特集 3・2

UDC 621.315.1.015.5
621.315.624.015.52

# 汚損条件下における電力供給システムの絶縁信頼度

Reliability of Insulation in the Power Transmission Systems under Polluted Condition

河村　達雄*・石井　　勝*・森田　和実*・伊坂　勝生*
Tatsuo KAWAMURA, Masaru ISHII, Kazumi MORITA and Katsuo ISAKA

## 1. まえがき

近年大都市における電力エネルギーの需要は比躍的に増大しており，これに応ずるために超高圧送電線が続々と計画，建設されている．かかる系統においては，これが一旦事故に遭遇すると大都市における大停電事故につながるため，その信頼度を向上させることは以前にも増して重要な問題である．

わが国における送電線の事故の原因としては，自然雷によるものが最も多い．他面，わが国が四面海に囲まれた島国であるために，特に台風時には塩分を含んだ風が内陸に吹き込み，がいし等の絶縁物が塩風によって汚損されて絶縁耐力の低下をもたらすことも多く，これによってフラッシオーバ事故が発生するいわゆる塩害が重要な問題としてクローズアップされて来ている．特に最近は海岸に近接して大容量の火力発電所が建設され，超高圧送電線が都市の外輪の臨海地域に建設されるに及んで，この問題はますます重要の度を加えている．

従来送電線における絶縁設計においては，外的要因の最苛酷条件を想定し，これを基準にして行なう方法が採用されている．しかしながらこの方法によれば，ややもすれば絶縁の強度を高くとり過ぎるきらいがあったが，最近これに対して統計的手法による絶縁信頼度の評価が提唱されている．この手法は自然雷や台風時における気象条件の統計的性質を考慮し，電子計算機によってフラッシオーバ事故発生確率を計算し，電力系統における信頼度を算定するものである．

筆者らはこの立場に立脚して，種々の自然条件下における電力供給システムの絶縁信頼度の評価に関する研究を行って来たが，本文においては汚損条件下におけるフラッシオーバ事故発生確率を電子計算機を用いて算定し，現実に屋外に設置したがいしのフラッシオーバ事故の発生状況と比較検討し，電力供給システムにおける信頼度とその向上につき行なった研究結果について述べる．

## 2. 汚損条件下における電力系統の絶縁問題

送電線における事故の原因としては，自然雷，開閉サージ，がいし汚損等いくつかの原因が考えられる．事故

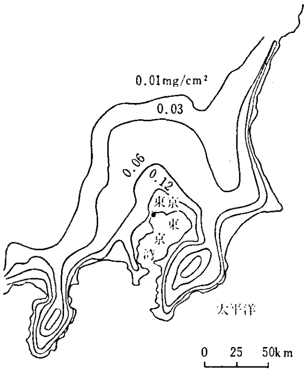


図 1　台風時におけるがいし付着塩分密度

統計によれば，110 kV 以上の架空送電線においては，自然雷によるものが全体の 53% をしめている．これに対して絶縁物の表面汚損によるものはこれと比較すればかなり少ないが，この問題が電力系統における絶縁問題上特に重要な地位を占める理由としては，まず送電電圧の増大に伴ないその苛酷度が増加する傾向にあることがあげられる．さらに，最近は発電の形態が火主水従となり，大容量の火力発電所が用地難，燃料の輸送条件等により大都市近郊の海岸地域に建設されるようになり，塩風による汚損はますます深刻となっている．

塩風によって汚損されたがいしの絶縁耐力の低下はその表面に付着する塩分密度によって変化する．図 1 は関東地方の台風時におけるがいし表面の付着塩分密度を示す．この図より明らかなように，塩分付着量は海岸からの距離によって大きく変化する．わが国においては，最大想定塩分量は海岸からの距離によって決まるものとし，A, B, C, D の区分を設けておのおのの付着塩分量を決め，絶縁設計に際して参考にしている．第 1 表はその 1 例として 250 mm 懸垂がいしに関する区分を示す．これらの区分を参考にして付着塩分量の想定を行うことができる．

第 1 表　汚損地域区分 (250 mm 懸垂がいし)

| 汚 損 区 分 | | | D | C | B | A |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 最大想定塩分付着量 | 量 | mg/下面 | 400 | 200 | 100 | 50 |
| | 密度 | mg/cm² | 0.5 | 0.25 | 0.125 | 0.063 |
| 海岸からの距離 (km) | | | 0— 3 | 3—10 | 10—50 | 50以上 |

* 東京大学生産技術研究所　第 3 部

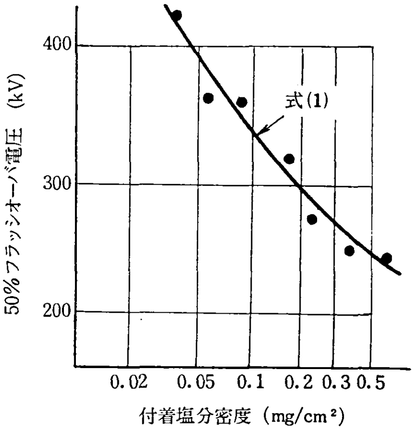


図 2　280 mm 懸垂がいし 35 個連の等価霧中フラッシオーバ特性

絶縁物の表面が塩あるいは塵埃によって汚損されたがいしの絶縁耐力は付着塩分密度によって変化し，その 50% フラッシオーバ電圧 $V$ (kV) はがいし表面の付着塩分密度 $M$ (mg/cm²) が大きい程低下する．この点については屋外に設置したがいしや人工汚損試験によって検証されており，両者の間の実験式ももとめられている．わが国においては次の実験式が一般に利用されている．

$$V=CM^{-1/5} \quad (C \text{ は定数}) \qquad (1)$$

図 2 は従来わが国において広く利用されている人工汚損試験法である等価霧中法によってもとめられた 280 mm 懸垂がいし 35 個連のフラッシオーバ特性を示す．同図には上式によってもとめられた値もあわせて記してあるが，両者の間にはきわめてよい一致がみられる．

汚損条件下における送電線の絶縁設計に当っては，送電線経過地における付着塩分密度の推定を行い，これに対してフラッシオーバしないことを条件に耐電圧目標値を選定する手法が従来一般に行われている．この方法はその地域における汚損条件についての苛酷な条件を規定し，これを基準として絶縁設計を行ういわば確定論的手法といえる．

近年この手法に対して，気象条件などの時々刻々に変化する時系列の統計的変動を考慮し，電子計算機を利用して電力系統におけるフラッシオーバ事故発生の確率を算定し，これによって系統における絶縁信頼度の評価を行う手法が注目されている．この手法は汚損条件のみならず，雷や開閉サージなどの波高値，波形，発生頻度などの統計的分布を考慮し，送電線におけるサージに対する絶縁信頼度の評価にも適用することができる．

この手法は前述の確定論的手法に対して統計的手法とも言い得るもので，電力系統における絶縁の合理化をはかるために最近特に注目されている．この手法によれば，従来の手法における設計の条件が，統計的分布上のどのような位置づけとなっているかを評価できる点でその意義は大きいものと考えられる．この方法は国際電力技術会議 (CIGRE) における重点研究項目として取り上げられており，また最近制定された国際電気標準 (IEC) の絶縁協調に関する規格においてもこの考え方が大幅に採り入れられている．

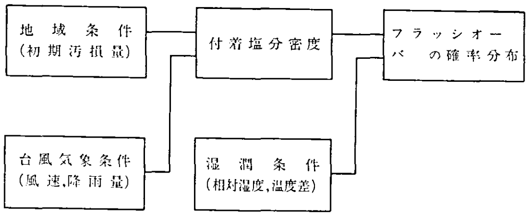


図 3　汚損がいしのフラッシオーバ確率分布の決定法

本文においては，かような統計的手法に立脚して，汚損条件下における電力供給システムの絶縁信頼度の算定を近なうとともに，事故を未然に防止するための予測の可能性について行った研究結果について述べる．

### 3.　汚損フラッシオーバ確率の算定

統計的手法を利用して，電力系統におけるフラッシオーバ事故確率の算定を行うためには，フラッシオーバ機構の数式化をはかることが必要である．いまこの問題に関する最も苛酷な条件と考えられる台風襲来時を想定すれば，そのフラッシオーバ確率を与える条件は図 3 のように与えられる[1]．フラッシオーバ確率は付着塩分密度によって規定されるが，これは台風襲来直前における値と台風時における気象条件により時々刻々に変化する量とに分けて考えることができる．前者は対象地域で決まる量であって，例えば海岸からの距離により規定される．塩分の付着したがいしは，相対湿度，周囲気温，がいし表面温度等の影響によりその表面が湿潤してはじめてフラッシオーバ電圧が低下する．以下にフラッシオーバに影響するいくつかの因子とフラッシオーバ確率の算定法について述べる．

台風襲来直前における初期塩分量を $MA$ とすれば，これから単位時間後の付着塩分密度 $M_1$ はその時間内の海方向よりの平均風速を $W_1$ とすると，次式により推定できる．

$$M_1=MA+GA\cdot W_1^3 \qquad (2)$$

ここで，$GA$ は風速係数と呼び，地域条件によって左右される量である．例えば三浦半島武山における値は 2.1 $\times 10^{-6}$ (mg/cm²)/(m³/s³) である．

がいしに付着した塩分は降雨により洗い流されるが，その量は降雨量の関数として表現される．懸垂がいしのフラッシオーバ特性に関係するのは主としてがいし下面の付着量であるが，これが降雨により洗い流された後の残存率を $FR$ とする．かような量を用いれば，$i$ 単位時間後のがいし下面の付着塩分密度 $M_i$ はその単位時

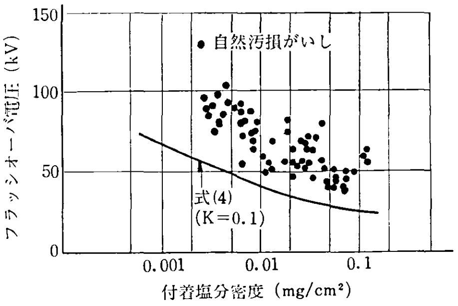


図 4　自然および人工汚損懸垂がいし 3 個連のフラッシオーバ電圧

間帯における海方向よりの平均風速 $W_i$, 塩分残存率 $FR_i$ を用いて次式のように計算される.

$$M_i=FR_i(M_{i-1}+GA\cdot W_i^3) \qquad (3)$$

ここで, $FR$ の値は実測により求められた値を数式化して, 計算プログラムに組み入れている.

がいし (下面) の塩分付着密度が $M$ (mg/cm²) である 250 mm 懸垂がいしの最低フラッシオーバ電圧 $U$ (kV) は人工汚損試験によって次の実験式が妥当とされている.

$$U=\frac{28}{\left(\frac{M}{0.1}\right)^{1/5}\left[1.5(K^{1/3}+2)+\frac{5}{8}K\right]} \qquad (4)$$

ここで $K$ はとのこ付着密度 (mg/cm²) を示す. 図 4 では自然汚損がいしにおける実測結果と上式によってもとめた値との比較を行なっている. 実際の自然汚損がいしは上式より一般に高く, ばらついている為, 後述のようにフラッシオーバ電圧の分布を考慮している.

上述の $U$ の値は霧中でがいし表面が充分湿潤している状態の値であり, 自然条件下においては, 一般にこれ程苛酷にならず, 相対湿度$H$および気温とがいし表面温度との差 $\Delta T$ (以下これを単に温度差と呼ぶ) の関数となる. 図 5 は筆者らが実験室においてもとめた関係を示すものである[2]. 温度差によりフラッシオーバ電圧が著しく低下することがわかる. いま, 一般のフラッシオーバ電圧を霧中 $\Delta T=10$℃ の場合の耐電圧の倍数 (湿潤係数) $FM$ で表現すると, 図 6 のように表わされる. 本計算においてはこの関係を数式化して利用している.

これらのデータを利用すれば, 気象データから最低フラッシオーバ電圧 $V$ (kV) は次のように計算される.

$$V=FM\cdot U \qquad (5)$$

実際の自然汚損がいしのフラッシオーバ電圧はほぼ正規分布をなしてばらついており, その 50% および 5% 値, $V_{50\%}$, $V_{5\%}$ の最低フラッシオーバ電圧に対する倍数をそれぞれ $k_m$, $k_n$ とすれば, これらはそれぞれ 1.57～1.75, 1.22～1.32 となることが知られている. いま $V_{50\%}=k_mV$, $V_{5\%}=k_nV$ の 2 点が判明し, 正規分布を仮定すれば, がいし 1 個当りの分担電圧が $V_{ac}$ の時の

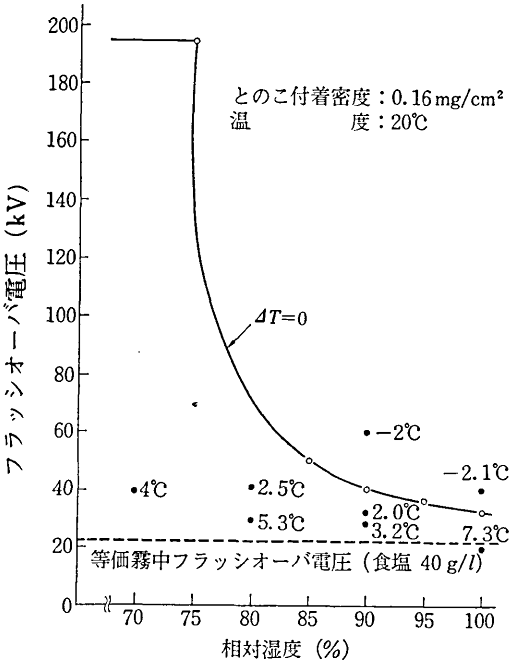


図 5　がいし表面温度のフラッシオーバ電圧への影響 (塩分付着密度 0.09 mg/cm²)

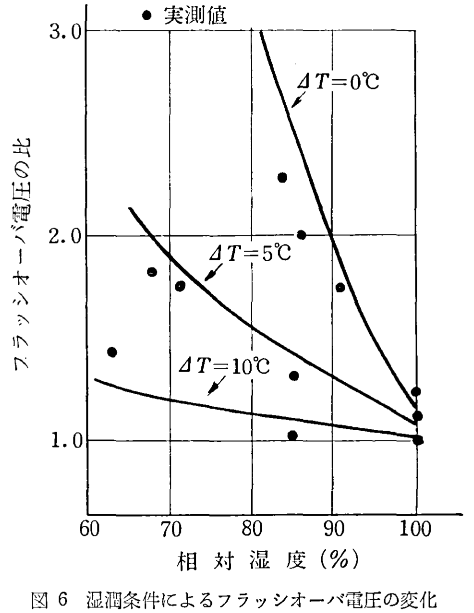


図 6　湿潤条件によるフラッシオーバ電圧の変化

がいし一連のフラッシオーバ確率 $P$ は次式により計算される.

$$P=\frac{1}{\sqrt{2\pi}D_V}\int_{-\infty}^{V_{ac}}\exp\left\{-\frac{(V-V_{50\%})^2}{2D_V^2}\right\}dV \qquad (6)$$

ここで, $D_V=(V_{50\%}-V_{5\%})/1.645=(k_m-k_n)V/1.645$ また, $k_m=1.57$, $k_n=1.22$ として計算を行った.

これらの関係を利用して, フラッシオーバ確率を計算するための流れ図を図 7 に示す[4)5)]. 気象条件のサンプル

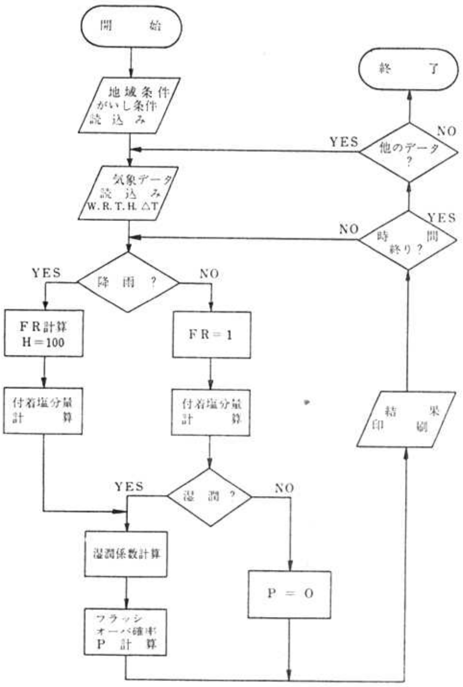


図7　流れ図

間隔は1時間として計算を行い，計算の結果，がいし一連のフラッシオーバ確率は時系列として出力されている．

#### 4.　フラッシオーバに影響する諸条件の測定

汚損条件下におけるフラッシオーバ機構には気象条件が関与する割合がきわめて大きい．フラッシオーバ電圧低下に影響すると思われる気象条件，フラッシオーバ確率と関連があると見られる汚損がいしの漏れ電流の測定を行うため，超高圧電力研究所，武山研究所に図8に示す測定設備を設置して長期間の連続測定を行った[3])．

気象条件に関する測定項目としては，気温，相対湿度とともに，従来信頼できる資料が全く得られていなかった表面温度を対象とした．気温，相対湿度の測定は鋭感温湿度計を使用し，表面温度は熱電対を250 mm懸垂がいしの下面に付着させて測定を行なった．漏れ電流の測定はがいしの上下面の境に幅5 mmのリング状の電極を設け，両面の漏れ電流を分離して測定している．測定用電源としては，直流500 V間歇課電装置を用いた．この装置は500 Vを一定時間毎に印加するもので，電圧印加時間およびその間隔は任意に設定することができる．

これらの温湿度測定素子，熱電対用温度補償器は百葉箱中に置かれ，地上3 mの鉄骨アームを用いて漏れ電流および表面温度測定用懸垂がいしによって吊り下げられている（図9）．ここから約20 m離れた測定室には記録計とともに，漏れ電流測定用電

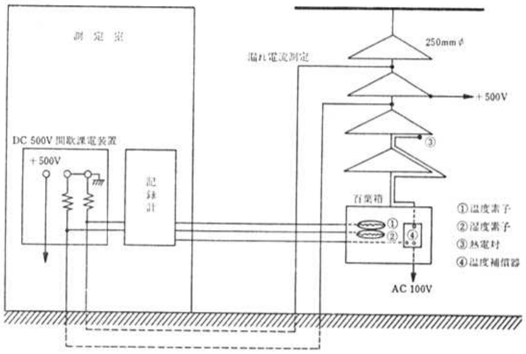


図8　汚損がいし測定設備

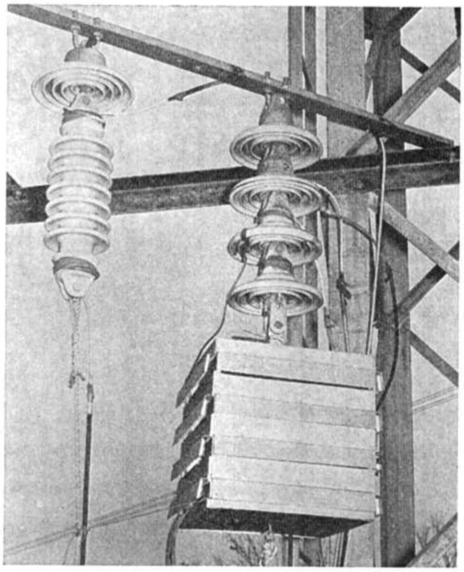

図9　汚損がいしの連続測定装置

源が置かれている．記録には6打点記録計と2現象連続記録計を用いている．

気温，がいし表面温度，相対湿度の測定結果を見ると，天候によっていくつかの特徴的パターンを示すことが明らかになった．図10は，気温，がいし表面温度の晴天時における結果で，昼夜間の気温変化が大きく，昼間は太陽よりの放射，夜間はがいしの放射冷却の影響を受けて温度差が生ずる．この温度差については内外を

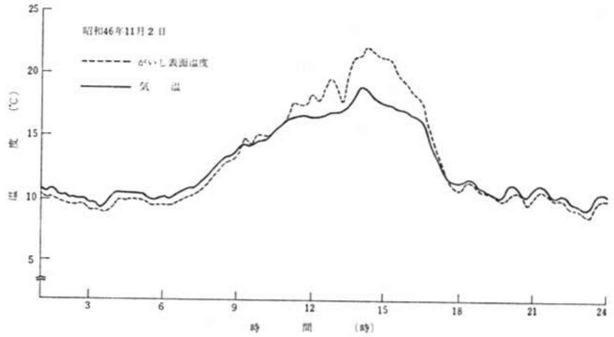


図10　表面温度および気温の変化

通じて測定が行なわれておらず，本研究によってはじめてその実態が明らかになったものである．漏れ電流については，500 kV 課電曝露がいしのフラッシオーバ発生時の統計をもとめた結果，特にがいし下面の漏れ電流とフラッシオーバ確率との間には著しい相関がみられている[6]．

## 5. フラッシオーバ確率の計算結果

さきに述べた汚損がいし連のフラッシオーバ確率に関する計算プログラムに，実測によって得られた気象データを入力することにより，武山における仮想的な送電系統のがいし連のフラッシオーバ確率を時間関数として計算することができる．想定したがいし連は相間 275 kV，250 mm 標準懸垂がいし 19 個/連である．付着塩分密度の初期値はそれ以前の 1 ケ月程度にわたる気象データから推定することも可能であるが，ここでは分布の 50% 値の 0.064 mg/cm$^2$ とした．

計算結果の 1 例として，図 11 に昭和 46 年 9 月の第 29 号台風における気象条件を電子計算機に入力して得たがいし一連のフラッシオーバ確率 $P$，がいし 1 個当りの 50% フラッシオーバ電圧 $V_{50\%}$ の計算値を示す．計算値と実測値との比較を行なうため，武山研究所におけるがいしの課電曝露試験場における 500 kV 課電曝露がいしのフラッシオーバ発生時刻もあわせて記してある．この図から明らかなように，フラッシオーバ発生時刻は確率算定値ときわめてよく一致しており，仮定したモデルの単純さにもかかわらず極めて良好な結果が得られている．また $V_{50\%}$ についてもこれと同様の結論が得られている．

さらに，同時に得られた 250 mm 懸垂がいしについてもとめられた漏れ電流のうち，上下面の漏れ電流の和 $(I_u+I_l)$ とフラッシオーバ確率値との間にはかなり良好な相関関係の存在することが明らかにされている．この結果上下面の漏れ電流の実測を行なうことにより，フラッシオーバ電圧の低下を推定する可能性が自然条件下においても示されたと結論することができる[4)6)]．

## 6. む　す　び

近年都市における電力需要の比躍的増大に伴って，周辺の臨海地帯に大容量の火力発電所が建設され，また都市の外輪部に超高圧送電線が計画，建設されている．か

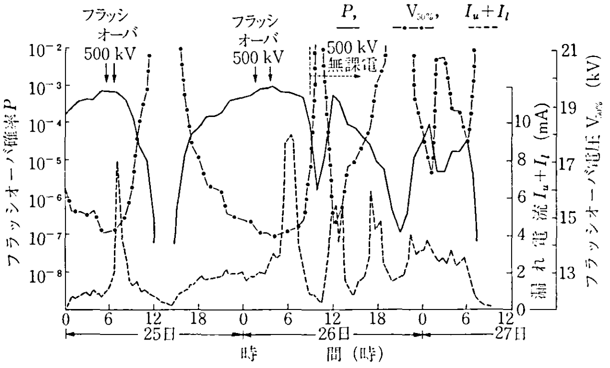


図 11　29 号台風時の $P$, $V_{50\%}$, $I_u+I_l$

ような電力供給システムの汚損条件下におけるフラッシオーバ確率をもとめ，実績値との比較検討を行なった．その結果，本文において述べた手法によって絶縁信頼度の算定を行うことができることを明らかにした．さらに本手法によれば台風時における電力供給システムのフラッシオーバ危険度の地域的分布をもとめることができるとともに，フラッシオーバ事故の予測とその未然防止をはかり，電力供給システムの信頼度を向上させ得るものと考える．

終りに，屋外における連続測定に際してご協力いただいた超高圧電力研究所，武山研究所の関係者の方々に厚く御礼申し上げる．

(1973 年 12 月 11 日受理)

### 参 考 文 献

1) T. Kawamura et al: Statistical Estimation of Transmission Line Performance under Polluted Condition, Summer Power Meeting of the IEEE, 71 CP 650-PWR, 1971. 8.
2) 河村，伊坂，大平，森田「がいし表面温度のフラッシオーバ現象への影響」昭和 46 年電気学会全国大会論文集 931，1971. 3.
3) 河村，伊坂，大平「汚損がいしのフラッシオーバ電圧に影響する気象条件の測定」昭和 47 年電気学会全国大会論文集 940，1972. 3.
4) 河村，石井「汚損がいしのフラッシオーバ確率と漏れ電流との関連」昭和 48 年電気学会全国大会論文集 1096，1973. 4.
5) 河村，石井「放電確率を考慮した絶縁設計法」昭和 48 年電気四学会連合大会論文集 41，1973. 10.
6) 河村，石井「自然汚損懸垂がいしの漏れ抵抗とフラッシオーバとの関連」昭和 48 年電気関係学会関西支部連合大会論文集 G4-19，1973. 10.