

称号及び氏名 博士（工学） 岡崎 友紀

学位授与の日付 2022年3月31日

論文名 「多孔体界面乱流の統計的性質に関する実験的研究」

論文審査委員 主査 須賀 一彦 教授

副査 高比良 裕之 教授

副査 瀬川 大資 教授

論文要旨

多孔体は内部に多くの空孔を持ち比表面積が大きいことから、固体高分子型燃料電池のガス拡散層や熱交換器、二酸化炭素の分離・回収を目的とした各種装置など工業的に広く活用されている。低炭素社会の実現に向け、装置を駆動するエネルギーを省力化することや、反応効率の向上が課題として認識されており、上述の装置においては多孔体の界面を流れる流体が受ける摩擦抵抗をコントロールすることが重要となる。工業装置内部の多孔体近傍流動は大小様々な渦を含む複雑な乱流状態であることがほとんどであり、多孔体界面付近における乱流現象の実態を把握・理解するとともに、工学的には流れや渦の特徴を普遍的かつ単純な式等で表現することが多孔体構造の最適設計には不可欠である。しかし、多孔体の表面は単純な壁状ではなく、凹凸構造や流体が多孔体内部に浸み込む効果もあいまって、現象の把握すら非常に難しい問題となっている。そこで本研究では、燃料電池等に用いられる高空隙率多孔体を対象に、その界面乱流の PIV (Particle Image Velocimetry) 計測を行い、平均速度分布や界面近傍に形成されるコヒーレント構造の性質やそのスケールを解明することを目的とした。本論文は全 8 章で構成されており、概要は以下のとおりである。

第 1 章は序論であり、まず多孔体界面近傍流れに関する研究背景と実験及び数値計算により実施された既往の研究に関して記述している。最後に本研究の目的について述べている。

第 2 章では本研究で用いた PIV についてその原理と実験概要について述べている。またデータ処理手法と PIV 計測で得られるデータの誤差とあいまいさについて評価している。

第 3 章では多孔体界面近傍における大規模コヒーレント構造について議論している。多孔体界面では平均速度に見かけ上滑りを許容するため、層流状態では滑面境界層よりも壁面摩擦が小さくなる。その一方で、滑面境界層よりも低いレイノルズ数で乱流に遷移し、乱流状態では滑面境界層よりも壁面摩擦抵抗が大きくなる。この主たる原因は多孔体内部と外部流の大きな速度差により生じる速度分布の変曲点に起因した Kelvin-Helmholtz 不安定波 (KH 波) ではないかと考

えられている。多孔体界面乱流でこの KH 波の存在を実験で確認した前例がないため、実験データを解析し、進行波の空間スケールを二点相関により抽出しその特性を調べたところ、波の主流方向の波長が多孔体界面の境界層厚さと比例関係にあり、その比例定数が 3.8–5.5 倍となっていることを確認した。これは発達混合層や植生上部の乱流において観測されている KH 波のスケールと同程度であることから、多孔体界面乱流においても形成される進行波が発達混合層などと同様の特性を持つ KH 波が形成されることを明らかにした。

第 4 章では KH 波が壁面性状にどの程度影響を受けるかを明らかにするため KH 波の半波長の非透過性の板材を多孔体表層に等間隔に埋め込んだ多孔体を作成しその評価を行った。その結果、非透過壁近傍では乱れが減少し、透過壁近傍で乱れが増加することがわかった。また非透過材を埋め込まなかった場合に比べて流動抵抗は約 30% 低減することが明らかになった。非透過性壁面の摩擦抵抗を考慮した有効壁面摩擦抵抗と比較するとバルクレイノルズ数が 5000 のケースでは平均的に 11% 小さく見積もられるが、バルクレイノルズ数 20000 のケースでは有効壁面摩擦抵抗の減少は確認できなかった。このように壁面の表面性状により、KH 波の発達と摩擦抵抗を制御できることを確認した。

第 5, 6, 7 章では多孔体の透過性と構造粗さの複合影響について議論した。多孔体の表面は常にフラットというわけではなく、多孔質ヒートシンクのように熱交換促進のために凹凸構造を設置することもよく行われる。このような多孔体の界面近傍乱流は表面の構造粗さと透過性の両方から影響を受ける。そこで第 5 章では同じ空隙率を持ち、透過率の異なる 3 種類の多孔体表面に壁材と同じ性状の多孔質リブや非透過性リブを等間隔に設置し、構造粗さを有する多孔体界面乱流について議論した。ここで対象とした粗さ形状はリブ間隔 w がリブ高さ k の 9 倍 ($w/k = 9$) であり、非透過性の場合、粗さ関数が粗さ高さと同様に相関を有する k 型粗面に分類される。非透過性リブを設けたケースでは、リブ後方に形成される再循環渦の中心が透過率の増加とともに下流側、下方へ移動する傾向を確認した。これはリブ前方から多孔質壁内部に潜り込んだ流れがリブ後方から湧き出すバイパス流れにより逆圧力勾配が緩和されたためだと考えられる。多孔質リブを設置したケースでも同様の傾向が確認されたが、透過率の高いケースでは再循環渦が形成されないことを確認した。またリブ後方の剥離せん断層がバイパス流れにより緩和されるため、透過率の増大に伴い乱れは減少することを確認した。多孔体界面近傍乱流の平均速度を議論する際、多孔体内部流速のゼロ点位置を示すゼロ面変位 d を導入した対数則： $\bar{u}^+ = \kappa^{-1} \ln(y+d)/h$ が用いられる。ここで κ はカルマン定数、 h は非透過性粗面で流動抵抗の指標として用いられる等価砂粒径に関連する粗さのスケールである。得られた速度分布にこの対数則をフィッティングしたところ、透過率の増加に伴い、ゼロ面変位は増加する一方で、カルマン定数と等価砂粒径は減少することを確認した。

第 6 章では第 5 章で述べた表面構造と大きく異なる粗さ形状を考慮するため、等間隔に溝を設けた粗面形状界面の流動について議論している。この溝の間隔は溝の深さの 9 倍であり、第 5 章で議論した構造粗さに対して逆相となる表面構造である。この粗さ形状は溝幅 w が溝深さ k と同程度 ($w/k = 1$) であり、非透過性の場合、 d 型粗面に分類される。計測の結果、溝内部に形成される循環渦は透過性により消失し、 k 型粗面と同様の傾向となることを確認した。しかし、乱れ強度に与える透過性の影響を比較したところ、逆相タイプの粗面では、非透過性のケースに比べて乱れが増大し、 k 型粗面と逆の傾向となることを確認した。また、これらは粗面の表面形状が大きく異なるにもかかわらず、粗さ高さより上方の領域では乱れ強度は同程度になることから壁面の透過性は粗さ構造がおよぼす影響を緩和する効果があると考察した。平均速度のパラメータについて第 5 章で示したデータを含めて議論し、ゼロ面変位 d が粗さスケール h と線形関係にあることを明らかにした。ゼロ面変位は粗さの形状や壁面の透過性の両方から影響を受けるため、透過性のあるケースで得られたゼロ面変位から同じ粗さ形状を持つ非透過性のケースのゼロ面変位を除いた有効ゼロ面変位を定義したところ、有効ゼロ面変位は多孔体表面の平均ポア径と同程度であることがわかった。また透過率の増加によりカルマン定数が減少する傾向が平均ポア径によ

て表現できることを明らかにした。以上から、透過性を有する粗面の等価砂粒スケールがポアレイノルズ数という単純なパラメータで予測できると結論づけた。

第7章では粗さ要素となるリブの設置間隔と透過性を変えた粗面近傍乱流について議論している。計測対象とした粗さ形状は $w/k = 1, 3, 7, 9, 19$ の計5ケースであり、それぞれ異なる3種類の透過性と非透過性のケースを対象とした。リブの設置間隔を変えた場合も同様に、透過性の増加に伴いリブを通過する流量が増えるため、循環渦の中心が下流側・下方へ移動する傾向および透過率が高いケースでは循環渦が形成されないことを確認した。また透過性による循環渦の緩和により、リブ周りの分散応力が著しく低下することがわかった。非透過性の場合、リブ幅の増加にともない流動抵抗が増加し、 $w/k = 7$ 程度で最大値をとり、さらにリブ幅が広がるにつれ抵抗は減少するが、透過性のある場合、リブ間隔が狭い $w/k = 1$ では透過性の増加に伴い乱れが増大すること、 $w/k > 7$ では逆に減少することがわかった。最後に平均速度のパラメータについて議論し、第6章の議論のようにゼロ面変位 d と粗さスケール h がおおよそ線形関係にあるものの、 h/d が透過性やリブ間隔に依存して変化することを確認した。また有効ゼロ面変位が透過率レイノルズ数やポアレイノルズ数と線形関係にあることも確認した。またカルマン定数は壁面の透過性とリブ間隔に影響を受けるが、透過率レイノルズ数やポアレイノルズ数と比較的有意な相関を持つことを示した。以上から、透過性壁面乱流の対数速度分布を表面構造によらず統一的に近似する関係式群を提案した。

第8章は結論であり、これまでに得られた結果をまとめ総括している。

審査結果の要旨

本論文は実験的に、多孔体界面における乱流現象の平均速度分布や界面近傍に形成されるコヒーレント構造の性質やそのスケールを解明することを目的とした研究成果をまとめたものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 多孔体界面に発達する乱流では、透過率レイノルズ数の増加に伴いストリーク構造が分断されスパン方向にコヒーレントな大規模渦構造が存在することを確認した。その周期 λ_x は境界層厚さ δ と比例関係： $\lambda_x/\delta=3.8-5.5$ にあり、発達混合層やキャノピー乱流で観測されるケルビン・ヘルムホルツ波と同様の特徴を持つことを実験的に明らかにした。
- (2) 多孔体界面に形成されるケルビン・ヘルムホルツ波の1波長程度の周期構造をもたせた多孔体近傍ではケルビン・ヘルムホルツ波の発達を抑制し、レイノルズ数5000の低速流では平均的に11%の抵抗低減を実現できることを明らかにした。しかし、この効果はレイノルズ数の増加とともに失われ、恒常的な抵抗低減の為にはさらなる工夫が必要であることを示した。
- (3) 多孔体界面にリブ列による構造粗さを持たせると、乱流強度や流動抵抗はリブ間隔が非常に狭い範囲では多孔体の透過率の上昇とともに増加するが、リブ間隔がリブ高さの7倍以上に広がると逆に減少することを発見した。
- (4) リブ列間隔を様々に変化させて計測した結果を解析し、乱流現象の理解を深化させるとともに、平均速度分布を多孔体のポア径で記述する汎用的な相関式群を導出することで、知見の工学的な応用範囲を広げた。

以上の成果は、多孔体界面乱流物理の理解を広げたばかりではなく、多孔体を流路に含む流れ場の工学的設計指針に寄与できるものであり、その機械工学や環境工学に対する貢献度を高く評価できる。さらに、これら成果は有機的に関連しており、申請者が自立して研究計画を立て、研究を遂行するに十分な能力と学識を有することを証している。学位論文審査委員会は、本論文の審査および最終試験の結果から、以上のことを確認したので博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。