

論文・解説

32

## 冷却性能予測手法の開発 Development of Prediction Method for Cooling Performance

長野 直樹\*<sup>1</sup> 池田 大志\*<sup>2</sup> 平松 繁喜\*<sup>3</sup>

Naoki Nagano

Daishi Ikeda

Shigeki Hiramatsu

高松 俊二\*<sup>4</sup> 本郷 均\*<sup>5</sup>

Shunji Takamatsu

Hitoshi Hongou

### 要約

短期間に高品質の製品を開発するには、開発前半での充実した検討と確実な検証活動が重要である。特にこの段階では、個別システムの性能検証だけでなく、車両性能目標からシステムや部品レベルへ目標をカスケードし、車両性能目標と関連する個別システムや部品が、相互に性能目標を矛盾なく満足することが検証できなくてはならない。マツダでは、こうした考えのもとに冷却性能予測手法を開発した。本手法は、動力性能・燃費モデルと連携させた冷却システムモデルと、Computational Fluid Dynamics (以下CFD) によるラジエータ通過風速予測から構成され、両者を関連させることで、車両性能目標とデザインを考慮した冷却系の検討を可能とした。検証の結果、これらが十分な精度と実用性を有することを確認し、車両性能目標から冷却性能へ目標をカスケードし、車として最適な冷却仕様を得られることを確認した。

### Summary

To develop high quality products within a limited period of time, it is essential to conduct proper study and rigorous verification activities in the first half of development period. Especially in this phase, in addition to the verification of individual system performance, it must also be verified that performance targets for both vehicle and associated individual systems & components are satisfied without discrepancy between them after target setting is done by cascading the targets from vehicle level to individual component level. Based on this concept, Mazda has successfully developed a method of predicting cooling performance. This method consists of a cooling system model linked with driving performance & fuel consumption model and CFD (Computational Fluid Dynamics) prediction of the velocity of air flow passing through a radiator. Combining these factors made it possible to study a cooling system while both design and vehicle performance targets are taken into account at the same time. The verification result demonstrates that they provides sufficiently high accuracy and practicability, and can achieve optimum cooling system specifications for the vehicle by cascading vehicle performance target down to cooling performance target.

### 1. はじめに

お客様のニーズの多様化が進む中、ニーズに対応した商品をタイムリーに提供できるよう、マツダでは開発の革新的効率化を目標にMDI (Mazda Digital Innovation) 計画<sup>1)</sup>を推進している。その一環として、冷却系開発についても

予測技術の開発を行ってきた。

本稿では、マツダにおける最新の冷却性能予測手法について紹介する。

\* 1 パワートレインシステム開発部  
Powertrain System Development Dept.

\* 4 車両実研部  
Vehicle Testing & Research Dept.

\* 2, 3 第3エンジン開発部  
Engine Development Dept.No.3

\* 5 パワートレイン先行開発部  
Powertrain Advance Development Dept.

## 2. 開発の狙い

従来の開発プロセスの概要をFig.1に示す。開発前半の企画構想段階では、車両の各種性能目標やデザインを受けて、車両からユニット、ユニットからシステム、システムから部品へと品質や性能目標をカスケードし、その中で最適設計が実現できるように検討や検証が行われる。この図の後半部は、試作車を用いて、設計、実験および生産技術など多数の部門が並行して育成を図る段階である。この車両育成段階で問題が発覚すると、対策検討、試作部品製作および再評価といった開発のやり直しが発生し、人、物、金など資源の損失が大きいばかりでなく、開発期間短縮の実現も困難である。こうした問題を解決するため、机上検討の充実をCAEの活用で図ってきた。これにより、システムレベルの性能検証は充実したが、システムが車両性能目標を満足するかの検証ができないため、結果的に実車依存型開発となっていた。

本稿で紹介する冷却性能予測手法は、短期開発化に向けた開発プロセス革新のイネーブラーのひとつとして、車両やパワートレイン（PT）の企画構想段階で活用することを前提として開発に取り組んだ。この手法の運用イメージは、Fig.2に示す通り、車両レベルの目標から冷却システムの目標をカスケードし、車両最適の冷却システム構築を早期に実現するものである。具体的に述べると、冷却性能と密接に関わる車両レベルの目標には、燃費、エミッション性能とデザインがある。燃費、エミッション性能は、ラジエータ放熱量とPT発熱量で決まる冷却水温度の影響を強く受けるため、冷却水温度を適切に制御することができれば、これらの性能向上が可能である。また、冷却性能はデザインを制約するので、車体通風系を改善して冷却性能を向上させれば、フロントエンドのデザイン自由度が上がり、商品の魅力を向上できる。

こうした性能の検討や検証に対する要求を見据えて、冷却性能予測手法の開発構想を描いた結果、

- ① 燃費、エミッションを考慮した冷却性能検証が可能

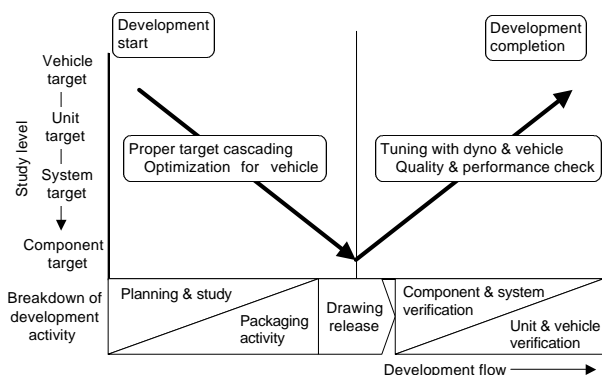


Fig.1 Vehicle Development Process

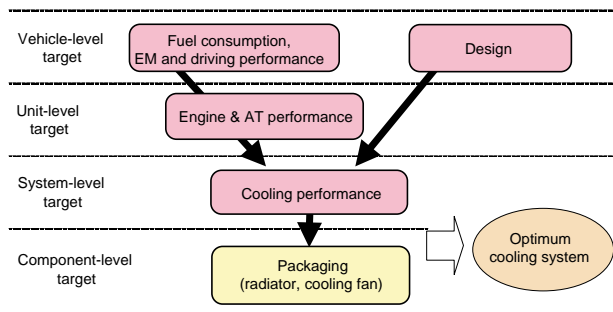


Fig.2 Operation Image of Cooling Performance Prediction Method

- ② デザイン、パッケージを考慮した冷却性能検証が可能
  - ③ 詳細な形状や仕様が未定の開発初期段階でも検討可能
  - ④ 妥当な工数、かつ出図前の開発前半で検証が可能
- これらを狙いとして開発を行った。

## 3. 予測手法

### 3.1 全体構成

車両性能向上やデザインに貢献できる冷却システムを構築するには、車両の走行状態を反映した冷却システムの検討手法が必要である。なぜならば、先述のように燃費、エミッション性能は水温の影響を受け、冷却水温度は負荷や走行速度など車両走行状態の影響を顕著に受けるからである。このように、両者は互いに影響を及ぼし合うため、相互の関係を再現した冷却水温度の予測が不可欠となる。

以上のようなコンセプトの下に構築した冷却性能予測手法の全体構成を、Fig.3に示す。図中の黄色部は検討ツールを示し、矢印は検討に用いられる情報やデータのやりとりを示している。図中の青色で囲まれた部分は、本予測手法の中核となる冷却システムモデルとCFDを示す。

冷却水温度を予測する冷却システムモデルは、動力性能・燃費モデルと連携し、走行状態や冷却水温度を相互に反映し合う。また、その中で重要な位置を占めるラジエータ放熱量を得るには、車体デザインやラジエータ前後の構造物など、物の形状に大きく影響を受けるラジエータ通過

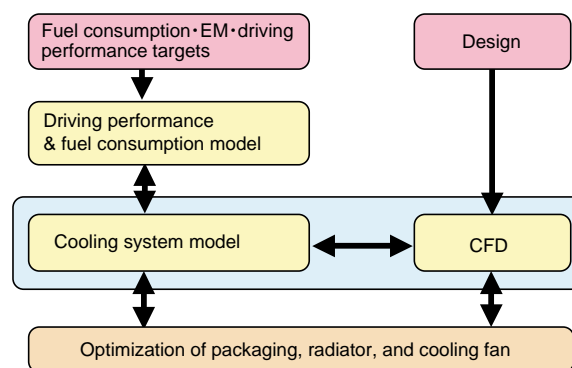


Fig.3 Overall Structure

風速を精度良く求める必要があり、この領域にはCFDを適用した。そして、冷却システムモデルとCFDとは、車体通気抵抗値を用いて関連を持たせた。

このように、複数のツールを連携させることによって、車両に最適な冷却システムの検討が可能となった。

### 3.2 冷却システムモデル

上述のように、車両最適な冷却システムを検討するためには、走行状態に対応した冷却水温度を予測しなければならない。この冷却水温度の要因は、発熱、熱伝達、放熱という三つに分けることができ、それぞれが車両の走行状態と密接に関連している。したがって、各要因に走行状態に応じた車両やPTの状態量を与え、水温を求める。そこで、冷却システムを(1)PT発熱モデル、(2)PT熱流モデル、(3)ラジエータ放熱モデルという三つの要素に分けてモデル化し、既存の動力性能・燃費予測モデルに接続した。

その構成の概略をFig.4に示す。動力性能・燃費予測モデルと冷却システムモデルの間では、任意の走行モードにおける車速やPTの負荷、回転などの状態量や冷却水温度を共有している。動力性能・燃費予測モデルは、冷却システムモデルから与えられる冷却水温度を用いて、過渡を含めた運転状態を計算し、走行中の燃料消費量やエミッション性能を予測する。冷却システムモデルは、刻々と変化する走行、補機、制御および損失などの状態を反映して、PT発熱量とラジエータ放熱量を計算し、動力性能・燃費モデルへ冷却水温度を与える。それぞれの要素モデルは、更にいくつかの要素から構成され、各要素の内部では、エンジン水温、エンジンシリンダ温度、ラジエータ水温、ラジエータ通過空気温度、ATF (Automatic Transmission Fluid) 温度などを考慮している。

このような構成でモデル化することにより、ラジエータやエンジン、ATなど複数の要素から構成される複雑な冷却システムの機能が再現でき、走行状態を反映した冷却水温度の予測が可能となった。以下に、冷却系システムモデルを構成する各要素について述べる。

#### (1) PT発熱モデル

PT発熱モデルは、エンジン発熱量とAT発熱量について

以下の方法で算出する。

#### ① エンジン発熱量

本モデルでは、4サイクル水冷ガソリン機関放熱量モデル<sup>(2),(3)</sup>をもとに、排気系仕様差などで補正を加えたエンジン発熱量計算式を用いて計算する。

#### ② AT発熱量

Fig.5に、AT発熱量の内訳を示す。図の通り、AT発熱量として考慮したのは、トルクコンバータの損失、機械抵抗およびギヤ伝達損失による発熱である。これらの損失による発熱量は、動力性能・燃費モデルから得られる過渡の運転情報(トルク、エンジン回転など)から求めた。

機械抵抗による発熱の一部はケーシングから放熱されるので、ATFへの熱伝導もモデル化した。

#### (2) PT熱流モデル

まず、PT発熱モデルから受け取った熱量は、それぞれの要素における熱容量によって温度へと変換される。各要素の温度は、熱伝達率、流量などによって関連付けられ、エンジン水温へ反映される。エンジン水温は、これらの加熱とラジエータによる放熱とのバランスを保ちながら、熱伝達の原理によって時々刻々と変化していく。このとき、熱の移動はウォーターポンプやATFポンプなどによって行われ、走行状態に応じた流量が考慮される。

一例として、以下にエンジンシリンダと冷却水との間の熱伝達に関する支配方程式を示す。

$$C_{ec} \dot{T}_{ec} = w A_w (T_w - T_{ec}) + Q_e$$

$T_{ec}$ : エンジンシリンダ温度,  $T_w$ : エンジン水温

$C_{ec}$ : エンジンシリンダ熱容量,  $w$ : 冷却水熱伝達率

$A_w$ : 放熱面積,  $Q_e$ : エンジン発熱量

係数  $w A_w$ は熱の流動を支配する役割をもち、各要素の支配方程式は、この係数を適合させることによって上式と同様に表すことができる。例えば、エンジンとラジエータ間では、両者の間を流れる冷却水熱容量がこの係数となる。また、式の各特性はウォーターポンプやATFポンプなどの状態によって変化させ、走行状態に応じた熱流を求めるこ

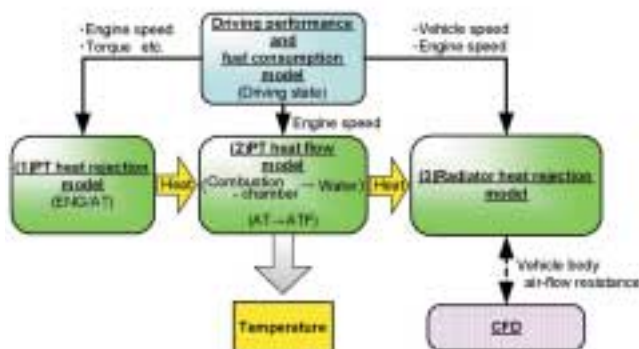


Fig.4 Architecture of Cooling System Model

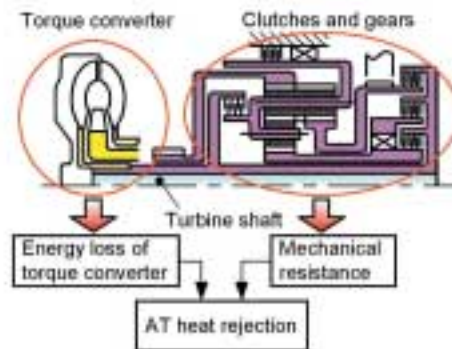


Fig.5 Breakdown of AT Heat Rejection

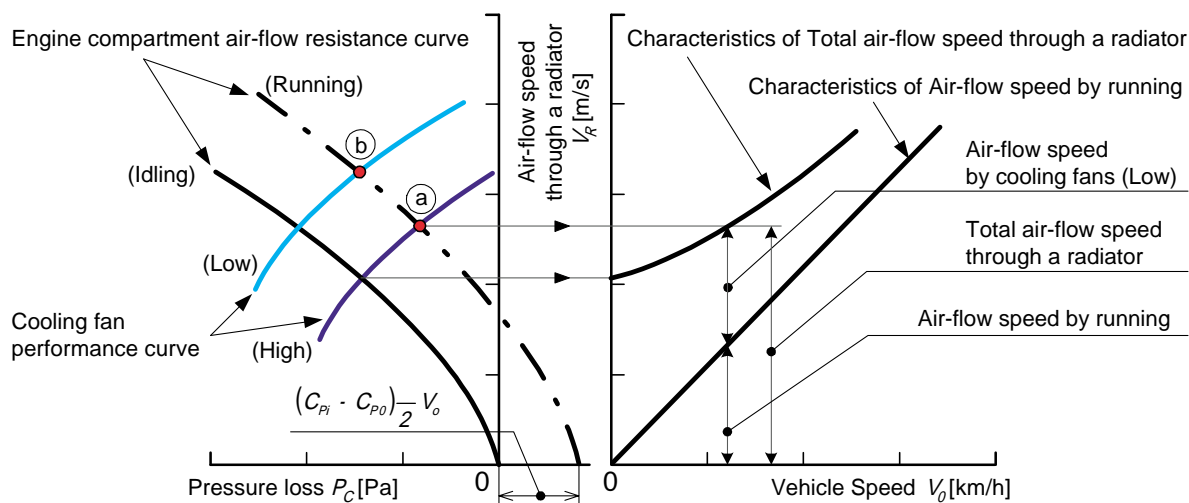


Fig.6 Vehicle Body Air-flow Resistance and Air-flow Speed through Radiator

とを可能とした。

(3) ラジエータ放熱モデル

ラジエータ放熱量は、ラジエータ通過風速、通過水量および放熱率で決まる。このうちラジエータ通過風速は、車両が走行することで得られる走行風と冷却ファンが作動することで得られる冷却ファン風の合成であり、走行車速や冷却ファンの作動状態を考慮してラジエータ通過風速を求める必要がある。ラジエータ放熱モデルでは、Fig.6<sup>(4)</sup>に示す関係を用いてこの計算を行う。図において車体通気抵抗曲線は近似式で表現し、CFDとの関連付けを容易にしている。冷却ファンの性能曲線は、ファンの静圧と風量の特徴データをもとに近似式を求めて入力する。走行状態におけるラジエータ通過風速は、連動する動力性能・燃費モデ

ルから得られる走行車速から走行動圧を求めて車体通気抵抗線をずらし、冷却ファン性能曲線との交点(Fig.6 ④)を求めて算出する。更に冷却ファンは、制御ロジックによって出力を変化させられるように冷却ファン性能曲線を複数設定し、制御に従って性能曲線を切り替えて作動点(Fig.6 ⑤)を求める。ラジエータ通過水量は、エンジン回転数に応じたマップで求め、サーモスタットの作動状態を加味した補正水量を用いる。こうしてラジエータ通過風速と通過水量が得られ、放熱率マップからラジエータ放熱量を算出する。

3.3 CFD

CFDでは、冷却システムモデルから与えられる車体通気抵抗の要求値とデザインとを両立できる、パッケージや冷却部品仕様を検討する。具体的には、デザインやパッケージ構想を受けて3Dモデル化を行い、ラジエータ通過風速を求める。また、冷却システムモデルとの関連を持たせるため、ラジエータ通過風速を車体通気抵抗値に変換する。

本手法では、多くのパッケージや冷却部品仕様の検討を迅速に行えるように、モデリングを含めた解析工数低減に注力した工夫を凝らした。なお、CFD解析には市販の汎用流体解析ソフト“STAR-CD”を使用している。

(1) 解析モデル

CFDでは、冷却システムモデルからの車体通気抵抗要求値を満たす仕様を、素早く決定できるモデリング手法が求められる。そこで、仕様変更時のモデル修正工数低減を狙い、全体の解析モデルをFig.7に示すような位置で分割し、これらを不連続面で接合した。モデルは図に示す通り、①車体外部風洞部、②車体外部(バンパーフェイス部)、③車体外部(その他)、④床下部、⑤エンジンルーム部その他、バンパー裏部、ファン含む放熱器部の7つの部分モデルで構成した。各部分モデルの分割位置は可能な限り標準化して、様々な車種モデルでも流用使用を可能とし、モデリング作業を容易にした。また、分割した格子モデルは解

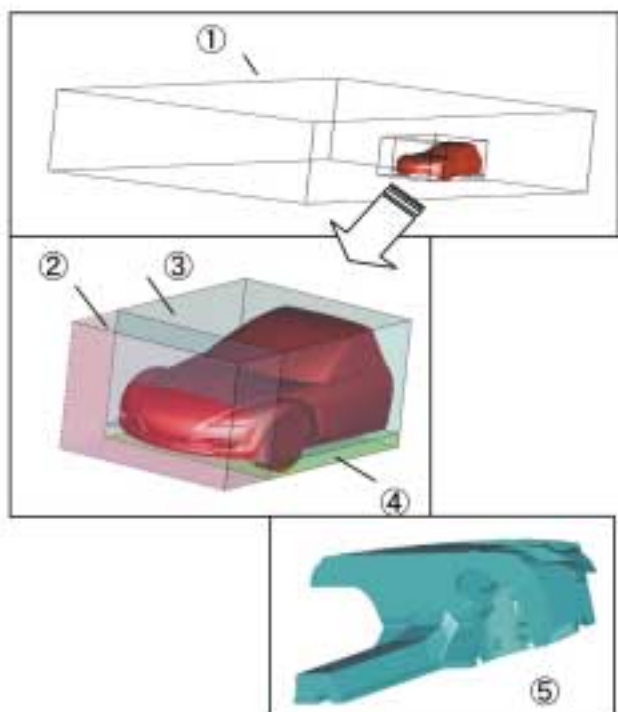


Fig.7 Division of Grid Model for CFD Analysis



析精度とのバランスを取りながら格子サイズを適正化し、全体格子数と解析時間を短縮した。

冷却ファンモデルは、ファンを通過する流れを翼角度で数学的に分配するだけとし、増速はさせていない。

(2) 車体通気抵抗の算出

CFDで得た数点の車速におけるラジエータ通過風速をもとに車体通気抵抗を求め、冷却システムモデルで与えられる要求値と比較検証する。

以下に車体通気抵抗の算出式を示す<sup>(4)</sup>

$$P_o - P_i = \zeta \frac{\rho}{2} V_r - (C_{pi} - C_{po}) \cdot \frac{\rho}{2} V_o^3$$

$P_o$  : エンジンルーム出口圧力,

$P_i$  : エンジンルーム入口圧力,  $\zeta$  : 全圧力損失

$V_r$  : ラジエータ通過風速,  $V_o$  : 車速

$C_{po}$  : 出口圧力係数,  $C_{pi}$  : 入口圧力係数

このうち、全圧力損失  $\zeta$  は

$$\zeta = \left( \frac{V_o}{V_r} \right)^2 - 1$$

で表される。また、エンジンルーム抵抗 $P_c$ は、

$$P_c = \zeta \frac{\rho}{2} V_r^2$$

で表される。上式で表されるエンジンルーム抵抗 $P_c$ が車体通気抵抗値となる。

4 . 検証結果

冷却性能予測手法の中核となる、冷却システムモデルおよびCFDの検証を行った。前者は冷却水温を、後者はラジエータ放熱量を実車による計測値と比較した。

(1) 冷却システムモデルの検証

3.0L・V型6気筒エンジン搭載車を用いて、冷却水温度の検証を行った。検証にはFTP75モードを使用し、ファストアイドル領域、冷却ファン作動領域に着目した。前者は冷間始動からのエミッション排出量やエンジンの機械抵抗算出に、後者は冷却スベックや冷却ファン制御などの検討に活用される重要な領域である。実車データは、シャシーローラによるものであり、水温初期値、外気温度はともに25 前後、走行風速として16km/h一定の風速を車両前部からファンによって与えた条件のもとで計測している。これと同様の条件を冷却システムモデルに入力し予測を行った。

Fig.8に、ファストアイドル領域、Fig.9に電動ファン作動領域における実測値と予測値を示す。グラフ上段は走行経過時間と水温変化を示し、グラフ下段は走行経過時間とエンジン回転数を示している。これらより、ファストアイドル領域の誤差は平均にして - 1.4 , 電動ファン作動領域での誤差の平均値は - 0.6 と、動力性能・燃費モデルで燃費、エミッション検証を行うには、十分な冷却水温予

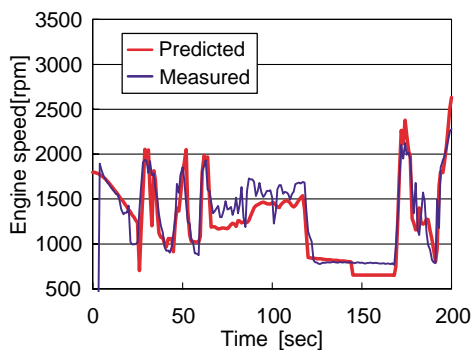
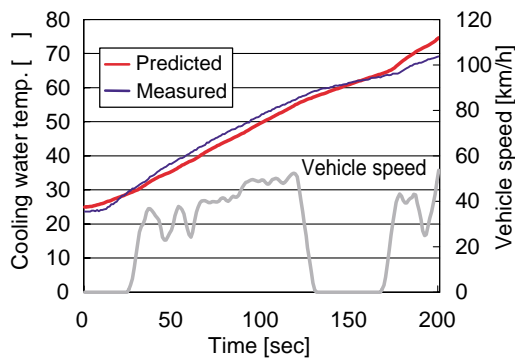


Fig.8 Verification Result (during fast idle)

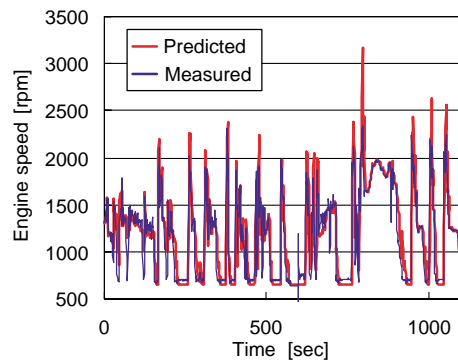
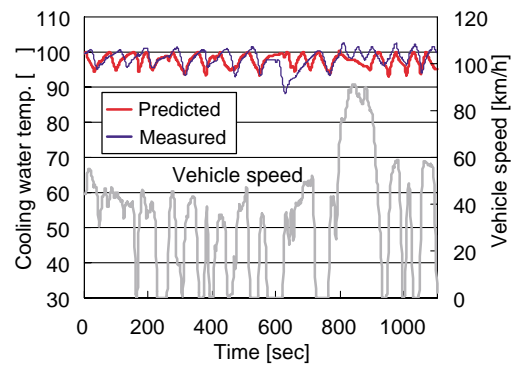


Fig.9 Verification Result (during cooling fans activated)

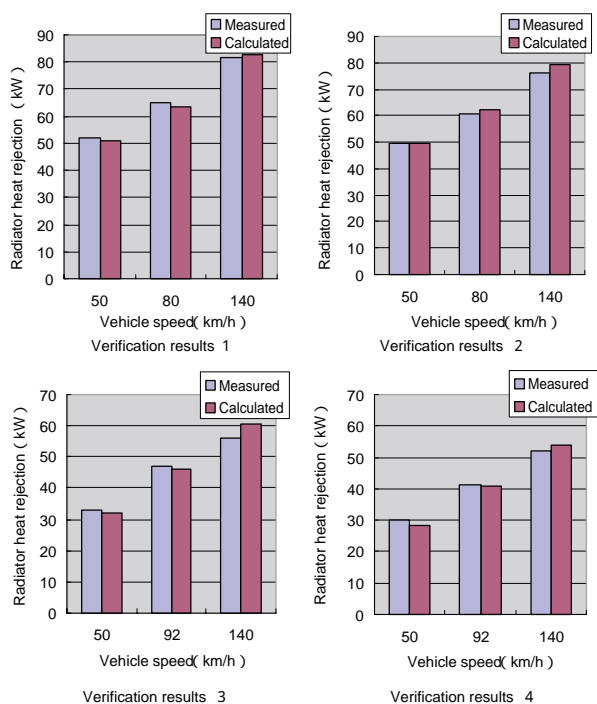


Fig.10 Verification Results of Heat Rejection Value of Radiator

測精度を有することが確認できた。

## (2) CFDの検証

CFDの検証を、ラジエータ放熱量の実測値と予測値の比較によって行った。実測値は、車両を風洞に持ち込み、ラジエータに一定流量の温水を流した際のラジエータ入口と出口の温度差を計測し、ラジエータ放熱量を求めたものである。予測値は、実測した車両と同一の車体形状や冷却系仕様で、CFDによってラジエータ通過風速を求め、3.2 (3)の手法でラジエータ放熱量を算出したものである。これらラジエータ放熱量の実測値と予測値を比較した結果をFig.10に示す。検証結果1, 2は同じ車体デザインで、ラジエータとエンジンルームパッケージが異なる2仕様である。検証結果3, 4は同じ冷却系部品仕様で、車体デザインが異なる2仕様である。検証の結果、ラジエータ放熱量の予実差は全て $\pm 8\%$ 以内に収まり、実用上十分な精度が得られている。

## 5. まとめ

車両性能目標からカスケードし、車に最適な冷却システムを構築する冷却性能予測手法を開発した。

この手法は、動力性能・燃費モデルと冷却システムモデルを連携させることによって、相互に影響し合う走行状態や冷却水温度の関係を予測可能とした。更に、CFDと関連させることで、車両性能目標に沿ったパッケージや冷却部品仕様を検討することを可能とした。

このように、詳細形状データを必要としない動力性能・燃費モデルおよび冷却システムモデルと、3D形状を扱う

CFDとが連携した本手法によって、開発前半で実車に依存することなく、燃費、エミッションなど車両レベルの性能やデザインを主役に据えた検討を可能とした。それにより、お客様の喜びに貢献する冷却システムが構築できるようになった。

現在、本予測手法を開発に適用しており、車両開発期間の短縮化や車両の主要性能向上に貢献する付加価値の高い冷却システムの構築に活用している。

今後は、冷却水に関連する車両の諸性能との連携を進め、より車両に最適な冷却システムを提供していきたい。

## 参考文献

- (1) 新見：製造業のデジタル革新マツダ技報，No.18 (2000)
- (2) 山岸，星：4サイクル水冷ガソリン機関放熱量についての研究(第1報)，内燃機関12巻9号(1973)
- (3) 山岸，星：4サイクル水冷ガソリン機関放熱量についての研究(第2報)，内燃機関12巻10号(1973)
- (4) 妹尾，知名，二之湯，亀山：機関冷却システムの基本設計手法，自動車技術会誌，Vol.40，No.4(1986)

## 著者



池田大志



平松繁喜



高松俊二



本郷均