

| | |
|------|-------------|
| 報告番号 | 甲 第 12777 号 |
|------|-------------|

主 論 文 の 要 旨

論文題目 **Influence of large-scale structure on momentum and scalar transfer process in spatially-developing shear mixing layer (空間発展するせん断混合層における運動量とスカラ輸送過程に及ぼす大規模構造の影響)**

氏 名 高牟禮 光太郎

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、異なる流速をもつ二つの流れが合流することによって形成される流れ場、すなわち「自由せん断混合層」に関するものである。この流れ場は、流下するにつれて複雑に混合・拡散を繰り返し、やがて乱流状態へ至る。自由せん断混合層中には、大規模渦構造が存在することが知られており、この大規模渦の構造における決定論的な発達メカニズムが解明されれば、乱流の基本理論の発展に大いに貢献することが期待される。そのため、大規模渦の構造やそれに関する統計的性質は早くから多くの研究者によって議論されている。しかしながら、近年においても大規模渦の構造における確固たる発達メカニズムの解明には至っていない。

自由せん断混合層の決定論的な発達メカニズムの解明を困難にしている原因として、流れのトポロジカルな構造や統計的な性質が流下方向に遷移することが挙げられる。ここで、自由せん断混合層の発達過程において、発達の状態を「未発達領域」「発達遷移領域」「完全発達領域」の3つの領域に大別した。これらの3つの領域では、以下に示すような特徴を有する。

- 未発達領域は自由せん断混合層の発達初期段階を指す。この領域における統計量は非相似的であり、エネルギースペクトルには慣性小領域が見られない。また、この領域では Kelvin-Helmholtz 不安定性によって大規模な渦構造が誘起され、縦渦構造などの三次元構造の発達が著しいが、これらの構造の中には小規模な構造はほと

んど含まれない。すなわち、非乱流状態であることを意味する。

- 発達遷移領域のエネルギースペクトルは乱流に見られるような慣性小領域を有し、自己相似的である。そのため、この領域における乱流エネルギーの波数分布は定常である。しかし、実際には大規模渦の動的構造の遷移は依然として続いており、小スケール渦の発達もまたこの領域で著しい。この領域における一次統計量は相似的であるが、二次以上の統計量は非相似的である。
- 完全発達領域は、二次以上の高次統計量においても自己相似的かつ定常状態に達した乱流を意味する。この時、大規模渦の動的構造は定常状態である。

このうち、未発達領域と完全発達領域においては、渦構造や統計量について詳細な解析が行われており、既に多くの知見が得られている。発達遷移領域においても未発達領域や完全発達領域と同様に、様々な解析が試みられてきたが、依然として未解明な点が多い。その理由として、発達遷移領域では乱流構造と非乱流構造が複雑に入り混じった非常に複雑な構造を有しているためである。加えて、この領域における乱流特性は初期条件に大きく依存することも決定論的な発達メカニズムの推定を困難にしている原因である。近年では、発達遷移領域において大規模渦が共存する場合に、運動量およびスカラ輸送に特異な現象が見られることが知られている。そのため、これらの原因を明らかにするために、様々な調査が行われている。

本論文では、発達遷移領域における流動構造およびその統計的性質を明らかにするために、空間的に発達する自由せん断混合層に関する直接数値シミュレーションを行った。特に、発達遷移領域において、大規模渦が共存する場合に見られる特異な現象について、運動量およびスカラ輸送の観点から現象の解明を試みた。ここで、本論文で実行した計算は、自由せん断混合層の未発達領域から完全発達領域に至るまでの領域を確保するために、**Message Passing Interface (MPI)**および**Open Multi-Processing (OpenMP)**のハイブリッド計算による並列化技術を駆使し、並列化率 **99.97%**、ベクトル化率 **99.5%**の高效率な計算コードを作成し、大規模な計算を実現した。

本論文の構成は以下のとおりである。第1章では研究背景として、既往研究および研究目的をまとめている。第2章では、自由せん断混合層の直接数値計算に関する計算手法および計算条件の詳細について述べる。第3章では、速度場の基本的な流れ特性について説明し、発達遷移領域の居所的なスケールで見られる逆勾配方向の運動量輸送についてレイノルズ応力方程式の各項を比較しながら論じる。第4章では、乱流プラントル数を用いて運動量輸送とスカラ輸送の相違を調べ、相違の原因について渦の動的構造とその乱流特性から言及する。第5章では、発達遷移領域において、乱流運動エネルギーの散逸係数が**Kolmogorov-Richardson**理論に基づく古典的な仮説から得られる散逸スケールリング則とは異なる傾向を示す理由について、大規模渦の観点から議論する。最後に、第6章で本論文の結論をまとめている。以下に第3章から第6章の概要を記す。

第3章では、大規模渦が共存する乱流場の運動量輸送過程の特性について調査した。本

章の目的は、局所的なスケールで出現する逆勾配方向の運動量輸送の駆動力と渦の動的構造を明らかにすることである。主な結果は以下のとおりである。発達遷移領域において、(流速の変動速度の r.m.s. 値やレイノルズ応力などの) 基本的な統計量は自己相似性を示した。加えて、エネルギースペクトルも自己相似的であり、典型的な乱流のスペクトルに見られる慣性小領域を有していることを確認した。この領域において、レイノルズ応力のコスペクトルには局所的なスケールで逆勾配方向の運動量輸送の傾向が見られた。この時、逆勾配方向の運動量輸送のスケールは、コヒーレント構造の渦領域と伸縮領域の間隔に相当することが明らかとなった。また、レイノルズ応力における収支解析から、逆勾配方向の運動量輸送が混合層外縁部では圧力拡散項が、混合層中心部では圧力歪相関項の $-p(\partial u / \partial y)$ が逆勾配輸送に寄与することを明らかにした (ここで、 p は瞬時の変動圧力、 u は瞬時の主流方向変動速度を示す)。下流方向に移動するにつれて、圧力相関項や圧力歪相関項の逆勾配輸送に寄与する領域の出現はランダムになり、運動量の逆勾配方向の輸送の傾向は消失する。さらに、混合層の渦領域における運動量の逆勾配方向の輸送と渦度分布の関係を調べた。その結果、未発達領域において順勾配方向と逆勾配方向の運動量輸送が生じる境界領域で高渦度領域が現れる。逆勾配方向の運動量輸送が見られる領域は、流下するにつれて徐々に広域に引き伸ばされ、渦度の高い流体塊が伸縮領域から逆勾配方向に向かって輸送される。この場所では、高渦度領域で流れの三次元化が著しいことがわかった。これらの結果を考慮すると、逆勾配方向の運動量輸送が見られる領域は、乱流領域と非乱流領域が混在する領域に出現する。そして、完全発達領域において、非乱流領域と逆勾配方向の運動量輸送が生じる領域はほぼ同時に消滅することが明らかとなった。

第4章では、乱流プラントル数に対する大規模渦の構造の影響を明らかにすることを目的とした。主な結果として、乱流プラントル数は大規模渦の構造に支配的な発達遷移領域において、通常の乱流場の値よりも小さな値をとることがわかった。この時、流れ場およびスカラ場の可視化から、発達遷移領域における流れ場は混合層中における速度分布が連続的に均されているのに対して、スカラ場は流入時のスカラ濃度を保ったまま渦中に留まり続けていることがわかった。レイノルズ応力方程式とスカラフラックス方程式の収支分析から、運動量とスカラ輸送の相違の原因は圧力に関連する項 (すなわち、圧力歪相関項、圧力スカラ勾配相関項、および圧力拡散項) によって引き起こされることを明らかにした。現象的には、大規模な渦が共存する場において、運動量は圧力の影響を受けて逆勾配方向に輸送される傾向が見られるが、スカラ場ではこれらの影響を受けないために順勾配方向に輸送される。このために、運動量輸送とスカラ輸送の駆動力に差が生じ、乱流プラントル数の低下を引き起こしていることがわかった。

第5章では、乱流運動エネルギーの散逸係数の空間発展について考察した。自由せん断混合層の完全発達領域において、乱流運動エネルギーの散逸係数は Kolmogorov・Richardson 理論に基づく古典的な仮説から得られる散逸スケーリング則に従う。しかしながら、発達遷移領域の広い範囲にわたって、Goto と Vassilicos (Physical review E, No.94,

053108 (2016))によって提案された非平衡散逸スケーリング則が成立することがわかった。この時、発達遷移領域におけるエネルギースペクトルの低波数領域には多数のスペクトルのピークが見られたが、完全発達領域において、それらのピークは失われていることがわかった。エネルギースペクトルの結果から、非平衡散逸は乱流の低波数領域の挙動と関係していることが推測される。そこで、発達遷移領域と完全発達領域における大規模渦のエネルギー含有構造の流れ方向の確率密度分布を調べるために、主流方向の変動速度に対して固有直交分解 (Proper Orthogonal Decomposition:POD) を行った。この時、累積エネルギー率が 60%を超えるまでの低次の POD モードを足し合わせることで時系列データを再構築した。再構築された時系列のゼロクロッシングの確率密度分布から、大規模渦のエネルギー含有構造の分布が非相似状態のとき、乱流運動エネルギーの散逸係数は非平衡散逸スケーリング則に従い、相似状態に達したとき、乱流運動エネルギーの散逸係数が一定になることを明らかにした。この結果は、乱流運動エネルギーの散逸係数が定数であるという条件を適用するためには、大規模渦のエネルギー含有構造の長さの分布の自己相似性を満たす必要があることを明示した。

第6章では結論を示し、本論文で得られた知見をまとめた。