

論文 | カーエアコンにおける CFD (数値流体力学) の研究と応用*

Research & Application of Computational Fluid Dynamics for Automotive Air Conditioner

浅野秀夫
Hideo ASANO

The improvement in temperature controllability and the reduction in noise are strongly required for mobile air conditioning following the recent trend of the luxury oriented vehicle.

While, the changes of the market trend and customer needs are increasing remarkably, therefore the demand of the reduction in development term is becoming further stronger.

Based on this background, the authors initiated the applied development of the numerical analysis (particularly CFD : Computational Fluid Dynamics) as the method of developing air conditioning system in a shorter period and have prospected the method for actualization. The authors report the details this time.

Key Words : Computer Application, Computational Fluid Dynamics, Air Conditioner, Automobile.

1. まえがき

カーエアコンは、今や走る・曲がる・止まるに、冷やす(暖める)を加えた、自動車の四大機能といえる程に重要な製品となっており、より快適でより静かな車室内空間を創り出す技術の追求には限りがない¹⁾。

しかも、最近の社会動向・市場動向・消費者嗜好の急激な変化に対応して、開発期間を短縮した、タイムリーな新技術の市場投入が必要である²⁾³⁾。

このような背景のもとで、エアコンに高度な技術を短期間に開発する一手段として、筆者はCFD (Computational Fluid Dynamics=数値流体力学)の応用研究を進めてきた。

CFDは、大型電子計算機の驚異的な進歩に支えられて発展した新分野であるが、実用に即したCFDの活用方法に重点を置き研究を行い、成果を上げたので報告する。

2. エアコンの構成と特性

エアコンは、冷凍サイクルをエンジンルーム内に、エアコンユニットをダッシュボード内に設置する⁴⁾。

本稿で関係するエアコンユニットは、図1に示すよ

うに、一般的にブロワ・クーラー・ヒーターで構成される。ブロワおよびクーラーにて作り出された冷風はヒーターに導入され、エアミックスドアにより、一方はそのままバイパスされ、残る一方は、エンジン冷却水を利用した温水熱交換器 (=ヒーターコア) を通過し、温風となる。そして、下流でこの温風と冷風が混合し、さらに下流のモードドアの開閉にてFACE・FOOT・DEFの所定の吹出しグリルから適切な温度の風が車室内に送り出されることになる。

エアミックスドアの開度 (即ち温度調節レバー) を変えることで、各吹出しグリルからの空気温度を図2 aの実験例のように変化させる。

さらに下流のモードドアの開度を変えることで、各

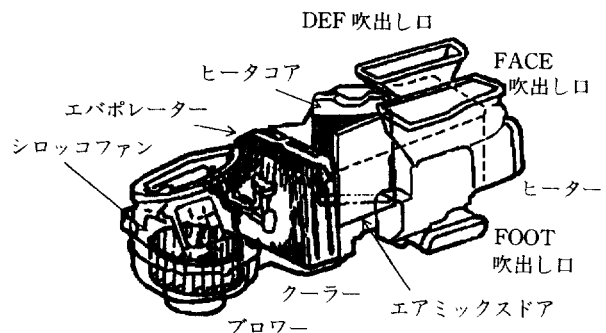


図1 エアコンユニットの構成例

* 1996年7月11日 原稿受付

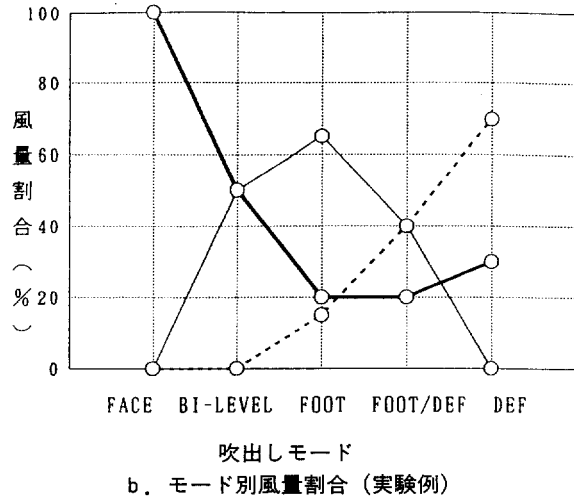
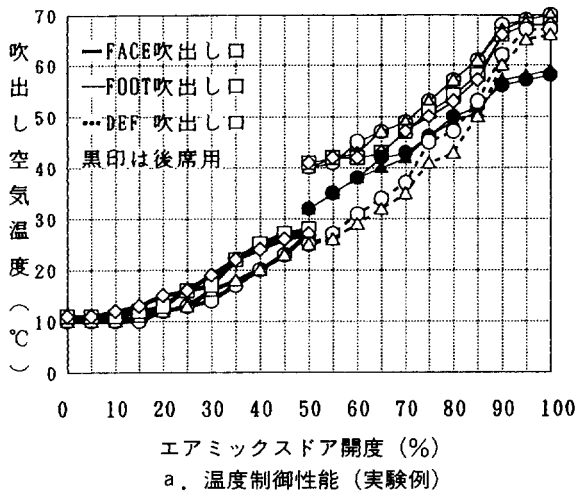


図2 エアコンユニットの特性

吹出しグリルからの風量を図2bのように変化させる。今回、4章以降で述べるように、シロッコファン・ヒーターなどについて、CFDの応用研究を行った。

3. CFDの進展

- ① 大型電子計算機性能の飛躍的向上
- ② 数値流体解析プログラムの進歩
- ③ 熱流体分野の研究者のニーズ増大

に支えられて発展してきた新しい分野である⁵⁾。

図3に主なスーパーコンピューターの性能推移を示す。

1秒間に10億回の浮動小数点演算を行うことを、1

GFLOPS (ギガフロップス) と表し、演算性能の指標とするが、80年代は、演算素子性能の向上から、5年で10倍の伸びであったが、90年代に入って、演算処理方法の革新 (スカラー処理からベクトル処理へ、さらにパラレル (並列) 処理へ) から、5年で100倍と、驚異的な伸びを示している⁶⁾。現在では、CPUを膨大に並べた超並列マシンによる大規模高速計算が主流になってきている⁷⁾。

続いて、表1に市販のCFDプログラムを示す。この分野の進展は90年代初めまでは、方程式の差分計算法の精度向上に重点が置かれていたが、現在は大規模計算モデルに対する計算格子生成の半自動化の方向に重

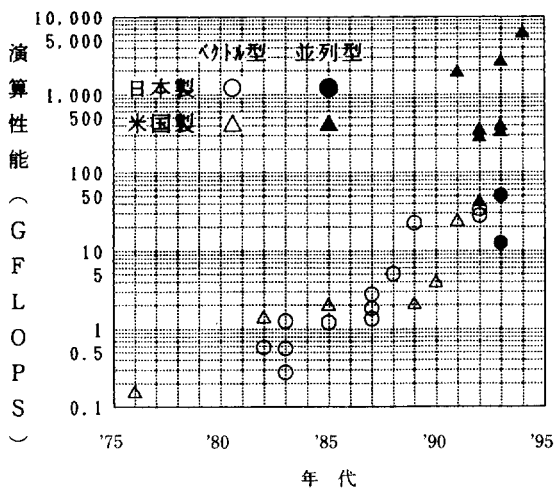


図3 スーパーコンピューター性能

表1 CFDプログラム (代表例)

名称	*1 計算法	*2 格子系	特記事項
FIDAP	FEM	非構造	FEMの草分け的
FLUENT	FDM	非構造	自動格子作成可能
NAGARE	FDM	境界適合	直接法, 熱機能丸
NISA/3D	FEM	非構造	汎用熱流体プログラム
PHOENICS	FDM	境界適合	CFDの草分け的
SCRYU	FDM	境界適合	非圧縮性, 圧縮性
STAR-CD	FDM	非構造	実績例多し
STREAM	FDM	構造	FDMの草分け的

*1 FDM: 有限差分法 FEM: 有限要素法

*2 構造: 直交・円筒座標系 境界適合: 境界線と一致する格子系 非構造: 不規則格子系

点が移っている⁸⁾。

しかし、入力処理と計算精度の両方を兼ね備えたものはなく、計算対象の特徴をとらえて、適したプログラムを選択する他ない⁹⁾。

4. 送風機内の流れ解析

シロッコファンの翼形状はファンの回転軸方向に二次元形状であり、回転対称形であることから計算モデルは、一組の翼間とし、流れを二次元計算した。

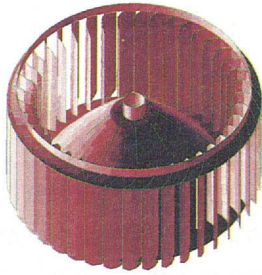


図4 シロッコファンの外観例

なお、翼表面は円弧の連続であるため、境界適合格子が形成できる熱流体解析コード「SCRYU」を使用した。

基礎方程式は、質量保存の式(1)、運動量保存の式(2)で

$$\nabla V = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V = -1/\rho \cdot \text{grad}P + \nu \nabla^2 V + F - g\beta(T - T_{\text{ref}}) \quad (2)$$

V : 流速ベクトル t : 時間 P : 静圧 F : 外力

T : 温度 T_{ref} : 参照温度 ν : 動粘性係数

g : 重力加速度 β : 体膨張率 ρ : 流体密度

回転流体には外力 F として、遠心力とコリオリ力が作用する。

$$F = m r \omega^2 - 2 m \omega \times V \quad (3)$$

表2 境界条件と計算条件

部 位		条 件
境 界	入口/出口	周速度・流入速度/均一抵抗
	翼面/周期面	速度0/翼ピッチ分回転周期
計 算	格子/ Δt	$80 \times 48 = 3840 / 3 \times 10^{-7} \text{sec}$
	サイクル	10000 (準定常)
	計算機/時間	IBM9021 / 150分

上記基礎方程式の差分化は時間項を後進差分、空間項を2次中心差分、移流項を河村スキームとした¹⁰⁾。また、直接シミュレーションを用い乱流モデルは使用しない¹¹⁾。

4.1 境界条件と計算格子

一組の翼形状の境界条件と計算条件を表2に示す。また、計算格子の例を図5に示すが、翼面近傍は直接シミュレーションが可能なメッシュ間隔とした。

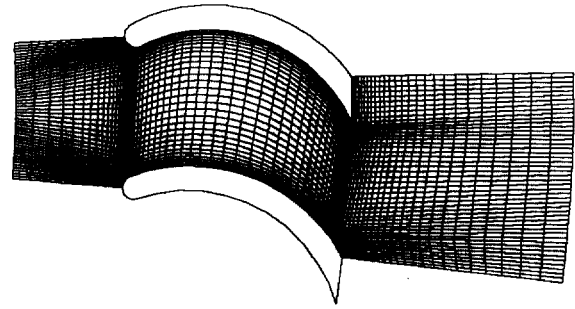


図5 計算格子

4.2 流れ・圧力の計算例

翼へ流入した流れは翼間に大きな渦を作り、この渦により偏った主流は出口で再付着し、後流ではカルマン渦が発生する。

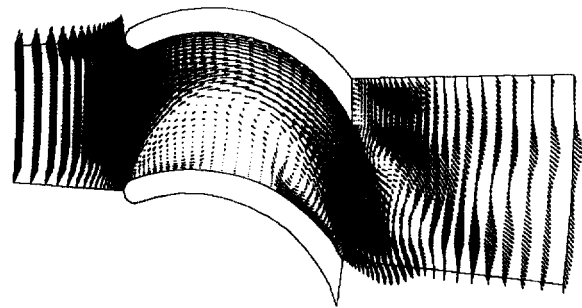


図6 流速ベクトル

このカルマン渦の挙動は前述の再付着点の変動に強く影響を受け、後流部分の圧力の凹凸分布が周期的に発生する。

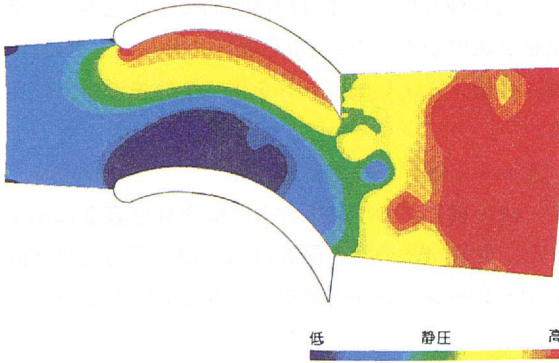


図7 圧力分布

4・3 流れ・圧力の実験検証

翼出口部の流速分布を熱線風速計により測定し、変動、分布共に、計算値と測定値はよく一致した。

また、翼の両面にかかる圧力の時間ごとの変化を、半導体圧力センサーにて測定し、変化幅が計算値と概ね一致していることが確認できた。

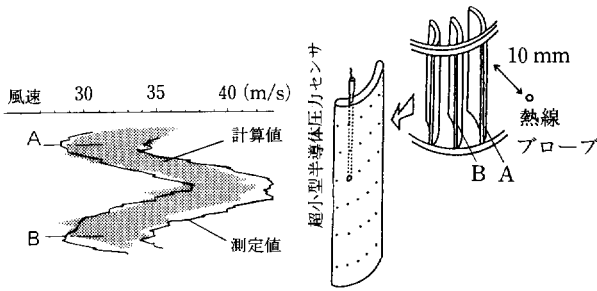


図8 流れの検証

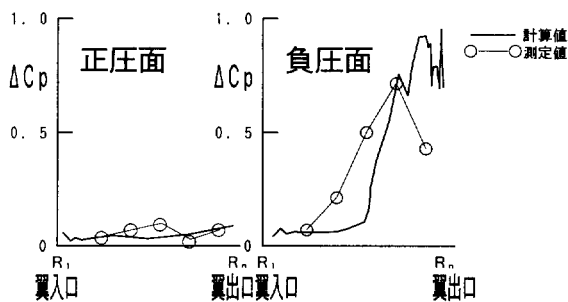


図9 圧力の検証

4・4 送風機性能への応用

翼間流れを計算する目的は、流動状態を推定し、流れの良いファン形状への設計指針を得ることにある。

従って、流速分布・圧力分布という定性的な表現では、形状検討時の比較が的確にできないため、圧力係数φ・比騒音Ksなどの特性指標を流れ計算結果から

誘導する定量推定法を考案した。

4・4・1 圧力係数の推定

圧力係数φは、送風機全圧ΔP_Tの周速相当動圧による無次元数である。

送風機全圧ΔP_Tは、ファン全圧ΔP_{FT}とスクロール内部損失の差であり、スクロール損失係数をφ_{sc}とすると、圧力係数φは式(4)となる。

$$\phi = \Delta P_{FT} / (1/2 \rho U_2^2) - \phi_{sc} \quad (4)$$

ただしφ_{sc}＝一定

ファン全圧ΔP_{FT}は、流れ計算から求め、圧力係数φが推定できる。

4・4・2 比騒音の推定

比騒音Ksは、通風路からではなく送風機本体から発生する固有の空力騒音である。

空力騒音は、圧力騒音と流速騒音に分離できる。圧力騒音は、翼の正圧面・負圧面各々が受ける周期的な圧力変動から発生する騒音であり、この圧力変動の時間微分値の総和が音圧に比例する¹²⁾。

流速騒音は、カルマン渦等の乱流から発生する騒音であり、これは乱れ領域の大きさに比例する¹³⁾。

$$Ep = l \cdot \sum (dPp/dt) \quad (5)$$

$$Es = l \cdot \sum (dPs/dt) \quad (6)$$

$$Ew = \xi U_2^3 \sqrt{Dw} \quad (7)$$

$$Ks \propto 10 \log Zb(Ep + Es + Ew)^2 \quad (8)$$

E: 音圧 Z: 翼枚数 l: 翼長さ b: 翼高さ

Dw: 後流幅 p: 正圧面 s: 負圧面 w: 後流

4・4・3 推定法の精度

上記推定法の精度を、性能試験結果から比較検証した。

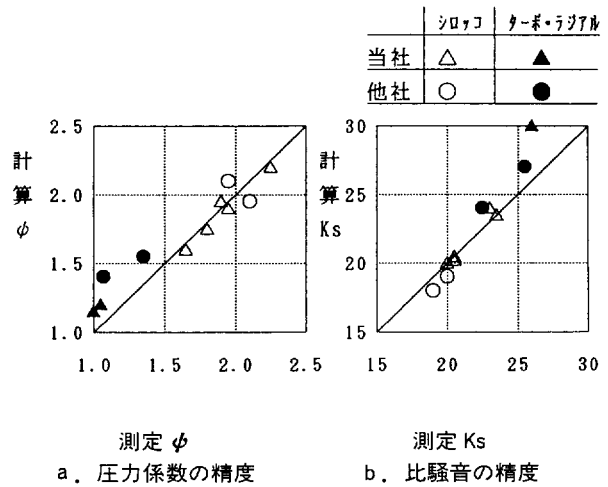


図10 推定法の精度

出口角の大きいラジアル・ターボ翼は圧力係数 ψ 、比騒音 K_s ともに推定精度が低い。

これは、シロッコ翼と比べて、翼車幅が短く、回転軸方向流れが入口から出口まで急変し、二次元に近似でできる流れではないためであろう。

より一層推定精度を向上させるには、スクロールも含めた、全体の三次元流れ解析が必要である。

以上からシロッコファンについては、各種の翼形状の翼間流れ解析を行い、その性能推定値から、要求される仕様に適した設計指針が得られ、試作工数の削減が可能になった。

5. エアコンユニット内の熱流れ解析

エアコンユニットは一般的にボックス形状であり、内部の熱交換器（エバポレーター・ヒーターコア）とエアミックスドアなどもほぼ直方体であるため、3次元直交格子系の熱流体解析コード「STREAM」を使用した。

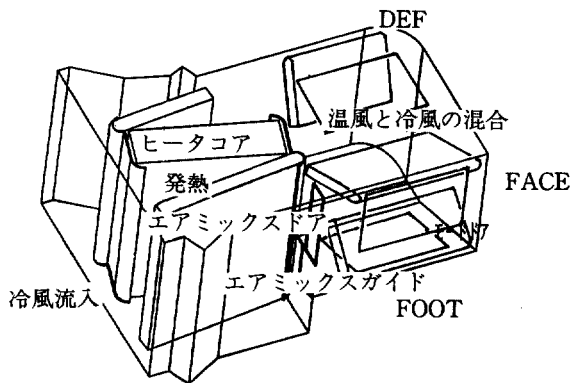


図11 ヒーターユニットの構造例

基礎方程式は、前述の質量保存の式・運動量保存の式に加えて、エネルギー保存の式(9)である。

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (V \cdot \nabla) T = \alpha \nabla^2 T + Q / \rho C_p \quad (9)$$

Q : 内部発熱 (W/m^3) α : 温度拡散係数 (m^2/s)

以上の方程式の差分化は、時間項を後進差分、空間項を2次中心差分、移流項を1次風上差分とした¹⁰⁾。なお、ユニット内の流れは、中程度の風量で、レイノルズ数 $Re \approx 15000$ 程度で乱流状態であるため、 $k-\epsilon$ 乱流モデルを使用した¹¹⁾。

5.1 ヒーターコアのモデル化

ヒーターコアは温水が循環する扁平チューブと放熱用のコルゲートフィンとで構成された複雑な形状の熱交換器である。

従って、放熱特性・圧損特性のモデル化を行った。

放熱特性として、熱交換器性能を表す熱通過率 KF_a 、

値が実仕様と同一となるように熱貫流率 K' を換算して与える。

$$\frac{1}{KF_a} = \frac{1}{F_a \alpha_a} + \frac{1}{F_w \alpha_w} \quad (10)$$

$$K' = KF_a / n \quad (11)$$

$$Q = K'(t_w - t_i) \quad (12)$$

K : 熱貫流率 F : 伝熱面積 n : コア要素数

α : 熱伝達率 Q : 発熱量 添字 a : 空気側

添字 w : 温水側 添字 i : 要素番号

また、圧損特性として、ヒーターコア形状内部の流体要素毎に、抵抗係数 ζ_i を与える。

$$\zeta_i = \frac{\Delta P}{1/2 \rho U_i^2} \quad (13)$$

$$\zeta_x = \zeta_i \cos \theta \quad (14)$$

$$\zeta_y = \zeta_i \sin \theta \quad (15)$$

ΔP : コア圧損 U_i : コア要素風速

θ : コア傾斜角

5.2 境界条件と計算格子

ヒーターユニット全体の境界条件と計算条件を、表3に示す。入口速度は均一分布としたが、設定により実測分布も適宜入力した。

表3 境界条件と計算条件

部 位		条 件
境 界	入口/出口	風速・温度指定/圧力指定 要素発熱 対数則・断熱壁
	ヒーターコア 壁面	
計 算	格子/ Δt	4 4 8 0 0 / $5 \times 10^{-3} \text{sec}$ 8 0 0 (準定常)
	サイクル数 計算機/時間	

計算格子は、ユニットの各端点を基準として、ヒーターコア、エアミックスドアの周辺はほぼ等間隔に設定し、壁面近傍はより細かく設定した。

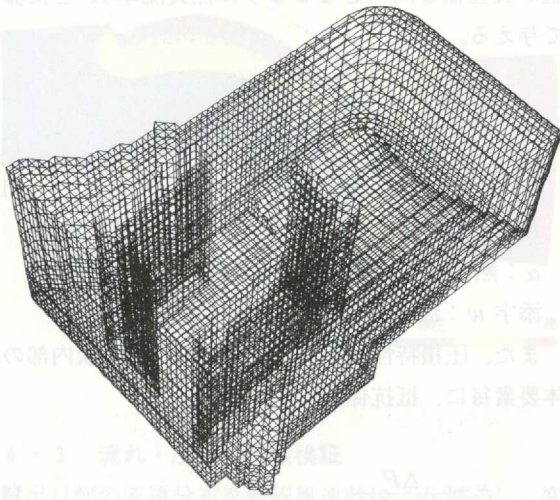


図12 計算格子

5・3 流れ・温度の計算例

計算条件として、各種の風量、エアミックスドア開度、送風モードにて実行した。

本報告では、温感フィーリング上最も重要な、中風量、エアミックスドア開度4/8、バイレベルモードの計算結果を図13 a、bに示す。

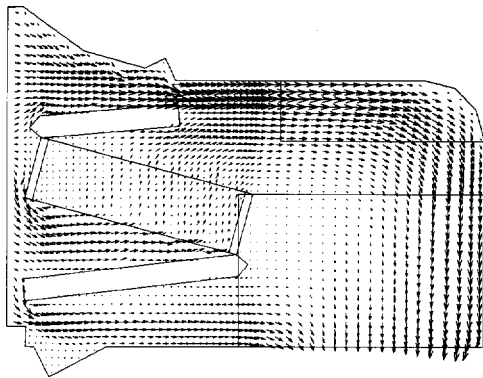


図13a 流速ベクトル

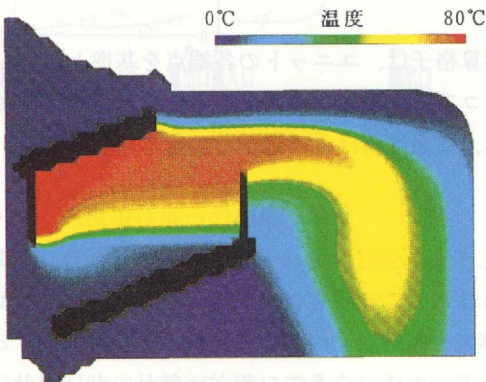


図13b 温度分布

5・4 流れ・温度の実験検証

ヒーター内部・吹き出し口の計算精度を図14に示す。ヒーター内部の測定はエアミックス領域に対して行い、流速分布はレーザー流速計、温度分布は熱電対を使用したトラバース測定である。

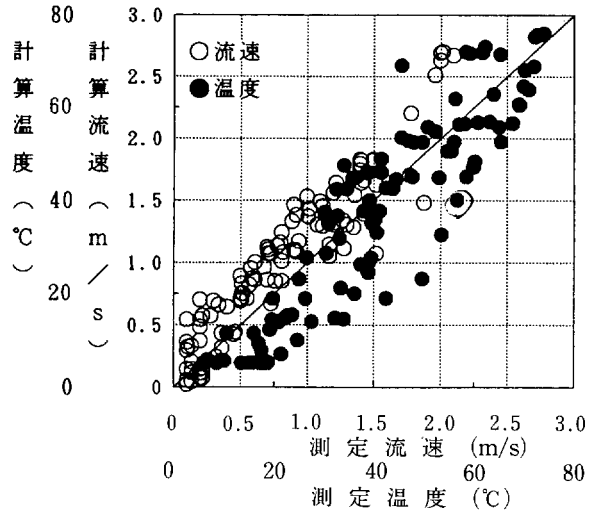


図14 内部同一点での検証

温度については、今後、精度向上が必要であるが、全体的に、実用化可能なレベルと考える。

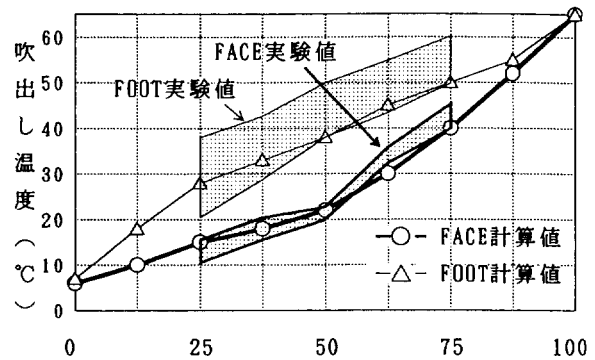


図15 吹出し温度の検証

5・5 エアコンユニット性能への応用

2章にあったように、エアコンの性能は、温度制御性能・風量配分が中心である。

図15に示すように特性の予測がある程度可能である。これは、計画図段階で、過去にない構成のユニットでも性能素性を予測できることを意味し、初回試作品の性能が高いレベルでスタートできる¹⁴⁾。

結果として、開発期間短縮に貢献できる。

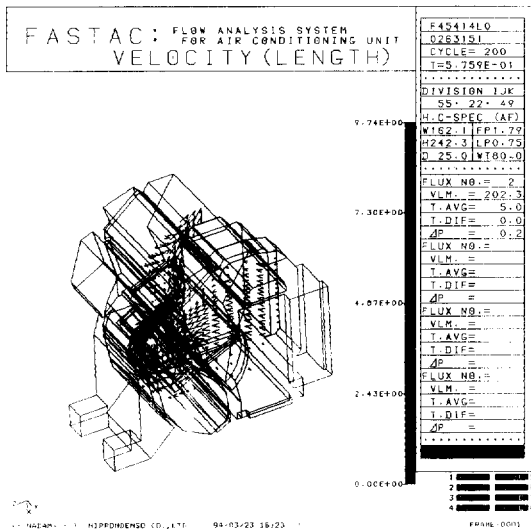


図16 設計支援システムによる計算例

このため前述のCFDプログラム「STREAM」に、エアコン特有の熱交換器モデルの自動入力機能などを組み込み、計算結果には吹き出し口の風量・平均温度などを自動表示するなどの機能を追加した。

6. 車室内の日射解析

自動車室内環境の快適性は、空調装置からの気流速度・気流温度（湿度）などの内的要因と、キャビン外からの侵入熱・窓ガラスからの日射など外的要因に大きく影響される¹⁵⁾。

車室内空調に熱流れ解析を行う応用研究は、社内外で実施しているが、計算規模が根本的に前述のユニットなどと比べて極めて大きい。

大規模計算格子の生成法が高度化し、車室内形状を相当に精度よく表現できる非構造格子法が開発されてきているが、計算精度・計算時間ともに実用化には、さらに研究が必要である¹⁶⁾。

しかし、このモデル表現機能を利用すれば、幾何学解析である日射の影響は定量評価できる。

以下はその点に着目した研究である。

6・1 自動車室内形状のモデル化

普通乗用車の室内部分のみを取り出し、検定マネキン JSAE-3 DM 相当の人体、シート、普通ガラス等の各表面に四角形の面要素を作成する。

この複雑な3次元表現には非構造格子系の流れ解析ソフト「STAR-CD」の格子生成機能を利用した。

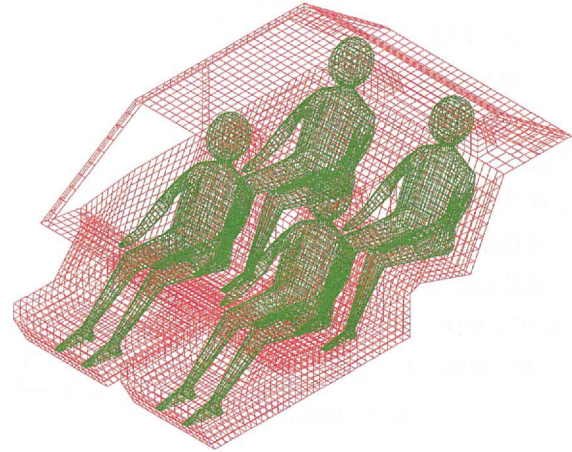


図17 車室内計算格子形状

6・2 太陽情報の計算

日射には、太陽光が直接到達する直達日射と、大気圏で散乱されて到達する天空輻射がある。

乗員への影響がより強いと考えられる、直達日射について、次式を適用する¹⁷⁾。

$$\sin \theta = \sin \zeta \sin \delta + \cos \zeta \cos \delta \cos t \quad (16)$$

$$\sin \alpha = \cos \zeta \sin t / \cos \theta \quad (17)$$

$$\phi = \alpha - \beta \quad (18)$$

$$I = I_0 P^{1/\sin \theta} \quad (I_0: \text{大気圏外日射量}) \quad (19)$$

θ : 仰角 α : 方位角 ϕ : 左右角 β : 進行角
 ζ : 緯度 δ : 赤緯 I : 強度 P : 大気透過率

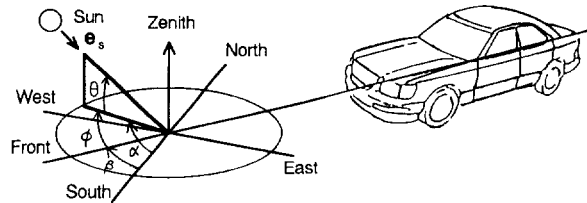


図18 計算上の座標系

6・3 日射の直達判定

日射に対し各要素の対向判定、障害物判定を行う。日射ベクトル \vec{e}_s と各要素面の法線ベクトル \vec{e}_1 の間に式(5)の関係があれば対向と判定できる。

$$\vec{e}_s \cdot \vec{e}_1 < 0 \quad (20)$$

$$\eta = F(\lambda_j) \quad (21)$$

$$Q_i = \eta I_i A_i \sin \gamma \quad (22)$$

$$Q_T = Q_H + Q_B + Q_F \quad (23)$$

η : 透過率
 λ : ガラス入射角
 Q : 受熱量
 γ : 要素入射角
 添字 T : 全体、 H : 頭部
 B : 胸部、 F : 足部

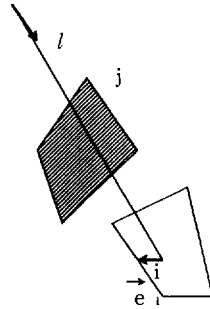


図19 直達日射と要素

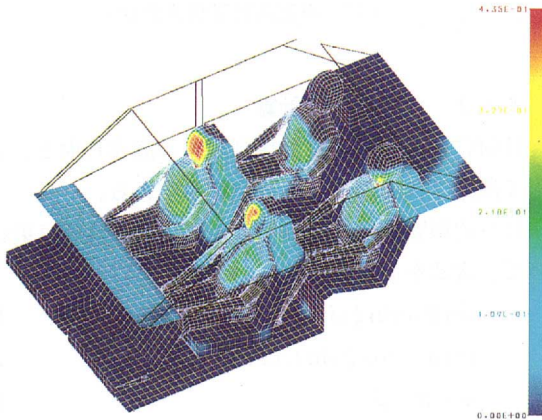


図20 計算例

また、日射ベクトルの方向ベクトルで対象要素 (i) 中心を通る直線 l が対象外要素 (j) を通過していれば、障害物と判定できる。
 但し、要素 (j) がガラスの場合は障害物とせず、日射の入射角度による透過率 η を考慮する。

6・4 日射受熱量の計算例

図20に太陽仰角30°での乗員を含めた車室内の日射受熱量分布を示す。前席乗員の胸から上の部分の受熱量が多い点などが、この表現方法で明確になる。

6・5 計算精度の検証

以上により得られた計算結果を、仰角 θ にてまとめ、図21に示す。合わせて、実験と比較検証を行った。

乗員の受熱量を頭部・胸部・足部の3か所に分け、各々の吸収率を、標準的な0.9、0.5、0.5とすると、計算結果の精度が良好である事が確認できる。
 なお、実験には1 kW/m²の赤外線ランプを使用し、乗員各部位の受熱量は熱流束センサーで測定した。

	全	頭	胸	足
計算	—	—
実験	●	○	△	□

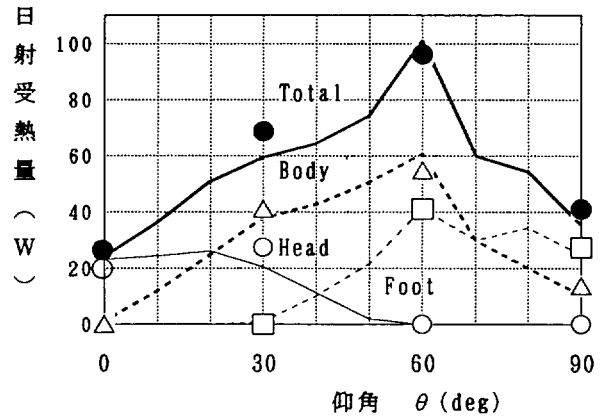


図21 日射受熱量の仰角変化

仰角 θ が増加するにつれて、頭部への受熱量は減少し胸部・足部への受熱量が増加するが、 $\theta=60^\circ$ をピークとして全体受熱量は減少する。これ以上の角度では、ルーフによる遮へいが多くなるためである。

6・6 車室内快適性への応用

温熱感の3要素は、温度・気流・輻射である。これらが、個々に形状モデルの上で数値解析できることが、判明した。

従って、日射受熱量から内装材温度・皮膚温度の推定、さらに車室内の熱流れ解析から、乗員周りの気温と風速が得られ、乗員の温感推定が可能である¹⁸⁾。これにより、4席の乗員が同様な快適な温感レベルにするには、空調制御はどうすれば良いか、の設計指針が得られる。

7. あとがき

以上、CFDの基本機能である流れ計算から、送風特性の推定、熱との連成による冷暖房性能の予測、計算モデル表現機能から日射受熱量分布の計算など、エアコンへの種々の応用方法を考案した。

いづれも、十分な実験検証のもとで、実用化が可能と判明した。

その製品への適用成果は、既に幾つか出ているが、本報告は研究と応用過程までにとどめた。

今後、エアコンユニットから、車室内快適性までの全てを一環してCFDで計算予測する、TVP (Totally organized Virtual Prototyping = 総合仮想試作) 構想の実現を目指したい。

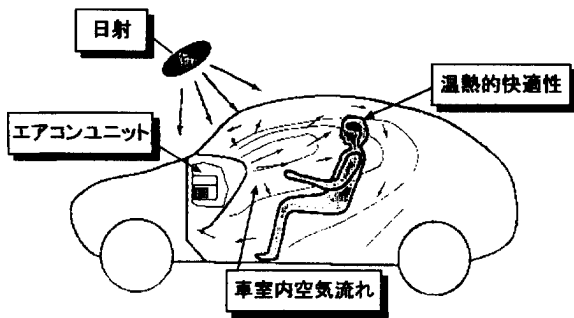
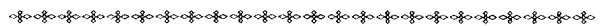


図22 全体系¹⁹⁾

＜参 考 文 献＞

1) 久末, 他:自動車技術会会誌, Vol. 42, No. 12 (1988-12), p. 1613
 2) 宮原:自動車技術会会誌, Vol. 49, No. 8(1995), p. 8
 3) 三浦:日本機械学会誌, Vol. 98, No. 916(1995), p. 18
 4) 自動車技術会:自動車技術ハンドブック2 設計編
 5) 齊藤:数値伝熱学, 養賢堂 (昭61), p. 2
 6) 川合:日本機械学会誌, Vol. 87, No. 785(昭59), p. 348
 7) 立花:電腦進化論, 朝日新聞社 (1993), p. 37
 8) 村上, 他:格子形成法とコンピュータグラフィクス, 東大 (1995), p. 18

9) 村田:工学における数値シミュレーション, 丸善 (昭63), p. 179
 10) ソフトウェアクレイドル SCRYU, STREAM 使用説明書
 11) 巽, 他:乱流現象の科学, 東大 (1994), p. 277
 12) 小竹, 他:機講論, No. 790-10, p. 15
 13) 深野, 他:機論, 41-345 (昭50), p. 1479
 14) 栗山:自動車技術会会誌, Vol. 48, No. 4(1994), p. 41
 15) 小森谷:自動車技術会 学術講演会前刷集 924079 (1992)
 16) 小林, 他:日本機械学会誌, Vol. 92, No. 847, (1989), p. 492
 17) 井上:空気調和ハンドブック, 丸善(1991), p. 12
 18) 松永, 他:自動車技術会会誌, Vol. 49, No. 7 (1995), p. 23
 19) 自動車技術会:熱・空力ジョイントフォーラム前刷集 (1996)



＜筆 者＞



浅野 秀夫 (あさの ひでお)

冷暖房開発部
 企画および数値流体解析の適用化
 推進に従事。