

水車ステーベーン, ガイドベーン周りの3次元流れ解析

Numerical Analysis of Three-dimensional Flow in Stay Vane and Guide Vane Cascade of Hydroturbine

谷口伸行*・小林敏雄*・長藤友建**・鈴木敏暁**・島田尚子**
 Nobuyuki TANIGUCHI, Toshio KOBAYASHI, Tomotake NAGAFUJI, Toshiaki SUZUKI and Takako SHIMADA

1. ま え が き

フランス水車, カプラン水車など反動水車の流路の一部を構成するステーベーン (以下SVと略す), ガイドベーン (以下GVと略す) まわりの流れに関しては, 羽根間圧力分布の実測および2次元ポテンシャル流れ解析の適用により解析・実験両面から研究されている。中程度の比速度 (100rpm kw m) のフランス水車について, 流れの2次元性が高いことが報告されている¹⁾²⁾。しかし, 高比速度フランス水車では流路高さが大きくなり, 流れの3次元性が無視できなくなると推察される。

いっぽう, 流れ解析の分野ではポテンシャル解析からオイラー解析あるいは粘性解析への発展段階にあり, おのおの解析結果の差異および解析上のノウハウなど今後研究を推進するうえで解明すべき問題が含まれている。

そこで本報では, 3次元流れが期待しうる高比速度 (200 rpm kw m) のフランス水車SV, GV³⁾を選定し, 有限要素法によるポテンシャル解析 (以下FEM-Pと呼ぶ) および有限体積法による粘性解析 (以下FVM-Vと呼ぶ) をともに3次元で行い, SV, GVまわりの流れの特徴を明らかにするとともに, 両解析結果の比較およびそれらの差異などについて報告する。

2. 解 析 手 法

2.1 FEM-P³⁾

ポテンシャル流れを仮定すると速度ポテンシャルはラプラス方程式

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

に従い, 圧力は

$$1/2(\nabla \phi)^2 + U + p/\rho = \text{constant} \quad (2)$$

より得られる。離散化には任意6面体要素による有限要素法を用い, 係数行列に関して直接計算により数値解を得た。流入出境界上で速度条件を満たすように循環分布

を与えた。

2.2 FVM-V⁴⁾

粘性解析においては高レイノルズ数流れを表すために $k-\epsilon$ 2方程式乱流モデルを用いた⁵⁾。定常流れにおける乱れエネルギー k および散逸 ϵ の式は,

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G - \epsilon$$

$$; G = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} G + C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3)$$

と与えられ, 渦粘性は

$$\nu_t = C_\mu k^2 / \epsilon \quad (4)$$

と表される。モデル定数は $C_\mu = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$ とした。

壁境界条件には対数速度分布測に基づく壁法則を適用した。流入条件について実験値が得られていないため, 平均流入速度の1/10の乱れと層流粘性の100倍の渦粘性を仮定した。また, レイノルズ数は実験に合わせて与えた。

格子は一般座標系に従い与え, 任意のセル P は6面体隣のセルに接する。隣接セル (または代表点) を E, W, N, S, T, B で, 境界面を e, w, n, s, t, b で表す。連続の式とスカラー量の式はこのセルで評価し, 速度成分は代表点を結ぶ方向に射影 (共変) 成分として面上 ($e \sim b$) に代表点を持つ異なるセル (staggered mesh) で評価する。セル内で積分した物理量 ϕ の輸送方程式は,

$$\sum_{nb}^{nb} \left\{ \iint_{A_{no}} \mathbf{J}_{no} \cdot d\mathbf{n}_{no} \right\} = \iint_{\omega_P} S_{av} \quad (5)$$

ここで, $\mathbf{J} (= \mathbf{v}\phi - \Gamma \nabla \phi)$ は面からの全フラックス, \mathbf{n} は面法線ベクトル, S は ϕ の生成量, \mathbf{v} は速度ベクトルおよび Γ は拡散係数である。また, 添字 nb は e, w, n, s, t, b を意味し, 左辺はこれらの総和を取る。

面積分の方法を面 e を例に示すと,

*東京大学生産技術研究所 第2部

**(株)東芝重電技術研究所

研 究 速 報

$$\iint_{A_e} J_e \cdot dn_e = JD_e F(|Pe|) (\phi_P - \phi_E) + JM_e \phi_{UP} \quad (6)$$

ここで、 $JM = \mathbf{v} \cdot \mathbf{A}$ 、 $JD = (\Gamma/L)(\mathbf{e} \cdot \mathbf{A})$ 、 $Pe = JM/JD$ (ペクレ数) であり、 L は点 P 、 E の距離、 \mathbf{e} はその単位ベクトル、 \mathbf{A} は面ベクトル、 ϕ_{up} は風上値を意味する。 \mathbf{v} および \mathbf{e} は一般には面ベクトルと直交しないことに注意された。

式(4)の Pe の関数 F はスキームによって表1のように定義される。本解析ではHybridスキームを使用した。関数 F は $Pe = 2$ を境に中心差分から風上差分に切り替わり、その際拡散項は無視される。最終的な離散式は以下の線形方程式で表示される。

$$a_P \phi_P = \sum_{NB} a_{NB} \phi_{NB} + b \quad (7)$$

ここで、 a_P 、 a_{NB} は中心および隣接点に対する係数で、 b は生成項である。

この手法の特徴は式の離散化が物理座標より直接得られる点にあり、解析座標への変換を必要としない。また、staggered meshにより式の構成は複雑になるが、数値解析上の不安定性を適切に抑制する利点を有している。

計算アルゴリズムにはPatankarらのSIMPLE法⁶⁾を適用した。繰り返し計算の収束条件は、SIMPLE法における圧力修正量が解析場の最大圧力差の0.1%以内とした。

表 1 関数 F の表式⁶⁾

Central difference	$F(Pe) = 1 - 0.5 Pe $
Up wind	$F(Pe) = 1$
Hybrid	$F(Pe) = \max(0, 1 - 0.5 Pe)$

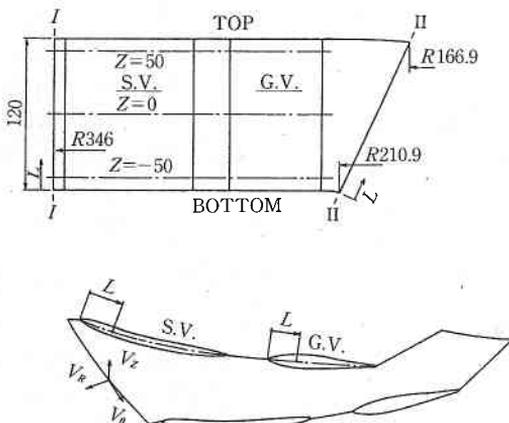


図 1 解析領域

3. 解析結果

3.1 解析条件

図1に解析に用いたSV, GVまわりの形状を示す。ここで、流入、流出断面の速度、圧力は周方向に一定であるとの仮定により、周方向のある一点で高さ方向に測定した実験値を境界条件に利用している(断面I, II)。速度、圧力は以下の無次元値で表示する。

圧力係数 $C_P = P/(\rho E)$; 圧力 P (N/m²)
 速度係数 $C_R = V_R/\sqrt{2E}$; 速度 V (m/s)
 $C_Z = V_Z/\sqrt{2E}$
 $C_\theta = V_\theta/\sqrt{2E}$

ここで、 $\rho = 1000$ (kg/m³)、 $E = 58.42$ (J/kg) で、流量

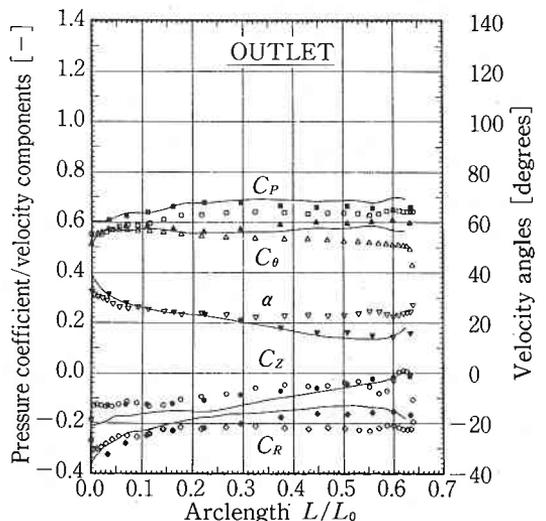
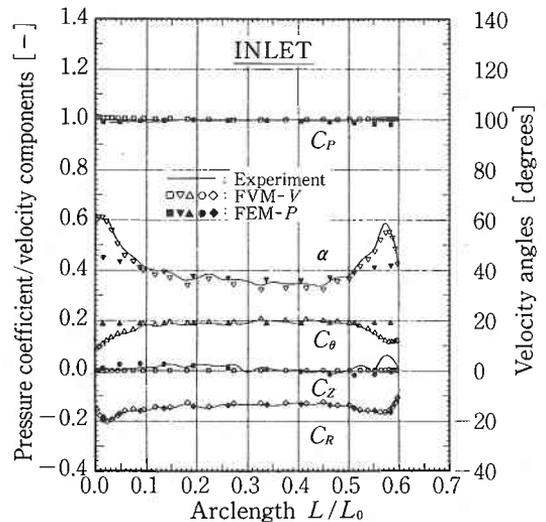


図 2 入口、出口断面の速度圧力分布の比較

研究速報

$Q=0.372$ (m³/s) である。流れ角度 α は

$$\cos\alpha = C_\theta / \sqrt{C_R^2 + C_z^2 + C_\theta^2}$$

と定義する。また、以下に示す図では基準長さ $L_0=200$ mmとし、横軸を断面I, IIについては下面からの、SV, GV面についてはキャンパー線に沿った翼前縁からの長さ比(L/L_0)で表示してある。図1に示す一点鎖線

表2 解析上の境界条件

境界項目	FEMポテンシャル解析	FVM粘性解析	備考
入口断面	法線速度, 循環の分布	速度3成分の分布	実験値
出口断面	法線速度, 循環の分布	圧力分布, 他は自由流出	実験値
周期条件	翼なし部周方向に適用	翼なし部周方向に適用	
壁面	Free slip	壁法則	
Reynolds数	—	100000	

表3 使用コンピュータの概要

項目	FEMポテンシャル解析	FVM粘性解析
計算機タイプ	ACOS 1000(7MFLOPS)	HITAC S820(2GFLOPS)
CPU時間	310sec (5 min 10sec)	580sec (9 min 40sec)
CPU時間/(節点数×繰返数)	0.0657sec	2.4×10^{-5} sec ($k-\epsilon$)
ベクトル化率	—	スカラー計算の20倍以上

はSV, GV翼面分布を表示する3断面を表す。入口, 出口断面における速度, 圧力の実験値と解析結果の比較を図2に示す。入口断面については実験と解析の一致はよい。ただし, FEM-Pでは一様循環の仮定のために壁近傍では周方向速度係数 C_θ に差異が生じ, その結果流れ角 α もずれている。出口断面については, FEM-Pでは C_θ が実験値と一致するよう高さ方向の循環分布を補正して解析を行った。FVM-Vでは出口圧力分布を実験より与え, その他は自由流出条件を用いており, 解析結果として実験値との差異を示している。両解析に用いた境界条件の比較を表2に要約する。また, 各図において圧力係数は入口を基準値として表示した。

3.2 分割格子形状と使用コンピュータの比較

図3に両解析に用いた格子形状を示す。FEM-Pでは接点数4719(半径方向33, 高さ方向13, 周方向11), FVM-Vでは67,500(75×30×30)とした。使用コンピュータと計算時間の概要は表3に示す。

粘性解析においては一様収束が実現されており, 定常解析が妥当と思われる。本計算では初期層流解析を含め600回の反復でほぼ収束条件を満たしている。

3.3 解析結果と考察

解析結果の代表例として, 一定高さにおける翼間のフローパタンおよびSV後端位置での周方向断面内のそれを図4に示す。また, 図1に示した3断面におけるSV, GV翼面上の圧力分布解析結果の比較を図5に示す。

図4より本解析モデルでは, 粘性解析で周方向断面に弱い2次流れがえられるものの, 2次元流れに近い特徴を示している。粘性の有無による差異は高さ方向の各翼入口端にも認められるが, それ程顕著ではない。

図5の比較では, SVにおいては両手法の一致は良好で

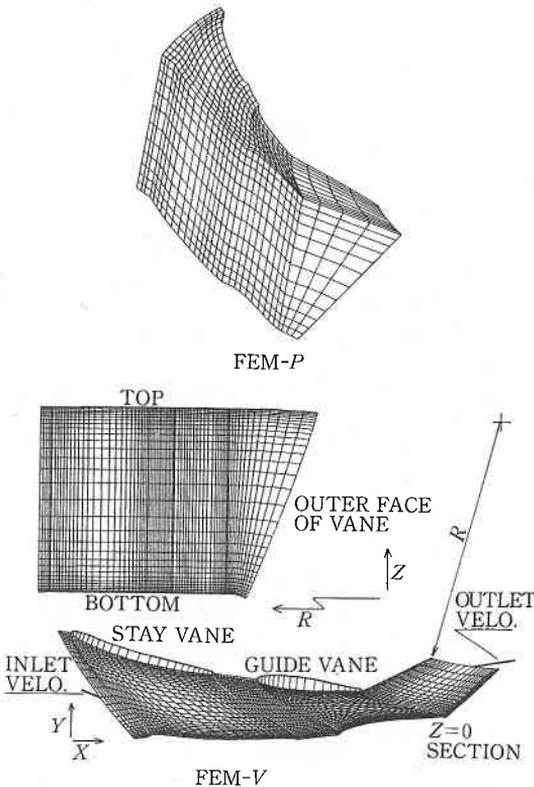


図3 解析に用いた格子

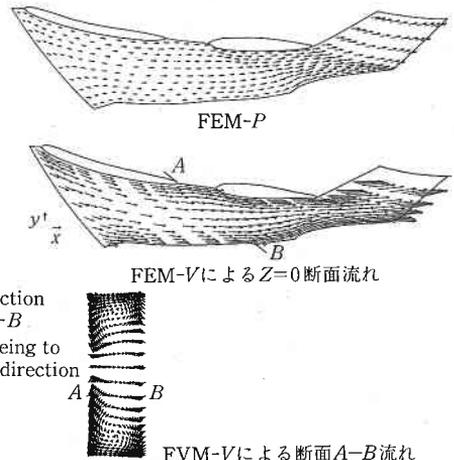


図4 解析結果のフローパタン

研究速報

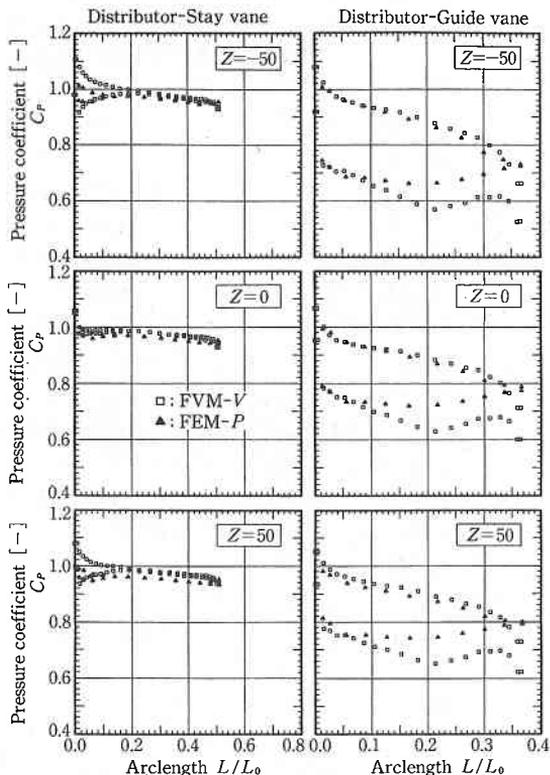


図5 SV, GV翼面圧力分布の解析結果比較

あるが、GVにおいて分布に差が生じる。圧力面では両手法の一致はよいが、負圧面では前半部でほぼ一致するが後半部で顕著な差を示している。SVおよびGVの圧力分布の詳細測定がされていないので評価が難しいが、この部位は流速が速く、粘性の影響をもっとも強く受けることが予測されるゆえ、両解析手法の特徴がこの部分に発生したものと考えられる。最終的には、実験値との比較などにより解明すべき課題と考える。FVM-V解析では図2に見られるごとく周方向の速度が流路上部ほど減速しており、実験値および流路形状から期待される現象と矛盾している。また、実験値から得られる出入口全圧の

差は小さく、流れはポテンシャルに近い結果であるが、粘性解析では損失が過大に評価されている。格子の変形が大きいことから数値粘性の影響が考えられ、実用上解決すべき課題である。

流路内部における乱れエネルギーおよび渦粘性の分布は壁面近傍を除きほぼ均一で、 $k-\epsilon$ モデルは有効と考える。しかし、詳細な評価のためには流入条件の設定値について検討を要し、乱流情報に関する実験データの蓄積が必要となる。

4. あとがき

水車SV, GVまわりの流れを3次元ポテンシャルおよび粘性解析の手法を用いて解析し、以下の結論を得た。

- 1) 本研究に使用した解析モデルでは流れの3次元性は期待したほど顕著でなく、ほぼ2次元流れに近い特徴を示した。ただし、弱い2次元流れは予測されており、より高比速度の解析モデルを使用して検討する必要がある。
- 2) 粘性、非粘性解析を同一のモデルにより行い、両解析の特徴を明らかにした。ただし、粘性解析に関しては格子分割と数値粘性に関する評価を要する。また、乱流情報についての実験研究も必要と思われる。

(1990年10月29日受理)

参考文献

- 1) K. Matsumotoほか2, Proc. of 13th IAHR Sympo., (1988. 9), 60.
- 2) 鈴木ほか2, ターボ機誌, 17-10, (1988. 10), 619.
- 3) T. Nagafuji & H. Morii, Proc. of 10th IAHR Sympo., (1988. 9), 353.
- 4) 谷口ほか3, 機論, 55-518, (1989. 10).
- 5) S.V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere pub. Co., New York, (1980), 113
- 6) W. Rodi, "Turbulence Model and Their Application in Hydraulics", Book pub. of IAHR, Netherlands, (1980).
- 7) 谷口ほか4, ターボ機械協会高知講演会論文集7-12, (1989. 11).