

過給機駆動用ラジアル排気タービンの非定常流特性に関する研究 ——第 4 報 波形変化に対する時間平均法性能予測——

The Study of Characteristics of Radial Inward-Turbines for Exhaust Gas Turbochargers
Under Non-Steady Flow Conditions

——4th Report, Prediction of turbine characteristics by time-mean method for various wave forms——

小 西 奎 二*・吉 識 晴 夫*

Keiji KONISHI and Haruo YOSHIKI

1. 結 言

排気タービンの非定常流性能予測を考えると、まず定常流性能に基礎を置いて単体としての性能がどのようになっているのかを知ることが重要である。すなわち、定常流性能とどの程度異なるのか、また定常流性能から出発して非定常流時の流量特性や出力特性を見積ることはできないかなどである。企業などで簡便な方法として用いられている時間平均法についての研究は、ほとんど行われてなく、わずかに水町¹⁾や宮下²⁾らの研究の一部に見られる程度であり、系統立ててはほとんど行われていない現状である。軸流タービンについては、小泉³⁾が行っているが十分な結果が得られていない。

筆者らも前報^{4),5)}で流れの基本となる正弦波波形を用いた場合の流量・出力特性に与える脈動周波数と振幅の影響について報告した。しかし、脈動流れの中で問題となる波形の影響に着目した研究はほとんどされていない。それゆえ、本報では、先に報告⁶⁾した円盤型脈動流発生装置を用いて脈動波形を種々変化させ、その影響について定常性能を用いた時間平均法により研究した。

2. 実 験 方 法

空気源と脈動流発生装置⁶⁾を組み合わせた既報^{4),5)}とほぼ同一の実験装置によって空気運転した。タービン修正回転速度は、 $N^*=800$ のみとした。

実験は圧縮機の出口を絞った全負荷状態を基本にし、膨張比もほぼ一定としたときのものである。波形変化は、先に報告⁶⁾した正弦波に準じたものを基本波形として考え、本報では実機に対応した模擬波形として 5 種類変化させた。さらに、同一波形について脈動周波数を 10~70 Hz とし、おのおのの周波数に対して振幅を 10~13 点変えて行った。

3. 結果および考察

脈動流下のタービン性能を見積る一つの方法としていわゆる時間平均法が考えられる。これは、タービン入口の全圧、全温度の時間平均値を測定して平均膨張比を算出し、定常流性能曲線からこれに対応する平均性能を得ようとするものである。定常流性能曲線は、既報^{4),5)}で用いたものと同一である。これを基礎にして時間平均法によるタービン性能予測を行い、その成立程度に与える波形の影響について検討した。本報では、計測器によって得られた実測値を真の値とし、前記によって得られた値とを比較することによってその成立程度を評価した。

3.1 流量特性

実験条件は、各波形間で時間平均膨張比にごくわずかな差が見られるが、波形変化を与えた以外はほぼ基本波形における実験と同一である。その結果を修正回転速度 $N^*=800$ について、各波形ごとに速度振幅比 θ に対する流量比との関係について表す。流量比は、実測値 M_e を真の値としたときの予測値 M_{lm} との比である。

図 1 は、波形 1 について脈動周波数をパラメータとした流量予測結果である。脈動周波数が高くなるとわずかに平均値からのズレが認められるが、全体の傾向としてほぼ 1 本の曲線で表される。予測誤差は、最大約 22% 程

主な記号

f : 脈動周波数 Hz
 L : 出力 kW
 M : 質量流量 kg/s
 N^* : 修正回転速度 ($=N/\sqrt{T_0}$)
 P : 圧力 Pa
 R : 膨張比 ($=P_{01}/P_a$)
 T : 温度 K
 Tq : トルク $N\cdot m$
 V : 流速 m/s
 e_p : 圧力波形率⁶⁾
 θ : 速度振幅比⁶⁾

添字

e : 実測値
 tm : 時間平均法特性
 m : 時間平均値
 $*$: 修正状態
 1 : タービン入口
 a : 大気状態

*東京大学生産技術研究所 第 2 部

研 究 速 報

度である。図2は、波形2についての流量予測結果である。脈動周波数が高くなるとわずかに平均値からのズレが認められるのは波形1と同様であり、1本の曲線で表され速度振幅比 θ の関数となっている。波形1に対していくぶん曲線の傾きが大きくなり、予測誤差は最大で約23%程度である。図3は、波形3についての結果である。比較的穏やかな流れであり、波形1、2に比して、さら

に曲線の傾きが大きくなる。予測誤差は最大約18%程度である。図4は、波形4についての結果である。非定常性の強い波形であるが、全体の予測誤差は小さく最大18%程度である。これまでの波形の中で最も曲線の傾きが小さい。50Hzで平均値からのズレがいくぶん大きく認められるが、全体の傾向は、ほぼ1本の曲線にのる。図5は、波形5についての流量予測結果である。波形5は、波形3とほぼ同様の結果を示している。流れも比較的穏やかであり、予測誤差は最大22%程度である。

以上振幅のみの関数である θ による各波形ごとの結果からは、波形の影響についての相対的な考察は困難であるので、図6～図9に、波形をパラメータとして圧力波形率 e_p に対する流量比 M_{tm}/M_e との関係を各周波数ごとについて示す。なお、図中の破線は、基本波形による結果を、また実線は実験点を最小自乗法により結んだおおよその傾向を示す。

流量予測に対する波形の影響は、図6の $f=10\text{Hz}$ では明らかに波形の違いとして認められるが、 $f=30\text{Hz}$ になると明確な差が少なくなり、 $f=50\text{Hz}$ においてはほとんど差異は認められなくなる。大略の傾向として、各波形

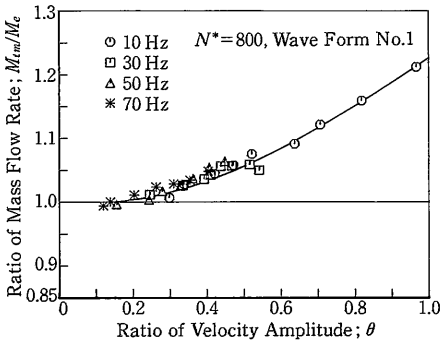


図1 波形1による流量予測

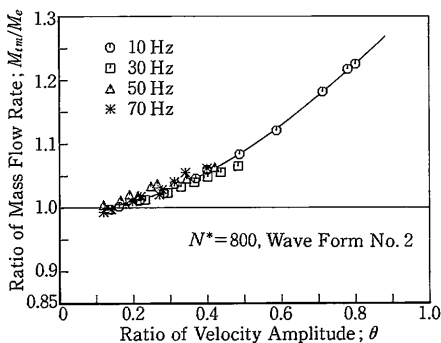


図2 波形2による流量予測

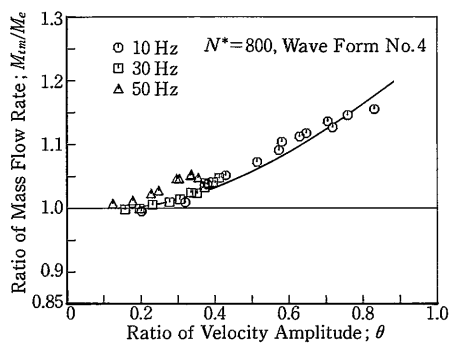


図4 波形4による流量予測

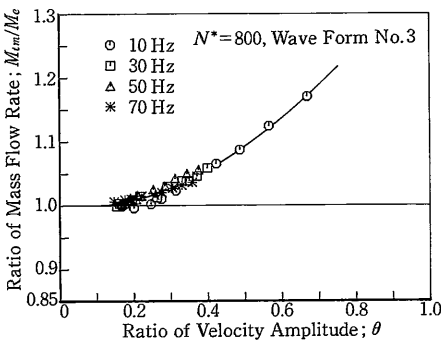


図3 波形3による流量予測

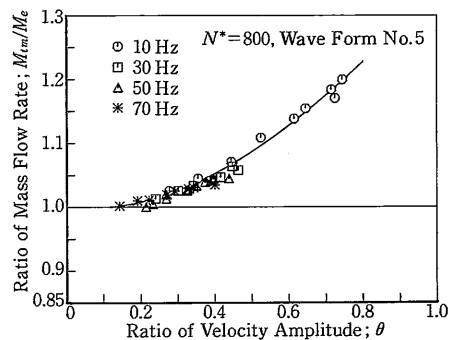


図5 波形5による流量予測

研究速報

とも流量比は、 ε_p の二乗に比例した傾向を示し、各波形に対する比例定数は、前報⁹⁾で求めた θ に対する ε_p の並びと同順序で大きくなる。また、波形の影響が明確に認められる図6において、同一の予測誤差、例えば10%の誤差を生じる波形の ε_p を比較すると、波形4が最も大きくつづいて波形1、つぎに波形2となり、つづいて少し非定常性が弱まり波形3、および波形5が同程度で小さくなる。基本波形と波形変化を与えた流れでは多少設定膨張比が異なるため、厳密な比較は困難であるがロータリ弁による正弦波に準じた基本波形は、波形3と波形2の間に位置する。

本研究では実験条件として時間平均膨張比を各波形ともほぼ同じ値としているため、これに対応する定常流性能曲線から求めた時間平均法による流量予測値 M_{tm} は、各波形ともほぼ同じ値となる。したがって、流量比 M_{tm}/M_e が大きいことは M_e が小さいことになる。すなわち、波形3または5は、波形4に比較して非定常流下の流量 M_e が少ないことを意味している。逆に、波形4は、定常流特性値からの流量減少が少なく非定常流下でも他の波形より多くの流量を流していることを意味する。

流れの非定常性によって流量に差が生じているのは、流量は第一義的に流速によって決まり、本質的には流れの慣性に起因するものと思われる。すなわち、流れの慣性により急激な圧力変化があっても流量(流速)はその圧力変化ほど変化しないが、穏やかな流れに対しては圧力と流量はほぼ対応したものとなる。それゆえ、各波形間での流量差を議論する場合には、圧力波形の上昇および下降のしかた、ならびに速度波形との対応について考察しなければならない。供試波形は、機関からのブローダウン時を想定して各波形とも同程度に急に圧力が上昇する波形であり、この領域では、圧力波形と速度波形はほぼ同程度に対応していることから同条件と考えられる。よって主として波形の膨張(減速)域について考察する。

まず、急激に圧力が上昇して穏やかに下降する波形5のような流れでは、流れの慣性の影響は小さく、真の流量は少なくなる。逆に圧力上昇のしかたは同じでも、急激に下降する波形4のような流れでは、流速は圧力変化ほど変化しないため、真の流量は多くなる。このことは、供試波形図⁹⁾において、圧力波形と速度波形の関連および速度波形の形状からも推察される。また、図6において

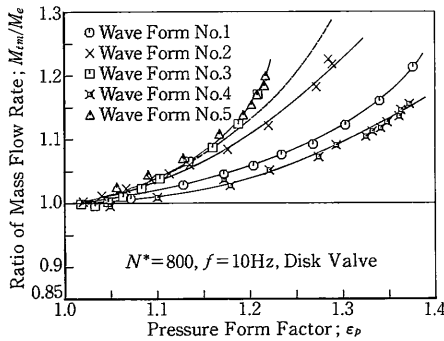


図6 波形変化による流量予測 $f=10\text{Hz}$

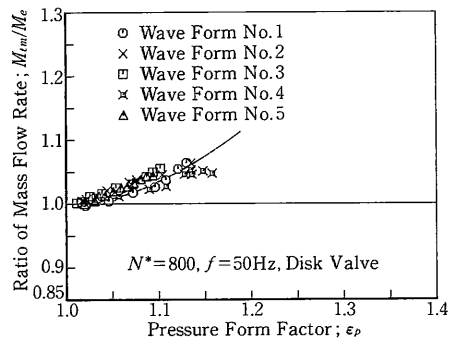


図8 波形変化による流量予測 $f=50\text{Hz}$

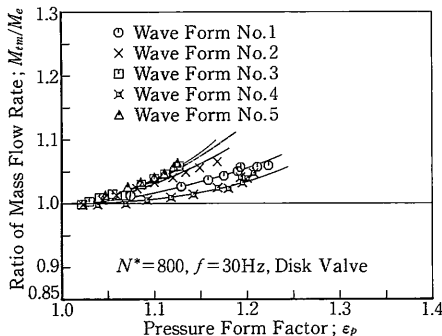


図7 波形変化による流量予測 $f=30\text{Hz}$

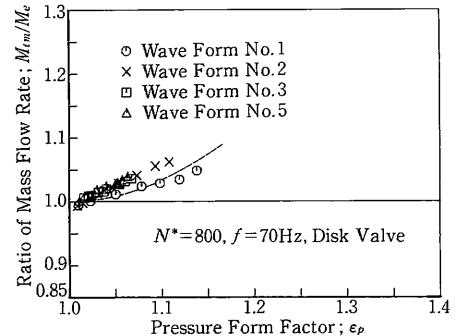


図9 流量予測による流量予測 $f=70\text{Hz}$

研究速報

同一圧力波形率で比較できる $\epsilon_p=1.22$ における各波形の時間平均流速を、同位置で測定したプラントルピトー管で求めた時間平均流速値と併用して比較すると、波形 3 と 5 はほぼ同じ値で約 47m/s、波形 2 は 52m/s、波形 1 は 62m/s、波形 4 は 70m/s となる。

以上のことから、波形 4 は、先鋭的な波形であり波形のひずみも大きく流れの非定常性は強い波形といえるが、平均流速は大きく、タービンを駆動している時間平均流量値(実測流量値) M_e は大きなものとなる。逆に波形 3 または 5 は、波形のひずみは小さく非定常性は弱い、平均流速も小さいため非定常流下の流量 M_e は少ない。このことが図 6 において非定常性の強い波形 4 は流量比が小さく、波形 3 または 5 の非定常性の弱い流れは流量比が大きく見積もられた原因と考えられる。

図 7 になると、流量予測に対する波形への依存性は減少してくる。さらに、図 8 の 50Hz になると波形への依存性はほとんどなくなり、波形 3 の結果に取れんする傾向をみせる。周波数が高くなるにつれて穏やかな波形 3 または 5 に取れんする原因は、予測精度に最も影響を与える流れの因子は振幅と考えられ、周波数が高くなると流体の慣性によって非定常性は残るが、流れは平均流に変動成分が重畳した程度の連続した定常流成分の多いものとなる。それゆえ、高い周波数領域では波形の違いが少なくなり、穏やかな波形 3 に近づくものと思われる。

なお、時間平均法は、予測値 M_{tm} を算出する過程において時間平均膨張比 R_m を基準にするため、流れの非定常性を直接考慮できない。逆に、実測値 M_e は、流れの非定常性によって直接影響を受ける。したがって、流れの非定常性を表すパラメータ ϵ_p と流量比 M_{tm}/M_e との関係は、流れの慣性を変数とした平均流速を仲立ちとする 2 次的な関係にあるものと思われる。

したがって、時間平均法による流量予測は、波形によって大きな影響を受けるため、同法の実機への適用は十分な注意が必要である。

3.2 出力特性

図 10 は、時間平均法による出力予測結果である。実験条件は流量特性と同一である。波形をパラメータとして圧力波形率 ϵ_p に対する出力比の関係を表す。出力比は、トルク検出器によって得られた測定平均値と軸受け損失の和を真の値 L_e とし、これに対する予測値 L_{tm} から算出した。図は割愛しているが周波数が高くなっても同様の傾向を示す。予測値のバラつきは、油温の測定精度を主因とした軸受け損失の見積誤差に起因する実測値 L_e の不正確さに原因があるものと考えられる。基本波形による既報⁴⁾とほぼ同様に脈動周波数および振幅による顕著な影響は見られない。このことは、脈動周波数、振幅およ

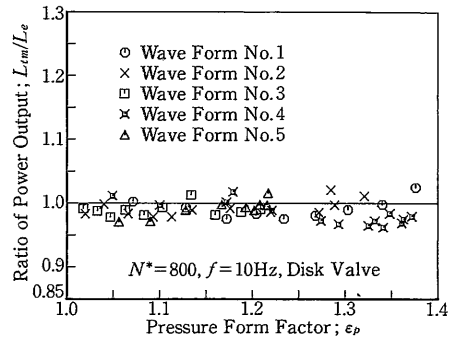


図 10 波形変化による出力予測 $f=10\text{Hz}$

び波形の変化を与えても時間平均法による出力予測結果には大きな影響を生じないことを表している。すなわち、非定常流下でも時間平均タービン出力 L_e は、脈動流れの周波数、振幅、波形変化に左右されず膨張比と修正回転速度を与えればほぼ同一となる。

タービン出力は、流れの非定常性に直接影響を受けないということはこれまで明らかにされておらず、この結果は、非定常流下のタービン出力問題に対する基本的な考えを与えるものといえる。

4. 結 言

タービン性能予測に与える波形の影響について、時間平均法により調べた結果、以下のような結論を得た。

- (1) 流量予測では波形の影響が強く現れ、予測誤差は最大 23% に達する。
- (2) 出力予測では波形の影響を無視することができ、実測値を 95% 以上の高精度で見積もることができる。
- (3) 振幅の影響は、本解析に対して最も大きな影響を与える因子として作用する。
- (4) 脈動周波数の影響は、顕著でなく無視してよい。

(1990年 8月10日受理)

参 考 文 献

- 1) 水町・ほか 4 名, 機論, 44-388 (昭53-12), 4272.
- 2) 小菅・ほか 3 名, 機論, 44-386 (昭53-10), 3497.
- 3) 小泉, 機論, 25-152 (昭34-4), 319.
- 4) 小西・吉識, 生産研究, 第42巻, 第 2 号 (1990-2), 34.
- 5) 小西・吉識, 生産研究, 第42巻, 第 5 号 (1990-5), 10.
- 6) 小西・吉識, 生産研究, 第42巻, 第 9 号 (1990-9), 33.
- 7) 小西・吉識, 日本ガスタービン学会誌, 18-69, (1990-6), 41.
- 8) 小西・吉識, 機論, 投稿中. (No90-0586)