

令和元年6月18日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14587

研究課題名（和文）非定常流れにおける三次元伝熱面形状最適化アルゴリズムの構築と実証

研究課題名（英文）Shape optimization of three-dimensional fluid-solid interface for unsteady convective heat transfer: algorithm construction and substantive experiment

研究代表者

亀谷 幸憲 (Kametani, Yukinori)

東京大学・生産技術研究所・特任助教

研究者番号：60759926

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：乱流熱対流場における複雑伝熱面の形状最適化アルゴリズムの構築と実験実証を実施した。本研究では、時間平均した支配方程式（RANS）に基づく随伴解析に、直接数値シミュレーション（DNS）を実施することで得られる乱流統計量を組み合わせるRANS-DNSハイブリッド型のアルゴリズムを構築した。開発したアルゴリズムをピンフィン及び波状フィンに適用してアルゴリズムの検証を行った。樹脂3Dプリンタを用いて供試体を製作し、非定常法及び微差圧計を用いた実験実証を行った。形状最適化による熱交換性能向上機構の考察から、乱流場では潜在的に熱伝達率が高いため流体抵抗の減少によって性能が向上する傾向が見られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非線形の強い乱流熱対流場での、随伴解析に基づく形状最適化は数理的困難を含む。しかし、今回開発したRANSとDNSを組み合わせる手法は乱流理論やコンピュータ能力の発達を背景に拡張性が非常に高く、今後さらに精度の高い形状最適化へと拡張されるポテンシャルを含んでいるため、学術的に非常に意義がある。また、乱流場での高効率な熱交換器の設計は環境負荷軽減に重要な役割を果たすため、非常に大きな社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：A shape optimization algorithm of complex heat transfer surfaces for turbulent convective heat transfer was constructed and experimentally validated. In the present study, an adjoint-based shape optimization with the time-averaged governing equations, RANS, is combined with direct numerical simulations, viz., RANS-DNS hybrid approach.

The present algorithm was applied to conventional pin-fin and wavy-fin, respectively. As results reduction of the cost functional was numerically confirmed. The optimal shape is printed by resin 3D printer as a matrix for the substantive experimental validation. With the single blow method and manometer measurements, the increase of performance was experimentally confirmed as well. By investigating the mechanism of the increased performance with optimal shape, it is found that the drag reduction is a key to higher-performance heat exchangers rather than the heat transfer enhancement since the heat transfer is essentially large in turbulent flows.

研究分野：熱流体工学

キーワード：形状最適化 乱流 伝熱 数値シミュレーション 実験

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

熱交換器の性能は圧力損失と伝熱性能で決定され、流路形状を工夫することで性能向上が図られてきた。しかし、圧力損失低減及び伝熱促進の同時達成は支配方程式の相似性から困難である。また、多くの熱交換器において流れは非定常であるが、時々刻々、非線形に変化する流れに対する流路形状最適化は困難であり、有効な手法は確立していない。最適化数理を利用した決定論的形状最適化である随伴解析に基づく手法が、定常層流場での境界面最適化やトポロジ最適化に適用されてきた。しかし、非定常である乱流場での非定常随伴解析では、形状の微小変化に対する流れ場の変化の強い非線形性のため、変分の線形化が行えず理論が破綻する。そのため、支配方程式に時間平均を施し (RANS)、定常随伴解析による形状最適化が多く行われてきた。しかし、RANS ではレイノルズ応力テンソルや乱流熱流束ベクトルが現れ方程式が閉じないため、乱流モデルを用いる必要がある。そのため、順解析の精度が乱流モデルに強く依存し、結果として形状最適化その精度も乱流モデルに依存する。一方で、近年のコンピュータの性能向上及び高精度な数値解析手法の開発により、直接数値シミュレーション (DNS) やラージエディシミュレーション (LES) 等の非定常数値解析によって、レイノルズ応力テンソルや乱流熱流束ベクトルそのものが高精度に予測できるようになった。そこで、本研究では RANS に基づく随伴解析に DNS によって得た統計量を組み合わせるハイブリッド型のアプローチに着目する。

2. 研究の目的

本研究では、非定常流れにおいて圧力損失低減及び伝熱促進の非相似制御を達成するための三次元伝熱面形状最適化アルゴリズムの開発を行う。本アルゴリズムを代表的な熱交換器形状に適用し、数値解析による検証を行う。また、最適形状の供試体を作成し、圧力損失及び伝熱性能を計測することでアルゴリズムを実証する。さらに、制御機構を解明し、非相似制御を達成する形状の一般的な知見を得る。

3. 研究の方法

本研究は以下の3つの項目に大別される。それぞれの方法を下記に示す。

(1) 非定常流れ場での形状最適化アルゴリズムの構築

実施者が既に開発していた定常流れにおける随伴解析に基づく形状最適化アルゴリズムを非定常流れへと拡張する。非定常随伴解析に渦粘性理論を導入することで、随伴方程式を定常計算として解くことが可能となる。

(2) 数値解析によるアルゴリズムの検証

構築したアルゴリズムを代表的な熱交換器形状 (ピンフィン、波状フィン、格子等) に適用し、数値解析を用いた検証を行う。実際の流路は湾曲部など複雑であるが、本研究では理想的な形として主流方向及びスパン方向に周期的な平行平板間流れに上記形状を配置する。

(3) 実験計測によるアルゴリズムの実証

形状最適化から得られた形状の熱伝達率の実験計測を行うとすることで、最適化アルゴリズム実証を行う。数値解析から得た最適形状を CAD データ化し、3D プリンタで印刷することにより供試体を作成する。熱伝達率の測定に非定常法を用いる。非定常法は、上流をヒータで加熱した際の供試体の入口及び出口の温度上昇の応答性から熱伝達率を測定する手法である。また、供試体上流及び下流の圧力差を微差圧計で測定し圧力損失とする。形状最適化前後の形状から供試体を作成し、数値解析と比較することで実験実証とする。

4. 研究成果

(1) 非定常流れ場での形状最適化アルゴリズムの構築

乱流を含む非定常流れ場における形状最適化アルゴリズムの構築を行った。本アルゴリズムはコスト関数を、時間平均されたナビエ・ストークス方程式、連続の式及びエネルギー方程式群 (RANS) を制約条件とする随伴解析に基づく。ここで、順解析に直接数値シミュレーション (DNS) を実施し、得られた統計量から、渦粘性を評価する RANS-DNS ハイブリッド型の新しい手法を確立した。最適化における反復フローを図1に示す。本手法は、渦粘性を $k-\epsilon$ モデルなどの乱流モデル方程式を用いず、DNS から得たレイノルズ応力・乱流熱流束の正解場を用いて評価することで、乱流モデルに必要な流れ場依存のモデル定数のチューニングの必要が無く、形状最適化の精度の向上が期待される。

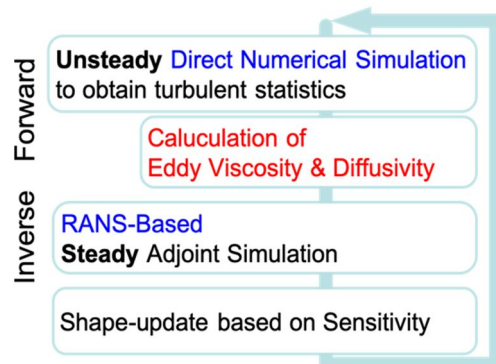


図1 アルゴリズムフローチャート

本アルゴリズムでは、流体及び固体表面、レベルセット関数を用いて表現し、デカルト座標形状に投影する。レベルセット関数は、固体部で 1 及び流体部で 0 となる相識別関数に変換され、境界埋め込み法である Volume Penalization 法を用いて数値解析に組み込まれる。随伴解析から得た感度分布からレベルセット関数を更新することで形状最適化を達成する。形状表現の概要を図 2 に示す。

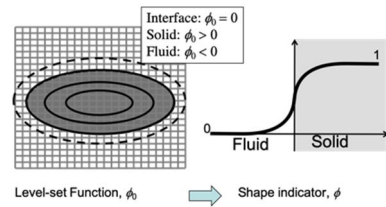


図 2 形状表現

本アルゴリズムはレベルセット関数を形状表現に用いることでトポロジ変化に対応した形状最適化を実現し、デカルト座標系に投影することで高精度な乱流数値解析手法を適用することができる。また、RANS に基づく随伴解析での渦粘性を、DNS から得た統計量から評価することで、モデル定数に依存しない形状最適化の精度の向上が見込まれる。

(2) 数値解析による検証

開発したアルゴリズムを平行平板間チャンネルに配置されたピンフィン及び波状フィンに適用し、乱流場での形状最適化を実施した。ここでは、一定の圧力勾配で駆動された一様に発熱する空気流が、熱伝導率が流体に比べて十分に高いフィンで冷却されることを想定し、平均流速とチャンネル高さで定義されるレイノルズ数を $Re_H = 2000$ とした。得られた形状の一部を図 2 に示す。コスト関数は伝熱(Nu)をポンプ動力(fRe)で除したアナログファクタの最大化に基づいて設定した。その結果、ピンフィン及び波状フィンでそれぞれ 36%、29% のアナログファクタの向上が達成された。ピンフィンでは、14%の伝熱低下及び 36%の圧力損失低減が得られるのに対し、波状フィンでは 8%の伝熱促進及び 17%の圧力損失低減が得られており、後者では伝熱促進と圧力損失低減が同時達成されている。

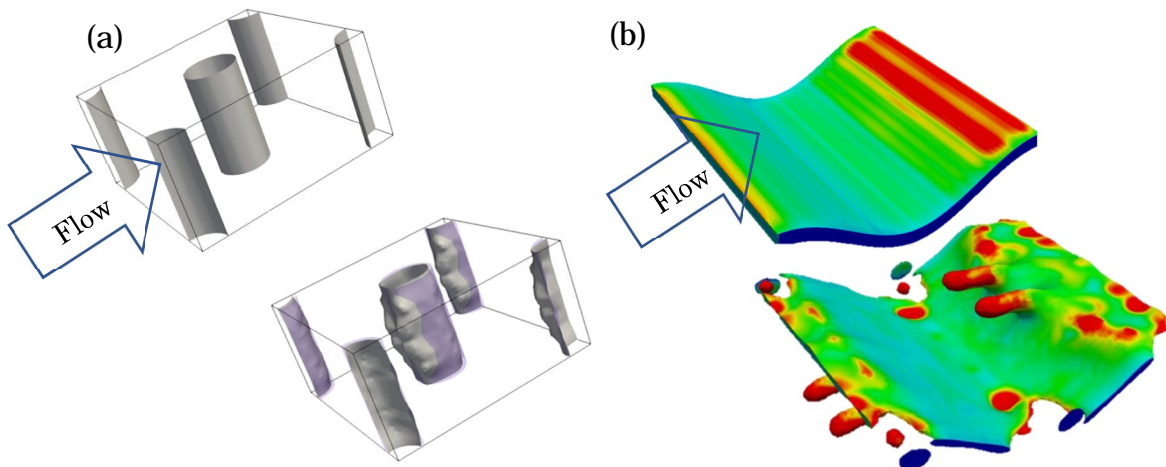


図 3 初期形状と最適形状。(a) ピンフィン、紫等値面は初期形状を表す。(b) 波状フィン、色は局所の熱伝達係

(3) 実験計測によるアルゴリズムの実証

伝熱及び圧力損失の計測をそれぞれ非定常法及び微差圧計を用いて行う。実験系を図 4 に示す。非定常法は熱交換器供試体の上流でステップ関数状に加熱し、出口温度の時間応答をあらかじめ用意したモデル応答曲線と比較することで熱伝達係数を求める(図 5)。数値解析から得られた最適形状の CAD データから供試体を 3D プリンタで製作する(リコー 3D プリントサービス)。造形精度と製造コストを考慮して、材料を樹脂とし、造形方法は Selective Laser Sintering (SLS) である。ここで、数値解析では流体に比べて十分に高い熱伝導率をフィン内で仮定したが、樹脂の熱伝導率には適切ではない。そこで、あらかじめ熱の深さの時間変化を見積もり、同等の熱伝導率を仮定できる加熱開始時刻からの時間範囲を求め、モデル曲線評価のための時間範囲とする。

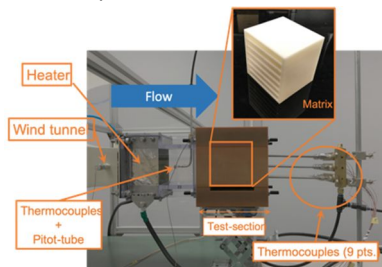


図 4 実験系概要

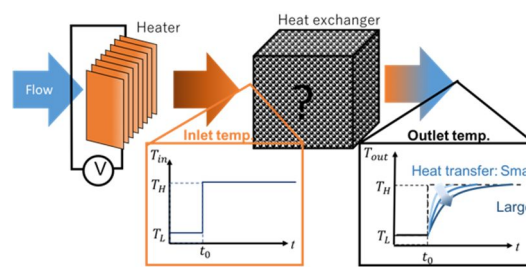


図 5 非定常法概要

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

本研究では、既述したピンフィン形状最適化結果に関して実験を行った。図 3-a について造形された供試体を図 6 に示す数値解析と同様の配置を計 7 段の流路に施した。図 6 に示された初期形状と最適形状について実験検証を行った結果を図 7 の破線円内に示す。結果より、実験においても数値解析と同様アナログファクタの向上が確認された。しかし、伝熱と圧力損失の評価には定量的なズレが生じており、ここの一致は得られていない。原因として、数値解析で課していた主流方向及びスパン方向の周期境界条件が適切でなく、実験では上流の境界層発達部の影響が大きいと考えられる。また、マトリックスを囲む断熱材の隙間から熱が漏れてしまっていることも考えられるが、今後の課題事項とする。

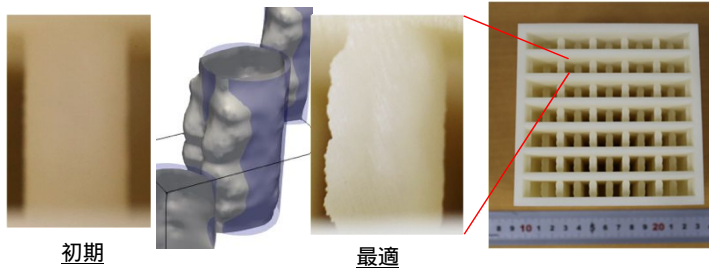


図 6 3D プリンタにて製作された供試体

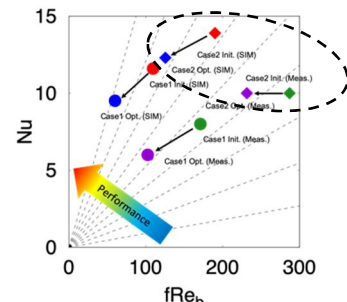


図 7 計測結果

(4) 工学利用に向けた制御メカニズムの解明

図 3 に示したピンフィン及び波状フィンの、本研究で開発した形状最適化アルゴリズムによる性能向上メカニズムを考察した。ここで紹介する最適化例は、アナログファクタの最大化としてコスト関数を設定している。既述した最適化による伝熱の変化と圧力損失の変化では、圧力損失の減少の方が著しく、結果アナログファクタの増加を達成している。一般的に、「乱流」である限りその混合効果によって高い伝熱性能を維持できる。そのため、圧力抵抗の減少が感度に顕著に現れることは理にかなっていると言える。最適化前後のピンフィンにおける主流方向及びスパン方向の速度変動から成るレイノルズせん断応力の分布を図 8a に示す。最適形状では著しく減少していることがわかる。これは上流方向にフィン構造が伸びて曲率が減少することでカルマン渦の放出を抑制し、フィン後流での圧力損失低下が抑制されていることを示唆している。一方、図 8 (b) に示す波状フィンの断面図では、波状フィン頂点付近で穴が形成されることで面内の流路面積が拡張しており、流量が増加していることから流路抵抗が低減していることがわかる。また、上流へと伸びる枝状の構造により、二次流れが誘起されて対流による混合が促進していることがわかった。

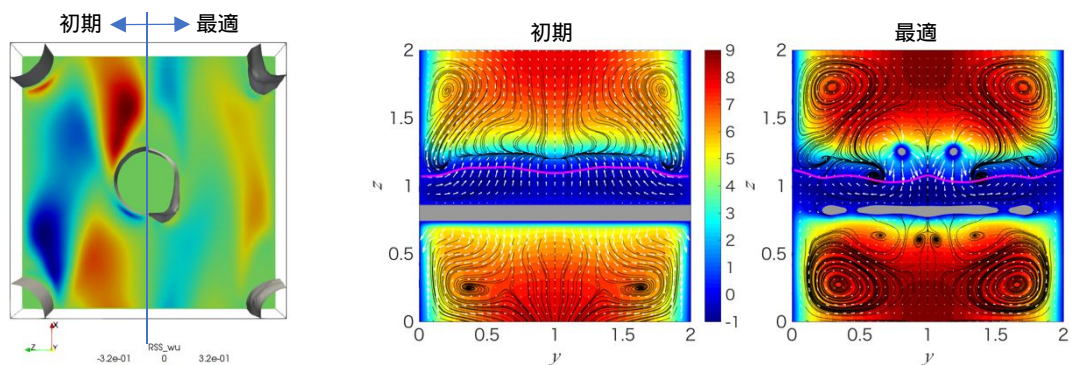


図 8 最適化前後の流れ場の変化。(a) ピンフィンにおける主流方向及びスパン方向速度からなるレイノルズせん断応力。(b) 波状フィンの主流方向断面内平均主流方向速度分布、黒線は面内流線を示す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

亀谷 幸憲、長谷川 洋介、乱流場における随伴解析に基づく複雑伝熱面の形状最適化、生産研究、査読無、70 巻、2018、29-32

DOI: <https://doi.org/10.11188/seisankenkyu.70.29>

〔学会発表〕(計 9 件)

国際会議

Kametani, Y. and Hasegawa, Y., "Adjoint-based shape optimization for complex heat

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

transfer surfaces in turbulent flows,” European Drag Reduction and Flow Control Meeting 2019 (EDRFCM19), Bad Herrenalb, Mar. 26-29 (2019).
Kametani, Y., Fukuda, Y., Osawa, T. and Hasegawa, Y., “Experimental assessment of heat transfer and pressure loss characteristics of optimal heat transfer surfaces,” 12th European Fluid Mechanics Conference (EFMC12), Vienna, Sept. 9-13 (2018).
Kametani, Y. and Hasegawa, Y., “Adjoint-based shape optimization for turbulent convective heat transfer with a hybrid RANS-DNS approach,” 16th International Heat Transfer Conference (IHTC16), Beijing, Aug. 10-15 (2018).
Kametani, Y. and Hasegawa, Y., “Adjoint-based shape optimization of heat transfer surface in turbulent flows with DNS-based eddy viscosity and diffusivity,” The 70th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, Denver, Nov. 19-21 (2017).
Kametani, Y. and Hasegawa, Y., “Shape optimization of three-dimensional solid-fluid interface for conjugate heat transfer,” The 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, Okinawa, Oct. 27-30 (2017).

国内会議

亀谷 幸憲、長谷川 洋介、「乱流場における伝熱面形状最適化アルゴリズムの構築と実証 1」, 第 55 回日本伝熱シンポジウム, 札幌, 2018 年 5 月 29 日-31 日。
福田豊、大澤崇行、亀谷幸憲、長谷川洋介、乱流場における伝熱面形状最適化アルゴリズムの構築と実証 2」, 第 55 回日本伝熱シンポジウム, 札幌, 2018 年 5 月 29 日-31 日。
亀谷 幸憲、長谷川 洋介、「随伴解析に基づく伝熱面の形状最適化及びその乱流熱伝達促進機構の考察」, 日本流体力学会年会 2017, 東京, 2017 年 8 月 30-9 月 1 日。
亀谷 幸憲、長谷川 洋介、「随伴解析を用いた非定常熱流体場における三次元伝熱面の形状最適化」, 第 54 回日本伝熱シンポジウム, 大宮, 2017 年 5 月 24-26 日。

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 2 件)

名称: ピンフィン、ピンフィン群及びタービン翼
発明者: 長谷川洋介、亀谷幸憲、大澤崇行、福田豊、飯田耕一郎
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特願 2017-206129
出願年: 2017
国内外の別: 国内

名称: 熱交換器
発明者: 高木勇輔, 島津知寛, 松村憲志郎, 水野安浩, 長谷川洋介, 亀谷幸憲
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特願 2017-144777
出願年: 2017
国内外の別: 国内

取得状況(計 0 件)

該当なし

〔その他〕該当なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

該当なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 長谷川 洋介
ローマ字氏名: HASEGAWA, Yosuke
研究協力者氏名: 深潟 康二
ローマ字氏名: FUKAGATA, Koji

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。