

令和 4 年 6 月 27 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04177

研究課題名(和文)自動車用ターボチャージャの脈動流下における損失発生機構の解明

研究課題名(英文) Loss Mechanism of Turbocharger under Pulsating Flow

研究代表者

宮川 和芳 (Miyagawa, Kazuyoshi)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：30623673

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：自動車用ターボチャージャは、エンジンのダウンサイジングのために最近多く使われているが、エンジンの吸排気に伴う脈動流下で運転されていることから、非定常的な挙動を示し、定常流での運転とは異なる性能となる。本研究では要素試験装置およびターボチャージャ試験装置を使用し、基本的な流路形状への脈動流やウェークの流入による損失増加のメカニズム解明、脈動流下におけるターボチャージャの実験での損失計測による脈動流が与える定量的な影響を明らかにした。これらによりターボチャージャ性能のエンジンの吸排気脈動流の影響を明らかにすることができ、今後のターボチャージャ設計に資する結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多くのターボ機械は定常流下で運転が行われているため、非定常流動下での内部流れや性能への影響はほとんど研究されていない。一方、ターボチャージャはエンジンの吸排気に伴い脈動流下で運転され、性能が定常流下とは異なることは知られているが、構成要素であるタービン、コンプレッサは定常流下での性能評価により設計されており、脈動流の影響はほとんど考慮されていない。本研究では、基本的な流路形状における非定常流動下での損失向上を実験、解析により検討し、それをもとにターボチャージャの損失発生メカニズムを明らかにした。本成果は、脈動流の影響を考慮したターボチャージャの設計手法構築の資料となる。

研究成果の概要(英文)：Automotive turbochargers have recently been widely used for engine downsizing. Since turbochargers are operated in the pulsating flow associated with engine exhaust and intake air, they exhibit unsteady behavior, and their performance is different from that of operation in steady flow. In this study, elemental test rig and turbocharger test apparatus were used to clarify the loss mechanism due to pulsating flow and wake inflow into the fundamental channel geometry, and the quantitative effect of pulsating flow on the turbocharger performance was clarified by measuring the loss in the turbocharger experiments under pulsating flow. These results have contributed to the clarification of the effect of engine intake and exhaust pulsation flow on turbocharger performance and to the design of future turbochargers.

研究分野：ターボ機械の性能、内部流れ、最適設計、流体関連振動、キャピテーションについての数値解析、実験的研究

キーワード：ターボチャージャの脈動流下損失発生機構 タービン・コンプレッサの非定常内部流れ 脈動流試験装置および非定常流計測 非定常流動解析

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

自動車用エンジンの効率向上は、今後のカーボンニュートラルの達成に重要な課題である。そのため、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム(SIP 2014~2019)においてエンジン最大熱効率 50%達成を産官学で研究し目標を達成した。本目標を満たすためにターボチャージャの効率向上も重要な項目であり、多くの研究を実施し目標効率を達成した。本プログラムの中でエンジンの排気、吸気脈動流下での効率の向上も検討を実施、多くの知見を得たが、脈動流下でのタービン、コンプレッサの性能低下は、十分に解明できていなかった。そこで、本研究では、要素試験、ターボチャージャ試験によりタービン、コンプレッサの脈動流により発生する損失発生メカニズムを明らかにし、脈動流を考慮した設計手法の構築に資する。

2. 研究の目的

多くのターボ機械は定常流下で運転が行われているため、非定常流動下での内部流れや性能への影響はほとんど研究されていない。一方、ターボチャージャはエンジンの吸排気に伴い脈動流下で運転され、性能が定常流下とは異なることは知られているが、構成要素であるタービン、コンプレッサは定常流下での性能評価により設計されていて、脈動流の影響はほとんど考慮されていない。本研究では、基本的な流路形状における非定常流動下での損失向上を実験、解析により検討し、それをもとにターボチャージャの損失発生メカニズムを明らかにすることにより、脈動流の影響を考慮したターボチャージャの設計手法の構築を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では脈動流による非定常的な損失を明らかにするために要素的な実験装置と、ターボチャージャの実験装置を用いる。非定常流計測要素試験装置では簡易な流路内に脈動流や、ウェークを流入させ、圧力や、流速の計測を行うことで損失発生機構の分析を行う。ターボチャージャ試験装置では、脈動流下におけるターボチャージャの実験を実施し、脈動流が与える影響を検討する。以上、2つの実験装置により脈動流における非定常的な損失を明らかにする。図1に要素試験装置、図2にターボチャージャ試験装置を示す。

非定常流計測要素試験装置では定常と非定常流下での流れの計測、評価を行う。損失の計測において非定常計測試験装置は計測部である基本的流路の上流に脈動流発生装置を設置している。この脈動発生装置の中には穴の空いた円盤が入っており、任意の周波数の周期的な脈動流を生成することが可能となっている。非定常損失の計測においては、非定常試験装置は脈動発生装置の円盤を変更することにより様々な流れを模擬可能であるために、脈動発生装置内に円柱棒を回転させ、ディフューザ、ノズル配管内に回転する円柱の後流によってウェークを発生させる。このウェークが計測部内でどのように拡散し、損失となっていくのかを詳細に計測する。定常流下におけるウェーク損失の計測を始めに実施し、その後インバータプロウにて増速流、減速流においてウェークの損失がどのように変化するかを定量的な計測を実施していく。ターボチャージャ試験装置では非定常流試験装置にて計測した非定常損失の傾向をもとにタービン、コンプレッサにて実験を実施し、損失の分析を行う。脈動流下におけるタービン、コンプレッサ内の損失は準定常的な損失と非定常損失の2種類に分けることができる。準定常的な損失は定常流が連続的に作動したと考えるために定常流下の計測結果から推定可能である。現状計測されている脈動のパラメータは少なくさらなるデータが必要となる。そこで本研究においては、脈動振幅、脈動周波数を変更した場合の準定常損失、非定常損失の計測を行い、脈動流に対する非定常損失の予測式を導出する。計測項目はタービン、コンプレッサの非定常圧力、流量特性と、効率特性である。非定常流試験装置にて計測した脈動流下における損失を用いることで非定常損失分を1次元計算によって導出する。実験で得られた損失量と比較することで非定常損失が計測できているかどうかの判断を行っていく。

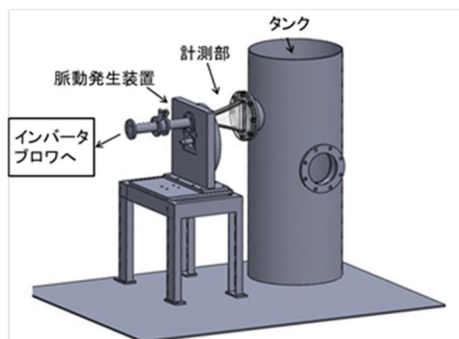


図1 要素試験装置

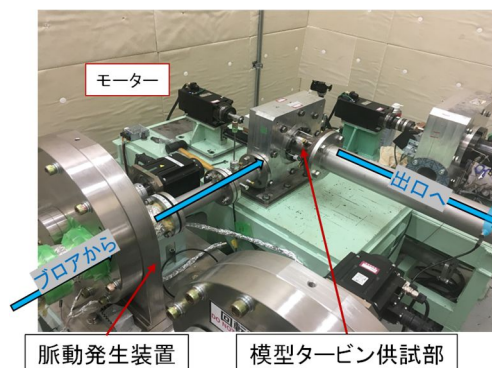


図2 ターボチャージャ試験装置

4. 研究成果

3 項の実験設備および流動解析を併用して以下の脈動流下の流れの特徴および損失への影響因子を見いだした。

(1) 加速流, 減速流においては圧力損失を計算する上で, 非定常圧力項を除去し単純なディフューザ, ノズル流路で流量変動の無い定常流下と比較検討した結果, ディフューザ流れにおいては加速流にて損失が減少, 減速流にて損失が増加する. ノズル流れにおいては加速流にて損失が増加, 減速流にて損失が減少する.

また, 基礎的な流路形状へのウエーク流入に関しては, 非定常壁面静圧計測と流動解析を用いて, ウエーク流入に伴う非定常流化でのディフューザ性能や非定常損失メカニズムについて詳細に調査した. 図3に実験装置を模擬した流動解析結果を示す.

(2) 圧力変動が下流へ伝播する過程で振幅が減少し, ディフューザ内で一様化している様子が確認された.

(3) 円柱棒が流路内へ侵入もしくは流路外へ流出する際に, 大きな渦が生成される. 実際のベンドディフューザではインペラが次の翼間へ移行する際に大きな乱れが発生すると考えられる.

(4) 流動解析においてウエーク流入により, 運動量厚さが局所的に大きくなる様子が見られ, ウエークと境界層の干渉の様子を捉えることができた. ウエーク通過後には境界層の挙動は定常状態に戻る.

(5) ウエークの領域での損失を定量的に評価し, 定常流と比較して23%全圧損失が増加することが分かった. 渦による損失や混合損失, 運動量欠損等が考えられる. また, 下流に向けて渦が均一化する過程で, 全圧の欠損量が減少していく様子が確認された.(図4)

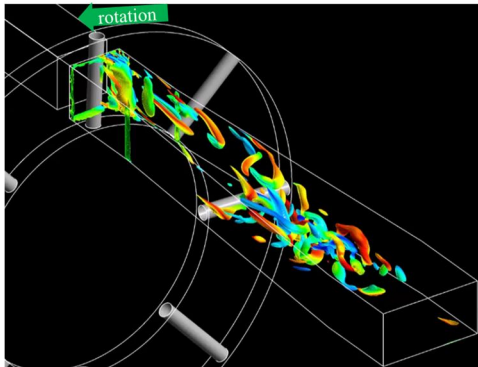


図3 ディフューザ内のウエーク挙動

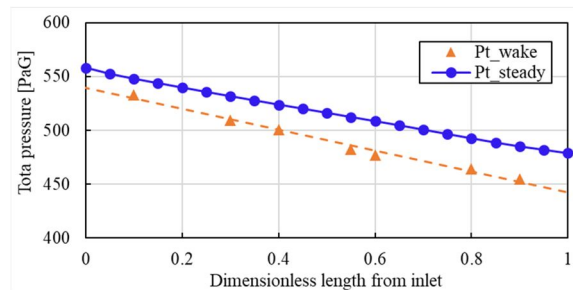


図4 ウエーク流入時の損失増大

ターボチャージャ試験装置を用いた脈動流下のターボチャージャ性能については以下の結果を得た。

(6) タービン試験装置にて脈動流下における性能計測を行った結果, 脈動流下においてタービンの性能は定常流下と比較して大きく低下し, 脈動周波数が小さいほど効率低下が大きく, 大きいほど効率低下が小さい(図5). タービンの流動解析の結果から, 定常流下と比較すると, ホイール, 出口ディフューザ, ケーシングにて脈動流下における損失が増加することが明らかになった(図6).

(7) コンプレッサ性能計測ではタービンと同様に脈動流下でヒステリシスループなどが確認されたが, 効率についてはタービンほど大きな影響は見受けられない. また, サージ周波数は脈動周波数の影響を受け, 脈動周波数への引き込み現象が見られた.

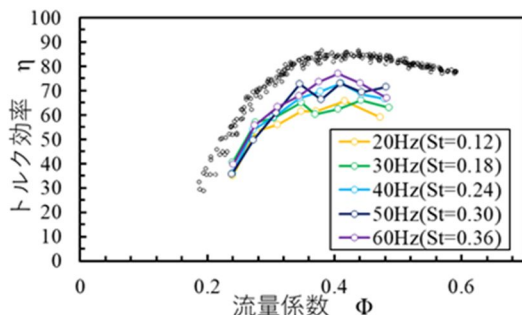


図5 脈動周波数と効率の低下

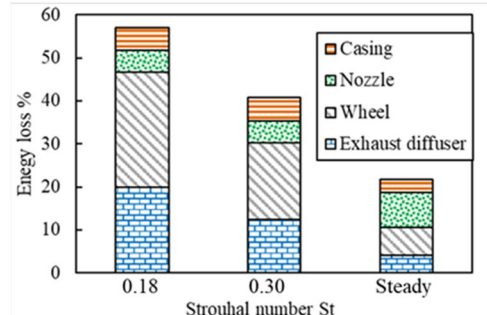


図6 脈動流下の各部損失増加

本研究では脈動流下におけるターボチャージャの内部流れから損失メカニズムを分析したものであり、タービン、コンプレッサそれぞれにおいて脈動流下における瞬時作動点の挙動、平均効率の傾向が示された。これらはエンジン条件からターボチャージャに与える影響を推定するのに有効である。損失メカニズムの分析は、今後のターボチャージャ設計にも有用だと考えられる。コンプレッサでは主に低流量側の不安定現象に注目した。低流量域での不安定現象はターボチャージャが壊れる原因になることがあるが、避けることのできない作動点でもある。エンジンの性能を推定するためには流動解析では時間がかかりすぎるために次元モデルを使用することが主流となっているが、解析精度が問題となっている。本研究で得た非定常損失を考慮したターボチャージャ0次元モデルは既存のマップを参照する方法では考慮できない非定常損失を考慮しており、エンジンシミュレーションの精度向上に有効である。以上、本研究で示したメカニズムや新たな解析モデルは今度の脈動流下におけるターボチャージャの性能推定をする際に有効であり、また、設計に脈動流を考慮した方法の構築に有用である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yohei Nakamura(WASEDA University), Manato Chinen(WASEDA University), Masamichi Sakakibara(WASEDA University), Yuudai Abe(WASEDA University), Kazuyoshi Miyagawa(WASEDA	4. 巻 13-4
2. 論文標題 Prediction of a Turbocharger Performance Under Pulsating Flow by Construction of an Unsteady One-Dimensional Flow Analysis Model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Fluid Machinery and Systems	6. 最初と最後の頁 743-749
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5293/IJFMS.2020.13.4.743	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 該当する

1. 著者名 中村 揚平, 宮川和芳	4. 巻 48-11
2. 論文標題 ターボチャージャタービンの脈動流下における非定常内部流れと損失メカニズム	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ターボ機械協会誌	6. 最初と最後の頁 52-61
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Yuji ASANAKA, Yohei NAKAMURA, Kazuyoshi MIYAGAWA, Kazuyoshi MIYAGAWA
2. 発表標題 Effect of Pulsating Flow on Surge Frequency of a Turbocharger Compressor
3. 学会等名 18th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yohei NAKAMURA, Kazuyoshi MIYAGAWA
2. 発表標題 Development of turbocharger engine system using 3D and 1D simulation to achieve 50% brake thermal efficiency
3. 学会等名 18th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浅中祐二、中村揚平、宮川和芳
2. 発表標題 過給機用コンプレッサの脈動流下サージング挙動に関する実験的研究
3. 学会等名 第83回ターボ機械協会総会講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yohei Nakamura, Manato Chinen, Masamichi Sakakibara, Yuudai Abe, Kazuyoshi Miyagawa
2. 発表標題 Prediction of a turbocharger performance under pulsating flow by construction of an unsteady one-dimensional flow analysis model
3. 学会等名 The 15th Asian International Conference on Fluid Machinery (AICFM15) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 阿部勇大, 知念真渡, 榊原將至, 中村揚平, 宮川和芳
2. 発表標題 エンジンの排気脈動波形がターボチャージャータービン性能に及ぼす影響
3. 学会等名 ターボ機械協会第81回総会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村揚平, 宮川和芳, 森吉泰生 窪山達也, 田畑正和
2. 発表標題 エンジン熱効率 50%に寄与した過給機システムの研究と開発
3. 学会等名 ターボ機械協会第81回総会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yohei Nakamura, Kazuyoshi Miyagawa, Yasuo Moriyoshi, Tatsuya Kuboyama
2. 発表標題 Development of turbocharger engine system using 3D and 1D simulation to achieve 50% brake thermal efficiency
3. 学会等名 18th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuji Asanaka, Kanto Kobayashi, Masamichi Sakakibara, Yuta Itagaki, Yohei Nakamura, Kazuyoshi Miyagawa
2. 発表標題 Effect of Pulsating Flow on Surge Frequency of a Turbocharger Compressor
3. 学会等名 18th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浅中祐志, 中村揚平, 榊原將至, 板垣悠太, 宮川和芳
2. 発表標題 過給機用コンプレッサの脈動流下サージ挙動に関する実験的研究
3. 学会等名 ターボ機械協会第83回総会講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 宮川和芳	4. 発行年 2021年
2. 出版社 三栄	5. 総ページ数 8
3. 書名 Motor Fan illustrated	

〔産業財産権〕

〔その他〕

【受賞】
脈動流下でのターボ過給機の性能と挙動
https://www.jsae.or.jp/engine_rev/backnumber/11-04/11-04-02.html
(受賞1) Best Paper Award: Yohei Nakamura, The 15th Asian International Conference on Fluid Machinery, Busan, September 2019
(受賞2) ターボ機械協会技術賞, 宮川和芳, 中村揚平, 森吉泰生, 窪山達也, 田畑正和, ターボ機械協会総会講演会、2019年5月、東京
【国際会議】
18th ISROMAC (国際回転機械シンポジウム) を主催, 過給機オーガナイズ度セッションを含む. <http://isromac2020.com/>

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
研究 分 担 者	中村 揚平 (Nakamura Yohei) (80822452)	早稲田大学・理工学術院・助手 (32689)	2019, 2020まで

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
---------	---------