

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04188

研究課題名(和文) 動的モード分解と最適変動励起法によるターボ機械の動特性解明とアクティブ制御

研究課題名(英文) Dynamic characteristics and active control of turbomachinery using dynamic mode decomposition and proper fluctuation excitement

研究代表者

姜 東赫 (Kang, Donghyuk)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：40610366

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：非定常エネルギー式の適用により非定常流量を測定可能なベンチュリ式非定常流量計の提案と理論、数値解析、実験的な検証を行った。この成果により実験によるターボ機械の動特性の調査が可能となった。また、実験・数値的にターボファンの動特性を測定し、非定常時の性能曲線の勾配が準定常のものより大きくなっていることがわかった。

準定常流下のターボ機械内部流れ場のリアルタイム推定技術の開発を行った。特異値分解を用いた画像のモード分解・再構築技術に着目し、流れ場のモード分解・再構築技術を考案した。計測データのみ予測された流れ場が実際CFDで計算した結果とよく一致していることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非定常ベルヌーイ式を用いて、変動流量装置の開発した。本開発によって変動時の流れの様子を明らかにすることができる。さらに、特異値分解、動的モード分解という手法や時空間FFT・IFFTを用いることによって、ある特定な流れ場の成分を抽出することができた。これによって、複雑流動現象を明らかにすることができた。特に、特異値分解を用いて、ターボ機械のデジタルツウィンができることを示した。

研究成果の概要(英文)：We proposed a Venturi-type unsteady flowmeter. The proposal was supported by theoretical analysis, numerical simulations, and experimental verification. This achievement enabled the investigation of the dynamic characteristics of turbo machinery through experiments. Additionally, we measured the dynamic characteristics of a turbofan experimentally and numerically, revealing that the slope of the performance curve during unsteady operation is larger than that during quasi-steady operation.

We also developed a real-time estimation technique for the internal flow field of turbo machinery under quasi-steady conditions. By focusing on the mode decomposition and reconstruction technique of images using singular value decomposition, we devised a mode decomposition and reconstruction technique for flow fields. It was found that the predicted flow field based solely on measurement data closely matched the results obtained from computational fluid dynamics (CFD) simulations.

研究分野：流体工学

キーワード：非定常流量 動的モード分解 特異値分解 流れ場の推定 デジタルツウィン



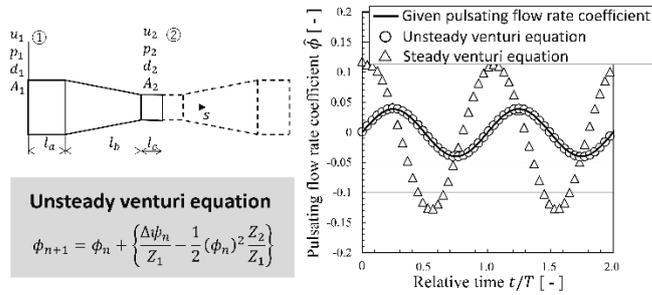


図2 ベンチュリ式非定常流量計

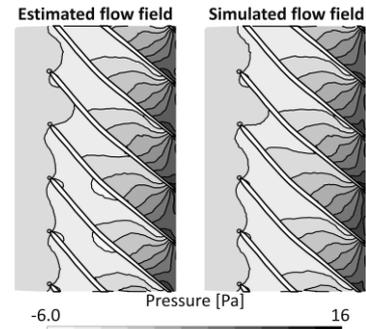


図3 流れ場のリアルタイム推定

## (2) ターボファンの動特性調査<sup>(3)</sup>

図4には、実験と数値計算(CFD)による定常時および非定常時の性能曲線が示されている。性能曲線はオレンジと黒で表示され、それぞれが実験結果と数値計算結果であることが示されている。点線は定常流から得られた回帰曲線を表示し、実線は脈動流下のリサージュ曲線を表示している。実験結果のノイズを取り除くためには、バンドパスフィルタを用いて脈動周波数の変動成分のみを抽出して再構成する必要がある。図4の性能曲線により、非定常状態における性能は定常性能とは異なることが分かる。また、数値計算結果は実験結果と比較すると、定常性能に関しては数値計算の方が実験結果よりも小さくなっているが、非定常性能に関しては両者とも定常曲線と比較すると右下がりの勾配がより大きくなっていることが分かる。以上のように、非定常性能は定常性能と大きく異なることが示されており、また、数値計算でも実験で観察される非定常特性が再現されていることが分かる。

図5では、図4から得られた非定常性能のベクトル線図が示されている。横軸は流量変動に対する圧力変動の複素振幅の実部を、縦軸はその虚数部を表している。また、 $f^*$ はインペラ回転周波数と流量変動周波数の周波数比を意味している。ベクトル線図からは、周波数比が増大すると、実験結果と数値計算結果の複素振幅が増大し、両者の位相遅れがほぼ一定であることがわかる。各周波数比における複素振幅と位相遅れについては、数値計算結果と実験結果がほぼ同じであることが示されている。

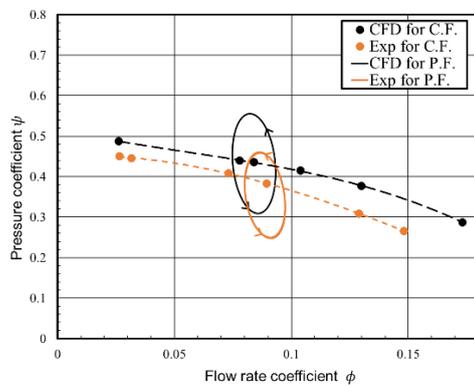


図4 性能曲線

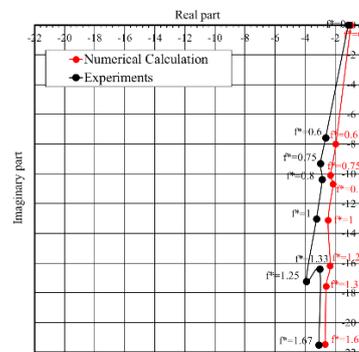


図5 ベクトル線図

図6、7、8では、数値計算から得られた静圧項、慣性項、動力項のベクトル線図が示されている。緑色、青色、赤色、黒色はそれぞれ吸込み配管、インペラ、ケーシング、全体を表している。図6に示される全体の静圧差は、吸い込み配管、インペラ、ケーシングの静圧差の和で表すことが分かる。図7および8の慣性項と動力項は、損失項と動圧項の複素振幅と比較して相対的に大きく、脈動流量に対する遠心ファンの非定常性能の発生原因となっている。さらに、慣性項の複素振幅と位相遅れについて、より詳細な分析を行った結果、インペラの周方向速度成分が大幅に遅れていることが明らかになった。また、動力項に関しては、インペラの内部角運動量変化の位相遅れが動力項の位相遅れの主な発生原因であることが分かった。



## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Kanata Nemoto, Donghyuk Kang, Izuru Kambayashi, Wakana Tsuru, Satoshi Watanabe and Kazuhiko Yokota	4. 巻 4
2. 論文標題 Stability Analysis of Cavitation Surge in Hydraulic System Considering Response Delay of Cavitating Pump	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Fluid Machinery and Systems	6. 最初と最後の頁 401-410
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5293/IJFMS.2022.15.4.401	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Izuru Kambayashi, Donghyuk Kang, Naoki Nishimura	4. 巻 143
2. 論文標題 Theoretical, numerical, and experimental study on an unsteady venturi flowmeter for incompressible flows	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ASME Journal of Fluids Engineering	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/1.4048689	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Izuru Kambayashi, Donghyuk Kang, Naoki Nishimura	4. 巻 143
2. 論文標題 Theoretical, Numerical, and Experimental Study on an Unsteady Venturi Flowmeter for Incompressible Flows	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluids Engineering	6. 最初と最後の頁 021308, 021321
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/1.4048689	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Donghyuk Kang, Satoshi Yamazaki, Shusaku Kagawa, Byungjin An, Motohiko Nohmi and Kazuhiko Yokota	4. 巻 12
2. 論文標題 Flow characteristics in a V-shaped region of a suction performance curve in a double-suction centrifugal pump	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Fluid Machinery and System	6. 最初と最後の頁 89-98
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5293/IJFMS.2019.12.1.089	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 川崎真俊, 平原裕行, 箭内優樹, 姜東赫	4. 巻 47
2. 論文標題 多翼送風機の低流量運転モードで発生する低周波数騒音に対する時系列PIV解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ターボ機械	6. 最初と最後の頁 16-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11458/tsj.47.4_208	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 堤 寛征, 姜 東赫, 平原 裕行	4. 巻 47
2. 論文標題 実験及び数値計算に基づくヘリカルタービンの性能評価及び理論モデルの提案	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ターボ機械	6. 最初と最後の頁 22-31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11458/tsj.47.6_342	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Donghyuk Kang, Koichi Nisibe, Kotaro Sato and Kazuhiko Yokota	4. 巻 2
2. 論文標題 Three-Dimensional Theoretical Study on Flow Characteristics of a Spiral-Channel Viscous Micropump	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Fluid Machinery and System	6. 最初と最後の頁 169-180
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5293/IJFMS.2019.12.2.169	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計8件(うち招待講演 0件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Izuru Kambayashi, Donghyuk Kang
2. 発表標題 Estimation of Internal Flow in Turbomachinery Using Machine Learnin
3. 学会等名 16th Asian International Conference on Fluid Machinery (国際学会)
4. 発表年 2021年~2022年

1. 発表者名 Chengye Dou, Donghyuk Kang
2. 発表標題 Dynamic Response of a Centrifugal Fan to Flow Rate Oscillations
3. 学会等名 16th Asian International Conference on Fluid Machinery (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 上林出, 姜東赫
2. 発表標題 機械学習によるターボ機械内部流れ場の推定
3. 学会等名 ターボ機械協会第85回総会講演会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 竇程煒, 上林出, 姜東赫
2. 発表標題 ターボ機械の動特性測定システムの開発
3. 学会等名 ターボ機械協会第85回総会講演会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 竇程煒, 上林出, 姜東赫
2. 発表標題 流量変動時の遠心ファンの伝達関数に関する実験的・数値的研究
3. 学会等名 ターボ機械協会第86回講演会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 上林出, 姜東赫
2. 発表標題 機械学習を用いた流体機械内部流れ場の推定手法の検証
3. 学会等名 ターボ機械協会第86会講演会
4. 発表年 2022年~2023年

1. 発表者名 上林出, 姜東赫, 平原裕行
2. 発表標題 非定常運動方程式を用いたベンチュリ式流量計の評価
3. 学会等名 83回ターボ機械総会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西村尚樹, 姜東赫, 平原裕行
2. 発表標題 非定常運動方程式を用いたベンチュリ式の流量計の提案
3. 学会等名 ターボ機械協会(岡山)講演会&見学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>機械学習によるターボ機械の内部流れの再構築  <a href="http://park.saitama-u.ac.jp/~fdl/research.html">http://park.saitama-u.ac.jp/~fdl/research.html</a>  ターボ機械の動特性に関する研究  <a href="http://park.saitama-u.ac.jp/~fdl/research.html">http://park.saitama-u.ac.jp/~fdl/research.html</a></p>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------