UDC 537.213:537.222:621.315.616:536.5

論文

61-A30

温度こう配熱刺激表面電位による絶縁体中 Zero-Field Plane の位置測定

正員 加藤 景三 (東工大)

正員 岩本 光正 (東工大)

正員 日野 太郎 (東工大)

1. ま え が き

絶縁体中には、双極子、トラップキャリア（電子、正孔）、可動イオンなどの種々の荷電粒子が存在している。このうちトラップキャリアや可動イオンは、絶縁体中に空間電荷を形成することから、絶縁材料の電気伝導や絶縁破壊などの特性に大きな影響を及ぼすことはよく知られている。特に最近の絶縁機器の使用電圧の上昇に伴い、絶縁材料への電荷注入が生じ、形成される空間電荷が注目されている。

著者らはいままで、この空間電荷に関する情報を得る手段として、絶縁体試料内に一定の温度こう配を人為的に設けて昇温する熱刺激測定（温度こう配熱刺激測定）を提案してきた。そして、実際に通常の熱刺激測定では不可能であった絶縁体中に注入トラップされたキャリアあるいはイオン空間電荷分極を形成する可動イオンの極性判定を行なった⁽¹⁾⁽²⁾。ところで、この方法は空間的に異なった温度条件を与えるので、試料内の空間電荷分布についての情報が得られる可能性がある。その中で今回は、絶縁体中に注入トラップされたキャリアにより形成される空間電荷電界が零となる面、すなわち Zero-field plane の位置を求めることを検討したので報告を行なう。そして、実際に低密度ポリエチレンを試料として試料内の空間電荷電界も

求めた。なお、Zero-field plane は Lindmayer 氏⁽³⁾によって導入されたもので、絶縁体中で解放されたトラップキャリアの輸送に重要な役割を果たすものである。しかしながら、この位置を直接に実験的に求めたという報告はない。

また、絶縁体中の空間電荷分布測定は重要な問題であり、圧縮波法⁽⁴⁾、電子ビーム法⁽⁵⁾、熱パルス法⁽⁶⁾などが開発され、分布を直接に求める方法として検討されている。しかし、現状ではいずれも複雑な装置を必要とし、試料の厚さなどにも限界があるようである。これに対して、本測定法は Zero-field plane を直接に求める方法であり、試料内の電界分布を直接に評価することが可能である。また、例えば実用の電気機器のケーブル絶縁のように厚い試料の熱刺激測定では、昇温時に試料内に温度こう配が付くのが常である。しかし、このような肉厚の試料に対しては、本測定法のように温度こう配を設定すれば熱刺激測定が容易となる。

2. 表面電位による Zero-field plane の位置の測定法

絶縁体中に注入トラップされたキャリアが熱によって解放され輸送される過程には、熱励起による律速と電界によるドリフトでの律速とが考えられる⁽⁷⁾。本論文で用いた低密度ポリエチレンでは前者の過程が観測されており⁽⁷⁾、ここではこの場合について述べることにする。すなわち以下の解析では、トラップより解放されたキャリアの輸送が熱励起で律速されるので、励起されたキャリアは再トラップされることなく速やかに試料内に形成された電界に沿って電極に達し、そこで電極電荷と再結合するものと仮定する。なお、本論文での測定は表面電位によって行なわれた。

Measurement of the Position of Zero-field Plane of Space Charge Field in Insulators by Temperature Gradient Thermally Stimulated Surface Potential. By Keizo Kato, Member, Mitsumasa Iwamoto, Member (Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology) & Taro Hino, Member (Department of Physical Electronics, Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology).

加藤景三：正員，東京工業大学工学部電気・電子工学科
岩本光正：正員，東京工業大学工学部電気・電子工学科
日野太郎：正員，東京工業大学工学部電子物理工学科

〈2・1〉 解析 厚さ d の絶縁体試料に、バイアス電圧 V_0 を印加することにより一種の電荷、すなわち電子が注入トラップされたとする（正孔であっても解析は同じ）。この過剰電子を低温で凍結し、電極 1 に初期電位（コレクティング電位） V_c を印加したときの電位分布を図 1 に示す。同図に見られるように、絶縁体試料内に Zero-field plane x^* がただ一つだけ存在している。このとき、電極 1 での表面電位 $V_s(t)$ は次式で表わされる⁽⁸⁾。

$$V_s(t) = -\frac{1}{\varepsilon} \int_0^{x^*} x \rho_t(x, t) dx + \frac{1}{\varepsilon} \int_{x^*}^d (d-x) \rho_t(x, t) dx \quad \dots (1)$$

ただし、 ε ：試料の誘電率、 $\rho_t(x, t)$ ：トラップ電荷密度

上述したように、トラップキャリアは熱励起律速により輸送されるとすると、トラップ電荷密度 $\rho_t(x, t)$ は次式で与えられる。

$$\rho_t(x, t) = \rho_t(x, 0) \exp \left\{ -\int_0^t e_n dt \right\} \dots \dots (2)$$

ここで、 e_n はトラップキャリアの励起速度で、深さ H_t の単一トラップとすれば、 ν をトラップキャリアの離脱周波数、 k をボルツマン定数として次のようになる。

$$e_n(x, T(x)) = \nu \exp \left\{ -\frac{H_t}{kT(x)} \right\} \dots \dots (3)$$

上の(3)式では、試料内に図 1 のような温度こう配 $T(x)$ があるものとして、温度 T が試料内の位置 x の関数として示されており、

$$T(x) = T_2 + (d-x) \Delta T / d \dots \dots (4)$$

$$(\Delta T = T_1 - T_2)$$

となる。ただし、 T_1 、 T_2 はそれぞれ電極 1、電極 2

図 1 トラップ電子による電位分布と試料内の温度こう配

Fig. 1. Potential distribution due to trapped electrons and temperature gradient in the specimen.

の温度で、 ΔT は両電極間の温度差を示している。

従って、表面電位 $V_s(t)$ は熱励起律速のもとでは一般に次式で表わされる。

$$V_s(t) = -\frac{1}{\varepsilon} \int_0^{x^*} x \rho_t(x, 0) \times \exp \left\{ -\int_0^t e_n(x, T(x)) dt \right\} dx + \frac{1}{\varepsilon} \int_{x^*}^d (d-x) \rho_t(x, 0) \times \exp \left\{ -\int_0^t e_n(x, T(x)) dt \right\} dx \quad \dots \dots (5)$$

表面電位測定では電荷の解放が熱励起によって行なわれるものとする、温度こう配がある場合であっても測定中 Zero-field plane の位置 x^* は移動せず、測定時に印加するコレクティング電位 V_c によって定まる⁽⁸⁾。すなわち、コレクティング電位 V_c と x^* との間には 1 対 1 の対応関係がある。従って、 x^* と V_c との関係が求められると試料内の電界分布が定められることになる。

ここで図 2 のように、コレクティング電位 $V_c = V_{c1}$ と $V_c = V_{c2}$ のときの Zero-field plane の位置をそれぞれ x_{c1}^* 、 x_{c2}^* とおき、(5) 式に代入してその両者の表面電位の差 $\Delta V_s(t)$ を求めると、

$$\Delta V_s(t) = V_s(t)|_{V_c=V_{c2}} - V_s(t)|_{V_c=V_{c1}} = \frac{d}{\varepsilon} \int_{x_{c2}^*}^{x_{c1}^*} \rho_t(x, 0) \times \exp \left\{ -\int_0^t e_n(x, T(x)) dt \right\} dx \quad \dots \dots (6)$$

図 2 電位分布と電荷分布

Fig. 2. Potential distribution and charge distribution.

となる。(6)式において $V_c = V_{c1}$ における微分係数を求めてみると、

$$\begin{aligned} & \left. \frac{dV_s(t)}{dV_c} \right|_{V_c=V_{c1}} \\ &= \lim_{V_{c2} \rightarrow V_{c1}} \frac{1}{V_{c2} - V_{c1}} \left[\frac{d}{\varepsilon} \int_{x_{c1}^*}^{x_{c2}^*} \rho_t(x, 0) \right. \\ & \quad \times \exp \left\{ - \int_0^t e_n(x, T(x)) dt \right\} dx \Big] \quad (7) \end{aligned}$$

(7)式において、 $V_{c2} \rightarrow V_{c1}$ のとき $x_{c2}^* \rightarrow x_{c1}^*$ となり、分母、分子ともに零に漸近する。そこで、Cauchyの定理を用いてその極限値を求めてみると、 $V_{c2} \rightarrow V_{c1}$ のとき $x_{c2}^* \rightarrow x_{c1}^*$ となることに注意すれば、

$$\begin{aligned} & \left. \frac{dV_s(t)}{dV_c} \right|_{V_c=V_{c1}} \\ &= \lim_{V_{c2} \rightarrow V_{c1}} \left[- \frac{d}{\varepsilon} \rho_t(x_{c1}^*, 0) \right. \\ & \quad \times \exp \left\{ - \int_0^t e_n(x_{c1}^*, T(x_{c1}^*)) dt \right\} \frac{dx_{c1}^*}{dV_c} \\ & \quad - \frac{d}{\varepsilon} \int_{x_{c1}^*}^{x_{c1}^*} \frac{\partial}{\partial V_c} \rho_t(x, 0) \\ & \quad \times \exp \left\{ - \int_0^t e_n(x, T(x)) dt \right\} dx \Big] \\ &= - \frac{d}{\varepsilon} \rho_t(x_{c1}^*, 0) \frac{dx_{c1}^*}{dV_c} \\ & \quad \times \exp \left\{ - \int_0^t e_n(x_{c1}^*, T(x_{c1}^*)) dt \right\} \quad (8) \end{aligned}$$

が得られる。

この結果は図2からわかるように、コレクティング電位 V_{c1} と V_{c2} を印加したときの表面電位の差 $\Delta V_s(t)$ が Zero-field plane x_{c1}^* と x_{c2}^* との間に注入トラップされている全電荷 ΔQ の減衰によって生ずる電位変化であることを示している。

従って、同図から明らかのように $t=0$ 、すなわち初期コレクティング電位を加えた状態では、注入トラップされた電荷とコレクティング電位の間には、次式の関係が成立している。

$$- \rho_t(x_{c1}^*, 0) dx_{c1}^* = \frac{\varepsilon}{d} dV_c \dots \dots \dots (9)$$

よって、(8)、(9)式より次式が得られる。

$$\begin{aligned} & \left. \frac{dV_s(t)}{dV_c} \right|_{V_c=V_{c1}} \\ &= \exp \left\{ - \int_0^t e_n(x_{c1}^*, T(x_{c1}^*)) dt \right\} \dots (10) \end{aligned}$$

すなわち、(10)式は Zero-field plane の位置における温度の関数となっている。よって、二種類の温度こう配(温度こう配がない場合も含む)を与えて表面

電位測定を行なったとき、(10)式による両者の測定結果が一致するのは、両者の Zero-field plane の位置における温度が一致したときとなる。従って、この特性によりコレクティング電位 V_c と Zero-field plane の位置 x^* との関係が定まる。また、種々のコレクティング電位 V_c を印加して Zero-field plane の位置 x^* を電極1と電極2の間で移動させ、この位置の測定を行なえば、試料内の電界分布が定められることになる。

なお、以上の解析は簡単のため単一トラップであるとして示したが、トラップの活性化エネルギーが分布している場合にも以上の解析は全く同様で、結果も同じになる。すなわち、電荷の i 番目の深さのトラップからの励起速度を(3)式に対して、

$$e_{ni}(x, T(x)) = \nu_i \exp \left\{ - \frac{H_{ti}}{kT(x)} \right\} \dots \dots \dots (11)$$

とすれば、トラップ電荷密度が(2)式に対応して、

$$\begin{aligned} \rho_t(x, t) &= \sum_i \rho_{ti}(x, 0) \\ & \quad \times \exp \left\{ - \int_0^t e_{ni}(x, T(x)) dt \right\} \quad (12) \end{aligned}$$

と表わされることを用いれば、

$$\begin{aligned} & \left. \frac{dV_s(t)}{dV_c} \right|_{V_c=V_{c1}} \\ &= \sum_i \exp \left\{ - \int_0^t e_{ni}(x_{c1}^*, T(x_{c1}^*)) dt \right\} \\ & \quad \dots \dots \dots (13) \end{aligned}$$

となり、(10)式と同様な関係が導出され、この場合にもやはり Zero-field plane の位置が求められる。

また(10)式によれば、測定中に試料を昇温せずに時間 t に対して表面電位測定を行なう残留電圧特性による方法、試料を一定速度 β ($T = T_0 + \beta t$, T_0 : 初期温度) で昇温する熱刺激表面電位(TSSP)測定のどちらでも Zero-field plane の位置の測定が可能である。更に、ここでは表面電位特性から Zero-field plane の位置が定まることを示したが、電流測定であっても同様に行なうことができる。ただし電流測定では、測定中 Zero-field plane が移動するのでその取扱いはやっかいである。しかしながら、測定初期においては電荷は保存されていると近似され、Zero-field plane はほとんど移動しないとみられるので、測定初期の特性だけを考えるならば、表面電位測定と同様に Zero-field plane の位置を求めることが可能である。

〈2.2〉 シミュレーション ここでは、上述の原理をもとにしてコレクティング電位 V_c と Zero-field plane の位置 x^* との関係を計算機シミュレーションにより求め、理論値との対応関係を検討した結果につ

いて述べる。

注入トラップキャリアの初期電荷分布 $\rho_i(x, 0)$ として、通常よく用いられる SCLC (空間電荷制限電流) 理論⁽⁹⁾ から得られる分布 (SCLC 形分布) を仮定する。このとき全トラップ電荷量を Q_t とおくと、 $\rho_i(x, 0)$ は、

$$\rho_i(x, 0) = \frac{Q_t}{2\sqrt{d}} \frac{1}{\sqrt{x}} \dots\dots\dots (14)$$

で与えられる。この式を(1)式において時間 $t=0$ としたときに代入すれば、初期電位 $V_i(0)=V_c$ となるので、Zero-field plane の位置 x^* とコレクティング電位 V_c との関係が求まり、

$$\frac{x^*}{d} = \frac{4}{9} - \frac{4CV_c}{3Q_t} + \left(\frac{CV_c}{Q_t} \right)^2 \dots\dots\dots (15)$$

となる。ただし、 $C(=\epsilon/d)$ は試料の容量である。ここで、Zero-field plane x^* が試料内に存在する条件は $0 \leq x^* \leq d$ であるので、(15)式より V_c の範囲は、

$$-\frac{Q_t}{3C} \leq V_c \leq \frac{2Q_t}{3C} \dots\dots\dots (16)$$

となる。ただし、(16)式は $Q_t \geq 0$ の場合で、 $Q_t \leq 0$ ならば不等号は逆になり、シミュレーションは $Q_t \geq 0$ の場合について行なっている。

シミュレーションは、試料内に温度こう配のある場合 (温度差 $\Delta T = T_1 - T_2 = 20$ K) とない場合 ($\Delta T = 0$) の熱刺激表面電位 (TSSP) 特性を用いて行なった。シミュレーションに用いたパラメータの値として、トラップの深さ H_t およびトラップからの離脱周波数 ν は本論文の実験で使用した低密度ポリエチレン試料の熱刺激電流 (TSC) 測定より求められた値を使用した。すなわち、 $H_t = 1.10$ eV、 $\nu = 8.40 \times 10^{14}$ (1/s) とし、昇温速度 β は本実験条件である $\beta = 10$ °C/min とした。
 図3は(14)式で与えられる SCLC 形分布のトラップキャリアによる TSSP 特性について、(15)式でコレクティング電位 V_c に対する Zero-field plane の位置 x^* を定め、(10)式を用いて電極2側の温度 T_2 における dV_s/dV_c の値を V_c に対して求めた結果である。同図の $T_2 = 330$ K における直線は温度こう配がない場合の特性、他の $T_2 = 310 \sim 330$ K の 2 K 間隔で求められた曲線は $\Delta T = 20$ K の温度こう配がある場合の特性を示している。このように試料内に温度こう配がない場合は(10)式からもわかるように、一定温度に対しては、 dV_s/dV_c は試料内に Zero-field plane が存在するコレクティング電位 V_c に対して一定となり、この結果は実験的にも得られている⁽¹⁰⁾。図3より、温度こう配がないときの $T_2 = 330$ K の直線と温度こう配があるときの曲線は、 dV_s/dV_c 特性

図3 dV_s/dV_c 特性の計算値

Fig. 3. Calculation values of dV_s/dV_c characteristics.

図4 Zero-field plane の位置の求め方

Fig. 4. A method for determining the position of Zero-field plane.

が 1~11 の各点の V_c において一致していることがわかる。この一致したときの温度特性により、図4のようにしてそのときの Zero-field plane の位置 x^* が求まる。このようにして得られたコレクティング電位 V_c と Zero-field plane の位置 x^* の関係をプロットした結果を図5に示す。同図の実線で示された曲線は、(15)式で示された理論曲線を表わしている。同図に見られるように、計算値は理論値と完全に一致することが明らかになった。

なお、ここでは空間電荷分布として SCLC 形分布を仮定した結果についてのみ示したが、他の電荷分布 (一様分布、指数形分布) を仮定しても同様に一致す

図5 コレクティング電位と Zero-field plane の位置の関係

Fig. 5. Relation between the position of Zero-field plane and the collecting potential.

る良い結果の得られることを確認している。更に、残留電圧特性を用いたシミュレーションでも同様な結果が得られている。

3. 実験

〈3・1〉 試料および実験方法 実験に用いた試料は、厚さ 0.3 mm の低密度ポリエチレン (LDPE) フィルム (密度 0.922 g/cm³, メルトインデックス 2.6) である。このフィルムの両面に面積約 8 cm² の円形に Al 蒸着を施して測定を行なった。

測定装置は前報⁽²⁾と同様で、試料の上部電極 (電極 1) 側を赤外線集光ランプを用いて加熱し、下部電極 (電極 2) 側は従来のように電熱ヒータと液体窒素を用いて温度制御を行なっている。図 6 に、この装置による LDPE 試料の昇温特性の測定結果を示す。T₁, T₂ はそれぞれ上部, 下部電極温度である。(a) は試料上部が下部より約 23°C 高温となり昇温されてお

図6 LDPE フィルムの昇温特性

Fig. 6. Temperature difference between two electrodes of LDPE film during heating.

り、(b) は逆に上部が下部よりも約 6°C 低温となり昇温されているのがわかる。Zero-field plane の位置の測定を行なうには、二種の温度こう配 (温度こう配がない場合も含む) が必要で、本実験では同図の (a) と (b) の昇温特性を取上げる。なお、測定は前章で述べたように残留電圧特性でも可能であるが、今回は一定速度 $\beta=10^\circ\text{C}/\text{min}$ で昇温する TSSP 特性を用いて行なう。

実験は、図 1 における試料の電極 1 に電極 2 に対してバイアス電圧 $V_b=5,200\text{ V}$ を温度 $T_b=50^\circ\text{C}$ で時間 $t_b=10\text{ min}$ 印加して行なった。そして、 0°C 以下に下げて試料を短絡し、低温で温度こう配を形成して昇温を行なった。その後、 0°C において電極 1 側にコレクティング電位 V_c を瞬時印加して、電極 2 側の温度 T_2 に対して TSSP を測定した。

〈3・2〉 実験結果 図 7 に LDPE 試料に対する 0°C 以上の領域での通常の熱刺激電流 (TSC) の測定結果を示すが、 60°C 付近にピークが見られる。以下

図7 LDPE フィルムの TSC スペクトル
Fig. 7. TSC spectrum for LDPE film.

図8 コレクティング電圧印加の TSC の測定例
Fig. 8. An example of TSC measurements applying the collecting voltage.

図9 種々のコレクティング電位印加の温度こう配 TSSP

Fig. 9. TSSP curves with temperature gradient in the specimen for various collecting potentials.

では、このピークに注目して測定を行なっている。

図8はコレクティング電圧 V_c 印加の TSC の測定例である。同図より、正負のコレクティング電圧により TSC ピークが容易に反転することから、このピークは注入トラップキャリアに起因したものと考えられる⁽¹¹⁾。なお同図の破線は、TSC 測定後、コレクティング電圧 V_c を印加したまま冷却し、再び昇温して測定したもので漏れ電流を表わしている。

上記のように LDPE 試料の 0°C 以上に現われるピークは、注入トラップキャリアに起因したもので、この空間電荷に対して Zero-field plane の位置の測定を試みた。図9に、図6に示した温度こう配を与えたときの種々のコレクティング電位 V_c を印加した TSSP 特性を示す。同図の実線と破線は、それぞれ温度差 $\Delta T (= T_1 - T_2)$ が -6°C と 23°C のときの特徴を示している。なお、コレクティング電位 V_c は次章で述べる特性コレクティング電位 (Zero-field plane が両電極面にくる電位) 以内とし、 V_c の間隔 ΔV_c は $60 \sim 75 \text{ V}$ とした。

図9の実線と破線で示された二種の温度こう配 TSSP 特性から、(10)式に基づき Zero-field plane の位置 x^* を求めることになる。前章のシミュレーションでは、図3に示したようにある一定温度に対して dV_c/dV_s 特性をコレクティング電位 V_c に対して求

めて、二種の温度こう配を与えたときの dV_c/dV_s の値が一致する温度を求めることにより Zero-field plane の位置を決定した。しかし、ここでは前章のシミュレーションで示した図3のような特性を求める代わりに、図9の実線と破線に対して隣同士のコレクティング電位 V_c を印加した TSSP V_s の差 ΔV_s を電極2側の温度 T_2 に対して求めることにした。このようにすれば、(10)式の変化率 dV_c/dV_s に比例した量を温度全体に対して評価できるので、誤差が少なくなると考えられる。以上のようにして TSSP の差 ΔV_s をプロットした例を図10に示す。同図(a)は、 $V_c = 205 \text{ V}$ と $V_c = 135 \text{ V}$ を印加した温度こう配 TSSP に対して、 ΔV_s を 1°C 間隔でプロットした結果である。上部の温度軸は $\Delta T = 23^\circ\text{C}$ に対するもので、下部の温度軸は $\Delta T = -6^\circ\text{C}$ に対するものであり、両者の特性は測定温度軸 T_2 に対して 9.5°C ずらしたときにほぼ一致することがわかる。なお同図(b)は、 $V_c = -135 \text{ V}$ と $V_c = -205 \text{ V}$ を印加した温度こう配 TSSP に対して同様に求めた結果であり、この場合、 $\Delta T = -6^\circ\text{C}$ と $\Delta T = 23^\circ\text{C}$ の特性は温度軸 T_2 を 16.5°C ずらしたときにほぼ一致している。図10に示したよ

図10 ΔV_s 特性の例

Fig. 10. Examples of ΔV_s characteristics.

うな特性から得られる温度軸のずれと二種の温度こう配 ($\Delta T = 23^\circ\text{C}$ および $\Delta T = -6^\circ\text{C}$) を考慮すれば、図 11 のようにして Zero-field plane の位置 x^* が決定される。同図は、図 10(a) の結果から得られたものであり、近似的に $V_c = (205 + 135)/2 = 170\text{ V}$ のコレクティング電位のときの Zero-field plane の位置は $x^*/d = 0.67$ となる。

以上のようにして、図 9 のすべての隣同士のコレクティング電位印加の温度こう配 TSSP 特性より、コレクティング電位 V_c と Zero-field plane の位置 x^* との関係求めた結果を図 12 に示す。なお、図中の両電極面における ● のプロットは、次章で述べるコレクティング電圧印加の TSC 特性から得られた特性コレ

図 11 図 10(a) から得られた Zero-field plane の位置

Fig. 11. The position of Zero-field plane in the specimen obtained from Fig. 10(a).

図 12 コレクティング電位と Zero-field plane の位置の関係および試料内の電界分布

Fig. 12. Collecting potential dependence of the position of Zero-field plane (or electric field in the specimen).

クティング電位を示している。同図より、Zero-field plane は、正のコレクティング電位により電極 2 ($x = d$) 側に移動し、負のコレクティング電位により電極 1 ($x = 0$) 側に移動することより、このトラップキャリアは電子とみられる。また、この図が本実験で得られた電界注入後の両電極面を短絡した直後の試料内の電界分布を示していることになる。

4. 検 討

ここでは、図 12 で示された Zero-field plane の位置の測定結果について若干検討を行なう。

前章で述べたように、図 12 に示した結果のコレクティング電位 V_c の極性と Zero-field plane の移動方向からトラップキャリアの極性が判定され、同図は電子性トラップを示していることがわかる。このトラップキャリアの極性判定については、コレクティング電位 $V_c = 0$ 印加の温度こう配 TSSP の発生初期の特性によって行なえることを著者らは既に報告している⁽¹⁾⁽²⁾。従って、図 9 に示された温度こう配 TSSP 特性の $V_c = 0$ のときの測定結果からもトラップキャリアの極性が判定される。図 1 で考えてみると、 $\Delta T = 23^\circ\text{C} (> 0)$ のときは電極 1 から Zero-field plane x^* の間にトラップされたキャリアがより早く励起されて電極 1 に達するが、 $\Delta T = -6^\circ\text{C} (< 0)$ のときは逆に電極 2 から Zero-field plane x^* の間にトラップされたキャリアがより早く励起されて電極 2 に達することになる。よって、もし正孔トラップならば電極 1 での電位は $\Delta T = 23^\circ\text{C}$ のときの TSSP のほうが $\Delta T = -6^\circ\text{C}$ のときの TSSP に対して正の方向に変化することになり、逆に電子トラップならば負の方向に変化することになる。従って、図 9 の $V_c = 0$ のときの $\Delta T = 23^\circ\text{C}$ の破線で示された TSSP は、 $\Delta T = -6^\circ\text{C}$ の実線で示された TSSP に対して発生初期において負の電位方向に変化していることから、電子性トラップを示唆している。すなわち、この結果は Zero-field plane の位置の測定結果の図 12 の特性から得られるトラップキャリアが電子であるという結論を支持している。

次に、トラップ電荷の平均注入距離と特性コレクティング電位について検討する。これらの量は、コレクティング電位印加の TSSP でも求まるが⁽⁸⁾、ここでは図 8 に示したようなコレクティング電圧印加の TSC を用いて評価した⁽¹¹⁾。

図 13 にコレクティング電圧印加の TSC の面積から計算される電荷量 Q_{TSC} を V_c/V_b に対してプロットした結果を示す。同図の特性から得られる飽和電荷量 Q_1 , Q_2 は、トラップ電子に対しては初期にそれぞ

図 13 コレクティング電圧印加の TSC の面積から計算される電荷の飽和特性

Fig. 13. Saturation characteristics of the charge calculated from the TSC peak area for various collecting voltages.

れ電極 1, 電極 2 に誘起された電荷量に相当 (正孔の場合は逆になる) し, 全トラップ電荷量 Q_t は $Q_t = Q_1 + Q_2 = 9.6 \text{ nC/cm}^2$ と求まる。よって平均注入距離 $\bar{x}$ は, 電極 1 側からの位置として $\bar{x}/d = Q_2/Q_t = 0.53$ となる。また, 特性コレクティング電位 V_{cs} は, 図 13 の飽和に至るコレクティング電圧 V_c によって与えられるが, 飽和電荷量から求めたほうが明確なので計算して求めた。すなわち, Zero-field plane が電極 1 にくる電位を V_{cs}^1 , 電極 2 にくる電位を V_{cs}^2 として, $V_{cs}^1 = -Q_1 d/\epsilon = -663 \text{ V}$, $V_{cs}^2 = Q_2 d/\epsilon = 751 \text{ V}$ と求められた。なお, LDPE 試料の比誘電率を 2.3 として計算した。これらの特性コレクティング電位の値は, 図 13 の飽和に至るコレクティング電圧とほぼ一致している。また, これらの特性コレクティング電位の値は図 12 の中に●でプロットされており, この電位近くのコレクティング電位により, それぞれ両電極付近に Zero-field plane が移動しているのがわかる。よって測定された Zero-field plane の位置は確かなものだと考えられる。そして, $V_b = 5,200 \text{ V}$ のバイアス電圧で注入しているので, 電極 2 ($x=d$) 側から電子が注入されており, 試料を短絡したときの電界は電極 2 側のほうが大きくなっているのが示されている。また図 12 の電界分布を見ると, 注入電極 (電極 2)

側に多量に電子がトラップされているとは言えず, 平均注入距離が $\bar{x}/d = 0.53$ であるという結果からしても, 試料の中央付近まで電荷が注入されていると推定される。しかし, この電荷分布に関しては今後検討する必要があると思われる。

5. ま と め

本論文では, 試料内に温度こう配を設けて行なう表面電位測定を用いた注入トラップキャリアにより形成された空間電荷電界が零となる面, すなわち Zero-field plane の位置の測定法について述べた。本測定法は Zero-field plane の位置を直接に求める方法で, 試料内の電界分布を求めることが可能であり, 空間電荷分布を評価することも可能である。そして, 実際に低密度ポリエチレン (0.3 mm 厚) 試料について実測を行なった。今後, 更にこの空間電荷分布測定について検討していきたいと考えている。なお, 絶縁体中の注入トラップ電荷には double injection などの場合もあり, これらを含めた議論は今後の課題である。

なお, 本研究の一部は文部省科学研究費 (一般研究 B) の援助を受けて行なわれた。

(昭和 60 年 9 月 26 日受付)

文 献

- (1) 岩本・小林・日野:「温度こう配熱刺激測定法とトラップキャリアの極性」, 電学論 A, 104, 193 (昭 59-4)
- (2) 岩本・加藤・駒・日野:「温度こう配熱刺激測定による XLPE フィルム中の荷電粒子の種別と極性の判定」, 同上 A, 105, 255 (昭 60-5)
- (3) J. Lindmayer: "Current Transients in Insulators", *J. Appl. Phys.*, 36, 196 (1965)
- (4) 例えば, G. M. Sessler, J. E. West, R. Gerhard-Multhaupt & H. von Seggern: "Nondestructive Laser Method for Measuring Charge Profiles in Irradiated Polymer Films", *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, NS-29, 1644 (1982)
- (5) 例えば, G. M. Sessler, J. E. West & H. von Seggern: "Electron Beam Method for Detecting Charge Distributions in Thin Polyethyleneterephthalate Films", *J. Appl. Phys.*, 53, 4320 (1982)
- (6) 例えば, R. E. Collins: "Measurement of Charge Distribution in Electrets", *Rev. Sci. Instrum.*, 48, 83 (1977)
- (7) 日野・山下・金子:「絶縁体中のトラップ電子による熱刺激電流とその律速過程」, 電学論 A, 96, 143 (昭 51-4)
- (8) 日野・金子:「注入電荷による絶縁体の熱刺激表面電位」, 同上 A, 96, 309 (昭 51-7)
- (9) M. A. Lampert & P. Mark: *Current Injection in Solids* (1970) Academic Press, New York
- (10) 金子・日野:「熱刺激表面電位による絶縁フィルムの空間電荷電界の測定」, 電学論 A, 97, 339 (昭 52-7)
- (11) 日野・山下:「熱刺激電流による絶縁膜への注入電荷と注入距離の測定」, 電学論 A, 95, 79 (昭 50-2)