



対流熱伝達の上限への挑戦



基礎工学研究科 機能創成専攻

講師 本木 慎吾

Researchmap <https://researchmap.jp/s.motoki>

研究の概要

流体による熱の輸送現象の解明・予測・制御は、惑星における大気循環やマントル・核の運動、恒星におけるエネルギー輸送といった地球宇宙物理学上の難問解決において高い学術的意義を有すると同時に、様々な工学機器における伝熱技術にも直結し、エネルギー有効利用の観点からも極めて重要です。一般に、流れを乱流化させることで伝熱を促進できることがよく知られています。他方で、最近我々は、乱流による熱伝達を遥かに超える熱伝達（対流熱伝達の上限）を達成する流れが存在することを理論的に見出しました。本研究では、多孔質体や電磁力などを利用して流体を上手く制御することで、この上限の実現を目指しています。

研究の背景と結果

近年加速する世界的な気候変動や都市部におけるヒートアイランド現象による気温上昇に伴い、高性能な空調機器の需要が高まっています。また、生成AIをはじめとする高度デジタル技術の爆発的な発展によるCPU/GPUやデータセンターの高発熱化・高電力化のために、伝熱促進を目的とする熱流体制御技術のさらなる高性能化・高効率化が強く求められています。このような背景から、流体による熱の輸送現象の解明・予測・制御は、持続可能な社会に向けたエネルギー有効利用において極めて重要な意義を持ちます。一般に、流れが自発的あるいは強制的に乱流となることで、熱伝達が顕著に促進されることが良く知られています。では、その乱流状態よりもさらに高い熱伝達を実現することはできるでしょうか。本研究では、熱流体工学におけるこの素朴な問いを理論解析・数値シミュレーション・実験により追求しています。

一定の温度差に保たれた平行な壁面間の流れを対象に、変分原理に基づく汎関数の数値最適化を行うことで、最適な速度場を求めることに成功しました。得られた最適状態は、大規模な強い対流構造と壁面近傍の階層的な渦構造によって構成され、乱流による熱伝達を遥かに超える熱伝達を達成します。その熱伝達率は厳密な数学的上界に極めて近く、また、究極熱伝達（壁面熱流束が流体の粘性率や熱伝導率に依存しない特異な熱伝達）を示します。

この「対流熱伝達の上限」を達成するための実際的な熱流体制御として、多孔質体で構成される壁面に着目しました。透過性壁面間の熱対流乱流に対する数値シミュレーションを実施した結果、壁面の透過性（多孔性）が壁面上の流れを不安定化させ、乱流中に大規模な熱ブリューム構造が現れることで、究極熱伝達が達成されることを明らかにしました。また、壁面せん断乱流に対して同様の制御を適用した結果、大規模なスパン方向渦構造が現れることで、究極熱伝達が達成されることを見出しました。

研究の意義と将来展望

本研究では、乱流状態の流れに対して多孔質体や電磁力を適切に導入することで、大規模な強い対流運動が生成され、顕著な伝熱促進効果を得られることを明らかにしました。このような流れの状態は、「究極熱伝達」と呼ばれる、壁面熱流束が流体の粘性率や熱伝導率に依存しない熱伝達を達成します。今後は、その複雑な流動のメカニズムを

解明することで、地球・宇宙物理学等における新たな知見の創出を目指すとともに、本研究において見出された熱流体制御技術を社会に実装することで、持続可能な社会の実現に貢献します。

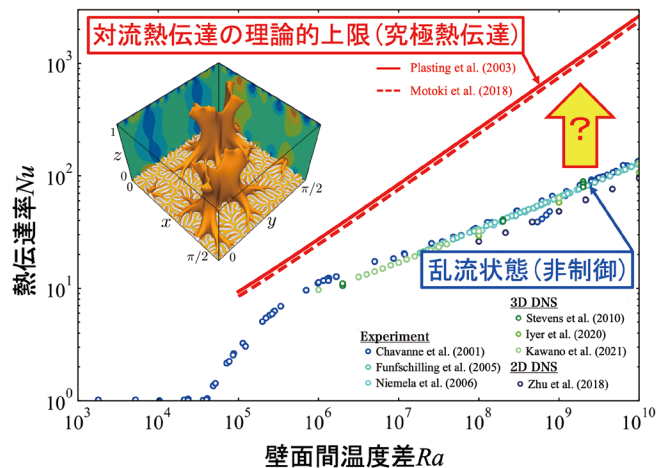


図1 熱対流における熱伝達率と壁面間温度差の関係。

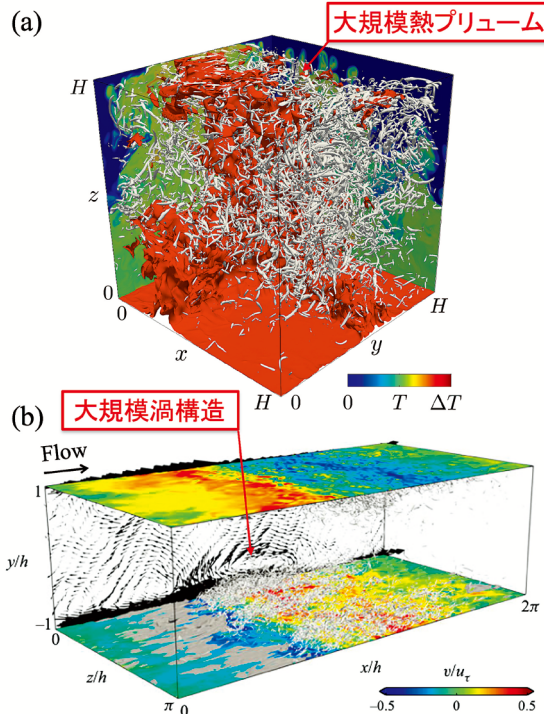


図2 透過性壁面間における究極熱伝達状態。(a) 熱対流、(b) 壁面せん断流。

特許	
論文	Motoki, Shingo; Kawahara, Genta; Shimizu, Masaki. Optimal heat transfer enhancement in plane Couette flow. <i>Journal of Fluid Mechanics</i> . 2018, 835, 1157-1198. doi: 10.1017/jfm.2017.779 Motoki, Shingo; Kawahara, Genta; Shimizu, Masaki. Maximal heat transfer between two parallel plates. <i>Journal of Fluid Mechanics</i> . 2018, 851(R4). doi: 10.1017/jfm.2018.557 Kawano, Koki et al. Ultimate heat transfer in 'wall-bounded' convective turbulence. <i>Journal of Fluid Mechanics</i> . 2021, 914(A13). doi: 10.1017/jfm.2020.867 Motoki, Shingo et al. The ultimate state of turbulent permeable-channel flow. <i>Journal of Fluid Mechanics</i> . 2022, 931(R3). doi: 10.1017/jfm.2021.937 Motoki, Shingo; Kawahara, Genta; Shimizu, Masaki. Steady thermal convection representing the ultimate scaling. <i>Philosophical Transactions of the Royal Society A</i> . 2022, 380, 20210037. doi: 10.1098/rsta.2021.0037
参考URL	https://sites.google.com/view/shingomotoki https://sites.google.com/view/wwwkawaharalab
キーワード	熱流体制御、エネルギー効率化技術、究極熱伝達、乱流、非線形最適化