

# 特集 セラミックスと金属の焼付きメカニズム\*

## Seizure Mechanism of Ceramics with Metal

濱松宏武

村上洋一

杉浦慎也

堀内康弘

河籬実昌

Hirotake HAMAMATSU Youichi MURAKAMI Shinya SUGIURA Yasuhiro HORIUCHI Sanemasa KAWABATA

With this research, we examined the phenomenon of seizure between ceramics and metal, and for the first time highlight that the ceramic superficial voids influence seizure. Therefore we adopted  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramics, reduced superficial voids on roller materials of common-rail diesel fuel injection pumps, satisfied a claim against increasing contact pressure, and manufactured more than 1999.

**Key words** : Common-rail, Ceramics roller, Metal, Seizure, Superficial voids, Generation of heat, Adhesion

### 1. 序論

近年、自動車用ディーゼル、ガソリン噴射ポンプにおいては、排出ガス規制から噴射圧の高圧化が要求され、しゅう動部はますます苛酷な条件にさらされるようになってきている。これに伴い、材料面では、従来の金属系材料、熱処理からセラミックスやセラミックス系コーティングなどが用いられ、今後の更なる高圧化を考慮すれば、高性能セラミックスしゅう動材の開発が不可欠である。

セラミックスのトライボロジー研究は、従来より、耐摩耗性に関するものは多数行なわれている<sup>1)</sup>が、焼付き現象に関する研究例はほとんど無い。本研究では、セラミックスと金属の焼付き現象について、燃料雰囲気焼付き試験機、SEM内しゅう動部その場観察装置を用い、そのメカニズムを明らかにし、コモンレール式高圧ディーゼル噴射ポンプの重要なすべり接触しゅう動部品であるローラ部品に対して、耐焼付き性に優れた低ポイドセラミックスを初めて適用した。

### 2. 燃料噴射ポンプの焼付き

本研究では、高性能しゅう動材セラミックス開発の一ステップとして、ディーゼル燃料噴射ポンプを対象製品としてとり上げた。その燃料圧送部は、Fig.1に

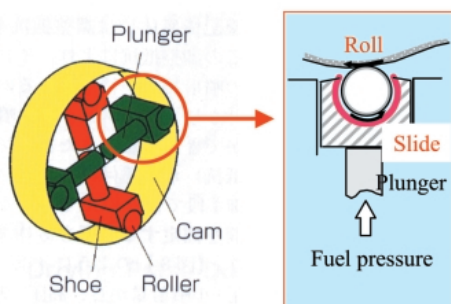


Fig.1 Products structure

示すように、外側のカムに沿ってローラが転がることで、プランジャが上下運動し、燃料を圧送する構造となっている。ここでローラとローラを受けるシュー間は高面圧なすべり接触となり、その耐焼付き性がポンプの使用限界を決定している重要な部位である。そのため、ローラ/シュー間の耐焼付き性向上がこのポンプ開発のキー技術となる。

開発当初、ローラ及びシューの材質はともにFe系材料を検討していたが、耐久試験にて焼付きが発生することから、凝着性の改善を目的にローラ材を窒化珪素セラミックス( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )に変更し、シュー材にはFe系材料上に油保持性のある化成被膜処理を追加したが、レベルアップはするものの、焼付きが発生するという問題が残った。

従来より、セラミックスは凝着し難いものと考えられていたが、今回のケースのようにセラミックス/金属間でも焼付きが発生することが分かったため、本報では、これを題材に、セラミックスと金属の焼付きメカニズムを解明、支配物性を明確化し、今後の材料開発の方向付けを行なった。

### 3. セラミックス焼付きメカニズムの推定

#### 3.1 実機耐久焼付き品の精査

実機耐久試験にて焼付いたローラ及びシューについて、形状測定、SEM観察及びEDX分析を行なった。結果をFig.2に示す。形状測定の結果、焼付き品でシューは大きく損傷しているものの、ローラはマクロ的にはほとんど損傷が見られていない。しかし、SEMにてしゅう動面をミクロ観察すると、セラミックス表面にはポイドが多数存在し、EDXによる面分析の結果、このポイド中にはFeが埋没していることが確認された。

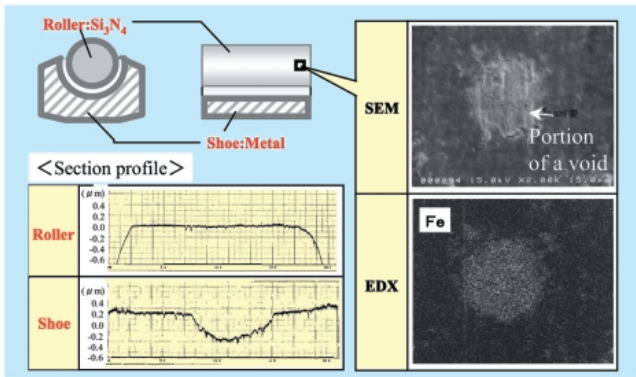


Fig.2 Investigation of roller and shoe

### 3.2 金属とセラミックスの焼付き特性の比較

次に金属とセラミックスについて、焼付き現象の相違点を明確にすべく、焼付き試験による特性比較を行った。評価は、Fig.3に示す燃料雰囲気焼付き試験機により行った。これは、バーベルとプレート形状の試験片を用い、回転数と荷重で制御ししゅう動させる装置である。評価は、実機最悪条件を想定し、軽油より粘度の低い灯油中（常温）にて行なった。しゅう速は4m/s、荷重はステップ状に付与し（50N/min）、摩擦係数が急激に上昇する値を焼付き荷重とした。供試材は、プレートには共通してSUJ2（焼入れ焼戻し材、Hv：750、Rz=0.2）を、相手材のバーベルには金属/金属のしゅう動としてSKH51（タフトライド処理材、Hv：1100、Rz=0.2）、セラミックス/金属のしゅう動としてSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>（Hv：1420、Rz=0.2）を用いた。

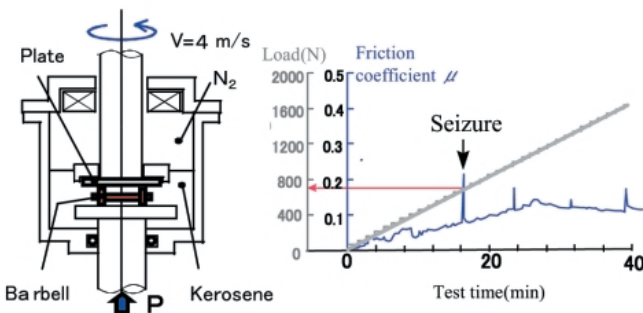


Fig.3 Experimental method

評価結果をFig.4に示す。金属/金属の組み合わせでは、初期よりμが大きく変動し、100Nで焼付いてしまうのに対し、セラミックス/金属では、安定なμを示し、1750Nと高い焼付き性を示したが、特徴として、初期より微小なμ上昇の傾向が見られた（図中 部）。

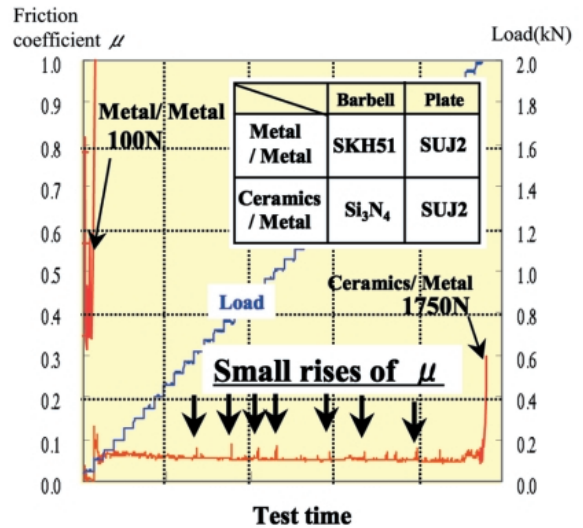


Fig.4 Result of friction test

### 3.3 焼付きメカニズムの推定

以上の調査結果から、セラミックス/金属の焼付きメカニズムを以下のように推定した（Fig.5）。

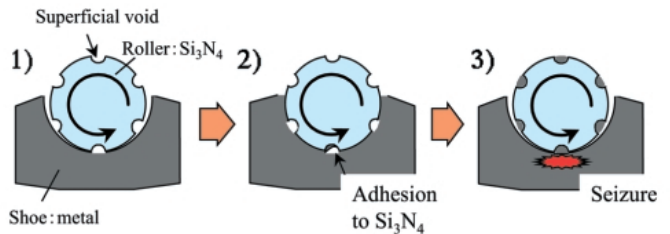


Fig.5 Hypothesis of seizure mechanism

- 1) 初期段階では、セラミックスの低凝着性のため、セラミックス/金属間は低摩擦にてしゅう動する
- 2) しゅう動により発熱が生じ、金属が軟化し、ポイドに移着し始める（この時、Fig.4で示した微小なμの上昇があると推察）
- 3) ポイドに金属が完全に埋没、金属/金属の同種材接触となり、μが上昇、焼付きが発生する  
この推定メカニズムに対し、焼付きの主要因と考えられるポイド及び発熱に着目し、検証を行なった。

## 4. セラミックス焼付き推定メカニズムの検証

### 4.1 評価方法

セラミックスの推定焼付きメカニズムに対し、本研究では、しゅう動部可視化によるその場観察を試みた。検証に用いたその場観察SEMの全景及び摩擦ステージの様子をFig.6に示す。本装置は通常のSEMのステージ部を改造し、SEM内にピン/ディスク試験を挿入

したものであり、しゅう動試験の様子をSEM像にて直接観察することが可能である。また、摩擦力（歪ゲージ）、荷重（ロードセル）、試験片温度（熱電対）、接触抵抗（電圧増幅器）の各波形をリアルタイムで測定できる。試験片には、ピンにSUJ2を、プレートにローラ材のSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>を用い、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>表面についてその場観察を行ない、セラミックスのポイドが焼付きに及ぼす影響を評価した。なお、ピンの先端はR = 1.0mm, Rz = 0.01であり、荷重は3.5 ~ 20N, 摺速は10 ~ 100mm/s, 試験環境は真空中, 常温とした。

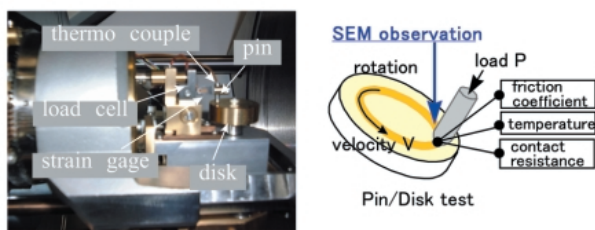


Fig.6 In-situ SEM and pin/disk test

また、実機条件（油環境中、高負荷）にてポイドが焼付きに与える影響を明確にすべく、前述の燃料雰囲気焼付き試験機による耐焼付き性の評価を行なった。評価条件は灯油中、常温環境下にて、しゅう速4m/s, 荷重は0 ~ 2000Nまでを毎分500Nの割合でランプ荷重（連続的に荷重を増加させる負荷方式）にて付与した。摩擦係数が急激に上昇する時の荷重を焼付き荷重とし、ポイド率の変化により焼付き荷重にどのような差が現れるかについて評価を行なった。

4.2 供試材

供試材をTable 1に示す。評価には、セラミックス材として窒化ケイ素（Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>）、相手金属材料としてSUJ2（焼き入れ焼戻し材）を用いた。加藤ら<sup>2)</sup>によれば、セラミックス材料の焼付き性は、表面のポイド量に大き

Table 1 Test specimen

	A	B	C	D	E	F
Void level*1	1	2	3	4	5	6
Surface roughness Rz (μm)	0.07	0.07	0.07	0.30	0.30	0.30
Hardness Hv	1450	1450	1450	1420	1420	1420
Strength (MPa)	1050	1050	1050	800	800	800
Heat conductance rate (W/(m·K))	27	27	27	30	30	30
Sintering process	HIP*2 Normal pressure	HIP Low pressure	HIP Normal pressure	GPS*3 Normal pressure	GPS Low pressure	GPS Normal pressure

\*1 As a figure is large, void % is large.

\*2,3 HIP:Hot Isostatic Pressing, GPS:Gas Pressure Sintering

く影響を受けるため、本研究では、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>のポイド径及びポイドが全体に占める面積率（以下ポイド率）の異なる6水準を試験片とした（その場観察は代表的な3水準のみ実施）。なお、本水準はSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>の焼成方法、成形圧等の条件を変えることにより作製した。

4.3 結果及び考察

4.3.1 ポイドの影響

SEMによるしゅう動部その場観察を行なった結果についてFig.7に示す。評価には、ポイドの影響を観察しやすい様にポイド径の大きいポイドレベル6のもの（ポイド径約50μm）を用いた。Feとセラミックスのしゅう動について、セラミックス表面の経時変化を観察した結果、セラミックスの焼付きは以下のようなメカニズムで起こることが分かった。

- 1) 初期はFeの凝着はなく、μは安定
- 2) Feがポイド部を起点として移着しはじめ、μの変化は少ないものの、一部で上昇の兆候が出現（Fig.7 部）
- 3) ポイド部にFeが埋没、同種材接触となりμが上昇（凝着）

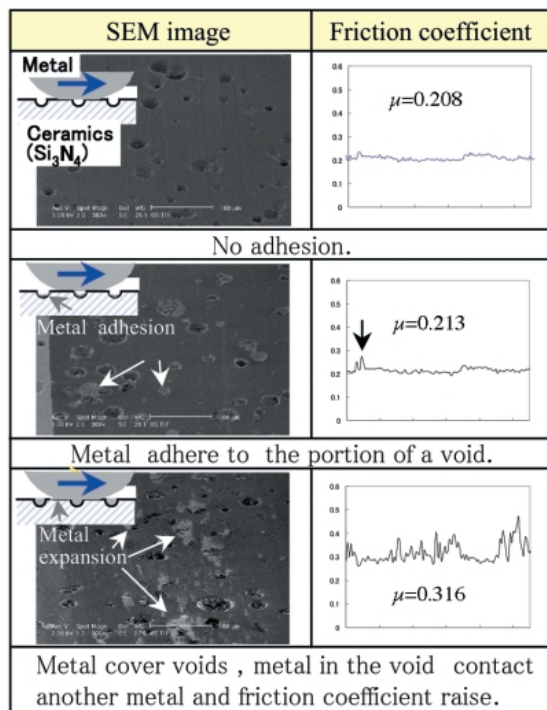


Fig.7 Result of observation by in-situ SEM



また、ポイド（率）の違いが焼付き現象にどのように影響するかを同装置を用い、同一条件下にて評価を行なった結果をFig.8に示す。ポイドレベル6のものでは、 $\mu$ が各所にて上昇し、ポイドレベル4のものでは、低 $\mu$ であるが一部で $\mu$ が上昇、またポイドレベル1のものでは $\mu$ の上昇はなく、安定した低い $\mu$ を示す結果を得た。

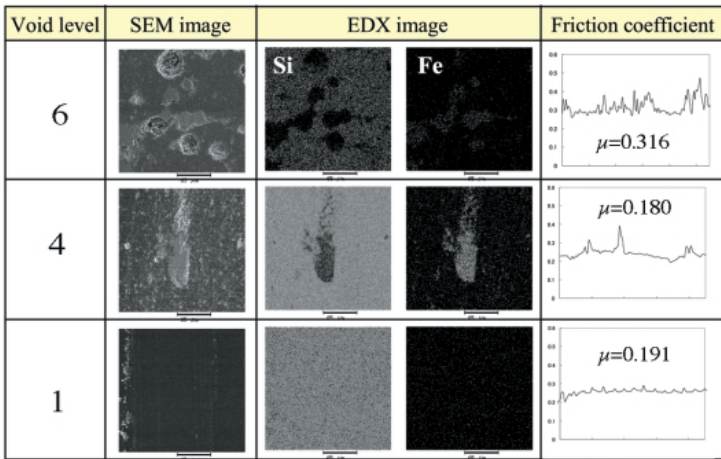


Fig.8 Result of observation at different void levels

次に、ポイドが実機条件（灯油浸漬、高負荷）にて、焼付き荷重に与える影響を明らかにするため、燃料雰囲気焼付き試験機による耐焼付き性評価を行なった。結果をFig.9に示す。ポイド率が低いほど、高い焼付き荷重となる傾向を示し、あるものは1000Nを超える高い焼付き荷重を示した。この結果は、その場観察による評価にて、同じポイドレベルのものではFeの移着、 $\mu$ 上昇が見られなかったことと一致する。

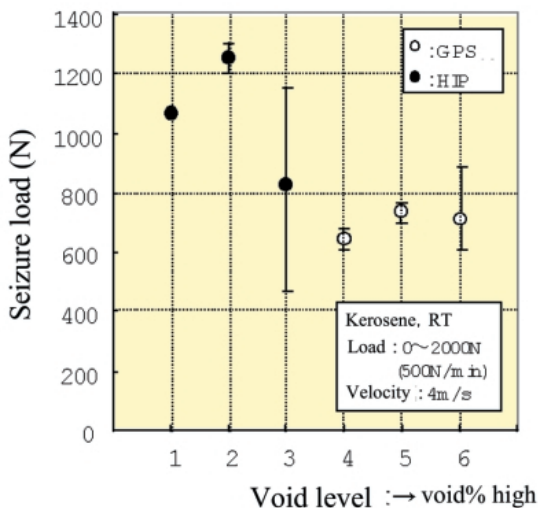


Fig.9 Result of seizure test

#### 4.3.2 発熱の影響

前節のメカニズム2)の段階にて、Feの軟化は摩擦熱により生じると予想される。そこで、摩擦発熱の観点より、Feの移着に関する評価を行なった。しゅう動部の作用面圧を $P$ 、しゅう速を $V$ とすると、発熱量は $Q = \mu PV$ で表されることが知られている<sup>3)</sup>。そのため $PV$ 値を変化させ、評価は前述同様にピン/ディスク試験にて行い、一定荷重にてしゅう速を変化させ、 $PV$ 値の変化に対してFeが移着し始めるまでのしゅう動距離の違いについて評価した。結果をFig.10に示す。 $PV$ 値の増加に対して、移着開始までの距離は減少傾向を示すのに対し、ピン先端の温度上昇( $\Delta T$ )はほぼ同程度の値を示す。これは、 $PV$ 値の増加に対し、発熱のエネルギー(=  $\mu PVt$ ,  $t$ : 時間)が減少かつ蓄熱のエネルギーが一定であることから、しゅう速が大きい程、放熱し難くなると考えられる。従って、セラミックスの焼付き性には放熱能力もまた重要な因子であり、表面のポイドとともに、相手材を含めた材料の熱伝導性も重要であると考えられる。

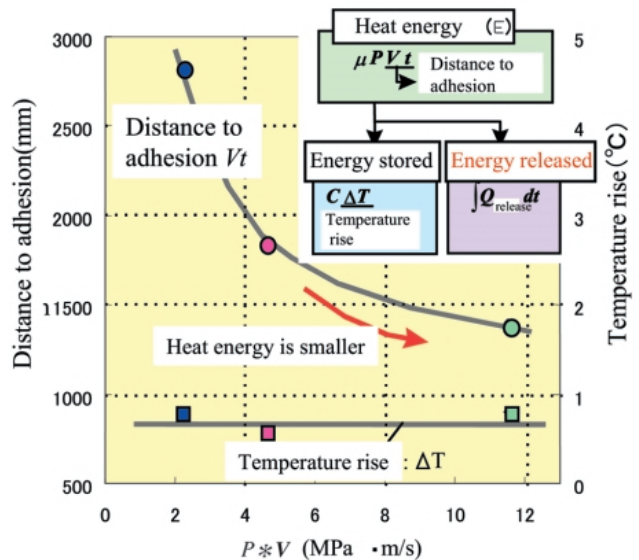


Fig.10 Relationship between  $PV$  and distance to adhesion

#### 4.3.3 しゅう動発熱の解析

セラミックスのポイド、熱伝導性がFeの移着に大きく影響していることから、セラミックス/金属のしゅう動には金属/金属の場合と同様に、しゅう動面温度の把握が重要と考えられる。そのため本節では、セ

ラミックス/金属のしゅう動面温度についてシミュレーション解析を行なった。解析のモデルは、セラミックスと金属が直径 $2a$ の円で接触していると仮定し、Jaegerの解析<sup>9)</sup>により表面温度を金属及びセラミックスの熱伝導率と $\mu PV$ により算出した(式(1))。ここで $\mu$ は、ポイドにFeが埋没した状態を想定し、Feとセラミックスの面積比より表される平均の $\mu$ 値を用いた(式(2))。Fig.11に解析結果を示す。

$$T_{max} = \frac{\mu PV}{Ka} \quad (1)$$

$T_{max}$ : 表面温度  $\mu$ : 摩擦関係  $P$ : 作用面圧  
 $V$ : しゅう速  $K$ : Fe,  $Si_3N_4$ の熱伝導率の和  
 $a$ : 接触部半径

$$\mu = \mu_{Fe} + (1 - \mu_{Si_3N_4}) \cdot \text{ポイド率} \quad (2)$$

$\mu_{Fe}$ : Fe/Feの摩擦係数  $\mu_{Si_3N_4}$ : Fe/ $Si_3N_4$ の摩擦係数  
 : ポイド率

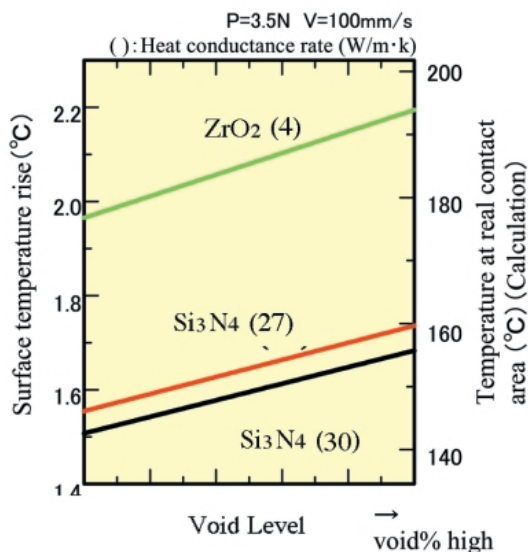


Fig.11 Result of heat simulation

熱伝導率の異なる $Si_3N_4$ ,  $ZrO_2$ について解析した結果、ポイド率が大きいほど、また熱伝導率が低いほど表面温度及び真実接触点温度(ヘルツ圧と硬度より算出される真実接触面積より計算)は上昇するという結果を得た。本結果より、セラミックスと金属をしゅう動させる場合、セラミックスはより低ポイド、高熱伝導性(放熱性が大)のものが望ましいと考えられる。

### 5. 実機確認

以上得られた知見に対し、実機確認を行なった。その結果をFig.12に示す。燃料噴射ポンプのローラ材と

してポイド率の異なる3水準について行ない、実機環境である軽油中にて試験を行った。ポイド率が高いもの(ポイドレベル5, 6)では焼付きが発生するが、ポイドレベル1のものでは焼付きは発生しないことを確認した。なお、表面ポイドを低減した高熱伝導性 $Si_3N_4$ セラミックスをコモンレール式噴射ポンプのローラ材として採用し、高面圧化に対する要求を満足し、1999年より流動した。

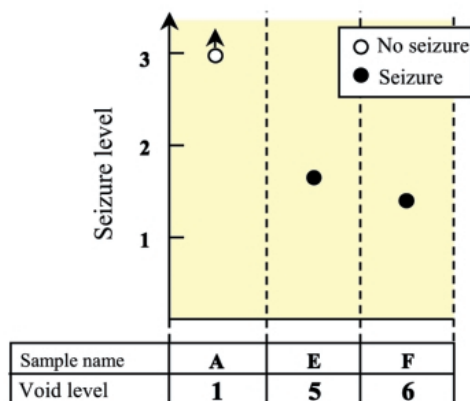


Fig.12 Result of products test

### 6. 結論

高性能セラミックス材開発の一ステップとして、ディーゼル用燃料噴射ポンプの $Si_3N_4$ ローラを例に、セラミックスの焼付きメカニズムについて検討した結果、

- 1) セラミックスの焼付きは、相手金属がしゅう動発熱により軟化 セラミックスポイド部に埋没成長 金属同士のしゅう動  $\mu$ 上昇によって生じる。
- 2) セラミックスの焼付きの支配因子はポイドと熱伝導性であり、高性能セラミックスの材料開発には、低ポイド化と高熱伝導率化が重要である。

### <参考文献>

- 1) 例えば 堀切川, 他: トライボロジー会議 '96東京予稿集(1996), p.229.
- 2) 加藤, 他: 豊田織機技報, 13(1986), p.37.
- 3) 木村, 他: トライボロジー概論(1982), pp.168-169.
- 4) 山本, 他: トライボロジー(1998), pp.49-54.



< 著 者 >



濱松 宏武  
(はままつ ひろたけ)

材料技術部  
トライボロジー技術に関する研究に  
従事



村上 洋一  
(むらかみ よういち)

材料技術部  
トライボロジー技術に関する研究に  
従事



杉浦 慎也  
(すぎうら しんや)

材料技術部  
トライボロジー技術に関する研究に  
従事



堀内 康弘  
(ほりうち やすひろ)

ディーゼル噴射技術部  
コモンレール式噴射ポンプの開発・  
設計に従事



河鱒 実昌  
(かわばた さねまさ)

材料技術部  
トライボロジー技術に関する研究に  
従事