

主 論 文 の 要 約

論文題目 **Transport mechanism of turbulent
momentum flux in a plane jet**
(二次元噴流における乱流運動量フラックス
の輸送機構に関する研究)

氏 名 高橋 護

論 文 内 容 の 要 約

多くの工業装置まわりでは、流体の流れは乱流状態となる。乱流が有する性質の中でも工学的に重要なものの一つに、活発な運動量輸送がある。これにより流体混合は層流状態に比べはるかに促進されるが、一方で主流のエネルギー損失は増大してしまう。乱流を適切に制御し、流体機械の動作効率を向上させるためには、乱流の運動量輸送効果が発生および消滅する機構（輸送機構）を理解することが重要である。本研究は運動量輸送効果の消滅機構を調査したものである。

第一章は緒論である。せん断乱流において、乱流による統計的な運動量輸送量はレイノルズせん断応力（以下、簡単にレイノルズ応力と表す）により記述される。先行研究により、レイノルズ応力を発生させる乱流構造はさまざまな乱流場で特定されてきたが、一方でどのような乱流構造によってレイノルズ応力が失われるのかについてはほとんど明らかにされていない。ここで、レイノルズ応力の消滅に寄与する統計量は圧力と歪速度の相関であることが知られている。先行研究では思考実験により、なぜ圧力と歪速度の相互作用によりレイノルズ応力が失われるのかが説明されているが、その説明を立証する実験的または数値的結果は非常に限定的であった。このような背景から、圧力-歪速度相関に関連する乱流構造を実際の流れ場の中で特定し、その構造の圧力-歪速度相関に対する寄与が調査されることが望まれる。さらに、乱流構造抽出手法として条件付き平均法を、また速度と圧力の同時計測手法として熱線流速計プローブと圧力プローブの複合を挙げ、これらについて総説した。以上より、本研究の目的を、先行研究による説明では不十分だったレイノルズ応力消滅機構の知見を深めることとした。本研究では二次元乱流噴流を対象とし、数

値計算および実験により目的の達成に努める．数値計算では低レイノルズ数噴流を取り扱い，結果から乱流構造を抽出し三次元的に可視化する．実験では高レイノルズ数噴流場の速度（勾配）および圧力の同時計測を行い，数値計算結果との比較により考察する．

第二章では低レイノルズ数二次元噴流の数値計算について述べている．乱流モデルを用いない直接数値計算により，レイノルズ数 2,000 の噴流を計算した．本研究では噴流は水平に噴出され，噴流出口から $15h$ (h は噴流出口の高さ) の位置における主流に垂直方向平面において物理量の時系列を取得し，それらの時間-空間変換により構築された擬三次元データを解析した．まず，平均速度，変動速度 Root-Mean-Square (R.M.S.) 値の主流方向分布，レイノルズ応力の垂直方向分布，ならびにレイノルズ応力収支の垂直方向分布から，乱流構造の検討に適した典型的な二次元噴流場が数値計算により実現されていることを確認した．擬三次元データの中では，レイノルズ応力による運動量輸送は間欠的に活発になっており，一方で圧力が低下していた．そしてほぼ同一箇所で圧力とひずみ速度の積は激しく変動していた．圧力の低下は渦構造の通過に対応している可能性が高いことから，この結果はレイノルズ応力を消滅させる乱流構造が，強い運動量輸送を引き起こす特定の渦構造（コヒーレント渦構造）の周辺に集中していることを示す．そこで，条件付き平均操作による強い運動量輸送を引き起こす渦構造の抽出を試みた．壁乱流の研究において，乱れの生成に大きく寄与するコヒーレント渦構造を抽出する Variable-Interval-Time-Averaging (VITA) と呼ばれる条件付き平均法がよく使用される．本研究は VITA を参考にした条件付き平均を利用した．その結果，スパン方向に軸を持った大規模な渦の列と，馬蹄型の渦構造が組み合わされたコヒーレント構造が抽出された．このような構造は二次元噴流を調査した先行研究の多くで存在が確認されてきた大規模コヒーレント構造とよく整合する．さらに馬蹄型の渦構造は二次元噴流のみならず，せん断混合層，円柱後流，軸対称噴流といったさまざまな自由せん断乱流でも確認されてきたコヒーレント構造である．以上のような大規模コヒーレント構造によって中心から外部への流体放出運動が生じており，レイノルズ応力消滅イベントは確かに放出運動の存在地点で特に集中していた．しかし，大規模コヒーレント構造がつくる流れ場中の歪速度と圧力の積は圧力-歪速度相関の値にはるかにおよばなかったことから，大規模コヒーレント構造そのものはレイノルズ応力の消滅にほとんど寄与していないことが示された．したがって，レイノルズ応力を消滅させる乱流構造は，条件付き平均操作によって失われる不規則（インコヒーレント）成分に含まれていると考えられる．本研究では，インコヒーレント成分のうち，とくに強いレイノルズ応力消滅を引き起こすイベント (Significant events) の統計的な特性を調査した．ここで，Significant events は圧力が正かつ歪速度が負のイベントと，圧力が負かつ歪速度が正のイベントに分類される．まず，速度勾配テンソルの不変量の結合確率密度関数（不変量マップ）を検討した．圧力が正の Significant events の不変量マップは第三不変量が正の領域に集中し，すなわち一方向圧縮-平面展延の非回転構造（パンケーキ構造）が頻繁に形成されていることを示した．一方圧力が負の Significant events の不

変量マップは第二不変量，第三不変量ともに正負の発生頻度が同程度であり，この結果は平面的に歪んだ旋回構造（ローラー構造）が形成されることを示す．最後に，**Significant events** まわりの流れ場および圧力場を平均し，パンケーキ構造，ローラー構造，ならびに歪速度テンソルの主方向を可視化した．パンケーキ構造のまわりでは正の運動量輸送に寄与する運動どうしが互いに向かい合ってパンケーキ構造存在位置で衝突していた．これにより押し出されるように負の運動量輸送に寄与する運動が見られた．このように正の運動量輸送に寄与する運動により負の運動量輸送に寄与する運動が生成されるのが，二次元噴流におけるレイノルズ応力消滅メカニズムの一つである．この結果は先行研究の説明とよく合致し，その有効性を支持する．一方ローラー構造の周りでは，ローラー構造により噴流中心から外部へ飛び出す運動がつくられ，その飛び出しによる欠損を補うように負の運動量輸送に寄与する運動が誘起されていた．この場合も正の運動量輸送に寄与する運動によって負の運動量輸送に寄与する運動がつくられ，レイノルズ応力は失われる．ただしパンケーキ構造周りの流れと異なり，先行研究の説明とは部分的にのみ合致した．なお，パンケーキ構造およびローラー構造は圧力-歪速度相関に対してそれぞれ 5.3%および 4.2%寄与していることも明らかにした．

第三章は高レイノルズ数噴流における実験について述べている．圧力-歪速度相関の直接計測のためには速度勾配と圧力の同時計測技術が必要となる．本研究では熱線流速計プローブと圧力プローブからなる複合プローブを二つ製作した．一つは X 型熱線プローブ（直径 5.0 μm ，長さ 1.0 mm のタングステン細線二本から構成されている）と圧力プローブを，もう一つは Double-I 型熱線プローブ（I 型熱線を主流に対し垂直方向に二本平行に配置したものであり，直径 1.0 μm ，長さ 0.2 mm の白金細線を使用している）と圧力プローブを複合させたものである．これらは Tsuji and Kaneda (*J. Fluid Mech.*, 2012) と構成要素が同じであるが，Terashima et al. (*Exp. Fluids*, 2012) などにならって熱線プローブと圧力プローブを主流方向に配置している．これにより速度（勾配）と圧力の計測位置の不一致を補償することができる．まず，これらの複合プローブによる同時計測から算出された速度，速度勾配，圧力の個別統計量が，熱線プローブ及び圧力プローブによる単独計測結果から算出されたものと（二次元噴流の平均速度分布半値幅より内側，すなわち平均速度が十分に大きい領域において）よく一致し，速度（勾配）計測と圧力計測が互いに影響を及ぼし合っていないことを確認した．さらに，レイノルズ応力収支評価において，直接計測された圧力-歪速度相関はレイノルズ応力輸送方程式中の他の項とよく釣り合っていることから，複合プローブによる速度勾配-圧力同時計測の定量的な妥当性が確認された．瞬時レイノルズ応力，瞬時レイノルズ応力消滅，瞬時圧力の波形は数値計算結果と同様，間欠的に運動量輸送が活発になると同時に圧力が低下し，かつレイノルズ応力消滅も激しくなることを示した．また速度二成分のコスペクトル（クロススペクトルの実部）は低波数領域で，速度勾配のパワースペクトルは高波数領域でピークを示した一方で，速度勾配と圧力のクロススペクトルは中波数領域で負のピークを示した．この結果からレイノルズ応力消滅には運

動量輸送に関わる大スケール構造よりも小さく、また乱流エネルギー散逸に関わる小スケール構造よりも大きい、中間スケールの乱流構造が関連していることが明らかになった。これは数値計算において大規模コヒーレント構造がレイノルズ応力消滅にほとんど寄与していないという結果が得られたことと整合する。さらに慣例的なエネルギーカスケードの描像にもよく従う結果である。そこでバンドパスフィルタにより取り出した中間スケールの成分をさらに解析していくこととした、条件付きサンプリングによってレイノルズ応力消滅の **Significant events** 周りの流れパターンを取り出すと、数値計算で観察したパンケーキ構造およびローラー構造の一部を検出したと考えられる流れパターンが得られた。このように、数値計算と実験で、互いの妥当性を支持し合う結果が得られた。また、実験で確認された乱流構造の圧力-歪速度相関に対する寄与は、少なくともパンケーキ構造は 9.5%、ローラー構造は 13.0%であることが明らかになった。

第四章は結論であり、第二章および第三章で得られた結果を総括した。総合的な結論を以下に述べる。本研究で得られた結果は先行研究の説明を支持し、その上で十分に説明されていなかった事項に対して新たな知見を与えた。そして本研究で示した乱流構造は、少なくともレイノルズ数が 2,000 から 10,000 の噴流では普遍的に存在すると考えられる。さらに、レイノルズ応力の消滅イベントがよく集中しているような、大規模なコヒーレント渦構造は二次元噴流のみならず他のせん断乱流でも観察されてきたものである。したがって、本研究で得られた結果が多く of the せん断乱流場の現象を説明しうるものであることが期待できる。