境界潤滑下の亜鉛合金の軸受性能に及ぼすAlとSiの影響

瀬川 赳夫* 佐藤 鉄男** 木村 康夫**

J. Japan Inst. Metals, Vol. 47, No. 6(1983), pp. 515-520

Effects of Al and Si of Zinc Alloys on the Bearing Performance under Conditions of Boundary Lubrication

Takeo Segawa*, Tetsuo Sato** and Yasuo Kimura**

Zinc alloys containing the hard phase are expected to have a high wear resistance. In this study, the effects of Al and Si of zinc alloys on the bearing performance under conditions of boundary lubrication have been investigated. A thrust type wear testing machine was used in the test.

The best wear resistance of Zn alloys was observed in a Zn alloy containing 10%Al and 1%Si by measuring the load carrying capacity. After wear testing of the Zn alloy containing Al and Si, the worn surface was covered by a thin layer around 1 μ m in thickness. This thin layer was rich in silicon and poor in aluminum as compared with the inner part of the specimen. It is concluded that the stable thin layer has a good wear resistance for the zinc bearing alloy.

(Received January 12, 1983)

Keywords: bearing material, boundary lubrication, load carrying capacity, wear, surface analysis, zinc-aluminum-silicon-copper alloys, hexagonal matrix alloys

I. 緒 言

軸受合金としては、従来、銅合金やホワイトメタルなどが主として使用されてきた⁽¹⁾。近年、機械類が高速化、高荷重化、小型化するにつれて、さらに高性能で安価な材料が、産業界において望まれている。亜鉛は低価格であり、また潤滑油との化学反応性がすぐれていることから摩擦係数が小さく、すべりもなめらかである⁽²⁾。すなわち亜鉛合金は本来、油潤滑性にすぐれているが、一方機械的強度が弱く、また低融点であり、やわらかいので、油膜が薄くなったとき、凝着しやすく、熱膨張係数が大きい欠点をもっている。これらの欠点の改良策として、Al, Cuなどを添加して強度、硬さを増加させた軸受合金が存在し、オーストリアではAlzen 305合金という5~10%Cu, 30~40%Alを含む亜鉛合金が使用されているが⁽³⁾、銅合金に匹敵する

軸受性能をもっているとはいえない。

梶山ら⁽⁴⁾により、Alを22~50%含む亜鉛合金の耐摩耗性の研究結果が報告されている。その試験方法は乾燥状態で大越式摩擦試験機によるもので、それによるとAlが多いほど耐摩耗性がわずかながら向上してゆくが高速度ではいずれの組成も焼きつき摩耗を生ずる。これにCuを添加すると耐摩耗性は大きく改善され、Cu量3%以上では摩擦速度が増加しても良好な耐摩耗性を示す。623 K (350°C)で86.4 ks (24 h)加熱処理後空冷した場合、耐摩耗性が向上する。またSiとMgを同時に添加するとさらに性能が向上すると報告されている。しかしこれらの結果は、乾燥摩擦試験の結果であり油潤滑軸受に使用する場合の境界潤滑⁽⁵⁾下の摩擦性能は評価しがたい。

Gervaisら⁽⁶⁾やKennethら⁽⁷⁾は27%Al-2%Cu-0.01%Mg, 11%Al-0.75%Cu-0.02%Mg, 8%Al-1%Cu-0.015%

* オイレス工業株式会社 (Oiles Industry Co. Ltd., Fujisawa)

** 東京大学工学部金属工学科 (Department of Metallurgy, Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Tokyo)

Mg をそれぞれ含む亜鉛合金について軸受への応用面を記述しているが、油潤滑下の基本データが示されていない。

著者らは、高性能な亜鉛合金を開発すべく独立に研究を進めてきた。研究の主眼点を境界潤滑下における軸受性能に置いた。すなわち低速高荷重で油の供給が不十分な状態の、いわゆる境界潤滑下において、相手材へ大きく凝着することがないような亜鉛合金の開発を目的とした⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

本報告は亜鉛合金の Al と Si の含有量を変えて、境界潤滑下における亜鉛軸受合金の最適成分を見いだすとともに軸受性能を明らかにした。

II. 試料および実験方法

試料はすべて鑄造材であり、シリコニット炉を用い、黒鉛ルツボ中で溶解し金型に鑄造した。溶解原料としては、99.99% の電気亜鉛、99.7% Al、99.9% Cu、Al-25% Si 母合金、98% Si を用いた。合金成分は、Al を 5~30%、Si を 0~4% まで変化させ、Cu は 1% 一定とした。なお、Cu は機械的性質を向上させるが、多くなると寸法安定性が悪くなるので 1% にした⁽¹⁰⁾。Si 5% 以上添加すると溶解作業が困難となるので 4% にとどめた。

合金を舟底型金型に試料を鑄造し、これより JIS 4 号引張試験片を削りだし、アムスラー式試験機で引張試験を行なった。ブリネル硬さ試験は、直径 40 mm、長さ 100 mm の縦型金型に丸棒を鑄造し、その底部より 40 mm のところの断面の、鑄物中心と円周部の中間のところを荷重 9.81 kN で測定した。

摩擦試験機にはボール盤改良スラスト試験機を用いた。摩擦試験機にはいろいろな形式のものがあるが^{(11)~(13)}、この形式を選んだ理由は、この形式が境界潤滑下の試験に適しており、結果が実際の軸受性能とよい相関関係をもっているからである。Fig. 1 にその概略図を示す。図中、摩擦試験片 C は、試料ホルダー上に固定し、試料ホルダーの下部には、自動調心作用をするために D のように直径 4 mm のボール 2 対をたがい直角に配し、これにより摩擦面の片当りを防止し、いわゆる油膜によるくさび効果が起らないようにした。すなわち流体潤滑⁽¹⁴⁾下ではなく境界潤滑下で試験できるようにした。さらにその下部にはスラストボールベアリング E をはめた。アーム G によって摩擦力の測定を可能にした。B は相手すべり材料で、上部の回転スピンドルにとりつけ、上部から荷重を加えた状態で回転する。F は熱電対で、試料温度が 373 K に達すると自動的に試験機が停止するようにセットされ、また運転時の温度は自動記録された。摩擦試験片は、直径 22 mm、長さ 100 mm の縦型金型(金型外径 82 mm)に鑄造した丸棒の下部より 20 mm 上の部分から削りだし、その寸法は内径 10.5 mm、外径 16.5 mm、長さ 12 mm であり、摩擦面として、その端面を用いた。仕上方法は旋盤で加工した。顕微鏡組織は摩擦面から 3 mm 内側の面を観察した。摩擦相

A: Driving spindle
B: Rotating mating material
C: Specimen
D: Ball
E: Thrust bearing
F: Thermocouples
G: Torque measuring arm

Fig. 1 Schematic representation of the wear testing machine.

手材は機械構造用炭素鋼 S45C 丸棒より内径 5 mm、外径 30 mm、長さ 20 mm の大きさに削りだし、摩擦面はエメリーペーパー #240 で研磨し、アセトンで脱脂後、SAE 30 エンジンオイルを塗布して摩擦した。油の供給方法を摩擦面に塗布することのみにした理由は、油の供給量を少なくして、境界潤滑条件を作りやすくするためである。摩擦速度は 0.05 m/s で、このように低速度を選んだ理由も境界潤滑下での摩擦性能を評価するためである。荷重のかけ方として、一定荷重試験と累積荷重試験の 2 種類の試験方法を行なった。前者の方法は、はじめ 3.92 MPa の荷重をかけ、1.8 ks のなじみ運転後、荷重を 19.6 MPa に増加し、28.8 ks の寿命試験を行なった。このような条件を選んだ理由は、この寿命試験にパスすれば、実用上問題のない軸受性能がえられるからである。後者の方法は 18 ks ごとに荷重を 1.96 MPa ずつ増加し、試料温度が 373 K を越えるか、試料高さの変化量が 0.05 mm を越える場合に、この荷重を限界荷重とした。一定荷重試験を 1 次試験として、おおよその傾向を把握し、累積荷重試験を 2 次試験として、より詳細に性能を把握できるようにした。さらに摩擦の進行状況を把握するために、代表的試料 3 種類について摩耗率測定試験を行なった。その方法は、荷重 1.96 MPa、摩擦時間 18 ks の試験の後に、試験片を試験機から取りはずし重量、寸法変化量を測定し、再び潤滑油を塗布して荷重を 1.96 MPa ずつ増加させ、摩耗量が急激に増加する荷重まで試験を続けた。摩耗率の計算方法は、試料の高さの寸法減少量を測り、それに摩擦表面積を乗じた値をすべり距離で除した値を用いた。相手材の摩耗率は、重量減量をすべり距離で除した値を用いた。

摩擦面の観察には冷間埋込樹脂に試料を埋込み、研磨後、樹脂を取り除いて、試料表面を清浄にし、摩擦面の直角断面を走査電子顕微鏡で観察した。また X 線マイクロアナライザー (XMA) で成分分析を行なった。

III. 実験結果および考察

1. 機械的性質の測定

Fig. 2 に亜鉛合金の Al と Si 量に対する引張強さ、伸び、ブリネル硬さの変化を示す。引張強さについては、Al 量が増加するにつれて増加するが、Al 20% 以上では、ほぼ一定となる。Si 量については明瞭な差は認められないが、Si 1, 2% 含有のものは Al 10% 以下では引張強さを低下させ、Al 10% 以上では、引張強さを向上させる傾向にある。伸びについては、Si 無含有のものは Al が増加するにつれて伸びも増加し、Al 20% 以上では一定となる。Si を 1~2% 含有した亜鉛合金の伸びは Al 20% 付近に極大値を示すが、その量は非常に低い。ブリネル硬さは、Al 量が増加するにつれて増加し Al 20% 以上では一定となり、Si の含有は硬さを少し高くする。以上の結果から、亜鉛合金への Al の添加は引張強さ、伸び、硬さを高くさせるが、Si の複合添加は硬さを高くさせるが、伸びを非常に低下させる。

Fig. 2 Effect of Al and Si on ultimate tensile strength, elongation and Brinell Hardness of zinc alloys.

2. 一定荷重試験

Si 量を 2%, Cu 量を 1% と一定として、Al 量を 4~20% の範囲に変化させた亜鉛合金の荷重 19.6 MPa の一定荷重試験の結果を Fig. 3 に示す。Al 量 4~13% の亜鉛合金が摩擦性能によく、それ以上になると凝着しやすくなる。これらの試料の Al 量の違いによる初晶デンドライトの大きさの差を Fig. 4 に示す。Fig. 4(a) は 7% Al 合金の顕微鏡組織であり、Fig. 4(b) は 16% Al 合金のものである。両者を比較すると、16% Al 合金のほうが、Al に富んだ初晶デ

ンドライトが全体にしめる割合が大きく、Al 本来の性質である凝着しやすさの傾向が強くなり、軸受性能が低下するものと思われる。次に Al を 10%, Cu 量を 1% と一定として、Si 量を 0~4% まで変化させその影響をしらべた結果を Fig. 5 に示す。0% Si 合金では 7.2 ks で凝着をおこし、温度が上昇したので試験を中止した。1~4% Si では、どの試料も 28.8 ks の試験時間中、異常なく回転し、この試験条件をみたした。これらの試料の顕微鏡写真を Fig. 6 に示す。黒色析出物が Si であり、0.5% および 1% Si 合金では Si 粒子がこまかく分散しているが、合金に 2% 以上 Si が添加されると Si 粒子が大きく、しかも不定形となっている。

Fig. 3 Effect of Al content on the wear life of zinc alloys.

Fig. 4 Microstructures of the Zn-Al-2%Si-1%Cu alloys, (a) 7% Al, (b) 16% Al. Etchant: solution of chromium trioxide, 200 g; sodium sulfate, 7.5 g; water, 1 L.

Fig. 5 Effect of Si content on the wear life of zinc alloys.

Fig.6 Microstructures of the Zn-10%Al-Si-1%Cu alloys, (a) 0%Si, (b) 0.5%Si, (c) 1%Si, (d) 2%Si, (e) 3%Si, (f) 4%Si. (not etched)

3. 累積荷重試験

前項の一定荷重試験結果では Al, Si 量の最適値がつかめなかったため、18 ks ごとに 1.96 MPa ずつ荷重を増加させてゆく累積荷重試験を行なった。その結果を Fig.7 に示す。Al 量の影響については、0, 1, 2%Si のいずれの場合も Al 10% で耐荷重性の極大値を示し、Si 量の影響については 1%Si で最大の耐荷重性を示し、2%Si では、ややそれより劣った性能を示した。これらの試料の代表的顕微鏡組織として、10%Al で 0, 1, 2%Si を含む合金の組織と、20%Al で 0, 1, 2%Si を含む合金組織を Fig.8 に示す。Fig.8 は無腐食の組織で、黒色粒子は Si である。2%Si では 1%Si よりも粒子が大きくなっているが、10%Al と 20%Al の場合の Si の大きさの差はほとんどない。10%Al と 20%Al 合金を腐食した場合 Al に富んだ初晶デンドライトの大きさが両者で異なり、10%Al 合金では初晶デンドライトの全体に占める割合が 20%Al 合金よりも小さい。Si 含有量は初晶デンドライトの大きさにはほとんど影響していない。Si を含まない亜鉛合金では相手材と直接接触して、非常に凝着しやすいために耐荷重性が劣る。1, 2%Si を含有する亜鉛合金では Si 粒子が存在するので、亜鉛合金と相手材との凝着を防ぎ耐荷重性が高くなるものと思われる。また、2%Si を含有する合金は 1%Si を含有する合金よりも Si 粒子が大きくなり、また角ばった角が多くなるので 1%Si のものよりも耐荷重性が劣るものと思われる。

Fig.7 Effect of Al and Si content on the maximum load carrying capacity of specimens.

Fig.8 Microstructures of the zinc alloys, (a) 10%Al, 0%Si, (b) 10%Al, 1%Si, (c) 10%Al, 2%Si, (d) 20%Al, 0%Si, (e) 20%Al, 1%Si, (f) 20%Al, 2%Si. (not etched)

4. 摩耗率測定試験

前項の累積荷重試験によって亜鉛合金の Al と Si 含有量と耐荷重性の関係が把握できたが、さらに Si 量と摩耗量との関係を把握するために摩耗率測定試験を行なった。Al 量を 10%, Cu 量を 1% と一定として、Si 量を 0, 1, 2% 変化させた亜鉛合金の試料の摩耗率を測定した。Fig.9(a) は亜鉛合金試験片の摩耗率を示したもので、0%Si 合金では荷重 9.81 MPa で摩耗率の急上昇を示したが、1%Si 合金では 25.5 MPa でもごくわずかの摩耗率であり、摩擦表面の損傷もほとんど生じなかった。2%Si 合金では、17.7

MPa で摩耗率が急上昇し、相手材も少しかじられており、1%Si 合金よりも性能が劣った。Fig.9 (b) は相手材 S45C の摩耗率であり、Si 含有量が多くなると相手材の摩耗が増加する傾向にあるが、2%Si 合金ではかなり大きいものの、1%Si 合金ではほとんど問題にならないとみてよい。これらのそれぞれの試料の試験最後の 3 段階の荷重時の試料温度を Fig.10 に示す。0%Si 合金では 9.8 MPa の時、温度に乱れを生じているが、1%Si 合金では 25.5 MPa のときでも温度が高いにもかかわらず安定した状態を示している。2%Si 合金で 17.7 MPa のとき、温度の乱れを生じた。これは相手材をかじったため表面が荒れて摩擦が不安定になったことを示す。しかるに 1%Si 合金では温度が高いにもかかわらず安定していることは、摩擦面が荒れていなく摩擦がスムーズであったためと思われる。

Fig.9 Effect of Si content on the wear rate of Zn-10%Al alloys and mating materials (S45C).

Fig.10 Temperature of each specimen in the last three stages of the wear rate measuring tests.

5. 摩擦面直角断面の XMA 分析

以上の実験より、亜鉛合金の Si 含有量が適正量存在すると耐荷重性が非常に向上することが明らかとなった。その原因を調べるために摩擦表面の XMA 分析を行なった。試料としては 0%Si 合金と 1%Si 合金を用い、これらの試料にまだ摩耗が生じない荷重、すなわち 0%Si 合金では 5.9 MPa, 1%Si 合金では 13.7 MPa で試験をやめ、それらの摩擦面の直角断面を XMA で分析した。Fig.11 (a)~(e) は 1%Si のものであり、(a) は反射電子像、(b) は Si 像、(c) は (b) の AB 間の Si の線分析、(d) は Al 像、(e) は (d) の AB 間の Al の線分析である。摩擦表面で Al が少なくなり、摩擦表面に 1 μ m 以下の厚さの Si に富む非常に薄い皮膜が形成されているのが観察された。Fig.11 (f)~(j) は 0%Si 合金のものであり、摩擦面には Si はほとんど存在しないが、Al が試料内部より多く存在している。0%Si 合金と 1%Si 合金の摩擦表面を比較してみると 1%Si 合金では摩

Fig.11 SEM photograph and X-ray images on the cross-section of sliding surface of zinc alloy specimens. left : 1%Si specimen. right : 0%Si specimen. (a), (f) B.S.E., (b), (g) Si image, (c), (h) line scanning profiles of Si along the A-B line of (b), (g), each, (d), (i) Al image, (e), (j) line scanning profiles of Si along the A-B line of (d), (i), each.

擦面で Al 量が減少し Si 量が多く、これが亜鉛合金と相手材との凝着を防ぎ耐荷重性を高くする原因と考えられる。

IV. 結 言

境界潤滑下の亜鉛合金の軸受性能に及ぼす Al と Si の影響について研究した結果をまとめると次のようになる。

(1) Al 量が 10% 付近の合金では、Al に富む初晶デンドライトが細かく耐荷重性がよいが、Al 含有量がそれ以上多くなると、しだいに初晶デンドライトの占める割合が多くなって、Al の潤滑性能の悪化の影響が大きくなりあらわれて、耐荷重性が低下してくる。

(2) Si 量 0.5~2% 含む合金で耐荷重性は改善されるが、これは摩擦している間に、Si を多量に含む皮膜が摩擦表面に形成され、これが相手材と亜鉛合金との金属接触を防止し、耐荷重性を向上させるものと思われる。10%Al を含む亜鉛合金の Si 量の最適量は約 1% である。

(3) 本実験における亜鉛合金では、引張強さ、硬さが高いことが必ずしも耐荷重性を向上させるものではない。約 10%Al を含む亜鉛合金では Si が含有されることにより伸びが減少し、塑性流動性がおさえられ凝着しにくくなり、その結果、耐荷重性が向上するものと思われる。

(4) 耐荷重性の試験によると、亜鉛合金の最良の耐摩耗性は、10%Al と 1%Si を含む亜鉛合金に見いだされた。この合金の摩擦表面は約 1 μm の厚さの薄い層によっておおわれていた。この薄い層は試料内部とくらべて、Si を多

く含む、Al が少なくなっていた。この安定な薄い層が亜鉛軸受合金に対して良い耐摩耗性をもたせるものといえる。

文 献

- (1) 例えば、日本潤滑学会編：潤滑ハンドブック，養賢堂，(1970)，446。
- (2) F.P.Bowden and D.Taber：固体の摩擦と潤滑（曾田範宗訳），丸善，(1969)，191。
- (3) 日本潤滑学会編：潤滑ハンドブック，養賢堂，(1970)，454。
- (4) 梶山正孝，林 清蔵，中田 毅：鋳物，**43**(1971)，6，435。
- (5) 例えば，曾田範宗：摩擦と潤滑，岩波書店，(1954)，88。
- (6) E.Gervais, H.Lever and M.Bess：Trans. AFS, **88**(1980)，183。
- (7) Kenneth J.Altorfer：Metal Progress, **122**(1982)，6，29。
- (8) 川崎景民：オイルレスベアリング，アグネ，(1980)，125。
- (9) 諏訪正輝，添野 浩：日本金属学会誌，**42**(1978)，8。
- (10) 鋳造技術講座編集委員会：非鉄合金鋳物，日刊工業新聞社，(1971)，282。
- (11) 川崎景民：オイルレスベアリング，アグネ，(1980)，339。
- (12) 日本潤滑学会編：潤滑ハンドブック，養賢堂，(1970)，644。
- (13) 水野万亀雄：機械の研究，**20**(1968)，953。
- (14) 例えば，軸受・潤滑便覧編集委員会編：軸受・潤滑便覧，日刊工業新聞社，(1961)，90。