

流動帶電에 의한 絶緣油中の 靜電氣 放電機構와 對策에 관한 研究

A Study on the Mechanism and Countermeasure of Electrostatic Discharge in Insulating Oil by Streaming Electrification

박광현* · 임헌찬** · 김두식*** · 황명환**** · 육재호***** · 이덕출*****
K·H·Park · H·C·Lim · D·S·Kim · M·W·Hwang · J·H·Yuk · D·C·Lee

ABSTRACT

In this paper, it is studied the electrostatic discharge in insulating oil for the purpose of the technical control of the streaming electrification resulted from the interface between an insulating liquid and a solid.

The streaming current increases exponentially with flow rate and in region of lower than 50[°C] but decreases at higher than the same temperature. The phenomena of electrostatic discharge appear at an interface between measuring tank and insulating oil when the seven sheets of gauzes are inserted in electrification apparatus. And those of partial or surface discharge are shown when eight sheets are inserted.

1. 서 론

석유, 실리콘유, 광유 등과 같은 절연성이 좋은

액체는 유동할 때 액체내에 전하의 축적이 일어나 대전하게 되고 이 유동대전에 의해 정전기 재해가 발생한다¹⁾. 유동대전은 절연액체와 고체계면과의 접촉에 의한 전기이중층의 형성, 액체의 유

* 삼척산업대학 전기공학과
** 대구공업전문대학 전기과
*** 전북산업대학 전기공학과
**** 인천대학교 산업안전공학과
***** 인하대학교 전기공학과

동에 의한 전하분리 및 전하의 완하등 세가지 현상이 동시에 일어나 발생하는 현상이다. 유동대전 현상에 관한 연구는 19세기 후반에 Quinkes, Lipman 및 Helmholtz에 의해 시작되었고, 20세기에 Gouy, Chapman등이 확산 이중층 이론을 제시하였으며 Stern, Grahame등은 확산 이중층 이론으로 대전현상을 분석하였다.^{1),2)} Schön³⁾은 파이프벽 계면에서의 액체-고체 상호관계가 전하의 분리에 기초가 되는 전류원으로 생각하여 유동전류와 파이프 길이의 관계를 연구하였다. 최근에는 일본의 S. Watanabe, A. Ohashi⁴⁾ 등이 세관에서의 유동대전 현상, 전기이중층 전위집진기등에 대해 연구를 진행하고 있으며, 히다찌 연구소의 M. Higaki⁵⁾, H. Miyao등은 절연유-절연지 계면에서 대전현상에 의해 발생된 대전 전하의 전위분포 계산 및 제전 방법에 관한 연구결과를 발표한 바 있다. 유동대전 현상에 의한 재해로써, 석유화학공업에서 기름의 수송, 저장등 절연성이 좋은 석유등이 송유관 및 오일필터를 통하여 저장탱크로 송유될 때, 탱크내에 다량의 전하 축적이 일어나고 유면전위 및 전계가 상당히 증가하기 때문에 저장탱크내의 구조물과 대전유 사이에 불꽃방전이 발생, 주위의 폭발성 혼합기체에 착화되어 폭발을 일으켜 산업 재해를 유발하는 경우가 있다.⁶⁾

최근 송전전압의 상승추세로 전력용 변압기도 대용량, 고전압화로 되어가고 있으며, 이를 위하여 냉각효과의 증대 및 절연물의 절연성능 향상에 관심이 집중되고 있다. 특히 냉각효과의 증대방안으로 변압기유를 강제순환시키고 있으며 이로 인하여 유동전류가 커지고, 국부적으로 큰 전위차가 발생하게 되어, 코로나 방전 혹은 연면 방전을 일으키게 되고 이것이 원인으로 변압기의 폭발사고등 재해가 보고되고 있다.^{7),8)}

본 연구에서는 대용량 변압기에서 절연유가 강제순환하는 계통을 모델화하여 유동대전에 의한 절연유 중의 정전기 방전이 발생하는 조건등을 실험을 통하여 분석함으로써, 정전기에 의한 기기파손 및 폭발사고 원인의 규명과 아울러 정전기 방전의 소멸대책을 위한 정보를 제공하고자 한다.

2. 실험

절연유중의 정전기 방전현상을 고찰하기 위하

여 강제순환 냉각식 대용량 변압기를 모델로 제작한 실험장치 개략도를 Fig. 1에 나타낸다.

본 실험에서는 정전기 발생량을 증가시키기 위해 대전장치에 가재(gauze)를 삽입하여 유량, 유온 및 가재의 장수가 유동대전에 미치는 영향을 조사하였다. 이 결과를 토대로 유동전류가 가장 크게 나타나는 조건하에서 완화탱크와 대전관 내에서의 정전기 방전현상을 관찰하고 고찰하는 것으로 한다.

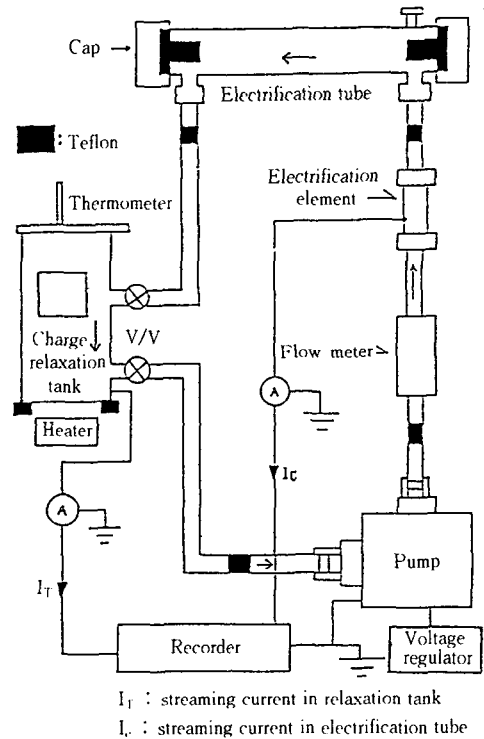


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

3. 실험결과 및 고찰

3.1 유동전류 특성

대전장치내 가재장수를 2, 5 및 8 장을 각각 삽입하고 변압기유를 강제순환시켰을 때, 시간 경과에 대한 유동전류 특성을 Fig. 2에 나타낸다.

펌프의 가동초기에는 유동전류가 크게 나타나지만, 시간이 경과함에 따라 감소하면서 30분 이후부터는 거의 일정한 현상이 관측되었다. 이 현상은 펌프 가동초기에 변압기유의 흐름이 불안정한 과도

기적인 현상이라 볼 수 있으며, 이하의 실험에서는 시료유의 유동전류가 정상상태에 도달하는 약 30분 정도의 시간경과 한 후 실험값을 택하기로 한다.

대전장치 및 완화탱크에서의 정전기 방전현상에 의한 방전횟수도 Fig. 3 과 같이 적어지고 유동전류

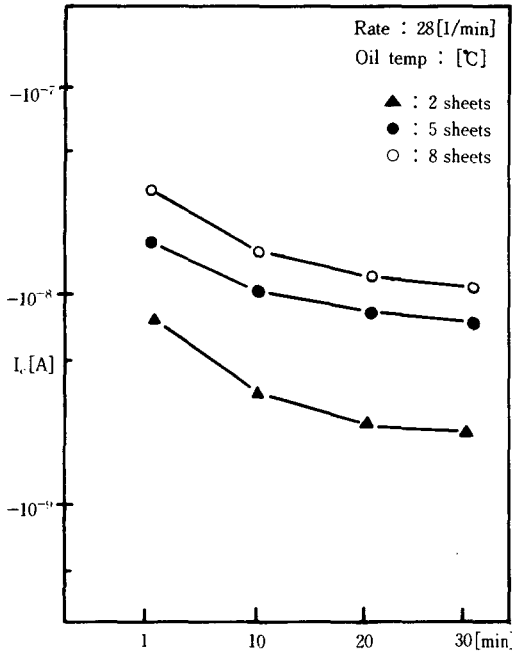


Fig. 2 Characteristic of streaming currents with time

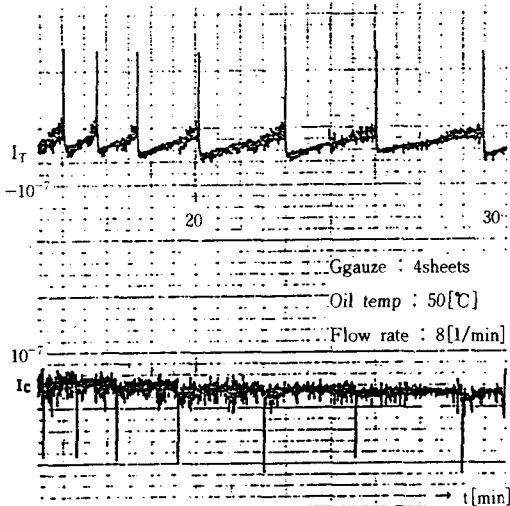


Fig. 3 The number of discharges with the lapse of time

가 감소하는 현상과 잘 일치하므로 측정상의 오차가 없음을 확인할 수 있었다. 또, 가제의 장수가 많아질수록 유동전류값이 커짐을 알 수 있다.

3.2 유속 의존성

절연유의 유속변화에 대한 대전장치에서의 유동전류(I_c)와 완화탱크에서의 유동전류(I_s)를 Fig. 4에 도시한다.

유동전류는 I_s 가 I_c 보다 약간 큰 값을 보이고 있으며, 유속이 증가함에 따라 I_c 및 I_s 는 지수함수적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 이것은 유량의 증가로 접촉면적이 증대하여 유동전류 특성인 전하이중층의 형성, 분리 및 전하완화 현상의 반복이 많아지고 생성된 전하가 외부로 완화되는 전하량이 증가하기 때문으로 생각된다. 그리고 관의 직경이 일정한 파이프에 액체가 통과할 때 파이프로부터 액체로 향하여 흐르는 전류밀도 J_a 라 하면, 유동전류(I_c)는 Schön의 이론에 의하여 다음과 같이 쓸 수 있다.⁹⁾

$$I_c = 2\pi Rv\tau j_a \{1 - \exp(-x/\tau v)\} \quad (1)$$

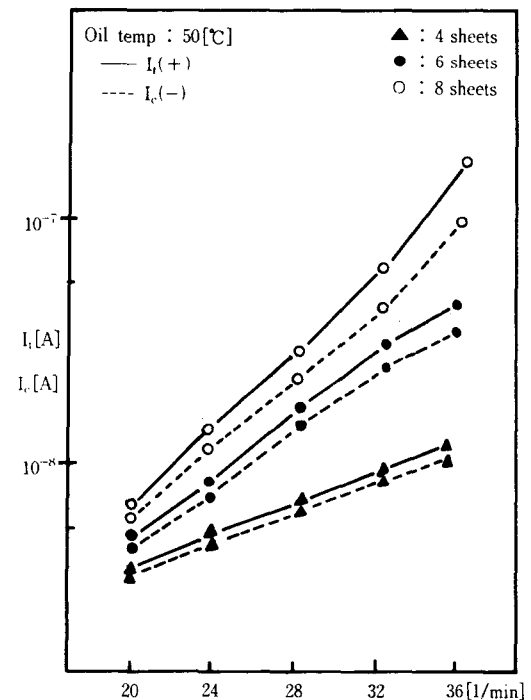


Fig. 4 Dependence of streaming current with flow rate

단, R : 파이프 반경, v : 액체의 평균유속, τ : 액체의 전하완화정수, x : 파이프 길이이다. 식 (1)에서 유동전류에 미치는 가장 중요한 요소인 액체의 속도는 Schön에 의하면 I_c 는 거의 $v^{1.6} \sim ^2$ 승에 비례한다는 보고가 있으며⁹⁾, 본 실험결과와 대체적으로 잘 일치 하고 있다.

3.3 유온 의존성

대전장치를 통과하는 변압기유의 온도(유온)을 변화시키면서 관측되는 유동전류의 특성을 그림 5에 나타낸다. 유동전류는 50[°C] 부근까지 증가하다가 급격히 감소하는 특이한 반전(反轉)현상이 관측되었다. 유동전류의 증가영역(50[°C]이하 영역)에서는 절연유의 이동도와 도전율이 다소 증가하므로 액체측에서 파이프로의 전하완화가 유동전류의 증가로 나타나지만, 감소영역(50[°C]이상 영역)에서는 절연유의 전하축적이 어려울 정도로 이동도와 도전율이 급격히 증가하므로 전하완화시간이 극히 짧아지게 되어 유동전류가 감소하는 것으로 사료된다.

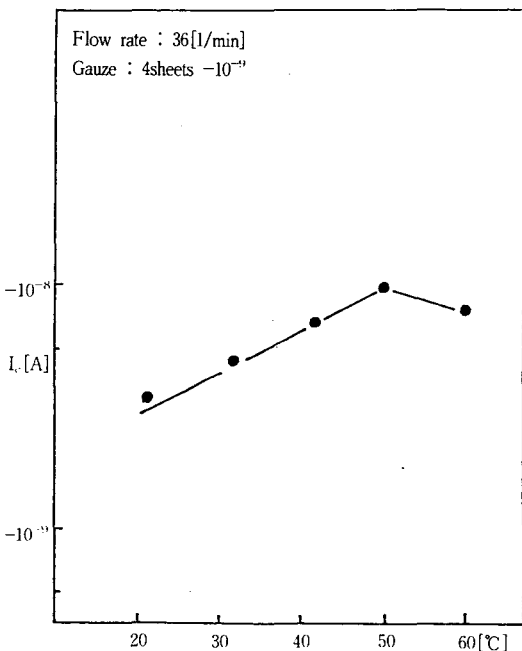


Fig. 5 Dependence of streaming current with flow rate

3.4 가제(gauze)수 의존성

액체의 흐름은 유동전류에 큰 영향을 미치는 요소이다. 유속을 증대시키기 위하여 대용량의 펌프를 사용하면 변압기유의 압력이 높아져 시료유가 파이프간의 접촉부에서 누설될 우려가 있다. 본 실험에서는 Fig. 6 과 같이 대전장치 내의 입구쪽에 가제 1~10장까지 삽입하는 것이 제한 장수이었고, 이와 같이 가제장수를 증가시켜 변압기유와의 접촉면적을 크게 하여 Fig. 7의 전하발생 기구해석과 같이 가제에는 부이온을 흡착, 변압기에는 정이온으로 전하를 분리시켜 대전량을 증가시키는 방법으로 유동전류를 크게 하였다.

Fig. 8은 가제 장수에 의한 완화탱크에서의 유동전류(I_s)를 측정된 것으로 가제를 8장까지 삽입하였을 때는 지수함수적으로 증가하면서, 그 이상에서는 감소하는 현상이 나타난다. 8장 이하에서의 증가현상은 가제 장수가 증가함에 따라 변압기유와 가제와의 접촉면적이 증대되어 완화탱크 내의 전하가 많이 축적되므로 전류치가 크게 나타나고, 가제장수 10장에서는 가제의 과다 삽입으로 인해 유량의 유입이 급격히 감소하고, 전하의 생성 및 전하의 완화량이 감소하게 되어 전류치가 작게 나타나는 것으로 추정된다.

또, 방전관 양측에 테프론 캡을 사용하였을 경우, 외부로 누설되는 전하량이 적게 되므로 무삽입시보다 유동전류가 다소 증가됨을 확인 할 수 있다

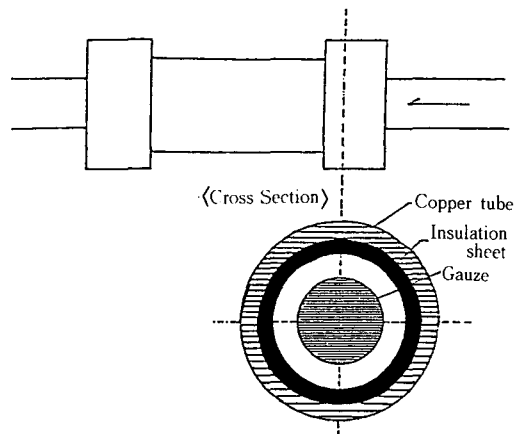


Fig. 6 Schematic diagram of electrification apparatus

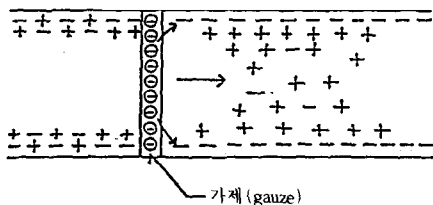


Fig. 7 Model of charge separation by gauze

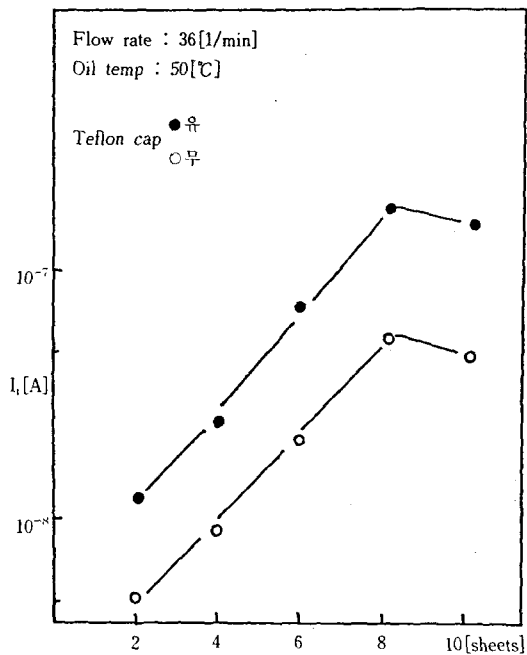
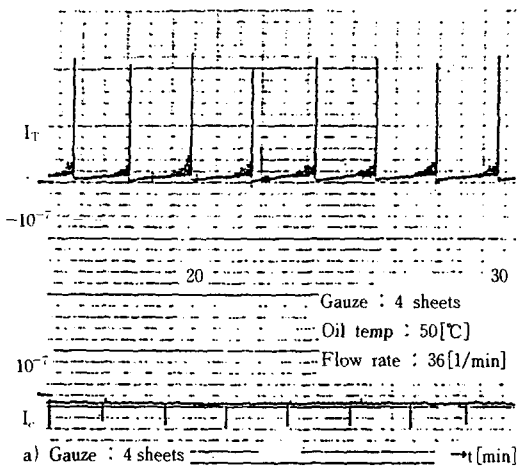
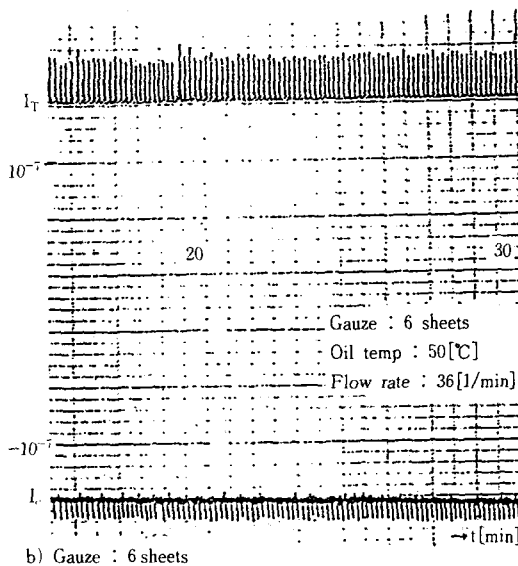


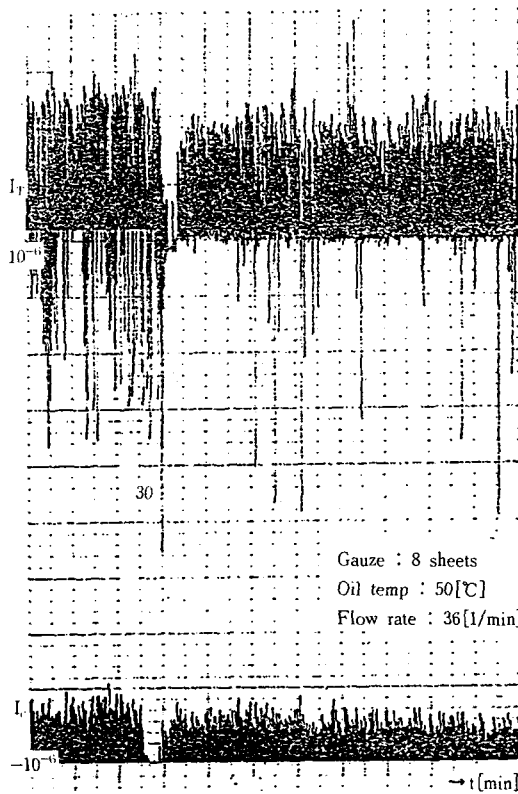
Fig. 8 Streaming current in relaxation tank with sheets of gauzes



a) Gauze : 4 sheets



b) Gauze : 6 sheets



c) Gauze : 8 sheets

Fig. 9 Characteristics of discharge with sheets of gauzes

3.5 정전기 방전특성

이상의 실험결과를 토대로 유동전류가 가장 크게 나타나는 조건(유량 : 36[l/min], 유온 : 50 [°C])을 일정하게 유지시키고, 가제장수 변화에 대한 시간경과에 따른 정전기 방전현상 측정을 Fig. 9에 나타낸다.

가제 7장까지는 유동전류가 1×10^{-7} [A] 이하이며 대전관 내에서 방전현상을 육안으로 관찰할 수 없었으나, 8 장에서는 유동전류가 3×10^{-7} [A] 이상의 높은 값이 나타나 대전관 내부에서도 절연유와 절연지 계면에서 큰 전위차를 발생하게 되어 유중 정전기 방전현상을 관찰할 수 있었다. Fig. 9(c)에서 30분정도 경과시 유동전류가 큰 값을 나타내는 영역은 유중 정전기 방전현상이 크게 발생한 부분으로, 이 방전에 의해 전하가 다량 소실되는 것을 추정할 수 있으며, 다음 순간 유동전류가 거의 나타나지 않는 현상으로 부터 확인될 수 있다.

4. 결 론

절연유가 대전장치를 통과할 때 발생하는 전하에 의한 유중 정전기 방전현상을 조사하기 위하여 유속, 유온 및 대전장치 내의 가제 장수 변화에 따른 유동전류를 측정하였다. 이상의 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 냉각을 목적으로 설치한 강제 순환용 펌프가 기동시, 가장 큰 유동전류가 흐르며, 시간경과와 함께 감소하면서 약 30분 이후부터 일정한 유동전류가 흐른다.
- 2) 유동전류는 유속의 증가와 함께 지수함수적으로 증가한다.
- 3) 유동전류는 유온 50[°C] 이하 영역에서는 증가하고, 그 온도이상 영역에서는 감소하는 반전(反轉)현상이 나타난다.
- 4) 유량(36[l/min])과 유온(50[°C])을 일정하게 유지하고, 대전장치내의 가제의 장수 1~7장까지 삽입시, 유동전류가 약 1×10^{-7} [A]가 되어 완화탱크와 변압기유면에서 방전이 일어나고, 8 장에서는 약 3×10^{-7} [A]의 큰 값이

되어 대전관에서도 절연유와 절연지계면에서 발생하는 유중 정전기 방전현상을 관찰하였다.

본 연구의 결과로부터 실제의 대용량 변압기에서 변압기유의 온도와 유속변화등 특수 조건하에서는 변압기유의 유동대전에 의한 유중에서 방전이 일어나 파손 및 폭발등 정전기 재해가 발생할 가능성을 제시 할 수 있으며, 현재 이의 방지 대책으로 유중 전하의 제거를 위한 연구를 수행하고 있는 중이다.

본 연구는 학술진흥재단 지방대학 육성 연구비 지원에 의하여 수행되었음을 밝히고 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 靜電氣學會編, 靜電氣ハンドブック, pp. 101~106, pp.888, 1981.
- 2) J. A. Cross, Electrostatics, pp. 64~69, 1987.
- 3) G. Schön, Chem. Ing. Techn., Vol.34, 1962.
- 4) 大矯朝夫, 液體の靜電氣現象と應用, 靜電氣學會誌, 13, No.3, pp. 239~245, 1989.
- 5) M. Higaki 外1, A Calculation of potential distribution caused by static electrification owing to oil flow in a oil-paper insulation system and It's application to partial discharge phenomena in oil, IEEE, Vol. PAS-98, No.4, 1979.
- 6) 村崎憲雄, 靜電氣障災害對策ハンドブック(上), マグロウヒル 好學社, pp. 108~113, 1977.
- 7) 大久保仁 外1, 油中絶縁における破壊と空間電荷, 靜電氣學會誌, Vol.14. No.1, pp. 16~24, 1990.
- 8) 田中俊秀 外3, Model approach to static electrification phenomena by oil flow in large power transformer, 靜電氣學會, Vol.3. No.5, pp. 274~282, 1979.
- 9) 有本匡男, イオン吸着モデルによる流動帶電現象の解析, 1982.