

蒸気タービン用CCB長翼

—特徴および性能・信頼性設計技術—

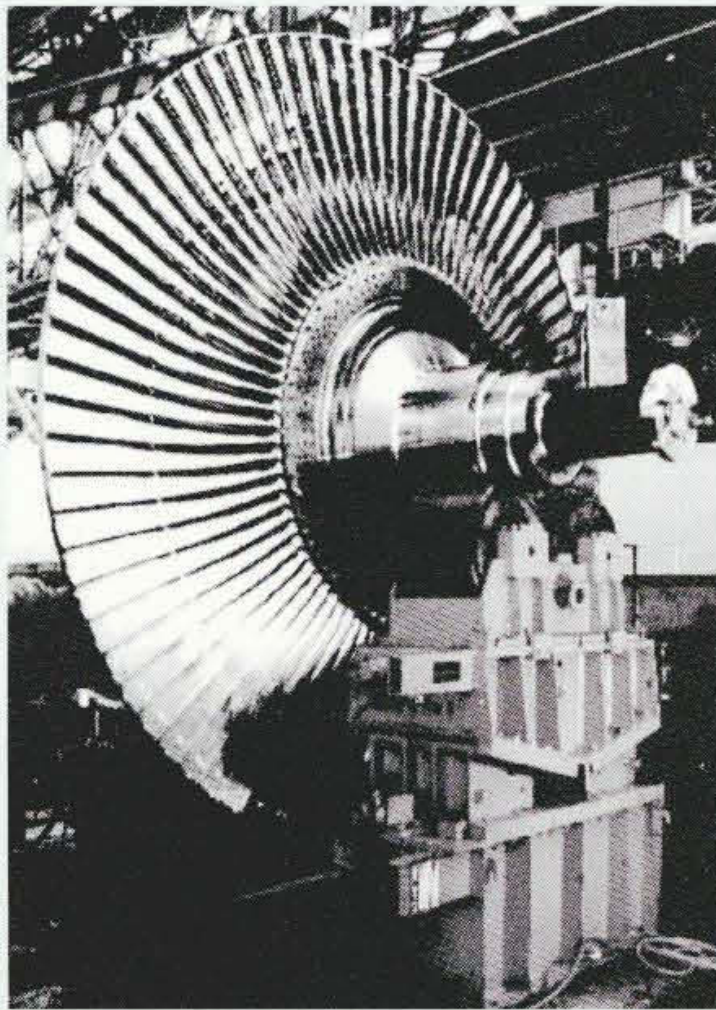
Development of Long Blades with Continuous Cover Blade Structure for Steam Turbines

町田雅人 Masato Machida

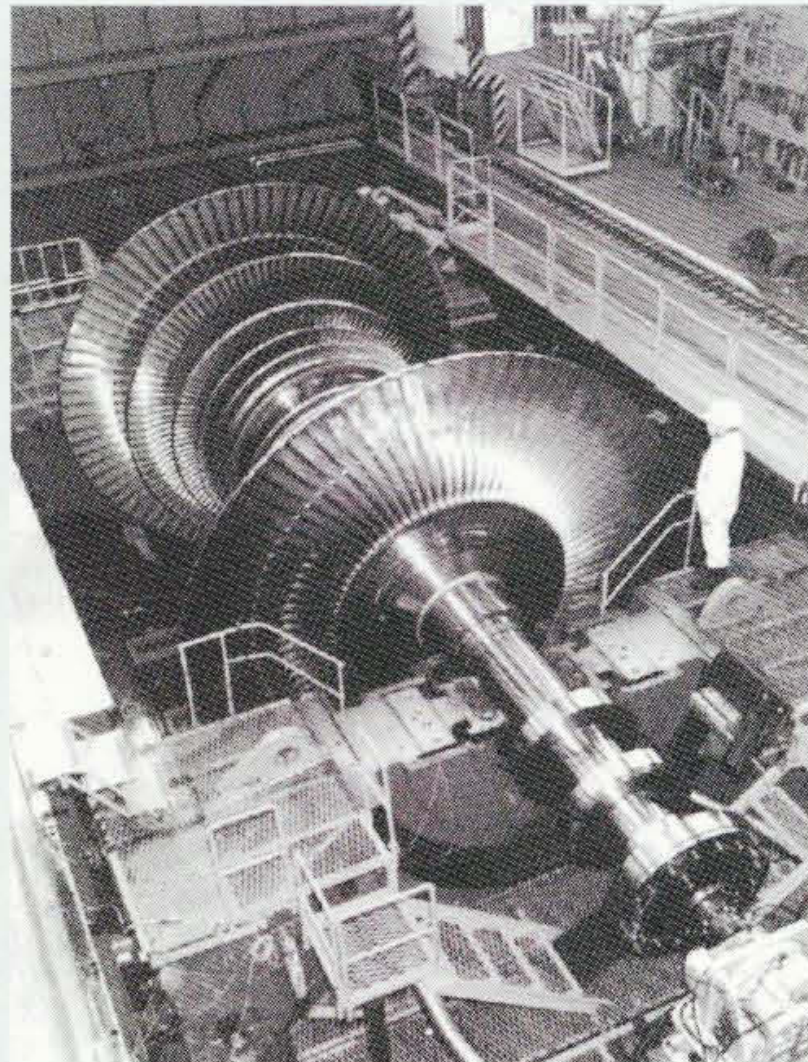
齊藤英治 Eiji Saitō

依田秀夫 Hideo Yoda

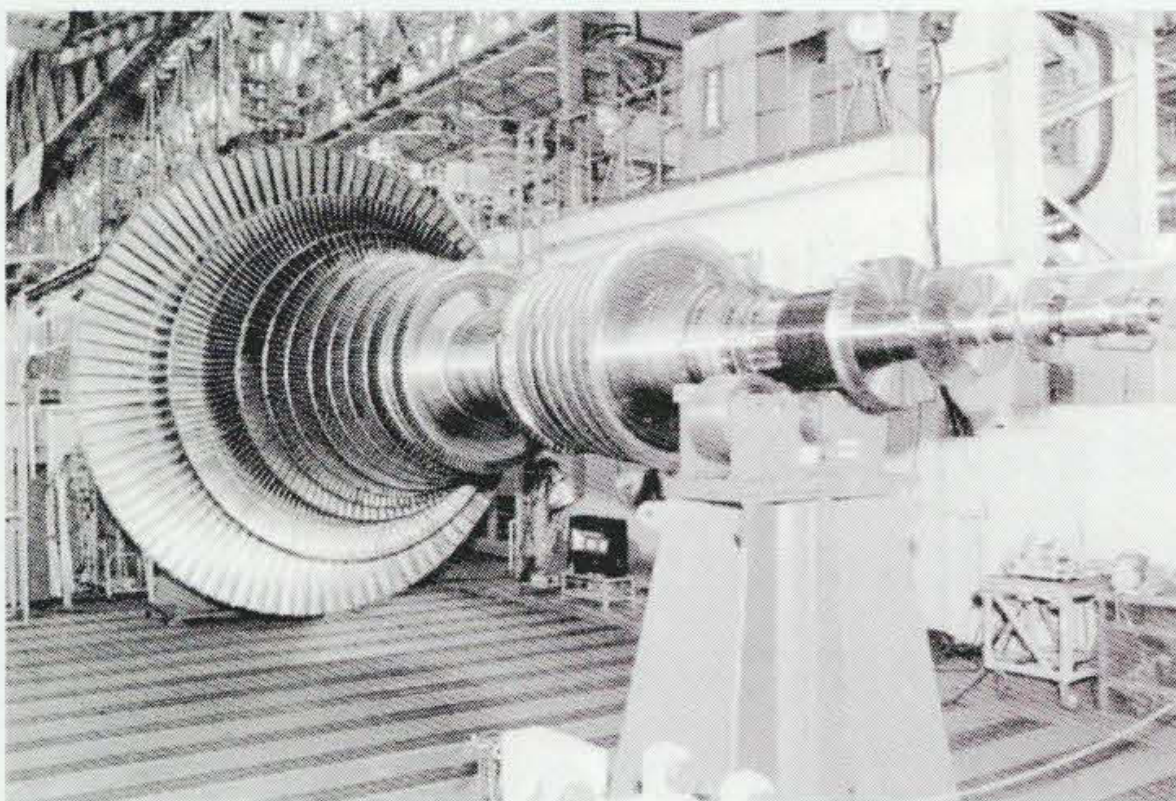
名村 清 Kiyoshi Namura



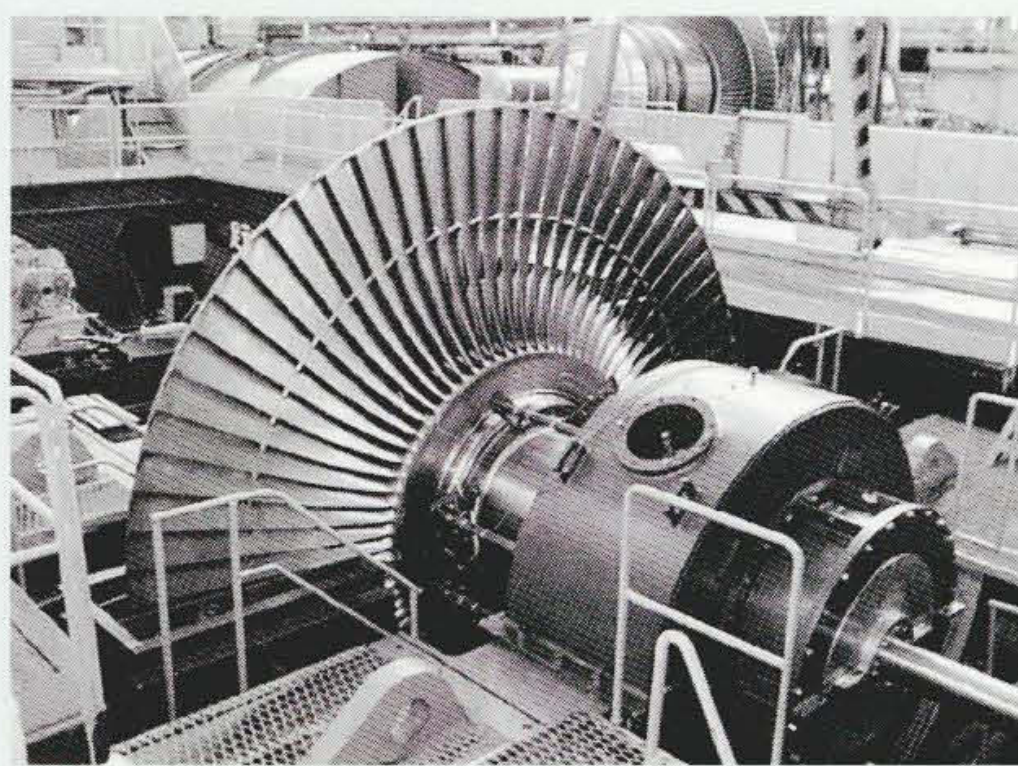
33.5インチ(85 cm)CCB長翼試験ロータ



最終段43インチ(109 cm)CCB長翼実機ロータ



最終段40インチ(102 cm)CCB長翼実機ロータ



46インチ(117 cm)CCB長翼試験ロータ

注：略語説明

CCB(Continuous Cover Blade)

各種CCB構造タービン翼を用いた蒸気タービンロータ

CCB長翼ラインアップとして数種類の新翼の工場試験が完了し、実機に適用されつつある。

近年の電力市場では、安定したエネルギー基盤の中核を担うという点で、火力・原子力発電の重要性に変わりはない。一方、電力規制緩和による発電単価の低減やCOP3[※]で提案された温室効果ガス削減要求など、エネルギー事業を取り巻く状況は価格と環境面でいっそう厳しさを増している。そのため、火力・原子力用蒸気タービンに対しては、新規プラントはもとより、長期にわたって稼動してきたプラントのリプレースにも、高効率・高信頼性が求められている。

その要求にこたえるために、日立製作所は、翼構造にCCB構造を採用し、最新の解析技術と開発当初からの性能・振動・強度についての実験データを基に、新しい蒸気タービン翼の開発を行ってきた。CCB構造を用いた低圧最終段長翼は、1986年に開発した3,000 rpmの26インチ(66 cm)翼から3,600 rpmの46インチ(117 cm)翼に至るまで、各種プラント出力に適応したCCB長翼ラインアップとして開発してきており、国内外の実機に適用され、順調に稼動している。

1 はじめに

蒸気タービンの最終段に用いられる長翼は、約10%のプラント出力を担い、最も大きな遠心力作用下で運転されるため、タービン全体の性能や信頼性を左右する重要なコンポーネントの一つである。また、最終段では、長翼化が進むにしたがって、流速や遠心力の増加、固有振動数の低下などを招くので、性能・強度・振動の面か

ら、特に高度な設計技術が要求される。

日立製作所は、最新の設計技術を用いて性能向上を図るとともに、翼構造に強度・振動の面で信頼性の高いCCB(Continuous Cover Blade)構造を採用した長翼の開発を行ってきた。これにより、おのこのプラント出力に対応したCCB長翼ラインアップがほぼ完成し(表1参

※) 第3回気候変動枠組み条約締約国会議

表1 CCB長翼のラインアップ

これまでに開発が完了したCCB長翼のラインアップを示す。

回転速度 (rpm)	カバーのみ	カバー＋タイボス*
3,600	26インチ(66 cm)	33.5インチ(85 cm), 40インチ(102 cm), 46インチ(117 cm)
3,000	26インチ(66 cm)	33.5インチ(85 cm), 43インチ(109 cm)
1,800	—	48インチ(122 cm)

注：*図4参照

照), わが国をはじめ, 米国, カナダ, メキシコ, 韓国, パキスタン, ペルーなどで広く実機に適用され, 順調に稼動している。

ここでは, CCB長翼の概要と, 最近の設計技術について述べる。

2 性能設計技術

2.1 性能解析技術

一般に, タービンの最終段翼の先端部では, 蒸気は遷音速流れとなり, 長翼化に伴い, 出口流速はさらに高マッハ数化する傾向にある。したがって, 翼の種類ごとに遷音速流れに最も適し, かつ衝撃波による損失が少ない翼形の設計が重要となる。そのため, 古くから翼列実験によるデータが蓄積されてきた。最近では, 流れ解析技術の大幅な向上により, 翼形の性能評価が, 精度よく, 短時間で行えるようになってきている。

最終段では蒸气流路が急拡大し, 三次元性の強い流れとなる。このため, 三次元フローパターンの適正化を図

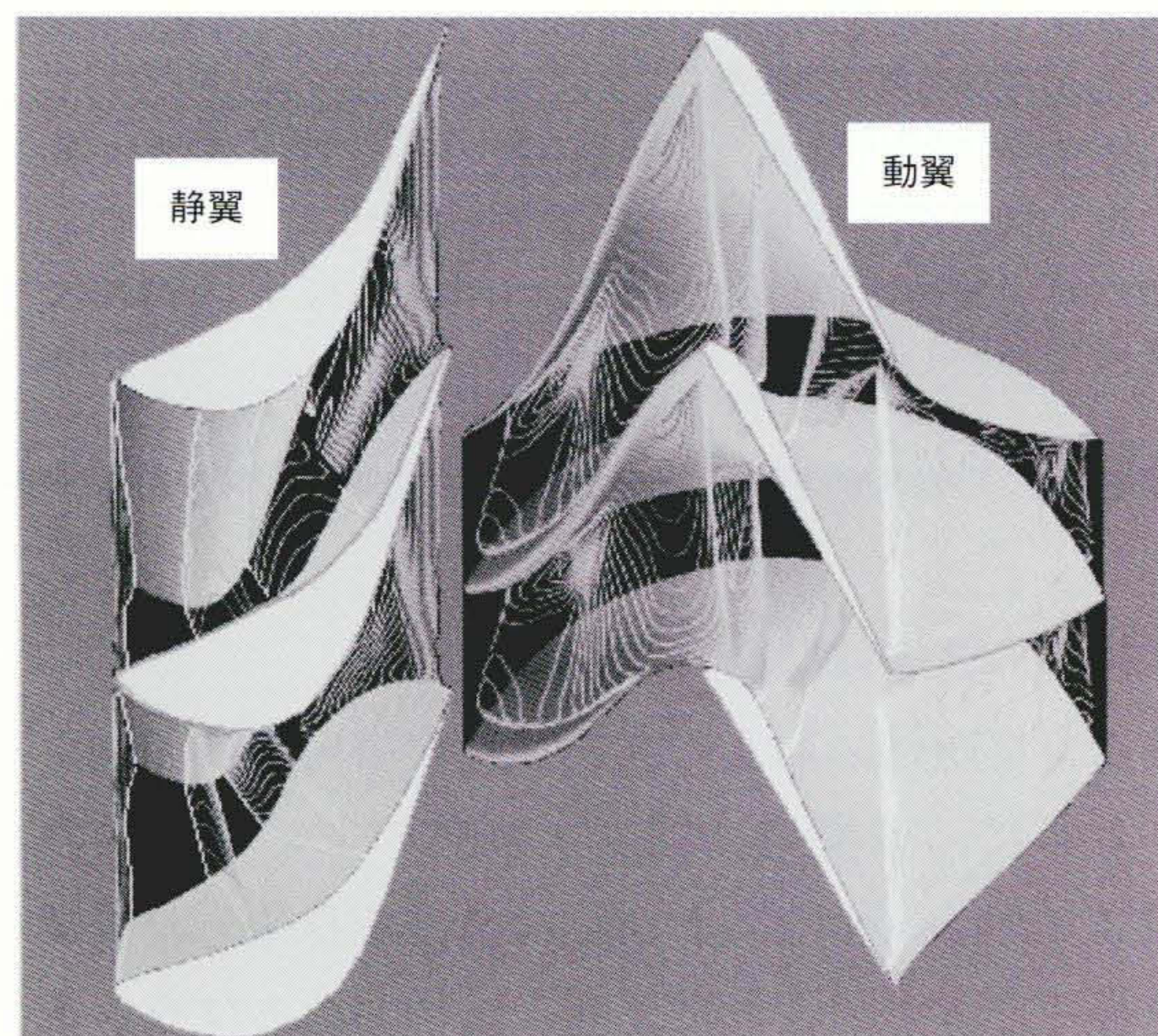


図1 三次元段落流れ解析の例

三次元段落流れ解析によって得られた静翼・動翼間のマッハ数分布の変化を示す。これにより, 実際に即した静翼・動翼間の流れの適正化が把握できる。

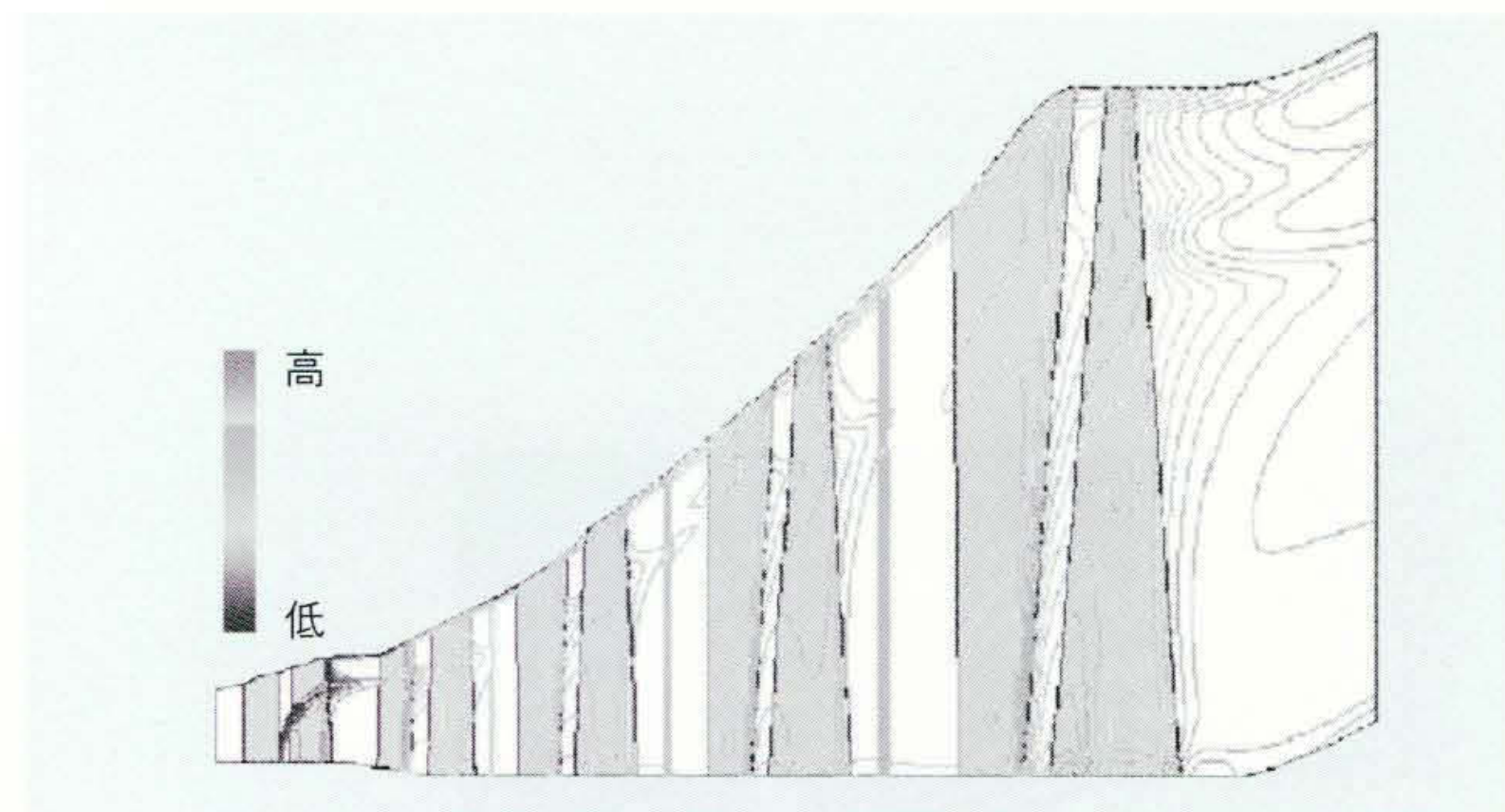


図2 非平衡凝縮流れ解析による湿り度分布

高速気流中の相変化を伴う湿りを考慮することにより, 流量・段落負荷・損失の予測精度が向上する。

る必要がある。この問題に対しても, 従来はタービン試験での流れ計測が主要な手段であった。これに対して最近では, 三次元段落流れ解析技術が, 有用な設計ツールとして活用されるようになってきている。その解析例を図1に示す。

また, 理想気体を扱うにとどまっていた従来の流れ解析に対し, 現在は蒸気による湿り条件や相変化も考慮した非平衡凝縮流れ解析が可能になったことから, 蒸気タービン低圧段の流量や段落負荷, 損失の予測が精度よく行えるようになってきている(図2参照)。このため, このような流れ解析は, 高精度の性能評価と性能向上策抽出の手段として活用されている。

2.2 性能評価試験

従来の翼に代わる新翼を開発した場合, 性能の向上量を実験と解析の両面で確認しておくことは重要である。その一例として, 3,600 rpm用 26インチ(66 cm)翼について以下に述べる。

設計点(速度比=0.4)で従来翼の効率を1.0とした場合の段落効率特性比較を図3に示す。これにより, 新しい翼

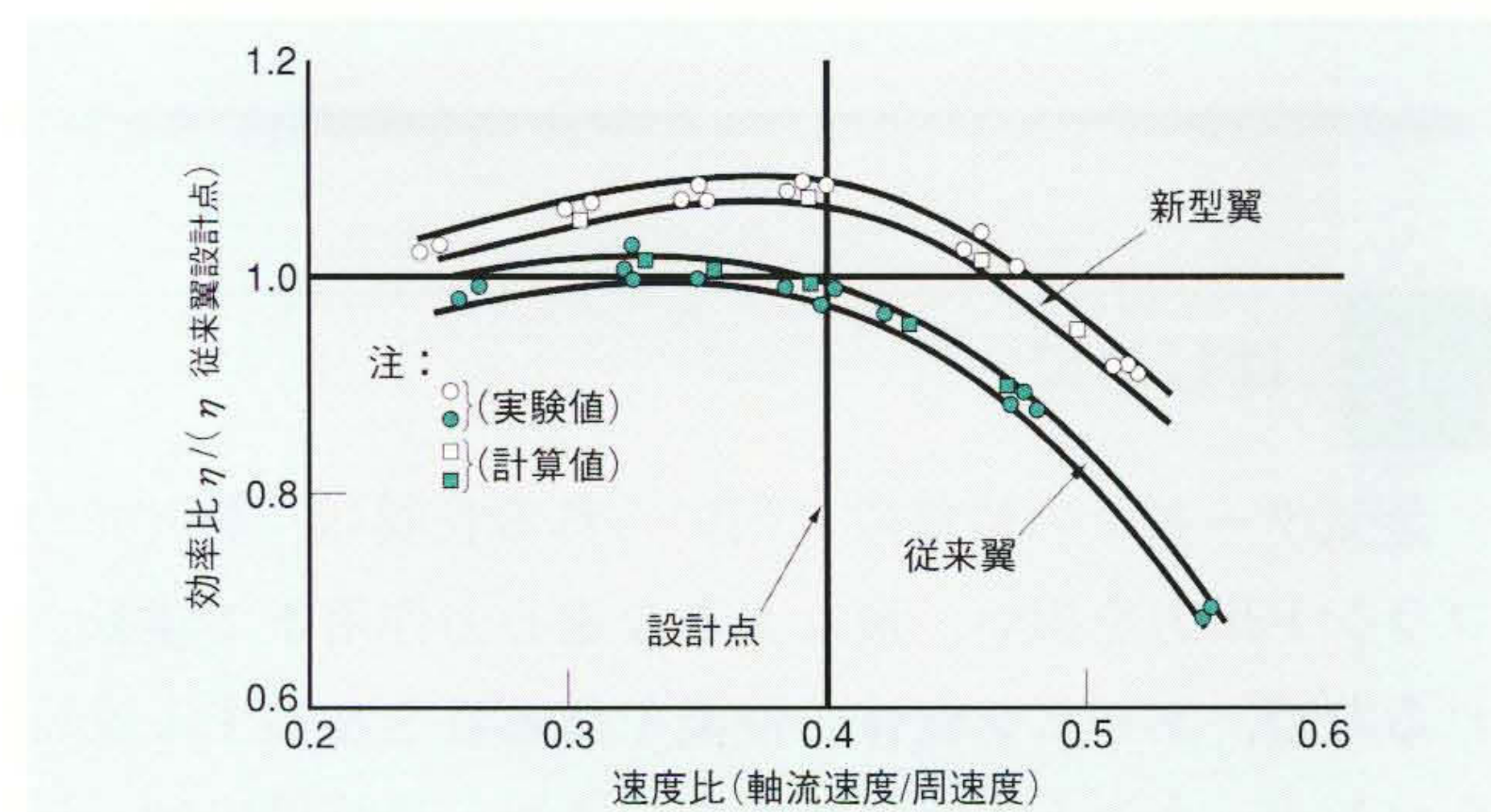


図3 26インチ(66 cm)翼の段落効率特性比較

翼出口マッハ数に適合した翼形状設計により, 従来翼よりも段落効率が向上したことを実証した。

を採用すれば平均段落効率が大幅に改善されることがわかる。特に、速度比の大きい部分負荷領域で、効率向上量が多い。また、実験値は計算値とよく一致しており、流れ解析の有効性を確認することができた。

3 CCB構造の特徴

蒸気タービンの翼構造では、一般に、剛性や振動減衰を高める手段として、隣り合う翼を連結する翼連結構造が採用される。従来のテノン(ほぞ)かしめシュラウドやタイワイヤなどの連結構造では、(1)連結部材と翼の連結部付近に応力集中が起きやすい、(2)組立の作業性が悪いなどの問題があった。これに対して、CCB構造では、連結部材であるカバーやタイボスを翼と一体に成形することにより、応力集中を緩和している(図4参照)。

一体成形された連結部材による翼連結作用は、回転中の遠心力による翼のねじり戻り(アンツイスト)を、隣接翼のカバーやタイボスどうしの接触面で拘束することによって得られる。この結果、翼構造は、すべての翼が連結された全周1リング翼構造となる。全周1リング翼構造は、数本の翼を単位とする群翼構造に比べて回転中の共振点が少ないという利点を持っていることが知られている。

CCB構造では、従来構造に比べて接触連結による振動減衰効果が大きいため、共振応力を低減できるだけでなく、ランダム振動応力の低減や、フラッタの抑制に大きな効果を持っている。

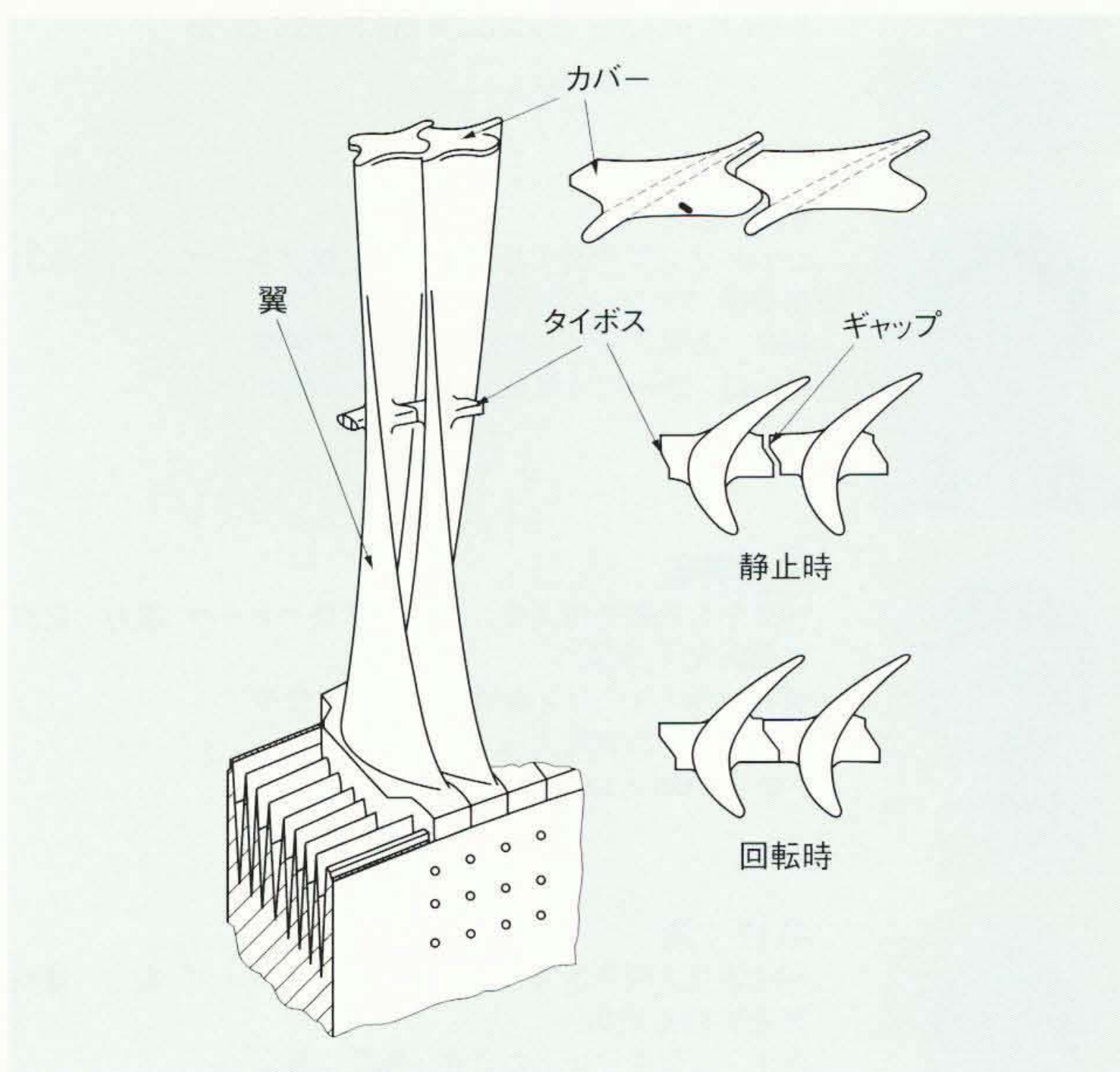


図4 CCB構造の概要

連結部としてカバーとタイボスを持つ。カバーは回転開始と同時に接触連結し、タイボスは回転途中で接触連結する。

4 信頼性設計技術

4.1 強度特性解析技術

長翼に定常的に作用する変形や応力は、主として遠心力によって引き起こされる。これに対する設計手段として、通常、蒸気曲げ力と運転温度場を考慮し、有限要素法による解析が行われる。CCB構造は、カバーやタイボスの接触面で遠心力によって発生するアンツイストを拘束することにより、隣り合う翼を連結する構造である。そのため、強度設計では、カバーやタイボスの接触を考慮した非線形接触大変形解析を用い、定格回転時の強度評価を行っている。

構造解析結果の例を図5に示す。このような解析により、翼面の最大応力の発生位置、カバー、タイボスなどの連結部材周りの応力分布をチェックし、必要に応じて翼形の修正を加える。一方、翼形の性能設計では、回転時の翼変形を考慮しておくことが重要である。この解析

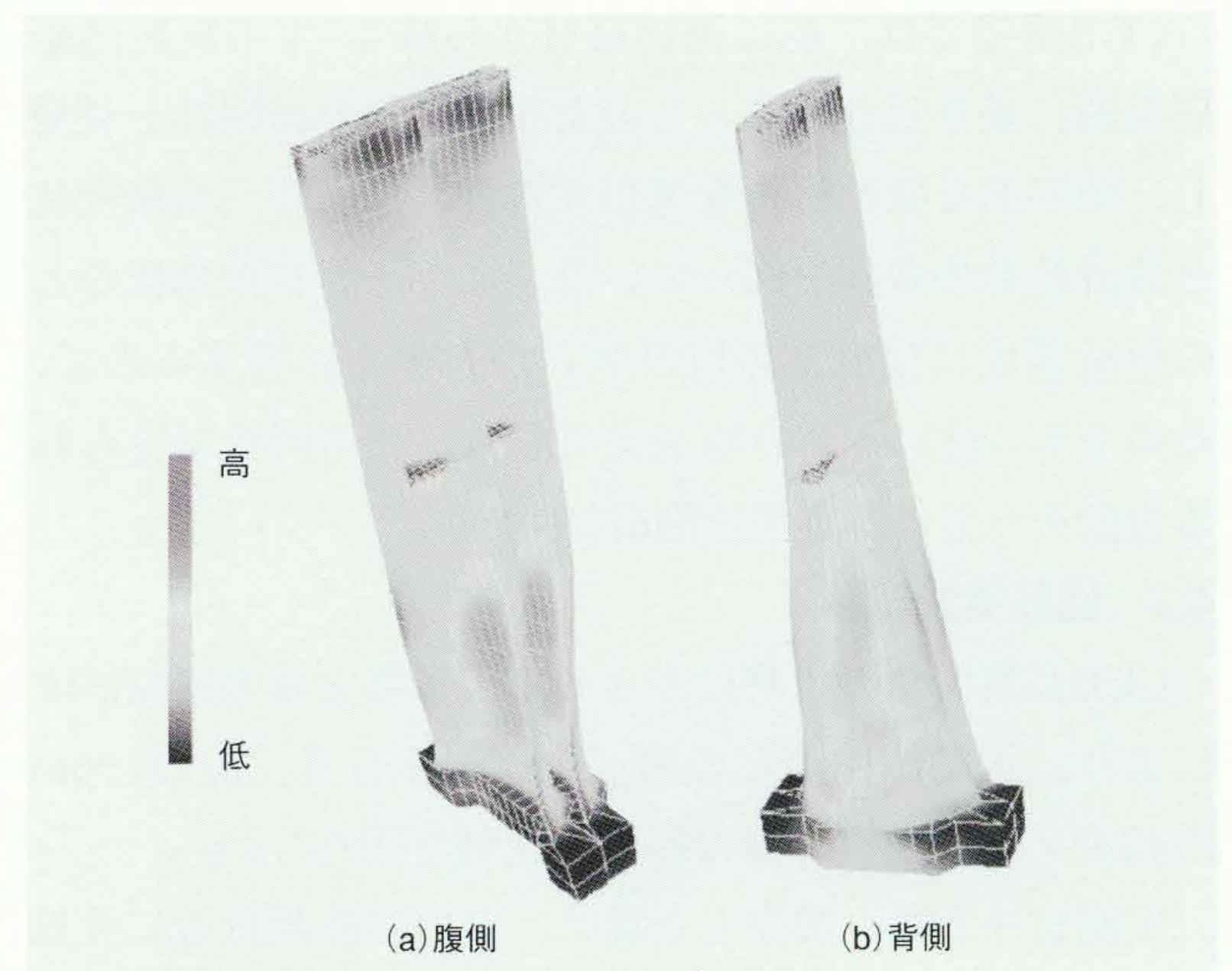


図5 CCB長翼構造の解析例(応力分布)

接触を伴う大変形解析により、応力分布や翼変形量が精度よく予測できる。

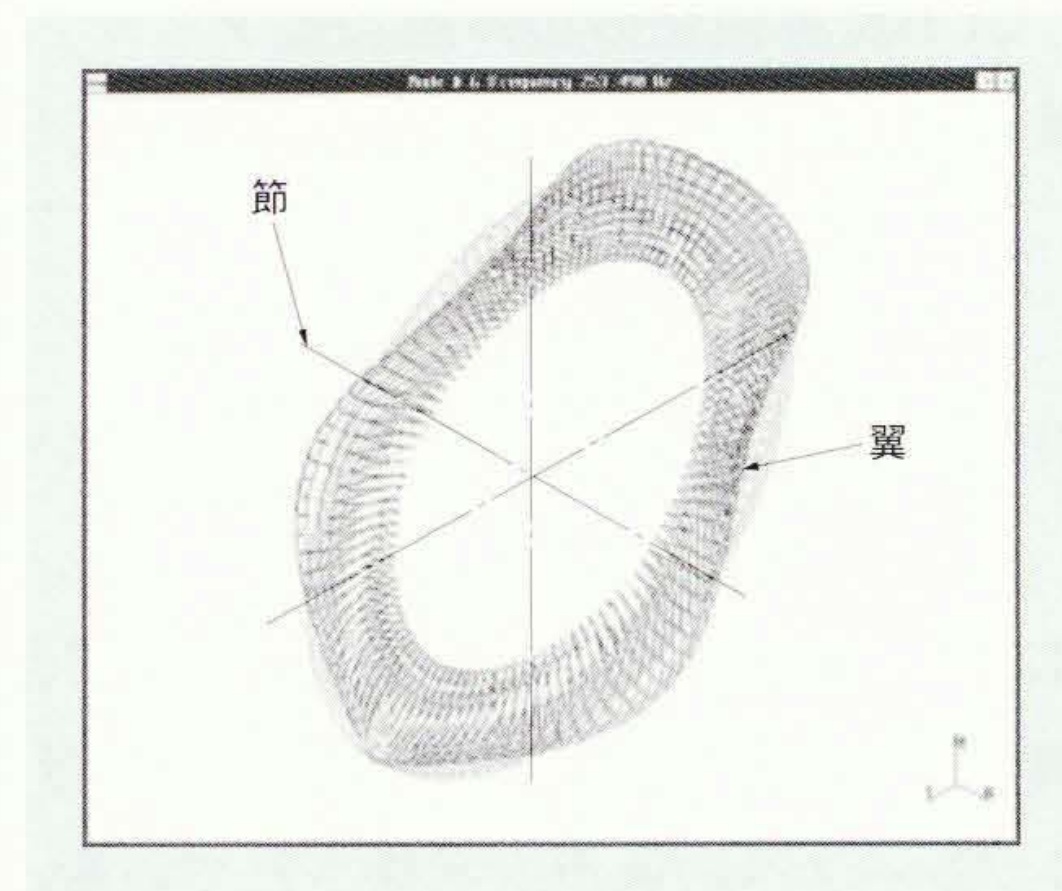


図6 振動モードの解析例

全周の振動モードが高速・高精度に計算できる。

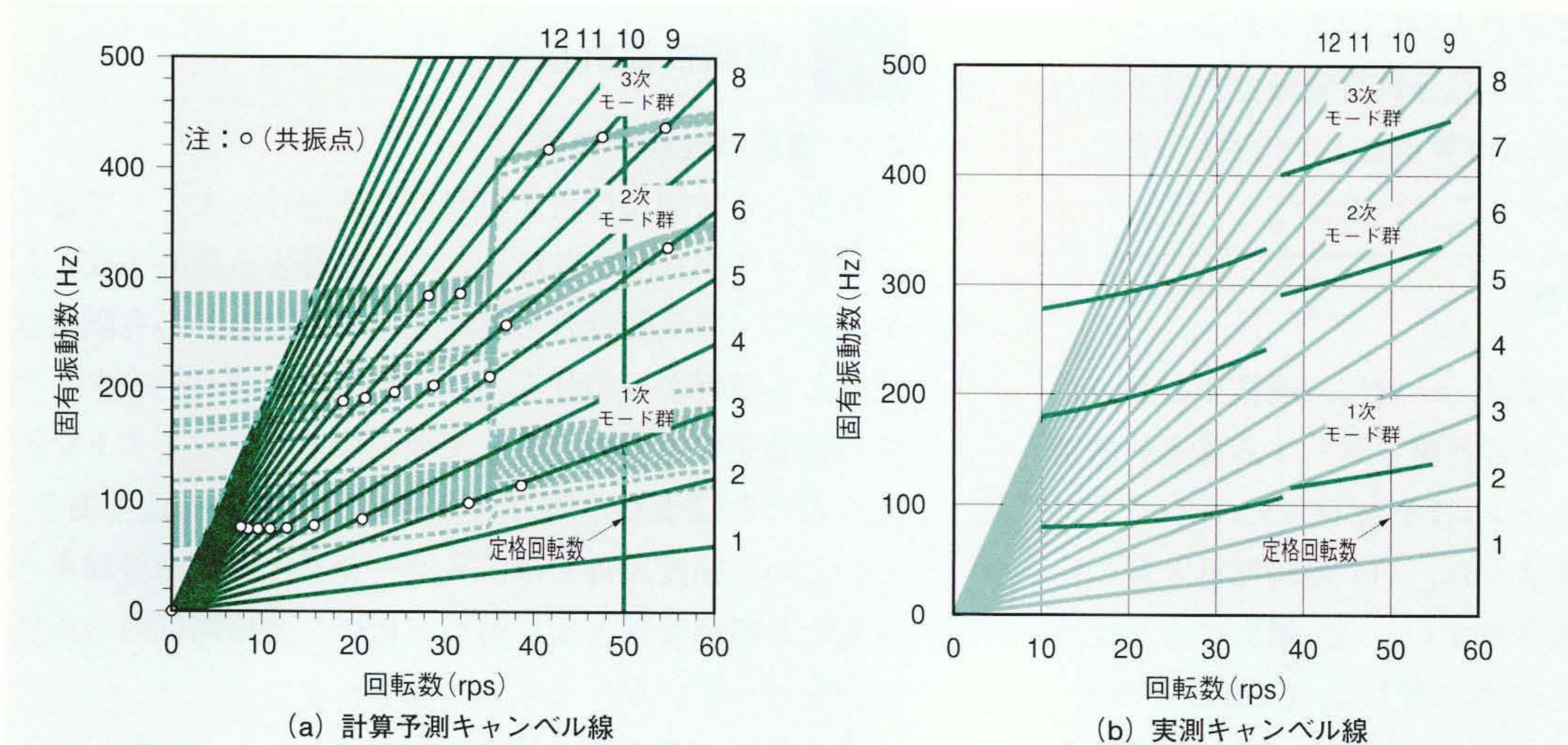


図7 キャンベル線の比較

計算予測と信頼性検証試験の両方で、定格回転数近傍に共振点のない良好な振動特性が確認できた。

では、高い精度で回転時の翼変形を見積もることができ
るため、あらかじめ回転時の翼形変形量を考慮した性能
評価を行うことが可能である¹⁾。

4.2 振動特性解析技術

CCB構造では、翼と連結部材から成る1本の翼構造が
周期的に繰り返される。このような構造の周期性を利用
し、効率的な振動解析を適用することにより、高精度化
と設計時間の短縮を図っている。また、固有振動数など
の解析精度に接触部の取り扱いが大きく影響するので、
そのモデル化にくふうを加えている。この解析で得られ
る振動モードの計算例を図6に示す。

4.3 回転実証試験

CCB長翼開発の最終段階として、実物大翼の回転試験
により、振動特性などの検証、確認を行う。3,000 rpm
用43インチ(109 cm)翼の振動特性例を図7に示す。

実測結果から、開発した翼は、定格回転数付近に共振
点がなく、良好な振動特性を持つことが確認できる。ま
た、途中の回転数変化に伴う振動特性の変化なども、実
測と計算でよく対応していることが確認できた。

なお、CCB長翼開発のスピードアップと振動予測精度
の向上については、CCB長翼開発の積み重ねとフィード
バックが大きく貢献していると考えている。

5 おわりに

ここでは、CCB長翼の特徴と、最近の設計技術につい
て述べた。

これらCCB長翼については、顧客ニーズにこたえて、
現在も継続して新翼を開発中である。新翼は、新規プラ
ントだけでなく、リプレースへの適用も考慮されている。

日立製作所は、今後も、顧客の多様化するニーズにこ
たえる、高効率・高信頼性のCCB長翼を、タイムリーに
提案していく考えである。

参考文献

- 1) R. Kaneko, et al.: Development of New 26-in. Blade with High Reliability and Efficiency, Proc. J.P.G.C., 137-143 (Oct. 1989)
- 2) 齊藤, 外: 3000 rpm用43インチ最終段翼の開発, ターボ機械, 27, 8, 495~501 (1999.8)

執筆者紹介



町田雅人

1986年日立製作所入社, 電力・電機グループ 火力・水力
事業部 タービン設計部 所属
現在, 蒸気タービンの設計・開発に従事
E-mail: masato_machida @ pis. hitachi. co. jp



依田秀夫

1998年日立製作所入社, 電力・電機グループ 火力・水力
事業部 タービン設計部 所属
現在, 蒸気タービンの設計・開発に従事
E-mail: hideo_yoda @ pis. hitachi. co. jp



齊藤英治

1987年日立製作所入社, 電力・電機グループ 電力・電機
開発研究所 所属
現在, 蒸気タービンの研究・開発に従事
日本機械学会会員
E-mail: eiji-a_saitou @ pis. hitachi. co. jp



名村 清

1968年日立製作所入社, 電力・電機グループ 電力・電機
開発研究所 所属
現在, 蒸気タービンの研究・開発に従事
工学博士
日本機械学会会員
E-mail: kiyoshi_namura @ pis. hitachi. co. jp