

共同利用(産業利用トライアルユース:先端研究施設共用促進事業『みんなのスパコン』TSUBAME によるペタスケールへの飛翔) 成果報告書 平成 21 年度 戦略分野利用推進「大規模流体-構造連成解析技術の開発」

利用課題名: 流体構造連成シミュレーションによるターボ機械流体関連振動解析技術の実用化
英文: Practical Development of Analysis Method for Flow Induced Vibration on Turbomachinery by Flow-Structure Interaction Simulation.

清水 駿助
Shunsuke SHIMIZU

株式会社荏原製作所 風水力機械カンパニー 開発統括部
Fluid Machinery Development Division, Fluid Machinery&Systems company, Ebara Corp.

邦文抄録: ターボ機械において高速化・コンパクト化等によって流体内部に働く非定常な変動力が増加することで羽根車やケーシング並び軸受部等に振動や破損が生じるといった流体関連振動の問題が多く発生し、ターボ機械開発における信頼性向上並びに省エネルギー化、環境負荷低減に対して妨げとなっている。本利用課題では、ターボ機械のオフデザイン運転領域における流体関連振動を高精度に予測することによってターボ機械の最適・健全設計に有効且つ実用的な予測技術を開発することを目的としている。本報告では、流体関連振動の原因と考えられる流体内部に発達した非定常不安定流れを再現する予測技術として LES 乱流モデルを用いた非定常流体解析を適用することによって不安定流れに起因するインデューサ付きディフューザポンプの揚程ストール特性についてより高い精度の予測結果が得られた。

英文抄録: The highly accurate estimation of the flow induced vibration phenomena in their off-design points, makes turbomachineries more optimized and more reliable. In order to estimate the flow induced vibration in the turbomachinery, it is very important to precisely simulate the unstable flows in the passages, for example, reverse flow and the flow with large separation. In this report, by means of the unsteady flow analysis based on LES turbulence model, we can obtain more accurate prediction of the stall characteristics for an axial diffuser pump with an inducer rotor, which is caused by unstable flows.

Keywords: LES, Flow induced vibration, Reverse flow, Stall characteristics, Diffuser pump

背景と目的

発電、水循環、対洪水等防災設備、石油化学プラントなど、既設インフラの大容量化や高効率化、省エネルギー化・省資源化にとって流体機械の高速化並びにコンパクト化が重要な技術課題である。一方、ターボ機械において高速化・コンパクト化等によって流体内部に働く非定常な変動力が増加することで羽根車やケーシング並び軸受部等に振動や破損が生じるといった流体関連振動の問題が発生することがあり、社会基盤を支えるターボ機械開発において信頼性向上並びに省エネルギー化、環境負荷低減に対する課題となっている。

本利用課題では、ターボ機械のオフデザイン運転領域における流体関連振動を高精度に予測することによってターボ機械の最適・健全設計に有効且つ実用的な予測技術を開発することを目的としている。本報告書では、流体関連振動の原因と考えられる流体内部に発達

した非定常不安定流れを再現する予測技術として LES 乱流モデルに基づく非定常流体解析を用いることによって、より精度の高いポンプ性能予測が可能となった。

概要

ターボ機械の開発において、近年高速化並びにコンパクト化が進められるに従い装置内の非定常な流体変動力(以下、非定常流体力)が増加することによって、流体现象と構造振動現象が連成した振動問題が重要な技術課題となっている。このような流体関連振動問題に対して、非定常流れ現象が顕著となるオフデザインポイントにおける非定常流体力の定量的評価が重要となる。現在、このような非定常流れ現象を解析的に定量評価する予測技術としてラージエディシミュレーション(Large Eddy Simulation、以下 LES)モデルに基づく非定常乱流解析手法が高精度かつ有効であることが

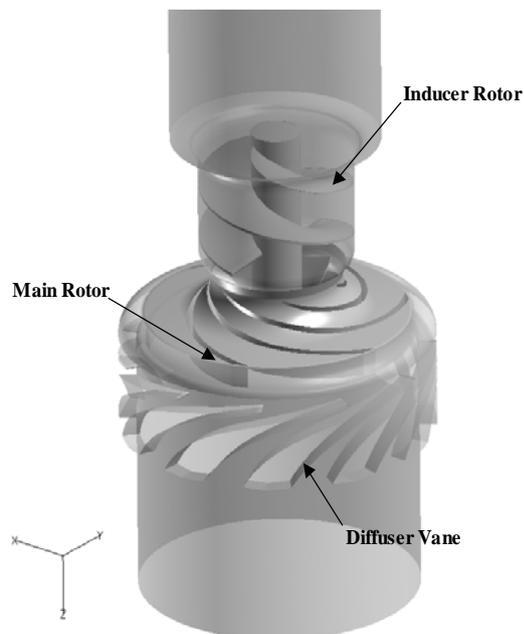


図1: インデューサ付きディフューザポンプ

数多く示されている¹⁻⁵⁾。そこで本利用課題では、図1のような遠心羽根車の前段にインデューサと呼ばれる吸込性能向上のための羽根車を取り付けた形態のディフューザポンプ(以下、インデューサポンプ)に対して、LES 乱流モデルを実装した流体解析ソフトウェア FrontFlow Blue²⁻⁶⁾を適用することにより、該当ポンプのオフデザインポイントとなる少流量領域におけるストール不安定特性⁷⁻¹⁰⁾についてその再現性の検証を行った。

結果および考察

インデューサポンプの揚程性能評価について、モデル試験結果との比較のため、表1のように合計 11 ケースの解析を実施した。ここで表中、準非定常解析及び非定常解析とはそれぞれ、羽根車の回転位相を固定した LES 解析、及び、回転位相の時間変化を考慮した LES 解析と対応させている。

解析結果によるポンプ揚程性能曲線を図2に示す。図中、該当ポンプのデザインポイント流量比 100%より大きい大流量側では準非定常並びに非定常の解析共にモデル試験結果とよい一致が得られている。一方、モデル試験結果においてストールによる揚程低下が見られる、流量比 100%より少流量側の領域について、準非定常

| | ケース数 | 解析流量比 | | | | | | | | |
|--------|------|-------|-----|-----|---|-----|-----|------|------|---|
| | | 0% | 12% | 30% | — | 57% | 70% | 100% | 141% | |
| 準非定常解析 | 7 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 非定常解析 | 4 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

表1: 解析ケース

解析では顕著な揚程低下が見られないのに対し、羽根

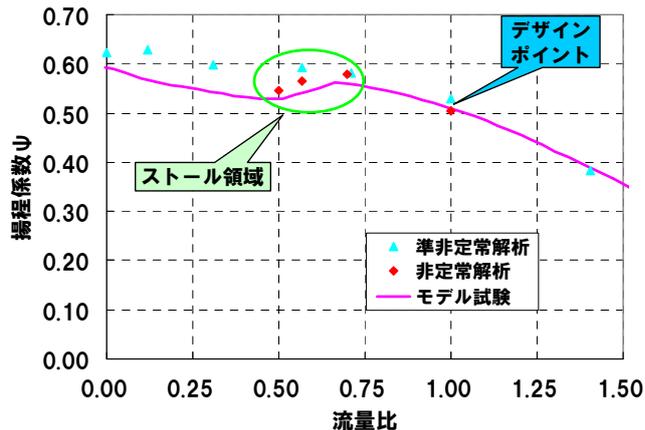
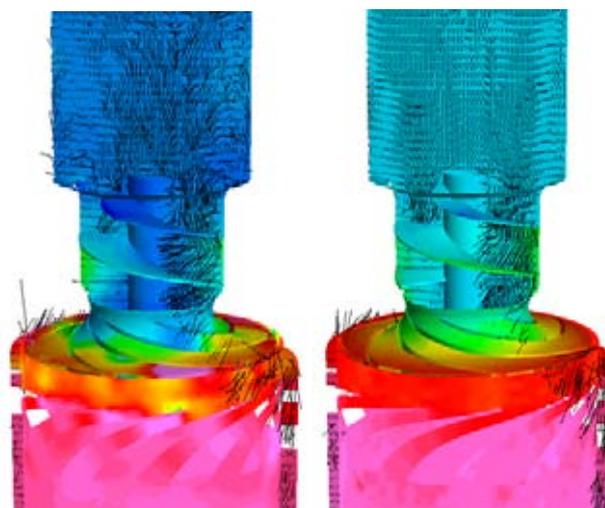


図2: 揚程性能曲線

車の回転を考慮した非定常解析では揚程曲線右上がりのストール特性がよく再現されていることが確認できる。

流れ場の比較として、揚程低下が見られるストール領域の流量比 50%と流量比 100%における瞬時流れ場分布をそれぞれ図3に示す。本図では少流量側流量比 50%においてインデューサポンプ入口付近で見られる逆流領域が大きく発達していることが確認できる。

このような入口逆流の発達にはポンプ性能の低下だけでなく異常振動発生の原因となるキャビテーションサージ現象と関連していると考えられており、本利用課題の主題である流体構造連成現象のシミュレーション対象として非常に興味深い。本利用課題内で試験的に実施したキャビテーションモデルを適用した LES 非定常解析の結果を図4に示す。



a) 流量比 50% b) 流量比 100%

図3: 瞬時流れ場分布の比較

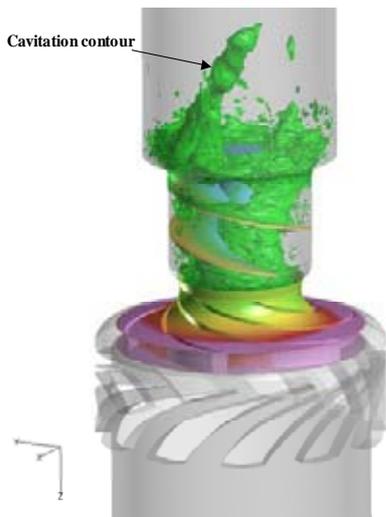


図4: キャビテーション予測結果
(瞬時ボイド率分布)

まとめ、今後の課題

インデューサ付きディフューザポンプに対して LES 乱流モデルを用いた非定常乱流解析を適用した結果、オフデザインポイントとなる少流量領域におけるストール不安定特性の再現性において実験値とよい一致が得られた。

今後はこのような不安定流れで発生する非定常流体力の定量的評価に加え、構造振動を解析するための流体構造連成解析へと発展させる必要がある。

謝辞

本利用課題では、文部科学省次世代 IT 基盤構築のための研究開発「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」プロジェクトにおいて開発された成果を利用させていただいた。ここに関係者各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) Jang, C.M., *et al.*, "Large Eddy Simulation of Vortical Flow In a Half-Ducted Propeller Fan", ASME FEDSM 99-6850, 1999.
- 2) 加藤千幸, 他, "LES による斜流ポンプ内部流れの非定常解析(第 1 報, 解析手法)", 生産研究, 52-1, 2000.
- 3) Kato, C., *et al.*, "An Overset Finite-Element Large-Eddy Simulation Method with Applications to Turbomachinery and Aeroacoustics", Trans. ASME, Jour. Appl. Mech., 70, 2003.
- 4) 王宏, 他, "多段遠心ポンプの流体-構造連成解析

(第一報, LES による非定常内部流れ解析)", 生産研究, 56-1, 2004.

5) Nagahara, T., *et al.*, "Investigation of the Flow Field in a Multi Stage Pump by Using LES", ASME FEDSM 2005-77319, 2005.

6) Kato, C., *et al.*, "Large Eddy Simulation of Unsteady Turbulent Wake of a Circular Cylinder Using the Finite Element Method", ASME FED, 117, 1991.

7) Hergt, P., *et al.*, "Flow Patterns Causing Instabilities in the Performance Curves of Centrifugal Pumps with Vaned Diffusers", Proc. 2nd Int. Pump Symp., 1985.

8) Guelich, J., *et al.*, "Influence of Flow between Impeller and Casing on Part-Load Performance of Centrifugal Pumps", 3rd Joint ASCE/ASME Mech. Conf., 81, 1989.

9) Eisele, K., *et al.*, "Flow Analysis in a Pump Diffuser - Part I LDA and PTV Measurements of the Unsteady Flow", Trans. ASME, Jour. Fluids Eng., 119, 1997.

10) 渡辺啓悦, 他, "流れ解析によるインデューサ付きディフューザポンプの設計流量ならびに部分流量における非定常流れ場の検討", JSME 論文 B, 75-753, 2009.