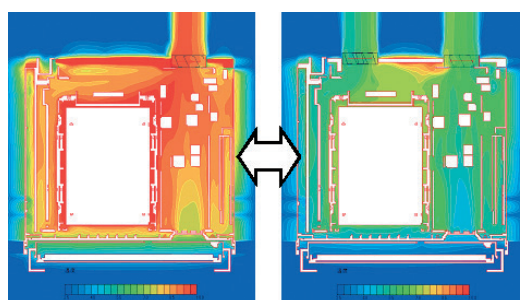


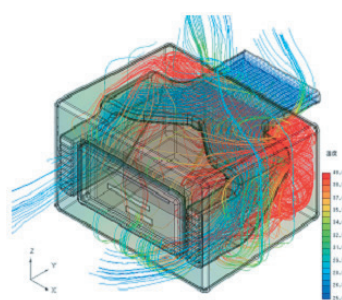
熱流体解析技術の開発・実用化と熱設計 (AVN熱設計への効果的な活用法)

Development/Practical Application of Thermal Hydraulic Analysis Technology and Heat Design (Effective Utilization for AVN Heat Design)

原 義 勝 Yoshikatsu Hara
三 輪 昇 平 Syouhei Miwa



AVN : 風の流れ、温度分布の比較検証



コンソール構造による影響検証

要 旨

カーナビゲーション (AVN: Audio Visual Navigation) は、ますます高性能・高密度になり、消費電力 (発熱量) も年々増加傾向である。それに伴い、熱問題はかなり深刻な状況になってきている。しかし、複雑な熱移動の現象を手計算で解くことは困難である。このため、当社では熱および風の流れを可視化し、熱設計への有効な方策を探るべく、CFD(Computational Fluid Dynamics)熱流体解析および熱設計への取り組みを開始、2002年度初めに実用化にこぎつけ、製品開発に活用を開始している。本稿では、その検証事例、活用事例およびCFDの効果的な活用法について紹介する。次に、放熱の基本原則、「熱対策」の限界、および車載機器特有の熱問題にも触れ、そして、『熱を考えた設計』への移行に向けた取り組みの重要性についても展開する。

Abstract

As Audio Visual Navigation (AVN) systems increase in both high specification and density, their power consumption (heat value) has also been increasing on an upward yearly trend. For this reason, problems related to heat have become extremely serious. However, complicated heat transfer phenomena cannot be solved using simple hand calculations. For these reasons, Fujitsu Ten creates visual representations of heat and air flows to seek out effective measures regarding thermal design to support efforts that have begun in relation to Computational Fluid Dynamics (CFD) thermal hydraulic analysis and thermal design for product development activities that have been initiated with a view to introduce practical applications in 2002. This article introduces related case studies, examples of practical applications and effective CFD application methods. Next, the essay presents the basic principles of heat dissipation, the limits of "heat countermeasures" and unique heat problems related to on-board devices. Finally, we expand on the importance of changing approaches in order to move towards "design that takes heat into consideration".

1

はじめに

図-1は、昨年秋に発売された、当社の代表的なカーナビゲーション（AVN：Audio Visual Navigation）である。これらは、『更に高性能化』、『更に高密度化』が進んだ代表的な商品である。



図-1 AVN7905HD & AVN075HD
Fig.1 AVN7905HD and AVN075HD

- ・『更に高性能化（Dual View AVN）』…左右で異なる画像を同時に表示可能。運転席ではナビ画面，助手席では，DVDやTV鑑賞が同時にできる。
- ・『更に高密度化（1 Din AVN）』…2Dinの機能を1Dinに凝縮。ナビもオーディオも1Dinにオールイン1。

このように、カーナビゲーションは、ますます高性能・高密度になり、パソコン並みに処理速度の高速化が求められ、消費電力（発熱量）も年々増加傾向であり、熱問題はかなり深刻な状況になってきている。また、車載機器の熱環境は厳しく、非常に過酷な条件をクリアしなければならない。

また、熱の移動は、①熱伝導、②対流（自然対流・強制対流）、③放射（輻射）という3つの形態で構成されている。図-2は、一つの発熱部品についての熱移動を簡易的に表現したものであるが、実際にはこれらが相互に影響しあい複雑な現象となる。

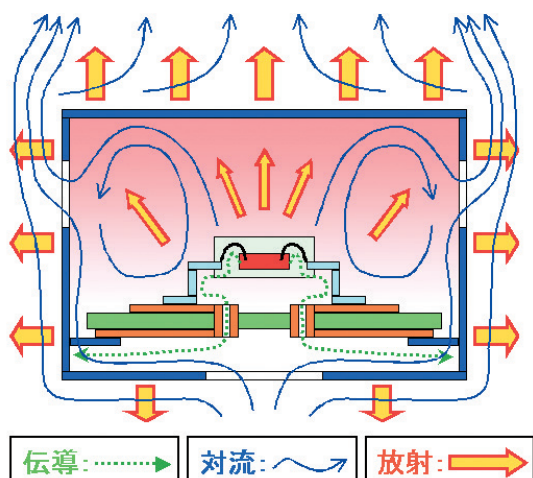


図-2 熱移動の3つの形態
Fig.2 Three patterns of thermal transfer

電子機器、特にAVNの場合、数百～数千点の発熱部品

があり、これらの伝熱形態が組み合わさって非常に複雑な放熱経路を形成することになる。したがって、これらの熱現象を手計算で解くことは非常に困難である。

そのため、熱および風の流れを可視化し、熱設計への有効な方策を探るべく、CFD（Computational Fluid Dynamics）熱流体解析、および熱設計への取組みを開始し、2002年度初めに実用化にこぎつけた。その検証事例、活用事例、および、CFDの効果的な活用法について紹介する。

次に、上流での熱設計を推進するため、放熱の基本原則および熱対策の限界について解説し、更に、車載環境、特にコンソール構造による製品の温度上昇に対する影響にも触れ、自動車メーカーへ問題提起をし、協力を得る為のプレゼンテーション手段としてもCFDを活用しているので、併せて紹介する。そして、『熱を考えた設計』への移行に向けた取組みの重要性についても展開する。

2 製品設計への活用技術の開発と実用化

2.1 熱流体解析技術の開発

2.1.1 解析技術開発の考え方

解析は、製品の構想設計段階からの適用が効果的である。『一つの発熱部品や基板レベルでの解析精度を追求する』ことは勿論重要ではある。しかし、まずは、製品開発の初期段階から、『大まかでもいいから、製品全体での相对比较としての相関が取れれば、十分に設計の役に立つ』と考え、最初に次のような検証から試みることにした。

2.1.2 検証事例Ⅰ【カーオーディオ】

1) 解析対象：2Dinサイズのカーオーディオ（CD+MD+チューナ）

2) 検証内容：筐体の放射率変動&ファン有無の比較

- ①筐体（全てSECC）
- ②筐体（上面のみ黒色メッキ銅板に変更）
- ③筐体（上面+両側面を黒色メッキ銅板に変更）
- ④～⑥上記それぞれに対し、ファン追加

という、計6つのパターンにて、CFDと実験値との比較検証を試みた。

CFDと実験値（データは紙面の都合で割愛した）を比較した結果、温度の絶対値には開きはあったが、相対的な相関は良く取れていた。この検証結果から即座に、「比較解析としてならすぐにでも使える！」という判断を下し、熱流体解析の活用方針を決定した。

また、この検証結果から、放射率変動の効果は少ないということも確認できた。

2.1.3 検証事例Ⅱ【カーナビゲーション】

次にファン風量（駆動電圧）を変動させ、カーナビゲーション製品各部の温度変化の推移を検証した事例を

紹介する。

定格12Vのファンにて、その駆動電圧を、「ファン駆動無し」⇒「6.5V」⇒「7.5V」⇒「8.5V」⇒「10V」⇒「11V」⇒「12V」⇒「13.2V」と変化させ、CFDと実験とでその相関を検証した。ファン特性は、駆動電圧毎のP（静圧）－Q（流量）特性を設定した。

ファン駆動電圧を変動させた時の上昇温度を、CFDと実験結果で比較した結果を図-3に示す。

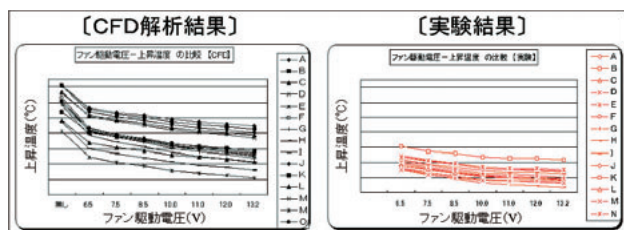


図-3 CFDと実験結果の比較

Fig.3 Comparison of CFD and experimental results

この検証結果から次の二つの事が判った。

- 1) ファンによる強制対流の放熱効果は非常に大きい。
- 2) ファン風量（駆動電圧）を上げると、それにほぼ比例して、製品各部の温度が一様になる。

また、図-4は、各部位毎に上昇温度の推移を比較したものである。

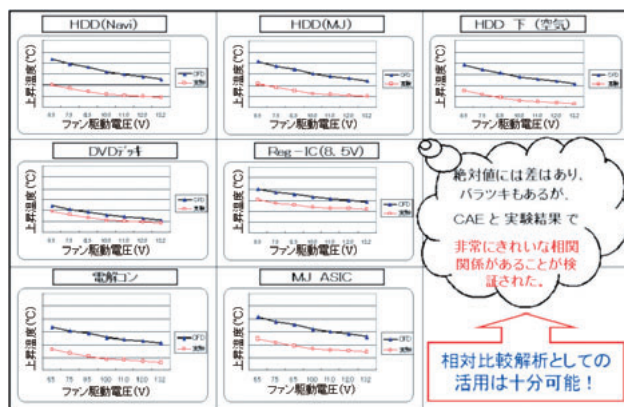


図-4 CFDと実験結果の相関比較（部位毎）

Fig.4 Correlation comparison of CFD and experimental results (For each area)

それぞれ、各絶対値には差があり、バラツキもある（理由は後述の「解析結果の誤差要因」を参照）が、CFD解析結果と実験結果との間には、きれいな相関関係があることが検証された。この結果からも、『相対比較解析としての活用は十分可能』なレベルまで技術開発できたとと言える。

2.1.4 解析結果の誤差要因

ここでは、まず、熱流体解析の基本的な手順を説明し、解析に必要な境界条件および解析結果の誤差要因について順を追って解説していく。

図-5に、熱流体解析の基本的な手順を示す。各ステップ

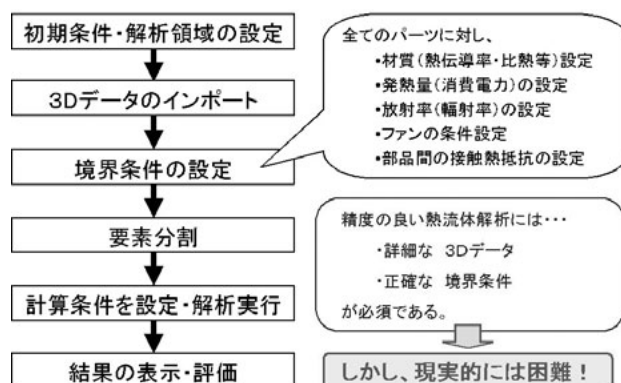


図-5 熱流体解析の基本的な手順

Fig.5 Basic procedures of thermal hydraulic analysis

で様々な設定が必要であり、ここに解析結果の誤差を発生させる多くの要因がある。CFDと実験で、温度の絶対値が合わない要因としては、主として次の四項目が考えられる。

- 1) 詳細な3Dモデルでは解析規模（要素数）が大きすぎて計算できない。
 - ・デッキ、電子部品、プリント基板等の詳細モデル化は非現実的である。
 - ・簡略モデル化および、要素分割が重要であるが、各社各人のノウハウに依存している。
- 2) 不明な境界条件が多い。（パーツの数だけバラつく。）
 - ・各発熱部品の発熱量（計算も実測も難しい）
 - ・各部品の物性値（熱伝導率・比熱等）
 - ・プリント基板の物性値（パターン・層数・スルーホール等によって大きく変化する）
 - ・各部品の放射率（輻射率）の値
 - ・各部品間の接触熱抵抗の値
 - ・ファン特性（駆動電圧毎のP（静圧）－Q（流量）特性も必要）⇒機器に組み込むと特性は変わる。
- 3) CFD計算プログラムの精度
 - ・実際の現象をまだ完全には数値計算できない。
 - ・このように不確かな境界条件を与えて、ソフトの精度を比較検証する事は困難である。
 - ・要素分割、収束判定等によっても解は変化する。（ノウハウ＝正解はない！）
- 4) 測定の誤差
 - ・熱電対の貼り方でも数度程度バラつく。
 - ・測定値は、大体低めにバラつく。

しかも当社の製品は、数千点の部品で構成されており、それぞれの境界条件の誤差が部品点数の数だけバラつくわけであるから、結果が合うのは困難である。要は、実際の現象を完璧にモデル化し計算することが、今の世の中の技術をもってしても非常に困難だということである。これから、熱流体解析に挑戦しようとする方は、よくCFDの特

性を理解し、活用目的を明確にした上で挑んで頂きたい。
うまく活用すれば非常に有効なツールとなる。

2.2 熱流体解析の実用化

2.2.1 AVN熱設計への活用事例

これまでの検証結果を元に、当社AVN（2004年夏モデル）の熱設計に、CFDを活用し開発を行った事例を紹介する。

背面に軸流ファンを配置して強制対流による放熱を行うが、効果的なファン配置・風量を見極める為に、図-6に示す3つのパターンにてCFDで比較検証した。

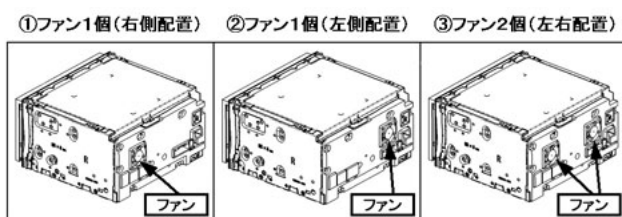


図-6 比較解析モデル（カーナビ背面視）

Fig.6 Models for comparative analysis (Rear view of car navigation unit)

解析結果を図-7～図-9に示す。HDD部断面の平面視を示す。それぞれ、左側が流速ベクトル図、右側が空気温度コンター図である。

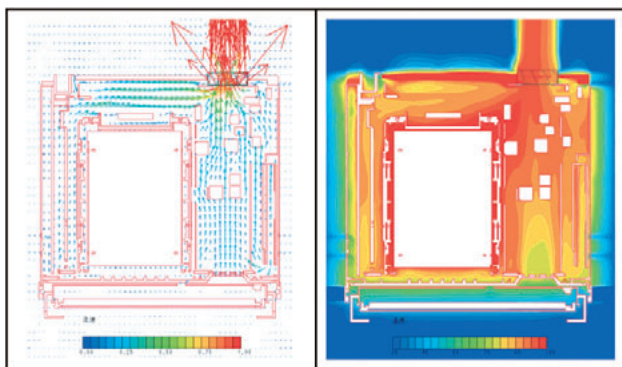


図-7 ①ファン1個（右側配置）

Fig.7 ① Single fan (right-side placement)

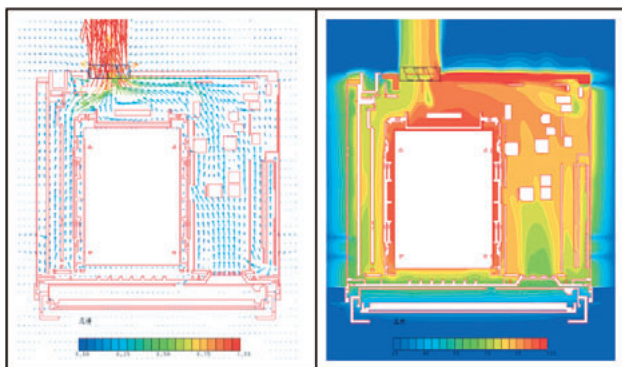


図-8 ②ファン1個（左側配置）

Fig.8 ② Single fan (left-side placement)

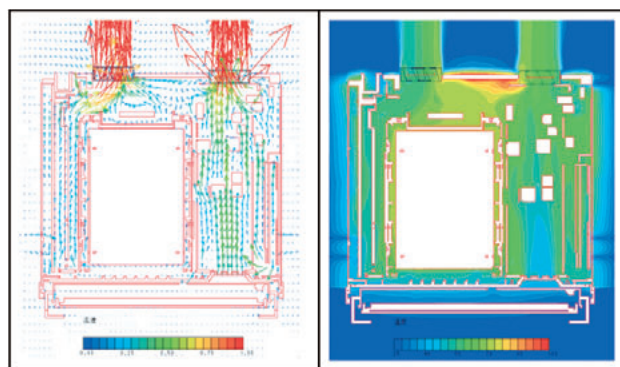


図-9 ③ファン2個（左右配置）

Fig.9 ③ Double fan (right and left-side placement)

これらの解析結果から、ファンが1個の場合では、「①右」より「②左」に配置する方が良い、また当然であるが、「③2個」の場合の方がより効果が大きいことが、物を作って実験しなくても、その差が視覚的にも明らかとなった。本解析により、ファン位置変更・数による冷却効果の違いを、『可視化』し、設計者に視覚的に理解して頂き、設計方針の決定根拠に活用された事例である。結果的に、ファンは2個使用することになったが、ファンの駆動電圧を下げて回転数を下げ、温度・ファン騒音共に満足させることが出来た。

2.2.2 CFD活用の効果

設計の初期段階では、モデルもラフであり、個々の電子部品の正確な発熱量も中々求まらない。まずはラフなモデルでの製品内部の空気の流れだけでも、おおよその優劣を相対比較検証することができる。その後、段々と詳細モデルができ、個々の部品の発熱量が求まった段階で、必要に応じて、流れのみや温度も含めた詳細解析を実施して行くことが効果的な活用法である。

相対比較解析活用の効果としては、次のような項目が挙げられる。

- 1) 筐体に穴を開けたら温度は何℃下がるか？ また、どこに開けたらいいか？
- 2) 筐体・ヒートシンク等にメッキ・塗装等を施し、放射率を変えたらどれだけ効果があるか？
- 3) ファンや発熱部品をどう配置するのがBest (Better) か？
- 4) ファンの位置・風量・数を変えたらどうなるのか？

冷却したい部位の空気は動いているのか？

これらに対して、空気の流れが見える、温度分布が見える、即ち『可視化（見える化）』というのがCFDの最大の嬉しさであり、それを利用して、できるだけ短時間に検証し、素早く設計に反映させることが、CFDの最も重要な役割である。これにより、設計構想段階からの最適な放熱構造の検証及び立案への活用が可能となり（図-10参照）、既に当社では広く活用されている。

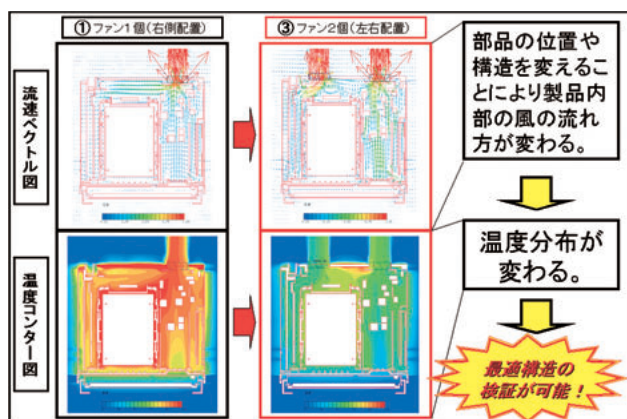


図-10 相対比較解析活用の効果

Fig.10 Effectiveness of the relative comparison analysis approach

3 更なる上流での熱設計

これまで、CFDの活用事例、活用の効果について述べてきた。しかし、CFDを実施すれば、熱問題が全て解決するというにはならない。CFDにて検証する前に、効果的な『熱を考えた設計』を実施しておく必要がある。その為には、次のような取組みが重要である。

〔製品側〕・最適な放熱手段の選定と織り込み

・低消費電力設計

〔車両側〕・コンソール部の最適放熱構造設計

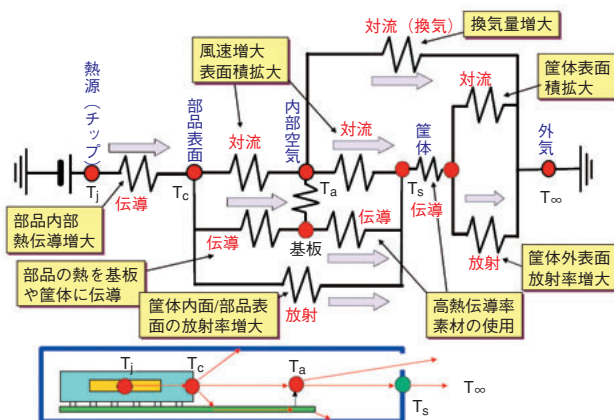
この章では、まず、放熱の基本原理解について説明し、製品の放熱対策には限界があるということを解説していく。更に、車載環境、特にコンソール構造による製品の温度上昇に対する影響にも触れ、『熱を考えた設計』への移行に向けた取組みの重要性について展開する。

3.1 熱対策の限界

3.1.1 電子機器の放熱経路

電子機器の放熱形態は、図-2に示したように、①熱伝導、②対流（自然対流・強制対流）、③放射（輻射）という3つの形態で構成されている。現実には、これらの形態が絡み合って多数の熱源が相互に影響を及ぼしあう複雑な状態となるが、巨視的に表現すれば、どんな実装形態であれ、放熱経路は概ね図-11のようになる。

熱源（チップ）で発生した熱はまず、部品内部の熱伝導によって放熱部（部品ケース）に伝えられる。部品ケースに達した熱の多くは周囲の空気（装置内部空気）へ対流によって伝達されるが、一部はリードを経由しプリント配線板に、また一部は放射により筐体へ伝えられる。プリント配線板に伝えられた熱は、徐々に内部空気に拡散しながら筐体へと伝達される。内部空気へ伝えられた熱のほとんどは、換気口を通して外部へ放出されるが、一部は筐体へ伝達される。種々の経路を経て筐体に達した熱は、筐体表面

図-11 電子機器の放熱経路²⁾Fig.11 Heat radiation paths for electronic devices²⁾

へと抜けて、外部空気へ放散される。

これがおおまかな電子機器の放熱経路である。電子機器の熱対策とは、これら放熱経路を構成する熱抵抗を最小化することに他ならない。図中に各熱抵抗を下げるための方策を示した。同じ熱対策といっても、対策すべき対象部分によってその方法はまったく異なる。電子機器の冷却を考えるには、このような放熱マップを頭に描いてアプローチすることが大切である。²⁾

3.1.2 熱対策の限界

当社の製品の場合、

- 1) 『熱伝導』には、「ヒートシンクの設置」等の手段が挙げられるが、「奥行き制限や多数のコネクタによる穴だらけとなり、十分な体積が確保できない」、「CD/DVDディスク、MDパック、ピックアップ等の熱を直接導くことはできない」、という問題点がある。
- 2) 『自然対流』には、「筐体に穴をあける」、「ヒートシンクにフィンを設けて表面積を増やす」等の手段が挙げられるが、「エアコンダクトからの結露による水滴落下によるショート防止の為、筐体上面に穴をあけられない」、「奥行き制限のため、ヒートシンクにフィンを設けるスペースが取れない」、という問題点がある。
- 3) 『放射』には、「筐体やヒートシンクへの黒塗装、黒メッキ」等の手段が挙げられるが、「放射率はどうかあいても1以上には上げられない」。

という状況にある。

電子部品などの「固体発熱源」の放熱能力は、

〔放熱能力＝放熱面積×表面の熱伝達率×温度差〕

で表わされる。即ち、放熱能力を高める方策としては、

●『放熱面積の拡大』

●『熱伝達率の増大』

残念ながら、この二つの組み合わせしか方法は存在しない。

図-12に、熱対策への各アプローチをまとめた。

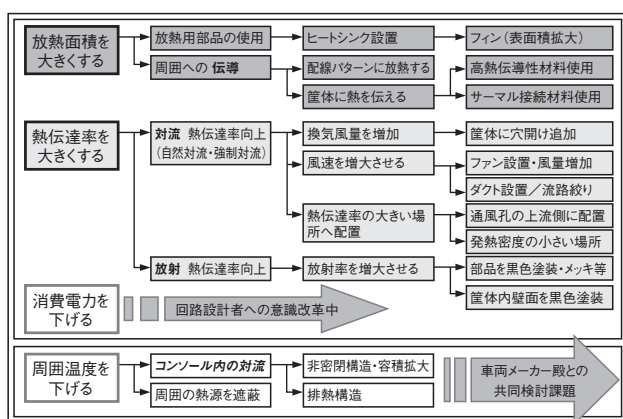


図-12 熱対策へのアプローチまとめ

Fig.12 Overview of approaches to heat countermeasures

『自然対流』や『放射』による放熱能力は、製品の大きさに決まってしまう。また、これらの対策には、コストがかかる割には効果は少ない。これ以上の放熱対策には、ファンを設置し、『強制対流』により対流熱伝達を向上させ、放熱させるしかない。『強制対流』には、「ファンの設置、風量の増加、ファン数量の増加」等の手段が挙げられるが、ファン騒音、風量増加によるピックアップ部へ付着する埃の増大、等の問題と相反関係にある。このように、機構的に実施できる「熱対策」には限りがあるということである。これ以上の熱対策には、図-12に示したように、「消費電力を下げる」、「周囲温度を下げる」等のアプローチも重要である。

3.2 車載環境の影響

3.2.1 車載機器特有の熱問題

周囲温度を下げるアプローチとして、車両コンソール部にも着目した。

ホームオーディオやパソコン等民生機器の場合は、ファン等により内部の熱をドンドンと製品外部の無限大の空間に放出させることができる。しかし、AVN等車載機器の場合は、それだけでは解決できない。

AVNの実車両への搭載例を、図-13に示す。様々な装着構造があり、特にコンソール部の構造によっては、直射日光の影響を受けたり、熱が籠ってしまったりする場合がある。

ファン等により、製品から放出された熱い空気は、まず、車両のインパネコンソール内に排出される。構造にもよるが、そのままでは、製品から放出された熱い空気がコンソール内に滞留し、コンソール内の温度がドンドン上昇し、結果として製品の温度は下がらない、という車載機器特有の熱問題が発生する場合がある。

もし、車両コンソール内に、何らかの手段で、常に、ほんの少しでも対流を起こすことができれば、製品の温度低減に大きな効果が期待できる。



図-13 実車両への搭載例

Fig.13 Installation samples in actual vehicles

この様子を、「実際の車両での実験事例」と、「簡易コンソールモデルでのCFD熱流体解析試行事例」とで確認したので、その内容を紹介する。

3.2.2 車両コンソールの影響検証

ある車両にて、エアコンのモードを、「①エアコンOFF」⇒「②オートエアコンON（外気導入）」⇒「③オートエアコンON（内気循環）」へと順番に切替え、コンソール内の対流の有無、温度変化を実験により検証した。そして更に、この現象を、CFDにより簡易モデルで比較検証を行った。

1) 流れの可視化

車両コンソール内の対流の様子を可視化するために、線香の煙を使って、対流の有無を確認した。

図-14は、その実験の様子の写真である。

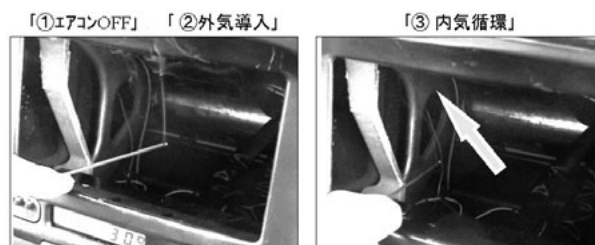


図-14 線香の煙による車両コンソール内の対流確認

Fig.14 Confirmation of convection within a vehicle console using incense

「①エアコンOFF」、「②外気導入」では、コンソール内に空気の対流は認められず。

「③内気循環」に切替えると、コンソール内の空気が、左上隅部（上記の矢印の方向）に吸い込まれて行く様子が確認できた。これにより、コンソール内部に、僅かではあるが、空気の対流が発生することが確認できた。

2) 実車での温度確認

次に、AVNを実車に組み込み、各モードでの温度変化の推移を測定した。図-15は、実験結果のグラフである。

「①エアコンOFF」では、温度はドンドン上昇していく。

「②外気導入」では、コンソール内に対流は無いが、エアコンダクトに25℃の空気が流入する為、その影響でコンソール内の温度も若干下がった。

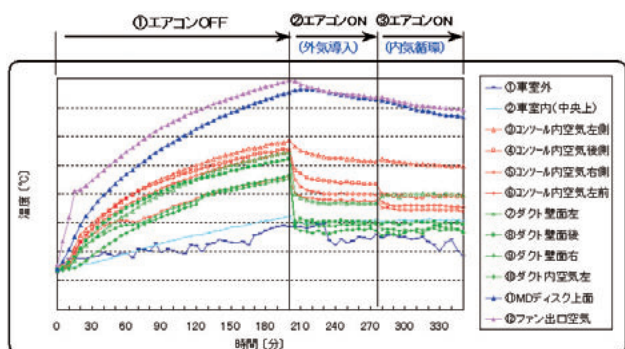


図-15 コンソール内温度変化の測定結果

Fig.15 Measurements of heat variation within consoles

「③内気循環」に切替えると、コンソール内に空気の対流が発生し、コンソール内の温度は更に低下した。

この実験結果から、結論として、『コンソール内の熱い空気を排出することができれば、製品の温度も下がる』ということが確認できた。

3) 簡易コンソールモデルによるCFDの試行

次に、この実験を、図-16のような簡易コンソールモデルを作成し、図-17のような比較モデルにて、CFDで再現・検証しようと試みた。

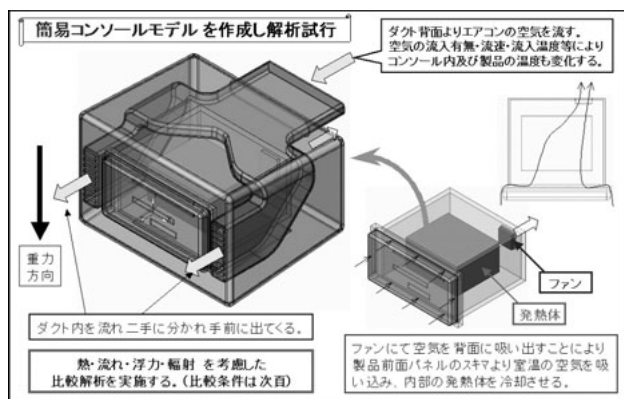


図-16 CFD用簡易コンソールモデル

Fig.16 Simple console model for CFD-use

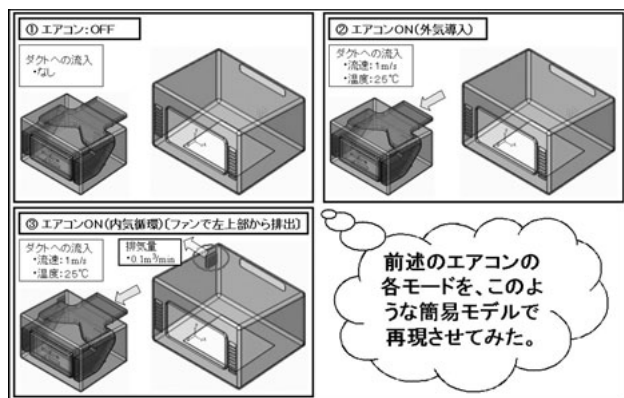


図-17 比較モデル

Fig.17 Comparative models

CFD解析試行結果を次に示す。図-18は、表面温度分布を、赤外線サーモトレーサによる画像と、上記簡易モデルによるCFD解析結果とを比較したものである。勿論、モデル・境界条件等完全に再現させた訳ではないので、絶対値は異なるが、よく似た傾向を再現させることができた。

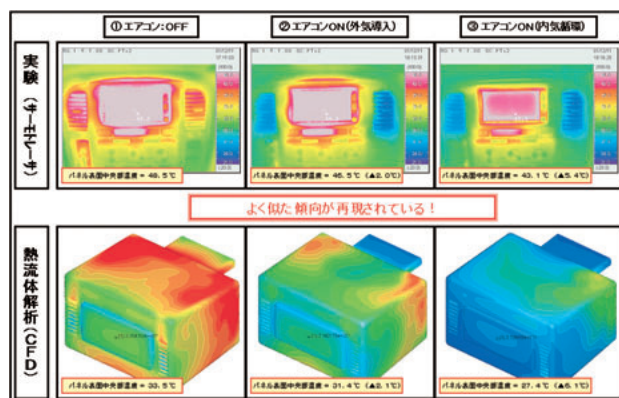


図-18 表面温度分布の比較〔実験⇔CFD〕

Fig.18 Comparison of surface heat distribution (Experiment ⇔ CFD)

図-19は、更に内部の様子をCFD解析結果で比較したものである。それぞれ、上段が、流線コンター図、下段が、中央部断面右側面視の温度コンター図である。内部の熱い空気の滞留、分布、コンソール構造の差による冷却効果の変動等の様子が視覚的に理解できる。アニメーションを活用すれば、さらに判りやすく表現することができる。

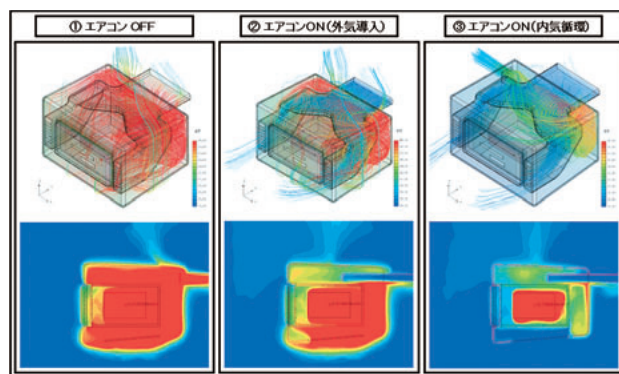


図-19 CFD解析結果（流線・断面温度コンター図）

Fig.19 Results of CFD analysis (Flow line/Cross-section temperature contour drawing)

AVN等車載機器単体での放熱対策は限界にきている。これからは、車両側も含めての放熱構造設計が必須であり、切実な状況となってきている。これらは、車両メーカーでコンソール部の基本設計段階から、熱を意識した放熱構造設計を実施して頂くために、自動車メーカーへ問題提起をし、協力を得る為のプレゼンテーション手段として活用し、熱設計の改革活動を展開しているところである。

3.3 『熱を考えた設計』への移行

本稿では、AVN熱設計へのCFD熱流体解析の実用化事例、および効果的な活用法についての報告を行ってきた。CFD熱流体解析技術の活用により、これまでより早い段階での熱設計に効果が出てきている。しかし、当社の熱設計の現状は、まだ、図-20のStep-1『旧来の熱対策』からStep-2『CFDを活用した熱検証』へ移行した段階にすぎない。真の意味でのフロントローディングでの熱設計を行うには、次のステップ、『熱を考えた設計』への移行が必須であり急務である。

今後、Step-3『熱を考えた設計』への移行に向けた取り組み・活動を更に強化していく必要があるが、その為には、発熱量・発熱部品の把握・配置、基板・回路・ソフト設計、デッキ構造設計、車両コンソール構造設計まで含めたトータルでの熱設計が重要であり、全部門の協力が必須である。

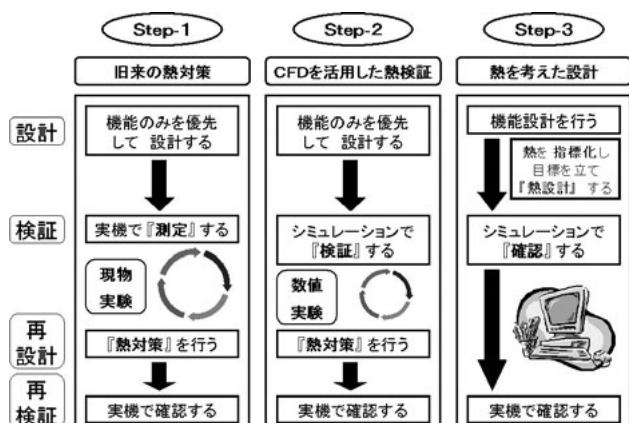


図-20 『熱を考えた設計』への移行ステップ

Fig.20 Steps to move towards "Design that take heat into consideration"

4

おわりに

CFD熱流体解析技術の開発・実用化が図れ、AVN等製品の熱設計への活用が定着し効果が出てきた。

今後は更に『熱を考えた設計』への取り組みを継続して推進していきたいと考えている。

最後に、資料引用を快諾して頂いた沖電気工業（株）国峯尚樹様、（社）日本機械学会RC214-RC227研究分科会でお世話になった富山県立大学教授 石塚勝様、等々、熱設計・熱流体解析業界でお世話になった皆様に心より感謝致します。

参考文献

- 1) 国峯尚樹：エレクトロニクスのための熱設計完全入門，日刊工業新聞社
- 2) 国峯尚樹：電子機器の熱設計と見積りの「つぼ」と「こつ」，オフィス・ジェーアイ（<http://www.thermo-clinic.com/>）
- 3) 原義勝：カーナビゲーションへの熱流体解析適用事例，TECHNO-FRONTIER SYMPOSIUM 2005 第5回熱設計・対策技術シンポジウム & 第3回カーエレクトロニクス技術シンポジウム，（社）日本能率協会，セミナーテキスト pp.G5-2-1～20，（2005）
- 4) 原義勝：カーナビゲーションの高性能化・高密度化による熱対策の必要性和放熱技術，月刊誌：MATERIAL STAGE，（株）技術情報協会，2005年7月号，pp.21～27，（2005）
- 5) 原義勝：カーナビゲーションの高性能化・高密度化による熱対策の必要性和放熱技術，RC214エレクトロニクス実装における信頼性設計と熱制御に関する研究分科会研究報告書，（社）日本機械学会，pp.853～868，（2006）
- 6) 原義勝：カーナビゲーションの高性能化・高密度化による熱対策の必要性和放熱技術，エレクトロニクス分野における熱制御，放熱・冷却技術（下巻），（株）技術情報協会，pp.22～38，（2006）

筆者紹介



原 義勝
（はら よしかつ）

1979年入社。以来、カーオーディオ、カーナビ、無線機等の機構設計に従事。1999年頃よりCAEへの取り組みを開始。現在、開発本部 DE技術部に在籍。



三輪 昇平
（みわ しょうへい）

1982年入社。以来、自動車用電子機器および開発支援ツールの開発に従事。現在、開発本部 DE技術部チームリーダー。