

端板付き横流タービンの流れ解析

Simulation for the Flow around Cross Flow Turbine with End Plates

石松克也, 大分大, 〒870-1192 大分市旦野原 700 番地, E-mail: isimatu@cc.oita-u.ac.jp

鹿毛一之, 奥林豊保, 大分大

Katsuya ISHIMATSU, Oita University, 700 Dannoharu Oita 870-1192, E-mail: isimatu@cc.oita-u.ac.jp

Kazuyuki KAGE, Toyoyasu OKUBAYASHI, Oita University

Flows around rotating Cross flow turbines with end plates were simulated by 3-D Navier-Stokes analysis. The equations were discretized by the Fractional step method for time and Finite volume method for space, and the region was constructed by trigonal prisms. Simulated flow fields were visualized by streak lines, pressure distribution, etc. The simulated running performances for Savonius rotors showed good agreement with the experimental data, and the effect of end plates has been clarified. On the other hand, it has been clarified that 2-D simulation is over estimation for running performances.

1. 目的

著者らは垂直軸風車の流れを数値的に解析し, その流れ場と性能の関係を把握すべく研究してきた⁽¹⁾⁽²⁾. 2次元 Navier-Stokes 方程式に基づく解析法を回転中の Savonius 風車の流れに適用し, 定量的にかなり良い結果を得る事ができた⁽¹⁾. また, 2次元計算では定量的に良い値が得られなかった静止時の起動トルクについて, 周期境界条件での3次元解析で再現できる事を示した⁽³⁾. 今回はさらに実際に近づけるため, 両側に端板を有する風車を解析して, その流れ場や性能に及ぼす影響を解明しようとするものである.

2. 計算方法

記号 主な記号は以下に示す. x は主流方向, z は回転軸方向を意味し, R, H, A は端板を含まない値である. 数値は風速 u_∞ とロータ直径 $2R$ の代表値によって無次元化されている. ただし, 図中の圧力は圧力係数 (= 動圧によって無次元化された値) で表示している.

x, y, z : 静止 (絶対) 座標 u, v, w : 絶対速度 $= \vec{v}$

X, Y, Z : 相対座標 U, V, W : 相対速度

P : 静圧 u_∞ : 風速

R : ロータ半径 H : ロータ長さ

θ : 迎角 (回転角) ω : 回転角速度

λ : 周速比 $= R\omega / u_\infty$

q : 動圧 $= \rho u_\infty^2 / 2$ A : 風車投影面積 $= 2RH$

C_t : トルク係数 $= \text{トルク} / qRA$

C_p : 出力係数 $= \lambda C_t$

方程式 基礎方程式は3次元非圧縮 Navier-Stokes 方程式(1)と連続の式(2)である. ここで用いる運動方程式は静止座標方向の式であり, 変数は絶対速度 u, v, w である. これをロータに固定した相対座標と相対速度で表した形を用いる. ここで z と Z, w と W は同じである.

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{\partial U \vec{v}}{\partial X} + \frac{\partial V \vec{v}}{\partial Y} + \frac{\partial W \vec{v}}{\partial Z} = -\text{grad}P + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \vec{v} \quad (1)$$

$$\text{div} \vec{v} = 0 \quad (2)$$

離散化 基本的には文献⁽²⁾の方法を3次元に拡張したものである. 空間に関しては, 3角柱要素で分割し, 変数の速度, 圧力ともその頂点に配置して, 有限体積法で離散化する. 格子は z のどの位置でも xy 面は同じものである. 時間の離散化はFractional Step法により, 対流項の上流化等も⁽²⁾と同様である.

境界条件 ロータは一定の角速度で回転し, 表面は滑

りなしとする. 遠方境界 (流入, 流出とも) では流速一定, 圧力0とする. なお, 今回の報告は流れは面对称として計算したものであり, 流れ場等の表示も片側だけとした.

計算対象 今回報告するのは半円弧翼の Savonius 型 (= Fig.1) と, 円弧と直線を組み合わせた Bach 型 (= Fig.2) の2種類である.

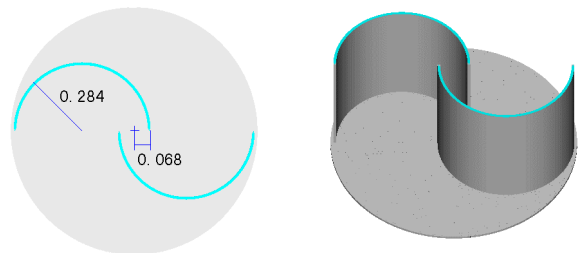


Fig.1 Savonius type rotor (half view)

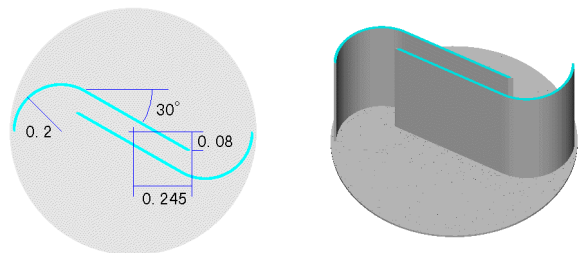


Fig.2 Bach type rotor (half view)

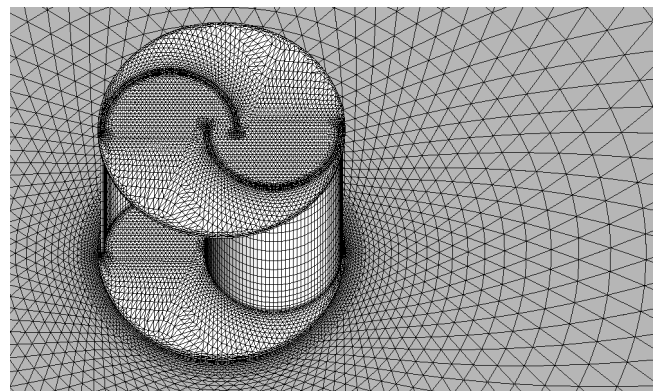


Fig.3 Calculation grid for Savonius type rotor

いずれもローター長さHは直径と同じ、端板は円形で厚さは0.01、Reynold 数は 3×10^5 とした。計算領域は xy 面は直径30、軸方向に3確保した。Fig.3 に Savonius 型の計算格子の一部を示す。

3. Savonius 型の結果

性能 Fig.4 には Savonius 型の性能を示す。2次元計算と端板のない場合の結果も併せて示している。最高出力は周速比1弱のあたりで0.22であった。これはほぼ同条件での Sheldahl⁽⁴⁾らの実験値とよく一致している。端板がない場合、著しく性能が低下しており、長さが短いこともあり出力は半分にも達しない。また、この程度の長さのローターに対しては2次元計算による性能は過大である事がわかる。

トルク変動 Fig.5 には $\lambda = 1$ での端板の有無によるトルク変動の違いを示す。端板が無い方は、翼1枚当たりの最小値は少ししか低下しないが、最大値が大きく低下して、台形状の波形となっている。

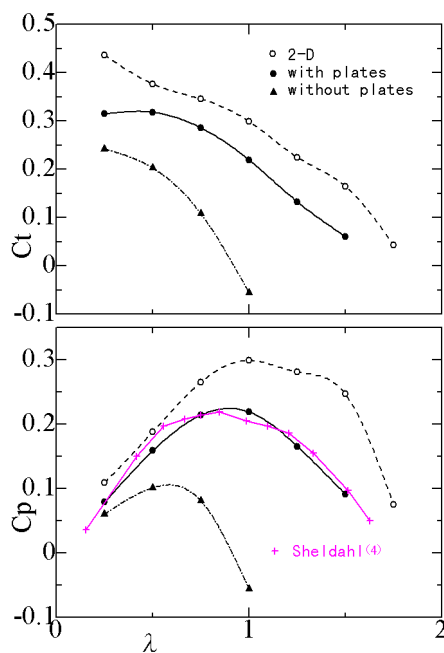


Fig.4 Running performance for Savonius rotors (H=1)

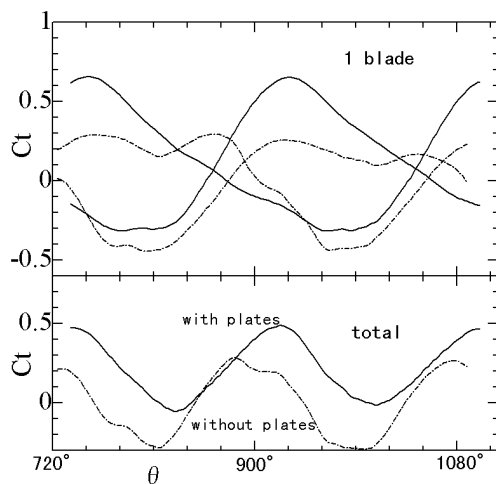


Fig.5 Torque fluctuation for Savonius rotor with end plates and without end plates ($\lambda = 1$)

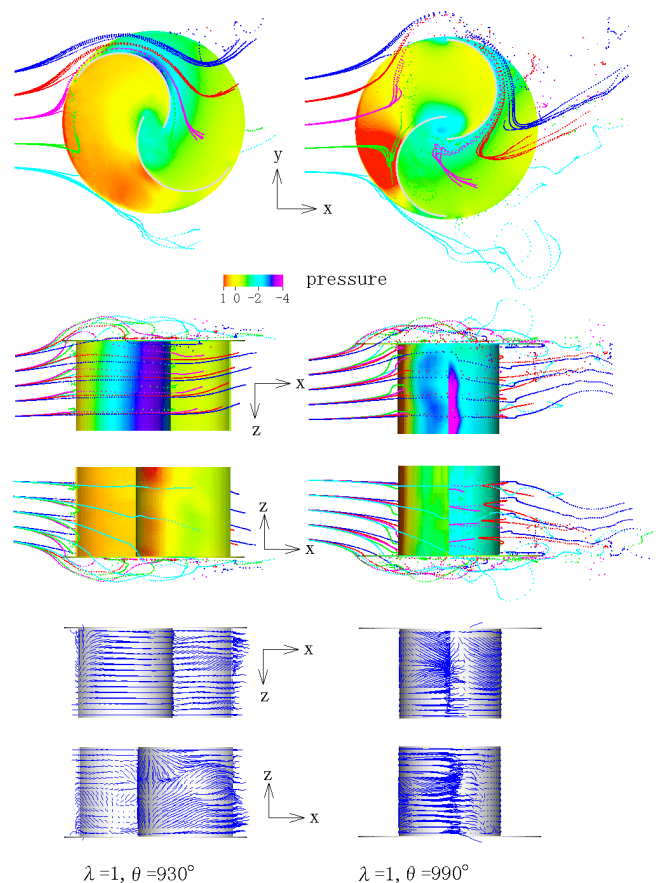


Fig.6 Flow fields for Savonius rotor with end plates (Surface pressure & Streak lines, Stream lines)

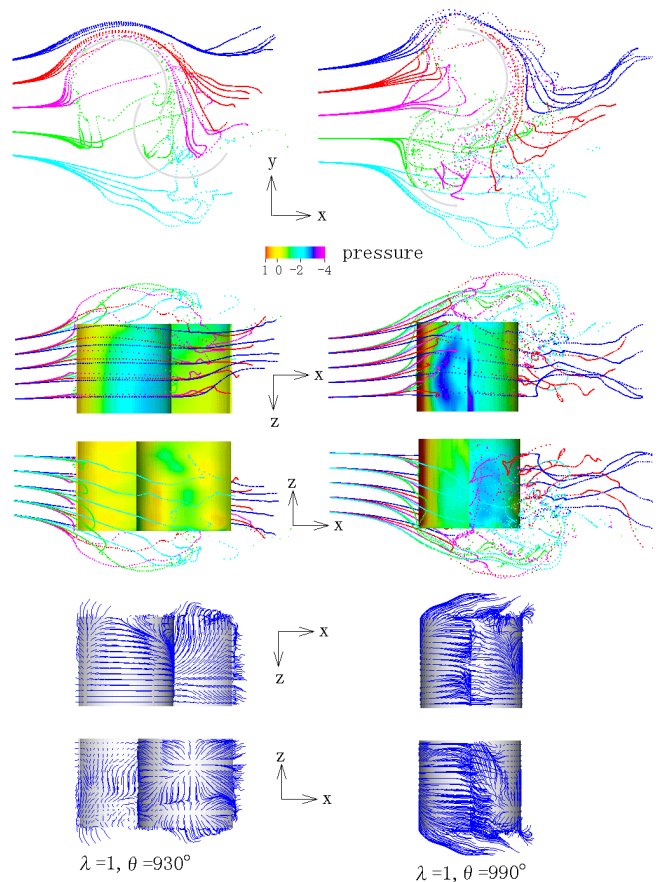


Fig.7 Flow fields for Savonius rotor without end plates

流れ場 Fig.6 には端板がある場合の流れ場を示す． $\lambda = 1$ はほぼ最高出力を得る周速比である．角度は翼 1 枚のトルクが最大と最小地点のものである．流線の長さは速度に比例させている．流脈では端板を超えて内側へ入る流れもあるが，かなり 2 次元流となっている．特に進み側翼（下流へ向かう翼）の凸面では，流れが剥離していないため強い 2 次元性を見せていて，表面圧力も中心部から端まであまり差が無い．これに対し，戻り側翼（上流へ向かう翼）凸面では，放出渦の影響もあり 2 次元性が弱い．

Fig.7 には端板が無い場合の流れ場を示す．翼端からの流れ込みは当然であるが，剥離していない進み側翼面上の中央部はかなり 2 次元性が保たれている．ただし，負圧は著しく弱くなっていて，この周速比では出力も負となる．

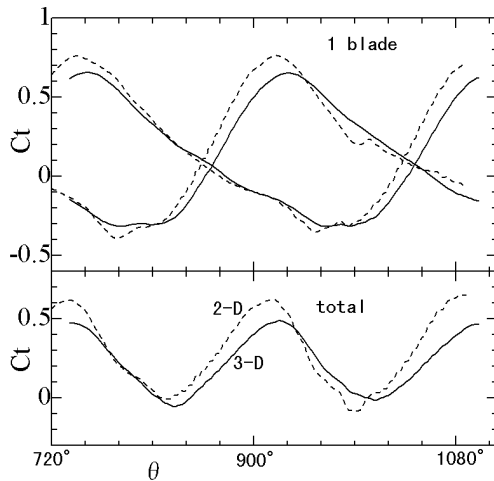


Fig.8 Torque fluctuation for 2-D and 3-D Savonius rotor ($\lambda = 1$)

2 次元計算との比較 Fig.8 にはトルク変動を 2 次元計算と比較して示す．翼 1 枚当たりのトルクは $\theta = 930^\circ$ と 990° でそれぞれ最大値と最小値を生じる．2 次元計算は，最小値はあまり変わらないが最大値が過大な値となり，合計トルクも大きくなる．

Fig.9 には軸方向平均値（端板内側のみ）による流れ場を，Fig.10 には中心面での流れ場を，さらに Fig.11 には 2 次元計算の流れ場を示す．これ以降，圧力の青は負圧，赤は正圧を意味し，渦度の青は時計方向回転，赤はその逆を意味する．流線の長さは速度に比例させている．全般的に 2 次元値は渦が拡散しにくく，強さを保つ傾向がある．3 次元の平均値では凹部の渦がほとんど拡散している様に見えるが，平均値では規模の小さい渦は相殺されるので，必ずしも拡散しているとは限らない．Fig.10 に見られる様に中心面での渦は 2 次元値ほどではないがかなり強く残っている．

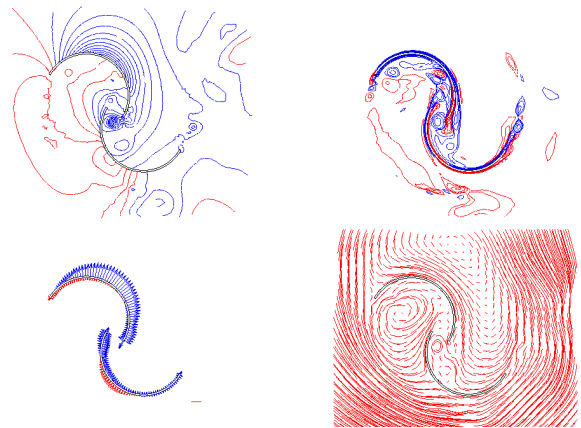


Fig.10 Flow fields for 3-D rotor with plates at span center ($\lambda = 1$, $\theta = 930^\circ$)

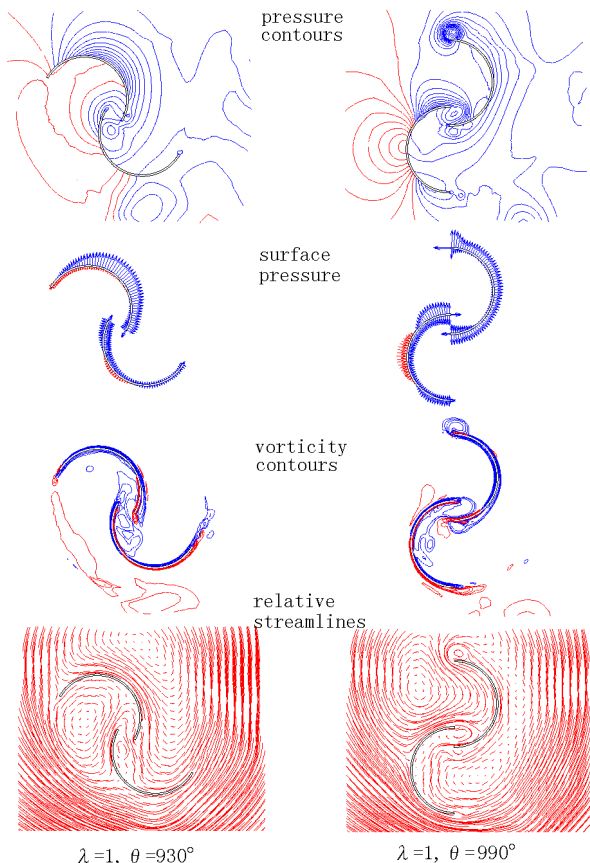


Fig.9 Spanwise mean flow fields for 3-D rotor with plates

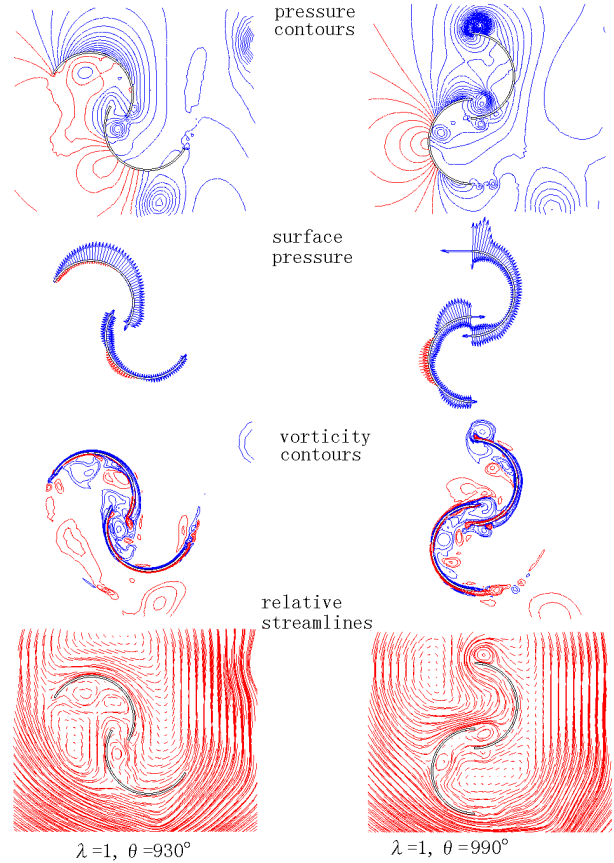


Fig.11 Flow fields for 2-D calculation

両者のトルクの違いは $\theta = 930^\circ$ での圧力分布に現れている．2次元では進み側翼凸部の負圧がより強く，なおかつ先端に近い位置にある．相対流線を見ると，進み側翼凸部の先端付近に激み点があるが，その位置が少しずれている事がそれと関わっている．

4. Bach 型の結果

性能 Fig.12 には Bach 型の性能を Savonius 型と比較して示す．Savonius 型に対し，3次元計算では全ての周速比で上回っていて，最高出力で約 0.02 向上している．しかし2次元計算では，低周速比で上回っているものの，高周速比では逆に低くなり，最高出力は劣る結果となる．

トルク変動 Fig.13 には Bach 型のトルク変動を Savonius 型と比較して示す．Savonius 型より振幅が大きく，最大値が大きいが最小値も低くなっていて，一見して優劣は分かりにくい．

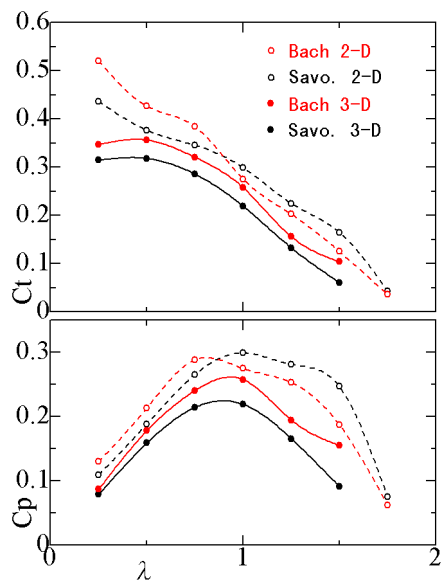


Fig.12 Running performance for Bach rotor and Savonius rotor ($H=1$)

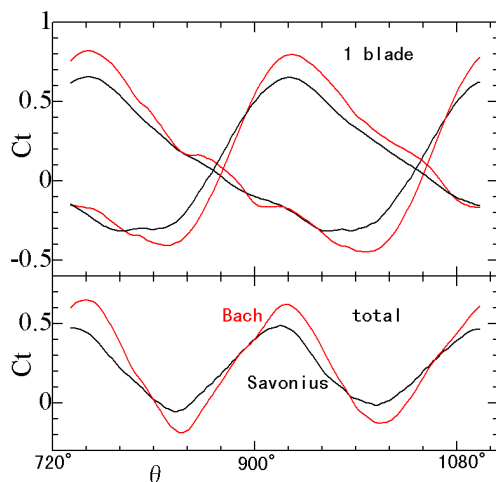


Fig.13 Torque fluctuation for Bach rotor and Savonius rotor ($\lambda=1$)

流れ場 Fig.14 には流れ場を示す．Savonius 型より翼の曲率が小さい事もあり，進み側翼凸部に強い負圧が生じている．また戻り側翼凸部では流れの2次元性はあまり保たれていない．この図を見る限りでは，激み点と負圧の位置がより翼先端に近い事以外は Savonius 型と大きく異なる流れではない．

2次元計算との比較 Fig.15 には最大出力点付近のトルク変動を2次元計算と比較して示す．

2次元計算は，最小値はあまり変わらないが最大値が過大な値となる事は Savonius 型と同じ傾向である．ただし合計トルクの差は Savonius 型のものよりずっと小さい．

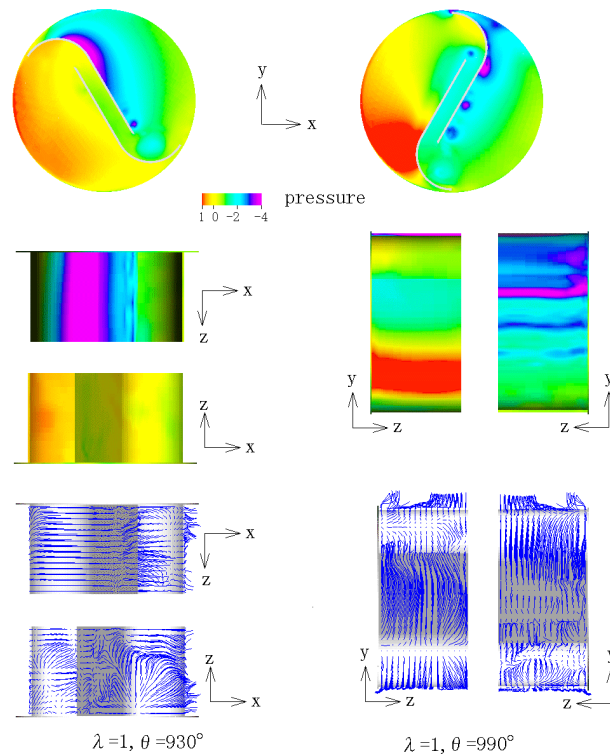


Fig.14 Flow fields for Bach rotor with end plates (Surface pressure, Stream lines)

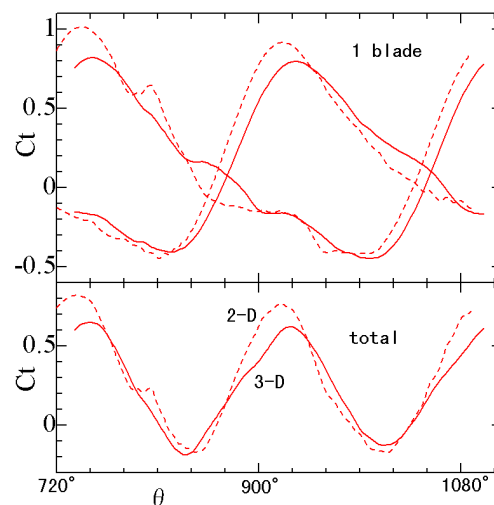


Fig.15 Torque fluctuation for 2-D and 3-D Bach rotor ($\lambda=1$)

Fig.16 には軸方向平均値による流れ場を，Fig.17 には 2 次元計算の流れ場を示す．3 次元値では翼間の平行部分（重複部）に滑らかでかなりの流量が認められる．翼の凹部に渦が溜まりにくくするという役目を充分果たしている．従って翼の凹部に強い渦はなく， $\theta = 990^\circ$ の進み側翼には流れ込みがあるため凹部の負圧は弱い．これに対し，2 次元計算では渦が拡散しにくく，翼の凹部には強い渦が溜まっており，特に $\theta = 990^\circ$ の進み側翼ではほとんど死水域になっていて負圧も強い．また翼間の平行部分にも渦が溜まっており，ここを通過する流れは殆ど無く，機能は停止している．この両者は悪循環していると考えられる．渦が拡散しにくい事が間違った現象を導き，もはや定性的に正しいとは言えない結果になっている．

5. 結論

円形の端板を持つ Savonius 型及び Bach 型の横流式風車の流れを 3 次元解析した結果，以下の様な事が分かった．

- (1) 端板がない場合，性能が著しく低下する．
- (2) 3 次元計算により，Bach 型は Savonius 型より高い出力係数を生じる事を再現できた
- (3) 2 次元計算による性能は過大である．
- (4) 現象を正しく再現できない場合があるので，2 次元計算で性能の優劣を判断する事は危険である．

参考文献

- (1) 石松・他 2 名，“サボニウス風車に関する数値計算（運転特性と流れ場）”，機械学会論文集，60-569，B(1994)，pp.154-160
- (2) 石松・他 2 名，“ダリウスタービンの流れ場に関する数値計算”，機械学会論文集，61-587，B(1995)，pp. 187-192
- (3) 石松・他 3 名，“サボニウス風車の三次元流れ解析”，第 12 回数値流体力学講演論文集，1(1998)，pp. 273-274
- (4) Sheldahl, R.E.・他 2 名，“Wind Tunnel Performance Data for Two-and Three-Bucket Savonius Rotors”，J.Energy，2-3, (1978)，pp. 160-164

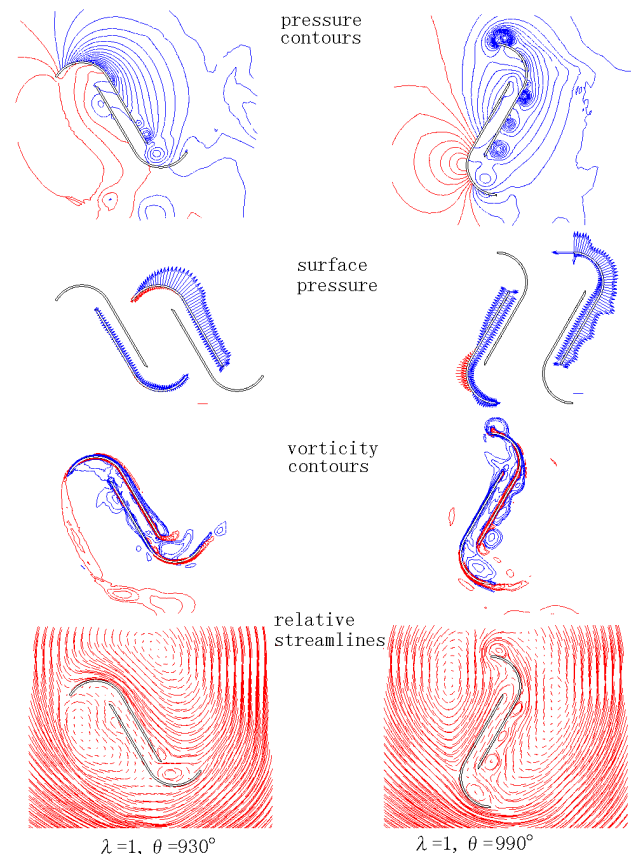


Fig.16 Spanwise mean flow fields for 3-D rotor with plates

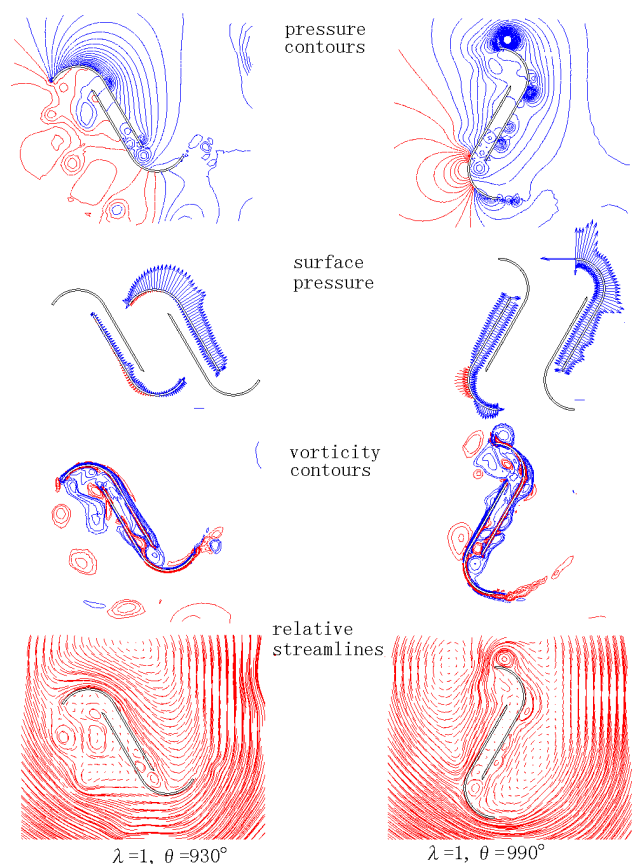


Fig.17 Flow fields for 2-D calculation