

生物応用化学実験

物理化学実験

誘電率と双極子モーメント

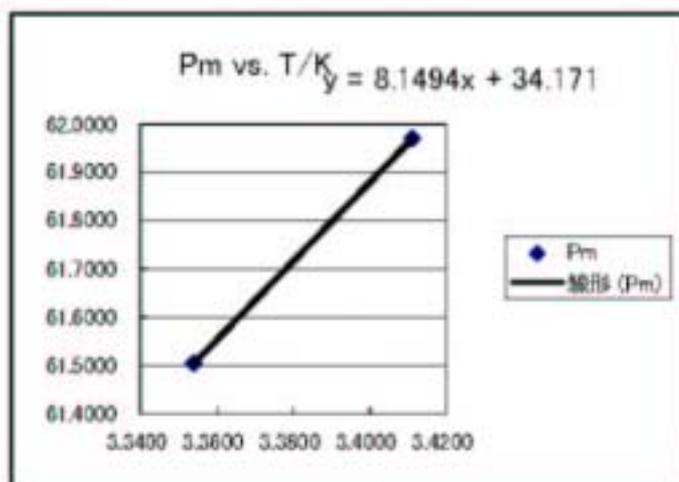
福井大学工学部生物応用化学科

前田史郎

2004.5.18

自習問題22.1

T/°C	T/K	(103K)/T	Pm	ϵ	ρ	$(\epsilon-1)/(\epsilon+2)$
20	293.15	3.4112	61.9701	5.7100	1.1100	0.6109
25	298.15	3.3540	61.5039	5.6200	1.1100	0.6063



$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha' = 1.4 \times 10^{-23} \text{cm}^3 \\ \mu = 1.2 \text{D} \end{array} \right.$$

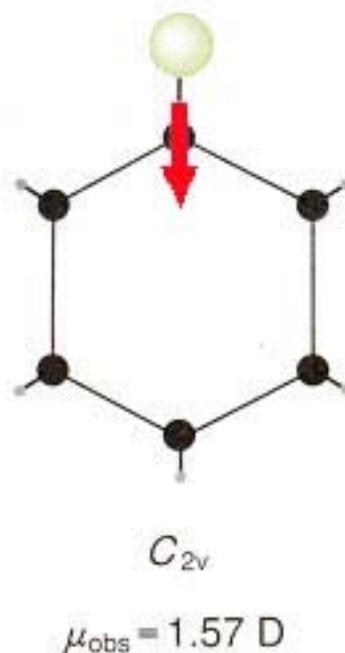
NA	6.02E+23
ϵ_0	8.85419E-12
k	1.38066E-23

α' / cm^3	
α'	1.35E-23

μ / Cm		μ / D	
μ	3.85857E-30		1.1568

課題1：クロロベンゼンの電気双極子モーメントの測定

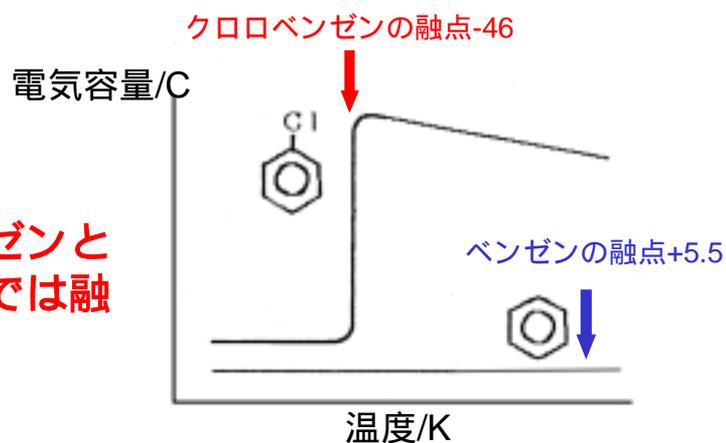
[目的]ベンゼン、クロロベンゼン混合液の電気容量を測定する。そして、**クロロベンゼンの電気双極子モーメントを求める**。極性分子は双極子モーメントを持つことを理解する。



課題2：ベンゼンおよびクロロベンゼンの誘電率の温度変化測定

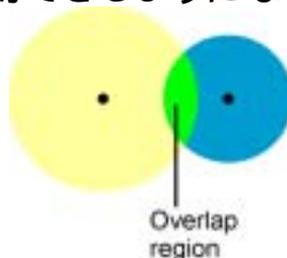
[目的]有極性分子であるクロロベンゼンと無極性分子であるベンゼンの誘電率の温度依存性を測定し、その融点での振る舞いを調べる。そして、有極性分子には無極性分子にも存在する変形分極だけでなく、配向分極の寄与があることを確認する。

極性分子のクロロベンゼンと無極性分子のベンゼンでは融点での挙動が異なる！



(1)分子の電氣的性質は、バルクの物質の多くの性質の原因となる。

(2)分子内の電荷分布にわずかな不均衡があると、分子は分極して**電気双極子モーメント**を持つようになり、分子同士、あるいは分子と外部電場とが相互作用できるようになる。



(3)分子が凝集して物質のバルクな相を形成するのは、この相互作用がもたらす一つの結果である。これらの相互作用は、生体高分子や合成高分子がとる形を理解するためにも大切である。

分子の電氣的性質は、次のような原因から生じる。

(1)異なる電荷を有する原子核が互いに競合する作用



電気双極子モーメント

(2)特定の領域に集積した電子と外部電場の相互作用



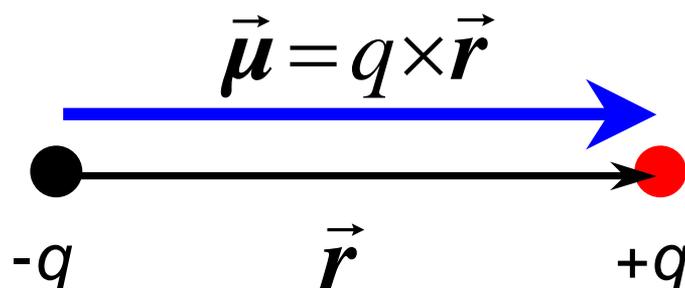
屈折率や光学活性

電気双極子モーメント

等しい大きさの正および負の電荷 $\pm q$ が距離 r だけ離れているものを電気双極子という。双極子モーメント μ は、 qr の大きさと、負の電荷から正の電荷へ向かう方向を持ったベクトルによって表わされる。双極子モーメントの大きさは、非SI単位であるデバイ(D)で表わされることがある。

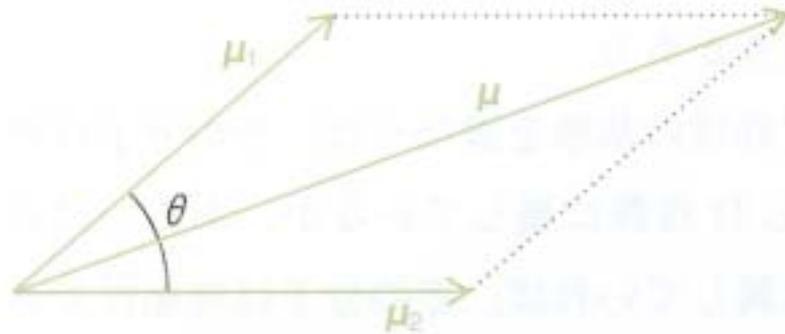
$$1 \text{ D} = 3.33564 \times 10^{-30} \text{ Cm}$$

一対の電荷 $+e$ と $-e$ が 100pm 離れている場合、双極子モーメント μ は $1.6 \times 10^{-30} \text{ Cm}$ であり、これは 4.8D にあたる。



- (1) デバイ(D)という単位は、物理化学者デバイの名前にちなんで名付けられた。単位の係数 3.33564×10^{-30} は、もともこの単位が静電単位系 (e.s.u. 単位系) で定義されたものであることに由来している。 $\pm 1\text{e.s.u.}$ の大きさの2つの電荷が 1 (0.1nm, 100pm) の距離離れている双極子では、 1e.s.u. cm の双極子モーメントを生じる。
- (2) $\pm e$ の大きさ ($4.80 \times 10^{-10}\text{e.s.u.}$) の2つの電荷が 0.1nm の距離だけ離れている双極子では、 $4.80 \times 10^{-10}\text{e.s.u. cm}$ の双極子モーメントを生じる。
- (3) 10^{-10}e.s.u.cm の単位はデバイ(D)と呼ばれる。

多原子分子中の2つまたはそれ以上の結合がそれぞれ双極子を持つ場合には、その分子全体としての双極子モーメントは、それぞれの結合モーメントのベクトル和である。



3 双極子のたし算

多原子分子中の2つまたはそれ以上の結合がそれぞれ双極子を持つ場合には、その分子全体としての双極子モーメントは、それぞれの結合モーメントのベクトル和である。

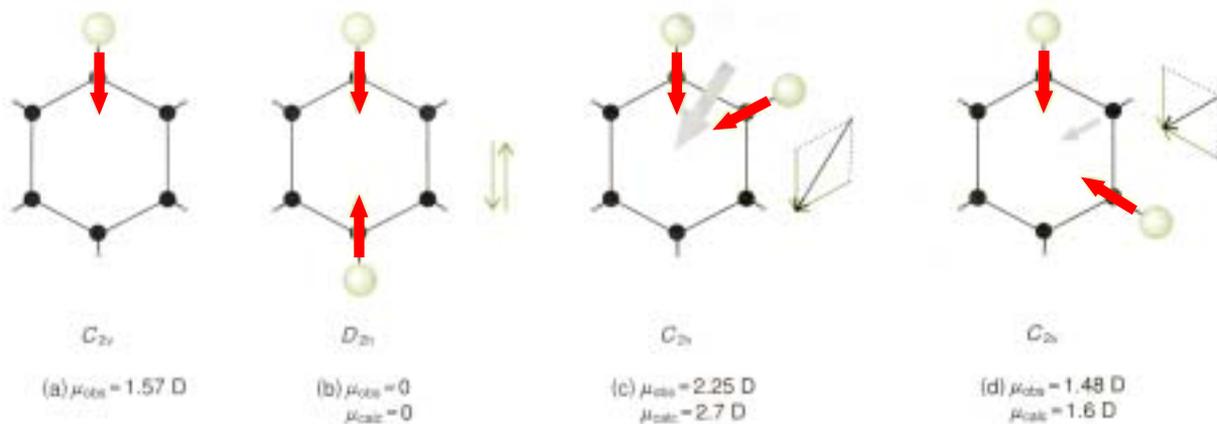


図 22-2 ジクロロベンゼン異性体 (b) から (d) の合成双極子モーメント (灰色) は、近似的に 2 個のクロロベンゼンの双極子モーメント (1.57 D) のベクトル和で与えられる。

課題1：クロロベンゼンの電気双極子モーメントの測定

[目的]ベンゼン、クロロベンゼン混合液の電気容量を測定する。そして、**クロロベンゼンの電気双極子モーメントを求める**。極性分子は双極子モーメントを持つことを理解する。

課題2：ベンゼンおよびクロロベンゼンの誘電率の温度変化測定

[目的]**有極性分子であるクロロベンゼンと無極性分子であるベンゼンの誘電率の温度依存性を測定し、その融点での振る舞いを調べる**。そして、有極性分子には無極性分子にも存在する変形分極だけでなく、配向分極の寄与があることを確認する。

課題1：クロロベンゼンの電気双極子モーメントの測定

[実験操作]

容量既知のコンデンサを用いてブリッジ(DELICA・ミニブリッジM6)の使用方法を練習する。通常の電子回路に用いられるマイカ、マイラ、スチロールコンデンサ等の損失は $D=0 \sim 0.02$ であり、Dダイヤルはほとんどゼロの位置から動かす必要はない。ベンゼンのような無極性液体の場合も同様である。

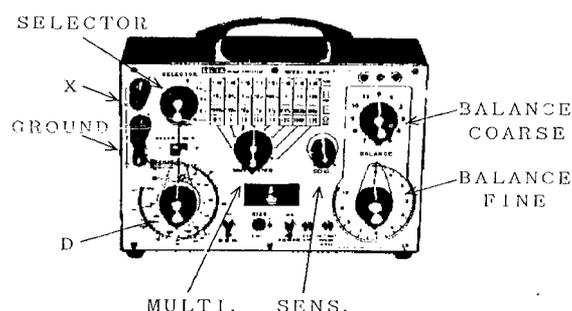


図9. DELICA ミニブリッジ M6 の端子・ダイヤル・スイッチ名称

測定セルをX端子に正しく接続すること

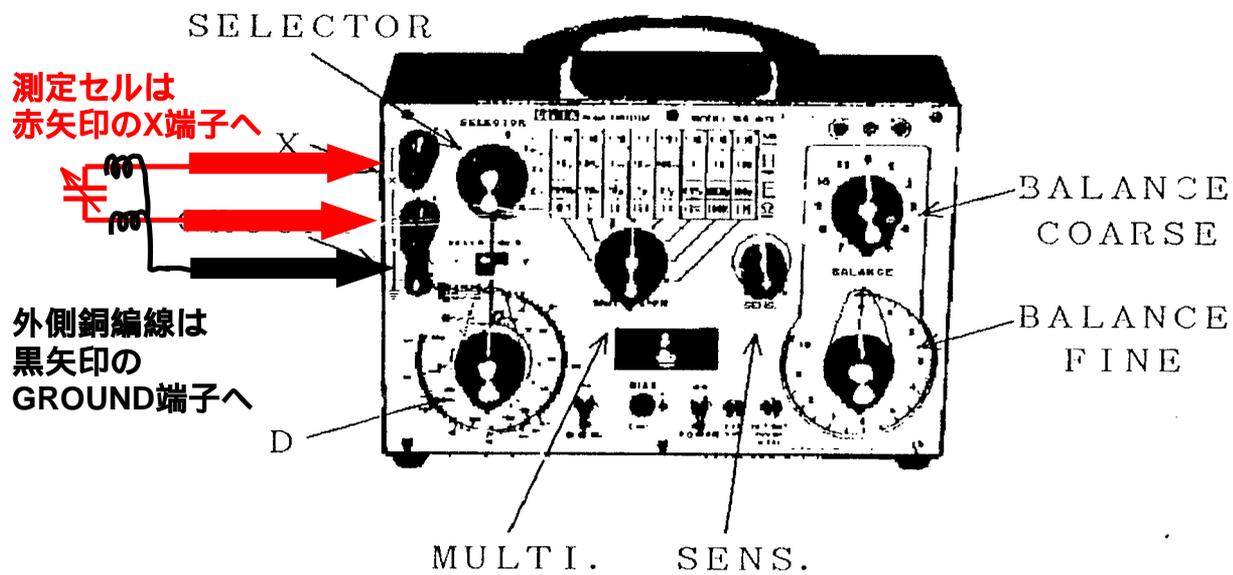


図9. DELICA ミニブリッジ MG の端子・ダイヤル・スイッチ名称

容量測定用の液体セルを図1に示す。コンデンサには50pFのエア・バリコンを利用している。まず、測定試料を入れずに、空のコンデンサ容量(C_0)を3回測定し平均をとる)。

ベンゼン($\epsilon_1=2.27$)を液体セルに、コンデンサの羽根が浸る程度に適量入れる。この状態で容量(C_1)を測定する。測定は同じ試料について、3回繰り返して行い、その平均をとる。測定が済んだら、BALANCEダイヤルを全く別のところにずらして、初めから測定を行う。

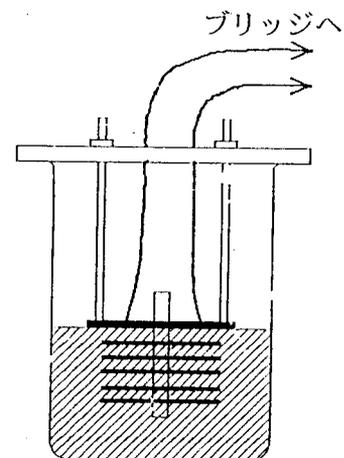


図1 . 容量測定セル

クロロベンゼン($\epsilon_2=5.63$)について、と同様の測定を行う。測定された容量を C_2 とする。

クロロベンゼンとベンゼンの混合液(クロロベンゼンのモル分率が、およそ0.05、0.1、0.2、0.3、0.5、0.75)の容量測定を行う。10mlメスシリンダでおよその量を計りとった両試料を共栓付三角フラスコに入れ、上皿電子天びんで質量を測定して正確なモル分率を求める。モル分率は、きっちり0.500である必要はなく、例えば0.486でも全く問題はない。

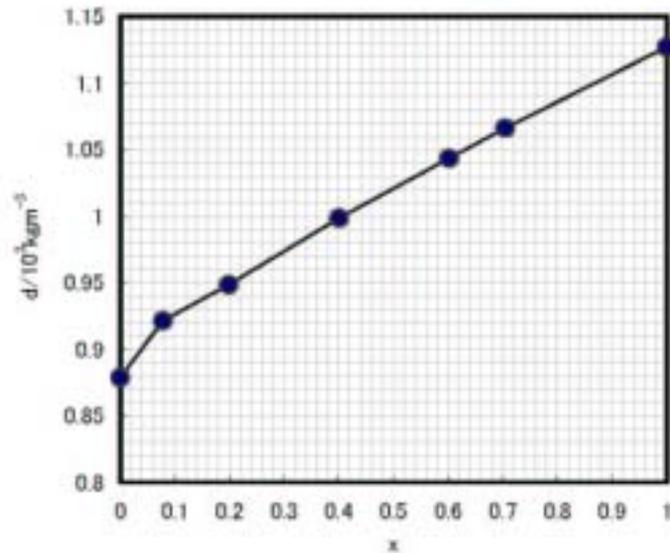
また、新たな試料の測定を行う前に、前回の液がコンデンサーの極板間に残っていないように特に注意する(エアドライアで充分乾燥させる)。

[注意事項] ベンゼン、クロロベンゼン共に有毒であり、特にクロロベンゼンは危険であるから、試料の入れ替え等の作業は必ずドラフト内で行い、蒸気を吸い込まないように充分注意しなければならない。

[理論]に書かれているように、混合液の各モル分率に対してモル分極 P_2 (2はクロロベンゼン)を計算し、モル分率対 P_2 のグラフを描き、濃度ゼロに外挿して P_2 を求める。 P_{D2} R_2 を計算し、式(28)よりクロロベンゼンの双極子モーメントを求める。ただし、混合液の密度は表に示した d_4^{20} の数値から補間法で求める。また、クロロベンゼンの屈折率としては、温度にかかわらず20 の値 $n_D^{20}=1.52479$ を用いる。

x	$d/10^3 \text{kgm}^{-3}$
0	0.8787
0.0786	0.9214
0.1988	0.9485
0.4007	0.9986
0.602	1.0435
0.7048	1.0663
1	1.1272

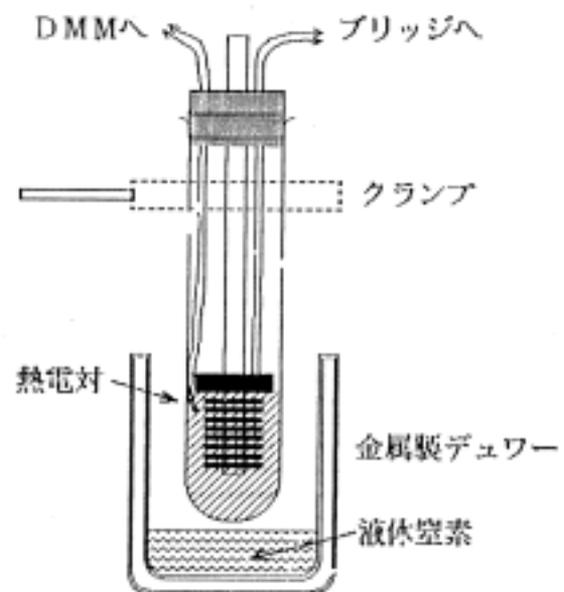
ベンゼン-クロロベンゼン系の密度



課題2：ベンゼンおよびクロロベンゼンの誘電率の温度変化測定

[実験操作]

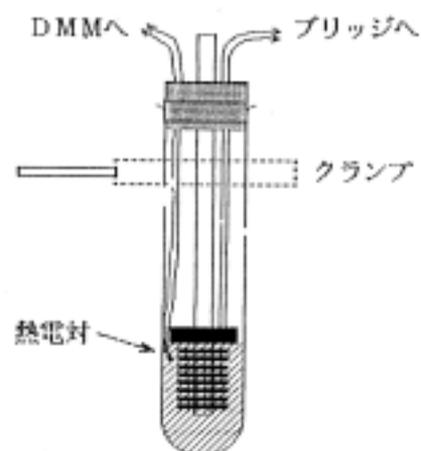
容量測定用コンデンサおよび温度測定用銅-コンスタンタン熱電対を備え、熱容量を大きくするために下部にハンダを巻き付けたガラス容器にクロロベンゼンをコンデンサの羽根の少し上になるように入れる。そして、ガラス容器をクランプで固定する。



コンデンサはミニブリッジに、熱電対は基準接点(氷水の0)を經由してデジタルマルチメータ(DMM)に接続する。

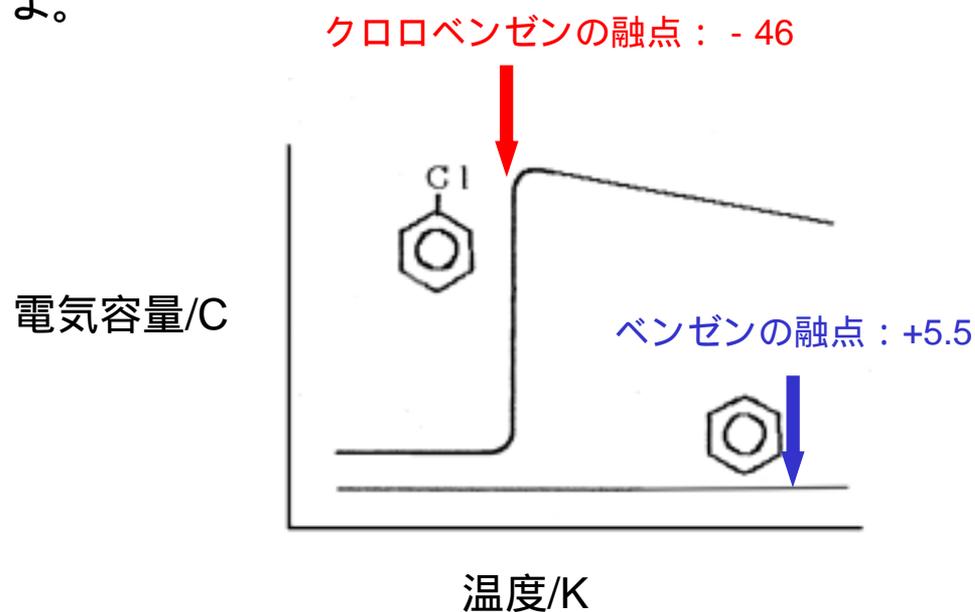
ガラス容器を金属製デュワー瓶中の液体窒素に漬けてDMMの表示がおよそ -5mV (-170)になるまで放置して、容器全体を冷却する。

クランプを上げて容器を空気中に取り出し、およそ3分おきにDMMの表示を読みながら容量測定を行う。融点付近に近づいたらその後は、およそ1分おきに同様に測定を行う。



熱電対の起電力(DMMの読み)を温度に換算し、容量を温度に対して目盛ると、図3のようになる。

ベンゼンに対しても ~ の実験操作を繰り返す。極性分子と無極性分子では融点における振る舞いが異なる理由を考察せよ。



実験は1号館3階分析化学実験室(135Sの向かい側)で行います。



アトキンス物理化学 22章 分子の電氣的・磁氣的性質

22・1 永久および誘起電気双極子モーメント

(a)物質の分類

極性分子・・・永久電気双極子モーメントを持つ分子

永久電気双極子モーメントは分子内の原子上の部分電荷に由来するが、この部分電荷は電気陰性度の違いから生じる。

無極性分子・・・永久電気双極子モーメントを持たない分子

無極性分子は電場中で誘起双極子モーメントを持つようになるが、これは電場によって分子の電子分布と原子核の位置に歪みが生じるためである。

永久電気双極子モーメント

- ・・・極性分子のみが持つ

誘起電気双極子モーメント

- ・・・電場中に入れられた全ての分子が持つ

誘起電気双極子モーメントは電場によって分子の電子分布と原子核の位置に歪みが生じるために誘起される。したがって、極性分子であるか、無極性分子であるかに関係なく、あらゆる物質が電場中で誘起双極子モーメントを持つようになる。

試料の分極 P

$$P = \mu N \quad [2]$$

ここで、 $\langle \mu \rangle$ は電気双極子モーメント密度、つまり分子の平均電気双極子モーメントであり、 N は数密度である。

以下の説明では、物質は誘電体であるとする。誘電体とは、分極性で非伝導性の媒質のことである。

外部電場がないとき・・・ $\langle \mu \rangle = 0$

外部電場がないと分子は乱雑な配向をとるので $\langle \mu \rangle = 0$ で、等方性流体試料の分極は0である。

外部電場があるとき・・・ $\langle \mu \rangle \neq 0$

電場が存在するとある配向の方が他の配向より低いエネルギーをもつから、双極子は部分的に配列するようになる。その結果、電気双極子モーメント密度は0でなくなる。

さらに、電場によって誘起された誘起双極子モーメントからの寄与が付け加わる。

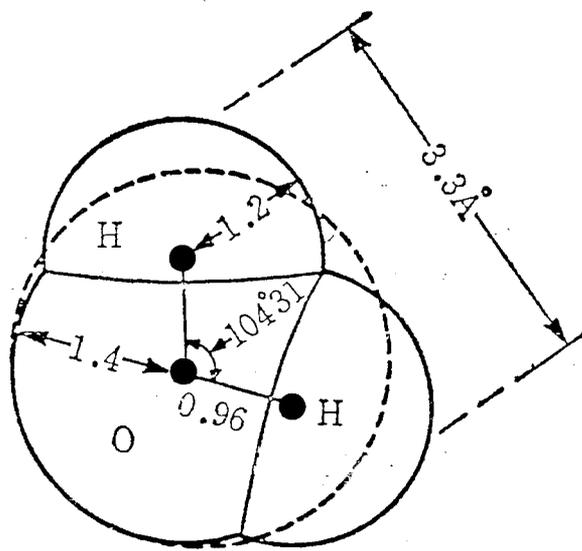
(b)極性分子

すべての異核二原子分子は極性分子である。

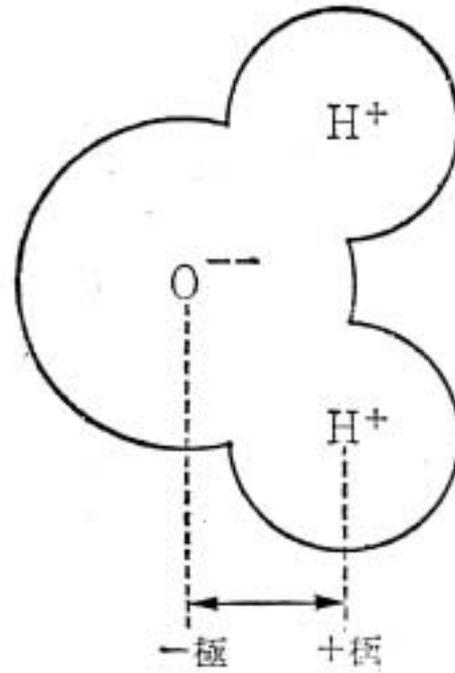
	μ / D	$\alpha' / (10^{-30} \text{m}^3)$
CCl_4	0	10.5
H_2	0	0.819
H_2O	1.85	1.48
HCl	1.08	2.63
HI	0.42	5.45

双極子モーメントと二つの原子の電気陰性度の差の間には非常に近似的な関係式が成り立つ。

$$\mu / D \sim \Delta\chi$$

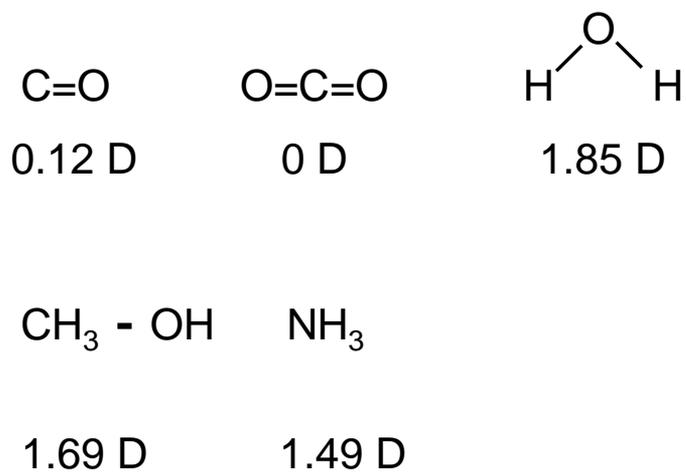


水分子の形状



水分子の双極

多原子分子が対称性を持つとき、無極性分子になる。



流体試料の分子の平均双極子モーメント

外部電場がないとき . . . $\langle \mu \rangle = 0$

外部電場があるとき . . . $\langle \mu_z \rangle = \frac{\mu^2 E}{3kT}$

ここで、 z は外部電場の方向、 μ は双極子モーメント、 E は電場の大きさ、 k はボルツマン定数、 T は温度である。

(c)誘起双極子モーメント

外部電場は、

(1)分子の永久電気双極子モーメントを電場方向に配列させる

(2)分子の電子分布や原子核の位置を歪ませる。

(1)の効果は極性分子にのみ作用するが、(2)の効果は全ての分子中に誘起双極子モーメント μ^* を生じさせる。

$$\mu^* = \alpha E$$

ここで、 α は分子の分極率、 E は電場の大きさである。

分極率体積 α'

分極率 α は、しばしば体積の次元を持つ分極率体積 α' で表される。

$$\alpha' = \frac{\alpha}{4\pi\epsilon_0}$$

ここで、 ϵ_0 は真空の誘電率である。 $4\pi\epsilon_0$ の単位はクーロンの2乗/ジュール/メートル($C^2J^{-1}m^{-1}$)であるから、 α' は体積の次元を持つ(その名称の由来である)。

分極率体積は現実の分子体積と同じくらいの大きさである(ほぼ $10^{-30}m^3$ つまり1 Å³程度である)。

(d)高い周波数における分極

外部交流電場の周波数が高いとき、分子は、その外部電場の変化に追従できるほど速く向きを変えることができないので、配向分極の寄与は消失する。

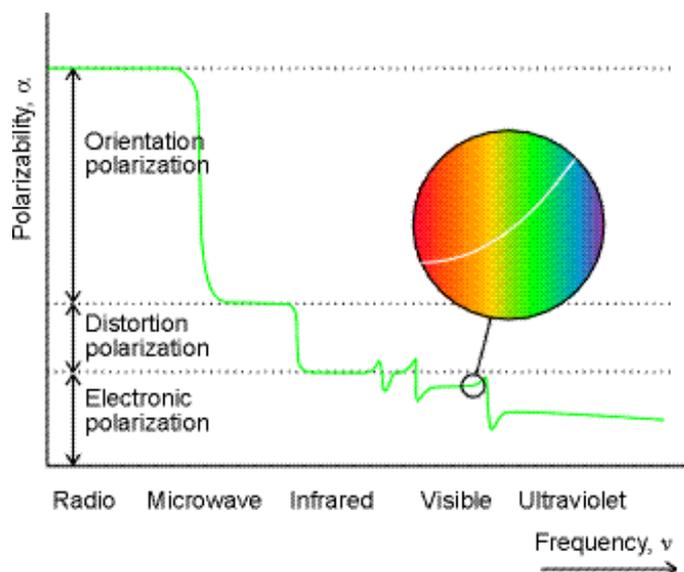


図22.4 分極率が外部電場の振動数によって変化する様子。

「アトキンス物理化学」では、

変形分極・・・原子核の位置が歪むことによる分極

電子分極・・・電子分布が歪むことによる分極

というように区別している。そして、変形分極は赤外光領域で分子分極に対する寄与がなくなる。しかし、電子の動きは速いので、電子分極の寄与は可視光領域でも残っていると説明している。

一方、実験手引き書では両者を合わせて変形分極といている。この実験では、電子分布の歪みも含めて変形分極ということにする。

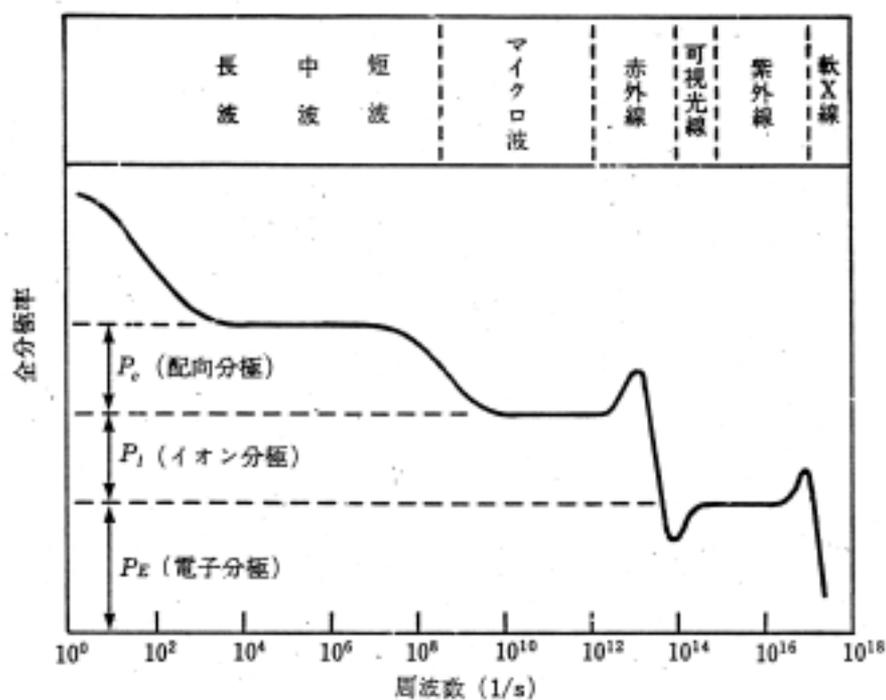
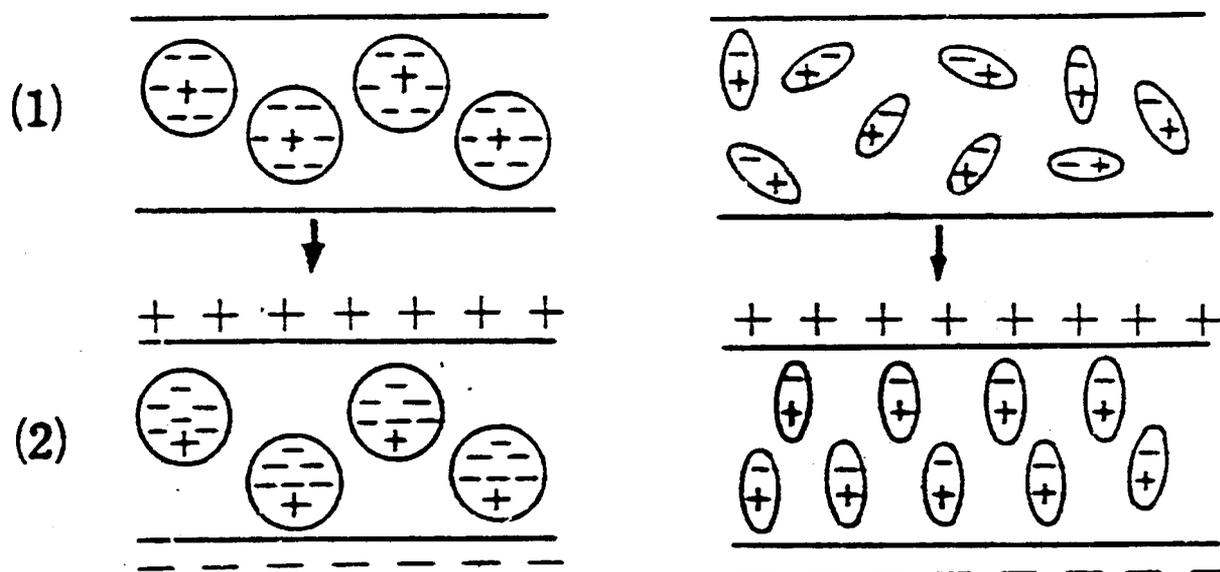
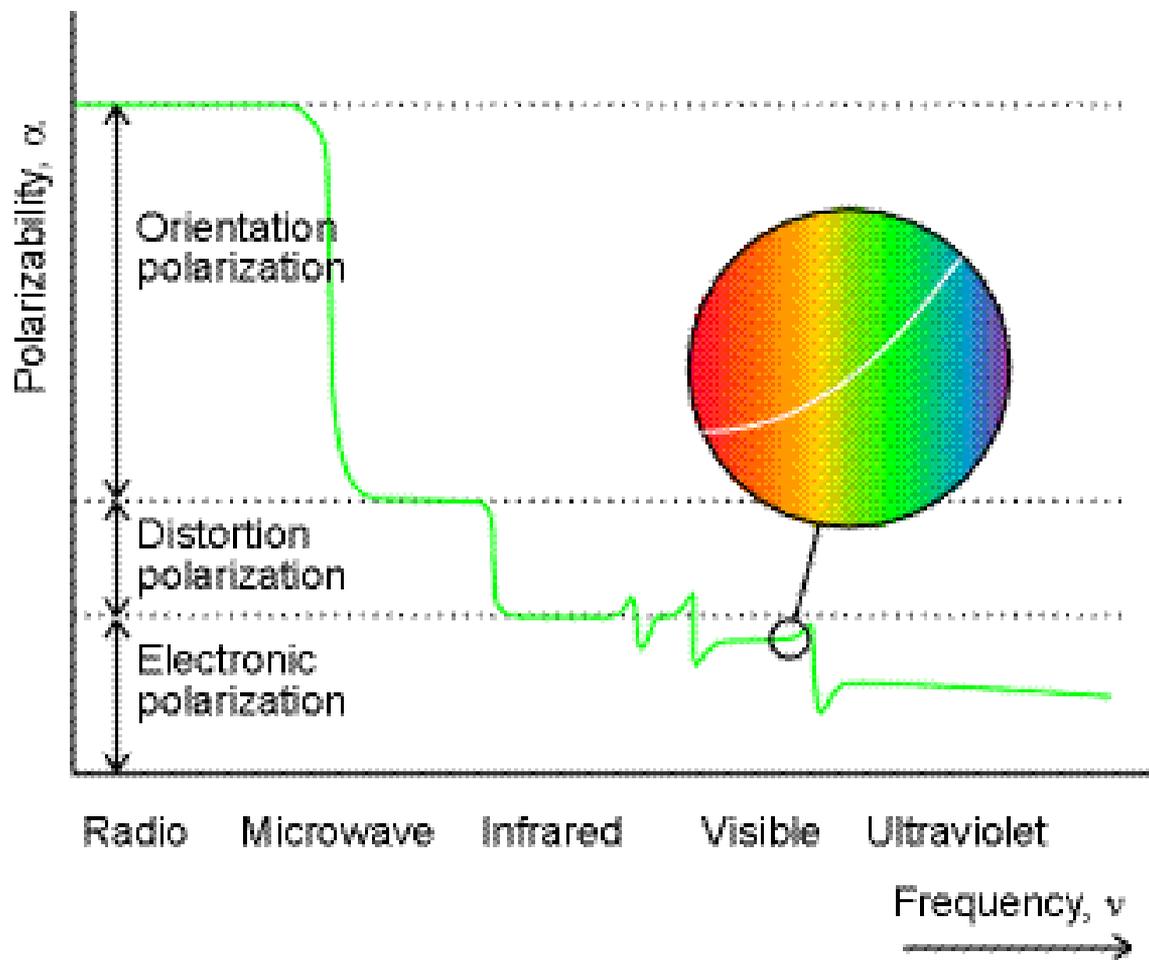


図 5-8 分極率の周波数依存性



変形分極

配向分極

(1) 電場の無い場合, (2) 電場をかけた場合

(e)比誘電率

真空中で距離 r だけ離れたところに、二つの電荷 q_1, q_2 があるとき、その相互作用のポテンシャルエネルギーは、

$$V = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (13a)$$

である。これと同じ二つの電荷が、ある(空気あるいは液体のような)媒質中に浸っているときは、そのポテンシャルエネルギーは減少して、

$$V = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon r} \quad (13b)$$

となる。ここで、 ϵ は媒質の誘電率)である。誘電率は、ふつうその媒質の無次元の**比誘電率** ϵ_r を使ってつぎのように表す。

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad [14]$$

比誘電率は、溶液中のイオンの間の相互作用の強さに非常に重要な効果を与えることができる。たとえば、水の比誘電率は25 で78であって、イオン間のクーロン相互作用エネルギーをその真空の値からほとんど2桁近く減少させる

物質の比誘電率は,その分子が有極性であるか,分極しやすいと高い.比誘電率と分子の電氣的性質の間の定量的な関係は,媒質の分極を考慮することによって得られ,それは次のデバイの式で表される.

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{\rho P_m}{M} \quad (15)$$

ここで, ρ は試料の質量密度で, M は分子のモル質量である. P_m はモル分極であり,永久双極子モーメントの寄与を表す項も含めて次のように定義される.

モル分極

$$P_m = \frac{N_A}{3\epsilon_0} \left(\alpha + \frac{\mu^2}{3kT} \right) \quad [16]$$

$\mu^2/3kT$ という項は,外部電場の存在のもとで電気双極子モーメントの熱平均をとることによって生じる(式5).これに相当する式で,永久双極子モーメントの寄与が入っていないものを**クラウジウス - モソッティの式**という.すなわち,

クラウジウス -
モソッティの式

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{\rho N_A \alpha}{3M\epsilon_0} \quad (17)$$

である.

クラウジウス - モソッティの式は,分子が無極性であるか,外部電場の振動数が高すぎて分子が電場の方向変化に応じて速く配向することができないかのどちらかのために,**永久双極子モーメントからの分極への寄与がないときに使う.**

デバイの式

デバイの式

$$P_m = \frac{N_A}{3\epsilon_0} \left(\alpha + \frac{\mu^2}{3kT} \right) \quad [16]$$

式[16]から,一連の異なる温度で ϵ_r を測定し, P_m を計算し,それを $1/T$ に対してプロットすることによって,試料中の分子の分極率と永久双極子モーメントを決定できることがわかる.このグラフの勾配は $N_A\mu^2/9\epsilon_0k$ であり, $1/T=0$ における切片が $N_A\alpha/3\epsilon_0$ である.

例題22.1 物質の誘電率と分極率の決定

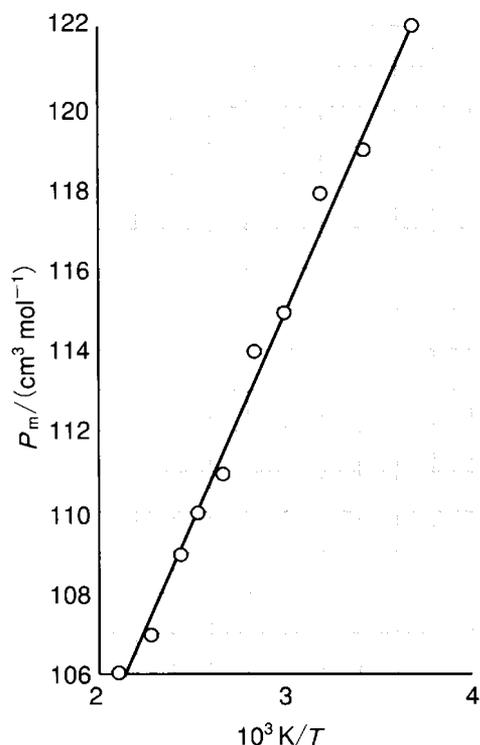
ショウノウ(4)の比誘電率を一連の温度で測定し,下表に示す結果を得た.この分子の双極子モーメントと分極率体積を決定せよ.

$\theta/^\circ\text{C}$	$\rho/(\text{g cm}^{-3})$	ϵ_r
0	0.99	12.5
20	0.99	11.4
40	0.99	10.8
60	0.99	10.0
80	0.99	9.50
100	0.99	8.90
120	0.97	8.10
140	0.96	7.60
160	0.95	7.11
200	0.91	6.21

式(15)に従って,各温度における $(\epsilon_r - 1)/(\epsilon_r + 2)$ を計算し,これに M/ρ を掛けて P_m をつくる必要がある.

ショウノウでは, $M=152.23\text{g mol}^{-1}$ である.したがって,上のデータを使ってつぎの表を作成することができる.

$\theta/^\circ\text{C}$	$(10^3 \text{ K})/T$	ϵ_r	$(\epsilon_r - 1)/(\epsilon_r + 2)$	$P_m/(\text{cm}^3 \text{ mol}^{-1})$
0	3.66	12.5	0.793	122
20	3.41	11.4	0.776	119
40	3.19	10.8	0.766	118
60	3.00	10.0	0.750	115
80	2.83	9.50	0.739	114
100	2.68	8.90	0.725	111
120	2.54	8.10	0.703	110
140	2.42	7.60	0.688	109
160	2.31	7.11	0.670	107
200	2.11	6.21	0.634	106



式(16)から, P_m を $1/T$ に対してプロットすると,直線になると期待できる.

$1/T=0$ における切片が
 $N_A \alpha / 3 \epsilon_0 = (4\pi N_A / 3) \alpha'$ で,
 勾配が $N_A \mu^2 / 9 \epsilon_0 k$ である.

(1)切片は82.7にあるから、

$\alpha' = 3.3 \times 10^{-23} \text{cm}^3$ になる。

(2)勾配は10.9であるから、

$\mu = 4.46 \times 10^{-30} \text{Cm}$ となり、

これは1.34Dに相当する。

図 22・3 $P_m/(\text{cm}^3 \text{ mol}^{-1})$ を $(10^3 \text{ K})/T$ に対してプロットしたもので, 例題 22・1 でショウノウの分極率と双極子モーメントを決定するために使う。

[理論1]

§ 1. 比誘電率

真空中に置かれた平行板コンデンサーを考えよう(図4)。このコンデンサーの極板に単位面積当たり \pm の電荷をそれぞれ与えると、極板に垂直に電場が生じる。その電場の強さは次式で与えられる。

$$E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

ここで、 ϵ_0 は真空の誘電率である

($\epsilon_0 = 8.85419 \times 10^{-12} \text{J}^{-1} \text{C}^2 \text{m}^{-1}$)。

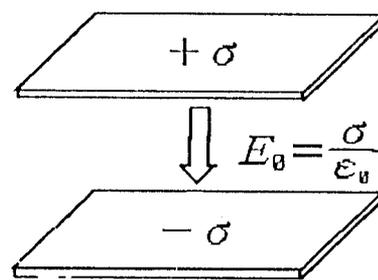


図4. コンデンサー (真空中)

コンデンサーの極板間を電気を伝えない物質、すなわち誘電体で満たすとしよう(図5)。小さい電場を作用させると、導体内では電子はまったく自由に動くのに対し、絶縁体または誘電体内ではこの電場のために電子がその平衡位置からほんの少しずれるだけである。すなわち誘電体に電場が作用すると正負の電荷の分離が起こる。このような場合電場が誘電体を分極する、あるいは誘電体内部に分極が生じるという。

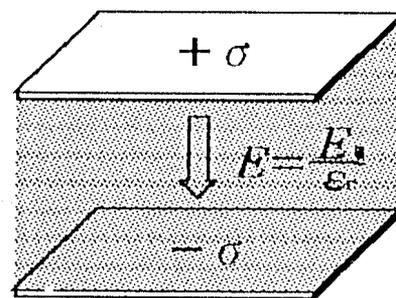
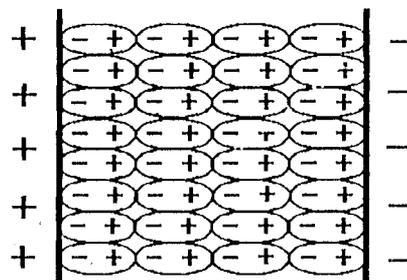


図5. 誘電体を極板間にはさんだコンデンサー

このために極板上にもともとあった電荷の一部が中和され、電場Eは次のように外部から加えられた電場 E_0 よりも小さくなる。

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\sigma}{\epsilon_r \epsilon_0} = \frac{E_0}{\epsilon_r}$$



(a)

図7. (a)誘電体の分極

ここで、 ϵ はその誘電体の誘電率である。 ϵ_r は誘電体の誘電率 ϵ と真空の誘電率 ϵ_0 との比であり、比誘電率、または誘電定数と呼ばれる。比誘電率 ϵ_r は1より必ず大きな値である。

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon_r > 1 \quad (3)$$

比誘電率は通常、ブリッジ回路を使って、誘電体を極板の間に入れたときの容量Cの真空中での値 C_0 (通常、空気中の値で近似する)に対する比

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (5)$$

として測られる。

気体の比誘電率の値は1に近い。種々の液体についての比誘電率は2 ~ 100程度の範囲で変わる。

§ 3. 誘電体の分極

誘電体の分極は、次のクラウジウス - モソッティの式で表される。

クラウジウス -
モソッティの式

$$\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} = \frac{N\alpha}{3\varepsilon_0}$$
$$= \frac{\rho N_A \alpha}{3M\varepsilon_0}$$

ここで、 N は単位体積当たりの分子数、 N_A はアボガドロ数、 ρ は密度、 M はモル質量である。

モル分極 P_m は、外部電場存在の下での電気双極子モーメントの熱平均を加えた、次のデバイの式で表される。

デバイの式

$$P_m = \frac{N_A}{3\varepsilon_0} \left(\alpha + \frac{\mu^2}{3kT} \right) \quad (19)$$

第1項は、分子の極性には関係なく電場中に置かれたあらゆる物質に生じる**変形分極** P_D である。一方、第2項は、極性分子にのみ存在する永久双極子モーメントに起因する**配向分極** P_O である。

したがって、無極性分子においては

$$P_m = P_D$$

極性分子においては

$$P_m = P_D + P_O$$

である。

無極性溶媒に極性分子を少量溶かした希薄溶液

希薄溶液では、溶質の持つ双極子間の相互作用が無視できるので、デバイの式が適用できる。

溶媒と溶質の間に特殊な力が働かない場合には、分極について加成性が成り立つので、溶液のモル分極 P_{12} は

$$P_{12} = xP_2 + (1-x)P_1 \quad (21)$$

で表される。添え字、1、2、12は、それぞれ溶媒、溶質、溶液に関する量であることを表し、 x は溶質のモル分率である。(21)式より、

$$P_2 = P_1 + \frac{P_{12} - P_1}{x} \quad (22)$$

ここで、クラウジウス-モソッティの式を適用すると、

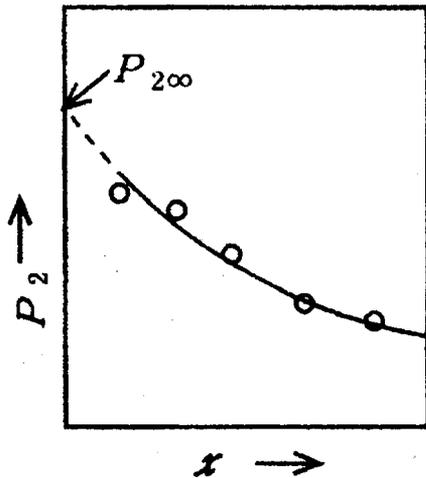
$$P_{12} = \frac{\varepsilon_{r12} - 1}{\varepsilon_{r12} + 2} \cdot \frac{xM_2 + (1-x)M_1}{d_{12}} \quad (23)$$

であり、また $P_{O1}=0$ であるから、溶媒のモル分極 P_1 は

$$P_1 = P_{D1} = \frac{\varepsilon_{r1} - 1}{\varepsilon_{r1} + 2} \cdot \frac{M_1}{d_1} \quad (24)$$

となり、溶液および溶媒の誘電率 ε_{r12} 、 ε_{r1} と密度 d_{12} 、 d_1 の測定から P_2 が計算できる。

実際には、希薄溶液より求めた P_2 には大きな誤差が伴うので、かなり濃度の大きいところまで測定を行い、図8に示すように、 P_2 を x に対してプロットして得た曲線を $x=0$ に外挿した無限希釈の極限值として P_2 を求める。



P_2 は、ベンゼン溶媒の中に1分子だけ孤立した状態のクロロベンゼン分子の分極をアボガドロ数個分集めた仮想的なモル分極である！

図8 無限希釈の溶質分極 P_2 の決定

配向分極 P_{O2} は、無限希釈の溶質分極 P_2 より変形分極 P_{D2} を差し引いたものである。

$$P_{O2} = P_2 - P_{D2}$$

変形分極は(17)式で与えられる量であるが、これをマックスウェルの関係式

マックスウェルの関係式 $\epsilon_r = n^2$

を用いて、ナトリウムD線に対する分子屈折 R_2 で近似する。ここで、 n は光の振動数における屈折率である。この近似は P_{D2} がすべて電子雲の変形によると仮定することに相当する。

$$P_{D2} \approx R_2 = \frac{n_2^2 - 1}{n_2^2 + 2} \cdot \frac{M_2}{d_2}$$

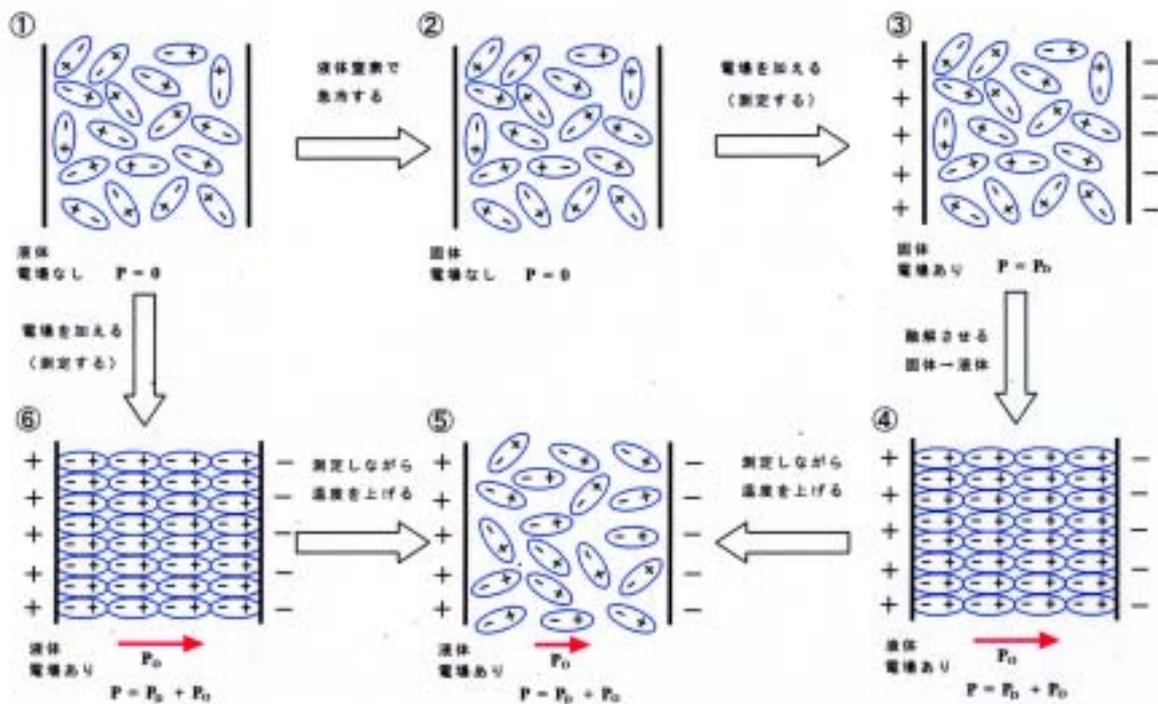
したがって、

$$P_{O2} = P_2 - R_2 \quad (27)$$

である。この式と、(19)式のデバイの式より、双極子モーメントは

$$\mu = \sqrt{\frac{9\varepsilon_0 kT}{N_A} (P_{2\infty} - R_2)} \quad (28)$$

で与えられる。



課題1では、測定にともなって①→⑥の変化が起こる。

課題2では、急冷で①→②、測定で②→③、融解で③→④、温度上昇で④→⑤の変化が起こる。

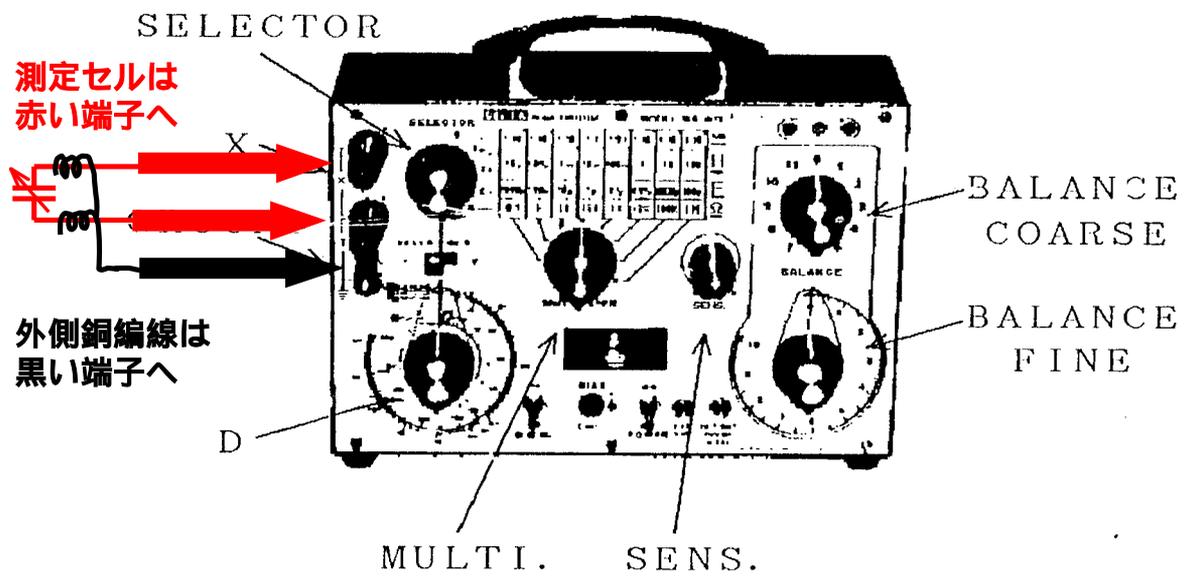


図9. DELICA ミニブリッジ MG の端子・ダイヤル・スイッチ名称

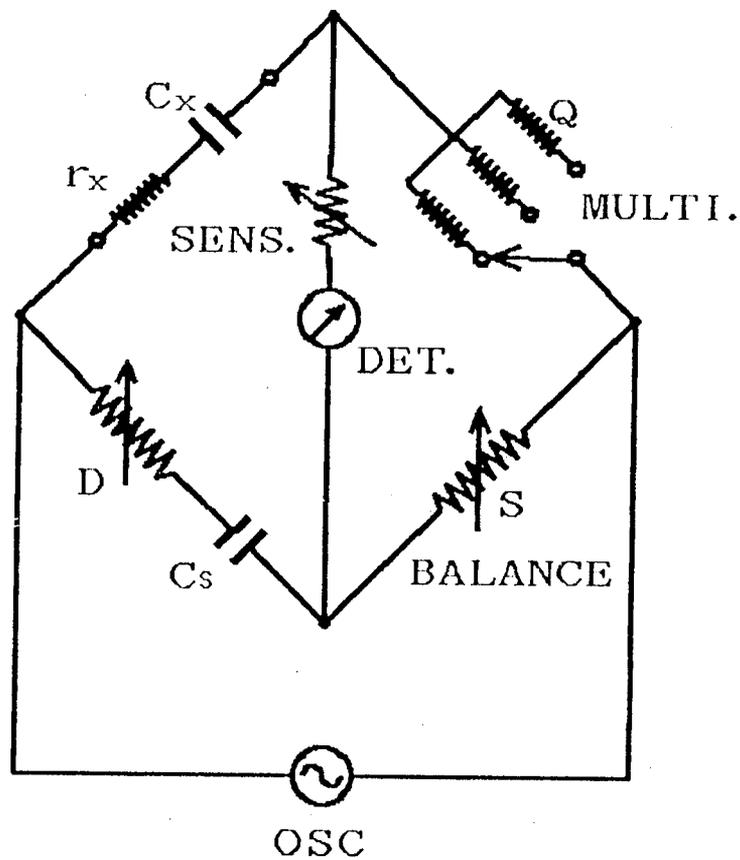


図10. 容量測定モードのときにMGが構成する直列抵抗ブリッジ

熱電対温度計

2種の金属A、Bを図11のように接合するとゼーベック効果によって両端の温度差に比例した電流が流れる。

この熱起電力を利用して温度を測定することができる。これを熱電対という(図12)。

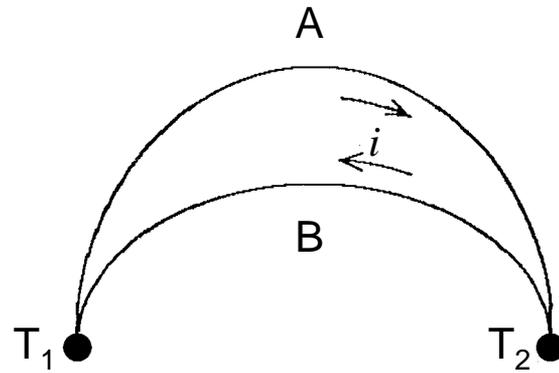


図11 ゼーベック効果

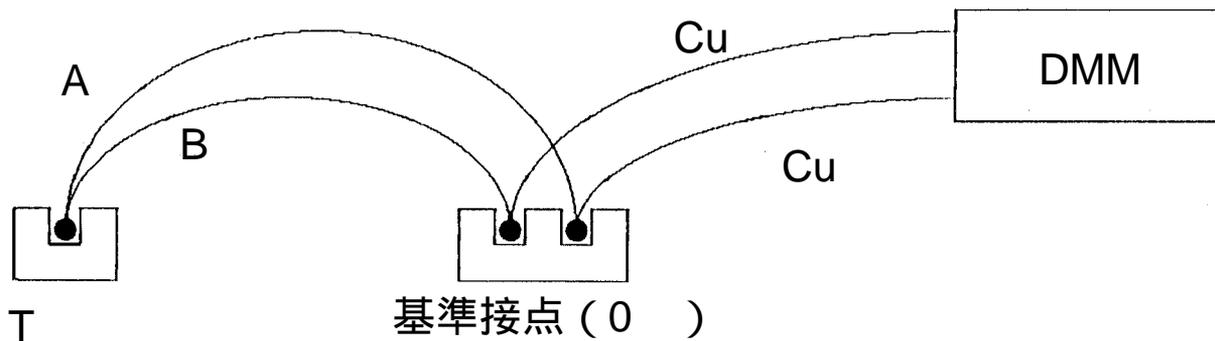


図12 熱電対の標準的な接続方法

銅-コンスタンタン熱電対の起電力 [mV] (基準接点が0°Cの場合)

温度 [°C]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-100	-5.379	-5.395	-5.411	-5.428	-5.445	-5.462	-5.479	-5.496	-5.513	-5.530
-180	-5.205	-5.223	-5.241	-5.258	-5.276	-5.294	-5.311	-5.328	-5.345	-5.362
-170	-5.018	-5.037	-5.056	-5.075	-5.094	-5.113	-5.132	-5.150	-5.169	-5.187
-160	-4.817	-4.838	-4.858	-4.878	-4.899	-4.919	-4.939	-4.959	-4.978	-4.998
-150	-4.603	-4.625	-4.647	-4.669	-4.690	-4.712	-4.733	-4.754	-4.775	-4.796
-140	-4.377	-4.400	-4.423	-4.445	-4.469	-4.492	-4.514	-4.537	-4.559	-4.581
-130	-4.138	-4.162	-4.187	-4.211	-4.235	-4.259	-4.283	-4.307	-4.330	-4.354
-120	-3.887	-3.912	-3.938	-3.964	-3.989	-4.014	-4.039	-4.064	-4.089	-4.114
-110	-3.624	-3.651	-3.678	-3.704	-3.730	-3.757	-3.783	-3.809	-3.835	-3.861
-100	-3.349	-3.377	-3.405	-3.432	-3.460	-3.488	-3.515	-3.542	-3.570	-3.597
-90	-3.062	-3.091	-3.120	-3.149	-3.178	-3.207	-3.235	-3.264	-3.292	-3.320
-80	-2.764	-2.794	-2.824	-2.854	-2.884	-2.914	-2.944	-2.974	-3.003	-3.033
-70	-2.455	-2.486	-2.518	-2.549	-2.580	-2.611	-2.642	-2.672	-2.703	-2.733
-60	-2.135	-2.167	-2.200	-2.232	-2.264	-2.296	-2.328	-2.360	-2.392	-2.423
-50	-1.804	-1.838	-1.871	-1.905	-1.938	-1.971	-2.004	-2.037	-2.070	-2.103
-40	-1.463	-1.498	-1.532	-1.567	-1.601	-1.635	-1.669	-1.703	-1.737	-1.771
-30	-1.112	-1.148	-1.183	-1.218	-1.254	-1.289	-1.324	-1.359	-1.394	-1.429
-20	-0.751	-0.788	-0.824	-0.860	-0.897	-0.933	-0.969	-1.005	-1.041	-1.076
-10	-0.380	-0.417	-0.455	-0.492	-0.530	-0.567	-0.604	-0.641	-0.678	-0.714
(-)0	0.000	-0.038	-0.077	-0.115	-0.153	-0.191	-0.229	-0.267	-0.305	-0.343
(+)0	0.000	0.038	0.077	0.116	0.154	0.193	0.232	0.271	0.311	0.350
(+)10	0.389	0.429	0.468	0.508	0.547	0.587	0.627	0.667	0.707	0.747
20	0.787	0.827	0.868	0.908	0.949	0.990	1.030	1.071	1.112	1.153
30	1.194	1.235	1.277	1.318	1.360	1.401	1.443	1.485	1.526	1.568
40	1.610	1.652	1.694	1.737	1.779	1.821	1.864	1.907	1.949	1.992
50	2.035	2.078	2.121	2.164	2.207	2.250	2.293	2.336	2.380	2.423

実験は1号館3階分析化学実験室(135Sの向かい側)で行います。

