

超高圧 OF ケーブル用ガラスフレーク混抄絶縁紙の諸特性

Properties of Glass Flake Loaded Kraft Paper for EHV Oil-filled Cable

佐藤 政 勝* 椎 名 利 雄*
Masakatsu Satō Tosio Shiina

要 旨

500 kV 級超高圧 OF ケーブル用の新しい低損失紙として、クラフトパルプにアルミノホウケイ酸ガラスフレークを混抄した、いわゆるガラスフレーク混抄紙を取り上げ、油浸状態における電気的特性および機械的特性など基礎的な特性について検討した。

ガラスフレーク混抄紙は低誘電損失であるばかりでなく、機械的特性においても縦横の方向性が少なく、引張弾性係数や座屈強さが大きいなど特色ある絶縁紙であることを明らかにした。

1. 緒 言

最近、大都市およびその周辺の電力需要は著しく増大しており、大容量地中送電線路として 500 kV 級の超高圧 OF ケーブルの必要性がいちだんと高まってきた⁽¹⁾⁽²⁾。国内においても現在 500 kV 送電系統の実用化研究が進められている。

このような超高圧 OF ケーブルでは主絶縁体を構成する厚さ 125 μ 以上の厚手の絶縁紙に対して誘電特性の改善が強く要求されている。そのためクラフト絶縁紙においては純水洗浄による金属イオンの除去、長網式抄紙機による低密度高気密度紙の抄造など製紙技術面で多くの改良がなされている。しかしながら元来電力ケーブル用紙は機械的強度も重視されるため誘電特性の大幅な改善はきわめてむずかしい問題となっている。

日立電線株式会社では超高圧 OF ケーブル用の新しい低損失紙を開発することを目的として、クラフトパルプとガラスフレークとの混抄紙を取り上げ、現在その実用性について種々の観点から検討を行なっている⁽³⁾。本論文ではまず手抄(す)き紙による予備検討結果を述べ、次に長網式小形抄紙機を用いて厚さ 150 μ および 200 μ 、混抄率 0~40% のガラスフレーク混抄紙を試作し、電気的特性、機械的特性などに対するガラスフレークの影響を詳しく検討した結果を報告する。

2. ガラスフレークの種類と特性

使用したガラスフレークはアルミノホウケイ酸ガラスから製造された電気用のガラスフレークである。その物理化学特性を表 1 に示した。厚さ(平均値)は 0.0013 mm および 0.0033 mm の 2 種に分かれるが、大きさはいずれも 0.1~5.0 mm の範囲に分布しているものである。なお一部粉碎処理を施し大きさを調整して使用した。

ガラスフレーク自体の誘電率および誘電正接-温度特性を示したのが図 1 である。これはガラスフレークの母体ガラス板を用い、シェーリングブリッジにより周波数 60 Hz、電界強度 0.5 kV/mm で試験した結果である。ガラスフレークの誘電率および誘電正接は温

度が高くなるに従いわずかに増加する。図 1 には本実験に使用したクラフトパルプを構成している紙繊維の特性をあわせて示した。このクラフトパルプは最近の超高圧 OF ケーブル用紙に使用されているもので、ヘミセルロース、リグニンなどの非セルロース成分や金属イオンなどの不純物がよく除去されており、誘電特性の点では最良品といえるものである。ガラスフレークの誘電率は紙繊維の誘電率に比較して若干大きい、誘電正接は逆に小さく 20~120°C の温度範囲で紙繊維の約 1/5~1/3 の値になっている。

3. 手抄き紙による予備検討

まず初めにガラスフレーク混抄紙の抄紙方法やその特性を大まかに把握(はあく)するため、手抄き紙を作製し予備的な検討を行なった。ここではその結果を簡単に述べる。

3.1 手抄き紙の抄紙方法

あらかじめ叩解(こうかい)したクラフトパルプ(叩解度 67° SR)に所定量のガラスフレークを添加し、離解機を用いてよく混合した。そしてパルプ-ガラスフレーク懸濁液の濃度を 0.5% に調整したのちタッピー式スタンダードシートマシンを用いて抄紙した。乾燥は送風機を用いて風乾で行なった。

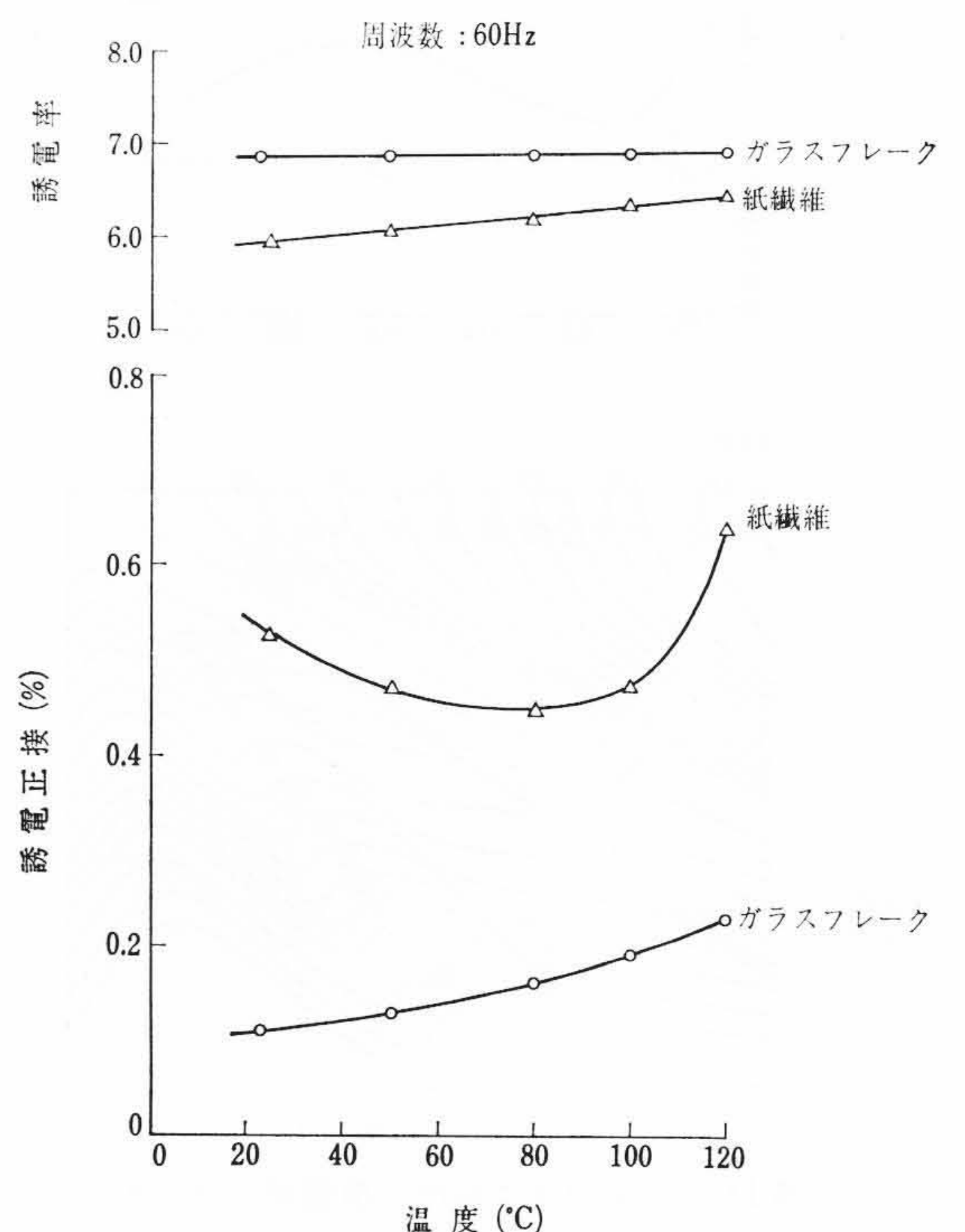


図 1 ガラスフレークおよび紙繊維の誘電特性

表 1 実験に使用したガラスフレークの種類と物理化学特性

項目 種類	厚さ (平均値) (mm)	大きさ(重量分率) (%)			密度 (20°C) (g/cm ³)	成分 (%)							
		0.1 ~0.5 mm	0.5 ~1.0 mm	1.0 ~5.0 mm		SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
ガラス フレーク A	0.0013	21	35	44	2.55	51.72	0.17	0.04	17.25	4.40	9.71	16.34	0.42
ガラス フレーク B	0.0033	11	16	73									

* 日立電線株式会社研究所

表2 ガラスフレーク混抄手抄き紙の特性
 (ガラスフレークA使用)

種 類	項 目 ガラス フレークの 大きさ (最大径) (mm)	ガ ラ ス フ レ ー ク 混 抄 率 (%)	厚 さ (mm)	密 度 * (g/cm ³)	パ ル プ 換 算 密 度* (g/cm ³)	気 密 度 (s/ 100cc)	引張強さ (20℃ 65%RH) (kg/ mm ²)	引 張 破 断 伸 び (20℃ 65%RH) (%)	座屈強さ (20℃ 65%RH) (kg/ mm ²)	誘 電 率 (油浸紙) (80℃)	誘電正接 (油浸紙) (80℃) (%)	絶縁破壊強度 (油 浸 紙) (kV/mm)		灰 分 (%)
												交 流	インパルス	
無 添 加 紙	—	0	0.195	0.58 (0.53)	0.58 (0.53)	370	2.5	5.4	0.55	3.08	0.160	38	93	0.17
ガ ラ ス フ レ ー ク	5	20	0.200	0.63 (0.59)	0.58 (0.54)	460	2.2	3.9	0.60	2.94	0.128	39	101	20.4
		40	0.200	0.62 (0.59)	0.52 (0.49)	310	1.7	1.9	0.66	2.85	0.104	37	96	41.3
混 抄 紙	1	40	0.220	0.60 (0.57)	0.50 (0.48)	250	1.5	1.6	0.61	2.85	0.112	—	—	40.6
	0.1	40	0.200	0.68 (0.65)	0.58 (0.55)	150	2.2	4.7	—	3.00	0.118	—	—	40.6

* () 内の数値は絶乾状態の密度を表わす。

表3 ガラスフレーク混抄紙の一般特性

種 類	項 目	ガ ラ ス フ レ ー ク の 種 類	ガ ラ ス フ レ ー ク 混 抄 率 (%)	厚 さ (mm)	密 度 * (g/cm ³)	パ ル プ 換 算 密 度* (g/cm ³)	気 密 度 (s/ 100cc)	引 張 強 さ (20℃ 65%RH) (kg/mm ²)		引張破断伸び (20℃ 65%RH) (%)		灰 分 (%)	水浸液 導電率 (25℃) (μS/ cm)	吸湿量 (20℃ 65% RH) (%)	乾燥による 収縮率 (長さ 方向) (%)	備 考 使用パル プの叩 解 度 (°SR)
								縦	横	縦	横					
無 添 加 紙	200 μ 紙	—	0	0.190	0.67 (0.62)	0.67 (0.62)	830	4.4	2.6	3.4	5.3	0.16	6.7	7.8	1.4	55
ガ ラ ス フ レ ー ク 混 抄 紙	200 μ 紙	ガラス フレークA	20	0.194	0.71 (0.67)	0.65 (0.61)	340	3.6	2.2	1.9	2.3	22	4.4	6.4	0.7	45
		ガラス フレークA	40	0.203	0.76 (0.72)	0.65 (0.62)	270	3.6	2.3	1.0	1.1	36	3.5	5.4	0.6	45
	150 μ 紙	ガラス フレークA	30	0.147	0.74 (0.70)	0.65 (0.60)	870	3.2	2.4	0.9	1.3	34	4.2	—	—	77
		ガラス フレークB	30	0.153	0.74 (0.70)	0.65 (0.61)	1,410	3.2	2.3	1.3	1.7	32	3.8	—	—	77

* () 内の数値は絶乾状態の密度を表わす。

3.2 手抄き紙の特性

厚さ200μ、密度（以下、絶乾状態におけるパルプ換算密度を意味する）0.60 g/cm³ を目標に抄紙したが、ガラスフレークを添加した場合も無添加紙と同じように容易に抄紙することができた。表2は手抄き紙の代表的な特性を示したものである。

灰分で示されるように添加したガラスフレークは全量混抄紙中に残存している。このことは最大径0.1 mmまで粉碎した微細なガラスフレークを用いた場合にもいえることであり、ガラスフレークの留(とま)りに関しては非常に良好な結果が得られた。また抄紙時の汙(ろ)水性も無添加紙と同程度であった。

この手抄き紙について油浸状態における誘電特性および絶縁破壊特性を試験した。表2に示した結果から明らかなようにガラスフレークを混抄することにより誘電率、誘電正接は大幅に減少している。またガラスフレーク混抄紙の交流破壊強度は無添加紙と同程度であるが、インパルス破壊強度はいくぶん増加する傾向が認められる。

機械的特性としては引張強さ、引張破断伸び、座屈強さを試験した。手抄き紙は縦横の方向性がないため詳細な検討はできないが、ガラスフレークを混抄すれば座屈強さは増加するが、引張強さ、引張破断伸びは減少するようである。

4. ガラスフレーク混抄紙の小形抄紙機による試作

3. で述べたように手抄き紙による予備的な検討結果によれば、クラフトパルプにガラスフレークを混抄することにより誘電特性を大幅に改善できることがわかった。そこで第2次の検討として、研究用の小形抄紙機を用いて実際の製造時とほぼ同じ条件で厚さ150μおよび200μの混抄紙を試作した。

4.1 抄 造 方 法

手抄き紙を抄紙したときと同じようにあらかじめ叩解したクラフ

トパルプにガラスフレークを添加する方法を採用した。すなわち叩解したクラフトパルプをチェストにとり所定量のガラスフレークを加え攪拌(かくはん)混合した。そしてパルプ-ガラスフレーク懸濁液の濃度を約0.4%に調節したのち小形抄紙機にかけて抄造した。この小形抄紙機はワイヤパート、プレスパート、ドライイングパートなど実際の抄紙機と同じような構造を有する長網式の抄紙機である。抄造速度は異なるが、実際の長網式抄紙機で製造したものとほとんど同様な特性を有する紙を抄造することができる。

なおクラフトパルプの叩解度はガラスフレーク混抄紙の種類によって45～77°SRの範囲に変えられた。

4.2 試 作 結 果

今回の試作では厚さ150μおよび200μの混抄紙とも特に問題なく順調に抄造することができた。ガラスフレークの留りは良好で添加したガラスフレークはほぼ全量混抄紙中に残留した。さらにガラスフレークの分布は一様で肉眼では混抄紙の表裏に差が認められなかった。ガラスフレークの密度は紙繊維の密度よりも大きく約1.7倍の値を持っているが、厚さが薄く薄板状をとっているためワイヤパートではクラフトパルプと同時に金網上に沈降するためであろう。混抄紙の厚さや密度は目標値どおりとなっている。

5. ガラスフレーク混抄紙の特性

5.1 一 般 特 性

小形抄紙機で抄造したガラスフレーク混抄紙の一般的な物理化学特性を無添加紙の特性と比較して示したのが表3である。

密度（絶乾状態のパルプ換算密度）は、0.59～0.62 g/cm³ の範囲内にはいっておりほぼ目標値0.60 g/cm³ に近づいている。0.60 g/cm³ という密度は現在国内において275 kV OF ケーブル用として広く使用されているクラフト絶縁紙の密度とほぼ等しい値であ

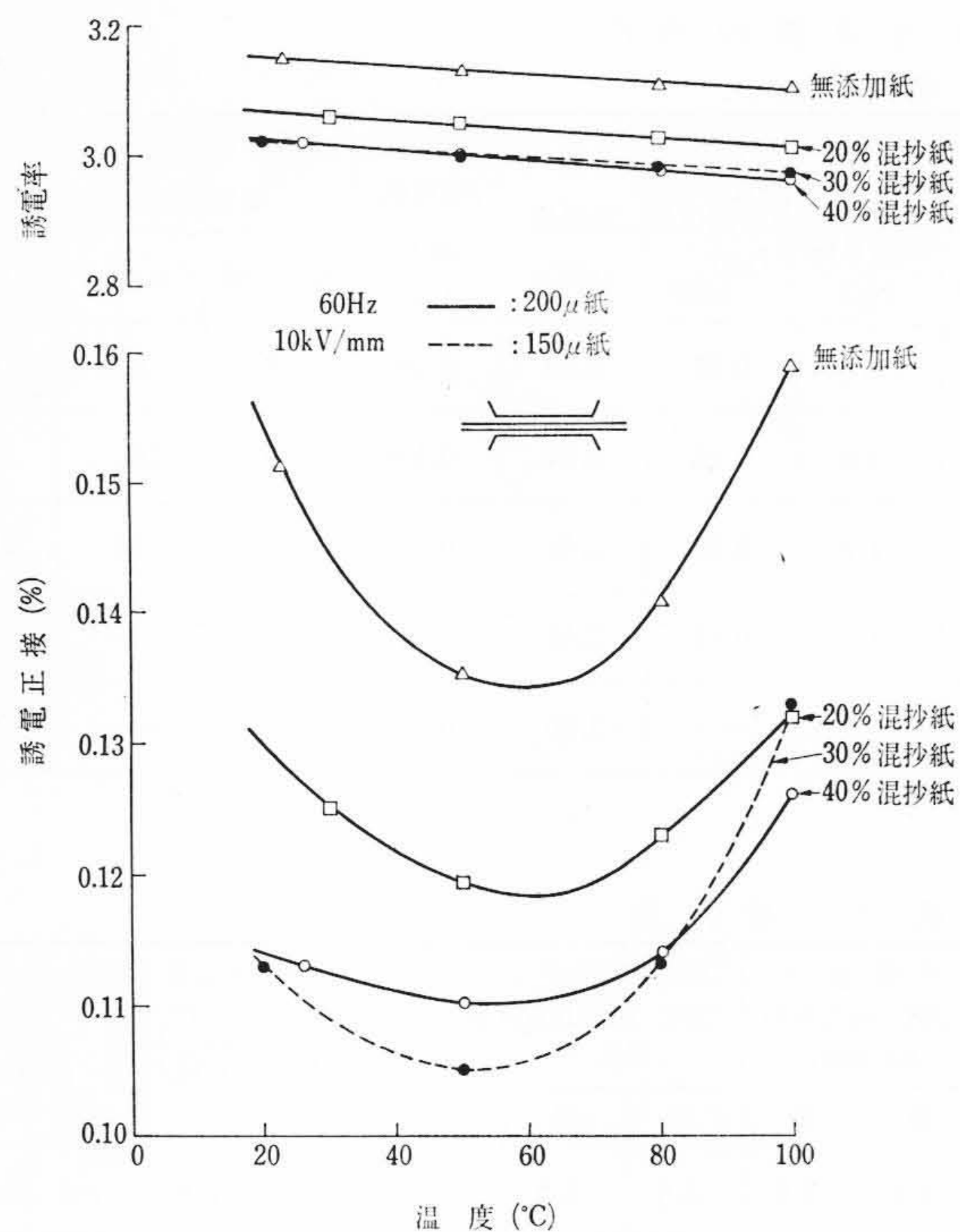


図2 ガラスフレーク混抄紙の誘電特性 (油浸紙)

る。一方、気密度は最小値がガラスフレーク40%混抄紙の270s/100ccで、最大値は30%混抄紙の1,410s/100ccであり、それぞれの差が比較的大きい。この理由は小形抄紙機の機能や混抄紙の地合いを考慮してクラフトパルプの叩解度を変えたためであり、ガラスフレーク混抄率とはあまり関係がない。

表3には20°C, 65% RHにおける飽和吸湿量と、この状態から絶乾状態まで乾燥したときの収縮率を試験した結果を示した。ガラスフレークは内部には吸湿しないため、飽和吸湿量および乾燥収縮率とも小さくなっている。

5.2 誘電特性

図2はガラスフレーク混抄紙の油浸状態における誘電特性を示したもので、直径60mmφの平板電極に2枚重ねの試料をそう入し、真空乾燥後脱気したOFケーブル油を含浸して試験した結果である。試料の密度はいずれも約0.60g/cm³と等しいので試験結果は密度補正を行わずにそのまま比較することができる。

ガラスフレークを混抄することによって誘電率、誘電正接ともに減少しており低損失化できることは明らかである。そしてガラスフレークの混抄率が増せば誘電率および誘電正接の減少の割合が大きくなっている。

さて絶縁紙の誘電特性に関するA. Büchner氏の理論式⁽⁴⁾を紙繊維、ガラスフレークおよび含浸材の3成分から構成されているガラスフレーク混抄紙に適用すると次のようになる。

$$\epsilon_r^K = \sum_j \theta_j \epsilon_j^K = \theta_f \epsilon_f^K + \theta_g \epsilon_g^K + \theta_i \epsilon_i^K \dots (1)$$

$$\tan \delta_r = \frac{\sum_j \theta_j \epsilon_j^K \tan \delta_j}{\sum_j \theta_j \epsilon_j^K} = \frac{\theta_f \epsilon_f^K \tan \delta_f + \theta_g \epsilon_g^K \tan \delta_g + \theta_i \epsilon_i^K \tan \delta_i}{\theta_f \epsilon_f^K + \theta_g \epsilon_g^K + \theta_i \epsilon_i^K} \dots (2)$$

$$\theta_f = \frac{d_D}{d_f} (1 - \alpha) \dots (3)$$

$$\theta_g = \frac{d_D}{d_g} \cdot \alpha \dots (4)$$

$$\theta_i = 1 - (\theta_f + \theta_g) \dots (5)$$

絶乾パルプ換算密度 $d_p = 0.60 \text{ g/cm}^3$

$$\begin{aligned} \epsilon_f &= 6.25 & \tan \delta_f &= 0.45\% & d_f &= 1.52 \text{ g/cm}^3 \\ \epsilon_g &= 6.90 & \tan \delta_g &= 0.16\% & d_g &= 2.55 \text{ g/cm}^3 \\ \epsilon_i &= 2.18 & \tan \delta_i &= 0.01\% \end{aligned}$$

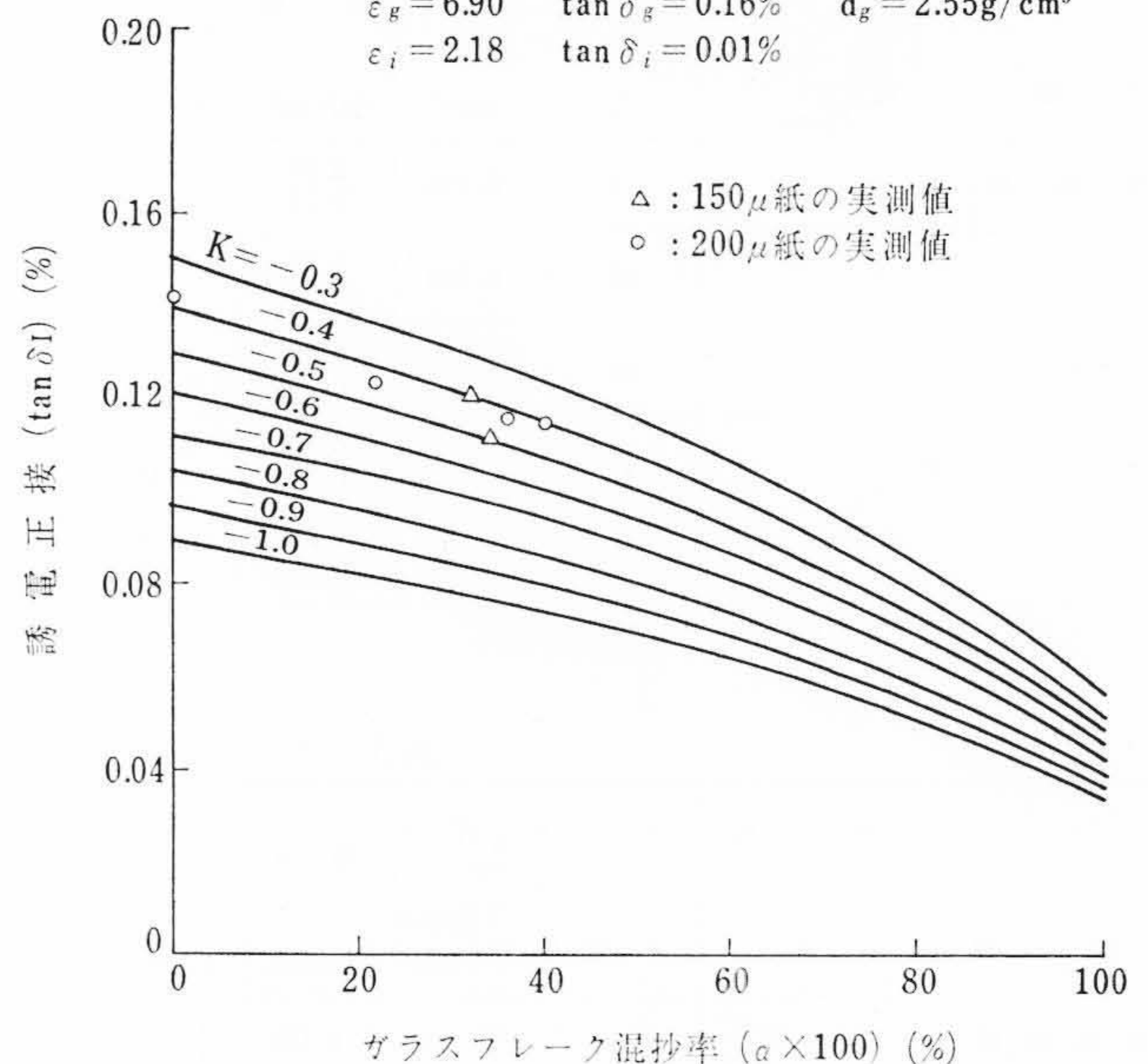


図3 ガラスフレーク混抄紙の誘電正接と混抄率との関係 (油浸紙, 80°C)

$$d_p = d_D \left\{ 1 - \alpha \left(1 - \frac{d_f}{d_g} \right) \right\} \dots (6)$$

$$-1 \leq K \leq 1 \dots (7)$$

ここで

$\epsilon_f, \epsilon_g, \epsilon_i$: ガラスフレーク混抄紙(油浸紙)、紙繊維、ガラスフレークおよび含浸材の誘電率

$\tan \delta_f, \tan \delta_g, \tan \delta_i$: ガラスフレーク混抄紙(油浸紙)、紙繊維、ガラスフレークおよび含浸材の誘電正接(%)

$\theta_f, \theta_g, \theta_i$: 紙繊維、ガラスフレークおよび含浸材の占積率

d_D, d_f, d_g : 絶乾状態におけるガラスフレーク混抄紙、紙繊維およびガラスフレークの密度(g/cm³)

d_p : 絶乾状態におけるガラスフレーク混抄紙のパルプ換算密度(g/cm³)

α : ガラスフレーク混抄率(重量分率)

K : 構成成分の配列状態を表わす定数

いま、各構成成分の特性値に対してそれぞれ単独に試験して求めた実測値を使用し、密度 d_p 0.60 g/cm³のガラスフレーク混抄紙について、(2)式を用いて80°Cにおける油浸紙の誘電正接とガラスフレーク混抄率との関係を求めてみると図3のようになる。パラメータ K は、紙繊維およびガラスフレークの配列状態に関する定数であり、 $K=-1$ のときは純直列に配列し、一方、 $K=1$ のときは純並列に配列していることを意味している。この図より仮にガラスフレークを混抄したときに配列状態が変わらないとしても、ガラスフレークの混抄率が増せば誘電正接は減少することがわかる。

実際に小形抄紙機で抄造したガラスフレーク混抄紙の誘電正接の実測値を理論式による計算結果と関係づけると図3に点描したとおりとなる。ガラスフレーク混抄紙の実測値は無添加紙の特性から外そうされる理論値よりも小さくなっている。したがって実際にはガラスフレークを混抄したときは紙繊維の配列状態が変化し、直列に配列する部分が多くなることを意味している。図4は(1)式および(2)式から油浸状態におけるガラスフレーク混抄紙の誘電損率(誘

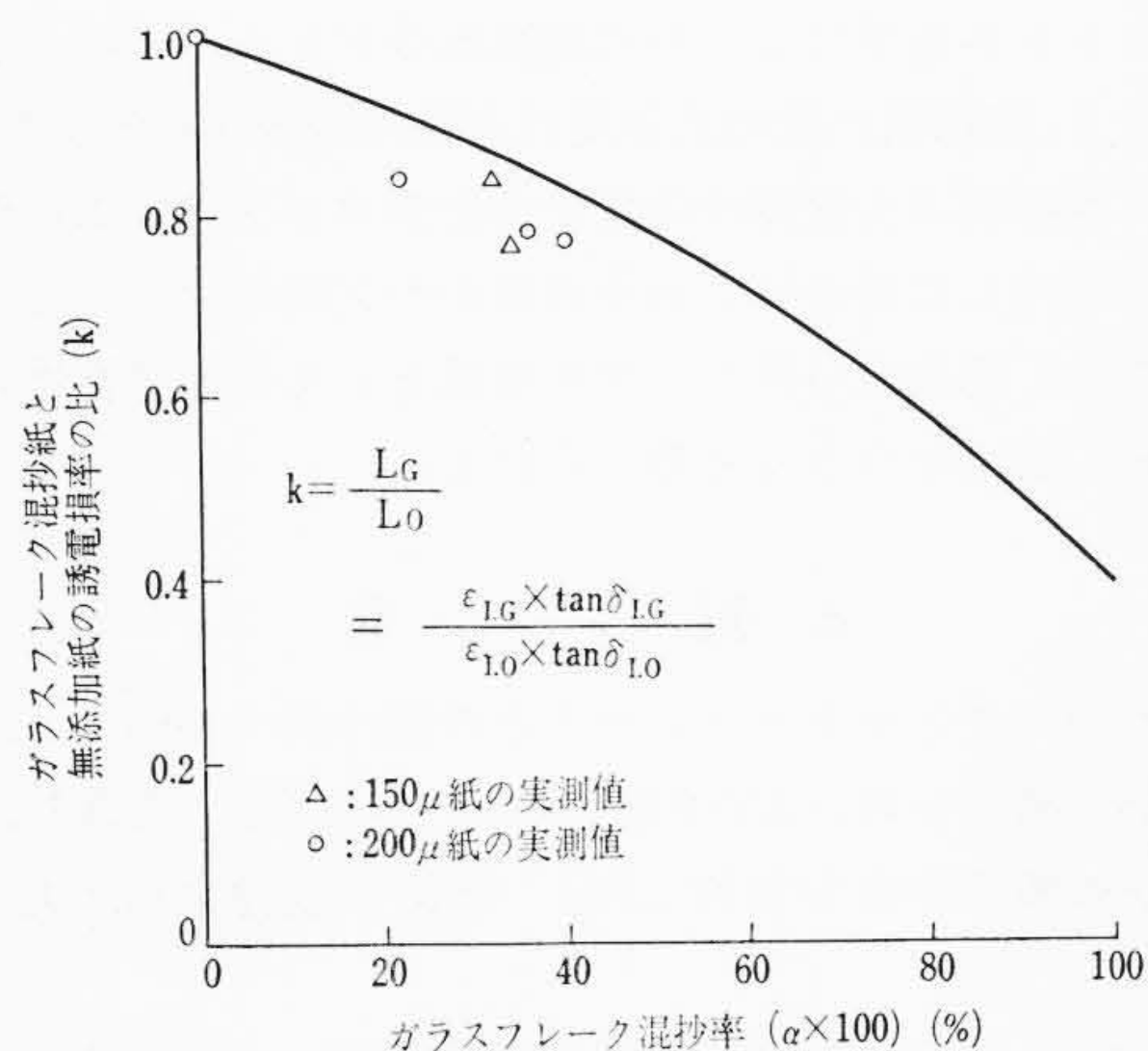


図4 ガラスフレック混抄紙の誘電損率と無添加紙の誘電損率の比と混抄率との関係 (油浸紙, 80℃)

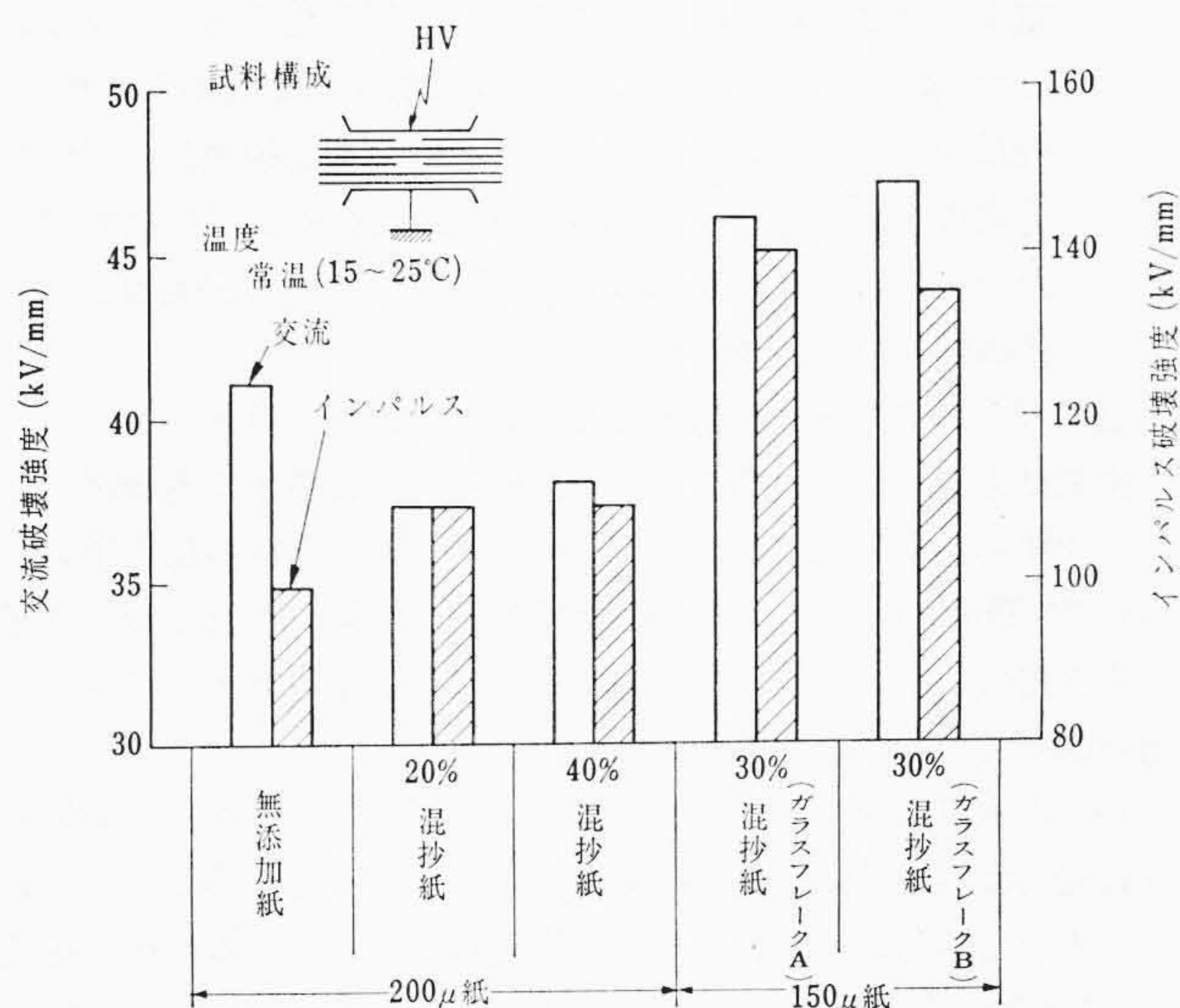


図5 ガラスフレック混抄紙の絶縁破壊特性 (油浸紙)

電率と誘電正接との積)と密度および配列状態の等しい無添加紙の誘電損率との比を算出しガラスフレック混抄率との関係を求めた結果である。誘電損率の比は理論的には密度や配列状態に関係なく、ガラスフレック混抄率に対して一定の値をとっている。誘電損率においても実測値は理論値を下回り、ガラスフレックを混抄すれば紙繊維の配列状態が変化することを示唆している。

なお、ガラスフレック混抄紙においても誘電特性に厚さ効果が認められ、150μ紙のほうが200μ紙よりも誘電率および誘電正接が小さくなるようである。

5.3 絶縁破壊特性

油浸紙で得られた絶縁破壊試験結果は図5に示すとおりである。これは直径25mmφの平板電極を使用し、これに3枚ごとに1枚だけ直径9mmφのパンチ孔を設けた試料を6枚重ねてそう入し、真空乾燥後脱気したOFケーブル油を含浸して、油みぞのある試料構成で試験した結果である。電圧印加法は交流およびインパルスともステップアップ方式で破壊予想値の70%値から交流は0.5kV/min、インパルスは2.5kV/3回の割合で上昇し破壊させた。

厚さ150μのガラスフレック30%混抄紙の場合はきわめて高い破壊値が得られた。特にインパルス破壊強度は同じ厚さのクラフト絶縁紙(交流破壊強度48.1kV/mm、インパルス破壊強度126kV/mm)よりも高くなった。一方、厚さ200μの20%および40%混抄紙においてはインパルス破壊強度は無添加紙よりも高いが、交流破

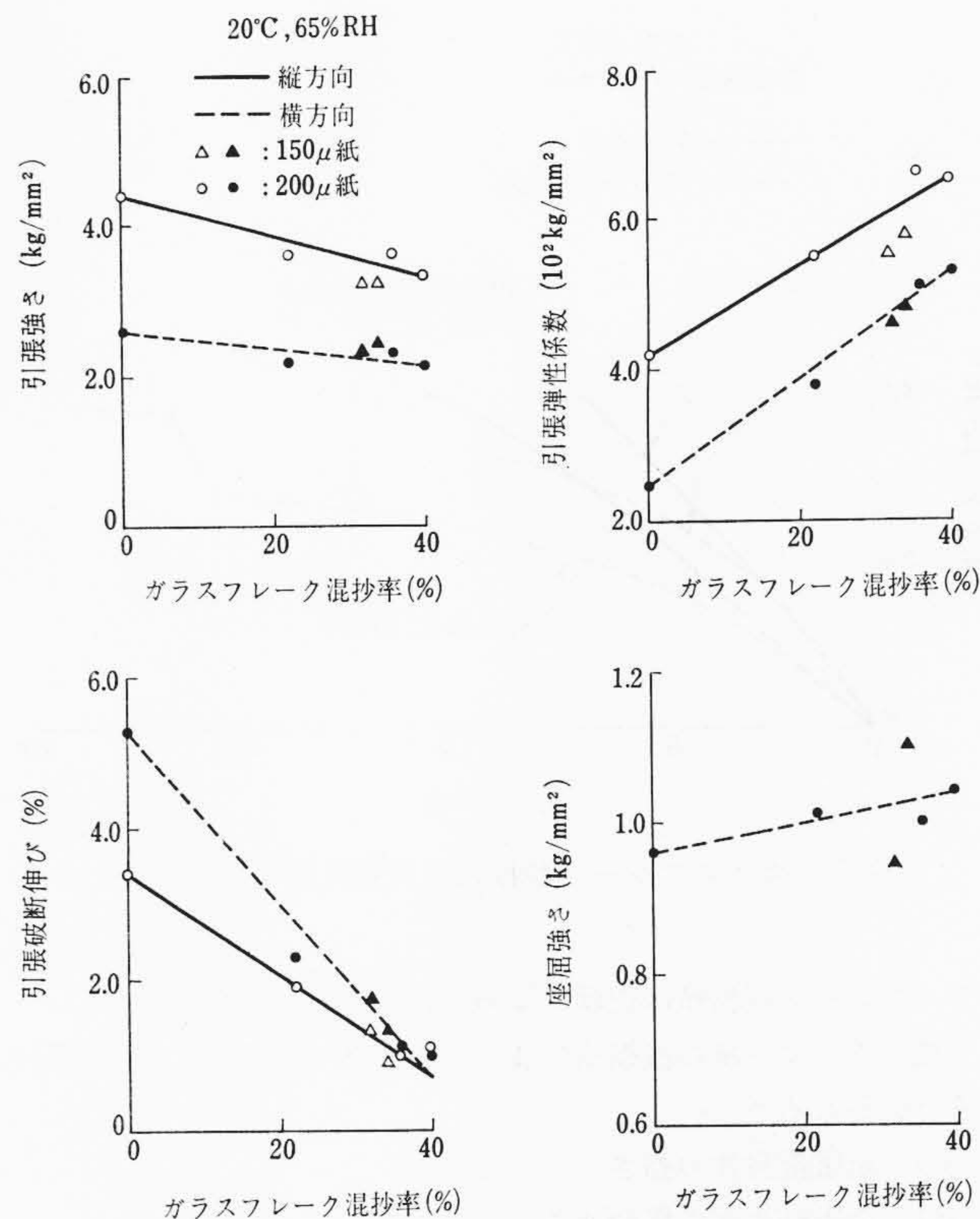


図6 ガラスフレック混抄紙の機械的強度と混抄率との関係

壊強度はいくぶん低くなっている。一般に絶縁紙の破壊強度は紙の厚さ、密度、気密度など二次的な要因によって支配される。特に今回の試験のように油みぞの存在する試料構成の場合は油みぞの厚さすなわち紙の厚さや油みぞに接する紙の気密度などによって大きな影響を受ける。厚さ200μのガラスフレック混抄紙と無添加紙では厚さや気密度に差があり、それが交流破壊強度を減少させた原因と考えられる。

5.4 機械的特性

ガラスフレック混抄紙についてまず、20℃、65%RHで調湿して引張強さ、引張破断伸び、引張弾性係数および座屈強さを試験した。これらの機械的強度とガラスフレック混抄率との関係を求めると図6のようになる。

機械的強度に対するガラスフレックの影響は強度の内容によって異なり、引張強さと引張破断伸びはガラスフレックを混抄することにより減少するが、一方、引張弾性係数と座屈強さはガラスフレックを混抄すれば増加している。そしてガラスフレック混抄率が40%までの範囲ではこれらの機械的強度の変化はいずれもガラスフレック混抄率に対して比例関係があるようである。また引張強さ、引張破断伸び、引張弾性係数については縦横両方向の強度を試験したが、ガラスフレック混抄紙は無添加紙に比較して縦横の強度の差が小さく方向性が少なくなっている。

次に、絶乾油浸状態の機械的強度を試験した。一般にクラフト紙中の水分を取り去れば紙繊維が剛直になり、紙繊維の引き抜けによる破断が起こりやすくなる。したがって引張破断伸びは減少するのが普通である。ガラスフレック混抄紙の機械的強度に対する乾燥の影響は無添加紙の場合と同様な傾向にあるが、一般に乾燥前後の強度の変化が少ない。このことは図7に示した引張荷重一伸び特性に端的に現われている。これは試料を真空乾燥後脱気したOFケーブル油を含浸し、20℃まで放冷したのち、直ちに試験した結果である。無添加紙の破断時の伸びは乾燥によって著しく減少するのに対し、

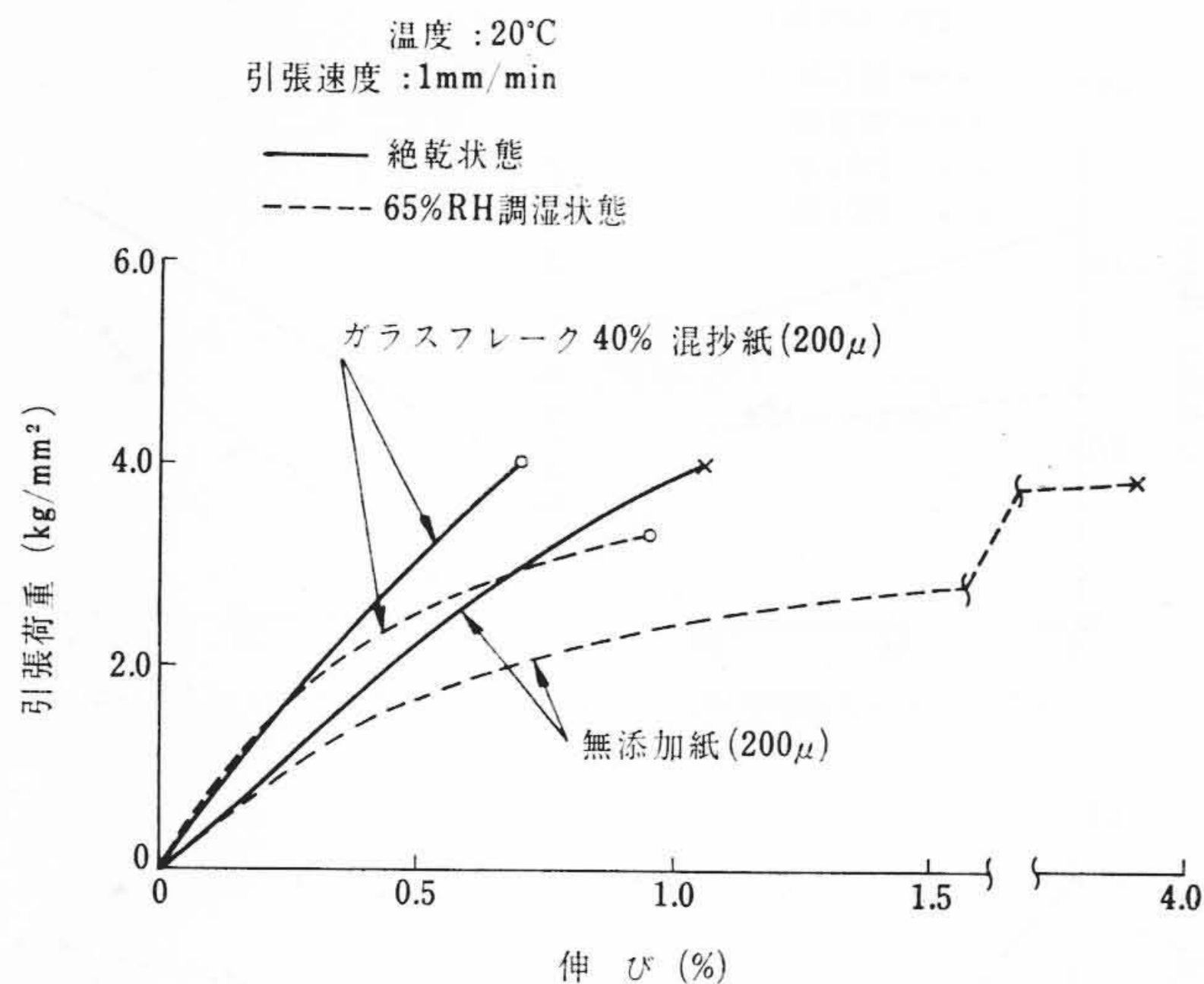


図7 ガラスフレーク混抄紙の引張荷重—伸び特性

ガラスフレーク混抄紙は乾燥による変化がきわめて小さい。

一般にクラフト紙の機械的強度は次の3種の因子によって支配されるといわれる⁽⁵⁾。

- (i) 紙繊維自体の強さ
- (ii) 紙繊維相互の接合強さ
- (iii) 紙繊維相互のからみ合いに基づく摩擦強さ

ガラスフレーク混抄紙の機械的強度に対しても同様の考え方が適用できよう。すなわちガラスフレークを混抄することによって機械的強度における縦横の方向性が少なくなり、また引張弾性係数や座屈強さが増加するのは構成成分相互の接合強さが大きくなっているためと考えられる。このことはガラスフレークと紙繊維との間に相互作用が存在することを意味している。アルミノホウケイ酸ガラスの表面にはシラノール基 ($\equiv\text{Si}-\text{OH}$)、アルミノール基 ($=\text{Al}-\text{OH}$) およびボラノール基 ($=\text{B}-\text{OH}$) が存在することはよく知られている。したがってガラスフレーク表面に存在するこのような水酸基とセルロース分子の水酸基との間に水素結合その他の相互作用が生ずることはじゅうぶん考えられることである。なお引張強さと引張破断伸びはガラスフレークを混抄することによって減少するが、これは紙繊維間にガラスフレークが侵入し、紙繊維相互のからみ合いを阻害するためであろう。

OFケーブルでは製造、布設および使用時に曲げその他の複雑

な機械的ストレスを受ける。特に超高圧OFケーブルは必然的に大サイズとなり、絶縁紙の機械的強度は非常に重要な性能である。ガラスフレーク混抄紙は引張弾性係数や座屈強さが大きいことからOFケーブルに適用した場合にしろその他のほかの欠陥が生じにくくなることが予想され、超高圧OFケーブル用紙として機械的特性の点でも特色ある絶縁紙になりうると考えられる。

6. 結 言

クラフトパルプとガラスフレークとの混抄紙について、おもに長網式の小形抄紙機を用い150μ紙および200μ紙を試作し、電気的特性および機械的特性を検討した。結論を要約すれば次のとおりである。

- (1) ガラスフレーク混抄紙は小形抄紙機により容易に抄造することができた。ガラスフレークの留りは良好で、ワイヤパートにおける汙水性も問題なかった。
- (2) クラフトパルプにガラスフレークを混抄することにより誘電率および誘電正接ともに減少し低損失化することを確認した。またインパルス破壊強度は増加する傾向がみられた。
- (3) 機械的特性においてはガラスフレークを混抄すれば縦横の方向性が少なくなり、引張弾性係数や座屈強さは増加した。ただ紙繊維相互のからみ合いを阻害するので引張強さや引張破断伸びは減少した。

以上、ガラスフレーク混抄紙は500 kV級超高圧OFケーブル用の低損失紙として、電気的にもまた機械的にも特色ある絶縁紙となることを明らかにした。なおすでにガラスフレーク混抄紙を用い、66 kV 3×150 mm² OFケーブルを試作した結果、予想どおり良好な性能を得ている。今後は漸次大サイズの超高圧OFケーブルへの適用を図っていく予定である。

終わりに本研究を進めるにあたり、ご指導いただいた日立製作所日立研究所紫藤主管研究員を始め関係者のかたがたに感謝の意を表わす。またご協力いただいた株式会社巴川製紙所、日本板硝子株式会社、日立化成株式会社の関係者のかたがたに厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 林: OHM, 57, 81 (1970-2)
- (2) R. W. Burrell, F. S. Young: IEEE Winter Power Meeting Papers, 70C26-PWR-A (1970-1)
- (3) 外山, 佐藤, 椎名: 電気四学会連合大会, No. 216 (1970-4)
- (4) A. Büchner: Wiss Veröff Siemens, 18, 204 (1939)
- (5) 上野: 紙の強度 (1956 丸善)
- (6) 土屋: 表面, 7, 160 (1969-3)