

# 環境対応車向け統合熱マネ用小型・高性能 ラジエータの開発\*

## Development of a Compact and High-Performance Radiator for Environmentally-Friendly Cars

浦濱 敬史  
Takashi URAHAMA

杉戸 肇  
Hajime SUGITO

赤木 翔太  
Shota AKAGI

宮野 良和  
Yoshikazu MIYANO

To comply with increasing environmental and fuel efficiency regulations, low-temperature radiators are required to use for thermal management of environmentally-friendly cars. As one of the low-temperature radiators, we developed a supplementary radiator installed in the front of the wheel-well which achieves the compact, high performance, and durability requirements by use of an inner-fin tube. The purpose of this paper is to report our design approach and product specifications of the supplementary radiator.

*Key words :*

*Heat, Fluid, Radiator, Engine cooling, Low temperature, Inner-fin tube, Chipping*

### 1. まえがき

環境や燃費に対する規制強化に伴い、自動車業界では環境対応車（過給エンジン車、HEV、EV、FCV等）の開発が急速に進んでいる。この環境対応車に求められる総合熱マネジメントでは、低水温回路で使用される低水温（以下、LT）ラジエータが成立の大きな鍵となる。低水温回路は、水冷インタークーラ（以下、水冷CAC）やインバータ、モータージェネレータ等を冷却するための新たな冷却回路で、従来のエンジン冷却回路よりも水温が低くなる。そのため現在デンスーでは、車両の総合熱マネ成立に不可欠で今後の急速な需要拡大が見込まれる、LTラジエータの開発に取り組んでいる。

環境対応車の一つとして重要な過給エンジン車で

は、レスポンス等で優れる水冷CAC式過給エンジンの採用が増加している<sup>1)</sup>。この水冷式では従来のエンジン冷却用（以下、HT）ラジエータに加え、水冷CAC冷却用のLTラジエータが必要となる。これまでデンスーでは小型～中型車を対象に、従来のフロントエンド（以下、F/E）に搭載されるFull-FaceタイプとMultiタイプ（エンジン冷却用回路と低水温回路の2系統複合ラジエータ）のLTラジエータを開発してきた（Fig.1）。

しかし近年、LTラジエータのニーズは、更なる燃費規制強化への対応や高排気量エンジンの小型化と高出力化の両立から、大型車や高性能車にまで急速に拡大してきた。要求冷却性能が高い大型車・高性能車では、F/E搭載のLTラジエータのみでは性能が不足してしまうため、タイヤハウス前に搭載できる追加の性

\*（公社）自動車技術会の了承を得て、「2018年春季学術講演会講演予稿集（No13-18 P1～文献番号20185059）」より一部加筆して転載

能補助ラジエータが必要となる。タイヤハウス前搭載には、限られたスペースでの性能確保と最前面搭載に対する耐チップング性（耐飛び石性）が求められる。

本稿では、インナフィン（以下、I/F）チューブの使用で、小型・高性能・高品質を実現するコア幅 48mm の LT ラジエータを開発したので、その設計手法と製品仕様を報告する。

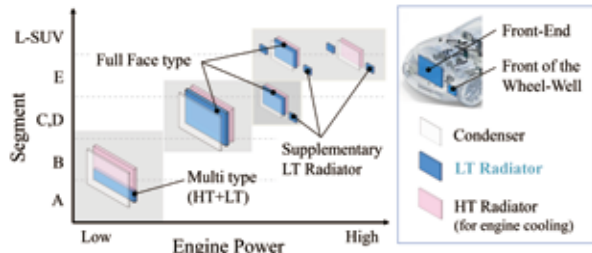


Fig. 1 Lineup of LT Radiators and Installation Locations

## 2. 開発の課題

タイヤハウス前搭載では、従来の F/E 搭載に対して、以下 2 つの点で異なる。

1 つ目は搭載スペースの縮小である。これによりラジエータの放熱部の前面面積（コアサイズ）が縮小されるが、コアサイズ当たりの要求性能は F/E 搭載ラジエータよりも高くなるため、要求性能確保には小型・高性能化が求められる。具体的なコアサイズは、F/E 搭載が (500 ~ 700) × (350 ~ 550)mm に対し、タイヤハウス前搭載が (100 ~ 400) × (100 ~ 300)mm となる。

2 つ目は搭載位置の変化である。従来の F/E 搭載ラジエータは通常コンデンサの後方に配置されるが、タイヤハウス前搭載ラジエータは最前面となるため、従来ラジエータでは検討不要であった耐チップング性が求められる。ラジエータではチップングによるチューブの穴あきが冷却水洩れとなり、走行不能になる恐れがある。そのため、耐チップング性の理論的な設計手法確立が重要な課題と考えた。

上記 2 つの課題に対する開発の詳細（①小型・高性能コア仕様の確立、②耐チップング性の設計手法確立）について、以下述べる。

## 3. 小型・高性能コア仕様の確立

### 3.1 使用環境と高性能化の考え方

ラジエータはチューブとアウターフィン（以下、O/F）で構成されるコア部にて、高温の冷却水と低温の空気を熱交換させる製品である（Fig. 2）。ラジエータの放熱性能は式 (1)、(2) で表され、性能向上には空気側および水側の熱抵抗を低下させる必要がある。

$$Q = K_a \cdot F_a (T_w - T_a) \quad (1)$$

$$\frac{1}{K_a \cdot F_a} = R_a + R_w = \frac{1}{\alpha_a \cdot F_a} + \frac{1}{\alpha_w \cdot F_w} \quad (2)$$

$Q$  : 放熱性能 [kW]

$K_a$  : 空気側熱通過率 [kW/m<sup>2</sup>K]

$T_w, T_a$  : 温度 [°C] ( $w$ : 水側,  $a$ : 空気側)

$R_w, R_a$  : 熱抵抗 [K/kW]

$\alpha_w, \alpha_a$  : 熱伝達率 [kW/m<sup>2</sup>K]

$F_w, F_a$  : 伝熱面積 [m<sup>2</sup>]

従来の F/E 搭載 HT ラジエータでは設計点（最も性能が要求される条件）で流量が 100L/min を超えるが、LT ラジエータでは小型の電動式 W/P が使用され 10L/min 程度の低流量環境となる。とくに今回の補助 LT ラジエータでは最大でも 5L/min 程度の極めて低い流量条件となる。一方、空気側の風速は同等（最高車速時で約 6m/s）である。

上述の使用条件を踏まえ、空気側と水側の熱抵抗比を比較した（Table 1）。前提仕様は、F/E 搭載 HT ラジエータはコアサイズ 650 × 400mm で流量 100L/min、タイヤハウス前搭載 LT ラジエータは 200 × 130mm で 4L/min とした。また風速は最高速想定で 6m/s とした。高流量の従来 HT ラジエータでは、水側の熱抵抗比が低く空気側の熱抵抗比が高いため、高性能化には空気側の改良、すなわち O/F のルーバ改良で空気側の熱伝達率  $\alpha_a$  を限界まで向上させてきた<sup>2)</sup>。一方、低流量の LT ラジエータでは従来 HT ラジエータに対して水側の熱抵抗比が増加（20 → 45%）している。そこで、高性能化には水側の性能改良、すなわち水側の熱伝達率  $\alpha_w$  と伝熱面積  $F_w$  の向上が効果的であると考え、これらを増加できるチューブを検討した。次節で高性能コア仕様の詳細を述べる。

Table 1 Comparison of the Thermal Resistance Ratios

	Air-side	Coolant-side
HT Radiator (Front-end)	80%	20%
LT Radiator (Wheel-well)	55%	45%

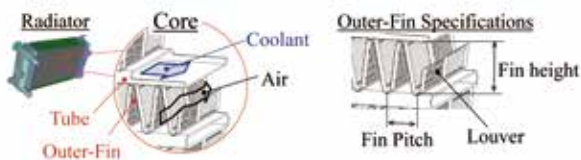


Fig. 2 Radiator Construction and Outer-Fin Specifications

### 3.2 小型・高性能コアの設計

水側性能を改良するチューブとして、従来 HT ラジエータではディンプルチューブが採用されている。これはチューブ内部に設けたディンプル（突起）によって冷却水の流れを攪乱させ、熱伝達を促進させる技術である。しかし、タイヤハウス前搭載 LT ラジエータの使用域は、ディンプル効果が出るレイノルズ数 (Re) 域外の 500 以下と低いため、 $\alpha_w$  の向上が期待できない。そこで  $F_w$  の増大に着目し、目詰まり性の限界まで伝熱面積を増大させたストレートタイプの I/F チューブを採用した。

一方、O/F は、空気側の環境（温度や耐食性）が F/E 搭載と同等であるため、従来 HT ラジエータの技術（材料やフィン高さ等）<sup>2)</sup> を活用したコルゲートルーバタイプとした。

### 3.3 性能検討結果とコア仕様の確立

コア幅に対する冷却性能の検討結果を Fig. 3 に示す。縦軸の冷却性能は、通風抵抗の違いを考慮したシステムのマッチング風速で算出している。ディンプルチューブを使用した従来ラジエータ仕様では車両の要求性能（縦軸の 100%）を満足できないが、I/F チューブでは満足できることがわかる。今回、タイヤハウス前の搭載性や事業性も踏まえ、デンソー既存製品である水冷 CAC の 48mm 幅 I/F チューブを採用した。これにより、要求性能比 +4% を実現するコア仕様を確立した。

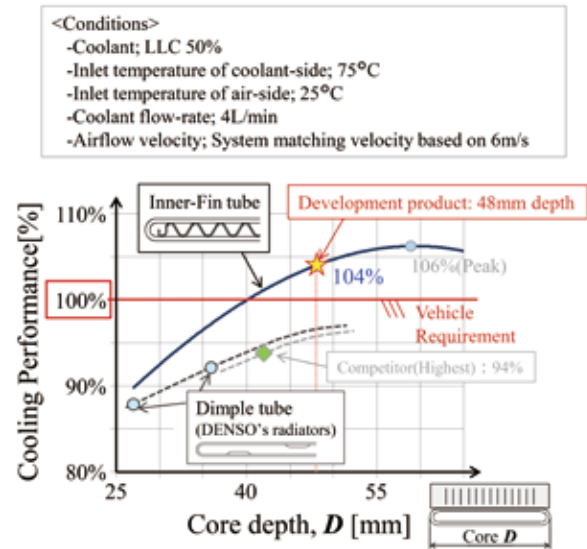


Fig. 3 Performance Results and Core Specification

## 4. 耐チップング性設計手法の確立

### 4.1 飛び石環境の把握と目標設定

#### 4.1.1 飛び石環境の把握

チップングとは、車両 2 台が近接して走行する場合に、前者のタイヤで跳ね上げられて浮いた石に、高速走行する後車が衝突することで起こる。この時、石がチューブに衝突する。ことで、チューブが破壊し洩れに至る (Fig. 4)。今回、チューブ耐力の目標設定には、飛び石がチューブに衝突する環境を把握することが重要と考え、モデル化を実施した。

Fig. 5 に示すように、石の質量  $m$ 、後車の車速  $V$  とすると、飛び石の衝突エネルギー（運動エネルギー） $E$  は式 (3) で表される。この衝突エネルギーがチューブの破壊につながるため、目標のチューブ耐力  $E_t$  はチューブが破壊に至る限界の衝突エネルギーと置き換えることができる。ここで、石のサイズを相当直径  $d$ 、密度を  $\rho$  とおくと、最終的に  $E_t$  は式 (4) で表される。したがって、チューブ耐力目標の設定には、石の条件 ( $d$ ,  $\rho$ ) と車速  $V$  の明確化が必要となる。

$$E = \frac{1}{2} m V^2 \quad (3)$$

$$E_t = \frac{1}{2} m V^2 = \frac{1}{2} \rho \frac{\pi d^3}{6} V^2 \quad (4)$$

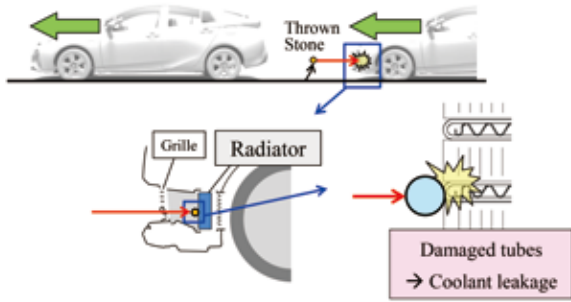


Fig. 4 Stone-Impact Environment

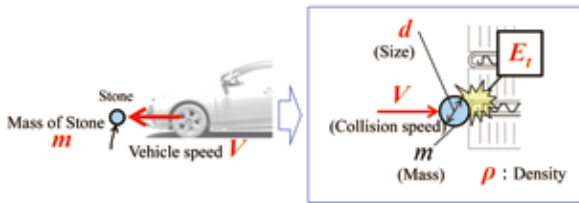


Fig. 5 Modeling the Stone-Impact Environment

#### 4.1.2 チューブ耐力の目標設定

##### (1) 石の条件

路上の石（硬物）は以下2つである。1つ目は、もともと路上にあるもの、すなわち道路の材料であり、道路の種類や舗装方法が影響する。2つ目は、後で路上に追加されたもの、すなわち散布物であり、凍結防止剤が挙げられる。散布物には予測が困難な落下物や飛来物は考慮しない。

まず道路の種類について検討した。式(4)より衝突エネルギーには車速  $V$  が2乗で効くため、高速走行できる道路の選定が重要と考え、舗装道（一般道、高速道路等）を選定した。参考までに、その他の道路としては農道、林道、里道等が挙げられるが、これらの道路では車両2台が近接して高速走行する状態は、発生する可能性が低く今回の検討からは除外した。

次に舗装道の舗装方法について検討した。舗装方法はコンクリート舗装とアスファルト舗装の2種類がある。コンクリート舗装は90%以上が粒径5mm以下の石で構成されている。一方アスファルト舗装は、Fig. 6に示すような層状の構成<sup>3)</sup>となっており、チップングに影響する石は舗装の表面に位置する表層や基層のアスファルト混合物と考えた。このアスファルト混合物<sup>4)</sup>の中で最も粒径が大きいものが粗骨材で、平均粒径が7.7mm、比重が2.7（砂岩、石灰岩、花崗岩等）である。

最後に凍結防止剤である。凍結防止剤（固体）にはNaClやCaCl<sub>2</sub>、砂利等があるが、いずれも粗骨材よりは径（ $\sim 7.0\text{mm}$ ）、比重（ $\sim 2.2$ ）ともに小さい<sup>5)</sup>。

以上より、最も粒径が大きな粗骨材を石の条件（ $d=7.7\text{mm}$ 、 $\rho=2700\text{kg/m}^3$ ）に設定した。

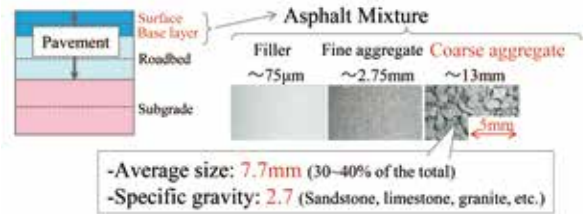


Fig. 6 Construction of Asphalt Mixture

##### (2) 車速

各地域の高速道路の制限速度から最も高いものを車速条件として設定した。Table 2に各地域の制限速度<sup>6)</sup>を示す。今回、制限速度超えは考慮しない。また、欧州のアウトバーンでは速度無制限区間が一部あるが、130km/h以上の速度で車両2台が近接して走行する状態は起こりにくいと考えた。以上より、車速の条件は130km/hと設定した。

Table 2 Speed limit

Region	Speed limit
Japan	100km/h
Europe	$\sim 130\text{km/h}$
North America	$\sim 129\text{km/h}(80\text{MPH})$

##### (3) チューブ耐力目標

式(4)と石の条件（ $d=7.7\text{mm}$ 、 $\rho=2700\text{kg/m}^3$ ）および車速（ $V=130\text{km/h}$ ）より、安全率1.5を考慮して、チューブ耐力目標を  $E_t=0.63\text{J}$  に設定した。

#### 4.2 車両搭載環境を踏まえたチューブ耐力の明確化

##### 4.2.1 チューブ耐力の明確化の考え方

チューブ耐力の明確化には、ストレスとストレングスの明確化が重要と考えた。ストレスとして、車両搭載環境でのコアへの石の当たり方に着眼した。またス



トレンクスとしては、飛び石の衝突に対する I/F チューブの構造や変形に着眼した。以下、順に詳細を述べる。

#### 4.2.2 車両搭載環境での石の当たり方 (ストレス)

Fig. 7 に示すように、タイヤハウス前搭載では、ラジエータの前方にグリルとエアダクトが設置される。車両の下側はアンダーカバーで覆われている。このような環境では、下側からの石はアンダーカバーで防がれ、斜めから進入する石はラジエータ前方のエアダクトによって直接コアへ当たらない。したがって、チューブを破壊する高エネルギーの石は、コア (チューブ) に対して正面方向から直撃すると考えられる。

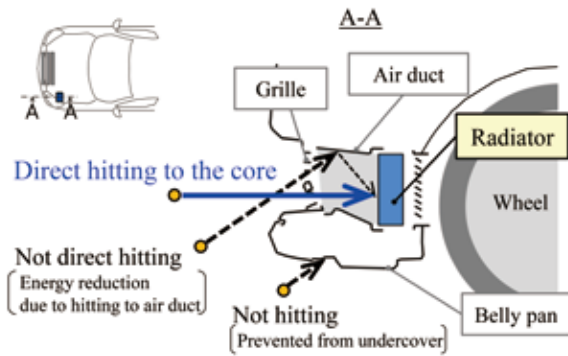


Fig. 7 Stone-Hitting Direction (In the Front of the Wheel Well)

#### 4.2.3 飛び石の衝突による I/F の効果 (ストレンクス)

飛び石がチューブの正面から衝突する場合には、チューブの先端部がコアの後方側へ変形し、チューブ内部の I/F に接触することで、チューブ先端部へ与えられた衝撃エネルギーが緩和されると考えられる。

そこで、I/F チューブの構造がチューブ耐力の向上に効果があると着眼し、飛び石がチューブの正面から衝突した場合に、チューブがどのように変形するか仮説をたてた (Fig. 8)。I/F が無い従来のチューブでは、正面からの衝突により、先端が潰されて大きく膨らみ、引き裂かれるモードが考えられる。一方 I/F チューブでは、I/F の以下 2 つの効果によりチューブ耐力が向上すると考えた。1 つ目の効果は、I/F がバネ構造となりチューブ先端部の衝撃を吸収することである。2 つ目の効果は、I/F がチューブ内側に接合 (ろう付) されているため、チューブの変形 (膨らみ) を

抑制することである。この仮説の効果を確認するため、I/F の有無で、衝突解析を以下実施した。

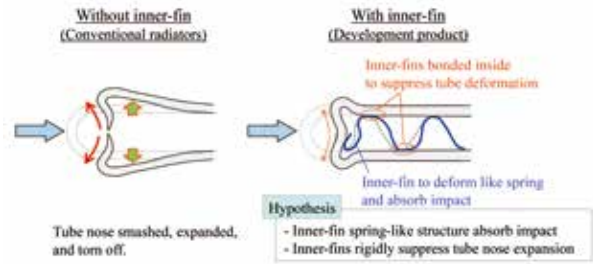


Fig. 8 Tube Deformation by Stone-Hitting from the Front Direction

#### 4.2.4 衝突解析による I/F の効果確認

現状の衝突解析技術では定量的な応力把握や亀裂を考慮した破壊部位の特定は困難であるため、飛び石の衝突による定性的な変形形態を確認した。衝突解析のソルバーには LS-DYNA を使用した。衝突解析の結果を Fig. 9 に示す。飛び石の条件は、4.1 節で述べた、径  $d = 7.7\text{mm}$ 、密度  $\rho = 2700\text{kg/m}^3$ 、速度  $V = 130\text{km/h}$  である。I/F 無しでは、チューブが厚み方向に大きく変形している。一方 I/F 有りでは、チューブ先端 R 部の内壁が I/F と接触して衝撃を吸収し、チューブ厚み方向の変形が抑制できていることが確認できた。したがって、前項で述べた仮説通り、I/F による衝撃吸収と変形抑制の 2 つの効果は、チューブ耐力を向上させると考えられる。以下、実機にてチューブ耐力を検証した。

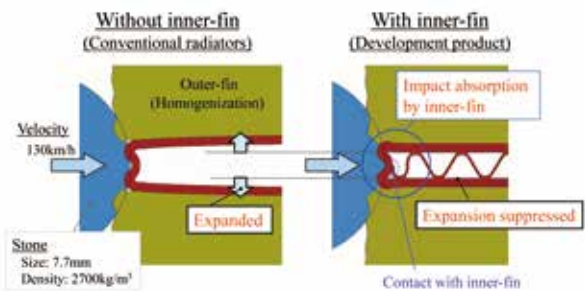


Fig. 9 Impact Analysis Results

#### 4.2.5 チューブ耐力の実機検証

実機検証は市場実績のあるデンソーのコンデンサで用いられている評価方法を改良して実施した。この方法は飛び石の衝突エネルギーを錘の位置エネルギーに置き換えたものである (式 (5))。コア表面に市場の石 (巖

しい角形状)を模擬した鋭利なポンチを設置し、錘を高さ  $H$  からポンチへ落下させ、コアへ衝撃を与える (Fig. 10)。4.2.2 項で述べたタイヤハウス前搭載環境での石の当たり方を踏まえ、チューブ正面方向から衝撃を与えた。

$$E_i = MgH \quad (5)$$

チューブ落錘評価の結果、I/F 有りのチューブでは、チューブが破壊しない限界高さは  $H=16\text{cm}$  となった、式 (5) からチューブ耐力を算出した結果、チューブ耐力は  $0.78\text{J}$  となり、目標の  $0.63\text{J}$  を満足することが確認できた。Fig. 11 は  $H=17\text{cm}$  でチューブが破壊した時の断面である。また Fig. 12 は、I/F の効果を確認する目的で評価した、I/F 無しのチューブの結果 ( $H=8\text{cm}$  で破壊) である。これらの結果より、I/F の2つの効果である衝撃吸収と変形抑制によって、I/F チューブのチューブ耐力が向上したと考えられ、仮説を実証することができた。

また、デンソールのコンデンサの評価結果は  $H=16\text{cm}$  (今回の開発品と同じ) であるため、今回の理論的設計手法は市場実績のあるコンデンサにも適用可能であるといえる。

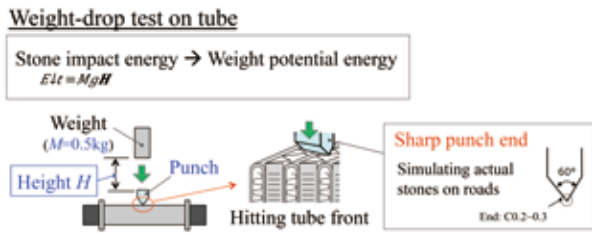


Fig. 10 Test Method of Weight-Drop

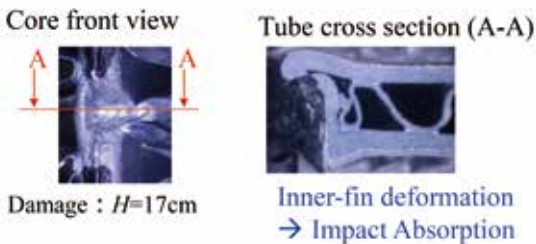
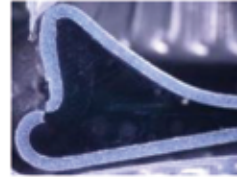


Fig. 11 Test Results of Tube with I/F (Development Product)

### Tube cross section



Damage :  $H=8\text{cm}$

### End portion expanded and pulled

Fig. 12 Test Results of Tube without I/F

### 4.3 車両での適用例

式 (4), (5) と前節の限界高さより、今回の I/F チューブが耐えうる石のサイズと車速 (衝突速度) の関係を Fig. 13 に整理した。グラフの曲線は等チューブ耐力線 (等衝突エネルギー線) である。このグラフは、例えば、石のサイズが  $7.7\text{mm}$  の場合、目標の車速  $130\text{km/h}$  に対して、本 I/F チューブが車速  $145\text{km/h}$  まで耐えられることを示す。

実際の車両では路面環境や走行条件は一定ではないため、石のサイズや車速の違いを考慮する必要がある。本手法は、車両のさまざまな環境・条件での設計点に対する耐チップング性の検討に有用である。

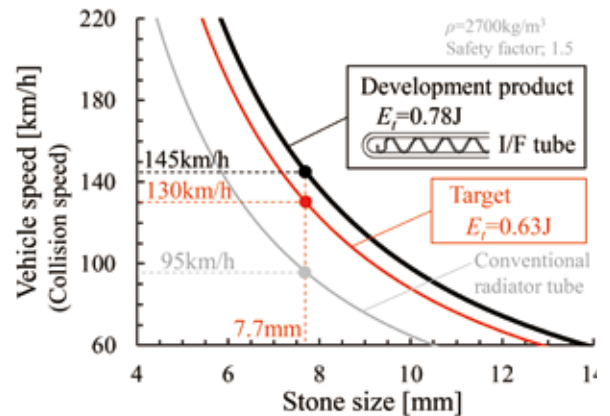


Fig. 13 Vehicle Speed and Stone Size for Impact Resistance

## 5. むすび

フロントエンド搭載ラジエータの性能補助を目的に、 $48\text{mm}$  幅のインナフィンチューブを採用し、タイヤハウス前に搭載可能な小型・高性能と耐チップング性を両立した低水温ラジエータを開発した。

信頼の確立

とくに、最前面搭載特有の耐チップング性は、飛び石環境に対する理論的アプローチからチューブ耐力の目標値（0.63J 以上）を設定し、実機検証した。さらに、本設計手法が市場実績のあるコンデンサにも適用可能であることを示した。

本製品は 2017 年 12 月より量産を開始した。さらに、FCV や EV 向け総合熱マネ用高性能 LT ラジエータへも適用拡大すべく、開発に取り組んでいる。

## 参考文献

- 1) Harada, M. : Water Cooled Charge Air Cooler Development, SAE Technical Paper (2016), 2016-01-0651
- 2) 袴田治：フィン最適化による高性能ラジエータの開発，自動車技術会学術講演会予稿集 (2013), 20135359
- 3) (社) 日本道路協会：舗装設計施工指針 (平成 18 年版)
- 4) 小谷昇：アスファルト混合物の知識 (改訂 3 版)，技報堂出版株式会社 (1994)
- 5) 木村恵子：凍結防止剤散布と沿道環境，国総研資料第 412 号 (2007)
- 6) AIT/FIA : Speed limits around the world, ([http://www.mctc.dk/media/76070/fartgraenser\\_2013.pdf](http://www.mctc.dk/media/76070/fartgraenser_2013.pdf))

## 著者



**浦濱 敬史**

うらはま たかし

サーマルマネジメントユニット技術 2 部  
冷却製品の要素開発に従事



**杉戸 肇**

すぎと はじめ

サーマルマネジメントユニット技術 2 部  
冷却製品の要素開発に従事



**赤木 翔太**

あかぎ しょうた

トヨタ出向中  
冷却製品の要素開発に従事



**宮野 良和**

みやの よしかず

サーマルマネジメントユニット技術 2 部  
冷却製品の要素開発に従事