



摩擦用のサーメット材料

花 澤 孝*

Cermets for Friction Materials

Takashi HANAZAWA

1. は じ め に

サーメットは第2次大戦後、米国において、ジェットエンジン用の耐熱材料を開発しようという努力の過程で生まれたセラミックスと金属の複合材料であつて、両者の頭文字の一部を組み合わせ、“Cermet”と呼ばれたことから出発する。残念なことには、この材料によつて開発の目的を達成することはできなかつた。しかし、副製品として、多くの有用な新素材を生み出す出発点となつた記念すべき材料である。ここでとりあげた摩擦用のサーメット、いい換えれば、サーメット系の摩擦材料もその一つであつて、最初、航空機用の摩擦材料（ブレーキライニングまたはブレーキパッドと呼ぶ）として実用されるようになった。

この材料があらわれる以前の航空機用のブレーキライニングはアスベストをはじめとする各種の非金属や鉄や銅などの各種の金属から成る混合物をフェノール樹脂のような熱硬化性樹脂によつて結合した複合材料が使われていた。しかし、航空機の高速度化や大型化に伴つて、このような耐熱性に劣る摩擦材料は熱による劣化が著しくなり、使用に耐えられなくなつてきた。その結果、耐熱性に富み、耐久性に優れたブレーキライニングが求められ、サーメットに摩擦材料としての出番がまわつてきたのである。

航空機用のブレーキライニングに求められる性能は下に述べるような多くの要求から成つている。すなわち、①高温（600～1000℃）における十分な強度、②高い比熱（摩擦熱による温度上昇を少なくするため）、③耐酸化性（酸化による消耗を少なくするため）、④摩擦係数が使用条件の変化にかかわらず一様であつて、できれば高いこと（制動時には摺動速度が最高速度から短時間（1 min 以内）に0に達し、温度も低温から600～700℃に達する）、⑤高い熱勾配に抵抗する強さ（制動中の熱衝撃に耐えるため）、⑥十分な耐摩耗性を持つこと（ブ

レーキの寿命の点から）、⑦熱伝導性に優れること（⑤の理由と同じ）、⑧制動トルクのなめらかなこと（停止直前の制動トルクの急上昇はブレーキのチャター（Chatter）現象の原因となり、機体の異常振動を惹起する）、⑨軽量であること（機体重量の節減）などである。このような多くの要求に対しては、金属に備わつた強靱性・高熱伝導性にセラミックスに特有なかさ・耐熱性・軽さとを組み合わせることによつてひとつの回答を見出したのである。

上述の複合化においては特にセラミックス成分を厳選する必要がある。すなわち、その化学的組成に配慮を加え、粒子の大きさは比較的粗粒とし、含有量が全体のかんりの部分を占めるようにする。次に、組み合わせる金属には、この材料を一体化させるための結合材としての役割を担わせる。更に、第3成分として、固体潤滑作用を持つ成分を配し、相手材に対する摩擦材の攻撃性の緩和をはかる。このように構成成分を粉末化して組み合わせることにより、セラミックスだけでは脆く、熱衝撃に対応困難であつたものが、かたさを失うことなく、耐熱性が賦与されることになる。更に、ヒートシンク（Heat sink）として眺めると、密度の高い金属のみの場合に比し、低密度・高比熱のセラミックスを選択することにより、熱容量も改善される。このような各成分の複合効果をもとに、実際の摺動において、各成分はさらに付加的な役割を演ずる。まず、金属成分は、摩擦材料の強度を担うばかりでなく、相手材金属との真実接触による凝着現象を通じて摩擦力の発生に寄与する。また、セラミックス成分は相手材に付着した金属成分をそぎ落とし、過剰な凝着を防止して耐摩耗性を高める。かくして、摺動面の真実接触点における高圧と摩擦熱による高温のもとで、各成分はそれぞれ異なつた挙動をとり、総合的に、摩擦材としての好ましい性能を発揮する。いい換えれば、各成分を巧みに調和させたものがサーメット摩擦材料であるといふことができる¹⁾。以下に、この材料の製造方

昭和 61 年 9 月 2 日受付 (Received Sep. 2, 1986) (依頼解説)

* カヤバ工業(株)技術管理本部理事（現：(社)窯業協会専務理事） 工博（Engineering Administration Dept., Kayaba Industry Co., Ltd., Now The Ceramic Society of Japan, 2-22-17 Hyakunin-cho Shinjyuku-ku, Tokyo 160）

Key words: friction ceramics; metal; composite material; powder mixing; lubricating agent; vapour deposit; brake lining; heat resistance; wear; hardness.

法を述べ、更に、材料の構成とその特性を明らかにして応用例に言及することにする。

2. 製造方法²⁾³⁾

サーメット系の摩擦材料はその見掛け密度が理論値の80%程度の値にしか達していない。この事実は焼結体の空孔率が高いたることを意味する。その結果、材料の強度はかなり低く（最高で5 kgf/mm²程度の曲げ強度）、強度の不足は補強メンバーによつて補われて使用されねばならない。したがつて、製品は補強の方法によつて分類され、鋼製容器（カップと呼ぶ）によるものと鋼板に直接冶金的に融着されたものとに2大別できる。この材料の製造工程をフローチャートによつて示すと図1のように示される。

2.1 原料

摩擦材料の製造には金属の粉末と非金属の粉末が使用される。

2.1.1 金属粉末

銅（Cu）や鉄（Fe）が主成分で、これに錫（Sn）、亜鉛（Zn）、鉛（Pb）のような低融点成分やモリブデン（Mo）のような高融点成分が補助的に添加される。組成が均一となり、同時に、焼結を促進する効果を狙つて、いずれも200メッシュ以下の比較的細かい粉末の状態で使用される。

2.1.2 非金属粉末

黒鉛（C）とセラミックスの粉末がこれに相当する。

C粉末としては天然または合成物が使用される。粗粒（40メッシュ）の合成Cの場合に摩擦係数の低下が少ない。また、微細な天然C（200メッシュ）は相手材表面に対する攻撃性を改善し、摺動時に発生するトルクをス

ムーズにするなど摩擦材料の性能の顕著な改善効果があるが、摩擦係数を低下させる欠点がある。他に、2硫化モリブデン（MoS₂）のような固体潤滑剤もよく使用される。

セラミックス粉末としてはムライト（3Al₂O₃・2SiO₂）、シリカ（SiO₂）、炭化けい素（SiC）、窒化けい素（Si₃N₄）、アルミナ（Al₂O₃）などが天然または合成状態で使用される。

2.2 混合

原料粉末の混合は多くの場合、V型混合機で30min～1hかけて行われる。混合で注意すべき点は下の数点である。

①微細な非金属粉末（SiO₂、Cなど）は直接混合機に投入されると凝集しやすい。その上、一度このような凝集体が形成されると、これが最終製品の状態まで維持され、途中工程で発見し、排除することが困難である。そのため、凝集しやすい微粉末は混合機に投入する直前に篩通しする必要がある。

②比重の異なる異種粉体から成る混合物は成形工程に至る過程で偏析をおこしやすい。そのため、鉍物性タービン油が金属粉末に加えられ（約0.3%）、その表面にコートされる。偏析の防止以外に、成形時の金属微粉の飛散防止にも効果がある。

③Cなどの潤滑成分は、長時間の混合過程で微粉化し、金属粉末表面にコートされやすい。これは金属粒子相互間の焼結を阻害するので、これらの粉末は混合の終了する5～10min程度前に混合機に投入するのが望ましい。

2.3 成形

2.3.1 カップ補強

(1) 航空機用ライニング この場合には1500 kgf/cm²で成形し、銅めつきした鋼製カップに装着後、再度、3100 kgf/cm²で2次成形する。

(2) 一般民需用ライニング この場合には3100 kgf/cm²で成形する（カップ補強は焼結後に行う）。

一般粉末冶金製品の成形と同様、圧粉体密度を規格化された値の限界内に保つ必要がある。実際の工程では、ある時間間隔で圧粉体の厚さと重量を求め、両者の関係から、製造される圧粉体の概略の密度値を把握する。正確な密度の測定は、ランダムサンプリングにより、水置換法で行われる。

2.3.2 鋼板補強

加圧焼結（焼結過程で圧粉体の補強鋼板への接合を行う）に供する圧粉体は5000 kgf/cm²前後の加圧力で成形される。

2.3.3 成形実施上注意すべき事項

圧粉体は金属以外に多量の非金属成分を含むため、圧粉体強度が低く、圧粉体自身にも偏析が生じやすい。そのため、金型への正確かつ再現性ある混合粉末の充填と欠陥のない圧粉体を金型より取り出すことが重要であ

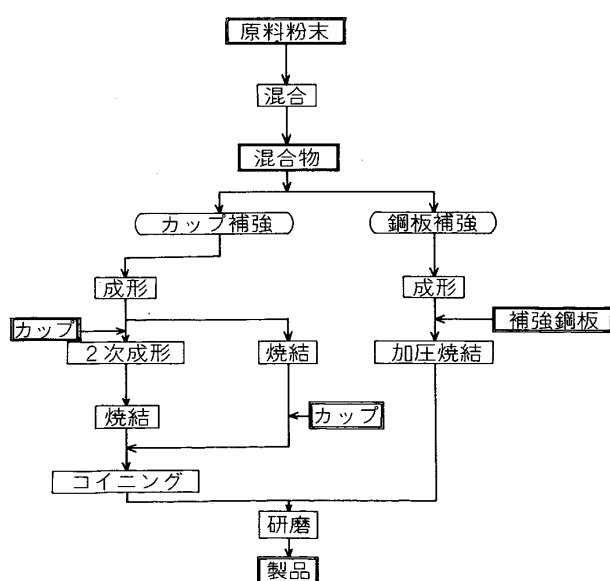


図1 サーメット系摩擦材料の製造工程図

る。また、混合粉末の特性として成形時の弾性応力値が高く、金型から取り出された圧粉体の膨張（スプリングバック）が1%にも達するため、加圧力の解除（Pressure stripping）が是非とも必要となる。

2.4 焼結

2.4.1 カップ補強

この場合、焼結は連続炉（プッシュタイプ、メッシュベルトタイプ等）を用いて発熱ガス（Exothermic gas）の雰囲気で行われる。雰囲気ガスの一例として表1のような組成があげられる。

焼結の最高保持温度は、被加熱物の組成によつて変わるが、大体800~1000°Cの範囲であり、この温度に約30 min 保持される。

2.4.2 鋼板補強

鋼板補強のために行われる加圧焼結の目的は、単に圧粉体を焼結してその密度と強度を増大させるばかりでなく、圧粉体と補強鋼板間に強固な冶金結合を形成させることにある。補強鋼板と圧粉体の組立品をベル型炉に垂直に積み重ね、加圧と焼結を同時に行わせる（加圧焼結）。この操作は保護雰囲気中で行われ、組成によつて、650~1000°Cに加熱し、加圧力は7~35 kgf/cm²の範囲にとられる。鉛を含有する組成の場合に、最適の焼結温度以上に加熱されると鉛の発汗滲出が起こるが、それ以外の場合に、加圧力が焼結を促進するため、温度の管理は比較的容易である。最も問題となるのは鋼板の波打

ち現象で、製品の厚さのばらつきの原因となる。これを防止するには、被焼結物の全積み上げ高さを数段に分割する方法がとられる。このようにして、各段の高さを減らせば、製品の平坦度の管理は比較的容易となる。

2.5 その他の工程

2.5.1 カップ補強

(1) 航空機用ライニング 製品を目標とする密度範囲内におさめるため、5000~7000 kgf/cm²の加圧力で再加圧される（コイニングと呼ぶ）。

(2) 一般民需用ライニング 焼結体をカップに装着し、5000~7000 kgf/cm²の加圧力でコイニング処理して目標とする密度範囲におさめると同時にカップと焼結体の一体化がはかれる。

(3) 研磨 コイニングされた材料は研磨によつて所望の厚さに揃えられる。

2.5.2 鋼板補強

鋼板で補強された加圧焼結品は、カップ補強品のようにコイニング工程を必要とせず、研磨し所望の厚さに仕上げられる。

3. サーマット系摩擦材料の組成と補強の方法

摩擦材料は摩擦現象のうちでも特に高い摩擦係数に注目しこれを積極的に利用するものである。したがって、この材料はエネルギーを伝達するクラッチや運動する物体の制動に欠くことのできないブレーキに使用され、長期にわたつて大量のエネルギーを熱に交換する役割を果たさねばならない。

摩擦材料の苛酷な使用例として現用の新幹線（DT 200 台車）と航空機（F104J 戦闘機及びボーイング 747

表 1 発熱ガス組成の例 (vol %)

ガス成分	CO ₂	CO	H ₂	O ₂	CO ₂ /CO 比	露点
含有量	5.0~8.0	9.0~15.0	約 10	Nil.	1:1.25~1:2.5	13°C

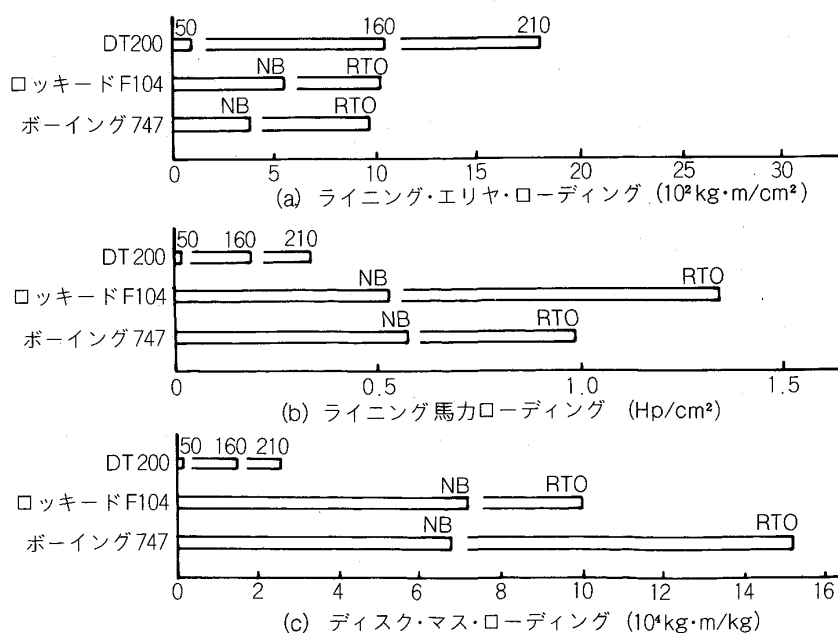


図 2 ブレーキ設計基準比較図

旅客機) を例にとつて比較したものが図2である⁴⁾。同図において、(a) はライニングの単位面積当たりの吸収エネルギー (ライニング・エリア・ローディング)、(b) はライニングの単位時間、単位面積当たりの吸収エネルギー (ライニング・馬力・ローディング)、(c) は相手面の単位重量当たりの吸収エネルギー (ディスク・マス・ローディング) で、それぞれ、ブレーキ設計の見地から摩擦摩耗の熱的な条件を比較したものである。なお、図中に示された数字は制動時の速度であり、また、NB は正常のブレーキ条件、RTO は離陸断念時のブレーキ条件を示した。いずれにしても、このように大量の熱エネルギーが摩擦材や相手材に放出される可能性があるわけで、材料の表面では部分的な溶解が起こっている。その結果、このような摩擦摩耗の現象下に、摩擦材料が満足に機能するには、冒頭でも述べたように、いくつかの具備すべき条件を備えねばならない。それら多くの要求のなかには相互に矛盾する性格のものもあつて、単一の材料ではこれに答えるすべがないのである。かくて、複合化が不可欠の手段として浮上することになる。この要求に対してサーメット系の摩擦材料は3成分の構成で対応している。すなわち、①材料の骨格を構成する金属成分、②摩擦性を助長し、材料の寿命にかかわる耐摩耗成分および③摩擦現象の安定化と材料の寿命を助長する潤滑成分がこれである⁵⁾。なお、上記3成分以外に材料中の空孔もその割合、形状、分布状態などを通じて、摩擦摩耗現象に重要な影響を及ぼすことを無視することはできない。

3.1 金属成分

通常、Cu あるいは Fe が金属成分の主要構成メンバーで、後述するいくつかの役割を担っている。まず第1は耐摩耗成分と潤滑成分を保持する役割である。次に、直接、摩擦摩耗の機能を分担する。第3には、摩擦によつて発生する熱を摺動面から除去する媒体として作用する。最後に、摩擦材の強度不足を補う補強メンバー (カップまたは鋼板) との結合の主役を演ずる。

金属成分としては Cu、Fe 以外に、Zn や Sn のような補助的成分がある。これらが添加されるのは、焼結過程で液相を形成して焼結を促進する作用以外に、Cu や Fe の主要金属成分に対する合金化効果や金属間化合物の形成が期待されるからである。したがつて、これらの補助的金属成分は金属成分を硬化、あるいは、脆化させる性質を備えることが望まれる。例えば、Sn や Sb の添加により、Cu あるいは Fe 単体の場合よりも、相手材に対する摩擦材の転移を防止することが知られている。これは、金属成分が脆化する結果、摩擦材料から分離した摩耗粉が相手材に凝着したり、あるいは、摩擦材料の表面をこすつたりして、摩擦面 (摩擦材料と相手材との両者) を著しく摩耗させることが防止されるからであろう²⁾。ただし、摩擦材料の摩擦水準を決めるのはあ

くまでも金属成分の主成分であつて、添加される少量の金属成分の役割は補助的なものであることを銘記する必要がある。

3.2 耐摩耗成分

大別すると金属系と非金属系の2種類に分けられる。

(1) 金属系耐摩耗成分 これには金属成分より融点が高く、また、金属成分との間の溶解度が限られているような成分が該当する。例えば、銅系サーメットに加えられる鉄粉の役割がこれに相当する⁶⁾。その添加により、摩擦水準が増大し、温度上昇に対する摩擦の安定性が改善されるなどの効果がある。ただし、鉄系材料の場合に、摩擦水準の増大を目的として金属系の耐摩耗成分を加えることは現在までのところ、比較的少ない²⁾。

(2) 非金属系耐摩耗成分 これはサーメットの名前に由来するセラミックスそのものであつて、 SiO_2 、 Al_2O_3 、ムライト ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)、 SiC 、 Si_3N_4 などである。その役割は相手面に対する摩擦摩耗の掘り起こし効果にある⁷⁾。その結果、摩擦材料の機能としては摩擦水準を高める働きがある。更に、相手材への摩擦材の転移物が除去される作用もあり、摩擦面の損傷が最少にとどめられ、摩耗も減少することになる。この見地からは、耐摩耗成分のかたさ、特に、耐摩耗成分のかたさと金属マトリックスのかたさとの比を重視する必要がある。また、これらの硬質粒子については、その含有量、粒の大きさや形状なども重要な意味がある。上述の粒子を総称してフリクション・エージェント (Friction agent)、フリクション・モディファイアー (Friction modifier) などと呼ぶ理由は以上のような考え方に基づくからであろう。

3.3 潤滑成分

この成分も金属系と非金属系に2大別される。

(1) 金属系潤滑成分 これに属する成分は、例えば Pb のように、低い融点を持ち、金属マトリックスとの間に溶解度の無いいわゆる軟質金属がこれに相当する。これら軟質金属の効用は次のような内容から成っている。すなわち、①摩擦材料と相手材との摺動面間に低せん断力の皮膜を形成することによつて、摩擦材を構成する金属成分の相手面への転移を減少させる。②摺動面の温度上昇によつて融解し、加工速度が減少する結果、局部的な温度上昇を防止する。③摺動時の摩擦係数の変化をなめらかにするなどである。

(2) 非金属系潤滑成分 非金属質の固体潤滑剤がこれに相当し、主なものは黒鉛である。他に MoS_2 や各種ガラスなどがある。 MoS_2 は 400°C 以上に昇温する摩擦条件で効果があるといわれている²⁾。

3.4 サーメット系摩擦材料の組成⁸⁾

上述したように、サーメット系の摩擦材料は多くの成分を組み合わせた複合材料である。したがつて、要求される性能に合わせて配合組成も使用する原料も選ばねばならない。航空機用ブレーキに実用されている代表的な

サーメットライニングの組成を表2に示した⁹⁾。

航空機用ブレーキライニングに開発されたサーメット系摩擦材料を一般民需用の摩擦材料としてその用途を広めるには使用条件に応じた工夫が必要である。しかも、経済性を念頭に考えねばならない。そこに航空機とは違った難しさがある。1960年以降今日に至るサーメットライニング開発の歴史はそのための苦闘の連続といつても過言ではない。さて、その過程でサーメットに出番の声がかかるのは、それまで使われてきた材料が、使用条件が苛酷化して使用に耐えなくなつた場合である。そのような場合には、一般に、高い摩擦係数が求められる。更に、トラクターや大型トラックなどに装着される大型クラッチに対する強い要求は寿命の延長である。あるいは、レジン系の材料が焼損するような高温に対する耐熱性である。しかし、サーメットに含まれるセラミックスの高含有量のため、この材料を航空機以外の一般工業用途に応用した場合、第一に問題となる欠点は摩擦材料によつて発生するトルクがなめらかになりにくいという点にあつた。配合組成の選択、特に潤滑成分に工夫が凝らされた結果、この欠点もかなりの程度解決されてきた。表3には現用される一般用サーメット摩擦材料の代表的組成をCu系材料とFe系材料に分けて示した。

昭和40年代初期の製品(表3(a)例1)ではセラミックス(ムライトやSiO₂など)を3~6%(wt%以下省略)、Cを4~6%と非金属成分を減量して好成績をおさめることができた。その後は、この製品を手がかりに、潤滑成分(特にPb)の増量をはかつて、新幹線

ブレーキ用のライニング(表3(a)例2)を完成し、あるいは、路線バスのクラッチ用ライニング(クラッチの場合にはフェーシングと呼ぶことが多い)(表3(a)例3)へとその応用分野を広めることができた。最近では、Pb添加の欠点(その毒性と耐熱性の劣化)を改善するために、その減量ないしは除去がはかられ、表3(a)の例4ではビスマス添加、例5、例6では特殊なほうりん酸アルミナガラスを固体潤滑剤として使用することによつて、その用途拡大をはかつているのが現状である。

上述の材料はいずれも金属成分が銅または銅合金であるが、経済性と、更に、いつその耐熱性の向上には鉄系の材料が有利である。大型クラッチ用のフェーシング材として最初に実用化された材料を表3(b)例1に示した。この材料では摩擦材料中の鉄成分と相手材の主要構成成分である鉄成分との同質材同士の凝着や転移を防ぐ狙いからSb添加による金属成分の脆化がはかられて成功した例である¹⁰⁾。その後、同表中の例2~例4に示すように潤滑成分を増量し、耐摩耗成分の多様化をはかり、実用分野を着実に広めている¹¹⁾¹²⁾。

しかし、摩擦材の応用として最も魅力を感じる分野である乗用車用のディスクブレーキへの進出にはまだまだ解決しなければならない問題が少なくない。特に解決を必要とするのは、①制動時に発生するブレーキトルク(換言すれば摩擦係数)の時間に対する変化が不安定でなめらかでない。②摩耗(摩擦材料と相手材両者)が比較的多い。③ブレーキ時の鳴きが著しい、などである。

3.5 補強の方法

サーメット系の摩擦材料は、その目的として、摩擦摩耗特性を第一義に考え、開発され、利用される材料である。そのため、この特性と相反する性質の多い強度特性は二義的に考えざるを得なかつた。その結果、機械的強度が、通常使用される構造用の金属材料に比べて、著しく低い値に満足することとなつた。かくて、この材料を単体でクラッチやブレーキに組み込むことは困難とな

表2 航空機ブレーキ用サーメットライニングの代表的組成(wt%)

成分 種別	金属成分			耐摩耗成分				潤滑成分	
	Cu	Sn	Zn	Fe	Mo	SiO ₂	ムライト	黒鉛	その他
例1	Bal.	3~10	3~10	5~10	3~5	20~30	—	5~10	—
例2	60	—	—	5	5	5	20	10	—
例3	60	—	—	10	5	5	20	10	—

表3 一般用サーメットライニングの代表的組成(wt%)

(a) 銅系サーメット

成分 種別	金属成分		耐摩耗成分			潤滑成分			用途
	Cu	Sn	Fe	Mo	SiO ₂ ムライト	黒鉛	Pb	その他	
例1	Bal.	3~6	—	—	—	3~6	—	—	クラッチ
例2	Bal.	5~10	3~6	—	—	3~6	—	—	新幹線用ブレーキ
例3	Bal.	5~10	3~5	—	—	3~5	—	—	クラッチ
例4	Bal.	3~6	3~5	—	—	3~6	—	—	クラッチ, ブレーキ
例5	Bal.	5~10	—	—	3~5	—	—	Bi 5~10	クラッチ, ブレーキ
例6	Bal.	5~10	—	—	3~5	—	3~5	ガラス 5~10	クラッチ, ブレーキ

(b) 鉄系サーメット

成分 種別	金属成分			耐摩耗成分			潤滑成分		用途
	Cu	Fe	その他	SiO ₂ ムライト	その他	その他	黒鉛	その他	
例1	30~40	30~40	Sb 3~6	3~6	Fe+Mo 3~5	—	4~6	—	クラッチ
例2	10~15	50~60	Sn 2~4	8~10	—	—	10~15	—	ブレーキ
例3	—	Bal.	Zn 14	—	SiC 4	クロマイト 8	18	—	クラッチ, ブレーキ
例4	3	Bal.	Sn 3	—	3~5	SiC 3~5	—	10~15	ブレーキ

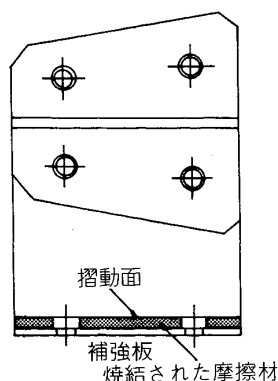


図3 鋼板補強品(片面)の例

り、その解決策として、次のような二つの補強方法がとられることになった¹³⁾。

3.5.1 鋼板補強

サーメットを補強用の鋼板に冶金的に結合して一体化をはかり、強度をこの鋼板によつて分担させる方法である。サーメットは、補強用の鋼板によつて、その片面か両面かのいずれかの形式に接合されて補強される。図3に、片面補強の例として、新幹線に使用されるライニングの1例を示した。この鋼板には、サーメットとの接合強度を増大させるため、通常、銅めつきが施される¹¹⁾。また、Cu-Sn 混合粉末 (10% Sn) を鋼板上に介在させ、接合強度を増大させる方法¹⁴⁾、あるいは、銅めつき上に Sn めつきを施す方法などが試みられている。

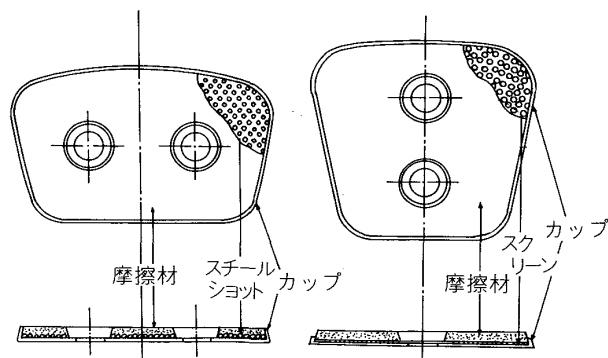
3.5.2 カップ補強

航空機用ブレーキに使用される銅系のサーメットライニングを強化する方法としてカップ補強の方法が提案され、広く、各種のサーメット系摩擦材料の補強に利用されている。航空機の場合には図4(a)に示すようにカップの縁が摺動面の一部を構成している。この方法はサーメットの摺動時のせん断力の不足を補う効果が顕著であった。しかし、相手材が鋳鉄 (FC-25 材など) で、しかも、その摩耗を極度に少なく押さえる必要のある一般工業的用途に対しては、カップの縁による相手材の損傷は無視できなかつた。このような要求からカップの縁を摺動面より引き下げる方式 (図4(b)) が開発され、この問題も解決された。

カップと摩擦材料との接着力を増大するため種々の方法が工夫された。図4(b)はカップ内部にスクリーンのメッシュを融着し、スクリーンによるサーメットの投錨効果を利用したものである。また、図4(a)では2~3mmの直径を有するスチールショットをカップ内面にろう付けし、前記投錨効果の改善をはかっている¹⁵⁾。

4. サーメット系摩擦材料の特性とその応用

サーメット系の摩擦材料はジェット機の出現を契機と



(a) スチールショットによる保持 (b) スクリーンによる保持
図4 カップ補強品の例

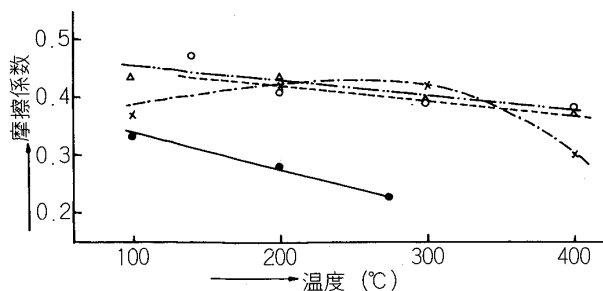
して、まず、航空機ブレーキ用のライニングとして発達した。このライニングが遭遇する制動の苛酷度を表す指標として、ライニング・エリア・ローディング、ライニング・馬力・ローディング、あるいは、ディスク・マス・ローディングなどブレーキ設計のための基準値のあることは、図2に関連して既に説明した。これらの値からも、サーメット系摩擦材料の使用環境が、面圧、摺動速度、あるいは、摺動温度のいずれから眺めても、極めて厳しい状態にあることを推察できるであろう。しかも、その機械的、熱的な現象は動的に短時間 (1 min 以内) のうちに生起するものである。摩擦材料といわれる以上、このような変化に耐えて始めてその使命が果たされたといえることができる。下には、このような変化のダイナミズムを前提として、その特性と応用例を考えてみたい。

4.1 サーメット系摩擦材料の特性

摩擦材料の大宗を占めるレジン系の摩擦材料とこの材料を比較し、実用の点からその特徴を整理してみると耐熱性を中心とした次の3点にまとめることができる。すなわち、①耐酸化性に優れること。②高温まで摩擦係数の低下がないこと。③高温の耐摩耗性に優れること。

この材料が耐酸化性に優れることは、金属とセラミックスの複合材料であつて、レジン系の材料に含まれるような有機物質の存在しないことから容易に理解できるであろう。さらに、摺動面が赤熱状態に達するような苛酷なブレーキの制動は、新幹線の 210 km/h からの停止やジェット機の着陸などの例をあげるまでもなく、現在では、日常茶飯事となつている。レジン系の材料では、摩擦係数や耐摩耗性の問題以前に、このような高熱にさらされた場合、それを構成する樹脂バインダーなどの有機物が炭をあげて燃え出すような異常な現象を呈するのである。これに対して、サーメット系の摩擦材料では前記のような可燃性成分を含有していない。そのため、この材料は高温の出現する苛酷な摺動条件下で信頼して使用できる唯一の材料となつている。

次に、第2の特徴である高温の摩擦係数を考えてみよ



○:サーマットA △:サーマットB ×:サーマットC
●:レジン系

図5 摩擦係数と温度の関係におけるクラッチ用摩擦材料のサーマット系とレジン系との比較

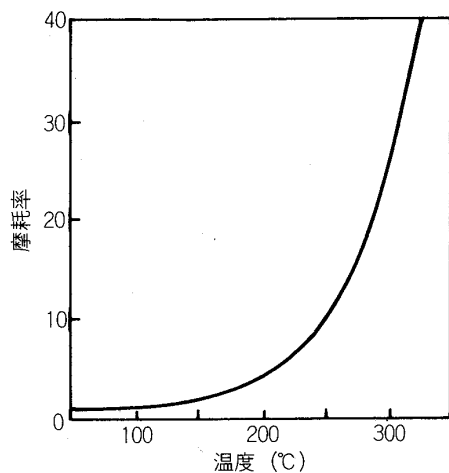


図6 代表的なレジン系ライニングの摩耗と温度との関係 (100°Cの摩耗を1単位とする)

う.ライニングの高温における摩擦係数の低下は“ブレーキフェード”と呼ばれて、ブレーキの使用上極めて危険な現象である。したがって、摩擦材料にとって、高温の摩擦係数の低下は、致命的な欠陥といえる。ブレーキライニングに限らず、摩擦材料全般の問題として、室温の摩擦係数を高温まで保持しつづけることは、実に至上命令なのである。材料を構成するバインダー成分として合成樹脂などの有機成分を含有する多くの摩擦材料では性能の劣化が200°Cを越えると無視できなくなる¹⁶⁾。上述のブレーキに比べるとクラッチの使用条件は穏やかであるといわれる。しかし、実際にはここでも、図5に示したように、レジン系材料の摩擦係数は昇温に伴ってその低下が顕著となり、遂には使用に耐えなくなる。これに対し、サーマット系の材料では300°C程度までならば、クラッチに不可欠な低温域の摩擦係数のなめらかさを大幅に損なうことなく、高い摩擦係数を保つことがわかる(図5, サーマットA, B, C)。

第3の耐摩耗性については、特に高温とことわるまで

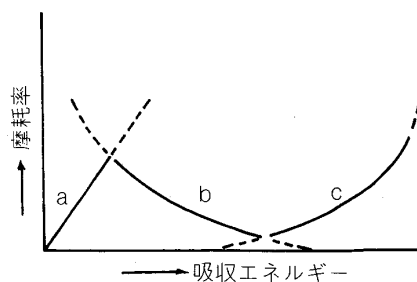


図7 サーマット系ブレーキライニングの摩耗挙動

もなく、実用上極めて重要な性質である。しかし、レジン系材料の摩耗は、有機物を含有するその材料特性から、温度の上昇と共に放物線的に増加し、200°C付近から急激に増大する(図6)。一方、サーマット系材料の摩耗と温度の関係は、図7に示したような特性を持つ¹³⁾¹⁷⁾¹⁸⁾。同図の横軸は温度に比例する吸収エネルギーである。吸収エネルギーの比較的小さい低温の領域aでは、摩擦熱による酸化膜の形成が不十分のため、摩耗がある程度進行する。そのため、低温ではレジン系の材料に比べて耐摩耗性の改善もそれ程顕著ではない。しかし、このa領域より摩擦による吸収エネルギーが増加し、摺動面温度が上昇した領域bでは、摩擦材の低融点成分(Pb, Bi, ガラスなど)が融解し、あるいは、摺動面に酸化物が形成され、摩擦材料と相手材料バルク部分の直接接触がさまたげられる。この摺動面に形成された物質は温度の上昇に伴ってその量を増大する。このため、摩擦材料と相手材料との直接接触の機会がますます減少し、結局、摩耗も減少することになる。この領域をすぎ、更に高エネルギーの領域cに移ると温度の上昇は顕著になり、材料の酸化変質が摩耗の主役を演ずることになる。換言すると、この段階では吸収エネルギーが増大するほど、あるいは、摺動面温度が上昇するほど、材料の熱劣化が進み、摩耗が増大することになる。

4.2 応用例

ここでは、上述のような特徴を持ったサーマット系の摩擦材料が実用時に示す2, 3の摩擦特性を用途と関連づけて述べ、その応用例を提示することにする。

4.2.1 ブレーキライニング

摩擦材料をブレーキに装着し、制動に使用する場合、多くのブレーキでは摩擦材料を一定の圧力で回転する相手材に押しつけ、摩擦力による制動トルクを発生させる。したがって、制動とは最高速度からしだいに減速し、遂に速度がゼロに達して静止する現象とみることができ、ユーザーは、この速度変化の過程を通じて一定のトルク、換言すれば、摩擦係数が一定となることを強く要求する。それは、このような制動のトルク挙動がブレーキ力の制御に好都合であるばかりでなく乗り心地の上からも求められるからである。しかし、実在の摩擦材料で

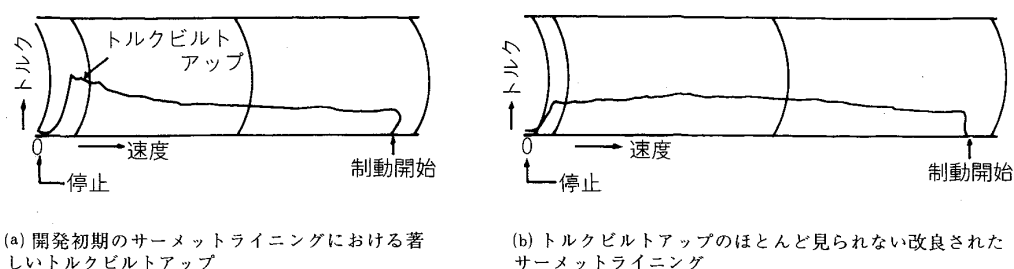


図8 ダイナモメーター試験における制動速度とトルクの関係

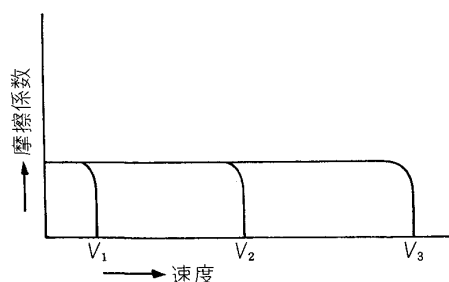


図9 摩擦材に要求される摩擦係数の理想的速度特性

この要求を満たすことは難しく、特に、停止直前には摩擦係数が急激に増大するものである。停止時の摩擦係数とは近似的に静止の摩擦係数と考えて実用的には取り扱われている。摩擦摩耗の理論によれば、一般には、静止摩擦係数は動摩擦係数より高いといわれている。このため、制動時には停止直前にブレーキトルクが急上昇し、この現象をブレーキトルクのビルトアップ (Torque build up) と呼ぶ、ブレーキの異常振動 (ブレーキのチャター現象 (Chattering)) や乗り心地の不良を引き起こすものである。図8にサーメットライニングの制動トルク曲線の1例を示したが、同図の (a) に見られるように、停止直前にトルクのビルトアップを伴うものが多い。実用できる摩擦材とするにはこのビルトアップ値 (静止摩擦係数-動摩擦係数)/動摩擦係数の%表示 を引き下げる必要があつて、同図 (b) に示すように改良して初めて実用可能な摩擦材料となるのである。

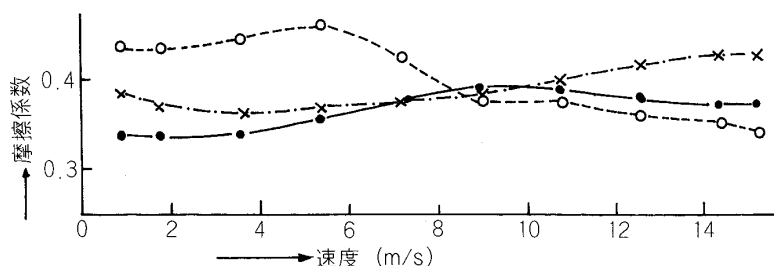
以上をまとめて摩擦係数の速度特性についての理想像として示したものが図9である。V₁、V₂、V₃ によつて示されたそれぞれの制動初速度に対し、速度にかかわらず、あらゆる条件に際し一定の摩擦係数を示して停止するような材料がユーザーにとって使いやすい材料なのである。現用の航空機用ブレーキの大部分には上述のようにして改良されたサーメットがその性能を評価され広く採用されている。

一方、航空機以外の分野に目を向けると新幹線ブレーキ用の摩擦材料 (表3の例2) がある。この材料も、既

述のような視点に立つて、潤滑成分の種類や添加量を工夫し、図9の要望を満たす材料としてまとめられたものである。また、最近開発されたサーメット系材料の一種には、特に、高面圧下でもその性能を劣下させることなく実用できるものが見出されている。元来、サーメット系の摩擦材料は5~10 kgf/cm²以下の面圧で最高の性能を発揮し賞用されてきた。しかし、最近のブレーキに対する小型化、軽量化の強い要求から、高面圧下の制動に耐え、高温でも通常の場合と変わりなく使用できる摩擦材料が求められる状況に変わつてきた。サーメット系の材料は、高温強度を特色に、このようなユーザーニーズに答えられる唯一の材料であつて、100 kgf/cm²と従来の10倍を超す面圧に耐える材料が開発され実用されるようになった。この事実は将来ブレーキサイズを1/2~1/3まで縮小できる端緒を生んだ画期的な進歩と評価されるであろう。この材料的な躍進は金属繊維による補強と鉛のような低融点の潤滑成分をほうりん酸アルミ系の特殊ガラス成分に置換することによつて成し遂げられたのである。巧みな複合化により、金属マトリックスの脆化特性を大きく損なうことなく、摩擦材料の荷重負担能力を増大させることに成功したからである。オフロード用の大型ダンプ車向けディスクブレーキなどにその特徴を生かし新市場を拡大中である。

4.2.2 クラッチフェーシング

大型バスやダンプなどのクラッチフェーシングとしてレジン系の材料がその性能を充足できなくなつて、そのような用途に対しサーメット系の材料がその地歩を確立してきた⁸⁾。ただし、この結果も簡単に得られたものではない。前記ブレーキで問題となつた停止直前のトルクビルトアップと同じ摩擦現象に基づくジャダー (Judder) やうさぎ飛びなどのクラッチの異常現象の克服によつて達成されたものである。この現象については、既に、ライニングの項で詳述したように、一定圧力で摩擦材料を相手材に押しつけると、一般にサーメットは、摺動速度が高速から低速に変化するにつれて、摩擦係数を増大する。実用の大型クラッチ (クラッチサイズ: 外径 395 mm×内径 255 mm) を使つたベンチ試験の結果をもとに摩擦係数と摺動速度の関係をサーメットとレジンの両者



○: サーマットB ×: サーマットC
●: レジン系材料
図10 クラッチ用摩擦材料の摩擦係数と速度の関係におけるサーメットとレジン系材料の挙動の比較

について比較したものが図 10 である。一定圧力の摺動でサーメットは、一般に、高速から低速に変化するにつれて摩擦係数を上昇する傾向がある（図 10 の B、これは表 3 (b) の例 1 に相当）。このような摩擦特性は上述のジャダーやうさぎ飛びと呼ばれるクラッチの異常現象の原因となる。図 10 中のレジン系材料のように高速よりも低速で低い摩擦係数を示すサーメット系の材料が望まれるのはこのような理由によるのである。この問題も、ライニングの場合と同様に、その後の開発努力により同図の C で示されるような材料へと改良が進み、サーメットに特有の欠点も解決されるようになった。その結果、サーメット系の材料が苛酷な条件で使用されるクラッチフェーシングとして大型クラッチに採用されるようになったのである。ただし、広く使用されるにはこの特徴以外に低価格なことでと寿命の長いことが前提となる。クラッチ用摩擦材料の寿命とは材料の耐摩耗性のことであつて、材料自身と相手材との両者に分けて考えられる。なお、相手材の場合には、更に、プレッシャープレートとフライホイールの摩耗に分けられる。クラッチを使用し、その結果、摩耗が進めば、当然、新品と交換することになるが、その場合に、摩擦材料の交換は比較的容易である。これに反し、相手材の交換は長時間を要する大事となる。したがって、その費用はクラッチフェーシングの場合に比べて多額の出費となる。かくして、相手材の摩耗については摩擦材料に比べるとはるかに少ないことがユーザーから強く要求される。図 11 は大型クラッチを使つて 2 種類の使用条件下の各摩擦材に対する摩耗状況を比較した結果である。なお、その試験条件は表 4 に示したような内容であつた。図中のサーメット A は表 3 (a) の種類 1、同じく C は種類 3 に相当し、B は表 3 (b) の種類 1 である。この図からも明らかなように、レジン系材料は、通常の使用条件（軽および中負荷）では、摩擦材、相手材ともその摩耗が少なく優秀な材料である。しかし、条件が苛酷化し、重負荷になると、耐熱性が劣るために、摩擦材自身の摩耗が激増する。これに対しサーメットでは図中の A、B に示すように、耐摩耗性の改善は顕著だが、相手材摩耗の増加を防止することは容易でなかつた。この欠点を改善して開発された材料が C 材である。潤滑成分とし黒鉛を増量し、更に、鉛を添加した結果、レジン系材料と同程度の相手材摩耗

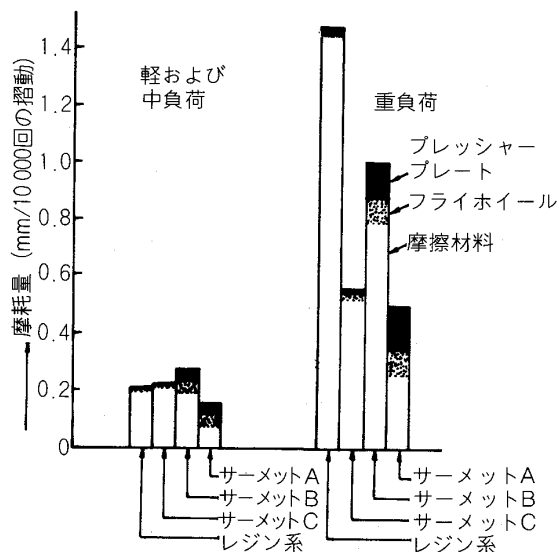


図11 クラッチ用摩擦材料に使用されるサーメットおよびレジン系材料と相手材（プレッシャープレート、フライホイール）の摩耗の比較

表 4 大型クラッチ耐摩耗試験の条件

負荷条件	項目	
	軽および中負荷	重 負 荷
慣性エネルギー 回 転 数 荷 重	1,369 kg·m·s ² 1 100 rpm 660 kg	3.41 kg·m·s ² 920 rpm 1 400 kg

を達成することができた。その上、サーメットの特徴である優れた耐熱性から、重負荷時の耐摩耗性の劣化も防止されることになった。更に、その後の開発努力によつて、鉛潤滑はガラス潤滑へと発展し（表 3 (a) 種類 5, 6 参照）、鉛の融解による高温性能の劣化（図 5 における C 材の 400°C 近辺からの摩擦係数の急減）も解決されるに至つた。その結果、サーメットの特徴である高温特性とレジン系材料の低温特性を備えた摩擦材料をユーザーに提供できるようになり、大型クラッチ用摩擦材の地歩を確立することとなつた。

上記の大型クラッチに比べると小型クラッチの使用条件はだいぶ異なる。図 12 は外径 215 mm の小型クラッチにこの材料を装着してその耐摩耗性を評価した結果である。小型クラッチは普通乗用車や小型トラックに装着

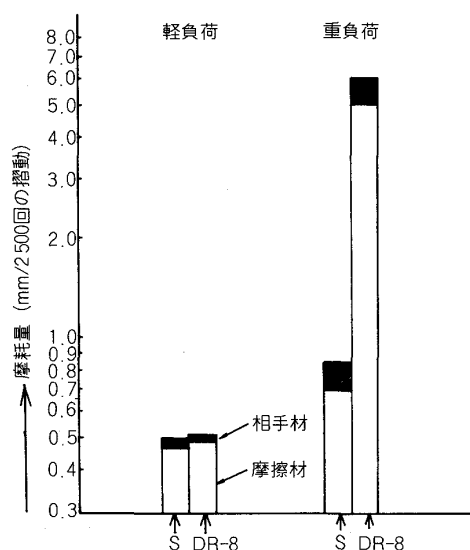


図12 小型クラッチの耐摩耗試験

表 5 小型クラッチ耐摩耗試験の条件

負荷条件	軽負荷	重負荷
項目		
慣性エネルギー	0.185 kg·m·s ²	0.385 kg·m·s ²
回転数	1400 rpm	1400 rpm
試験回数	2500回	2500回 (250回ずつ10回)
試験温度	270~330°C	RT→400°C

されて使用される。その使用条件の大型クラッチと最も違う点はその回転数の高いことである。条件によつては5000~6000 rpmに達することさえある。この試験では、試験機的能力から、回転数は最高1400 rpmに押さえざるを得なかった。その代わり、エネルギー条件を現車のそれに等しく設定して耐摩性の比較を行つた。条件の詳細は表5に示した。この図において、サーメットはガラス潤滑によるものであり(S材)、それと比較したレジンの材料は現在入手できる最高の耐熱性を持つ材料(DR-8)である。その結果から、サーメットの欠点とみなされる相手材摩耗の防止にガラス潤滑が顕著な効果をあげていることがわかる。

5. おわりに

摩擦材料としてのサーメットを複合材料の視点から、まずその成り立ちを明らかにし、更に、製造方法からその特徴と用途まで、主として材料技術的問題に焦点を絞って議論を展開した。元来、摩擦材料は実用の場におい

て相手材と対をなし(フリクションペアーの概念)²⁾¹⁹⁾、摩擦摩耗現象の場にさらされて初めてその性能が評価される宿命を担っている。したがって、現象論的な観点からこの材料をもつと掘り下げれば²⁰⁾、更に興味深く摩擦材料としてのサーメットの本質を解明できたかもしれない。

しかし、限られた紙面でこの点を詳述することはかなりの困難が伴うし、本題から逸脱する恐れもあつて、その詳細については参考文献にゆだねることにした¹³⁾¹⁶⁾²¹⁾。サーメットの研究に手を染めて以来、この材料を摩擦摩耗の用途に適用して今日に及んだが、まだ未解決のまま残っている材料技術的な問題が余りにも多い。また、その応用も、乗用車のブレーキライニングの例をあげるまでもなく、まだこれからだと思ふ。したがって、この材料の将来は実に魅力に満ちあふれている。サーメット材料そのものおよびこの材料の摩擦摩耗現象とのかかわりに興味を持たれる読者にこの解説が何らかの手がかりを与えたとすれば著者にとっては将に望外の喜びといえよう。

文 献

- 1) H. B. HUNTRESS: Cermets, ed. by J. R. TINKLEPAUGH and W. B. CRANDALL (1960), p. 166 [Reinhold]
- 2) A. JENKINS: Powder Metallurgy, 12 (1969), p. 503
- 3) R. FISHER and T. VOLLMER: Powder Metallurgy, 13 (1970), p. 309
- 4) 日本国有鉄道車両設計事務所(新幹線), 新幹線電車技術発達史(250 km/h編)(1976), p. 1041
- 5) (a) 花澤 孝: 潤滑, 14 (1969), p. 126
(b) F. W. ALDRICH and M. G. JACKO: Bendix Technical Journal, 2 (1969), p. 42
- 6) 特許公告番号昭 48-11445
- 7) 會田範宗: 摩擦と潤滑 (1960), p. 188 [岩波]
- 8) 花澤 孝: セラミックデータブック '76 (工業製品技術協会編)(1976), p. 336
- 9) 特許公告番号昭 32-6269, 昭 33-1222, 昭 34-10453
- 10) 特許公告番号昭 34-10453, 昭 48-11445
- 11) S. OZSEVER: Metals Handbook 9th Edition Vol.7 Powder Metallurgy, ed. by E. KLAR (1984), p. 702 [ASM]
- 12) E. KLAR and P. E. MATTHEWS: Powder Metallurgy, ed. by E. KLAR (1983), p. 162 [ASM]
- 13) 花澤 孝: 日本複合材料学会誌, 3 (1977), p. 8
- 14) 特許公告番号昭 42-26370
- 15) U. S. P. 3, 139, 671
- 16) 花澤 孝: セラミックス, 8 (1973), p. 186
- 17) N. A. HOOTON: Bendix Technical Journal, 2 (1969), p. 55
- 18) 花澤 孝: 機械設計, 18 (1974) 9, p. 58
- 19) 特許公告番号昭 45-21168
- 20) 花澤 孝, 藤村 修: 潤滑, 28 (1983), p. 376
- 21) 花澤 孝: Boundary, 1 (1985) 3, p. 11