シリコン粒子分散アルミニウム焼結含油軸受材料の 摩擦摩耗に及ぼす潤滑油と固体状潤滑剤の影響[†]

水 流 健 一^{*} 松 本 将^{**}

Effects of Lubrication Oil and Solid Lubricants on Friction and Wear Properties of Si-Particle Dispersed Al Sintering Bearing Materials

by

Kenichi TSURU^{*} and Susumu MATSUMOTO^{**}

The tribological properties of the new developed Si-particle dispersed Al sintering materials were investigated. The materials impregnated lubricant oil, semi-solid state Vaseline with solid lubricant and solid state Vaseline were experimented by using two disc end sliding contact testing machine. (1) The impregnated semi-solid state Vaseline with MoS₂ type solid lubricant has the effects on improvement of friction, wear and scuffing limit compared with the impregnated lubricant oil. The scuffing limit (PV value, P: contact pressure, V: sliding velocity) was improved about 45%. (2) The impregnated solid state Vaseline with MoS₂ is effective in improvement of the tribological properties for sliding bearing materials. The scuffing limit was improved about 52% compared with the impregnated material of lubricant oil.

Key words: Impregnation materials, Coefficient of friction, wear amount, Friction time, PV (Pressure Velocity) Value, SEM (Scanning Electron Microscope), EDS (Energy Dispersive x-ray Spectroscopy)

1 緒 言

機械要素の効率化は、環境負荷の削減に欠かせない課題である。なかでも、しゅう動材料の潤滑作用¹⁾は重要なもので、その要求は大きく地球温暖化対策の決め手につながる。潤滑の目的は、構成される材料の組み合わせや摩擦面の状態などに関係し焼付きを防ぐことを第一に、摩耗を少なくし、さらに摩擦を小さくする²⁾ことである。

一般的にAlは、しゅう動材料として鋼と摩擦させると局部的なホットスポットを発生して、鋼表面と凝着し、凝着物が酸化しやすい欠点もある。Alの酸化物(Al₂O₃)は、硬度が高く鋼や軸受のアブレッシブ摩耗³⁾の原因となることがある。

この異常摩耗を防止するため、鑄造材にはSiを添加することで材料強度と耐摩耗性を増す対策が考えられるが、材料マトリックスに残存するSi単体が原因で焼付きやすくなるため、従来はSi 0.3 ~ 4%以下⁴⁾程度の極めて微量な添加量に限られていた。このため利点があるにもかかわらず実用上多くの課題を残している。

著者らのこれまでの研究では、Alを焼結することで多量のSiを配合した場合⁵⁾のしゅう動特性を検討することを可能とした。摩擦性能を向上させる方法として素地よりも高融点、高硬度(HV1500)のSi元素を点在させる考え方を採用した。

軟らかい下地に高融点、高硬度の物質を点在させる考

え方については、BowdenとTaborによると⁶⁾摩擦に對する効果は認められていないが、Al焼結体には効果があることがわかってきた。これは、実用的な観点のみならず機械的強度などにも重要な意味を持つものである。

硬度の高いSi30wt%添加することで^{7~10)}荷重を支える役割を持たせ組織自体の最適化を図り目詰まり防止と空隙に潤滑油を含浸する、しゅう動材料の研究を進めてきた。

空隙に含浸された潤滑油は、温度の上昇により粘度が降下し漏洩による損失、飛散、損耗などで摩擦が不安定になる。持続的な安定を図るために、最適化されたAl焼結体を下地に、粘度を系統的に変化させながら、高い潤滑作用を持つ含浸材料の選定を進めた。

無理な運転により、潤滑膜を破断させないために、摩擦の低減をはかりながら、飛散や漏洩など摩擦面の置かれた環境や要求を満たすため摩擦の安定が求められる。

潤滑油は、経験的に10℃¹¹⁾高くなるごとに劣化速度が2倍の割合で進行し有機酸や重合、縮合等によりアスファルト状物質ができて酸化による低下が起きるといわれている。摩擦を安定させるには、種々の条件が整わなければならない。条件(高温、低温、真空など)によっては、必然的に潤滑油は使えない。物理的に安定した固体状の潤滑剤をさけては通れない。

そこで、せん断応力とせん断速度が比例する潤滑油と

[†] 原稿受理 平成24年9月21日 Received Sep. 21, 2012 ©2013 The Society of Materials Science, Japan

^{*} 学生会員 早稲田大学大学院情報生産システム研究科 〒808-0135 北九州市若松区ひびきの, Graduate Student, IPS, Waseda Univ., Wakamatsu-Ku, Kitakyushu, 808-0135

^{**} 早稲田大学大学院情報生産システム研究科 〒808-0135 北九州市若松区ひびきの, IPS, Waseda Univ., Wakamatsu-Ku, Kitakyushu, 808-0135

降伏点以上^{12), 13)}において流動が起きる固体状の潤滑剤を適切な方法(含油, 溶浸, 真空など)において含浸し, 摩擦挙動を検討することは, これまでに AI 系焼結体では確認されておらず実用的な観点からも注目に値する。

このうち, 半固体状(鉱油, 混成油に石鹼類が混和された状態)のものは, 粘着性があり多孔質に潤滑膜を作りやすいものと, 擦りつけると過半が摩擦粉となり転げおちるものがある。漏れにくく, 蒸発しにくいものを単一または複合しながら含浸した。

固体状の潤滑剤を分類すると, 結合強さと潤滑膜の形成および耐久性を考えた金属系, 圧縮に強くすべり性の高い有機系, 層状構造で, しゅう動性の高い無機系などに分類した。

組み合わせや潤滑法を正しく, 機械が必要とする条件を第 1 に, 環境と品質の観点から性能に見合った使い分け, 用途に応じた機能上, 性能上の効率化, 信頼性の面, 無公害の面, 資源有効利用の面, メンテナンスフリーなど役割は多岐にわたる。

本稿では, 持続可能な地球環境に役立てるしゅう動材料として, 省エネルギー化, 省資源化, 無事故化をコンセプトに潤滑油を系統的に変化させ, 粘度と摩擦摩耗の傾向および摩擦時間と摩擦係数の関係を検討した。

さらに, 固体状含浸材料について耐摩耗性および耐焼付き性の向上を図るために, 摩擦時間と摩擦係数を検討した。特定された含浸材料については, 限界面圧と限界 PV 線図および摩擦後のすべり面を観察した。

また, サイジングしたものを光学顕微鏡, 低真空走査電子顕微鏡 (SEM) およびエネルギー分散型 X 線分光分析 (EDS) により拡大観察した。

2 実験方法

2・1 実験試料

Si 配合量の最適比率を重量比で 30wt% とした。この比率を特定するにあたり 7 種類の重量比率 (0, 2, 6, 10, 20, 30, 40wt%) を配合して材料を試作¹⁴⁾した。Table 1 に示した配合量と純度の粉末原料を使用した。

粒度は, Si を除く 200mesh (インチ間目数) 以下の粉末と粉末潤滑剤ステアリン酸亜鉛 3wt% を配合し, V 型攪拌機で混合時間を 5h に設定した。

製法は, 混合, 成形, 焼結, サイジングおよび含浸処理の手順で実施した。

焼結条件は, 焼結温度 545℃で 60min 無酸化雰囲気 N₂ ガス 3ℓ/min の下で実施した。このとき, 焼結体の比重は 2.2 を示した。

本稿における潤滑油および固体状潤滑剤は以下のとおりである。潤滑油は 15, 72, 93, 95, 131, 136mm²/s の 6 種類を含油し, 含油処理は, 120℃ 60 分で徐冷した。

Table 2 は, 含浸した 6 種類の半固体および固体状の

Table 2 Melting point of the lubricant.

Lubricant	Vaseline	Wax	Grease	Sn	PTFE	MoS ₂
MP (°C)	38~60	61~	85	231	327	1185

潤滑剤 (Solid Lubricant) について溶融点を示した。

有機系の半固体状のものは, 溶融点で含浸したあと徐冷した。PTFE (ポリテトラフルオロエチレン) は, 懸濁液(揮発性の液体に分散)を含浸させ 327℃以上¹⁵⁾で焼成したものを実施した。また, 金属系の Sn は, 溶浸しサイジングしたものと表面を切削したものを試みた。無機系の層状構造 MoS₂ (二硫化モリブデン) は, ワセリンに 30wt% 配合して実施した。

2・2 試作材の機械的特性

試料の形状は, 内径 10mm, 外径 16mm, 幅 16mm の中空円筒で作成した。圧環強さ試験は JIS B 7721¹⁶⁾に基づき平行な平板に試作材を挟み垂直な圧縮力を作用させ環にクラックが発生する荷重 P を求めた。

圧環強さは 180 N/mm² 以上を示し, 硬さは HRF120 以上, 表面粗さ約 15μm (焼結孔の凹凸も含む) とし, 含油処理は JIS Z 2501¹⁷⁾の下で平均値 8wt% 以上 (含油率 ≤ 有効多効率) とした。しゅう動試験は, 円筒端面試験機を用い摩擦係数 μ を測定した。相手材の形状は, 内径 8mm, 外径 20mm, 幅 20mm の中空円筒とした。材質は S45C (HRC45) の表面を酸化クロムでバフ鏡面仕上げ (0.8μm) とした。摩擦係数 μ は式 (1) によった。半径 r は $f_{\pi}(r_{22}-r_{12})r = \int_{r_1}^{r_2} 2\pi r^2 dr$ から

$$\mu = \frac{R \cdot T}{W \cdot r} \quad (1)$$

摩擦試験機にセットする供試体の関係を Fig. 1 に示した。

粘度と摩擦摩耗の傾向は, 回転数 560rpm 荷重 5MPa の下で, なじみ¹⁸⁾時間を経て 5h を測定点とした。しゅう動試験は, 摩擦時間と摩擦係数の傾向を観察した。回転数 560rpm (0.38m/s) 荷重 5MPa とした。停止の目安は, しゅう動面から発煙を目視し摩擦係数 $\mu 0.15$ 以上を計測した段階で実験を停止した。また, 同じ条件下で, 固体状含浸材料について摩擦挙動を観察した。

また, 限界面圧特性は, 上部に軸材を置いて駆動し荷重は軸方向にスピンドルを介して段階的に増やした。軸の回転数を 560rpm, 10min 毎に面圧を 1MPa ずつ増加させて実施した。すべり面から発煙を確認または摩擦係数 $\mu 0.15$ 以上が測定された段階で焼付きと判定し実験を停止した。

2・3 Si 配合量 30wt% の焼結体の状態

2・3・1 焼結体の表面状態 Si 配合量 30wt%, 粒度 250mesh 焼結温度 545℃による焼結面を Fig. 2 に示した。凹凸は, 低融点金属と空格子点^{19), 20)} (Lattice vacancy) の移動による表面拡散 (Surface diffusion) の跡と推定される。

Fig. 2 の焼結面を切削し酸化クロムでバフ鏡面仕上げすると Fig. 3 の様な表面状態を示した。

粒子間は, 空隙 (潤滑貯蔵部) と粒界拡散などによる合金化および網目状の黒いコントラストが観察された。

Table 1 Composition of sintered materials.

	Al	Si	Cu	Sn	Sb	Mg
Composition wt%	Remain	30	4	4	0.6	0.6
Purity, %	99.5	99.0	99.7	99.9	99.0	99.0
S. gravity	2.7	2.33	8.96	7.3	6.62	1.74

Fig. 1 Sliding test apparatus.

- R : 軸心から測定点までの長さ (100mm)
 r : 積分半径 (mm)
 r₁ : 内半径 (5mm)
 r₂ : 外半径 (8mm)
 W : 荷重 (N)
 T : 測定点に作用する力 (N)
 f : 摩擦力 (N)

Fig. 2 Surface state of the aluminum sintered material.

2・3・2 サイジングの表面状態 サイジング表面を拡大観察して Fig. 4 に示した。表面は、空隙とみられる網目状の黒いコントラストが多数みられ多孔質であることが×100 と×500 でわかる。さらに×2,000 と×5,000 に拡大すると空隙の周りにグリース状の粘着 (Adhesion) した物がみられた。これは、サイジング前に塗布した潤滑油の塊状と推定される。

Fig. 3 Surface state after the polishing.

表面を EDS 分析してミクロ組織との関連を調べた。Fig. 7 は Fig. 5 から得られた EDS プロファイルを示す。図中では、矢印で示した様に C, O と S の元素が認められた。これらの元素は、サイジングで塗布した油に含まれることから Fig. 5 では、黒い塊状として観察されたとみられる。

Fig. 6 は、露出元素の分布状態を示した。白地の部分は、元素濃度が高く分布していることを示している。これから、Al の素地に Si 元素が分散し表面に露出していることが認められた。また、配合していない微量の Fe 元素が観察された。要因として、サイジングにおける押型の損耗が推定される。

3 実験結果および考察

3・1 潤滑油としゅう動特性

3・1・1 潤滑油の動粘度と摩耗摩擦の傾向 潤滑油 6 種類について 5MPa, 5h の下で動粘度^{21), 22)}と摩耗および摩擦係数の関係を Fig. 8 に示した。

動粘度の増加に伴い摩耗は、非線形で減少傾向がみられた。15 ~ 93mm²/s の間の減少に比べ 95mm²/s になると顕著になり最小値を示した。131 ~ 136mm²/s の間には、変化はなかった。

また、摩擦係数 μ は、動粘度の増加に伴い減少し、摩耗と同じ様な傾向がみられた。しかし、131mm²/s 以上になると摩擦係数に微増の傾向がみられた。潤滑油の動粘度は 95mm²/s 以上が適切と推定される。

3・1・2 潤滑油と摩擦挙動 5MPa, 560rpm の下で摩擦時間と摩擦係数の関係を Fig. 9 に示した。Fig. 4 のサイジング材について 6 種類を含油して、それぞれの摩擦特性を観察した。15mm²/s と 72mm²/s の摩擦挙動は、

Fig. 4 A surface state of sizing material.

Fig. 5 Macrophotograph of the sizing side.

Fig. 6 EDS element mapping analysis of after sizing.

Fig. 7 Exposure element distribution of the sintering surface.

Fig. 8 Relationship between viscosity and coefficient of friction and wear amount.

開始から $\mu 0.13 \sim 0.18$ 以上が認められ、なじみに 2h かかり 8h を過ぎると増加傾向がみられ、15h で $\mu 0.15$ 以上を示し停止した。

93 ~ 136mm²/s は、開始から $\mu 0.07$ 以下を示し、初期なじみ (Running in) に優れ 10h まで安定した潤滑作用が認められた。摩擦時間が 15h を過ぎて 20h を越えると無給油寿命 (枯渇) の傾向がみられ 40h で $\mu 0.15$ 以上を示し停止した。

この様に、動粘度による影響は、なじみにも現れ下地との被着性も高め潤滑作用に関係しているとみられた。

3・2 固体状の潤滑剤としゅう動特性

3・2・1 固体状潤滑剤と摩擦挙動 半固体状、固体状の潤滑剤について摩擦時間と摩擦係数 μ の関係を Fig. 10 示した。無数の空隙に固体状潤滑剤を含浸して適切な潤滑状態を示す材料を観察した。

金属系の Sn は、溶浸したあとサイジングして実施した。開始から 2h でなじみの傾向がみられたが、時間の経過に伴い表面に被着した Sn 同志の接触 (トモガネ) で振動がみられ、 μ は上昇を続けながら 8h で $\mu 0.15$ 以上を示し停止した。

Fig. 9 Relationship between friction time and coefficient of friction.

Fig. 10 Relationship between friction time and coefficient of friction.

これを受けて、すべり面の Sn を切削除去すると摩擦の改善と時間に延びがみられた。これから、Sn の被着は振動を伴いやすいとみられる。

また、有機系の PTFE は、揮発性の液体に分散して含浸させ、その後に揮発物を蒸発させて焼成したものを実施した。摩擦挙動は、 $\mu 0.09$ 以下を示しながら 10h 安定したが、時間の経過につれ上昇し 30h で $\mu 0.15$ 以上を示し停止した。

F 原子と C 原子からなる PTFE は、圧縮に強く、しゅう動性の高い材料とみられるが、空隙に含浸したものは、時間の経過にともない効果は期待できなかった。

汎用性の高いカップグリースは、加熱処理して進めた。開始から 15h まで $\mu 0.1$ 以下を示し、そのあと、摩擦上昇を続けながら、30h で発煙が目視され停止した。

有機系ワックスは、加熱処理して含浸した。開始から 10h のあいだ $\mu 0.08$ 以下を維持したが、時間の経過につれ変動がみられ、20h で $\mu 0.15$ を示し、発煙が目視され停止した。含浸、被覆されたワックスは、表面から剥がれ落ち、焼結体との粘着性に欠けた。主要構造は、炭化水素化合物で n が 20 以上のアルカン（一般の構造式から、 C_nH_{2n+2} 鎖式飽和炭化水素）である。

同じ有機系のワセリンは、 $\mu 0.06$ 以下で 200h 安定した状態がみられ、すべり面は潤滑膜を形成し粘着性のある潤滑物がみられた。構造式 C_nH_{2n+2} における n は、16 ~ 20 くらいの炭化水素の混合物で石油の分別蒸留による。

顕著な違いは、溶融点の許容範囲 (38 ~ 60°C) と組織自体への粘着性があり、潤滑性に優れた特性がみられた。

ワセリン MoS_2 (1185°C) 30wt% 入りの固体状潤滑剤は、ワセリン単体より 100h 安定した傾向がみられた。これは、圧縮に強く、しゅう動性の高い MoS_2 の潤滑作用と無数の空隙による含浸材料の安定供給が影響しているとみられる。

比較のため潤滑油の動粘度で最適とされた 95mm²/s に固体潤滑剤 MoS_2 10wt% を配合して摩擦挙動を試みたが 50h で停止した。単体に較べてわずかな改善で終わった。表面の無数の空隙から潤滑油の流失、飛散がみられた。添加された MoS_2 は、漏洩する潤滑油に誘導され流出を繰り返しながら消耗したことが要因とみられる。したがって、固体状含浸材料は、ワセリン MoS_2 30wt% 入りが好ましいとみられる。

3・3 限界面圧

3・3・1 潤滑油と限界面圧 動粘度 95mm²/s に関して耐荷重性と摩擦係数 μ の関係を Fig. 11 示した。開始から 5MPa まで安定した摩擦挙動がみられた。6MPa 以上になると上昇傾向になり、9MPa になると $\mu 0.1$ を示した。10MPa では $\mu 0.12$ となり、17MPa では $\mu 0.14$ を示し無給油寿命（枯渇）の兆候がみられた。18MPa では発煙が目視され停止した。このとき限界 PV 値は 6.46MPa・m/s を示した。

再現性をみると 10MPa 以上で摩擦挙動に違いがみられた。変動の少ないものは、含浸材料の再供給能力（供給と吸収の循環）の違いとみられる。10MPa 以上で安定と向上を図るには、漏洩の抑制とすべり面の向上が求められる。そこで、Fig. 10 おける固体状潤滑剤（固体状

Fig. 11 Relationship between aspect pressure and coefficient of friction.

Fig. 12 Relationship between aspect pressure and coefficient of friction.

ワセリン MoS_2 30wt% 入) を検討の対象にした。

3・3・2 固体状潤滑剤と限界面圧 固体状のワセリン MoS_2 30wt% 入りに関して耐荷重性と摩擦係数 μ の関係を Fig. 12 示した。

ワセリン MoS_2 30wt% 入は、開始から 20MPa に至るまで $\mu 0.08$ 以下の安定した摩擦挙動を示した。含浸材料は空隙に被着しすべり面に有効に供給され下地との潤滑が円滑に機能しているとみられる。

23MPa 以上になると無給油寿命（枯渇）の傾向がみられ 26MPa を越えると $\mu 0.15$ 以上を示し停止した。このとき、限界 PV 値は 9.5MPa・m/s を示した。

再現性のために、複数回繰り返しを図ったが大きな変化はみられなかった。途中のプロセスは誤差の範囲と考えて良い。この動きから、含浸材料の漏洩は抑制され円滑な潤滑作用で下地との安定した摩擦挙動がみられた。

これは、素材と空隙（含油率 $\leq$ 有効多孔率）の含浸材料による相乗効果とみられる。

Fig. 13 は、Fig. 11, Fig. 12 において観察した焼結材料のすべり面を示した。95mm²/s の適切な潤滑油は、薄膜を形成した状態がみられた。内周には、部分的な損傷がみられた。

半固体状のワセリン MoS_2 30wt% 入りは、すべり面の薄膜の上に粘着性のあるグリース状の黒い潤滑物が認められた。

Fig. 13 Surface after the friction.

Fig. 14 Relationship between Limit P-V value of sintered materials.

3・3・3 限界PV線図 限界面圧によるPV線図をFig. 14示した。動粘度 $95\text{mm}^2/\text{s}$ を含油したAl焼結体は、すべり速度 0.38m/s においては、限界PV値 $6.46\text{MPa}\cdot\text{m/s}$ を示した。同様に $95\text{mm}^2/\text{s}$ を含油したCu焼結体の限界PV値は、 $4.94\text{MPa}\cdot\text{m/s}$ を示した。

この時、ワセリン MoS_2 30wt% 入りは、限界PV値 $9.5\text{MPa}\cdot\text{m/s}$ を示した。この値は、Cu焼結体軸受材料を目安にとると1.9倍の高い水準にある。全体的に速度をあげると限界面圧は低下傾向がみられた。

4 結 言

シリコン粒子分散アルミニウム焼結体に関する潤滑油と半固体状および固体状の含浸材料におけるしゅう動試験を実施し下記のこと明らかにした。

(1) 潤滑油は、 $95\text{mm}^2/\text{s}$ 以上が摩擦と摩耗を安定させ適切な潤滑状態を示した。

(2) 固体状含浸材料のワセリン MoS_2 30wt% 入りは、持続性の高いしゅう動特性を示し低摩擦、耐摩耗性、および耐焼き付き性を向上させた。

(3) 潤滑油 $95\text{mm}^2/\text{s}$ による限界面圧は、 17MPa を示し、この時の限界PV値は、 $6.46\text{MPa}\cdot\text{m/s}$ になった。

固体状含浸材料のワセリン MoS_2 30wt% 入りは、限界面圧 25MPa を示し、この時の限界PV値 $9.5\text{MPa}\cdot\text{m/s}$ を示した。

本研究を行うにあたり、オイレックス工業(株)岸園司殿および出光興産(株)殿には多くの有益な助言を頂き感謝します。

参 考 文 献

- 1) K. Kawasaki, "Oilless bearing", p.88 (1980) Agune.
- 2) K. Yokokawa, J. Akaoka, H. Toyama, H. Tahara, S. Suzuki, K. Kawasaki and K. Mizuno, "Design point of the plain bearing", p.74 (1963) THE NIKKAN KOGYO SHIMBUN, LTD.
- 3) H. Hashimoto, "Tribology", p.51 (2006) Morikita shuppan.

- 4) Japanese tribology society, "Tribology handbook", p.429 (2001) Youkendo.
- 5) K. Tsuru and S. Matsumoto, "Effects of quantity and size of silicon particle on lubricating characteristics of particle-dispersed aluminum sintered materials", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.59, No.11, pp.871-872 (2010).
- 6) F. P. Bowden and D. Tabor, "The friction and lubrication of solid", p.123 (1954) Oxford.
- 7) K. Tsuru and S. Matsumoto, "Effects of quantity and size of silicon particle on lubricating characteristics of particle-dispersed aluminum sintered materials", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.59, No.11, pp.869-874 (2010).
- 8) K. Tsuru and S. Matsumoto, "Effects of Si particle size on boundary lubricating characteristics of Al Sintered Materials", Proceedings of JAST tribology conference, Saga, pp.119-120 (2007).
- 9) K. Tsuru and S. Matsumoto, "Effects of molding pressure and sintering temperature of silicon particles on oil content and lubricating characteristics of particle-dispersed aluminum sintered", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.59, No.11, pp.875-880 (2010).
- 10) K. Tsuru and S. Matsumoto, "Effect of molding pressure and Si particle size on boundary lubricating characteristics of Al sintered materials", Proceedings of JAST tribology conference, Nagoya, pp.133-134 (2008).
- 11) N. Soda, "Friction and lubrication", p.191 (1954) Iwanami Shoten.
- 12) H. Hashimoto, "Tribology", p.65 (2006) Morikita shuppan.
- 13) Y. Yamamoto and M. Kaneta, "Tribology", p.219 (2001) Rikou gakushiya.
- 14) K. Tsuru and S. Matsumoto, "Effects of quantity and size of silicon particle on lubricating characteristics of particle-dispersed aluminum sintered materials", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.59, No.11, pp.871-872 (2010).
- 15) Bearing a lubrication manual editing committee, "Bearing lubrication manual", p.407 (1964) THE NIKKAN KOGYO SHIMBUN, LTD.
- 16) Association of powder metallurgy technology, "Powder metallurgy.sintering mechanism", p.209 (1964) THE NIKKAN KOGYO SHIMBUN, LTD.
- 17) Association of powder metallurgy technology, "Powder metallurgy.sintering mechanism", p.200 (1964) THE NIKKAN KOGYO SHIMBUN, LTD.
- 18) Association of powder metallurgy technology, "Powder metallurgy applied product (III)", pp.5-7 (1964) THE NIKKAN KOGYO SHIMBUN, LTD.
- 19) Association of powder metallurgy technology, "Powder metallurgy.sintering mechanism", p.153 (1964) THE NIKKAN KOGYO SHIMBUN, LTD.
- 20) S. Wakabayashi and T. Watanabe, "Powder metallurgy", p.32 (1967) Gijutu shoin, CO., LTD.
- 21) H. Hashimoto, "Tribology", pp.172-174 (2006) Morikita shuppan.
- 22) Y. Yamamoto and M. Kaneta, "Tribology", pp.218-220 (2001) Rikou gakushiya.