

カーボンニュートラル社会を加速する高応答遮熱材料技術の開発

Development of High-Response Heat Insulation Material Technology to Accelerate Carbon-Neutral Society

○正 古賀 広之^{*1}, 湊 允哉^{*1}, 山本 一陽^{*1}, 金 尚奎^{*1}, 市原 浩一郎^{*1}

Hiroyuki KOGA^{*1}, Masaya MINATO^{*1}, Kazuaki YAMAMOTO^{*1}, Sangkyu KIM^{*1} and Koichiro ICHIHARA^{*1}

^{*1} マツダ株式会社, Mazda Motor Corporation, 3-1 Shinchi, Fuchu-cho, Aki-gun, Hiroshima 730-8670, Japan

Key words : Heat engine, Engine component, Performance/Fuel economy/Efficiency, Heat insulation

1. はじめに

カーボンニュートラル社会の実現に向け、CO₂排出量の削減はますます重要になっている。自動車業界では、走行時にCO₂を排出しない電気自動車の普及が注目されているが、総排出量を本質的に減らすためには、エネルギーの採掘・製造・輸送段階まで含めた「Well-to-Wheel」の視点が不可欠である。こうした背景から、エンジンを含むパワーユニットを適材適所で活用するマルチソリューション戦略が有効と考えられる。また、カーボンニュートラル燃料の導入も進んでおり、ハイブリッドやプラグインハイブリッドを含むエンジン搭載車は当面高い比率を維持すると予測される⁽¹⁾。このため、エンジンの燃費改善、特に熱効率の向上は依然として重要な課題である。

エンジンの熱効率向上には高圧縮比化が有効だが、それに伴い増加する冷却損失(燃焼ガスから部品を介して冷却水へ逃げる熱損失)を抑える必要がある。その有効な手段の一つが、燃焼室壁面の遮熱である⁽²⁾。本報では、この遮熱技術の概要、材料開発の成果、さらにピストン冠面への適用による燃費改善効果の検証、耐久性評価の結果について述べる。

2. 高応答遮熱技術の概要

エンジン1サイクルの冷却損失 q_c [W]は式(1)で表される。

$$\frac{dq_c}{dt} = hA(T_g - T_w) \quad (1)$$

ここで、 h [W/m²/K]は燃焼室壁面の熱伝達率、 A [m²]は伝達面積、 T_g [K]は燃焼ガス温度、 T_w [K]は燃焼室壁面温度である。燃焼ガスと壁面の温度差が小さくなれば、冷却損失が低減することが分かる。一方で、Fig.1に示すエンジン1サイクル中の燃焼ガス温度と壁面温度の推移イメージの通り、部品を低熱伝導率のセラミックスにすると伝熱は抑えられ壁面温度は上昇するが、壁面が常時高温となるため、吸気行程で作動ガスが加熱され充填効率が悪化(トルク低下)し、排気ガス温度も高くなって排気損失が増える。したがって、この課題には燃焼ガス温度変化に壁面温度が高応答で追従する「高応答遮熱材料」が必要となる。また、高応答遮熱材料は燃焼室内に施工するため、高温、高圧環境に対する高い耐久性が不可欠であり、熱物性との両立が重要である。

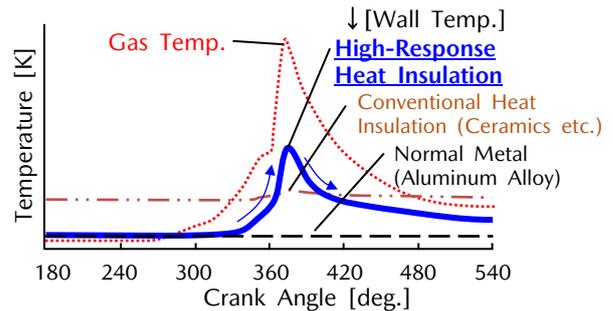


Fig.1 Comparison of Wall Temperature through a Cycle Relative to Gas Temperature

3. 高応答遮熱材料技術の概要

高応答遮熱材料に必要な特性は、熱を伝えない(低熱流束、低熱伝導)、熱をためない(低熱容量)であり、(1)低熱浸透率、(2)耐熱性・耐機械負荷性(高温・高圧・熱衝撃・振動)、(3)施工時の成膜性・密着性(複雑形状/異材基材への薄膜施工)、が求められる。熱物性は熱浸透率 b [kJ/m²/s^{1/2}/K]を指標とし、式(2)で求めた λ [W/m/K]は熱伝導率、 ρ [kg/m³]は密度、 c [J/kg/K]は定圧比熱、 α [W/m²/K]は熱拡散率である。

$$b = (\lambda\rho c)^{1/2} = \alpha^{1/2}\rho c \quad (2)$$

膜厚が及ぼす燃費改善率と全負荷時のトルク変化率の解析(Fig.2)から、燃費改善とトルク維持を両立できる適切な膜厚は、熱浸透率の値によらず50 μ m付近であった⁽³⁾。これらを主要要件とし、熱浸透率0.5kJ/m²/s^{-1/2}/Kを目標に開発した。

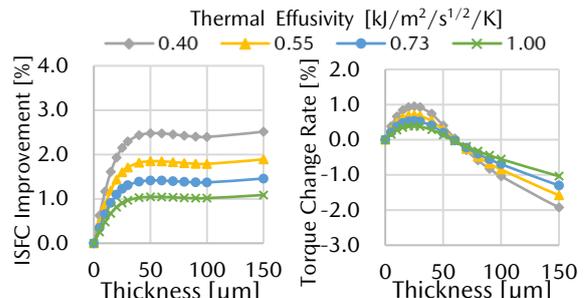


Fig.2 Relationship between Insulation Thickness and ISFC Improvement / Engine Torque Change Rate.

3. 材料設計および複合化技術

ベース材にはSi-O骨格の熱硬化型シリコン樹脂を採用し、低熱容量と成膜性を確保した。遮熱性向上の主要手段として、平均粒子径10 μm 以下の無機中空粒子を50vol%で複合化し、材料内部に空隙を導入して熱流束を抑制した。同時に、耐久性(体積収縮・エロージョン耐性)向上のため平均粒子径100nmの微細シリカ粒子を20vol%で充填し、中空粒子間隙へ良分散させて応力集中を緩和・クラック進展を抑制した。分散設計にはHansen溶解度パラメータ(HSP)を用い、成膜後の三次元的均一分散を実現した。

4. 材料特性評価

遮熱膜(膜厚50 μm)について、健全性を断面SEM観察、耐久性を体積収縮率試験(大気中 773K \times 6h)とひっかき硬度試験(JIS K 5600-5-4 鉛筆法)とスモールパンチ(SP)試験/加熱試験後の膜観察(大気中 773K \times 6h)、熱特性を熱物性測定(DSC・レーザーフラッシュ)から、それぞれ評価した。評価結果の抜粋を下記に示す。

- ・断面SEM観察(Fig.3)： 微細シリカ粒子を20vol%複合した膜の代表的な断面写真を示す。凝集やボイド欠陥は認められず、無機中空粒子間の隙間に微細シリカ粒子が良好に分散・充填できていることを確認した。
- ・体積収縮率(Fig.4)： 微細シリカ粒子の複合比率増加に伴い単調低下し、加熱収縮起因の内部引張応力の抑制が示唆された。
- ・ひっかき硬度(Fig.5)： 微細シリカ粒子の複合比率増加に伴い上昇する傾向を示した。一方、30vol%では過充填によるボイド形成の影響で低下した。
- ・強度(SP)／破壊じん性(Fig.6, Fig.7)： 微細シリカ粒子複合で強度が増加した。金属基材上に成膜した試験片の加熱後の観察から、微細シリカ粒子の複合比率増加に伴いクラック数は減少し、破壊じん性向上を示唆する結果を得た。
- ・熱浸透率(Fig.8)： 微細シリカ粒子の複合比率増加によりわずかに上昇するが、Bruggemanモデル計算値と良一致を示し、粒子接触ネットワークによる不要な伝熱経路形成が抑制されていると解釈した。

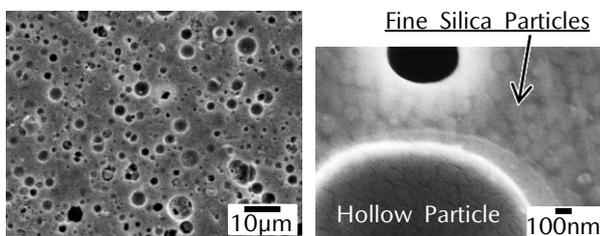


Fig.3 Cross-Sectional SEM Image of High-Response Heat Insulation Material

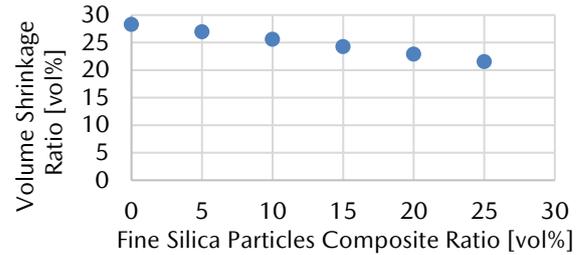


Fig.4 Results of Volume Shrinkage Ratio

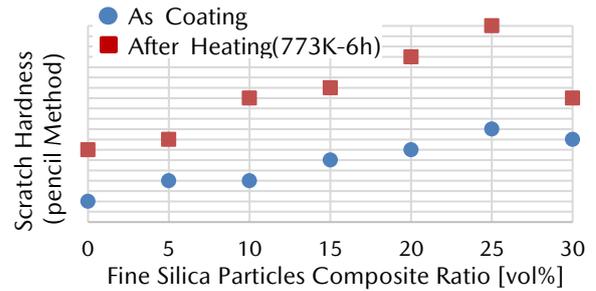


Fig.5 Results of Scratch Hardness Test

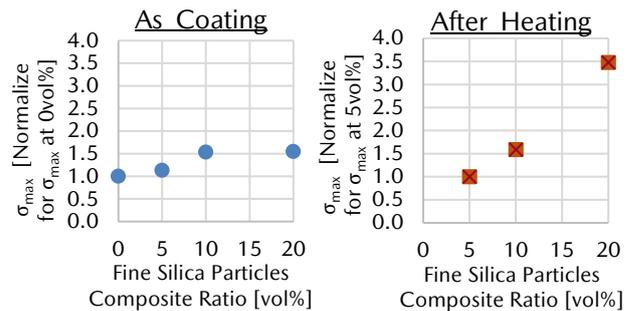


Fig.6 Results of Strength Test

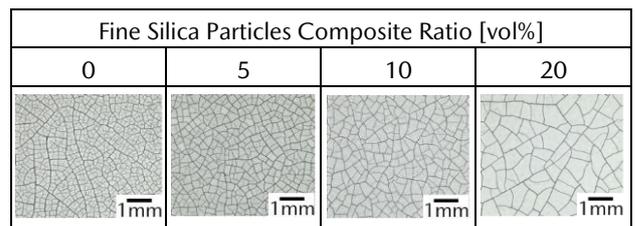


Fig.7 Surface Photographs (After Heating Test)

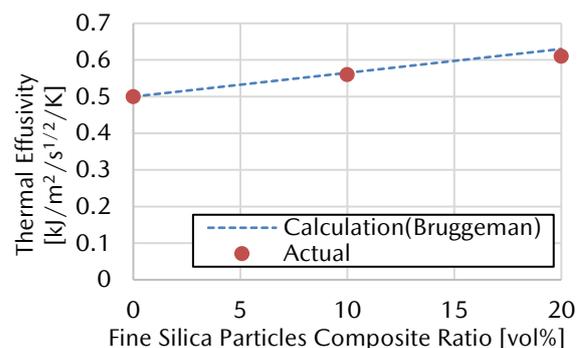


Fig.8 Measurement Results of Thermal Effusivity

5. 実機エンジンによる性能評価

(1) 燃費改善効果

Table1に示す単気筒ディーゼルエンジン(圧縮比15.2:1)で評価した。ピストンは2段エッグ燃焼室⁽⁴⁾の鋼製で、試験は軽負荷域の予混合(Premixed Compression Ignition: PCI)燃焼及び中負荷域の空間制御予混合(Distribution Controlled partially Premixed Compression Ignition: DCPCI)燃焼の代表条件として図示平均有効圧(IMEP)が各々375kPaと720kPaの条件で行った。

Table1 Engine Specification and Experimental Conditions

Engine Type	Single Cylinder 4-stroke DI	
Bore x Stroke [mm]	φ86 x 94	
Nozzle Type	φ0.106 x 10h-157° (Denso's G4P/Common Rail)	
Engine Speed [rpm]	1500	
IMEP [kPa]	approx. 375	approx. 720
Fuel Amount [mm ³ /str]	12	23
Intake Temperature [K]	350	321
Intake Pressure [kPa]	123	130
EGR rate [%]	52	42
Inj. Pressure [MPa]	73	187

評価結果をFig.9-1, Fig.9-2に示す。本遮熱材料の適用により、軽負荷及び中負荷の代表条件において熱発生率はほぼ変化しておらず、それぞれ1.6%と1.0%の燃費改善ができた。

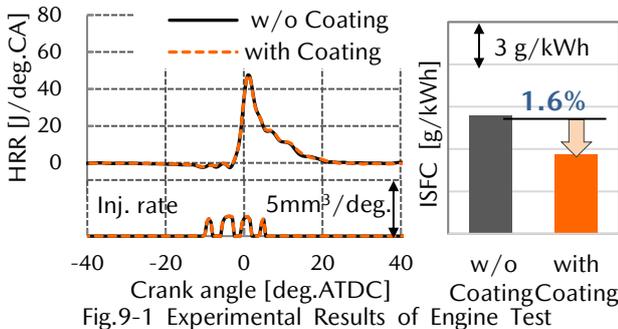


Fig.9-1 Experimental Results of Engine Test
(1500rpm-IMEP 375kPa, NOx 50ppm)

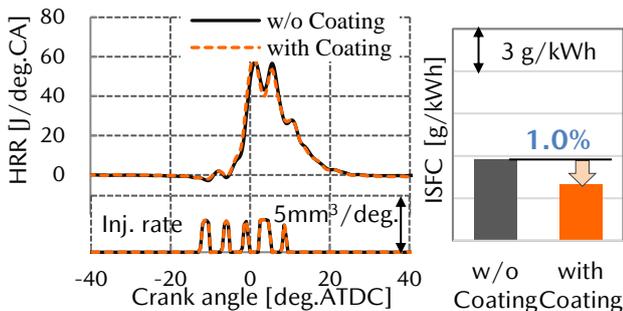


Fig.9-2 Experimental Results of Engine Test
(1500rpm-IMEP 720kPa, NOx 50ppm)

(2) 耐久性

スーパー耐久シリーズ⁽⁵⁾に参戦しているレースカーに搭載するディーゼルエンジン(圧縮比13.0:1,排気量2.2L,出力270ps,トルク530Nm)で評価した。ピストンは2段エッグ燃焼室のアルミニウム合金製である。

本評価のエンジン運転履歴と、耐久前後の遮熱材料の外観をFig.10に示す。有負荷条件の累計運転時間は116時間で全負荷領域の頻度が大半を占めているが、耐久後のピストンには燃焼中に生成したデポジットの付着(写真の黒色部分)が確認されるのみであり、本遮熱材料は過酷な運転条件下でも高い耐久性を有していた。

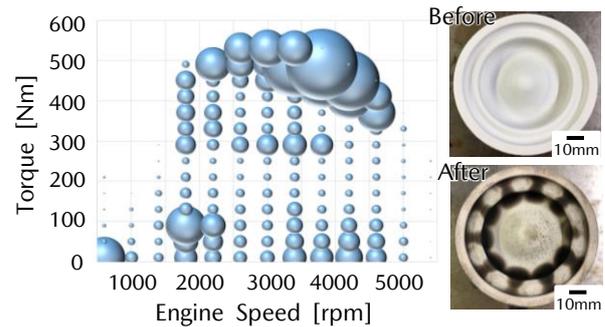


Fig.10 Frequency of Engine Operating Condition, and Comparison Before and After Durability Test

6. まとめ

エンジンの冷却損失低減による燃費向上を目的に、シリコン樹脂に無機中空粒子と微細シリカ粒子を複合化し、熱浸透率の低減と耐久性を両立する高応答遮熱材料の開発を行った。また、本材料をピストン冠面に適用した場合の約1.0~1.6%の燃費向上とスーパー耐久レースエンジンの過酷な運転条件下でも耐え得る耐久性を確認した。

なお、本報告の高応答遮熱材料は、セラミック含有遮熱コーティング(Ceramic Infused Insulation Coating, CII Coating)として実用化検討を進めている。

参考文献

- (1) IEA: Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector, 2021
- (2) 角島ほか: エンジンの燃費を向上する燃焼室高応答遮熱材料技術, マツダ技報, No.41, pp.126-pp.132 (2025)
- (3) 角島ほか: エンジンの燃費を向上する燃焼室高応答遮熱材料技術の開発, 自動車技術, Vol.77, No.12, pp.58-63 (2023)
- (4) S.Kim et al.: A new concept for high efficiency and clean diesel combustion by controlling mixture distribution with dual zone combustion chamber, Int. J. Engine Res., 24 (10), pp4421-4432 (2023).
- (5) スーパー耐久機構: スーパー耐久公式サイト, <https://supertaiky.com/>, (2024/09/02参照)