



CAE 特集

熱伝導解析

Heat Transfer Analysis

松岡 直樹 Naoki Matsuoka 中野 実 Minoru Nakano

● AM 事業部 / (株)ワイ・イー・シー プロセス開発事業部 DE 推進室

Low weight, compact size and high output are characteristics of the automotive engines developed by Automotive Operations. On the other hand, there have been increasing calls for higher efficiency and greater compactness in engines in order to address environmental issues and secure an extra measure of safety in head-on collisions. But along with this, increases in the levels of heat transfer occurring in the engine itself can cause problems that must be avoided, such as deterioration in material strength and heat-induced distortion. In addition to this, unevenness in combustion chamber wall temperature between the cylinders adversely affects the engine's anti-knock characteristics, and simply increasing the amount of coolant to the engine in turn adversely affects its warm-up characteristics. CAE technology that enables prefabrication analysis has become indispensable in the development of high-quality engines in such a short time frame by addressing these problems in the design of the water jackets.

This report introduces the methodology employed in analyzing coolant flow and heat transfer for a cylinder head as an example of how heat-transfer analysis can be used in automobile engine development.

1 はじめに

当事業部の自動車用開発エンジンは、軽量・コンパクト・高出力が特徴である。一方、環境問題への対応や車両衝突安全性の確保のため、益々エンジンの高効率化・コンパクト化の要求が高まっている。それと共に、エンジン自体への熱伝達量の増大が、材料強度の低下や熱変形を引き起こさないように配慮しなければならない。また、燃焼室壁温度の気筒間ばらつきはエンジンの対ノック性を悪化させ、冷却水量の安易な増大はエンジン暖気性能を悪化させる。そのため、ウォータージャケットの設計にあたっては、これらの問題を未然に防ぎ高品質のエンジンを短期間に開発する為、CAE技術の活用による事前評価が必要不可欠になってきている。

本報告では、自動車用エンジン開発業務における熱伝導解析の適用例としてシリンダーヘッドの冷却水流れ・熱伝導解析の手法について紹介する。

2 解析方法

2.1 解析手順の概要

図1にエンジン（シリンダーヘッド、シリンダーブロック）のウォータージャケット水流れ・熱伝導解析の手順を示す。

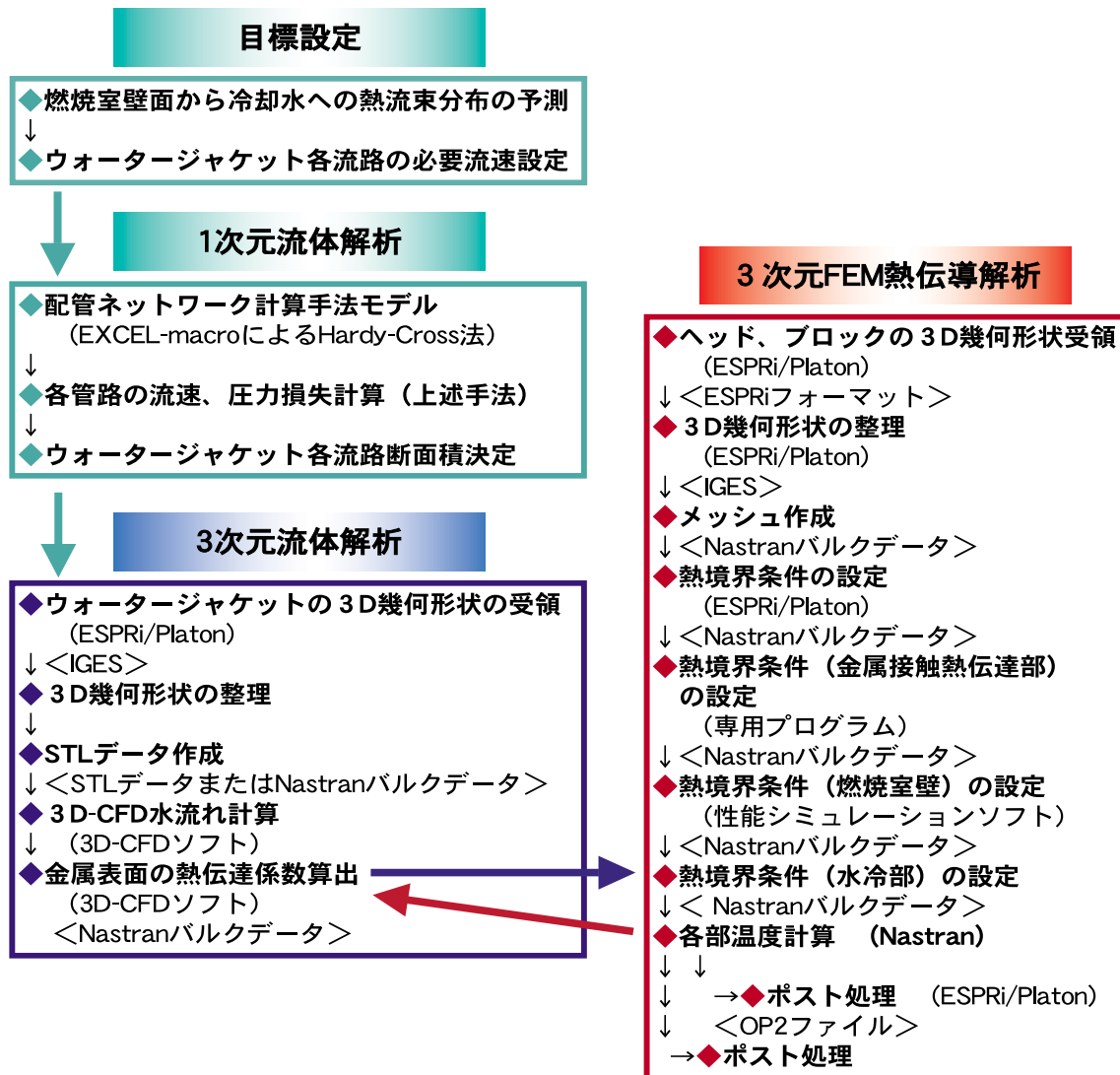


図1 エンジンのウォータージャケット水流れ・熱伝導解析の概略手順

以下にこの手順の内容を説明する。

2.2 ウォータージャケット設計の目標設定

エンジンは燃料を燃焼室内で燃焼させ、発生する熱エネルギーを機械エネルギーに変換する。この機能を満足する為に冷却水によりエンジンの温度上昇を適正值に抑えなければならない。しかし、単純にウォーターポンプの容量を大きくし冷却水流量を増やしても圧力損失の増大やエンジン暖気性能の悪化を引き起こす。また気筒間の燃焼室壁温度ばらつきの改善も期待できない。したがって、ウォータージャケットの設計においては、必要最低限の冷却水流量で必要な部位を的確に冷却し、かつ各気筒の燃焼室温度を均等にするための精密な冷却手法が必要である。この精密冷却に関してはいくつかの報告¹⁾²⁾³⁾⁴⁾がなされており、本報告では1)、4)の手法を参考にしている。以下の一連の手順について説明する。

- (1) 燃焼室壁面から冷却水への熱流束分布の予測
- (2) 冷却水流速と壁温との関係からウォータージャケット各流路の冷却水流速を推算
- (3) 上記 (2) に合致したウォータージャケットの断面積の推定
- (4) ウォータージャケットの詳細設計
- (5) 冷却水流速の確認と熱伝達係数算出（3次元流体解析）
- (6) エンジン温度の予測（FEM（有限要素法）熱伝導解析）

2.2.1 燃焼室壁面から冷却水への熱流束分布の予測

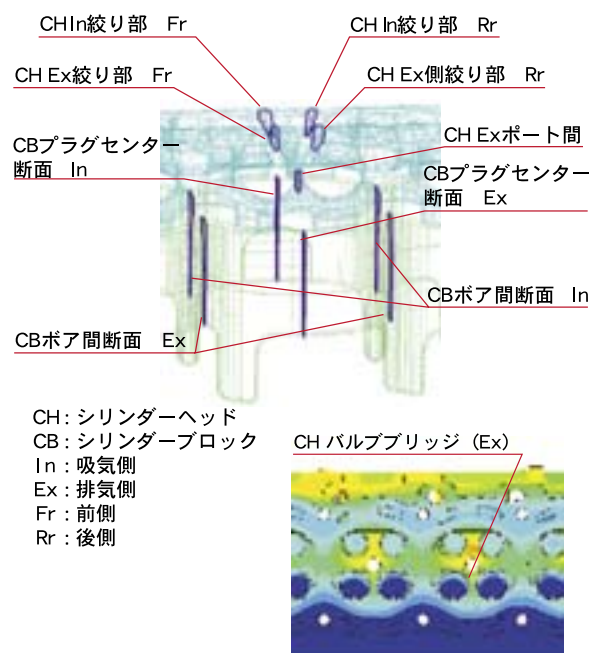
ウォータージャケットの金属表面の温度は、冷却水の速度（熱伝達係数に関連）と燃焼室から金属を通る熱流量との関係に依存している。また、冷却水流速が不足し金属表面の温度が高すぎると冷却水が沸騰を始め、激しくなると金属の温度が急上昇し破損に至る可能性がある。したがって、適切な金属温度を保つ冷却水流速を決める必要があり、そのためには燃焼室から金属を通る熱流量を知ることが第一歩となる。一方、冷却水流速を上げていくと流れの抵抗が増大し、ウォーターポンプの容量不足が生じる為、結局流速の上限が存在する。

他社では実機試験による熱流束分布測定が行われている²⁾⁵⁾⁶⁾。しかし、シリンダーヘッド形状の複雑さの為、詳細な実測を行うことは容易ではない。そこで、CAEモデルを用いた簡易な方法により冷却水流速の目標値を設定する。ただし、別途実機測定による確認は必要である。

以下に本手法の概要を紹介する。

2.2.1.1 過去のCAEモデルによる簡易壁温予測

過去に実測実績のあるエンジンのCAEモデル（ウォータージャケット水流れ解析、シリンダーヘッド・ブロック熱伝導解析）を用いて、冷却水流量を変化させた場合の注目部位毎の温度変化を再計算により求める（図2）。さらに、注目部位毎の冷却水流速と壁温との関係式を導く（図3）。どの部位



シリンダーヘッド温度分布(燃焼室側)

図2 冷却水流速と壁温の注目部位

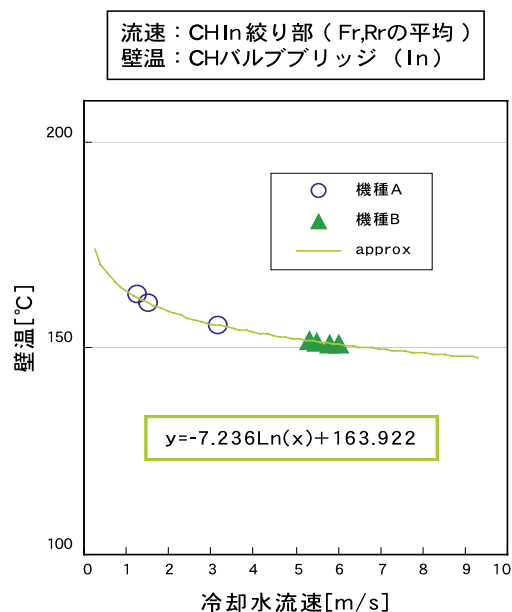


図3 注目部位の簡易温度予測

に関してもほぼ同様の傾向が見られ、冷却水速度 3m/s ～ 5m/s 以上で壁温の変化が緩やかに一定傾向に近づく。ただし、本例は実測値ではないのであくまで参考に用いる。このグラフの傾向と圧力損失の影響を考慮して、ウォータージャケット各部の冷却水速度目標値を設定する。

2.2.2 1次元配管ネットワーク計算 (Hardy-Cross 法)

1次元配管ネットワーク計算手法である Hardy-Cross 法⁷⁾を用い、ウォータージャケットを単純な配管ネットワークに置き換えて、管路の必要断面積を検討する¹⁾。Hardy-Cross 法は網目状管路網の流量計算法として古くから水道関係などで利用されてきた簡便な手法である。

具体的にはシリンダーヘッドの1気筒分のウォータージャケット形状を、例えば 12 本の管路構成とみなし(図4)、それぞれの管路に適当な等価断面積及び流入・流出・ベンド・管摩擦による損失係数を設定する。同様にして図5のようにシリンダーブロック部も含めてエンジン全体を管路モデルに置き換える。Hardy-Cross 法に基づき Microsoft-Excel のマクロ機能を用いて繰り返し計算を行い、各管路の流量(流速、圧損)を算出する。Hardy-Cross 法と3次元流体解析の計算結果について述べる。図6はシリンダーヘッド1気筒の3次元流体解析モデルによる計算結果で、図7は同じく1次元配管ネットワークモデルによる計算結果である。1次元配管ネットワークモデルにより得られた流量分配と数値と変化の傾向は、3次元流体解析によるものとほぼ同等である。また、圧力損失については値の開きが大きい為絶対値評価は出来ないが、形状変更による変化の比率としては概ね良好な対応といえる。以上により Hardy-Cross 法による計算・評価の妥当性が確認できた。

この方法により、ウォータージャケットの目標流速を満足するような管路断面積を選定する。あるいは、管路の断面積や長さを変化させて流量分配や圧損を検討する、あるいはスプリットクーリングのように冷却水の流し方を大きく変えたときの影響を簡単に評価することが可能である。市販の1次元流体解析のソフトウェアも有効であろう⁸⁾。

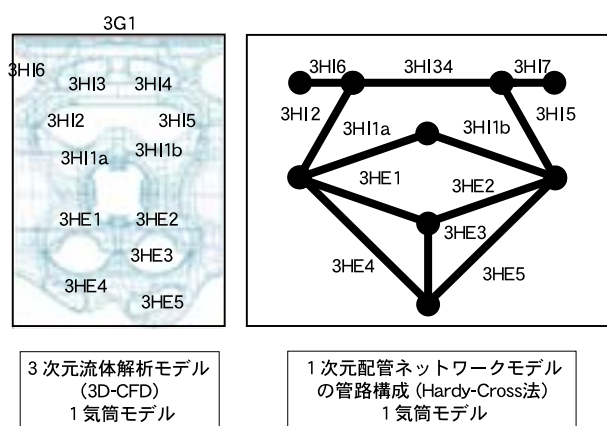
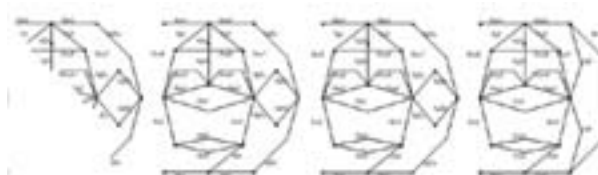
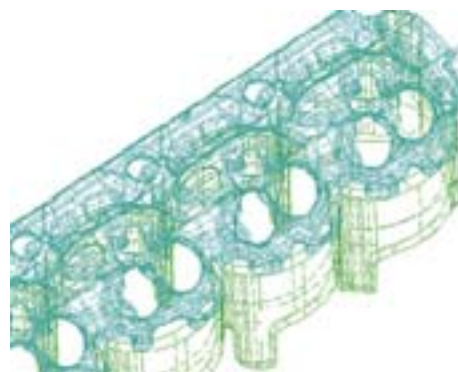


図4 1次元配管ネットワークモデルの管路構成 (3次元流体解析モデルとの対比)

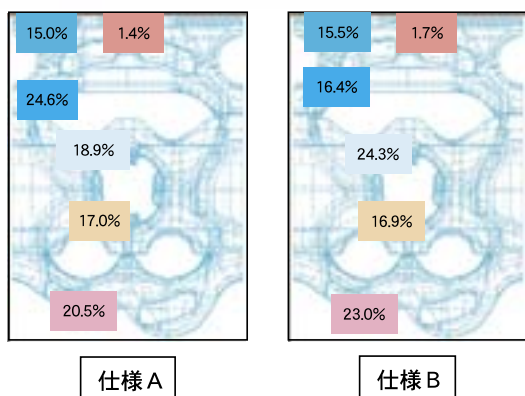


1次元配管ネットワーク計算モデル (Hardy-Cross 法)



ウォータージャケット3次元形状モデル

図5 1次元配管ネットワークモデルの実際例



仕様 A と仕様 B との結果の比較

- ◆ 吸気側（Int 側）と排気側（Exh 側）の流量比率は概ね 6 : 4 で、仕様 B は排気側が若干増加傾向 (59.9% : 37.4% → 57.9% : 39.9%)
- ◆ 仕様 B の圧力損失は仕様 A の約 1.6 倍 (+ 57%)

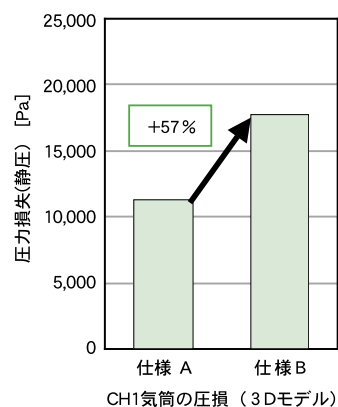
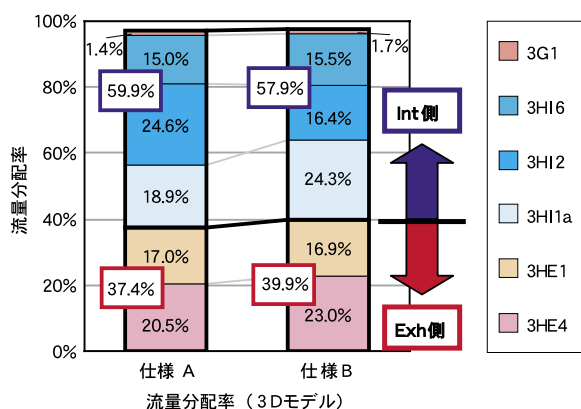
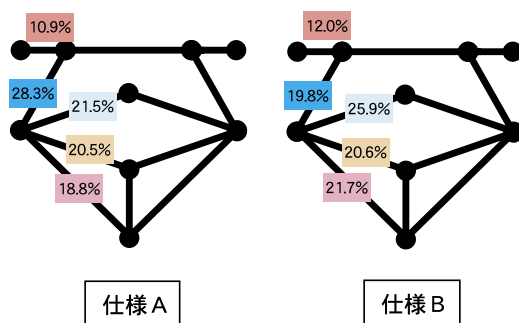


図 6 3次元流体解析モデルでの流量分配及び圧力損失の仕様間比較



仕様 A と仕様 B との結果の比較

- ◆ 吸気側（Int 側）と排気側（Exh 側）の流量比率は概ね 6 : 4 で、仕様 B は排気側が若干増加傾向 (60.7% : 39.3% → 57.7% : 42.3%)
- ◆ 仕様 B の圧力損失は仕様 A の約 1.5 倍 (+ 46%)

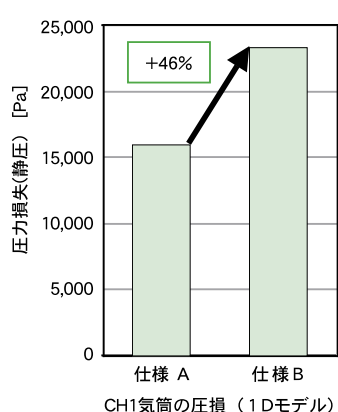
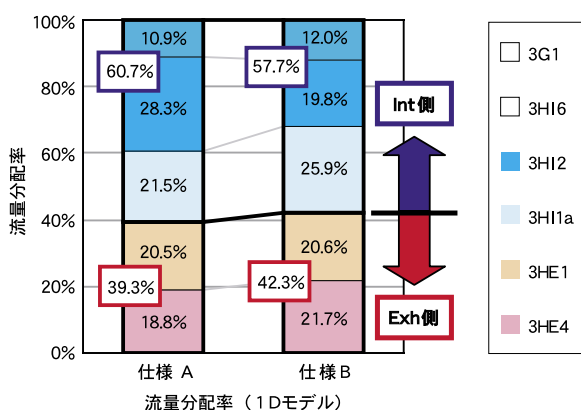


図 7 1次元配管ネットワークモデルでの流量分配及び圧力損失の仕様間比較

2.2.3 3次元流体解析 (3D-CFD)

ウォータージャケットの実体形状による3次元流体解析は、最近のソフトウェアやパソコンの著しい性能向上により、数年前までは考えられない程容易に計算できる環境になった。しかし一方、ウォータージャケットの形状は、複雑な曲面の集合体であるため、3D形状データ作成には現状でも多くの工数を要する。

3次元流体解析の目的は、上述の1次元配管ネットワーク計算の結果設定された管路断面積に基づき再設計された3D形状データでの確認、及びこの後に続くFEM熱伝導解析において水冷部の熱境界条件を与えることである。

図8にウォータージャケット表面近傍の流速分布を、図9に熱伝達係数分布を示す。これらからわかるように、壁表面の熱伝達係数は壁近傍の流速に強く影響される。

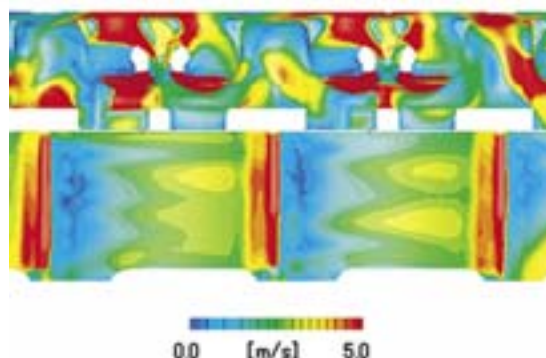


図8 ウォータージャケット表面近傍流速分布
(排気側からの View)

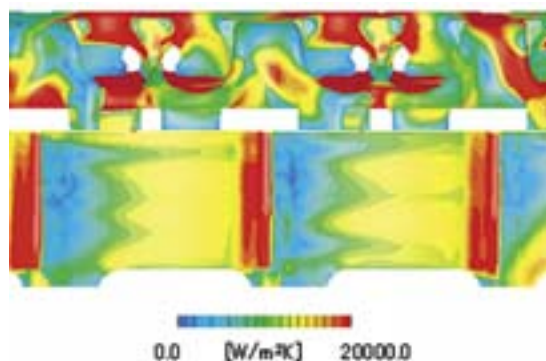


図9 ウォータージャケット表面の熱伝達係数分布
(排気側からの View)

2.3 3次元 FEM 熱伝導解析

図10に熱伝導解析用 FEM モデルの一部を示す。各気筒の熱伝達係数がばらつきを持つことや、エンジンの中央部と両端部とでは隣り合う気筒の条件が異なる為、エンジン全体モデルを用いた解析が必要である。

熱境界条件は、水冷部のウォータージャケット壁では3次元流体解析から得られた熱伝達係数と実測の水温、燃焼室壁及び吸排気ポートでは市販性能シミュレーションソフトの計算から得られた熱伝達係数と燃焼ガス温度、金属接触部・他部位は実験経験式等から算出した数値を用いた。

図11及び図12に計算結果の例を示す。燃焼室のバルブシート間やシリンダーブロックのボア間金属部分の温度予測精度に関して、実測値と計算値との比較の結果、ほぼ 10℃以内の差であった。相対的な評価に対しては十分な精度であるが、設計仕様の決定の為にはさらに予測精度の向上が必要である。



図10 シリンダーヘッド熱伝導解析用 FEM モデル
(一部)

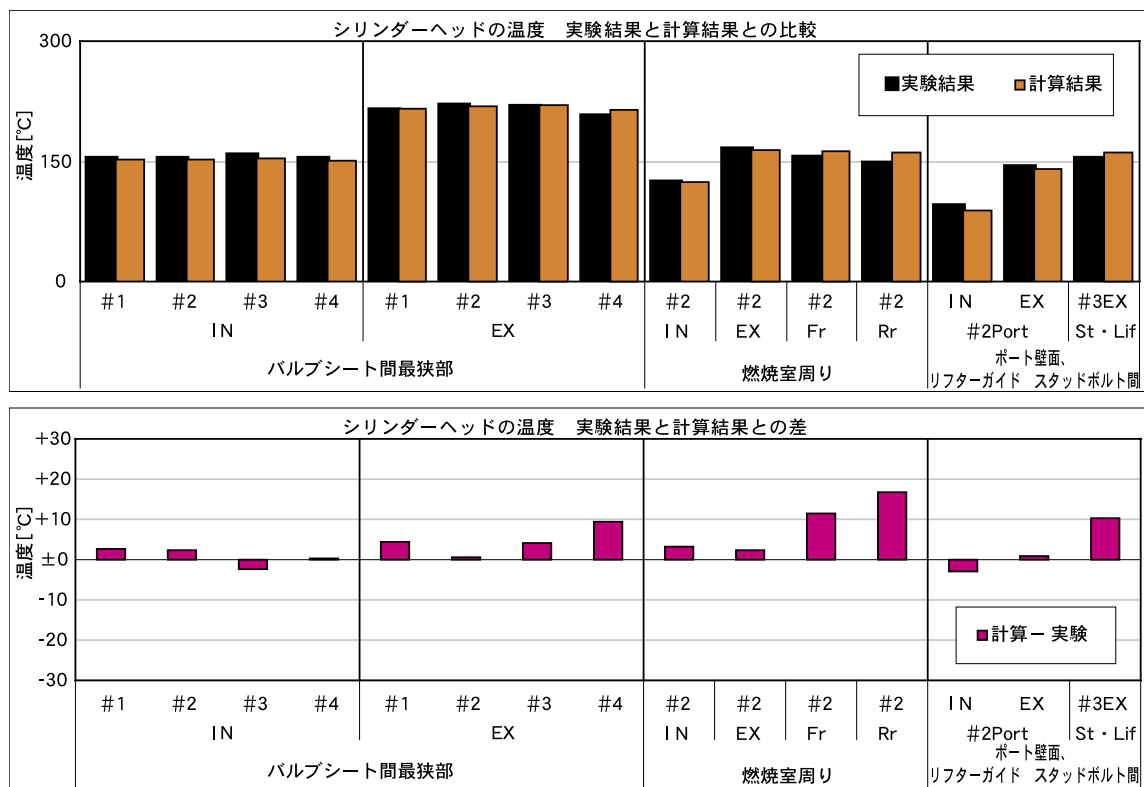


図 11 シリンダーヘッド熱伝導解析結果と実機実験結果との比較

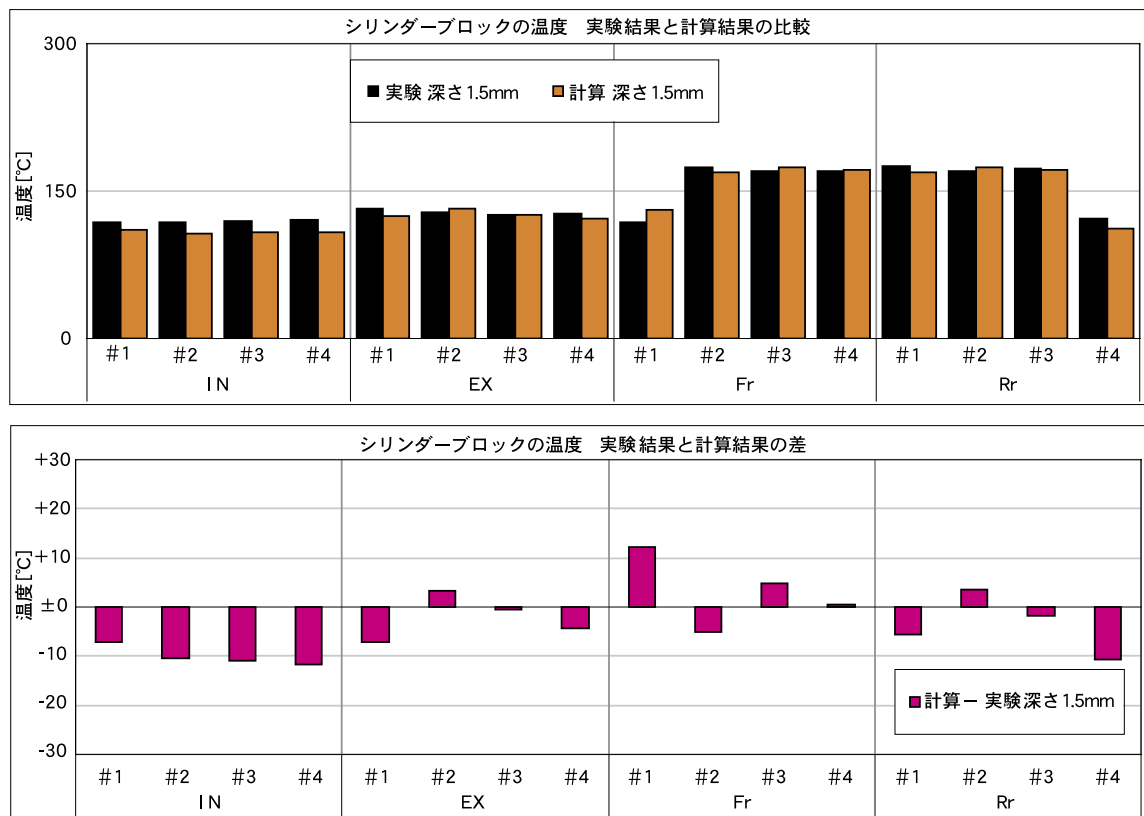


図 12 シリンダーブロック熱伝導解析結果と実機実験結果との比較

3 おわりに

実際のウォータージャケットの設計においては、制約が多く複雑なシリンダーヘッドの構造の中で、吸排気ポートやプラグタワーを配置した後で最後に余った空間に水を流すということになりがちである。このような従来の設計手法に対し、本報告で紹介した1次元の配管ネットワーク計算手法と3次元の流体解析及び FEM 熱伝導解析を併用することで、冷却水通路の設計最適化の工数を短縮し効果を上げることが可能になった。

しかしながら、本報告に関しては実機測定値との比較検証が十分でない部分も残されている。CAEにより迅速に設計仕様を決定する為には、実機検証に基づくCAEの予測精度のさらなる向上が必要である。

伝熱問題は他にも、ピストン、排気マニフォールド、排気バルブなど多くの部品設計において重要である。それらに関してもガスや液体の流れと密接な関係があり、流れの問題として扱う必要がある。これらの取り組みに関しては紙面の制約により今回は割愛した。

■参考文献／引用文献

- 1) M.J.Clough, "Precision Cooling of a Four Valve per Cylinder Engine" ,SAE paper 931123.
- 2) I.C.finlay and G.R.Gallacher, T.W.Biddulp and R.A.Marshall, "The Apprication of Precision Cooling to the Cylinder-Head of a small,Automotive,Petrol Engine" ,SAE paper 880263.
- 3) 周 維敏, 播磨 健司, 近藤 巧, 武藤 直人, "水平対向エンジンの冷却改善", 自動車技術会学術講演会前刷集 962 1996-5.
- 4) 山田 敏生, 古野 志健男, 神田 睦美, 岩下 義博, 横井 豊, 片桐 晴朗, "冷却系改良によるノック改善", 自動車技術会学術講演会前刷集 902 1990-10.
- 5) 片桐 晴朗, 横井 豊, 蔵園 功一, 安部 静生, "ガソリンエンジンヘッドの熱流シミュレーション", 自動車技術 Vol.48, No.4, 1994.
- 6) 今別府 悟, 平野 芳則, 下野 蘭均, "シリンダーヘッドに於ける冷却水への放熱量解析", 自動車技術会学術講演会前刷集 892 1989-10.
- 7) 日本機械学会編, 管路・ダクトの流体抵抗, 丸善
- 8) G.Pembery and C.T.Doyle, "Effect Engine cooling Systems - A computer Aided Approach" ,FLOWMASTER/ROVER C427/17/195.

●著者



松岡 直樹



中野 実