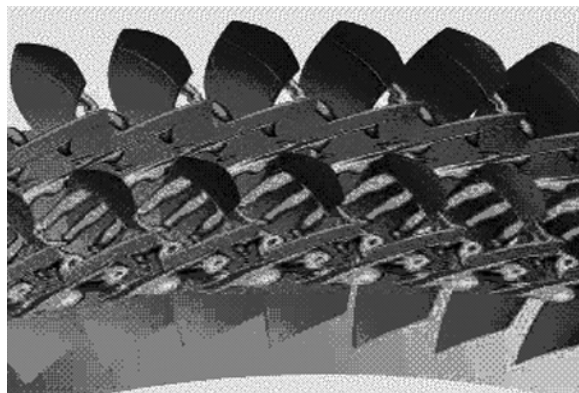


The Advanced CFD Technology for The Development of Turbo- Machinery

内 田 澄 生 宮 脇 俊 裕 宮 川 和 芳
古 賀 淳 石 坂 浩 一 茨 木 誠 一



近年、計算機能力の向上と相まって、CFD技術は急速に進展してきている。本報では当社のターボ機械における同技術の最新状況とガスタービン・蒸気タービン・遠心圧縮機・ターボチャージャ・水車・ポンプに適用し、新製品の開発及び性能・信頼性・運用性の改良に活用している具体例を紹介する。解析技術は実測データ等との対比により予測精度の確認と精度向上を継続的に行いながら実設計への適用拡大を進めている。

1. はじめに

ターボ機械に対するCFD（Computational Fluid Dynamics：数値流体力学）技術は、実設計レベルでの利用が急速に拡大しつつあり、高性能で信頼性の高い製品開発を行うための最重要技術の一つとなっている。

当社では長年にわたり同技術の高度化と利用ノウハウの蓄積に取り組んできており、近年では従来の定常流れ解析に加え、非定常流れ解析技術あるいは翼列・インペラの流れと静止流路流れを一体として解く大規模解析技術等を実用化している。これらにより非常に複雑なターボ機械内部の流れをより正確に把握し、製品の高度化に活用している。

本報ではこの状況と各種製品への適用具体例について紹介する。

2. ターボ機械の開発におけるCFD技術の最新状況

当社では、解析適用範囲の自由度の大きい市販の汎用コードと翼列・インペラ・ディフューザ等に適用範囲を特化した高精度インハウスコードの両方を使い分け製品開発に適用している。

図1にガスタービン各部の解析例を示す。タービン冷却翼、圧縮機翼列、排気ディフューザについてはインハウスコードを、また抽気・漏れ流れなどの複雑流路や、圧縮機ロータの構造部の熱伝導と流動の連成解析には汎用コードを用いている。

これらのコードの実用化に当たってはモデル試験あるいは実機の運転で取得した計測データ等を用いて十分な予測精度の検証を行っている。また、動静翼干渉の影響を知るための多段非定常流れ解析や翼列・インペラ流れと複雑な静止流路流れとの一体解析、あるいは遺伝的アルゴリズムなどの最適化手法とCFD解析を組み合わせた最適翼型設計等を実用時間レベルで行うために並列計算機を用いて計算時間の大幅な短

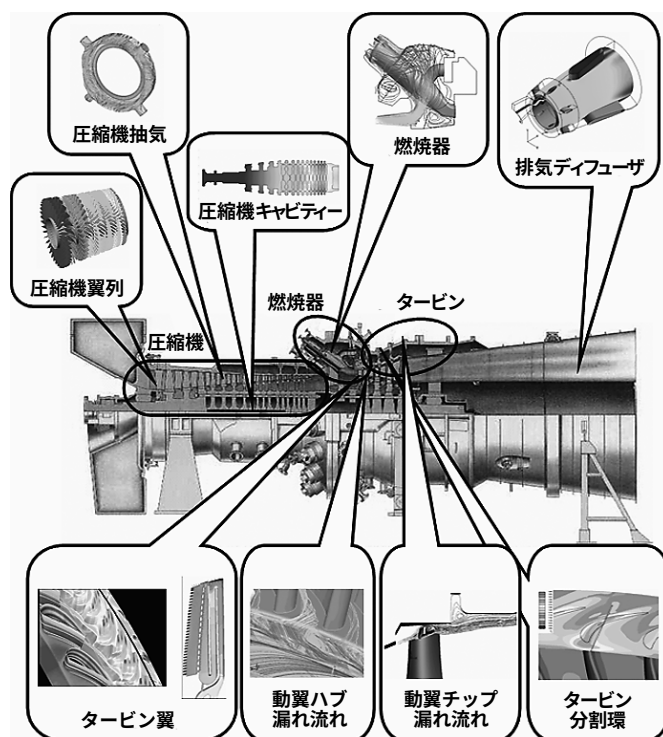


図1 ガスタービン各要素に対するCFD技術の適用

縮を進めている。

これらにより、従来実験に頼っていた開発の大半を数値シミュレーションに置き換えることが可能となってきている。

3. ターボ機械開発への適用事例

3.1 ガスタービン翼列への適用例

ガスタービン翼列のCFDは図2に示すごとく1970年代の準三次元、1980年代の三次元粘性、1990年代の多段三次元粘性、そして近年では多段非定常のCFDを用いた設計が実用化されている。当社では、さらに翼面などにフィルム冷却

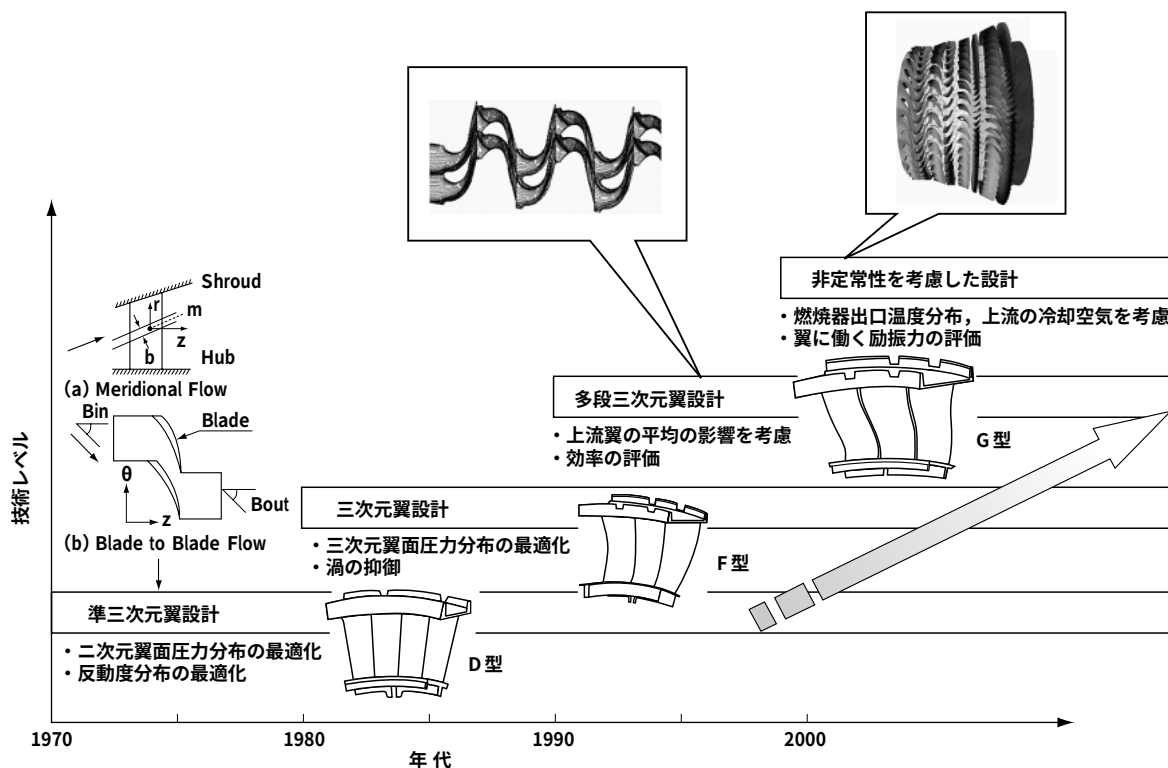


図2 ガスタービン翼列設計の変遷



図3 非定常流れ解析によるタービン翼列内部ガス温度分布

の噴き出しモデルを加え、実機の性能向上、信頼性向上に反映させている。

図3は、G型ガスタービン翼列のガス温度分布を非定常三次元粘性コードで解析した結果である。タービン上流には実測に基づいた燃焼器出口の温度分布を模擬しており、翼及びプラットフォーム面でのフィルム冷却流、またディスク冷却流を付加している。本解析により、運転条件の違いを考慮した局所ガス温度などを従来よりも正確に評価することが可能となっている。

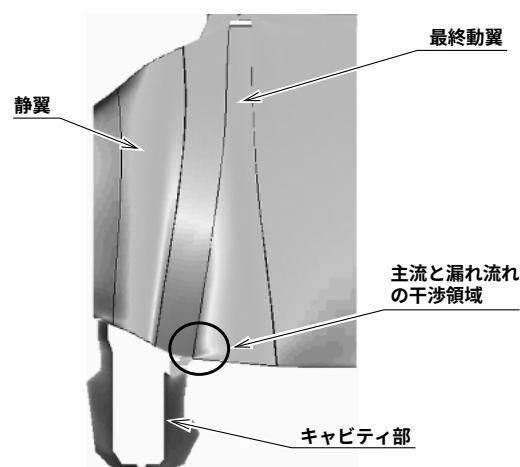


図4 低圧蒸気タービンの主流とキャビティ流れの一体解析（マッハ数分布）

3.2 蒸気タービン翼列への適用例

翼高さが短い場合や、運転時の軸方向の熱伸び量が大きく、回転部と静止部間に大きな間隙を設ける必要がある場合には、翼の先端あるいはディスクキャビティ部からの漏れ流れが主流に大きな影響を与える。

図4に蒸気タービンの低圧段落に対する、翼列主流とキャビティ流れを一体解析した例を示す。静翼出口根元部からキャビティ空間部に漏れ出した流れは、動翼入口で再び主流部に入り込んでいる。この影響により動翼入口の流れの角度等の流入条件が変化する。また、動翼先端部の漏れ流れはジェットとして、主流と干渉し流れを乱すことになるので、これらの影響を低減した設計を行うことが重要である。

図5は動翼出口の温度分布を計算値と実測値で比較した例で、翼根元及び先端からの漏れ流れの影響で両端壁部の温度が上昇する現象を正確にとらえていることが分かる。

3.3 遠心圧縮機への適用例

石油精製・石油化学プラント、ターボ冷凍機等に使用されている遠心圧縮機は、高効率と共に広い作動範囲が要求される。従来機では、インペラとペーンレスディフューザを組み合わせた構成で高効率化を図ってきたが、更なる高効率化のためにディフューザペーンが必須となってきている。このためインペラ・ディフューザペーン・リターンペーンを組み合わせ

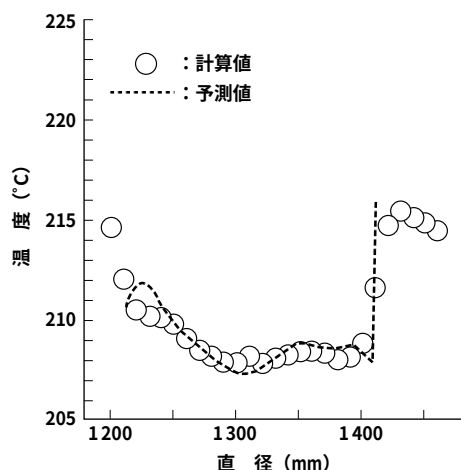


図5 最終動翼出口全温分布の比較

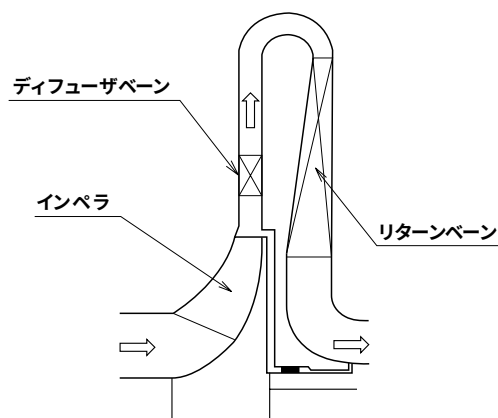
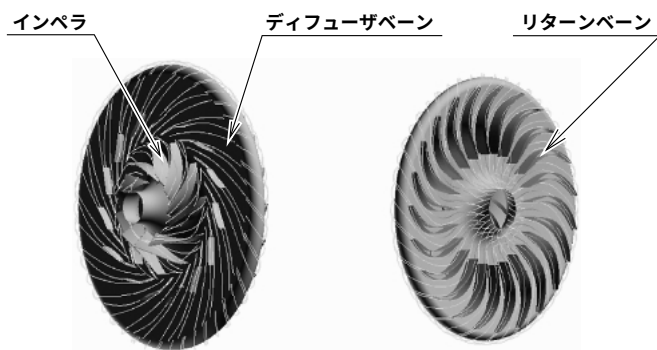


図6 ターボ冷凍機用遠心圧縮機の子午面流路



インペラ、ディフューザ部 リターンペーン部

図7 遠心圧縮機フローパターン解析例

たステージ解析を高精度に行うことが重要となっている。

図6にターボ冷凍機用圧縮機の第1段の子午面形状を、図7にフローパターン解析例を示す。

このようなステージ解析により流路の全体最適化を行い、効率向上と作動範囲の確保を行っている。

3.4 ターボチャージャへの適用例

ターボチャージャは遠心圧縮機とラジアルまたは軸流タービンで構成される。エンジンの運転条件に応じて作動点が変わるため、極めて広い作動範囲が要求される。またエンジンの高出力化に伴い、圧縮機の圧力比が向上し、吸い込み流れが音速を越え、衝撃波を伴う超音速流入となる場合も多い。このような非設計点も含めた複雑な流れをいかに正確に把握できるかが重要である。

図8に車両用ターボチャージャの遠心圧縮機インペラに対する失速点近傍の解析結果を示す。本図ではCritical point理論を用いてインペラ内部の三次元渦構造とその大きさ（無次元ヘリシティ）を可視化している。例えば主翼の前縁はく離により巻き上がった渦が、遠心力でケーシング面に集積し、スプリッタ翼前縁に衝突している様子を確認することができる。

図9に船用ターボチャージャ用高圧力比遷音速インペラにおける、シュラウド壁面の等エントロピーマッハ数のCFDと計測の比較を示す。計測は高応答圧力センサを用いて壁面

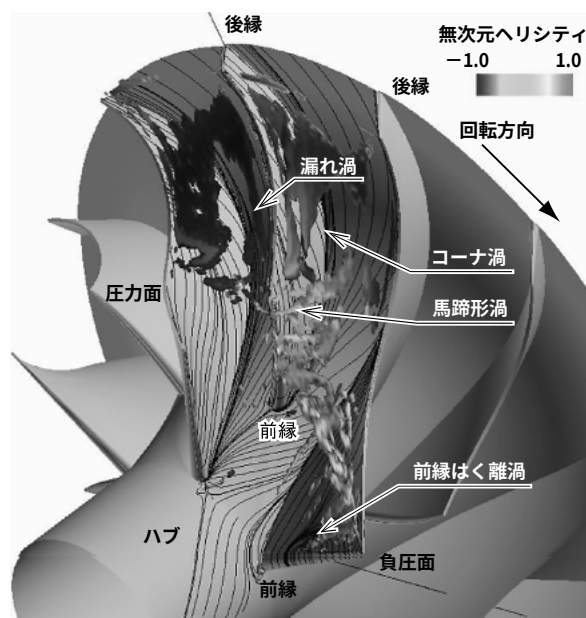


図8 車両用ターボチャージャの失速点近傍の解析例

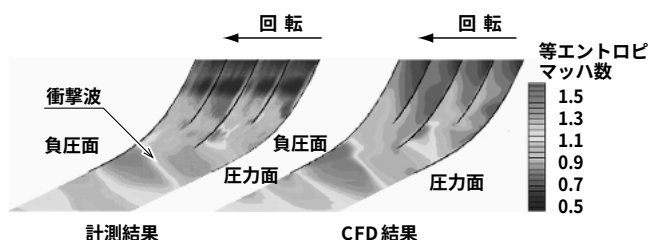


図9 船用ターボチャージャシュラウド壁面での等エントロピーマッハ数の比較

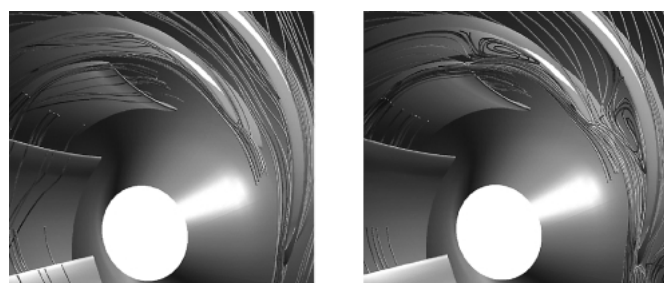


図10 遠心ポンプ逆流発生前後のフローパターン

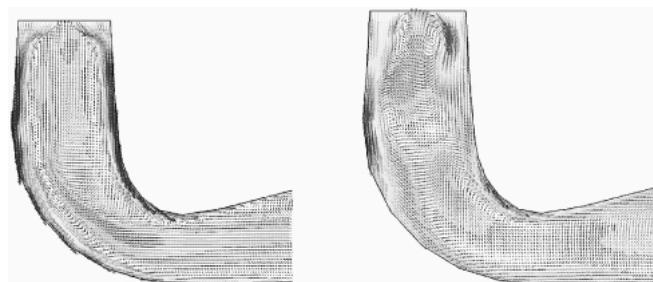


図11 水車ドラフトチューブ内のフローパターン

静圧を計測した。主翼負圧面に衝撃波が発生している様子がとらえられており、CFDと計測で流れのパターンは良好に一致していることが分かる。

3.5 ポンプ・水車への適用例

ポンプや水車などの水力機械においてもCFDを適用し、高性能化及び運用性の拡大を進めている。ポンプは設計点から締切り点までの範囲で運用される。このため、設計点のみならず低流量での運転で問題となる羽根車内部の逆流発生点の把握あるいは羽根車下流に位置するドラフトチューブ内の挙動を予測することが、運転範囲の拡大のため非常に重要である。

図10は遠心ポンプの逆流発生前後の流線を示しており、逆流点を境にフローパターンの急変が確認される。図11は水車ドラフトチューブ部に対する解析結果である。旧ランナのドラフトチューブ内には周方向に大きな流れ場の変動がみられるが、取替え後の流れ場では変動が抑制されている。新ランナの設計に際しランナ、ドラフトチューブの非定常解析を実施し、不安定性を抑制できるランナの開発を実施した。新旧ランナのドラフトチューブ壁面での振動を図12に示すが部分負荷時に生じていた大きな変動が抑制されているのが分かる。

4. ま と め

各種ターボ機械に対し最新のCFD解析技術を活用し、性

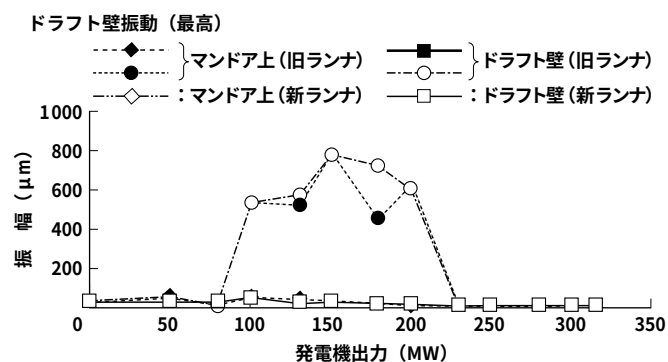


図12 新・旧ランナのドラフトチューブ壁面での振動計測結果

能・信頼性及び運用性の改善に取り組んでいる一端を紹介した。

計算機的能力向上と相まって、解析技術の精度・適用範囲は急速に進展しており、今後ますます製品開発における活用を広げてゆくことが可能と考える。一方で解析の限界も認識し、確実なエンジニアリング判断を行うために、計測あるいは実機での経験との対比を継続して行い、製品の高度化に役立てていく所存である。

参 考 文 献

- (1) Seki, W. et al, High-Efficiency Turbo Chiller, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review Vol.39 No.2 (2002) p.67~72
- (2) 古川, 翼列内の渦流れ構造解析, ターボ機械協会誌 第28巻12号 (2000) p.7~12
- (3) Ibaraki, S. et al., Aerodynamics of a Transonic Centrifugal Compressor Impeller, Trans. ASME J. of Turbomachinery Vol. 125 No.2 (2003) p.346~351
- (4) 宮川他, ランナ取替えによる既設水車のリパワリング技術の開発, 三菱重工技報 Vol.39 No.3 (2002) p.148~151



内田澄生
技術本部
高砂研究所
ターボ機械研究推進
室長



宮脇俊裕
技術本部
高砂研究所
ターボ機械研究推進
室主席



宮川和芳
技術本部
高砂研究所
ターボ機械研究推進
室主席



古賀淳
技術本部
高砂研究所
ターボ機械研究推進
室



石坂浩一
技術本部
高砂研究所
ターボ機械研究推進
室



茨木誠一
技術本部
長崎研究所
ターボ機械研究室