

水冷インタークーラ開発*

Water Cooled CAC Development

寺地 翔太
Shota TERACHI

齊藤 荘史
Masafumi SAITO

原田 真樹
Masaki HARADA

神谷 定行
Sadayuki KAMIYA

安田 位司
Takashi YASUDA

Due to the recent trend emphasizing on environmental performance, engine supercharger downsizing technology has been developing globally with consideration for fuel efficiency and emission regulations. In this report, we provide mainly the technical knowledge regarding the water-cooled CAC development for higher performance (downsizing) and higher quality.

For higher cooling performance, we have designed the optimum core matrix with fins and tubes of water-cooled CAC, leading to the top level of performance quality. For higher reliability against thermal stress, we have established the detail specifications of water-cooled CAC based on the transient characteristics analysis and the simulation technology.

Key words :

WCAC, Thermal stress, Transient characteristics analysis, Supercharging

1. まえがき

先進国を中心に年々強化されている燃費規制を背景に、過給ダウンサイジングシステムの採用が拡大している。同システムは、過給を行うことでエンジン出力を落とすことなく排気量を小さくし、燃費改善を図っている。インタークーラは、過給機により圧縮された高温空気の密度を高め、またノックを抑制するために冷却する熱交換器である。

インタークーラには、空冷式と水冷式があり、以下の理由で水冷式の採用拡大が予測される。水冷式は、車両グリルへの吸気ダクトの配索が不要で、配管長を短くできるため、吸気容積（コンプレッサからエンジンまでの吸気配管容積）及び吸気圧損を低減できる。そのため、空冷式に対して加速のレスポンスとエンジン出力を高められる。また冷却水制御により、吸

気温のコントロールが可能で、EGR ガスをコンプレッサ上流に導入する LPL（Low Pressure Loop）システムにおいて、凝縮水の発生を抑制する上で有効である。LPL システムは、高過給域でも EGR ガスを導入できるため、燃費・エミッションの改善に効果的であり、検討・開発が進められている。

水冷インタークーラには、車両ニーズから以下の機能が求められる。

- ①省スペース；エンコパ内の限られたスペースに搭載するための小型化
- ② LPL 対応；酸性凝縮水に対する過給気側耐食性
- ③過給気側への水洩れを発生させない
；高温環境下における熱歪耐性

本稿では、上記ニーズに対応したアルミ製水冷インタークーラ開発について述べる。

*（公社）自動車技術会の了解を得て、「2015 年春季大会学術講演会予稿集」より一部加筆して転載

2. 製品構想

以下の3点をポイントに、製品開発を行った。

- ①小型化；コア部（フィン&チューブ）の冷却性能向上と、ケース一体ろう付構造の採用
- ②過給気側耐食性；高耐食材の開発
- ③熱歪耐性；熱歪発生メカニズムの解明，そのための解析ツールの開発

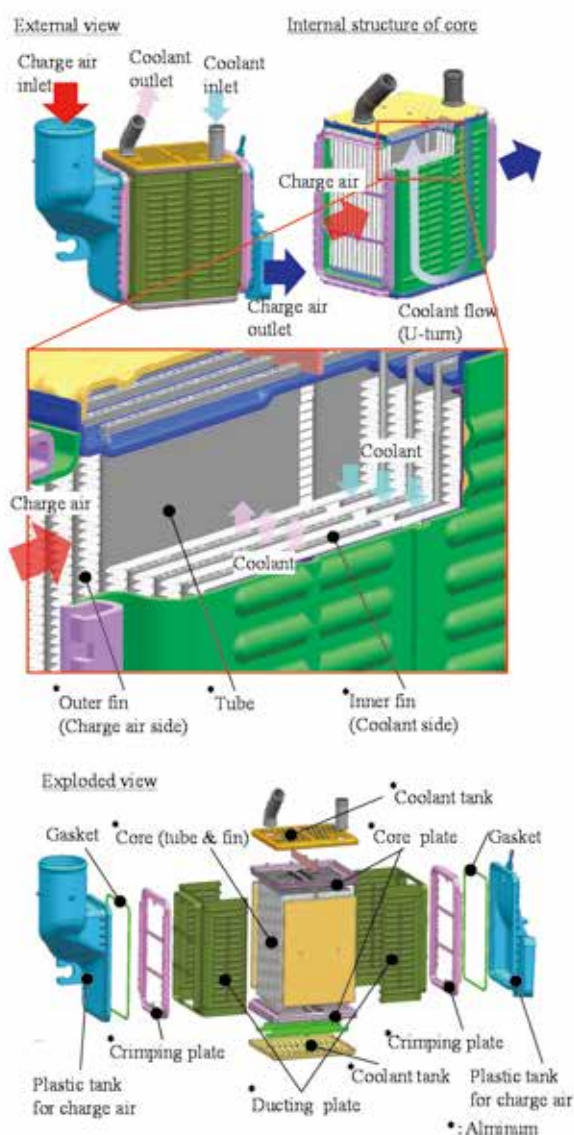


Fig. 1 Structure of developed product

水冷インタークーラは、冷却水と過給気の熱交換により、過給気を冷却する機器である。開発品の構造を Fig. 1 に示す。上下の水タンクをチューブで連通し、チューブ内にはインナーフィン、チューブ間にはアウターフィンが設置されている。冷却水はチューブ内を

流れ、過給気をアウターフィンを通して冷却している。チューブ仕様とフィン山高さを最適化することで、コアの高性能化を実現した（詳細後述；2.1）。またチューブには高耐食開発材を適用し、過給気側の耐食性を向上した（詳細後述；2.2）。

そのコア部をダクティングプレートで覆い、過給気の流路を形成している。ダクティングプレートの開口部には、タンクをかしめるための「かしめプレート」を設定している。そして、このかしめプレートまでを、コア部と一体ろう付した（ケース一体構造）。タンクとの接合方式をかしめ式とすることで、樹脂タンクの適用を可能とし、軽量・低コストを実現した。ケース一体構造は、コア部とケースの熱膨張差による熱歪が懸念されたが、熱歪解析ツールの開発によりメカニズムを解明し、耐熱歪性を高めた（詳細後述；2.3）。

2.1 小型高性能コア

コア部の高性能化にあたり、過給気側のフィン仕様の最適化、水側の伝熱促進、フィン&チューブ仕様の最適化の3つの観点で検討した。

<過給気側フィン仕様の最適化>

高性能化を狙って、ルーバフィンを採用した。オイルや凝縮水の排出性、デポの詰り性を考慮し、ルーバの詳細仕様を決定した。

<水側の伝熱促進>

伝熱促進のためには、熱伝達率を向上させるか伝熱面積を拡大しなければならない。熱伝達率を向上させるために、ラジエータ等では流れの攪乱を狙い、水側通路にディンプルを設けているものがある。しかし、Fig. 2 に示す通り、ディンプルはラジエータの使用域（レイノルズ数（Re）1000以上）では効果を発揮するが、水冷インタークーラの使用域（レイノルズ数（Re）500以下）では効果が小さい。従って、開発品は、伝熱面積拡大を目的とするストレートタイプのインナーフィンを採用した。

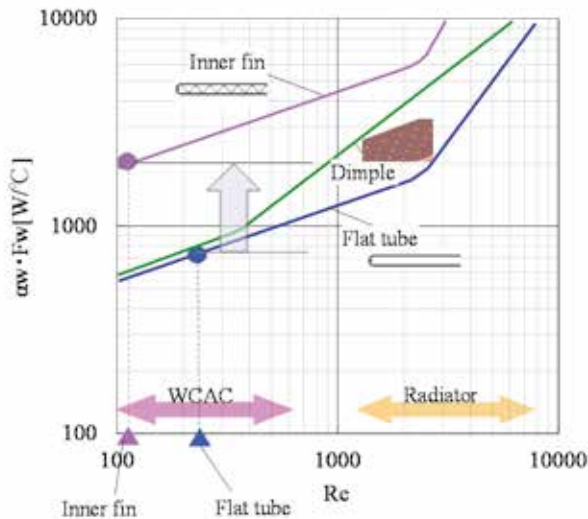


Fig.2 Heat transfer characteristics with Reynolds number

<フィン&チューブ仕様の最適化>

上記フィン及びチューブ仕様を前提として、コア部の性能当たりの質量最小化を狙い、アウターフィン及びインナーフィンの山高さを決定した (Fig. 3)。水側のフィン山高さは、小さくするほど高性能化を図れるが、異物詰まり限界から決定した。

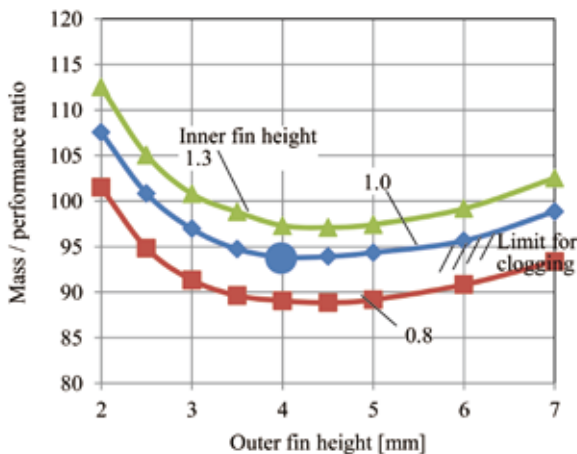


Fig.3 Optimization of fin height

2.2 過給気側の耐食性向上

LPL システムでは、SO_x や NO_x、Cl⁻ を含んだ排ガスがインタークーラを通過するため、インタークーラで冷却されることにより酸性の凝縮水が発生する。これにより、チューブが腐食する課題があり、犠牲防食が必要である。一方で、チューブとフィンを接合するために、ろう材を配置する必要がある。そこで、我々はろう

材を低 Si の Zn 入りろう材とし、ろう材 (接合) 機能と犠牲防食材機能の両立を図った 3 層材を開発した。

Fig. 4 に、その材料構成と電位分布の概要を示す。チューブの心材に対し、チューブ表層の Zn 濃度を向上させることで孔食電位を卑にし、犠牲防食機能が働くようにしている。その結果、従来材に対し耐食寿命の向上が図れた (Fig. 5)。

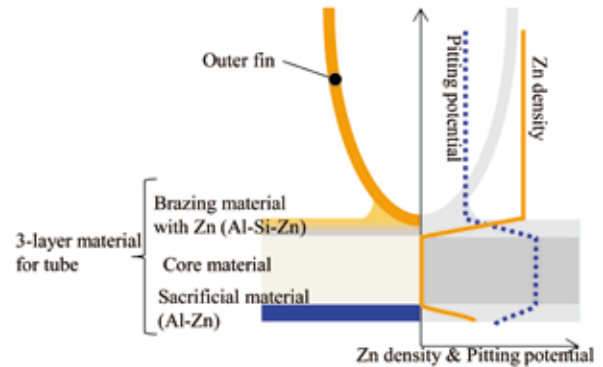


Fig. 4 Materials of core and the pitting potentials

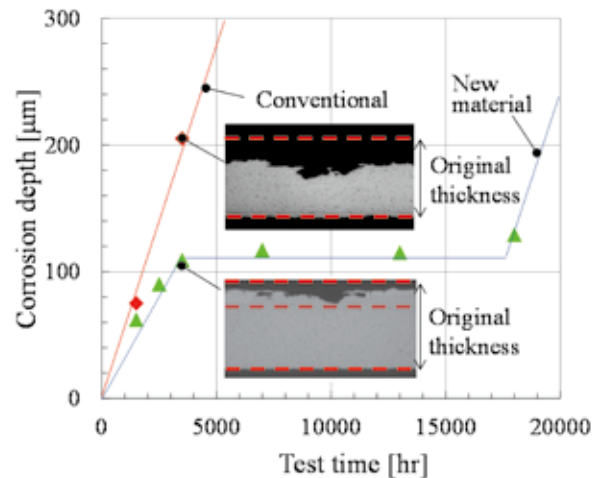


Fig. 5 Sacrificial protection effect by developed material

2.3 耐熱歪性の向上

熱歪は、主に部位ごとの温度差に起因した熱膨張差によって発生する。特に過渡的に温度が変化する際に発生しやすく、空冷インタークーラでも高温の過給気が急に入るタイミング (実車で急加速時に相当) で大きな歪が発生する。

水冷インタークーラは、水冷却のため過給気の流れ方向の長さを、空冷インタークーラに対して約 1/6 に短くできるが、背反としてコア内の温度勾配が大きく

空調・熱マネ

なり、熱歪も発生しやすくなる。更に今回の開発品は、ケース一体構造であるためにコア部の四方を拘束されていること、コア部の高性能化によりコア部の昇温速度が大きいことより、従来の水冷インタークーラに対して、より熱歪が厳しくなるため、本開発品における熱歪検討は非常に重要である。

しかし、水冷インタークーラの熱歪発生メカニズムを解明することは容易ではない。空冷インタークーラはコア部が外部から見える状態であるのに対し、水冷インタークーラはコア部がケースにより覆われている。そのため、空冷インタークーラの熱歪発生メカニズムの解明に活用される、赤外線カメラによる温度分布把握や、歪ゲージを多点貼り付けての変形モード把握が困難であった。

そこで我々は、温度分布の時間変化とそれによる変形を精度よく計算できる解析ツールを開発し、熱歪発

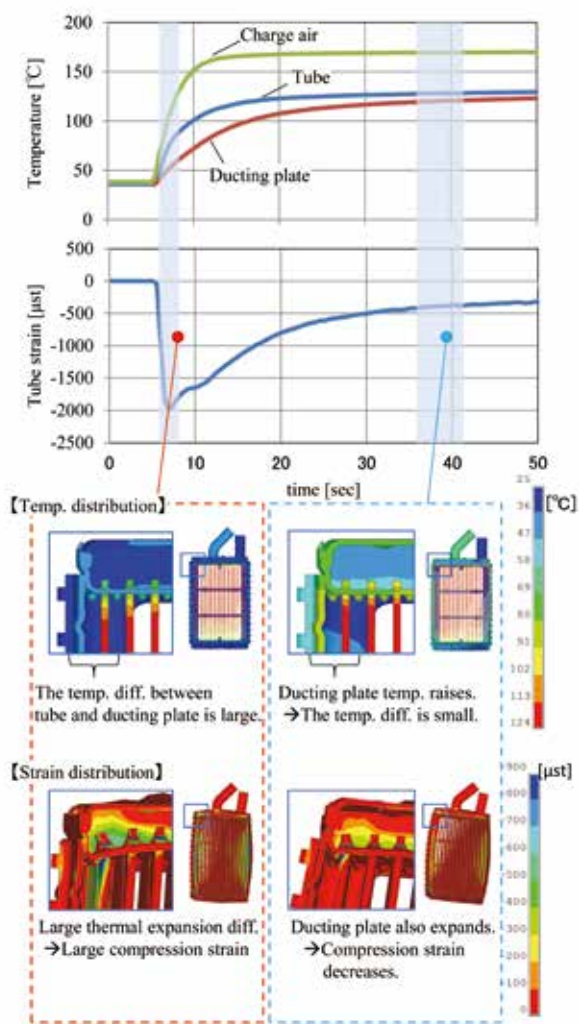


Fig. 6 Thermal strain mechanism

生メカニズムを明らかにすることで、耐熱歪構造を検討した。Fig. 6 に示すように、チューブ・ケースとも低温の状態から高温の過給気が入る際に、チューブが急激に昇温する。一方、ケースは熱容量が大きいので、昇温速度は遅い。そのため、過渡的に大きな温度差が生じ、膨張しようとするチューブの変形がダクティングプレートにより拘束され、チューブに圧縮歪が生じる。

このメカニズムに基づき、チューブとケースの熱膨張差を吸収する構造を考案し、実車で急加速時の発生歪が目標を満足することを確認した。

3章にて構築した熱歪解析手法の詳細を述べる。

3. 熱歪解析ツールの開発

3.1 熱歪解析の概要と課題

Fig. 7 は、水冷インタークーラの熱歪の時間変化の一例を示す。Fig. 7 中の点 O→A→B の時間変化を応力-歪線図上で示すと、Fig. 8 のようになる。点 B の歪を点 A の歪履歴を考慮せずに計算すると、正しい歪値を得られない（点 B' の歪と見誤る）ことが分かる。

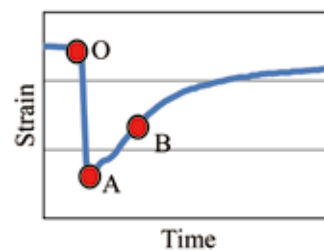


Fig. 7 Transient change of thermal strain

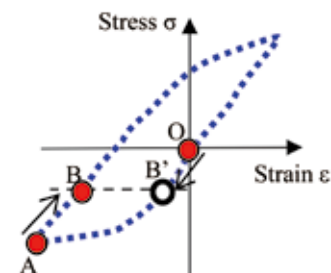


Fig. 8 Stress - strain characteristics

そこで、歪の時間履歴を正確に捉えるために、時々刻々の温度分布をCFD解析により算出し、その温度分布を入力としてFEM解析を行う連成解析を実施した。FEM解析は、変形の履歴を考慮するために、前時刻の変形データを初期形状として入力した (Fig. 9)。

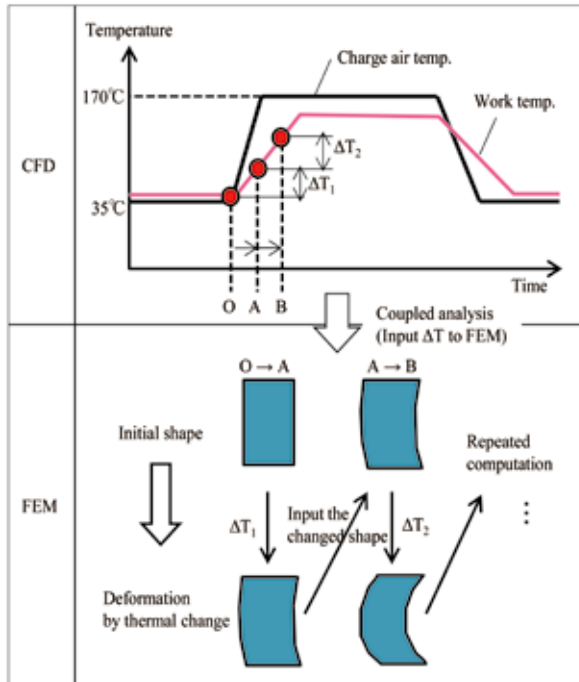


Fig. 9 Simulation overview

しかし、実際に解析を実施しようとするとき、熱歪は製品全体の変形を把握する必要があり要素数が多く、かつ繰り返し計算となるため、莫大な計算時間を必要とし、開発ツールとして活用できない。そこで次節では、解析時間短縮化のための工夫を述べる。

3.2 解析モデルの簡略化

解析時間が膨大となる要因は、莫大な要素の分割数にある。特にアウターフィンの要素数が大半を占める (約 95%)。岩堀 (4) らは、FEM 解析においてフィンに対し剛性を考慮した均質化モデルを適用し、計算時間の短縮と計算精度を両立した。本稿でも FEM 解析において岩堀らの手法を用いた。

CFD 解析においても、アウターフィンの均質化が要素数削減に有効だが、過渡的な伝熱現象を再現する特性を、均質化モデルに付与する必要がある。

式 (1) は、非定常熱伝導の基礎方程式である。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

式 (1) 中の密度、比熱、熱伝導率の定義がポイントである。我々は、これらの物性値について、フィンと空気の体積占有率を考慮して、それぞれ下記のように定義した。

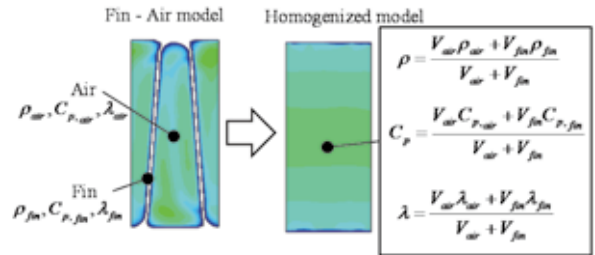


Fig. 10 Homogenization of Fin-Air model

この仮想物性を付与した均質化モデルの計算精度を検証するため、フィン形状を完全に再現したモデルでの CFD 解析結果と比較した。Fig. 11 に過給気流れ方向のチューブ壁面の温度分布を示す。これにより過給気流れ方向の温度分布が再現できていることを確認した。この均質化モデルを取り入れ、製品全体解析を実施した。以下にその結果を述べる。

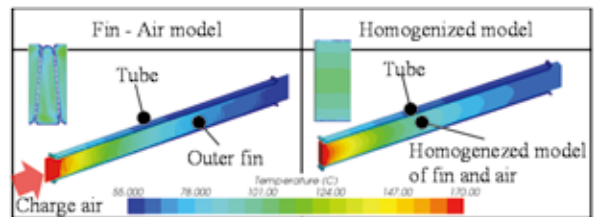


Fig. 11 Comparison study of the models

3.3 解析精度の検証

Fig. 12 に、それぞれ温度と歪の過渡的变化に対する、実測と解析での比較を示す。高温の過給気導入によるチューブ壁温の立ち上がり方を再現できており、歪の過渡的な挙動も精度よく再現できていることが分かる。

空調・熱マネ

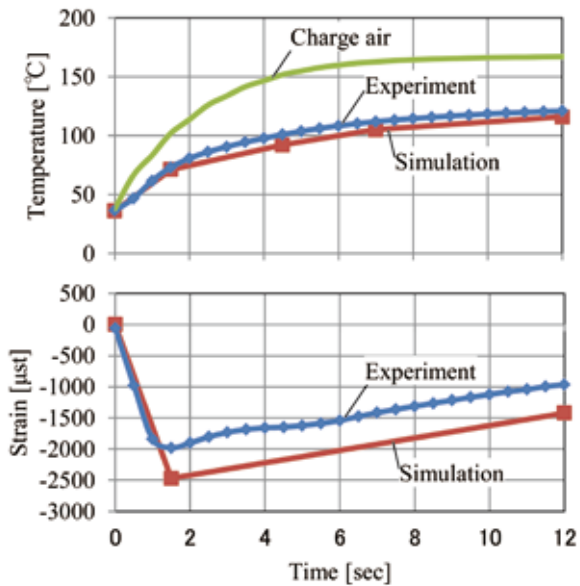


Fig. 12 Comparison between simulation results and experiment results

4. むすび

以上の取り組みにより、コア部の性能を向上し、体格を低減することで、省スペースに貢献し、かつ熱歪解析ツールを開発することで、高い熱歪信頼性を有する水冷インタークーラを開発した。更に、今後のLPLシステム拡大に備えた高耐食技術を織り込むことができた。なお、本開発品は2014年に量産を開始している。

今後は、本製品開発の過程で得られた知見そして開発ツールを活用し、更なる燃費改善やLPLシステムに対する凝縮水抑制を行うための冷却水制御（冷却水の流動変動大）に対応する水冷インタークーラの開発を進めていく。

参考文献

- 1) 古野志健男：環境変化に順応する将来パワートレイン技術の方向性, Vol.19 (2014)
- 2) 原田真樹：特許公開 20114-214955
- 3) 安藤誠：特許公開 WO2011034102
- 4) 岩堀恵介：チューブフィン構造体におけるフィン層の均質化弾性剛性, 日本機械学会論文集, Vol. 81 (2015)

著者



寺地 翔太

てらち しょうた

クーリングシステム開発部
水冷インタークーラ開発に従事



齊藤 荘史

さいとう まさふみ

トヨタ自動車株式会社 出向
水冷インタークーラ開発に従事



原田 真樹

はらだ まさき

DENSO THERMAL SYSTEMS S.p.A.
出向
水冷インタークーラ開発に従事



神谷 定行

かみや さだゆき

クーリングシステム開発部
水冷インタークーラ開発に従事



安田 位司

やすだ たかし

クーリングシステム開発部
冷却製品開発に従事