

## 平成 16 年度科学研究費補助金 ( 基盤研究 ( S ) ) 研究状況報告書

ふりがな		こもり さとる			所属研究機関・ 部局・職		京都大学・大学院工学研究科・教授	
研究代表者 氏名		小森 悟						
研究 課題 名	和文	剪断力の働く気液界面を通してのスカラ輸送機構の解明と輸送量の評価 - 流体力学でしか出来ない大気・海洋間の炭酸ガス及び熱の交換量の正確な評価 -						
	英文	Scalar Transfer Mechanisms at the Sheared Air-Water Interface: Estimation of Scalar Transfer Rate						
研究経費		平成14年度	平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	総 合 計	
16年度以降は内約額 金額単位：千円		16,300	18,600	23,600	10,000	9,400	77,900	
研究組織 ( 研究代表者及び研究分担者 )								
氏名		所属研究機関・部局・職		現在の専門		役割分担 ( 研究実施計画に対する分担事項 )		
小森 悟		京都大学・大学院工学研究 科・教授		流体力学		研究全体の実施と総括		
長田 孝二		京都大学・大学院工学研究 科・講師		流体力学		風波乱流場でのスカラ輸送に関する実 験		
伊藤 靖仁		京都大学・大学院工学研究 科・助手		流体力学		風波乱流場でのスカラ輸送に関する実 験		
三角 隆太		横浜国立大学・工学研究 院・助手		化学工学		スカラ輸送に及ぼす気泡と汚れの影響		
松本 充弘		京都大学・大学院工学研究 科・助教授		界面化学		気液界面でのスカラ輸送の分子シミュ レーション		
鈴木 靖		(財)日本気象協会・東海支 社・技術部・課長(研究職)		海洋物理		地球上の大気・海洋間でのスカラの輸 送量の評価		
当初の研究目的 ( 交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。 )								
<p>流体力学 ( 熱工学を含む ) は非常に有用な学問であり、従来の機械工学分野の研究に留まらず、運動量、熱、物質輸送が複雑に絡み合う大気・海洋中での乱流輸送現象に関連した地球環境分野の研究にも適用可能である。本研究は、この流体力学の特徴を生かすことにより、地球温暖化予測の研究において重要な大気・海洋間での海水面を通して物質 ( CO<sub>2</sub> 等 ) ならびに熱の輸送 ( 交換 ) 量に対する信頼性の高い評価法を確立しようとするものである。</p> <p>周知のように、温暖化予測に関する既往研究は、GCM ( General Circulation Model ) と呼ばれる温暖化予測モデルを用いた数値シミュレーション手法の精度と計算 ( 時空間 ) 分解能の向上に主眼を置いたものが大半であり、大気・海洋間の物質および熱の輸送量に対する物理的サブモデルの信頼性の向上を目指したものではない。しかし、これらのサブモデルの信頼性をなくしては、それらを統合した GCM の不確定性を拭い去ることは出来ない。また、物理的サブモデルの精度向上を可能にするのは全球的な数値シミュレーション予測ではなく実験である。特に、大気・海洋間での炭酸ガス等の物質および熱の輸送速度が海水面近傍の乱流構造に支配されることを考えれば、その輸送速度の正確な実験の評価を可能にするのは、既往研究に主体的に取り組んできた海洋化学者ではなく、流体力学や輸送現象論分野の学問的知識に精通した流体力学者であると言っても過言ではない。</p> <p>そこで、本研究では、流体力学の立場から、剪断力の働く風波気液界面を通しての物質と熱の輸送機構を風波水槽を用いた室内実験および数値シミュレーションにより解明することを目的とする。さらに、その結果から、大気・海洋間の海水面を通しての物質および熱の輸送速度を正確に評価できるモデルを構築することをめざす。具体的な研究目標は以下の通りである。</p>								
<ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 風波界面近傍での乱流構造とスカラ輸送機構との関連性の解明とスカラ輸送モデルの確立</li> <li>(2) 現実の海洋に現れるうねりおよび密度成層 ( 浮力 ) がスカラの輸送速度に及ぼす影響の解明</li> <li>(3) 降雨および重油等の界面汚れがスカラ輸送に及ぼす影響の解明とそのモデル化</li> <li>(4) 本研究で開発したスカラ輸送速度モデルを用いた地球上の大気・海洋間での物質および熱の輸送量の正確な評価</li> </ol>								

これまでの研究経過（研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入してください。）

図1に大気・海洋間、つまり剪断力が働く気液界面を通してのスカラー輸送に及ぼす諸因子をイラストで示す。今年度までの2年間は、研究を物質(CO<sub>2</sub>)の輸送に関するものに限定し、左図に示す諸因子が物質輸送に及ぼす影響の解明とその定量的評価に取り組んできた。以下に、これまでの研究成果を箇条書きで示す。なお文中の[ ]内の数字は の研究成果の発表状況に記入した論文番号を示す。

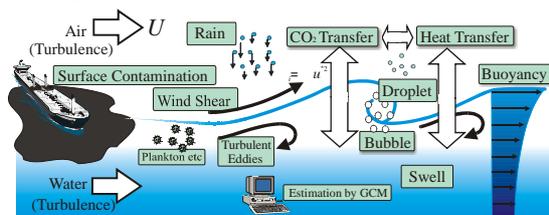


図1. 大気・海洋間のスカラー輸送に影響を及ぼす諸因子

### 1) 物質輸送速度（液側物質伝達係数） $k_L$ の正確な評価とそのモデル化

風波水槽を用いた実験により、従来の定説であった「物質輸送速度 $k_L$ は風速に比例する」を示す結果とは全く異なる、「物質輸送速度が風速5m/s以下で上昇し、風速5~12m/sの領域で横ばいになり、風速12m/s以上で急激に上昇する」という結果を再実験により実証した[7]。この相違の理由を、粒子画像流速計(PIV)等を用いた乱流計測および波状壁面上の気相乱流に対する三次元直接数値計算(DNS)を行うことにより明らかにした[14,18,19,26]。また、鳥羽良明東北大名誉教授と中国海洋大学趙棟梁教授（招聘研究者として研究代表者の研究室に滞在中）を本プロジェクトに加えることにより、風波水槽のみならず海洋にも適用可能な $k_L$ の相関パラメータとして気液界面でのレイノルズ数に相当するパラメータが重要であることを示すに至っている[2,7]。さらに、このパラメータの有用性を実証し $k_L$ のモデル化を推進するため、昨秋に全長約30mの大型風波水槽を本研究経費で製作し、現在、実験を進めている。

### 2) 高風速時の風波の崩壊に伴う気泡の巻き込みおよび飛散液滴が物質輸送に及ぼす影響

従来、風波の崩壊に伴う気泡の巻き込みと液滴の飛散が高風速域における物質輸送速度 $k_L$ の急激な増加の主因であると考えられてきたため、気泡および液滴の影響を考慮した $k_L$ のモデル化が必要とされてきた。しかし、この見解は気泡と液相間および液滴と気相間の物質移動の正確な評価に基づいたものではなく、単なる予想に過ぎなかった。そこで、本研究では気泡および液滴の径ならびに速度をレーザドップラ流速計と位相ドップラ式粒子計測器(PDA)を用いて測定し、さらに三次元直接数値計算による単一気泡および液滴周りの $k_L$ の評価を行うことにより、気泡と液滴が界面を通しての全物質輸送速度にどの程度寄与するのかを明らかにした[1,3,4,5,8,28]。その結果、気泡および液滴が全物質輸送速度におよぼす影響は最大限数%程度とかなり小さいことがわかった[21,22]。また、乱流場での液滴の凝縮と合体に関する数値計算手法の開発も行った[9,17,29]。

### 3) 風波気液界面を通しての物質輸送に及ぼすうねりの影響

うねりが物質輸送速度 $k_L$ に与える影響を解明するため、造波装置を用いて風波水槽内に風波の進行方向と同じ方向にうねりを発生させた場合の物質輸送速度の測定を行った。その結果、従来のモデルでは $k_L$ に対するうねりの影響は全く考慮されていなかったが、うねりは砕波を伴わない風波気液界面を通しての $k_L$ を大幅に（最大40%）減少させることが本研究で初めて明らかになった[15,22,23,25]。また、風波気液界面を波状壁面で近似した三次元直接数値計算結果から、 $k_L$ の減少は界面に作用する摩擦応力の減少に起因することがわかった[11]。さらに、砕波を伴う高風速域では物質の輸送速度に及ぼすうねりの影響がなくなることを明らかにした[15,22]。

### 4) 気液界面を通しての物質輸送に及ぼす降雨の影響

降雨が気液界面を通しての物質輸送速度に及ぼす影響を解明するため、開水路乱流の気液界面上に雨を降らせる降雨装置を製作設置し、降雨時の物質輸送速度 $k_L$ の測定を行った。その結果、降雨は気液界面を通しての物質輸送を著しく促進させ、雨量が多い場合の $k_L$ は風速14m/s程度の風波乱流場での物質輸送速度に匹敵することを明らかにした。この結果は、従来の $k_L$ のモデルでは全く考慮されていなかった降雨の影響のモデル化の必要性を示すものである[30]。

### 5) 密度成層が物質輸送に及ぼす影響

密度成層を形成する海洋表層の温度成層（浮力）の効果が物質および熱の輸送速度に与える影響を、風波水槽の液相側に温度成層を形成させることにより調査した結果、海洋表層に存在する安定および不安定温度成層は界面を通しての物質および熱の輸送速度に影響しないことを示した[13,20]。

### 6) 気液界面を通しての物質輸送に及ぼす界面汚れの影響

タンカーの事故等により漏出する重油が気液界面を覆う場合、如何なる濃度でどの程度の物質輸送速度の変化を引き起こすかを風波の崩壊現象との関係をも含めて明らかにした[12,27]。また、重油の処理剤（界面活性剤）や化学反応物質（プランクトン等を含む）等が乱流混合反応[31]に及ぼす影響を明らかにすることも重要であり、そのための基礎研究として化学反応を伴う乱流場での混合反応機構の数値シミュレーション手法(LES)を開発した[6,10,16,24,32]。

以上、従来の $k_L$ のモデルでは全く考慮されていなかった諸因子の影響を精力的に解明した。

特記事項 (これまでの研究において得られた、独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入してください。)

大気・海洋間での海水面を通しての  $\text{CO}_2$  等の物質輸送の問題は、気象学関連の温暖化予測研究の分野では既に解決済みの問題と考えられている嫌いがある。国内でこの問題に取り組んでいる研究者は極めて数少なく、温暖化予測分野のほとんどの研究者は大気海洋大循環モデル GCM を使用した数値シミュレーションによる将来の温暖化予測のシナリオ作りの研究にシフトしている。しかし、大気・海洋間での物質輸送速度のモデルは非常に不確定性の強いものであり、これまで海洋化学者が中心に行ってきた研究では、非常にばらついた物質輸送速度  $k_L$  の観測値を風速に対する単純な増加関数で強引に相関してモデルを作るという極めて粗雑な方法がとられてきた。我々のグローバルな炭素収支のシミュレーションによると、この相関関数を少し変化させるだけで大気・海洋間の年間炭素輸送量の予測結果が 1Gt (ギガトン) 程度 (全球での炭素発生量は年間約 5.5Gt) 簡単に变化する。このことは、精度のない  $k_L$  を使用して、グローバルな炭素収支をとると森林等の陸地は炭素の放出源にも吸収源にも成りうるという極めて不確定な予測を与えることになる。この問題点を克服するため、本研究では、研究目的のところに記したように、流体力学や輸送現象論に精通した流体力学者を中心にして研究組織を構成し、流体力学の立場から精巧な室内実験および直接数値計算を行うことにより、物質輸送機構と乱流構造の解明および物質輸送速度  $k_L$  の正確な評価を試みたもので、得られた結果は既往研究には見られない、あるいは既往研究の結果とは全く異なるインパクトのある独創的な知見等を数多く含んでいる。それらを列挙すると次の通りである。

(1) 既往の大気海洋大循環モデル GCM に組み込まれている物質輸送速度  $k_L$  と風速の関係は全く物理的根拠に乏しい便宜的なモデルに過ぎないことを明らかにするとともに、液側の組織的乱流渦である表面更新乱流渦の発生周波数および風波気液界面での摩擦速度と風波のピーク波数から定義されるレイノルズ数の一種である  $R_B$  が  $k_L$  を支配する重要な相関パラメータと成り得ることを初めて示した。

(2) 従来の物質輸送速度  $k_L$  のモデルには現実の海洋に頻繁に現れるうねりや降雨の影響が全く考慮されていなかった。これに対し、本研究では、うねりや降雨が  $k_L$  に大きな影響を及ぼすことを実験により初めて明らかにし、これらの影響を  $k_L$  のモデルに組み込むことの必要性を示した。また、うねりの影響に関しては、波状気液界面に働く摩擦抗力が重要であり、圧力抗力をも含む摩擦速度ではうねりの影響を論じることができないことも実証するに至った。これは、極めて貴重な知見であり、大気側の時間平均流速分布に対数則を適用する方法やレイノルズ応力を測定する渦相関法により導出した摩擦速度を用いたパラメータ化法では、うねりのある場合の  $k_L$  のモデル化を行うことが出来ないことを示した。また、降雨の効果については、降雨 (真水) によって海洋上に形成される安定密度成層により鉛直方向の物質輸送が抑制されるため降雨が  $k_L$  に及ぼす影響は小さいとされていたが、安定な塩水成層した乱流場への降雨実験の結果から密度成層の  $k_L$  への影響は無視小であり、豪雨状態での  $k_L$  は風波の崩壊を伴う高風速の場合の  $k_L$  に相当する大きなものとなることが明らかになった。これは、降雨の影響を全く考慮していない従来の GCM には重大な欠陥があり、地球上の降雨のデータベースの必要性とそれに基づく大気・海洋間の物質輸送に及ぼす降雨の影響を GCM に組み込むことの重要性を指摘する画期的な成果である。

(3) 風速 12m/s 以上の高風速では  $k_L$  が急激に増加する。既往研究では、この原因が風波の崩壊による多数の気泡の液相への巻き込みと気相側への飛散液滴によるものであるとの解釈がなされてきた。しかし、この推論を裏付けるためには単一の液滴および気泡のもつ気液界面を通しての物質移動速度を正確に評価し、さらに全気泡および全液滴の効果を評価するため気泡および液滴の径、個数分布、速度等も計測しなければならない。本研究では、気泡周りの流れ、液滴内外部の流れを直接数値計算 (DNS) で解析し、PIV、PDA、LDV 等の計測器を使用した液滴の径、個数分布、速度の計測結果を併用することにより、気泡および液滴の物質移動促進効果を評価した。その結果、気泡および液滴による促進効果は最大でもそれぞれ 7% および 0.7% 程度であることを初めて定量的に示すことに成功した。この成果は、 $k_L$  を白波の発生率を用いてモデル化しようとする最近の研究の方向が全くの誤りであることを示唆する貴重なものとなった。なお、気相流中に置かれた単一液滴内外の流れの同時解析を可能にする DNS コードを開発したのは本研究が世界で初めてであり、この DNS の開発も今後の広範囲での応用を考えるとかなりインパクトのある研究と判断される。

(4) 海洋表層は温度および塩分濃度差で密度成層している場合が多い。既往研究では、この密度成層が  $k_L$  に影響を及ぼすことが予想されていたが、実際にその影響を評価した研究は皆無であった。本研究では、温度成層した風波乱流場で  $k_L$  の測定を行い、剪断力により生成された乱流のエネルギーが密度成層によるポテンシャルエネルギーより遙かに大きいことから、海洋表層の液側の密度成層は  $k_L$  に影響を及ぼさないことを明らかにした。この結果は、 $k_L$  のモデル化を格段に容易にする貴重な知見である。

(5) 海洋表層などに存在するプランクトン等の生物や重油などの化学汚染物質等も  $k_L$  に大きな影響を及ぼすことが考えられる。この問題を検討する第一歩として液相の乱流場での化学反応物質の濃度予測が必要である。本研究では、ラーゼエディシミュレーション (LES) という数値計算手法を用いて、化学反応を伴う液相乱流場での混合反応過程を予測することに初めて成功した。

研究成果の発表状況 (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(発表予定のものを記入することも可能。)の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。)

#### (査読付国際学術誌)

- [1] M. Ni and S. Komori, General Second-Order Projection Formulas for Unsteady Flows, *AIAA Journal*, Vol.40, No.7, pp.1464-1467 (2002).
- [2] D. Zhao, Y. Toba, Y. Suzuki and S. Komori, Effects of Wind Waves on Air-Sea Gas Exchange: Proposal of an Overall CO<sub>2</sub> Transfer Velocity Formula as a Function of Breaking-Wave Parameter, *Tellus B*, Vol.55, pp.478-487 (2003).
- [3] R. Kurose, H. Makino, S. Komori, M. Nakamura, F. Akamatsu and M. Katsuki, Effects of Outflow from the Surface of a Sphere on Drag, Shear Lift, and Scalar Diffusion, *Phys. Fluids*, Vol. 15, No. 8, pp. 2338-2351 (2003).
- [4] M. Ni, M. Abdou and S. Komori, A Variable-Density Projection Method for Interfacial Flows, *Numerical Heat Transfer*, Vol. 44, pp.553-574 (2003).
- [5] M. Ni, S. Komori and N. Morley, Projection Methods for the Calculation of Incompressible Unsteady Flows, *Numerical Heat Transfer*, Vol. 44, pp.533-551 (2003).
- [6] T. Michioka and S. Komori, Large-Eddy Simulation of Reacting Liquid Flows, *AIChE J.*, Vol.50 (2004). 印刷中
- [7] Y. Toba, S. Komori, Y. Suzuki and D. Zhao, Similarity and Dissimilarity in Air-Sea Momentum and CO<sub>2</sub> Transfers: The Nondimensional Transfer Coefficients in Light of Windsea Reynolds Number, *Atmosphere-Ocean Interactions* Vol. 2 (2004). 印刷中
- [8] M. Matsumoto, T. Matsuura, MD Simulation of a Rising Bubble, *Molecular Simulation* (2004). 印刷中
- [9] R. Onishi, S. Komori, A Theoretical Model of Gravity Effects on the Collision Frequency of Monodisperse Particles in Turbulent Flows, *Phys. Fluids* (2004). 発表予定
- [10] R. Onishi and S. Komori, Thermally-Stratified Liquid Turbulence with a Chemical Reaction, *AIChE J.*, (2004). 発表予定
- [11] K. Nagata, S. G. Sajjadi, H. Wong, J. C. R. Hunt and P. A. Davidson, Weak Mean Flows Induced by Anisotropic Turbulence Impinging onto Planar and Undulating Surfaces, *J. Fluid Mech.* (2004). 発表予定
- [12] K. Nagata and S. Komori, Effects of Heavy-oil Surface Contamination on Mass Transfer across the Air-water Interface, *J. Geophys. Res.* (2004). 発表予定

#### (査読付国内学術誌)

- [13] 大西領, 道岡武信, 長田孝二, 小森悟「液相混合層での乱流混合反応に及ぼす温度成層の効果」日本機械学会論文集(B編)69巻679号 pp. 636 - 643 (2003).
- [14] 長田孝二, 西岡毅弘, 杉岡健一, 小森悟「波状壁面上の乱流構造と抗力に及ぼすリップルの影響」日本機械学会論文集(B編)69巻684号 pp.1800-1806 (2003).
- [15] 丹野賢二, 小森悟「風波気液界面近傍の乱流構造と物質移動に及ぼすうねりの影響」日本機械学会論文集(B編)70巻691号 pp.644-649 (2004).
- [16] 伊藤靖仁, 小森悟「化学反応を伴う液相混合層内の混合と反応に及ぼすトリップワイヤおよび格子の効果」日本機械学会論文集(B編)70巻692号 (2004).
- [17] 大西領, 小森悟「乱流における同一径粒子間の衝突頻度に及ぼす重力の影響」日本機械学会論文集(B編)(2004). 発表予定
- [18] 長田孝二, J. C. R. Hunt「シアのない壁面上乱流境界層に及ぼすレイノルズ数の効果」日本機械学会論文集(B編)(2004). 発表予定
- [19] 長田孝二, J. C. R. Hunt「乱流の非等方性と壁面のブロック効果による平板上での平均流の発生」日本機械学会論文集(B編)(2004). 発表予定
- [20] 長田孝二, 佐藤他加志, 小森悟「強い安定密度成層乱流場でのスカラの逆こう配拡散に及ぼす分子拡散の影響(RDTによる線形および非線形過程の検討)」日本機械学会論文集(B編)(2004). 発表予定
- [21] 杉岡健一, 小森悟「風波乱流場での物質移動に及ぼす飛散液滴の影響」日本機械学会論文集(B編)(2004). 発表予定

#### (国際会議)

- [22] S. Komori, K. Nagata, K. Tanno and K. Sugioka, The Effects of Entrained Bubbles, Density Stratifications and Swell on Mass Transfer across the Sheared Air-Water Interface, Int. Sympo. on Dynamics and Statistics of Coherent Structures in Turbulence: Roles of Elementary Vortices (2002).
- [23] S. Komori, K. Nagata, K. Tanno and T. Nishioka, The Effects of Swell on Turbulence Structure and Mass Transfer at the Sheared Wavy Air-Water Interface, The 5th JSME-KSME Fluid Engineering Conference (2002).
- [24] R. Onishi, T. Michioka, K. Nagata and S. Komori, LES of Thermally-Stratified Liquid Turbulent Flows with a Chemical Reaction, The Third International Symposium on Turbulence and shear Flow Phenomena 2003 (2003).
- [25] K. Tanno, S. Komori, Laboratory Measurements of CO<sub>2</sub> Transfer Velocity in Wind-Driven Turbulence with Swell, IUGG 2003 (General Assembly of the International Union Geodesy and Geophysics) (2003).
- [26] K. Nagata, J. C. R. Hunt and P. A. Davidson, Turbulence Structure and Low Reynolds Number Effects in Shear-Free Boundary Layer in Turbulence, *Heat And Mass Transfer* 4 (2003).
- [27] M. Matsumoto, Mass Transport through Vapor-Liquid Interface: A Revisit, International Conference on the Occasion of Lars Onsager's 100th Birthday: Transport, Dissipation, and Turbulence (2004).
- [28] M. Matsumoto, T. Matsuura, MD Simulation of a Rising Bubble, International Conference on Molecular Simulation (2004).
- [29] R. Onishi and S. Komori, The Collision Rate of Monodispersed Particles in Turbulent Flows with Gravity, The 5th International Conference on Advances in Fluid Mechanics (2004).
- [30] S. Komori, N. Takagaki, K. Sugioka and K. Nagata, Promotion Effects of Falling Droplets on Mass Transfer Across the Air-Water Interface, Int. Conference on Multiphase Flow 2004 (2004).
- [31] Y. Ito and S. Komori, The Effects of Trip Wires and a Round-Rod Grid on the Reactive-Diffusive Mechanism in a Liquid Plane Mixing Layer with a Chemical Reaction, 10th European Turbulence Conference (2004)
- [32] S. Komori, T. Michioka and R. Onishi, Practical Large-Eddy Simulation Technique for Turbulent Reacting Liquid Flows, 6th World Congress on Computational Mechanics (2004).