

大容量蒸気タービン高圧初段開発上の諸問題

Some Problems in Developing Large Capacity Steam Turbine High Pressure First Stages

In developing large steam turbines with a capacity of 700 MW or more, completion of a satisfactory high pressure first stage holds the key to success. Operating at high temperatures and high pressure of the steam direct from boiler, the first stage should be designed for higher reliability and efficiency than other stages. In this article, the designing of the double-flow nozzle box, steam path connecting first and second stages, and first stage blades is discussed.

黒田倫夫* Michio Kuroda
名村 清* Kiyoshi Namura
山崎義昭* Yoshiaki Yamazaki
二宮 敏** Satoshi Ninomiya

1 緒 言

わが国における火力発電量は、昭和37年に至り、初めて水力発電量を上回って後しだいに発展し、現在では全発電設備の約70%⁽¹⁾を占めるまでに成長した。また、経済性の向上という面から大容量化も同時に進んでおり、昭和30年において60～70MW級であった単機最大容量も現在では1,000MW級の時代に入っている。すなわち、アメリカにおいてはすでに世界最大容量機として1,300MW機の運転が行なわれており、わが国においても1,000MW機がまもなく運転開始される状態になっている。

このような大容量機の開発にあたって問題になるものに、高圧タービン初段の設計がある⁽²⁾。高圧初段はボイラからの246 kg/cm²、538℃という高温高圧の蒸気がタービンに入る最初の部分であり、高温高圧蒸気に直接さらされること、また運転条件によっては大きな流れのかたよりが生じ、翼が大きな力を受けることなど、応力的に非常に過酷な状態で運転される段落である。このようなことから、高圧初段の開発には種々の問題の検討が必要であるが、ここでは、700MW級以上の大容量機に用いられる複流ノズルボックス式高圧初段の開発にあたって生ずる問題点およびそれに対する開発方法について紹介し、おおかたの参考に供したい。

2 複流ノズルボックス式高圧初段

一般に大容量化を図る場合には、材料の経済性の問題から蒸気条件を現在より上げることができないため、タービンの蒸気流量を増すことにより出力を増大させるのが普通であり、翼長の増加が行なわれる。しかし、前述のように高圧初段は応力的に過酷な状態にあり、翼長の増加にも制限がある。すなわち、現在用いられている単流形では700MW級が限界であり、それ以上の出力増加についてはなんらかの新しい対策が必要になる。その一つの解決法が複流ノズルボックス式の高圧初段である。

構造は図1に示したように従来形が単流ノズルボックスであるのに対して、初段だけが複流になっており、2段以降が従来どおり単流になっている形式のものである。これは、現在初段だけが非常に過酷な状態になっているのに対し、2段以降に余裕があり、その翼長を伸ばすことができることを利用して、初段のみを単流形と同一翼を用いて複流とし、2段以降は翼長を増加させることによって流量を増加させ、出力の2倍化を簡単にできるようにしたもののである。これにより、実績ある初段翼を用いて信頼性の高い大容量タービンの製作が可能になる。

このような方式を採用するにあたって問題になるのは、ノ

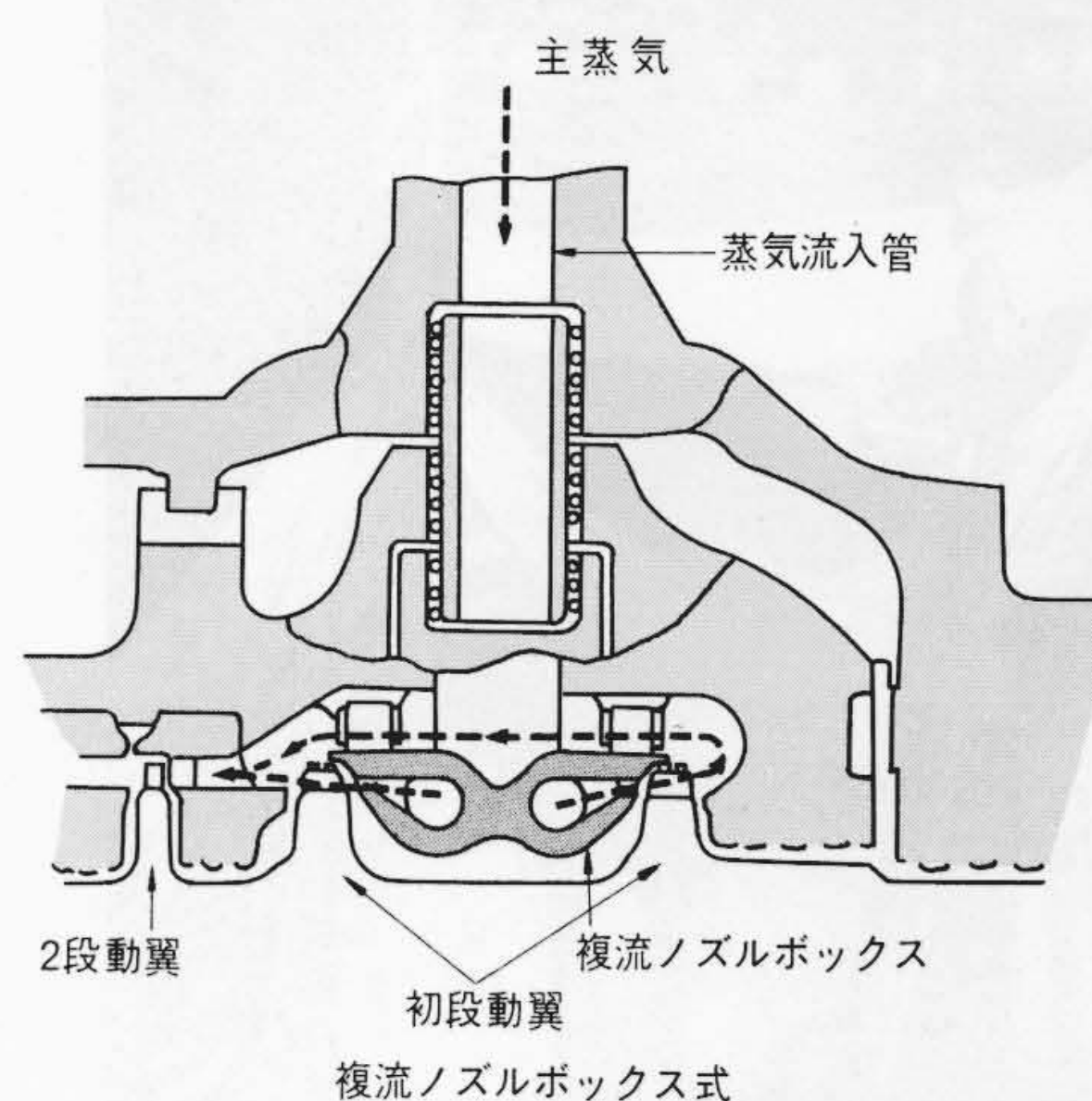
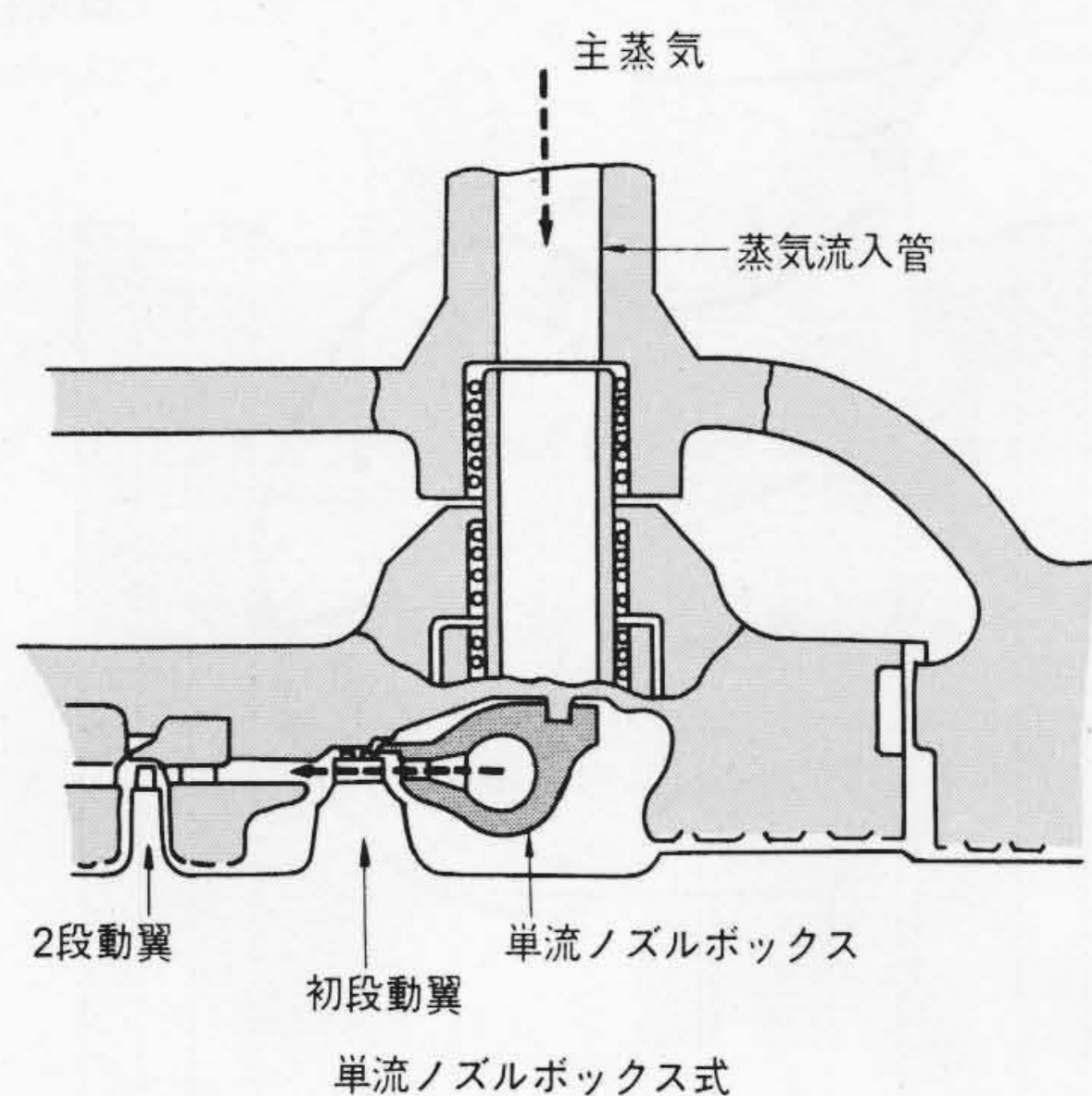


図1 単流形と複流形の高圧初段の比較 700MW機以上は複流形を用いる。

Fig. 1 Comparison between Single and Double-Flow High Pressure First Stages

* 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所日立工場

ズルボックスの形状、初段と2段の間の反転流路の形状、高圧初段翼の構造などであり、性能、振動、強度などの総合的な検討が必要である。以下、これらの問題点について種々検討し、700MW機以上の大容量機に用いる複流ノズルボックス式高圧初段を完成した際のおもな検討内容を中心とし高圧初段のもつ特徴の概略について述べる。

3 ノズルボックスの形状

複流ノズルボックスの形状を決定する場合に最も重要なのは強度的な検討である。複流ノズルボックスは図1に示したように蒸気室を二つ設けるため、単流形と比較し複雑な形状となり、局部的に応力の大きくなる部分が生ずる可能性があるため、各種の検討が必要になる。

形状の決定にあたっては、まず有限要素法を用い、計算による検討を行ない、これにより得られた形状について、実物大の実機同材質モデルで油圧試験を行なって、十分強度的に余裕のあることを確認し、最終的な形状を決定する。

図2は、応力測定を行なった実物大モデルの例である。応力の測定は実機運転時においてノズルボックスの内外の圧力差が最も大きくなる場合をカバーするため、最大200kg/cm²の油圧を段階的に加えてゆき、ノズルボックスの内外壁約300点の測定点について行なった。測定点の位置はあらかじめ行なった有限要素法を用いた計算をもとに決定した。

図3は、応力測定結果の例を示したものである。蒸気流入管外壁においてはA面が最も大きな値を示すがE面にゆくに従って一様な低い応力を示している。また、同図の右側は蒸気流入管取付部の応力分布であるが、すべて引張り応力となる。応力的にはいずれの場合も十分小さな値になる。

図4は、ノズルボックス内壁部について応力集中が最も大きいと思われる部分を中心に、応力分布を示したものである。これによると、補強用のリブの付け根が最も大きな応力を示している。リブ表面の応力は中間部で圧縮が起こり、端の部分は引張りになっている。また、蒸気流入管の外壁の部分は引張り、圧縮が混在した状態になっている。

補強用リブの付け根部応力の低減については肉厚調整が有効な方法として考えられる。図5は、リブ付け根部の形状を変えることによる最大応力の変化を示したものである。これによってすべての運転状態において十分余裕のある構造が決定できる。

このような応力分布については、有限要素法を用いた計算と実測による検討をくり返し、最終的な形状の決定を行なう。

4 初段後の反転流路形状

ノズルボックス内部の流れについては複流ノズルボックスになることによる問題はない。しかし、初段動翼を流出した蒸気の流れに対しては新しい問題が生ずる。すなわち、複流ノズルボックス構造においては図1に示したように初段動翼からの流れが左右方向に流出し、2段以降は1方向に流れることになるため、2段以降の流れの方向と同方向に流出する側のものは問題ないが、反対方向に流出する流れは、初段動翼後において180度方向転換する必要があり、この間の損失の増加が問題になる。

この間の流れは初段のノズルボックスの外壁面と内ケーシングの内壁の間に形成される空間を流れることになるが、この反転流路には図6に示すように、主蒸気流入管およびノズルボックスを支える水平フランジ部など変更不可能な障害物

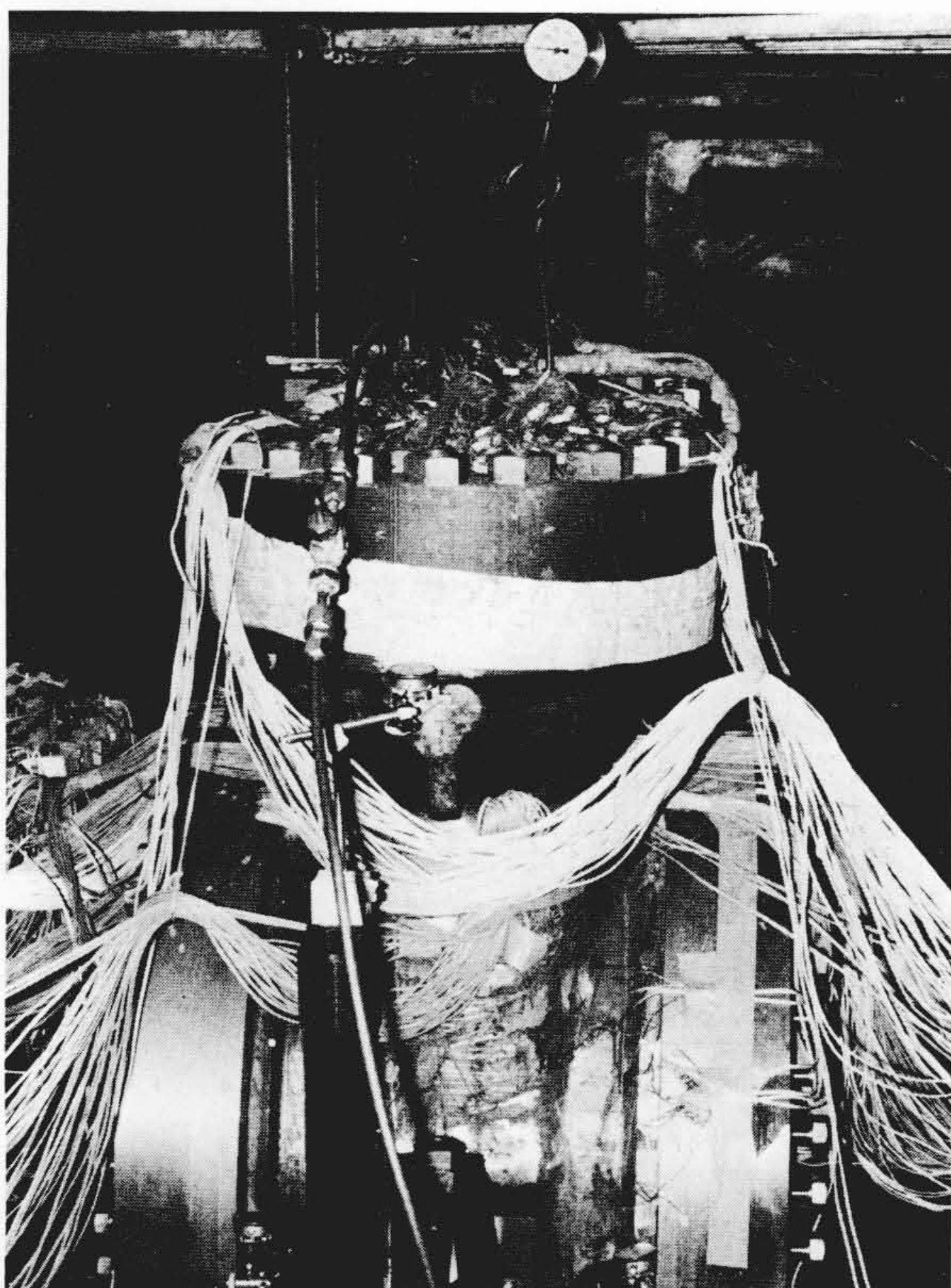


図2 複流ノズルボックスの耐圧試験 200kg/cm²まで油圧による試験を行ない、測定点約300点の測定を行なった。

Fig. 2 Pressure Test Model of Double-flow Nozzle Box

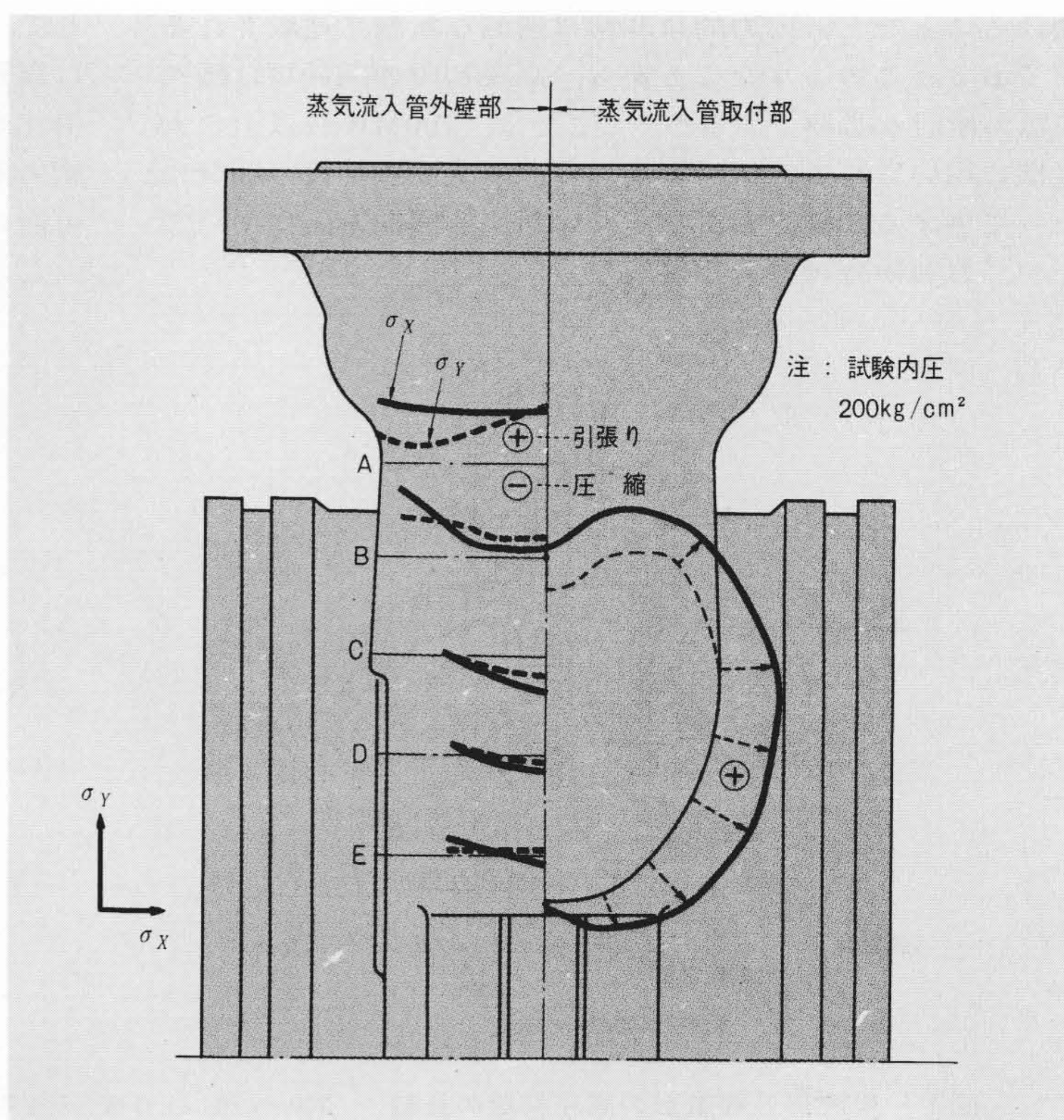


図3 蒸気流入管外壁応力分布 外壁応力はA部、管取付部が大きい。

Fig. 3 Outer Wall Stress Distribution in Steam Inlet Tube

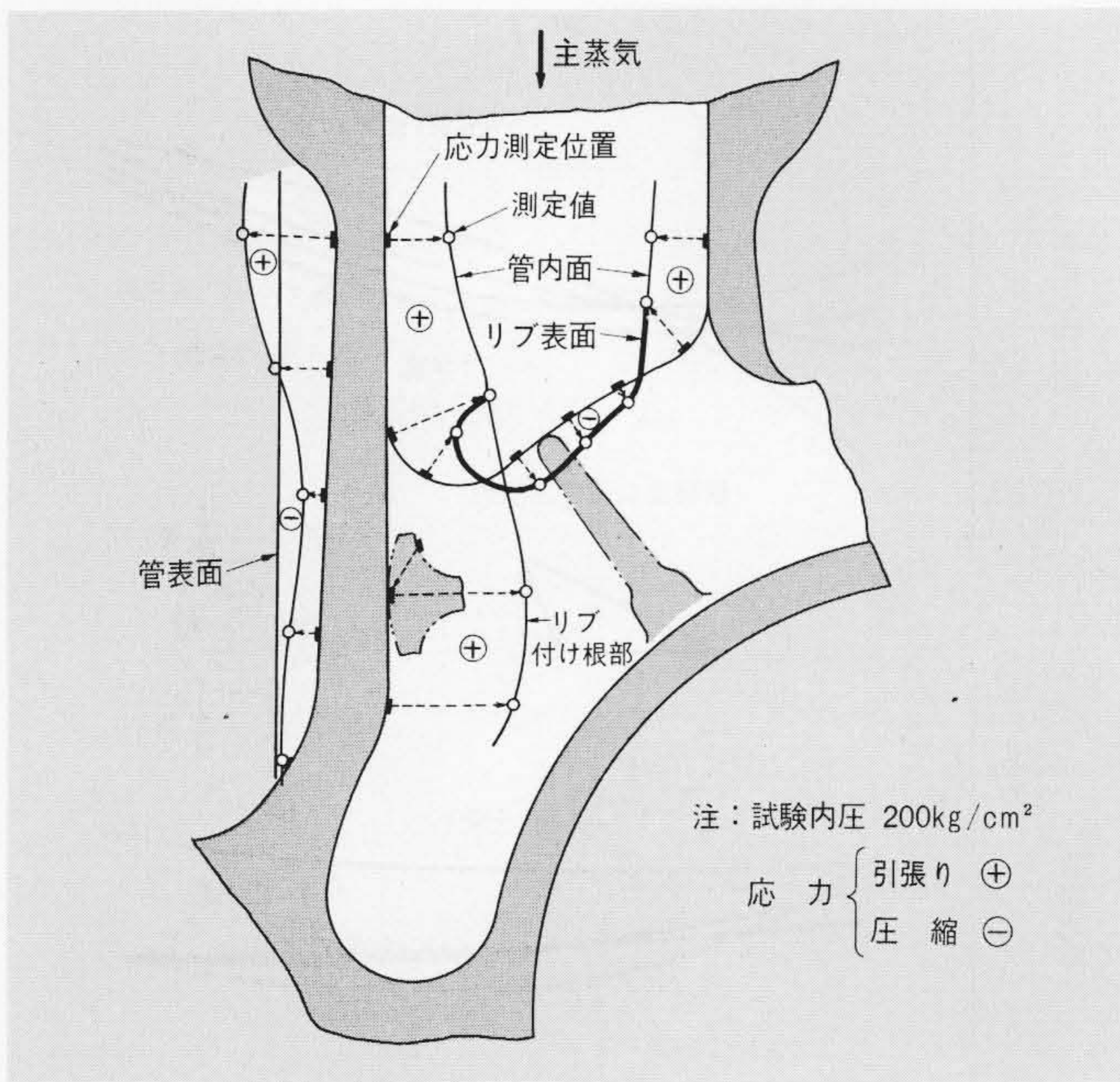


図4 ノズルボックス内壁応力分布 リブ付け根部の応力が最も大きい。

Fig. 4 Inner Wall Stress Distribution in Double Flow Nozzle Box.

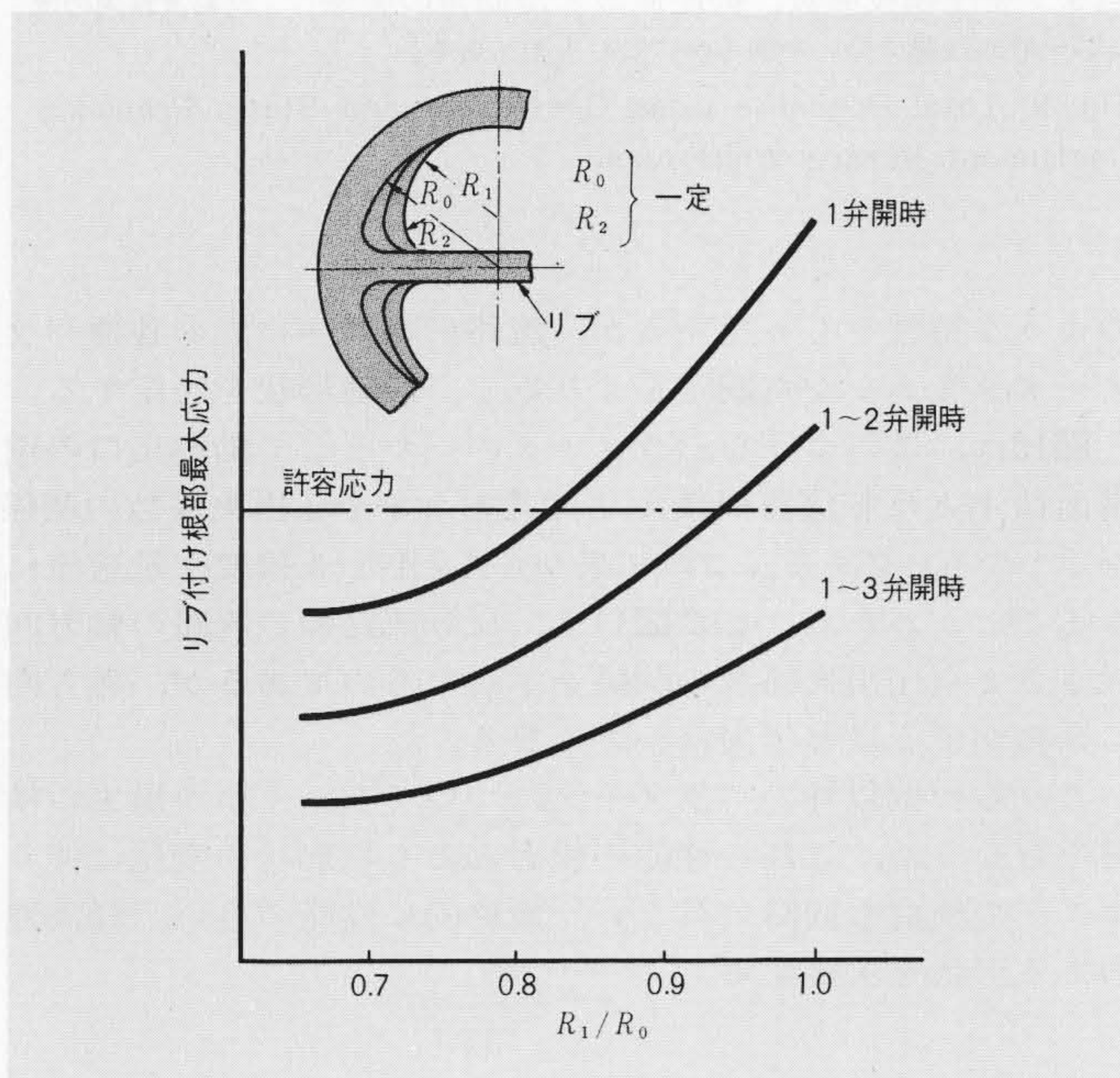


図5 リブ付け根部最大応力と R_1/R_0 (半径比) との関係 リブ付け根部最大応力はこの部分の形状を変えることによって大幅に低減できる。

Fig. 5 Maximum Strees at Base of Rib versus R_1/R_0 .

があり、非常に複雑な流路形状となっているとともに、実際に流路として用いられる部分は非常に狭いものとなっている。

また、初段動翼出口からの流れはジェット状の噴流となってこの流路に流入してくるが、これはタービンの負荷状態によって、たとえば図7に示すように旋回角、レイノルズ数、マッハ数が変化し、さらに部分噴流となるといように状態が大きく変化する。したがって、そこに起こる現象も複雑に変化することになり、これらの影響について十分検討しておくことが必要である。

このようなことから、実物の $\frac{1}{2}$ の縮尺モデルを用いて空気

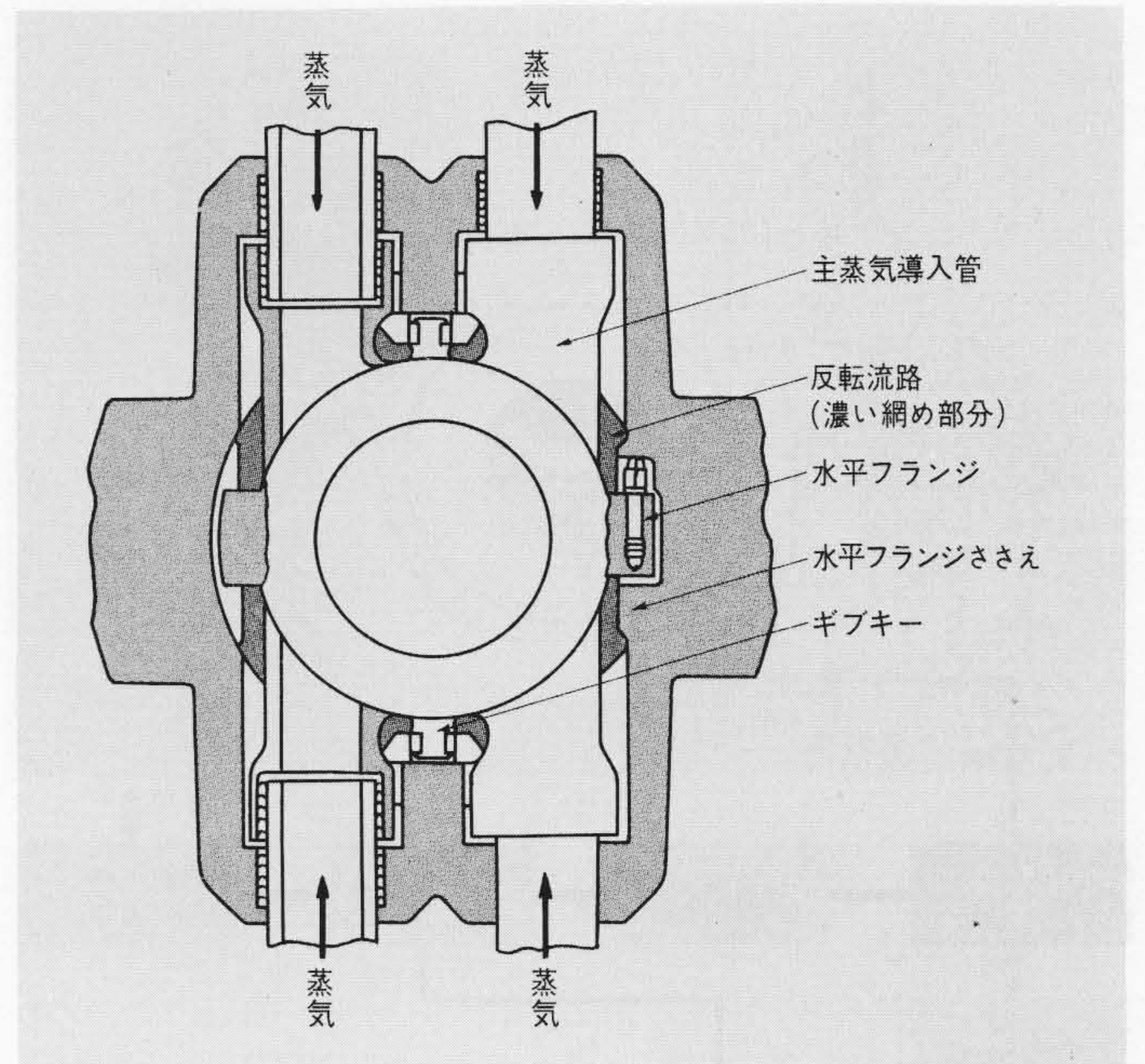


図6 蒸気流路断面(最狭部) 反転流路が非常に狭まることがわかる。

Fig. 6 Steam Path Cross Section

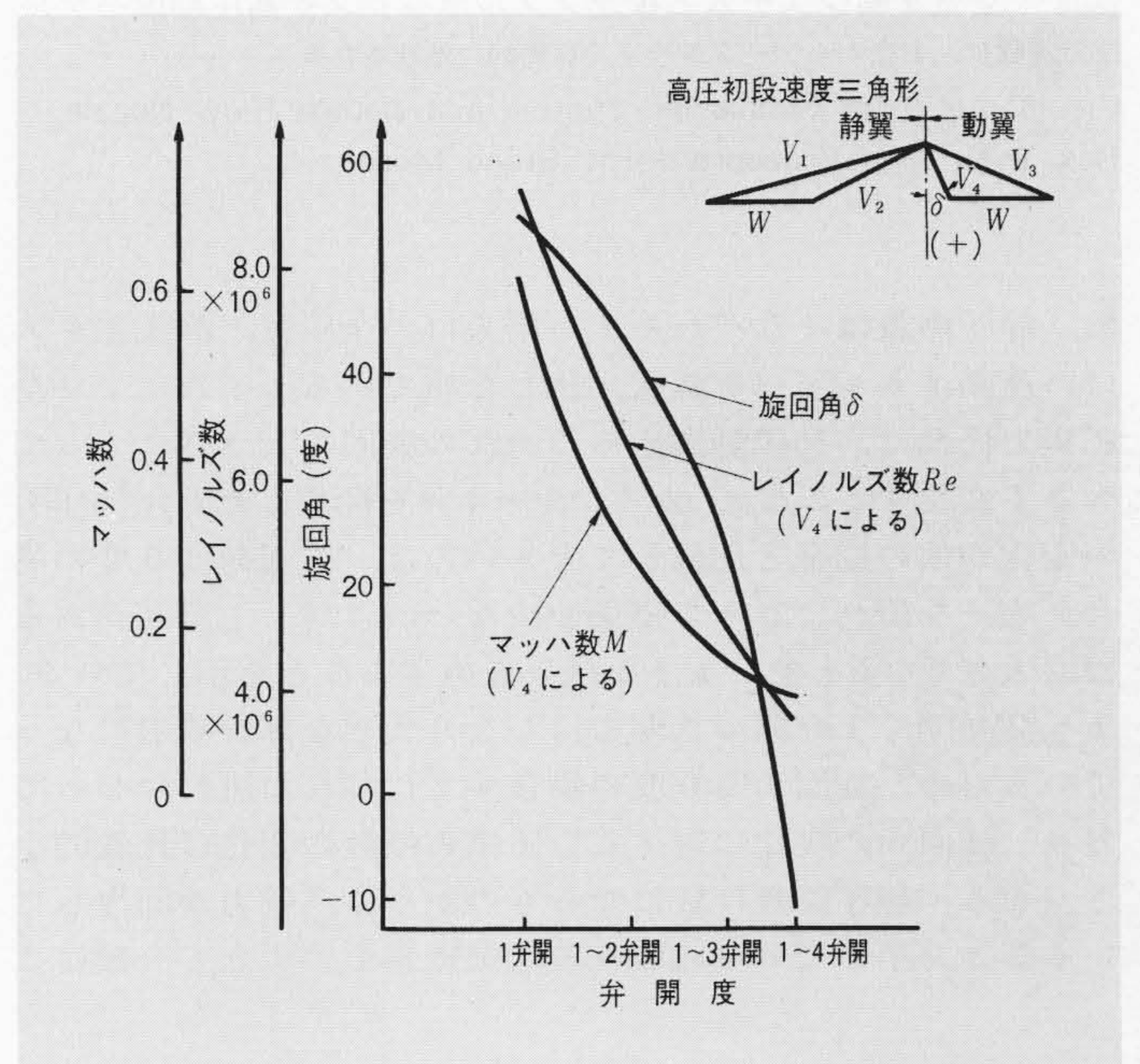


図7 高圧初段動翼出口の流れの条件例 弁の開度によって流れの条件が大きく変わることがわかる。

Fig. 7 Flow Condition for High Pressure First Stage Blade Outlet (Example)

実験を行ない、流線の観察による流れの状態の把握、損失発生部分の観察、全体的な流路損失の測定などを行なって、最終的な流路形状を決定する。

図8は、測定システムと実験用モデルを示すものである。測定は5孔ピトー管を用いて流れの状態を計測し、データ処理をするという一連の作業を、自動的にこなす計測システムを用いて行なった。また実験用モデルは、内ケーシングの上半分を外したものを示してあるが、180度転向する反転流路が非常に狭いことがわかる。

図9は、損失分布の測定例を示すものである。全圧損失係

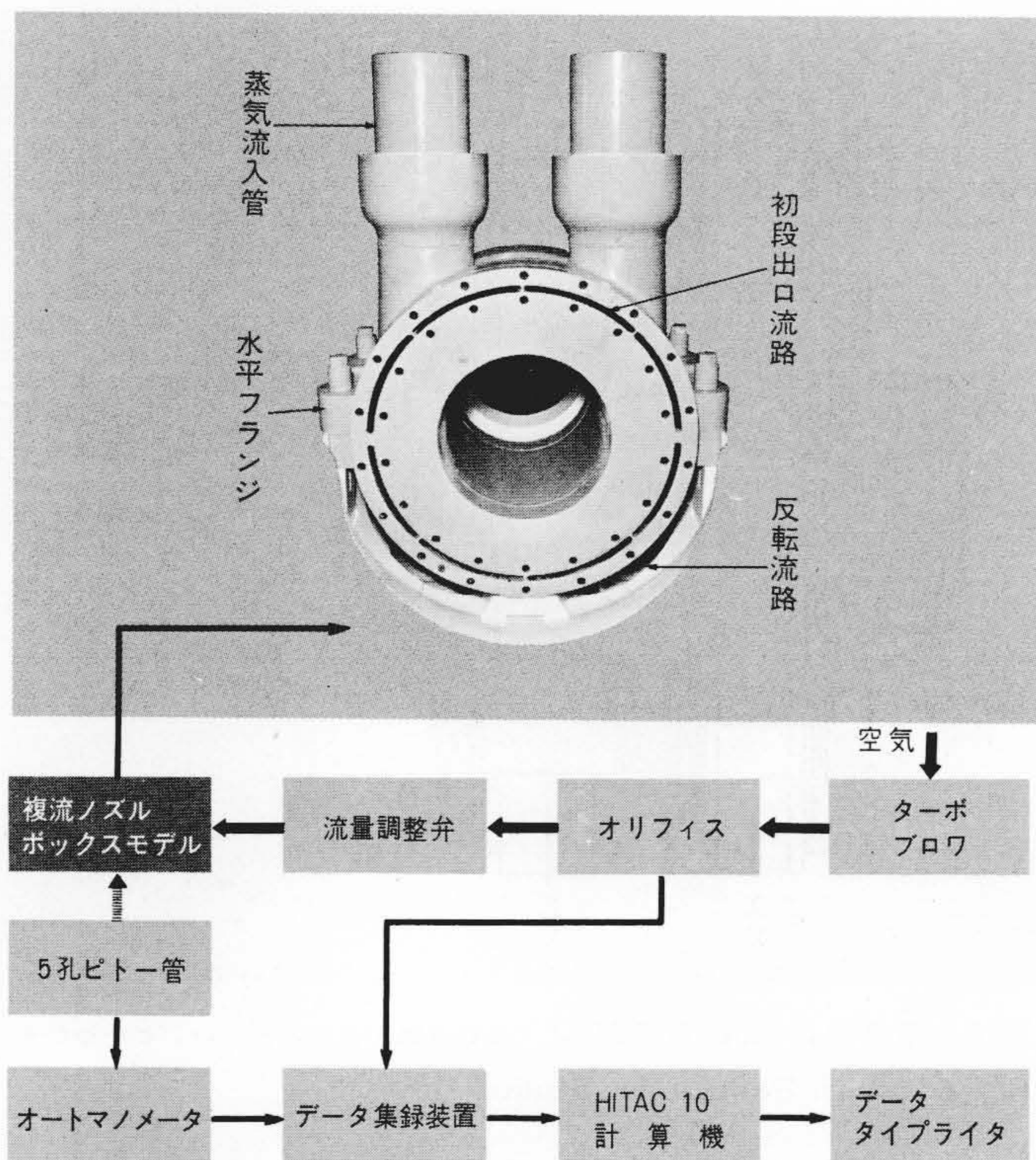


図8 空気実験システムと複流ノズルボックス式高圧初段モデル
空気実験は、測定からデータ整理まで自動的に処理される。

Fig. 8 Air Test Measuring System and Double Flow Nozzle Box Type High Pressure First Stage Model

数、静圧係数はそれぞれモデル出入口の全圧差、静圧差を入口の運動エネルギーで無次元化した値である。これにより全圧損失係数は、初段動翼出口の流れの旋回の大きさによって大きく変化することがわかる。1～4弁を開放した場合(全開)の変化が他の場合と比較して大きいのは、旋回角度0度の場合、均一な流れになって損失が少ないのに対し、旋回がある程度大きくなると急に大きな損失を生ずることを示している。1～2弁開、1弁開の状態ではかなり大きな部分噴射になっているため、旋回角度0度の場合すでに乱れた流れになっており、旋回角の変化に対する全圧損失係数の変化は比較的小さくなる。静圧係数は負になるものが多く、圧力が回復していることを示している。流れの状況は各モデルとも一般にこ

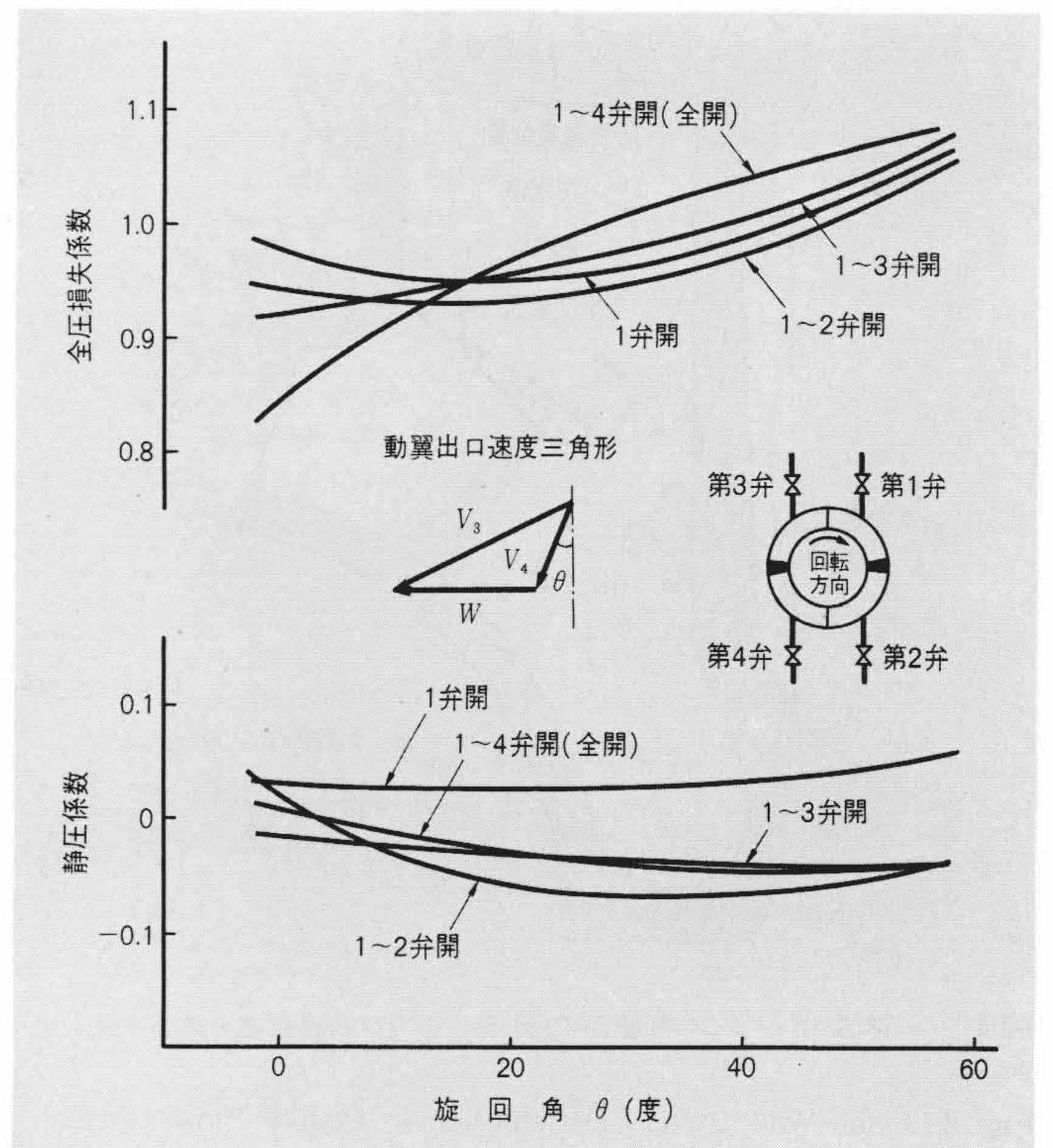


図9 全圧損失係数、静圧係数と旋回角の関係 反転流路内の流れの一般的性質について明らかにしたものである。

Fig. 9 Total Pressure Loss Coefficient and Static Pressure Coefficient Versus Whirl Angle

のような特性をもっているが、流路形状についての各種パラメータを変えながら測定をくり返し、最適形状を決定する。

図10は、このようなパラメータの一つとして動翼出口の環帯面積 A_1 と反転流路面積 A_2 との比および全圧損失係数の関係を示したものである。この結果から $A_2/A_1=4$ 程度が最適値になることがわかる。また図11は、反転流路側の流路の軸方向大きさと全圧損失係数の関係を示したものであるが、軸方向に余裕がでるほど損失は小さくなる。

これらの例以外のパラメータについてもいくつか損失の検討を行なうが、これら性能の検討とともに形状の変化に伴うコストの検討も同時に行ない、最終的に性能の良い、経済性のある形状を決定する。

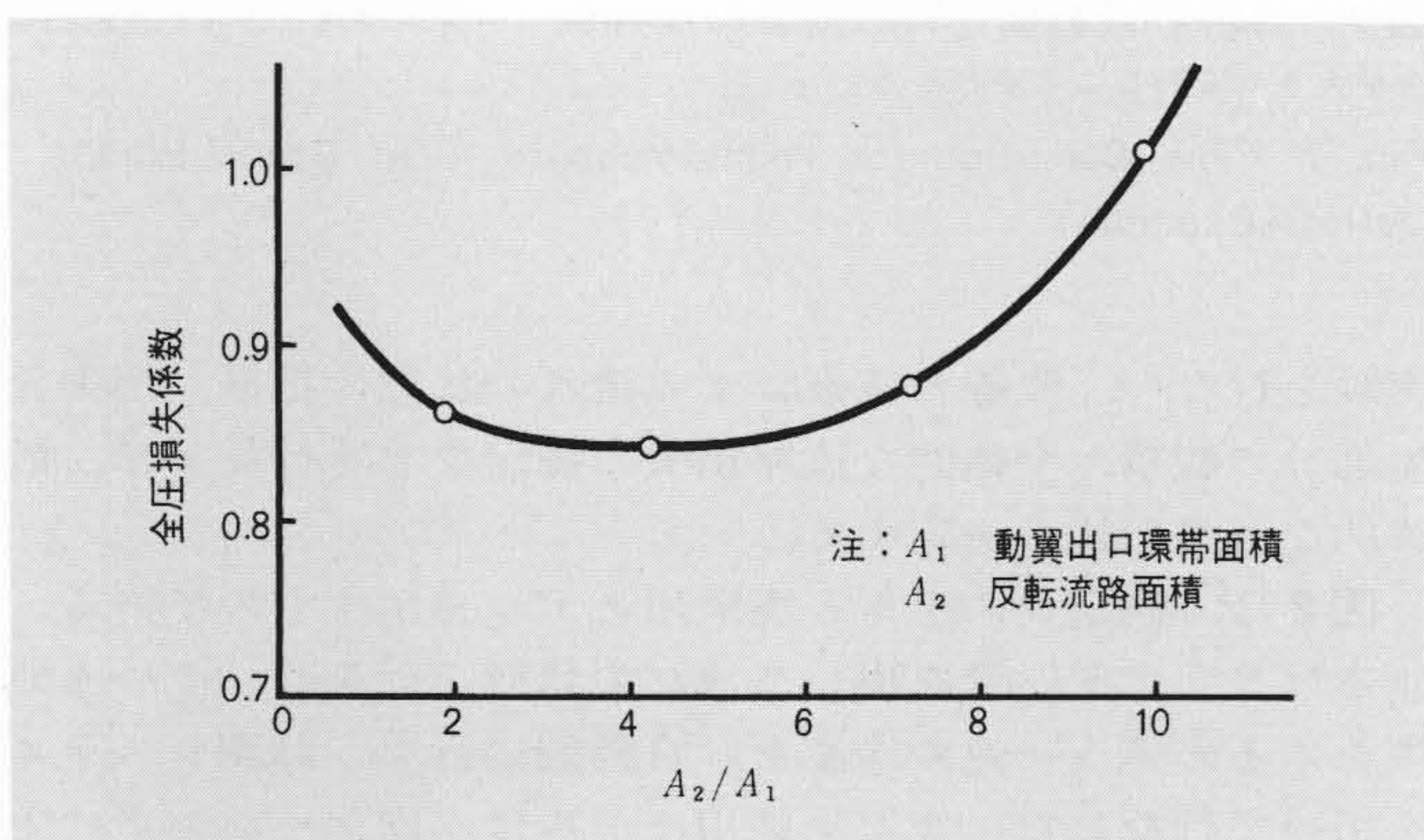


図10 全圧損失係数と A_2/A_1 (面積比)との関係 これより最適面積比が求まる。

Fig. 10 Total Pressure Loss Coefficient Versus A_2/A_1

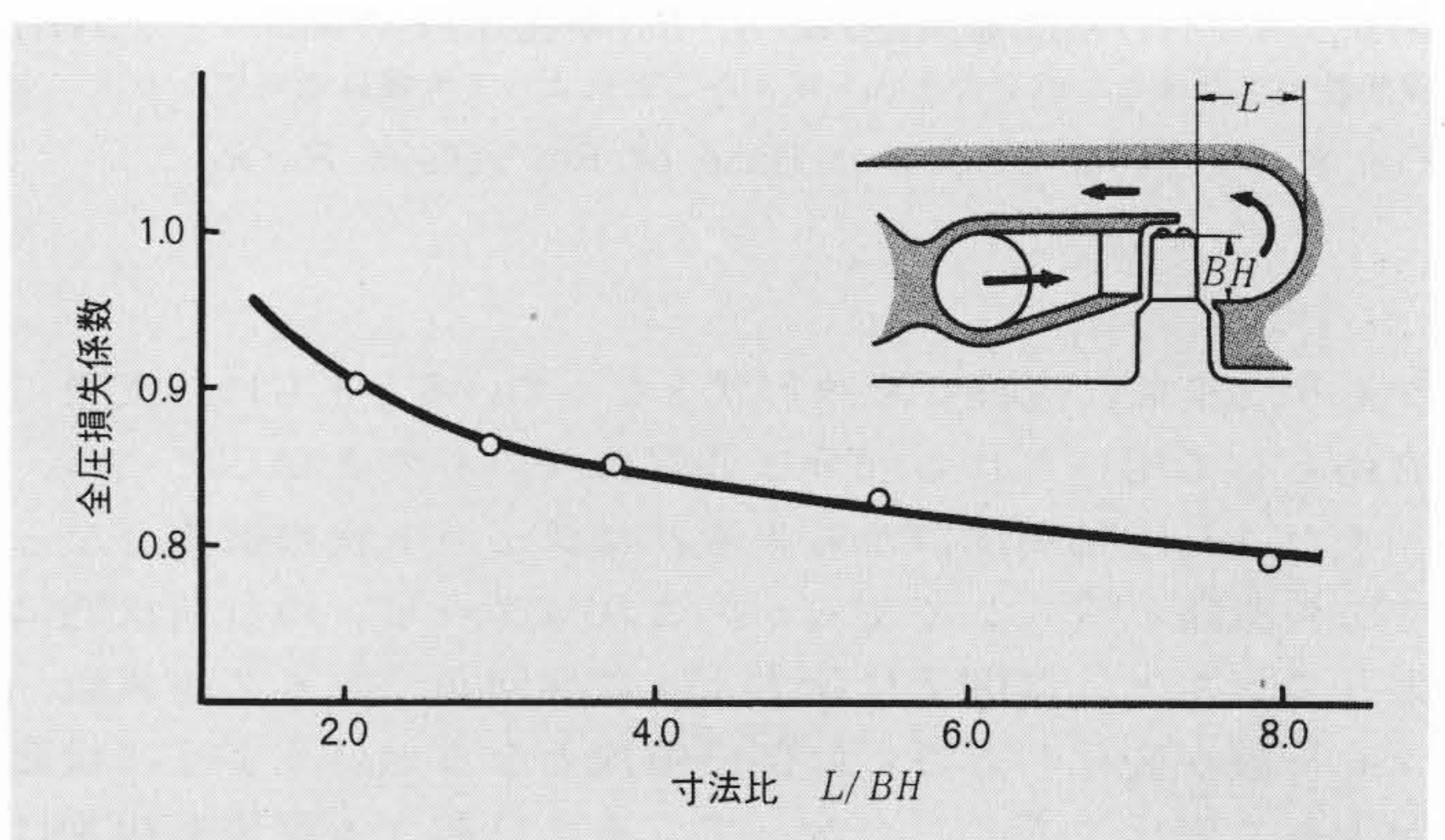


図11 全圧損失係数と L/BH (寸法比)との関係 軸方向長さと損失の関係である。コストの増加を考慮して最適値を定める。

Fig. 11 Total Pressure Loss Coefficient Versus L/BH

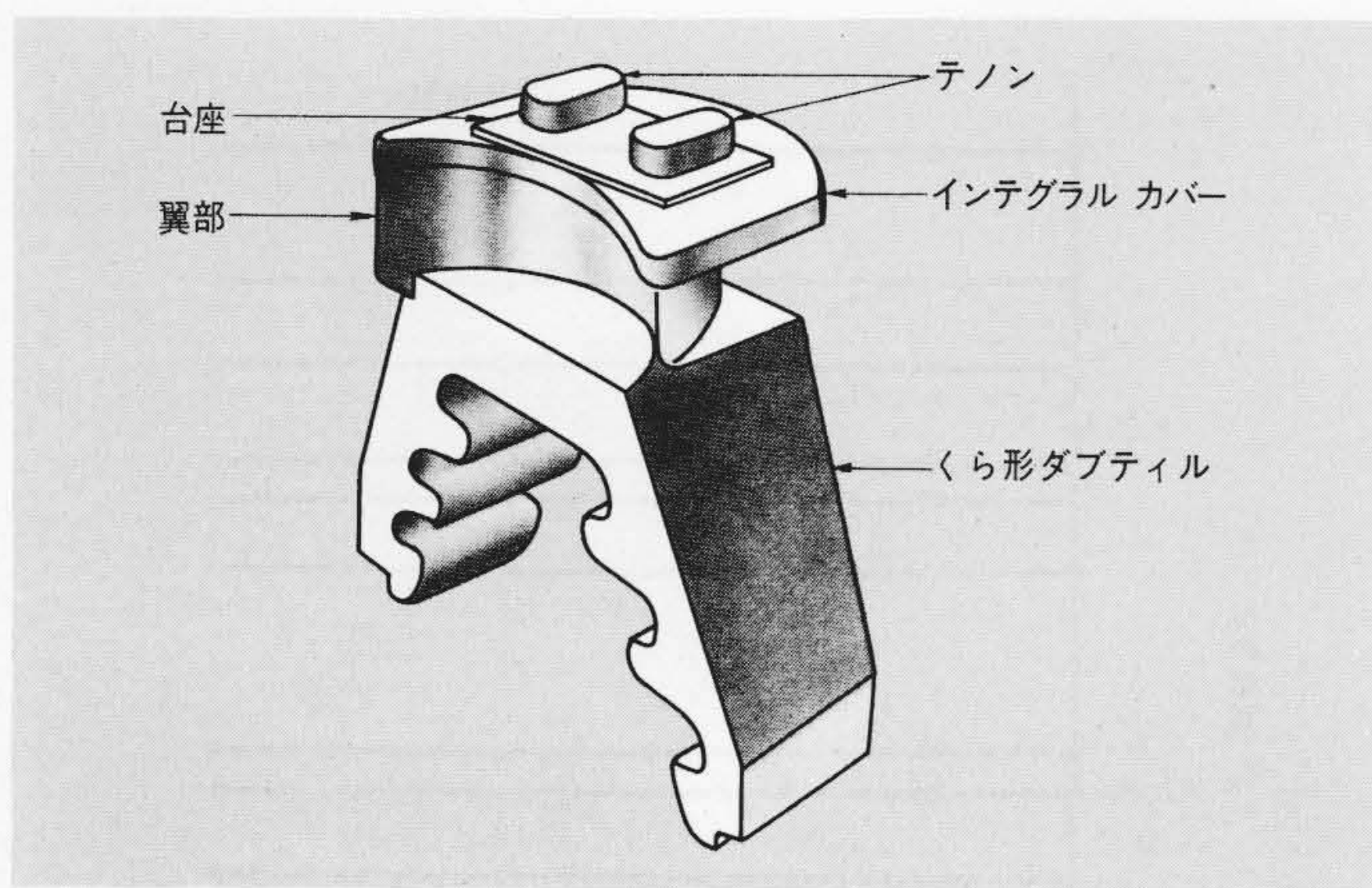


図12 高圧初段翼例 高圧初段翼の単翼の概略を示してある。実機ではこれを何枚かつづり、群翼の形で使用する。

Fig. 12 High Pressure First Stage Blade (Example)

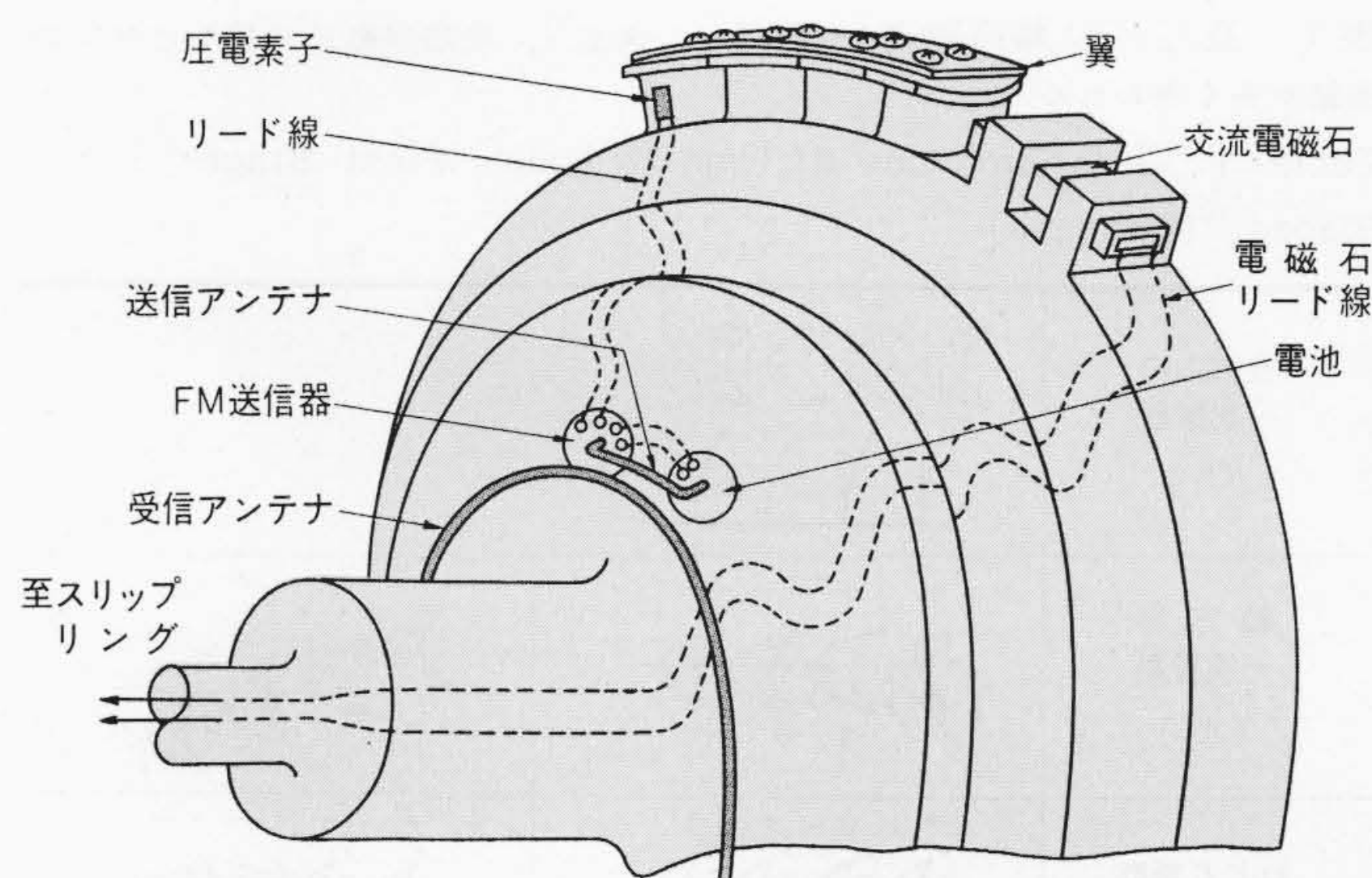


図13 モデルロータの振動測定システム 回転振動試験用各種要素の配置を明示した。

Fig. 13 Vibration Measuring System for Model Rotor

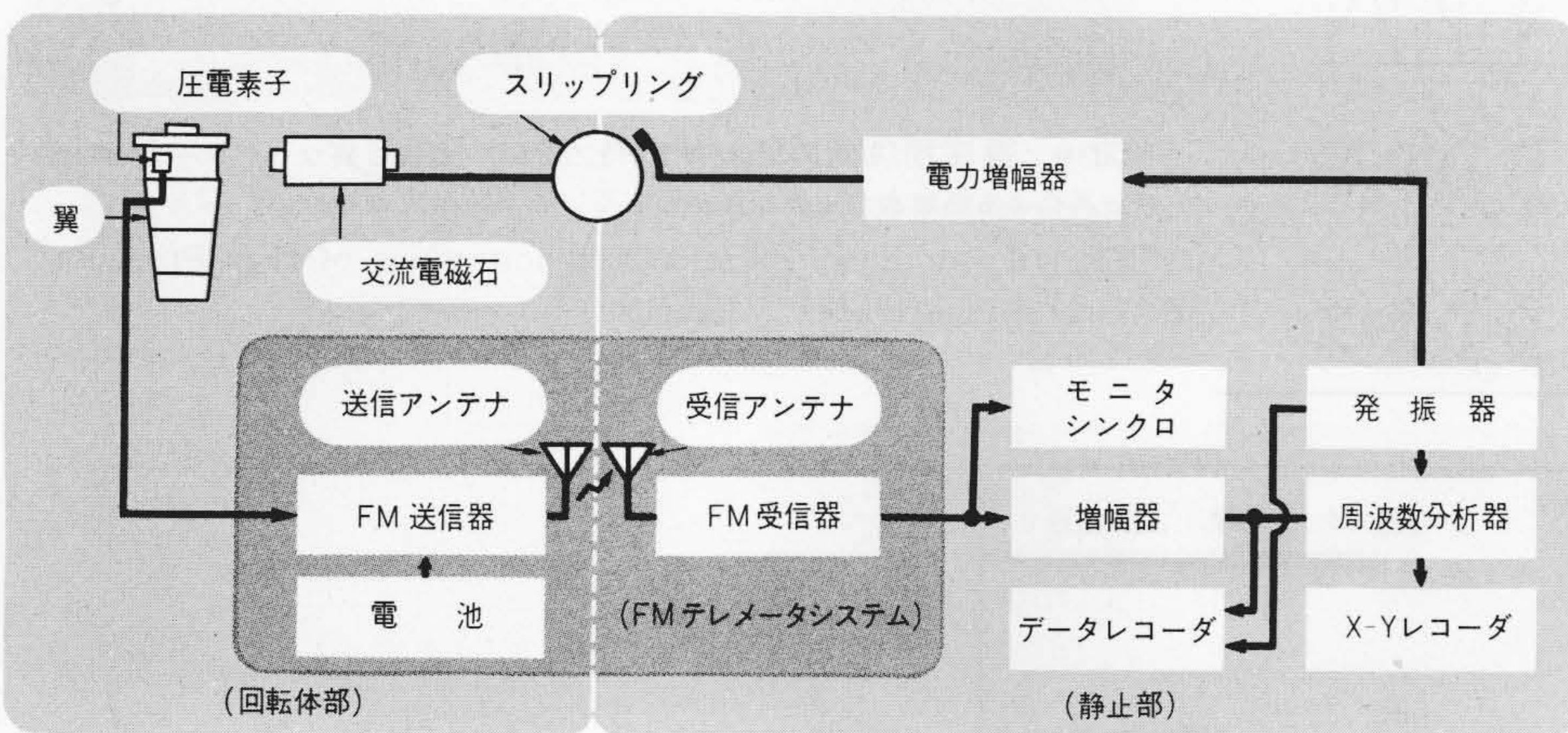


図14 回転振動試験用測定システム テレメータシステムを用いた測定システムは、回転試験に不可欠のものとなっている。電磁石による励振は、翼に対し回転数と独立に励振できる利点をもっている。

Fig. 14 Rotating Vibration Test Measuring System.

5 初段翼構造

高圧初段翼は高温高圧蒸気中で作動するため、蒸気力による励振力が他の段落に比べて非常に大きく、これによる振動応力が問題になる。また、回転中の遠心応力および蒸気力による曲げ応力などの静的な応力が加わるため、応力的に非常に過酷な状態におかれる。このため、設計にあたっては、振動、強度面の十分な検討が必要である。

高圧初段翼の構造上の特徴は、図12に示すように翼長が非常に短く、かつ厚肉であり、さらにこれをシュラウドで結合した非常に堅牢な群翼構造となっていることである。

このため、翼の固有振動数は数千ヘルツ以上と高く、振動的にはノズル後流による蒸気励振力との共振の可能性がでてくる。これはタービン回転数とノズル数の積の周波数(以下、NPFと略す)をもつものであり、共振すれば励振力が大きい。したがって、設計にあたってはこの共振が起こらないようにすることが重要な課題になる。

このようなことから、翼の振動特性、特に回転中の振動特性を十分把握することが不可欠であり、実物大モデル群翼を用いて回転実験を実施する必要がある。

図13は6種類の実物大翼を取り付けて回転実験を行なったモデルロータの一部を示したものである。ロータへ取り付けた翼加振、振動検出および信号取出し用の機器の配置状況ならびに配線状況は、同図に示すとおりである。回転実験では回

転中の翼の加振に交流電磁石を用い、群翼とともに回転させながら加振する方法を採用した。さらに検出信号の回転体外へへの取出しには、日立製作所において従来より回転振動試験に使用しているFMテレメータシステム⁽⁴⁾を用いている。これら測定システムの系統図は、図14に示すとおりである。テレメータシステムから取り出した出力は増幅器を通した後、データレコーダに記録しつつ、同時に周波数分析器で分析、処理し、X-Yレコーダに記録する。

回転試験は、回転数をステップ状に上昇させてゆき、各回転数において電磁石加振周波数に対する翼の振動応答を求める方法で行なった。結果の一例は図15に示すとおりである。同図に示すように高圧初段翼の場合は長翼などの場合の比較的簡単な振動特性とは異なり、共振点の非常に多い複雑な振動状況となっている。また、同図には振動モードも併せて示したが、翼、シュラウドから成る群翼全体としての振動モードである接線方向一次振動(T_1)、軸方向一次振動(A_x)、ねじり振動(Tor)、接線方向二次振動(T_2)が順次表われており、高い振動数では群翼各構成要素が局部的に振動するモードが表われ、非常に複雑になっている。表1は、各モードの具体的な振動状況をさらに詳細に示したものである。 T_1 から T_2 までは従来のものと変わらないが、 E_1 、 E_2 は特殊なモードである。この外にも高次のモードが多数あるが例として示した。

次にNPFの決定についてであるが、図15の振動特性をもつ翼の場合について、図中に示したようにNPFが運転範囲58.5~60.5Hzにおいて振動振幅が非常に小さい領域にくるよ

表 I 高圧初段翼振動モード例 構造上、局部振動 E_1 , E_2 など高次の振動が多く表われる。

Table I Vibration Mode of High Pressure First Stage Blades (Example)

接線方向 一次振動 (T_1)		
軸方向 一次振動 (A_X)		
ねじり振動 (T_{or})		
接線方向 二次振動 (T_2)		
局部振動 (E_1)		
局部振動 (E_2)		

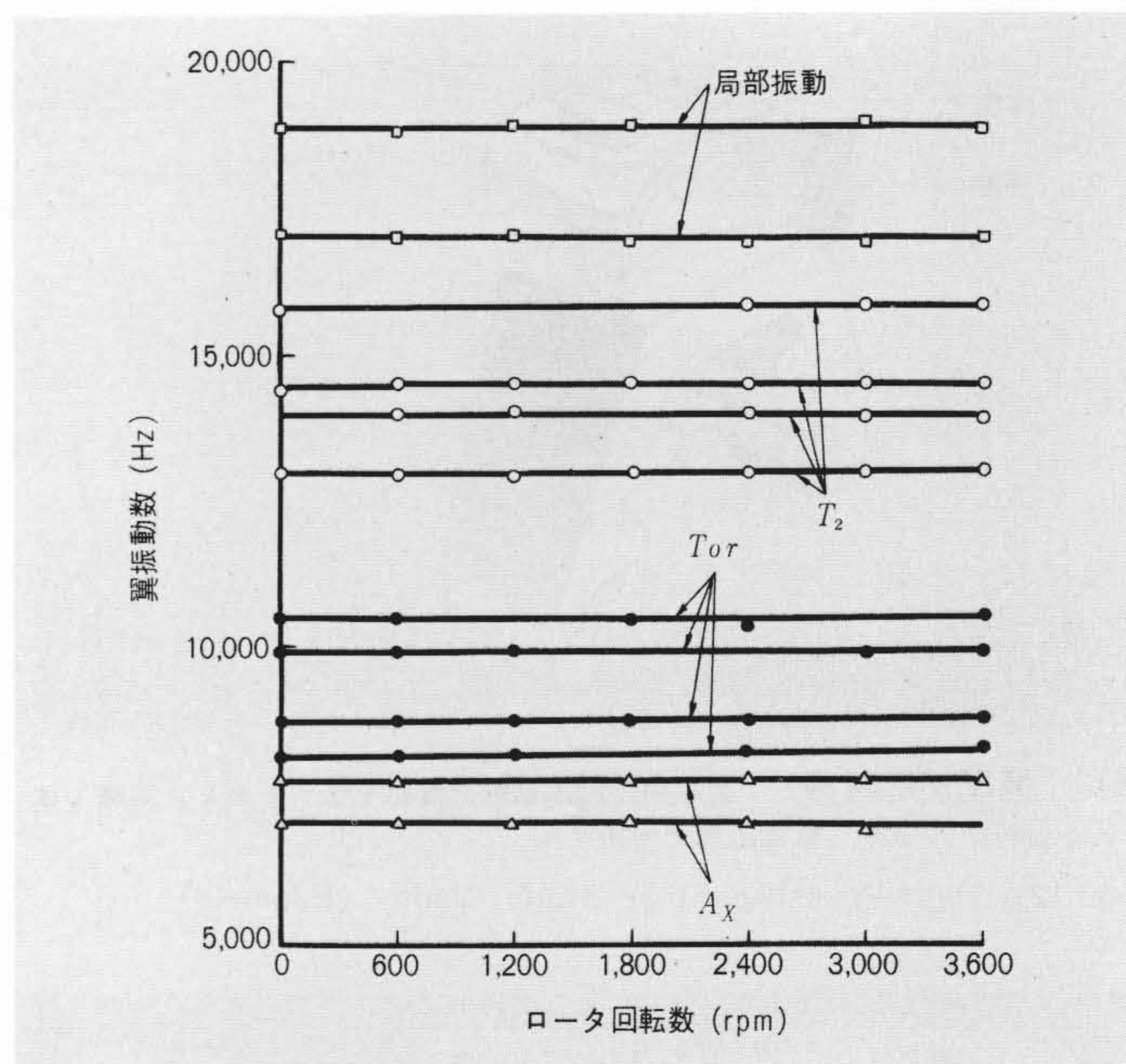


図16 高圧初段翼の回転振動特性例 長翼と異なり、ロータ回転数の上昇による振動数の上昇がほとんどないのが特徴である。

Fig. 16 Rotating Vibration Characteristics of High Pressure First Stage Blades (Example)

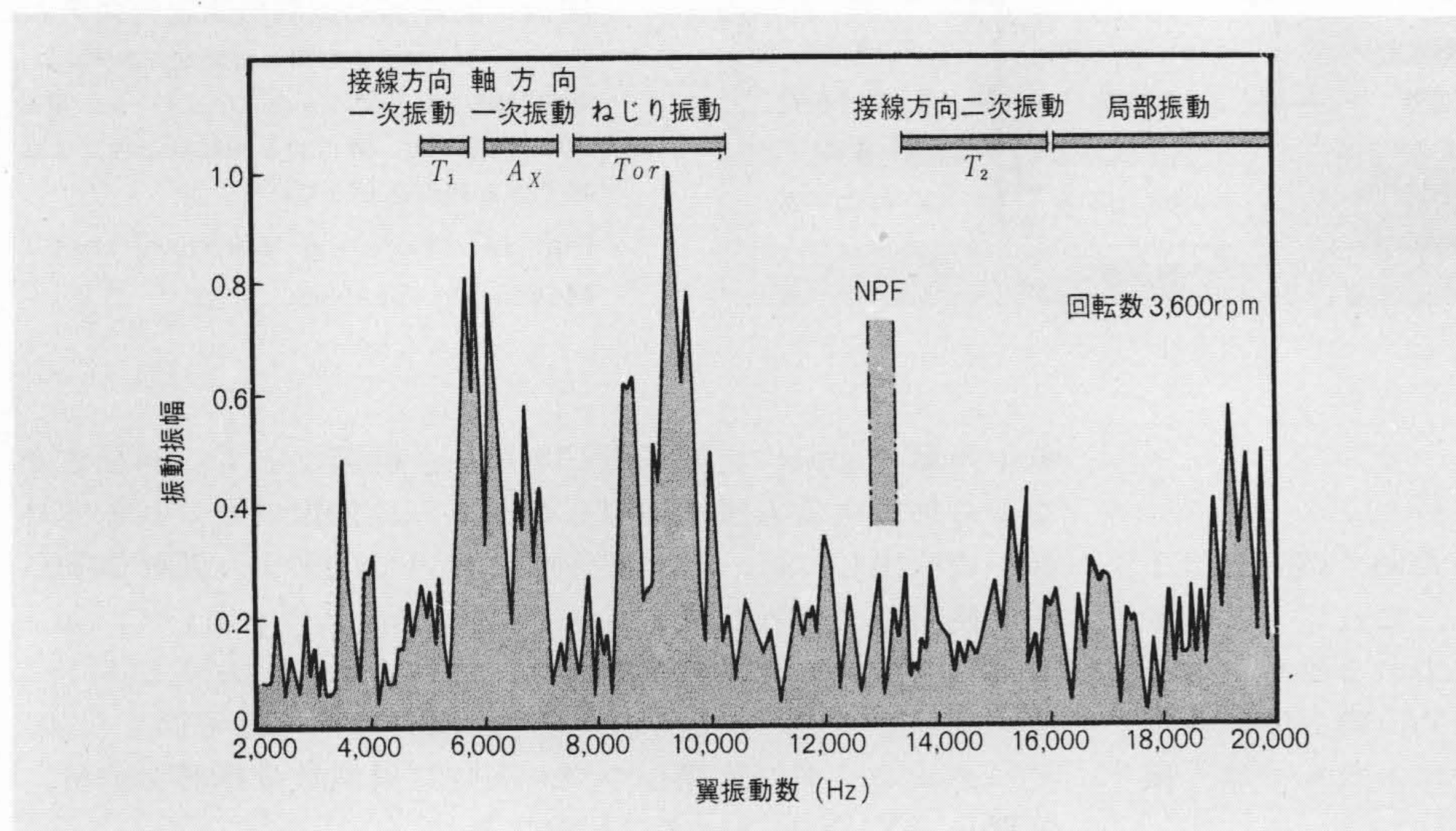


図15 高圧初段翼回転振動特性例 長翼の場合と異なり共振点が多い。NPFは振動振幅の小さい範囲に入るよう設計される。

Fig. 15 Rotating Vibration Characteristic of High Pressure First Stage Blades (Example)

うに選び、振動が全く問題ないように決定する。

図16は回転時の振動特性を示したものであるが、長翼の場合などと大きく異なり、遠心力の増加による翼振動数の上昇はほとんどなくほぼ一定の値を示す。

以上の振動の検討の外に、翼長に対する固有振動数と振動モードの関係およびシュラウド構造と振動特性の関係など一連の翼の振動設計上必要な検討を行なうとともに強度的な各種検討を行ない、これらの結果をもとに振動強度的に信頼性の高い翼を開発する。

6 結 言

大容量蒸気タービンの開発において特に問題になる高圧タービン初段の諸問題のうち、複流ノズルボックスの形状、初段と2段の間の反転流路の形状、高圧初段翼などの開発法について述べた。高圧初段は 246kg/cm^2 , 538°C という高温高圧蒸

気の中で作動し、過酷な条件で運転されることになるため、性能はいうに及ばず、振動強度面での十分な検討が必要である。今後とも、この点に十分留意し、細心の注意を払って研究開発を実施し、性能的に優れ、信頼性のある機器の開発を進めてゆきたいと考えている。

参考文献

- (1) 通産省公益事業局編、「電気事業の現状」、(昭48-2)
- (2) 加藤、「大容量蒸気タービンの動向と計画上の諸問題」日立評論54, 9 (昭47-9)
- (3) 黒田, 名村, 山崎, 今井, 「大容量蒸気タービンの高圧初段の検討」, 機械学会日立地方講演会講演論文集, (昭48-11)
- (4) 二宮, 藤田, 黒田, 「タービン長翼の開発」, 日立評論54, 9 (昭47-9)