

研究課題名 混相流の多重スケール高精度解析  
所属研究機関名 独立行政法人海上技術安全研究所  
研究者氏名 杉山 和靖

## ・研究計画の概要

### 研究の趣旨・目的

空気中の液滴や粒子、液体中の気泡や粒子を含む流れである「混相流」は多くの研究分野において重要である。工学分野では、流体機械を始め、化学反応器、熱交換器、エンジンの燃料噴射部、汚水処理のための曝気槽などで観測される。例えば、熱機関における燃料噴霧の蒸発・燃焼時の熱効率や、オゾン浄化システムにおけるオゾン気泡の水中溶解時の殺菌性能の向上には、混相流の特徴を十分に理解する必要があり、高精度な予測法が不可欠である。また、地球温暖化物質である二酸化炭素の海洋拡散といった地球規模の現象の評価には、二酸化炭素と海水の界面面積が広い波の破碎時における局所的な現象の混相流解析が重要である。従って、混相流の数値解析手法の高度化によって、エネルギー効率化技術、環境、海洋科学などの問題への貢献が期待できる。

本研究では、多くの研究分野で共通する混相流の多重スケール構造が反映された新たな解析手法を開発・応用し、高精度かつ普遍的な実用解析を実現することを目的とする。混相流の中でも応用範囲が広い、溶解や蒸発などの物質移動を伴う混相流を対象とする。混相流の高精度解析法の確立には、大規模数値計算や検証実験を通じて現象の本質に関わるスケール間の干渉機構に関する検討を行うことが必要である。そこで、気泡噴流の水中溶解や燃料噴霧流の蒸発を対象とした実験や数値シミュレーションを行い、詳細な流れ場のデータを取得する。そして、広範囲な分野の実用解析に適用可能な計算アルゴリズムを開発する。

### 研究計画の概要

本研究では、混相流の多重スケール高精度解析を行うために、現象の本質に関わるスケール間の干渉機構を正確に表現する計算アルゴリズムを開発する。そのためには、実験や数値計算によって流れ場の詳細なデータを取得することが必要である。研究開始時は、個々の分散体スケールにおける物質移動現象のシミュレータを開発し、コンピュータシミュレーションによる現象の把握を行う。また、光学計測法を開発し、モデル化や数値計算結果の検証に必要な実験データを高空間分解能で取得する。研究期間の前半では以下のように3つに大別して、研究を実施する。

#### (a)「多重スケール高精度解析モデルの構築」

単一気泡や単一液滴など、任意の分散相・連続相粘性比に対して流場解析が可能な数値計算法を開発する。このとき境界適合する格子を用いる。そして、直接数値シミュレーションを行い、気泡、液滴周囲の流場情報を取得する。次に、矩形格子を用いた多体問題の計算が可能なシミュレータを開発する。特に、境界適合格子を用いて計算した流場情報を照合してモデル化を行う。また、溶解、蒸発などの拡散現象の影響を、開発した数値計算手法に導入し、気泡の水中溶解、燃料液滴の蒸発の数値シミュレーションを実施する。そして、物質拡散に関する知見を得る。

#### (b)「気泡噴流の水中溶解過程計測」

水道水や海水が入った水槽の底部に気泡発生ノズルを設置し、噴流として発生した気泡の水中溶解過程や分散過程を測定するための実験装置を開発する。気泡径分布や速度分布を光学計測するため、高い透明度が確保された実験水槽を設計、製作する。バックライト法や干渉画像法による気泡径分布計測、粒子画像速度計測法、粒子追跡速度計測法やレーザー誘起蛍光法による速度分布計測を実施し、本実験装置に適した計測法を確立する。そして、予備実験を行い、基礎データの収集を行う。

#### (c)「燃料噴霧流の蒸発過程計測」

燃料噴霧流に関する既存の研究成果、最新の計測手法を調査し、燃料噴霧時の蒸発・拡散現象における具体的な問題点を明らかにする。また、既存の燃料噴霧流実験装置で、アセトン蒸気を用いた実験を行う。レーザー誘起蛍光法による蒸気濃度分布計測と干渉画像法による噴霧内液滴径計測を同時に行う新たな気液二相流計測手法を開発し、液滴の蒸発過程に対する知見を得る。

研究計画の詳細報告

(単位：百万円)

研究項目	所要経費				
	13年度	14年度	15年度	16年度	合計
1. 多重スケール高精度解析モデルの構築					
(1) 気泡の水中溶解・燃料液滴の蒸発のシミュレータの開発	← 4.8	3.0 →			7.8
(2) 気泡の水中溶解、燃料液滴の蒸発の数値シミュレーション		← 4.6	9.8	5.0 →	19.4
2. 気泡噴流の水中溶解過程計測					
(1) 気泡噴流実験装置の開発	← 6.5	3.5 →			10.0
(2) 気泡噴流の水中溶解計測		← 4.5	10.0	5.0 →	19.5
3. 燃料噴霧流の蒸発過程計測					
(1) 燃料噴霧流に関する研究調査	← 2.1 →				2.1
(2) 燃料噴霧流の濃度場・速度場同時計測		← 2.5 →			2.5
4. 混相流の大規模実用解析				← 5.0 →	5.0
所要経費(合計) (間接経費を含む)	13.4	18.1	19.8	15.0	66.3

## 研究成果の概要

### 研究成果の概要

これまでにを行った研究は、以下の3つに大別できる。

1. 多重スケール高精度解析モデルの構築
2. 気泡噴流の水中溶解過程計測
3. 燃料噴霧流の蒸発過程計測

まず、1.の研究成果について述べる。気泡の水中溶解・燃料液滴の蒸発を統一的な手法によって解析するために、任意の分散相・連続相粘性比に対して適用可能な気泡、液滴周りの流れ場の数値解析法を開発し、多重スケール解析に必要な分散体周りの流れ場のデータを取得した。本計算法によって得られる抗力係数などの結果が従来の理論や実験結果とよく一致することを確認した。次に、気泡、液滴周囲の速度場のデータベースを、少ない情報量で記述するために、球面調和関数の直交性を利用して、データの縮約化を行った。また、気泡・液滴・粒子の並進運動に伴う減圧に関する知見を理論と数値計算によって得た。これらの知見を基に、上昇気泡群が作り出す乱れをモデル計算により予測し、直接数値計算結果と比較したところ、従来のモデル計算法に比べて改善した結果を得た。さらに、物質移動の効果を考慮して、気泡の水中溶解、液滴の蒸発を対象として数値解析法を開発した。そして、一様流やせん断流中に存在する気泡、液滴周りの流れ場、濃度場を数値計算した。また、微係数を高次展開した理論解析を行い、物質移動量の高精度な理論解の導出し、計算と理論の妥当性を確認した。また、双曲座標系で流れ場、濃度場の輸送方程式を記述し、2個の球形気泡、液滴の物質移動を高精度に計算するプログラムを開発し、気泡間、液滴間距離に代表されるメソスケールでの物質移動に関するデータを取得した。

2.に関しては、気泡として発生した気泡の水中溶解過程や分散過程を測定するための気泡溶解実験装置を設計、製作した。実験水槽はアクリル製であり、水槽底部には気泡発生ノズルを設置した。実験には、 $N_2$  や溶解性の高い  $CO_2$  を用いた。群として周囲流体に作用する気泡の動的挙動に関する知見を得るため、流れの多次元性、非定常性に着目した光学計測を行った。気泡周囲流体の速度場計測には PIV-LIF (粒子画像計測・レーザー誘起蛍光)法、気泡径分布計測には ILIDS 法(干渉画像法; Maeda ら, 2000)を適用した。ILIDS 法とバックライト法により気泡径の確率密度関数(PDF)を計測したところ、PDF のピークと分布形状がよく一致し、本計測法(ILIDS 法)の妥当性を確認した。また、気体種、ノズルからの高さをパラメータとして、気泡の溶解に伴う気泡径の変化と周囲速度の関係を調べた。その結果、気泡周囲の乱流強度、気液界面積、気泡溶解量に関するデータを取得し、気泡の水中溶解過程や分散過程を理解する上で有用な結果を得た。

次に、3.の研究成果について述べる。噴霧拡散燃焼に対して、蒸気濃度計測法として LIF 法、液滴径・速度計測法として ILIDS 法を用いる新たな気液二相流計測手法を開発した。蛍光剤にはアセトン、励起・照射光源には二波長同時発振可能な Nd:YAG Laser を使用した。まず、蒸気の濃度分布を非接触でかつ高空間分解能で計測、調査した。本研究では定量化および励起光強度斑の除去を行う較正法を採用し、アセトン蒸気を用いた蒸気噴流により検証した。その結果、LIF 法により得られた蛍光画像を 6.1%の不確かさで二次元的に定量化することが可能となった。次に、濃度場、速度場の同時計測を行い、蒸発を含む噴霧流動場の解析を行った。そして、アセトン噴霧流の蒸気濃度、液滴数密度、液滴速度、液滴径分布を定量測定することにより、液滴の蒸発量の算出に成功し、データを取得した。本研究で開発した非接触でかつ高空間分解能の計測法を利用することによって、噴霧流動場構造を理解する上で有用な結果を得た。

## 波及効果、発展方向、改善点等

混相流は多くの自然現象や工業装置で見受けられることから、多重スケール構造が反映された混相流予測手法の高度化は広い分野に大きな影響を与え、波及効果が大きいと考えられる。科学的波及効果については、例えば、二酸化炭素の海洋拡散などの自然現象への寄与が挙げられる。二酸化炭素・海水の界面積は波が破碎し、気泡が発生するときに大きくなるため、碎波の混相流解析によって、二酸化炭素の海洋拡散評価法の高度化が期待できる。

また、混相流予測法の高精度化は、測定困難な流場の取得や実験コストの削減を可能とし、社会的・経済的波及効果も期待できる。社会的波及効果については、例えば、地球温暖化をもたらす二酸化炭素の固定化技術への寄与が挙げられる。二酸化炭素の固定化技術の1つとして、深海中に二酸化炭素気泡を噴出し、海洋へ溶解、拡散させる方法が提案されている。水質変化に伴う生態系へのダメージを抑制しつつ、高効率の固定化を実現する際に、本解析手法の貢献が期待できる。

経済的波及効果については、例えば、気液間の化学反応器、オゾンによる水質浄化プラントや養殖場への酸素供給システムの高効率化、省コスト化への寄与が挙げられる。これらでは、気泡群の駆動力を利用して、ガスを均一に、広範囲に、高濃度で溶解させることが求められる。気泡が微細化すると、界面積が増加するため、高濃度での溶解が可能となるが、駆動力が低下するため、均一で広範囲の溶解が困難となる。最適なガスの噴出条件を低コストで決定する際に、本解析手法の貢献が期待できる。

他にも、混相流状態にある機器は、熱交換器、マイクロバブルの抵抗低減効果を利用した船舶の摩擦抵抗低減装置、高速流体中で観測されるキャピテーション流れ、エンジンの燃料噴射部など数多くある。混相流予測法の高精度化により、汎用性の高い流動予測を実現することから、大きな波及効果が期待できる。

混相流以外の現象においても、スケール間の干渉が現象の本質を決定するといった共通する問題は工学・理学を問わず、様々な研究分野で見受けられる。本研究で開発された解析手法は、その展開、汎用化によって、異なる研究分野の進展にも寄与することが期待できる。

## 研究成果公表等の状況

### (1) 研究発表件数

	原著論文による 発表	左記以外の誌上発 表	口頭発表	合 計
国 内	12 件	0 件	1 件	13 件
国 際	5 件	0 件	1 件	6 件
合 計	17 件	0 件	2 件	19 件

### (2) 特許等出願件数

合計 0 件 (うち国内 0 件、国外 0 件)

### (3) 受賞等

0 件 (うち国内 0 件、国外 0 件)

### (4) 主な原著論文による発表

国内誌(国内英文誌を含む)

1. 杉山 和靖, 高木 周, 松本 洋一郎: 「一様等方性乱流場中での微細気泡・微粒子の挙動に対する密度比の影響」, 日本機械学会論文集 B, 68(669), 1431-1439, (2002).
2. 杉山 和靖, 高木 周, 松本 洋一郎: 「並進運動に伴う球形液滴周りの減圧挙動に対する微小慣性の影響 (第 1 報, 外部展開の影響とレイノルズ数摂動成分に関する理論解析)」, 日本機械学会論文集 B, 68(669), 1440-1448, (2002).
3. 杉山 和靖, 高木 周, 松本 洋一郎: 「一様流中の円柱周りの減圧挙動に対する微小慣性の影響」, 日本機械学会論文集 B, 68(671), 1972-1980, (2002).
4. 杉山 和靖, 高木 周, 松本 洋一郎: 「並進運動に伴う球形液滴周りの減圧挙動に対する微小慣性の影響 (第 2 報, 直接数値シミュレーションによる理論の検証)」, 日本機械学会論文集 B, 68(671), 1981-1989 (2002).
5. Sugiyama, K., Kawamura, T., Takagi, S. and Matsumoto, Y.: 「Numerical Simulations on Drag Reduction Mechanism by Microbubbles」, Proc. of the 3rd Symp. on Smart Control of Turbulence, 129-138, (2002).
6. 杉山 和靖, 高木 周, 松本 洋一郎: 「渦セル流れ中の気泡・粒子の並進運動」, 日本機械学会論文集 B, 69(680), 786-793, (2003).
7. Sugiyama, K., Kawamura, T., Takagi, S. and Matsumoto, Y.: 「Numerical Simulation of Transient Microbubble Flow」, Proc. of 4th Symposium on Smart Control of Turbulence, 51-60,(2003).
8. 杉山 和靖, 児玉 良明, 川村 隆文, 高木 周, 松本 洋一郎: 「過渡的影響を考慮したマイクロバブル流れの数値シミュレーション」, 第 3 回海上技術安全研究発表会講演集, 79-84, (2003).
9. 黒沢 亮, 菱田 公一, 前田 昌信: 「LIF・干渉画像法による噴霧内蒸気および液滴径・速度の同時計測」, 日本機械学会 2002 年度熱工学講演会講演論文集 (2002).
10. Lertnuwat, B., Sugiyama, K. and Matsumoto, Y.: 「Modeling of Phenomena inside an Oscillating Bubble」, 第 15 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, E08-1, (2001).
11. 北川 石英, 杉山 和靖, 笹木 俊男, 村井 祐一: 「壁面スライド気泡群中に観察される気泡間相互作用 (第 3 報, 気泡間相互作用に対するレイノルズ数の影響)」, 日本機械学会論文集 B, 69(681), 1140-1147, (2003).
12. 伊藤 展信, 杉山 和靖, 川口 達也, 菱田 公一: 「干渉画像法による気泡流動計測」, 第 7 回オーガ

ナイズド混相流フォーラム講演論文集, 33-34, (2003).

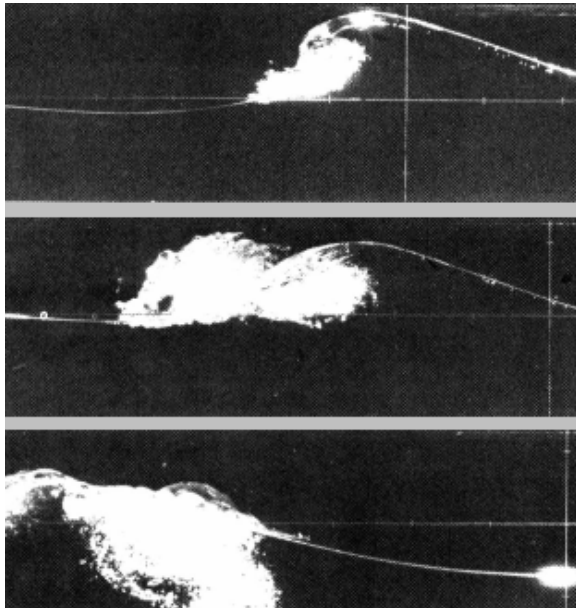
国外誌

13. Sugiyama, K., Takagi, S. and Matsumoto, Y., 「Multi-Scale Analysis of Bubbly Flows」, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 101, 689-704, (2001).
14. Kurosawa, R., Hishida, K. and Maeda, M. 「Combined measurement of LIF and ILIDS for vapor concentration and droplets size and velocity in a spray」, Proc. of Internal Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, 25.5, (2002).
15. Kitagawa, A., Sugiyama, K., Ashihara, M., Hishida, K., and Kodama, Y., 「Measurement of Turbulence Modification by Microbubbles Causing Frictional Drag Reduction」, Proc. of FEDSM03-45648 (CD-ROM), (2003).
16. Vance, M.W., Sugiyama, K., Takagi, S., Squires, K.W., 「Microbubble Transport in Turbulent Channel Flow」, Proc. of FEDSM03-45642 (CD-ROM), (2003).
17. Kodama, Y., Sugiyama, K., Kitagawa, A., Makino, M. and Takahashi, T., 「The Degree and Mechanism of Skin Friction Reduction by Microbubbles」, Proc. of International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena-2003, III, 953-958, (2003)

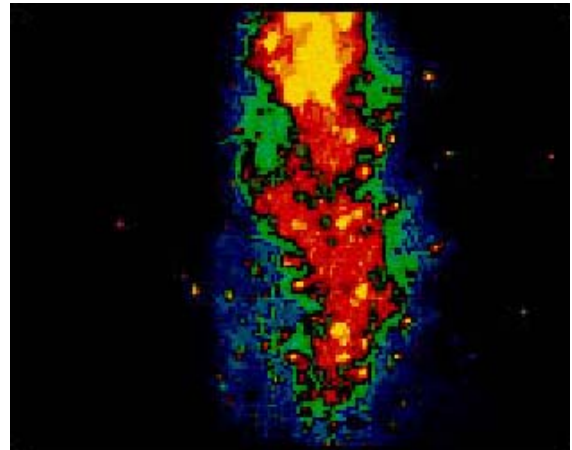
(5) 主要雑誌への研究成果発表

Journal	Impact Factor
Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering	0.913

様々な混相流現象

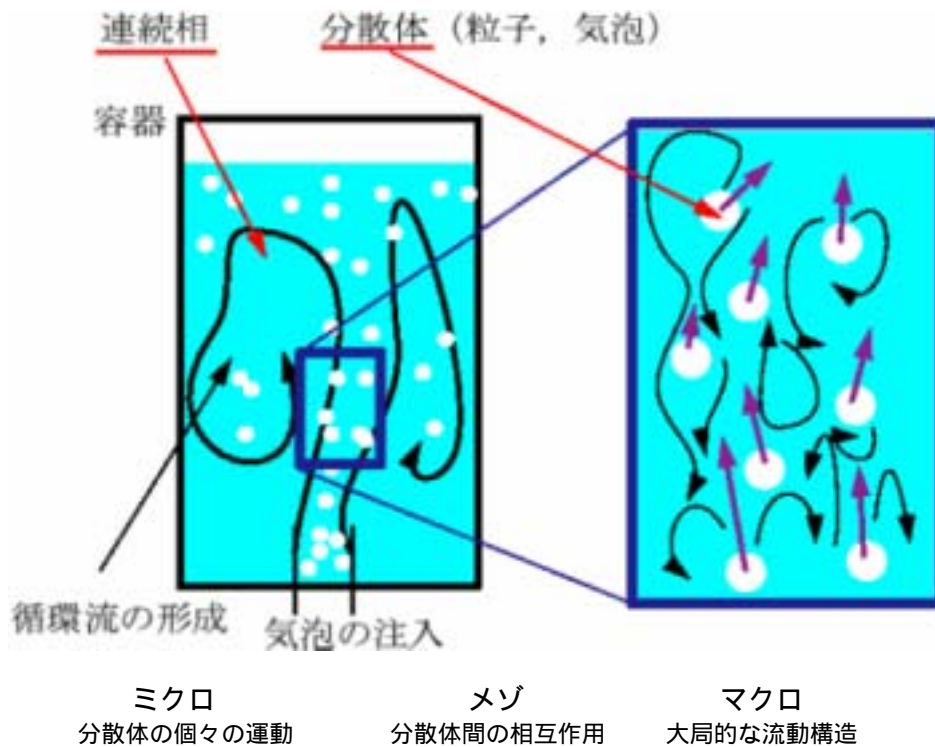


砕波 二酸化炭素の溶解  
が問題となる



アセトンの噴霧  
燃料液滴の蒸発・燃焼特性  
が問題となる

混相流の「多重スケール構造」(例・混合容器内の流れ)



スケール間の干渉機構が混相流の現象の本質に関わる。

混相流の多重スケール構造が反映された解析法の構築

広範囲な分野で高精度な実用解析が可能に