

熔融金屬の潤滑效果

會田範宗・宮川行雄

(1943年3月1日受理)

實 験

實驗の方法一般は前報告(4)におけると全く同様である。摩擦測定の場合もまた全く同じである。

實驗をA, Bの二つのグループにわけた。Aは軟鋼同志の組合せを主體として、摩擦板に種々の低融點金屬膜を作つて實驗した。Bは各種金屬の摩擦棒と軟鋼摩擦板との組合せを主體とし、金屬薄膜としては、Aグループの實驗から最も好ましいことわかつたPbとSnとのみを用いた。またA, B兩グループを通じて、はんだ、Cu-Hgアマルガム等の特殊金屬膜、及び最も多く實用されている軸受用合金としてホワイト・メタル(Pb+Sn合金)、ケルメット(Cu+Pbなる混合物)等の高温摩擦特性をも實驗した。實驗の組合せを

前報告(1)で、われわれは油脂の薄膜による潤滑には一つの熱的な限界點が存在し、それはまず機械的轉移溫度として、最後には油脂の分解、重合による致命的限界點としてあらわれることをのべた。特に重要なことは、機械的轉移溫度はなおよいとしても、後者の破局的限界點がなお300°C内外をでないうちに到來することが多いということである。この程度の溫度は、摩擦面の溫度として決して珍らしいものではなく(2,3)、普通の軸受面などでも常時おこつていると思われるのである。

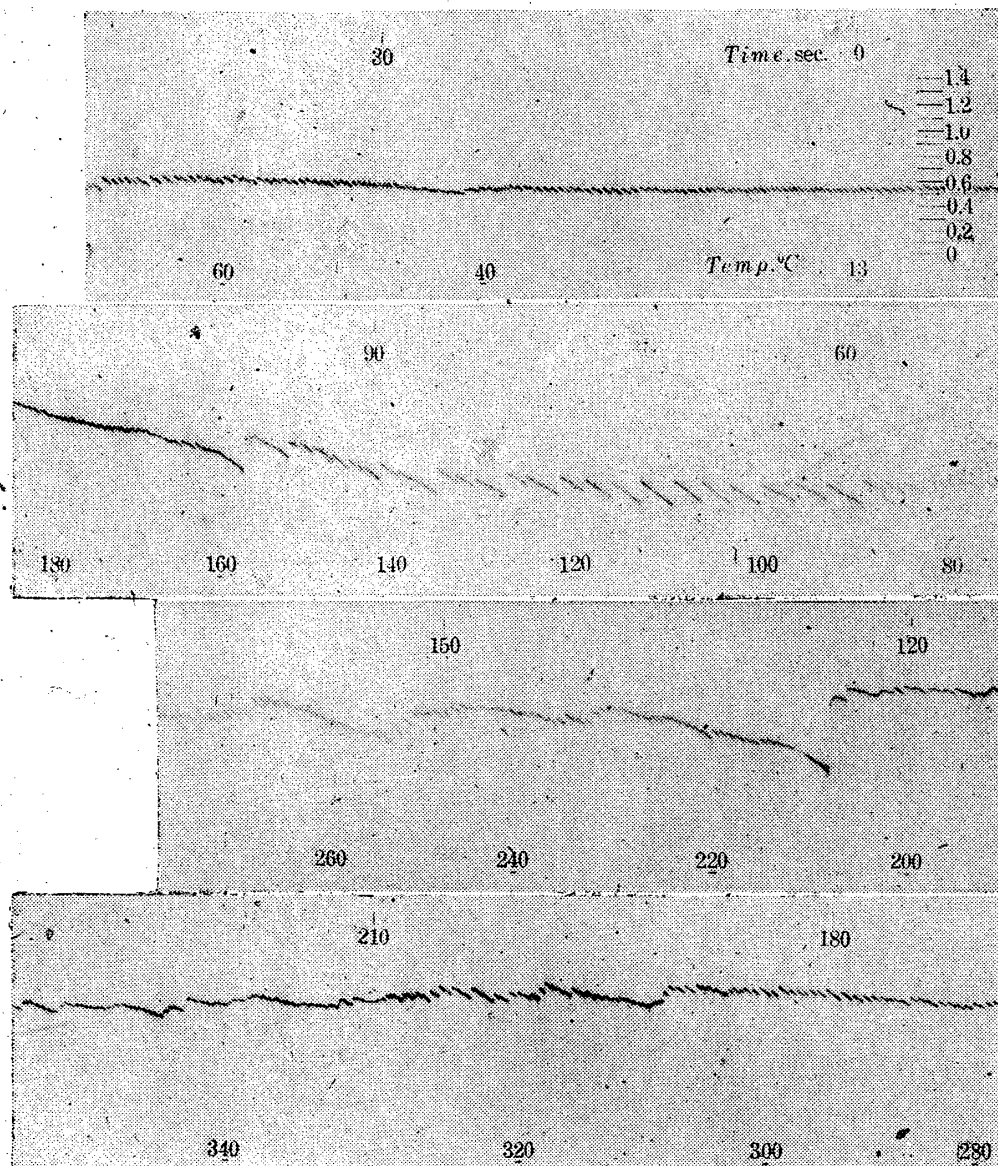
一方いわゆる軸受金という問題がある。軸受金の任務はなにかの問題は、以前から提示されたまま、はつきりした解答を得ないままに、經驗的によりよいものへと發達しつつ今日に及んでいる。そしていくたの變化を経つても、なおむかしからの共通した特徴は、低融點金屬の使用である。時にはいわゆる軸受合金なるものを全く使用しないものもあるが、それははじめから金屬同志の接觸の危険のない、または少ない特殊な場合で、一般の、金屬同志の接觸の機会が多いと期待され、焼付きを防ぐことが第一目的であるような軸受には、殆んどきまつて低融點合金類が軸受面に使用されるのである。特に最近の軸受金の使用法の一つの特徴は、軸受金の表面に各種の低融點金屬(Pb, Sn, In等)を薄層状に塗附、鍍金することである。われわれはまえの研究から、油脂の薄膜が300°C内外で失效すると同時に、その程度の溫度からPb, Sn等の低融點金屬が熔融しはじめる點に注目し、各種金屬面上に形成された低融點金屬の薄層が、その固態において、また熔融状態において、いかなる摩擦特性と潤滑能力とを示すかを實驗的に研究した。

一括して第I表に示す。

金屬薄膜を摩擦板上に形成するのに二つの方法を用いて區別して實驗した。それはこの二つの方法によつて摩擦特性が非常に相異したからである。一つは摩擦板に低融點金屬の小塊をおいて、それを摩擦板の裏から加熱し、熔融點をやや越えた近傍で自然に金屬が溶けて擴がつて膜を作つた上で摩擦を行う方法、他は低融點金屬を摩擦板にこすりつけて、その表面に薄い金屬膜を作る方法である。後者の方法によるときははじめから固態薄膜を作つていたので、低温から熔融點以上まで、油脂の薄膜におけると全く同じ方法で連続的に加熱しながら摩擦測定を行うことができる。このこすりつけの方法では金屬膜の厚さを非常に薄く作ることができ、こすりつけた金屬の減量から、

第 I 表

グループ	番號	摩擦棒	摩擦板	金屬薄膜	グループ	番號	摩擦棒	摩擦板	金屬薄膜
A	1	軟鋼	軟鋼	なし	B	1	軟鋼	Cu	なし, Pb, Sn
	2	"	"	Pb		2	Cu	軟鋼	"
	3	"	"	Zn		3	Al	"	"
	4	"	"	Cd		4	Ag	"	"
	5	"	"	Bi		5	Sn	"	なし
	6	"	"	Sn		6	Pb	"	なし
	7	"	"	ホワイト・メタル		7	ホワイト・メタル	"	なし
	8	"	"	はんだ		8	ケルメット	"	なし, Pb
	9	"	"	Hg(Cu-Hgアマルガム)		9	軟鋼	ケルメット	なし
	10	Cu	Cu	Cu-Hgアマルガム					



第 1 圖

に振幅をまし、140°C位からはssのまま摩擦を次第に増大する。200°C位から330°C位まではほぼ一定の摩擦と細かいssとを示してゐるが、それ以上では漸次irr(irregular)の特性をあらわしている。恐らくFe-Cの合金とはいえCが少いため、高温では純金屬同志の特性に近い摩擦を示すものであろう。これらの摩擦の特性變化と鋼の變態の關係も、この程度の温度範圍では考えられない。また300°~400°Cまでは鋼の機械的諸性質も大して變化せず⁵⁾、恐らく表面になお若干吸着している油やガスの分子が温度上昇とともに

算出するとその厚さは大體 5×10^{-4} mm である。本稿中では便宜上前者を熔塊法、後者を塗附法とよぼす。

加熱には従来通り電熱器を用い、毎分約 100°C の速度で加熱する。試験荷重は 400 g、摩擦速度は 0.05 mm/sec、試験片の先端は 1φ で平面状である。

油脂は全く使用しない。

實 験 結 果

Aグループ (1) 軟鋼/軟鋼 (軟鋼棒/軟鋼板の意。以下同様。)

Aグループの基本的摩擦特性として上の組合せにおける室温から高温(約 360°C)に到る摩擦變化のオシログラムをとつた。第1圖の寫眞がそれである。寫眞にみるように、室温から 70°C 位までは殆んど一定のss(stick-slip)の特性を示しているが、その後次第

飛散したためと考えられる。

摩擦係数 f_s はこの場合、一般の場合(約 0.3~0.4)よりやや高い値がえられているが、 f_s の温度特性の本質的なものには影響ないので、そのまま基本特性として採用した。第1圖を整理して第2表に示す。第2表及び以下の表において、摩擦特性を便宜上静止摩擦係数 f_s (さりのおこる直前の摩擦係数) と、振幅 s (さりを擦摩擦係数であらわした量) とであらわし、摩擦の連続さりの部分は c、不整摩擦部分は irr と略記することとする。従つて ss の模様から平均の運動摩擦係数

第 2 表

温度 °C	13-70	70-140	140-200	200-330	330-
f_s	0.55 ~0.60	0.55 ~0.60	次第に増加	1.20 ~1.30	1.20 ~1.30
s	0.03	0.18	—	0.03	irr

を求めるには $f_s - 1/2s$ を計算すればよいことになる。

第1圖, 第2表の基本特性を基礎にして, 以下摩擦面に形成された金属薄膜の効果を比較してゆこう。

(2) 軟鋼/(軟鋼+Pb), (軟鋼板にPbの薄膜形成の意. 以下同様.), (PbのM.P. = 327.4°C)

(a) 熔塊法 (約 360°C)

Pbの熔融點(M.P.)よりやや高い約 360°C で測定する。以下熔塊法によるときはすべて同様である。

$$f_s = 0.20 \sim 0.40, \quad s = 0.12 \text{ (ss)}$$

(b) 塗附法

連続温度上昇によると室温よりM.P.まで一様なこまかいssまたはcを示し, $f_s = 0.15 \sim 0.30$, $s = 0.03$ である。M.P.近傍を過ぎてからは, 安定なcのまま摩擦も $f = 0.20$ を持続する。別に塗附法により, 約 360°C の一定温度で実験したところ, $f = 0.10 \sim 0.20$ の美しい連続なり特性cを示し, 固態においても, 特にM.P.以上においては, 油脂の存在しないにもかかわらず極めて良好な潤滑作用をいとなむことがみられた。

(3) 軟鋼/(軟鋼+Zn), (ZnのM.P. = 419.4°C)

(a) 熔塊法 (約 450°C)

約 450°C の一定温度で連続なり特性を示し, $f_s = 0.80$ であつた。Znはc特性を興える點ですぐれているのであるが, f_s の絶対値がかなり大きい。これはPbとFeとが合金を作らないのに, ZnはFeと合金を作り, 摩擦面にできた合金層が上の特性を興えているものと思われる。事實実験後Zn層を剝離しようとしても結局Pbのように簡単にとることができず, 全表面を機械的に削りなおしたほどだつた。

(4) 軟鋼/(軟鋼+Cd), (CdのM.P. = 320.9°C)

(a) 熔塊法

約 360°C の一定温度で測定。

$$f_s = 0.60 \sim 0.80, \quad s = 0.25 \text{ (ss)}$$

(b) 塗附法 (約 360°C)

$$f_s = 0.60, \quad s = 0.25 \text{ (ss)}$$

(5) 軟鋼/(軟鋼+Bi), (BiのM.P. = 271°C)

(a) 熔塊法 (約 360°C)

$$f_s = 0.50 \sim 0.70, \quad s = 0.25 \text{ (ss)}$$

(b) 塗附法 (約 360°C)

$$f_s = 0.40 \sim 0.50, \quad s = 0.03 \text{ (ss)}$$

別に同じ塗附法によつて, Bi膜の室温より高温に到る間の特性をもとめたら第3表の結果をえた。

すなわちBiは全體としてよい性質をもち, 特に低温においてすぐれた特性をもつていことがわかる。

(b) 軟鋼/(軟鋼+Sn), (SnのM.P. = 231.8°C)

(a) 熔塊法 (約 260°C)

第 3 表

温度 °C	15-180	180-270	270-300	340	360
f_s	0.15	0.20	0.25	0.30	0.40
s	0.05	0.05	0.05	0.07	0.10

$$f_s = 0.40, \quad s = 0.35 \text{ (ss)}$$

(b) 塗附法 (約 260°C)

$$f_s = 0.60, \quad s = 0.40 \text{ (ss)}$$

SnはPbとともにすぐれた軸受用金属であるが, Snの摩擦特性は必ずしもPbほどにはすぐれていない。しかし他の諸金属—Zn, Cd, Bi—にくらべると明らかにすぐれている。

そこでさらにSnのM.P.以上における特性を測るために, 熔塊法によつて240°C以上の摩擦を測定した。その結果を第4表に示す。

第 4 表

温度 °C	240	260	280	300	320	340	360	390
f_s	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.40	0.50	0.90
s	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.15	0.80

すなわち300°C附近までは異常ないが, 次第に摩擦を増し, 360°C以上で急に荒れはじめて, 摩擦面を保護する能力を喪失することがみられる。

(7) 軟鋼/(軟鋼+ホワイト・メタル), (ホワイト・メタルのM.P. = 227°C)

(a) 熔塊法 (約 250°C)

$$f_s = 0.60 \sim 0.70, \quad s = 0.60 \text{ (ss)}$$

なおSnの場合と同様, 240°C以上の特性を求めると第5表のようになる。

第 5 表

温度 °C	240	260	280	300	320	340	360
f_s	0.45	0.52	0.55	0.58	0.60	0.60	0.62
s	0.40	0.40	0.40	0.45	0.45	0.50	0.50

ホワイト・メタルの場合は, まえのすべての場合にくらべて, sの大きいのが目立つ。

(8) 軟鋼/(軟鋼+はんだ), (はんだのM.P. = 182°C)

(a) 熔塊法 (約 250°C)

$$f_s = 0.20 \sim 0.40, \quad s = 0.03 \text{ (ss)}$$

約 240°C から連続温度上昇を行つたときの結果は第6表のとおりである。

なおこの場合cからssに轉移する温度は29°Cである。

(b) 上の場合ははんだを普通の熔塊法によつて

第 6 表

溫度 °C	249	260	289	300	320	340	360
f_s	0.23	0.25	0.43	0.53	0.61	0.65	0.65
s	c	c	c	0.25	0.25	0.25	0.35

實驗したもので、接着劑は用いなかつた結果である。従つてはんだの膜は實驗後容易に軟鋼面から剥ぎとることができたが、つぎにペーストを用いてはんだの完全な接着膜を作つて實驗したときの結果は、

$$f_s = 0.80, \quad s = 0.60 \sim 0.70 \text{ (ss)}$$

すなわち熔塊法にくらべてはるかに大きな摩擦とssとを示している。はんだは一般に鐵と合金を作らないのであるが、その界面においてはやはり若干の擴散を生じ、その屬が摩擦に大きな影響を及ぼしているものと考えられる。まへの Zn の場合と比較して考えると、界面に合金層を形成するようなものは一般に摩擦特性がよくないと思はれる(なお以下の Cu-Hg アマルガムの例参照)。

(c) つぎに上と同様、ペーストを用いてはんだの接着層を作り、熔融状態においてはんだを拭い去り軟鋼面上にわずかのはんだの薄層をのこした状態で室温から連續溫度上昇による摩擦實驗を行つた。結果は第7表に示すとおりで、はんだの M.P. 182°C において、それまで c であつた摩擦は ss に轉じ、その振幅も急に増大している。すなわちその傾向は (b) の場合と同じで、膜が薄いだけ ss が M.P. と同時に起つているだけが相異なる。そしてこの場合にもやはり熔融と同時に擴散による界面の物理的化學的性質の變化が摩擦に悪い効果を及ぼしていることが知られる。

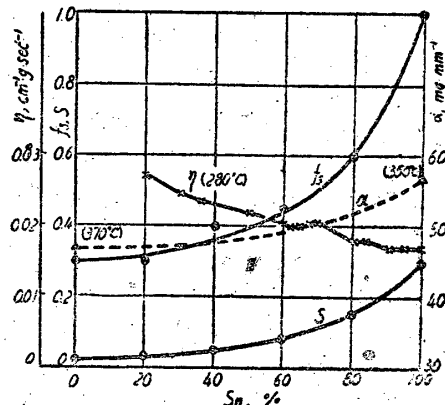
第 7 表

溫度°C	33	100	150	M.P. 182	193	200	240	260	300	360
f_s	0.43	0.40	0.40	0.40	0.45	0.50	0.50	0.50	0.60	0.70
s	c	c	c	ss 開始	0.13	0.35	0.40	0.40	0.45	0.45

(d) はんだ (Pb+Sn 合金) の組成の影響
はんだが Pb について極めてよい金屬潤滑劑であることが上の結果から知られたので、さらにその詳細を知るために、Pb-Sn 系合金の各種の組成について同

第 8 表

Pb, %	Sn, %	f_s	s
0	100	1.00	0.30
20	80	0.60	0.15
40	60	0.45	0.08
60	40	0.40	0.05
80	20	0.30	0.03
100	0	0.30	0.02



第 2 圖

じ熔塊法による摩擦實驗を行つた。結果は第8表および第2圖に示したとおりである。

これからわかるように、摩擦は Pb, Sn の熔融點や、各組成の合金の融解特性には關係が認められず、Pb はあたかも潤滑油に對する油性向上劑の役割に類似した作用をこの二成分系合金に對して果しているようである。圖に記入した粘度 η の曲線はプリュスの測定値であるが、粘度に無關係であることも明らかである。圖の點線の曲線は熔融状態にある Pb, Sn の表面張力の値から各組成の合金の表面張力の變化する傾向を類推したもので、松山芳治氏の Cd-Sb, Zn-Sb, Pb-Sb 各系の合金の眞空中の表面張力の測定値から同様の傾向を假定して記入してみたものである。もしこうした假定が正しいとすれば、摩擦はほぼ表面張力に比例的であると考えられる。これについてはなおあとでのべる。

(9) 軟鋼 / (軟鋼+Hg), 軟鋼 / (Cu+Cu-Hg アマルガム), (Hg の M.P. = -38.88°C)

(a) 軟鋼 / (軟鋼+Hg), (室温)

このときには Hg の影響は全くなく軟鋼 / 軟鋼結果と殆んど全く同じ特性がえられた。

これは Hg の表面張力の大きい點を考慮するとき容易に考へる結果である。

$$f_s = 0.50, \quad s = 0.04 \text{ (ss)}$$

(b) 軟鋼 / (Cu+Cu-Hg アマルガム)

比較のため、はじめに軟鋼 / Cu の溫度上昇による摩擦特性を測定しておいた。第9表がその結果である。

第 9 表

溫度°C	13-50	50-100	100	100-200	200	200-360
f_s	0.45	次第に増加	0.90	次第に増加	1.50	1.50
s	0.05	—	0.10	—	0.80	0.80

Cu·Hg アマルガムは極めてなめらかな感觸をもち、常溫で液狀の合金なので大きな期待で實驗した。結果は第10表のとおりである。

第10表

溫度 °C	13—130	130—220	220	270	330
f_s	0.15	0.15	—	0.75	1.40
s	0.05	c	ssに轉 移	0.65	1.50

すなわち第9表と比較すると、200°C位までは非常によい金屬潤滑劑の役割をはたしていることがわかるが、高温で激しいssをおこすようになり、表面は酸化して赤褐色を示していた。

なおCu·Hgアマルガムについて荷重を200~1000gまで變えて實驗してみたが、常に常溫におけると同じ摩擦特性が示された。

(10) Cu/(Cu+Cu·Hg(アマルガム))

(a) Cu/Cu, (室溫)

Cu·Hgアマルガムの特性をみるため、さらにも金で實驗を行つた。比較のためCu/Cuの特性を常溫でしらべると、とも金純金屬のirrの特性が示される。

$$f_s = 1.20 \sim 1.40, \quad s = irr \text{ (irr)}$$

(b) Cu/(Cu+Cu·Hgアマルガム), (室溫)

$$f_s = 0.35, \quad s = 0.15 \text{ (ss)}$$

第3圖はこの場合の比較寫眞で、(a)はCu/Cu, (b)はCu/(Cu+Cu·Hgアマルガム)である。圖にみるようにアマルガム層のために摩擦も非常に低下し、irrはssに變化している。

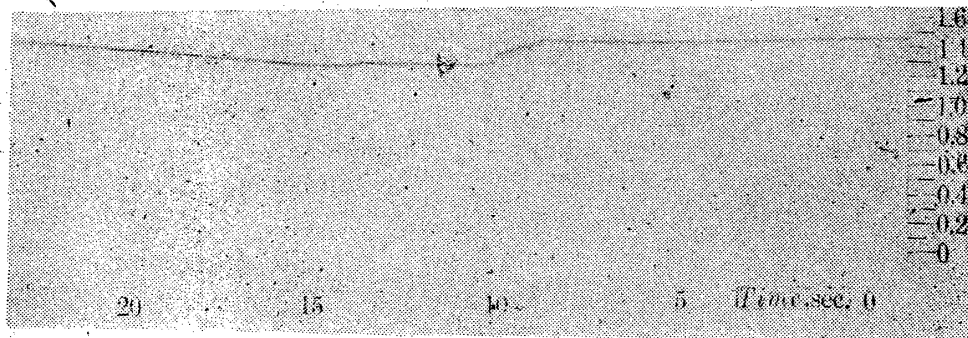
(11) 總括

これまでに得た純金屬薄膜のデータを一つにまとめて比較すると第4圖のようになる。いずれも摩擦棒は

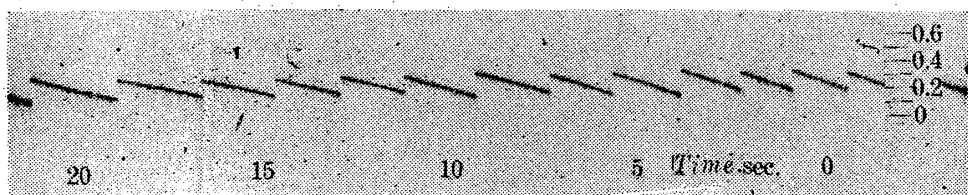
軟鋼で、圖には摩擦板の區別を示してある。なお合金薄膜の結果をも記載した。圖でみるように、低温では、液狀のCu·Hgアマルガム、Pb, Bi等が拔群の低摩擦を示しているが、高温ではPbが斷然優秀さを示している。そしてこれらの低融點金屬の薄膜の存在が、固態においても、特に熔融狀態において軟鋼軟鋼の摩擦を1/2~1/3に低下させていることは注目し値する。さらに金屬各薄膜の熔融點 M.P., 粘度 η ^{6), 8)}, 熔融時の表面張力 α ⁷⁾等と熔塊法による摩擦 f_s とを第5圖で比較した。圖の比較からわかるように、 f_s は異金屬相互間の摩擦においても第2圖におけると同様、粘度、熔融點等には無關係であり、Biを除いた他の金屬では摩擦係數の順位において表面張力と平行的である。このBiも、塗附法によるときはPbと殆んど同程度の摩擦を示す金屬であり、まへの第2圖とくらべるときは、摩擦は表面張力の小さいほど小さいということがほほいえるように思われる。熔融金屬の表面張力が低いほど摩擦もまた低いということは、熔融金屬を潤滑劑として考えるとき極めて考えやすいことである。すなわち一般油脂の薄膜の場合にはすでに常識であるように、表面張力の低いほど摩擦面の細かい凹凸の間までうるおすと考えられるので、このことは、熔融法と塗附法の二つの膜の作り方において、一般に塗附法による方が面の凹部深くよくゆきわたるだけ摩擦がずつと低かつたという事実からも裏がきされるのである。

Stick-slipにおける s の大きさについては、バウデンら⁹⁾がすでに觸れており、摩擦棒のM.P.が低いほど s が大きいとのべている。そして摩擦板上に熔融金屬膜の存在するときにも、やはりPbよりも

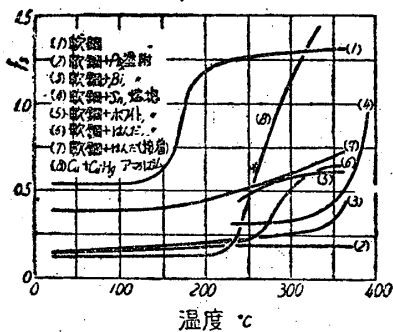
M.P.の低いSnの方が s の大きいことは第2圖ですでにみたとおりである。しかし s の大小が摩擦 f_s と關係ないことはバウデンら自身のデータがこれを證明しており、 s の變化は f_s の變化とともに前報¹⁾でのべたように摩擦特性曲線そのものの變化を意味するものである以上、簡単な推論はゆるされない。



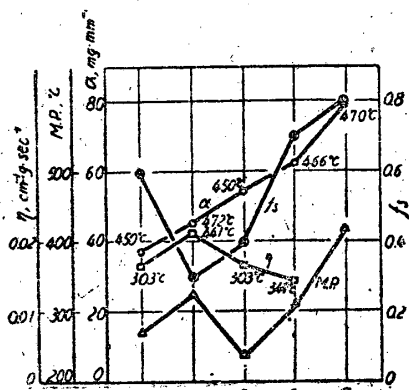
第3圖 (a)



第3圖 (b)



第 4 圖



第 5 圖

Bグループ Aグループの實驗から、われわれは Pb, Sn 等が熔融状態においてすぐれた金屬潤滑劑となり、經驗的に軸受面の鍍金用にこれらの金屬が用いられていた事實とよく符合することを知った。そこでBグループとして、Pb, Sn 等の薄膜を與えた場合、各種金屬の組合せにおける摩擦特性がいかに變化するかをしらべた。實驗では摩擦棒金屬を變えることを主とし、摩擦板には主として軟鋼板を用いた。なお Pb, Sn 等自體と軟鋼板との間の高温摩擦特性をもしらべた。Pb, Sn の薄膜の形成法としては、特にことわらない限り熔塊法を採用した。たい温度は Pb 薄膜に對してはほぼ 360°C, Sn に對してはほぼ 260°C で一貫して測定した。

(1) 軟鋼/Cu

比較の基準になる軟鋼/Cu の温度—摩擦特性はすでに第9表にあげてある。Pb, Sn の薄膜を Cu 表面に與えたときの結果を第 11 表に示す。ただし f_a は金屬薄膜を與えないときの乾燥摩擦である。

第 11 表

	Pb	Sn	f_a (360°C)	f_a (260°C)
f_s	0.40~0.50	0.60	1.50	1.50
s	0.03 (部分的に c)	0.50	0.80	0.80

(2) Cu/軟鋼

連續温度上昇による特性を第 12 表に示す。

第 12 表

温度 °C	15	60	80	120	190	240	280
f_s	0.15	0.25	0.35	0.50	0.55	0.60	0.95
s	0.01	0.03	0.05	0.07	0.08	0.15	0.35

Pb, Sn の薄膜に對しては第 13 表の結果をえた。

第 13 表

	Pb (熔)	Pb (塗)	Sn	f_a (360°C)	f_a (260°C)
f_s	0.40	0.15	0.40	>0.95	0.65
s	c	c	0.30	>0.35	0.20

軟鋼面に Pb 膜を塗附法で形成し、温度上昇特性をしらべると、室温から連続的に $f_s=0.20$, $s=c$ で、ところどころに ss を生じている。そして Pb の M.P. 附近で急に f_s は 0.20 から 0.15 に低下するのが認められた。

(3) Al/軟鋼

温度上昇特性を第 14 表に示す。

第 14 表

温度 °C	30	80	140	180	220	260	320
f_s	0.40	0.40	0.40	0.65	0.80	0.90	1.20
s	0.08	0.08	0.08	0.15	0.20	0.35	0.40

Pb, Sn 膜の効果を第 15 表に示す。

第 15 表

	Pb	Sn	f_a (360°C)	f_a (260°C)
f_s	0.40	0.40	1.20	0.90
s	c	0.12	0.42	0.20

(4) Ag/軟鋼

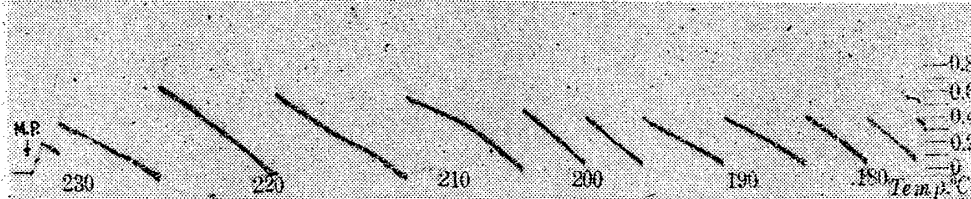
温度上昇特性を第 16 表に、Pb, Sn 膜の効果を第 17 表に示す。

第 16 表

温度 °C	16	40	100	140	180	200	230	260
f_s	0.20	0.25	0.44	0.56	0.72	0.93	0.93	1.24
s	0.02	0.02	0.04	0.12	0.24	0.48	0.70	1.02

第 17 表

	Pb	Sn	f_a (360°C)	f_a (260°C)
f_s	0.50	0.50~0.80	>1.24	1.24
s	c	0.08	>1.02	1.02



第 6 圖

(5) Sn/軟鋼

摩擦板は軟鋼のまま温度上昇特性を求めると第18表のやうにssが次第に發達するかたちを示すが、SnのM.P.(232°C)で急にssは消える。第6圖の寫眞はM.P.附近の様子を示したものである。まえにもふれたやうに、SnはM.P.の低い金属摩擦棒として s が非常に大きく、ときに f_s よりも s の大きい場合(220°C附近)さえ生ずる。こうした現象は第10表に示した軟鋼/(Cu+Cu·Hgアマルガム)の場合にも見られたもので、振動體の質量の割合に大きいとき、静止摩擦に比較して運動摩擦の非常に小さい

第 18 表

温度 °C	16	80	130	180	220	230	232
f_s	0.34	0.38	0.38	0.40	0.70	0.43	0
s	0.22	0.30	0.32	0.34	0.75	0.25	c

ときにみられる現象である。なおSnはPbとともに軸受面の鍍金用の低融点金属として重要なものであるが、その特性

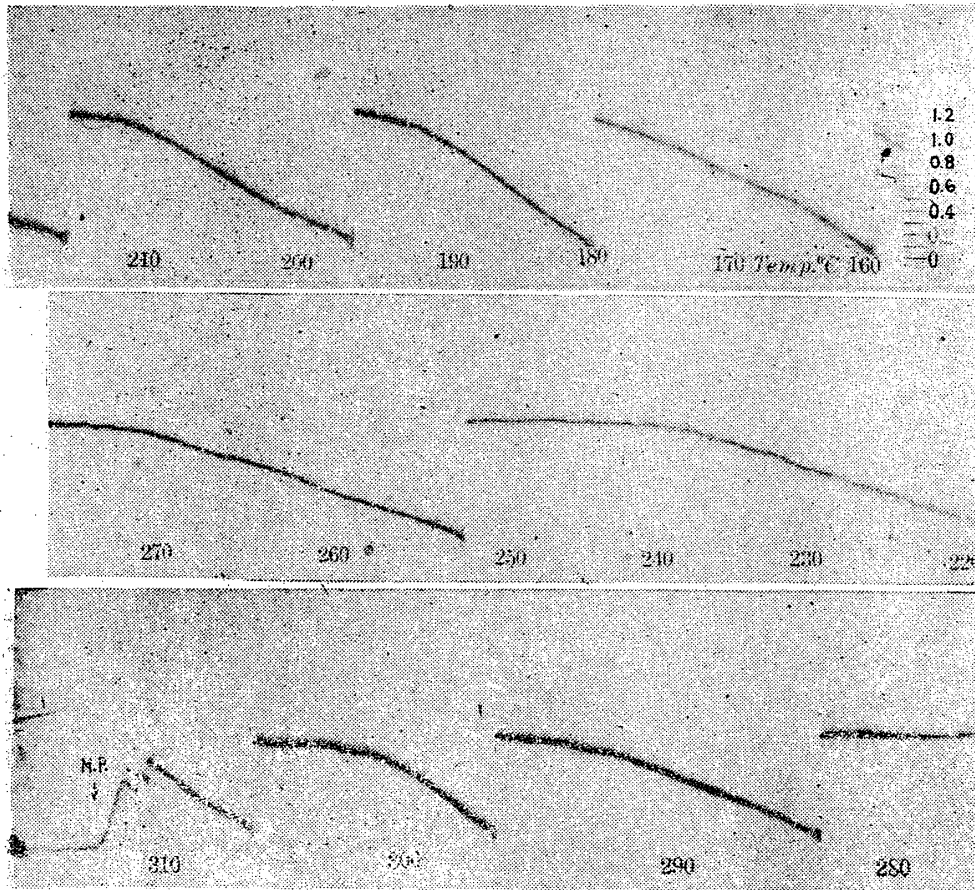
の差異はこのM.P.近くの兩金属の特性模様によくあらわれているもので、その比較についてはつぎのPbの項でのべる。

(6) Pb/軟鋼

この場合にもSnにおけると同様、ssが温度とともに増大する傾向をとる。そして s の大きいこと、そのM.P.(327°C)の極めて近くで漸く摩擦が低下し、M.P.ないしその附近に到達するやたちまち融けて f_s 、 s ともに消失すること等Snにおけると同様である。第19表、第7圖はその特性を示したものである。

第 19 表

温度 °C	40	100	150	200	250	300	315
f_s	0.80	0.95	1.05	1.20	1.10	1.03	0.10
s	0.80	0.95	1.05	1.15	0.95	0.75	c



第 7 圖

Pb/軟鋼の結果をまえのSn/軟鋼の結果と比較するのは興味あることである。一見ただちに気付くことはssの数のちがいである。約40°Cから各金属のM.P.に到る間のssの數と時間とから一つのssに要する時間の相異が求められる。それはSnのとき5.3secであるのに比しPbでは非常にのびて約3倍の15secを要している。もしもstickの間に摩擦棒と摩擦板の間に滑りがなかつたならば、この時間の比率はそのまほほ f_s の比率としてあらわれる

第 2) 表

温度 °C	50	80	100	130	150	180	200	210	220	230	220—250	250—280	290	300	310
Pb	1.0	1.4	1.3	1.4	1.4	1.6	1.7	—	—	—	3.6	3.4	1.8	1.4	0.7
Sn	1.0	1.0	1.2	1.1	0.9	0.8	1.0	1.8	1.8	1.5 →M.P.					→M.P.

はずである (slip のとき殆んど完全にもとに戻る兩金屬の場合において). 事實はこれに反し Pb の f_s は Sn の f_s の 3 倍をはるかに下まわつている. その原因は第 6, 第 7 兩圖の比較からわかるように, Pb の場合には高温に到るに従つて, 特に 170~180°C 以後急に stick 直線が下に曲つて stick 期間中の滑りを示しているのに, Sn の場合には M.P. に到るまで全くその傾向があらわれないからである. 事實 f_s の最大値は, Pb の場合にはその M.P. よりはるかに低い 20°C 附近の 1.20 を峠として以後次第に低下の途をたどるのに, Sn は温度上昇とともに一途に f_s を増し, その M.P. 直前の 220°C において漸く最大値 0.70 に達するのである. 第 20 表は兩金屬が温度とともにいかに一つの stick あたりの移動距離 (または時間) を變化させるかを示したもので, 40~50°C における stick をそれぞれの単位にとつてある. ここでも f_s におけると全く同じ特徴がみられ, Pb においてはその M.P. よりもはるかに温度の低い 200°C 内外ですでに 70% の増しを示しているのに, Sn においてはその M.P. 直前において漸く同程度の増しを示しているにすぎない. かつ Pb では初めの温度から温度のますに従つて次第に stick をましてゆくのに, Sn においては低温から M.P. 近くの 200°C 附近までほとんど stick に變化を生じていない. これも結局 Pb の stick 期間中におけるりによるもので, Sn にはこの現象がその M.P. 近くまで認められないのである. Pb の 180°C 以上におけるこのりの割合 r_s を寫眞から算出して表示すると第 21 表のようになる. ただし r_s は, 摩擦棒が滑りのない場合に移動すべき理論上の距離と実際に移動した距離との差を前者の理論上の距離で割つた比である.

第 21 表

温度 °C	180	200	210	250	280	290	300
$r_s, \%$	21.8	21.8	23.6	33.3	43.3	30.0	41.7

すなわち温度とともにりの割合の非常に大きくなる事がわかる. われわれは Sn, Pb を通じて低融點金屬の一つの特長をみる. それは他の金屬組合せ (たとえば Cu/軟鋼の第 12 表, Al/軟鋼の第 14 表等) においては, f_s が温度とともに急激に増大し, 300°C 附

近においては常温における値の數倍に達するのが普通であつたのに, Sn, Pb 等においてはその變化が割合にすくないことである. くわえて Pb においては温度上昇とともに, おそらく摩擦面近くの Pb 内部の大きなクリープのために, stick 期間中に大きなりを生ずるのである. M.P. において摩擦の急に低下するのは當然であるが, stick の最終點は到達しないうちに, すなわち Pb と軟鋼面との間の靜止摩擦が最大値に達して, そこに slip を生ずる以前に, すでに Pb の内部にクリープを生じて, そこからまず降伏するということ, このことの中に, おなじ低融點金屬中でも Pb が拔群の, かつ特異な特長を發揮する一つの祕密があるのではなからうか. このクリープをおこし初める點の摩擦力が第 7 圖中のいずれの stick-slip においても f_s にかかわらずほぼ一定であることも注意すべきである. このときの Pb の内部剪斷應力を算出すると約 0.5kg/mm² となつて, Pb の引張強さ (1.8 kg/mm²) を下まわること, 剪斷と引張りの差異を考慮してもはるかであるのは當然である. なお Pb の彈性限度は 0.25 kg/mm² で Sn の 1/6, 引張強さは 1/4~1/2, 伸びは 50% で Sn の 30~40% 増し, 硬度は 1/2 などの數値も M.P. のほかにこの際考慮すべき問題であろう. いわゆる軸受合金のなじみ易さの性質なども單なる M.P. の問題だけではないようであり, Pb の薄膜がしばしば常温でも連續り c を與へることのあるのも Pb の粘さのためと考えられる.

(6) ホワイト・メタル/軟鋼

ホワイト・メタルは Pb, Sn の合金として, ほぼ Pb, Sn の中間的特性を示している. f_s は M.P. 近くまで常温における値と大差なく, かつその絶対値は Pb よりも Sn よりも低い特長がある. r_s は Pb より小さいが, Sn よりやゝ大きく, stick 中のクリープの様子はみえない.

ここに注意すべきは A グループで扱つた Pb, Sn, 及びホワイト・メタルの薄膜の摩擦特性と, この B グループで扱つた Pb, Sn, ホワイト・メタル單獨の摩擦棒としての摩擦特性との差異である. 薄膜状で用いたときには明らかに Pb が拔群に低く, Sn はこれにつき, ホワイト・メタルはその中間的特性を示した. ところが單獨の棒として用いたときは全く別で, ホワイト

ト・メタルが一番低く、Sn はこれにつぎ、Pb が一番高いのである。ここに低融點軸受金屬の用法として、それを單獨に近い、すなわち厚い肉厚状で用いる方法と、薄膜状で用いる方法との性能上の差異があるので、この問題については、さらにつぎの報告¹¹⁾でのべることにする。

ホワイト・メタルの溫度上昇性を第 22 表に示し、M.P. 附近の模様を第 8 圖に示す。M.P. 近くで f_s が小さくなり、M.P. (227°C) で消失することは他の低融點金屬におけると同様である。

第 22 表

溫度 °C	16	50	100	150	200	210	220	M.P. 227
f_s	0.28	0.28	0.40	0.44	0.42	0.33	0.33	0.10
s	0.17	0.17	0.31	0.40	0.37	0.20	0.20	c

(8) ケルメット/軟鋼

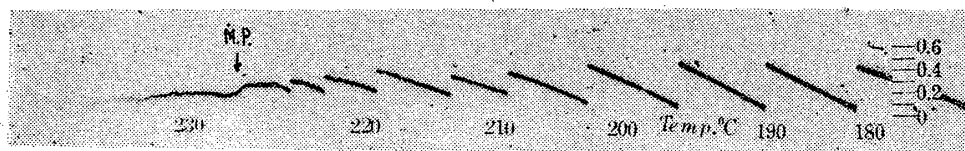
溫度上昇特性を第 23 表に示す。

第 23 表

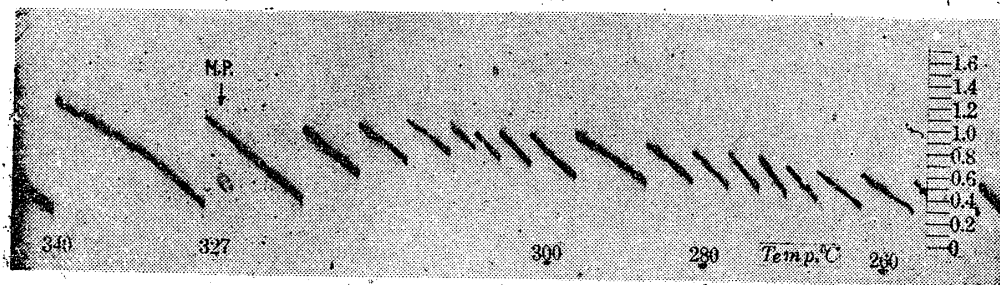
溫度 °C	30	50	100	150	200	250	300	M.P. 327	360
f_s	0.20	0.22	0.25	0.25	0.40	0.50	0.90	1.00	1.30
s	0.03	0.10	0.08	0.08	0.12	0.23	0.30	0.75	1.00

Pb の M.P. 附近の ss の模様を第 9 圖に示す。

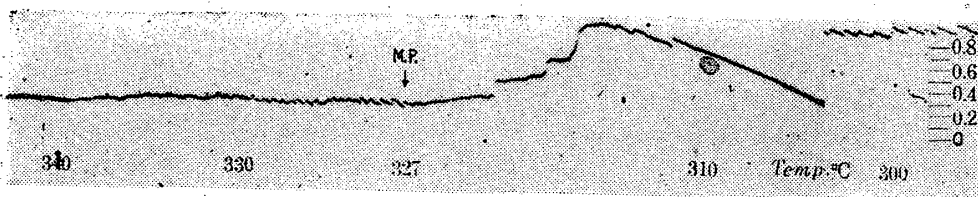
表及び圖からわかるように、溫度とともに ss は増大するが、特に M.P. 附近から f_s の増しに比較して、s の非常に急激に増加するのが認められる。このケル



第 8 圖



第 9 圖



第 10 圖

メット/軟鋼の場合には、摩擦棒の先端附近の Pb が比較的はやく流出または磨耗し、そのためにまへの Cu/軟鋼 (第 12 表) の結果と類似の ss 特性をあらわしているのであるが、M.P. 附近で Pb が熔融すると同時に急に f_s が増したものと考えられる。なおつぎの軟鋼/ケルメットの項を参照。

(9) 軟鋼/ケルメット

(8) の組合せの逆である。その溫度上昇特性のうち、M.P. 附近のデータ、および同じ附近の摩擦模様をそれぞれ第 24 表、第 10 圖に示す。

第 24 表

溫度 °C	280	300	M.P. 327	340	360
f_s	1.00	1.00	0.30	0.30	0.40
s	0.05	0.05	c, ss	c	0.05

表および圖にみるように、 f_s 自体はかならずしも低いとはいえない。しかし単なる軟鋼/Cu の組合せ (第 9 表) よりは 50% 程度低く、Pb の M.P. 以上では軟鋼/(Cu+Pb) の組合せ (第 11 表) よりもさらに低い値を示している。特に注目すべきは M.P. で突然摩擦が 1.00 から 0.30 に落ち、同時に ss もほとんど消失することで、この点がまへの (8) 組合せにおける結果との大きな差異である。この差異は、結局 (8) においては摩擦面に供給される金屬潤滑劑としての Pb が摩擦棒先端のごく少量に限られるのに、(9) においては摩擦棒の先端が移動するたびにそこに常に新しい

Pb 膜の供給をうけ、そのため後者の方がはるかに有利な条件にあることに原因するものである。実験後のケルメット摩擦板を検査すると、ケルメット中の Pb が融けて抜けでて、あとには細かい蟲孔様の小孔にみちた Cu 摩擦板が残っていた。第 24 表にみるように、360°C 附近から再び f_s が増し初め、ss も発生してくるのは、おそらく表面の Pb 溶

融層が沈下し初めた結果ではないかと考えられる。實際の軸受のケルメット軸受では、裏金があるのでこの心配はない。

實際のケルメット軸受の使用法にも、特に両面張りケルメットなどでは、上の(8)、(9)兩様の摩擦条件をもつことがある。(9)の条件にある方が他の条件が同様なら有利であることは論をまたない。

(10) 總括

このグループでは摩擦棒をいろいろ變えて実験を行ったが、低融點金屬と軟鋼との摩擦における M. P. の影響、いかえれば低融點金屬の M. P. に近づくや次第に摩擦が低下し、M. P. で突然に飛躍的に低下する様子がまえより一層はつきりした。特に Pb において、M. P. に到達するずつと以前にクリープに原因する摩擦面の降伏をまねく事實は、Pb の特異な性質として注目に値する。細部の討論は各項目ごとにのべたのでここには省略する。

結 び

以上の実験の結果から、われわれは軸受合金と一括によばれている一群の低融點合金が、實はそれ自體一つの減摩劑、潤滑劑であり、特にその M. P. 以上において特異な潤滑能力を發揮することを知った。特に Pb, Sn 等においてはしばしば摩擦係數 0.1 というような低い値を示し、それが最も良好な油脂潤滑劑の摩擦係數と同程度であることは注目すべきである。われわれは軸受合金に要求される一つの条件として、それが M. P. 附近、ないしそれ以上において良好な金屬潤滑劑であることを將來要求したい。

油脂の薄膜の熱的限度がほぼ 300°C 内外にあることはすでにまえの報告¹⁾でのべた。しかしこの油脂の薄膜がその潤滑能力を喪失すべき 300°C 内外から Pb, Sn, その他の低融點軸受合金が性能を發揮しだす事實も意味深いものを含んでいるようである。いわゆる軸受金と潤滑劑との組合せの問題も、軸受金屬を金屬潤滑劑として見なおすとき、新しい立場を獲得するものであろう。

軸受面上の低融點金屬の薄膜のあり方の問題は複雑である。ケルメットは、使用中に Pb が表面におし出されたり融け出たりして、良好な状態にあるケルメットの表面は薄い Pb の膜でおおわれている。この Pb の膜は以上の実験でわれわれのえたと同じ機構で摩擦面の潤滑をたすけているものであろう。ケルメットの組織中の Pb は、そのままの状態ではさほどの効果を發揮するものとは思われない。

最近軸受面に低融點金屬の薄膜を吹付け、電気鍍金

等の方法で施すことが行われている。これらの薄膜の意義は上の実験の結果から容易に理解することができる。ケルメットの表面に更に Pb の鍍金膜を作ることがある。それは金屬潤滑膜を作ることであるが、基礎のケルメットはさらに Pb 膜の補給源として重要な意味をもつものであろう。表面に Pb 膜を作つたら、基礎になる裏金金屬は何でもよからうという論も成り立つが、まえにふれたように軟鋼/ケルメットは軟鋼/(Cu+Pb) よりも性質がよいのである。

そこで前の報告⁴⁾で取りあげたと同じ問題がふたたびおこる。すなわち油脂の薄膜の存在するときの軸受金の組合せの問題と全く同様に、金屬薄膜の存在するときの裏金金屬の組合せの問題である。われわれは前報告⁴⁾の実験をさらに繰返す必要なく、上の実験データの中に一つの解答を見出すことができる。結論からべよう。前報告⁴⁾におけると全く同じである。金屬薄膜も、完全に裏金同志の接觸を防ぐには足りないのであり、特に M. P. 以上においては結局液體薄膜と同種の膜と考えられるのである。従つて裏金自體の摩擦特性が依然として決定的意味をもっているのである。では實際に軟鋼/Cu, Cu/軟鋼の組合せにおける Pb, Sn 膜の効果をみよう。Pb, Sn の薄膜のない場合に軟鋼/Cu が Cu/軟鋼より摩擦のはるかに大きいことは第 9, 第 12 表の比較からすぐわかる。そして Pb, Sn の薄膜を與えたときも、依然として軟鋼/Cu の方が大きいことは、おなじく第 11, 第 13 表の比較からわかる。こうしてわれわれは、油脂、金屬の兩薄膜において依然として基礎金屬の摩擦が重大な役割を果していることを知ることができるのである。

無論この金屬薄膜の厚さにも限度があろう。非常に厚い場合に裏金の影響がでないことは無論であるが、われわれが別に軟鋼の摩擦棒で Pb のみの摩擦板と Pb の薄膜をさせた軟鋼板とを摩擦した比較実験の結果では、室温で前者の摩擦係數 0.90~1.10 に對して、後者では 0.20 という値をえた。すなわち摩擦が單純な表面現象にとどまらないことを意味するもので、それが摩擦面から相當な深さまで擾亂を與えるものである以上、上の結果はむしろ當然であり、適當な厚さは別にまた考えるべきである。

なお同じ考えで、熔融點の異つた數層の低融點金屬の薄膜を——低融點のものほど表面近く——摩擦面にきせるという思想もでてくるのであり、現實にケルメットの上に Pb を、さらにその上に In (M. P. = 154°C) の薄膜をきせて好成绩をあげたという實例もあるが、その効果の全部を金屬潤滑劑の思想に歸せしめることの危険はいうまでもない。(1947年12月9日)

文 献

1. 曾田, 宮川. 理工研報告, 2 (1948), No. 3-4.
2. F. P. Bowden and K. E. W. Ridler, Proc. Roy. Soc., 154 (1936), 640-656.
3. 曾田. 日本機械學會誌, 10 (1944), 1-55-64.
4. 曾田, 宮川. 理工研報告, 2 (1948), 23-30.
5. H. J. French and W. A. Tucker, Proc. Am. Soc. Testing Mats., 24 (1924). Pt. II, 56-87.
6. M. Plüss, Z. anorg. Chem., 93 (1915), 1-44.
7. 松山. Sci. Rep. Tohoku Imp. Univ., 16 (1927), 555-562.
8. Int. Crit. Tables. Vol. 5 (1929), 7.
9. F. P. Bowden and L. Leben, Proc. Roy. Soc., 169 (1939), 371-391.
10. 機械工學便覽. 昭和 12 年, 岩波書店, 436.
11. 曾田, 宮川. 理工研報告, 2 (1948), No. 9 に發表豫定.

軸流同轉機の研究・既發表論文の訂正と補足 (その2)

(その1)は理工研第2卷第3.4號参照

第2報 航研彙報 246號

42頁 (2)式

$$w(x, y) = \longrightarrow u(x, y) =$$

第3報 航研彙報 246號

49頁 1. まえがきの9行目

$$\text{ジュ-コクスキー} \longrightarrow \text{ジュ-コウスキー}$$

59頁 1行目

(38) (39) より \longrightarrow (38'), (39') より

(47)式

$$\frac{\Gamma_2}{aV_2} \longrightarrow \frac{\Gamma_2}{aV_1}$$

60頁 1行目 (38) より \rightarrow (38') より

$$\left(\frac{d\xi}{d\theta}\right)^2 \longrightarrow \left(\frac{d\xi}{d\theta}\right)^2$$

第4報 理工研報告 第1卷7.8號

117頁 (5)式

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \frac{1}{2\nu} \left[\quad \right] \longrightarrow \frac{\partial}{\partial \theta} \log \frac{1}{2\nu} \left[\quad \right]$$

119頁 5. w_r に対する考慮の中の Z はすべて z にかえる。

右列の4行目

$$Z < 0 \longrightarrow z > 0$$

右列の中程

$$\left(\frac{w}{w_a + w_z}\right)_{\max} \longrightarrow \left(\frac{w_r}{w_a + w_z}\right)_{\max}$$

(26)式 印刷不完全につき再記

$$\frac{dh}{r} < \frac{\Delta H}{r} = \int_0^1 \frac{\left(\frac{1}{t^2} - t^2\right) \frac{1}{t}}{\frac{1}{\kappa} \frac{1}{t} + t \left(\frac{1}{t\nu} - t\nu\right) + 4} dt$$

121頁 右列の4行目 結論には變りない。の次に下記を補足

但しこの上流の流においては、同轉軸以外の部分に渦が存在してはならない。それは今、同轉軸以外の流の部分に渦を有する流を考えそこに Γ 一定で非常に翼數の多い翼車をもつて來た場合を考えると、この翼車によつて翼車の後の流はまげられる。その結果、流の中の渦の配置狀況が變り(渦は流によつて流されているのだから)その渦によつて誘起される速度も變つて來るものと考えられ、したがつてこの翼車の前方の流も變つて來るものと思はれる。故に同轉軸以外の流の部分に渦が存在する場合には、翼車はその上流の流に影響をあたえないとはいえないのである。

文 献 (1)

第3報 「任意無限…… \longrightarrow 第2報 「任意無限……