

論文・解説

20

エンジンの燃費を向上する燃焼室高応答遮熱材料技術

High-Response Heat Insulation Material Technology in Engine Combustion Chamber to Improve the Fuel Economy

角島 信司^{*1} 山本 一陽^{*2} 岡田 健太^{*3}
Shinji Kadoshima Kazuaki Yamamoto Kenta Okada
古賀 広之^{*4} 金 尚奎^{*5} 中島 研吾^{*6}
Hiroyuki Koga Sangkyu Kim Kengo Nakashima

要約

マツダではエンジンの冷却損失低減による燃費向上を目的に、燃焼室内のガス温度に対し燃焼室壁面温度を高応答で追従させて両者の温度差を縮小する高応答遮熱材料技術を開発している。この高応答遮熱材料には、熱浸透率が低い特性と、燃焼室内の高温、高圧環境に対する耐久性確保が求められる。今回、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した材料開発の結果と、本材料をピストン冠面に適用した場合の燃費改善効果と耐久性を確認した結果を報告する。

Abstract

To decrease cooling loss of engines and improve fuel economy, we are developing high-response heat insulation material technology that allows the wall surface temperature of an engine combustion chamber to follow the gas temperature with high response, reducing the temperature difference between the two. This high-response heat insulation material is required to have low thermal diffusivity characteristics and to ensure durability in the high-temperature, high-pressure environment of the combustion chamber. We report the development of a material that combines silicone resin with inorganic hollow particles and fine silica particles to achieve both low thermal diffusivity and durability. Additionally, we present the results of applying this material to the piston crown surface, confirming its effects on fuel efficiency improvement and durability.

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て、二酸化炭素排出量の削減が強く求められている。自動車では、走行時に二酸化炭素を排出しない電気自動車の普及に注目が集まっているが、本質的な二酸化炭素総排出量削減のためには、エネルギーの採掘・製造・輸送段階の二酸化炭素排出量まで考慮した「Well-to-Wheel」の考え方が重要であり、また電気を供給する電源構成比（自然エネルギー、原子力、石炭・石油などの火力）も国や地域で異なっているため、幅広い環境対応とお客様ニーズを満たすには、エンジンを含むパワーユニットの展開を適材適所で行うマルチソリューションの対応が有効である。ま

た、カーボンニュートラル燃料の普及も進められており、今後もハイブリッド、プラグイン・ハイブリッド含めたエンジンを搭載する自動車の比率は当面高い状態が続くと予測され⁽¹⁾、エンジンの燃費向上、すなわち熱効率向上は重要である。

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（燃焼ガスから各部品を通して冷却水へ逃げる熱損失）を低減する必要があるため、手段として燃焼室壁面を遮熱することが有効である。今回、この遮熱技術の概要、材料開発の結果、及び本材料をピストン冠面に適用した場合の燃費改善効果と耐久性の評価結果を報告する。

*1~3 技術研究所
Technical Research Center

*5,6 エンジン性能開発部
Engine Performance Development Dept.

*4 広島大学
Hiroshima University

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の縮小で、冷却損失が低減できることが分かる。一方、Fig. 1 のエンジン1サイクル中の燃焼ガスと燃焼室壁面の温度推移のイメージに示すように、部品を熱伝導率が低いセラミックス製とした場合、伝熱は抑制でき壁面温度は上昇するが、常に壁面が高温となるため、吸気行程中の作動ガスが加熱され吸気充填効率が悪化（トルク低下）し、また排気ガスも高温になり排気損失も増加する。この課題解決には、同図に示すように、燃焼ガス温度の変化に壁面温度が高応答に追従する「高応答遮熱材料」が必要となる。

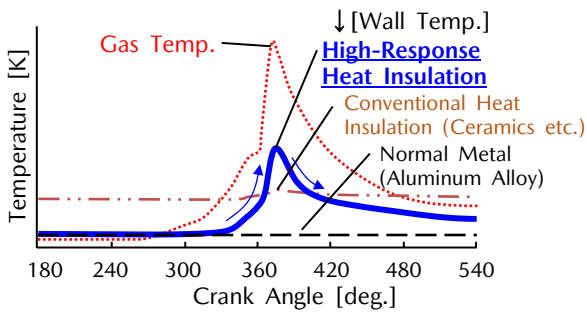


Fig. 1 Comparison of Wall Temperature through a Cycle Relative to Gas Temperature

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、熱物性としては式(2)に示す熱浸透率 b [kJ/m²/s^{1/2}/K] が低いこととなる。

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

ここで、 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。

次に、遮熱材料の厚さも重要な因子だが、熱流束の低減には厚く、熱容量の低減には薄くと、トレードオフの関係にあるため、適切な範囲とする必要がある。そこで、遮熱材料を燃焼室部品に適用した場合（シリンダーライナー除く）で、厚さがエンジンの燃費改善率と、全負荷時のトルク変化率におよぼす影響を0次元燃焼解析と1次元熱伝導解析で連成解析した結果をFig. 2に示す⁽²⁾。燃費改善とトルク低下の防止を両立できる適切な厚さは、熱浸透率の値によらず50 μ m付近であった。

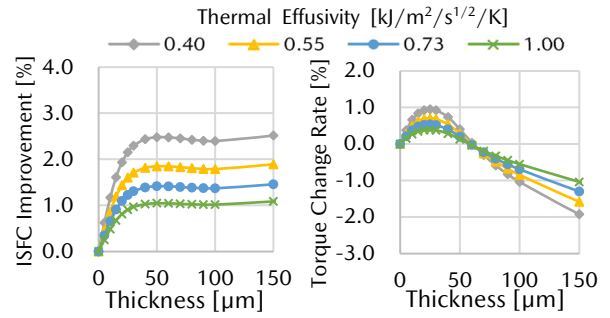


Fig. 2 Relationship between Insulation Thickness and ISFC Improvement/Engine Torque Change Rate

3. 材料開発の方向性

高応答遮熱材料には低熱浸透率特性に加えて、燃焼室内の高温、高圧環境に対する高い耐久性が要求される。Fig. 3に各種材料の熱浸透率と耐熱性の関係、及び本開発でねらいとする領域を示す。金属、無機、樹脂材料、それぞれ単体では、ねらいの領域に届かないことが分かる。また熱浸透率の低減には、材料中に空気のような空隙を設けることが有効となり、実用例として発電用ガスタービン翼などに適用されているセラミックスの溶射膜TBC (Thermal Barrier Coating)がある。Fig. 3中のTBCは膜中に約25vol%の空隙をもつが、熱浸透率は約1.3 [kJ/m²/s^{1/2}/K]であった。試算では熱浸透率を0.5 [kJ/m²/s^{1/2}/K]程度にするには空隙が80vol%以上必要であり、構造体として脆く、現実的ではないと考えた。

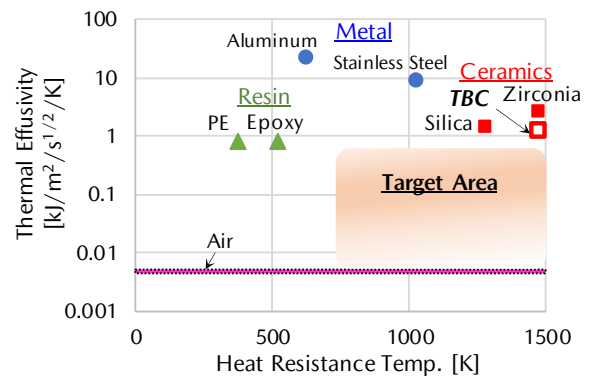


Fig. 3 Comparison of Thermal Effusivity and Heat Resistance of Various Materials

また、本遮熱材料は燃焼室を構成するピストン、シリンダーヘッド、吸排気バルブといった複雑な形状面、及びアルミニウムや鉄鋼など、さまざまな材質に薄膜で施工する必要がある。

以上より、熱浸透率が低い樹脂材料をベースに内部に空隙を導入すること、及び塗装で成膜できることを前提に検討を行い、樹脂にはシロキサン結合 (Si-O) を主骨格とした熱硬化性のシリコーン樹脂をベースに耐熱性と柔軟性 (成膜性) を両立した開発樹脂を、内部への空隙

導入には平均粒子径が10 μ m以下の無機中空粒子を50vol%配合することで、熱浸透率0.5 [kJ/m²/s^{1/2}/K]の高応答遮熱材料を開発してきた⁽²⁾。

一方、さまざまなお客様の使用環境や今後のエンジンの高圧縮比化を想定した場合、壁面温度の更なる上昇やそれに伴うノッキングなどの異常燃焼発生の可能性が考えられるため、よりロバストな耐久性の確保は重要である。本材料系における耐熱性の主な課題は、エンジン内の燃焼熱によるシリコン樹脂の熱分解・再結合で生じる樹脂の収縮、すなわち体積収縮に伴う内部応力の発生である。この内部応力は引張応力のため、遮熱材料にクラックを生じさせる方向に働く。よって、内部応力（体積収縮）発生の低減、強度の向上、クラックの進展や連結を防止する指標である破壊じん性の向上が有効な手段となる。次に、ノッキングとは高周波振動を伴う異常燃焼であり、この高周波振動による衝撃圧力や熱衝撃の影響で、材料表面が機械的に損傷を受け減肉するエロージョン現象が発生するとされている⁽³⁾。エロージョンには、材料の硬度の向上、破壊じん性の向上が有効であることが文献⁽⁴⁾などで示されており、本高応答遮熱材料に対しても有効と考えた。

以上から耐久性向上の方針は、①内部応力（体積収縮）発生の低減、②硬度の向上、③強度の向上、④破壊じん性の向上に定めた。具体的な手段は、微細な無機粒子の複合化であり、材質は熱浸透率が低い二酸化ケイ素(SiO₂、シリカ)、平均粒子径は中空粒子間の隙間に充填するため100nm、表面処理はシリコン樹脂との濡れ性が向上するものを選定した。

4. 実験方法

4.1 微細シリカ粒子の分散性

100nmレベルの微細粒子の制御課題の一つが、溶媒や溶液中における分散性の確保である。本検討では、樹脂溶液（シリコン樹脂+溶媒）への微細シリカ粒子の分散性向上は、物質の溶解性の予測に用いられるハンセン溶解度パラメーター（Hansen Solubility Parameter, HSP）値の活用を検討した。このHSP値は分散項 δ_d 、極性項 δ_p 、水素結合項 δ_h の3項を三次元座標にベクトルで表した値であり、この値が近いものは溶解性が高いと予測される（HSP値の近さの指標：HSP距離 [(MPa)^{1/2}]）。この考えは粒子の液中分散性の指標としても活用でき、粒子と溶液のHSP距離が近いほど、粒子の分散性向上が期待できる。HSP値は、測定対象物質とHSP値が既知の溶媒との相性を測定し、相性のよい溶媒の三次元座標プロット群（Hansen溶解球）の中心の値と定めることができる。事例をFig. 4に示す。既知溶媒との相性を測定する方法は種々あるが、本検討ではパルスNMRを用いた。

実際の微細シリカ粒子の分散性は、樹脂溶液に微細シ

リカ粒子を添加・攪拌した後の混合溶液の透明度での定性評価、また成膜後の膜については、連続断面画像を集束イオンビーム-走査電子顕微鏡（FIB-SEM）を用いて取得し三次元分散状態を画像解析で評価した。

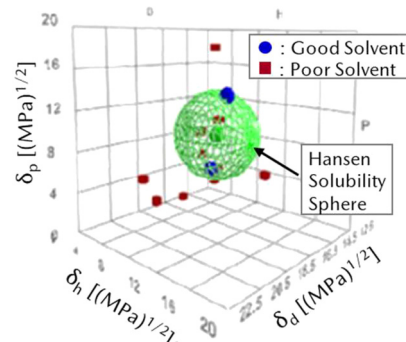


Fig. 4 Sample of Hansen Solubility Sphere

4.2 微細シリカ粒子を複合した高応答遮熱材料の特性

本検討では、シリコン樹脂に中空粒子と微細シリカ粒子を配合し、適切な溶媒を加えたものを塗料とした。成膜はスプレー塗装で実施し、その後オープンで焼成硬化した。なお中空粒子、微細シリカ粒子の配合率は、焼成硬化後の膜全体に占める体積割合で示し、中空粒子の配合率は50vol%で固定した。また、材料特性の評価は以下の方法で行った。

(1) 膜構造

成膜後の膜をエポキシ樹脂包埋した後に、切断・研磨し、膜の断面をSEMで観察した。

(2) 体積収縮率

成膜後と大気中773Kで6h加熱後の膜体積の測定結果から、加熱後の膜体積収縮率を算出した。

(3) 硬度

JIS K 5600-5-4に準じた引っかき硬度（鉛筆法）で評価した。

(4) 強度、破壊じん性

膜単体の試験片に鋼球を押し付け、荷重と変位の関係から機械的特性を測定するスモールパンチ（SP）試験で評価した。SP試験の概要図をFig. 5に示す。下型孔径 $D_{LD}=1.2$ mm、下型コーナー半径 $r_{LD}=0.1$ mm、鋼球径 $d_b=1.0$ mmであり、試験片は $\phi 3.0$ mmの円形である。強度 σ_{max} [MPa]は、Börgerらの報告⁽⁵⁾で脆性材料の評価に適用している式(3)、式(4)から算出した。

$$\sigma_{max} = f \frac{P_{max}}{t_0^2} a \quad (3)$$

$$f \left(\frac{t_0}{R}, \frac{R_a}{R}, \nu \right) = C_0 + \frac{\left(C_1 + C_2 \frac{t_0}{R} + C_3 \left(\frac{t_0}{R} \right)^2 + C_4 \left(\frac{t_0}{R} \right)^3 \right)}{1 + C_5 \frac{t_0}{R}} \left(1 + C_6 \frac{R_a}{R} \right) \quad (4)$$

ここで、 P_{max} [MPa] は最大荷重、 t_0 [m] は試験片厚さ、 R [m] は試験片の半径、 R_a [m] は試験片の支持内径であり $R_a = D_{LD}/2 + r_{LD}$ で表される。また、 $C_0 \sim C_6$ の係数、ポアソン比 ν は Börger らの報告内の値を適用した。

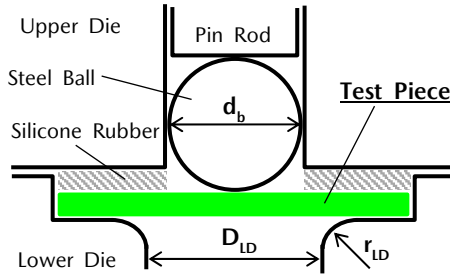


Fig. 5 Cross-Sectional View of Small Punch Test

(5) 熱物性

式(2)で示した熱浸透率の算出のため、密度は気体置換法、定圧比熱は示差走査熱量計 (DSC)、及び熱拡散率はレーザーフラッシュ法で測定した。

4.3 エンジン実機試験

本検討では、中空粒子の配合率 50vol%、微細シリカ粒子の配合率 20vol%の遮熱材料とし、成膜部位はピストン冠面部、ねらい膜厚は 50 μ mとした。ピストン冠面と膜の密着性は、粗面化による機械的結合 (アンカー効果) により確保した。また、評価は以下の方法で行った。

(1) 燃費改善効果

Table 1 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⁽⁶⁾ 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。

Table 1 Engine Specification and Experimental Conditions

Engine Type	Single Cylinder 4-stroke DI	
Bore x Stroke [mm]	$\phi 86 \times 94$	
Nozzle Type	$\phi 0.106 \times 10h-157^\circ$ (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

(2) 耐久性

スーパー耐久シリーズ⁽⁷⁾ 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。

5. 実験結果

5.1 微細シリカ粒子の分散性

微細シリカ粒子とシリコーン樹脂の HSP 値をそれぞれ測定、算出した結果を Table 2 に示す。この結果から、微細シリカ粒子と HSP 距離が近くなる樹脂溶液を机上検討した。具体的には、シリコーン樹脂にトルエン溶媒を添加した樹脂溶液との HSP 距離を計算した。結果を Fig. 6 に示す。トルエンの添加量 50vol%付近で HSP 距離が近くなり、微細シリカ粒子の分散性が向上する予測となった。実際に微細シリカ粒子を添加した混合溶液の状態を同図に示す。トルエン添加量 50vol%で最も透明度が高くなり、予測どおりの結果が得られた。次に、成膜後の膜の FIB-SEM 画像と、粒子の分散状態を粒子間距離で評価した結果を Fig. 7 に示す。トルエン添加量 50vol%で成膜した膜は、画像からも凝集が少なく、また粒子間距離のバラツキも小さい結果となり、成膜後も分散性が保たれていた。

Table 2 HSPs of Fine Silica Particles and Silicone Resin

	[(MPa) ^{1/2}]		
	δ_d	δ_p	δ_h
Fine Silica Particles	19.0	8.4	11.3
Silicone Resin	24.8	10.2	10.8

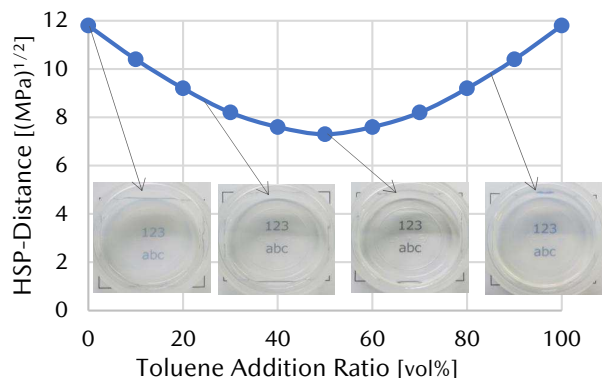


Fig. 6 HSP-Distance of Fine Silica Particles and Silicone-Toluene Solution

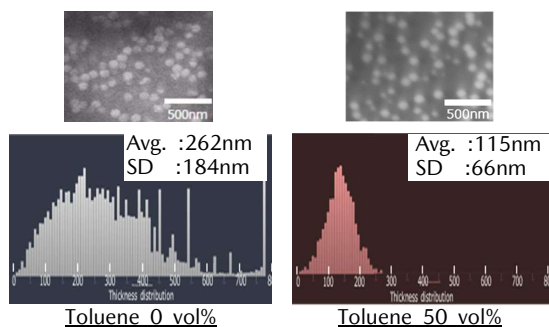


Fig. 7 Cross-Sectional SEM Image of Hardened Film, and Analysis Result of Distance between Particles

5.2 微細シリカ粒子を複合した高応答遮熱材料の特性

(1) 膜構造

微細シリカ粒子を 20vol% 配合した膜の断面写真を Fig. 8 に代表として示す。膜中に中空粒子の凝集や塗装に起因するボイド欠陥などは認められず、また中空粒子間の隙間に微細シリカ粒子が良好に分散・充填できていた。

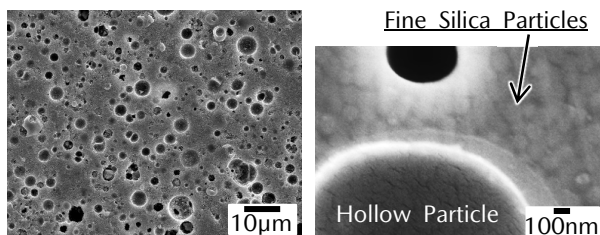


Fig. 8 Cross-Sectional SEM Image of High-Response Heat Insulation Material

(2) 体積収縮率

膜体積収縮率を算出した結果を Fig. 9 に示す。微細シリカ粒子の配合率増加に伴い体積収縮率は低減し、内部応力の発生を低減できることが示唆された。

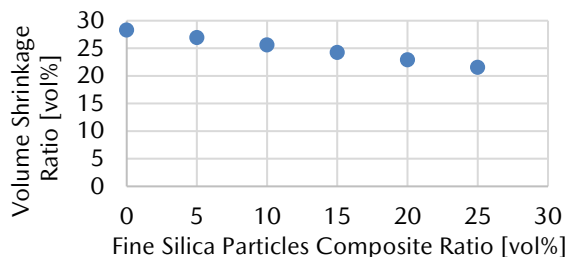


Fig. 9 Results of Volume Shrinkage Ratio

(3) 硬度

成膜後と大気中 773K で 6h 加熱後の膜の測定結果を Fig. 10 に示す。微細シリカ粒子の配合率増加に伴い、引っかき硬度は上昇する傾向を示した。一方、配合率が 30vol% になると硬度は低下した。これは微細シリカ粒子の充填不良に伴うボイド欠陥発生の影響であった。

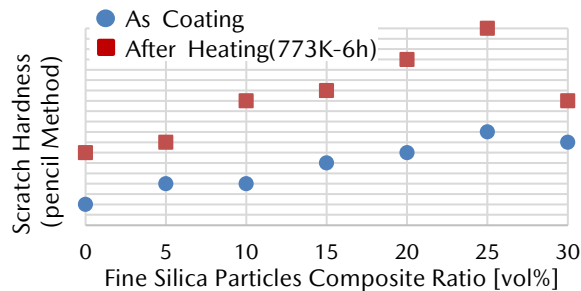


Fig. 10 Results of Scratch Hardness Test

(4) 強度、破壊じん性

成膜後と大気中 773K で 6h 加熱後の膜の強度測定結果を Fig. 11 に示す。なお、成膜後の値は微細シリカ粒子 0vol% 時の値を 1 として、加熱後の値は微細シリカ粒子 5vol% 時の値を 1 として正規化している。微細シリカ粒子の配合率増加に伴い、強度は上昇する傾向を示した。

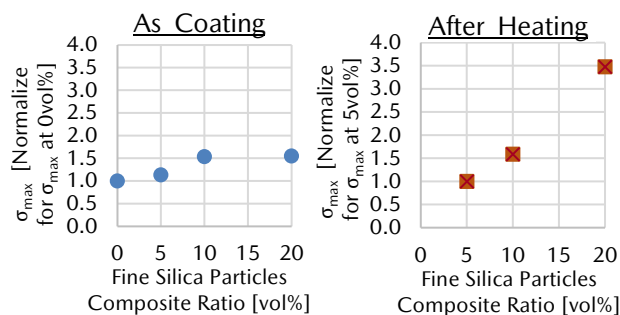


Fig. 11 Results of Strength Test

また、破壊じん性については、齊藤らの報告⁽⁸⁾で、押し込み型試験で得られた強度と破壊じん性の間に比例関係が認められており、本検討材料でも、破壊じん性の向上が期待できた。そこで、金属基材上に成膜した試験片を大気中 773K で 6h 加熱した後のクラックの発生状況を観察した。結果を Fig. 12 に示す。微細シリカ粒子の配合率の増加に伴いクラック数は減少しており、破壊じん性が向上した効果が現れていた。

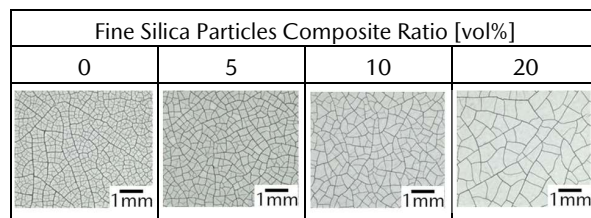


Fig. 12 Surface Photographs (After Heating Test)

(5) 熱物性

熱浸透率を算出した結果を Fig. 13 に示す。微細シリカ粒子の増加とともに熱浸透率は高くなることが確認された。一方、この測定値は、同図に示す高分散粒子の樹脂複合材料における熱伝導率予測モデルである Bruggeman

の式⁽⁹⁾から導出した熱浸透率の計算値とほぼ一致していた。よって、微細シリカ粒子の良分散により、粒子同士の接触・凝集で形成される不必要な伝熱経路は少ないことが示唆された。

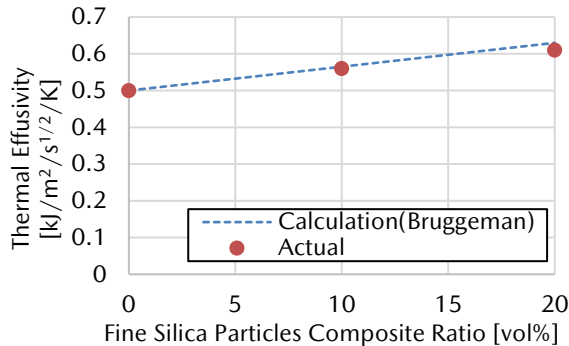


Fig. 13 Measurement Results of Thermal Effusivity

5.3 エンジン実機試験

(1) 燃費改善効果

評価結果を Fig. 14-1, Fig. 14-2 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。

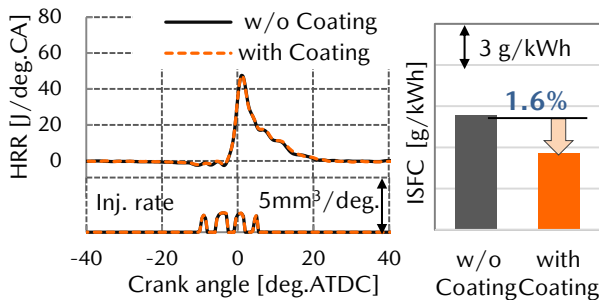


Fig. 14-1 Experimental Results of Engine Test (1500rpm-IMEP 375kPa, NOx 50ppm)

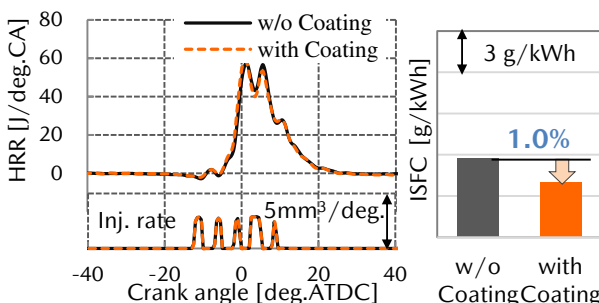


Fig. 14-2 Experimental Results of Engine Test (1500rpm-IMEP 720kPa, NOx 50ppm)

(2) 耐久性

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. 15 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。

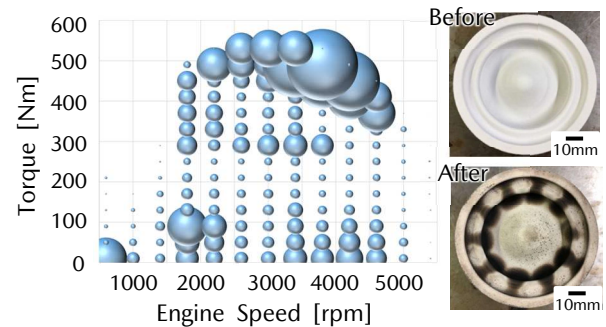


Fig. 15 Frequency of Engine Operating Condition, and Comparison Before and After Durability Test

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燃費向上効果と耐久性を確認した。結果、以下の知見を得た。

- (1) 微細シリカ粒子の分散性は、粒子と樹脂溶液（シリコン樹脂＋溶媒）の HSP 距離の制御で確保できた。
- (2) 微細シリカ粒子の複合化で、高応答遮熱材料の体積収縮率を低減でき、硬度、強度、破壊じん性は向上できた。また、粒子同士の接触・凝集の抑制で不必要な伝熱経路も少なくでき、熱浸透率と耐久性を開発ターゲットに入れることができた。
- (3) 中空粒子 50vol%、微細シリカ粒子 20vol%の遮熱材料を膜厚 50 μ m でピストンに施工しエンジン評価を行った。単気筒ディーゼルエンジンで約 1.0~1.6%の燃費改善ができ、またスーパー耐久レースエンジンの過酷な運転条件下でも損傷はなく、高い耐久性を有していた。

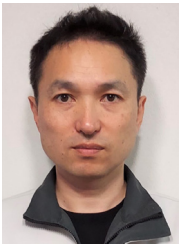
なお、本報告の高応答遮熱材料は、セラミック含有遮熱コーティング（Ceramic Infused Insulation Coating, CII Coating）として実用化検討を進めている。

参考文献

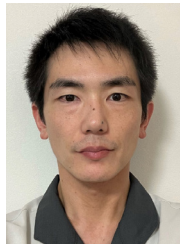
- (1) IEA: Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector, 2021
- (2) 角島信司ほか：エンジンの燃費を向上する燃焼室高応答遮熱材料技術の開発、自動車技術、Vol.77, No.12, pp.58-63 (2023)
- (3) Cavina, N. et al.: Investigation of Knock Damage Mechanisms on a GDI TC Engine, SAE Technical Paper, 2017-24-0060 (2017)

- (4) 山本勉ほか：WC-Co 系超硬合金のエロージョン摩耗，粉体および粉末冶金，Vol.43, No.12, pp.1439-1443 (1996)
- (5) Börger, A. et al.: J. Eur. Ceram. Soc., Vol.22, pp.1425-1436 (2002)
- (6) 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., Vol.24, No.10, pp.4421-4432 (2023)
- (7) 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)
- (8) 斎藤雅弘ほか：微小試験片法による金属／セラミックス複合材料の破壊靱性評価，日本機械学会論文集 (A 編)，Vol.57, No.535, pp.525-529 (1991)
- (9) DAG Bruggeman: Ann.Phy., Vol.24, p.636 (1935)

■著者■



角島 信司



山本 一陽



岡田 健太



古賀 広之



金 尚奎



中島 研吾