

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2報 基本波形に対する準定常法性能予測—

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

—2nd Report, The Prediction of Turbine Performances by Quasi-Steady Analysis for Sinusoidal Wave Forms—

小西 奎二*・吉 識 晴 夫*

Keiji KONISHI and Haruo YOSHIKI

1. 緒 言

過給機などのターボ機械は、本来定常流で運転される機械であり、その下での特性については詳細に調べられており、設計水準も極めて高い。しかし、脈動流下で運転された場合の挙動については、流れの非定常問題が加わるためいまだ十分に明らかにされていない。

準定常法によるタービン性能予測について、WallaceとBlair¹⁾が行ったのが最初であり定常性能曲線の不正確さにより流量、出力とも25%以上の誤差を生じると報告している。つづいてBensonとScrimshaw²⁾は、Wallaceらの研究に詳細な検討を加え、注意深い実験を行っているが、それでもなお流量で約20%、出力で最大25%程度の誤差を報告している。さらに小菅ら³⁾は、一部波形変化を行って同様の解析をしているが、見積誤差が依然流量で22%、出力では40%にも達すると報告している。

本報においては、前報³⁾と同様に脈動周波数および振幅の影響について準定常法によりタービン性能予測を試み、その成立程度を調べた。

主な記号		添字
f : 脈動周波数	Hz	e : 実測値
L : 出力	kW	q : 準定常法特性
M : 質量流量	kg/s	m : 時間平均値
N : 回転速度	rpm	$*$: 修正状態
P : 圧力	Pa	1 : タービン入口
T : 温度	K	4 : 動翼入口
t : 時間	s	5 : 動翼出口
Tq : トルク	N・m	a : 大気状態
V : 流速	m/s	

2. 実験装置および方法

図1に示すような空気源と脈動流発生装置を組み合わせた既報³⁾とほぼ同一の実験装置によって空気運転した。

*東京大学生産技術研究所 第2部

動力の吸収は原則として、定常流実験の場合には、[CASE 1]として減速機を介して直流発電機を、非定常流実験の場合には、図2に示したように[CASE 2]として直接付属の圧縮機を、トルク検出器の従動側に接続して用いた。これによって非定常流運転時でも、回転慣性質量の増加を抑え、実機に準じた過給機本来の動特性が得られているものと思われる。

入口変動全圧は、シリコンオイルを封入した全圧ピトー管と小型圧力変換器(受圧面径3mm、固有振動数 $f_0=50\text{KHz}$)を組み合わせ、零点の移動を防ぐため水冷構造としたものにより得た。また変動温度は温度補償を行なった熱線風速計を用いた。なお、熱線の全長 $l=1\text{mm}$ と線径 $d=5\mu\text{m}$ との比は $l/d=200$ となり、このときの時定数は約1.38msとなる。しかし、熱線風速計の電気回路による一次応答周波数の改善を行っているため、今回の実験範囲では十分対応しているものと思われる。流速の検定は、非定常流実験の前後に定常流運転をして行っ

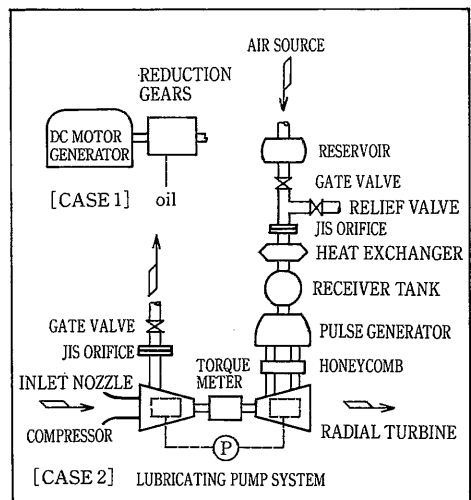


図1 実験装置全体図

研究速報
た。

また脈動流下の時間平均諸量は、以下の方法により求めた。タービン流量は、回転弁の影響を受けないように整定タンクを置き、その上流でJIS標準オリフィスによって得た。圧力は、細管により圧力変動を減衰させた後、水または水銀マンオメータを用いた。温度は、75 μ mの熱電対を感温部とする全温度プローブ、および外径1.0mmのシース熱電対を適宜用い、それぞれ時間平均値を得た。なお、タービンの時間平均回転速度は、歯車のパルスを検出する方法によった。

定常流実験は、回転弁を固定し負荷変化を与えて行った。定常流・非定常流実験を通じて、修正回転速度 $N^*=800$ とした。非定常流実験は、脈動周波数を10~70Hzとし、さらに、おのおのの周波数に対して振幅を定常流に近い状態から部分的に逆流の生じる範囲まで9~10点変えて行った。準定常法解析における負荷条件は、圧縮機による全負荷状態を基本とした。

3. 脈動流の代表例

3.1 パラメータの定義

非定常流れおよびタービン性能を記述するために以下のようなパラメータを定義して用いた。タービンは速度型の機械であり、入口速度三角形で代表されるように流速に最も影響を受けられるので、渦巻室入口での流速を用い、主として振幅変化に着目した速度振幅比 θ を以下の式(5)で定義した。

$$\text{膨張比} \quad R = \frac{P_{01}}{P_a} \quad (1)$$

$$\text{修正回転速度} \quad N^* = \frac{N}{\sqrt{T_{01}}} \quad (2)$$

$$\text{修正流量} \quad M^* = \frac{M \sqrt{T_{01}}}{P_{01}} \quad (3)$$

$$\text{修正出力} \quad L^* = \frac{L}{P_{01} \sqrt{T_{01}}} \quad (4)$$

$$\text{速度振幅比} \quad \theta = \frac{(V_{1\max} - V_{1\min})/2}{V_{1m}} \quad (5)$$

3.2 基本波形代表例

図3は、正弦波に準じた基本波形の代表例をロータリ弁の回転角に対して表したものである。同図の実験条件は、修正回転速度 $N^*=800$ 、脈動周波数 $f=20$ Hzにおいてバイパス弁をいくぶん開き、 $\theta=0.81$ としたときのものである。高振幅域でも周波数が増すと、トルク波形は平均成分が多くなり振幅が小さくなっていく。これは、回転慣性の影響により、トルク変動は流れに対応できないためと思われる。

4. 結果および考察

4.1 定常流特性

図4に修正回転速度 $N^*=800$ の定常流下の流量・出力特性を示す。図中の出力は軸受け損失を考慮に入れた実測値である。今回の脈動流実験範囲では、瞬間膨張比は1.0~1.60くらいの間を変化しており、準定常法をタービ

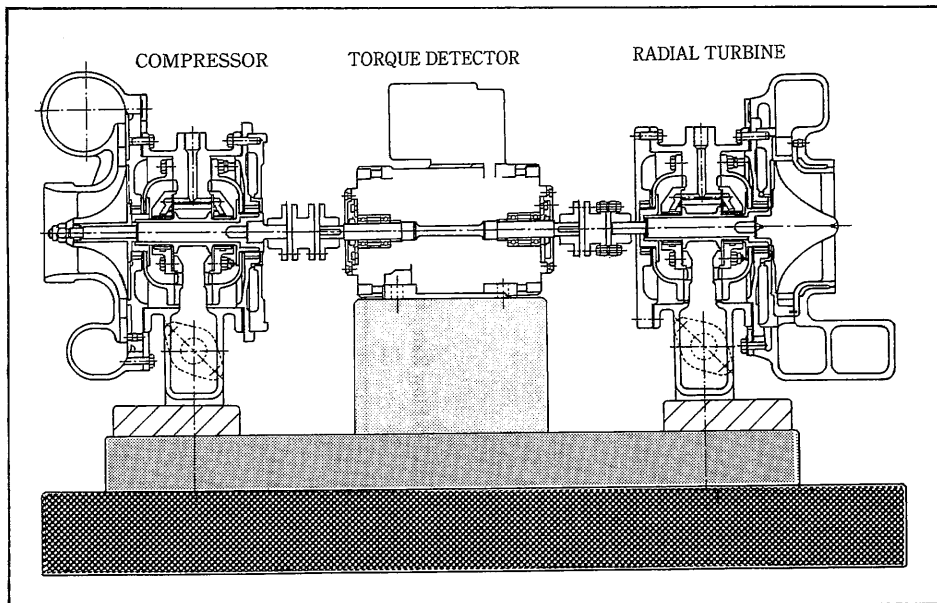


図2 トルク検出器内蔵過給機 [CASE 2] 概略図

研究速報

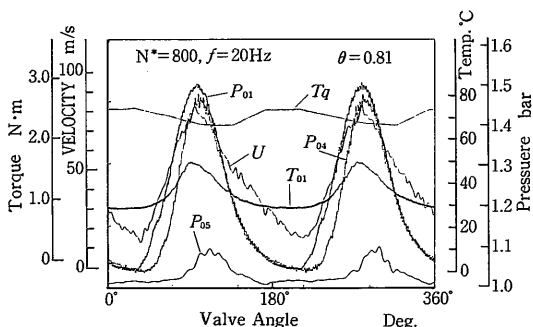


図3 波形代表例 (f=20Hz, θ=0.81)

ン性能予測に適用するときの、ほぼ全領域を実験値で得ている。

この結果を準定常法に適用するための曲線の近似は、非線形性が強い流量・出力両曲線とも、2区間に分割して近似した。

4.2 準定常法による性能予測法

準定常法による性能予測とは、タービンが非定常流下で運転されているときも各瞬間の微小時間についてみれば、定常流性能が成立するとして非定常流下のタービン性能を得ようとするものである。すなわち、次式で表されるように、瞬間膨張比より算出した流量の積分値を一周期 t_c で除して求めた。

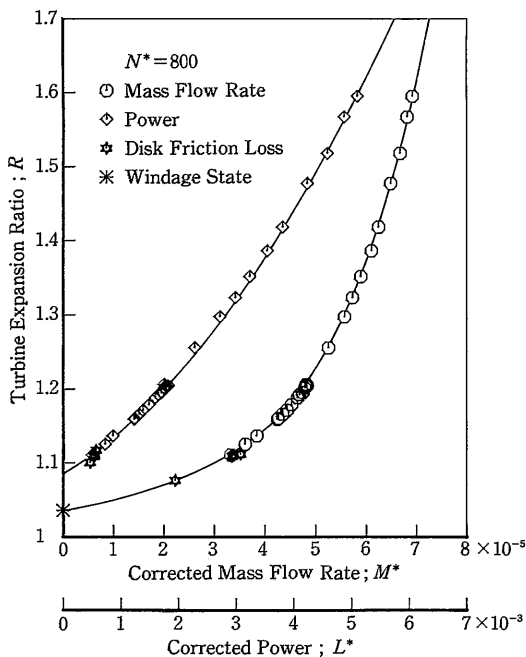


図4 定常流性能曲線 (流量, 出力)

$$Mq = \frac{1}{t_c} \int_{\text{cycle}} f M \left(\frac{P_{01}}{P_a}, T_{01}, N \right) dt \quad (6)$$

4.3 準定常法による性能予測結果

4.3.1 流量特性

図5は、基本波形に対する準定常法による脈動流下のタービン流量予測結果である。速度振幅比 θ に対する実測値 Me と準定常法による流量 Mq との比 Mq/Me の関係を、脈動周波数 f をパラメータとして表す。実験条件は、[CASE 2]の圧縮機による全負荷状態における修正回転速度 $N^*=800$ のときのものである。また、時間平均膨張比は、同一周波数においてほぼ同じであり、周波数が変わっても膨張比はわずかにしか変化しない流れである。

図から明らかのように $\theta=0.5$ くらいまでは周波数の影響はほとんど認められず、準定常法で求めた値 Mq により実測値 Me を高精度で見積もることができる。 θ が大きくなるにつれて、わずかに過小評価の傾向をみせるが、最大でも5%を越えない。なお、 θ の増加によって予測誤差が多少大きくなっているが、周波数の影響は小さい。また、 f が増大するにつれて、ごくわずかではあるが θ への依存性が現れてくる。この原因は、流れの慣性の影響によるものと思われる。

脈動流の主要素である周波数、振幅、波形のうち、波形の影響については現時点で言及できないが、タービン性能に最も影響を与える因子は、第一義的に振幅と思われる。Wallaceら¹¹⁾やBensonら¹²⁾などこれまでの研究は、主として脈動周波数について解析しており、振幅については述べていないので直接の比較は困難である。しかし、Bensonらの供試波形図からおおよその値を推定すると $\theta=0.85$ 程度に相当する流れである。この流れ条件で、Bensonらは30~70Hzの全周波数域で流量の見積誤差は、最大25%程度過小評価されると報告しており、大略の傾

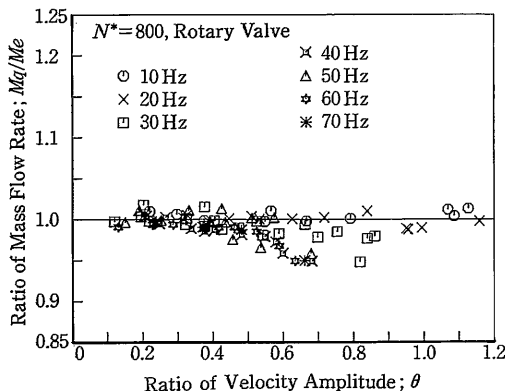


図5 準定常法による流量予測

研究速報

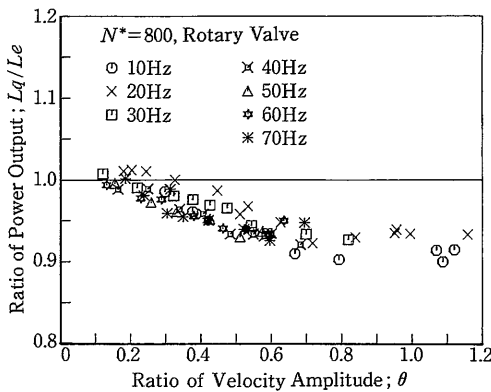


図6 準定常法による出力予測

向は本研究と一致する。

つぎに、脈動周波数の影響については余り顕著でなく、タービン非定常性能を表す良いパラメータとはなり得ない。準定常法は本質的に脈動周波数の影響を考慮できず、流れの慣性の影響も本実験範囲では、実験誤差を考えると特定できない。

以上のことより、全体として流量見積誤差は最大でも5%以内の範囲にあり、正弦波波形におけるタービン流量予測への流れの非定常性は、無視しても大きな影響はないものと思われる。言い換えれば、脈動流下でも瞬時のタービン流量特性は、定常性能曲線に沿って作動していると考えてよい。

また、実機での排気流の振幅変化は、供試波形ほど大きな変化を伴っていないこと、および2サイクル機関で $f=10\text{Hz}$ および 70Hz に対応する機関回転速度はそれぞれ 600rpm と $4,200\text{rpm}$ に相当し、この範囲以外の回転速度領域での排気流では、非定常性は残るけれども流れは平均流の多い連続した流れとなる。それゆえ、機関の全作動域で準定常法によるタービン流量予測を行っても問題ないものと思われる。

4.3.2 出力特性

図6は同様にして出力について表したものである。トルク検出器によって得られた測定平均値と、潤滑油の温度上昇から求めた軸受け損失との和を真の値 Le とし、準定常法によって得られた平均値 Lq とを比較し、それを速度振幅比 θ に対して表したものである。準定常法で出力を求める際、修正出力が零となる点以下の膨張比については、出力をすべて零と置いた。

周波数による影響が顕著でないのは流量特性と同様である。しかし、低周波数域から θ への依存性がいくぶん現れ、 θ の増大と共にわずかに過小評価の傾向をみせる。

流量に比して出力の予測精度が幾分劣るのは、出力は

流れの総合されたものであること、および実測値 Le の損失動力の見積りに起因する測定精度の影響と思われる。さらに、流量予測結果と異なり、 10Hz 、 20Hz の低周波状態でも高振幅比の領域で過小評価されるのは、図5の供試タービンの出力が零である膨張比 ($R=1.086$) が流量特性 ($R=1.037$) より高く、これ以下の膨張比では出力をすべて零と置いたためと考えられる。全体として出力見積誤差は、全領域で10%以下の範囲にある。しかし、出力予測に限ってみれば、先に報告した時間平均法による結果⁵⁾のほうが見積誤差は小さくなる。これは修正回転速度を与えれば、時間平均膨張比でタービン出力が定まるためと考えられる。

今まで報告された出力に関する準定常解析で研究者によって結果が異なり、実測値との誤差が最大40%も見られたのは、定常性能曲線と組み合わせる出力の変動値を求めることの困難さに加え、その基になる定常性能や脈動流下での出力の実測値に大きな問題があったのではないかと思われる。特に過給機の軸受けには一般に平軸受けが多用されており、本実験でも軸受け損失の占める割合は、タービンの発生全動力の約15%程度見込まれるため、予測精度を数%の範囲で議論するときは、大きな影響を受ける。

5. 結 言

本研究よって、以下のような結論を得た。

- (1) 準定常法による脈動周波数の影響は顕著でない。
- (2) 速度振幅比は、タービン性能に大きな影響を与える因子として作用する。
- (3) 流量予測に対しては、脈動周波数および速度振幅比の影響を無視してもよい。
- (4) 出力については、脈動周波数の影響は無視できるが、速度振幅比が大きくなるとわずかに推定誤差を生じる。しかし、本実験範囲では、ほぼ10%を越えない。

(1990年2月26日受理)

参 考 文 献

- 1) Wallace, F.J. and Blair, G.P., ASME Paper, 65-GTP-21 (1965), 1.
- 2) Wallace, F.J., Adgey, J.M. and Blair, G.P., Proc. Inst. Mech. Engrs., Vol. 184, Pt. 1 (1969-70), 183.
- 3) Benson, R.S. and Scrimshaw, K.H., Proc. Inst. Mech. Engrs., Vol. 180, Pt. 3J Paper 23, (1965-66), 74.
- 4) Kosuge, H. et al., Trans. ASME, J. Eng. Power, 98-1 (1976), 53.
- 5) 小西・吉識, 生産研究, Vol. 42-2. No. 485, (1990-2), 34.