

# 蒸気タービン次世代超長大翼の開発及び 一軸ガスタービンコンバインドサイクルプラントの軸トルク計測

Development of Next-generation Ultra-long Exhaust End Blades for Steam Turbines and  
Measurement of Axial Torque at Single-axil Gas Turbine Combined Cycle Plants



赤石 裕二\*1  
Yuji Akaishi

丸山 隆\*2  
Takashi Maruyama

瀬戸山 正幸\*3  
Masayuki Setoyama

新井 眞\*4  
Makoto Arai

渡邊 敏生\*5  
Toshio Watanabe

当社では火力発電プラント用蒸気タービンに適用するスチール製 3600rpm-50IN/3000rpm-60IN 次世代超長大最終翼群の開発設計を完了, ガスタービンコンバインドサイクル (GTCC) プラント用及び, 大型火力プラント用蒸気タービンへの適用を推進中である。本報ではスチール製 50/60IN 最終翼群の適用状況に加え, 一軸 GTCC プラントの性能劣化診断に有効な手段である軸トルク計測技術について紹介する。スチール製 50/60IN 最終翼群は開発プロセスであるフルスケールの実負荷試験, 実機ロータでの回転振動試験を完了し, その健全性が確認できている。また, ロータに生じるせん断ひずみから軸トルクを計測し, 蒸気タービン及びガスタービンの出力分離と性能劣化診断を可能とする軸トルク計測技術を開発した。

## 1. はじめに

当社では, 火力発電プラント用蒸気タービン低圧最終翼群に対して, 長年にわたり高効率化, 高信頼性化, 合理的低コスト化を実現させる ISB 最終翼群シリーズの開発を実施し, 実機への適用を推進してきた。平成 15 年には次世代高性能翼(反動翼, 衝動翼, 最終翼群)を採用した高性能新形タービン<sup>(1)</sup>の開発・実機検証を実施し, 内部効率, フローパタンの確認を行った。この度, この高性能化技術を更に発展させるとともに高強度翼材料を採用した 3600rpm-50IN/3000rpm-60IN スチール製次世代超長大最終翼群の開発設計を完了<sup>(2)</sup>, 実機適用に先立ち実施した回転振動試験, 実負荷試験設備での実負荷総合確認試験により実機状態における性能, 流れの状況, 応力, 振動特性等を検証し, その信頼性を確認した。本報ではスチール製 50/60IN 最終翼群の開発設計概要及び実機適用状況に加え, 一軸ガスタービンコンバインドサイクル (GTCC) プラントにおいてガスタービン及び蒸気タービンの出力を分離することにより, 性能劣化診断に役立つ軸トルク計測技術について紹介する。

## 2. スチール製 50/60IN の開発

### 2.1 開発設計

次世代超長大最終翼群では, これまでの性能向上技術を更に高度化した技術を採用し, 20% 以上の環状面積増大を実現した。

火力発電プラント用蒸気タービンに対しては高効率化と低コスト化の両立を狙った“スチール製 3600rpm-50IN/3000rpm-60IN 最終翼群”を開発・検証し, 計画どおりの性能・信頼性を確認

\*1 原動機事業本部蒸気タービン技術総括部 グループ長

\*2 原動機事業本部蒸気タービン技術総括部高砂タービン技術部 主席 \*3 原動機事業本部 蒸気タービン技術総括部

\*4 技術統括本部 高砂研究所 主席研究員

\*5 技術統括本部 高砂研究所

の上、順次実機に適用している。図1には、それぞれの低圧最終翼群の適用範囲例を示す。

超長大最終翼群採用による単車室タービン化は大型 GTCC 発電プラントの建設費低減に寄与する。図2には単車室タービン化の一例を示す。

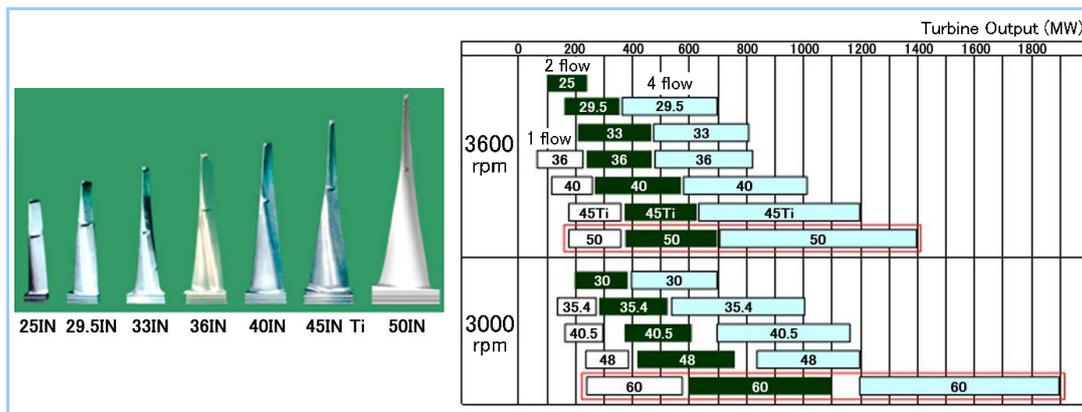


図1 低圧最終翼群のラインナップと適用範囲

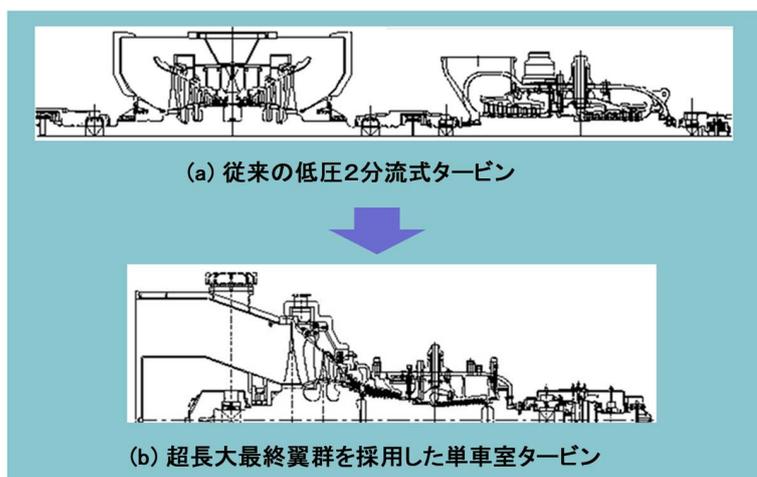


図2 大型 GTCC 用蒸気タービンへの適用例

(1) 3次元流動解析

翼列の高効率化に対しては、非平衡蒸気特性を考慮した三次元多段粘性非定常流動解析を用いて、多段タービン翼列の壁形状、翼型形状に影響される流体力をすべて考慮することにより、多段タービンとして最大効率・出力を得られるように各段・各列の負荷制御(フローパタン設計)を実施した。同時に内部流れを時刻歴で評価し、翼面上の負荷分布制御とともに非定常流れ場の時間平均における最大の効率を得られるよう最適化を実施している。翼列部流動解析の一例として、図3には、子午面解析結果を示す。

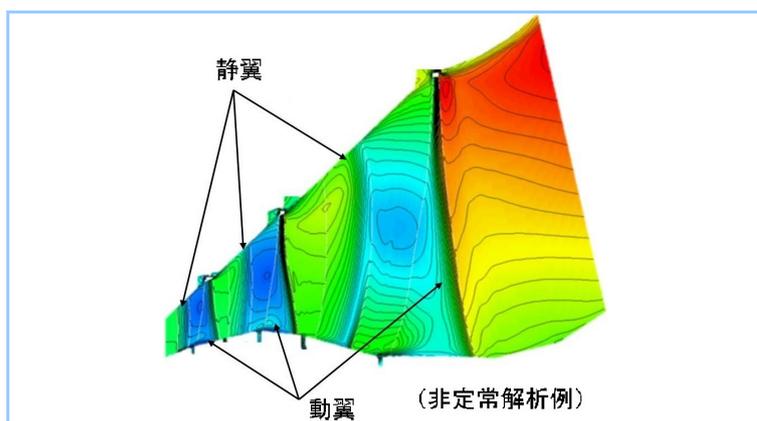


図3 翼列流動解析結果(50IN 低圧最終翼群 マッハ数分布)

最終翼群に特有の水滴による損失(湿り損失)に対しても、水滴の飛跡予測をより正確に実施し、静翼面の水滴排出スリット位置、形状の最適化を行い水滴除去効率の大幅な向上を図った。

一方、最終翼出口から排気室、復水器までの流れ場も、翼列解析と同様に蒸気特性を考慮した三次元粘性流動解析を用いて翼列部と連成させた検討の実施により、圧力回復係数を大幅に向上させるとともに軸方向長さを低減した新型軸流排気室、改良三次元非対称排気室を開発した。図4に排気室流動解析の一例を示す。

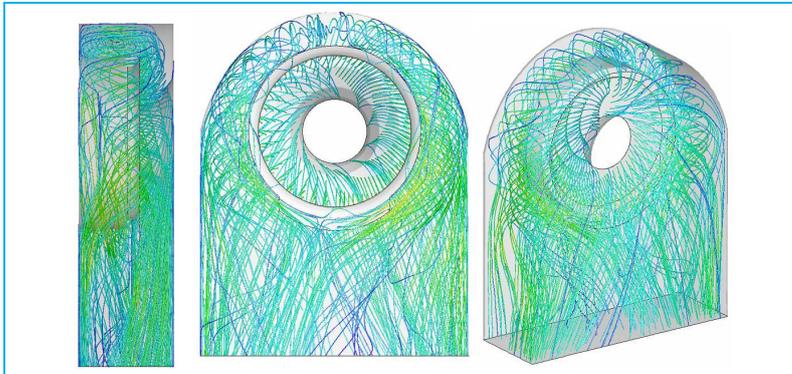


図4 排気室流動解析結果例(50IN 低圧最終翼群)

## (2) 3次元有限要素法を用いた振動応力解析

最終翼群動翼では、遠心力による翼のねじり戻り変形を利用したシュラウド/スタブの接触により全周つづり(綴)翼構造を形成することから、長大化では変形解析の精度が重要となる。

翼全体の変形をバランスさせ、翼プロファイルは空力性能と変形解析の最適点を選択した。また、翼根・翼溝部は応力腐食割れ、腐食疲労に対する耐力向上のため大型翼根・翼溝を採用することで信頼性を大幅に向上した。

一方、振動強度解析では周期対称法による FEM 解析を実施している。固有振動数解析及び非線形振動応答解析を用いて、シュラウド/スタブ形状及び位置の検討を実施しており、これにより接触回転数、接触面反力の調整を行っている。図5に振動解析の例を示す。

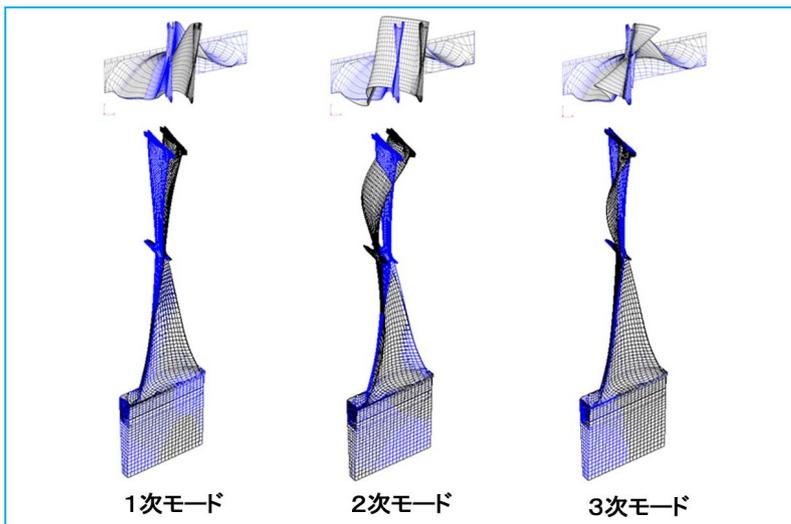


図5 振動応答解析の例(50IN 低圧最終段動翼)

## 2.2 検証テスト結果

検証は、回転振動試験及び実負荷試験設備での実負荷総合確認試験を実施し、性能・信頼性の両面から総合的な検証を実施した。その結果、従来翼に対して1%以上の効率向上が達成されていることを確認した。また、固有振動モードは十分に共振回避しており、あらゆる運転範囲で非同期振動が発生しないことを確認した。

図6には当社における新規開発長大翼に対する開発・検証プロセスを示す。検証試験の結果を次期の開発に反映するフィードバックプロセスを継続することにより、従来を超える長大翼化を実現している。図7に実負荷総合確認試験で用いた実負荷試験設備の外観を示す。また、図8に検証試験結果の一例を示す。

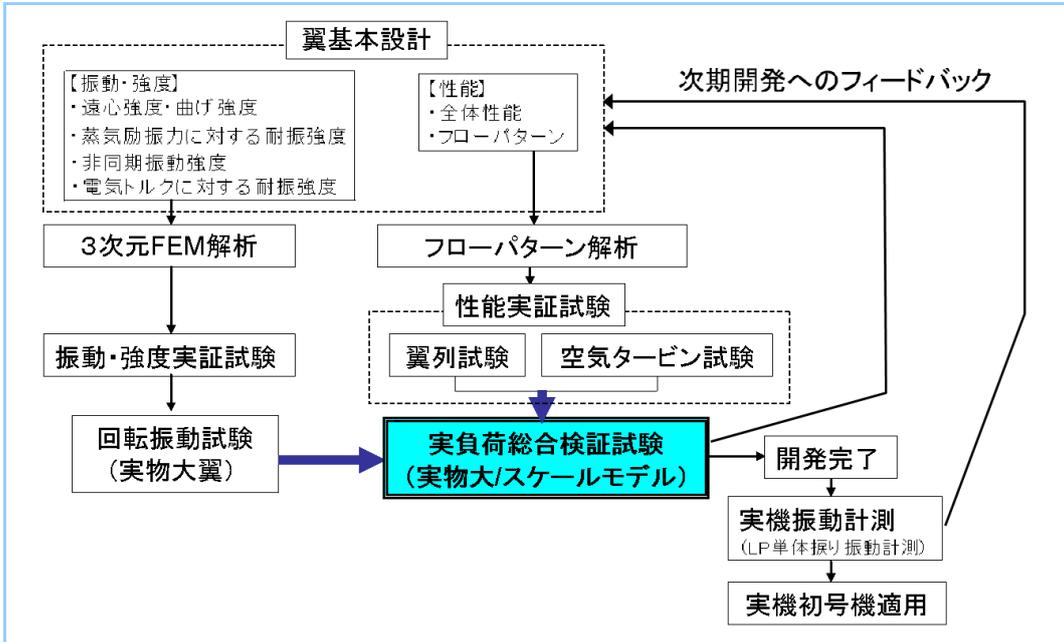


図6 低圧最終翼群の開発・検証プロセス



図7 実負荷試験設備

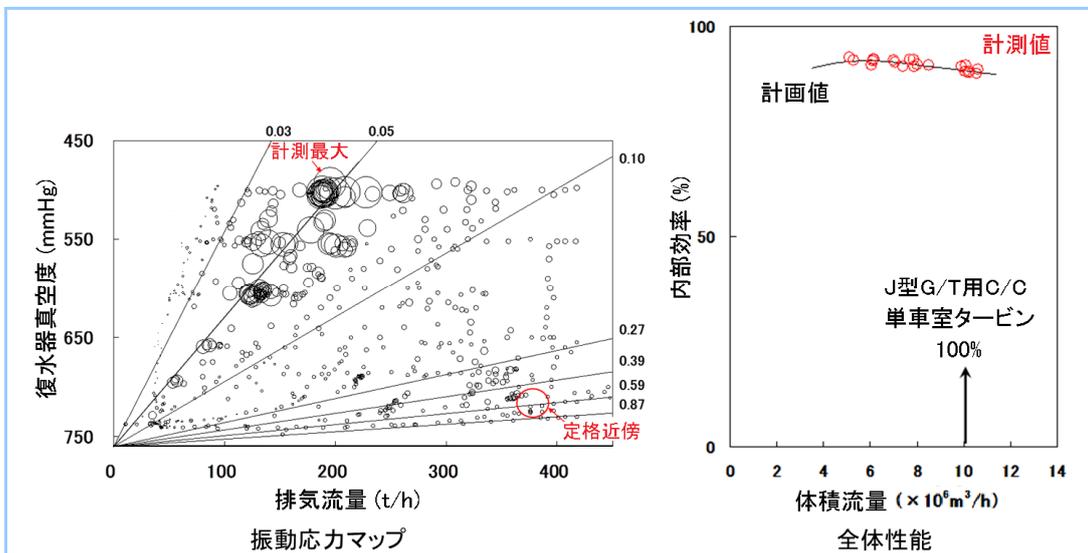


図8 3600rpm-50IN 低圧最終翼群 実負荷試験結果例

### 3. スチール製 50/60IN の実機適用

開発プロセスでの検証試験を完了した 3600rpm-50IN/3000rpm-60IN スチール製次世代超長大最終翼群は現在 GTCC プラント用(1 on 1, 2 on 1)及び、大型火力プラント用蒸気タービン(1000MW 機)へ適用中である。図9に実機鳥瞰図を示す。

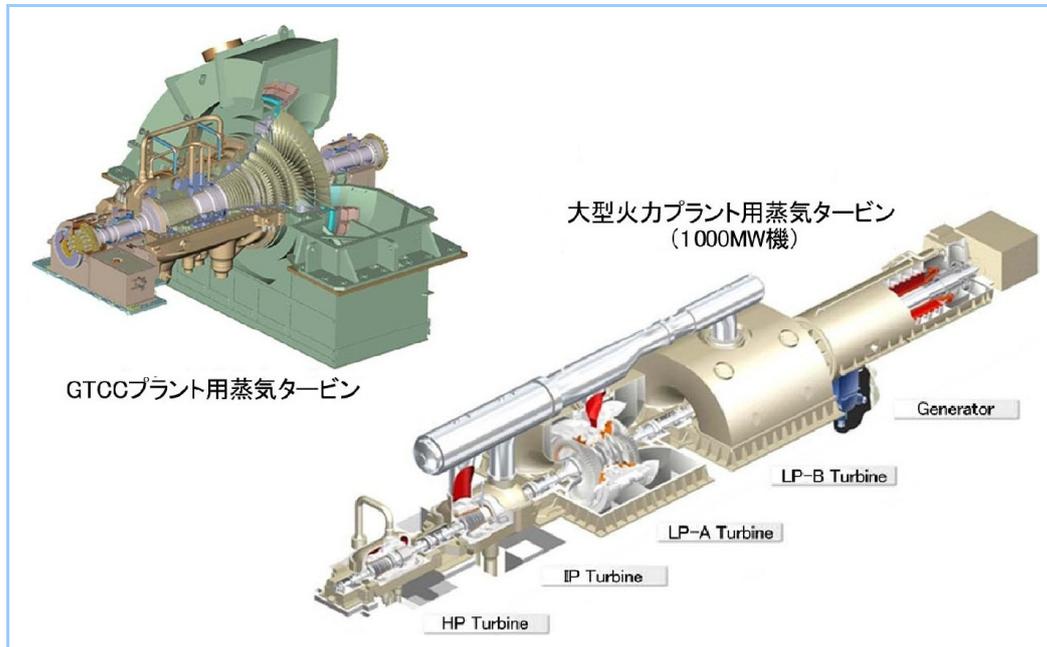


図9 スチール製 50/60IN 最終翼群適用例

### 4. 実機出荷時工場試験結果

3600rpm-50IN 低圧最終翼群は前述の開発プロセスでの検証試験に加え、実機ロータ回転振動試験より健全性を確認した。これらの実機翼の計測は、検証試験翼と実機翼での製造・組立上のバラツキなどの影響を加味して最終的な製品としての健全性を確認するためのものであり、当社の開発プロセスの重要な確認項目の一つである。

#### 実機ロータ回転振動試験

実機製作翼を定格回転数まで運転，空気加振を実施し翼振動数を計測することで，振動特性が計画どおりであることを確認した。また，ロータの軸端部にねじり加振器を設置し，定格回転数にて一定の加振力でねじりトルクを付加することにより，翼軸連成のねじり振動数の確認を実施した。その結果，検証試験翼と同様の特性を有していることを確認した。図 10, 11 に実機ロータの概観を，図 12 に計測結果の一例を示す。



図 10 スチール製 50IN 実機ロータ例  
(GTCC プラント用)



図 11 スチール製 50IN 実機ロータ例  
(大型火力プラント用)

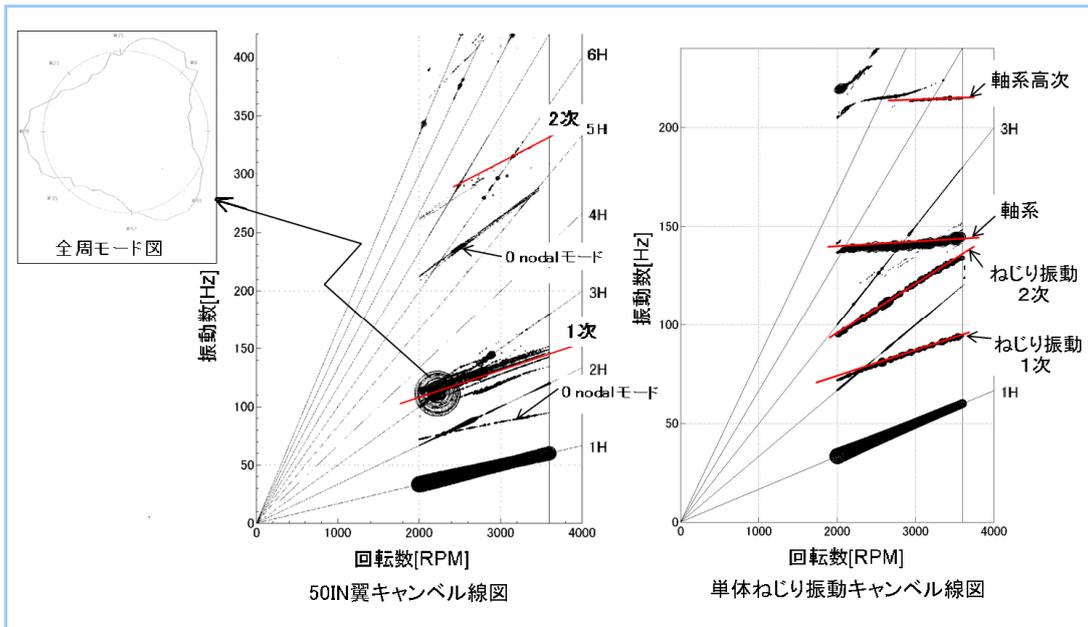


図 12 実機ロータ回転振動試験結果例

## 5. 一軸 GTCC プラントの軸トルク計測技術について

一軸型 GTCC プラントにおいては、ガスタービン及び蒸気タービンの出力を分離することにより、それぞれの性能確認が可能となる。また、それぞれの性能を定期的に確認し、各々の性能劣化診断をすることはプラント全体としての保守最適化につながる。出力を分離する手段として、一軸 GTCC タービンの軸部にひずみゲージを貼り付け、ロータに生じるせん断ひずみから軸トルクを計測するシステムを開発した。また、本システムの計測結果に加え、本システムにより求めた出力と、状態量(圧力、温度、流量、真空)計測結果から評価した出力との関係を把握することにより性能劣化診断の更なる正確性向上が期待できる。

### 5.1 計測システム概要

カップリングボルト先端にトランスミッタ及びバッテリーをはめ込む構造とし、ロータの各軸部に生じるせん断ひずみから軸トルクを計測した。図 13 に計測システム概要を示す。

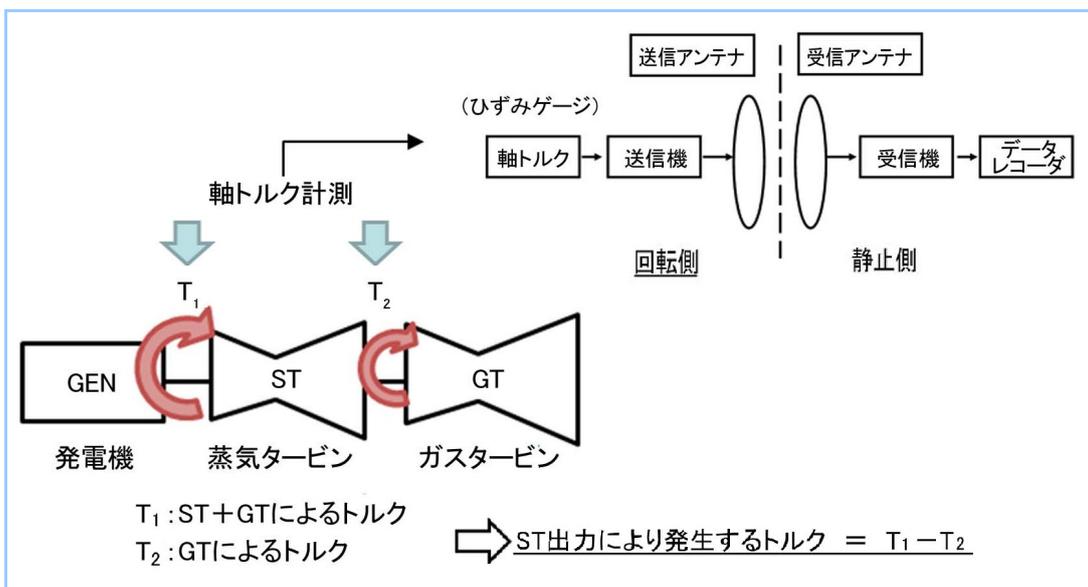


図 13 計測システム概要

## 5.2 検証試験

実機での計測に先立ち、当社高砂製作所内の実証発電設備(T地点)にて同一システムを使用した計測を実施した。その結果から、トルク計測用カップリングボルトへの入れ替えが軸振動に影響を与えないこと及び、取付け作業並びに計測システム全体として健全性を有していることを確認し、現在実機への適用を推進中である。図 14 に計測システムの概観を、図 15, 16 に計測結果の一例を示す。

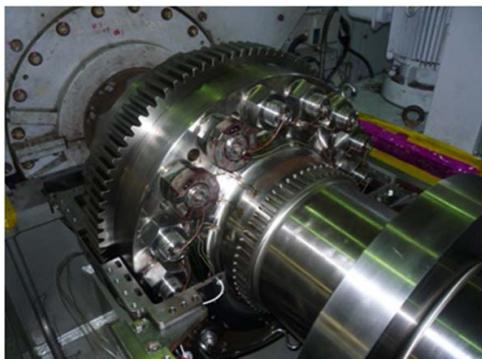


図 14 トルク計測システム

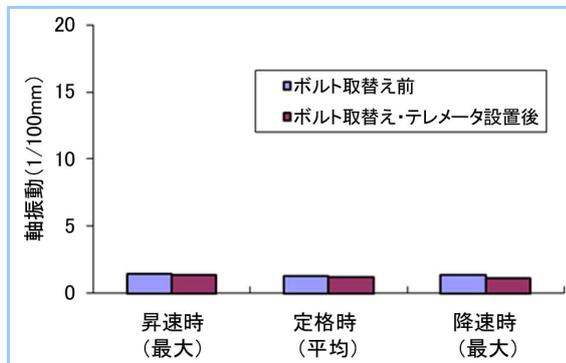


図 15 トルク計測用カップリングボルト使用前後の軸振動比較

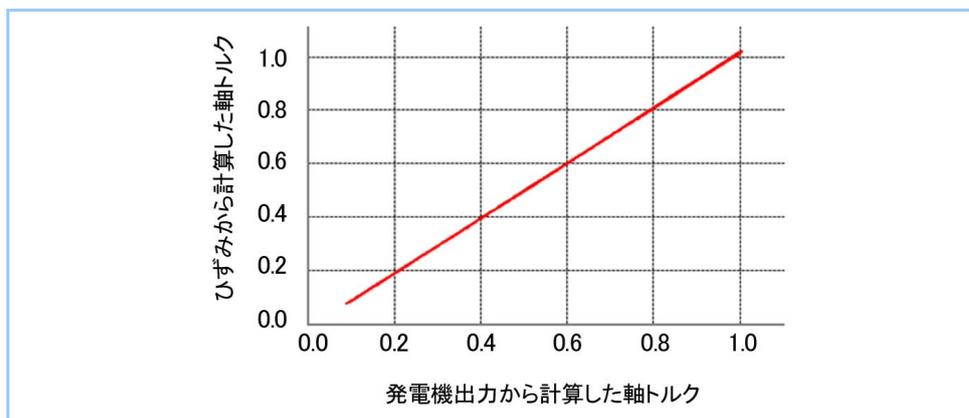


図 16 T地点におけるトルク計測検証結果(発電機出力から計算したトルクで正規化)

## 6. まとめ

火力発電プラント用蒸気タービンに対し適用する、3600rpm-50IN/3000rpm-60IN スチール製次世代超長大最終翼群について、高性能化技術を更に発展させるとともに高強度翼材料を採用し開発設計を完了、検証結果を次期の開発に反映するフィードバックプロセスを継続することにより、従来を超える長大翼化を実現した。また、開発プロセスでの検証試験だけでなく、50IN 最終翼群を実機 GTCC プラント用タービンへ適用、実機ロータ回転振動試験を通じて最終翼群の健全性を確認することができた。

また、一軸 GTCC 発電プラントにおいて、ガスタービン及び蒸気タービンそれぞれの性能確認を可能とするため、軸トルク計測技術を開発、当社高砂製作所内の実証発電設備(T地点)にて計測を実施した。本計測を用いることで一軸 GTCC プラントの経年的な性能劣化診断が可能となった。

## 参考文献

- (1) 渡辺英一郎ほか、高性能新形蒸気タービンの開発、三菱重工技報 Vol.40 No.4 (2003-7) p.212
- (2) 福田 寿士ほか、蒸気タービン超長大最終翼群 3600rpm-50IN/3000rpm-60INの開発、三菱重工技報 Vol.46 No.2 (2009) p.18~24