

数値流体計算を用いた ラジエータ放熱量シミュレーション

Prediction of Quantity of Radiation Using Computational Fluid Dynamics

蟻 坂 篤 史* 大 関 孝 夫* 久 野 仁*
Astushi ARISAKA Takao OZEKI Hitoshi KUNO

西 川 健 次* 岡 本 安 雄* 高 橋 易 資*
Kenji NISHIKAWA Yasuo OKAMOTO Yasusi TAKAHASHI

要 旨

自動車の冷却仕様を設計初期段階で精度良く設定するために、ラジエータ通過風速計算とラジエータ放熱量実験式を組み合わせたラジエータ放熱量シミュレーションを確立した。このラジエータ通過風速計算は、ラジエータ、コンデンサ、ファンの単体性能とフレーム等の設計データを用いた数値流体計算を用いている。そのさいラジエータ放熱量を求めるにあたっては、ラジエータ通過風速の計算値とラジエータ放熱量の実験値の相関性を用いてシミュレーションの実用化を実現した。

さらに本技術を利用することにより、実際の開発において設計初期段階でラジエータ、ファンの冷却性能仕様決定が可能であることを示した。

ABSTRACT

In order to examine the vehicle cooling performance at early design stage, a simulation system of cooling performance which integrates prediction of air velocity through radiator and experimental formula on quality of radiation has been established. Computational Fluid Dynamics (CFD) calculation is used to predict such air velocity through radiator using data of simple capacity for radiator condenser, cooling fan and design data on body frames. Taking relationship between calculated air velocity through radiator and experimental quality of radiation into consideration, the quality of radiation can be obtain with practical accuracies.

Some examples are shown on which utilization of such technologies has made it possible to design cooling performance of radiators and cooling fans at the early stage of development.

1. まえがき

これからの自動車に強く求められる、省燃費化、低価格化、長寿命化、環境保全、安全性に対する技術は、冷却性能と大きな関わりをもっている。また、デザインによる車両のスラントノーズ化、エンジンの高出力化は冷却性能面に対して厳しい条件となってきた。いままでは車両の冷却仕様を設定する上で、テストに頼る所が大きく、車両のデザインを冷却性能面から机上評価することが困難であり、エンジンルーム内の形状、レイアウトを変更するようなテストは多大な時間と費用を伴っていた。また、現象の把握に当たっては、煙による可視化程度しか手法がなかった。

これまで、ラジエータ通過風速を計算した論文^{1)～4)}は多数みられるが、ラジエータ放熱量に言及し、実際の開発に用いる手法を取り上げたものは少ない。本研究はその冷却性能を机上で検討することを目的とし、冷却性能の最も重要なファクタの一つである車両搭載時のラジエータ放熱量を数値流体計算と実験式を用いて求めるものである。そのさいに、ラジエータ通過風速の実験値と計算値の関係、ラジエータ通過風速の実験値とラジエータ放熱量の関係というプロセスは踏まらずに、ラジエータ通過風速の計算値と、ラジエータ放熱量の実験値との相関性に焦点を置くことにより、自動車の開発にお

* 栃木研究所

いて実用的にシミュレーションを用いることを可能とした。さらに本手法を用いて、実験では確認困難なラジエータのサイズ変更など冷却性能向上のためのパラメータスタディをおこなった。

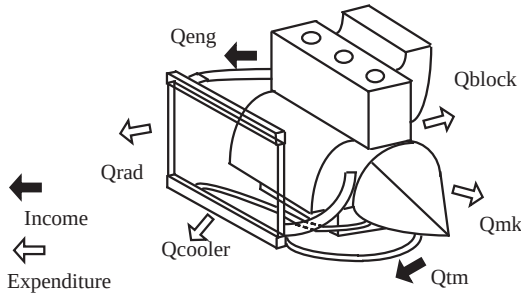


Fig. 1 Heat Income and Expenditure

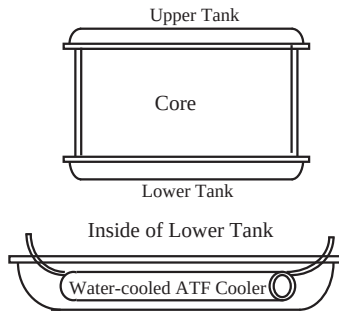


Fig. 2 Structure of Radiator

2. 熱収支計算

一般的なオートマチックトランスミッション車を考えたとき、発熱源としては、エンジンの発熱とトランスミッション（以下T/Mという）の発熱が考えられる。放熱側はラジエータ放熱、ブロック放熱、T/M ケース放熱、オートマチック T/M オイルクーラ（以下ATF クーラという）放熱がある。Fig. 1 にその模式図を示す。また、放熱側のラジエータ、ATF クーラの構造について Fig. 2 に示す。これらの熱収支は式（1）、（2）式で表せる。

$$Q_{eng} = Q_{grad} + Q_{block} - Q_{cooler} \dots \dots \dots (1)$$

$$Q_{tm} = Q_{cooler} + Q_{mk} \dots \dots \dots (2)$$

ここで

Q_{eng} : エンジン冷却水受熱量

Q_{tm} : T/M 発熱量

Q_{grad} : ラジエータ放熱量

Q_{block} : ブロック放熱量

Q_{mk} : T/M ケース放熱量

Q_{cooler} : ATF クーラ放熱量

さらにエンジンとT/Mの熱収支トータルでは（3）式のように表せる。

$$Q_{eng} + Q_{tm} = Q_{grad} + Q_{block} + Q_{mk} \dots \dots \dots (3)$$

また、それぞれの熱量の割合は、栗野の実験結果⁵⁾によると、平坦路 100km/h で

発熱側 $Q_{eng} : Q_{tm} = 9 : 1$

放熱側 $Q_{grad} : Q_{block} : Q_{mk} = 8 : 1 : 0.5$

であり、放熱のほとんどがラジエータで行われている。そのラジエータ放熱についてさらに細かく見ると（4）式で表せる。

$$Q_{grad} = K \times A \times (V_{air})^x \times (V_w)^y \times \Delta T \dots \dots \dots (4)$$

ここで

K, x, y : 定数

A : 放熱面積

V_{air} : ラジエータ通過風速

V_w : ラジエータ循環水流量

ΔT : 気水温度差

この中でラジエータ循環水流量は、ウォーターポンプの前後差圧と流量の関係、およびエンジンの系統圧、ラジエータの水流路の圧力損失と流量の関係より求められる。しかしラジエータを車両に搭載状態したときのラジエータ通過風速はエクステリアデザイン、フレーム形状、エンジンルームレイアウト、ラジエータ、コンデンサの圧力損失、ファン特性とパラメータが多く予測することが困難なため、数値流体計算を用い、ラジエータ放熱量を求めた。

3. ラジエータ通過風速計算手法

ラジエータ通過風速計算に必要な条件について考える。ラジエータやコンデンサのような抵抗体のモデル化、ファン排風の遠心成分の考慮、エンジンルームの中の複雑な形状のモデル化などが必要であり、以下の手法を採用した。

3. 1. 計算手法

ラジエータ通過風速計算の理論モデルとしては、主流経路の時間平均計算ができればよく、非定常な流れは必要ない。そこでコンピュータメモリが少なくすみ、計算時間も短く、メッシュ依存性の比較的少ない K- ϵ 乱流モデルを用いた定常流計算を行った。

ラジエータ、コンデンサのような多孔質体を計算で直接解くことは、ラジエータ通過風速を計算をする上で時間的に効率がよくない。そこでラジエータ、コンデンサのような抵抗体については、それらの単体テストで流速と前後差圧の関係式を求め、抵抗体の前後でその関係式が成り立つようなモデル化を行った。

ファンのモデル化については、翼形状を再現し計算内にて回転させ計算する方法もあるが、エンジンルーム内のファンのようなケースでは、モデル作成時間、計算時間を考えると効率がよくない。よって、ラジエータ同様の手法で流速と前後差圧の関係を再現し、さらにファン回転数とファンの翼と空気とのスリップ効率より求めた遠心成分を通過風に与えるようなモデル化を行った。

3. 2. 基本方程式

計算コードとして市販のスター CD⁶⁾ を用いる。この中で非圧縮粘性流体の基本方程式として、連続の式、ナビエストークスの式を数値的に解くことにより流速が求められる。離散化については有限体積法を用い、アルゴリズムは、SIMPLE 法、PISO 法を用いている。また、空間差分については 1 次風上差分法を用いた。

3. 3. 車両通風系モデルによる検証

本シミュレーションの妥当性の検証をエンジンルームを簡易的に表現した車両通風系モデルを用いて行った。車両通風系モデルは Fig. 3 に示すように、ラジエータ、コンデンサ、ファンを付け、簡単な開口形状、エンジンに相当する直方体、また、エンジンの前後フロア部にそれぞれ排出口を設けたものである。車両でのレイノルズ数が約 1.8×10^6 であることより相似を考え主流を 10m/sec で検証をおこなった。計算モード、計算結果、およびテスト結果を、Table 1 に示す。これより、風量は実測値と 10% 以内の精度で一致することがわかった。また、流れの可視化では Fig. 4 にラジエータ、コンデンサ付きでの実験と計算の流線を示す。モデル前方の淀み点、エン

ジン前方の淀み点が一致しているのがわかる。また、Fig. 5 にファン排風の可視化実験結果と計算結果を示す。ファン後方においてエンジンブロックより上部においては逆流し、それより下方では下向きに風が流れているのが確認できる。これより以下のことが確認できた。a) ラジエータやコンデンサのような抵抗体を通過する流れの再現ができる。b) 遠心成分を考慮したファンの効果の再現ができる。

Table 1 Comparison of Air Velocity Through Radiator

	Name of Parts			Average of Air Velocity (m/sec)	
	Radiator	Condensor	Fan	Experiment	Calculation
1	×	×	×	4.06	4.04
2	○	○	×	1.69	1.73
3	○	○	○	3.03	2.77

○:with ×:without

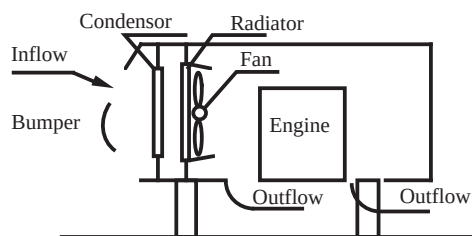


Fig. 3 Vehicles Ventilation Model

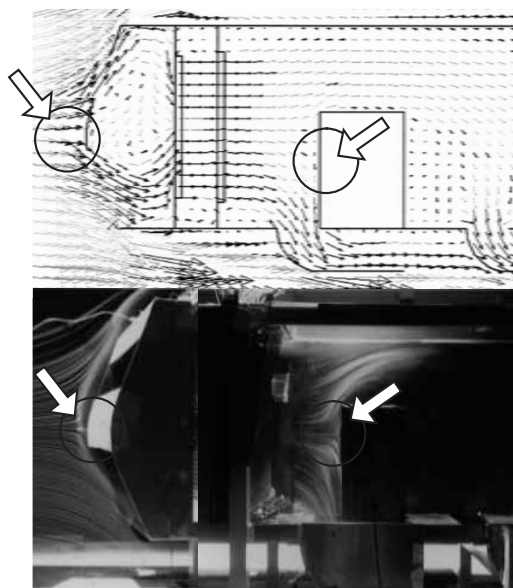


Fig. 4 Stagnation Point of the Vehicle Ventilation Model without Fan

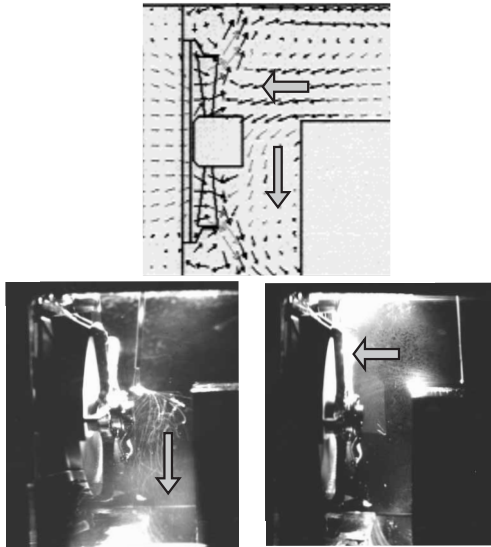


Fig. 5 Streamline behind Fan of the Vehicle Ventilation Model

3. 4. 車両への計算の適用

車両通風系モデルでの検証をもとに実際に車両におけるラジエータ通過風速の計算をおこなった。計算モデルを作成するにあたりどの部品を再現するかを、実験と計算で検討した。その結果エンジンルーム内では、ラジエータ、コンデンサ、ファン、エンジン、T/M ビームを再現し、影響の少ない排気系、エアフローチューブ、ラジエータホースなどは再現しないこととした。そのうえでまず形状データの作成をおこなう。これは設計データとデザインデータのワイヤーフレームを表面データに作り直す作業である。次に計算空間全体を作成する。そしてその計算空間内で車両に相当するセルを割り振り形状データに適合させる。なお、ファンシュラウドなど非常に薄い部位についてはセル間の板で表現する。Fig. 6に作成したモデルを示す。また、境界条件を、Table 2に示す。計算結果をFig. 7に車速とラジエータ通過風速の関係で示す。

Fig. 8にフロント開口部への流線およびFig. 9にラジエータ表面の速度分布図を示す。Fig. 8、Fig. 9はそのデザインでの開口形状によってどのように空気が開口に流れ込むか、またどのようにラジエータに空気があたっているかを調べるためによく使われる出力の例である。次章のラジエータ放熱量計算にはFig. 7の結果を用いる。

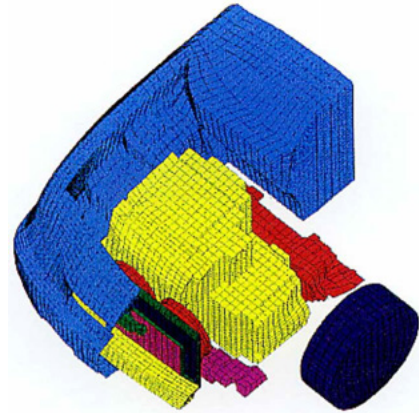


Fig. 6 Calculation Model of Exterior and Engine Compartment

Table 2 Boundary Condition

Inlet	Main Current 0 km/h ~ 120 km/h
Outlet	Flow Spirit :1
Floor	Wall (Non slip)
Side Upper side	Symmetry

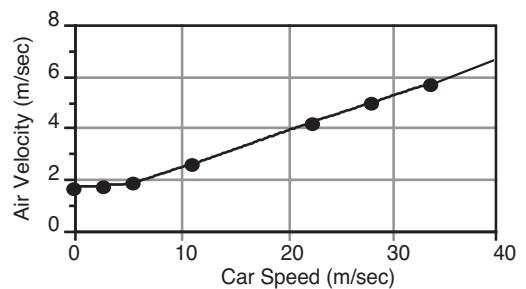


Fig. 7 Car Speed vs Air Velocity through the Radiator

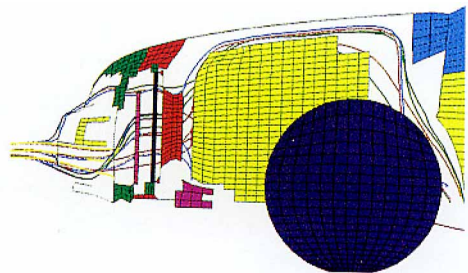


Fig. 8 Streamline on Vertical Section

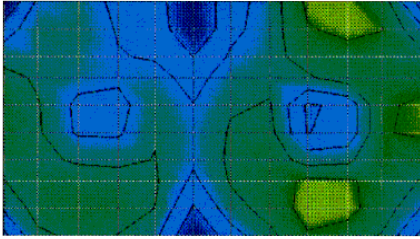


Fig. 9 Contour of Air Velocity on the Surface of Radiator

4. ラジエータ放熱量推定方法

車両搭載時のラジエータ放熱量を推定するにあたり、ラジエータ通過風速の計算値と車両搭載時のラジエータ放熱量の実験値との相関について調べた。その方法としては、計算にて車速を0km/hから120km/hに変化させ、また車速100km/hについては開口形状を変化させ計算した。そしてそれぞれのモードについて車両搭載時のラジエータ放熱量を測定した。各モードでのラジエータ通過風速計算値と放熱量測定値の関係をFig. 10に示す。これより計算値のラジエータ通過風速と車両搭載時のラジエータ放熱量の間には明らかに相関があることがわかる。さらにラジエータ単体での放熱量との関係は、Fig. 11のように一次関数で近似でき、(5)、(6)式のように表せる。

$$\text{Qrad1} = \text{Qrad2} \times \alpha \cdots \cdots (5)$$

$$\text{Qrad2} = k \times A \times \text{Vair}^x \times \text{Vw}^y \times \Delta T \cdots \cdots (6)$$

ここで

Qrad1：車両搭載時のラジエータ放熱量

Qrad2：単体時のラジエータ放熱量

α ：単体に対する車両搭載時の放熱量の割合

k, x, y：定数

A：ラジエータ放熱面積

Vair：ラジエータ通過風速の計算値

Vw：ラジエータ循環流量の設定値

ΔT ：ラジエータ入口水温と外気との差

以上より数値流体計算と実験式を組み合わせることによって、ラジエータ放熱量を予測することが可能となった。

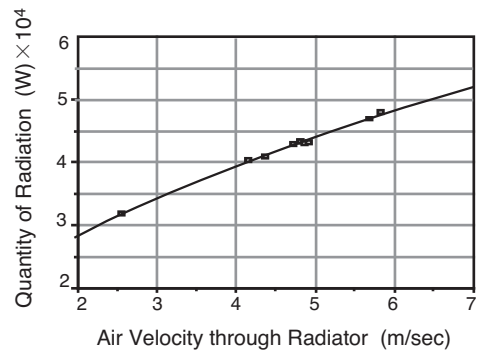


Fig. 10 Air Velocity vs Quantity of Radiation

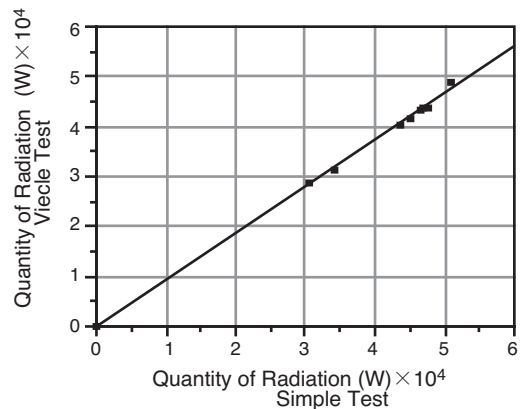


Fig. 11 Relationship of Quantity of Radiation between Simple Test and Vehicle Test

5. シミュレーションの開発への適用

自動車の開発における冷却仕様の設計とは、開発されている車両の熱収支を満足させる冷却仕様を決定することである。その際に計算を利用する場合、設計初期段階においてそのデザインでの冷却性能の評価を行い、その車両でのラジエータ、ファンの仕様を検討できることが最大の利点と考えられる。そのほかには現象解析ツールとしての利用法がある。その例として、3. 4. 項にて述べた車両におけるラジエータサイズの検討手法と放熱量向上のためのフロントスポイラの検討について述べる。

5. 1. ラジエータコア面積の検討手法

車両実験においてラジエータサイズを変更することはフレーム形状の改修など、テスト準備が非常に困難である。そこで計算モデル上でA、B、Cの性能の違う3種類のタイプのラジエータにてサイズを変更し、その影響を確認した。開口形状、ファン径を変更せずに、Fig. 12に示すようにサイズのみを元の680mm × 375mm から720mm × 400mmに拡大させたところラジエータコア面積とラジエータ通過風量の関係は、あまり変化しないことがわかった。Fig. 13にタイプAの結果を示す。なお(4)式の定数 x, y はA、B、Cのラジエータともに0.5、0.2である。

以上の結果より、ラジエータを車両に搭載した場合コア面積アップの約0.5乗で放熱量が変化することがわかった。この結果より、ラジエータコア面積と放熱量の関係を導きだし、車速100km/h時の必要放熱量をどのコア面積で満足するかを検討した。その結果をFig. 14に示す。この図より、必要放熱量がわかれば、計算により実験では困難なラジエータのサイズおよびタイプ違いでの放熱量を机上にて得ることが可能であり、種類別のラジエータが作られていない時点でのラジエータ仕様の検討が可能となった。

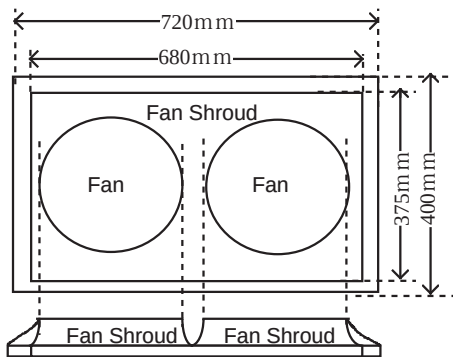


Fig. 12 Radiator Size

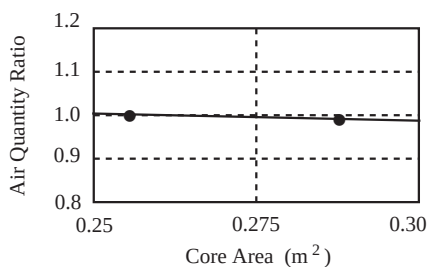


Fig. 13 Core Area vs Air Quantity Ratio

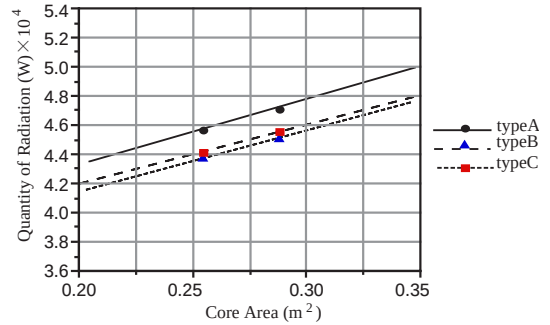


Fig. 14 Core Area vs Quantity of Radiation

5. 2. フロントスポイラの影響

フロントスポイラの冷却性能向上効果について放熱量向上の割合を求めた。また車両を用いて同様の実験を行い計算結果の検証も行った。検討したフロントスポイラの種類は、Fig. 15に示すように 1) ラジエータ下 2) フロントビーム下 3) ドライブシャフト下 の3種類である。なおフロントバンパ下端のスポイラは基本仕様なので、その位置をベースとした。これらフロントスポイラの効果をベースに対する風速の上昇の割合と放熱量の上昇の割合をまとめたものがTable 3である。またフロントビーム下のスポイラのフローパターンをFig. 16に示す。これら結果より、フロントスポイラは流れを剥離させ空気の出口の負圧を高め、より多くの空気を排出させる効果があり、エンジン前方の空気の出口に近いフロントビーム下の効果が大きいことがわかった。ドライブシャフト下のフロントスポイラはエンジン後方から空気を抜くのだが、フロント側から抜く方が効果は大きいことがわかった。このようにラジエータ、ファンなどのデバイスを組みあわせた場合の、冷却性能を向上させる手法の検討が可能となった。

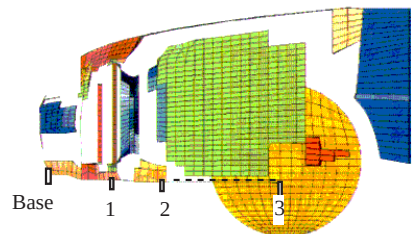


Fig. 15 Location of Front Spoiler

Table 3 Effect of Each Spoiler

Location	Base	1	2	3
Air Velocity Ratio	1	1.026	1.062	1.049
Radiation Quantity Ratio	1	1.013	1.030	1.024
Radiation Quantity Ratio (experiment)	1	—	1.036	1.032

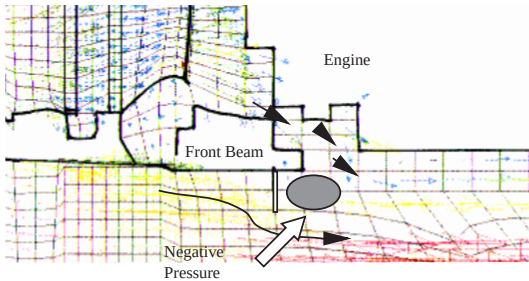


Fig. 16 Vector of Outflow

6. まとめ

本研究にて以下の成果が得られた。

- (1) 通過風速の数値流体計算とラジエータ単体性能を用いた実験式により車両搭載状態でのラジエータ放熱量を計算することが実用精度で可能となった。
- (2) この手法により、自動車の設計初期段階において、そのエクステリアデザインにおける冷却性能の評価お

よびラジエータやファン仕様の机上検討が可能となった。

- (3) 冷却性能向上のためのデバイスとしてフロントスポイラの性能を計算した結果、フロントビーム下のスポイラの効果が最も大きいことがわかり、実験検証の結果、その妥当性が証明された。

参考文献

- 1) 小野、姫野、三次元流れ解析によるラジエータ通過風速の予測、自動車技術会論文集, Vol.24, No.2 (1993)
- 2) 上田、川口他、エンジンルーム内の数値解析マツダ技報, No.12 (1994)
- 3) 花岡、林、RVのエンジンルーム内流れの予測、いすゞ技報、第92号 (1994)
- 4) 安部、鈴木、エンジンルーム内風流れシミュレーション、自動車技術会学術講演前刷集、952 (1995)
- 5) 栗野、内燃機関工学、山海堂 (1983)
- 6) ゴスマン他、スターCD ユーザーマニュアルCD アダプコ社 (1993)
- 7) 鈴木、熱交換機設計マニュアル アイピーシー社 (1983)

■著者■



蟻坂 篤史



大関 孝夫



久野 仁



西川 健次



岡本 安雄



高橋 易資