

整流子片用マイカ板の圧縮特性に関する二・三の考察

Compressibility of Commutator-Segment Mica Plates

田 嶋 基 文*
Motofumi Tajima

内 容 梗 概

整流子製作技術の進歩につれて、片間絶縁用マイカプレートには、よく管理された製造技術によって得られる均一性と設計、製作上必要となる熱、応力挙動に対する立体的な圧縮弾性特性の解析が各方面から要求されるようになった。従来、整流子片用マイカ板の圧縮特性の究明に対しては、その必要性を感じながらも試験装置の精度的な不備、あるいは構成される銅その他の金属部分とあまりにも異なった複雑な特性をもつため、簡単な実験や推測による面が多かったが、日立化成では最近、マイカ製品の圧縮試験機に改善を加え、所期の目的とする特性が得られるようになった。本稿はこの試験装置によって行なった原料はがしマイカと整流子片用軟質マイカ板の二・三の基礎実験から、材料および製品のもつヤング率の究明、製品の熱圧使用限界、あるいはシーズニング性などについて検討を加えたもので、従来未検討であった弾性面に対する種々の知見を得た。

1. 緒 言

整流子を製作するのに必要なことはまず寸法が設計値に仕上がることであり、また寸法が設計値と一致しても熱処理が不完全であると長期または高温高速運転において high-Bar, high-Mica, または偏心などの寿命的欠陥⁽¹⁾を生ずるため、片間マイカ板の諸圧縮特性を把握することも重要である。日立化成では過去数年間この整流子片間マイカ板の諸圧縮特性を検討し、整流子の構造材料としての必要特性、熱圧使用限界あるいは、理想的なシーズニングの条件などを考察し、製品の開発、改善に応用するとともに、使用者の設計、製作上の資料に供してきた。頭初は試験装置の不備もあって実験は困難をきわめたが、その後マイカ製品の特異性に合わせ工夫、改善を加えた装置によって所期の目的とする諸特性が測定できるようになった。また、この試験機もマイカ製品の圧縮試験機として正式に JIS-C 2116-1962 に採用されたのでこの機会に本試験機で実験を行ってきた中から、原料はがしマイカと整流子片用軟質マイカ板のセラックを主成分とした一般製品に例をとり、二・三の実験結果を紹介する。なお採用した試験方法はおもに材料を使用する立場から要求される特性が得られるように考慮したものである。

2. 試 験 装 置

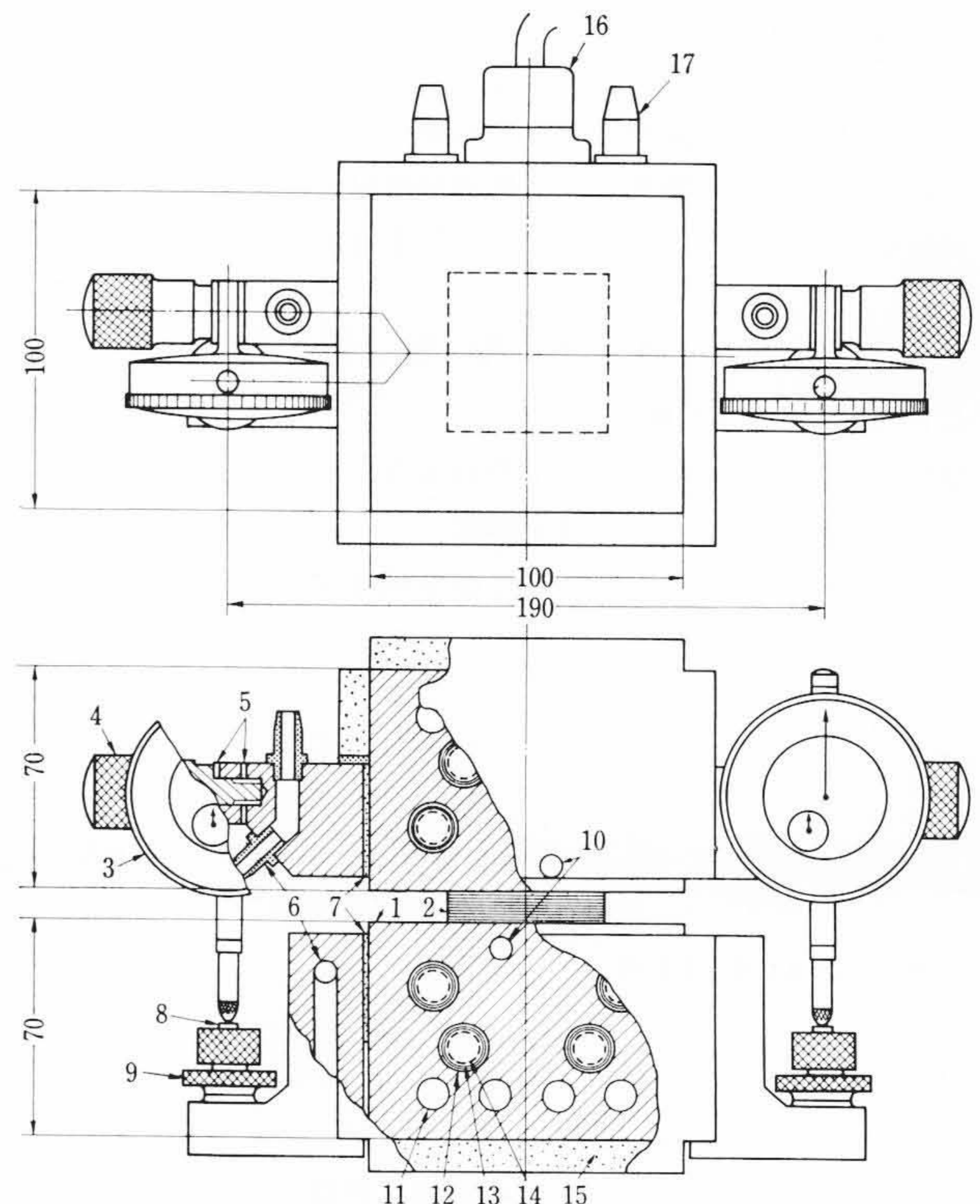
マイカ製品の圧縮試験のために完成したこの装置は、マイカ製品のほかに構造材料の圧縮試験にも応用される。第1図はその構造を示すもので、2個のダイヤルゲージによって温度と圧力に対する圧縮ひずみが連続的に直読できること、およびパイプヒータと水冷管によって比較的短時間(最高 20°C/分)に温度上昇と冷却の行程が可能であることが特長である。加圧は第2図に示すようにアムスラ万能試験機の圧縮側に固定して行なわれる。

応用できる試験の範囲は次に示すとおりである。

- (1) 加 圧 範 囲 0~25,000 kg 連続
- (2) 加 熱 温 度 20~350°C
- (3) ひずみ測定感度 1/200 mm
- (4) 試験片の大きさ 100 mm×100 mm×30 tmm 以下任意

3. 破 壊 試 験

整流子の片間には、部分的に相当高圧力のかかることが予想され、この意味から材料の圧縮による弾性を検討する場合、座屈破壊強度を当然知る必要がある。試験は常温において第3図に示すよう



- | | | | | | | |
|------------|---|----------|---|---|------------|--------|
| ① 熱 | 板 | ⑦ 断 | 熱 | 板 | ⑬ 石英管 | パイプヒータ |
| ② 試 | 験 | ⑧ 測 | 定 | 子 | ⑭ ヒータ | |
| ③ ダイヤルゲージ | | ⑨ ロックネジ | | | ⑮ 断熱板 | |
| ④ 取付ネジ | | ⑩ 温度計の位置 | | | ⑯ ヒータコンセント | |
| ⑤ ワッシャー | | ⑪ 熱板冷却孔 | | | ⑰ 冷却口 | |
| ⑥ ゲージ冷却パイプ | | ⑫ 熱板加熱孔 | | | | |

第1図 マイカ圧縮試験用熱板

な試験片と装置を使用して行なった。各種整流子片用マイカ板とその原料はがしマイカの破壊の結果は第1表に示したとおりで、材料は一般の使用圧力よりかなり高い値を持つものと考えられる。硬質マイカ (Muscovite) を使用した MP 20 とパルプマイカ板は常温における破壊強度が高いが、接着剤の質およびその量によって別な温度特性を示すであろう。第1表のなかで軟質マイカ (Phlogopite) は、硬質マイカに比べ一般に破壊強度は低い製品化するとかなり向上することが認められる。

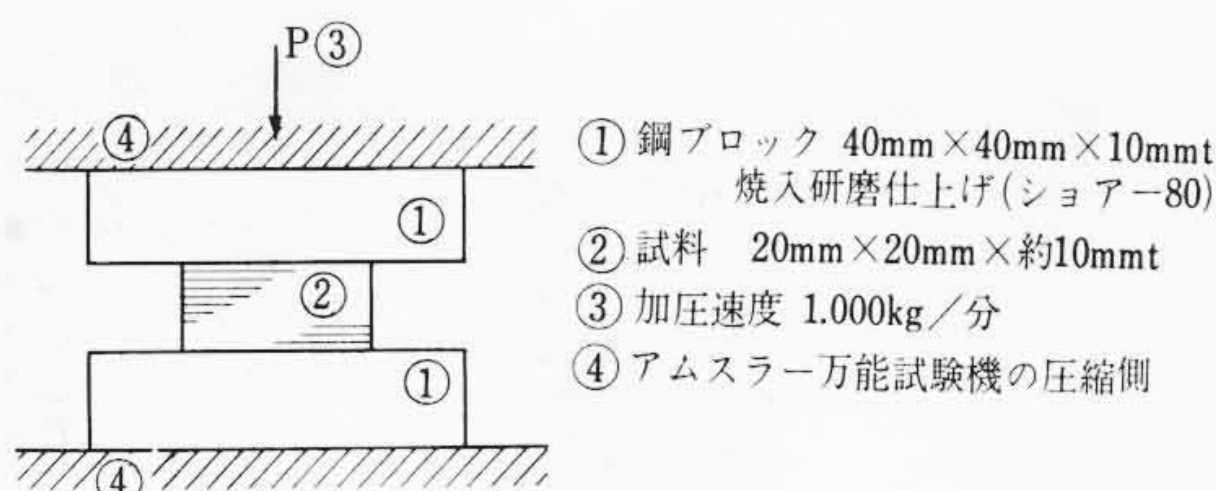
4. 圧縮弾性(応力-ひずみ)特性とヤング率

整流子の片間に加えられる応力はマイカの積層方向に作用するが

* 日立化成工業株式会社山崎工場



第2図 圧縮試験装置



第3図 破壊試験の略図

第1表 整流子片用マイカ板および原料はがしマイカの圧縮破壊強度

分類	名称	破壊強度* (kg/cm ²)	備考
整流子片用 マイカ板各種	MP 20-0.55	5,340	硬質マイカを使用した製品
	MP 30-0.85	4,050	軟質マイカを使用した製品
	U300-0.55	5,500	パルプマイカプレート
原料はがし マイカ各種	硬質-(1)	5,350	硬質マイカ (Muscovite)
	硬質-(2)	5,730	硬質マイカ (Muscovite)
	軟質-(1)	2,600	軟質マイカ (Phlogopite)
	軟質-(2)	2,650	軟質マイカ (Phlogopite)
	軟質-(3)	4,500	軟質マイカ (Phlogopite)
	軟質-(4)	3,240	軟質マイカ (Phlogopite)
	軟質-(5)	3,140	軟質マイカ (Phlogopite)
	軟質-(6)	2,680	軟質マイカ (Phlogopite)
	軟質-(7)	2,800	軟質マイカ (Phlogopite)
	軟質-(8)	2,450	軟質マイカ (Phlogopite)
	軟質-(9)	4,250	軟質マイカ (Phlogopite) 特に気泡が多く柔軟性に富む
	軟質-(10)	3,580	軟質マイカ (Phlogopite)

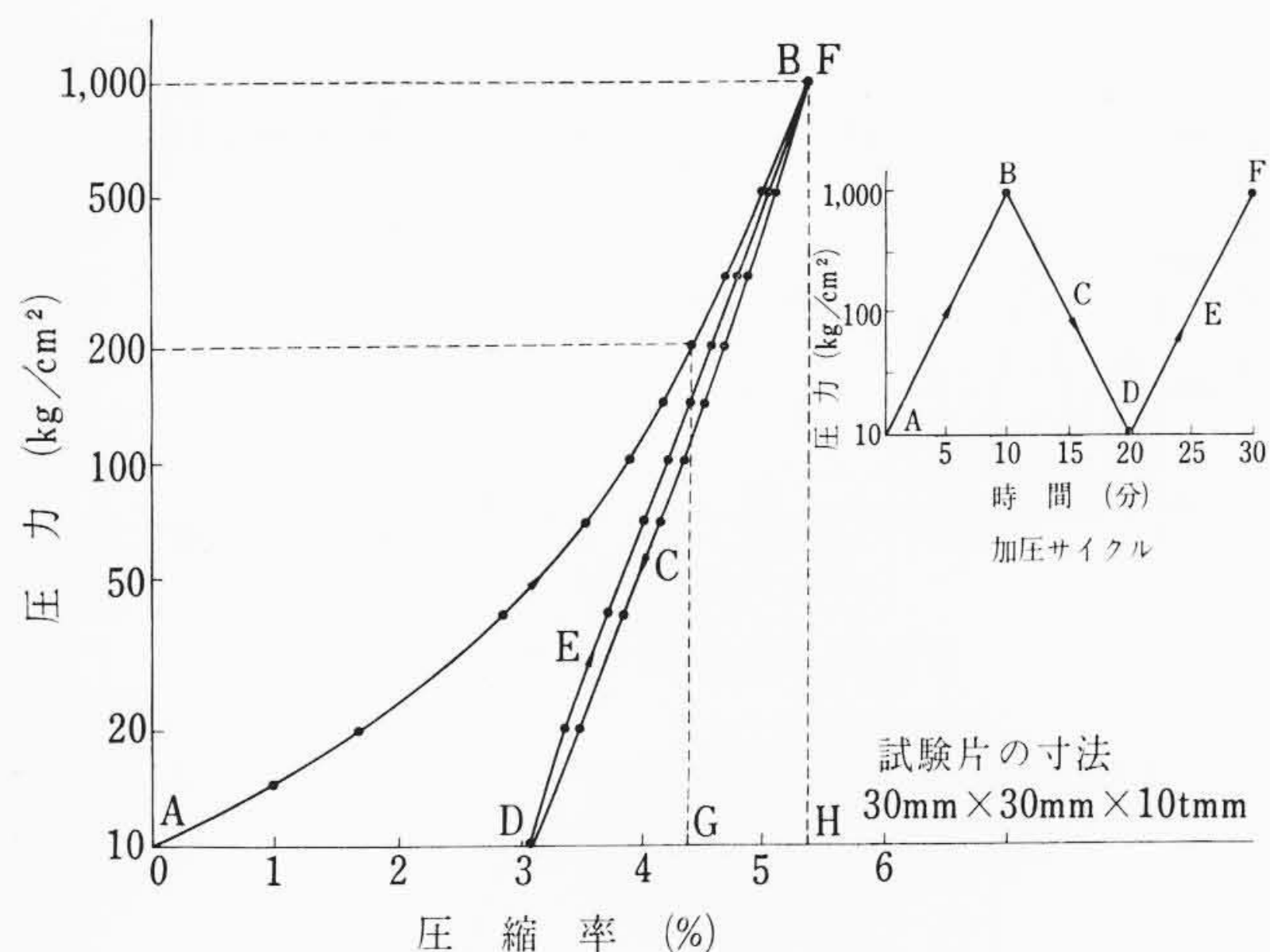
* 3回測定平均 (20℃ 65%RH)

このときの弾性特性を検討する一般的方法として、繰返し圧縮応力による単純ひずみを測定することによって、圧縮率、ヤング率、塑性変形量など材料および製品の圧縮性を考察するための有効な測定値が得られる。

4.1 原料軟質はがしマイカの弾性特性

マイカプレート製品の圧縮性の検討を進めるに当たり、まずこれに使用される原料はがしマイカ単独の特性を知る必要があり10種類の代表的なものについて実験した。整流子片用マイカ板に用いる軟質はがしマイカは現在マダカスカル産のものが大半を占めているが、出産地ごとに類別すると種類も多く⁽²⁾色相、品質を異にし、製品に及ぼす影響も大きい。

試験の方法は、各はがしマイカからはがし厚さの均一なものを選び30×30mmに正しく切りとったものを約5mmの高さに積み重ね、これを第1図のマイカ製品圧縮試験用熱板の中央に配置し常温で第4図に示す10～1,000 kg/cm²の加圧サイクルにより応力ひ

第4図 原料はがしマイカの応力—ひずみ特性
(軟質(8)マイカの一例)

ずみを連続的に記録した。第4図に軟質-(8)マイカの一例を示した。一般に、最初の圧縮負荷行程(A-B)ではゆるやかな曲線をたどり、この圧力を減ずる(B-D)と圧力の対数目盛りにたいしてほぼ直線的に“C”線上を経過し応力塑性量を残した“D”点に落ち着き、さらに、圧力を加えると“E”線上を経過し“F”にいたる。この弾性曲線からマイカの特異性を示しているものとして見のがせないことがらは次の点である。

- (1) “A-D”の応力塑性変形量が意外に多い。
- (2) “B”点“F”点はほとんど一致しクリープが少ない。
- (3) “B-D-F”のひずみ特性は圧力の対数に対しほとんど直線として論じられる。
- (4) “B-D-F”のひずみ特性はループを描き弾性余効果⁽³⁾(Elastic aftereffect)が顕著である。

(1)(2)は次項で述べる製品の加熱塑性変形量とあわせ整流子のシーズニング性を考察するために重要な意味がある。(3)の特性からはヤング率を算出できる。すなわち係数「c」のこう配で描くことのできる直線の範囲では実験式(1)が対立する。

$$\log_e \sigma = c \cdot \varepsilon + \sigma_0 \quad \dots \dots \dots (1)$$

σ : 圧縮応力 (kg/cm²)

ε : 圧縮率

σ_0 : 定数

$$\sigma_0 = \log_e \sigma' \quad \dots \dots \dots (2)$$

(1)式に(2)式の条件を加味すれば、 σ は(3)式に誘導され、求めるヤング率は(4)式のように圧縮応力に比例する。

$$\sigma = \sigma' \cdot e^{c \cdot \varepsilon} \quad \dots \dots \dots (3)$$

e : 自然対数の底

$$E_m = \frac{6 \sigma}{6 \varepsilon} = \frac{6 \sigma' \cdot e^{c \cdot \varepsilon}}{6 \varepsilon} = c \cdot \sigma \quad \dots \dots \dots (4)$$

E_m : ヤング率 (kg/cm²)

直線の係数「c」は(5)式で求められ、この係数が成立する圧力範囲のひずみ量は(6)式で任意に得られる。

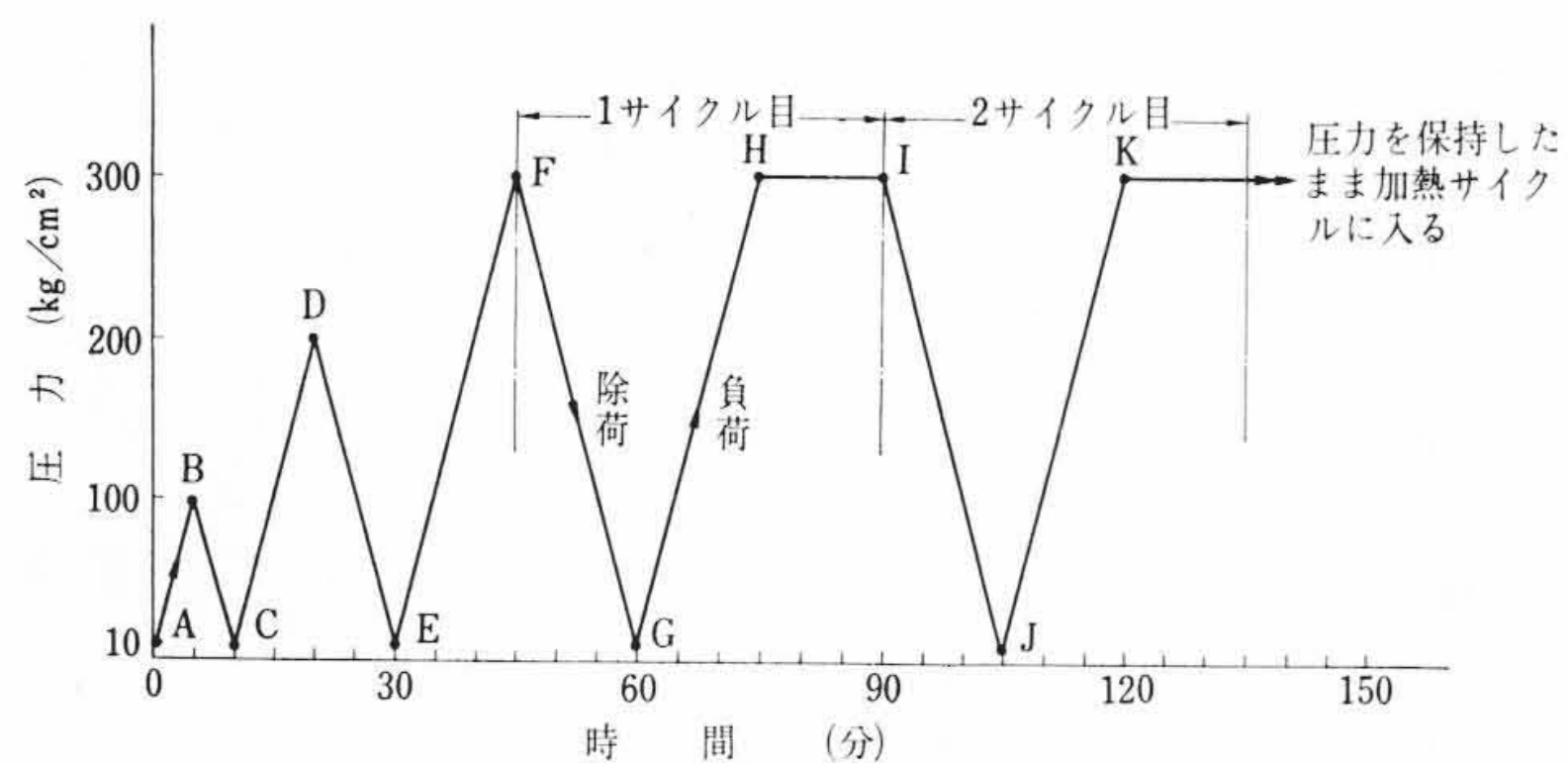
$$c = \frac{\log_e \sigma_B - \log_e \sigma_A}{\varepsilon_B - \varepsilon_A} \quad \dots \dots \dots (5)$$

σ_B のときのひずみ ε_B

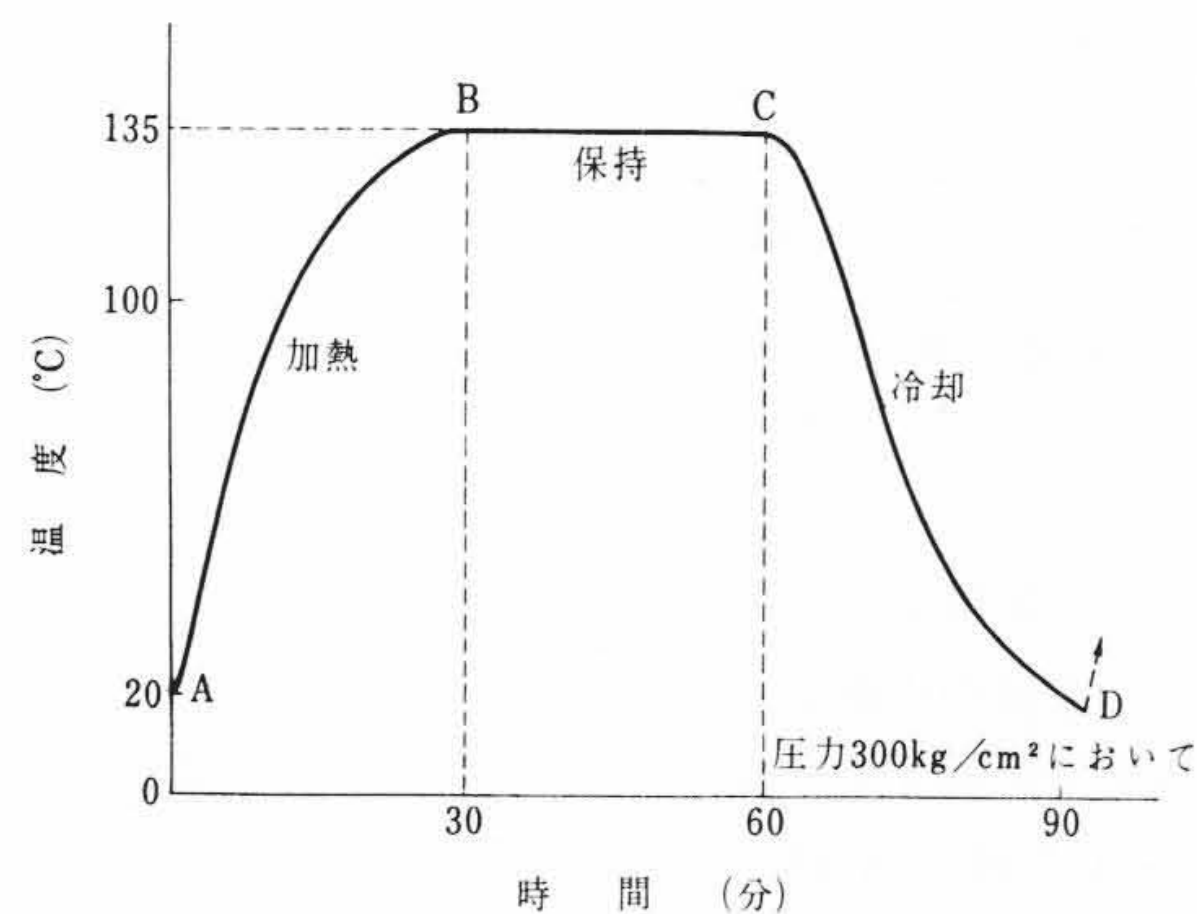
σ_A のときのひずみ ε_A

$$t_i = T_s \left(\log_e \frac{\sigma_i}{\sigma_s} \cdot \frac{1}{c} \right) \quad \dots \dots \dots (6)$$

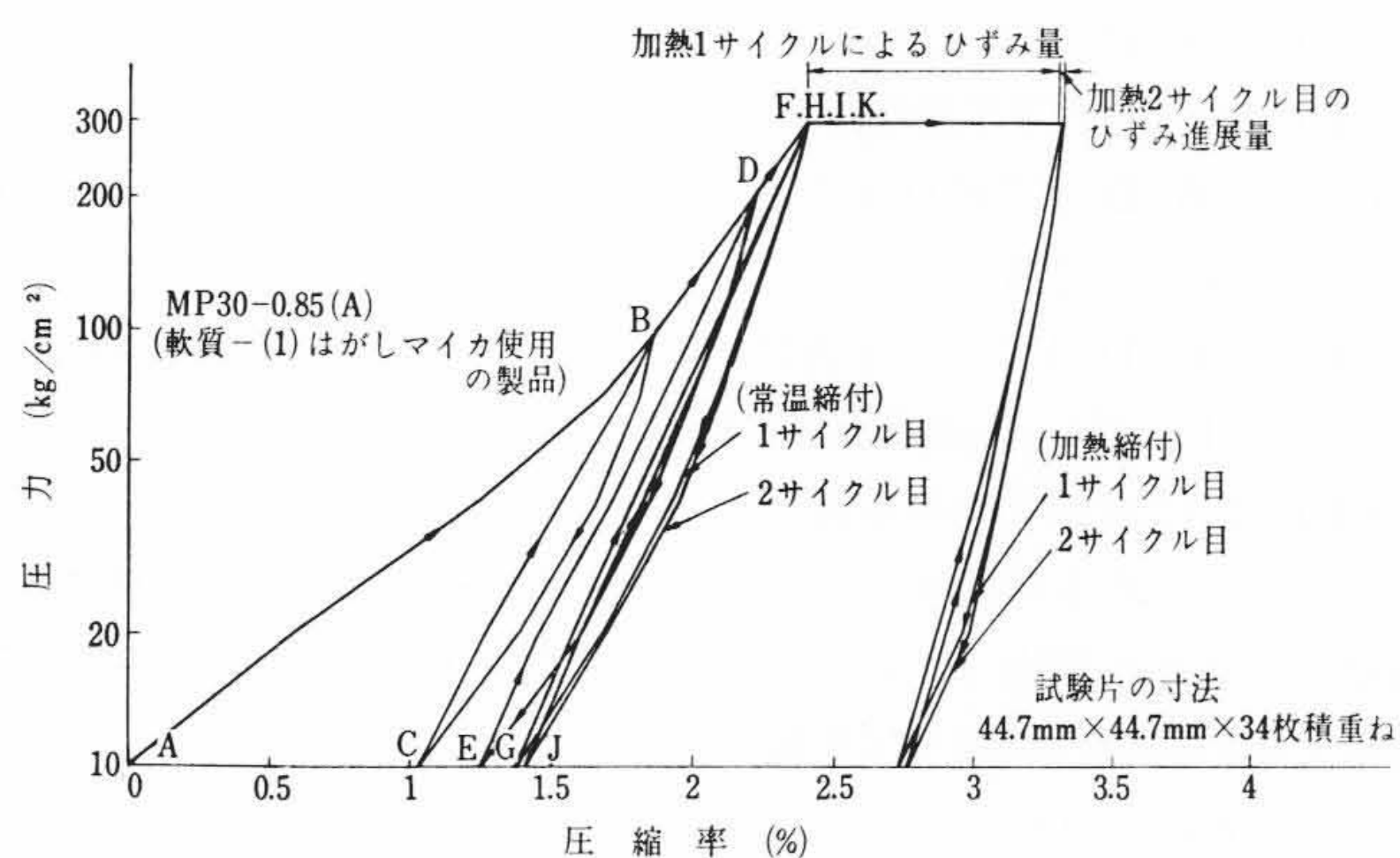
t_i : 圧力が σ_s から σ_i に変動したときの T_s のひずみ量 (mm)



第 5 図 常温締付サイクル



第 6 図 加熱サイクル



第 7 図 整流子片用軟質マイカ板の応力-ひずみ特性 (A)
(製品単独を積重ねた場合)

第 2 表 各種軟質はがしマイカの弾性特性

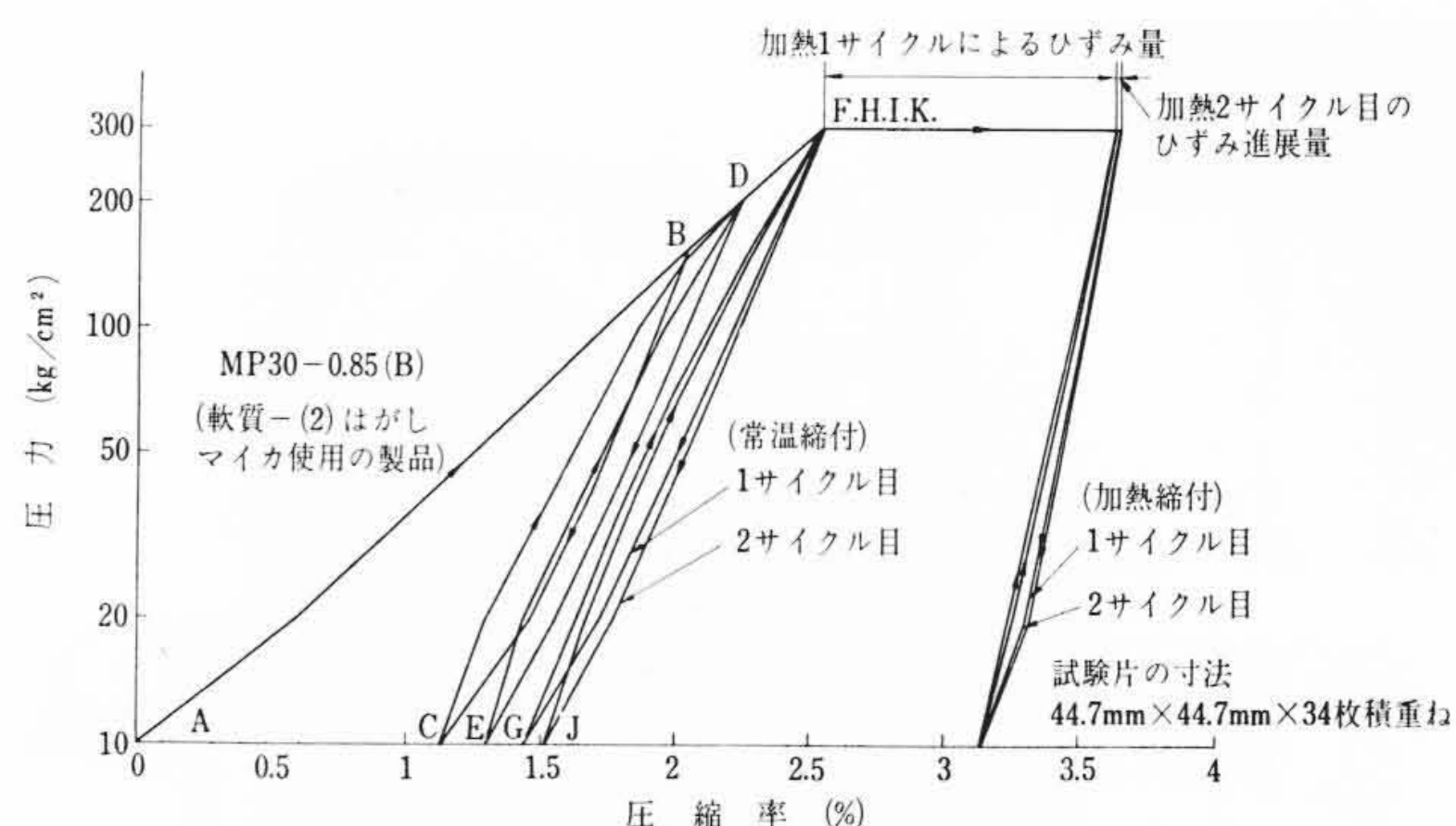
原料はがしマイカの種類 (整流子片用軟質マイカ板用)	圧縮率* (%)		塑性変形量 (%)	ヤング率係数 (c)	
	200kg/cm ² の点	1,000 kg/cm ² の点		10~100 kg/cm ²	100~1,000 kg/cm ²
軟質-(1)	3.4	4.9	2.9	0.25×10 ³	
軟質-(2)	3.8	5.2	3.3	0.24×10 ³	
軟質-(3)	3.6	4.6	2.4	0.21×10 ³	
軟質-(4)	3.6	4.0	2.4	~	0.40×10 ³
軟質-(5)	4.5	5.4	3.1	~	0.23×10 ³
軟質-(6)	4.5	4.9	2.7	0.20×10 ³	
軟質-(7)	4.5	5.9	3.3	0.18×10 ³	
軟質-(8)	4.2	5.3	3.1	0.20×10 ³	
軟質-(9)	12.1	13.1	6.0	~	0.26×10 ³
軟質-(10)	3.1	3.9	2.4	0.30×10 ³	

* 10 kg/cm² を基準とした圧縮率
~ 直線として係数が求められない部分

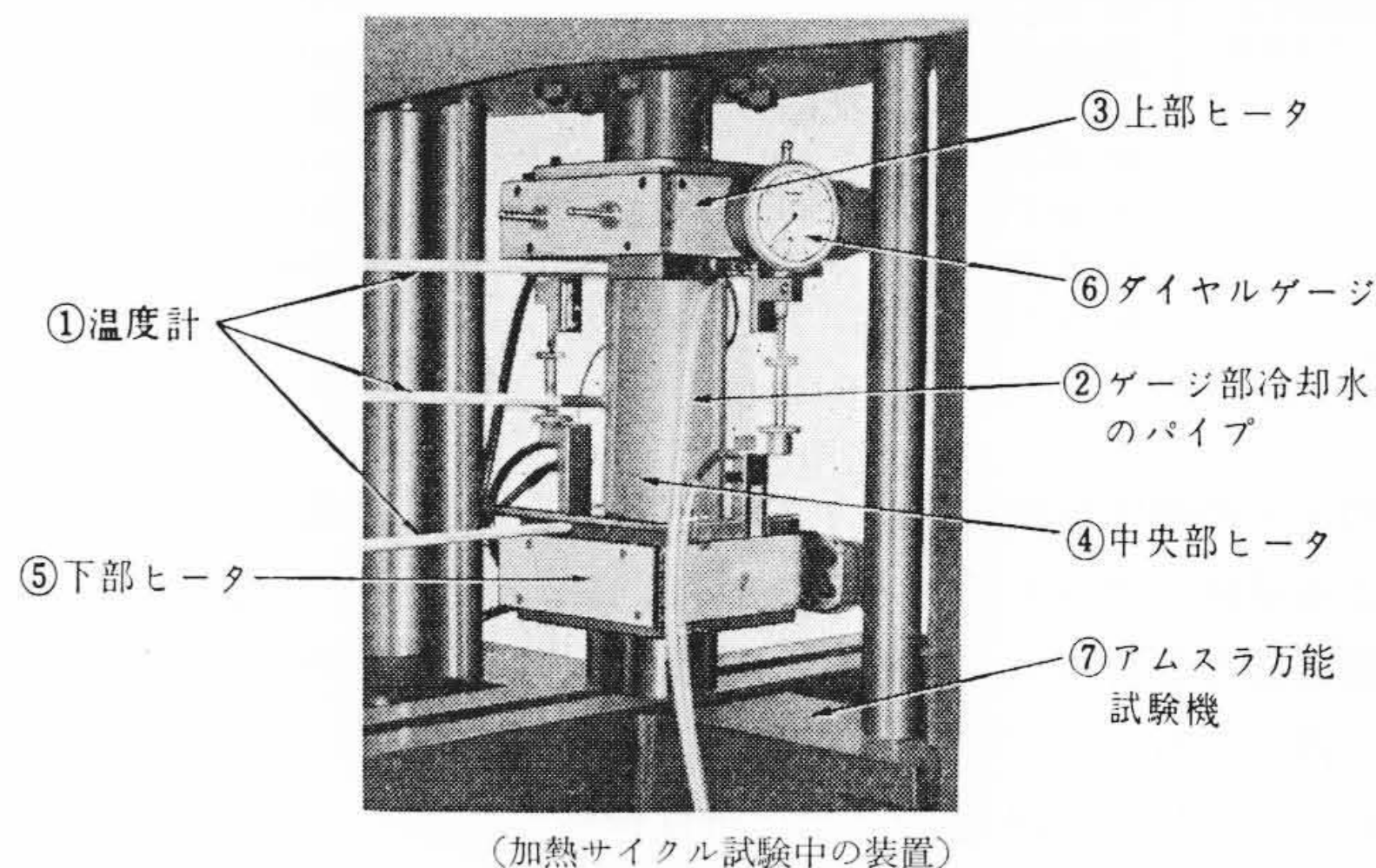
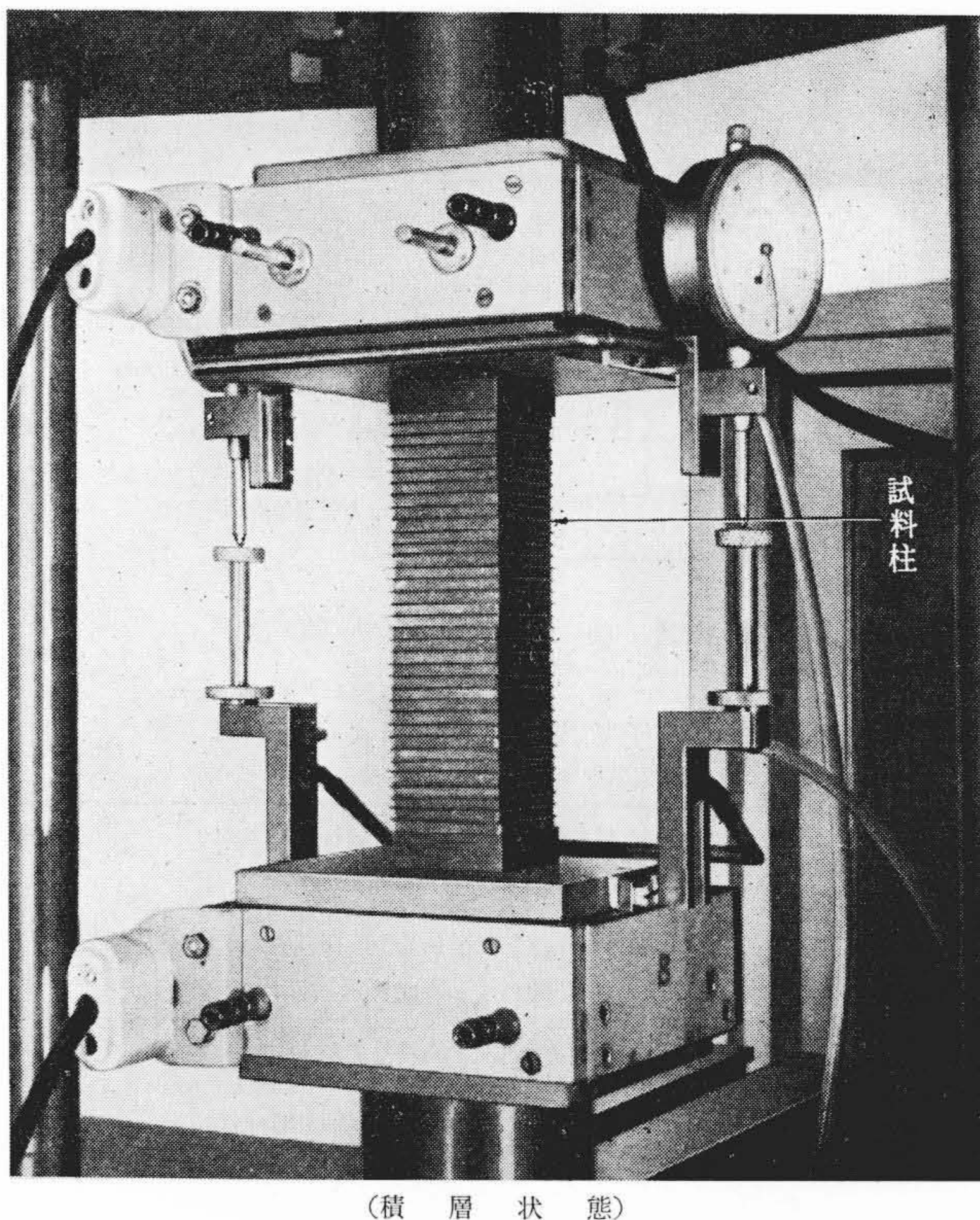
T_s : 圧力 σ_s のときの材料の積層厚さ (mm)

c : ヤング率の定数

この方法によって得られた軟質はがしマイカの諸弾性量を第 2 表に示した。圧縮率は圧縮初行程の面圧 10 kg/cm の点を基準にしてあるため、商用試験で行なうマイクロメータによる測定厚さを基準



第 8 図 整流子片用軟質マイカ板の応力-ひずみ特性 (B)
(製品単独を積重ねた場合)

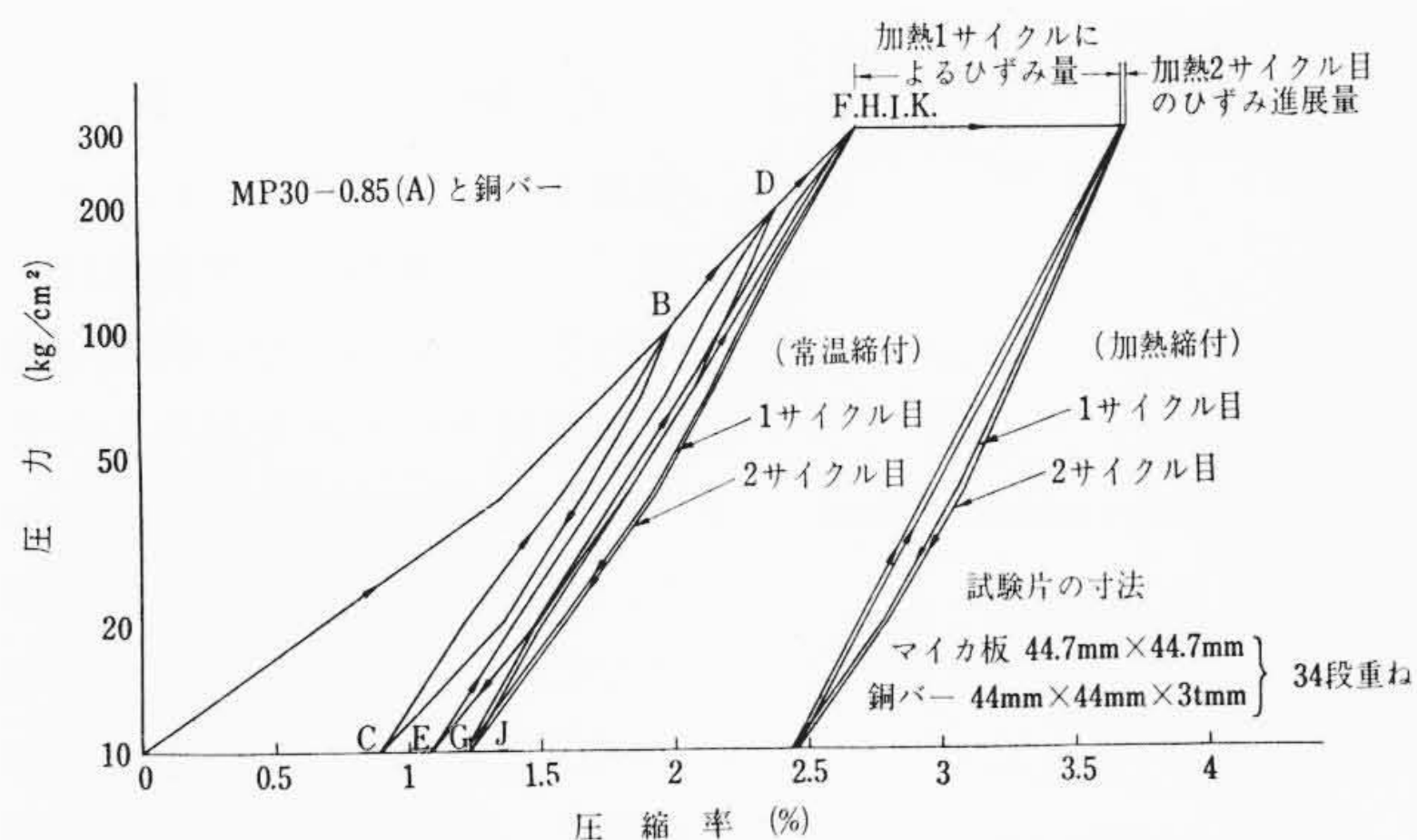


第 9 図 モデル整流子銅バーと積層して
圧縮性を測定した装置

とするものより小さい値となっているが、軟質-(2), (5), (7), (9)などは圧縮率の大きいマイカである。

4.2 整流子片用軟質マイカ板の弾性特性

前項と同じ試験装置で、44.7×44.7 mm (約 20cm²) に切断した製品を 34 枚積重ねこれを試験片とした。試験の方法は JIS の試験圧力に準拠し第 5 図に示す常温の締付サイクルと第 6 図の加熱サイクルを行なってその間の応力-ひずみ特性を記録した。



第10図 整流子片用軟質マイカ板の応力—ひずみ特性(C)
(モデル整流子銅バーと積層した場合)

第3表 整流子片用軟質マイカ板の諸弾性特性

製品および 試験状態	実測接 着剤量 (%)	常温締付後			加熱締付後	
		圧縮率 (%) 10~300 kg/cm ² (A-K)*	塑性変形量 (%) (A-J)**	ヤング率 の係数 (c) 10~300 kg/cm ²	圧縮率 (%) (135°C 30分)	ヤング率 の係数 (c) 10~300 kg/cm ²
MP30-0.85 (A)	1.5	2.41	1.40	0.35×10^3	0.90	0.67×10^3
MP30-0.85 (A) (銅バーと組み 合わせた場合)	1.5	2.69	1.22	0.24×10^3	1.00	0.28×10^3
MP30-0.85 (B)	1.8	2.56	1.52	0.28×10^3	1.10	0.65×10^3

*, ** A-K, A-Jは第7, 第8, 第10, 図中の諸量

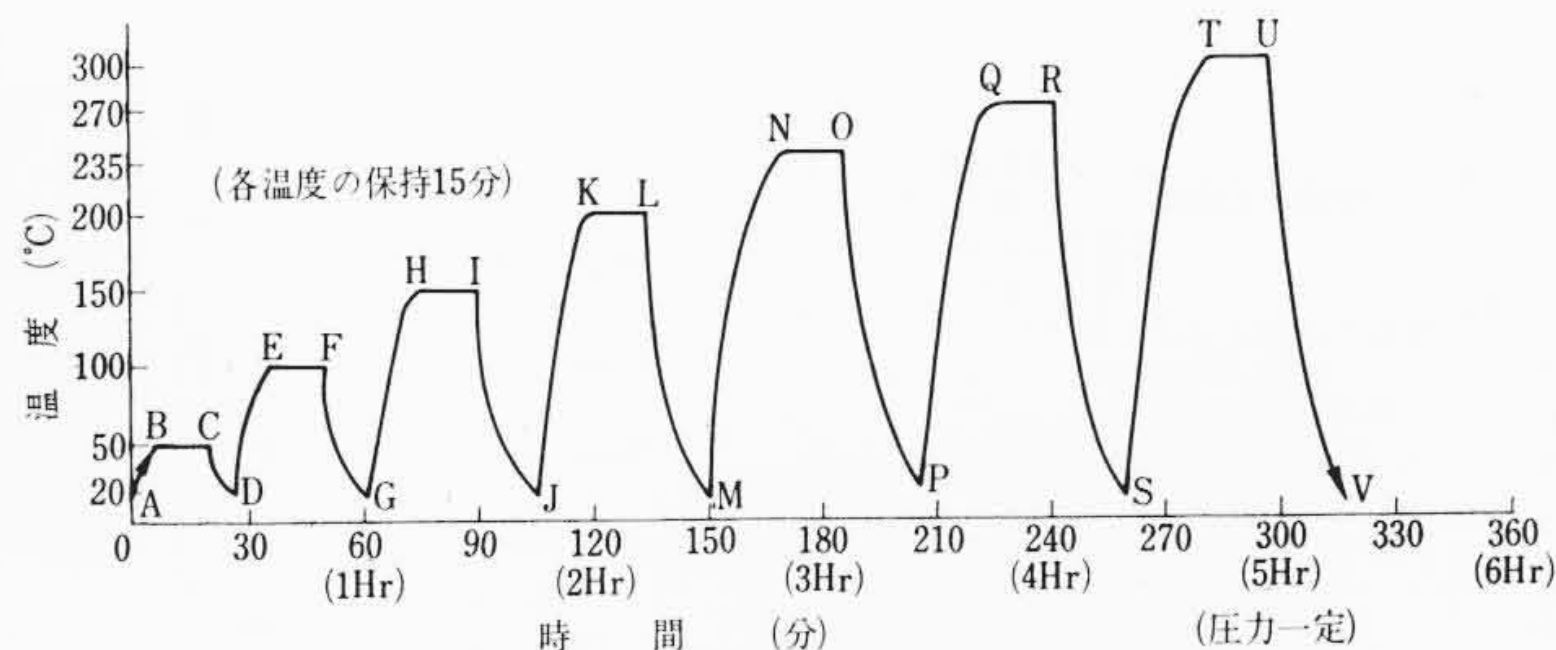
実験結果は第7, 8図に示すとおりで、原料マイカを異にする二つの例であるが、前項で述べた原料はがしマイカとよく似た弾性曲線を示すもので同様に考察し得ることがわかる。また同一条件の応力および加熱の繰り返しによって新たに圧縮されるひずみ量はきわめて小さい。次に整流子片用マイカ板が整流子銅バーと組み合わされた実用に近い状態の弾性特性を知るために、第9図に示す装置によってモデル整流子銅バーとマイカ板を交互に積層した状態で応力ひずみ特性を検討した。第10図はその結果を示したものである。

第10図の実験に使用したマイカ板は比較のため、第7図の製品と同一のものを使用している。このようにして整流子片用の軟質マイカ板について試験した各応力—ひずみ特性から得られた特性値は第3表に示すとおりであるが、整流子に組み込まれた場合は積層効果、その他の因子によってマイカ板単独とは異なった弾性を持つことがわかる。特に整流子銅バーを構成するときは常温締付後と加熱締付後の弾性があまり変わらず、ヤング率の値の小さいことも興味のある効果である。

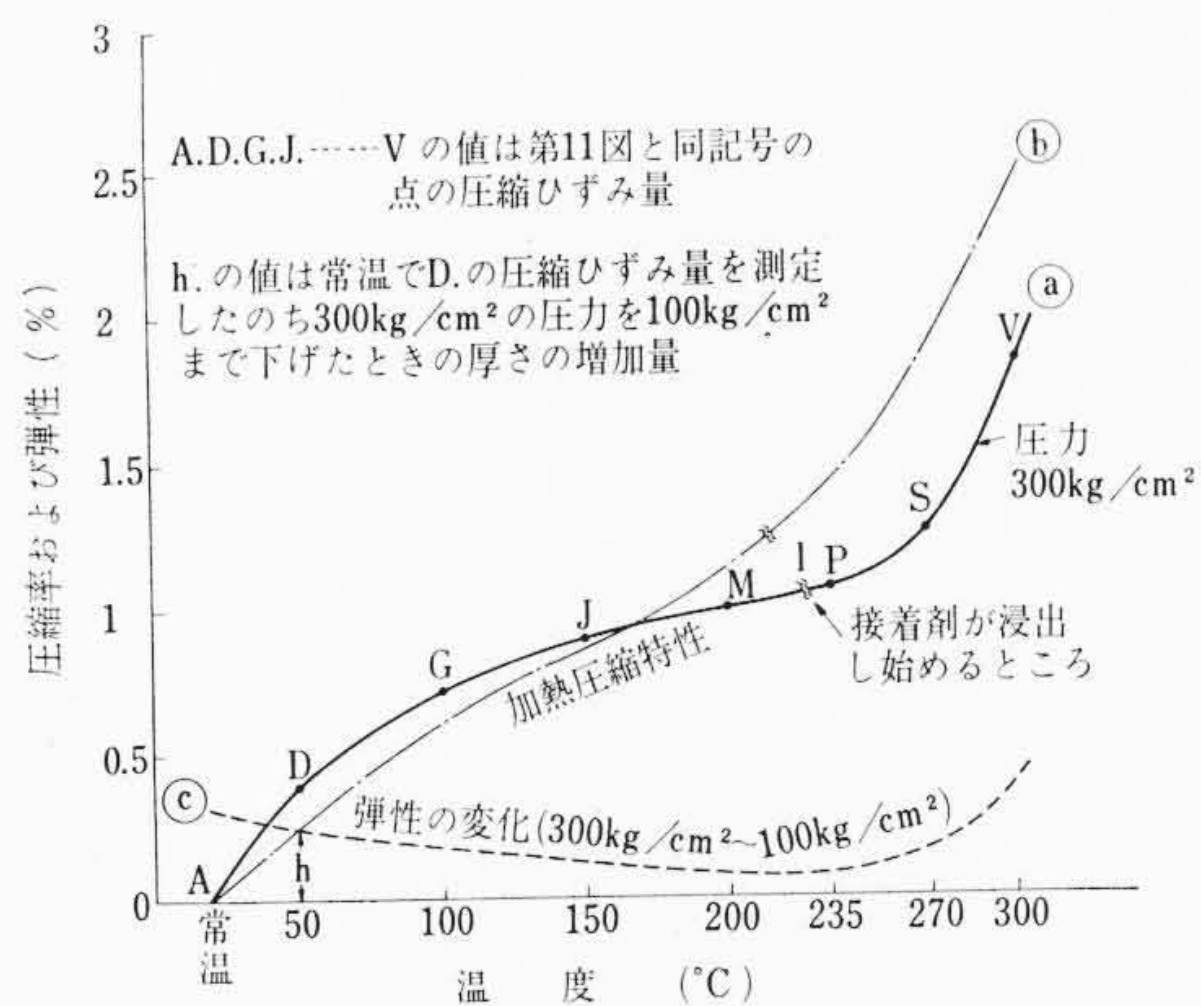
整流子片間絶縁に用いる軟質マイカ板の弾性曲線(第7, 8, 10図)から共通してみられる“A—C”, “C—E”, “E—G”, “G—T”などの塑性変形量は、整流子のシーズニングにおいて片間面圧の不均一を吸収緩和するものと考えられ、使用圧力範囲で材料がもつヤング率が銅バーより小さいことは、熱応力挙動による整流子のゆるみを少なくする効果を与えているもので、絶縁材料であると同時に整流子の構造材料として欠くことのできない特性と考えられる。

5. 加熱圧縮特性と熱圧使用限界

加熱圧縮特性は、一定圧力において加熱サイクルによる塑性変形量を測定し材料の良否および耐熱度を判定するもので、一般にはJIS-C 2116-1962に規定された加熱圧縮試験の拡大と考えられ圧力としては300kg/cm²が採用された。試験片としては44.7mm×44.7mm×約10mmの積層したものをを用いて第11図の加熱サイクルを行ないA, D, G, J……の加熱圧縮率を順次測定する。この加熱圧縮率を第12図に示すと④の曲線が得られる、曲線のほぼ変曲点①に接着剤が浸出しはじめるところがあり、それがその圧力における



第11図 加熱圧縮特性における加熱サイクル



第12図 整流子片用軟質マイカ板の加熱圧縮特性の一例
(MP 30-0.85(B))

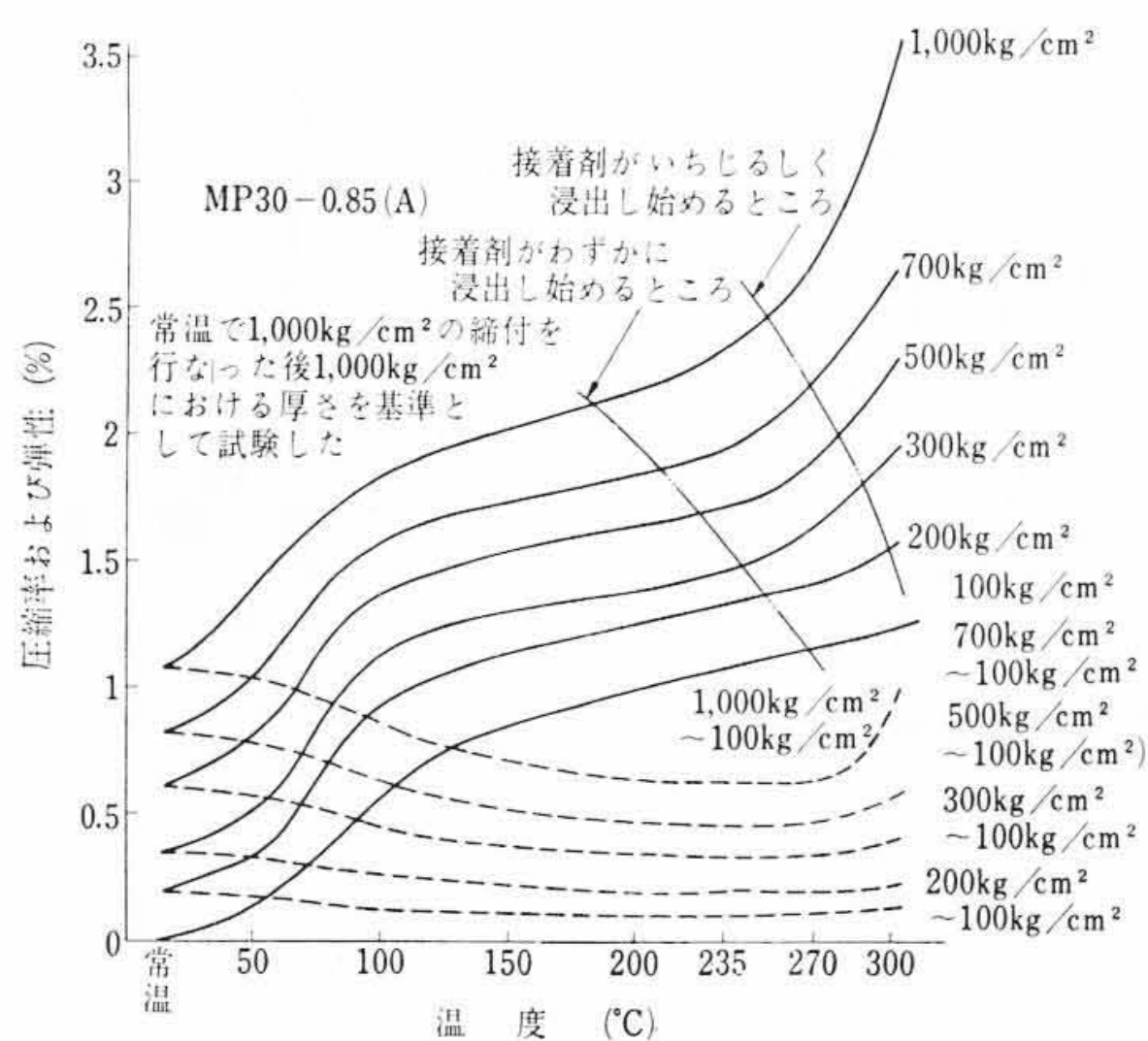
材料の使用温度限界とみられる。

さらに、各温度の圧縮率を測定した直後に300kg/cm²の圧力を100kg/cm²まで減じたときの弾性変化量を示すと④の曲線が得られる。これは加熱締付による締り度合いすなわちシーズニング性と安定度を表わすもので、曲線の立ち上がる高温部分では接着剤が浸出あるいは熱劣化によって接着力を失ってくることを示している。このような試験方法から得られる加熱圧縮特性には多くの判定要素を含んでいるが、おもに①点の温度位置で決まる耐熱性、実用付近の安定性(図のこう配が小さいほど安定とみる)および各温度における圧縮率の大小などを比較することができるので整流子片用マイカ板にたいしては最も重要な基本特性と考えられる。第12図の④の特性は④と比較して悪いと考えられるものの例を示したもので、このような性質の相違はマイカ板の製造時のプレス条件、接着剤の種類、およびその含有量と原料はがしマイカの性質、さらには製品の保存中に受ける吸湿の程度などによって変わる。

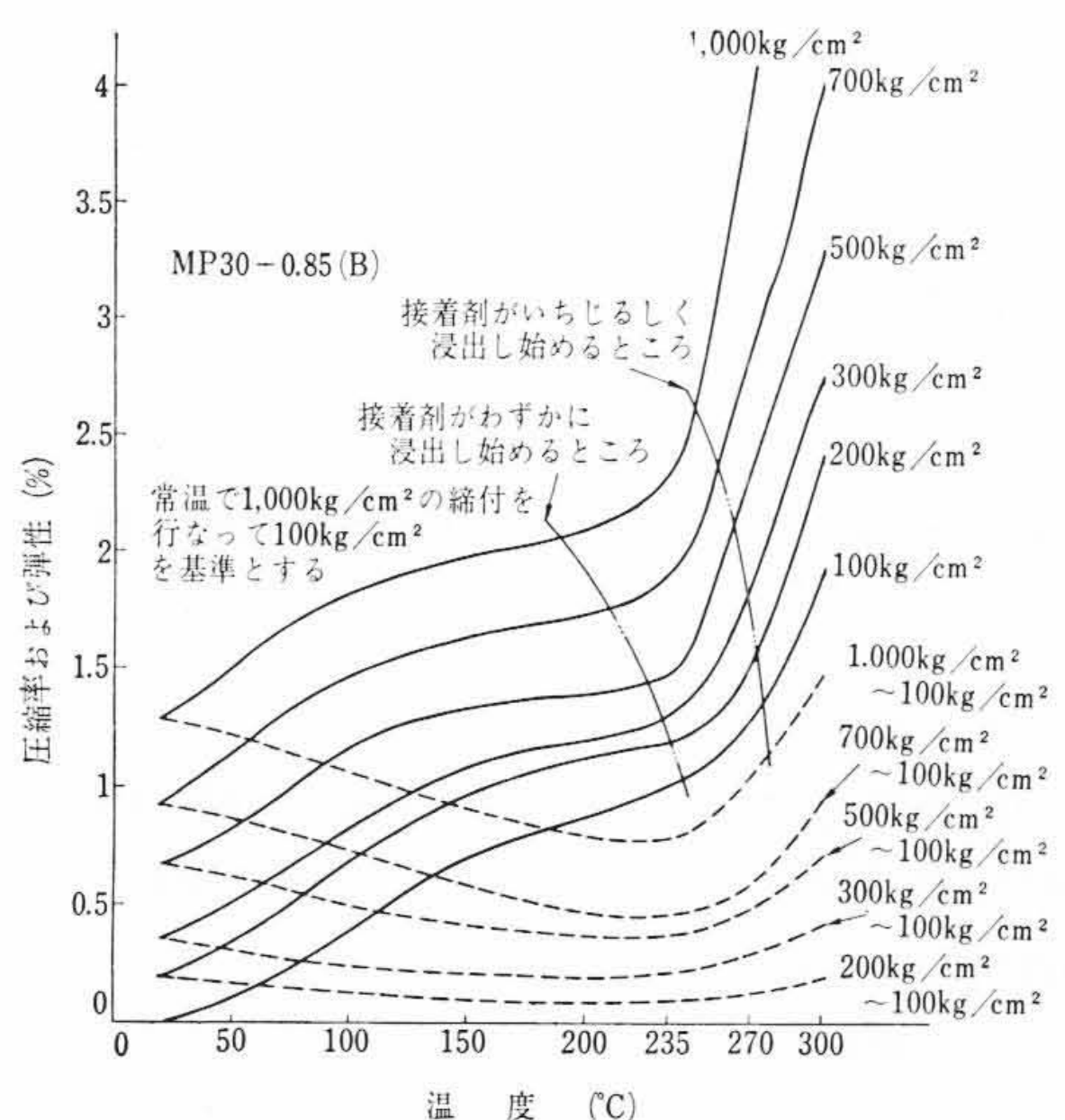
次に上記の加熱圧縮特性を100, 200, 300, 500, 700, 1,000 kg/cm²と圧力を変えて測定し材料の圧力と温度に対する使用限界の設定を試みた。その結果を第13, 14図に示した。図のなかで特性に異常のない温度と圧力の範囲が使用限界とみられるが、接着剤の熱処理が進むにつれてこの限界は向上して行くのが常識とされている。シーズニングの適正条件は材料の熱圧使用限界内において極力、高温、高圧力を採ることが効果的と考えられる。その意味で圧力をパラメータにして加熱圧縮率と弾性を測定する方法は材料の使用限界およびシーズニング条件の設定に有効な試験と考えられるものであり、新規の整流子片用絶縁材料の開発、実用化に際して必ず検討したい特性である。

6. 整流子片用マイカ板の熱膨脹率

マイカ圧縮試験装置の応用実験として整流子片用軟質マイカ板と整流子片用パルプマイカ板の熱膨脹率を測定した。実験方法は測定する試験片が加熱によって塑性変形を生ずる性質をなくすため、250°C, 200kg/cm²で1時間熱圧セットを行なったものを使用し、試



第 13 図 整流子片用軟質マイカ板の加熱圧縮特性および弾性 (A)



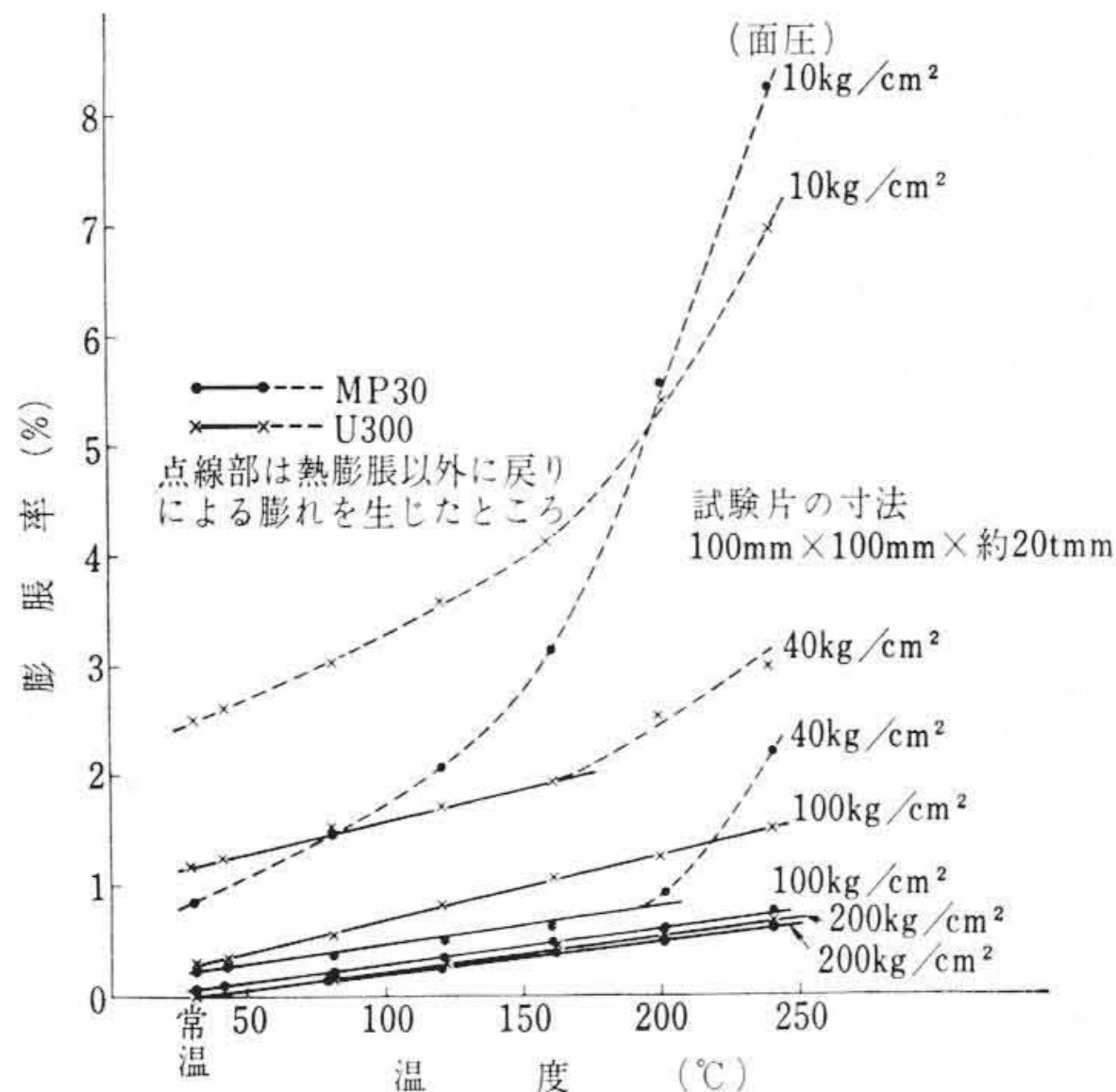
第 14 図 整流子片用軟質マイカ板の加熱圧縮特性および弾性 (B)

第 4 表 整流子片用マイカ板の熱膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

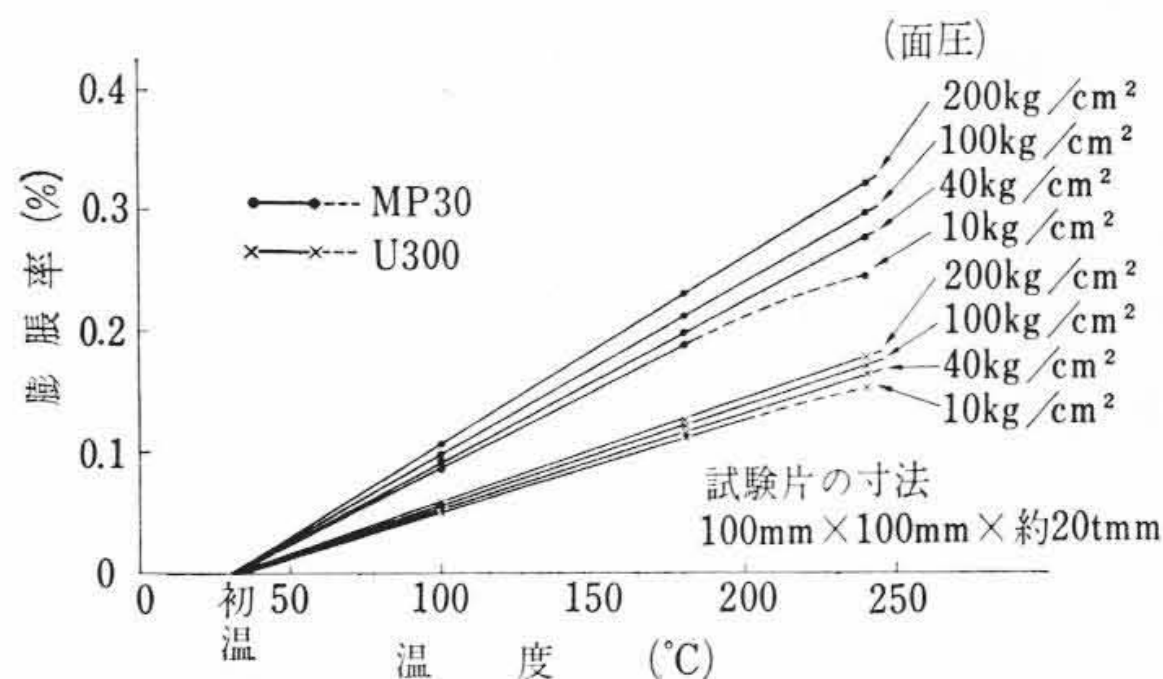
方 向 面 圧 力 (kg/cm^2)	厚 さ 方 向				幅 お よ び 長 さ 方 向			
	200	100	40	10	200	100	40	10
製 品								
整流子片用軟質マイカ板 (MP30)	29	33	35	—	15	14	13	13
整流子片用パルプマイカ板 (U301)	31	59	61	—	8.6	8.1	7.8	7.7

験片の面圧を変えて測定した。その結果を厚さ方向の熱膨張率として第 15 図に示した。250℃ 1 時間のシーズニングでは熱セット不十分のため面圧の低い部分では熱膨張以外の変形が生じているところもあるが、かなり信頼度の高い測定値が得られた。同じく第 16 図には幅方向の熱膨張を示したが、これらの結果から算出した膨張係数を第 4 表に示した。この結果から、整流子片マイカ板が銅バー間で締付けられた状態で熱変動を受ける場合の膨張と収縮の関係がわかる。また、厚さ方向と幅方向で異なること、締付けている面圧力でも相違してくることがわかり、このように状態によって膨張の異なる性質はパルプマイカ板の場合にかなり強い傾向が認められる。

整流子の片間に使用されるマイカ板と銅バーの膨張率の差異を考えると厚さ方向の膨張は面圧に影響し、幅方向の膨張は銅バーとマイカ板の接着性あるいは high-Bar, high-Mica と関連する特性になる。



第 15 図 整流子片用の軟質マイカ板およびパルプマイカ板の厚さ方向の熱膨張
(200 kg/cm^2 –250℃ で 1 時間
(熱圧セットした試験片による))



第 16 図 整流子片用の軟質マイカ板およびパルプマイカ板の幅、長さ、(横)方向の熱膨張率
(200 kg/cm^2 –250℃, 1 時間で
(熱圧セットした試験片による))

7. 結 言

整流子の片間に用いられるマイカ板が、絶縁材料として現在ほかに代わるべき材料がない特質を持った構造材といわれながらも今まで弾性面に対する検討は少なかった。新材料の開発、実用化に対してなにかマイカ板の特質か、なにか実用上要求されるべき特性かを数値的に明らかにする目的で検討を進めてきたが、以上報告した基礎実験のなかから得られた知見を要約すると次のとおりである。

(1) 原料はがしマイカには多くの種類があり、その圧縮特性はそれぞれ異なるのでその用途によって適切なマイカを選定する必要がある。

(2) マイカ板の圧縮特性は弾性限界内で、応力に対し一定のヤング率を持たない、すなわち一般にフックの法則で考察できない複雑な塑弾性体である。しかし、実験結果からかなり広範囲の応力に対し材料の圧縮ヤング率は応力に比例することを明らかにした。この比例恒数をヤング率係数「 c 」と考え種々の

材料で比較することが整流子片用マイカ板の圧縮性を検討するために有効である。

(3) マイカ板の実用応力付近と思われるヤング率が、銅のヤング率よりはるかに小さいことが数値的に確認された。この性質は種々の原因で誘起される整流子の面圧の変動によるゆりみを防ぐ作用となり、整流子片間絶縁に必要な特質の一つと考えられるがその程度に関しては今後の研究を必要とする。

(4) マイカ板は熱、応力によってかなりの塑性変形をもち安定して行く。この性質が整流子のシーズニングに際し適度な“なじみ”となる特質と考えられるが、その量とバラツキは十分管理されなければならない問題である。

(5) 加熱圧縮特性はマイカ板のシーズニング性と熱圧強度を検討するために有効な試験である。この結果から整流子のシーズニング条件をより合理的に改善するための資料が得られると思う。

(6) 応用実験でマイカ板の膨張を厚さ方向および幅方向について数値的に求めた、整流子片間絶縁板では特に銅バーの膨張と比較して十分考慮する必要がある。

以上整流子片間マイカ板の二、三の基本特性について述べたが、引き続き機会をみて各種マイカ板の実用特性について報告する考えである。終わりに本研究の実験に協力された国分弘氏に感謝する。

参 考 文 献

- (1) 棚橋：日立評論 45, 316 (昭 15-6)
- (2) 金沢：電気試験所調査報告 第 51 号 (1928-7)
- (3) 中川：機械工学講座 3 (塑性学) 共立出版