

実機単段遠心ブロワで生じるサージ点近傍非定常失速現象の大規模圧縮性 LES 解析

塚本和寛

日立製作所 研究開発グループ

1. はじめに

遠心ブロワをはじめとした遠心式のターボ機械は、石油化学プラントや水処理施設、家電品などで気体の圧縮、送風工程において広く用いられている。古くからの課題ではあるが、顧客や製品使用環境下における運用ニーズに柔軟に応えるために、遠心ブロワの作動範囲拡大が求められている。

作動範囲拡大のためには、設計点の低流量側の運転限界点（サージ点）付近で生じる非定常現象の分析及び抑制が必要である。サージ点で生じるサージングは、ターボ機械の上流・下流の配管も含めた配管系全体の圧力変動現象であるが、その発生はターボ機械内で生じる非定常流動現象に起因するものと考えられている。本研究で対象とする遠心ブロワといった遠心式のターボ機械は、サージ点近傍の低流量側運転点において、羽根車の下流に設けられたベーンレスディフューザで旋回失速と呼ばれる非定常現象が生じることが古くから知られている^[1]。旋回失速をはじめとした非定常現象の分析及び理解が作動範囲拡大のためには重要な点である。

遠心式のターボ機械で生じる非定常現象の分析について、これまでも多くの報告がなされており、それらの報告によって失速現象が生じている流れ場の定性的な理解が進んでいる^{[2][3]}。しかし、非定常現象を対象に顧客ニーズに応じて寸法や風量、圧力が変化する製品設計で活用可能となる一般的な設計基準を確立するためには、現象の定量的な分析と理解が必要と考えている。

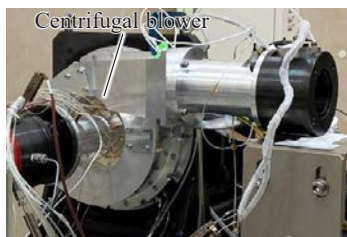
そこで本研究では、流れ場の最小渦スケールまで解像する LES (Large Eddy Simulation) に着目し、LES によって遠心ブロワ内で生じる非定常流れ場の定量的な分析手法確立を目的に、圧縮性流体解析手法を構築することとした。本報告では、LES を用いた遠心ブロワの解析手法確立に向けた最初のステップとして、2020 年度学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 (JHPCN) 萌芽型共同研究課題 (課題名: 実機単段遠心ブロワで生じるサージ点近傍非定常失速現象の大規模圧縮性 LES 解析, 課題番号: EX20305) 内において低解像度の解析格子を用いて解析を行った結果について説明する。

2. 供試遠心ブロワ及び性能計測試験条件

供試ブロワの外観を第 1 図に示す。供試ブロワはオープン型の遠心羽根車、ベーンレスディフューザ、スクロールから構成される。羽根車の翼枚数はフルブレード 13 枚で、外径の周速マッハ数は 0.48 である。ディフューザ径比 D_4/D_2 は 2.1 で、羽根車出口との高さ比 b_3/b_2 は 1.0 の平行壁である。羽根車外径の周速度を代表速度、羽根車外径を代表長さにとった際の Re 数は 9.9×10^5 であった。

供試ブロワはオープンループ型の試験装置に設置され、ブロワ上流に設けられた調節弁の開閉によって吸込流量を変化させた。また、吸込部に設けられたノズルで流量を計測した。羽根車で

昇圧された流れはディフューザ、スクロールを経て大気開放した。ブロワは電動機により駆動し、インバータで回転数を制御した。また、ブロワと電動機の間にはトルク計を設置し、軸動力を計測した。ブロワ性能を計測するために、吸込・吐出部において全圧、全温を計測した。また、ディフューザ性能を計測するために、羽根車出口（径比 1.1）及びディフューザ出口（径比 2.1）で壁面静圧を計測した。なお本ブロワは、サージ点近傍の低流量域においてセル数 2 のディフューザ旋回失速が発生することがわかっている。



第 1 図: 供試遠心ブロワ外観

3. 数値解析手法及び解析条件

本研究では、ターボ機械の非定常非圧縮 LES 解析において実績^[4]を有する FrontFlow/blue (FFB) で圧縮性の解析を行うために、エネルギー方程式及び状態方程式を新たに追加して解析を行った。基礎方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ -\delta_{ij} p + (\mu + \mu_{SGS}) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \frac{1}{2} u_i^2 + \rho \frac{1}{\gamma-1} RT \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j \frac{1}{2} u_i^2 + \rho u_j \frac{1}{\gamma-1} RT \right) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ -\delta_{ij} u_i p + (\mu + \mu_{SGS}) u_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\lambda + \lambda_{SGS}) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

$$p = \rho RT \quad (4)$$

ここで流速成分を u とし、 ρ, p, T はグリッドスケールの状態量（密度、圧力、温度）を表す。 μ, λ はそれぞれ粘性係数および熱伝導率を表し、添字 SGS がついている変数はそれらのサブグリッドスケールの乱れによる貢献分を表す。流体は理想気体を仮定しており、 R および γ はそれぞれガス定数および比熱比を表し、これらの値は一定であるものとした。

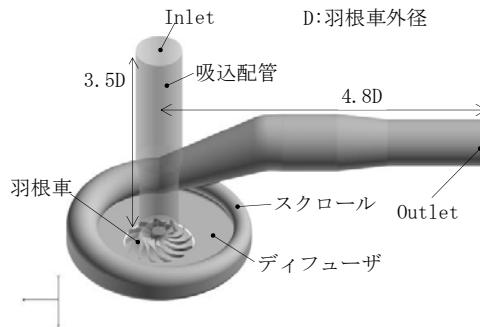
離散化手法は従来の FFB での解析同様に、時間、空間において 2 次精度の有限要素法により離散化を行った。圧力解法には Fractional Step 法を適用し、運動方程式は Crank-Nicolson 法に

より陰的に時間積分を行った。乱流モデルには Dynamic Smagorinsky モデルを用いた。

第 2 図に解析領域の外観を示す。解析領域は吸込配管、羽根車、ディフューザ - スクロールの 3 領域で構成した。計算領域の格子数を表 1 に示す。壁面近傍の格子解像度は、無次元コード方向 $r^+ = 80$ 、無次元壁垂直方向 $y^+ = 8$ 、無次元スパン方向 $z^+ = 40$ とした。この解像度は、本格子を各方向に対して分割数を 4 倍にすると、壁近傍の縦渦まで解像できる値である。本報告では上述の解像度での解析結果について説明するが、現在格子数を増やした解析を別途実施中である。

本解析では、入口境界条件として質量流量及び温度を付与し、出口境界で静圧を付与した。入口境界で付与する質量流量の値を振ることで、遠心ブロワの性能曲線を取得した。

計算機には Oakbridge-CX を用いた。領域分割には Metis を用い、OpenMPI による並列計算を行った。このとき羽根車 1 回転の計算に対して 10 ノード使用時で約 4 時間を要した。また、1 流量点に対し羽根車 50 回転分の解析を行った。



第 2 図：解析領域

表 1：解析格子数

	要素数
吸込配管	11,664,380
羽根車	13,584,714
ディフューザ+スクロール	34,668,566
合計	59,917,660

4. 数値解析結果

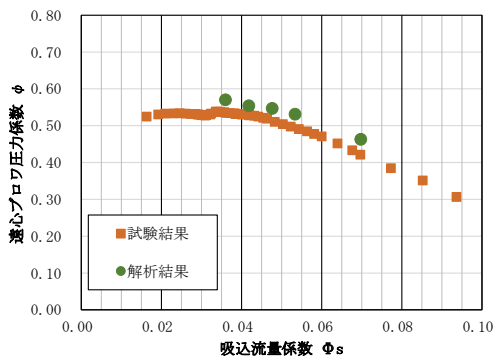
第 3 図に供試ブロワの性能予測結果を示す。図中横軸は吸込流量係数 ϕ_s 、縦軸は圧力係数 ϕ を示している。図より解析結果は遠心ブロワ性能を全体的に過大評価している傾向があり、 $\phi_s = 0.07$ において 10.0%の過大評価であった。この要因として、格子解像度の不足に伴う損失の過大評価が考えられ、壁近傍の縦渦を解像する解析を行うことで、誤差は低減するものと考えている。

第 4 図にベーンレスディフューザでの無次元静圧上昇についての結果を示す。図中横軸は無次元流量係数、縦軸は静圧上昇を羽根車動圧で無次元化した無次元静圧上昇を示している。図より供試ブロワは、 $\phi_s = 0.044$ において性能曲線の勾配が右上がりに変化していることがわかる。

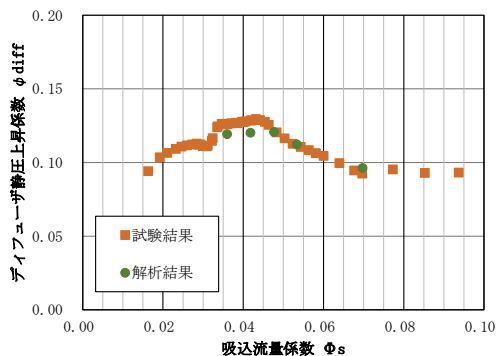
数値解析の結果は定性的にはこの傾向を捉えていることがわかる。このことから、解析はベーンレスディフューザ内で勾配が右上がりに変化する要因となる流れ場を定性的には捉えられているものと考えられる。

第5図及び第6図に解析で得られた $\phi_s = 0.036$ でのベーンレスディフューザ中間断面における径方向流速分布（径方向外向きを正）、静圧分布を示す。径方向流速分布は羽根車周速で無次元化した値を表示している。また静圧分布は、羽根車動圧で無次元化した値を表示している。図より、ディフューザ内には2か所の径方向流速が大きい領域が存在し、時間変化に応じて周方向に回転していることがわかる。この流れ場は、先述した供試ブロワで確認されたセル数2の巡回失速であるものと考えられる。静圧分布の結果と比較すると、径方向流速の大きい領域で圧力が低くなっている領域（低圧域）が見られることがわかる。この傾向は、Ohuchidaらの報告^[5]による実験結果の傾向と一致することから、巡回失速の流れ場を解析で捉えることができているものと考えられる。

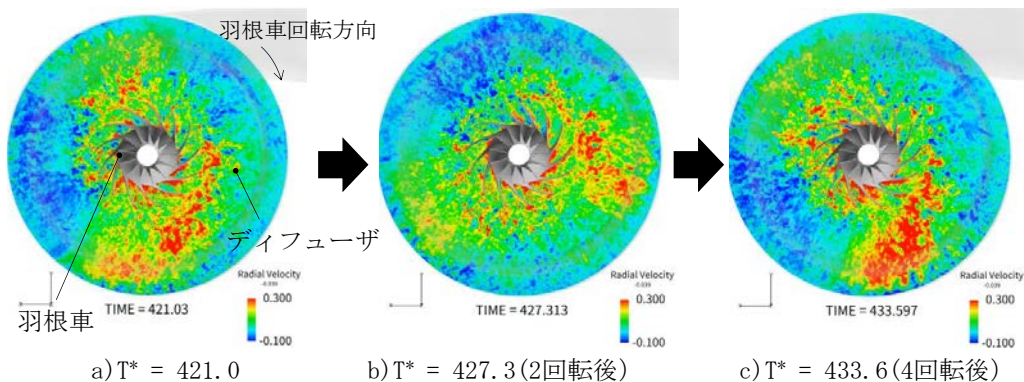
本解析は非定常現象の詳細分析に向けた最初のステップとして、低解像度の解析格子を用いて行った。今後より細かい解像度を有する格子を用いた解析を行うことで、解析精度の精度検証及び現象の定量的な分析を行う予定である。



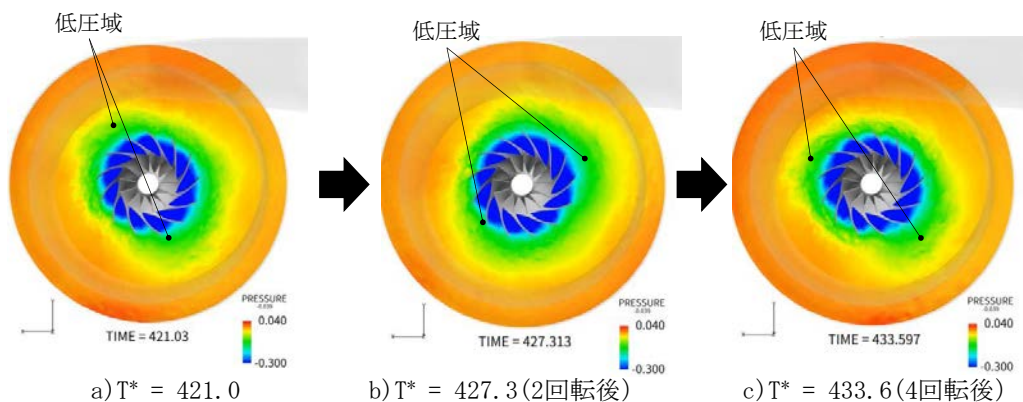
第3図：遠心ブロワ静圧係数の比較



第4図：ディフューザ静圧上昇係数の比較



第5図：ディフューザ中間断面における径方向流速分布の時間変化（ $\phi_s = 0.036$ ）



第 6 図：ディフューザ中間断面における静圧分布の時間変化 ($\phi_s = 0.036$)

5. まとめ

流れ場の最小渦スケールまで解像する LES によって遠心ブロウ内で生じる非定常流れ場の定量的な分析手法確立を目的に、LES 圧縮性流体解析手法を構築した。低解像度の解析格子を用いた解析では、遠心ブロウ性能を過大評価するが、低流量域においてベーンレスディフューザ内で生じる非定常現象である旋回失速の様な流れ場の傾向を定性的に捉えられることがわかった。

今後は解析精度の向上及び現象の定量的な分析に向け、格子解像度をあげた解析を行う予定である。

参 考 文 献

- [1] 妹尾 泰利, 木下 凱文, 遠心羽根なしディフューザに生じる失速と旋回失速, ターボ機械, 1978, 6 巻, 4 号, p. 217-223
- [2] Yamada, K., Furukawa, M., Arai, H., Kanzaki, D., Evolution of Reverse Flow in a Transonic Centrifugal Compressor at Near-Surge, Proc. ASME. GT2017, Volume 2C: Turbomachinery, V02CT44A014, June 26-30, 2017
- [3] Fujisawa, N., Agari, Y., Yamao, Y., Ohta, Y., Rotating Mechanism of Diffuser Stall in a Centrifugal Compressor With Vaneless Diffuser, Proc. ASME. GT2021, Volume 2D: Turbomachinery, V02DT39A010, June 7-11, 2021
- [4] Pacot, O., Kato, C., Guo, Y., Yamade, Y. and Avellan, F., Large eddy simulation of the rotating stall in a pump-turbine operated in pumping mode at a part-load condition, Journal of Fluids Engineering, Vol. 138, No.11 (2017), pp.111102-1-111102-11.
- [5] Ohuchida, S., PIV for Turbomachinery Applications, Proceedings of 14th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (2012) p. 1 126