

カーボンパイルの諸特性

一木利信* 茂木正二**

The Characteristics of Carbon-Piles

By Toshinobu Ichiki and Shoji Mogi
Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

Abstract

Carbon-pile voltage regulators have come to win a major place in the voltage regulation of charging dynamos for air-craft and automobiles, generators for train lighting, etc.

When thin plates of carbon compound are stacked and pressure applied at right angle to their surface, the resistance varies in proportion to the pressure. The carbon-pile voltage regulator makes use of this property of the carbon stack for maintaining the voltage of the generator at a certain value. Accordingly, the performance of this type of regulator depends largely upon the characteristics of the carbon-pile.

As there have been no dependable researches published hitherto as regards the characteristics of carbon-piles, the writers made experimental studies on the intrinsic properties of this material.

In this article the writers mention the results of their study on the quality, thickness, size, number of piled sheets, temperature, etc. of the carbon disk which have influence on the pressure resistance characteristic of the carbon-pile.

〔I〕 緒 言

最近航空機及び自動車の充電用発電機、列車点灯用発電機等の電圧調整にカーボンパイル電圧調整器が盛に使用されるようになった。

カーボンの混合物で造った薄い板を堆積し、これを加圧すると堆積抵抗は加圧力に応じて変化する。この特性を利用して発電機の電圧を一定に保つようにしたものがカーボンパイル電圧調整器である。従つてカーボンパイルの特性はカーボンパイル電圧調整器の特性を決定する重要な一要素である。しかしながら、カーボンパイルの特性に就いての報告は余りないようである。よつて筆者等はカーボンパイルの基本的な諸特性を究明するために研究を行つた。

本報告は圧力—抵抗特性に及ぼすパイル素子の材質、厚み及び大きさ、重ね枚数、温度等の影響を明らかにしたものである。尙実験は便宜上物理特性の明らかな刷子材に就いて行つた。

〔II〕 接 触 抵 抗

一般に如何によく面を研磨しても幾何学的平面にすることは不可能であるから、面接触は点接触の集合と考えられる。面接触に於ける接触点の数及びその面積は両面間に加えられる圧力によつて大いに変化する。接触面積に関してはヘルツの式がある。即ち、突出部が球状をなしているものとし、接触面の半径を a cm, 両面間に加える全圧力を P kg, 両物質の弾性率をそれぞれ E_1, E_2 kg/cm², 両物質の半径をそれぞれ r_1, r_2 cm とすれば、弾性限界内に於ては

* ** 日立製作所日立研究所

$$a^3 = 0.68 P \frac{\alpha}{\beta} \dots\dots\dots(1)$$

但し $\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)$

$$\beta = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

塑性変形の場合には

$$a^2 = 0.68 P \frac{\alpha}{\beta} \dots\dots\dots(2)$$

又両物質の固有抵抗をそれぞれ ρ_1, ρ_2 とし、接触点の数を n とすれば、接触抵抗 R は R. Holm の式より

$$R = \frac{1}{4an} (\rho_1 + \rho_2) \dots\dots\dots(3)$$

従つて、弾性変形に於ては

$$R = K_1 \frac{\rho_1 + \rho_2}{n \left(P \frac{\alpha}{\beta} \right)^{1/3}} \dots\dots\dots(4)$$

但し、 K_1 は常数

又塑性変形に於ては

$$R = K_1 \frac{\rho_1 + \rho_2}{n \left(P \frac{\alpha}{\beta} \right)^{1/2}} \dots\dots\dots(5)$$

カーボンパイルの場合には

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho$$

$$E_1 = E_2 = E = 1/\alpha$$

従つて、(4)式及び(5)式はそれぞれ(6)式及び(7)式の如くなる。

$$R = K_1' \frac{\rho}{n \left(P \frac{1}{\beta E} \right)^{1/3}} \dots\dots\dots(6)$$

$$R = K_1' \frac{\rho}{n \left(P \frac{1}{\beta E} \right)^{1/2}} \dots\dots\dots(7)$$

但し、 $K_1' = 2K_1$

一般に内部抵抗は接触抵抗に比し無視し得られるからパイルの重ね枚数を N とし、圧力が各素子に均一にかかるものとするれば全抵抗 R' は

$$R' = (N-1) R \dots\dots\dots(8)$$

従つて、固有抵抗 ρ 及び弾性率 E が大きく、重ね枚数 N が多い程同一圧力に於ける全抵抗 R' が大きくなる。

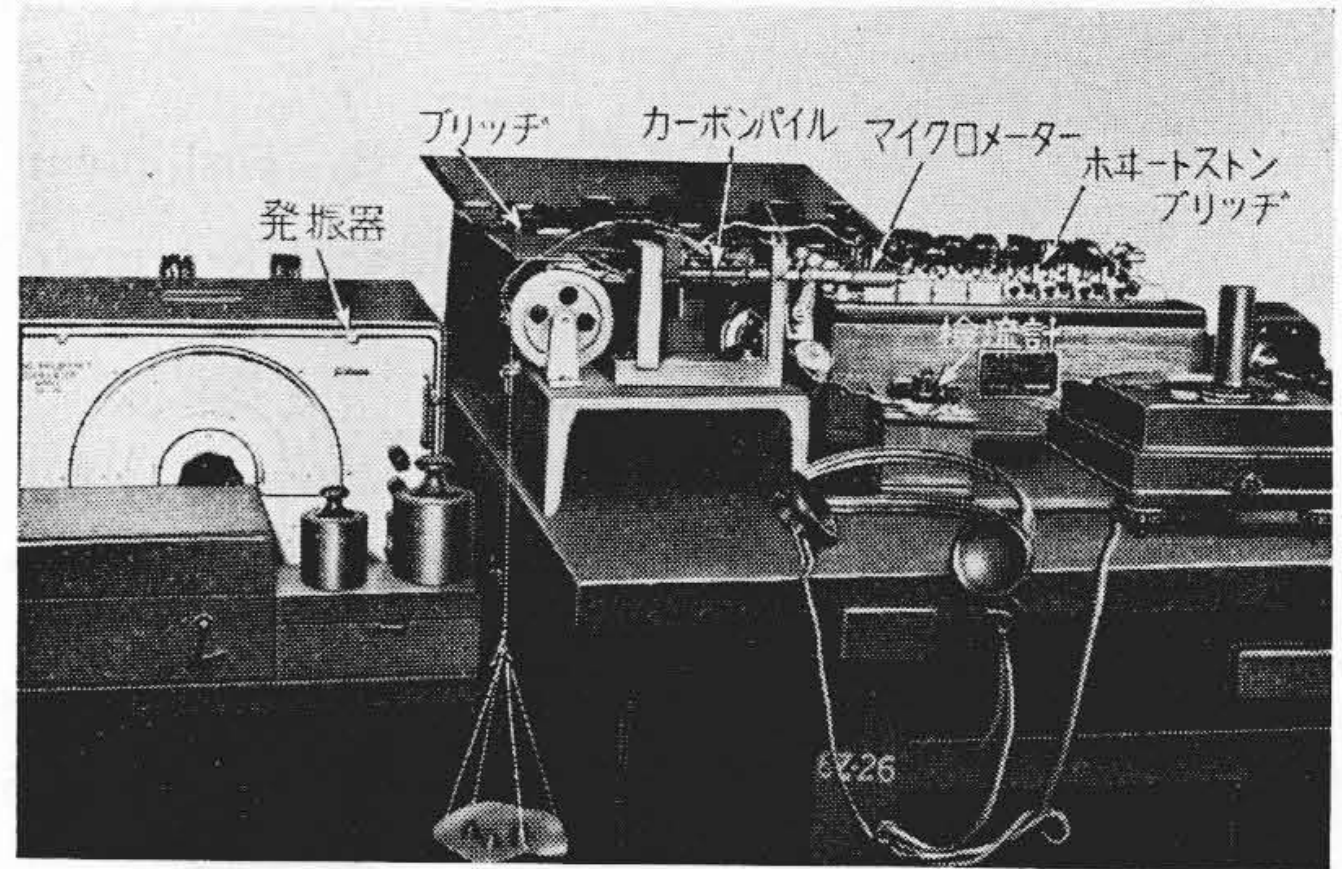
接触点の数 n は全圧力 P が増すに従つて増加することは R. Holm によつて明らかにされている。 n が P^r (r は常数) に比例するものと仮定すれば、(6)式或は(7)式及び(8)式より

$$R' = K_2 (N-1) P^{-m} \dots\dots\dots(10)$$

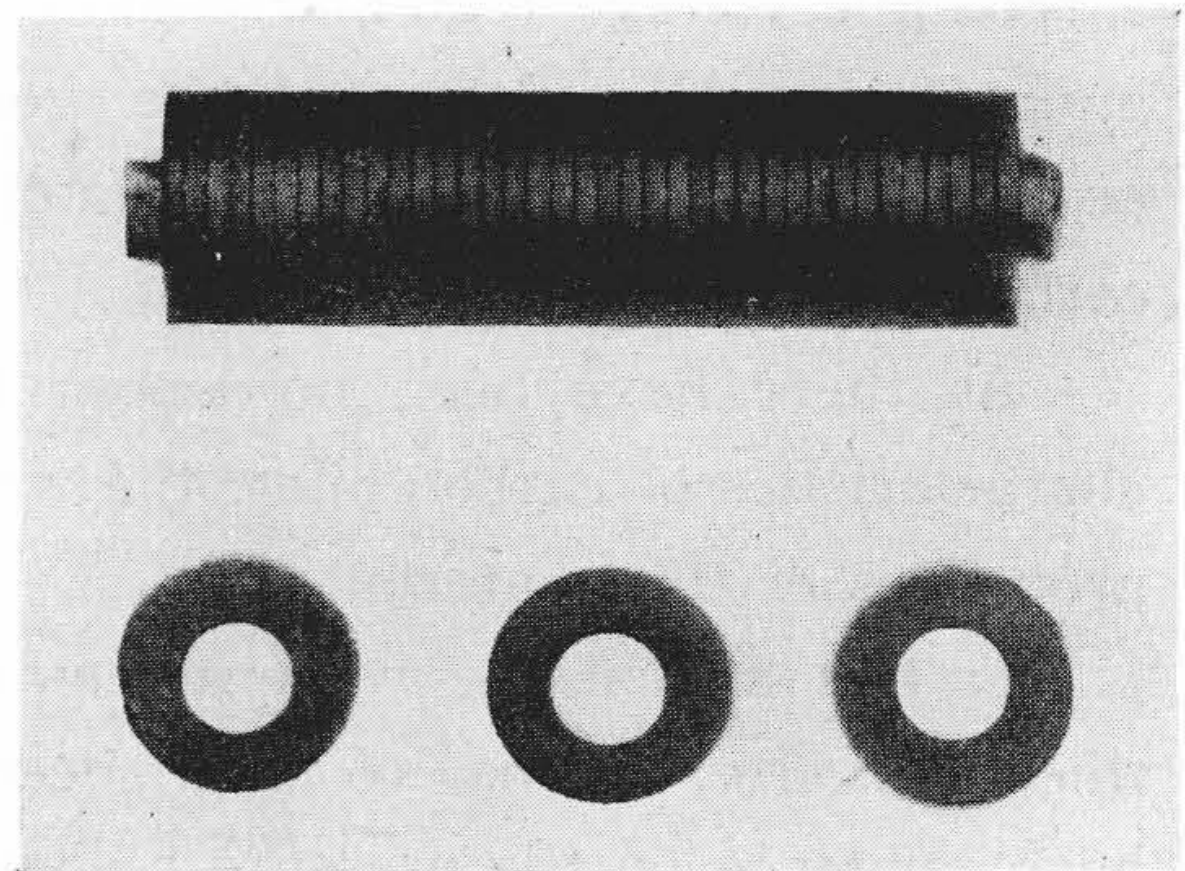
但し、 K_2 及び m は材質の物理特性、接触面の状態等によつて定まる常数とする。

〔III〕 実験方法

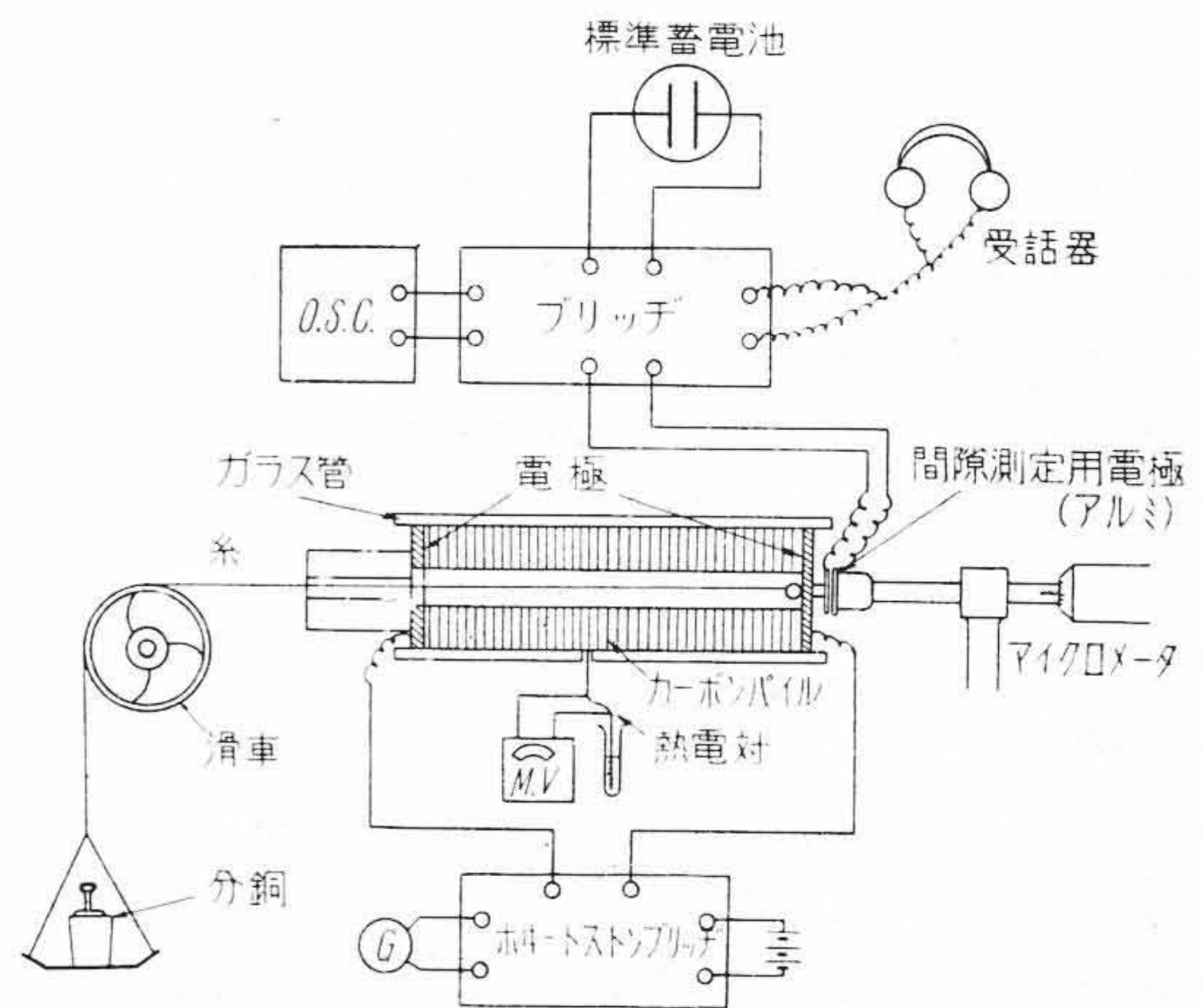
荷重と抵抗及び変位の関係を第1図に示す方法によつて測定した。即ち、ガラス製パイル収容筒を横置し、この中にカーボンパイルを収め、その両端にはパイルと略



第1図 実験装置外観
Fig. 1. Outside View of Testing Apparatus



第2図 カーボンパイル
Fig. 2. Carbon-Pile



第3図 実験装置
Fig. 3. Schematic Diagram of Testing Apparatus

々同径の通電用の銀板電極を置いた。第1図に実験装置の外観を示す。

銀板電極の一方に綿糸を取り付け、これをパイルの中空部(第2図参照)を通しその先に滑車を介してファイバー製の皿を取り付けた。この重量は約10gである。

荷重には化学天秤用の分銅を用い、抵抗の測定はホイートストーンブリッジにより、又変位測定は第3図に示す如く、銀板電極とマイクロメータの先端に取り付けたアルミニウム板電極とよりなる蓄電器を利用してマイクロメータによつて行つた。即ち、最初容量ブリッジによつて平衡を保つて置く。次に荷重によりパイルが変位すれば不平衡となるから、マイクロメータにより受話器音が聞えなくなる点まで間隙測定用電極板を移動すれば、マイクロメータの読みから変位を測定することが出来る。

[IV] 圧力—抵抗特性

(1) 測定値の変動

(A) 配列を変えた場合の影響

パイル素子の配列を任意に変えた場合に抵抗の測定値にどの位のバラツキがあるかを実験した。

直径 20 mm 厚み 1 mm のパイル素子 25 枚を用いて荷重と抵抗の関係を測定した後、パイル収容筒からパイルを取り出し、これをかきまぜ、任意に一枚一枚取り出して重ね再び荷重と抵抗の関係を測定した。順次同様の操作を繰り返し測定した結果は第1表より明らかな如く、パイル素子の配列を変えても荷重の大きいところでは常に一定値が得られるが荷重の小さい場合には測定値に若干のバラツキを生ずる。しかしこの程度のバラツキは荷重の小さいところでは接触が不安定になるために配列を変えない場合でも生ずる。

(B) 面の仕上げ程度の影響

第2表にパイル素子の面の仕上げ程度を変えた場合の荷重と抵抗の関係を示す。即ち第2表に示す程度の仕上げ面の相違では抵抗値に余り影響を及ぼさぬことが判つた。従つて面の状態を可及的に一定に仕上げた試料を使用する場合には面の仕上げ程度の相違を問題にしないでよいことになる。唯実験に際して注意しなければならないことはパイル素子の表面を汚損しないようにすることである。例えばパイル素子の表面に手を触れると抵抗値は著しく大きくなる。

(2) 各種カーボンパイルの圧力—抵抗特性

カーボンパイルの圧力と抵抗との関係は理論的には(10)式で表わされることを明らかにしたが、実験的にこれを確かめるため各種カーボンパイルに就いて荷重と抵抗との関係を測定し、その結果を第4図(次頁参照)に示

第1表 配列を変えた場合の荷重と抵抗との関係
Table 1. Effect of Change of Arrangement of Carbon Disks on Pressure Resistance Characteristic

実験回数 荷重(gr)	抵抗			
	1	2	3	4
10	18.0	19.1	19.3	20.9
20	13.0	12.9	12.3	14.0
30	10.0	9.50	9.30	10.4
40	8.2	8.00	7.70	8.60
60	6.10	6.00	6.00	6.10
110	4.00	3.80	3.80	4.00
210	2.50	2.30	2.45	2.50
310	1.90	1.80	1.80	1.80
510	1.25	1.25	1.25	1.22
710	0.95	0.95	0.95	0.95
1,010	0.75	0.75	0.75	0.75

第2表 面の仕上げ程度を変えた場合の荷重と抵抗との関係

Table 2. Effect of Surface State of Carbon Disks on Pressure Resistance Characteristic

荷重 (gr)	仕上げ程度		
	1/0号砂紙で仕上げた場合、光沢なし	4/0号砂紙で仕上げた場合、光沢あり	板ガラスで研磨した場合、光沢あり
10	14.7	15.6	15.9
20	10.1	10.4	9.9
30	6.90	7.4	7.3
40	5.50	6.4	5.9
60	4.00	4.4	4.3
110	2.50	2.9	2.5
210	1.60	1.7	1.65
510	0.83	0.85	0.82
710	0.65	0.65	0.62
1,010	0.52	0.52	0.52

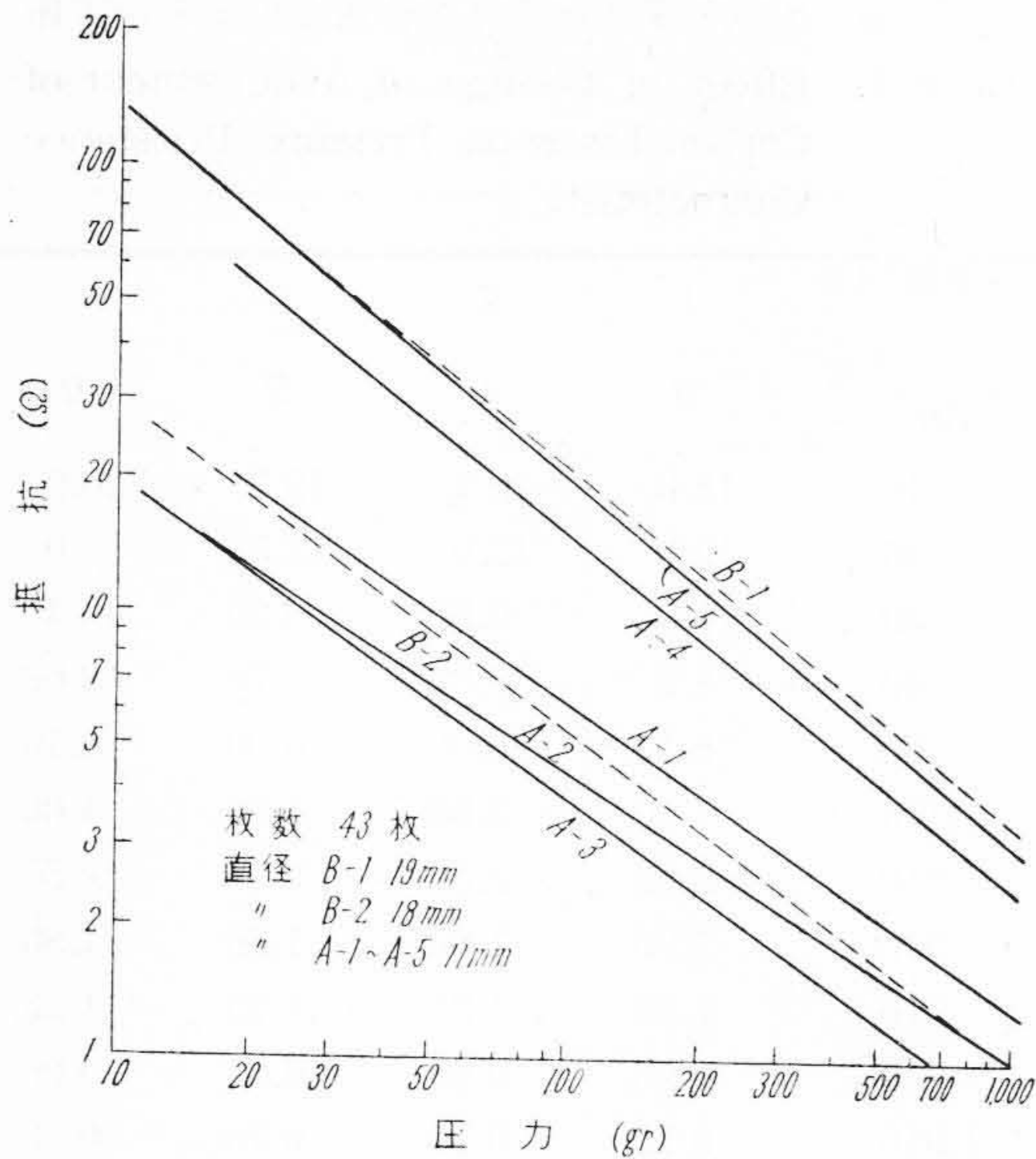
した。図で明らかな如く、荷重と抵抗との関係を対数グラフで表わすと両者の関係は直線になる。従つて(11)式が成立する。

$$R' = kP^{-m} \dots\dots\dots(11)$$

但し、 k は常数

即ち、実験式(11)は理論式(10)と一致する。

一般に圧力と抵抗との関係は第5図(次頁参照)の如く、加圧する場合と減圧する場合とでは圧力—抵抗曲線は一致せずヒステリシスを生ずる。この場合に振動を与えるとヒステリシスは僅少となる。



第 4 図 各種カーボンパイルの圧力—抵抗曲線

Fig. 4. Pressure Resistance Curves

(3) 圧力—抵抗特性に及ぼすパイル素子の直径並びに厚さの影響

(A) 直径の影響

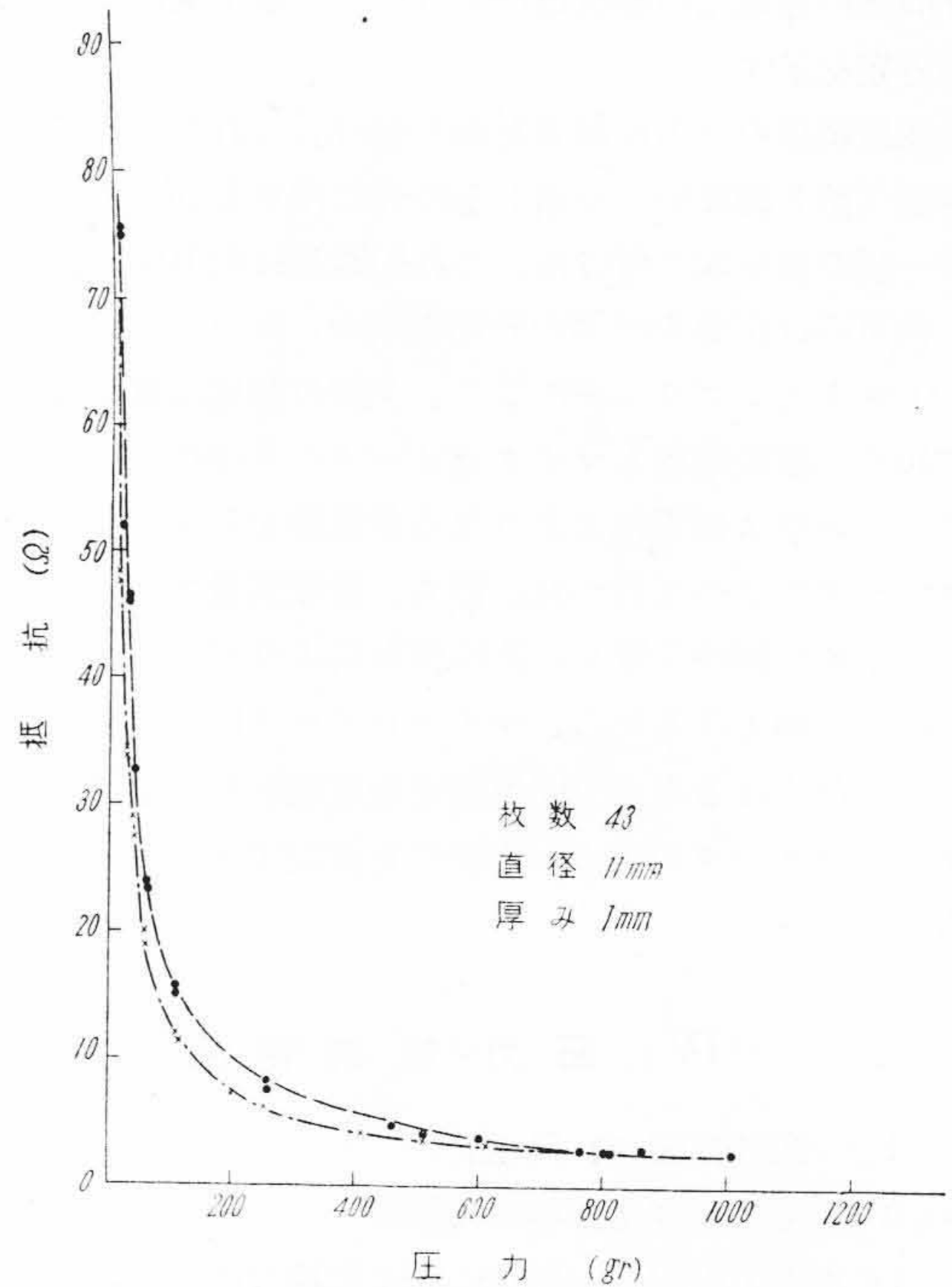
刷子材より直径 10 mm, 20 mm, 30 mm のパイルを作り、実験を行つた。第 6 図は測定結果を示したものである。パイル材質を種々変えた場合にも同様の結果が得られた。

若し 3 点接触の理論が成立するものとするれば、抵抗はパイル素子の直径には無関係に一定となる筈であるが、実際には直径の大きい程抵抗は小さい。従つてこの場合には 3 点接触の理論は成立せず、見掛けの接触面積が大きい程接触点の数は増し、有効接触面積が増大するものと考えられる。パイル直径が 10 mm の場合には荷重と抵抗の関係は完全に直線となつたが、直径が大きくなるに従つて荷重の小さいところで測定値は直線から離れた。(第 6 図参照) これはパイル素子の直径が大きい程パイル素子と容器との摩擦力が大きくなるためではないかと考えられる。

次に第 6 図から m の値を求めるとパイル素子の直径には無関係に $m=0.72$ であつた。これより m の値、即ち圧力変化に対する抵抗の変化の程度はパイル素子の直径には殆ど無関係に一定であることがわかる。しかしパイル素子が非常に薄い場合には直径も影響するように思われる。これについては次に述べる。

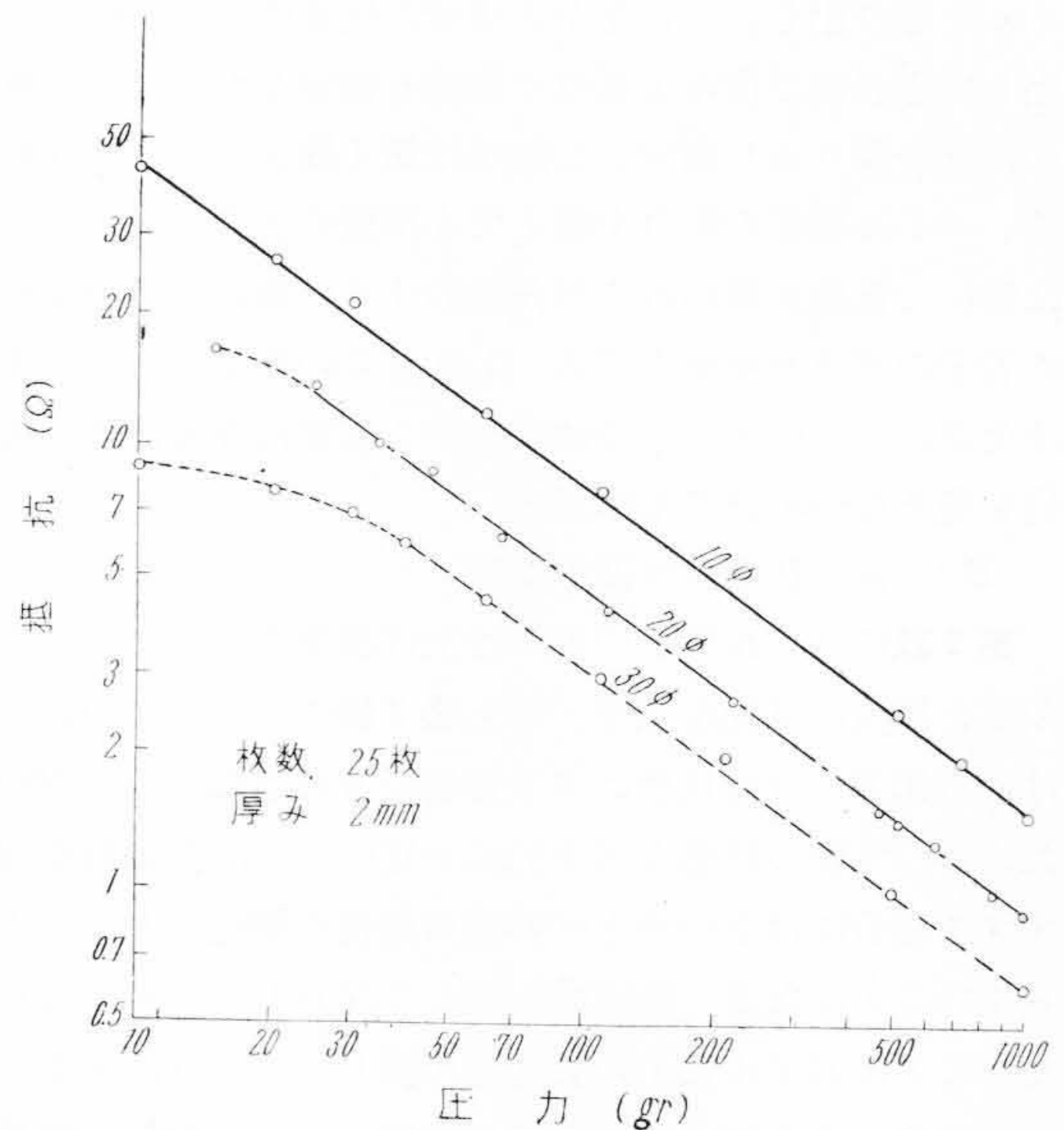
(B) 厚みの影響

先づ最初に試料の厚みを 2 mm とし、順次これを砂紙



第 5 図 圧力—抵抗曲線

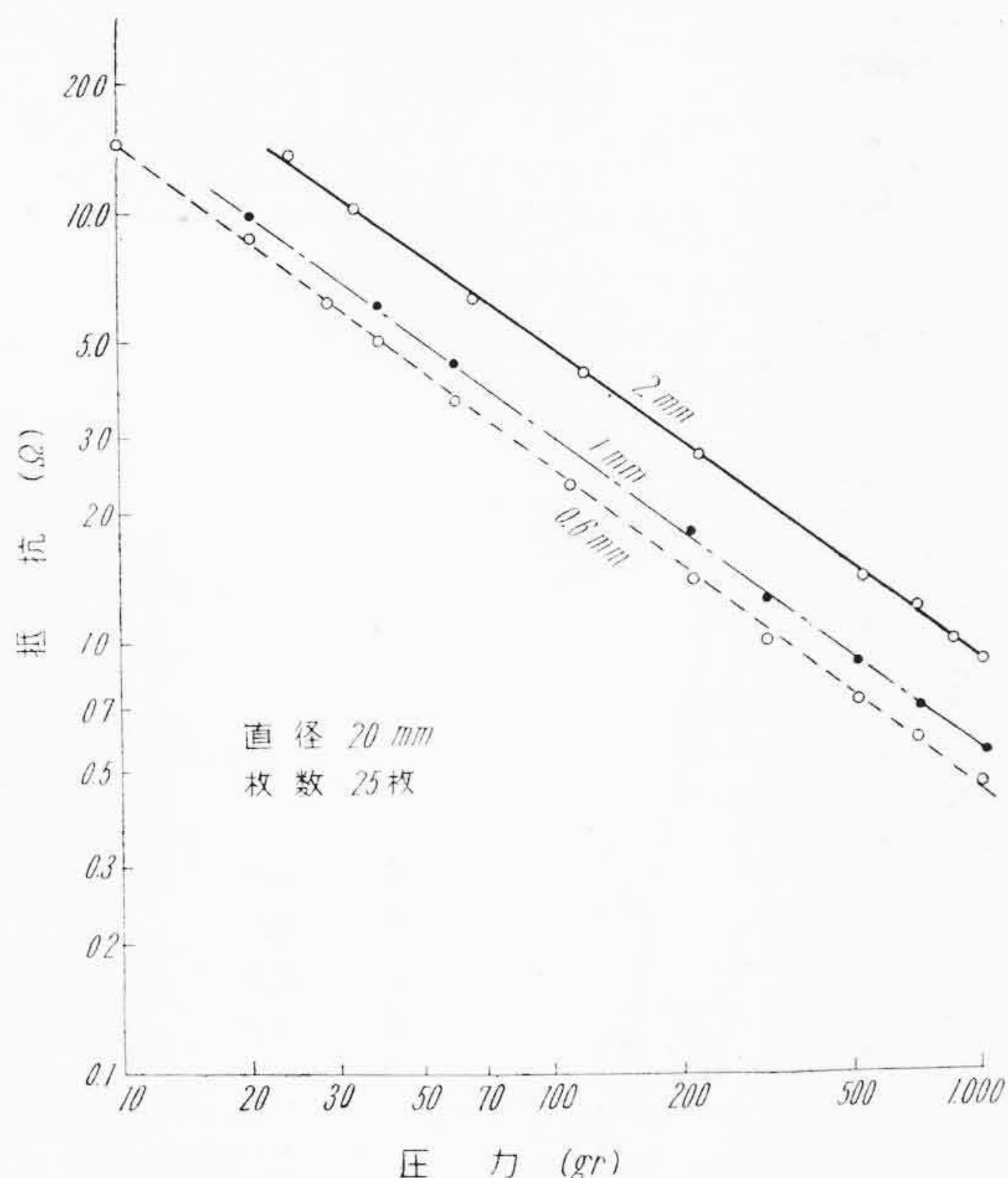
Fig. 5. Pressure Resistance Curves



第 6 図 圧力—抵抗特性に及ぼすパイル素子の直径の影響

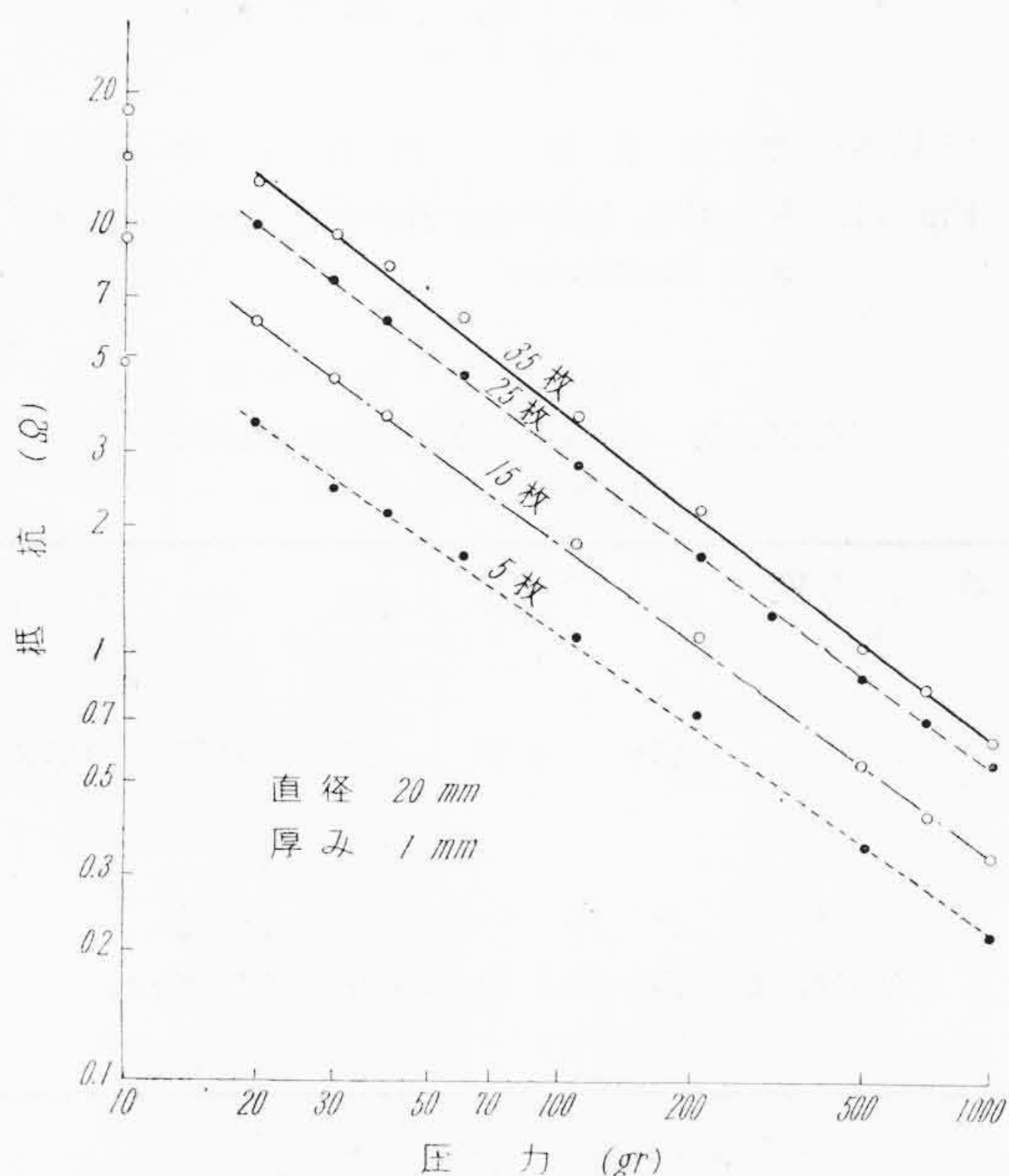
Fig. 6. Effect of the Dia. of Carbon Disks on Pressure Resistance Curves

で摺り、薄くして実験を行つた。第 7 図は直径 20 mm のパイルを用いた場合の測定結果を示すもので、パイル



第7図 パイル素子の厚みを変えた場合の圧力—抵抗曲線

Fig. 7. Effect of Thickness of Carbon Disks on Pressure Resistance Curves



第8図 圧力—抵抗特性に及ぼす堆積枚数の影響

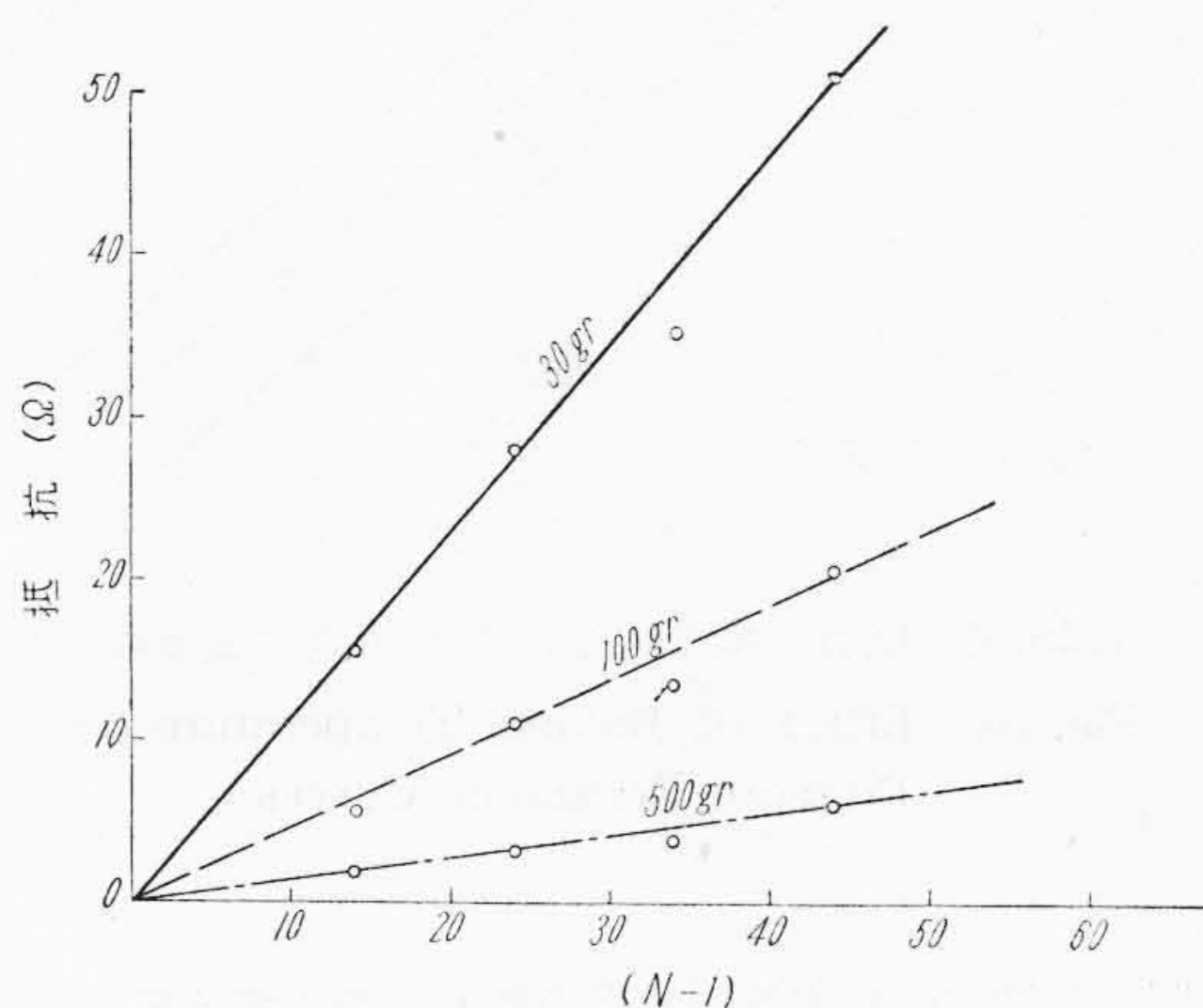
Fig. 8. Effect of Number of Carbon Disks on Pressure Resistance Curves

素子が薄い程同一圧力に対する抵抗は小さい。これはパイル素子が薄い程(6)式或いは(7)式の n の値が大きく、従つて有効接触面積が大きいことを示すものである。

第3表 パイル素子の厚みと m との関係

Table 3. Relation between m and Thickness of Carbon Disk

直径 (mm)	10	20	30
厚み (mm)			
2	0.72	0.72	0.72
1.5	0.72	—	0.75
1.0	0.72	0.75	—
0.6	—	0.87	—



第9図 パイル枚数 N と抵抗との関係

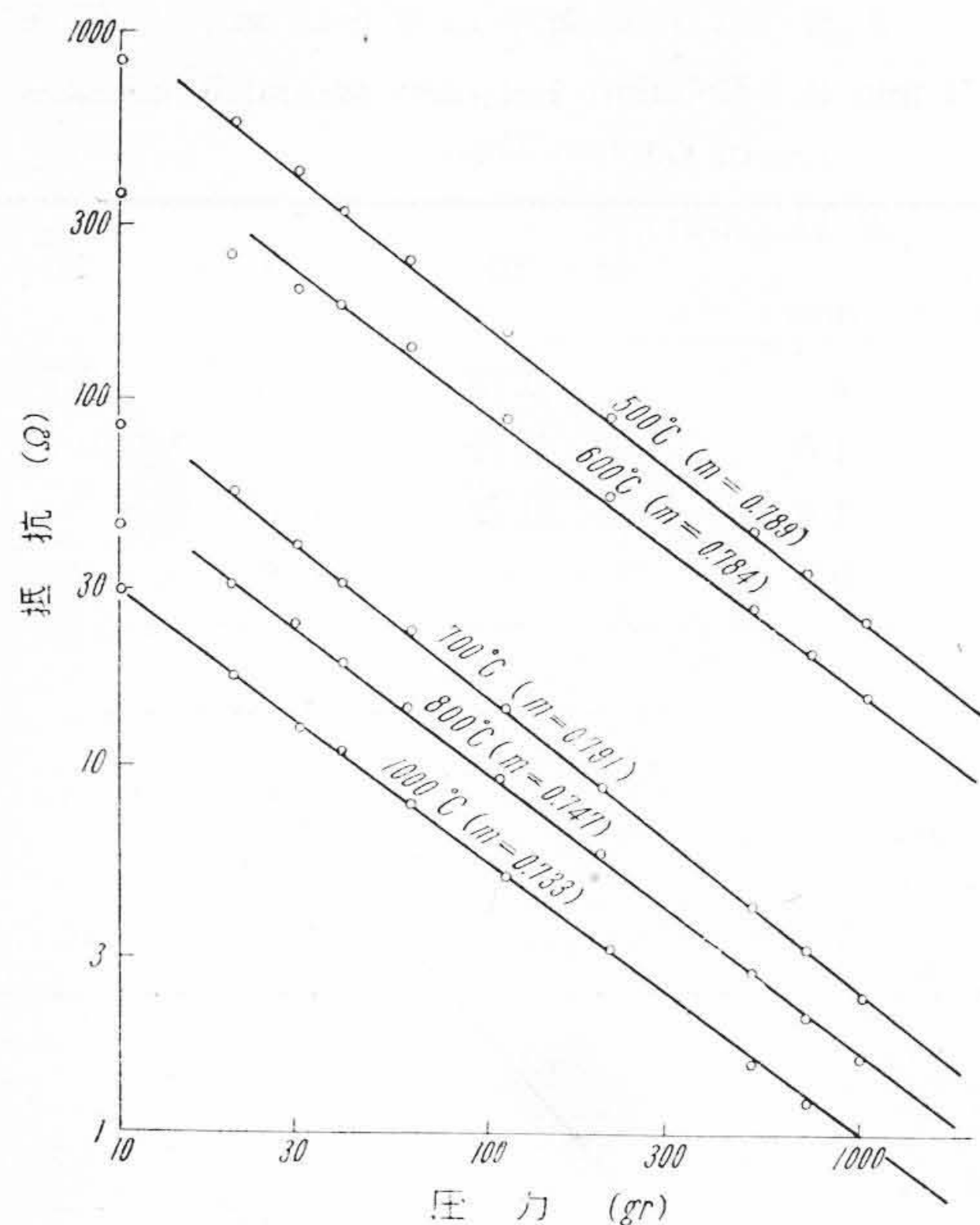
Fig. 9. Relation between Resistance and Number N of Disks

第4表 重ね枚数と m との関係

Table 4. Relation between Number of Disks and m

直径 (mm)	10	18	20	30
枚数				
44	—	0.79	—	—
35	0.72	0.79	0.76	0.72
25	0.72	0.79	0.75	0.72
15	0.71	0.79	0.74	0.72
5	0.69	—	0.72	—

次に圧力変化に対する抵抗変化の程度即ち(11)式の m の値がパイル素子の厚みによつて異なるか否かを検討してみよう。第3表はパイル素子の厚みと m との関係を示すもので直径 10mm のものでは厚みに無関係に m の値は一定であるが、直径 20mm の場合にはパイル素子が薄い程 m の値が大きい。これはパイル素子の直径が大きく且つそれが薄い場合には変形し易いため



第 10 図 圧力—抵抗特性に及ぼす焼成温度の影響
Fig. 10. Effect of Baking Temperature on Pressure Resistance Curves

に圧力の増加に対する接触点の数 n の増加する場合がパイル素子の厚い場合に比して大きいために m の値が大きくなるものと考えられる。

(4) 圧力—抵抗特性に及ぼす
パイル重ね枚数の影響

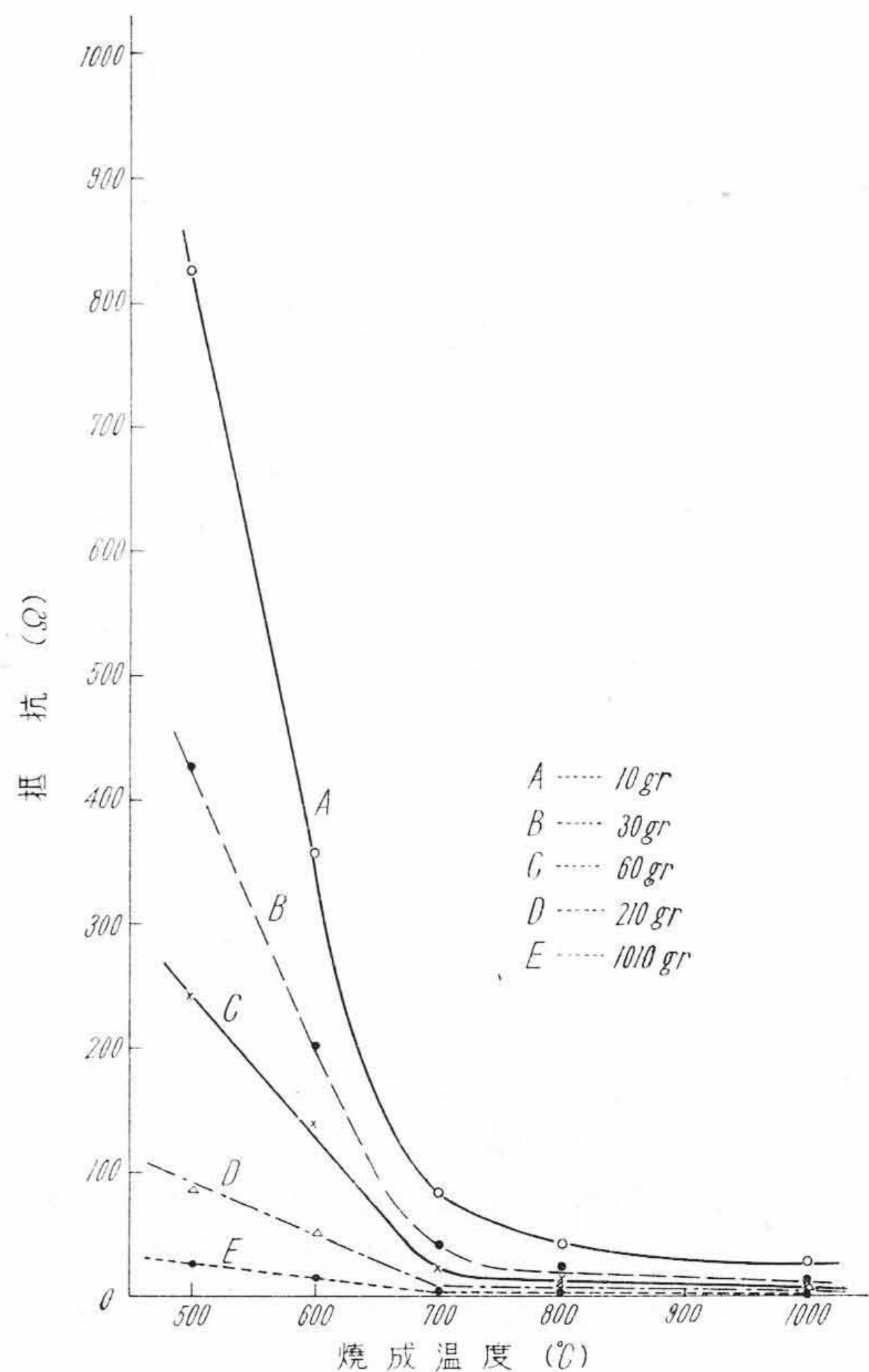
パイル重ね枚数を変えた場合 (11) 式の m の値が変化するか否か、又重ね枚数と抵抗との関係が (10) 式の如くなるか否かを明らかにするため、圧力—抵抗特性に及ぼす重ね枚数の影響について実験を行った。第 8 図 (前頁参照) に測定結果の一例を示す。

重ね枚数を N とした場合、 $(N-1)$ と抵抗との関係を図示すれば第 9 図 (前頁参照) の如くなり、両者の間には直線的関係が成立する。即ち重ね枚数と抵抗の関係を示す (10) 式の理論式は実験的にも正しいことがわかる。

次に重ね枚数と m の関係を求めると第 4 表 (前頁参照) の如く、重ね枚数によつては m の値は余り変化しないことがわかる。

(5) 圧力—抵抗特性に及ぼす焼成温度の影響

未焼成のカーボンパイルを最初 500°C で焼成を行い、この荷重と抵抗の関係を測定し、次にこれを 600°C で焼成し、再び抵抗を測定した。順次これを繰り返して 1,000°C 迄焼成を行った。第 10 図に焼成温度をパラメーターとした場合の荷重と抵抗との関係を、又第 11 図に焼成温度と抵抗との関係を示す。第 11 図より明らかな如く



第 11 図 焼成温度と抵抗との関係
Fig. 11. Relation between Baking Temperature and Resistance

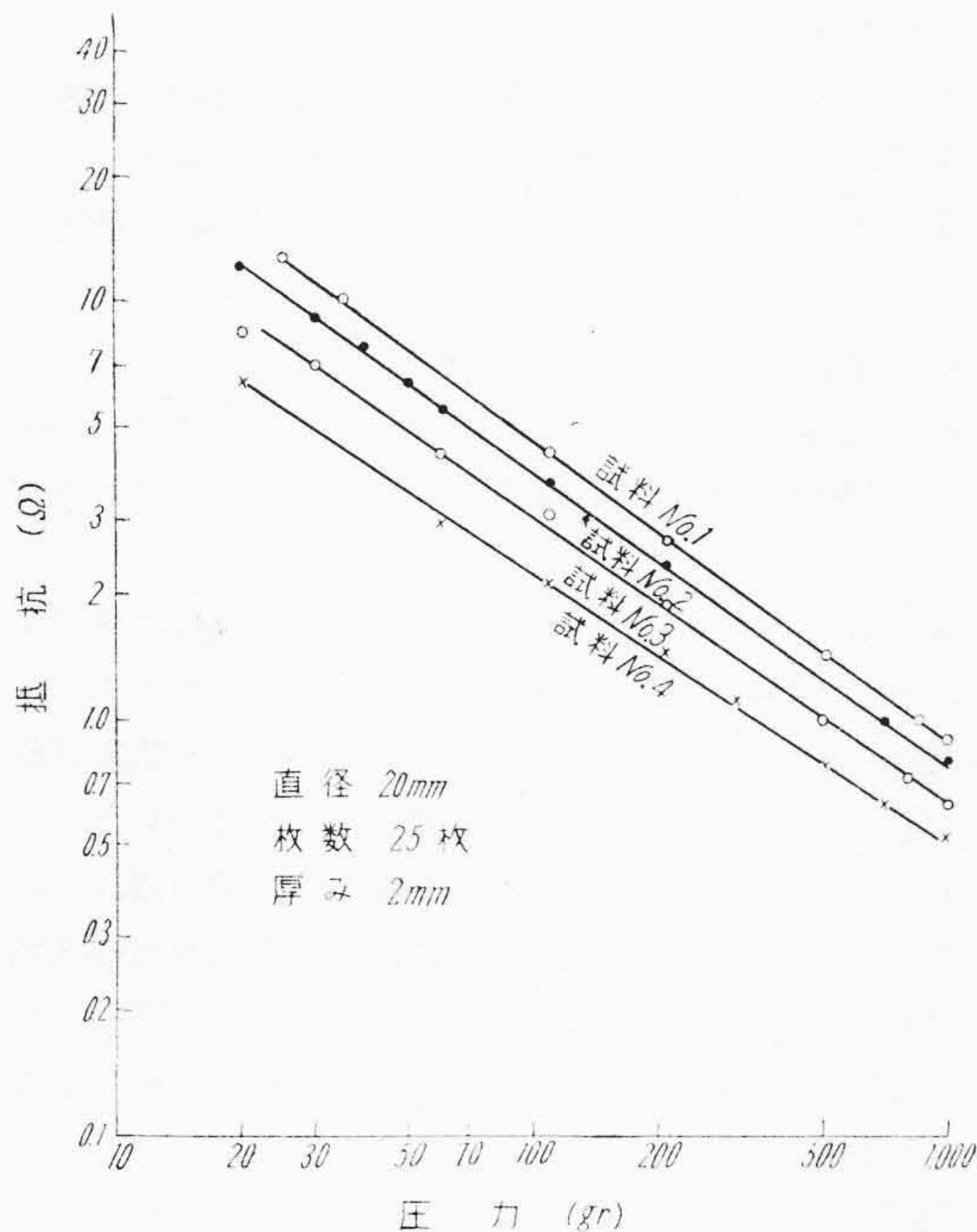
第 5 表 焼成温度と m との関係
Table 5. Relation between Baking Temperature and m

焼成温度 (°C)	500	600	700	800	1,000
m	0.79	0.78	0.77	0.75	0.73

第 6 表 試料の物理特性
Table 6. Physical Properties of Carbon Samples

試料番号	見掛比重	固有抵抗 (Ω-cm)	弾性率 (kg/mm ²)	真比重
試料 No. 1	1.54	0.0060	516	1.98
試料 No. 2	1.58	0.0040	810	2.00
試料 No. 3	1.64	0.0023	580	2.11
試料 No. 4	1.70	0.0016	618	2.13

500°C より 700°C の間では抵抗は急激に減少するが、これ以上の温度では抵抗の減少は僅少である。従つて



第12図 材質を異にするカーボンパイルの圧力-抵抗曲線

Fig. 12. Pressure Resistance Curve of Various Carbon Disk Grades

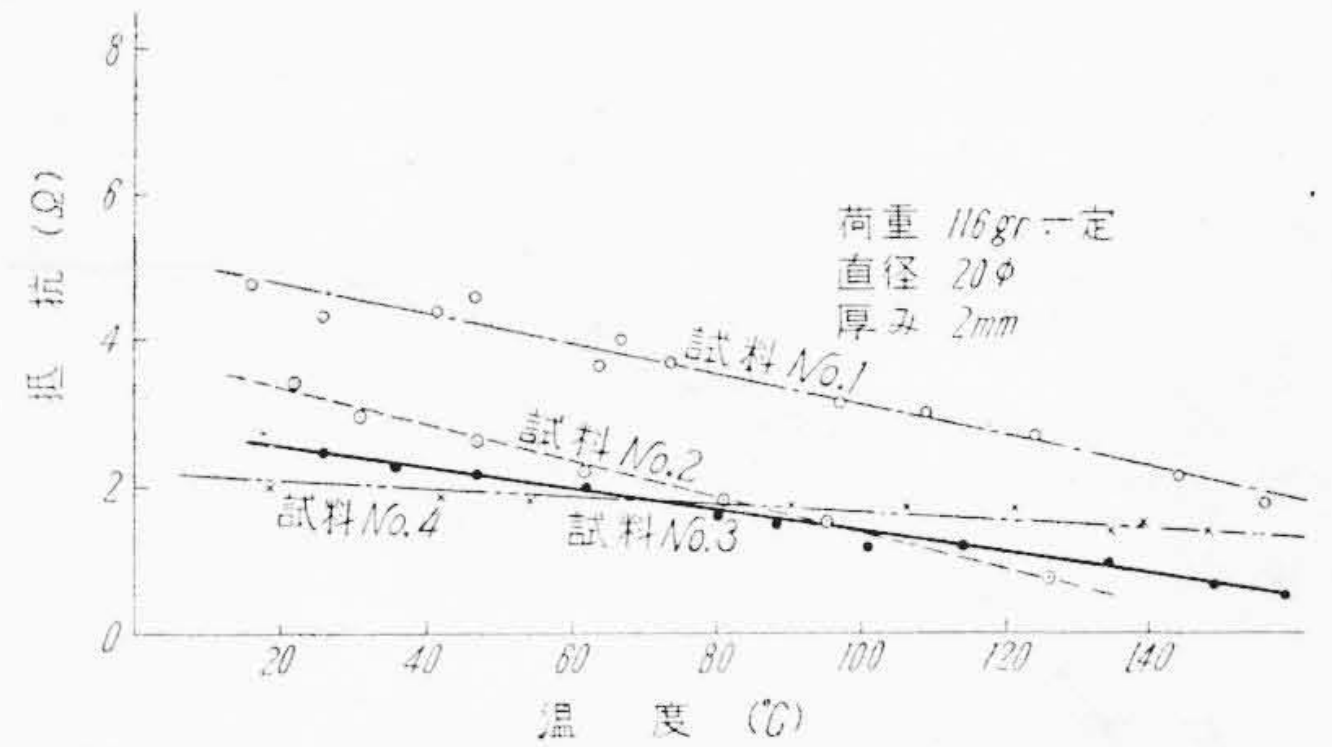
第7表 材質と m との関係
Table 7. m of Various Carbon Disk Grades

材質 直径(mm)	試料 No. 1	試料 No. 2	試料 No. 3	試料 No. 4
20	0.72	0.71	0.68	0.65
10	0.72	0.71	0.64	—

700°C以下で焼成する場合には焼成温度の変動を少なくしなければ抵抗値の一定なものを得られない。次に第10図から m の値を求めると第5表の如く、焼成温度の低い程 m の値が大きい。即ち焼成温度の低い程圧力変化に対する抵抗の変化が大きい。

(6) 圧力-抵抗特性に及ぼす材質の影響

第6表の如き物理特性を有する刷子材から作ったカーボンパイルについて荷重と抵抗との関係を測定した。第12図に測定結果の一例を示す。(6)式或いは(7)式によると固有抵抗の小さいもの程接触抵抗は小さくなるが、実験からも同様の結果が得られる。測定結果から m の値を求めると第7表の如くなる。これより真比重の大きいもの即ち黒鉛化の進んだもの程 m の値が小さいことがわかる。先に焼成温度の高いもの程 m の値が小さく



第13図 温度と抵抗との関係
Fig. 13. Relation between Temperature and Resistance

第8表 各種材質による α
Table 8. Temperature Coeff. α of Piles

材質	試料 No. 1	試料 No. 2	試料 No. 3
α	-4.9×10^{-3}	-9.3×10^{-3}	-6.6×10^{-3}
材質	試料 No. 4	試料 No. 5	試料 No. 6
α	-2.6×10^{-3}	-1.25×10^{-3}	-2.4×10^{-3}

なることを明らかにしたが、焼成温度が高い程黒鉛化は進むから m の値が小さくなるものと考えられる。

[V] 抵抗に及ぼす温度の影響

カーボンパイル收容筒を環状に巻いてニクロム電熱線の中に挿入して温度と抵抗との関係を測定した。第13図は刷子材で作ったカーボンパイルの温度と抵抗との関係を示すもので 20~140°C の範囲では温度と抵抗との関係は直線になることがわかる。即ち両者の関係は次式で表わされる。

$$R' = R_0' (1 + \alpha t)$$

但し、 R' 及び R_0' はそれぞれ t_1 及び t_0 °C に於ける抵抗

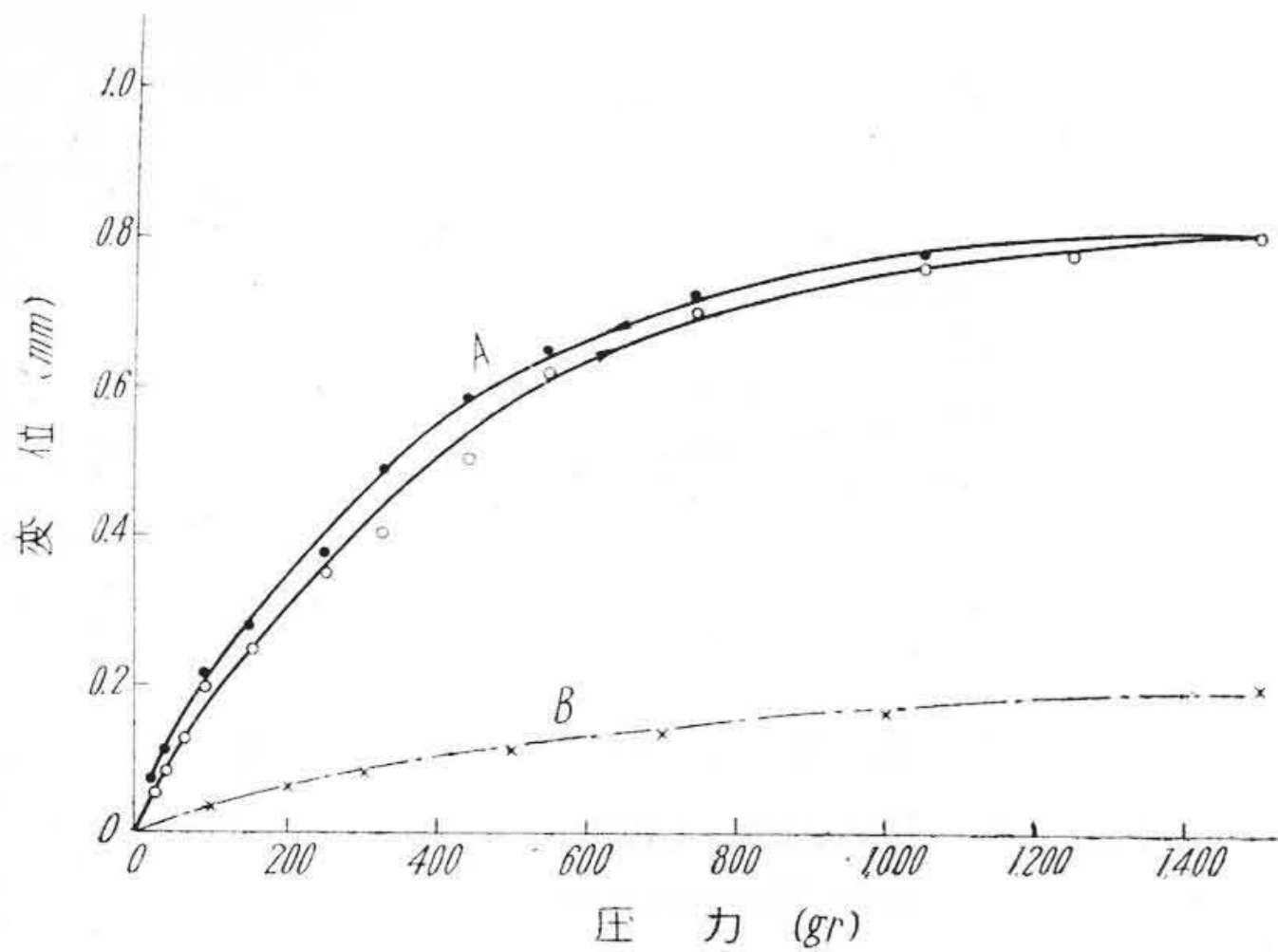
$$t = t_0 - t_1$$

$$\alpha = \text{常数}$$

測定結果から α を求めると第8表の如くなる。

[VI] 荷重と変位の関係

カーボンパイル式自動電圧調整器の設計に於て圧力によるパイルの変位は重要な要素である。第14図から明らかな如く、Aの変位は大きい、これに反してBは変位が非常に少い。Aの変位が大きいのはパイル素子のソリが大きいためである。これに反してBの変位が少いのはパイル素子にソリがなく表面が平なためである。



第 14 図 圧 力 - 変 位 曲 線

Fig. 14. Pressure Displacement Curves

(註) Aは第8表 No. 6, Bは第4表直径 18 mm のものである。

[VII] 結 言

以上を要約すれば次の如くである。

1. 圧力と抵抗との関係は R. Holm の理論式と定性的に一致する。
2. パイル素子の直径が大きい程抵抗は小さいが、 m の値は変らない。
3. 厚みが薄い程抵抗は小さいが、 m の値は余り変らない。しかしパイル素子が非常に薄い場合には m

の値は若干大きくなる。

4. パイルの重ね枚数と抵抗との関係は直線となる。
5. m の値は重ね枚数には無関係に一定である。
6. 焼成温度が高い程抵抗は小さく、又 m の値も小さい。
7. 黒鉛化の進んだもの程 m の値は小さい。
8. 温度が上昇するに従つて抵抗は減少する。20~140°C の範囲では温度と抵抗との関係は大體直線になる。

カーボンパイルをカーボンパイル電圧調整器に使用するに当つて特に留意せねばならぬことはその圧力-抵抗特性、圧力-変位特性、温度-抵抗特性等が電圧調整器の設計上の要求を十分満すものでなければならない。

若しもカーボンパイルの特性が電圧調整器の設計上の要求を満さぬものであつた場合には、電圧調整器の諸特性は著しく悪くなるのみならず、乱調を起す一原因となる。従つて製作者の指定したカーボンパイルを使用することが絶対に必要である。

尙現在日立製作所に於て製作しているカーボンパイル電圧調整器に使用しているカーボンパイルは特別の製法によつて製造されたもので、本論文の実験に供した刷子材とは特性の異なるものであることを附言しておく。

本研究を行うに当り御指導を賜つた副所長三浦博士、今尾主任研究員に厚く感謝の意を表す。



最近登録された日立製作所の特許及び実用新案

(その 4)

(第68頁より続く)

区 別	登録番号	名 称	所 属	氏 名	登録年月日
実用新案	403504	電動油圧押上機の押上速度調節装置	亀戸工場	橋本勲 一 細谷栄次郎	28. 6. 15
"	403464	継電器作動復旧時間測定装置	戸塚工場	高木寿夫	"
"	403481	磁性材料撰別装置	戸場工場	内藤大三	"
実用新案	403441	電子顕微鏡用磁気レンズ	中央研究所	木村博一	28. 6. 15