軸流圧縮機のケーシングトリートメント形状に関する研究*

藤田 英雄**, 高田 浩之**

A Study on Configurations of Casing Treatment
for Axial Flow Compressors

by Hideo FUJITA and Hiroyuki TAKATA

Casing treatment is known to improve the stall margin of axial compressors. However, it is known as well that casing treatment lowers the efficiency of compressors. An experiment was planned in order to test a series of configurations of casing treatment which are supposed to have favourable effects and obtain the optimum ones, if any, judged from above-mentioned two standpoints: larger stall margin improvement and smaller lowering of efficiency.

The result showed that the relation between the stall margin improvement and the compressor efficiency for all of the tested configurations falls on some smooth curved-line, and thus, there exists no particular superior treatment configurations to others. It rather showed a certain amount of loss in efficiency was inevitable in order to obtain some required amount of stall margin improvement. Influence of rotor tip clearance on the effect of casing treatment was also examined.

The result can be used as a guide for the selection of configurations in designing casing treatment.

Key Words: Fluid Machines, Axial Compressor, Casing Treatment, Stall Margin, Rotating Stall

1. ま え が き

ケーシングトリートメントが軸流圧縮機や軸流ファンの失速マージンを増大する上で効果があることは、少なくとも単独のロータや単段圧縮機においては、多くの実験によってすでに確認されている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。しかし、一方ではまた、ケーシングトリートメントは圧縮機効率に悪影響を及ぼすこともわかっており、一般に失速マージン改善の効果の著しいトリートメントほど効率を低下させる程度も大きい傾向にある。

設計の立場からは、当然失速マージンの改善の面で効果的であると同時に効率(とくに設計点付近の効率)を低下させることのないケーシングトリートメントが望ましいわけで、従来この観点から多くのトリートメント形状が試験され、個々の形状の効果について多くの報告が行われている。たとえば、定性的には後述する斜めみぞ形や軸方向みぞ形のトリートメントは失速マージン改善の程度が著しいかわりに効率を低下させる程度も著しく、周方向みぞ形や翼角度みぞ形のトリートメントは効率に悪影響を及ぼす程度が小さいかわ

りに失速マージン改善の程度もあまり大きくないといわれている。また、前者の形式において効率低下を抑えるために、みぞの軸方向範囲を翼先端の軸方向投影長さの中央部分に限ったり、あるいはみぞの中に適当な仕切り板を入れて軸方向逆流を防止したりすることが議論され、後者の形式において失速マージンを増大するために周方向みぞ内数箇所にやはり仕切り板を入れることが提案されたりしている⁽⁴⁾。

本研究は、以上のような従来の研究成果の上になつて、失速マージン改善と効率の両面から見て、定量的検討の意味で最も望ましいトリートメント形状を見いだそうとしたものであって、具体的には幾つかの良好と目されるトリートメント形状について、みぞの範囲や位置、数など；仕切り板の有無やその入位置、その数などを広範囲に変えて、トリートメントの効果を系統的に、かつ定量的に調べたものである。

一方、ロータ先端の翼端間げきの大きさが失速マージンや圧縮機効率に対して微妙な影響をもつことは容易に想像できる。したがって、本研究では圧縮機の効率および失速マージンに及ぼすケーシングトリートメントと翼端間げきの両者の影響の相互関係についても定量的に明らかにすることを試みた。

この研究では以上のほか、同一のロータを用いて、

* 昭和58年9月2日 第921回講演会において講演、原稿受付昭和58年2月14日。

** 正員、東京大学工学部 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)。

ロータ単独の場合におけるケーシングトリートメントの効果と入口案内羽根, さらにはステータをも具えて単段圧縮機とした場合におけるケーシングトリートメントの効果との比較も行い, またピトーラバースによる内部流動の計測も行った。

2. 実験装置と実験方法

実験は図1の軸流圧縮機を用い, ケーシング壁面のロータ先端に対向する部分にトリートメントライナをそう入して行った。翼列流路部分は外径500 mm, 内径320 mmで, ロータはNACA 65系断面をもつ36枚の動翼を有し, 回転速度3000 rpm, 標準翼端間げき0.6 mmである。動翼設計諸元を表1に示す。

圧縮機流量は吐出し管途中に設けたベンチュリ管により計測し, 圧縮機全圧上昇はロータ上, 下流(ロータ中心線より上流側208 mm, 下流側410 mm)に設けたキールプローベの差圧より求めた。ただし, 上流側は合計4個のキールプローベを円周方向90°ごとに流路の半径方向高さの中央にそう入してその平均値をとり, 下流側は圧縮機流量により全圧の半径方向分布が変化するので, 半径方向7点のくし形キールプローベを円周方向8箇所に入してその平均値をとった。また圧縮機入力はいねり軸式トルクメータと軸回転数により計測した。実験条件の設定および結果の整理はすべて15°C, 101.3 kPa {1 atm}の標準状態を基準にして行った。すなわち, 回転数をその修正値 n が3000 rpmになるよう設定したのち, 計測値から修正流量

- ① Treatment liner
- ② Total press. probe
- ④ Hot wire probe

図1 供試軸流圧縮機

図2 斜めみぞ形および軸方向みぞ形トリートメント

図3 周方向みぞ形トリートメント

表1 翼列設計諸元

	IGV			Rotor			Stator		
	Tip	Mean	Hub	Tip	Mean	Hub	Tip	Mean	Hub
Solidity σ	0.92	0.91	0.90	0.69	0.98	1.43	0.92	1.12	1.43
Camber Cl_0	0.51	0.64	0.84	0.70	0.84	1.40	1.28	1.33	1.40
Stagger angle ξ°	-8.3	-9.9	-12.2	53.6	44.6	27.2	19.5	22.8	27.2
Chord length c mm	40.0	32.5	25.0	30.0	35.0	40.0	40.0	40.0	40.0

$\dot{m}$ [kg/s], 修正全圧上昇 ΔP_t [Pa], 修正トルク T [N·m] の各値を求め, 効率 η は

$\eta = 60 \dot{m} \Delta P_t / (2\pi \rho T n)$ として算出した。ただし ρ は密度である。効率算出値の誤差は, 各トリートメント形状間の相対的比較に関するかぎりでは, 各計測値の測定精度の検討および多数回の試験結果の比較よりおおよそ $\pm 0.25\%$ と推定している。同様な意味で圧縮機流量の相対的な精度は $\pm 0.2\%$ である。

実験に供したトリートメント形状をその呼称のしかたとともに図2~4に示す。図2でSVは斜めみぞ形, AVは軸方向みぞ形を表す。みぞの軸方向範囲と動翼先端との相対位置関係および軸方向仕切り板の有無に関しては図に示す9種類を選んで実験することとし, それぞれを表す記号をSVまたはAVに続く横線のあと括弧の位置に並べて各トリートメント形状の名称とする。ここでこれらの各記号のうちの数字はみぞの軸方向幅(3mmを単位としてのその倍数)を表し, 文字C, F, Rはそのみぞ部分が動翼先端の軸方向投影と比較してそれぞれほぼ中央部分, 比較的前縁寄り, および比較の後縁寄りにあることを表す。またBはみぞ中央に軸方向仕切り板のある形状を意味する。図3は周方向みぞ形(C形)で, Cのあとの数字でみぞの数

を, また横線のあと括弧の位置の数字で周方向仕切り板の間の中心角 θ (この位置がブランクのものは仕切り板なし)を表す。本実験で, トリートメント形状のいかなる要因に着目してその効果を調べようとしているかは以上からも明らかであろう。

そのほか, 著者らが従来ケーシングトリートメントの研究⁽³⁾に使用してきたライナも本実験の対象に含めることとし, 図4に示した。すなわち斜めみぞ形系のS-SO(浅みぞ開端)形, S-SC(浅みぞ閉端)形, S-DC(深みぞ閉端)形, 軸方向みぞ系のA-SO(浅みぞ開端)形および翼角度みぞ形系のBA形の5種類である。

単段圧縮機としての試験に際しては, 単独ロータの試験に用いたと同一のロータ(Rと略記)の上, 下流にそれぞれ36枚の翼より成る入口案内羽根列(Gと略記)およびステータ(Sと略記)を用いて, G-Rの組合せおよびG-R-Sの組合せについて実験を行った。これらの各翼列の設計諸元も表1に示した。

表2 単独ロータにおける試験結果

Treatment configuration		Stall point mass flow kg/s	Stall margin improvement %	Maximum efficiency	Stall point efficiency
Solid		4.56	—	0.886	0.856
Skewed slot	S-S0	3.73	18.2	0.862	0.728
	-SC	3.71	18.6	0.860	0.723
	-DC	3.65	20.0	0.859	0.712
	SV-6C	3.79	16.9	0.863	0.744
	-4C	4.08	10.5	0.874	0.800
	-4F	4.24	7.0	0.878	0.821
	-3C	4.31	5.5	0.882	0.833
	-3R	4.42	3.1	0.880	0.837
	-4B4	4.22	7.5	0.870	0.813
	-3B3	4.31	5.5	0.874	0.825
	-2B2	4.35	4.6	0.882	0.836
	-1B1	4.48	1.8	0.884	0.848
Axial slot	A-S0	3.88	14.9	0.867	0.763
	AV-6C	3.99	12.5	0.868	0.790
	-4C	4.15	9.0	0.876	0.816
	-3C	4.36	4.4	0.878	0.837
	-4B4	4.29	5.9	0.870	0.821
	-3B3	4.34	4.8	0.872	0.828
	-2B2	4.42	3.1	0.876	0.838
	-1B1	4.51	1.1	0.878	0.846
Circum.groove	C5	4.43	2.9	0.880	0.843
	C3	4.55	0.2	0.882	0.854
	C5-30	4.25	6.8	0.878	0.828
	-60	4.36	4.4	0.878	0.838
	-90	4.38	3.9	0.878	0.841
	-120	4.38	3.9	0.878	0.840
	C4-30	4.33	5.0	0.882	0.842
	C3-30	4.45	2.4	0.882	0.850
	C2-30	4.53	0.7	0.883	0.850
Blade angle BA		4.26	6.6	0.874	0.818

図4 既存形式各種トリートメント

3. 実験結果と考察

3.1 単独ロータにおける各種トリートメント形状の効果 各種形状のトリートメントを施した場合の実験結果から、失速点流量、失速限界改善率、ロータ最高効率、ロータ失速点効率を要約して表2に示す。ただし、ロータ上流にそう入した熱線風速計の出力を監視しながら、圧縮機流量を一定の方式に従って徐々に減少させていき、旋回失速が発生する直前の流量の点を失速点と呼ぶことにした。また、失速限界改善率は剛壁の場合を基準として次のように定義した。

失速限界改善率

$$= 1 - \frac{\text{ケーシングトリートメント時の失速点流量}}{\text{剛壁時の失速点流量}}$$

表2のうち、とくに関心のもたれる失速点流量と効率との関係を斜めみぞ形の場合を例にとって図5に示す。ケーシングトリートメントの目的からいって最高効率になるべく高く、かつ失速点流量のなるべく小さい形状が望ましいわけであるが、この図を概観するかぎりでは両者の関係はすべてのトリートメント形状を

図5 失速点流量と効率の関係(斜めみぞ形系)

図6 ロータ最高効率と失速限界改善率の関係

通じてほぼ1本の連続的な曲線の上ののっており、トリートメントの詳細構造の相違は単にこの曲線上でどの位置を占めるかを指定するにすぎない。したがって、この意味では失速マージン改善と効率低下防止の両面から見て特別に有利なトリートメント形状というものは存在しないというべきであろう。以上の結論は考察の範囲に軸方向みぞ形や周方向みぞ形を含めて考えることにしても同様である。図6はロータ最高効率と失速限界改善率との関係を表2の全試験結果について示したものである。この図からも前記の意味で特別に有利なトリートメント形状が存在しないことは明らかである。またすべての形式を通じて、剛壁の場合よりも効率を向上させるようなトリートメント形状というものも存在しないことがわかる。

一般に1%程度の最高効率の低下を許すことにすれば約10%の失速限界改善を期待することができる。そしてその場合のトリートメント形状としては、選択の自由度は比較的大きいが、たとえばSV-4C, AV-4C,あるいはC5-30などが適当のようである。軸方向仕切り板つきの4B4あるいは3B3などの形式は得られる改善率の大きさに比して効率低下がいくぶん大きい傾向にある。これは、これらの形式においてはみぞの軸方向範囲が動翼先端の前後縁よりそれぞれ上流および下流へ延びていることに関係があるものと思わ

図7 全圧の半径方向分布

図8 軸流速度の半径方向分布

れる。いずれにしても効率低下を抑えるためにはみぞの前、後縁はそれぞれ動翼の前、後縁よりも外側へ延びていないことが望ましい。前記の4C形においてはみぞの軸方向長さは動翼先端の軸方向投影長さの2/3程度である。周方向みぞ形はもともとケーシングトリートメントによりあまり効率が低下しないかわりに失速限界の改善も小さい形式である。いまの場合、最大の改善率が得られるのはなるべく多数のみぞを用い、かつなるべく細かく仕切り板を入れたC5-30形である。この形状においては周方向みぞ中の流体と圧縮機翼列流路中の流体との間の流量あるいは運動量の交換が最も活発であり、これが失速マージンの改善に貢献しているものと思われる。

内部流動の計測は五孔ピトー管を用い、ロータ入口および出口断面（それぞれロータ中心線より上流側41.5 mm, 下流側52.5 mm）において、3種類の代表的トリートメント形状および剛壁の場合に対して行った。結果の一例として、図7および8にロータ入口および出口における全圧と軸流速度の半径方向分布を示す。ただし剛壁の場合の失速点に相当する流量4.60 kg/sにおける結果である。この図より、ケーシングトリートメントを行った場合には、周方向みぞC5-30形における軸流速度を除いて、他はロータ出口の全圧、軸流速度ともすべてがケーシング壁面付近で剛壁の場合よりも大きくなっていることがわかる。一般にこれらの事実は失速限界の改善に対して好ましい影響をもつものと思われる。しかし、上記のC5-30形における軸流速度分布の解釈や、内部流動と失速限界改善率との間の相互関係のトリートメント形状間における

比較など、このような周方向平均流^{*1}の測定結果だけでは判断できないと思われる面もある。これらの点に関してさらに考察を進めるためには、ロータ出口における動翼1ピッチ間の相対流れがケーシングトリートメントによりどのように影響を受けるかについて各トリートメント形状ごとに知る必要がある。現在、そのための実験を準備中である。

3・2 翼端間げきがケーシングトリートメントの効果に及ぼす影響 3・1節の結果に基づいて、代表的なトリートメント形式としてSV-4C, AV-4C, およびC5-30の各形式を選び、これに剛壁の場合を加えて、それぞれに対して翼端間げきを0.3, 0.6, 1.2 mmの3種類に変えて実験を行った。剛壁とSV-4C

図 10 特性曲線 (SV-4C)

図 9 特性曲線 (剛壁)

図 11 翼端間げきの影響

^{*1} C5-30 形の場合には周方向仕切り板の影響を受けるので、ロータ下流では軸対称性は少し悪いものと思われる。図7および8の結果は仕切り板間隔の中央の後方で計測したものである。

図 12 全圧の半径方向分布

の場合のロータ特性曲線を図 9 および 10 に示す。剛壁の場合、最高効率も翼端間げき 0.3 mm と 1.2 mm に対して約 1% の差を生ずるが、SV-4C の場合にはこの差は 0.4% と小さい。なお、SV-4C で翼端間げきが 1.2 mm のとき、流量の小さい領域で全圧上昇および駆動トルクが他の翼端間げきの場合に比べて大きくなることが特徴的である。

翼端間げきに対する失速点流量およびロータ最高効率の変化を図 11 に示す。剛壁の場合には翼端間げきによる失速点流量の変化は顕著であるのに対し、周方向みぞ形、軸方向みぞ形、さらには斜めみぞ形と失速限界改善率の大きいトリートメントを施した場合ほど、失速点流量の翼端間げきによる変化は小さくなっていく。ロータ最高効率の翼端間げきによる変化に対しても同様なことがいえる。失速限界改善の効果の著しい形式のトリートメントにおいては、翼端間げきのかなり大きい場合においても、トリートメントの影響が翼端付近の流れを大きく支配しているものと考えることができよう。また、見方を変えていえば、翼端間げきの大きい場合にはケーシングトリートメントは失速限界改善に対して非常に効果的であるとともに、それに伴う効率低下は比較的小さいものであるということもできる。

本節の実験においてもロータ入口および出口において内部流の測定を行った。図 12 に剛壁と SV-4C の場合のロータ出口における全圧の半径方向分布の例を示す。この図からロータ出口全圧の半径方向分布もやはり、剛壁の場合には翼端間げきにより大きな影響を受けるが、SV-4C の場合には影響の程度がかなり小さくなっていることがわかる。

3.3 単独ロータと単段圧縮機におけるトリートメントの効果の比較 3.1 節に述べたロータの上流側に入口案内羽根をつけた場合 (G-R)、および下流側に

表 3 単段圧縮機における試験結果

Treatment	G - R		G - R - S	
	Stall margin improvement %	Maximum efficiency	Stall margin improvement %	Maximum efficiency
Solid	—	0.873	—	0.845
SV-4C	11.1	0.862	9.9	0.835
AV-4C	9.9	0.865	8.9	0.837
C5-30	8.0	0.868	6.7	0.841

さらにステータをつけて単段圧縮機とした場合 (G-R-S) に対して、合計 3 種類のトリートメント形状についてその効果を比較する実験を行った。入口案内羽根および静翼の設計諸元は表 1 に示したとおりである。入口案内羽根やステータを付け加えることによってフローパターンは変化するが、それでも結果的に rotor tip-critical であることには変わりはなく、概括的には単独ロータの場合とほぼ同じような結果が得られた。すなわち、各トリートメント形状の効果の相対的な比較は上の程度のフローパターンの変化によってはあまり影響をうけなかった。表 3 に結果の一部を示す。

このとき内部流の計測結果によれば、旋回失速が発生する直前の状態においては、単独ロータの場合 (R) と単段圧縮機の場合 (G-R-S) とにおいて、動翼の外径側約 1/4 スパン程度の部分は相対的にはほぼ同じ作動状態にあることが確かめられた。

4. む す び

本実験は特定のロータについて行ったものであるが、結果は一般の軸流圧縮機におけるケーシングトリートメントを計画する際にも参考になるものである。今後、動翼ピッチ間の相対流れを調べることによって、各トリートメント形状が失速限界改善と効率低下に影響を及ぼす機構について調べていく予定である。なお、本研究は文部省試験研究費の補助を受けて行った。

文 献

- (1) Osborn, W. M., ほか 2 名, NASA Tech. Note, D-6537 (1971).
- (2) Moore, R. D., ほか 2 名, NASA Tech. Note, D-6538 (1971).
- (3) Takata, H. and Tsukuda, Y., Trans. ASME, Ser. A, 99-1 (1977), 121.
- (4) Prince, D. C., ほか 2 名, ASME Paper, 75-GT-60 (1975).

討 論

〔質問〕 松 木 正 勝〔日本工業大学〕

各種のトリートメントについて実験結果を示され、現象の理解と使用の便を提供されたものを考える。

実験は動翼同速は 80 m/s 程度であるが、フロントファンのように 400 m/s 程度の場合についてはどのようにお考えか。

〔回答〕 ケーシングトリートメントの効果については、今日まで各国で各種形状のトリートメントを用い、広い範囲の流れ条件に対して実験が行われている。そして、その結果一般的な結論として、ケーシングトリートメントは非圧縮流れの圧縮機に対しても遷音速流れの圧縮機に対しても同様に有効であるとされている。著者らの圧縮機はロータ周速 78.5 m/s であるが、文献(1)、(2)の実験は 421 m/s、文献(4)の実験は 45 m/s におけるものである。そしてこれらの結果はみな大きく言って同じ方向を指している。ほかにも NASA の実験の多くは遷音速圧縮機を用いて行われており、また翼端マッハ数 1.5 の超音速圧縮機においてもトリートメントが有効であったとの報告(付1)もある。

文献(1)は遷音速におけるケーシングトリートメントの実験の代表的な報告であるが、ここではトリートメントの溝通路の音響的振動数と翼通過周波数とのチューニングの影響のようなことについても調べられており、結果として、これらの因子もトリートメントの効果には無関係であるとされている。

翼列流路中に衝撃がある場合には、流れはトリートメントによって亜音速圧縮機の場合とはまた異なった複雑な影響を受けることであろう。ケーシングトリートメントが失速マージンを改善する機構はまだ理論的に明らかではないので推測にしかすぎないが、もしトリートメントの効果が結局翼背面の衝撃波下流側のサブソニックディフュージョンの領域を改良してはく離(失速)を防ぐという形で現れるものであるならば、トリートメントの効果は遷音速圧縮機であっても、亜音速圧縮機であっても本質的には変わらないと考えることができよう。

〔質問〕 大 山 耕 一

〔科学技術庁航空宇宙技術研究所〕

種々の条件のもとで実施された綿密な実験研究に対し深く敬意を表す。ケーシングトリートメントによる

作動範囲の改善とともに翼端すきまの影響も明らかにされて、興味深く拝見した。

(1) 翼端のすきまの値は静止時のものか、またはロータ回転中のものか。

(2) 翼端すきまはケーシングの円周方向位置に関係なく一様であったのか。

(3) 翼端すきまは各動翼について、すべての一様だったのか。もしばらつきがあったとしたら、どの程度の差異があったのか。

〔回答〕 (1) 翼端間げきはロータ静止時の測定値である。

(2) 翼端間げきには圧縮機円周に沿って、片振幅 10/100 mm 程度で円周を 1 波長とするような正弦波状に近い変動がある。すなわち、ケーシング外周に対してロータ軸が約 0.1 mm 偏心している形にはほぼ近い。

(3) 翼ごとによる翼端間げきのばらつきは ± 4/100 mm の範囲内に分布している。

〔質問〕 永 野 進〔石川島播磨重工業(株)〕

(1) ケーシングトリートメントの実機への適用上、みぞの深さはスペースあるいは重量に影響をもつ重要な設計パラメータとなる。本研究では斜めみぞ形で 3 種の深さ (S-SC, SV-6C, S-DC) の比較ができると思われるが、みぞ深さを失速マージン改善量との関連が必ずしも明確でない。この点についてどのようにお考えか。また、他のタイプでみぞ深さを変えた試験はなされているか。

(2) 翼端間げきの増加は効率低下とともに失速マージンの低下を招くのに対し、ケーシングトリートメントは効率の低下とともに失速マージンの増加をもたらすという顕著な対照が本研究で浮き彫りとなったと思われるが、この相違を生ずる機構についてお考えがあればおきかせ願いたい。

〔回答〕 (1) AV-4C 形トリートメントで溝の深さのみを 10 (標準)、6.5、3 mm の 3 種に変えて行った実験の概略の結果を付図 1 に示す。深さ 6.5 mm では失速限界改善率、ロータ最高効率ともに深さ 10 mm の場合とあまり大きくは変わらない。すなわち深さの影響は 6~7 mm 程度で飽和している。深さが 3 mm の場合には標準とした 10 mm の場合に比べ改善率は約 1/2 に減少し、効率は少し良くなっている。また付図 1 に破線で示したように、この深さの影響は剛壁の場合の結果(黒丸印)と連続的につながる傾向を

(付 1) Fabri, J. and Reboux, J., ASME Paper, 75-GT-95 (1975).

示している。

S-DC (深さ 30 mm) および S-SC (深さ 10 mm) 形の場合も改善率と効率の値のふりまから見て深さの影響はほぼ飽和していると見てよいようである (ご質問中の SV-6C は溝の幅が異なるので比較することはできない)。

著者らはかつてトリートメントの溝の中の再循環流を測定したことがあるが、これによれば圧縮機主流中の流体は翼弦後縁部付近より溝内へ入り、その中を逆流して上流側へ向かい、さらに翼弦前縁部から中央部のあたりで翼の通過ごとに非常に高速なジェットとして再び翼列流路中へ噴出していることがわかっている。そして S-DC 形と S-SC 形とではこの噴出するジェット流の溝幅方向 (軸方向) に沿う速度分布が相違していた (付 2)。この計測は困難で、かつかなり誤差の大きいものであるが、トリートメントの効果に対する溝深さの影響を考える上で一つのヒントを与えているものと考えられる。

(2) ケーシングトリートメントが失速マージンを改善するメカニズムについてはまだよくわかっていない。しかし、著者らは回答 (1) に関連して述べた高速ジェットの存在が失速マージン改善機構に大きく関わっているものと考えている^{(3)(付 2)}。このジェット流は翼列流路内では動翼に相対的に翼の圧力面に向かう非常に大きな速度成分を有している。このジェット流とケーシング壁面付近の低運動量の流体との間の運動量交換がこの付近の流れを改良し、それに関連してチップ寄りの翼列断面の作動状態が改良されて失速マージン

付図 1 溝の深さの影響 (AV-4C)

の改善につながると期待するものである。しかし一方では上の翼圧力面に向かう高速流に対してロータは余分の仕事をするであろうからこれは圧縮機効率低下の原因となる。したがって過度の再循環流は望ましいことではなく、効率の観点からトリートメントの溝の幅を制限したり、中央に仕切り板を入れたりすることが場合によっては有効となる。

失速限界改善機構についての上の考え方はまだ全く推測の段階を出ない。これを確認していくためには圧縮機ロータ内およびロータ出口における相対流れの詳細とトリートメントによる再循環流との関係を実験的に調べる必要があるが、これは今後の問題である。

〔質問〕 井上 雅弘 [九州大学工学部]

ケーシングトリートメントによる失速限界改善率と効率低下との関連を興味深く拝見した。圧縮機の失速限界はブレードローディングが主因になる場合とウォールローディングが主因になる場合があるといわれているが、ケーシングトリートメントはどちらの場合にも同様の効果があるのか。またこのことに関連して供試圧縮機の拡散係数 D_f または相当拡散比 D_{eg} および圧力係数 C_p またはデ・アレ数 w_2/w_1 がどの程度かを お示し願いたい。

〔回答〕 ご質問の趣旨に関しては Greitzer ら (付 3) の論文がある。これはある単独ロータについてソ

付図 2 拡散係数および圧力係数

(付 2) 高田, 第 4 回日本ガスタービン学会セミナー資料集, (昭 52), 3-1.

(付 3) Greitzer, E.M., ほか 4 名, *Trans. ASME, J. Fluid Eng.*, 101-2 (1979), 237.

リディティを1.0と2.0の2種類に変化させて、それぞれ流量を絞っていったときにブレードストール($D=0.6$)あるいはウォールストール($C_p=0.6$)が先に起きるようにしておいて、ケーシングトリートメントの効果を比較したものであるが、これによればケーシングトリートメントが有効なのはウォールストールに対してのみであると結論されている。

しかしながら著者らは、ケーシングトリートメントはケーシング壁面と動翼失端部とで形成される領域の流れを改良して、とくにケーシング壁面と翼負圧面のコーナ部分の流れに好ましい影響を与えて、動翼のチップの断面の失速を遅らせ、よって失速マージンを改善しているという場合が普通であろうと考えている。すなわち、これは言葉の定義の問題でもあるかもしれないが、実際にはウォールストールとブレードストールとは区別しにくい状況にあるのではないかと考えている。また、この種の問題で圧縮機の失速というとき

には、それは普通旋回失速の発生を指しているので、前記の Greitzer らの結論を完結させようとするウォールストールがどのようにして旋回失速の発生につながっていくかについての考察が不可欠であるが、これも中間に翼負圧面のはく離(翼の失速)を考えないのでは困難であろうという問題もある。

著者らの圧縮機で剛壁の場合およびSV-4C形のトリートメントを行った場合の内部流れの計測値から拡散係数 D および圧力係数 C_p を算出した結果を付図2に示す。ただし、それぞれ設計点付近より失速点付近に至る間の4種類の圧縮機流量の点におけるスパン方向分布として示した。この図だけから失速(旋回失速)の発生との関連を論ずることは無理のようである。SV-4C形のチップ付近における D の値のふるまいは特異であり、これは他のトリートメント(AV-4CやC5-30)には見られない独特の傾向である。