

# 特集 | カーエアコン基本性能シミュレータの開発\* 温度計算精度の向上

Development of Automotive A/C System Basic Performance Simulator  
Accuracy of Temperature Calculation Technique Development

北田 基博      浅野 秀夫      神原 正浩  
Motohiro KITADA      Hideo ASANO      Masahiro KANBARA

In simulating the basic performance of car A/C system, accurate estimation of temperature control characteristics of HVAC unit is required. Our approach is to include the thermal diffusion in air mix region of unit where cool air and hot air are mixed through the use of turbulent Prandtl number expressed as a function of each segment. This paper describes how this method is used in the HVAC unit computation model and the accuracy obtained by this method.

**Key Words** : Air Conditioning , Computational fluid dynamics , Numerical analysis, Simulation /HVAC, Simulator

## 1. まえがき

カーエアコンの開発期間短縮のためにシミュレーションを活用した仮想試作の実現に向けて、設計者が日常的に使用できるカーエアコン基本性能シミュレータの開発・適用を進めている。このシミュレータにより従来非常に多くの工数と熟練を必要としていたエアコンの数値計算技術を設計者が身近に使用できるようになった<sup>1,2)</sup>。

その結果、試作品を作製する前にエアコンの風量割合、圧力損失などを予測・改良する手段としてシミュレーションの適用が広く浸透してきた。しかし、エアコンの基本性能として重要な温度コントロール特性の予測に関しては十分な計算精度が得られていなかった。カーエアコンの内部温度計算をした例はいくつかあるが<sup>3)</sup>、温度コントロール特性の計算精度について言及したものは少ない。実際のエアコンの開発現場にシミュレーション技術をいかしていくために実用的な計算時間の範囲で計算精度の向上が要求される。

本報では、冷風と温風の混合(エアミックス)状態を実験と計算で比較検証し、計算負荷を上げずに温度計算精度を向上させる手法として乱流プラントル数( $Pr_t$ )の関数化を試み、実機エアコンモデルへ適用した結果、温度計算精度向上が確認できたので報告する。

## 2. エアミックス基礎モデルによる検討

### 2.1 流れ場・温度場の検証

実験モデルとの形状差による誤差を極力無くし、冷風・温風の混合(エアミックス)現象のみを比較できるように

\* (社)自動車技術会の了解を得て、2000年秋季大会学術講演会前刷集・発表No.169より加筆転載

にシンプルなモデル(エアミックス基礎モデル)を作製し検証を行った。

Fig. 1 にエアミックス基礎モデル概略形状と実験モデルを示す。エアガイドの位置を変えることでエアミックスのパターンを変えることができる。

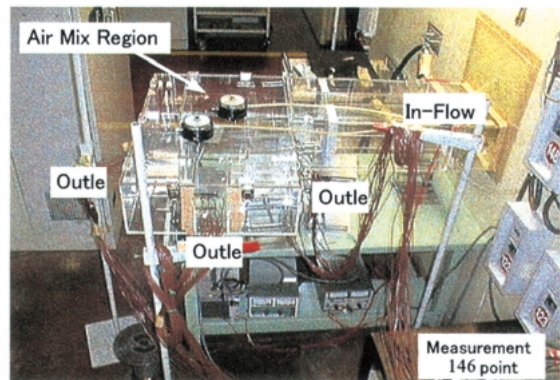
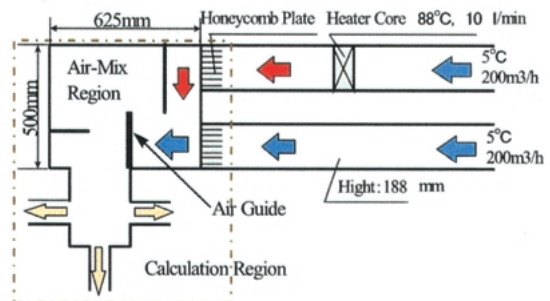


Fig. 1 Air-Mix basic model

Fig. 2 に計算モデルを示す。流体計算は汎用流れ解析ソフトSTAR-CDを用いた。流れ場計測にはレーザ流速計を用いた。

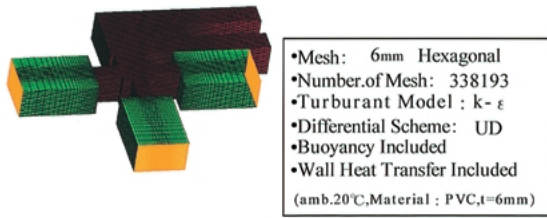


Fig. 2 Analysis model

Fig. 3に流れ場の検証結果を示す。エアガイド1枚、3枚の場合とも平均流としてはよく一致している。ただしエアガイド1枚の場合、実験結果ではガイド後方の渦がやや楕円形状なのに対して、計算では円形状となっている。この違いはk-ε乱流モデル適用の影響と考えられる。

Fig. 4に温度場の検証結果を示す。エアガイド1枚の場合、ガイド後流側の渦領域の温度が計算値では実験値よりも約10℃ほど低い結果となった。ガイド3枚の場合はほぼ実験値に近い温度分布が得られている。

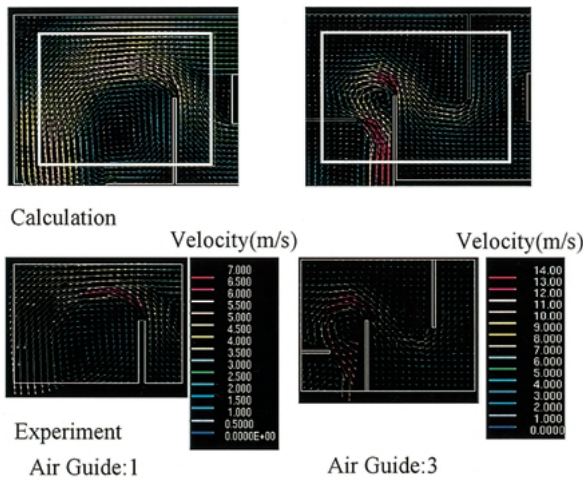


Fig. 3 Comparison of velocity vector

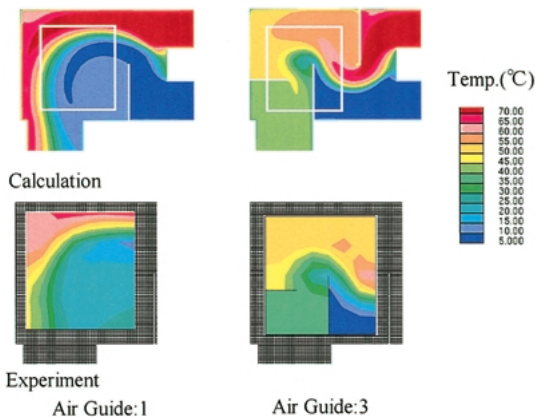


Fig. 4 Comparison of temperature distribution

## 2.2 エアミックス領域での現象考察

エアガイド1枚の場合のガイド後流側の各断面における速度勾配、温度勾配をFig. 5に示す。断面2、3での温度勾配を比較すると実験値に対して計算値の温度勾配が大きいことがわかる。またその部分での速度勾配は比較的小さい。

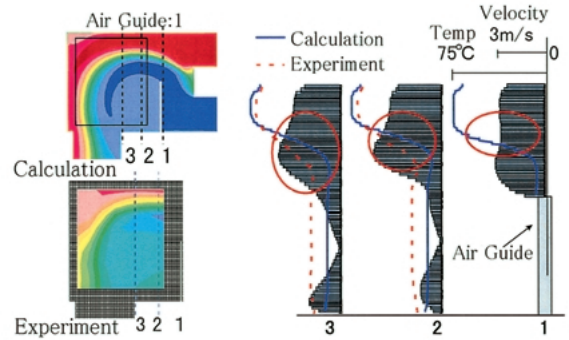


Fig. 5 Gradient of temperature and velocity

一方、流れ場・温度場の基礎式を ~ 式に示す。運動方程式の中で、渦拡散係数  $\mu_t$  は、標準k-ε乱流モデルから求めた。温度場は乱流プラントル数を用いた0方程式モデルを適用している。

•運動方程式：

$$\sum_{j=1}^3 \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + (v + \nu_t) \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad \text{①}$$

•エネルギー方程式：

$$\sum_{j=1}^3 \bar{U}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} = (\alpha + \alpha_t) \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x_j \partial x_j} \quad \text{②}$$

•乱流プラントル数：

$$Pr_t = \frac{\nu_t}{\alpha_t} \cong 0.9 \quad \text{③}$$

温度場0方程式モデルでは、乱れによる熱拡散が乱れによる運動量拡散に対して一義的に決まるという仮定が前提にあるが、例えば壁面からの距離と乱流プラントル数の値の研究例<sup>4)</sup>にあるようにその値は一様ではないことがわかっている。

一般に空気の場合乱流プラントル数は0.9程度と考えられているが、基礎モデルのエアガイド1枚での実験結果が、計算値よりも熱拡散が大きなことから判断するとエアミックス領域では乱流プラントル数は0.9よりも小さいことが予想される。ただし計算側の問題として標準k-εモデル使用によるエアミックス領域での

乱流エネルギーの計算精度が十分でないことも一因として考慮しておく必要がある。またエアガイド3枚の場合では乱流プラントル数は0.9で良く一致していることから、一つの提案として乱流プラントル数を温度勾配と乱れ量で関数化し計算上の熱拡散を補正する方法が考えられる。

2.3 乱流プラントル数関数化の試み

流れ場、温度場の実験結果、計算結果を基に乱流プラントル数の概略値を決定し、温度勾配が大きいほど乱流プラントル数を小さくし(補正量を大きくする)、乱れが大きいほどその補正量を小さくする傾向となる関数を提案し(Fig. 6)その効果を評価した。

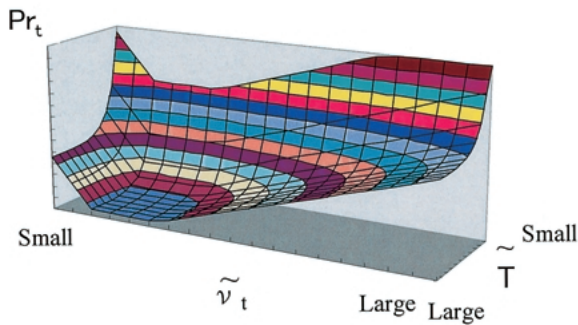


Fig. 6 Proposal of  $Pr_t$  revision characteristic

Fig. 7に $Pr_t$ 関数式を適用した場合の検証結果を示す。 $Pr_t=0.9$ 一定値(従来計算手法)の場合と比較するとエアガイド1枚の場合、 $Pr_t$ 関数式を適用した場合の方が実験値に近い値が得られている。またエアガイド3枚の場合でも実験値に近い傾向にある。

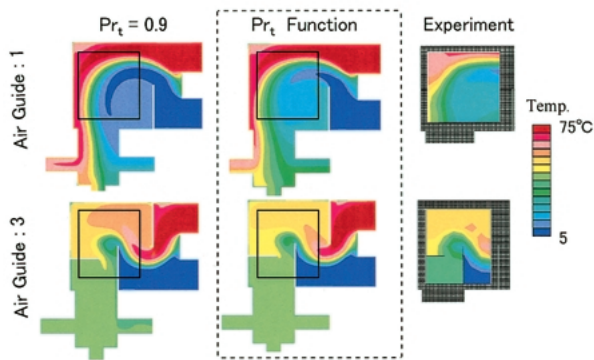


Fig. 7 Comparison of temperature distribution

Fig. 8に $Pr_t$ 関数式を適用した場合の乱流プラントル数分布を示す。エアミックス領域を中心に乱流プラントル数による熱拡散の補正がかかっている。エアガイド1枚の場合は、3枚の場合と比較してより広範囲に

補正されていることがわかる。Fig. 9に温度測定領域での実験値と計算値の相関を示す。分布の標準誤差は従来計算手法と比較して9.4 6.0 と向上している。

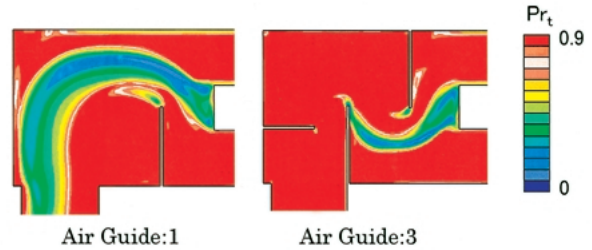


Fig. 8  $Pr_t$  distribution

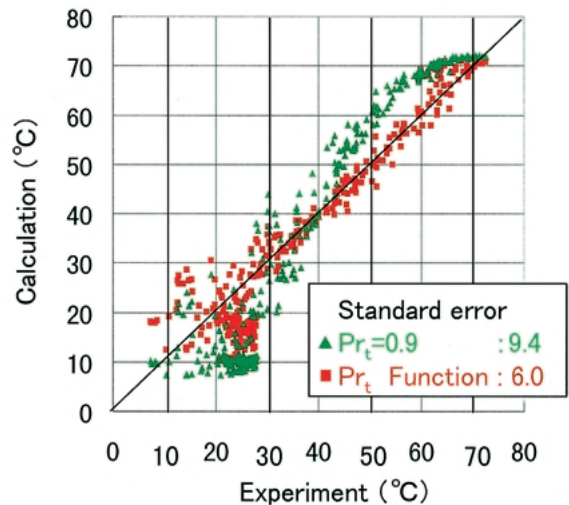


Fig. 9 Correlation of temperature distribution

3. 実機エアコンモデルへの適用

$Pr_t$ 関数式を実機エアコンモデルに適用し、その効果を検証した。Fig. 10にエアコン計算モデル(セミセントラレイアウトタイプ)の概要を示す。メッシュ数約70万、熱交換器、ファン部分はヘキサメッシュ、それ以外はテトラメッシュ、プリズムメッシュを使用している。エバポレータは通過空気を一様に8となるように設定し、ヒータコアは通過風速に対する熱伝達率を考慮し、88の温水と熱交換するようモデル化した。

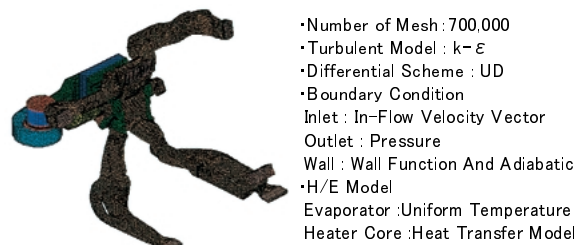


Fig. 10 Analysis model of HVAC (TYPE-A)



ファン部分はモータ回転数に相当する体積力を与えている。

Fig. 11 にエアコン内部温度分布の実験値との比較を示す (a) はエアミックス領域の主流に平行な断面の温度分布の比較を示す。従来計算手法に比べて  $Pr_t$  関数式を適用した場合、エアミックス領域での熱拡散が促進されており、実験値の分布により近くなる (b) はエアミックス領域の主流に垂直な断面の温度分布を示す。また、グラフは断面 A-B の温度勾配を示している。従来計算手法では熱拡散が少ないために温度勾配が大きい。  $Pr_t$  関数式を適用した場合、エアミックス領域での熱拡散が促進され実験値に近い分布が得られる。

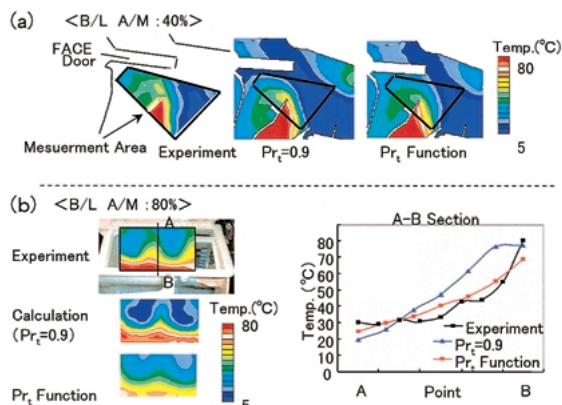


Fig. 11 Comparison of temperature at Air-Mix region

Fig. 12 に  $Pr_t$  関数式を適用した場合の温度コントロール特性の検証を示す。エアミックスドア開度 (横軸) に対する各吹き出し口温度の特性を示し、エアミックスドアは開度 10% ごとに計算して、開度に応じて Face モード、B/L モード、Foot モードで評価している。

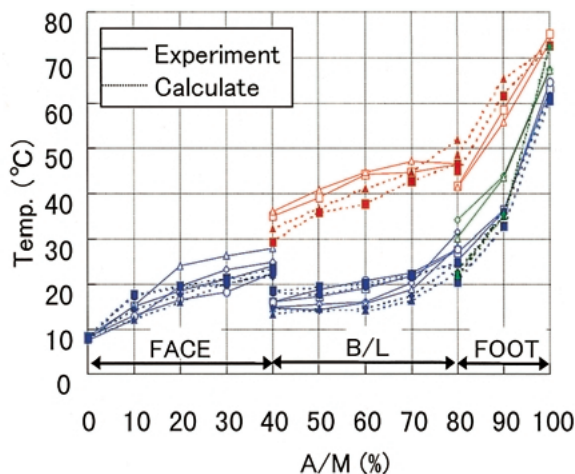


Fig. 12 Temperature control characteristic

全体の温度コントロール特性は実験値と良く一致している。部分的には実験値と最大 10 程の差が存在するが、全データの実験値と計算値の相関は 95% 信頼性区間で評価すると 8.0 となった。従来計算手法の 9.4 に対して 1.4 の精度向上が得られた (Fig. 13)。

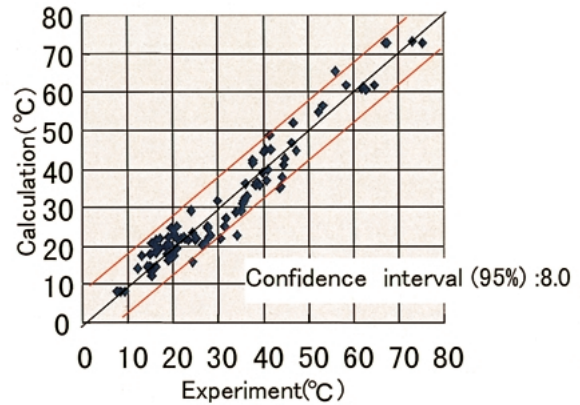


Fig. 13 Correlation of temperature

#### 4. 計算手法の汎用性確認

$Pr_t$  関数式の汎用性を確認するために、別のレイアウト (横置きタイプ) のエアコンユニットで検証した。Fig. 14 にモデル概要を示す。計算条件等は前項ユニットと同様である。温度コントロール特性の比較を Fig. 15 に示す。

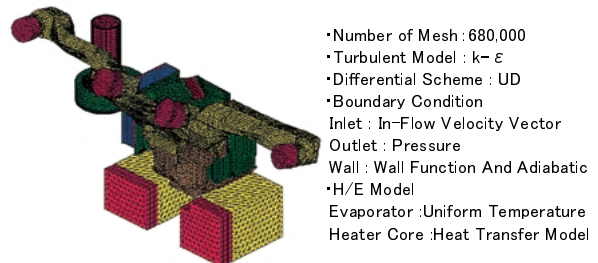


Fig. 14 Analysis model of HVAC (TYPE-B)

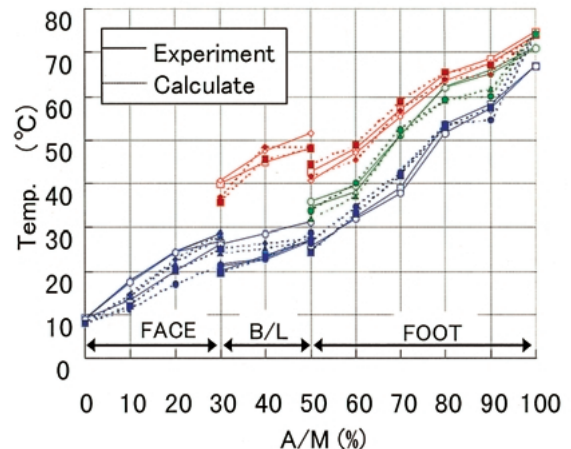


Fig. 15 Temperature control characteristic

また、各吹出し口温度の実験値と計算値の相関を Fig. 16 に示す。95%信頼性区間評価で従来計算手法の場合の 6.4 から 5.8 と 0.6 向上した。

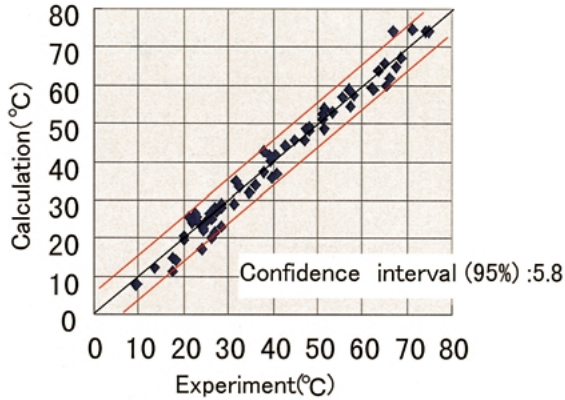


Fig. 16 Correlation of temperature

Fig. 17 に検証した 2 つのエアコンユニットモデルの乱流プラントル数分布を示す。両ユニットともエアミックス領域で乱流プラントル数の補正がされている。ただし横置きレイアウトタイプのユニットの方が補正量が少ない。これは横置きレイアウトタイプの方がエアミックス領域で上下左右に配置されたリブにより、積極的に冷風・温風を混ぜる構造になっており、エアミックス領域での乱れが強いほど乱流プラントル数による補正量が少ないためである。

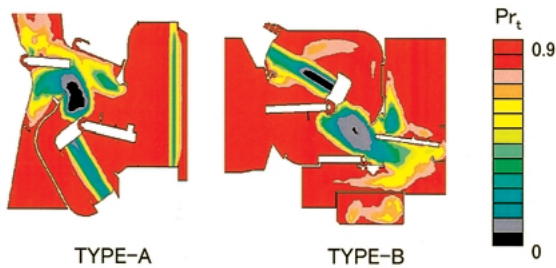


Fig. 17  $Pr_t$  distribution

## 5. むすび

カーエアコンの温度コントロール特性の計算精度向上のためエアミックス領域での熱拡散現象を検討し、乱流プラントル数の関数化による熱拡散補正を試みた。この手法を実機エアコンモデル 2 タイプに適用した結果、いずれも温度計算精度を向上できることが確認できた。

## <参考文献>

- 1) 彦坂他：自動車技術会講演会前刷集 No.92(1998)
- 2) 北田他：自動車技術会講演会前刷集 No.93(1998)
- 3) Nam-Hyo Cho, Mi-Ro Kim：“Numerical Investigation of Fluid Flow in an Automotive HVAC Module”； SAE Paper 971778,1997
- 4) 数値流体力学シリーズ 3 乱流解析，東大出版会

## <著者>



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。



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。



神原 正浩  
(かんばら まさひろ)

冷暖房事業部  
エアコン性能の実験評価・解析に従事。