船舶が排出する二酸化炭素の海中溶解・固定に関する研究

正員 金 井 健* 正員 武 隈 克 義*
 正員 佐 藤 和 範* 高 橋 勝 六**
 山 口 昇 吾***

Evaluation of CO₂ Dissolution Contained in Marine Exhaust Gas Bubbles and Reduction of Ship's Frictional Resistance.

by Takeshi Kanai, *Member* Katuyoshi Takekuma, *Member*
 Kazunori Sato, *Member* Katuroku Takahasi
 Syougo Yamaguchi

Summary

Reduction of CO₂ emission into the atmosphere has been one of the important concerns in the various fields of human activities for prevention of the climate change in global size. CO₂ contained in the exhaust gas from ships is also considered to be the reduced one, for which improvement of ship's propulsive performance and fuel oil consumption reduction etc. has been earnestly investigated.

In this paper dissolution of CO₂ in the exhaust gas bubbles injected into the flow around ship hull is proposed to be one of the powerful candidate for resolution, taking into account the hydrodynamic characteristics of flow around ship hull and chemical property of CO₂ in the large amount of salt water around ships. The system outlined is composed of exhaust gas bubbles injection system, including power needed for injection, hydrodynamics of micro gas bubbles flowing along the ship hull of full scale accompanied with chemical process of CO₂ dissolution, reduction of ship's frictional resistance.

1. 緒 言

大気中に蓄積される二酸化炭素による地球温暖化の危険性が指摘されて久しい。1994年に発効した気候変動枠組み条約に続き、1997年に京都で開催された第3回締約国会議(COP3)では、2000年代初頭の温室効果ガスの人為的排出量を、1990年の水準より少なくとも5%削減するという目標を決定し、先進各国に具体的な数値目標を課した。

船舶が大気中に放出する二酸化炭素の低減対策としては、主機関の熱効率の向上や推進性能の向上等の発生

量削減と並んで、発生した二酸化炭素の大気中への放出を抑える技術が考えられる。例えば陸上の大型プラントでは、発生した二酸化炭素を液化し専用の運搬処理施設を用いて深海底に投入したり、パイオ技術を用いた二酸化炭素固定装置が検討されている。船舶より排出される二酸化炭素も、船内の専用タンクに貯蔵した上で陸上のそうした施設にゆだねることも考えられるが、そのための回収・貯蔵のコストは莫大なものとなることが予測される。従って個々の船舶で二酸化炭素を処理する技術を検討すべきである。

こうした考えに基づき、ここでは航行中の船舶から排出される排ガス中の二酸化炭素を、周囲の海水表層に溶解・固定させるというコンセプトを検討する。すなわち主機関からの排ガスを、船首の比較的浅い位置より直接海中に微細気泡として排出し、船体周囲の流れに乗せて船底部へ送り込み、二酸化炭素の海水溶解に充分な滞留

* (財) 日本造船技術センター
 ** 名古屋大学大学院工学研究科
 *** 三菱重工業㈱産業機器事業部

時間を確保するとともに、微細気泡による船体の摩擦抵抗低減も期待する。これにより二酸化炭素の空中排出量を抑制するのみならず、気泡排出に要する動力を推進性能向上により回収するという、総合的にエネルギーバランスの優れた二酸化炭素削減技術の開発を目指す。

本研究は運輸施設整備事業団による基礎的研究推進制度により、日本造船技術センター、名古屋大学、三菱重工業(名古屋研究所)との共同研究として実施された。三社は、海水への二酸化炭素吸収特性の解明(名古屋大学)、二酸化炭素の海水への効率的な吸収溶解方法の確立(三菱重工業)、排ガス気泡の挙動推定手法の構築と推進性能やエネルギーバランスを考慮したコンセプトの確立(日本造船技術センター)という構成で研究を進めた。

本論文では、このうち排ガス気泡挙動シミュレーションシステムの構築と、それを用いた排ガス中二酸化炭素海中溶解コンセプトのケーススタディについて述べる。まず、排ガス中二酸化炭素海中溶解コンセプトの検討に用いるツールの構築を主目的に、船体周囲の気泡流れについて実験的、理論的検討を行い、排ガス気泡流の実用的な流力モデルを構築する。それを用いて気泡滞留時間、二酸化炭素海中溶解量、推進性能変化等の推定を行うための排ガス気泡挙動シミュレーションシステムを開発し、最後に70,000DWのB/Cについて、ここで提案する排ガス中二酸化炭素海中溶解コンセプトのケーススタディーを行った。結果として、排ガス中の二酸化炭素の80%は海水中に溶解すること、排出に要する動力を摩擦抵抗の低減により回収できる可能性があること、条件によっては気泡排出動力も併せた全動力の削減も期待しうることが示された。

Fig.1 Test Arrangement of Bubbly Flow in Vertical Channel

2. 気液2相流の性質

本研究で提案する排ガス化炭素海中溶解コンセプトの評価には、排ガス気泡中の CO_2 の海水溶解量、排ガス気泡が推進性能に与える影響などを推定する実用的な設計ツールが不可欠である。しかし多数の微細気泡の挙動をシミュレートすることは、非常に困難な課題であり、実用上不可能といえる。このため、船体周囲の気泡流に適した実用的な流力モデルが不可欠である。

そこで船舶から排出された直後の排ガス気泡の挙動について

実験的に把握するとともに、それを元に船体周囲の気泡流について理論的な検討を進めた。

2.1 実験的検討

船体周囲の流場中に排出された気泡の排出直後の挙動を、垂直流路における気泡の上昇実験とキャビテーション水槽(水平流路)における実船相当流速の気泡排出実験により観察した。垂直流路における実験は名古屋大学で、キャビテーション水槽における実験は(財)日本造船技術センターにおいて行った。Fig.1, Fig.2にそれぞれの実験装置を示す。

Fig.2 Test Arrangement of Bubbly Flow in Cavitation Channel

2.1.1 垂直流路における気泡流の観察

垂直流路における気泡径の計測結果を Fig.3 に示す。

Q_L は液相の流速、 Q_G は気相の流量を表す。計測に用いた気体は、 CO_2 濃度を調整した空気である。真水中での気泡径は直径3~4mm前後のものが卓越するが、人工海水中のそれは真水より小さく、直径1mm程度が殆どである。気泡形状は直径数mm以下の気泡の場合ほぼ真球であり、それ以上ではやや扁平な形状となる。これらの傾向は排出孔径や流速を変化させてもほとんど変わらない。また、気泡の合一等の干渉はわずかであり、特に人工海水中には相互干渉は全く見られなかった。なお、排ガスに含まれる CO_2 以外の成分の気泡径や気泡挙動に及ぼす影響は小さいことが、別途確認されている⁹⁾。

Fig.3 Measured Diameter of Bubbles in the Vertical Channel

2.1.2 水平流路における実船相当流速の気泡流の観察

Fig.4 にキャビテーション水槽の上面より下向きに気泡を排出した場合（船底排出に相当）の気泡流の例を示す。気泡排出には排出孔径 5mm の多孔板を用いた、排出孔は千鳥上に配され、排出孔間の間隔は 20mm である。実験装置の関係で観察時間は排出後の極短時間に限られるが、気泡流が排出後の不安定な状態から安定した平衡状態になるには十分な時間と考えられる。流速が遅い場合(4m/s)は、隣り合う排出孔からの気泡が排出直後に合一し大きな気泡塊を形成するが、流下するにつれちぎれて急速に気泡径は小さくなる。実船相当の流速である 7m/s や 10m/s では、観察可能な時間内で殆どが直径数 mm 以下の小さな気泡となる。この状況は空気流量により多少の変化は見られるが本質的には変わらない。

Fig.4 Photographs of Bubbly Flow in the Cavitation Channel

Fig.5 に、キャビテーション水槽の上面（船底）と側面（船側）から気泡を排出した時の気泡排出位置より 600mm 下流における局所ボイド率の壁面に垂直な方向の分布を示す。空気流量は 1000NI/min である。壁からの距離 Hv で整理した局所ボイド率は、実船相当の流速

である 7m/s、10m/s では壁面から約 10mm 付近にピークをもち、その後急速に減少する。船側排出の場合はこのピークが無い。キャビテーション水槽の上面と側面の流速分布の差の影響はあるものの、こうした水平壁面と垂直壁面における局所ボイド率分布の相違は、これまでも観察されている。

水平壁面での下向き排出の場合、気泡はそれ自身の浮力により上昇する。しかし Fig.4 や Fig.5 で示されているとおり、壁面付近で固着したり空気膜を形成するような挙動は見られない。これは管内気液混相流において直径 1～5mm 程度の気泡では 0.3m/s 以下または 1.5m/s 以上で壁面から遠ざかる方向に気泡が移動するという従来の知見とも合致する。このことから、気泡には浮力に抗して壁面から離れる方向に何らかの力が作用していることが考えられる。また Fig.6 に例を示すような、流れと直角な方向（壁面と平行な面内）の気泡の広がりも観察されている。

Vw=4m/s

Vw=7m/s

Vw=10m/s

Fig.5 Distribution of Void Fraction Near the Wall

Fig.6 An Example of Bubbly Flow with Diffusion

2.2 理論的検討

2.2.1 支配方程式

混相流に対する支配方程式は、混相流を構成するそれぞれの相の連続な部分に対し、単相流と同様な(1)式の形で表される (Fig.7 参照)¹⁾。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho q_i &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} \rho q_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho q_j q_i &= \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_i} + f_i \\ \frac{\partial}{\partial t} \rho \left(e + \frac{1}{2} q^2 \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho \left(e + \frac{1}{2} q^2 \right) q_j &= \frac{\partial}{\partial x_i} T_{ij} q_i + f_i q_i - \frac{\partial Q_i}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (1)$$

さらに相(1)、相(2)の間にある不連続な境界面を挟む保存則としていわゆる‘とびの条件’が付加される¹⁾。

$$\begin{aligned} [\rho(q_i - q_i^*) n_i] &= 0 \\ [\rho q_i(q_j - q_j^*) n_j - T_{ij}] &= \sigma \kappa n_i \\ \left[\rho \left(e + \frac{1}{2} q^2 \right) (q_i - q_i^*) n_i - T_{ij} q_i n_j + Q_i n_i \right] &= \sigma \kappa q_i^* n_i \end{aligned} \quad (2)$$

Fig.7 Co-ordinate System

ρ は密度、 q_i は速度、 T_{ij} は応力テンソル、 f_i は質量あたり体積力、 e は単位質量あたり内部エネルギー、 Q_i は熱流ベクトル、 q_i^* は境界面の速度、 σ は表面張力、 κ は境界面の平均曲率、 n_i は境界面の法線方向ベクトルをそれぞれ表す。 $[[f]] = f^{(2)} - f^{(1)}$ は量 f が相(1)、相(2)を挟む境界面を横切る時の‘とび’を示し、肩文字(2)、(1)は各相側からの極限値を示している。混相流の問題は、与えられた初期条件のもと(1)式で表される場の方程式を(2)式のとびの条件を満足しつつ解くことである。しかしとびの条件を満足すべき相間の境界面は複雑に運動し変形する上、その運動と変形は解の一部分として決定されねばならない。さらに気泡流の場合、決定すべき境界面は無数にある。このような複雑な問題を解くことはコンピューターが発達した現在でも殆ど不可能であり、混相流の問題を解く場合は、与えられた現象に合うように適当なモデル化を行うことが一般的である。

船体周囲の海水を非圧縮性流体と考える。海水の熱容量は非常に大きいため、等温変化を仮定し、(1)式のうち

エネルギー保存則は避けることができる。また、気体と液体の密度差が十分に大きいため、気泡の質量や慣性力は無視し得る。前項の観察の結果、船体周囲の海水中に排出された気泡は、直径数 mm 以下の真球に近い状態で、互いに干渉しない程度の距離を保ったまま流れていくことがわかっている。これらの事実は、気泡が十分小さく周囲の流場とともに流れる、即ち、連続相である海水と気泡の相対速度が小さいと見なせることを示唆している。厳密には、粒子の干渉（衝突）が無視し得るためには、粒子間の平均自由行程 λ が以下の条件を満たす必要がある²⁾。

$$\frac{\lambda}{L} \sim \frac{l}{L \alpha_2^{2/3}} > 1 \quad \lambda = \frac{1}{\pi (2a)^2 n} \quad (3)$$

L は流場の代表長さ、 l は平均粒子間距離、 α_2 は粒子相の体積比率($=4/3 \pi a^3 n$)、 a は粒子半径、 n は粒子の数密度を表す。

このような十分小さな数密度で分散した互いに干渉しない粒子は、連続相の流場に殆ど影響を与えないと考えられ、粒子追跡法により粒子（この場合は気泡）の挙動を解析することができる。このときの単一気泡に対する運動方程式は、気泡の体積変化に対して、

$$p_1 - p = \rho_2 r \frac{d^2 r}{dt^2} + \frac{3}{2} \rho_2 \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{4 \mu_2}{r} \frac{dr}{dt} + \frac{2 \sigma}{r} \quad (4)$$

気泡の運動に対して、

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} \rho_2 V (q_{1i} - q_{2i}) \right] = -V \frac{\partial p}{\partial x_i} - C_D (q_{1i} - q_{2i}) \quad (5)$$

と表すことができる¹⁾。 P_1, P は気泡および混合体の圧力、 r は気泡半径、 ρ_2, μ_2 はそれぞれ液体の密度と粘性率、 σ は表面張力、 V は気泡体積、 C_D は気泡の抵抗係数を示す。添え字 1, 2 はそれぞれ気泡と液体を示している。(5)式の右辺第 2 項は外力の影響を表す項であり、ここでは相対速度に対する抵抗力のみを考えている。

2.2.2 気泡流の乱れ

(3)式の条件を満たし、粒子間の衝突を無視し得る場合でも、粒子のランダムな運動は起こる。一つはブラウン運動による場合、もう一つは粒子配置の変化や周囲流体との相対運動による場合、最後が周囲流体のレイノルズ数が高く乱流となっている場合である。気泡直径や気泡密度を考えた場合、船体周囲の気泡流では最後の乱流による乱れを考慮する必要がある。粒子追跡法は決定論的な手法であるため、これが自然に適用できるのは、以下の場合である¹⁾。

$$\frac{\left[(q'_{2i})^2 \right]^{1/2}}{|q_{2i}|} \ll 1 \quad q_{2i} = q_{2i}' + q_{2i} \quad (6)$$

$q_{2i}', \overline{q_{2i}}$ は、それぞれ q_{2i} の変動成分平均成分を表す。しかし、粒子の変動を決定できるような適当な流体変動を

何らかの方法で与えることができれば、乱流による速度変動や拡散がある場合でも粒子追跡法で解析することができる¹⁾。

2.2.3 壁面効果と拡散の影響

2.1.2 項述べたように、壁面付近の気泡は壁面から遠ざかる方向に運動していると考えられる。また、壁面に平行な面内にも気泡は拡がる。これらの運動をもたらす力についてはマグナス効果や気泡周囲の液の循環に伴う揚力では必ずしも説明できず、気泡背後に形成される渦の挙動と関係した揚力が気泡に働く結果と考える方が自然である。しかし現状ではその詳細は明かではない。

管内流の場合を考える。気泡に働く力は壁面効果としての揚力とボイド勾配による拡散力のみであると考ええる。定常状態に発達した気泡流では半径方向の気泡束 j_{gr} に対し、以下の式が成り立つ¹⁾。

$$j_{gr} = j_w + j_D = 0 \quad (7)$$

j_w, j_D はそれぞれ揚力項およびボイド勾配による拡散項を表す。軸対称流れの場合、揚力項 j_w は

$$j_w = -(\rho_l \alpha q_0^2 (\partial q_l / \partial r) / g \Delta \rho) \quad (8)$$

$$C = 0.8 \exp(-2\alpha)$$

$$\Delta \rho = \rho_l - \rho_g$$

のように、液相主流方向速度の時間平均 q_l の勾配に依存する形で表される。添え字 l, g はそれぞれ液相と気相を表す。 α はボイド率を q_0 は無限遠方の気泡の終端速度を表す。また拡散項 j_D は、ボイド率勾配により以下のように表される¹⁾。

$$j_D = -\epsilon_b \partial \alpha / \partial r \quad (9)$$

ϵ_b は拡散係数である。以上のように気泡に働く力は主流の速度勾配とボイド率勾配に支配されると考えられている。

3. 気泡挙動シミュレーションシステムの構築

船体周囲の気泡挙動シミュレーションは、2章で検討した粒子追跡法に基づいて行う。粒子追跡法のベースとなる流場は、CFD により計算した実船レイノルズ数の船体周囲流場である。計算コードは船舶技術研究所（現海上技術安全研究所）で開発された Nice コードを使用した。乱流モデルは Baldwin-Lomax モデルである。ベースとなる流場中で単一気泡（代表気泡と呼ぶ）の軌跡を計算し、その軌跡の周りに同一の排出位置から排出された気泡がある関数に従って分布する、と考えることにし、群としての気泡を表現する。

3.1 単一気泡のモデル化

3.1.1 物理的条件

排ガス気泡の物理的条件を以下のように与える。

- ・ 直径 : 一定

- ・ 形状 : 真球
- ・ 質量および慣性 : 無視
- ・ 気泡体積 : 状態方程式に依存

高温のまま排出された排ガス気泡は、極短時間の間に船体周囲の海水と同一温度となることが理論計算により確認されている。これより排ガスと海水の温度差は無視することとする。気泡の境界面を通して CO_2 をはじめとした物質が交換されるが、後述するように排ガスの主たる成分は海水に溶けにくい窒素であるため、境界面を通した物質交換の影響も無視する。

3.1.2 気泡の上昇速度と抗力係数

半径 r ($2r=d$) の気泡は、自身をもつ浮力 F により上昇し、上昇速度 u_b に応じた抗力 D を受ける (Fig.8)。

$$D = C_D \frac{1}{2} \rho u_b^2 \pi r^2 \quad (10)$$

$$F = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g \quad (11)$$

$$u_b = \sqrt{\frac{8rg}{3C_D}} \quad (12)$$

Fig.8 Forces Acting on the Bubble

この時抗力係数 C_D はいくつかの方法で与えられる¹⁰⁾。

$$\text{微小気泡の理論式} \quad C_D = \frac{48}{Rn} \quad (13)$$

$$\text{Mooreによる改良式} \quad C_D = \frac{48}{Rn} \left(1 - \frac{2.2}{\sqrt{Rn}} \right) \quad (14)$$

これらの式は、・気泡背後に逆流が生じない、・気泡内部の気体の運動は液体に影響を与えない、等の仮定で求められたものであり、その適用範囲は $d < 1.2\text{mm}$ 程度である。また大気泡(体積 2cc 以上)の上昇速度に関しては(15)式が知られている¹⁰⁾。これらの式を Haberman & Morton の計測結果¹⁰⁾と比較して Fig.9 に示す。

$$u_B = \frac{2}{3} \sqrt{gR} \quad (15)$$

Fig.9 Comparison of Rising Velocity of a Bubble

微小気泡の場合のレイノルズ数 Rn は気泡直径に対するものである。また大気泡の R は気泡上面の曲率半径を表し、Fig.9 にプロットする際は、大気泡の体積相当の球の直径に換算しプロットした。本研究の対象となる気泡直径は、2章の観察結果より $1\text{mm} < d < 6\text{mm}$ 程度と推定され、ちょうど理論式も計測結果も適用できない領域である。従って、我々は Haberman & Morton の計測結果より C_D, u_b を求め、使用することとした。

3.1.3 壁面付近の気泡挙動

壁面付近の気泡の挙動については、2章の検討より以下のように扱うこととした。

壁面近傍に気泡がある場合、気泡の周りには流れと直角方向にわずかではあるが速度勾配が生じる。これによって、気泡の中心を通り流れと直角な軸に沿って圧力差 ΔP が生じる。境界層内の気泡は、浮力の他にこの圧力差に基づく流体力 L (揚力) を受ける。 L は揚力係数 C_l を用いて以下のように表現する (Fig.10 参照)。

Fig.10 A Concept of Imaginary Lift

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho \{ (q + \Delta q)^2 - (q - \Delta q)^2 \} = 2 \rho q \Delta q$$

$$\Delta q = \frac{\Delta q}{\Delta y} \Delta y = \frac{dq}{dy} r$$

$$L = \frac{1}{2} l \Delta P C_l \quad l = 4 \pi r^2 \quad (16)$$

気泡にはこの仮想的な揚力 L (仮想揚力と呼ぶ) により移動速度 q_l が生ずる。 q_l は揚力と移動速度により生ずる抵抗とのバランスから以下のように定義できる。

$$\sqrt{8 q \Delta q \frac{C_l}{C_D}} = q_l \quad (17)$$

船底極近傍のボイド率分布の計測結果では、壁面からある距離 h でボイド率が最大となることが示されている。これを距離 h のところで浮力 B と仮想揚力 L が釣り合っているためと考え、以下で仮想揚力係数 C_l を求める。

$$L = B$$

$$2 \pi r^2 \Delta P C_l = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g$$

$$2 \pi r^2 2 \rho q \Delta q C_l = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g$$

$$q_h \Delta q C_l = \frac{r g}{3}$$

$$C_l = \frac{r g}{3 q_h \Delta q_h} \quad (18)$$

$q_h, \Delta q_h$ は、壁面からの距離 h における流速を表す。簡単のため、 $q_h, \Delta q_h$ を $1/n$ 乗りで求めることとする。

$$C_l = \frac{7 g \delta}{3 q_0^2} \left(\frac{\delta}{h} \right)^{1-\frac{2}{n}} \quad (19)$$

船舶技術研究所で行われた長尺模型船の船底部における局所ボイド率分布の計測結果²⁾ ($L_{pp}=12\text{m}, V_m=7.0\text{ m/s}$ 、船首より 8.8m) を参考に $h=10\text{mm}$ と仮定すれば、 $C_l=0.013370$ となる。

3.2 群気泡の取り扱い

群気泡を構成する気泡は単独気泡と同一の直径を持ち、単位時間当たり一定の排出量で排出孔より連続的に排出されているものとする。

代表気泡軌跡周りの拡散を、固定連続源からの拡散として取り扱う³⁾。まず、①拡散は2次元的な現象と見なす、②定常一様流の方向に x 軸を取り、これと直交して y 軸を取る、③ x 方向のみに流れを仮定するので、移流項が卓越し拡散項が無視できる、と仮定する。

さらに計算を容易にするため、固定連続源からの拡散を、瞬間的に次々と物質が放出された場合の重ね合わせと考える (Fig.11)。平均流方向の拡散を無視する円板型の拡散モデル (Frenkiel による) を導入すると、単位体積当たり質量濃度 $C(x, y)$ は、(20) 式で表すことができる。

$$C(x, y) = \frac{QH^{-1}}{\pi^{0.5} \omega x} \exp \left(-\frac{q_0^2 y^2}{\omega^2 x^2} \right) \quad (20)$$

Fig.11 A concept of Diffusion around Locus of Representative Bubble

Q は単位時間内気泡流量、 H は均一な濃度が拡がる厚さ、 ω は拡散速度である。気泡挙動シミュレーションの結果で得られるものは単位時間当たりの気泡数 n_B であるため (20) 式を以下のように書き改める。

$$Bn(x, y) = \frac{n_B H^{-1}}{\pi^{0.5} \omega x} \exp \left(-\frac{q_0^2 y^2}{\omega^2 x^2} \right) \quad (21)$$

単位体積当たり気泡数 Bn と船体表面ボイド率 Br の関係は、気泡体積 V_B を用いて、

$$Br = Bn \cdot V_B \quad (22)$$

となる。ここでは数値計算上の困難さを省くため H は平板乱流境界層厚さの近似式を用いて定義した。

$$H = 0.382 x R_{ex}^{-1/5} \quad R_{ex} = \frac{q_0 x}{\nu} \quad (23)$$

3.3 推進性能の計算

3.3.1 摩擦抵抗低減量の計算

マイクロバブルによる摩擦抵抗低減量に関しては、いくつかの研究^{4),5),6),7)}がある。ここでは局所摩擦抵抗低減率 f を Merkle & Deutsch に倣い、(24)式で推定した⁸⁾。

$$f = \frac{Cf}{Cf_0} = 0.8 \exp(-4.0Br) + 0.2 \quad (24)$$

これより摩擦抵抗低減量 ΔR_f 、全抵抗 R_t は以下のように計算できる。

$$\Delta R_f = \frac{1}{2} \rho V_s^2 \int Cf_0 (1-f) ds \quad (25)$$

$$R_t = \frac{1}{2} \rho S V_s^2 \{ (1+K) Cf_s + \Delta Cf \} - \Delta R_f + \rho \nabla^{2/3} V_s^2 r_w \quad (26)$$

S は浸水表面積、 ∇ は排水量、 V_s は航走速度、 K は形状影響係数、 r_w は造波抵抗係数、 ΔCf は粗度修正量をそれぞれ表す。 Cf_s は相当平板の摩擦抵抗係数でシェンベルの式を使用した。局所摩擦抵抗係数 Cf_0 としては Nice コードによる基礎流場の計算結果を使用した。

3.3.2 微細気泡によるプロペラ特性の変化

微細気泡の流入によるプロペラ単独性能の変化は、流体の密度が気泡流のボイド率分変化することによるスラスト係数、トルク係数 (K_t, K_q) の変化として扱う。ボイド率によるプロペラ単独特性の変化量 $\Delta \eta_o$ 、回転数の変化量 ΔN を Fig.12 に示す。

Fig.12 Influence of Void Fraction on Propeller Characteristics

計算に際しては、この関係をプロペラ面内ボイド率 Br_p の 1 次式で近似し与える。

$$\Delta \eta_o = f_\eta \cdot Br_p \quad (27)$$

$$\Delta N = f_N \cdot Br_p$$

$$f_\eta, f_N = \text{const.}$$

Br_p は、プロペラ面を通過する代表気泡軌跡の本数より以下の式で定義する。

$$Br_p = \frac{\sum (V_{BPi} n_{BPi} q_{Pi})}{S_p} \quad (28)$$

添え字 i は i 番目の気泡軌跡を意味する。 V_{BPi} 、 n_{BPi} はそれぞれプロペラ位置における代表気泡の体積と単位時間当たり排出個数を、 q_{Pi} はプロペラ面における代表気泡の速度、 S_p はプロペラ円の面積をそれぞれ表す。

3.3.3 馬力計算法

自航要素 ($l-t, l-w_s, \eta_R$) は気泡排出により変化しないと考える。これにより、摩擦抵抗減少とプロペラ効率の変化を考慮した制動馬力は、以下の手順で計算できる。

- (1) 推力 T の計算 $T = R_t (1-t)$
- (2) プロペラ効率を $\sqrt{Kt} \cdot J$ (J : 前進率) で整理する。
- (3) 推力より $\sqrt{Kt} \cdot J$ を以下の式で計算する。

$$\frac{\sqrt{Kt}}{J} = \frac{\sqrt{\frac{T}{\rho}}}{Va D_p} = \frac{\sqrt{\frac{T}{\rho}}}{Vs(1-w_s) D_p}$$

Va はプロペラ流入速度、 D_p はプロペラ直径である。

- (4) (2),(3)の結果を用いてプロペラ効率 η_o を求める。
- (5) (27)式で気泡による効率低下を考慮した η_o を求める。
- (6) 有効馬力 EHP 、制動馬力 BHP を求める。

$$EHP = \frac{R_t V_s}{75} \quad BHP = \frac{EHP}{\frac{1-t}{1-w_s} \eta_R \eta_o \eta_f}$$

気泡がプロペラ面内に流入することにより、プロペラ回転数も上昇し、プロペラ前進率 J も変化するのはである。しかし実際のプロペラ面内ボイド率の範囲では効率変化、前進率変化ともごくわずかなので、ここでは効率変化のみ考慮した。

3.4 気泡排出動力の計算

船体後部のエンジンルームより船首部まで排気ガスを輸送するための動力を計算する。排ガス輸送のために圧縮機を使用することを前提に、気泡排出動力は以下の式で計算される。

$$Kw_{add} = \sum_{i=1}^n Kw_{add}(i) \\ Kw_{add}(i) = \frac{0.2815}{\eta_{ad}} \frac{\kappa}{\kappa-1} P_1 Q(i) \left\{ \left(\frac{P_2(i)}{P_1} \right)^{\frac{(\kappa-1)}{\kappa} 2\kappa} - 1 \right\} \quad (29) \\ P_2(i) = P_{atm} + \rho g d(i) + P_s(i) + P_{aw}(i) + P_p$$

Kw_{add} は排出動力、 η_{ad} は断熱効率、 κ は比熱比、 P_1, P_2 、 P_{atm} はそれぞれ吸い込み圧力、排出圧力、大気圧を示す。 $Q(i)$ は排気流量、 $d(i)$ は排出口の没水深度、 $P_s(i)$ は排出口位置での船体表面圧力、 $P_{aw}(i)$ は排出用多孔板による圧力損失である。 P_p は配管による圧力損失であるが、これは他に比べると小さな値であるので無視する。

排出用多孔板による圧力損失は、2章でのキャビテー

シオン水槽における気泡流観察と同時にに行った圧力計測の結果を以下の式で整理し、その係数 C_w, C_a を最小自乗法で求めた。

$$P_{ad}(i) = C_w K_w + C_a K_a \quad (30)$$

$$K_w = \frac{1}{2} \rho_w V_w^2 / 1000 \quad K_a = \frac{1}{2} \rho_a \left(\frac{Q(i)}{A(i)} \right)^2 / 1000$$

ρ_w, ρ_a は海水、排気それぞれの密度、 V_w は流速 (= 船速)、 $A(i)$ は多孔板面積を表している。この結果より $C_w=0.0832$ 、 $C_a=715$ とした。

3.5 二酸化炭素海中溶解量の計算

排ガス気泡中の CO_2 の海中溶解量の計算は、(31)式によった。これは気泡を真球と仮定し、1成分のガスが一樣な温度で溶解している静止流体中で、1種類のガス成分を内包した気泡が存在すると仮定した場合の気泡中ガス成分の濃度変化の簡易式である。

$$\frac{P_A}{P_{A0}} = \frac{\frac{RT}{\exp(12t\sqrt{D_A V_G / \pi d^3})} + \beta H}{RT + \beta H} \quad (31)$$

P_A/P_{A0} は気泡中二酸化炭素の濃度変化を表している。 H はヘンリー定数、 R は気体定数、 T は絶対温度、 D_A は水中での気体の拡散係数、 V_G は気泡上昇速度、 d は気泡径、 β は気液流量比、 t は経過時間である。この式は排ガスのような多成分のガスの溶解挙動を考慮した厳密な数値計算結果ともよく一致することが確認されている。(31)式による気泡中二酸化炭素の濃度変化の計算例を Fig.13 に示す。

Fig.13 Examples of CO_2 Soluble Ratio

3.6 気泡挙動シミュレーションシステム

以上に述べてきた気泡挙動シミュレーションシステムとしてまとめた。システムのフローを Fig.14 に示す。気泡挙動シミュレーションシステムは、対象船舶の主要目、主機出力、航海速力、推進性能データ、主機排ガスデータを入力とし、別途計算する実船周囲の粘性流場の情報とその計算格子データをベースとして代表気泡の追跡を行う。その結果をもとに、排ガス中二酸化炭素溶解量、推進性能変化、気泡排出動力を評価し、最終的に

は船舶排ガス中の二酸化炭素を海中に排出し溶解させ処理するという本コンセプト全体のエネルギーバランスを評価することを目的とする。気泡排出位置、初期気泡条件、排ガス処理条件などは任意に指定できる。

なお、造波による影響は船側波形に対応した水压変化として扱い、波浪による船体運動は無視し得るほど小さく、造波による船首波と波浪を合わせた海水面の変動は装置機能に影響しない程度の平穏な海象下を航行するものとして考慮しない。

Fig.14 Flow Chart of Bubble Behavior Simulation System

4. 試計算

4.1 計算対象船舶および排ガス特性

計算対象船舶として、海上輸送に従事する外航船舶の中でも隻数が多く、多様な航路に就航する中型肥大船（載荷重量 70,000 トンのバルクキャリアー）を選定した。Table1 に計算対象船の主要目、主機出力、航海速力等を示した。本船の線図情報等は国内中手造船所 7 社による共同研究(HRC)のデータより参加各社の了承を得て選定したものである。

Table1 Principle Dimensions of Aimed Ship

Lpp (m)	226.0	
B (m)	36.0	
主機出力 (PS)	16300	
載貨状態	Full Load	Ballast
d (m)	11.78	6.61
Rn	1.528×10^9	
Vs (m/s)	8.025	8.641
Fn	0.171	0.184

Table2 Characteristics of Exhaust Gas

排ガス量	重量	8.200kg/kwh
	体積	6.350Nm ³ /kwh
排ガス条件	温度	200 ° C
	圧力	196Pa
CO ₂ 濃度	重量	6.2%
	体積	4.1%
酸素 + 窒素濃度	重量	91.2%
	体積	92.1%
水蒸気濃度	重量	2.2%
	体積	3.6%
その他濃度	重量	0.4%
	体積	0.2%

Table2に搭載主機関の排ガスに関するデータを示す。このデータは船用の大型2サイクルディーゼルエンジンについての公表されたデータと中手造船所より提供されたデータを併せ、平均的な値として算出したものである。排ガス中の二酸化炭素は重量比で高々数%以下であり、二酸化炭素海水溶解後の容積変化が気泡挙動に及ぼす影響は無視しうる。

船首 St.9 3/4 から排ガスを船外に微細気泡(d=3mm)として排出した場合の代表気泡の軌跡を試みにシミュレートした。Fig.15に得られた代表気泡の軌跡(緑)と船体表面限界流線(青)を示す。船首部で代表気泡の軌

跡を限界流線と比較すると、気泡の浮力により気泡軌跡が流線よりやや上向きとなっていることが認められる。しかしその影響はわずかで、ある程度より深い位置から排出した気泡は、殆どが狙いどおり船首より船底へ回り込んでいることが分かる。

Fig.15 Comparison of Calculated Limiting Stream lines and Representative Bubble Loci

4.2 パラメータスタディー

4.2.1 排出位置および排出率の影響

船首から適当な距離を取った船体表面の矩形領域に排出装置を設置し、Table2で設定した量の排ガスを船外に微細気泡として排出した場合の気泡挙動をシミュレートした(Cal_50_1)。ここでは排出装置一つに対し径

Fig.16 Simulated Representative Bubble Locus and Local Void Fraction on Hull Surface

3mmの排出孔が約1000個、それを片舷50カ所(両舷100カ所)設置すると考える。Fig.16に得られた代表気泡の軌跡と船体表面ボイド率を示す。船体表面ボイド率は拡散により代表気泡軌跡のまわりに拡がっている。船側船体平行部では仮想揚力により船体から代表気泡の軌跡が離れるため船体表面ボイド率が低い領域が見られる。この計算の場合、気泡は8.3~83.6秒間水中を滞留する。平均の気泡滞留時間は50.1secであり、Fig.13でも示されているとおり、CO₂の海中溶解にとって十分な時間と考えられる。

排出位置、排出装置の配置が本システムの性能に与える影響を評価するため、排出位置を変更した試計算を行った。Fig.17に計算を行った排出位置を示す。Table3に計算結果をまとめた。

Fig.17 Arrangement of Blow out Device

Table3 Influence of Arrangement of Blow out Device

排出装置配置		Cal_50_1	Cal_50_2	Cal_50_3	Cal_50_4
CO ₂ 残存率	%	20.9	22.5	22.1	22.3
摩擦抵抗変化率	%	-9.3	-8.8	-10.1	-9.5
全抵抗変化率	%	-7.8	-7.4	-8.5	-8.0
プロペラ効率変化率	%	-0.4	-0.3	-0.4	-0.4
制動馬力(Orizinal)	PS	16225			
制動馬力(Reduction)	PS	14722	14793	14575	14680
気泡排出動力	PS	3546	2457	2584	2719
全動力	PS	18268	17250	17158	17399
全動力変化率	%	12.6	6.3	5.8	7.2

CO₂は全てのケースで目標の60%を上回る80%近くが海水に溶解しており、CO₂の溶解に関して、排出位置は大きな問題にならないことが分る。しかし、気泡排出動力は排出装置配置に大きく影響を受け、摩擦抵抗の減少率が全てのケースで9~10%程度で殆ど変わらないのに対し、気泡排出動力を含めた全動力は5%~13%の増加を示し、水深の深い場所に多くの排出装置を配した

Cal_50_1が、最も全動力の増加が大きくなる。システムを設計する上で気泡排出位置の選定が大きな問題となることが示されている。

(29)式でも明らかのように気泡排出動力は排ガス排出量に比例する。このため全動力の増加が無いレベルまで排ガス排出量を削減するという選択肢が考えられる。Fig.18に排ガス排出量を100%, 50%, 10%とした場合のCO₂残存率、全動力変化率、摩擦抵抗減少率を比較して示した。排出装置配置はCal_50_3である。排ガス排出率を少なくするとCO₂残存率、摩擦抵抗減少率は増加するが、全動力は大きく減少し、全動力の増加が殆ど0となるケースも見られる。

以上のようにエネルギーバランス向上のためには排出動力の減少、即ち十分な滞留時間と船底への気泡流れ込みを確保しつつ、排出深度を全体的に浅くすること、排出時の容積を極力少なくすること等が課題として挙げられる。

4.2.2 拡散速度、仮想揚力係数、気泡径の影響

2~3章では、実験的調査や現在までに公表されている混相流の知見を元に、いくつかのモデル化を行い、それらについて適当な定数を設定し用いている。一つは壁面から気泡が離れる方向に作用する揚力や拡散力をモデル化した仮想揚力であり、他は気泡の壁面に沿った拡散の程度を示す拡散速度である。これら値の変化がCO₂残存量や全動力へ及ぼす影響を把握する事は、評価結果の信頼性検討や今後のシミュレーション手法改善のために重要である。

Fig.19, Fig.20に仮想揚力係数、拡散速度を有意と考えられる範囲で変更した結果を示す。仮想揚力を小さくし

て気泡が船底により近い位置を流れるように設定すると、船体表面ボイド率が増加し摩擦抵抗減少率は減少する。また拡散速度を増すとより船体表面ボイド率の高い範囲が広がるため摩擦抵抗減少率はやはり減少する。しかし想定された値の範囲では両

者とも影響は小さいと評価される。また、気泡径の影響も調査した(Fig.21)。海水中では気泡同志の合は殆ど無く、気泡径は排出孔径に関わらず、1mm程度となると考えられる。そこで気泡径を3mmから1mmとすると、CO₂残存量は殆ど変わらず、全動力はやや増加する傾向にある。しかし相違は1%以下のオーダーである。

Fig.18 Influence of Exhaust Rate

Fig.19 Influence of Diffusion Velocity

Fig.20 Influence of Imaginary Lift

Fig.21 Influence of Bubble Diameter

以上のように、気泡挙動シミュレーションの基本である気泡径、仮想揚力及び拡散に関する係数の値が有意と考えられる範囲では二酸化炭素溶解量や全動力の計算結果への影響は小さいと言える。

4.2.3 載貨状態の影響

一般に船舶は計画満載喫水より浅い喫水での航行が就航の半分程度を占める。従って航行時の状態（喫水）が二酸化炭素溶解量や全動力に及ぼす影響を把握することは装置設計や評価において重要である。Fig.22 にバ

ラスト状態を対象とした計算結果を示す。

気泡滞留時間が殆ど変わらないため、CO₂残存率の載貨状態による変化はごくわずかである。他方バラスト状態の全動力は、摩擦抵抗低減率と気泡排出動力の改善により、大幅に減少する。これは満載状態に比べて船側に沿う流量よりも船底方向への流量が相対的に多いため船体表面ボイド率の高い範囲が相対的に増加したためと考えられる。排出率 50%の場合には摩擦抵抗低減による推進馬力の減少分が排出に要する馬力を上回る例も見られる。

Fig.22 Influence of Load Condition

5. 結論

船舶から大気中に排出される二酸化炭素を削減するために、船舶よりの排ガスを直接船体周囲の海水に微細気泡として排出し、周囲の海水に溶解・固定するというコンセプトを提案し、その実現可能性を検討した。

この結果、以下のことが示された。

- 二酸化炭素海中溶解量は目標である 60%に容易に達する。
- 全動力変化率は、載貨状態、排ガス排出率に大きく影響を受ける。これは主に気泡排出動力の変化によるもので摩擦抵抗低減の影響は小さい。
- 載貨状態、排ガス排出率を適当に選べば、二酸化炭素溶解率 60%を維持したまま、全動力の

増加を実用上許容しうるレベルに抑えられる可能性がある。

以上より、ここで提案したコンセプトは実現性の高い方法と判断される。しかし実用化に当たっては、気泡排出動力の削減が重要であることがわかる。このために、

- ・ 気泡排出装置配置の最適化
- ・ 圧力損失の少ない排出装置の設計
- ・ 船型の開発 (超広幅浅喫水船など)

といった課題を今後解決してゆく必要がある。また、気泡挙動シミュレーションシステムに関しても実用化に向けて以下の課題が存在する。

- ・ 波浪影響や船体運動影響の考慮
- ・ 実験的検証

一方、今回の研究では触れていないが、海中に溶解したあとの二酸化炭素が、海洋表層で長期的にどのような振る舞いを示すかということは、大きな問題である。短期的にみて海中に溶解した二酸化炭素が、海洋表層という物理的にも生物学的にも変化の激しい領域で、大気中に戻ることなく生物の食物連鎖の中に取り込まれ固定されていくのか否かを定量的に評価することは、現状殆ど不可能であり、海洋学、生物学といった多様な分野の今後の研究成果を待たなければならない。

本論文で提案した排ガス中二酸化炭素海中溶解コンセプトは前述のように充分実用化可能であり、今後実用化に向けて造船工学、化学工学のみならず海洋学、生物学といった多様な分野を総合した検討が必要であろう。

謝 辞

本研究は運輸施設整備事業団の基礎的研究推進制度により行われた。研究実施に際しお世話になった運輸施設整備事業団の関係各位に感謝いたします。また本研究は、計画当初における(社)日本船用工業会常務理事横山勲氏(当時(財)日本造船技術センター常務理事)のご努力が無ければ実現しえませんでした。ここに改めて謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 日本流体力学会編:「混相流体の力学」朝倉書店
- 2) T.Takahashi et.al.: "Experimental study on drag reduction by micro bubbles using a 50m-long flat plate ship", 2nd International symposium on turbulence and shear flow phenomena, June 2001, Vol.1, pp.175-180
- 3) 玉井信行: 新体系土木工学 22「密度流の水理」、技報堂出版
- 4) 川北他:「流れ方向の圧力勾配と曲面形状がマイ

クロバブルによる摩擦抵抗低減効果に及ぼす影響」、造船学会論文集第 188 号(2000)

- 5) 川島他:「マイクロバブルによる摩擦抵抗低減効果と局所的なボイド率の関係」、第 72 回船研発表会講演集(1996)
 - 6) 高橋他:「マイクロバブルによる摩擦抵抗低減の流れ方向分布」、造船学会論文集第 182 号(1997)
 - 7) Guin et.al : " Reduction of skin friction by micro bubbles and its relation with near-wall bubble concentration in a channel ", J.of Marine Science and Technology(1996)
 - 8) C.L.Merkle & S.Deutsch : " Drag Reduction in Liquid Boundary Layers by Gas Injection", AIAA(1989)
 - 9) 「船舶から排出される二酸化炭素の海中固定に関する研究」、平成 12 年度運輸分野における基礎的研究推進制度研究成果報告書、運輸施設整備事業団(2001)
 - 10) Batchelor : 「入門流体力学」、東京電機大学出版局(1972)
-