

名古屋大学工学研究科 エネルギー理工学専攻
エネルギー流体工学講座

エネルギー熱流体工学グループ

辻 義之(教授)、伊藤高啓(特任教授)
博士後期課程4名、博士前期課程8名、学部4名(2022年度の実績)

研究分野と研究方針

【概要】

エネルギーのより効率的で安全な利用のための熱流体技術に関する研究と、その基礎となる混相流、乱流、気液界面現象、固液界面現象の解明のための研究、液体金属や粘弾性流体などさまざまな流体の熱流現象に関する研究をおこなっています。乱流制御による省エネルギー技術の開発に向け、高レイノルズ数乱流の実験及び数値計算をおこなっています。

【キーワード】

流体乱流における普遍法則の解明とエネルギーの有効利用への応用

【主な研究と内容】

(A)流体力学的知見に基づく省エネルギー技術の開発

物体が移動するとき、必ず空気、水などの周囲の流体から粘性に起因した抵抗を受けます。この粘性による壁面せん断応力は航空宇宙、地球物理学などあらゆる分野で非常に重要となります。特に航空機、自動車、船舶等の輸送機器においては、粘性抵抗が主要なエネルギー損失源であり、空力性能に大きな影響を与えます。粘性抵抗が5-10%減少した場合、航空産業単独で年間10億ドル相当の燃料の削減が見込まれています。流れの中の物体の表面には、粘性の影響により強いせん断層を持つ薄い境界層が発達します。境界層内部の流れ方向速度は、物体表面上ではゼロであり、主流へ向けて急激に増加します。この速度勾配が大きいと粘性力が大きくなることから、壁面せん断応力を見積もるためには境界層の性質を解き明かすことが重要となります。通常、船の底には海中生物の付着を防ぐために船舶塗料が塗装されています。船舶塗料には海中生物の嫌がる成分である防汚剤とポリマーが含まれており、それらは非常に緩慢に周囲の海水に溶け出していきます。ポリマーが海水中に添加されることにより摩擦抵抗が大きく低下しますが、その過程で船体表面にわずかな凹凸が発生し、抵抗増加につながります。本研究では、船舶分野における燃費向上を目的とし、スペクトル解析を用いて高次の統計量を調べることによって表面形状による境界層内の組織構造の変化について考察します。そのうえで、表面形状による摩擦抵抗の変化と組織構造の関係を明らかにすることを目指します。

昨年度に引き続き、学外実験施設(鉄道総合研究所米原風洞、産業総合技術研究所)における高レイノルズ数乱流の実験データを詳細に解析することで、壁面せん断流れの普遍則について論文としてまとめた。いずれも世界最大規模のレイノルズ数であり、基礎的・実用化のいずれの観点でも貴重なデータベースとなる。また、富岳を用いたチャネル流れの直接数値計算を実施しており(山梨大学との共同研究)、

スペクトルコードによる統計解析を進めている。この計算も世界最大の Re 数を実現しています。室内実験では、熱線風速計を用いた多選計測データにより、壁面摩擦を低減するための制御法の開発と、受動的制御法として、柔軟粗面を用いた実験を計画しています。乱流大規模構造と粗面との干渉がいかん抵抗の増加と軽減をもたらすか、その物理的メカニズムを解明することを主眼に置きます。その過程で、機械学習や確率的予測法を併用することを計画しており、その成果も得られました。

(B) 超流動乱流場の可視化法の開発

液体ヘリウムは 2.17 [K]を臨界値として常流動ヘリウム(He I)から超流動ヘリウム(He II)へと相転移を起こす。超流動ヘリウムは高い熱輸送性を持ち、非粘性流のように振る舞うことから、超伝導マグネット等における優れた冷却媒体としての利用が期待される。He II は、粘性とエントロピーを持たない超流動成分と、通常の流体と同様の性質を持つ常流動成分の 2 成分によって構成される。He II に熱を印加すると、2 成分が熱カウンター流と呼ばれる内部対向流を形成することで熱輸送が行われる。He II における熱輸送の理解を深めるため、熱カウンター流に関する実験的・数値的研究が盛んに行われている。しかし、これまでの実験的研究では熱カウンター流を一様流と仮定したものが主流であり、壁面近傍における非一様流動場に関する知見は不足している。一方で、近年の数値的研究ではチャンネルダクトの壁面近傍において量子渦と呼ばれる渦構造の存在密度が高くなる傾向が報告された。量子渦は熱カウンター流の相互摩擦として作用するため、He II の熱輸送性の低下を招くと予想される。以上の背景から、本年度はチャンネルダクトの壁面近くの熱カウンター流の非一様性を対象とし、詳細なデータ解析から、粒子のラグランジュ軌道を解析し、フラクタルブラウン運動により定量化できることを明らかにした。また、軌道曲率の大きさから量子渦との干渉を区別する方法を考案し、熱対向流における粒子の運動を古典乱流との比較で統一的に解釈できることを示した。可視化については、4台のカメラを用いる PTV 解析を実施して空間中のラグランジュ軌道を算出した。エキシマを用いた可視化では、直流電源によるプラズマ発光のための回路を作成し、その放電を安全にできることを確認した。また、中性子を用いたエキシマ生成方法を開発している。

(C) 流動加速型腐食機構の解明

火力、原子力発電所で用いられている冷却水用の配管では、水の流れによって配管の厚みが薄くなる現象、流れ加速型腐食 (FAC) が生じます。FAC が進行すると、薄くなった配管はやがて破損して中から高温の水が噴出し、大事故に至ります。国内での代表的な事故として、2004 年 8 月、美浜原子力発電 3 号機の冷却水配管の破損事故が挙げられます。この事故では、オリフィス流量計下流の配管が破損しました。FAC が配管のどの部分で生じ、いつ破損に至るのかを予測することは、発電所を安全に運用するうえで重要です。FAC は、曲り管を通過する偏った流れなどの影響により、配管表面の金属の溶け出す速度、物質移行係数が大きくなることで進行するのではないかと予想されています。FAC の要因として 3 つ (流体力学、水化学、材料) 挙げられますが、本研究では流体力学的観点から、オリフィス下流部、エルボ、T 字管における流れ場を対象として粒子画像速度測定法 (Particle Imaging Velocimetry) 法と電気化学的手法を用いた実験的研究を行なっています。配管要素の中でも、T 字配管 (以下 T 字管と呼ぶ) での合流部において発生する FAC に着目した。T 字管では、数値計算による評価はなされているものの、流量比によって流動場の様相が変化するため、実験的な評価を行うことが困難であった。本年度は、電気化学的手法により、初めて T 字管での物質移行係数を計測することができた。対向流、壁面噴流下における物質以降係数の統計解析から、FAC と流動との関連を考察した。今後は、電極形状を小型、多数化することでベクトル量の計測を試みる。

(D) 数値計算に基づく物質移行と流動との関連

発電プラントの炭素鋼配管の減肉事象の一因として流れ加速腐食 (FAC) が挙げられる。FAC とは炭素鋼配管からの鉄イオンの溶解及び拡散に流動が何らかの影響を与え、腐食を促進するというものである。FAC の根本的な流体力学因子は壁面における物質移行係数と考えられる。配管要素の減肉予測評価には、配管要素における物質移行係数と直円管における物質移行係数の比として定義される形状係数が用いられる。本研究では、配管内流れを対象として、プラントの配管系統を構成するオリフィスや T 字管といった個別の配管形状毎に詳細な数値解析を行っています。流動場及び温度場の計算から、運動量輸送と熱輸送と物質輸送のアナロジーを介して形状係数の予測をおこなっています。平均流動場、温度場を求める定常計算を RANS を用いて行った。乱流モデルは 2 次流れを計算可能なレイノルズ応力方程式モデル (RSM) を用いた。温度場計算には乱流プラントル数に基づく代数方程式モデルを用い、作動流体はバルク温度 300K の水として物性値を定数で与えている。温度場は壁面温度が 310K の加熱条件として計算し、入口境界条件は周期境界を用いたドライバー部を別計算することから、その値を受け渡している。また、非定常計算として、LES を用いた流動場の計算を実施することができた。

(E) 喉頭での発生機構の解明

喉頭内の声帯を模擬した自励振動を行う実験モデルの流れを対象に、PIV を用いて空間的な流速計測を行う。計測した流れ場から音源を算出し、Ffowcs Williams-Hawking の理論に基づいて伝播する音圧を推定する。流れから推定された音圧とマイクロホンによる実測音圧の比較を通じてモデル発生音の支配因子を特定する。また、時間・空間的な流れの構造と伝播する音圧の比較から、音を発生させる流動場構造の特徴を明らかにした。

シャント発声での原音生成において、ボイスプロステシスを通過した呼気流のふるまいが重要とされながらも、空間的な流動場測定自体が行われた例がなく、特に、日本で唯一認可されているボイスプロステシスである Provox® Vega 周囲の流れについて調べられているのは弁の上流と下流の圧力損失のみである。そこで本研究では、国内のシャント発声法においてボイスプロステシスとして使用されている Provox® Vega を対象に、世界で初めて PIV を用いた流速の空間分布の計測を行った。測定結果について統計解析を行い、シャント発声時に形成される流動場構造の特徴を整理した。また、ボイスプロステシス弁の振動解析から流動場構造と弁の構造的な関連性の考察をおこなった。

以上の結果を総合して考察を行い、喉頭とボイスプロステシスにおける音源生成メカニズムに関連する流動場構造の特徴を明らかにした。

2022 年度の研究・教育の概要

本年度は 4 名の学部卒業生、4 名の修士卒業生の研究指導をおこない、国内外の学会での成果発表を実施することができた。国内および国外の会議がリモートでおこなわれたことから、学会への参加は昨年度の経験から、十分にできたといえる。M2 学生については、対面での学会参加を実現することができ、在学中の良い経験を積むことができた。研究に関しては、実験も通常通りに実施できる体制となった。対面での作業と、データ解析などをリモートで進めることができた良い点もある。熱流体に関する基礎研究からエネルギーシステムの基礎技術に関する応用研究まで広い分野の課題に取り組むことができた。各テーマでの研究室内の研究成果と研究手法の蓄積を有効に活用できる体制が整いつつあり、引き続き研究テーマの継続的な展開をおこなっていく。修士学生についても、テーマを絞ることから在学期間中に短い

論文を書ける体制を整えたい。また、博士後期課程学生については、博士論文の執筆をおこないながら、深い考察を伴う論文を書けるように研究指導に力を入れていく。

【本年度の研究成果発表の概要】

	国内会議発表	国際会議発表	国際会議予稿	学術論文
教員	3	4	4	4
学生	15	4	4	7

本年度の卒業論文・修士論文・博士論文のタイトル

【卒業論文】

- 機械学習による超流動場内の量子渦系の検出法に関する研究
- 超流動ヘリウム流動場における風洞実験装置の開発
- 低レイノルズ数円管流れにおける凹凸粗面による乱流構造の変化に関する研究
- 高分子添加流体流動場の壁面せん断応力計測による乱流構造と摩擦抵抗低減に関する研究

【修士論文】

- 超流動ヘリウム流動場の三次元可視化手法の開発と熱カウンター流に追従するトレーサ粒子の三次元的挙動の解析に関する研究
- 低レイノルズ数壁乱流における外層の大規模渦構造の統計的性質に関する研究
- 機械学習を用いた複雑流動場における時系列データ欠損値補間に関する研究
- 壁面せん断応力測定に基づく高分子添加流体の乱流摩擦抵抗低減効果に関する研究

その他・特記事項

日本機械学会論文賞:

高レイノルズ数乱流境界層における平均速度分布の普遍性(諸外国の大型風洞との比較)