

## 極低温用帯磁率測定装置

## II. 基本性能と測定例

(昭和59年11月30日 原稿受付)

自然科学教室 高 木 精 志  
吉 弘 満  
松 本 賢 昭

Instrument for Magnetic-Susceptibility Measurement  
at low Temperatures

## II. Fundamental Capability and Some Examples of Measurement

by Seishi TAKAGI  
Mitsuru YOSHIHIRO  
Yoshiaki MATSUMOTO

## Abstract

The magnetic-susceptibility measurement system at our laboratory which is based on Faraday technique is described.

A part of CAHN 2000 type electrobalance used as the detector of force change is enveloped with some permalloy sheets in order to reduce the influence of external magnetic field such as terrestrial magnetic field. The balance insures accurate and precise weight measurement up to 0.1 microgram.

The intensity and the spatial gradient of the magnetic field generated by a electromagnet are measured and the best position of the basket for samples is determined. The calibration of the system is precisely performed by using two standard substances, sodium chloride and Mohr's salt. The system can be used for the accurate measurements of the susceptibility as small as that of the diamagnetism in solid-state atoms or molecules.

The diamagnetic-susceptibility of some molecules is determined and the temperature dependence of paramagnetic-susceptibility of two organic ion-radical salts is reported.

## 1. はじめに

原子や分子の反磁性程度の非常に小さな帯磁率を高精度で測定することを目的として、ファラデー型の帯磁率測定装置(磁気天秤)を設計製作し、この詳細について前報で報告した。<sup>1)</sup>

本論文ではこの装置の磁気天秤としての基本的な性能についてまとめ、あわせていくつかの試料の帯磁率の測定例を報告する。装置は電気天秤部、電磁石及び電源、

クライオスタット、試料温度測定系、真空排気・熱交換用ヘリウムガス導入系の5つに大別できる。2ではこれらについての基礎データをまとめる。

試料の位置の磁場の強さや磁場勾配を正確に求めることは難しいので、本装置では帯磁率既知の標準物質との比較により帯磁率未知の試料の帯磁率を決定する方法を採用した。<sup>2), 3)</sup> このために必要な較正定数の決定など装置の較正法を3にまとめ、つづく4ではいくつかの具体的な帯磁率の測定例をまとめる。

## 2. 装置の基礎データ

### 2.1. 電気天秤

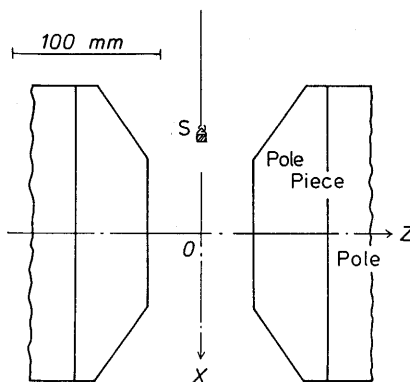
本装置の力の測定用として使用した CAHN 2000型電気天秤は2.5 g までの重量のものを0.1  $\mu\text{g}$  の感度で測定できるよう設計されている。この電気天秤はウェイトリングユニットとコントロールユニットの2つに大別され、前者は大気中はもちろん、高真空中でも作動する。作動原理は、トルクモーターに直結した天秤のビームの位置を発光ダイオードとフォトセルからなる検出ユニットで検出して、その位置を一定の位置に保つようにトルクモーターのコイルに電流を流し、その電流の大きさから天秤にかかった力を求める方法である。トルクモーターは永久磁石と可動コイルを組み合わせたもので、天秤のビームはその可動コイルに直結され、びんと張ったリボンの中心で支えられその支点のまわりを回転できる。

永久磁石で作られる磁場をみだすような要因があれば当然のことながら測定誤差を生じる。事実、小さな永久磁石をトルクモーターの近傍へ持っていくと、天秤にかかっている荷重は一定であるにもかかわらず天秤の出力は大きく変動する。電磁石の使用中に発生する漏れ磁束がトルクモーターに与える影響を調べるため、ガウスメーターを用いて天秤を内蔵しているガラス容器の周辺の磁場の測定を行ったが、電磁石に最大電流10 A を流した際にもその磁場の大きさは1 ガウス以下で地磁気との区別ができない程度のものであった。しかしながら地磁気やそれと同程度の磁場の影響も減らし、より高精度の測定を可能にするために、トルクモーターの部分を中心としてガラス容器の円筒部の周辺を厚さ0.2 mm のパーマロイ板で二重に囲った。これにより電気天秤自身の相対感度を0.1  $\mu\text{g}$  程度にすることができた。

### 2.2. 電磁石及び電源

電磁石の8ユニットのコイルをすべて並列結線することでコイルの直流抵抗は室温で約190  $\Omega$  となったが、最大10 A の励磁電流を流しつづけるとコイルの温度上昇にもなって抵抗が増加し220  $\Omega$  程度にまでなる。しかしながら磁場の強さはほとんど電流によってのみ決まり、時間的な変動はほとんど無視できる程度である。

図1のように磁極の中心軸方向にZ軸、磁極の中心を通り垂直下方にX軸をとることにする。座標の原点における磁場の強さの電流依存性(磁場-電流特性)を図2に示す。磁場の強さは指針型のガウスメーター(横



図一 電磁石の磁極に固定した直交座標系

河電機3251型)で測定した。この図より明らかなように、磁場の強さは電磁石の励磁電流  $I$  にほぼ比例して直線的に増加するが、8 A 以上ではわずかに直線よりはずれ磁極の飽和が始まっていることを示す。電流を増加、減少させる際のヒステリシスはガウスメーターの測定誤差の範囲であり、磁場の再現性は良い。

図3に励磁電流が10 A の時の  $-X$  軸上の磁束密度を  $-X$  の関数として示す。原点から離れるにつれて磁束密度は単調に減少し、100 mm 離れたところで約半分になる。図4にはやはり励磁電流10 A のときのZ軸上 ( $X = 0$  mm) 及び  $X-Z$  平面内  $-X = 60$  mm の線上の磁束密度を  $Z$  の関数として示す。いずれの場合も  $X$  軸から離れ磁極に近づくとき磁場は強くなるが、Z軸上の場合の方がその変化が小さい。また、 $-X = 60$  mm の場合も  $X$  軸に近い ( $Z$  の絶対値の小さい) 領域では1 mm あたり0.4%程度の違いであることがわかる。

指針型のガウスメーターだと読み取り誤差が大きいため、磁場の強さや勾配をより精密に求めるためにホール素子を用いたデジタル表示式のガウスメーターを試作して測定を行った。ホール素子にはシーメンスFA 22 e型を用いた。磁極空間の磁場の測定には図5に示すような治具を用いた。治具は厚さ5 mm の透明アクリル板製で、磁極の中心軸と治具のZ軸が一致するように挿入して使用する。治具には2 mm 間隔の線が格子状にきざまれている。試作したガウスメーターは磁場による較正をしていないので、磁場の強さに比例するホール電圧をそのまま利用して、励磁電流10 A のときの  $-X$  軸上の磁場の相対的な強さを図6に示す。このデータの隣接する2点間、及び1点をささむ2点間の傾き、及びそ

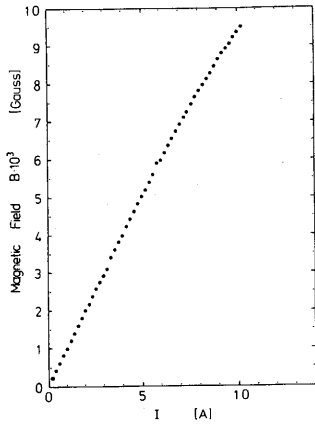


図-2 磁極の中心軸上の中心 ( $X=Y=Z=0$ ) の磁場の励磁電流依存性

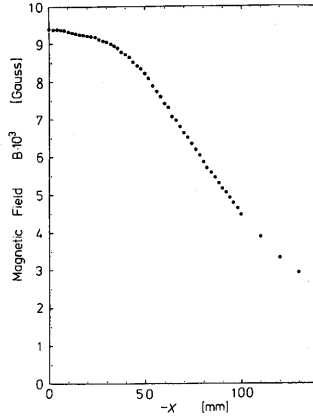


図-3 励磁電流10AのときのX軸上の磁場分布

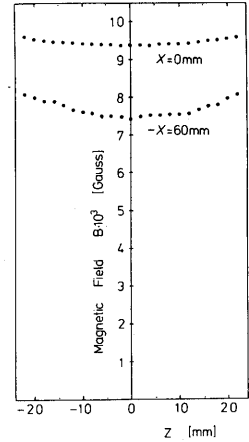


図-4 励磁電流10AのときのZ軸上 ( $X=0$  mm) 及びX-Z平面内  $X=-60$  mm の線上の磁場分布

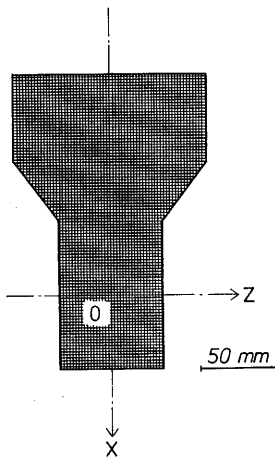


図-5 較正用具

の傾きにその点のホール電圧をかけたものを同じく図6に示す。前者は  $\partial H_z / \partial X$  に、後者は  $H_z \cdot (\partial H_z / \partial X)$  に比例するものである。図6より  $H_z \cdot (\partial H_z / \partial X)$  の極大が  $-X=60\sim 65$  mm 近傍にあり、試料はこの位置にセットするのが最もよいと期待される。すなわち、この位置に置かれた試料には最も大きな力が働き、試料位置のずれの影響が最も小さい。

### 2.3. クライオスタット

液体ヘリウム用内側デュワー瓶には約 1 l の液体ヘリウムを溜めることができる。また、液体ヘリウム槽は気密にできる構造で、ヘリウムガスを油回転真空ポンプ

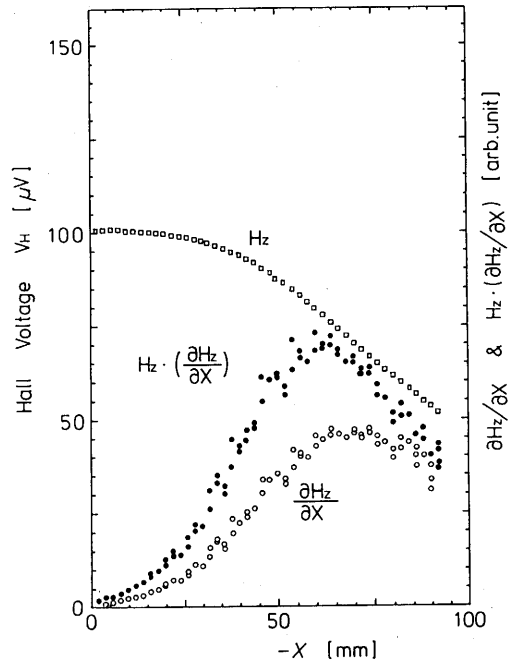


図-6 励磁電流10AのときのX軸上の磁場分布、磁場勾配 (ホール素子のホール電圧で表示)

(日本真空 PVD -180 K 型、排気速度 180 l/min) で強制排気して蒸発替熱をうばい液体の温度を 1.5 K 程度まで下げることができたが、排気速度のより大きいポンプの使用でさらに低温にすることが可能である。

### 2.4. 試料温度測定系

試料の温度は 4.2 K 以上では (金+0.07 at. % 鉄) -

クロメル熱電対の起電力をデジタルボルトメーター（タケダ理研 TR 6840型）で  $1 \mu\text{V}$  の桁まで測定して決定した。熱交換用ヘリウムガスを 5 Torr 程度入れ、温度変化もゆっくりすることで試料と熱電対とを熱平衡状態にすることができる。この熱電対は極低温用熱電対として開発されたもので、常温からヘリウム温度までほぼ一定の起電力を有している。<sup>4)</sup> 熱電対の接点は少量の低融点はんだ（ウッドメタル）でろう付した。液体ヘリウム（4.2 K）及び液体窒素（77 K）温度で熱電対の較正を行なったが、熱起電力は NBS（National Bureau of Standards）より出されている規準熱起電力表の値と差がなかったので以後 NBS の値を使用することにした。NBS の表には 280 K までしかこの熱電対の熱起電力が記載されていないので、恒温水浴を用いて 370 K までの熱起電力の較正を行なった。この測定結果及び NBS の表にもとづいて水の氷点（273.15 K）を参照温度とする熱起電力を温度の関数として図 7 に示す。

4.2 K 以下の温度はヘリウムガスの蒸気圧を水銀マンオメーターで測定して決定したが、当然のことながらこのとき試料部（ガラス製試料保護管）が液体ヘリウムにつかっていることが必要である。

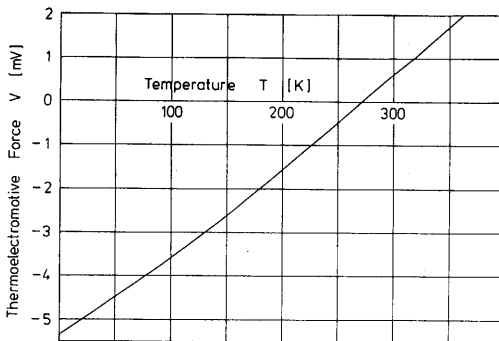


図-7 (金+0.07at.%鉄) -クロメル熱電対の起電力の温度依存性

### 2.5. 真空排気・熱交換用ヘリウムガス導入系

油回転真空ポンプと油拡散ポンプを組みこんだ高真空排気装置（大亜真空 DS-312-U 型）により  $4 \times 10^{-6}$  Torr（液体窒素トラップを使用しない時）、 $1 \times 10^{-6}$  Torr（液体窒素トラップを使用した時）程度の高真空にすることができる。ただし、真空度の測定には電離真空計（大亜真空 IT-L 20 P）を用い、排気装置のメインバルブ近傍の真空度を測定したので、これらの値は試

料近傍の真空度ではない。真空排気ラインは 3/4 インチの銅パイプで構成されていて導管のコンダクタンスはかなり小さく、試料近傍では前述の値に近い高真空ではないと思われるが、一応の目安にはなる。

一旦高真空に排気したのち、液体窒素で冷却した活性炭入のトラップを通してヘリウムガスを導入し、そのガス圧はガイスラー管の放電の様子によっておよそその値を求める。通常の測定では 5 Torr 程度とした。

## 3. 装置の較正（キャリブレーション）

### 3.1. 較正方法の概略

図 1 に示す位置におかれたモル数  $m$ 、モル帯磁率  $\chi_M$  の試料に働く力は、

$$F_x = m \cdot \chi_M \cdot H_z \cdot \left( \frac{\partial H_z}{\partial X} \right) \quad (1)$$

で与えられる。試料の分子量が既知ならば  $m$  は試料の重量を化学天秤等で測定することにより知ることができるが、 $H_z \cdot (\partial H_z / \partial X)$  の値を正確に求めることは難しい。 $X$  軸上のどの点においても  $H_z \cdot (\partial H_z / \partial X)$  の値は電磁石の励磁電流によって決まる固有の値を示すと考えられるので、 $m$  と  $\chi_M$  が既知の標準試料を用いてその点の  $H_z \cdot (\partial H_z / \partial X)$  の値を求めることができる。たとえば、励磁電流 10 A のとき、 $H_z \cdot (\partial H_z / \partial X)$  が最大になる点は 2.2 で求めたように  $-X = 60 \sim 65 \text{ mm}$  であったので、標準試料をこの位置に置いて測定によりこの位置の  $H_z \cdot (\partial H_z / \partial X)$  の値を求めることができる。この値を  $A'(10)$  とすれば、未知試料の帯磁率  $\chi_{Mx}$  は  $F_{xx}$  と  $m_x$  を測定することにより、

$$\chi_{Mx} = \frac{F_{xx}}{A'(10) \cdot m_x} \quad (2)$$

で求められる。

試料は石英製の細い棒で吊り下げられた石英製バスケットに入れて測定するようになっているため、磁場を加えた時に電気天秤で測定する力は試料に働くだけでなく、石英棒やバスケットに働く力も加わったものになる。すなわち、石英は反磁性物質なので石英棒やバスケットには  $-X$  軸方向の力が働く。試料の入っていない状態（空バスケット）の電気天秤の出力  $f_0$  をあらかじめ測定しておき、次に試料をバスケットに載せて同じ条件で測定した時の出力を  $f$  とすれば  $f - f_0$  より試料に働い

た正味の力を知ることができる。たとえば、励磁電流10 Aで測定したときの標準物質 ( $m_s, \chi_{Ms}$ ) の出力を  $f_s$  (10) とすれば、このときの較正定数  $A(10)$  は、

$$A(10) = \frac{f_s(10) - f_0(10)}{m_s \cdot \chi_{Ms}} \quad (3)$$

で決定される。未知試料 ( $m_x, \chi_{Mx}$ ) の励磁電流10 Aのときの出力を  $f_x(10)$  とすれば、

$$\chi_{Mx} = \frac{f_x(10) - f_0(10)}{A(10) \cdot m_x} \quad (4)$$

により  $\chi_{Mx}$  が求まる。励磁電流  $I$  のときの較正定数を  $A(I)$ 、出力を  $f_x(I)$ 、 $f_0(I)$  とすれば一般に、

$$\chi_{Mx} = \frac{f_x(I) - f_0(I)}{A(I) \cdot m_x} \quad (5)$$

となる。

### 3.2. バスケットの位置の設定

バスケットは外径6 mm、高さ6 mmのカップに取っ手をつけた高純度石英製の図8に示す形状のものである。両端にフックをつけた0.5 mm径の石英棒でこのバスケットを電気天秤に吊り下げ、高さを調節し、過大な荷重が加わった時に電気天秤を損傷しないように天秤と石英棒との間には、両端にフックのついた短くて細いニクロム線が入れてある。高さはニクロム線の長さを変えることによってかなり自由に調節でき、過大な過重が加わった時にはフックが伸びてはずれるようにしてある。

図5に示した治具をポールピース間に挿入し、これよりY軸方向に3 m余り離れ治具の高さとほぼ同じ高さの位置から読取り望遠鏡でバスケットと治具を重ねて観測できるようにする(図8)。バスケットは  $H_z \cdot (\partial H_z / \partial X)$  が極大となる図8に示すような位置に来よう、天秤部全体を鉄板上で水平に移動したり、ニクロム線の長さや天秤部保持台とクライオスタット保持台の間の連結棒の長さを調節する。その位置合わせが終わればクライオスタット保持台の三点支持部のボルトの受け台を鉄板に固定する。次に、電磁石を180°回転させ、Y軸方向から望遠鏡で治具とバスケットを重ねて観測し、バスケットの中心がX軸と重なるよう電磁石をレールに沿って移動させる。この時の電磁石のレール上の位置を床面に張りつけた物差しで測定・記録しておく。電磁石を180°逆回転して元にもどしてバスケットの位置合

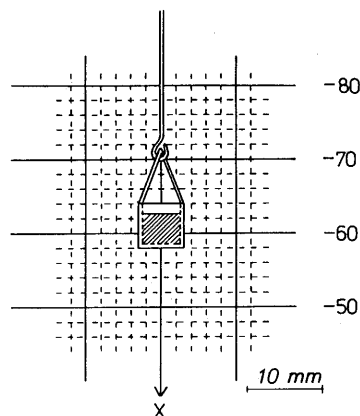


図-8 バスケットの位置の設定

わせが完了する。

電磁石の位置は0.5 mm以内の精度で所定の位置に固定できる。天秤部を一度吊り上げたのち元に戻した時のバスケットの位置のずれは望遠鏡での観測にかからない程度である。

### 3.3. 空バスケット出力

3.2.で定めた位置にある空バスケットに磁場を加えた時の電気天秤の出力を励磁電流の関数として図9に示す。電気天秤の測定レンジは1 mg - 10 mVのレンジを使用した。すなわち、1 mgの重量変化があれば10 mVの出力があるレンジである。以後の測定もすべてこのレンジで行なった。出力は  $H_z \cdot (\partial H_z / \partial X)$  に比例し、 $H_z$  及び  $\partial H_z / \partial X$  はいずれもほぼ励磁電流  $I$  に比例するので、出力はおおよそ  $I^2$  に比例することが予想されたが、測定結果は予想通りである。直線からの少しのずれは磁極の飽和が原因であると思われる。励磁電流10 Aで測定した時の空バスケット出力は、空バスケットの取り付け取りはずしをくり返しても、天秤部の吊り上げ下げをくり返してもほとんど変動はなく室温近傍で  $-3.700 \pm 0.010$  mVであった。

使用したバスケット及び石英棒は高純度の石英で作られており、その反磁性はほとんど温度に依存しないが、極低温ではわずかに含んでいる常磁性不純物の影響が無視できない大きさになることがある。図10に励磁電流10 Aで測定した空バスケットの出力の温度依存性を示す。室温近傍では出力は温度に依存せずほぼ一定の値を示すのに対し、20 K以下の低温では常磁性不純物の存在によると思われるかなり大きな変化が観測される。この温

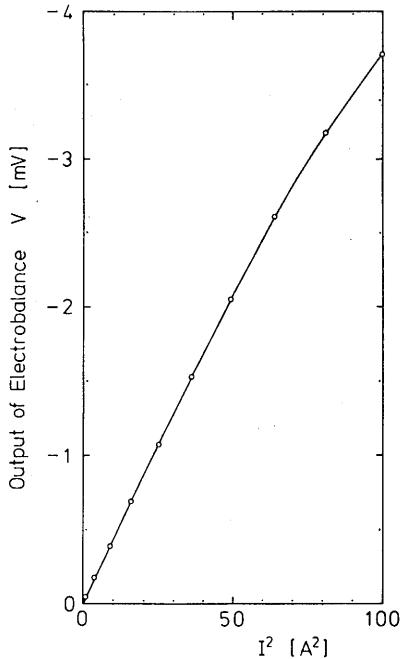


図-9 空バスケットの出力の励磁電流依存性

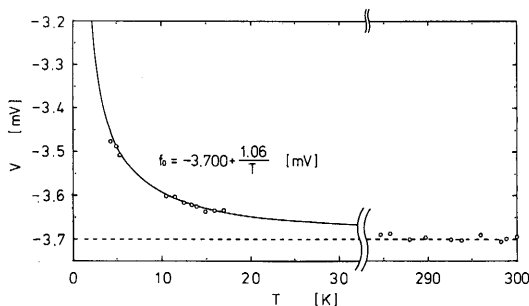


図-10 励磁電流10 Aのときの空バスケットの出力の温度依存性

度依存性は、

$$f_0 = -3.700 + \frac{1.06}{T} \quad [\text{mV}] \quad (6)$$

で表わすことができる。従って、室温近傍での測定で帯磁率を求める計算には(4)式の $f_0$ を $-3.700 \text{ mV}$ としてさしつかえないが、低温域での測定では(4)式の $f_0$ として(6)式を用いなければ大きな誤差を生じる結果になる。

### 3.4. 塩化ナトリウムによる較正定数の決定

反磁性物質である高純度の塩化ナトリウム ( $\text{NaCl}$ ,

分子量 $58.448$ ,  $\chi_M = -30.2 \times 10^{-6} \text{ emu/mol}^2$  ; 松永化学工業99.99%)を用いて室温で較正定数を決定した。その手順はまず、試薬瓶から取り出した微結晶塩化ナトリウムを加熱しながら真空ポンプで真空に引いて脱気・乾燥したのち、化学天秤で重量を測定しバスケットへ入れて電気天秤へセットする。試料の重量は電気天秤でも測定する。一昼夜以上ガラス容器内を高真空に引き、その後高真空に引きながら、あるいは熱交換用ヘリウムガスを導入して測定する。ヘリウムガスを導入することによって零点出力(磁場を加えないときの電気天秤の出力)はわずかに変化するが、磁場出力(磁場を加えたときの電気天秤の出力)と零点出力の差にはこの影響はない。磁場出力から零点出力を差し引いたものが正味の出力となる。

空バスケット出力の補正を行ない、塩化ナトリウム $1 \text{ mg}$ 当たりの出力の電流依存性を図11に示す。その依存性は図9に示した空バスケットの出力と当然のことながら類似のものである。励磁電流 $10 \text{ A}$ に対する較正定数 $A(10)$ は(3)式より求められ、他の励磁電流 $I$ に対する較正定数 $A(I)$ も同様に求めることができる。

天秤の較正は何度も行なったが、約2ヶ月の間隔をおいて行なった2回の結果を表1に示す。励磁電流の大きいところでは $\pm 0.2\%$ 程度の測定誤差で較正定数を定めることができる。

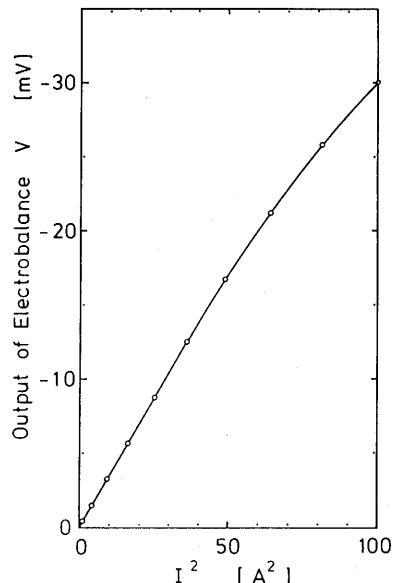
図-11 塩化ナトリウム $1 \text{ mg}$ 当たりの出力の励磁電流依存性

表-1 磁気天秤の較正定数

標準物質 較正定数	塩化ナトリウム(1)	塩化ナトリウム(2)	モール塩
A(1)	0.082	0.082	0.071
A(2)	0.287	0.289	0.278
A(3)	0.616	0.623	0.624
A(4)	1.086	1.096	1.101
A(5)	1.692	1.693	1.702
A(6)	2.400	2.415	2.419
A(7)	3.220	3.225	3.242
A(8)	4.107	4.101	4.134
A(9)	4.986	4.990	5.013
A(10)	5.800	5.816	5.851

(単位:  $10^7$  mV/emu)

### 3.5. モール塩による較正定数の決定

標準物質としてモール塩 ( $\text{FeSO}_4 \cdot (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 分子量 392.13,  $\chi_m = 0.0122579$  emu/mol (300 K)<sup>5)</sup>, 関東化学・特級試薬) を用いても較正定数を決定した。その結果の一例を表1に示す。モール塩は標準物質としてよく用いられているが, 真空に引くと結晶水が一部なくなり結晶が壊れてしまう。このため測定は常圧で試料を交換して数回行なったが, 測定結果のばらつきが1%程度もあり信頼性に乏しい。従って, 以後の未知試料の測定に際しては塩化ナトリウムで決定した較正定数を使用した。

## 4. 測定例

### 4.1. 測定手順

室温でのみ測定する場合には標準物質の測定手順と同様で, 電気天秤の出力  $f_x$  を測定し(5式)により帯磁率が求められる。

液体ヘリウムを用いて極低温より測定する手順は次のとおりである。未知試料をバスケットへ入れて電気天秤にセットし, 12時間以上高真空に引き, その後熱交換用ヘリウムガスを導入する。ガラス製試料保護管を液体窒素で予冷したのち, 液体ヘリウムを溜めたクライオスタットを取り付ける。4.2 K 以下の温度で測定する必要がある場合は真空ポンプでヘリウムガスを強制排気し, それ以上の温度では2つのヒーターにより温度を調節して測定する。

### 4.2. TCNQ の反磁性帯磁率

7,7',8,8'-テトラシアノキノジメタン (TCNQ) の分子構造を図12(a)に示す。再結晶をくり返し純度をあげた TCNQ の微結晶の室温における反磁性帯磁率は測定の結果  $(-1.01 \pm 0.02) \times 10^{-4}$  emu/mol である。

### 4.3. シアニン色素の反磁性帯磁率

よう素塩として市販されているいくつかのシアニン色素の反磁性帯磁率を測定により求めた。シアニン色素・よう素塩微結晶の帯磁率を測定により求め, この値からよう素イオンの反磁性帯磁率  $-0.52 \times 10^{-4}$  emu/mol<sup>6)</sup> をひいてシアニン色素の反磁性帯磁率が得られる。

図12(b), (c), (d)に示すシアニン色素カチオン  $\text{DEQSeC}^+$ ,  $\text{DEDMTzC}^+$ ,  $\text{DMTC}^+$  の反磁性帯磁率は各々  $(-2.26 \pm 0.02) \times 10^{-4}$ ,  $(-1.73 \pm 0.02) \times 10^{-4}$ ,  $(-1.93 \pm 0.02) \times 10^{-4}$  emu/mol と決定した。

### 4.4. $\text{DEDMTzC} - [\text{TCNQ}]_2$ の帯磁率

シアニン色素 - TCNQ 系錯塩の一種である  $\text{DEDMTzC} - [\text{TCNQ}]_2$  結晶の常磁性帯磁率の温度依存性を図13に示す。結晶の帯磁率を測定により求め, 分子の反磁性帯磁率がシアニン色素カチオンと TCNQ 分子2個分の和  $(-3.75 \times 10^{-4}$  emu/mol) であるとして反磁性の補正を行い常磁性帯磁率を得た。低温より温度の上昇とともに単調に増加する興味深い振舞いを示す。

### 4.5. $\text{DMTC} - [\text{TCNQ}]_2$ の帯磁率

図14に  $\text{DMTC} - [\text{TCNQ}]_2$  結晶の常磁性帯磁率の温度依存性を示す。反磁性の補正は4.4.と同様に行った。これもキュリーの法則等とは大きく異なる温度依存性を示している。

## 5. おわりに

本論文では極低温用帯磁率測定装置の基本性能をまとめ, いくつかの未知試料の帯磁率の測定結果を報告した。装置の詳しい基礎データを集め較正を確実にこなすことにより,  $1 \times 10^{-6}$  emu/g 程度の小さな帯磁率を1%以下の誤差で測定できる高感度, 高精度な帯磁率測定装置にすることができた。また, シアニン色素 - TCNQ 系錯塩のような分子自身の反磁性を精度よく補正できる物質では常磁性帯磁率もよい精度で求められることが実証できた。

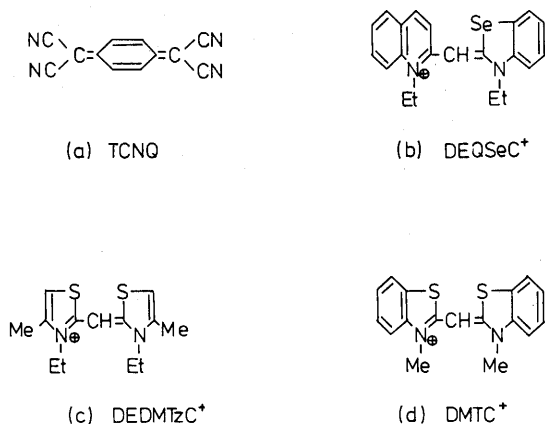
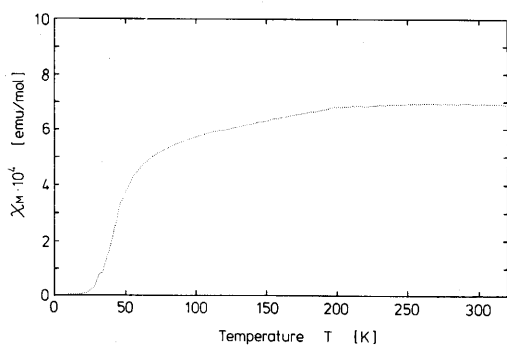
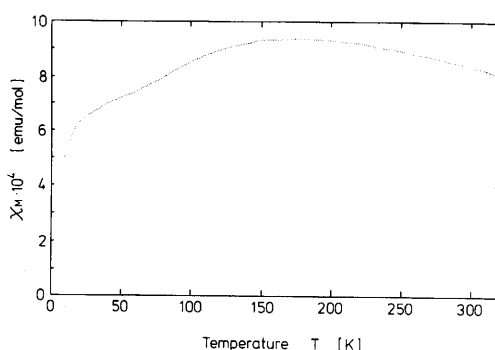


図-12 TCNQ及びシアニン色素の分子構造

図-13 DEDMTzC-[TCNQ]<sub>2</sub>の常磁性帯磁率の温度依存性図-14 DMTC-[TCNQ]<sub>2</sub>の常磁性帯磁率の温度依存性

## 謝辞

本研究の一部は文部省科学研究補助金、一般研究(C) (課題番号58540189)、特定研究「分子集合体の高次組織と機能」(課題番号59212031)及び明専会80奨学金を受けて行われた。装置の基礎データの収集や較正を行うにあたって、本学在学生・桜本隆徳、福澤祐二の両君に御協力いただいた。ここに心より感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 高木, 吉弘, 松本; 九州工業大学研究報告(工学) No. 50 (1985).
- 2) 日本化学会編; 「新実験化学講座3・磁気」(丸善, 1976).
- 3) 近角総信編; 「磁気」(共立出版, 1968).
- 4) 高野, 阿部, 信貴, 松原, 柳井; 低温工学 **9** (1974) 78.
- 5) G. A. Candela & R. E. Mundy; Rev. Sci. Instrum. **32** (1961) 1056.
- 6) 日本化学会編; 「化学便覧(改訂2版)」(丸善, 1975).