

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 6 報 等価ノズルによる特性近似——

The Study of Characteristics of Radial Inward-Turbines for Exhaust Gas Turbochargers

Under Non-Steady Flow Conditions

——6th Report, Approximation of Turbine Characteristics by Equivalent Nozzle——

小 西 奎 二*・吉 識 晴 夫*・田 代 伸 一*

Keiji KONISHI, Haruo YOSHIKI and Shin-ichi TASHIRO

1. 結 言

これまでの研究によって、動圧駆動タービンの非定常流時間平均特性は、流れの振幅変化によって大きな影響を受けること、またその特性は、定常流特性を基礎とした時間平均法および準定常法によって大略予測可能であることが明らかになった^{9)~10)}。しかしながら、タービン特性を広範囲に渡って実測により求めることは、定常流特性でさえも、実験設備の巨大化と複雑さおよび出力計測や負荷吸収容量の制約など種々の困難さを伴う非常にやっかいな問題である。また、実機に装着された状態では、流量、出力計測自体が大きな制約を受ける。さらに、通常の表示法で表した修正流量または修正出力に対するタービン膨張比との関係を時間平均法および準定常法によって正確に推定することは、かならずしも簡易な計算とは言えず、高精度でより簡便な性能評価法が待たれている現状である。

それゆえ、本研究ではタービン流路系を一次元等価ノズルモデルに置き換えて、タービン単体の時間平均特性近似を行い、動圧駆動タービンの設計に資することのできる簡易計算法をめざしている。

2. 定常流特性近似

2.1 流量特性

連続の条件が成りたつとすれば、一般にノズルを含む管路系の質量流量 M は、流量係数を ϕ とすれば次式で表される。

$$M = \phi A_N C_{ad} \rho_{01} \quad [\text{kg/s}] \quad (1)$$

大気圧までの膨張を考えると、ノズルを通過する修正流量は、膨張比を R とし次式となる。

$$M^*_{STD} = \phi A_N \frac{1}{R_g} \sqrt{2 C_p \left\{ \left(\frac{1}{R} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{1}{R} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right\}} \quad (2)$$

ここで

$$\phi = \phi_N \phi_R \phi_{STD}$$

*東京大学生産技術研究所 第 2 部

ϕ_N : タービンノズル流量係数

ϕ_R : 動翼の流量係数

ϕ_{STD} : 定常流特性における ϕ_N , ϕ_R 以外にかかる渦巻室、曲がりなどによる流量係数(タービン定数)

A_N : ノズルスロート部断面積 $[\text{m}^2]$

$$(\pi r_4 b_4 \sin \alpha)$$

ρ_{01} : 空気密度 $[\text{kg/m}^3]$

C_{ad} : 理論断熱膨張速度 $[\text{m/s}]$

R_g : ガス定数 $[\text{kJ/kg K}]$

である。供試タービンでは、動翼外半径 $r_4 = 70 \text{ mm}$ 、ノズル幅 $b_4 = 17.5 \text{ mm}$ 、流入角 $\alpha = 16.5^\circ$ より、 $A_N = 2186 \text{ mm}^2$ となり、したがって等価ノズルのスロート径は、52.75 mm となる。

なお、本研究では、個々の流量係数を求めていないので他の研究を参考にし、最終的には実験結果と一致するよう個々の流量係数を見積もった。

ϕ_N : 水町ら^{11,12)}の研究によればノズルの流量係数は、膨張比には余り関係せず 0.87~0.95 の範囲にあると報告している。それゆえ、ここでは $\phi_N = 0.91$ とし、全解析を通じて一定とした。

ϕ_R : 動翼で生じる全損失に対する流量係数は、個々のタービンによって値が大きく異なるため、実験結果を基にして見積もった。供試タービンでは $\phi_R = 0.815$ とした。

ϕ_{STD} : 式(2)で表される関係は一般の管路系で成り立つものであり、基本的には平方根の関数となる。このままでは正確に個々の流量係数を求め得たとしても、非線形性の強い低膨張比域や、高膨張比になるにしたがってタービンノズル部で流れがチョークしていく運転条件を精度良く表しにくい。それゆえ、 ϕ_{STD} を膨張比の関数として考え、 $\phi_{STD} = \sqrt{(1/R^{\gamma})}$ とおく。ここで指数は、非線形性の強い領域など微少な変化に対応する修正係数で通常は 1 としてよい。(なお、本実験範囲で $R = 1.7$ まで変化したとき、 ϕ_{STD} は約 0.982~0.85 の値をとる)。

さらに、式(2)は原点を通る式であり、タービン特有のウインディッジ状態を考慮できない。動翼の遠心力に

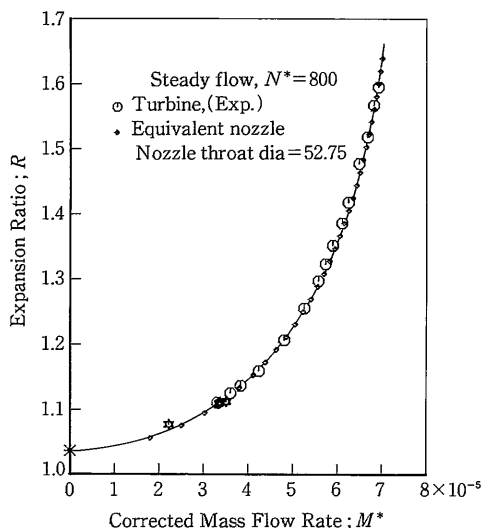


図1 定常流修正流量特性近似

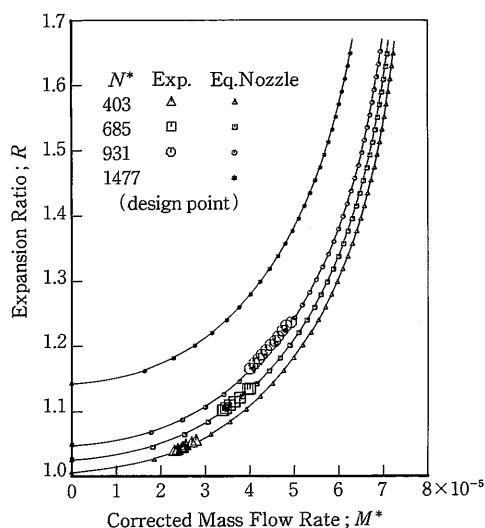


図2 定常流修正流量特性近似, 修正回転速度変化

よる圧力上昇は一般に次式で表される。

$$\left(\frac{P_w}{P_a}\right)_{windage} = \left\{ 1 + \frac{\omega^2}{2 c_p T_{01}} (r_4^2 - r_{5 out}^2) \times \left(\frac{P_{01}}{P_a} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right\}^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (3)$$

ここで

P_w : 動翼入口圧力 [Pa]

P_{01} : タービン入口全圧 [Pa]

ω : 角速度 [rad/s]

$r_{5 out}$: 動翼出口の代表半径 [m]

r_4 : 動翼外半径 [m]

また、動翼出口の代表半径は次式で表される。

$$r_{5 out} = r_{5 i} + \frac{3}{4} (r_{5 o} - r_{5 i}) \quad (4)$$

ここで

$r_{5 o}$: 動翼出口外半径 [m]

$r_{5 i}$: 動翼出口ボス半径 [m]

供試タービンでは、修正回転速度 $N^*=800$ のときタービン回転速度は、 $N=14,000\text{rpm}$ ($T_{01}=313\text{K}$) であり、 $(P_w/P_a)_{windage}=1.034$ となり、実測値とほぼ一致する。等価ノズルによる実際の計算は、大気圧に代えて式(3)より求められる動翼の遠心力によるウインディッジ状態まで膨張するとして取り扱った。

以上の各係数を考慮して、既報⁹⁾で求めた定常流性能曲線を近似した結果が図1である。実験点を高精度で見積もることができ、したがって、式(2)は実測値をほぼ近似している。

また、修正回転速度を変化させた場合は、式(3)によ

りウインディッジ状態点を考慮することにより、低修正回転速度から最高速の設計点まで見積もることができる。図2は、実験条件としてタービン入口温度 $T_{01}=313\text{K}$ のとき、修正回転速度 $N^*=403, 685, 931, 1477$ (設計点) について表したものである。設計点での実測値は得られていないが、その他の修正回転速度については実測値と良い対応を示し、全体としてほぼ良好な結果が得られる。

さらに、他のタービン型式およびサイズについて表したものが図3である。比較として用いたタービンは、車両用ディーゼル機関の過給機タービンで、動翼外形 $D=70\text{mm}$ 、ノズル羽根無し of 軸方向分割型2送入孔形式のものである。修正回転速度 $N^*=1120, 1680, 2250, 2800, 3370, 3920$ について全周送入運転したものである。タービンサイズが小さくなると、流量に対する等価ノズルの喉部断面積の影響が相対的に大きくなる。ノズルの流量係数 $\phi_N=1$ とし、動翼の流量係数と等価ノズルの断面積の両者を考慮して、実験結果と一致するように動翼の流量係数 $\phi_R=0.85$ を求めた。タービン型式およびサイズが異なっても各運転条件をほぼ近似することができ、良好な結果が得られている。それゆえ、図1から図3より本近似法は、タービン型式、サイズおよび運転条件が変化しても、係数を個々のタービンに合わせて適当に選べば、一般的に上式の形で流量特性を表し得ると言える。

2.2 出力特性

流量特性に準じて出力特性の近似を試みた。すなわち、修正流量 M^*_{sTD} は先のノズルの近似式(2)より算出し、動力のタービン定数を ϕ_L とすれば、定常流下の修正出力 L^*_{sTD} は次式で表される。

研究速報

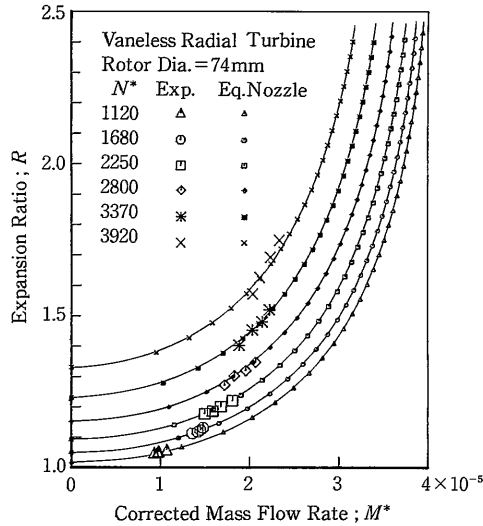


図3 定常流修正流量特性近似, 形式・サイズ変化

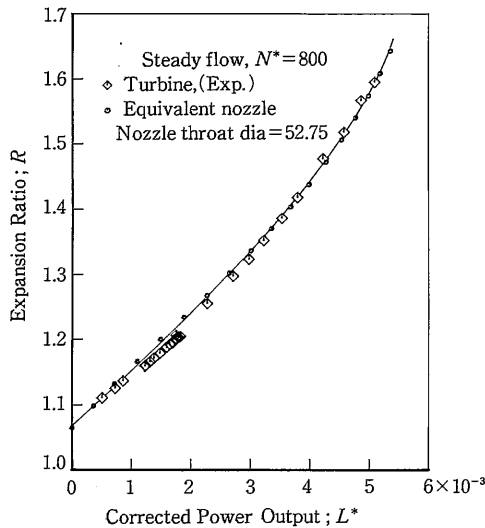


図4 定常流修正出力特性近似

$$L^*_{STD} = \phi_{LCF} \left\{ 1 - \left(\frac{1}{R} \right)^{\frac{x-1}{x}} \right\} M^*_{STD} \quad (5)$$

出力特性は、流量特性に対して非線形性が弱い点を考慮し、流量特性近似と同様の考えをすると、膨張比を R として $\phi_L = 0.82R^x$ が得られる。また、出力に対するウインディッジ点は、現時点では評価が困難なため実測値を参考にして、流量特性におけるウインディッジでの膨張比の2倍とし、各膨張比に加えた。なお、本実験範囲で $R = 1.7$ まで変化したとき、 ϕ_L は約0.736~0.622の間の値をとる。

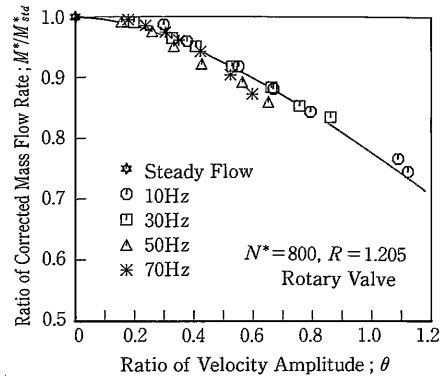


図5 速度振幅比と流量比の関係

この結果を図示すると図4となる。低膨張比域でわずかな差異が認められるが実験点をほぼ見積もることができる。過給機タービンの出力特性について、このような近似法は初めての試みであり、この方法によれば詳細な実験を行わなくとも、2~3点のデータから大略の出力特性を見積もることが可能となる。

3. 非定常流流量特性近似

3.1 実測時間平均特性

図5は、実測より求めた非定常流下の時間平均タービン流量特性について、膨張比を一定としたときの流量比 M^*/M^*_{std} と速度振幅比 θ の関係を、脈動周波数 f をパラメータとして表したものである。流量比は、同一膨張比の定常流特性値に対する非定常流下の時間平均修正流量の割合を表す。修正回転速度、修正流量および膨張比の値は、計測器によって得られた時間平均値から算出した。実験条件は、修正回転速度 $N^* = 800$ 、時間平均膨張比 $R = 1.205$ であり、流れは正弦波に準じた基本波形による脈動周波数 $f = 10 \sim 70 \text{ Hz}$ である。

非定常流下の時間平均タービン修正流量特性は、同一膨張比と比較して全領域で減少する。流量の減少割合は、脈動周波数にはほとんど影響を受けず、速度振幅比 θ が大きくなるほど増大する。タービン流量割合は、 θ が0.2位までの流れでは、定常流特性と明確な区別が認められないが、 θ が0.2より大きくなると速度振幅比に対して強い関数関係を示す。この原因は、 θ が約0.2以下の領域では流れの非定常性は残るが定常流成分の多い、定常流との差異の少ない流れのためと考えられる。

3.2 特性近似

つぎに、先に求めた図5で表される非定常流下の流量特性を、定常流特性と同様に等価ノズルの式で近似する。等価ノズルの流量を与える式(2)に、流れの非定常性に

研究速報

よる流量係数を考慮すると、非定常流下の時間平均修正流量 M^*_{UNST} は、

$$M^*_{UNST} = \phi_{UNST} \times M^*_{STD} \quad (6)$$

となる。ここで

ϕ_{UNST} : 非定常流を表す流量係数で定常流特性では 1 となる。

タービン特性に影響を与える流れの非定常性は、振幅： θ 、周波数： f 、波形： $wave$ の 3 成分によって代表されるとすれば、

$$\phi_{UNST} = \phi_{UNST}(\theta, f, wave) \quad (7)$$

で表される。周波数 f は、これまで得られた結果から、タービン特性に直接影響を与える因子とはならないことから外す。さらに、波形の影響は、既報^{7),8),10)}において明らかにされているように、低周波数域で振幅の影響を通して波形の影響が現れる程度と見られるので、 θ の中に含めて考える。したがって、非定常流を表す流量係数 ϕ_{UNST} は、速度振幅比 θ のみの関数として考えてよいものと思われる。

また、速度振幅比 θ は、0 で定常流、1 を越えると部分的に逆流を生じる流れを表し、 θ はほぼこの範囲内を変化するものとする。それゆえ、 $\phi_{UNST} = \phi_U \theta$ とおき実験結果と一致するように ϕ_U を選ぶと大略非定常流流量特性を近似できる。 ϕ_U はタービン個々によって決まる定数であり、本供試タービンの非定常流実験結果から $\phi_U = 0.79$ を得る。さらに、図 5 より、同一膨張比で比較した修正流量もまた速度振幅比 θ に対して対数関係が認められるので、次式とおけばよいと考えられる。

$$\phi_{UNST} = \phi_U \theta^{\frac{2}{3}} \quad (8)$$

この関係を用いて、式(6)に代入して得られたものが図 6 である。図中の大きな記号は実測値を表す。非定常流での実験範囲が限られており、また $\theta = 1.12$ の低膨張比域でわずかな差が認められるが、実験結果をほぼ近似することができる。流量係数の比例定数は定常流特性から非定常流下の流量減少割合を示すことになる。なお、タービンの流量減少割合を表す ϕ_{UNST} の値は、非定常流下の実験点が得られていないような一般の場合には、既報^{9),10)}の準定常法によって数個の非定常流流量値を求めた後 ϕ_{UNST} を決定すればよい。

なお、非定常流下のタービン出力特性近似は、既実験結果⁵⁾から定常流特性と同一であるという結論が得られているため試みていない。

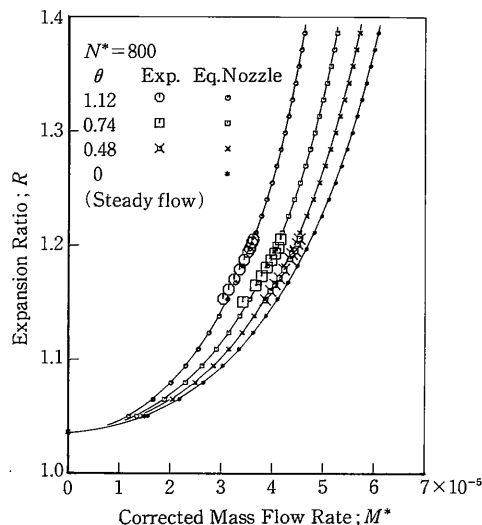


図 6 非定常流修正流量特性近似

4. 結 言

本研究によって以下の結論が得られた。

- (1) 動翼の遠心力によるウインディッジでの圧力上昇を考慮すれば、一次元等価ノズルモデルにより、ラジアルタービンの定常流下の流量および出力特性を高精度で近似できる。
- (2) 非定常流下の流量特性は、流量係数を速度振幅比の関数として考慮すれば、大略近似できる。

終わりに、本研究を進めるにあたり、東京大学生産技術研究所第二部吉識研究室の遠藤敏彦氏、および高間信行氏にご協力頂き、厚くお礼申し上げます。

(1991年6月20日受理)

参 考 文 献

- 1) 水町, 生研報告, Vol. 8-1 (1958-12), 1.
- 2) 水町, 吉識, 遠藤, 生研報告, Vol. 28-1 (1979-12), 1.
- 3) 小西, 吉識, 生産研究, Vol. 42-2 (1990-2), 122.
- 4) 小西, 吉識, 生産研究, Vol. 42-5 (1990-5), 272.
- 5) 小西, 吉識, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 18-69, (1990-6), 41.
- 6) 小西, 吉識, 生産研究, Vol. 42-9 (1990-9), 557.
- 7) 小西, 吉識, 生産研究, Vol. 42-11 (1990-11), 649.
- 8) 小西, 吉識, 生産研究, Vol. 42-12 (1990-12), 653.
- 9) 小西, 吉識, 機論, Vol. 56-532 (1990-12), 3756.
- 10) 小西, 吉識, 機論, Vol. 57-533 (1991-1), 94.