

# 特集 仮想設計：カーエアコン基本性能シミュレータの開発\*

Digital Engineering : Development of Automotive A/C System Basic Performance Simulator

浅野秀夫  
Hideo ASANO

彦坂佳宣  
Yoshinori HIKOSAKA

北田基博  
Motohiro KITADA

Performance simulation, together with 3D-CAD, has become a key element in reduction of development period and cost. This, however, requires much human labor and technical know-how, and has not been easily accessed by product engineers.

In the computation in complex system such as heat flow in automotive HVAC unit, much labor and know-how are still needed, then no significant changes are observed in handling the system. This paper describes the simulator newly developed to allow the computation of HVAC basic performance with small human labor and an easy access by A/C engineers, and our approach to a high accuracy estimation technique development, taking an example of temperature control characteristics which is an important item in evaluation of A/C performance.

**Key word** : Air Conditioning, Computational Fluid Dynamics, Simulation, HVAC, Simulator

## 1. まえがき

現在、各社は設計・生産準備プロセスの変革で開発期間の短縮やコスト削減に取り組んでいる。その中でシミュレーションは、3次元CADとともに、これらを実現する切り札になっている<sup>1,2,3)</sup>。しかし従来、シミュレーションを設計者が自ら実施するのは困難であった。その理由は、解析モデルの作成や、計算に多くの時間が必要であり、また、解析テクニックや新しいアプリケーションの操作を覚える必要がある、設計者が開発・設計の現場にシミュレーションの結果を十分いかしていくためには、実用的な計算精度が要求されるが、従来のシミュレーション技術の計算精度は研究段階で使えるレベルに止まっていることであった。

今回、Fig.1に示すHVAC(Heating, Ventilation and Air Conditioning)を対象に、その基本性能を計算できるシミュレータを開発し、設計者自らが使用できるシステムを構築した。また、温度計算精度を向上させるための方向性を見出したので報告する。

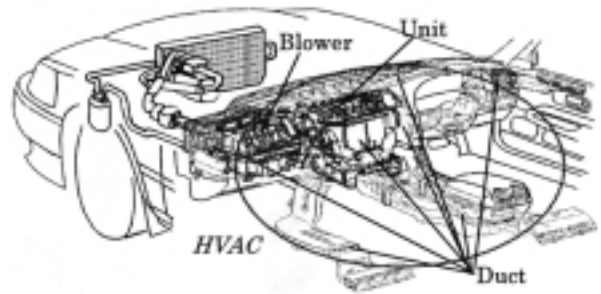


Fig.1 Air Conditioning system

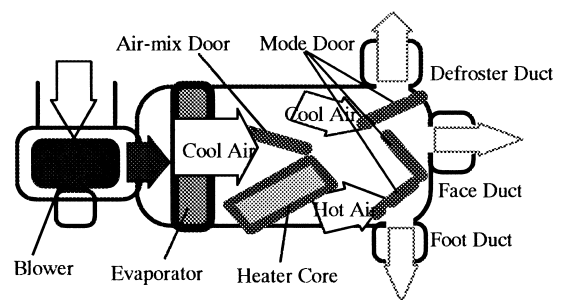


Fig.2 HVAC

## 2. HVACの構造と計算対象

HVACの構成と仕組みをFig.2に示す。温度調節は、エアミックスドアの開度を変化させることによって温風と冷風の量をコントロールして行う。また、モード・ドアを変化させることによって、送風するダクトを切り替える

今回のHVAC基本性能シミュレータで対象としたの(社)自動車技術会の了解を得て、1998年秋季大会学術講演会前刷集No.92,93より加筆転載

は、設計者のニーズが最も高い、温度コントロール性能、各ダクトの風量割合、全体の圧力損失計算である。

一例としてFig.3にFaceモードの温度コントロール性能を表わすグラフを示す。これは、エアミックスドアの開度に応じて、各ダクトの出口空気温度がどのように変化するかを表わしたものであり、一般にドア開

度に応じてリニアに温度が変化できれば素性の良いHVACと言える。

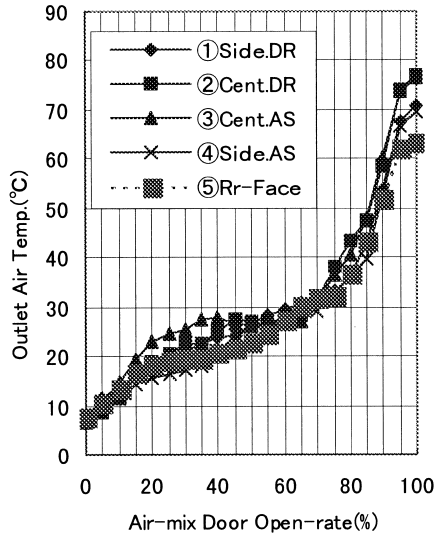


Fig.3 Temperature control performance

### 3. 基本性能計算の現状と課題

CFDによるHVACの基本性能計算は、Table 1に示す工程に各ソフトウェアを使用し、それぞれ示した操作回数と時間が必要である。

Table 1 Analysis process

No.	Process (1 Door Pattern)	Software	Operation	
			Count	Time (Min.)
1	Geom. Model creation From product-model	Unigraphics	45	10
2	Grid Generation	PATRAN	25	25
3	Boundary Cond. Def.	PATRAN	185	120
4	Calculation	STAR-CD	10	5
5	Data Analysis	Pro-STAR	35	15

これは、あるドアパターン1つの計算に必要な工数にすぎず、通常の5モード×8エアミックスドア開度の40パターンの計算には、操作回数5000回、操作時間30時間という膨大な工数が必要となっている。また、メッシュ分割や計算が失敗する場合もある。

実際の製品形状ソリッドモデルから計算用ソリッドモデルを作成し、何も処理せずにPATRANで自動メッシュ分割する場合、50%以上の確率でメッシュ分割が失敗する。また、メッシュ分割が成功しても、ほとんどの場合、計算発散が生ずる。従って、修正に更に多くの工数が必要になる。

一方、計算精度についてみると、Fig.4に示す各ダクトからの出口風量割合は実験値と比較して全体とし

て10%以下の誤差範囲であるものの、Fig.5に示す温度コントロール特性は吹出し口や条件により15%を超える誤差が判明し、HVACの良否を判定するリニア性を評価できる計算精度とは言えない。

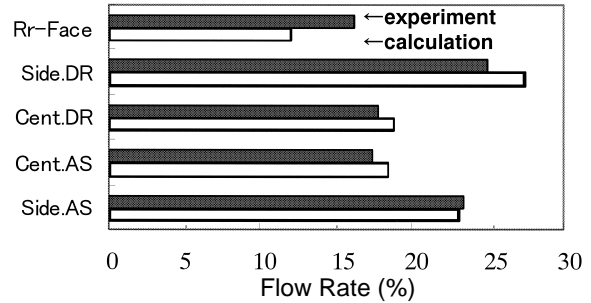


Fig.4 Comparison of flow rate

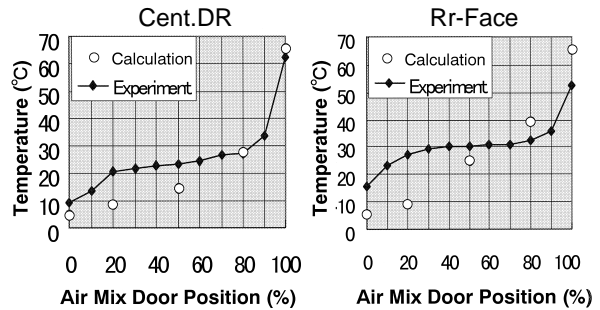


Fig.5 Comparison of temperature (Cent. DR, Rr.-Face)

以上から、設計者が使える実用的なシミュレータの開発目標値として、システムとしては、5モード×8エアミックスドア開度40パターンの合計操作時間である30時間が、確実に1日すなわち8時間以内で収まること、計算精度としては、上記40パターンで実験値との誤差が吹出し口温度で5%以内であること、を設定した。

### 4. システムの開発

前述の目標値「5モード×8エアミックスドア開度40パターンの合計操作時間である30時間が、確実に1日すなわち8時間以内で収まること。」を満足するために、以下の2点の開発を目指した。

計算可能なソリッドモデルの作成手法の開発

計算手順の自動化システムの開発

#### 4.1 計算可能なソリッドモデル作成手法

50%以上の確率でメッシュの自動分割が失敗する、またメッシュ分割が成功してもほとんどの場合で計算が発散する原因を調査した。

まず、メッシュの自動分割が失敗する件については、

計算用ソリッドモデル上に存在する $10^3$ mm オーダの微小形状が主な原因であることが判明した。

次に、計算が発散する問題については、計算で使用しているメッシュの品質、すなわちアスペクト比の悪いメッシュが主な原因であることが判明した。HVACの計算用ソリッドモデル、すなわち空気モデルに対してテトラメッシュで自動分割を実行すると、非常に複雑な形状の部分にアスペクト比の悪いメッシュの生成が避けられない。そこで、ソリッドモデルのどの形状がアスペクト比悪化の原因になっているかについて検討した。

アスペクト比の定義はメッシュ分割ソフトやソルバーによって異なることがあるため、ここで、Fig.6の式(1)のように定義しておく。

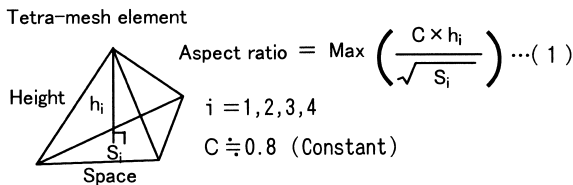


Fig.6 Aspect ratio definition

ここで、Cは、正四面体でアスペクト比が1になるように調整する係数である。実際の計算ではメッシュサイズとして8mmを使用しているため、これを式(1)に当てはめ簡略化するとFig.7の式(2)となる。

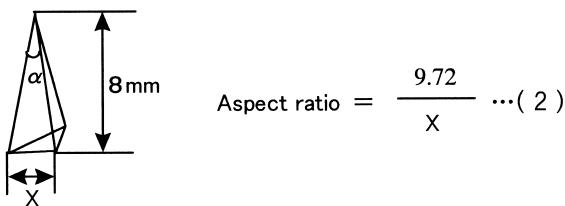


Fig.7 Aspect ratio

ここで、Xは最大8mmであるメッシュ高さの底辺の1辺の長さを表す。経験上、ソルバーに使用しているSTAR-CDでは、本計算に関する限り、アスペクト比が10を超えるメッシュが存在すると、発散する可能性が急増することがわかっている。従って、発散に対する安全率を2とすると、アスペクト比は5以下にコントロールする必要があるため、Xは1.94mm以上が必要となる。このXは計算用ソリッドモデルの微小形状の1辺の長さとして考えることができるため、1.94mm以下のサイズの形状に変更を加えれば良いこ

とになる。

しかし、Xが1.94mm以下になる場合はこれだけではない。鋭角なソリッド形状をメッシュ分割した場合にも同様にアスペクト比の大きいメッシュが生成される。アスペクト比が5以上になる角度は、Fig.7で $X = 1.94$ mmとした場合の頂点の角度 $\alpha$ と同じであり、約14度となる。

以上の考察から、計算用ソリッドモデルの2mm未満の微小形状と、15度以下の鋭角形状を排除すれば、発散の確率を激減できることがわかった。これは同時に前述のメッシュ自動分割の失敗を防ぐことにもつながる。

そこで、微小形状と鋭角形状をソリッドCAD上でチェックする機能を開発した。Fig.8に示すとおり、簡易な操作で該当する形状を検索し、ハイライト表示できる。

この機能を使用し、チェックされた部分を事前に修正することにより、計算の発散を未然に防ぐことが可能となった。

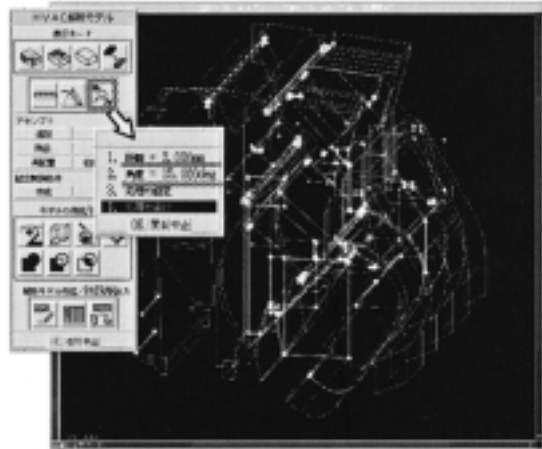


Fig.8 Check functions

#### 4.2 計算手順の自動化システム

工数削減のためには自動化が有効なことは言うまでもないが、現状の計算手順をそのまま自動化したのでは、大幅な工数削減は期待できない。そこで、類似の手作業が繰り返される部分に着目し、その工数を最小限にする計算手順を検討した。

従来の計算はFig.9のように、ドアパターンごとに別個に行っていた。このため、境界条件設定等をドアパターン分だけ繰り返す必要があった。

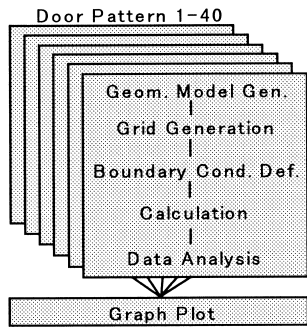


Fig.9 Conventional flow of analysis

そこで、Fig.10の新しい手順を考案した。すなわち、

- ・最初のステップでは、各ドアの開度パターンをUnigraphicsの標準機能であるEXCELのようなスプレッドシートを用いて一括指定する。次に、あらかじめ用意したドアの無い空気ソリッドから、パターンに応じてドアを自動で引き算し、ドアパターンごとのソリッドを作成する。生成したドアパターンごとのソリッドは、同一ファイル中にレイヤを分けて自動保管する。
- ・メッシュ分割は、ドア位置に左右されない共通部とドア周辺部との2段階に分け、共通部については1回だけ実施する。
- ・境界条件設定は、プロワからの風の入り口と、ダクトの出口、および熱交換器を1回だけ設定すれば済むようにし、他の境界条件や物性値、解析コントロールは専門家のノウハウに基づき自動設定する。
- ・ドア周辺部のメッシュ分割と計算は、ドアパターンに従い同時並行的に実施する。
- ・すべての計算が終了すると、グラフを自動作成する。

Fig.10に示す計算手順を自動実行するための機能として、Fig.11に示す画面を持つ、ワークフロー機能を

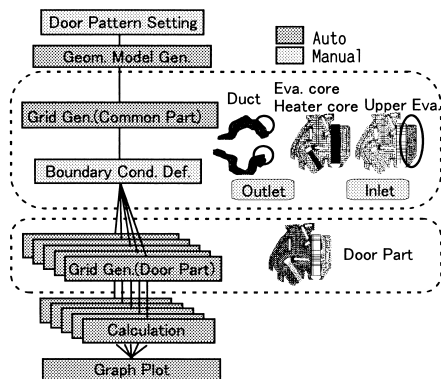


Fig.10 New flow of analysis

開発した。

- ・手順の各項目にアプリケーションソフト、ここではUnigraphics、PATRAN、STAR-CD等を割り当てられるようにすることで、各アプリケーションの順次実行、およびアプリケーション間のデータの受け渡しを自動化する<sup>4,5,6)</sup>。
- ・基本的な設定は、アイコンやメニューをクリックし、出てくるウインドウに入力することで実施可能とする。
- ・処理の進捗状況は、アイコンの色でわかるようにする。
- ・計算パターンが幾つであっても、あらかじめ定義しておく手順は1つで済むようにする。実行が始まり、処理が計算の所まで進むと、Fig.12のようにパターンの分だけ自動的にフローを増殖させる。

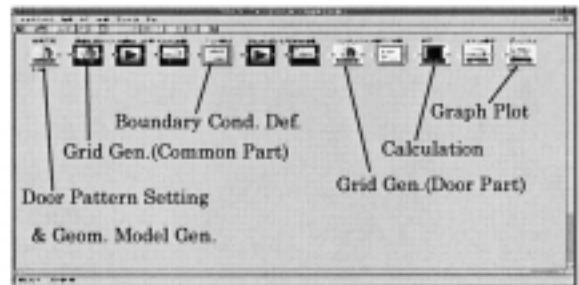


Fig.11 Workflow (Before execution)



Fig.12 Workflow (After execution)

#### 4.3 システムの適用事例と効果

開発したHVAC基本性能シミュレータをFig.13に示すHVACの計算用ソリッドモデルに適用し、効果を確認した。



Fig.13 Analysis model

本シミュレータによってFaceモード計算を行った結果を示す。Fig.14が自動作成されたFaceモードの温度コントロール性能のグラフである。

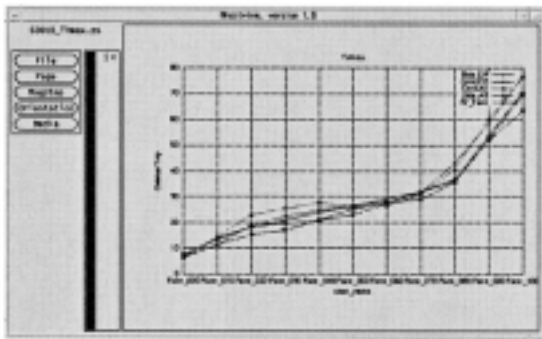


Fig.14 Output 1 of simulator

Fig.15がドア開度50%時の温度分布である。これは別途Pro-STARを立ち上げ確認する。

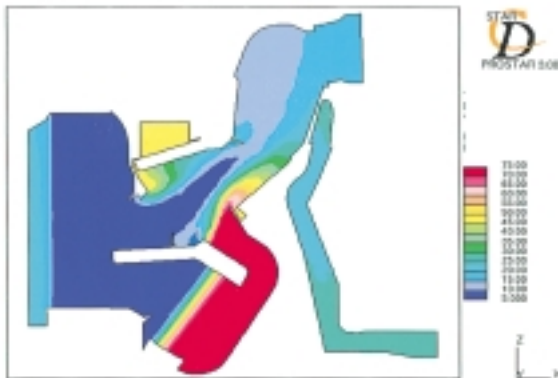


Fig.15 Output 2 of simulator

40パターンの計算を行った時の操作時間をFig.16に示す。操作時間が30時間から5.6時間に81%減少し、目標の8時間以内を達成できた。

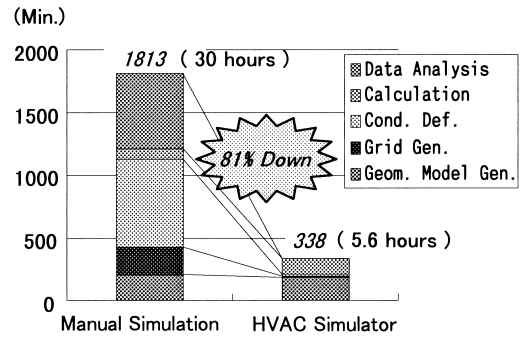


Fig.16 Operation time

### 5. 計算精度の向上

前述の目標値「5モード×8エアミックスドア開度40パターンで実験値との誤差が吹出し口温度で5以内であること。」を満足するために、計算値と実験値に温度差が発生する要因を検討し、以下の4点の課題を抽出した。

- 計算モデルと実験モデルの形状、条件の不一致
- ダクトの熱ロス
- 冷風と温風の混合(エアミックス現象)計算の精度
- ヒータコアの温度分布

#### 5.1 温度計算精度向上の課題

##### 5.1.1 計算モデルと実験モデルの形状、条件の不一致

計算モデルは4.1項で説明したように、製品形状モデルから、2mm未満の微小形状と15度以下の鋭角形状を排除したモデルに変更されている。この形状面の差が計算に与える影響は無視できないが、精度を検証する上では計算モデルを正とした実験モデルを試作し、全く同一の作動条件でなければ正当な比較評価ができない。このため後述するように、製品形状モデルではなく、エアミックス基礎モデルで評価する。

##### 5.1.2 ダクトの熱ロス

計算モデルでは壁面を断熱条件で計算しているが、実験ではダクトケース外との間の熱移動(熱ロス)が存在する。エアミックスドア開度が0%(Max.Cool)、100%(Max.Hot)時には外部との温度差が大きくなるため熱ロスの考慮が必要である。実験による確認ではMax.Hot時、サイドFaceで5、リアFaceで10の熱ロスがあり、計算上、壁面での熱伝達条件を加える必要がある。

5.1.3 熱の混合(エアミックス現象)計算の精度

HVACの内部温度計算を行った例はいくつかあるが、その温度分布から精度を考察したものは見当たらない<sup>7)</sup>。HVACの重要機能である冷風と温風を混合する、エアミックス現象の計算精度は計算の本質的な課題であり、次項で検討を行った。

5.1.4 ヒータコアの温度分布

ヒータコアの温度分布の影響はエアミックスタイプのエアコンの場合、ヒータコア内を流れる温水の量が多いため、実験的にも温度分布は少ないことを確認している。

ただし、温水流量で温度を調節するリヒートタイプのエアコンシステムの場合、分布の偏差は顕著であり考慮する必要があるが、今回はエアミックスタイプに限定し、検討対象から除外する。

5.2 エアミックス現象の計算精度向上

エアミックス現象の計算精度を検証するため、エアコンユニット内部の温度分布を実測し、計算結果と比較した。Fig.17の内部断面温度分布の比較(上段：計算値、下段：実験値)にその結果を示す。比較断面位置はエアミックス後のダクトへの分岐前の付近で、センタープレートからドライバ側半分の断面での結果を示している。温度分布の形状は比較的良く一致しており、左上と右端の高温部の傾向も一致している。

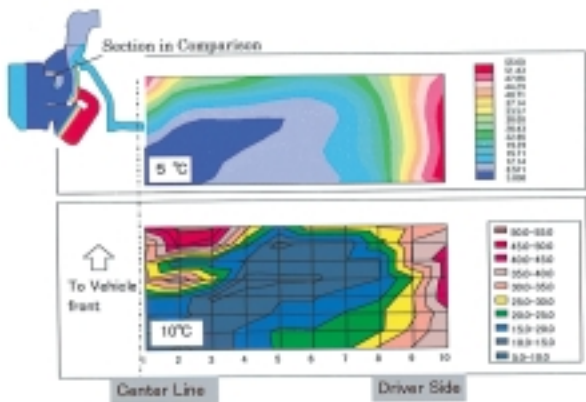


Fig.17 Comparison of temperature at HVAC -inside

ただし、温度の絶対値と分布の大きさを比較すると差があり、この分布の差がそのままダクト出口での温度差となっている可能性が高い。

5.2.1 エアミックス基礎モデルの概要

実験モデルとの形状差による誤差を極力無くし、エアミックス現象のみを比較できるよう、シンプルなモ

デル(エアミックス基礎モデル)を作製し、検証を行った。Fig.18に基礎モデルの概略を示す。

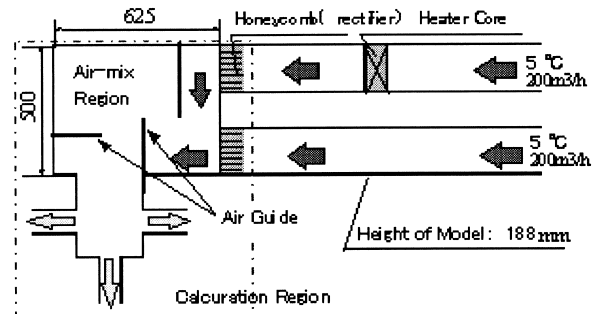


Fig.18 Air Mixing basic model

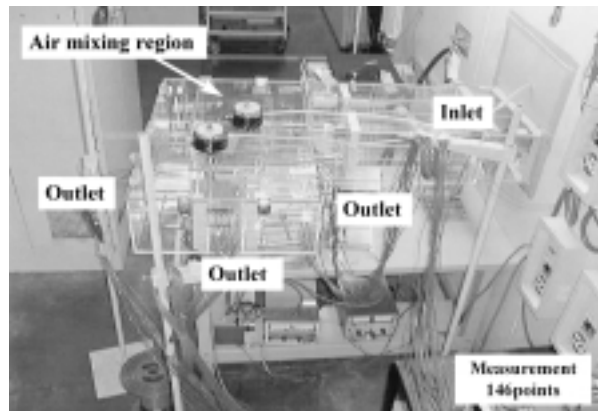


Fig.19 Experimental model

エアミックスタイプの基本として、冷風・温風の衝突、曲げ、分岐を再現できる構造とした。またエアガイド位置を移動することで、エアミックスのパターンを変更できる構造となっている。Fig.19に実験装置を示す。内部温度測定は熱電対を使用し、内部流れを乱さないように1ポイントごとに測定を行った。Fig.20に計算モデル(3次元)の概要を示す。

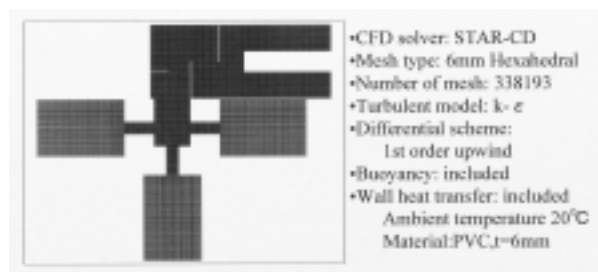


Fig.20 Analysis model

5.2.2 エアミックス基礎モデルによる検証

Fig.21 およびFig.22 に計算値と実験値の温度分布 (中心断面) を比較検証した結果を示す。エアガイド3枚 (Fig.21) の場合、温度分布も絶対値も良く一致している。しかし、エアガイド1枚 (Fig.22) の場合、温度分布の形状は一致しているが、絶対値では10 近く計算値が低くなっている。図示していないが、各吹き出し口の風量割合は良く一致していることから、流速ベクトルの計算は精度良く解けているが、熱の拡散が実際の現象に対し不完全であると考えられる。

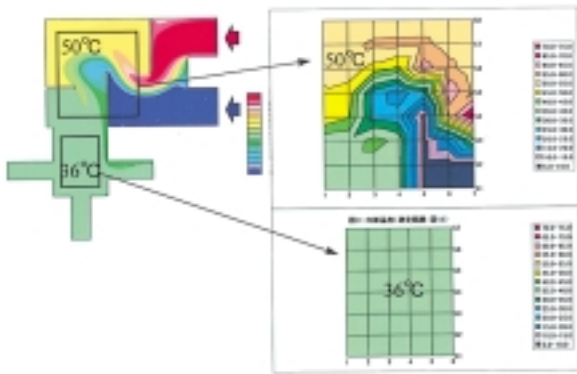


Fig.21 Comparison of temp. distribution (Air guide3)

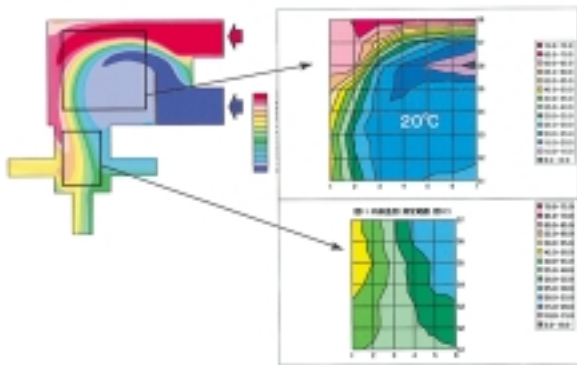


Fig.22 Comparison of temp. distribution (Air guide1)

5.3 温度計算精度向上の方向

計算理論の面から見ると、Fig.20の計算条件に示すように、エアミックス現象の温度計算はk- 乱流モデルで熱拡散を取り扱い、ほとんどのソルバーが渦熱拡散係数型モデルを使用している (Fig.23)。これは運動量に対する熱の拡散を乱流プラントル数 (Prt) を用いて表現する方法である。乱流プラントル数は通常計算上では定数として扱っているが、実際は流れ場の状態によって変化する値で、一般的には空気の場合0.6

~ 0.9 くらいの範囲であることが知られている<sup>8)</sup>。

Equation of Energy

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( a \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} - u'_j \theta' \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (a + a_t) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} \right]$$

Equation of Motion

Eddy Diffusivity for Momentum

Eddy Diffusivity for Heat

Turbulent kinetic energy: k  
Dissipation: ε

$$v_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$a_t = \frac{v_t}{Pr_t}$$

Turbulent Prandtl Number

Fig.23 Equations<sup>9)</sup>

Fig.23の式からわかるように、乱流プラントル数を変えることで熱拡散の度合いをコントロールすることができる。エアガイド1枚のモデルで乱流プラントル数を変更した場合の効果を検討した Fig.24に Prt = 0.1にした場合の結果を示す。温度分布、絶対値ともによく一致していることがわかる。ただし、この乱流プラントル数の値をエアガイド3枚のモデルに適用すると、熱拡散が強すぎる結果となる。

以上の検討から、エアガイド3枚のように比較的乱れの強い流れ場の場合、Prt = 0.9が適用でき、エアガイド1枚のように乱れの弱い流れ場の場合、Prt = 0.1まで下げることで温度を合わせ込むことは可能である。

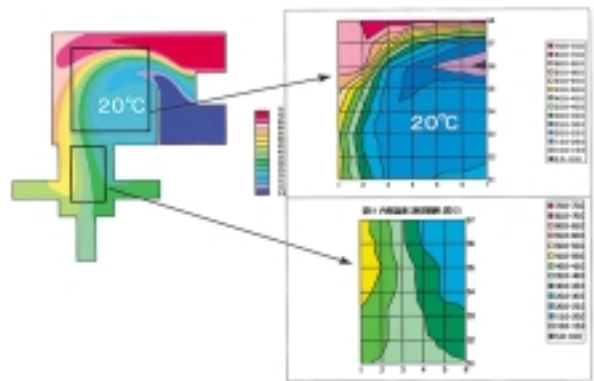


Fig.24 Temp. distribution in case of Prt = 0.1

流れ場に応じて乱流プラントル数をコントロールすることで熱計算の精度を向上することはできるが、汎用性は少ない。前記検証結果から、計算上の本質的な問題としては、等方性のk- 乱流モデルを使用しているため、せん断流れでの乱流強度を適切に表現できていないことが上げられる。

シミュレータに適用し汎用的に扱う場合、より高精

度の乱流モデルの適用と、熱拡散に関する数学モデルの改良が必要である。

## 6. まとめ

設計者自身が使用することのできる、HVACの基本性能シミュレータを開発できた。

- (1) メッシュのアスペクト比と計算用ソリッドモデル形状の関係について考察し、ソリッドモデルのチェック機能を開発することで、自動メッシュ分割と計算が可能なソリッドモデルの作成を可能にした。
- (2) 操作回数を減らす計算フローについて考察し、ワークフロー機能を開発することで、81%もの工数削減を可能にした。
- (3) カーエアコンの温度コントロール特性を精度良く予測するための技術として、エアミックス現象の基礎解析を行った。その結果、エアミックス現象の数値的合わせ込みの可能性と、精度向上の方向を見出した。

## 謝辞

最後に、本シミュレータの開発及び温度計算精度向上にあたり、

- ・富士通(株)様はじめ関連各社様
- ・EDS(株)様
- ・伊藤忠テクノサイエンス(株)様
- ・日本エムエスシー(株)様
- ・日本オラクル(株)様
- ・(株)シーディ・アダプコ・ジャパン様
- ・(株)デンソーアイテック様

にご協力頂きました。この場をお借りして厚く御礼を申し上げます。

## <参考文献>

- 1) 久保他：トルクコンバータの流体性能解析システムの開発，自動車技術会前刷集964，p133-136(1997)。
- 2) 浅野他：仮想試作を使ったカーエアコン開発期間の短縮，自動車技術会シンポジウム，No.9710，p18-23(1997)。
- 3) 木崎：日経デジタルエンジニアリング，p.176-185(1998-4)
- 4) Unigraphics Ver.13.0 マニュアル，EDS/富士通(1997)
- 5) MSC/PATRAN Ver.7.5 ユーザーマニュアル，日本MSC
- 6) STAR-CD Ver.3.0 ユーザーマニュアル，CD-adapco JAPAN(1996)
- 7) 中山力：日経デジタルエンジニアリング，p.87-103(1998.5)
- 8) 日本機械学会編 伝熱工学の進展 第2巻(養賢堂)
- 9) 3乱流解析 数値流体力学シリーズ(東大出版会)(1995)

## <著者>



浅野 秀夫  
(あさの ひでお)

冷暖房事業部  
エアコン仮想設計システムツールの開発に従事。



北田 基博  
(きただ もとひろ)

冷暖房事業部  
エアコン流れ解析要素技術の開発に従事。



彦坂 佳宣  
(ひこさか よしのり)

冷暖房事業部  
ソリッドCADシステム要素技術の開発に従事。