

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560609

研究課題名(和文)ステレオPIV/LIFによるラングミュア循環流の組織構造とガス輸送機構の解明

研究課題名(英文) Investigation of coherent structure and gas transfer mechanism in Langmuir circulation using stereo PIV / LIF system

研究代表者

禰津 家久 (Nezu, Iehisa)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・名誉教授

研究者番号：30109029

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：ラングミュア循環流のような3次元性が大きい流れとガス輸送の関係性に関する解明はほとんど進展していないのが現状である。そこで本研究は計画期間内に、高精度な流体計測技術を駆使して次の内容を鋭意研究した。

1)高精度ステレオPIVを開発して、時空間的に変化する自由水面境界も含めた全水深領域における流速成分の3次元構造を計測し、組織渦、ストークスドリフト、縦渦構造を定量評価することで循環流の発生特性を解明した。2)DO計測より溶存ガスの時間変化を詳細に調べた。実験データより循環流による運動量の集積・発散の影響を解明した。特にセルの形成パターンによるガス分布の偏在やガス交換速度への寄与を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：There remains uncertainty about significant relationship between the gas transfer and large-scale three-dimensional currents such as Langmuir circulation. Therefore, the present project studied following topics using highly accurate fluid measurements system.

1)We developed highly accurate stereoscopic PIV system and measured all three components of velocity depending on space and time. The measured data let us investigate coherent structure, Stokes drift and longitudinal vortex in detail. 2)We also measured DO in the laboratory flume, and could reveal the contributions of the circulation on divergence and convergence of momentum. Particularly, the relation between the cell formation and gas transfer velocity was revealed reasonably.

研究分野：水工学

科研費の分科・細目：水理学

キーワード：ラングミュア循環流 風波 界面ダイナミクス ガス輸送

1. 研究開始当初の背景

温室効果ガスである二酸化炭素の大気および海洋循環を正確に予測することは、地球温暖化問題を解決するために必要不可欠な課題であり多くの工学・地球科学分野で鋭意研究されている。特に海洋・湖沼・河川などの水層と大気層の異層界面における物質、熱および運動量の輸送現象が温暖化素過程解明のためのキーポイントとなる。このためこれまでに世界各国で最先端研究が進められており社会的関心も高いため、界面近傍の乱流構造やガス輸送プロセスについて貴重な知見が得られてきた。しかし、その多くが鉛直方向の1次元および2次元のアプローチに限定されており、現実の環境流体現象に適用するには十分ではなく当該分野の共通認識課題である。実際の環境流体では様々なスケールの循環流や乱流渦が混在し強い3次元性を呈するとともに界面の輸送現象に大きく影響する。特に海洋や湖沼では風波に起因するラングミュア循環流²⁾が生成する。中でもスーパーセルと呼ばれる水深スケールの大規模循環流の存在も確認されており、海洋大循環に大きな影響をもつと考えられている。ラングミュア循環流は風下方向に回転軸をもち、その発生メカニズムには諸説があるが波と流れの相互作用によって説明するCL2理論³⁾が最も有力である。自由水面にはラングミュア循環流による浮遊物質が集積する領域 (convergence region) がしばしば観察されることから、溶存ガスの移流拡散輸送にも重要な役割をもつことが容易に想像できる。ラングミュア循環流の生成特性とガス輸送メカニズムの解明は、温暖化素過程を正確に知るためにきわめて重要な研究トピックスである。このような社会的・学術的背景の下で研究代表者の禰津はこれまでに風波発生下の水・空気界面の乱流構造およびラングミュア循環流の生成機構を重点的に研究してきた。特に画像流速計 (PIV/PTV) やLDAを駆使して界面組織渦の生成特性やバースティングによるガスの乱流輸送を高精度に計測し、その現象モデルや物理モデルを提案してきた。

一方でこのような強い3次元性や非定常性を有する水理流体現象の発生メカニズムを実験的に解明するためには瞬時空間構造の時間変化を高精度に計測する必要があり、現有のLDAによる点計測や標準型の2次元PIVでは対応できない。そこで本研究では新たにマルチカメラコントロールによる次世代ステレオPIVシステムを開発する。ステレオPIVではレーザーライトシート(LLS)上の2方向の流速成分に加えて、垂直方向の流速成分(以下、面外流速とよぶ)を得ることができる。さらにガスの移流・拡散プロセスを実験的に解明するためには瞬時の流速とだけでなくガス濃度の計測も行う。

水・空気界面の乱流輸送現象は大変ホット

な分野であり、1985年に第1回の国際会議が米国コーネル大学で開催され、2010年に京都で開催された第6回会議では、海洋科学、気象学、流体工学および水理水工学等の研究者が分野をまたいで一堂に結集した。この間、計測技術や数値計算手法の進展とともに界面の流体力学的メカニズムや気液間のガス輸送機構が鋭意研究されてきた。しかし、ラングミュア循環流の界面ガス輸送への役割についてはその重要性が指摘されているものの、具体的な研究着手には至っていない。界面のバースト現象やそれに伴う乱流ガス輸送に関しては研究代表者の禰津が一連の研究を行っており、この成果をもとにラングミュア循環流の発生特性や組織構造および炭酸ガスの3次元的な移流拡散輸送を解明しようとするのが本研究の位置づけである。一般に実水域では風向や風速が頻繁に変化するため、非定常に変化する気液界面と組織構造の相互作用を解明することが学術上重要であり、溶存炭酸ガスの3次元輸送現象を解明するキーポイントと考えられる。本研究は別個に発展してきた「ラングミュア循環流」と「界面ガス交換」の研究知見をリンクさせて、気液界面ダイナミクスと大規模循環流との相互作用およびこれらに起因する溶存ガスの界面交換および輸送プロセスを乱流力学の視点から解明し、さらに実水域の様々なスケールの組織構造との関係性や相似則を検討して新しい物理モデルを提案するものであり、きわめて画期的な研究プロジェクトと確信する。

2. 研究の目的

既往研究では界面ガス交換・輸送現象と風波に起因するラングミュア循環流は、独立に各分野で研究されてきたが、実水域環境場の炭酸ガスの輸送特性や分布予測を正確に評価することは学術面だけでなく社会的にも大きな関心があり、研究代表者の禰津がこれまでの知見と実績をもとに、禰津研究室(水理環境ダイナミクス分野)の特進研究課題として準備してきた。風波界面流れは気液界面が時間的に変形しながら流れと相互作用する複雑なマルチフェイズ現象であるから、室内実験や数値計算が容易ではなく、特にラングミュア循環流のような3次元性が大きい流れとガス輸送の関係性に関する解明はほとんど進展していないのが現状である。そこで本研究は計画期間内に、高精度な流体計測技術を駆使して主として次の内容に着目して鋭意研究し、実水域に十分適用できる炭酸ガスの交換輸送を予測するモデルを構築し、水理水工学の発展に寄与するものである。

3. 研究の方法

本研究は、風波界面での界面シアーによるガス輸送現象へのラングミュア循環流の寄

与特性を高精度な乱流実験計測に基づいて解明するものであり、界面の組織渦と大規模循環流の動的相互作用やこれらが引き起こす気液界面におけるガス交換の定量評価および物理モデリングを目指す独創的な研究である。これを可能にする次世代の流体計測システムこの開発と計測は、代表者の禰津の総括下で分担者の山上が担当する。計測結果の解析および考察は、代表者の禰津と山上が十分にコンタクトしながら統一的な見解を得る。図-1 に示すように初年度は流体運動の計測と考察に集中し、3次元の次世代型ステレオ PIV システムを開発し、大規模循環流の形成機構の解明を目指す。2 年目以降では界面極近傍も含めた全水深領域の溶存炭酸ガス分布の高精度計測を行う。流速・ガスの計測データをもとにラングミュア循環流によるガス輸送の全貌解明に精一杯チャレンジする。

4. 研究成果

本研究成果は次節に記載するように国内外の査読付論文に逐次発表した。ここではその要点を整理して示す。

1)時間平均流速に関する全成分の横断面分布を得た。水面付近で、横断流速が分散する divergence 領域では主流速は低速となるとともに上昇流が現れる。一方で水面付近で横断流速が収束する convergence 領域では主流速は高速となり下降流が生じる。このように典型的なラングミュア循環流の構造が得られた。また本計測システムでは低水深の大アスペクト比ケースにも適用した。アスペクト比が2および3では1対の循環流がみられるが、アスペクトが6および8では循環渦の数が増えることがわかった。

2)水面画像計測より、横断方向には波の振幅の変化が観察されたが、位相のずれは小さく、2次元的な波が生成されていることが確認できた。瞬時の流れ場ではセルが定在するわけではなく不安定になる。既往研究におけるラングミュア循環流のモデルはあくまでも時間平均的な概念であることを強調したい。

3)循環流の構造は位相によって伸張・圧縮されることが確認できた。循環流の構造変化とともに主流の分布も大きく変化する。水面の上昇下降速度がゼロになるトラフやクレストよりもそれらの遷移位相の方が、時間平均流構造からの差異は大きい。

4)ラングミュア循環流の形成を渦度方程式より考察した。渦度方程式のクロスレイノルズ項と非等方性項が卓越しセル形成を誘起する。側壁より離れた領域では前者が抑制項、後者が生成項の役割を果たし、セル形成には側壁の影響が必ずしも重要でないことがわかった。

5)溶存酸素濃度の時間変化を横断面方向で比較したところ、それぞれの横断位置において分布に違いが見られなかった。このことから、界面から底面サイドへのガス輸送は横断面位置に依存せず均等に進み、拡散していくと思われる。

6)水深を変化させて溶存酸素濃度分布を比較したところ、水深が低いほど濃度変動が大きくなり、飽和溶存酸素濃度への到達がはやいことがわかるが、これは水深低下による水層体積減少の影響とともに水深低下による流れ場におけるラングミュアセルの個数の増加による拡散効果の増大が影響していると考えられる。

7)再曝気係数 k_2 と水深との関係性を調べたところ、水深が大きいケースでは k_2 は非常に緩やかに変化するが、水深が小さくなり、ラングミュア循環流の遷移領域あたりを境に k_2 の値が大きく上昇していることがわかった。

8)ガス交換係数 k_L は水深が大きいケースでは k_L と H がほぼ比例関係にあることがわかるが、水深が小さいケースではこの直線上の k_L 値よりも大きな k_L をとっていることがわかる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4 件)

- 1) Sanjou, M. and Nezu, I.: Secondary current properties generated by wind-induced water waves in experimental conditions, *Advances in Oceanography and Limnology*, Taylor & Francis, IAHR, Vol.5(1), pp.1-17, 2014.
- 2) Sanjou, M. and Nezu, I.: Experimental study on surface velocity divergence and interfacial gas transfer in open-channel flows, *J. of JSCE*, Vol.1, I_82-89, 2013.
- 3) 小松峻也・山上路生・禰津家久: 風波流れの発達過程と3次元構造に関する実験的研究, *水工学論文集*, Vol.57, I_1483-1488, 2013.
- 4) 山上路生・禰津家久: 開水路乱流における自由水面の流速発散とガス輸送に関する実験的研究, *水工学論文集*, Vol.56, pp.1297-1302, 2012.

[学会発表](計 7 件)

- 1) Sanjou, M. and Nezu, I.: Development of Surface Velocity Divergence Model for Gas Transfer Phenomena in Open-channel Flows, *Proc. of 2nd IAHR Europe Congress, Munich, on USB-Memory*, 2012.

- 2) Sanjou, M., Nezu, I. and Komatsu, T.: Hydrodynamic relation between surface velocity divergence and gas transfer process in open-channel turbulence, Proc. of IAHR-APD 2012, Jeju, on USB-Memory, S4B-3, 2012.
- 3) Komatsu, T., Sanjou, M. and Nezu, I.: Langmuir circulation effects on gas transfer in wind-induced water waves, Proc. of IAHR-APD 2012, Jeju, on USB-Memory, PS4-3, 2012.
- 4) Sanjou, M., Nezu, I. and Komatsu, T.: Experimental Study on Langmuir Circulation using a Stereoscopic PIV, Proc. of 7th International symposium on stratified flows, Roma, on USB-Memory, 2011.
- 5) Sanjou, M. and Nezu, I.: Gas exchange properties beneath air/water interface in open-channel flow, Proc. of 7th International symposium on stratified flows, Roma, on USB-Memory, 2011.
- 6) 小松峻也・山上路生・禰津家久：風波流れの発達過程と3次元構造に関する実験的研究，第57回水工学講演会，2013名城大学．
- 7) 山上路生・禰津家久：開水路乱流における自由水面の流速発散とガス輸送に関する実験的研究，第56回水工学講演会，2012愛媛大学．

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

禰津 家久 (Iehisa Nezu)

研究者番号：30109029

(2) 研究分担者

山上 路生 (Michio Sanjou)

研究者番号：80362458

(3) 連携研究者

()

研究者番号：