

[Review Lecture Paper]

自動車の環境対応と熱・流体課題

小林 信雄[†] 池上 徹[‡]

Automobile Industry's Action on Environments and Relevant Thermal and Fluid Dynamics

Nobuo KOBAYASHI[†] and Tohru IKEGAMI[‡]

Abstract

To enhance the environmental performance of vehicles, CO₂ emission should be reduced and the fuel efficiency should be improved. The fuel efficiency can be improved by reducing the aerodynamic drag of vehicles and improving the thermal efficiency of engines. Further improvement can be achieved by currently developed systems such as the hybrid vehicle (HV), which employs the internal combustion engine and the motor, and by the fuel cell vehicle, which does not require fossil fuel. However, HV and FCHV (Fuel Cell Hybrid Vehicle) have piles of concerns to be tackled such as thermal issues of new devices including the motor, the inverter, the battery and the fuel cell. This paper reviews the thermo-fluid dynamic approaches, which are indispensable to manage these concerns.

Key Words: *Automobile fuel consumption, Aerodynamic resistance, Hybrid vehicle, Fuel cell hybrid vehicle*

1 はじめに

19世紀に発明された自動車は20世紀に黎明期を迎え、移動タイミングの自由度やドア TO ドアの利便性から個人の移動手段として人々に広く受け入れられ、供給燃料の安定確保、道路整備と相まって目覚ましい普及をみた。反面、大気汚染、交通事故、最近では石油資源枯渇危機、CO₂増加による地球温暖化等、負の遺産を生み出したことも否めない。持続発展可能な社会を実現するには自動車の環境対応は欠くことができない。

自動車に関わる環境問題には、地域・都市環境問題である大気汚染、騒音、振動、悪臭、廃棄物等があり、また地球規模では地球温暖化、酸性雨、資源枯渇等があげられる。

本稿では、地球温暖化に焦点を当て、とりわけ自動車の燃費向上技術の開発状況とその中の熱・流体課題について簡単に紹介したい。

2 自動車の普及と自動車産業

自動車の歴史は1886年ドイツのカールベンツが作った3輪自動車が祖と言われ、発明当時の動力としては蒸気機関を用いていた。その後、意外な事に電気モータを動力とする自動車、ガソリンを燃料とする内燃機関を動力とするガソリン自動車が開発された。

1900年当時はこれら3つの動力を持つ自動車がそれぞれ走っていたが、それぞれに課題を抱えていた。

蒸気はボイラーに入れる軟水の供給設備が不足し、電気は充電時間が長いにも関わらず走行距離が短く、ガソリンについてはエンジン始動性のため重いクラックを回す必要があり、更に変速が難しい上、給油体制も未整備であった。

ガソリン自動車に幸運だったのは、当時照明のランタンに灯油が使われたが、その精製過程の副産物であるガソリンが、地方都市のドラッグストアで入

受付日: 2006年3月20日, 第43回日本伝熱シンポジウムより受付, 担当エディター: 中山 顕

[†] トヨタ自動車(株) 471-8572 豊田市トヨタ町1

[‡] トヨタ自動車(株)第1車両技術部 471-8572 豊田市トヨタ町1

手できたことにあった.その後 1911 年に電動スタータが発明され,ユーザは始動時のクランクの重労働から開放され,スイッチひとつでエンジン始動が可能となり,次にトランスミッションのシンクロメッシュの発明により扱いやすさが各段に向上した.更に,1914 年のガソリンエンジンである T 型フォードのベルトコンベア方式による大量生産の開始に伴い生産コストが劇的に下がった.

こうして燃料が容易に入手できるインフラ,取扱い易さ,低価格という普及 3 条件が整ったガソリン自動車,終に電気自動車や蒸気自動車から抜け出し,20 世紀の主役に踊り出たのである.

また,1913 年のリンカーンハイウェイ協会のアメリカ大陸横断道路構想に代表される自動車道路整備も開始されたことで自動車は目覚ましい普及となり,地球上の保有自動車は 1900 年に 20 万台であったのに対し,1950 年には 7000 万台,2000 年には 7.5 億台となっている.先進国の普及率が 1 台/2 人であることを考えると今後 BRICs を中心に更なる増加が予測される (図 1) [1].

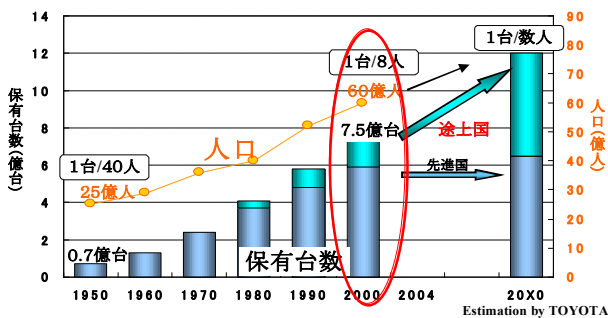


Fig. 1 The number of the world population and owned automobiles.

3 自動車と環境

地球温暖化については IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) の報告によれば,現状を放置すると大気中の CO₂濃度は急激に増大し,2100 年レベルで約 6°C の気温上昇が予測されている.現在では 2°C 上昇により異常気象,砂漠化,食糧危機が顕在化すると予測されており,それを防ぐには大気中の CO₂濃度を 450~550 ppm に安定化することが必要とされている (図 2).

CO₂ 排出量低減は化石エネルギーから新エネルギーへの転換や CO₂ の固定化技術の開発等多面的な対応が必須である.また,原油生産量についても 2020

年以降減少する悲観的な予測もあり (図 3), エネルギー需給から自動車も燃料多様化への対応は必須である (図 4) [1].

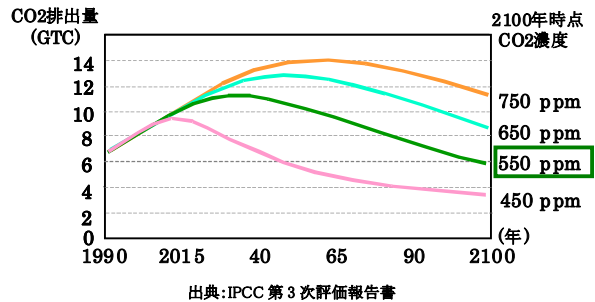


Fig. 2 The curve of reduction of CO₂ emission for the stabilization of CO₂ concentration.

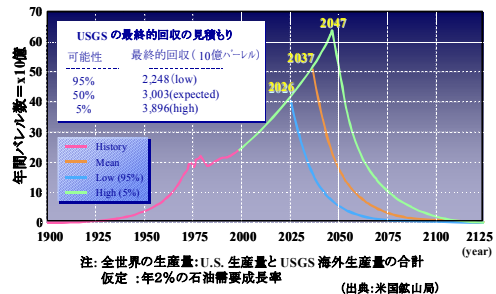


Fig. 3 Scenario of crude oil production.

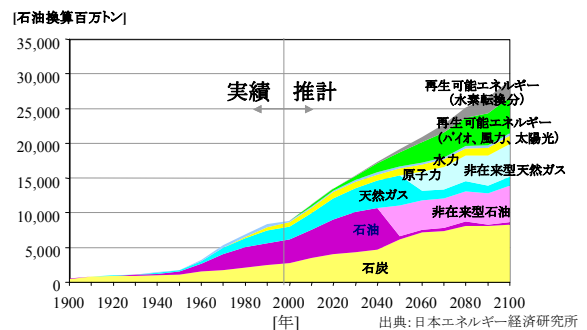


Fig. 4 The expected amount of energy supply.

4 自動車の燃費規制

前節の地球温暖化防止,石油資源枯渇対応を背景として各国で燃費規制の設定・強化が実施されている (図 5). 2005 年には自動車販売台数が急速に伸長している中国においても,燃費規制が開始された.日本の 2010 年燃費基準は 1995 年比で平均 22.8% の燃費改善,欧州の自主協定である各自動車工業会平均 CO₂:140 g/km は 1995 年比で 25% (欧州自動車工業会) の削減という厳しいレベルにある.

最近では CARB(California Environmental Protection Agency)によりカリフォルニア州の温暖化ガス排出

規制 (AB1493) が検討され, 2009 年から規制を開始し 2016 年にかけて段階的に規制値を強化するものである. 乗用車・小型トラックの 2013 年での規制値は欧州自主協定 140 g/km より厳しいレベルとなっている. カリフォルニア州以外でも米国東部州を中心にこの規制を採択しようとする動きが出ている[2].

	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11~15	
日本								2005年燃費基準 (7.1~7.5ℓ/100km)		2010年燃費基準 (6.7ℓ/100km)	2015年燃費基準 (6.2ℓ/100km)
欧州			中間目標: 欧州自工会 (165~170g/km) 日本自工会 (165~175g/km)				140g/km達成	欧州自工会 日本自工会 韓国自工会 (165~170g/km)		120g/km	2012年燃費基準 (7012)
米国			CAFE 乗用車LDV: 27.5mpg 小型トラックLDV: 20.7mpg			LDV: 20.7~22.2mpg 規制強化				加州CO2規制 (AB1493)	
中国					2005年 (第1段階)			2008年 (第2段階)			

注: CAFE: Cooperate Average Fuel Economy 企業別平均燃費

Fig. 5 Trend of the regulation of fuel consumption with respect to the countries.

5 自動車の燃費性能構成因子

車両の燃費性能は定められた走行パターンで消費される燃料 (ガソリン・軽油) を示し, 一般的には (走行距離/消費された燃料の体積) で表される.

ガソリンの熱効率: η_e は, 理論上 60% 程度あるが, 現実には機関各部の摺動抵抗 (フリクション), 吸排気損失, 燃焼による損失があり, エンジン軸出力に変換できなかったエネルギーは, 熱・圧力となり大部分が冷却水, 排気ガスを通じ, 外部に放出される.

エンジン軸からでた出力は, 補機にその一部を与えた後, 駆動系の伝達効率 η_t を経て, タイヤに駆動力として伝達される.

車両走行時には, このタイヤ駆動力と走行抵抗力とのバランスにより, 加速・減速・定常走行が決定される. 定常走行時におけるエネルギーの流れを図 6 に, エネルギーバランス式を式 (1), (2), (3) に示す[2].

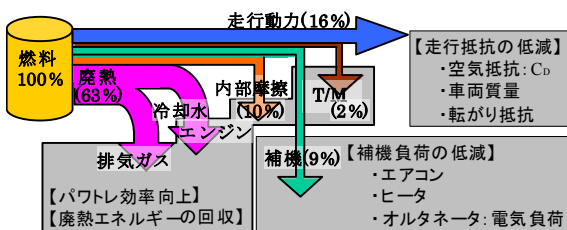


Fig. 6 Energy flow.

$$(La-Lh) \times \eta_t = Lw + Lb + (Rt + \mu_r \times M \times g) \times V \quad \dots(1)$$

$$La = (Be \times \gamma_f \times Hu) \times \eta_e \quad \dots(2)$$

$$Rt = \frac{1}{2} \rho_a V^2 \times C_D \times A \quad \dots(3)$$

La: エンジン軸出力 Lh: 補機駆動損失

Lw: ホイールベアリング摺動損失 Rt: 空気抵抗

Lb: ブレーキ引き摺り損失 η_t : 駆動系伝達効率

μ_r : タイヤ転がり抵抗係数 M: 車両質量

g: 重力加速度 Be: 燃料消費量 γ_f : 燃料比重量

Hu: 燃料低位発熱量 η_e : エンジン発熱量

ρ_a : 空気密度 V: 車両速度

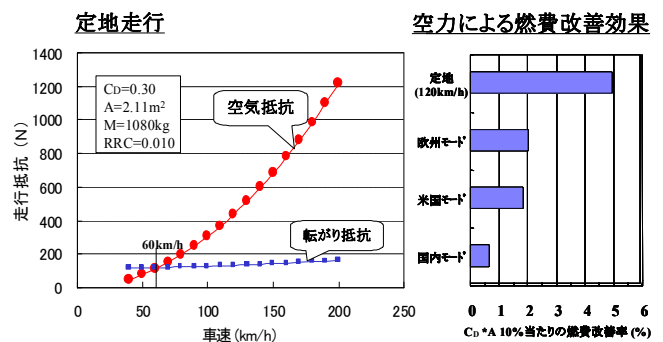
C_D : 空気抵抗係数 A: 車両前面投影面積

6 燃費性能の向上技術

6.1 走行抵抗

走行抵抗は前出の式 (1) の右項であるがシャシー系部品の摩擦抵抗 (ホイールベアリング転動抵抗, ブレーキ引き摺り抵抗) 低減とタイヤの転がり抵抗の低減, 質量低減と共に空気抵抗低減が必要となる.

一般的な乗用車において空気抵抗の走行抵抗への寄与率は車速 60 km/h 程度を境にシャシー系部品の転がり抵抗を上回り, 200 km/h では走行抵抗の約 9 割を占め, 空気抵抗を 10% 低減すると国内 10・15 燃費モード (乗用車・軽商用車燃費試験方法) では 1% 弱, 車速 120 km/h の高速巡航モードでは 5% の燃費向上が期待できる (図 7).



A: 車両前面投影面積 M: 車両質量

RRC: タイヤ転がり抵抗係数 (Rolling Resistance Coefficient)

Fig. 7 Influence on the vehicles of the drag coefficient.

空気抵抗低減のポイントは基本的には車両前部で流れを剥離させず, 後部では後流を収束させるように形状を絞り込むのが良いとされているが, 自動車としてのパッケージやデザインとの成立性の課題があるため, 様々な空力技術を部位に応じて使い分け, 改善を図っている. 具体的にはルーフからトランク

にかけて圧力回復できるように形状を最適化，局所での剥離を抑制するよう徹底したボデー表面のフラッシュサーフェス化とエンジン冷却開口とラジエータ周りのダクト化による通気抵抗低減，タイヤ周りの整流，徹底した床下流れの整流等（図 8）が行われている[3].

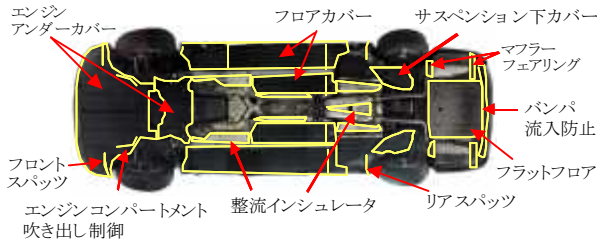


Fig. 8 Points of C_d reduction.

6.2 エンジン熱効率

エンジンの熱効率を向上させるには，理論熱効率を向上させ排気損失，冷却損失を低減すること，機械効率を向上させ摩擦損失を低減，吸排気タイミングと吸排気システムの適正化によるポンピング損失を低減させることが必要である。

排気・冷却損失を低減する方策としては，次のような手段がある。

- ・ノッキング改善による高圧縮比化
- ・廃棄（熱・圧力）エネルギー回収

ここで排気圧力エネルギー回収の一手法としてターボ過給があり，ディーゼルエンジンでは一般化された技術である。最近では排気熱を回収し，エンジンの暖機特性を向上させるデバイスも開発されている（図 9）。

摩擦損失を低減する方法としては次の手段がある。

- ・スペックの最適化（オフセットクランク等）
- ・摺動面の加工精度向上，表面処理変更

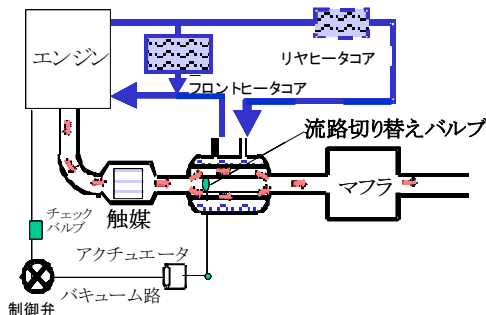


Fig. 9 Exhaust Heat Recirculation System. (Estima HV 2006 model)

6.3 駆動系効率

駆動系による燃費向上は，大きく以下の 2 点により対応されている。

(1) 駆動系ユニットの損失低減

トランスミッションギアの噛合い損失の低減，トランスミッションフルードの攪拌損失の低減，摺動面の引き摺り損失低減等ハード側の改良と AT(Automatic Transmission)のロックアップ領域拡大による伝達効率向上と減速時ダウンシフトによるフューエルカット領域拡大等の制御側対応も実施されている。

(2) エンジン使用領域の最適化

効率的に燃費向上するためにエンジンの熱効率向上を最大限引き出す方法として AT の多段化や CVT(Continuously Variable Transmission)によりエンジン特性と協調させ，熱効率が最も良い作動点にエンジン回転数を制御する方法が取られている。

7 究極の環境対応車めざして

究極の環境対応車を目指すにあたり 3 節で述べたようにエネルギーの多様化に対応する必要がある。そのためにはハイブリット技術は適していると言えるだろう。

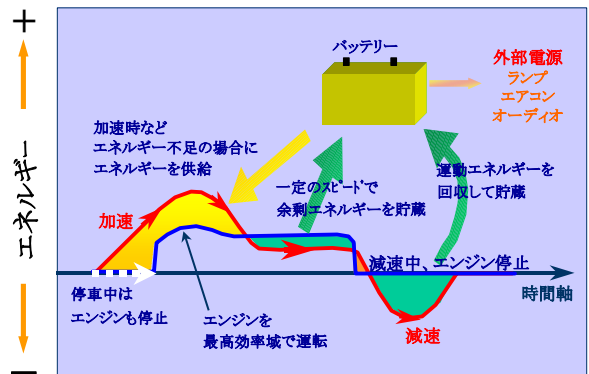


Fig. 10 Energy management for the hybrid vehicles.

図 10 にプリウスを例にとってハイブリット車の燃費向上の原理を示す。まず，減速時のエネルギーをモータの回生により電池に蓄えるとともに，その回収したエネルギーを発進直後のエンジン効率が低い時にはモータで走行するのに使用するとともに，加速時はエンジンを補助することにより燃費の向上を図るということがその原理である。また，走行時に使用する電気エネルギーは減速エネルギーのみならず，エンジン効率の良好な作動条件において，発

電することにより蓄積させることもできる. ハイブリット車の燃費向上の原理は次のようにまとめられる.

- ・ 走行エネルギーの回収および再利用
- ・ エンジンの低効率域での電池 (&モータ) の代替利用

実際の走行パターンで2つの動力源がどのように使われ, エネルギー回収しているかを図 11 に示す.



Fig. 11 Driving mode of the hybrid vehicles.

さらに2代目プリウスにおいてはエアコン用コンプレッサを従来のエンジン駆動式から電動モータ駆動式とすることで冷房の要求によるエンジン始動をなくし, エンジン停止時間を延ばし, 燃費向上と快適性の両立を実現している[4].

8 新しいパワーソースの熱・流体課題

ハイブリッド技術により画期的な燃費向上=CO₂排出量削減を実現したが, そこにはたくさんの超えるべき挑戦的課題が存在した. 特にハイブリッド技術は新しい電子デバイスやパワーソースを活用するが, 熱課題がついてまわった. 代表的なものとして, モータ, インバータ, バッテリーがあげられる. プリウスの冷却システムを図 12 に示す.

8.1 モータの熱課題

ハイブリッド車の電気モータは密閉型を使用しており, ロータ磁石の減磁防止, 絶縁紙の耐熱性, コイル被覆の耐熱性に配慮し, 水冷を行なっている. しかしながら, ステータから各部を冷却するには絶縁紙自体, コイル巻線間の空間が熱抵抗となってしまう (図 13). そこでモータギアの潤滑・冷却を行っているオイルも活用し, 冷却を行っている[5].

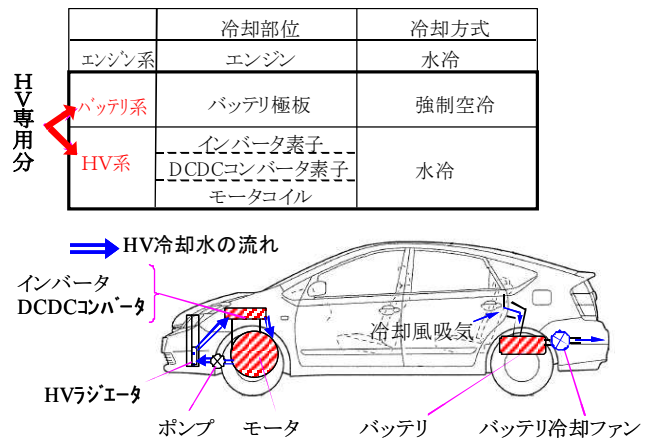


Fig. 12 Refrigeration system of the hybrid vehicles.

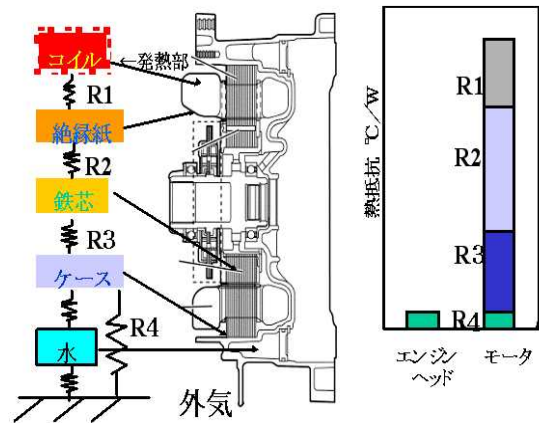


Fig. 13 Structure of the motor cooling.

8.2 インバータの熱課題

インバータの構成を図 14 に示す. インバータ素子自体を冷却したいが, 電気的な絶縁が必要なためモータ同様, 熱抵抗の大きい間で冷却をする必要がある. 冷却性能を向上させるため, 放熱板の材質類による熱伝導率向上, 伝熱面積の拡大, ヒートシンクに設けられた冷却水経路の改良により課題を克服している.

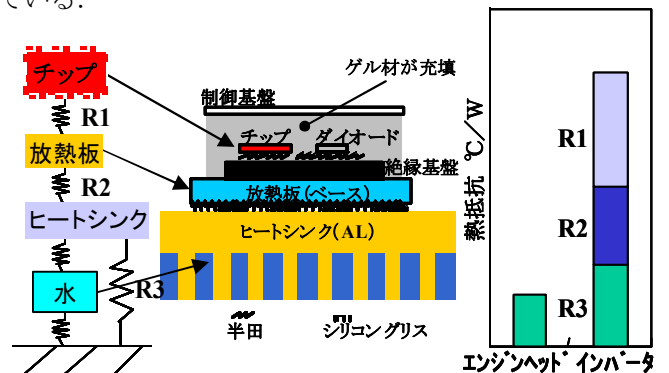


Fig. 14 Structure of the inverter cooling.

8.3 バッテリーの熱課題

バッテリーはそれ自体の発熱量は 100~150 W 程度であるが、寿命の観点から許容温度が低く、少ない温度差での冷却が要求される。実際のバッテリー冷却システムを図 15 に示す。室内の空調された風を活用してバッテリーを冷却しているが、冷却ファン騒音等との両立が必要となっている[6]。

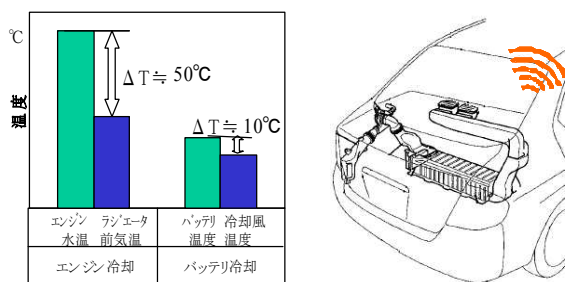


Fig. 15 Structure of the battery cooling.

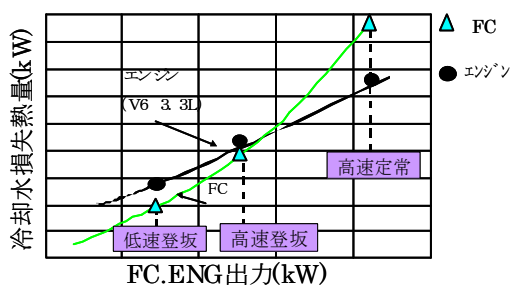


Fig. 16 Diagram of heating characteristics with respect to the FC and Engine.

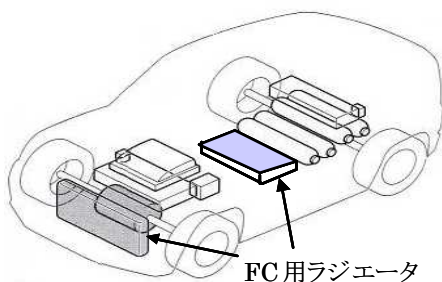


Fig. 17 Cooling system of the FC.

8.4 FCHVの熱課題

燃料電池を活用したハイブリッド車は走行時のCO₂排出が無いため都市環境負荷が非常に低いメリットがある。燃料電池の発電効率は約 45~60%程度で高出力時ほど効率は低下し、それ以外は発熱となるため水冷を行っている。低負荷ではその効率の良さから冷却は問題とならないが、高出力が要求された場合、内燃機関を持つ従来の車両では排気側にエネルギーを捨てる事ができるが、燃料電池車では全て水冷側面に廃熱されるため、非常に冷却が厳しいものとなっている (図 16,17)。

9 終わりに

地球の温暖化防止、持続的発展可能な社会を実現するためには自動車の燃費向上は必須である。自動車だけでは到底解決できる問題ではないが、他に先駆けて積極的に対応していくべきことと考えている。また、一人の人間としての立場からは人類が生み出してきた様々な負の遺産に自ら対峙し、青い地球を後世に継承していくためにできることは確実に実践していくことも大切であろう。

参考文献

- [1] 小吹, ハイブリッド車の現状と将来, 東京国際自動車会議, セッション F2-1, (2005).
- [2] 高間, 西村, 伊藤, 車両の CO₂ 低減策, 自動車技術, Vol.59, 20044169 (2004).
- [3] 炭谷, 前田, 一之瀬, 自動車と流体力学:車体周り流れと空力特性, ながれ,23, 445-454 (2004).
- [4] 佐々木, ハイブリッド車とその構成部品, 自動車技術, Vol.59, No.2, 20054127 (2005).
- [5] 畑ら, FF SUV 車用新ハイブリッドトランスミッションの開発, 2005 自動車技術会学術講演会前刷集, No.8-05, 20055046 (2005).
- [6] 宿谷ら, エスティマ HV 用新型バッテリーシステムの開発, SAE2002 World Congress, SP-1697, 2002-01-1090.