亜鉛めっき浴中における $\text{TiB}_2/\text{SiAlON}$ 複合セラミックスの摩擦・摩耗特性中川師夫・酒井淳次・大八木智仁[†]・大河内敬彦^{*}

(株)日立製作所日立研究所, 319-12 茨城県日立市久慈町 4026

^{*}(株)日立製作所日立工場, 317 茨城県日立市幸町 3-1-1Friction and Wear Properties of $\text{TiB}_2/\text{SiAlON}$ Composite Ceramics in a Zinc Plating BathMitsuo NAKAGAWA, Junji SAKAI, Tomohito OHYAGI[†] and Takahiko OHKOUCHI^{*}

Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd., 4026, Kuji-cho, Hitachi-shi, Ibaraki 319-12

^{*}Hitachi Works, Hitachi, Ltd., 3-1-1, Saiwai-cho, Hitachi-shi, Ibaraki 317

Friction and wear properties of $\text{TiB}_2/\text{SiAlON}$ composite ceramics slid against SiAlON ceramics were investigated in a zinc plating bath and in air. Friction coefficient of $\text{TiB}_2/\text{SiAlON}$ in a zinc plating bath was found to decrease monotonically from 0.5 to 0.1 when TiB_2 content was increased from 0 to 80 mass%, but it did not change in air with increasing TiB_2 content and was about 0.5. No wear was observed for $\text{TiB}_2/\text{SiAlON}$ although hard particles (dross) were present in the bath, because $\text{TiB}_2/\text{SiAlON}$ were harder than the dross. Improved lubrication afforded by better wetting between $\text{TiB}_2/\text{SiAlON}$ and the molten zinc may be the primary cause for the reduction of friction coefficient. [Received July 3, 1996; Accepted November 12, 1996]

Key-words: Hot-dip plating, Molten zinc, Friction and wear, SiAlON , $\text{TiB}_2/\text{SiAlON}$ composite ceramics

1. 緒 言

鋼板の防食を目的とした被膜形成法として、生産性に優れた連続溶融亜鉛めっき法が一般に採られている。近年は生産技術及び品質の向上により、自動車用鋼板等にも用途を広げ、生産量を伸ばしており、今後も発展していくものと予想される。

連続溶融亜鉛めっき装置では、鋼板が連続的に亜鉛めっき浴を通過する間に鋼板の表面に防食めっきがなされる。一方、めっき装置内で溶融亜鉛と直接接触する浴中部品として広く用いられている鉄鋼材料は、溶融亜鉛との反応により激しく溶損する。特に、シンクロールやサポートロールの軸受け部には滑り摩擦による機械的応力も加わるので損耗が著しく、製品の品質を維持するために短い周期でラインを停止して部品の交換や補修をしなければならず、生産性や経済性を著しく阻害している。したがって、これまでに鉄鋼材料の溶融亜鉛中での耐溶損性に関して多くの研究や改良がなされてきた^{1)~3)}。しかし、従来の鉄鋼材料ではその限界にきているものと思われる。そこで更に溶損しがたく摩擦・摩耗特性に優れた新しい材料が望まれており、上記ロール軸及び軸受けとしてサーメットやセラミックスの適用が試みられている^{4),5)}。

著者らは、溶融亜鉛中で種々の材料について溶損及び摩擦・摩耗特性を調べ、ロール軸などの摺動部品は、溶損(腐食摩耗)と機械的摩耗の相乗効果として激しい摩耗が起こるため耐食、耐摩耗性に優れたセラミックスが有望な材料であることを明らかにした^{6),7)}。しかし、溶融亜鉛と濡れないセラミックス同士での滑り摩擦では摩擦係数が大きく実用上問題があった⁶⁾。また、耐溶損性に優れ、しかも固体潤滑性を有する炭素系材料を一方に用いた軸受けでは、低摩擦係数は得られたが、浴中に浮遊する硬質異物が軸受け間に入り込み軟らかい炭素系材料を削るため、低摩耗は達成されなかった⁸⁾。現在は、セラミックスに付着する硬質異物を機械的に除去する方法により実機亜鉛めっき浴中ロール軸受けにセラミックスが使用されている^{9),10)}。

しかしながら、理想的な摺動部材として、耐溶損性に優れ、しかも溶融亜鉛を潤滑剤として活用することにより低摩擦が得られる硬いセラミックスの開発が要望されている。

本研究では、溶融金属との接触角が小さく、濡れやすいセラミックスとして知られているが焼結性が悪く、また低強度のホウ化チタン (TiB_2)¹¹⁾と、溶融金属との濡れ性は悪いが焼結性に優れ高強度の焼結体が得られるサイアロン (SiAlON) との複合セラミックスを作製し、 SiAlON を相手材として亜鉛めっき浴及び大気中で摩擦・摩耗特性を調べた。

2. 実験方法

2.1 試料の作製

試料名と原料の組成を表1に、また試料の作製工程を図1に示す。

2.1.1 混合・乾燥

SiAlON 焼結体を得るための原料粉としては、平均粒径1.5 μm の Si_3N_4 (電気化学工業製, SN-9S) を85 mass%, 平均粒径0.3 μm の Al_2O_3 (高純度化学研究所製) を5 mass%, 平均粒径3 μm の21R ポリタイプ AlN (Lucas 製) を3 mass%, 平均粒径1 μm の Y_2O_3 (高純度化学研究所製) を7 mass%を用いた。また、 TiB_2 として、平均粒径7 μm の TiB_2 (Starck 製) 粉末を用いた。表1の原料組成となるように SiAlON 原料粉100 g に対して所定量の TiB_2 粉末を混合し、これにアセトン150 ml を加えて、500 ml のボールミルで約24h 混合して

Table 1. Sample Names and Nominal Compositions of Powder Mixtures

Sample name	Component(mass%)	
	SiAlON	TiB_2
SiAlON	100	0
TB10	90	10
TB20	80	20
TB40	60	40
TB60	40	60
TB80	20	80

$\text{SiAlON} : 85\text{Si}_3\text{N}_4 + 5\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{AlN} + 7\text{Y}_2\text{O}_3$

[†] 現在：大阪大学医学部, 565 大阪府吹田市山田丘 2-2
Now with Medical Department, Osaka University, 2-2, Yamadaoka, Suita-shi, Osaka 565

Fig. 1

Fig. 2

Fig. 3

Fig. 1. Manufacturing process of samples.

Fig. 2. Schematic drawing of friction and wear testing machine.

Fig. 3. Geometry and dimension of specimens.

スラリーを得た。更に、スラリーをらいかい機により混合乾燥し、乾燥が終了した後に 5 vol% のポリビニールブチラール (PVB) を溶解したエタノールを加え、約 30 min 混合・乾燥した。これを 35 メッシュ (420 μm) のふるいにより分級して成形用粉末を得た。

2.1.2 成形・焼結

成形用粉末を直径 60 mm の金型に入れて 50 MPa の圧力を加え、直径 60 mm $\times$ 厚さ 20 mm の成形体を得た。次に、成形体をホットプレスにより、約 15°C/min の速度で 1500°C に加熱し 1h 保持した後、約 20°C/min の速度で降温して TiB₂/SiAlON 複合焼結体を得た。雰囲気は昇温時に 1000°C までは 80 Pa に減圧し、次いで冷却終了まで 500 kPa の窒素ガスとした。また、圧力は昇温時 1000°C までは常圧、次いで 30 MPa の荷重をかけ、冷却時に 1000°C に達した時点で圧力を解除した。ただし、TiB₂ を含まない SiAlON は常圧焼結した。

2.2 試料の組織及び機械的特性試験

2.2.1 組織及び組成分析

各試料の表面を 1 μm ダイヤモンドペーストを用いて鏡面に研磨し、光学顕微鏡により組織観察を行った。更に、試料 TB20 について SEM 及び EDX により組成分析を行った。

2.2.2 X 線回折

試料 TB20 及び TB40 について X 線回折を行い、TiB₂/SiAlON 複合焼結体の結晶を分析した。

2.2.3 密度

各試料について、曲げ強度試験前の試験片の寸法をマイクロメーターで、また重量を電子天秤で測定し、これらの値から焼結体のかさ密度を算出した。更に、焼結体が β -SiAlON と TiB₂ のみからなると仮定した理論密度と焼結体のかさ密度とから相対密度を算出した。

2.2.4 曲げ強度

各試料の 4 点曲げ強度を、JIS R1601 の「ファインセラミックスの曲げ強さ試験方法」に従い、クロスヘッドスピードを 0.5 mm/min とし、各組成につき 5 本の試験片を用いて測定した。

2.2.5 ビッカース硬さ

各試料のビッカース硬さを荷重 100 N、負荷時間 15 s の条件で測定した。

2.3 摩擦・摩耗試験

2.3.1 試験装置

本研究に用いた試験装置の概要を図 2 に示す。本装置では、

縦型加熱炉内の熔融金属中に円筒状の回転試験片と、その側面に接触する固定試験片を浸漬し、加圧接触させて種々の液体中で温度：室温～800°C、回転数：0～800 rpm (滑り速度：0～150.8 m/min、ただし回転側試験片の半径：30 mm)、荷重：0～0.5 kN (面圧：0～2.8 MPa、ただし固定側試験片の接触面積：180 mm²) の条件で滑り摩擦・摩耗特性を評価することができる。

2.3.2 試験方法

試験片の形状及び寸法を図 3 に示す。回転側試験片としては常圧焼結法で作製した SiAlON 焼結体を用い、固定側試験片には図 1 の工程で作製した TiB₂/SiAlON 複合焼結体を用いた。摩擦・摩耗試験条件を表 2 に示す。面圧を 2 段階、滑り速度を 3 段階に変化させた。また、雰囲気は室温大気中と 480°C の亜鉛浴中の 2 種類とし、亜鉛浴で試験する際には、浴面にアルゴンガスを吹き付け熔融亜鉛の酸化を防止した。亜鉛浴としては実機連続亜鉛めっき装置で使われているものに近い組成で Al-Fe や Zn-Fe 化合物を含んだ 0.15 Al-0.1 Pb-Zn (mass%) を用いた。試験時間はおのおの面圧及び試験条件のもとで大気中では 5～10 min、亜鉛浴中では 30 min 以上とした。大気中では摩擦係数が大きいため試験時間は短くし、また高面圧、高速での試験は行わなかった。一方、亜鉛浴中では、各条件での初期摩耗が終わり摩擦係数が安定するまで試験を続行した。しかしながら、亜鉛浴中においても摩擦係数が大きく、また摩耗が激しい時は試験時間を短くした。

3. 実験結果及び考察

3.1 試料の組織及び機械的特性

3.1.1 組織及び組成

SiAlON 及び TiB₂/SiAlON の光学顕微鏡写真を図 4 に示す。図 4 (a) は SiAlON で 2～3 μm の気孔が見られる。図 4 (b)～(f) は TiB₂/SiAlON で SiAlON 中に粒径 5～10 μm の TiB₂ 粒子 (写真で白い部分) が分散しており、TiB₂ を多く含むものほど、分散量は多くなっている。気孔 (写真で黒い部分) は

Table 2. Experimental Conditions of Friction and Wear Tests

Atmosphere	Air	Molten Zinc
Temperature	R.T.	480°C
Contact pressure (MPa)	0.36, (0.97)	0.36, 0.97
Sliding speed (m/min)	15, 25, 40	15, 25, 40
Testing time (min)	5~10	30

*Composition of molten zinc : 0.15Al-0.1Pb-Zn(mass%)

Fig. 4. Optical micrographs of SiAlON and $\text{TiB}_2/\text{SiAlON}$ composite ceramics.

TiB_2 と SiAlON との界面に多く存在し、 TiB_2 の割合が多いほど多くなっていることが観察される。相対密度に比べ、写真において気孔が多く観察されるのは、断面の切削、研磨で表面の TiB_2 粒子の一部はく離・脱落したためと考えられる。

図 5 に TB20 の SEM 写真とそれに対応した Ti の面分析結果を示す。これより分散している粒子は Ti を含む成分、すなわち TiB_2 であり、得られた焼結体は、 β -SiAlON 中に TiB_2 が分散し、また TiB_2 の近傍には気孔が集中した構造の複合焼結体である。

3.1.2 X 線回折

TB20 及び TB40 の X 線回折結果を図 6 に示す。X 線回折図は、いずれも β -SiAlON と TiB_2 による回折ピークの重なりからなる。したがって焼結体は、 β -SiAlON と TiB_2 との混合物からなることが分かる。

3.1.3 密度

各試料の密度の測定結果を表 3 に示す。これより TiB_2 を多く含むほど相対密度が下がる傾向にはあるが、 TiB_2 を 80 mass% 複合しても相対密度 90% と高い焼結密度が得られた。また、 TiB_2 と SiAlON との界面は、 TiB_2 の割合が多いほど多くなり、 $\text{TiB}_2/\text{SiAlON}$ の気孔は主に焼結性の悪い TiB_2 と SiAlON との界面に生ずるので、それに伴って気孔の量も増加する。 TiB_2 複合率 20 mass% で密度が低下しているが、その理由としては、焼結温度が他のものに比べてやや高く、 TiB_2 の酸化または窒化反応¹²⁾が進んだためと考えられる。

3.1.4 曲げ強度

SiAlON 及び $\text{TiB}_2/\text{SiAlON}$ の 4 点曲げ強度試験結果を図 7 に示す。SiAlON に 10 mass% でも TiB_2 を複合させると、強度が SiAlON の約半分の約 430 MPa まで低下するが、10 mass% から 60 mass% まで増加した試料の強度は 400 MPa から 500

Fig. 5. SEM micrographs and Ti mapping of the surface in sample TB20.

Fig. 6. X-ray diffraction profile of samples TB20 and TB40.

Table 3. Density of SiAlON and $\text{TiB}_2/\text{SiAlON}$ Composite Ceramics

Sample name	Bulk density (Mg/m^3)	Ideal density (Mg/m^3)	Relative density (%)
SiAlON	3.31	3.31	100
TB10	3.40	3.38	99
TB20	3.30	3.50	94
TB40	3.62	3.71	97
TB60	3.73	3.94	94
TB80	3.80	4.21	90

Fig. 7. Flexural strength of SiAlON and TiB₂/SiAlON composite ceramics.

MPa 程度の値で変化は少ない。しかし、80 mass%まで増加すると、強度は再び低下し、300 MPa 程度となった。

TiB₂/SiAlON は物理・機械的性質の異なる材料を組み合わせ生成した材料であるので、強度は単一材料と異なり、マトリックスや複合材の性質ばかりでなく異種材料を結合した界面の影響も受ける。更に、セラミックスの強度は、気孔の大きさや気孔率に支配されることもよく知られている^{13),14)}。曲げ試験の結果から10 mass%の TiB₂の添加による強度の低下は TiB₂の強度が低い^{11),15)}ことに起因しているものと思われる。また、強度の変化を表3の相対密度や図4の光学顕微鏡写真から TiB₂/SiAlON 中の気孔率と関係づけて考察することができる。すなわち、TiB₂の複合率が10 mass%から60 mass%の範囲では、いずれも気孔は TiB₂ 粒子レベルの大きさで気孔率の変化も少なく、マトリックスである SiAlON 同士の結合がなされているので、この範囲の TiB₂ 複合率では、TiB₂の量にかかわらず強度がほぼ一定になったと考えられる。更に、TiB₂ 複合率が80 mass%に増加すると、図4(f)からマトリックスである SiAlON 同士の結合が途切れ、気孔の連結が観察され、相対密度も低下している。したがって、TiB₂ 複合率を80 mass%と増した際に強度が再び低下したものと考えられる。

3.1.5 ビッカース硬さ

TiB₂/SiAlON のビッカース硬さ測定の結果から、TiB₂ 複合率とビッカース硬さの関係を図8に示す。TiB₂ 複合率が60 mass%程度までは、TiB₂ 複合率の増加に伴って硬さが15 GPaから20 GPaに増している。この範囲の TiB₂ 複合率で硬さを支配するのは、焼結体を構成する成分の硬さと考えられる。TiB₂のマイクロビッカース硬さは約30 GPa¹¹⁾、また SiAlON のビッカース硬さは約15 GPaであるので、TiB₂ 複合率が多いものほど、硬さが高くなったと考えられる。更に、TiB₂ 複合率が80 mass%になると、相対密度が低下し、気孔の存在がマクロ的な硬さに及ぼす影響が強くなるために、硬さが下がったと考えられる。しかしながら、いずれの TiB₂/SiAlON においてもドロス (Al-Fe系で約7 GPa, Zn-Fe系で約4 GPa)⁹⁾よりも硬さが高く、ドロスによって摩耗されにくいことが予想される。

3.2 摩擦・摩耗特性

3.2.1 摩擦係数

回転側試験片を SiAlON、固定側試験片を SiAlON 及び TiB₂/SiAlON として大気中及び亜鉛めっき浴中で滑り摩擦させた場合の摩擦係数の測定例を SiAlON 及び TB40 について図9に示す。SiAlON 同士の摩擦では、大気中、亜鉛めっき浴中のいずれにおいても、摩擦係数は0.5付近の高い値を示し、摩擦時に高いきしみ音が発生した。これは、SiAlON が熔融亜鉛に濡れず、亜鉛めっき浴中においても SiAlON 同士が大気

Fig. 8. Hardness of SiAlON and TiB₂/SiAlON composite ceramics.

Fig. 9. Dependency of contact pressure and sliding speed on friction coefficient between (a) SiAlON and SiAlON, (b) SiAlON and TB40.

中と同様に乾式接触し、高い摩擦抵抗を示すためと考えられる。これに対し TiB₂/SiAlON と SiAlON との摩擦においては、大気中では0.5付近の高い摩擦係数を示すものの、亜鉛めっき浴中では大気中に比べ摩擦係数は低下した。また、この組み合わせの摩擦でも大気中では SiAlON 同士の摩擦と同様、高いきしみ音が発生するのに対し、亜鉛めっき浴中ではきしみ音は消え、熔融亜鉛が潤滑剤として働いたことが示唆された。

亜鉛めっき浴中での摩擦試験で、面圧を0.36 MPaで一定とし、滑り速度を15, 25, 40 m/minと変化した場合の TiB₂/SiAlON 複合焼結体中の TiB₂ 複合率と摩擦係数との関係を図10に示す。ただし、ドロスなどのかみ込みにより一時的に摩擦係数の上昇があったが、その値は除いて整理した。これより、TiB₂ 複合率の増加に伴い、亜鉛めっき浴中での摩擦係数は低下し、滑り速度が速いほど小さくなっている。特に、TiB₂ を80 mass%まで複合させることにより、亜鉛めっき浴中での摩擦係数は0.1前後の値となり、SiAlON と固体潤滑性を有する炭素材との組み合わせ⁶⁾と、ほぼ同じレベルに達した。

以上の結果より、TiB₂ による摩擦係数の低下は TiB₂ の割合が増加するほど顕著となり、液体が摩擦面に介在したときに特徴的な摩擦係数の速度依存性が見られた。したがって、SiAlON は亜鉛めっき浴中でも大気中と同様に摩擦係数が大き

Fig. 10. Effect of TiB_2 content on friction coefficient between SiAlON and $\text{TiB}_2/\text{SiAlON}$ composite ceramics in a zinc plating bath.

いのに対して、 $\text{TiB}_2/\text{SiAlON}$ が亜鉛めっき浴中で摩擦係数が低下する理由として、 TiB_2 を複合させることにより、SiAlON の熔融亜鉛に対する濡れが良くなり、熔融金属が潤滑剤として働くためと考えられる。

しかし、 $\text{TiB}_2/\text{SiAlON}$ の亜鉛めっき浴中での摩擦係数は、得られた最も低い値でも 0.05 程度であった。摺動部材間に摺動部の表面粗さより厚い境界膜が生成する流体潤滑によって潤滑が行われている場合には、摩擦係数は 0.01 以下のレベルになることが一般的であるので、ここで得られた結果は潤滑剤が関与する潤滑のモードとしてはストライベック曲線で示される境界潤滑と流体潤滑の間に存在する混合潤滑領域¹⁰⁾とみなされ、高速度ほど熔融亜鉛の摩擦面への流入が多く、流体潤滑効果が大きくなり、摩擦係数が低下したものと考えられる。

3.2.2 摩耗特性

大気中及び亜鉛めっき浴中で SiAlON と SiAlON を組み合わせた場合には摩擦係数が大きく、また高いきしみ音が発生したため、摩耗量の測定は行わなかった。

亜鉛めっき浴中で $\text{TiB}_2/\text{SiAlON}$ と SiAlON との組み合わせでの摩擦試験を行った場合の摩耗量は TiB_2 複合率にかかわらず、約 6 h、約 50,000 回転 (約 9.5 km) の摩擦試験後においても 0.1 mm 以下であり、これまでに SiAlON と種々の材料の組み合わせで得られた摩耗量⁷⁾に比較して微小であった。図 11 に亜鉛めっき浴中で測定した TB80 におけるドロスの巻き込みと摩耗挙動を摩擦係数と合わせて示す。円滑に潤滑されているときはばかりでなく、ドロスを巻き込んで一時的に摩擦係数が増大しても摩耗はほとんど進行していないことが分かる。すなわち、ドロスの巻き込みにより摩擦係数が一時的に増大した際に摩耗 (変位) は負の値を示すが再び元の値に復帰している。これは大きなドロス等が摩擦面に巻き込まれても、それが除去されると変位は元に戻り、摩耗でないことを示すものである。 TiB_2 複合率にかかわらず、 $\text{TiB}_2/\text{SiAlON}$ の摩擦試験では、図 11 と同様に、ドロス等を巻き込んで、それによって摩耗は進行しなかった。すなわち、円滑に摩擦しているときにはセラミックス間に潤滑膜が形成されており、またドロス等を巻き込んでも $\text{TiB}_2/\text{SiAlON}$ はドロスの 2 倍以上の硬さを有するため摩耗が生じにくいものと思われる。

4. 結 論

熔融亜鉛に対する SiAlON セラミックスの濡れ性の向上を図り、亜鉛めっき浴中で滑り摩擦した際に、熔融亜鉛を潤滑剤として活用できる低摩擦・摩耗摺動材の開発を目的として $\text{TiB}_2/\text{SiAlON}$ 複合焼結体を作製し、その機械的特性及び SiAlON と組み合わせた場合の摩擦・摩耗特性を大気中と亜鉛めっき浴中で評価し、以下の結果を得た。

Fig. 11. Change in wear amount and friction coefficient of TB80 sliding against SiAlON when dross is between the sliding faces in a zinc plating bath.

(1) ホットプレス法により複合率の異なる $\text{TiB}_2/\text{SiAlON}$ 複合焼結体を得られた。気孔は TiB_2 粒子の近傍に存在し、 TiB_2 の割合が増すにつれて上昇した。

(2) TiB_2 の割合が増すにつれて相対密度、強度ともに低下し、40 mass% $\text{TiB}_2/\text{SiAlON}$ では相対密度が約 95%、強度が SiAlON の約 1/2 に下がり、80 mass% $\text{TiB}_2/\text{SiAlON}$ では相対密度が約 90%、強度が約 1/3 に低下した。

(3) SiAlON 同士の摺動では、大気中、亜鉛めっき浴中共に約 0.5 と高い摩擦係数を示したのに対し、 $\text{TiB}_2/\text{SiAlON}$ は、大気中では SiAlON 同士の組み合わせと同様に高い摩擦係数を示したが、亜鉛めっき浴中では TiB_2 の割合が増すにつれて低下し、80 mass% $\text{TiB}_2/\text{SiAlON}$ では約 0.1 まで低下した。

(4) $\text{TiB}_2/\text{SiAlON}$ は、ドロスなどの硬質粒子を含む亜鉛めっき浴中においても摩耗は微小であった。

文 献

- 1) E. J. Daniels, *J. Metals*, XLVI, 81 (1931).
- 2) 中村 勇, 山根壽巳, 越久村信次, 日立造船技法, 21, 212-16 (1960).
- 3) 宇部善満, 森原豊多, 山崎大蔵, 中川義清, 岸川利一, 山口登男, 三菱重工技法, 7, 83-88 (1970).
- 4) 中平 宏, 原田良夫, 谷 和美, 小林圭史, 日本金属学会会報, 31, 446-48 (1990).
- 5) 可児保宣, 飯田芳彦, 中川師夫, 大河内敬彦, 木村光男, 日立評論, 72, 429-36 (1990).
- 6) 中川師夫, 酒井淳次, 大河内敬彦, 大越 斉, 鉄と鋼, 81, 989-94 (1995).
- 7) 中川師夫, 酒井淳次, 大河内敬彦, 大越 斉, 鉄と鋼, 82, 226-31 (1996).
- 8) 中川師夫, 荻原 寛, 酒井淳次, 大河内敬彦, 大越 斉, 材料とプロセス, 8, 1560 (1995).
- 9) 大河内敬彦, 川東民人, 中川師夫, 酒井淳次, 大越 斉, 材料とプロセス, 7, 1536 (1994).
- 10) 中川師夫, 酒井淳次, 大河内敬彦, 大越 斉, 鉄と鋼, 82, 689-94 (1996).
- 11) ゲ・ヴェ・サムソノフ, イ・エム・ヴィニツキー, “データブック高融点化合物便覧”, 日ソ通信社 (1977) pp. 287-91, pp. 399-409.
- 12) エル・エフ・ボイトヴィチ, “難融性化合物便覧—熱力学的特性—”, 日ソ通信社 (1971) pp. 12-20.
- 13) E. Ryshkewitch, *J. Am. Ceram. Soc.*, 36, 65-68 (1953).
- 14) W. D. Kingery, H. K. Bowen and D. R. Uhlmann, (小松和蔵ら共訳), “セラミックス材料科学入門 (応用編)”, 内田老鶴圃新社 (1981) pp. 779-82.
- 15) “94年度版ファインセラミックスデータブック”, 工業材料, 日刊工業新聞 (1994) p. 117.
- 16) 木村好次, “トライボロジーデータブック”, テクノシステム (1991) pp. 18-24.