研究論文

Al-Si 合金鋳物と5052, 6061アルミニウム合金押出材とが
擦過する場合の潤滑摩耗

山田 始*・田中他喜男*

Lubricated wear of extruded 5052 and 6061 aluminum
alloys sliding on Al-Si alloy castings

Hajime YAMADA* and Takio TANAKA*

Lubricated wear of extruded 5052 and 6061 aluminum alloys to Al-Si alloy castings containing Si up to the eutectic point increased with the increase in Si in Al-Si alloys. The wear resistance of a 6061 alloy which contained large amounts of inclusion particles was superior to that of a 5052 alloy. This was because that the inclusion particles effectively acted to prevent the adhesive wear. Hyper-eutectic Al-Si alloy castings resulted in the increased wear to both of the extruded alloys due to the abrasion wear. However, the wear loss in the hyper-eutectic Al-Si alloy castings was small. In this case, the wear resistance of a 5052 alloy was superior to that of a 6061 alloy. This was because of an enhancement of the abrasion wear in a 6061 alloy by the inclusion particles. An addition of Cu to the hypo-eutectic silumin resulted in the unfavorable effect on the wear of both extruded alloys at high sliding loads. An addition of about 0.4% Mg gave a preferable effect. More addition of Mg, however, resulted in the increased wear for both extruded alloys.

Keywords: lubricated wear, 5052 alloy, 6061 alloy, Al-Si alloy, silumin

(Received June 1, 1989)

1. 緒 言

アルミニウム合金は軽量で、塑性加工も容易であり、また、鋳物の分野ではダイカストにより高い生産性と優れた製品が得られるので、機械部品としての需要が増加している。一方、機械の軽量化に対する要求が強まるに従い、アルミニウム合金同士が擦過する構成部分も必要となってきた。たとえば、ダイカストをはじめとするアルミニウム合金鋳物と擦過する軸あるいはスピンドル類なども用途によっては、従来の鉄系材料に代わって、アルミニウム合金を用いる必要性も生じている。

このようなニーズに対し、アルミニウム合金の耐摩耗性は十分なものとはいえないが、しかし潤滑下では、その耐摩耗性は著しく向上する^{1)~3)}。したがって、擦過条件によっては、アルミニウム合金同士が擦過する構成部分への適用も考えられる。そこで、本報は機械部品としての需要も多い6061合金およびAl-Mg系の5052合金押

出材が種々けい素量のAl-Si合金鋳物と擦過する場合の潤滑摩耗について調べた。さらに、アルミニウム合金鋳造材の主要な地位を占める含銅シルミンおよびガンマーシルミンと擦過する場合の潤滑摩耗についても調べた。

2. 試料および実験方法

実験に供したアルミニウム合金の種類および組成をTable 1に示すが、5052, 6061合金の押出材は市販の直径35 mmのもので、その質別はそれぞれ次のようなものである。5052 (H112, HV84.7), 6061 (T6, HV113)。また相手材のAl-Si合金、含銅シルミンおよびガンマーシルミンの鋳物は直径40 mm、長さ50 mm寸法の常温の金型に鋳造したものである。押出材および鋳造材は、いずれも切削加工によって、既報^{1)~3)}と同様、 $\phi 30 \times 8$ mm、孔径16 mmのリングに仕上げ、さらに鋳造材は外周部を長さ約10 mmの擦過平面が8面とれるように切削加工して試料とした。

* 滋賀県立短期大学 (彦根市)。Shiga Prefectural Junior College (Hikone-shi, Shiga)。

Table 1 Chemical composition of specimens (mass%)

Specimens	Mg	Si	Cu	Fe	Mn	Zn	Cr	Al
5052	2.60	0.08	0.01	0.12	0.03	0.01	0.21	bal.
6061	1.02	0.63	0.24	0.30	0.04	0.04	0.09	bal.
Al-1%Mg-0.6%Si	1.12	0.62	0.01	0.18	0.01	<0.01	<0.01	bal.
Al-7%Si	<0.01	6.92	0.02	0.20	<0.01	<0.01	<0.01	bal.
Al-10%Si	<0.01	9.50	0.03	0.22	<0.01	0.01	<0.01	bal.
Al-12%Si	<0.01	11.75	0.03	0.24	0.01	0.01	<0.01	bal.
Al-17%Si	0.04	16.50	0.04	0.28	<0.01	<0.01	<0.01	bal.
Al-10%Si-2%Cu	<0.01	9.50	1.65	0.21	0.01	0.02	<0.01	bal.
Al-10%Si-4%Cu	<0.01	9.50	4.00	0.22	0.01	0.02	<0.01	bal.
Al-10%Si-0.4%Mg	0.43	9.52	0.03	0.25	0.01	0.01	<0.01	bal.
Al-10%Si-0.9%Mg	0.93	9.53	0.03	0.25	0.01	0.01	<0.01	bal.

摩耗試験機も既報^{1)~3)}と同じ、西原式摩耗試験機を改造した平面-円筒リング方式によるもので、平面を有する鋳造材の試料が固定され、この平面に円筒リングの押出材の試料が所定荷重で擦過回転するものである。摩耗試験の方法、潤滑油およびその取替えなどもすべて既報^{1)~3)}と同じである。摩耗量は読取限度0.1 mgの電子分析天びんにより測定した摩耗減量で表し、いずれも4回以上の試験による平均値である。

また、供試材の5052, 6061合金中の介在物による分散粒子の数を求めたが、これは光顕によって隣接する4か所の写真を撮り（写真倍率600倍）、各写真内（70×100 mm）の測定できる範囲の粒子の数をすべて測定した。この結果、供試材の5052, 6061合金の分散粒子の数は5052合金については 3.6×10^2 個/mm²、6061合金は 4.8×10^2 個/mm²であった。さらに、この写真を用いて、大きなものから順に10個の粒子をとり、その平均粒径を粗大粒子の平均粒径として求めた。

なお、押出材の両合金の間には、質別および硬度の相違があるので、この影響についても調べるため、種々の熱処理を行ったが、溶体化処理は、試験の開始直前に5052合金に対しては420°C、6061合金に対しては520°Cで行った。焼なましは、析出をできるだけ押さえるため、5 minの短時間の焼なましとした。また、6061合金の析出処理は400°Cから300°Cまで1 hかけて徐冷し、300°Cで18 h保持した。

3. 実験結果および考察

3.1 種々のけい素量のAl-Si合金鋳物と擦過する場合の潤滑摩耗

Fig. 1 は5052, 6061合金押出材が種々けい素量のAl-Si合金鋳物と擦過荷重4.5 kgf、擦過速度1.57 m/sで、8 kmの距離を擦過した場合の潤滑摩耗について示したも

Fig. 1 Lubricated wear loss of extruded 5052 and 6061 aluminum alloys rubbed with Al-Si alloy castings containing various amount of silicon at sliding speed of 1.57 m/sec, sliding load of 4.5 kgf and distance of 8 km.

のである。5052, 6061合金が共晶以下のAl-Si合金と擦過する場合は、けい素量の多いAl-Si合金ほど5052, 6061合金の摩耗は増加する傾向が見られる。また、Al-Si合金側の摩耗も同様に増加する傾向を示すが、このAl-Si合金側の摩耗の増加は、5052合金と擦過する場合の方が6061合金よりも著しい。

さらに、けい素量の多い過共晶Al-Si合金と擦過する場合は、5052および6061合金の摩耗は共晶以下のAl-Si合金と擦過する場合よりも著しくなる。また、過共晶

Fig. 2 Lubricated wear loss of extruded 5052 and 6061 aluminum alloys rubbed with Al-Si alloy castings containing various amount of silicon at sliding speed of 1.57 m/sec, sliding load of 4.5 kgf and distance of 9.4 km.

Fig. 3 Relation between lubricated wear loss and hardness of various heat treated 5052, 6061 aluminum alloys to Al-10%Si alloy at the same wear condition as shown in Fig. 2

Al-Si 合金に対しては、6061 合金の方が5052 合金よりも摩耗は著しい。しかし、過共晶 Al-Si 合金の摩耗は両合金の摩耗にくらべると非常に少ない。

これらのことは Fig. 2 に示すように、擦過距離が長くなるとさらに顕著になる。

次に、これらのことについて考察すると、供試材として用いた5052と6061合金の耐摩耗性の相違は、供試材の

Fig. 4 Relation between lubricated wear loss and hardness of various heat treated 5052, 6061 aluminum alloys to Al-17%Si alloy at the same wear condition as shown in Fig. 1.

質別および硬度差によることが考えられる。このため、供試材の5052, 6061合金押出材を熱処理によって種々の質別のもとし、その硬さをパラメータとして、亜共晶の Al-10%Si 合金と擦過した場合の摩耗量との関係について求めると Fig. 3 に示すような結果となった。両合金とも硬度が高くなると摩耗量は減少する傾向が見られるが、質別および硬度の相違を別にしても、両合金の耐摩耗性には相違のあることが認められ、6061合金の耐摩耗性の方が優れていることが明らかである。とくに、6061合金の析出処理したものは、硬度は低いが耐摩耗性は非常に優れている。このことは、前報³⁾のダイカスト合金 ADC12に対する潤滑摩耗においても認められたことである。

さらに、Fig. 4 は過共晶の Al-17%Si 合金に対して同様な関係を求めたものである。過共晶の Al-Si 合金に対しては、5052合金の耐摩耗性の方が、6061合金よりも質別の相違にかかわらず著しく優れていることが明らかである。また、6061合金の耐摩耗性に対する析出処理の効果も過共晶 Al-Si 合金に対してはほとんど認められない。

次に、Fig. 5 は5052, 6061合金が種々けい素量の Al-Si 合金鋳物と擦過した場合の摩耗量と、相手の Al-Si 合金の摩耗量との関係について調べた結果である。この関係には、図に示すように、大別して(A), (B)の2通りの関係のあることが見られる。(A)の関係は5052, 6061合金の摩耗量に対して、Al-Si 合金側の摩耗が(B)の関係の場合よりも大きくなるもので、両押出合金が共晶以下の Al-Si 合金と擦過する場合の多くは、この関係となる。Fig. 6はこの関係の場合の摩耗の状況について示したものであるが、凝着の起こっていることが見られる。したがって、(A)の関係の場合の摩耗は、凝着摩耗が支

Fig. 5 Relation between lubricated wear loss of 5052 or 6061 aluminum alloy and that of Al-Si alloys containing various amount of silicon, rubbed at the same wear condition as shown in Fig. 1 and Fig. 2.

5052 alloy
wear loss: 34.2 mg
surface roughness
 $R_{\max}$ 56 μm

hypo-eutectic Al-Si alloy
wear loss: 3.7 mg
surface roughness
 $R_{\max}$ 76.5 μm

Fig. 6 Aspect of wear belonged to the relation of (A) shown in Fig. 5.

配的なものであるとみなされる。なお、この場合、けい素量の多い Al-Si 合金ほど、5052 および 6061 合金の摩耗量が増加するのは、凝着の防止に有効な擦過面の酸化膜が Al-Si 合金中の硬い針状けい素粒子の増加によって破損されやすくなるため、凝着摩耗が著しくなるものと思われる。また、共晶以下の Al-Si 合金に対しては、6061 合金の方が 5052 合金よりも耐摩耗性の優れている理由については Fig. 7 に示すように、供試材の 6061 合金の方が 5052 合金よりも介在物による分散粒子の数が多い (6061 合金 4.8×10^2 個/ mm^2 , 5052 合金は 3.6×10^2 個/ mm^2)。このため、6061 合金の方が 5052 合金よりも凝着が起りにくいものと思われる。同様に、6061 合金を析出処理することにより、耐摩耗性が著しく向上することも析出粒子 (Mg_2Si) によって、凝着が阻止されるためとみなされる。

次に、Fig. 5(B) の関係の場合の摩耗状況を Fig. 8 に

示すが、この関係の場合には、摩耗による深い条痕が発生しても、(A) の関係の場合のような凝着はほとんど見られない。したがって、この場合の摩耗は、ひっかき摩耗が支配的なものと見られる。この (B) の関係には、両合金が過共晶の Al-Si 合金と擦過する場合の多くが属するが、合金別では、6061 合金の方が 5052 合金よりも多い。したがって、過共晶 Al-Si 合金に対しては、6061 合金の方が 5052 合金よりも摩耗は著しいことになる。さらに、このことより次のことがいえる。供試材の 6061 合金は Fig. 7 でも認められたように、5052 合金よりも分散粒子の形状が大きく (大きなものから順に測った 10 個の粒子の平均粒径は 6061 合金では $7.5 \mu\text{m}$, 5052 合金は $4.6 \mu\text{m}$)、その数も多い。したがって、このようなアルミニウム合金が、硬い板状のけい素粒子を有する過共晶 Al-Si 合金と擦過すると、ひっかき摩耗が起りやすい。すなわち、過共晶 Al-Si 合金中の板状けい素粒子はひっ

Fig. 7 Microstructures showing inclusion particles in extruded 5052 and 6061 aluminum alloys.

Fig. 8 Aspect of wear showing the relation of (B) in Fig. 5.

Fig. 9 Microstructure of heat treated Al-1%Mg-0.6%Si alloy castings showing primary inclusions.

かき摩耗の要因をなすものではあるが、相手材に粗大な分散粒子あるいは後述の晶出粒子などが多く存在する場合ほど、ひっかき摩耗を起こしやすいとする。

なお、供試材の5052, 6061合金中の分散粒子は、供試材の組成および質別より、5052合金においてはAl-Cr系またはAl-Mg-Cr系化合物、6061合金ではAl-Fe-Si系、Cr-Fe-Al系の粒子とみられる^{4),5)}。これに対して、Fig. 9に示すように、いくつかの初晶の Mg_2Si 粒子が

残存するように熱処理(T6)した99.7%純度のアルミニウムを用いて鋳造したAl-1%Mg-0.6%Si合金の鋳造材も供試材の6061合金の押出材と同等の摩耗量を示した。

Fig. 10は5052, 6061合金と過共晶Al-Si合金が擦過する場合の荷重の影響について示したものであるが、擦過荷重が減少すると(たとえば3 kgf以下)、5052合金の摩耗は著しく減少する。また過共晶Al-Si合金側の摩耗も少なくなる。しかし、この場合においても、6061合金の摩耗は5052合金よりも著しい。このことは、擦過荷重が減少すると、5052合金では著しいひっかき摩耗は起こらなくなるが、6061合金では、このような場合でもひっかき摩耗が起こるため、このことから、過共晶Al-Si合金に対しては、供試材の6061合金の方が5052合金よりもひっかき摩耗が起こりやすいことが明らかである。

以上の結果、Al-Si合金鋳造材と5052, 6061などのアルミニウム合金同士が擦過する場合は、共晶以下のAl-Si合金においては凝着摩耗が支配的であり、過共晶Al-Si合金ではひっかき摩耗が支配的になるものと思われる。そして、このような場合のAl-Si合金鋳物に対する相手材のアルミニウム合金としては、分散粒子あるいは

Fig. 10 Lubricated wear loss vs sliding load for 5052 and 6061 aluminum alloys rubbed with Al-17%Si alloy at the same wear condition as shown in Fig. 2.

Mg₂Siなどの析出粒子を有することが、凝着摩耗の防止に対して有効である。しかし、ひっかき摩耗に対しては、このような粒子は効果がなく、そのうえ、粗大な粒子はひっかき摩耗を起こしやすくする。

3.2 含銅シルミンおよびガンマーシルミンと擦過する場合の潤滑摩耗

Fig. 11は5052, 6061合金押出材が含銅シルミンと擦過する場合の潤滑摩耗について示したものである。亜共晶シルミンにCuを添加した含銅シルミンは、擦過荷重4.5 kgfの場合には、Cu無添加の場合よりも両合金の摩耗を増加する。しかし、Al-Si合金側の摩耗はCuの添加によって減少するようになる。

このことについて考察するために、Fig. 11にはCu添加によるAl-Si合金の硬さの増加についても示したが、Al-Si合金の硬さはCuの添加によって増加する。このため、含銅シルミンでは、Cu無添加の場合の凝着摩耗に代わり、ひっかき摩耗が支配的になるものと思われる。したがって、5052あるいは6061合金の摩耗量の増加に対し、含銅シルミン側の摩耗は減少するものと思われる。しかし、擦過荷重が減少すると（たとえば3.5 kgf以下）、含銅シルミンに対する両合金の摩耗はCu無添加の場合とほとんど変わらない。

次に、Fig. 12は5052, 6061合金押出材のガンマーシルミンに対する潤滑摩耗について示したものである。亜共

Fig. 11 Lubricated wear loss of 5052 and 6061 aluminum alloys rubbed with Al-10%Si alloys containing various amount of Cu at the same wear condition as shown in Fig. 2 (○, ●), and sliding load of 3.5 kgf, distance of 8 km (△, ▲).

Fig. 12 Lubricated wear loss of 5052 and 6061 aluminum alloys rubbed with Al-10%Si alloys containing various amount of Mg at the same wear condition as shown in Fig. 2.

晶シルミンに約0.4%程度のMgを添加した場合は、Mg無添加の場合よりも両押出合金の摩耗を減少する。また、Al-Si合金側の摩耗もMgの添加によって減少する。しかし、Mgの量がさらに多くなると5052, 6061合金の摩耗量は増加するようになる。Fig. 12にはAl-Si合金にMgを添加した場合の硬さの増加についても示したが、Mgの添加による硬さの増加は著しい。したがって、ガンマーシルミンにおいても、ひっかき摩耗が支配

的になるものと思われる。しかし0.4%程度の少量のMgを添加したガンマーシルミンでは、ひっかき摩耗はそれほど著しくないため、5052, 6061合金の摩耗量は、Mg無添加の場合の凝着摩耗に比べて減少するものと思われる。

また、含銅シルミンおよびガンマーシルミンに対しても、5052合金の方が6061合金よりも耐摩耗性の優れている傾向が見られる。

4. 結 言

機械の軽量化のため、従来の鉄系材料に代わり、5052あるいは6061などのアルミニウム合金押出材が種々けい素量のAl-Si合金、および含銅シルミン、ガンマーシルミンなどのアルミニウム合金鋳物と擦過する場合の潤滑摩耗について調べた結果、次の結論を得た。

(1) 5052, 6061などのアルミニウム合金押出材が共晶以下のAl-Si合金鋳物と擦過する場合は、凝着摩耗が支配的となり、分散粒子の多い供試材の6061合金の方が、5052合金よりも耐摩耗性は優れ、分散粒子あるいはMg₂Siなどの析出粒子は、凝着摩耗の防止に対して有効である。また、Al-Si合金については、けい素量の多いAl-Si合金ほど、相手材のアルミニウム合金およびAl-Si合金側の摩耗を著しくする。

(2) 過共晶のAl-Si合金鋳物と擦過する場合は、ひっかき摩耗が支配的となり、両押出合金の摩耗はさらに著しくなる。しかし、過共晶Al-Si合金の摩耗はそのわり

には少ない。過共晶Al-Si合金に対しては、粗大な分散粒子あるいは晶出粒子はひっかき摩耗を起こしやすくする。したがって、この場合においては、粗大な分散粒子の多い供試材の6061合金の方が5052合金よりも摩耗は著しい。

(3) 亜共晶シルミンにCuを添加した含銅シルミンに対しても、ひっかき摩耗が支配的となり、Cu無添加の場合よりも両押出合金の摩耗量は増加する。この反面、Al-Si合金側の摩耗はCuの添加によって減少するようになる。しかし、擦過荷重が減少すると、両押出合金の摩耗は、Cu無添加の場合とほとんど変わらなくなる。

(4) 0.4%程度のMgを添加したガンマーシルミンは、Mg無添加の場合よりも5052, 6061合金の摩耗量を減少する。また、Al-Si合金側の摩耗もMgの添加によって減少する。しかし、Mgの添加量が増加すると両押出合金の摩耗量は増加するようになる。

(5) 含銅シルミンおよびガンマーシルミンの鋳物に対しても、5052合金の耐摩耗性の方が6061合金よりも優れている傾向を示した。

参 考 文 献

- 1) 山田 始, 田中他喜男, 大塚英夫: 軽金属, **37** (1987), 83.
- 2) 山田 始, 田中他喜男: 軽金属, **38** (1988), 257.
- 3) 山田 始, 田中他喜男: 軽金属, **39** (1989), 123.
- 4) 吉田英雄, 福井利安: 軽金属, **38** (1988), 496.
- 5) 大堀紘一: 軽金属, **38** (1988), 748.