

高々度航空機用ブラシ

Brushes for Extra High Altitude Aircraft Service

一木利信* 花園文熙**
Toshinobu Ichiki Fumiteru Hanazono

内容梗概

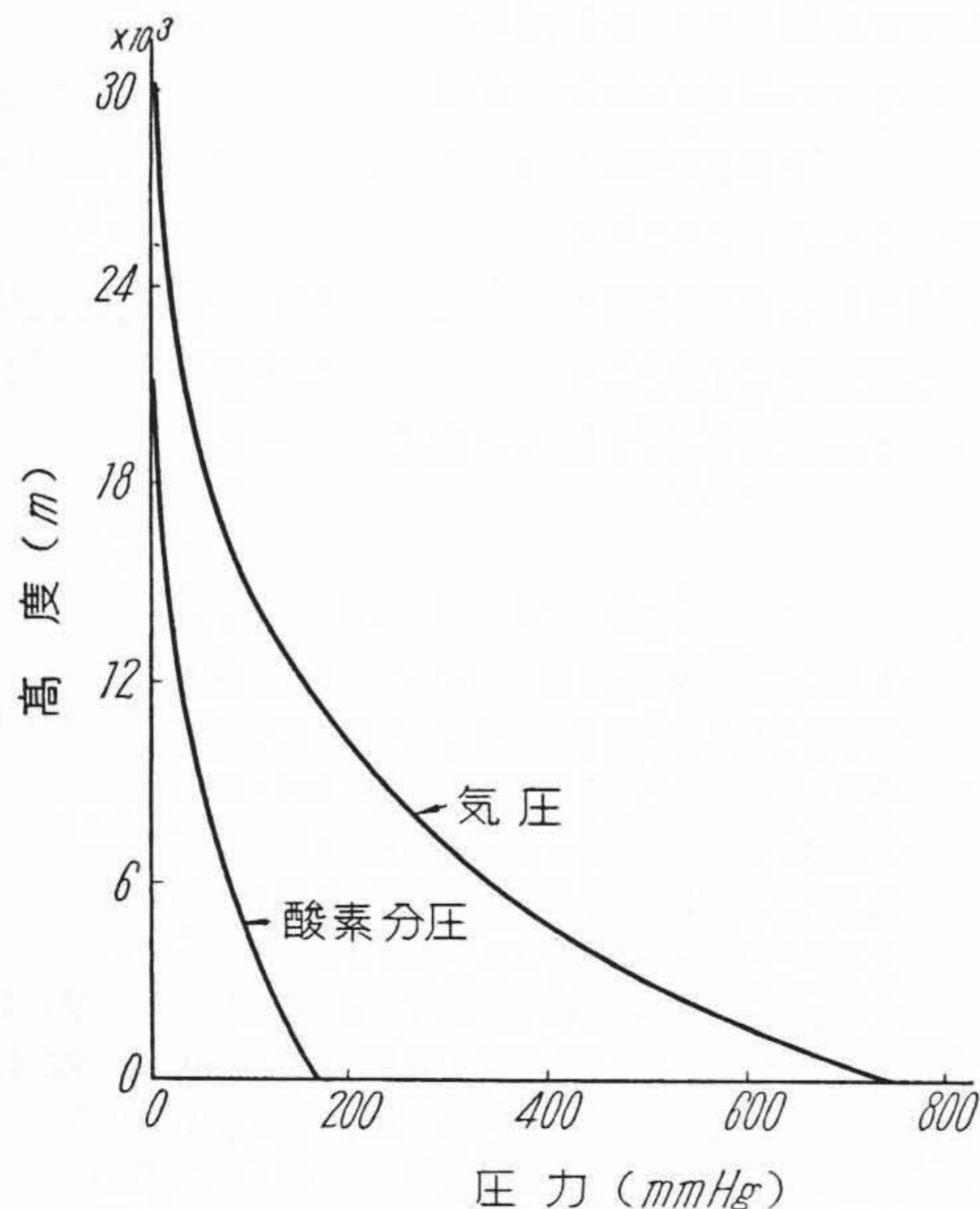
高々度飛行をした場合ブラシは粉塵摩耗と称する異常摩耗によつてたちまち摩耗してしまう。この現象を実験室で再現することは困難であつたが、筆者らは実験装置を種々改良することにより粉塵摩耗を容易に起させることに成功した。本文は粉塵摩耗の起る原因を明らかにした後、粉塵摩耗を防止するために試みた研究について述べた。粉塵摩耗を防止するには、二硫化モリブデン粉末をブラシ中に配合しておけばよく（特許出願中）、この種のブラシは高々度航空機用ブラシとして良好な特性を示すものと思う。

1. 緒言

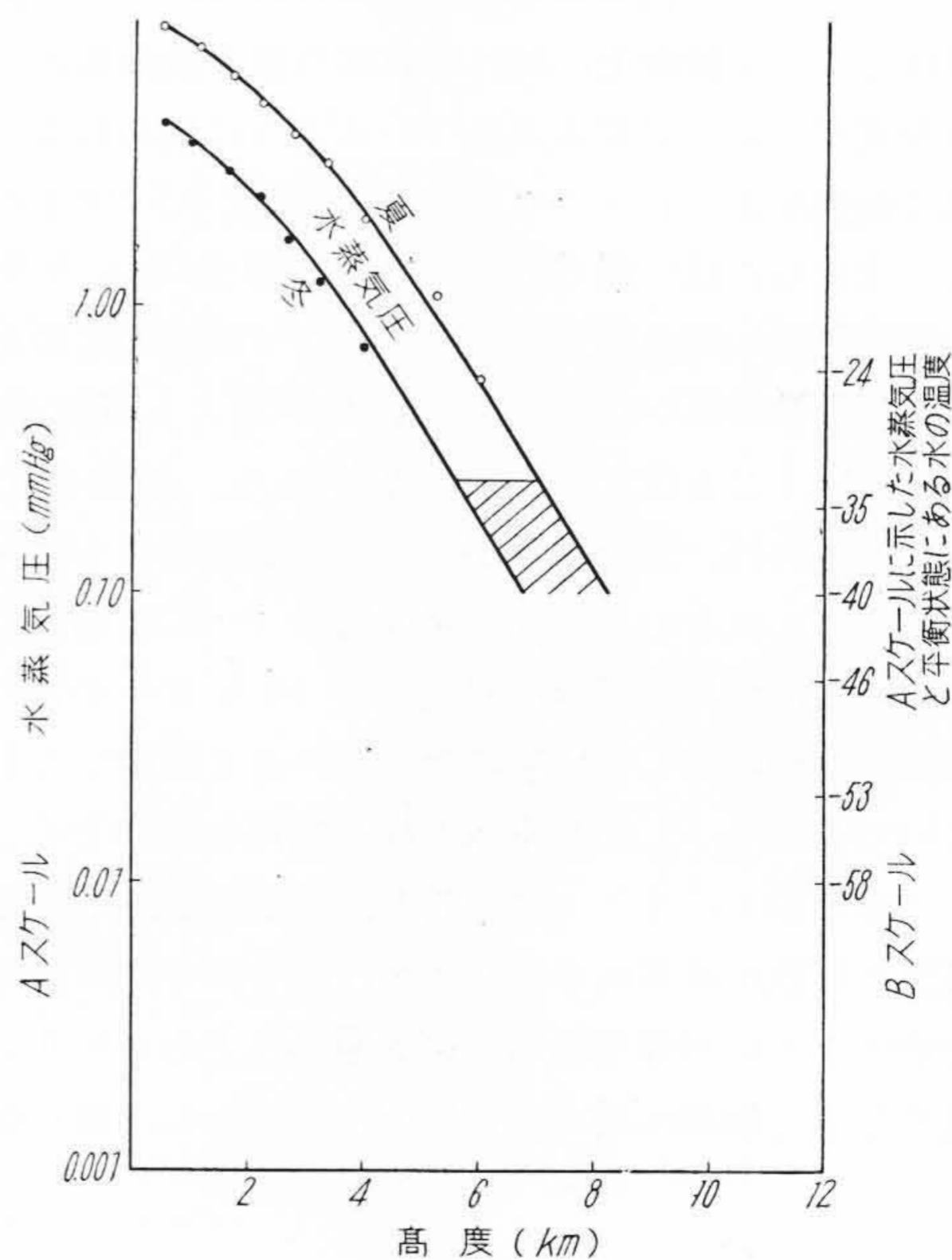
整流子（または集電環）表面には水膜および酸化皮膜（ Cu_2O および CuO ）が生成されており、これらの皮膜はブラシの摺動特性にきわめて重要な役割を演ずるものであることは一般によく知られている。極寒の地で一夜にしてブラシが摩耗してしまつたという報告もあるが、地上においてはこのような例はあまり経験しない。しかるに航空機が高々度飛行をした場合には異常摩耗をする。この事実は 1939 年にドイツにおいて発見されたもので、成層圏飛行をした場合には数時間で新品のブラシ

と取り替える必要があると報告されている⁽¹⁾。わが国においても戦時中これが問題となり、筆者らの一人もこれの研究に従事したが、十分の成果を収めることなく終戦となつた。アメリカおよびイギリスなどにおいても戦時中大きな問題としてこの解決に当つたようで、これに関する多くの報文⁽²⁾⁻⁽⁸⁾ および特許⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ がある。

最近わが国においてもようやく航空機の製造が開始されたが、やがて高々度用航空機も製作されるものと考えられる。さきに述べたように高々度飛行において、まず問題になるのはこのブラシであり、これを解決しておくことが必要であるので本研究を行つた。

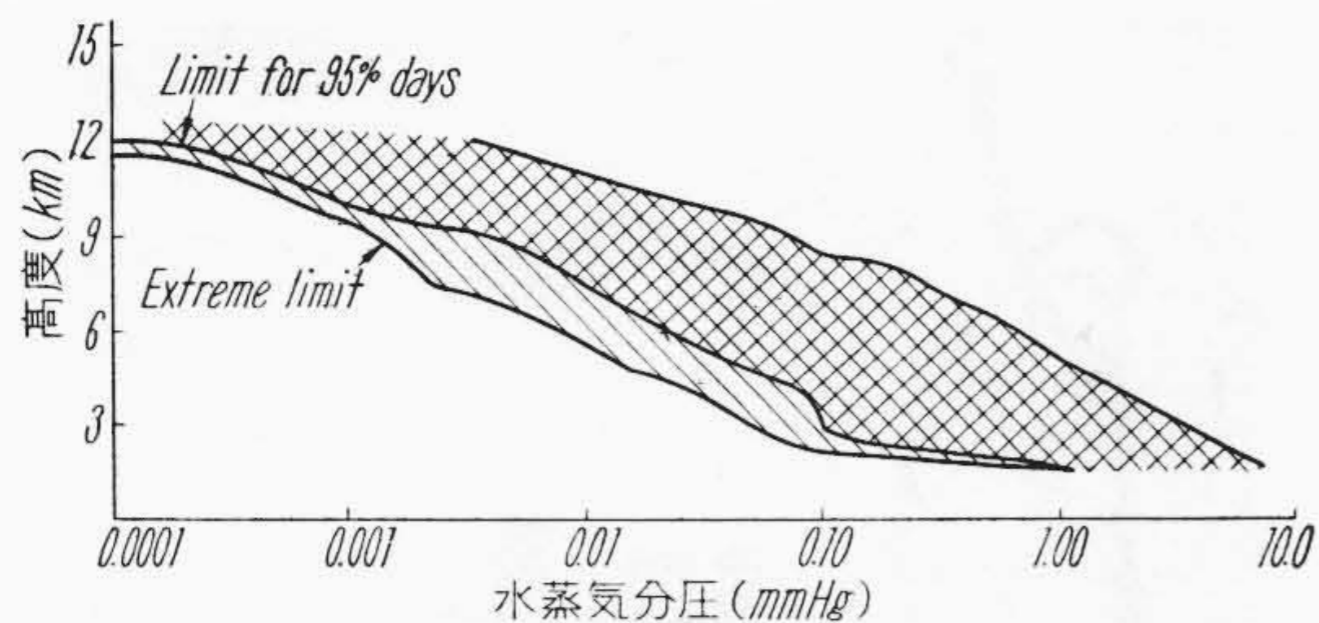


第1図 高度と気圧および酸素分圧の関係

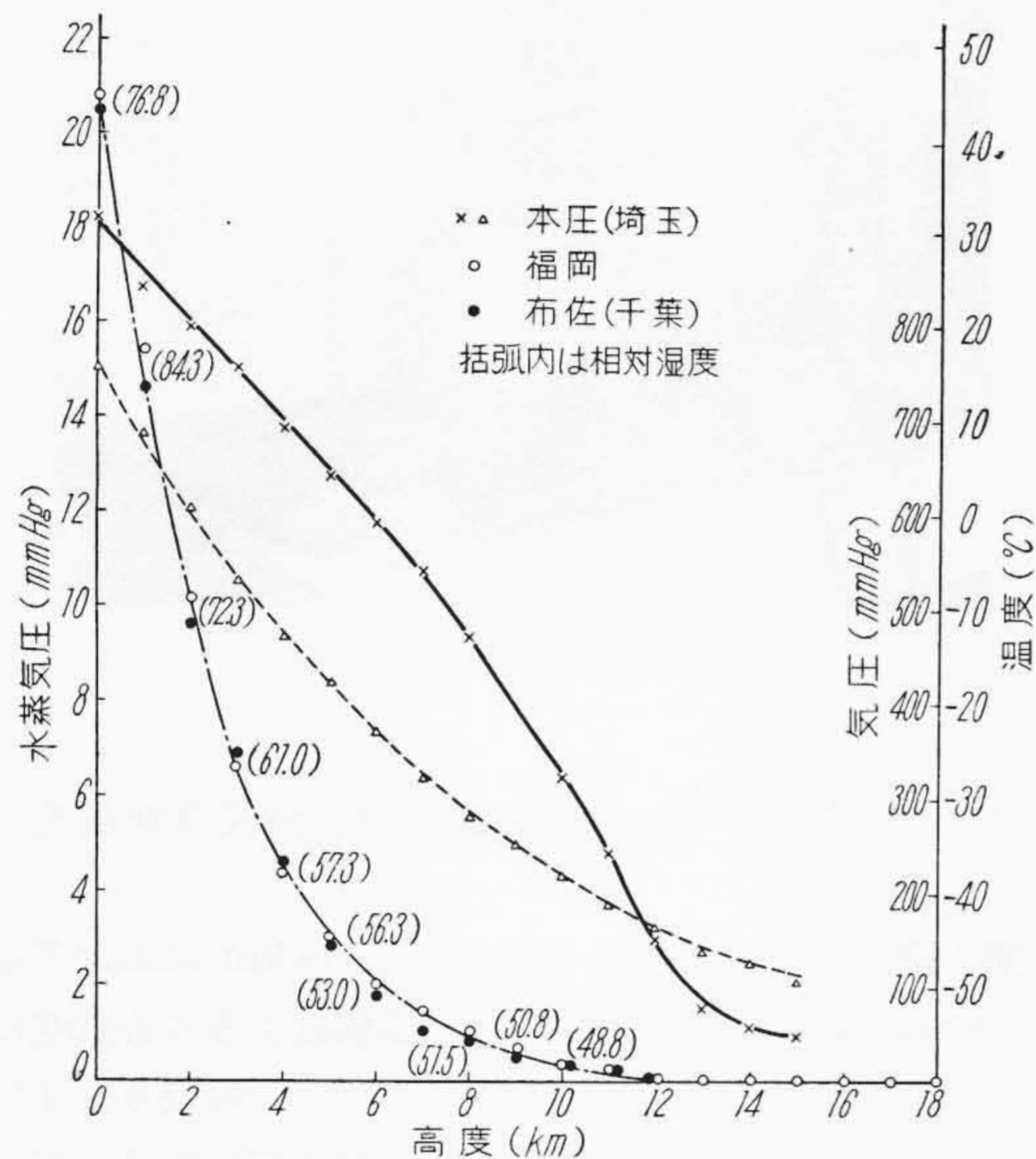


第2図 高度と水蒸気圧の関係 (米国)

* 日立製作所日立研究所 工博
** 日立化工株式会社



第3図 大気湿度の限界 (Southern England)



第4図 日本の高空気象状況

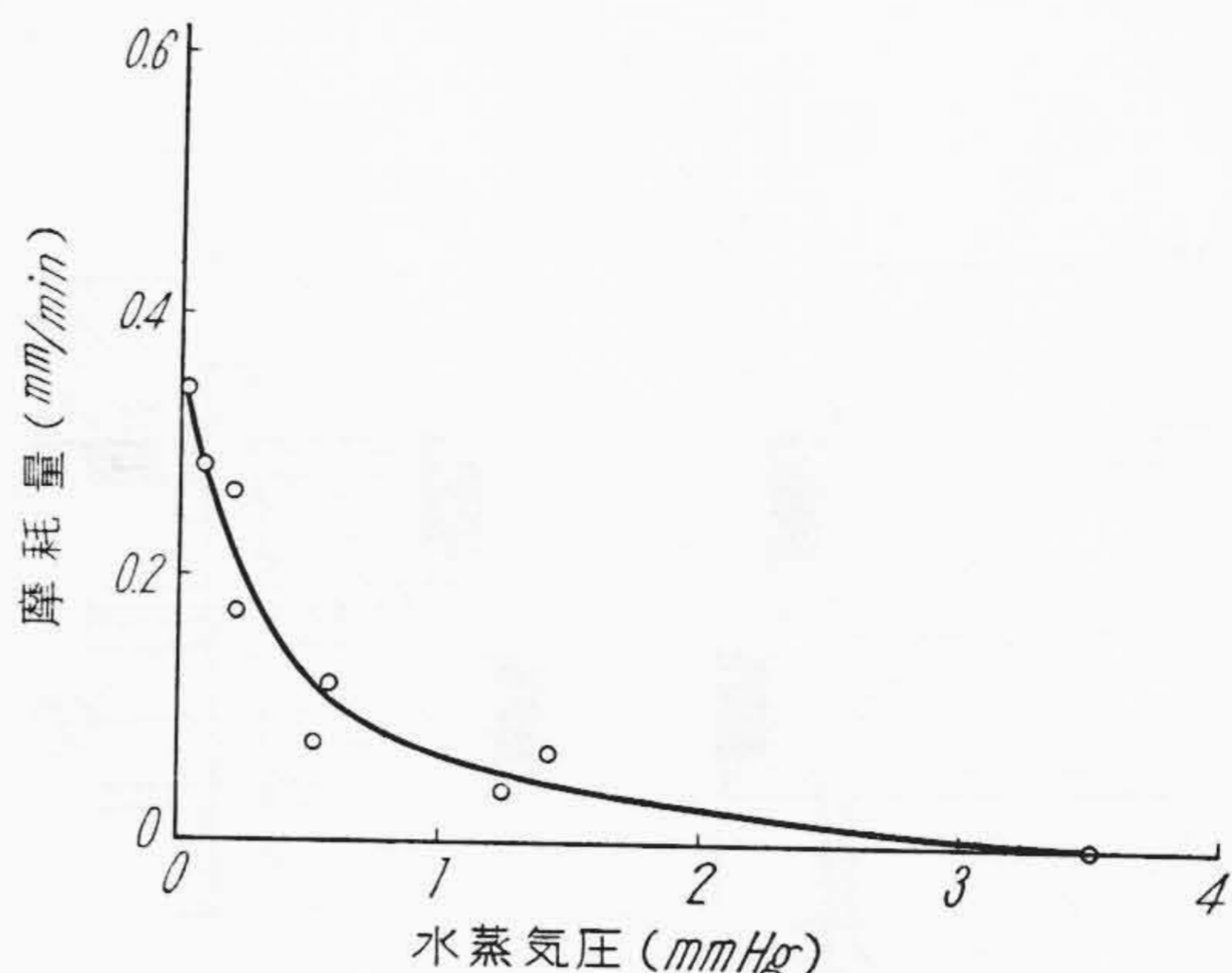
2. 高度と気象状況

高々度における摩耗現象を究明するには、まず気象状況を知る必要がある。第1図に高度と気圧および酸素分圧の関係を、第2図および第3図にそれぞれ英国および米国で実測した高度と水蒸気圧の関係を、また第4図にわが国の高空における気象状況を示した。

3. 異状摩耗についての学説

緒言で述べたように高々度状態におけるブラシの摩耗については多くの人々の研究があるが、低湿度になるとブラシの粉塵化が起り（この異常摩耗現象を粉塵摩耗と呼ぶことにする）、この現象は電流の有無には無関係に機械的に起るものであるということについてはその見解が一致している。

従来黒鉛はその結晶構造から特有の低摩擦物質であるという Bragg 氏の考え方が一般に信じられていた。Bragg 氏の説によれば黒鉛の c 軸方向の面間距離は炭素

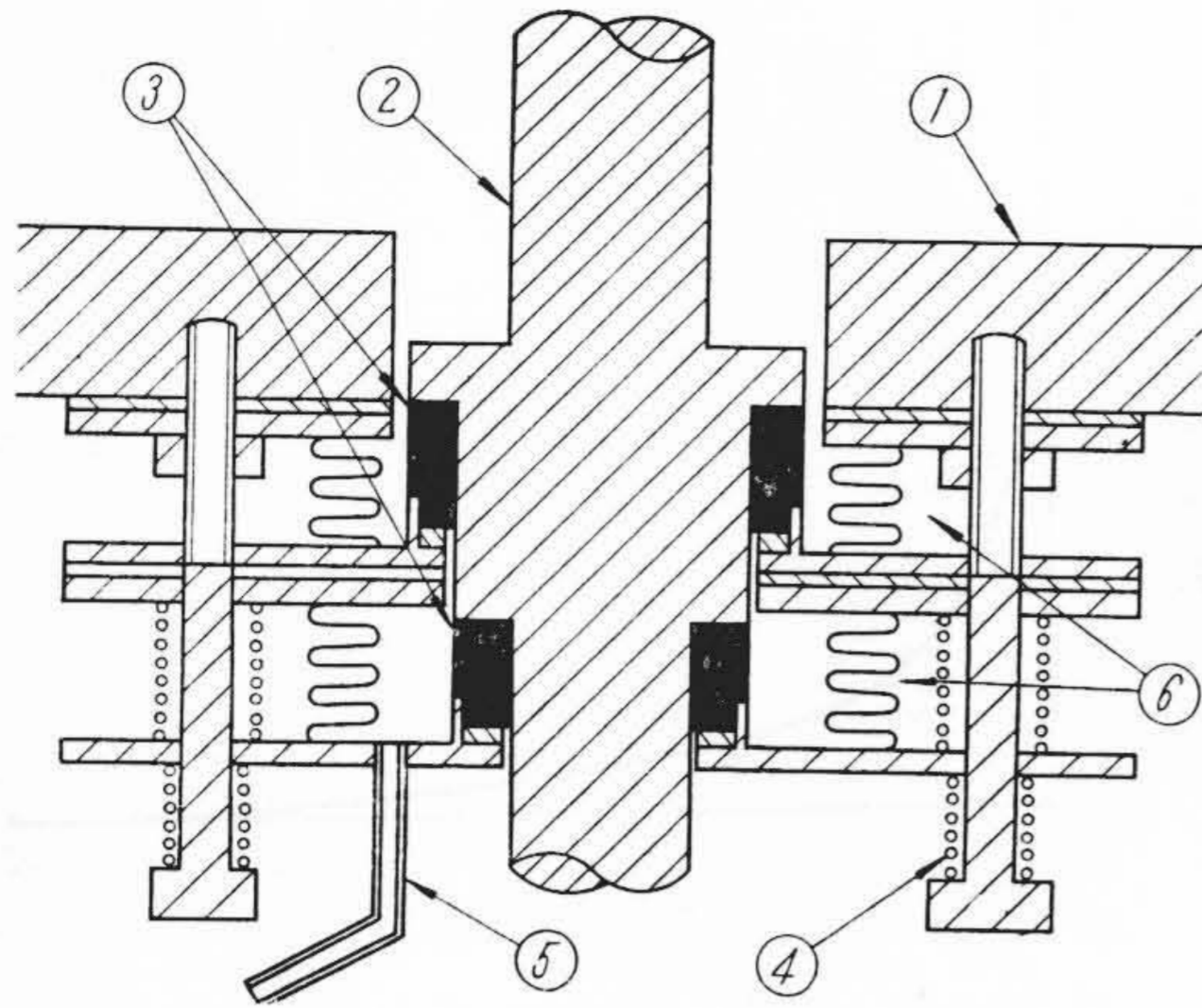


第5図 R. H. Savage 氏の実験結果

原子間距離の約 2.5 倍あるので結晶自身はダイヤモンドあるいはそれ以上硬いが、結晶相互の保持力は比較的弱く、したがって結晶は比較的相互にすべりやすいため潤滑性があるとされている。しかし、ごく低湿度においてブラシの摩擦係数が大きく、かつ粉塵摩耗の起る現象から Bragg 氏の考え方も十分なものでないことは明らかである。

Savage 氏らは真空にした場合、水蒸気圧が 3 mmHg 以下では粉塵摩耗が起るが、それ以上の圧力では粉塵摩耗が起らず、3 mmHg が臨界水蒸気圧であることを明らかにしている（第5図参照）⁽⁴⁾⁽⁵⁾。また同氏らは水蒸気圧が 3~5 mmHg では摩耗および摩擦係数は圧力に比例して減少するが、5 mmHg 以上に水蒸気圧が増してもこの値以下には摩耗および摩擦係数は減少しないことを述べている。なお酸素では水分がないときの臨界圧力は 300 mmHg であり、また水素、窒素、炭酸ガスでは 600 mmHg にしても潤滑性を示さないが、アンモニア、アセトン、ベンゼンのような容易に圧縮しうる蒸気では 5 mmHg またはそれ以下にしても潤滑作用を示したと述べている。

Savage 氏らの説によれば、水膜には減摩作用があるが、水膜がない場合には摩擦係数は大きくなり異常摩耗する。水の分子が摺動面に衝突凝縮（または吸着）してふたたび蒸発するのであるが、凝縮（または吸着）されている時間は 0.7×10^{-6} s であり、水の分子によつて摺動面が完全におおわれるためには 3 mmHg の水蒸気圧が必要である。また炭素の結晶の原子の引力はへき開面の端の原子と面中の原子とではちがいが、前者の方がはるかに大きい。しかし水を吸着した場合にはこの力が小さくなり、炭素の結晶は摺動面に orientation を生じ、連続した皮膜をつくる。なお炭素が水の分子を吸着している平均寿命は 10^{-3} 秒より小さい。水蒸気圧が低い場合に



① ガラス鐘台 ② シャフト ③ カーボンシール
④ パネ ⑤ 排気孔 ⑥ ベロー
第6図 実験装置気密部構造

は黒鉛結晶は orientation をせず、摺動面には連続的皮膜が生成されないため異常摩耗を起す (R. Holm 氏も同様なことを明らかにしている⁽¹¹⁾)。

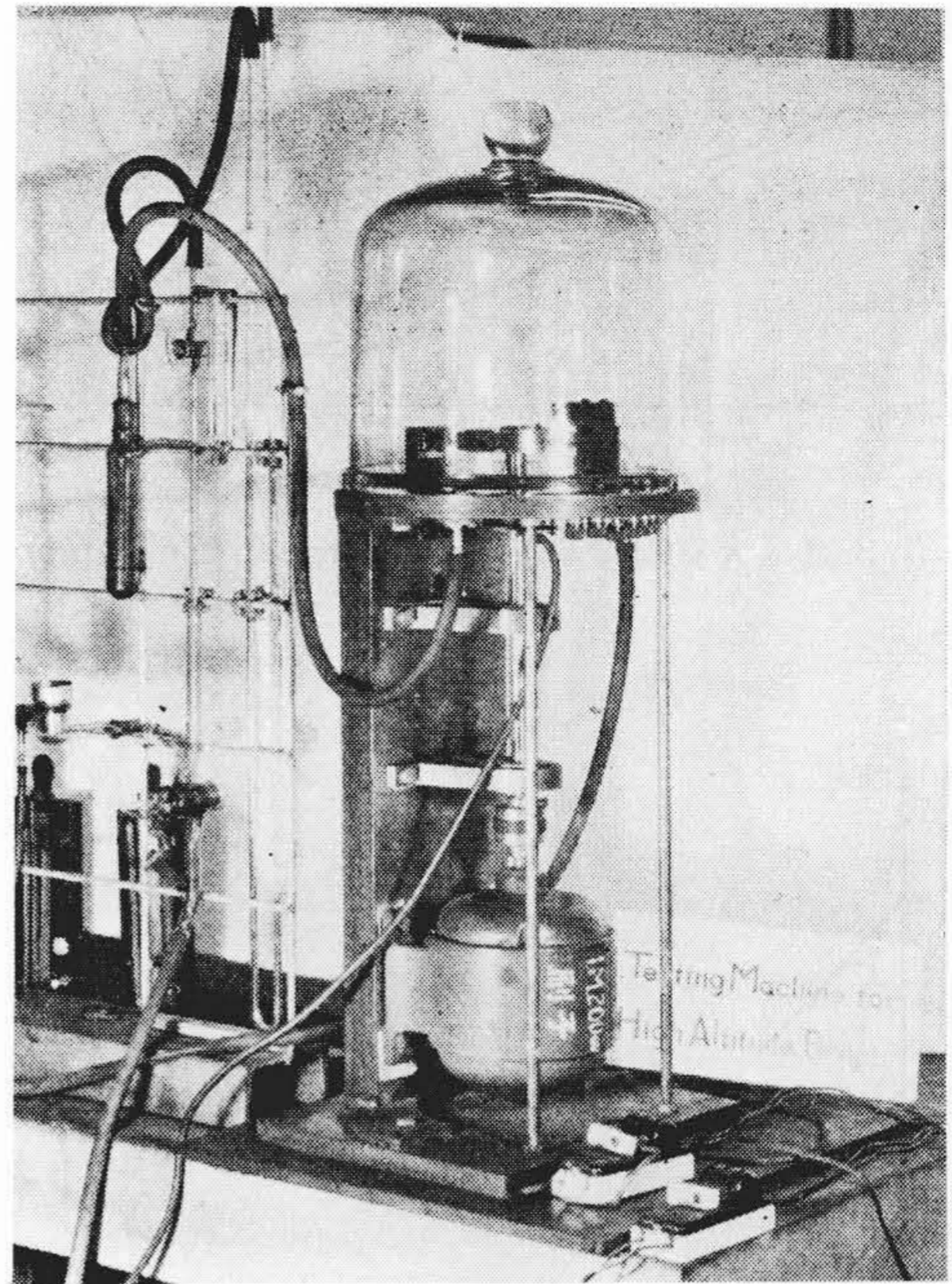
以上は Savage 氏一派の説であるが、これに対して Elsay 氏は異常摩耗の原因は摺動面に酸化皮膜が生成されないためであるとしている。すなわち、Elsay 氏の説によればブラシに吸着された水は酸化皮膜とともに潤滑作用もするが、これは空気中の酸素による酸化を促進させる触媒作用をするもので、酸化皮膜の有無が異常摩耗に影響するものであるといっている。

現在高々度状態におけるブラシの粉塵摩耗を防ぐ方法としてはもつぱら無機物をブラシ中に含浸する方法が用いられている。すなわち W. H. 社の特許⁽¹⁰⁾によれば非吸湿性の金属ハゲロン塩を 0.7% 以上をブラシ中に含浸することによつて異常摩耗を防止できるとされており、また G. E. 社の特許⁽⁹⁾によればアルカリ金属の塩素酸塩、臭素酸塩、燐素酸塩、硼素酸塩、セレン酸塩および弗素酸塩の中から選んだ化合物を 2~6% 含浸せしめることによつて粉塵摩耗を防止できるとされている。

4. 実験装置および実験の方法

4.1 実験装置

筆者の一人が戦時中に行つた実験では粉塵摩耗を起させることができなかつた。これは駆動電動機を装置内部に収めたため軸受などの油が蒸発して粉塵摩耗が起らなかつたものと考えられたので、今回は集電環の部分のみを低気圧にできるようにし、外部から集電環を回らす構造にした。この場合装置内を低気圧にするために回転軸の部分の気密保持のための構造をいかにするかが最も問題になつた。種々試作を行つた結果第6図の構造のもの



第7図 実験装置

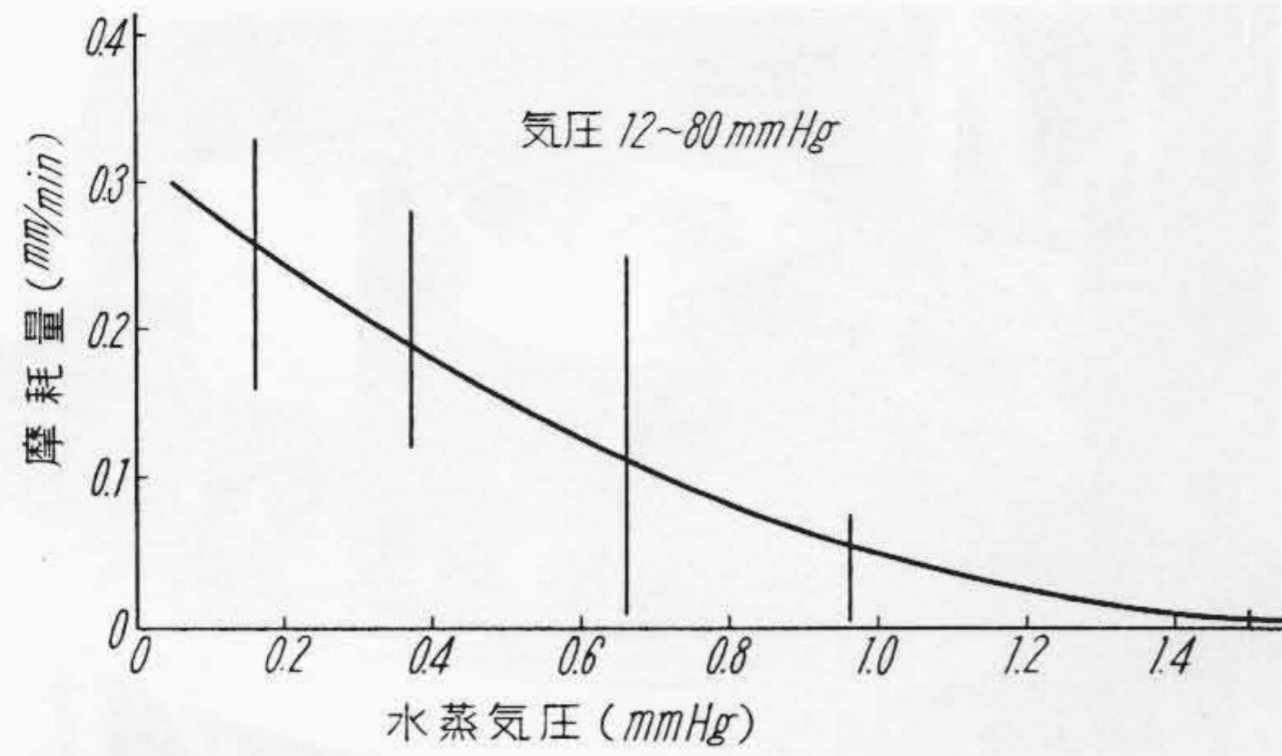
がよいことがわかつた。第7図に実験装置の外観を示す。

第1図から明らかなように、高度 14 km における気圧は約 80 mmHg であるから本試験機はあまり高真空にできるものでなくてもよく、むしろブラシの取りはずしの簡単にできる構造のものがよい。第7図の写真で明らかなように、ガラス鐘をゴムパッキングの上に単にのせる構造とした。本試験機を排気量 50 l/min, 真空度 10^{-4} mmHg の油回転真空ポンプで連続排気した場合の真空度は 5~10 mmHg である。なお駆動電動機には 100V, 1,500 r p m, 200W の单相誘導電動機を、また集電環は幅 25 mm 直径 100 mm, ブリンネル硬度 93 の硬銅集電環を用いた。

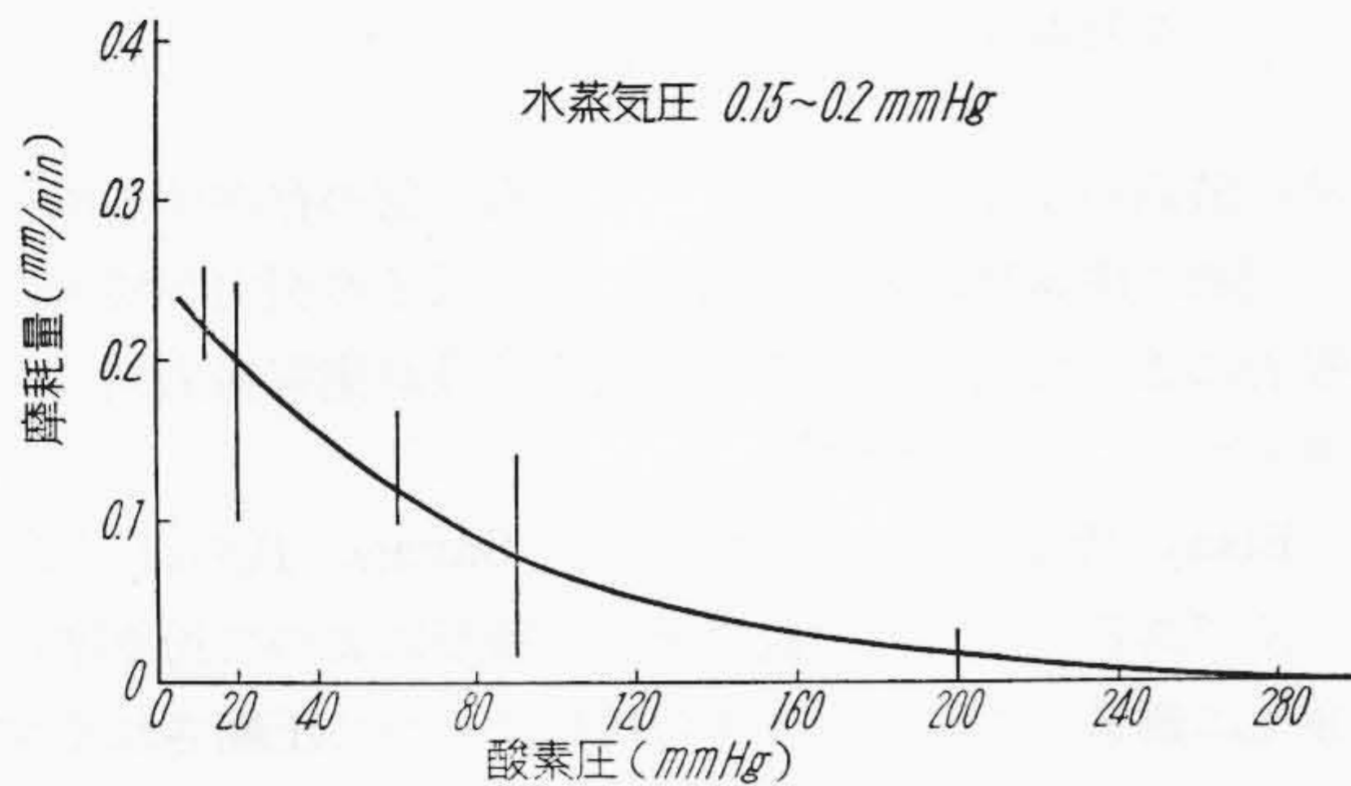
4.2 実験の方法

実験に先立つて、まずガラス鐘内の各部をよくベンジンで拭き、油などの付着物を除去した後 10 時間排気を行つた。

試験用ブラシを取り付け砂紙で摺り合せ、次に大気中で十分摺り合せ運転を行つた後マイクロメータでブラシの寸法を測定する。次に集電環表面を砂紙で研磨した後ブラシを取り付け、装置の内部を減圧し所要の圧力に達したら一定時間運転し、しかる後ブラシを取り出してマイクロメータで寸法を測定し摩耗量を求めた。N₂ および O₂ ガス中で実験する場合には装置内部を一度排気した後 N₂ ガスあるいは O₂ ガスを入れた。なお実験はこれらのガスを通しながら行つた。



第8図 水蒸気圧と摩耗の関係



第9図 酸素圧と摩耗の関係

装置内の湿度の測定には露点湿度計を用いた。

5. 粉塵摩耗に及ぼす諸影響

5.1 水蒸気圧の影響

ガラス鐘内を 12~80 mmHg に減圧し、鐘内の水蒸気圧を変えて水蒸気圧と摩耗量の関係を測定したところ第8図のとおりの結果を得た。運転時間は2~3分であり、摩耗量に相当のばらつきがあつたので同一実験を6回行つた。第8図には測定結果のばらつきの範囲を示した。

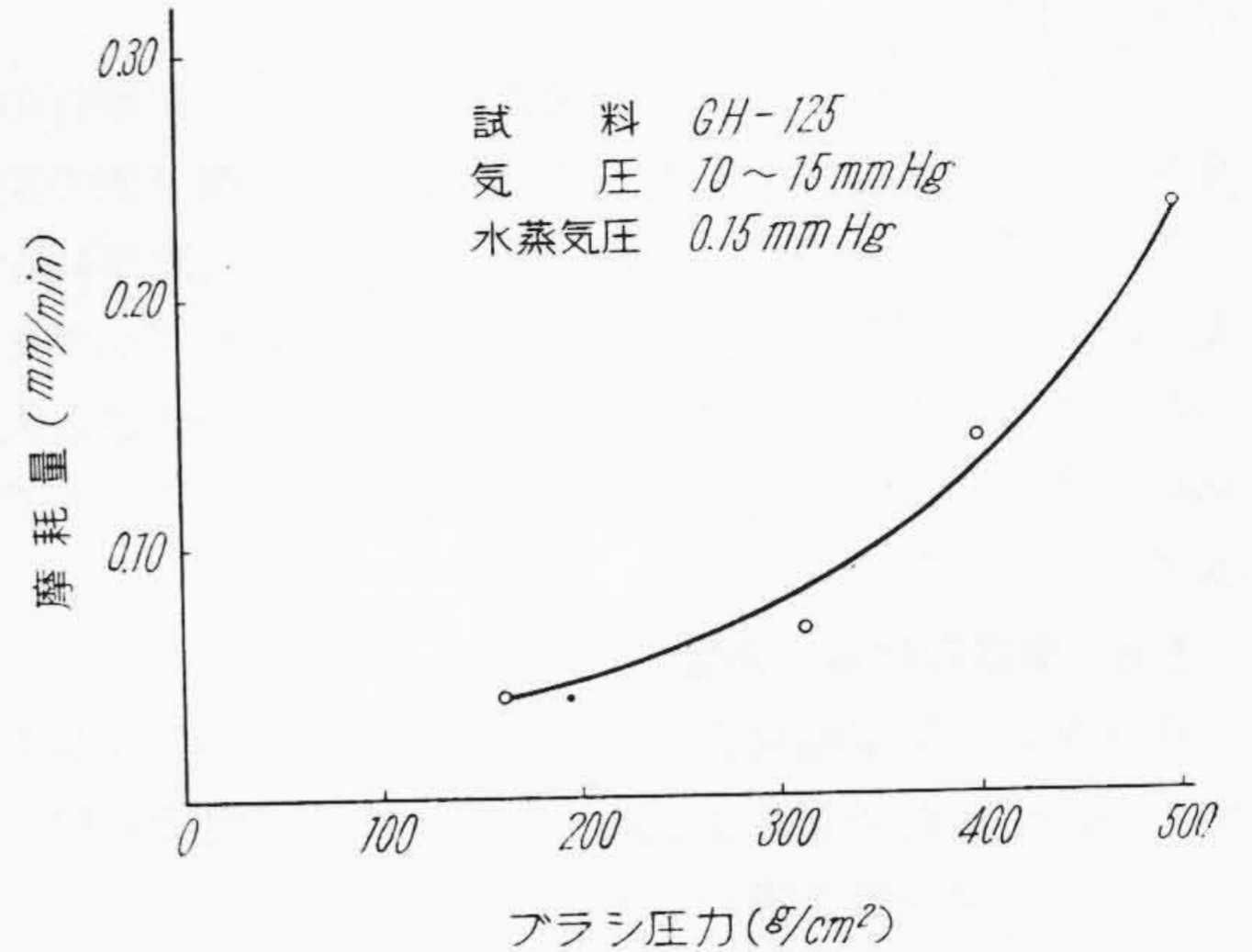
5.2 酸素ガスの影響

ガラス鐘内の空気を排気した後酸素ガスを注入し酸素圧と摩耗量の関係を測定した。その結果を第9図に示す。なお実験にはポンベの酸素ガスを用いたが、その水蒸気圧は 0.15~0.2 mmHg であつた。また試験機の運転時間は2~3分である。

第9図で明らかなように、酸素ガス圧が高くなるほど摩耗量は減少し 300 mmHg 以上になると粉塵摩耗は起らなかつた。

5.3 窒素ガスの影響

窒素ガスを用いてガス圧力と摩耗の関係を求めたところ、ガス圧力には無関係に 0.2 mm/min 程度の粉塵摩耗を起すことがわかつた。



第10図 ブラシ押え圧力と摩耗の関係

第1表 供試ブラシの物理特性

種別	特性	見掛比重	比抵抗 ($\mu\text{-cm}$)	抗折力 (kg/cm^2)	弾性率 (kg/mm^2)	硬度 (ショワール)
GH-125		1.75	1,490	397	900	41~43
GH-45		1.53	7,200	146	420	32~34
GH-530		1.78	1,200	290	240	19~20
GH-125 B		1.77	1,400	400	950	40~42
MH-33 L		3.85	28	225	—	11~13

第2表 ブラシ材質と摩耗量の関係

材質	条件	空気圧 10~15 mmHg 湿度 約 0.15 mmHg	窒素ガス 760 mmHg 湿度 約 0.15 mmHg	備考
GH-125		0.23 mm/min	0.23 mm/min	使用リング銅
GH-125 B		0.25	0.22	硬度
GH-45		0.35	0.33	ブリネル 91
GH-530		0.11	0.14	ロックウール 46
MH-33 L		0.28	—	

第3表 集電環材質とブラシ摩耗量の関係

集電環	鍛造銅	ヒタクローム (クローム入り銅)	鉄 (SF材)
硬度			
ブリネル	91	108	119
ショワール	20	24	22
ロックウール (Bスケール)	46	68	74
GH-125	0.23 mm/min	0.23	各10時間程度運転するも摩耗せず。しかし摩擦係数は非常に大きくなる。
GH-45	0.35	0.24	
GH-530	0.11	0.09	
MH-33 L	0.28	0.26	

5.4 ブラシ押え圧力の影響

第10図にブラシ押え圧力と摩耗の関係を示す。ブラシ押え圧力が小さくなるに従つて摩耗量は減少し、20~30g/cm² 以下の圧力では粉塵摩耗は起らないようである。ブラシ押え圧力が大きくなるほど集電環表面は荒損(円周方向に無数の細い溝状の条ができる)しやすく、摩耗量も急激に増大する。

5.5 ブラシ材質の影響

第1表に供試ブラシの物理特性を、また第2表に試験

結果を示す。

最初ブラシを構成している炭素材の硬さが粉塵摩耗の発生に大きく影響するものと考えられたが、第2表で明らかのように、いずれの材質でも同じように粉塵摩耗を起し、しかもブラシ材質による摩耗量の差はわずかであった。これは黒鉛結晶の硬さがダイヤモンドの硬さと大体同じであるという説に従えば容易に考えられることである。

5.6 集電環材質の影響

粉塵摩耗が集電環材質によつて影響されるかどうかを明らかにするため銅および鉄集電環を用いて実験を行った。その結果を第3表に示す。

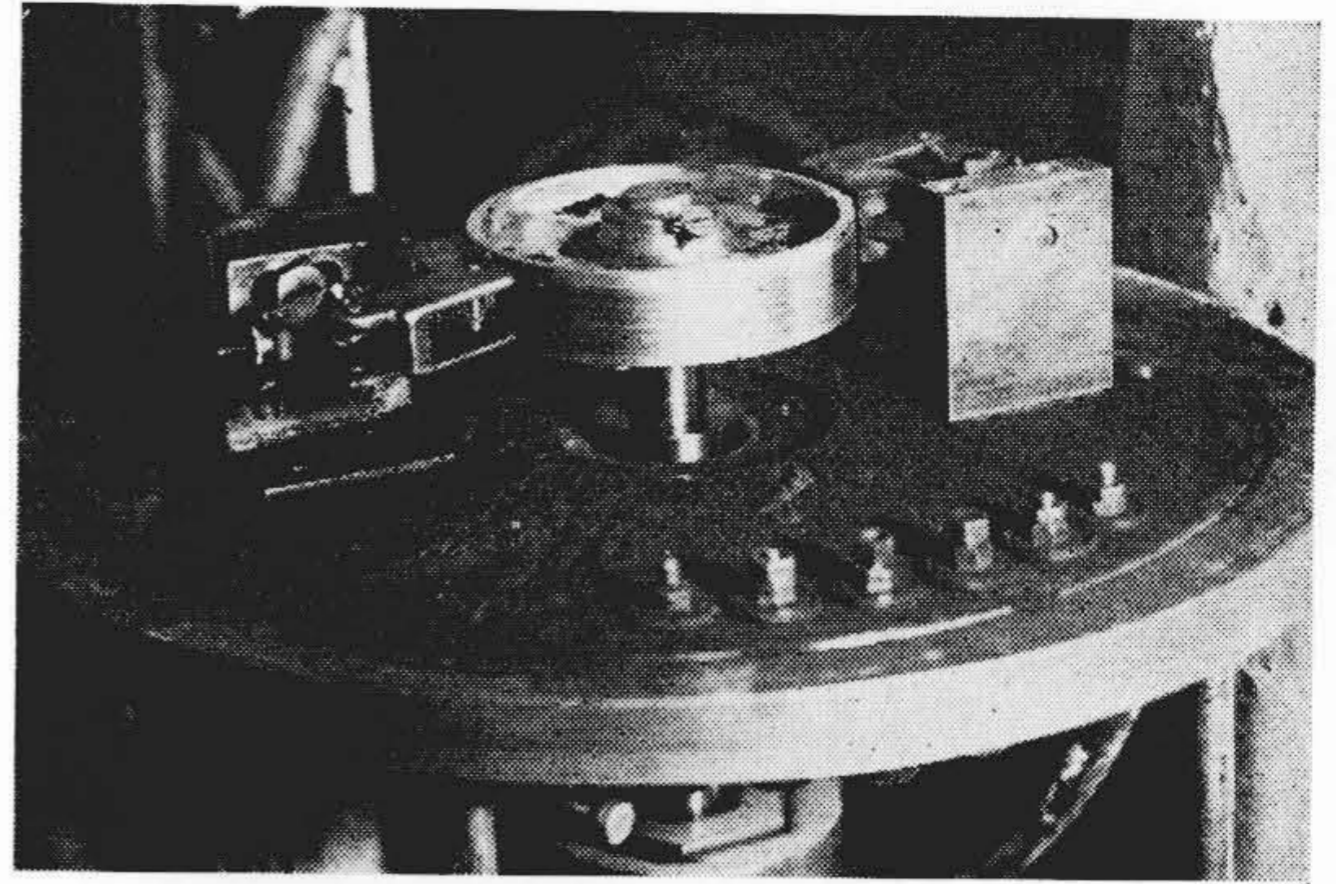
鍛造銅とヒタクローム（クローム入り銅）とでは、ほとんど差がなかつたが、後者の方が若干ブラシの摩耗量が少なかつた。鉄集電環（SF材）の場合にも粉塵摩耗を起さなかつた。SF材は硬度が高いので集電環表面に細かい溝状の条はできず、そのために粉塵摩耗が起らなかつたものと考えられるが、材質の影響も考えられるので今後さらに多くの種類の材質および硬度の異なつたもので実験を行う必要があると思う。

5.7 検 討

以上の実験結果から、水蒸気圧および酸素量特に水蒸気圧が粉塵摩耗の発生に深い関係のあることがわかる。第8図の結果では粉塵摩耗発生の限界水蒸気圧は大体1.5 mmHg ぐらいである。これに対し Savage 氏は3 mmHg が限界水蒸気圧だといつている。同氏は装置内を0.05 μHg の高真空にして実験を行つているが、筆者らの実験では水蒸気圧1 mmHg の場合には気圧は約80 mmHg であつたため水蒸気圧のみでなく、気圧特に酸素の分圧の影響が現われ限界水蒸気圧の値が小さくなつたものと考えられる。

水蒸気圧がある値以上になると粉塵摩耗を起さなくなる理由を Savage 氏は次のように説明している。すなわち、(1) 水膜が集電環表面をおおうため、(2) 炭素結晶のへき開面の端の原子の引力が水の吸着によつて弱められ、炭素結晶が集電環表面にオリエンテーションするためであると説明している。

水蒸気のほかににも存在しない場合には、その圧力が大体3 mmHg 以下になれば粉塵摩耗を起すことは上述のとおりであるが、水蒸気圧が0.15~0.20 mmHg でも酸素ガス圧が300 mmHg 以上あれば粉塵摩耗は起らなかつた。しかるに窒素ガスの場合にはその圧力を760 mmHg にしてもいちじるしい粉塵摩耗を起した。なぜ酸素には粉塵摩耗の発生を防止する性質があり、窒素にはそれがないか明らかでない。しかし次のようなことが考えられる。すなわち、(1) 酸素ガスの場合には集電環表面に酸化皮膜が生成される、(2) 集電環表面に



第11図 低湿度低気圧中で運転したときの粉塵摩耗および集電環の荒損状況

薄い酸素の皮膜ができる、(3) 水蒸気の存在する場合と同様に炭素結晶のへき開面の端の原子の引力が酸素の吸着によつて弱められるため炭素結晶が集電環表面にオリエンテーションする。

Elsay 氏は(1)の説であり、Savage 氏らは(2)の説である。(2)の説でガスの種類によつて粉塵摩耗発生に難易があるのはガスの種類によつて圧縮されやすさがちがうからだとして Savage 氏は説明している。

第11図は鍛造銅集電環にGH-125を用い、10mmHgの空气中で6分間運転した場合の摩耗粉末および集電環の表面状況を示したものである。粉塵摩耗を起す場合には、必ず集電環表面には回転方向に無数の細かい溝状の条ができる。このような面によつてブラシは摺動されるため、粉塵摩耗と称する異常摩耗を起すものと考えられる。集電環にSF材を用いた場合には環の硬度が高いため集電環表面には溝状の条は発生せず、したがつて粉塵摩耗は発生しない。またブラシ押え圧力を下げると粉塵摩耗の程度が軽減する。以上の諸事実より粉塵摩耗発生の直接の原因は集電環表面の荒損にあるものと考えられる。

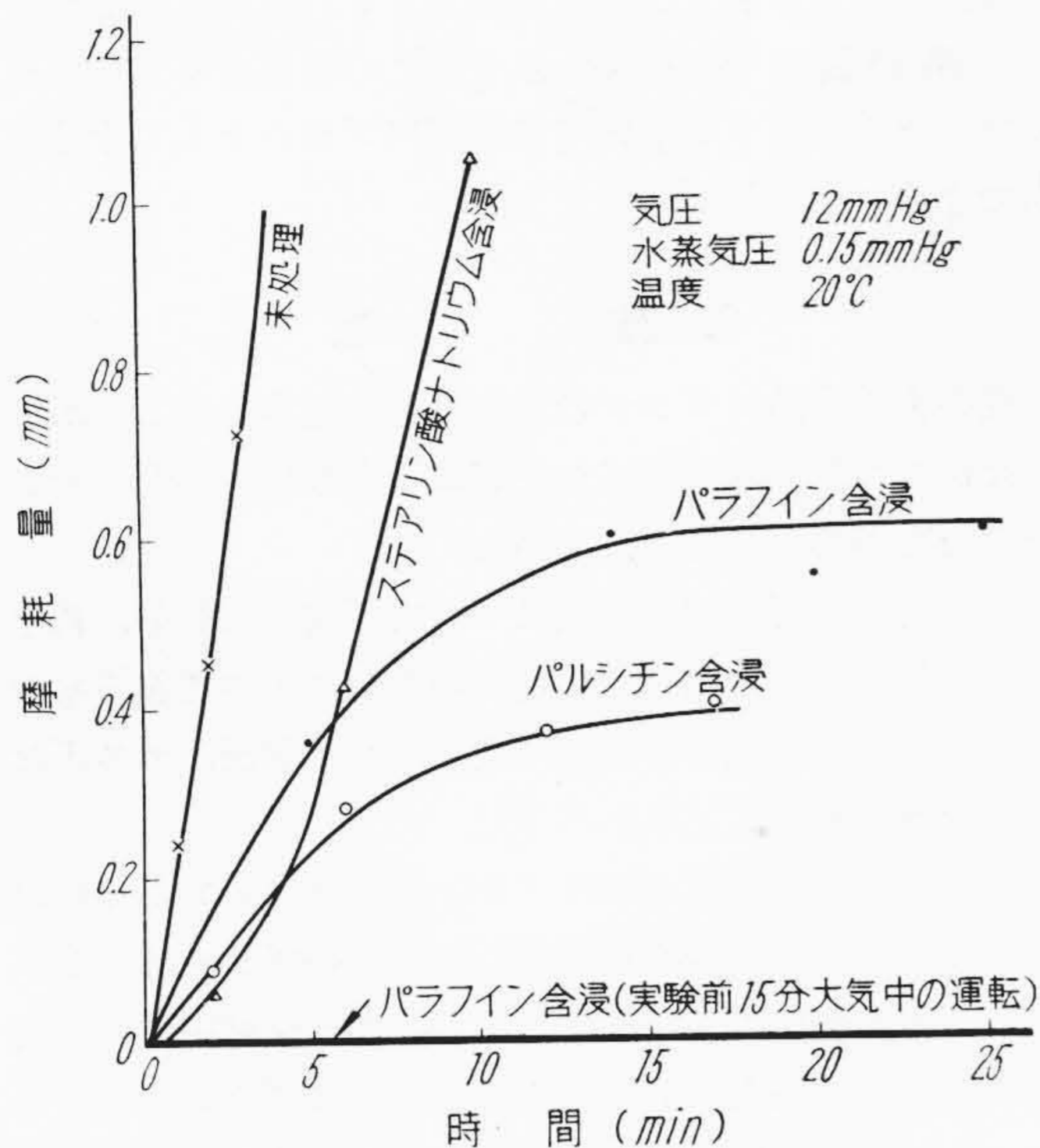
6. 含浸ブラシ

6.1 外国特許による含浸ブラシ

すでに第3節において述べたように、アメリカにおいては金属ハロゲン塩、アルカリ金属をブラシ中に含浸せしめて粉塵摩耗を防止しているようであるが、これらが

第4表 外国特許による含浸ブラシの摩耗試験結果

種 類	条 件	空 気	窒 素 ガ ス
		10~13mmHg (mm/min)	760 mmHg (mm/min)
GH-125	未 含 浸	0.23	0.23
GH-125	沃化カドミウム含浸	0.12	0.11
GH-125	四硼酸ナトリウム含浸	0.17	0.12~0.2
GH-125	ピロリン酸ナトリウム含浸	0.2	0.24



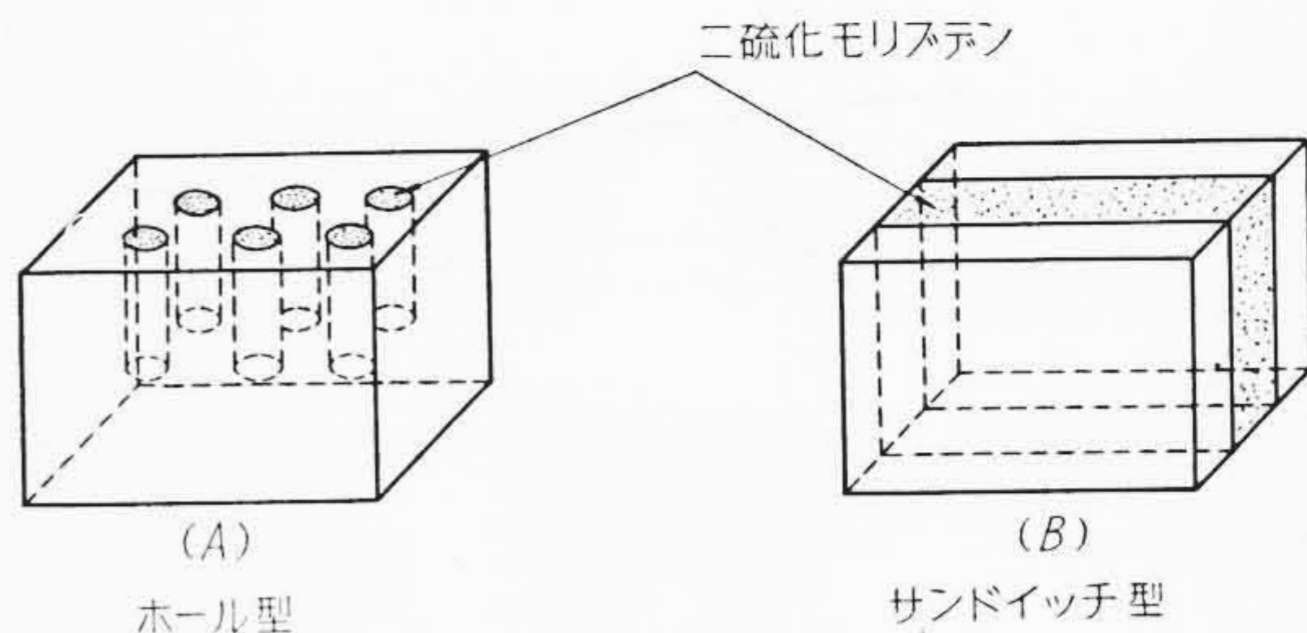
第12図 含浸ブラシの磨耗特性

どの程度粉塵摩耗防止に効果があるかを確かめるため沃化カドミウム、ピロリン酸ナトリウム、四硼酸ナトリウムを
含浸せしめた場合について実験を行つた。その結果を第4表に示す。第4表より明らかなように、どの含浸ブラシも低湿度低気圧中（水蒸気圧 0.15mmHg, 気圧 10~13 mmHg）および 760 mmHg の窒素ガス中（水蒸気圧 0.18 mmHg）では粉塵摩耗を起した。この種の含浸ブラシが本実験の場合のように高々度状態より苛酷な試験条件でも粉塵摩耗を起さないものかどうか、あるいは筆者らの含浸処理の方法が悪かつたために粉塵摩耗が起つたのかどうかは不明である。

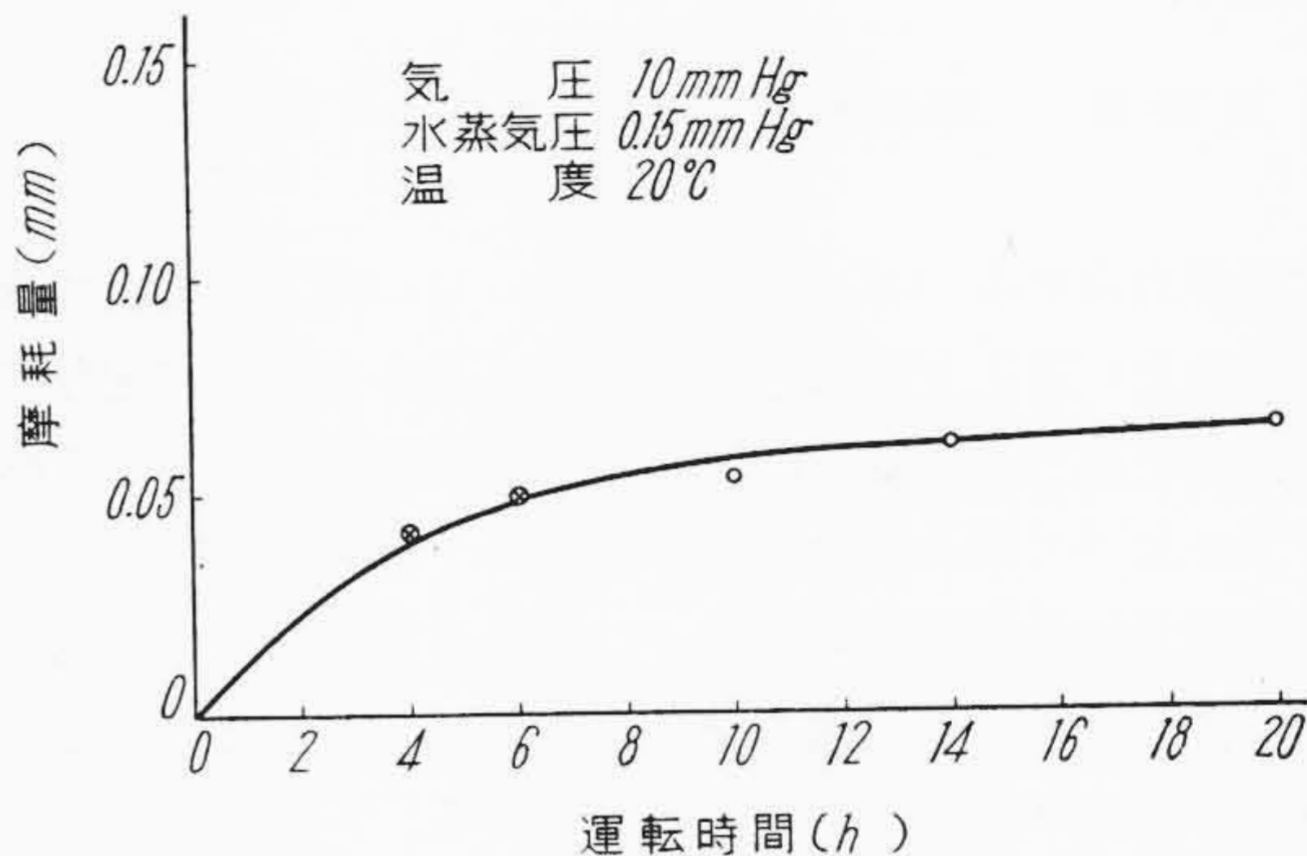
6.2 パラフィンおよび脂肪酸含浸ブラシ

粉塵摩耗を防止に無機物の含浸剤を使用することはほとんど特許となつていたので、筆者らは有機物の中から適当な含浸剤を見出すことにし、まずパラフィン、脂肪酸を含浸してみた。

第12図に含浸ブラシと未含浸ブラシの低気圧、低湿度中における試験結果を示す。図から明らかなように、パラフィン含浸ブラシおよびパルミチン酸含浸ブラシ（特許出願中）は運転の初期には摩耗が多いが、12分ぐらゐ経過すると異常摩耗が起らなくなつた。運転の初期には集電環表面に潤滑皮膜がないため摩耗が多いが、時間が経過するに従つて潤滑皮膜が生成されて摩耗が少なくなるものと考えられる。低気圧、低湿度中で運転する前に大気中で運転して潤滑皮膜をあらかじめ生成せしめておくと上述のような初期摩耗の現象は起らなかつた。



第13図 ホール型およびサンドイッチ型ブラシ



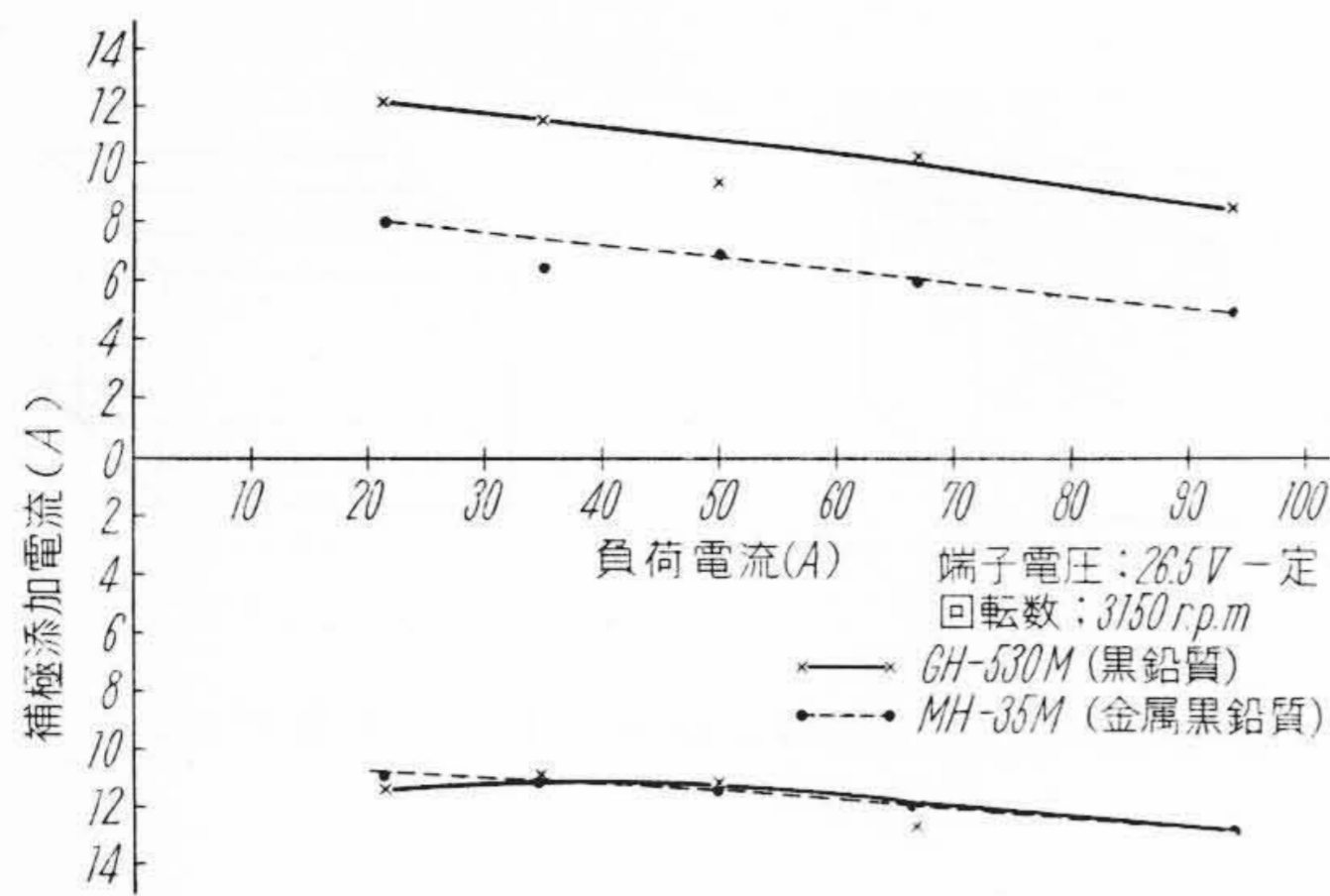
第14図 ホール型ブラシの磨耗曲線

7. 二硫化モリブデンブラシ

パラフィンあるいはパルミチン酸含浸ブラシは粉塵摩耗を起さないことがわかつたが、しかしこれらのブラシも高温になるとやはり粉塵摩耗を起した。有機物質を含浸したものは温度の影響を受けやすいことが容易に考えられるので、高温まで使用できるようにするためには適当な無機物を使用する必要がある。二硫化モリブデン (MoS₂) は真空中でも安定に潤滑し、しかも空気中で 400°C まで潤滑作用を失わない性質をもつているので、これをブラシに使用することにより高々度状態でも粉塵摩耗を防止できるものと考え、二硫化モリブデンのブラシへの適用について研究を行つた。

7.1 二硫化モリブデンの潤滑機構⁽¹²⁾⁽¹³⁾

二硫化モリブデンの潤滑機構については、いまだ決定的な説明はされていないようであるが、二硫化モリブデンの分子構造が相当影響しているようである。二硫化モリブデンは結晶構造が黒鉛と似ていて六方晶系であり、容易にへき開する性質をもつている。しかも金属と硫黄層間の結合とモリブデンと硫黄間の結合は非常に強いが、硫黄原子層同志では結合は非常に弱く、容易にすべるといわれている。また Vangen 氏の説によれば S—Mo—S は内面力ですつかり結合して、へき開するのは S—Mo—S の2つの層間であり、そしてへき開面の硫黄の上には吸着した非晶形の硫黄があるので、表面層は層



第15図 二硫化モリブデン入りブラシの整流特性

状固体自身がもつせん断力より弱いせん断力の皮膜で保護されていることになり、そのため真空中でも安定な潤滑作用をもつ。しかるに、黒鉛の場合は結晶の層間の結合力に比べて結晶表面上の非晶形カーボンと黒鉛結晶との結合力の方が大きいので、この結合力を弱くする水分またはそのほかの圧縮しやすいガスが存在しなければ真空中で粉塵摩耗を生ずるといつている。

7.2 ホール型およびサンドイッチ型ブラシ

(特許出願中)

二硫化モリブデン粉末を適当なバインダーを用いて第13図のように孔の中あるいは二つ割のブラシの間に充填する。これらブラシの低湿度、低気圧中における摩耗特性は第14図のとおりであり、粉塵摩耗は起らないことがわかった。なおこれらブラシの低湿度低気圧中における接触電圧降下は電流密度 6.25 A/cm^2 で $0.5 \sim 0.8 \text{ V}$ であり、素材のそれとほとんど同じであった。

7.3 混合型ブラシ (特許出願中)

上述のホール型およびサンドイッチ型は製作に困難がある。そこでブラシを成型する前の原料にあらかじめ二硫化モリブデン粉末を混合してブラシを作った。このようにして作ったものは炭素ブラシでも、また金属黒鉛ブラシでも低気圧、低湿度中で使用して粉塵摩耗を起すことなく良好な摺動特性を示した。なお電流密度 6.25 A/cm^2 の電流を流して8時間連続運転を行つたが異常がなかつた。また 300°C までの試験を行つたが、粉塵摩耗は起らなかつた。二硫化モリブデン入りブラシの摩耗特性は良好なことがわかったが、整流特性が不明であるので 3 kW 航空機用発電機を用いて二硫化モリブデン

入り黒鉛ブラシおよび金属黒鉛ブラシの整流試験を行つた。第15図にその結果を示す。この結果より二硫化モリブデン入りブラシが航空発電機用ブラシとして十分使用できることがわかった。

8. 結 言

従来実験室的にブラシの粉塵摩耗を起させることができなかったが、本研究においては粉塵摩耗を容易に起させることができるようになった。

まず粉塵摩耗を起す原因について研究した結果、粉塵摩耗を起す直接の原因は集電環の荒損によつて起るものであり、また集電環の荒損の発生は水蒸気圧、ガス圧などに影響されることがわかった。

粉塵摩耗を防止するにはブラシにパラフィンあるいはパルミチン酸を含浸すればよいが、このブラシは温度が高くなると使用できない。しかるにブラシ材中に、二硫化モリブデン粉末を混入するかあるいはブラシに孔をあけ、この中に二硫化モリブデン粉末を充填しておくことと高温まで粉塵摩耗を起すことなく、良好な特性を示すことがわかった。

本研究を行うに当り種々御指導を賜つた日立製作所日立研究所三浦所長、藪野副所長、今尾部長、高橋部長、絶縁物工場鶴田工場長、日立化工株式会社高橋工場長に、また種々御援助を賜つた日立研究所第五研究室高野主任、日立化工株式会社今井課長、佐藤係長および五十嵐、柴田両君に対し厚く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) VDE Fachberichte 11, 1939 (海外論抄 昭 17.7)
- (2) R. Randoff, S. W. Glass: A. I. E. E. Trans. 63 825 (1944)
- (3) Van Brunt & R. H. Savage: G. E. Rev. July, 16 (1944)
- (4) Van Brunt: G. E. Rev. Aug. 28 (1944)
- (5) R. H. Savage: G. E. Rev. Oct. 13 (1945)
- (6) H. M. Elsey: A. I. E. E. Trans. 64, 576 (1945)
- (7) R. F. Sims: P. I. E. E. 100, Part I 183 (1953)
- (8) C. J. Herman: A. I. E. E. Trans. 63, 929 (1944)
- (9) 特許 昭 30-32026
- (10) 特許 昭 26-442
- (11) R. Holm: Wiss Veroff Siemens, 18, 73 (1930)
- (12) H. Peter Jost: Sheet Metal Industries Oct. (1956)
- (13) Y. R. Jonson & G. W. Vanghn: JI of applied phys., 27, 10 (1956)