

機械駆動蒸気タービン用可変速高負荷500 mm翼列の開発

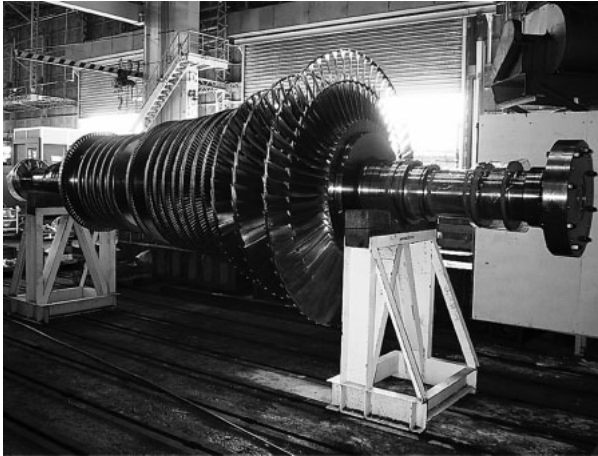
Development of 500 mm Long Blade Applied for Variable Speed, High Loading Mechanical Drive Steam Turbine

岩田 和 明*
Kazuaki Iwata

宮脇 俊 裕*
Toshihiro Miyawaki

長 井 直 之*
Naoyuki Nagai

佐々木 公 良*
Tomoyoshi Sasaki



近年、天然ガスを液体燃料に直接変換するGTL (Gas To Liquid) 技術が世界的に注目されている。そのプロセスに使用される圧縮機駆動蒸気タービンの低圧翼列には、いまだ世界に類のない高負荷、高速、かつ可変速が要求される。そのような過酷な条件に対応する最終翼長500 mmの低圧翼列3段を開発したのでここに紹介する。

1. はじめに

近年、天然ガスを液体燃料に直接変換するGTL (Gas To Liquid) プロセスが世界的に注目されており、そのプロセスに使用されるギアド空気圧縮機駆動用蒸気タービンには70 MWを超える大出力が要求されるが、砂漠地帯での空気冷却式復水器による低真空状態での運転が想定されるため、その低圧部の流量は500 T/Hを超える。そのため、図1に示すように世界に類のない高負荷、高遠心力に耐えうる可変速の翼列が不可欠である。

その低圧最終段翼列には、20 MW / 段の高負荷、定格：4 500 rpmの高回転、かつ可変速が要求される

が、このような翼列は未だ世界に存在しない。

この度当社では、最新の三次元粘性流動解析技術を用い、上述の低圧翼列の設計を実施した。また、三次元ソリッドFEMモデルにて強度設計を実施し、最終的に低圧翼列3段分の実翼を試作して、回転振動試験を実施した。その結果、試作翼列がほぼ解析どおりの振動特性を示すことを検証した。

以下にその結果を紹介する。

2. 基本仕様

2.1 タービン仕様

開発を念頭においた単純復水式蒸気タービンの主仕様を以下に示す。また、その計画図を図2に示す。入

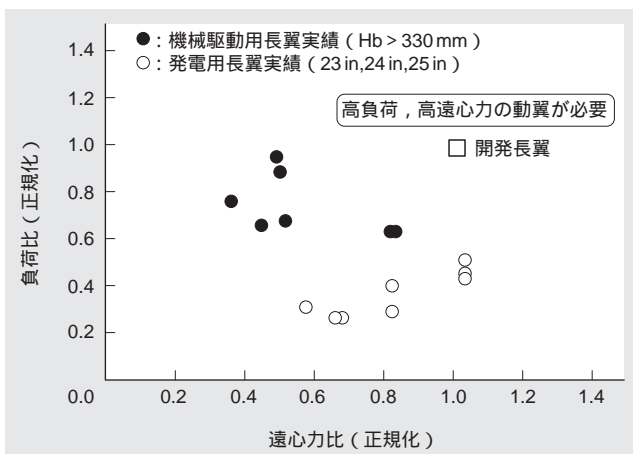


図1 翼に作用する遠心力と負荷の関係 (当社従来翼との比較)

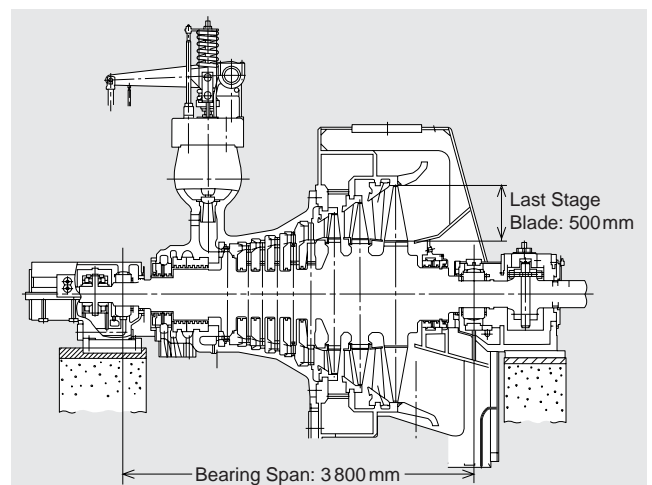


図2 GTLプラント向け蒸気タービン計画図

*1 広島製作所ターボ機械技術部タービン設計課

*2 技術本部高砂研究所ターボ機械研究推進室主席

*3 技術本部広島研究所応物・振動研究室主席

*4 MHI ターボテクノ(株)広島支社技術部担当部長

口蒸気条件は20 ataと低圧であるが、要求される出力は75 MWと大きいため、蒸気流量は最大550 T/Hと今までにない大流量となる。排気真空は、前述のように空気冷却式復水器の使用を想定しており、低排気真空条件での運転となる。

タービン仕様

入口蒸気圧力×温度	Normal : 20 ata × 260
	Max. : 30 ata × 300
排気圧力	0.3 ata
最大出力	75 MW
回転数	4 500 rpm
	[回転数レンジ : 3 600 rpm(80 %) ~ 4 725 rpm (105 %)]
最大流量	550 T/H

2.2 低圧翼列の仕様

前述の条件での80 ~ 105 %の可変速運転に対応可能な、翼長500 mmの最終段長翼を含む低圧翼列(L-0, L-1, L-2段)を開発することとし、単段の段出力としては、20 MWを目標とした。低圧翼列の設計仕様範囲を図3に示す。

この条件に対し、全領域で最適な性能が得られるように翼列の基本仕様を決定した。

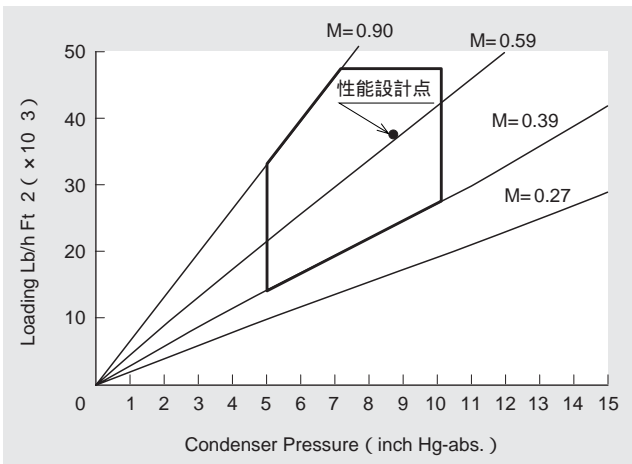


図3 低圧翼列の設計仕様範囲 太線にて囲んだ範囲が今回の低圧翼列の設計範囲を示す。

3. 空 力 設 計

3.1 三次元粘性流動解析

今回の開発では、三次元翼列粘性流動解析を駆使して、タービン翼列の空力設計を実施した。本解析の計算格子を図4に示す。解析手法の特徴は以下のとおりで、低圧翼列3段の多段翼列解析を実施した。

- (1) 蒸気表が組み込まれているので、低圧タービンの蒸気特性を正確に模擬できる。
- (2) 多段翼列を同時に解析するので、上流翼列で発生する損失に基づく流れ場のひずみの影響、上下流翼列のポテンシャル効果を評価できる。
- (3) 翼列試験、タービン試験結果を逆解析し、フローパターン/性能値の較正を十分に行い、タービン性能の評価に使用可能な精度を確認済みである。

図5にL-0段のフローパターンの解析結果例を示す。開発した500 mm長翼は、従来設計と比較して翼根元部の反動度を大きく設計したことが特徴で、高負荷翼列にも関わらず、動翼根元部の相対流入マッハ数が低く、動翼入口部に衝撃波が発生しない。また、転向角も小さく、2次流れ渦発生領域が狭い高性能翼列になっている。

3.2 性能評価

三次元粘性流動解析で低圧翼列3段分の性能評価を実施した結果を図6に示す。図の横軸は無次元化した翼高さ、縦軸は無次元化した内部効率を示している。実線は開発した最終段500 mm翼、破線は当社の機械駆動用蒸気タービンに適用される従来の330 mm翼のそれぞれ内部効率の変化を示している。開発した500 mm長翼では、高反動度設計で2次流れを低減した効果で、翼根元部での性能が大幅に改善され、さらに小転向角で設計した結果、翼高さ方向の全領域でプロファイル性能向上も図られており、定格回転数条件において約8%翼素性能が向上する結果が得られた。

また、定格の80 ~ 105 %回転数範囲及び、想定している全運転適用範囲(図3)における性能変化量も

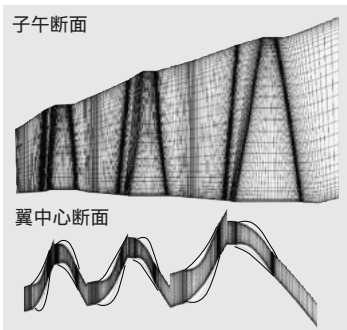


図4 三次元粘性流動解析の計算格子

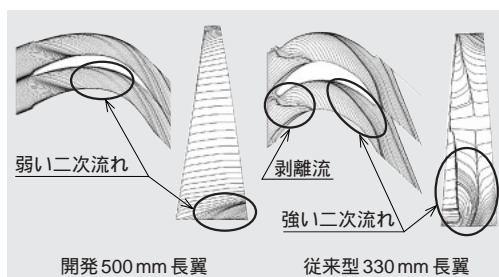


図5 三次元粘性流動解析の結果(L-0段における従来翼との比較)

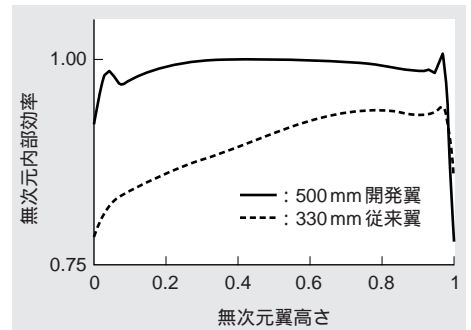


図6 低圧翼列(3段分)の性能評価(従来翼との相対比較)

± 2 %程度で、広範囲に渡って高性能を発揮することが可能である。

4. 強度設計

4.1 強度評価法

強度評価は翼体格を決める際には一部シェルモデルを用いて行ったが、最終的には完全三次元ソリッドモデルにより精算を行った。図7に精算時の有限要素格子モデルを示す。解析ツールにはNASTRANを使用した。なお最終段翼については、翼剛性を上げるために中間スタブを設け、かつ局部応力低減のため初期ギャップを設けている。

4.2 強度評価結果

静的強度については、最大連続回転数での各代表断面平均応力、局部応力、及び変形量について評価を行った。図8にL-0段における局部応力解析例を示すが、これを含めすべての評価項目においていずれも許容値内に収まっている。

また、動的強度については、1～3次の主要共振点について疲労強度評価を実施した。ここでは例として、L-0段に関して述べる。まず、周期境界条件を用いた解析により翼群としての固有振動数を求め、図9に示すようなキャンベル線図を作成した。この図においてハーモニクス（以下Hで示す）線と固有振動数との

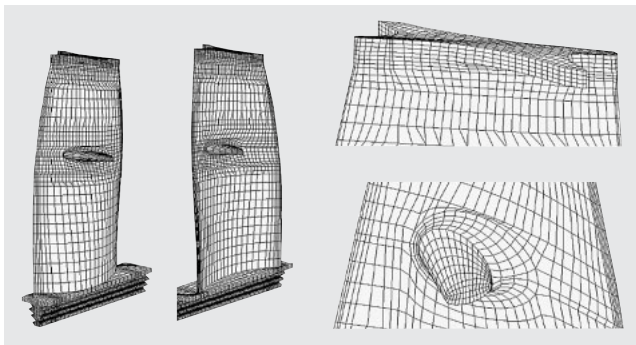


図7 L-0段有限要素格子モデル

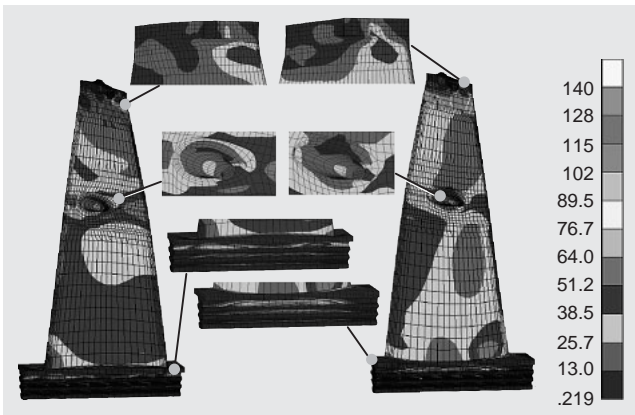


図8 L-0段静的変形図

交点が共振点となるが、ここでは1次モードの8,9H, 2次モードの12H及び3次モードの14H共振について、グッドマン線図にて評価を行った。その結果の一例を図10に示すが、いずれの共振点においても許容値以下となり、疲労破壊に対し十分な強度を有していることを確認した。

5. 回転振動試験

5.1 試験方法

上述した開発翼列の実機試作モデルを製作し、当所高速ローター回転設備にて、回転振動試験を実施した。試験用ローター外観を図11に、また計測装置の構成を図12に示す。各段の翼にはひずみゲージが貼り付けられており、この信号はFMテレメータを介して計測室内に設置された計測器に記録される。これを分析することで翼列の振動特性評価を行った。加振については静止側に空気ノズルを設け、トリップ速度である5197 rpmまで連続加振した。なお、静的な翼

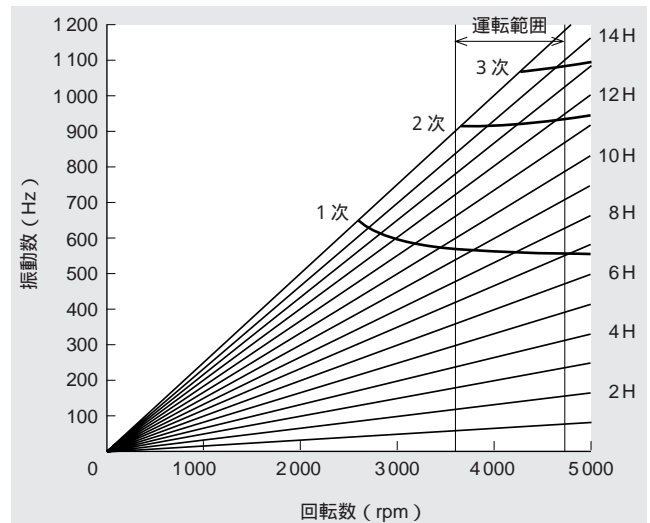


図9 L-0段キャンベル線図（解析結果）

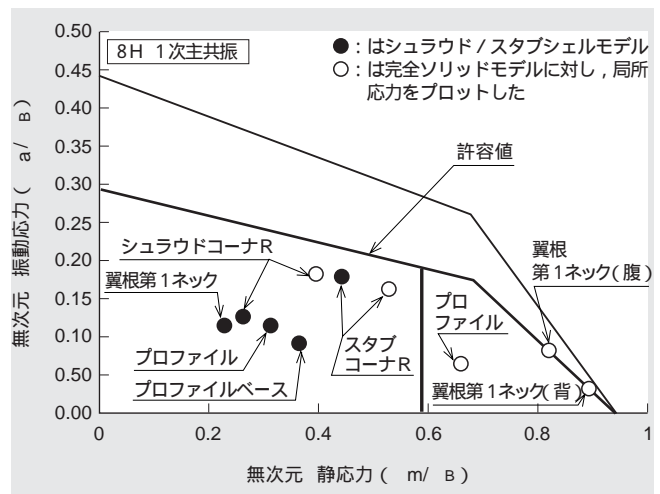


図10 L-0段グッドマン線図

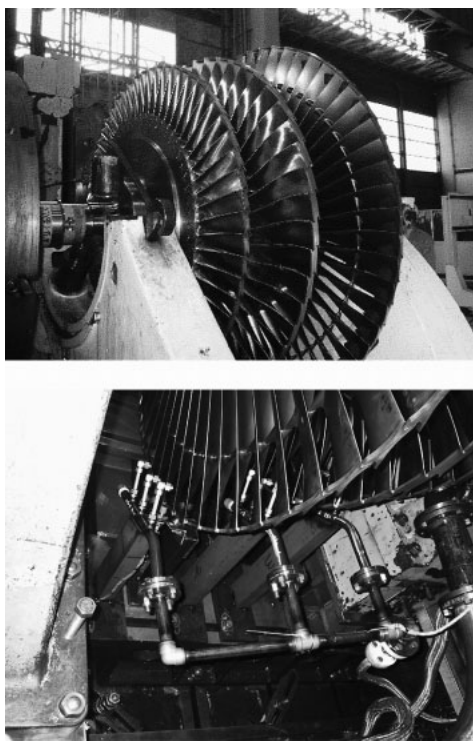


図11 試験用ローター 上段：試験ローター全体図，下段：加振用空気ノズルの設置詳細。

の変形についても非接触変位計にて計測を行った。

5.2 試験結果

試験結果より得られたL-0段のキャンベル線図を図13に示す。図中の実線は解析値を示している。1次の主共振はほぼ解析値どおりであり，設計の妥当性を確認できた。また，翼変形に関しても，解析値と概略一致することが確認され，これらより十分実運転に供するものと判断される。

6. ま と め

20 MW / 段の高負荷，定格：4 500 rpmの高回転，かつ可変速に対応した最終翼長500 mmの低圧翼列（3段）を開発した。三次元粘性流動解析の結果，開発した翼列は当社従来長翼に比べて約8%性能がよく，また可変速の運転回転数範囲（定格回転数の80～105%）においてほぼ翼素性能の変化が見られないことを確認した。静的，及び振動強度解析は，完全三次元ソリッドモデルにより精算を行った。特に主共振評価には周期境界法を適用した結果，共振点においても十分な強度を有することを確認した。

最終的に，設計した翼列を実機試作し，回転振動試験を実施した。その結果，運転範囲内において無限翼化が達成され，かつ固有振動数特性もほぼ計画どおりとなっていることが実証されたことから，十分実用に供するものと判断する。

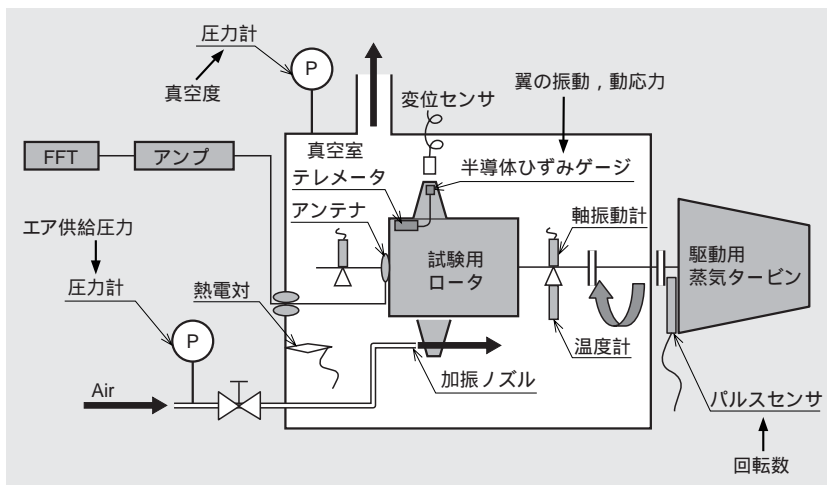


図12 回転振動試験の計測装置構成

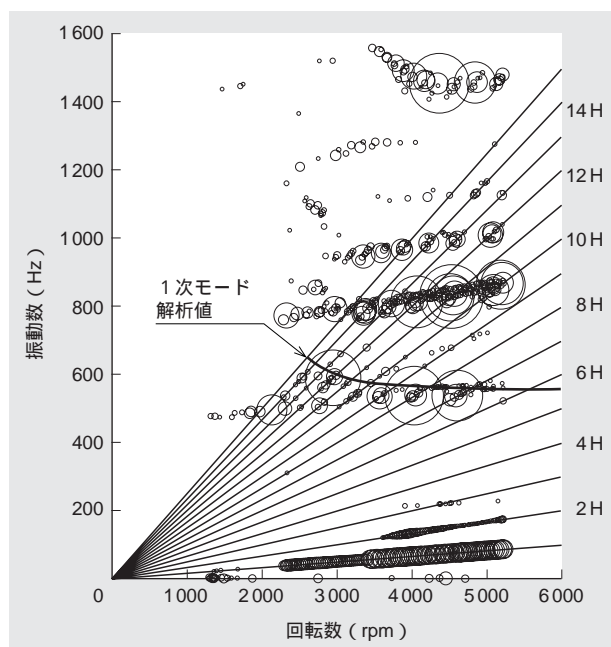
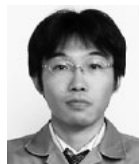
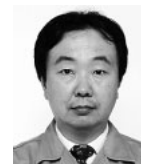


図13 L-0段キャンベル線図（解析と実測の比較）

本翼列は世界に比類なき可変速500 mm翼列であり，この開発方法に基づき，今後も低圧翼列及び蒸気タービンの高性能化に取り組んでゆく。



岩田和明



宮脇俊裕



長井直之



佐々木公良