

© 1989 ISIJ

技術報告

金属基複合材料のピストンへの応用

菅沼徹哉*・田中淳夫*

Application of Metal Matrix Composites to Diesel Engine Pistons

Tetsuya SUGANUMA and Atsuo TANAKA

Synopsis :

Aluminum based FRMs : Fiber Reinforced Metals (MMCs : Metal Matrix Composites) have been in use for the top ring groove of Toyota's diesel engine pistons since 1982.

At first, "KAOWOOL[®]" (alumina-silica short fiber) FRM as a standard grade and "SAFFIL[®]" (alumina short fiber) FRM as an upper grade were developed. These FRMs showed good wear resistance, as well as higher thermal conductivity and lower thermal expansion than conventional "Niresist" cast iron as the piston ring groove.

In the next step, corresponding to the demands for lower cost with higher strength and superior wear resistance, "ALSILON[®]" FRM was developed in 1987. The "ALSILON[®]" (crystallized alumina-silica short fiber) FRM gives both as good performance as "SAFFILL[®]" FRM and as low cost as "KAOWOOL[®]" FRM.

In the 3rd step, a new type of MMC has been developed in 1988 to improve higher temperature durability. The MMC is composed of hybrid reinforcements of the "ALSILON[®]" and NiAl₃ intermetallic compound particulates uniformly dispersed in the aluminum matrix. The NiAl₃ particulates are formed by *in-situ* processing and exhibits excellent adhesive wear resistance.

Thus, the MMC pistons have made a steady progress in the field of material and processing technology and their mass production scale has successfully increased up to more than 200 000 pieces/month (2.4 million pistons/year).

Key words : composite material ; aluminum base alloy ; ceramics ; casting ; intermetallic compound ; wear.

1. はじめに

金属基複合材料(以下 MMC)なかでも繊維強化金属(以下 FRM)は、強度・剛性・耐摩耗性・熱的寸法安定性などに優れた新材料として期待を集めている。しかしながら、コストが高くまた製造・設計技術が未成熟であること等により、開発課題が山積みの現状である。

トヨタ自動車(株)では、世界初の量産 FRM 部品として 1982 年よりディーゼルエンジン用のピストンを生産している。これは FRM の耐摩耗性に着目し、ピストンのなかでも摺動条件が厳しいトップリング溝部に用いて良好な耐久性を実現した製品である(Photo. 1)。このピストンは 1982 年の製品化以後、エンジンの性能向上に合わせて材質的にも種々改良が加えられ、採用機種及び生産量を増加させてきている(Fig. 1)。

本稿では、この FRM 耐摩環ピストンの進化について、

まとめて紹介する。

2. ピストン耐摩環について

従来、ディーゼルエンジン用のアルミニウム合金製ピストンで特に使用条件が厳しい場合には、ニレジスト鋼鉄(耐熱合金鋼鉄)製耐摩環が鑄ぐるまれていた。しかしながら、このニレジスト耐摩環はピストンの重量を増加させるとともに生産性も悪く、コストの上昇に結び付いていた。このような問題点を解決するため当初の FRMピストンを検討した¹⁾。

2.1 FRM 材料の選定

耐摩耗性を向上し、かつコストが比較的安価な強化繊維として Table 1 に示す 4 種類のセラミックス質繊維を選定した。これらを Fig. 2 に示す高圧鑄造法によりピストン用耐熱アルミニウム合金(JIS AC 8 A)と複合し、FRM を製作した。すなわち、上記候補繊維を所定の密

昭和 63 年 12 月 16 日受付 (Received Dec. 16, 1988)

* トヨタ自動車(株)材料技術部 (Material Research & Development Div., Toyota Motor Co., Ltd., 1 Toyota-cho Toyota 471)

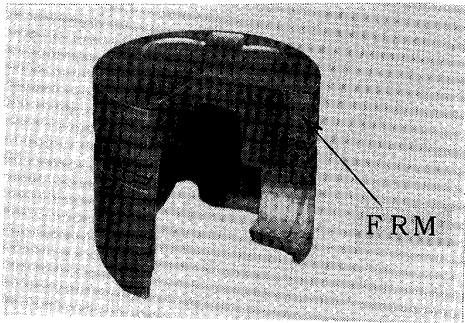


Photo. 1. Piston with FRM top ring groove.

Table 1. Physical properties of reinforcing fibers.

Fiber	Composition	Diameter (μm)	Density (g/cm ³)	Strength (MPa)	Modulus (MPa)
Potassium-titanate	K ₂ O(TiO ₂) ₆	0.2	3.3	>7 000	280 000
Carbon	Pitch carbon	12	1.8	1 100	60 000
Alumina-silica	Al ₂ O ₃ : 51% SiO ₂ : 49%	2.8	2.6	1 300	120 000
Alumina	Al ₂ O ₃ : 95% SiO ₂ : 5%	3.0	3.4	1 000	300 000

Table 2. Description of FRMs.

Composite	Fiber	Matrix	V _f (%)	Density (g/cm ³)	H. T.*
T-Al	Potassium-titanate	AC8A	9.8	2.8	T ₇
GC-Al	Carbon	AC8A	6.9	2.6	T ₇
AS-Al	Alumina-silica	AC8A	6.6	2.7	T ₇
A-Al	Alumina	AC8A	4.7	2.7	T ₇

* H. T.: Heat treatment

度に予成形して鋳型に配置し、溶融アルミニウム合金を注湯したのち上型にて加圧し、含浸凝固させる方法である。得られた FRM の諸元を Table 2 に示す。チタン酸カリウムウィスカーの場合、そのサイズが微細なことから繊維体積率を若干高めて約 10% とした。以下この材料を T-Al と呼ぶ。炭素繊維、アルミナ繊維、アルミナ-シリカ繊維の場合、繊維体積率は 5~7% とした。以下これらの FRM 材料をおのおの GC-Al, A-Al, AS-Al と呼ぶ。

Fig. 3 に示す方法でこれらの材料の摩擦摩耗試験を行った。この結果を Fig. 4 に示す。図中の縦軸は FRM (ブロック) の摩耗痕深さを示している。図より A-Al と AS-Al が耐摩耗性に優れ、特に A-Al はニレジスト鋳鉄に匹敵する耐摩耗性を示すことが分かった。

次に、この優れた耐摩耗性を示した A-Al と AS-Al について各種材料特性を調査し、ピストン用材料としての適合性を把握した。Fig. 5 は、FRM の室温、250°C、350°C における回転曲げ疲労試験結果を示す。図より室温の 10⁷ 回疲労強度はピストン用アルミニウム合金の

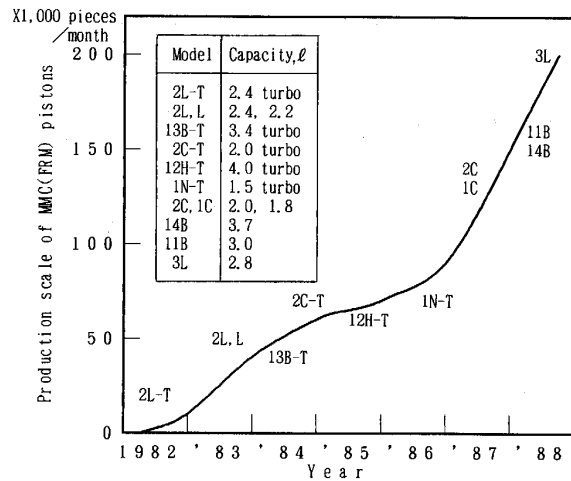


Fig. 1. Trends in production scale of MMC (FRM) pistons.

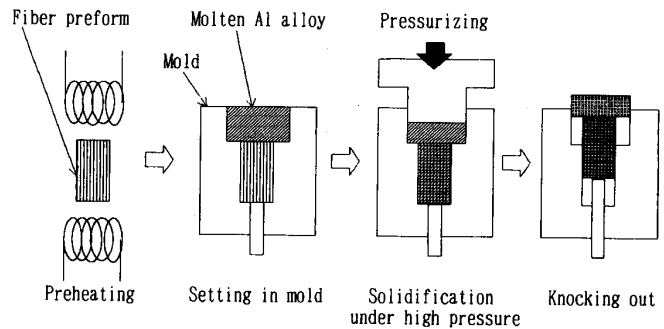


Fig. 2. Composite fabrication process.

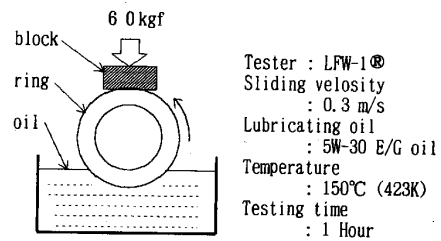


Fig. 3. Friction wear test procedure.

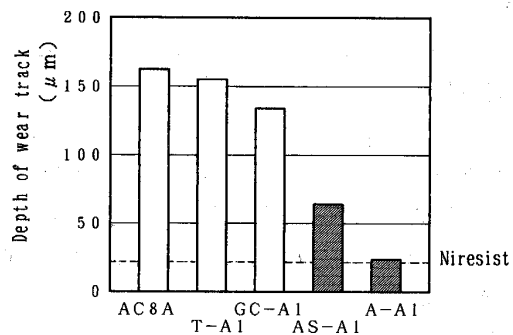


Fig. 4. Wear resistance of FRMs against piston ring material.

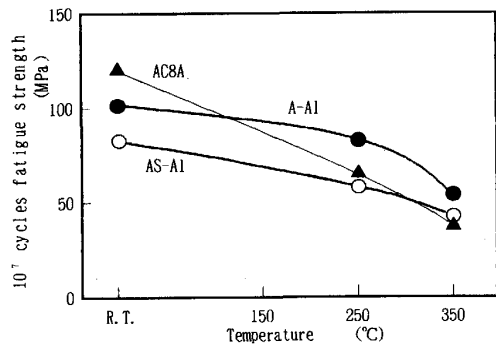


Fig. 5. Fatigue strength of FRMs.

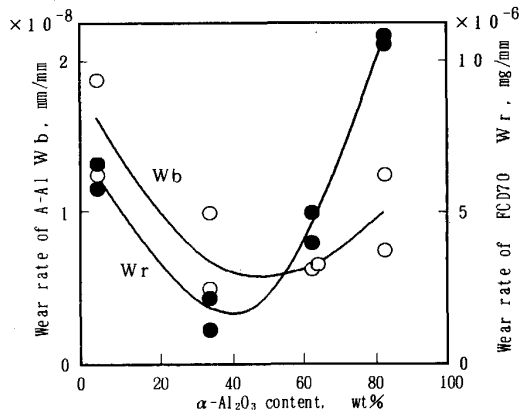


Fig. 6. Wear rate of A-Al and FCD70 (counter part) vs. α - Al_2O_3 content of A-Al.

AC8A より若干劣るものの、250°C 以上では同等かそれ以上の値であることが分かる。したがって、ピストンの実働条件では、FRM は十分な強度を有すると言える。この他、熱膨張率は AC8A に比べて約 8~15% 小さく、また熱伝導率も良好であるなど、ピストン用材料として好適であることが分かった。そこで本系材料の最適化について検討を進めた。

2.2 FRM 材料の最適化

FRM 材料を規定する要因は、繊維体積率・配向など種々考えられる。また、材料に要求される特性も多様であるが、ここでは A-Al について重要特性である耐摩耗性の最適化過程について述べる。

材料のスクリーニング試験 (Fig. 4) において A-Al は優れた耐摩耗性を示したが、欠点として摺動相手材の (この場合は鉄) 摩耗量の若干多いことが分かった。

そこでこの欠点を解決するために次の三つの項目について検討を加えた。

- (1) 繊維体積率の低下
- (2) 繊維の改良
- (3) 摺動相手材の選定

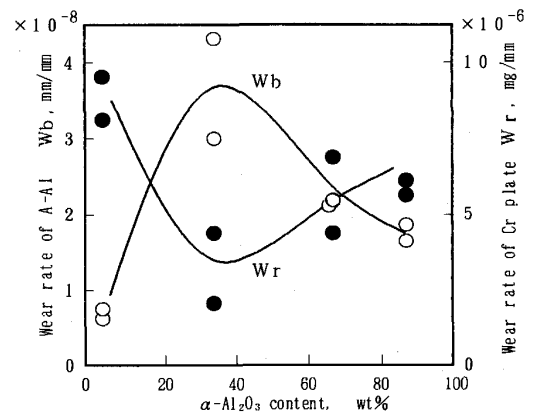


Fig. 7. Wear rate of A-Al and Cr plate (counter part) vs. α - Al_2O_3 content of A-Al.

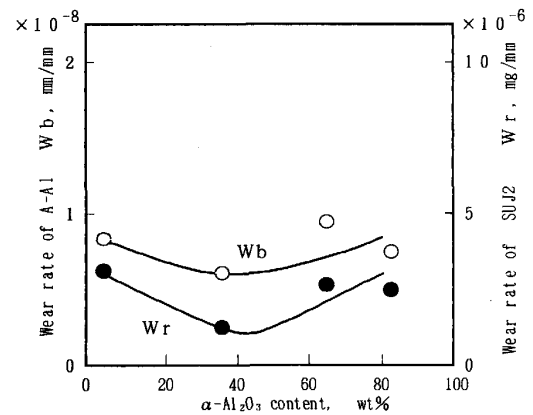


Fig. 8. Wear rate of A-Al and SUJ2 (counter part) vs. α - Al_2O_3 content of A-Al.

(1) については、成形体中繊維の均一分散や高圧鋳造含浸時の繊維成形体の変形など問題も多く、繊維体積率は平均 4% が最低ラインであった。一方 (2) については、繊維中の α - Al_2O_3 量により繊維の硬さが変化するという知見が得られ、これを基に (3) と同時に検討を進めた。Fig. 6~8 に、球状黒鉛鉄 (FCD 70) 硬質 Cr めっき、軸受鋼 (SUJ 2) を相手材とした場合の、繊維の α - Al_2O_3 量 (以下 α 化率と呼ぶ) と摩耗率の関係を示す²⁾。FRM のマトリックス Al 合金は AC8A であり、試験方法は室温条件で行った以外は Fig. 3 に示す方法と同じである。

いずれの場合でも、繊維で強化しない AC 8 A 合金よりも耐摩耗性は向上するが、その挙動は相手材により大きく異なる。相手材が SUJ2 の場合、A-Al と相手材とも摩耗は少なく、Cr めっきの場合は、 α 化率 30~40% で A-Al の摩耗率が最大を示すのに対し、相手材は逆に最小値を示す。FCD 70 の場合、 α 化率 30~40%

で両方の摩耗とも少なくなる。

相手材の摩耗率が α 化率 40% 前後で最小値を示すのは、Fig. 9 に示す繊維の硬さが α 化率 35% 付近で最小となることと良い対応を示す。相手材が SUJ-2, FCD 70 の場合にはアルミナ繊維の硬さが低いものほど、相手材・自身とも摩耗率が低い。Cr めっきの場合、 α 化率 35% 前後で摩耗が多くなるのは、アルミナ繊維の硬さが HV 900 程度とほぼ Cr めっきと同じになり、繊維が摩耗しやすくなるためと考えられる²⁾。

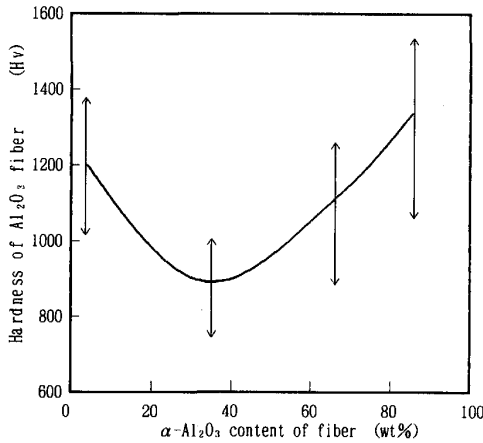


Fig. 9. Hardness vs. α -Al₂O₃ content of Al₂O₃ fiber.

Table 3. Description of FRMs.

FRM	Fiber			Fiber Vf (%)	Hardness of FRM (HV 10 kg)
	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	A.D.* (μm)		
A-Al	94~97	3~6	2.0~4.5	3.5~5.5	100~150
AS-Al	44~50	50~56	2.0~4.5	6.0~8.0	85~140

* Average diameter

上記の検討結果より A-Al のアルミナ繊維 α 化率として 35% を選定し、相手のピストンリング材として SUJ-2 相当の合金鋼を選定した。

その他の特性についても同様な検討を加え、Table 3 のごとく FRM 材料のスペックを決定した。2 種類の材質のうち A-Al の方は、AS-Al に比べ強度・耐摩耗性とも優れているがコストは高く、より厳しい条件で使用される過給ディーゼルエンジンに用いられる。一方、AS-Al は通常のディーゼルエンジンに用いられ、特性を生かした使い分けがされている。

3. 低コスト・高性能化への対応

以上述べたような材料開発及びその最適化の結果、第一段階の開発が完了し、FRM 耐摩環ピストンは順調に量産化されてディーゼルエンジンの高性能化と耐久性向上に大きな寄与を果たした。しかし、その後エンジン高性能化が更に進展するにつれ、カオウル系 FRM のレベルアップとサフィール系 FRM のコストダウンが求められるようになった。このような要求に対応し、第二段階として低コストかつ高性能の新 FRM 開発に着手した。以下この開発について述べる³⁾。

3.1 材料スクリーニング

新 FRM 材料の目的は、低コストでかつ優れた耐摩耗性および強度を得ることにある。このため、最初の FRM 開発で評価した繊維の枠を広げ、より幅広く強化用繊維の調査・検討を行った。この際、目標値としては耐摩耗性・強度をサフィール並み、コストをカオウル並みとした。

Table 4 に検討した候補繊維の代表例を示す。ここに、高アルミナ-シリカは、従来材のカオウルよりもアル

Table 4. Description of fibers studied.

Type		Chemical composition (wt%)		Microstructure	Diameter (μm)	Note
Conventional fibers	SAFFIL	Sa	95% Al ₂ O ₃ -5% SiO ₂	Crystallized	3.0	Commercial
	KAOWOOL	Ka	48% Al ₂ O ₃ -52% SiO ₂	Amorphous	2.8	Commercial
New fibers studied	High-alumina-silica	Ka55	55% Al ₂ O ₃ -45% SiO ₂	Amorphous	2.8	Commercial ○
		Ka60	60% Al ₂ O ₃ -40% SiO ₂		2.8	
	Crystallized alumina-silica	CK50	48% Al ₂ O ₃ -52% SiO ₂	Crystallized	2.8	○
		CK55	55% Al ₂ O ₃ -45% SiO ₂		2.8	○
		CK60	60% Al ₂ O ₃ -40% SiO ₂		2.8	○
	Mineral fiber Chopped glass fiber Potassium titanate whisker	MF	40~43% SiO ₂ -31~33% CaO-10~18% Al ₂ O ₃	Amorphous Amorphous Crystallized	3~6	Commercial Commercial Commercial
GF		52~56% SiO ₂ -16~25% CaO-12~16% Al ₂ O ₃	9~12			
TW		K ₂ O : 6TiO ₂	0.2~0.5			
Hybrid	Sa/MF	SAFFIL + Mineral fiber	Crystallized + Amorphous	—	○ ○ ○	
	Sa/Ka	SAFFIL + KAOWOOL		—		
	CK/MF	Crystallized alumina-silica + Mineral fiber		—		

○ : Investigated

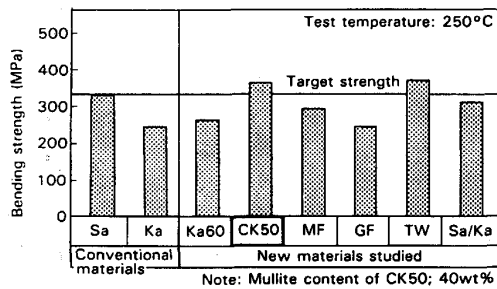


Fig. 10. Bending strength of FRMs investigated.

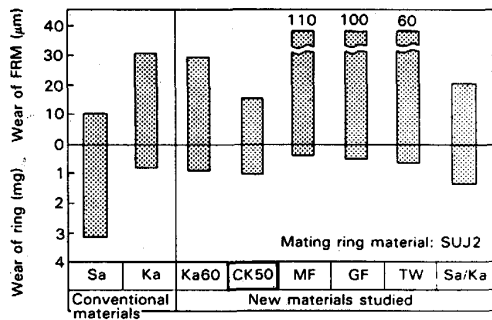


Fig. 11. Wear properties of FRMs investigated.

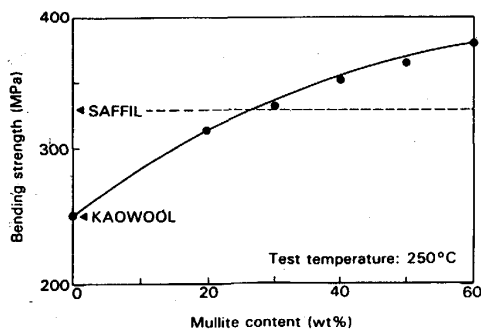


Fig. 12. Mullite content vs. FRM bending strength.

ミナ分の多い非晶質の短繊維であり、結晶質アルミナ-シリカは、非晶質アルミナ-シリカ繊維を熱処理して結晶質とした繊維である。また、鈹物繊維・ガラス繊維は代表的な低コスト繊維であり、ハイブリッドは高性能な結晶質短繊維と低コストな非晶質短繊維を混合した物である。これらの繊維を Fig. 2 と同じ方法で AC8A と複合し、強度と耐摩耗性を評価した。なお、繊維の体積率は、5~7% である。

Fig. 10 に三点曲げ試験による各 FRM 強度の例を示す。Fig. 11 に Fig. 3 と同様な方法で評価した耐摩耗性の結果を示す。ただしこの場合試験温度が室温であり、また相手材が軸受鋼 (SUJ2) である点が異なる。また、

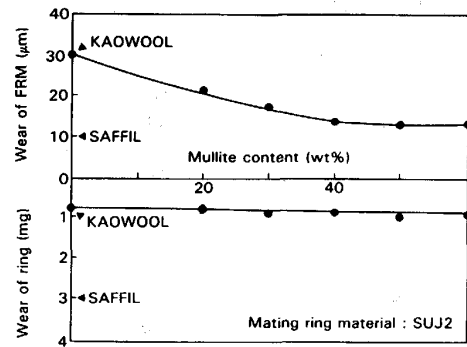


Fig. 13. Mullite content vs. FRM wear resistance.

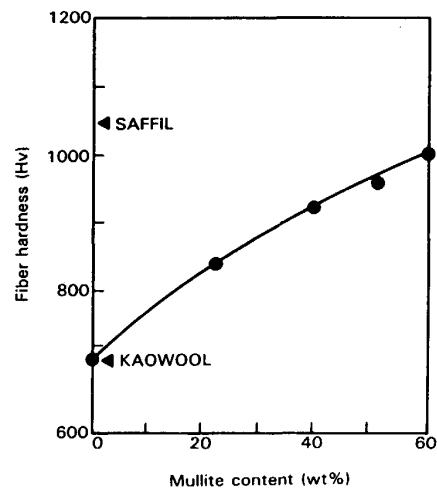


Fig. 14. Mullite content vs. fiber hardness.

図の縦軸は FRM ブロックの摩耗痕深さと相手材リングの摩耗減量を示している。

図より、CK50 (結晶質アルミナ-シリカ繊維)が強度・耐摩耗性とも目標値を満足する優れた特性を示すことが分かる。すなわち、強度は従来サフィールよりも高く、自身の摩耗量はサフィールよりも若干多いが、相手材摩耗量は、ほぼカオウール並みの低いレベルに保たれている。この結果より結晶化アルミナ-シリカ繊維を候補繊維として選定し、その結晶化量の最適化を行った。

3.2 結晶化量の最適化

繊維の結晶化は、原料のカオウールを 1200~1300°C の温度で熱処理することにより行い、これにより繊維はムライト結晶と非晶質の混合した構造となる。このムライト結晶量を種々変化させた時の強度と耐摩耗性の変化を Fig. 12, 13 に示す。図より FRM の強度はムライト量の増加にともない向上し約 30 wt% でサフィールのレベルを越える。一方、耐摩耗性もムライト量の増加にともない向上し、ムライト量 40 wt% 以上でサフィール並

みのレベルとなる。ここで、相手材の摩耗量がほとんど変化しないことが特筆される。以上の結果より新 FRM 用繊維としてムライト結晶量を 40~60 wt% 含むアルミナ-シリカ繊維を開発し、これをアルシロンと名付けた。

3.3 アルシロン FRM について

ここでアルシロンの耐摩耗性と強度が優れることについて、若干補足を加える。

繊維中のムライト量の増加にともない耐摩耗性が向上することは、Fig. 14 に示すように、繊維の硬さがムライト量の増加にともない上昇することと良い対応を示している。すなわち、非晶質のカオウール繊維中に硬いムライト結晶が析出することで繊維の硬さが上昇し、耐摩耗性が向上するものと考えられる。

FRM 強度が向上することは以下のようなメカニズムによるものと考えられる。非晶質のカオウールの場合、繊維とマトリックス合金 (AC8A) 中のマグネシウムが反応し、マトリックス中のマグネシウムがほとんど消失するとともに、繊維強度も劣化する。一方、結晶化してより安定な構造となったアルシロン繊維の場合、その反応性は低く、マトリックスや繊維の強度劣化は最小限に保たれる。EPMA により FRM 中の繊維周辺におけるマグネシウムの状態を観察した結果を Photo. 2 に示す。写真よりカオウールの周辺にマグネシウムが偏在してい

ることが分かり、上記のメカニズムが裏付けられる。このアルシロン系 FRM は、1986 年 9 月より実用化された。

4. 耐熱性向上への対応

FRM ピストン量産化以後 5 年が経過し、新しいディーゼルエンジンの性能向上に対応して、FRM 耐摩環にも耐熱性の向上が求められるようになった。ディーゼルエンジン用ピストンのトップリング溝の温度は従来 220~230°C であったが、当時計画中のピストンでは 250°C 程度の高温が予想された。このような高温では、アルミニウムが軟化し、いわゆる凝着摩耗の発生が予想された。この対策として、従来の FRM の概念を一步進めた第三段階の新規 MMC (金属基複合材料) 耐摩環を

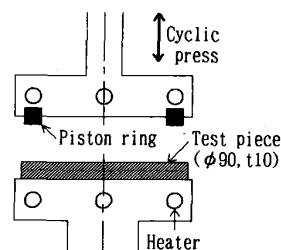
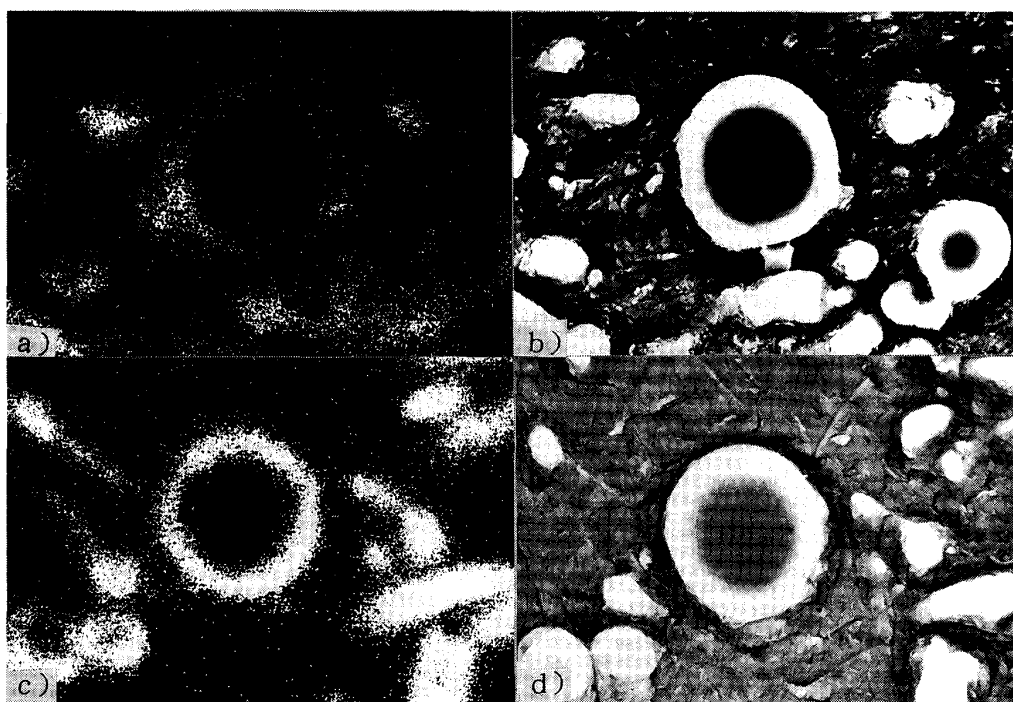


Fig. 15. Adhesive wear lab. test procedure.



a) Mg-Kα of ALSILON/AC8A b) SEM of ALSILON/AC8A
c) Mg-Kα of KAOWOOL/AC8A d) SEM of KAOWOOL/AC8A

Photo. 2. EPMA analysis focused on chemical reaction at the fiber/matrix interface.

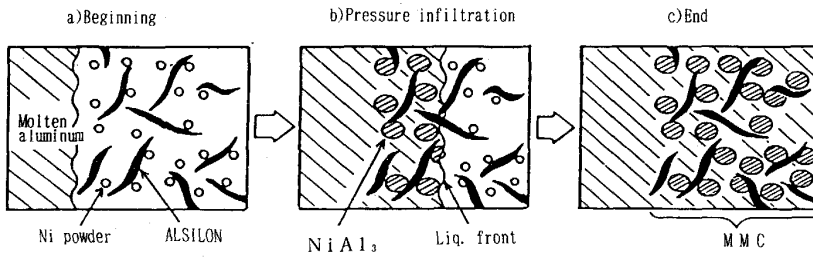


Fig. 16. *In-situ* fabrication method for $NiAl_3$ particulates formation during squeeze casting process.

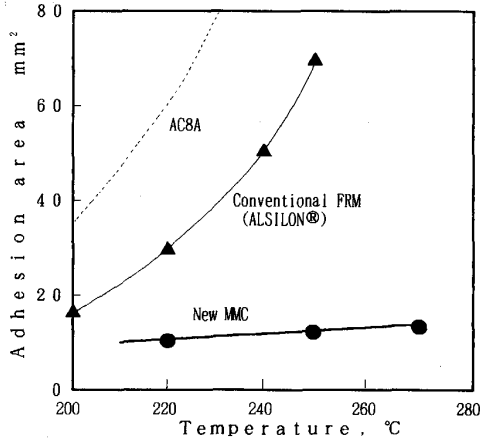


Fig. 17. Adhesion area vs. test temperature (accelerated condition).

開発した。この MMC 耐摩環の開発については別の機会に詳細を述べることにし、ここではその一端について簡単に述べる。

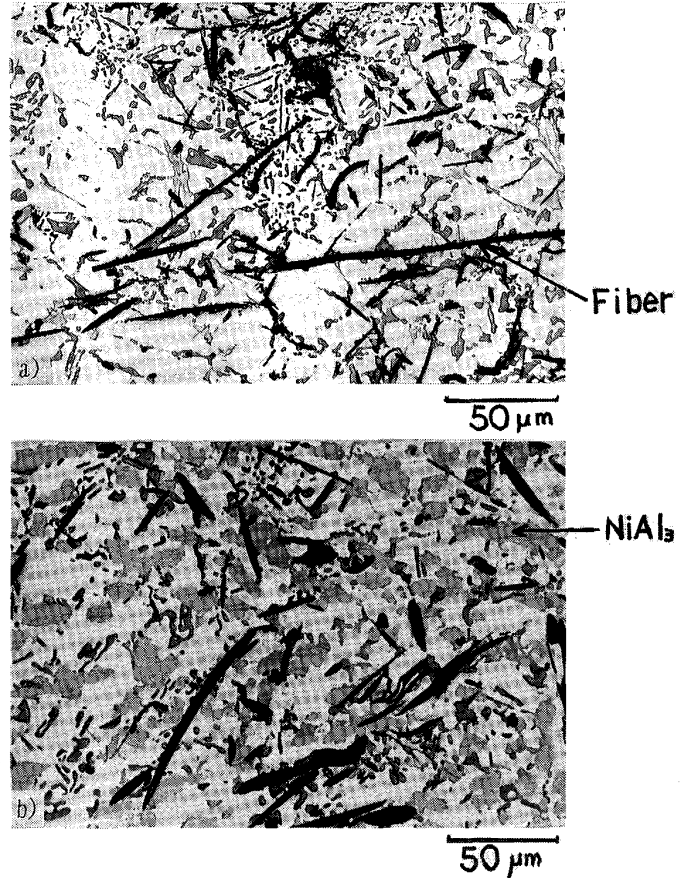
4.1 凝着摩耗について

新しい耐摩環材料の目的は、凝着摩耗の抑制にある。そこで、まず凝着摩耗現象の解析を行い、試験法の確立を行った。Fig. 15 に採用した凝着試験法を示す。ヒータにより加熱された試験片は、エアシリンダーによって駆動された相手リング材と叩き合わされる。所定の条件で試験した後、試験片上の凝着面積を測定し、材料の耐凝着性を評価する方法である。この方法により、各種候補材料の評価を行った。

4.2 耐凝着 MMC の開発

従来材 FRM の耐凝着性を向上させるためには、アルミニウム合金マトリックスの軟化を抑制し、あるいは相手リング材とのミクロな接触面積をできるだけ減らすことが必要と考えられる。この考え方にに基づき、先述のアルシロン系 FRM をベースに次の 5 種類の材料系列について評価・検討を行った。

- (1) 短繊維複合量増加
- (2) 短繊維とウイスキーをハイブリッド複合
- (3) 短繊維とセラミックス粉末をハイブリッド複合



a) Conventional FRM b) New hybrid MMC

Photo. 3. Optical micrographs of new MMC and conventional FRM (ALSILON).

- (4) 短繊維と純金属粉末をハイブリッド複合
- (5) 短繊維と合金粉末をハイブリッド複合

上記 5 系列 24 種類の MMC を評価した結果、(4)の短繊維/純金属粉末ハイブリッド複合 MMC の系列で、特にニッケル粉末を複合した場合に優れた耐凝着性を示すことが分かった。

ここで金属粉末をハイブリッド複合した狙いについて説明を加える。FRM ピストンの製造技術である金属溶湯の加压含浸法で複合材料を製造する場合、金属溶湯と強化材の反応が起こりやすいことはよく知られている。アルシロン開発の項でも述べたとおり、過度の反応は強

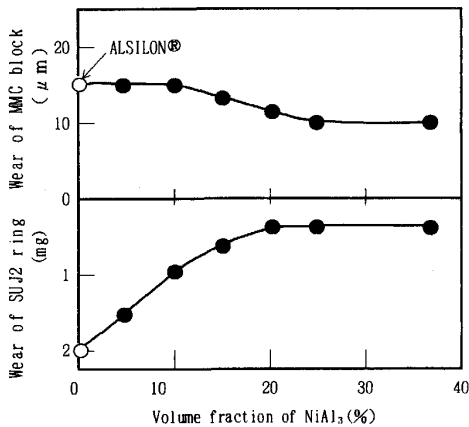


Fig. 18. NiAl₃ content vs. wear resistance of MMC.

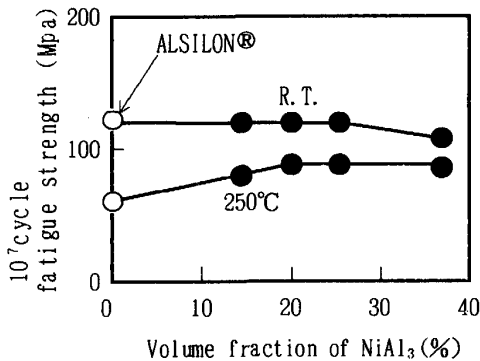


Fig. 19. NiAl₃ content vs. fatigue strength of MMC.

化材を劣化させるとして極力抑制するのが常識である。しかしながら逆の発想として、反応によりさらに強固な物質が安定的に生成できれば、従来の材料を上回る高性能な複合材料の製造が期待できる。このような狙いの下に、強化物質としての金属間化合物の形成を期待して、(4)系列のMMCを検討した。

このMMC製造過程の模式図をFig. 16に示す。まず、繊維と金属粉末が混在した成形体を用意する。これに適切な条件下でアルミニウム溶湯を加圧含浸させると、金属粉末は順次アルミニウムと反応し、金属間化合物を生成することとなる。Photo. 3は、このようにして製作したニッケル粉末入りアルシロン繊維成形体のMMC組織である。

以後この材料についてその各種特性を調査するとともに材質の最適化と製造条件の最適化を行った。

4.3 新MMCの特性と実用化

Fig. 17に新MMCの耐凝着特性を従来材に比較して示す。図の縦軸は凝着発生面積を示し、横軸は試験温度

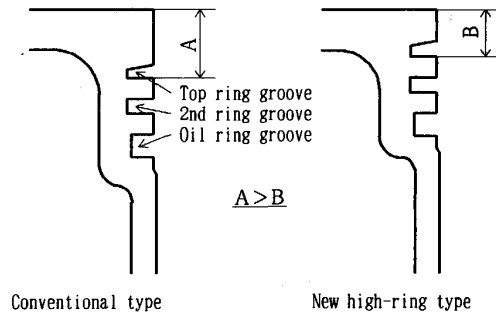


Fig. 20. Schematic view of conventional type and high-ring type piston.

を示す。図より新MMCの耐凝着性が従来材より遙かに優れ、しかも250°Cを越える高温領域まで安定した特性を示すことが分かる。Fig. 18は新MMCの摩耗試験結果を、Fig. 19は回転曲げ疲労試験結果を示す。図より、新MMCの耐摩耗性・強度とも従来材のカオウル、サフィールやアルシロンよりも優れており、ピストン耐摩環材料として好適であることがわかる。

開発された新MMCは、1988年8月より新型ディーゼルエンジンのピストンに採用されて性能向上と耐久性の向上に寄与している。特に耐熱性に優れることからピストンのトップリング溝位置を上げる(トップランド寸法を短縮する)ことが可能となり(Fig. 20)エンジン出力と燃費の向上に効果的であった。

5. おわりに

FRMを含むMMC(金属基複合材料)のピストン耐摩環への応用について振り返った。当初量産化したカオウル、サフィールに種々改良を加え、様々なニーズに対応できる技術へと質・量ともに成長してきたように思う。

しかしながら、今後ともエンジンの高性能化が予想される現在、ピストンへの要求は更に高度化してきている。このような状況のもとでMMC技術への期待も大きく、一層の飛躍が望まれている。

今後、リング溝部以外への応用(例えば頂面部など)、更にはピストン以外への応用が進み、MMC技術が成熟していくことを期待しつつ本稿を終わる。

文 献

- 1) T. DONOMOTO, N. MIURA, K. FUNATANI, and N. MIYAKE : SAE Technical Paper, No. 830252 (1983)
- 2) 不破良雄, 道岡博文: 潤滑, 30 (1985) 5, p. 365
- 3) M. KUBO, A. TANAKA and T. KATO : JSAE Review, 9 (1988) 3, p. 56