

ターボ機械の旋回失速

三宅 裕*

気体圧送を目的とするターボ型空気機械は新しい需要が生じるにしたがって高圧縮比、大風量の機械が開発され、その利用範囲が次第に広がっている。

設計点についての流れの解析、あるいは反対に所要の圧力比、風量を得るための空力設計の方法はほぼ実用上不足のない程度に確立されたと言えるであろう。しかしターボ機械には設計風量より小さい流量域でサージングという厄介な問題を抱えている。サージングはターボ機械の揚程特性と後に続く管路系の中の気柱の振動特性で定まる自励振動であるが、これを回避することまたはその発生点を予測し、且つ少しでも低流側へ寄せて可能な運転範囲を広げることが現在の課題である。

サージングの発生は管路系を含めてのみ生ずることであるが、圧縮機、送風機にいわゆる右上がり特性、すなわち風量の増加と共に揚程も上昇するという風量域が存在しなければ生ずることはない。このような不安定特性は、圧縮機、送風機の後に短かく体積の小さいダクトをとりつけて運転するときは旋回失速を生ずるときに発生することが多い。遠心圧縮機不安定特性は必ずしも旋回失速には依らないが、旋回失速現象は遠心型でも軸流型でも同様に発生する。

以下、主として軸流型ターボ機械の場合を述べよう。旋回失速の初生と形態は羽根車、静翼の設計条件によって異なるが、翼面負荷とボス比の影響が強い。高圧、高ボス比の圧縮機では図1¹⁾のように、多くは失速域はボスから羽根先端まで広がる全スパン失速の形態をとり、この失速域が羽根間流路を次々と移動して旋回する。そして揚程特性では、旋回失速の発生後は

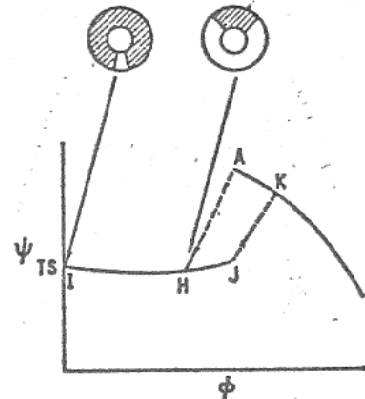


図1 軸流圧縮機の旋回失速と揚程特性

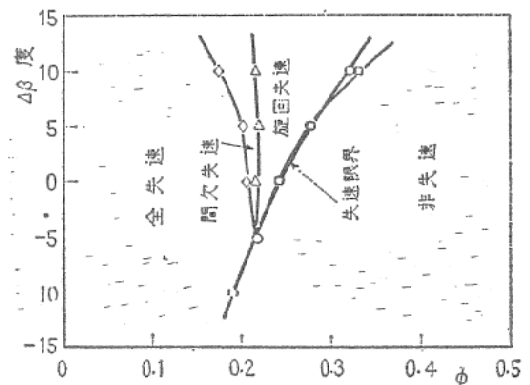


図2 軸流送風機の旋回失速の形態

揚程がほとんど変化しない。また旋回失速の初生点では揚程に大きな落ち込みが生ずる。ただし図で $\phi_{Ts} = H_{Ts} / (U_t^2 / 2g)$, $\phi = c_m / U_t$ で、 H_{Ts} は静圧上昇 [m], U_t は羽根車先端周速 [m/s], g は重力の加速度 [m/s²], c_m は羽根車断面平均軸流速度 [m/s] である。一方低圧、低ボス比の送風機では翼の迎え角を設計迎え角より変化させると失速の形態は図2²⁾のように変化する。図で $\Delta\beta$ は設計迎え角からの動翼取付角の変化分で羽根を軸方向にたてて翼面負荷を大きくした場合が正である。図のように翼面負荷が十分小さければ旋回失速を生ずることなく全失速に移行する。この場合の旋回失速

*三宅 裕 (Yutaka MIYAKE), 大阪大学, 工学部, 機械工学科, 助教授, 工学博士, 流体工学

は失速域が羽根先端部に局限される部分半径失速で、この失速域が風量の減少と共に次第に周方向に領域を拡げ、遂には羽根先端部が全周にわたって失速する。これを全失速と呼んでいる。失速形態の変化に対応して送風機の揚程特性は図3²⁾のように変化する。つまり全失速に達すれば右上がりの不安定特性は消えて特性上は問題が無くなる。しかし設計時に全失速を目標として翼面負荷を小さくすることは設計点での翼面積を無駄に大きくすることになって機械全体は大型になるので得策ではない。

全スパン失速と部分半径失速の場合とでは以上のように特性上にも大きな違いがあらわれているが、いずれの場合も失速域が旋回しうるためには羽根間流路の閉塞が必要である。羽根は

高迎え角、すなわち風量の低下によっていずれ失速は免れない。しかしおのおのの羽根が失速に至ったとしてもそれだけでは羽根間流路が閉塞することはない。旋回失速は動翼では必ず羽根先端部から初生するが、失速直前の羽根間流路の流れを測ってみると図4のようになる³⁾。

図は動翼後方で測った相対流速の分布であるが、図中 PIS は1枚の羽根の圧力面側(P)と負圧面側(S)である。明らかに羽根先端部の圧力面側には流速の遅い失速と同質の流れ場が生じている。この領域は過大迎え角による羽根面失速ではない。そのような失速はS側にしか生じないはずだからである。

低流量域特性の改善にはブレード・セパレータ⁴⁾、ケーシング・トリートメント⁵⁾などの方法が知られている。ブレードセパレータは基本的には羽根先端の失速を促進し、全失速を促すものであるが、設計流量時には余計な抵抗体を吸込流路中にとりつける効果となって効率に低下を生じること、高負荷翼には効果がうすいことなどの欠点がある。また、ケーシング・トリートメントは動翼先端部分に位置するケーシング面に溝を切って図4に示した低速域を消す効果を目指すものと解されるが、失速マージンの拡大にはいくらかの効果があるものの、工作が面倒なこと、旋回失速の全面的な解消は不可能であることなどやはり欠点が多い。これに対し

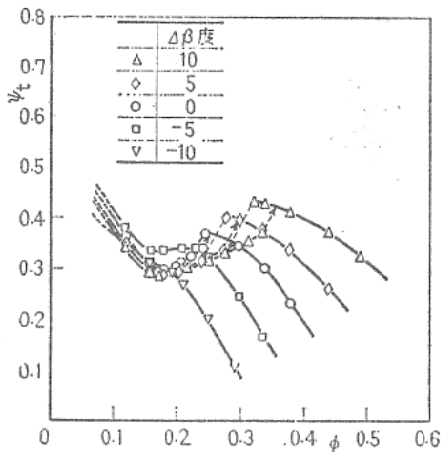


図3 軸流送風機の揚程特性

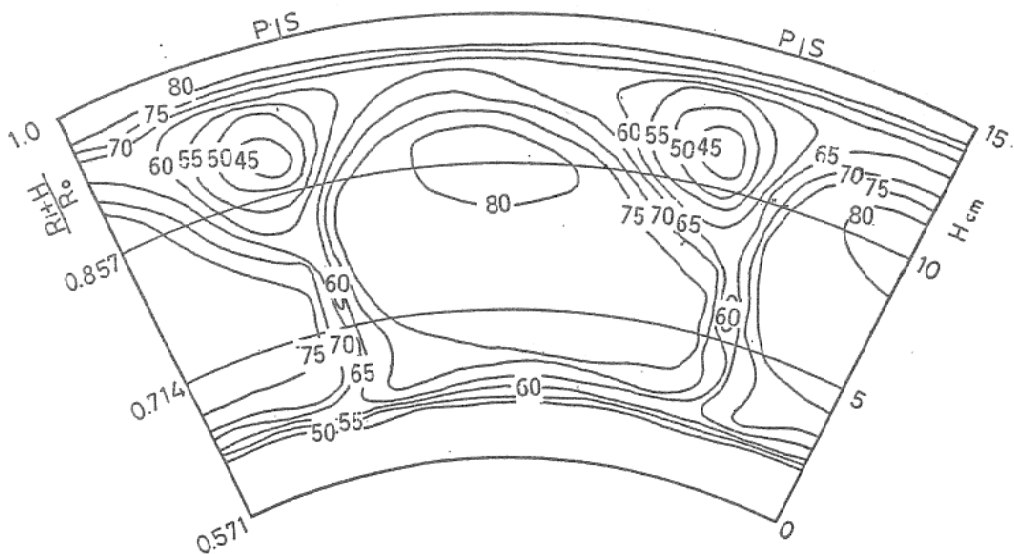


図4 軸流送風機の失速直前の流路間相対速度分布

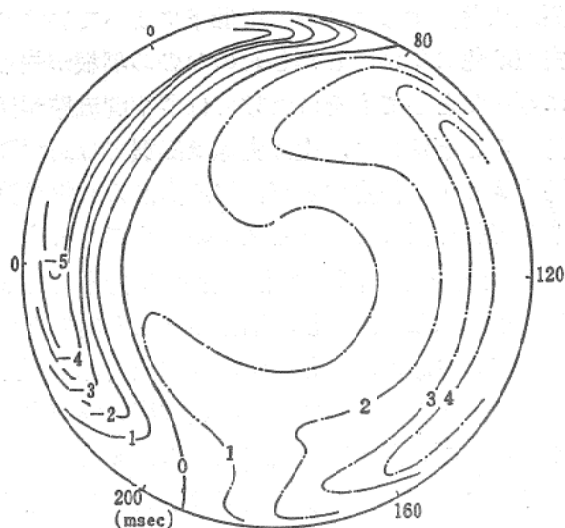


図5 遠心送風機の巡回失速時の吸込管内軸流速度分布

て筆者はエア・セパレータを試みている。その詳細は、研究が未だ途上にあるので記述を省略させていただくが、文献⁶⁾にはその一部を述べてあるのでご参照いただくこととしたい。

いずれにしても、巡回失速の初生一羽根間流路閉塞の機構には図4に示した流れ模様に鍵がありそうである。

遠心羽根車の場合にも同様の巡回失速が生ずる。図5は巡回失速を生じているときの吸込管内の流れの軸流速度分布で、図4と同様の方法で測定したものである⁷⁾。図中円内の数字の単位は[m/s]で、負の値の領域は逆流域である。図の逆流域は羽根車の回転と同方向に、約30%の角速度で巡回する。また、巡回失速にともなって揚程特性には同様に不連続があらわれる。この特性の不連続は羽根車出口側にとりつけら

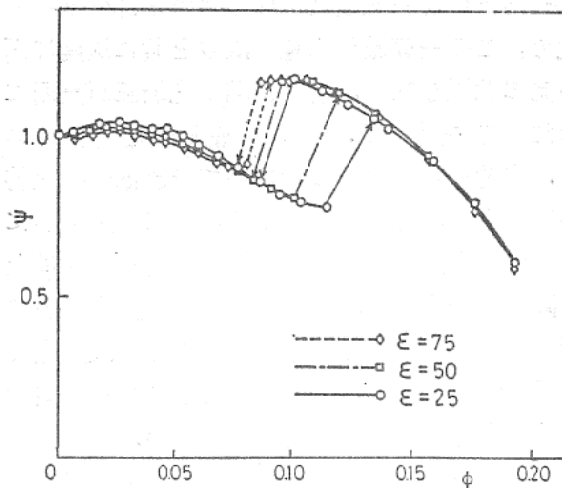


図6 巡回失速による遠心送風機の特性の不連続

れる案内装置の種類によって強さが一定しない。図6は図5の流れを与える羽根車に羽根付きディフューザをとりつけた場合の顕著な特性の不連続の例である。この場合にもエア・セパレータに類する改善装置を試みるに値する。

参考文献

- 1) E.M. Greitzer et al. : Trans. ASME. Ser I. 101-2 (1979) P. 237.
- 2) 田中, 村田: 機械学会論文集40-335 (昭49) P. 1948.
- 3) 西川ほか: 機械学会講演論文集 No. 814-5 (昭56) P. 86.
- 4) 浅野, 村田: 全上 No.704-6 (昭45) P. 9.
- 5) 高田: ターボ機械 6-7 (昭53) P. 43.
- 6) 野路ほか: 機械学会講演論文集 No. 810-15 (昭56) P. 193.
- 7) 村田, 三宅: ターボ機械 8-5 (昭55) P. 279.