



HOKKAIDO UNIVERSITY

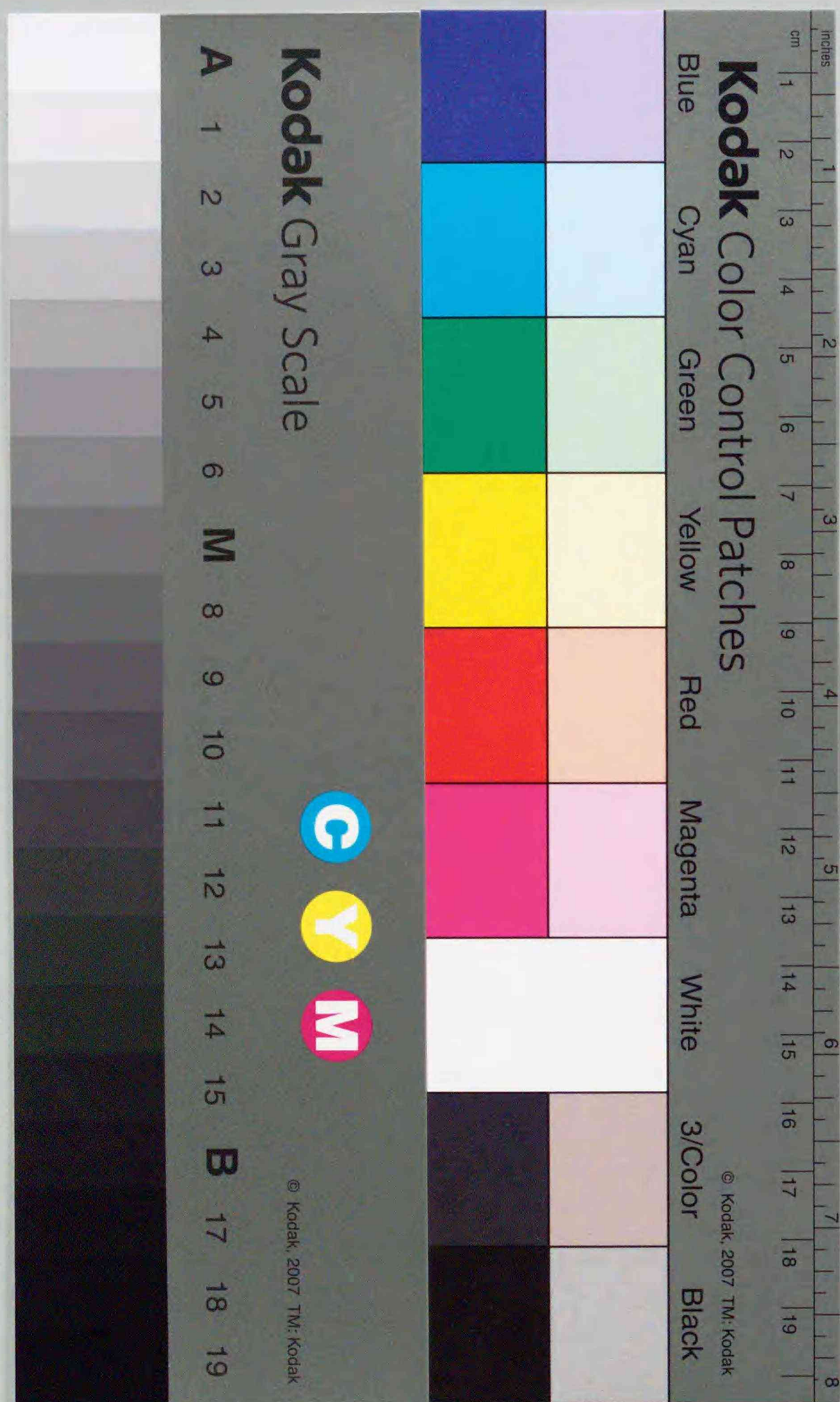
Title	電力ケーブル用絶縁材料の性能向上に関する研究
Author(s)	高橋, 享
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第4133号
Issue Date	1997-03-25
DOI	https://doi.org/10.11501/3122291
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/51418
Type	doctoral thesis
File Information	000000307482.pdf



電力ケーブル用絶縁材料の
性能向上に関する研究

1997年

高橋 享



電力ケーブル用絶縁材料の 性能向上に関する研究

目次	1
第1章 電力ケーブル用絶縁材料の概要と歴史	1
第2章 ポリプロピレンラミネート絶縁材料の特性と製造	17
第3章 ポリプロピレンラミネート絶縁材料の電気特性	18
第4章 ポリプロピレンラミネート絶縁材料の機械特性	20
第5章 ポリプロピレンラミネート絶縁材料の熱特性	25
第6章 ポリプロピレンラミネート絶縁材料の耐候性	35
第7章 ポリプロピレンラミネート絶縁材料の加工性	37
第8章 ポリプロピレンラミネート絶縁材料の応用	40
第9章 ポリプロピレンラミネート絶縁材料の将来展望	45
第10章 電力ケーブルの絶縁材料の選定と設計	48
第11章 電力ケーブルの絶縁材料の施工と検査	50
第12章 電力ケーブルの絶縁材料の故障と修理	55
第13章 電力ケーブルの絶縁材料の廃棄とリサイクル	58
第14章 電力ケーブルの絶縁材料の安全と環境	60
第15章 電力ケーブルの絶縁材料の規格と標準	65
第16章 電力ケーブルの絶縁材料の試験と評価	70
第17章 電力ケーブルの絶縁材料の信頼性と寿命	75
第18章 電力ケーブルの絶縁材料の経済性とコスト	80
第19章 電力ケーブルの絶縁材料の市場と需要	85
第20章 電力ケーブルの絶縁材料の技術と開発	90

1997年

高橋 享

電力ケーブル用絶縁材料の性能向上に関する研究

目 次

第1章 緒 論

第1.1節 本研究の背景及び目的	1
1.1.1 まえがき	1
1.1.2 高電圧電力ケーブル絶縁材料の歴史と現状	1
1.1.3 本研究の目的	10
第1.2節 本研究の概要	13
(第1章 参考文献)	16

第2章 ポリプロピレンラミネート紙の諸物性と特性改善

第2.1節 緒 論	17
第2.2節 PPラミネート紙の製造方法及び電気特性	18
2.2.1 製造方法	18
2.2.2 電気特性	23
第2.3節 1000kV級UHV OFケーブルの絶縁設計	35
2.3.1 要求電気特性	35
2.3.2 絶縁設計の考え方及び定数	37
2.3.3 1000kV級ケーブルの設計と予測性能	45
第2.4節 OFケーブルの紙層間面圧に及ぼすPP層の影響	49
2.4.1 面圧計算	49
2.4.2 各種物性値の測定	52
2.4.3 面圧に及ぼす α の影響のモデルケースによる検討	57
第2.5節 PPラミネート紙の耐油性とその改善	66
2.5.1 絶縁油溶解特性	66
2.5.2 吸油膨潤及びその抑制方法	71
第2.6節 結 論	78
(第2章 参考文献)	80

第3章 高分子の固体構造と絶縁破壊特性

第3.1節 緒 論	82
第3.2節 絶縁破壊強度の評価試験方法	83
第3.3節 各種高分子の絶縁破壊特性	84
第3.4節 ポリオレフィンの絶縁破壊特性	91
3.4.1 ポリオレフィンの物性と絶縁破壊強度	91
3.4.2 ポリエチレンの結晶性と絶縁破壊強度	93
第3.5節 ポリエチレンへの添加剤及びポリマーブレンドの効果	95
3.5.1 絶縁油添加効果	95
3.5.2 ポリマーブレンド効果	97
第3.6節 モデルケーブルによる絶縁破壊特性の評価	100
3.6.1 ケーブル製造条件及び評価方法	100
3.6.2 ケーブル製造条件と絶縁破壊特性	105
3.6.3 固体構造と絶縁破壊特性	105
第3.7節 結 論	113
(第3章 参考文献)	113

第4章 水トリーの進展機構及び抑止方法

第4.1節 緒 論	117
第4.2節 水トリーの進展機構とポリマー物性の関係について	119
第4.3節 極性ポリマーブレンドXLPE及び 各種ポリオレフィンの水トリー特性	122
4.3.1 極性ポリマーブレンドXLPEの水トリー特性	122
4.3.2 各種ポリオレフィンの水トリー特性	126
第4.4節 XLPEの結晶配向と水トリー特性	130
4.4.1 試料作成及び試験方法	130
4.4.2 水トリー特性試験結果	132
4.4.3 結晶配向と水トリー進展性の関係	136
第4.5節 超低密度ポリエチレン(VLDPE)による 水トリー抑止ケーブルの特性	141
4.4.1 各種VLDPEの水トリー特性	141
4.4.2 ケーブル試作	146
4.4.3 ケーブルの水トリー評価試験	148
第4.6節 結 論	154
(第4章 参考文献)	155

第5章 直流ケーブル用新種絶縁材料の開発

第5.1節 緒 論	156
第5.2節 各種高分子の直流破壊特性	157
5.2.1 供試試料の選定	157
5.2.2 直流破壊試験方法	157
5.2.3 結果と考察	159
第5.3節 変性HDPEの選定及びその特性	163
5.3.1 変性ポリエチレンの最適化検討	163
5.3.2 熱刺激電流による空間電荷特性の評価	168
5.3.3 変性HDPEの一般物性	170
第5.4節 変性HDPEケーブルの直流破壊特性	173
5.4.1 ケーブル試作	173
5.4.2 絶縁破壊特性	173
5.4.3 直流長期課電特性	179
第5.5節 変性HDPEケーブルの直流特性発現機構の検討	181
5.5.1 変性HDPEとXLPEの空間電荷の比較	181
5.5.2 変性HDPEの変性基及び添加剤の影響	190
第5.6節 結 論	195
(第5章 参考文献)	196

第6章 結 論

謝 辞

研 究 業 績

第1章 緒 論

第1.1節 本研究の背景及び目的

1.1.1 ま え が き

都市部の電力輸送を担う高電圧地中電力ケーブルは環境保全や防災、近年の都市機能の高度化に伴いその重要性は増してきており、電力供給信頼度のより一層の向上が要求されてきている。また、将来の電力需要の増大と安定供給に対処するため、高電圧化、大容量化、コンパクト化が高電圧電力ケーブルに対する一貫した要請事項である。

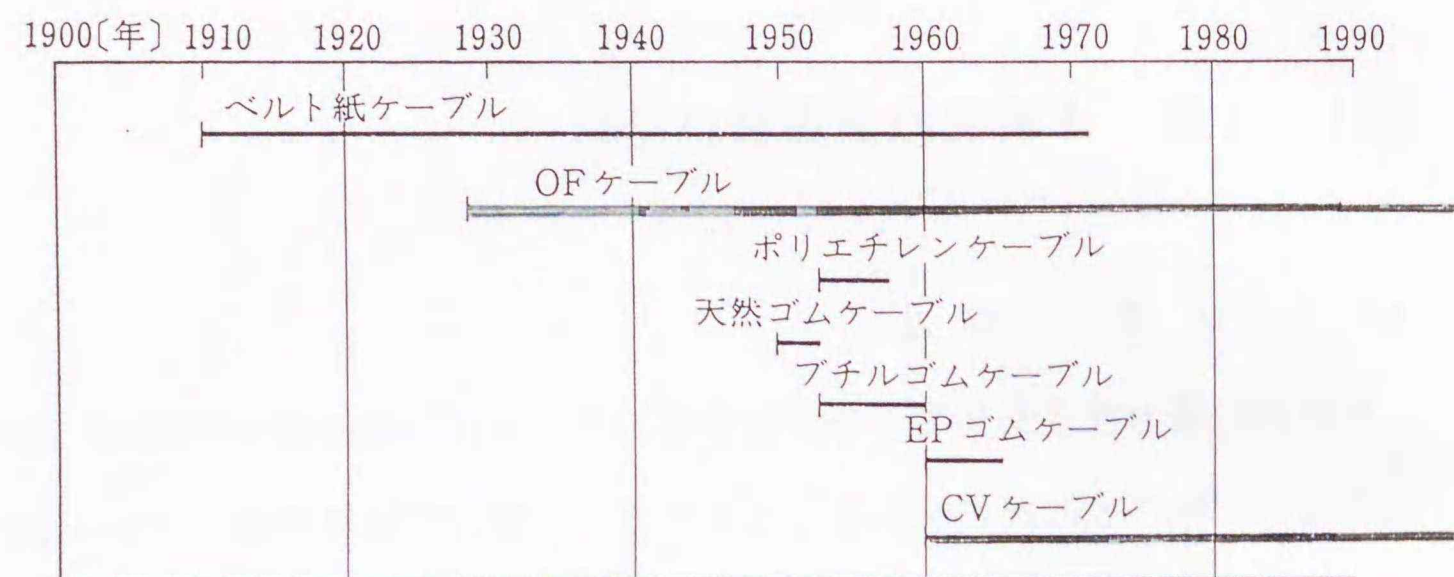
電力ケーブルの信頼性を支配する最も重要な要素は、限られた狭いスペース内で高電圧の絶縁を担う絶縁材料にあると言っても過言ではない。第1.1図に絶縁材料で分類した電力ケーブルの歴史的変遷を示すが⁽¹⁾、その絶縁信頼性が優れていることから、現在に至るまで広く用いられているものは油浸紙を絶縁体とするOF(Oil Filled)ケーブル及び架橋ポリエチレン(XLPE)を絶縁体とするCV(Crosslinked Polyethylene 絶縁、Vinylシース)ケーブルである。各種OFケーブル、CVケーブルの製品例並びに超高压電力ケーブルとしての構造例を第1.2図および第1.3図に示す。

本研究はこれらOFケーブル、CVケーブル絶縁材料の性能向上に関するものであり、1.1.2項ではこれまでの絶縁材料の開発経緯を概観し、1.1.3項でこれを踏まえて本研究の目的について述べる。

1.1.2 高電圧電力ケーブル絶縁材料の歴史と現状

高電圧電力ケーブルとして最も汎用されているOFケーブル、CVケーブルについて絶縁材料開発の視点から、現在に至る経緯は以下に述べる通りである。

OFケーブルは導体上に絶縁紙(クラフト紙)をテープ巻きし、真空加熱乾燥により水分を除去した後、低粘度の絶縁油(鉱油系、アルキルベンゼン系等)を含浸し、金属



第1.1図 電力ケーブルの変遷



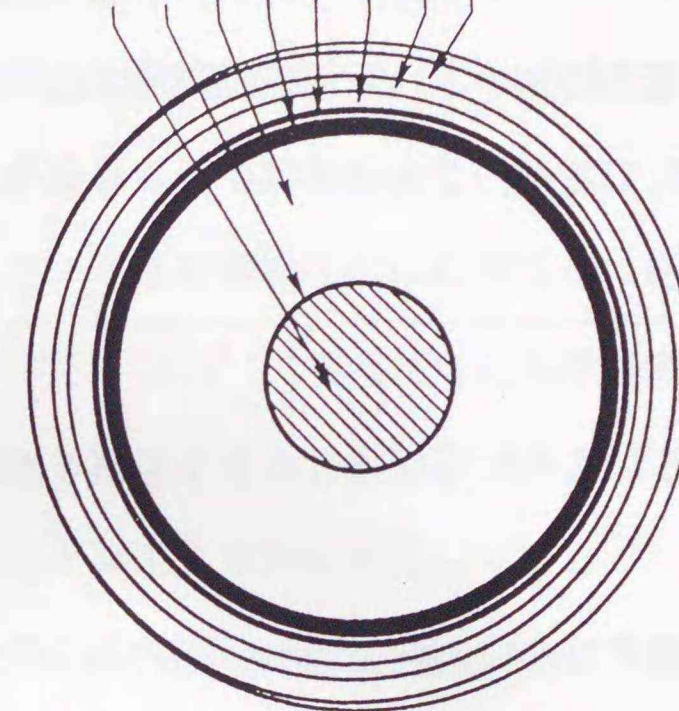
各種OFケーブル



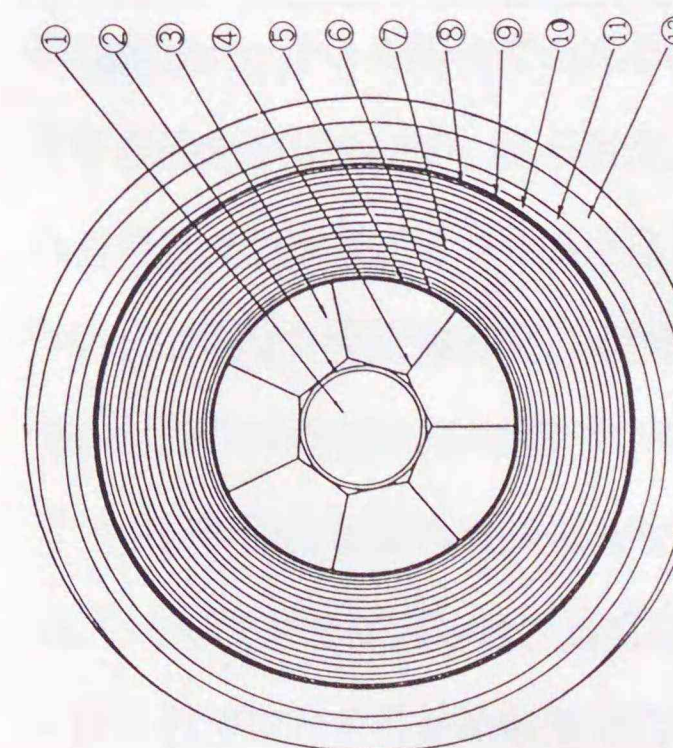
各種CVケーブル

第1.2図 各種OFケーブル、CVケーブル製品例

体層体層ブ被層
電絶電ーミ食
導レ導テ布ル防
半エ半い性アル
部ポリ部へ電付ニ
導内架外遮半波ビ



超高压単心CVケーブル



1	油	7	絶	紙
2	油	8	金	紙
3	導	9	し	層
4	セ	10	銅	層
5	導	11	アル	被
6	内	12	防	層

超高压単心OFケーブル

第1.3図 超高压OFケーブル、CVケーブル構造例

シースの内側に圧力タンクにより油圧（100～300kPa）をかける密閉型の構造となっている。油浸紙絶縁体は内部が油圧により油が充填されて完全なボイドレスとなっており紙繊維と細分化された油隙の積層構造の効果により高電界に対する優れた信頼性を示すことから、古くから用いられており60年以上の歴史を有する。材料、製造技術の改善により、現在国内では地中送電の最高電圧である500kV電力ケーブルにまで適用されている。OFケーブルをこのような超高压電力ケーブルに適用可能にするには絶縁材料（クラフト紙）の誘電特性（誘電率（ ϵ ）、誘電正接（ $\tan \delta$ ））、耐電圧特性の改善が不可欠であり、そのために下記の技術が採用されており、この技術は1960年代に完成された⁽²⁾。

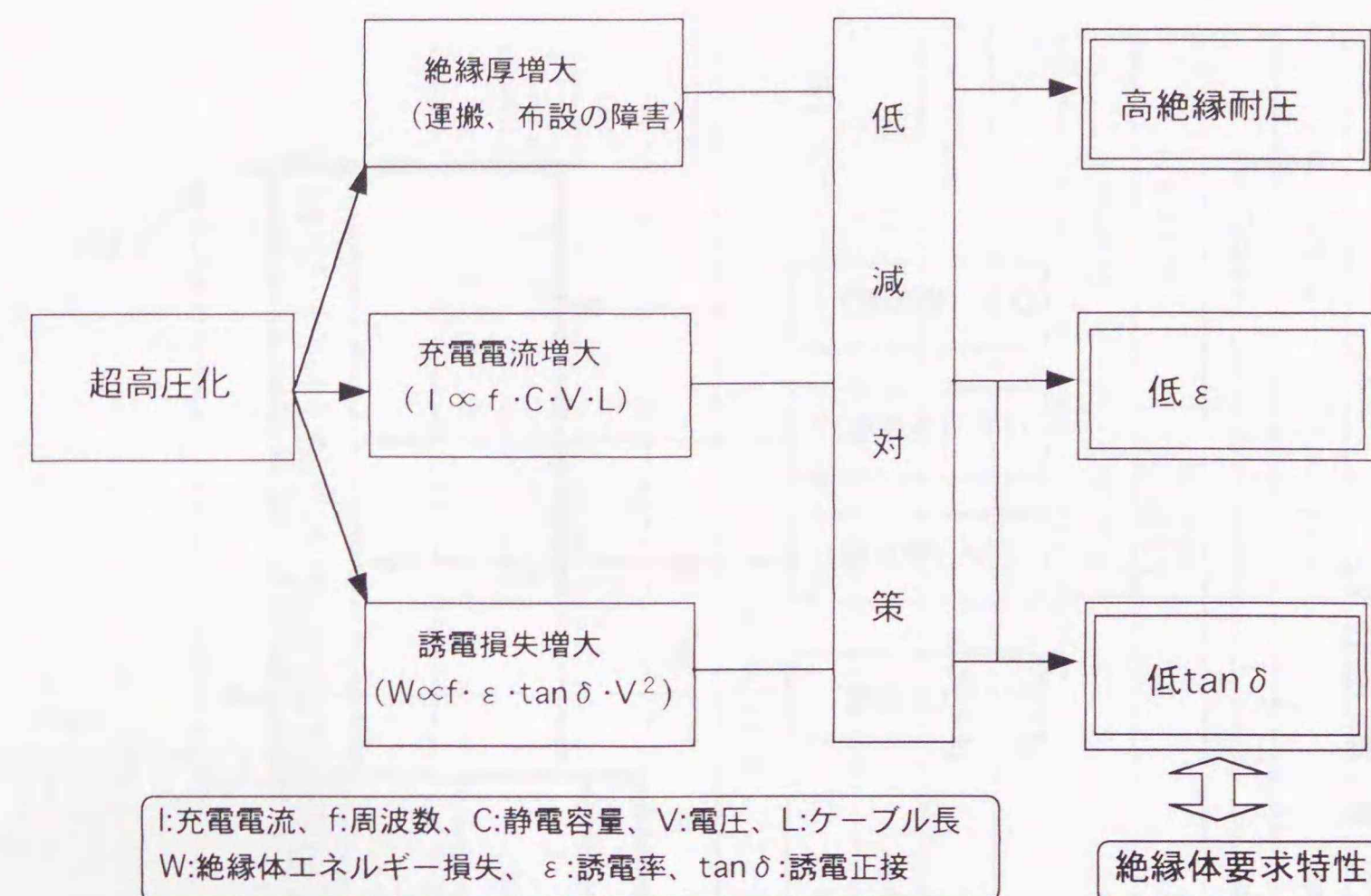
- ①誘電特性不良の原因となる樹脂分の少ない松系原木パルプの選定。
- ②誘電特性改善のための紙の低密度化と密度低下による耐電圧特性の低下を補うために気密度を高めた低密度・高気密度紙の採用。
- ③セルロースの双極子に起因する低温（室温付近） $\tan \delta$ 改善のためのヘミルセルロースを適量減少させたパルプの採用。
- ④絶縁紙中の金属イオン（特に1価陽イオン）に起因するイオン伝導による高温（100℃付近） $\tan \delta$ 改善のための脱イオン水洗紙の採用。

以上の手法の研究開発によりクラフト紙による500kV OFケーブルは短距離（接続部なし）では既に1972年に完成している。しかし、以上の改善にも拘わらず、元来比較的大きい極性基を有するセルロースをベースとするクラフト紙では誘電特性の改善には限度があり、第1.4図に示すように長距離送電超高压電力ケーブルに対しては絶縁体の充電電流（ $\propto \epsilon$ ）及び誘電体損失（ $\propto \tan \delta$ ）の面から、もはやクラフト紙のみの適用は不可能となる。このことから、OFケーブル絶縁体の低損失化（低 ϵ 、低 $\tan \delta$ ）の研究開発は早くから開始（1960年代）されており、プラスチックフィルム、合成繊維紙、紙とプラスチックを組合わせた半合成紙等が検討されてきた⁽³⁾。種々検討された中で誘電特性、絶縁破壊特性、耐絶縁油性（耐油性、油含浸性）、ケーブル製造性、経済性が総合的に考慮され現在実用化されているものは、ポリプロピレ

ン（PP）フィルムの両面にクラフト紙を貼合わせた構造の半合成紙であるPPラミネート紙であり、275kV長尺OFケーブルには1980年⁽²⁾、500kV長尺OFケーブルには1994年⁽⁴⁾に初めて採用された。

一方、CVケーブルは有機過氧化物系の架橋剤を添加した低密度ポリエチレンを導体上に押出後、高温、高圧力の架橋筒中での架橋により耐熱性を改善した架橋ポリエチレン（XLPE）を絶縁体とする電力ケーブルであり、1960年に3～6kVの配電ケーブル用に製造を開始して以来、その後の製造技術の進歩、絶縁材料の異物管理等により高電圧化が急速に進んできている。第1.5図及び第1.1表にOFケーブルと比較したCVケーブルの高電圧化の変遷並びに絶縁厚の比較を示すが、短距離ケーブルでは1980年に275kV、1988年に500kVに適用されており、接続部入りの長距離ケーブルに対しても1989年に275kVが実用化され⁽²⁾、さらに長距離500kV CVケーブルが近々実用化される見通しである⁽⁵⁾。CVケーブルはOFケーブルに比べ油を使わないので油圧維持のメンテナンスが不要であり、防災面でも優れることから、上述の急速な高電圧化の経緯を辿って近年OFケーブルに替わって使用量が増大しているが、高電界に対する絶縁材料の信頼性を確保するための開発経緯は決して平坦なものではなかった。CVケーブルでは無極性高分子であるXLPEを絶縁体とするため第1.4図の超高压電力ケーブル絶縁体に対する要求事項のうち誘電特性（ ϵ 、 $\tan \delta$ ）については殆ど考慮する必要がなく、専ら耐電圧特性の改善が最大の課題となる。特に、油が充填され完全ボイドレスとなっているOFケーブル油浸絶縁体と異なり、プラスチック固体絶縁体では局部的高電界を形成し絶縁破壊の起点となる絶縁体中の欠陥（電極突起、異物、ボイド）低減のための対策が極めて重要となる。これまでのCVケーブルの高電圧化適用への歩みは殆ど絶縁体中の欠陥低減対策の歩みと言ってもよく、その主なものは次に掲げる通りであり、第1.2表のようにまとめられる⁽²⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾。因みに、これらの対策により275kV～500kV CVケーブルでは、許容欠陥レベルとして絶縁体中異物50～100 μm 以下、電極（半導電層）突起及びボイドは数十 μm 以下の水準を達成している⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁸⁾。

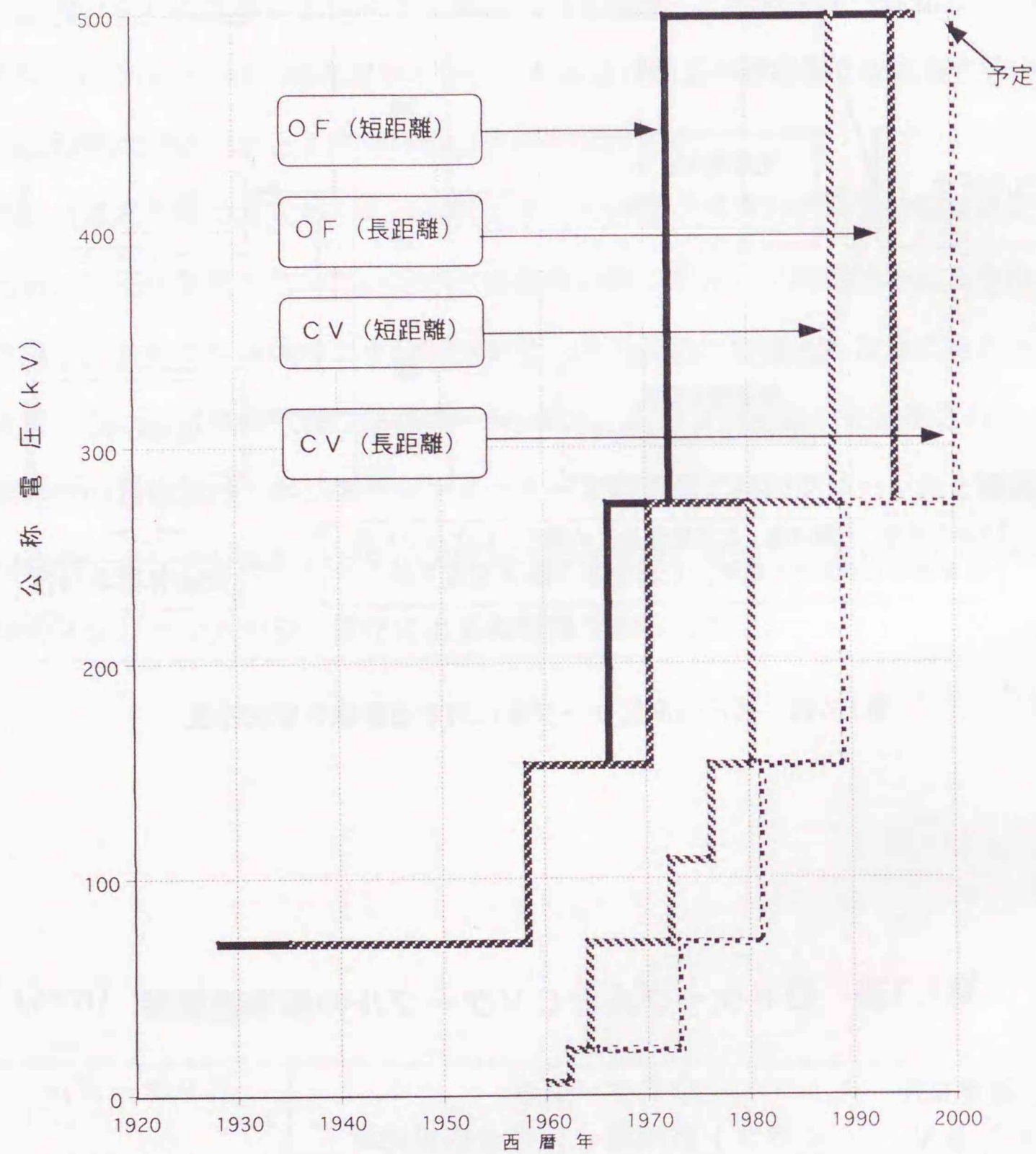
- ① 3層同時押出半導電層の採用：電極界面に相当する内部及び外部半導電層をテープ巻き方式から押出半導電層（ポリエチレン系樹脂にカーボンブラックを充填した半導電樹脂を用いる）とすることによって電極（半導電層）と絶縁層を一体化し、この際、界面突起の少ない平滑半導電材料を用い、内部及び外部半導電層と絶縁層を押出機ヘッド内に同時に合体させる3層同時押出方式を採用する。
- ② 水蒸気（湿式）架橋方式から乾式架橋方式への変更：ポリエチレンの架橋熱媒体として当初、加圧水蒸気を用いていたが水蒸気の凝縮に起因して絶縁体中にマイクロボイドを生成し、さらに絶縁体中の水分は水トリー劣化促進の原因ともなることから、水蒸気を用いない乾式架橋（加圧熱媒体：N₂ガス、シリコン油等）に変更された。
- ③ 絶縁体中の異物低減：ポリエチレンメーカーでの製造工程のクリーン化と輸送システムの改善によりポリエチレン中の異物レベルが大幅に低減し、さらにケーブル押出製造時のスクリーンメッシュ強化による異物捕捉効率の向上。



第1.4図 長尺超高压ケーブルに対する絶縁体要求特性

第1.1表 OFケーブルとCVケーブルの標準絶縁厚 (mm)

送電電圧 kV	OFケーブル		CVケーブル
	クラフト紙絶縁	半合成紙絶縁	
6.6	7.0	—	11.0
15.4	13.0		23.0
27.5	19.5	16	27.0
50.0	33.0	24.5	32.0
			(長距離) 27.0



第1.5図 国内OFケーブル、CVケーブルの最高使用電圧の推移

第1.2表 CVケーブルの欠陥低減技術の進歩と最低破壊強度 (E_L) の向上

	年 度	第 1 世 代		第 2 世 代		第 3 世 代	
		1975		1980		1985	
製造技術の改善	ボイド対策	蒸気架橋		乾 式 架 橋		第 2 ステップ	
	突起対策	三層タンデム押出		三 層 同 時 押 出		第 1 ステップ	
	異物対策	クリーンレベルI PE スクリーンレベルA		クリーンレベルII PE スクリーンレベルB		クリーンレベルIII PE スクリーンレベルC	
ケーブル欠陥レベル	ボイド	数十 μ m程度		10 μ m以下			
	突 起	100 μ m程度		10 μ m以下			
	異 物	250 μ m以下		100 μ m以下			
適用ケーブル		66 kV ~ 77 kV		275 kV 短尺		275 kV 長尺 500 kV 短尺	
		154 kV		30 kV/mm		35 kV/mm	
		20 kV/mm		60 kV/mm		75 kV/mm	
性 能	$E_{L(eo)}$	250 μ m以下		100 μ m以下		70 μ m以下	
	$E_{L(tmp)}$	50 kV/mm		60 kV/mm		80 kV/mm	

1. 1. 3 本研究の目的

1. 1. 2項では高電圧地中電力ケーブルの代表であり、現在最も汎用されているOFケーブルおよびCVケーブルについて、高電圧化適用に際して最も重要な構成材料である絶縁材料の視点からその研究開発の歩みを概観した。電力の安定供給確保のため電力ケーブルの高電圧化、大容量化、コンパクト化の適用拡大は今後ますます進む傾向であり、そのためには絶縁材料のより一層の高性能化並びに信頼性の向上が要望される。しかし、前項で概観したような近年の絶縁材料の急速な高電圧化への適用は、主に経験的な実証試験結果をもとに実線路に適用されるケースも多く、未解明の基礎的事項や更に改善、改良が要望される事項も多く、多数の課題が残されている。

すなわち、OFケーブルについては、従来のクラフト紙ケーブルでは長年の使用実績を有するが、近年超高压電力ケーブルに採用された半合成紙タイプのPPラミネート紙ケーブルでは未だ実線路への適用の歴史も浅く、PPラミネート紙の絶縁材料としての基礎的な特性やPP層の存在のためにPPの絶縁油膨潤の影響及びその対策等、従来のクラフト紙ケーブルになかった幾つかの問題点が今後の改善すべき課題とされている。

CVケーブルについては、XLPEが元来素材として優れた電気特性を有することから、超高压ケーブルへの適用に際しては、これまで専ら絶縁体中の欠陥除去による対策が主であり、絶縁材料(XLPE)そのものは基本的に変化していない。しかし、CVケーブルの今後の超高压ケーブルへの適用の拡大に伴い、より一層の信頼性の向上した高電界設計を可能にするには絶縁素材自身の高性能化、すなわち、高分子の結晶構造や分子構造と絶縁破壊特性の関係を明確にし、材料設計の指針を与えるべきである。

さらに、CVケーブルについてはOFケーブルに認められなかった特有の絶縁劣化現象として水トリー劣化が挙げられ、CVケーブル絶縁材料の短所となっている。この水トリーは絶縁体中の水分と電界の作用で絶縁体中の電界不整部(電極突起、異物、ボイド)を起点として発生する電氣的劣化現象であり、半導電層の電極突起を起点とする内外導水トリーについては半導電層の改善(3層同時押出方式の採用)による絶縁体/半導電層界面の平滑化によりほぼ解決しているが、絶縁体内部から発生するボウタイ状水

トリーについては絶縁材料自身の物性も関与することもある未解決の問題である⁽¹⁰⁾。

特に、水トリーは1~2kV/mmの比較的低電界でも容易に発生することから、遮水シースがなく浸水下で使用されるケースの多い地中配電ケーブルに対しては、水トリー発生機構の解明と併せてその抑止対策が望まれている。

また、CVケーブル絶縁体のもう一つの短所として、過去に超高压直流送電ケーブルとしての検討が試みられたが空間電荷形成等の直流高電圧に対する信頼性の問題から実用化に至っておらず、現在直流送電ケーブルとしては油浸絶縁ケーブルのみが用いられている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。直流送電ケーブルは海底長尺ケーブルとして用いられるケースが多く、油圧維持が不要で、トラブル時の絶縁油による海洋汚染の懸念もないCVケーブルタイプのプラスチック絶縁ケーブルであればそのメリットは大きく、実現が望まれている。

本研究では高電圧電力ケーブルの絶縁材料が課題として抱えている以上の状況に対し次の4項目に分類し第2章~第5章で詳細に検討を行った。

- ・PPラミネート紙の諸物性と特性改善(第2章)
- ・高分子の固体構造と絶縁破壊特性(第3章)
- ・水トリーの進展機構及び抑止方法(第4章)
- ・直流ケーブル用新種絶縁材料の開発(第5章)

各々のテーマ項目に対する目的をまとめて第1.3表に示す。

第1・3表 本研究で取り上げる研究テーマと目的

研究テーマ名	対象ケーブル	目的	該当章
PPラミネート紙の諸物性と特性改善	超高圧 OFケーブル	PPラミネート紙の絶縁材料としての基礎特性を明確にし、従来のクラフト紙ケーブルになかったPP層の存在に起因する問題点を定量的に把握し、その改善を行う。	第2章
高分子の固体構造と絶縁破壊特性	超高圧 CVケーブル	高分子絶縁材料の絶縁破壊特性をその固体構造（分子構造、結晶構造）の面から評価し、高耐電圧絶縁材料を得るための設計、加工の指針とする。	第3章
水トリーの進展機構及び抑制方法	配電 CVケーブル	絶縁材料の物性と水トリー特性の関係を明らかにし、この知見を基に水トリー抑止ケーブルの開発を行う。	第4章
直流ケーブル用新種絶縁材料の開発	超高圧 直流ケーブル	高分子構造と直流特性（直流破壊、空間電荷特性）の関係を把握し、直流ケーブル用新種プラスチック絶縁材料の探索並びにケーブルの開発を行う。	第5章

第1.2節 本研究の概要

本論文は高電圧電力ケーブルの最も重要な構成材料である絶縁材料の性能向上に関するものであり、課題として残されている解明すべき基礎的事項や特性改善が要求されている超高圧OFケーブル、超高圧CVケーブル、配電CVケーブル、超高圧直流ケーブルに亘る分野の第1.3表に示した項目を取り上げ、全6章で構成されている。

第1章「緒論」では本研究の背景、位置付け並びに本研究の目的と概要について述べた。

第2章「ポリプロピレン（PP）ラミネート紙の諸物性と特性改善」ではPPラミネート紙の基礎特性としての製造加工上の留意点、クラフト紙と比較した電気性能上の優位性、並びにPP層の存在に関わり従来のクラフト紙ケーブルでは考慮されてなかった幾つかの問題点の定量的把握とその改善方法について述べた。まず、PPラミネート紙の製品性能に影響を及ぼす製造加工上の因子としてPPレジジンやラミネート押出加工の選定条件について明らかにし、さらに、現用PPラミネート紙の弱点である紙/PP間の剥離力の向上手法についても確立した。次に、PPラミネート紙の電気特性として誘電特性（ ϵ 、 $\tan \delta$ ）は紙とPPの単純な積層モデルでほぼ等価に評価できること、絶縁破壊特性は交流（AC）及びインパルス（Imp）共にクラフト紙の約20%以上向上した値で見積もることができることを明らかにした。PPラミネート紙のこの優れた電気特性を用いて将来予想される1000kV級UHVケーブルに対する絶縁設計として、PP分率の異なるPPラミネート紙を適用した誘電率段絶縁（ ϵ グレーディング）を積極的に取り入れると共に、 ϵ グレーディングの段替わりに生ずる絶縁中層 $E_{\max}$ （最大電界強度）の新規の考え方を導入することにより、その絶縁設計が可能であることを示した。PP層の存在によるケーブル絶縁層に与える最も大きい影響はPP吸油膨潤、熱膨張に起因するPPラミネート紙の紙厚増加による紙層間面圧の増大であり、ケーブルの曲げ特性や油流抵抗に影響を与える。紙厚増加と面圧の間の関係式を導き、PPラミネート紙の紙厚増加率 α を $\alpha = \alpha_s + \alpha_T + \alpha_D$ （ α_s ：PP層の吸油膨潤、 α_T ：PP層の熱膨張、 α_D ：乾燥紙厚減、クラフト紙では $\alpha_s = \alpha_T = 0$ ）の要因に分離して、それぞれの

物性値の詳細な測定を行い、PPラミネート紙のPP分率、紙巻張力、温度条件と紙層間面圧との関係を定量的に明らかにした。PPラミネート紙の紙厚増加の最も大きい要因はPPの吸油膨潤であることから、その抑制方法について検討を行い、絶縁油練込PPとラミネート押出時の冷却条件（結晶性のコントロール）の選定により現用PPラミネート紙の約40%以下に膨潤を抑えたLSP (Low Swelling PPラミネート紙)を開発した。このLSPの使用により高PP分率（約75%）のPPラミネート紙が要求される1000kV級UHVケーブルの製造が可能となる見通しを得た。

第3章「高分子の固体構造と絶縁破壊特性」では高分子絶縁材料の固体構造の面から絶縁材料の高耐電圧化の方向を探るため、まず、高分子の固有絶縁破壊強度（ E_B ）を得るのに最も適切な試験方法について検討し、この試験方法による同一の評価基準で種々の分子構造を有する高分子についてその E_B を評価した。その結果、常温域（ケーブル使用温度域）では高分子構造と E_B の間には特定の顕著な相関は認められなかったが、HDPE（高密度ポリエチレン）、PP-R（ポリプロピレンランダムコポリマー）が比較的良好な絶縁破壊特性を示した。そこで、誘電特性、ケーブルへの押出加工性、機械特性も併せて考慮し、PE（ポリエチレン）を中心とする結晶性ポリオレフィンに絞って、分子構造、結晶性、添加剤&ポリマーブレンドの効果について詳細に検討を行った。これらの評価から、同一PEであっても結晶化条件（冷却条件、造核剤添加）を変化させることによる E_B の違いが最も大きいことが判明した。次に、以上の基礎検討結果を基に、HDPEを選定し種々の製造条件でケーブルを製造、評価した結果、絶縁体押出後の温度条件（冷却結晶化条件）が E_B に最も大きい影響を与え、最適条件では現用XLPEケーブルの約1.7倍の E_B の向上となった。ケーブル絶縁体の微細構造解析によりPEの結晶厚（ラメラ厚）と非晶厚の最適な存在比率が絶縁破壊特性を向上させるための重要な因子であることが明らかとなった。

第4章「水トリーの進展機構及び抑止方法」ではCVケーブルの未解決の絶縁劣化現象であるボウタイ状水トリー（BT）の抑止を目的として、絶縁材料の物性要因と水トリー特性の関係を把握し、この結果を踏まえて開発した水トリー抑止ケーブルの

諸特性について述べた。まず、水トリーの進展機構から見たポリマー物性の要因として、①親水性付与の効果、②結晶化度の効果、③結晶配向の効果を取り上げその関係を調べた結果、①については親水性（極性基）の付与によりBTは抑制傾向を示し、電界不整部への水の課電凝縮を抑える効果であると推定された。②については結晶化度は大きくても、小さくてもBTは抑制され現用XLPE近傍の中間の結晶化度が最もBTを発生させ易く、③については（極度変形による結晶配向XLPEを使用）BTの進展性と結晶軸配向の関係を調査することによりBTは結晶ラメラ間の非晶部に沿って進展し易いことが判った。以上の知見に基づき水トリー抑止ケーブル用絶縁材料として、低結晶性である程度の親水性添加剤を含む超低密度ポリエチレン（VLDPE）を選択し、ケーブル製造及びその評価を行った。その結果、VLDPEケーブルのBT発生数は現用XLPEケーブルの $1/10^4$ 以下の極めて優れたBT抑止能を示した。VLDPEケーブルの初期破壊電圧は現用XLPEケーブルより劣るものの、BT抑止の効果により浸水課電による破壊電圧の低下は非常に小さく、長期浸水課電後では現用XLPEケーブルに比べて大幅に優れていることが明らかになり、従って本ケーブルは浸水下の過酷な条件で使用するケースの多い地中配電ケーブルへの適用に有望であることが示された。

第5章「直流ケーブル用新種絶縁材料の開発」では超高压直流送電プラスチック絶縁ケーブルの開発を目的として、絶縁材料の探索検討を行い、材料スクリーニングの過程から直流特性に優れる新種絶縁材料として変性高密度ポリエチレン（変性HDPE）の選定に至った経緯と変性HDPEケーブルが直流ケーブルとして極めて良好であることを、その直流特性発現機構の解明と併せて述べた。まず基礎検討として、化学構造、結晶構造の異なる各種ポリマーの直流特性の評価により、①結晶性の向上→固有絶縁破壊強度の向上、②酸変性基の導入→空間電荷の制御の方向性が示され、①と②を併せ持つ少量の酸変性基を導入した変性HDPEを見出すに至った。次に、変性HDPEの最適化検討（結晶化度、変性基量の最適条件）を行い、この最適化された変性HDPEケーブルの直流絶縁破壊特性の評価の結果、初期及び長期特性共に非常に良好な性能

であることが確認された。このケーブルでの優れた直流特性は肉厚絶縁体の空間電荷の定量的測定の有効な手法として開発されたパルス静電応力法による評価によっても裏付けられ、超高圧直流ケーブルへの適用の見通しを与えた。

第6章「結論」では本論文の研究成果についての総括を述べた。

（第1章 参考文献）

- (1) 速水著：「CVケーブル」、コロナ社（昭和61）
- (2) 電気学会技術報告、第464号「絶縁材料技術開発の歴史的展開」（1993）
- (3) 電気学会技術報告、Ⅱ部第224号「最近の油浸絶縁と将来展望」（1986）
- (4) 藤井他：「本四連係500kV OFケーブル」、フジクラ技報、No88, p107（1995）
- (5) 神永：「500kV CVケーブルの開発動向」、電学論B、114巻10号, p964（平成6）
- (6) 浅井、島田：「架橋ポリエチレンケーブルの歴史と将来」、電学論B、115巻8号, p865（平成7）
- (7) 木村、高橋：「CVケーブルの現状と将来・CVケーブルの絶縁材料について」、放電研究、No140, p21（1993）
- (8) 久保田他：「500kV CVケーブルの基礎研究」、フジクラ技報、第84号、p139（1993）
- (9) 吉田、志関、竹鼻：「275~500kV CVケーブルシステムへの展望」、フジクラ技報、第80号、p23（1991）
- (10) 電気学会技術報告、Ⅱ部第404号「地中配電ケーブルの信頼性向上技術」（1992）
- (11) 今城他：「架橋ポリエチレン絶縁ケーブル特性と試験法に関する検討」
電力中央研究所報告、No177086（1978）
- (12) 電気学会技術報告、Ⅰ部第128号「直流油入機器、直流ケーブル材料の直流絶縁特性」（1979）

第2章 PPラミネート紙の諸物性と特性改善

第2.1節 緒 論

油浸紙を絶縁体とするOF（Oil Filled）ケーブルはその優れた絶縁信頼性から電力ケーブルとして60年以上の最も古くからの実績を有している。しかし、近年の送電システムの超高圧化に伴い、絶縁体にはより一層の低誘電損失化、高絶縁耐力化が要求されている。例えば、ケーブル絶縁体による単位長当たりの損失エネルギー W_d は $W_d = 2\pi \cdot f \cdot c \cdot n \cdot (V^2/3) \cdot \tan \delta \times 10^{-3}$ (W/m) (f : 周波数、 c : 静電容量($\mu F/km$)、 n : 線心数、 V : 電圧(kV)、 $\tan \delta$: 誘電正接)で示されるように、電圧の2乗に比例して増大することから275~500kVクラスの長尺ケーブルになると ϵ 、 $\tan \delta$ の大きい材料は不利となる⁽¹⁾。OFケーブル絶縁体の構成材料である絶縁紙（クラフト紙）はセルロースの極性基のためにCVケーブル絶縁体（XLPE）に比べ比較的大きい ϵ 、 $\tan \delta$ を有している。（油浸紙 $\Rightarrow \epsilon = 3.5$ 、 $\tan \delta = 0.2\%$ 程度、XLPE $\Rightarrow \epsilon = 2.2$ 、 $\tan \delta = 0.01\%$ 以下）このことから、OFケーブル絶縁体の低損失化の課題は早い時期（1960年代）から取り上げられており、プラスチックフィルム、合成繊維紙、紙とプラスチックを組み合わせた半合成紙などが検討されてきた⁽¹⁾。誘電特性のみを考慮すれば無極性のプラスチックを用いることによりその目的は容易に達成できるが、種々検討された中で、絶縁破壊特性、耐絶縁油特性（耐油性、油含浸性）、ケーブル製造性、経済性を総合的に満たすものとして、現在実用化されているものは半合成紙タイプのポリプロピレン（PP）ラミネート紙である。

しかし、PPラミネート紙ケーブルの超高圧ケーブル実線路への適用の歴史は未だ浅く、初めて採用されたのは275kV級では1980年、500kV級では1994年である⁽²⁾⁽³⁾。また、PPラミネート紙ではPP層の存在のため従来のOFケーブル（クラフト紙絶縁）になかった問題としてPPの油膨潤、熱膨張の影響があげられる。すなわち、PP層の絶縁油及び温度による厚さ増加がテープ巻きされて構成されるOF

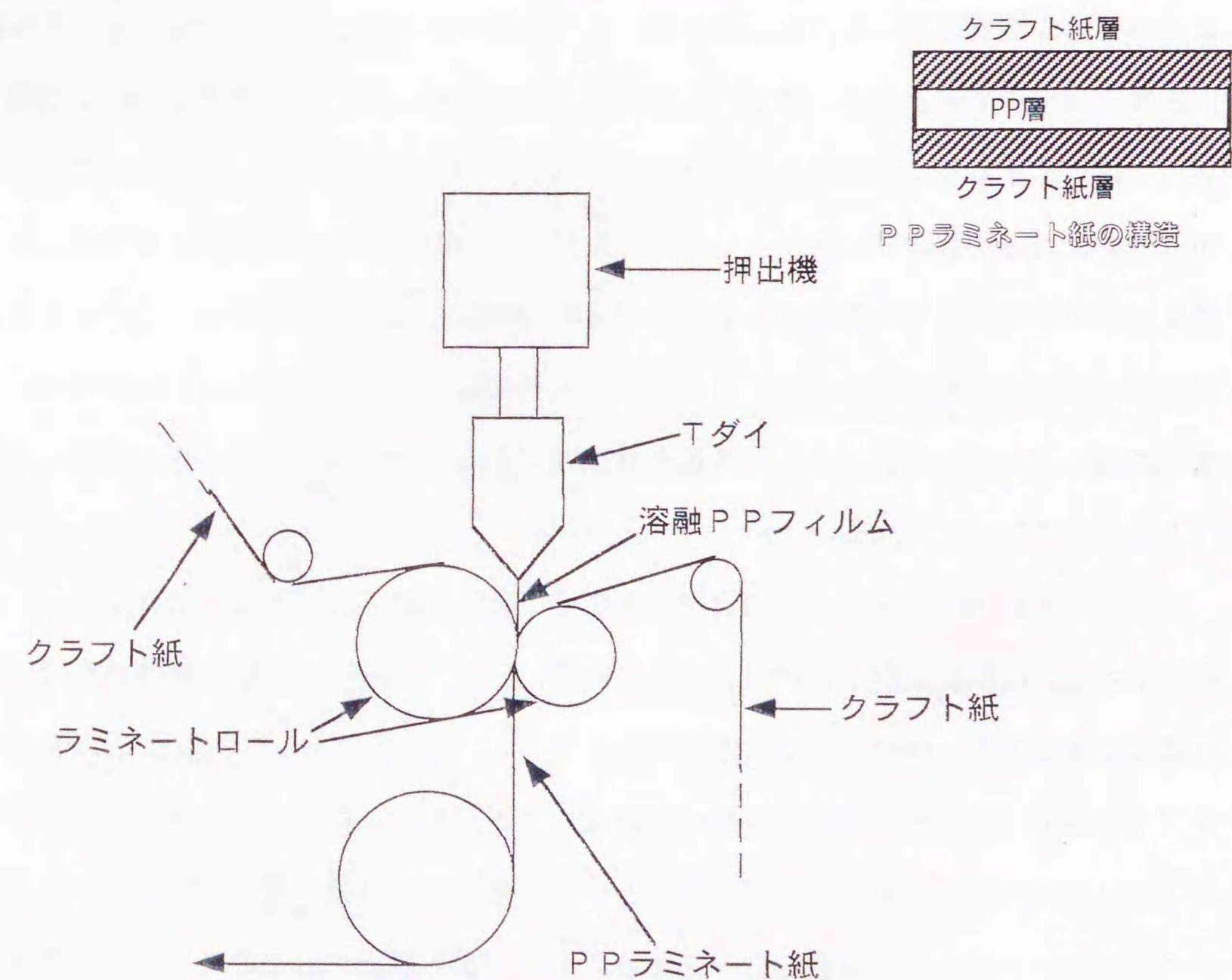
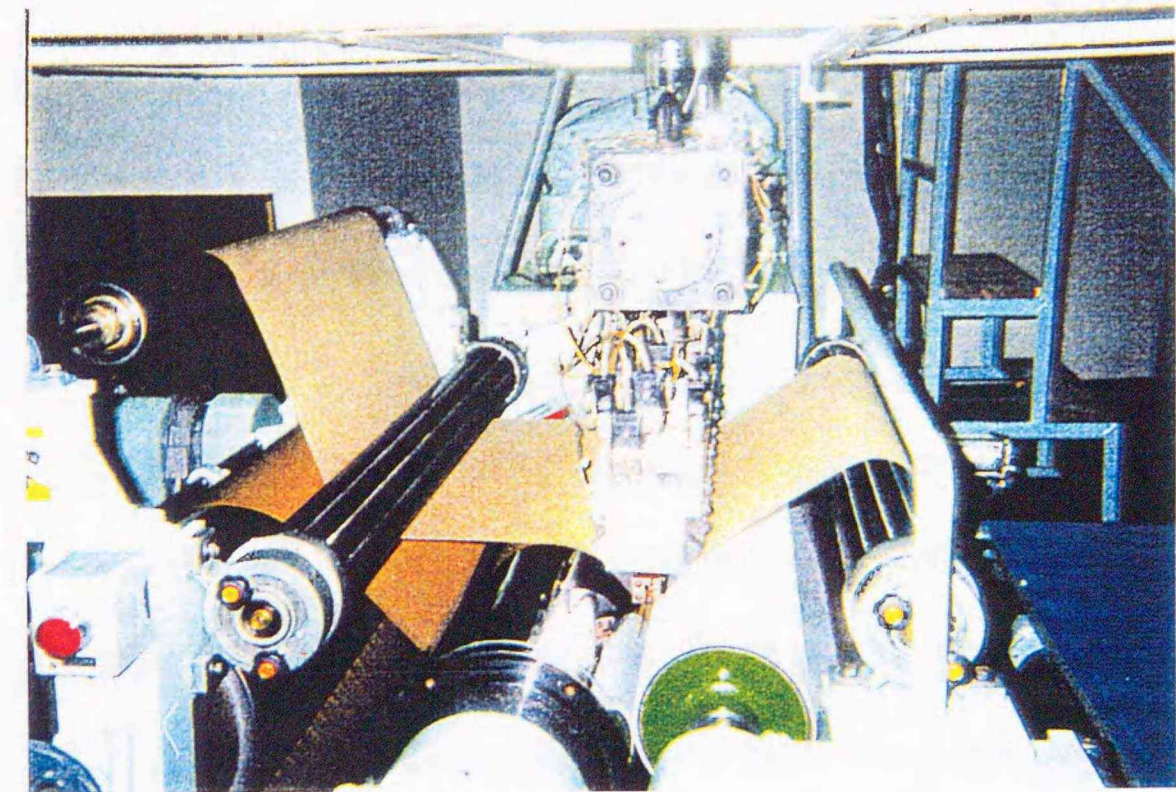
ケーブル絶縁層の層間面圧を増大させることから、ケーブルの製造条件（テープ巻き条件、絶縁油含浸条件）や使用条件に制約を余儀なくされている。さらに、将来の1000 kV級UHV（Ultra High Voltage）ケーブルへの適用に応えるためには、一層の低損失化、すなわちPPラミネート紙のPP分率の増大が必要となるためPP層の油膨潤抑制等の改善が一段と要求される。

本章ではこれらの課題に対し、先ず、第2.2節ではPPラミネート紙の製造加工方法並びにクラフト紙と比較した電気特性（誘電特性、絶縁破壊特性）の優位性について説明し、次に、第2.3節ではPPラミネート紙の材料電気特性から推察した1000 kV級OFケーブルの絶縁設計の考え方について述べる。第2.4節及び第2.5節ではPPラミネート紙の改善すべき課題であるPP層の存在による絶縁層の層間面圧に及ぼす影響と、この影響を少なくするのに最も効果の大きいPPの油膨潤の抑制方法について検討した結果を述べる。

第2.2節 PPラミネート紙の製造方法及び電気特性

2.2.1 製造方法

PPラミネート紙は最も一般的には第2.1図に示すように、Tダイから熔融押出されるPPフィルムの両面に絶縁紙（クラフト紙）を沿わせラミネートロールで圧着後冷却することにより製造される。この際、接着剤等は誘電特性を非常に悪化させることから使用することはできず、PPと絶縁紙の接着は紙繊維の空隙に熔融PPが食い込むだけの物理的な接着であり、従って、紙/PP間の接着強度（剥離強度）は一般的にはかなり低い。また、PPラミネート紙はPP層の片面ではなく、両面に絶縁紙を配置する理由は絶縁油の含浸性が良いことの他に、次項（2.2.2項）で述べるように片面ラミネート紙では油隙がPP面に直接触れる部分もあり、この場合絶縁破壊特性を低下させるからである。



第2.1図 PPラミネート紙の製造方法

TダイによるPPフィルムの押出加工上の留意点は一般的に知られてるラミネート押出加工と同じであるが⁽⁴⁾、PPラミネート紙の製造加工条件の中で製品性能に影響を及ぼす主な因子は ①PPレジンの選定及び押出温度 ②ラミネートロール圧着温度である。PPは立体化学構造的にはアイソタクテック、シンジオタクテック、アタクテックの3種があり、また、アイソタクテックPPの中にもプロピレンの重合体だけから成るホモポリマー及び少量の共重合成分を含有するコポリマー（ブロックコポリマー、ランダムコポリマー）のグレードがある⁽⁵⁾。この中で、PPラミネート紙用のPPは耐絶縁油性（油中膨潤及び油中溶解）を考慮して、立体規則性が高く最も高結晶性であるアイソタクテックのPPホモポリマーが用いられる。前述のように紙/PP間は紙繊維間に熔融PPが絡む単なる物理的接着であるため、PPの押出時の熔融粘度は、PPラミネート紙の剥離強度を左右し、従って、PPのMFR（メルトフローレート）及び押出温度の選定が重要となる。第2.1表にその例を示す。尚、剥離強度については第2.2表に示すように絶縁紙の選定及びPPレジンの特殊処理によっても改善することができる。（説明は後述）ラミネートロール温度は熔融PPが冷却結晶化する際の冷却速度を決めるため、PPラミネート紙のPP層の結晶性に影響を及ぼし、この結晶性は耐油性（特に油中膨潤）に影響する。特に、PPの場合は冷却条件により結晶性への影響がかなり大きいことからこの条件選定は重要であり、その詳細については第2.5節（2.5.2項）で述べる。

紙/PP間の剥離強度はPPの熔融粘度の他に絶縁紙の表面荒さにも依存する。この表面荒さは紙の気密度が小さい程大きくなるが、一方、絶縁紙では絶縁破壊特性の面からは気密度が大きい程絶縁破壊特性が向上する⁽⁶⁾。気密度はクラフト紙抄紙の際のパルプの叩解度（紙繊維のフィブリル化の程度）で左右され、気密度の大きい紙は繊維のフィブリル化の進んだ緻密な紙であることから表面が平滑（表面荒さが小さい）となりPPラミネート紙の剥離強度を低下させる。この問題を解決するために、高気密度紙の片面を低気密度化処理した2層構造のクラフト紙（2重紙）を用い、PP層側に低気密度面が向くようにラミネートする方法について検討した。第2.2表に結果を示したよ

第2.1表 PPのMFR及び押出温度と剥離強度データ例

PPのMFR (PP-1<PP-2)	押し出し温度 (T1<T2<T3)		
	T1	T2	T3
PP-1	—	—	0.56
PP-2	0.68	0.74	0.88

（剥離強度：N/15mm幅）

試料：120 μ m PPラミネート紙（30 μ m紙/PP/30 μ m紙）
（30 μ m紙：気密度 $\rightarrow 3 \times 10^4$ ガーレ秒、密度 $\rightarrow 0.72 \sim 0.75$ g/cm³）

第2.2表 剥離強度の改善効果

PPラミネート紙構成		剥離強度 (N/15mm幅)		破壊強度 (kV/mm) *3	
紙の気密度*1	PP	乾紙	油浸後*2	AC	Imp
2 $\sim 3 \times 10^3$	無処理 PP	1.80	0.40	55	110
高気密側 3×10^4 以上 低気密側 ~ 0	無処理 PP	3.0以上	1.0	60	115
2 $\sim 3 \times 10^3$	シラングラ フトPP	3.0以上	3.0以上	—	—

試料：170 μ m PPラミネート紙（40 μ m紙/PP/40 μ m紙）

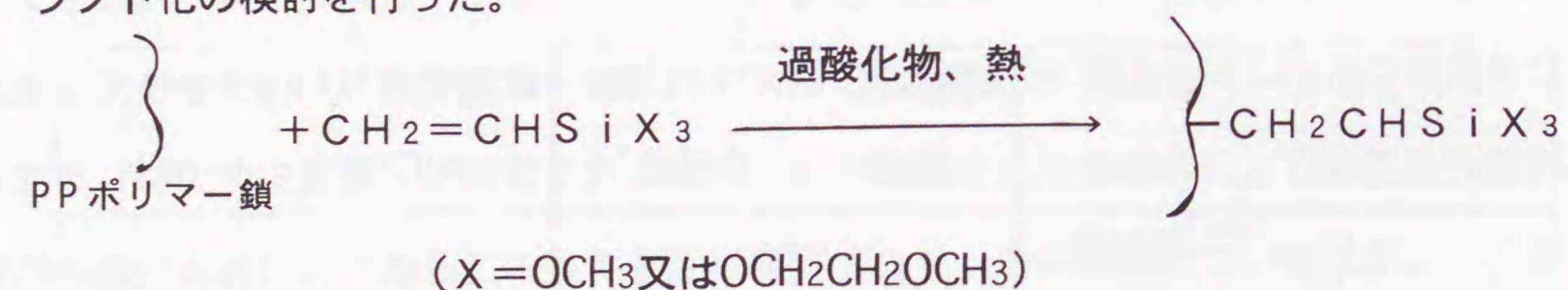
*1：気密度単位 $\rightarrow$ ガーレ秒

*2：油浸条件 $\rightarrow 100^\circ\text{C}$ アルキルベンゼン油中 $\times 24$ 時間

*3：破壊強度 $\rightarrow$ モデルケーブル（絶縁厚0.6 $\sim$ 0.7mm）試料

うに2重紙の使用によって剥離強度は大きく改善され、また、同表中にラミネート紙の絶縁破壊強度も示してあるが、高気密度紙をベースとしているため破壊特性もやや向上している。

剥離強度を向上させる別の方法として、シラングラフト化した高密度ポリエチレン(HDPE)をプラスチック層に用いたラミネート紙で剥離強度が著しく向上することが報告されている⁽⁷⁾。そこで、同様の方法をPPに適用する方法についても検討した。シランカップリング剤は一般式 RSiX_3 (R:官能基、X:アルコキシ基)で示され、官能基の種類によりビニル系、エポキシ系、アミン系等があるが化学構造の中に極性基を含むため誘電特性への影響が考えられる。各々のシランカップリング剤(ビニル系、エポキシ系、アミン系)をPPに添加した場合の誘電正接($\tan \delta$)を調査した結果、アミン系>エポキシ系>ビニル系≒オリジナルPP(無添加PP)の順の $\tan \delta$ であり、ビニル系シランカップリング剤では $\tan \delta$ に殆ど影響を与えないことが判った。そこで、ビニル系シランカップリング剤($\text{CH}_2=\text{CHSiX}_3$)を用いてPPへの下記反応によるグラフト化の検討を行った。



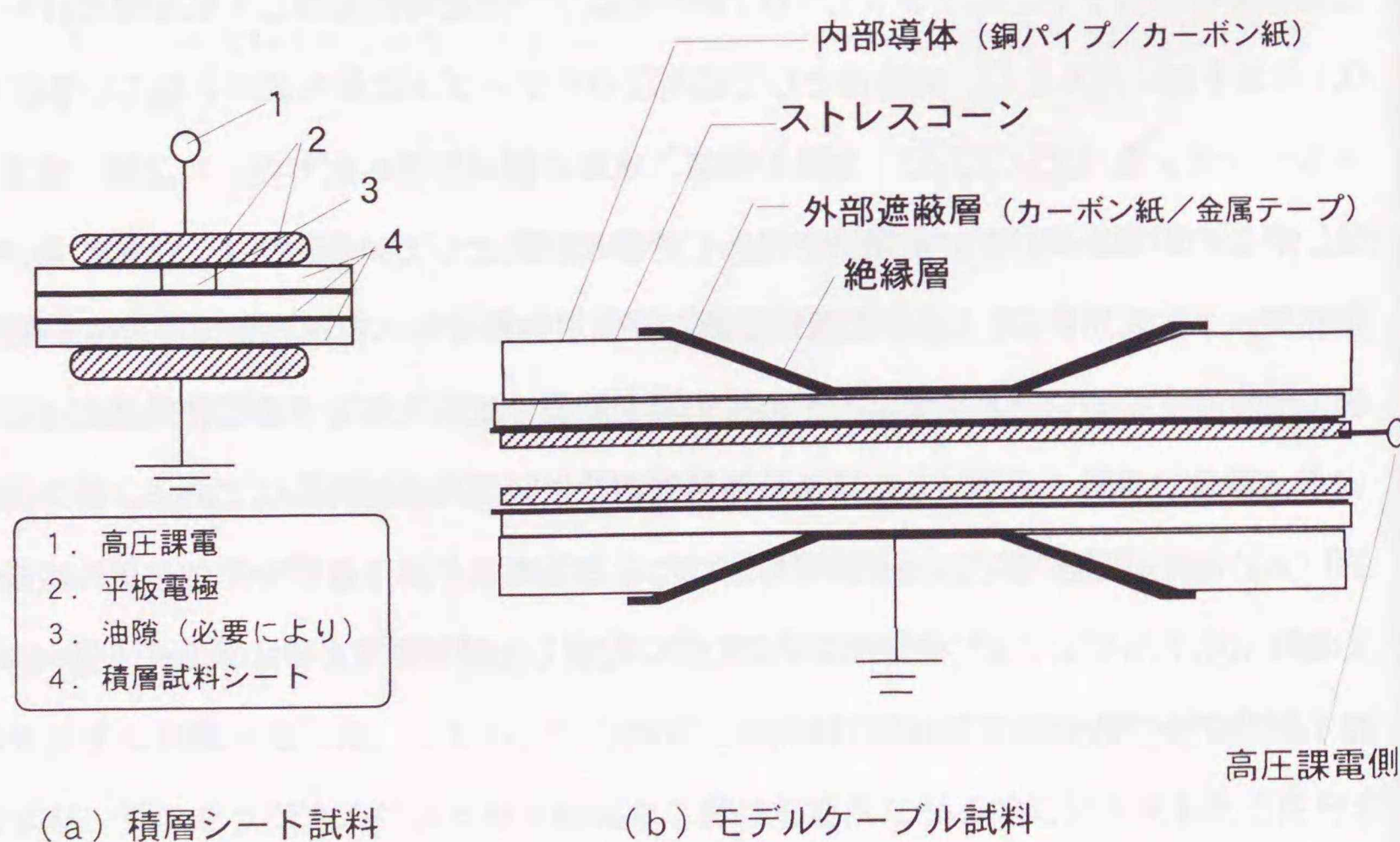
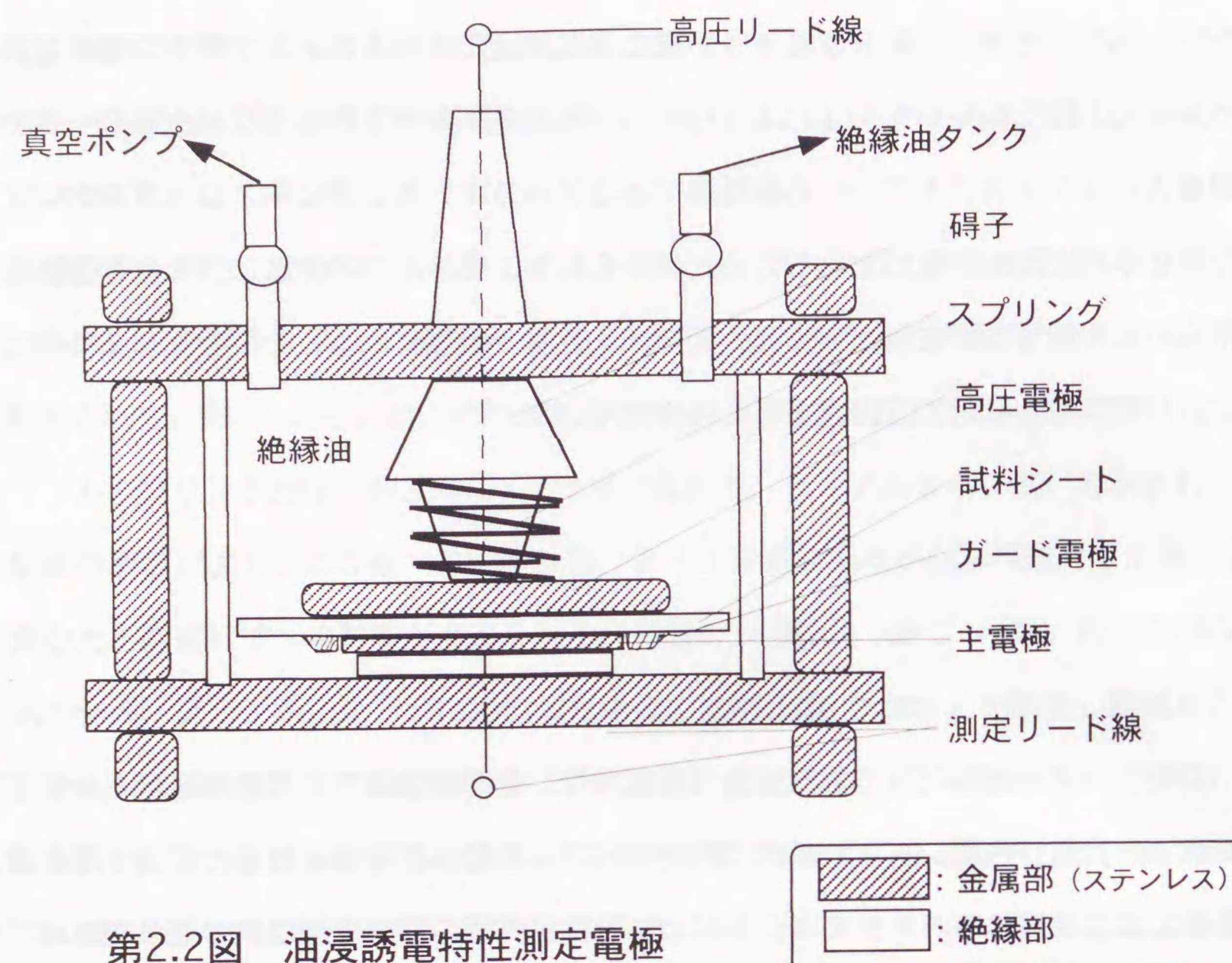
シランカップリング剤をポリマー鎖にグラフト化させるにはポリマー鎖中にラジカル点を発生させる必要があり、通常、ポリマーに微量の過酸化物を添加しておき、その熱分解ラジカルでポリマー鎖にラジカル点を造る方法がポリエチレン(PE)等の場合に一般的に用いられている方法であり、PEでは容易にグラフト化を行うことが出来る⁽⁸⁾。一方、PPでは分子構造中に3級炭素を含むためPEの場合と同様の過酸化物(DCP; Dicumyl Peroxide等)を用いると、グラフト化が起こるのに先行してPPの分子鎖切断を生ずる結果となった。しかし、この問題は分解温度の低い過酸化物を選定することにより、PPがラジカルによる分子鎖切断を受ける温度になる前にグラフト化を先行させることに成功した。第2.2表に示されたデータはこのようにして得られたシラング

ラフト化PPを用いたPPラミネート紙の剥離強度であり、紙/PP間が剥離不能なレベルまで一体化している。このような強力な剥離強度が得られる理由はセルロースの水酸基とシラングラフトマー中の極性基であるアルコキシ基の間に例えば水素結合のような半化学的な結合を生じているためと考えられる。但し、この方法は強力な剥離強度が得られる可能性は示されたものの、製造加工行程が煩雑になることや押出加工条件の選定法など実用化に対する課題が未だ残されている。

2.2.2 電気特性

(1) 試験方法

OFケーブル絶縁材料の電気特性(誘電特性、絶縁破壊特性)は絶縁紙の水分除去後絶縁油を含浸し金属シースで密閉されたケーブル絶縁体と等価の状態の評価が必要がある。以降に述べるPPラミネート紙の材料電気特性の標準状態は次の通りであり、OFケーブルのこの状態を模擬している。すなわち、PPラミネート紙のクラフト紙層部の水分を除去するため120℃×0.1mmHg以下で所定時間乾燥して紙層部水分を0.1%以下のレベルとし、絶縁油として超高压OFケーブルに最も汎用されているアルキルベンゼン油(JIS C2320 2種1号油:脱気、脱水処理したもの)を注油、含浸後、吸湿の影響を受けない密閉系を保って評価用試料としている。第2.2図に油浸誘電特性(ϵ :比誘電率、 $\tan \delta$:誘電正接)評価用の電極を示す。ステンレス製平板電極にセットされるシート状試料をそのまま真空乾燥→注油含浸できる密閉構造となっている。第2.3図(a)(b)は油浸絶縁破壊特性評価用の試料形状である。第2.3図(a)は平板電極間にシート試料を重ねたものであり必要によりOFケーブル絶縁層の油隙(オイルギャップ)模擬部を所定位置に配置した試料系であり、第2.3図(b)はモデルケーブル構造の試料系である。



第2.3図 油浸絶縁破壊特性評価試料形状

(2) 誘電特性

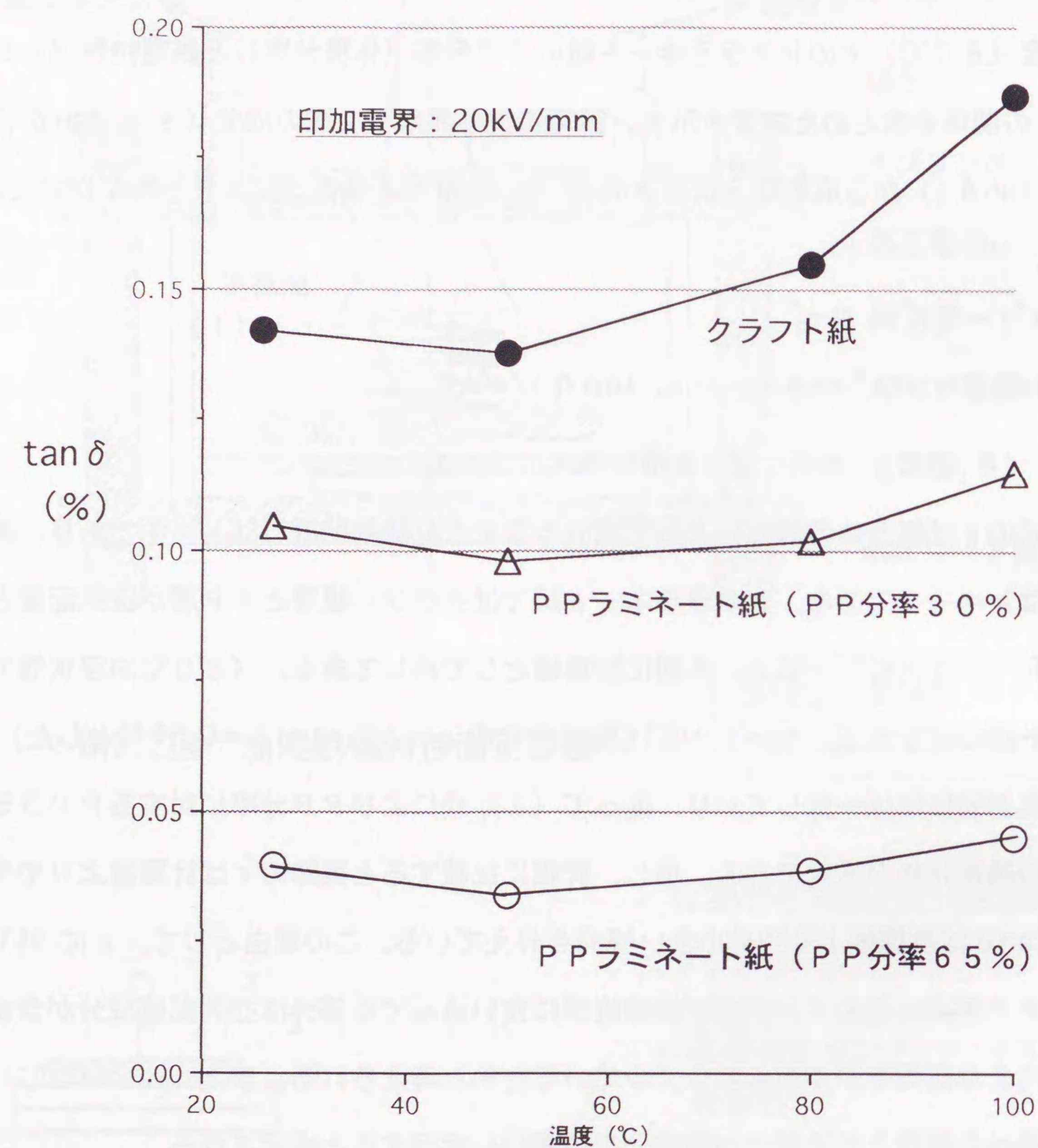
PPラミネート紙の $\tan \delta$ -温度特性例を第2.4図に示す。また、第2.5図には特定温度(80℃)でのPPラミネート紙のPP分率(体積分率)と誘電特性(ϵ & $\tan \delta$)の関係をまとめた結果を示す。誘電特性の異なる2種の成分(ϵ_1 , $\tan \delta_1$ 及び ϵ_2 , $\tan \delta_2$)から成る複合誘電体の ϵ , $\tan \delta$ はべき級数法により一般に次式で示される。⁽⁶⁾

$$\left. \begin{aligned} \epsilon^K &= \theta_1 \epsilon_1^K + \theta_2 \epsilon_2^K \\ \tan \delta &\approx (\theta_1 \epsilon_1^K \tan \delta_1 + \theta_2 \epsilon_2^K \tan \delta_2) / \epsilon^K \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

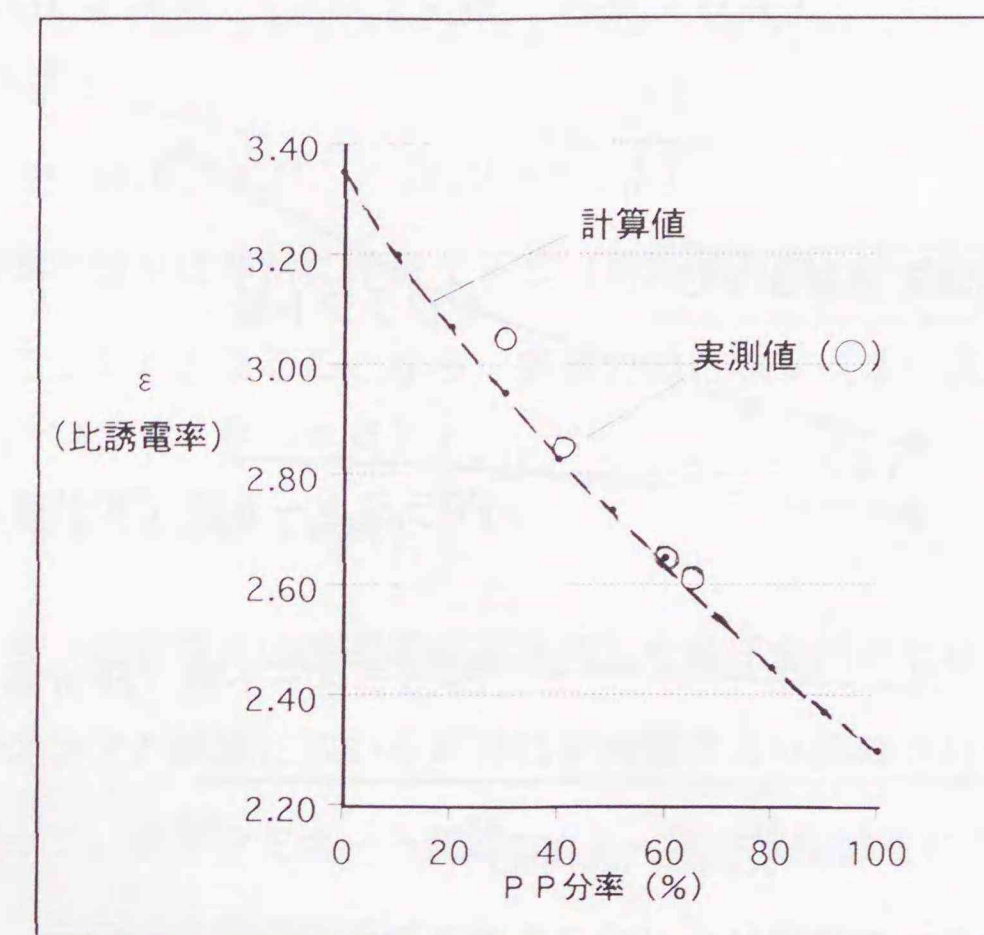
(θ_1 , θ_2 : 成分1, 2の体積分率, $-1 \leq K \leq 1$)

(1) 式の k は複合体の構成によって異なる値をとり並列配置では $k=1$ であり、直列配置では $k=-1$ である。PPラミネート紙ではクラフト紙層とPP層が直列配置となるので $k=-1$ となり、第2.5図に計算値として示してある。(80℃油浸状態でのクラフト紙の $\epsilon=3.35$, $\tan \delta=0.16\%$, PPの $\epsilon=2.3$, $\tan \delta=0.01\%$ とした)計算値と実測値はほぼ一致しており、従って(1)式によりPP分率に対するPPラミネート紙の誘電特性が推定できる。但し、詳細に比較すると実測の ϵ は計算値よりやや大きく、 $\tan \delta$ は計算値よりやや小さい傾向を与えている。この理由として、 ϵ については紙/PP界面付近のPP樹脂が紙繊維間に食い込んでる部分は並列配置成分が含まれており完全な直列モデルから多少ズレているためと考えられる。また、 $\tan \delta$ については次に述べる紙層とPP層での電圧分担の違いに起因すると推定される。

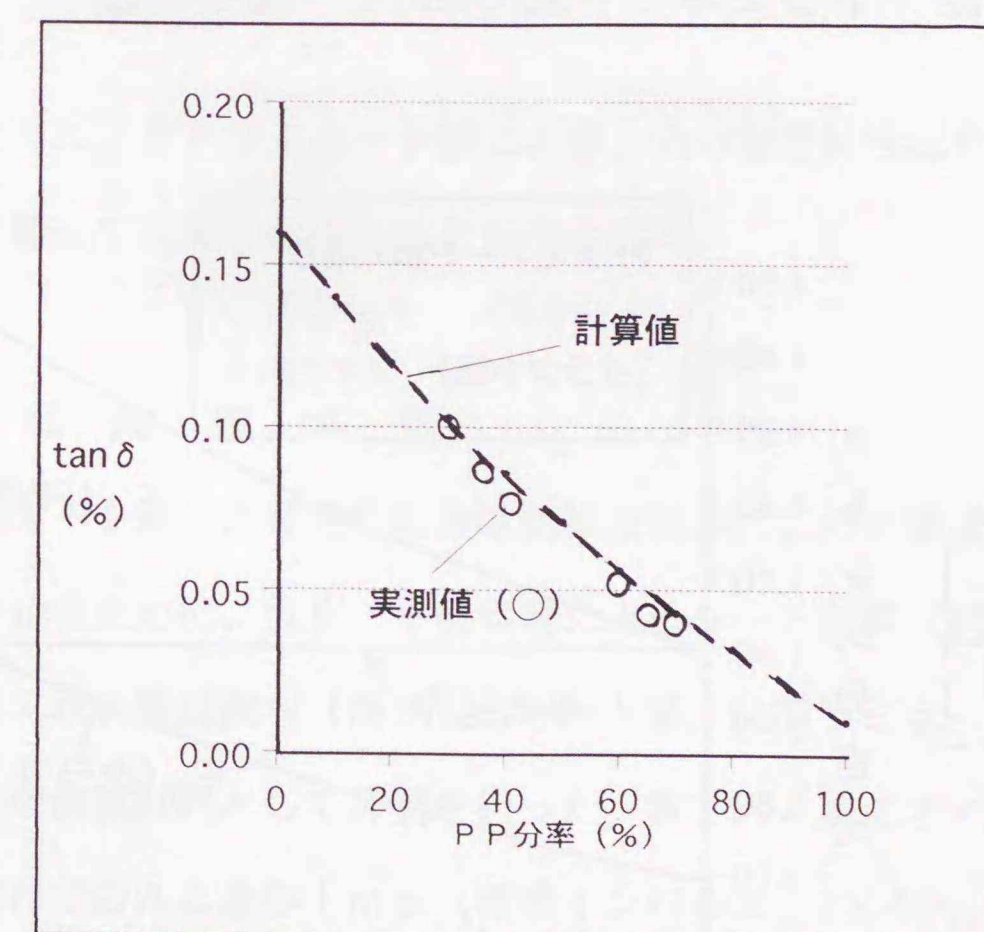
第2.6図にPPラミネート紙の $\tan \delta$ -電界特性をクラフト紙と比較して示す。クラフト紙の電界による $\tan \delta$ の上昇は紙繊維間の微細油隙での電界による油のイオン化に起因するとされている⁽⁶⁾。一方、PPラミネート紙の電界による $\tan \delta$ 増はクラフト紙よりもかなり小さく、PP分率が大きい程この傾向がある。第2.7図のような2層誘電体(誘電率: ϵ_1 , ϵ_2 , 導電率: σ_1 , σ_2)に外部電圧 V を時刻 $t=0$ から印加した時の誘電体1に加わる電界 E_1 の時間変化は次式となる⁽⁹⁾。

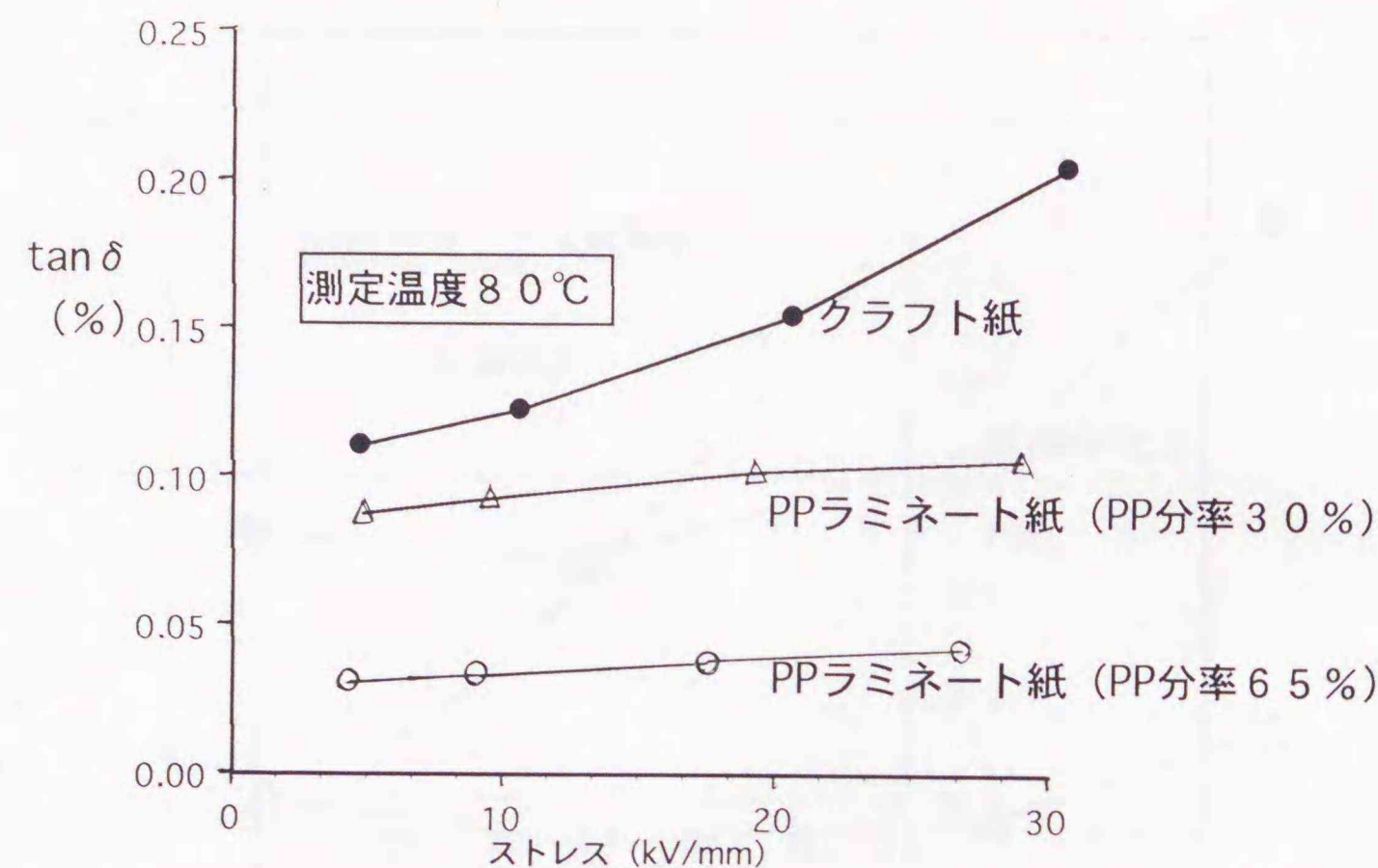


第2.4図 P P ラミネート紙の $\tan \delta$ - 温度特性

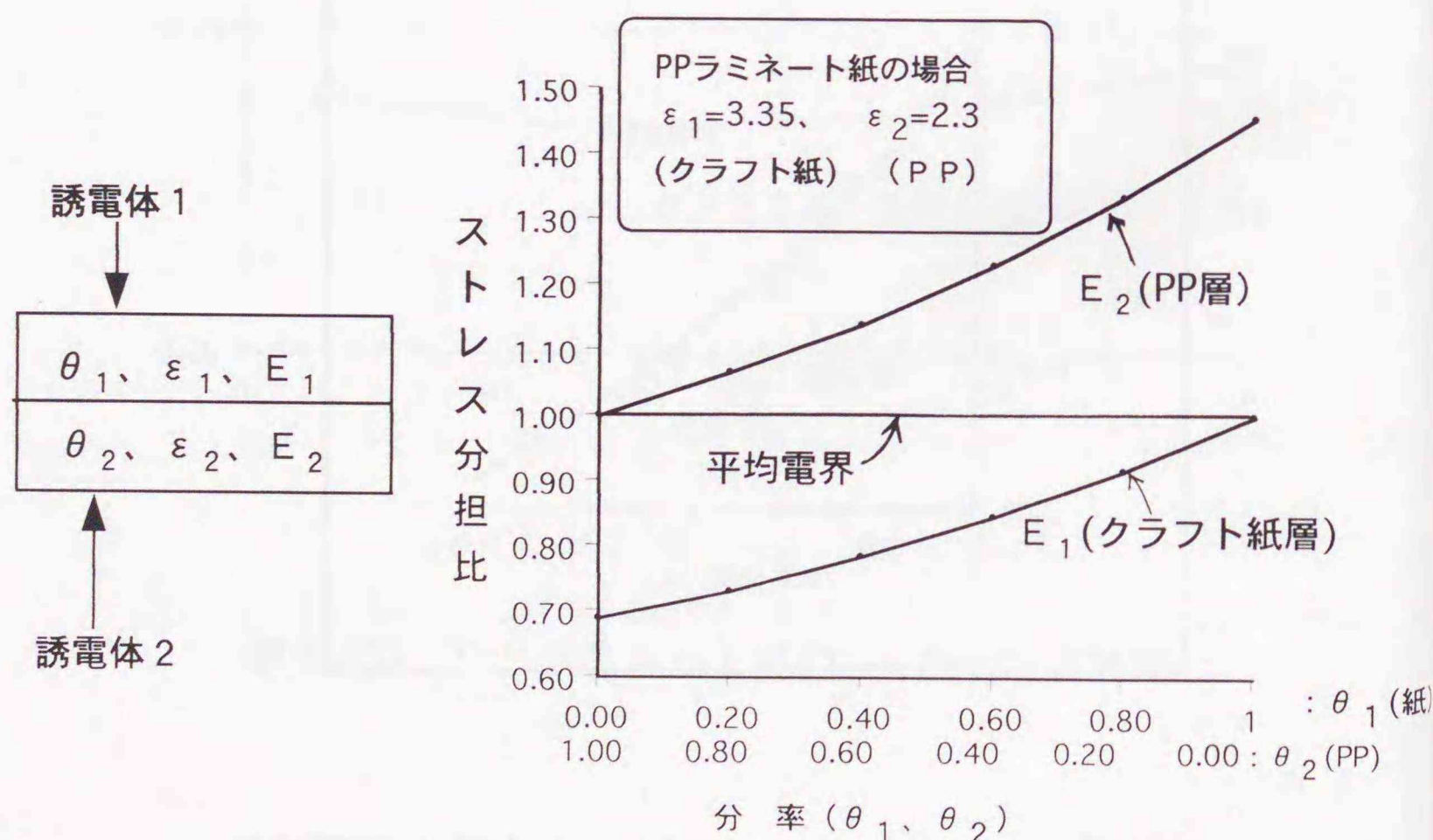


第2.5図 P P ラミネート紙の PP 分率と誘電特性





第2.6図 PPラミネート紙のtan δ -電界特性



第2.7図 2層誘電体の電界

$$E_1 = \frac{\sigma_2 V}{\sigma_1 \theta_2 + \sigma_2 \theta_1} + \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1 \theta_2 + \epsilon_2 \theta_1} - \frac{\sigma_2}{\sigma_1 \theta_2 + \sigma_2 \theta_1} \right) V \exp(-t/\tau) \dots \dots \dots (2)$$

(E₂も同形)

$$(\tau = (\epsilon_1 \theta_2 + \epsilon_2 \theta_1) / (\sigma_1 \theta_2 + \sigma_2 \theta_1))$$

通常、絶縁体ではσは非常に小さくAC（商用周波数）やインパルス（Imp）の時間変化に対してτ≫tとなることから、容量分担となり（3）式となる。

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= \epsilon_2 V / (\epsilon_1 \theta_2 + \epsilon_2 \theta_1) \\ E_2 &= \epsilon_1 V / (\epsilon_1 \theta_2 + \epsilon_2 \theta_1) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

すなわち、各々の誘電体は誘電率に逆比例した電圧分担となりPPラミネート紙では、εの大きいクラフト紙層に加わる電界は平均電界より低減されることになる。（第2.7図参照）従って、PPラミネート紙のtan δ -電界特性は主にクラフト紙層に支配されることから、その分担電圧が低減されることにより電界によるtan δ増が小さくなると考えられる。

以上のように、PPラミネート紙により、その誘電特性はPP分率に依存しつつクラフト紙に比較して大幅に改善されたものとなる。

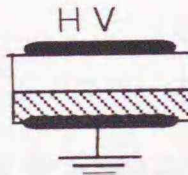
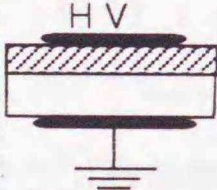
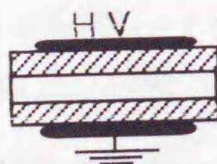
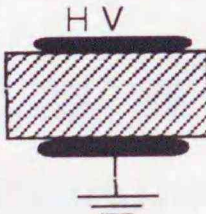
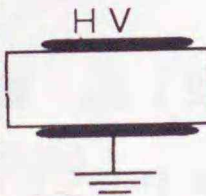
(2) 絶縁破壊特性

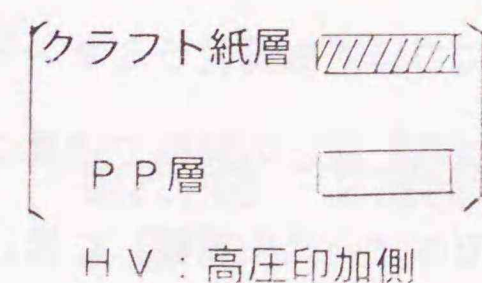
PPラミネート紙の基礎的な絶縁破壊特性並びにこれを構成するクラフト紙層&PP層の効果をj知るために、先ず、平板電極によるシート試料（第2.3図（a））により第2.3表に示す構成試料（両面ラミネート紙、片面ラミネート紙、クラフト紙のみ、PPのみ）を供試試料として評価を行った。第2.4表にオイルギャップ（油隙）がないシート試料でのAC及びImp（標準インパルス：1×40μsec）破壊強度を示す。AC破壊強度についてはラミネート紙の構成（両面、片面）によらずクラフト紙に対して約40%の向上が認められる。Imp破壊強度についても両面ラミネート紙では30～40%の向上となるが、片面ラミネート紙では試料配置との関係で特異な結果を与えている。すなわち、PP面が正電極（負極性印加ではアース側電極）に接してる時は値

第2.3表 供試シート試料

試料	厚さ (μm)	PP分率 (%)
両面ラミネート紙	100	35
	120	55~60
片面ラミネート紙	100	65
クラフト紙	40	0
	120	0
PPフィルム	60	100

第2.4表 シート試料（オイルギャップなし）破壊強度

試料			片面ラミネート紙 (100 μ ,PP65%)	両面ラミネート紙 (100,PP35%)	クラフト紙 (40 μ ×2枚)	PPフィルム (60 μ)	
電極構成							
破壊強度 (kV/mm)	Imp	+	186	317	263	201	348
		−	324	194	273	197	347
	AC			130	133	88	—



(試料数5点の平均)

が低く、負電極（正極性印加ではアース側電極）に接している時は値が高い。片面ラミネート紙がこのようなImp極性効果を示す理由については不明であるが、いずれにしても両面ラミネート紙の方が絶縁破壊特性上は有利な構成となる。以上のように、片面ラミネート紙のImp特性の結果を別にすれば、ラミネート紙ではAC、Imp共にクラフト紙の30~40%程度の破壊強度の向上となり、この向上率はPP層 ($\epsilon=2.3$) とクラフト層 ($\epsilon=3.35$) に加わる電圧分担比 $1.46 (=3.35/2.3)$ に近い値でもある。第2.4表のように構成材料（クラフト紙、PP）単独の破壊強度はPP>クラフト紙であることからラミネート紙構造でのクラフト紙層の分担電圧の低減（PP層は増加）が破壊強度向上の主要因の1つと考えられる。

テープ巻き構成される実際のOFケーブル絶縁層ではテープ厚相当のオイルギャップが必ず存在し、オイルギャップを起点とした絶縁破壊となる。第2.5表はオイルギャップを設けたシート試料での絶縁破壊強度を示したものである。オイルギャップを設けた試料においても、ラミネート紙のAC破壊強度はクラフト紙より約30%程度の向上となるが、Imp破壊強度ではクラフト紙の場合と異なり極性効果が認められる。このImp極性効果はオイルギャップがPP面に接する片面ラミネート紙の場合に特に顕著であり、負極性が高く、正極性が低い。両面ラミネート紙構造でも極性効果は残るが緩和される傾向となる。電極直下にオイルギャップを設けた種々の材料の積層シートについてImp極性効果を調べた結果では、クラフト紙では極性効果が殆どないのに対して、PPやPC（ポリカーボネイト）では比較的大きな極性効果を示し、正極性が低いことが知られている⁽¹⁰⁾。このような極性効果を示す理由として油中（オイルギャップ）で発生する正、負油中ストリーマの鋭さ、すなわち、ストリーマ先端電界の大きさの違いと考えられている⁽¹¹⁾。すなわち、油中ストリーマの形状として、正ストリーマは樹脂状に細く枝分かれした構造で先端電界が大きく進展し易いのに対し、負ストリーマは太く枝分かれが少ないとされている⁽¹²⁾。PPフィルム面がオイルギャップに接している場合は油中ストリーマの正負の進展し易さをそのまま反映してPP層内に侵入するのに対し、クラフト紙では紙繊維間に絶縁油が微細分割された構造となっているため

第2.5表 シート試料（オイルギャップあり）破壊強度

試料			片面ラミネート紙 2枚 (100 μ , PP65%)	両面ラミネート紙 2枚 (100 μ , PP35%)	両面ラミネート紙 3枚 (120 μ , PP55%)	クラフト紙 3枚 (120 μ)
電極構成						
破壊強度 (kV/mm)	Imp	+	1 1 2	1 3 4	1 4 3	1 2 1
		-	1 8 4	1 6 0	2 0 5	1 3 0
	A C		—	—	9 3	6 1

クラフト紙層

PP層

オイルギャップ

HV : 高圧印加側

(試料数5点の平均)

片面ラミネート紙		両面ラミネート紙	
正極性 Imp	負極性 Imp	正極性 Imp	負極性 Imp

・正油中ストリーマ：細く枝分かれ（先端電界が大きい）

・負油中ストリーマ：太く枝分かれが少ない

[ストリーマ進展性：PP層（正）＞クラフト紙層（正、負）＞PP層（負）]

: PP層

: クラフト紙層

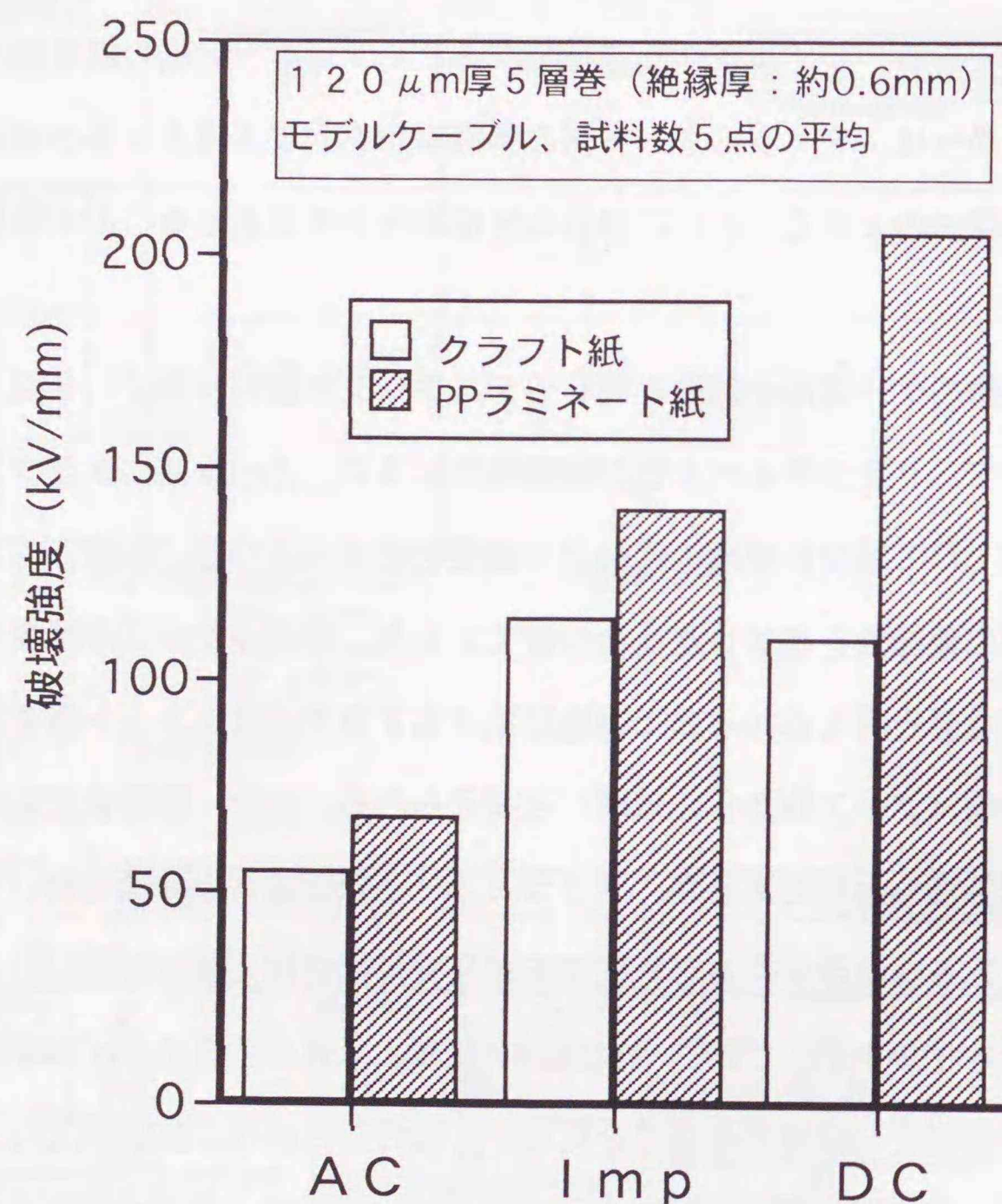
: ストリーマ

第2.8図 油中ストリーマ進展モデル

ストリーマは分散され正負の違いも小さくなると考えられる。両面ラミネート紙構造では油中ストリーマがクラフト紙層で一旦分散して弱められた状態でPP層内に侵入することになり、従って、極性効果もそれだけ緩和すると推定される。このモデル図を第2.8図に示す。以上のように、PPラミネート紙（両面ラミネート紙）ではImp極性効果は残るものの破壊強度の低い正極性の場合であってもクラフト紙より15～20%程度向上した値である。オイルギャップを有するPPラミネート紙の破壊強度の向上は電圧分担の観点からは、PPラミネート紙の誘電率がクラフト紙よりも小さいためオイルギャップ（絶縁油の $\epsilon=2.2$ ）に加わる分担電圧を低減させることから解釈できる。

第2.9図に実際のケーブル絶縁層と同じモデルケーブル試料（第2.3図（b））での破壊強度を示す。PPラミネート紙の破壊強度はAC、Imp共にクラフト紙より20%程度以上向上しており絶縁破壊性能上の優位性を示している。なお、ここでImp破壊強度は導体側に負極性を印加した場合の値であるが、モデルケーブル試料では絶縁厚が薄くほぼ平等電界と考えられるので極性効果を有するPPラミネート紙では実質的に正極性Impの値（アース側からの破壊）と考えられる。また、参考までに同図中に直流（DC）破壊強度も示してあるが、PPラミネート紙ではDC破壊においてもクラフト紙を大きく上回る値を示す。DC電圧での電圧分担は抵抗分担となり、PP層の絶縁抵抗は絶縁油（オイルギャップ部）やクラフト紙層より大きいためオイルギャップ、クラフト紙層の分担電圧を低減させることになり、このことがDC破壊強度向上の主な理由と考えられる。このことから、最近、PPラミネート紙ケーブルの超高圧直流ケーブルへの適用検討もなされている⁽¹³⁾。

以上のように、PPラミネート紙の電気特性は誘電特性（ ϵ 、 $\tan \delta$ ）においてはクラフト紙層とPP層との単純な積層とほぼ等価のモデルで評価できたが、絶縁破壊特性（特に、Imp極性効果）は単純ではなく、ラミネート構造やオイルギャップとの関係を考慮に入れる必要がある。PPラミネート紙の構造として両面ラミネート紙が選ばれるのは、絶縁油の含浸性のみならず絶縁破壊特性上も有利となるからである。



第2.9図 モデルケーブルによる破壊強度

第2.3節 1000kV級UHV OFケーブルの絶縁設計

2.3.1 要求特性

現在、国内でのケーブルの最高送電電圧は500kVであり第2.1節で述べたように、PPラミネート紙絶縁による500kV地中送電ケーブルも、極く最近、実用化されている。一方、電力需要の増大により次のステップの送電電圧として1000kV UHV (Ultra High Voltage) 送電が計画されており、ラミネート紙による500kV OFケーブルの開発の目途が立った時点で、この技術を発展させた1000kV級OFケーブルの設計案が幾つか提案されている⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。多面的な検討がなされているが、その中で絶縁材料に要求される主な事項は次の通りである。

- ①ケーブルの輸送、製造条件等からくるケーブル外径の制約により、ケーブル絶縁厚は33mm程度とする必要がある。
- ②上記絶縁厚制約により、絶縁体に要求される破壊強度は500kVケーブルに比べ、Imp耐圧で1.5～1.6倍、AC長時間耐圧で約2倍となりAC耐圧は特に厳しくなる。
- ③絶縁耐力を向上させるために誘電率段絶縁（以下「 ϵ グレーディング」と呼ぶ）を積極的に採用する必要がある。
- ④誘電特性については送電容量の維持及びAC長時間試験時に熱破壊を起こさないために少なくとも $\epsilon \cdot \tan \delta = 2.8 \times 10^{-3}$ 以下であり、好ましくは 1.5×10^{-3} 以下が望まれる（強制冷却なしの場合）。
- ⑤ ϵ グレーディング及び低 $\epsilon \cdot \tan \delta$ の点からPP分率の大きいPPラミネート紙が不可欠となり、PP層の吸油膨潤の低減対策が望まれる。

第2.6表に500kVPPラミネート紙ケーブルの要求電気特性と実性能値及び1000kVケーブルの要求特性を比較して示す⁽¹⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。絶縁耐圧は要求特性に対し通常10～20%程度の裕度を見込むことを考慮すると1000kVケーブルの要求絶縁破壊強度は500kVケーブルの実性能値を越えており格段に厳しいことが分かる。

第2.6表 500kV P Pラミネート紙ケーブルと
1000kVケーブルの要求特性

項 目	500kV P Pラミネート紙ケーブル		1000kVケーブル 要求値
	要求値	実性能値	
絶縁厚 (mm)		25	33
AC長時間耐圧(kV) ($E_{\max}$: kV/mm)	690	830~840 (45~45.5)	1320 (60)
Imp耐圧(kV) ($E_{\max}$: kV/mm)	±1860	正 2060~2110 (111~115) 負 2160~2360 (117~127)	±2880 (110~130)
$\varepsilon \times \tan \delta$	—	$2.7 \times 0.07\%$ $= 1.89 \times 10^{-3}$	少なくとも 28×10^{-3} 以下 好ましくは 15×10^{-3} 以下

OFケーブル絶縁耐力設計に関しては、現在の所、確立された設計指針はないが、絶縁破壊強度については数多くのOFケーブルの絶縁破壊強度の統計的解析から、導体上の最大ストレス $E_{\max}$ を用いて設計される⁽¹⁷⁾。

絶縁内径（導体直上径） $=r_1$ 、絶縁外径 $=r_2$ の円筒ケーブルに電圧 V を印加したときの半径 r 位置 ($r_1 \leq r \leq r_2$) での電界は $E_r = V / r \cdot \ln(r_2/r_1)$ となることから、 $r=r_1$ で最大ストレスとなり $E_{\max} = E_{r_1} = V / r_1 \cdot \ln(r_2/r_1)$

P Pラミネート紙絶縁では既に、シート、モデルケーブルから275~500kV級実ケーブルに至るまでの絶縁破壊データが揃っており、これらのデータの解析から次項（2.3.2項）では新しい絶縁設計の手法として絶縁破壊強度の絶縁厚効果の考慮、並びに、 ε グレーディングと組み合わせた場合の最大ストレスの考え方について述べる。なお、前記⑤の要求事項であるP P吸油膨潤の低減に関する検討については第2.5節で後述する。

2.3.2 絶縁設計の考え方及び定数

絶縁破壊電圧の厚さ効果を表示する多くの絶縁材料に適用される経験則として次式がある⁽¹⁸⁾。

$$V_B = A \cdot t^n \quad (\text{又は } E_B = A \cdot t^{-(1-n)}) \quad \dots \dots \dots (4)$$

V_B : 厚さ t の破壊電圧(kV)、 t : 厚さ(mm)、 A : 定数
 n : 厚さ効果指数 ($0 < n \leq 1$)、 E_B : 厚さ t の破壊強度 (kV/mm)

前項（2.3.1項）で述べたようにOFケーブルの場合は E_B として導体上の最大ストレス $E_{\max}$ が用いられる。クラフト紙OFケーブルでは種々の絶縁厚のものについて過去からの多くのデータの蓄積があり、その例を第2.10図に示す。同図はインパルス破壊強度の $E_{\max}$ と絶縁厚の関係であり、最内層（導体直上）に $100 \mu\text{m}$ のクラフト紙を用いているケーブル及びモデルケーブルデータを含めた広い絶縁厚範囲で示してある。バラツキの上限及び下限の傾斜は同一で広い絶縁厚にわたって（4）式の関係が成立していることが分かり、厚さ効果指数として $n=0.90 \sim 0.91$ が得られる。

一方、絶縁厚の厚い超高压OFケーブルの絶縁層では内層側は薄く密度の大きい（す

なわち、 ε の大きい)クラフト紙、外層に向かって厚く密度の小さい(ε の小さい)クラフト紙を配置するので実効上 ε グレーディングとなっている。円筒形状の内層側から誘電率の異なる絶縁層($\varepsilon_1 > \varepsilon_2 > \dots > \varepsilon_i > \dots$)を順次配置したときの i 層目の電界は次式で示される。

$$E_{ir} = (V/\varepsilon_i r) \cdot \left\{ \sum (1/\varepsilon_i) \cdot \ln(r_i/r_{i-1}) \right\}^{-1} \dots \dots \dots (5)$$

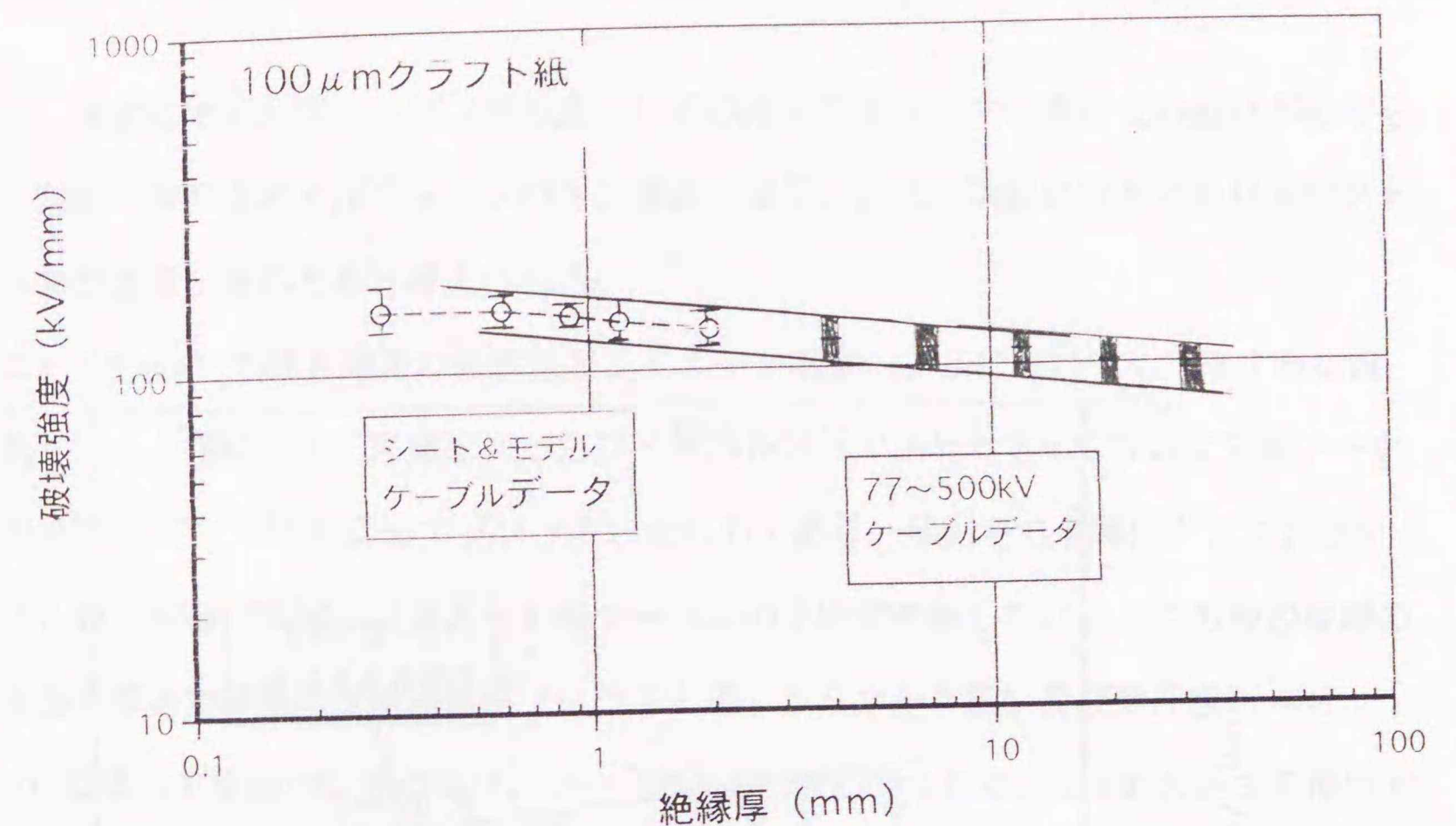
$\left[\begin{array}{l} \varepsilon_i : i \text{ 層目の比誘電率、} \quad r_i : i \text{ 番目の層の内半径(mm)} \\ E_{ir} : i \text{ 層目の } r \text{ 位置のストレス (kV/mm)、} V : \text{印加電圧 (kV)} \end{array} \right]$

第2.11図に275kV 1×400mm² OFケーブルの場合の ε グレーディング下のストレス分布の例を示す。同図の例に示されるように絶縁層の構成如何により、絶縁体中の最大ストレス E_{max} が第2層目のクラフト紙(125 μ mクラフト紙)に存在する場合が生ずる。第2.12図は125 μ mクラフト紙のシート、モデルケーブルデータ及び125 μ mクラフト紙を最内層に用いてのOFケーブル(20~77kVケーブル)のインパルス破壊強度を第2.10図と同様の厚さ効果で示したものである。第2.12図には125 μ mクラフト紙を第2層に使用したケーブル(110~275kVケーブル)の破壊電圧から求めた第2層目ストレスの状況を斜線で示してある。同一絶縁紙(125 μ mクラフト紙)が第2層目に使用されると下限及び上限を外れるデータの現れることが判る。個々のデータを詳細に対比することにより、次の傾向が示された。

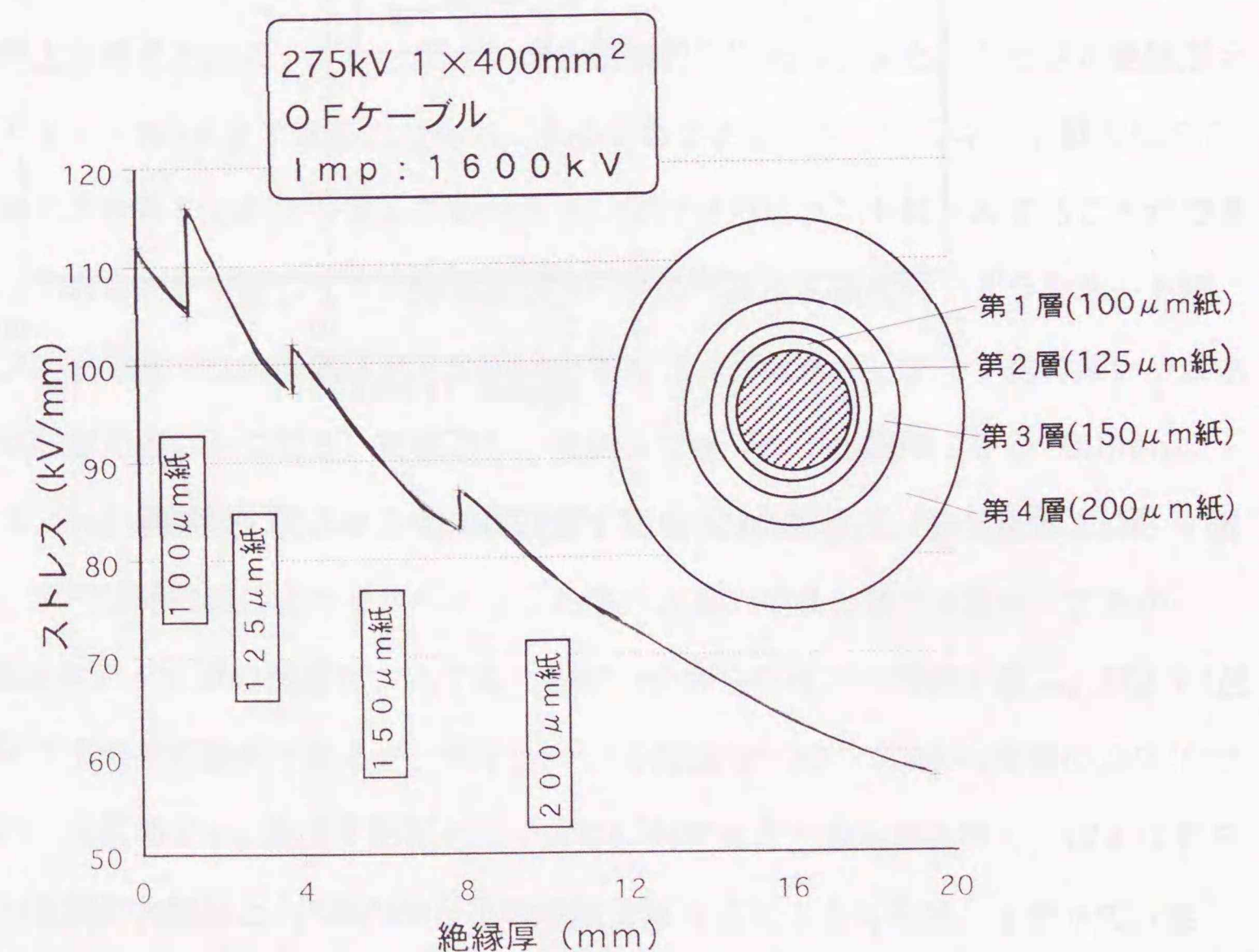
- ① 下限値付近及び下限値以下のデータは第1層目の厚さが厚い場合であり、 E_{max} は例外なく導体直上であり破壊の起点は第1層目であることを示唆している。

② 上限値付近及び上限値以上のデータは第1層目の厚さが薄く、 E_{max} が第2層目に在る場合であり、破壊起点は第2層目の可能性もある。

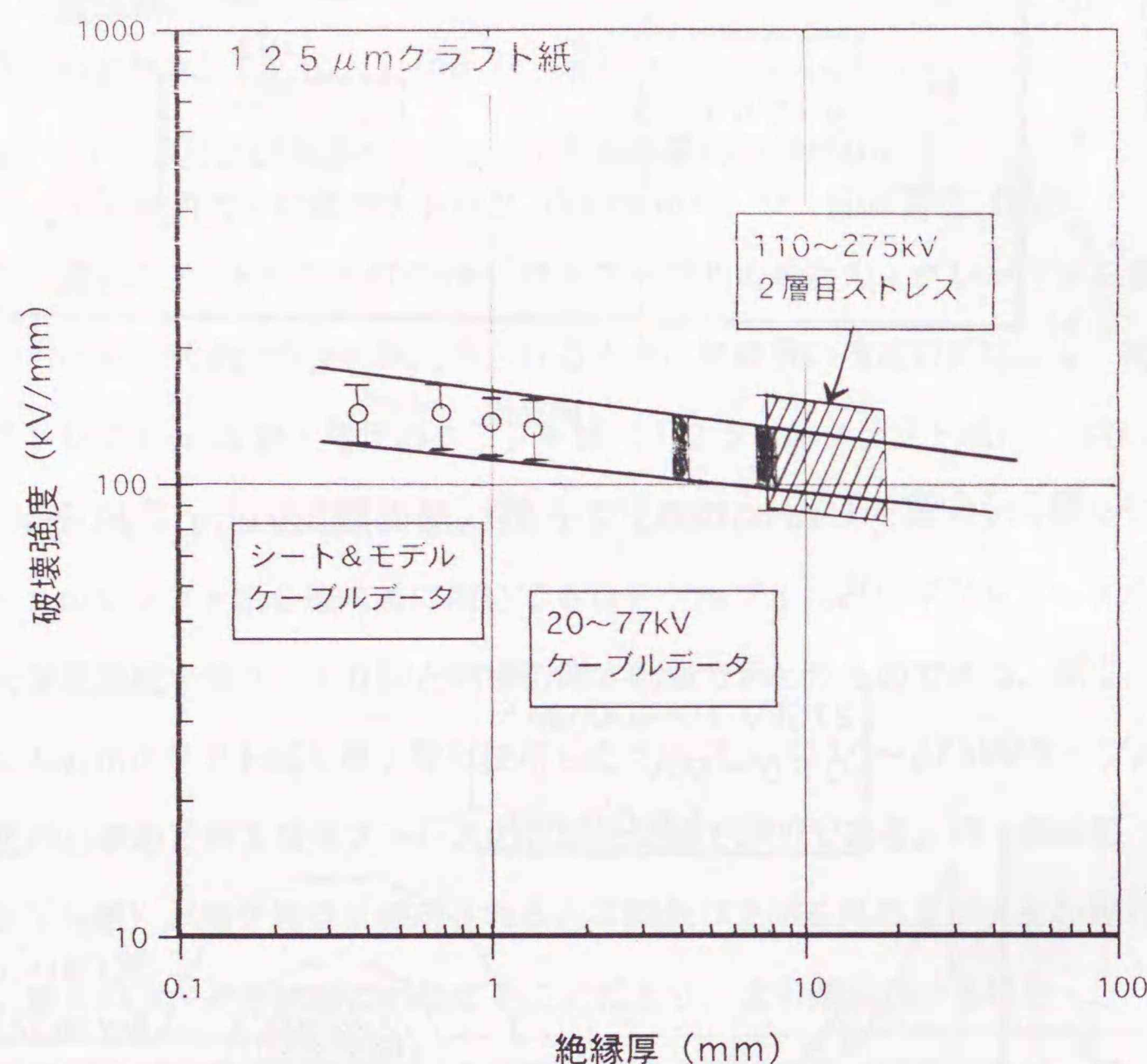
上述の②の状況は「 E_{max} が第2層目以降、すなわち、導体直上ではなく絶縁体中層に在る場合は第1層目の厚さ効果で予想される破壊強度より高い値を許容できる」ことを示している。その許容程度として個々のデータの比較により裕度を見込んでも下限値の約1.2倍程度の値が得られた。絶縁中層の E_{max} が導体直上の E_{max} より高い値を有する理由として、絶縁物に囲まれるオイルギャップ(絶縁中層)と電極(半導電カーボン



第2.10図 100 μ mクラフト紙(最内層)の $Imp E_B$ の厚さ効果



第2.11図 ε グレーディングのストレス分布例



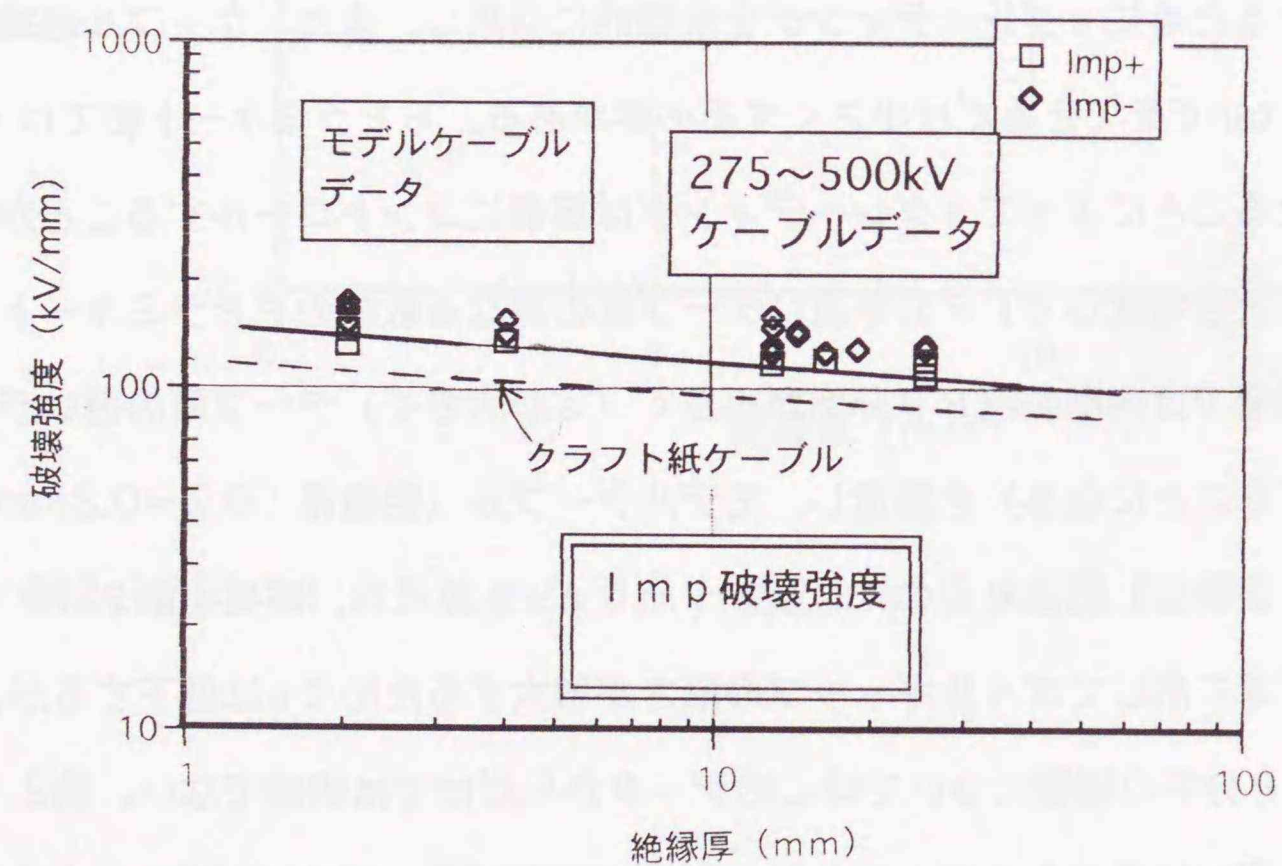
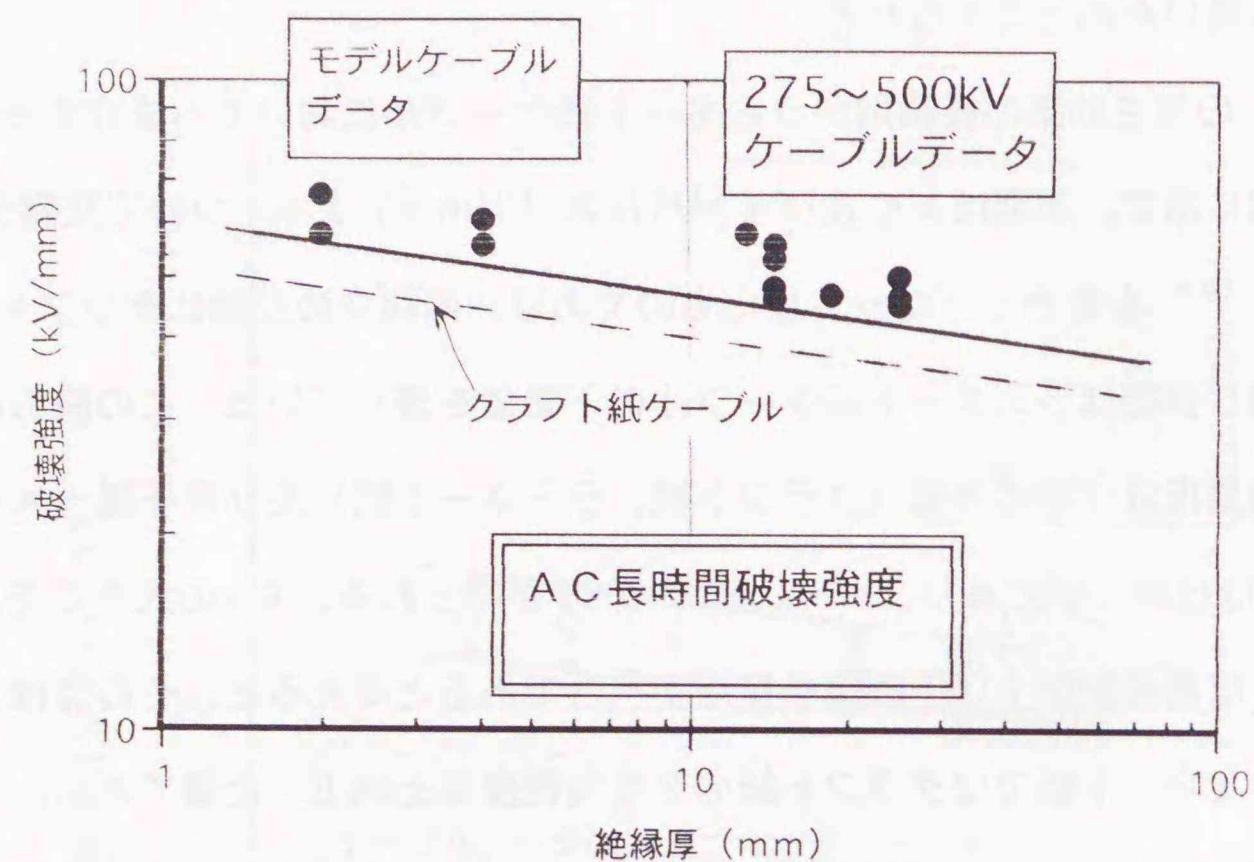
第2.12図 125 μm クラフト紙のImp E_B の厚さ効果

紙)に接するオイルギャップ(導体直上)での油中ストリーマの進展性の違いがあげられ、電極に接するオイルギャップの方が電荷(電子、正孔)供給が容易であり油中ストリーマが進展し易いためと考えられる。

E_B ($E_{\max}$)の厚さ効果の経験則がラミネート紙ケーブルにおいても成立する状況を第2.13図に示す。同図はAC及びインパルス(Imp) E_B について文献データ⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾⁽²¹⁾⁽²²⁾を含めてプロットしたものであり、同図中の点線はクラフト紙ケーブルの下限値、実線はラミネート紙ケーブルの下限値を表している。この図の直線の傾きから厚さ効果指数は絶縁体種(クラフト紙、ラミネート紙)及び電圧種(AC、Imp)に依らずほぼ同じ値であり、 $n=0.90\sim0.91$ が得られる。 E_B の大きさを反映する(4)式のAは絶縁設計上、下限値を使用すべきであると考え、その値はAC及びImp共にラミネート紙ではクラフト紙の20%程度以上向上した値である。

1000kV級UHVケーブルでは前項(2.3.1項)で述べたように、絶縁破壊特性を向上させるために ϵ グレーディングを積極的に採用し、また、ケーブル絶縁層全体としては $\epsilon \cdot \tan \delta$ をできるだけ小さくする必要がある。PPラミネート紙ではPP分率を変化させることによって ϵ グレーディングは容易にコントロールできるので、このことを考慮してPP分率及びテープ厚の異なる数種のPPラミネート紙(ケーブル絶縁層では内層側程PP分率が小さく(ϵ が大き)テープ厚の薄いラミネート紙を配置することになる)を製造し、モデルケーブル(絶縁厚:0.7~0.8mm、第2.3(b)図参照)によりそのAC及びImp E_B を調べた。結果を第2.14図に示す。テープ厚に応じてオイルギャップの厚さが増大するため E_B は低下するが、 E_B に及ぼすPP分率の影響についてはこのデータからだけでは明確でない。第2.14図は大気圧下での測定結果であるが、OFケーブルは通常100~300kPa程度の油圧下で使用され、油圧の E_B に及ぼす影響としてACに対する向上効果が大きく、例えばPPラミネート紙の大気圧と200kPa油圧下の比較ではACで15%程度、Impで5%程度の向上が見込める⁽²³⁾。

以上を示したデータ及び数値を絶縁設計定数としてまとめると第2.7表となる。



第2.13図 ラミネート紙ケーブルの破壊強度

厚さ (μ m)	構成 (紙/PP/紙)	PP分 率 (%)	ε	$\tan \delta$ (%)	AC破壊強度 (kV/mm)		Imp破壊強度 (kV/mm)	
					80°C, 20kV/mm		1000	200
100	30 μ m/PP/30 μ m	40	2.85	0.080				
125	25 μ m/PP/25 μ m	60	2.62	0.053				
150	25 μ m/PP/25 μ m	67	2.55	0.042				
200	25 μ m/PP/25 μ m	75	2.47	0.033				

第2.14図 ε グレーディング用PPラミネート紙の破壊強度

第2.7表 ε グレーディング用PPラミネート紙の絶縁設計定数

厚さ (μm) (PP分率)	ε	$\tan \delta$ (%)	A^{*1}		n^{*2}	第2層目 以降係数
	(80°C, 20kV/mm)		AC	Imp		
100 μm (40%)	2.85	0.080	7.8	16.2	0.90	—
125 μm (60%)	2.62	0.053	7.3	14.8	0.90	1.2
150 μm (67%)	2.55	0.042	5.9	13.6	0.90	1.2
200 μm (75%)	2.47	0.033	5.3	9.9	0.90	1.2

*1 : 厚さ1mm、油圧200kPaでの破壊強度下限値 ((4)式)

モデルケーブルデータ (第2.14図) の下限値に油圧の
効果としてAC $\Rightarrow$ 1.15倍、Imp $\Rightarrow$ 1.05倍として
求めた値

*2 : 厚さ効果指数 ((4)式)

2.3.3 1000kV級ケーブルの設計と予測性能

1000kV級ケーブルの絶縁耐力の要求特性として最も厳しい条件は2.3.1項
第2.6表に示したようにAC長時間耐圧である。外径の制約から絶縁厚33mmとし、
超高压ケーブルの代表的導体サイズとして2500mm² (油通路径25mm ϕ 、導体
外径68.6mm ϕ) の場合を取り上げ、第2.7表の定数を用いて、以下絶縁設計を行う。

ε グレーディング絶縁層の半径 i 層目 r 位置のストレス E_{ir} は (5) 式で示され (第
2.11図参照)、この場合のケーブル全体の等価比誘電率 ε_T 及び誘電正接 $\tan \delta_T$ は
次式で示される⁽⁶⁾。

$$\varepsilon_T = \ln(r_m/r_0) \cdot \left\{ \sum (1/\varepsilon_i) \cdot \ln(r_i/r_{i-1}) \right\}^{-1} \dots \dots \dots (6)$$

$$\tan \delta_T \approx \frac{\varepsilon_T}{\ln(r_m/r_0)} \cdot \left\{ \sum (1/\varepsilon_i) \cdot \tan \delta_i \cdot \ln(r_i/r_{i-1}) \right\} \dots \dots \dots (7)$$

(r_0 : 絶縁内径 (導体径)、 r_m : 絶縁外径、添え字 i : i 層目を意味する)

破壊電圧を決定する導体直上ストレス E_{r0} は (5) 式及び (6) 式から

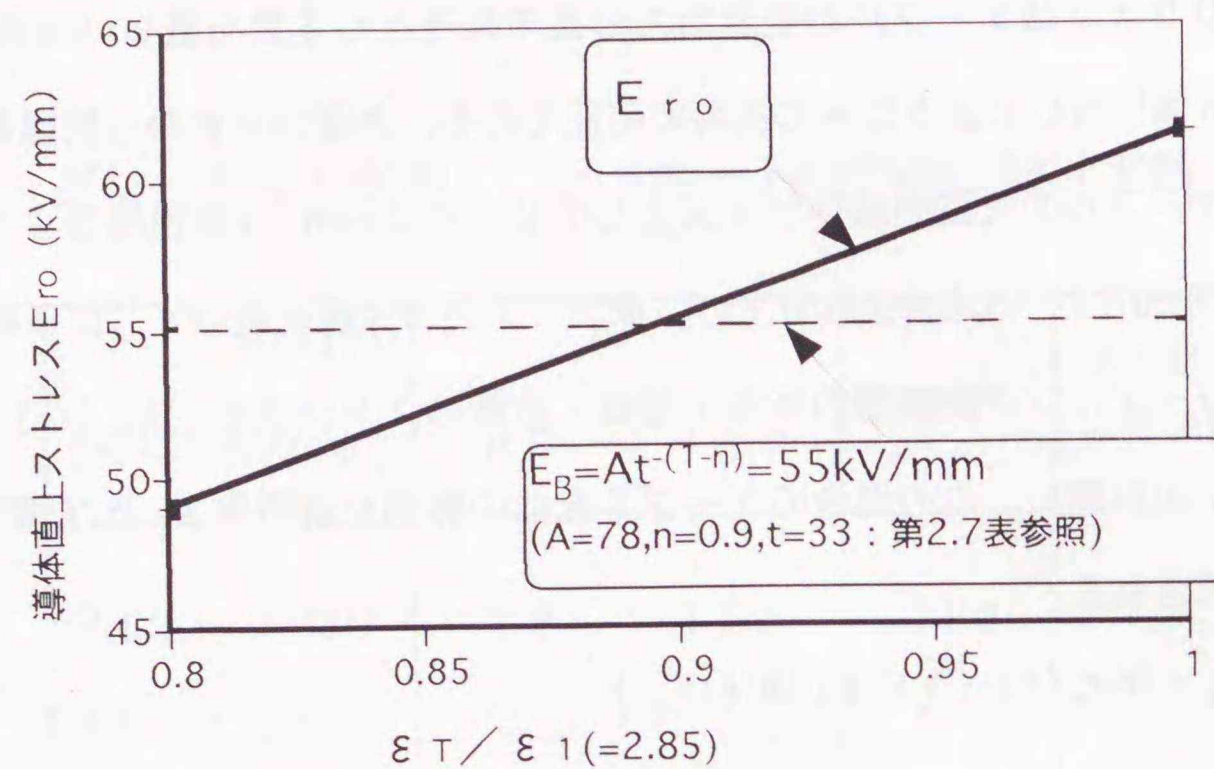
$$E_{r0} = (\varepsilon_T/\varepsilon_1) \cdot \{V/r_0 \ln(r_m/r_0)\} \dots \dots \dots (8)$$

となり、形状因子 ($r_0 \ln(r_m/r_0)$) を一定とすると $\varepsilon_T/\varepsilon_1$ を小さくする程有利
となる。AC長時間耐圧の要求値1320kV (第2.6表) に5~10%の裕度を見
込んで設計絶縁耐力 $V=1420\text{kV}$ として第1層目絶縁層 (導体直上絶縁層) の E_{r0} を
 $\varepsilon_T/\varepsilon_1$ に対して示せば第2.15図となる。図中の点線は第2.7表の第1層目絶縁
層 (100 μm PPラミネート紙、 $A=7.8$ 、 $\varepsilon_1=2.85$) の厚さ効果を考慮した E_B
 $= A \cdot t^{-(1-n)} = 7.8 \times 33^{-0.1} = 5.5 \text{ kV/mm}$ の値であり、 $\varepsilon_1=2.85$ では $\varepsilon_T \leq$
 $2.55 = \varepsilon_{Tmax}$ 以下の値であれば導体直上の絶縁耐力が確保されることが分かる。

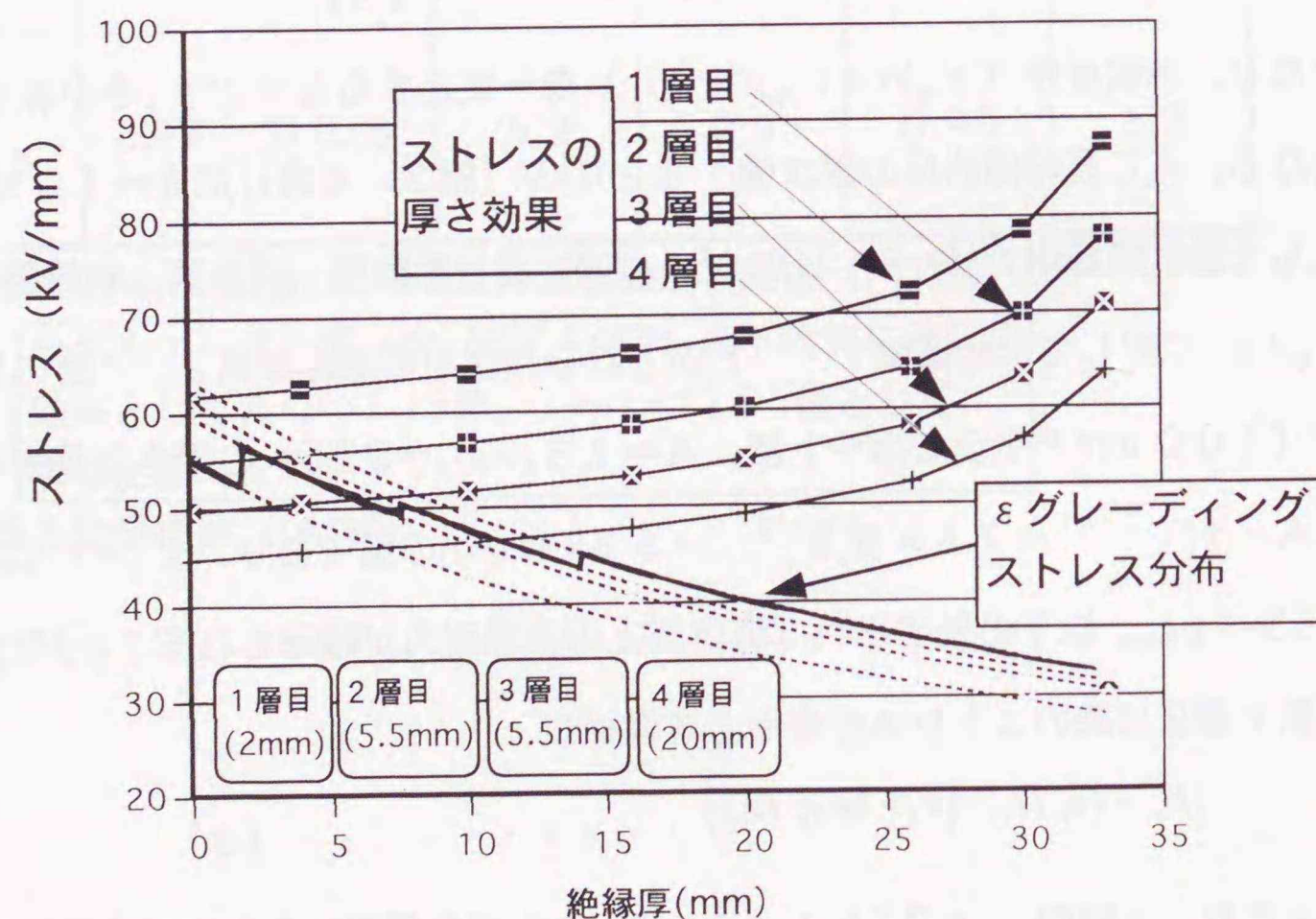
第2層目以降のストレス分布も上式同様に

$$E_{ir} = (\varepsilon_T/\varepsilon_1) \cdot \{V/r \ln(r_m/r_0)\} \dots \dots \dots (9)$$

で示され、上記の $\varepsilon_T=2.55$ ($=\varepsilon_{Tmax}$) として各層のストレス分布を各層の厚さ効果
のカーブと併せて示すと第2.16図となる。ここで、絶縁中層となる第2層目以降の
厚さ効果は (4) 式に対して $E_B=1.2 \times A \cdot t^{-(1-n)}$ となる1.2倍の値を用いること



第2.15図 導体直上ストレスと $\varepsilon_T / \varepsilon_1$ の関係



第2.16図 ε グレーディングによる絶縁設計方法

ができ各層のストレス分布と厚さ効果カーブの交点が ε グレーディングの層変わりとなる。(第2.16図では2層目のストレスが十分高く、交点が現れないので導体直上から2mm位置を層変わりとした) このようにして求めた ε グレーディングに対して、改めて(6)式により ε_T を求め $\varepsilon_T \leq \varepsilon_{Tmax}$ の条件を満足すれば絶縁耐力の要求を満たす設計が可能であることになる。第2.16図の構成では $\varepsilon_T = 2.54 \leq \varepsilon_{Tmax}$ ($= 2.55$) でありこの条件を満たしている。この絶縁構成によるケーブル構造及び予測電気性能(AC&Imp 耐圧、 ε_T 、 $\tan \delta_T$ 等)を示せば第2.8表となる。この電気性能は第2.6表の要求値に対し、AC長時間耐圧及びImp耐圧共に5~10%程度の裕度があり、また、 $\varepsilon \cdot \tan \delta = 1.14 \times 10^{-3}$ の低損失化が達成されている。1000kV送電時の運転電界は導体直上で22kV/mm、第2層目に生ずる E_{max} で23kV/mmとなり、PPラミネート紙の電圧劣化に対する長期安定性として30kV/mm程度以下ではクラフト紙と同様、電圧による劣化よりも紙の熱劣化に支配される特性となるが知られており⁽²⁴⁾、従って、長期信頼性の面でも従来のOFケーブルと同様に扱えると考えられる。

以上のように、主なポイントとして、 ε グレーディングとの組み合わせで絶縁中層 E_{max} が導体直上 E_{max} より少なく見積もっても1.2倍の高い値を許容できるとする新しい考え方を取り入れることにより、PPラミネート紙による1000kV級UHVケーブルの絶縁設計が、電気絶縁性能面からは十分可能であることが示された。

第2.8表 1000kV PPラミネート紙UHVケーブルの構造及び予測電気性能

			特性値	
ケ ブ ル 構 造	導 体	公称断面積(mm ²)	2 5 0 0	
		油通路径(mm)	2 5 . 0	
		外径 (導体遮蔽層を含む) (mm)	6 8 . 6	
	絶 縁 層	構 成 (mm)	100 μm (ε =2.85)	2 . 0
			125 μm (ε =2.62)	5 . 5
			150 μm (ε =2.55)	5 . 5
			200 μm (ε =2.47)	2 0 . 0
		絶縁層全厚 (mm)		3 3 . 0
		絶縁外径 (mm)		1 3 4 . 6
	(外部遮蔽+銅線織入綿テープ) コア外径 (mm)		1 3 6 . 0	
(Al被+防食層) ケーブル外径 (mm)		1 6 9 . 0		
電 気 特 性	誘 電 特 性	静電容量 (μ F / km)	0 . 2 1 0	
		等価比誘電率 ε _T	2 . 5 4	
		等価誘電正接 t a n δ _T (%)	0 . 0 4 5	
		ε _T × t a n δ _T	1 . 1 4 × 1 0 ⁻³	
	絶 縁 耐 力	A C長時間破壊電圧 (k V)	1 4 3 0	
		I m p破壊電圧 (k V)	2 9 6 0	
	運 転 電 界 (kV/mm)	導体直上ストレス	2 2 . 2	
		第2層目 E _{max}	2 3 . 0	

第2.4節 OFケーブルの紙層間面圧に及ぼすPP層の影響

2.4.1 面圧計算式

クラフト紙では油浸及び温度による体積変化が殆ど起こらないのに対して、PPラミネート紙ではPP層の吸油膨潤並びに熱膨張による体積変化が在り、PPラミネート紙の紙厚変化として現れる。ケーブル絶縁層の内(導体)と外(外部遮蔽層)は固定されているので、この紙厚増はPPラミネート紙の紙層が潰されラミネート紙の紙層間面圧が増大することによって吸収され、その結果ケーブルの絶縁層が締めりケーブルの曲げ特性や油流抵抗に影響を及ぼすことから、PPラミネート紙ケーブルでは従来のクラフト紙ケーブルに比べケーブル製造条件(特に紙巻き張力条件、注油含浸条件)や使用条件に制約を余儀なくされている。この制約は前節(第2.3節)で述べたUHVケーブルに要求されるPP分率の大きいPPラミネート紙では一層厳しくなる。

αを紙厚増加率とすると、この増加を圧縮で潰すのに必要な面圧Pは $P = \alpha \cdot E_r$ (E_r:圧縮ヤング率)となる。ケーブル絶縁層では第2.17図に示すように径方向に増加しようとする力に伴って円周方向の引張力も加わるので半径rの位置では

$$P = \alpha \cdot E_r - (1/2) (S/r)^2 \cdot E_\theta \cdot \alpha \quad \dots \dots \dots (10)$$

$\left[\begin{array}{l} P: \text{紙層間面圧 (Pa)}、\alpha: \text{紙厚変化率、} S: \text{紙厚 (cm)}、r: \text{半径位置 (cm)} \\ E_r: \text{紙の圧縮ヤング率 (Pa)}、E_\theta: \text{紙のタテ方向ヤング率 (Pa)} \end{array} \right]$

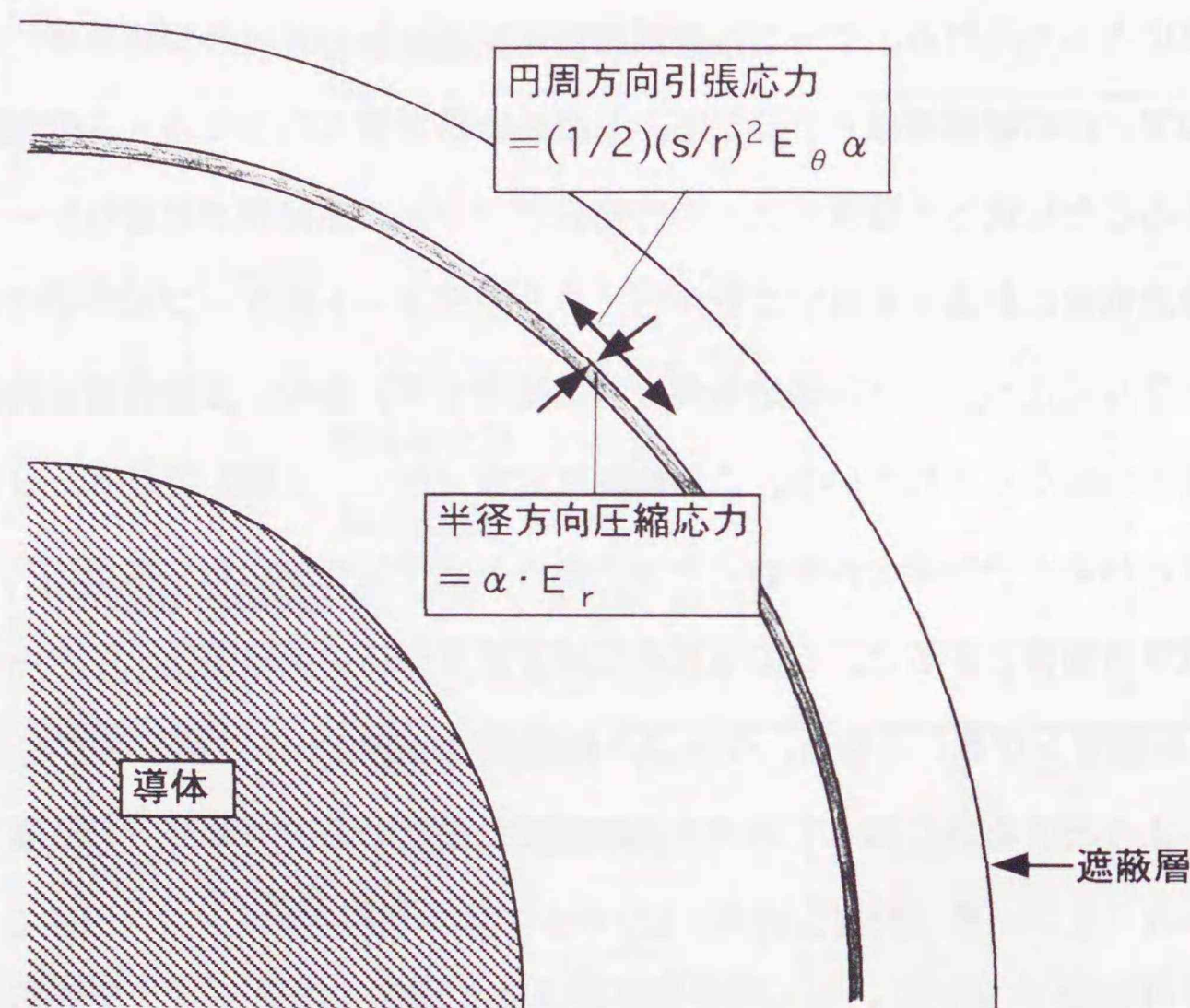
ここで、紙厚増加率(変化率)αに影響を与える因子としてPPラミネート紙では次の3因子がある。(尚、クラフト紙では下式のα_s=α_T=0)

$$\alpha = \alpha_s + \alpha_T + \alpha_D \quad \dots \dots \dots (11)$$

$\left[\begin{array}{l} \alpha_s: \text{吸油膨潤による変化率} \\ \alpha_T: \text{熱膨張による変化率} \\ \alpha_D: \text{ケーブル製造工程の乾燥による紙厚減} (\alpha_D < 0) \end{array} \right]$

一方、紙の面圧による圧縮の大部分は紙繊維間の空隙が潰されることによりなされ、この場合に紙厚yと面圧x(=p)の間の圧縮方程式として次式の実験式が知られている⁽⁶⁾。

$$y = -a \log_{10} x + b \quad \dots \dots \dots (12)$$



第2.17図 紙厚増によるケーブル絶縁層の応力

従って、圧縮ヤング率 E_r は面圧 P の関数として次式となる。

$$E_r(P) = 2.303 (kP - p \log_{10} P) \dots \dots \dots (13)$$

$$(k = b/a)$$

尚、PPラミネート紙ではPP層の圧縮ヤング率 ($\approx 5 \times 10^7 \text{Pa}$) $\gg$ 紙層のヤング ($\approx 2 \sim 10 \times 10^6 \text{Pa}$ at $P = 100 \sim 300 \text{kPa}$) であり、従って、PPラミネート紙の E_r の面圧依存性の大部分は紙層の潰れに起因しておりPP層の潰れは無視できる。

(10) 式より面圧 P の状態から α の微小増加 $\Delta \alpha$ による面圧増加 ΔP との関係は $\Delta \alpha = \Delta P / \{E_r(P) - (1/2) \cdot (S/r)^2 \cdot E_\theta\}$ となるので

$$\alpha = \int d\alpha = \int_{P_0}^P \frac{dP}{E_r(P) - (1/2) \cdot (S/r)^2 \cdot E_\theta} = \int_{P_0}^P \frac{dP}{2.303kP - P \ln P - (1/2) \cdot (S/r)^2 \cdot E_\theta} \dots \dots (14)$$

(P_0 : 初期面圧、 $P = P_0$ で $\alpha = 0$)

ここで、(14) 式右辺分母の $P \ln P$ 及び $(1/2) \cdot (S/r)^2 \cdot E_\theta$ はここで対象とする数値範囲 (k : 数十、 P : 数百kPa以下、 $S = 0.01 \sim 0.02 \text{cm}$ 、 $r = \text{数cm}$ 、 $E_\theta \sim 10^9 \text{Pa}$) では $2.303kP$ に対し無視できる小さい値である。従って、(14) 式は

$$\alpha \approx (1/k) \cdot \log_{10}(P/P_0) \dots \dots \dots (15)$$

(15) 式が初期面圧 P_0 から紙厚増加率 α を押し潰すのに必要な面圧 P を与える基本的な関係式となる。しかし、次項(2.4.2項)で述べるように α もまた P の関数となるため単純な計算では求まらない。

以上の面圧計算式は従来のOFケーブル(クラフト紙ケーブル)では配慮されてないPPラミネート紙ケーブル特有のものであるが、従来のクラフト紙OFケーブルの絶縁紙テープ層間の面圧はGazzana-Priaroggia の理論として知られており、ケーブル製造時のテープ巻き張力 T と絶縁紙の物性値の関数として以下のように与えられる⁽²⁵⁾。

$$P = \left\{ T / (\sqrt{n} - 1) \right\} \cdot (\sin^2 \alpha / SL) \dots \dots \dots (16)$$

$$\text{許容最小面圧 } P_{\min} = (1/R_0) \cdot \{ S \cdot E_\theta \cdot g_1(L/2r) \} / \{ 1 + 2f \cdot g_2(L/2r) \} \dots \dots (17)$$

$$\text{許容最大面圧 } P_{\max} = (\sqrt{3}/2) \cdot C \cdot (S^2/f \cdot L \cdot r) \cdot (4G^2 E_\theta E_z)^{1/4} \dots \dots (18)$$

P 、 $P_{\min}$ 、 $P_{\max}$ ：面圧(Pa)、 T ：テープ巻き張力($\times 10^{-4}$ N)、
 E_{θ} ：テープのタテ方向ヤング率(Pa)、 E_z ：テープのヨコ方向ヤング率(Pa)
 E_r ：テープの圧縮ヤング率(Pa)、 G ：テープのせん断ヤング率(Pa)
 $n = E_{\theta} / E_r$ 、 S ：テープ厚(cm)、 L ：テープ幅(cm)、 α ：テープ巻角度
 f ：紙の静摩擦係数、 C ：1より小さい安全係数($C=1.0$ とする)
 r ：ケーブル半径位置(cm)、 R ：中間製品ケーブル巻取径(cm)
 $g_1(L/2r)$ 、 $g_2(L/2r)$ ：文献(25)参照(煩雑な関数形であるので記載省略；文献
 (25)に $L/2r$ に対する計算結果が示されている)

ここで、許容最小面圧 $P_{\min}$ はケーブル製造工程での紙巻き後の中間製品ケーブルの巻き
 取り曲げ径 R_0 。(ケーブル外径の25~30倍径程度)に対し絶縁テープ層間の緩みのた
 めに滑りを生じない最低の面圧として求まる値であり、許容最大面圧 $P_{\max}$ は最終製品
 ケーブルの曲げ径(ケーブル外径の15~20倍径程度)に対し絶縁テープ層間の締めり
 のために座屈を生じない最大の面圧として求まる値である。従って、テープ巻き張力 T
 は(16) & (17)式から求まる $T_{\min}$ と(16) & (18)式から求まる $T_{\max}$ の範
 囲に限定される。(16)~(18)の面圧とテープ巻き張力の制約はPPラミネート
 紙ケーブルでも共通する制約事項である。

2.4.2 各種物性値の測定

(1) 紙厚変化率(α)に対する物性値

(11)式に示したようにPPラミネート紙の α は α_s (吸油膨潤)、 α_T (熱膨張)、
 α_D (乾燥紙厚減)の和として与えられる。このうち α_s 及び α_T はPP層の存在による
 ものであり、PPの3次元膨張がPPラミネート紙構造では紙/PP間の剥離が起こ
 らない限り幅方向、長さ方向の変化は抑えられ、厚さ方向の変化としてのみ現れる。
 PPラミネート紙のPP分率(厚さ分率=体積分率)を θ とすると当然のことながら

$$\alpha_s \propto \theta, \quad \alpha_T \propto \theta, \quad \alpha_D \propto 1 - \theta \quad \dots \dots \dots (19)$$

である。以下、各々について測定データを示す。

① α_s (吸油膨潤厚さ変化率)

PPは炭化水素系の高分子であり炭化水素系のOFケーブル絶縁油はPP分子鎖に対
 しては本来良溶媒であるが、PPラミネート紙のPPでは吸油膨潤が比較的小さく抑え
 られる理由は、高結晶性PPを用いており膨潤が主に非晶部にのみに限られるからであ
 る。従って、その膨潤機構は網目構造をした架橋ゴムの溶媒膨潤に類似しており、PP
 の結晶部が架橋点に相当することになり、膨潤量は温度及び圧力(膨潤を抑える圧力)
 に依存する。

PP分率(θ)55%のPPラミネート紙(170 μ m厚)を2cm角、20枚重ねて
 所定温度、所定面圧下で絶縁油(アルキルベンゼン油：JIS C2320 2種2号油)に浸漬
 後の平衡厚さ膨潤(24時間以内に平衡に到達)の測定結果を第2.18図(温度依存
 性)及び第2.19図(面圧依存性)に示す。尚、図中の記号LSP(Low Swelling
 PPラミネート紙)は後述(第2.5節2.5.2項)する膨潤抑制PPラミネート紙
 に対するデータである。図中に示した実用的温度($R T \sim 120^{\circ}C$)、面圧(10~数
 百kPa)の範囲では厚さ膨潤 α_s は温度 $T(^{\circ}C)$ に対しては $\alpha_s \propto \exp(aT)$ 、面圧 P
 に対しては $\alpha_s \propto P^{-n}$ で示され、従って

$$\alpha_s = A \theta \exp(aT) \cdot P^{-n} \quad \dots \dots \dots (20)$$

(T ：膨潤温度($^{\circ}C$)、 P ：面圧(Pa)、 θ ：PP分率)

の実験式が得られる。ここで、定数 a 、 n はPPラミネート紙の種類(PP分率、現用
 PP&膨潤抑制(LSP用)PP)に依らず $a=0.019$ 、 $n=0.1$ 程度の値となる。また、
 A は現用のPPラミネート紙に対しては $A=1.19 \times 10^{-2}$ であり、LSPに対しては
 $A=5.29 \times 10^{-3}$ である。

膨潤に対する温度及び膨潤圧の一般的な関係は本来、Flory-Hugginsの理論による
 架橋ゴムの溶媒膨潤に対する混合の自由エネルギー(高分子鎖と溶媒分子による混合エ
 ントロピーの増加と網目間分子鎖の緊張によるエントロピー減少の平衡関係式)から理
 論的に得られるが⁽²⁶⁾、(20)式の関係は膨潤量及び面圧の限られた範囲での実験
 式と考えられる。

② α_T (熱膨張厚さ変化率)

PPラミネート紙 (PP分率55%、170 μ m厚) の熱膨張による厚さ増加率を第2.20図に示す。図中の点線はラミネート紙に使用しているPPレジンの熱膨張係数を用いてPP分率55%のPPラミネート紙に換算して求めた計算値であり実測値とほぼ一致している。このことから、PPラミネート紙の熱膨張は殆どPP層に起因していることが判る。また、同図中の表に実測データからPP層のみの厚さ方向の線熱膨張係数 β として求めた値を各温度 (基準温度 $T_0=25^\circ\text{C}$) に対して示してあるが、この値を用いて α_T は次のように示される。

$$\alpha_T = \theta \beta (T - T_0) \dots \dots \dots (21)$$

(θ : PP分率、 β : PP層の厚さ方向熱膨張係数、 T_0 : 基準温度(25 $^\circ\text{C}$))

α_T の面圧依存性は熱膨張を抑える圧力は体積弾性率に相当する大きい値であるので、ここで対象とする面圧レベル (10~数百kPa) に対しては考慮する必要がない。

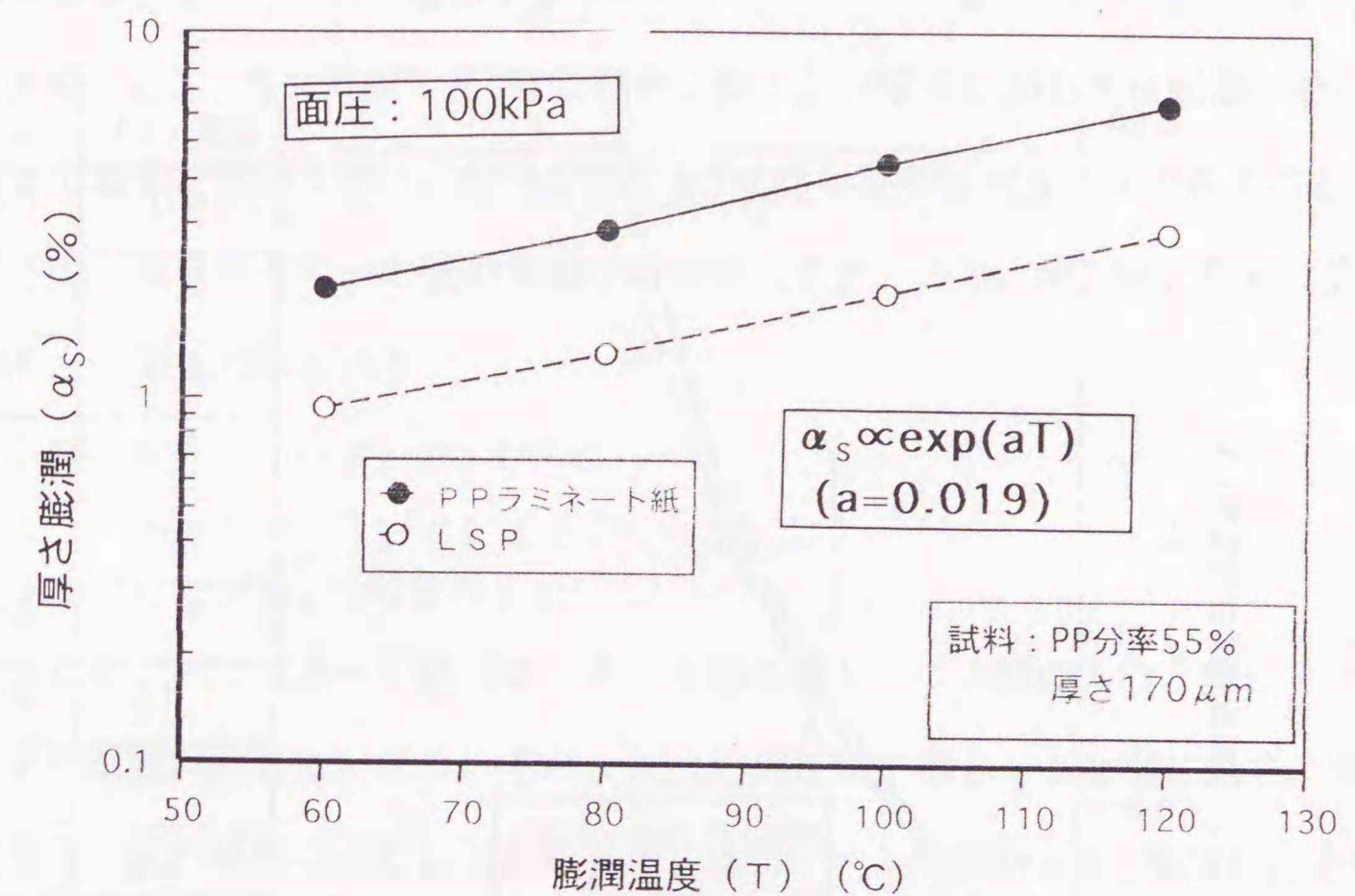
③ α_D (乾燥による紙厚減)

α_D はケーブル絶縁層のテープ巻き後の乾燥工程でのクラフト紙からの水分除去による紙厚減少率であり $\alpha_D < 0$ であることから面圧依存性は考えなくて良い。また、クラフト紙の水分量は絶対湿度ではなく相対湿度に支配されることから⁽⁶⁾、温度の考慮は要らず相対湿度のみを考慮すれば良い。第2.21図にクラフト紙の相対湿度と乾燥による紙厚減少率の関係を示す。ケーブル紙巻き時の相対湿度はPPラミネート紙ケーブルでは65%程度であり、この場合のクラフト紙の紙厚減少率は4.5%であるのでPP分率 θ のPPラミネート紙では次のようになる。

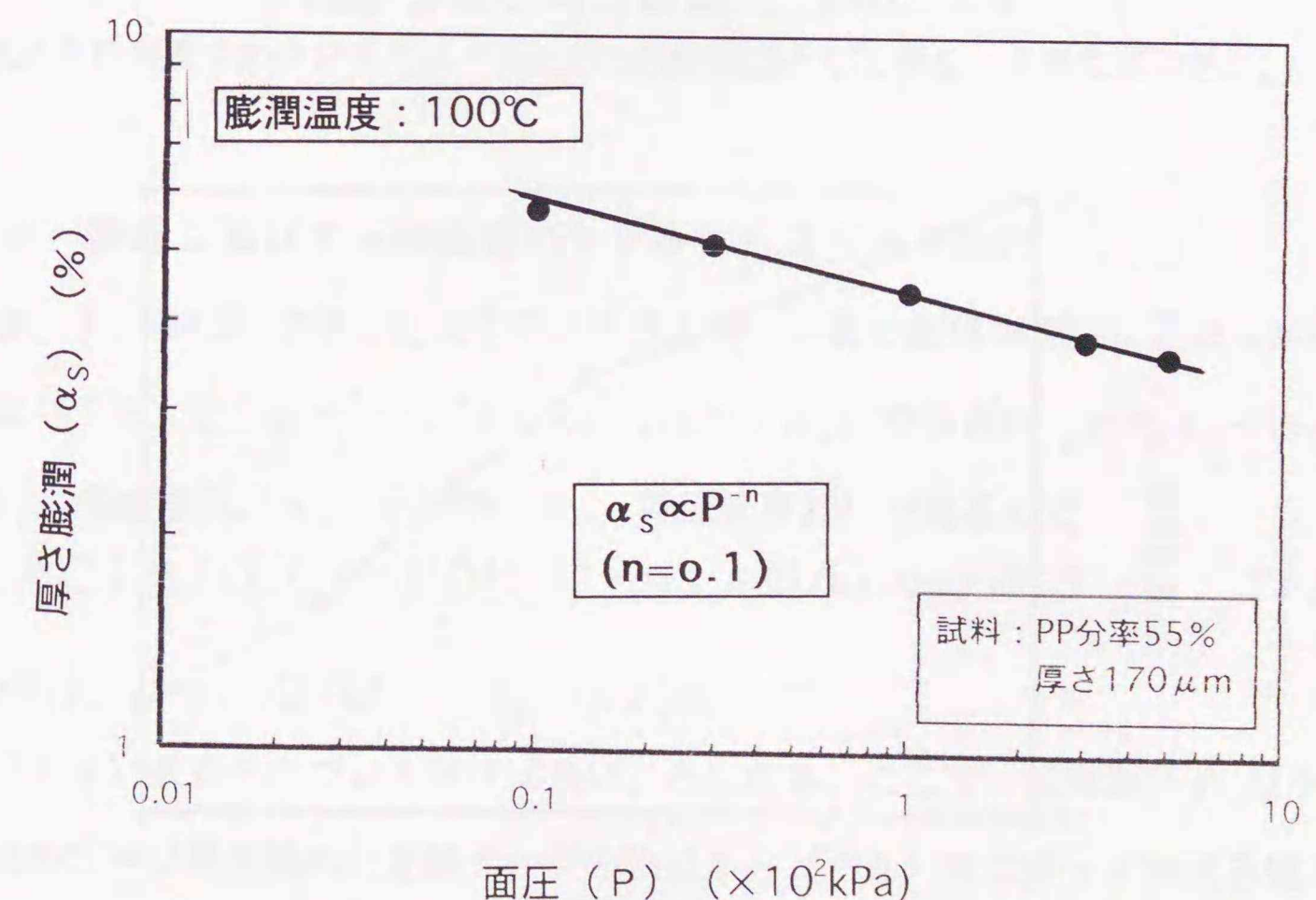
$$\alpha_D = -0.045 (1 - \theta) \dots \dots \dots (22)$$

(2) 紙巻き条件に対する物性値

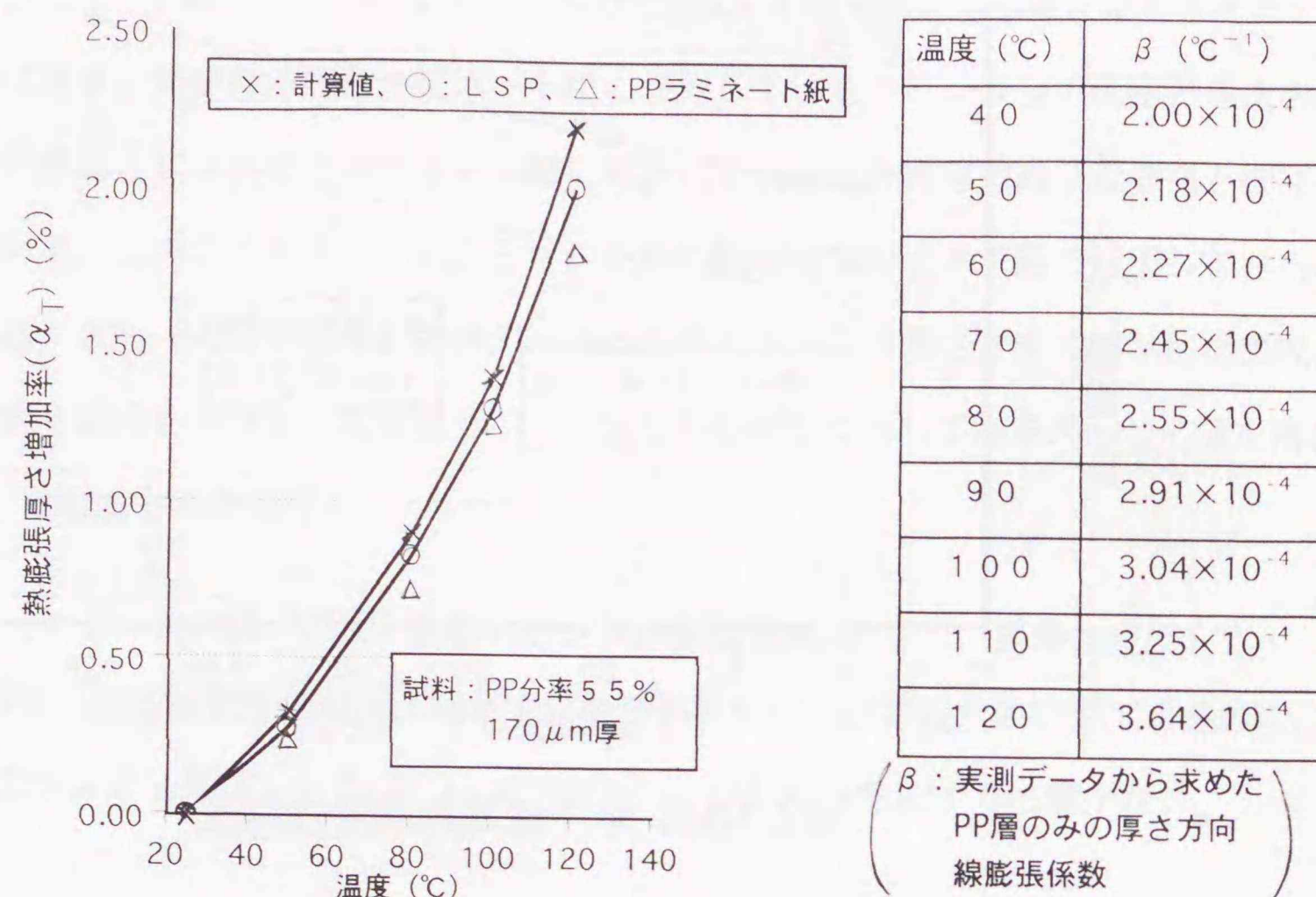
ケーブル絶縁層のテープ巻き張力と面圧の関係に対する物性値は(16)~(18)式で与えられ、主にヤング率等の機械特性に関する値である。PPラミネート紙のクラ



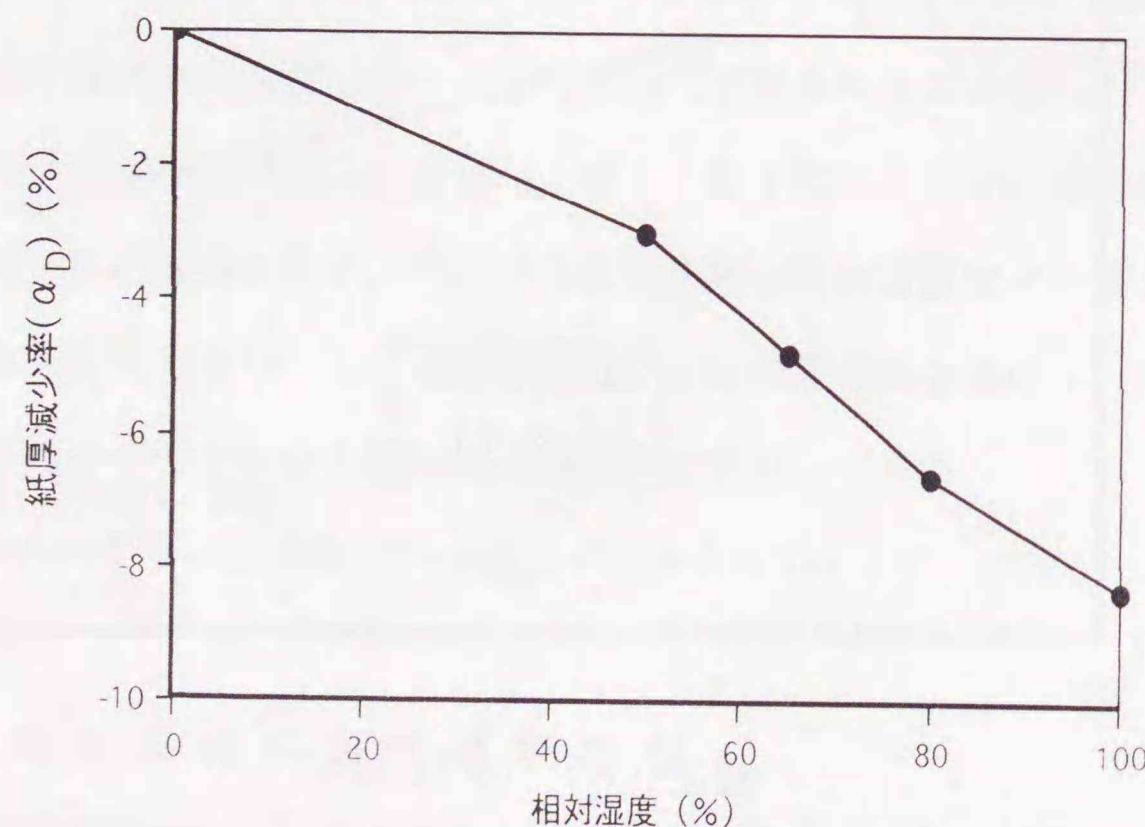
第2.18図 厚さ膨潤の温度依存性



第2.19図 厚さ膨潤の面圧依存性



第2.20図 熱膨張による厚さ増加



第2.21図 クラフト紙の相対湿度と乾燥による紙厚減少率

フト紙層のヤング率を E_k 、PP層のヤング率を E_{pp} 、PP分率を θ とすると引張ヤング率（タテ方向： E_θ 、ヨコ方向： E_z ）及びせん断ヤング率 G に対しては紙層/PP層の並列モデルで表すことができ、圧縮ヤング率 E_r に対しては直列モデルで表すことができる。従って、PPラミネート紙の各種ヤング率（タテ、ヨコ、せん断、圧縮）を E で代表させると、下式で示される。

$$\left. \begin{array}{l} \text{引張\&せん断: } E = (1-\theta) E_k + \theta E_{pp} \\ \text{圧縮: } 1/E = (1-\theta)/E_k + \theta/E_{pp} \end{array} \right\} \dots \dots \dots (23)$$

$E_{pp} \gg E_k$ では $E \approx E_k / (1-\theta)$

PP分率の異なるPPラミネート紙（2.4.2項の第2.14図のものと同じPPラミネート紙を供試試料とした）について E_θ 、 E_z の測定例を第2.22図に示す。測定データは（23）式の関係を満たしており $\theta=0$ 及び $\theta=1$ の値から E_k 及び E_{pp} を知ることができる。尚、この図から紙層のヤング率がタテ方向、ヨコ方向の異方性が大きいのに対し、PP層はタテ方向、ヨコ方向でほぼ同じ値で異方性がないことから無配向であることが判る。同様に、圧縮ヤング率等の他の物性値についてもクラフト紙層、PP層の値を求めPP分率 θ のPPラミネート紙の一般的関係として第2.9表にまとめた。

2.4.3 面圧に及ぼす α の影響のモデルケースによる検討

前項（2.4.2項）で示したようにPPラミネート紙の紙厚増加率 α と紙層間面圧 P の関係は（15）式 $\alpha = (1/k) \log_{10} (P/p_0)$ で示され、 $\alpha = \alpha_s + \alpha_T$

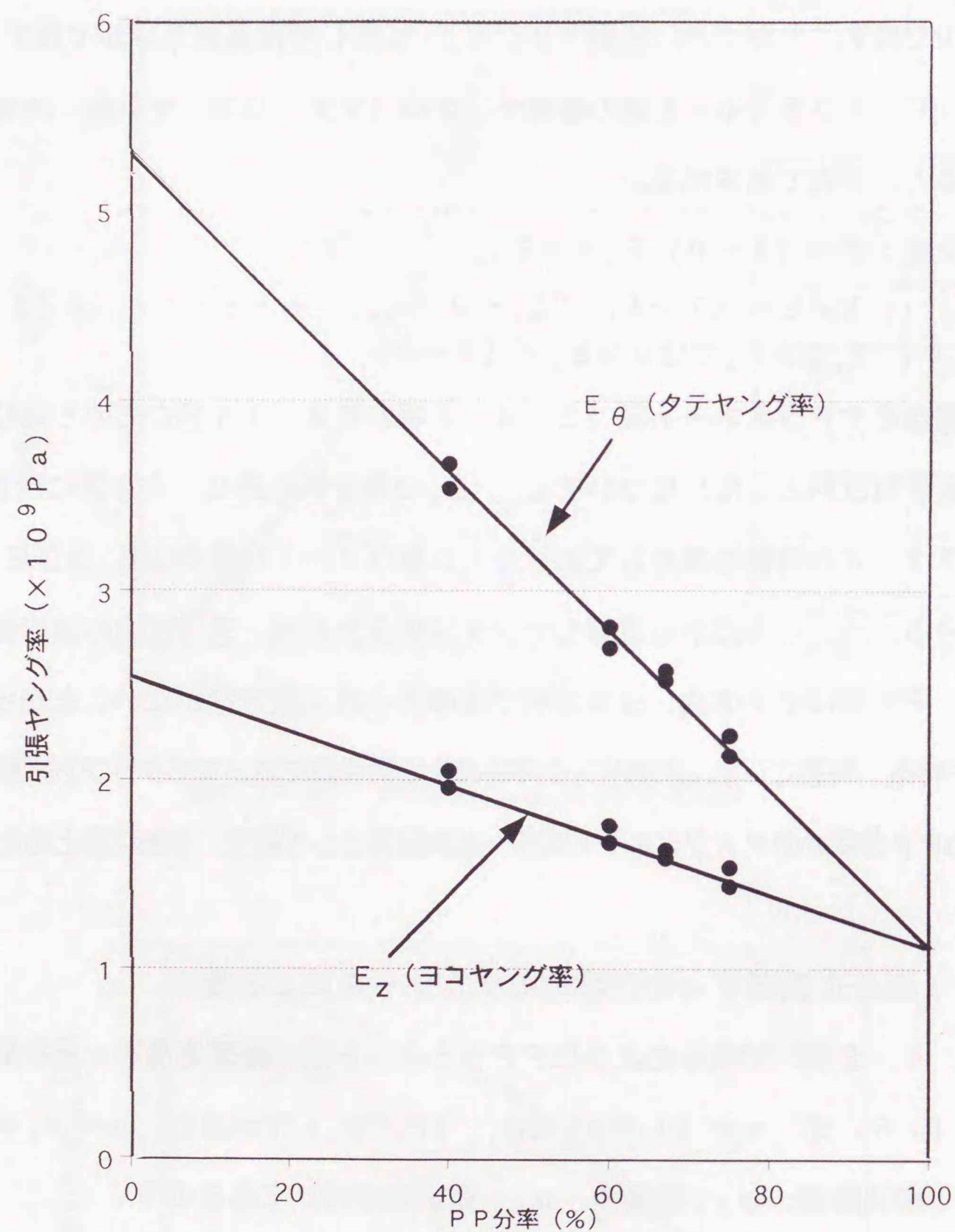
$+ \alpha_D$ （ α_s : 吸油膨潤、 α_T : 熱膨張、 α_D : 乾燥紙厚減）であるので

$$\frac{\theta A e^{aT} \cdot P^{-n}}{+ \theta \beta (T-T_0)} - \frac{0.045 (1-\theta)}{= (1/k) \cdot \log(P/P_0)} \dots \dots (24)$$

$$\downarrow \quad \quad \downarrow \quad \quad \downarrow$$

$$\alpha_s: (20) \text{式} \quad \alpha_T: (21) \text{式} \quad \alpha_D: (22) \text{式}$$

となり、（24）式を P について解けば良いことになる。ここで、初期面圧 P_0 はケーブル製造時のテープ巻き張力と絶縁テープの物性から（16）式によって決まる値であり、その制約として（17）式の最低許容面圧 P_{min} 以上の値とする必要がある。また、（24）式を解いて得られた P が（18）式の最大許容面圧 P_{max} 以上となるとケーブル



第2.22図 PPラミネート紙のPP分率と引張ヤング率

第2.9表 PPラミネート紙の紙巻物性値

項目		クラフト紙層 (E_k)	PP層 (E_{pp})	PPラミネート紙 (PP分率: θ)
ヨコヤング率 (E_z) ($\times 10^5 \text{ Pa}$)		2.5×10^4	1.2×10^4	$(1-\theta)E_k + \theta E_{pp}$
セン断ヤング率 (G) ($\times 10^5 \text{ Pa}$)		1.6×10^4	0.60×10^4	
圧縮ヤング 率 (E_r) ($\times 10^5 \text{ Pa}$)	$P=1$ $\times 10^5 \text{ Pa}$	27.6	$E_k \ll E_{pp}$	$E_k / (1-\theta)$
	$P=2$ $\times 10^5 \text{ Pa}$	54.6		
	$P=3$ $\times 10^5 \text{ Pa}$	81.5		
(13) 式のK		12	—	$12 / (1-\theta)$
摩擦係数	静	0.7 (0.6~0.8)	—	クラフト紙に同じ
	動	0.5 (0.4~0.6)	—	//

ルの曲げ特性の問題（絶縁層の座屈）を生ずることになる。面圧 P の増大は上述の曲げ機械特性のみならず、ケーブル絶縁層のラジアル方向の油流抵抗をも増大させる。この油流抵抗の増大は OF ケーブルの実使用時の送電電力の負荷変動や遮断、投入時に生ずる絶縁層の温度変化時の絶縁油の膨張、収縮に伴う過渡油圧変動の補償を困難にする。特に、 PP ラミネート紙ではクラフト紙と異なり PP 層の介在のため絶縁層ラジアル方向の油流はテープ層の貫通流は期待できずテープ層間流のみとなるので、層間面圧増大による油流抵抗への影響は大きい。 PP ラミネート紙の面圧と層間油流抵抗の関係の測定例を第2.23図に示す。同図はリング状の PP ラミネート紙を積み重ねた試料により測定を行い、層間油流抵抗 $[r]$ は次式により求めた。

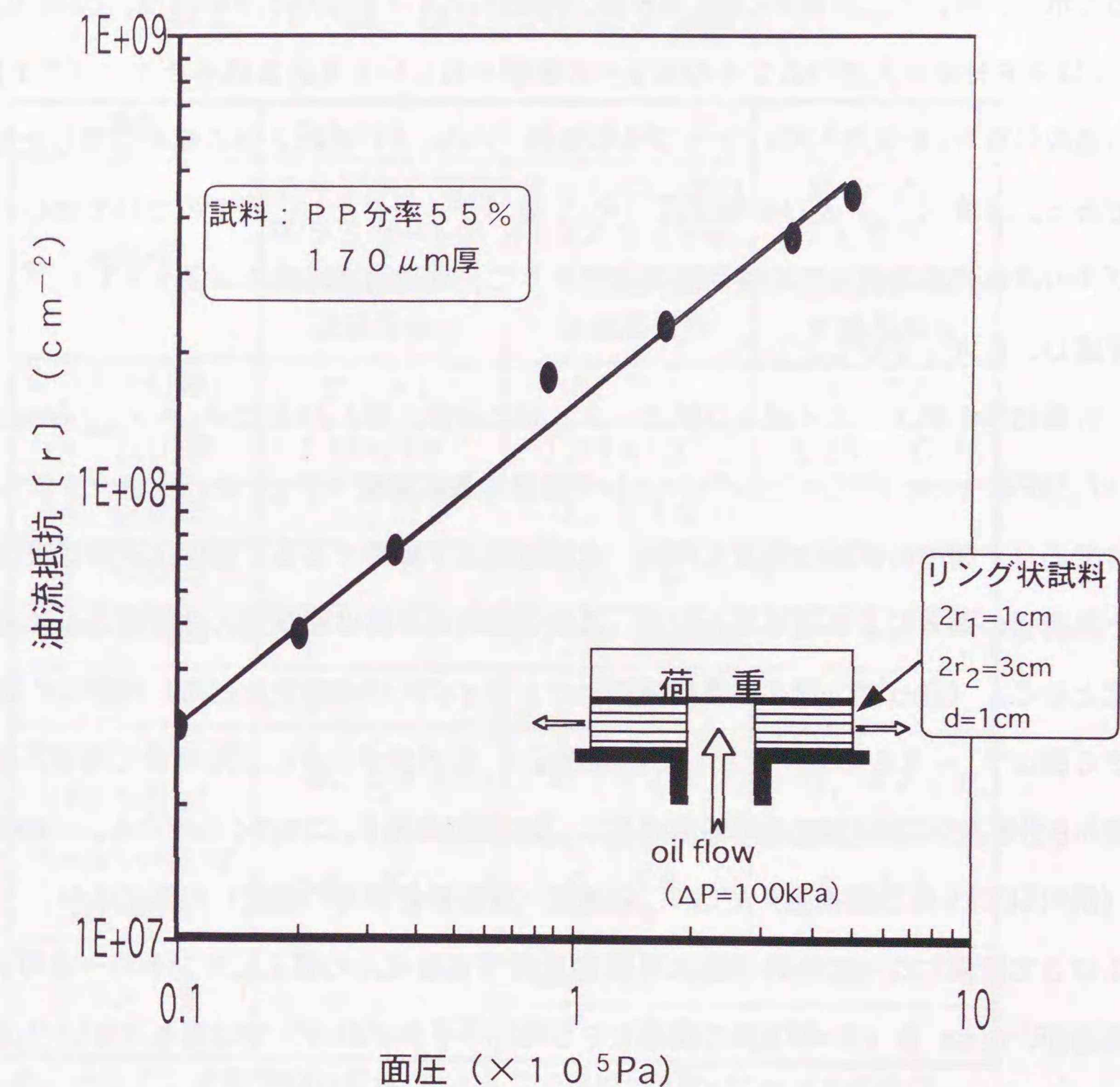
$$[r] = (\Delta P / Q \eta) \cdot (2 \pi d / \ln(r_2/r_1)) \cdots \cdots (25)$$

$$\left[\begin{array}{l} [r] : \text{油流抵抗 (cm}^{-2}\text{)}, \Delta P : \text{油圧差 (} \times 10^{-5} \text{ Pa)} \\ Q : \text{流量 (cm}^3\text{/s)}, \eta : \text{絶縁油 (アルキルベンゼン油) の粘度 (Poise)} \\ d : \text{リングの重ね厚さ (cm)}, r_1 \& r_2 : \text{リングの内半径及び外半径 (cm)} \end{array} \right]$$

油流抵抗 $[r]$ と面圧 P は $[r] \propto P^n$ であり、 $n=0.71$ であることから面圧依存性がかなり大きいことが分かる。

2.1節で述べたように PP ラミネート紙ケーブルは 275 kV 級、 500 kV 級については既に実用化されており、この場合 275 kV 級では θ (PP 分率) $=40\sim45\%$ 、 500 kV 級では $\theta=55\sim60\%$ の PP ラミネート紙が用いられている。また、将来計画されている 1000 kV 級では第2.3節で考察したように ε グレーディング絶縁層の体積的には過半を占める低 ε 最外層の PP ラミネート紙として $\theta=75\%$ 程度が要求される。当然のことながら、 θ の大きい PP ラミネート紙程面圧に与える影響は大きく、(24)式の中で紙厚増に最も大きく寄与するのは α_s (吸油膨潤) である。そこで、 PP ラミネート紙による次の3つのモデルケースについて、(24)式により面圧に与える影響を試算することとする。

- | |
|--|
| case A : $\theta=55\%$ の現用 PP ラミネート紙 (現用 500 kV 級絶縁層相当) |
| case B : $\theta=75\%$ の " (1000kV級絶縁層相当) |
| case C : $\theta=75\%$ の LSP (膨潤抑制 PP ラミネート紙) (1000kV級絶縁層相当) |



第2.23図 PP ラミネート紙の面圧と層間油流抵抗

(尚、導体サイズ2500mm²、500kV級→絶縁厚25mm、1000kV級→絶縁厚33mmとする)

各々のケースの(24)式に対する計算定数並びに紙巻物性値を用いて(17)式、(18)式から得られる許容最小面圧 P_{min} 、許容最大面圧 P_{max} を第2.10表にまとめて示す。尚、 P_{min} の値がcase B及びCがcase Aよりかなり小さいのは、case B及びCではPP分率が大きいのでその面圧への影響が大きいと見込まれるため、(17)式の巻取外径 R_o を現用500kVケーブルの条件(case A)の約2倍の値を採用したためである。温度(T_m)及び初期面圧(P_o)をパラメータとし、温度についてはOFケーブルの導体許容温度(常時使用最高温度85℃、短時間使用最高温度95℃)⁽²⁷⁾を考慮し、最大100℃とした。

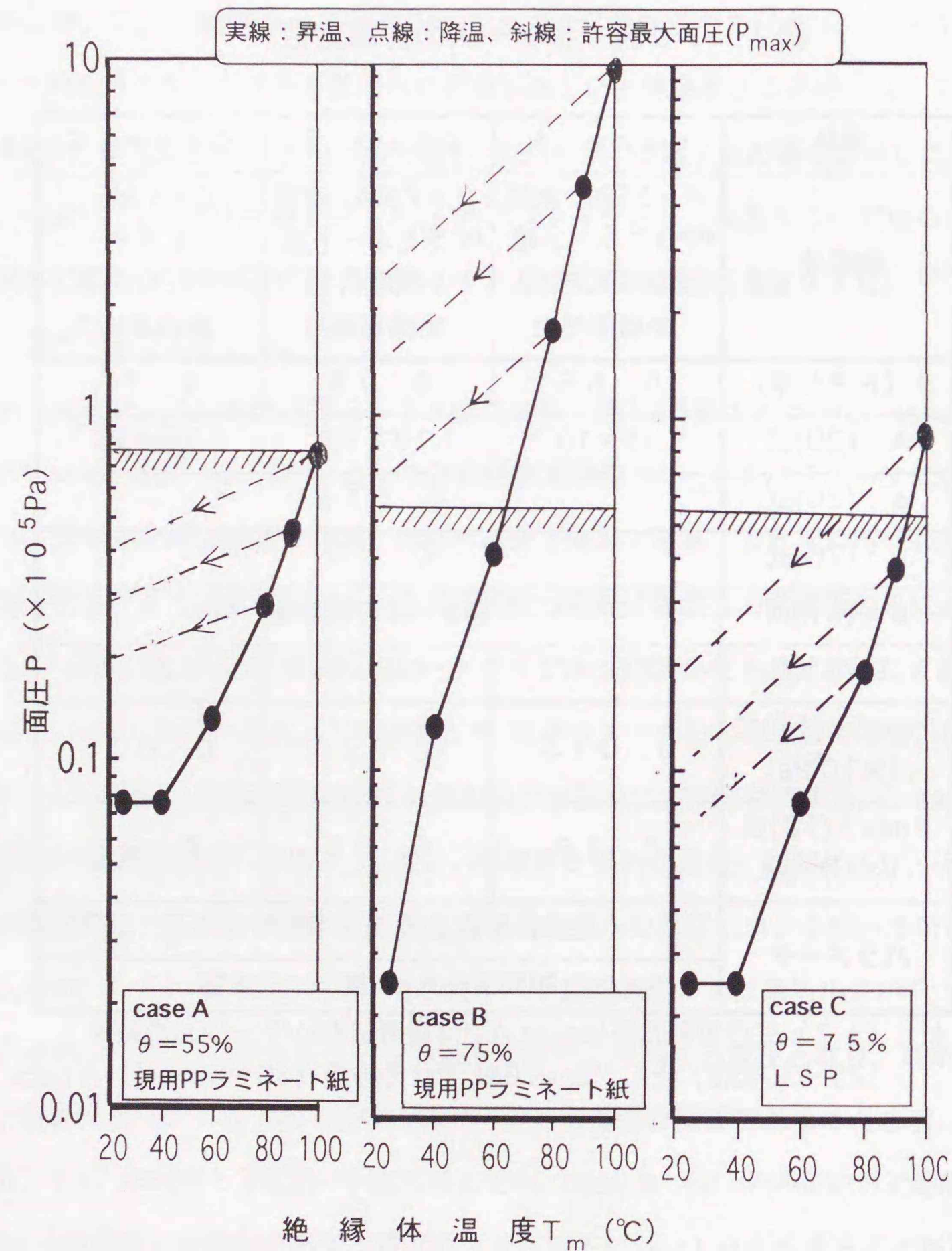
計算結果を第2.24図及び第2.25図に示す。第2.24図は $P_o = P_{min}$ (case A→7.5kPa, case B&C→2.5kPa)として絶縁体最高温度(T_m)をパラメータにした場合であり、図中の実線は温度上昇時、点線は温度下降時である。温度上昇時は吸油膨潤と熱膨張の両方による紙厚増となり、温度下降時の点線は膨潤後の熱膨張のみによる変化となる。(従って、第2回目以降のヒートサイクルは点線をたどる)同様に、第2.25図は $T_m = 85℃$ の一定として初期面圧 P_o をパラメータにした場合である。計算結果から分るように面圧は絶縁体最高温度 T_m 及び初期面圧 P_o に大きく依存する。case A(現用500kV絶縁層相当)では P_o の選定(低紙巻き張力の選定)如何により、 T_m が100℃程度になっても許容最大面圧 P_{max} 以下のレベルの面圧にコントロール可能であるが、case B($\theta = 75\%$ の現用PPラミネート紙絶縁層)では最も小さい P_o 。

(P_{min})を用いても、 T_m が60～70℃以上では P_{max} を越える面圧となり、現用PPラミネート紙の膨潤レベルでは1000kV級ケーブルの製造が困難であることを示している。一方、 $\theta = 75\%$ のPPラミネート紙であっても、case C($\theta = 75\%$ のLSP絶縁層)ではcase Aの場合と同程度の裕度で許容最大面圧以下にコントロールすることが可能であり、PP層の吸油膨潤の抑制が1000kV級ケーブルには不可欠であることを示唆している。

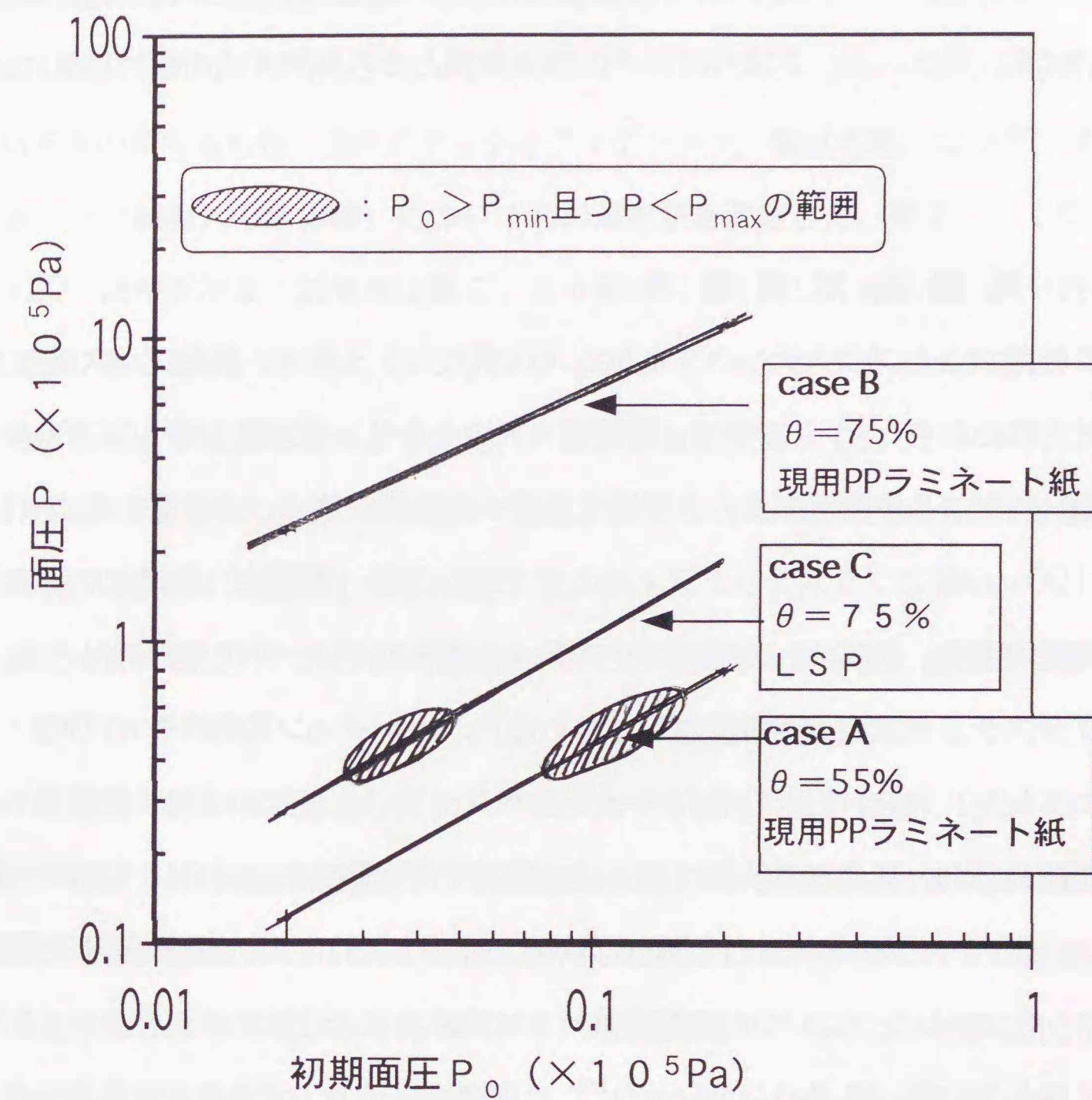
第2.10表 各ケースの計算定数

項目	case A	case B	case C
絶縁体	$\theta = 55\%$ 、現用PPラミネート紙 現用500kV級絶縁層相当	$\theta = 75\%$ 、現用PPラミネート紙 1000kV級絶縁層相当	$\theta = 75\%$ 、LSP 1000kV級絶縁層相当
θ (PP分率)	0.55	0.75	0.75
A : (20)式	1.19×10^{-2}	1.19×10^{-2}	5.29×10^{-3}
a : (20)式	0.019		
n : (20)式	0.10		
β : (21)式	第2.20図参照		
k (第2.9表)	26.7	48.0	48.0
P_{min}^* : (17)式 ($\times 10^5 \text{Pa}$)	0.075	0.025	0.025
P_{max} : (18)式 ($\times 10^5 \text{Pa}$)	0.70	0.56	0.56
パラメータ	絶縁体最高温度 T_m : 第2.24図		
	初期面圧 P_o : 第2.25図		

* : (17)式の巻取外径はcase Aでは現用500kVケーブルの条件(25～30倍径)とし、case B&Cではその倍(50～60倍径)とした。



第2. 24図 面圧の絶縁体温度依存性
(初期面圧 $P_0 = P_{\min}$ とした場合)



第2. 25図 面圧の初期面圧依存性
(絶縁体温度 $= 85^{\circ}\text{C}$ とした場合)

第2.5節 PPラミネート紙の耐油性とその改善

PPはオレフィン系高分子であることからOFケーブルに用いられる炭化水素系の絶縁油とは溶解度パラメータの差も小さく、絶縁油によるある程度の溶解及び膨潤は避けられない。以下、2.5.1項ではPPの絶縁油に対する溶解特性並びにその影響度に関する検討結果、第2.5.2項ではPPの吸油膨潤とその抑制方法の検討結果について述べる。

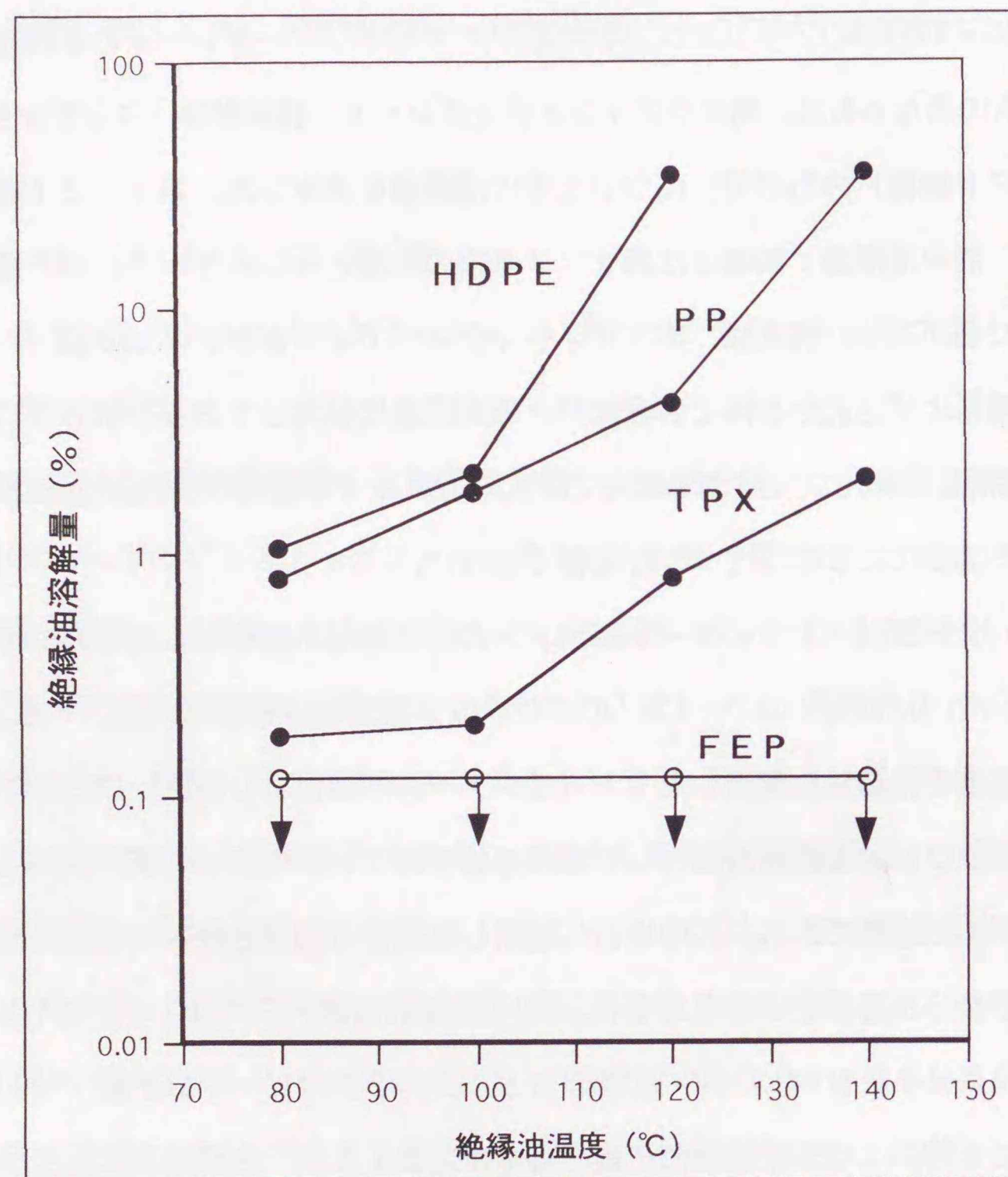
2.5.1 絶縁油溶解特性

PPを含め幾つかのプラスチックフィルム（いずれもラミネート紙用プラスチック層として検討された材料⁽¹⁾）について、絶縁油（アルキルベンゼン油：JIS C2320 2種1号油）に対する平衡溶解量の温度特性を調べた結果を第2.26図に示す（試験法は50～100μm厚のプラスチックフィルムをその5倍量（重量比）絶縁油に所定温度×所定時間浸漬後、絶縁油への溶出プラスチック量をエタノールで冷却析出させ、析出重量／プラスチック重量を溶解量として求めた）。オレフィン系高分子（HDPE：高密度ポリエチレン、PP、TPX：ポリ-4-メチルペンテン-1）ではいずれも絶縁油への溶解現象が認められ、高温程溶解量は増大し、溶解平衡時間も高温程短い（溶解平衡時間：80℃&100℃→20～30日、120℃&140℃→5～10日）。フッ素系高分子であるFEP（フッ化エチレンプロピレン共重合体）では絶縁油との溶解度パラメータ（SP）差が大きく離れている（SP（cal/cm³）^{1/2}）：絶縁油→8.0、オレフィン系高分子（HDPE、PP、TPX）→8.0～8.2、FEP→6.8）ことから溶解は殆ど認められない。オレフィン系高分子はいずれも結晶性高分子であり、その溶解量はHDPE>PP>TPXの順となり各々の高分子の結晶融点（HDPE：～125℃、PP：160～170℃、TPX：～240°）の順と一致し、結晶化度の低下が著しくなる結晶融点に近い温度では溶解量が急激に増大する傾向を示すことから、溶解現象は主に非晶部で起きていることを意味している。溶解量が急増する手前の領域（溶解量4～5%程度）の温度を絶縁油

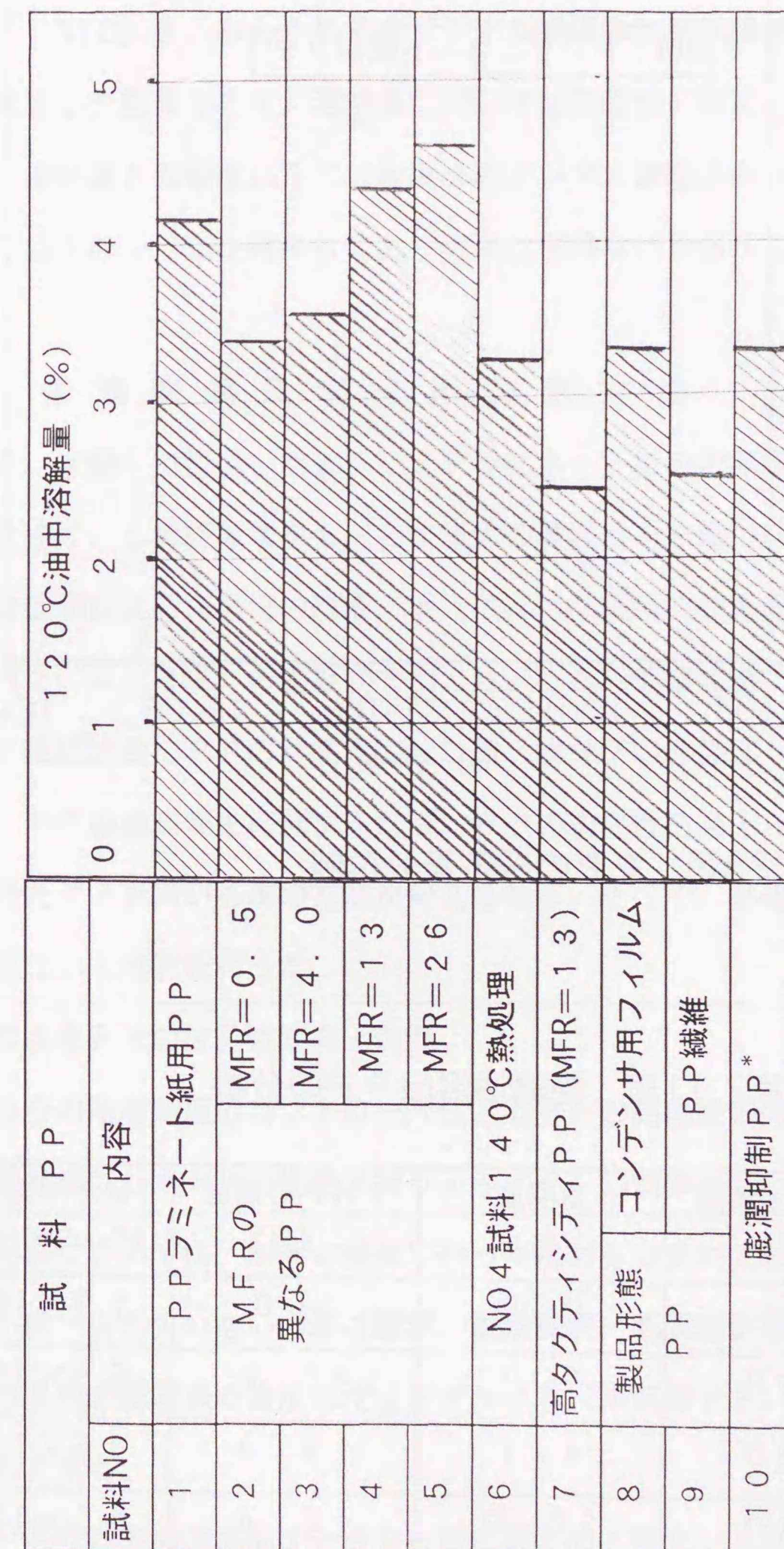
溶解に対する許容温度とすると、HDPE→100～110℃、PP→120℃、TPX&FEP→140℃以上となり、いずれもOFケーブルの導体許容温度（常時使用最高温度：85℃、短時間使用最高温度：95℃）以上の値であるがHDPEでは裕度が小さい。

PP種の違いによる溶解量の差を調べるためにPPラミネート紙用のPPと同じ結晶融点160～170℃のアイソタクティックPPホモポリマーグレードの各種市販PP（MFRの異なるもの、高タクティシティグレード、製品形態（コンデンサ用PPフィルム、PP繊維）のもの等）についてその溶解量を測定した。第2.27図に測定結果（120°油中溶解量：試験法は第2.26図の方法と同じ）を示す。PP種によっても溶解量に差があり、例えば、タクティシティ（アイソタクティック成分）の高いPPや熱処理により結晶性を向上させたPPの溶解量は低減しており、MFRについては小さい程溶解量は僅かに小さくなる傾向である。しかし、PP種間の溶解量の差は第2.26図に示した温度による差に比べると顕著ではない。

第2.28図はPPラミネート紙用PPの分子量分布例を示したものであり、分子量は10³～10⁴から10⁶～10⁷のかなり広い範囲に分布している。一方、第2.11表は各温度で絶縁油に溶出したPP（エタノール析出により採取）についてTHF（テトラヒドロフラン）を展開溶媒として高速液体クロマトグラフィ（液クロ）によりその分子量を求めた結果である。この場合に使用した液クロ展開溶媒THFには或る一定値以下の分子量しか溶けないと考えられ、80℃絶縁油溶解PPではTHFに100%溶け、そのピーク分子量も1.9×10⁴でありオリジナルPP（ピーク分子量：～1.0×10⁵：第2.28図）よりかなり低分子量のものが溶出するが、絶縁油浸漬温度が高くなるにしたがってTHF可溶分が減少し高分子量成分の溶出割合が増えることが分かる。また、80℃の例で説明すると、絶縁油へのPP溶出量は0.9%であるが溶出PPのピーク分子量（1.9×10⁴）以下のトータル重量分率はオリジナルPPに対しては約11%であり、従って、必ずしも分子量の小さい成分だけが油中へ溶出するのではなく、非晶部に存在するものは比較的分子量の大きいものでも溶出し、分子量が小さくても結晶域に組み込まれていれば溶出し難いと推定される。

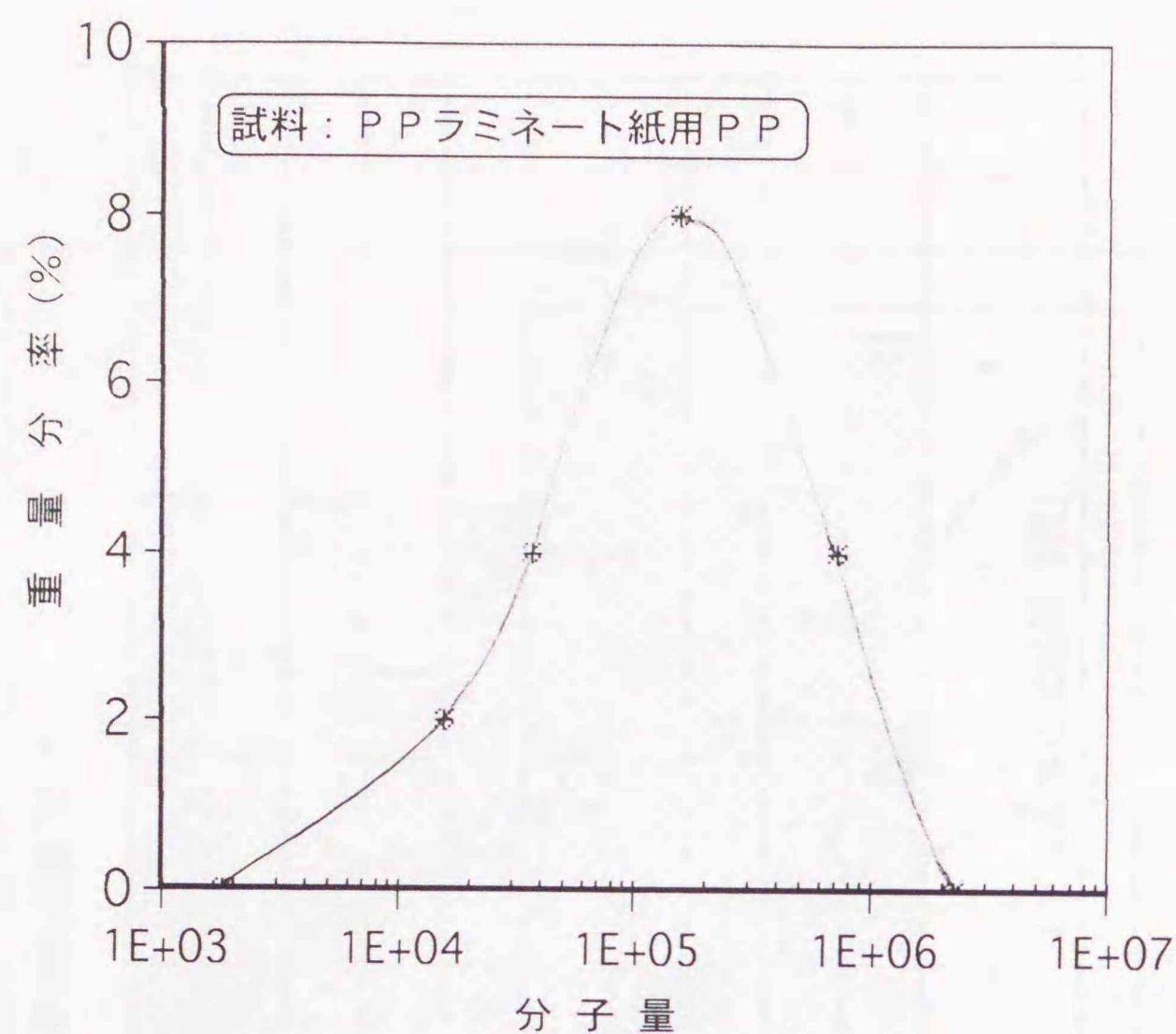


第2.26図 各種プラスチックの絶縁油平衡溶解量



* LSP用PP (2.5.2項参照)

第2.27図 PP種と絶縁油溶解量



第2.28図 PPの分子量分布例

第2.11表 絶縁油溶出PPの分析

絶縁油浸漬温 (℃)	溶解量 (%)	THF可溶分 (%)	THF可溶分の ピーク分子量
80	0.9	100	1.9×10^4
100	1.7	47.5	6.5×10^4
120	4.1	19.4	3.6×10^4
140	35.0	12.4	6.5×10^4

溶出PPによる絶縁油への影響として絶縁油の粘度及び流動点上昇が考えられるので、その度合いを調査した。第2.29図はエタノール析出により採取した絶縁油溶出PP（溶出温度：120℃）を、あらためてオリジナル絶縁油に所定量溶解させ、その粘度及び流動点を測定した結果である。溶解量に対しほぼ直線的に粘度、流動点は上昇する傾向であるが、溶解量5%程度以下では粘度はオリジナル絶縁油の2倍以下であり、流動点も-50℃以下のレベルを維持しており実用上支障ないレベルと考えられる。

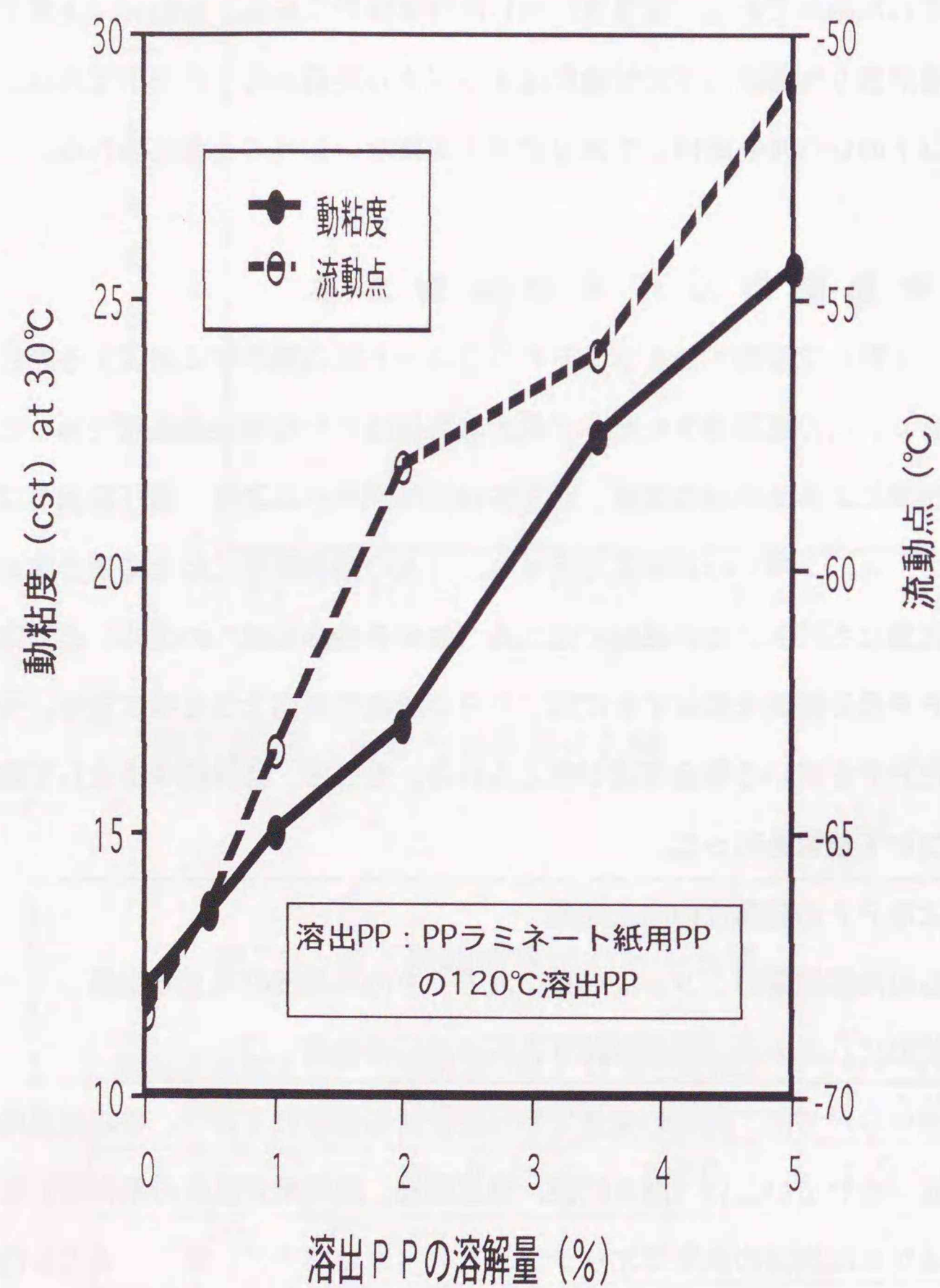
2.5.2 吸油膨潤及びその抑制方法

前節（第2.4節）で説明したようにPPラミネート紙の紙厚増に起因する面圧に及ぼす影響は大きく、この紙厚増をもたらす最大の要因はPP層の吸油膨潤であった。PP層の吸油膨潤による紙厚増の温度、面圧依存性は実用的な温度、面圧範囲では（20）式（2.4.2項）の実験式で示され、ゴムの溶媒膨潤に似た機構と考えられることから、膨潤は主にPPの非晶部で起こる（油分子の非晶部への侵入）と推定される。従って、PP吸油膨潤を抑制するには、PPの結晶性を向上させることや、予め膨潤状態にさせたPPを用いる等の方法が考えられる。そこで、具体的手法として次の3通りの効果について検討を行った。

- ①熱処理によるPPの結晶性の向上効果
- ②熔融時からの冷却速度のコントロールによるPPの結晶性の向上の効果
- ③予め膨潤状態にしたPP（絶縁油練り込みPP）の効果

尚、各々の効果については、別々の機会に行った検討も含まれており、吸油膨潤の評価法も必ずしも統一されていない（厚さ膨潤、重量膨潤、膨潤測定面圧の条件等）ので、煩雑さを避けるため膨潤量の表示はオリジナルPP（未処理PP）を1.0とした相対値で示すこととする。

上述の①～③の効果の代表的データを一覧にまとめて第2.30図に示す。同図より膨潤抑制の効果は、絶縁油練り込みPP<冷却条件調整PP<熱処理PP（最も効果のある条件での膨潤量の小さい順）の順となっている。



第2.29図 溶出PPによる絶縁油の粘度、流動点への影響

手法	条件	膨潤量 (相対値)		
		0	0.5	1.0
熱処理温度 (N_2 ガス中、 24時間)	無し	[Hatched Area]		
	120°C			
	130°C			
	140°C			
冷却条件 (ラミネート ロール温度)	基準温度 (T_0)	[Hatched Area]		
	$T_0 + 20^\circ C$			
	$T_0 + 35^\circ C$			
	$T_0 + 50^\circ C$			
	$T_0 + 70^\circ C$			
	$T_0 + 85^\circ C$			
絶縁油 練込 (油種; アルキルベ ンゼン油)	練込無し	[Hatched Area]		
	5%練込			
	10%練込			
	20%練込			
	30%練込			

第2.30図 各手法による吸油膨潤抑制効果

PPの熱処理による結晶性の向上は、一般に結晶性ポリマーを結晶融点よりやや低い温度に保つことにより、その温度で部分融解した結晶部が熱運動により結晶部に再配列し、さらに非晶部の一部も結晶部に練り込まれ結晶化度が增加する効果に基づくものである。従って、PPの結晶融点(160~170℃)に近い温度でなければこの効果は期待できず、第2.30図に示すように130~140℃以上の温度(効果が平衡に達する熱処理時間は24時間以下)で効果が認められている。熱処理による結晶化度の向上は密度或いはDSC(示差走査熱量計)による結晶融解熱の増加にも認められる(後掲の第2.12表参照)。この方法は具体的にはOFケーブル製造時の水分除去のための乾燥工程の温度コントロールにより適用可能であるが、上述の温度(130~140℃)はクラフト紙の熱劣化が顕著になり始める温度でもあり⁽⁶⁾、この点を考慮に入れる必要がある。

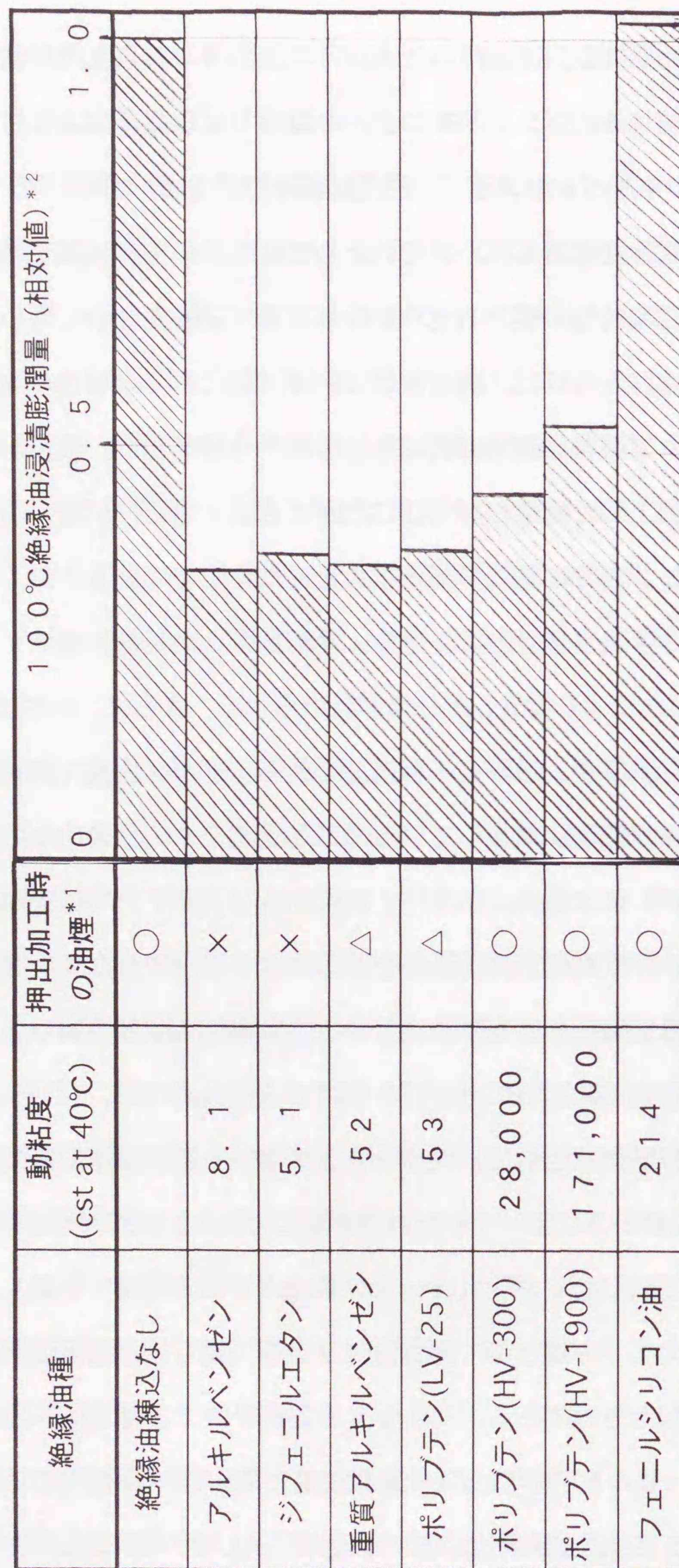
冷却条件の調整は溶融PPが冷却結晶化する際の結晶化温度を決めるものであり、具体的にはPPラミネート紙製造工程(2.2.1項、第2.1図参照)のTダイから押出される溶融PPフィルムがクラフト紙と一体化されるラミネートロールの温度コントロールにより、この方法が適用できる。溶融時からの冷却結晶化速度は結晶化温度により変化し、温度が高いと結晶核の発生が困難となり結晶化が遅れ、また、温度が低いと分子鎖が拡散し難いため結晶化しにくく、その間に結晶化速度が最大となる温度があり、ポリエチレン等に比べPPではこの傾向が特に顕著である⁽⁵⁾。例えば、PPフィルムを溶融状態から種々の結晶化温度 T_c (-75~140℃)で結晶化させたときの結晶化度、球晶径、結晶化時間を調べた結果では、 T_c が高い程結晶化度、球晶径は大きくなるが、結晶化時間は T_c が100℃以下では数秒~数十秒であるのに対し100℃以上では数分~数十分となることが報告されている⁽²⁸⁾。第2.30図ではラミネートロール温度に対して膨潤量が最小値となる温度レベルが存在するが、温度が低い場合はその温度での到達結晶化度が低く、温度が高い場合は到達結晶化度に達するのに必要な十分な時間(結晶化時間)が与えられないと考えられる。

絶縁油練り込みPPの使用は膨潤抑制に最も効果が認められ、絶縁油練り込み量が多

い程膨潤は低減するがその効果は飽和する傾向であり、また、30%以上の多量になると絶縁油のブリード現象も現れる。第2.30のデータは練り込み絶縁油として超高压OFケーブル用の低粘度アルキルベンゼン油(=膨潤試験時の浸漬油)を用いているが、実用上の問題として、粘度($\propto$ 絶縁油沸点)が低いためにラミネート押出加工時に油煙の発生が生じる。そこで、誘電特性の優れる他の絶縁油を練り込んだ場合について上述の油煙発生レベルを含めて検討を行った。結果を第2.31図に示す。炭化水素系絶縁油(同図のシリコン油以外)であれば膨潤抑制効果はいずれも認められ、或るレベル以上の粘度の油であれば押出加工時の油煙も抑えることができる。また、同図から非炭化水素系の絶縁油であるシリコン油では膨潤抑制効果の全くないことが分る。

膨潤抑制に対する以上の3手法(絶縁油練り込み、冷却条件、熱処理)は第2.12表に示すように、併用することにより重畳した効果が認められる。さらに、同表には各々の試料PPの密度並びに結晶融解熱、融解ピーク温度の値も示すが、結晶化度を反映する値である密度、結晶融解熱が顕著に増加しているのは熱処理PPの場合のみであり、冷却条件の違い(急冷、徐冷)による差は小さく、絶縁油練り込みPPでは逆に若干減少している。このことから、膨潤抑制効果は結晶化度の大きさだけではなく非晶域の状況、すなわち、冷却条件(冷却結晶化過程)に支配される非晶域の状態や練り込まれた絶縁油分子の非晶域での存在状態によっても影響を受けると考えられる。

PPラミネート紙の膨潤抑制対策として、現用PPラミネート紙では冷却条件(ラミネートロール温度)のコントロールによってその対策を施しており、前節(第2.4節)第2.18図に比較用として示したLSP(Low Swelling PPラミネート紙)は冷却条件のコントロールに加えてPP層として絶縁油練り込み(練り込み絶縁油:重質アルキルベンゼン油)を採用したものである。尚、LSP用のPPでは練り込み油によってPPのMFR(メルトフローレート)が増大するために現用PPラミネート紙用のPPより低MFRのベースPPを用いることにより押出加工上の問題を解決している。また、LSPの絶縁油溶解性については前項(2.5.1項)第2.27図に示したように現用PPラミネート紙より若干優れた結果が得られている。



* 1 : ○⇒発生なし、△⇒発生量小、×⇒発生量大
 * 2 : 浸漬油 : アルキルベンゼン

第2.31図 練込絶縁油の種類と膨潤抑制効果

第2.12表 膨潤抑制手法の併用効果

試料 P P			膨潤量 ^{*4} (相対値)	密度 (g/cm ³)	D S C	
PP レジ	冷却条件 ^{*2}	熱処理 ^{*3}			融解熱 (cal/g)	融解ピーク 温度(°C)
絶縁油 練込なし	急冷	なし	1.0	0.898	21	162
	徐冷	なし	0.61	0.901	20	162
	徐冷	あり	0.46	0.915	33	163
絶縁油 ^{*1} 練込あり	急冷	なし	0.42	0.895	17	161
	徐冷	なし	0.28	0.904	17	162
	徐冷	あり	0.21	0.913	26	161

* 1 練込油 : ポリブテン (動粘度28,000cst at 40°C) 20重量部

* 2 冷却条件 : 急冷⇒冷却温度 = T_0 (基準温度)

徐冷⇒冷却温度 = $T_0 + 40^\circ\text{C}$

* 3 熱処理 : 140°C N_2 ガス中 $\times 24$ 時間

* 4 膨潤量 : 100°C 絶縁油 (アルキルベンゼン油) 浸漬後

第2. 6節 結

論

超高压電力ケーブル用油浸絶縁材料として電気特性（誘電特性、絶縁耐力）の改善効果から従来のクラフト紙に替わってポリプロピレン（PP）フィルムの両面にクラフト紙を貼り合わせたPPラミネート紙が採用され、極く最近、500kV OFケーブルとしての実用化も始まっている。しかし、PPラミネート紙の絶縁材料としての基礎的な特性を含め、PP層の存在のために従来のクラフト紙では配慮されていなかった幾つかの問題点が今後の改善すべき課題として残されている。そこで、本章では先ず、基本事項としてPPラミネート紙の製造加工上の留意点並びにクラフト紙に比較した電気特性上の優位性について説明し、次に、PPラミネート紙の優れた電気特性を用いて将来計画されている1000kV級UHVケーブルに対する絶縁設計手法について考察した。また、PPラミネート紙の最も改善すべき問題点であるPP層の主に吸油膨潤に起因する絶縁紙層間面圧に及ぼす影響に関する定量的検討とPP層の吸油膨潤の抑制法等についても検討を行った。得られた主な結論は次の通りである。

- (1) PPラミネート紙の製品性能に影響を及ぼす製造加工上の因子として、PPレジン並びに押出加工条件の選定に関する基本的な考え方を明らかにした。また、紙/PP間の剥離強度の改善に関して高気密度紙の片面を低気密度化処理した2層構造の紙（二重紙）を用いる方法、及びシラングラフト化PPを用いる方法により、顕著な改善効果が認められる。
- (2) PPラミネート紙の電気特性として誘電特性（ ϵ & $\tan \delta$ ）についてはクラフト紙とPP層の単純な積層とほぼ等価のモデルで評価することができ、従ってPP分率に応じて誘電特性は改善される。絶縁破壊特性についてはPPラミネート紙ではインパルス（Imp）極性効果が認められるものの、AC並びにImp破壊強度の低い極性側（正極性）であってもクラフト紙より20%以上向上した値となる。
- (3) PPラミネート紙を用いた1000kV級UHV OFケーブルの絶縁設計には誘電率段絶縁（ ϵ グレーディング）の手法を積極的に取り入れる必要がある。この際、

破壊強度の厚さ効果及び ϵ グレーディングの段替わりの位置に生ずる絶縁中層 $E_{\max}$ （最大電界強度）が導体直上 $E_{\max}$ より高い値を許容できるとする新手法を用いることにより1000kV級ケーブルの要求電気特性に対し絶縁設計が可能であることが示された。また、この場合、体積的に過半を占める ϵ グレーディング最外層のPPラミネート紙のPP分率として75%程度のものが要求される。

- (4) PPラミネート紙絶縁層の紙厚増加率 α は $\alpha = \alpha_s + \alpha_T + \alpha_D$ （ α_s ：PP層の吸油膨潤、 α_T ：PP層の熱膨張、 α_D ：乾燥紙厚減）で示され（クラフト紙では $\alpha_s = \alpha_T = 0$ ）、紙厚増加による紙層間の面圧増加（絶縁層の締め）のためにケーブルの曲げ特性、油流抵抗に影響を及ぼす。紙厚増加率と面圧の間に成立する関係式を導き、さらに計算に必要な定数値（物性値）の詳細な測定を行い定量的に検討した。その結果、現用500kV PPラミネート紙ケーブル（PP分率：55%）では紙巻き張力の選定により許容最大面圧以内にコントロール可能であるが、より大きいPP分率（75%）が要求される1000kV級ケーブルに対しては、現用PPラミネート紙の吸油膨潤レベルでは上記のコントロールが不可能であり、膨潤抑制PPラミネート紙（LSP）が不可欠であることが示された。
- (5) PPの耐絶縁油特性として絶縁油へのPPの溶出及び絶縁油による吸油膨潤が挙げられる。PPの溶出による絶縁油への影響（粘度、流動点上昇）についてはOFケーブルの最高使用温度レベルまでは実用上支障のないことが確かめられた。また、(4)で述べたPP層の吸油膨潤の抑制方法について検討を行い、①絶縁油練り込みPP（予めPPを膨潤状態にする）＜②溶融時からの冷却条件のコントロール＜③熱処理（膨潤量の小さい順）の順の順の順に効果が認められた。①と②の方法を併用したLSP（Low Swellig PPラミネート紙）では現用PPラミネート紙の40%以下に膨潤を抑えることができる。

(第2章参考文献)

- (1) 電気学会技術報告Ⅱ部第224号;「最近の油浸絶縁と将来展望」 (1986)
- (2) 畑、木下;「ケーブル絶縁一半合成紙の技術進歩」、電気絶縁材料研究会資料、EIM84-41 (1984)
- (3) 藤井、前川、関、中陣、保坂、小船井、松田、石田、岩瀬;「本四連係500kV OFケーブル」、フジクラ技報、No88、p107 (1995)
- (4) 加工技術研究会編;「ラミネート加工便覧」、p88 (1978)
- (5) 高木、佐々木編;「プラスチック材料講座⑦ポリプロピレン樹脂」、日刊工業社 (1979)
- (6) 斎藤、武編;「電気絶縁紙」、コロナ社 (1969)
- (7) 草野、児島、曾田、佐藤、木下、藤原、武内;「S I O L A P絶縁 OFケーブルの開発(第1報)」、昭和電線電纜レビュー、vol29、No1、p27 (1979)
- (8) 伊藤編;「シリコンハンドブック」、p55、日刊工業新聞社 (1990)
- (9) 電気学会編;「誘電体現象論」、p316、電気学会 (1974)
- (10) C.W.Reed;"The application of polymer film and synthetic papers for use as electrical insulation",第7回絶縁材料シンポジウム、p15 (1974)
- (11) 水谷;「油浸絶縁の基礎」、電気絶縁材料研究会資料、EIM84-38 (1984)
- (12) 山下;「液体誘電体のエレクトロニクス」、昭和57電気学会四学連合大会、8-4 (1982)
- (13) 藤森、中西、田中、高島、今城、三谷、牧野、重年、嶋田;「PPLP絶縁を採用した500kV海底 OFケーブルの開発」、平成7年電気学会全国大会、1718 (1995)
- 土田、名切、藤井、長谷部、鈴木、石井、中尾、村田、広田;「直流500kVPPLP絶縁 OF 海底ケーブルの長期性能確認試験」、同上、1719 (1995)
- (14) 岩田、一柳、五嶋、菊地;「UHV地中送電線路の設計と諸問題」、電気絶縁材料研究会資料、EIM80-26、 (1980)
- (15) 久保、畑、宮崎;「1000kV級ケーブルの絶縁技術開発課題」、電気絶縁材料研究会資料、EIM80-27、 (1980)
- (16) 金丸、安藤、斎藤;「FEPラミネート紙による1000kV級 OFケーブルの絶縁方式」、電気絶縁材料研究会資料、EIM80-28、 (1980)
- (17) 津元、置鮎;「 OFケーブルの交流長時間破壊電圧に関する統計的検討」、藤倉電線技報、No52、p9 (1975)
- (18) 大木;「高電圧工学」、p175、槇書店 (1982)

- (19) 久保、宮崎、野田、西野、畑;「275kVポリプロピレンラミネート紙 OFケーブルの開発」、住友電気、vol115、p22 (1979)
- (20) 金丸他、電気絶縁材料研究会資料、EIM78-61 (1978)
- (21) 草野、曾田、木下、藤原、海老沼;「S I O L A P絶縁 OFケーブルの開発(第2報)」、昭和電線電纜レビュー、vol29、No2、p57 (1979)
- (22) 内田、風間、今城、藤井、久喜、三浦、嶋田、松本;「半合成紙500kV OFケーブルの開発」、電線ケーブル研究会資料、EC86-1 (1986)
- (23) 山本、一色、中山、中山、津元、置鮎;「超々高圧電力ケーブル用合成絶縁紙」、藤倉電線技報、No45、p1 (1972)
- (24) 高橋、中山;「紙、プラスチック複合油浸絶縁体の寿命特性」、第15回電気絶縁材料シンポジウム、IV-12 (1982)
- (25) P.Gazzana-Priaroggia,E.Occhini,N.Palmieri;"Breif review of the theory of paper lapping of a single-core high voltage cable",IEEE Monograph,No390S (1960)
- (26) 斎藤;「高分子物理学」、p164、裳華房 (1968)
- (27) 電気協同研究第40巻第1号;「特高ケーブルの導体許容温度」、 (1984)
- (28) M.Mucha,M.Kryzewski;「イソタクトポリプロピレンの空気中における熱安定性へのモルフォロジ効果」、海外高分子研究、vol27、p37 (1981)

第3章 高分子の固体構造と絶縁破壊特性

第3.1節 緒論

架橋ポリエチレン（XLPE）を絶縁体とするCVケーブルはOFケーブルに比べ、防災およびメンテナンス上有利であることから、近年、急速に高電圧領域にまで適用されてきている。しかし、高電圧化に伴う絶縁厚の増大はケーブル径の増大となり、運搬や布設上の問題から、使用電圧に比例した絶縁厚の増加は望めない。例えば、国内で現在実使用されているCVケーブルでは、絶縁厚は66～77kVクラスで9～13mm、154kVでは19～23mm、275kVでは25～27mm、500kVでは27～35mmであり、高電圧ケーブルになる程、絶縁体に加わる電気ストレスが大きくなってきている⁽¹⁾⁽²⁾。

ケーブル絶縁体の耐電圧特性を向上させる手段として、下記の方法があげられる。

- ①絶縁体一半導電層間の界面不整（界面突起）の除去
- ②絶縁体中の異物、ボイドの除去
- ③絶縁素材自身の破壊強度の向上

XLPEは無極性の結晶性高分子であり、本来、非常に優れた電気絶縁材料であることから、これまでのCVケーブルの高電圧化適用に対しては、絶縁体中に電界集中を起こすような前記①と②に相当する欠陥（界面突起、異物、ボイド）を除去することにより対処してきた。すなわち、製造技術上の改良として、3層同時押出技術、異物を防止するためのクリーン化技術、乾式架橋方式の採用等である⁽³⁾⁽⁴⁾。

しかし、超高圧CVケーブルの絶縁厚低減を含む更なる高ストレス化に対処するには、上述の欠陥除去技術に加えて、絶縁素材の破壊強度そのものを向上させる基礎的な検討も必要となってきた。

本章では、こうした状況に鑑み、先ず、種々の分子構造をもつ高分子について、同一の評価試験方法での比較により、各種高分子の固有絶縁破壊強度を概観した。次に、こ

の中から、絶縁破壊特性の良好な結晶性ポリオレフィンについては・分子構造&結晶性との関係・添加剤&ポリマーブレンドの効果を詳細に検討した。これらの評価結果から絶縁破壊特性が優れ、かつ、ケーブルへの押出加工性を考慮して、高密度ポリエチレン（HDPE）を取り上げモデルケーブルを作成し、その絶縁破壊強度と結晶固体構造との関係をXLPE（現用絶縁体）と対比して評価した。

第3.2節 絶縁破壊強度の評価試験方法

種々の高分子について、その絶縁破壊強度の報告は多数あるが、それら値は電極形状、試料形状などの影響を受けており、相互の比較が困難である。また、シートやフィルム試料の絶縁破壊強度の試験方法としてASTM D-149, JIS C-2111, JEC-126等の規格類に標準試験法が規定されている。しかし、これらの方法は、材料の簡便なスクリーニングには有効であるが、規格の主旨からも絶縁体の固有破壊強度を評価するには必ずしも適切でない。

一方、絶縁体の固有破壊強度を測定する目的で、電極有効部以外からの破壊を極力防ぐ工夫をした電極系として、以下のものがあげられる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

- ①グレーディングした蒸着電極を施す蒸着拡散電極
- ②電極エッジをエポキシで補強したMcKeown電極
- ③電極部の絶縁厚を周囲より薄く成形したりセス電極

ここで、①&②の電極系はフィルム試料を用いるため試料作成は容易であるが、電極形成が煩雑である。③の電極系では試料をリセス状に成形するという煩雑さはあるが、電極形成は容易である。また、フィルム状試料は一般にインフレーション、Tダイ、2軸延伸等の手法で作成されるため、試料中に配向、歪みが残留し絶縁破壊特性に影響を及ぼすと考えられる。例えば、ポリエチレンの結晶配向が絶縁破壊強度に影響することが知られている⁽⁷⁾。

一方、CVケーブルのような肉厚押出絶縁物では、このような配向歪みは殆どない。

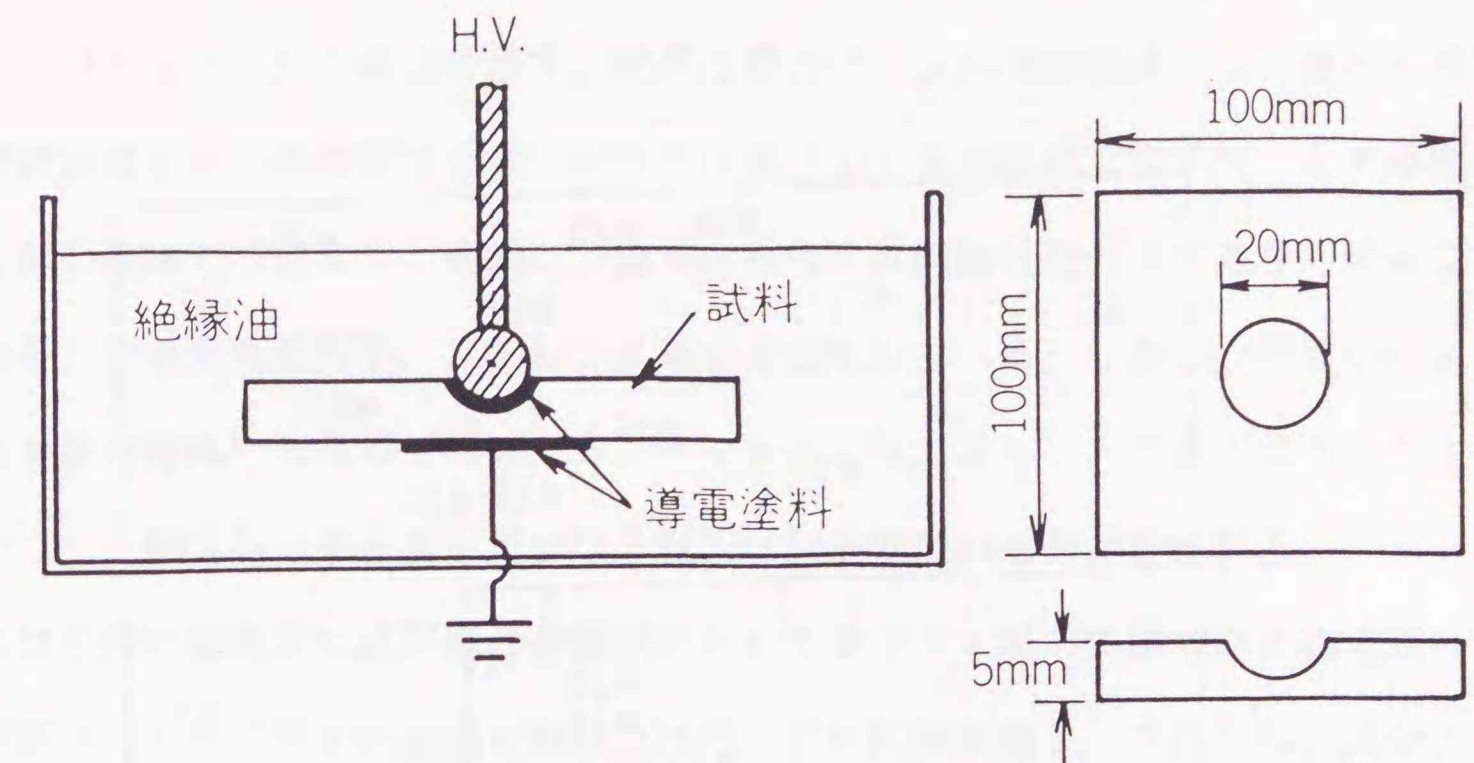
そこで、本研究では、このようなケーブル絶縁体の状態を模擬するために、試料を高分子の融点以上の温度で熱プレス成形したリセス状シート試料を採用した。リセス部（電極有効部）の厚さは $200 \sim 300 \mu\text{m}$ であり、電極部には導電塗料を塗布する。沿面破壊を防ぐため絶縁油（室温：アルキルベンゼン油、 $90 \sim 130^\circ\text{C}$ ：シリコン油）中で破壊電圧を測定した。試料形状および試験方法を第3.1図に示す。電圧波形はインパルス電圧が高分子構造と関係した固有破壊強度をより反映すると考えられるので、主に、標準インパルス電圧（ $1 \times 40 \mu\text{s}$ ）を用いた。 $5 \text{ kV} / 2$ 回ステップアップの条件で印加し、約10試料の測定値の平均から絶縁破壊強度 E_B （ kV / mm ）を求めた。

比較のために、第3.2図に低密度ポリエチレンについて、リセス状電極および球一球電極で測った E_B を示す。球一球電極では電極エッジの影響による E_B の低下があると考えられ、高い E_B をあたえるリセス状電極がより素材の固有破壊強度を反映する測定値を与えている。

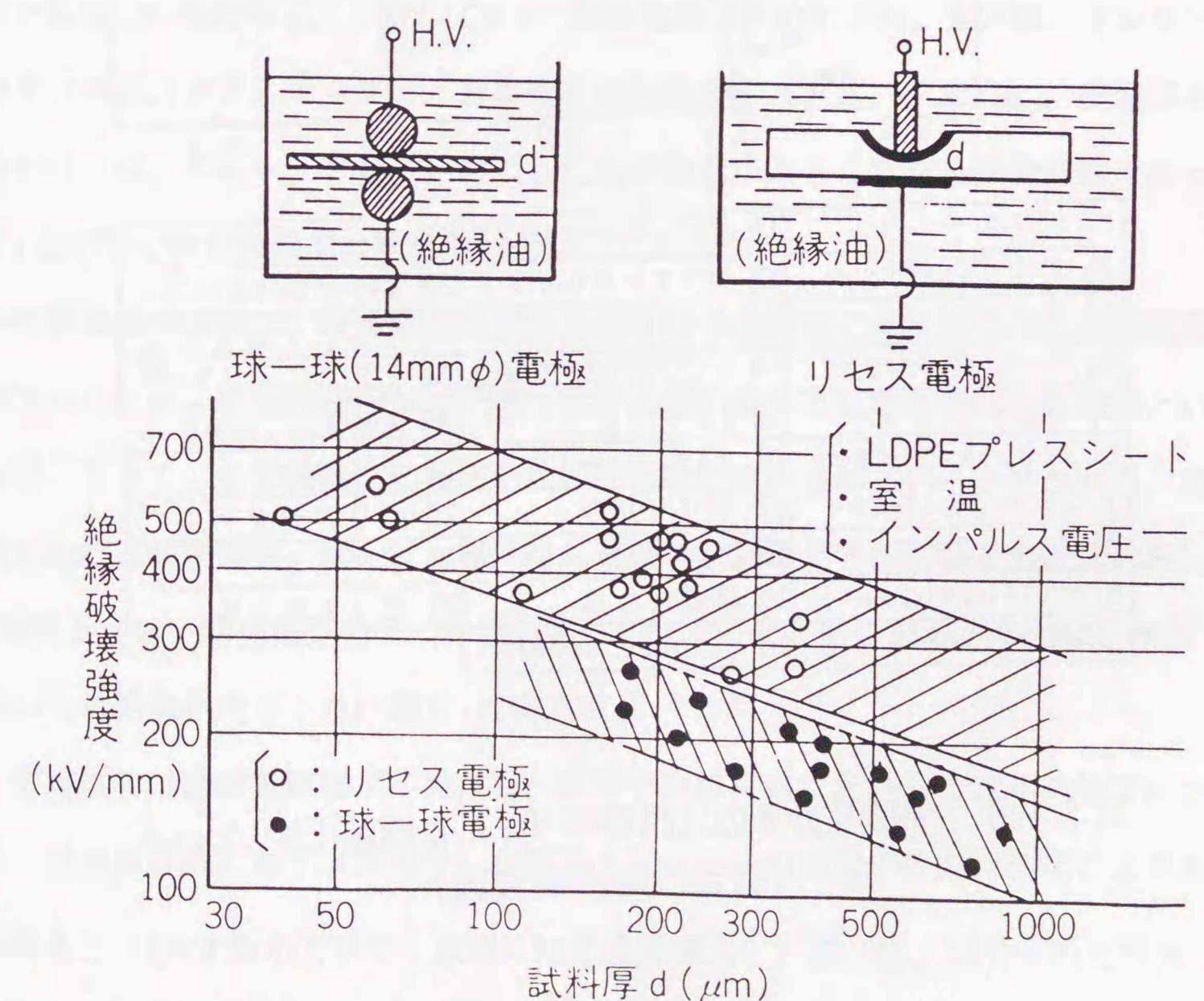
第3.3 各種高分子の絶縁破壊特性

押出ケーブル絶縁体の特性として、電気特性（耐電圧特性、誘電特性）のみならず、機械特性、押出加工性、熱特性も同時に要求される。これらの特性を同時に満足するのはオレフィン系高分子等の非常に限定されたものになるが、ここでは種々の高分子の分子構造と絶縁破壊強度の基礎的な関係を知る目的で、取り敢えず、押出加工性、機械特性などを無視して、電気特性に重点を置いて高分子材料の予備スクリーニングを行った。

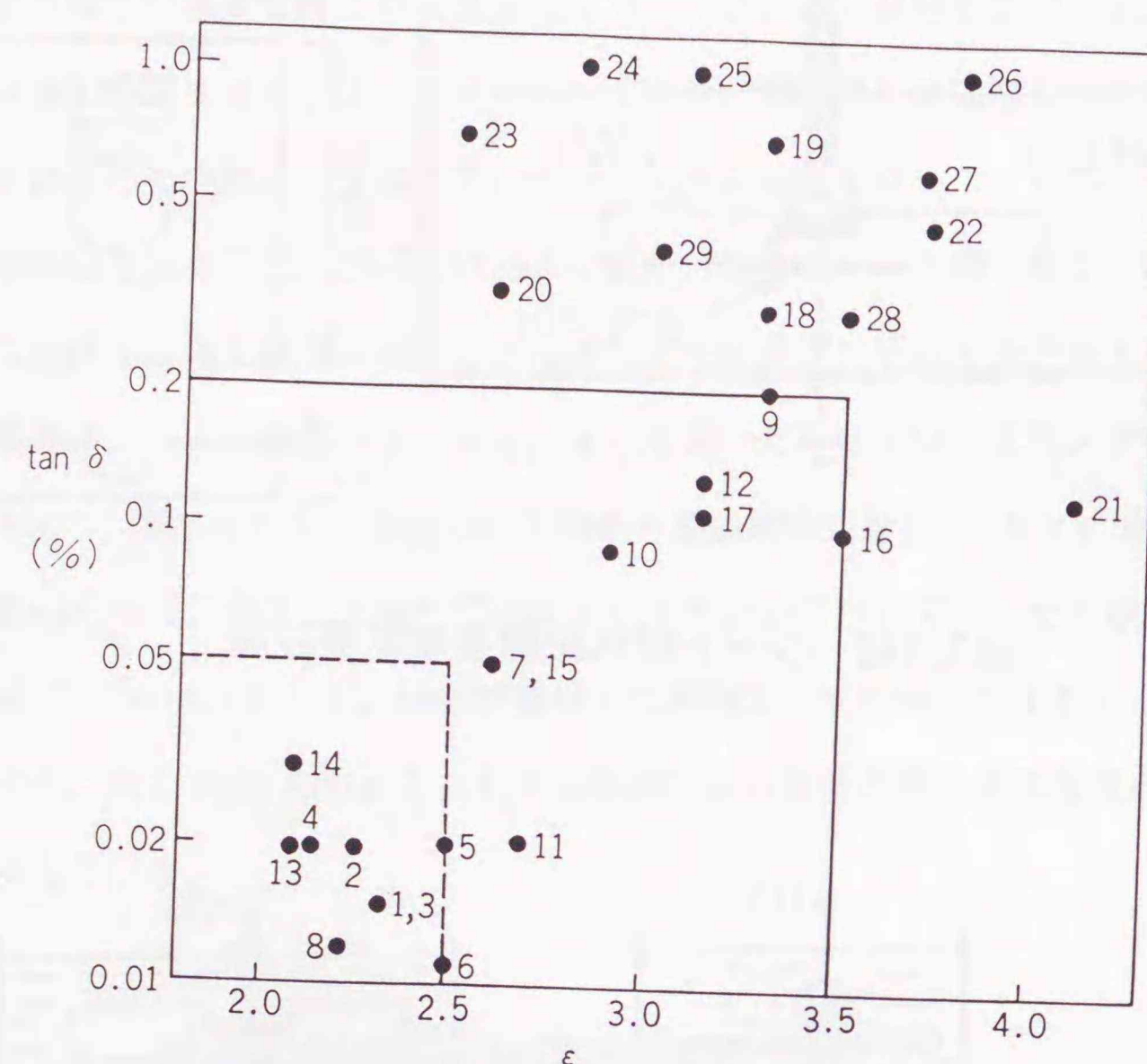
電気特性の中でも絶縁破壊特性は、前節で述べたように、試験条件（試料厚さ、電極構成、電圧波形、雰囲気媒体など）でその値が異なるため、過去の文献値、カタログ値の単なる引用は危険であり、同一試験条件で特性値の比較を行うべきである。一方、電気特性の中でも誘電特性については、試験法で左右される因子が少ないことから、先ず、誘電特性に着目して大まかな材料選択を行った。第3.3図に各種高分子の比誘電率（ ϵ ）



第3.1図 シート試料絶縁破壊試験方法



第3.2図 リセス電極と球一球の絶縁破壊強度



1 ポリエチレン	11 ポリフェニレンオキサイド	21 フェノキシ
2 ポリプロピレン	12 ポリエーテルイミド	22 オキシベンゾイルポリエステル
3 ポリブテン-1	13 ポリテトラフルオロエチレン	23 アクリルニトリル スチレン共重合体
4 ポリ4メチルペンテン-1	14 テトラフルオロエチレン-ヘキサフルオロプロピレン共重合体	24 エチレン-アクリル酸 エチル共重合体
5 ポリスチレン	15 テトラフルオロエチレン-エチレン共重合体	25 塩素化ポリエーテル
6 スチレンブタジエン共重合体	16 ポリエーテルサルフォン	26 ナイロン6
7 オレフィン系エラストマ	17 ポリサルフォン	27 ポリアセタール
8 スチレン系エラストマ	18 ポリエーテルエーテルケトン	28 ポリイミド
9 ポリブチレンテレフタレート	19 硬質ビニル	29 ポリエステル
10 ポリカーボネイト	20 ポリクロロトリフルオロエチレン	

第3.3図 各種高分子の比誘電率 (ϵ) と誘電正接 ($\tan \delta$)
(室温、商用周波数)

と誘電正接 ($\tan \delta$) の関係を示す。超高压電力ケーブル用絶縁体には、優れた誘電特性が要求されるが、その値として、 $\epsilon \leq 2.5$ 、 $\tan \delta \leq 0.05\%$ とすると、第3.3図の点線で示すように範疇に、含まれるものは無極性高分子であり、オレフィン系高分子、フッ素系高分子、スチレン系高分子に限定される。しかし、現用OFケーブル（油浸紙絶縁体）並みの $\epsilon \leq 3.5$ 、 $\tan \delta \leq 0.2\%$ とすると第3.3図の実線のように、極性高分子を含んだかなり幅広い分子構造のものが含まれる。

各種高分子の絶縁破壊強度評価の供試試料として第3.3図の実線で囲まれる高分子群である第3.1表に示す試料種を取り上げた。各試料種を第3.1表に示す高分子の融点以上の温度でリセス形状（第3.1図）へ熱プレス成形した後、室温まで冷却して作成し、絶縁破壊強度 (E_B) 測定用の供試試料とした。

各試料の室温における E_B の測定結果を第3.4図に示す。分子構造が大幅に異なる高分子間であるにも拘わらず、一見して E_B に顕著な差は認めれない。例えば、オレフィン系高分子 (PE、PP、TPX)、芳香族を含む高分子 (PS、PPO)、極性基を含む高分子 (PC、PSu、PES) のように化学構造が大きく異なる高分子間であっても、 E_B との間に特定の傾向は認められない。

高分子の絶縁破壊機構は、液体窒素温度のような極低温領域では伝導帯への熱励起電子が僅少であるため、電極からのショットキー電子を初期電子とした電子なだれ破壊といわれており、従って、分子構造との関係が比較的明瞭に解釈されている。すなわち、電子の加速を妨げる分子構造、例えば、極性基は双極子振動による加速電子の散乱効果により E_B を向上させ、結晶性高分子では規則正しい分子配列を持つ結晶域では電子が加速され易いため結晶化度が小さい程 E_B は向上する⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

一方、室温域では絶縁破壊機構が異なり、高分子絶縁材料にたいしては不純物準位から伝導帯へ熱励起される電子（熱電子）が豊富となり、この熱電子の電界加速による絶縁破壊の考え方 (Frohlichの熱電子破壊又は非晶質破壊)、或いは、高分子のガラス転移点 (T_g) 以上での比較的大きい E_B の低下が、熱運動によってできる分子鎖間の

第3.1表 供 試 試 料

記号	ポリマ名	化学構造	融点 (°C)	成型 温度 (°C)
LDPE	低密度ポリエチレン	$\text{-(CH}_2\text{-CH}_2\text{)-}$	103	160
XLPE	架橋ポリエチレン		103	160
LLDPE	線状低密度ポリエチレン		122	160
HDPE	高密度ポリエチレン		127	160
UHMPE	超高分子量ポリエチレン		136	200
PP-H	ポリプロピレンホモポリマ	$\text{-(CH}_2\text{-CH-CH}_3\text{)-}$	165	200
PP-R	ポリプロピレン ランダムコポリマ		136	160
TPX	ポリ-4-メチルペン テン-1	$\text{-CH}_2\text{-CH-CH}_2\text{-CH(CH}_3\text{)-CH}_2\text{-CH(CH}_3\text{)-}$	240	260
PS	ポリスチレン	$\text{-(CH}_2\text{-CH-}\phi\text{)-}$	~150	200
PPO	ポリフェニレンオキサイド	$\text{-(O-}\phi\text{-CH}_3\text{)-}$	~250	270
FEP	テトラフルオロエチレン ・ヘキサフルオロプロピ レン共重合体	$\text{-(CF}_2\text{-CF}_2\text{-CF(CF}_3\text{)-CF}_2\text{)-}$	290	300
ETFE	エチレン・テトラフルオ ロエチレン共重合体	$\text{-(CF}_2\text{-CF}_2\text{)-CH}_2\text{-CH}_2\text{-}$	270	300
PC	ポリカーボネイト	$\text{-(O-}\phi\text{-C(CH}_3\text{)}_2\text{-O-C(=O)-}\phi\text{-O-C(=O)-CH}_3\text{)-}$	~240	260
PSu	ポリサルフォン	$\text{-(}\phi\text{-C(CH}_3\text{)}_2\text{-O-}\phi\text{-S(=O)}_2\text{-O-}\phi\text{-S(=O)}_2\text{-O-}\phi\text{)-}$	~300	350
PES	ポリエーテルサルフォン	$\text{-(}\phi\text{-S(=O)}_2\text{-O-}\phi\text{-S(=O)}_2\text{-O-}\phi\text{)-}$	~330	350

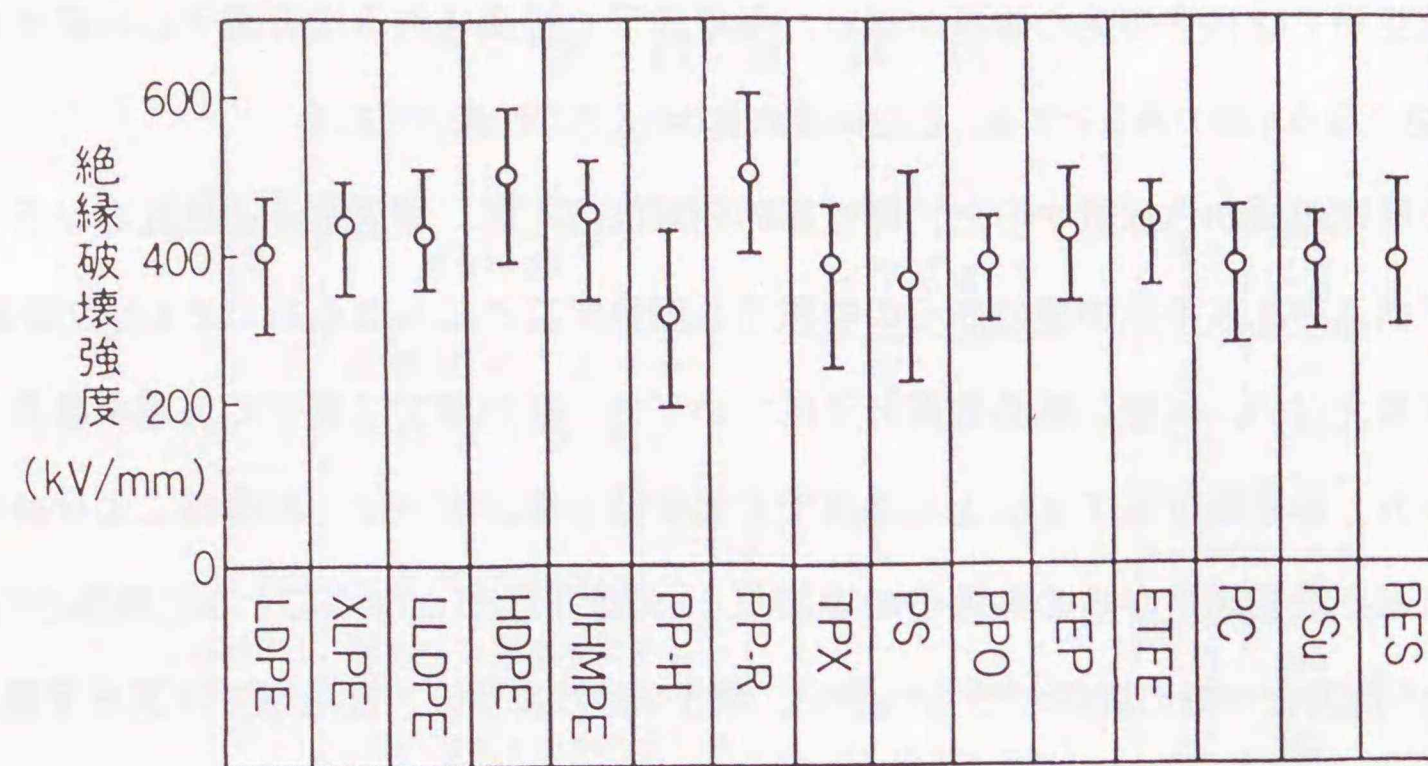
自由体積空間では格子衝突の確率が減り、高電界下で加速される伝導電子の利得エネルギーが大きくなるためであるとする、自由体積破壊の考え方が代表的である⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。

これらの破壊機構から解釈すると、極性基の効果は例えば、加速電子を散乱させると同時に格子構造を乱し不純物準位からの熱電子を増やすことにもなるので E_B との関係を一概には言えない。同様に結晶性高分子についても、結晶域では電子の加速が容易となるが、一方、非晶域でも T_g 以上の温度で自由体積破壊、或いは、非晶域により多いと考えられる不純物準位からの熱電子の増加が E_B の低下因子となることから結晶性の大小と E_B の効果を一概に関係づけられない。第3.4図のように、室温域では高分子構造と E_B に特定の顕著な相関が見いだせないのは、上述のような理由によると考えられる。

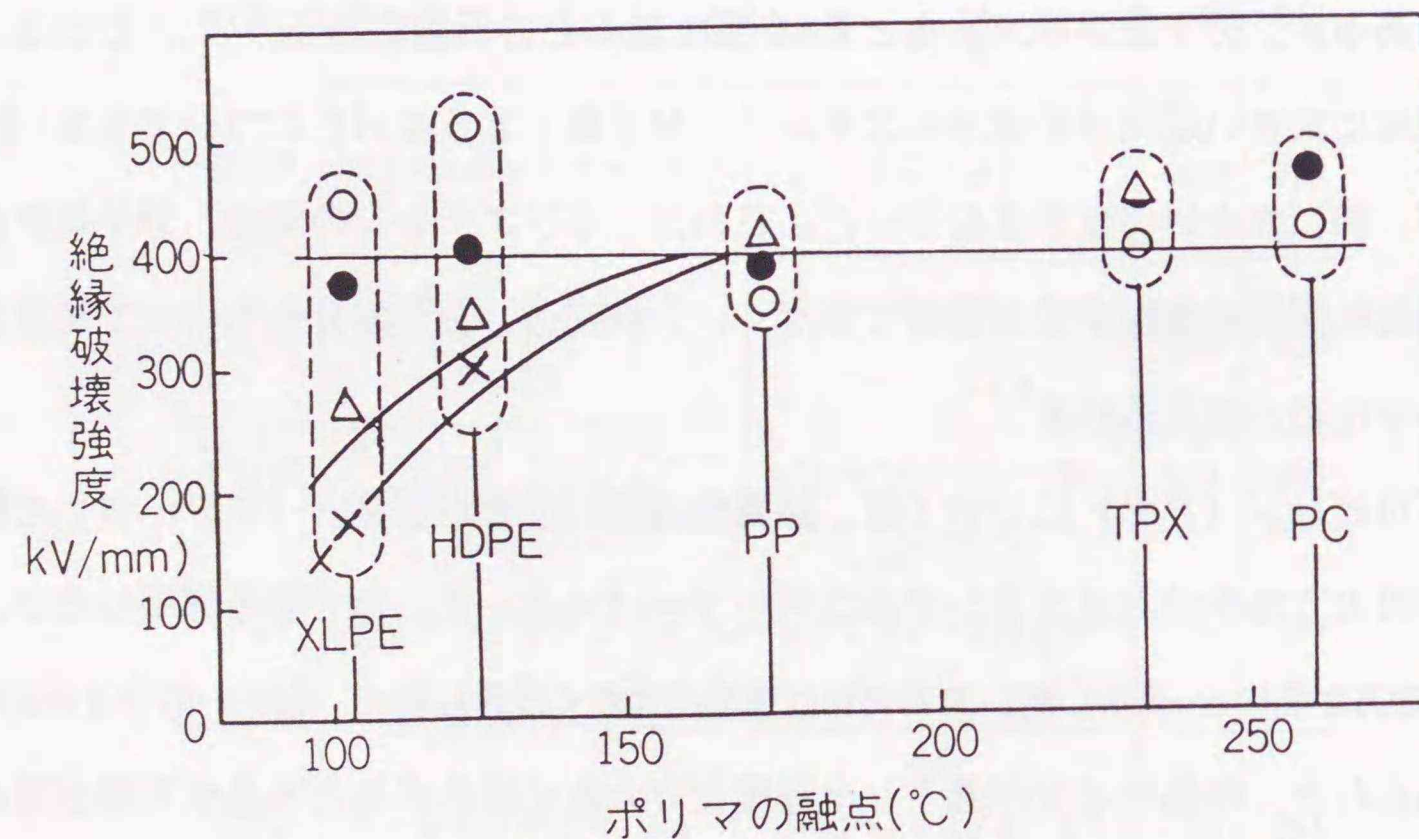
ポリエチレンについては、結晶性の違いによる E_B の比較を行う目的で密度の異なる数種類のものを評価したが、中では、高密度ポリエチレン(HDPE)が最も高い E_B を示した。また、通常のポリエチレンは分子量数万(CVケーブル用ポリエチレンを含めて)であるが、分子量が増大すると E_B が高くなるとの報告がある⁽¹⁵⁾。そこで、分子量の極端に大きい超高分子量ポリエチレン(分子量; 250万)についても E_B を測定したが、特に大きい値は示さなかった。これは、ポリエチレンの場合、分子量が必ずしも結晶固体構造を支配する主要因ではなく、分岐構造、分子量分布も併せて考慮する必要があるためと考えられる。

ポリプロピレン(PP)については、結晶性の高いホモポリマー(PP-H)と結晶性が低く可とう性を持たせたランダムコポリマー(PP-R)の2種を評価したが、PP-Rの方が高い E_B を示した。PP-Hは球晶が大きく成長し易く、数十~数百 μm の球晶が認められた。球晶サイズが数十 μm 程度まで大きく成長すると球晶境界部が弱点部となり、 E_B が低下するという報告⁽¹⁶⁾とも一致する。

第3.5図に試験温度90~130°Cの高温域における E_B の測定結果を示す。同図には横軸に高分子の融点を示してある。試験温度域に融点のある高分子(XLPE、HDPE)では、その温度付近から E_B は大きく低下するが、融点の高い高分子(PP、TPX、PC)では E_B は室温の値と殆ど変わらない。融点近傍の E_B の低下は



第3.4図 各種高分子の絶縁破壊強度(室温)



(測定温度 ○：25℃，●：90℃，△：110℃，×：130℃)

第3.5図 高温域の破壊強度

$$E_B = (Y/\epsilon)^{1/2} \exp(-1/2) \quad (Y: \text{ヤング率}, \epsilon: \text{誘電率})$$

で示されるヤング率で支配される電気機械的破壊によるものである⁽¹⁷⁾。この破壊機構が支配的となるのはヤング率が $10^6 \sim 10^7$ Pa以下となる場合であり、高分子では融点又は軟化点近傍にならないとこのような値とならない。

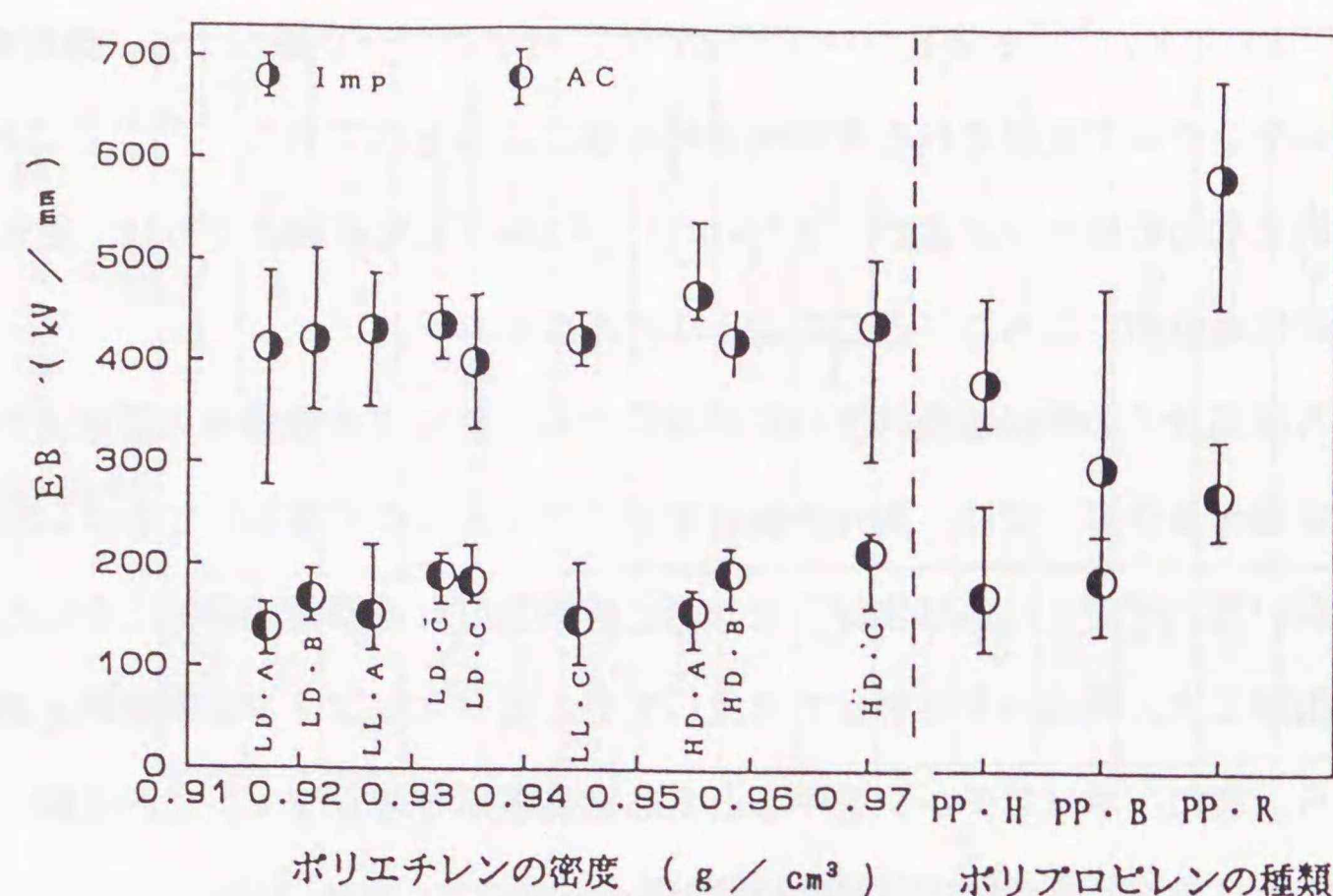
以上の各種高分子の絶縁破壊特性の評価結果から、ケーブル絶縁体に要求される常用温度域(室温～90℃)では、高分子構造がダイナミックに変化しても E_B の相違は顕著ではないが、中でも、ポリオレフィンが比較的良好な絶縁破壊特性を示した。誘電特性、押出加工性、機械特性を併せて考慮しても、ポリオレフィンが実用的と考えられることから、次に、ポリエチレンを中心とする結晶性ポリオレフィンに的を絞って、第3.4節及び第3.5節で更に詳細に検討を行った。

第3.4節 ポリオレフィンの絶縁破壊特性

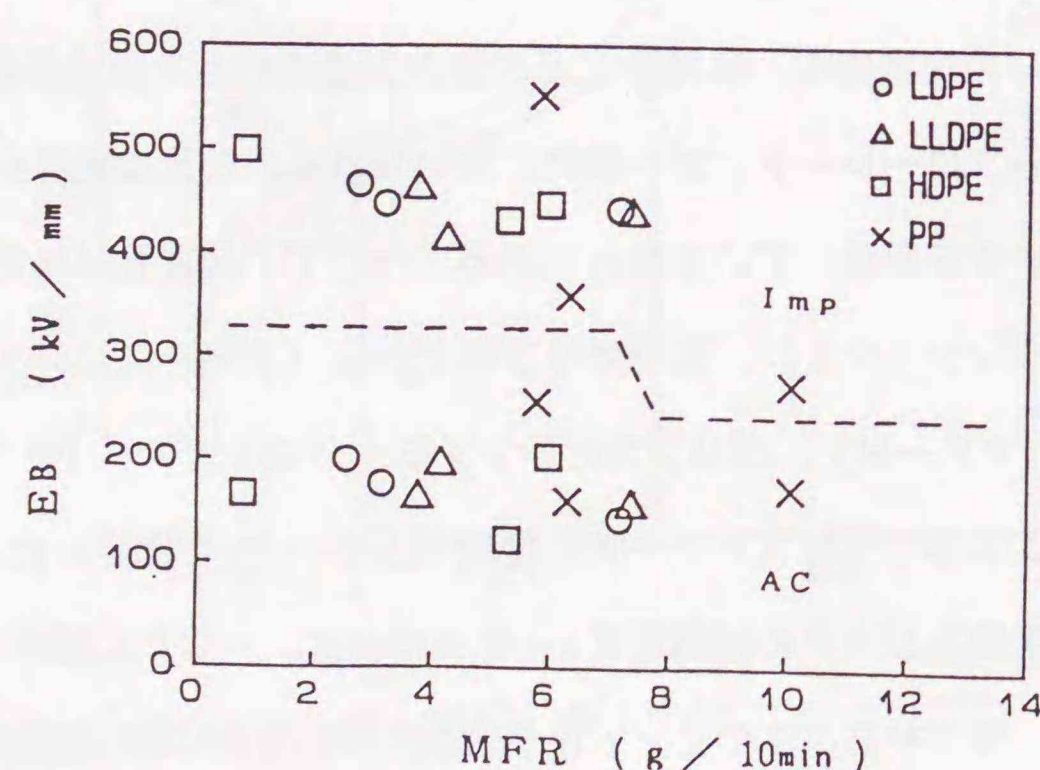
3.4.1 ポリオレフィンの物性と絶縁破壊強度

結晶性ポリオレフィンの機械特性、熱特性などのおおよその物性を表す指標として、密度及びMFR(メルトフローレート)が一般的に用いられる。密度は結晶化度を反映しており、MFRは分子量を反映しているからである。そこで、密度及びMFRの異なる種々の銘柄のポリエチレン(PE)、及びポリプロピレン(PP)についてはポリプロピレンホモポリマー(PP-H)、ポリプロピレンブロックコポリマー(PP-B)、ポリプロピレンランダムコポリマー(PP-R)を取り上げ、 E_B を測定した。

第3.6図にPEの密度及びPPの種類と E_B (インパルス、AC)の関係を示す。PEについては密度 $0.91 \sim 0.97 \text{ g/cm}^3$ の範囲のものを対象に試験を行ったが、 E_B との関係に特定の傾向は見られない。PPについては、先の実験結果(第3.4図)同様、PP-Rが中では高い値を示した。次に、MFRと E_B の関係を第3.7図に示す。幅広いMFRの範囲にわたり、 E_B のMFR依存性は認めれない。



第3.6図 PEの密度及びPPの種類と絶縁破壊強度



第3.7図 PE及びPPのMFRと絶縁破壊強度

以上のことから、結晶性ポリオレフィンの密度 ($\propto$ 結晶化度) 及びMFR ($\propto 1/\text{分子量}$) は機械特性、熱特性を反映する指標ではあるが、絶縁破壊特性は単純にこの指標により決定されるものではないことが明らかとなった。これは、前節で述べた室温域での高分子の絶縁破壊機構からも推定される結論である。

3.4.2 ポリエチレンの結晶性と絶縁破壊強度

前項 (3.4.1) では密度の異なるポリエチレンの銘柄間で E_B に特定の傾向は認められなかったが、結晶性ポリマーでは、その結晶性が E_B に影響するとする報告もある⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁸⁾。そこで、同一銘柄の低密度ポリエチレン (LDPE) と高密度ポリエチレン (HDPE) について、その結晶性を変化させた場合の E_B を測定した。

結晶性の調整はLDPEとHDPEに対して、造核剤の添加、並びに熔融時からの冷却速度に変化を与えることによって行った。造核剤は一般に球晶を細分化させ結晶化速度を速める作用があり、また、冷却速度には結晶の成長を最大にする最適条件がある。試料調製条件及び各々の試料の密度並びに結晶化度を第3.2表に示す。ここで、密度は密度勾配管法、結晶化度は示差走査熱量計 (Differential Scanning Calorimeter : DSC) により測定した融解熱から求めた値である。

LDPE及びHDPEの各試料について密度及び結晶化度に対して E_B を示すと第3.8図となる。密度或いは結晶化度の増大に伴い E_B は上昇し、その程度はHDPEよりもLDPEの方が顕著である。この結果は、PEの絶縁破壊には結晶性が関与していることを示唆するが、密度或いは結晶化度の大きさそのものが E_B を支配するものではないことも意味する。これは、例えば、LDPEの徐冷試料 (プレス条件: $160^\circ\text{C} \rightarrow 100^\circ\text{C} \rightarrow \text{室温}$) とHDPEの急冷試料 (プレス条件: $160^\circ\text{C} \rightarrow \text{室温}$) で同程度の E_B となるが、両者の密度或いは結晶化度に大きな相違があることから明らかである。

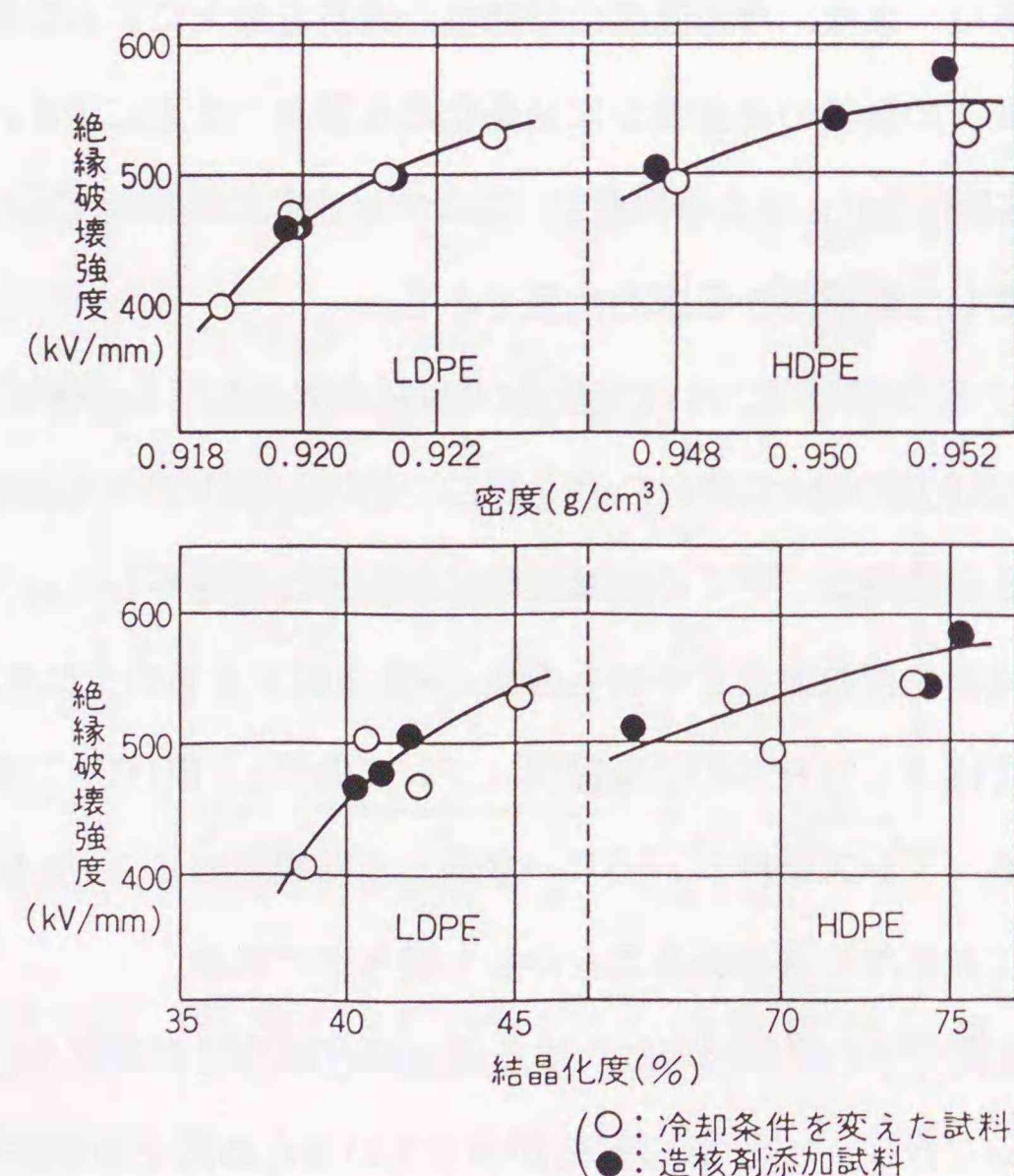
PE等の結晶性高分子の絶縁破壊に対する結晶域と非晶域の役割として次のような解釈もなされている⁽¹⁹⁾。『分子鎖の配列が揃っているため電子加速性の大きい結晶域では、電子は活性化エネルギーの殆どないプロセスで走行し結晶-非晶界面にトラッ

第3.2表 LDPEとHDPEの試料調製条件

種類	造核剤	冷却条件	d	K
LDPE	—	160℃→R.T.	0.9188	38.8
	A (0.3phr)	160℃→R.T.	0.9214	40.7
	B (0.05phr)	160℃→R.T.	0.9198	40.4
	B (0.1phr)	160℃→R.T.	0.9201	42.4
	—	160℃→80℃→R.T.	0.9213	42.0
	—	160℃→100℃→R.T.	0.9199	41.2
	—	160℃ $\xrightarrow{24hr}$ R.T.	0.9229	45.2
HDPE	—	160℃→R.T.	0.9480	70.0
	A (0.3phr)	160℃→R.T.	0.9478	65.8
	B (0.05phr)	160℃→R.T.	0.9519	75.3
	B (0.1phr)	160℃→R.T.	0.9513	74.4
	—	160℃→80℃→R.T.	0.9522	69.0
	—	160℃→100℃→R.T.	0.9524	74.2

(A, B: 芳香族カルボン酸系造核剤)
d(g/cm³): 密度
K(%): 結晶化度

※R.T.: 室温



第3.8図 LDPEとHDPEの密度及び結晶化度と絶縁破壊強度

プされる。トラップされた電子はプールフレンケル効果により電界放出されて非晶域をホッピングして進む。非晶域分子鎖のミクロブラウン運動が活発になると自由体積が増し、電子の平均自由行程が増加するため破壊強度は低下する』この解釈によれば、結晶化度のみならず非晶域の分子運動の状態（例えば、非晶域分子鎖の緊張による分子運動の抑制⇔ E_B の向上）も E_B に対して重要な役割を果たすことになる。このことから、造核剤や冷却条件による結晶性の変化は結晶化度に影響を与えるのみならず、非晶域の分子運動の状態にも影響を及ぼすことも考えられる。また、本節の実験結果は、後述（第3.6節）のように、ケーブル絶縁体の製造条件（押出加工温度、押出後の冷却条件等）が、 E_B の向上に対して重要な因子であることを示唆している。

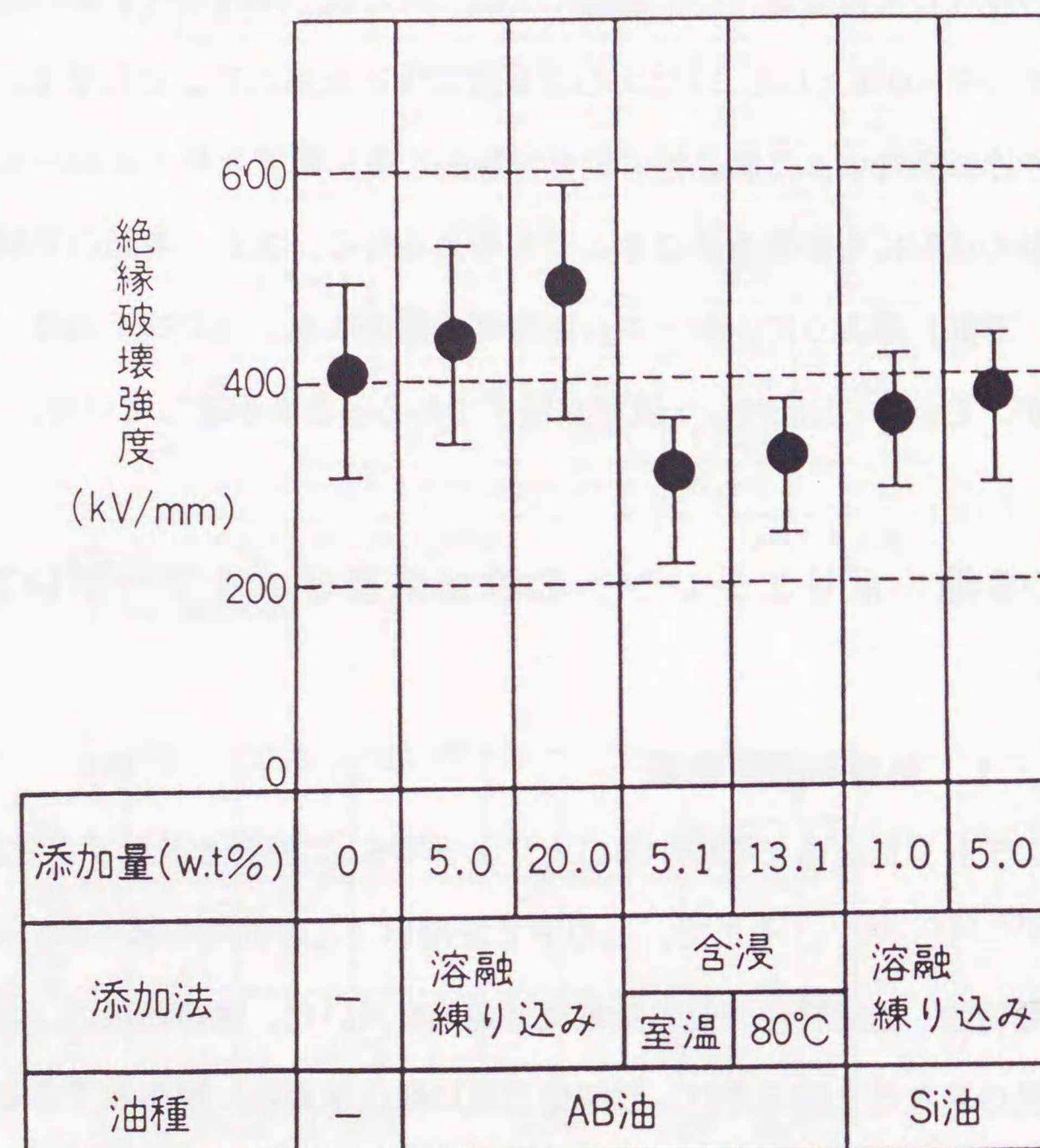
第3.5節 ポリエチレンへの添加剤及びポリマーブレンドの効果

3.5.1 絶縁油添加効果

ポリエチレンに液体を添加することによって E_B に影響を及ぼすことが知られている(20)(21)(22)(23)。そこで、LDPEを用いてこの効果を調べた。添加液体としては、誘電特性、絶縁特性の優れた電気絶縁油を用いた。絶縁油種は、オレフィン分子鎖と親和性の異なる2種を選び、親和性の良い炭化水素系の絶縁油であるアルキルベンゼン油（AB油）、及び親和性の悪いメチルシリコン油（Si油）とした。添加方法は、絶縁油をLDPEに対し溶融練込後プレス成形した場合と、LDPEのプレス成形品に絶縁油を含浸した場合の2通りとした。絶縁油添加条件及び各試料の E_B の測定結果を第3.9図に示す。 E_B は大きい順に次の通りとなっている。

AB油練込試料>オリジナル試料（無添加試料） $\geq$ Si油練込試料>AB油含浸試料

実験結果の解釈は以下のように考えられる。AB油含浸試料では、AB油がPE分子鎖と親和性が比較的良好いため分子鎖間の結合の緩い非晶域に油分子が分配され易いと考えられる。その結果、非晶域の分子鎖結合がさらに緩み、分子運動が活発化し、 E_B の



第3.9図 絶縁油添加LDPEの絶縁破壊強度

低下をもたらす。これは、前節で述べた非晶域の E_B に対する解釈とも一致する。一方、AB油練込試料では、結晶固化過程に油分子の分配箇所が決まるので、含浸添加の場合と異なり、油分子はPE分子鎖と比較的強く相互作用を持つと考えられる。事実、試料の外観上の変化は、オリジナル試料と比べ、含浸試料では若干軟化しており、熔融練込試料では若干硬化していることから、試料の可とう性を支配する非晶部の分子運動性が異なると思われる。AB油練込試料では、このようなPE分子鎖とAB油分子の相互作用による分子運動の抑制が E_B の向上に寄与していると考えられる。Si油の場合は、PE分子鎖との親和性が悪く、熔融練込であっても前述の相互作用は期待できず、 E_B の変化も小さいと思われる。

3.5.2 ポリマーブレンドの効果

前項(3.5.1)で検討した絶縁油のような低分子の液体添加では、長期安定性や残留性の問題が欠点となる。そこで、次に、ポリエチレン(PE)に対して幾つかの異種高分子を、PEの押出加工性、機械特性を損なわない範囲の少量ブレンドした場合の効果について検討した。

高分子は分子量が極めて大きい相異なる2種の高分子をブレンドしても、分子レベルで混じり合うことは稀で、通常、非相溶性高分子では数 μm オーダーのドメインに相分離した複合構造になることが多い⁽²⁴⁾。このような μm オーダーの複合構造は、ある意味で代表的超高压用絶縁材料である油浸紙絶縁体(微細な数 μm ~10 μm のセルロース繊維間隙に絶縁油を含んだ構造となっている)に似ている。この場合、セルロース単独あるいは油単独の絶縁破壊強度は決して優れるものではないが、両者の微細複合構造が絶縁破壊に対するバリア効果となり、優れた耐電圧特性を示すことは周知のことである。ポリマーブレンド系では、不連続な相分離ドメインが上述の絶縁破壊に対するバリア性を期待できる反面、絶縁油により空隙含浸されている油浸紙系と異なり、ドメイン界面に剥離空隙が生じると逆効果になることも考えられる。

ポリマーブレンド系の試験試料及び試料作成条件を第3.3表に示す。LDPE及

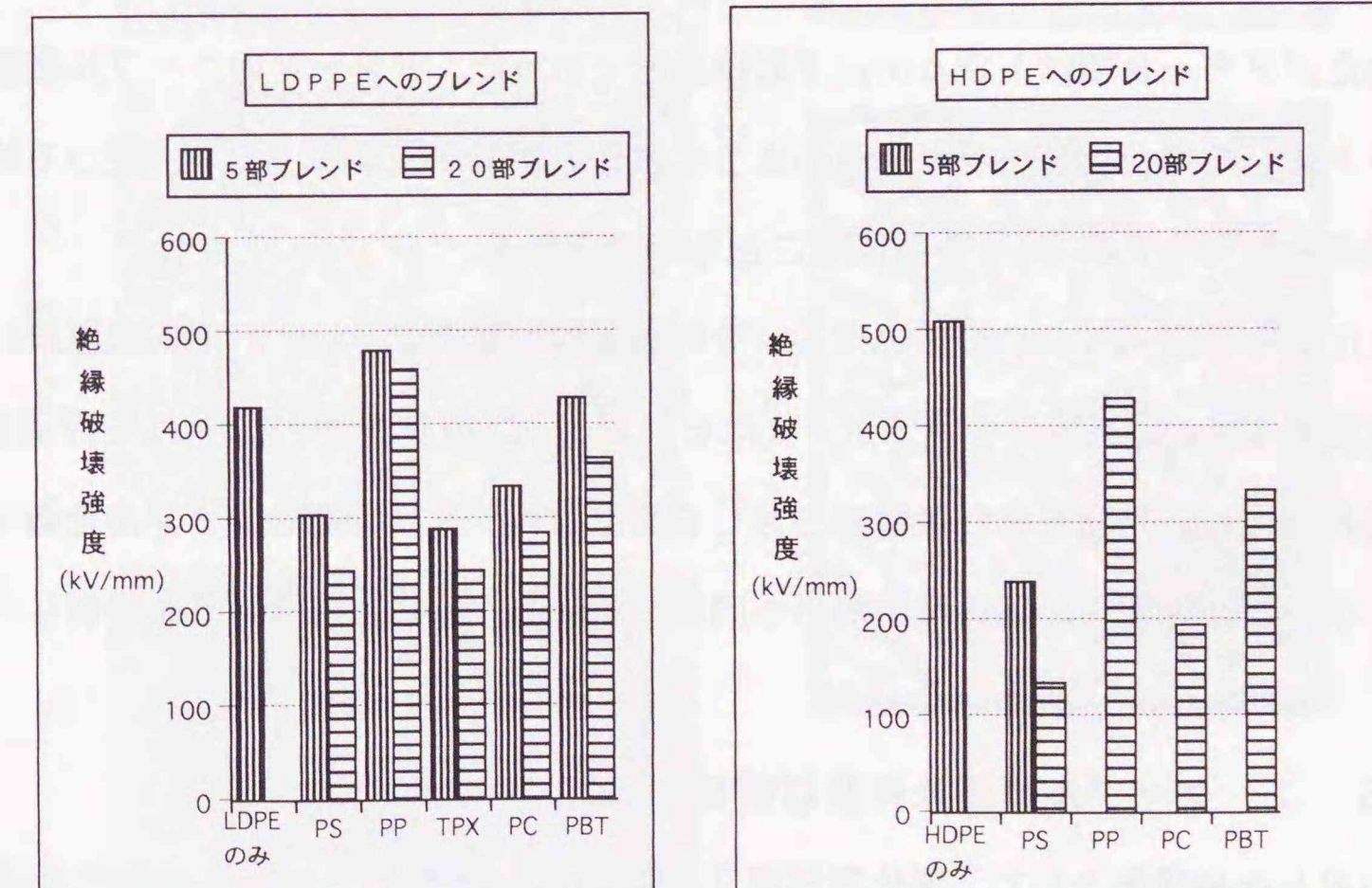
びHDPEに対し、第3.1表（第3.1節）の中の高分子群の幾つかのものを選り、5重量部及び20重量部をブレンドした。ブレンドは高融点側の高分子の融点以上の温度で押し出し機により混練後、160℃でリセス形状に成形し、試料とした。

ポリマーブレンド系の E_B の測定結果を第3.10図に示す。大部分の場合で、ポリマーブレンドの E_B はベースポリマー（LDPE、HDPE）より低下しており、5重量部ブレンドより20重量部ブレンドの方が低下が大きい。ベースポリマーよりも E_B が僅かに向上しているのは、オレフィン系高分子同志であるLDPEにPPをブレンドした場合のみであり、この場合も20重量部より5重量部の方が E_B が大きい。これらの実験結果は、ブレンドポリマーの相分離により絶縁破壊へのバリア性は殆ど示していないことを意味する。また、ポリマーブレンド試料の外観色はPPをブレンドしたもの以外は、非相溶性高分子同志のブレンドであることから、白濁色となっており、明瞭な相分離ドメインを形成していることを示している。従って、 E_B の低下が比較的大きい試料については、ドメイン界面に剥離空隙が生じていることも考えられる。

以上のことから、ポリマーブレンド（或いはポリマーアロイ）の手法は種々の物性改良に一般的に用いられる手法ではあるが、絶縁破壊特性の向上に対しては効果は認められず、逆効果となる場合の方が多いことが分かった。

第3.3表 ポリマーブレンド供試試料

ベースPE	ブレンドポリマー	ブレンド量(重量部)	ブレンド温度(℃)
LDPE	PS	5、20	180~200
	PP	5、20	200
	TPX	5、20	270
	PC	5、20	270
	PBT	5、20	250
HDPE	PS	5、20	200
	PP	20	220
	PC	20	270
	PBT	20	250



第3.10図 ポリマーブレンド試料の絶縁破壊強度

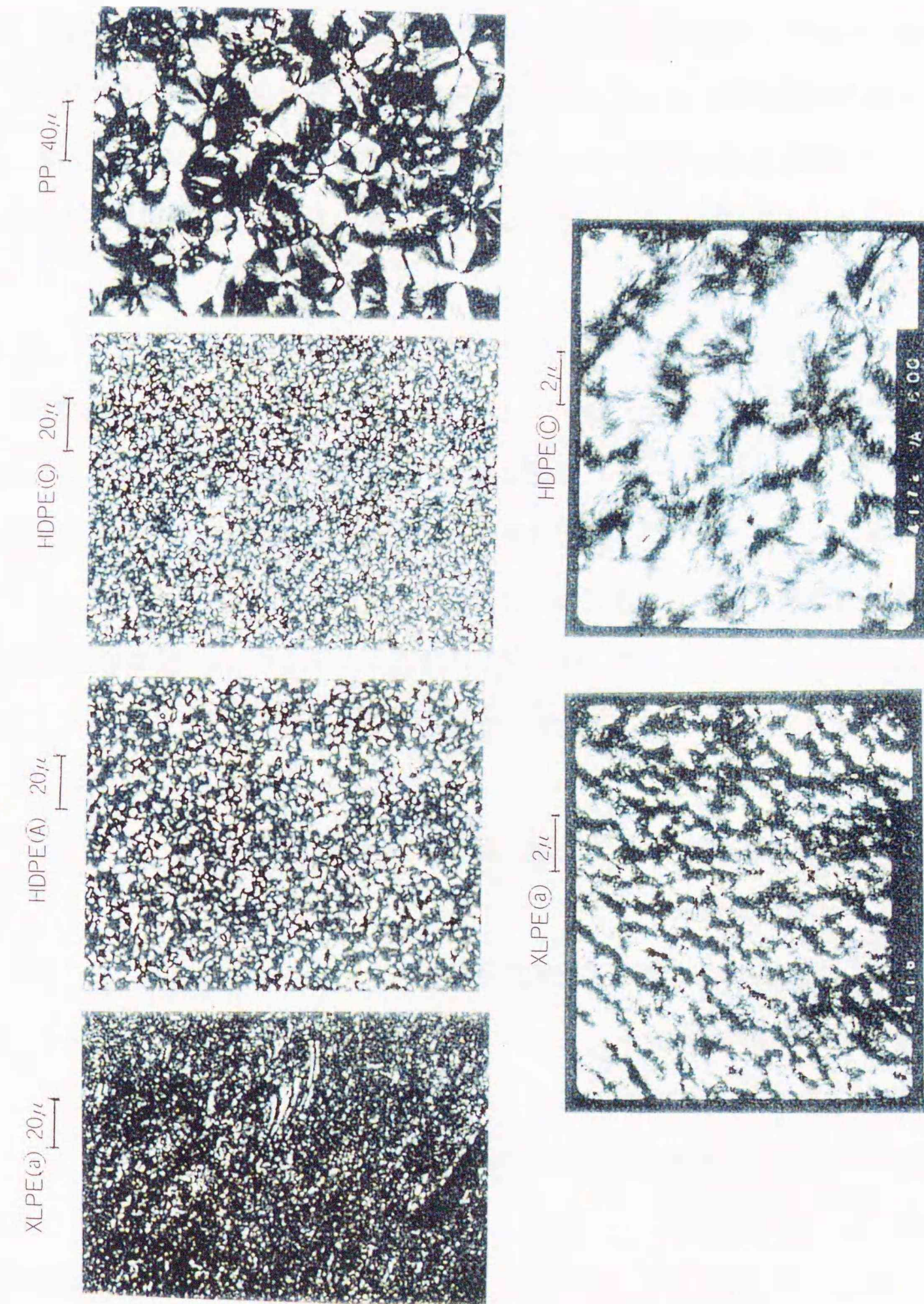
第3.6節 モデルケーブルによる絶縁破壊特性の評価

シート試料での E_B 評価結果から、室温域では各種高分子間で顕著な差は認められなかったが、その内、ケーブルへの押出可能な結晶性ポリオレフィンであるHDPE（高密度ポリエチレン）及びPP-R（ポリプロピレンランダムコポリマー）が比較的良好な結果を示した。また、結晶性ポリオレフィンでは熔融時からの冷却条件等で決まる結晶性の違いも、 E_B に影響を及ぼすことが明らかとなった。そこで、HDPE及びPP-Rについて予備的にモデルケーブル試作を行った所、PP-RではPE用の押出半導電層との整合性が良くなく、直ちにケーブル評価するには問題があった。さらに、第3.11図にHDPE、PP-Rのケーブル絶縁体の球晶をXLPEケーブル絶縁体と比較して示すが、ケーブルのような肉厚絶縁体では極端な徐冷となることから、XLPEでは $1\mu\text{m}$ 以下、HDPEでは $2\sim 10\mu\text{m}$ であるのに対し、PP-Rでは数十 μm に達する球晶が成長していた。第3.3節で述べたように、PPは球晶の発達し易い高分子であり、シート試料ではPP-Hの場合に大きい球晶（数十 $\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$ ）が観察されたがPP-Rでは $10\mu\text{m}$ 以下の球晶径であった。PP-Rのケーブル絶縁体ではシート試料の場合と異なり、上述のように大きい球晶が発達しており、従って球晶界面が弱点となって E_B に影響を及ぼすことも考えられる。

以上のことから、HDPEに限定し、その数種類の銘柄について、押出温度及びその後の温度条件等の製造条件をパラメータにモデルケーブルを造り、その E_B を評価した。比較のために、現用品を含む数種類のXLPEについても同構造のケーブルを造った。また、ケーブル絶縁体の固体構造解析も同時に行い、その対比についても検討した。

3.6.1 ケーブル製造条件及び評価方法

HDPEを絶縁体として、導体断面積 200mm^2 、絶縁厚 2.5mm を標準構造とするモデルケーブルを造った。（一部については、導体断面積 38mm^2 、絶縁厚 6.0mm の異なる構造のものもつくった） ケーブル製造プロセスは、導体上へ内部半導電層、絶



（写真上：偏光顕微鏡，写真下：透過電子顕微鏡）

第3.11図 ケーブル絶縁体の球晶例

縁層及び外部半導電層の3層同時押出に引き続き、熱媒体として加圧シリコン油を充填したカテナリータイプの加熱筒及び冷却筒を通過させるFZCV方式を用いた⁽⁴⁾⁽²⁵⁾。FZCVの概要図を第3.12図に示す。FZCVは、通常、CVケーブルの製造機であり、加熱筒は架橋のための加熱ゾーン、冷却筒は架橋後の冷却のために用いられるが、本研究では加熱筒を熱処理ゾーンとして、冷却筒はそのまま冷却ゾーンとして用いた。また、本方式では熱媒体として用いるシリコン油の比重がポリエチレンの比重に近いいため、本検討のように未架橋のHDPEであっても、重量による絶縁体の偏肉が避けられるのが大きな利点である。

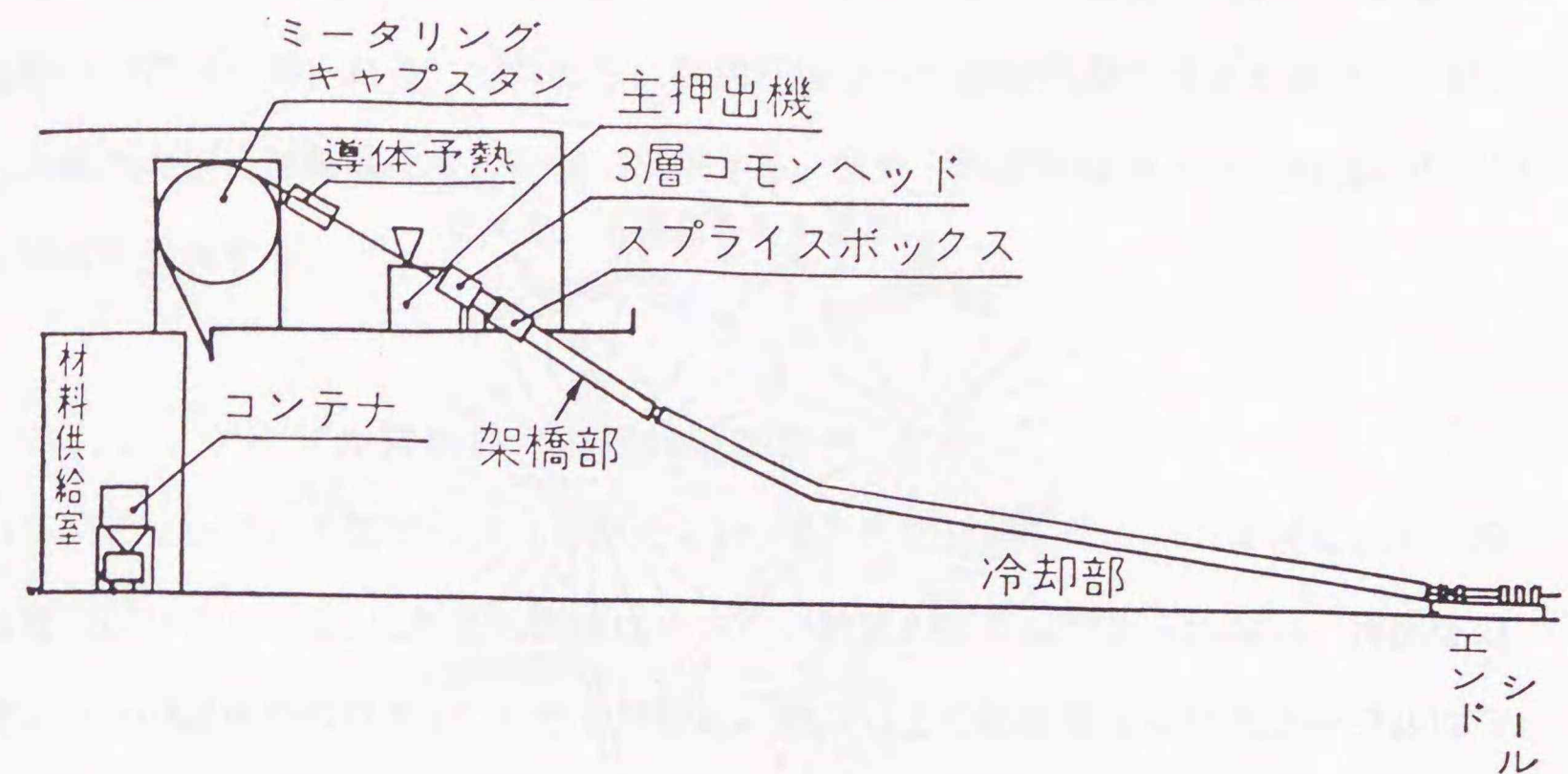
ケーブル絶縁体用HDPEとしてはMFRの異なる4種のもの(A、B、C、D)を用いた。押出温度はHDPEの融点(約130℃)以上の140～200℃の範囲とし、押出後の加熱ゾーン(熱処理ゾーン)温度はHDPEの融点を含む室温～200℃とした。第3.4表にHDPEケーブルの製造条件を示す。現用品を含むXLPEケーブルについても同じ製造機によって、通常の方法で造った。

各ケーブルについて、インパルス(標準インパルス: $1 \times 40 \mu s$)破壊電圧を10 kV/3回ステップアップの条件で測定し、その絶縁破壊強度 E_B (kV/mm)を求めた。(測定数3～4点の平均)

各々の絶縁体の固体構造について下記の方法によりその微細構造解析を行った⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾。

- ・密度 : 密度勾配管法
- ・結晶化度 : X線広角回折及び示差走査熱量計
- ・長周期 : X線小角散乱
- ・ラメラ厚 : レーザーラマン分光法
- ・球晶径 : 透過電子顕微鏡及び偏光顕微鏡
- ・配向度 : X線広角回折

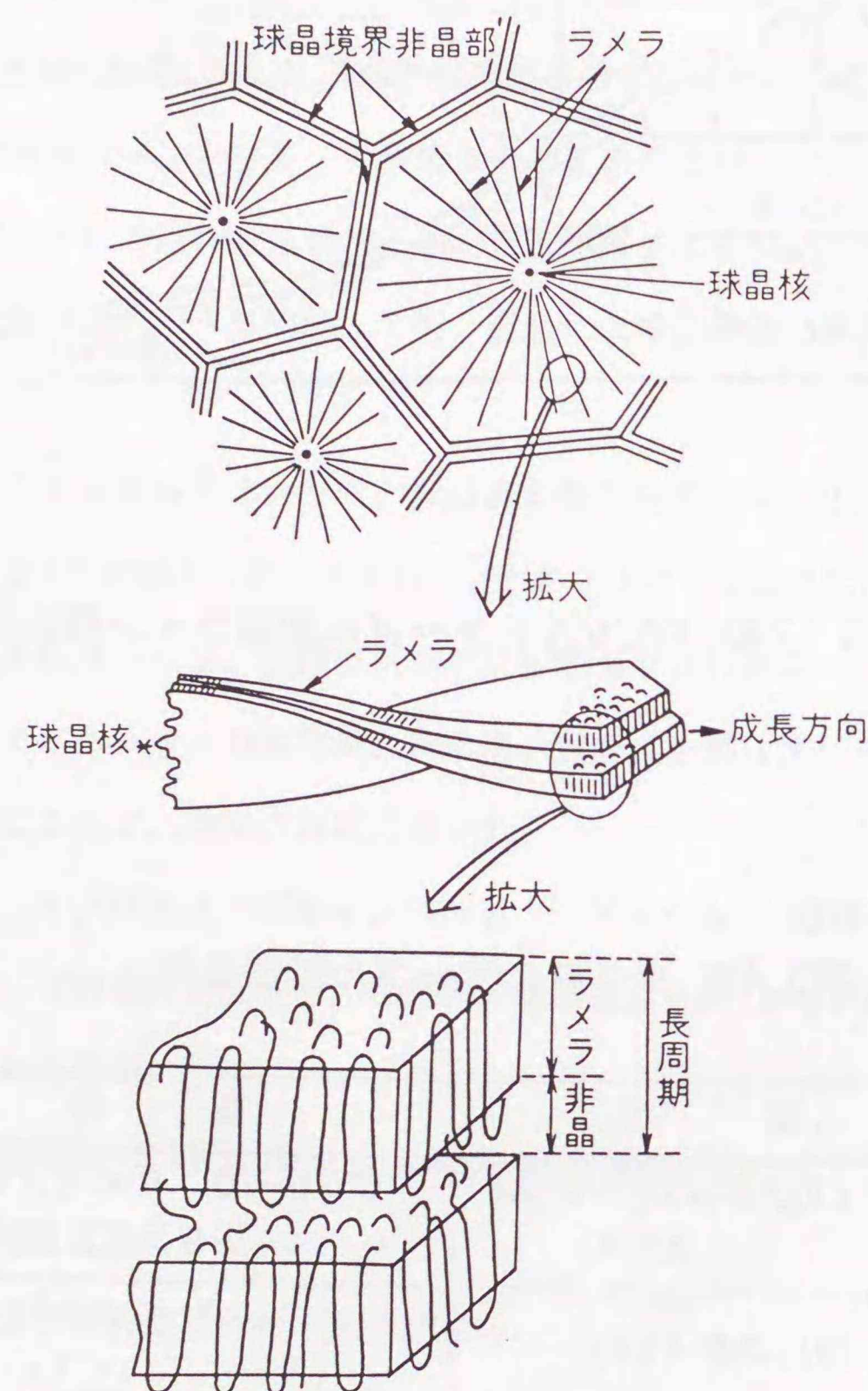
参考までに、第3.13図にPE球晶、ラメラ構造の概念図を示す。PEは短冊状をした規則正しい折りたたみ鎖であるラメラ(結晶)が多数集まって核(球晶核)を中心にラセン状にねじれながら放射状に成長した球晶構造をとっており、ラメラとラメラの間



第3.12図 FZCV方式ケーブル製造ライン概要図

第3.4表 HDPEケーブル製造条件

項 目	条 件
HDPEのメルトフローレシオ(MFR)	6.5～0.04 g/10分 (A>B>C>D)
押出温度(T_E)	140～200℃ ($T_{E1} < T_{E2} < T_{E3}$)
加熱ゾーン温度(T_H)	室温～200℃ ($T_{H1} < T_{H2} < \dots < T_{H6}$)
冷却ゾーン温度	室 温



第3.13図 ポリエチレンの球晶、ラメラ構造概念図

及び球晶境界は分子鎖の無秩序な非晶域となっている。前記の固体構造解析によりこの結晶構造の情報が得られる。すなわち、長周期はラメラ間の周期の長さを意味し、結晶域と非晶域の割合は結晶化度と密度に反映する。また、配向度はラメラ（結晶）の平均的な傾きを意味する。

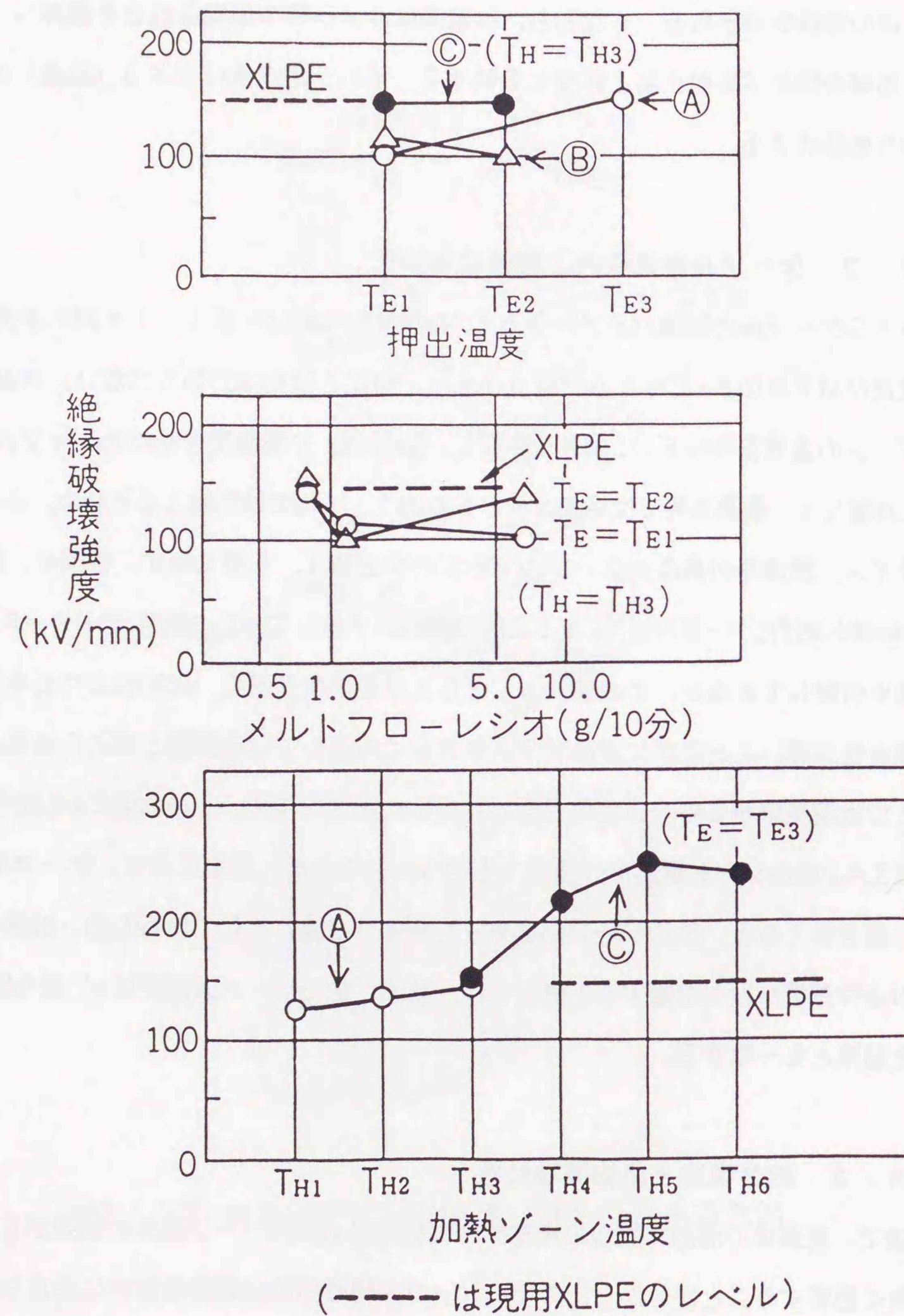
3. 6. 2 ケーブル製造条件と絶縁破壊特性

HDP Eケーブルの製造パラメータと E_B の現象的な関係を第3. 14図に示す。押出温度及びMFRの E_B に与える影響は小さく、特定の傾向は認められない。押出後の加熱ゾーンの温度条件は E_B に大きく影響し、融点以上の熱処理を受けたケーブルは E_B の向上が著しく、最適条件では現用XLP Eの約1. 7倍の特性向上を示した。さらに、導体サイズ、絶縁厚の異なるケーブルでのデータを第3. 5表に示す。やはり、融点以上の熱処理を受けたケーブルはXLP Eに比べ高い E_B を示している。同表にはPP-Rの試験結果も併記してあるが、その値はXLP Eよりもかなり低く、前述のように半導電層との整合性が悪いこと並びに球晶サイズが大きく成長している影響と考えられる。

PEでは熔融時からの冷却固化過程が結晶性に影響を与え、その結果 E_B も変化することは3.4.2項のシート試料での検討でも明らかにされた。このことは、ケーブル製造条件に置き換えると、冷却ゾーン温度を一定条件（室温）としているため、加熱ゾーン温度の条件選択が最も影響すると考えられ、事実、加熱ゾーン温度が E_B に最も影響を与えた結果とも一致する。

3. 6. 3 固体構造と絶縁破壊特性

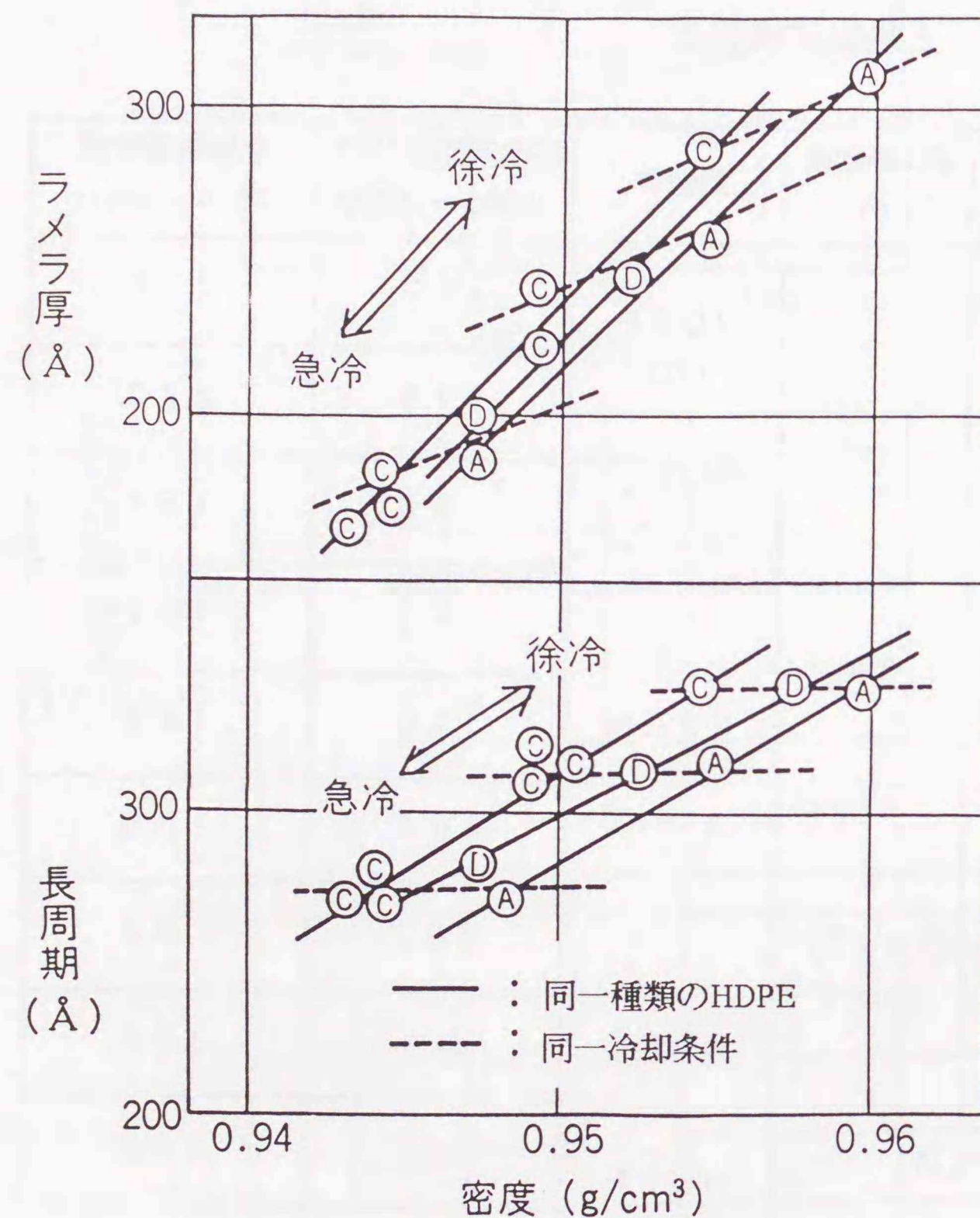
前項で、絶縁体の熔融時からの冷却条件に関する加熱ゾーン温度の選択が E_B に最も大きく影響することが分かったので、ケーブル絶縁体の結晶構造解析に先立ち、数種のHDP Eについて、プレスシートを用いて冷却条件によるラメラ厚及び長周期の変化を調べた。第3. 15図に結果を示すように、長周期は同一冷却条件下ではHDP Eの種類によらずほぼ同じ値を示し、一方、ラメラ厚は密度の大きいもの程厚くなる傾向を



第3.14図 HDPEケーブルの製造条件と絶縁破壊強度

第3.5表 HDPE、PP-R絶縁ケーブルのケーブル構造&製造条件と絶縁破壊強度

絶縁厚さ (mm)	導体断面積 (mm ²)	絶縁体	加熱処理温度 (°C) (加熱ゾーン温度)	絶縁破壊強度 (kV/mm)
2.5	38	HDPE (C)	110	215
			170	242
		PP-R	90	136
			100	157
			120	127
			170	115
			200	93
		XLPE	—	176
6.0	200	HDPE (C)	140	148
			170	151
		XLPE	—	120



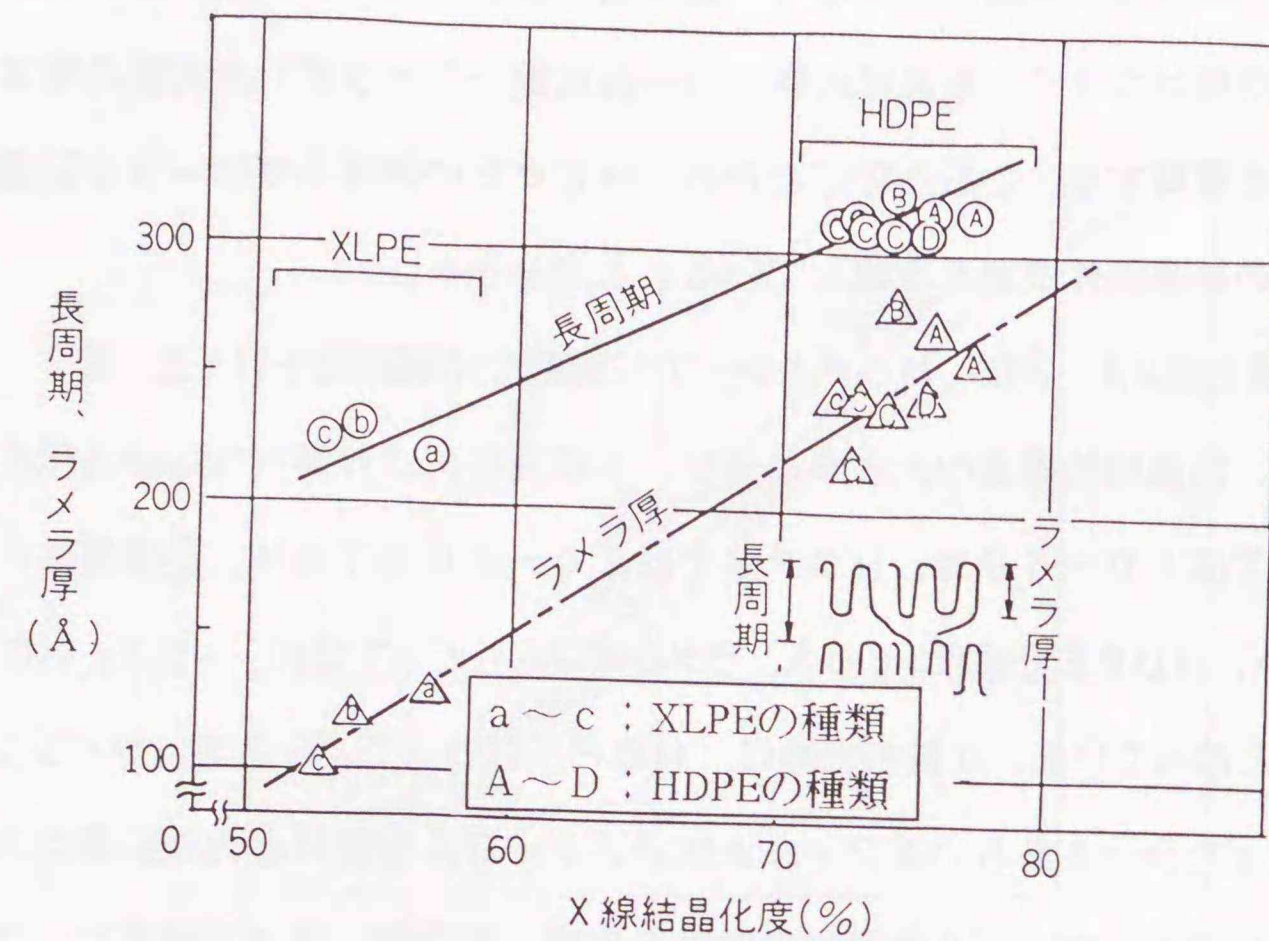
第3.15図 HDPEの冷却条件によるモフォロジー変化

示した。また、密度の増加に対応して、長周期及びラメラ厚共に増加するが、ラメラ厚の方が増加傾向は大きく、非晶部の厚さ（＝長周期－ラメラ厚）が密度の増加に伴い減少することを意味する。これらのことから、HDPEの種類及びケーブル製造条件の選択が絶縁体の結晶固体構造を支配していることが分かる。

以上の結果を踏まえ、次に、HDPEケーブル絶縁体の微細構造を調べた。第3.16図に示すように、結晶固体構造の大まかな値は、X線回折により得られる結晶化度についてはXLPEでは50～60%、HDPEでは70～80%であり、長周期はXLPEでは約220Å、HDPEでは約300Å、ラメラ厚はXLPEでは約110Å、HDPEでは約240Åとなっている。比較のために、HDPEについてプレス成形やインフレーション押出で造ったシートあるいはフィルム試料とケーブル絶縁体との微細構造の違いを第3.6表に示す。ケーブル絶縁体では結晶化度、長周期、ラメラ厚共に、プレスシート、インフレーションフィルムに比べ大きい値を示し、配向度についても殆ど零であることが分かる。これは、肉厚のケーブル絶縁体が、製造時に熔融熱処理され、かつ、徐冷されている効果と考えられる。

ケーブルの E_B と固体構造の関係を第3.17図及び第3.18図に示す。XLPEでは結晶化度が大きい程 E_B は大きく、HDPEについても同一HDPEでは同様の関係にある。これは、第3.8図（3.4.2項）で示したシートサンプルでの評価と同様の結果であった。しかし、第3.18図に示すように密度との関係は必ずしも明瞭でない。第3.19図にケーブルの E_B と長周期、ラメラ厚及び非晶厚（＝長周期－ラメラ厚）との関係で整理した結果を示す。各々のXLPE、HDPEの長周期はほぼ同じ値であり、XLPEにおいてはラメラ厚の増加と共に E_B は上昇し、HDPEにおいては逆にラメラ厚の増加は E_B を低下させる傾向を示している。

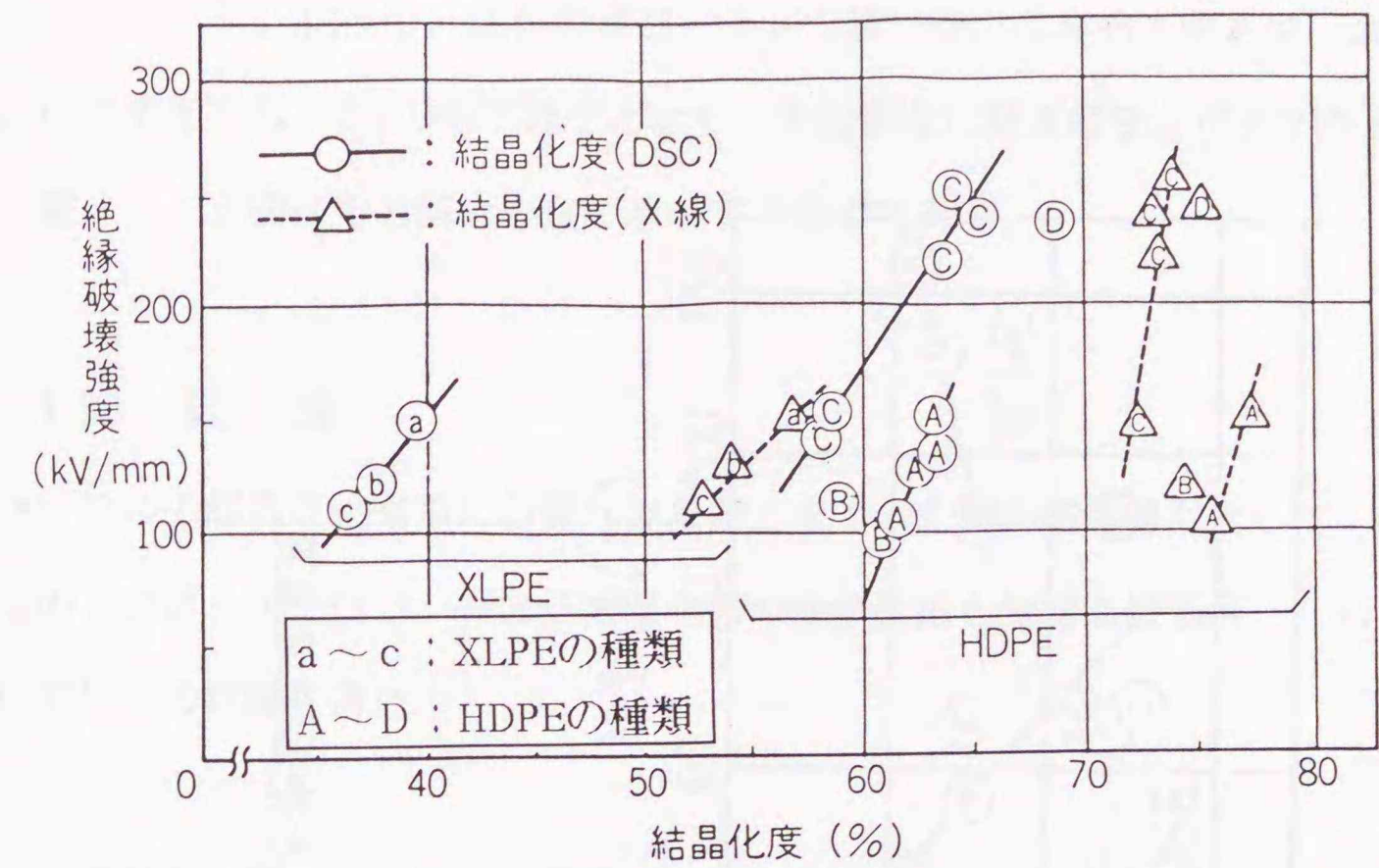
第3.3節及び3.4.2項でも述べたように、PEの室温での絶縁破壊過程において、結晶域では折りたたみ鎖方向の電子移動度が大きいので電子加速を容易にするとされており、非晶域は電子走行に対するバリアとして働く⁽¹⁹⁾⁽²⁹⁾。しかし、非晶域の増加は非晶域の自由体積破壊あるいはFrohlichの非晶質破壊による E_B の低下因子とし



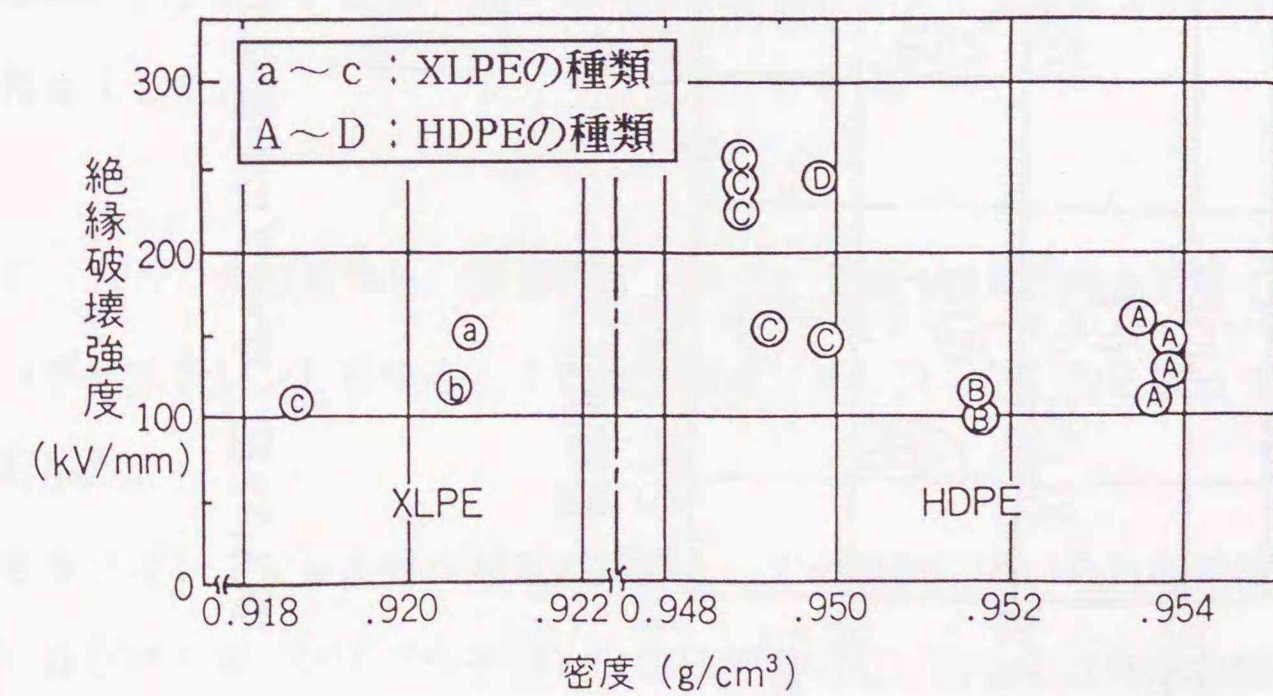
第3.16図 ケーブル絶縁体の長周期、ラメラ厚と結晶化度

第3.6表 HDPEのケーブル絶縁体とシート&フィルム試料のモフォロジーの比較

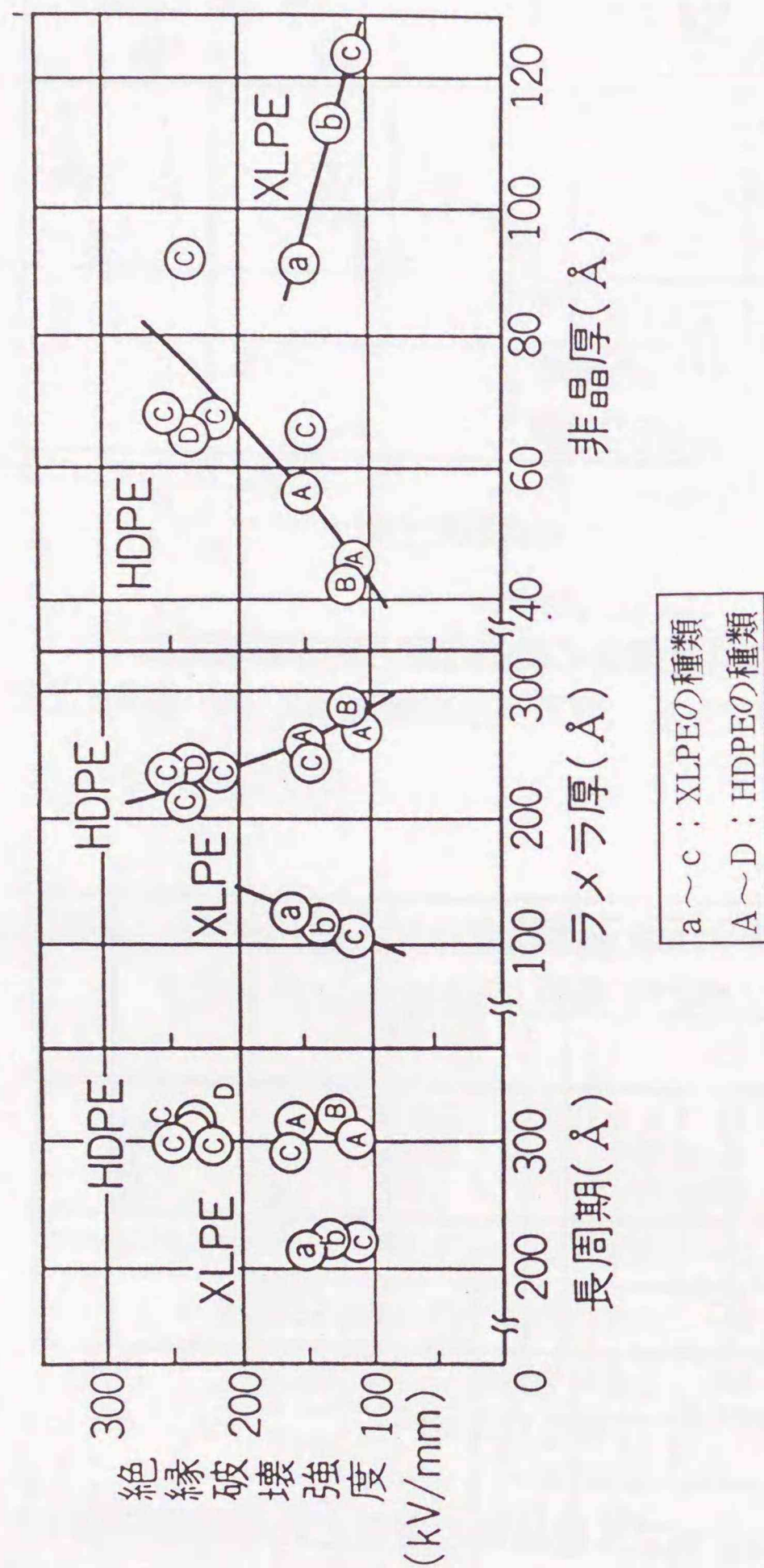
試料	X線結晶化度 (%)	長周期 (Å)	ラメラ厚 (Å)	配向度		球晶径 (μm)
				Fc	Fa	
プレスシート (200~300μ)	72.6	284	212	~0	~0	2~4
ケーブル絶縁体	76~77	310	260	~0	~0	2~4
インフレーションフィルム (100μ)	74.1	250	204	0.130	0.352	1~2
		330	—			
	73.9	276	223	0.084	0.180	1~2
		305	—			
ケーブル絶縁体	75.4	309	243	~0	~0	4~6



第3.17図 ケーブル絶縁体の結晶化度と絶縁破壊強度



第3.18図 ケーブル絶縁体の密度と絶縁破壊強度



第3.19図 ケーブル絶縁体のラメラ厚、非晶厚と絶縁破壊強度

でも働く^{(1.0)~(1.4)}。従って、結晶の厚さ(ラメラ厚)或いは非晶の厚さは、大き過ぎても、小さ過ぎても、 E_B の低下因子となり、その割合に最適領域が存在すると考えられる。第3.19図はその傾向を良く示唆するものである。

第3.7節 結 論

CVケーブルの超高压化適用に必要な絶縁耐力向上のための基礎検討として、絶縁材料面からのアプローチを行い、高分子絶縁材料の固体構造と絶縁破壊強度(E_B)の関係について以下の結論を得た。

- (1) 先ず高分子の固有絶縁破壊強度を適切に評価するための試料形状について調査、検討後、リセス状シート試料を採用し、幅広い分子構造を有する高分子絶縁材料について、その E_B を測定した。その結果、室温域では、高分子構造と E_B との間の特定の顕著な関係は認められなかったが、なかでは、結晶性ポリオレフィンであるHDPE(高密度ポリエチレン)及びPP-R(ポリプロピレンランダムコポリマー)が良好な特性を示した。
- (2) 次に、(1)の結果から、誘電特性、押出加工性、機械特性も併せて考慮し、PE(ポリエチレン)を中心とする結晶性ポリオレフィンに的を絞って、更に詳細に検討した。
 - ①結晶性ポリオレフィンの材料選定の指標として一般的に用いられる密度($\propto$ 結晶化度)及びMFR($\propto 1/\text{分子量}$)は絶縁破壊特性に対しては特定の傾向を示さず、指標とはならない。
 - ②同一のPEに対し、結晶性を変化(冷却条件、造核剤添加)させることにより、 E_B に影響を与え、同一のPE内で結晶化度が高い程、 E_B は上昇する。
 - ③PEの E_B に対する添加剤(絶縁油添加、ポリマーブレンド)の効果は大部分の場合

合認められなかった。(唯一効果が認められたのPEに親和性の良いアルキルベンゼン油を溶融練込添加した場合のみ)

(3) (1) 及び (2) の検討結果より、HDPE 及び PPR を選定したが、PPR は半導電層との整合性が悪いこと及び球晶成長が大きいことから適切なケーブル評価を行えなかった。HDPE については各種条件下でケーブルを試作し、下記の結果を得た。

- ① HDPE ケーブルの製造条件の中で、押出後の温度条件が E_B に最も大きい影響を与え、最適条件では、現用 XLPE の 1.7 倍の E_B の向上となった。
- ② ケーブル絶縁体の微細構造解析により、XLPE では結晶厚 (ラメラ厚) が増加 (非晶厚が減少) する程 E_B は向上するが、HDPE ではこの逆となり、結晶部と非晶部の最適な存在比率が絶縁破壊特性を向上させるための重要な因子であることが明らかとなった。

第 3 章 参考文献

- (1) 吉田、志関、竹鼻：「275～500kV CV ケーブルシステムへの展望」
フジクラ技報、NO80, P23 (1980)
- (2) 浅井、島田：「架橋ポリエチレンケーブルの歴史と将来」、電学論 B、vol115, p865 (1995)
- (3) M.Takaoka, M.Ono, and K.Kaji: "Development of 275kV XLPE cable system and prospect of 500kV XLPE cable", Fujikura Technical Review, vol13, p53 (1984)
- (4) 大島、小野、小島、片岡、岩田、竹鼻：「超高压ケーブル用 FZCV 機による XLPE ケーブルの特性」、藤倉電線技報、No59, p1 (昭和 53)
- (5) 長尾、沢、家田：「ポリエチレンの絶縁破壊に及ぼす試料形状の効果」、
昭和 50 年電気学会全国大会、308
- (6) J.J.McKeown: Proc.PIEE vol112, p824 (1964)
- (7) 電気学会技術報告、II 部第 304 号、「高分子絶縁材料の絶縁破壊現象」(1989)
- (8) M.Ieda: "Dielectric Breakdown Process of Polymers", IEEE Trans.El, vol15, p206 (1980)
- (9) 天川、森内、吉田、犬石：「ポリエチレンの電気伝導と絶縁破壊」
電学論 A、vol84, No1, p129 (1964)
- (10) 宮入、家田、沢、山内：「極低温ポリエチレンの絶縁破壊」電学論 A, vol91, p1962 (1971)
- (11) H.Frohlich: "On the theory of dielectric breakdown in solids",
Proc.Royal Soc., vol188, p521 (1947)
- (12) J.Artbauer: "Electrische Festigkeit von Polymeren",
Kolloid Z. und Z. Polymere, vol202, p15 (1965)
- (13) 長尾、沢、家田：「ガラス転移温度領域におけるポリエチレンフィルムの絶縁破壊」、
電学論 A、vol96, p605 (1976)
- (14) J.K.Nelson, H.Sabni: "Evidence for the role of free volume in the high field breakdown of polymers", 1980 CEIDP, p499 (1980)
- (15) P.H.H.Fischer, K.W.Nissen: "The short time electric breakdown behavior of polyethylene", IEEE Trans. El vol11, No2, p37 (1976)
- (16) S.N.Kolsov: "The influence of morphology on the electric strength of polymer insulation",
IEEE El vol15, p382 (1980)

- (17) K.H.Stark,G.C.Garton: Nature vol176, p1225 (1955)
- (18) 宮内、矢作:「室温領域におけるポリエチレンフィルムの電子性破壊」、
電学論A、vol92,p36 (1972)
- (19) 矢作、沖中:「ポリエチレンフィルムの電気絶縁破壊と高次構造の関係」、
電気絶縁材料研究会資料、EIM81-18 (1981)
- (20) 速水:「CVケーブル」、p107、コロナ社 (昭和61)
- (21) M.Mangaraj et al: CEIDP p195 (1978)
- (22) 高橋、丹羽:「架橋ポリエチレンの耐トリッキング性に与える添加剤の影響」、
電気絶縁材料研究会資料、EIM86-28 (1986)
- (23) 電気学会技術報告、II部第342号、「固体絶縁材料の添加剤、充填剤効果」(1990)
- (24) 高分子学会編:「ポリマーアロイ」(基礎と応用)、東京化学同人 (1987)
- (25) 鹿間、高岡、小野、大島、関:「架橋ポリエチレンケーブル用新CV機(FZCV)の開発」、
藤倉電線技報、No54, p1 (1976)
- (26) 角田、笠井:「高分子X線回折」、丸善 (1968)
- (27) L.E.Alexander,桜井(訳):「高分子X線回折」、化学同人 (1973)
- (28) J.Dlugosz,G.V.Grubb,A.Keller:"Study of crystallization and isothermal thickening in
polyethylene using SAXD,low frequency Raman spectroscopy and electron microscopy",
Polymer,vol17, No6,p471 (1970)
- (29) S.Mita,K.Yahagi:"Effect of elongation on dielectric strength in polyethylene",
J.Appl.Phys. vol14,No14,p197 (1975)

第4章 水トリーの進展機構及び抑止方法

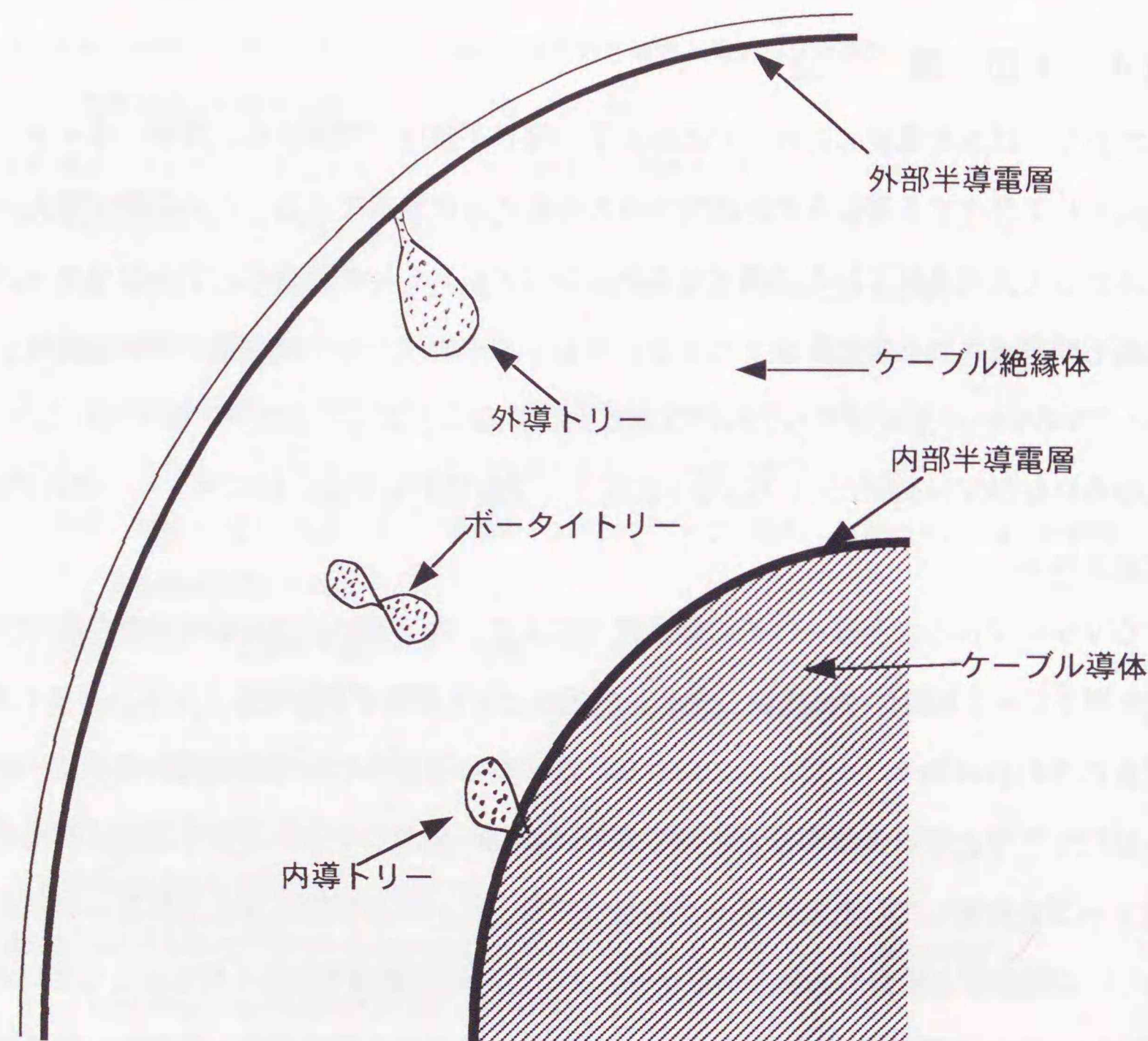
第4.1節 緒 論

水トリーは水と電界の共存下で絶縁体中の電界不整部(電極突起、異物、ボイド)を起点として発生する固体有機絶縁物特有の電氣的劣化現象である。この現象は電力ケーブルとして汎用されている架橋ポリエチレン(XLPE)を絶縁体とするCVケーブルで最も問題視される劣化形態でもある。XLPE中の水トリーは電気トリーと異なり、1~2kV/mmの低電界でも比較的容易に発生することから、浸水下で使用されるケースの多い6.6kV~33kVクラスの地中配電ケーブルに対しては、特に水トリー劣化対策が望まれる。

CVケーブルの水トリーはその発生起点により、内部及び外部半導電層から発生する内外導トリーと絶縁体中の異物、ボイドを起点として発生するボウタイトリー(BTT)に大別される(第4.1図)。このうち、電極からの水トリーである内外導トリーは一般にBTTより有害であるとされており、初期の配電CVケーブルでは内外導に半導電テープを使用していたためテープのラップ目、ケバ等が電極不整となり著しい内外導トリーが発生する場合もあり、水トリーによる絶縁破壊事故を数多く引き起こしている。その後、押出半導電層が採用されるようになり、絶縁体と内外導を一括押出しする三層同時押出技術、平滑半導電材の選定等の製造技術の進歩により、絶縁層/半導電層界面の平滑性が著しく向上し、現在国内では内外導トリーの問題はほぼ解決されている⁽¹⁾⁽²⁾。

しかし、絶縁体内部から発生するBTTについては絶縁材料自身の物性も関与することもある。未解決の問題であり、その進展機構の解明と対策が望まれている。

そこで本章では、絶縁材料の改質によるBTTの抑止を目的として、まず、水トリー進展機構から見た高分子絶縁材料の物性の要因と水トリー特性の関係について推察した(第4.2節)。次にこの推察を基に、ポリマーの①親水基の効果、②メカニカル要因、③結晶配向の効果を取り上げ第4.3節及び第4.4節で検討を行った。そこで得ら



第4.1図 水トリーの分類

れた知見に基づき、第4.5節では水トリー抑止新規絶縁材料として超低密度ポリエチレン (VLDPE) を選定し、ケーブル試作並びにその評価を行い、BTTの抑止に極めて有効であることが明らかにされた。

本章では、これらの検討内容について述べる。

第4.2節 水トリーの進展機構とポリマー物性の関係について

水トリーの進展機構については従来から数多くの説が提案されている⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

いずれの説であっても、水トリーの発生にはつぎの2ステップを経る必要があると考えられる⁽⁶⁾。

- ・ステップⅠ：絶縁体中に溶解する気体水を発生源（電界不整部；突起、異物、ボイド）へ液体水として凝縮する過程。
- ・ステップⅡ：発生源の液体水が絶縁体に向かって噴出し、水トリー形状に進展する過程。

ステップⅠが起こる最も有力な考え方は、大きい双極子を有する絶縁体中の溶解水（分子水）が不平等電界下（電界不整部となっている突起、異物、ボイド近傍）で高電界部（発生源）に向かって移動する誘電泳動による課電凝縮である。また、ステップⅡに対する考え方としては凝縮水（液体水）となった水が、水の誘電率が大きいことマックスウエル応力（ $=1/2(\epsilon_w - \epsilon_p)E^2$ ； ϵ_w ：水の誘電率、 ϵ_p ：絶縁体の誘電率、 E ：水に加わる電界）により絶縁体に向かって噴出するとする説が従来から一般的であり、この場合AC電場下では振動的に噴出されるためストレスクラックや疲労破壊も生ずるとの説もある⁽³⁾⁽⁴⁾。さらに、ステップⅡでは水の電気化学的分解による酸化剤（ O_2 、 H_2O_2 、 $HO_2\cdot$ ）の発生により絶縁体の酸化現象を伴うことが水トリー部の微細分析により明らかにされている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

以上の水トリー進展機構から絶縁体中から発生する水トリーであるBTTを抑止するにはステップⅠ又はステップⅡを抑制すれば良いことになる。CVケーブル絶縁体であるXLPEは無極性の疎水性ポリマーであり、また、結晶部と非晶部を持つ半結晶性ポ

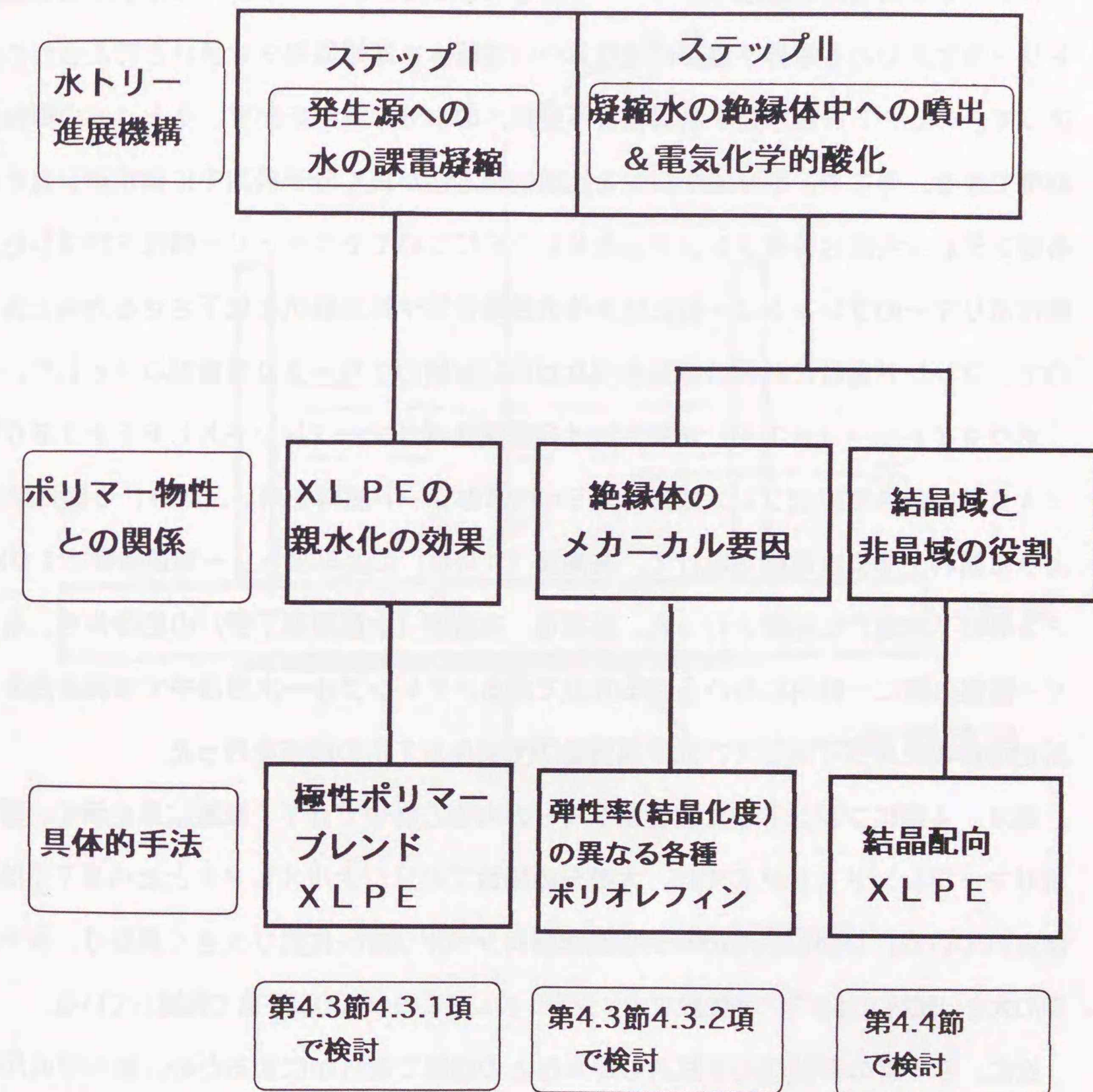
リマーでもある。このXLPEの特徴は水トリ進展機構との関係では、ステップⅠに対しては疎水性ポリマーであることから溶解水を電界不整部に析出（凝縮）させ易いと考えられる。また、ステップⅡの過程に対しては、マックスウエル応力による水の噴出に対するXLPEのメカニカルな抵抗性を確認しておく必要がある。さらに、ステップⅡの水のメカニカルな噴出や電気化学的酸化現象に対して、よりミクロな視点からは結晶域よりも非晶域の方が弱点になると考えられることから、この点も明らかにしておく必要がある。

上述の水トリ進展機構から見たBTTの進展性とポリマー物性の関係を明確にするため、具体的手法として、

- ①XLPEの親水化（極性ポリマーブレンドXLPE）
- ②メカニカル特性（弾性率 $\propto$ 結晶化度）の異なる各種ポリオレフィン
- ③結晶配向XLPE

を取り上げ、そのBTT特性を第4.3節及び第4.4節で検討した。

第4.2図にこの関係を示す。



第4.2図 水トリ進展機構とポリマー物性の関係

第4.3節 極性ポリマーブレンドXLPE及び各種ポリオレフィンの水トリ特性

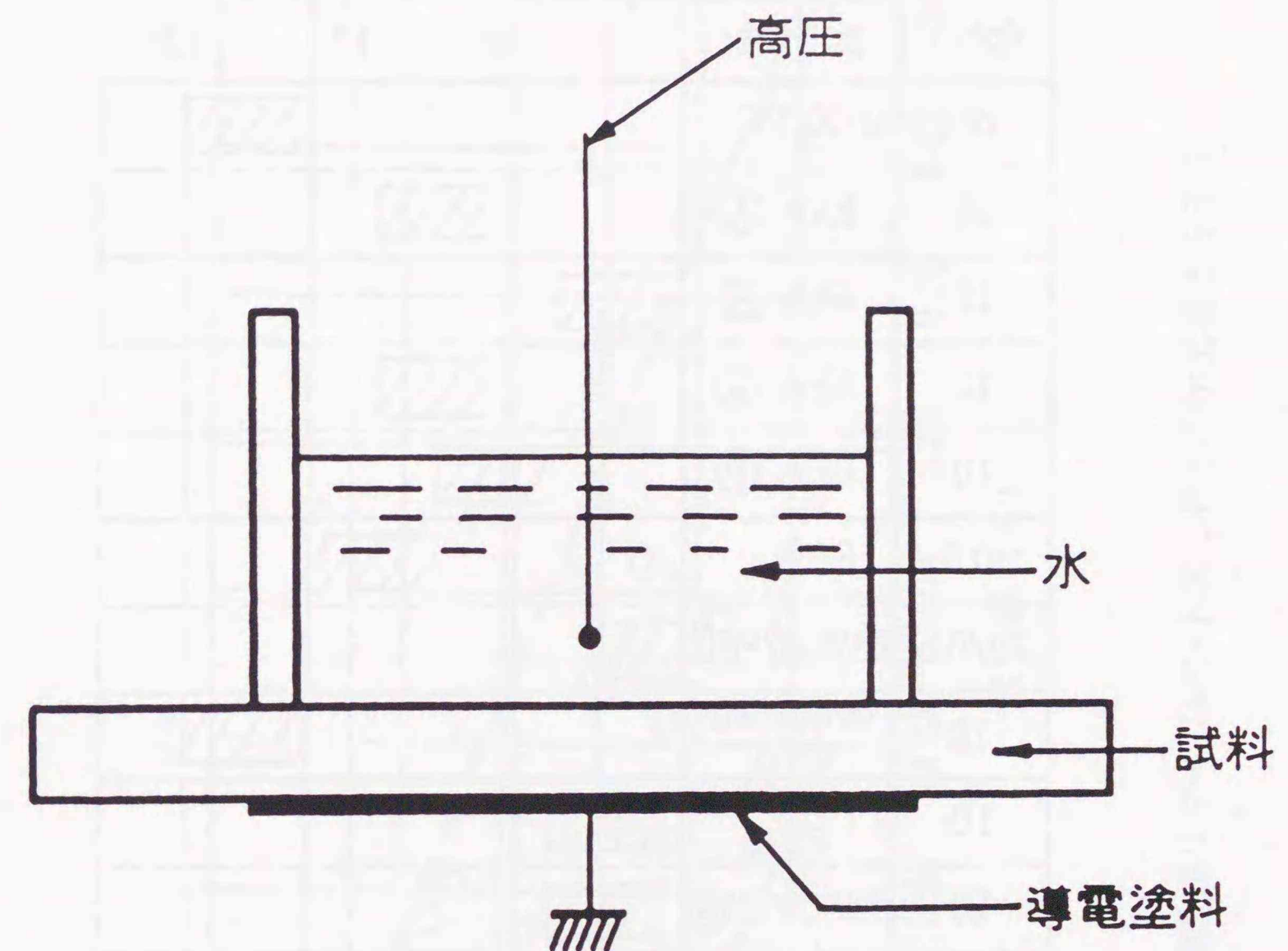
4.3.1 極性ポリマーブレンドXLPEの水トリ特性

XLPEは無極性の疎水性ポリマーであることから、第4.2節で推察したように水トリ発生源である電界不整部に絶縁体中の溶解水を課電凝縮させ易いと考えられる。従って、XLPEを親水化すれば電界不整部への水分の集中を防ぎ、水トリの抑制が期待できる。そこで、ポリエチレンと比較的相溶性が良く分子構造中に極性基を有する各種エチレン共重合体をブレンドしたXLPEについてその水トリ特性を評価した。極性ポリマーのブレンドは一般に絶縁体の誘電特性や絶縁抵抗を低下させる方向にあるので、ブレンド量はこれらの特性を損なわない範囲の10～20重量部以下とした。

ボウタイトリー(BTT)試験方法は各種極性ポリマーブレンドXLPEを160℃×40分の条件で架橋プレス成形した5mm厚のシート試料を用い、第4.3図に示すように試料上部に水電極を設けて、高周波(1kHz)による水トリ加速条件で10kV×30日(室温)の課電を行った。課電後、有効部(水電極部下部)の絶縁体を、水トリ観察の際に一般的に用いられる方法であるメチレンブルー水溶液中で煮沸染色後、所定の厚さにスライスして、光学顕微鏡下で発生BTTの調査を行った。

第4.4図にブレンドした極性ポリマーの内容と併せてBTT試験結果を示す。極性ポリマーブレンドXLPEでは、大部分の場合でオリジナルXLPEと比べBTTは抑制されている。しかし、その抑制程度はブレンドポリマーにより大きく異なり、最も効果の大きい試料ではBTT発生数がオリジナルXLPEの1/100以下まで低減している。

次に、BTTの抑制程度を試料の親水性との相関で明らかにするため、親水性の尺度として試料の水分量、BTT発生の尺度としてBTT数×BTT長をとり整理すると第4.5図のように示される。ばらつきはあるものの、水分量が多い(親水性が大きい)程、BTT発生が抑制される概略の相関が認められる。図中のばらつきが比較的大きいのは、BTTの抑制が単に親水性のみで支配されるのではなく、異種ポリマーブレ

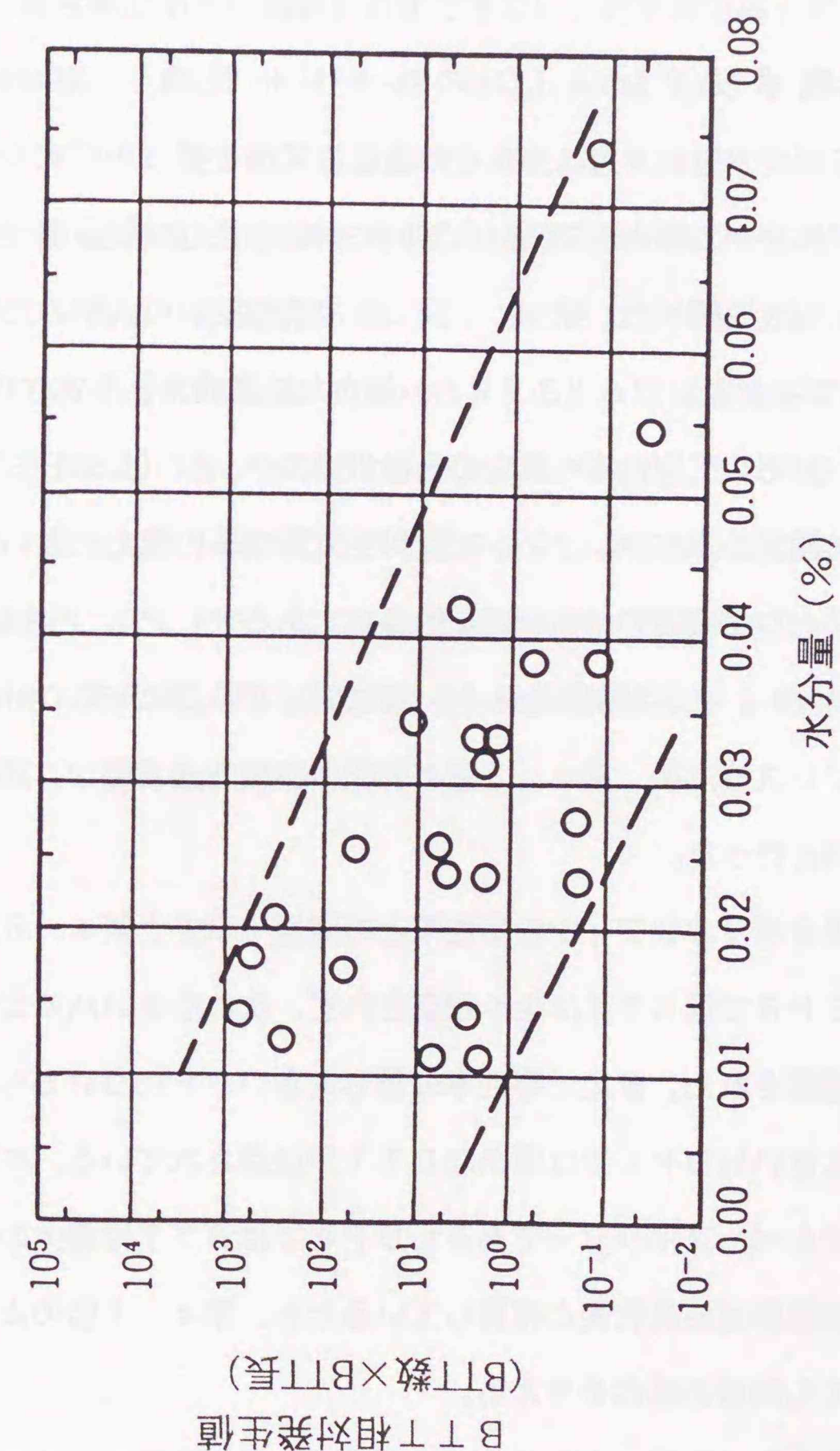


第4.3図 シート試料水トリ試験方法

Sample		B T T 発生数 (相対値)		
Ratio (phr)	Blend polymer	10^0	10^1	10^2
	original XLPE			////
20	EVA ①	////		
10	EVA ②	////		
10	EEA ①	////		
10	EEA ②	////		
0.5	PEG		////	
10/0.5	EVA B/PEG	////		
10	modified EVA		////	
10	modified EEA	////		
10	ionomer①	////		
10	ionomer②		////	
10	ionomer③	////		
10	chlorinated PE.	////		

EVA : エチレン酢酸ビニル共重合体 EEA : エチレンエチルアクリレート共重合体
 PEG : ポリエチレングリコール ionomer : エチレンカルボン酸塩共重合体
 chlorinated PE : 塩素化ポリエチレン

第4.4図 極性ポリマーブレンドXLPEのBTT試験結果



第4.5図 極性ポリマーブレンドXLPEの水分量とBTT

ンドによるXLPEの結晶構造の変化やイオン性不純物の増加等他の要因も関係しているためと考えられる。しかし、XLPEへの親水性の付与がBTTを抑制させる方向性にあることは明らかな傾向である。

4. 3. 2 各種ポリオレフィンの水トリ特性

BTTに及ぼすポリマーのメカニカルな特性との関係を明らかにするために、ポリエチレンと同様に無極性かつ疎水性であり化学的に同質と見なせる各種ポリオレフィンについてそのBTT特性を調べた。第4. 1表に示すように、ゴム状の完全な非晶性高分子であるエチレンプロピレンゴム(EPR)、僅かな結晶成分を持つハイエチレンEP、結晶性が異なり、対応して弾性率も異なる各種ポリエチレン(LDPE、LLDPE、HDPE)、高結晶性のポリオレフィンで試料中で弾性率の最も大きいポリプロピレン(PP)、比較用として現用CVケーブル絶縁体であるXLPE(供試LDPEはXLPEのベースポリマー)を供試試料とした。各試料は200℃×20分の条件で5mm厚のシートに熱プレス成形後、第4. 3図と同様の試験方法(但し、課電時間は7日)によりBTT試験を行った。

BTT試験結果をポリオレフィンの弾性率との関係で示すと第4. 6図となる。弾性率の最も小さいEPRではBTTは全く観察されず、次に小さいハイエチレンEPには僅かなBTTが観察された。また、弾性率の最も大きいPPについてもBTTは全く観察されず、次に大きいHDPEでは僅かなBTTが観察されている。中間の弾性率を持つXLPE及びそのベースポリマーであるLDPEではBTTは最大の値を示した。ポリオレフィンの弾性率は結晶化度と相関しているため、第4. 7図のように、結晶化度との関係で示しても同様の傾向を与える。

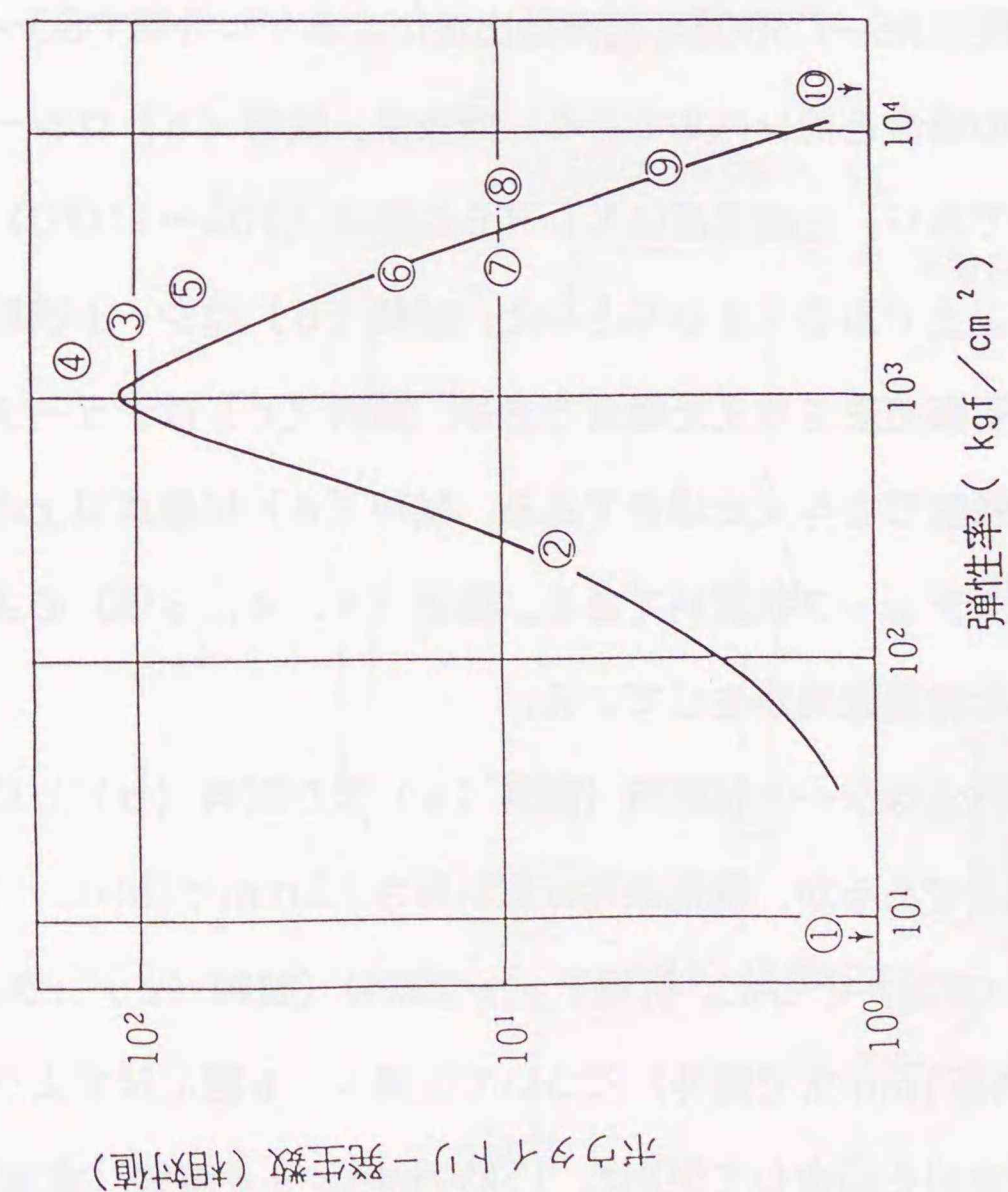
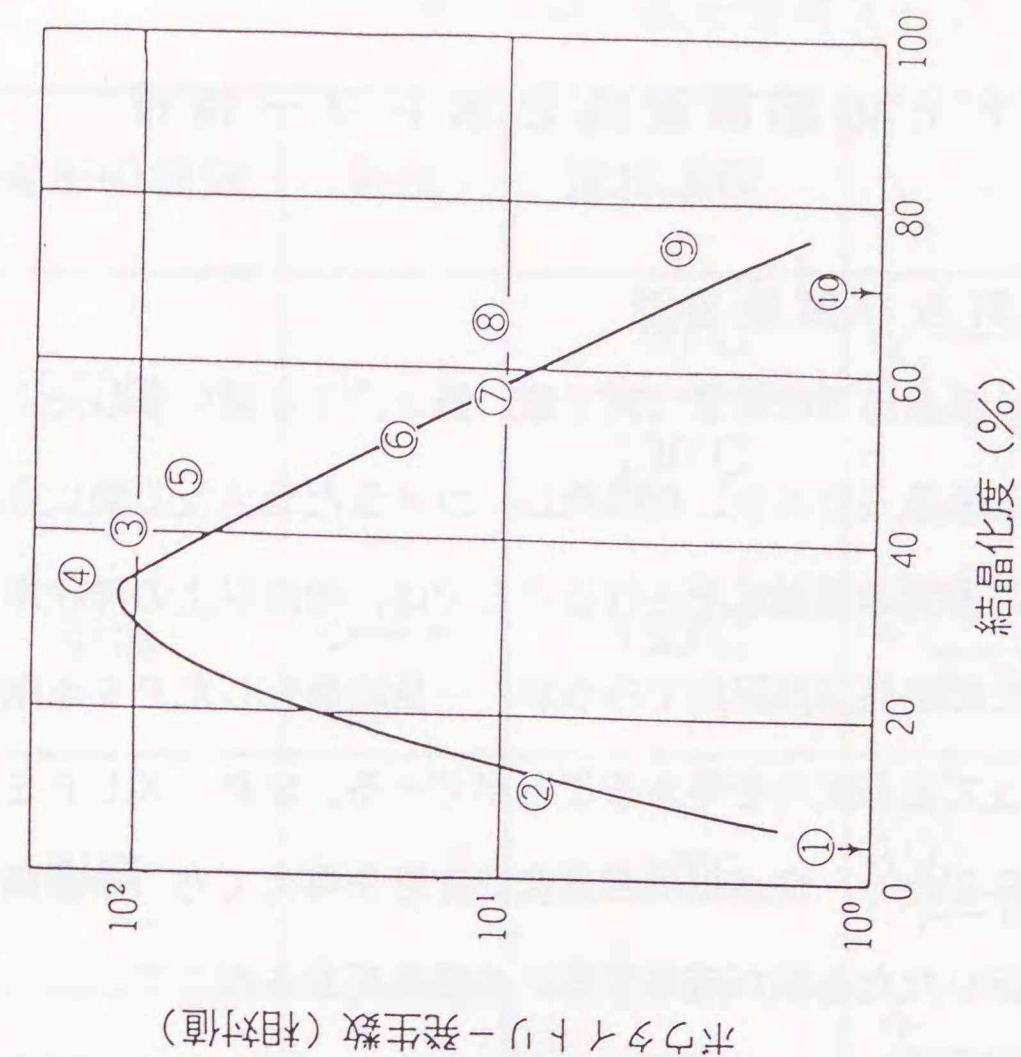
第4. 2節で述べたように、水トリの進展が発生源からのマックスウエル応力による水のメカニカルな噴出(または注入)と関係するとすれば、単純には柔らかい材料(弾性率の小さい材料)程BTTは発生し易いことになる。事実、ポリエチレンと化学的に同質の炭化水素系化合物であるポリブテン油を用いた水トリ疑似実験では、ポリ

ブテン油が弾性のない液体であることから、電圧印加により吸湿異物から油中へ微小水滴が放出される水トリ疑似現象が短時間で容易に観察されている⁽⁹⁾。一方、第4. 6図の実験結果は、弾性率の大きい材料でBTTが発生しにくいことは上述の考え方でも説明できるが、弾性率の小さい場合を説明できない。電子顕微鏡を用いた水トリ発生XLPEの微細観察によれば、水トリ部には0.1μm以下のチャンネル状の空隙も観察されており⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、従って、絶縁体中への水の注入過程は弾性率のようなマクロな物性値ではなく、結晶域と非晶域を考慮したよりミクロなレベルで起こっていると考えられる。水トリ発生初期過程において、水のメカニカルな注入が弾性率の小さい非晶域に選択的であるとすれば、PPやHDPEのような高結晶性ポリマーでは非晶域が狭いため注入される水の量が制限され、また、EPRのような非晶性ポリマーでは水は均質に注入されるため水トリのミクロチャンネルが形成しにくいと考えられる。

中間の結晶化度をもつXLPE、LDPEでは非晶域への選択的な水の注入に対して最もミクロチャンネルを形成し易いことになる。結晶配向XLPEを用いた次節(第4. 4節)での検討で、この関係をより詳細に調べる。

第4.1表 ポリオレフィンの水トリ評価供試試料

ポリオレフィン種	結晶性 (結晶化度%)	弾性率 (kg/cm^2)
エチレンプロピレンゴム (EPR)	非晶 (0)	8.3
ハイエチレンEPゴム (ハイエチEP)	低 (10)	3.5×10^2
低密度ポリエチレン (LDPE)	中 (40)	1.8×10^3
架橋ポリエチレン (XLPE)	中 (40)	1.6×10^3
直鎖状LDPE (LLDPE)	中 (45)	2.5×10^3
LDPEとHDPE のブレンド	中高 (50~70)	$3.3 \sim 7.0 \times 10^3$
高密度ポリエチレン (HDPE)	高 (75)	8.0×10^3
ポリプロピレン (PP)	高 (70)	1.5×10^4



- ①EPR ②ハイエチレンEP ③LDPE ④XLPE ⑤LLDPE
⑥⑦⑧LDPEとHDPEのブレンド ⑨HDPE ⑩PP

第4.6図 ポリオレフィンの弾性率とBTT

第4.7図 ポリオレフィンの結晶化度とBTT

第4.4節 XLPEの結晶配向と水トリー特性

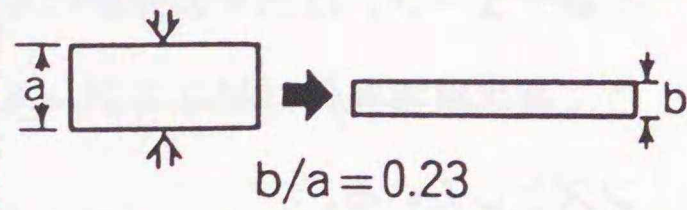
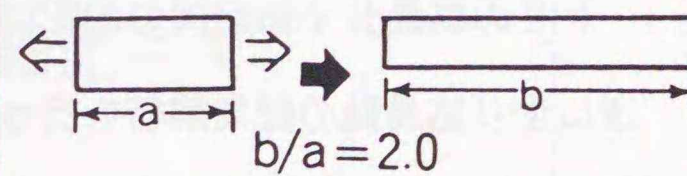
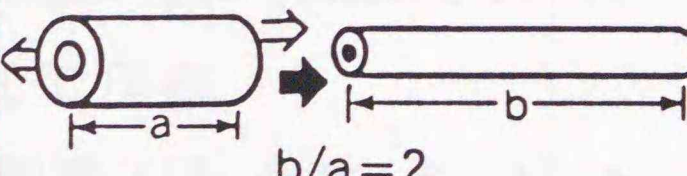
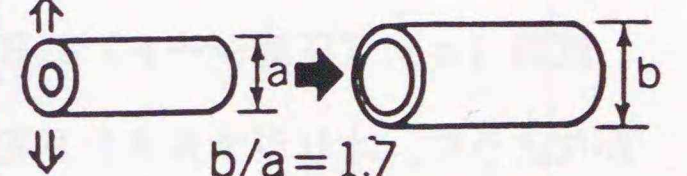
4.4.1 供試材料及び試験方法

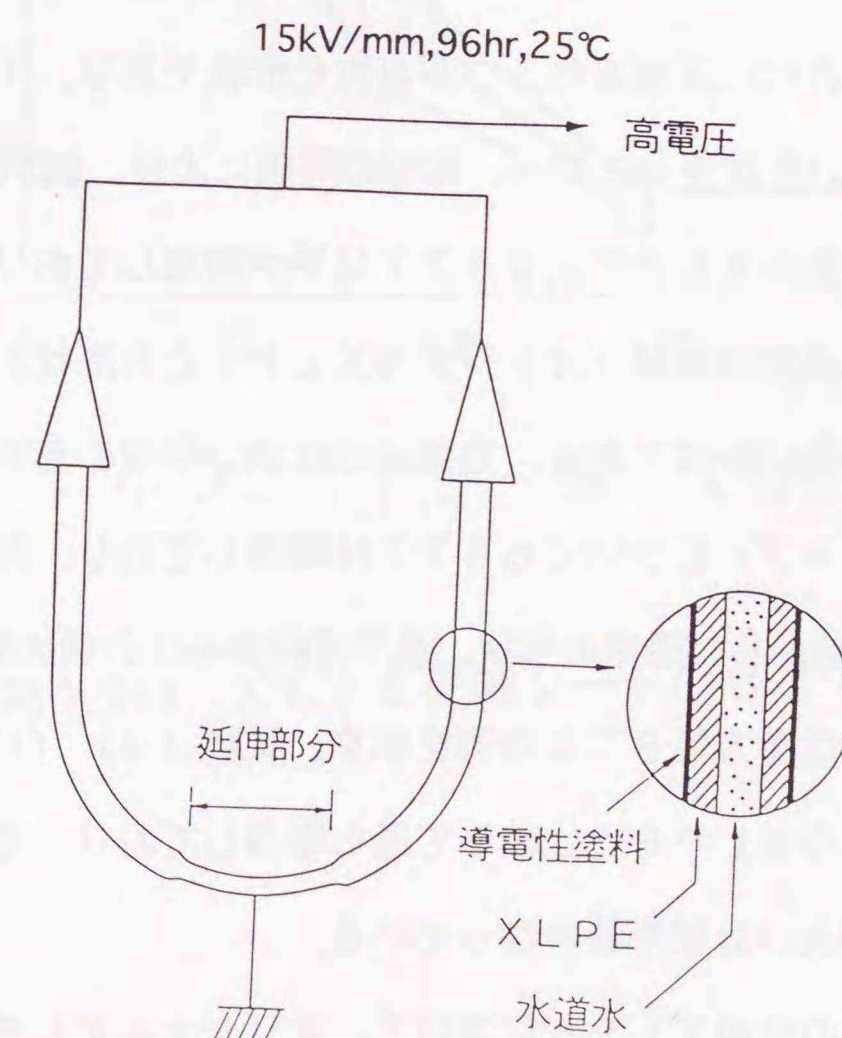
ポリエチレン（PE）結晶構造は前章（第3章）第3.13図に示したように規則正しい折りたたみ鎖である結晶（ラメラ）が積層し、ラメラとラメラの間に非晶部が配置する構造となっている。通常の熔融成形されるPEでは、融点以上の無秩序な分子鎖状態から冷却結晶化するため結晶は無配向であるが、一旦結晶化したPEを融点以下の温度で変形することによって結晶配向を与えることができる。また、XLPEでは網目を形成する架橋分子鎖が在るため、融点以上の温度で変形を与えても、冷却時に分子鎖が配向した状態から結晶折りたたみ鎖が成長するため結晶配向を起こす。

そこで、シート状及びチューブ状XLPEを用い、第4.2表に示す温度、変形条件で圧縮、引張、拡張の極度の変形を与え種々の結晶配向XLPEを作成した。（なお、各々のXLPEの架橋度はJIS-C3005の溶剤抽出法によるゲル分率で80～85%でありCVケーブル絶縁体の場合と同レベルである）同表中、試料（a）はシート状試料に圧縮変形を与えた場合であり、圧縮温度はXLPEの融点（105～110℃）以下の温度である90℃及び融点以上である130℃とした。試料（b）はシート状試料を融点以上の130℃の温度で引張変形を与えた場合であり、試料（c）はチューブ状試料を融点近傍の110℃で引張変形を与えた場合である。試料（d）は融点以上の温度（150℃）で拡張変形を与えたチューブ状試料である。後述（4.4.3項）のように各試料にはそれぞれに特徴的な結晶配向が生じている。

ボウタイトリー試験方法はシート状試料（試料（a）及び試料（b））については第4.3図と同様の方法であるが、課電条件は試料厚さ1.5mmで1kHz、15kV（10kV/mm）×10日間（室温）とした。引張チューブ試料（試料（c）：外径5mmφ、肉厚3mmチューブを肉厚1mmまで延伸）については第4.8図に示すように内面を水電極とし、外面に導電塗料を塗布して50Hz、15kV/mm×96時間（室温）の条件で

第4.2表 変形付与XLPE試料

変形の種類	形状	変形温度	説明図
圧縮	シート	90℃	
		130℃	
引張	シート	130℃	
引張	チューブ	110℃	
拡張	チューブ	150℃	



第4.8図 引張チューブ試料のBTT試験法

課電した。拡張チューブ試料（試料（d）：1.7倍拡張）は1kV/mmの低電界で約1200日の長時間浸水課電されたものである。各々の試料（シート試料、引張チューブ、拡張チューブ）は別々の機会にそれぞれの目的で試験されたものであるため、上記のように浸水課電条件は異なるが、オリジナルXLPE（無変形XLPE）を常にリファレンスとしている。

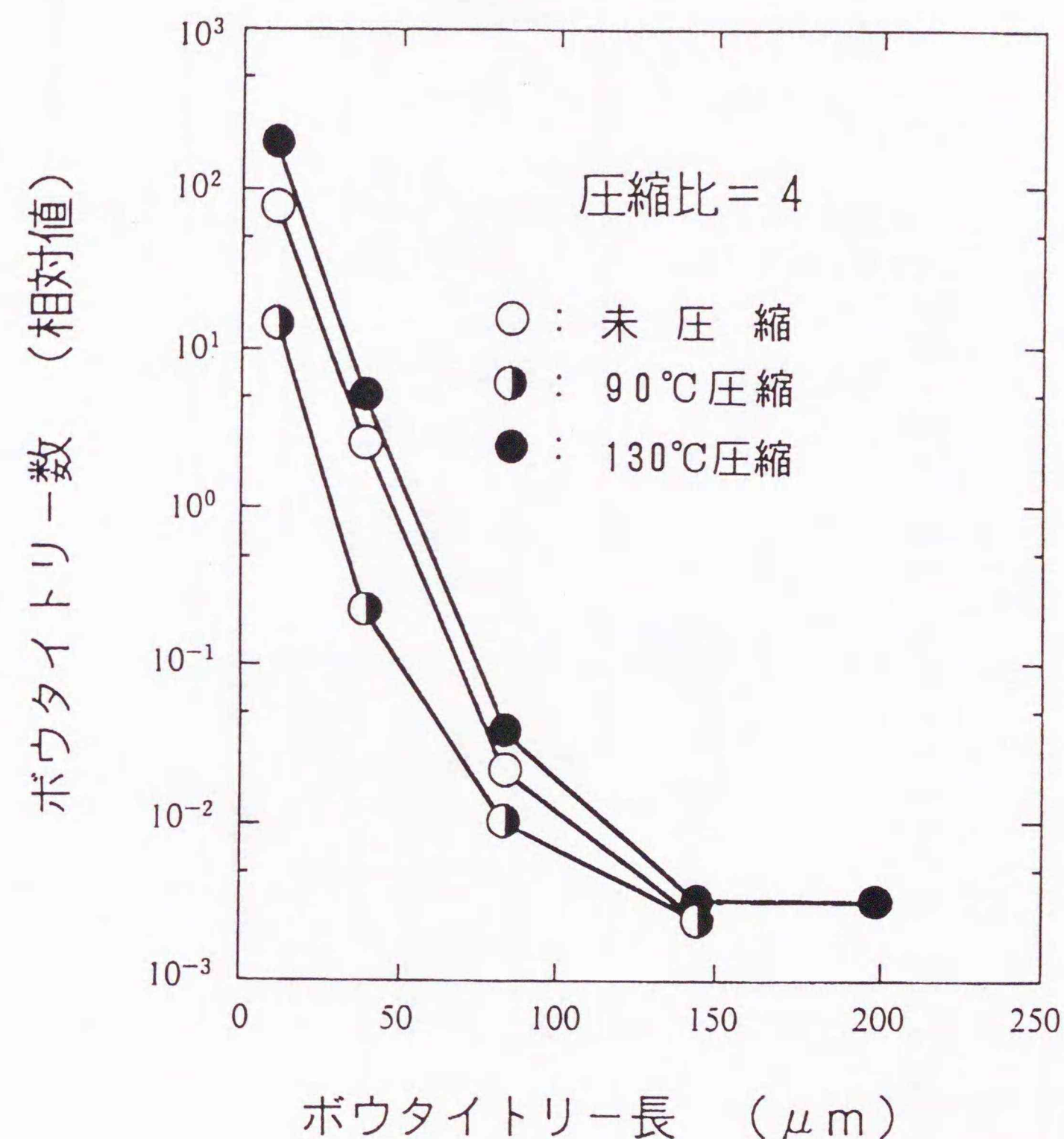
PEの結晶分子鎖配向の測定には種々の方法があるが⁽¹²⁾、ここでは広角X線回折法により結晶軸の配向解析を行った⁽¹³⁾。また、透過電子顕微鏡（TEM）観察により、ラメラの配向とBTの進展性の関係についても調べた。

4.4.2 水トリ特性試験結果

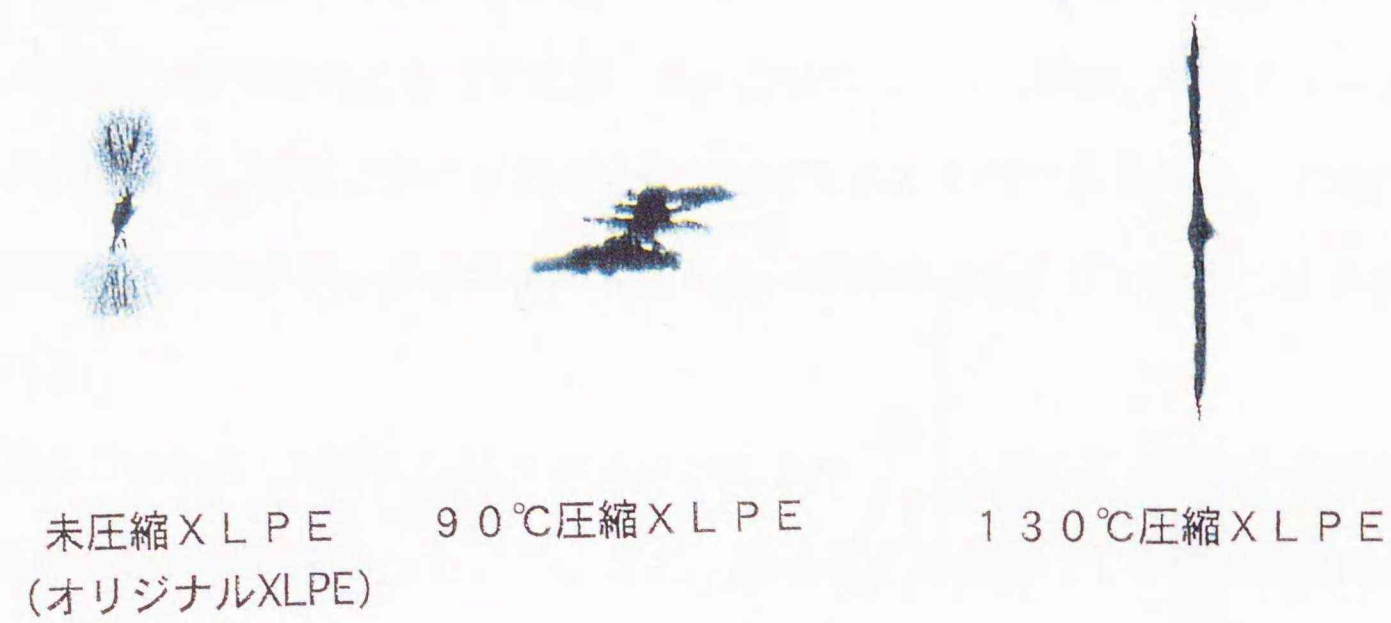
試料（a）（圧縮シート）のBT試験結果の例を第4.9図に示す。同図から明らかのように、オリジナルXLPE（無変形XLPE）に比べ融点以下の90℃で圧縮した試料ではBT発生は減少しており、融点以上の130℃圧縮試料では増加している。さらに、第4.10図に示すように、90℃圧縮試料のBTの形状はオリジナルXLPEと比較し電界方向に圧縮され、つぶされた形状であり、130℃圧縮試料では電界方向に針状の細長い形状をしている。同様の評価により、試料（b）（110℃引張チューブ）ではオリジナルXLPEよりBTはやや増加しており、その形状は引張方向断面からの観察では通常形状（オリジナルXLPEと同形状）であるが、引張方向側面からの観察では細長い針状であり、立体的には薄い扇状の形をしている。試料（c）

（110℃引張チューブ）についてもBTは増加しており、形状は試料（b）の場合に似ており、断面方向からは通常形状、長手方向からは針状の扇形となっている。第4.11図にこのような異方性BTの例を示す。試料（d）（150℃拡張チューブ）ではBTはオリジナルXLPEと比較して最も増加しており、その形状は断面方向からも長手方向からも細長い針状形状となっている。

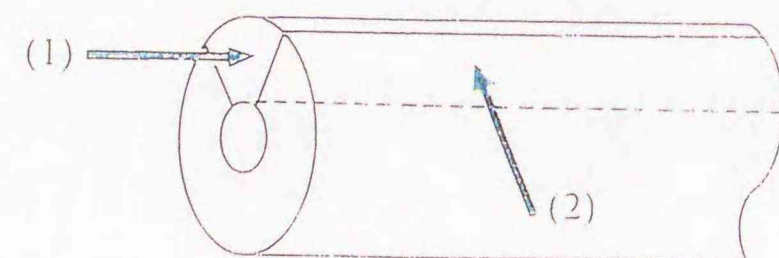
以上のそれぞれの変形XLPEについて、オリジナルXLPEと比較したBTの発生の難易と形状の特徴をまとめると第4.12図となる。この結果はXLPEの変形に



第4.9図 XLPE圧縮シートのBT



第4.10図 XLPE圧縮シートのBTT形状



第4.11図 XLPE引っ張りチューブの異方性BTT

項目	オリジナル (無変形)	圧縮シート		引張シート	引張チューブ	
		90℃	130℃		110℃	150℃
BTT 形状						
BTT 発生難易	2	1	5	3	4	6

BTT発生難易：1<2<3<4<5<6
 難← →易

第4.12図 変形XLPEのBTT形状と発生難易

よる配向歪（結晶配向）がBTTの進展性に影響を与えることを示唆しており、次項（4.4.3項）でこの関係を詳細に調べる。

4.4.3 結晶配向と水トリ－進展性の関係

ポリエチレンの結晶構造は架橋、非架橋を問わず第4.13図のような構造をしており、結晶（ラメラ）軸は分子鎖方向がc軸、ラメラ成長方向がb軸、b軸とc軸に直交する軸がa軸となる⁽¹⁴⁾。X線広角回折により、この結晶軸の方向を第4.2表の各々の変形XLPEについて調べた結果は次の通りである。

・試料（a）：90℃圧縮シート

圧縮方向にa軸が配向しており、b軸、c軸は圧縮面内に等方的に存在している。

この場合、a軸は電界方向であり、b軸、c軸は電界に垂直である。

・試料（a）：130℃圧縮シート

圧縮方向にb軸が配向しており、a軸、c軸は圧縮面内に等方的に存在している。

この場合、電界方向はb軸と一致する。

・試料（b）：130℃引張シート

a軸が引張方向に配向しており、b軸、c軸はa軸に垂直な面内に等方的に存在している。

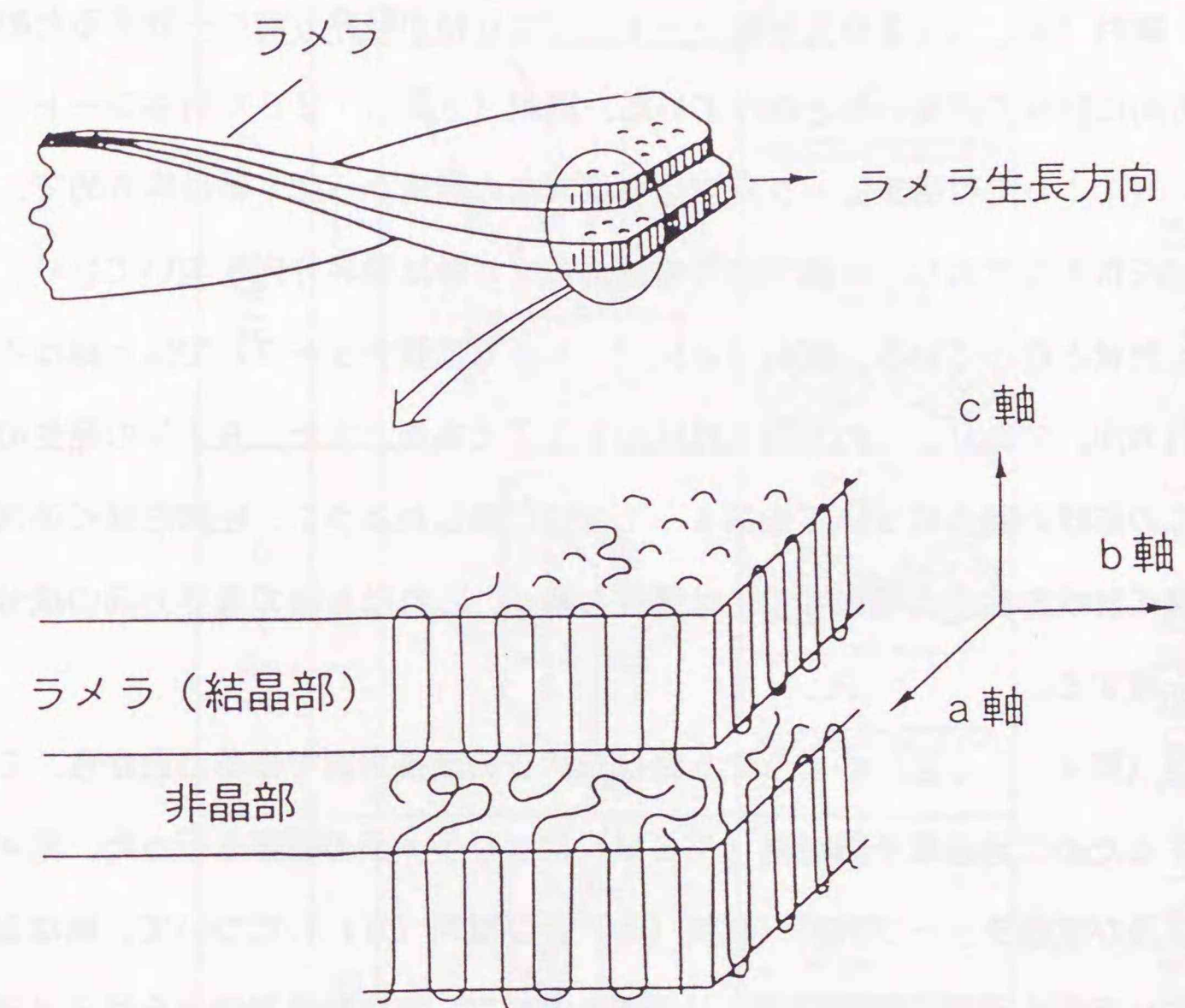
・試料（c）：110℃引張チューブ

b軸がチューブ横断面内に40°の揺らぎをもって等方的に存在している。a軸はb軸に直交しチューブ断面から55°の位置に沿っており、c軸はa軸及びb軸に直角の方向である。

・試料（d）：150℃拡張チューブ

b軸はチューブの半径方向に配向しており、a軸及びc軸はb軸の回りに等方的に存在している。この場合、b軸は電界方向に一致する。

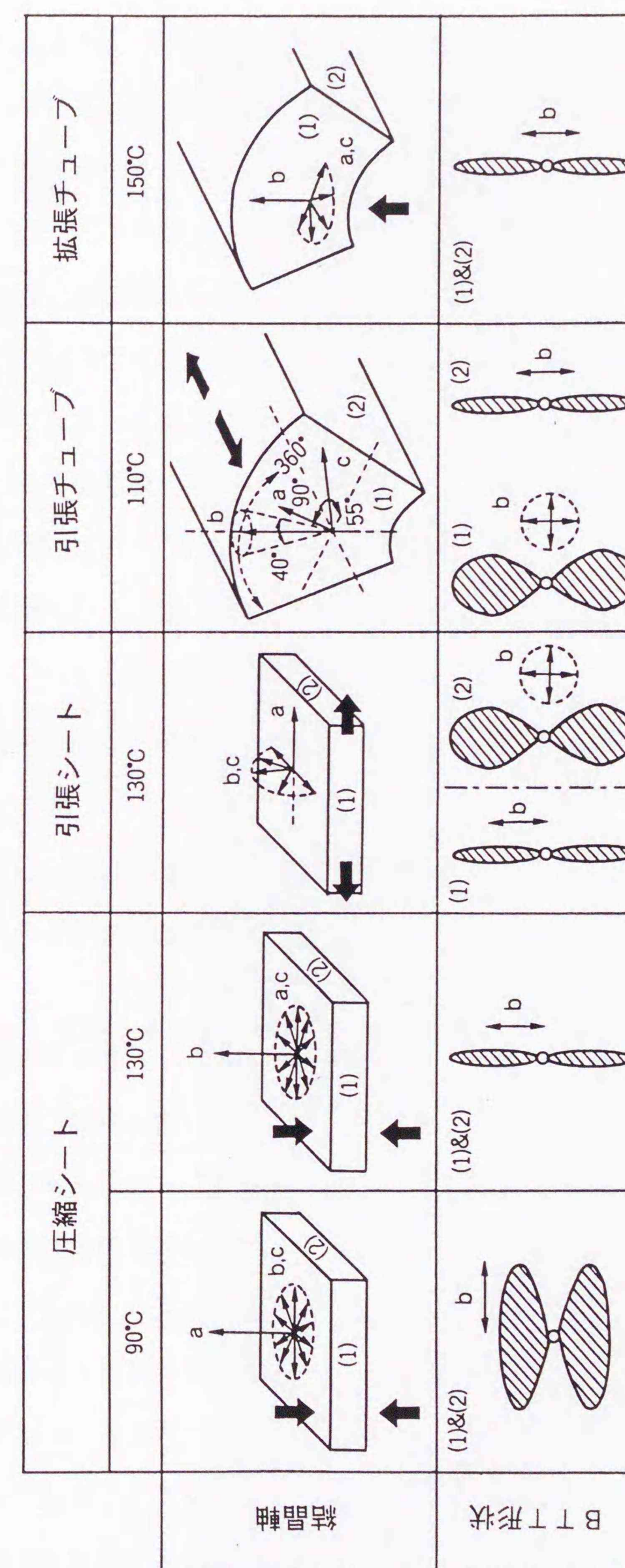
なお、融点以上の温度で延伸歪を与えた状態から結晶化させたXLPEでは、a軸は延伸方向に配向し、b軸は延伸方向に垂直に配向することが知られており⁽¹⁵⁾、上記の融点以上で変形を与えた試料についてはこの報告とも一致した結果となっている。



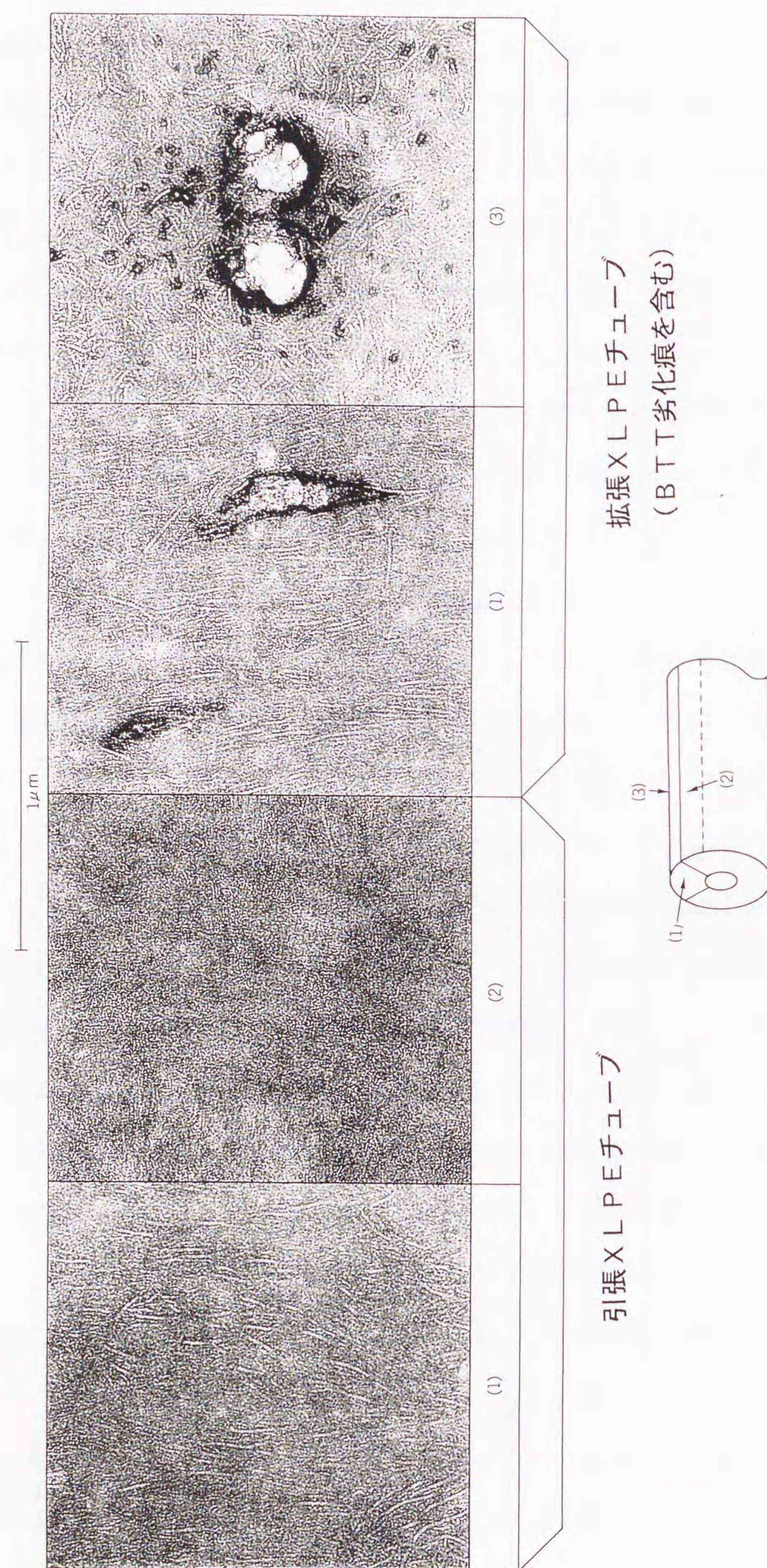
第4.13図 ポリエチレンの結晶構造と結晶軸

以上の各試料の結晶軸の配向とBTTの形状をまとめ、対比して示すと第4.14図となる。同図から、共通する事象としてはBTTはb軸方向に伸び易い傾向であることが分かる。すなわち、試料(a)(90℃圧縮シート)ではb軸はシート面内であり、BTTの形状は面内方向に広がる結果、電界方向には圧縮されて潰された形状となり、一方、試料(a)(130℃圧縮シート)ではb軸が電界方向に一致するためBTTは電界方向に針状の細長い形となっている。試料(b)(130℃引張シート)及び試料(c)(110℃引張チューブ)では引張方向の断面からはb軸は等方的で、BTTは通常の形状をしており、引張方向の側面からはb軸は電界方向を向いており、BTTの形状は針状となっている。試料(d)(150℃拡張チューブ)ではb軸は半径方向(電界方向)であり、この方向に針状のBTTである。また、BTTの発生の難易とBTTの形状の関係についても第4.12図に示したように、圧縮形状<通常形状<扇形状<針形状の順にBTTは発生し易く、これはb軸の電界方向の成分の大きさとも一致する。

前述(第4.13図)のようにb軸はラメラの成長方向であることから、このことを確認するために透過電子顕微鏡(TEM)によりラメラの観察を行った。第4.15図に引張及び拡張チューブ試料(試料(c)及び試料(d))について、異なる方向からのTEM写真を示す。試料(c)(引張チューブ)では断面方向からはラメラは無秩序であるが、長手方向からはラメラは半径方向に配向している。一方、試料(d)(拡張チューブ)では断面方向及び長手方向からの観察ではラメラは半径方向に配列しており、表面方向からの観察では無秩序である。これらの観察結果はX線回折から得られたb軸の向きと一致している。なお、第4.15図の拡張チューブ試料ではBTT劣化痕を含んだ箇所を観察しているが、ラメラの配向方向には細長い形状の劣化痕となっており、この方向にBTTが進展し易いことを示唆している。また、空孔状の大きい劣化痕の周辺にはラメラの厚さ(～100Å)と同オーダーの数百Åの黒色斑点が多数認められる。この斑点が水トリー発生初期段階の劣化痕とすると、その大きさ(数百Å)から推定されるように、水トリーの発生は結晶域及び非晶域サイズレベルのミクロな領域が絡む現



第4.14図 変形X L P Eの結晶軸とBTT形状の関係



第4.15図 引張及び拡張XLPEチューブの透過電子顕微鏡写真

象であることになる。斑点が黒く見えるのは、TEM観察の際の染色液（ルテニウム酸）で染色されているためである。染色液は極性部を染色し易いから染色部は化学的変質を受け極性化していると考えられ、水トリー劣化には酸化現象を伴うとする報告⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽¹⁶⁾とも一致する。

以上のBTTの進展性と結晶軸配向及びTEM観察の結果を総合的に考慮すると、BTTはラメラの向きに沿って進展し易いことになる。ラメラとラメラの間には非晶域が存在し、第4.2節で言及した水トリーの進展機構との関係でも絶縁体中への水のメカニカルな噴出や電気化学的な酸化現象に対して、結晶域より非晶域が弱点になると考えられることから、実際にはラメラ間の非晶域パスに沿って水トリーは進展し易いと推定される。この関係を第4.16図に示す。

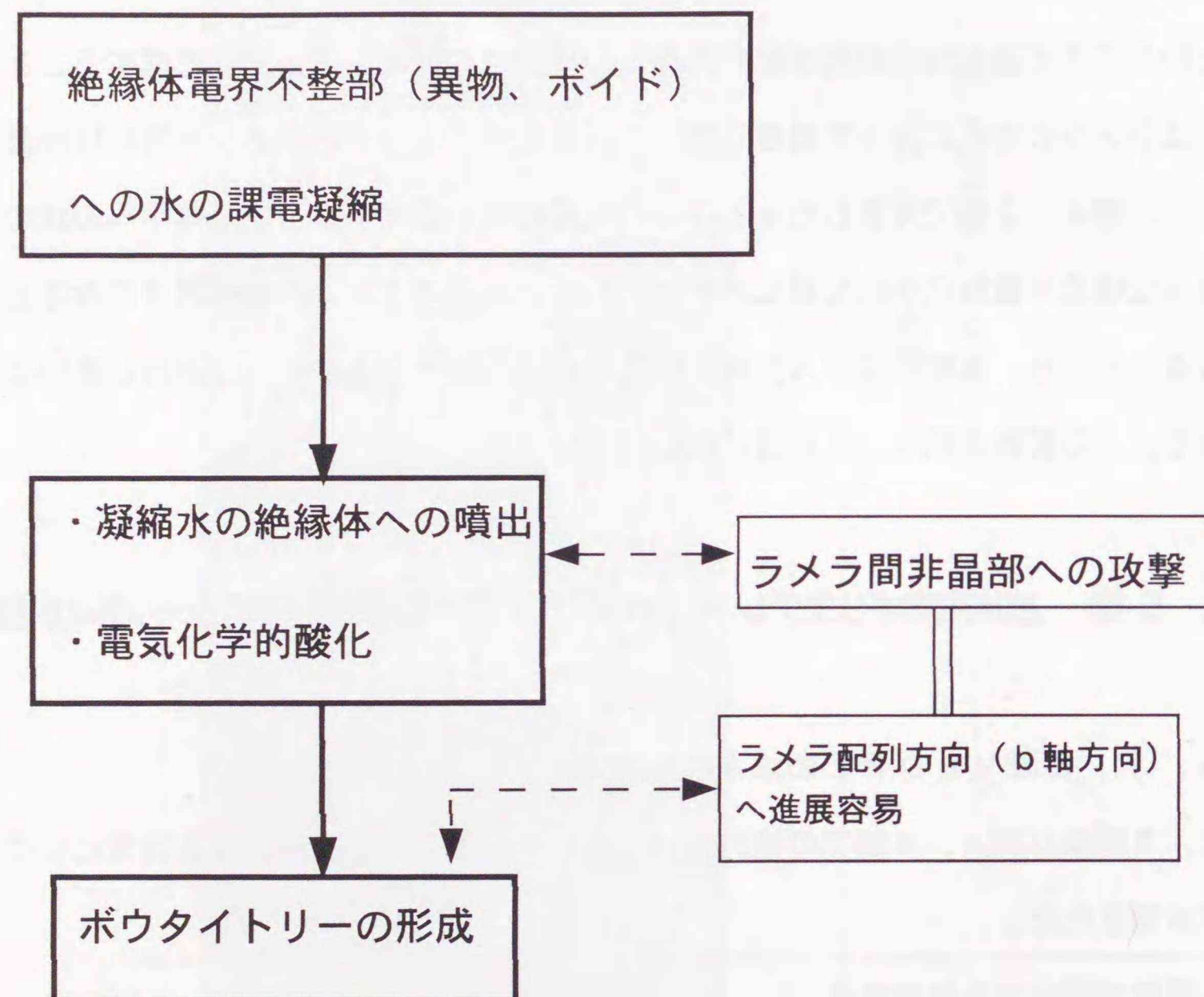
第4.5節 超低密度ポリエチレン (VLDPE) による水トリー抑止ケーブルの特性

4.5.1 各種VLDPEの水トリー特性

第4.3節及び第4.4節での検討から、XLPEのBTTを抑止する方法として下記が示唆された。

- ①ある程度の親水性を付与する。
- ②結晶部と非晶部の割合（結晶化度）とその配列をコントロールする。

この中で②の結晶配列（配向）のコントロールは現用のXLPEケーブル製造機でのケーブル製造を考慮すると工業的に現実的でない。結晶化度については第4.7図に見られたように、現用XLPEのベースPEであるLDPEより高結晶性又は低結晶性とするによりBTTは抑制されるが、ケーブル絶縁体の機械特性、可とう性を考慮すると低結晶性の方が好ましい。従来のPEよりさらに結晶化度を下げた最近の新しいグレードのPEとして超低密度ポリエチレン (VLDPE: Very Low Density Polyethylene) があげられる。VLDPEはチーグラ触媒を用いて中低圧法により重合される直鎖状ポ



第4.16図 XLPEの結晶配向とBTTの関係

リエチレンであり、重合時に少量の α -オレフィンとエチレンを共重合させることにより結晶化度を下げ、通常のLDPEの密度が $0.91 \sim 0.93 \text{ g/cm}^3$ であるのに対しVLDPEは $0.89 \sim 0.91 \text{ g/cm}^3$ であるため超低密度ポリエチレンと呼ばれる。VLDPEは α -オレフィンの種類、量、重合法等の選択により特性の異なる種々のものが得られ、また、高压法で得られるLDPEと異なり中低压法により触媒重合されるために添加剤として通常の耐熱安定剤のほかに、触媒中の塩素を中和する塩酸吸収剤が含まれる。この塩酸吸収剤は水酸基等を含む比較的親水性を有するものも在り、親水性の付与によるBTTの抑制効果も期待できる。以上のことから、各種VLDPEについてそのBTT特性を、先ず、シート試料により評価した。

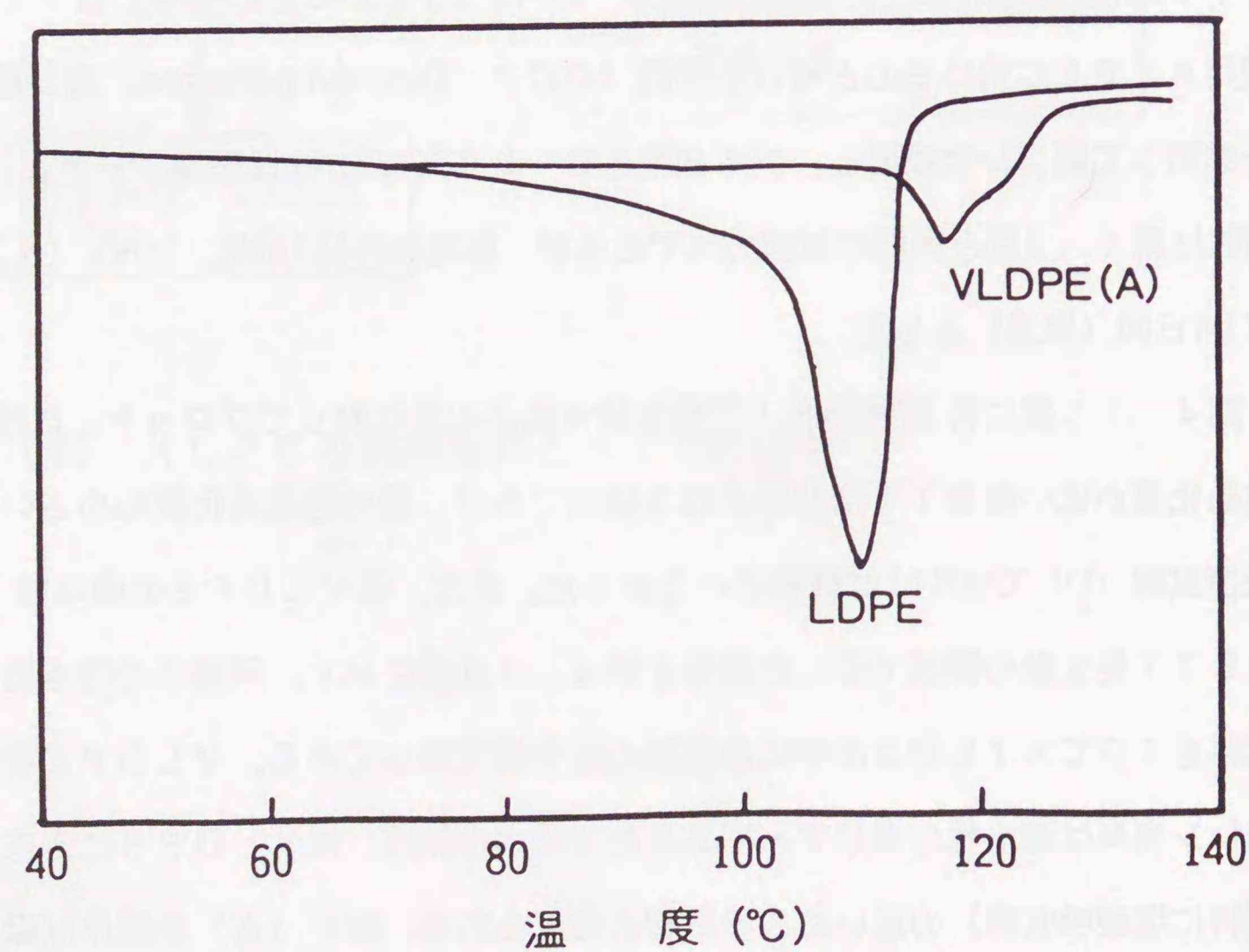
VLDPE供試試料を第4.3表に示す。密度（ $\propto$ 結晶化度）、重合方法の異なる種々のものとし、MFR（メルトフローレート）はケーブルへの押し出し加工性を考慮して $MFR = 1 \sim 4 \text{ g/10分}$ の範囲で選択した。第4.17図にVLDPEとLDPEのDCS（示差走査熱量計）チャートの一例を示す。VLDPEはLDPEより結晶融点やや高く、結晶化度（ $\propto$ 結晶融解熱）はかなり小さいことが判る。各VLDPEには現用XLPEに用いるのと同じ架橋剤（DCP：Dicumyl peroxide）及び酸化防止剤を添加して熱プレス成形し、ゲル分率 $80 \sim 90\%$ の3mm厚架橋シートとした。BTT試験は第4.3図と同様の試験方法であるが、課電条件は 1kHz 、 10kV （ 3.3kV/mm ） $\times 14$ 日間（室温）とした。

第4.18図に各試料のBTT発生数を結晶化度に対してプロットした結果を示す。結晶化度が低い程BTTは抑制される傾向であり、最も結晶角化度の小さい試料（A）及び試料（D）ではBTTは観察されなかった。また、各VLDPEの吸水性（親水性）とBTT発生数の関係で示した結果を第4.19図に示す。同図中の吸水性は3mm厚試料を $70^\circ\text{C} \times 7$ 日間温水中に浸漬後の水分量で示してある。VLDPEを含めポリエチレン自身は疎水性のポリマーであるため吸水性の違いはVLDPEに含まれる添加剤（特に塩酸吸収剤）の違いによる影響と考えられる。試料（A）を除けば吸水性が大きい程BTTは抑制される傾向を示し、吸水性の最も大きい試料（D）が最も抑制されて

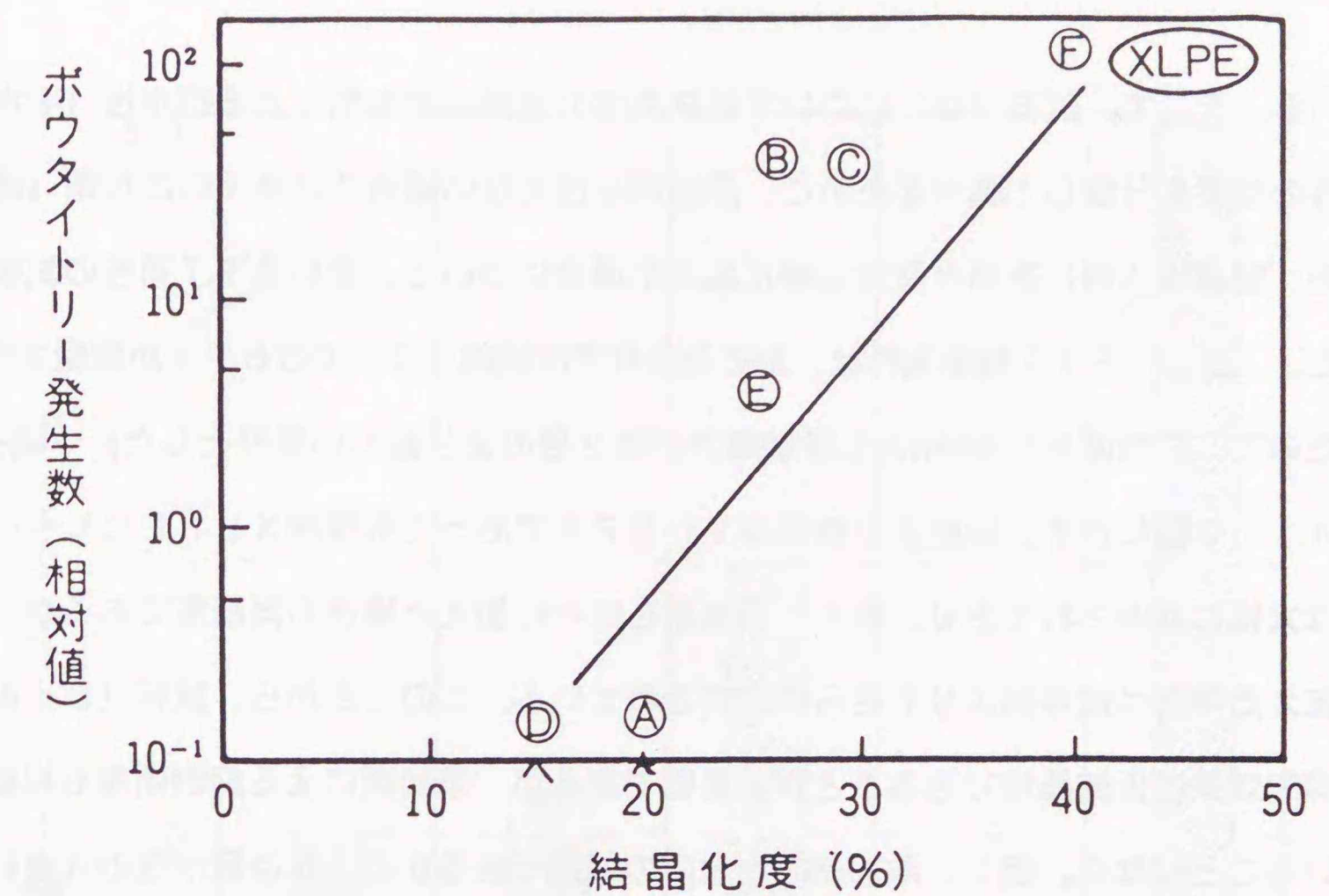
第4.3表 VLDPE 供試試料

試料	密度 (g/cm ³)	MFR (g/10分)	DSC法 結晶化度 (%)	重合方法
A	0.890	1	20	低圧気相重合
B	0.900	1	25	低圧気相重合
C	0.906	1	29	低圧気相重合
D	0.890	1	15	中圧気相重合
E	0.900	1	27	中圧気相重合
F	0.910	4	40	溶液重合
LDPE	0.920	3	45	高圧重合

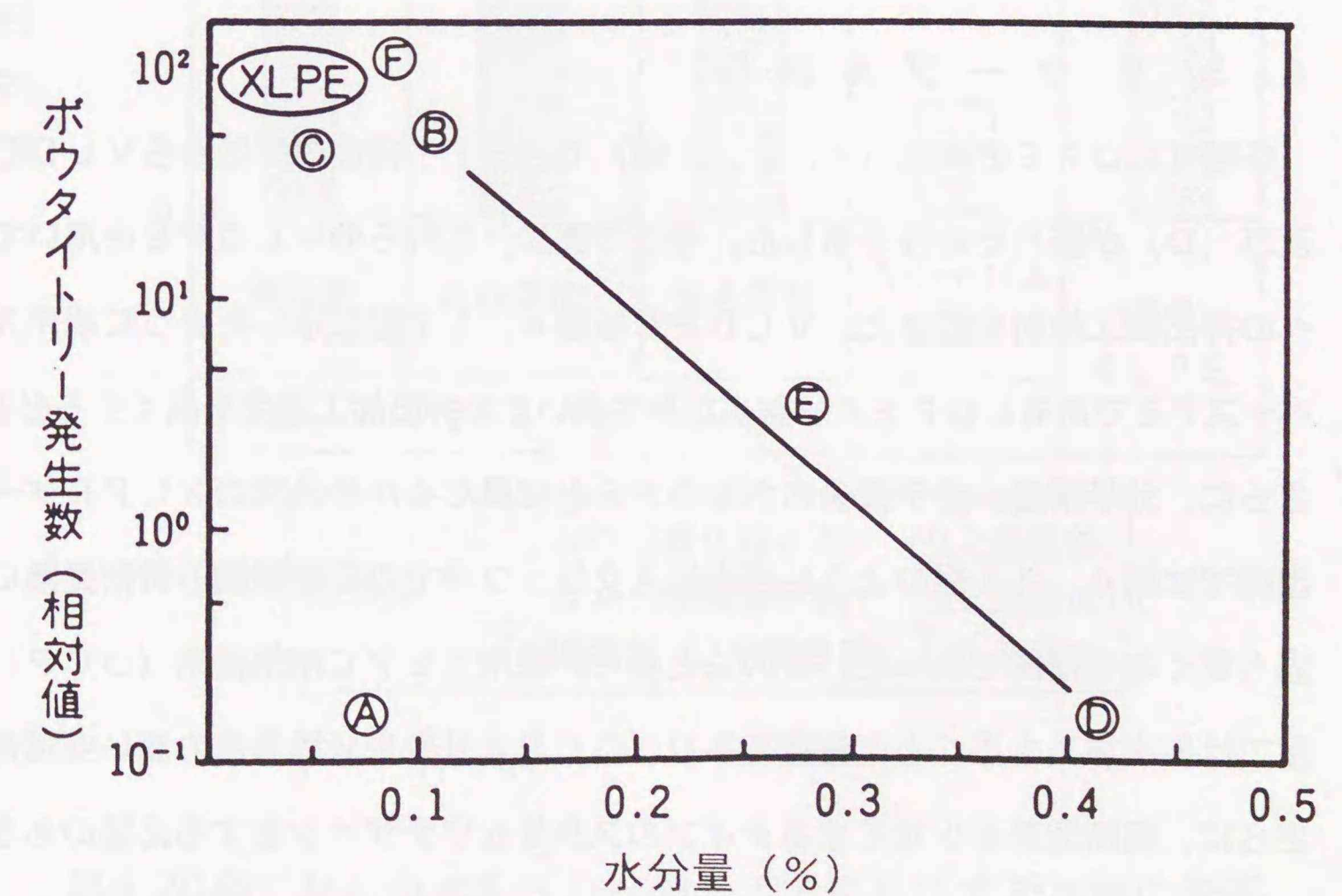
LDPEは比較用試料である。



第4.17図 VLDPEとLDPEのDSCチャート例



第4.18図 VLDPEの結晶化度とBTT

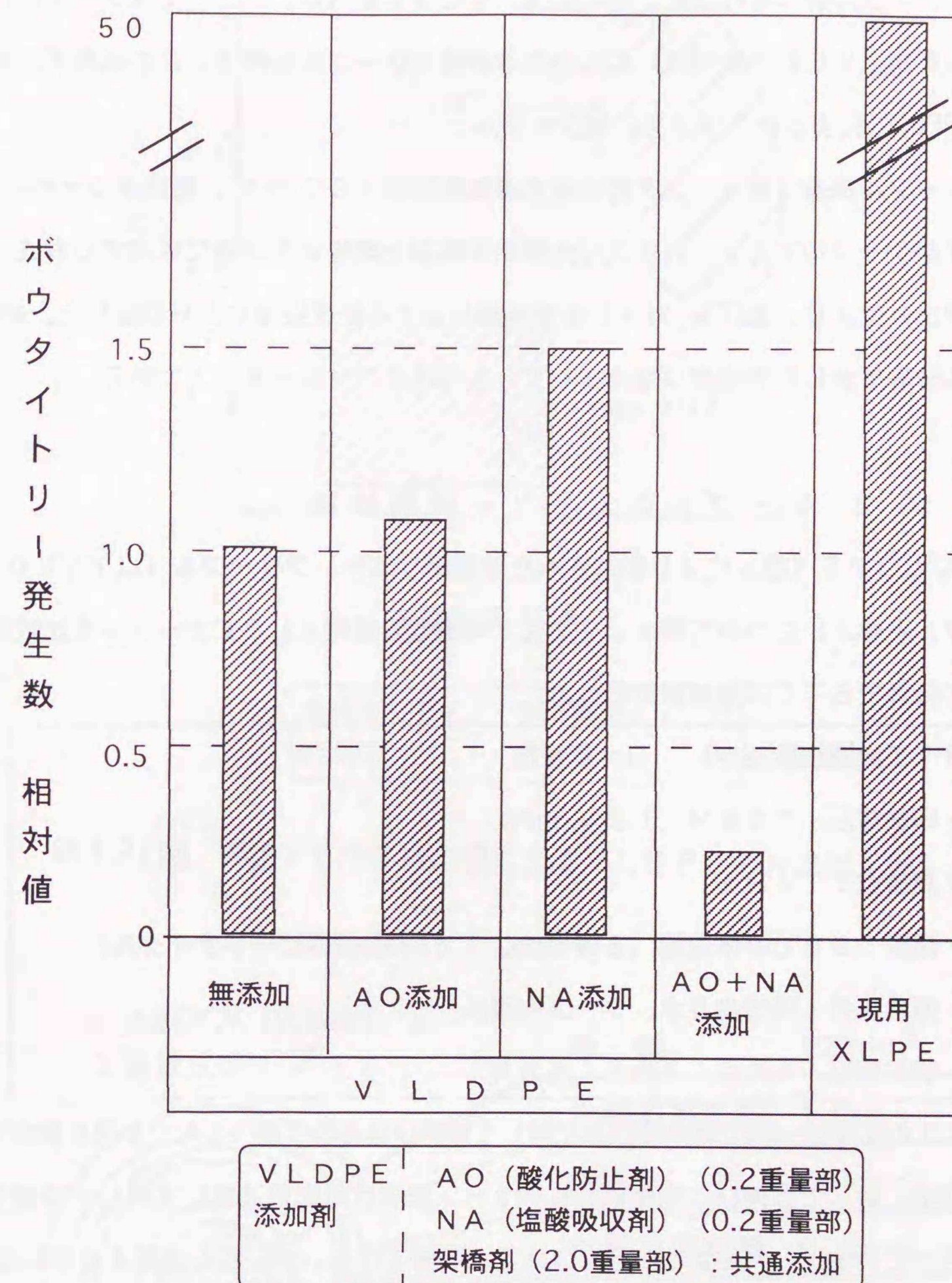


第4.19図 VLDPEの吸水量とBTT

いる。そこで、試料（D）について低結晶性の効果と添加剤による親水性（吸水性）付与の効果を分離して調べるために、添加剤を加えない場合及び各々の添加剤（酸化防止剤、塩酸吸収剤）を別々又は同時に加えた場合について、そのBTT特性の試験を行った。（但し、BTT試験条件は、前述の条件では試料（D）でのBTTが観察されなかったもので、試料厚を1.4mmとし印加電界が約2倍のより厳しい条件とした）結果を第4.20図に示す。同図より無添加VLDPEであっても現用XLPEにくらべBTTは大幅に抑制されており、各々の添加剤を別々に加えた場合も同程度であるが、同時に加えた場合は無添加よりもさらに抑制されている。このことから、試料（D）のBTT抑制効果は低結晶性であることが主要因であるが、添加剤による抑制効果も相乗されていることになる。但し、添加剤の親水度の効果であるかどうかは親水性の大きい塩酸吸収剤のみを添加した場合が必ずしも無添加に比べBTTが抑制されていないことから、現在のところ明確ではない。

4.5.2 ケーブル試作

各種VLDPEの前項（4.5.1項）でのBTT特性の評価からVLDPE（A）及び（D）が優れた特性を示した。そこで次に、これらのVLDPEを用いてケーブルへの押出加工検討を行った。VLDPEは第4.17図に示したように現用XLPEのベースPEであるLDPEより融点がやや高いため押出加工温度を高くする必要があり、さらに、分子構造、分子量分布がLDPEとは異なるため通常のXLPEケーブル用押出機では第4.21図のように押出機スクリュウ中での溶融樹脂の剪断発熱により樹脂温も高くなる傾向であった。このことから、現用XLPE用架橋剤（DCP）の分解温度では押出加工することは困難であり、DCPよりやや分解温度の高い架橋剤を用い、さらに、剪断発熱を少なくするタイプのスクリュウデザインとする必要のあることが分かった。実験的にはこれらの対策により押出加工可能であることが確認されたが、評価用のケーブルを製造するには現時点では設備面で、現用XLPE製造機に頼らざるをえないため、架橋剤変更VLDPEにより現用製造機の押出条件をコントロールできる範



第4.20図 VLDPE（D）のBTTに及ぼす添加剤の影響

図でケーブル試作を行った。その結果、VLDPE (D) についてはケーブル製造に成功したが、VLDPE (A) については評価用ケーブルを得ることが出来ず、従って、VLDPE(D)によるケーブルを供試ケーブルとした。

ケーブル構造は第4.22図に示す導体断面積 100mm^2 、絶縁厚 3mm の 6.6kV 級ケーブルであり、内部及び外部半導電層と絶縁体を同時に押出する方式（三層同時押出）により、加圧 N_2 ガスを架橋熱媒体とする乾式架橋により製造した。絶縁体のゲル分率で表した架橋度は現用XLPEと同程度の $80\sim 85\%$ である。

4.5.3 ケーブルの水トリ－評価試験

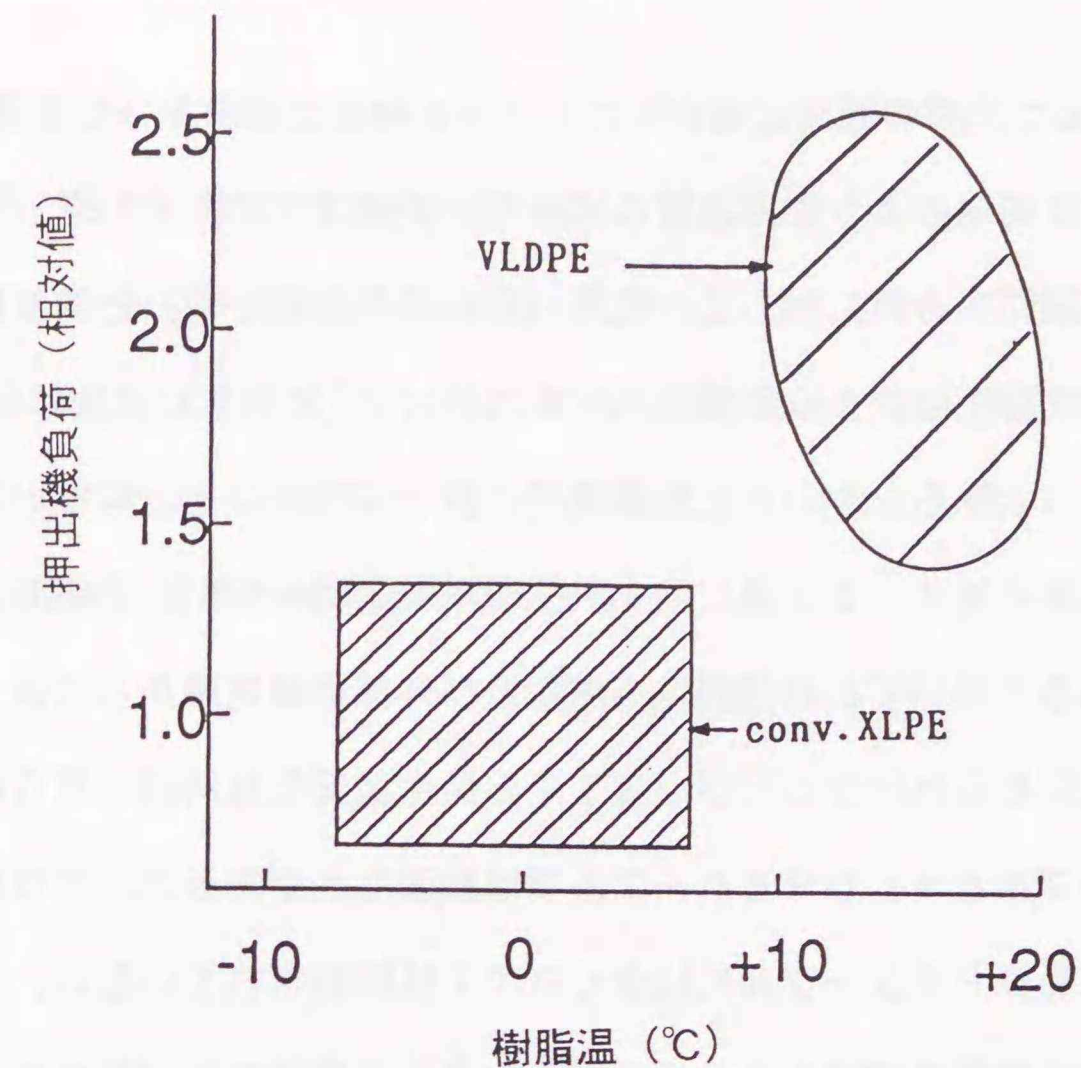
VLDPE (D) により製造された架橋ポリエチレンケーブル（以下VLDPEケーブルと呼ぶ）について第4.22図と同構造の現用XLPEケーブルを比較用として次の条件でBTT加速試験を行った。

（BTT加速試験条件）

- ・印加電圧： 10kV (3.3kV/mm)
- ・周波数： 1kHz
- ・温度： 90°C 導体通電（8時間on、16時間offのヒートサイクル）
- ・浸水条件：導体内浸水、シース内浸水
- ・試験期間：1カ月、3カ月、6カ月

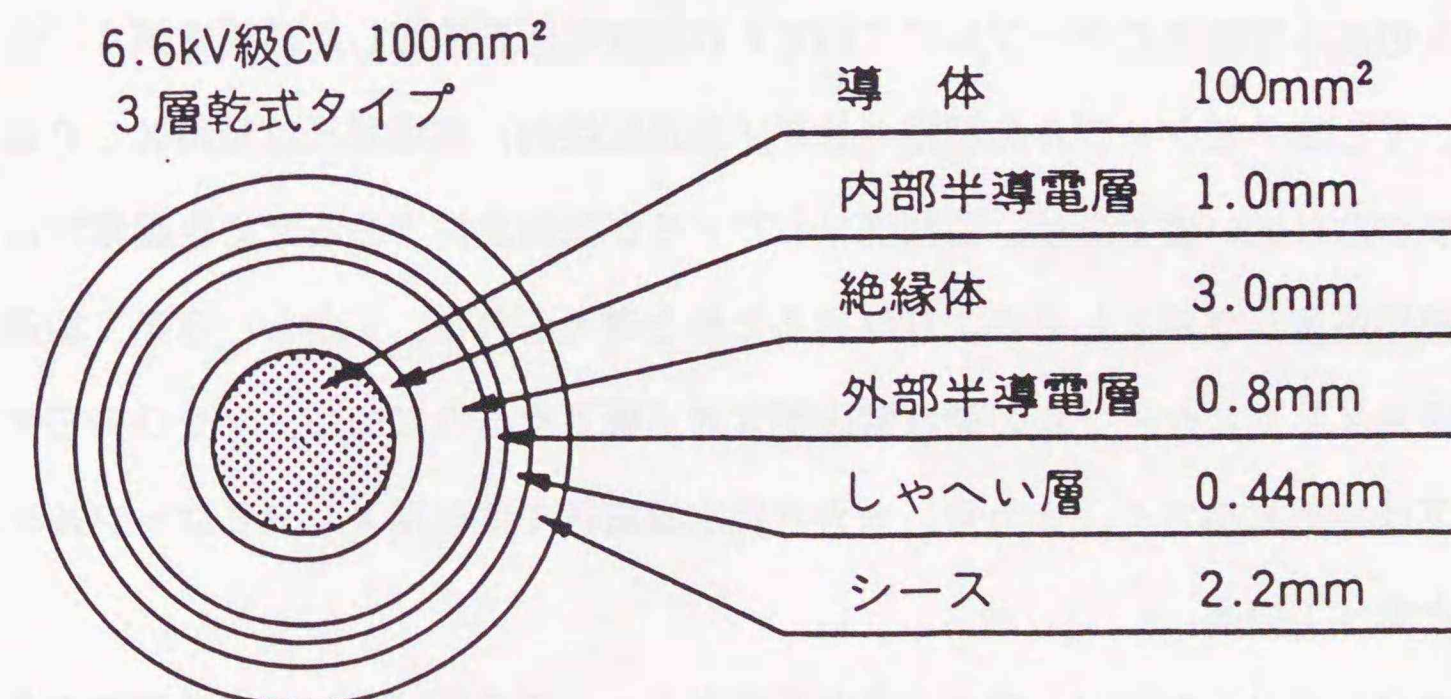
BTTの進展は一般に電界の増加に対しては伸びはあまり変化しないが発生数が増加し、周波数に対しては伸び、発生数共に数 kHz まではほぼ周波数に比例した加速性があるとされている⁽⁴⁾。温度の影響については明確ではないが、均一加熱より導体側とシース側の間に温度勾配の出来る導体通電で且つヒートサイクルの在る条件が水トリ－加速には最も厳しい条件であり⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽¹⁷⁾、浸水条件についても絶縁層を介して内部（導体内）及び外部（シース内）に水の存在する過酷な条件としている。通常の配電クラスCVケーブルでは商用周波数（ $50\sim 60\text{Hz}$ ）下で運転電界 $1\sim 2\text{kV/mm}$ 程度である。

BTT劣化に対する電圧加速性として $V^n \cdot t = \text{const.}$ （ V ：電圧、 t ：時間）で示され



現用XLPEの条件
・押出負荷 = 1.0
・樹脂温 = 0

第4.21図 現用XLPE押出機によるVLDPEの押出加工性



第4.22図 供試ケーブル構造

る劣化指数 n として条件の過酷な場合で $n = 3 \sim 4$ の値が報告されており^{(2) (3) (18)}、周波数に対しては前述のように周波数の比率だけの加速性がある。従って、本加速試験条件は最大試験期間 6 カ月に対して、電界（運転電界の約 2 倍）と周波数（商用周波数の約 20 倍）で計算上は約 80 年相当（ $= 6 \text{ カ月} \times 2^3 \times 20$ ）となり、温度、浸水条件も過酷であることから、少なくとも実使用の数十年相当以上と等価と考えられる。

BTT 試験結果を第 4. 23 図に示す。平滑半導電層を用い、三層同時押出による製造ケーブルであるためいずれの試料にも内部及び外部半導電層からの水トリー（内外導トリー）は一切認められなかったが、BTT の発生状況には同図に見られるように、現用 XLP E ケーブルと VLDPE ケーブルでは顕著な差があった。すなわち、1 カ月浸水課電後では VLDPE ケーブルには全く BTT は観察されていない。VLDPE ケーブルの 3 カ月浸水課電後では $100 \mu\text{m}$ 以下の BTT が僅かに観察されているが BTT 発生数は現用 XLP E ケーブルの $1/10^4$ 以下と極めて少なく、6 カ月課電後でも BTT 最大長は現用 XLP E ケーブルの $600 \mu\text{m}$ に対して、VLDPE ケーブルでは $250 \mu\text{m}$ であり、発生数はやはり現用 XLP E ケーブルの $1/10^4$ 以下の極めて小さい値を維持している。

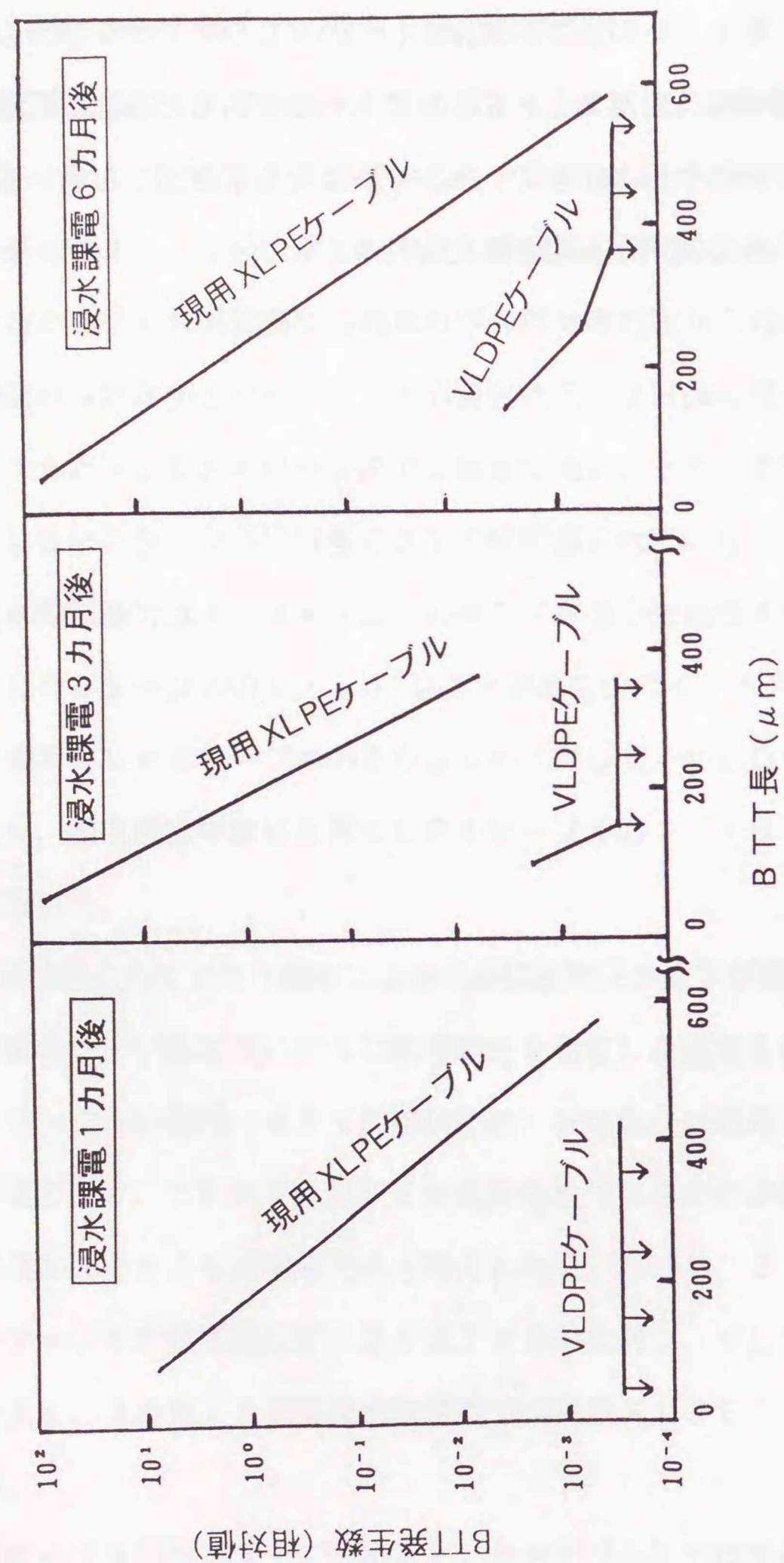
ケーブルの実用特性として BTT 発生による絶縁破壊電圧の低下が重要視されるので、各々の浸水課電後のケーブルについて AC 破壊電圧を測定した結果を第 4. 24 図に示す。VLDPE ケーブルの初期（BTT 加速試験前）破壊電圧は現用 XLP E ケーブルよりかなり低い値であり、これは VLDPE が低結晶性であるため絶縁素材としての固有破壊強度が現用 XLP E より劣るためと考えられる。しかし、BTT 加速試験後では現用 XLP E ケーブルの破壊電圧が大きく低下するのに対し、VLDPE ケーブルの低下は極めて小さく、3 カ月、6 カ月浸水課電後では現用 XLP E ケーブルを上回る結果となっている。

本 VLDPE ケーブルのベース PE である VLDPE (D) では前述のように比較的吸水性が大きいことから、浸水課電後の誘電特性に及ぼす影響についても調査した。

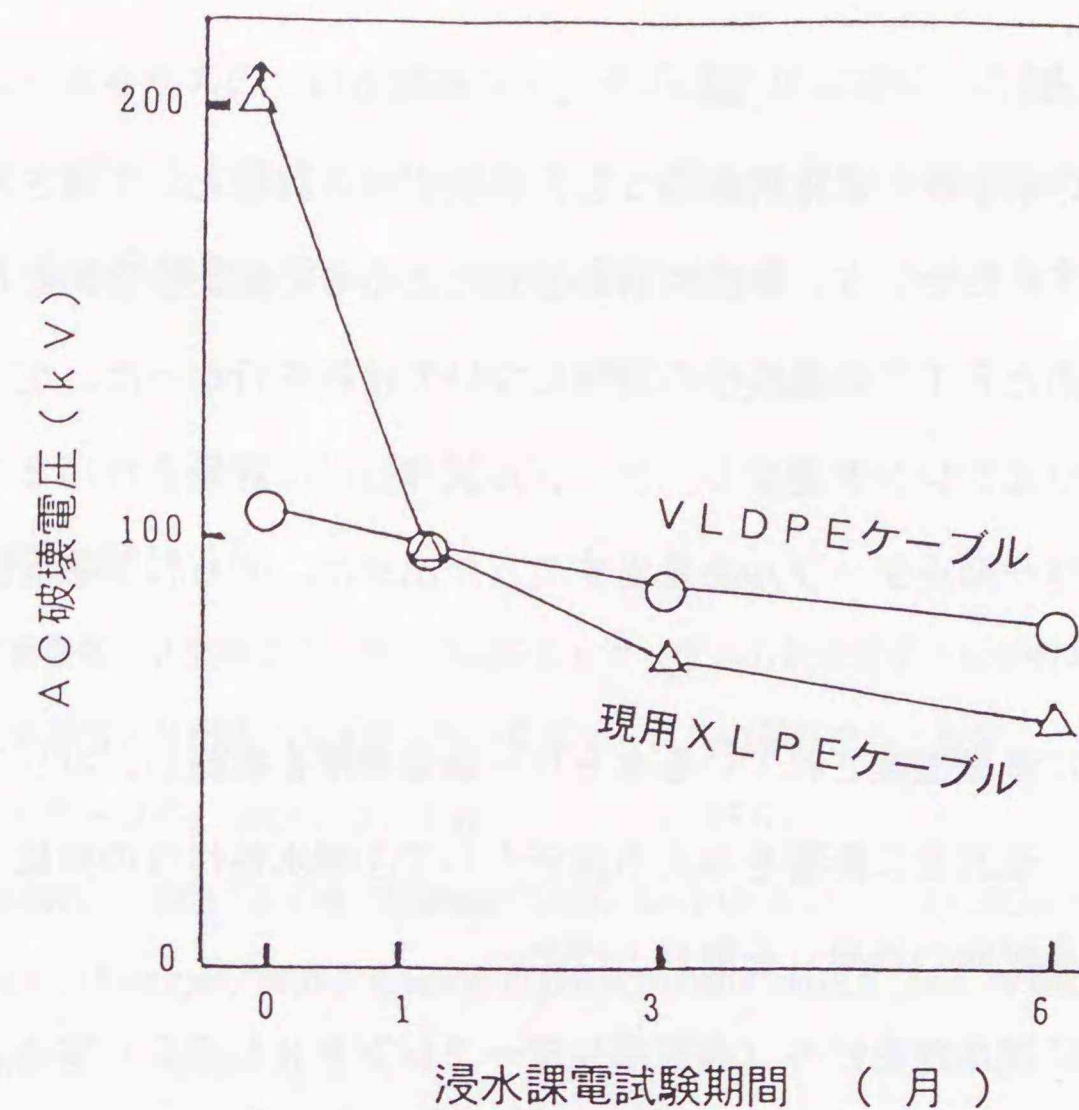
第 4. 4 表に誘電正接 ($\tan \delta$) 及び絶縁体吸水量の測定結果を示す。VLDPE ケー

ブルの浸水課電後の吸水量は現用 XLP E ケーブルより大きい値であるが $\tan \delta$ に与える影響は殆ど認められないことが分かる。

以上のように、水トリー抑止ケーブルとしての VLDPE ケーブルの適用分野は、絶縁素材の固有破壊強度は現用 XLP E より劣るものであるため、運転電界は比較的低いが浸水下で使用されるケースが多く、水トリー劣化も引き起こし易い 6. 6 ~ 33 kV 級の配電ケーブルへの適用が有望と考えられる。



第4.23図 VLDPEケーブルのBTT試験結果



第4.24図 浸水課電ケーブルのAC破壊電圧

第4.4表 浸水課電ケーブルの $\tan \delta$ 及び吸水量

ケーブル種		VLDPEケーブル				現用XLPEケーブル			
試験期間(月)		初期	1	3	6	初期	1	3	6
$\tan \delta$ (%)	25°C	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	60°C	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02
	90°C	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.03
吸水量(%)		0.04	0.26	0.28	0.35	0.00	0.02	0.06	0.07

第4.6節 結 論

C Vケーブルの水トリー劣化現象のうち、解決すべき課題として残されているポータイトリー(B T T)について、絶縁材料の改質によるその抑止を目的として、先ず、絶縁材料の物性要因とB T Tの進展性の関係について検討を行なった。次に、この知見を基にして新種ポリエチレンを選定し、ケーブル試作並びに評価を行いB T Tの抑制に極めて有効な水トリー抑止ケーブルを見出すことが出来た。得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) これまでに多数提案されている水トリー進展機構を概観し、ポリマー物性との関係で水トリー進展性に影響を与える因子として①親水性付与の効果 ②結晶化度の効果 ③結晶配向の効果 を取り上げた。
- (2) X L P Eに親水性を付与(極性ポリマーブレンドX L P E)することによりB T Tは抑制される傾向を示し、電界不整部への水の課電凝縮を抑える効果があると推定された。また、結晶化度の影響として現用X L P E(及びそのベースであるLDPE)より結晶化度は小さくても、大きくてもB T Tは抑制される傾向となる。
- (3) 極度の変形を与え結晶配向させたX L P EのB T T特性の結果からB T Tは結晶ラメラ間の非晶部に沿って進展し易いことが分かった。このことから、(2)で述べたX L P E(又はL D P E)程度の結晶化度で最もB T Tが進展し易いのはB T Tの進展過程である非晶域への選択的な水の注入や電気化学的酸化現象によるミクロチャンネルの形成に対して、最も攻撃を受け易い非晶域サイズを有するためと考えられた。
- (4) 上述の知見に基づき、水トリー抑止ケーブル用絶縁材料として低結晶性で、ある程度の親水性添加剤を含む超低密度ポリエチレン(V L D P E)を選択し、ケーブル製造及びその評価を行った。ケーブルの浸水課電試験の結果、V L D P EケーブルのB T T発生数は現用X L P Eケーブルの $1/10^4$ 以下の極めて優れたB T T抑止能を示した。V L D P Eケーブルの破壊電圧はB T T劣化前では現用X L P E

ケーブルより劣るものの、浸水課電後ではその低下が非常に小さいことから現用X L P Eケーブルを上回る。従って、本ケーブルは浸水下の過酷な条件で使用されるケースの多い配電ケーブルへの適用に有望であることが示された。

(第4章 参考文献)

- (1) 電気学会技術報告、II部第266号「特高压C Vケーブルの設備実態と診断技術の動向」(1988)
- (2) 電気学会技術報告、II部第404号「地中配電ケーブルの信頼性向上技術」(1992)
- (3) 速水；「C Vケーブル」、p65、コロナ社(1986)
- (4) 電気学会技術報告、I部第134号「有機絶縁材料における水トリーについて(3)ボウタイ状水トリー」(1982)
- (5) E.F.Steenis,F.H.Kreuger;"Water treeing in polyethylene cables",IEEE Trans.,EI-15,No5,p989(1990)
- (6) 高橋；「特集解説；高電圧ケーブルにおける水トリー研究の最近の進展」、静電気学会誌、vol.19,No2,p99(1995)
- (7) J.J.Xu,S.A.Boggs;"The chemical nature of water treeing:Theories and evidence",IEEE Electrical Insulation Magazine, vol.10,p29(1994)
- (8) ラシカワン、清水、平田；「水トリーから電気トリーへの進展」、平成5年電気学会全国大会、328(1993)
- (9) 山本、一色、阿部；「水トリーの発生機構と検知方法」、藤倉電線技報、vol.58,p27(1978)
- (10) L.J.Rose,V.Rose;"Microscopic failure in water-treeing and fatigue as revealed by transmission electron microscopy",Jicable'87,p283(1987)
- (11) 福田；「解説：C Vケーブル絶縁体の水トリー防止材料」、電気学会誌、vol.108,p389(1988)
- (12) 和田；「高分子の固体物理」、培風館(1971)
- (13) L.E.Alexander,桜田(訳)；「高分子X線回折」、化学同人(1973)
- (14) 岡、山形；「プラスチック材料講座(4)ポリエチレン樹脂」、日刊工業社(1971)
- (15) J.T.Judge,R.S.Stein,J.Appl.Phys.,vol.32,p2357(1961)
- (16) A.Garton,S.Bamji,A.Blinski,J.Densley;"Oxidation and water tree formation in service aged XLPE cable insulation",IEEE EI-22,p405(1987)
- (17) M.T.Show,S.H.Show;"Water treeing in solid dielectrics",IEEE EI-19,No5,p149(1984)
- (18) 高橋；「解説：高電圧ケーブルの寿命特性」、安全工学、vol.30,No6,p472(1992)

第5章 直流ケーブル用新種絶縁材料の開発

第5.1節 緒 論

高電圧電力ケーブルは、交流ケーブル用としてはメンテナンスの容易さ、防災面から油浸絶縁ケーブルに代わり、架橋ポリエチレン（XLPE）に代表されるプラスチック絶縁ケーブルが広く用いられてきている。一方、超高压直流送電ケーブルとしては、現在、油浸絶縁ケーブルのみが用いられており、XLPEケーブルを始め、プラスチック絶縁の超高压直流ケーブルへの適用を目的に、過去に多くの検討がなされてきているが、直流高電圧に対する信頼性の問題から実用化に至っていない。

直流送電ケーブルは海底長尺ケーブルなどに用いられるケースも多く、油圧維持が不用で、事故時の絶縁油による海洋汚染の懸念もないプラスチック絶縁ケーブルが実現できればそのメリットは大きい。こうした状況を踏まえ、超高压直流ケーブル用新種高分子絶縁材料についての探索並びに開発を行った。

既に多くの高分子材料についてその直流絶縁破壊特性及びこの特性と深く関係する空間電荷形成特性が調べられており、多数の報告がある。本研究では、先ず、これらの調査結果を出発点として、候補絶縁材料群のスクリーニング試験を行なった。この試験での材料選択ステップの過程から、直流特性に極めて優れる新種絶縁材料として、側鎖に少量の酸変性基を導入した高密度ポリエチレン（変性HDPE）を見出すに至った。次に、この新種材料について、ケーブル製造の検討を行い、その特性試験として、直流絶縁破壊に対するケーブル絶縁厚さ効果、直流長期特性等の評価を行った。また、変性HDPEケーブルの直流特性発現に関して、ケーブルのような肉厚絶縁体の空間電荷評価に有効である新しい手法（パルス静電応力法）を用い、交流用の現用XLPE絶縁体との対比検討等により、その機構を明らかにした。

本章では、こうした直流ケーブル用新種絶縁材料の開発経緯について述べる。

第5.2節 各種高分子の直流破壊特性

5.2.1 供試試料の選定

直流絶縁破壊特性に優れる材料としての方向性を見いだすための第一ステップとして、第5.1表に示すグループの試料系を供試試料とした。グループ①はポリエチレン（PE）系であり、現在、交流用の電力ケーブル用絶縁材料として広く用いられている架橋ポリエチレン（XLPE）のベースポリマーである低密度ポリエチレン（LDPE）を比較用として密度の異なる3種の高密度ポリエチレン（HDPE）を試料とした。

グループ②及びグループ③は極性ポリマーブレンドLDPE及び極性ポリマー単独の試料系である。極性ポリマーが直流特性に影響を及ぼす例としては、エチレン酢酸ビニル共重合体（EVA）やアイオノマーをブレンドしたXLPEで直流破壊特性の向上や電荷注入の抑制効果が報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。また、ポリエステル（PES）では電荷注入の抑制が顕著であるとの報告もある⁽³⁾。グループ②及びグループ③はこれらの報告を参考として選んだものである。グループ②の変性LDPE〔A〕及び〔B〕はLDPEの側鎖に酸変性基を導入したものであり、〔A〕と〔B〕では変性基の種類が異なる。EVAは酢酸ビニル含有量（VA%）3%のものを、PESは芳香族系ポリエステルを用いた。

なお、直流破壊特性には添加剤、充填剤が大きい影響を及ぼすと考えられるが⁽⁴⁾、高分子材料の素材としての特性を明らかにするため、本試料系の対象外とした。

5.2.2 直流破壊試験方法

絶縁破壊試験試料は第5.1図に示す形状で180℃で熱プレス成形したリセス状シート試料を用いた（第3章、第3.2節で説明の試料形状）。電極有効部に相当するリセス部は径10mmφ、厚さ200～300μmであり、導電塗料を塗布後、塗料中の溶媒を除くため60℃で24時間乾燥し、試料とした。試験はシリコン油中で室温及び

第5.1表 各グループ系の供試試料

グループ	試料名称	試料内容
①	LDPE	d=0.920, MFR=3.2
	HDPE ①	d=0.942, MFR=0.8
	HDPE ②	d=0.950, MFR=0.8
	HDPE ③	d=0.968, MFR=6.0
②	LDPE/変性LDPE ①	100/10 ブレンド量10重量部
		100/20 ブレンド量20重量部
	LDPE/変性LDPE ②	100/10 ブレンド量10重量部
		100/20 ブレンド量20重量部
	LDPE/PES	100/5 ブレンド量5重量部
		100/10 ブレンド量10重量部
③	EVA	VA%=3%
	PMMA	ポリメチルメタクリレート
	変性LDPE ③	d=0.930

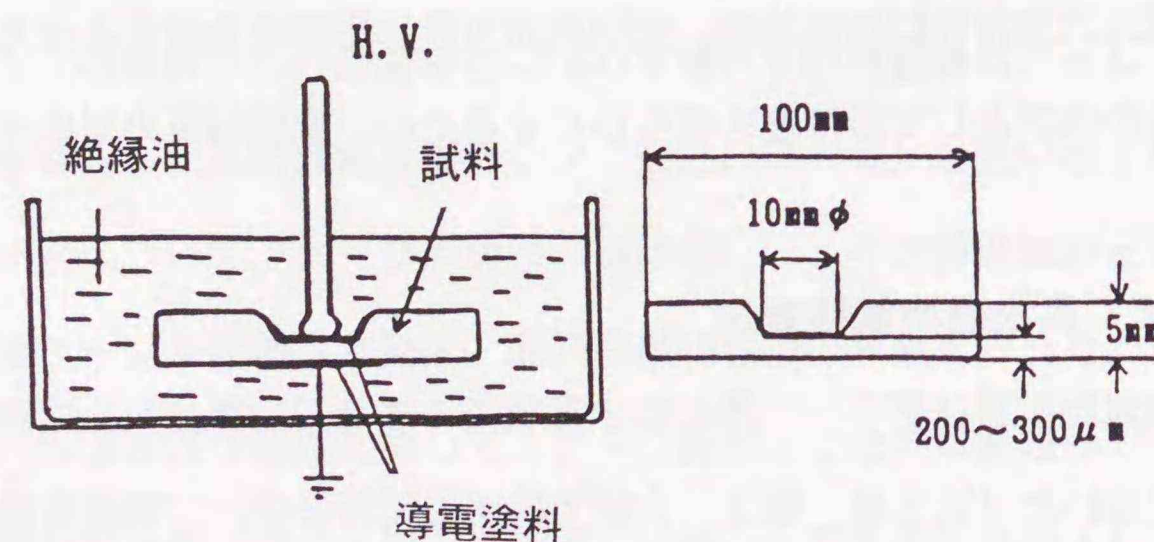
グループ①：ポリエチレン系

グループ②：極性ポリマーブレンドLDPE系

グループ③：極性ポリマー系

d：密度 (g/cm³)

MFR：メルトフローレート (g/10分)



第5.1図 シート試料の絶縁破壊試験方法

90℃の温度で行った。

絶縁破壊試験の電圧種は直流電力ケーブル絶縁体に加わる電圧であるインパルス (Imp.)、DC、DC極性反転とし、次の印加条件とした。

・ Imp. (+) (標準インパルス：1×40μs)；予想破壊値70%スタート、

5kV/3回ステップアップ

・ DC (+)；2kV/s、連続昇圧

・ DC極性反転；予想破壊値70%スタート、±5kV/10分ステップアップ

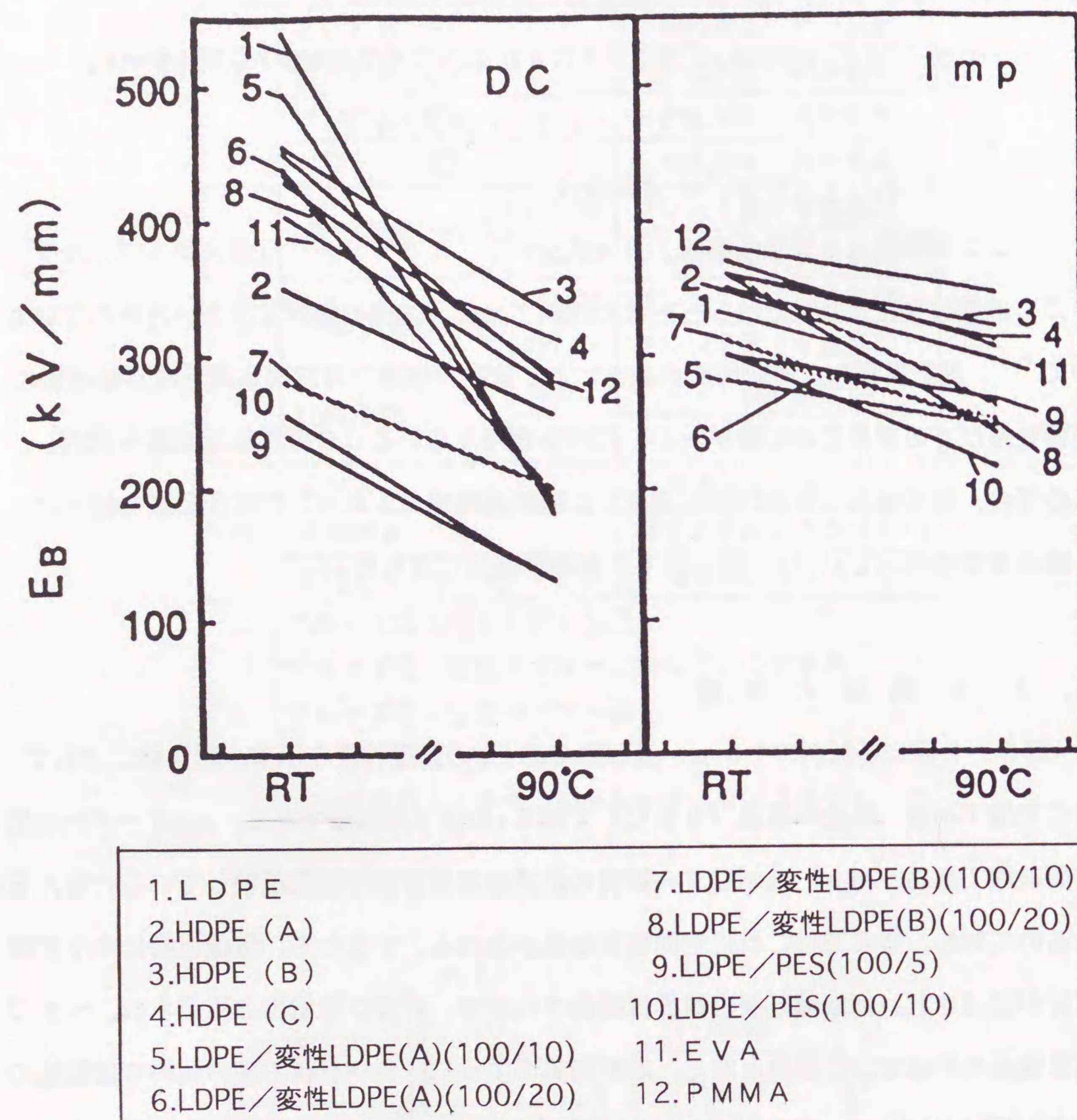
DC破壊はフィルムまたはシート状の試料では昇圧速度の影響は小さいとされているので⁽⁵⁾、連続昇圧による短時間破壊とした。また、直流では空間電荷形成が破壊値に影響を及ぼすので、この影響が大きく現れると考えられるDC極性反転試験も実施し、この場合、空間電荷の形成時間も考慮し比較的長時間 (10分) の電圧印加を行った。

絶縁破壊強度 (E_B) は、試料数10個の平均より求めた。

5.2.3 結果と考察

第5.2図に各試料の Imp. 及びDCの E_B の温度特性を示す。試料種によらずDCでは Imp. に比べ高温 (90℃) での E_B の低下が顕著である。μsオーダーの短時間破壊である Imp. はポリマー固有の絶縁破壊強度が比較的反映していると考えられるのに対し、DCではこれに空間電荷効果が加わる。すなわち、電極近傍にホモ空間電荷が形成されれば電極近傍の電界は緩和されるが、バルクの電界は強調され、ヘテロ空間電荷の形成ではこの逆となる。本試料系のように、シート状の薄い試料では破壊の起点が電極であるか、バルクであるかは判別できないが、通常には試料作成上から電極近傍に欠陥が形成されやすく、破壊の起点は電極と考えられるので、特に室温におけるDC E_B > Imp. E_B のケースが多く認められるのは電極近傍のホモ空間電荷による電界緩和効果と推定される。このような電極前面の空間電荷が破壊値に影響を与えることについては、多くの報告がなされている⁽⁶⁾。

一方、DC E_B < Imp. E_B (特に高温で多く認められる) となるのは、電圧の印加



第5.2図 各試料のImp及びDC E_B の温度特性

時間効果のほかに空間電荷効果としてヘテロ空間電荷が形成された場合、並びに、ホモ空間電荷であっても、電荷注入が顕著であればバルクの電界が強調され、バルクからの破壊も考えられる。

以上のように、DC E_B とImp. E_B の単純な比較では直流破壊に及ぼす空間電荷の影響は明瞭にできないが、DC極性反転 E_B との比較により、その影響をより明瞭にできると考えられる。前述のようにDCではポリマー種によらず高温破壊値の低下が顕著であり、高温破壊値がケーブルの絶縁設計を支配すると考えられるので、以後 E_B は主に90°Cで評価した。

第5.2表に各試料グループの90°Cでの E_B をDC極性反転の結果を含めて示す。グループ①のLDPEとHDPEの比較では、Imp.、DCともに結晶化度の大きいHDPEが高い E_B を示すが、HDPEではDC極性反転の低下率大きい。HDPEでは後述のように、空間電荷の形成が顕著であり、極性反転低下率の大きい一因と考えられる。なお、ポリエチレンでは球晶径と E_B に相関があるとする報告もあるが⁽⁷⁾、本試料系の球晶径を透過型電子顕微鏡で観察した結果では、LDPE→1.5~5 μm 、HDPE [A]→1~2 μm 、HDPE [B]→2~3 μm 、HDPE [C]→7~14 μm であり、 E_B との相関は認められない。球晶径が10 μm 程度以下の小さい領域では球晶境界は破壊の弱点にはならないと考えられる。

グループ②の極性ポリマーブレンドLDPE系では、いずれの試料もImp. E_B は小さいが、DC及びDC極性反転では、変性LDPE [B]ブレンド>LDPE単独≒変性LDPE [A]ブレンド>PESブレンドの順であり、特に変性LDPE [B]ブレンドでは極性反転低下率も小さく、空間電荷の抑制効果が考えられる。なお、ブレンド系の走査型電子顕微鏡によるミクロ分散の状態を第5.3図に示すが、分散状態は前記 E_B の順序とも一致しており、LDPEとの相溶性が悪く、相分離分散の状況が顕著であるPESブレンドではDC E_B の低下も大きい。相分離界面が空間電荷のトラップ箇所となることも推定され、分散状態が直流破壊に影響することも考えられる。

グループ③の試料系(極性ポリマー)では、Imp.、DCともに高い E_B を示すが、

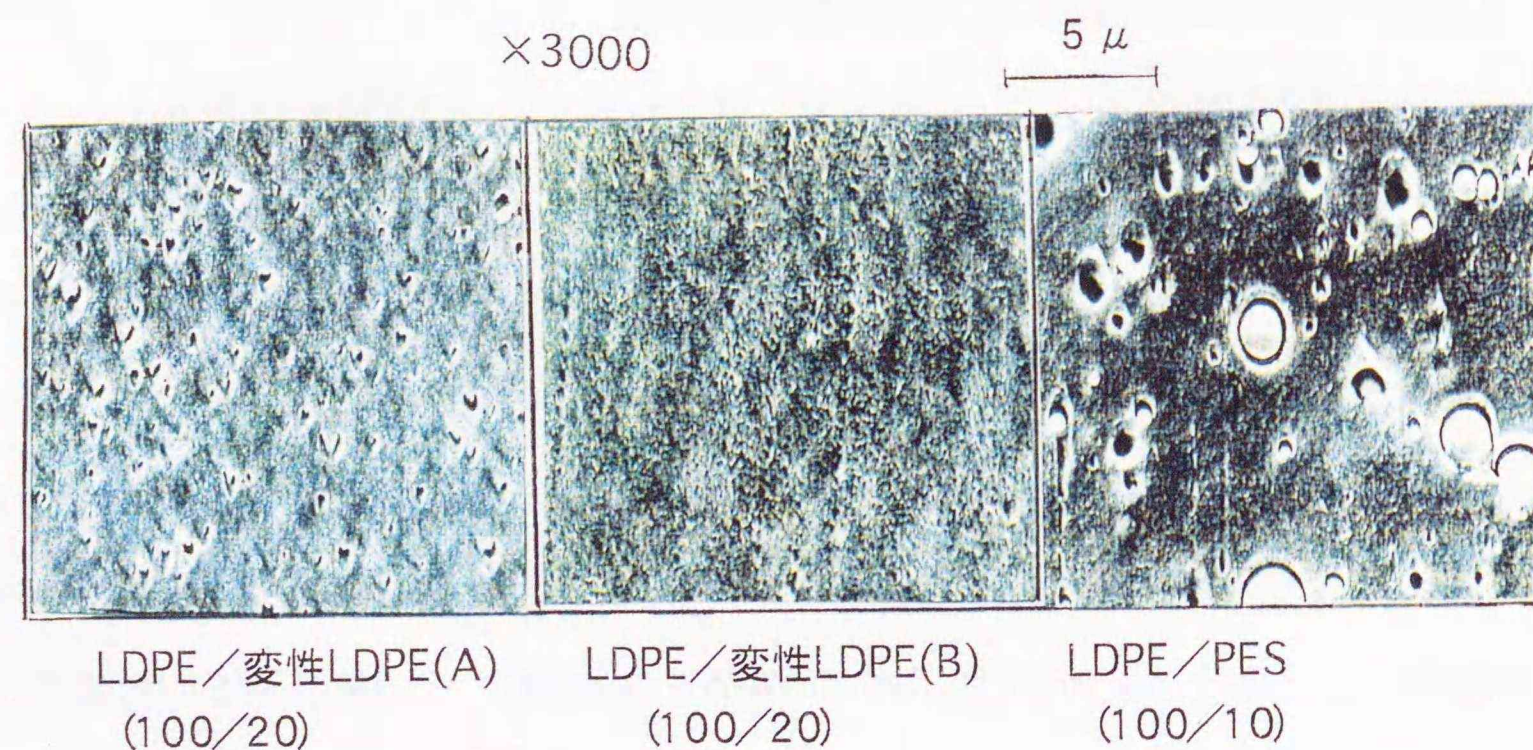
第5.2表 各試料の90℃の E_B

グループ 試 料			E (kV/mm)			DC極性反転
			Imp.	DC	DC極性反転	
①	LDPE		240	180	155	0.88
	HDPE ㊶		295	255	180	0.70
	HDPE ㊷		320	330	200	0.61
	HDPE ㊸		310	280	210	0.75
②	LDPE/	100/10	245	185	155	0.84
	変性LDPE ㊶	100/20	245	190	150	0.79
	LDPE/	100/10	260	200	200	1.0
	変性LDPE ㊷	100/20	250	195	200	1.0
	LDPE/PES	100/5	265	130	110	0.85
		100/10	215	130	100	0.77
③	EVA		305	275	160	0.58
	PMMA		345	285	125	0.44
	変性LDPE ㊸		270	350	300	0.86

グループ①：ポリエチレン系

グループ②：極性ポリマーブレンドLDPE系

グループ③：極性ポリマー系



第5.3図 ポリマーブレンドLDPEの走査電子顕微鏡写真

DC極性反転はEVA、PMMAが低下率が大きいのにに対し、変性LDPE〔B〕の低下率は小さい。一般に極性基は空間電荷のトラップ源として考えられることが多く⁽⁸⁾、EVA、PMMAの極性反転低下率の大きい原因と推定されるが、変性LDPE〔B〕のように極性基の種類により空間電荷の抑制に有効に作用すると考えられる。

各種高分子の評価結果から、次節（第5.3節）ではPEに対する変性基〔B〕（以後、単に変性基と呼ぶ）の効果について、詳細な検討を行った。

第5.3節 変性HDPEの選定及びその特性

5.3.1 変性ポリエチレンの最適化検討

〔1〕供試材料及び試験方法

PEに対する変性基の効果として、第5.3表に示す試料により次の3通りに対する効果を調べた。

- (1) 変性LDPEのLDPE及びHDPEに対するブレンド効果
- (2) 変性PEのベースPEの密度の効果
- (3) 変性基量の効果

PEの基本的な機械特性、熱特性は結晶化度に大きく支配されるが、変性PEの変性基量は1重量%未満の少量であり、上記特性に及ぼす影響は殆どない。

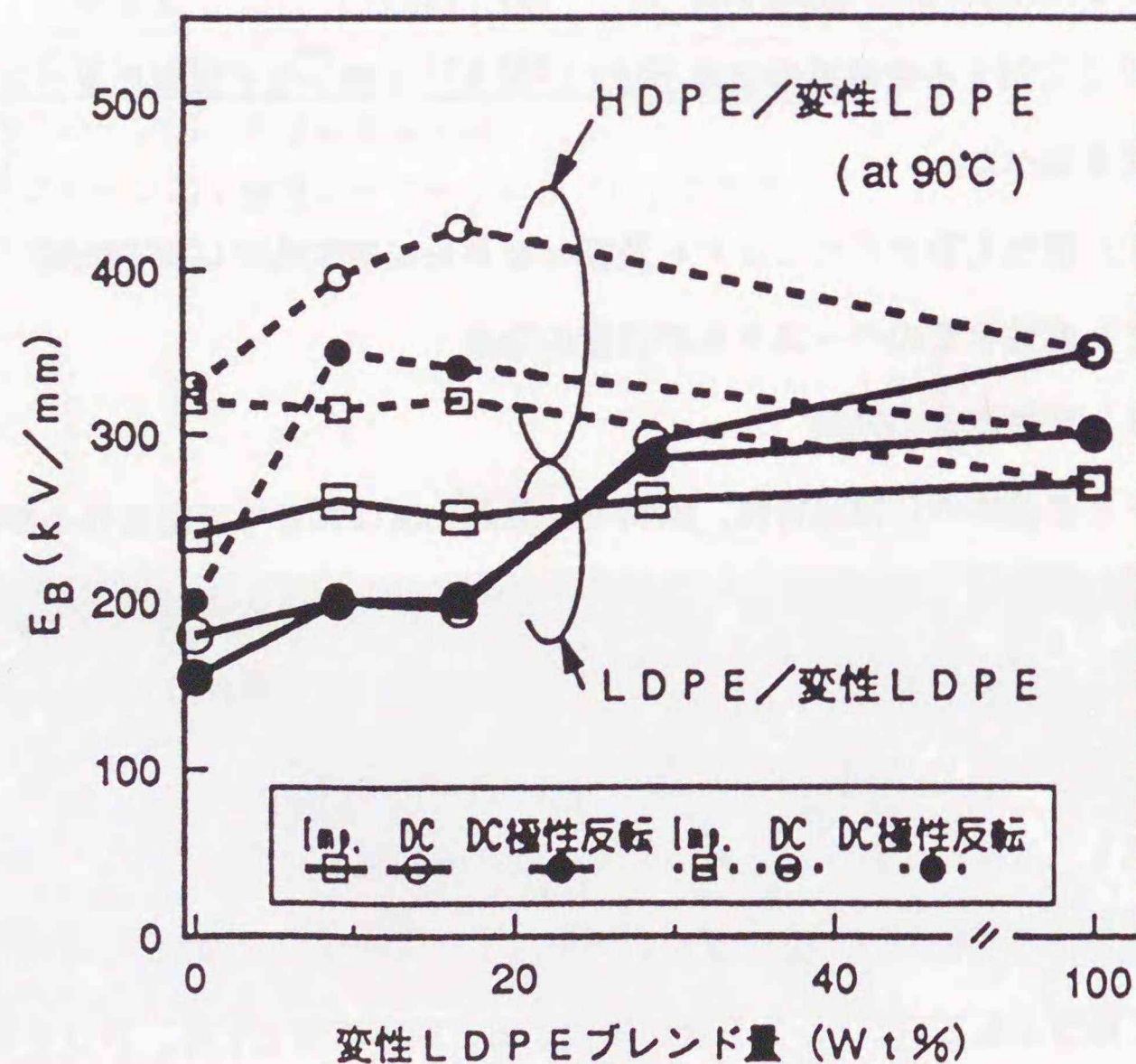
絶縁破壊試験方法は5.2.2項と同様であり、温度は90℃とした。

〔2〕結果と考察

第5.4図にLDPEとHDPEに対する変性LDPEのブレンド効果を示す。LDPEとのブレンドでは、ブレンド量によるImp. E_B の変化は小さいが、DC及びDC極性反転 E_B はブレンド量が増大すると顕著に向上する。HDPEとのブレンドではImp. E_B はLDPEとのブレンドの場合よりさらに高い値を示すのに加え、DC及びDC極性反転 E_B についても更に顕著な向上となっている。前述のように、 μs

第5.3表 変性ポリエチレンの試料系

目 的	試料内容	備 考
P E (LDPE&HDPE) に対する ブレンド効果	LDPE/変性LDPE = 100/10, 100/20, 100/40	変性LDPE d=0.93
	HDPE B/変性LDPE = 100/10, 100/20	標準変性量
密度の異なる 変性P E	変性P Eの密度(d:g/cm ³) =0.92, 0.93, 0.94, 0.95, 0.96	標準変性量
変性基量の 効果	変性基量 =0, 1/2, 1, 2, 4	標準変性量 = 1



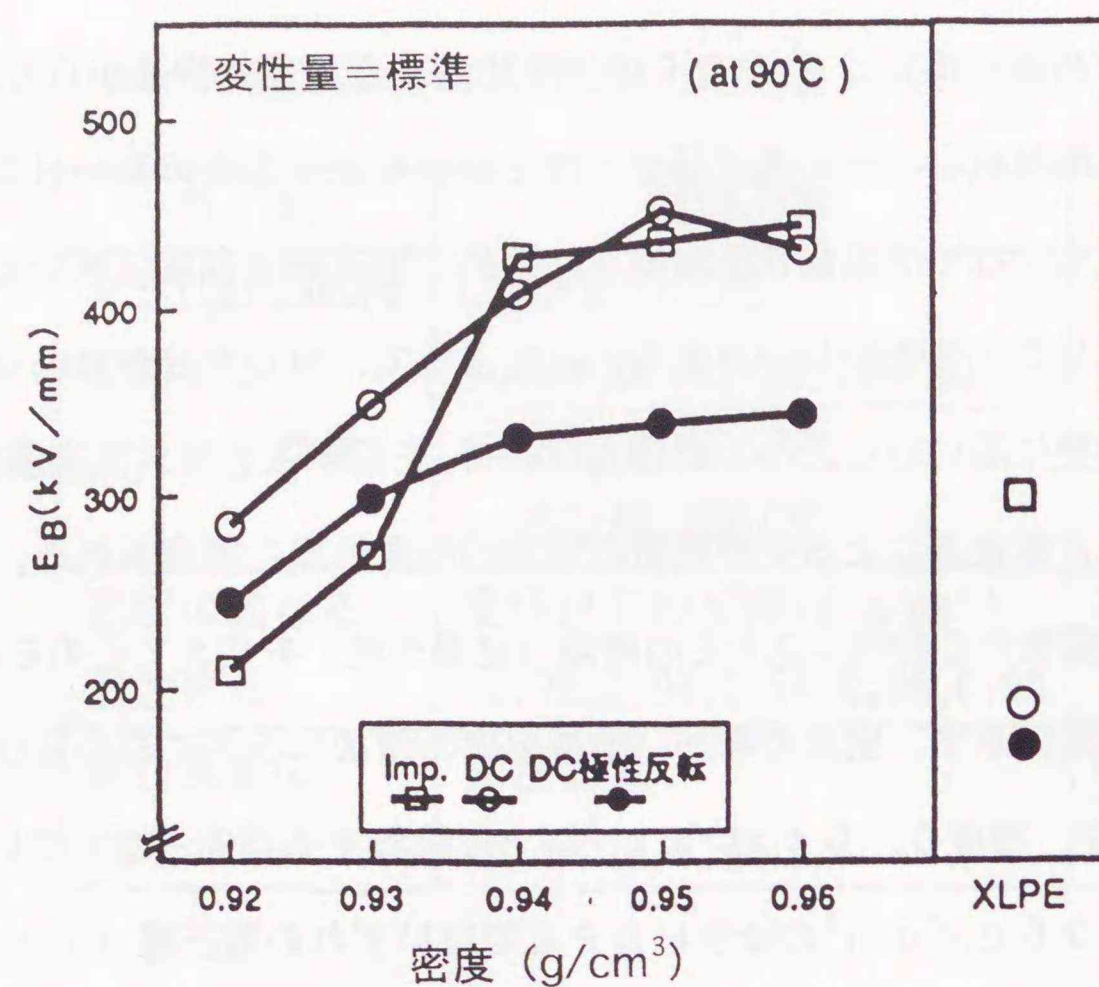
第5.4図 LDPE及びHDPEに対する変性LDPEのブレンド効果

オーダの破壊である $Imp.$ E_B は P E の結晶化度など、固体構造からくる材料の固有破壊強度を比較的反映し、特に高温領域では LDPE より融点の高い HDPE の方が微結晶の部分融解も少なく高結晶性を維持するため、固有破壊強度は高いと考えられる。HDPE に変性 LDPE をブレンドすることによって、HDPE 単独あるいは変性 LDPE 単独よりも更に高い DC 及び DC 極性反転 E_B を示すことは、高結晶性による固有破壊強度の向上と変性基による空間電荷の制御の相乗効果と推定される。

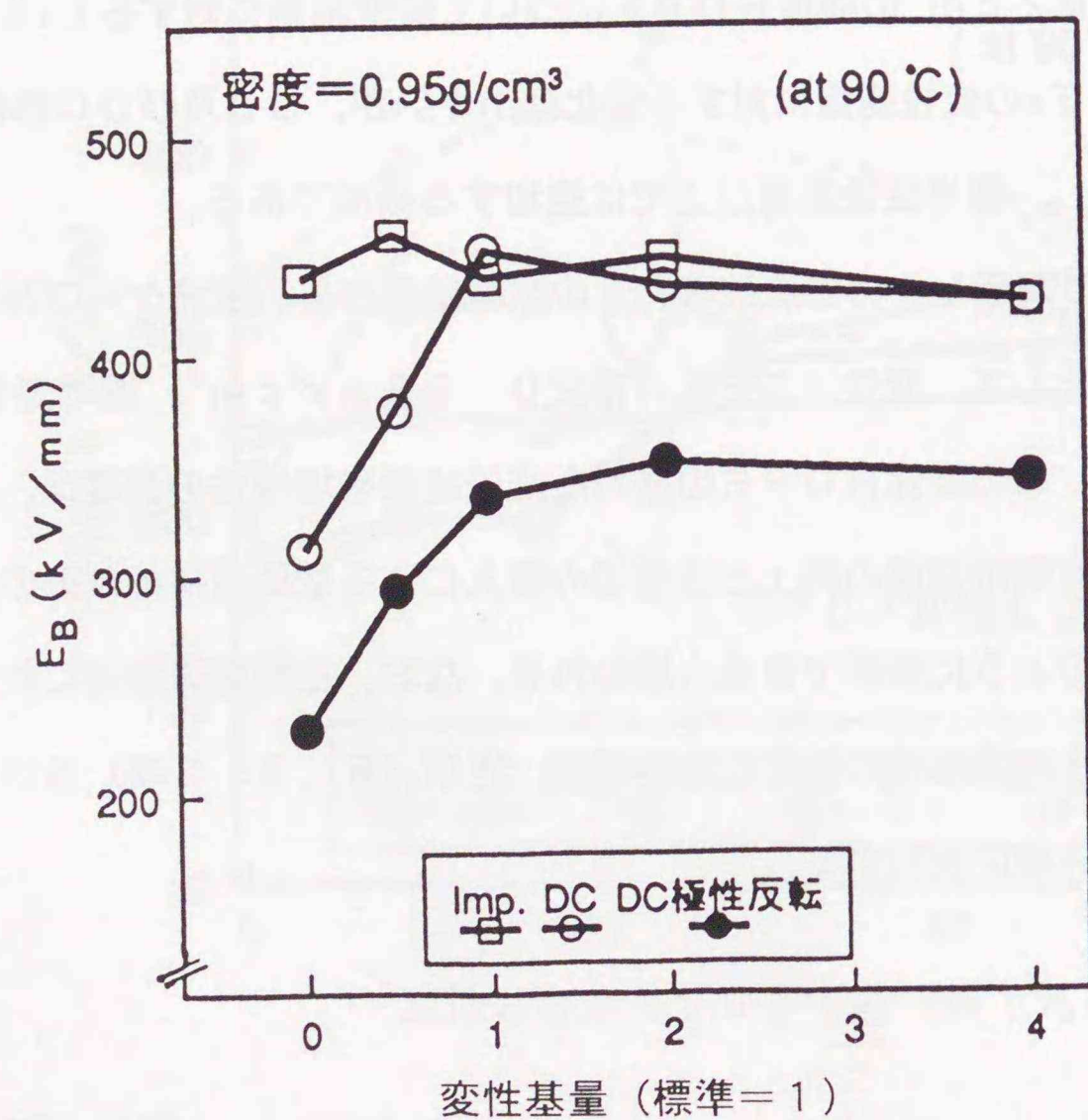
そこで次に、変性 P E のベース P E の密度 (結晶化度) を変えてその E_B を評価した。結果を第 5. 5 図に示す。密度の増加 (結晶化度の増加) と共に DC 及び $Imp.$ E_B は向上するが、密度 0.94 g/cm^3 以上で飽和する傾向となっている。密度 $0.94 \sim 0.96 \text{ g/cm}^3$ の変性 HDPE ではいずれの電圧種 ($Imp.$ 、DC、DC 極性反転) に対しても、これまで検討した試料系の中で最高の E_B を示しており、特に DC 及び DC 極性反転では同図中に併記した XLPE の約 2 倍の高い値となっている。

密度 0.95 g/cm^3 の変性 HDPE について変性基量に対する E_B を第 5. 6 図に示す。 $Imp.$ E_B の変性基量に対する変化は小さいが、DC 及び DC 極性反転は変性基量と共に向上し、標準変性基量以上では飽和する傾向である。

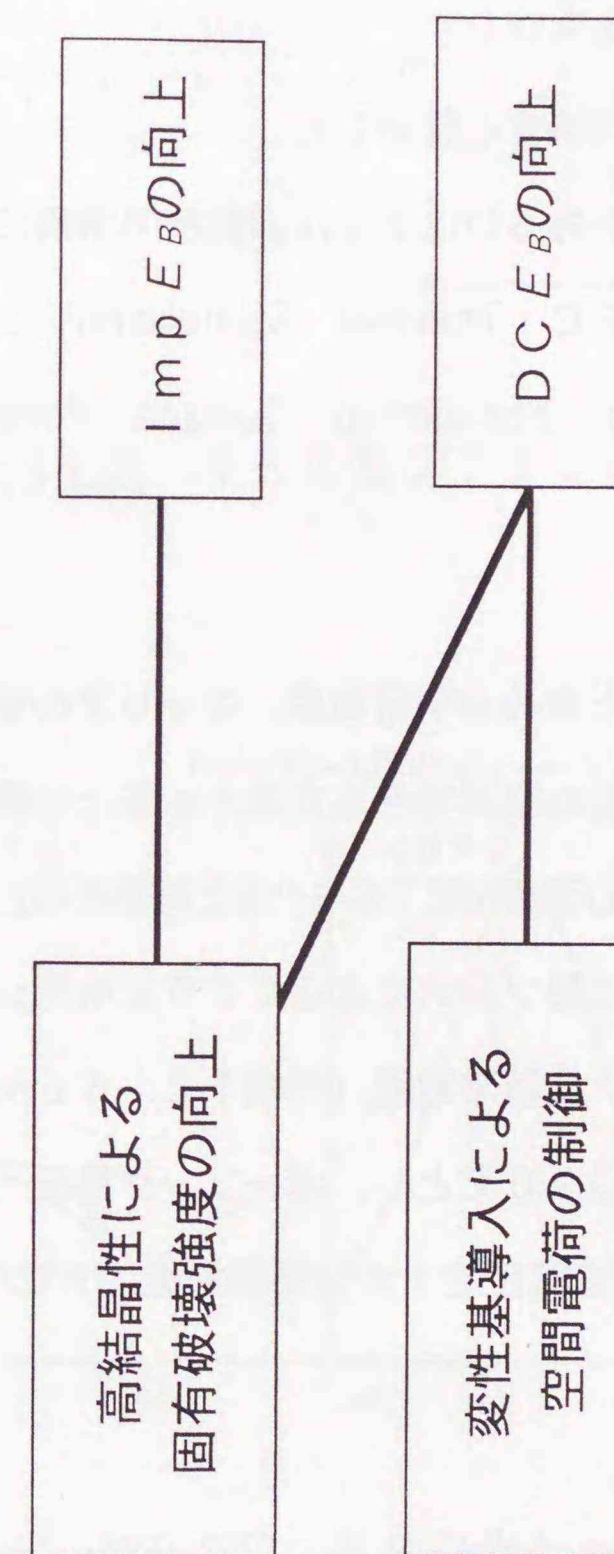
以上の変性ポリエチレンの直流破壊特性の試験結果から、直流ケーブル用新種高分子絶縁材料の候補として、変性 HDPE (密度 0.95 g/cm^3 、標準変性量) の選択に至った。また、この変性 HDPE の優れた直流絶縁破壊特性の発現は、HDPE の高結晶性による固有破壊強度の向上と変性基の導入による空間電荷の制御の効果と考えられ、第 5. 7 図のように解釈できると思われる。なお、空間電荷制御に対する変性基及び変性 HDPE 中の添加剤の効果については、次項 (5. 3. 2 項) 並びに第 5. 5 節 5. 5. 2 項で詳細に検討する。



第5.5図 変性ポリエチレンの密度と E_B



第5.6図 変性HDPEの変性基量と E_B



第5.7図 変性HDPEの直流特性発現機構

5. 3. 2 熱刺激電流による空間電荷特性の評価

変性HDPEの直流破壊特性と空間電荷特性の関係を調べるために、XLPEとの比較ならびに変性の効果の観点から

- ・ XLPE
- ・ 変性HDPE
- ・ HDPE (変性HDPEのベースHDPE)

の3試料を対象として、その空間電荷特性を評価した。

空間電荷の測定方法として、シートあるいはフィルム試料の測定に從來から最も一般的に用いられている熱刺激電流 (TSC; Thermal Stimulated Current) 及び熱刺激表面電位 (TSSP; Thermal Stimulated Surface Potential) 法⁽⁹⁾を用いた。

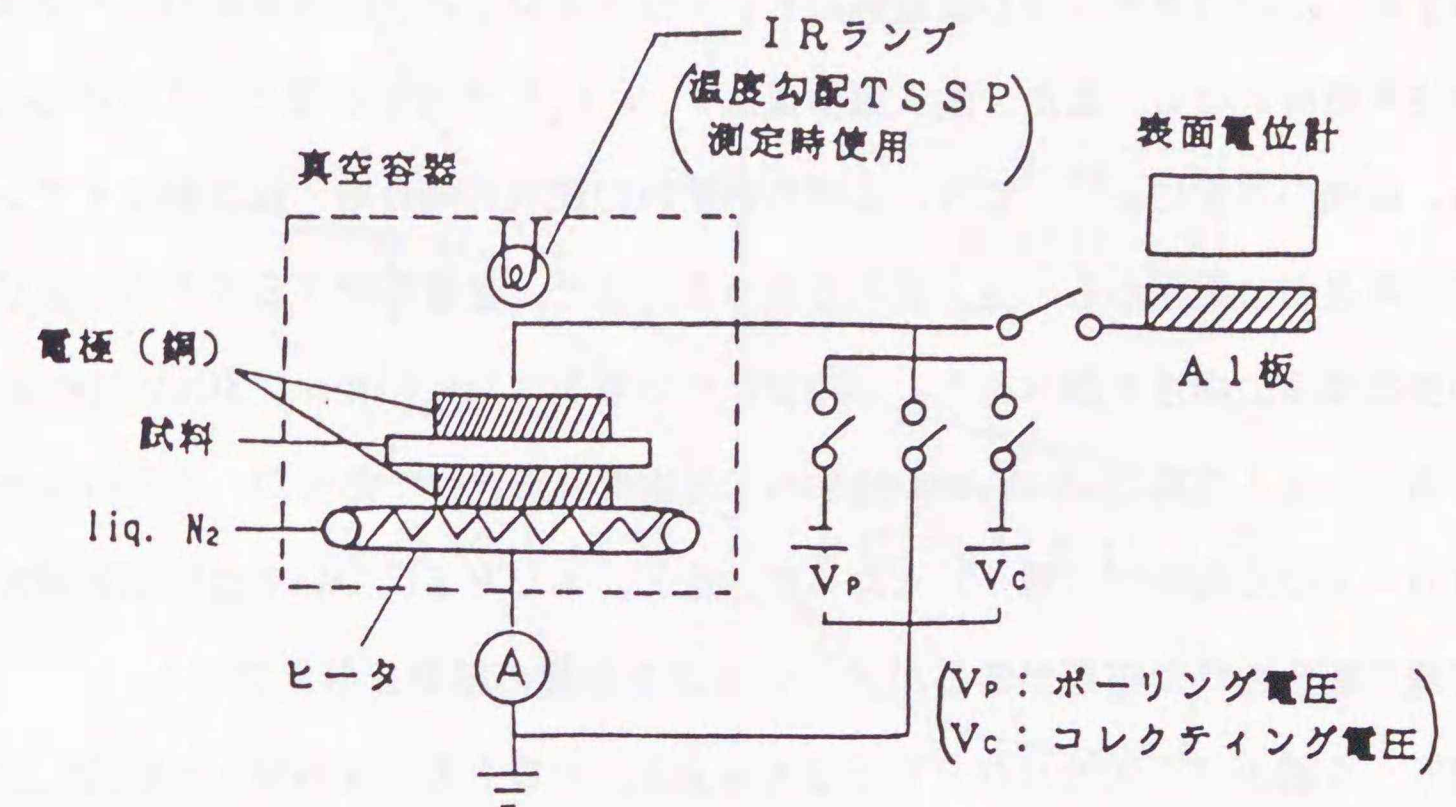
〔1〕試験方法

直流電圧で試料をポーリングしたときの空間電荷量、キャリアの種類 (電子性、イオン性、双極子性) 及び空間電荷の極性を判別できる方法として、日野等によって提案されているコレクティング電圧TSC法及び温度勾配TSSP法と同様の方法を用いた⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。第5. 8図に測定回路を示す。試料は熱プレスによる200 μ m厚シート (破壊試験用シート試料と同程度の厚さ) であり、金蒸着電極 (面積12. 6cm²) を設けた。ポーリング温度は破壊試験温度と同じ90℃とし、ポーリング電圧 (V_p) として、10kV/mm、30kV/mmの直流電圧を10分間印加後、7℃/分の昇温速度でTSCおよびTSSPを測定した。

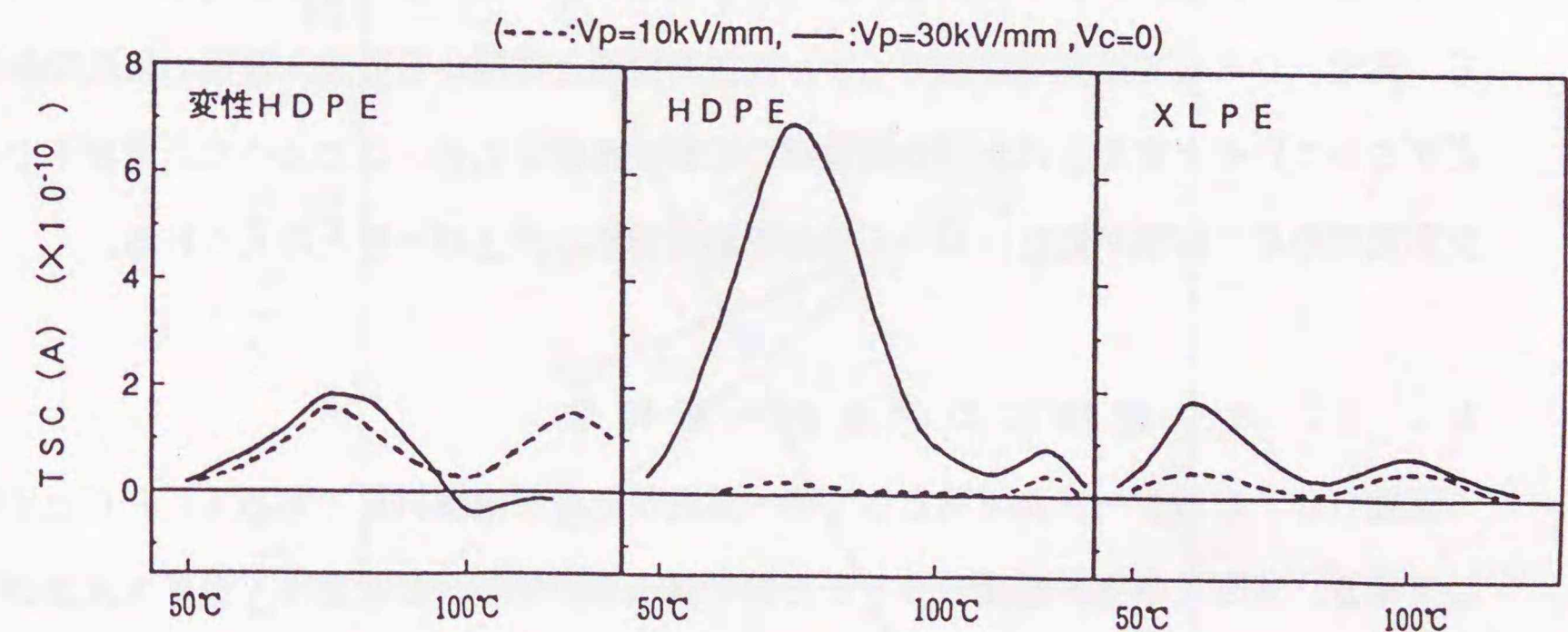
〔2〕結果と考察

TSCチャートの一例を第5. 9図に示す。各試料には低温側と高温側、すなわち、XLPEでは60℃と100℃、変性HDPEとHDPEでは75~80℃と110~120℃にそれぞれTSCピークが観察される。コレクティング電圧 (V_c) を変化させたTSCより、TSCピークの電荷の種別及び注入電荷量を求めることができる⁽¹⁰⁾。

変性HDPEの $V_p = 30\text{kV/mm}$ でのそれぞれのピークの V_c 依存性の例を第5. 10図



第5.8図 TSC及びTSSP測定回路



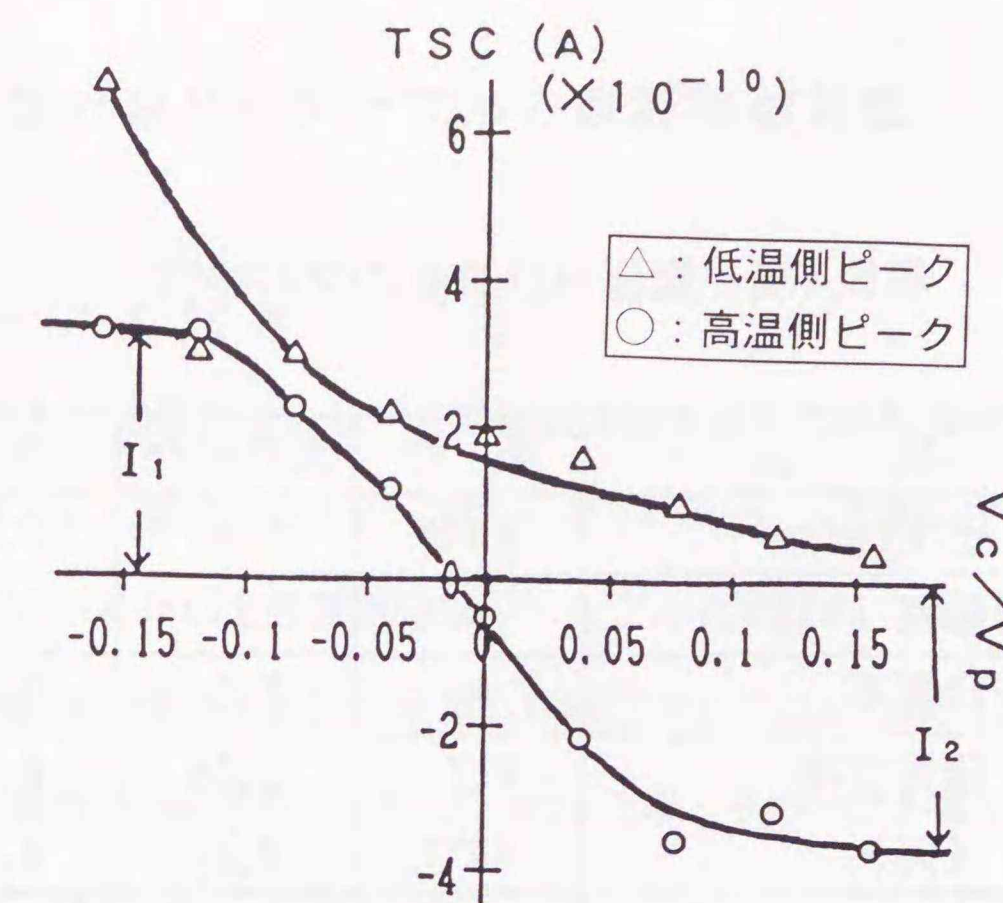
第5.9図 TSCチャート例

に示すが、このパターンから低温側のピークはイオンであり、高温側のピークは電極からの注入電荷となる。また、注入電荷量は $I_1 + I_2$ に比例する量として求めることができる。同様の測定により、第5.9図のいずれの試料の場合も、低温側はイオン性空間電荷、高温側は電極からの注入電荷であった。また、温度勾配 TSSP 法によりそれぞれの空間電荷の極性を調べると、イオン性空間電荷は 10kV/mm 、 30kV/mm 共に正極性であり、注入電荷は 10kV/mm はすべて正極性（正孔）であるが、 30kV/mm では変性 HDPE のみ負極性（電子）となった。なお、XLPE についてはほぼ同様の測定条件で既に報告された結果があるが⁽¹¹⁾、上記と同様の結果を与えている。

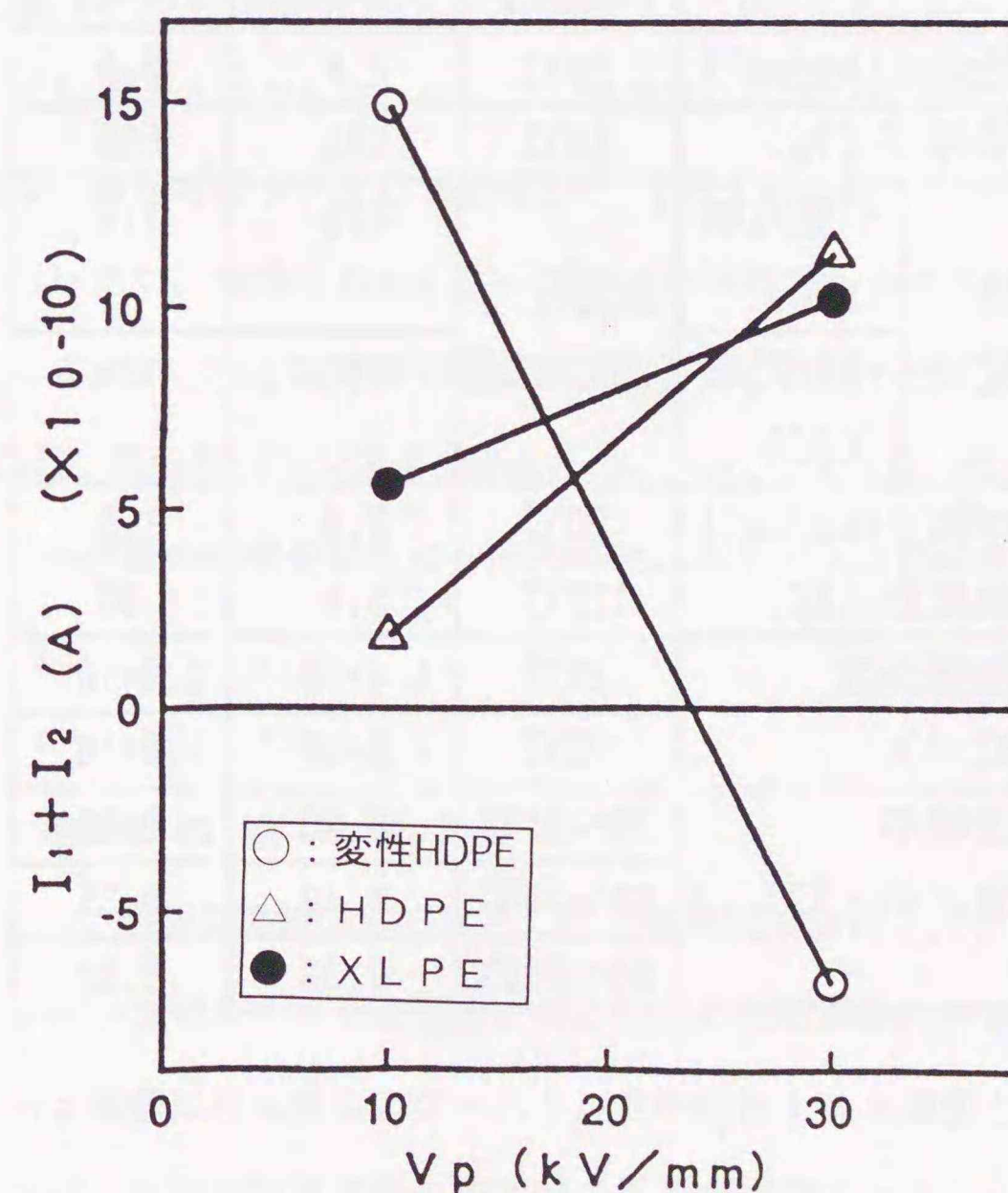
第5.9図より、変性 HDPE では XLPE、HDPE に比べ V_p の増加によるイオン性空間電荷の増加が僅かであることが分かる。また、注入電荷の $I_1 + I_2$ は第5.11図に示すように XLPE、HDPE が V_p と共に増加するのに対し、変性 HDPE では正極性から負極性に変化し、その量は減少している。ここで、イオン性空間電荷はヘテロ空間電荷として、電極からの注入電荷はホモ空間電荷として作用すると考えられる。従って、変性 HDPE では高電界側でイオン性空間電荷と電極からの注入電荷の相殺現象などが生じていると考えられ、総空間電荷の抑制が推定される。このような高電界下での空間電荷形成の抑制が変性 HDPE の直流破壊特性の向上の一因と考えられる。

5.3.3 変性 HDPE の一般特性

変性 HDPE のケーブル材料としての一般物性を現用絶縁材料である XLPE と比較して第5.4表に示す。変性 HDPE の極性基（酸変性基）変性量は1重量%未満の微量であることから、誘電特性、絶縁抵抗に与える影響は殆どない。また、機械特性、熱特性は XLPE より結晶化度の高い HDPE をベースとする絶縁体であるため、曲げ強さが XLPE の約2.5倍となるが、融点（ 130°C ）以下での熱変形、熱膨張係数、熱伝導率の熱的性質は XLPE より有利な物性値を与える。



第5.10図 TSCピークのコレクティング電圧 (V_c) 依存性



第5.11図 I_1+I_2 のポーリング電圧 (V_p) 依存性

第5.4表 変性HDPEの材料物性

項 目			条 件	変性HDPE	XLPE
	密度(g/cm ³)		20℃	0.95	0.92
	融点(℃)		—	130	105
電 気 特 性	誘電率		—	2.3	2.3
	誘電正接 (%)		R.T	0.05	0.03
			90℃	0.04	0.03
	絶縁抵抗 (Ω-cm)	50℃	10kV/mm	9.0×10 ¹⁰	1.3×10 ¹⁰
			50kV/mm	8.2×10 ¹⁵	1.3×10 ¹⁵
		90℃	10kV/mm	4.0×10 ¹⁴	1.8×10 ¹⁴
			50kV/mm	5.4×10 ¹³	3.4×10 ¹³
機 械 特 性	引張強さ(kg/mm ²)		20℃	2.8	2.5
	引張伸び(%)		20℃	520	560
	加熱 老化後	引張残率 (%)	熱老化 120℃×60日	110	110
		伸び残率 (%)		130	105
		曲げ強さ(kg/mm ²)		20℃	3.8
	熱 特 性	加熱変形(%)		120℃	5.8
線膨張係数 (℃ ⁻¹)		25℃	1.4×10 ⁻⁴	2.6×10 ⁻⁴	
		90℃	7.3×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻³	
熱伝導率 (W/m・℃)		20～35℃	0.45	0.38	
		60～75℃	0.42	0.35	
		85～100℃	0.38	0.32	

第5.4節 変性HDPEケーブルの直流破壊特性

5.4.1 ケーブル試作

前節(第5.3節)での検討により、直流破壊特性の優れた絶縁素材として側鎖に少量の酸変性基を導入した変性HDPE(密度=0.95g/cm³、標準変性量)の選定に至ったので、次に、これを用いて各種絶縁厚のケーブルを試作し、超高压直流ケーブル適用に向けて必要な絶縁破壊特性並びに直流長期課電特性について調べた。

第5.5表に示す絶縁厚3.5mm、6.0mm、12.0mmの3種の変性HDPEケーブルを供試試料とした。なお、比較のために、3.5mm厚についてはHDPE(変性HDPEのベースポリマー)ケーブルについても試作した。ケーブルは内部及び外部半導電層と絶縁体の一括押出による3層構造であり、導体サイズはそれぞれの絶縁厚に対して、絶縁内径(d_1)と絶縁外径(d_2)の比 $d_1/d_2=1.6 \sim 1.7$ とほぼ同一になり相似形になるように選んだ。ケーブル製造はシリコン油を加圧熱媒体としてCVケーブルの架橋、冷却を行うFZCV装置⁽¹²⁾(第3章、第3.6節の第3.12図参照)により行ったが、変性HDPEケーブルは未架橋であるので架橋筒は押出後の熱処理ゾーンとして用い、引き続き冷却筒に導きケーブルを造った。また、ケーブルの製造条件(押出温度、熱処理ゾーン温度条件など)については第3章、第3.6節で述べたHDPEケーブル製造の知見を参考にして決めた。第5.12図に試作ケーブルの写真を示す。

5.4.2 絶縁破壊特性

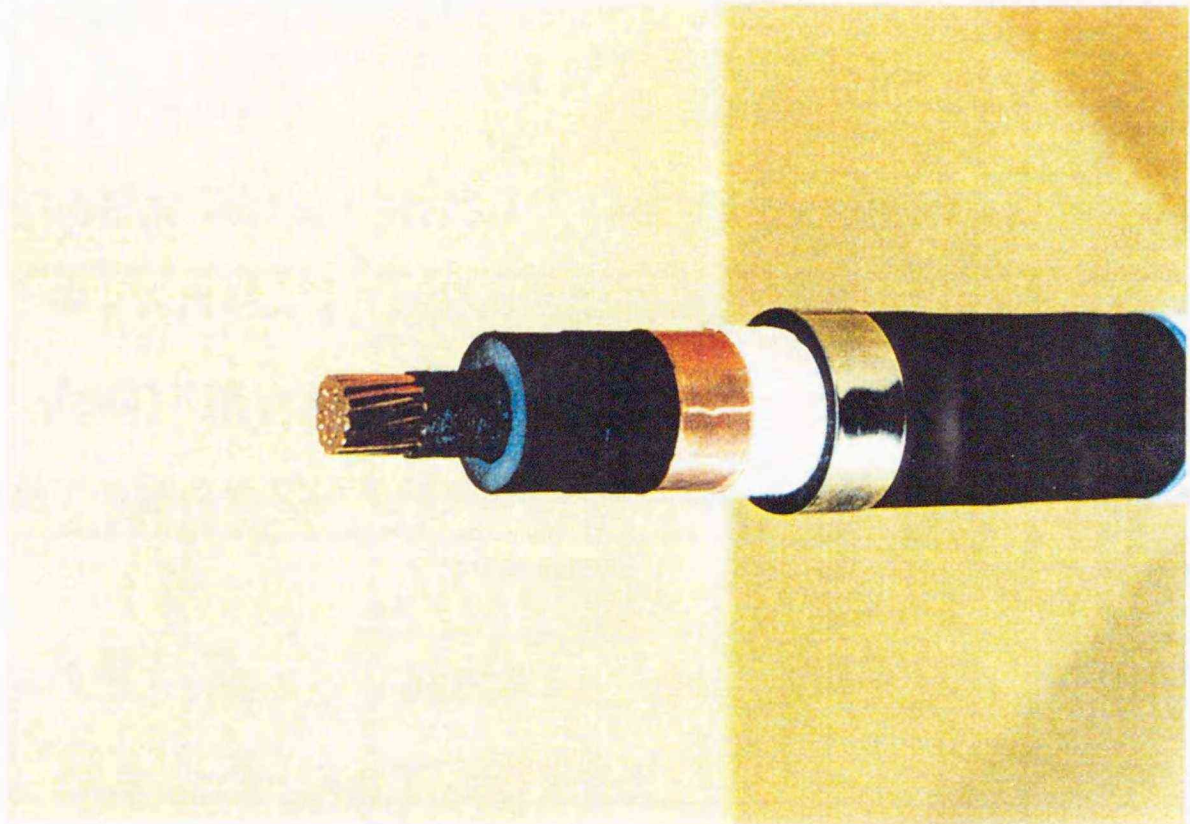
直流ケーブルに必要な絶縁破壊特性として、破壊試験はDC、DC極性反転、インパルス(Imp)、DC+Imp重畳の4種とし、その試験条件を第5.5表に併記した。DC+Imp重畳は最も厳しいケースとして逆極性Imp重畳とし、また第5.2節で述べたように、直流では高温時の破壊値の低下が顕著であることから、試験温度は

第5.5表 供試ケーブル構造及び破壊試験条件

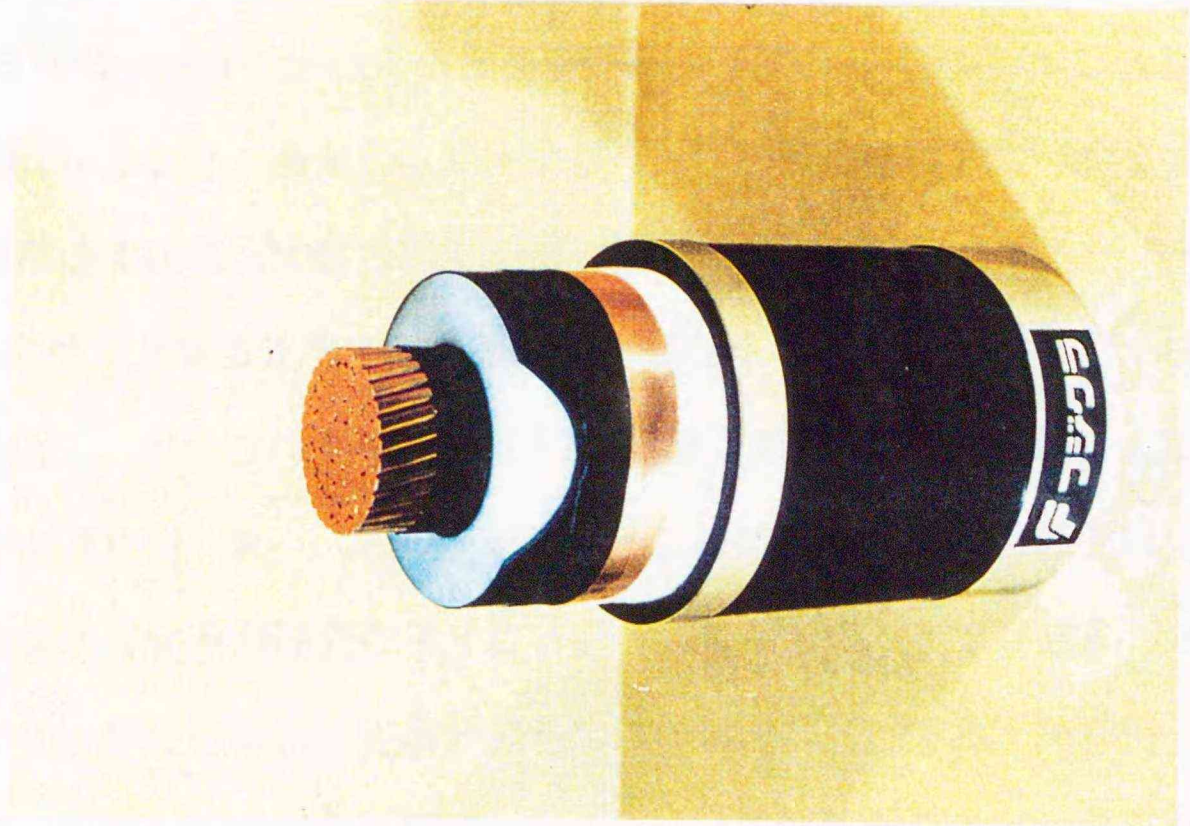
絶縁厚クラス		3.5 mm 級	6 mm 級	12 mm 級
構 造	導体サイズ (mm ²)	60	200	800
	絶縁厚 (mm)	3.5	6.0	12.0
	d_2/d_1^{*1}	$\frac{18.7}{11.7}=1.60$	$\frac{31.4}{19.4}=1.62$	$\frac{60.4}{36.4}=1.66$
破 壊 試 験 条 件 ^{*2}	DC(-)	-20 kV/10 分 ステップ	-30 kV/10 分 ステップ	-50 kV/10 分 ステップ
	DC 極性反転	±20 kV/10 分 3 回ステップ	±30 kV/10 分 3 回ステップ	±50 kV/10 分 3 回ステップ
	Imp(-)	-20 kV/3 回 ステップ	-20 kV/3 回 ステップ	-30 kV/3 回 ステップ
	DC + Imp 重畳	DC = -100 kV Imp + 20 kV/3 回 ステップ	DC = -200 kV Imp = +20 kV/3 回 ステップ	—

* 1: d_1 : 絶縁内径 (mm), d_2 : 絶縁外径 (mm)

* 2: いずれも予想破壊値 70% よりスタート



(絶縁厚 3.5 mm 級)



(絶縁厚 12 mm 級)

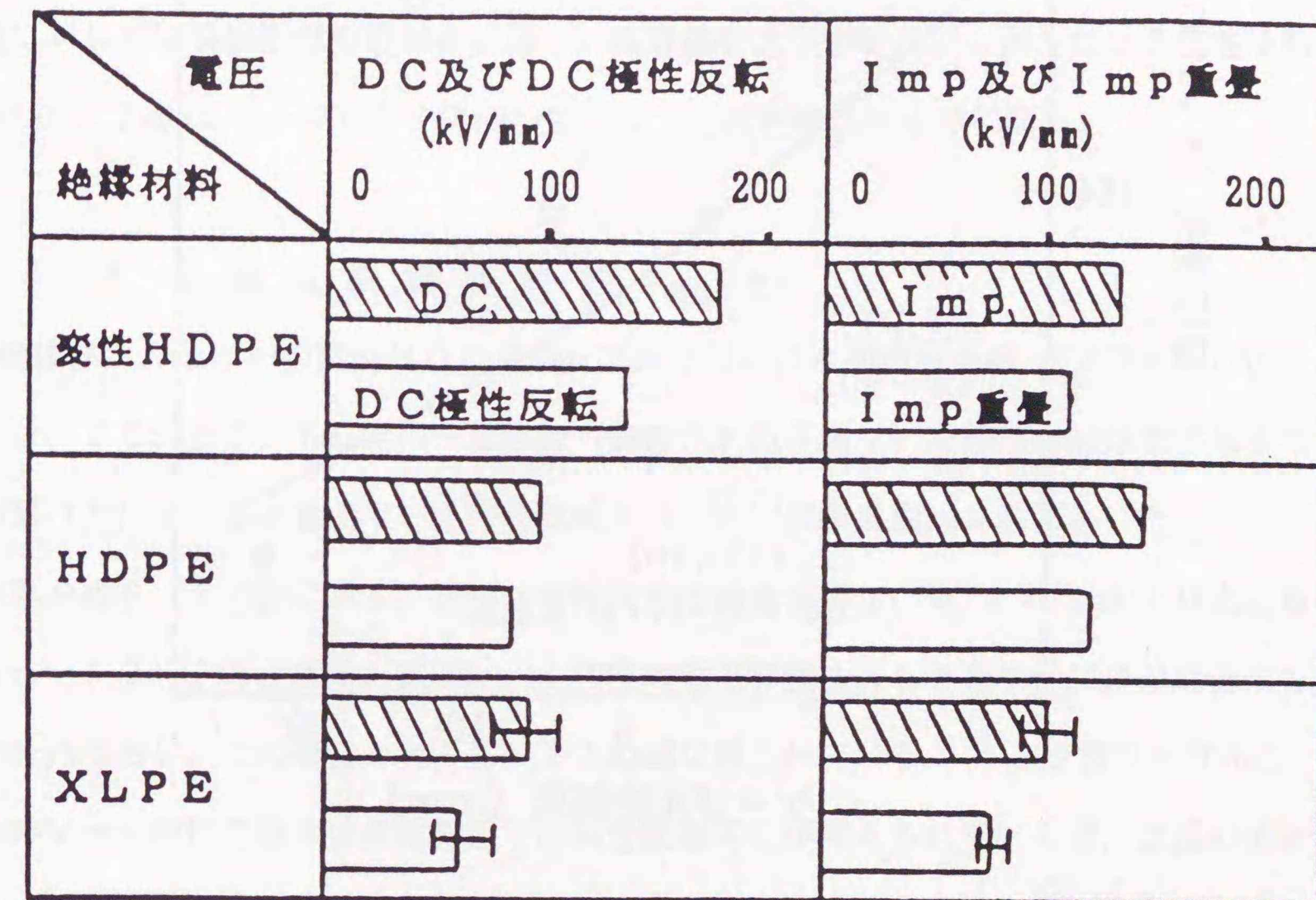
第5.12図 変性HDP E 試作ケーブル

90℃とした。各電圧に対して、絶縁厚3.5mmのケーブルでは5点、絶縁厚6.0mm及び12.0mmのケーブルでは2点の平均から各々の絶縁破壊強度 E_B (kV/mm)を求めた。

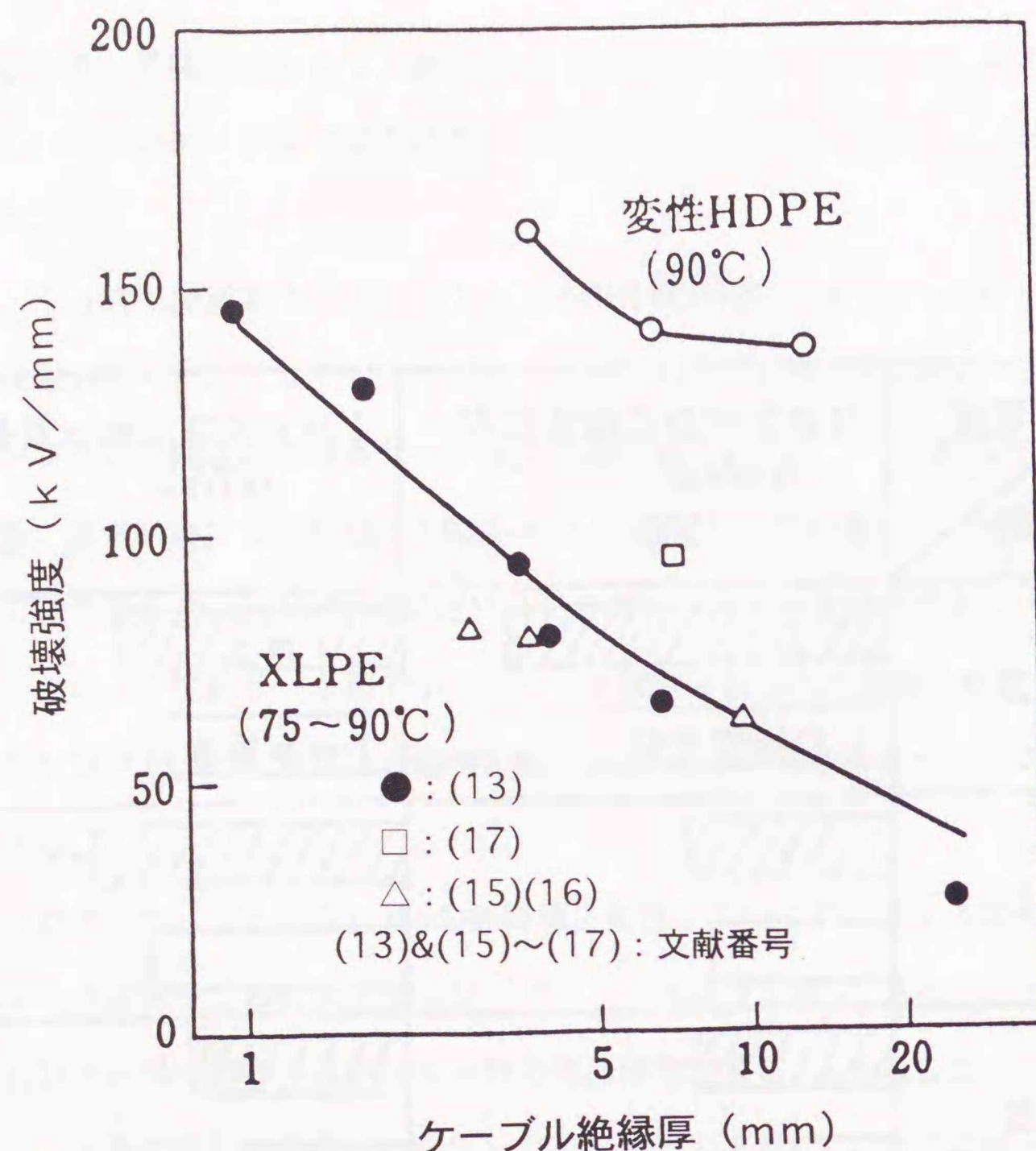
第5.13図に絶縁厚3.5mmケーブルの各電圧種に対する E_B をHDPE、XLPEと比較して示す。XLPEケーブルの E_B については多数の報告データがあり、本試作ケーブルと同程度の絶縁厚ケーブルでの報告値で^{(13)~(16)}、同図中に示したものである。変性HDPE、HDPEのImp E_B はXLPEより向上した値であり、DC及びDC極性反転 E_B については変性HDPEがHDPE、XLPEより大きく向上している。このことは第5.3節で示したシート試験で得られた結果と一致しており、特に、変性HDPEのDC及びDC極性反転 E_B はXLPEの1.5~2倍の極めて優れた値である。

変性HDPEケーブルのDC E_B の絶縁厚さ特性について第5.14図に示す。同図中にはXLPEケーブルの文献報告値^{(13)~(17)}も併せて示してある。また、第5.6表に変性HDPEケーブルの各絶縁厚及び各電圧種に対する E_B を示した。

第5.14図に示したように、変性HDPEのDC E_B はXLPEに比べて極めて高く、XLPEでは絶縁厚の増加による E_B の低下が顕著であるのに対し、変性HDPEの絶縁厚さ効果は非常に小さいことが分かる。XLPEケーブルの場合、DC E_B の厚さ効果が大きい理由の一つとして、特に高温側では直流漏れ電流の増大に起因する熱破壊的要因も考えられており⁽¹³⁾、この場合、絶縁厚が厚い程、熱的不安定が生じやすく E_B の低下が大きくなる。変性HDPEのDC E_B の厚さ効果の小さいことは、この熱的破壊要因が破壊の支配的因子にはなっていないことを示している。一方、空間電荷特性面からは、次節(第5.5節)で述べるように、変性HDPEの空間電荷分布は電極近傍にホモ電荷であり、短時間で飽和し、印加電界による空間電荷の増加が少ないのに対し、XLPEでは電極近傍はヘテロ電荷であり、直流印加時間、印加電界に依存して空間電荷量の増大が大きい。DC破壊に対し、ホモ空間電荷は電極近傍の電界を緩和し、ヘテロ空間電荷は強調させる。変性HDPEの材料固有の破壊強度が高いこと、および



第5.13図 各種電圧に対するケーブル E_B
(90℃、絶縁厚3.5mmケーブル)



第5.14図 変性HDPEケーブルのDC E_B とケーブル絶縁厚

第5.6表 変性HDPEケーブルの各種電圧に対する E_B (kV/mm)

電圧種	絶縁厚	3.5 mm	6 mm	12 mm
DC		170	140	137 ↑
DC 極性反転		131	132	117
Imp		146	143	128
DC+Imp 重畳		111	107	—

(90°C)

この空間電荷特性がXLPEに比べ高いDC E_B と与える要因と考えられ、第5.3節でのシート試験の結果と一致した結論を与えている。変性HDPEケーブルの E_B の絶縁厚さ効果はDC極性反転、Imp、DC+Imp重畳に対しても同様に優れた結果となっている(第5.6表)。変性HDPEのホモ空間電荷分布はDC極性反転、逆極性Imp重畳に対しては電極近傍の電界を強調し、破壊値を低下させるが、例えばDC極性反転 E_B はDC E_B の80~90%を維持しており、その絶対値は十分に高い。

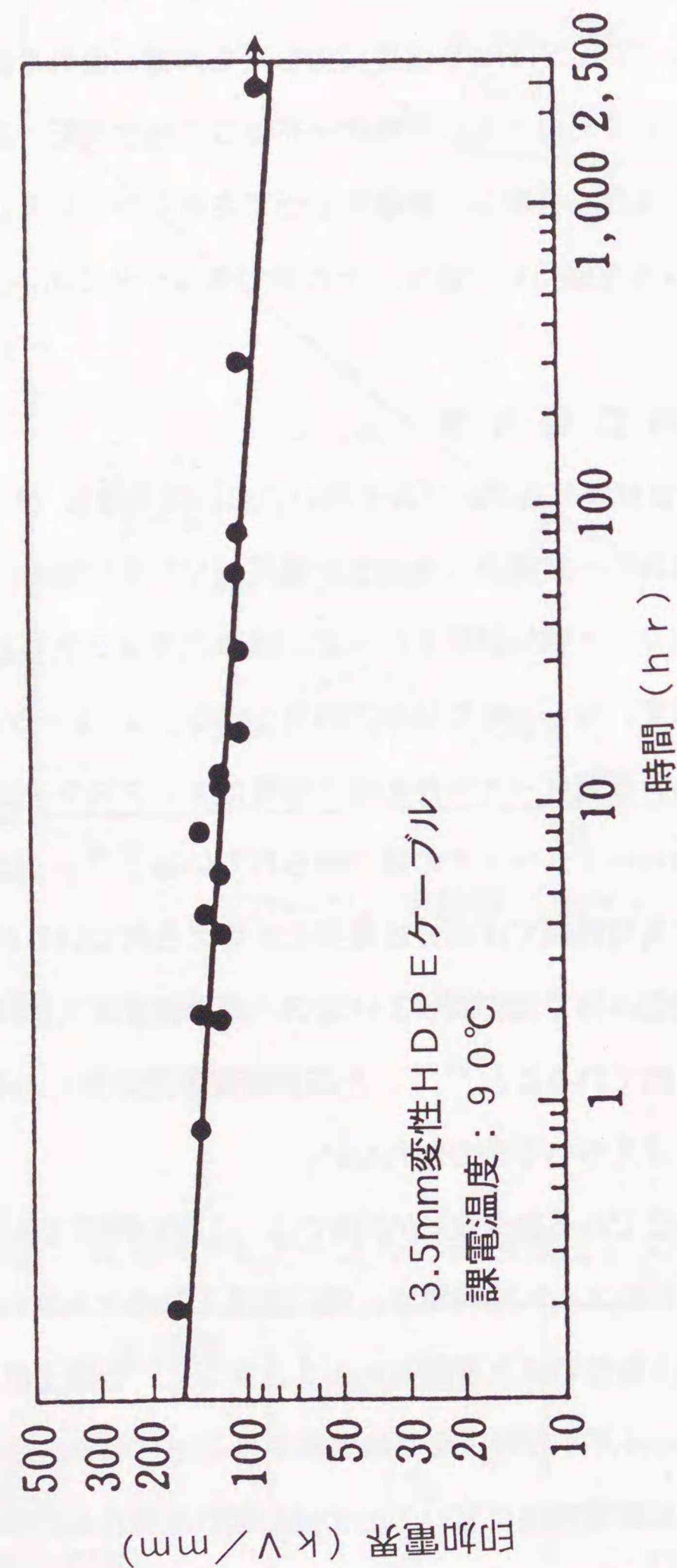
5.4.3 直流長期課電特性

絶縁厚3.5mmの変性HDPEケーブルを用いDC初期破壊値(170kV/mm)の80、70、60、50%の一定直流(負極性)電圧(V)を印加し、破壊するまでの時間(t)を求める直流V-t特性試験を行った。試験温度は90°Cとした。

結果を第5.15図に示す。V-t特性は垂下特性を示し、 $V^n t = \text{const.}$ より求まるnは $n=1.3 \sim 1.4$ となる。直流V-t特性の垂下特性はXLPEケーブルの場合にも報告されており、この場合 $n=1.0 \sim 1.4$ の値が得られている⁽¹³⁾。交流ケーブルの場合のV-t特性の垂下は高電界側では部分放電劣化が考えられているが、直流の場合のV-t特性の垂下の理由については分かっていない。電界強度が大きい場合、直流による部分放電現象も報告されていること⁽¹⁸⁾、及び長時間直流印加による空間電荷蓄積による電界変歪が原因と考えられるかも知れない。

V-t試験の最低試験電圧である約90kV/mmでは、2,500時間で破壊せず試験を打ち切った。なお、90kV/mm×2,500時間は、仮に超高压直流ケーブルの運転電界を30kV/mm程度、V-t垂下特性の劣化指数 $n=1.3$ とすると、計算上は $(90/30)^{1.3} \times 2500 \text{時間} = 45.5 \text{万年}$ の電圧寿命に相当することになる。従って、変性HDPEケーブルは直流長期課電特性においても十分に優れた特性を発揮していることが確認されたことになる。

90kV/mm×2,500時間課電打ち切り試料について、残存DC破壊電圧(90°C)を求めた結果140kV/mmであり、初期破壊電圧の約80%に低下していた。次節



第5.15図 変性HDPEケーブルの直流V-t特性

(第5.5節)で述べるように、この残存破壊値の低下度合は直流長期課電により蓄積した空間電荷の形成する電界とほぼ一致している。

第5.5節 変性HDPEケーブルの直流特性発現機構の検討

前節で示したように、変性HDPEの直流破壊特性がケーブル実用化を考慮した絶縁厚さ効果、直流長期課電特性も含めて十分に発揮されていることが確認された。直流特性の発現には空間電荷特性が大きく係わっており、シート試料による材料評価(5.3.2)においても熱刺激電流(TSC)法により変性HDPEが直流特性上有利な空間電荷特性となることが示されたが、ケーブルのような肉厚絶縁体の直流特性を適切に判断するには数mmオーダ以上の絶縁厚の空間電荷を評価する必要がある。そこで、本節では変性HDPEケーブルの直流特性の発現機構を主に肉厚絶縁体の空間電荷特性の測定によって、XLPEとの比較、並びに変性HDPEに含まれる変性基、添加剤の影響も含めて検討を行った。

5.5.1 変性HDPEとXLPEの空間電荷の比較

〔1〕ダストフィギャ法による測定

肉厚絶縁体の空間電荷分布を定性的に知る方法として、従来からダストフィギャ法が知られている。絶縁厚12mmの変性HDPEケーブルを用いて、下記条件で直流電圧を印加した後、ケーブルを切断しその切断面上に硫黄(黄色：負電荷に付着)と鉛丹(赤色：正電荷に付着)の混合粉を振りかけて空間電荷分布を調べた。

(直流印加条件)

- ・電界：10kV/mm、30kV/mm、60kV/mm、100kV/mm (導体側負極性)
- ・温度：室温(RT)、90℃
- ・時間：6時間

第5.7表にダストフィギュアパターンの特徴をまとめた。また、第5.16図にその一例の写真を示した。変性HDPEの空間電荷分布はホモ空間電荷分布であることが分かる。ダストフィギュア粉の付着程度から、空間電荷量は電界が高い程大きく、室温と90℃の比較では90℃の方がかなり大きい様子を示している。空間電荷の少ない室温では、一様に負の電荷分布のみを示す場合が多いが、90℃では内部半導電層側に負、外部半導電層側に正の両電極にホモ空間電荷分布となる。高温側で空間電荷が大きくなるのは、本絶縁材料のベースポリエチレンであるHDPEでは60～70℃程度の温度で結晶域が関係する分子運動が始まることが知られており⁽¹⁹⁾、この運動に伴って電極からの注入電荷のトラップが増加することも考えられる。熱刺激電流(TSC)によるポリエチレンの空間電荷の評価からも、分子運動との関係で同様のことが多数報告されている⁽⁹⁾。一方、XLPEケーブルのほぼ同様の条件でのダストフィギュア法による空間電荷の評価結果では、両電極近傍にヘテロ空間電荷分布となることが報告されており⁽²⁰⁾、変性HDPEとは逆のパターンである。

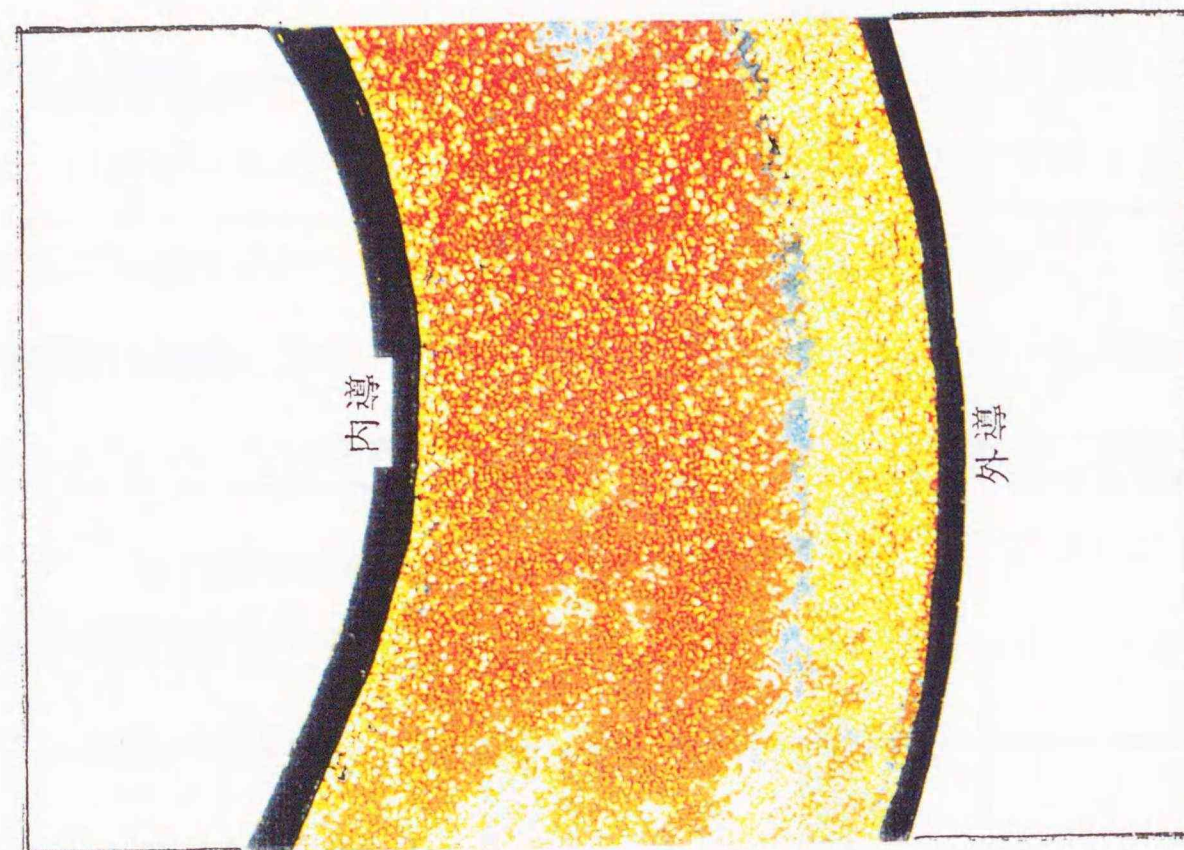
〔2〕パルス静電応力法による測定

ダストフィギュア法では空間電荷の定性的な情報を得るのみであるが、最近、肉厚絶縁体の空間電荷分布を定量的に測定する有効な方法として、高田らの開発したパルス静電応力法のケーブル絶縁体への応用が報告されており、電極系を工夫することにより円筒形のケーブルでの測定にも成功している⁽²¹⁾⁽²²⁾。そこで、次にこの方法により変性HDPE及びXLPEの空間電荷分布を定量的に評価した。パルス静電応力法の測定回路を第5.17図に示す。測定原理の詳しい説明は文献に譲るが⁽²¹⁾⁽²²⁾、空間電荷 $\rho(x)$ の蓄積した絶縁体にパルス電圧 $e(t)$ (1kV、50ns)を印加することによって空間電荷のある部分から弾性波 $p(t)$ が発生する。この弾性波を圧電素子で受け止め、電圧に変換して出力とする。空間電荷の位置に応じて弾性波に遅れが生ずるので空間電荷分布を知ることができる。なお、空間電荷分布の位置分解能はパルス電圧幅と圧電素子(PVDFフィルム)の厚さに依存し、本測定系(パルス幅:50ns、PVDFフィルム:

第5.7表 ダストフィギュアパターンの特徴

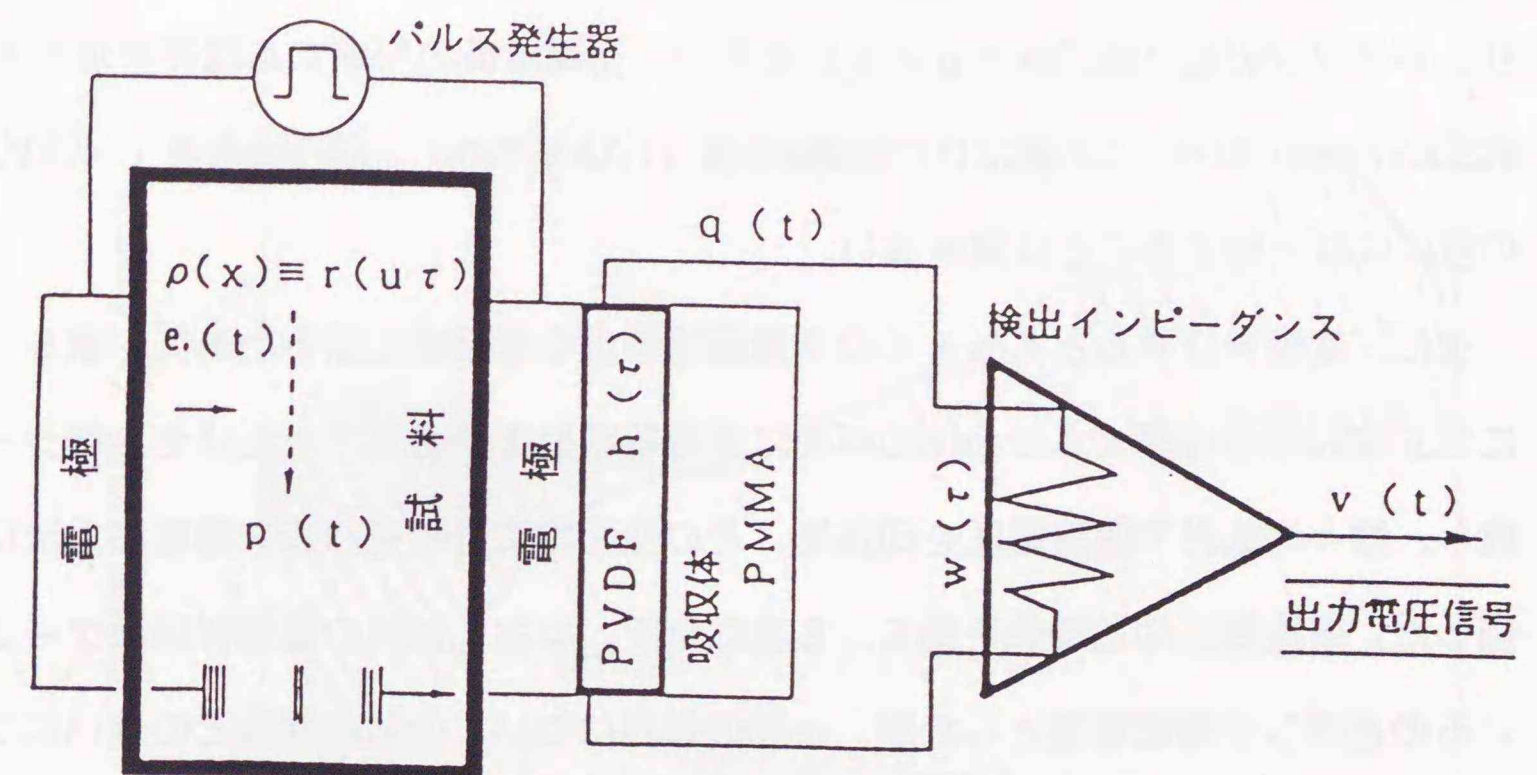
電 界	温 度	ダ ス ト フ ィ ギ ャ 特 徴		
10kV/mm	RT			内導からのみ広く、薄く ホモ空間電荷分布
	90℃			薄いホモ空間電荷分布
30kV/mm	RT			RT, 10kV/mmと同傾向
	90℃			ホモ空間電荷分布 (90℃、10kV/mmより 厚い)
60kV/mm	RT			ホモ空間電荷分布 (30kV/mmより厚い)
	90℃			ホモ空間電荷分布 (RT, 60kV/mmより厚い)
100kV/mm	RT			内導からのみホモ空間電荷 分布 (RT, 60kV/mmと同程度)
	90℃			ホモ空間電荷分布 (60℃、60kV/mmより 厚い)

内導 外導 ( : 中性層)



ケーブル：変性HDPE（絶縁厚12mm）ケーブル
課電条件：90℃、100kV/mm、6時間

第5.16図 変性HDPEケーブルのダストフィギュア例



$\rho(X)$: 電荷密度
 $P(X)$: 圧力波(弾性波)
 $e(t)$: 高電圧パルス
 u : 弾性波の伝搬速度(試料内部)

$h(\tau)$: 厚電素子の伝達関数
 $q(t)$: 厚電素子の出力信号発生電荷
 $W(\tau)$: 検出器の伝達関数

第5.17図 パルス静電応力法測定 of 構成図

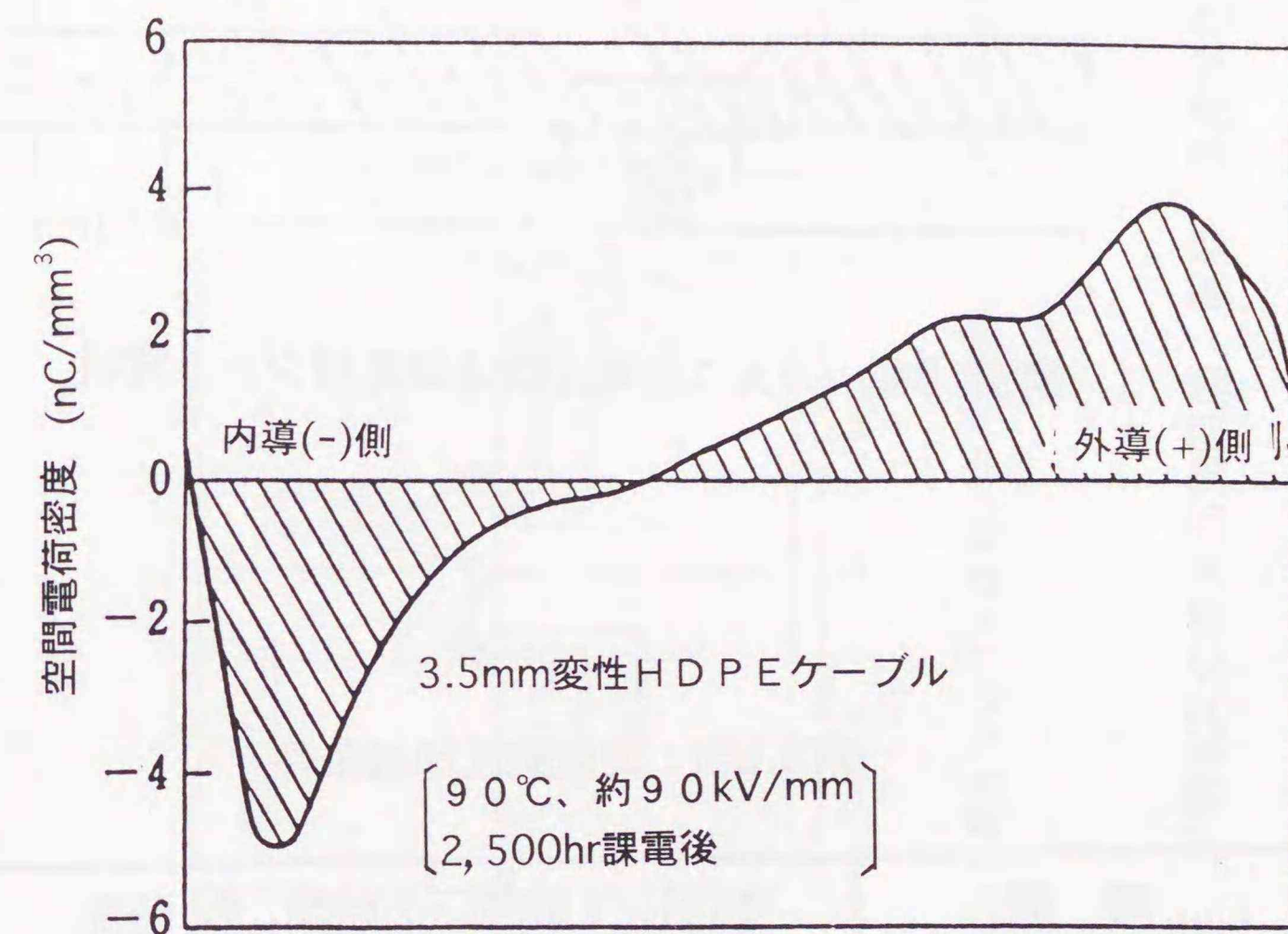
100 μ m) ではポリエチレン中の弾性波速度1700m/sとして約100 μ mとなり、mmオーダの絶縁体の空間電荷分布の評価に対しては十分である。

変性HDPEケーブルについてパルス静電応力法による空間電荷分布の例として、第5.18図に前述(第5.15図)のV-t試験供試ケーブルの90℃、約90kV/mm $\times$ 2,500時間課電後試験を打ち切った試料について測定した結果を示す。ダストフィギャの場合同様、ホモ空間電荷分布が得られている。第5.18図の結果より、ポアソンの式($dE/dx = \rho / \epsilon$)を用いて空間電荷の形成する電界を求めると約30kV/mmとなり、この値はDC初期破壊値(170kV/mm)と残存破壊値(140kV/mm)の差にほぼ一致することは興味深い。

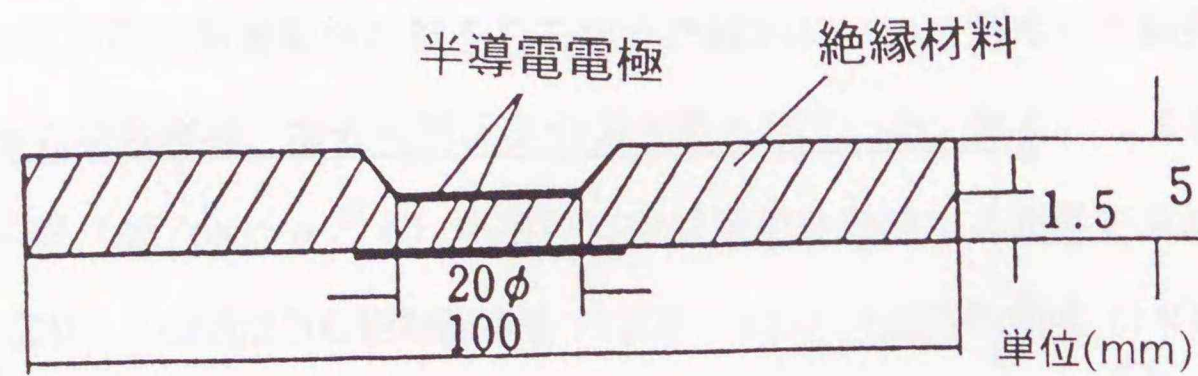
次に、変性HDPEとXLPEの空間電荷特性を定量的に知るために、第5.19図に示す有効部絶縁厚1.5mmの両面に半導電電極を熱融着させたりセス状シートを作成し、種々の条件で直流電圧を印加後、その空間電荷分布をパルス静電応力法により評価した。直流電圧印加条件を第5.8表に示す。なお、試料の電極材料はケーブルに用いるのと同じ半導電電極としたが、一部の試料について金蒸着電極との違いについても検討した結果、空間電荷分布には殆ど差は認められなかった。直流電圧印加の時間特性、電界特性、温度特性の代表的結果を第5.20(a)~(c)図に示す。この結果をまとめると次のようになる。

- ①変性HDPEは電極近傍にホモ空間電荷分布、XLPEはヘテロ空間電荷分布となる。
- ②電圧印加時間による空間電荷の形成は変性HDPEでは1時間以内に飽和するが、XLPEでは時間と共に増大し24時間でも飽和しない。長時間側(24時間)の空間電荷量の比較では、XLPEの空間電荷量は変性HDPEの約4倍となっている(第5.20図(a))。
- ③印加電界による空間電荷の増加は変性HDPEよりXLPEの方が大きい(第5.20図(b))。
- ④高温程空間電荷量は大きくなる(第5.20図(c))。

以上より、第5.4節で示した変性HDPEケーブルの優れた絶縁破壊特性は、空間



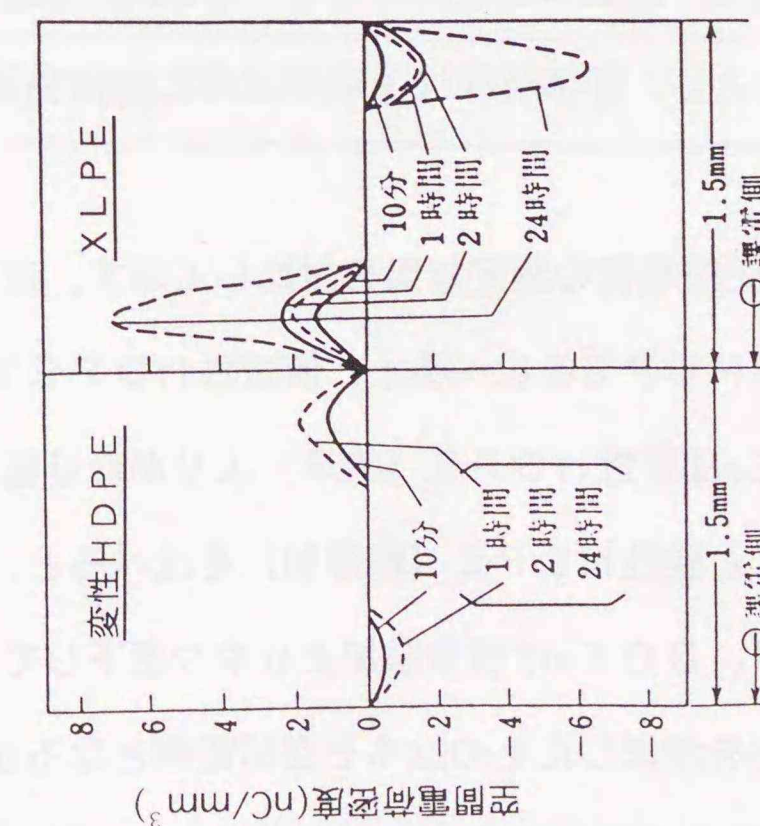
第5.18図 変性HDPEケーブルの空間電荷分布例



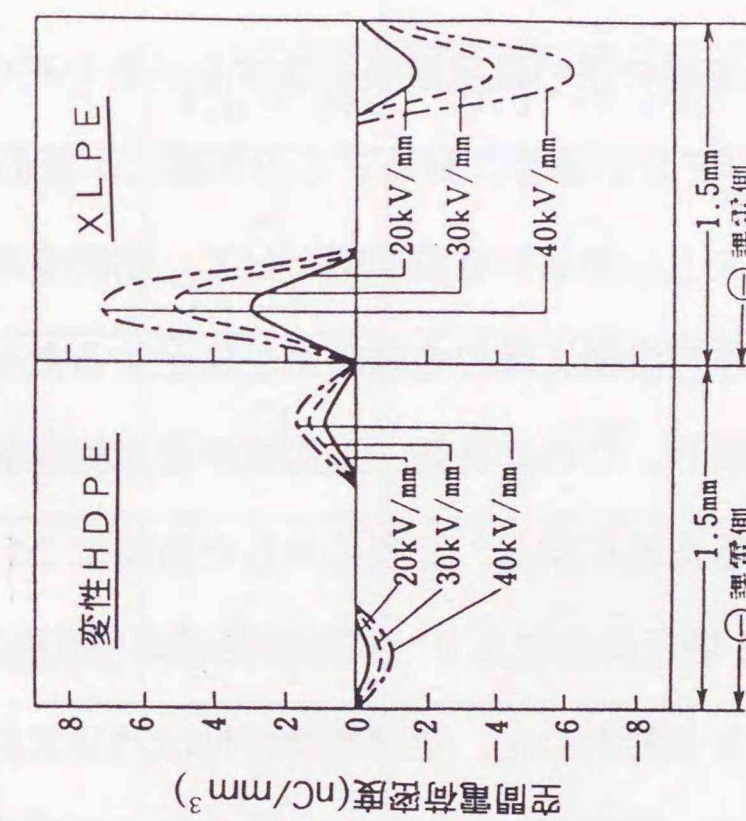
第5.19図 パルス静電応力法測定用シート試料

第5.8表 直流電圧印加条件

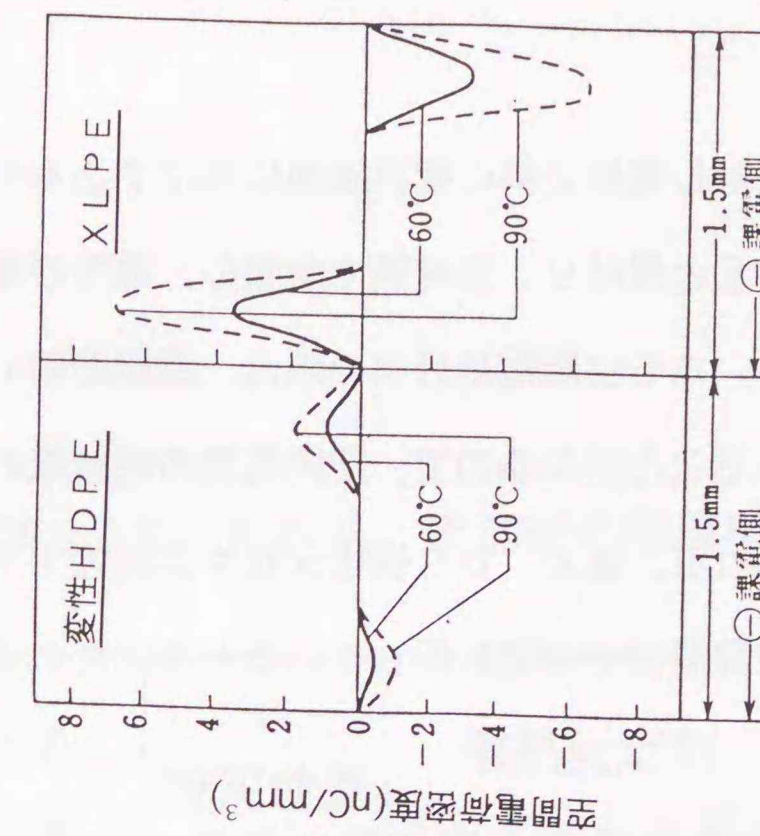
時 間	10 分, 1 時間, 2 時間, 24 時間
電 界	20 kV/mm, 30 kV/mm, 40 kV/mm
温 度	60°C, 90°C



(a) 印加時間特性 (90°C, 40kV/mm)



(b) 電界特性 (90°C, 24時間)



(c) 温度特性 (40kV/mm, 24時間)

第5.20図 空間電荷の直流印加時間、電界、温度特性

電荷特性面からはDC破壊に対し電極近傍の電界緩和に作用するホモ空間電荷分布であり、その空間電荷量はXLPEと異なり、短時間で飽和し、電界の増加による増大も少ないことが一因と考えられる。ホモ空間電荷分布の場合、電極近傍の電界は緩和されるが、バルクの電界は強調されることになるので、空間電荷の絶対量の少ないことも直流破壊特性の向上因子と考えられる。また、DC極性反転や逆極性Imp重畳での特性の多少の低下は、前記のホモ空間電荷分布に起因していると推定される。

5.5.2 変性HDPEの変性基、添加剤の効果

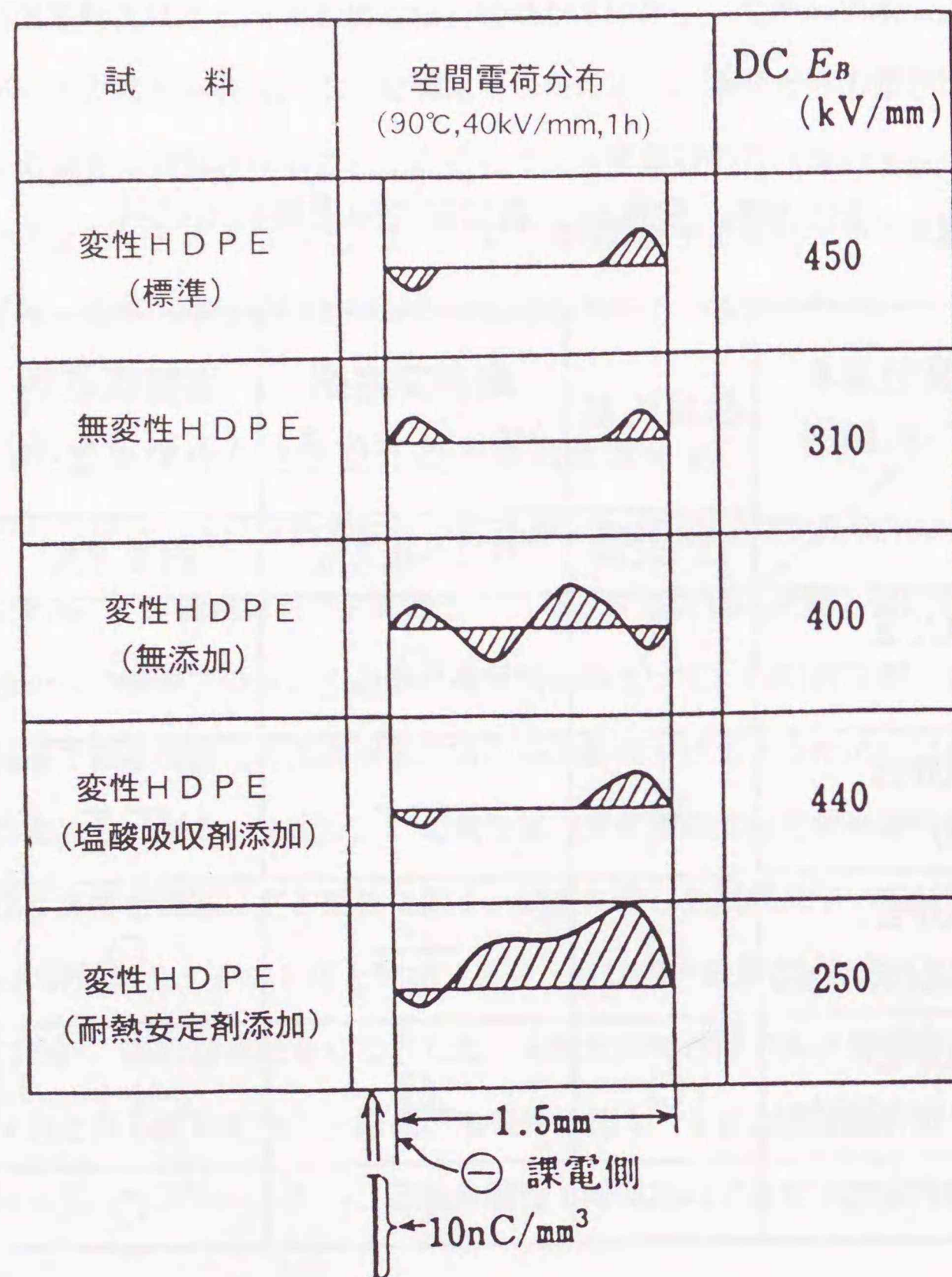
ポリエチレンなどの高分子絶縁材料の直流破壊特性は添加剤や充填剤などによって大きく影響される⁽⁴⁾。変性HDPEの場合、HDPEの側鎖に少量の酸変性基が導入されているほかに、製造プロセス上必要な微量添加剤として、耐熱安定剤、HDPE重合時の触媒残渣である塩素による押出加工時の金属腐食を防止するために添加される塩酸吸収剤が含まれる(第5.9表)。この変性基、添加剤が直流絶縁破壊特性、空間電荷特性に及ぼす影響を明確にするために第5.9表に示した試料について試験を行った。

DCEBの評価は5.2.2項と同様であり(有効部絶縁厚200~300μmのリセス状シート試料)、試験温度は90℃とした。空間電荷特性はパルス静電応力法により第5.19図と同じ試料形状で、直流印加条件は第5.8表の条件の中で空間電荷の最も顕著な90℃、40kV/mmとし、印加時間は1時間以内に飽和する傾向であったので1時間とした。

第5.21図にDCEBと空間電荷の測定結果を対比して示す。変性の効果として変性HDPE(標準)と無変性HDPEを比べると、無変性HDPEでは負電極近傍がヘテロ空間電荷となり、DCEBは変性HDPE(標準)よりかなり低い。添加剤の効果として変性HDPE(標準)と変性HDPE(無添加)を比べると、無添加では両電極近傍にヘテロ空間電荷となり、DCEBは標準添加よりやや低下している。各々の添加剤の効果として、耐熱安定剤を添加したものはホモ空間電荷となるが、正電極側の電荷量は極めて大きく、DCEBは大きく低下するが、塩酸吸収剤の添加では変性HDPE

第5.9表 変性基、添加剤の効果検討用試料

変性基& 添加剤 試料	酸変性基	耐熱安定剤 (フェノール系)	塩酸吸収剤 (エポキシ系)	触媒残渣 (Cl, Al, Mg, etc)
	1%未満	0.1~0.2%	約0.2%	数十ppm
変性HDPE (標準)	○	○	○	○
変性HDPE (無添加)	○	—	—	○
変性HDPE (塩酸吸収剤添加)	○	—	○	○
変性HDPE (耐熱安定剤添加)	○	○	—	○
無変性HDPE	—	○	○	○

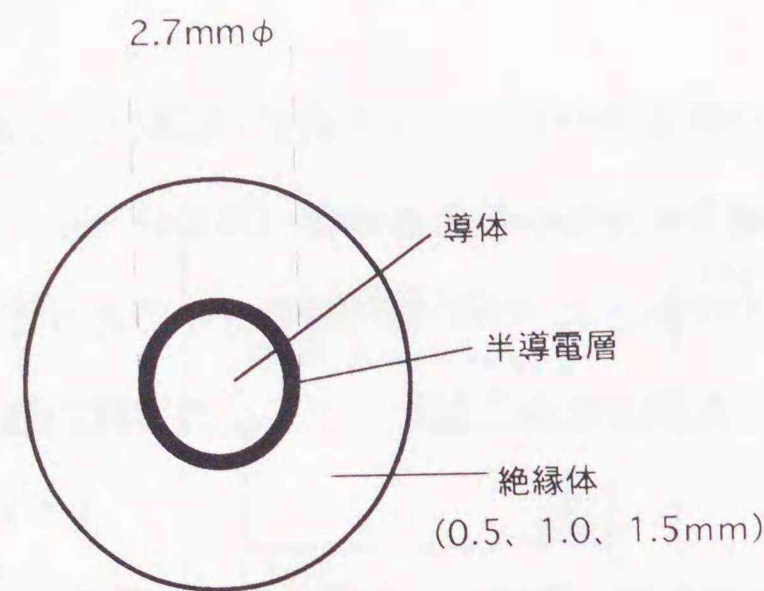


第5.21図 変性基、添加剤の空間電荷、DC E_B への影響

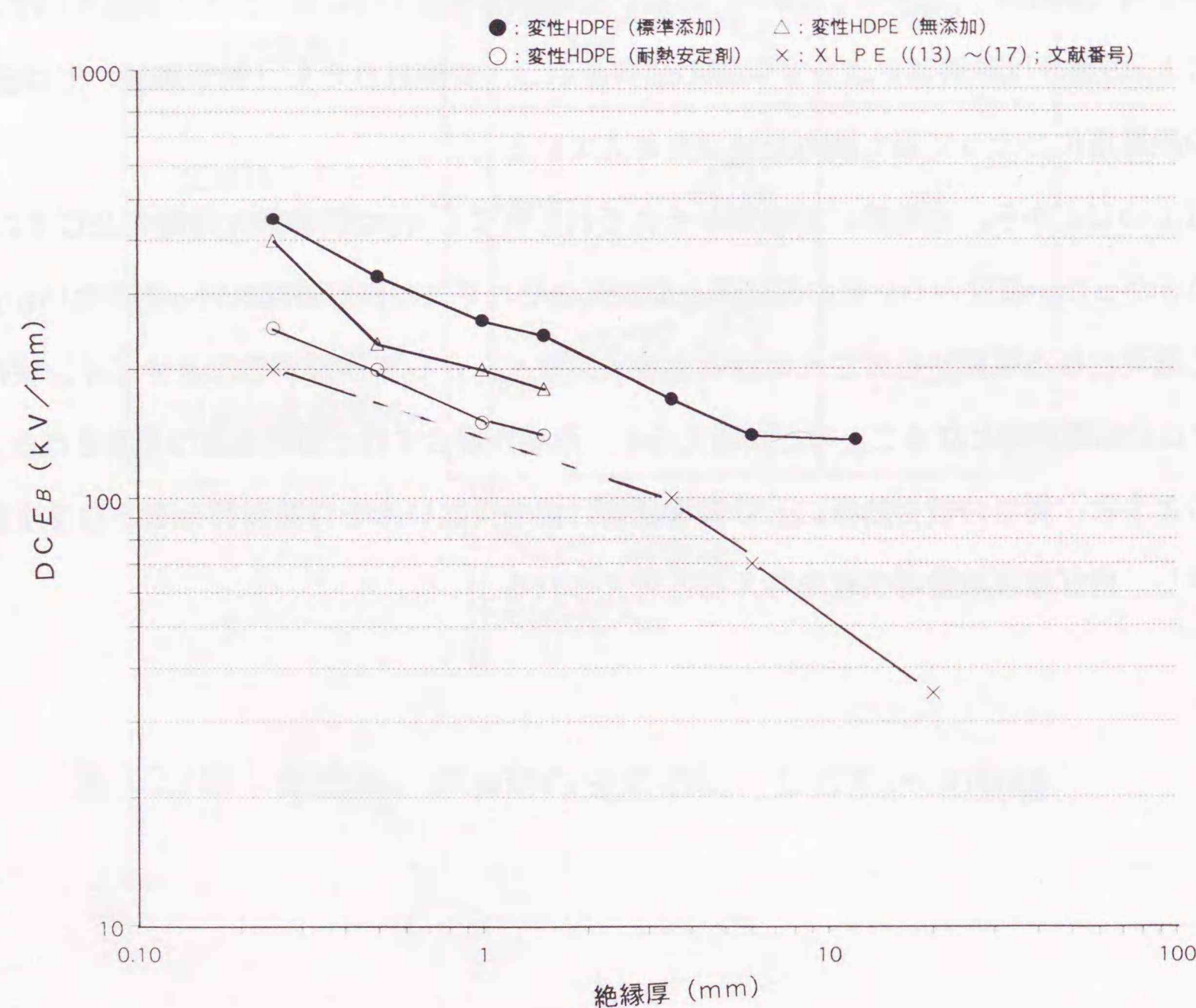
(標準)と同程度のホモ空間電荷分布でありDC E_B も高い。このことから、電極の一方または両方にヘテロ空間電荷分布を与える場合(無変性HDPE、変性HDPE(無添加))電極近傍の電界が強調され、ホモ空間電荷分布であっても空間電荷が極めて大きい場合(変性HDPE(耐熱安定剤添加))バルクの電界が強調されるため、DC E_B は低下すると考えられる。

添加剤のDC E_B に及ぼす影響を絶縁厚さ効果を含めて評価するために、第5.9表の一部の試料について絶縁厚0.5mm、1.0mm、1.5mmのミニチュアケーブル(第5.22図)を作成し、そのDC E_B (90°C)を測定した。第5.23図に、この結果と併せてこれまで得られているシート試料(絶縁厚:0.2~0.3mm)からケーブル試料(絶縁厚:3.5~12.0mm)の広い絶縁厚の範囲でDC E_B の厚さ効果を示す。DC E_B の順序は絶縁厚によらず同様の傾向を示し、変性HDPE(標準添加)では全ての絶縁厚にわたって最も優れた結果を与えている。

以上のことから、変性基、添加剤がそれぞれにDC E_B 、空間電荷に影響を及ぼすことが分かった。変性HDPEの変性基と添加剤のそれぞれの作用機構は明らかでないが、ホモ電荷となる電極からの注入電荷のトラップサイトとして作用することやイオン性のヘテロ空間電荷源となることなどが考えられ、両者が複合すれば空間電荷は相殺される。このような、両者の複合効果により電極近傍に量の少ないホモ空間電荷分布となる現象を示し、良好な直流破壊特性を与えられ。



第5.22図 ミニチュアケーブル構造



第5.23図 添加剤の効果とDCEBの絶縁厚特性

第5.6節 結論

超高圧直流ケーブル用新種高分子絶縁材料の探索検討を行い、先ず、基礎検討として各種高分子群の直流特性を評価し、この試験での材料選択ステップの過程から直流特性に極めて優れる新種絶縁材料として側鎖に少量の酸変性基を導入した高密度ポリエチレン（変性HDPE）を見出すに至った。次に、この新種絶縁材料の実用化に向けて、ケーブルでの評価を行い、変性HDPEの素材としての直流特性がケーブル構造でも十分に発揮されていることが確認され、併せて、ケーブル直流特性の発現機構についても、主に空間電荷特性の観点から明らかにした。これらの検討過程での主な結論は次の通りである。

- (1) ポリエチレン（PE）系、極性ポリマー系等の各種高分子群の絶縁破壊強度（ E_B ）の評価から、 $Imp E_B$ は結晶化度の高いPE（HDPE）、 DCE_B は酸変性基の導入により向上する傾向を示した。
- (2) (1)の結果より、側鎖に少量（1%未満）の酸変性基を持つ変性PEに的を絞ってその最適化検討を行い、 Imp 、 DC 共に優れた直流用新種絶縁材料候補として変性HDPEが選定された。変性HDPEの優れた絶縁破壊特性はPEの結晶化度が高いことによる固有破壊強度の向上及び変性基による空間電荷の制御の効果と推定された。
- (3) 変性HDPEのケーブルでの絶縁破壊特性の評価から、変性HDPEの DCE_B はXLPEケーブルと異なり、絶縁厚が増大しても低下は極めて小さく、肉厚の超高圧直流ケーブルへの適用に有望であることが分かった。また、直流長期課電特性についても、高温、高電界の厳しい条件下でも十分に耐えることが確認された。
- (4) 肉厚絶縁体での空間電荷の定量的評価（パルス静電応力法による）から、変性HDPEケーブルの優れた直流破壊特性を裏付けることができた。すなわち、空間電荷分布はXLPEでは電極近傍にヘテロ、変性HDPEではホモとなり、また、変性HDPEでは直流電圧の印加時間、印加電界の増加による空間電荷の増加は小

さい。このような量の小さいホモ空間電荷分布を有していることが直流破壊特性を向上させている。

- (5) 上述の変性HDP Eの直流特性に有利な空間電荷分布は、HDP Eに対する変性基の導入および変性HDP Eに含まれる添加剤の複合効果により現れることが分かった。

(第5章参考文献)

- (1) 権、岩本、日野：「EVA-XLPE系のTSCと空間電荷特性」、電気絶縁材料研究会資料、EIM85-123、p35 (1985)
- (2) H.Fukagawa,Y.Nitta and Y.Sekii:"Development of a new insulating materials for DC XLPE cable", Jicable'84, BIII-2, p283, (1984)
- (3) T.Tanaka:"Charge injection by voltage application into polymer dielectrics-New proposal for DC cable polymer insulation system",IEEE PES Summer Meeting,A76,p464 (1976)
- (4) 電気学会技術報告、II部342号、「固体絶縁材料の添加剤、充填剤効果」(1990)
- (5) 菊地、二宮、宮内：「プラスチック絶縁体の直流特性」、古河電工時報、No57、p83 (1975)
- (6) 電気学会技術報告、II部304号、「高分子絶縁材料の絶縁破壊現象」(1989)
- (7) S.N.Kolesov:"The influence of morphology on the electric strength of polymer insulation" IEEE Trans. Elec. Insul.,EI-15,p382 (1980)
- (8) 矢作他：「特集：最近の絶縁材料；直流絶縁材料と試験法の諸問題」、電学誌、vol.95,p425 (1975)
- (9) 電気学会技術報告、II部194号、「電気絶縁材料の熱刺激電流」(1985)
- (10) 日野、山下：「熱刺激電流による絶縁膜への電荷注入と注入距離の測定」、電学論A、vol.95,No2,p79 (1975)
- (11) 岩本、加藤、鞠、日野：「温度勾配熱刺激測定によるXLPEフィルム中の荷電粒子の種別と極性の判定」、電学論A、vol.105,p255 (1985)
- (12) 大島、小野、小島、片岡、岩田、竹鼻：「超高压ケーブル用FZCV機によるXLPEケーブルの特性」、藤倉電線技報、No59,p1 (1978)
- (13) 今城他：「超高压架橋ポリエチレン(XLPE)絶縁ケーブル特性と試験法に関する検討」、

電力中央研究所報告、No177086 (1978)

- (14) 電気学会技術報告、I部128号、「直流油入機器、直流ケーブル材料の直流絶縁特性」(1979)
- (15) 峰村他：「直流CVケーブルに関する基礎検討」、昭和63電気学会全国大会、1326 (1988)
- (16) 峰村他：「直流CVケーブル開発可能性の検討(2)」、昭和63電気学会全国大会、1327 (1988)
- (17) P.Michel,L.Michel:"Extruded synthetic insulations for development of HVDC energy cable", Jicable'87, B2-2, p111 (1987)
- (18) 一色、山本、新元：「ボイド放電によるポリエチレンの直流V-t特性」、第8回電気絶縁材料シンポジウム、I-6 (1975)
- (19) K.Wolf:"Relaxationsuntersuchungen zum Studium der Molekularen Vorgange in Hochpolymeren", Z.Electrochem. vol.65, p604 (1961)
- (20) 緒方他：「ダストフィギャ法による直流CVケーブル中の空間電荷の評価」、平成元電気学会全国大会、1464 (1989)
- (21) 櫛部、前野、高田：「パルス静電応力法を用いた誘電体中の蓄積電荷量測定」、電学論A、vol.106,p118 (1986)
- (22) 福永他：「パルス静電応力法によるケーブル絶縁体中の空間電荷分布測定」、電学論A、vol.110,p647 (1990)

第6章 結 論

本研究は高電圧電力ケーブルの信頼性を確保するための最も主要な構成材料である絶縁材料の性能向上を目的として行われたものであり、超高压OFケーブルに用いられる「PPラミネート紙の諸物性と特性改善に関する研究」、超高压CVケーブルの絶縁材料設計の指針を与えるための「高分子の固体構造と絶縁破壊特性に関する研究」、浸水下で使用される配電CVケーブルの水トリー劣化防止を目的とした「水トリーの進展機構と抑止方法に関する研究」、従来のOFケーブルに替わる「超高压直流ケーブル用新規プラスチック絶縁材料に関する研究」を研究課題として取り上げている。

本研究で得られた成果を要約すると次の通りである。

(1) 超高压OFケーブル用絶縁材料としてクラフト紙より誘電特性、絶縁破壊特性が優り、最近実用されるようになったPPラミネート紙について、その基本的な諸物性とPP層の存在に関わるケーブル特性への影響の定量的検討、並びにPPの耐油性の改善について研究を行った。

①PPラミネート紙の製造加工上の因子のうち、PPレジジン及びラミネート押出加工条件の選定が製品性能に対して特に重要であることを示すと共に、現用PPラミネート紙の弱点である紙/PP間の剥離強度の改善手法(2層構造紙の使用、シラングラフト化PPの使用)を開発した。

②クラフト紙に比較したPPラミネート紙の電気特性(誘電特性(ϵ 、 $\tan \delta$)、AC&Imp絶縁破壊特性)の優位性を定量的に検討し、さらに、将来予想される1000kV級UHVケーブルへの絶縁設計に際し、PP分率の異なるPPラミネート紙を使用した ϵ グレーディングの手法を取り入れ、且つ本研究で明らかにされた ϵ グレーディングの段替わりに生ずる絶縁中層 $E_{\max}$ (最大電界強度)が導体上 $E_{\max}$ より高い値を許容できるとする考え方を導入することにより、絶縁設計の見通しを与えた。

③PPラミネート紙絶縁層は従来のクラフト紙ケーブルになかった現象として、PP層の吸油膨潤、熱膨張による紙厚増加により紙層間の面圧増加(絶縁層の締め)が現れ、ケーブルの製造条件(紙巻張力、絶縁油含浸)、使用条件(曲げ特性、油流抵抗)に制約を余儀なくされている。PPラミネートの紙厚増加と面圧の関係式をPP分率、紙巻張力、温度の関数として求めることによって、従来経験に頼っていた上記の制約に与える影響を定量的に把握した。

④PPの耐絶縁油特性として、絶縁油へのPPの溶出、③で述べた紙厚増加の最も大きい因子となる吸油膨潤が挙げられる。PPの溶出による絶縁油への影響(粘度、流動点上昇)についてはOFケーブル使用最高温度レベルまで実用上支障のないことが確かめられた。また、吸油膨潤の抑制方法について検討し、絶縁油練込PPとラミネート押出時の適切な冷却条件(PPの結晶性コントロール)の併用により、現用PPラミネート紙の約40%以下に膨潤を抑制したLSP(Low Swellig PPラミネート紙)を開発した。LSPの使用によって75%程度の高PP分率が要求される1000kV級UHVケーブルの製造が可能となる見通しを与えた。

(2) 超高压CVケーブルの信頼性向上の一貫として高耐電圧絶縁材料を得るための材料設計、加工法の指針とすべく、高分子の固体構造と絶縁破壊特性の関係について検討を行った。

①高分子の固有絶縁破壊強度(E_B)を適切に評価する試験方法について検討し、リセスシート電極の方法を採用した。この同一の評価方法で幅広い分子構造を有する高分子絶縁材料についてその E_B を測定した結果、常用温度域(ケーブル使用温度域)では高分子構造と E_B の間に特定の相関は見出されなかったが、HDPE(高密度ポリエチレン)、PP-R(ポリプロピレンランダムコポリマー)が比較的良好な E_B であることを認めた。

②①での結果から、誘電特性、押出加工性、機械特性も含めて実用性のあるPE(ポリエチレン)を中心とする結晶性ポリオレフィンについて更に詳細に検討した。種々

の条件（分子構造、結晶性、添加剤&ポリマーブレンド効果）を変えて E_B を測定することにより、最も影響の大きい因子は同一種のPEに対する結晶化条件（冷却条件、造核剤添加）の違いであることが判明した。

③前記の結果から、HDPEを選定し、種々の条件によるケーブル製造及びその評価を行なった結果、ケーブル製造条件の中で押出後の温度条件（冷却結晶化条件）が E_B に最も大きい影響を与える事が判り、最適条件では現用XLPEケーブルの約1.7倍の E_B の向上を認めた。ケーブル絶縁体の微細結晶構造解析から、絶縁破壊強度の向上には結晶厚（ラメラ厚）と非晶厚の最適な存在比率が重要な因子として作用することが明らかとなった。

（３）CVケーブルの未解決の課題として残されているボウタイ状水トリ（BT）の抑止方法についてポリマー物性と水トリ進展性の関係の解明と併せて検討を行った。

①水トリの進展機構から推察したポリマー物性要因として、・親水性付与の効果、・結晶化度の効果、・結晶配向の効果を取り上げ水トリ特性との関係を明らかにした。すなわち、電界不整部への水の課電凝縮の抑制を想定した親水性（極性基）の付与によりBTは抑制傾向を示し、結晶化度の効果については、小さくても、大きくてもBTは抑制され中間の結晶化度（現用XLPE近傍）が最もBTの進展性の大きいことが判った。結晶配向XLPEのBT特性と結晶軸配向の関係を調べた結果、BTは結晶ラメラ間の非晶部に沿って進展し易いことが判り、現用XLPE近傍の結晶化度（非晶域サイズ）が非晶域への水の選択的注入によるBTの微視的構造であるミクロチャンネルを最も形成し易いと考えられた。

②水トリ抑止ケーブル用絶縁材料として上記の知見を基に、低結晶性で、ある程度の親水性添加剤を含む超低密度ポリエチレン（VLPE）を選択し、ケーブル製造及びその特性評価を行った結果、VLPEケーブルのBT発生数は現用XLPEケーブルの $1/10^4$ 以下の極めて優れたBT抑止能を示した。低結晶性であるた

めVLPEケーブルの初期破壊電圧は現用XLPEケーブルより劣るものの、長期浸水課電後では、そのBT抑止効果により破壊電圧の低下は非常に小さく、現用XLPEを大幅に上回る結果となる。このことから、本ケーブルは過酷な浸水下で適用されるケースの多い地中配電ケーブルへの適用に有望であることが示された。

（４）超高压直流ケーブル高分子絶縁材料について、高分子構造と直流特性（直流破壊電圧、空間電荷特性）の関係を踏まえて、新種絶縁材料の探索研究並びにケーブルの開発を行った。

①結晶構造、化学構造の異なる幾つかの高分子群の直流特性の評価により、結晶化度の向上は固有絶縁破壊強度を向上させ、酸変性基の導入は空間電荷を制御する傾向を認め、この結果から両者の特性を併せ持つ少量の酸変性基を導入した高密度ポリエチレン（変性HDPE）が極めて優れた直流特性であることを見出した。

②変性HDPEの結晶化度、変性基量について最適化検討を行い、この最適化された変性HDPEを用いたケーブルでの直流絶縁破壊特性を試験した結果、ケーブル絶縁厚さ効果を含め、初期特性、長期特性共に非常に良好な性能を示し、変性HDPEの素材としての直流特性がケーブル構造でも十分に発揮されていることが確認された。

③肉厚絶縁体の定量的空間電荷測定に有効な手法として開発されたパルス静電応力法によって、変性HDPEでは両電極近傍に量の少ないホモ空間電荷分布となることから、変性HDPEケーブルの優れた直流絶縁破壊特性の発現を裏付けることができ、超高压直流ケーブルへの適用の見通しを与えた。

以上述べた通り、本研究は高电压電力ケーブルの主要な分野である超高压OFケーブル、超高压CVケーブル、配電CVケーブル、超高压直流ケーブルに関わり、そのケーブル性能を発揮するための要となる絶縁材料の性能向上並びに改善に貢献するものと考える。

謝 辞

本研究を学位論文にまとめるに当たり、懇切な御指導を終始賜りました北海道大学工学部 堤耀広教授に心より謝意を表します。また、本論文の査読に際し、貴重な御意見、御教示をいただきました北海道大学工学部 大場良次教授、田中啓司教授、酒井洋輔教授に厚く感謝致します。

本論文は多くの方々からの御支援、御鞭撻、御助言により、筆者が株式会社フジクラ（旧、藤倉電線株式会社）に入社以来22年間の主な研究成果をまとめて完成できたものであり、研究の機会を与えていただいた株式会社フジクラ 田中重信取締役社長、工学博士 一色節也技師長をはじめとし、特に、学位論文にまとめるように強く勧めていただいた工学博士 丹羽利夫基盤材料研究所長に深甚の謝意を表します。

本論文のうち、第4章「水トリーの進展機構と抑止方法」の一部は中部電力株式会社殿と、第5章「直流ケーブル用新種絶縁材料の開発」は東京電力株式会社殿との共同研究により行われたものであり、関係各位に謝意を表します。

本研究の遂行に当たり、御支援、御鞭撻をいただいた株式会社フジクラ 取締役 桧山滋電力事業部長、工学博士 小野幹幸エネルギーシステム研究所長、工学博士 吉田昭太郎副電力事業部長、工学博士 志関誠男部長、山本修治部長、藤本郁夫部長、竹鼻始部長、渡辺和夫部長、中尾由明部長、長谷川正毅課長をはじめ基盤材料研究所、電力技術部、電力機器技術部、電力技術開発部、富津工場、鈴鹿工場の関係各位に厚く御礼を申し上げます。

また、本研究の遂行に多大の御協力、御援助をいただいた株式会社フジクラ 中山四郎氏、前田剛課長、井坂宗晴課長、大塚秀文課長補佐、宮田裕之主任研究員、國村智課長補佐、前田和則課長補佐、畑田道則課長補佐、鈴木淳主任研究員、理学博士 中司徹係長、横山綾子氏、飯沼浩一氏に深く感謝致します。

研 究 業 績

1. 論 文

- (1) 高橋享、新元孝、一色節也、中瀬吉昭、栗山将：「各種高分子絶縁材料の放射線誘起電流」、電気学会論文誌A, vol.101, No3, p167~p174 (昭和56)
- (2) 久保田武夫、吉藤直久、丹羽利夫、高橋享、宮田裕之：「直流ケーブル用高分子絶縁材料の開発（その1）」、電気学会論文誌A, vol.112, No3, p215~p222 (1992)
- (3) 鈴木建哉、丹羽利夫、高橋享、宮田裕之：「直流ケーブル用高分子絶縁材料の開発（その2）」、電気学会論文誌B, vol.112, No10, p914~p920 (1992)
- (4) 丹羽利夫、中山四郎、小林一治、中司徹、高橋享：「CVケーブル用PEのキャラクタリゼーション」、電気学会論文誌A, vol.113, No9, p638~p646 (1993)
- (5) 高橋享、宮田裕之、中司徹、横山綾子：「ポリエチレンの空間電荷形成に及ぼす因子」、電気学会論文誌A, vol.115, No5, p430~p436 (1995)
- (6) 内田克己、平田宜弘、田中稲穂、高橋享、竹鼻始：「CVケーブル接続部欠陥の部分放電及び絶縁破壊特性」、電気学会論文誌B, vol.115, No10, p1185~p1192 (1995)
- (7) T.Takahashi, H.Ohtsukuka, H.Takehana, T.Niwa：「Study on Improvements to the Dielectric Breakdown Strength of Extruded Dielectric Cables」, IEEE Trans. Vol. PAS-104, No8, p1945~p1950 (1985)
- (8) N.Yoshifuji, T.Niwa, T.Takahashi, H.Miyata：「Development of the New Polymer Insulating Materials for HV DC Cable」, IEEE Trans. Power Deliv. vol.7, No3, p1053~p1059 (1992)
- (9) T.Niwa, H.Hatada, H.Miyata, T.Takahashi：「Study on the Improvement of Breakdown Strength of Polyolefins」, IEEE Trans. E.I., vol.28, No1, p30~p34 (1993)
- (10) A.Asano, T.Takahashi, K.Maeda, T.Niwa：「Water Tree Retardant XLPE Cable Using VLDPE」, IEEE Trans. Power Deliv., vol.9, No1, p553~p558 (1994)

2. 講演他

2. 1 国際会議

- (1) T.Takahashi, H.Ohtsukuka, H.Takehana, T.Niwa：「Study on Improvements to the Dielectric Breakdown Strength of Extruded Dielectric Cables」, IEEE PES 1985 Winter Meeting, New York, USA (1985)
- (2) T.Niwa, T.Takahashi, M.Isaka, H.Takehana：「Morphological Studies of Water Tree in Polyolefin」, IEEE 1988 Int. Symposium on Elec. Insul., Boston, USA (1988)
- (3) T.Takahashi, T.Niwa, J.Suzuki：「Some Consideration on Water Tree in Polyolefin」, 2nd Int. Conf. on Properties & Application of Dielec. Materials, Beijing, China (1988)
- (4) K.Ogawa, T.Suzuki, T.Niwa, S.Yoshida, T.Takahashi, M.Hatada：「Investigation of Insulating Materials for DC Cables(3)」, 21th Symposium on Elec. Insul. Materials, Tokyo, Japan (1988)
- (5) T.Suzuki, T.Niwa, S.Yosida, T.Takahashi, M.Hatada：「New Insulating Materials for HV DC Cables」, 3rd Int. Conf. on Conduction & Breakdown in Solid Dielectrics, Trondheim, Norway (1989)
- (6) K.Fukunaga, H.Miyata, T.Takahashi, S.Yoshida, T.Niwa：「Measurement of Space Charge Distribution in Cable Insulation Using Pulsed Electro-acoustic Method」, 3rd Int. conference on Polymer Insulated Power Cable, B8-1, Versailles, France (1991)
- (7) N.Yoshifuji, T.Niwa, T.Takahashi, H.Miyata：「Development of the New Insulating Materials for HV DC Cable」, IEEE PES 1991 Winter Meeting, New York, USA (1991)

- (8) T.Kamosawa, T.Niwa, H.Miyata, T.Takahashi, N.Yoshimura, M.Nishida, F.Noto : 「Investigation of Tracking Deterioration for Organic Insulating Materials under Direct Current Application」, Int. Conf. on Material Engineering for Resources 1991, Akita, Japan (1991)
- (9) T.Kawashima, T.Maki, T.Takahashi, K.Maeda : 「Study on Water Tree Retardant XLPE Insulation」, 3rd Int. Conf. on Properties & Application of Dielec. Materials, p222, Tokyo, Japan (1991)
- (10) A.Fujimori, H.Uno, K.Yokota, T.Takahashi, T.Nakatsuka, I.Shigetoshi : 「New Insulating Oil for DC OF Cable」, 1993 Int. Workshop on Elec. Insul., p175, Nagoya, Japan (1993)
- (11) K.Uchida, Y.Ohashi, I.Tanaka, M.Tan, T.Takahashi : 「Characteristics of Partial Discharge on Defect in XLPE Cable Joint Box」, 1993 Int. Workshop on Elec. Insul., p213, Nagoya, Japan (1993)
- (12) A.Asano, T.Takahashi, K.Maeda, T.Niwa : 「Water Tree Retardant XLPE Cable Using VLDPE」, IEEE PES 1993 Summer Meeting, Vancouver, Canada (1993)
- (13) T.Nakatsuka, A.Yokoyama, H.Miyata, I.Ishikawa, T.Takahashi : 「Dielectric Loss Characteristics of Acetophenone and Cumylalcohol Doped Polyethylene」, 6th Symposium on Elec. Insul. Materials, p95, Osaka, Japan (1994)
- (14) T.Nakatsuka, T.Takahashi, H.Miyata, A.Yokoyama, I.Ishikawa, T.Niwa : 「The Effect of Dielectric Loss of Polyethylene Caused by Acetophenone and Cumylalcohol」, IEEE 1994 Int. Symposium on Elec. Insul., p574, Pittsburgh, USA (1994)
- (15) T.Takahashi, H.Miyata, T.Nakatsuka, A.Yokoyama : 「Some Factor for the Space Charge Formation of Polyethylene」, 3rd Int. Conference on Polymer Insulated Power Cable, A7-1, Versailles, France (1995)
- (16) K.Iinuma, H.Miyata, T.Takahashi, S.Yamamoto : 「Factor for Dielectric Strength due to Fibrous Contaminants in XLPE」, 1995 Int. Symposium on Elec. Insul. Mat., E-1, Tokyo, Japan (1995)
- (17) H.Miyata, A.Yokoyama, T.Takahashi : 「Effect of Water on the Space Charge in XLPE」, IEEE 1996 Int. Symposium on Elec. Insul., 5B-20, Montreal Canada (1996)

2. 2 電気学会全国大会

- (1) 栗山将、中瀬吉昭、一色節也、砂塚英夫、高橋享 : 「絶縁材料の γ 線照射による誘起電流」、昭和52電気学会全国大会、No258 (昭和52)
- (2) 角田恒巳、堀越茂、藤原正彦、高橋享 : 「高速炉用無機-有機複合絶縁ケーブル(第1報)」, 昭和54電気学会全国大会、No262 (昭和54)
- (3) 高橋享、中山四郎、瀬野尾純二 : 「ポリプロピレンクラフト複合絶縁体の油浸膨潤の改善」、昭和54電気学会全国大会、No1145 (昭和54)
- (4) 瀬野尾純二、中山四郎、高橋享 : 「複合シート絶縁体」、昭和54電気学会全国大会シンポジウム、S.4-8 (昭和54)
- (5) 一色節也、瀬野尾純二、中山四郎、高橋享 : 「1000kV級OFケーブル絶縁体FLAPについて」、昭和55電気学会全国大会、No342 (昭和55)
- (6) 角田恒巳、堀越茂、藤原正彦、上野山博巳、高橋享 : 「高速炉用無機-有機複合絶縁ケーブル(第2報)」, 昭和55電気学会全国大会、No348&350 (昭和55)
- (7) 高橋享、山本実 : 「各種液体による水トリー疑似現象」、昭和57電気学会全国大会、No299 (昭和57)
- (8) 高橋享、山本実、丹羽利夫 : 「スチレン系ポリマーブレンド絶縁物の絶縁破壊特性」、昭和58電気学会全国大会、No222 (昭和58)
- (9) 高橋享、中山四郎 : 「半合成紙OFケーブルの紙巻条件」、昭和59電気学会全国大会、No1231 (昭和59)

- (10) 大塚秀文、高橋享、丹羽利夫 : 「各種プラスチックの高温絶縁破壊特性」、昭和59電気学会全国大会、No380 (昭和59)
- (11) 井坂宗晴、高橋享、丹羽利夫、中尾由明、小野幹幸 : 「XLPEのボウタイトリーに及ぼす歪の影響」、昭和62電気学会全国大会、No419 (昭和62)
- (12) 高橋享、井坂宗晴、國村智、丹羽利夫 : 「XLPEの結晶構造とボウタイトリー」、昭和63電気学会全国大会、No284 (昭和63)
- (13) 小川勝徳、鈴木建哉、丹羽利夫、吉田昭太郎、高橋享、畑田道則 : 「直流ケーブル用絶縁材料の基礎検討(その2)」, 昭和63電気学会全国大会、No386 (昭和63)
- (14) 高橋享、井坂宗晴、國村智、丹羽利夫 : 「XLPEのモルフォロジーと水トリー」、平成元年電気学会全国大会、No238 (平成元年)
- (15) 高橋享、井坂宗晴、丹羽利夫 : 「XLPEの水分によるマイクロボイド生成に及ぼす因子」、平成元年電気学会全国大会、No239 (平成元年)
- (16) 高橋享、井坂宗晴、二ノ宮信夫、英久仁夫 : 「簡易遮水層付11kV CVケーブルの撤去調査結果」、平成元年電気学会全国大会、No1455 (平成元年)
- (17) 吉藤直久、丹羽利夫、高橋享、宮田裕之 : 「直流ケーブル用新種絶縁材料の基礎開発」、平成2年電気学会全国大会、No316 (平成2年)
- (18) 吉藤直久、丹羽利夫、高橋享、宮田裕之 : 「直流ケーブル用新種絶縁材料の基礎開発(その2)」, 平成3年電気学会全国大会、No240 (平成3年)
- (19) 福永香、宮田裕之、高橋享、吉田昭太郎、丹羽利夫 : 「パルス静電応力法によるCVケーブル絶縁体中の空間電荷分布の測定」、平成3年電気学会全国大会、No242 (平成3年)
- (20) 中司徹、高橋享、丹羽利夫 : 「XLPEの架橋度と諸物性」、平成3年電気学会全国大会、No246 (平成3年)
- (21) 川島孝雄、牧健彦、高橋享、前田和則 : 「超低密度ポリエチレンケーブルの水トリー特性」、平成3年電気学会全国大会、No279 (平成3年)
- (22) 宮田裕之、高橋享、丹羽利夫、鈴木建哉 : 「直流ケーブル用新種絶縁材料の基礎開発(その2)」, 平成4年電気学会全国大会、No292 (平成4年)
- (23) 浅野秋廣、高橋享、前田和則 : 「超低密度ポリエチレンケーブルの水トリー特性」、平成4年電気学会全国大会、No258 (平成4年)
- (24) 丹羽利夫、高橋享、宮田裕之、神永健二、鈴木建哉 : 「DC前課電の有無によるXLPE内半導電突起が絶縁特性に及ぼす影響」、平成5年電気学会全国大会、No299 (平成5年)
- (25) 平田宜弘、内田克己、高橋享、田中稲穂 : 「前課電処理によるXLPEのトリーイング抑制効果の検討」、平成5年電気学会全国大会、No318 (平成5年)
- (26) 藤森明治、宇野史、横田和夫、高橋享、中司徹、重年生雄 : 「直流OFケーブル用新規絶縁油の検討」、平成5年電気学会全国大会、No347 (平成5年)
- (27) 平田宜弘、内田克己、竹鼻始、高橋享、田中稲穂 : 「ゴム/XLPE界面欠陥の部分放電特性」、平成6年電気学会全国大会、No356 (平成6年)
- (28) 神永健二、重次浩樹、丹羽利夫、高橋享、宮田裕之 : 「直流ケーブル用新種絶縁材料の基礎開発(その6)一界面破壊特性の検討」、平成6年電気学会全国大会、No421 (平成6年)
- (29) 横山綾子、宮田裕之、高橋享 : 「高温、高電界における空間電荷の測定」、平成7年電気学会全国大会、No258 (平成7年)
- (30) 飯沼浩一、田中稲穂、宮田裕之、高橋享 : 「XLPE絶縁体中の繊維異物有害性の要因検討」、平成7年電気学会全国大会、No339 (平成7年)
- (31) 神永健二、武田直樹、中司徹、宮田裕之、高橋享 : 「直流ケーブル用新種絶縁材料の基礎開発(その7)一界面破壊特性の検討」、平成7年電気学会全国大会、No340 (平成7年)
- (32) 横山綾子、宮田裕之、高橋享 : 「温度勾配下における空間電荷の測定」、平成8年電気学会全国大会、No241 (平成8年)

- (33) 坂谷孝雄、武田直樹、中司徹、宮田裕之、高橋享：「直流ケーブル用新種絶縁材料の基礎開発（その8）—絶縁破壊強度に与える異物の影響」、平成8年電気学会全国大会、No331（平成8年）

2.3 電気学会 誘電・絶縁材料研究会

- (1) 栗山将、中瀬吉昭、一色節也、砂塚英夫、高橋享：「LOCA模擬環境劣化絶縁材料の放射線誘起電流」、EIM-77-65（1977）
- (2) 瀬野尾純二、中山四郎、高橋享：「油浸複合絶縁体の絶縁耐力向上に関する一検討」、EIM-78-58（1978）
- (3) 栗山将、中瀬吉昭、一色節也、高橋享：「放射線効果とモルフォロジー」、EIM-81-20（1981）
- (4) 高橋享、中山四郎：「不均一相ポリマーブレンド絶縁体FSPの諸特性」、EIM-82-7（1982）
- (5) 丹羽利夫、高橋享、中山四郎：「ポリマーブレンドの空間電荷が関与した絶縁破壊特性」、EIM-82-38（1982）
- (6) 丹羽利夫、高橋享、後関文雄：「CVケーブルの寿命特性」、EIM-83-88（1983）
- (7) 高橋享、丹羽利夫：「架橋ポリエチレンの耐トリッキング性に与える添加剤の影響」、EIM-86-28（1986）
- (8) 丹羽利夫、高橋享、畑田道則：「結晶性高分子の固体構造と絶縁破壊特性」、EIM-88-36（1988）
- (9) 高橋享、中山四郎：「1000kV級UHV OFケーブルの絶縁設計」、EIM-88-27（1988）
- (10) 鈴木建哉、丹羽利夫、吉田昭太郎、高橋享、畑田道則：「直流ケーブル用新種絶縁材料の基礎検討（その5）」、EIM-89-51（1989）
- (11) 鈴木建哉、丹羽利夫、高橋享、宮田裕之：「直流ケーブル用新種絶縁材料の基礎開発（その5）」、DEI-92-100（1992）
- (12) 横山綾子、中司徹、宮田裕之、高橋享：「ポリエチレンの空間電荷形成への影響要因」、DEI-94-81（1994）
- (13) 中山四郎、中司徹、石川泉、高橋享：「CVケーブルの破壊強さのワイブル分布理論式と未破壊データも含めた統計処理について」、DEI-94-43（1994）
- (14) 内田克己、平田宜弘、田中稲穂、高橋享、竹鼻始：「CVケーブル接続部欠陥の部分放電特性」、DEI-94-34（1994）
- (15) 横山綾子、宮田裕之、高橋享：「ポリエチレンの空間電荷形成への影響要因（その2）」、DEI-95-95（1995）
- (16) 横山綾子、宮田裕之、高橋享：「ポリエチレンの空間電荷形成への影響要因（その3）」、DEI-96-130（1996）

2.4 電気学会 電気絶縁材料シンポジウム

- (1) 栗山将、中瀬吉昭、一色節也、砂塚英夫、高橋享：「各種ポリマーのγ線照射による空間電荷」、第10回、p63（昭和52）
- (2) 一色節也、山本実、丹羽利夫、高橋享：「架橋ポリエチレンケーブルの寿命特性についての考察」、第11回、NoV-6（昭和53）
- (3) 一色節也、瀬野尾純二、中山四郎、高橋享：「UHV OFケーブル用PPラミネート紙の特性改善について」、第11回、p49（昭和53）
- (4) 中村有作、高橋享、中山四郎、丹羽利夫：「水トリ発生CVケーブルの誘電特性に関する考察」、第13回、NoV-7（昭和55）
- (5) 角田恒巳、堀越茂、藤原正彦、高橋享、上野山博巳：「高速炉用難燃、耐熱、耐放射線性ケーブル」、第13回、p225（昭和55）
- (6) 一色節也、山本実、高橋享、丹羽利夫：「Water Trees and Detectig Device」、第14回、NoII-3（昭和56）

- (7) 高橋享、中山四郎：「不均一相ポリマーブレンドによる微細複合絶縁体の基礎特性」、第14回、p213（昭和56）
- (8) 高橋享、中山四郎：「紙・プラスチック複合油浸絶縁体の寿命特性」、第15回、p151（昭和57）
- (9) 丹羽利夫、高橋享、大塚秀文：「結晶性ポリオレフィンの絶縁破壊特性」、第16回、NoI-11（昭和58）
- (10) 丹羽利夫、竹鼻始、高橋享、大塚秀文：「HDPE試作ケーブルの絶縁破壊特性」、第17回、NoVIII-4（昭和59）
- (11) 高橋享、丹羽利夫：「ポリオレフィンの水トリに及ぼす因子」、第19回、NoVII-3（昭和61）
- (12) 小川勝徳、鈴木建哉、丹羽利夫、吉田昭太郎、高橋享、畑田道則：「直流ケーブル用絶縁材料の基礎検討（その1）」、第20回、NoVIII-4（昭和61）
- (13) 井坂宗晴、前田和則、高橋享、丹羽利夫：「XLPEの水分とマイクロボイド」、第22回、NoII-3（平成元年）
- (14) 鈴木建哉、丹羽利夫、高橋享、宮田裕之：「直流ケーブル用新種絶縁材料の基礎開発（その4）」、第24回、p171（平成4年）
- (15) 勝田銀造、坂谷孝雄、中司徹、宮田裕之、高橋享：「直流ケーブル用絶縁材料の異物欠陥に関する検討」、第28回、NoIV-1（平成8年）

2.5 その他の学会

- (1) 高橋享、中山四郎：「紙・プラスチック油浸複合絶縁体の部分放電特性」、昭和58電気学会東京支部大会、No157（昭和58）
- (2) 山本実、高橋享：「エミッションシールド層の検討」、昭和60電気学会東京支部大会、No176（昭和60）
- (3) 前田和則、高橋享、牧健彦、川島孝雄：「超低密度ポリエチレンの水トリ特性」、平成2電気学会電力エネルギー部門大会、No195（平成2）
- (4) 神永健二、鈴木建哉、丹羽利夫、高橋享、宮田裕之：「突起入XLPEの絶縁特性に及ぼす直流前課電の影響」、平成5電気学会電力エネルギー部門大会、No492（平成5）
- (5) 内田克己、平田宜弘、高橋享、田中稲穂：「CVケーブル接続部欠陥の部分放電特性」、平成6電気学会電力エネルギー部門大会、No485（平成6）
- (6) 内田克己、平田宜弘、高橋享、田中稲穂、竹鼻始：「界面の部分放電に及ぼすシリコン油の効果」、電線・ケーブル研究会、EC-94-24（平成6）

2.6 技報、解説など

（フジクラ技報：旧藤倉電線技報）

- (1) 栗山将、中瀬吉昭、一色節也、砂塚英夫、藤本郁夫、高橋享、八橋元治、新元孝：「放射線下における絶縁材料の電気特性」、藤倉電線技報、vol.56,p25（昭和52）
- (2) 角田恒巳、堀越茂、清水正夫、藤原正彦、砂塚英夫、高橋享、上野山博巳：「原子力発電所用ケーブル（第4報）高速増殖炉用ケーブルの開発（その1）」、藤倉電線技報、vol.60,p25（昭和54）
- (3) 角田恒巳、堀越茂、清水正夫、藤原正彦、小林弘忠、高橋享、新郷善興、上野山博巳：「原子力発電所用ケーブル（第5報）高速増殖炉用ケーブルの開発（その2）」、藤倉電線技報、vol.62,p11（昭和56）
- (4) 中山四郎、高橋享：「油中溶存ガスを基礎としたOFケーブルシステムの保守及び異常検知方法」、藤倉電線技報、vol.70,p64（昭和60）
- (5) 加藤和哉、久村展典、高橋享、畑田道則、丹羽利夫、竹鼻始、片岡敬一郎、大塚秀文：「結晶性ポリオレフィンの固体構造と絶縁破壊特性」、藤倉電線技報、vol.69,No6,p59（1985）

- (6) 小林一治、中山四郎、中司徹、高橋享、丹羽利夫：「CVケーブル熱履歴の新しい推定法」、フジクラ技報、vol.81,p33 (1991)
- (7) 宮田裕之、福永香、高橋享、丹羽利夫、吉田昭太郎：「PEA法によるケーブル中の空間電荷分布の測定」、フジクラ技報、vol.81,p55 (1991)
- (8) 川島孝雄、牧健彦、高橋享、前田和則、吉川哲、鈴木淳：「耐水トリートメントCVケーブルの開発」、フジクラ技報、vol.81,p51 (1991)
- (9) 神永健二、鈴木建哉、丹羽利夫、高橋享、宮田裕之：「直流ケーブル用高分子絶縁材料」、フジクラ技報、vol.84,p170 (1991)
- (10) 穂積直祐、武田敏尚、鈴木寛、岡本達希、渡辺明年、吉田学、渡辺和夫、宮田裕之、横山綾子、高橋享：「CVケーブル絶縁体中の空間電荷測定(その1)」、フジクラ技報、vol.89,p22(1995)
- (11) 宮田裕之、高橋享、中司徹、横山綾子：「直流CVケーブル絶縁体の空間電荷形成要因」、フジクラ技報、vol.90,p46 (1996)
- (12) K.Kato,N.Kumura,T.Takahashi,M.Hatada,T.Niwa,H.Takahana,K.Kataoka,H.Ohtsuka : 「The Influence of Morphology on the Dielectric Breakdown Strength of Crystalline Polyolefin」,Fujikura Technical Review,No15,p58 (1986)
- (13) T.Takahashi,M.Isaka,J.Suzuki,H.Takahana,T.Niwa : 「Morphological Effect on Water Tree in Insulating Materials for Power Cable」,Fujikura Technical Review,No18,p59(1989)
- (14) N.Hozumi,T.Takeda,H.Suzuki,T.Okamoto,A.Watanabe,K.Watanabe,M.Yoshida,H.Miyata,T.Takahashi : 「Measurement of Space Charge Distribution in XLPE Cable Insulation-Part1」Fujikura Technical Review,No25,p61(1996)

(解説他)

- (1) 高橋享、一色節也：「ゴムの劣化、老化、破壊とその防止対策；第V章8節&第VII章2節、9節」、経営開発センター出版 (昭和57)
- (2) 高橋享：「高電圧ケーブルの寿命特性」、安全工学、vol.30,No6,p472 (1992)
- (3) 木村仁、高橋享：「CVケーブルの現状と展望；CVケーブルの絶縁材料について」、放電研究、No140,p21 (1993)
- (4) 高橋享：「高電圧ケーブルにおける水トリートメント研究の最近の進展」、静電気学会誌、vol.19,No2,p99 (1995)

3. 特許

本論文に関係した特許：下記他24件

特許出願公告番号：特公平6-16366、発明の名称「直流電力ケーブル」

