

## 論 文

# アビエチン酸およびデヒドロアビエチン酸の エレクトレット的性質

真田 安祥\*, 有本 邦夫\*, 高松 俊昭\*\*  
(1985年2月5日受理)

Electrets Properties of Abietic Acid and Dehydro Abietic Acid

Y. SANADA,\* K. ARIMOTO\* and T. TAKAMATSU\*\*

(Received February 5, 1985)

Thermal electrets of abietic acid (ABA) and dehydro abietic acid (DHA) were prepared at the polarizing temperature ( $T_p$ ) of 56°C with varying polarizing electric field ( $E_p$ ). The polarity and the amount of surface charge and thermally stimulated current (TSC) were measured in these specimens. When  $E_p$  was below 80 kV/cm the polarity of surface charge was negative (a heterocharge). When  $E_p$  was above 95 kV/cm the distribution of charge represented positive (a homocharge). The TSC spectra of the ABA and DHA electrets showed one peak at about 55°C. Depolarization charge appearing at this temperature region increased monotonously with increasing  $E_p$  and may be caused by the disorientation of aligned dipoles. Using the Debye equation, an effective dipole moment  $\langle \mu \rangle$  was calculated to be  $\langle \mu \rangle_{ABA} = 1.28$  D and  $\langle \mu \rangle_{DHA} = 0.83$  D. The activation energy for the disorientation of dipoles was calculated to be 1.0 eV for ABA and 0.9 eV for DHA. Using a contactless electrode method, the TSC spectra of corona charged ABA and DHA showed two peaks at about 55°C and 96°C, respectively. The low temperature peak may be caused by the orientational polarization of dipoles and the high temperature peak is caused by the movement of space charge due to impurity ions trapped in the bulk.

## 1. はじめに

エレクトレットが江口元太郎によって発見されてから早や 65 年の歳月が経過する。その最初のエレクトレットはカルナウバ蠟と松脂の等量混合物を加熱溶融し、直流高電圧を印加しながら溶融温度から室温まで冷却して作られた<sup>1)</sup>。これまでカルナウバ蠟のエレクトレット性は詳細に調べられているが<sup>2-4)</sup>、松脂に関する研究報告は少ない<sup>5)</sup>。松脂はアビエチン酸を主成分（約 90%）とし、その他デヒドロアビエチン酸 ( $C_{20}H_{28}O_2$ )、テトラヒドロアビエチン酸 ( $C_{20}H_{34}O_2$ )、デキストロピマール酸 ( $C_{20}H_{30}O_2$ ) 等、多くの樹脂酸成分を含む<sup>6)</sup>。アビエチン酸およびデヒドロアビエチン酸の脆化温度は 50~55°C にあるため、室温ではいずれもガラス状態を示し、そのうちアビエチン酸の薄膜は機械的衝撃に対してひび割れを生じやすく、また加熱によって変色しやすいという欠

点がある。これに対して、デヒドロアビエチン酸はアビエチン酸より蠟状を示し、ひび割れせず、かつ加熱による変色は起こりにくい。

本報告では江口エレクトレットの生成機構における松脂の役割を明らかにするため、精製したアビエチン酸およびその誘導体であるデヒドロアビエチン酸の薄膜を 56°C で種々の直流電圧で分極した後の初期残留表面電荷の極性、大きさおよび熱刺激電流を測定した。また同種試料に室温でコロナ放電を行なった後の表面電荷減衰およびコンタクトレス電極法による熱刺激電流を測定し、得られた結果に検討を加えたものである。

## 2. 実験

精製したアビエチン酸 (ABA) およびデヒドロアビエチン酸 (DHA) の構造式を図 1 に示す。これらの分子式、純度、密度、軟化点、融点などを表 1 に示した。これらの試料をカセロールに入れ、加熱溶融したあと、厚さ 0.3 mm、一辺の長さ 3cm の正方形ステンレス板上に流延し、室温まで徐冷して厚さ 0.1~0.3 mm の薄板を作製した。

このステンレス板を一方の電極とし、次いでアルミ箔

\* 播磨化成工業株式会社 (675 加古川市野口町水足 671)  
Harima Chemicals Inc., 671, Mizuashi, Noguchi-cho, Kakogawa, 675 Japan

\*\* 理化学研究所 (351-01 和光市広沢 2-1)  
The Institute of Physical and Chemical Research,  
2-1, Hirosawa, Wako, 351-01 Japan

表1 ABA および DHA の物理的性質  
Table 1 Physical properties of ABA and DHA.

Sample	Chemical formula	Purity (%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Softening point (°C)	Melting point (°C)	$[\alpha]_D^{25}$
ABA	C <sub>20</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	91	1.037	70~80	159~162	-92
DHA	C <sub>20</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub>	89	1.08	70~80	172~173	+61

Where  $[\alpha]_D^{25}$  is specific rotatory power at 25°C for D (sodium) line.

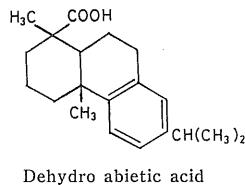
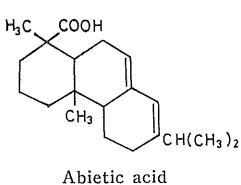


図1 アビエチン酸 (ABA) とデヒドロアビエチン酸 (DHA) の化学構造式

Fig. 1 Chemical formulae of abietic acid (ABA) and dehydro abietic acid (DHA).

で包んだ直径 2cm の金属板を試料表面に接触させてもう一方の電極とした。これらの試料を 56°C に加熱し、種々の電圧 ( $E_p$ ) を印加して分極を行なったあと、それらの一部については上部電極を試料表面から剥がし、通常の静電誘導法で試料の表面電荷密度を測定した。また、他の一部は電極を剥がすことなく東洋精機製エレクトレット熱分析装置を用いてコンタクト電極法で熱刺激電流 (TSC) を測定した。昇温速度は 2.8°C/min であった。

また、各試料表面の垂直上方 10 mm の距離に針状電極をセットし、室温で -6 kV の電圧を 30 秒間印加してコロナ放電を行ない試料面を負に荷電したあと、表面電荷減衰およびコンタクトレス電極法による TSC を測定した。これらの測定法の詳細は文献に記されているのと同じである<sup>7)</sup>。

### 3. 結 果

図2は ABA および DHA 薄膜に室温でコロナ荷電したあとの表面電荷比 ( $\sigma/\sigma_0$ ) の対数を時間に対してプロットした結果である。ここで  $\sigma_0$  は荷電直後の表面電荷密度で約  $1 \times 10^{-8} \text{ C/cm}^2$  である。 $\sigma$  は荷電後の経過時間  $t$  における表面電荷密度である。荷電直後の電荷減衰は早いが、時間の経過とともに遅くなっている。

図3は試料を 56°C において  $E_p$  を変えて分極したエレクトレットの初期表面電荷の極性と大きさを示す。 $E_p < 80 \text{ kV/cm}$  のとき、電荷の極性は負（ヘテロ電荷）であり、その大きさは  $E_p$  に比例して増加する。 $E_p \geq 90 \text{ kV/cm}$  のとき、極性は正（ホモ電荷）になり、 $E_p$

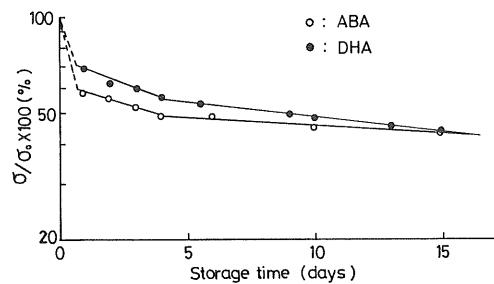


図2 コロナ荷電した ABA および DHA の  $\sigma/\sigma_0$  と経過時間の関係

Fig. 2 Relationship between  $\sigma/\sigma_0$  and storage time for corona charged ABA and DHA.

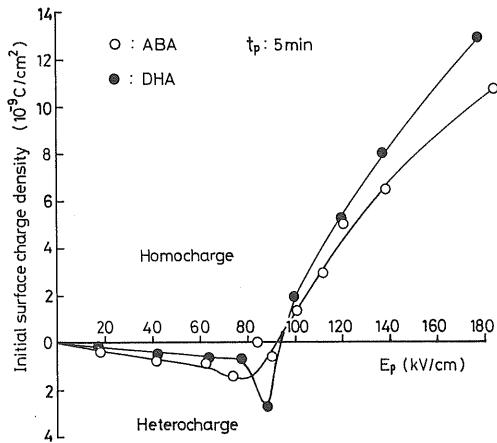


図3 分極電圧 ( $E_p$ ) と初期表面電荷密度の関係 ( $T_p=56^\circ\text{C}$ )

Fig. 3 Initial surface charge density vs. polarizing electric field  $E_p$ ,  $T_p=56^\circ\text{C}$ .

の増加とともにホモ電荷の大きさは増加している。

図4は ABA を 56°C で  $E_p$  を変えて分極したあとのコンタクト電極法による TSC 曲線を示す。いずれも分極時間 ( $t_p$ ) は 3 分間である。TSC 曲線は 55~57°C でピークを示し、そのピーク電流は  $E_p$  とともに増加している。

図5は DHA の場合の TSC 曲線を示す。TSC は 55~57°C でピークを示しているが、ABA の場合に比べて

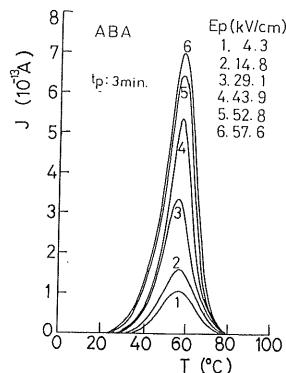


図4 各  $E_p$  で分極した ABA の TSC スペクトル ( $T_p = 56^\circ\text{C}$ )

Fig. 4 TSC spectra of ABA polarized at various  $E_p$ .  $T_p = 56^\circ\text{C}$ .

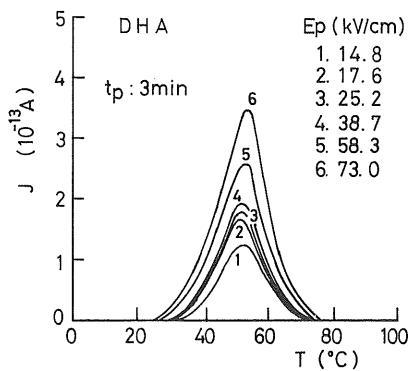


図5 各  $E_p$  で分極した DHA の TSC スペクトル ( $T_p = 56^\circ\text{C}$ )

Fig. 5 TSC spectra of DHA polarized at various  $E_p$ .  $T_p = 56^\circ\text{C}$ .

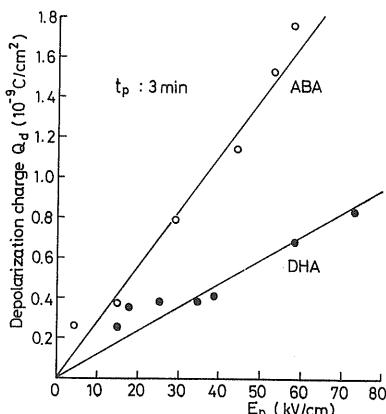


図6 図4, 5 から求めた脱分極電荷量の  $E_p$  依存性 ( $T_p = 56^\circ\text{C}$ )

Fig. 6  $E_p$  dependence of depolarization charge  $Q_d$  obtained for TSC appearing at low temperature region.  $T_p = 56^\circ\text{C}$ .

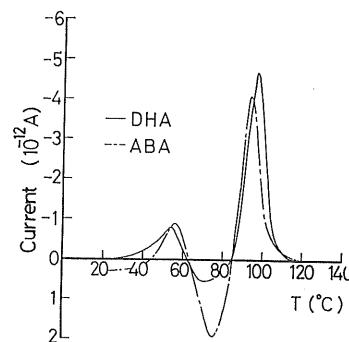


図7 コンタクトレス電極法で測定したコロナ荷電 ABA および DHA の TSC スペクトル

Fig. 7 TSC spectra of corona charged ABA and DHA measured with a contactless electrode.

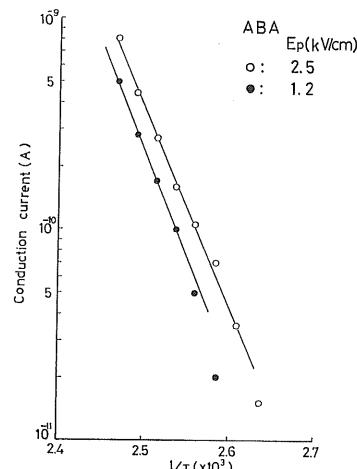


図8 ABA の伝導電流の対数と絶対温度の逆数 ( $1/T$ ) の関係 ( $\beta = 2.8^\circ\text{C}/\text{min}$ )

Fig. 8 Relationship between logarithm of conduction current and the reciprocal absolute temperature  $1/T$  for ABA.  $\beta = 2.8^\circ\text{C}/\text{min}$ .

電流値は小さい。

図6は図4および5に示した脱分極電流 ( $i_d$ ) を時間で積分して求めた電荷量  $Q_d \left(= \int_0^\infty i_d dt \right)$  を  $E_p$  に対してプロットした結果を示す。ABA および DHA の  $Q_d$  はいずれも  $E_p$  に比例して増加している。

図7は室温でコロナ荷電した ABA および DHA のコンタクトレス電極法による TSC 曲線を示す。55°C 附近および 95~100°C の二つの温度域でピークが現われている。なお、電流の方向はいずれも同じである。

図8はABA 薄膜の両面に電極をつけ、一定の直流電圧 (1.2 kV/cm および 2.5 kV/cm) を印加しながら一定の昇温速度 ( $2.8^\circ\text{C}/\text{min}$ ) で加熱したときの伝導電流

表2 コロナ荷電した ABA および DHA の表面電荷の寿命 ( $\tau_1$ ) と  $\tau_1$  から算出した電気抵抗率 ( $\rho_1$ )  
Table 2 Life time ( $\tau_1$ ) of surface charges for corona charged ABA and DHA and electric resistivity ( $\rho_1$ ) estimated from  $\tau_1$ .

Sample	$\tau_1$ (s)	$\rho_1$ ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	$\tau_2$ (s)	$\rho_2$ ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )
ABA	$1.6 \times 10^6$	$6 \times 10^{18}$	$9 \times 10^6$	$4 \times 10^{19}$
DHA	$1.2 \times 10^6$	$4.6 \times 10^{18}$	$4 \times 10^6$	$2 \times 10^{19}$

の対数を絶対温度の逆数 ( $1/T$ ) に対してプロットした結果を示す。伝導電流は ABA の軟化点以上で観測しうる値を示し、その値は温度の上昇に伴い著しく増加している。

#### 4. 考 察

誘電体表面に摩擦帶電、またはコロナ荷電したとの表面電荷は、一般に時間の経過につれて減衰する。その減衰機構は種々考えられているが、ここでは、(1)表面電荷が試料内部に拡散して消滅する場合と、(2)有極性物質の場合、荷電後開放状態で放置しておくと、試料表面にトラップされたホモ電荷によって強い内部電界が働き、この電界によって双極子が順向分極し表面電荷を中和するため、見掛け上表面電荷が減衰する場合を考える。(1)の場合、電荷減衰を支配する重要な因子は室温における試料の電気伝導度の大きさである。図2に見られるように表面電荷の減衰曲線は単一緩和式  $\sigma_t = \sigma_0 \times \exp(-t/\tau_1)$  には従わず、短寿命および長寿命の緩和時間を異にする減衰機構が含まれている。ここで  $\sigma_0$  は初期電荷量、 $\tau_1$  は緩和時間、 $t$  は時間である。

表面電荷が試料内部にオーム則で拡散移動して減衰すると仮定すれば  $\tau_1$  は次式で与えられる。

$$\tau_1 = \epsilon_0 \epsilon \rho_1 \quad (1)$$

ここで  $\epsilon_0$  および  $\epsilon$  は真空および試料の誘電率、 $\rho_1$  は試料の体積電気抵抗率である。そこでコロナ荷電後、1日および10日間経過したあとにおける減衰曲線の勾配から求めた見掛けの緩和時間を  $\tau_1$  および  $\tau_2$  とし、 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ 、 $\epsilon = 3$  とするとオーミック伝導に対する電気抵抗率  $\rho_1$  および  $\rho_2$  の値が求められる。これらの値を表2に示した。短寿命機構における  $\tau_1$  の値は ABA で  $1.6 \times 10^6$  s、DHA で  $1.2 \times 10^6$  s で、これらの値はカルナウバ蠟の場合における長寿命機構の  $\tau_3 (= 1.7 \times 10^6$  s) の値<sup>10</sup> に大体一致している。

なお ABA および DHA の長寿命機構における  $\tau_2$  を求めた  $\rho_2$  の値は  $(2\sim 4) \times 10^{19} \Omega \cdot \text{cm}$  で、これまで報告されているカルナウバ蠟の電気抵抗率の値 ( $\approx 10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$ ) より<sup>22</sup> 10倍以上も大きく、ABA および DHA が室温でいずれも電気絶縁性に優れていることを示して

いる。これら短寿命および長寿命の電荷減衰が存在する機構は明らかでないが、試料の結晶-非晶相よりなる固有の組織構造が関係するものと考えられる。

なお、コロナ荷電直後の早い電荷減衰は、荷電面から電荷が空気中へ放電したり、気中の対イオンとの中和や前述の(2)の機構によって生じたものと考えられる。

ABA および DHA を  $T_p = 56^\circ\text{C}$  で  $E_p \leq 90 \text{ kV/cm}$  の条件で分極したとき、表面電荷の種類はいずれもヘテロ電荷であり(図3)、 $E_p > 90 \text{ kV/cm}$  のとき、ホモ電荷に変換している。カルナウバ蠟の場合、極性変換の電圧は  $T_p = 70^\circ\text{C}$  で  $E_p \geq 30 \text{ kV/cm}$  であるので、前者はこれより約3倍も高い値である。Grossの二電荷理論によればホモ電荷は電極と試料との接触面にある空隙でのコロナ放電によって生成する<sup>9</sup>。これに対して本実験の場合、試料の表面と電極との密着性がよくて空隙が少ないのでコロナ放電が起こりにくく、より高い電圧の印加によって試料と電極間のポテンシャル障壁を越えて電荷が直接電極より試料表面に注入されるものと考えられる。

ヘテロ電荷は有極性物質の場合、双極子が電場配向したり、イオンの巨視的な移動や、微視的に変位してトラップされた状態で凍結されて生成する。ABA および DHA の脆化温度が  $50\sim 55^\circ\text{C}$  にあることを考慮すると  $T_p = 56^\circ\text{C}$  では両分子の有するカルボキシル基(-COOH)が電場配向し均一に分極していると考えられる。図4および図5より求めたヘテロ電荷量は  $E_p$  に大体比例している(図6)。したがって Debye の双極子回転理論が適用される。

$$Q_p = \frac{N \langle \mu^2 \rangle E_p}{3 k T_p} \quad (2)$$

ここで  $Q_p$  は、分極電荷量、 $N$  は試料  $1\text{cm}^3$  当りに含まれる双極子数、 $\langle \mu \rangle$  は平均の双極子モーメントの大きさ、 $k$  はボルツマン定数である。

ABA の密度 ( $1,037 \text{ g/cm}^3$ ) と分子量 (302.2) より得られる双極子密度 ( $N \approx 2.0 \times 10^{21}/\text{cm}^3$ )、 $E_p = 30 \text{ kV/cm}$ 、 $Q_d = 8.3 \times 10^{-10} \text{ C/cm}^2$ 、 $T_p = 330 \text{ K}$  を用いると  $\langle \mu \rangle \approx 1.28 \text{ D}$  を得る。この値はこれまで報告された  $\mu = 1.7 \text{ D}$  の値<sup>10</sup>よりも多少小さい。DHA の場合も同

表3 TSC の解析より求めた活性化エネルギー

Table 3 Summary of activation energy ( $\Delta E$ ) from TSC analysis.

Material	Poling condition	$T_p$ (°C)	Peak temperature (°C)	$\Delta E$		
				Thermoelectret (eV)	Corona charged electret (eV)	Conduction current (eV)
ABA	Thermo.	56	57	1.0		
	Corona	R.T.	{56 94}		1.5 2.0	1.9-2.2
DHA	Thermo.	56	57	0.9		
	Corona	R.T.	{54 97}		1.0 2.2	2.0-2.2

様にして  $\langle \mu \rangle = 0.83D$  の値が得られた。

また、図4および図5より脱分極電流の対数と絶対温度の逆数 ( $1/T$ ) をプロットし、その初期勾配により求めた配向双極子緩和の活性化エネルギー ( $\Delta E$ ) の値を表3に付記した。 $\Delta E_{(ABA)}=1.0\text{ eV}$  および  $\Delta E_{(DHA)}=0.9\text{ eV}$  で、 $\Delta E_{(ABA)}$  の値は文献9)の結果 ( $\Delta E \approx 2.2\text{ eV}$ ) に比べて小さい。

ABA および DHA に室温でコロナ荷電をしたあと、コンタクトレス電極法によるTSC曲線(図7)では50~60°C および 90~100°C の二つの温度域でピークが現われている。低温域のピークは試料の脆化温度に一致しており、この温度域ではコロナ荷電によって試料表面にトラップされたホモ電荷による内部電界によって双極子が配向するときの分極電流で説明される。さらに温度が上昇すると分極電流は減少はじめ、ゼロを経過したあとその電流方向が逆転している。これは先の配向分極した双極子が熱エネルギーを得て無秩序化するときに生じる配向緩和の電流と考えられる。

試料の軟化温度は70~80°C にあり、この温度以上では電気伝導度は急に増加してゆくため試料表面にトラップされたホモ電荷がトラップを離れて試料内部に拡散移動するため90~100°C の温度域で電流のピークが現われるものと考えられる<sup>5,10)</sup>。

Perlman らはコロナ荷電したポリマ膜において、注入された電荷が  $0 \leq x \leq d$  に存在する深さ  $\Delta E$  のエネルギーをもつ單一トラップに捕えられて一様に分布していると仮定し、かつトラップから解放された電荷はただちに再結合するとの条件で脱分極電流  $J(T)$  を次式のように導いた<sup>11)</sup>。

$$J(T) = \frac{\mu e^2 d^2 n t_0^2}{2 \varepsilon l} \frac{\tau}{\tau_0} \exp\left[-\frac{\Delta E}{kT}\right] - \frac{2}{\beta \tau_0} \int_{\tau_0}^T \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) dT \quad (3)$$

ここで  $\tau = \tau_0 \exp(\Delta E/kT)$ ,  $\mu$  はキャリヤの移動度,  $e$  は電気素量,  $d$  はキャリヤが均一に存在するとしたときの存在範囲,  $n t_0$  は初期トラップ密度,  $\varepsilon$  は誘電率,  $l$  は試料の厚さ,  $\beta$  は昇温速度である。

(3)式は単一緩和の双極子による脱分極電流と同様な温度特性を示し、 $\log J(T)-1/T$  の初期勾配より、トラップの深さ  $\Delta E$  が求められる。この  $\Delta E$  の値を表3に付記した。

なお ABA に一定の直流電圧を印加したまま 80°C より 135°C の温度域で伝導電流 ( $J_p$ ) の対数を絶対温度の逆数 ( $1/T$ ) でプロットした結果を図8に示したが  $\log J_p$  は  $1/T$  と直線関係にある。この  $J_p$  は試料の熱分解や混入不純物、その他、酸化反応などで生成した解離イオンが軟化温度以上で電界により分子間のすき間をぬって移動するために現われるものと考えられる。

解離イオンが距離  $a$  だけ離れた安定な位置間のボテンシャル障壁をホッピングして移動するとき、そのイオン電流密度 ( $J_1$ ) は次式で与えられる<sup>12-16)</sup>。

$$J_1 = 2 q n a \nu \exp\left[-\frac{\Delta E}{kT}\right] \sinh \frac{q E_p a}{2 kT} \quad (4)$$

ここで  $q$  はイオンの電荷,  $n$  はイオン数,  $\nu$  はイオンの振動数,  $\Delta E$  は活性化エネルギー,  $E_p$  は印加電圧である。低電界では  $q E_p a \ll kT$  より

$$J_1 \approx q n a \nu \cdot \frac{q E_p a}{kT} \exp(-\Delta E/kT) \quad (5)$$

すなわち  $J_1 \propto E_p$  のオーム則を満たす。(5)式より  $\log J_1 - 1/T$  の直線関係より  $\Delta E$  が求められる。これらの値を表3に付記したが、コロナ荷電した試料の高温域に現われるTSC曲線より求めた活性化エネルギーの値に大体一致しているのが認められた。

ABA および DHA の脆化温度が50~55°C にあり、室温では内部粘性が著しく高く、かつ電気抵抗率が  $(2 \sim 5) \times 10^{19} \Omega \cdot \text{cm}$  程度であるため、双極子の配向緩和は

起こりにくく熱エレクトレット法やコロナ荷電法によって生成したヘテロ電荷またはホモ電荷のいずれも安定となる。それゆえ江口エレクトレットにおける電荷の安定性はカルナウバ蠟よりは松脂成分による分極効果が大きく寄与しているものと考えられる。

## 5. 結　　び

以上の結果をまとめると次のようになる。

(1) ABA および DHA を 56°C に加熱し、電圧を変えて分極したあとの残留表面電荷の極性は  $E_p < 80 \text{ kV/cm}$  のとき負であり、その電荷量は  $E_p$  に比例して増加する。 $E_p \geq 100 \text{ kV/cm}$  のとき、極性は正であり、その電荷量は  $E_p$  とともに増加した。

(2) ABA および DHA を 56°C で分極した熱エレクトレットの TSC スペクトルでは 50~60°C の温度域でピークを示した。このピーク電流は両分子のカルボキシル基双極子の配向緩和によって生じ、双極子モーメント  $\langle \mu \rangle$  の大きさは  $\langle \mu \rangle_{ABA} = 1.28D$ ,  $\langle \mu \rangle_{DHA} = 0.83D$  の値が得られた。

(3) ABA および DHA にコロナ荷電したあとの表面電荷は荷電直後を除くと非常に安定で減衰しくい。これらのコンタクトレス電極法による TSC スペクトルは 55~57°C および 90~100°C の温度域でピークを示す。低温域のピーク電流は双極子の配向分極に、高温域のピーク電流は試料が軟化温度以上に加熱されたために電気伝導率の増大によって試料表面にトラップされていたホモ電荷が遊離し、移動したためと考えられる。

## 参 考 文 献

- 1) M. Eguchi : Proc. Phys.-Math. Soc. Jpn., 1 (1919) 320; Philos. Mag., 49 (1925) 178
- 2) V.M. Fridkin and I.S. Zheludev, ed. : *Photoelectrets and the Electrophotographic Process*, Van Nostrand Co. Inc., Princeton (1960)
- 3) B. Gross : *Charge Storage in Solid Dielectrics*, Elsevier Publ. Co., Amsterdam (1964)
- 4) G.M. Sessler, ed. : *Electrets*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1980)
- 5) T. Takamatsu and E. Fukada : *Proc. Symp. Thermal and Photostimulated Currents in Insulators*, ed. D.M. Smyth, p. 201, The Electrochemical Soc., Inc., U.S.A. (1976)
- 6) P.G. Stecher, ed. : *The Merck Index of Chemicals and Drugs*, 8th ed., pp. 1, 923, Merck & Co., Inc. Rahway, N.J. (1968)
- 7) 高分子学会編：熱力学的、電気的および光学的性質、高分子実験学、第12巻、p. 306、共立出版、東京（1984）
- 8) M.M. Perlman and J.L. Meunier : J. Appl. Phys., 36 (1965) 420
- 9) B. Gross : J. Chem. Phys., 17 (1949) 866; Br. J. Appl. Phys., 1 (1950) 259; INDEVA, 8 (1971) 115
- 10) Y. Hoshino and Y. Tokunaga : J. Appl. Phys., 48 (1977) 1456
- 11) R.A. Creswell and M.M. Perlman : J. Appl. Phys., 41 (1970) 2365
- 12) L.E. Amborski : J. Polym. Sci., 62 (1962) 331
- 13) 家田正之、沢五郎：電気学会雑誌、89 (1969) 812
- 14) J.J. O'Dwyer : *The Theory of Electrical Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics*, p. 18, Clarendon Press, Oxford (1973)
- 15) D.A. Seanor, ed. : *Electrical Properties of Polymers*, p. 1, Academic Press, New York (1982)
- 16) 静電気学会編：静電気ハンドブック、p. 120、オーム社、東京（1981）