

高分子がいしの電気絶縁特性に
関する基礎研究

1997年

近藤 邦明

名古屋工業大学博士論文
乙第118号(論文申請による)
平成9年 9月 3日授与

目次

第1章 緒言	1
1.1 まえがき	1
1.2 高分子がいしの開発の経緯	1
1.3 高分子がいしの構造	3
1.3.1 FRPコア	5
1.3.2 外被ゴム	5
1.3.3 把持金具	6
1.4 本研究の背景	6
1.5 本研究の内容	12
第2章 高分子がいし芯材の吸湿性	17
2.1 まえがき	17
2.2 FRPの絶縁破壊特性に及ぼす吸湿の影響	18
2.3 芯材の吸湿における異方性	23
2.3.1 供試試料と試験方法	23
2.3.2 試験結果および検討	25
2.4 むすび	28
第3章 高分子がいし外被の撥水性	30
3.1 まえがき	30
3.2 シリコーンゴムの撥水性メカニズム	30
3.3 試験方法と手順	34
3.3.1 水質の影響	34

3.3.2	水温の影響	38
3.3.3	水中浸漬・乾燥繰り返しの影響	42
3.4	むすび	42
第4章	高分子がいしの人工汚損試験方法	50
4.1	まえがき	50
4.2	高分子がいしの人工汚損方法	50
4.3	がいしの汚損耐電圧試験設備	57
4.3.1	交流人工汚損耐電圧試験設備	57
4.3.2	直流人工汚損耐電圧試験設備	60
4.3.2.1	汚損がいしの直流漏れ電流	63
4.4	交流・直流人工汚損耐電圧特性	68
4.5	むすび	71
第5章	高分子がいしの人工汚損耐電圧特性	74
5.1	まえがき	74
5.2	試験方法	74
5.3	霧水量の影響	75
5.4	シリコーンゴム製高分子がいしの撥水性	77
5.5	塩分付着密度の影響	83
5.6	不溶性物質の影響	84
5.6.1	不溶性物質の種類の影響	84
5.6.2	不溶性物質付着密度の影響	90
5.7	高分子がいしの形状と汚損耐電圧特性	90
5.7.1	笠形状の影響	90

5.7.2	がいし有効長と平均直径の影響	93
5.8	むすび	95
第6章	結言	99
6.1	高分子がいしの芯材の吸湿性	99
6.2	高分子がいしの外被材料の撥水性	100
6.3	高分子がいしの人工汚損試験方法	101
6.4	高分子がいしの人工汚損耐電圧特性	102
6.5	今後の研究課題	102

第1章 緒言

1.1 まえがき

高電圧屋外用がいしの絶縁材料としては、国内では磁器が、海外では磁器およびガラスが使用されてきた。しかし、近年有機絶縁物を用いたがいしが、軽量性、耐震性、耐汚損性、防爆性等の優れた特性に加え、バンドリズム対策（銃撃対策）や景観面からも、アメリカ合衆国を中心に広く用いられている。これらのがいしは、高分子（ポリマー）がいし、ノンセラミックがいし、プラスチックがいし、複合（コンポジット）がいし等と呼ばれているが、JEC（電気規格調査会標準規格）や JIS（日本工業規格）等においてはまだ正式な名称は決められていない。本論文では、「高分子がいし」と呼ぶことにする。高分子がいしは、機械荷重を分担する芯材であるガラス繊維強化プラスチック（FRP：Fiber-glass Reinforced Plastic）コア、このFRPコアを保護し、必要な表面漏れ距離を得るための外被ゴムおよび鉄塔や電線に連結するための端部把持金具から構成されている。

以下に、高分子がいしの開発の経緯とその構造、本研究の背景、内容について述べる。

1.2 高分子がいしの開発の経緯

高分子がいしの研究は古くから行われて来たが⁽¹⁾、高電圧屋外用高分子がいしとしては、エポキシ樹脂を用いた配電用がいしが約30年前初めて、アメリカ合衆国で商品化され脚光を浴びた⁽²⁾。しかし、使用現場で種々の劣化問題を起こし、本格的な実用化には至らなかった。その後、充填材を添加して耐トラッキング性や耐候性を改良したエポキシ樹脂が開発され、ヨーロッパを中心に一

部の配電線や変電所で使用された。

60年代後半から70年代初頭にかけて、イタリアでポリテトラフルオロエチレン（PTFE：Polytetrafluoroethylene）を使った高分子がいしが商品化され、耐トラッキング性に優れたがいしとして、イタリア、イギリス、フランス等のヨーロッパの鉄道用がいしなどに多数採用された。しかし、これらがいしは、外被材が薄いこともあり、コロナ放電により使用中に笠部で電気貫通したり、FRPが後に述べる脆性破壊（Brittle Fracture）と呼ばれる離断事故を相次いで生じ、生産は中止された。

70年代に入ると、アメリカ合衆国国内では、将来の電力需要の増加に対応するため、1000～1500kV級のUHV送電の研究が始まった。しかし、UHV送電に必要な高強度の懸垂がいしを供給することのできるがいしメーカーはアメリカ合衆国国内には存在しなかった。このような背景から、比較的容易に、高強度が実現できるFRPコアを利用した高分子がいしの開発に力が注がれるようになった。外被材料としては、当初エチレンプロピレン系ゴム（EPR：Ethylene Propylene Rubber）が、その後、表面に優れた撥水性を有するシリコーンゴム（SiR：Silicone Rubber）が採用されるようになった。しかし、アメリカ合衆国では、電力需要の低迷が続き、UHV送電建設の目処がたたず、UHV送電用に開発が進められてきた高分子がいしは、ガラスがいしや磁器がいしのライフルなどの射撃により破損されることへの対策や、軽量で取り扱いやすいとして、送電線の工事や保守作業の低減の面から、また、アメリカ合衆国における既存磁器がいしの品質や性能が低いこともあって、低電圧線路を中心に、500kV級や800kV級送電線路にまで適用が広がっている。アメリカ合衆国での新規設備に占める、高分子がいしの割合は、50%を超えたと言われている⁽³⁾。その後、高分子がいしは、表面の撥水性やFRPコアの可撓性を活かし、汚損地区や道路沿いで自動車の衝突や断線時などに衝撃曲げ荷重が加わるラインポスト

(LP : Line Post) がいしへの適用が増えている。

一方、国内では、高品質、高強度の磁器がいしの入手性が高いことから、高分子がいしの送電線への適用は行われて来なかった。しかし、近年電力会社の送電線の雪害対策用の相間スペーサや列車速度の高速化対応のための電車線路用設備の改善に、高分子がいしの軽量性が注目され、適用研究が始まっている。

また、送電用、配電用だけでなく、変電用についても、送電用高分子がいしの実績、地震被害の対応策、がいし洗浄のための保守経費節約等を考慮し、高分子がい管の試験的採用が始まっている。

1. 3 高分子がいしの構造⁽⁴⁾

高分子がいしの代表的な基本構造を図 1.1 に示す。主な構成部材は、FRP コア、外被ゴム、把持金具である。それぞれの構成部材の役割は以下の通りである。

FRP コア : 電氣的絶縁と機械的荷重支持を担う構造体としての骨格を成す。

外被ゴム : 紫外線や降雨、局部放電や漏れ電流などから、FRP コアを保護すると共に、表面汚損特性に必要な漏れ距離を確保する。

把持金具 : FRP コアの担う機械荷重を鉄塔や電線に連結伝達する。

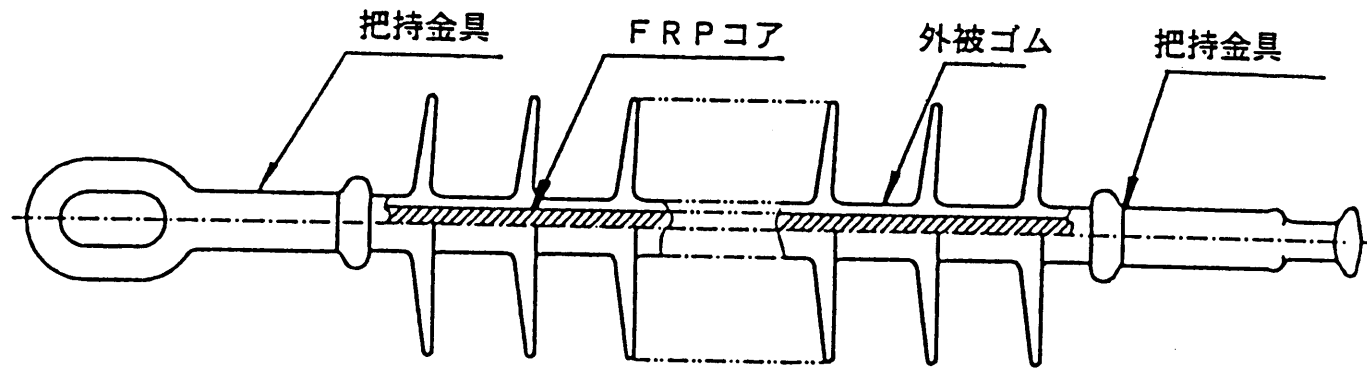


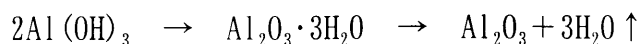
図 1.1 高分子がいしの構造

1. 3. 1 FRPコア

FRPコアはガラス繊維とそれらを結合するエポキシまたはポリエステル樹脂などから構成されている。ガラス繊維には一般に電気絶縁用ガラス（Eガラス）が使われる。

1. 3. 2 外被ゴム

外被材としては、EPゴム（EPR）、シリコーンゴム（SiR）、ポリテトラフルオロエチレン（PTFE）、脂環族系エポキシ樹脂などが使われている。近年は、耐候性、耐エロージョン性に優れたEPDMやシリコーンゴムが多く使われるようになった。また、耐アーク性や耐トラッキング性を改良するために三水和アルミナ（Alumina Tri-Hydrate： $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ）が添加されることが多い。この三水和アルミナは、通常ギブサイト（Gibbsite）であり、主に $\text{Al}(\text{OH})_3$ の形で存在する。この三水和アルミナに放電の熱が加わると、次の化学反応式に従い変化すると考えられる。ここで、放電の熱とは、外被ゴム表面における部分放電等によって生ずる熱を示す。また、この三水和アルミナの働きは、以下の[1]、[2]のように考えられている⁽⁵⁾。



[1] 結晶水と放電の熱による外被ゴムの分解物が、アルミナ（ Al_2O_3 ）を触媒として反応し、一酸化炭素と揮発性炭化水素類に変わり、消失することによって、外被ゴム表面のトラッキング等を抑制する。

[2] 結晶水と外被ゴムの分解物は放電の熱によってガス化し、外被ゴム表面の未酸化の炭化物分子を飛散させトラッキングの発生等を抑制する。

外被の製法としては、笠、シースを別々に成形し、組立後加硫接着する、または接着剤により接着する方法や、金型を用い一体製の外被を直接FRPコアに成形し、加硫接着する方法、または単位笠を成形加硫後、FRPコアとの間にシリコングリースを充填して積み重ね、軸方向に圧縮荷重を加え組み立てる方法などがある。表 1.1 に上述の代表的な外被の構造とその特徴を示す。

1. 3. 3 把持金具

把持金具の材質は、主に熔融亜鉛メッキを施したダクタイル鋳鉄または炭素鋼であり、比較的強度の低い配電用にはアルミが用いられることもある。FRPコアの把持方式としては、楔を用いた円錐型、樹脂接着型、圧着型など種々の方式があるが、現在では圧着方式が一般的である。表 1.2 に上述の代表的な把持金具の構造とその特徴を示す。

1. 4 本研究の背景

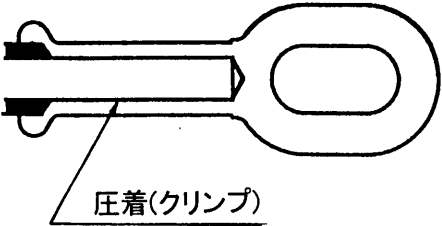
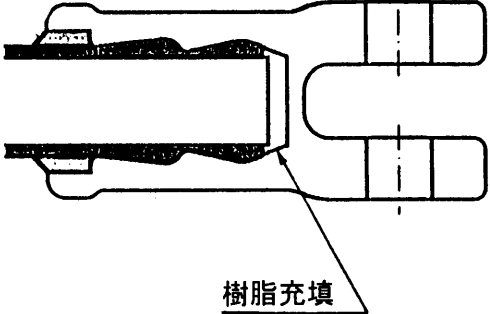
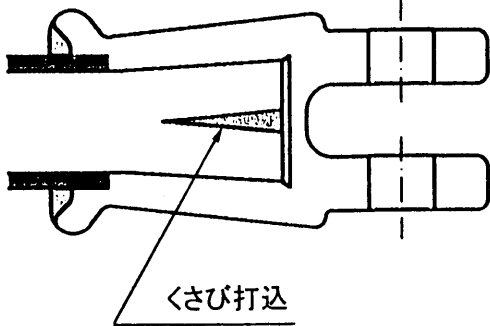
有機絶縁物を用いたがいしは、磁器がいしやガラスがいしに比べ、比較的歴史は浅いが、30年以上前から屋内用、ガス絶縁用として、エポキシ樹脂をはじめ、種々の有機絶縁物を用いたがいしが開発されてきた。しかし、その長期信頼性が確立されたわけではない。当初これらを屋外で使用すると短時間で劣化を生じ、事故に至る場合が多く生じた。特に、高電圧条件下では、汚損湿潤時の漏れ電流や局部放電によって劣化が促進される。

近年、耐候性、耐トラッキング性、耐エロージョン性に優れたゴム材料が開発され、ある程度の長期性能が期待できるようになり、日本でも雪害対策用の相間スペーサや列車速度の高速化対応のため電車線用として、高分子がいしの適用が始まっている。屋外絶縁用高分子がいし材料の長期信頼性に関する研究は、まだ基礎的な段階ではあるが、欧米を中心に、人工加速劣化試験方法の検

表 1.1 代表的な高分子がいしの外被の構造

成型方法の分類	構造図	特徴
外被一体成形		<p>笠とFRPコアの一個所に界面があるのみで、劣化しにくい。</p>
笠部単独成形 シース押出後笠接着		<p>笠とFRPコアおよび笠とシースにも界面があり、笠貫通する可能性がある。</p> <p>笠とシースの材質が異なることがある。</p>
外被単独成形 外被-FRP ロッド界面 グリース充填		<p>笠がFRPコアに未接着である。</p> <p>グリースが漏れる可能性がある。</p>

表 1.2 代表的な高分子がいしの把持金具の構造

把持金具の分類	構造図	特徴
<p>圧着(クリンプ)方式</p>		<p>圧着押圧が管理でき、機械強度のばらつきが少ない。</p>
<p>樹脂充填方式</p>		<p>使用荷重で、金具-樹脂間にずれを生ずることがある。</p> <p>圧縮荷重が加わる場合は、使用できない。</p>
<p>くさび打込方式</p>		<p>FRPコアに大きな損傷を与える。</p> <p>使用荷重で、金具-樹脂間にずれを生ずることがある。</p>

討や各種評価研究、使用実績の調査等が精力的に行われている。

現在、高分子がいしは、アメリカ合衆国を中心に適用を拡大しており、日本においても、主に相間スペーサとして適用が進められている。そのような環境の中、各国で高分子がいしの事故も報告され、IEEE（米国電気電子学会）やCIGRE（国際大電力システム会議）の高分子がいしに関する分科会（WG：Working Group）でも事故の調査がなされている⁽⁶⁻⁸⁾。

ヨーロッパでは、**図 1.2** に示すようなFRPの脆性破壊による離断事故が数多く発生している。脆性破壊は、コアの軸に直角に破断するという特徴があり、FRPが酸に曝された条件下で、機械的荷重が加わることにより生ずる。CIGRE WG 22 で取りまとめられた脆性破壊についての 20 件の事故例を**表 1.3** に示す^(9,10)。この発生率は磁器やガラスがいしに比べ、二桁高いと報告されている。

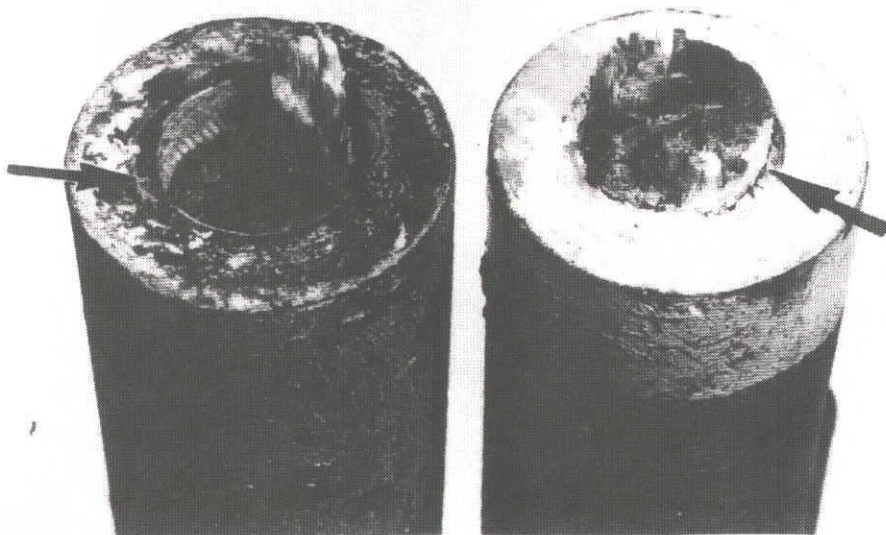


図 1.2 FRPの脆性破壊による破断面

表 1.3 高分子がいしの脆性破壊の事故例

電圧	420kV		275kV	145kV
コア径	24mm	37mm	22mm	18mm
事故件数	2	2	9	7
事故までの期間	18ヶ月後	30日後	18～24ヶ月後	2年以内
取付け状況	<ul style="list-style-type: none"> ・清浄地区 ・工業地域から約10km ・懸垂吊り 	<ul style="list-style-type: none"> ・清浄地区 ・海岸から16km ・耐張吊り 	<ul style="list-style-type: none"> ・重汚損地区 ・海岸から5km ・送電線40kmにわたって分布 	<ul style="list-style-type: none"> ・高温、重(塩+工業)汚損 ・4件/鉄塔一基 ・2件は他鉄塔
破壊位置	<ul style="list-style-type: none"> ・把持金具の内部(機械ストレス最大位置) ・2本とも課電側 	<ul style="list-style-type: none"> ・把持金具の内部 ・課電端、接地端各1本 	<ul style="list-style-type: none"> ・把持金具から2～5cm外側 ・耐張吊り：8本 ・懸垂吊り：1本 	<ul style="list-style-type: none"> ・耐張吊りのみ ・把持金具端：5本 ・中間部：2本
製造欠陥の有無	把持金具内コアに樹脂欠陥あり	把持金具内コアに樹脂欠陥あり	なし	なし
取扱い不良の有無	なし	なし	あり、外被一部破損、外被-コア界面剥離	なし
汚損状況	製造欠陥によるストレス集中部に汚損物が多く付着	製造欠陥によるストレス集中部に汚損物が多く付着	汚損物が破損部のコアに付着	中程度の汚損(塩と工業汚損)

また、表 1.4 に示すように、1991 年 12 月アメリカ合衆国フロリダ地区において、磁器がいしと同等のもれ距離を有する高分子がいしの汚損フラッシュオーバー率が磁器がいしより高いという事例も報告されている⁽¹¹⁾。

表 1.4 がいしの設置数とフラッシュオーバー率の例⁽¹¹⁾

電圧階級	外被材料 (漏れ距離、mm)	設置数	事故数	フラッシュオーバー率、 %
138kV	磁器(2920)	31,500	4	0.0127
	EPDM(3020)	1,400	24	1.71
	EPDM(3300)	1,500	7	0.467
	Alloy*(3300)	7,500	0	0
	SiR(3300)	377	0	0
230kV	磁器(5720)	680	1	0.147
	EPDM(5720)	3,000	42	1.40
	SiR(5590)	1,430	0	0

*) Alloy とは EPDM にシリコン油を添加した外被材料。

一般にシリコンゴムや EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer) を外被材料に有する高分子がいしは、表面に撥水性を有し、磁器がいしやガラスがいしに比べ、汚損耐電圧特性が優れていると言われている。しかし、実使用条件において、その撥水性が十分発揮され続けるかという疑問も出されている。

磁器およびガラス製がいしは、これまでに様々な角度から、研究されてきており十分な基礎データを有している。したがって、それらの評価技術や適用指針はほぼ確立されている。一方、高分子がいしは歴史も浅く、評価方法や適用指針もほとんど確立されていない。特に、屋外用のがいしにとって最も重要な

電気絶縁特性の一つである汚損耐電圧特性については、その評価方法も含め、いまだ充分検討されていない。したがって、従来の磁器やガラスがいしの評価方法をそのまま適用しているケースが多く、その妥当性を検討する必要がある。

以上のような状況の中で、近年国内でも高分子がいしの適用検討が始まり、従来ほとんど行われてこなかったこの分野での電気絶縁特性に関する基礎研究に取り組み、高分子がいしの評価技術の確立、適用指針の確立に貢献したいと著者は考えた。著者は、およそ5年間にわたり、一貫して高分子がいしの電気絶縁特性に関する基礎研究に従事してきた。すなわち国内はもとより世界的にも研究されていなかった高分子がいしの芯材であるFRPの吸湿時の電気絶縁破壊特性と吸湿における異方性、現在最も代表的な外被材料であるシリコーンゴムの撥水性、高分子がいしの人工汚損特性を評価するための実使用状態における汚損付着状況を模擬した簡便な人工汚損方法、磁器がいしと高分子がいしの汚損フラッシュオーバーのメカニズムの違い、人工汚損耐電圧特性に及ぼす要因の影響、高分子がいしの各種形状の効果等について、重要な項目が未検討のままであり、高分子がいしの適用に必要な電気絶縁特性に関するこれらの基礎特性を明らかにする必要がある。

1. 5 本研究の内容

本研究は、著者が日本ガイシ株式会社 電力技術研究所および名古屋工業大学電気情報工学科において高分子がいしの電気絶縁特性に関する基礎的研究を行ったもので、その内容を以下に示す。

第2章では、高分子がいしの電気絶縁と機械荷重支持の役割を担う芯材であるFRPの吸湿時の電気絶縁破壊特性と吸湿における異方性について研究する。FRPは、酸に曝された条件下で、機械ストレスを受けると通常の破壊荷重の20%以下の荷重で破壊してしまうことがある。FRPの吸湿性および吸湿時の電

気特性については国際的にも重要な研究課題である。そこで、基礎特性として、FRP棒単体の絶縁破壊特性に及ぼす吸湿の影響と、種々のFRPの吸湿における異方性について試験する。FRPを高湿度条件下や水中に浸漬しておいた場合、試験開始直後は表面に付着したわずかな水分の影響で、負極性雷インパルスフラッシュオーバー電圧が極めて低くなることを明らかにする。吸湿における異方性については、ガラス繊維の表面処理が異なると、ガラス繊維と樹脂間の密着性が異なり軸方向の吸湿性に大きな影響を及ぼすこと、FRPは端面からの吸湿が最も顕著であり、その特性はガラス繊維と樹脂との界面での拡散現象であること、FRP表面の粗面化処理の影響は小さいこと等を明らかにする。

第3章では、高分子がいしの代表的な外被材料であるシリコーンゴムの撥水性について述べる。シリコーンゴムの表面の撥水性は、シリコーンゴムを構成するメチル基によって発現されている。屋外では、使用時に、様々なストレスに曝されることになり、その撥水性の低下する場合がある。しかし、一旦撥水性が低下しても、シリコーンゴム内部のシリコーン油が表面に移行したり、メチル基が反転したりすることにより、撥水性は再び回復する。これらの撥水性の低下と回復のメカニズムについて紹介する。

撥水性が低下する一要因として、今までほとんど研究されて来なかった水分供給の極限状態を想定し、シリコーンゴムの試料を水中に浸漬した場合についての研究を行う。シリコーンゴムを水中に浸漬したり、乾燥する過程において、表面の撥水性や試料の重量変化を調査することにより、高温過湿潤条件下での挙動について明らかにする。ここでは、水浸過程において、シリコーンゴム表面には、親水性を示すぬめりが形成され、撥水性が低下すること、表面を洗浄した後の乾燥過程において、再び撥水性が回復すること、水浸と乾燥の繰り返しにより、表面の撥水性は徐々に低下し、初期の状態には戻らなくなること、水温を上げると撥水性の低下が加速されること、シリコーンゴム内部から

滲み出してきたシリコン油が水中に溶け出すこと等を明らかにする。

第4章では、高分子がいしの人工汚損試験方法について述べる。表面に撥水性を有する高分子がいしの人工汚損耐電圧試験の意義や方法については、各所で検討されているが、その人工汚損方法も含め、いまだ標準化されていない。高分子がいしの適正な人工汚損耐電圧試験方法を提案するため、まず始めに、実使用状態での高分子がいしの汚損付着状況を調査し、次いでそれを模擬した簡便な人工汚損方法を開発する。その方法についての手順を示し、模式図を用いて解説する。

また、今回用いた人工汚損試験設備の概要についても紹介し、合わせて各種汚損がいしの直流漏れ電流について調査した結果、現行 I E C（国際電気標準会議）規格の見直し点についても指摘する。加えて、汚損がいしの漏れ電流波形と交流・直流の高分子がいしの人工汚損耐電圧特性について調査し、高分子がいしの汚損フラッシュオーバーのメカニズムは、磁器がいしとは異なることを示す。

第5章では、前章で示した評価方法を用いて、高分子がいしの基礎的人工汚損耐電圧特性について評価する。表面に撥水性を有する高分子がいしの定印霧中法を中心とした評価により、人工汚損耐電圧特性を磁器がいしの場合と比較し、その特徴について明らかにする。以下にその特徴を示すと、高分子がいしの方が汚損耐電圧特性が優れていること、霧水量の影響が磁器がいしに比べより顕著であること、高分子がいしの人工汚損後、耐電圧試験実施までの時間が長くなるにつれ汚損表面の撥水性が回復し汚損耐電圧が上昇していくこと、塩分付着密度の影響や不溶性物質の種類や付着密度の影響は磁器がいしと同等であること等を明らかにする。

高分子がいしの笠形状やがいし有効長、平均直径と汚損耐電圧特性の関係についても検討する。高分子がいしの笠形状としては、笠間隔を保ちながら、漏

れ距離が確保できる段違い笠の方が、笠径が一定の通常笠に比べ優れた汚損耐電圧を示すことを明らかにする。また、高分子がいしの有効長や平均直径と汚損耐電圧の関係についても試験し、その特徴を述べる。

第6章では、本論文の総括と今後の研究課題について述べる。

文献

- (1) J. F. Hall : “Review of Nonceramic Insulators”, Electrical Power Research Institute, 1992.
- (2) GENERAL ELECTRIC 社 GEPOL[®] 配電がいし用パンフレット
- (3) G. G. Karady, M. Maralidhar and J. F. Hall : “Evaluation of the Second EPRI Transmission Line Polymer insulator Survey”, April 27, 1990.
- (4) J. T. Burnham, D. W. Busch and J. D. Renowden : “FPL’s Christmas 1991 Transmission Outage”, IEEE 93WM 094-3 PWRD, 1993.
- (5) 今駒, 石原, 松岡, 篠窪 : 「送電線用ポリマーがいしの開発」、静電気学会誌、第18巻、第4号、pp. 347-354、1994.
- (6) H. M. Schneider, J. F. Hall and G. G. Karady : “Non-ceramic Insulators for Transmission Lines”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 4, No. 4, pp. 2214-2221, 1989.
- (7) CIGRE Sub-WG 22. 03. 01 : “Worldwide Service Experience with HV Composite Insulators”, Electra, No. 130, pp. 69-77, 1990.
- (8) G. G. Karady, H. M. Schneider and F. A. M. Rizk : “Review of CIGRE and IEEE Research into Pollution Performance of Nonceramic Insulators : Field Aging Effects and Laboratory Test Techniques”, CIGRE Session Paper 33-103, 1994.

- (9) "Suspension and Tension Composite Insulators for Overhead Lines, Brittle Fractures at Low Mechanical Stress", CIGRE SC22 WG22-10 Document No. 22, 80(IWD10)23, 1980.
- (10) 松岡, 篠窪, 石野: 「複合がいしの脆性破壊について」、電気学会絶縁材料研究会資料、No. EIM-90-82、1990.
- (11) 「トラッキング現象と耐トラッキング性試験法の動向」 電気学会技術報告 (I部) 第86号、昭和43年.

第2章 高分子がいしの芯材の吸湿性

2. 1 まえがき

高分子がいしの機械的強度を担うものとして、一般にガラス繊維強化プラスチック（FRP）が用いられている。これは航空機や船舶、自動車等、様々な工業分野でも用いられている材料である。

高分子がいしの機械強度は、FRPの強度、把持金具の強度、およびFRPと把持金具の接合部の強度のいずれかで決まるが、把持金具の強度が十分な場合には、FRPに応力の集中が生ずる接合部の強度によって決まる。

送電線用がいしの離断事故に直接つながる高分子がいし特有の破壊形態として、FRPの脆性破壊現象がある。高分子がいしの脆性破壊による事故調査や発生メカニズムについて、各所で報告されている⁽¹⁻³⁾。実使用時に、外被が何らかの原因で損傷を受けると、FRPが外気に露出し、酸性雨や、界面での局部放電により空気中の窒素が酸化され水分と反応して発生する硝酸、などに曝されることになる。FRPがこのような酸に曝されると、通常の破壊荷重の20%以下の機械荷重で、前章に示したようにコアの軸にほぼ直角に、金具の疲労破壊で見られるような滑らかな破面を呈して破断する。

また、FRP単体について、その吸湿性及び吸湿時の電気的特性を評価するため、CIGREにおいて、FRPの誘電特性や絶縁破壊特性に及ぼす吸湿の影響に関する持ち回り試験が進められている⁽⁴⁾。また、FRPが吸湿することにより絶縁特性が低下する可能性があることも指摘されている⁽⁵⁾。

これらの観点から、高分子がいしの芯材に用いられる複合絶縁体であるFRPの絶縁破壊特性に及ぼす吸湿の影響とFRPの吸湿における異方性について研究することとした。

2. 2 FRPの絶縁破壊特性に及ぼす吸湿の影響

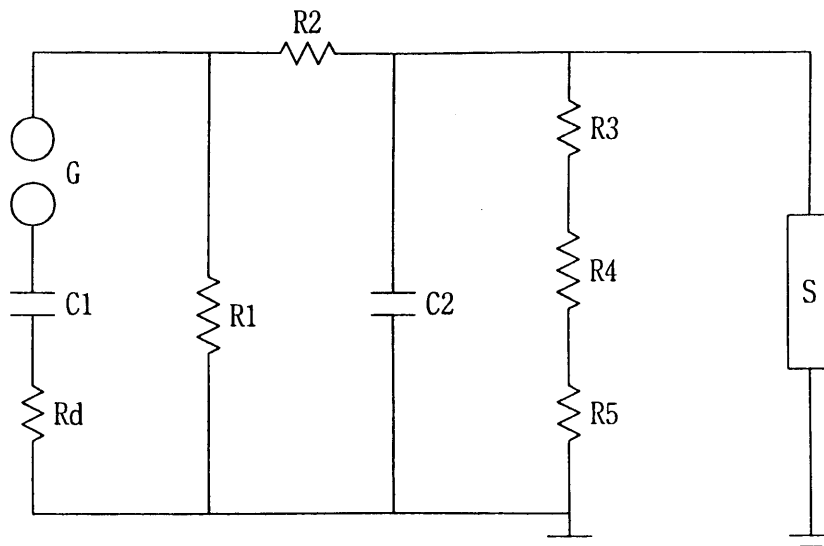
直径 20 mm、長さ 1000 mm、電極間隔 500mm の FRP 棒を用い、試験時の絶対湿度と負極性雷インパルスフラッシュオーバ電圧の関係を調査した。図 2.1 に雷インパルス電圧発生装置の回路図を示す。試験結果を表 2.1、表 2.2 に示す。試験方法は昇降法によった。絶対湿度が高い場合、試験開始直後は、通常のフラッシュオーバ電圧に比べ、約 20%低い電圧でフラッシュオーバした後、試験電圧の約 20 回の繰り返し印加中に徐々に通常のフラッシュオーバ電圧レベルに戻った。絶対湿度が低い場合には、初めから通常のフラッシュオーバ電圧レベルであった。

また、FRPを水中に1日浸漬し、表面を吸湿させた場合においても、表 2.3 に示すように、同様に試験開始直後は低いフラッシュオーバ電圧レベルを示した⁽⁶⁾。一方、事前に交流のフラッシュオーバ電圧の約 1/2 の交流電圧を 30 分間印加した場合には、初めから通常のフラッシュオーバ電圧レベルとなった⁽⁷⁾。フラッシュオーバの繰り返し、または事前電圧印加により、表面に付着した水分が蒸発したためと考えられる。

一方、正極性雷インパルスや交流の場合には、負極性雷インパルスの場合に比べ、フラッシュオーバ電圧に及ぼす吸湿の影響は、顕著には現れなかった。これは、負極性雷インパルスの場合、正極性雷インパルスや交流の場合に比べ、フラッシュオーバ経路はFRPの沿面に沿い易いため、FRPの絶縁特性に及ぼす吸湿の影響が現れたものと考えられる。

雷インパルス電圧波形 正極性 1.28/50.2 μ sec
 負極性 1.20/48.9 μ sec

最高充電電圧 600kV



- | | |
|-----------------------------|--------------------------|
| G : 放電ギャップ | R1 : 放電抵抗, 1600 Ω |
| C1 : 主コンデンサ, 0.0416 μ F | R2 : 抵抗, 150 Ω |
| Rd : 制動抵抗, 110 Ω | R3 : 抵抗, 240.92 Ω |
| C2 : 波形調整用コンデンサ, 1990 pF | R4 : 抵抗, 7490 Ω |
| S : 供試物 | R5 : 抵抗, 22.87 Ω |

図 2.1 雷インパルス電圧発生装置の回路図

表 2.1 FRPの雷インパルスフラッシュオーバ電圧試験結果(高湿度条件)

印加電圧 (kV)	電圧印加回数					
	5	10	15	20	25	30
404.25						
399.00						×
393.75					×	× ○ ×
388.50	凡例 ○：耐圧 ×：フラッシュオーバ				○ ○	○
383.25					○	
378.00				×	○	
372.75				○ ○		
367.50				○		
362.25				○		
357.00				○		
351.75				○		
346.50				○		
341.25				○		
336.00		×	×	○		
330.75		○ ○ ○				
325.50		○				
320.25		○				
315.00	×	○				
309.75	○					
304.50						
(試験実施時の気象条件)						
気圧：757.3mmHg 乾球温度：30.6℃ 湿球温度：24.2℃						
絶対湿度：18.5g/m ³ 相対空気密度：0.961						

表 2.2 FRPの雷インパルスフラッシュオーバ電圧試験結果(低湿度条件)

印加電圧 (kV)	電圧印加回数					
	5	10	15	20	25	30
404.25						
399.00						
393.75				×		
388.50	×	×	×	○ × ×	×	
383.25	× ○ ○	× ×	○ ○	○	○ ×	× ×
378.00	○	○ ×	○		×	○ ○ ○
372.75			○		○	
367.50						
362.25	凡例 ○：耐圧 ×：フラッシュオーバ					
357.00						
351.75						
(試験実施時の気象条件)						
気圧：766.7mmHg 乾球温度：21.6℃ 湿球温度：15.0℃						
絶対湿度：9.2g/m ³ 相対空気密度：1.003						

表 2.3 FRPの雷インパルスフラッシュオーバー電圧試験結果(1日水中浸漬した試料)

印加電圧 (kV)	電圧印加回数										
	5	10	15	20	25	30					
393.75											
388.50	凡例 ○：耐圧 ×：フラッシュオーバー										
383.25											× ×
378.00										×	
372.75				○ ×	×	○					
367.50			○	×	× ○ ○						
362.25			× ○	○	○						
357.00			○ ○								
351.75		○									
346.50		○									
341.25		○									
336.00		○									
330.75		○									
325.50	○										
320.25	○										
315.00	× ○										
309.75	○										
304.50											
(試験実施時の気象条件)											
気圧：760.7mmHg 乾球温度：9.0℃ 湿球温度：6.6℃											
絶対湿度：6.2g/m ³ 相対空気密度：1.039											

2. 3 芯材の吸湿における異方性

F R Pはガラス繊維と樹脂との複合絶縁体であり、吸湿により絶縁特性に影響を与える。しかし、F R Pの吸湿における異方性について実験的評価を行った例はない。以下に種々のF R Pの吸湿性についての実験結果を述べる。

2. 3. 1 供試試料と試験方法

試料として、4種類のエポキシ樹脂系F R Pを用いた。表 2. 4 に寸法諸元を示す。いずれの試料も、ガラス繊維の方向は試料の長さ方向に平行である。

表 2. 4 供試試料

試料	直径	長さ	備考
F R P - A - B	20mm φ	60mm	ガラス繊維の表面処理が異なる
- C - D	22mm φ	60mm	F R P 表面粗面化処理あり F R P 表面粗面化処理なし

最初に恒温槽中で 50℃・24 時間、試料の加熱乾燥を行い、次いで、吸湿性の異方性を評価するため、図 2. 2 に示すように F R P の側面のみを水道水に浸漬した場合（半径方向の吸湿測定）、端面のみを浸漬した場合（軸方向の吸湿測定）、および試料全体を浸漬した場合（全方向の吸湿測定）について試料の重量の経時変化を測定した。水道水の導電率は約 200mS/m、水温は約 15℃（一定）とした。重量測定には、電子天秤（分解能 0. 0001g）を使用した。

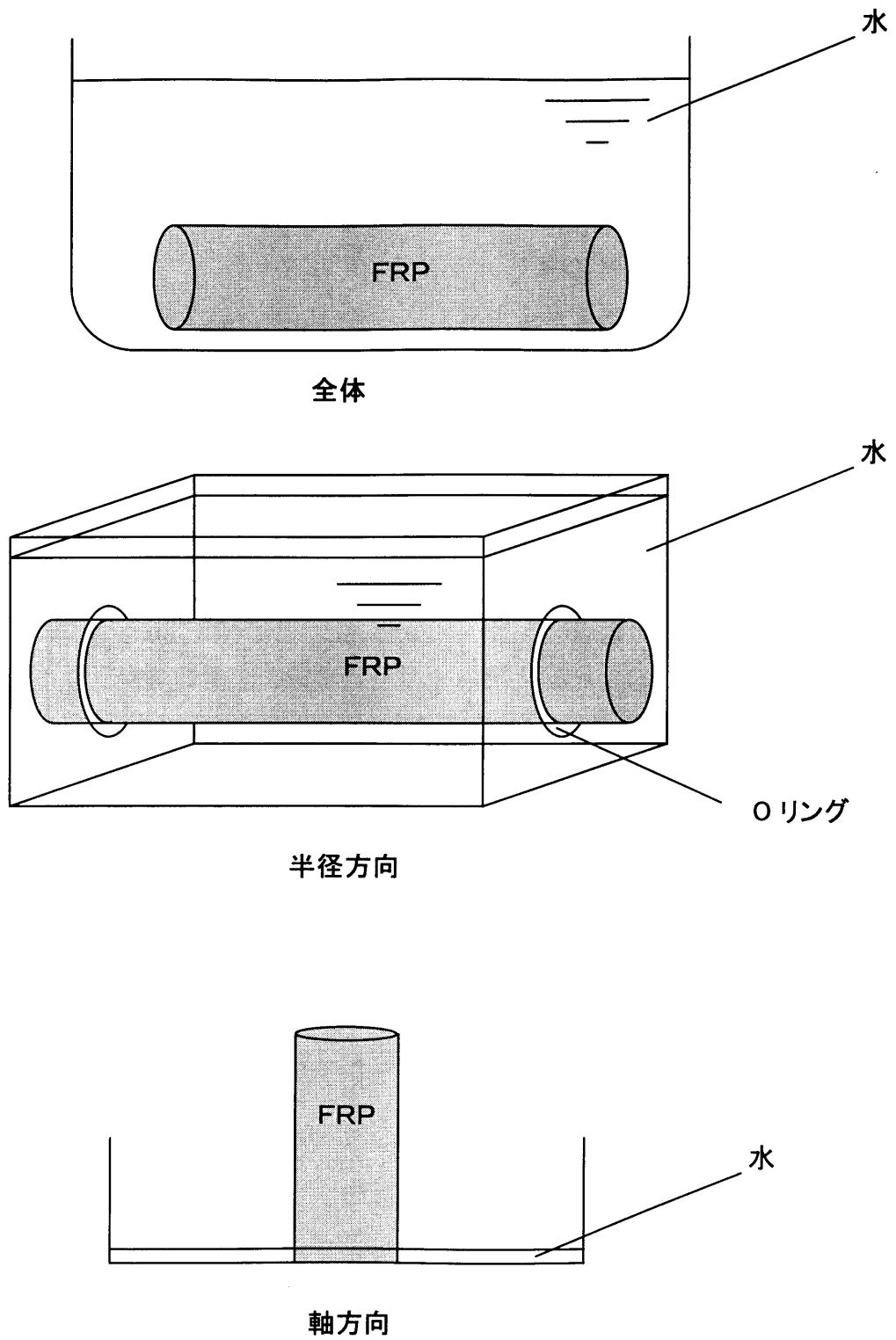


図 2.2 試験配置

FRP-CおよびFRP-Dの単位面積当りの重量増加量の経時変化を、それぞれ図 2.4, 図 2.5 に示す。図 2.2 に示した結果と同様に、軸方向からの吸湿による重量増加が大きいことが分る。表面粗面化処理により重量増加量は若干増えている。これは、処理により水と接触する面積が増加するためと考えられるが、今回程度の処理では吸湿性への影響は小さいことが分る。

一般に樹脂の吸水現象は水分子の拡散によるものである。簡単のために一次元で考えると、拡散方程式は次式で表される。

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2C}{dx^2}$$

ここでCおよびDは、それぞれ水分濃度および拡散係数である。Cの減少割合はその点におけるCに比例すると仮定して、比例定数を $1/\tau$ とすると拡散距離Lは

$$L = \sqrt{D\tau}$$

で表される。ここで、 τ は時間 t の関数であり、拡散定数Dは時間 t、距離 x によらず一定なので

$$L \propto \sqrt{t}$$

である。さらに、拡散距離Lは単位断面積当たりの吸水量wに比例するので

$$L \propto w$$

となる。したがって、単位面積当たりの吸水量wと時間 t の関係は、

$$w \propto \sqrt{t}$$

で表される。この関係を各図中に実線で示した。測定された重量増加量は、ほぼこの関係式を満足していることが分る。

2.3.2 試験結果および検討

吸湿量は、水に接触する単位面積当たりの重量増加量で評価した。重量増加量は、重量の増加分の初期重量に対する割合を示す。

FRP-AおよびFRP-Bの単位面積当たりの重量増加量の経時変化を図2.3に示す。FRP-A、FRP-B共、時間と共に重量は増大しているが、軸方向からの吸湿に大きな違いが認められ、前者は後者の2倍程度である。両試料では、ガラス繊維の表面処理剤のみが異なることから、ガラス繊維とエポキシ樹脂との密着性が軸方向の吸湿に大きな影響を与えることが分る。また、それぞれの試料において、軸方向の吸湿による重量増加量は、半径方向からのその4~8倍と大きく、顕著な異方性があることが分る。ガラス繊維とエポキシ樹脂との界面において、ガラス繊維に沿って水分が移動しやすいためと考えられる。

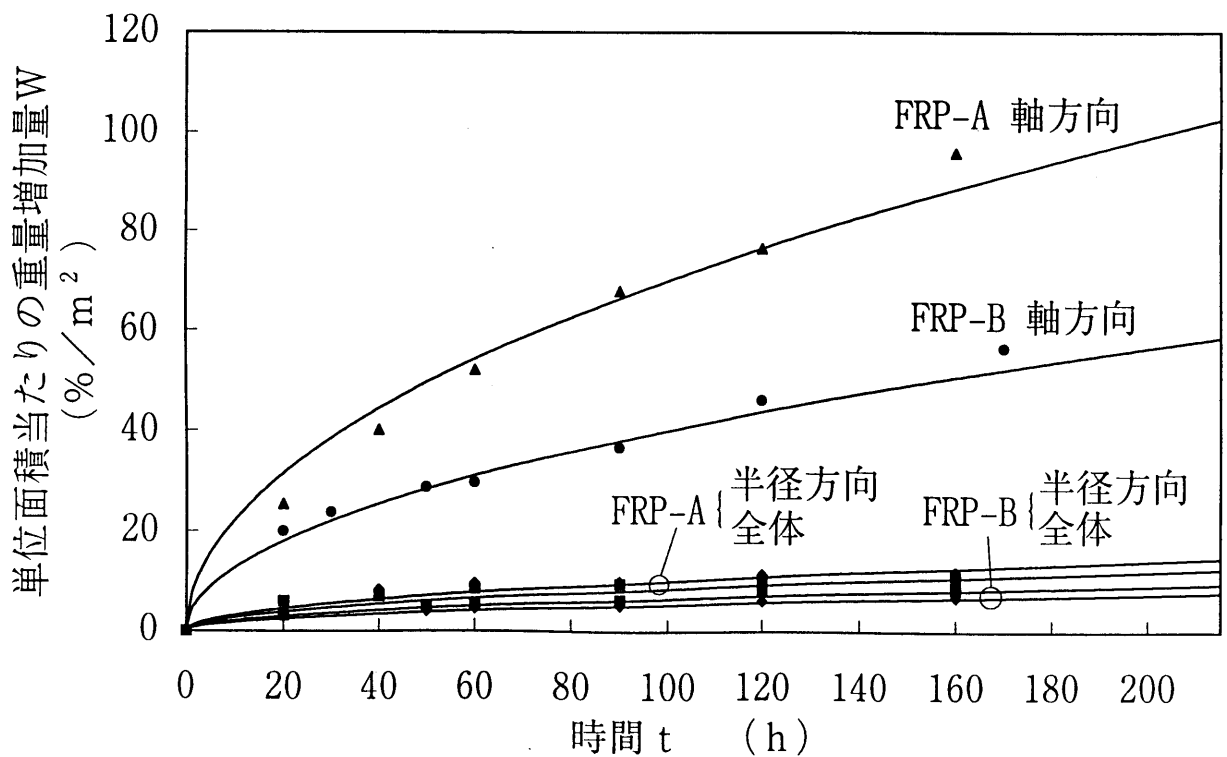


図 2.3 重量増加量の時間変化 (FRP-A、FRP-B)

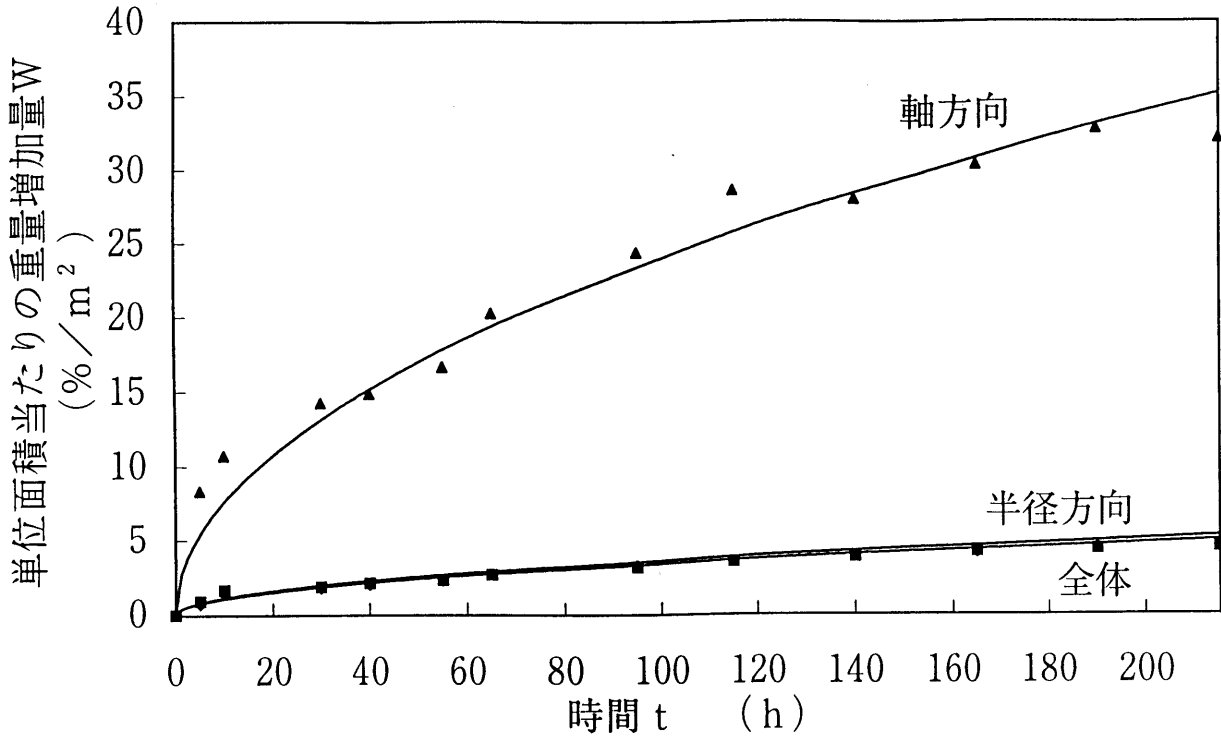


図 2.4 重量増加量の時間変化 (FRP-C)

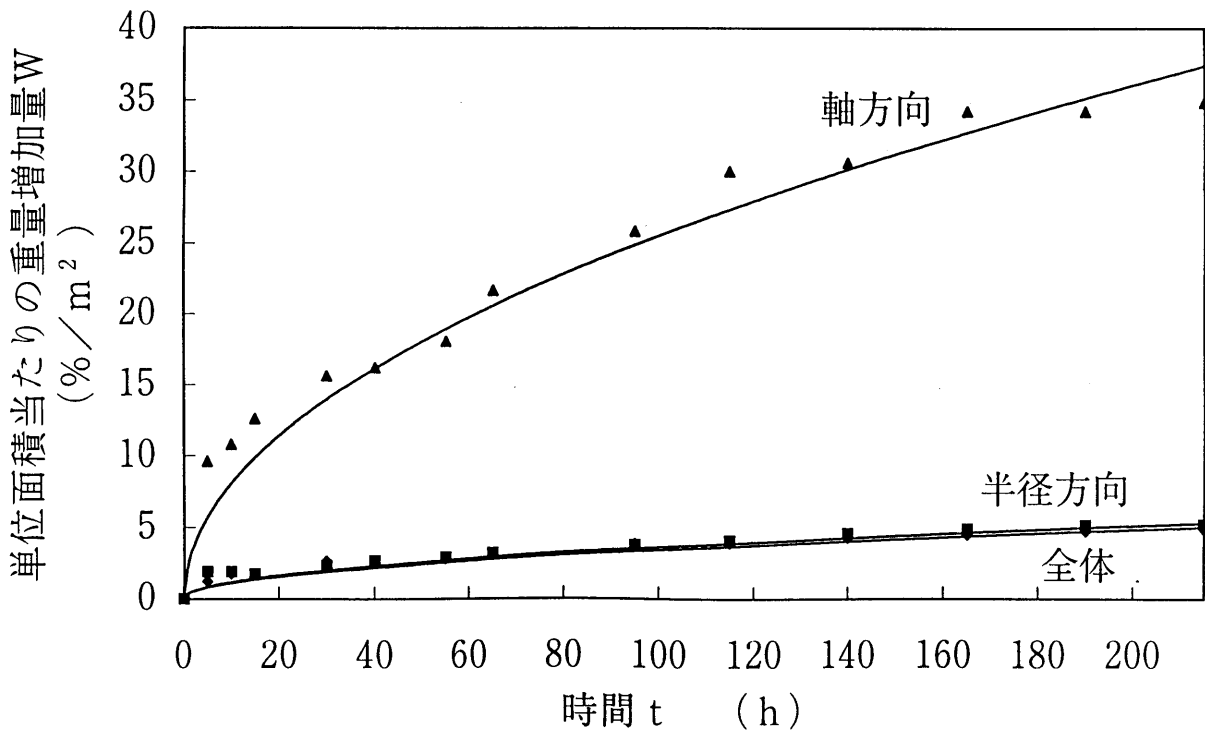


図 2.5 重量増加量の時間変化 (FRP-D)

2. 4 むすび

高分子がいしの芯材に用いられるFRPの吸湿による絶縁破壊特性への影響と吸湿における異方性を評価し、以下の結果が得られた。

- (1) 絶対湿度が高い場合や、FRP表面が吸湿した場合、表面に水分が付着し、絶縁破壊特性は低下する。特に負極性雷インパルスフラッシュオーバ電圧の顕著な低下が認められた。
- (2) ガラス繊維の表面処理剤の種類により軸方向からの吸湿による重量増加量が異なり、ガラス繊維と樹脂間の密着性は吸湿に大きな影響を及ぼす。
- (3) 軸方向からの吸湿による単位面積当りの重量増加量は、半径方向のそれに比べてはるかに大きい。
- (4) 軸方向の吸湿はガラス繊維とエポキシ樹脂との界面での水の拡散現象によると考えられる。
- (5) FRP表面の粗面化処理が吸湿に及ぼす影響は小さい。

FRPの端面からの吸湿が最も顕著であり、高分子がいしの芯材として用いる場合、FRPコアを外部へ露出させないことはもちろん、特に、把持金具内部に水分が侵入しないよう密封した構造とすることが必要である。

文献

- (1) “Suspension and Tension Composite Insulators for Overhead Lines, Brittle Fractures at Low Mechanical Stress”, CIGRE SC22 WG22-10 Document No. 22-80 (WG10) 23 IWD, 1980.
- (2) “Guide for the Identification of Brittle Fracture of Composite Insulator FRP Rod”, ELECTRA No. 143, pp. 61-65, 1992.

- (3) 松岡、篠窪、石野：「複合がいしの脆性破壊について」、電気学会絶縁材料研究会資料、No. EIM-90-82、1990.
- (4) 長尾、中村、村本、小崎、田中：「複合材料の誘電・絶縁特性に及ぼす吸湿の影響」、電気学会誘電・絶縁材料研究会資料、No. DEI-96-38、1996.
- (5) 劉、甲斐、佐藤、長尾、小崎、家田：「エポキシ樹脂の耐トラッキング性と吸湿について」、平成7年電気学会全国大会、No. 392、平成7年.
- (6) 堀、松下、草田、石井、水野、内藤：「がいしのフラッシュオーバ電圧に及ぼす事前電圧印加効果（第2報）」、平成7年電気学会全国大会、No. 1624、平成7年.
- (7) 堀、松下、草田、石井、水野、内藤：「がいしのフラッシュオーバ電圧に及ぼす事前電圧印加効果」、平成6年電気学会東海支部連合大会、No. 72、平成6年.

第3章 高分子がいしの外被材料の撥水性

3. 1 まえがき

高分子がいしは、通常製造直後は優れた表面の撥水性を示し、磁器がいしやガラスがいしに比べ優れた汚損耐電圧特性を示す。特に、シリコーンゴムを外被に有する高分子がいしの場合には、一時的に撥水性が喪失してもシリコーンゴム内部より表面へシリコーン油が滲み出すため撥水性が回復し、長期間表面の撥水性が維持される⁽¹⁾。しかし、豪雨に曝され続けたり、アーク放電に曝されたり、紫外線に照射されることにより、撥水性が低下することが懸念される。アーク放電や紫外線照射によるシリコーンゴムの撥水性への影響について種々報告されているが⁽²⁻⁵⁾、過湿潤条件に曝された場合の影響についてはほとんど報告されていない。

今回、豪雨に長期間曝される等、過湿潤条件の極限状態を模擬して、シリコーンゴム試料を水中に浸漬した場合の表面の撥水性の経時変化を調査した。評価項目としては、表面の撥水性への影響を調査するための後退接触角の測定と、試料中のシリコーン油の含有量に及ぼす水浸の影響を調査するための重量変化量を取り上げた。合せて水温および繰り返し水中浸漬の影響についても調査した。

3. 2 シリコーンゴムの撥水性メカニズム

シリコーンゴムは一般に優れた撥水性を示し、その特性は屋外で用いられても長時間維持される。図 3.1 にシリコーンゴムの化学構造を示す。シリコーンゴムを構成する表面エネルギーの小さいメチル基(CH₃)が表面の撥水性の原因となっている。しかし、屋外で長期間使用していると、紫外線、汚損、温度変

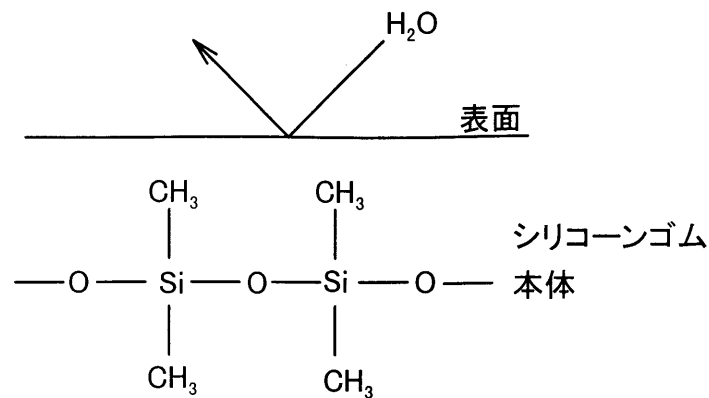


図 3.1 シリコーンゴムの化学構造

化、局部アーク、湿潤などの様々なストレスにより劣化し、徐々に表面の撥水性が失われる。これはメチル基の切断、欠落により親水性を示す水酸基（OH）の発生、主鎖（O-Si）の切断等によると考えられている⁽⁵⁾。図 3.2 に水酸基が表面に現れ、親水性になる模式図を示す。しかし、シリコーンゴムの場合には、局部アーク等により、一旦表面の撥水性が低下したり、汚損物が表面を覆っても、表面の撥水性は回復することが報告されている^(7,8)。図 3.3 にシリコーンゴムの撥水性回復のメカニズムの模式図を示す。水酸基とメチル基が反転し、再び撥水性を示すメチル基が表面に現れたり、シリコーンゴム内部のシリコーン油が汚損層表面上まで現れるためである⁽¹⁻³⁾。

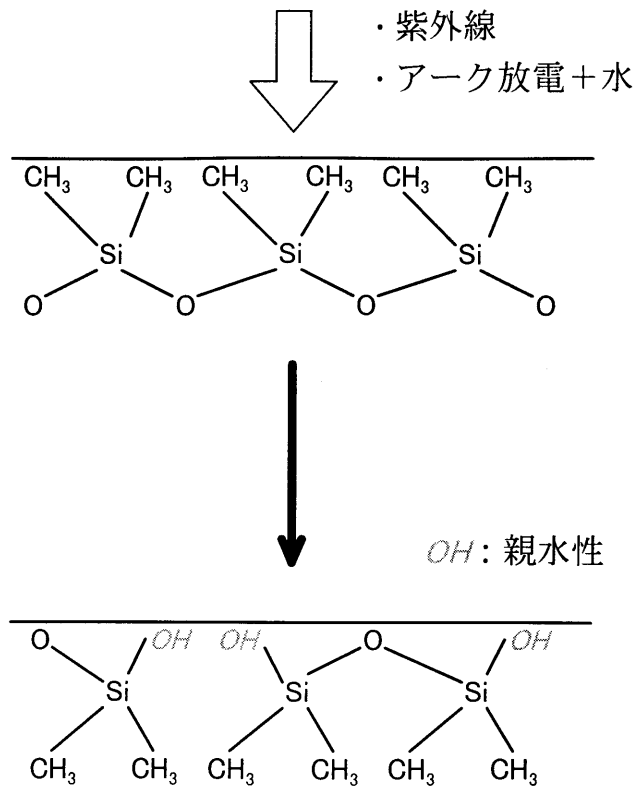
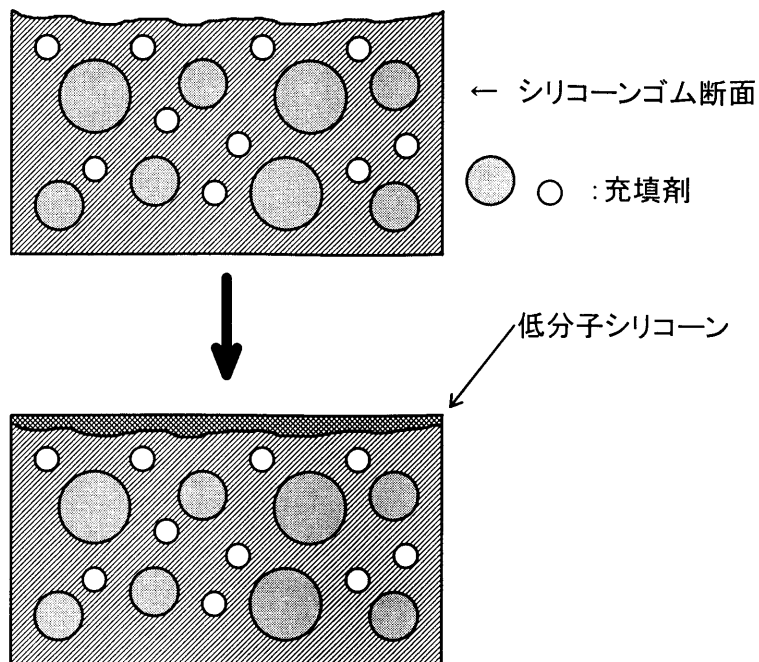


図 3.2 シリコーンゴム表面の水酸基発生モデル

1. 低分子シリコンゴムの内部からの表面への移行



2. 疎水基の反転

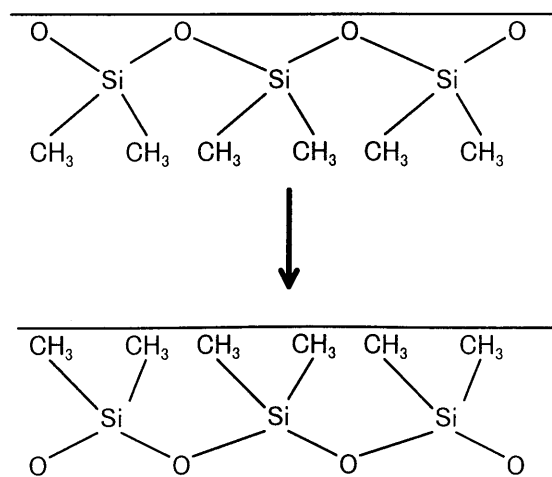


図 3.3 シリコンゴム表面の撥水性回復メカニズム

3. 3 試験方法と手順

供試試料として2mm厚の高温硬化型シリコーンゴム (HTV-SiR) を用いた。初期重量は約10gであった。試料を名古屋市の水道水 (以下、水道水という。) と蒸留水に浸し、所定の時間水中に保持し、その後、水から取り出した。静かに試料を取り出し水を切った後、電子天秤 (分解能 0.0001g) で試料の重量を測定し、その直後に後退接触角を測定した。接触角は、水平にした試料に 30 μ l の水粒を落とし、そこから 15 μ l 吸い取り、その水粒を側面から写真撮影し、写真像から測定した。同じ条件で、測定を5回行い、所定の間隔でこの測定を行った。

水中に浸漬させておくと、浸漬時間と共に後退接触角は徐々に低下し、一定の値に達する。浸漬時間が長くなると、試料の表面には徐々にぬめりのような物質が形成された。そのぬめりは指で容易に取り除くことが出来た。接触角と重量は試料を水中から取り出した直後に測定し、その後、室温の外気中で乾燥させて、接触角の回復と重量変化を調査した。

同様の現象を加速するため、水温を 30~50℃に上昇させ、水浸試験を行った。本試験においては、 $\pm 1^\circ\text{C}$ に温度を制御し、上記の試験手順を繰り返した。

3. 3. 1 水質の影響

図3.4に20℃の水道水に試料を浸漬させた時のシリコーンゴム試料の後退接触角と重量の経時変化を示す。図には5回測定データの平均値とばらつきを示す。重量は初期値からの変化率を%で示した。

シリコーンゴム試料の後退接触角は時間とともに徐々に低下し、約100時間で安定した。重量は10時間までは、わずかに、その後急激に上昇した。表面のぬめりを洗浄すると、後退接触角は直ちに回復したが、初期値までは回復しなかった⁽¹⁻³⁾。

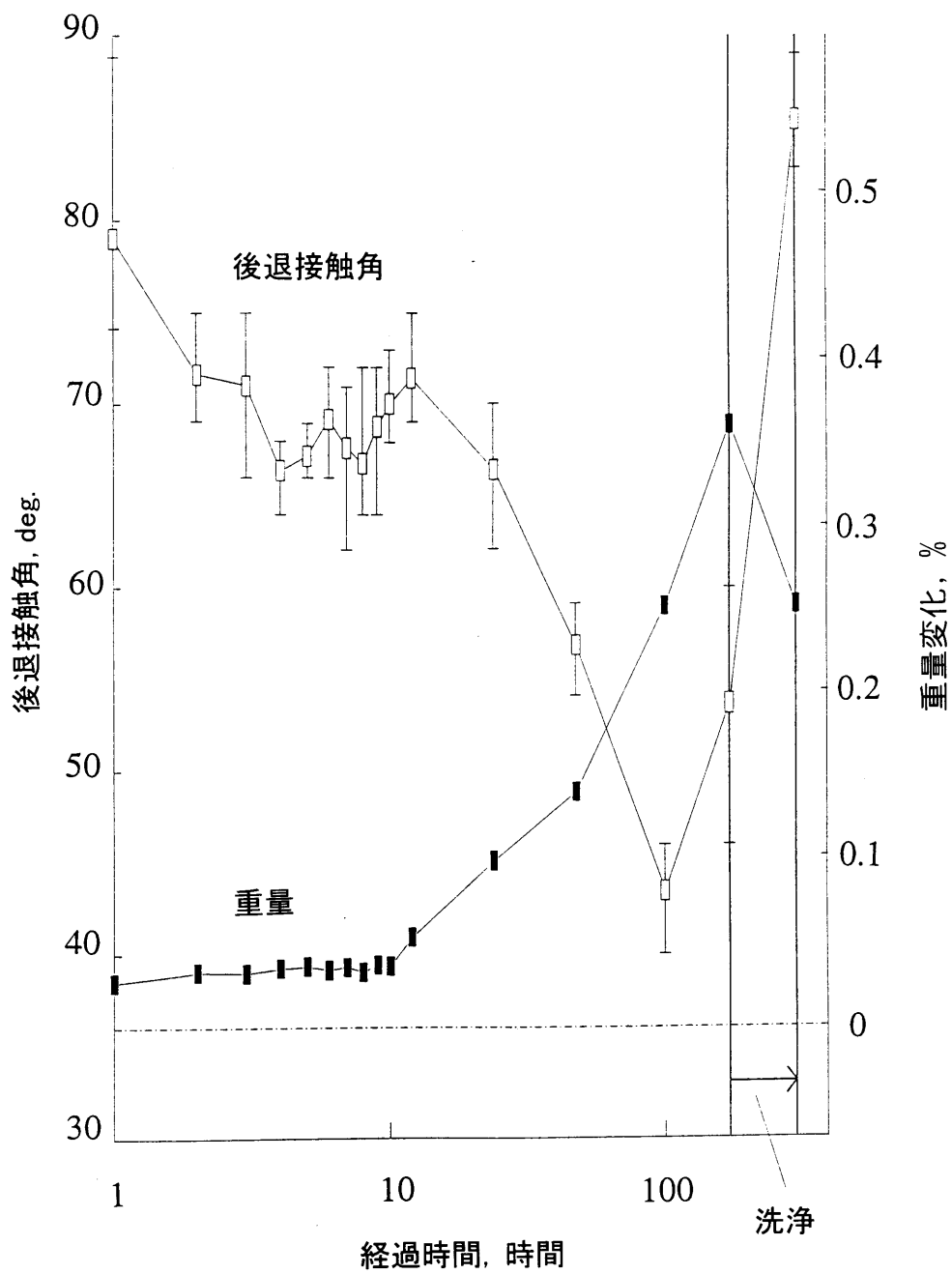


図 3.4 後退接触角と重量の経時変化 (水道水浸漬)

蒸留水に浸漬したときのシリコーンゴム試料の後退接触角と重量の経時変化を図 3.5 に示す。ここには乾燥過程における経時変化も示した。後退接触角と重量の変化は、水道水の場合に得られた結果と同様であるが、後退接触角のばらつきは水道水の場合に比べ多少小さくなった。室温での乾燥過程において、後退接触角は、経過時間に関係なくほぼ一定であったが、重量は初期に急激に減少し、その後、徐々に減少し、初期値より 0.05%低い値で安定した。

次に、ぬめりの成分について化学分析を行った。250 時間蒸留水に浸漬させた後、試料表面に形成されたぬめりを蒸留水中で洗い、蒸留水中に溶出した成分を誘導結合プラズマ原子発光分光法（ICP-AES：Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry）により分析した。参考のため、シリコーンゴム試料を短時間浸した場合についても調査した。表 3.1 に化学分析結果を蒸留水中のシリコーン成分の含有量として示す。250 時間浸漬した蒸留水中には最も多くシリコーンが含まれており、試料表面のぬめりの主成分はシリコーンと推測される。水浸過程における後退接触角の低下はシリコーンゴム表面に形成された親水性の成分に起因すると想定される。表面に形成されたぬめりを洗浄した直後に接触角が回復することがこのことを裏付けている。また、蒸留水、水道水ともに同様の現象であることから、親水性物質の源は、水道水中の不純物ではないといえる。この親水性は主鎖の切断による水酸基の生成やメチル基の反転に起因すると想定される^(5, 9, 10)。

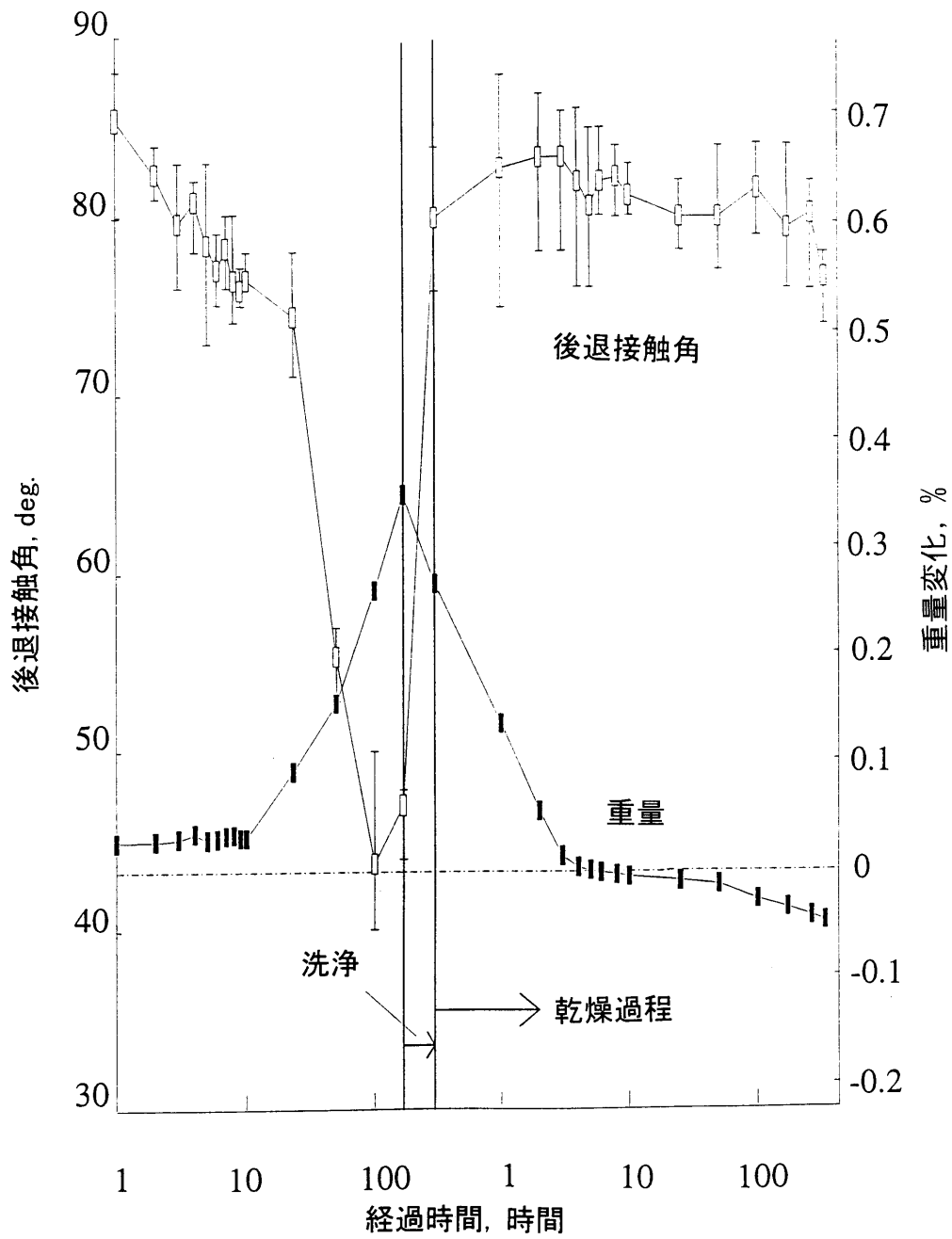


図 3.5 後退接触角と重量の経時変化 (蒸留水浸漬)

表 3.1 蒸留水の中のシリコン成分含有量

試料浸漬時間	シリコン成分 (μ g/ml)
250 時間	22
短時間	<0.05
試料浸漬なし	<0.01

重量の減少は試料中のシリコン油が拡散により水中へ溶け出したためと考えられる⁽¹¹⁾。乾燥過程後の重量損失と上記の化学分析の結果が低分子シリコンのような物質がシリコンゴムの内部から表面へ移行したことを示している。水道水と蒸留水に浸漬させた試料間で、経時変化にほとんど違いがないことから、以下の試験は水道水についてのみ行った。

3. 3. 2 水温の影響

図 3.6 に様々な温度の水道水に浸漬させた場合の試料の後退接触角の経時変化を示す。乾燥過程後の重量減少に及ぼす水温の影響を図 3.7 に示す。水温の上昇により接触角低下と重量減少の経時変化が加速されることが分った。しかし、40℃と 50℃では、ほとんど差は認められなかった。

図 3.8 に後退接触角が飽和するまでの時間と水温の関係を示す。化学反応の法則によれば化学反応率は温度が 10K 上昇すると 2～3 倍になると言われている⁽¹²⁾。試験データの直線の傾きは、多種要因により、通常の化学反応より少し小さい 1～2 の値を示した。今回のような反応メカニズムが、シリコンゴム表面のみに生ずるか否かは更に研究が必要である。

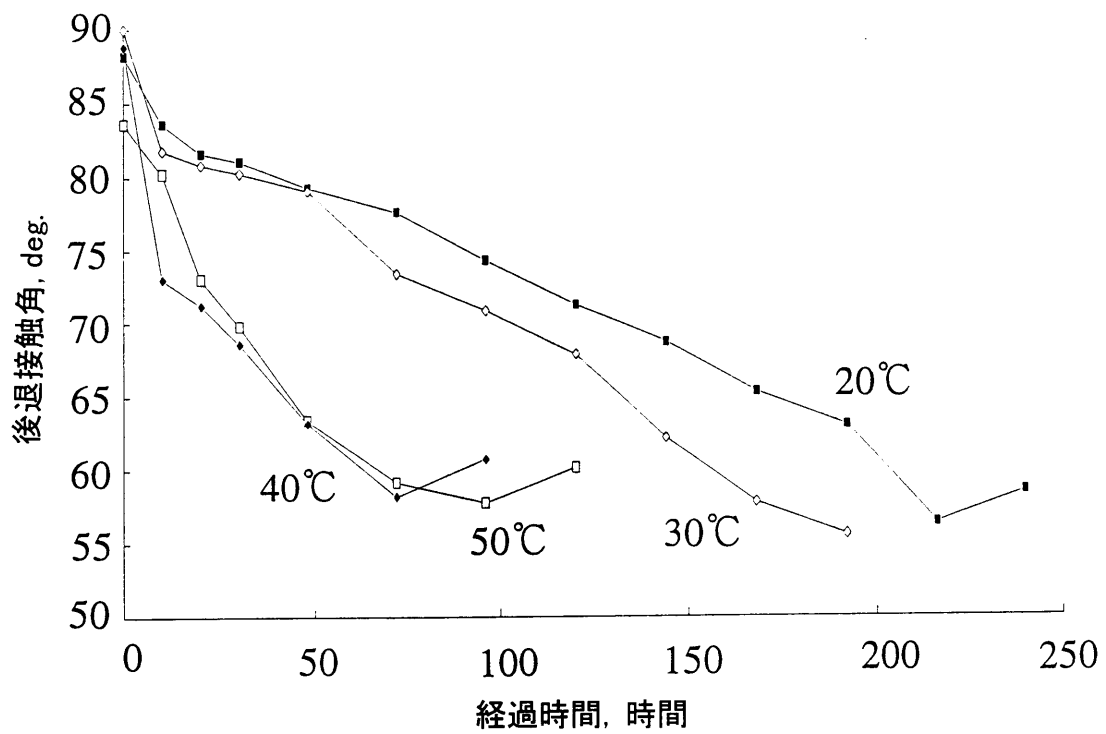


図 3.6 水温と後退接触角の経時変化の関係

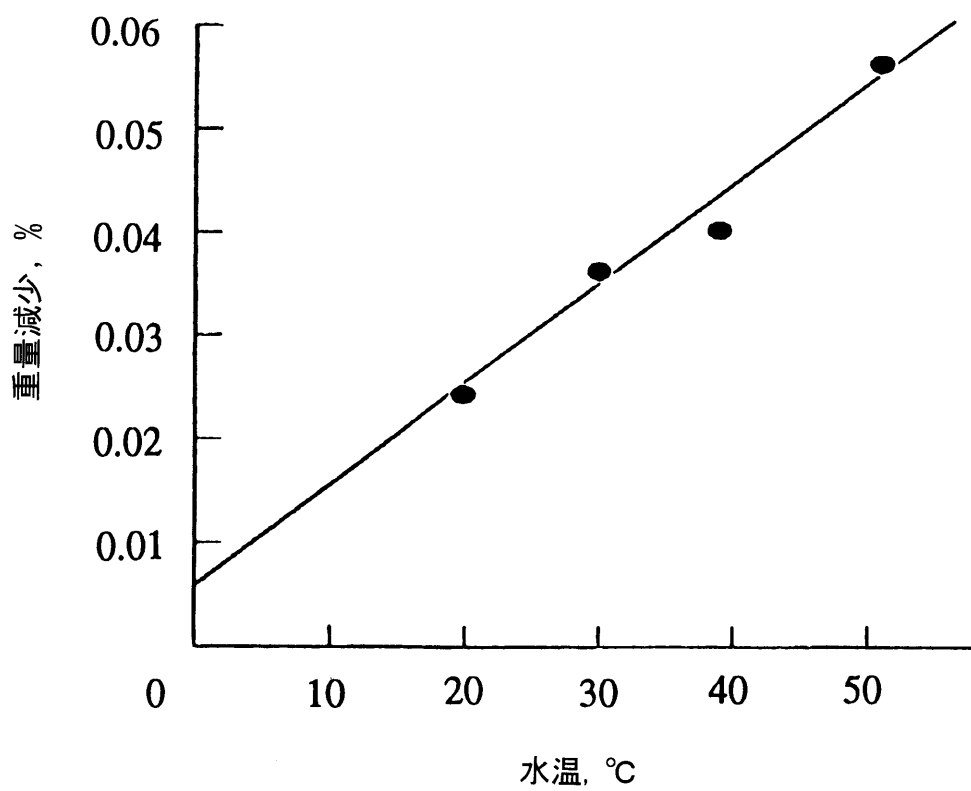


図 3.7 乾燥過程終了後の重量減少と水温の関係

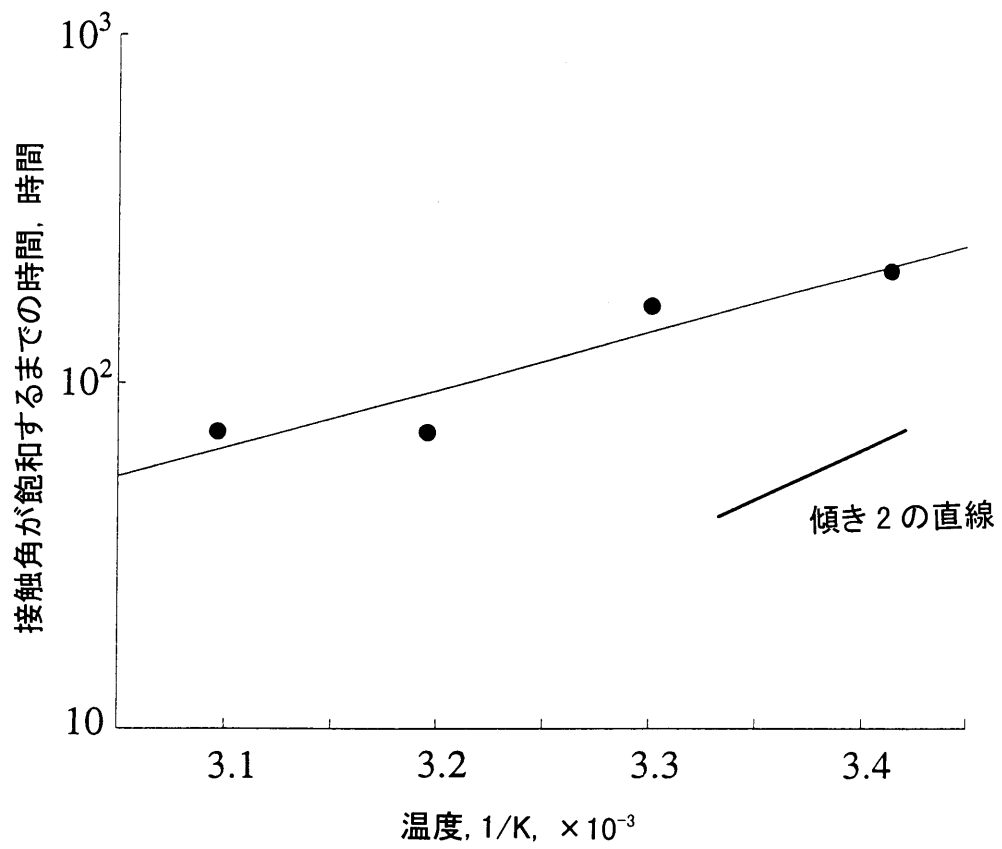


図 3.8 後退接触角が飽和するまでの時間と水温の関係

3. 3. 3 水中浸漬・乾燥繰り返しの影響

図 3.9 に後退接触角に及ぼす水浸、乾燥繰り返しの影響を示す。水温は 20℃ で実施した。図中の“I”と“D”はそれぞれ水浸過程と乾燥過程を示す。水浸過程で接触角が一定の値に達する時間は、水浸と乾燥過程を繰り返すことにより、徐々に短くなった。ぬめりを洗浄した後の接触角の回復度合も繰り返しにより徐々に小さくなった。この結果は、水浸、乾燥の繰り返しによってシリコーンゴムの表面の撥水性が徐々に低下することを示している。

図 3.10 に繰り返しサイクル中の重量の経時変化を示す。各サイクルにおいて試料は、水浸過程において水分を吸収し、乾燥過程において水分を喪失する。乾燥過程後の重量は、これらの過程を繰り返すことにより、徐々に減少した。この結果は試料が水浸中に水分を吸収し、乾燥中に放出すること、各繰り返しサイクルにおいて、低分子シリコーンのような物質が内部から表面に移動していることを示している。

図 3.11, 図 3.12 に水温 50℃の水に浸し、同様の試験を行った場合の後退接触角と重量の経時変化を示す。水温 20℃の場合と同様の変化を示すが、水温を 50℃に上昇することにより、上述の現象が加速され、特に、乾燥過程における重量の減少が顕著であることを確認した。

3. 4 むすび

シリコーンゴム表面の撥水性に及ぼす水中浸漬および水浸・乾燥の繰り返しの影響に関する試験により、シリコーンゴムの表面の撥水性と重量の経時変化を調査した。得られた結果の要点を以下に示す。

- (1)シリコーンゴムの表面の撥水性は、水浸過程において、徐々に低下し安定する。撥水性を喪失した試料表面のぬめりを洗浄すると、撥水性は回復するが、初期の状態までは回復しなかった。シリコーンゴム表面に親水性物質が形成

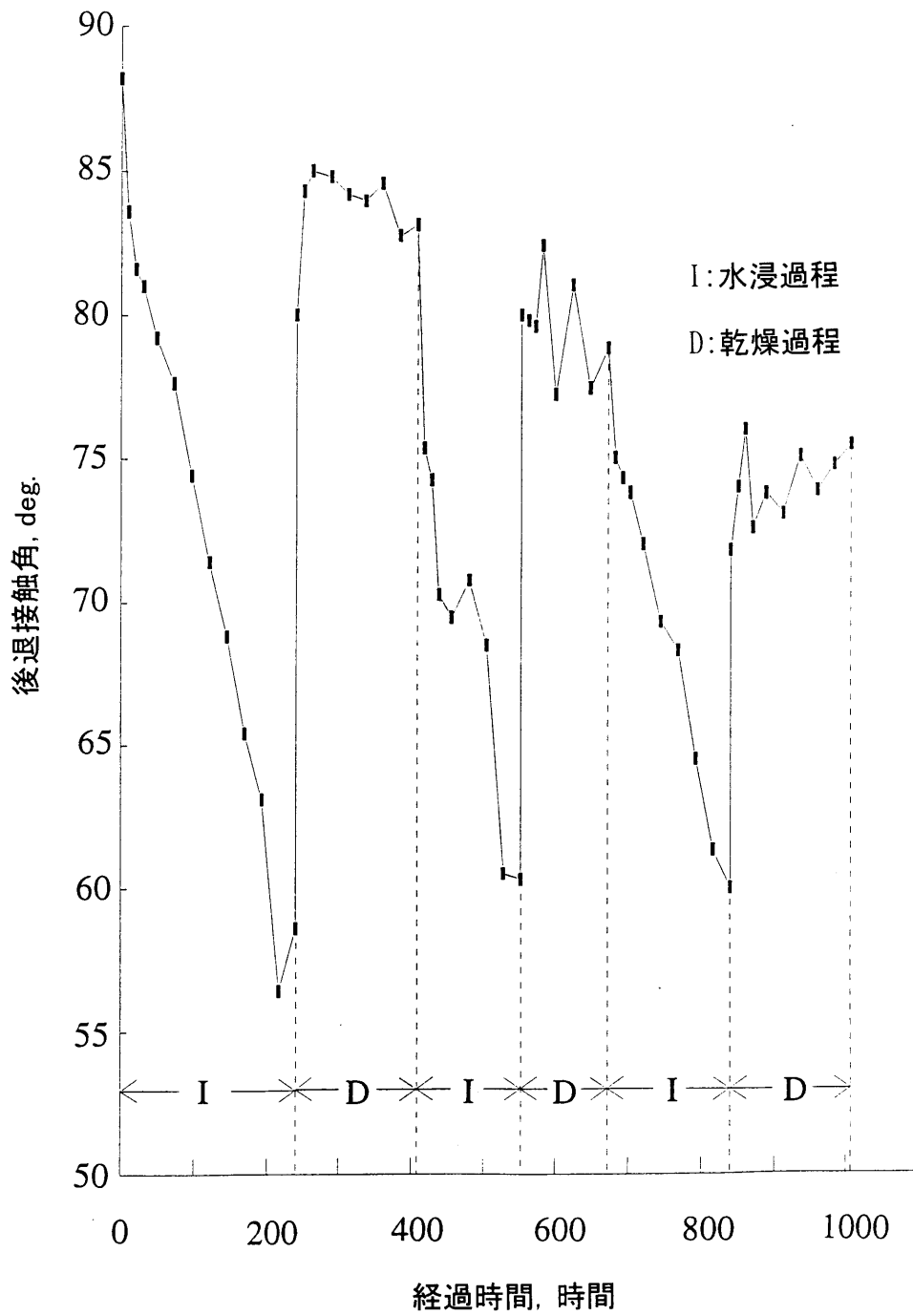


図 3.9 水浸、乾燥の繰り返しによる後退接触角の経時変化(常温)

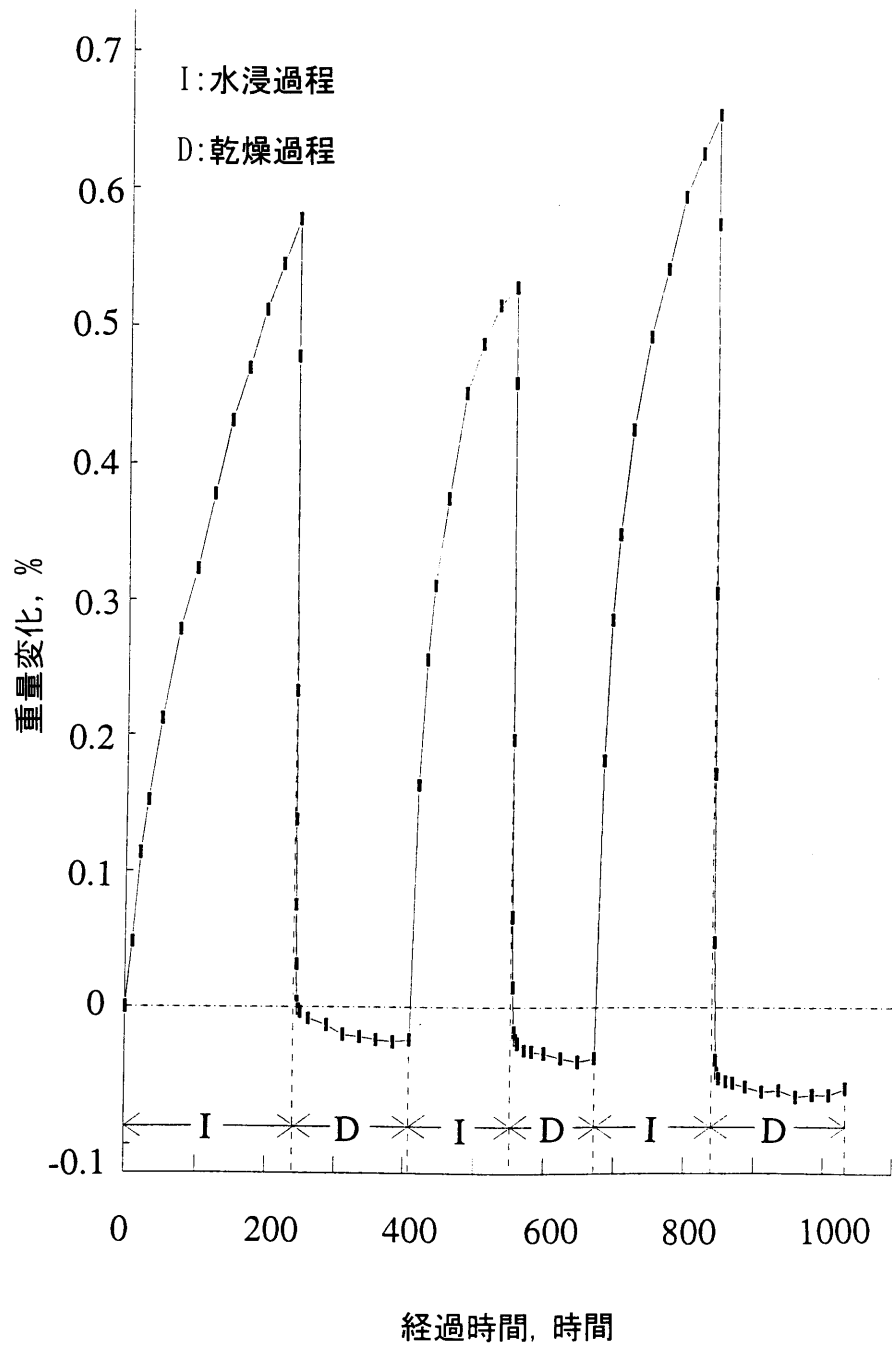


図 3.10 水浸、乾燥の繰り返しによる重量の経時変化(常温)

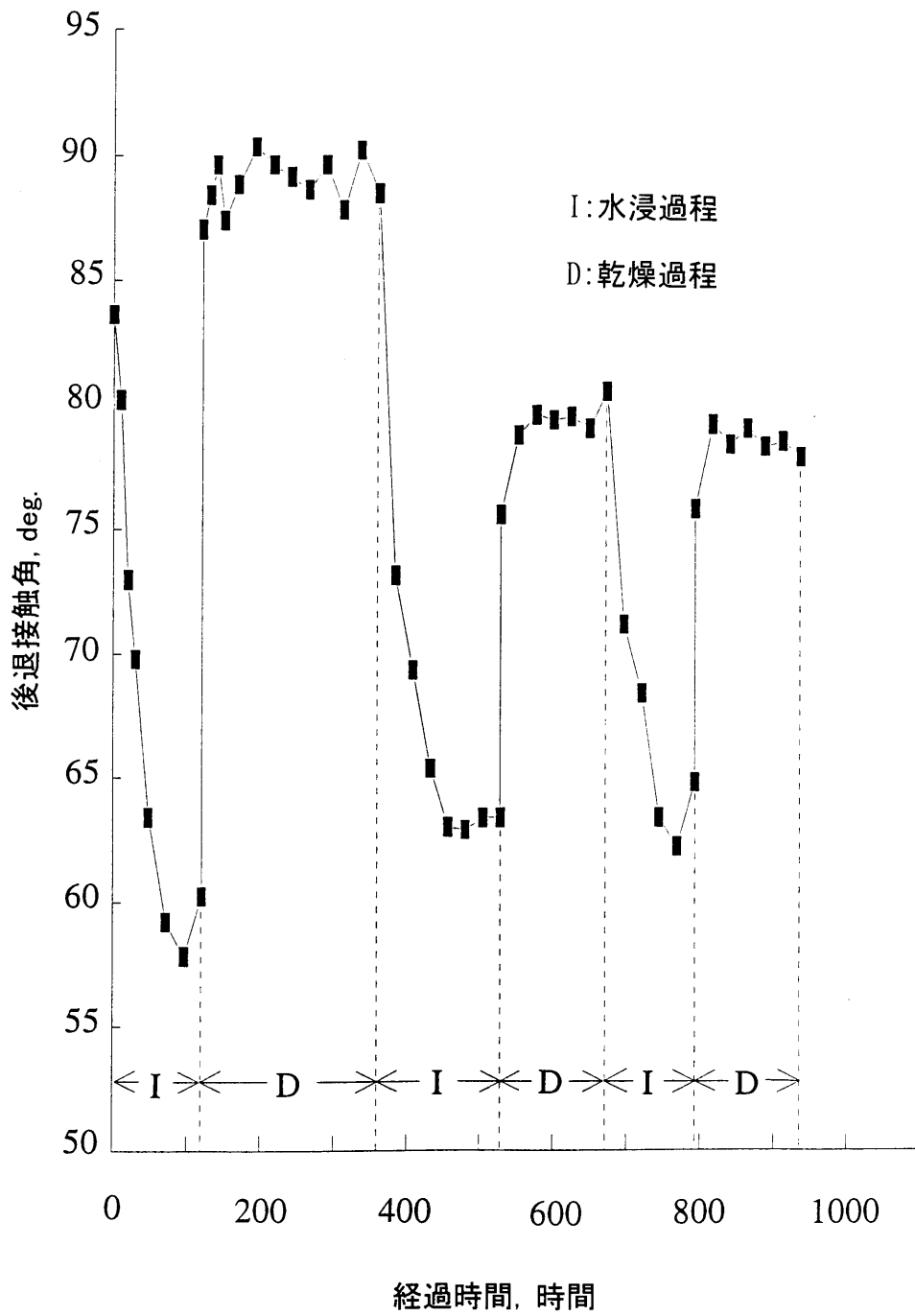


図 3.11 水浸、乾燥の繰り返しによる後退接触角の経時変化(水温：50℃)

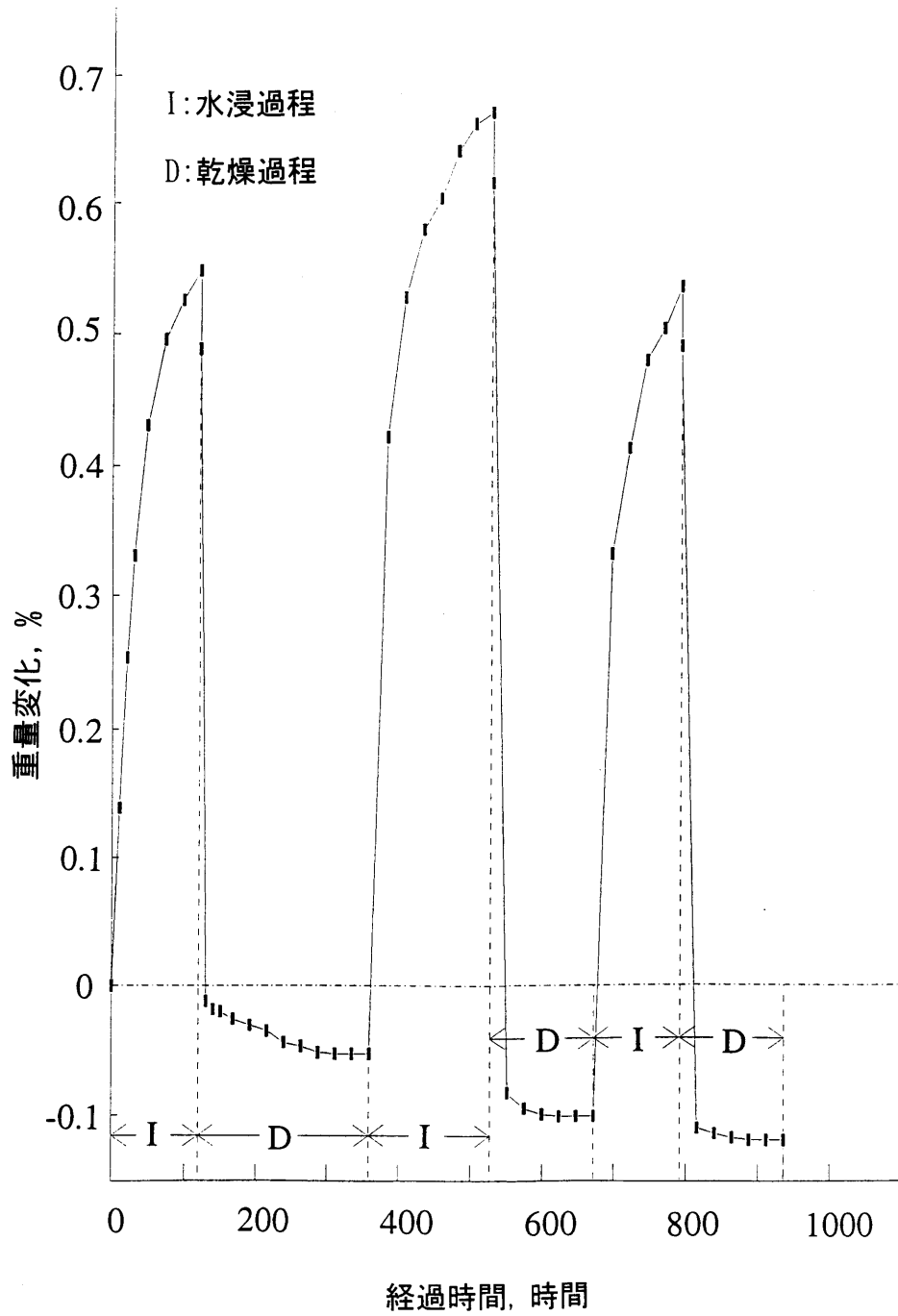


図 3.12 水浸、乾燥の繰り返しによる重量の経時変化(水温：50℃)

され、この現象を引き起こすと考えられる。

- (2) シリコーンゴムの重量には、水浸、乾燥過程において徐々に増加したり、減少したりする。シリコーンゴムが、乾燥過程に水分を吸収、放出するためと考えられる。
- (3) 水浸過程において、低分子のシリコーン成分が水中に溶け出すため、乾燥過程における重量の最小値は、初期値よりわずかに低い値に達する。また、蒸留水中に溶け出したぬめりは、化学分析により、シリコーンゴム内部から表面へ移行した、親水性を示す低分子のシリコーン成分であることが分った。
- (4) 水温を上昇すると上記3つの現象は加速される。
- (5) 水浸と乾燥過程の繰り返しにより、シリコーンゴム表面の撥水性は初期状態に比べて、徐々に低下していくことが分った。

今回の研究結果から、シリコーンゴム製高分子がいしの場合、外被が高温過湿潤条件下や豪雨に繰り返し曝されると、表面の撥水性は著しく低下し、その後、初期の状態まで回復しないことがあることが明らかになった。このような環境でのシリコーンゴム製高分子がいしの適用に当たっては、表面の撥水性が充分発揮されない場合があるので注意を要する。

文献

- (1) R. S. Gorur, E. A. Cherney, R. Hackam and T. Orbeck : “The Electrical Performance of Polymeric Insulating Materials under Accelerated Aging in a Fog Chamber”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, pp. 1157-1164, 1988.

- (2) S. H. Kim, A. E. Vlastos, and R. Hackam : "The Loss and the Recovery of Hydrophobicity of RTV Silicone Rubber Insulator Coating", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 3, pp. 1491-1499, 1990.
- (3) S. M. Gubanski and A. E. Vlastos : "Wettability of Naturally Aged Silicone and EPDM Composite Insulators", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 3, pp. 1527-1535, 1990.
- (4) E. L. de Mattos Mehl and C. de Turreil : "Multiple Stress Aging of HV Polymeric Insulation", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. EI-25, No. 3, pp. 521-526, 1990.
- (5) 熊谷, 王, 吉村 : 「紫外線が屋外高分子絶縁材料のトラッキング性に及ぼす影響」、電気学会論文誌 A、117 巻、3 号、pp. 289-298、平成 9 年.
- (6) R. S. Gorur, G. G. Karady, A. Jagota, M. Shah and A. M. Yates : "Aging in Silicone Rubber for Outdoor Insulation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 2, pp. 525-532, 1992.
- (7) 漆原, 吉原, 内藤 : 「高分子材料の外部絶縁への適用に関する基礎的研究」、平成 4 年電気学会東海支部連合大会, No. 108, 平成 4 年.
- (8) K. Naito, K. Izumi, K. Takasu and R. Matsuoka : "Performance of Composite Insulators under Polluted Conditions", CIGRE Session Paper, No. 33-301, 1996.
- (9) 筏, 松永, 鈴木 : 「高分子表面上の極性基の反転」日本化学会誌, No. 6, pp. 1079-1086, 1985.
- (10) S. J. Clarson and J. A. Semlyen : "Silicone Polymers", PTR Prentice Hall Press, pp. 332-352, 1992.
- (11) T. Tanada, K. Naito and J. Kitagawa : "A Basic Study on Outdoor Insulators of Organic Materials", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. EI-13,

No. 3, pp. 194-193, 1978.

(12) H. Tominaga and K. Komoto : "Chemical Reaction Kinetics for Process and Material Design", Shoko-do, 1994.

第4章 高分子がいしの人工汚損試験方法

4.1 まえがき

高分子がいしは、一般に磁器やガラスがいしに比べ優れた汚損耐電圧特性を示す。高分子がいしの実験室における汚損耐電圧特性の評価方法には、磁器がいしやガラスがいしの方法がそのまま適用されている。また、高分子がいしの人工汚損耐電圧試験の意義や方法について、現在各所で検討されている⁽¹⁾。しかし、高分子がいしの汚損方法も含め、従来と同一の試験方法をそのまま流用することが妥当か否か、いまだ充分には検討されていない。したがって、実使用状態における高分子がいしの汚損物の付着状況を調査し、それを模擬した人工汚損方法を開発する必要がある。

本章では、まず始めに、高分子がいしの汚損耐電圧特性を評価するため、従来の方法とは異なる、また特別な設備は必要とせず、長時間の準備を要することなく、更に大型、長尺の試料でも無理なく汚損することが出来る、国際的な標準試験法として提案できるような人工汚損方法を開発した。次に、人工汚損試験に用いた設備の概要とがいしの汚損湿潤時の漏れ電流についての試験結果について述べる。加えて、高分子がいしと磁器がいしの汚損フラッシュオーバーのメカニズムの違いについても考察する。

4.2 高分子がいしの人工汚損方法

高分子がいしの人工汚損耐電圧を評価する方法として、従来から磁器やガラスがいしに用いてきた方法である定印霧中法^(2,3)が、実際の汚損湿潤過程を良く模擬しており、現時点では、最も妥当な方法であると考えた。定印霧中法とは、所定の汚損量にてがいしを汚損乾燥させ、霧室内に搬入し、所定の電圧を印加

した後、清水霧により湿潤させ、がいしの耐電圧特性を評価する方法である。

まず始めに、実使用状態における高分子がいしの汚損物の付着状況を調査した。図 4.1、図 4.2 にそれぞれ、初期のシリコンゴム製高分子がいしの表面の撥水状況と実使用状態における汚損物の付着状況を示す。高分子がいしの表面は、製造直後は水をスプレーしても水滴状に付着し、優れた撥水性を示すことが分る。しかし、表面に撥水性があるにもかかわらず、実際には汚損物は均一に付着する。実験室において、人工汚損耐電圧試験を行う場合、実際の汚損物の付着状況を模擬して均一に汚損することが必要である。一般に磁器やガラス

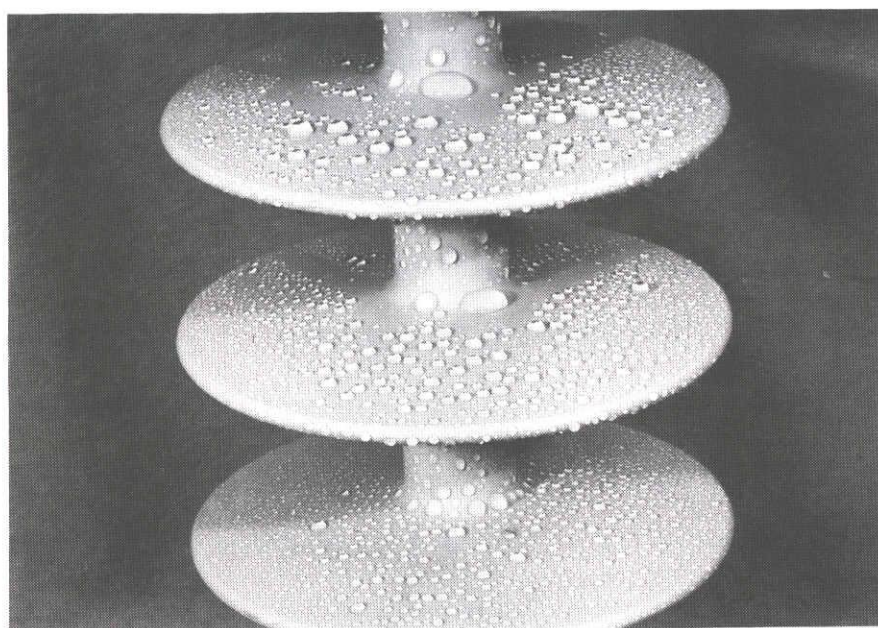


図 4.1 高分子がいしの表面の撥水性（初期）

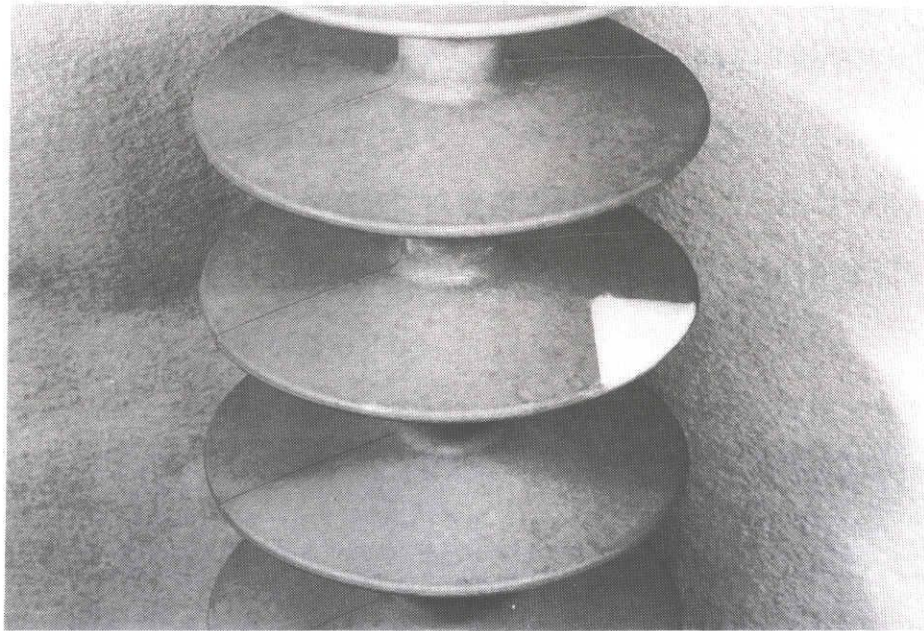


図 4.2 撤去した高分子がいしの汚損物の付着状況（使用期間：約1年間）
（白色部は洗浄した部分）

がいしの場合、表面に撥水性が残るとき、石けん水などで表面を洗浄し、撥水性を除去した後、所定の汚損液で汚損する。しかし、同様の汚損方法では、撥水性を有する高分子がいしに均一な汚損層をつくることは困難である。各所で、均一に汚損を施すための様々な試みがなされて来た。例えば、表面をサンドブラストして一次的に撥水性を損失させたり^(4,5)、フォトフロ (Photo-flo 600 : Kodak 社製) 等の界面活性剤を汚損液中に添加するといった方法⁽⁶⁾である。これらの方法で均一に汚損することは可能であるが、表面に物理的、化学的損傷を与える恐れがある。今回、高分子がいし表面に損傷を与えず、また、汚損液中に添加剤等を加えず以下に示す前処理を行って、均一に汚損する方法を開発した。具体的手順を以下に示す。

1. との粉と水 1 対 1 (重量比) の懸濁液を高分子がいしの表面全体に吹き付けて、付着乾燥させる。
2. 乾燥後、流水により付着したとの粉を軽く洗い流す。
3. 所定の塩分との粉の汚損液により、従来通りどぶ漬けまたは流し掛け法により汚損し、乾燥させる。

図 4.3 にこの方法の模式図を示す。手順 1 でとの粉をがいし表面全体に付着させ、乾燥させることによりとの粉を表面に固着させる。手順 2 で流水によりとの粉の層を洗い流す。しかし、一部との粉の残留物が表面に付着したまま残る。この残留付着物により手順 3 において均一で連続した汚損層の形成が可能となる。図 4.4 に実使用撤去がいしの汚損表面、本方法により人工的に均一に汚損した汚損面、表面未処理のまま人工的に汚損した汚損面の比較を示す。この方法により、撥水性を有する高分子がいしの場合でも、試料表面に損傷を与えることなく人工的に均一な汚損層を形成することができる。この方法は大型、長尺の試料においても比較的容易に行うことができ、高分子がいしの定印霧中法による人工汚損耐電圧特性の評価が可能となった。

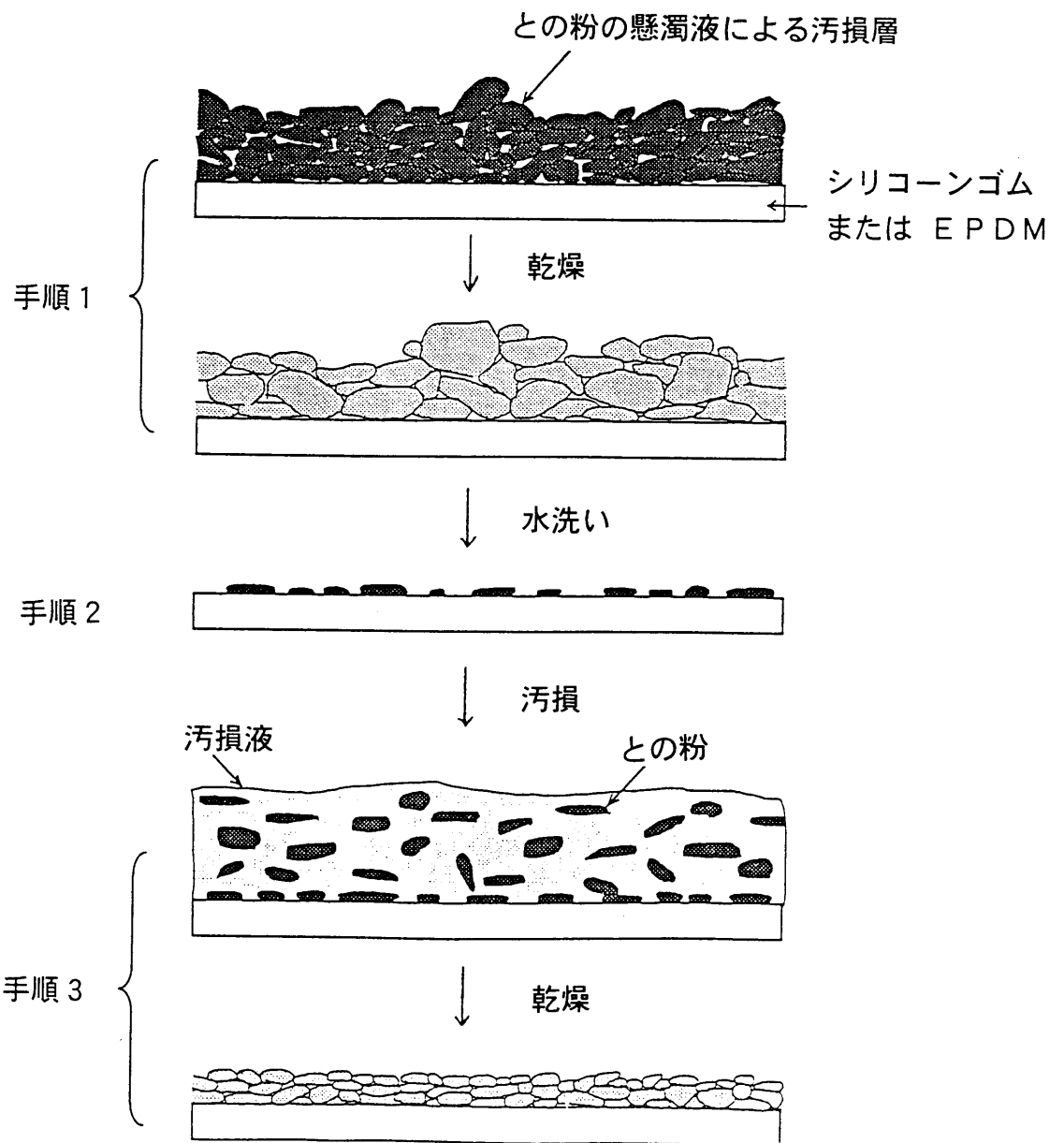


図 4.3 高分子がいしの人工汚損方法の模式図

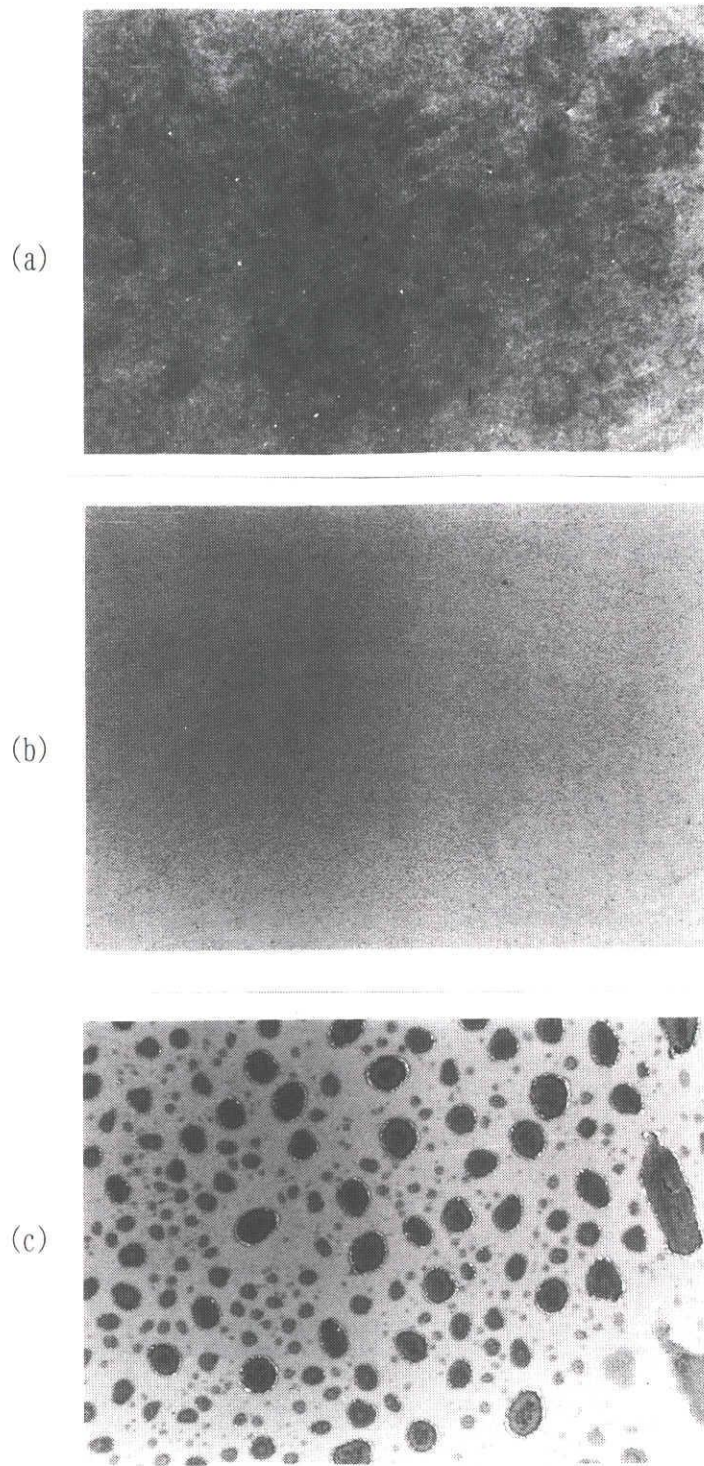


図 4.4 シリコーンゴムの汚損表面

(a) 実使用撤去品の汚損面

(b) 本方式による人工汚損面

(c) 未処理の場合の人工汚損面

図 4.5 にこの方法で汚損したシリコンゴムおよび EPDM 製高分子がいしの不溶性物質付着密度 (NSDD : Non-Soluble material Deposit Density) の測定結果を示す。汚損液中のとの粉の量が 10g/l の時、NSDD は約 0.1mg/cm² となる。NSDD の標準偏差は約 20%であった。JEC や IEC (国際電気標準会議) 規格では汚損液中の不溶性物質の量は 40g/l 一定と規定されている^(2,3)。この場合、磁器がいしでは NSDD は約 0.1mg/cm² となるが、上述の方法で高分子がいしを 40g/l で汚損すると約 2 倍の NSDD となる。したがって、本研究においては、本方式を用いて高分子がいしを汚損する場合、汚損液中のとの粉の量は 10g/l とした。

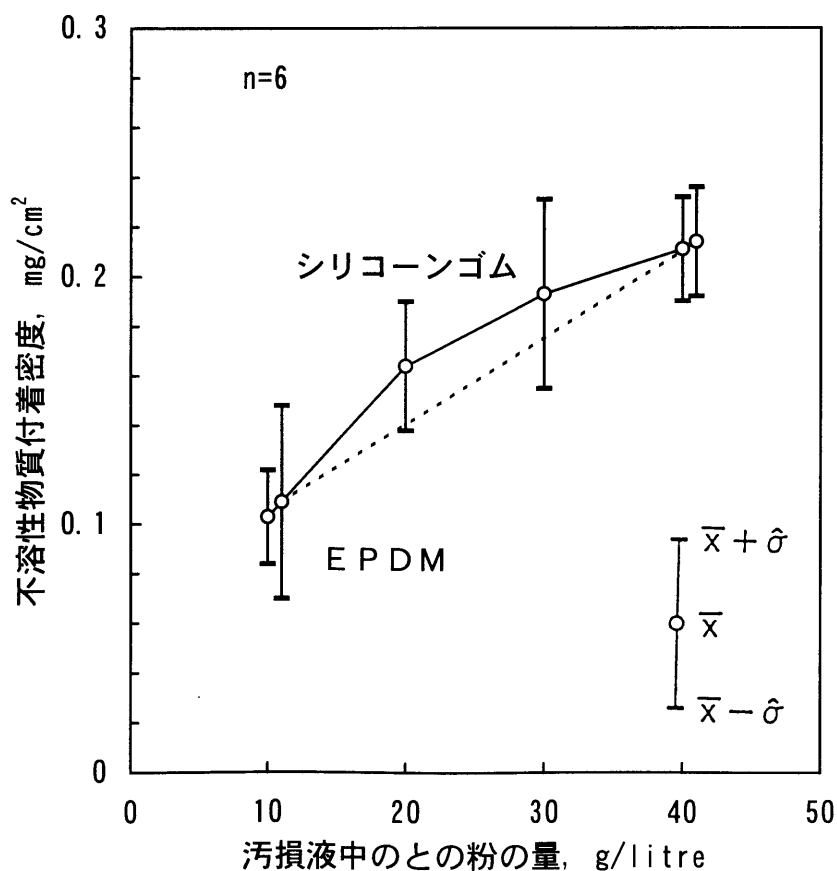


図 4.5 汚損液中のとの粉の含有量と NSDD の関係

4. 3 がいしの汚損耐電圧試験設備

本研究は日本ガイシ（株） 電力技術研究所で行い、大小合せて3つの試験設備を用いた。試験設備の概要を表 4.1 に示す。図 4.6 に大霧室内の交流 1000kV と直流±750kV 汚損試験電源を示す。

表 4.1 人工汚損試験設備

最大発生電圧 (kV)	大霧室	中霧室	小霧室
	AC 1000 DC ±750	AC 500 DC ±200	AC 200
霧の種類	蒸気霧		
ボイラ容量	型式：蒸気ボイラ 定格：3.6ton/h		
使用ノズル个数	150	38	25
霧室の霧水量 (g/m ³)	2.5~5	2.5~5 (濃霧条件:13~15) (薄霧条件:0.3~0.5)	
霧室	寸法(m)	30×25×30 ^H	15×10×13 ^H
	容量(m ³)	22,500	1,950
			6.4×5.3×4.8 ^H
			163

汚損湿潤したがいしのフラッシュオーバ電圧試験においてはフラッシュオーバ直前に大きな漏れ電流が流れる。したがって、がいしの人工汚損試験では、このように大きな電流が流れても供試がいしに印加される電圧が電源の内部インピーダンスによって低下しないような大容量の電源を用いる必要がある。以下に、本研究で用いたがいしの汚損試験設備について紹介する。

4. 3. 1 交流人工汚損耐電圧試験設備⁽⁷⁾

本研究に用いた交流試験用電源の仕様を表 4.2 に示す。これら電源は大容量

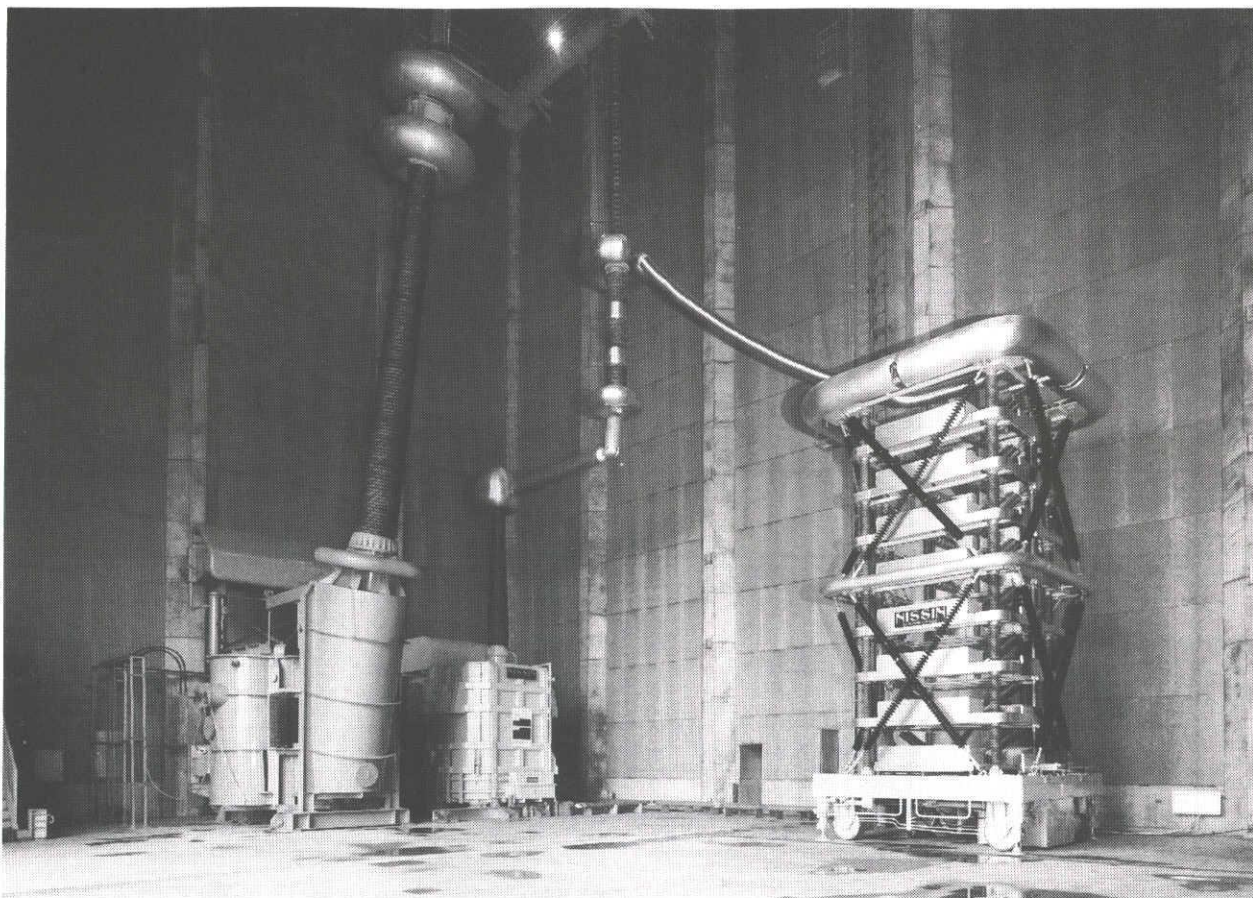


図 4.6 交流 1000kV と直流±750kV 汚損試験電源

であり負荷電流 1A でも 1 次巻線タップの接続変更により、広範囲の出力電圧に対して、5 %以下の低い電圧変動に抑えられている。短絡電流は 10A 以上であり、汚損試験用電源として十分な容量を有している。

表 4.2 交流汚損試験用電源の仕様

電源別	変圧器	1 次電源
1000kV 電源	UHV 汚損がいし試験用変圧器 定格容量:4000kVA(連続) :5000kVA (1 分間) 1 次電圧:6000V 2 次電圧:1000kV %インピーダンス:4.08%	短絡発電機 短絡容量:30MVA (単相)
500kV 電源	500kV 汚損がいし試験用変圧器 定格容量:500kVA(連続) :5000kVA (1 分間) 1 次電圧:6000V 2 次電圧:500/250kV %インピーダンス:5.54%	相 数 : 3 周波数 : 60Hz 極 数 : 8 定格電圧:6.9/6/5.2/3.46kV
200kV 電源	200kV 汚損がいし試験用変圧器 定格容量:200kVA(1 時間) 1 次電圧:500V 2 次電圧:200kV %インピーダンス:1.71%	汚損がいし試験用 正弦波発電機 定格容量:173kVA(連続)
70kV 電源	70kV 汚損がいし試験用変圧器 定格容量:140kVA(1 時間) 1 次電圧:500V 2 次電圧:70/26.3kV %インピーダンス:2.03%	相 数 : 3 周波数 : 60Hz 極 数 : 6 定格電圧:500/333V 定格電流:200/300A

4. 3. 2 直流人工汚損耐電圧試験設備^(8,9)

直流の汚損試験においても、交流の場合と同様に大容量の電源を用いる必要がある。本研究においては、最大 $\pm 750\text{kV}$ 、 $\pm 200\text{kV}$ の直流電源を用いた。どちらの電源も汚損試験時に試料に大きな電流が流れても、出力コンデンサにより、電圧降下を補償している。サイリスタ制御方式を採用しており、フィードバック制御装置により電圧降下を瞬時に検出し電源の交流側のサイリスタを操作し、電圧降下を補償している。電圧制御にはサイリスタ制御方式を採用することにより装置のコンパクト化も図られている。図 4.7 に電源の制御系のブロック線図を示す。電源の仕様を表 4.3, 表 4.4 に示す。これらの設備を用いることにより、 $\pm 200\sim 750\text{kV}$ (750kV 電源)、 $\pm 50\sim 200\text{kV}$ (200kV 電源)において、漏れ電流が 2.5A 流れた時の電圧降下は 5%以下に抑えられている。したがって、UHV クラスまで、信頼性の高い汚損試験を実施することが可能である。

表 4.3 200kV 直流汚損試験用電源の仕様

入力	三相、60Hz、6.6kV
出力	DC±200kV : 1.0A(連続) : 2.5A(1分) : 20A(0.17秒)
整流方式	三相全波整流方式 (单相全波整流三相カスケード接続方式)
電圧制御方式	サイリスタ制御方式 (20kV~200kV)
出力コンデンサ	6 μ F(フルタップ使用時) 24 μ F(中間タップ使用時)
電圧変動率	出力電圧±50kV~±200kVにおいて 負荷電流 2.5A 通電時 5%以内
脈動率	出力電圧±50kV~±200kVにおいて 無負荷時~2.5A 通電時 2%以内

表 4.4 750kV 直流汚損試験用電源の仕様

入力	三相、60Hz、6.6kV
出力	DC±800kV : 30mA(30分) DC±750kV : 1.0A(連続) : 2.5A(1分) : 15A(0.17秒)
整流方式	三相全波整流方式 (单相全波整流三相カスケード接続方式)
電圧制御方式	サイリスタ制御方式
電圧変動率	出力電圧±200kV~±750kVにおいて 負荷電流 2.5A 通電時 5%以内
脈動率	出力電圧±200kV~±750kVにおいて 無負荷時~2.5A 通電時 2%以内

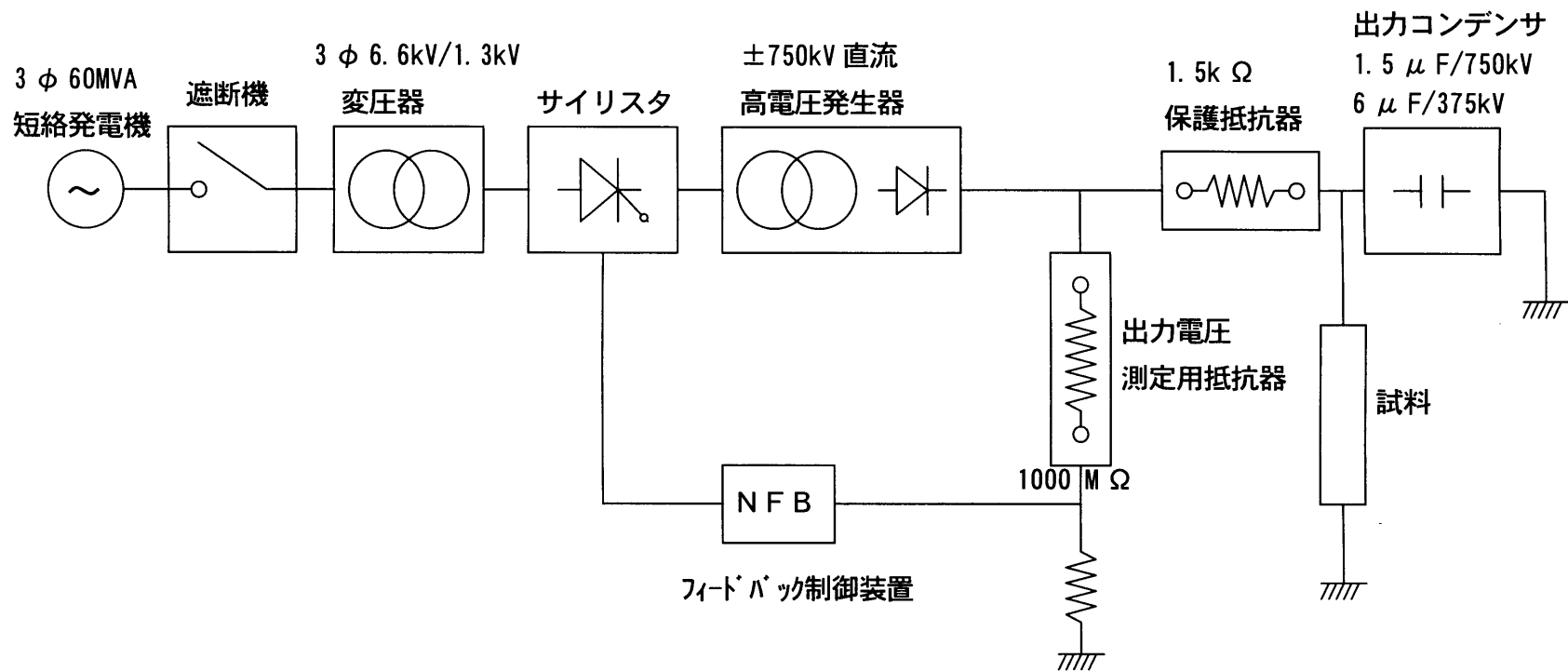


図 4.7 ±750kV 直流電源制御系のブロック線図
(サイリスタ制御方式)

表 4.5 供試試料と霧中試験条件

供試試料					試験条件		対応図
がいし 種類	連結 個数	有効長 (mm)	平均直径 (mm)	表面漏れ距離 (mm)	印加電圧 (kV)	塩分付着密度 (mg/cm ²)	
直流用 耐塩用懸垂	15	—	320 (笠径)	545	-320	0.02	4.8
SP	4	3780	225	12800	-465	0.02	4.9
がい管	1	9228	955	39700	-750	0.03	4.10
長幹	4	1011	127	2970	-300	0.05	4.11
高分子	1	3353	102	11926	-300	0.05	4.12

4. 3. 2. 1 汚損がいしの直流漏れ電流

ここで、各種磁器および高分子がいしの直流汚損試験における漏れ電流について述べる。人工汚損試験は日本ガイシ（株）電力技術研究所 UHV 汚損ホール（30m×25m×30m^H）にて行った。一般に低い汚損耐電圧が得られる負極性で行った。試験は定印霧中法で実施した。供試試料の諸元と試験条件を表 4.5 に示す。

磁器製懸垂がいし、SP がいし、がい管の定印霧中法におけるサージ性漏れ電流波形の例を図 4.8～図 4.10 に示す。いずれも漏れ電流は時間と共に、徐々に上昇し、ピークをすぎると急に低下する。懸垂、SP がいしの漏れ電流の継続時間は通常 0.5～1 秒であるのに対し、がい管の場合には 1 秒以上が普通である。図 4.11、図 4.12 に磁器製長幹がいしとシリコンゴム製高分子がいしの電流波形の例を示す。磁器製長幹がいしの場合には、上述の SP がいしとほとんど同様であるのに対し、高分子がいしの場合には電流の値も小さく継続時間も短い。高分子がいしの漏れ電流波形は長方形型であり、磁器がいしの場合とは異なる。これは表面の撥水性によるものと考えられる。

図 4.13 に漏れ電流の波高値と継続時間の関係を示す。供試試料の形状が大きくなるに従って、電流値は大きくなり、継続時間も長くなる。図 4.14 に SP がいしの汚損試験時の漏れ電流の累積発生確率を示す。各試験において、印加電圧は異なるが、漏れ電流値の大きい場合の発生確率は、耐電圧試験時に比べ、フラッシュオーバー電圧試験の方が高くなっている。

IEC⁽¹⁰⁾の人工汚損試験法の規格の中で、試験用電源について、①漏れ電流 100mA に対しリプル率 3%以下 ②耐電圧試験における漏れ電流に対し電圧降下は 10%以下と記載されている。②では電流値は規定されておらず、また、大型がいしの汚損試験時の漏れ電流は継続時間も長く、波高値も 1A を越えることがあり、IEC の規定では不十分であり、見直しが必要と考える。

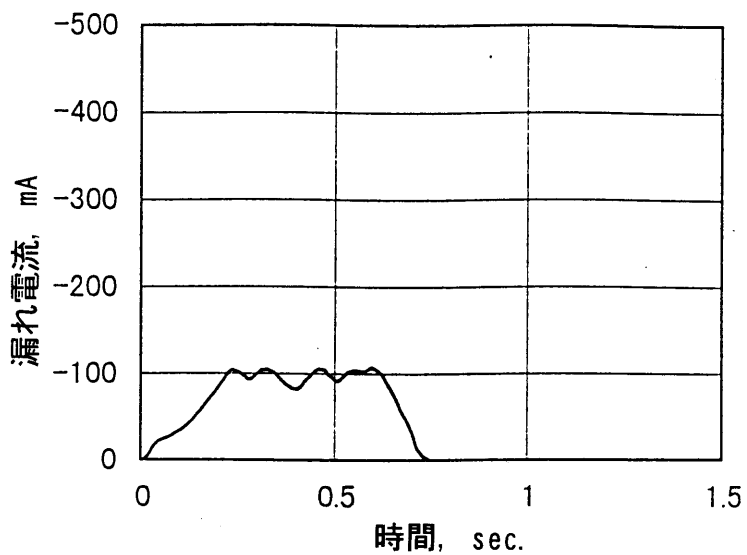


図 4.8 漏れ電流波形 (懸垂がいいし)

塩分付着密度 : $0.02\text{mg}/\text{cm}^2$. 印加電圧 : -320kV

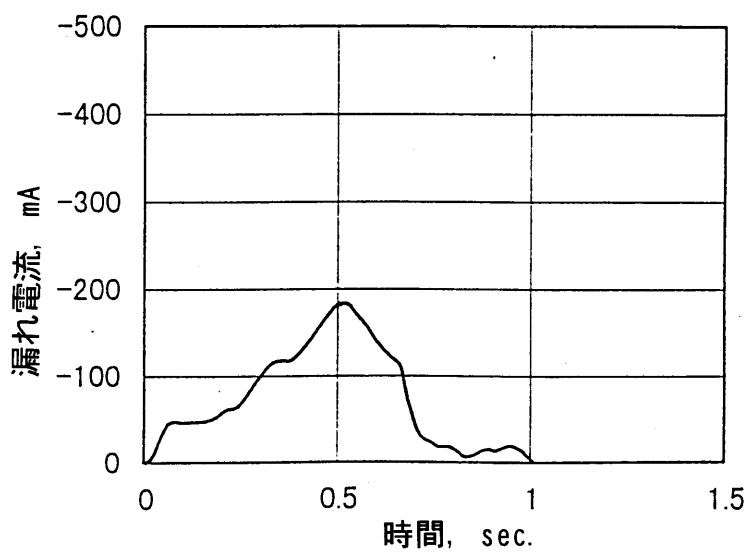


図 4.9 漏れ電流波形 (SP がいいし)

塩分付着密度 : $0.02\text{mg}/\text{cm}^2$. 印加電圧 : -465kV

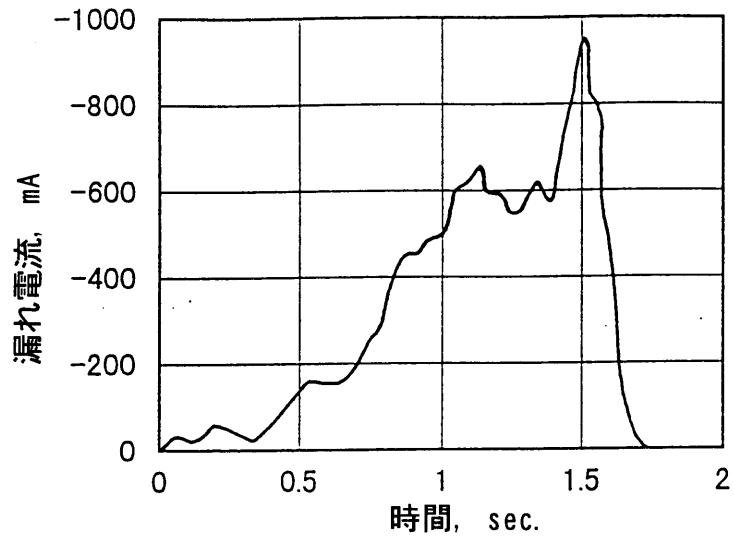


図 4.10 漏れ電流波形 (がい管)

塩分付着密度 : $0.03\text{mg}/\text{cm}^2$. 印加電圧 : -750kV

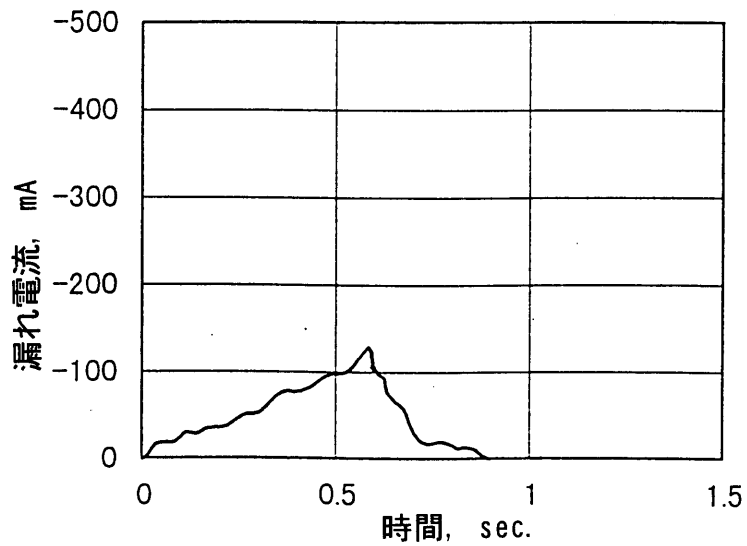


図 4.11 漏れ電流波形 (長幹がいし)

塩分付着密度 : $0.05\text{mg}/\text{cm}^2$. 印加電圧 : -300kV

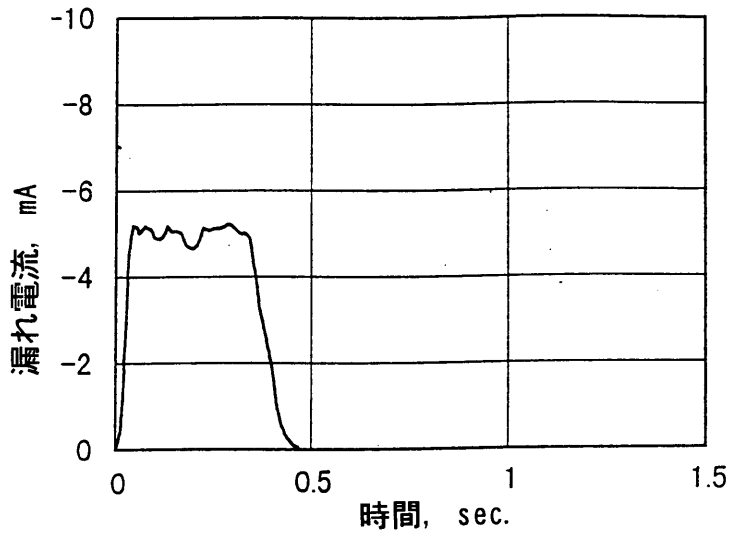


図 4.12 漏れ電流波形 (高分子がいし)

塩分付着密度 : $0.05\text{mg}/\text{cm}^2$. 印加電圧 : -300kV

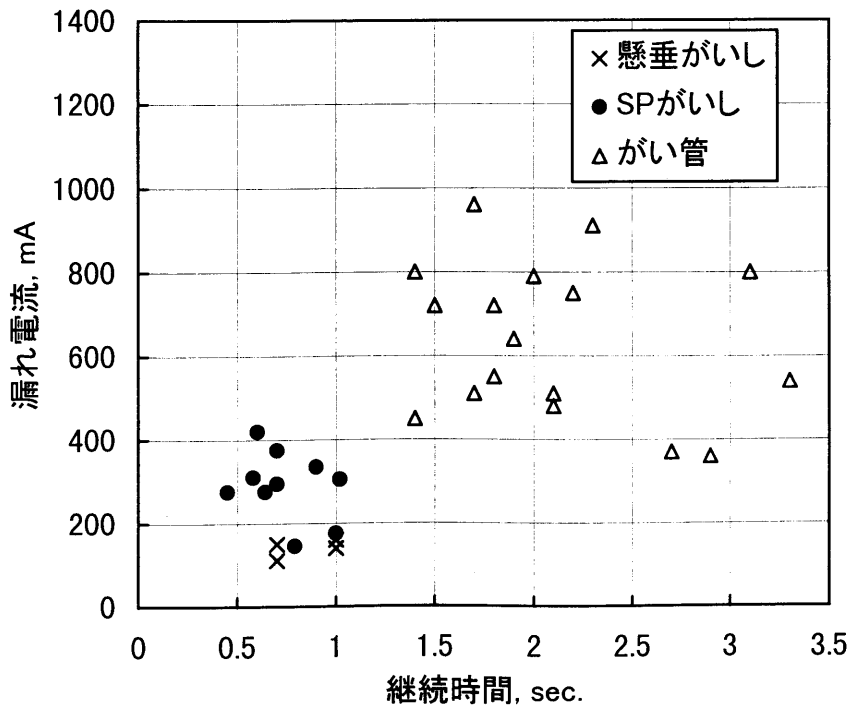


図 4.13 漏れ電流の大きさと継続時間の関係

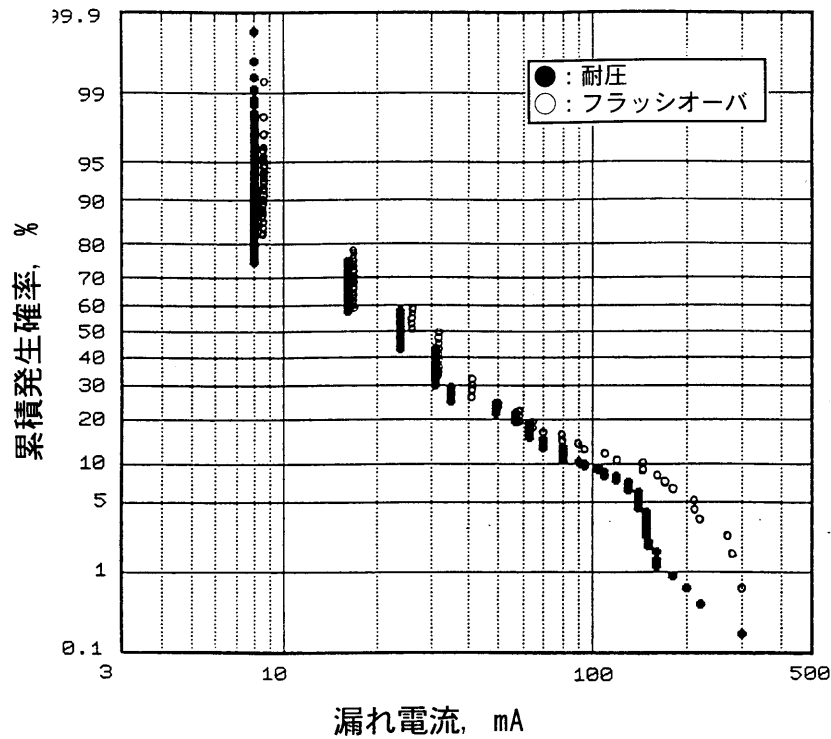


図 4.14 漏れ電流の累積発生確率 (SP がいいし)

4. 4 交流・直流人工汚損耐電圧特性

前項において、磁器がいしと高分子がいしの汚損湿潤時の直流漏れ電流波形の違いについて述べた。これらの結果から、表面に撥水性を有する高分子がいしと、撥水性の低い磁器がいしでは汚損フラッシュオーバのメカニズムが異なることが予想される。現在、各所で高分子がいしのフラッシュオーバのメカニズムの研究が行われているが、いまだ基礎的な段階である⁽¹¹⁻¹⁵⁾。今回、人工的に均一に汚損する方法を確立することができたので、この方法を用い、高分子がいしの汚損フラッシュオーバのメカニズムを究明する一環として、高分子がいしの塩分付着密度(SDD : Salt Deposit Density)とフラッシュオーバ電圧の関係を調査した。

磁器がいしの場合、一般に図 4.15 に示すように塩分付着密度が増すにつれて、汚損耐電圧は低下し、その割合は、交流の場合 SDD の約 $-1/5$ 乗、直流の場合、約 $-1/3$ 乗に比例することが知られている⁽¹⁶⁾。

シリコンゴム製高分子がいしの場合の特性について調査した。4. 2 項に示した方法で、高分子がいしを均一に汚損し、定印霧中試験の昇降法により、50%フラッシュオーバー電圧⁽¹⁷⁾ (50%FOV:50% Flashover Voltage) を求めた。試験結果を図 4.16 に示す。

交流の場合、磁器がいしの場合と同様に、50%FOV は SDD の約 $-1/5$ 乗に比例した。一方、直流の場合、磁器がいしの汚損耐電圧が SDD の約 $-1/3$ 乗に比例するのに対して、高分子がいしの汚損耐電圧は交流の場合と同様、SDD の約 $-1/5$ 乗に比例した。直流汚損試験時の漏れ電流波形の差にも見られるように、これ

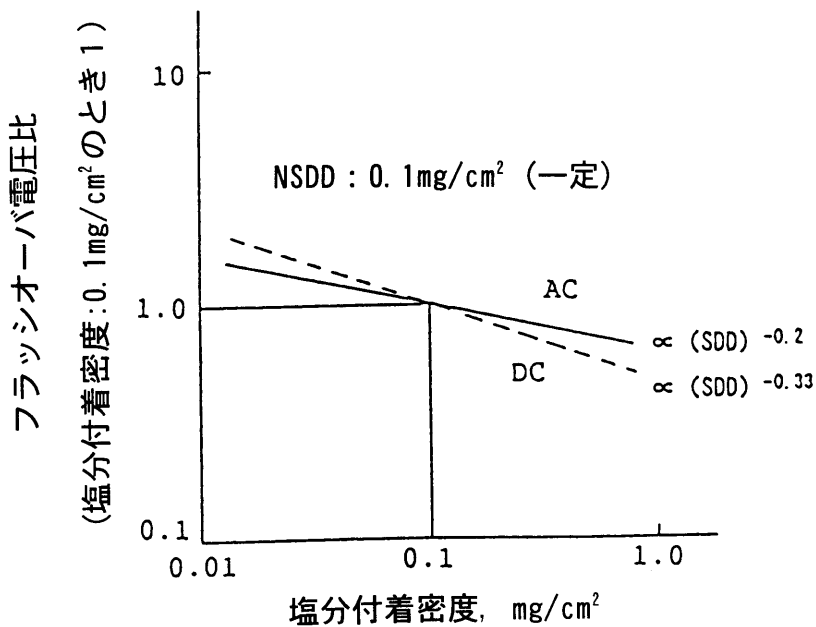


図 4.15 汚損フラッシュオーバー電圧に及ぼす塩分付着密度の影響
(磁器がいしの場合)

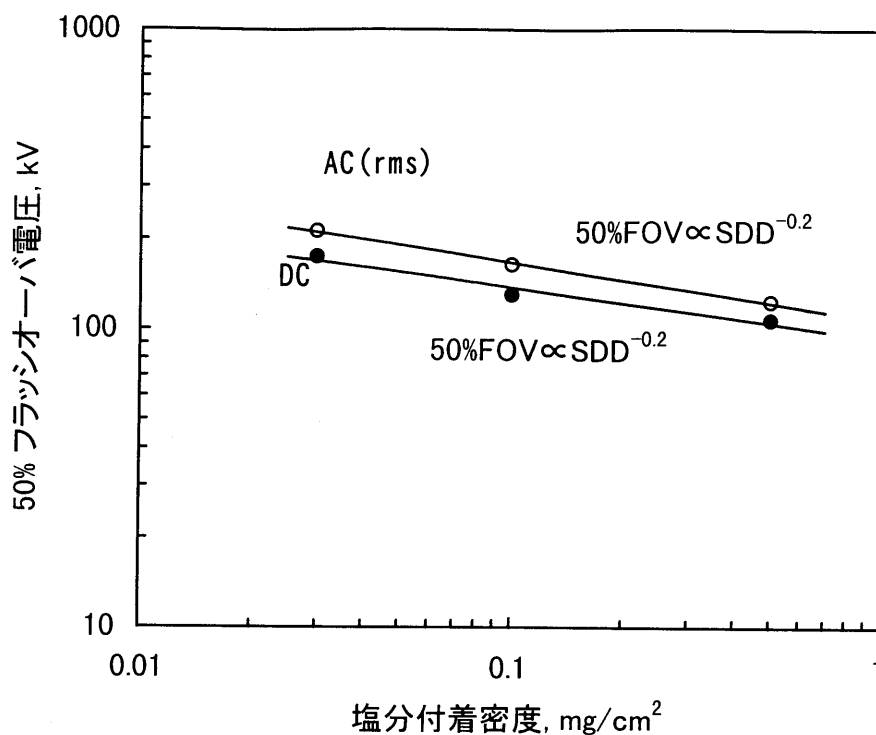


図 4.16 塩分付着密度と 50%フラッシュオーバー電圧の関係
(高分子がいしの場合)

は磁器がいしと高分子がいしの表面の汚損フラッシュオーバーのメカニズムの差によると考えられる。磁器がいしの場合、交流に比べて、直流の方が、SDD に対し汚損耐電圧の低下する割合が大きい。汚損されたがいしが湿潤すると、がいし表面に漏れ電流が流れ始める。交流の場合、印加電圧は交番しているため、漏れ電流は、印加電圧に同期し、磁器がいし、高分子がいし共に、同様の波形を示す。一方、直流の場合には、磁器がいしの漏れ電流の継続時間は 1 秒以上にも達することがある。この継続時間の長い局部アークが、がいしの笠間を橋絡し、フラッシュオーバーに至る。したがって、定性的に述べると、塩分付着密度

が大きくなるに従い、漏れ電流によって形成された乾燥帯での局部アークが伸展しやすくなるため、交流に比べて、汚損耐電圧の低下の割合が大きくなる。一方、高分子がいしの場合には、表面に撥水性を有するため、前項に示したように、磁器がいしに比べ直流漏れ電流は小さく、継続時間も比較的短い。したがって、局部アークにより笠間を橋絡する頻度は少なく、塩分付着密度が大きくなっても、磁器がいしに比べて、汚損耐電圧の低下する割合が少ないのではないかと考えられる。

4. 6 むすび

本章では高分子がいしの汚損耐電圧特性を評価する方法について検討した。得られた結論は以下の通りである。

- (1) 撥水性を有する高分子がいしの場合でも実使用状態では、汚損物は均一に付着する。実使用状態における汚損物の付着状態を模擬し、試料表面に損傷を与えず、大型、長尺の試料にも適用可能な簡便な人工汚損方法を開発した。
- (2) 大型がいしの場合、汚損湿潤時に、継続時間が長く、大きな漏れ電流が流れるため、がいしの人工汚損耐電圧試験を行う際、交流・直流とも十分な容量を備えた電源が必要であることを明らかにした。
- (3) 高分子がいしの汚損フラッシュオーバーのメカニズムは、表面の撥水性のため、磁器の場合とは異なると考えられる。特に、直流の場合には、人工汚損耐電圧試験時の霧中における漏れ電流は、磁器がいしの場合より、電流値が小さく、継続時間も短い。また、直流 50%フラッシュオーバー電圧は、磁器がいしでは塩分付着密度の約 $1/3$ 乗に比例するのに対し、高分子がいしでは、交流の場合と同様、塩分付着密度の約 $1/5$ 乗に比例した。

文献

- (1) CIGRE TF33.04.07 : “Natural and Artificial Ageing and Pollution Testing of Nonceramic Insulators”, Doc. 33-97(TF04-07)01-IWD, 1997.
- (2) JEC 0201 : 「交流電圧絶縁試験」、1988.
- (3) IEC Publication 507 : “Artificial Pollution Tests on High-voltage Insulators to be used on a. c. Systems”, 1991.
- (4) CIGRE TF33.04.07 : “Report from CIGRE TF33-04-07 (Non-Ceramic insulators) ”, Doc. 33-91(WG04)34-IWD, 1991.
- (5) A. De La O, R. S. Gorur and I. Chang : “AC Clean Fog Test on Non-Ceramic Insulating Materials and a Comparison with Porcelain”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, pp. 2000-2009, 1994.
- (6) I. Urushihara, K. Naito, K. Sakanishi and R. Matsuoka : “A Method of Artificial Contamination Test on Composite Insulators”, 8th ISH, No. 47.10. Yokohama, 1993.
- (7) 藤村、内藤、入江、川口 : 「UHV 交流汚損試験設備」、NGK レビュー、No. 41、pp. 1-12、1980.
- (8) 内藤、入江、坂西 : 「200kV 大容量直流汚損試験設備」、NGK レビュー、No. 39、pp. 21-31、1978.
- (9) 内藤、川口、伊藤 : 「750kV 直流汚損試験設備」、NGK レビュー、No. 44、pp. 1-9、1983.
- (10) IEC Publication 1245 : “Artificial Pollution Tests on High-voltage Insulators to be used on d. c. Systems”, 1993.
- (11) M. Shah, G. G. Karady and R. L. Brown : “Flashover Mechanism of Silicone Rubber Insulators used for Outdoor Insulation I”, IEEE WM252-7PWRD, 1995.

- (12) M. Shah, G. G. Karady and R. L. Brown : “Flashover Mechanism of Silicone Rubber Insulators used for Outdoor Insulation II”, IEEE WM253-5PWRD, 1995.
- (13) N. Sugawara, K. Sakaguchi, I. Nakajima and K. Kondo : “Negative DC Surface Discharge Triggered by Water Drops on Hydrophobic Surface of Insulation Materials”, 9th ISH, Graz, Paper No. 3216, 1995.
- (14) 坂口、菅原、伊藤、中島、近藤 : 「撥水性表面上の水 droplet 誘発沿面放電現象」、平成 7 年電気学会誘電・絶縁材料研究会、No. DE-95-113、平成 7 年.
- (15) 石橋、前川、水野、内藤、近藤、中島、松岡 : 「汚損シリコンゴム表面の放電現象」、平成 8 年電気学会東海支部連合大会、No. 116、平成 8 年.
- (16) G. Ramos N., M. T. Campillo R. and K. Naito : “A Study on the Characteristics of Various Conductive Contaminants Accumulated on High Voltage Insulators”, IEEE SM 463-0 PWRD, 1992.
- (17) JEC 0202 : 「インパルス電圧・電流試験一般」、1994.

第5章 高分子がいしの人工汚損耐電圧特性

5.1 まえがき

前章までに述べたように、高分子がいしは一般に磁器がいしやガラスがいしよりも、優れた汚損耐電圧特性を示す。特に、製造直後は、表面に優れた撥水性を示す。しかし徐々にその撥水性は失われて行く。また実際に磁器がいしと同等の表面漏れ距離を有する高分子がいしの汚損フラッシュオーバー率が磁器がいしより高いという事例も報告されている⁽¹⁾。本章では、高分子がいしの適用設計の指針の確立に貢献するため、前章において確立した高分子がいしの人工汚損試験法を用いて、表面に撥水性を有する高分子がいしの人工汚損耐電圧特性に及ぼす各種要因の影響を、磁器がいしと比較して、調査することとした。また、高分子がいしの合理的な笠設計の基礎を確立するため、各種笠形状と汚損耐電圧の関係を調査することとした。

5.2 試験方法

供試がいしとしてはシリコーンゴム製高分子がいしを用いたが、一部 EPDM 製も評価した。また、比較のため磁器製長幹がいしも用いた。加えて、過去の文献のデータも合わせて比較検討した。

高分子がいしの耐電圧特性を評価する際、フラッシュオーバーを繰り返すと、そのフラッシュオーバー経路に沿って撥水性が一時的に喪失し、フラッシュオーバー電圧が低下することがある。本研究においては、このフラッシュオーバーの影響を受けないよう電圧印加法に配慮した。したがって、高分子がいしの汚損耐電圧特性を定印霧中法を用いて 50%フラッシュオーバー電圧(50%FOV)、または、4回耐電圧(WSV: Withstand Voltage)で評価した⁽²⁾。合わせて、簡便法として、汚損した

がいしに所定の電圧を印加した後、人工霧を発生させ、フラッシュオーバーするまで、5分毎に10%ずつ印加電圧を上昇させて耐電圧レベルを求める階段上昇法も一部用いた。

なお、耐電圧試験は、日本ガイシ（株）電力技術研究所内、各汚損試験室において行った。

5. 3 霧水量の影響

撥水性を有する高分子がいしの汚損耐電圧特性は、棒状の試験用試料において、湿潤条件により異なることが報告されている⁽³⁾。今回、実際の笠付きの高分子がいしについて、汚損耐電圧特性に及ぼす湿潤の程度の影響を調査するため、3種類の霧条件（霧水量：0.3～0.5, 3～5, 13～15g/m³）で試験した。霧水量は雲水量計を用いて測定した⁽⁴⁾。実際には、自然霧の霧水量は最大でも0.5g/m³程度であるが、今回人工汚損試験で用いた霧水量は、それぞれ結露、霧、小雨等の種々の湿潤条件を模擬している。

表 5.1 に供試がいしの寸法諸元を示す。耐電圧試験と合せて、汚損がいしの霧中における表面抵抗の時間特性も調査した。表面抵抗は、がいしに電圧 交流 2kV を印加し、漏れ電流を測定することにより求めた。

表5.1 供試がいし

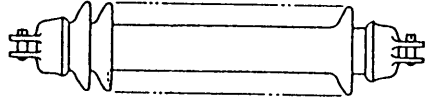
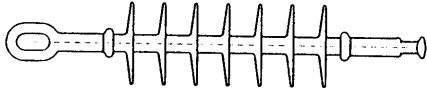
供試がいし	笠枚数	笠径 mm	胴径 mm	表面漏れ距離 mm	連結長 mm
磁器がいし 	10	160	80	1020	585
高分子がいし (SiR & EPDM) 	7	126	26	980	623

図 5.1 にがいしの表面抵抗の時間特性を示す。シリコーンゴム製高分子がいし（以下、シリコーンゴムがいしという。）が最も表面抵抗が高い。EPDMがいしはほとんど磁器がいしと同等であった。霧が濃くなるにつれて、シリコーンゴムがいしの抵抗は低下し、磁器がいしの抵抗に近づいた。EPDM、磁器がいしの場合、表面抵抗は徐々に低下し最小値になった後抵抗値は再び大きくなる。最小値になるまでの時間は、霧が濃くなるにつれて短くなり、 $0.3\sim 0.5\text{g}/\text{m}^3$ で 30～50 分、 $3\sim 5\text{g}/\text{m}^3$ で 15～25 分、 $13\sim 15\text{g}/\text{m}^3$ で 5～15 分であった。これは、霧により表面の汚損物、特に塩分が洗い流されるためと考えられる。一方、シリコーンゴムの場合には、時間経過とともに徐々に抵抗は低下していくものの、60 分経過しても、最小値には達しなかった。

汚損耐電圧を 4 回耐電圧法により求めた。シリコーンゴムがいしの場合、がいし表面を人工汚損して 4 日後、試験に供試した。図 5.2 に汚損耐電圧に及ぼす霧水量の影響を示す。磁器がいしの耐電圧は、 $3\sim 5\text{g}/\text{m}^3$ 以上の霧水量で飽和し、その値は $0.3\sim 0.5\text{g}/\text{m}^3$ の耐電圧の約 80% である。この傾向は文献^(4,5)とよく一致する。シリコーンゴムがいしの場合、同様に霧を濃くすると、耐電圧は低下する傾向を示し、 $3\sim 5\text{g}/\text{m}^3$ 以上でもさらに耐電圧は低下し、 $13\sim 15\text{g}/\text{m}^3$ における耐電圧は、 $0.3\sim 0.5\text{g}/\text{m}^3$ の場合に比べ、約 60% にまで低下した。耐電圧と表面抵抗の関係はよく一致している。シリコーンゴムがいし表面の撥水性は過湿潤になると、充分発揮されない場合があることを示している。

5. 4 シリコーンゴム製高分子がいしの撥水性

シリコーンゴムの特徴は、製造初期に表面に撥水性を有するのみでなく、長期間その撥水性を維持し、たとえ表面を汚損層が覆って、撥水性が一時的に低下しても、シリコーンゴム内部からシリコーン油が滲み出して、汚損層の上まで移行して撥水性が回復することである。そこで、シリコーンゴムの表面を人

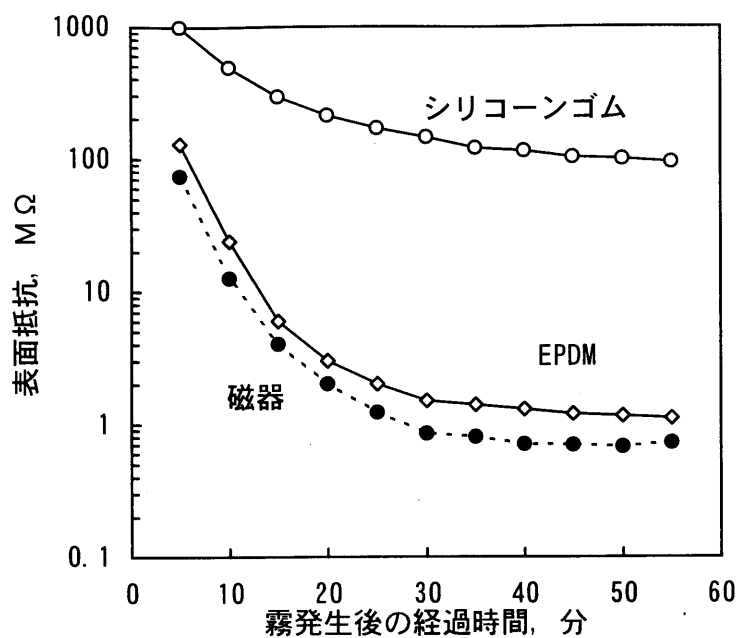


図 5.1 (a) 表面抵抗の時間特性

(霧水量 : 0.3~0.5 g/m³)

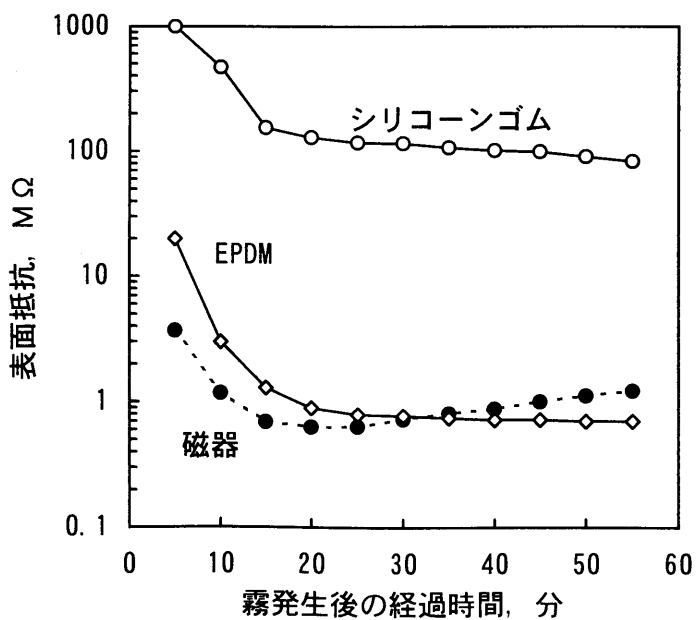


図 5.1 (b) 表面抵抗の時間特性

(霧水量 : 3~5 g/m³)

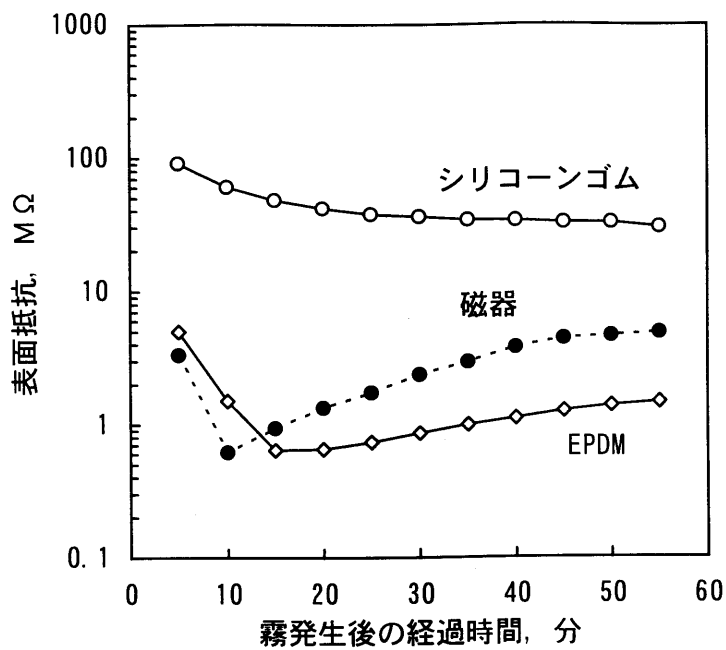


図 5.1 (c) 表面抵抗の時間特性

(霧水量 : 13~15 g/m³)

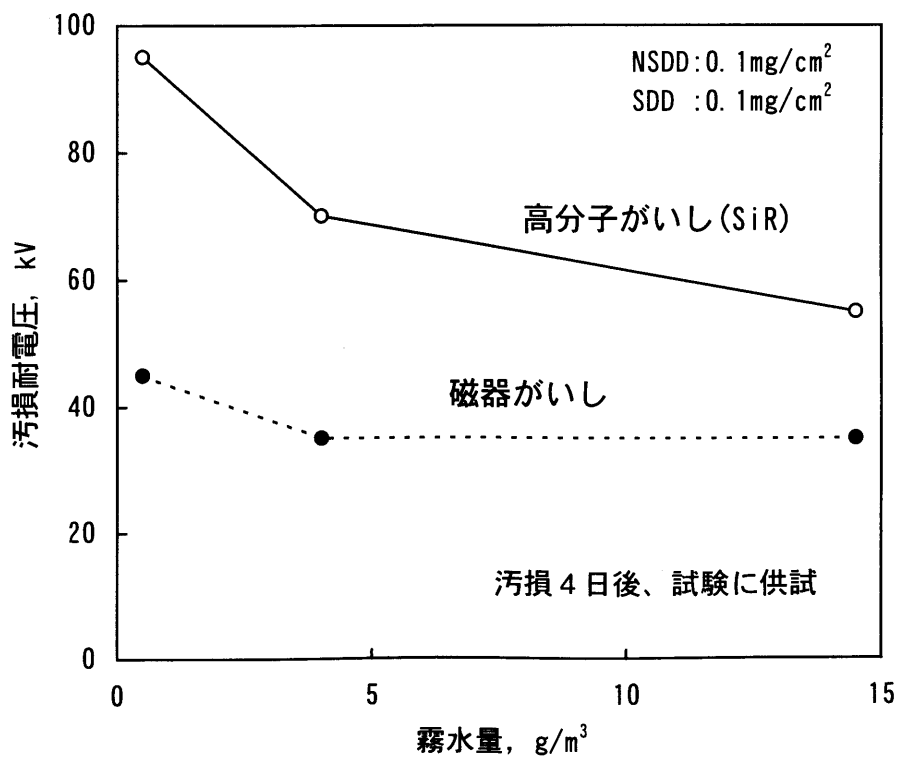


図 5.2 汚損耐電圧に及ぼす霧水量の影響

工的に汚損して、汚損表面上の撥水性の経時変化を、後退接触角、汚損耐電圧、表面抵抗により検討した。

表面を均一に汚損したシリコンゴム板（厚さ 2mm）と磁器板（厚さ 5mm）を水平に配置し、50 μl の水滴を滴下し後退接触角を測定した⁽⁶⁾。図 5.3 に測定結果を示す。シリコンゴムの接触角は、汚損後の経過時間とともに徐々に増大し、約 50 時間経過するとほぼ飽和傾向を示すことが分かる。しかし、シリコンゴム表面が清浄時の値にまで接触角は回復しなかった。一方、磁器の場合は、経過時間に関係なく一定であった。

図 5.4 に霧中での表面抵抗の時間特性を示す。汚損後約 5 時間経過した場合の表面抵抗は 4 日後に測定した場合の抵抗値の約 1/2 であった。図 5.5 に汚損

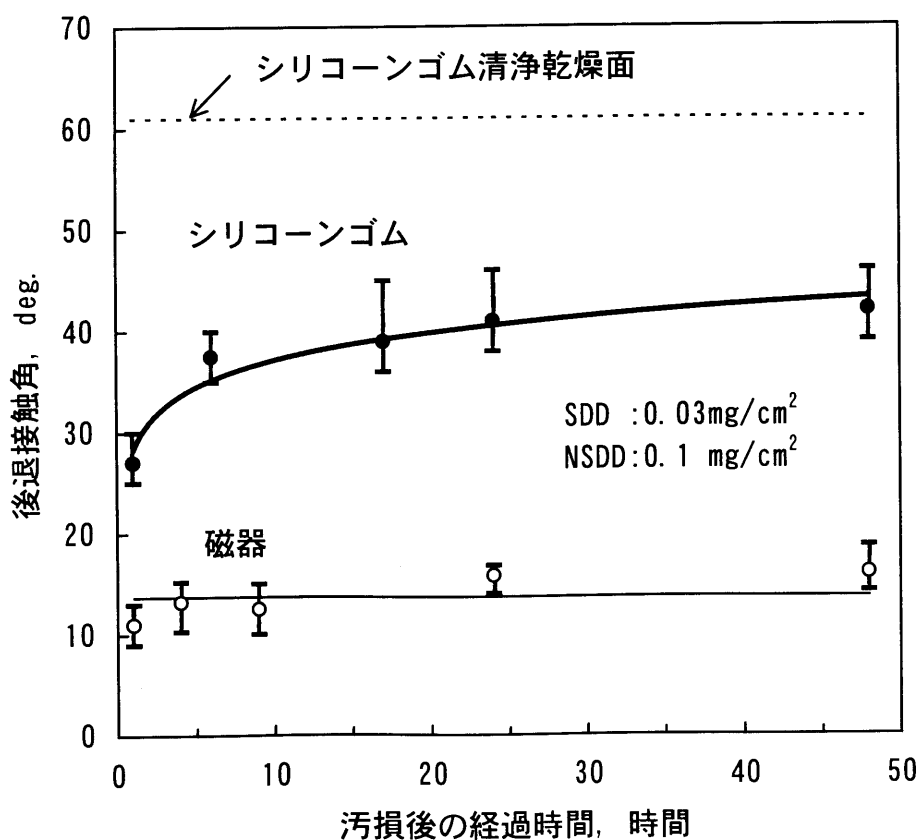


図 5.3 汚損後の経過時間と後退接触角の関係

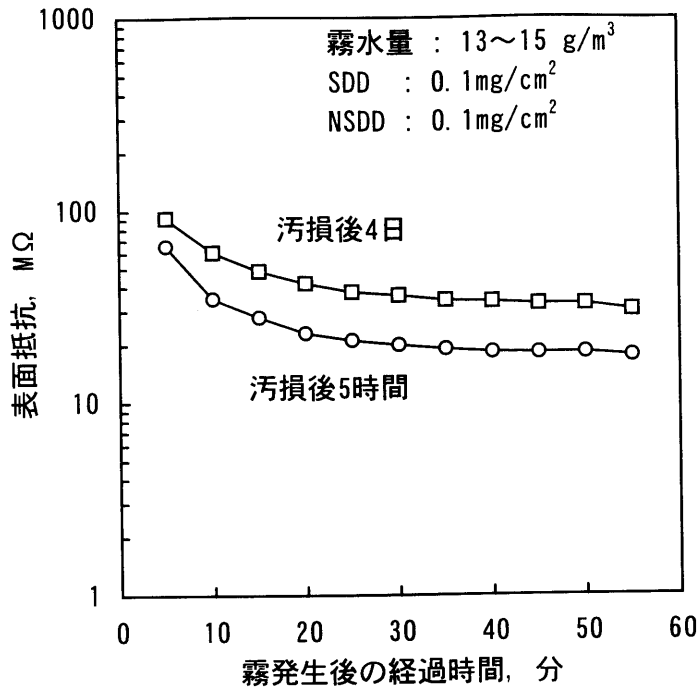


図 5.4 表面抵抗の時間変化

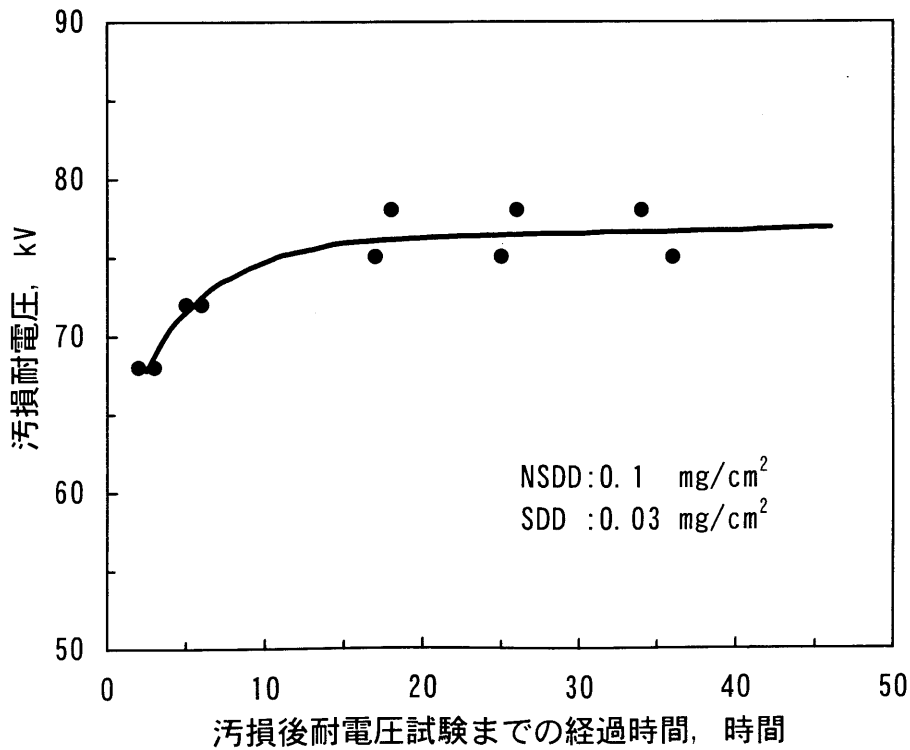


図 5.5 汚損後耐電圧試験までの経過時間と汚損耐電圧の関係

後の経過時間と、耐電圧の関係を示す。耐電圧はフラッシュオーバーするまで、5分毎に電圧を約10%ずつ上昇する階段上昇法により求めた。汚損後の経過時間とともに耐電圧は上昇し20時間を過ぎるとほぼ一定となった。

図 5.6 に、霧中試験後の（試験時間：約45分）残留塩分の測定結果を示す。表面の汚損層は汚損直後に霧室で耐電圧試験に供試した試料では容易に洗い流されるが、汚損後耐電圧試験までの時間が長くなるにつれて、内部より低分子のシリコンが滲み出し、汚損層を覆ってしまうため、洗い流され難くなり、残留塩分が多くなると考えられる。

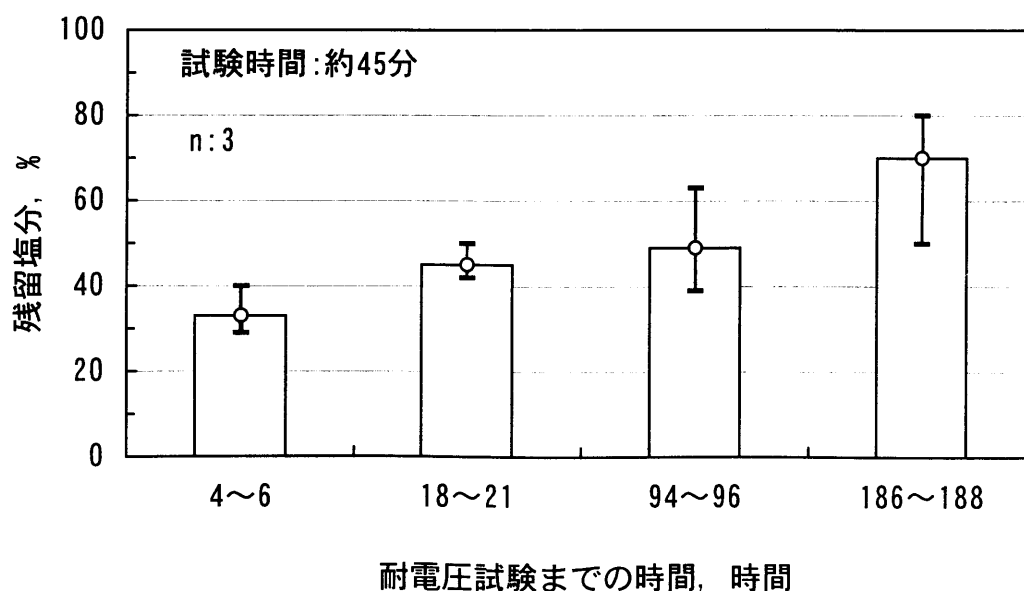


図 5.6 汚損耐電圧試験後の残留塩分測定結果

5. 5 塩分付着密度の影響

汚損耐電圧に及ぼす塩分付着密度の影響を5. 4項と同様の方法で調査した。高分子がいしは、人工汚損後約5時間以内に、試験に供した。霧水量は、高分子がいしの場合13~15g/m³、磁器がいしの場合3~5g/m³で行った。試験結果を図5.7に示す。耐電圧は階段上昇法により求めた。シリコーンゴム, EPDMがいしの耐電圧は磁器がいしのそれぞれ約1.5, 1.2倍であった。表面の撥水性はシリコーンゴムがもっとも優れており、撥水性の度合にしたがって耐電圧は高くなることが分った。また、高分子がいしの場合でも、磁器がいしと同様に耐電圧は塩分付着密度の約1/5乗に比例する。したがって、撥水性を有する高分子がいしの場合においても塩分付着密度によって、汚損耐電圧を求めることができることが分った。

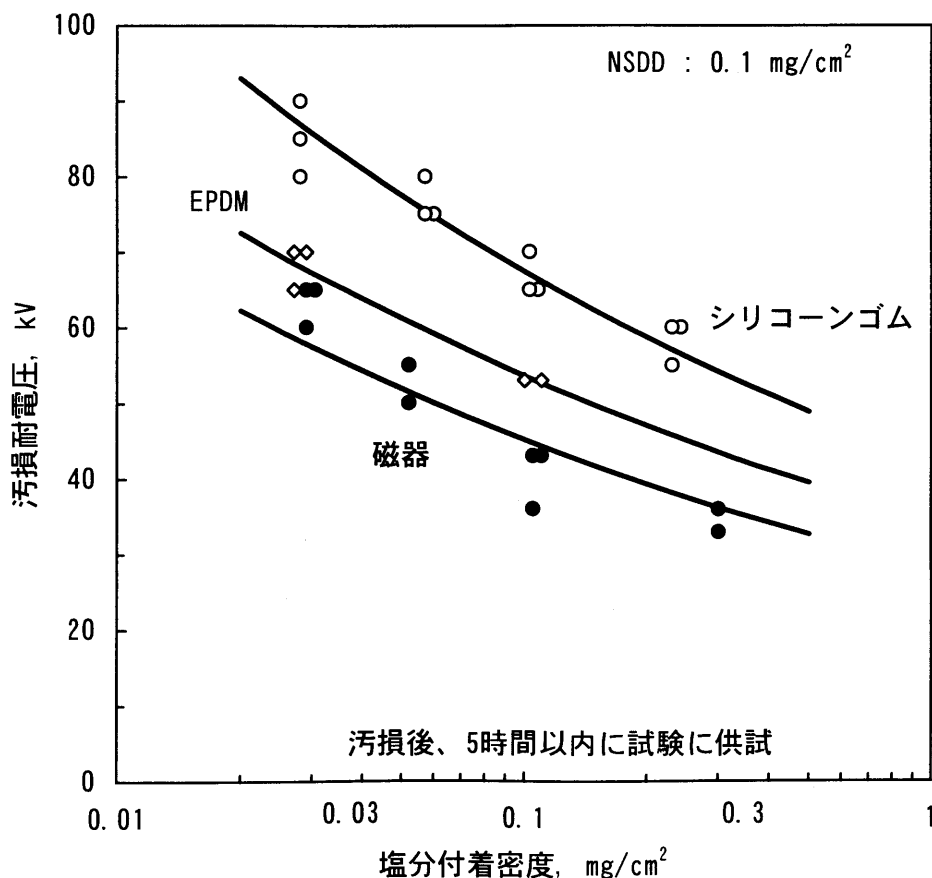


図5.7 塩分付着密度と耐電圧の関係

5. 6 不溶性物質の影響

がいしの人工汚損試験に用いる不溶性物質としては、国内ではとの粉が、海外ではカオリンが広く使われている。磁器がいしの場合、不溶性物質の影響について種々調査されている⁽⁷⁻⁹⁾。不溶性物質として、との粉とカオリンを用いた場合では、磁器がいしの直流汚損耐電圧に大きな差異が生ずる⁽⁷⁾。

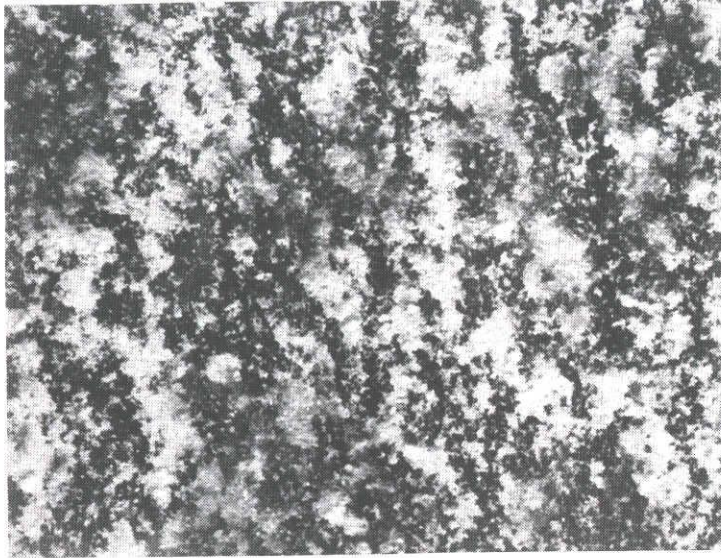
本項では高分子がいしの汚損耐電圧に及ぼす不溶性物質の種類と付着密度の影響について調査した。

5. 6. 1 不溶性物質の種類の影響

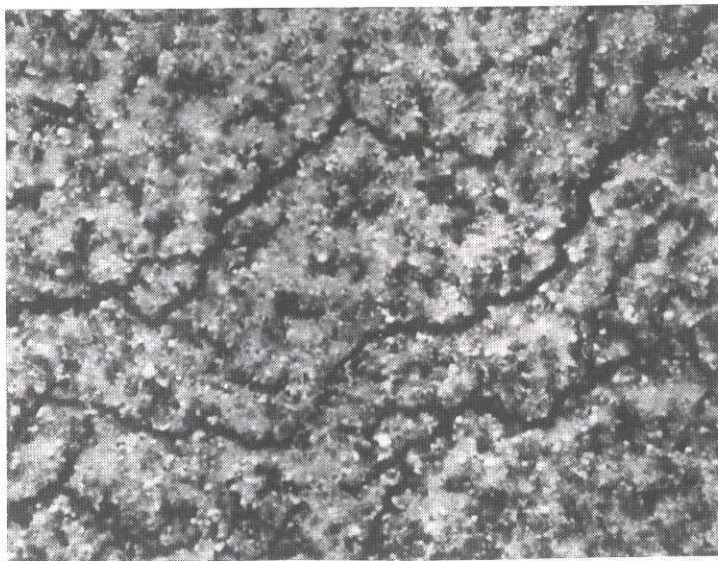
IEC-507(1991)に規定されているとの粉と米国産ロジャーズカオリンについて、その特性を表 5. 2 に示す。図 5. 8 にとの粉とカオリンの汚損懸濁液にどぶ漬けしたガラス板の汚損表面の拡大写真を示す。との粉とカオリンの化学成分をX線解析法により分析した。初期損失は 1050℃での熱処理による損失であり、結晶水や有機物のような揮発性成分の量である。との粉とカオリンでは初期損失を含め、異なる性質を示すが、どちらも酸化ケイ素が主成分である。

表 5. 2 との粉とカオリンの物理・化学特性

項目	測定方法	との粉	カオリン	
粒度, μm (50%値)	レーザ散乱法	6. 2	5. 8	
密度, g/cm^3	ピクノメータにより測定	2. 76	2. 60	
主な結晶成分	X-線回折法	ムスコバイト 石英	カオリナイト 石英	
化学成分, wt%	初期損失		4. 8	14
	X-線 分光法	SiO_2	67	46
		Al_2O_3	16	37
		Fe_2O_3	5. 8	0. 9



(a) との粉



(b) カオリン

図 5.8 汚損表面の拡大図



粒度および密度についてはとの粉とカオリンにほとんど差は見られないが、との粉の主な結晶成分はムスコバイト ($KAl_2Si_3Al_{10}(OH)_2$) と石英であり、カオリンはカオリナイト ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) と石英である。結晶構造上カオリナイト結晶中の水酸基は親水性を示し、一方、ムスコバイトの場合、水酸基と水分子は容易に結びつくことのない性質を有している。加えて、疎水性を示す SiO_2 (石英) の成分がとの粉の方がカオリンに比べ多く含まれている。したがって、図 5.8 に示すように、との粉とカオリンでは、との粉で汚損した場合の方が、不溶性物質はやや分散し、汚損付着する結果となった。との粉よりカオリンの場合の方が、汚損層が連続しており、霧中耐電圧試験を行う際、人工霧で汚損層が湿潤すると連続した水膜が形成されやすく、結果として同じ塩分付着量でも低い耐電圧を示すことになると思われる。

シリコーンゴムがいしの場合について、不溶性物質の種類の影響を調査した。供試がいしには表面漏れ距離 980mm のシリコーンゴム製高分子がいしを用いた。直流の場合の方が、交流の場合に比べて不溶性物質の種類に対する感度が高いため直流についてのみ調査した^(10,11)。図 5.9 にとの粉とカオリンで汚損したシリコーンゴムがいしの表面抵抗の時間特性を示す。表 5.2 に汚損耐電圧試験結果を示す。

表面抵抗、汚損耐電圧いずれも、カオリンで汚損した場合の方が低い値を示した。カオリンの場合の耐電圧はとの粉の場合の約 75% であり、この値は磁器がいしの場合に得られている結果とよく一致した⁽⁷⁾。撥水性のあるシリコーンゴム製高分子がいしの場合でも、磁器がいしと同様に、不溶性物質の種類が、汚損耐電圧に影響することが分った。

上述のように、がいしの人工汚損試験に用いる不溶性物質として、との粉とカオリンを用いた場合、特に直流の場合に、人工汚損耐電圧に差を生ずる。カオリンは代表的には米国製のロジャーズカオリンを用いるのが一般的とされて

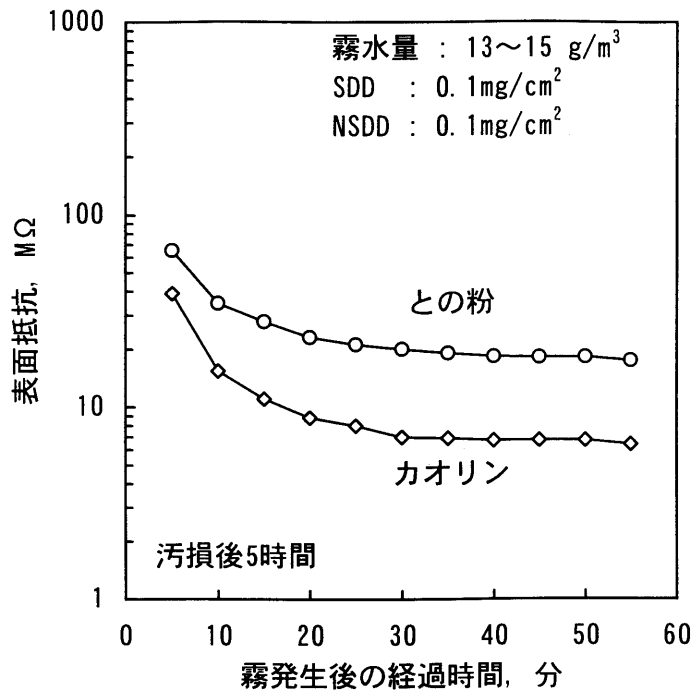


図 5.9 シリコンゴムがいしの表面抵抗の時間特性

表 5.2 シリコンゴムがいしの直流汚損耐電圧試験結果

不溶性物質の種類	SDD, mg/cm ²	NSDD, mg/cm ²	耐電圧, kV
とこの粉	0.12	0.12	60
カオリン	0.12	0.13	45

注) 霧水量 : 3~5g/m³

いるが、各国で試験を行う場合、自国産のカオリンを用いることが多い。ブラジル CEPEL (電力研究所) において、ブラジル産カオリンを用いる場合、とこの粉の場合と同様、ロジャーズカオリンを用いた場合に比べて、20%程度高い汚損耐電圧を示したと報告されている⁽⁹⁾。

各国のカオリンを入手し、直流人工汚損耐電圧試験 (定印霧中試験の昇降法) を実施した結果を図 5.10 に示す。供試がいしは、320mm φ の直流用磁器懸垂が

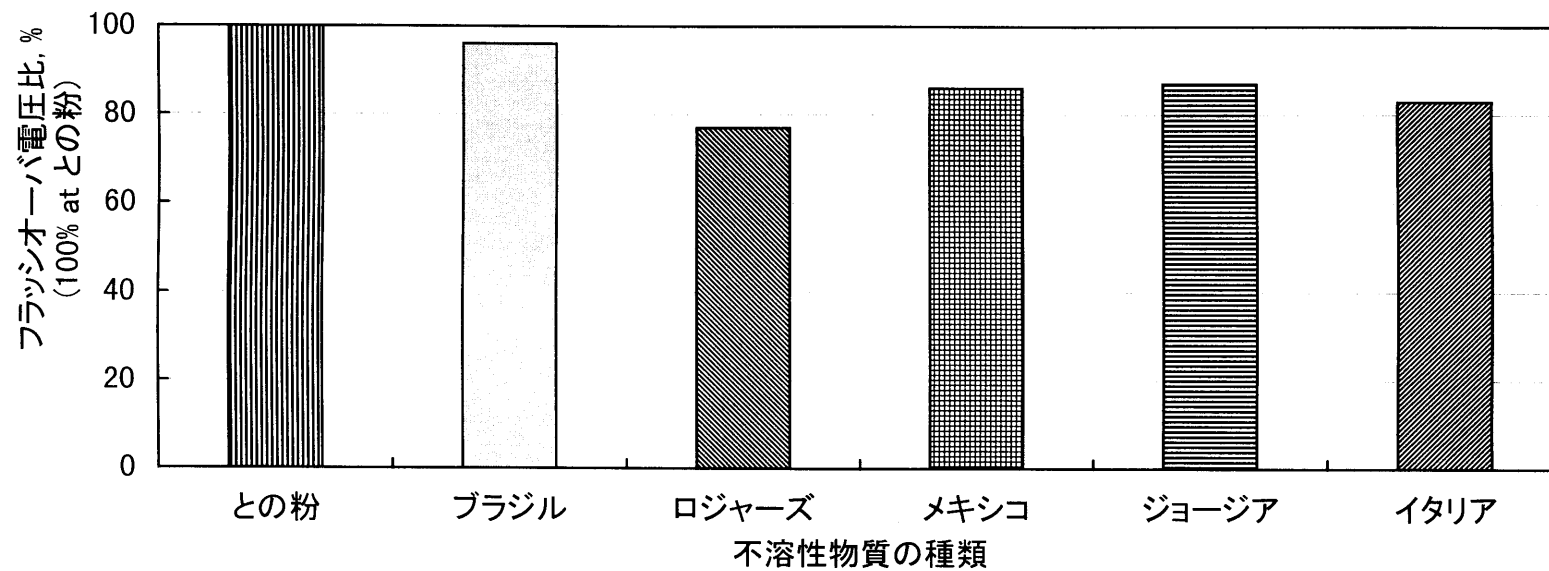


図5.10 各種不溶性物質の汚損フラッシュオーバー電圧に及ぼす影響
(との粉以外は各国産カオリン、塩分付着密度 0.03mg/cm²)

いしである。との粉を用いた場合が最も高い耐電圧を示した。しかし、ブラジル産カオリンもほぼ同等であり、ブラジルで行った結果とよく合っていた。

実際の汚損設計には、自然汚損がいしの特性を検討することが重要である。

図 5.11 に日本各地の自然汚損磁器がいし(標準懸垂がいし)の等価塩分付着密度と直流フラッシュオーバ電圧の関係を示す^(12, 13)。図中の実線は、不溶性物質としてとの粉を用いた場合の人工汚損耐電圧特性である。自然汚損がいしのフラッシュオーバ電圧は、人工汚損耐電圧より、一般にはるかに高く、最低でもわずかに高くなっている。

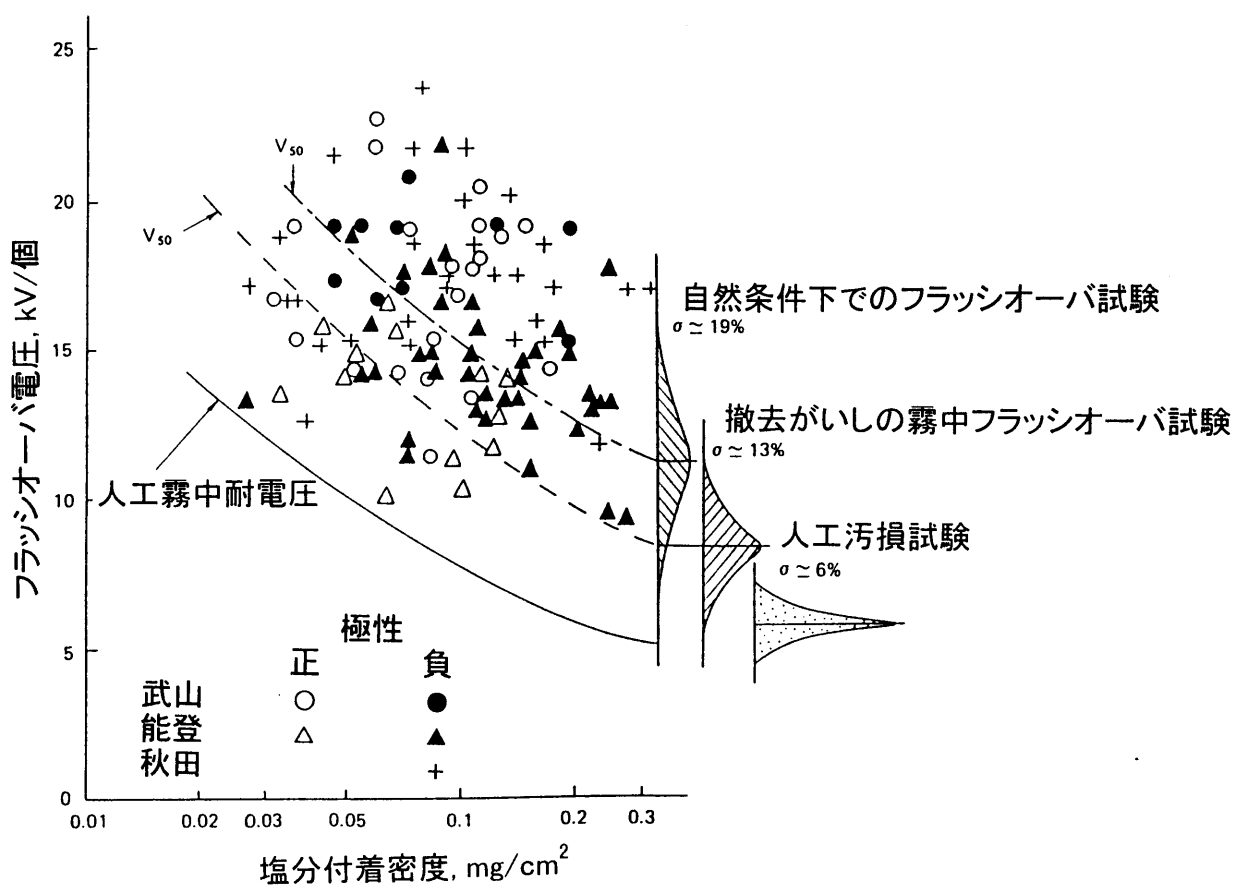


図 5.11 撤去がいしの直流フラッシュオーバ特性

5. 6. 2 不溶性物質付着密度の影響

不溶性物質付着密度(NSDD)と汚損耐電圧の関係を図 5.12 に示す。磁器がいしのデータは文献(14)より引用した。NSDDが大きくなると、保水する汚損層が厚くなるため、耐電圧は徐々に低下した。その低下する割合は、磁器がいしの場合とほぼ同等であった。

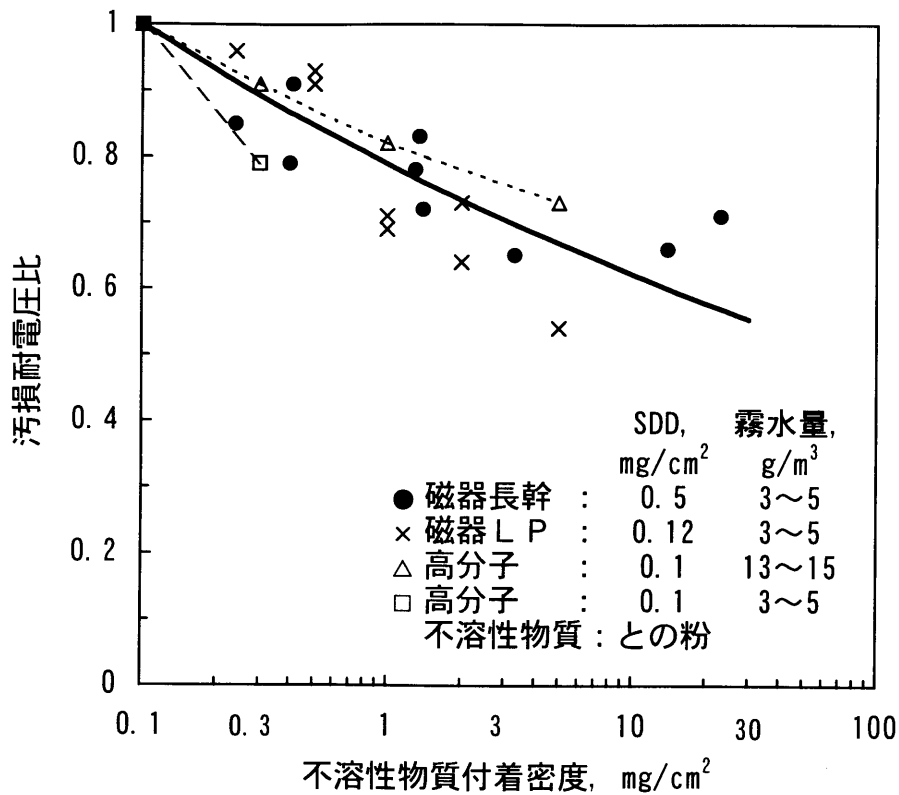


図 5.12 不溶性物質付着密度と汚損耐電圧の関係

5. 7 高分子がいしの形状と汚損耐電圧特性

5. 7. 1 笠形状の影響

汚損耐電圧を向上させるためには、一般に限られたがいしの長さの中で表面

表面漏れ距離を出来るだけ大きくする必要がある。高分子がいしの笠形状は一般に、その製造方法、量産の観点から、無ひだ笠の組み合わせで構成される。典型的笠形状としては、笠径が一定の通常笠と、異なった笠径の段違い笠がある。高分子がいしの適正な笠形状を決定するため、表 5.3 に示す様々な笠形状のシリコーンゴム製高分子がいしを作製した。

表5.3 供試がいしの笠形状

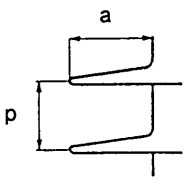
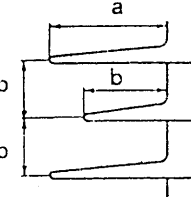
笠形状	がいし タイプ	笠ピッチ p, mm	笠出張 mm	笠ピッチ 当たりの 表面漏れ距離 ℓ, mm	ℓ/p	
通常笠 	A	100	a=50	190	1.9	
	B	50		140	2.8	
	C	40		128	3.2	
	D	30		118	3.9	
	E	25		113	4.5	
段違い笠 	F	42.5	a=70	150	3.5	
	G	37.5		b=50	145	3.9
	H	35			143	4.1
	I	30			138	4.6
	J	25			133	5.3

図 5.13 に単位笠ピッチ当たりの表面漏れ距離 (l/p) とがいしの単位有効長当たりの交流 50%FOV の関係を示す。50%FOV は笠ピッチを縮小して、単位笠ピッチ当たりの表面漏れ距離を増大して行くに従い上昇する。ここで、通常笠より、段違い笠の方が優れた汚損耐電圧特性を示すことが分る。しかし、段違い笠を採用しても単位笠ピッチ当たりの表面漏れ距離を大きくしていくと 50%FOV は最大値を示し、 l/p を増加しすぎると 50%FOV は低下していく。

図 5.14 に笠ピッチ (p) と 50%FOV 1kV 当たりの表面漏れ距離 (l/e) の関係を示す。表面漏れ距離効率はいし笠ピッチが 30mm より小さくなると、急激に低下する。段違い笠を採用した高分子がいしは、笠間隔を広く保ちながら笠ピッチ当たりの表面漏れ距離を確保することが出来るため優れた汚損耐電圧特性を示すことが分った。

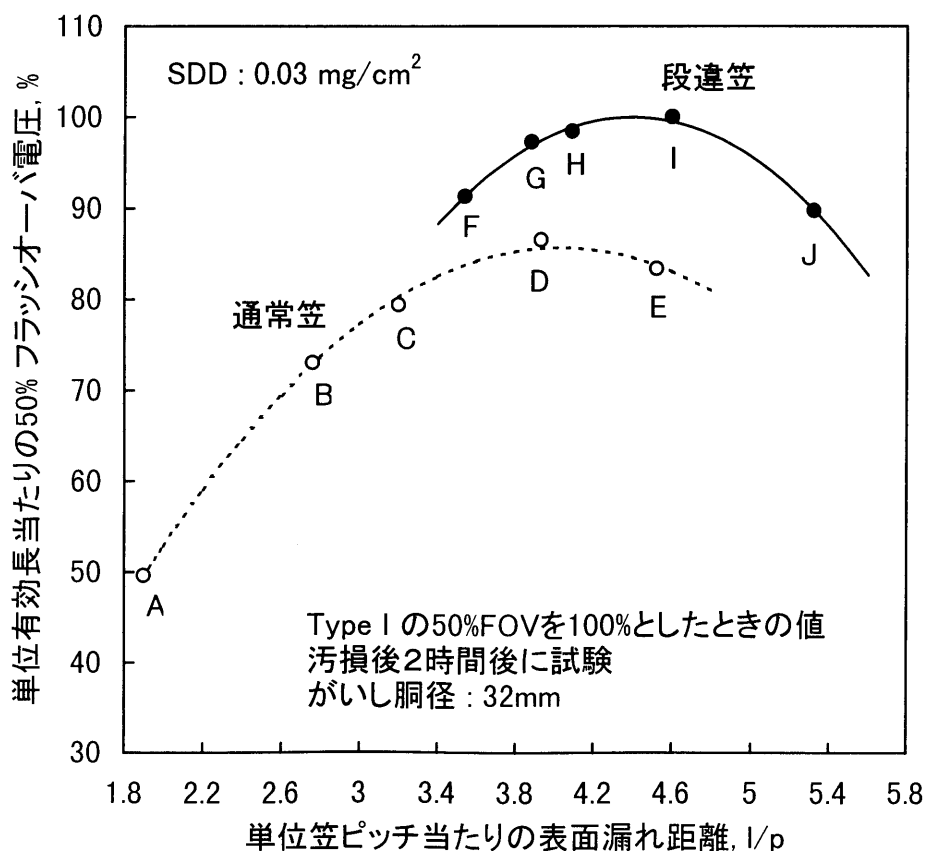


図 5.13 笠ピッチ当たりの表面漏れ距離 (l/p) と 50%FOV の関係

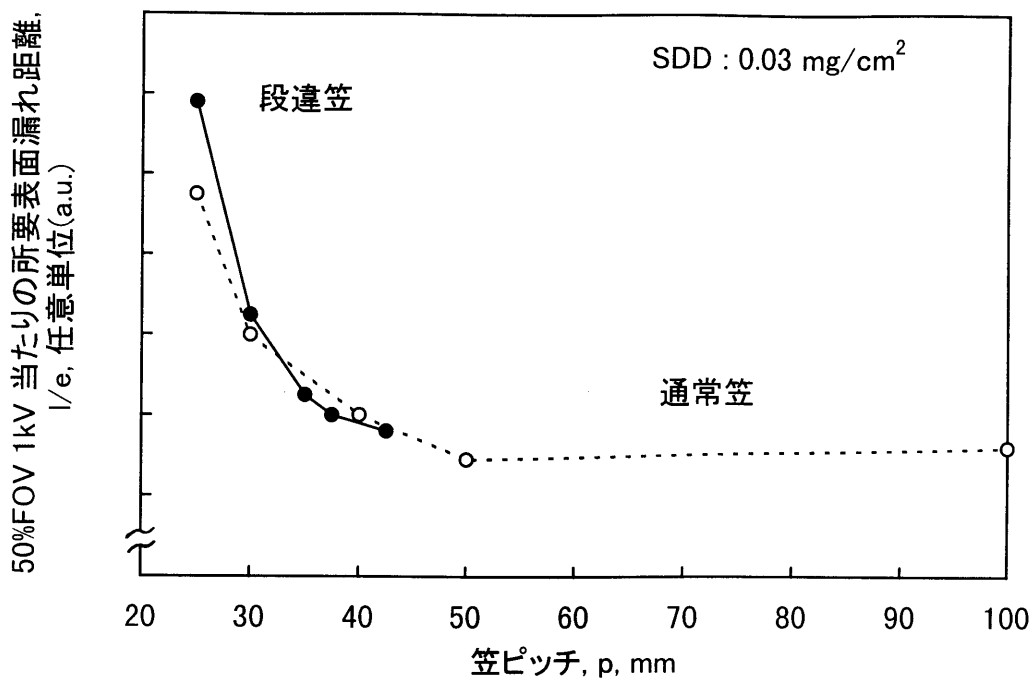


図 5.14 笠ピッチ (p) と所要表面漏れ距離 (l/e) の関係

5. 7. 2 がいし有効長と平均直径の影響

高分子がいしの汚損耐電圧特性におよぼす有効長と平均直径の影響について調査した。本研究における供試試料には表 5.3 の笠形状 Type B と Type G を用いた。耐電圧は 4 回耐電圧法により求めた。

従来、磁器がいしの場合、がいし連の長さが長くなるにつれて、汚損耐電圧は直線的に上昇することが分っている。今回、高分子がいしについて調査して結果を図 5.15 に示す。限られたデータではあるが、磁器がいしの場合と同様、SDD が 0.5 mg/cm^2 に対しては有効長約 3 m までは直線性を示した。しかし、SDD が 0.03 g/cm^2 の軽汚損条件では、有効長約 3 m で汚損耐電圧は直線上にのらなかった。がいし課電端の電位分布が高くなり、課電端の笠をアークが橋絡したためと考えられる。しかし、高分子がいしの場合でも軽汚損条件で、直線性が得られている報告⁽¹⁵⁾もあり、今回のデータは、数も限られており、さらにデー

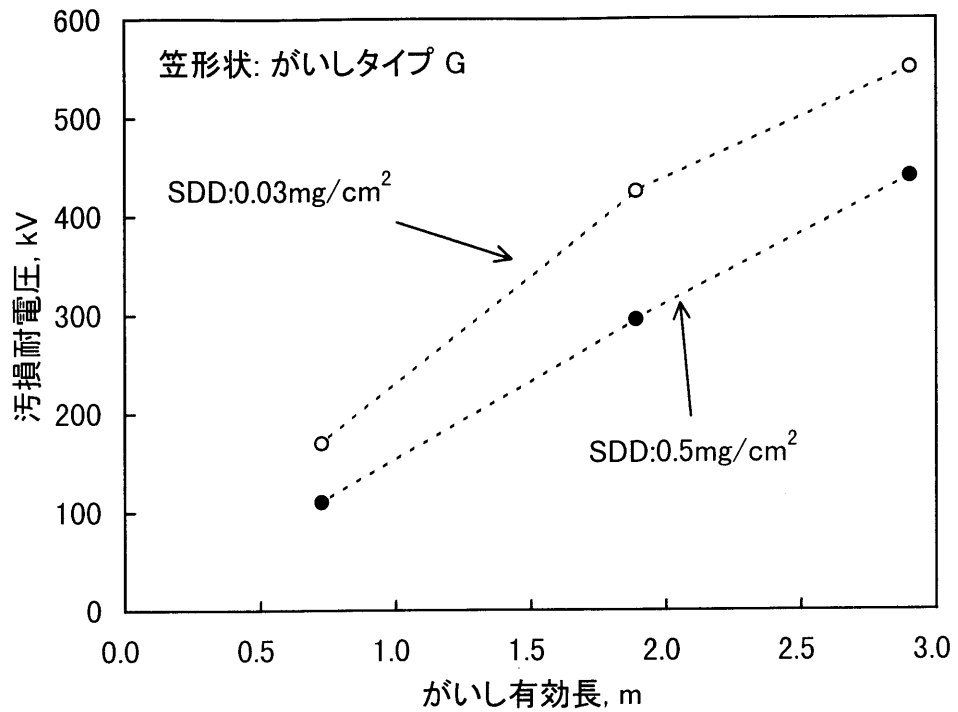


図 5.15 がいし有効長と耐電圧の関係

タを蓄積する必要がある。

次に、同じ笠形状で平均直径の異なる 4 種類の円筒状高分子がいしについて、平均直径と汚損耐電圧の関係を調査した。図 5.16 に試験結果を示す。ここで、L/E は耐電圧 1kV 当りの表面漏れ距離を示す。参考のため磁器がいしのデータも付記した⁽¹⁶⁾。磁器がいしの場合、L/E は平均直径の 0.43 乗に比例している。データの数は限られてはいるが、高分子がいしの L/E は磁器がいしに比べ小さい。また、平均直径が 200~300mm から L/E は飽和傾向を示し、磁器がいしに比べ、汚損耐電圧に及ぼす平均直径の影響は小さいことが分る。高分子がいしの場合、磁器がいしに比べ漏れ電流も少なく、表面に撥水性を有するため磁器がいしのような撥水性のない表面に比べ放電路が少ないためと考えられる。

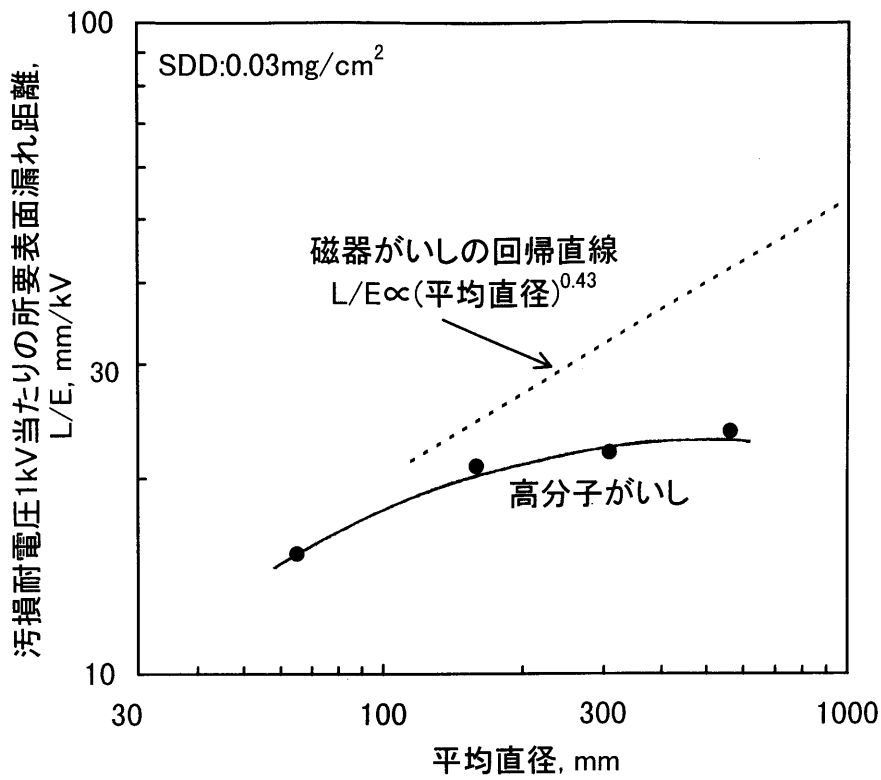


図 5.16 がいしの平均直径と所要表面漏れ距離の関係

5. 8 むすび

本章では、表面に撥水性を有する高分子がいしの人工汚損耐電圧特性について、定印霧中法により、種々の影響要因と形状の効果について検討した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 撥水性を有する高分子がいしの汚損耐電圧に及ぼす霧水量の影響は、磁器がいしの場合より顕著である。
- (2) 汚損後耐電圧試験までの経過時間が長くなるにつれて、高分子がいしの汚損耐電圧は上昇する。

- (3) 高分子がいしの汚損耐電圧は、磁器がいしの場合と同様、塩分付着密度が増すにつれ、低下する。不溶性物質の種類や密度の影響についても、磁器がいしの場合と同様の傾向を示す。
- (4) 高分子がいしの笠形状としては、笠間隔を保ちながら、表面漏れ距離が確保できる段違い笠の方が、笠径が同じ通常笠に比べ、優れた汚損耐電圧特性を示す。
- (5) 高分子がいしの有効長と汚損耐電圧に関しては、重汚損条件では有効長 3 m まで直線性を示すが、軽汚損条件では、有効長 2 m を超えると、直線性を示さなくなる。また、汚損耐電圧に及ぼす平均直径の影響は磁器がいしに比べ高分子がいしの方が小さい。

表面に撥水性を有する高分子がいしの場合でも、過湿潤条件下や、急速汚損条件下では、表面の撥水性が充分発揮されず、耐電圧が低下することがある。また、汚損耐電圧特性に及ぼす塩分付着密度や不溶性物質付着密度の影響は磁器がいしの場合とほぼ同じであることが分った。また、笠形状の効果や、直線性、平均直径の影響等、高分子がいしに特徴的な特性についても明らかになり、今後、高分子がいしの適用指針の確立に貢献できると考える。しかし、信頼性の高いデータを得るには、さらにデータを蓄積していく必要がある。また、有機材料にとって、経年劣化は避けられないが、劣化後の耐電圧特性や撥水性が充分発揮されないような超重汚損、急速汚損、着氷雪等の各種条件下での特性は、いまだほとんど研究されていない。劣化を模擬した条件や、急速汚損条件下での高分子がいしの特性についても、評価方法は明確でなく、さらに研究して行く必要がある。

文献

- (1) J. T. Burnham, D. W. Busch and J. D. Renowden : "FPL's Christmas 1991 Transmission Outage", IEEE 93WM 094-3 PWRD, 1993.
- (2) Y. Ozaki, T. Seta, T. Fujimura and K. Naito : "Flashover Voltage Characteristics of Contaminated Bushing Shell for UHV Transmission Systems", IEEE Trans. on PAS, Vol. 100, No. 8, pp. 3733-3743, 1981.
- (3) A. De La O, R. S. Gorur and I. Chang : "AC Clean Fog Test on Non-Ceramic Insulating Materials and a Comparison with Porcelain", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, pp. 2000-2009, 1994.
- (4) K. Naito, T. Kawaguchi, M. Ito, H. Katsukawa and Y. Suzuki : "Influence of Fog Parameters on Withstand Voltage of Contaminated Insulators", IEEE Trans. on PAS, Vol. 100, No. 8, pp. 3733-3743, 1981.
- (5) 「がいしの霧中試験法の検討」、電気学会技術報告 (II 部)、第 146 号、昭和 58 年.
- (6) K. Naito, S. Nishiwaki, R. Matsuoka and H. Shinokubo : "Investigation Results of Silicone Rubber Insulators under Wet and Contaminated Conditions", ICPADM, Brisbane, Paper No. 5116, 1994.
- (7) Y. Hasegawa, K. Naito, K. Arakawa, H. M. Schneider and L. E. Zattarella : "A Comparative program on HVDC contamination test", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, pp. 1986-1993, 1988.
- (8) 伊藤、坂西、近藤、内藤、西山 : 「がいしの汚損耐電圧におよぼす不溶性物質の影響」、平成 6 年電気学会高電圧研究会、No. HV-94-10、平成 6 年.
- (9) R. Bosignoli, E. Gomes Jr., R. W. S. Gorgia and E. G. C. Gonzales : "The Influence of Inert Material in the Clean Fog Test", 8th ISH, Yokohama, Paper No. 45. 04, 1993.

- (10) G. Ramos N., M. T. Campillo R. and K. Naito : "A Study on the Characteristics of Various Conductive Contaminants Accumulated on High Voltage Insulators", IEEE SM 463-0 PWRD, 1992.
- (11) D. de Decker, D. Perin, P. J. Lambeth, W. D. Lampe, G. Marrone, K. Naito, H. Niklasch and H. M. Schneider : "Artificial Pollution Testing of HVDC Insulators : Anaysis of Factors Influencing Performance", ELECTRA, No140, pp. 99-113, 1992.
- (12) T. Kawamura, T. Seta, K. Nagai and K. Naito : "DC Pollution Performance of Insulators", CIGRE Session Paper No. 33-10, 1984.
- (13) K. Naito, R. Matsuoka, S. Ito and K. Sakanishi : "Site Severity, Insulation Design and Insulator Type", CIGRE SC33 Colloquium, 1987.
- (14) 松岡、坂西、土井、中村 : 「砂漠汚損地区用がいしの研究」、NGK レビュー、No. 50、pp. 37-48、1990.
- (15) J. J. LaForest et al, "Transmission Line Reference Book 345kV and Above / Second Edition", Electrical Power Research Institute, pp. 483-484, 1982.
- (16) R. Matsuoka, S. Ito, K. Sakanishi and K. Naito : "Flashover on Contaminated Insulators with Different Diameters", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 26, No. 6, 1991.

第6章 結言

高分子がいしが高電圧屋外用がいしとして、約30年前初めて、アメリカ合衆国において、商品化されて以来、数々の劣化や事故を起こしては来た。しかし、アメリカ合衆国を中心に、高分子がいしの適用は拡大しており、評価技術や長期信頼性の研究が望まれている。これまで、各所でその信頼性や評価技術の研究が行われてきたが、従来の磁器やガラスがいしに比べ、研究期間も短く、実際の適用に際して、評価方法や適用指針はいまだ確立されていない。高分子がいしの適用に関する重要な基礎データを得るため、著者は、一貫して高分子がいしの電気絶縁特性に関する基礎研究に従事してきた。これまで未検討であった様々な研究項目に取り組み、諸特性を明らかにすることで、高分子がいしの評価技術や適用指針の確立に貢献できたと確信する。本章では、本研究の総括と今後の課題について述べる。

6.1 高分子がいし芯材の吸湿性

F R Pは酸に曝された条件下で、機械的ストレスを受けると、脆性破壊と呼ばれる破壊形態を引き起こす可能性がある。また、吸湿により電気絶縁破壊特性が低下するという懸念もあり、これらの分野は国際的にも重要な研究課題である。今回、高分子がいしを構成し、電気絶縁と機械的荷重を担う芯材であるF R Pの吸湿時の電気特性と吸湿における異方性について研究した。得られた主な成果は以下の通りである。

- (1) F R Pは、高湿度条件や表面が吸湿している場合には、絶縁破壊特性、特に負極性雷インパルスフラッシュオーバ電圧が低下することを明らかにした。
- (2) F R Pを構成するガラス繊維表面の処理方法の違いにより、ガラス繊維と樹

脂間の密着性が異なり、吸湿特性に影響を及ぼすことを明らかにした。

(3) FRPの吸湿特性については、端面からガラス繊維に沿っての水分の吸湿が最も顕著であり、ガラス繊維とエポキシ樹脂との界面での水分の拡散現象であることを明らかにした。

したがって、FRPを高分子がいしの芯材として用いる場合、FRPへの水分の吸湿による絶縁特性の低下や脆性破壊を起こす可能性があり、FRPを外部へ露出させないことはもちろん、把持金具内部に水分が侵入しないような密封した構造とすることが必要である。

6. 2 高分子がいしの外被材料の撥水性

高分子がいしの表面は、製造初期には優れた撥水性を示す。特に、シリコーンゴムを外被に有する場合には、長期間、その撥水性を維持する。しかし、その撥水性は、豪雨に曝され続けたり、アーク放電や紫外線に曝されることにより、その効果が低下することが懸念される。今回、このシリコーンゴムの撥水性と重量変化に及ぼす影響を、水分供給の極限状態を考え、試料を水中に浸漬したり、水浸・乾燥を繰り返すことにより調査した。得られた主な結果は以下の通りである。

(1) 高温過湿潤が長く続いたり、豪雨に繰り返し曝されることによって、親水性を示す水酸基を有した低分子のシリコーン成分により、撥水性が低下することを明らかにした。

(2) シリコーンゴムはそれぞれ水浸、乾燥過程に水分を吸収、放出することを明らかにした。

(3) 水温を上昇させると撥水性や重量の変化は加速されることを明らかにした。

(4) 水浸と乾燥過程の繰り返しにより、シリコーンゴムの表面の撥水性は初期状態に比べて徐々に低下し、重量は蒸留水中にシリコーン油が溶け出して、

徐々に減少していくことを明らかにした。

高温過湿潤条件下でのシリコンゴム製高分子がいしの適用に当たっては、表面の撥水性が十分に発揮できない場合があるので、このような環境への適用に当たっては、充分配慮する必要がある。

6. 3 高分子がいしの人工汚損試験方法

高分子がいしを屋外で使用する場合の最も重要な電気絶縁特性の一つである汚損特性について、その評価方法が各所で検討されている。しかし、撥水性を有する高分子がいしを人工的に汚損する方法も含めて、現在、試験法についての標準化はなされていない。したがって、高分子がいしの合理的な人工汚損方法を開発し、評価試験方法の標準化を提案する必要がある。そこで、始めに高分子がいしの人工汚損方法を開発した。合わせて、汚損湿潤時の漏れ電流や人工汚損耐電圧特性を調査し、磁器がいしと高分子がいしの汚損フラッシュオーバーのメカニズムの違いについても考察した。

実使用状態では、撥水性を有する高分子がいしの場合でも、汚損物は均一に付着する。そのため、人工汚損試験を行う場合、実使用状態における汚損物の付着状況を模擬して、均一に汚損する必要がある。今回、表面に物理的損傷を与えることなく、また、汚損液に添加剤を加えることなく、比較的簡便で、大型の高分子がいしにも適用が可能な人工汚損方法を開発した。この方法が、国際的にも高分子がいしの標準的な人工汚損方法の一つになることを確信する。

今回開発した人工汚損方法を用いて、高分子がいしと磁器がいしの直流漏れ電流波形や、交流・直流汚損耐電圧特性を調査した。高分子がいしと磁器がいしは表面の撥水性の違いにより、高分子がいしの方が、継続時間の短い電流波形となること、人工汚損耐電圧は、交流、直流ともに塩分付着密度の約 $1/5$ 乗に比例し、磁器がいしの特性とは異なることを明らかにした。しかし、表面

に撥水性を有する高分子がいしの汚損フラッシュオーバーのメカニズムの解明には、さらに研究が必要である。また、直流人工汚損試験法に関して、大型がいしの汚損湿潤時には、継続時間の長い、大きな漏れ電流が流れるため、現行の IEC 規格についての見直し点についても指摘した。

6. 4 高分子がいしの人工汚損耐電圧特性

高分子がいしの外被表面は撥水性を有するため、汚損耐電圧特性において、磁器がいしとは異なる面がある。今回開発した人工汚損方法により、人工汚損耐電圧に及ぼす各種要因の影響について調査した。次に、高分子がいしの形状と人工汚損耐電圧特性について調査した。これらの重要な特性が明らかとなり、高分子がいしの適用指針の確立に大きく貢献できた。今回、交流での特性を中心に調査したが、得られた主な成果は以下の通りである。

- (1) 高分子がいしの場合には、磁器がいしの場合より、表面の湿潤度合が、汚損耐電圧特性に大きな影響を及ぼす。また、汚損後の経過時間によって、内部からシリコン油が滲み出すため、表面の撥水性が回復し、汚損耐電圧は上昇することを明らかにした。
- (2) 高分子がいしの場合も、磁器がいしの場合と同様、塩分付着密度や不溶性物質の種類や付着密度によって、汚損耐電圧特性が決定することを明らかにした。
- (3) 高分子がいしの笠形状として、笠間隔を保ちながら、表面漏れ距離が確保できる段違い笠の方が、笠径が一定の通常笠に比べて、優れた汚損耐電圧特性を示すことを明らかにした。

6. 5 今後の研究課題

最後に、本研究に関する今後の研究課題を以下に示す。1) 接触角の実験観測

データを物理理論的計算結果と比較検討すること。2) 現在検討を始めている課電条件下における水滴の挙動について検討すること。3) 課電、紫外線、湿潤等の複合的なストレスが表面の撥水性や劣化に及ぼす影響については、試験条件を含め、評価方法を検討すること。4) 高分子がいしの人工汚損耐電圧特性について、外被が劣化した後の耐電圧特性や、超重汚損、急速汚損、着冰雪条件などでの耐電圧特性についても、評価方法を検討すること。

謝辞

本論文の作成に当たり懇切なる御指導と御鞭撻を賜りました名古屋工業大学 電気情報工学科教授 工学博士 内藤 克彦先生に心より感謝いたします。また、本論文の作成に当たり有益な御助言と御指導を賜りました名古屋工業大学 電気情報工学科教授 工学博士 常廣 譲先生、同教授 工学博士 松井 信行先生、同生産システム工学科教授 工学博士 大江 一行先生に深く感謝いたします。

本研究は、著者が日本ガイシ株式会社および名古屋工業大学において、一貫して携わった高分子がいしの絶縁特性研究業務の中で得られた成果をまとめたものであり、この論文の作成を快く許可され、暖かい励ましと御指導下さった当社 常務取締役電力事業本部 磯崎 孝副本部長、電力技術研究所 工学博士 松岡 良輔所長に厚くお礼申し上げます。また、本研究の遂行、論文作成に当たり切なる御指導と御鞭撻を賜りました中部大学 工学部電気工学科教授 工学博士 藤村 哲夫先生（元当社専務取締役）、東京大学 生産技術研究所教授 工学博士 石井 勝先生、名古屋工業大学 電気情報工学科助教授 工学博士 水野 幸男先生に厚くお礼申し上げます。

最後に、本研究の遂行に当たりご協力いただいた、日本ガイシ株式会社 電力技術研究所の伊藤 進課長、坂西 健治主任、ポリマー事業部の田中 賢治課長、中島 功主任をはじめとする職場関係の方々、ならびに名古屋工業大学 電気情報工学科内藤研究室、中部大学 電気工学科藤村研究室の皆さまに感謝いたします。

本研究に関して公表した論文

章	論文題目	掲載誌	著者
第2章	FRP 棒の吸水における異方性	電気学会論文誌 A、 Vol. 117-A、No. 1、 pp.84-85 (1997)	近藤邦明 中島 功 松岡良輔 水野幸男 木田雄次 内藤克彦
第3章	Time Variation of Hydrophobicity and Weight of Silicone Rubber Immersed in Water	電気学会論文誌 A、 Vol.117-A、No.3、 pp.299-304 (1997)	Y.Mizuno Y.Maekawa K.Naito K.Kondo I.Nakajima R.Matsuoka
第4章	Assessment of Basic Contamination Withstand Voltage Characteristics of Polymer Insulators	IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 4, pp.1895-1900 (1996)	R.Matsuoka H.Shinokubo K.Kondo Y.Mizuno K.Naito T.Fujimura T.Terada
	Investigation of DC Leakage- current Waveform on Contaminated Insulators	IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation (投稿中)	Y.Mizuno H.Kusada K.Naito K.Kondo R.Matsuoka S.Ito K.Sakanishi
第5章	Influence of Non-Soluble Contaminants on Withstand Voltages of Artificially Contaminated Insulators	8th International Symposium on High Voltage Engineering, Yokohama, Paper No.45.05 (1993)	R.Matsuoka S.Ito K.Kondo K.Naito I.Ishii S.Takei M.Ishii
	Influence of Nonsoluble Contaminants on the Flashover Voltages of Artificially Contaminated Insulators	IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, pp.420-430 (1996)	R.Matsuoka K.Kondo K.Naito I.Ishii
	Influence of Kinds of Insoluble Contaminants on Flashover Voltages of Artificially Contaminated Insulators	9th International Symposium on High Voltage Engineering, Graz, Paper No.3210 (1995)	R.Matsuoka O.Kaminogo K.Kondo K.Naito Y.Mizuno H.Kusada
	Contamination Withstand Voltage Characteristics of Polymer Insulators	10th International Symposium on High Voltage Engineering (1997 : 発表予定)	R.Matsuoka S.Ito K.Tanaka K.Kondo

研究業績（公表論文を除く）

[論文／国際会議]

- [1] Y.Mizuno, K.Naito, K.Ishii, R.Matsuoka, I.Nakajima and K.Kondo, “Time Variation of Hydrophobicity and Weight of Silicone Rubber Immersed in Water”, 9th International Symposium on High Voltage Engineering, Graz, Paper No.3050, 1995.
- [2] N.Sugawara, K.Sakaguchi, I.Nakajima and K.Kondo : “Negative DC Surface Discharge Triggered by Water Drops on Hydrophobic Surface of Insulator Materials”, 9th International Symposium on High Voltage Engineering, Graz, Paper No.1326, 1995.
- [3] R.Matsuoka, M.Ishiwari, H.Shinokubo and K.Kondo : “Field Test Results of Polymer Insulators”, 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Montreal, 1997.（発表予定）
- [4] R.Matsuoka, H.Shinokubo, K.Kondo, T.Fujimura and T.Terada : “Artificial Contamination Withstand Voltage Characteristics of Polymer Insulators”, International Symposium on Electrical Insulating Materials, pp.487-490, 1995.
- [5] R.Matsuoka, H.Shinokubo, K.Kondo and R.S.Gorur : “Investigation of Field Energized RTV Coated Porcelain Insulators”, International Symposium on Electrical Insulating Materials, pp.185-188, 1995.
- [6] R.Matsuoka, K.Kondo, K.Naito and M.Ishii : “Influence of Nonsoluble Contaminants on Withstand Voltage of Artificially Contaminated Insulators”, CIGRE SC33 Colloquium, 1993.

- [7] R.Matsuoka, T.Nakamura, H.Shinokubo and K.Kondo : “High Water Pressure Washing Test on Polymer Insulators”, CIGRE SC33 Colloquium, 1995.
- [8] H.Imagawa, R.Matsuoka, S.Ito, K.Sakanishi, K.Kondo, N.Okada and T.Yonezawa : “Comparative Contamination Degrees on Porcelain and Silicone Rubber Insulators in Fields”, CIGRE SC33 Colloquium, 1997.
- [9] N.Sugawara, K.Sakaguchi, I.Nakajima, K.Konodo and S.Ito : “DC Surface Discharge Triggered by Five Water Drops on Polymer Insulator Materials in Uniform Electric Field”, International Conference on Electrical Engineering, pp.1362-1365, 1996.
- [10] I. Gutman, R.Hartings, R.Matsuoka and K.Konod : “The IEC 1109, 1000h Salt Fog Test : Experience and Suggestion for Improvement”, Nordic Insulation Symposium, pp.389-398, 1996.
- [11] I. Gutman, R.Hartings, R.Matsuoka and K.Konod : “Experience with IEC 1109 1000h Salt Fog Ageing Test for Composite Insulators”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.13, No.3, pp.36-39, 1997.

[電気学会／研究会]

- [1] 伊藤、坂西、近藤、内藤、西山 : 「がいしの汚損試験におよぼす不溶性物質の影響」、平成6年電気学会 高電圧研究会資料、HV-94-10.
- [2] 松岡、篠窪、近藤、内藤、西脇 : 「ノンセラがいしの人工汚損試験方法の研究(その1)」、平成6年電気学会 高電圧研究会資料、HV-94-17.
- [3] 坂口、菅原、伊藤、中島、近藤 : 「撥水性表面上の水滴誘発沿面放電現象」、平成7年電気学会 誘電・絶縁材料研究会資料、DEI-95-113.

- [4] 中島、篠窪、近藤、松岡：「ポリマーがいしの加速劣化試験」、平成8年電気学会 誘電・絶縁材料研究会資料、DEI-96-36.

[電気学会／連合大会]

<不溶性物質に関する研究>

- [1] 武井、内藤、近藤、上之郷、松岡：「がいしの汚損特性に及ぼす不溶性物質の種類の影響」、平成4年電気学会 東海支部連合大会、No.107.
- [2] 近藤、坂西、松岡、武井、内藤、石井：「がいしの汚損耐電圧特性に及ぼす不溶性物質の種類の影響に関する実験」、平成5年電気学会 全国大会、No.1328.
- [3] 松岡、坂西、上之郷、近藤：「がいしの人工汚損試験に用いる各種不溶性物質の基礎特性」、平成6年電気学会 東海支部連合大会、No.78.

<高分子がいしの汚損特性に関する研究>

- [4] 松岡、篠窪、近藤、内藤、水野、西脇：「複合がいしの人工汚損耐電圧に及ぼす霧の影響」、平成6年電気学会 全国大会、No.1337.
- [5] 松岡、篠窪、近藤、内藤、水野、藤村、寺田：「ポリマーがいしの人工汚損耐電圧特性」、平成7年電気学会 全国大会、No.1629.
- [6] 松岡、伊藤、近藤、内藤、水野：「ポリマーがいしの人工汚損方法の改善」、平成8年電気学会 全国大会、No.1602.

<高分子材料の加速劣化試験に関する研究>

- [7] 國枝、中島、水野、近藤：「トラッキングホイール試験(CEA LWIWG-01(91)Method2)における漏れ電流」、平成6年電気学会 東海支部連合大会、No.75.

- [8] 鬼頭、寺田、藤村、松岡、中島、水野、近藤：「高分子材料の劣化におよぼす紫外線の影響」、平成7年電気学会 東海支部連合大会、No.77.
- [9] 藤村、寺田、鬼頭、松岡、中島、近藤：「高分子絶縁材料の紫外線照射による劣化について」、平成8年電気学会 全国大会、No.1603.
- [10] 鬼頭、伊藤、藤村、石割、中島、水野、近藤：「高分子材料の劣化におよぼす複合ストレスの影響」、平成8年電気学会 東海支部連合大会、No.117.
- [11] 鬼頭、伊藤、藤村、石割、中島、近藤：「高分子材料の劣化におよぼす複合ストレスの影響（2）」、平成9年電気学会 全国大会、No.1755.
- [12] 前川、石橋、水野、内藤、松岡、近藤：「高分子絶縁材料の汚損湿潤時特性－CIGRE 持ち回り試験－」、平成8年電気学会 東海支部連合大会、No.115.
- [13] 前川、石橋、水野、内藤、近藤、松岡：「高分子絶縁材料の汚損湿潤時特性－CIGRE 持ち回り試験（第2報）－」、平成9年電気学会 全国大会、No.1756.

<シリコーンゴム表面の放電現象に関する研究>

- [14] 坂口、阿部、土方、菅原、中島、近藤：「水滴誘発沿面放電現象（1）－直流負極性印加の場合－」、平成6年電気学会 北海道支部連合大会、No.67.
- [15] 坂口、阿部、土方、菅原、中島、近藤：「水滴誘発沿面放電現象（2）－直流正極性印加の場合－」、平成7年電気学会 全国大会、No.1637.
- [16] 坂口、土方、菅原、中島、近藤：「水滴誘発沿面放電現象（3）－ノンセラ材料表面上水滴の動きとフラッシュオーバー電圧－」、平成7年電気学会 電力・エネルギー部門大会、No.607.
- [17] 坂口、小森、土方、菅原、中島、近藤：「水滴誘発沿面放電現象（4）－定温度・定湿度室内条件－」、平成8年電気学会 全国大会、No.1599.

- [18] 石橋、前川、水野、内藤、近藤、中島、松岡：「汚損シリコーンゴム表面の放電特性」、平成8年電気学会 東海支部連合大会、No.116.
- [19] 竹内、水野、内藤、近藤、中島、松岡：「交流電圧印加時のシリコーンゴム表面の水滴の挙動」、平成8年電気学会 全国大会、No.1600.
- [20] 石橋、前川、水野、内藤、近藤、中島、松岡：「交流電圧印加時の汚損シリコーンゴム表面の水滴の挙動（第2報）」、平成9年電気学会 全国大会、No.1757.

<シリコーンゴムの撥水性に関する研究>

- [21] 西脇、水野、内藤、近藤、篠窪、松岡：「シリコーンゴムの表面の撥水性の経時変化」、平成6年電気学会 全国大会、No.1346.
- [22] 伊藤、坂西、近藤、伊東：「シリコーンゴムの撥水性に及ぼす着氷の影響」、平成7年電気学会 東海支部連合大会、No.78.

<着氷時の高分子がいしの絶縁特性に関する研究>

- [23] 菅原、村上、土方、田中、近藤、伊藤：「着氷ポリマーがいしの絶縁特性（1）－直流漏れ抵抗－」、平成8年電気学会 全国大会、No.1604.
- [24] 村上、菅原、中内、田中、近藤、伊藤：「着氷ポリマーがいしの絶縁特性（2）－材質と直流漏れ抵抗－」、平成8年電気学会 電力・エネルギー部門大会、No.462.
- [25] 村上、菅原、保苺、石田、中内、近藤、伊藤：「着氷ポリマーがいしの絶縁特性（3）－同一形状で表面材質の違いによる影響－」、平成9年電気学会 全国大会、No.1754.
- [26] 石田、菅原、中内、近藤、中地、伊藤：「着氷ポリマーがいしの絶縁特性（4）－材質と耐電圧の関係－」、平成9年電気学会 電力・エネルギー

部門大会、No.434.

<その他>

[27] 小澤、吉田、伊藤、鳥本、近藤：「がいし冠雪観測装置の試作」、平成6年電気学会 電力・エネルギー部門大会、No.434.

[28] 近藤、伊藤、松岡：「ポリマーがいしの課電曝露試験」、平成8年電気学会 東海支部連合大会、No.118.

[29] 木田、水野、内藤、近藤、中島、松岡：「吸水状態におけるFRPの沿面放電特性」、平成9年電気学会 全国大会、No.340.