539.375.6 : 620.178.162 : 669.018.24

軸受合金の軸受性能の研究 (第3報)*

松山徳蔵**, 萱場孝雄**

A Study on the Characteristics of Bearing Alloys (3rd Report)

by Tokuzō MATSUYAMA and Takao KAYABA

Some properties of friction and wear of Al-base bearing alloys under dry or wet condition were investigated, being compared with those of WJ 1.

The results of this investigation were as follows :

(i) Under dry condition :—When the speed was slow, the rates of increase of wear decreased with the increase of load and when the speed was high, the wear decreased to a certain minimum value under a small load, though they increased rapidly with the load under a large load. The speed, at which they were minimum, became slow as the load increased, and this tendency was conspicuous with AIJ 1. The coefficient of friction of AIJ 2 changed like that of WJ 1, and though under a small load it was almost constant, it increased extremely under a large load.

(ii) Under wet condition :—The wear decreased generally with the increase of load and speed. When AIJ 1 was used, this decrease was larger and the value of Zn/P , below which the coefficient of friction increased rapidly, was largest. Under a certain load, the coefficient of friction was almost constant regardless the speed with every alloy respectively. The wear of mild steel, which slid on the alloys, was nearly equal to that of alloys respectively.

1. 緒 言

Al 合金が軸受に用いられたのは従来の軸受合金の主要成分である Cu, Sn, Sb などの不足を補う代用品に端を発する。ゆえにそれに対する使用者の期待も少く, 不完全な取扱いにより十分な実用成績が得られなかった。この合金を軸受に使用するにはそれ自身および軸の仕上げ, 軸の選択, 潤滑管理, 遊びなどの点で従来の軸受合金に比し取扱いが困難ではあるが, それらは現在の工業水準では容易に解決可能であり, かつこの合金は軸受合金として必要な機械的強度, 比重, 熱伝導率, 鋳造, 価格など多くの点ですぐれているのでおおいに軸受合金としての真価が発揮さるべきものであるといえる。ことに Cu を少量含んだ Al-Sn 系合金は高速高荷重用軸受としてきわめてすぐれた性能をもつことが認識されてきたため, わが国でも JIS に制定され次第にその実用度を高めつつある。

しかしこの合金に対しては軸受合金の性能の重要因子である摩擦摩耗に関する詳細な報告は見あたらぬゆえに, 本研究では JIS に制定された Al 軸受合金の

2 種類に対し, それぞれ乾燥および潤滑状態における摩擦摩耗に対する性能を調べ, 従来のバビットメタルのそれらと比較吟味した。

2. 供試材, 試験機および試験片

供試材には第1表のごとき成分⁽¹⁾のものを選んだ。この供試材の主要性質⁽²⁾をバビットメタル (WJ 1) (Sn 90.5%, Sb 5.5%, Cu 2.5%, As 1.5%) と比較して第2表に掲げる。

試験機は既報⁽³⁾に述べた理由から, 荷重登載部分を

第1表 供試材の種類および成分

種 類	記 号	成 分 %					
		Sn	Cu	Ni	Mg	その他	Al
軸受用 Al 合金 鋳物第1種	AIJ 1	10~13	0.5~1	>1.0	>0.5	>2.0	残部
軸受用 Al 合金 鋳物第2種	AIJ 2	6~9	2~3	>1.5	>1.0	>2.0	残部

第2表 供試材の主要性質

記 号	ブリネル かたさ		引張強さ σ_B kg/cm ²	伸び率 $\delta\%$	衝撃値 kg·m/cm ²	比重	熱伝導度 g·cal/cm ² s°C	熱膨脹 係 数 ×10 ⁶
	20°C	150°C						
AIJ 1	35	30	12	9	4.1	3.0	0.24	22.1
AIJ 2	45	40	15	10	4.0	2.8	0.30	22.3
WJ 1	26	7	7.6	15	2.5	7.4	0.15	21.0

* 昭和 32 年 4 月 2 日 第 34 期通常総会講演会において講演, 原稿受付 昭和 33 年 11 月 13 日。

** 正員, 東北大学工学部(仙台市桜小路)。

できる限り軽く作り最低荷重を約 1 kg までに下げた既報に用いたと同じ筒形試験片摩耗試験機を選んだ。

試験片は 800°C から約 250°C に予熱された既報のごとき円筒形金型に鋳造されたのちに、規格⁽¹⁾により約 200°C で 1 時間焼なましされた中空円筒の供試材の鋳造体のほぼ中央から接触面が鋳造体の下部端面から一定距離 10 mm のところから得られるように切削された。

A1 軸受合金は第 2 表でもわかるごとく かたさが大きいので、それとすべり摩擦する軸にもかなりのかたさが要求されるが、本報ではこの合金がバビットメタルの代用品として用い始められたことから、これとの比較の意味においてバビットメタルに対して軟鋼軸が用いられる理由から、摩擦相手としてはすべて軟鋼を使用した。この軟鋼の試験片も合金試験片と同形であり、これらの接触面積は約 1 cm² である。両試験片の接触面はエメリー紙 05 番までよく研磨し各試験ごとにベンジンなどでよく洗浄し、両面の油分、ほこりなどを取除き乾燥させたのち試験機に取付けた。

3. 試験結果ならびにその考察

1. 乾燥摩擦摩耗の場合 この場合の全摩擦距離と乾燥摩耗量との関係を二三の摩擦速度で調べた結果から、摩擦距離が 500 m を越せば定常摩耗状態になることがわかったが、更に荷重などの影響を考慮し 1500 m 摩擦後の状態を基準とし、それから 1 km 当りの摩耗量を測定した。また各測定値は数個の平均値である。

(i) 荷重特性 一定摩擦速度における荷重と乾燥摩耗量との関係を第 1 図に示す。ここで 150, 300, 500, 700, 900, 1100, 1300 rpm はそれぞれ 0.14, 0.28, 0.47, 0.66, 0.85, 1.04, 1.22 m/s の摩擦速

第 1 図 乾燥状態における荷重特性

度に相当する。

これによれば一般に低速では荷重の増大とともに荷重による摩耗量の増加の割合は減少し、それは A1J 2 において大きい。速度が増せば接触面の摩擦熱が次第に大になり、かつ試験片のまくれも増大し、ある荷重から摩耗量は急激に増加する。A1J 1 では速度が 0.28 m/s のときでも約 3 kg/cm² の荷重を越すとこのことがおこるが、A1J 2 では 0.28 m/s の速度では 10 kg/cm² の荷重でも摩耗量の急激な増加は見られず、より高速になって初めてあらわれるものと考えられ、しかもその増加の量は少い。これは A1J 2 は地がかたい上に含まれる Al₂Cu, Al₃Ni などが多いためであると考えられる。摩耗量が急激に増加する以上の荷重では、摩擦相手の軟鋼への溶着量が多くなり、あたかも合金同志の摩擦状態のごとくなり、摩耗量の測定は不可能となり、速度が増せばその傾向が著しい。

WJ 1 では一般に荷重とともに摩耗量は増加し、速度とともに減少していることを既報に述べたが、A1 軸受合金の場合にも低速低荷重では同様である。すなわち摩耗粉は黒色粉となってあらわれ、この間は溶融摩耗を伴わず、かつ速度が増せば摩耗量は減少するが、WJ 1 ほどではなくある速度以上では速度による摩耗量の減少はほとんどなくなる。しかし高荷重または高速になれば次第に溶融摩耗を伴うようになり、摩耗粉は輝いた金属粉となってくる。しかし A1 軸受合金では WJ 1 が溶融摩耗を伴うようになる荷重および速度よりも著しく小さな値で溶融摩耗にはいることがわかる。これは A1 軸受合金は地が WJ 1 に比してかたいので、硬粒の地中への沈下が少いためであると考えられる。また溶融摩耗の著しくない間、すなわち低速または高速低荷重の場合には A1 軸受合金の摩耗量が WJ 1 のそれよりもむしろ少い。

次に摩擦相手の軟鋼の摩耗量を第 2 図に示す。A1 軸受合金は前述のごとく溶融摩耗にはいる荷重が比較的低いので、高速になれば合金の一部が軟鋼に溶着し測定結果が不確実になり、これは高速、高荷重ではなはだしい。一般に高荷重で軟鋼の摩耗量が

第 2 図 相手軟鋼の摩耗量

きいことは WJ 1 に対する場合と同様であるが、高荷重では溶融摩擦にはいりやすいので WJ 1 に対するとときほどは荷重による摩耗量の増加は大きくない。高速になれば摩耗量はある速度までは減少し、それ以上では溶着その他の影響によりあまり変化は見られなくなる。また軟鋼の摩耗量はそれ自身の摩耗量の少い AIJ 2 に対するとときに少いが、WJ 1 に対するとときに比較すれば数倍に達している。

(ii) 速度特性 一定荷重下での乾燥摩耗量と摩擦速度との関係を示したのが第3図である。AIJ 1, AIJ 2 とともに速度特性曲線に最小値があらわれ、荷重の増大とともにそれは次第に低速に位置するようになり、かつこの最小値附近で小摩耗量を示す範囲が著しく狭くなる。また両者間では AIJ 2 が一般に摩耗量が少く最小摩耗量を示す摩擦速度も高速に位置し、かつこれを過ぎてからの摩耗量の増加は少い。とくに AIJ 1 の場合には 10 kg/cm^2 程度の荷重では 0.28 m/s の摩擦速度でも摩耗量は非常に大きく測定不可能である。 0.14 m/s 以下の速度では測定しなかったが、既報の WJ 1 の場合から推定すれば更に低速で極大値に達したのち減少し、この極大値は荷重が増すと低速に移動するものと考えられる。

この結果と WJ 1 の場合の結果と比較すれば、WJ 1 の場合には摩耗量の最小値が約 2 m/s 附近に存在すると推定されたのに対し、これらの合金ではそれ以下の速度に最小値があるが、摩耗量は低速における大なる値から摩擦速度の増大とともに減少し、最小値を通り再び急激に増加すること、および最小摩耗量を示す速度は荷重が増大するにつれ低速に移動することなどの傾向は全く同様であるといえる。この場合上記の速度を境にして前方を合金の硬軟両相が大きな因子として摩耗量を支配する範囲、後方を合金の溶融によって大きく支配される範囲と区別することができ、前範囲で

は速度、荷重が加わると硬粒のやわらかい地への沈下により荷重分布が平均化してくるため荷重は増加した多くの硬部分でさえられるので耐摩耗性を示すが、後範囲では摩擦速度が大なるため接触面温度の上昇が大きく溶融がはなはだしくなり、したがって地の全面的な溶融状態により軟鋼への溶着が大きくなり摩耗量が増大するものである。

(iii) 乾燥摩擦係数 試験機附属の装置により各荷重、各速度における摩擦力を測定し摩擦係数を算定した。この場合にも一般金属において見られるごとく摩擦初期においていくぶん摩擦係数が大きく、すべりの進行とともに定常摩擦状態になり、もちろん速度、荷重により差異はあるが、ほぼ $10 \sim 15 \text{ mn}$ 後にはほぼ一定の摩擦係数を示すようになった。しかしこの定常摩擦状態も局所的な温度上昇などにより溶着をおこせば摩擦力が急激に増加し、暫時経過すれば再び一定の値に落着くことがあり、この溶着がいつそうはげしくなれば摩擦力の変動が大きく摩擦係数の算定が不可能に

第3図 乾燥状態における速度特性

(a) 荷重による変化

(b) 速さによる変化

第4図 乾燥摩擦係数の荷重および速さによる変化

なる。

乾燥摩擦係数の荷重および速度による変化を第4図(a), (b)に示す。WJ 1 では既報のごとくある荷重までは摩擦係数は減少し、それ以上では荷重によらずほぼ一定の値を示し、速度によってはあまり差異はなかったが、Al 軸受合金では低荷重では WJ 1 と同様に荷重の増大とともに減少しある一定値に近づく傾向が見られるが、一定値を示す荷重範囲はきわめて狭く溶着により摩擦係数は増大してくる。したがって前述のごとく摩擦量も増加してくるわけである。

また低荷重では速度の増大とともに摩擦係数は減少し、荷重が小さければその減少は大きい、荷重が増加すればその減少が次第に減少し約 3 kg/cm^2 の荷重では速度によらずほぼ一様になり、更に荷重が増せば逆に高速になると摩擦係数も次第に増大し、荷重の増大によりその増大がいっそう大きくなって来る。これらの荷重および速度による摩擦係数の変化は AIJ 1 が大きく、 1.04 m/s では 3 kg/cm^2 附近から摩擦係数は増大の一途をたどってくる。AIJ 2 では低速低荷重では WJ 1 と全く同様の变化を示すが、高速高荷重になればやはり溶着がはげしくなることにより急激に増加する。

WJ 1 の摩擦係数と比較すれば定常摩擦状態における一定値は Al 軸受合金がむしろ約 25% くらい少ないが、一定値を示す荷重の範囲が WJ 1 に比較してきわめて狭いのが欠点である。

2. 潤滑摩擦摩擦の場合 軸受合金は普通油の潤滑状態で使用されるものであり、潤滑状態では両接触面は油膜により隔離されるので摩擦は起らないはずであるが、運転開始および停止の際の潤滑油の不行きわたりな半液体摩擦状態や、発熱による粘度低下などにより常に摩擦を伴ってくることは避けられない。また使用した試験機では端面接触ですべり摩擦をするために試験片の接触面が完全な平行面であれば油の潤滑はないはずであるが、摩擦面のわずかな凹凸、組織の不揃一によって、また試験片の周辺からの油の浸入などによってかならず潤滑されるものであって、その程度は試験片間の相対すべり速度によって定まる。

潤滑油として WJ 1 の場合と同様に市販のモートル油を使用し、総回転数と潤滑摩擦量との関係を求めた結果から約 30 000 回転以後は摩擦距離あたりの潤滑摩擦量はほとんど一定になることがわかったので、30 000 回転すなわち約 2 km 走行後を基準とし、しかも潤滑摩擦量は乾燥摩擦量に比して非常に少ないので 10 km 当りの潤滑摩擦量を測定した。

(i) 荷重特性および速度特性 速度を 0.47 m/s

(a) 荷重特性

(b) 速度特性

第5図 潤滑状態における荷重および速度特性

と一定にした場合および荷重を 80 kg/cm^2 と一定にした場合の潤滑摩擦量を各供試材および摩擦相手の軟鋼について測定した結果が第5図(a), (b)である。荷重の増大とともに、また速度の増大とともに潤滑摩擦量は次第に減少することは両者に共通であるが、その減少は AIJ 1 が大きく、AIJ 2 の潤滑摩擦量はわずかながら AIJ 1 に比して少い。しかし高速になれば AIJ 2 では摩擦量はいくぶん増加気味になるが、速度による摩擦量の減少は AIJ 2 が少い。

また摩擦相手の軟鋼の潤滑摩擦量は AIJ 1 に対するときは、荷重によってはあまり差異が見られず常に摩擦相手の供試材のそれよりも少いが、AIJ 2 に対するときにはごくわずかではあるが、摩擦相手の供試材の摩擦量よりも大きい。速度によっては両供試材に対しておのおの同量くらいの潤滑摩擦量を示す。これらは供試材のかたさの相異、初品の含有量の相異などによるものである。したがって軟鋼軸を Al 軸受合金に対して使用するにはかたさが不足であり、とくに AIJ 2 でははなはだしいのである。

(ii) 潤滑摩擦係数 潤滑摩擦における荷重と摩擦係数の関係を図示したのが第6図である。これによれば WJ 1 では低荷重では速度によりいくぶん変化し、速度が増せば摩擦係数も次第に増加し、また荷重が増せば次第に速度による変化が少くなり、ある荷重以上になるとほとんど変らない値を示すようになる。AIJ 2 と WJ 1 とは類似し摩擦係数の変化が少く、低荷重から高荷重になるとわずかな増加してゆく程度である。したがって荷重が大になっても油膜が破壊される機会が割合に少く不完全潤滑状態にはならない。AIJ

1ではその油膜の破壊の影響が大きく、AIJ2の場合よりも不完全潤滑状態になりやすく発熱が大きくなってきて摩擦係数の傾向は他の二つとはかなりことなり、低荷重のとき大きかった摩擦係数は荷重とともに急激に減少してゆくが、ある大いさの荷重になればその後は次第に増加し同時に油温もかなり上昇する。

WJ1はごくわずかずつであるが摩擦係数は速度の増大とともに増加し、AIJ2は低荷重ではこれと同様に速度とともにわずかに増加するが、荷重が増せばその増加は減少しある荷重でほとんど速度による変化がなくなり、荷重がそれ以上にませばかえって速度によって摩擦係数は減少する。しかしその差はいずれの場合でもあまり大きくはない。AIJ1もAIJ2と全く同様な傾向をもってはいるが荷重による摩擦係数の変化はAIJ2に比して著しく大きい。

(iii) 潤滑油の温度上昇 潤滑摩擦状態でも接触面は高荷重により非常な高温になっているものと推定されるが、その摩擦発生熱は大部分は両試験片を通じて試験機本体に伝わり、一部分は潤滑油の温度上昇に費される。またこの熱によりあたためられた潤滑油も表面および外周から冷却されるので、伝入する熱が少なければ油温はほとんど上昇しない。しかし条件が過酷

になれば潤滑油の温度は徐々に上昇し、伝入熱と散逸熱とが平衡すれば潤滑油の温度は一定に保たれる。潤滑油の粘度は温度により著しく変化し、それが摩擦摩擦に影響するものである。第7図は潤滑油を循環させず一定量80ccを使用したときのその温度上昇の一例である。

すなわち摩擦初期には接触面の発生熱により温度上昇は大きい、これと同時に油からの散逸熱も次第に多くなり、暫時後油温はほぼ一定に達する。荷重が増せば発生熱も多くなり伝入熱が増すが、それに応じて散逸熱も多くなり低荷重のときよりも高温で一定温度を保持するようになる。AIJ1では荷重が240 kg/cm²程度になれば伝入熱は散逸熱よりも多く潤滑油の温度は急激に上昇し油膜は生成されず焼付きの現象をおこす。WJ1はAl軸受合金よりも熱伝導率が劣るため潤滑油の温度上昇も大きい、AIJ1のように240 kg/cm²程度の荷重では急激な温度上昇はおこらない。

この図から各荷重における3時間後の潤滑油の温度上昇を各供試材について図示すれば第8図のごとくなり、AIJ2とWJ1とでは後者が温度上昇は大きい荷重による増加の割合はほぼ同様である。これに対しAIJ1は低荷重ではAIJ2とほとんど変りないが、高荷重になれば著しく増加する。

第6図 潤滑摩擦係数の荷重による変化

第7図 潤滑油の温度上昇

第8図 3時間後の潤滑油温度上昇と荷重との関係

第9図 荷重と潤滑油粘度との関係

このように潤滑油の温度が変化すればそれに応じて潤滑油の粘度も変化してくるゆえに、各供試材について荷重と潤滑油の粘度との関係を調べてみれば第9図のごとくになり、荷重がある値以上になれば潤滑油の粘度は急激に減少し、AlJ 1 でその減少が最も激しいことがわかる。

(iv) Zn/P と摩擦係数との関係 第10図は上述の種々の関係から Zn/P と摩擦係数との関係を各供試材について求めたものであり、ここで Z は潤滑油の粘度、 n は回転数、 P は荷重を意味する。

一般に潤滑油膜が生成されている範囲では荷重の増加による温度上昇、粘度低下により油膜は薄くなり、摩擦係数は Zn/P の減少に比例して減少するが、この Zn/P の減少による摩擦係数の低下は AlJ 1 で最大で AlJ 2 ではほとんど変わらない程度である。この状態で平衡を保ち油膜の破壊がなければ軸はきわめて円滑に回転する。

Zn/P が更に低下すれば摩擦熱が過大になり、潤滑油の機能は低下し油膜は破壊され不完全潤滑状態にはいるので、摩擦係数はある Zn/P で最小値を示しそれ以下では増加するが、AlJ 1 ではそれがはなはだしく摩擦係数は急激に増大する。一方 AlJ 2 および WJ 1 では油膜はほとんど安定のまま潤滑油温度は平衡を保っているため、摩擦係数の増加はきわめて少くほぼ一定値にとまる。

4. 結 論

JIS に制定されている Al 軸受合金の乾燥および潤滑摩擦摩耗試験を行い、摩擦係数、摩耗量、温度上昇などを WJ 1 のそれらと比較しながら調べた。その結果つぎのことがいわれる。

(1) 乾燥摩擦摩耗の場合は (i) 低速では一般に荷重の増大とともに摩耗量の増加の割合は減少し、速度が増せば摩耗量は低荷重では減少しある最小値に近づくが、高荷重では荷重により著しく増加する。摩耗量が最小である速度は荷重が増すと低速に移り、かつそ

第10図 摩擦係数と Zn/P との関係

の附近で小摩耗量を示す速度の範囲は急激に減少する。この傾向は AlJ 1 で大きい。摩擦相手の軟鋼の摩耗量は高荷重、高速では Al 軸受合金の軟鋼への溶着により不確実になる。(ii) 速度および荷重による摩擦係数の変化は AlJ 2 が WJ 1 に類似し低荷重では速度によらず一定であるが、高荷重になると急激に増大する。AlJ 1 ではそれがいっそうはげしく、各荷重、各速度により一定の摩擦係数を示す範囲がきわめて狭い。Al 軸受合金は WJ 1 に比して最小摩擦係数は小さい。

(2) 潤滑摩擦摩耗の場合は (i) 摩耗量は両者ともに高速、または高荷重になればわずかに減少するが、その減少は AlJ 1 で大きい。摩擦相手の軟鋼も相手合金とほぼ同程度に摩耗する。(ii) 摩擦係数は両者ともに速度による差が見られない荷重が存在し、それ以上あるいはそれ以下では速度による傾向が逆になり増加あるいは減少する。(iii) 使用潤滑油の温度上昇は WJ 1 で最も大きく、AlJ 2 で最も少い。また温度上昇の荷重による傾向は AlJ 2 と WJ 1 とは類似し、AlJ 1 は高荷重では著しく大きい。 Zn/P と摩擦係数との関係も WJ 1 と AlJ 2 とは類似し、AlJ 2 が最も大きい Zn/P で急激に摩擦係数は増大する。

文 献

- (1) JIS H 5402.
- (2) 水野, 軸受合金(昭 29)(日刊工業新聞社)などによる。
- (3) 松山, 萱場, 機械学会論文集, 20, 98(昭 29-9), 666.