

2

高熱効率燃焼の開発に適用する筒内壁温予測技術 Simulation Technique of Cylinder Wall Temperature to Apply for High Thermal Efficiency Combustion Development

山本 亮*¹ 横畑 英明*² 角田 浩行*³
Ryo Yamamoto Hideaki Yokohata Hiroyuki Tsunoda
丸井 堅太郎*⁴ 和田 栄治*⁵ 寿美 眞治*⁶
Kentaro Marui Eiji Wada Shinji Sumi

要 約

燃焼の革新による今後の更なるCO₂排出削減を実現しつつ、世界中のお客様に走る喜びをお届けする上で、エンジンの筒内壁温管理は非常に重要な開発課題である。走りと環境性を高い次元で両立するためには、高効率燃焼が要求する筒内壁温を、従来よりも詳細な制御により維持することが求められる。これを実現するために、エンジン本体の熱伝導と、冷却水やエンジンルーム内雰囲気への対流熱伝達による放熱を連成したCAE (Computer Aided Engineering) 予測技術を開発し、冷却水流量の制御や、キョーフ後のエンジン保温といった新たな放熱コントロール技術による熱流れのメカニズム解明と、その効果の予測に適用した。

Summary

Management of cylinder wall temperature is one of the most important topics for further CO₂ emission reduction and driving performance improvement. In order to achieve such improvement, more precise control of engine temperature is necessary to maintain suitable condition for higher thermal efficiency combustion. To achieve this goal, we developed new CAE(Computer Aided Engineering) simulation technique which couples the engine heat conduction and the fluid convection calculation, and applied to predict the heat transfer mechanism and its effect of the measures for controlling the temperature by new technologies such as the coolant flow rate control, and the engine heat retention.

1. はじめに

今後の更なるCO₂排出削減を実現しつつ、世界中のお客様に走る喜びをお届けするためには、内燃機関の燃焼革新による熱効率改善が重要である。ここで、さまざまな環境、乗り方において高効率燃焼を安定して実現し、一方では燃焼の熱負荷に対する部品の信頼性を満足するには、従来以上に詳細な筒内壁温の管理が必要である。そのような状態を実現するには、エンジンの温度状態と走行時の熱負荷に応じて、冷却水や外気への放熱量を調整する必要があり、部品構造と制御の最適化が求められる。本稿では、この課題の解決のために開発したCAEの解析技術について概要を説明する。

2. エンジン暖機の重要性と課題

2.1 開発における課題

運転中のエンジン温度管理は、冷間時の機械損失低減やHC,CO排出量の抑制、あるいは、高負荷運転時のシリンダーヘッド、ブロック（以下、エンジン本体と呼ぶ）の熱疲労による信頼性問題の回避など、さまざまな課題に直結する。また、燃焼改善によるCO₂排出削減のためには、エンジン始動から停止まで燃焼の要求する適切な筒内壁温を常時達成することが求められる。運転中のエンジンの壁温を管理するには、燃焼によって生じる熱に対して、エンジン本体内に設けられたウォータージャケットを流れる冷却水に、熱伝達によって伝わる熱量を適切に調整することが求められる。

*1~6 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

マツダの次世代車種開発においては、このような放熱のコントロールによる温度管理についてFig. 1に示す考え方で開発をしている。具体的には、①始動時は冷却水への放熱を抑制することによりエンジン本体の昇温速度を高め、②燃焼に合わせて適温の状態を維持しながら運転し、③ソーク過程についてはエンジン停止後の放熱を抑制し、温度低下を小さくすることで、④再始動時の温度を高くすることにより昇温時間を短くする、というものである。

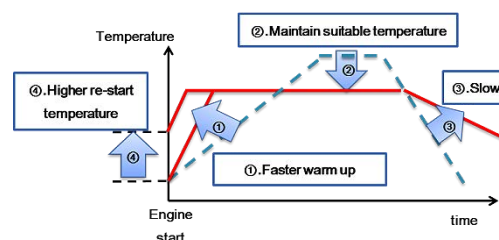


Fig. 1 Concept of Engine Temperature Control in New Vehicle Development

①の過程においては、冷却水への放熱を抑制するため、冷却水流量を小さくする制御を行っている⁽¹⁾。今後は、更に昇温時間を短縮するために、冷却水流量を停止し、熱伝達による放熱を限界まで小さくすることを目指している。②以降は目標とする燃焼室壁温に到達後も、燃焼安定性の維持とエンジン本体の信頼性それぞれの要求を満足するよう、冷却水流量の制御を行う。

③のエンジン停止後では、エンジンの放熱先はエンジンルーム内の雰囲気になる。雰囲気への放熱を抑制するために、断熱材をエンジン表面に設置することで、エンジンと雰囲気との熱抵抗を大きくする。しかし、エンジン本体の全ての表面に設置することは難しく、設置できない部位から熱が逃げてしまうため、これだけでは十分な効果を発揮できない。そこで、特に断熱材が設置しにくいシリンダーヘッド周辺をカバーで覆い、エンジンの熱で暖まった雰囲気をエンジン周辺にとどめ、シリンダーヘッド表面と雰囲気の温度差を低減することで熱伝達による放熱を抑制する。Fig. 2に断熱材とカバーの配置イメージを示す。

Fig. 1の①から③で用いられるいずれの手段も、従来のエンジンにない放熱管理のための新技術であり、それらの改善効果を発揮しつつ、部品の温度が上がりすぎることによる耐熱性、あるいは熱疲労による信頼性の課題を解決する必要がある。それには、始動からエンジン停止以降の熱流れと温度変化のメカニズムを理解した上で、最適な温度コントロールの方法を開発の早期に決める必要があり、その実現のため熱流れのモデル化と机上検討手段の確立を目指した。

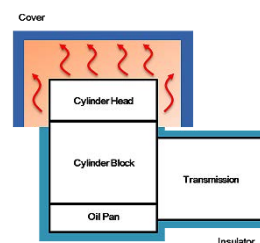


Fig. 2 Image of Engine Heat Insulation in Soak Process

2.2 サーマルマネジメント開発に向けた予測技術

エンジン内熱流れ・温度予測には、定常運転条件を対象に、燃焼ガスと冷却水の流れ・温度をCFD (Computational Fluid Dynamics) で計算し、その結果をエンジン本体の熱伝導解析の境界条件として用いる手法が広く用いられている。マツダにおいても、高負荷定常運転時の熱応力に対する信頼性評価のために、同様の手法を用いて温度を予測し⁽²⁾、冷却のための対策構造を検討してきた。

しかし、今後の開発では、早期昇温、燃焼と信頼性に対する適温維持、キーオフ後の保温という非定常状態の温度管理のために流体の熱伝達による放熱を適宜コントロールする。また、冷却水制御やエンジン保温などの技術によって、従来支配的だった経路の放熱が抑制され、エンジン本体内の熱伝導経路が大きく変わる。これらを考慮した上で筒内壁温管理の最適な方法を早期に決定するためには、部品の詳細な構造を考慮した過渡の伝熱現象の予測が必須であった。しかし、前述の定常状態の温度予測技術は、流体の流れとエンジン本体の熱伝導の計算を分離しているため、流れの時間変化とそれに伴う熱移動の変化を考慮することができない。

そこで、流体の流れとエンジン本体内の熱伝導を同時に計算する連成解析技術を開発した。具体的には、①ウオータージャケット内の冷却水流れの時間変化を考慮したエンジン本体内の伝熱解析技術、②ソーク中のエンジンルーム内の自然対流を考慮したエンジン本体内の伝熱解析技術を開発した。その詳細を以降で説明する。

3. エンジン温度変化の予測技術

始動からソークまでを含めた過渡のエンジン熱流れと温度変化を予測するには、まず、放熱先である流体の流れ、熱伝達を精度よく計算しなければならない。特に、ウオータージャケット内の冷却水の流れは、エンジン本体からの放熱量や温度分布に大きな影響を与えるため、その予測精度が重要である。

そこでまず、冷却水流れの可視化計測と、その結果を元にCFDモデルの改良を行うことで、流速、及び熱伝達率分布の予測精度を改善した。その上で、エンジン本体から冷却水への熱移動を時々刻々と計算するために、熱

伝導計算と冷却水流れ・熱伝達計算を連成する解析技術を構築した。

3.1 冷却水流れの予測精度改善

従来の温度予測は高負荷運転時の信頼性検討を主としており、熱負荷の高い運転条件と高温部位は、ある程度限定することができていた。このため、冷却水流れの予測を行う際には、その運転条件における高温部位の壁温と周辺の流速、及び熱伝達率との相関関係を把握できることが重要であった。

しかし、高効率燃焼の安定性確保や、エンジン油温コントロールなど、燃費に関連する機能を強化するための壁温管理部位は、エンジン本体の信頼性におけるそれとは異なることが考えられる。また、温度管理が必要なエンジン運転条件や冷却水流量の範囲が従来よりも大幅に広がっている。このため、ウオータージャケット内の局所的な流れだけでなく、流路内の全体的な流れを幅広い流量範囲で精度よく計算する必要があり、CFDの計算精度を検証する実験においても、複雑な形状のウオータージャケット内の全体的な流速分布の計測が必要であった。

そこで、ウオータージャケット内の流れをPIV (Particle Image Velocimetry) により可視化し、全体的な流速分布をCFDと比較することで、解析の問題点を明確にして精度を改善する活動に取り組んだ。

PIV計測を行う上で、ウオータージャケットのような複雑な形状は、湾曲する表面形状による屈折で、撮影する粒子の像が歪んでしまい、解析精度が低下するという課題がある。これを解決するため、Fig. 3に示すように流路の材料であるアクリルと同等の屈折率をもつ溶液中にウオータージャケット流路を浸し、屈折を相殺することで内部の画像の歪みを抑制するIndex Matching法を用いたPIV計測を行った⁽³⁾。

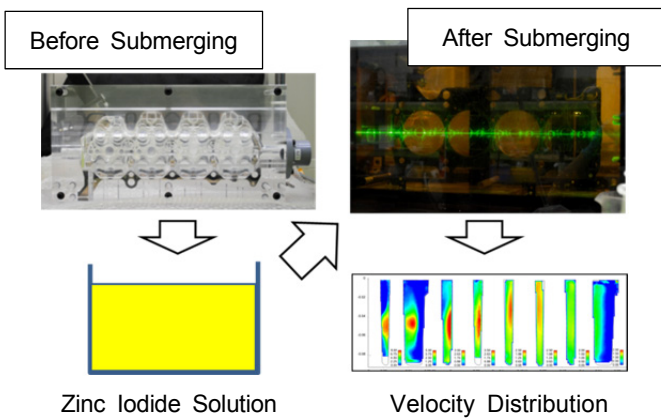


Fig. 3 Experiment of Index Matching PIV

上記の手法で計測したシリンダーブロック部の流速分布とCFD解析結果を、Fig. 4(a), Fig. 4(b)に示す。CFD

解析には、汎用流体解析プログラムICONCFD®を用いた。CFDで求めたシリンダーブロック内の流速分布は、流速の高い領域が広がらずに下流に流れており、この点で計算と実測の差が大きいが分かる。流速分布の広がりや差は断面C以降で発生しているため、その上流のシリンダーブロック入口付近の流れの様子に着目した (Fig. 5)。断面Cの直前で流れが壁面に衝突し、その後流れが広がらない状態で下流に向かって流れていることが分かる。このことから、シリンダーブロック入口付近の流れの衝突挙動が、予測精度に大きく影響すると推測した。

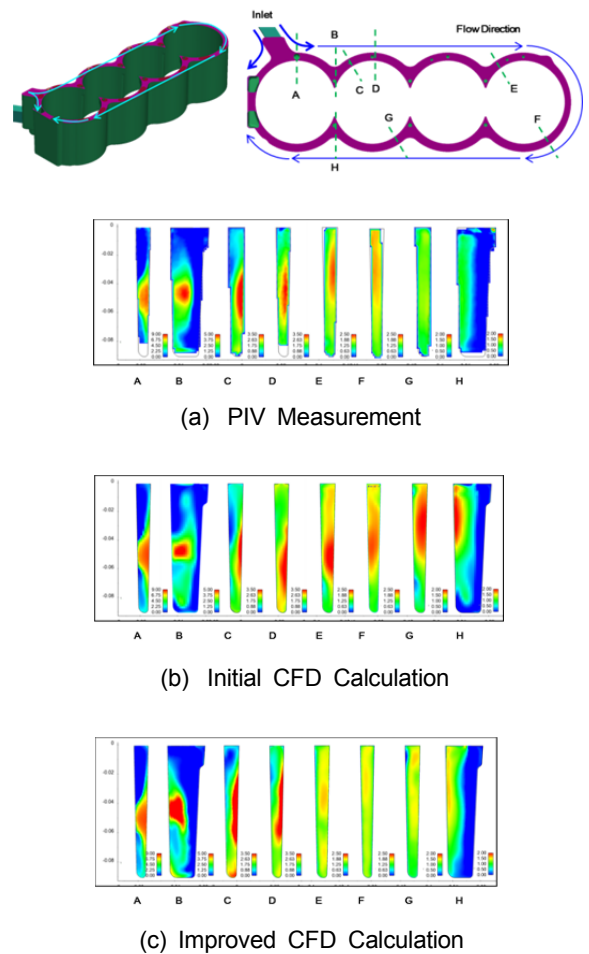


Fig. 4 Comparison of Cylinder Block Velocity Distribution between CFD and PIV

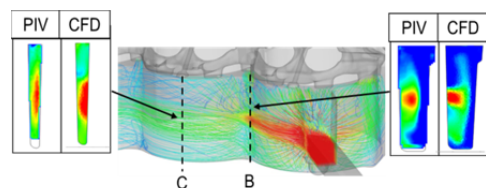


Fig. 5 Flow Behavior and Velocity Distribution

PIVによる検証により、ウォータージャケット内の流れ計算において、最上流であるシリンダーブロック入口付近の流れに課題があることが分かった。シリンダーブロック内の流れは、Fig. 6に示すようにまず入口でウォーターポンプのインペラ形状とその回転の影響を受けて流入する。その後、シリンダーの壁面に衝突、分岐し、それ以降も壁面への衝突を繰り返すことで流れの広がり方が決まってくる。

以上より、ウォーターポンプからの流れと、壁面衝突時の流れの挙動が流れの予測精度に対して重要と考え、これらに着目したモデル改善を行った。

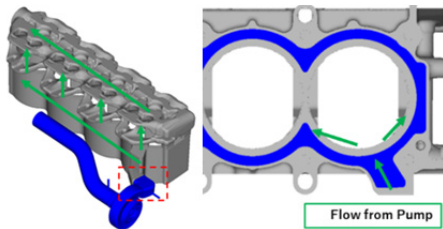


Fig. 6 Flow Complexity at the Inlet of Water Jacket

ウォーターポンプから吐出される流れを再現するために、インペラの詳細形状を考慮し、その回転による運動量の増加をMRF (Multiple Reference Frame) (4) によりモデル化した。モデル化の有無による流れの差を流線で比較した結果を示す (Fig. 7)。ポンプを考慮することによりシリンダーブロック内の流線は上下方向に広がっており、ポンプが流れに大きく影響していることが分かる。

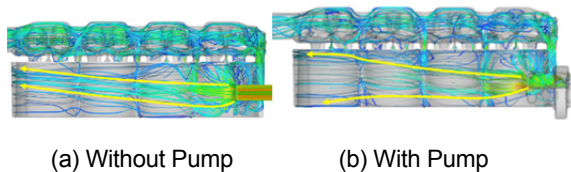


Fig. 7 Comparison of Flow with/without Water Pump

次に、壁面衝突・分岐流れの精度について検討した。ここでは、Fig. 8に示すT字型流路で分岐出口に同一な条件を与えたモデルを用い、対称な形状、条件における流れの対称性の計算精度を検証する。

Fig. 4(b)で示した計算のシリンダーブロック内のメッシュ分割は10程度のため、まず同等の分割数で計算を行った。このとき、メッシュを分岐流路に対して傾けた状態のヘキサ (立方体) セルを用いている。Fig. 8(a)に計算結果を流線で示す。流線の色は流速に対応している。これより、分岐部の再循環領域や、衝突後の分岐流れが対称にならず、流れ場がメッシュパターンに依存することが確認され、単純な形状においても衝突・分岐の流れ

の計算精度に課題があることが分かった。

この改善のためメッシュ分割数を倍程度にすると、全体的に衝突後の対称性は改善するが、循環領域の流れの非対称性が残ることが分かった (Fig. 8(b))。そこで、複雑な流れ場に対するセル面の直交性を確保しやすいポリヘドラル (多面体) セルを用いて計算を行った。その結果をFig. 8(c)に示す。流れがほぼ対称になり、衝突・分岐流れに対してメッシュタイプや分割数の選択による数値誤差の低減が有効であることが分かった。

以上の知見を適用したウォータージャケット改善モデルの計算結果Fig. 4(c)と実験Fig. 4(a)を比較すると、断面C以降で流速の速い領域が徐々に広がりながらブロック上部に向かって流れる様子が解析でも計算されており、実測とよく一致していることが分かる。

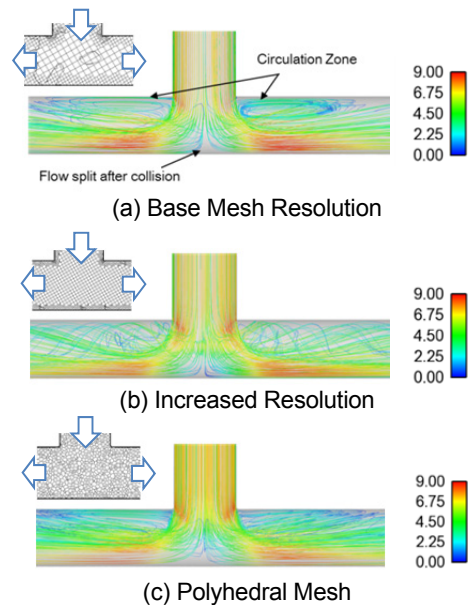


Fig. 8 Improvement in T-Split Flow Calculation

シリンダーヘッドの比較結果をFig. 9に示す。シリンダーヘッド内の流速分布も、PIVとCFDでよく一致していることが分かる。断面内で分岐している流路ごとの流量配分も比較しているが、これについても実験と解析は良好な一致を示した。

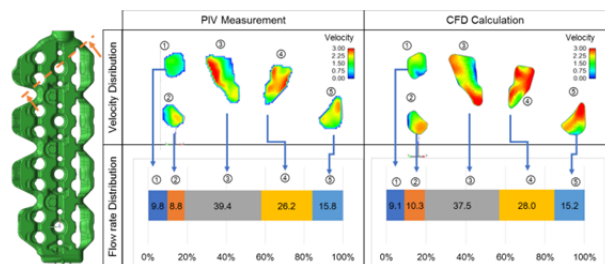


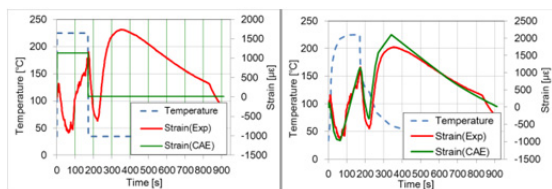
Fig. 9 Comparison of Cylinder Head Flow Between CFD and PIV

このような詳細精度検証とCFDのモデル化・計算方法改善により、ウオータージャケット内の流速分布の計算精度を確保した。冷却水制御では流量が大きく変わるため、上記の検証は25, 130[L/min]の条件で行い、いずれの流量においても良好な精度を確認している。

3.2 エンジンの非定常温度予測技術

従来の定常運転における温度解析は、熱の流れが一定となった状態を計算するため、定常状態の冷却水流れをCFDで計算し、その結果をエンジン本体の温度解析の境界条件とすることで予測ができた。しかし、非定常過程では流体とエンジン本体が相互に影響することで熱移動量が増えるため、この手法を用いた温度予測は難しい。

開発における温度の時間変化の重要性を、シリンダーヘッドの歪みを例に説明する。エンジンを定常状態まで運転し、その後停止して冷却する過程における温度と歪みを、CAE（熱応力・歪解析）と実験と比較した結果をFig. 10に示す。Fig. 10(a)に示すように、従来の定常温度解析手法ではステップ状の温度変化しか考慮できないため、歪みが成長する温度変化過程の予測が難しい。一方で、Fig. 10(b)のように実機の温度変化を考慮することができれば、歪みは実測とよい一致を示しており、温度変化が信頼性に対して非常に重要であることが分かる。



(a) Step-wise Temperature (b) Transient Temperature

Fig. 10 Difference in Strain Calculation by Transient Temperature Profile

エンジン本体温度の管理による燃費改善を実現するためには、目標温度の早期達成だけでなく、温度が変わる際の熱応力・歪に対するエンジン本体の強度を確保することも重要であり、温度変化の予測が開発に与える影響は大きい。そこで、エンジン本体の熱伝導（構造）と、冷却水やエンジンルーム内雰囲気の流れ（流体）を同時に計算する、非定常の構造流体連成解析技術を開発した。

まず、冷却水制御によるエンジン本体温度予測の手法について説明する。ここでは、流体領域であるウオータージャケットと、固体領域であるエンジン本体を1つのメッシュモデルで構築し、エンジン全体の熱バランスを計算することで温度分布を求める方法を採用した。これが、構造流体連成と呼ばれる解析手法である。流体の変化による熱バランスの変化を精度よく計算できるため、非定常の温度解析手法として適している。

冷却水流れと同じくICONCFD®を用いて、この手法によるエンジン本体の非定常温度予測技術を開発した。

Fig. 11にエンジン本体、冷却水領域のモデルをそれぞれ示す。固体はFig. 11(a)に示すように、エンジン本体（内部の吸排気バルブ含む）とエキゾーストマニフォールドをモデル化した。エキゾーストマニフォールドは非常に高温になり、シリンダーヘッドとの接触部位に対する熱源となるため考慮している。部品間のクリアランスに起因する熱抵抗は、接触熱抵抗によりモデル化した。

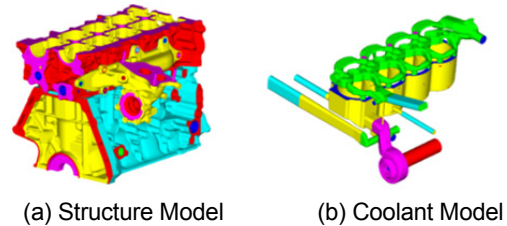


Fig. 11 Mesh Model of Engine Conjugate Heat Transfer Model

エンジンへの入熱要因となる燃焼ガスの流れや温度は、1次元のエンジン解析ツールの計算結果を適用した。燃焼ガスの温度は冷却水やエンジン本体の温度に比べて高いことから、燃焼ガスからの入熱は水温・壁温では変わらないと仮定し、入熱量は一定とした。

シリンダーブロックへの入熱は、ガスからだけでなくピストンを経由してライナーに入るものもあるため、1次元モデルにピストンライナー間の熱伝導を考慮し、ライナーへの伝熱量計算結果を当該部位への熱境界条件として適用した。

エンジン停止後の放熱を予測する上でも同様の手法は有効であり、この場合はエンジン本体からの輻射、及び内部の伝導とエンジンルームの雰囲気流れの連成計算となるが、大きく異なるのは評価時間の長さである。

キーオフから再始動までの時間は、毎日車に乗るお客様を想定すると一晩程度と考えられ、つまり数時間レベルでの保温が必要である。このような長時間の解析評価を、3次元の非定常CFDで行うのは計算負荷が高く、非現実的である。一方で、複雑な形状の部品が配置されるエンジンルーム内の自然対流や、エンジン構造体内の伝熱を、1次元モデルで精度よく再現することも難しく、計算負荷の低減と精度の確保が課題であった。

この課題の解決のために、エンジンルーム流れのCFDと伝熱解析の計算を交互に一定の時間だけ実行し、計算切り替え時にCFDと伝熱計算の結果を交換する仕組みを開発した。流れと伝熱の解析ツールには、それぞれICONCFD®と輻射・伝導解析プログラムPowerTHERM®を用いている。ここで、エンジン本体の温度変化が小さい間は雰囲気の流れは一定と仮定し、

CFDの実行頻度を間引くことで、計算時間の削減を行った (Fig. 12)。これにより、流れと伝熱計算のそれぞれに対して適切なメッシュや非定常計算の時間刻みを選択でき、精度と計算時間の課題を解決した。

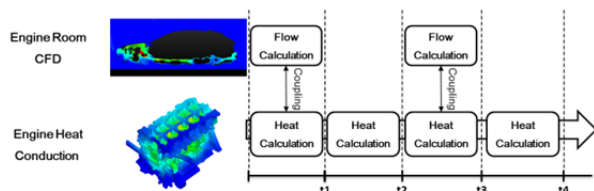


Fig. 12 Calculation Method of Engine Soak Simulation

4. 非定常温度解析の適用

前述手法を用いて、始動時の昇温速度を計算し、実機 (SKYACTIV-D 2.2) の温度計測との比較検証を行った。昇温促進の技術メニューとして検討している流量完全停止の効果を検証するため、SKYACTIV-D 2.2の流量を試験的に停止した場合、1.75[L/min]の流量を流した場合の比較を行っている。25[°C]でソークした状態から始動し、回転・負荷を1500[rpm] Pe 100[kPa]の一定に保った状態の温度計測を行った。解析で得られた本体の温度分布と、シリンダーヘッド計測点における実験値との比較結果をFig. 13に示す。

いずれの条件においても、計測点での温度は良好な精度で予測できていることが分かる。また、水の流れを停止することによる早期昇温効果を確認することができた。

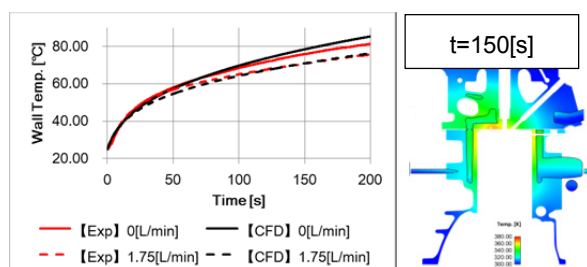


Fig. 13 Effect of Coolant Flow Rate in Cylinder Head Temperature Change

Fig. 14には、エンジン停止後の保温性能の予測結果を示す。量産車をベース車両として、カバーや断熱材で保温を強化した車両の水温を比較している。長時間の温度変化に対して、絶対値に不一致はあるものの、ベース車両からの保温効果は実測をほぼ再現しており、前述の連成計算手法で十分な精度の計算が行えていることが分かる。

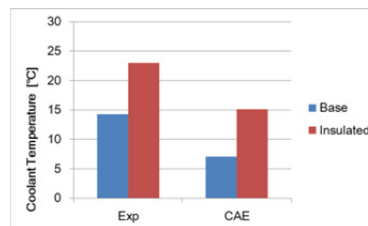


Fig. 14 Result of Coolant Temperature after 4hr Soak

5. まとめ

エンジンのサーマルマネジメント開発は、非常に多岐にわたる流体と伝熱現象が関わっているが、それぞれの現象に対してモデルを個別に検証・改善し、連成技術によってそれらをつなげることで、今後のエンジンの燃費改善において重要な、筒内壁温制御の開発に適用可能な予測技術を構築した。

参考文献

- (1) 山谷ほか：クリーンディーゼルエンジン新型 SKYACTIV-D 2.2の開発, マツダ技報, No.34, pp. 133-138 (2017)
- (2) 宮崎ほか：シリンダヘッドの熱疲労寿命予測, マツダ技報, No.24, pp.173-177 (2006)
- (3) K. Nishino and J.-W. Choi, "Index-Matching Technique for Effective Liquid Flow Diagnostics for Internal Combustion Engine", 20076592 (JSAE), (2007)
- (4) J. Y. Luo, et al., "Prediction of Impeller-Induced Flows in Mixing Vessels Using Multiple Frames of Reference". In I ChemE Symposium Series. 136. 549-556. 1994

(5) 著者 ■



山本 亮



横畑 英明



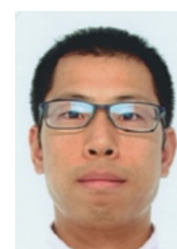
角田 浩行



丸井 堅太郎



和田 栄治



寿美 眞治