

## 第31回 C I S 研究所パートナー会 議事録

日時 2013年11月16日(日) 13時~17時

場所 C I S 会議室

1. サロン 講師 竹内 学 様  
テーマ 粉体系の誘電率



会議風景

目 次

1. 誘電率
2. 分極
3. 誘電率の関係する現象
4. 粒子分散系の誘電率
5. 実験結果
  - 5.1 粒子-ポリマー系
  - 5.2 粒子-液体系
6. 誘電率と電界
7. むすび

1.誘電率

誘電率とは

クーロンの法則

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (\text{真空中})$$

$\epsilon_0$ : 真空の誘電率 ( $\approx 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ )

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_r \epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (\text{物質中})$$

$\epsilon$ : 物質の誘電率 (異方性物質ではテンソル)

$\epsilon_r$ : (物質の) 比誘電率 ( $\rightarrow$  誘電率)

誘電率 = permittivity

dielectric constant (dia-(= apart)  $\rightarrow$  di-)

真空の誘電率 = permittivity of free space

dielectric constant of a vacuum

(物質の) 誘電率 = permittivity (of a material)

dielectric constant (of a material)

比誘電率 = dielectric constant (relative permittivity)

relative dielectric constant

permittivity : 電束 (flux) の通りやすさ

Cf:

透磁率 = (magnetic) permeability

**比誘電率(低周波)**

固体	液体 (20°C)	気体(0°C, 760Torr)
パラフィン 1.9~2.4	エチルアルコール 25	アルゴン 1.0005556
軟質塩化ビニール 3.2~3.6	メチルアルコール 33.6	酸素 1.0005326
ポリエチレン 2.2~2.4	エチルエーテル 4.3	水素 1.0002723
ポリスチレン 2.5~2.7	グリセリン 42.5	窒素 1.0005882
ポリエステル 2.9~3.5	ベンゼン 2.3	二酸化炭素 1.0009878
ポリカーボネート 2.9~3.1	変成器油 2.3	ヘリウム 1.0000701
フェノール樹脂 5.0~7.5	アイソパー 2.0	
石英ガラス 3.5~4.0	水 80.36	
チタン酸バリウム ~5000		

昭和48年度理科年表による

電極間に誘電体を入れると、誘電体からにじみ出る電荷＝分極電荷により等価的に電荷がキャンセルされたことになる。

## 2.分極

分極には次の3つの形態があり、誘電率は周波数で変わる（分散があると言う）。

- ・電子分極
- ・イオン分極
- ・方位分極
- ・空間電荷分極

詳細説明は省略

## 3.誘電率の関係する現象

- ・帯電の立ち上がりの時定数  $\tau$  ----- 帯電の速さと減衰の時間的变化

帯電

$$Q(t) = Q_{\infty} \{1 - \exp(-t/\tau)\}$$

$Q(t)$ : 時刻  $t$  における帯電量

$Q_{\infty} = \beta\tau$ : 飽和帯電量 ( $t = \infty$ )

$\beta$ : 帯電速度 (電荷の発生速度)

$\tau$ : 帯電立ち上がりの時定数

$$\tau = \epsilon\rho \quad \epsilon: \text{誘電率}$$

$\rho$ : 抵抗率

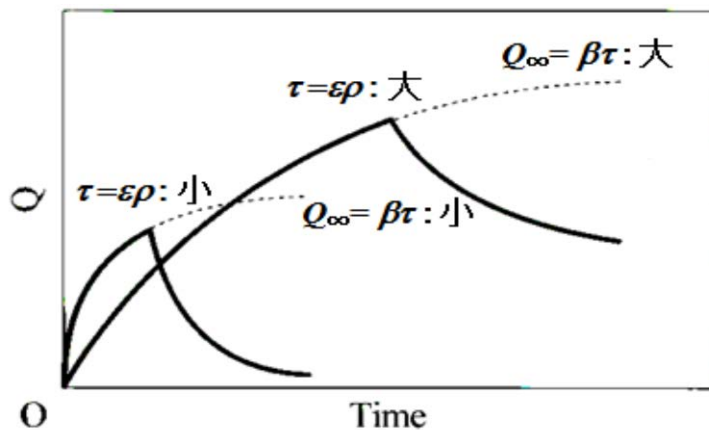
放電 (電荷減衰)

$$Q(t) = Q_0 \exp(-t/\tau)$$

$Q_0$ : 初期電荷量

$\tau$ : 電荷減衰の時定数

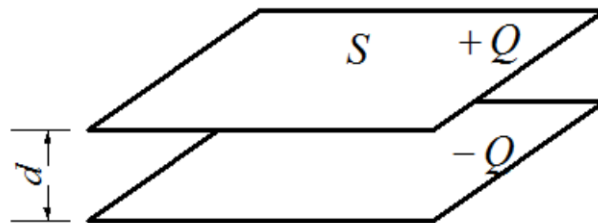
グラフで示すと下図のようになる。



- ・平行平板キャパシタ

### 静電容量

平行平板キャパシタ



$$C = \frac{Q}{V}$$

$$C_0 = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon_0 S}{d}$$

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon S}{V} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{V}$$

$$\frac{C}{C_0} = \epsilon_r \quad \text{キャパシタの静電容量}$$

$$V = \frac{Q}{C} \quad \text{感光体の表面電位}$$

- ・電界中にある帯電粒子に働く力

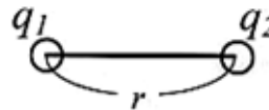
$$F = qE$$

$F$ : クーロン力

$q$ : 粒子の有する電荷

$E$ : 電界

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$



$$E = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad \text{から } q_2 \text{ に働くクーロン力}$$

註：クーロンの法則はどれほど正しいか？

現在、理論的に証明することができなく、実験で検証しかない。

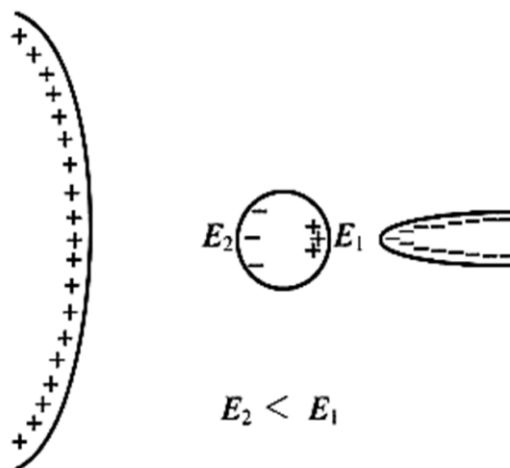
$$F(r) \sim r^{-(2-\alpha)} \quad \alpha$$

$\alpha$  の精度は現在 Bartlett, Goldhagen, Phillips (1970) により、 $|\alpha| < 3 \times 10^{-13}$  が得られている。現在、15桁までゼロに近づいている。

注意すべきは、現在の電磁気は  $\alpha = 0$ 、すなわちクーロン力は、電荷の二点間の距離  $r$  の二乗に逆比例するという仮定の下に成り立っている。将来、もしこれが崩れる発見があった場合、現在の電磁気は大幅な修正が必要となる。

・ グレーディエント力

帯電していない誘電体が電界の勾配の大きい領域にある場合、分極により大きい電界のほうへ力を受ける。右図の場合、球状の誘電体はより大きな電界の方向＝右側へ力を受ける。誘電率の大きいほうが大きな力を受ける。

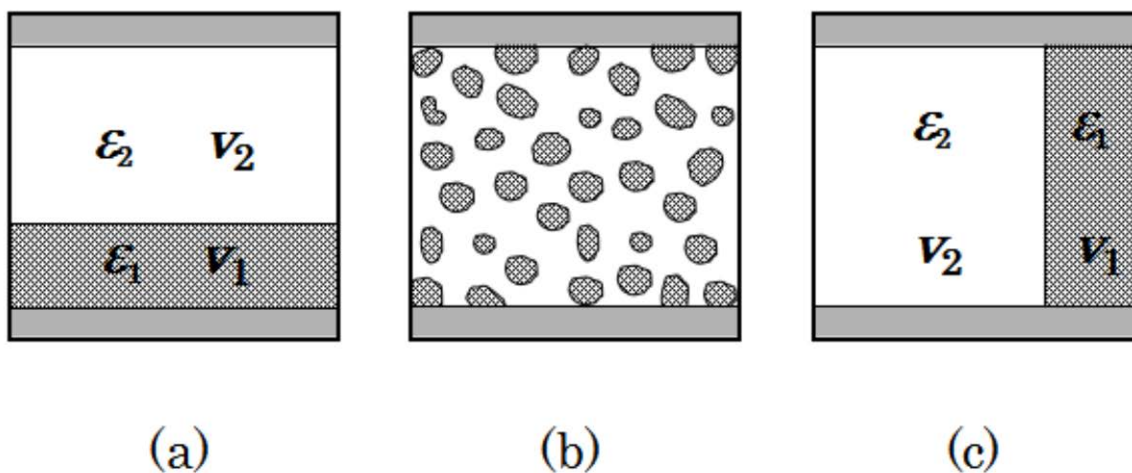


$E_2$  の大きくなる方向に作用する。  
クーロン力よりかなり弱い。

グレーディエント力

金属の場合も同様の現象が生じる。

4. 粒子分散系の誘電率



竹内 学：日本画像学会誌、45 (2006) 194-203

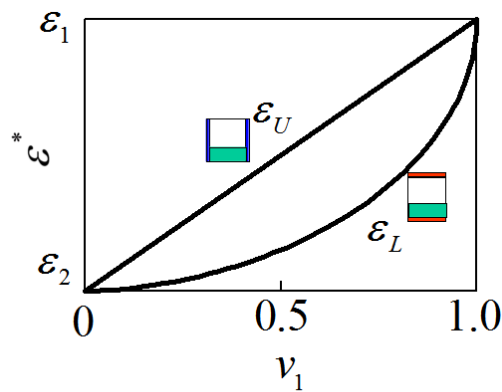
$$F = 2\pi\epsilon_0 \frac{\epsilon_r - 2}{\epsilon_r + 2} a^3 \text{grad } E^2$$

コンデンサーを作る例では、空気コンデンサーにチタン酸バリウムを入れた場合、  
(a) 直列接続のコンデンサー (c) 並列接続コンデンサーの二つの局在する状態があり、  
(b) 実際の分布状態 では、分布状態の違いで、静電容量は図のように大きく異なる。

粒子分散系の誘電率

$$\epsilon^* = v_1 \epsilon_1 + v_2 \epsilon_2 \quad \text{Wiener の上界}$$

$$\epsilon^* = \frac{1}{\frac{v_1}{\epsilon_1} + \frac{v_2}{\epsilon_2}} \quad \text{Wiener の下界}$$



Wienerの上界、下界

竹内 学：日本画像学会誌、45 (2006)

この研究は、Maxwell の後 100 年来研究されているが最終結論に達せず今も研究が続いているが、あまり知られていない。

途中省略

粒子分散系の誘電率は Hashin-Strikman の限界式が提案された。

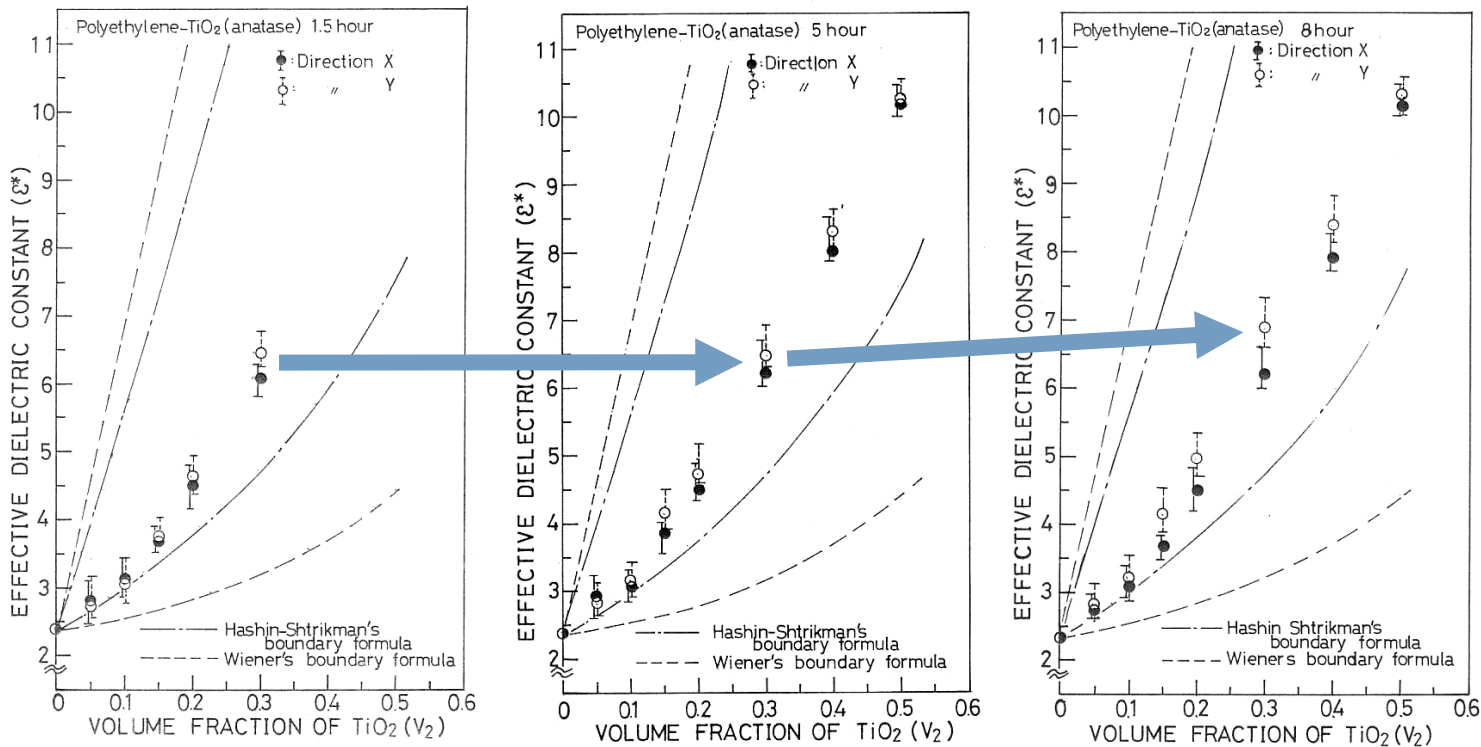
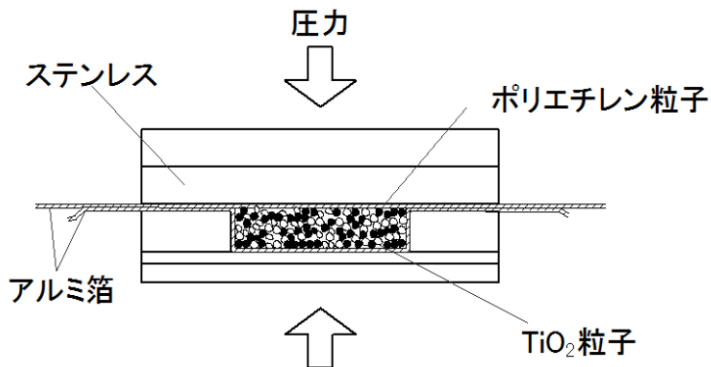
$$\epsilon_1 + \frac{v_2}{\frac{1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} + \frac{v_1}{3\epsilon_1}} \leq \epsilon^* \leq \epsilon_2 + \frac{v_1}{\frac{1}{\epsilon_1 - \epsilon_2} + \frac{v_2}{3\epsilon_2}}$$

$$\epsilon_2 \geq \epsilon_1$$

実験結果

5.1 粒子-ポリマー系

粒子分散系の誘電率を下記のホットプレス (TiO<sub>2</sub>-ポリエチレン) で実際に実験した。

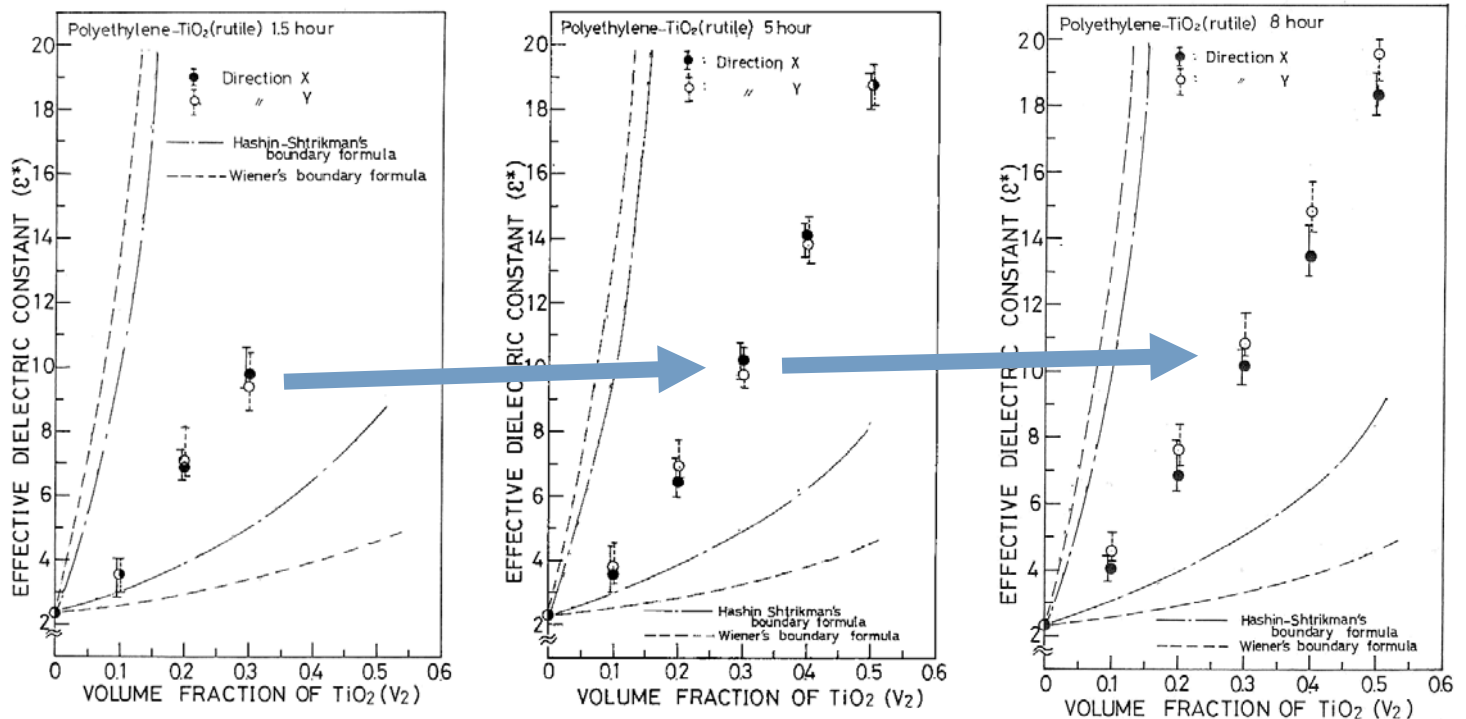


TiO<sub>2</sub>(rutile)-ポリエチレン系の実効誘電率  $\epsilon^*$

(8h : 差が認められる)

実験値は時間とともに X 方向 と Y 方向の実効誘電率  $\epsilon^*$  の差が広がっている。

放置時間とともに TiO<sub>2</sub> 沈み込む効果が実験的に観察され、実効誘電率  $\epsilon^*$  は両バウンダリーの間にあることが検証された。



TiO<sub>2</sub>(anatase)-ポリエチレン系の実効誘電率  $\epsilon^*$

(8h : 差が認められる)

実験値は時間とともに X 方向 と Y 方向の実効誘電率  $\epsilon^*$  の差が広がっている。

放置時間とともに TiO<sub>2</sub> 沈み込む効果が実験的に観察され、実効誘電率  $\epsilon^*$  は両バウンダリーの間にあることが検証された。

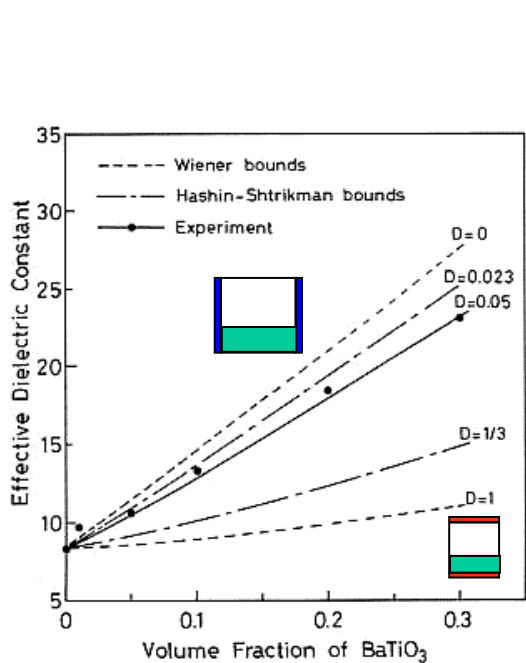
補足 (Wikipedia 酸化チタン IV) :

結晶構造にはアナターゼ型 (正方晶)、ルチル型 (正方晶)、ブルッカイト型 (斜方晶) がある。アナターゼ型の酸化チタン(IV)を 900 ° C 以上に加熱すると、ルチル型に転移する。また、ブルッカイトを 650 ° C 以上に加熱すると、やはりルチル型に転移する。ルチル型は最安定構造であるため、一度ルチルに転移すると低温に戻してもルチル型を維持する。

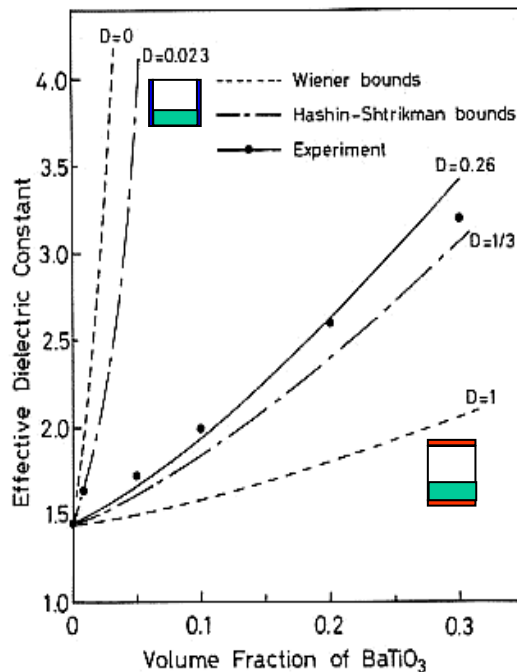


実験 2 :

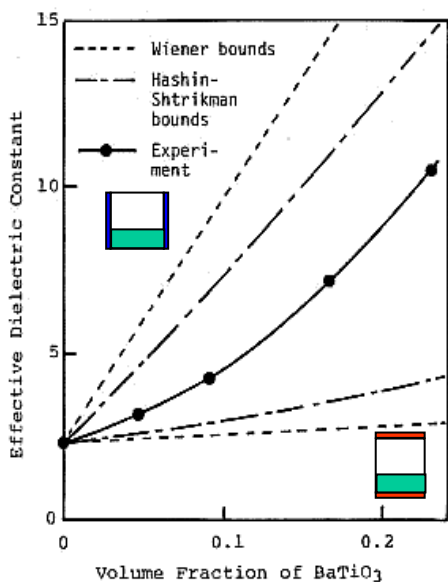
M.Takeuchi, Y.Sekita, H.Nagasaka: Jpn. J. Appl. Phys., 24 (1985) Supplement 24-2, 451-453



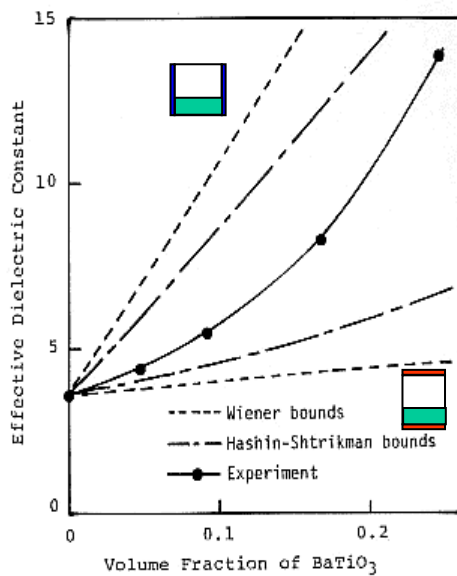
BaTiO<sub>3</sub>-PVdF 系 (溶融) の実効誘電率 (10 kHz)



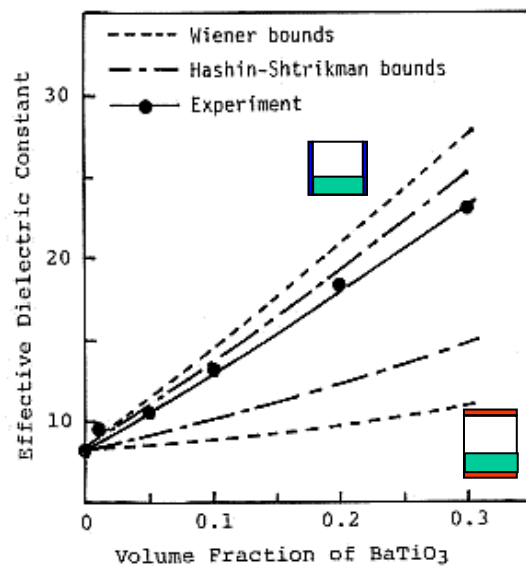
BaTiO<sub>3</sub>-PVdF 系 (casting) の実効誘電率 (10 kHz)



BaTiO<sub>3</sub>-ポリエチレン系 (溶融) の  $e^*$ (10KHz)



BaTiO<sub>3</sub>-EVA 系 (溶融) の  $e^*$ (10KHz)



BaTiO<sub>3</sub>-PVdF 系 (溶融) の  $e^*$  (10 kHz)



会議風景 2

## 5.2 粒子-液体系

以下省略

### 2) 次回開催日の予定

12月21日(土) 中尾 元一 様

次々回：2013年1月度 久米 健次 様

26日(日) . . . 久米様からOKをいただきました。

ホームページ URL

<http://www.cis-laboratories.co.jp/>

以上