研究論文

Al-Si 合金の耐摩耗性に及ぼすけい素量 ならびに Mg, Cu 添加の影響

山田 始*・田中他喜男*・大塚 英夫*

Effects of silicon content and addition of Mg, Cu
on wear resistance of Al-Si alloys

Hajime YAMADA*, Takio TANAKA*
and Hideo OHTSUKA*

Wear resistance of Al-Si alloy is increased with increasing the silicon content at low sliding speed, and severe scuffing wear occurs easily in the hypo-eutectic Al-Si alloy at high sliding speed or high load. However, desirable oxide wear by protective oxide film formed during slide is more remarkable in the hypo-eutectic Al-Si alloy than that of eutectic or hyper-eutectic alloy. An addition of Mg or Cu to Al-Si alloy is effective to improve the wear resistance but Cu is more effective than Mg. Wear resistance of AC4B is superior to AC4C, and that of AC4B is nearly same as AC8C or ADC12. T_6 treatment gives rather unpreferable effect for wear resistance of these alloys. Lubrication gives a notable effect to protect the sliding-wear of aluminum and its alloys.

Keywords: wear loss, wear coefficient, lubrication, Al-Si alloys, Al-Si alloys added Mg or Cu

(Received May 20, 1986)

1. 緒 言

アルミニウム合金は鉄に比して軽量で、しかもダイカストにより高い生産性が得られることなどの優れた利点を有する。したがって、機械部品としての需要も増加しつつあるが、機械部品には、強度のほかに耐摩耗性の要求される場合が多い。しかし、一般にアルミニウムおよびアルミニウム合金は摩耗に対しては弱いものとされており、これに関する研究も非常に少ない^{1)~4)}。

一方、アルミニウム合金において、けい素を主成分とする Al-Si 合金は鑄造性に優れ、さらにその組織は、非常に硬いけい素の晶出相 (Hv 1450)⁴⁾と比較的軟らかい地とからなるので、耐摩耗性に対しても非常に望ましい組織をなすものとみられる。したがって、本報は亜共晶から過共晶までの種々のけい素量の Al-Si 合金のけい素量と耐摩耗性との関係について調べ、さらに Al-Si 系合金の主要添加元素である Mg あるいは Cu 添加の効果、ならびに同実用合金の耐摩耗性について調べた。

また、潤滑油を用いた場合のこれら合金の耐摩耗性についても調べた。

2. 試料および実験方法

実験に供した主な試料の組成を Table 1 に示すが、ADC12 の試料はダイカストによるものである。その他の試料は直径 40 mm、長さ 50 mm の鑄型寸法の常温の金型に鑄造したもので、いずれの試料も切削加工によって Fig. 1 に示す形状に仕上げた。

Table 1 Chemical composition of specimens (wt%)

Alloy	Si	Cu	Mg	Fe	Mn	Al
Al-5%Si	5.49	<0.01	0.05	0.18	<0.01	bal.
-7%Si	7.43	0.02	0.03	0.22	<0.01	bal.
-13%Si	12.56	0.01	0.04	0.20	<0.01	bal.
-17%Si	16.79	0.02	0.04	0.25	0.01	bal.
-24%Si	24.30	0.02	0.04	0.25	0.01	bal.
AC4C	6.51	0.07	0.27	0.31	0.22	bal.
AC4B	7.47	2.16	0.20	0.58	0.27	bal.
AC8C	8.51	2.70	0.88	0.19	0.01	bal.
ADC12	10.44	1.87	0.33	0.82	0.23	bal.

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

Fig. 1 Plain-ring wear test used.

Fig. 2 Principal part of wear tester.

なお、岡林ら³⁾および Clegg-Das⁴⁾によれば、過共晶 Al-Si 合金の初晶けい素粒子の大きさは、耐摩耗性に対しては影響がないとされ、また共晶 Al-Si 合金の改良処理の有無による顕著な差も見られなかつたので、試料はいずれも改良処理あるいは初晶けい素粒子の微細化処理を施さない無処理のものを用いた。

摩耗試験は、一部改造した西原式摩耗試験機を用い、Fig. 1 に示す平面-円筒リング方式によるものである。平面が試料面であつて固定され、この試料面に円筒リングが所定荷重で接触回転するもので、Fig. 2 にその外観を示す。円筒リングには、焼入した炭素鋼 S45C (Hv 580) を用いた。試料および炭素鋼の摩擦面は 04 エメリーペーパー仕上げとしたもので、表面あらさは、いずれも $R_{\max}$ 3~5 μm である。また、潤滑油を用いない乾式摩耗試験の場合には、試験の開始に際し、材質固有の摩擦面を得るための準備操作として、軽い摩擦荷重 (0.5 kg) で 500 回転の擦過を行つた。

Fig. 3 Variation of wear coefficient for Al-Si alloys containing various amount of silicon, sliding on the carbon steel ring at load of 2.5 kg.

試料および相手炭素鋼の摩耗量は摩耗減量を測定し、この摩耗減量によつて表したが、炭素鋼の摩耗減量については、形状が円筒リングであるので、試料と接触する表面積で除した単位表面積当りの摩耗減量 (mg/cm^2) で表した。

また、一部は摩耗係数、あるいは比摩耗係数にもよつたが、摩耗係数は摩耗容積を摩擦距離で除したもので、単位摩擦距離当りの摩耗量 (cm^3/m) である⁵⁾。比摩耗係数は摩耗係数を試験荷重で除したもので、単位摩擦荷重における単位摩擦距離当りの摩耗量である⁵⁾。摩耗容積は摩耗減量より算出したが、この場合に必要な各試料の比重は、試料の化学組成より算出した比重を用いた。

潤滑油を用いた場合には、試料および炭素鋼のいずれも摩耗減量が非常に少ないので、摩耗痕の深さによつて摩耗量を表した。摩耗痕の深さは形状測定機によつて測定した。

3. 実験結果

3.1 潤滑油のない場合

Fig. 3 は種々のけい素量の Al-Si 合金の摩耗係数、および相手炭素鋼の摩耗係数について示したもので、摩擦荷重 2.5 kg の場合である。けい素の量は Al-Si 合金の耐摩耗性に対して著しい影響のあることが認められ、摩擦速度が遅い場合は (例えば 0.6 m/sec), けい素量が少なくなるにしたがい、摩耗係数すなわち摩耗量は増大する。この摩耗量の増加割合は亜共晶の Al-Si 合金では著しい。また、摩擦速度が速くなると (例えば 0.9 m/sec), 7% 未満のけい素量では、高摩耗係数すなわち酷摩耗と

Fig. 4 Wear loss vs. sliding distance for Al-Si alloys containing various amount of silicon and for carbon steel ring at sliding speed of 0.94 m/sec and load of 2.5 kg.

なり、さらに摩擦速度の速い場合には7%のけい素量でも酷摩耗状態となる。

さらに Fig. 4 は、摩擦速度 0.9 m/sec の場合における摩擦距離と摩耗量との関係について示したものである。本試験法は摩耗の進行とともに接触面が増加し、真の摩擦圧力が低下する欠点はあるが、7%以上のけい素では、初期摩耗の段階を過ぎると摩耗は摩擦距離に比例して、ほぼ直線的に増加する。しかし5%Si合金では、摩擦距離が1,500 m ぐらいになると摩耗が急激に増加し酷摩耗状態となる。

ここで重要なことは、相手炭素鋼に対する挙動である。酷摩耗の場合は、Fig. 3 および Fig. 4 で明らかのように、相手の炭素鋼は重量増加となる。この重量増加は Fig. 5 に示すように、試料の著しい凝着、すなわち融着摩耗によるものである。しかし、このような酷摩耗以外の場合には、アルミニウム合金よりも、はるかに硬い相手の炭素鋼にも摩耗減量が起る。しかも、この炭素鋼の摩耗は、試料のアルミニウム合金の硬さとは関係がなく、アルミニウム合金の摩耗の大きいものほど著しい。

これらのことより、アルミニウムおよびアルミニウム合金の摩耗形態は凝着摩耗がきわめて支配的なもので、このため硬度と摩耗量との間には直接的な関係が見られないものと思われる。さらに相手材との間に凝着による

(A)

(B)

Fig. 5 Difference of sliding surface of carbon steel rings for Al-5%Si (A) and Al-13%Si (B) alloys at sliding speed of 0.94 m/sec, load of 2.5 kg.

Fig. 6 Wear loss vs. sliding speed for Al-7%Si or eutectic and hyper-eutectic Al-Si alloys at load of 2.5 kg and sliding distance of 4700 m.

反応生成物が生成されるような場合には、非常に硬い相手材でも硬度とは無関係の著しい摩耗が起るものと考えられる。

Fig. 6 は亜共晶の7%Si合金および共晶、過共晶のAl-Si合金の摩耗の速度特性を示したものである。亜共

Fig. 7 Specific wear coefficient for Al-7%Si alloys containing various amount of Mg or Cu sliding on the carbon steel ring at sliding speed of 0.94 m/sec, and hardness of these alloys.

晶の7%Si合金と共晶および過共晶のAl-Si合金とでは、摩擦速度特性が異なることが見られる。共晶ならびに過共晶のAl-Si合金では、摩擦速度が遅い場合には摩擦は少ない。しかし、摩擦速度が低速域より上昇すると摩擦は著しくなり、さらに摩擦速度が上昇すると摩擦の減少傾向が見られるようになる。それに対し、亜共晶の7%Si合金では、低速の場合は摩擦が大きいが、摩擦速度が上昇すると摩擦は減少するようになる。さらに摩擦速度が上昇すると融着摩擦が起こり酷摩耗状態となる。この低速域からの摩擦速度の上昇による摩擦の減少は酸化摩擦⁶⁾によるものと考えられる。しかし、共晶および過共晶のAl-Si合金では、このような速度域においては酸化摩擦による摩擦量の減少は見られない。このことは、共晶あるいは過共晶Al-Si合金のように、けい素量が多くなると高速における融着摩擦は減少するが、酸化摩擦すなわち、摩擦時に形成される摩擦を保護する酸化皮膜の形成は減少するようになるのではないかとみられる。

次に、Fig. 7はAl-7%Si合金の耐摩耗性に及ぼすMgあるいはCuの影響を比摩耗係数によって示したものである。Mg, Cuの添加量は実用合金を対象としてMgは0.8%, Cuは4%までとしたが、さらにCuとMgの効果を同一添加量で比較するため、Cuは0.8%からの添加量とした。

Mgは添加量が0.8%程度となるとAl-Si合金の耐摩耗性を向上するが、それ以下のMg量ではほとんど効果は見られない。Cuの場合も0.8%の添加で効果が見られ、さらに添加量が多くなると効果は増大する。また、Cu

Table 2 Effect of Mg or Cu on sliding surface and wear loss of Al-7%Si alloy at sliding distance 940 m, speed 1.26 m/sec, load 2.5 kg.

	appearance of surface	Surface roughness $R_{\max}$ (μm)	wear loss (mg)
Al-7%Si	×	58	22.3
" -0.3%Mg	×	93	19.4
" -0.6%Mg	×	108	20.3
" -0.8%Mg	×	122	14.9
" -0.8%Cu	△	69	6.7
" -3%Cu	○	59	8.0
" -4%Cu	○	59	7.8

adhesion: × overall, △ some part, ○ non

Fig. 8 Wear loss of various alloys sliding on the carbon steel at sliding speed of 0.94 m/sec and sliding distance of 4700 m.

とMgの効果を同一添加量で比較すると、Cuのほうが効果は優れている傾向が見られる。さらにTable 2にCuあるいはMgを添加した場合の初期の擦過面の状況、ならびに摩擦減量について示すが、CuのほうがMgよりも効果の大きいことが認められる。また、Fig. 7にはMgあるいはCuを添加した場合の硬度の増加についても示したが、硬度はCuよりもMgのほうが少量で増加する。しかし、この場合においても前述のように、硬度と摩擦量との直接的な関係は見られない。

Fig. 8は実用合金AC4C, 4B (F材, T₆材)およびADC12の耐摩耗性を過共晶のAl-24%Si合金と比較して示したものである。AC4CとAC4Bの耐摩耗性を比

Fig. 9 Wear loss vs. sliding speed for AC4B, ADC12 and AC8C, and for carbon steel ring at load of 2.5 kg, sliding distance of 4700 m.

較するとAC4Bのほうが優れており、ADC12の耐摩耗性もAC4Bとほぼ同等とみなされる。また、AC4C、4BにおけるF材とT₆材の耐摩耗性について見ると、硬度はいずれもT₆材のほうがはるかに高いが（AC4B、4CのF材の硬度Hv 68.5, 95.9, T₆材は112, 146）、耐摩耗性はF材のほうがT₆材よりも優れており、さらに、この相違は摩擦荷重が大きくなると顕著になる。この原因については、一般に硬度の高い場合のほうが摩擦面における接触点は増加しにくく、接触点の数が少ないと多い場合よりも接触点にかかる荷重は大きくなる。したがって凝着の起こりやすいアルミニウム合金では、それだけ凝着が起こりやすくなり、このため硬度の高いT₆材のほうがF材よりも摩耗が大きくなるものと考えられる。

Fig. 9はAC4B, ADC12さらにはAC8Cの摩耗の速度特性を示したものである。これらの合金のけい素量は、いずれも亜共晶のけい素量で、摩耗の速度特性も前述のAl-7%Si合金の速度特性とよく似た傾向を示す。しかし、けい素単独のAl-7%Si合金では摩擦速度が高速になると酷摩耗状態となるのに対し、これらの合金では7%Si合金よりも酷摩耗状態になりにくいことが認められる。なかでもAC8Cが、このことについては、これらの合金のなかで最も良好な傾向が見られる。

3.2 潤滑油のある場合

Fig. 10はADC12について潤滑油の有無による摩耗の相違を示したものである。潤滑油は少量（0.2 ml）のエンジンオイルを擦過開始前に与えただけのものである

Fig. 10 Difference of sliding-wear of ADC12 slid on the carbon steel ring without and with lubricant at sliding speed of 0.94 m/sec, load of 2.5 kg, distance of 4700 m. (A): without lubricant, (C): with lubricant.

Fig. 11 Difference of surface roughness and wear loss of carbon steel ring in case of Fig. 10. (A) without lubricant: $H_{\max}$ 21.2 μm , wear loss 4.8 mg/cm², (B) with lubricant: $H_{\max}$ 2.7 μm , wear loss 2.7 mg/cm².

が、潤滑油によつて摩耗は著しく減少することが見られる。また、相手炭素鋼の表面状況もFig. 11に示すように、著しく向上するとともに摩耗量も減少する。さらに、Fig. 12は前記実用合金について、潤滑油のある場合の摩耗量を摩耗痕の深さによつて示したものである。いずれの合金も潤滑油によつて摩耗は著しく減少する。しかし、このような潤滑油のある場合においてもAC4Bの耐摩耗性はAC4Cよりも優れ、さらに過共晶Al-Si合

Fig. 12 Sliding-wear of AC4C, 4B, ADC12 and hyper-eutectic Al-24%Si alloys when lubricant was supplied only 0.2 ml before sliding at load of 2.5 kg, sliding speed of 0.94 m/sec and distance of 4700 m.

金の耐摩耗性の優れていることが見られる。

このように、アルミニウムおよびアルミニウム合金の耐摩耗性は潤滑油によつて著しく向上するが、この潤滑油による著しい効果は、摩擦面の潤滑油の油膜によつて、相手材との凝着が妨げられるためと考えられる。

4. 結 言

過共晶を含む種々のけい素量の Al-Si 合金、および Mg あるいは Cu を添加した同合金の耐摩耗性を焼入した S45C を対象として調べた結果、次の結論を得た。

(1) Al-Si 合金におけるけい素量は耐摩耗性に対して重要な影響があり、摩擦速度が遅い場合は、けい素量の減少とともに耐摩耗性は減少する。しかし、その減少割合は亜共晶の Al-Si 合金では著しい。また摩擦速度が速くなると、けい素量の少ない場合ほど酷摩耗状態になり

やすい。

(2) 摩擦時に生成される酸化皮膜の保護作用による酸化摩耗は、亜共晶の Al-Si 合金のほうが、けい素量の多い共晶あるいは過共晶の Al-Si 合金よりも著しい。

(3) Mg あるいは Cu の添加は、Al-Si 合金の耐摩耗性に対して有効であるが、Al-7%Si 合金に対しては 0.8% 以上の添加が必要である。また Cu のほうが Mg よりもその効果は大きい。

(4) 実用合金 AC4B の耐摩耗性は AC4C より優れ、ADC12 あるいは AC8C の耐摩耗性も AC4B とほぼ同等とみられる。また、F 材の耐摩耗性のほうが、これより硬度の高い T₆ 材よりも優れていることが見られる。

(5) アルミニウムおよびアルミニウム合金の摩耗形態は凝着摩耗がきわめて支配的なものとみられるが、さらに相手材との間に凝着による反応生成物が生成されるような場合には、非常に硬い相手材にも硬度とは無関係の著しい摩耗が起こる。

(6) アルミニウムおよびアルミニウム合金の耐摩耗性は潤滑油によつて著しく向上する。この潤滑油による著しい効果は、潤滑油の油膜によつて、相手材との凝着が妨げられるためと考えられる。

終りに、本研究は軽金属奨学会の助成金によることを付記し、深甚なる感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 岡林, 中谷, 野谷, 川本: 軽金属, **14** (1964), 415.
- 岡林, 中谷, 野谷, 川本: 軽金属, **14** (1964), 429.
- 岡林, 川本, 野谷: 軽金属, **16** (1966), 36.
- A. J. Clegg and A. A. Das: *British Foundryman*, **70** (1977), 333.
- R. D. T. Whittle and V. D. Scott: *Metals Technol.*, **11** (1984), 231.
- 例えば, 日本金属学会編: 金属便覧 (1982), 557.