

特集：新型MAZDA3

5

SKYACTIV-X用熱マネジメント技術 Thermal Management Technology for SKYACTIV-X

幸徳 正信*1 Masanobu Koutoku	早川 元雄*2 Motoo Hayakawa	宮本 晃一*3 Kouichi Miyamoto	石原 太郎*4 Tarou Ishihara
岡村 和美*5 Kazumi Okamura	菅崎 健二*6 Kenji Sugasaki	引谷 晋一*7 Shinichi Hikitani	高籾 達也*8 Tatsuya Takahata

要 約

新型MAZDA3に搭載されたSKYACTIV-Xは、火花点火制御圧縮着火（以下SPCCI）燃焼の実現に向けた熱マネジメント技術（以下熱マネ技術）に、車両全体で取り組んでいる。この熱マネ技術によって、お客様が使われるさまざまな環境条件でも、新しく導入したSPCCI燃焼が実現できることをねらいとしている。エンジン自体の燃焼効率が大幅に改善されたことで、従来のエンジンよりも昇温に活用できる熱エネルギーが減少しており、限られた熱エネルギーを有効に活用し、SPCCI燃焼に必要なエンジンの筒内状態量を実現させる技術に取り組んでいる。

上記技術の確立に向け、机上解析と基礎実験による熱エネルギーのメカニズム解明を行い、燃費性能と同時にNVH性能や空力性能及び室内の快適性改善にも同時に貢献できる熱マネ技術を実現することができた。

Summary

We have been working on the thermal management technologies in the entire vehicle to realize the SPCCI (Spark Controlled Compression Ignition) combustion in Skyactiv-X mounted on the new Mazda3. With these thermal management technologies, we aim to realize the newly developed SPCCI combustion under any environmental conditions in which customers encounter. Drastic improvements in combustion efficiency of the engine itself decrease the thermal energy that can be used for warming up compared to the conventional engine. For this reason, we try to develop the technology to achieve the cylinder state quantity of the engine which is required for SPCCI combustion by using limited thermal energy efficiently.

We clarified the mechanism of thermal energy by conducting the analysis on a desk and the basic experiment to establish the above mentioned technology. As a result, we managed to realize the thermal management technologies which also contribute to improvements in NVH performance, aerodynamic performance and comfortableness in the cabin. This technology has increased frequency of SPCCI combustion under practical conditions and improved actual fuel efficiency.

Key words : Heat Engine, Heat/Fluid, Environment/Energy/Resources, New Combustion Model/New Combustion Model Engine, Fuel Economy/Thermal Efficiency, Engine Component or Element, Engine Cooling, Temperature Control/Environmental Control, Coolant Flow Control, Encapsulation, Oil Viscosity

1. はじめに

新型MAZDA3に搭載されたSKYACTIV-Xは、G/FリーンスPCCI燃焼とA/FリーンスPCCI燃焼という燃焼状態を実現し、燃焼効率を従来のエンジンよりも高めている。この

二つの燃焼状態の中でも、A/FリーンスPCCI燃焼は、筒内の温度環境（壁温や吸気温等）をSPCCI燃焼可能な状態にすることで実現でき、大幅な燃焼効率改善を図っている。このため、いかに早く筒内状態量を、A/FリーンスPCCI燃焼に移行できるようにするかが、SKYACTIV-X用熱マネ

*1 MBD革新部

MBD Innovation Dept.

*2~3 エンジン性能開発部

Engine Performance Development Dept.

*4 走行環境性能開発部

Driveability & Environmental Performance Development Dept.

*5~8 エンジン設計部

Engine Design Engineering Dept.

技術には求められている。加えて、G/FリーンSPCCI燃焼も、従来のエンジンに比べると燃焼効率が良くなっており、暖機に使える熱エネルギーが少なく、限られた熱エネルギーをいかに有効に活用するかが、重要なポイントとなる。この章では、安定してA/FリーンSPCCI燃焼を実現させるために、限られた熱エネルギーをマネジメントする技術について、詳しく説明していく。取り組み技術としては、Fig. 1に示すとおり、①暖機後に燃費のよくなる適温を下げ、②その適温までのエンジン各部の温度や油水温を短時間で上昇させ、③エンジン停止後の温度低下(放熱)を抑制させ、④駐車後の再始動時のエンジン各部の温度を従来よりも高い状態から運転できるようにすることを目指している。具体的な取り組み方針は、Table 1に示すように、必要エネルギーの最小化や熱エネルギーの分配の適正化及び熱エネルギーの保存という視点で、開発している。具体的な内容は、後述していくが、①の対応として低粘度オイル、②の対応として水流制御や可変吸気システム及び空調協調制御、③&④の対応としてカプセル化を織り込んでいる。

この熱マネ技術によって、新型MAZDA3に搭載されたSKYACTIV-Xの実力を最大限に発揮させ、いかなる環境下で、お客様が思いどおりに運転いただいても、実際の燃費性能は大幅に改善されていることを体験していただける状態を実現させている。

2. 適温までに短時間で上昇（暖機の早期化）

2.1 水流制御

SKYACTIV-Xから採用されているSPCCI燃焼は、筒内の温度を一定値以上に高めなければならない。このため、一晚駐車した後等、エンジンが冷えた状態で走行する場合は、早期に筒内温度を高めることが重要となる。ここでは、暖機時局所的に温度を高め、エンジン全体の構造体や水温及び油温に熱が拡散しないための水流制御について説明する。具体的には、Fig. 2のイメージ図のように、エンジン始動後に燃焼時の発熱量は、冷却水等を介して循環され、各部へ拡散していくため、始動後の発熱量と構造体の熱容量を元に、燃焼室周りの壁温を予測し、信頼性や快適性（暖房性）から許容できる止水許容時間を試算しながら、冷却水の流れを止めて、筒内の暖機を優先させている。また、冷却水を流し始めても、発熱量と放熱量のバランスを確認しながら、SPCCI燃焼が実現できる状態を維持すべく、Fig. 3に示す各デバイス（冷却水切替バルブ（CSV）や電子制御サーモスタットやアクティブエアシャッター（以下AAS）等）のシステムをエンジンの出入り口水温を計測し、筒内の壁温を予測しながら制御することで、冷却水の流量をコントロールし、筒内の温度を適温に保っている。

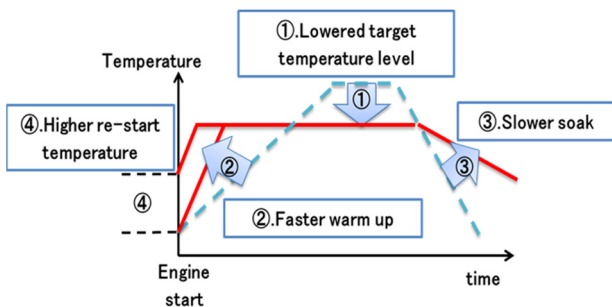


Fig. 1 Concept of Thermal Management

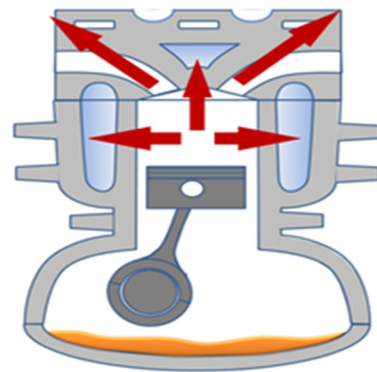


Fig. 2 Image of Reduction of the Heat Conduction

Table 1 Function to Improve and Action

	Objective			Measure
	Minimizing energy requirement	Optimizing energy partition	Conserving and producing energy	
① Lowered target temperature level	●			Low oil viscosity
② Faster warm-up	●	●		Coolant flow control and variable intake air system
③ Slower soak	●		●	Engine encapsulation
④ Higher restart temperature	●		●	

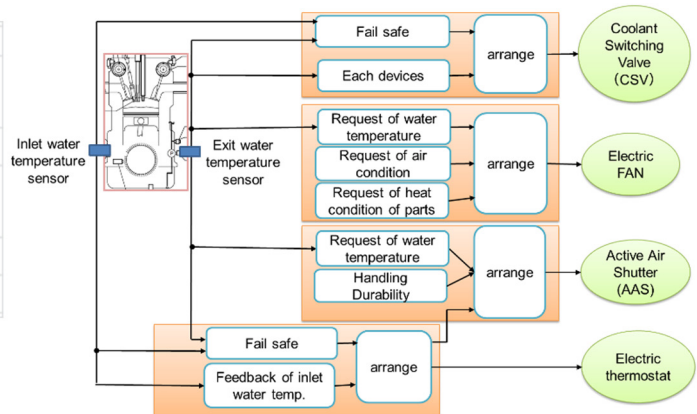


Fig. 3 Function of Temp. for Engine

この効果は、Fig. 4に示すように、燃焼室周りの水温の上昇を大幅に早め、燃焼効率の高い状態へ早期に移行できるようにになっている。

今回の水流制御は、止水中の発熱量と各部の熱容量の関係を踏まえて、燃焼室周りの壁温や水温を予測しながら、トランスミッションの暖機や暖房用の空調要求も満足できるように、通水タイミングや通水量もコントロールしている。

2.2 適温を下げる (オイルの低粘度対応)

エンジンやトランスミッションの抵抗は、油温が低い状態では、Fig. 5に示すように、暖機後に比べてかなり大きくなるため、燃費性能への影響が大きい。このため、エンジンオイルもトランスミッションオイルも、低油水温時のオイル粘度を下げ、SKYACTIV-Xでは低油水温時の抵抗低減を図っている。この適温の低温化技術を採用することで、先に述べた水流制御との相乗効果で、SPCCI燃焼の早期実現とパワートレイン全体の抵抗低減で、燃費性能改善にも貢献できている。また、従来の車両から採用しているトランスミッションの油温を昇温させるためのATFウォーマー機能と低粘度化を併用することで、低外気時の走行中もロックアップ作動が可能となり、実用燃費も改善されている。

2.3 可変吸気システム

SPCCI燃焼が要求する筒内状態量にするためには、筒内の壁温と同じように、吸入空気温度も重要な因子となっている。従来の吸気システムは、吸気導入口をラジエーターグリル近傍に設けることで、外気を導入しやすい構造としており、高外気温度下においても、吸入空気温度を低く保つことをねらっていた。その反面、吸入空気温度は外気温度に依存することから、低外気温度下においては、吸入空気温度が低くなる。

SPCCI燃焼を低外気温度下でも実現するためには、外気温度に依存せず、適温にすることが求められる。

そこでSKYACTIV-Xでは、燃焼状態の要求に応えるべく、吸入空気温度制御構造を採用している。

従来の構造同様にラジエーターグリル近傍の吸気口に加え、後述するエンジンルーム内のカプセル化の中にも吸気導入口を設け、Fig. 6に示すように、ラジエーター後方の排熱を利用することで、低外気温度下においても、SPCCI燃焼に必要な状態量にすることが可能となっている。

この2つの吸気口をFig. 7に示すように、電動アクチュエータで切り替えることで、各燃焼方式に適した吸入空気温度を実現させている。

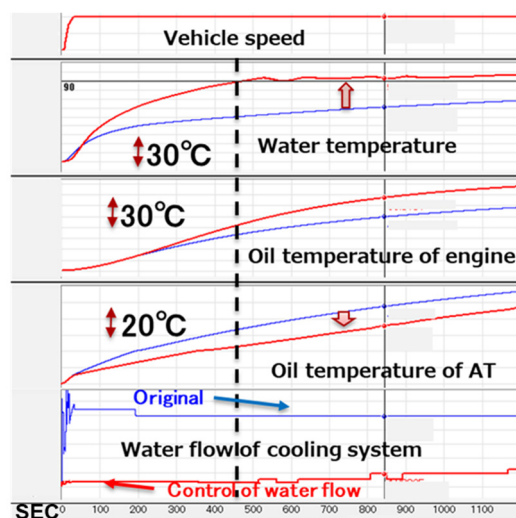


Fig. 4 Effect of Water Flow Control

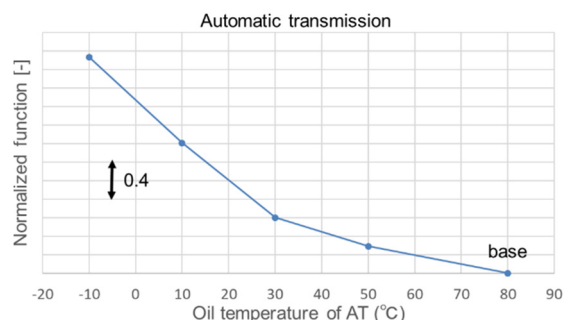
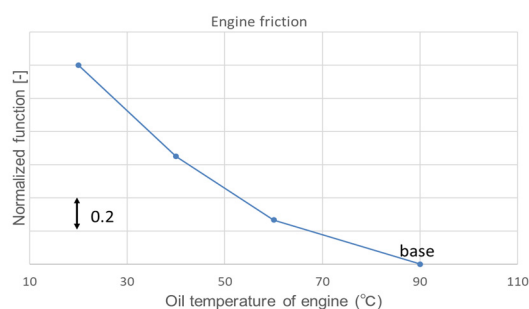


Fig. 5 Friction ratio by Oil Temperature

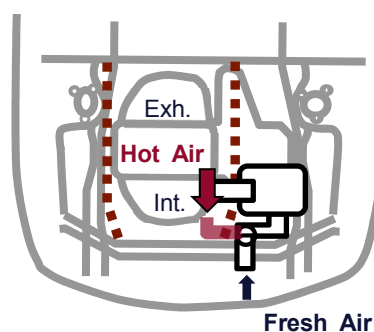


Fig. 6 Image of Air Duct Position

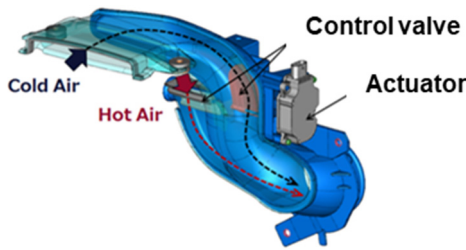


Fig. 7 Part of Fresh Air Duct

2.4 空調性能との協調対応

お客様が快適に運転していただくためには、車室内の快適性は重要である。快適性を最少のエネルギーで実現し、早期暖機にエネルギーを使えるようにすることにも、取り組んでいる。まず、冬場の運転時は、暖房性能が必要となるため、エンジンの発熱量をエバポレータという熱交換器を通して、室内に熱を供給している。これは、冬場の早期暖機にとっては大きな外乱である。このため、暖房使用時の必要熱量を減らすことで、エンジンの暖機性は改善される。今回、冬場に車室内に乗り込んだお客様が、暖房の効きを人として感じるまでの時間とヒーター回路に通水するタイミングを合わせることで、暖房要求があっても、エンジン内の水温がお客様に温かさを感じてもらえるまで上昇してからヒーター回路に通水を始めて、エンジンの暖機と快適性を両立させている。これには、前述したヒーター回路への通水量コントロールだけでなく、前モデルのハーフタイプから今回のフルタイプに変更したAASも活用している。フルタイプのAASは、ラジエーター前に設置された可動式のフラッパー構造となっており、全閉にすることで冬場の走行中の冷たい走行風が、エンジンルーム内へ流入するのを抑え、エンジン構造体や配管等からの放熱を抑制させることにつなげている。更に加えて、後述のカプセル化技術による再始動時のエンジン水温を高くすることでの上昇の早期化と合わせ、車両全体での熱を無駄にしない取り組みが空調性能との両立に貢献している。

3. 停止後の温度下降ゲインを減らす（保温）

3.1 エンジンカプセル化

エンジンの筒内温度を適温に保ち、かつ燃焼刺激音に寛容なエンジン環境を整えることで、SPCCI燃焼頻度を上げる技術としてエンジンルーム内のカプセル化を採用している。

この技術は、NVH性能の改善にも貢献しているが、詳細は本誌、神田らの「SKYACTIV-X NVH技術」の稿で述べているので、ここでは、熱マネ領域でのカプセル化技術のねらいを説明する。効果が得られるシーンとしては、車をお客様が走行した後に、エンジンを停めて、駐車中における構造体や油水温の外気温相当まで低下する時間を、従来よりも長くすることである。イメージしやすい事例で説明すると、浴槽に溜めたお湯を冷めにくくするために、浴槽

に蓋をすると蓋なしよりも、お湯が冷めにくくなることと同じ原理である。

カプセル化は、カプセルカバー、エンジン直貼り、AAS、アンダーカバー、スプラッシュシールドで構成され、エンジン周りにホットゾーン空間を形成し、エンジンの熱を逃がさず、温かい空気を溜め、かつエンジンから放射される音も吸音する機能を適正機能配分で実現させている。

2018年版のマツダ技報内の山本らの「高熱効率燃焼の開発に適用する筒内壁温予測技術、マツダ技報、No.35, p.2 (2018)」でも紹介されているFig. 8のような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モデルを活用し、Fig. 9やFig. 10に示すように、各部品に保温機能を配分させて対応している。

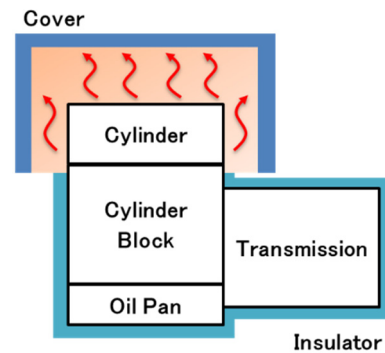


Fig. 8 Image of Heat Convective Model

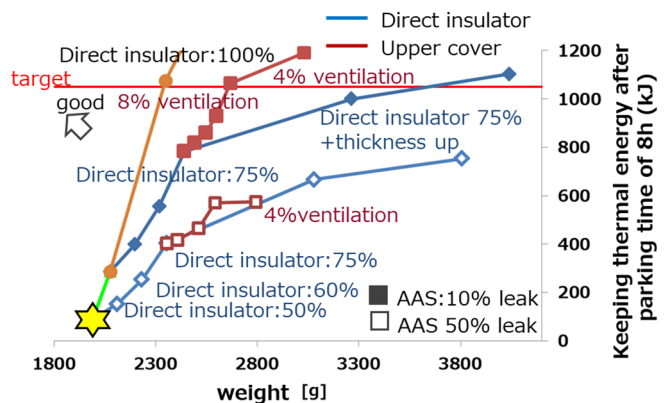


Fig. 9 Function Distribution for Encapsulation

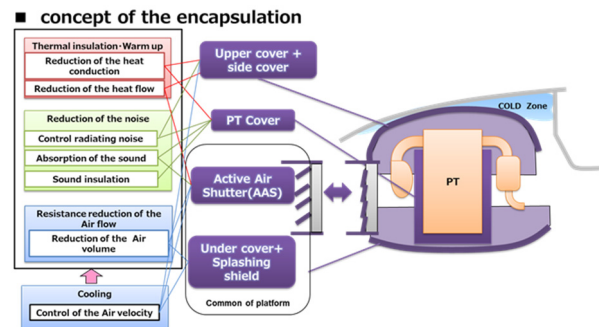
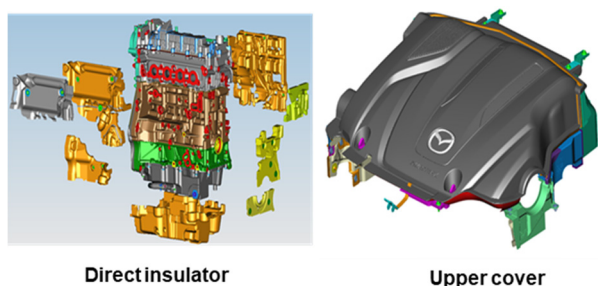


Fig. 10 Concept of the Encapsulation

具体的には、Fig. 11に示すようにカプセルカバーは、超極細繊維を1100g/m²の目付量で構成した高性能グラスウール、不織布製の表皮、PA6-GF30の基板、及びシールラバーから成り、エンジンを囲ったカプセル空間の換気率（カプセル内外の空気循環率）は4%以下を達成している。

また、エンジン直貼りは、ウレタン材を採用し、エンジンを覆う直貼りカバー率は60%以上となっている。



Direct insulator Upper cover
Fig. 11 Image of Encapsulation

カプセル化技術による保温効果は、Fig. 12に示すように外気：-10℃の環境下で駐車時間に応じて、水温等が低下していくスピードが大幅に緩やかになっている。これにより、Fig. 13に示すように、市場での遭遇頻度多い、駐車時間が9時間以下では、従来よりも駐車後の再始動時の油水温が高くなり、5%以上の実用燃費効果が得られている。

このカプセル化については、CO₂削減の先進技術として、欧州市場では、エコイノベーション技術のCO₂クレジットの認可も、新型MAZDA3で、獲得できている。

3.2 適温維持に向けた風流れコントロール

エンジンルーム内をカプセル化することで、走行中のエンジン回りの各部品等への走行風の導入にも工夫している。概要はFig. 15のイメージ図のとおり、カプセル化の構造を利用し、エンジンのヒートポイント周辺にエンジンルーム内の風の流れを作り、従来よりも通過風速を20%増やしている。また、走行状態によっては適温維持に必要な風量も少なくできる領域も発生するため、フルタイプに変更したAAS開度をコントロールしている。これにより、Fig. 16のようにヒートポイントの温度下げ、エンジンルーム内に導入する風量低減によって、空力改善にも貢献している。

4. おわりに

新しい燃焼状態を常に実現すべく、限られた熱源を有効利用する技術に取り組んできた。今回の適温を下げ、その適温までの各部の温度や油水温を短時間で上昇させ、エンジン停止後の温度低下（放熱）を抑制させることは、熱マネジメントの基本と考えている。今後、更なる内燃機関の燃効率改善に向けて、廃棄する熱エネルギーを更に減らし続ける技術に取り組んでいきたい。

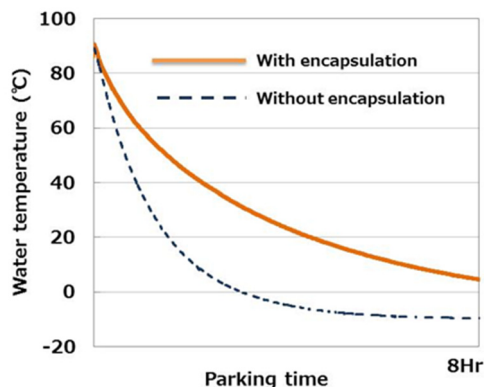


Fig. 12 Effect of Water Temperature within Parking Time

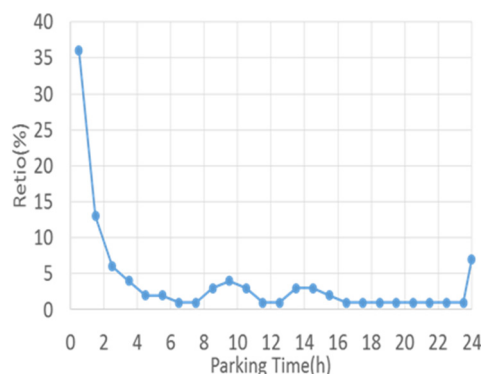


Fig. 13 Ratio of Parking Time in Europe

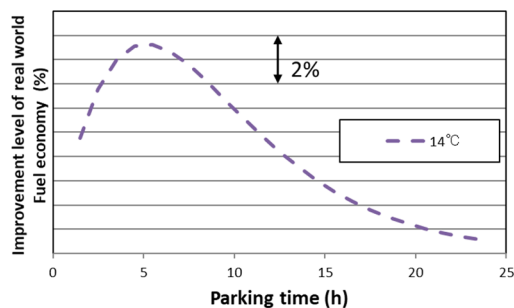


Fig. 14 Improvement of Fuel Economy by Parking Time

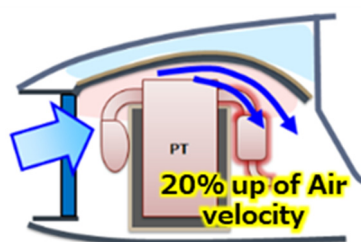


Fig. 15 Image of Wind Flow

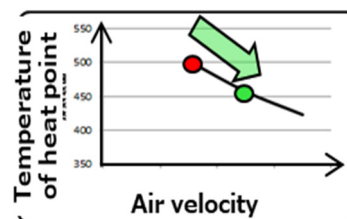


Fig. 16 Control of the Air Velocity

参考文献

- (1) 山本ほか：高熱効率燃焼の開発に適用する筒内壁温予測技術, [マツダ技報, No.35, pp.9-14 \(2018\)](#)
- (2) 欧州エコイノベーション規制ガイドライン情報
欧州市場における駐車時間頻度

■ 著 者 ■



幸徳 正信



早川 元雄



宮本 晃一



菅崎 健二



高旗 達也



石原 太郎



引谷 晋一



岡村 和美