

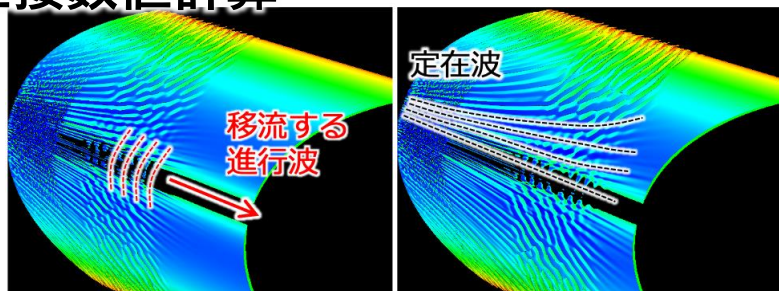
ワークショップ 数理・計算・データに基づく流体解析の最前線
2025年6月12日 14:00-14:40

データ同化による 流体モデルの最適化とその応用 (公開版)

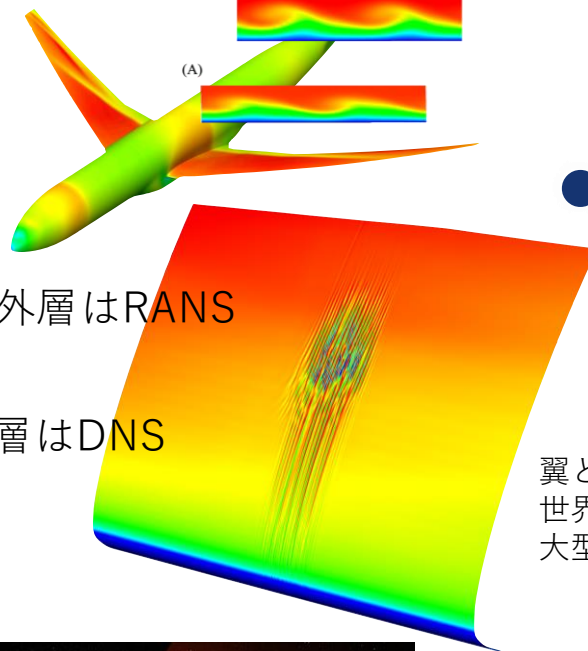
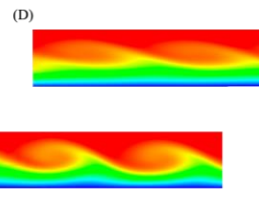
焼野 藍子

東北大学 流体科学研究所

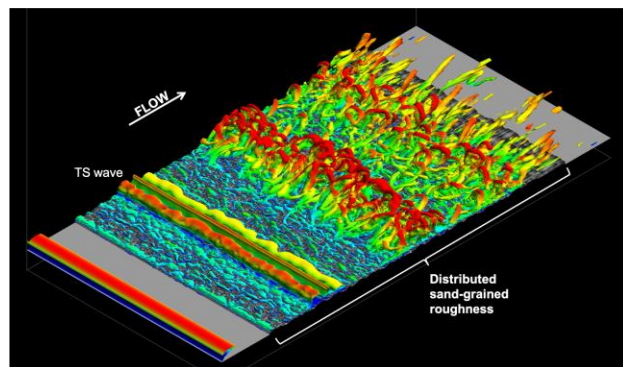
● 実機巡航条件での遷移を再現する最高忠実*な 直接数値計算



逆ハイブリッド計算による実機巡航条件
($M0.85$, $Re1.7 \times 10^7$)
での遷移の再現
(NEDOプロジェクト)



● 微小壁面粗さの抵抗低減効果の提案 特許登録 第7609489号 (2024.12.23)



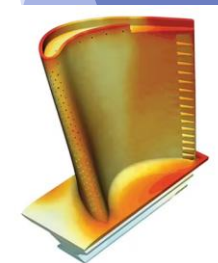
2024年5月 (1回目)
2025年2月 (2回目)
MSBS装置を用いた
DMR (特許登録)
実証試験に成功

● 羽田空港や那覇空港の乱気流の予測 国土交通省の航空事故調査に協力



● 「分岐」予測と制御の重要性

JST CREST に採択 (代表 焼野藍子)
「非線形・散逸・偶然性の動力学」



ガスタービンの温度分布

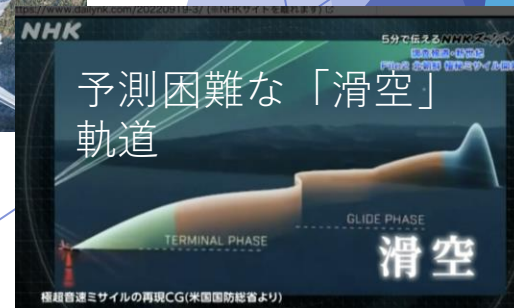
翼とノーズに層流化を施し
世界シェア1位となったホンダジェット
大型機や高速域では未だ困難



ホンダ
ジェット
HPより



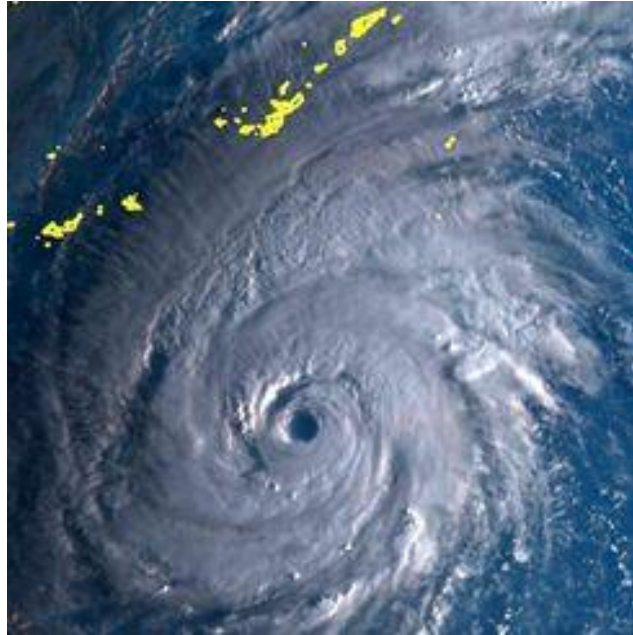
アポロカプセル極超音
速境界層の遷移予測
(JAXA委託研究など)



極超音速飛行体の再現CG (米国国防省より)

観測&実験とシミュレーションを繋ぐデータ同化

自然現象

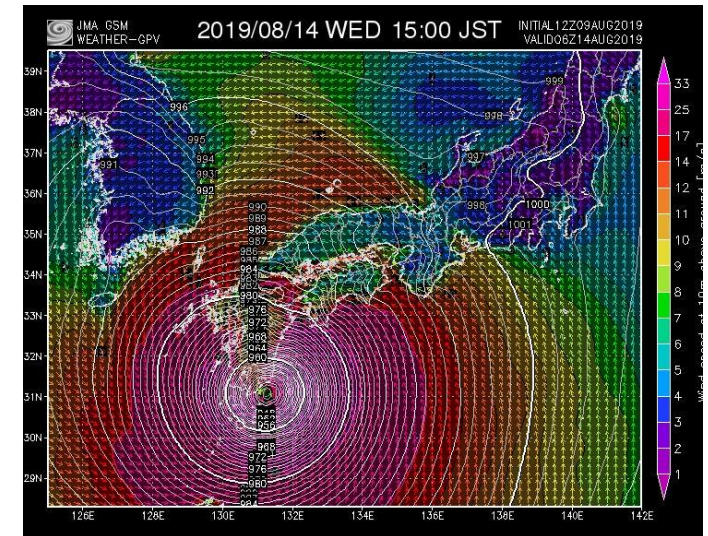


ひまわり8号 衛星写真

観測

- 風速
- 温度
- 湿度
- etc.

シミュレーション
(多次元, 多変数の情報)



GPV気象予報

観測&実験の問題点

- データが粗い, 不連続
- データに誤差が多い

シミュレーションの問題点

- 予測に時間がかかる
- 計算モデル自体が不確実 (乱流モデルのパラメータ値など)

まとめ

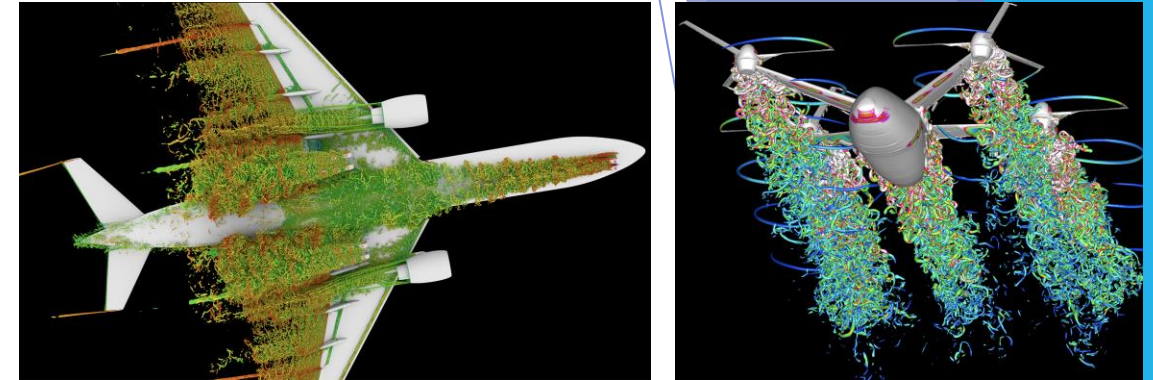
1. 疑似観測値を用いた双子実験によるパラメータ推定とデータ同化手法の検証
 - データ同化により真値に近いパラメータを推定
 - 適応型シミュレーションで真値の流れ場に近いストローハル数を取得
2. PSP観測値を用いたデータ同化によるパラメータ推定の実施
 - 適応型シミュレーションによりPSPデータのような周期的な振動を再現
 - 取得したストローハル数は観測データと少し異なる

今後の課題

- 適応型シミュレーションのストローハル数を観測値に近づけるためのデータ同化・計算条件の検討
 - 推定するパラメータの検討
 - 観測点数やデータ同化ステップ以外の条件の検討

航空機設計におけるCFD

- 設計の効率化に寄与
- 計算コストの点から(U)RANS計算の利用
- (U)RANSでは複雑な3次元の流れの予測は困難
- 渦放出流れなどの高精度な予測が、CFDの設計の道具としての信頼性の向上に寄与



航空機周りの複雑な流れ場[1]

(U)RANS計算の不確かさ要因

• Boussinesq近似

レイノルズ応力 $\tau_{ij} = \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} - 2\mu_T S_{ij}$

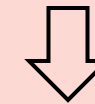
k : 乱流エネルギー

μ_T : 乱流粘性

S_{ij} : ひずみ速度

非等方成分

レイノルズ応力とひずみ速度を線形で仮定



乱れの非等方性を扱うことができない

複雑流れの予測精度の向上のためには適切な乱流のモデリングが必要

先行研究

- 進化計算アルゴリズムを用いて, LES結果から得られるレイノルズ応力の非等方成分を教師データとしてレイノルズ応力の非等方テンソルclosureを構築し $k - \omega$ SST モデルへ適用(2方程式モデル)^[1]
- CFD駆動の進化計算フレームワークのSAモデル(1方程式モデル)へ適用^[2]

非等方テンソルのclosure構築

レイノルズ応力に非等方成分の項を追加

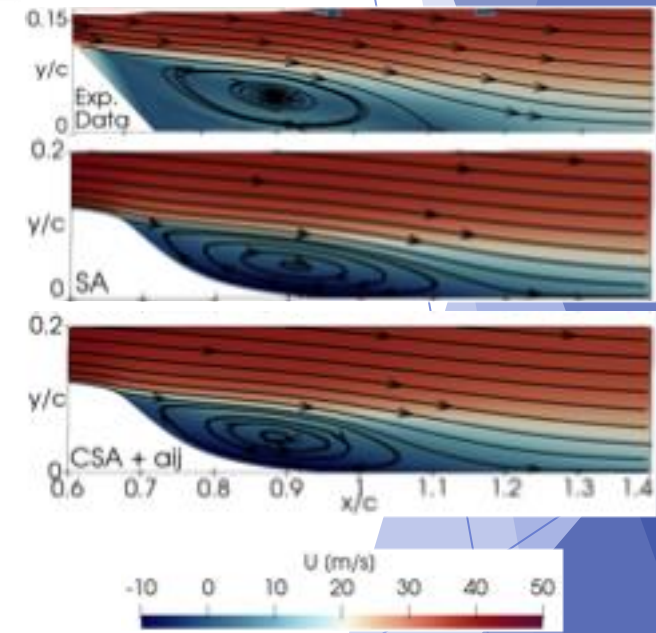
$$\tau_{ij} = \frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} - 2\mu_T S_{ij} + a_{ij}$$

closure構築により参照値に近い流れ場を取得している

Reference

Baseline

Developed model



CFD駆動のフレームワークが一方程式モデルのURANS計算で実行されていない
流れの非定常な特徴量を目的変数とした乱流のモデリングは行われていない

[1] Weatheritt, J., et al. (2016) A novel evolutionary algorithm applied to algebraic modifications of the RANS stress-strain relationship, *J. Comput. Phys.*, 325, 22-37.

[2] Di Fabbio, T., et al. (2024). Strategies for Enhancing One-Equation Turbulence Model Predictions Using Gene-Expression Programming, *Fluids*, 9 (8), 191.

参考文献

- ▶ Unsteady RANS simulations of vortex shedding using a closure developed by a CFD-driven machine learning framework (CFD 駆動の機械学習フレームワークにより作成される closure を用いた渦放出流れの非定常RANS 計算)

Atsuhito Kawabata

Master's Thesis, Tohoku University, 2024年1月29日

- ▶ Reproduction of unsteady observation data by optimization of turbulence model parameters using data assimilation

Atsuhito Kawabata, Aiko Yakeno, Shigeru Obayashi

Turbulence, Heat and Mass Transfer 10, 2023年9月13日

- ▶ [学会発表] Unsteady RANS simulations of vortex-shedding using CFD-driven machine-learned turbulence closure

Atsuhito Kawabata, Aiko Yakeno, Richard D. Sandberg

International Conference on Fluid Dynamics (ICFD2024), 2024年11月19日