

放射をともなう機器の熱流動解析と実験

電子機器やエネルギー機器などの最近の機器は高性能化、コンパクト化、低騒音化にともない効率のよい冷却設計が求められている。比較的低温においても放射による放熱は無視できない量であり、放射を考慮にいたった設計が必要である。放射は固体間を電磁波として伝播するが、対流は固体表面にそって流れるため、放射による冷却と対流による冷却を選択して設計することができる。本稿では、放射を使って放熱を促進させた電子機器の事例と、放射の遮熱を利用した原子力関連機器の事例を紹介する。



技術本部
エンジニアリングメカニクス事業部
応用技術部 流熱加工技術室
満田 正彦

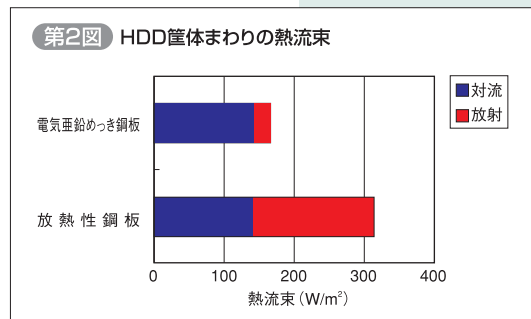
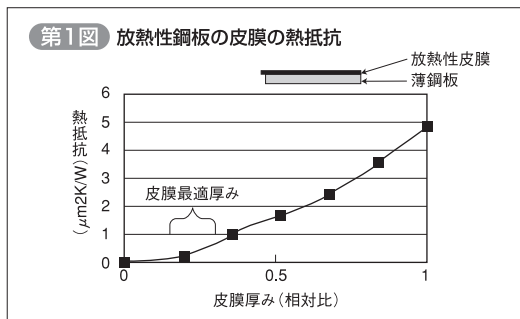
A-1 比較的低温での熱放射

外付ハードディスク（HDD）の筐体の材料を電気亜鉛めっき鋼板から放熱性鋼板「コーベホーネツ」*1)*2)に代えた事例を例に説明する。放熱性鋼板は鋼板の表面に放熱性皮膜を付与することで高い放射率をえている。一般に放射率の高い表面層がある場合、表面層の厚さ自体も放射率に影響するが、一方で熱抵抗も関係するため、両者を考慮した表面層厚さの設定が必要である。第1図はアルバック理工製熱定数測定装置TC-7000を用いて、皮膜の厚みと熱抵抗の関係を求めた結果である。日本電子製JIR-5500型フーリエ変換赤外線分光光度計を用いて測定した放熱性鋼板の放射率は0.86であり、放射率が0.12の電気亜鉛めっき鋼板の7倍の放射率を持つ。

HDDまわりの放射熱流束と対流熱流束はそれ

ぞれ、 $q_r = \varepsilon \sigma (T_w^4 - T_\infty^4)$ 、 $q_c = h(T_w - T_\infty)$ と表される。

ここで T_w は筐体の表面温度、 T_∞ は周囲温度、 ε は放射率、 σ はステファンボルツマン定数、 h は対流熱伝達率である。表面温度を50℃、周囲温度を20℃、HDD高さを15cmとした場合の対流と放射の熱流束を第2図に示す。筐体が放熱性鋼板の場合は、電気亜鉛めっき鋼板の場合とくらべて放熱性がほぼ2倍であり、放射が半分をしめる。このように比較的低温においても放射による放熱は無視できない。



参考文献

*1) 平野ほか：R&D神戸製鋼技報、Vol.52(2002年)No.2、p.107

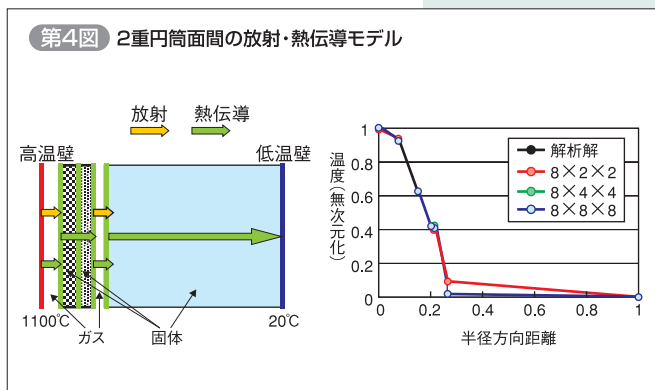
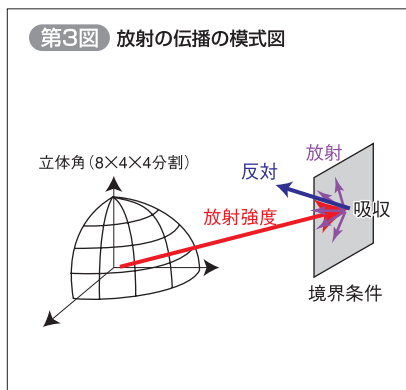
*2) 平野ほか：R&D神戸製鋼技報、Vol.55(2005)No.2、p.42

A-2 放射伝熱のシミュレーション

第3図に放射の伝播を模式化した図を示す。放射強度 $I(\vec{r}, \vec{s})$ は、位置ベクトル \vec{r} と方向ベクトル \vec{s} の4次元の変数である。物体表面のマイクロオーダーの領域においては放射が吸収・散乱と放射をともなって伝播しているが、それ以外の空間においては吸収・散乱と放射を無視できる。系全体の輸送方程式は $\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} = 0$ と簡単化し、物体表面は境界条件として定義する。物体に入射する放射熱流束は $q_r = (1 - \varepsilon) - \varepsilon \sigma T_w^4$ となる。この式を解くために、Discrete Ordinate

法 (DO法) *3)*4) を採用し、解析コードとしてFLUENTを用いる。DO法では立体角を複数に分割し、それぞれの方向における放射強度の輸送方程式を解く。DO法の検証に用いた2重円筒間での放射と熱伝導による伝熱モデルを第4図に示す。高温面と低温

面の温度はそれぞれ1100℃、20℃で、ガス中は放射と熱伝導による伝熱、固体中は熱伝導による伝熱が行われる。立体角の分割数を $8 \times 2 \times 2$ から $8 \times 8 \times 8$ の3条件としたシミュレーションと理論解と比較した結果も第4図に示す。立体角の分割数が少ない場合は低温において計算誤差が大きい。この検証結果から、低温における放射のシミュレーションにおいては立体角の分割数を $8 \times 4 \times 4$ 以上とする必要があることがわかった。



参考文献

*3) R.Siegel, et al., "Thermal Radiation Heat Transfer", McGraw-Hill Book Co, 1980.

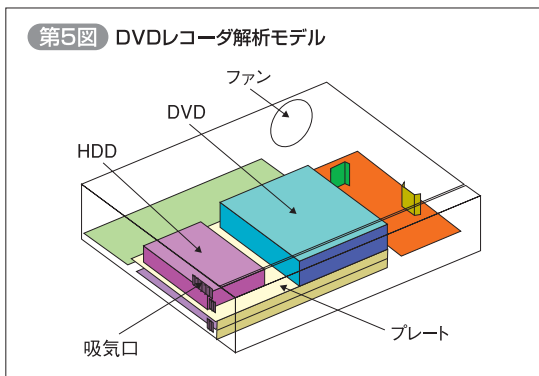
*4) FLUENT Inc., 「Fluent 6.2 ユーザズガイド、第12.3.6節」、2005年10月

A-3 電子機器の事例

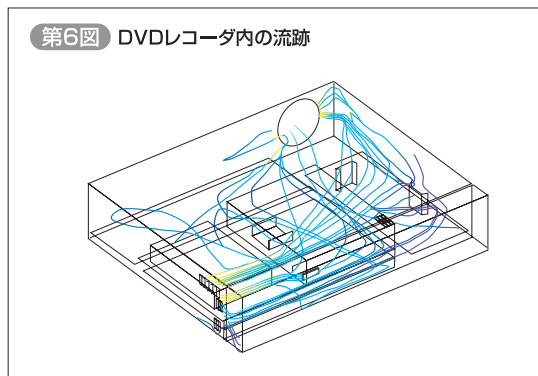
DVDレコーダの解析事例を紹介する。第5図は解析モデル図である。ハードディスク(HDD)、DVDやプレートは板材のみをモデル化し、内部で一樣に発熱していると仮定した。基礎方程式は連続の式、非圧縮性Navier-Stokes方程式、エネルギー保存式である。ブジネスク近似により浮力を考慮し、 $\kappa \varepsilon$ 乱流モデルの温度対数則を使って対流熱伝達を求めた。放射熱伝達はDO法を用いて計算した。吸気口から流入した空気の流跡を第6図に示す。吸気部から流入した空気は、HDDとDVDを冷却するほか、基板上のICやヒートシンク

を冷却しファン排気口から流出する。第7図に各部温度の解析結果と測定データの比較を示す。一樣発熱などの単純化のためによる解析誤差があるが、大局的な温度分布は表現できている。解析からわかった熱の流れの模式図を第8図に示す。HDDとDVDの放熱が下部のプレートを通して空気に放熱しているが上部への放熱がじゅうぶんでない。トップカバーを電気亜鉛めっき鋼板から放熱性鋼板にかえるとHDDやDVDから上部への放熱が促進され、最大で10℃の温度が下がることがわかった。各部の温度低下度を第9図に示す。

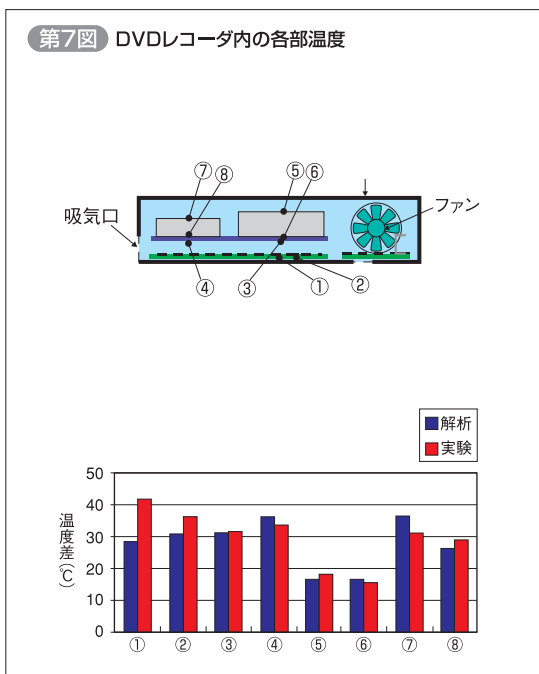
第5図 DVDレコーダ解析モデル



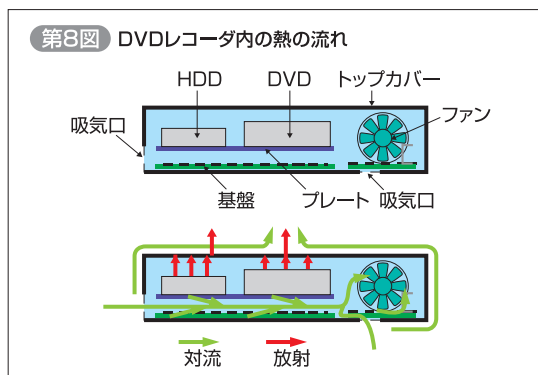
第6図 DVDレコーダ内の流跡



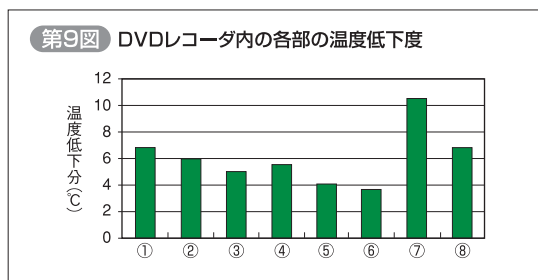
第7図 DVDレコーダ内の各部温度



第8図 DVDレコーダ内の熱の流れ



第9図 DVDレコーダ内の各部の温度低下度



参考文献

*5) 下条ほか: R&D神戸製鋼技報、Vol.53(2003)No.3、p.7

*6) 満田ほか、「コンクリートキャスク模擬放熱試験と熱流動解析」、第38回日本伝熱シンポジウム、2001年5月

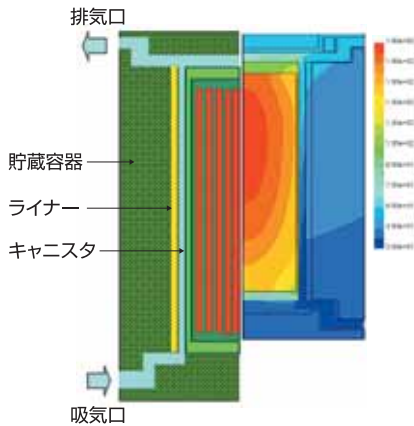
A-4 原子力関連機器の事例

コンクリートキャスク*5)*6)は原子力使用済燃料の集合体を収納したキャニスタを貯蔵するコンクリート製の容器で、放射線しゃへい機能と除熱性能を持つ。第10図にコンクリートキャスクの概念図と温度分布を示す。容器の直径は約3.4m、高さは約6.1mである。吸気口から流入した空気がキャニスタにより加熱されその浮力により排気口

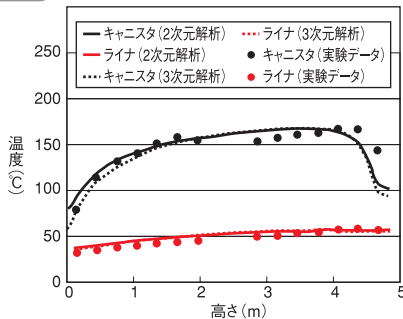
から流出される。通常のコンクリートの使用可能温度が65℃と低いため、放射率が0.15の金属製ライナを用いてキャニスタからコンクリートへの放射加熱をしゃへいする。軸対称2次元と3次元の熱流動解析を実施し、キャニスタとライナの表面温度をもとめた。基礎方程式は連続の式、非圧縮性Navier-Stokes方程式(ブジネスク近似、 $\kappa \varepsilon$ 乱流

モデル)、エネルギー保存式、DO法による放射輸送方程式である。キャニスタとライナの高さ方向の温度分布を第11図に示すが、実験でえられた測定データ*6)もプロットしている、高さが1m程度までは流れが層流状態で流れが上昇するにつれて境界層厚みが増えて、熱伝達率が下がり、キャニスタ温度が上がる。高さが1m以上の領域では流れは乱流状態で熱伝達率がほぼ一定でキャニスタ温度はほぼ一定となっている。

第10図 コンクリートキャスクの模式図と温度分布



第11図 キャニスタとライナの温度分布

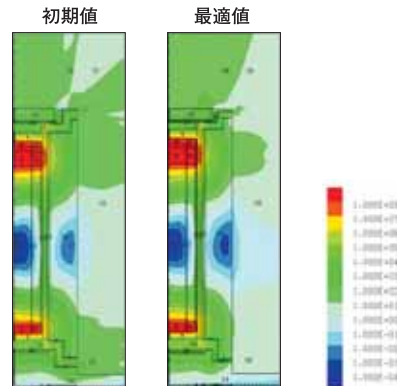


使用済燃料から放射された放射線は吸排気口を通して容器外にストリーミングするため放射線しゃへの観点からは流路幅は小さい方がよいが、除熱の観点からは広い方がよい。ここでは、吸排気口の流路幅を設計変数とする最適解析を行った。構造材の放射化ガンマ線、使用済燃料によるガンマ線および中性子線の線量当量率合計値の最大値を最小化することを目的関数とした。最適化の手

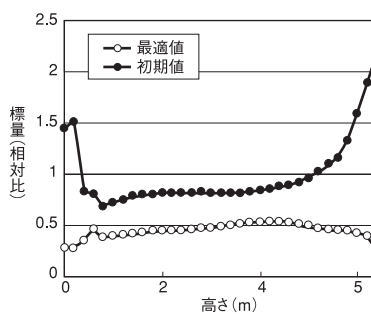
本稿では、放射を考慮した熱流動解析と実験の事例を紹介した。比較的低温においても放射の寄与度があることは案外知られておらず、また放射率のデータベースもじゅうぶんではない。今後、放射率などの熱物性値の測定の必要性が増えるであろう。電子機器の事例では、放射率を使った境界条件でモデル化しているが、電子部品レベルでみると、ミクロンオーダーの材料内の放射の吸収・

法に焼きなまし法を用いた。この方法は金属の焼きなましを参考としたもので、最適解の探索を急速に進めるものでなく、部分的には解の改悪を許すことで解の多様性を生出し、大域探索を可能にするといわれている。最適化コードにはiSHIGHTを用いた。放射線の解析コードにはDORT*7)を用いた。コンクリートキャスクまわりの構造材の放射化ガンマ線のコンタ図を第12図に示す。最適解では吸排気口のまわりのガンマ線が低減されている。半径方向の容器表面から1m位置での線量当量率合計値を第13図に示す。初期条件の線量当量率合計値の高さ方向の平均値に対する相対比で示す。初期値では吸気口と排気口の2カ所で極大値を示すが、最適解では大幅に低減された。吸排気口の流路幅が小さくなったため冷却空気の流量が約2割低下したが、コンクリート温度の上昇幅は4°Cにとどまった。

第12図 構造材放射化ガンマ線線量当量率のコンタ図



第13図 容器周囲1m位置での線量当量率合計値



散乱・放射をとまなう伝播を解析する必要が生じてくると予想される。その場合は、材料の吸収係数と散乱係数の測定も必要となってくる。コンクリートキャスクの吸排気口の最適化の問題は、音波と流れ、電磁波と流れの連成問題に通じるところがあり、今後はこのような連成問題にも展開していきたい。

参考文献

*6) 満田ほか、「コンクリートキャスク模擬放熱試験と熱流動解析」、第38回日本伝熱シンポジウム、2001年5月

*7) RSIC Code Package CCC-484, "DORT two-dimensional discrete ordinates transport code system", Oak Ridge National Laboratory, Nov. 1989.