

軸流羽根車の旋回失速

阪大院工 三宅 裕 (Yutaka Miyake)

1. まえがき

圧縮機は流れの圧力を高める装置であるが、ガスタービンの主要部分を構成するなど、産業と民生の最も重要な機械である。圧縮機では回転トルクの形で外部からエネルギーを受け取る回転羽根車の中を流体が通過する間に羽根車から仕事を受け取り、エンタルピを上昇させる。圧縮機は上流より下流のほうが圧力が高いため、必然的に減速流れとなる。ただし、減速とは回転系から見た減速で、静止形から見ると必ずしも減速はしない。逆圧力勾配に向かう流れは壁近くの運動量が小さいので剥離を起こしやすい。剥離は後方段付き流れのように安定な死水域をつくる場合もあるが、鈍頭物体のように、剥離渦が安定せず成長、流下を繰り返す場合もある。回転系においても、相対流れの減速は静止流路の場合と同様に、剥離は大きな問題である。

羽根車の失速は安定な失速域を構成するのではなく、失速域（失速セル）が羽根車に相対的に、羽根車の回転と反対の方向に回転する、強い非定常流れとなる。これが強い振動を誘起すると共に大きな騒音を発生する。さら

に、高圧圧縮機の場合は、圧縮機に接続する管系全体の大きな振動を誘起するサージングを起こし、運転不能に陥る。羽根車の失速は実用上は必ず回避されなければならない。このためには旋回失速の開始流量を正確に予知し、設計の運転範囲が旋回失速開始流量より十分大きくとられなければならない。この異常現象の予知と制御は、産業用ガスタービンのような単機容量の巨大化、航空機用ガスタービンのような極限設計が追求されるようになってますます高精度の知見を必要とするようになっている。

旋回失速の発生機構はその予知の基礎であるから古くから多くの研究が行われてきた。本稿では軸流羽根車の旋回失速に限定するが、その発生機構は図1に示すように理解されている。図1で、翼列は図の下方に向かって運動するので上方の羽根は回転の方向を基準にすると後方の羽根である。ある羽根車が失速するとその負圧面側の流路の昇圧機能が低下し、流量が局所的に減少する。流れは後方の羽根に対してはより大きくなるのでこの羽根は剥離に向かい、反対に、今失速中の羽根に対しては流れの迎え角が減少するので剥離は終息に向かう。したがって、羽根間流路の失速は後方の流路に移ることになる。この説明は Emmons ら⁽¹⁾ らによって与えられたもので、妥当な説明になっているため疑問の余地のない説明と考えられてきた。しかし、軸流羽根車の下流側断面の流れは図2に示すように、二次元流れからはほど遠く、とりわけ、失速が初生する羽根先端部は翼先端とケーシング壁の隙間を通り抜ける漏れ流れの影響が強く、強い三次元流れになっている⁽²⁾。さらに、最近計測された子午断面内流れにも強い羽根前

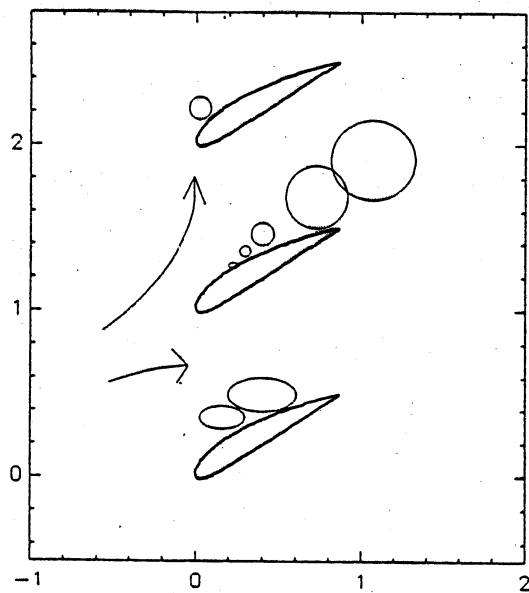


図1 二次元流れモデルによる旋回失速の機構の説明

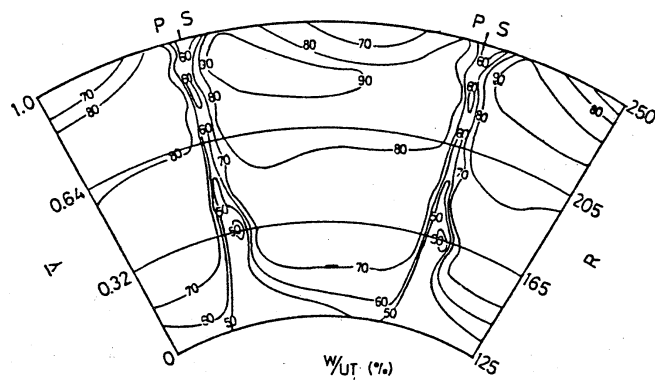


図2 羽根車後方の流れ（非旋回失速時）：相対流速 $w/r\omega$

縁渦が観測されており⁽³⁾、二次元モデルの基づいた流れの機構は再考の余地がある。

そこで筆者らは数値シミュレーションに依る解析を行った。初めに羽根先端側の負荷を大きくしたモデル羽根車について、一つの羽根間流路のみを対象とし、他のすべての羽根間流路の流れは合同と仮定して計算を行った。格子点数を多くとりながら計算機負荷を軽減し、旋回失速の特徴を把握するためである。次に、通常的设计による単段動翼について全周シミュレーションを行った。先のモデルシミュレーションの一般性を確かめるためである。本稿ではこれら二つのシミュレーションの結果の概要を述べる。

2. 基礎式

曲線座標系 $\xi_1(=\xi)$, $\xi_2(=\eta)$, $\xi_3(=\zeta)$ を用いる。また、補助的に直角座標系 x, y, z を用いる (図 3)。円筒面は $\zeta=\text{const.}$ の面で、この円筒面内に流れ方向に ξ 、翼間方向に η 軸をとる。

基礎式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial J U_k u_i}{\partial \xi_k} = - \frac{\partial \xi_k}{\partial x_i} \frac{\partial p}{\partial \xi_k} + \frac{2}{Re} \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi_k} \left(J \frac{\partial \xi_k}{\partial x_j} S_{ij} \right) + f_i \quad (1)$$

$$f_1 = 0 \quad f_2 = y\omega^2 + 2u_3\omega, \quad f_3 = z\omega^2 - 2u_2\omega \quad (2)$$

$$\frac{1}{J} \frac{\partial J U_i}{\partial \xi_i} = 0 \quad (3)$$

ただし、 $J = |\partial x_i / \partial \xi_j|$ は Jacobian, $Re = \bar{u} r_b / \nu$ (ν : 動粘性係数) はレイ

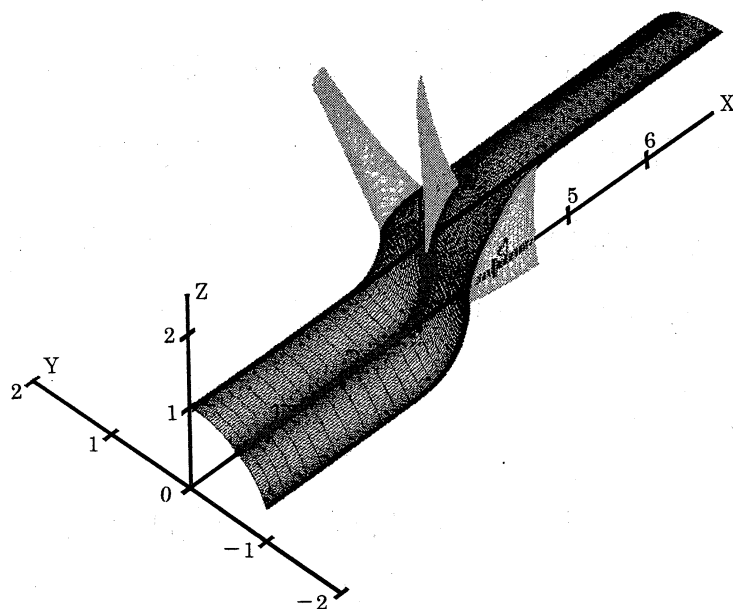


図3 羽根車形状と直角座表系 x, y, z

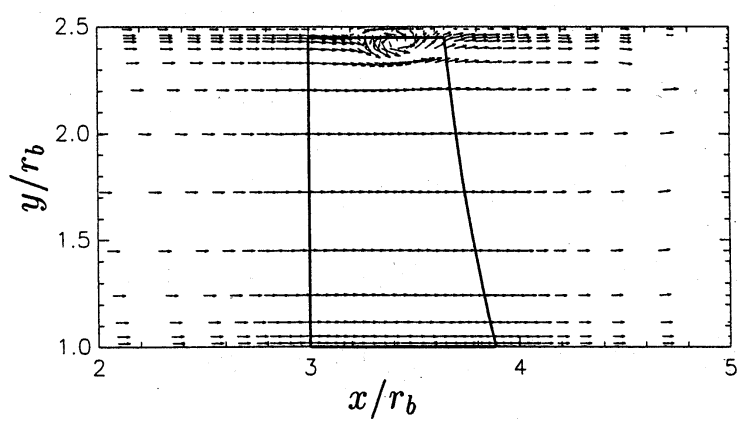


図4 非失速時の時間平均の子午断面内流れ (速度ベクトル図)

ノルズ数, U_i は反変速度成分, u_i は i 軸方向速度成分, $S_{ij} = (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i) / 2$, p は圧力, ω は軸の回転角速度である。また、長さは羽根車のボス半径 r_b で、速度は流路間平均流速 $\bar{u} = Q / \pi(r_c^2 - r_b^2)$, (Q :流量、 r_c :ケーシング半径) で無次元化してある。羽根枚数は 12、 $r_c / r_b = 2.5$ で、翼の幻長は $l_c = 1$ で、羽根先端はケーシングとの間に $\Delta r / r_b = 0.05$ の隙間がある。なお、乱流モデルは用いない。

3. モデル羽根車の単独流路の場合

すべての羽根間流路で合同な流れを仮定する。無限上流で一様な軸方向流れを考え、羽根に対する迎え角をスパン方向に一様に 20° となるように羽根を捻る。この羽根車に対して、流量を増加させて流量係数を $\phi = Q / \pi \omega r_c^3 = 0.59$ とすると、失速は生じず、羽根先端の漏れ渦の他は安定で (図 4), 羽根高さ方向の流れ分布もほぼ一様となる。図 4 は時間平均流れの子午断面内流れの速度ベクトル図である。図 5 は羽根間隙間内の $r / r_b = 2.48$ の円筒面上での半径方向速度 v_r と圧力 p の分布である。半径方向速度は強い正 (実線) の外向き部分と負 (点線) の下向き部分が隣り合い、その境界線に沿って深い低圧の谷がのびている。すなわち、この境界線に沿った軸を持つ渦が安定的に生成している。この渦は羽根両面の圧力差によって隙間を流れて流れ出すもので、このように安定な渦糸を作る機構はなお明らかでない。

流量を減じて $\phi = 0.37$ とすると翼先端は失速する。時間平均流れは翼先

端側の 1/3 程度を除いて子午断面内流れがほぼ平行な流線となる安定な流れとなるが、翼先端部分は強い失速を起こすので、時々刻々の流れは翼先端側の 2/3 程度に変動が現れる。図 6 は翼負圧面上での等圧線の瞬時分布であるが、翼面上に根をもつ渦管が現れる。渦は固体面に垂直な軸を持つことが可能で、その他方の端もまた他の固体面上の点に根を持つようにつながっている。このような特異な渦の生成が翼失速の特徴で、渦軸は二次元モデルが想定するように円筒面に垂直ではない。

次に、この渦の時間変化を図 7 に示す。図で管状部分は $p'/\rho\bar{u}^2 \leq -0.1$ の等値面で、必ずしも渦管とはいえないが、図 6 に示したように、その断面は閉じた流線になるので、この場合は渦管と考えて良い。なお、図の p' は圧力の時間平均値からの差である。図は羽根車に相対的な渦管の位置を示したもので、(a)~(c) は $\Delta T = 2$ ごとの時間変化である。この間に羽根車はほぼ 1/3 回転する。また、図では二つの流路について描かれているが、見る向きの違いによって解りやすくするため同じ図をつないだものである。図の重要な新しい知見は

- 1) 流れは間欠的で、その間欠性は管状渦の周期的成長と流下のためであること、
 - 2) 管状渦の渦軸は二次元モデルが想定するように流れに垂直でなく、ケーシング面にほぼ平行で、渦管は流れに乗って流下すること、
- である。時間平均流れは (d) に描かれているが、実験では一般にこの流れ場を得ることになる。したがって、実験的にこのような流れパターンを発

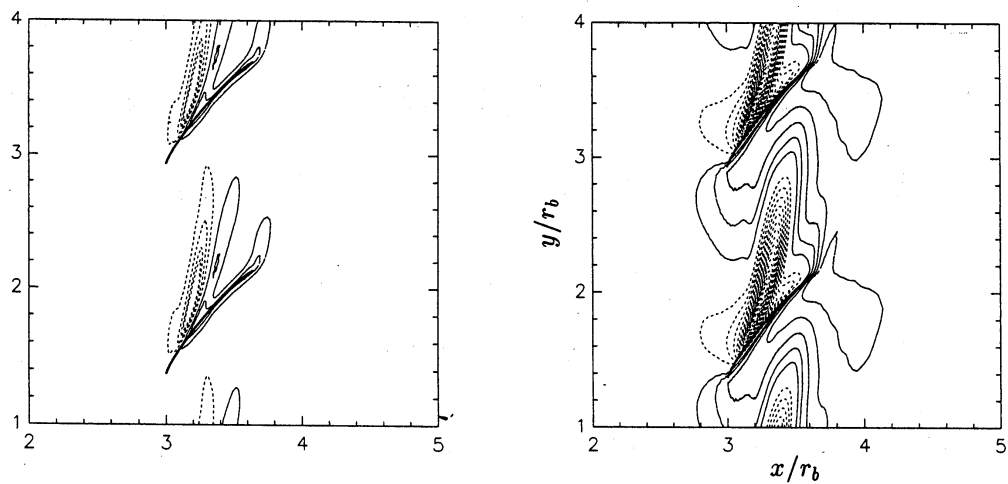
(a): 径向き流速 v_r 、(b): 静圧 p

図5 非失速時の漏れ渦

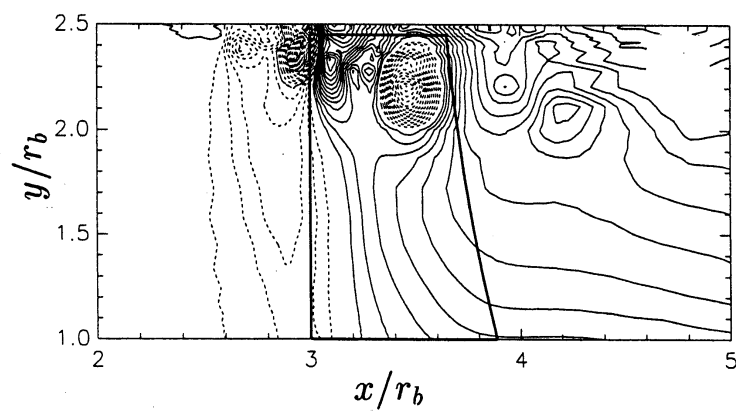


図6 旋回失速時の翼負圧面上の等圧線の瞬時分布

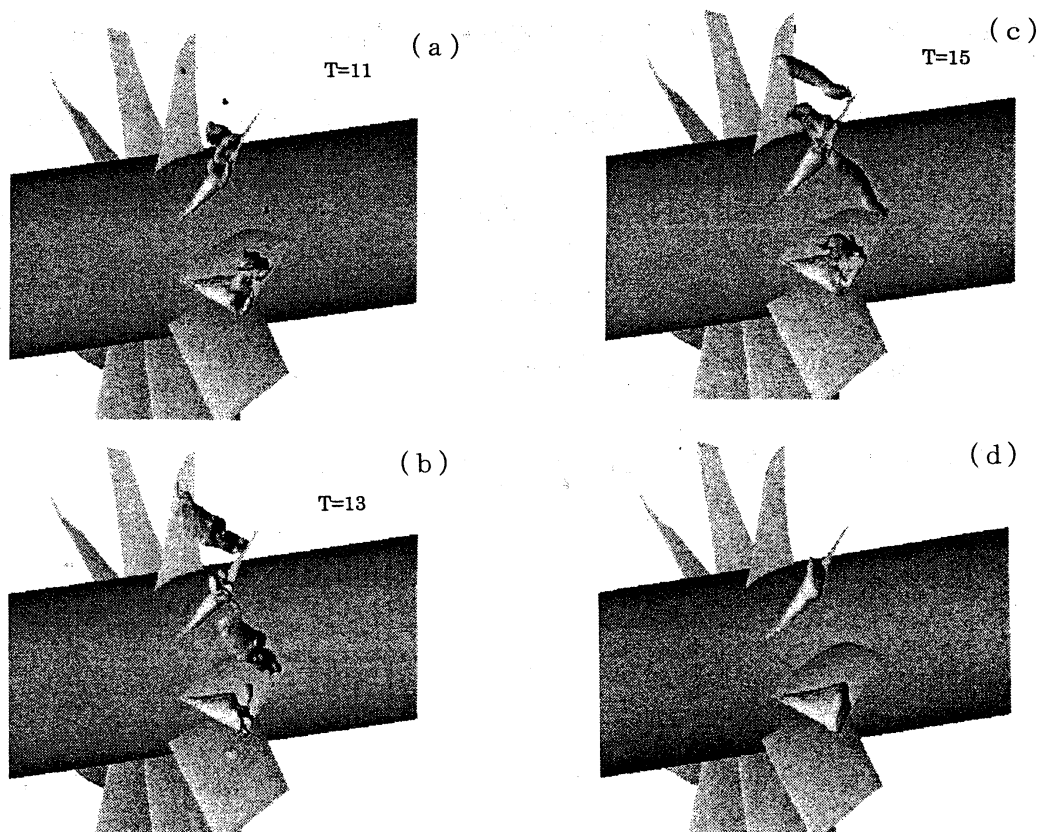


図7 時々刻々の管状渦の形状と流下（単独流路） (a)~(c):瞬時分布、(d):時間平均流れ

見することは極めて困難で、今後はこの流れが捕捉できるような位相固定平均などの手法を用いて実験的検証を行わなければならない。

この渦管の生成機構はほぼ以下の通りである。流量の減少と共に翼先端側は翼根側より負荷が大きくなり剥離しやすくなる。上述の $\phi = 0.37$ の場合、流れは翼先端側約 $1/2$ 以上で翼前縁で剥離し、その強さは先端に近づくほど強い。剥離した流体は周速が大きいのでより強い遠心力を受け、ケーシング壁に押しつけられる。この流体が蓄積すると、ケーシング壁に引きずられて周方向に向くが、下方の流体ほど速度が大きいので回転が生じる。このために渦管に成長する。一定の大きさまで成長すると、鈍体上の渦と同様、自由渦として流出するものと考えられる。

4. 実用単段動翼の全周シミュレーションの場合

前節のシミュレーションは単独流路を仮定したものであるから渦管の、翼間流路をわたる移動は無い。しかし、旋回失速流れでは失速域が後方流路へ伝播することが本質的な特徴であるから、この現象の数値シミュレーションによる確認が不可欠である。そこで、筆者らが古く実験に用いた実用羽根車⁽²⁾⁽⁴⁾について失速域流量でのシミュレーションを行った。羽根間流路は12個であるので、対応する点の平均値を求め、その長い時間平均をとって平均流れとした。瞬時の流れのこの時間平均力のずれをプライム (') を付して表す。なお、この単段羽根車はボス比は $r_c/r_b = 2$ である。

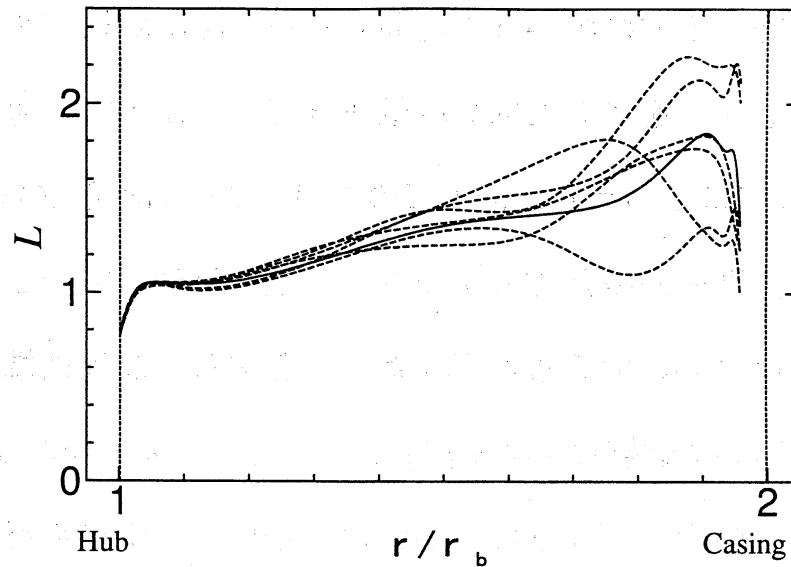


図8 翼に働く空気力 $L = \int (p_l - p_u) dl$ の変動 (旋回失速時)

以下、 $\phi = 0.225$ の場合について述べる。この流量は翼の失速が始まる最小流量 ($\phi = 0.28$) よりやや小さい。図8はこのとき一枚の翼の両面の圧力差 $p_l - p_u$ (添字 l, u は翼の負圧面、圧力面) の弦にそう積分値 $L = -\int (p_l - p_u) dl / \rho \bar{u}^2 l_c$ のスパン方向の分布で、 $\Delta T = 0.1$ ごとの瞬時分布を表している。失速のために翼端付近で L は大きく変動する。この変動は翼根に向かって小さくなるが、翼根側の小さな幅を除いて観察される。

図9は $p' / \rho \bar{u}^2 \leq -1.0$ の低圧部と $p' / \rho \bar{u}^2 \geq 0.75$ の高圧部の時間的な移動の様子を示すもので、 $\Delta T = 0.075$ ごとの高、低圧部を描いている。(a)~(d) は斜め上方から見た図で (a')~(d') は翼先端から翼根に向かって見た図であ

る。羽根車は図の下方に向かって運動するが、図は羽根車を静止させて描いてある。図 9 で l を付した部分は低圧部で、ほぼ渦管と考えて良い。時刻 $T = 27.075$ ではこの渦管は最下部の羽根の負圧面から立ち上がり、一方の端は隣接後方翼の前縁前方のケーシング壁に付着している。渦管は途中で切れることはないので両端が固体壁に付着する。渦管後端の一部は後方翼前縁を回り込んで隣接の羽根間流路まで伸びている。時刻 $T = 27.150$ では渦管は下流に移動し、先端部は漏れ渦と合体して隣接流路内で成長を始める。時刻 $T = 27.225$ では渦管の最下部の流路内の部分は翼後縁まで流下し、隣接翼間流路内の部分が主要部となる。そあいて、 $T = 27.300$ では隣接翼間流路内で時刻 $T = 27.075$ の状態が一つ流路を移して再現される。すなわち、後方への渦管の移動が完了する。

一方、先の単独流路のシミュレーションでは取り上げていないが、管状渦に伴って、形状が類似の高圧塊が現れることがこのような間欠的剥離の特徴である。図 9 で h, h_1 で示した部分は高圧域で特に h_1 は形状が明瞭である。時刻 $T = 27.075$ では h_1 は羽根中央部にあるが、 $T = 27.150$ では下流側に移動している。また、 h を付した高圧塊は時刻 $T = 27.075, 27.150$ では次第に成長する過程にあるが $T = 27.225$ では十分に成熟し、先端部が隣接の後方の翼の前縁まで伸び、 $T = 27.300$ では隣接の流路に入った部分は漏れ渦に伴う高圧域と合体してより成長する。この高圧部は渦管のように羽根前縁を回り込むのではなく、翼端隙間をすり抜けて羽根間流路を移動しているが、常にこの様になるとは限らず、羽根前縁を回り込む場合もある。

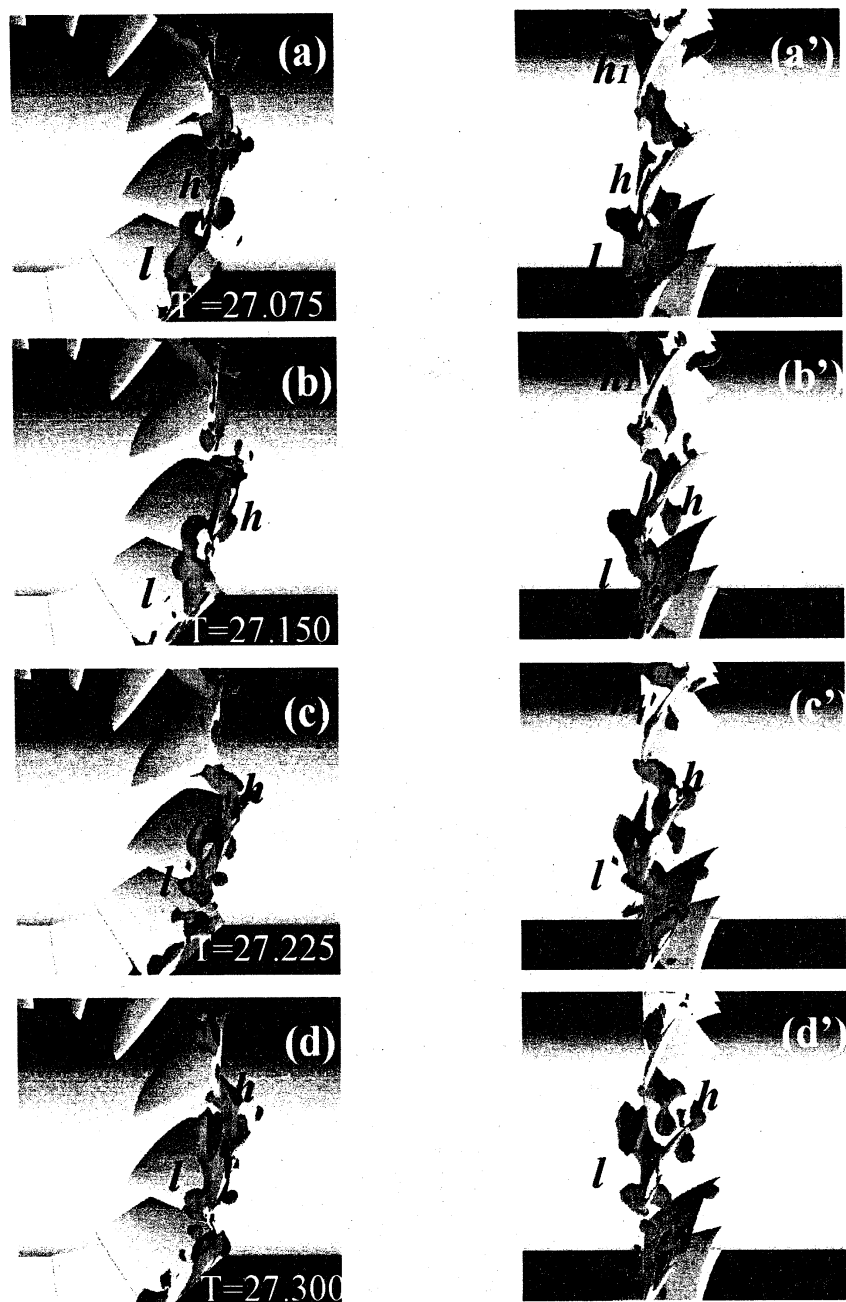


図9 時々刻々の管状渦の形状と流下（全周シミュレーション） (a)~(d):斜め上方から見た図、(a')~(d'):羽根先端から翼根を見た図 h, h_1 :高圧塊、 l :渦管

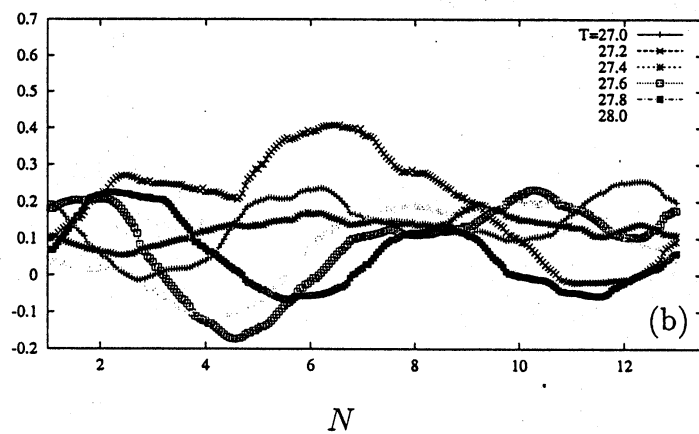


図 10 平滑化された羽根車外周上の変動圧力 p' の周方向変動

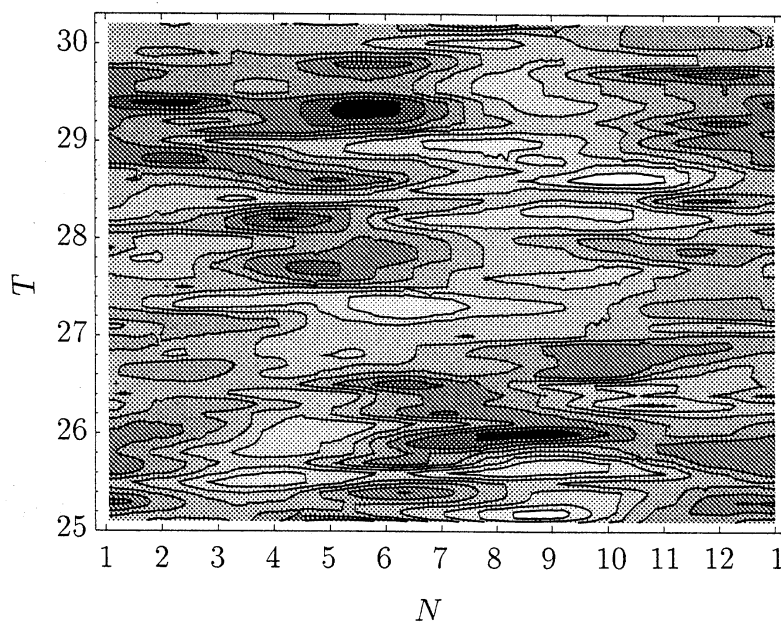


図 11 羽根車外周上の圧力の山、谷の時間的移動 N :羽根の位置、 T :時刻

いずれの場合も渦管と同様、羽根間流路を後方に移動する。個々の渦管の移動は確認されたが、それぞれの時刻で、羽根先端部の流れの変動の強さは周方向に一樣でない。変動は非常に強いので幅 Δl のボックスフィルタを用いて変動圧力を平滑化する。すなわち、

$$p' = \frac{1}{\Delta} \int_{-\Delta l/2}^{\Delta l/2} (p - \bar{p}) dl \quad (4)$$

この平滑化を二度行った結果が図 10 である。横軸は羽根番号 N で示してあるが、周方向位置で、縦軸は時々刻々の上式の分布である。二つのピークを持つ時刻もあるが、多くは一つのピークの正弦状変化である。それぞれの時刻の曲線を時刻をずらして並べ、等値線を作ると図 11 が得られる。図 11 には斜め上方に向かう濃淡が見られるが、淡い部分は低圧部、濃い部分は高圧部である。この山、谷の移動はセル状の構造が周方向に羽根車と反対方向に移動していることを示している。この移動速度は静止系から見て羽根車のその約 0.53 倍となる。この値は実験的に観察される、失速初期の単段羽根車のセルが一つの場合の値、0.65 に比べて妥当な値といえる。

5. 結論

1. 軸流回転羽根車の失速は間欠的な渦管とそれに付随する管状高圧塊の生成、流下で特徴づけられる強い変動流れである。
2. 渦の軸は平均流れ面である円筒面に平行で、古典理論が想定するような円筒面に垂直な軸を持つ渦ではない。したがって、二次元剥離モデルを仮

定する失速の機構の説明は再検討を要する。

3. この特徴は実用的な設計の全周羽根車でも、単独流路の場合と同様に生じ、その発生機構は単独流路によるシミュレーションで理解できる。
4. 管状渦管と柱状高圧塊は成長と共に流れに乗って流下しつつ隣接後方翼間流路に移動し、失速セルの移動と同様の振る舞いをする。渦管等の強さは周方向に一様でなく、うねりがある。このうねりはその形状を保持しつつ、通常観測される失速セルとほぼ同じ速度で周方向に移動する。

References

1. Emmons, H. W., Pearson, C. E. and Grant, H. P., 1955, "Compressor surge and stall propagation", *Trans. ASME*, **77**-4, pp.455-460.
2. Miyake, Y., Inaba, T., Nishikawa, Y. *et. al.*, 1986, "A Study on the Flow within the Passage of an Axial Flow Fan Equipped with Air-Separator.", *Bulletin of JSME*, **29**-256, pp.3394-3401.
3. Poensgen, C. A. and Gallus, H. E., 1966, "Rotating stall in a single-stage axial flow compressor", *J. Turbomachinery, Trans. ASME*, **118**-2, pp.189-196.
4. Miyake, Y., Inaba, T., Kato, T., 1987, "Improvement of Unstable Characteristics of an Axial Flow Fan by Air-Separator Equipment", *J. Fluid Eng., Trans ASME.*, **109**-1, pp.36-40.