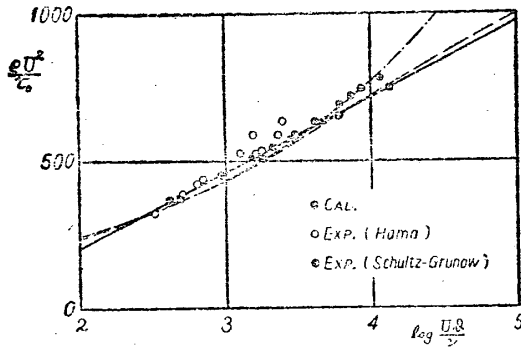


第9圖



第10圖 實線(31) 破線(32) 鎖線(33)

なつても  $\delta^*$  と  $\delta$  との間の直線關係(第2圖)に著しい變化が起るとは思へないから、上の關係を一般的に使用して差支へないであらう。

上の三つの條件のもとに計算した結果を第8, 9, 10圖に黒丸で示した。計算値を内挿する實驗公式

$$A = 0.048 \log(U\delta/\nu) + 0.235 \quad (29)$$

$$v^* \delta/\nu = 1.65 (U\delta/\nu)^{0.863} \quad (30)$$

$$1/c = \rho U^2/\tau_0 = 255 \log(U\delta/\nu) - 305 \quad (31)$$

を各圖に實線で記入した。第10圖には實驗値も記入

してあり、更に比較のために對數法則

$$2c = [2 \log(Ux/\nu) - 0.65]^{-2.3} \quad (32)$$

を破線で, Blasius 法則

$$c = 0.0296 (Ux/\nu)^{-0.2} \quad (33)$$

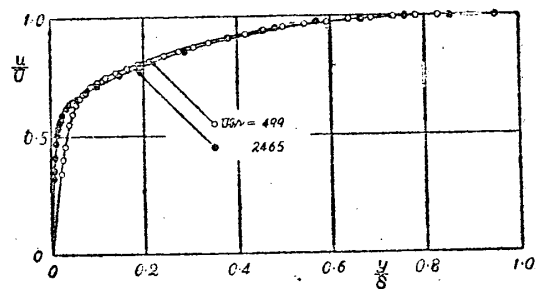
を鎖線で示した。但し何れの式に對しても

$$U\delta/\nu = 0.037 (Ux/\nu)^{1/5} \quad (34)$$

を用ひた。

(27) と (28) とが接續する點は (27) の上を Reynolds 數と共に  $y^*$  の大きい方へ移動する。ところで (27) が嚴密に成立つ範圍は大略  $y^* < 60$  であるから、この接續點の  $y^*$  が餘り大きい値を採るような Reynolds 數迄も上の方法を用ひるのは差控へねばなるまい。けれども第10圖に見られるように、Reynolds 數の大きいところでも對數法則に一致してゐるから、かなりのところ迄使用出来るかも知れない。實驗により檢討する積りである。

最後に、二の Reynolds 數に對して、(27) と (28) の組合せにより計算した速度分布を第11圖に示した。實驗値(丸印)との一致は略満足なものである。



第11圖

このようにして、壁面に近い部分と外側の部分とを分けて考へることにより、亂流境界層の速度分布を比較的合理的に記述することが出來、且つ計算の過程に於て局部的表面摩擦抗力係數が得られた。

## No. 15

## 境界摩擦の二つの領域

曾田 範宗・岡本 昇二

(1947年4月16日受理)

### 1. 問題のおこり

正常に潤滑されている滑り摩擦面が完全潤滑状態から境界状態をへて摩擦金屬の直接々觸をおこし、つい

に焼付きにまで發展する過程を考へてみると、それは摩擦面の彈性變形、工作上の誤差による凹凸、夾雜物の介入、その他の原因によつて局部的に著しく接近ま

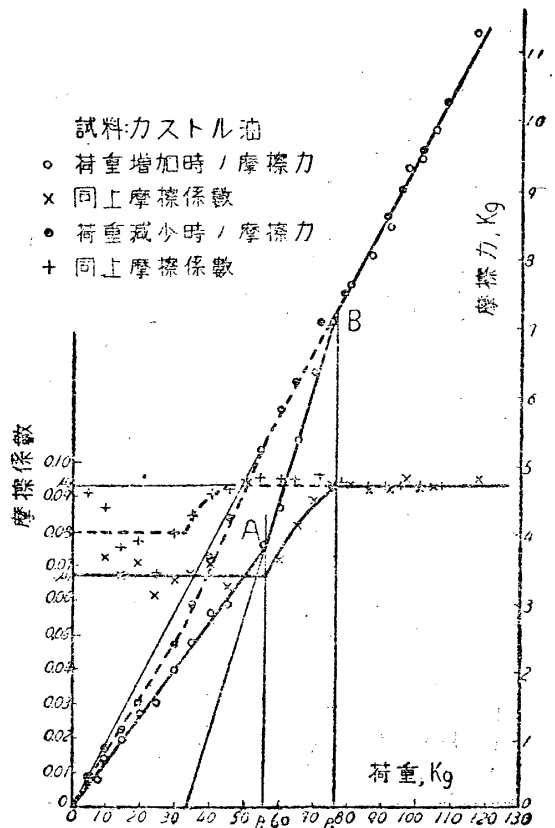
たは接着した個所にまず初まると思われる。たとえば摩擦面の温度を測定するとき<sup>1)</sup>、その熱起電力をガルヴァノメータで測定していると、比較的二面の接觸の機會の少ない低荷重において間歇的にはじくようにガルヴァノメータの針の振れることが觀察される。これは明らかに二面の細かな凸部同志の接觸の初まりを示すものである。またジャーナル型の軸受面を軸の變形にならつた形に仕上げることによつて、從來の軸受の限界荷重が數倍に増加したなどの經驗も、軸受荷重が實際には見掛け上の軸受面積のごく一部分で支えられていることを意味するものである。事實完全に平滑で、全面的に接觸していると考えられる場合でさえ、その眞實の接觸面積が見掛け上の面積の數千、數萬分の一であり、従つてこの接觸部分の應力は極めて高く、完全にその材料の降伏點をこえて塑性變形をおこしていることも既にパウデン等の推定したところである<sup>2)</sup>。従つてわれわれは軸受面、一般には摩擦面の磨耗や焼付きが、二面のこうした小さな接觸部分を核として、またそれが次第に累積して發達したものであることは容易に想像することができる。従つてまた一般の潤滑摩擦面の磨耗や焼付きの機構を明らかにするためには、こうした個々の小さな接觸部分の摩擦経過を精細に知ることが必要になる。しかも摩擦しつゝある二面間にはこうした小接觸部分が無數に生ずるはずであり、かつその個々の部分の摩擦條件は、漸く接觸を初めたもの、既に著しく大きな壓力をうけて吸着分子の剝離をおこしつゝあるもの等、はなはだしく異つていはずである。従つてこの小摩擦部分における眞實の摩擦過程や焼付きの過程を知り、更に油脂の吸着分子ないしは吸着分子層の剝離過程を知るためには、從來のように、この小凸部に比較して著しく大きな摩擦面積をもつた試験片を實驗したのでは到底不可能であり、粗雑な統計的平均値としての摩擦過程しか得られぬことは明らかである。

こうした考えから、われわれはその一人がさきに試作した四球式の摩擦試験球を用いその點接觸部分を潤滑摩擦面から摘出した小接觸部分に極めて近い條件にあるものと考え、その荷重増加による摩擦過程、ならびに境界膜の荷重による破壊過程をしらべた。

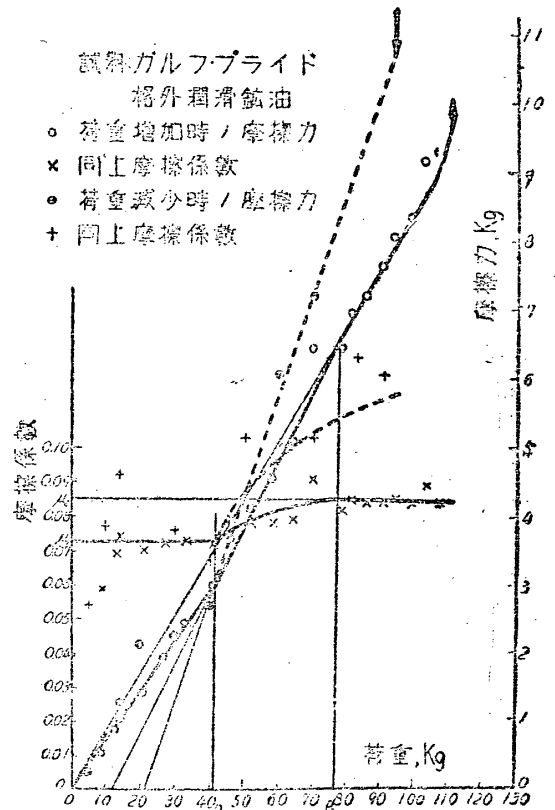
2. いかなる装置でいかに實驗したか

實驗装置に關するくわしいことはもとの報告<sup>3)</sup>をみていただくことにするが、その主要な部分は4個の球を正四面體形に積み重ねたときにできる摩擦部分である。摩擦はそこに生ずる3個の點接觸部分で行い、この小接觸部に下から油壓式荷重を與える。

使用した鋼球は標準型(3/4)である。上の球を

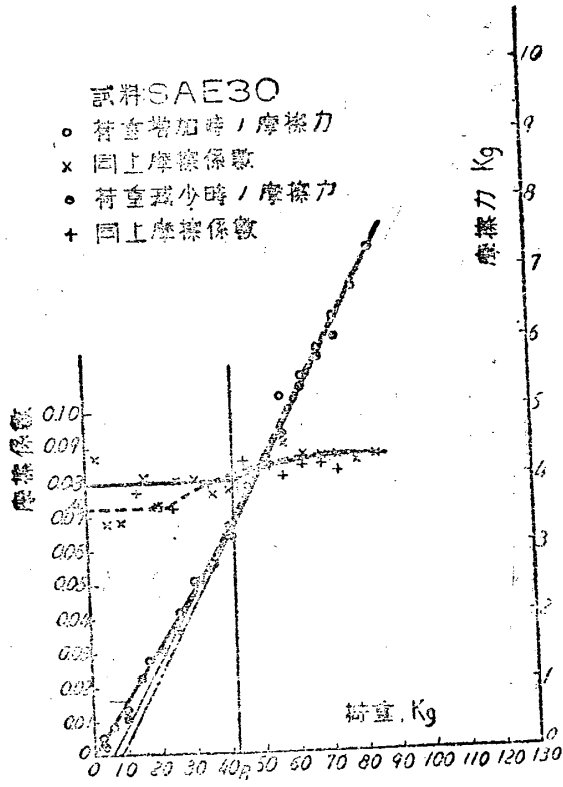


第1圖

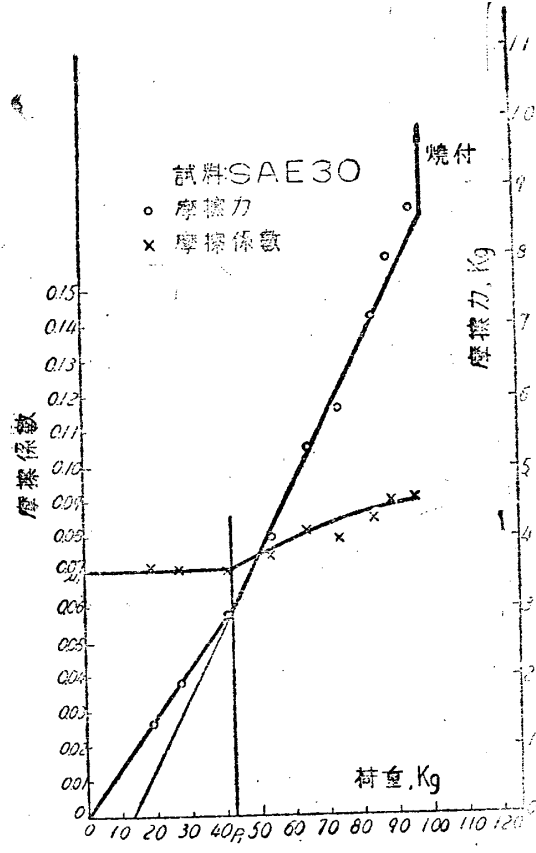


第2圖

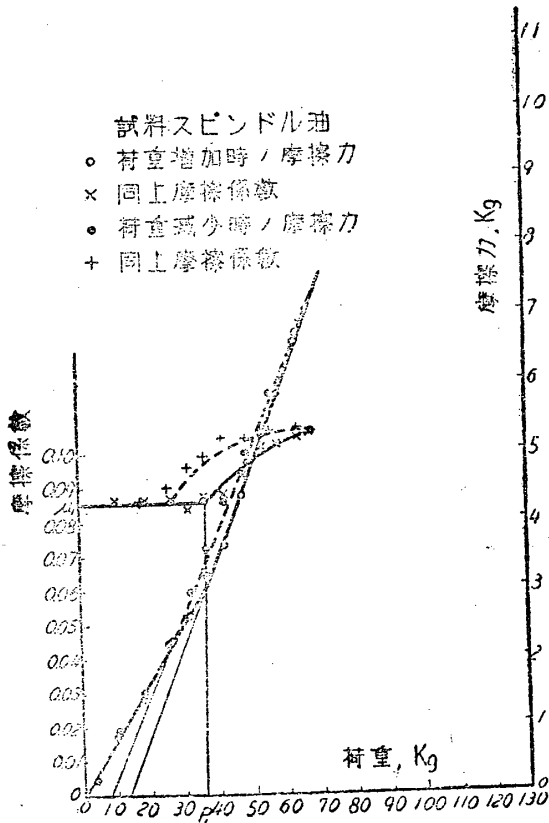
200rpm の一定回轉速度に保ちながら油壓を變化させて、そのつど荷重と摩擦トルクとを測定した。一個の



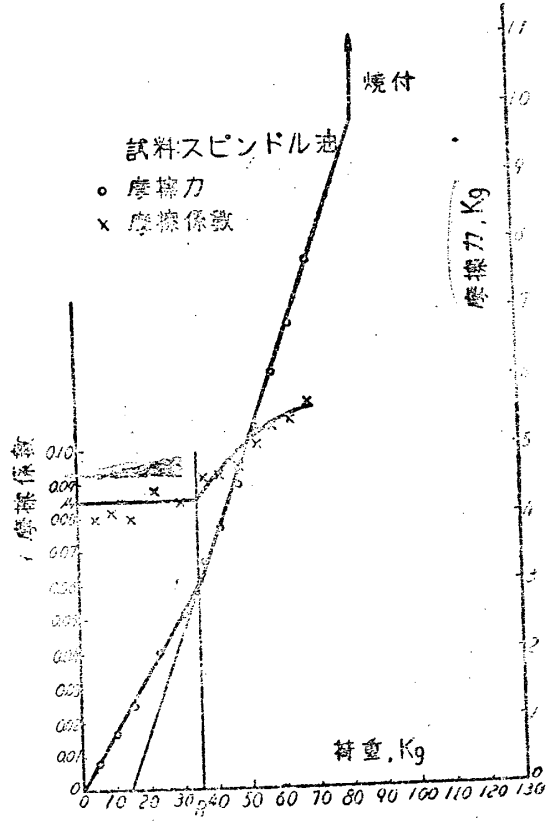
第3圖



第4圖



第5圖



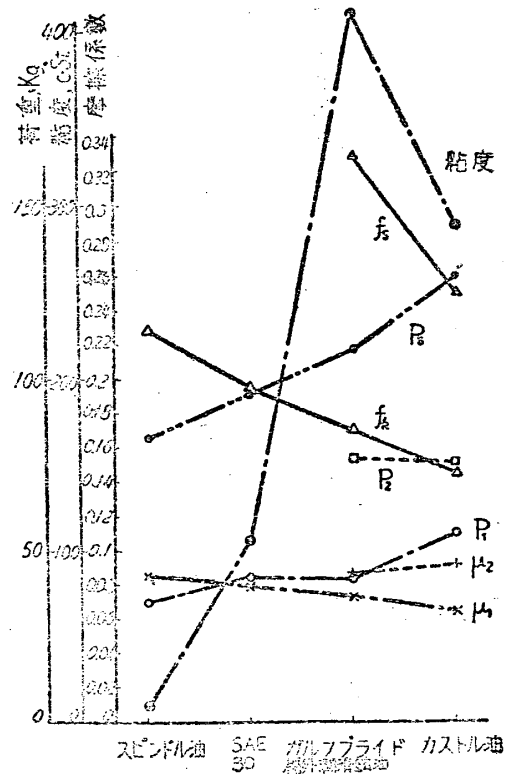
第6圖

球當りの摩擦力は 0.2kg から焼付きを生ずるまでかえたが、比較的輕荷重における 0.2~10kg 程度の摩擦力の測定には、直徑 3mm の振り棒を用いて（標準型は直徑 5mm）精度をあげた。またこうした輕荷重の加壓方法として指壓計の檢定機を用いたことは既に報告したとおりである。

3. 荷重増加とともに摩擦曲線にいかなる變化があらわれたか——曲りを生ずる

實驗の試料として用いた油はカストル油、ガルフ・プライド格外潤滑油、SAE 30、スピンドル油の四種である。これらの四種の油について行つた實驗の結果の一部を第1~6圖に示した。これらの實驗は、いずれも十數回繰り返し繰りかえし行つて同一の結果を得たもので、特に直線の途中にあらわれている曲りの現象とその位置については格別の注意を拂つてこれを確かめたものである。焼付きの荷重まで實驗したものは荷重減少に對する摩擦過程を求めることはできなかつたが（第4, 6圖）、その他のものでは荷重減少に對するデータをも記入しておいた。摩擦には必ず磨耗がともなうため、荷重の増加と減少とにおける摩擦の過程は、その摩擦面の變化のため必ずしも一致しないのは當然であるが、この實驗の一つの本質的な部分、すなわち摩擦直線の曲り、または摩擦領域の轉移の點においては可逆現象ともいえる。圖に示した摩擦力及び荷重はすべて單位當りの摩擦面にそれぞれ平行及び垂直の力である。以上の實驗結果からつぎのようなことがわかる。\*

\* (a) どんな潤滑油を用いたときも、はじめ摩擦力は荷重に比例して直線的に増すが、圖に示した第一の限界荷重  $P_1$  に達すると、直線は上方に曲つて、それ以上の荷重では摩擦力はそれまでの直線の延長上の値より大になる。そしてやはりほど直線的に増大する。更に第二の限界荷重  $P_2$  に達すると再び下方に曲つ



第7圖

第1表

潤滑油の種類	粘度 c·St	運動摩擦係数 $f_k$	静止摩擦係数 $f_s$	第一の限界荷重 $P_1$ kg	第一領域の摩擦係数 $\mu_1$	第二の限界荷重 $P_2$ kg	第二領域の摩擦係数 $\mu_2$	焼付荷重 $P_s$ kg
カストル油	288.8	0.146	0.25	55	0.064	76	0.092	130
ガルフ・プライド 格外潤滑油	411.2	0.170	0.33	41	0.073	77	0.085	108
SAE 30	107.2	0.195	—	42	0.079	—	—	95
スピンドル油	9.62	0.228	—	35	0.086	—	—	83

て、それ以上の荷重では再び摩擦力は荷重に比例して増加するようになる。そしてこの状態ですんでそのまま焼付荷重に達する。油によつては第二の限界荷重  $P_2$  があらわれず、 $P_1$ 、 $P_2$  の中間の状態から焼付きに達するものもある。

従つて荷重が  $P_2$  より大きい領域における摩擦力の荷重に對する比例常數 すなわち摩擦係数  $\mu_2$  は、 $P_1$  以下の荷重に對する摩擦係数  $\mu_1$  よりも大きい。これは第1圖において  $OB$  の傾斜が  $OA$  の傾斜よりも大

きいということである。また  $P_1P_2$  間では摩擦係数は一定でなく、 $\mu_1$  より  $\mu_2$  への過渡部分をなしている。

われわれは、以後この領域  $OP_1$  を第一の領域、 $P_2$  以上焼付荷重までを第二の領域、 $P_1P_2$  間を遷移領域とよぶことにする。

(b) 焼付きは第一の領域では決しておこらない。

(c) 各潤滑油に對する第一の限界荷重  $P_1$ 、第二の限界荷重  $P_2$ 、第一、第二領域に對するそれぞれの摩擦係数  $\mu_1$ 、 $\mu_2$ 、焼付荷重  $P_s$ 、また参考として  $100^\circ F$

の大気壓における粘度，振子式油性試験機<sup>7)</sup>で測つた常温における運動摩擦係数  $f_k$ ，同じく静止摩擦係数  $f_s$  等を第1表及び第7圖に比較して示した。それによると各潤滑油の  $P_1$ ,  $\mu_1$ ,  $f_k$  の間にはほぼ平行的な關係が存在し，運動摩擦係数  $f_k$  の最も低いカストル油が  $\mu_1$  は最小， $P_1$  は最大である。焼付荷重もまたカストル油において最大である。これらの關係に對し，粘度は全く獨立的であるかに思われる。

(d) 第二の限界荷重はカストル油，ガルフ・ブライド潤滑油だけにあらわれ，SAE 30 及びスピンドル油にはあらわれない。そしてこの限界荷重  $P_2$  の値がカストル油でもガルフ・ブライドでもほとんど同じである點は興味あり，注目すべきことである。

#### 4. 摩擦直線はどうして曲つたか

このようにして境界摩擦直線上に二つの明瞭な屈曲點  $P_1$ ,  $P_2$  があらわれるとゆうこと，いふかえれば明瞭に摩擦特性の異つた二つの領域（及びその中間の遷移領域）が存在するとゆう事實はどう説明すべきだろうか。初めわれわれはこの曲りを，鋼球が高荷重のために材質的な一種の降伏を生ずるためだろうと考えその靜的な壓縮試験を行つてその變形の状態をしらべたのであるが，實驗範圍内の荷重に對しては變形上の特異性は一つ認められず，且つ色々の潤滑油について實驗した結果は，第7圖にみるように， $P_1$ ,  $P_2$  が油によつて異なる値であることが明瞭である。これらのことから，この曲りの現象が潤滑油の境界摩擦に關する特性，すなわちいわゆる油性に關係するものと推定した。更に後にのべるように，磨耗痕をしらべることによつてこの推定が全く正しく，それが潤滑状態の高荷重による實際の轉移によつて招かれたものであることを確認した。

この摩擦直線にあらわれた最も興味ある事實の一つは，第一領域に屬する部分が座標の原點を通過すること（指壓計檢定機によつて單位球當り 0.2kg の荷重まで實驗してこれを確かめたことは前にのべた）は當然豫期できるとしても，第二領域に屬する直線部分の延長が同じく原點を通過することである。従つて各領域における摩擦係数はそれぞれの領域内においては荷重に無關係に一定である。これらの事から少なくともわれわれの考えることは，この二つの領域においてそれぞれ異つた特性をもつた摩擦現象が行われているに相異ないとゆうこと，それから第二領域の摩擦係数が第一領域のそれより大きいとはいへ，その相異は必ず著しいものではなく，依然として普通に知られている境界摩擦の程度であることから，この第二領域といえども決していわゆる乾燥摩擦ではなく，やはり油脂

の薄層がある形態において存在する状態，すなわち廣義の境界状態に包含されるべきものであるとゆうことである。そしてこの二つの領域の中間の領域は第一から第二の領域へ移行するための遷移現象としてあらわれたものに相異ないのである。

#### 5. 磨耗痕にはいかなる變化がみられたか—筋がはいる

われわれは，上の實驗に使用した鋼球に小さく残された磨耗痕を顯微鏡でのぞいているうちに，偶然そのいくつかのものの中央に，他のものと全く性質のちがつた粗く暗い筋のはいつていることを發見した。それは上の摩擦直線の曲りの現象にさんざん手を焼いたあとだつたので，それが上の曲りと深い關係にあることを直感した。それで改めて磨耗痕の系統的な實驗を行つた。問題は第一領域，遷移領域，及び第二領域に屬する各荷重に對してそれぞれいかなる磨耗痕があらわれるかである。選擇した單位球當りの垂直荷重及びその所屬領域も第2表に示す。但し試料としては焼付荷重の最も高かつたカストル油をえらんだ。

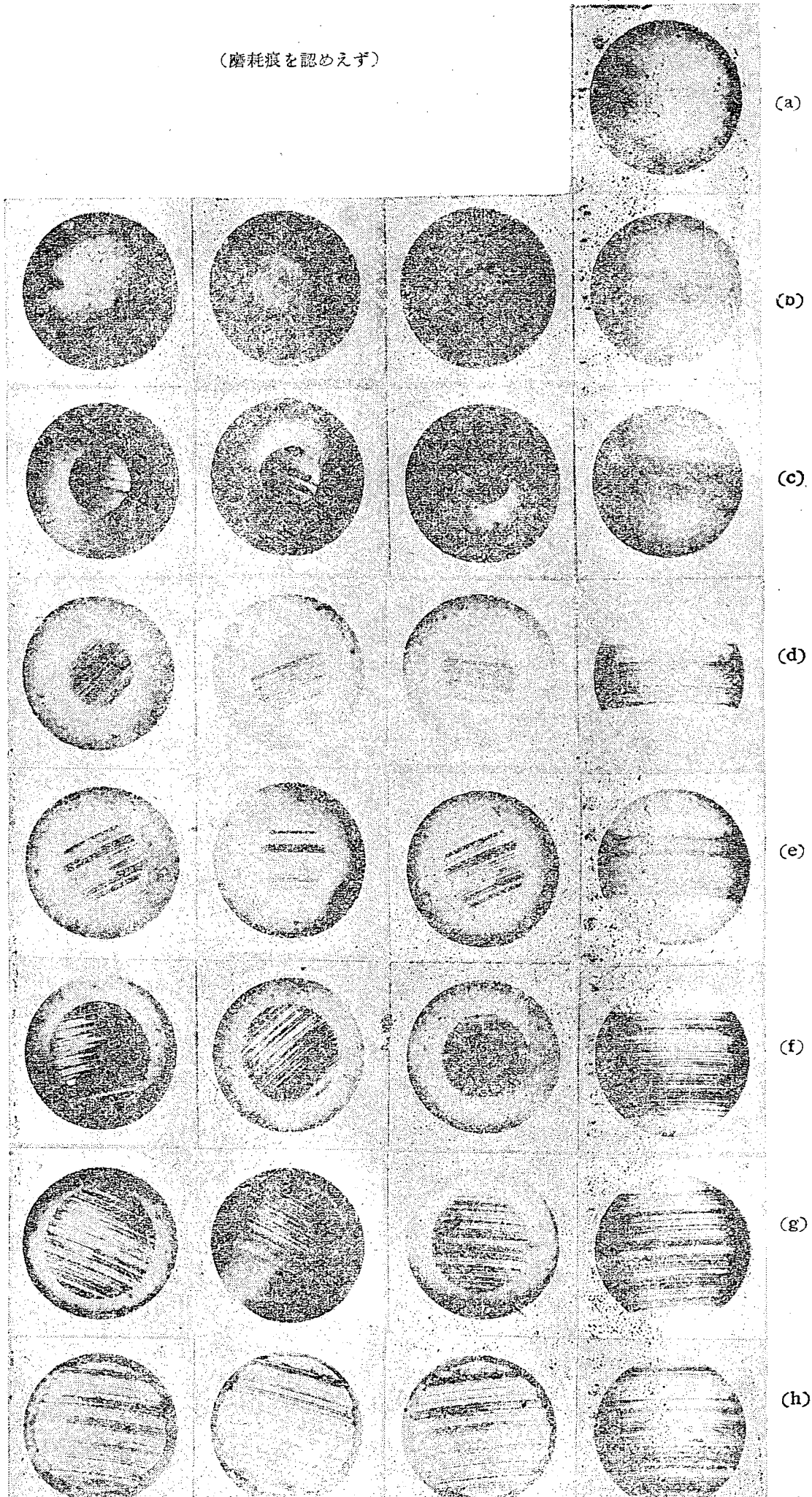
第2表

領 域	第1領域			遷移領域		第2領域			
	記 號	a	b	c	d	e	f	g	h
單位球當り 荷 重, kg	6.0	12.0	27.5	45.7	47.7	68.6	90.0	111.5	

回転數を 200rpm におさえ，各荷重に對する一時間運轉後の磨耗痕をしらべた。その顯微鏡寫眞を第8圖(a)~(h)に示す。各四枚が一組をなし，左の三枚は固定球の，右の一枚は回転球の磨耗面である。またかような磨耗痕の代表的なものゝプロフィールを第9圖及び第10圖に示した。いずれも摩擦方向と直角の方向に測定したもので，第9圖は固定球，第10圖は回転球上のプロフィールである。

第8圖(a)~(h)の寫眞から明瞭であるように，第一領域における磨耗痕(a), (b), (c) はいずれも滑らかな鏡面状であつて一様に白く輝いてみえる。従つてその撮影は照射光線の適當な調節によつて漸く可能な程度で鋼球の生地とほとんど見わけがつかぬ位である。遷移領域の寫眞(d), (e) はきわめて特徴的である。中央に粗く黒い筋がはいつて，その黒帯の兩側に半月形に第一領域におけると同性質の磨耗面が白く美しく輝いている。第二領域(f), (g), (h) にはいるとこの半月形の輝いた面が全く消失して，全面がさきの黒帯と同じ粗い引搔傷でおもわれてしまう。この第二領域の荒れ方は荷重が増すほど甚しくなり，ついには

(磨耗痕を認めえず)



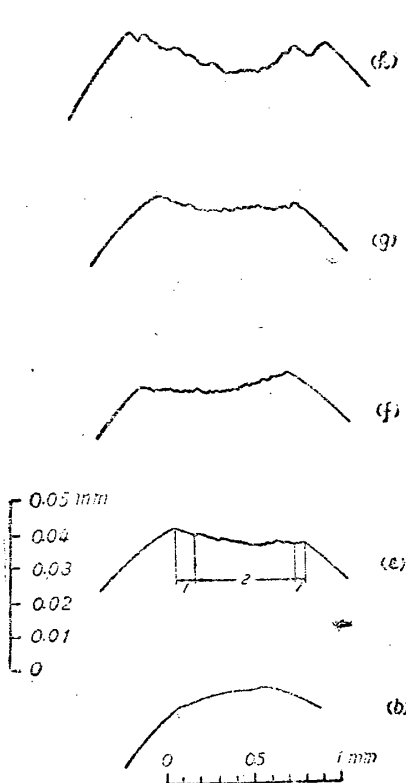
燒付きに到達する。

以上の過程は第9, 10圖のプロファイルからも容易に知ることができる。圖の(b)は第一領域に屬するもので、磨耗面が滑らかであることはすぐわかる。(e)は遷移領域に屬するもので、第9圖にみるようにプロファイルの兩端部1に滑らかな第一領域を残し、中

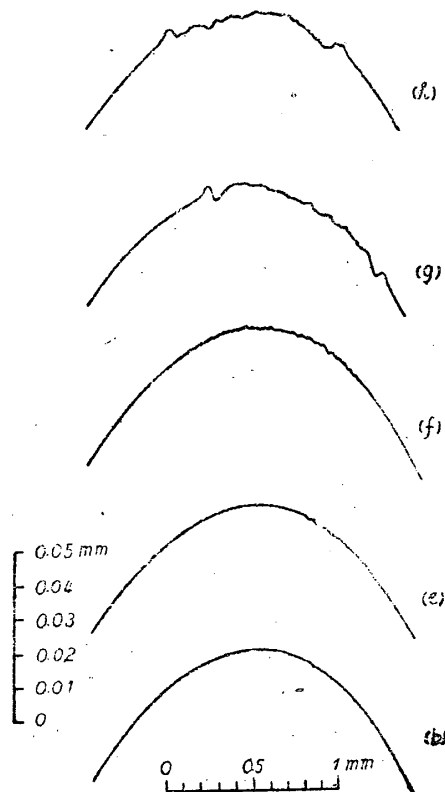
央部2は細かい凹凸にみちた第二領域に既にはいつている。この中央部の粗面は(f)から全面に擴大して完全な第二領域にはいり、次第にその粗さを増してゆく。第9, 10圖の磨耗痕の測定結果をまとめて第3表に示した。

第3表

番 號	固 定 球 (mm)						平 均	回 轉 球 痕 幅 (mm)	
	左		中		右				
	縱 徑	横 徑	縱 徑	横 徑	縱 徑	横 徑			
a	認めえず		同		同		—	0.30	
b	0.33	0.27	0.45	0.45	0.50	0.48	0.42	0.33	
c	0.53	0.58	0.53	0.53	0.45	0.45	0.53	0.50	
d	全幅	0.66	0.66	0.76	0.74	0.74	0.73	0.72	0.55
	黒帯	0.55	—	0.55	—	0.55	—	0.55	
e	全幅	0.77	0.76	0.69	0.65	0.77	0.76	0.73	0.55
	黒帯	0.55	—	0.55	—	0.55	—	0.55	
f	0.95	0.91	0.93	0.90	0.83	0.80	0.89	0.91	
g	1.03	1.00	1.03	1.03	0.94	0.94	1.01	1.05	
h	1.23	1.19	1.29	1.26	1.29	1.26	1.25	1.25	



第9圖



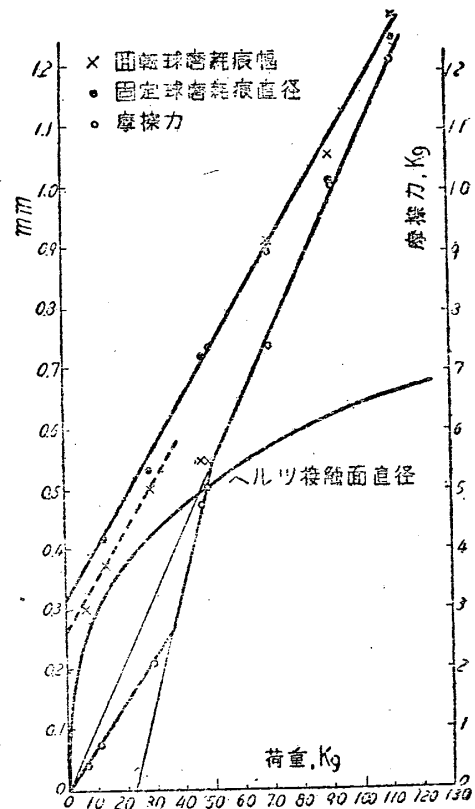
第10圖

第一領域に屬する (b), (c) の回轉球の磨耗痕幅が固定球における平均直徑より小さいのは、摩擦が滑らかであるため、摩擦面の兩側の比較的壓縮應力の低い部分の摩擦が回轉球の痕幅の兩端部に充分な磨耗痕を與えることができず、顯微鏡をもつてしては検出できぬ程度であることを意味する。従つて第一領域における回轉球の磨耗痕の境界線はきわめて漠然としている。それが第二領域 (d), (e) にはいるとはつきりとした兩領域にわかれるが、こゝに特に興味あり、注目し値するのは、回轉球の磨耗痕幅が固定球の磨耗痕中、その黒帯の幅に嚴密に一致していることである。すなわち第一領域に屬する磨耗痕は、固定球においてはその凹みのために漸く検出することができるが、回轉球においては全く發見することができない。この部分の滑らかさは、また第 10 圖 (e) において第二領域たる黒帯に對應した細かい粗面の外側に磨耗の痕跡らしいものが何一つみられない點からも知ることができる。第二領域 (f), (g), (h) では兩球の痕跡はほぼ一致しているが、回轉球の方がやゝ大きいのは、その痕跡が三個の固定球の痕跡のすべてを包含する以上、むしろ當然である。

遷移領域の寫眞 (d), (e) をみると、中央の荒れた黒帯部分は、磨耗痕の正しい中心線よりやゝ内側に寄つている。これは四つの球を積みかさねたときの接觸點が、固定球の最頂部より内側に寄つており、従つて磨耗の進行に伴つて接觸面における荷重の中心が次第に内側に移つてくる結果である。

第 11 圖は磨耗痕、始動後 10 分における摩擦力、及び参考のためヘルツの理論的接觸面の直徑をそれぞれ荷重に對してプロットしたものである。摩擦力の値を始動後 10 分とおさえたのはつきぎの理由による。すなわち摩擦力は低荷重のときは試験時間を通じて一定であるが、遷移領域以上においては初めはやゝ不安定で始動後次第に上昇し、大體 10 分間位で上昇の傾向は飽和し、その後は時間とともにむしろ次第に低下してゆくためである。いゝかえれば、面の磨耗が比較的少く、且つ摩擦状態がほぼ一定したところとゆう意味である。

第 11 圖における遷移領域が第 1 圖におけるそれより低く現われているのは、一定の荷重におさえて 10 分もの長時間運轉をしたため面の磨耗が第 1 圖の場合よりも著しく進行し、従つて粗さも進行したためである。しかし一方運轉時間を一定におさえ、一つの點ごとに新しい鋼球を使用して採つたデータであるため、各領域の轉移の様子は一層明瞭で、且つ各點はよく直線にのつている。



第 11 圖

## 6. 「曲り」と「筋」と潤滑機構とは いかに關連するか

著者の一人は既に別の個所<sup>3)</sup>において潤滑機構につきつきぎのような見解をのべておいた。すなわち二つの金屬面間に介在する油膜が完全な粘性流體膜と見なしうる場合か、いわゆる完全潤滑状態であつて、それが完全な粘性油膜としては説明しえないほど薄くなつてから先の状態が廣義の境界潤滑状態である。そして後者の状態において境界膜の比較的厚い場合を薄膜潤滑状態といふ、この状態は吸着分子の配列が比較的高次に及ぶか、あるいは更に多數の非配列分子をも介在していずれにせよそこには一定の油膜の定常的な存在を許すものと考えた。従つて金屬摩擦面はほとんど互いに接觸しないか、またはその接觸は極めて局部的で、従つてその摩擦も一般に低く且つ滑らかで、磨耗も低い。これに對して負荷条件がもつと苛酷になり、その強靱さにおいてほとんど金屬面を構成する分子と一體とも見なすべき境界單分子層、ないしはこれに準ずべききわめて薄い數分子層以外、高次配列層や介在非配列分子のすべてを喪失した状態を分子潤滑状態とよんだ。そしてこの状態は部分的な固體摩擦を伴ひ、若干の分子ないしは分子層によつてわずかに全面的な固體摩擦や焼付きを防止している状態と考えた。われわれ



の行つた實驗條件は、接觸點の摩擦速度は 11.5cm/sec 實驗した最低荷重 0.2kg/單位球の場合でもその最高ヘルツ壓力は 120kg/mm<sup>2</sup> (平均壓力約 70kg/mm<sup>2</sup>) に及んでいる。従つてわれわれの行つた實驗ではそのすべてを通じて完全な粘性油膜の形成は考えられず (簡単な理論計算によつても容易に證明できる)、それが境界状態を招くべき條件であることは明白である。このことはまた他方、摩擦力-荷重關係が境界摩擦の特性であるクローンの法則に従っていることから明らかである。こう考えると實驗の結果から、境界摩擦の第一の領域としてあらはれたものが、この薄膜潤滑状態であろうと考えることは不自然だろうか。一方この領域における滑らかな磨耗痕の輝き、その磨耗量の少なさを等から推しても金属の全面的接觸からはおよそ遠い状態であると考えられることは自然であろう。

またこの點に關連して重要なことは、まえにのべたようにこの第一領域では焼付きが絶対におこらないことで、スピンドル油のような粘度やいわゆる油性の低い油でも、形式的には必ず第一領域を過ぎてから焼付きをおこすのである。この事實もまた第一領域がかなり厚い境界層、すなわち薄膜状態にあり、金属接觸の機會がきわめて少ないことを證明するものであろう。

第二の領域は分子潤滑状態に相當するものである。油分子の洗れがなく、摩擦面間に多少の油分子が存在したとしても、それは摩擦面に吸着した分子の剝離をかりうじて補修する程度であつて、それ以上の役割は果さないと想像される領域である。あるいはまた若干の油分子を介していても、それがほとんど金属面と一體となつているため、金属粒子と一體になつて磨耗すると考えられる領域である。従つてこの領域ではたとへ良質の潤滑油を用いても磨耗面はきわめて粗いものになる。之は第 9, 10 圖にみる通りである。

遷移領域は上の二つの領域の過渡的な共存状態である。この共存の實状については既にのべたが、更に第一領域から次第に第二領域に踏みこむ過程を明らかにするきわめて興味ある事實がある。すなわち、いま (d) なる遷移状態において、輝いた第一領域と黒帯をなす第二領域との境界線における壓力を推定するとしよう。磨耗のため厳密なヘルツの式は適用できないが、近似的にこの磨耗痕の全面に回轉拋物面狀の壓力分布を考えてこの黒白兩域の境界線上の最高壓力を算定すると 393kg/mm<sup>2</sup> となる。一方第 1 圖のカストル油に対する  $P_1$  點の最大壓力をヘルツの式から算出すると 385kg/mm<sup>2</sup> となつて、この兩値がきわめてよく一致するのである。すなわち第一限界荷重  $P_1$  において、摩擦面の中央がまず第一領域を踏みこえ、以後荷重が

増すに従つて次第にその範圍を擴大してゆくのである。従つて遷移領域における黒帯周縁の境界の壓力は常に第一限界荷重  $P_1$  における中央最大壓力に一致すべきものである。

以上のことから、カストル油は約 390kg/mm<sup>2</sup> 以下の壓力においてのみ薄膜潤滑は可能で、これを限度としてそれ以上の荷重では突然境界状態が第二領域に轉移するため、境界膜の潤滑性能は急激に低下すると結論されるのである。第 8 圖の寫眞から既に明らかのように、第二領域では摩擦面の荒れが甚しく、もしもこの領域の潤滑状態が長時間にわたつて實際の軸受面に行われたとすれば、忽ち磨耗過大や焼付きの危險を招くことは明らかである。従つて境界状態にある軸受の實用限度ないしは安全限度は、この第一領域、すなわち薄膜潤滑状態までであると結論できる。

## 7. 油膜の負荷能力または油膜強度の概念がはつきりした

潤滑膜の強度を規定すべき基準としてその熱的な強さと、力學的な強さとの二つが存在することは、既に別の箇所において指摘し、熱的な強さが、境界分子層のある特定の温度における配列能力の喪失と摩擦の突然の増加とによつて一應判定されることは、既にその一部を報告<sup>10)</sup>しておいた。こゝで問題にとりあげるのは油膜の力學的な負荷能力または強度である。

従來潤滑油の負荷能力を測定する方法としてはいわゆる焼付き荷重を測定し、これを限界荷重として比較してきた。しかしこの焼付きなる現象は摩擦面上の局部的な片當り個所が核となつて發達することが多く、しかも焼付きに對する油膜の眞實の負荷能力または油膜強度はかような片當りの小面積から求むべきものであるにもかゝらず、従來の方法では不可能であつた。すなわち従來の軸受型の試験機による平均荷重であらわした油膜強度や限界荷重は、この意味で物理的にはきわめて根據の薄いもので、測定値が統一を缺くのはむしろ當然であつた。従つてかような装置からえられる摩擦は、上にのべた第一領域、遷移領域、第二領域、更にきわめて小さな焼付き部分等の複雑をきわめた混合物であり、上にのべたような各領域の明瞭な轉移が見のがされてきたことも當然であつた。われわれは比較的單純な試験條件のもとに軸受面上の眞實の負荷面だけを抽出することによつて油膜の破斷する過程をよほどはつきりさせることができ、且つ實驗の結果第一領域の限界荷重  $P_1$  に對する接觸面の中央最大壓力が、油膜の最大安全耐壓力であることを知つた。われわれは油膜強度の比較の基準として第一領域の限

界荷重における境界膜の最大壓力をえらぶことを合理的と考える。それはわれわれの實驗における焼付壓力よりは著しく低いものであるが、なほ從來の一般軸受型の試験機によつて得た焼付きにおける限界荷重や油膜強度より遙かに高いものである。

かようにして求めた各種潤滑油の油膜強度を第4表に示した:

第4表

潤滑油の種類	油膜強度 kg/mm <sup>2</sup>
カストル油	385
ガルフ・ブライド	349
SAE 30	352
スピンドル油	332

この表からもわかるように、油膜強度は鑛物油のような一般無極性物質でも、カストル油のような有極性の物質でもさほど大きな差はない。しかもその絶対値はいずれも 300~400kg/mm<sup>2</sup> の範囲内にあつて、現在最も負荷の大きいといわれる軸受(たとえば航空發動機用のクランク・ピン軸受では平均荷重で 3.0~3.5kg/mm<sup>2</sup> くらい)の負荷の 100 倍程度である。このことは、適當なる機械的構造によつて軸受に均等な當りを與えらるるならば、軸受の負荷能力が現在の 100 倍程度に上げられるとゆうこと、逆にいえば、一定の負荷に對し、現在の最も苦しい軸受でもなおその軸受面積が 100 分の 1 に縮小される可能性のあることを豫言するものである。

なほ油性向上劑の添加によつて各種鑛油の境界摩擦が著しく低下するにもかかわらず、實際の軸受試験の結果は、純鑛油と有極性物質を含んだ油との間にさしたる差異が認められず、實際には化學的に安定な鑛油系のものがむしろえらばれてきたとゆう經驗も、この第一領域の限界荷重を油膜強度と考える限り、兩油の間にさしたる差異が認められないとゆう事實から示唆されるものが多い。

### 8. この實驗で明らかになつたことども

以上のべたことを綜合して、この實驗によつて明らかになつたことからを結論的にあげて報告を終らう。

(1) 境界摩擦には明確に特性の異つた二つの領域が存在し、第一の領域は薄膜潤滑状態、第二の領域は分子潤滑状態である。そして兩領域の中間に兩領域の共存する遷移領域が存在する。

(2) この二つの領域の摩擦はいずれもクーロンの法則に従うが、第一領域の摩擦係数は第二領域の摩擦係数よりも低い。

(3) 第一領域は單層または多層の配列分子層のほ

かになほ多數の非配列分子をも介在する状態と考えられ、直接の金屬接觸はきわめて局部的にしかあらわれない。従つてこの領域では油分子の個々の性質のほかになお分子のある種の集團的、すなわち液體的性質が相當影響をもつものと考えられる。それはこの領域における摩擦と磨耗とがきわめて徐々に且つ圓滑に行なわれ磨耗痕もまたきわめて平滑であることによつて特徴づけられる。

(4) 第二領域は前者に比して境界膜がその液體的性質を全く失ひ、主として油分子の個々の性質が支配的であるものと考えられる。それはこの領域における摩擦と磨耗とがはげしく、磨耗痕が著しく荒れることによつて特徴づけられる。

(5) 摩擦面のいわゆる焼付きは第一領域内では決しておこらない。そして原則的には第二領域において初めておこる。たゞし良質でない潤滑油分子の場合には、遷移状態においてもしばしばその中に含まれる第二領域部分の摩擦が大きいため、全面が完全に第二領域に轉移するまえに焼付きをおこすことがある。

(6) 潤滑摩擦面に事實上許しうる限界荷重、すなわち油膜の最大負荷能力は第一領域たる薄膜状態の限界荷重である。

(7) かような意味における油膜の最大負荷能力または油膜強度は、比較的油性の高いといわれるカストル油も、その低いといわれる鑛油も著しい差はない。

(8) 各種潤滑油の油膜強度を測定した結果はいずれも現在の滑り軸受の負荷能力の 100 倍程度である。

なお末筆ながら本實驗に協力をえた白瀬金蔵、青柳鐘一郎、入江清の三氏に深く感謝する。(1947年4月10日、理工學研究所にて)。

### 文 献

- 1) Bowden, F. P. and Ridler, K. E. W. Physical Properties of Surfaces. III—The Surface Temperature of Sliding Metals. The Temperature of Lubricated Surfaces. Proc. Roy. Soc., Vol. 154, No. 882, 1936.
- 2) 曾田範宗. 摩擦面の温度上昇に就て. 日本機械學會論文集, 第10卷, 第39號, 1944. 應用物理, 第12卷, 第3號, 第4號, 1943.
- 3) Bowden, F. P. and Tabor, D. The Area of Contact between Stationary and between Moving Surfaces. Proc. Roy. Soc., Vol. 169, No. 938, 1939.
- 4) 曾田範宗. 油性試験機の研究(第2部). 試作四球式油性試験機について. 理工學研究所報告, Vol. 1, No. 2, 1947.
- 5) 同上.
- 6) 曾田範宗, 富田皓. 油性試験機の研究(第1部). 試作振子式油性試験機とその二三の試験結果. 航空研究所報告, No. 279, 1943.
- 7) 曾田範宗, 岡本昇二. 境界摩擦に及ぼす温度の効果. 應用物理, 第15卷, 第3~4號, 1946.
- 8) 富嶽清綱. 航空發動機, pp. 177-180. 共立出版株式會社, 1943.
- 9) 4) に同じ.
- 10) 7) に同じ.