

プラント機器を低コストで実機投入できる： 機械学習を活用した熱流動場予測モデルの構築

Thermal-Fluid Analysis with Reduced Computational Cost and Improved Accuracy:
Construction of a Genetic-Algorithm-Based Turbulence Model



小田 拓央^{*1}
Takuo Oda

Richard D. Sandberg^{*2}

本報では、複雑な熱流動場の高精度かつ低コストな解析を実現するため、遺伝的アルゴリズムの一種である Gene Expression Programming を用いてシンボリックな乱流応力及び乱流熱流束モデルを構築する技術を紹介する。適用例として、熱成層現象を対象として、高精度解析結果から乱流モデルを構築し、従来モデル並みの解析コストで高い予測精度を実現した事例を示す。また、現在開発を進めている、試験結果を教師データとするモデル構築手法についても概説する。これらの技術は、製品開発における解析負荷の低減と予測精度向上を両立する基盤技術として期待される。

1. はじめに

三菱重工業株式会社(以下、当社)における製品開発では、原子力発電プラントや化学プラント、ターボ機械など多種多様な分野において複雑な熱流動場の高精度な評価が求められている。製品の安全性や性能を確保するためには、流体の乱流挙動や熱輸送現象を予測するために数値流体力学(Computational Fluid Dynamics 以下、CFD)が不可欠である。CFD を設計開発に適用する際には、計算時間や解析負荷を抑制しつつ、信頼性の高い解析を実現することが重要な課題である。

一般的な Reynolds-Averaged Navier-Stokes(以下、RANS)解析は計算負荷が比較的低い一方で、複雑な熱流動場における乱流・熱輸送の非等方性を十分に捉えきれず、予測精度に限界がある。対照的に、Large Eddy Simulation(以下、LES)など高精度な解析手法は解析精度に優れたものの、計算コストが非常に大きく、設計検討の現場における実用性は限定的である。

そこで本報では、遺伝的アルゴリズムの一種である Gene Expression Programming(以下、GEP)を活用し、高精度な LES の結果を基に RANS 解析に適用可能な非線形の乱流応力及び乱流熱流束モデルを構築する新たな乱流モデリング手法について紹介する。図 1 は垂直円管内の自然対流現象に本技術を適用し、鉛直方向の速度場を可視化した結果である⁽¹⁾。本体系では、構築したモデルを適用することで、LES の数十分の 1 の解析コストで同等の精度を得ることができている。

本技術は、当社が扱う多様な熱流動の課題に対し、解析の効率化と精度向上を両立させる基盤技術としての展開が期待される。

*1 三菱重工業株式会社 総合研究所 伝熱研究部

*2 Department of Mechanical Engineering, The University of Melbourne, Professor, PhD (Aerospace Engineering)

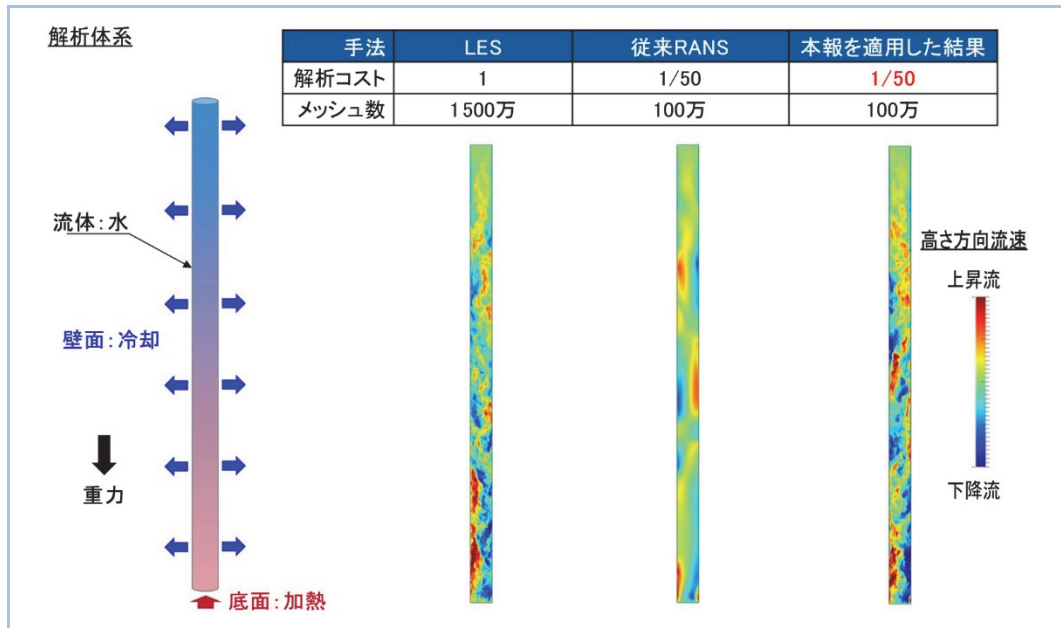


図1 垂直円管内の自然対流に本技術を適用した結果

2. GEP による乱流モデリング

遺伝的アルゴリズムの一種である GEP を用いた乱流モデリング手法について述べる。図 2 に本技術の概要をまとめる。

2.1 GEP の概要

GEP は進化的アルゴリズムの一種で、数学的関数やモデル式を遺伝子情報として表現し、突然変異や交叉等の遺伝的操作により最適解を探索する手法である。本手法は、比較的自由度の高いモデル構築が可能であり、複雑な非線形関係を説明可能な代数式として抽出できる点の特徴である。

2.2 乱流モデル構築の手法

本研究では、LES から得られた速度・温度場のデータを用いて、RANS 解析で使用する以下の 2 種類のモデルを GEP により構築する。これらのモデルを従来モデルに代えて使用することで、RANS 解析の精度を飛躍的に向上させている。

(1) 非線形レイノルズ応力モデル

従来の RANS 解析では、Boussinesq 近似による線形の応力-変形速度関係を仮定している。本手法では複数の非線形テンソル基底関数の最適な組合せを、速度勾配テンソルの不変量などを入力として進化的に探索させることで、この関係を非線形関係に拡張する。これにより、従来のモデルでは困難であった乱流の異方性を表現することが可能となる。

(2) 乱流熱流束モデル

従来の勾配拡散仮説に基づく一定の乱流プラントル数に代わり、温度勾配や速度勾配の不変量を入力とした非線形関数として乱流プラントル数をモデル化する。これにより、乱流による異方的な熱輸送を表現することが可能となっている。

2.3 データ準備とモデル学習プロセス

教師データとして、LES の結果として得られる平均速度・温度場、及び乱流統計量を用いる。GEP はこのデータを基にコスト関数（通常はモデル予測と参照データの差）を最小化するように 2 つのモデル式を進化的に求める。

2.4 モデルの特徴と実用性

構築されたモデルは代数的な式として表現され、既存 CFD ソルバーに容易に組み込み可能である。さらに、同様の支配現象を有する対象であれば、トレーニングに用いられなかった異なる熱流動場への適用性を持ち、適用範囲の汎用性を備えていることが後述の例で示されている。

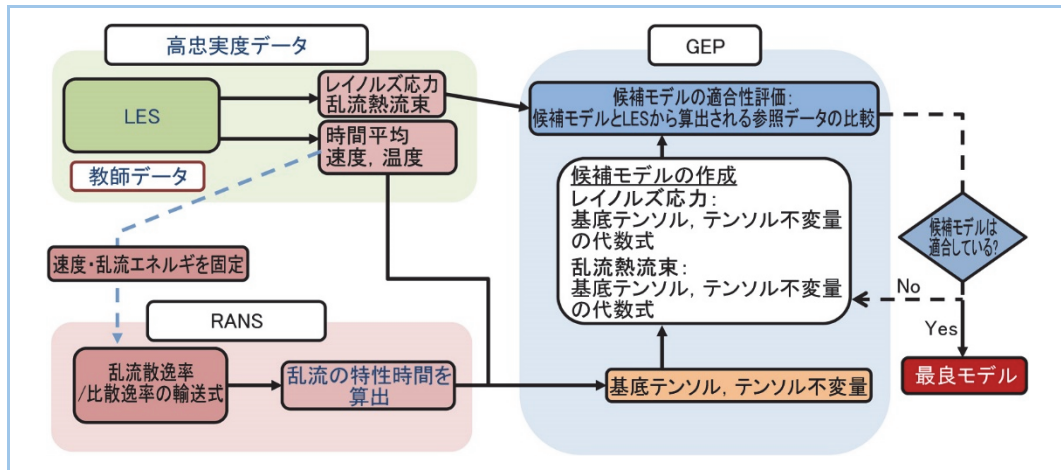


図2 GEPによる乱流モデリングフロー

3. 熱成層問題への適用例

3.1 熱成層現象の概要

熱成層現象は、温度差による密度差が浮力を生み、流体内に安定な層状構造を形成する現象である。タンク内で高温流体が低温流体中に注入される場合などに顕著に発生し、流体混合の抑制や急峻な温度分布を引き起こす。これらは構造物に熱応力集中を招く等、機器への悪影響を及ぼす可能性があり、設計段階での正確な予測が重要となる。

3.2 解析条件とモデル適用

本適用例では、代表的な熱成層問題として、タンク内における熱成層の崩壊現象を対象とした。モデル構築用の教師データには、公知文献⁽²⁾の試験結果で検証したLESの解析結果を使用した。一方で、テストデータとしては、当社で実施した要素試験の結果を使用した。図3に教師データとテストデータの解析体系を示す。解析には2章で紹介した非線形乱流応力モデル及び乱流熱流束モデルを組み込んだRANS方程式を用いた。比較のため、従来のRANSモデルでも解析を実施し、熱成層の崩壊挙動を評価した。

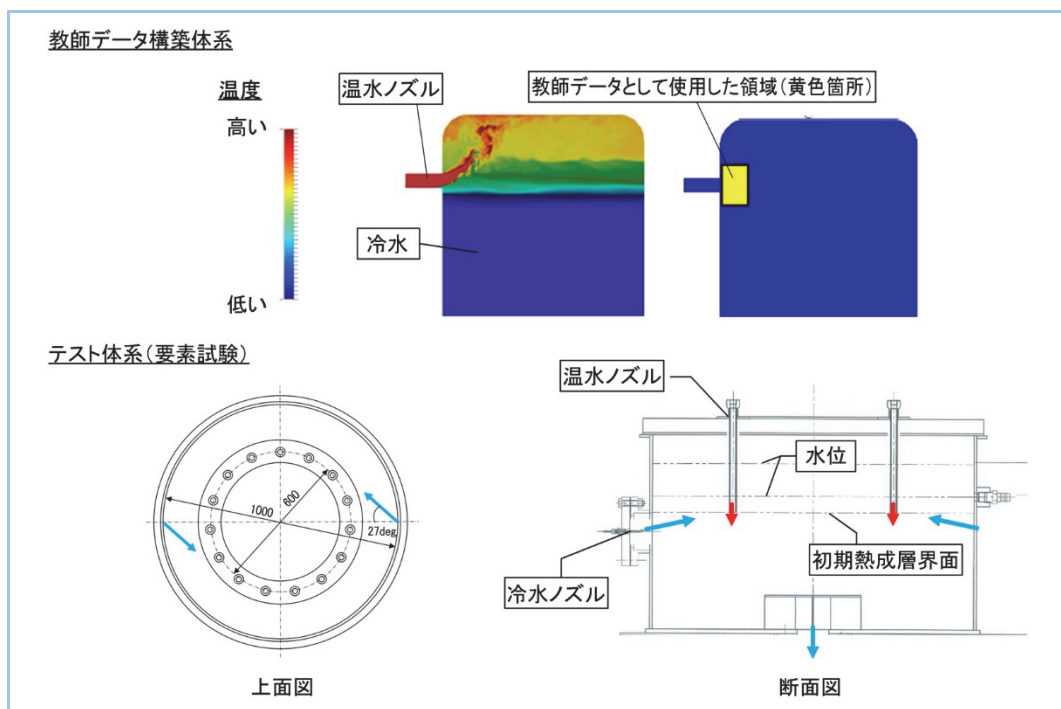


図3 熱成層現象の教師データ構築体系及びテスト体系

3.3 解析結果と考察

図 4 に示すとおり、GEP によって構築されたモデルセットでは、熱成層崩壊挙動が従来モデルに比べて、より実測に近い結果が得られた。また、計算コストは従来の RANS 解析とほぼ同等であり、LES と比較して大幅な負荷低減を実現している⁽³⁾。

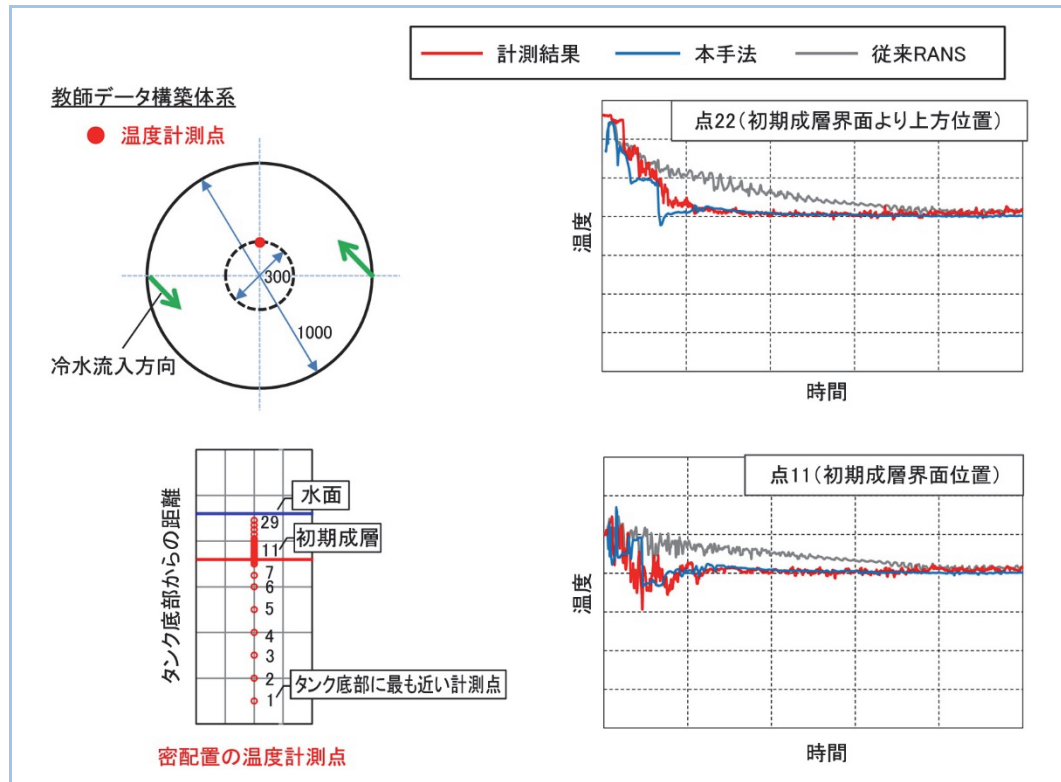


図4 要素試験の解析結果例

4. 限られた試験データを用いたモデル開発の取組み

現在、当社では限られた試験データを活用した乱流モデリング手法の開発に取り組んでいる。従来のモデル開発手法では、LES データを教師データとして用いていたが、これらの取得には多くの計算資源が必要であった。一方で、現在開発中の手法では、試験データを直接教師データとして用いることが可能であるため、LES 解析に依存することなく、例えば既存の社内試験データを活用した乱流モデリングが可能になる。

具体的には、試験で計測された速度・温度場のデータと、前述の 2 つのモデルを実装した RANS 解析結果との差異を評価指標とし、これを基に GEP により乱流モデルの関数形やパラメータを進化的に決定する。本手法を用いることで、より数値安定性が高く、速度と温度の連成効果が顕著な熱流動場の乱流モデルの獲得を目指している。図 5 は本手法のフローを模式図として示したものである。図 6 は、本手法を水平円管内の自然対流に適用した結果であり、従来の RANS 解析よりも、参照結果に近い結果が得られることが示されている。今後は、本手法を実際の製品規模の課題に対して適用し、手法の有効性を確認していく。

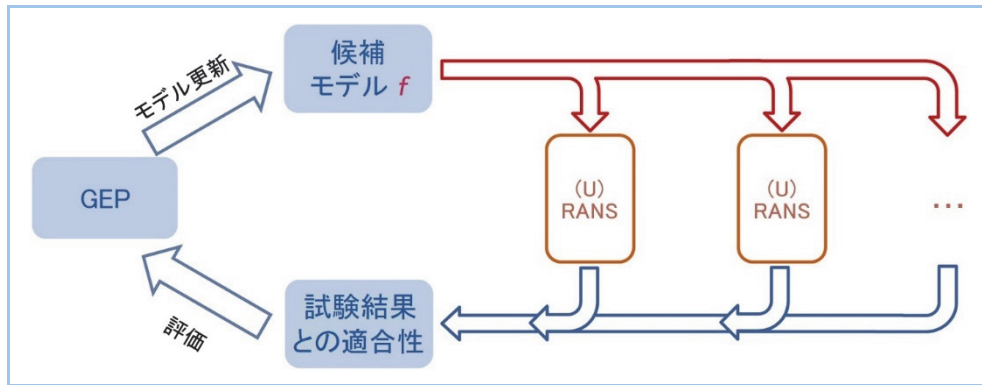


図5 試験データを教師として用いる乱流モデリング手法

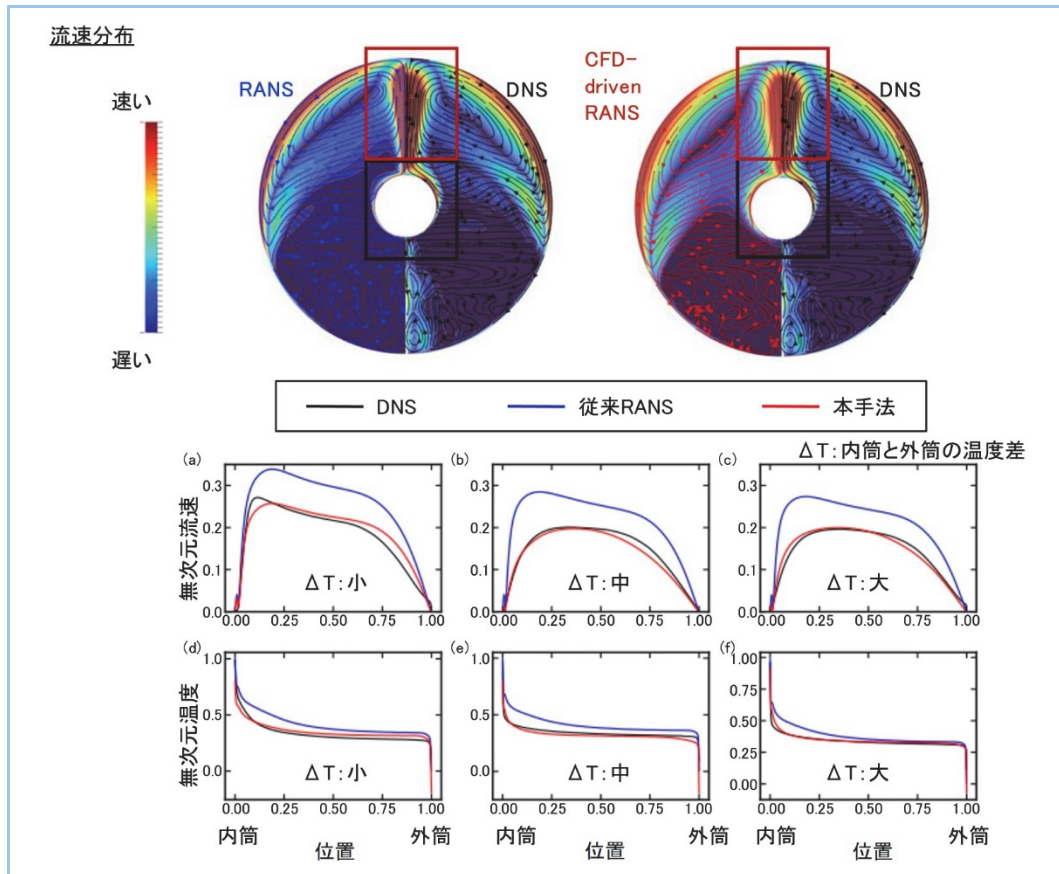


図6 現在開発中の手法を用いた水平円筒内の自然対流解析結果

5. まとめ

本報では、遺伝的アルゴリズムの一種である GEP を活用し、教師データを基に非線形の乱流応力モデル及び乱流熱流束モデルを構築する手法を紹介した。本手法を熱成層問題に適用した結果、従来の解析モデルでは評価が困難であった熱成層の崩壊挙動を高精度に予測できることを示した。解析負荷は従来の RANS 解析とほぼ同等であるため、設計段階での実用性が高いことが確認された。

開発中の、試験データを直接教師データとして用いるモデリング手法を概説した。これにより、計算負荷の高い LES データに依存せず、実測データを活用した高精度かつ安定的なモデル構築が可能となる。浮力流の簡易例題では、本手法を用いることで従来モデルよりも精度の高いモデルが得られた。現在、製品規模の課題に対する適用と有効性の検証を進めている。

今後は、これらの手法の適用を拡大し、より複雑な熱流動現象や実製品への対応を進めることで、当社製品開発の効率化と信頼性向上に貢献していく。

謝辞

本研究は、メルボルン大学機械工学科の Sandberg 教授との共同研究により進められました。教授の長年にわたるご指導と貴重なご助言に深く感謝するとともに、多大なご支援をいただいた同大学の関係者の皆様にも厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) Haghiri, A. et al., Improving a Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Model for High-Rayleigh-Number Natural-Convection Flows Using Machine Learning. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 147(1), (2025).
- (2) Baeten, B. et al., A validated model for mixing and buoyancy in stratified hot water storage tanks for use in building energy simulations. *Applied Energy*, 172, (2016), 217-229.
- (3) Oda, T. et al., Study on the applicability of a machine-learning framework to improve modeling for the stratification phenomenon. In *International Conference on Nuclear Engineering*, Vol.86434, (2022)