

直線状背後電極を伴う誘電体表面の 沿面放電に対するバリア効果

西 敏 行*

Barrier Effect on Creeping Discharge along Dielectric Surface
with Linear Back Side Electrode

NISHI Toshiyuki*

Dielectric breakdown countermeasure in high voltage equipment is an important problem in the safety aspect. Creeping discharge which develops on the plane and the cylinder dielectric surface causes the dielectric breakdown phenomenon. It is necessary to clarify the creeping discharge phenomenon in order to prevent the accidents of dielectric breakdown in the equipment. However, there are many unsolved points in the characteristics of the creeping discharge. The characteristics of creeping discharge on the cylinder dielectric surface are different from those of the creeping discharge on the plane dielectric surface. The cylinder dielectrics are used for the distribution lines such as aerial insulated wires, etc. In high voltage aerial distribution lines, creeping discharges develop along the insulated wire surface from the free end of the binding wire, when lightning surges invade to the central line of wire.

In this paper, I report the characteristics of creeping discharge which develops along the cylinder dielectric surface with the barrier. It has been clarified that the blocking effect on the development of positive and negative creeping discharges.

キーワード：沿面放電、円筒誘電体、背後電極、バリア、雷インパルス

creeping discharge, cylinder dielectric, back side electrode, barrier, lightning impulse

1. まえがき

沿面放電は、高電圧機器における絶縁破壊事故防止、電極近傍の絶縁強度増大に関連して重要な研究課題である。沿面放電の発生、進展機構に関しては、これまでも様々な研究例^{(1)~(5)}が報告さ

れているが、未だに完全な解明には至っていない。その理由の一つとして、電圧の種類や極性、誘電体の形状や表面状態、背後電極の形状など沿面放電の進展に影響を及ぼす要因が多く、それらが互いに影響し合い放電現象を複雑化させていることが挙げられる。沿面放電の発生、進展により電極間がフラッシュオーバーすれば、機器の損傷、短絡電流による火災事故などの原因となる。そのため、沿面放電の発生過程の解明、進展阻止方法、進展長の抑制方法の確立は重要な課題である。これら

* 電気工学科

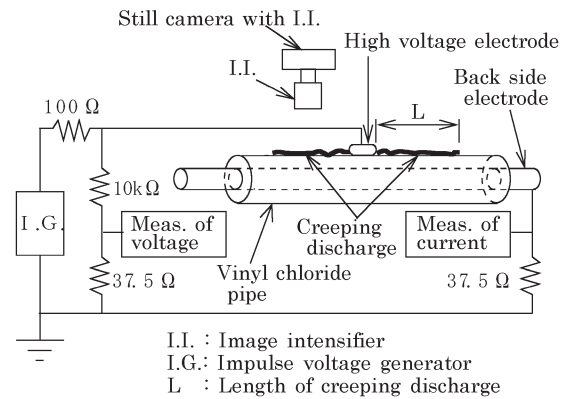
E-mail:nishi@toyama-nct.ac.jp

を成し遂げるためには、まず、各種条件下における沿面放電の進展長の特定、進展条件の明確化が必要となる。

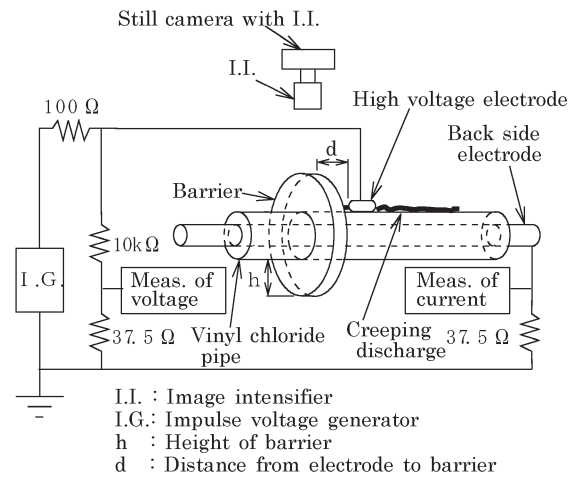
沿面放電の発生原因としては、高電圧側電極と接地側電極との間で、高電圧が常時印加されていること、あるいは、誘導雷などの異常電圧が短時間に高電圧機器に侵入すること、などが挙げられる。前者の場合、電圧の種類としては、交流、直流のどちらでも起こり得る。また、沿面放電の進展長は、数cm～数十cm程度が普通である。しかし、誘電体には常時電界が加わり、その表面には沿面放電が発生し続けることになる。それ故、誘電体は電界、沿面放電という電気的ストレスに長時間さらされるため、時間の経過とともに誘電体は劣化し、やがて誘電体の貫通破壊等が生じ短絡事故が発生する。この場合、絶縁破壊に至るまでの時間は、短い場合で数分～数時間、長い場合で数日～数ヶ月、あるいは数年かかることもあり得る。後者は、落雷時に高圧架空配電線に侵入した誘導雷サージが建造物等への引き込み線を通して高電圧機器内に侵入し、高電圧側電極と接地側電極を絶縁している誘電体表面に沿面放電が発生する場合である。この場合、接地側電極が沿面放電に対して背後電極とならなければ、沿面放電の進展長は数cm程度となる。しかし、背後電極となる場合は、十数～数十cmとなる場合があり、ときには数mにも及ぶ場合もある。この場合の絶縁破壊は、数 μ s程度の短時間で発生する。進展長が十数cm～数mに及ぶような沿面放電の場合、誘電体表面にバリアを設けることは、沿面放電の進展阻止、進展長抑制に対して有用である。

沿面放電が発生する誘電体形状としては、平板状誘電体が代表的であるが、円筒誘電体表面にも沿面放電が発生する。円筒誘電体は、引き込み線や機器内部の配線に使用されている電線の絶縁被覆に相当する。このような円筒誘電体表面に発生する沿面放電は、電線の心線が背後電極となるため、進展長が数十cm～数mにも及ぶことがある。

本研究においては、円筒誘電体を使用し、その表面にバリアを設けることにより、沿面放電の進



(a) 誘電体表面にバリアがない場合



(b) 誘電体表面にバリアがある場合

図1 実験回路

Fig.1. Experimental circuit.

展阻止、進展長抑制にどのような効果があるかを調べた。その結果、沿面放電の極性により進展阻止効果に著しい相違が現れることが判明したので報告する。

2. 実験方法

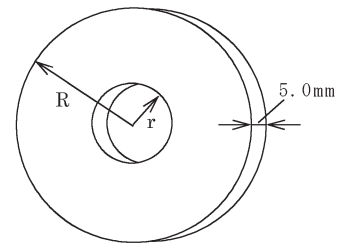
図1 (a), (b) は、実験回路を示す。(a) は、誘電体表面にバリアを設置しない場合であり、(b) は、バリアを設置した場合である。(a) において、インパルス電圧発生器(IG)により標準雷インパルス電圧を発生させ、円筒誘電体表面の高電圧側電極に印加した。このとき、印加電圧波高値(以後、 V_m と記す)を変化させ、

円筒誘電体表面を進展する沿面放電の進展長を測定した。沿面放電は、高電圧側電極の両端から左右両方向に進展する。進展長は、一方向の進展長を暗視装置付き静止カメラで測定して求めた。円筒誘電体として、長さ2.0m、外形2.6cm、内径2.0cm、比誘電率3.0の塩化ビニールパイプを使用した。背後電極として、仕上がり外径1.0cm、肉厚1.5mm、長さ2.5mのステンレスパイプを使用した。これを塩化ビニールパイプ内部に挿入し、放電電流波形観測用の抵抗 37.5Ω を通して接地した。(b)に示されるように、円筒誘電体表面にバリアを設置し、沿面放電に対する進展阻止効果を調べた。沿面放電は、高電圧側電極の両端から進展するが、バリアは、塩化ビニールパイプ上に1箇所のみ設置し、一方向の沿面放電の進展阻止状況を観測した。

図2は、図1(b)において塩化ビニールパイプに設置したバリアの形状を示す。バリアは、厚さ5.0mmのベニヤ板を半径2.3, 2.8, 3.3, 3.8, 4.3, 4.8, 5.3cmの円形に加工して製作した。この円板を塩化ビニールパイプの外径と同じ寸法(2.6cm)でくり抜き、塩化ビニールパイプを挿入してアクリル系接着剤で固定した。これにより、バリアの高さ h を塩化ビニールパイプ表面から $h=1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0$ cmまで変化させた。高電圧側電極からバリアまでの距離 d は、 $d=5.0$ cmに固定した。

図3は、インパルス電圧を印加する高電圧側電極の形状を示す。高電圧側電極は、長さ50.0mm、直径5.0mmの銅棒であり、塩化ビニールパイプ表面に軽く接している。また、電極の先端は、半径2.5mmの半球状に加工し、電極先端に電界が集中しないように工夫した。

実験に際して、高電圧側電極に $V_m=70$ および -70 kVの標準雷インパルス電圧を1回のみ印加した。今回の実験では、正極性および負極性沿面放電の進展長、進展様相およびバリアによる進展阻止状況をイメージインテンシファイヤ付き静止カメラで観測した。沿面放電の進展阻止状況は、10回の観測を行い、バリアによる正極性および負



$r=1.3$ cm
 $R=2.3, 2.8, 3.3, 3.8, 4.3, 4.8, 5.3$ cm

図2 バリアの形状

Fig.2. Shape of barrier.

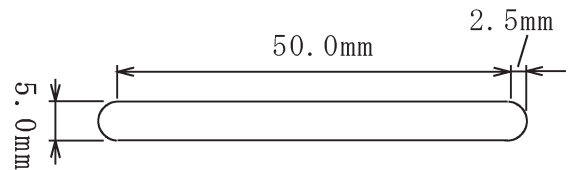


図3 高電圧側電極の形状

Fig.3. Shape of high voltage electrode.

極性沿面放電の進展阻止率を求めた。バリアにより沿面放電の進展が完全に阻止された、あるいは放電がバリアを乗り越えてはいるが、バリア近傍で進展を停止している場合を進展阻止可能なバリアの高さとした。また、放電電流波形は、デジタルオシロスコープで観測した。実験室は空調を行い、気温約 20°C 、湿度約40%に保ち実験条件を統一した。塩化ビニールパイプ表面に沿面放電が進展した後は、表面をアースし、電荷を除去して残留電荷の影響を排除した。なお、図1(a), (b)の回路図より、高電圧側電極に印加するインパルス電圧の極性と塩化ビニールパイプ上を進展する沿面放電の極性は同一となる。

3. 実験結果および考察

3.1 沿面放電の進展長特性 (バリアがない場合)

図4は、塩化ビニールパイプ上にバリアがない場合における正極性および負極性沿面放電の V_m と沿面放電進展長 L の関係を示す。グラフ上のプロットは、10回の測定の平均値を示す。正極性および負極性沿面放電の進展長 L は、 V_m の上昇とともに単調に増加していることがわかる。これらの進展長特性については、前報⁽⁶⁾で詳細に報告

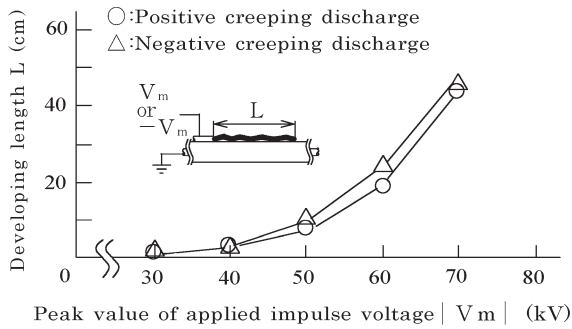


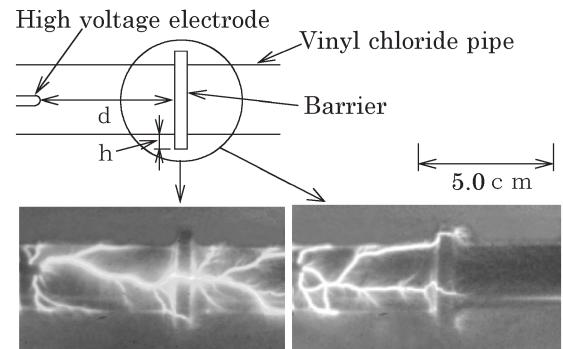
図4 印加電圧波高値—沿面放電進展長特性

Fig.4. Relation between length of creeping discharge and peak value of applied impulse voltage.

しているため、ここでは、進展長特性を示すに留める。

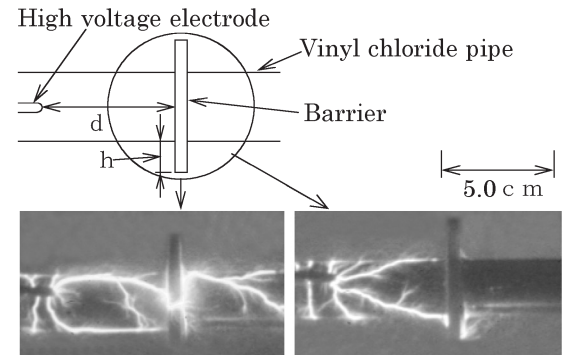
3.2 沿面放電に対するバリア効果

(a) 正極性沿面放電 図5(a)~(d)はそれぞれ、塩化ビニールパイプ上にバリアが存在する場合における正極性沿面放電の典型的な進展様相を示す。これらは、バリアの高さ $h=1.0, 2.0, 3.0, 4.0$ cm の場合である。また、 $V_m=70$ kV であり、高電圧側電極からバリアまでの距離 d は、 $d=5.0$ cm である。(a-1)より、バリアの高さ $h=1.0$ cm において、正極性沿面放電は、バリアを乗り越え、塩化ビニールパイプ上をさらに進展していることがわかる。また、(a-2)より、正極性沿面放電は、バリアをわずかに乗り越えているが、バリア部分で進展を阻止されていることがわかる。観測の結果、バリアの高さ $h=1.0$ cm では、正極性沿面放電において、バリアにより進展阻止可能な場合と不可能な場合が得られた。 $h=1.0$ cm における進展阻止率は20%であった。(b-1)より、バリアの高さ $h=2.0$ cm では、正極性沿面放電はバリアを乗り越え、塩化ビニールパイプ上をさらに進展していることがわかる。(b-2)より、正極性沿面放電は、バリアをわずかに乗り越えているが、バリア部分で進展を阻止されていることがわかる。観測の結果、バリアの高さ $h=2.0$ cm においても正極性



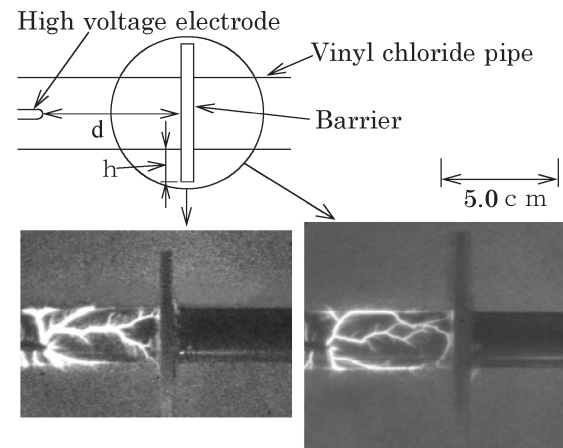
(a-1) (a-2)

(a) $h=1.0$ cm



(b-1) (b-2)

(b) $h=2.0$ cm



(c) $h=3.0$ cm (d) $h=4.0$ cm

図5 正極性沿面放電の進展様相
(バリアがある場合、 $V_m=70$ kV、 $d=5.0$ cm)

Fig.5. Typical aspects of positive creeping discharge with a barrier.

沿面放電において、バリアにより進展阻止可能な

場合と不可能な場合が得られた。しかし、進展阻止率は90%に増加した。(c)は、バリアの高さ $h = 3.0 \text{ cm}$ の場合である。同図より、正極性沿面放電は、バリアにより進展を阻止されていることがわかる。観測の結果、 $h = 3.0 \text{ cm}$ における進展阻止率は100%であり、バリアを乗り越える場合は観測されなかった。図(d)は、バリアの高さ $h = 4.0 \text{ cm}$ の場合である。同図より、正極性沿面放電は、バリアにより進展を阻止されていることがわかる。観測の結果、 $h = 4.0 \text{ cm}$ における進展阻止率は100%であり、バリアを乗り越えて進展する場合は観測されなかった。これより、正極性沿面放電の進展を阻止するためには、バリアの高さ h は、少なくとも $h \geq 3.0 \text{ cm}$ 必要であると思われる。これまでの研究⁽⁶⁾により正極性沿面放電は、円筒誘電体表面をジャンプしながら進展することが既に判明している。この場合、ジャンプの高さは、電線表面から約 1 cm 程度であるため、進展を完全に阻止するために必要なバリアの高さ h は、ジャンプの高さの約3倍であると推察される。

(b) 負極性沿面放電 図6(a)~(d)はそれぞれ、塩化ビニールパイプ上にバリアが存在する場合における負極性沿面放電の典型的な進展様相を示す。これらは、バリアの高さ $h = 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 \text{ cm}$ の場合である。また、 $V_m = -70 \text{ kV}$ であり、高電圧側電極からバリアまでの距離 d は、 $d = 5.0 \text{ cm}$ である。(a-1)より、バリアの高さ $h = 1.0 \text{ cm}$ において、負極性沿面放電は、バリアを乗り越え、塩化ビニールパイプ上をさらに進展していることがわかる。(a-2)より、負極性沿面放電は、バリアをわずかに乗り越えてはいるが、バリア部分で進展を阻止されていることがわかる。観測の結果、バリアの高さ $h = 1.0 \text{ cm}$ では、負極性沿面放電において、バリアにより進展阻止可能な場合と不可能な場合が得られた。 $h = 1.0 \text{ cm}$ における進展阻止率は80%であった。同じバリアの高さにおける正極性沿面放電の進展阻止率が20%であることと比較すると、負極性沿面放電の方がバリアによる進展阻止効果が高いと

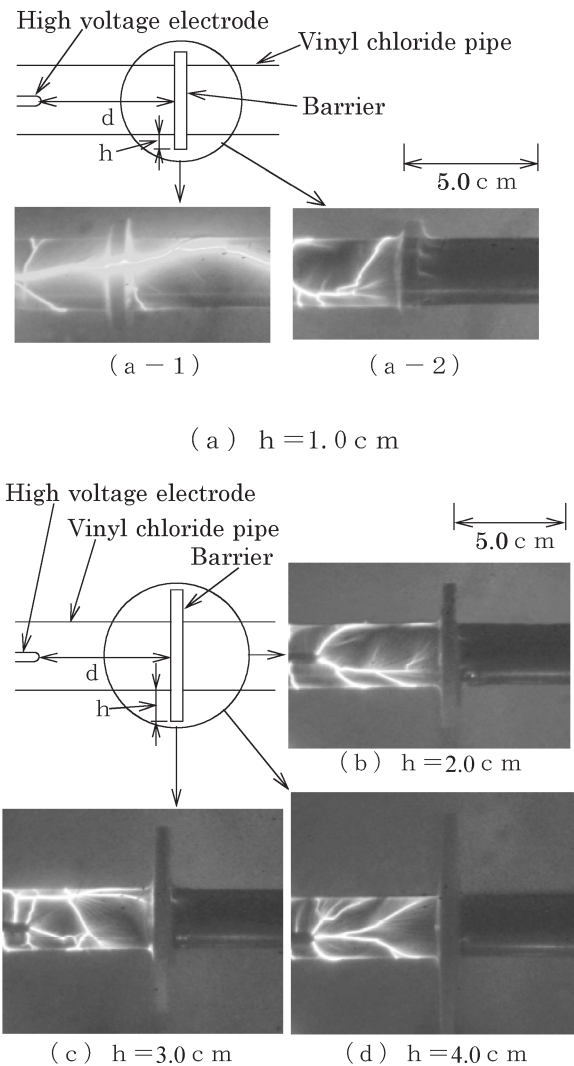


図6 負極性沿面放電の進展様相
(バリアがある場合、 $V_m = -70 \text{ kV}$ 、 $d = 5.0 \text{ cm}$)

Fig.6. Typical aspects of negative creeping discharge with a barrier.

言える。(b)~(d)より、負極性沿面放電は、バリアによって進展を阻止されていることがわかる。観測の結果、バリアの高さ $h = 2.0 \sim 4.0 \text{ cm}$ では、バリアによる負極性沿面放電の進展阻止率は100%であった。この結果からも、負極性沿面放電の方が正極性沿面放電よりもバリアに対する進展阻止効果が高いことがわかる。これは、正極性沿面放電が塩化ビニールパイプ上をジャンプしながら進展していくのに対して、負極性沿面放電は、密着しながら進展していく⁽⁶⁾ためであると思

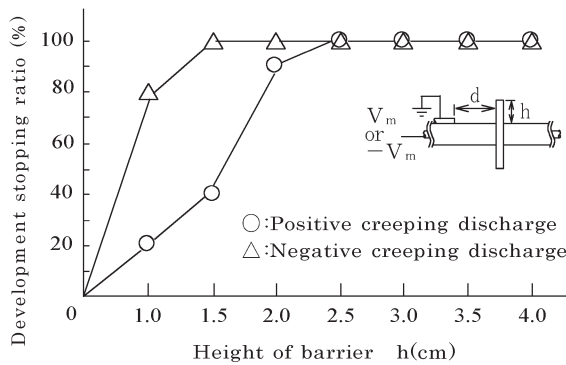


図7 バリアの高さ h と沿面放電進展阻止率の関係

($V_m = 70$ および -70 kV、 $d = 5.0$ cm)

Fig.7. Relation between development stopping ratio and height of barrier.

われる。

図7は、正極性および負極性沿面放電におけるバリアの高さ h と沿面放電進展阻止率の関係を示す。高電圧側電極からバリアまでの距離 d は、 $d = 5.0$ cm であり、 $V_m = 70$ および -70 kV である。正極性沿面放電では、バリアの高さ $h \geq 2.5$ cm において、進展が完全に阻止される。一方、負極性沿面放電では、バリアの高さ $h \geq 1.5$ cm において、進展が完全に阻止されることがわかる。これらより、沿面放電に対しては、安全性を考慮して、バリアの高さ $h \geq 3.0$ cm とすれば、放電の進展阻止に対して有用であると言える。

4. 結論

円筒誘電体表面に発生する沿面放電現象を実験室レベルで再現し、誘電体表面に設けたバリアによる進展阻止効果を調べた。実験では、インパルス電圧発生器によって波高値70および-70 kVの標準雷インパルス電圧を発生させ、円筒誘電体上の高電圧側電極に印加した。このとき、高電圧側電極先端から進展する正極性および負極性沿面放電の進展長、進展様相および進展阻止に対するバリア効果を観測し検討した。その結果、以下のような新しい知見が得られた。

(1) 正極性沿面放電

- ・印加電圧波高値70 kVにおいて、バリアによる進展阻止効果は、負極性沿面放電よりも小さい。
- ・バリアの高さが2.5 cm以上で有効な進展阻止効果が得られる。

(2) 負極性沿面放電

- ・印加電圧波高値-70 kVにおいて、バリアによる進展阻止効果は、正極性沿面放電より高い。
- ・バリアの高さが1.5 cm以上で有効な進展阻止効果が得られる。

(3) 沿面放電の進展阻止に対しては、放電の極性によらず安全性を考慮してバリアの高さを3.0 cm以上とすれば進展阻止に対して有用である。

終わりに、本研究の一部は日本学術振興会科研費の補助を受けて行われたことを記し謝意を表す。

文 献

- (1) 嶋崎俊行・常安 暢・赤崎正則：「大気中正インパルス電圧印加時におけるアクリル樹脂板の沿面フラッシュオーバー過程」, 電気学会論文誌A, 102巻, 4号, pp. 219-226 (1982)
- (2) 嶋崎俊行・常安 暢・赤崎正則：「大気中負インパルス電圧印加時における絶縁板の沿面フラッシュオーバー機構」, 電気学会論文誌A, 105巻, 2号, pp. 71-78 (1985)
- (3) 伊藤泰朗・富永 明・宮内秀幸・M. S. A. A. Hammam・杉沼義隆：「ピンがいしに把持された絶縁電線の放電特性」, 電気学会論文誌B, 103巻, 8号, pp. 561-567 (1983)
- (4) 高橋 勉・金田輝男・杉沼義隆：「絶縁細線上の沿面ストリーマの進展」, 電気学会論文誌A, 113巻, 7号, pp. 503-510 (1993)
- (5) T.Nishi, R.Hanaoka, R.Ishibashi and T.Korin : "Impulse Creeping Discharge Phenomena at Insulator Supporting Point of Aerial Insulated Wire", CEIDP, Annual Report, pp.586-591 (1993)
- (6) 西 敏行：「円柱状背後電極を伴う円筒誘電体表面の沿面放電に関する進展基本特性」, 富山工業高等専門学校紀要, 41巻, pp. 15-20 (2007)

(2007. 12. 28 受理)