

平成 22 年 5 月 30 日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間： 2007 ~ 2009
 課題番号： 19760131
 研究課題名 (和文) 高シュミット数界面乱流物質輸送の多重スケール数値シミュレーション

研究課題名 (英文) Multi-scale numerical simulation of
 interfacial turbulent mass transfer at high Schmidt numbers

研究代表者
 長谷川 洋介 (HASEGAWA YOSUKE)
 東京大学・大学院工学系研究科・助教
 研究者番号： 30396783

研究成果の概要 (和文)：

自由界面、及び固体界面における熱・物質輸送は、熱交換器や反応攪拌器等の様々な熱流体機器の性能を支配し、その予測と制御は、更なる省エネルギー化にむけて極めて重要である。一般に、界面からその周囲の流体に熱や物質が輸送される場合、界面近傍に薄い濃度境界層が形成され、その内部における輸送機構が系全体の輸送を支配する。本研究では、界面遠方のマクロな乱流運動から界面近傍におけるミクロな熱・物質輸送機構までを数値計算で再現し、両者の関係性を明らかにすると共に、その現象のモデル化を行った。

研究成果の概要 (英文)：

Heat and mass transfer across an interface plays a central role in deciding the efficiency of various thermal fluids system, so that prediction and control of such phenomena should bring tremendous benefit in innovating energy saving technologies. In general, when heat/mass is transferred from an interface to surrounding fluid, a thin thermal/concentration boundary layer is formed in the very vicinity of the interface so that the overall transport is governed by the microscopic transport mechanisms in this thin layer. In the present study, we conduct a series of numerical simulations, which reproduce the multi-scale phenomena from the macroscopic turbulence far from the interface to the microscopic transport phenomena near the interface. Though these simulations, we clarify the relationship between the different scale phenomena and model them based on the database obtained in these simulations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,800,000	0	1,800,000
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	450,000	3,750,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：乱流，物質輸送，気液界面，多重スケール

1. 研究開始当初の背景

自由界面，及び固体界面を介した熱・物質輸送現象の理解と予測は，工学，地球環境科学の分野において，基礎的，且つ重要な課題である．一般に，液中における溶質ガスの拡散係数 D は， 10^{-9} [m²/s] のオーダーであり，溶媒の動粘性係数 ν との比であるシュミット数 Sc は， $Sc \sim O(10^3)$ のオーダーとなる．すなわち，界面近傍に極めて薄い濃度境界層が形成され，その内部のミクロな輸送現象が全体のガス交換を支配する．しかし，界面近傍における速度場・濃度場の計測は極めて困難であるため，従来の多くの研究では，界面近傍のミクロな輸送プロセスをブラックボックス化し，マクロな情報（平均界面せん断，界面遠方の乱流場の状態など）とガス交換係数を関係付ける相関式の構築に重点が置かれてきた．90年代以降，particle image velocimetry (PIV) 技術を用いた界面近傍の速度計測が可能となり，界面近傍のミクロな輸送機構が明らかになりつつある．しかし，現実の海洋や熱流体機器内部において，上記のミクロな乱流状態を直接計測・制御することは困難であり，これらの知見が，モデルの改良や熱流体システムの最適化に十分に活かされていない．従って，より計測・制御が容易なマクロな乱流場からミクロな輸送機構までを繋ぎ，その階層構造をモデル化することが必要であった．

2. 研究の目的

そこで，本研究では，界面遠方の大規模乱流場から，界面近傍の微細な乱流構造，そして，濃度境界層内部のミクロな輸送プロセスまでを，階層型の格子系で解像し，連成させることにより，異なるスケール間の相互作用が界面物質輸送に与える影響を詳細に調べることを目的とする．更に，界面を自由界面から固体壁面へと変化させる計算を行うことで，界面の速度場境界条件が熱・物質輸送に及ぼす影響を明らかにする．さらに，上記の計算により得られるデータベースを基に，物理現象に基づいた，界面物質輸送のモデルの構築を行う．

3. 研究の方法

具体的な計算手法として，界面遠方では粗い格子を用いて LES を適用する一方，界面近傍では細かい格子による DNS を適用するハイブリッド DNS/LES 法を提案し，その有効性を検証した．これにより，界面遠方と界面近傍の乱流構造間の相互作用を考慮しつつ，計

算負荷の大幅な軽減が可能となった．上記の計算によって蓄積された速度場，スカラー場の瞬時場をデータベース化し，それを解析することで，界面遠方の乱流場が界面ごく近傍の熱・物質輸送に及ぼす影響を明らかにし，現象のモデリングを行った．

4. 研究成果

(1) 界面の力学的条件の影響

界面の力学的条件として，2つの極限である固体壁面と自由界面に注目し，それぞれについて Hybrid DNS/LES 法を適用して，高シュミット数物質輸送の数値シミュレーションを行った．系統的に格子解像度を変化させることで，数値計算の妥当性を検証するとともに，界面の力学的条件が物質輸送機構に及ぼす影響について考察を行った．その結果，界面鉛直方向速度 v の界面漸近挙動の変化によって，固体壁面と自由界面では，物質輸送機構が本質的に異なることが明らかとなった．具体的には， v が壁からの距離の二乗で変化する固体壁面では，シュミット数の増加に伴い，壁面近傍の輸送機構はより低い周波数成分に支配される一方， v が界面からの距離に比例する自由界面では，濃度変動の周波数スペクトルに及ぼすシュミット数効果が小さいことが分かった．上記の傾向は，界面鉛直方向の1次元移流拡散方程式によって説明できることが分かった．（参考文献：Hasegawa & Kasagi, IJHFF 2007）

(2) 汚れ界面における物質輸送機構

また，自由界面と固体壁面の中間に位置する，汚れ界面における物質輸送の数値シミュレーションを行った．界面汚れの度合いを表すマランゴニ数を系統的に変化させることで，界面汚れの効果を模擬した．その結果，界面汚れの増加に伴って，物質輸送係数は清浄界面の値から急速に減少し，最終的に固体壁面の値に収束する挙動が再現された．また，十分に汚れた界面は，速度変動は大きいものの，界面更新運動が著しく減衰するため，物質輸送の観点からは，固体壁面と等価であることが示され，その際の物質輸送係数 K のシュミット数依存性も， $K \propto Sc^{-0.5}$ から $K \propto Sc^{-0.7}$ へと遷移することが確認された．上記の結果は，僅かな界面汚れにより物質輸送係数が大きく減少することを示しており，現実のガス交換予測においても，その効果を適切に考慮する必要性を示唆している．（参考文献：Hasegawa & Kasagi, Proc. TSFP5 2007，

Hasegawa & Kasagi, IJHFF 2008)

(3) 固体壁面における物質輸送機構

上述の結果に基づき、固体壁面近傍の濃度場の解析をより高シュミット数域($Sc = 400$)まで拡張し、シュミット数の増加に伴って、濃度場の速度変動に対する応答性が鈍化する傾向を定量的に示した。また、壁面近傍の濃度場を1次元移流拡散方程式によりモデル化することによって、壁面垂直方向速度変動と濃度変動を関係付ける伝達関数を解析的に求め、数値計算結果と比較し、良好な一致を得た。この結果は、壁面鉛直方向の速度変動の統計量を用いることで、壁面近傍の濃度場の挙動が予測できる可能性を示唆している。

(参考文献: Hasegawa & Kasagi, Proc. ETMM7 2008)

(4) 固体壁面におけるレイノルズ数効果

これまで対象とする流れ場が、低レイノルズ数域に限られていたため、レイノルズ数を系統的に上げることで物質輸送機構に及ぼすレイノルズ数効果についても調査した。その結果、レイノルズ数を増加させた場合も、低レイノルズ数域と同様に低周波数成分が支配的であることが確認され、その結果、壁面近傍で運動量と物質輸送の非相似性がより顕著になることが分かった。(参考文献: 長谷川, 笠木, 第22回数値流体力学シンポジウム 講演論文集)

(5) 自由界面における物質輸送機構

更に、平滑な自由界面について、物質輸送を支配する速度場のパラメータを考察した。ハイブリッド DNS/LES による高シュミット数濃度場の数値シミュレーションを行った結果、シュミット数に依らず、界面近傍の濃度場は、界面鉛直方向速度に敏感に応答することが分かった。この事実は、シュミット数の増加に従い、低周波数成分が支配的となる固体壁面の結果(Hasegawa & Kasagi, IJHFF 2007)とは対照的である。界面近傍をモデル化した1次元移流拡散方程式に基づき、界面発散を用いて局所の物質流束を予測するモデルを開発した。本モデルを界面せん断のある場合と無い場合の気液界面に適用し、いずれの界面においても、本モデルは定量的な予測を与えることが分かった。(参考文献: Hasegawa & Kasagi, IJHMT 2008)

(6) 界面変形の効果

界面変形を伴う開水路乱流場の直接数値シミュレーションを行い、界面変形が物質輸送に及ぼす影響について考察を行った。その際、界面物質輸送を支配するパラメータである界面発散(界面垂直方向速度)に着目した。一般に、界面発散は乱流と界面変形の寄与に

分解できる。今回の計算により、波が十分発達した界面では、界面変形の寄与が乱流の寄与と同程度となることが確認された。また、乱流による寄与分についても、界面波の発生により増加する傾向が確認された。これらの結果は、界面波による物質輸送の促進を示唆している。(参考文献: Hasegawa & Kasagi, Proc. ICTAM 2008, 長谷川, 笠木, 日本流体力学シンポジウム 2008)

(7) 多様な界面における統一モデル構築

これまでの研究において、清浄な気液界面に界面活性物質が吸着することによって、界面物質輸送が阻害され、最終的には、物質輸送係数が固体壁面の値に収束することを示してきた。また、上述の物質輸送機構の変化は、界面垂直方向速度変動の界面漸近挙動に着目することで、説明できることを示した。最終年度は、これまで構築したデータベースを基に、界面弾性が界面垂直方向速度変動に与える影響を解析的に求めるモデルを構築し、バルクの流体運動が界面近傍の流れ場に及ぼす影響を明らかにした。更にその情報を1次元移流拡散方程式に基づく物質輸送モデルに組み込むことにより、清浄な気液界面から、汚れ界面、固体壁面までの統一的な予測を可能とするモデル構築を行った(参考文献: Hasegawa & Kasagi, Proc. THMT2009).

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 Hasegawa, Y. & Kasagi, N., Low-pass filtering effects of viscous sublayer on high Schmidt number mass transfer close to a wall, Int. J. Heat Fluid Flow, 査読有, 30 巻, 2009, 525-533.
- ② Hasegawa, Y. & Kasagi, N., Hybrid DNS/LES of high Schmidt number mass transfer across turbulent air-water interface, Int. J. Heat Mass Transfer, 査読有, 52 巻, 2009, 1012-1022.
- ③ Hasegawa, Y. & Kasagi, N., Systematic analysis of high Schmidt number turbulent mass transfer across clean, contaminated and solid interfaces, Int. J. Heat Fluid Flow, 査読有, 29 巻, 2008, 765-773.
- ④ Hasegawa, Y. & Kasagi, N., Effect of interfacial velocity boundary condition on turbulent mass transfer at high Schmidt numbers, Int. J. Heat Fluid Flow, 28 巻, 2007, 1192-1203.

[学会発表] (計8件)

- ① Hasegawa, Y. & Kasagi, N., A unified

molde of turbulent mass transfer under different interfacial dynamical conditions, 6th Int. Symp. on Turbulence, Heat and Mass Transfer (THMT09), 2009 年 9 月 14-18 日, Rome, Italy.

- ② Hasegawa, Y. & Kasagi, N., Effects of interfacial wave on turbulent mass transfer in open channel flow, 22nd Int. Cong. Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM2008), 2008 年 8 月 24-29 日, Adelaide, Australia.
- ③ Hasegawa, Y. & Kasagi, N., Low-pass filtering effects of viscous sublayer on high Schmidt number mass transfer close to a wall, 7th Int. ERCOFTAC Symp. on Engineering Turbulence Modelling and Measurements (ETMM7), 2008 年 6 月 4-6 日, Limassol, Cyprus.
- ④ Hasegawa, Y. & Kasagi, N., Systematic analysis of high Schmidt number turbulent mass transfer across clean, contaminated and solid interfaces, 5th Int. Symp. on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP5), 2007 年 8 月 27-29 日, Munich, Germany.
- ⑤ 長谷川 洋介, 笠木 伸英, 壁乱流高シュミット数物質輸送に対するレイノルズ数効果, 第 2 2 回数値流体力学シンポジウム, 2008 年 12 月 17-18 日, 東京.
- ⑥ 長谷川 洋介, 笠木 伸英, 開水路乱流場における界面発散と局所スカラー束の関係について, 日本流体力学会年会 2008, 2008 年 9 月 4-7 日, 神戸.
- ⑦ 長谷川 洋介, 笠木 伸英, 壁近傍における乱流濃度場に与える高シュミット数効果, 第 4 5 回日本伝熱シンポジウム, 2008 年 5 月 21-23 日, つくば.
- ⑧ 長谷川 洋介, 笠木 伸英, 汚れを伴う気液乱流界面における界面発散の予測, 日本機械学会 熱工学コンファレンス 2007, 2007 年 11 月 23-24 日, 京都.

[その他]

ホームページ :

http://www.thtlab.t.u-tokyo.ac.jp/users/hasegawa/high_Sc/index-j.html

受賞 :

- ① 平成 21 年 日本機械学会研究奨励賞
「多様な力学条件下の相界面における乱流物質輸送のモデリングの研究」,
2009 年 4 月 7 日.
- ② 平成 21 年 日本伝熱学会奨励賞
「壁面近傍における高シュミット数乱流物質輸送に関する研究」, 2009 年 6 月 3 日.

6. 研究組織

(1)研究代表者

長谷川 洋介 (HASEGAWA YOSUKE)
東京大学・大学院工学系研究科・助教
研究者番号 : 30396783