

ラジアルタービン内流れの3次元数値解析

Three Dimensional Flow Analysis of Radial Turbine

土屋直木*・吉識晴夫*

Naoki TSUCHIYA and Haruo YOSHIKI

1. はじめに

ガスタービンエンジンは、多種燃料の適合性、クリーンな排ガス、騒音・振動が少ない等の特徴を持つことから、レシプロエンジンに代わる次世代の自動車用エンジンとして注目され始めている。出力が数百馬力以下の小流量ガスタービンの場合、1段で3~4の膨張比を得られることや構造が簡単で安価に製作できる等の理由から、半径流（ラジアル）式が用いられることが多い。しかし速度型内燃機関は小出力になるに従って効率は下がる傾向にあり、高い効率を得るためには入口温度を上げたり、最適な翼形状を探る必要がある。近年、タービンの設計段階において数値流体力学が盛んに取り入れられるようになってきたが、半径流式では軸流式に比べて未だ実験や経験に依るところが大きい。

本研究では、高効率タービンを設計する際の指針を与える前段階として、東森らによってLDV（レーザードップラー流速計）で内部流れが計測された¹⁾ラジアルタービンについて、Beam-Warming法に基づくTVD差分法で非粘性数値解析を行った。その結果について、実験結果、準3次元解析結果及びBeam-Warming法による粘性解析結果²⁾と比較、検討した。

2. 基礎式及び数値解法

ラジアルタービン内流れの基礎方程式として、非粘性圧縮性流体の基礎方程式であるオイラー方程式を用いた。密度を ρ 、速度成分を u, v, w 、エネルギーを e 、圧力を p 、 ξ_i 方向の反変速度を U_i 、角速度を Ω 、ヤコビアンを J として基礎式を表すと次のようになる。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E_i}{\partial \xi_i} + H = 0 \quad (1)$$

$$Q = J^{-1} \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ e \end{bmatrix}, \quad E_i = J^{-1} \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u U_i + \xi_{i,x} p \\ \rho v U_i + \xi_{i,y} p \\ \rho w U_i + \xi_{i,z} p \\ (e+p) U_i - \xi_{i,t} p \end{bmatrix}$$

$$H = J^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ -\rho \Omega v \\ \rho \Omega u \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

時間方向差分に1次精度オイラー陰解法を用いて、デルタ形式で表すと次のようになる。

$$\left[I + \Delta t \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left(\frac{\partial E_i}{\partial Q} \right) + D \right] \Delta Q = -\Delta t \left[\left(\frac{\partial E_i}{\partial \xi_i} \right) + H \right] \quad (2)$$

ここで

$$LHS \equiv \left[I + \Delta t \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left(\frac{\partial E_i}{\partial Q} \right) + D \right]$$

$$RHS \equiv \left[\left(\frac{\partial E_i}{\partial \xi_i} \right) + H \right]$$

とおけば、(2)式は

$$LHS \cdot \Delta Q = -\Delta t \cdot RHS$$

と表せる。

計算の効率化のため、左辺LHSの離散化には陰的近似因子化法、対角化、不完全LUD分解を用いた。右辺RHSの離散化にはChakravarthyらの方法³⁾に基づくTVDスキームを用いた。また、定常解を求めることを前提にしているので、各格子点ごとに時間刻みを持たせる局

*東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

所時間刻みを用いることで収束を加速させた。

3. 計算コードの検証

独自に計算コードを開発したため、コードを検証する目的で、NACA0012 単独翼まわりの計算を行った。その結果、マッハ数等値線分布、圧力等値線分布及び圧力係数分布について、Yee らによる結果⁴⁾と一致する解が得られた。これにより本コードの妥当性を確認することができた。

4. 計算結果及び考察

計算対象のラジアルタービンの形状を図1に示す。翼枚数は14枚、動翼入口直径は180mmである。本計算では翼厚さは無いものとみなした。すべての翼間で同じ流れが起きているという周期境界の仮定の下で、1つの翼間についての計算を行った。図2は計算格子で、流れ方向に111格子、Hub から Shroud 方向に36格子、周方向に31格子を配置したH型格子である。図3は動翼内速度のLDVによる計測点及び計測面である¹⁾。

図3における OUTLET 面での相対速度の大きさと相対流れ角について、実験結果¹⁾、準3次元解析結果¹⁾及び Beam-Warming 法 (BW 法) による計算結果²⁾と本計算結果を比較したものを図4に示す。本計算は翼厚さを考慮していない非粘性解析であるのに対し、BW 法は翼厚さを考慮した粘性解析である。BW 法で、Suction Surface (負圧面) と Pressure Surface (正圧面) で速度が0となっているのは、翼面上で Non-Slip 条件を与えているためと思われる。相対速度の大きさについて、Suction Surface から Pressure Surface に向かうに従って値が減少していく様子は、実験結果や準3次元解析結果と一致している。Mid

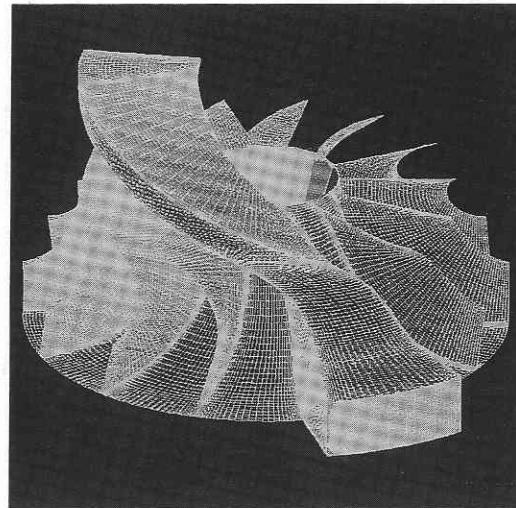
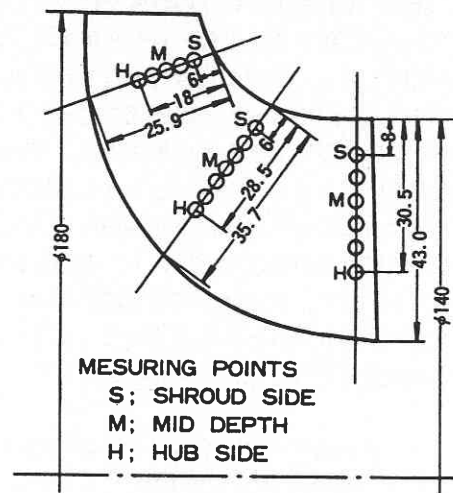
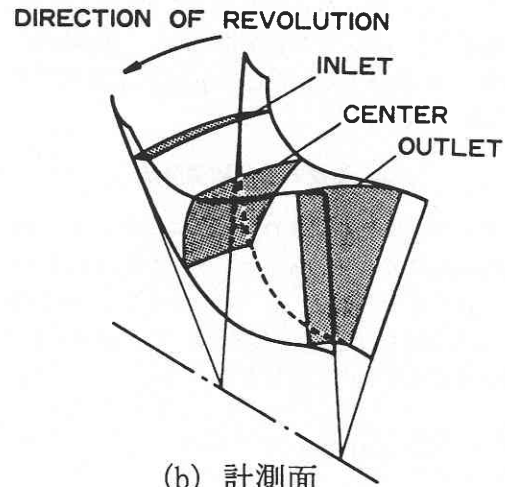


図2 計算格子 (111×36×31)



(a) 計測点



(b) 計測面

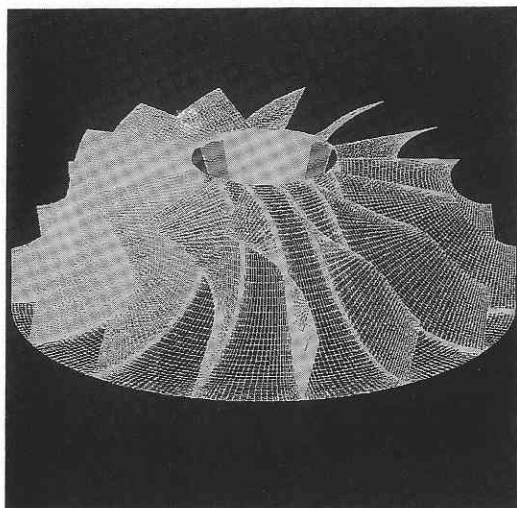
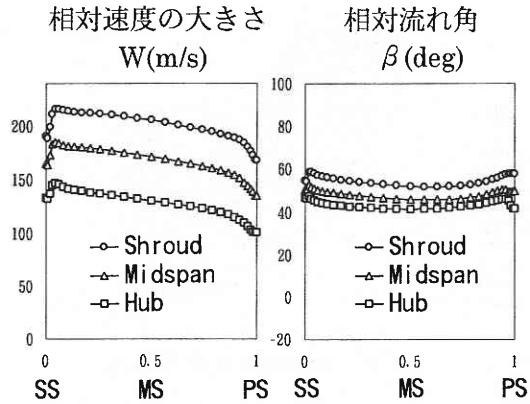
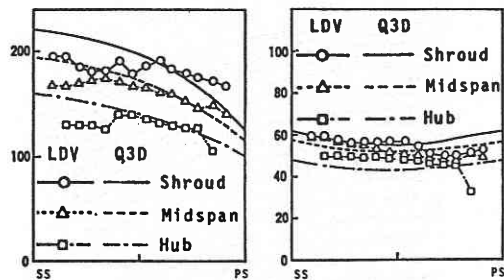


図1 タービン形状

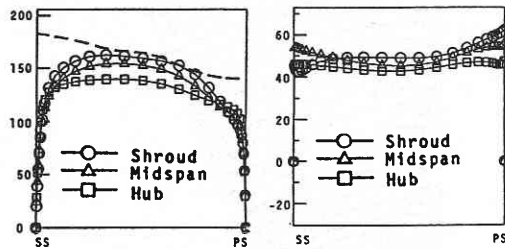
図3 LDV による計測点及び計測面



(a) 本計算結果



(b) 実験結果



(c) Beam-Warming法による計算結果

SS ; Suction Surface
MS ; Mid Surface
PS ; Pressure Surface

図4 OUTLET面の相対速度の大きさ及び流れ角の比較

Surface (負圧面と正圧面の中間面) 付近では, Midspan 及び Hub の計測点において, 実験結果と定量的な一致も見られる. これに対し, BW 法による結果は, 実験結果に比べて少し小さい値に見積もられている. 流れ角については, 本解析結果, BW 法による結果とも実験結果と定性的に良く一致している.

図5はタービン翼の Suction Surface, Mid Surface 及び Pressure Surface における圧力等値線分布である. Mid Surface と Pressure Surface では, 動翼入口から出口に向けてきれいな圧力分布となっており, タービンとしては理想に近い圧力分布となっている. 図6は, 図5における各面での速度ベクトル分布である. Suction Surface では流れの方向がやや Shroud 方向に向いているが, Mid Surface では流路に沿ったきれいな流れになっている. Pressure Surface では Hub 付近で流れのうねりが見られる.

図7は図3における INLET 面, CENTER 面, OUTLET 面に最も近い格子面における速度ベクトルの面内成分を表したものである. INLET 面では, Hub 側で Suction Surface から Pressure Surface に向かい, Shroud 側で Pressure Surface から Suction Surface に向かう渦が発生していることがわかる. CENTER 面, OUTLET 面と順に見ていくと, この渦の中心は下流に向かうに従い Hub 面に近づいていき, やがて消滅している.

本計算では, 翼厚さ, 粘性, チップクリアランスからの漏れ流れ等を考慮していないので, 大まかな流れの様子について比較する定性的な議論にとどめておくべきである. さらに踏み込んだ議論をするためには, これらを考慮した解析を行う必要がある.

5. ま と め

TVD 差分法による計算コードを開発し, ラジアルタービン内流れの3次元数値解析を行った.

その結果,

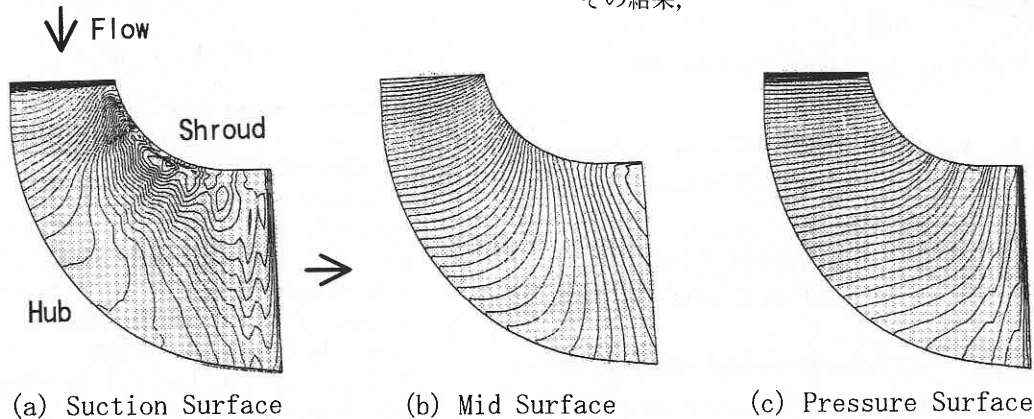


図5 圧力等値線分布

研究速報

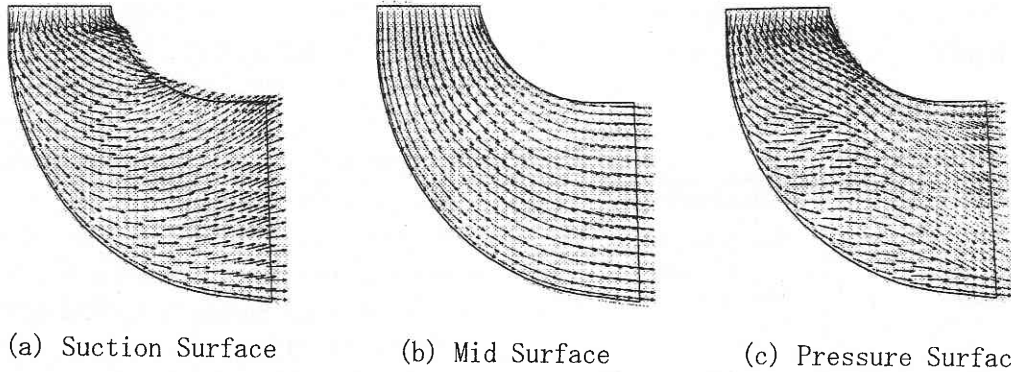


図6 速度ベクトル分布

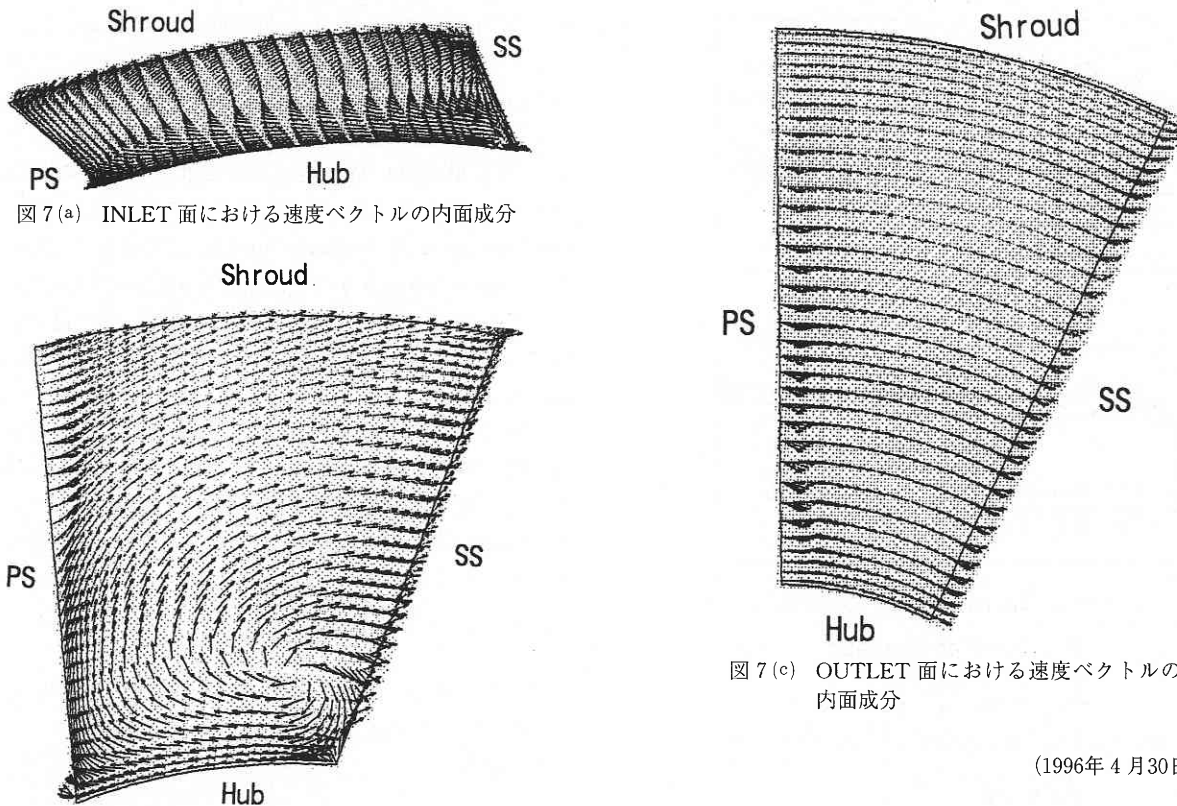


図7(a) INLET面における速度ベクトルの内面成分

図7(c) OUTLET面における速度ベクトルの内面成分

図7(b) CENTER面における速度ベクトルの内面成分

(1996年4月30日受理)

参考文献

- 1) H. Higashimori and et al. "Flow Study in Radial Impellers Using a Laser Velocimeter" International Gas Turbine Congress II-9, 15, 1987.
- 2) T. Yamane and et al. "Numerical Prediction of Radial Turbine Performance for an Advanced Small Turbocharger" I. G. T. C. III-133, 140, 1991.
- 3) S. R. Chakravarthy and et al. "A New Class of High Accuracy TVD Schemes for Hyperbolic Conservation Laws" AIAA paper 85-0363, 1985.
- 4) H. C. Yee and et al. "Implicit TVD Schemes for Hyperbolic Conservation Laws in Curvilinear Coordinates" AIAA Paper 85-1513, 1985.

- ・実験結果, 準3次元解析結果及び Beam-Warming 法による結果と定性的に一致する解を得ることができた.
- ・流路に垂直な面において, Hub 付近で Suction Surface から Pressure Surface に向かう渦を確認することができた.

低周速, 高効率タービンの設計指針を明らかにするために, 今後, 翼厚さ, 粘性, チップクリアランスからの漏れ流れ等を考慮した解析を行う予定である.