

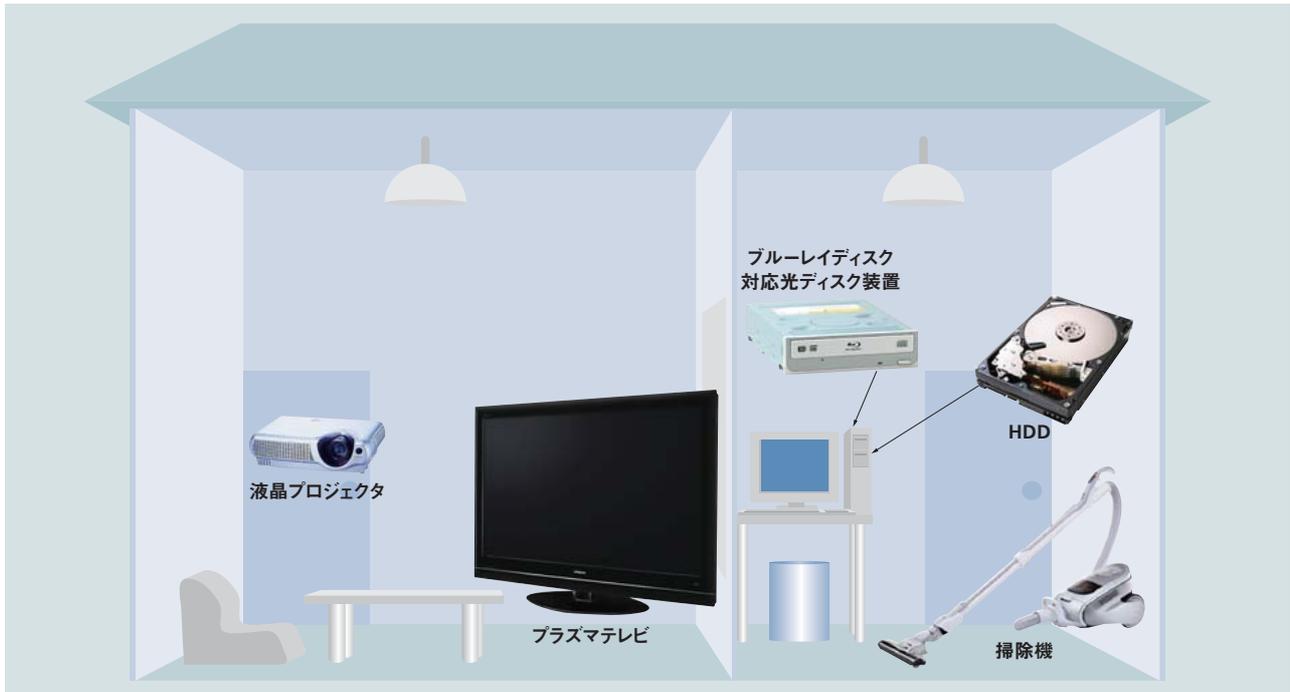
# 家電・デジタルメディア分野におけるシミュレーション技術

Simulation Technology for Home Appliances and Digital Media

池川 正人 Masato Ikegawa

磯島 宣之 Nobuyuki Isoshima

林 正二 Shoji Hayashi



注:略語説明 HDD(Hard Disk Drive)

**図1** 「製品まるごと熱流体シミュレーション技術」を活用して開発された身の周りの家電・デジタルメディア製品  
高性能化・小型化によって高集積化した最近の家電・デジタルメディア製品の開発には、製品全体の熱流体シミュレーション技術が活用されている。

最近の家電・デジタルメディア製品は高性能化・小型化が進展したことにより、内部に多くの部品が複雑に組み込まれ、冷却・振動低減のために、内部の熱や気流などを考慮した熱流体設計の重要性が増している。また、製品サイクルは短くなる傾向にあり、開発期間が短縮化されている。そこで、短時間で解析・評価が可能な「製品まるごと熱流体シミュレーション技術」が製品開発現場で活用されている。

この技術は、解析対象となる製品全体を微小な直交格子に分割するボクセルメッシュを用いた熱流体シミュレーションと、スーパーコンピュータによる並列計算技術を融合させることにより、製品内部の熱流体の状況を短時間で解析して評価するものである。この技術により、製品開発の初期段階からシミュレーションを活用する解析主導型の設計が可能となり、開発期間の大幅な短縮を実現している。

日立グループは、製品まるごと熱流体シミュレーション技術を、磁気ディスク装置、家庭用掃除機、液晶プロジェクタ、光ディスク装置、プラズマテレビなどの製品開発に適用している。

## 1. はじめに

近年、身の周りにある家電・デジタルメディア製品は高性能化・小型化により高集積化し、内部に多くの部品が複雑に配置されている(図1参照)。この結果、部品によって乱された気流による構造振動や、密集した発熱部品からの放熱などを考慮しながら、各部品を高密度に実装設計する必要があるため、製品内部の気流や熱などの熱流体现象の解析が重要になってきている。そこで、本稿ではシミュレーションの中でも、特に熱流体シミュレーション技術に着目する。

一方、製品サイクルは短くなる傾向にあり、迅速な製品開発を実現するために、開発期間の短縮が求められている。また、このような製品は流体機械ではないことから、流路が局所的に限定されておらず、製品内部全体に広がっている。したがって、ある部品の形状変更は全体の気流に影響するため、製品全体の解析が必要とされている。

このような背景から、製品開発の初期段階から製品内部全体の熱流体现象を定量的に予測して早期に問題点を解決

するため、短時間で製品全体の熱流体解析が可能な技術の確立が望まれていた。

熱流体解析を行うには、まず、解析対象となる物体を一定の微小要素に分割するメッシュ作成作業と、そのメッシュを基に計算機によるシミュレーションを実行する必要がある、これらの作業時間を同時に短縮することは難しかった。

従来、シミュレーションを高精度に実行するには、解析対象の形状に合わせた複雑なメッシュ作成を行う必要があり、その作成に多大な時間を要していた。特に最近の家電・デジタルメディア製品は実装が高密度であるため、製品内部が複雑な形状をしている場合が多く、形状に適合したメッシュを自動的に生成することが困難であった。また、複雑な形状を表現するためには膨大な数のメッシュが必要になることから、製品まるごとのシミュレーションを実行する計算時間が長期化する問題が発生していた。そのため、製品サイクルの短い家電・デジタルメディア製品に対しては、製品まるごとシミュレーション技術を設計に適用することができなかった。

しかし現在では、メッシュ作成が容易なボクセルメッシュを採用するとともに、スーパーコンピュータによる並列計算技術を駆使した、高速解析・評価が可能な「製品まるごと熱流体シミュレーション技術」を開発し、製品開発に活用している。

ここでは、「製品まるごと熱流体シミュレーション技術」の特長と家電・デジタルメディア製品への活用例について述べる。

## 2. ボクセル熱流体解析

ボクセルとは、要素が微小な直交格子である。例えば、ある製品を内部の部品形状を無視して、等間隔のボクセルに分割する。このようにしてできたボクセルメッシュは、データ構造が単純なため、スーパーコンピュータの特長であるベクトル演算機能による高速処理や、データ通信量を節約した並列処理に適している。そこで、ボクセルメッシュで生成された大量の要素を、スーパーコンピュータの処理能力を最大限に引き出して高速に実行する熱流体解析プログラムを開発した。

流体解析には、保存系の差分式を用いた有限差分法による三次元非圧縮熱流体解析のプログラムを、乱流モデルにはLES(Large Eddy Simulation)を使用した。これにより、製品まるごとシミュレーションを用いて、高密度実装の家電・デジタルメディア製品に対して熱流体性能の定量的な評価が可能となった。

設計の初期段階でメッシュを作成する場合は、製品全体の3D-CAD(3-dimensional Computer-aided Design)データを基に、すべての部品を含むメッシュを作成する。従来、この作業は手作業で行うことが主流であり、多くの手間と時間(数週間)を要していた。今回、要素サイズを指定するだけで、3D-CADデータからすべての部品を完全自動でボクセルメッシュ

を生成することにより、メッシュ生成を短時間(数分以内)で完了できるようになった。

この技術を家電・デジタルメディア製品の中から、磁気ディスク装置、家庭用掃除機、液晶プロジェクタ、光ディスク装置、プラズマテレビに適用した例について次に述べる。

## 3. 活用例

### 3.1 磁気ディスク装置(HDD)

企業や公共機関の大規模データベース、パソコンやハードディスクレコーダをはじめとするデジタル民生機器の記録・再生装置など、社会を支える大容量記録装置として広く利用されているHDD(Hard Disk Drive)の設計に適用し、装置内部に生じる気流を解析した例について述べる<sup>1)</sup>。

HDDの内部はディスクが高速で回転し、周囲の空気が摩擦で引きずられることによって高速流が生じる。この高速流がアームやディスクを振動させ、ヘッドの位置決め精度を悪化させる大きな要因となっているため、気流制御によって、アームやディスクの振動を低減することが求められている。

HDD内部は数枚のディスクの回転によって形成され、台風並みの高速気流が各部品の間を循環して流れるため、ボクセル法による製品全体解析が必要とされる。

HDDまるごとの形状をCADから作成したボクセルメッシュを図2に示す。従来、約3週間掛かっていたメッシュ作成が約30秒で完了するなど、大幅にメッシュ作成時間を短縮することができた。

さらに、日立スーパーテクニカルサーバ「SRシリーズ」を用いて解析プログラムを実行することで、約3週間掛かっていたシミュレーションが約1週間に短縮され、メッシュ作成から解析完了までの時間を数分の一にできた。

ディスク間の中間断面での気流の速度分布の計算結果を図3に示す。ディスク間に挿入する気流制御部材であるスポイラの有無によって、流れが大きく変わることがわかる。スポイラがないときには高速流がアームに沿って形成され、ディスクを1周するような分布になっている。一方、スポイラがあるとき

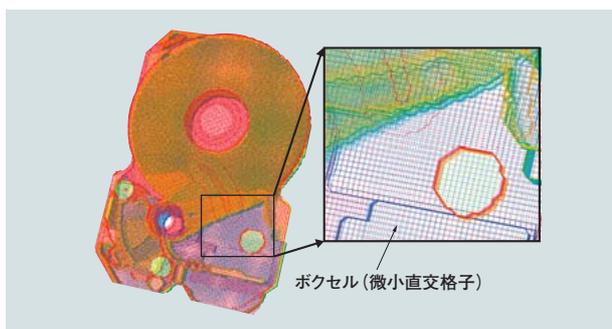
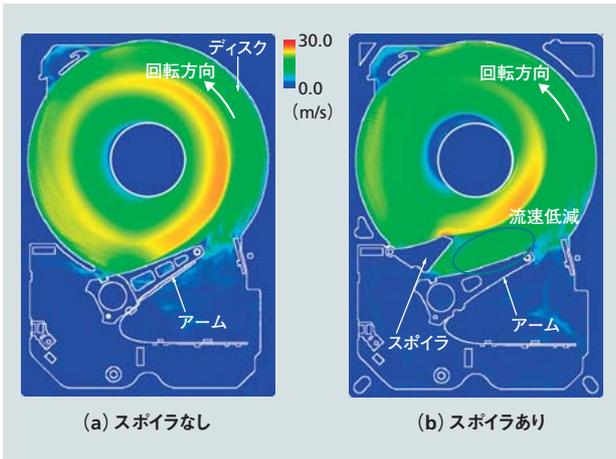


図2 HDDのボクセルメッシュ

CAD(Computer-aided Design)からサイズ0.2 mmのボクセルメッシュ約5,000万要素を生成する。



**図3 HDD内の気流速度分布(解析結果)**  
 スポイラなし(a)に比べ、スポイラあり(b)によって流速が下がり、高速流が内周側に偏向する。

にはスポイラの存在によってアーム付近の流速は大きく低減され、代わりにスポイラ先端から高速流が生じ、スポイラなしと比べて内周側に高速流が分布していることがわかる。このような解析結果を用いて、ディスクの回転(7,200 min<sup>-1</sup>)によって生じた高速気流に対し、スポイラなどの流れ制御部材で流速分布を制御し、アームやディスクの振動を低減するように設計している。

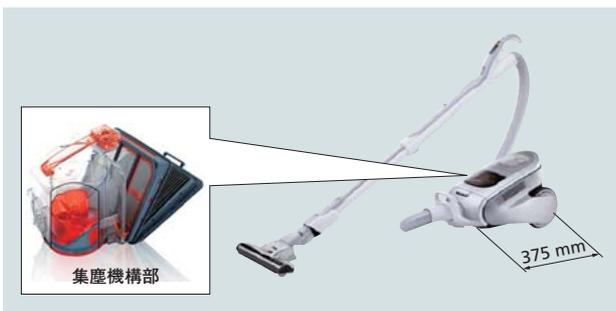
### 3.2 家庭用掃除機

家庭用掃除機においては、強い吸引力が求められる。吸引力の目安である吸込み仕事率を向上するために行ったボクセル解析による集塵(じん)機構部の改良事例について、以下に述べる<sup>2)</sup>。

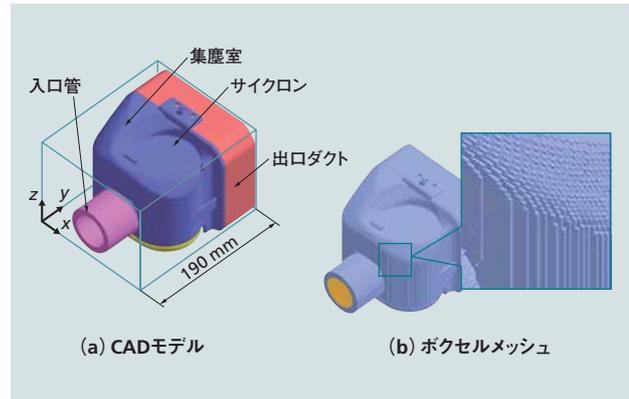
サイクロン式掃除機「ロボットサイクロン」と、その集塵機構部を図4に示す。最近、消費者から人気が集まっているサイクロン分離器を適用した掃除機は、しっかりゴミを吸引して、吸ったゴミを逃がさないことが特徴である。

また、掃除機のような家電製品は製品サイクルが短く、解析したい構造案に対して、迅速に結果を評価することが求められるため、ボクセル解析が活用されている。

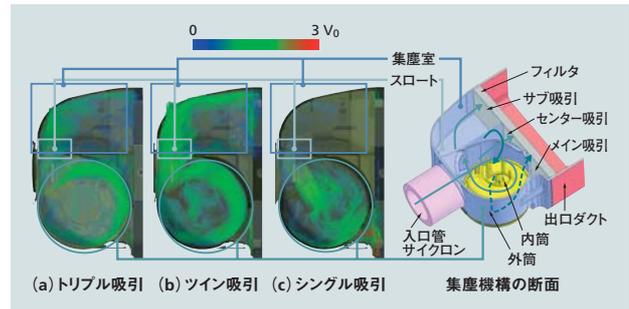
今回計算で用いた集塵機構のCADモデル、ボクセルメッシュ



**図4 サイクロン式掃除機と集塵機構部**  
 サイクロン式掃除機「ロボットサイクロン」の外観と集塵(じん)機構部を示す。



**図5 集塵機構のCADモデルとボクセルメッシュ**  
 CADからサイズ1 mmのボクセルメッシュ約400万要素を生成する。



**図6 3種類の集塵機構内の気流速度分布(解析結果)**

トリプル吸引(a)では、サイクロンに流入した空気流を内筒を通じて排気させるメイン吸引、集塵室内で塵埃(じんあい)を圧縮して排気させるサブ吸引、およびサイクロン内の圧損をさらに低下させるセンター吸引の三分流する。ツイン吸引(b)では、メイン吸引、サブ吸引の2流路を設ける。シングル吸引(c)では、サイクロンに流入した空気流を入口管から旋回上昇させ、上方で反転して旋回下降流とし、内筒を通じてメイン吸引へ排気させる。

シュを図5に示す。また、3種類の集塵構造に対する解析結果を比較して図6に示す。なお、それぞれの流速は解析の境界条件で与えた入口管の初期速度:V<sub>0</sub>=15.7 m/sとの比で示している。

塵埃(じんあい)分離に活用されない内筒内での低速度化、および塵埃の再飛散防止のための集塵室からサブ吸引口への低速度化の観点から、トリプル吸引がベストであることがわかった。以上の結果を踏まえて、トリプル吸引サイクロンを採用した3流路高圧縮方式サイクロンを開発した。

### 3.3 液晶プロジェクタ<sup>3)</sup>

会議のプレゼンテーションや店頭でのディスプレイなどで使用される業務用や家庭用の液晶プロジェクタでは、画像の高輝度・高精細化、筐(きょう)体サイズの小型化などのニーズが強くなり、ランプ・液晶パネル・電気基板といった発熱部品の冷却設計の重要性が増している。液晶プロジェクタとその内部構造を図7に示す。コンパクトな筐体にランプなどの光学系部品、電気基板などが高密度に実装されており、複数の冷却ファンによって効率よく、低騒音で通風冷却する必要がある。

液晶プロジェクタは内部構造が非常に複雑なので、構造を



注:略語説明 RGB (Red, Green, Blue)

図7 液晶プロジェクタと内部構造

コンパクトな筐(きょう)体にランプ・液晶パネルなどの部品が高密度に実装され、ファンによって通風冷却されている。

きわめて単純にモデル化し直さなければ、通常の手法では解析に必要な格子生成が困難である。詳細構造まで評価を行うため、ボクセル法による筐体一括の熱流体解析で実施して、筐体全体での一貫した通風の確認、部品配置の検討、部品ごとの干渉を検討するとともに、さらに次世代機用の新しい通風構造のアイデア創出を行っている。特に、試作段階において複数回の筐体全体解析を実施することで、製品に実装される新しい構造の効果と新たに生じる構造上の問題点を把握し、製品の完成度を高めている。

解析モデルと解析結果(断面流速分布)を図8に示す。ボクセルは、サイズ1 mmの立方体で、全ボクセル数は1,800万要素である。格子生成はPentium<sup>®</sup> 4 CPU (Central Processing Unit)を搭載したパソコンで行い、約5分で生成した。同図に示すように、ランプや液晶パネルなどの主要冷却部に通風が適正に行われていることが確認できるだけでなく、ノイズフィルタへの補助的な通風やランプ内部への通風確認など、詳細部分についても流動が確認でき、設計の妥当性の検証が可能となっている。

ボクセル熱流体解析を用いることにより、1機種当たり1~2回分の試作評価を解析で置き換え、製品の完成度向上と合わせて約1か月の開発期間を短縮する効果を上げている。

### 3.4 ブルーレイディスク対応光ディスク装置

日立製作所は、2006年7月に世界初となるブルーレイディスク

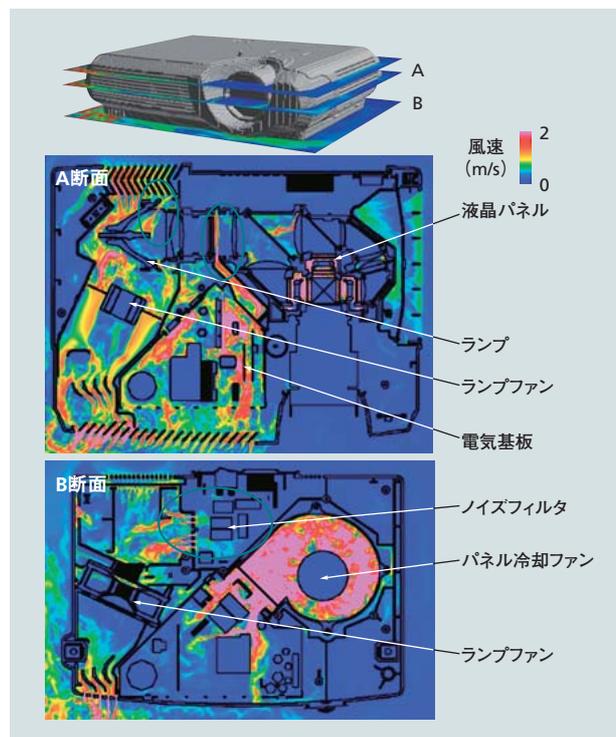


図8 解析モデルと解析結果による流速分布

ランプや液晶パネル、電気基板などの主要部への通風(A断面)だけでなく、ノイズフィルタ(B断面)やランプ内部(A断面)への通風といった補助流路の通風も確認できる。

ク4倍速記録を実現した光ディスク装置を製品化した。ブルーレイディスクはDVD (Digital Versatile Disc)に比べて約5倍以上の25 Gバイトの記録容量があり、当時の主流であった2倍速でディスク全面を記録した場合、約46分も掛かるため、高速化が強く求められていた。

高速化にあたっては、信号処理などのソフトウェア・回路面の対応とともに、レーザ光を発するレーザダイオードなど発熱部品の冷却、ディスク制振といった機械的な課題への対応が重要な開発ポイントであった。ボクセル流体解析を活用してディスク制振とレーザダイオードの冷却を両立する構造を開発

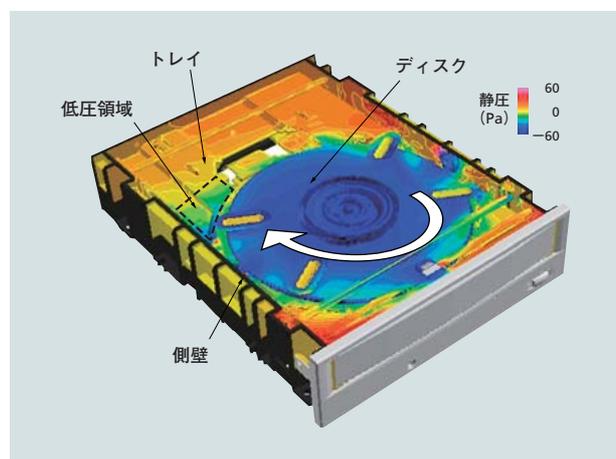


図9 従来のDVD装置内部の静圧分布(解析結果)

ディスク上面に形成される強い低圧域が局所的にトレイの上まで張り出す。

※) Pentiumは、Intel Corporationの米国およびその他の国における登録商標である。

した事例について以下に述べる<sup>4),5)</sup>。

開発に先立って、従来のDVD対応装置内部の流れを解析して得た筐体内部の静圧分布を図9に示す。解析結果を詳細に分析した結果、強い低圧域であるディスク上面に向かってディスク下面から巻き込む気流が、破線で囲った領域の上流では側壁との干渉で抑えられ、ディスク上面の低圧領域がこの部分だけ特異的にトレイ上にまで張り出していることが明らかとなった。そこで、この領域のトレイに開口を設ける構造とした(図10参照)。ブルーレイディスク対応装置では光学設計上、開口の下側に発熱源であるレーザーダイオードが配置される構造となっていることから、追加した開口によってレーザーダイオード周囲の空気がトレイ上側の低圧域に吸い上げられる二次流れが形成され、通風冷却が促進されると推察した。

解析の結果、開口構造によって二次流れが形成されることが確認でき、実機で検証した結果、レーザーダイオードの温度上昇を約2℃低減する効果が得られ、目標とする温度仕様を満足することができた(図11参照)。

ブルーレイディスク対応光ディスク装置の開発にボクセル流

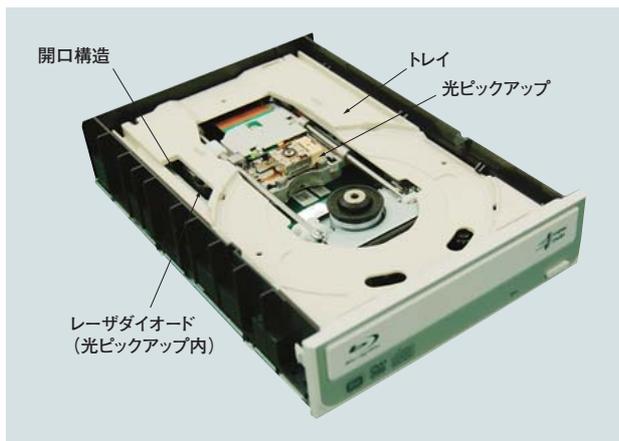


図10 ブルーレイディスク対応光ディスク装置の内部構造  
トレイの低圧領域に開口を設ける構造とした。

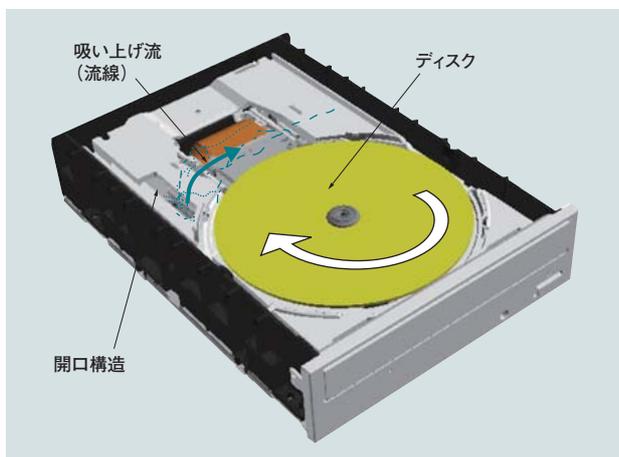


図11 吸い上げ流の形成状況(解析結果)

トレイの低圧領域に開口を設け、光ピックアップ内に搭載されたレーザーダイオードを開口で生じる二次流れで通風冷却する。

体解析を適用した結果、筐体内の流れに基づいた通風冷却設計を合理的に進めることが可能となり、従来の実験主体の検討では考えつかなかった新構造を、従来の約 $\frac{1}{2}$ の冷却設計期間で開発する効果を得ている。

### 3.5 プラズマテレビ

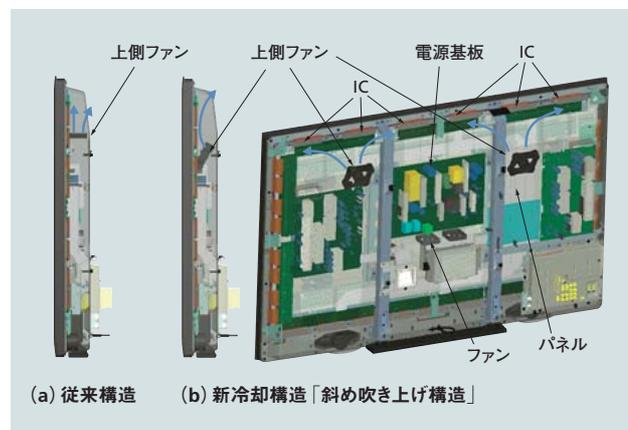
デジタル放送の普及に伴い、世界各国において大型薄型テレビの需要が拡大している。近年では特に高輝度化、フルHD(High Definition)に対応した高精細化、筐体薄型化が急速に進展している。

バックライトで発光する液晶テレビに対して、微細なRGB(Red, Green, Blue)セルの一つ一つが自発光するプラズマテレビは、コントラスト比が高く動画解像度が高い利点がある一方で、表示画像によって消費電力が大きく変化し、液晶テレビよりも厳しい最大発熱条件で冷却設計を行う必要がある。また、AV(Audio Visual)機器としての性質上、ファンを用いた冷却を行う場合には、十分ファンの騒音を抑えた設計を行う必要があり、大型のプラズマパネルをいかに効率よく通風冷却するかが構造設計上の重要な課題となっている。ボクセル熱流体解析を活用することで、プラズマテレビの通風冷却特性を向上させる新構造を開発した事例について以下に述べる。

従来のプラズマテレビの冷却構造の一例を図12(a)に示す。パネル上部にファンを設置し、鉛直上向きに吹き上げる通風により、プラズマパネルの冷却を促進している。

これに対して図12(b)に示す新構造では、画質向上のためパネル上側に設置されるIC(Integrated Circuit)の最大発熱量増加に対して、温度が上昇しやすいパネル上部の冷却を促進することを目的として、上側ファン2台を斜め前方に傾けて設置し、パネル上部とIC部に斜め噴流状の冷却風を吹き上げて通風する「斜め吹き上げ構造」とした。

従来構造の解析結果では、上側ファン通風範囲の横方向



注:略語説明 IC(Integrated Circuit)

図12 プラズマテレビの冷却構造

従来のプラズマテレビの冷却構造を(a)に、「斜め吹き上げ構造」とした新冷却構造を(b)に示す。

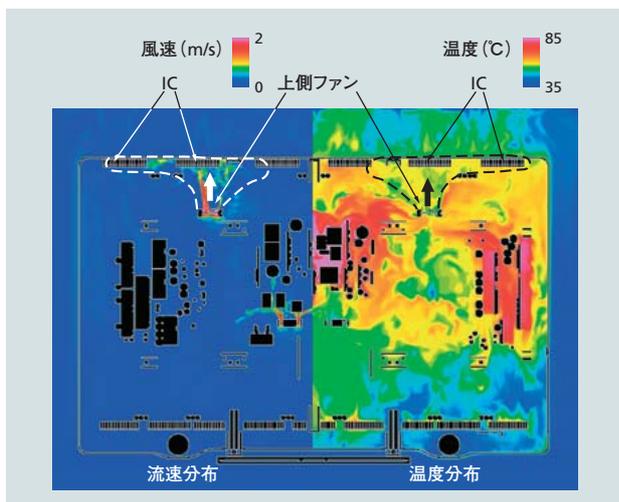


図13 従来の通風冷却構造の解析結果

左側は流速分布を、右側は温度分布を示す。

への広がりやや小さいことがわかる(図13参照)。それに対して新構造では、ファンを傾斜して設置し、斜め上向きのパネル方向に通風することで、流れがパネルに斜め噴流状に衝突して熱伝達率が増加する。さらに衝突によって左右方向に流れが広がり、パネル上側の端部のICまで通風が行われ、パネル上部と合わせて大幅に温度上昇が抑えられていることが確認できる(図14参照)。実機で検証した結果、新構造は従来構造に対してIC温度を9℃、パネル温度を5℃低減することが確認されており、現在製品に適用されている。

プラズマテレビに関するボクセル熱流体解析の適用は、低騒音・高効率実装の開発が求められるフルHD対応品を中心に行っており、特に新しい通風冷却構造の開発で効果を上げている。

#### 4. おわりに

ここでは、「製品まるごと熱流体シミュレーション技術」の特長と家電・デジタルメディア製品への活用例について述べた。

#### 執筆者紹介



##### 池川 正人

1976年日立製作所入社、機械研究所 所属  
現在、磁気ディスク装置の流体起因振動低減技術の研究開発に従事  
工学博士  
日本機械学会会員、応用物理学会会員、ASME会員、ECS会員、日本流体力学会監事



##### 磯島 宣之

1995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、電子・情報機器の冷却構造設計高度化の研究開発に従事  
日本機械学会会員

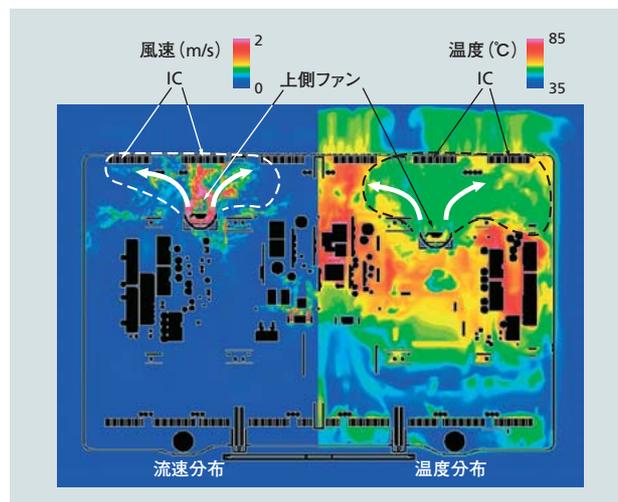


図14 新冷却構造「斜め吹き上げ構造」の解析結果

上側ファンを斜め上向きに設置することで、斜め噴流状の通風がパネルに衝突し、左右方向に広がって端部のICへの通風が促進される。

今後は、この技術をより多くの分野で活用することをめざして、低騒音設計のための流体音評価、異種ガスの拡散現象や液膜の広がりや分裂を支配する多相流現象も解析可能な複合解析を用いた「製品まるごと解析」に発展させていく所存である。

#### 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, 講演論文集, No.070-3(2007.9)
- 2) S. Hayashi, et al.:Development of a Household Vacuum Cleaner with a New Cyclone Dust Collector, Proc. of FEDSM2007, 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference(2007.8)
- 3) N. Isoshima, et al.:Numerical Simulation of Flow and Heat Transfer of LCD Projector Using VOXEL Method, Proceedings of ASME-FED Summer Meeting 2005, ASME-FEDSM2005-77399(2005.6)
- 4) N. Isoshima, et al.:Numerical Simulation and PIV Measurement of the Flow-field in Optical Disc Drives, Microsystem Technologies, Vol. 13, No. 8-10, pp. 923-931(2007)
- 5) N. Isoshima, et al.:Development of Cooling Structures for Blu-ray Disc Compatible Optical Disc Drives Using Computational Fluid Dynamics Based on Cartesian Grid Method, Proceedings of ASME InterPACK 2007, ASME-IPACK2007-33248(2007.7)



##### 林 正二

1996年日立製作所入社、機械研究所 生活家電研究部 所属  
現在、日立アプライアンス株式会社にて、家庭用電気製品の研究開発、商品計画に従事  
日本機械学会会員