研究論文

アルミニウム合金の炭素鋼に対する潤滑摩耗

山田 始*・田中他喜男*

Lubricated wear resistance of aluminum alloys to carbon steels

Hajime YAMADA* and Takio TANAKA*

The wear resistance of aluminum alloys to normalized or quenched carbon steels (0.1–0.8%C) was examined in the state of lubricating oil supplying. Wear resistance of aluminum alloys is remarkably improved by the existence of lubricant. JIS ADC12 and hypereutectic Al–Si alloys have much better wear resistance. However, the wear resistance of these alloys containing hard silicon particles is inferior to those of other aluminum alloys rubbed with normalized high carbon steel containing more than 0.45%C at a high sliding speed or high load. Low carbon steel also gives same unpreferable effect to the wear resistance of hypereutectic Al–Si alloy. Quenched carbon steel is superior to the normalized steel for wearing of aluminum alloys, and wear loss of the alloys to the quenched high carbon steel is small.

Keywords: lubricated wear resistance, ADC12, hypereutectic Al–Si alloy, Al–5%Mg alloy, Al–5%Cu alloy, carbon steels.

(Received September 30, 1987)

1. 緒 言

アルミニウム合金は鋳鉄に比して軽量で、しかもダイカストにより高い生産性が得られるので、機械部品としての需要が増加しつつある。

機械部品は強度のほかに耐摩耗性を要求される場合が多いが、アルミニウム合金は摩耗に対しては弱いものとされている。また、アルミニウム合金の耐摩耗性に関する研究も比較的少なく^{1)~7)}、さらに、これらの研究はいずれも潤滑油のない場合の非潤滑摩耗に関するものである。しかし、実際の場合には潤滑油があるのが普通で、潤滑油があるとアルミニウム合金の耐摩耗性は著しく向上する⁸⁾。また、擦過する相手材としては一般に炭素鋼が多い。

したがって、本報はADC12をはじめ、種々のアルミニウム合金と0.1%から0.8%Cの焼ならし鋼あるいは焼入鋼との潤滑油下における耐摩耗性を非潤滑油の場合の耐摩耗性と比較して調べた。

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、ADC12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前報⁸⁾と同じ寸法の試料に仕上げた。

これらの試料のうち、ADC12およびAl–20%Si合金は非常に硬い共晶あるいは初晶のけい素粒子(HV1450)⁶⁾と比較的軟らかい基地(ADC12: HV62.7, 20%Si: HV37.6)とからなるものである。なお、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いわれているので^{3), 6)}、Al–20%Si合金は微細化処理を施さない無処理のものである。

このようなAl–Si系の合金に対して、Al–5%CuおよびAl–5%Mg合金は両合金の組織を揃え、また晶出物の影響のない状態で耐摩耗性を比較するために、Al–5%Cu合金は試験の開始直前に520°C、4hr またAl–5%Mg合金は420°C、4hの溶体化処理を行った。**Fig. 1**にその組織を示すが、いくらかの晶出物が見られ、完全な単一相組織ではない。しかし、この程度の晶出物は耐摩耗性に対しては、ほとんど影響がないものとみられるので、本実験においては便宜上、単一相組織として取り扱うことにした。なお、硬さはそれぞれHV 64.9, 69.8であ

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

Table 1 Chemical composition of specimens (wt%)

Specimens	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Zn	Al
JIS ADC12	10.57	0.67	2.18	0.22	0.18	0.76	bal.
Al-20%Si	19.60	0.31	0.01	<0.01	<0.01	0.01	bal.
Al-5%Mg	0.07	0.15	<0.01	5.43	0.03	<0.01	bal.
Al-5%Cu	0.08	0.16	4.52	<0.01	<0.01	0.01	bal.
99.7%Al	0.08	0.16	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	bal.

Fig. 1 Structures of (a) Al-5%Cu and (b) Al-5%Mg alloys used as specimens.

る。また、比較のため単一相組織の試料として、99.7%純度の純アルミニウム (HV 23.5) も加えた。

摩耗試験機も前報と同じもので、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ある。試料側が固定され、相手材の円筒リングが所定荷重で接触回転する。円筒リングには、0.1%から0.8%Cの種々の炭素量の焼ならし鋼および焼入鋼を用いた (0.6%C以上の炭素鋼は一般には工具鋼として用いるが、浸炭などの場合を想定して試料としたものである)。なお、焼ならし鋼は市販のもので、焼入鋼はA₃点以上30°Cの焼入れ温度より水焼入れしたものである。

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。さらに乾式摩耗試験の場合には、材料固有の摩擦面を得るための準備操作として、試験の開始前に軽い摩擦荷重 (0.5 kg) で500回転の擦過を行った。

摩耗量は読取限度0.1 mgの電子分析天びんにより、摩耗減量を測定した。潤滑摩耗の場合は乾式摩耗にくら

べて摩耗量の値が小さいので、3回またはそれ以上の繰返し試験による平均値である。また、摩耗量のばらつきが大きくなる場合もあるので、ばらつきの範囲も示すことにした。

潤滑油は市販のモータオイルを用い、試験機に設置されている注油装置 (潤滑油はギャポンにより循環) により、1回転当たり0.04 mlの割合で摩擦面に注油した。

3. 実験結果および考察

Fig. 2は種々のアルミニウム合金および99.7%Alが0.1%から0.8%Cの焼入鋼と擦過する場合の非潤滑摩耗について示したものである。相手材が焼入鋼の場合には、炭素量の多い焼入鋼、すなわち硬度の高い焼入鋼ほどアルミニウムおよびアルミニウム合金の摩耗量は減少する。また、供試材のアルミニウム合金のなかでは、Al-5%Mg合金の耐摩耗性が最も良好で、過共晶のAl-

Fig. 2 Wear loss of 99.7%Al and various aluminum alloys rubbed with quenched carbon steels containing various amount of carbon at sliding load of 1.0 kg, sliding speed of 0.94 m/sec and sliding distance of 3770 m without lubricant.

20%Si 合金よりも優れていることが見られる。しかし、これは Fig. 3 に示すように、両合金の摩耗の速度特性の相違によるものである。すなわち、低速（たとえば、0.6 m/sec）では、Al-20%Si 合金のほうが耐摩耗性は優れているが、摩擦速度がこれより少し速くなると Al-20%Si 合金では摩耗量が増加するようになる。これに反して、Al-5%Mg 合金および他のアルミニウム合金では摩耗量が減少するようになる。このため Fig. 2 の摩擦速度（0.94 m/sec）では、Al-5%Mg 合金のほうが Al-20%Si 合金よりも耐摩耗性が優れていることになる。このような速度特性の相違より、過共晶 Al-Si 合金は他のアルミニウム合金にくらべて酸化摩耗、すなわち摩擦時に形成される酸化被膜による摩耗の進行の保護作用が少ないものとみられる。

次に、Fig. 4 は潤滑油がある場合には、アルミニウム合金の摩耗はどの程度のものになるかを同一条件の潤滑油のない場合と比較して示したものである。潤滑油がない場合には大きな摩耗であるが、潤滑油があるとこ跡程度の摩耗となり、アルミニウム合金の耐摩耗性は著しく向上することが明らかである。

さらに、Fig. 5 は種々のアルミニウム合金および 99.7%Al が 0.1% から 0.8%C の焼入鋼と擦過する場合の潤滑摩耗について示したものである。Fig. 2 の乾式の場合にくらべ、摩擦条件は荷重×擦過距離は 25 倍、摩擦速度も 2 倍であるが、アルミニウムおよびアルミニウム合金の摩耗量はきわめて少ない。

Fig. 3 Wear loss vs sliding speed for various aluminum alloys rubbed with 0.45%C quenched carbon steel at sliding load of 1.0 kg, distance of 3770 m without lubricant.

Fig. 4 Difference of wear of ADC12 rubbed with 0.45%C quenched carbon steel under the same wear condition as shown in Fig. 2 without and with lubricant. (A): without lubricant, (B): with lubricant.

Fig. 5 Wear loss of 99.7%Al and various aluminum alloys rubbed with quenched carbon steels containing various amount of carbon at sliding load of 10 kg, sliding speed of 1.88 m/sec and sliding distance of 9420 m with lubricant.

潤滑摩擦の場合においても、相手材が焼入鋼の場合には、炭素量の多い焼入鋼ほどアルミニウムおよびアルミニウム合金の摩耗量は減少する。しかし、アルミニウム合金の種類による耐摩耗性の相違は乾式摩耗の場合とは異なるようになる。潤滑摩耗の場合においては、過共晶の Al-20%Si 合金は、相手材が 0.1%C の低炭素の焼入鋼の場合には摩耗量のばらつきが大きく、したがって、その平均の摩耗量も大きくなる。しかし、0.35%C 以上の焼入鋼となると最も優れた耐摩耗性を示すようになる。また、ADC12 の耐摩耗性も良好で、これらの Al-Si 系合金の耐摩耗性は、過共晶 Al-Si 合金の 0.35%C よりも炭素量の少ない焼入鋼の場合を除けば、単一相組織の純アルミニウム、Al-5%Cu あるいは Al-5%Mg 合金よりも優れていることが認められる。単一相組織のなかでは、最も軟らかい純アルミニウムが良好な耐摩耗性を

示し、反対に乾式摩擦で良好な耐摩耗性を示した Al-5%Mg 合金が耐摩耗性のばらつきも大きく最も悪い。

次に、Fig. 6 は相手材が焼ならし鋼の場合の潤滑摩擦について示したものである。焼ならし鋼であるので、その組織はフェライトとパーライトよりなるものである。相手材がこのような組織の場合には、アルミニウム合金の摩耗は焼入鋼にくらべてばらつきが大きく、平均の摩耗量も大きくなる。また、アルミニウム合金の耐摩耗性に及ぼす炭素量の影響も焼入鋼とは異なり、Al-Si 系合金と単一相組織のものとは顕著な相違が見られる。単一相組織のものは、焼ならし鋼の炭素量が異なっても摩耗量はほとんど変わらない。しかし、ADC12 および過共晶の Al-Si 系の合金では、0.45%C よりも炭素量の多い焼ならし鋼となるに従い摩耗量、およびそのばらつきは大きくなり、0.8%C の高炭素の焼ならし鋼では、単一相組織のものよりも摩耗量の平均値は大きくなる。また、0.45%C よりも炭素量の低い焼ならし鋼においても、過共晶 Al-Si 合金の摩耗は低炭素鋼となるに従い増加し、0.1%C の低炭素鋼では摩耗量ならびにそのばらつきも著しくなる。

この原因について考察するため、Fig. 7 は Al-20%Si 合金および ADC12 が 0.1%, 0.45%C ならびに、0.8%C の焼ならし鋼と擦過する場合のアルミニウム合金の摩耗量と炭素鋼の摩耗量との関係について示したものである。また、Fig. 8 は単一相の Al-5%Mg および Al-5%

Fig. 6 Wear loss of 99.7%Al and various aluminum alloys rubbed with normalized carbon steels containing various amount of carbon under the same wear conditions as shown in Fig. 5.

Fig. 7 Relation between wear loss of ADC12 and Al-20%Si alloys and that of normalized carbon steel rubbed at the same wear conditions as shown in Fig. 5.

Fig. 8 Relation between wear loss of Al-5%Mg and Al-5%Cu alloys and that of normalized carbon steel.

Cu 合金について同様な関係を示したものであるが、Al-5%Mg および Al-5%Cu 合金においては、図に示すように一つの直線関係としてまとめることができる。また、炭素鋼の摩耗量も Al-Si 系合金にくらべると非常に少ない。なお、Fig. 8 の直線は最小 2 乗法によって求めたもので、相関係数は 0.90 である。

これに対し、ADC12 および過共晶の Al-Si 系合金の場合には、Fig. 7 に示すように、大別して (A), (B), (C) の 3 つの関係となる。(A) の関係はアルミニウム合金の摩耗に対して、炭素鋼の摩耗が最も大きくなる場合で、過共晶の Al-20%Si 合金が 0.1%C の低炭素の焼ならし鋼と擦過する場合の多くがこの関係となる。(B) の関係は (A) に次いで炭素鋼の摩耗量が大きくなる場合で、Al-20%Si 合金および ADC12 が 0.8%C の高炭素の焼ならし鋼と擦過する場合の多くがこれに属する。(C) は炭素鋼の摩耗量

が最も少ない場合で、前記の場合におけるアルミニウム合金の摩耗量の少ない場合、および両合金が0.45%Cの焼ならし鋼と擦過する場合、あるいはADC12が0.1%Cの低炭素の焼ならし鋼と擦過する場合の多くがこの関係となる。

これらの関係より、過共晶 Al-Si 合金が低炭素の焼ならし鋼と擦過する場合は、Al-Si 合金中の硬いけい素粒子と相手炭素鋼の軟らかいフェライトとの間にひっかき摩耗が起こり、このため炭素鋼の摩耗が大きくなると共にアルミニウム合金側の摩耗も増大するものと思われる。また、この場合には潤滑油の汚れも非常に著しい。

Fig. 9 はこれを示したもので、この場合の潤滑油は新しい油を 4 滴/min (2.7 ml/min) の割合で滴下し、循環させないで一回の滴下で回収したものである。さらに、この潤滑油をろ過し、潤滑油中の摩耗粉を採取して EPMA を行った結果を **Fig. 10** に示す。摩耗粉には Fe, Al, Si などが検出され、また弱い強度の酸素も検出され

Fig. 9 Difference of contamination of lubricated oil at the rub of Al-20%Si alloy with normalized 0.1% C steel (A), and with normalized 0.45% C steel (B).

Fig. 10 Results of EPMA of wear debris obtained from lubricated oil at the rub of Al-20%Si alloy with 0.1% C steel.

た。しかし、酸素の強度は乾式摩耗にくらべると非常に弱いものである。さらに定性分析の結果では P, S, Mn なども検出されたが、これらは 0.1% C 炭素鋼の定性分析において検出されたものである。

焼ならし鋼におけるフェライトの量は低炭素鋼ほど多くなり、また、このような低炭素鋼を焼入れしてマルテンサイト組織にしても炭素量が少ないので、硬いマルテンサイトにはならない。このため過共晶 Al-Si 合金が 0.1% C の焼入鋼と擦過する場合もひっかき摩耗が起こるものとみられる。しかし、焼入鋼の場合には、炭素含有量が 0.35% C 以上になると、マルテンサイトの硬さも増加するので (0.35% C で HV312)、ひっかき摩耗が起これなくなり、このため過共晶 Al-Si 合金の摩耗量は著しく減少するものと思われる。

次に、炭素量が 0.45% C よりも多い高炭素の焼ならし鋼になると、ADC12 および過共晶 Al-Si 合金の摩耗量が増加することについて、Fig. 7(B) の関係から考察すると、この場合は Al-Si 系合金中の硬くてもろいけい素粒子と、相手炭素鋼のパーライト中の硬くてもろいセメントタイトの相乗作用により摩耗量が大きくなるのではないかと考えられる。そこで次に、相手炭素鋼がソルバイト組織の場合には Al-Si 系合金の摩耗はどのようになるかを調べた。その結果を **Fig. 11** に示す。なお、Fig. 11 の焼もどし鋼は 0.8% C の焼入鋼を 600°C で焼もどしを行ってソルバイト組織にしたものである。ソルバイトは本質的にはパーライトと同じように、フェライトとセメントタイトの層状混合物である。しかし、パーライトに比し

Fig. 11 Wear loss of ADC12 and Al-20%Si alloys rubbed with various heat treated 0.8% C carbon steel. (1) quenched, (2) tempered (sorbite structure), (3) normalized. Wear conditions are same as shown in Fig. 5.

て、セメントタイトの凝集状態が非常に細かいもので、このような組織の場合には、パーライト組織よりも Al-Si 系合金の摩耗、および摩耗量のばらつきは少なくなることが認められる。しかし、セメントタイトが存在しないマルテンサイトの場合よりは摩耗が大きく、炭素鋼のセメントタイトの存在、およびその形状が Al-Si 系合金の耐摩耗性に影響することが明らかである。

次に、Fig. 7 の(C)の関係の場合には、ひっかき摩耗あるいはセメントタイトとけい素粒子の相乗作用などは起こらないものと思われる。この関係は、前述のように過共晶 Al-Si 合金が 0.1%C の低炭素鋼と擦過する場合の一部、あるいは ADC12 および過共晶 Al-Si 合金が 0.8%C の高炭素の焼ならし鋼と擦過する場合の一部起こった。したがって、Al-Si 系合金がこのような炭素鋼と擦過する場合においても、ひっかき摩耗あるいはセメントタイトとけい素粒子との相乗作用は必ず起こるものではなく、起こらない場合もある。このため、これらの場合においては摩耗量のばらつきも大きくなるものとみられる。

Fig. 12 は摩擦速度が変わると、前述の低炭素鋼に対する過共晶 Al-Si 合金、あるいは高炭素の焼ならし鋼に対する Al-Si 系合金の摩耗の挙動がどのようなかを示したものである。いずれも摩擦速度が遅くなると摩耗量は著しく少なくなり、また摩耗量のばらつきも非常に少なくなる。したがって、摩擦速度が遅くなると、Al-

Si 系合金における前述のようなひっかき摩耗、あるいはセメントタイトとの相乗作用などは起こらなくなるものとみられる。

また、図には単一相組織の Al-5%Mg 合金が 0.8%C 焼ならし鋼と擦過する場合の摩耗の速度特性についても示したが、Al-5%Mg 合金の速度特性は Al-Si 系合金とは明らかに異なり、Al-Si 系合金のような、摩擦速度による急激な摩耗量の減少は見られない。乾式摩耗では良好な耐摩耗性を示した Al-5%Mg 合金は、潤滑油下の耐摩耗性においては純アルミニウムよりも劣り、さらに供試材のなかでも最も悪い耐摩耗性となった。この原因は、相手材とのなじみ性の悪いこと、すなわち摩擦面における接触点のはかの合金よりも増加しにくく、接触点の数が少ないと接触点にかかる荷重が大きくなるので、摩耗が大きくなるのではないかと考えられる。

次に、Fig. 13 は摩擦荷重の影響について示したものである。Al-Si 系合金においては、摩擦荷重が減少しても、摩擦速度の減少と同じような効果を示す。しかし、この場合においても Al-Si 系合金と Al-5%Mg 合金とは異なった傾向を示し、Al-5%Mg 合金では摩擦荷重に比例して摩耗量が減少する傾向が見られる。

4. 結 言

0.1%から0.8%Cの種々の炭素量の焼ならし鋼、ある

Fig. 12 Wear loss vs sliding speed for Al-20%Si, Al-5%Mg alloys rubbed with 0.1, 0.8%C normalized carbon steels at sliding load of 10 kg and distance of 9420 m with lubricant.

Fig. 13 Wear loss vs sliding load for Al-20%Si, Al-5%Mg alloys rubbed with 0.1, 0.8%C normalized carbon steels at sliding speed of 1.88 m/sec and distance of 9420 m with lubricant.

いは焼入鋼と擦過する場合のアルミニウム合金の潤滑摩耗を比較的軟らかい基地と硬いけい素粒子とからなるADC 12および過共晶のAl-Si系合金, ならびに溶体化処理した単一相組織のAl-5%Cu, Al-5%Mg合金について調べた結果, 次の結論を得た。

(1) アルミニウム合金の耐摩耗性は潤滑油があると著しく向上する。

(2) 相手材が焼入鋼の場合には, 炭素量の多い焼入鋼ほどアルミニウム合金の潤滑摩耗量は少なくなる。また, ADC12および過共晶のAl-Si系合金は, 単一相組織のアルミニウム合金よりも優れた耐摩耗性を示す。単一相組織では, Al-5%Mg合金のほうがAl-5%Cu合金よりも耐摩耗性の劣ることが見られた。

(3) 相手材が焼ならし鋼で, 摩擦速度が速いか, あるいは荷重が大きい場合には, ADC12および過共晶Al-Si合金の潤滑摩耗は, 0.45%Cよりも炭素量の多い焼ならし鋼となるに従い著しくなる。また, 0.45%Cよりも

炭素量の少ない焼ならし鋼においても, 低炭素鋼になるほど過共晶Al-Si合金の摩耗は著しくなる。これに対し, 単一相組織のアルミニウム合金では, 焼ならし鋼の炭素量が異なっても摩耗量はほとんど変わらない。

(4) アルミニウム合金と擦過する炭素鋼は, 高炭素の焼入鋼が最も適しており, この場合はアルミニウム合金の摩耗も非常に少なくなる。

参 考 文 献

- 1) 岡林, 中谷, 野谷, 川本: 軽金属, **14** (1964), 415.
- 2) 岡林, 中谷, 野谷, 川本: 軽金属, **14** (1964), 429.
- 3) 岡林, 川本, 野谷: 軽金属, **16** (1966), 36.
- 4) 鷹合, 高橋, 山口: 軽金属, **24** (1974), 479.
- 5) 嵯峨, 竹内: 軽金属, **27** (1977), 290.
- 6) A. J. Clegg and A. A. Das: *British Foundryman*, **70** (1977), 333.
- 7) 嵯峨, 竹内: 軽金属, **32** (1982), 402.
- 8) 山田, 田中, 大塚: 軽金属, **37** (1987), 83.