

高速タービンの開発

Development of High Speed Turbines

今井 鉄* 和田 克夫* 森本 大三*
 Tetsu Imai Katsuo Wada Daizou Morimoto
 佐々木 良一** 黒田 倫夫*** 能戸 幸一****
 Ryoichi Sasaki Michio Kuroda Kouichi Noto

要 旨

化学工業の発達により化学プラント容量も大形化してきた。これに伴いプロセス用の圧縮機も大容量、高速化している。駆動機である蒸気タービンとしてもこれに対応して高速タービンの開発が必要となってきた。本文はこれら高速タービンの開発経過および結果について述べあわせて今後の問題についても触れている。

1. 緒 言

近年、化学工業の発達に伴いプラントの大形化による製品コストの低下が図られている。特にアンモニア、エチレン、石油精製、メタノールなどのプラントが巨大化している。これらのプラントにおけるプロセス用圧縮機も単機容量で必然的に大出力高速化が促されている。またこれに伴い駆動機に蒸気タービンを使用する例がますます増大している。蒸気タービンが使用されるのは、

- (1) 回転数が自由に選択できるとともに多くの場合、被駆動機との直結が可能である。
- (2) ある範囲内で簡単に回転数制御ができる。電動機では回転数制御が複雑で高価である。
- (3) 多くの化学プラントでは製品の製造過程において加熱蒸気が必要とするかあるいは逆に廃熱による加熱蒸気の発生を伴う。このような場合、蒸気を利用して動力を発生することはプラントの経済性を高める。などからである。

わが国のエチレン、アンモニアプラントの製造能力とプロセス用圧縮機の出力、回転数を示すと表1のようになる。また世界のアンモニアプラント用圧縮機の出力、回転数の年度経過を示すと図1のようになる。また、自家用発電設備においても、高速駆動機を採用して軽量化を図る傾向があり、10,000rpm、10,000kW以上の高速、大出力の蒸気タービンの製作に対する要求が高まってきた。

タービンの回転数および容量の限界を決めるのは翼の車盤応力（主として翼植込みみぞ部の引張応力）である。したがって高速タービンの開発に関しては、

- (1) 電解加工によりロータより翼を一体加工する技術の開発
- (2) 回転体の材料としては高強度の材料の開発
- (3) 新形逆クリスマスダブテールの開発
- (4) 高速回転に安定性のよい軸受の開発
- (5) タービン高速に伴う、タービン本体の小形化にマッチした小形電子ガバナの開発が必要である。

日立製作所ではさらに上記開発項目を確認するため実物のモデルタービンを製作し回転試験を施行した。高速タービンの開発は日立製作所日立工場内の関連部門のみならず、日立生産技術研究

表1 アンモニア、エチレンプラントの製造能力と圧縮機出力と回転数

エチレンプラントにおける圧縮機使用例

プラント容量	Cracked or charge gas 圧縮機用	Propylene冷凍機 圧縮機用	Ethylene 冷凍機 圧縮機用
150,000t/Y以下	5~8,000 rpm 10~13MW	5~8,000 rpm 10~12MW	9~12,000rpm 3~5 MW
300,000t/Y	4~7,000 rpm 20~26MW	4~6,000 rpm 20~24MW	7~9,000 rpm 5~7 MW
400,000t/Y以上	4~5,000 rpm 27~35MW以上	4~5,000 rpm 27~32MW以上	5~8,000 rpm 8~10MW以上

アンモニアプラントにおける圧縮機使用例

プラント容量	合成ガス圧縮機用	空気圧縮機用	NH ₃ 冷凍機 圧縮機用
600t/D	14,500rpm 8~10MW	8~9,000 rpm 4MW	10,000rpm 3MW
1,000t/D	14,500rpm 12~15MW	8~9,000 rpm 7~8 MW	10,000rpm 4~5 MW
1,500t/D	14,500rpm 18~22MW	8~9,000 rpm 10~12MW	10,000rpm 5~7 MW

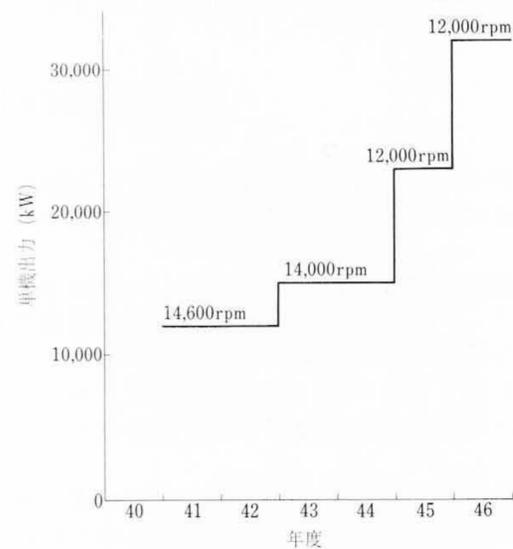


図1 世界のアンモニアプラントにおける合成ガス圧縮機の出力と回転数の年度経過

所、日立研究所、勝田工場など広範囲の協力により進められたものである。

以下、開発の詳細について述べる。

2. 電解加工翼の開発

ロータから一体に翼を加工する方法としては近年各方面で実用

* 日立製作所日立工場
 ** 日立製作所日立研究所 工学博士
 *** 日立製作所日立研究所
 **** 日立製作所生産技術研究所

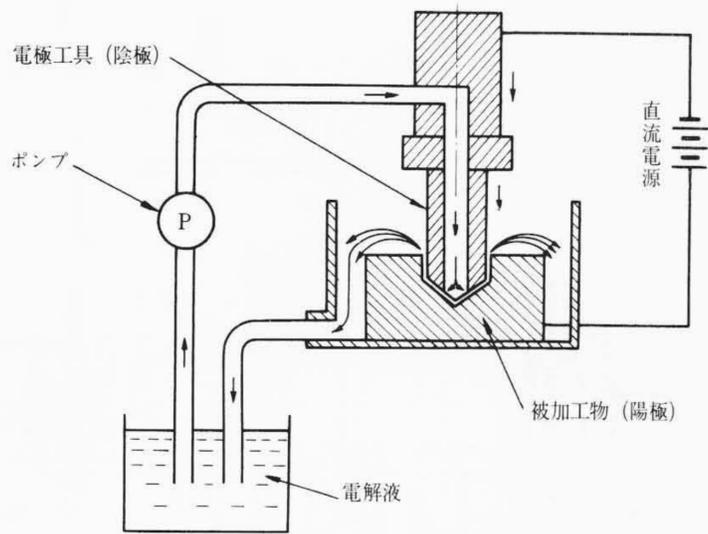


図2 電解加工原理図

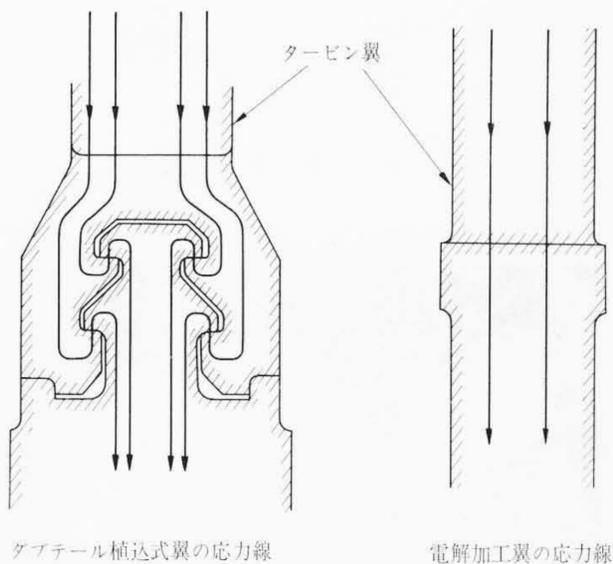


図3 電解加工翼とダブテール植込式翼の応力線の比較

に供されている電解加工法を応用したものである。原理は図2に示すように陰極の工具と陽極の被加工物とを狭い間隙(かんげき)で対向させておき、この間隙に高速の電解液を流し高い電流密度で電気分解を起こさせて、被加工物をあらかじめ成形した工具の転写形状として成形加工するものである。この電解加工による一体加工翼の利点は、従来のダブテールによる植込方式に比較して、

- (1) 翼と車盤が一体なので応力集中の危険度は少なく運転上の信頼度を著しく向上させる。図3はダブテール植込方式の翼みぞの応力線と電解加工翼の応力線を示すものである。
- (2) 植込部のみぞ加工および翼組立作業が不要になるので工数低減になる。
- (3) 従来のダブテールによる植込方式はみぞ部ロータ側に翼のダブテールを保持するための肩肉が必要であるが、ロータからの一体加工翼はこれが不要になりロータスパンを短縮できる。などの利点があるが反面、ロータと翼を同一材料にするためロータ価格が高くなる欠点がある。しかし、多くの化学プラントの全体の設備費は非常に高価で、したがって蒸気タービンの信頼性の向上は価格の上昇を補って余りがある。本加工法は日立製作所の生産技術研究所と日立工場が協力して開発したものである。

基本加工技術に加えテスト用のリング加工および実機モデルタービンの加工で得られたことは、

- (1) 電極設計加工方法に関する基本方針の確立(特許出願中)。
- (2) 高能率でしかも短絡なく安定な電解加工ができる条件、すなわち印加電圧、電極送り速度、電解液濃度、電解液温度などの加工技術に関連する技術の完成。

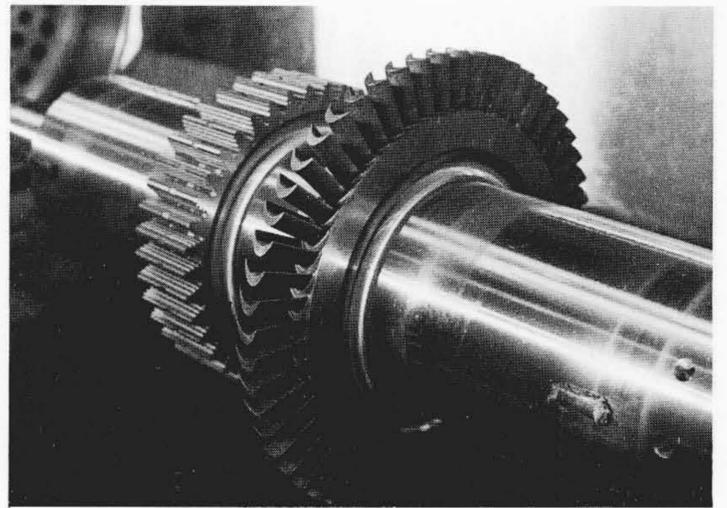


図4 電解加工翼

- (3) 表面あらかさは1~5 μ 、うねりは15 μ 程度に加工でき、実用上問題ない。
- (4) 加工精度を左右する因子は電解液の温度、濃度変化などであるが連続加工に対しても翼のプロファイル、厚み、幅、重心とも $\pm 0.25\text{mm}$ の公差に収まる。

これによりストレート翼を電解加工する技術を完全に取得し、作業法を確立した。現在、さらに複雑な形状の翼の電解加工(特許出願中)にも着手しほぼ完了している。図4は電解加工翼の写真である。

3. 12Crロータの開発

12Cr系の鋼種は使用温度550 $^{\circ}\text{C}$ 以下ではすぐれたクリープ強度、耐食性、振動減衰能を持つため火力発電用機器部品、たとえば翼、ボルトなどに広く使用され、今後も部材強度の上昇に伴いその使用範囲は増加する傾向にある。近年、事業用タービンの大形化によりロータの作用応力の増大でロータ材として12Cr系が注目されるようになった。高速タービンのロータ材としては、

- (1) 翼は電解加工にてロータから一体加工するためすぐれた耐食性があること。
 - (2) 大出力、高速回転のためクリープ強度のすぐれていること。
 - (3) 復水タービンにも使用するので遷移温度の低いもの。
- などの性質を有する材料が必要になる。このため日立研究所が高速タービン用ロータ材の研究を進めHNF-12R(特許出願中)という12Cr系のロータ材を開発した。この材料の特長は12%Crステンレス鋼のすぐれた耐食性にMo, W, VおよびNbの添加により高温度が付加されたことおよびCuの添加により遷移温度が低下した点にある。

次にモデルタービンのロータの試作と確性試験について述べる。タービンロータとして適用するためには高温強度のみならず、他のロータ材としての一般的機械的性質あるいは材料欠陥の面などについても、通常の高合金鋼ロータ材の場合と同様に、高度の品質が保証されねばならない。このような観点にたつてこのHNF-12Rが材料欠陥のない健全なロータ材の製造の可能性に関し、勝田工場において試作、試験の結果、高速タービンロータとして採用することになった。機械的性質についても確性試験を行ないモデルタービンの実機ロータのほかに試験材として710 ϕ の大径ドラムを製造した。表2は開発目標と試験結果の値を示したもので、表2から見られるように所期の目的を達成し高速タービンのロータ材の開発は完了した。12Crロータの欠点として種々の文献で指摘されている軸受ジャーナルの損傷については、当モデルタービンでは問題はなかったが、一般には別種金属の溶着、あるいはス

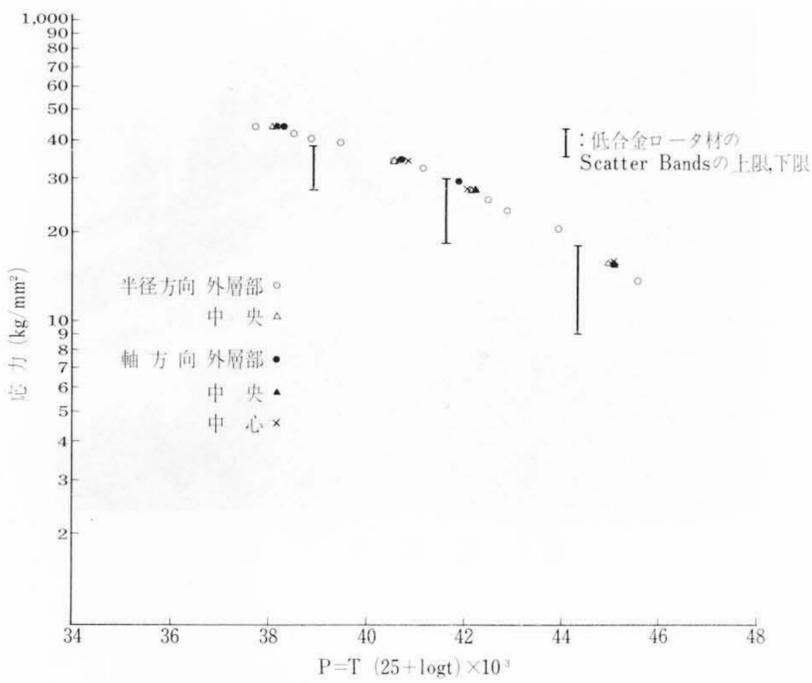


図5 HNF-12R クリープ破断強度

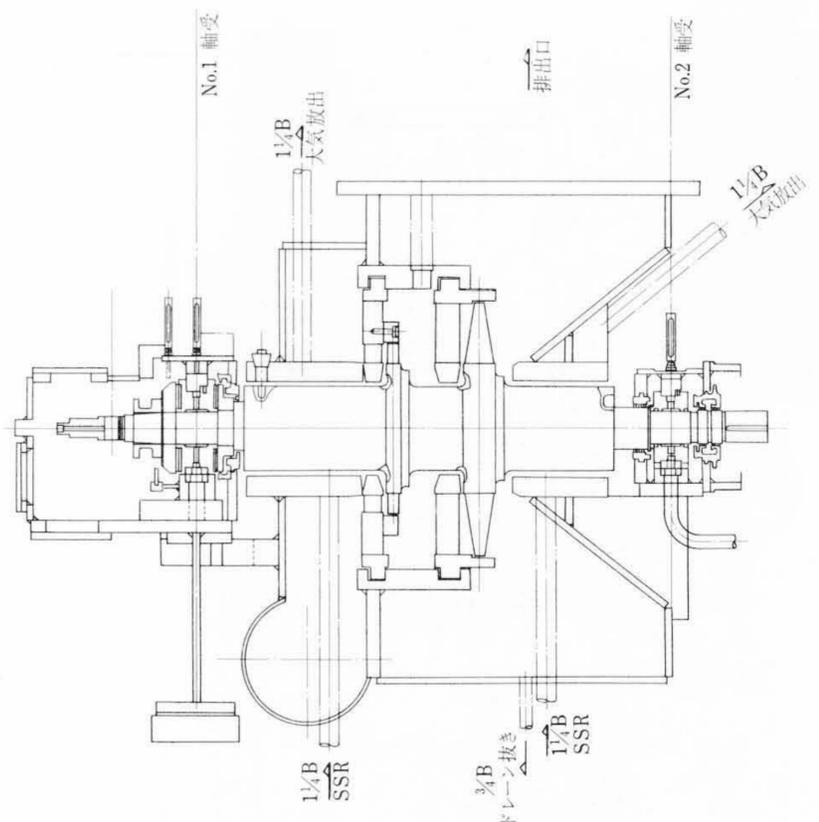


図8 モデルタービンの断面図

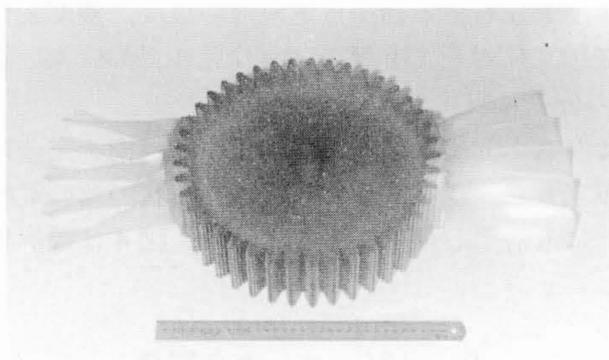


図6 逆クリスマスダブテール 3次元光弾性試験用モデル



図7 逆クリスマスダブテール 3次元光弾性

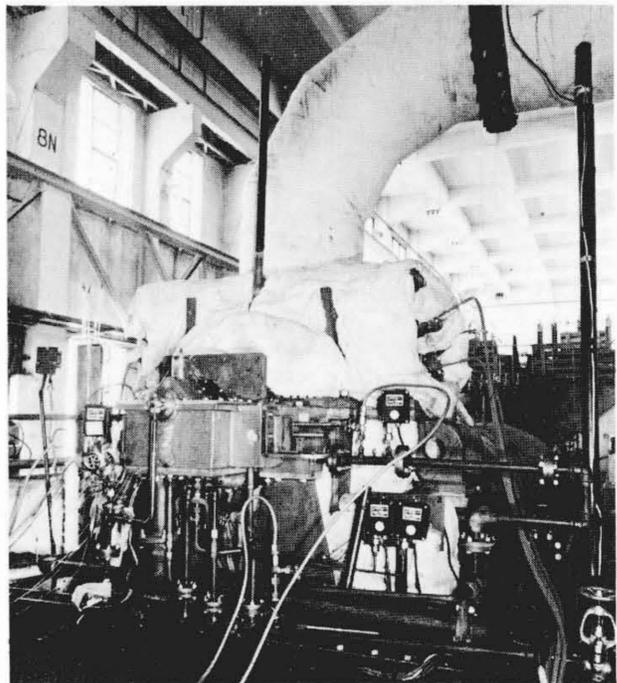


図9 モデルタービン

リーブをかませるなどの対策がとられている。日立製作所では低合金鋼のスリーブを焼ばめすることで実機の製作を進めている。また、モデルタービン回転試験により本材料が低温ぜい性に対してじゅうぶんな強度を有していることを確認した。

4. 逆クリスマス形ダブテールの開発

翼と車盤との結合方式には両者を一体に電解加工によって成形する方法とダブテールによって植え込む方法がある。復水タービンの低圧部のように翼長の長いねじれ翼についてはダブテールによって結合する方針とした。かつ、このダブテールも従来一般に使用されているくろ形ダブテールでは応力が苦しいので、新たに

逆クリスマス形ダブテールを設計し種々の試験を行なった。試験方法としては静止試験と回転試験によるものとした。静止試験としては光弾性皮膜法およびひずみゲージを用いて静止引張試験を行ないダブテールの静的強度を検討した。さらに光弾性試験として実機と同一寸法の翼付3次元モデルを作り、荷重も実際の場合と同じ回転による遠心力を与えてダブテール各部の応力を求め(図6,7)有限要素法による応力の計算値と比較した。その結果、
 (1) 光弾性皮膜法によりダブテール部のひずみの発達状態が判明した。
 (2) 3次元光弾性試験によりダブテール各段付根のR部の応力分布は有限要素法の計算値と一致している。
 (3) 引張試験の結果、ダブテール部の応力は高速タービンに適用できる数値であることが確かめられた。

5. モデルタービン回転試験

モデルタービンの断面は図8に、外観は図9に示すとおりでタービン段落数は2段の復水タービンである。1段には電解加工に

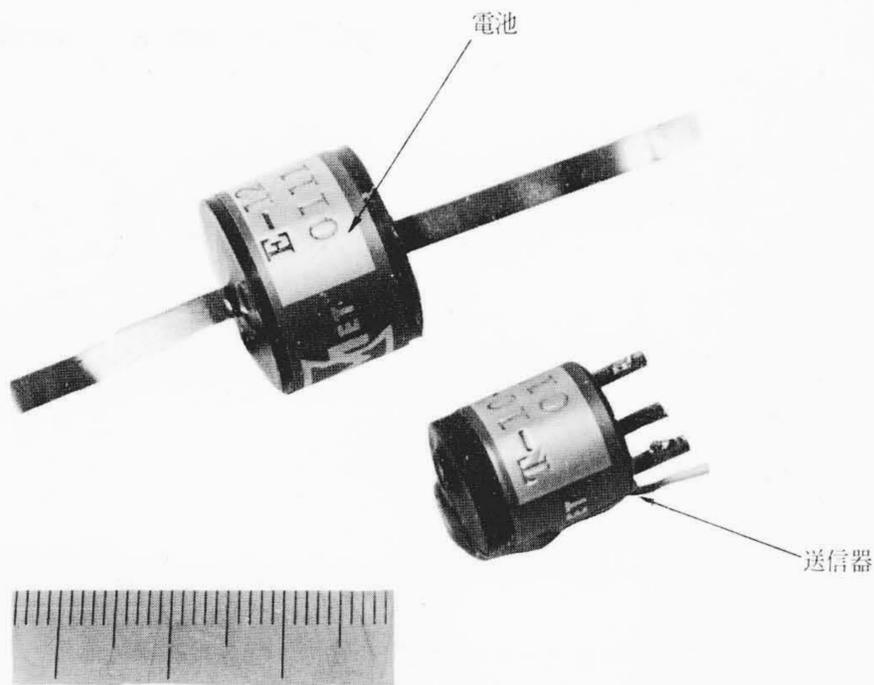


図10 送信器と電池

てロータから一体加工した翼を有し、2段目は逆クリスマスダブテールを使用したねじれ翼を有している。ロータにはNHF-12Rの12Cr材を使用し軸受には後述するが4形式を準備した。制御機構には高速タービン用に開発した小形電子油圧ガバナを採用した。回転数は定格15,000rpmで2段ねじれ翼を取りはずし18,000rpmまで可能なものである。回転試験の目的は、

- (1) ねじれ翼の共振振動数、共振応力の測定
- (2) 翼遠心力の安全確認
- (3) 軸受特性の測定
- (4) 小形電子油圧ガバナの作動試験

であるが、いずれも試験は所期の目的を達成できるデータを測定した。

5.1 ねじれ翼の共振振動数、共振応力の測定

機械駆動用蒸気タービンは被駆動機から可変回転数であり、また使用回転数も広範囲に及ぶので長翼においては翼の振動とタービン回転数とのある程度の共振は避けられない。このため共振振動数と共振応力を問題にする必要がある。従来蒸気タービンの回転試験での翼の振動数を測定する場合には、ストレインゲージを用いて翼の振動応力信号をスリップリングを介して外部に取り出して計測していたが、今回は比較的新しい測定法であるテレメータリングシステムにより翼振動数および共振応力を測定した。テレメータリングシステムについての詳細は種々の文献で発表されているので省略するが、本測定法はストレインゲージ信号を小形送信機(図10)で無線信号に変換し、軸に無接触で翼の振動応力を検出するものである。簡単な試験装置により測定できた利点がある。今まではテレメータによる振動数の測定は簡単に測定できるのに対して、共振応力の測定はシステムを構成する要素の特性が複雑であるため測定が困難であった。すなわち振動応力はストレインゲージの抵抗の変化により検出され、送信機によりその端子電圧信号が周波数変調し電波として送られ、そのときの出力電圧が振動応力と対応するとして測定されるわけであるが、同一振動応力が作用した場合でもテレメータシステムからの出力電圧が測定中に種々の原因により変化して測定にむらが生じた。今回この出力電圧の変化の原因を詳細に解析、検討しその特性を明確にした。この結果、テレメータとしては新しい技術である振動応力の測定が可能になったものである。ゲージの位置、送信機、ゲージ配線は図11に示すとおりである。翼の励振力を大きくするためノズルは1ピッチのみ供用し他は盲にした。ストレインゲージのカプセル取付部の温度上昇を防ぐため、運転中は常時、入口主蒸気温度を調節した。測定にあたってはモデルタービンの回転数が高いため、ストレインゲージおよびゲージ配線が遠心力のた

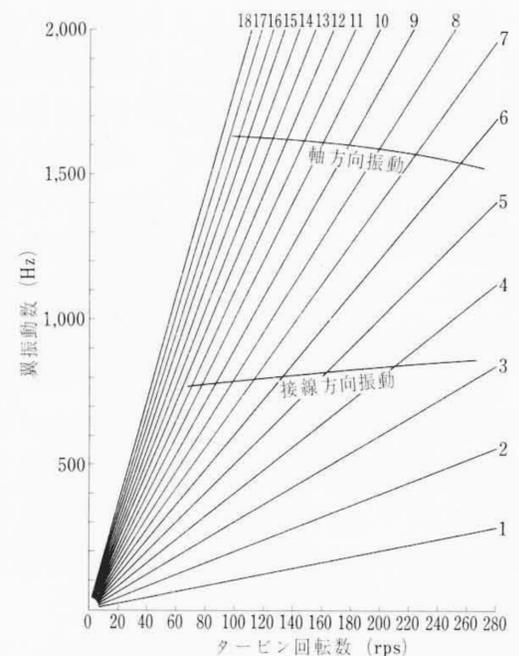


図11 試作高速タービン逆クリスマス翼キャンベル図

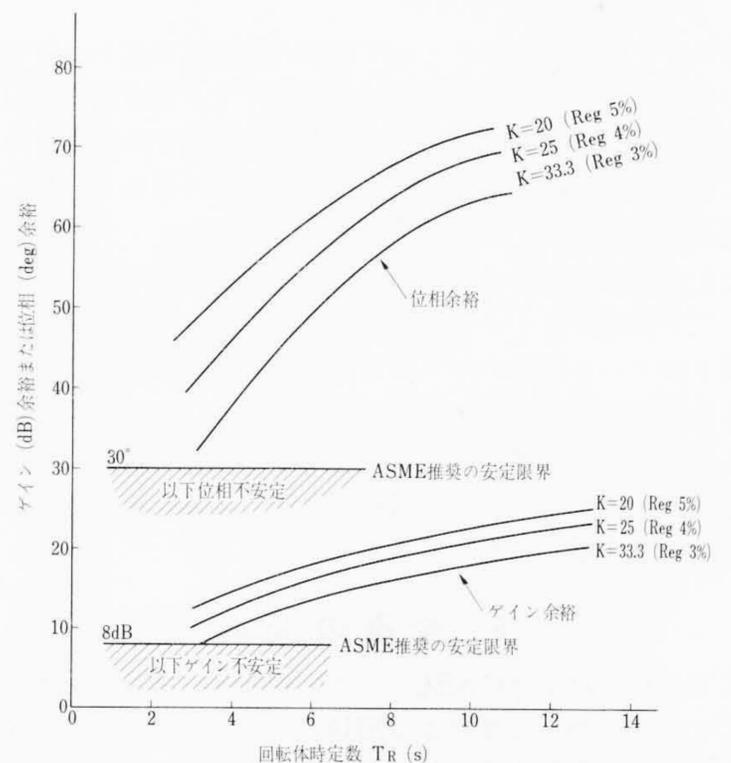


図12 高速タービン用電子油圧ガバナの調整安定性

め飛散、断線することが最大の問題点であった。

- (1) 翼の振動数、共振応力の実測値は図12に示すとおりである。
- (2) 共振応力の測定により低次の共振応力は許容値にはいっており実機応用に問題ないことが判明した。
- (3) 翼遠心力の測定および有限要素法を用いた細部の応力集中の計算結果をもとに本翼が十分安全な強度を持つことを確認した。

5.2 軸受試験

タービンの高速化、軽量化によりタービンロータ重量が軽くなりかつタービンロータの危険速度を大幅に越えた高速領域で使用されることが常識となっている。また油潤滑ジャーナル軸受を使用したこのような高速回転のタービンでは摩擦損失、温度上昇などの潤滑上の問題と同時に、軸受の安定性の限界についての精度よい見通しが必要である。さらに危険速度の計算において重量な要因の一つである軸受の油膜のばね定数についても、正確な数値の把握(はあく)が必要である。このためモデルタービンにおいて、これら高速タービンの軸受設計の一つの資料となるデータの

測定を行なった。試験用の軸受としては、(1)圧力形軸受 (2)長円形軸受 (3)ティルティングパッド軸受 (4)4円弧形軸受を用意した。さらに長円形軸受に対しては長円率を変え試験した。まず軸受油膜ばね定数の測定はモデルタービンのロータを軸受でサポートして、静止の状態に加振器で加振しロータの固有振動数を求めこれを剛性無限大の点とし、これから別途危険速度の計算結果の線に沿って修正した。モデルタービンの運転結果から各軸受における危険速度を測定し、軸受の油膜ばね定数を逆算した。次に各軸受の安定性、ロータの振動系態を測定するため無接触式の振動計を水平、垂直の2方向に配置した。軸受損失については軸受本体入口、出口および給排油配管途中において熱伝対で温度上昇を測定した。油量はオリフィス前後の差圧から推量した。

- (1) 各軸受の油膜のばね定数が判明し、これにより危険速度の正しい値が確定できるようになった。
- (2) 各軸受の軸受損失、油量、温度上昇について高速回転時における特性を把握することができた。
- (3) 軸受の安定については安定な運転の実績を得ることができ今後の設計方針となるデータを得た。

5.3 小形電子油圧式ガバナ

蒸気タービン用ガバナとして従来の機械式に代わって電子油圧式が採用されたのは1960年代の初めからで、日立製作所においても2段抽気復水タービンをはじめ複雑な制御を必要とするタービンに実機として1968年より着々と実績を積み重ねている。開発した電子油圧式ガバナは高圧不燃性油を用いシリンダの小形化を図ったが、装置は従来の機械油圧式に比べて割高なものになっており、広く採用するうえで障害になっていた。今回開発したものは市販されている回路、サーボ弁を組み合わせ従来使用していたJIS 2号低圧油(14kg/cm²g)を用いたもので、調速の安定度を確認するとともに発電用タービンを使用して負荷しゃ断、調圧調速試験を同時に行なっている。図15は今回の実験により求めた調速安定度の結果を示したものである。

6. 今後の問題

すでに述べたように高速タービンの開発は所期の目的を達成することができた。これにより図14のように圧縮機側の要求する仕様を全面的に満足することが確認された。今回これらの技術を生かした高速回転のタービンを受注し現在製作中である。

今後の問題としてあげられるのは、この開発した技術を多くの実機タービンの実績として積み重ねることである。これにより現実のなまのデータをフィードバックしながら開発した技術を伸ばしていきたいと考えている。電解加工については直線翼は開発完了であるが次の問題はねじれ翼の電解加工である。これは直線翼と異なり加工面積が常に変化するため電極設計および加工技術はいちだんと困難であるがわれわれはこの技術についても鋭意研究

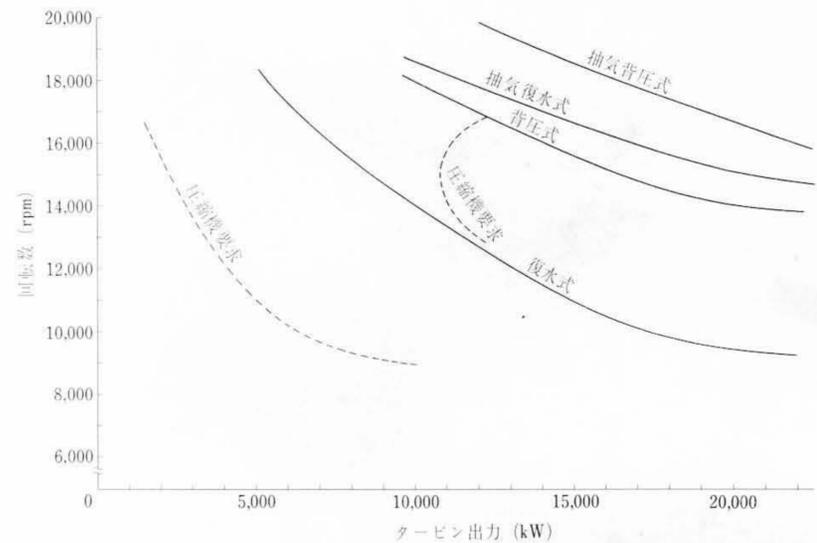


図13 高速タービン開発後の出力、回転数線図

中である。構造的な問題としてはタービンを高速にすることによりロータの小形化は可能であるが、蒸気の容積流量によって左右される蒸気止め弁、加減弁、入口、出口フランジについては小形化に限界がある。これらを解決することは今後の課題であろう。応用面について考えると、

- (1) 機械駆動用蒸気タービンの標準化
- (2) 発電機駆動用蒸気タービンへの適用

である。

標準化の利点は今さら述べるまでもないが、われわれは比較的需要の多い高速タービンについて標準機種を選定済みであり、今後これを中心にさらに拡大し深く検討を加え標準化を進めていく予定である。次に発電用蒸気タービンへの適用については、これには大容量減速機、タービン発電機とのパッケージ化および現地一体輸送などの問題があり、これもまた順次解決していかねばならない問題である。最後に事業用蒸気タービンもますます大容量化の一途をたどっている現状において、機械駆動用蒸気タービンについても超大形プラントの出現と被駆動機の技術進歩が加わりその回転数、出力はさらに高速、大形化するものと思われる。将来、この高速タービンよりもいちだんと飛躍した超高速タービンの開発がうながされてくるであろう。

7. 結 言

高速タービンの開発経緯およびその結果について述べた。高速タービンに不可欠な電解加工技術と12Cr系ロータ材料は今後の主流をなすものと思われる。今回行なわれた一連の試作、試験で得られた貴重なデータは翼、ロータ、軸受、ガバナなど多数にのぼり、今後の高速タービンの設計、製作に果たす役割は非常に大きいものと確信する。

参 考 文 献

- (1) 富士電機時報：41, No. 5 (昭43)