

論文の内容の要旨

論文題目 自由液面炭酸ガス吸収に対する高シュミット数乱流物質輸送モデルに関する研究

氏 名 長谷川 洋介

気液界面における熱・物質輸送は、化学プラントにおける反応攪拌器をはじめ、マイクロ熱交換器、蒸発・凝縮装置などの次世代高効率熱流体システムにおける中核技術として大きな注目を浴びている。工学的な重要性が益々高まる中で、近年では、環境科学の分野においても、地球温暖化の主因子である炭酸ガスの大気-海洋間の交換との関連性から、その予測精度の向上が強く望まれている。

従来、海洋界面におけるガス交換係数を見積もる際、海上風速で関連した経験式が用いられ(バルク法)、この式は、未来の大気中の炭酸ガス濃度を予測するための気候モデルにも組み込まれている。しかし、実際には、この経験式は大きくばらついた観測データを強引にフィッティングしものであり、物理的な裏付けに乏しく信頼性も低い。

一般に、炭酸ガスなど多くの物質は、液側でシュミット数が大きく($Sc \sim 10^3$)、液側界面近傍の薄い濃度境界層内部(20 ~ 200 μm)の物質輸送機構が、全体のガス交換量を支配している。このようなマイクロな輸送プロセスは、海上風速以外の因子、すなわち、海洋のうねり、界面変形と気流の相互作用、温度成層などの影響を受ける。また、界面活性物質は、マランゴニ効果を介して界面近傍の乱流場を減衰させ、ガス交換係数に大きな影響を与える。従って、ガス交換係数を風速で整理することは困難であると考えられ、今後、より高精度なガス交換予測に向けて、界面近傍のマイクロな輸送現象の理解と物理現象に基づく界面物質輸送モデルの構築が強く望まれる。

上記のマイクロな現象の解明に対して、数値計算は有力なツールとなる。しかし、自由界面乱流場に関する研究は、固体壁面近傍に比べてこれまで研究例が少ない。特に、現実の系で重要となる、界面せん断や気液乱流相互作用が物質輸送に与える影響に関して、ほとんど知見が得られてないのが現状である。また、これまでの研究では、計算負荷のために低シュミット数($Sc \sim 1$)に限られており、物質輸送機構に対する高シュミット数効果に関しても研究を行う必要がある。

上記の背景を踏まえ、本研究では、せん断のある界面近傍における気液乱流場とそれに伴う高シュミット数物質輸送の数値計算を行った。これにより、界面せん断や気液相互作用が、物質輸送に与える効果を明らかにした。また、従来例のない高シュミット数($Sc = 100$)での物質輸送計算を実現するため、ハイブリッドDNS/LES法を新たに開発し、気液乱流場に適用した。これにより、物質輸送機構に及ぼすシュミット数効果を調査し、得られた物理的知見に基づき、界面物質輸送モデルの構築を行った。更に、そのモデルをより高レイノルズ数流れ及び、界面活性物質のある界面へと適用し、モデルの検証を行った。以下、本研究で得られた主要な結果を纏める。

せん断のある気液乱流場に関して、以下のような知見が得られた。

界面せん断により液側界面近傍において、壁乱流同様のストリーク及び縦渦構造の生成が確認された。界面せん断の強さを変えた計算を行った結果、これらのスケールは液相の粘性スケールで整理されることが明らかになった。この結果より、界面せん断に伴う液相内部の自立的な乱流生成が支配的であり、気液乱流構造間の力学的な相互作用の効果は極めて小さいことが分かった。実際に、気相内部の乱流構造により誘起される速度変動を見積もったところ、液側で確認された速度変動の高々1%であった。

更に、本研究では物質輸送の観点から、気液乱流相互作用の効果に関する詳しい調査を行った。その結果、これまで報告例のない新たな気液相互作用の存在が確認され、それは、気側界面近傍における逆勾配拡散現象として統計量においても明確に現れた。炭酸ガスなどの溶解度の低いガス吸収においては、物質輸送は液側支配となるため、上述の気液相互作用の効果は小さい。しかし、より一般的な液-液界面における物質移動を考える際には、溶解度によって密度の小さい流体が物質輸送を支配することは十分考えられる。従って、今後、流体の密度比などのパラメータが気液相互作用に与える影響に関して、より詳しく調べる必要がある。

高シュミット数濃度場のハイブリッド DNS/LES を通して、以下のような知見が得られた。

界面スカラー束と界面近傍の速度場の時空間相関を求め、液側界面近傍の縦渦構造が濃度境界層を penetrate し、物質輸送を促進していることが分かった。特に興味深い点としては、界面近傍において、濃度変動と界面垂直方向の速度変動の相関が高く保たれる点である(~ 0.6)。この結果は、従来固体壁面近傍で報告されている、高シュミット数効果とは大きく異なる。固体壁面では、シュミット数の増加に伴いより低い周波数変動のみが物質輸送に貢献し、渦拡散係数が急速に減衰することが知られている。これに対し、固体壁面では渦拡散係数のシュミット数依存性が小さく、幅広い周波数帯域の速度変動が物質輸送に寄与することが分かった。

高シュミット数効果に関する上述の知見に基づき、第三章では界面鉛直方向の一次元移流拡散方程式の解析を行った。その結果、penetrationの時間スケール $1/\beta$ とrenewalの時間スケール $1/\omega$ という二つの時間スケールを導入し、その比 β/ω によって上記の一次元方程式の解の挙動が決まることを示した。ここで、 β は界面発散の強度、 ω は速度変動の角速度に対応する。

この時間スケール比 β/ω に着目した解析を行った結果、与えられた速度変動が物質輸送を支配するための条件は、 $\beta/\omega \gg 1$ であり、この時、界面スカラー束は、移流項と拡散項のバランスで決まることを示した。この結果をより現実的な二次元の界面更新渦モデルで検証し、両者に定性的な一致を確認した。また、速度変動が界面を penetrate する場合、界面スカラー束は界面発散の強度 β で決まり、ガス交換係数と以下のように関係付けられることが明かとなった。

$$K = 0.36 (\beta_{rms} D)^{1/2} \quad (1)$$

第四章及び、第五章では、上述の界面物質輸送モデルをより高いレイノルズ数流れ、及び界面活性物質のある界面へ適用し、モデル検証を行った。

レイノルズ数が、乱流場及び、物質輸送機構に与える影響を纏めると以下ようになる。

レイノルズ数が増加することにより、乱流の長さスケールは粘性スケールで整理されるものの、かなり速度変動が増加することが分かった。具体的には、乱流スカラー束に基づく流れ場の条件付き抽出を行った結果、レイノルズ数 Re_τ を 150 から 300 に挙げた場合、縦渦構造に誘起される鉛直方向速度変動は 50%程度増加し、これに伴いガス交換係数も 12%程度増加することが分かった。

このようなレイノルズ数効果に対して、式(1)は定量的なガス交換係数の予測を与えることを確認した。

界面活性物質が乱流場及び、物質輸送に与える影響は、以下のように纏められる。

マランゴニ効果は、界面発散を伴う運動、すなわち、界面上の渦なし流れを選択的に減衰させる一方、ソレノイダル成分に関しては、ほとんど影響を与えないことが明かとなった。また、ガス交換係数は、マランゴ

ニ数の増加と共に著しく減少し、さらにマランゴニ数を増加させるとある一定値に収束することが分かった。

これは、マランゴニ数の増加のために、界面を penetrate する速度変動が著しく減少するためである。このような流れ場では、界面を penetrate する速度変動の抽出が重要となる。本研究では、界面発散の時系列データと周波数スペクトルを用いる二つの抽出法を提案した。その結果、ある程度以上、マランゴニ数が大きい場合、大部分の速度変動が界面を penetrate せず、この場合、物質輸送の観点からは、界面は固体壁面と等価であることが分かった。実際に、十分高いマランゴニ数では、ガス交換係数が固体壁面のデータに近付くことが確認された。

以上、本研究で得られた知見を纏める。自由界面における物質輸送機構は、界面の penetration が本質である。ある速度変動が界面を penetrate するための条件は速度変動の二つの時間スケール比 β/ω が 1 よりも十分大きいことである。これは、濃度境界層が速度境界層に対して十分小さい場合、シュミット数に依存せずに成立する。従って、何らかの方法で界面の penetration のイベントを抽出することにより、界面下のミクロな物理現象に基づくガス交換予測が可能と成る。

近年、界面における PIV 計測や赤外放射計測が発達し、非接触で界面情報の取得が可能となりつつある。将来的には、これらの技術を用いて界面を penetrate する β を見積もり、これと式(1)を用いることで、より高精度なガス交換予測が可能になると思われる。

(以上)