

平成 30 年度 名古屋大学 HPC 計算科学連携研究プロジェクト報告書

研究課題代表者: 乙黒 雄斗 (早稲田大学 理工学術院)

研究課題名: 大規模計算機のための高次精度時空間計算手法による非定常流体シミュレーション

研究概要

本研究は時間スケールの異なる非定常流体問題に対する計算時間の短縮を目指す研究である。近年の大規模計算機の発達により、従来不可能であった大規模解析や高精度の解析が可能となってきた。しかし非定常流体計算のような、多くの計算ステップを必要とする問題に対して、より規模の大きい計算機を用いても計算時間を短縮することは困難である。このような問題に対しては、HPC 計算科学と数値計算手法の双方からのアプローチが必要である。

そこで本研究では、時間・空間の双方向に高次精度の計算手法を構築することで、対象とする現象を再現するために必要なステップ数を大幅に低減し、目標とする結果を得るまでの時間を短縮する。まず、1次元の理論計算を用いて提案する時空間計算手法が優位であることを示した。また非定常2次元計算を行い、より少ない計算ステップ数で十分な計算精度を保つことを示した。

研究結果

まず、本研究で提案する時空間高次精度計算手法が従来の手法に比べて優位であることを示す。Courant 数と解の精度の関係は計算手法の精度によって支配される。ここでは1次元の移流方程式に対する解析を行う。図 1,2 は無次元化周波数 kh に対する位相誤差 $|1 - \tilde{\omega}/\omega|$ とゲイン誤差 $\tilde{\xi}/\tilde{\omega}$ を示している。チルダ付きの記号は計算による解をそうでないものは真の値を示している。図 1 は空間に線形の基底関数を用い、時間を差分近似した従来の有限要素法による計算を表している。この図から空間に線形の基底関数を用いた場合 4 次精度あることがわかる。一方で時間方向を差分近似した場合、大きい Courant 数による低周波数領域では解の精度が落ちていることが確認できる。図 2 は空間

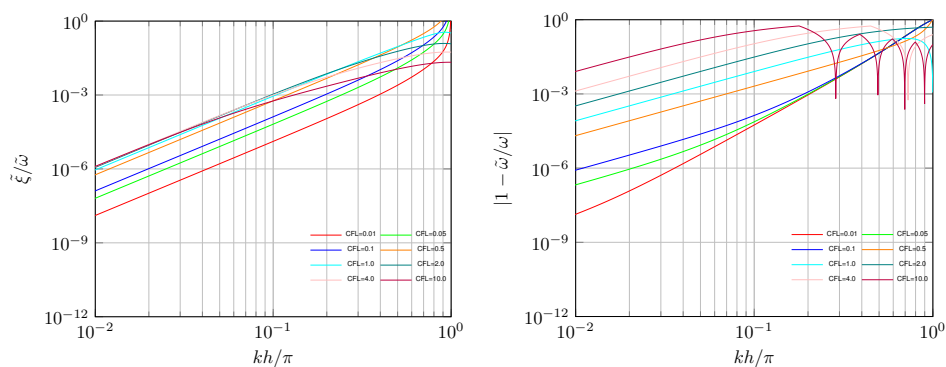


図 1 Error from the stability and accuracy analysis. Linear in space and finite difference in time. *Left* is gain error. *Right* is phase error.

に C^1 B-splines 基底関数を、時間に線形の基底関数を用いた計算手法による結果を表している。図 2 から空間に C^1 B-splines 基底関数を用いた場合 6 次精度あることが確認できる。また、時間方向に線形の関数を用いた場合、より高い Courant 数においても高い精度で計算できることがわかる。したがって、時空間に高次の基底関数を用いる手法を用いることで非定常流体計算において、これまでより少ない計算ステップで計算できることが期待される。

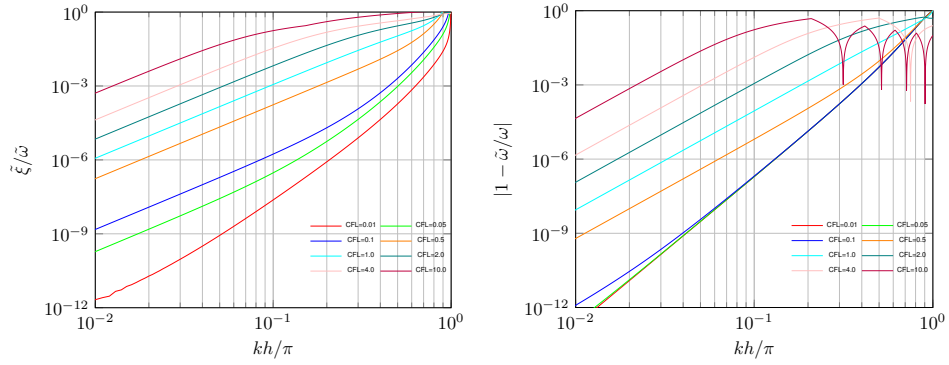


図2 Error from the stability and accuracy analysis. C^1 B-splines in space and linear in time. *Left* is gain error. *Right* is phase error.

次に時空間高次精度の計算手法を用いて2次元の垂直軸型風車の計算を行った。ここでは、空間に線形の基底関数、時間に線形の基底関数を用いた計算手法と空間に2次のNURBS基底関数、時間に線形の基底関数を用いた計算手法でそれぞれ計算を行い、結果を比較した。また、それぞれ格子解像度の異なるメッシュを3種類用意し、時間刻み幅の異なる2種類で計算し、計12の計算を行った。計算結果よりパワー係数を算出し、比較を行った。図3に同じCourant数における結果を4つ示す。

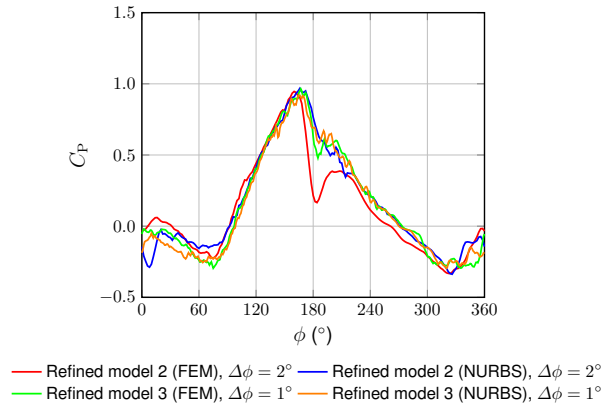


図3 2D VAWT. The comparison of the power coefficients at the same Courant number.

これらの計算結果から、本研究で提案する高次精度時空間計算手法はこれまでの手法に比べて、より粗い計算格子と大きな時間刻み幅で十分な精度を保った解析が可能であることを示した。

研究成果

査読付き学術雑誌論文

1. Y. Otoguro, K. Takizawa, T.E. Tezduyar, K. Nagaoka, R. Avsar and Y. Zhang, “Space-time VMS flow analysis of a turbocharger turbine with isogeometric discretization: computations with time-dependent and steady-inflow representations of the intake/exhaust cycle”, *Computational Mechanics*, DOI: 10.1007/s00466-019-01722-2 (2019).