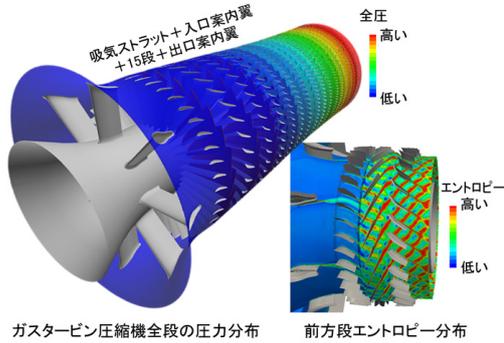


発電用ガスタービン圧縮機の 高性能化・信頼性向上を支える流動解析技術

Computational Fluid Dynamics Technology Applied to High Performance and Reliable Axial Compressors for Power Generation Gas Turbines



三戸 良介*1
Ryosuke Mito

高 学林*2
Xuelin Gao

ウォーカー トーマス*3
Thomas Walker

坂元 康朗*4
Yasuro Sakamoto

濱名 寛幸*5
Hiroyuki Hamana

高性能で信頼性の高いガスタービン圧縮機の開発においては、解析と実験検証の積み重ねにより最適な設計形状へと絞り込みを行う。最近では、数値流動解析(CFD)技術の進歩により圧縮機の全段流動解析結果を実用的な時間内で得られるため、設計段階で、定格負荷時だけでなく部分負荷時の全段の負荷分布や内部の流動現象をより正確・詳細に把握し改良設計に反映することや実験検証ケースの絞り込みを行うことが可能となっている。このように解析の役割が拡大する中で、当社は解析技術の高度化と精度向上に取り組んできた。本報では、解析手法の改良とその活用例の一端を紹介する。

1. はじめに

近年、発電用ガスタービンでは定格負荷時の効率向上とともに部分負荷時の運転範囲拡大による運用性の向上が求められている。高性能の圧縮機を開発するためにはその作動状況をより正確・詳細に把握することが重要である。特に、部分負荷条件は段によっては失速に近い流れ場となっており、圧縮機の作動状況を予測するには三次元流動解析により圧縮機全体を解析することが不可欠である。しかしながら、従来は時間の制約から三次元流動解析を圧縮機の部分的な範囲にしか適用できず圧縮機全段の挙動を予測することができなかった。

当社では、従来 CPU (Central Processing Unit) により演算されていた流動解析に対し、GPU (Graphics Processing Unit: 画像処理演算装置) による高速並列演算技術とこれに対応した流動解析コードを、オープン・イノベーションを活用して導入し世界に先駆けてターボ機械の開発に適用した。また、並行して GPU 計算機の整備を進めることにより、計算時間を従来の 1/20 と大幅に短縮した。さらに、圧縮機内部流動を詳細な計測データと比較し、プログラム内部の流動解析モデルを改良して実現象に近づけることにより、予測精度を実用レベルまで向上した。これにより、流動解析のターボ機械設計検討への適用範囲を飛躍的に広げ、ガスタービンの多段圧縮機を入口から出口まで細部にわたり詳細に評価することが可能となってきた。

2. ターボ機械の先進流動解析技術

2.1 GPU を用いた超高速・大規模並列計算技術

GPU は大量のデータに対し同じ命令を出して並列処理をする能力が CPU に比べて高い。GPU 並列演算技術は CPU の命令機能と GPU のデータ処理能力を組み合わせることで計算処理能力

*1 技術統括本部 高砂研究所 主席

*2 技術統括本部 高砂研究所 工博

*3 技術統括本部 高砂研究所

*4 技術統括本部 高砂研究所 室長

*5 三菱日立パワーシステムズ(株)ガスタービン技術本部 高砂ガスタービン技術部 グループ長

を向上させたものである(図1)。当社ではGPUに対応した流体解析コードの導入・改良とGPU計算機の整備をすすめ、従来(CPU計算)比1/20に計算時間を短縮した。これにより、圧縮機の設計段階において全段解析を実用レベルで活用することを可能とした。さらには、非定常解析により数段の圧縮機の失速点を実用時間内で予測可能となりつつある。

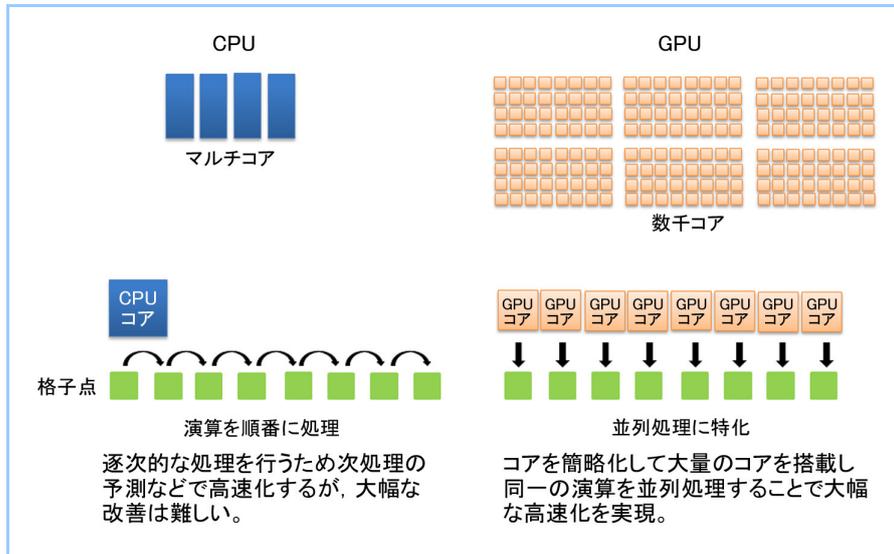


図1 GPUを用いた解析技術(従来比:約20倍速)

2.2 圧縮機内部形状の詳細模擬

計算時間を短縮したことにより、これまで簡略化しがちであったキャビティやクリアランス形状を詳細に模擬した大規模な計算格子を用いた解析を実現した(図2)。

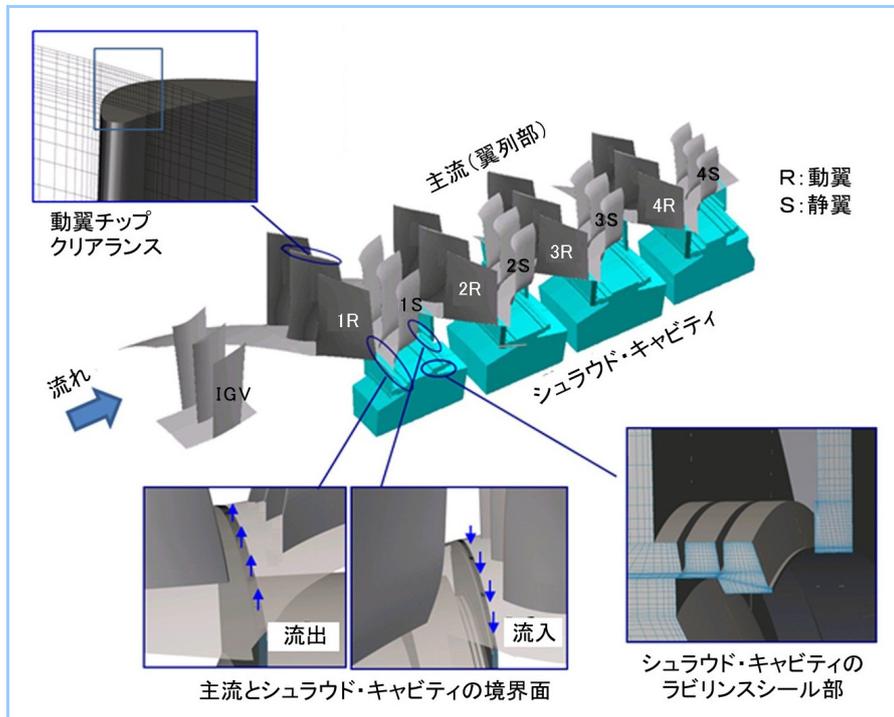


図2 圧縮機の解析モデル(主流部+隙間部)

2.3 詳細計測データの取得と解析手法の改良

発電用ガスタービン圧縮機の内部流動は前方段から後方段にかけて様相が大きく異なる。前方段は遷音速流れである。動翼では衝撃波が発生し、これが圧縮機の性能特性を支配する。一方、後方段は亜音速流れである。端壁付近の二次流れや動翼のチップクリアランス流れが支配的となる。また、回転数一定での運用であるため大気温度の変化や季節・昼夜における出力要求

の変化によって各段の圧力比が設計点に対して増減する。圧縮機全段の性能特性と内部流動は各段の積み重ねによって決まるため、全段の性能予測のためにはそれらを精度良く求める必要がある。当社では、前方段、及び、中・後方段を模擬した要素試験装置で定格負荷条件だけではなく、高圧力比側の条件、低回転数条件、動翼のチップクリアランス幅を変化させた条件で性能特性線と内部流動のデータを詳細に取得した。取得したデータをもとに図3に示す乱流モデルや解析手法の改良に取り組んできた。

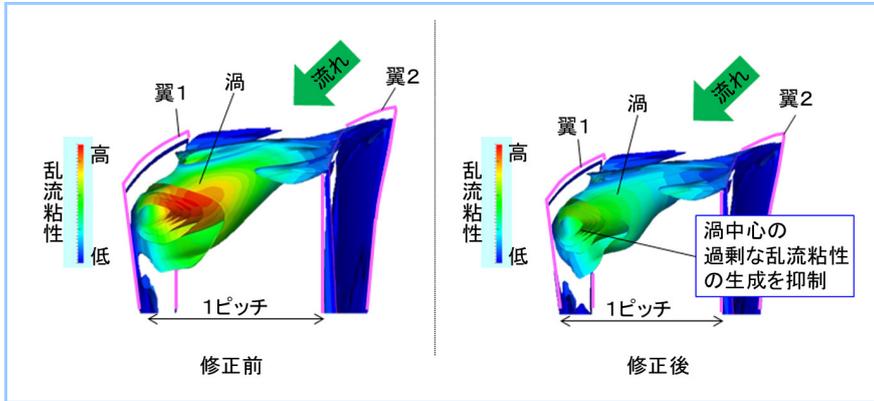


図3 乱流モデルの改良例

3. 実測値との比較による精度検証と精度向上

3.1 要素試験データとの比較

亜音速4段圧縮機試験装置にて取得した圧縮機特性線と流路内に全圧計測用のプローブを挿入して得た全圧損失係数の分布と解析結果の比較を図4、図5に示す。解析手法の改良により特性線と翼高さ方向の全圧損失係数の分布の予測精度が高まった。

3.2 ガスタービン実証設備(T地点)計測データとの比較

図6は、三菱日立パワーシステムズ(株)高砂工場内にあるガスタービン複合サイクル発電プラント実証設備(T地点)の外観である。T地点は、ガスタービン、蒸気タービン、熱回収蒸気発生器を備えた実証設備複合サイクル発電所であり、初号機の試運転時には特殊計測により各構成要素の種々のデータを取得する。

図7、図8に実機圧縮機の全段解析結果を示す。実証設備での圧縮機試運転時に取得したケーシング面の圧力分布及び流路内の全圧分布を精度良く捉えることが可能となった。

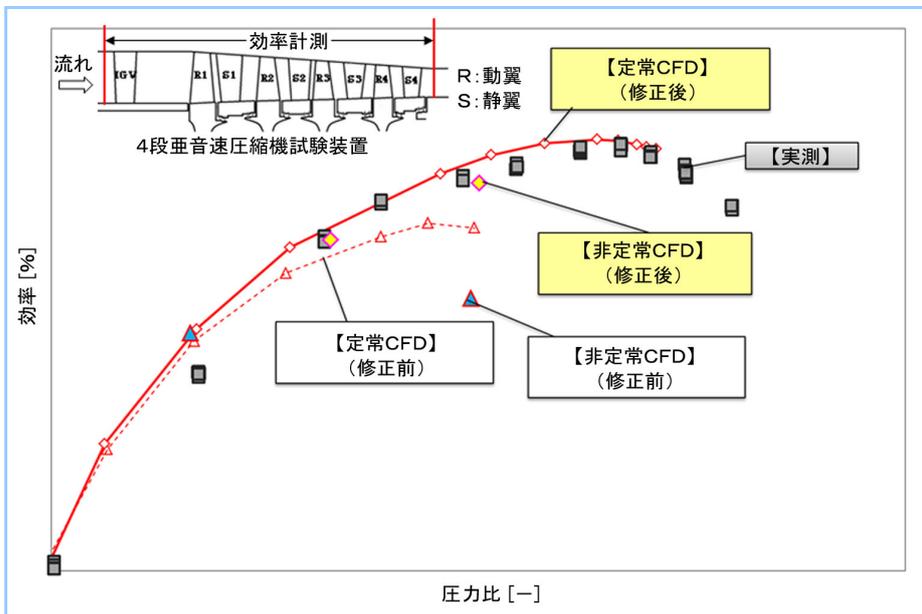


図4 亜音速4段圧縮機の圧力比-効率特性(計測 Vs. CFD)

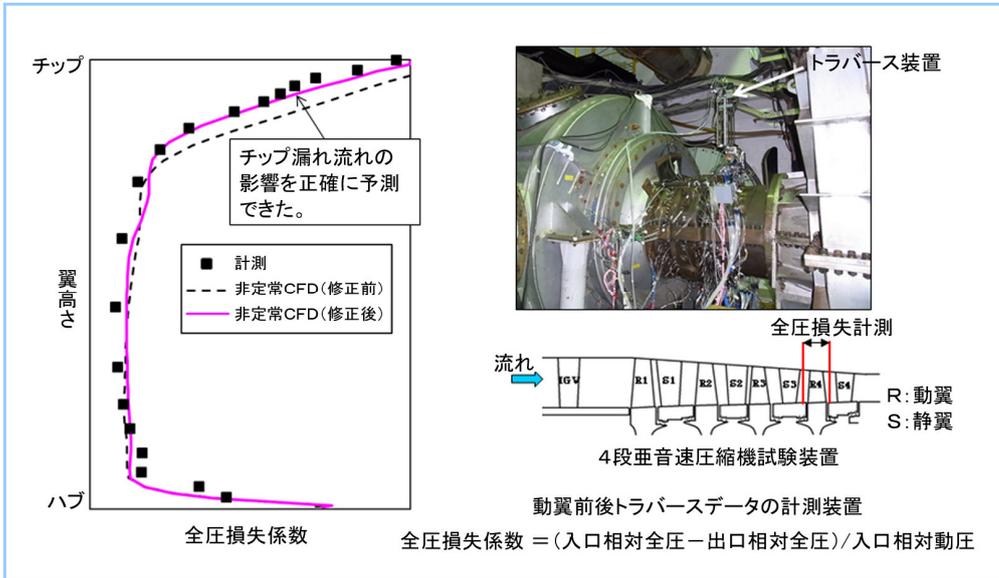


図5 4段動翼の全圧損失係数(計測 Vs. CFD)

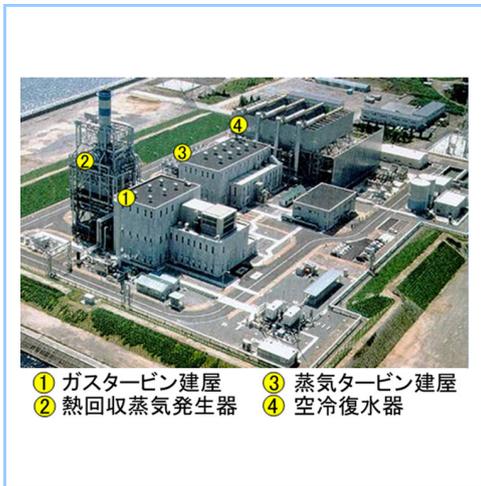


図6 高砂工場内の実証設備複合サイクル発電所(通称:T地点)

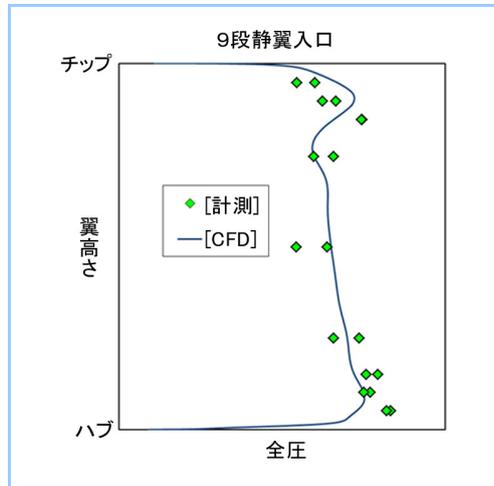


図8 実機圧縮機の段間流路内の全圧分布(計測 Vs. CFD)

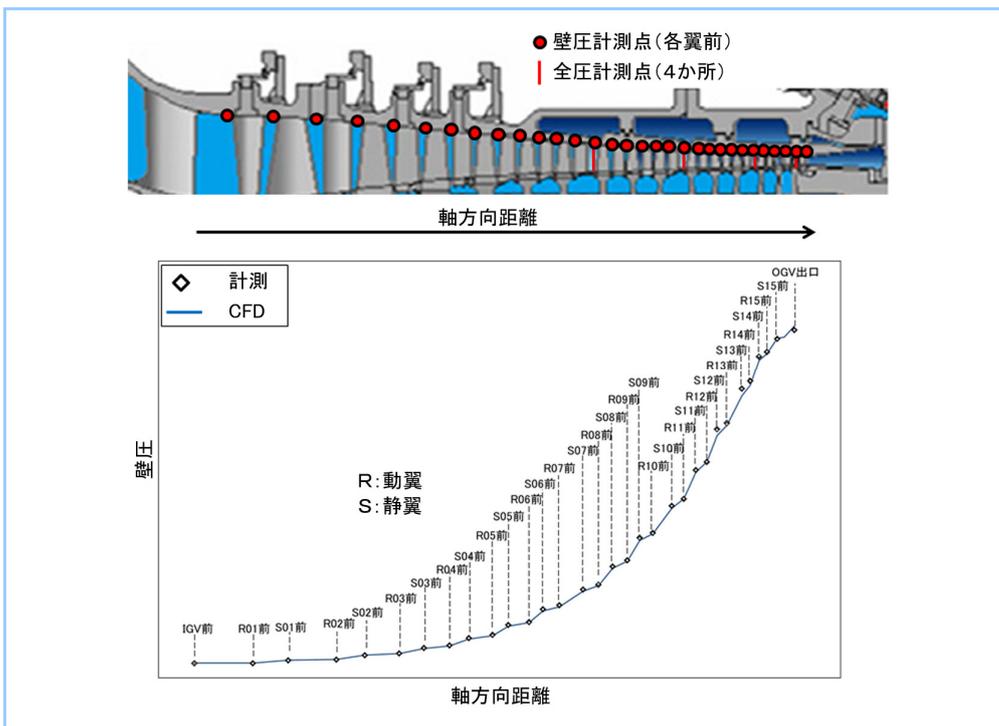


図7 実機圧縮機全段のケーシング面の圧力分布(計測 Vs. CFD)

4. 発電用ガスタービン圧縮機設計への活用例

4.1 内部流動現象の詳細把握による圧縮機空力性能向上検討

要素試験及び実機実証試験で取得した計測データをもとに予測精度を把握・向上した流動解析手法を適用して内部流動現象を詳細に把握したうえで空力性能の向上に取り組んでいる。図9に示すように、中・後方段のような動翼チップクリアランスが比較的広い条件では翼端隙間を通過する流れにより発生する渦の影響によりチップ付近で損失が増大するため、この翼端漏れ流れを制御することが性能向上において重要である。翼形状を変更した改良案の効果を流動解析で見極めて、良好なケースを要素試験で検証し、実機実証試験につなげるステップをスピーディに回すことにより、実機圧縮機の空力性能向上を短期間で達成することに努めている。

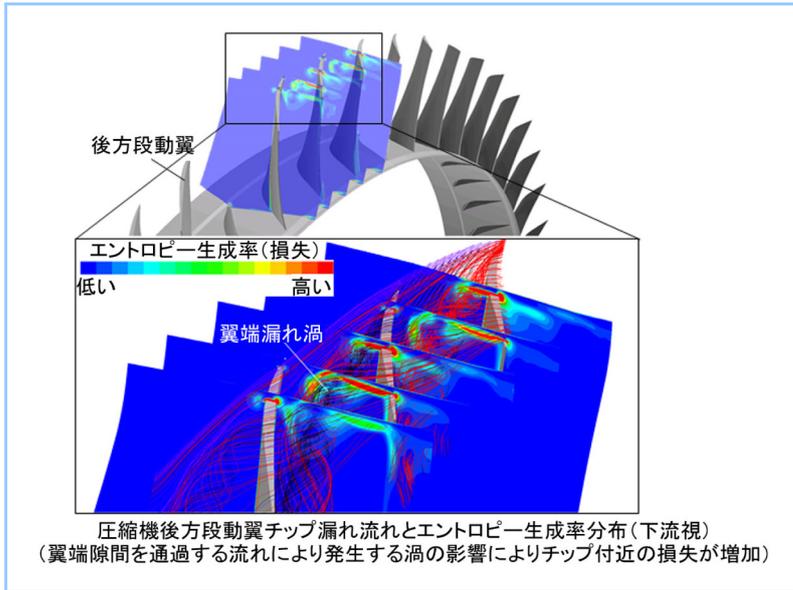


図9 後方段動翼チップ漏れ流れの詳細把握

4.2 ガスタービン起動中の圧縮機内部の圧力変動の予測

図10はガスタービン起動中の条件での圧縮機の非定常解析事例である。起動中は流量が少なく前方段で旋回失速が発生するが、そのような不安定な事象を予測することが可能となりつつある。ケーシング面の圧力変動の計測値と予測値は良好に一致した。また、この解析では失速セルが4つ発生し実測結果と一致した。

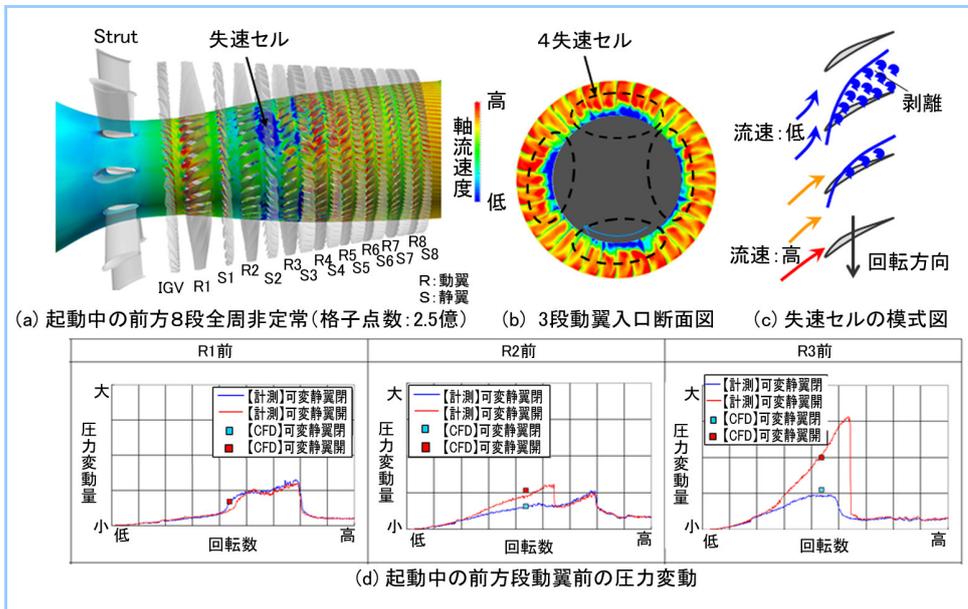


図10 圧縮機起動中の圧力変動の予測

4.3 圧縮機抽気部の主流への影響評価

圧縮機には起動中の安定性の確保、及び、タービンに冷却空気を供給するために抽気配管、抽気室、抽気スリットが設けられている。周方向に配置した配管により主流部に不均一な流れが生じるため、これらの失速特性に与える影響を解析により評価している。図 11 は①抽気配管本数、②抽気室の大きさ、③抽気スリット形状を検討するための解析モデルと解析結果の一例である。

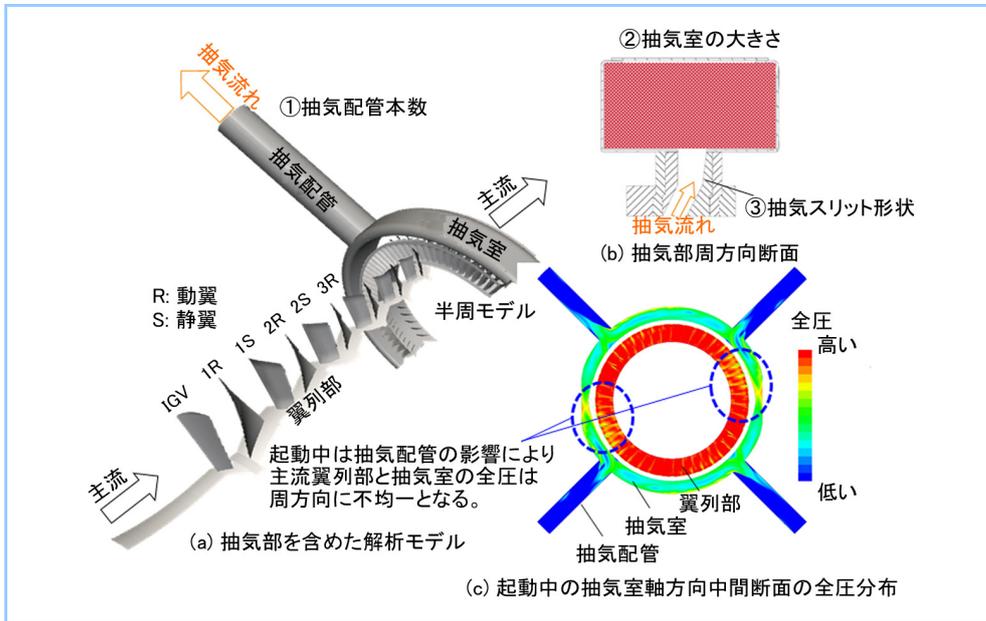


図 11 圧縮機抽気部の主流への影響評価

4.4 片吸い込み吸気形状の圧縮機前方段への影響評価

圧縮機の吸気には片吸い込みのダクトが採用される。上流に配置されたダクトの曲りの影響、入口案内翼の取り付け角の影響により流れは周方向に一樣にならないため、圧縮機の空力性能に対する影響を評価している(図 12)。

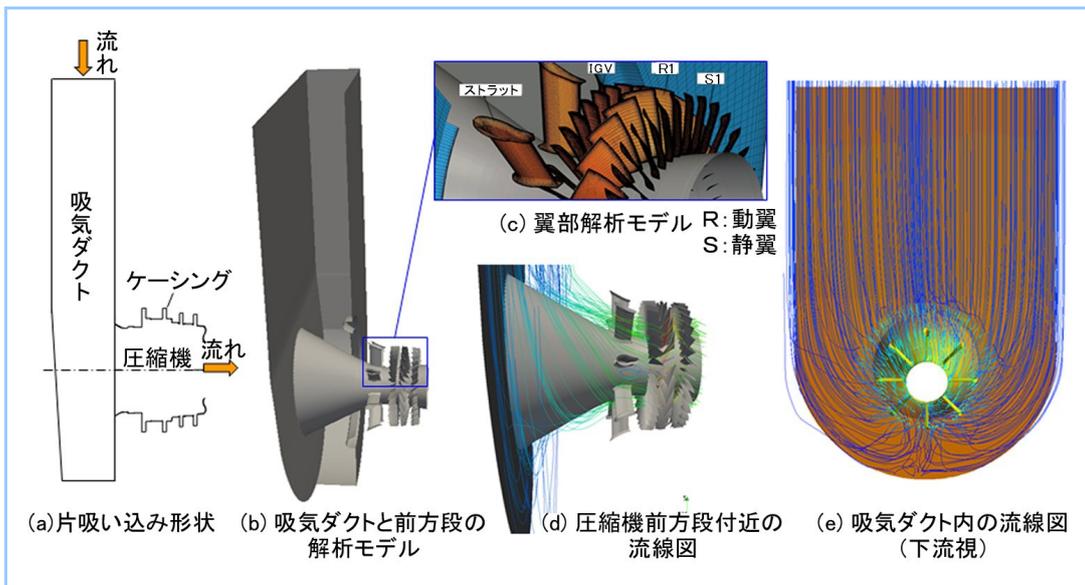


図 12 片吸い込み吸気形状の圧縮機前方段への影響評価

5. まとめ

発電用ガスタービン圧縮機の性能向上のための GPU(画像処理装置)を用いた超高速・大規模並列計算技術に関して、解析手法の改良とその活用例の一端を紹介した。計算技術の進歩に

伴いその役割は拡大しており、今後、益々高度な解析が設計検討に活用されるものと考え。一方で、その流動解析の精度検証や現象の把握のための信頼できる詳細な実験データが必要である。本報では触れていないが高精度の計測技術とそれを実現するための実験装置の高度化にもあわせて取り組んでいる。両者の技術を組み合わせて物理事象をより正確・詳細に把握して製品形状の新しいアイデアを提案し、実験検証のサイクルをスピーディに回すことで優れた製品をいち早くお客様に提供できるよう努めていく所存である。

参考文献

- (1) 羽田哲ほか, 世界初の 1600°C級 M501J ガスタービンの実証発電設備における検証試験結果, 三菱重工技報, Vol.49 No.1 (2012), P19~P24
- (2) Tobias Brandvik and Graham Pullan, An Accelerated 3D Navier-Stokes Solver for Flows in Turbomachines, ASME paper, GT2009-60052
- (3) 伊藤栄作, ガスタービンの主要コンポーネントや吸排気の CFD と最適化, 日本ガスタービン学会誌 Vol.40 No.6 2012. 11