

計算機の進歩とともに、さまざまな製品分野で設計ツールとして熱流体シミュレーション技術が活用されている。ノートパソコンでは、小さい筐(きょう)体内に発熱量の大きい素子を実装するため、放熱の検討は設計上欠かせない。また、製品開発の期間が短いため、熱設計にはシミュレーションが威力を発揮する。伝熱モードを熱伝導に限定しワークステーション (WS) レベルで定量的温度予測可能な熱解析ソフトウェアを開発した。また、大容量ガス絶縁変圧器のコイルの冷却設計支援として、ホットスポットの発見や冷媒流路の最適設計に熱流体シミュレーションが役だっている。ここでは、このほかにガスタービン用燃焼器の熱流体解析についても触れる。

With the progress of computers having high computation speed and large memory, the numerical thermo-fluid simulation technique is serving an important role as a design tool in various fields related to product development. In notebook type personal computers, for example, because components having a high heat flux are mounted in a small casing it is very important to take heat release phenomena into consideration in the thermal design process. Due to shorter new product development cycles, numerical simulation is playing a more significant supporting role than ever before in the thermal design process.

Considering heat transfer phenomena only due to conduction, we have developed a thermal analysis solver that can quantitatively predict temperature profiles using a workstation-level computer. Moreover, from the standpoint of cooling design for high-voltage gas-insulated transformer coils, the numerical thermo-fluid technique is playing an important role in identifying hot spots in coils and designing the optimum coolant flow path.

In addition to describing these applications, this paper presents some results of numerical thermo-fluid analysis of a gas turbine combustor.

## 1 まえがき

計算機の進歩とともに、さまざまな製品分野で熱流体シミュレーションが活用されている。ここではノートパソコン、大容量ガス絶縁変圧器、ガスタービン用燃焼器の例を紹介する。

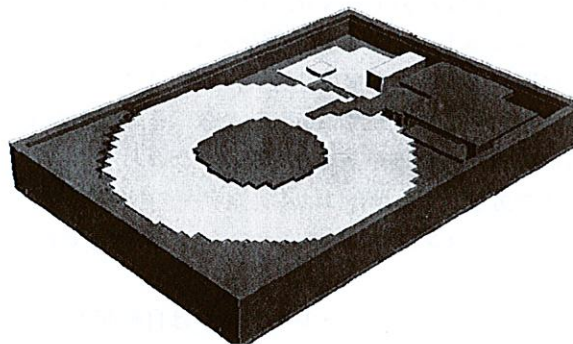


図1. HDD 数値モデル HDD, FDD などは細かいメッシュで計算しておき、等価な熱伝導率として筐体全体の数値モデルに組み込む。  
Numerical model of hard disk drive

## 2 ノートパソコンの熱解析

電子機器の性能向上に伴う発熱量の増加により、熱的な検討は機器実現のための重要な設計項目になっている。また、開発期間を短縮しているため熱設計を短時間で行う必要もあり、試作による放熱構造の評価に代わって、シミュレーション技術が問題解決の手段として期待されている。

ここではノートパソコンを対象に、ワークステーション (WS) クラスの計算機でチップからケーシングまで一括して扱える熱解析技術<sup>(1)</sup>を紹介する。

### 2.1 伝熱モードの限定

ノートパソコンでは小型化のため部品間のすき間が小さくなるように設計を行う。例えば、複数枚の基板をもつノートパソコンの基板間すき間は5~10 mm程度で、温度差が30 K程度であると部品間の伝熱に関するレーレ数は300~700

程度となり臨界値よりも小さい。そのため流体内の温度分布に起因する浮力よりも粘性が支配的になり、壁面間に熱対流は発生しない。つまり、熱の移動は伝導支配になり、熱解析は流体を扱わずに熱伝導計算だけで可能となる。レーレ数が大きく、自然対流が発生する場合においても対流が発生する領域が限定されていれば、対流の影響を含んだ等価な熱伝導率を使用して数値解析の上で熱伝導問題として扱うことができる。流体解析で複雑な機器を扱うには多



大な計算時間と記憶容量を要するが、伝熱モードの限定により WS 程度の計算機で実用的な熱解析が可能となる。

## 2.2 解析の階層化

ノートパソコンはさまざまな寸法の部品で構成される。例えば、ケーシングは外寸が 300 mm 程度あるが、厚みは 1 mm 程度であり、形状を表現するには最小 1 mm 間隔のメッシュを用いなければならない。LSI パッケージの解析ではシリコンチップ内部の構造を無視し、チップ形状だけをモデル化する場合においても、部分的に 10 μm オーダのメッシュの細かさが必要で、これはケーシング外寸に対して 4 けたほど小さい。そのため、ノートパソコンの全部品を網羅する数値モデルを作成するには、物体中の細かな構造をもつ部分に細かなメッシュを使用し、他の部分を粗くモデル化する。ハードディスク装置 (HDD) やフロッピーディスク装置 (FDD) およびバッテリーパックなどは、あらかじめ細かいメッシュで計算しておき、等価な熱特性をもつ物体として筐体全体を対象とする粗いメッシュの数値モデルに導入している。例として HDD の数値モデルを図 1 に示す。

## 2.3 境界条件

境界条件としては、キーボード以外の面では平板の層流自然対流熱伝達率を使用した。キーボード面に関しては実験を行い、実験結果を等価な熱伝達率として与えた。

## 2.4 計算結果

温度分布を図 2 に示す。動作条件は、CPU とディスプレイコントローラはほぼ最大稼働、FDD は待機、HDD はディスクは回転しているがデータ入出力のない状態、他の部品はティピカルとされる発熱量とした。

図 3 に各部の温度上昇を実験値と比較して示す。CPU とディスプレイコントローラ (図 3 中の DC) はパッケージ上面中央、HDD は底面中央、A および B は筐体表面温度である。計算時間は 50 MIPS (Milion Instruction Per Second) の WS を使用して約 40 分である。

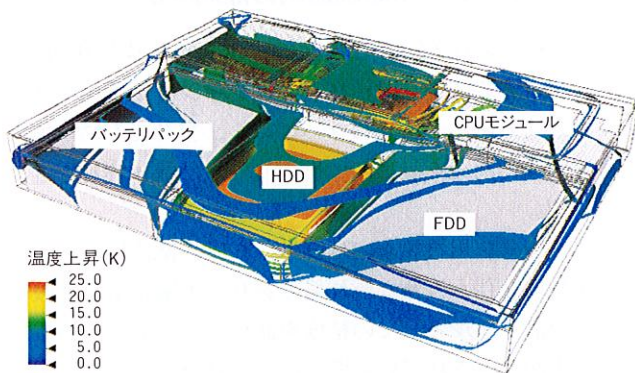


図 2. 温度分布 等温度面分布 (計算結果) を示す。HDD, CPU で温度上昇が大きいことがわかる。

Predicted temperature distribution

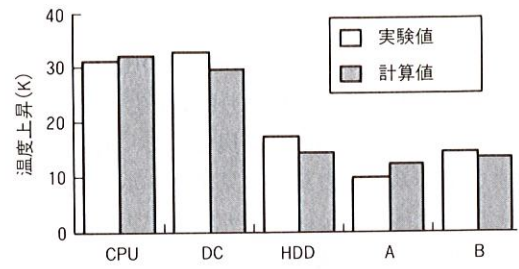


図 3. 温度上昇 計算と実験の比較を示す。この解析手法で温度上昇を数度以内で予測できる。

Comparison of predicted and measured temperature rise

この手法により温度を数度以内で予測でき、熱解析手法として十分な精度をもち、機器開発時の温度予測手法として有効であることがわかる。

## 3 大容量ガス変圧器の熱流体解析

ガス絶縁変圧器は、SF<sub>6</sub>などのガスを冷媒としてコイル内を循環させ冷却している。コイルは複雑な構造をしており、冷却性能は冷却流路などの形状に大きく依存する。

コイルの構造を図 4 に示す。円形に巻かれたコイルの一部を切り出したものである。コイル間に冷媒を強制的に供給するため数コイルごとに図 4 に示すようなガス止めカラーを設けている。この例では、カラーとカラーの間に 5 セクションのコイルがある。コイルの温度が均一になるように冷却するには冷媒の逆流や偏流を抑えることが重要で、

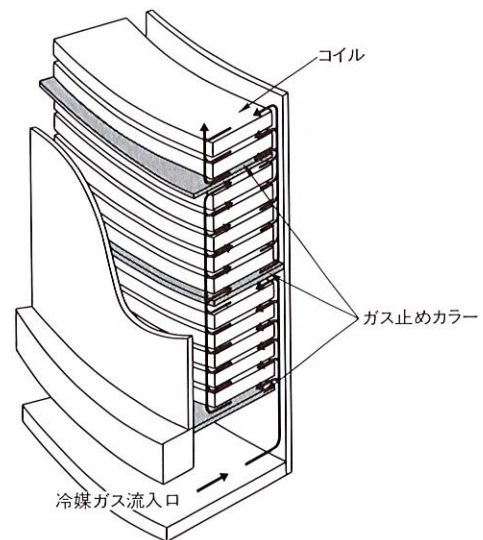


図 4. コイルの構造 円形に巻かれたコイルの一部を切り出したものである。コイル間に冷媒を強制的に供給するため、数コイルごとにガス止めカラーを設けている。

Configuration of coil structure



そのために冷却流路にカラーを設けている。しかし、いたずらにカラーを設置することは冷却系の圧力損失の増大を招き、ガスフロアの出力を増やす必要が生ずる。当社では、大容量ガス絶縁変圧器の設計支援として、適切なカラーの配置および冷却系の圧力損失の見積り、ホットスポットの発見などに熱流体シミュレーション技術<sup>(2)</sup>を活用している。

### 3.1 計算方法および数値モデル

計算は、SMAC (Simple Marker And Cell) 法を用いた定常解析で行った。支配方程式は連続の式、ナビエ・ストークス方程式およびエネルギー式で、乱流モデルは  $k-\epsilon$  モデルを用いた。境界条件は、速度に関して入口で一様流入、出口で自由流出を、その他は滑りなしの壁条件を与えている。温度に関してはコイルの表面に一様熱流束を、その他は断熱条件を与えた。数値モデルを図5に示す。この図で

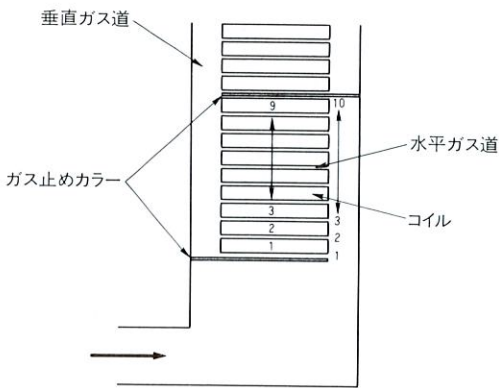


図5. 数値モデル このモデルは二次元軸対象でカラーとカラーの間に9セクションのコイルがある。

Numerical model of coil structure

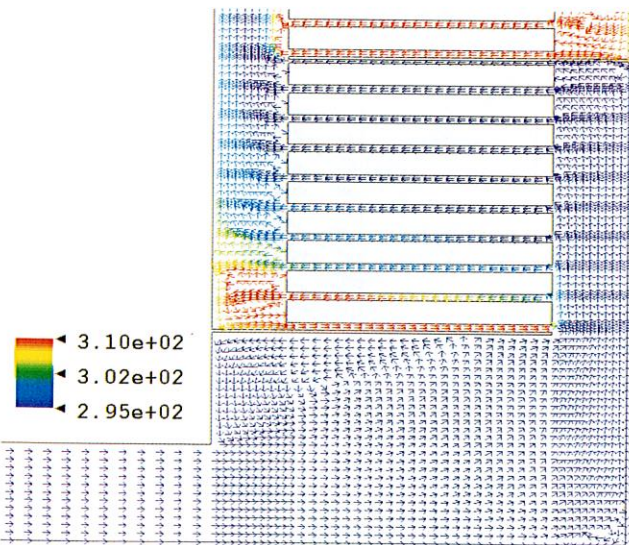


図6. フローパターン (9セクション) コイル番号1 (図5参照) で逆流がみられる。

Predicted velocity vector diagram of flow field

はカラーとカラーの間に9セクションのコイルを含んでいるが、このカラーの位置を変えることによりセクション数をパラメータにしたコイル構造の比較検討が容易にできる。

### 3.2 計算結果

9セクションの場合のフローパターンを図6に示す。図6において色は温度の高低を、数値は絶対温度(K)を示す。コイル番号1 (図5に表示) で逆流がおき、コイルの均一な冷却の妨げになっている。このような逆流は6セクションの場合にもみられるが、5セクション以下では発生しない。

図7にコイルの温度上昇を実験結果と併せて示す。計算と実験はよく一致しており、コイルの温度上昇の予測に熱流体シミュレーション技術が有効であることがわかる。

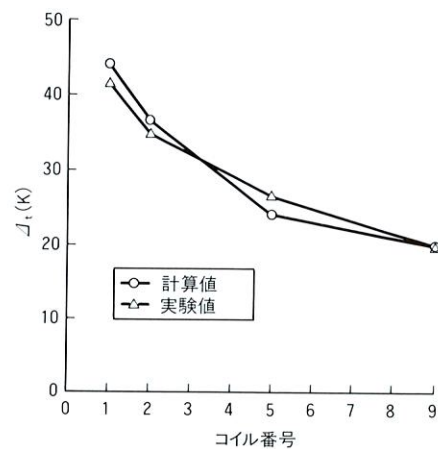


図7. コイルの温度上昇 計算と実験はよく一致しており、コイルの温度上昇の予測に熱流体シミュレーション技術が有効であることがわかる。

Comparison of predicted and experimental coil surface temperature rise (9 sections)

## 4 ガスタービン用燃焼器内の熱流体解析

ガスタービンの高効率化および低  $\text{NO}_x$  燃焼器実現の観点から、燃焼器の開発に熱流体シミュレーション技術を活用しようとする試みが盛んになっている。当社でも燃焼器の設計ツールの開発を旨として燃焼器内の熱流体解析を進めている<sup>(3)</sup>。

ガスタービン用燃焼器内は高温、高圧の乱流場で、さらに化学反応を伴う複雑な流れ場であり、実験結果と比較検討して設計ツールとしての精度を高めていく必要がある。実験結果が公表されている燃焼器<sup>(4)</sup>を対象に計算し、実験結果との比較を行った。

### 4.1 計算方法

図8に計算対象とした燃焼器を示す。内径 125 mm、長さ



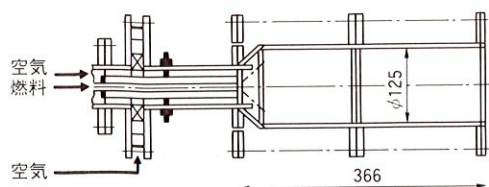


図8. 計算対象燃焼器 実験データが公表されている燃焼器で、内径125 mm、長さ366 mmの拡散型で、クォーツガラス製である。  
Schematic view of can type combustor

366 mmの拡散型燃焼器で、火炎の可視化とLDV (Laser Doppler Velocimetry) 計測のためクォーツガラスでできている。

計算は三次元円筒座標系で行った。周期性を考慮して90度のセクタモデルで計算した。支配方程式は連続の式、ナビエ・ストークスの式、エネルギー式、化学種の保存式および状態方程式で、乱流モデルは旋回流を考慮した修正  $k-\epsilon$  モデルを使用した。燃焼モデルは、アレニウスの反応速度と渦消散モデルの反応速度を併用した。解放アルゴリズムは、SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation) スキームを使用した。

#### 4.2 計算結果

実験および計算から得られた流線を図9(a)および(b)にそれぞれ示す。図9(a)の横軸は、燃焼器内径で無次元化した空気入口からの軸方向の距離である。実験結果および計算結果ともに燃料噴射口付近から循環領域が観察される。この循環領域は計算のほうがやや小さいが、実験で観察された現象を模擬している。

実験および計算から得られた温度分布を図10(a)および(b)にそれぞれ示す。実験結果および計算結果ともフローパターンと対応して、燃料噴射口付近の循環領域で高い温度を

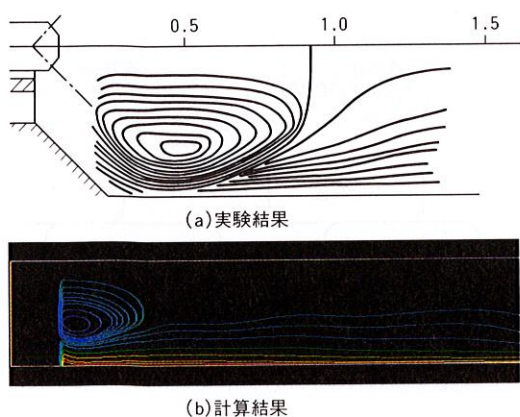
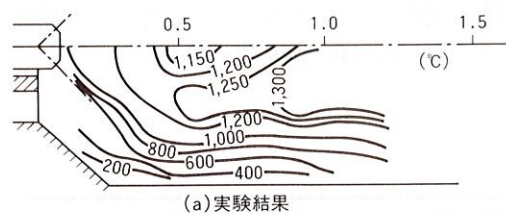
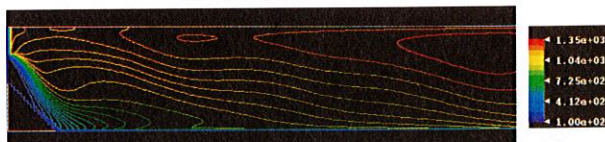


図9. 実験と計算の比較(流線) 実験結果(a)、計算結果(b)の両者は定性的によく一致している。

Comparison of measured and predicted streamline



(a)実験結果



(b)計算結果

図10. 実験と計算の比較(等温線) 実験結果(a)、計算結果(b)の両者は定量的にもほぼ一致している。

Comparison of measured and predicted temperature contour

示している。この熱解析で燃焼器内の最高温度を5~7%の誤差で予測することができる。

## 5 あとがき

熱流体シミュレーション技術の製品開発への応用について述べた。計算機の進歩とともに熱流体シミュレーション技術は今後ますます設計に利用されると思われるが、精度の向上と設計の現場で使えるツールの開発が重要になる。

## 文 献

- (1) 久野勝美, 他: 小形きょう体の熱解析, 日本機械学会論文集, 62-601, B (1996), 3453
- (2) K. Kawano, et al: Cooling Design of Large Capacity Gas Insulated Transformer. Proceedings of the ASME Heat Transfer and Fluids Engineering Divisions, HTD-Vol. 321/FED-Vol. 233, (1995)
- (3) D. Biswas, et al: Three-Dimensional Computation of Gas Turbine Combustors And The Validation Studies of Turbulence And Combustion Models, will be presented at ASME TURBO EXPO 1997
- (4) S. Nakamura, et al: The Structure and Stabilization Mechanism of the Primary Region of a Model Gas Turbine Combustor, Proceedings of International Gas Turbine Conference, Yokohama, Japan, Yokohama-IGTC-48



岩崎 秀夫 Hideo Iwasaki

研究開発センター 機械・エネルギー研究所主任研究員。  
電子機器の冷却技術の研究開発に従事。日本機械学会、日本伝熱学会会員。  
Energy & Mechanical Research Labs.



久野 勝美 Katsumi Hisano

研究開発センター 機械・エネルギー研究所研究主務。  
電子機器の冷却技術の研究開発に従事。日本機械学会、日本伝熱学会会員。  
Energy & Mechanical Research Labs.



デバシス ビスワス Debasish Biswas, Ph.D.

研究開発センター 機械・エネルギー研究所研究主務, 工博。エネルギー機器の熱流体解析技術の研究開発に従事。  
日本機械学会, ガスタービン学会会員。  
Energy & Mechanical Research Labs.