

ショットピーニングによる接合加工法の開発

豊橋技術科学大学 生産システム工学系
助手 原田泰典
(平成11年度研究開発助成 AF-1999021)

キーワード：ショットピーニング，接合，表面改質

1. はじめに

エネルギーの有効利用のため，輸送用車体における構造用材料の軽量化が要求されており，アルミニウム合金やマグネシウム合金の材料開発が行われている¹⁾．とくにマグネシウム合金はアルミニウム合金に代わる次世代材料として期待され，研究が盛んに行われている材料である^{2)・3)}．軽量性に加えて，比強度，比剛性，電磁遮蔽能，リサイクル性などに優れていることから，プラスチックの代替材として各分野での利用が急激に増加している．しかしながら，铸造性や加工性とともな耐摩耗性の低いことが利用上の大きな問題となっている．表面に適切な高硬度および厚さを有する異種材を被覆することができれば，耐摩耗性は飛躍的に向上できるので軽量構造用材料としての利用範囲は大きく広がると考えられる．

アルミニウム合金に対し，異種材を被覆する方法としてめっき⁴⁾や溶射⁵⁾などがあるが，従来法では適切な膜厚や接合強度が得られにくく，また難接合性材料であるマグネシウム合金においても従来法の適用が困難である．また，異種材を接合するためのクラッド法⁶⁾もあるが，両材をかなり大きな塑性変形をさせなければならない．熱処理型アルミニウム合金や稠密六方晶構造をもつマグネシウム合金の塑性加工性はあまりよくない．したがって，これまでにアルミニウム合金やマグネシウム合金への異種材の適切な接合加工法は見あたらず，その技術開発が強く求められているのが現状である．

著者らは，金属材料の表面特性を向上させるためにショットピーニング加工を用いた異種金属薄板のライニング加工法を提案している⁷⁻⁹⁾．アルミニウム合金やマグネシウム合金の耐摩耗性を向上させるため，ニッケル，チタンおよびステンレス鋼などの硬質金属薄板のライニング加工を行った．接合性の低いマグネシウム合金では，インサート材の使用と母材への加熱などの工夫で接合性を高めた．耐摩耗性をさらに向上させるためには，より硬質な材料，例えば超硬合金やセラミックスなどのライニングは有効であると考えられる．しかしながら，これらの硬質材料は脆性で接合性が低く，とくに接合性の低いマグネシウム合金へのライニング加工は非常に困難であると考えられる．

本研究では，アルミニウム合金およびマグネシウム合金

の耐摩耗性を向上させるため，硬質材料の粉末を用いることによってライニング加工を試みた．また，硬質粉末をライニング加工した材料表面の耐摩耗性を評価するため，摩耗試験も行った．

2. 硬質粉末のライニング加工法

2.1 ライニング方法

材料表面に硬質粉末を載せた状態でショットピーニング加工を行うと，投射に伴う風圧によって硬質粉末が飛び散るため，粉末の安定した固定が必要である．そこで，硬質粉末を載せた材料表面に純アルミニウムなどの軟質金属薄板で覆うことにより粉末の固定を試みた．しかしながら，風圧による硬質粉末の飛散は防げたが，加工に伴うショットの衝撃によって硬質粉末の固定は不安定であった．

硬質粉末を材料表面に均一に固定するため，材料表面が凹凸面になるように予めショットピーニング加工による前処理を施した．Fig. 1 に前加工を利用したライニング加工を示す．前加工によって生じた凹凸面の凹部に硬質粉末が埋まるようになっており，また粉末は軟質金属薄板を載せることによって風圧からも保護されるようになっている．

2.2 加工装置と実験材料

ショットピーニングによるライニング加工は，マスキングを用いた接合方法⁹⁾で行った．マスキング板は厚さ6mmの合金工具鋼(HV700)であり，ライニング加工部の寸法は幅40mm，長さ90mmである．試験片はマスキング板とともにヒーター内蔵の台座に固定し，大気中で所定の試験温度に保持後ライニング加工を行った．ショットピーニング加工は，広範囲な投射が可能な遠心式投射型装置(新東工業(株)社製，SZA1型)を用いた．ショットは高炭素鋳鋼(HV700)である．Table 1 に遠心式投射装置における加工条件を示す．

母材は市販のアルミニウム合金 A2017(A1-Cu)，A5052(A1-Mg)および市販のマグネシウム合金 AZ31B，AZ91Dを用いた．硬質粉末($\phi=0.05\sim 0.1\text{mm}$)は，市販の純クロム，超硬合金およびセラミックスを用いた．Table 1 に実験材料を併せて示す．

2.3 耐摩耗性の評価

材料表面の耐摩耗性を調べるため，2種類の方法で試験を行った．Fig. 2 に大越式磨耗試験機による試験方法を示す¹⁰⁾．ライニング加工した試料表面を一定加重下の回

転円盤によって強制摩擦を行い、得られた磨耗痕から痕の形状を測定した。式(1)により被磨耗材料の相手材料に対する磨耗特性を表す比磨耗量（比例定数）の算出を行った。磨耗痕形状の測定は1つの試料において3点以上行い、その平均値を比磨耗量とした。

$$W = \frac{a b^3}{8 r P L} \quad (1)$$

ここで、W：比磨耗量，a：磨耗痕の縦幅，b：磨耗痕の横幅，r：回転円盤半径，P：最終負荷およびL：磨耗距離である。

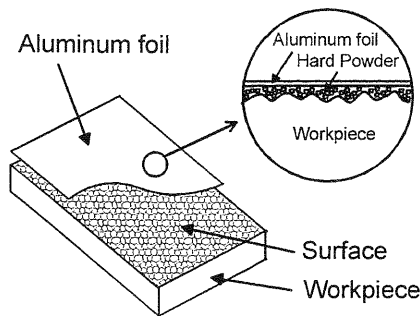


Fig. 1 Schematic illustration of shot lining of workpiece with hard powders

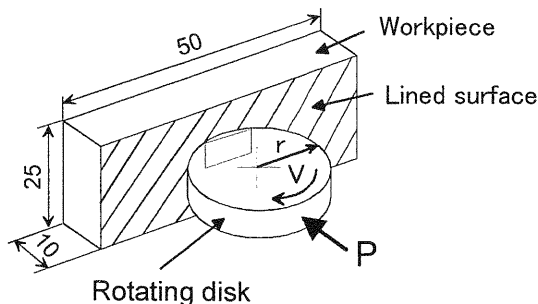


Fig. 2 Schematic illustration of wear test of Ohkoshi type

Table 1 Working conditions used for shot peening experiment

Equipment	Centrifugal peening
Shot material	High carbon cast steel
Shot diameter d / mm	1.0
Impact speed v / m/s	40, 80
Coverage %	100
Heating temp. T / °C	20 - 400
Workpiece	A2017, A5052, AZ31B, AZ91D
Hard powder (d=0.05 - 0.2 mm)	Chromium, Alumina, Zirconia, Cemented carbide
Insert powder (d=0.065 mm)	A1050
Surface finish (Emery paper)	# 120 (Ra=3.3 μm),
Atmosphere	Air

Table 2 Working conditions in wear test

Ohkoshi type	Grindstone type
Time of wear 84 s	Time of grinding 10, 30 s
Rotational velocity of disk 25.3 rps	Rotational velocity 167 rps
Diameter of disk r=30 mm	Diameter of grindstone 6 mm
Weight P=6.3 kg	Weight 2.2 kg
Material of disk SKS	Material of grindstone WA
Atmosphere Dry	Atmosphere Wet

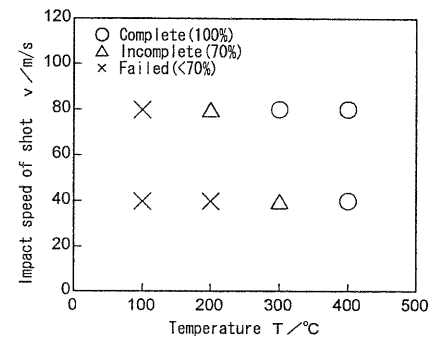


Fig. 3 Relationship between impact speed of shot and temperature for A2017 workpiece and chromium powders

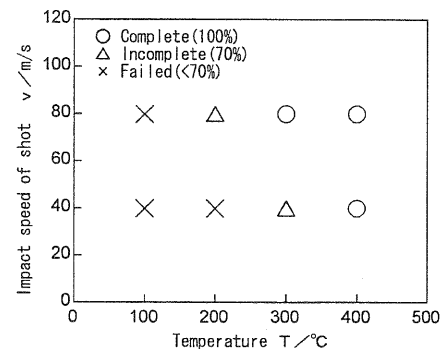


Fig. 4 Relationship between impact speed of shot and temperature for AZ91D workpiece and cemented carbide powders

つぎに、大越式磨耗試験から得られた結果と比較するため、軸付き回転砥石による研削試験¹¹⁾を行った。小型モーターの先端に円筒状軸付き砥石を取付け、一定荷重をかけた状態で砥石を回転させて接合表面の研削を行った。得られた研削量によって磨耗性を評価した。Table 2 に2種類の試験条件を示す。

3. 硬質粉末のライニング加工

3.1 限界ライニング加工温度

硬質粉末が金属母材にライニングする投射速度と加工温度の関係を調べた。母材表面はショットピーニング加工による前処理を施した。Fig. 3 にアルミニウム合金 A2017 に対するクロム硬質粉末のライニング状態を示す。ライニング加工温度が高く、また投射速度が高くなると、硬質粉末のライニングが可能となるのが分かる。他の硬質粉末におけるライニング状態も同様な傾向を示した。

母材材質をマグネシウム合金に変化させて接合状態を調べた。Fig. 4 にマグネシウム合金 AZ91D に対する超硬合金粉末のライニング状態を示す。接合面が酸化しやすいため、マグネシウム合金はアルミニウム合金母材に比べて接合性が低い。本研究では、両母材において、硬質粉末のライニングが可能となる限界ライニング加工温度以上で行った。

3.2 ライニング加工した試験片の断面組織

Fig. 5 にアルミニウム合金母材に硬質粉末をライニング加工した試験片の断面を示す。硬質粉末はショットの衝突によって母材表面に均一に接合しているのが分かる。また、接合した硬質粉末は母材と空隙もなく密着しており、接合性は良好であると思われる。

Fig. 6 にマグネシウム合金母材に硬質粉末をライニング加工した試験片断面を示す。アルミニウム合金母材で得られた結果と同様に、硬質粉末の母材に対する接合性は良好であると思われる。

3.3 バインダー材の添加

接合性の低いマグネシウム合金のライニング加工性を向上させるため、硬質粉末に純アルミニウム粉末をバインダー材として添加して加工を行った。バインダー材の硬質粉末に対する添加率は、体積比率で 20%である。マグネシウム合金 AZ91D と超硬合金粉末のライニング加工において、投射速度 80m/s、加工温度 250°C で硬質粉末の加工が可能であった。バインダー材添加なしの限界ライニング温度に比べて約 50°C 低い (Fig. 4) ことから、バインダー材の添加はマグネシウム合金に対するライニング加工性を向上させるのに有効であることが分かった。

3.4 接合強度

3.2 では、硬質粉末がアルミニウム合金及びマグネシウム合金母材に良好にライニング加工しているのが観察された。しかしながら、硬質粉末と母材との接合強度を測定することは困難である。そこで、ライニング加工した硬質粉末の母材に対する接合性を調べるため、ライニング加工した母材表面を外側にして 3 点曲げ試験を行った。投射速度 80m/s、加工温度 300°C でアルミニウム合金 A2017 母材と硬質粉末のライニング加工において、母材が加工限界以上になったときの接合部付近の SEM 写真を Fig. 7 に示す。硬質粉末の接合した母材表面は曲げによる引張りによって割れを生じたが、硬質粉末は母材から離脱することなく、母材との接合性は非常に良好であった。

3.5 金網を用いたライニング加工

3.1 では、硬質粉末を母材表面に均一に固定するため、母材表面をショットピーニング加工による前処理を施すことが必要であった。そこで、前処理なしで硬質粉末を母材表面に対し均一に固定するため、金網の網目を用いた加工を試みた。すなわち、母材表面に載せた金網の網目間の空隙に硬質粉末を埋めた状態で、金網とともにショットピーニング加工を行った。ただし、硬質粉末は加工に伴う風圧から保護するため、軟質金属薄板によって覆った。

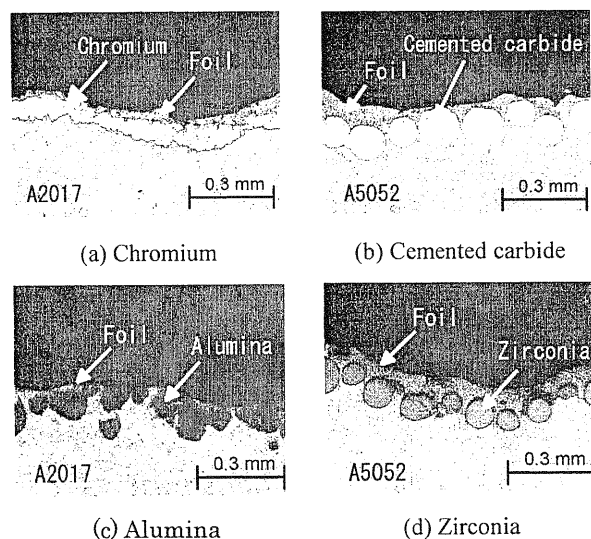


Fig. 5 Microscopic photographs of cross section for aluminum alloys workpieces and hard powders

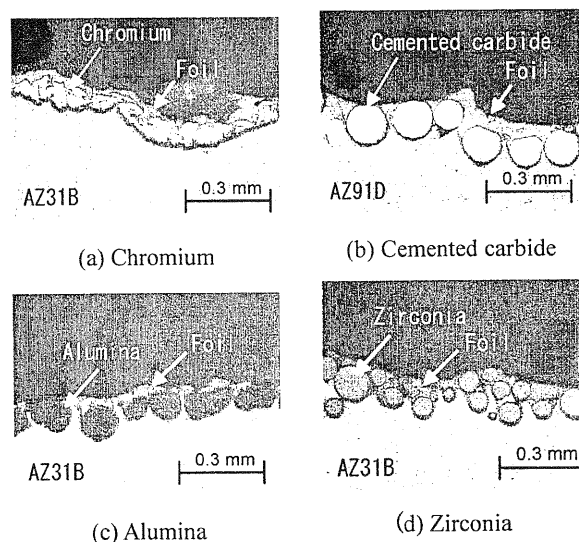


Fig. 6 Microscopic photographs of cross section for magnesium alloys workpieces and hard powders

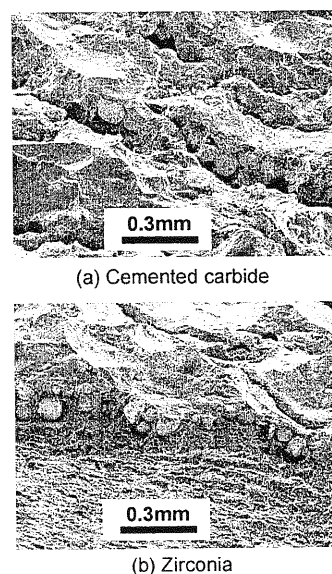


Fig. 7 SEM photographs of surface of lined workpieces after bending ($v=80$ m/s, $T=300^\circ\text{C}$, A2017)

マグネシウム合金 AZ91D 母材とクロム粉末において、ステンレス鋼製金網を用い、投射速度 80m/s、加工温度 300°C でライニング加工を行った。接合性を高めるため、バインダー材として純アルミニウム粉末を体積比率で 20% 添加した。さらに、母材と金網の間に純アルミニウム薄板 ($t=0.015\text{mm}$) をインサート材として挿入した。加工後の試験片の表面写真を Fig. 8 に示す。硬質粉末は金網とともに均一に母材表面に接合しており、また硬質粉末は空隙もなく網目間に存在しているのが分かる。

4. サンドイッチ薄板を用いたライニング加工

4.1 ライニング方法

前章では、硬質粉末を母材表面に均一に載せるため、ショットピーニングによる前処理 (Fig. 1) と金網の網目を用いた方法 (Fig. 8) を行った。本研究では、より簡便な硬質粉末のライニング加工を行うため、予め硬質粉末を均一に含んだサンドイッチ薄板を作製し、その薄板のライニング加工を試みた。

Fig. 9 にサンドイッチ薄板を用いたライニング加工方法を示す。サンドイッチ薄板は、上下の純アルミニウム箔の間に硬質粉末を均一に置いた状態で加圧 (約 130 MPa) して作製した。硬質粉末は 0.015mm 厚さの純アルミニウム箔間にサンドイッチされている。母材表面にサンドイッチ薄板を載せた状態でライニング加工を行った。サンドイッチ薄板は、アルミニウム合金母材に対し、投射速度 80m/s の場合、加工温度 250°C 以上でライニングが可能であった。同様に、マグネシウム合金母材に対しても投射速度 80m/s で、加工温度 300°C 以上でライニングが可能であった。

4.2 ライニング加工した試験片の断面組織

Fig. 10 に投射速度 80m/s、加工温度 300°C でマグネシウム合金母材に硬質粉末を含むサンドイッチ薄板をライニング加工した試験片の断面を示す。硬質粉末はサンドイッチ薄板とともに母材表面に均一に接合している。サンドイッチ薄板を用いたライニング加工は、接合性の低いマグネシウム合金母材に対しても有効であることが分かる。

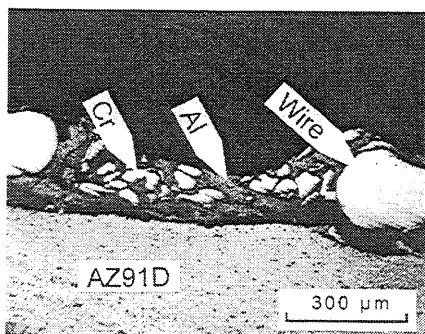


Fig. 8 Microscopic photographs of cross section for magnesium alloy workpiece and chromium powders using a stainless steel wire mesh ($v=80\text{ m/s}$, $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$)

本加工方法は、硬質粉末の母材への固定が簡便であるため、粉末を材料表面に均一に固定できない機械部品、例えば円管などのような曲面をもつ円筒部品に対し、ライニング加工が可能であると思われる。

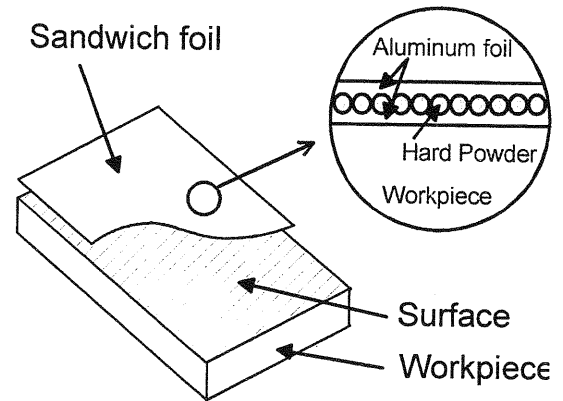
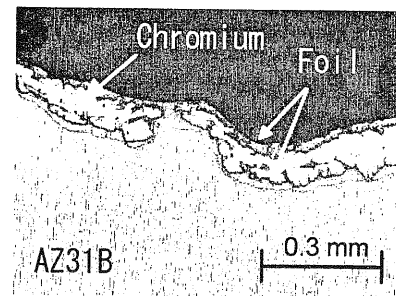
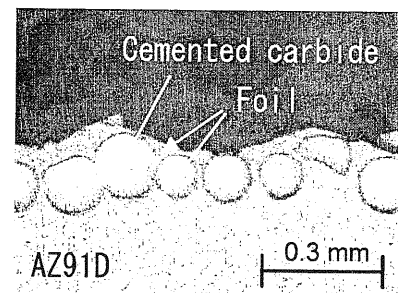


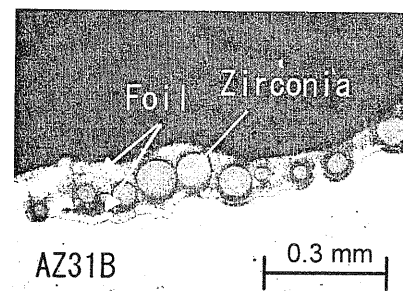
Fig. 9 Schematic illustration of shot lining of workpiece with hard powder using a sandwich foil



(a) Chromium



(b) Cemented carbide



(c) Zirconia

Fig. 10 Microscopic photographs of cross section for magnesium alloys workpieces and hard powders using a sandwich foil ($v=80\text{ m/s}$, $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$)

5. 磨耗試験

5.1 大越式磨耗試験

投射速度 80m/s, 加工温度 300°Cで, 硬質粉末をライニング加工した母材表面における耐磨耗性の評価を行った. Fig. 11 に大越式磨耗試験を用いて磨耗試験を行った比磨耗量と磨耗時間の関係を示す. ここで, 比磨耗量は磨耗前の母材板厚に対する磨耗後の板厚の比である. 比較のため, 硬質粉末をライニング加工していない母材に対しても磨耗試験を行った. ライニング加工していない母材表面の比磨耗量に比べると, ライニング加工した母材表面のそれはかなり向上している. とくに硬質粉末が超合金とアルミナの場合, 顕著に見られる.

5.2 回転砥石による研削試験

大越式磨耗試験で得られた結果と比較するため, ライニング加工した表面の回転砥石による研削を行った. Fig. 12 に研削砥石を用いた磨耗試験で得られた磨耗量と時間の関係を示す. 超合金とアルミナの粉末をライニング加工した材料表面において, 耐研削性は高いのが分かる. この傾向は大越式磨耗試験で得られた結果 (Fig. 11) と同じ傾向である.

Fig. 13 に研削試験を行った母材表面近傍の断面を示す. 研削砥石によって母材表面は硬質粉末とともに平滑な表面に研削されているが, 硬質粉末は母材から離脱することなく強固に接合しているのが分かる. とくに, 超合金粉末とアルミナ粉末は研削後も母材表面に多く残存しており, 耐磨耗性が良好であることが分かる.

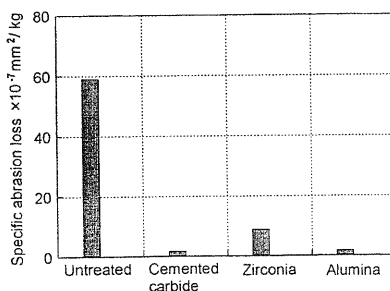


Fig. 11 Specific abrasion loss for lined workpieces ($v=80 \text{ m/s}$, $T=300^\circ\text{C}$, A2017)

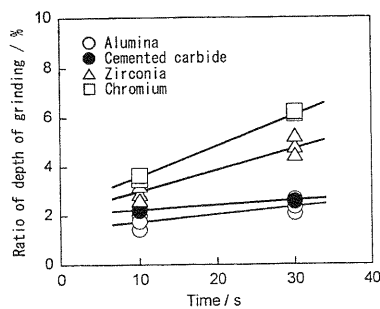
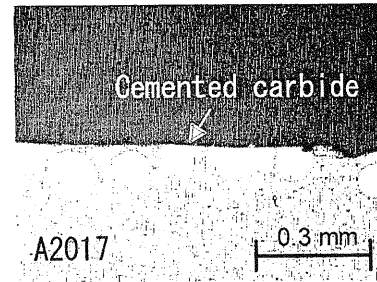
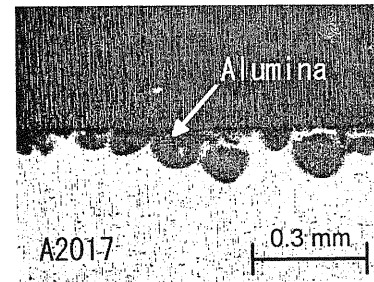


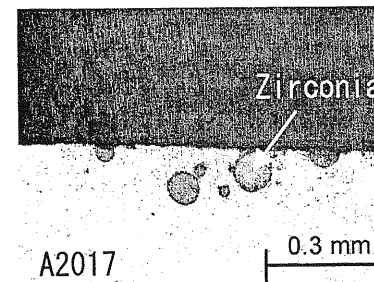
Fig. 12 Relationship between grinding time and ratio of depth of grinding ($v=80 \text{ m/s}$, $T=300^\circ\text{C}$, A2017)



(a) Cemented carbide



(b) Alumina



(c) Zirconia

Fig. 13 Microscopic photographs of cross section for aluminum alloy A2017 workpieces and hard powders after grinding

6. 結 言

軽量合金の耐磨耗性を向上させるため, ショットピーニングによる硬質粉末のライニング加工を行い, 以下の結果を得た.

- 1) 硬質材料の粉末を用いることと母材表面の前加工処理を行うことにより, 硬質材料の母材表面への均一なライニング加工は可能であった. また, 金網の網目を利用した硬質粉末のライニング加工も有効であった.
- 2) 活性な純アルミニウム粉末をバインダー材として用いることは, ライニング加工性の向上に有効であった.
- 3) 硬質粉末のサンドイッチした薄板を用いることにより, より簡便な硬質材料のライニング加工が可能であることが分かった. さらに, サンドイッチ薄板によるライニング加工は, 円管などの曲面をもつ機械部品へのライニング加工の可能性があったことが分かった.
- 4) 硬質粉末をライニング加工した母材の曲げ試験によって, 硬質粉末の母材との接合性は良好であることが分かった.

5) 磨耗試験において、硬質粉末のライニング加工によって母材の耐摩耗性の向上が見られた。とくに、超硬合金粉末とアルミナ粉末をライニング加工した母材の耐摩耗性は良好であった。

謝辞

本研究を行うにあたり、(財)天田金属加工機械技術振興財団より奨励研究助成金を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日刊工業新聞社：機械技術，48-10(2000)，33-45.
- 2) Landkof, B. : Magnesium Alloys and their Applications, (2000), 168-172, WILEY-VCH.

- 3) Luo, A. A. : Magnesium Technology 2000, (2000), 89-98, TMS.
- 4) 本間八朗：素形材，28-2(1987)，2-11
- 5) Delacressonni, R. B. : Rev. Alum., 514(1982)，75-82
- 6) 日本塑性加工学会：最新塑性加工要覧，(2000)，390-394.
- 7) 原田泰典・森謙一郎・牧清二郎：塑性と加工，40-464 (1999)，895-899.
- 8) 原田泰典・森謙一郎・牧清二郎：塑性と加工，40-466 (1999)，1106-1110.
- 9) 原田泰典・森謙一郎・原政明・牧清二郎：塑性と加工，42-486 (2001)，48-52.
- 10) 大越諒，佐田登志男，水野万亀男：機学論文，21-107 (1955)，555-561.
- 11) 原田泰典，小杉仁，森謙一郎，牧清二郎，竹田仁，伊藤俊郎，瀬野尾和久：第 52 回塑性加工連合講演会，(2001)，327-328.