けが必要なことがその一因である。

当所は、近年日本海で折損事故を起こしたナホトカ号の船体構造部材について、板厚測定を行う機会を得た。そこで、超音波厚さ計を用いた腐食部材板厚測定法改善の資料を得る目的で、板厚測定実験を実施した。

ナホトカ号から採取した複数の腐食試験片について、錆を落とした状態で、二振動子探触子による超音波厚さ測定、ダイヤルゲージによる厚さ測定、水浸超音波法により表面あらさ測定を実施し、腐食によって生じた凹凸が超音波厚さ測定に与える影響を調べた。錆を落とした凹凸状態の試験片でも、二振動子探触子による厚さ測定が適用できることが分かったが、本試験片では、厚さを0.6～1.5mm 過大評価することが分かった。また、表面の粗さは超音波厚さ測定値を増大させ、裏面の荒さは超音波厚さ測定値を減少させ、その程度は前者が後者の4倍であることが分かった。

この結果は、錆を落とした腐食面からの板厚測定は、板厚を過大評価するもので危険側であるし、無視するにはやや大きな誤差を有していることを示している。グラインダ掛けを省略し、腐食凹凸面から厚さ測定するには、誤差を小さくする工夫が求められる。

溶射皮膜における熱衝撃劣化部の超音波探傷画像による評価

Evaluation of Thermal Shock Damaged Plasma Sprayed Coatings Using Ultrasonic Immersion Technique

島田道男、吉井徳治、秋山 繁

平成11年7月

可視化情報学会

第27回可視化情報シンポジウム講演論文集

Vol.19 NO.1

熱機関の効率向上、宇宙往還機や核融合炉を実現するため、プラズマ溶射皮膜の耐熱性向上を目的とした研究が行われている。皮膜組成を表面のセラミックスから界面の金属組織に徐々に変化させる傾斜機能材料化は、界面に発生する熱応力を低減し、熱応力破壊特性を改善できるので、大きな期待が寄せられている。

熱応力破壊特性を調べるため、短時間レーザー照射による急速な加熱冷却過程で大きな熱応力を発生させ、皮膜を破壊するレーザー熱衝撃試験が行われている。結果の判定は表面上の割れや性状変化を観察することによって行うが、内部の割れや界面剥離等の詳細な評価を行うためには、試料の切断等の作業が必要であり、必ずしも容易でない。

そこで、超音波を用いて非破壊的に熱衝撃部の劣化状態の評価を試みた。試料としては、組成を表面から界面に向けて8YSZ($ZrO_2 \cdot Y_2O_3$:8%)からNiCrAlYへ連続的に変化させたFGM皮膜試料、7:3混合皮膜試料および8YSZ単層皮膜試料の3種を用い、レーザー出力720W、540W、360W、180Wでそれぞれ1秒間の熱衝撃を加えた。熱衝撃劣化部を水浸超音波探傷(探触子は周波数35MHzおよび15MHz、集束距離12.7mmおよび25.4mmの2種)し、得られた探傷画像と、試料断面を走査電子顕微鏡で観察した結果を比べた。

FGM皮膜試料では表面性状の変化はなかったが、他の試料では表面が熔融平滑化したり発泡盛り上がりを生じるなどの現象が見られ、FGM皮膜試料の耐熱性が優れていることが分かった。これらの表面性状の変化は表面エコー画像に認められたが、表面割れは溶射皮膜特有の表面荒さに邪魔されて表面エコー画像には表れなかった。

7:3混合皮膜試料および8YSZ単層皮膜試料では、皮膜内部の層間剥離に伴うエコー高さ低下が溶射皮膜を透過した底面エコー画像に認められた。FGM皮膜試料では層間剥離はなく、一部縦割れに伴うエコー高さが部分的に低下した領域、および超音波伝播速度が劣化領域で増大することが観測された。また界面エコー画像から界面の劣化状態が判断できることが分かった。

<装備部>

Effects of Vibration Reduction in Cabins with a New Floating Lining System at Trial Run

新方式防振内装船室の公試運転時における振動低減効果

原野勝博、今里元信、藤井 忍

平成10年11月

Proceedings of the 1998 International Congress on Noise Control Engineering

筆者等は、新方式防振内装法の設計概念を提案し、その有効性をモデル実験で既に確認した。最近建造された練習船“青雲丸”の一室にこの方式が試用され、同船の公試運転時に振動・騒音を計測し、その効果や問題点を調べた。本報告は、新方式防振内装法の設計概念と、模型実験結果とを総括し、実船における同内装法の仕様の詳細と、公試運転時の計測結果を述べたものである。

モデル実験と実船実験の結果には、大きな差異があった。その原因の一つは、実船では浮床の防振効果が予測値よりかなり小さかったことである。新方式防振内装の防振効果は、実船では期待した程の効果は得られなかったが、床面の振動レベルを下げることで、内装パネルの振動減衰性能を上げること、さらに天井の防振ハンガーの改良により、さらに防振性能をあげることが可能である。浮床の振動レベルを低下させることは、浮床の面密度を大きくすること、クッション層を厚くすることで容易に達成できるが、実船では軽量でかさばらない床が望まれており、防振効果が高くてかつ軽量で薄いという相反する利点を有する浮床を開発することが必要となっている。

船舶の建造工程におけるLCI解析

Application of Life Cycle Inventory Analysis to Shipbuilding

亀山道弘、木原 洸、福元正明、

千田哲也、城田英之、平岡克英

平成10年12月

日本機械学会

第7回交通・物流部門大会講演論文集

製品のライフサイクルにわたる環境への影響を評価するLCA(Life Cycle Assessment)がISO14000シリーズの普及と共に産業界に広がりを見せている。日本では多くの資源やエネルギー等を海外から船舶により輸入するため、製品のLCI解析(Life Cycle Inventory Analysis)では、船舶による輸送を考慮する必要がある。しかし、数十万に及ぶ素材や部品を使用して建造され、様々な環境で運航される船舶のライフサイクルは複雑であり、船舶自体のLCI解析は未だ本格的に実施され

ていない。そのため著者等はモデル船を対象に船舶の建造、運航及び解体にわたる船舶のLCI解析の第一歩として、モデル船とその建造工程におけるインベントリー解析を行った。

解析の対象としたモデル船は単底構造の載荷重量(DWT)約87,000トンのタンカーとした。モデル船の船体重量のうち、鋼材や大型鑄鍛造品等の船殻重量が約77%または主機関等の艤装重量が約23%を占めている。造船所の建造工程を設計、切断、曲げ、溶接、運搬、塗装、据付等の主な作業プロセスと使用する素材や部品のフロー図としてまとめた。また建造工程全体で使用する素材や部品の種類と重量、電力や酸素ガス等の使用量及び鉄スクラップの発生量等の造船所における調査結果を示した。

一方、建造工程で消費する電力の大部分は溶接作業によるものと考えられる。そのため、溶接作業を建造工程の代表的な作業として市販の解析ソフトを使ったLCI解析を行い、船舶建造作業におけるCO₂の排出量の概略値を得た。

これらの調査や解析の実施を通じ、船舶の建造工程におけるインベントリー解析を行う場合の課題が以下のように明らかになった。

- (1) 船舶に使用される厚板鋼材等の素材や主機関等船舶に使用される部品の製造に関するインベントリーデータ並びに溶接等の建造工程での作業プロセスデータは、現時点ではデータベースとして整備されていない。
- (2) 船舶に使用する素材や部品の種類及び数量は企業機密に属し、一般には公開することはできないため、インベントリー解析の実施には船主及び造船所の協力が必要である。
- (3) 船舶の建造工程は作業プロセスの作業量(プロセス量)が明確ではなく、建造作業に伴う環境への排出物の量を解析することは困難である。
- (4) 船舶のライフサイクル全体のLCI解析の実施では、エネルギー消費の観点からは運航が大きな割合を占めることから、運航条件を的確に考慮することが重要となる。

ケミカルタンカーにおけるベンゼン積み込み作業時の 排出濃度

Concentration of Benzene Emitted from Chemical Tanker During Loading Operation

間島隆博、山口勝治、藤井 忍、
山之内博、坂本真二

平成10年12月

日本機械学会

第7回交通・物流部門大会講演論文集

上輸送中に蒸発し、ガスとなって船舶から大気中に漏出・排出されているが、低濃度のベンゼンガスであっても慢性的に暴露されると白血病の原因になると懸念されている。しかしながら、ケミカルタンカーでは100%に近いベンゼンを大量に取り扱うことから、乗組員、荷役従事者及び周辺住民への影響が危惧されている。

ケミカルタンカーの荷役、輸送サイクルは、積み荷役、航海、揚げ荷役、タンククリーニングの4つに分類できるが、今回はその中で、積み込み作業時の排出濃度について実船計測を行った。

対象船舶は国内のベンゼン輸送で最も多く使用されている499GTケミカルタンカーとした。このタンカーは左右2タンク、前後方向に4タンク、計8タンクを有し、約1,000トンのベンゼンを積載する能力を持つ。また、タンクの排気管は甲板中央に設置された4タンク共通、2本のベントポストに集約されている場合が多く、最終的にここから排出が行われる。排出ガスはベントポストに設置されているドレンコックから採取された。計測対象となるタンクは1本のベントポストが4タンク共通に使用されているため、他のタンクからの排気ガスの影響を受けない最初に積み込まれるタンクを対象とした。また、採取はタンク内の液面高さがある設定高さになった時に行った。(タンク形状が直方体、積み込み流量はほぼ一定であるため、排出濃度の時間履歴が得られることになる。)この測定結果から、排出濃度は積み込み直後は低く、液面がタンク天井付近まで上昇すると急激に増大する結果が得られた。また、計測値を指数近似で表し、得られた曲線を積分することより1タンクあたりの総排出量を得た。

また、タンク内の蒸発ガスの拡散を一次元の拡散方程式を用いて表現した簡易的な排出濃度、排出量推定法を提案した。この手法により計測した条件について解析を行うと、計測結果と同様、液面上昇に伴い急激な濃度の上昇がみられた。また、拡散係数の比較から80%程度が移流による拡散、残りの20%程度が分子拡散であったという結論を得た。また、この推定法によると積み込まれるベンゼン液の温度が排出量、排出濃度に大きく影響することが分かった。この簡易推定法により、排出メカニズムが明らかになり、ベンゼンの排出量低減に対する有効な情報が期待できる。

ベンゼン等揮発性物質は岸壁での荷役作業中及び海

Withdrawal of Highly Viscous Oil and Oil Layer at a Moving Barrier

高粘性油の回収と移動堰部の油層
上田浩一、山之内博、藤井 忍、前田利雄
平成11年6月

Environment Canada, Emergencies Science Division
Proceedings of 22nd Arctic and Marine Oilspill Program
Technical Seminar

1997年1月に起こったナホトカ号の油流出事故では流出油を海洋で回収することができず多くの油が海岸に漂着し、被害を多くした。回収が困難になった一つの要因は油が高粘性になり回収することができないことであり、もう一つの要因は高波浪のためである。三国町で1月14日に採集された45%の水を含んだ油はC重油のエマルジョン油と同じ程度の粘度であったが、片岩で1月31日に採集された69%水分のエマルジョン油はC重油のエマルジョン油の10倍の粘度であった。流出油の回収に関して、流出油の粘性は流出直後の低粘性から、流出から長時間経った後の高粘性の範囲まで広い。C重油やC重油と水のエマルジョンの表面張力は25℃から45℃までは約0.03N/mであった。25℃から温度が下がるにつれて表面張力も小さくなり、含水率の多いC重油のエマルジョン程、表面張力は小さくなった。表面張力は5℃以下では測定できなかった。油水の界面張力は低粘性油程小さく、したがって低粘性の油はBrawnらの報告に見られるように、水流のあるところの堰き止め油層の界面で油滴になりやすい。高粘性の油では油水の界面張力の粘性に比べて、回収や堰き止めに関する影響は少ない。低粘性の油は吸引することができ、そして回収できる。しかし高粘性の油は回収や移送され難い。実際の海では油回収機の性能は高波高により低減する。したがって高粘性の油を回収することと、波浪下でも回収できる必要がある。

この研究では、高粘性油に関して、網ベルトによる回収方式が検討された。回収装置により流れが妨げられる場合には、油層が回収部まで流れない。波浪がある時波は回収部で反射される。そこで油は前方へ流されてしまう。しかし網ベルトによる回収装置の場合には、水流が網を通過して流れ、油は網ベルトに到着する。回収網ベルトを用いることにより、波が網ベルトを通り抜け、反射されることなく、浮遊油層がうまく網ベルトで回収され、低粘性油の場合には、その油は網ベルトを通り抜け、堰で堰き止め、吸引回収する。そこで移動堰前の油層についても調べた。

<システム技術部>

3D-VR Plant State Expression with See-Through - Type Head Mounted Display

for Human Interface in Plant Control Operation
プラント運転のヒューマンインターフェイスのための透過型ヘッドマウントディスプレイによる3D-VR表現
沼野正義、宮崎恵子、田中邦彦、
福戸淳司、松倉洋史、丹羽康之
平成10年10月

Proceedings of 1998 IEEE International Conference on
Systems, Man, Cybernetics

原子力プラント等の大規模かつ複雑なシステムは、熟練したオペレーターチームによって安全かつ効率的に運転されている。しかしながら現在では、オペレーターのヒューマンエラーを防止するために様々な自動化システムが取り入れられている。

自動化システムは、設計時に考慮された事象に対しては有効に働くが、自動化システムが対応する範囲を超えた事象が発生した場合は、人間のオペレーターの適切な対応が求められている。この際には、オペレーターは、訓練によって培われたプラントの構造や動作に関する理論的な理解に基づいて、現状を推定し適切な処置を施す。人間が陥りやすい「見落とし」、「思いこみ」等を防止するためには、理論的な理解と同時に、視覚的および感覚的な経験に基づく理解が重要である。プラントの運転に際しても、視覚的および感覚的な経験に基づく理解をもたらすヒューマンインターフェイスは、エラーを防止する観点で重要であると考え、従来の制御パネルやディスプレイに加えて、プラント情報を現場感覚で捉えることのできる3D-VR表示を通して人間に与える手法を提案する。プラントの3次元的形状の上に、温度、圧力等の状態量そのものや時間微分値等を色で表示するとともに、流量等の流体の状態量は、管路内等パーティクルを表示して、その動きで表現することとした。これらは、透過型ヘッドマウントディスプレイを使用することにより、容易に従来の運転制御システムと併用することが可能である。

また、オペレーターチームによる運転における協調や役割分担を果たすために、3D-VR空間内でのポインターは的確な情報交換の支援として有効である。同時に、プラントを制御するための操作入力、例えばバルブの開閉においては、現場のアクチュエータの動きやプラント状態量の遷移を遠隔操作入力端に、反力、振動、音などを用いてフィードバックさせることが有効である。

<原子力技術部>

**TLD Responses Backed by Copper, Silver or Gold for
20-40 keV Monoenergetic Photons**

銅、銀、または金を後方にもつTLDの20-40keV単一エネルギー光子に対する応答

成山展照、波戸芳仁、伴 秀一、平山英夫

平成10年7月

12th International Conference on Solid State Dosimetry
Radiation Protection Dosimetry Vol.84

高原子番号の物質に隣接した線量計が光子に照射された場合、人体組織等価物質中における線量より大きな線量はその境界において高原子番号物質からの二次電子と蛍光光子により与えられる。本研究では、低エネルギー領域におけるこうした効果の線量計応答に及ぼす影響を調べるため、異なる媒質に後方で接する熱蛍光線量計 (TLD) の20-40keV単一エネルギー光子に対する応答を測定し、光子-電子輸送計算コードEGS4により解析を行った。

実験は、高エネルギー加速器研究機構の2.5GeV蓄積リングからのシンクロトロン放射光を用いて行った。厚さ0.38mmのフッ化リチウムTLD(TLD-100)を異なる厚さの銅、銀、金箔に密着させ、20、30、40keV単一エネルギー光子をTLD側に照射した。照射線量は、自由空気電離箱によりモニターした。

0.1mm厚さの銅箔、0.5mm厚さの銀箔、0.01mm厚さの金箔に対して、各箔を後方にもつ場合のTLD線量の自由空気中におけるTLD線量に対する比すなわち後方散乱因子は、40keV光子に対してそれぞれ1.36、2.13、1.38であり、光子エネルギーと箔厚さの減少と共に小さくなることが示された。また、EGS4による計算値は、20-40keVのエネルギー領域において実験値と一致した。さらに、箔からの影響を成分弁別するため、カプトンフィルムをTLDとホイルの間に挿入することにより箔からの二次電子を除去し、蛍光光子の影響は箔厚さの増大と共に大きくなることを明らかにした。

深海調査船用原子炉DRXの貫流型蒸気発生器の流動安定性解析

**Hydraulic Instability Analysis of Deep-Sea Reactor
Drx's Once-Through Steam Generator**

安達雅樹、石田紀久

平成10年9月

日本原子力学会「1998年秋の大会」予稿集

深海調査船用原子炉DRXは大型船舶用原子炉MRXと同様に貫流型蒸気発生器(以下SGと呼称)を採用している。このとき二次冷却水が流れる伝熱管内では相変化に伴い密度波不安定などの流動不安定現象が発生する。そこで水力的安定化対策のために解析評価を

行った。さらにDRXは崩壊熱除去にSGを用いるので自然循環による崩壊熱除去性能への影響を検討した。解析手法は、一般的な線形安定性解析法に従った。このときの仮定は、・一次元流、・均質流、・一様熱負荷、・圧力変化に伴う物性値の変化無視である。両ヘッダー間の圧力差一定という境界条件のもとに、特性方程式を導き、これを使って系の安定判別を行うが、各パラメータが安定限界に及ぼす影響を調べるためにネイマルクのD分割法を用いた。本解析の前に、昭和56年に当所で行った貫流型蒸気発生器の実験結果と比較することで解析の精度を検証した。一例として、実験番号“IN-5-31-194-1200”の解析の場合、安定化する絞りの係数の最小値は、実験結果では1420であるのに対し、本解析では1627となった。振動周期は、実験では11.4秒、解析では10.53秒(5次)である。他の実験条件の場合も同程度であり、本解析は概ね妥当な精度と言える。工学設計の段階では二次水の流れは密度波不安定に陥る可能性があることから、想定される炉の出力に対して伝熱管の挙動を安定させるのに必要な入口での最小絞りの係数(K_{in})を評価した。 K_{in} の値はおおむね管内圧力損失の30%から50%であり、管内の圧力損失の見積もり計算の影響を受けていることを確認した。特に管摩擦係数を用いて圧力損失を評価する場合、DRXの運転範囲に対する入口流量のレイノルズ数がほぼ遷移域に位置するため、管摩擦係数が大きめに評価される。故に K_{in} もこの影響を受けることが考えられる。以上の解析結果を基に安定化対策として、オリフィスを給水入口に設ける。このオリフィスを設置することで、SG内の流動圧力損失が増加する。これと関連して崩壊熱除去時に十分な流量が確保されるかを検証した。例えば定格出力の5%に相当する崩壊熱を除去するのに必要な流量が定格時の5%とすると、SGの全圧力損失がオリフィスにより1.76kPaから1.8kPaに増えるが、自然循環の駆動水頭が30kPaであるので5%流量が確保でき崩壊熱除去性能への影響は問題ない。以上の結果からDRXのSGの水力的安定性を解析評価し、給水入口部にオリフィスを設置することにより、安定な運転が出来ることを明らかにした。また、崩壊熱除去性能への影響がないことを確認した。さらに、解析精度について実験との比較により妥当であることを確認した。

Numerical Simulation of Cold Leg Flow Oscillation of a PWR

PWR コールドレグ流動振動の数値シミュレーション

安達雅樹、綾 威雄

平成11年7月

Proceedings of the 3rd ASME/JSME Joint Fluid Engineering Conference

加圧水型炉 (PWR) の一次系破断事故時には、緊急炉心冷却水がコールドレグと呼ばれる配管から注入されるが、配管内を流れる蒸気と注入水との直接接触に伴い、凝縮起因水撃の生じる可能性が模擬実験により確認されている。コールドレグ流動振動と呼ばれるこの現象は、PWR の事故時の健全性に関わることから、実験及び解析研究がなされ、蒸気-水界面が注水口の下流にある時のみ凝縮が100%生じるとするいわゆる凝縮 ON-OFF モデルが提案された。しかしながら、このモデルでは現象を十分模擬できないことが指摘されてきた。

そこで、本研究では、先ず凝縮量の時間的変化を把握するため、小規模模擬実験における圧力変動データなどから、凝縮量の変化を評価し、蒸気流量が大きく変化していることや、圧力急降下時に過渡的な蒸発が生じていることを明らかにした。次に、コールドレグ流動振動現象を数値シミュレーションするため、凝縮特性が注水ジェット部とその下流の水平界面とで異なることを考慮したモデルを考案した。これら二つの領域における凝縮熱伝達率としては、著者の一人がかってレビューした直接接触熱伝達率を採用した。これによると、注水ジェット部の円柱状界面の熱伝達率は、 $10^5 \sim 10^6 \text{ W/m}^2\text{K}$ であるのに対し、水平界面の熱伝達率は、界面が安定している場合 $10^4 \text{ W/m}^2\text{K}$ 程度であるが、流動振動に伴い波立っている場合は、 $10^5 \text{ W/m}^2\text{K}$ 程度まで上昇する。この他、凝縮量に関わる界面積は、水平界面が層状部先端位置まで広がっているとの仮定から評価した。層状部先端位置を求めるため、水平管内の気液ドリフト速度相関式が使われている。

以上のモデルを組み込んだ解析プログラムを作成し、模擬実験で凝縮起因水撃が生じた境界条件と初期条件に対する数値シミュレーションを行った結果、実験とほぼ同様の周期を持った圧力変動と界面変動が再現できた。また、流動振動に伴うボイド率と蒸気流速を詳細に調べ、過渡的に層状流からスラグ流へ遷移する条件が満たされていること、つまり、水撃が生じ得ることを確認した。

新安全工学便覧 (2.材料物性 2.10放射線遮へい材) New Handbook of Safety Engineering

(2. Properties of Materials 2.10 Shielding Materials)

植木紘太郎

安全工学協会編 編集委員長：上原陽一、他

平成11年6月

コロナ社

新安全工学便覧 安全工学協会編

2.10 放射線遮へい材

原子力施設 (原子炉、再処理工場、放射性物質輸送あるいは貯蔵容器など) では、それらを取り扱う作業者や施設周辺住民などの放射線被曝を防ぐため、色々な方策を講ずる必要がある。放射線被曝を大別すると、放射性物質を体内に取り込むことによって人体の器官や組織が被曝するところの内部被曝と、核分裂、核融合あるいは放射性物質から発生する放射線に人体が曝されることによって被曝するところの外部被曝があるが、ここで取り上げる遮へい材は専ら放射線を減衰させるために用いるので、本節では外部被曝を対象とする。外部被曝を低減するための3原則として、(1) 線源から離れる (放射線の強度は距離の2乗に反比例すると言われているが、これは誤りであり、それぞれの線源の形状や線源周囲遮へいの構造によって異なる)、(2) 被曝時間の短縮、(3) そして適切な遮へい材の使用、がある。

放射線源としては、即発ガンマ線、核分裂生成物、放射性同位元素、核分裂中性子、自発核分裂中性子、及び核融合中性子について述べている。

遮へい材料の特徴としては、水、ポリエチレン、普通コンクリート、蛇門岩コンクリート、ステンレス鋼、レジンF、NS-4-FR、ホウ化チタン、窒化ホウ素について述べている。また、遮へい材の性能については、上記の材料を主に、ガンマ線及び中性子に対し、遮へい性能の目安となる1/10価層について当所で行った実験データを含め、詳しく記述している。また、モンテカルロ法によるより詳細な遮へい計算を行うことにより、簡易計算法、一次元あるいは二次元計算では簡略化せざるを得ない構造や体系が三次元的に忠実なモデル化が出来るので、計算結果 (線量当量率など) は過大評価することなく、正確でより現実的な値が得られる。したがって、モンテカルロ法を用いることにより、より合理的な遮へい設計が可能になり、遮へいコストの低減という課題も解決出来るようになる、という点にも触れている。

<海洋開発工学部>

海水によるワイヤロープの腐食劣化の研究
その3 実海域における暴露試験結果

Study on Corrosion Degradation of Wire Rope in Sea
Water

3rd Report: Result of At-Sea Exposure Test

山川賢次、坂本洋志、井上新也、木津和富雄、
早崎清志、鯖江俊彦、守谷敏之、倉本広志
平成10年11月

平成10年度 資源・素材関係学協会合同秋季大会
資源・素材 '98 (北九州)

海洋構造物や船舶におけるワイヤロープの利用は、係留や荷役など広範囲にわたる用途を有しており、不可欠な部材である。このように海洋環境で使用されるワイヤロープは、腐食による劣化が著しく、安全性を確保するためには的確な検査を行う必要がある。しかし、検査に必要なワイヤロープの腐食劣化に関する資料は非常に乏しく、今後発展するであろう海洋構造物の維持管理技術の要素の一つとして、これらの資料の充実が重要と考えられる。

このような観点からワイヤロープの腐食劣化の資料を得るために、実海水を用いた研究室における浸漬試験を共同研究で実施中である。これに加えて1997年1月から12月までの約1年間、実海域における暴露試験を実施した。この暴露試験では、メガフロート技術研究組合が横須賀市の住友重機械工業(株)追浜造船所東岸壁の沖約250mに係留された実証研究用浮体構造物の係留用ドルフィンに試料ロープを設置した。

試料は、ワイヤロープ8種類、銅線3種類である。試料の長さは5mとし、上端が平均海面から2.5mの高さになるように4セット設置して、3ヶ月毎に1セットずつ回収した。したがって、試料全長の暴露環境は、空气中、干満帯、海水中に及び、3ヶ月毎に3つの環境のデータが得られた。

実海域における11ヶ月間の暴露試験の結果は、次のようにまとめることができる。

- 1) めっきを施さない裸ロープは暴露試験開始直後から破断荷重が低下し始め、11ヶ月間の暴露試験では、30φロープが約10%、16φロープが約30%低下した。めっきを施したロープについては、最大で約6%の低下であった。
- 2) めっきの減少は、外層線に近いほど急激で、内部では緩和される傾向と、全層の進行が同程度で緩やかな場合との二通りがある。アルミニウムめっきロープは、耐食性が優れている。
- 3) 機械的性質の変化は、9ヶ月を過ぎると急激に低下し、海水中環境の場合の低下が大きい傾向がある。

4) 室内水槽による浸漬試験で実海域における腐食劣化を時間の同一スケールで再現することは困難である。

超大型浮体の弾性応答時系列計算法

Time Domain Analysis of Hydroelastic Behavior of VLFS

大松重雄

平成10年11月

日本造船学会論文集 第184号

最近、超大型浮体式海洋構造物の規則波中における弾性応答の実用的計算が可能となり、その基本的な特性なども明らかにされつつある。しかしながら、言うまでもなく実海域の波浪は方向分散性を持った不規則波である。一般の船舶等の動揺に関しては、不規則波中応答は規則波中応答の線形重ね合わせ理論が適用できることが知られているが、超大型浮体の弾性応答に関しても線形重ね合わせ理論が適用できるか否かを確認しておくことは重要である。不規則波に対する応答の有義値に関しては同理論の妥当性が示されているが、本論文ではより精密に、規則波中の応答関数の理論値を用いて不規則波中の応答を時間ベースで求め、長波頂不規則波中の模型実験結果と比較することにより、上記理論の妥当性を確認した。

また、弾性浮体上に物体が落下した場合や航空機の離着陸時のように浮体上を荷重が移動していく場合の弾性挙動についても上記と同様な理論展開が可能である。この場合は、平水中で浮体上のある点に周期的な荷重が加えられたときの弾性応答の周波数応答関数を求めておくことになる。その応答関数は、規則波に対する応答計算プログラムを若干修正することにより簡便に求められる。これらの応答関数を用いて弾性応答のインパルス応答関数を求めておけば、変動荷重との畳込み積分により任意に変動する荷重に対する応答が得られる。この場合も、弾性浮体模型上にウエイトを落下及び移動させた実験結果と比較し、計算法の妥当性を確認した。

ユニット接合された箱型浮体の波浪応答
Hydroelastic Response of Joining Floating Units in
Waves

矢後清和、松浦正己、島宗誠一、
鳥井正志、山下泰生、中野昭三郎

平成10年11月

テクノオーシャン'98国際シンポジウム
プロシーディングス

埋め立て工法に適した水深20m以下の海域は来世紀初頭にはほぼ飽和するとも言われており、より大水深における海洋空間を有効に利用したいとする考え方がある。近年、ポンツーン型浮体を用いた海上空港構想がマリフロート推進機構から発表され、これを受ける形でポンツーン形式の超大型浮体式海洋構造物の研究が各方面で活発に進められている。1995年～1998年にはメガフロート技術研究組合による、長さ300mのポンツーン型浮体を用いた大規模な実海域実験が実施され、さらに1998年からは長さ1,000m規模の浮体による実海域実験が開始されようとしている。

海上空港に用いられる規模の大型浮体式構造物は長さ4～5kmにもおよび、既存のドックで1体の構造物として建造することは事実上不可能であり、長さ数100m規模のユニットを多数設置海域まで曳航し洋上で溶接接合される計画である。

ユニットの洋上接合は、①接合前のユニット同士の引き寄せ、②仮接合による相対変位の拘束③最終的な溶接接合という過程をとることになる。その過程において、波浪の影響により浮体の挙動および仮接合部に働く荷重が多様に変化することが考えられ、それらを精度良く推定することが施工上重要なテーマとなる。また、こうした浮体式構造物は、長大なるがゆえに長さと同深さの比が1/100～1/1,000のオーダーとなり相対的に曲げ剛性も小さくなるため、挙動を流体と弾性変形運動の連成を考慮した流力弾性現象として扱わなくてはならない。

本研究では、長さ1,000mクラスのポンツーン型浮体の洋上接合を想定し、仮接合から接合完了までの過程における接合ユニット同士の挙動および仮接合部荷重を数値計算により推定した。浮体は弾性体とみなし離散化して有限要素法の平板要素でモデル化し、流体力の計算には3次元圧力分布法を用いた。波浪応答は浮体剛性の影響を含む運動方程式を周波数領域において直接解く方法を採用した。実施工では、仮接合から溶接による接合が可能となるまでの過程で段階を追って浮体間の拘束を増して行く。本論文では、今回提案した施工方法について、数種類の拘束段階をバネ、減衰系を用いた組み合わせでモデル化し計算を行った。

<氷海技術部>

船舶に搭載したレーザ距離計によるオホーツク海の
海水観測

Sea Ice Observation by Ship-borne Laser Distance
Sensor in the Sea of Okhotsk

下田春人、宇都正太郎

平成10年11月

国立極地研究所

第21回極域気水圏シンポジウム
プログラム・講演要旨

オホーツク海は地球温暖化の傾向を最も顕著に反映する海域の一つと考えられており、海水の拡がりや生産量の年々変動が注目されている。しかしながら海水生産量を評価するために必要な氷厚の広域観測手法は確立されていない。船舶による海水観測は衛星観測の検証データを与える観点から重要である。船舶技術研究所は1991年から北海道沿岸オホーツク海域で、砕氷船に搭載したVTRを用いた氷厚観測を実施している。本手法は比較的平坦な氷盤では氷厚を精度良く観測できるが、氷丘氷や氷丘脈などの変形氷の観測には適していない。そこで変形氷の氷厚観測への適用性を検討するために、航空機観測で実績のあるレーザ式距離計を砕氷船に搭載し、海水観測を実施した。

計測は1998年2月24日から26日にかけて知床岬の北約20km付近で行われた。海上保安庁の砕氷巡視船「てしお」にレーザレーダ式距離計(LD90-3100HS-GF;RIEGL製)を搭載し、航路に沿った氷盤表面の高度を計測した。距離計の精度は±20mmである。この他にVTRによる氷厚計測を実施している。解析には、停船後、氷盤の上に人が降り、左舷側の船首尾方向に5m間隔で氷盤を削孔して氷厚、積雪深及び高度を計算したデータと、その後、船が開水路を低速で後進した時のレーザ式距離計のデータを用いた。また、ゼロレベルは直近の時間帯で開水面もしくはニラス等の薄氷域を航行中に得られたデータを用いた。レーザ式距離計は右舷側で計測しているため、実際に氷盤上で計測した氷厚、高度との厳密な比較はできないが、山谷の関係は概ね一致していた。今後は船体運動の影響を考慮した解析法について検討する予定である。

砕氷航行船舶の推進性能解析におけるアイス影響係数について

Ice Effect Factor of Propulsion of a Ship in Ice

小山鴻一、宇都正太郎、若生大輔

平成10年12月

第14回寒地技術シンポジウム

寒地技術論文・報告集 Vol.14

船舶が氷海域で砕氷航行するときの推進性能を明らかにすることは、砕氷船等氷海船舶の設計・建造や運航の問題を扱う場合の基本である。船舶の推進性能を精度良く表示するためには、推進性能の成分を合理的に分析して表示することが重要である。その合理的な分析は、推進性能解析法に凝縮される。船舶の推進性能解析法は、氷のない海域の場合基本形は既に確立されている。しかしながら氷の海域における場合にはその様な推進性能解析法が確立されているとは言い難い。船舶の推進性能解析法においては、与えられた船型(船体・プロペラ)、船速に対して、模型船の水槽試験結果から伝達馬力を求めることを目的としている。水槽試験においては一般に抵抗試験と自航試験を行い、抵抗試験から有効馬力を求め、抵抗試験・自航試験から推進効率を求め、その両者から伝達馬力をもとめる。氷海船舶試験水槽における試験においては、有効馬力を求める段階は定着しているが、推進効率を求めることは未だ確立されているとは言えない。

本論においては、この推進効率を与える新しい方法としてアイス影響係数を用いた方法を提案した。この係数の主要項は、氷の無い状態と水中状態におけるプロペラトルクの比となっている。また、その方法を裏付けるプロペラ・トルクにおけるプロペラ氷片干渉の成分分析にも言及したものである。ここで提案した水中推進性能解析法を用いて、オホーツク海で運航する砕氷型巡視船について、当所の氷海船舶試験水槽において行った模型試験のデータを解析した。

得られた結論は次の通りである。

- (1) 荷重量変更試験法の採用により、氷質の違いによる推力減少係数のばらつきを少なくする事が出来た。
- (2) アイス影響係数を導入した推進性能解析法により、物理的に合理的な推進効率成分の表示が可能となった。
- (3) 氷片プロペラ干渉によるトルク増加について、要素成分の仮説に基づいて計算すると、実験で得られた氷厚・船速の影響の傾向を良く表す事が出来た。しかしトルク増加量を定量的に説明できる段階には至っていない。

微細気泡CD模型氷の開発について

Development of Controlable Density (CD) Ice with Micro Bubbles.

金田成雄、泉山 耕、山口 一

平成10年12月

第14回寒地技術シンポジウム

寒地技術論文・報告集 Vol.14

氷海水槽での実験が工学的に意味を持つためには、実現象と実験との間に力学的相似性が達成されていなければならない。氷海水槽に製氷される模型氷は、一般に実海水に比べて比重が高い点が問題であると指摘されていたが、近年、気泡を水中に混入することで模型氷の密度を制御する Controlable Density(CD)Ice がカナダの Institute for Marine Dynamics(IMD)により提案された。当所においても、微細な気泡を含有したCD模型氷の開発を行った。本論文では、この模型氷の開発過程、機械的特性への影響について報告する。

本システムは、渦流タービンポンプ、水槽両側壁に設置した配管、両者をつなぐ耐圧ホースから成る。ポンプにより空気を溶け込ませた加圧水を生成し、配管に取り付けてあるノズルより水槽内に放出される。ノズルから水槽内への放出の際に減圧されることで溶存空気が微細気泡として発生する。CD氷の作製は、この微細気泡を氷の成長過程において水槽内に漂わせることで、水中に自然に気泡をトラップさせた。

以下に、本研究によって得られた結果をまとめる。

- (1) 密度の制御については、気泡供給量の調整及び間欠運転システムの開発により、氷板内の密度分布が水槽全体にわたり、ほぼ均一にすることが出来た。また、密度値についても約940～800kg/m³までに変化させることができ、実海水の密度範囲を十分にカバーする密度が得られた。
- (2) CD氷を開発したカナダIMDでは、水中に混入する気泡径は、2～3mm程度である。また、IMDの計測結果によると、CD氷は一般に強度が高く、通常の模型氷と比較して同程度の曲げ強度を実現するには長い Tempering 時間を要することが報告されている。これに対し、本システムは、加圧水の流量、管内圧力、ノズル径等を調整することにより、1mm以下の小さな気泡径を達成した。また、気泡の混入位置を氷板の上層と中間層にしたこと、水槽水のPG濃度を0.8%に増したことで、ほぼ通常の Tempering 時間で、強度の低減を実現した。

Consideration on Accuracy of the Full-Scale Thrust Measurement in Ice by Strain Gauges

歪みゲージを用いた氷中での実船スラスト計測の精度に関する考察

宇都正太郎、田村兼吉、成田秀明

平成11年7月

Proceedings of the 18th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering

海上保安庁所属の砕氷巡視船「そうや」を用いて実船実験及び対応する模型実験を実施し、砕氷型船舶の氷中推進性能について考察した。実船実験は1997年2月に北海道沿岸オホーツク海域において行われた。本実験では氷中での速力試験、停船性能試験及び“ボラードブル”試験の3種類の試験を実施した。ただし、“ボラードブル”試験とは氷盤中に停船した状態で、比較的小さい翼角で可変ピッチプロペラを作動させる試験である。これらの試験では巡視船「そうや」のプロペラ中間軸に歪みゲージを設置し、プロペラ軸に作用するスラスト、トルクを計測した。本研究では氷中でのスラスト計測の精度について様々な確度から検討を行った。

はじめにスラスト計測における最大の誤差要因の一つである軸トルクとのクロストークの影響を、プロペラ軸を微速で回転させる軸ターニング試験の結果を用いて補正した。次に速力試験の直近で行われた停船性能試験時に、プロペラが翼角0度で作動している状態でスラストを計測し、この値を速力試験時のスラストのゼロ点として定義した。本手法によってスラスト計測におけるゼロ点の温度ドリフトによる誤差を最小化し、計測精度を向上させることができる。ボラードブル試験時に計測されたスラストにこれらの補正を行い、同一翼角且つ停船状態における複数のスラスト計測値の再現性を調査した。さらに不確かさ解析の手法を用いて氷中スラスト計測の精度を検討した。その結果、補正されたスラスト値の95%包括度はボラードブル試験のばらつきに対応することがわかった。また氷厚約1mの氷盤中を直進航行した速力試験において計測され、上記の補正を行ったスラスト値の95%包括度は平均値に対して±13%であることがわかった。

最後に速力試験で得られたスラスト値と模型実験結果から推定したスラスト値の比較を行った。相似模型による平坦氷中抵抗試験を当所の氷海船舶試験水槽にて実施し、平水中での過負荷模型試験から推定した推力減少係数を用いてスラストを推定した。両者を比較した結果、平均氷厚0.45m以下の氷盤については模型実験による推定値が約30%の過小評価となったが、平均氷厚1m程度の厚い氷盤では良く一致するという傾向が得られた。後者で良く一致した原因の一つとして、

模型実験によるスラスト推定の入力パラメータである氷盤曲げ強度値を過大に推定したことが考えられる。このために模型実験からのスラスト推定値が過大評価となった可能性がある。後者の氷盤は主に小氷塊が重なり合って形成された変形氷であり、その強度等の特性を定量的に評価することは現状では困難である。砕氷巡視船が運航する南部オホーツク海では氷厚0.5mを超える氷盤の多くは変形氷であると考えられるので、変形氷の強度特性及びその氷中推進性能への影響を明らかにすることは今後の重要な研究課題である。なお、本研究は海上保安庁装備技術部船舶課との共同研究として実施された。

<大阪支所>

**Proposal of Self Sinking CO₂ Sending System :
COSMOS**

自由沈降型二酸化炭素送り込みシステム、COSMOS、
の提案

綾 威雄、山根健次、汐崎浩毅

平成10年8月

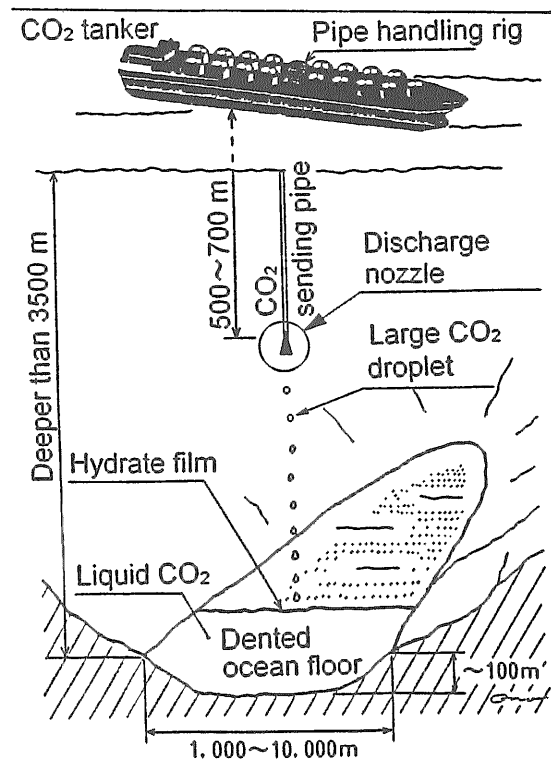
Proceedings of the 4th International Conference on
Greenhouse Gas Control Technologies

地球温暖化対策技術としてのCO₂海洋処理法には、広大な海洋に溶解・拡散させる「溶解法」と深海底の窪地に溜める「貯留法」とがある。溶解法における液体CO₂の投入深度は、CO₂が海水より軽い1,000～2,000mであるが、貯留法の場合は、通常、CO₂が飽和CO₂溶解海水より重くなる2,700m以深が求められる。貯留法には、海洋環境への影響範囲を限定できること及び大気からの隔離期間を海洋の鉛直循環周期の2000年より長く設定できるという、溶解法にはない大きな利点があるが、投入深度の深いことが技術的・経済的に不利な点である。

一方、CO₂を投入海域までタンカー輸送する場合の温度・圧力条件は、タンクローリーによる陸上輸送時と同じ-40℃、1MPa程度が経済的に妥当だと考えられている。液体CO₂は、海水との比較において、温度膨張率と圧縮率が非常に大きいため、-40℃の液体CO₂は海水より十分重い。従って、CO₂液化深度の500mから低温のCO₂を液泡として放出すると、自由沈降するが、途中、海水からの受熱により昇温し、次第に沈降力を失う。しかし、昇温の程度は、初期液泡径が大きくなるほど小さくなる。そのため、放出液泡径をある限界値より大きくすれば、深度2,700mを通過するまで液泡の沈降力を維持させ、最終貯留深度の3,500mに到達させることが可能となる。

そこで、放出CO₂温度をパラメータとして、安全を見た深度750mから放出した液体CO₂の自由沈降プロセスを、液泡回りの結氷などの伝熱現象を考慮して解析したところ、投入温度が-26℃の場合の限界径は、0.7m以下となることが判明した。この方法を採用すると、貯留法の投入深度を溶解法より浅海に設定でき、貯留法の技術的難点が解消される。

図は、新たに提案した「自由沈降型二酸化炭素送り込みシステム、COSMOS」の概念を示している。



COSMOSの概念

Strength Abnormality of CO₂ Hydrate Membrane just below Dissociation Temperature

解離温度近傍における二酸化炭素ハイドレート膜の強度異常

山根健次、綾 威雄、波江貞弘、成合英樹

平成10年8月

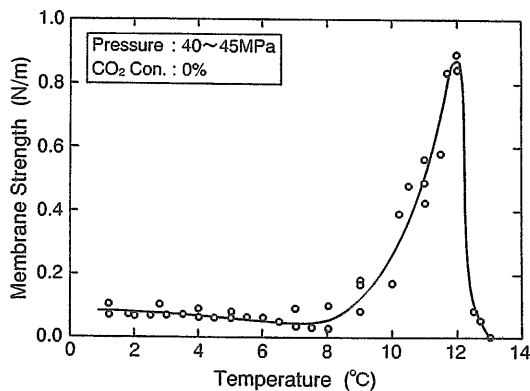
Proceedings of the 4th International Conference on
Greenhouse Gas Control Technologies

地球の温暖化傾向を緩和させる工学的手段として注目されているCO₂海洋処理法として、広大な海洋に溶解・拡散させる「溶解法」と深海底の窪地に溜める「貯留法」が提案されている。これらの適用深度は、溶解法ではCO₂が周りの海水より軽くなる1,000～2,000mであり、貯留法ではCO₂が飽和CO₂溶解海水より重くなる3,500m以深であるが、CO₂は、500～900m以深で海水と反応してハイドレートとなるため、その特性、中でも界面に生成するハイドレート膜の強度の把握がCO₂海洋処理法を評価する上で不可欠となっている。

著書らは、数年前、5MPaにおけるCO₂ハイドレート膜強度の計測を試み、1.3N/mという値を得た。その後、膜間差圧法により計測したところ、膜強度は水中

CO₂ 濃度の増加とともに増加する傾向があるものの、0.1～3N/mの間でばらついた結果となった。今回、ディヌーイ型表面張力計を搭載した新深海模擬装置により計測し、以下の結果を得た。

図に示される40～45MPaの清水中CO₂ハイドレート膜の強度は、1～8℃では0.1N/mの範囲で温度上昇とともに若干減少する傾向にあるが、8℃から急激に増加し、12℃付近で最大値0.83N/mをとり、解離温度の12.7℃でほぼ0となる。解離温度直前のピーク値は低温における強度の約10倍と際だっており、その理由の解明が待たれるところではあるが、このようなハイドレート膜強度の異常な温度依存性はこれまで予想されておらず、CO₂海洋処理法の海洋環境への影響評価ばかりでなく、CO₂海洋投入設備を設計する上で極めて重要な新発見の現象である。また、この新現象は、計測の必要性が指摘されながら未だ成功していないハイドレート膜厚さ計測の重要性をさらに増加させたといえる。



CO₂ハイドレート膜強度の温度依存性

Flashing-Condensation Oscillation Phenomena in Pool Water

プール水中におけるフラッシング・凝縮振動現象

綾 威雄、田村祥一、斉藤 彰、賞雅寛而

平成11年4月

Proceedings of the 7th International Conference on Nuclear Engineering

水漬け型格納容器は、軽水炉の受動安全性を高めるとともに小型化を狙った格納方式であるが、その安全性を確認するには、設計基準事故である一次系破断事故時に、原子炉容器内から放出される高圧飽和水が低温低圧水中でフラッシング・凝縮する未知現象を解明し、それが回りの構造物へどのような力学的影響を与えるかを明らかにする必要がある。そこで、当所は、このフラッシング・凝縮現象を実験的に明らかにするための基礎実験を東京商船大学と共同で行い、以下の結果を得た。

- (1) 放出飽和水圧力と放出口径の増大とともに、或いはプール水のサブクール度の減少とともに、プール水中でのフラッシング量は増大し、フラッシング位置が放出ノズルに近づく。そのため、フラッシング位置が間欠的にノズルに近づいたり (Phase A) 離れたり (Phase B) するフラッシング・凝縮振動は生じなくなる。また、短いノズルの場合、蒸気泡があまり成長できずノズルから離れる (Phase B) ため、フラッシング・凝縮振動が生じるのに対し、長いノズルの場合、蒸気泡がノズルに接触したままとなり、フラッシング・凝縮振動は起こらなくなる。
- (2) 高速ビデオ映像から求めた蒸気泡寸法を基に凝縮熱伝達率を求めたところ、 $6 \times 10^5 \sim 1.1 \times 10^6$ (W/(m²K)) という結果を得たが、これは、流水中への蒸気凝縮熱伝達率について従来からの実測値 [$7.3 \times 10^4 \sim 1.9 \times 10^6$ (W/(m²K))] の範囲に入っている。また、フラッシング・凝縮振動の周波数を良く予測することのできる線形理論から予測される熱伝達率と上記実験値ともほぼ一致することが判明した。これらの事実は、高圧飽和水が低温プール水中へ放出された際に生じるフラッシング・凝縮振動現象は水中の蒸気泡運動に支配されていることを示唆している。

膜強度データに基づくCO₂ハイドレートの生成メカニ
ズムGrowing Mechanism of CO₂ Hydrate Based on
Membrane Strength

綾 威雄、山根健次、成合英樹

平成11年5月

第36回日本伝熱シンポジウム講演論文集

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二酸化炭素深海貯留法を評価するためには、液体二酸化炭素と海水との界面に生成するハイドレート膜の性質を明らかにすることが不可欠である。本報告は、著者が最近計測に成功した二酸化炭素ハイドレート膜強度のデータから、その成長メカニズムについて、従来考慮されていなかった溶解水側の未飽和水分子に着目した基本モデルを提案するものである。

ハイドレート膜強度計測法を確立する過程で、ハイドレート膜は溶質側（液体二酸化炭素）に引っ張ることができるが、溶媒側（水）には引っ張ることができないことが判明している。また、未飽和溶解水中においては、ハイドレート膜は荷重の付加とともに大きく変形するが、飽和溶解水中ではほとんど変形せず、いきなり破断することが明らかになっている。これらの事実を矛盾なく説明できるモデルとして、溶質をさらに溶かし込むことのできる余剰の水分子を意味する「自由水分子」モデルを提案する。このモデルにおいては、飽和状態ではハイドレート膜の解離に必要な水分子が存在しないため、荷重をかけても膜は成長できず、いきなり破断に至るが、未飽和状態では、豊富に存在する自由水分子が膜の解離と再生を促し、荷重とともに膜が荷重方向に成長することができる。これが、上述の実験事実の真相であり、未飽和水中で見られた膜の変形は、実は、弾性変形や塑性変形とは本質的に異なる「自己再生膜」であることになる。

自己再生しない飽和濃度中のハイドレート膜強度は、変形がほとんどないため、未飽和中強度の10倍以上と推定される。材料試験的立場からは、真のハイドレート膜強度は、自己再生の生じない飽和水中での強度であるといえるが、二酸化炭素の海洋処理において遭遇するハイドレート膜は、特殊な例外を除き、未飽和海水中の自己再生型であるため、その処理法の評価に当たっては、自己再生膜強度の方が有用となる。