

電力・産業機器から家電製品に至るまで、多くのシステム製品にポ ンプやファンといった流体機器が使用されている。従来からこれらの 流体機器の設計にはCFD(数値流体解析)が活用されてきたが、 近年は、環境負荷の低減・製品の性能や信頼性向上・コスト低減 要求の高まりから、より高精度で広範囲な解析が必要となってきて いる。このため、日立グループでは、産学連携も活用し、従来はと らえられなかった現象を解明するための大規模流体解析に取り組ん でいる。また、トレードオフの関係がある中での多目的最適化設計 手法や、特徴あるキャビテーション解析手法の製品設計への適用も 推進している。

## 1. はじめに

省エネルギー性能の追求は、家電製品から電力・産業機 器に至るまで、多くの製品で重要な開発課題となってい る。家電製品では、省エネルギー競争が毎年繰り広げられ ており、細部の損失も見逃さないというほどの開発が続けら れている。電力・産業機器ではわずかな効率差から生じる影 響も大きいため、他社を上回る高効率製品の開発が重要と なっている。こういった多くのシステムにはポンプやファン といった流体機器が使用されており、CFD (Computational Fluid Dynamics:数値流体解析)は基盤技術として、それ ら数多くの製品設計に適用され、成果を上げてきた。

しかし,流体解析が日常の設計業務で活用されてくるよ うになるほど,特徴のある製品を生み出すためには,設計 手法としての流体解析の活用方法の工夫や,通常の解析で は得られない現象解明への取り組みなどが必要になって くる。

ここでは、日立グループが推進する流体解析基盤技術の 適用事例として、大規模流体解析技術による空力音源の可 視化やポンプの不安定特性解明、多目的最適化設計技術に よるブロワの高効率と不安定現象抑制、およびキャビテー ション解析技術によるポンプ羽根車の損傷位置予測と原子 炉内部構造物の残留応力改善予測について述べる。

# 2. 大規模流体解析技術

ファンの空力音やポンプの小流量時の不安定特性を予測 するためには,詳細な流れを非定常現象として解析する必 要がある。こういった現象の予測に向けて,東京大学と共 同で大規模流体解析技術の開発を進めている。以下に,東 京大学が主体となって開発している,非圧縮LES(Large Eddy Simulation)に基づく大規模流体解析に適した公開ソ フトウェア「FrontFlow/blue(FFB)」を用いた解析適用事 例を示す。

## 2.1 ファンの空力音源可視化

住環境や職場環境における快適性を高めるためには,冷 凍・空調機器,家電製品,情報機器などの製品に使用され るファンの低騒音化が重要である。低騒音のファンを開発 するためには,空力音源を可視化する技術が必要である。 ファンの空力音は,流れの剝離や渦による揚力変動に起



図1 | ファン空力音源の可視化事例 計算モデルを(a)に示す。解析の規模は、全体で1,600万メッシュ、翼間で 280万メッシュとした。Powellの空力音源を(b)に示す。

因する。そのため空力音源を可視化するためには, 翼面に 発生する流れの剝離や翼端渦の時間変動をとらえる必要が ある。前述の流体解析ソフトウェアFrontFlow/blueとスー パーテクニカルサーバ「SR16000」を活用することで, こ の現象をとらえるための,大規模な非定常流体解析が可能 である。

空力騒音の発生部位を調べるために、解析結果からファ ンの空力音源の可視化<sup>1)</sup>を行った(図1参照)。ここで示し た Powellの空力音源 [div ( $\omega \times v$ )。 $\omega$  は渦度、v は速度] と は、渦の変形による音源を表す指標である<sup>2)</sup>。同図では、 空力音源は翼端と前縁付近に集中しており、翼端と前縁が 騒音に影響を与えていることを示唆している。このように 解析によって音源を特定することが、低騒音化のアイデア 創出に生かされている。

## 2.2 ポンプの不安定特性解明

ポンプでは、小流量域において流量や圧力が周期的に変 動し、不安定な状態になることがある。このため、ポンプ の設計においては、不安定特性を抑制し、広い流量範囲で 安定して動作できるようにする設計技術の構築(作動範囲 の拡大)が必要とされている。

不安定特性は、翼からの流れの剝離などに起因する。そ のため不安定特性を予測するためには、非定常で複雑な流 れの予測が可能なLESによる大規模な流体解析を実行す る必要がある。

計算格子7,800万メッシュの大規模流体解析による不安 定特性の要因解明を東京大学と共同で試みた<sup>3)</sup>(図2参 照)。同図では, 翼後縁の圧力が局所的に増大し, この圧 力の増大が流れの剝離を引き起こしていることがとらえら れている。この流れの剝離は隣の翼にも影響を及ぼしてお り, これらが不安定特性の要因であることを確認できた。 このような詳細な分析によって複雑な流動現象を解明する ことで, 新たな設計指針の創出に取り組んでいる。



図2 | ポンプの小流量域での解析結果 翼面上の圧力分布と流線を(a)に,翼吸込み側の流線を(b)に示す。大規模 流体解析によって詳細な分析が可能となる。

# 3. 多目的最適化設計技術

トレードオフの関係にある複数の製品特性(目的関数) を同時に最適化する手法として,多目的最適化手法があ る。日立グループは,多目的最適化手法の一つである多目 的遺伝的アルゴリズムと,CFDとを組み合わせた最適化 手法を開発し,掃除機用ファンなどの開発に適用してい る<sup>4)</sup>。以下に,浄水場で用いられている下水曝(ばっ)気 用遠心ブロワの効率向上と,作動範囲拡大を検討した事例 を示す。

## 3.1 遠心ブロワ羽根車の多目的最適化問題の設定

遠心ブロワは,比較的小流量で高圧力な仕様を求められ るさまざまな製品に適用される。遠心ブロワの構成要素の 一つである遠心羽根車においては,仕様点効率の向上とと もに前述のポンプ同様,作動範囲の拡大が求められてい る。一般的に,仕様点効率向上と作動範囲拡大はトレード オフの関係にあり,設計時には両者の調整が重要となる。

遠心羽根車の作動範囲をCFDで評価するには,単純に は仕様点,および,それよりも小流量側の複数流量点での 遠心羽根車性能をCFDで評価し,多目的最適化を行えば よい。しかし,これでは計算回数が膨大になってしまう。 そこで,仕様点のみのCFD結果から羽根車作動範囲を評 価する手法の開発を行った。

妹尾ら<sup>5)</sup>によれば、遠心羽根車の入口からスロート(翼 間流路において、流路断面積が最も狭まる部分)までの相 対速度の減速比が増大すると、スロート付近の境界層厚み が増大し、流れが翼から剝離する場合がある。事前検討の 結果、今回の対象の羽根車もスロート付近で剝離が発生し ており、この剝離は仕様点におけるスロート減速比  $W_1/W_{th,s}$ が大きいほど、大流量側で発生することがわかっ た〔図3(a)参照〕。つまり、 $W_1/W_{th,s}$ が小さいほど、小流 量側まで剝離、失速を抑制し、作動範囲を拡大できる可能 性がある。

そこで、CFDにより求めた仕様点の断熱効率 $\eta_{imp}$ なら びに $W_1/W_{th,s}$ を目的関数として、羽根車形状の最適化を実施した<sup>6)</sup>。

## 3.2 最適設計結果

 $\eta_{imp} \& W_1 / W_{th,s} \& c$ 同時最適化したときの解の分布から, これら二つの目的関数には明確なトレードオフ関係が存在 することが確認できる [図3(b)参照]。そしてこれら解の 中から,仕様点効率と作動範囲のバランスがよい解を,最 適形状として選択した。詳細解析の結果,従来に対し最適 形状は,効率+1.8%,作動範囲+5% という効果を確認で きた [図3(c) 参照]。



#### 図3 遠心ブロワ多目的最適化設計

羽根車の概要を(a)に示す。仕様点のスロート減速比の大小で,遠心羽根車作動範囲を評価できる。最適計算の結果を(b)に示す。縦軸がスロート減速比,横 軸が無次元効率を示しており,図中右下にあるほど高性能である。また,詳細解析結果を(c)に示す。選択した最適形状は効率が向上し,失速点が低流側に移 動して,作動範囲が拡大している。

このように,評価指標(目的関数)の工夫によって,多 目的最適化の適用対象を広げることができた。前述した大 規模流体解析による現象解明から新たな評価指標を見いだ すことで,最適化設計の適用先はさらに拡張できるものと 考えられる。

## 4. キャビテーション解析技術

キャビテーションは液体中の低圧部で気泡が発生する現 象であり、この気泡が消滅する際、周囲に高い衝撃エネル ギーを放出する場合がある。この衝撃エネルギーが材料に 作用すると損傷を招くが、一方では残留応力の改善に役立 つという一面もある。そこで10<sup>6</sup>倍のスケール比を有する 流れと気泡の圧力相互作用を扱える解析技術を開発し、マ イクロ秒の時間スケールで急激に膨張・収縮する気泡運動 を予測するとともに衝撃エネルギーの見積もりを可能とし た<sup>7)</sup>。以下に、このキャビテーション解析技術を産業用大 型ポンプや原子力予防保全に適用した事例を示す。

## 4.1 ポンプ羽根車の損傷位置予測

ポンプは各種工業プラント,上下水道,自動車といった 社会インフラを幅広く支える流体機器であり,その信頼性 確保は重要である。ポンプにおいてキャビテーションによ る損傷の発生やその位置が予測できれば,設計段階であら かじめ対策が可能となる。

従来,大型ポンプのキャビテーション損傷位置は,小型 の模型ポンプを試作し,実験的に検証されてきた。羽根車 に塗料を塗布して一定時間ポンプを運転すると,衝撃エネ ルギーが強い場所では塗料が剝離し,損傷位置を特定でき る。開発した解析技術を用い,回転流れ場における多数の 気泡の膨張・収縮挙動や気泡核分布を世界で初めて予測し, それらに基づいて衝撃エネルギー分布を見積もった<sup>7)</sup>。これにより、性能だけでなく信頼性も考慮した短期間設計が可能となった(図4参照)。

## 4.2 原子炉内部構造物の残留応力改善予測

原子力発電プラントの原子炉内部構造物の溶接部には引 張残留応力が生じ、材料の鋭敏化・腐食環境との重畳に よって応力腐食割れの原因となる場合がある。

ウォータジェットピーニングは、応力腐食割れを防ぐ予防保全技術である。水中でノズルから噴射したキャビテー ション噴流を溶接部に衝突させ、衝撃エネルギーの作用に よって、残留応力を引張側から圧縮側に変化させること で、応力腐食割れの発生リスクを低減できる。

従来,原子炉内部構造物を模擬した試験体にウォータ ジェットピーニングを施工し,残留応力分布を計測するこ とでキャビテーション噴流の噴射位置を選定してきた。し かし,この解析では衝撃エネルギーと残留応力値の高い相



図4 ポンプ羽根車のキャビテーション損傷発生位置 小型模型ポンプの塗料試験結果を(a)に示す。また,この解析による衝撃エ ネルギー分布を(b)に示す。キャビテーションによって塗料が剝離した領域 と衝撃エネルギーが高い領域はよく一致している。



#### 図5 原子炉内部構造物の残留応力改善

原子炉内部構造物を模擬した試験体の塗料試験結果を(a)に示す。キャビテー ション噴流によって塗料が剝離した領域では高い圧縮残留応力値が計測され る。また、この解析による衝撃エネルギー分布を(b)に示す。塗料が剝離し た領域と衝撃エネルギーが高い領域はよく一致している。

関性を定式化することにより、衝撃エネルギーに基づいた 残留応力の見積もりが可能となった<sup>8)</sup>。その結果、低コス トでさらにきめ細かい施工法の検討が可能となった(図5 参照)。

# 5. おわりに

ここでは,流体解析基盤技術の製品設計への適用事例に ついて述べた。

流体解析が製品設計に活用されるようになって久しい が,計算機性能の向上や新たな解析手法の開発によって, 設計現場で適用する解析はより高度なものになってきてい る。また,適用を進めるにつれ,新たな課題やニーズも出 てきている。それらの課題に応え,技術革新を製品開発に 生かしていくためにも,日立グループの基盤技術として, 継続して流体解析基盤技術の革新を図っていくことが重要 である。

## 参考文献

- 1) 鹿園,外:高効率冷凍・空調・給湯機器の最新技術,シーエムシー出版(2011.11)
- 加藤,外:プロペラファン内部流れのLES解析と空力騒音源の可視化,可視化情報学 会誌, Vol.23, No.91, 192-198 (2003.10)
- Y. Yamade, et al.: Large Eddy Simulation of Internal Flow of a Mixed-Flow Pump, Proceedings of the ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting, FEDSM2009-78416 (2009.8)
- K. Sugimura, et al.: Multi-Objective Robust Design Optimization and Knowledge Mining of a Centrifugal Fan That Takes Dimensional Uncertainty Into Account, ASME Paper No.GT2008-51301 (2008.6)
- 5) 妹尾,外:超音速遠心羽根車の実験的研究(第一報,羽根車特性と作動範囲),日本 機械学会論文集(B編)45巻,390号,156-163(1979.3)
- K. Hiradate, et al.: Improvement in Efficiency and Stall Margin of Centrifugal Blower Impeller by Multi-Objective Optimization, ASME Paper No.GT2011-45351 (2011.6)
- 7) 深谷,外:気泡流モデルキャピテーション流れ解析による遠心ボンプ内のキャピテー ション強さおよびエロージョン発生領域の予測,日本機械学会論文集(B編),74巻, 746号,2126-2123(2008.10)
- M. Fukaya, et al.: Mitigation of Stress Corrosion Cracking Based on Residual Stress Improvement by Water Jet Peening (WJP), Proc. of ASME 2011 Pressure Vessels & Piping Division Conference, PVP2011-57493 (2011.7)

### 執筆者紹介

## 舩橋 茂久

1993年日立製作所入社,日立研究所エネルギー・環境研究センタ 応用エネルギーシステム研究部所属 現在,流体機器の高効率化,低騒音化の研究開発に従事 日本機械学会会員

#### 岩瀬 拓



1995年日立製作所入社,日立研究所 機械研究センタ 高度設計シミュ レーション研究部 所属 現在,流体機器の高効率化,低騒音化の研究開発に従事 技術士(機械部門),博士(工学) 日本機械学会会員,ターボ機械協会会員,日本技術士会会員

#### 平舘 澄賢



#### 深谷 征史

1997年日立製作所入社,日立研究所 機械研究センタ 高度設計シミュ レーション研究部 所属 現在, 流体機器の高性能化・高信頼性化の研究開発に従事 博士(工学) 日本機械学会会員,日本原子力学会会員,ターボ機械協会会員