

設計フロントローディングを加速する熱流体シミュレーション

Frontloading Engineering Design Process by Fluid and Thermal Simulation

渡邊 昌俊 Masatoshi Watanabe

清水 勇人 Hayato Shimizu

石井 英二 Eiji Ishii

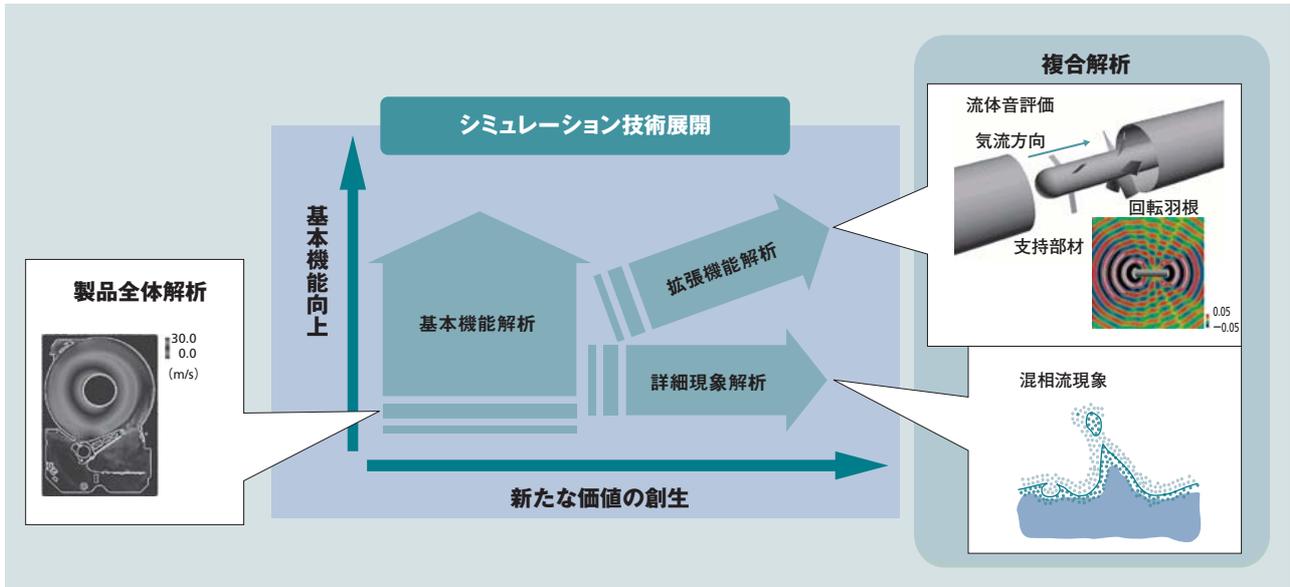


図1 熱流体シミュレーションを取り巻くさまざまな技術発展

熱流体の解析から始まったシミュレーション技術は、製品の部品性能解析から全体性能解析へと発展し、製品の基本機能の向上に貢献している。また、製品の高機能化や付加価値向上に向け、単なる熱流体シミュレーションにとどまらず、複合現象である流体音の発生予測への拡張(マルチフィジックス化)や、混相流などの詳細現象解明(マルチスケール化)へ向けた進化を遂げている。

現在、3D-CADや市販ソフトウェアの普及に伴い、シミュレーションの設計プロセスにおける位置づけはさらに重要となり、適用フェーズの早期化(フロントローディング)と活用方法(仮想試作など)が、最終製品の信頼性や性能に深くかわるようになってきている。

産業界において熱流体シミュレーション技術は、製品全体設計へ活用されるフェーズへと移行している。さらに、流体シミュレーションを基に複合現象である流体音の予測(マルチフィジックス化)や、新たな手法により混相流解析などの詳細現象解明(マルチスケール化)といった技術の高度化が進み、製品の基本機能向上と新たな価値の創生を、解析により実現するフェーズへと進化している。

日立グループは、産学連携などを通じてシミュレーション技術の高度化を図るとともに、積極的に製品に適用し、製品の品質向上や新たな製品の分野開拓に取り組んでいる。

1. はじめに

1980年代から本格的に開発が始まったコンピュータによる流れ解析は、当初、流体機械や製品の主要部品の改良に多く用いられた。代表的な成果としては、自動車用エアフローセンサー、産業用ポンプ、高速鉄道車両などが挙げられ、純粋に流体としてのふるまいを解析するものであった。その後、1990年代後半から、流体と騒音のような、製品としての付加価値を向上するための解析機能が開発されてきた。コンピュータの世界も高度解析に用いられてきたベクトルコンピュータ(いわゆるスーパーコンピュータ)から、単独の処理能力では劣るが、複数のCPU(Central Processing Unit)で構成することにより、総合的な処理能力でベクトルコンピュータを上回る並列コンピュータへの転換期を迎えていた。この並列コンピュータを用いることにより、従来では考えられなかった規模の解析が可能となるとともに、解析にかかる時間の大幅な短縮が可能となった。

このようなハードウェア環境の変化とともに、流れ解析もさらに大規模な製品全体解析の方向と、より詳細な現象解明の

方向へ二分化していった。

ここでは、大規模な製品全体解析を可能としたボクセル解析技術と、より詳細な現象の解明の方向へ進化した複合解析技術(流体音、混相流解析)について述べる(図1参照)。

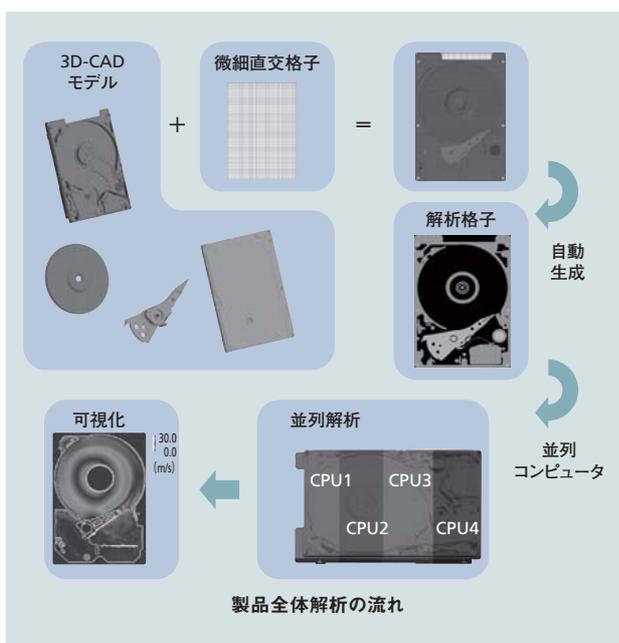
2. 製品全体解析・複合／詳細解析の背景

2.1 製品全体解析のニーズ

現在、設計業務に欠かせないCAE(Computer-aided Engineering)ツールとして、3D-CAD(3-dimensional Computer-aided Design)が挙げられる。設計初期段階の構想設計から試作に至るまで、製品形状は3D-CADによって多くの設計者の間で共有され、情報が集約されている。3D-CADが普及する以前は、複雑な製品全体解析を実施する場合は、解析のために三次元モデルを作成するといった通常の設計プロセス以外の工程を要していたが、現状では設計の上流段階において、コンピュータ上では製品がすでに組み上がっている。

さらに、3D-CADの普及によって、より複雑な部品を効率よく製品内部に配置することが可能となり、製品の小型化と軽量化を実現してきた。小型・軽量化に対する、目に見える課題である構造強度、振動、制御といった分野では、多くの解析手法が適用され、課題を解決してきた。その結果、機器の冷却性能や部品への流体的加振力などの実形状における評価が、より高信頼、高性能な製品をめざすうえでの重要な課題となってきた。

製品全体解析技術は、通常の設計プロセスの中で3D-CAD



注:略語説明 3D-CAD(3-dimensional Computer-aided Design), CPU(Central Processing Unit)

図2 ボクセル解析技術の概要

3D-CADモデルと微細直交格子(ボクセル)を重ね合わせることで、高速に複雑形状周りの解析格子を生成するため、形状を近似することなく製品全体解析が可能である。

の世界で組み上がっていく製品の評価・改良をコンピュータ上で実現し、よりよい製品に早期に仕上げるという設計のフロントローディングツールとして多くの製品に活用されている。

2.2 複合／詳細解析のニーズ

ポンプ(排水場、浄化設備など)や送風機(トンネル換気、火力発電設備など)、交通機関(高速鉄道車両など)といった公共の場で用いられる製品は、性能の向上だけでなく、振動、騒音といった周囲環境への配慮を必要とする。そのため、性能追求型の設計に加えて、環境配慮設計を推進することが企業としての責務となっている。このような観点から、ポンプや送風機の振動源の一つである非定常な流体による力(流体力)、さらに、高速車両などの走行に伴う空気力学的騒音(流体音)を高精度に予測する解析手法が開発された。

また、振動や騒音だけでなく、現在大きな社会的課題となっているCO₂排出量の低減を実現するための解析技術として、自動車エンジンなどに用いられるインジェクタの燃料噴射状態をコンピュータ上で再現する混相流(インジェクタでは、空気と燃料)の詳細解析技術を開発した。

3. シミュレーションの新展開

3.1 製品全体解析

直接3D-CADデータから製品全体解析を実行する技術を、ボクセル解析と呼んでいる。この手法は、解析を実施したい領域全体を微細な直交格子(ボクセル)に分割することにより、解析を実施する手法である(図2参照)。

この手法の最大の長所は、3D-CADデータをボクセル分割された空間に配置し、ボクセルに対して物体の有無を判定すると解析格子生成が完了するという点にある。複雑な形状に対しても単純なアルゴリズムで判定が可能であり、短時間かつ自動的に解析格子の生成を行うことができる。さらに、ボクセルの直交性から、解析に必要な演算数や物理量などを表すための記憶容量も少なくて済むため、従来のFEM(Finite Element Method)や、FVM(Finite Volume Method)と比較して、同一能力の計算機では1けた近い大規模解析が可能となる。

このようなボクセルの特徴と、スーパーテクニカルサーバ「SR11000」や、PCクラスなどの並列計算機を駆使することで、これまでは困難であった、億規模の製品全体解析が可能となり、HDD(Hard Disk Drive)¹⁾などの情報機器、液晶プロジェクタ²⁾などの映像機器、掃除機³⁾などの生活家電製品の開発に活用されている。

3.2 流体音解析

乱流を高精度に解析するLES(Large Eddy Simulation)が製

品開発の現場でも実用の段階へ移行している。この手法はすでにポンプなど、流体機械の非定常流体力の予測に用いられており、さらに、流体力から流体音を予測する手法へ拡張され、高速鉄道車両の騒音低減⁴⁾にも寄与している。当時の手法は、物体表面の圧力変動を音源とし、Curleの式³⁾を用いて直接音源から伝播(ば)する流体音を計算する手法であった。しかし、この手法だけでは、例えば、トンネル内の換気ファンの騒音や、機器内部に含まれる物体から発せられる騒音を解析するには、物体表面での反射・回折などの音響的效果が考慮されないために不十分であった。この課題を克服するために、商用音響解析ソフトウェア「LMS SYSNOISE[®]」(Ver5.6)とのカップリングを実施し、トンネル換気ファンから発生する流体音予測⁶⁾を可能とした(図3参照)。カップリングは、非定常乱流解析から得られる動翼面上の圧力変動を

※) LMS SYSNOISEは、LMS International社の登録商標である。

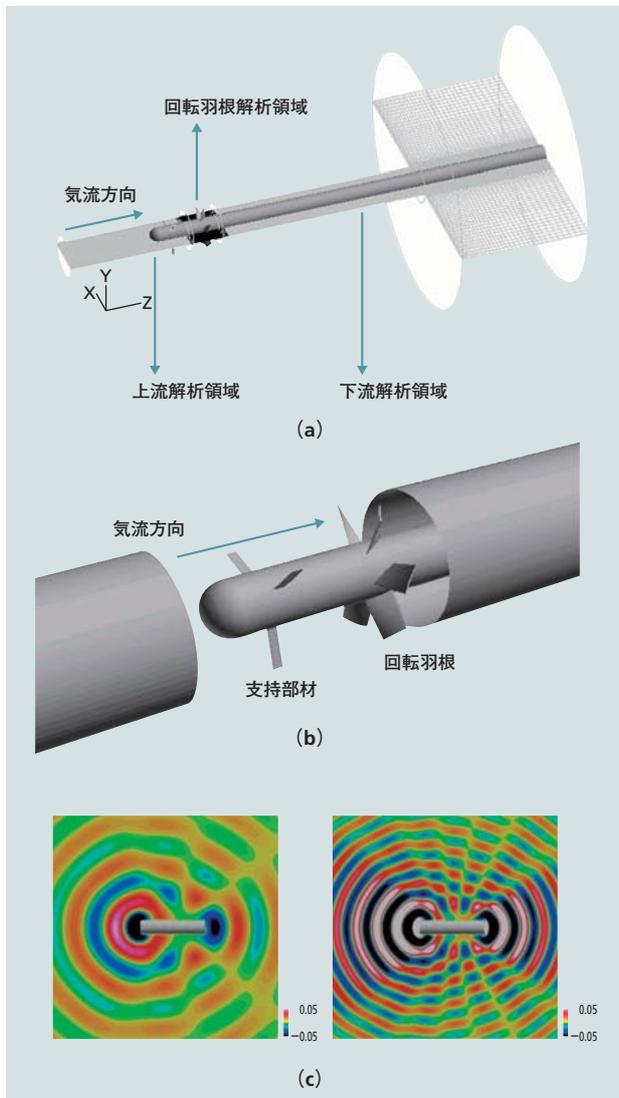


図3 トンネル換気ファンの流体音予測
解析領域全体図を(a)に、換気ファン周辺拡大図を(b)に示す。(c)に示す圧力伝播(ば)解析結果は、左が回転数×羽根枚数の周波数成分、右が回転数×羽枚数×2の周波数成分である。このような解析により、施工後の環境予測などが可能となる。

LMS SYSNOISEに入力する音源データに変換することによって行われる。非定常乱流解析の精度の高さが、流体音予測において重要な要因となることは言うまでもない。

このように、乱流解析というキー技術を中心に、製品に要求されるさまざまな付加価値を高めるために、今後も技術開発を推進していく。

3.3 混相流解析

工業的に利用される気液二相流の多くは、マイクロとマクロの気液界面が混在するマルチスケールの流動現象である。例えば、自動車エンジン内に燃料を噴霧する自動車用インジェクタでは、噴孔出口に液膜状のマクロ界面が形成され、それが液滴状のマイクロ界面へと分裂する。従来、気液界面挙動の計算では固定された計算格子により、界面移動を計算する界面追跡法が主に用いられてきた。しかし、この手法では界面サイズが計算格子サイズに近くなると、数値的拡散によって界面が消失する問題があった。一方、数値的拡散による界面消失のない解析手法として粒子法がある。この手法では計算格子の代わりに空間に配置した粒子を移動するので、数値的拡散による界面消失がないという利点がある。ただし、自動車用インジェクタの内部から大気領域までを粒子法で計算するためには、粒子数が膨大となり、計算負荷が大きくなる問題がある。このようなマルチスケールの気液界面挙動を解析するために、界面追跡法のCIP(Cubic-interpolated Propagation)法⁷⁾と粒子法のMPS(Moving Particle Semi-implicit)法⁸⁾を結合したハイブリッド解析手法を開発した⁹⁾。ここでは界面近傍のみに粒子法を適用し、他の領域を界面追跡法で解析することにより、マルチスケール気液界面の解析を可能とした(図4参照)。

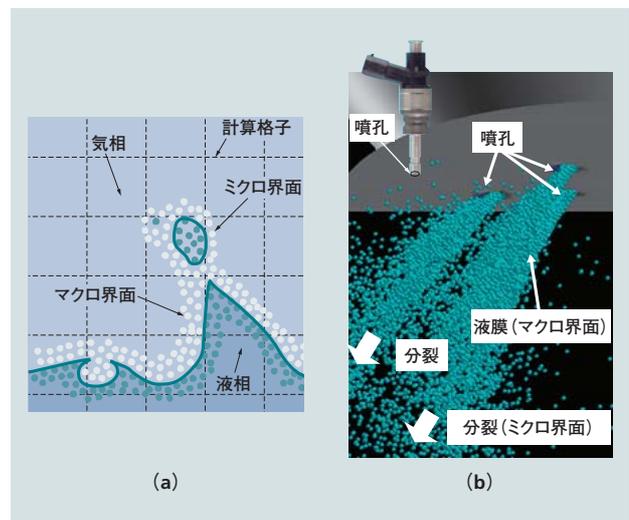


図4 マルチスケール気液界面の解析
気液界面において、計算格子より大きなマクロ界面を界面追跡法で解析し、計算格子サイズ以下のマイクロ界面を粒子法で解析するハイブリッド解析を構築し(a)、自動車燃料噴霧解析(b)に適用した。

4. おわりに

ここでは、大規模な製品全体解析を可能としたボクセル解析技術と、より詳細な現象の解明の方向へ進化した複合解析技術(流体音, 混相流解析)について述べた。

わが国におけるシミュレーション技術の開発は、1940年後半の電子計算機の誕生から遅れること約10年、これまで50年の歴史を刻んだに過ぎない。しかし、流体関連に限定しても、ポテンシャル解析から、粘性流、乱流解析と進み、さらに、化学反応(燃焼など)、相変化、音響、構造連成解析とその間の進化には目覚ましいものがある。さらに、進化に拍車をかけるべく、計算機環境は着実に進歩し、テラフロッパスからペタフロッパスへの挑戦が進められている。

このような背景の下、シミュレーションの使われ方もさらに多様化するとともに、研究開発での使用から設計現場での活用へと、フェーズ移行が進むことは間違いない。また、計算機の進化は、最適化技法による自動設計、コンピュータ上でのデジタル試作といった設計のあり方自体を大きく変える力を持っている。今後は、環境に適合し、目的を明確化したシミュレーション技術の開発を推進することが重要であると考ええる。

執筆者紹介



渡邊 昌俊

1990年日立製作所入社, 機械研究所 高度設計シミュレーションセンタ 所属
現在, 熱流体解析技術, 現物融合解析技術の研究開発に従事
日本機械学会会員



清水 勇人

1992年日立製作所入社, 機械研究所 生活家電研究部 所属
現在, 流体機械のシミュレーション技術の研究開発とその活用に従事
日本機械学会会員

参考文献

- 1) 竹森, 外:ボクセルメッシュを用いた磁気ディスク装置内の気流シミュレーション, 日本機械学会茨城講演会(2007)
- 2) N. Isoshima, et al.:NUMERICAL SIMULATION OF FLOW AND HEAT TRANSFER OF LCD PROJECTOR USING VOXEL METHOD, Proceedings of FEDSM2005:2005 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting and Exhibition(2005)
- 3) S. Hayashi, et al.:DEVELOPMENT OF A HOUSEHOLD VACUUM CLEANER WITH A NEW CYCLONE DUST COLLECTOR, FEDSM2007 ASME & JSME Joint Fluids Engineering Conference(2007)
- 4) 池川, 外:高速新幹線車両の空力・音響問題に対する数値解析技術の応用, 日本応用数理学会, Vol.6, No.1, p.2~16(1996)
- 5) Curle, N.:The Influence of Solid Boundaries upon Aerodynamic Sound, Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 231, pp.505-514(1955)
- 6) 山出, 外:軸流ファンから発生する騒音の数値予測, 第20回数値流体力学シンポジウム(2006)
- 7) T. Yabe, et al.:A dream to solve dynamics of all materials together, Proceedings of International Conference on High-performance Computing in Automotive Design, pp.2105-2108(1996)
- 8) S. Koshizuka, et al.:Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid, Nucl. Sci. Eng., 123, pp.421-434(1996)
- 9) E. Ishii, et al.:SIMULATION OF LIQUID JET BREAKUP OF A SWIRL-TYPE FUEL INJECTOR FOR AUTOMOBILE ENGINES, FEDSM2007 ASME & JSME Joint Fluids Engineering Conference(2007)



石井 英二

1993年日立製作所入社, 機械研究所 高度設計シミュレーションセンタ 所属
現在, 多相流, マルチスケール解析手法の研究開発に従事
工学博士
日本機械学会会員, 日本混相流学会会員