

Title	Variational Approach to Optimal Heat Transfer Enhancement: Nonlinear Optimisations and Applications
Author(s)	本木, 慎吾
Citation	大阪大学, 2018, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/69616">https://hdl.handle.net/11094/69616</a>
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉</a> 大阪大学の博士論文について <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈/a〉</a> をご参照ください。

***Osaka University Knowledge Archive : OUKA***

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

## 論文内容の要旨

氏 名 (本 木 慎 吾)	
論文題名	Variational Approach to Optimal Heat Transfer Enhancement: Nonlinear Optimisations and Applications (最適伝熱促進に対する変分的アプローチ：非線形最適化と応用)
論文内容の要旨	
<p>近年、伝熱促進や抵抗低減等を目的とする多種多様な流体制御技術の研究開発が行われているが、その多くは試行錯誤に基づき経験的に行われており、理論的に見出された指針に基づき流体制御が行われた例は極めて少ない。本論文は、流体制御の指針となる流れの構造を、変分原理に基づく汎関数の最適化により見出すことを目的とし、2つの最適化問題と関連する2つの応用問題を述べている。</p> <p>第2章では、一定の温度差を有する定常な平面クエット流を対象に、非圧縮性と温度の移流拡散方程式の制約の下でエネルギー散逸に対するスカラー散逸の超過を最大化する最適な速度場を数値最適化により求めた。最適状態は流れ方向の対流ロール構造と壁近傍の階層的な流れ方向渦構造によって構成され、乱流状態よりも低いエネルギー散逸を保ちながらも顕著に高い壁面熱流束を示した。また、壁近傍の流れ方向渦は平均流渦度と反対符号のスパン方向渦度をもつようにスパン方向に傾くアンチサイクロニック渦であることを流れ構造の解析により見出した。</p> <p>第3章では、最適化により見出されたアンチサイクロニック渦による伝熱促進の合理性を、漸近解析と数値シミュレーションにより実証した。この渦構造は伝熱促進を目的とする流体制御の指針となると期待される。</p> <p>第4章では、一定の温度差を有する互いに静止した平行な平板間の定常な速度場を対象に、一定のエネルギー散逸の下で壁面熱流束を最大化する3次元の速度場を数値的に求めた。最適な速度場は大スケールの対流セル構造と壁近傍の階層的な小スケールの自己相似渦構造によって構成され、その壁面熱流束はレイリー・ベナル対流についての数学的な上界に対応するスケールリングを示した。</p> <p>第5章では、ブシネスク方程式における3次元定常解もまた階層的な渦構造を有するという予想の下、熱伝導解から分岐する定常解をニュートン法を用いて高レイリー数まで求めた。3次元定常解ではレイリー数の増加と共により小スケールの構造が生成され、乱流に対応する構造及び統計量が観察された。この多重スケール解の発見は発達乱流の統計的性質を単純不変解に基づき理解する糸口となると期待される。</p>	

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (本 木 慎 吾)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教 授	河原源太
	副 査	教 授	後藤 晋
	副 査	教 授	杉山和靖

## 論文審査の結果の要旨

本論文では、平行平板間の熱伝達を最大化する非圧縮、定常の速度場を変分原理により決定している。伝熱工学においては、エネルギーの消費を低く保ちつつ伝熱量を大きくすることが求められる。しかしながら、運動量の輸送を支配するナビエ・ストークス方程式と熱の輸送を支配するエネルギー方程式（移流拡散方程式）とは相似性が認められ、熱の輸送を活発化して伝熱量を高めると、運動量の輸送も活発となり流動抵抗が増し、流動に要するエネルギーの消費量が増大する。これは運動量と熱の輸送の相似性とよばれ、効率的な伝熱促進を図るための大きな障害となっている。本研究ではこの課題を解決するために理論的な考察がなされている。

まず、平行平板間の剪断流において、流れがもたらす平板間の熱流束と平板に作用する摩擦力（運動量輸送）と外力の仕事率に対応するエネルギー散逸率との差を汎関数として、変分原理に基づき汎関数の停留点を決定するオイラー・ラグランジュ方程式を導出している。この非線形方程式の数値解を最急上昇法とニュートン法とを組み合わせた手法により求め、エネルギー散逸に比して熱輸送を卓越させる流れの構造が、剪断流の渦度と反平行な渦度を有するアンチサイクロニック渦であることを明らかにしている。また、アンチサイクロニック渦が熱輸送を増大させるメカニズムを理論的に解明している。これらの知見に基づき剪断流中にアンチサイクロニック渦を導入することにより、ナビエ・ストークス方程式に従って時間発展する実際の流れにおいても伝熱促進が実現されることを明らかにしている。

次に、剪断のない平行平板間においても、平板間の熱流束を最大化する速度場を上と類似の手法により明らかにしている。この場合には、エンストロフィーを一定に保って熱流束を最大化する流れを数値的に求めることに成功している。このようにして求められた流動場は、熱対流乱流問題における究極のスケーリングとして知られる、ヌセルト数（無次元熱流束）のレイリー数の1/2乗のスケーリングを達成することを見出している。また、この流動場には自己相似的な渦構造が認められ、熱輸送最大状態と熱対流乱流との統計的性質および速度場の空間構造の強い類似性が見出されている。そこで、この熱輸送最大状態からホモトピーによりナビエ・ストークス方程式（ブシネ方程式）の非線形定常解を求め、熱対流乱流と比較したところ、熱輸送最大状態から得られた非線形定常解が、熱対流乱流のスケーリング則や統計的性質および乱流構造を極めてよく再現することを明らかにしている。

以上の研究成果は、博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認める。