

2. 特性の計測評価

2-4 電気特性の計測と解析



上田正人* 池田勝彦**

2-4-1 緒言

オームの法則(1827年)で周知の電気抵抗は、測定される試料の長さや断面積で変化します。電気抵抗を測定試料の断面積で掛けて、その長さ(正しくは電圧端子間距離)で割ると比抵抗(電気抵抗率が一般的ですが、比電気抵抗の利用度も低くありません; ρ)という物性値が得られます(図1)。比抵抗は、測定される物質(試料)の温度、組成、加工、熱履歴などで変化する物理量です。組織観察では見落とされがちな基質固溶体の溶質濃度や欠陥密度の変化に敏感なため、平衡固溶度の決定や、時効、焼なましなどの熱処理過程の研究に ρ 測定が多用されています。透過電子顕微鏡(TEM)やアトムプローブ電界イオン顕微鏡(AP-FIM)など微細組織観察法と、回折現象を利用した組織解析手法(電子線, X線, 中性子回折とそれらの小角散乱)が常識的な手段となった現在で

も ρ 測定が続けられているのは、かなり大きな体積の平均値を測っているにもかかわらず、伝導電子の散乱が微細組織や構造の変化に非常に鋭敏なためです⁽¹⁾。このように比抵抗は格子欠陥や溶質濃度に敏感ですので、時効を含む熱処理に伴う相変態挙動を検討する上で有用で、比較的容易な測定方法として利用されています。ここでは、比抵抗の測定法について簡潔に説明をさせていただき、その測定法について「難しくなさそう」、「一度試してみたい」と思っていたような説明を目指しています。さらにチタン合金を用いた比抵抗(抵抗率)測定の例示も説明させていただき、この測定法の理解する一助としていただければと思っています。

金属および合金に関する比抵抗の基礎的な解説は⁽²⁾⁽³⁾小松先生らによってすでに行われていますので、ご興味ある読者の方々は読みいただければと思います。

2-4-2 電気抵抗測定法

電気抵抗を測定する方法としては、接触させて測定する方法と非接触で測定する方法があります。ここでは、「接触法」として「2端子法と4端子法」と「2探針法と4探針法」、非接触法として「渦電流法」について、簡潔に説明を行うこととします。

2-4-2-1 2端子法と4端子法

ここでいう「端子」とは測定試料に電極部分を作製するか、または測定用リード線を何らかの方法(溶接・はんだ付け・かしめなど)でその試料に電氣的・機械的接合した部分とします。電極を作製する場合は、測定試料と共材で作製すること、少なくとも測定試料の溶媒金属を用いて作製することが望まれます。作製された電極端子を測定試料に接合する場合

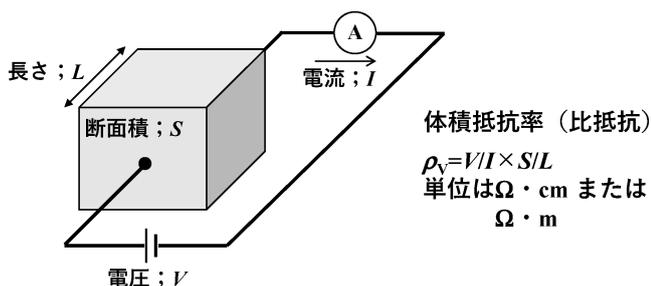


図1 体積抵抗率(比抵抗)(ρ_v)は試料抵抗(R_v)に試料の断面積(S)を掛けて、その長さ(L)で割って求めます。もちろん、試料抵抗は(R_v)は試料に直流電圧(V)を印加して、試料の直流電流(I)を測定し、その電圧を測定電流で割ることで求めます。

* 関西大学化学生命工学部; 教授(m-ueda@kansai-u.ac.jp)

** 株式会社日本スベリア社; 常任顧問(〒561-0894 豊中市勝部1-9-15 hikoik@kansai-u.ac.jp)

Experimental Guides for Metallic Materials: 2. Measurement and Evaluation of Material Properties

2-4 Measurement and Analysis of Electrical Properties; Masato Ueda* and Masahiko Ikeda** (*Kansai University, Suita. **NIHON SUPERIOR, CO., LTD, Suita)

Keywords: electrical resistance measurement, electrical specific resistivity, direct current four-probe method, direct current four-terminal method, eddy current method

2024年4月2日受理[doi:10.2320/materia.64.101]

はスポット溶接で行い、特に電圧端子である場合はスポット溶接で生じるスポット痕(打痕)が電圧端子の中心でなく、左右の各一か所のできるように接合する必要があります(図2)。

2端子と4端子の違いは、電極として電流端子と電圧端子を共用するか、独立させるかの違いです。2端子および4端子法の例を図3に示します。一般に測定する値が低抵抗測定の場合、普通は無視してよい接触抵抗を含んでしまい、これが誤差となって正確な測定ができません。より精密な抵抗値測定が高まっている中、このプローブピン2本を同じ接点にコンタクトすることにより、電流と電圧を別々に測定する4端子測定を可能にしています(4)。

まず、2端子法について説明を進めます。図4(a)にその回路と(b)に等価回路を示します。回路の R_S は測定試料の抵抗、 V は電圧計、 A は電流計、等価回路の $R_1(=R_{1C}+R_{1L})$ と $R_2(=R_{2C}+R_{2L})$ は測定試料とリード線との接触抵抗およびリード線の配線抵抗を表しています。もちろん、電圧計で測定できるのは電圧 V であって、抵抗 R ではありません。各々の抵抗で生じる起電力を V_S 、 V_1 および V_2 として、直流回路の電流を I とすると、各抵抗値は $R_S = V_S/I$ 、 $R_1 = V_1/I$ および $R_2 = V_2/I$ で算出できます。従って得られる抵抗値は試料抵抗と測定試料とリード線との接触抵抗およびリード線の配線抵抗の合算値、 $R_S + R_1 + R_2$ となります。した

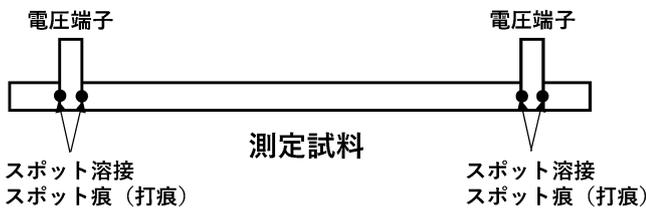


図2 4端子法の測定試料外観。電圧端子は測定試料の共材または原料金属(例えば、チタン合金であれば、工業用純チタン)の板材を測定試料にスポット溶接で接合しています。

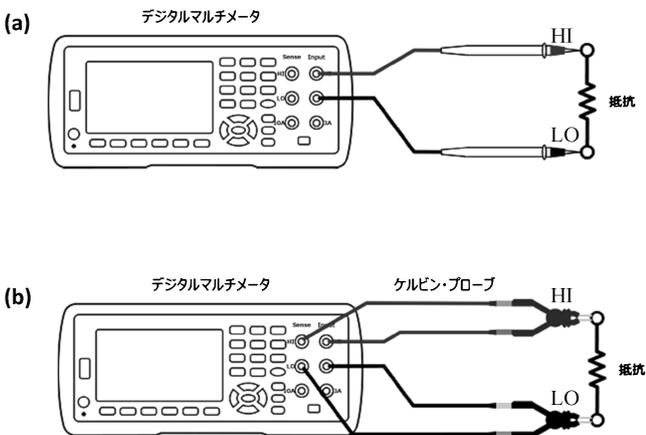


図3 デジタルマルチメータを用いた電気抵抗測定の実例イラスト。(a) 直流2端子法と(b) 直流4端子法を示しています。ケルビン・プローブは低抵抗測定を正確に行うための4端子測定を行う端子です。

がって、 $V = V_S + V_1 + V_2 = I \times (R_S + R_1 + R_2)$ であり $R_1 + R_2$ の抵抗値より R_S の値がわずかに大きい場合は $R_1 + R_2$ の抵抗値は R_S に対して無視できず、正確な R_S の値は測定できません。 R_S の値を正確に測定できるのは、つまり $V = I \times R_S$ となるのは $R_1 + R_2$ の抵抗値より R_S の値が非常に大きい場合のみです。したがって、 R_S の値が小さい場合は、測定法として適切なものを選択する必要があります。その方法の代表的なものが4端子法になります。

4端子法の回路とその等価回路を図5(a)および(b)に示す。 $R_1(=R_{C1C}+R_{C1L})$ 、 $R_2(=R_{C2C}+R_{C2L})$ 、 $R_3(=R_{V1C}+R_{V1L})$ および $R_4(=R_{V2C}+R_{V2L})$ は電流端子および電圧端子が持つ測定試料とリード線との接触抵抗およびリード線の回路抵抗を表しています。電流回路と電圧回路が並列回路となっているため、電圧計で測定している起電力は、測定試料と電圧測定

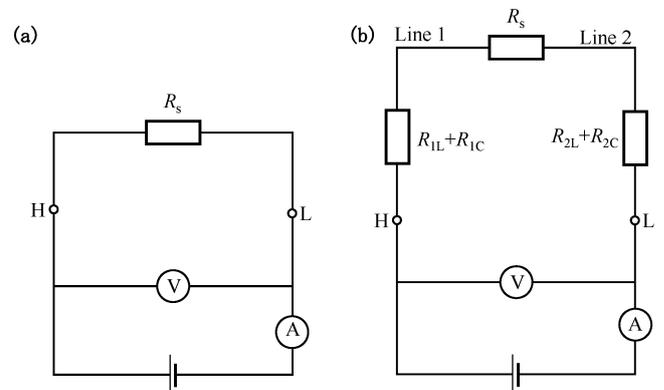


図4 直流2端子法の(a)回路と(b)等価回路。 R_S は試料抵抗です。等価回路の R_{1L} 、 R_{1C} および R_{2L} 、 R_{2C} はおののLine1の回路抵抗および試料との接触抵抗、Line2の回路抵抗および試料との接触抵抗を示しています。 V は電圧計、 A は電流計を示しています。

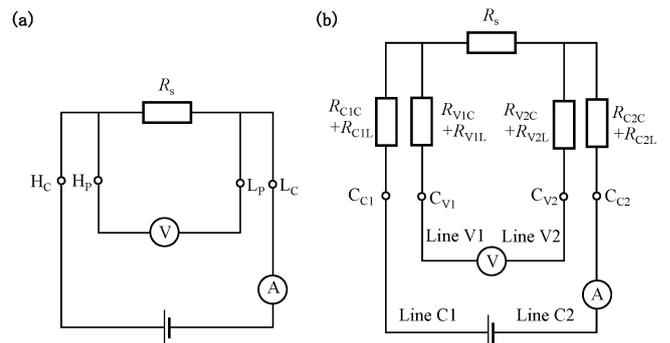


図5 直流4端子法の(a)回路と(b)等価回路。 R_S は試料抵抗です。等価回路の電流回路(Line C)の回路1(Line C1)の回路抵抗(R_{C1L})と試料との接触抵抗(R_{C1C})および電流回路の回路2(Line C2)の回路抵抗(R_{C2L})と試料との接触抵抗(R_{C2C})を示しており、さらに、電圧回路(Line V)の回路1(Line V1)の回路抵抗(R_{V1L})と試料との接触抵抗(R_{V1C})および電圧回路(Line V)の回路2(Line V2)の回路抵抗(R_{V2L})と試料との接触抵抗(R_{V2C})を示しています。 V は電圧計、 A は電流計を示しています。4端子法測定では、電流回路抵抗の影響を受けずに試料抵抗、 R_S の測定が可能となります。

回路に関する R_3 と R_4 のみです。一般的に電圧計の内部抵抗は非常に高いために、電圧測定回路の電流は非常に小さくなり、その電流で R_3 および R_4 で生じる起電力も極めて小さくなり、電圧計では R_S によって生じる起電力 V_S のみを測定していることになり、電流計の測定値 I を用いて、 V_S から $V_S/I=R_S$ で試料の抵抗値 R_S が算出できます。つまり、低抵抗試料の抵抗値を測定する場合は4端子法で行うべきであることが理解できると思います。

さらに測定精度を向上させるためには、異種金属間で生じる浮遊熱起電力の影響を対処する必要があります。浮遊熱起電力について以下に説明します。ループを構成するように2本の異なる金属導体を接続し、接合部の一方を他方より高温にするとループに電流が流れます。電流の大きさは、2本の金属の種類と接合部の温度差に依存します。ループを開くと熱起電力による電圧が開放端に現れます。この現象もまた、2つの金属の種類と接合部の温度差に依存します。この現象が浮遊熱起電力です。小さな電圧を測ろうとすると、熱によるこの起電力は読み取り誤差となることが多いです。

その浮遊熱起電力をキャンセルするための方法はいくつかありますが、我々が良く利用しているのは、回路電流の方向を変えて測定試料の起電力を測定し、その値の和を2で割った値を用いて測定試料に生じた起電力として採用するという方法です。生じている浮遊熱起電力は測定時間が短時間であれば大きく変化しないと考え、電流方向を変えることで、浮遊熱起電力がプラスで働いている場合の測定起電力とそれがマイナスで働いている場合の測定起電力が得られることとなります。それらの値の和で浮遊熱起電力は ± 0 となり、測定試料に起電力の倍の値となるので、その半分の値が測定試料の起電力となります。直接浮遊熱起電力を測定する方法として「回路電流オン・オフ法」があります。電流をオフにした場合でも試料抵抗の温度が変化しないとすると、オフ時に測定できる電圧は浮遊熱起電力に由来するものとなり、オンにした時の試料抵抗に電圧からオフ時の電圧を引いた値が、試料抵抗で生じた電圧となります。

2-4-2-2 2探針法と4探針法

この方法は2端子法・4端子法とほぼ同じですが、電極を作製したり、リード線を測定試料に接合したりせず、針状の電極を測定試料に押し当てて、一定電流を流して電圧を測定し、その電圧を回路電流で割ることで抵抗を得るという方式になります。探針法の理解を深めるために図6⁽⁵⁾に4探針プローブの一例の写真を示します。探針プローブと測定試料間の接触抵抗を低減するために荷重が不足しないようにする必要があります。例えばプローブに与える荷重を担うバネの変更や材質変更(ステンレス鋼製など)があります。先端形状をアール・ニードル・フラット・逆円錐・三角錐・クラウンなどがあり、測定物によって変更が必要です。例えば図7に示すような、アール、フラット(円柱)、ボール、ニードルがあり、各サイズとバネ圧が設定されており、電極素材としてはタングステンカーバイドやオスミウム合金



図6 4探針プローブの一例(写真)を示しています。

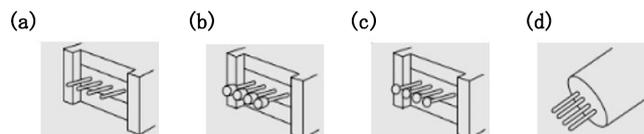


図7 探針法に用いられているプローブ形状と材質の例を示します。

- (a) 標準プローブ JIS K 7194対応; ピン間; 5 mm, ピン先; $\Phi 0.35$ mm, バネ圧; 210 g.
- (b) 不均一サンプル用; ピン間; 5 mm, ピン先; $\Phi 2.0$ mm, バネ圧; 240 g.
- (c) 柔らかいサンプル用; ピン間; 5 mm, ピン先; $\Phi 2.0$ mm, バネ圧; 130 g.
- (d) 小さいサンプル用(薄膜); ピン間; 1.5 mm, ピン先; $\Phi 0.26$ mm, バネ圧; 70 g.

などが採用されています⁽⁶⁾。さらに、先端の材質や表面改質も必要となります。例えば、電気的性能を向上する、具体的には許容電流値を大きくするために金メッキにカーボンナノチューブを含有させる方法があります⁽⁷⁾。

2探針法では、測定試料に探針(電極)を接触させ、直流電圧を加えて電流を流して、抵抗率をこの時の探針間の電圧 V と電流 I を用いて求めます。図8(a)に2探針法の回路と(b)に等価回路を示しています。 R は探針間の抵抗、 R_{L1} は電源と探針Aをつなぐ導線の抵抗と探針Aの抵抗を合わせた抵抗、 R_{L2} は電源と探針Aをつなぐ導線の抵抗と探針Dの抵抗を合わせた抵抗、 R_{C1} は探針Aと測定試料との接触抵抗、 R_{C2} は探針Dと試料との接触抵抗を表しています。2探針法では探針にも電流が流れるので、電圧 V には R での電圧降下 V_R だけでなく、 R_{L1} での電圧降下 V_{L1} 、 R_{L2} での電圧降下 V_{L2} 、 R_{C1} での電圧降下 V_{C1} 、 R_{C2} での電圧降下 V_{C2} も含まれます。すなわち

$$V = V_R + V_{L1} + V_{L2} + V_{C1} + V_{C2} \quad (1)$$

したがって、 V と I から求められる抵抗率は V_{L1} 、 V_{L2} 、 V_{C1} 、 V_{C2} による誤差が含まれることになります。このために、正確な抵抗率を必要とする場合にはこの2探針法を使用することはできません。

読者の方々が良く利用されているハンディなデジタルマルチメータやテスタなどの簡易的な測定器に利用されています。これらについて「2端子法」の範囲に入れて説明されている解説も多いです。

4探針法は、4端子法と同様に電流の探針と電圧の探針があり、それを一直線上に等間隔で測定試料に押し付けて、電

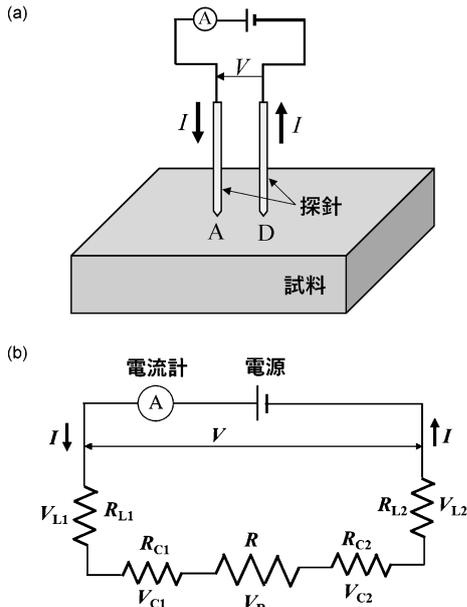


図8 (a) 2 探針法の回路と (b) 等価回路. 等価回路の R は試料抵抗, R_{L1} と R_{L2} は回路抵抗 (具体的には配線抵抗と探針部分の抵抗) で R_{C1} と R_{C2} は探針と試料間の接触抵抗を示しています.

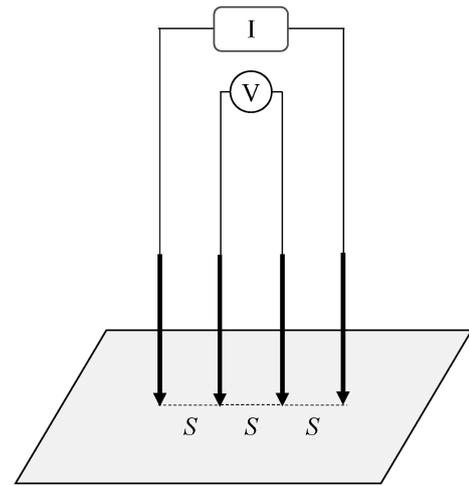


図9 4 探針法によるシート抵抗を求めるための測定の模式図. S は探針間距離を示しています.

圧探針間の起電力を測定し, 通電電流でそれを割って, 抵抗となります.

この 4 探針法では, シート抵抗 (表面抵抗率) と比抵抗 (抵抗率) が測定できます. シート抵抗 (表面抵抗率) (ρ_s) と抵抗率 (比抵抗) (ρ) の関係は, $\rho_s = \rho/t$ となります. t はシート厚です.

まずシート抵抗の測定・算出方法について説明します. 図9 にシート抵抗を求めるための測定方法を示しています. 図中の I は定電流直流電源, V は電圧計, S は探針間距離となり, シート抵抗 (表面抵抗率) ρ_s は $\rho_s = (V/I) \times RCF$ で表され, その単位は Ω/\square , Ω/sq と記述され, オーム/スクウェアと読みます. このように記述する理由は抵抗値 Ω と区別するためです. RCF は抵抗率補正係数 (Resistivity Correction Factor) です. ここでは詳しくは述べませんので, その詳細については参考文献 (8) でご確認ください. 表面抵抗値は, 表面に電流および電圧用電極を置いて, その電圧電極間の起電力 (V) を測定し, それを通電電流 (I) で割ること (つまり V/I) で求められます.

図10は電流探針に生じる電界を模式的に描いたものです⁽⁸⁾. このように電場には広がりがあるので, 試料形状や測定位置によっては, 例えば試料が小さい場合や試料の端で測定している場合は (試料の端から 5 cm 以上離す必要があるという報告もあります⁽⁹⁾). 電場の自由な広がりが抑制され, 電界エネルギー分布が変化し, そのエネルギー分布の最高値が増加し, その結果として抵抗値が高い値となります. したがって, シート抵抗 (表面抵抗) を測定する場合は, 試料形状 (長方形, 円形), サイズ, 測定位置から抵抗率補正係数 RCF を求める必要があります. 一般的には, 測定装置, 例

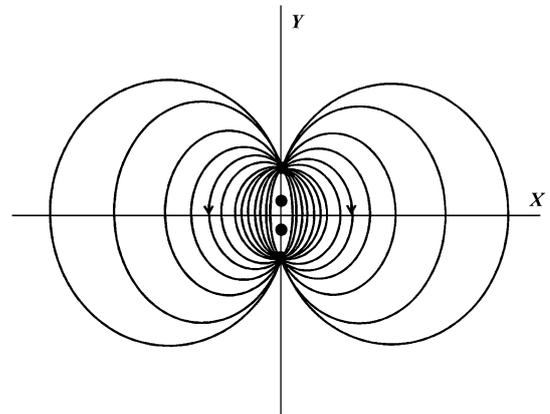


図10 4 探針法の電流端子に生じる電界の模式図.

えば高精度高機能抵抗率計 ロレスター GP (三菱化学製)⁽¹⁰⁾ などがあり, それにその演算ソフトウェアは組み込まれており, 試料形状, サイズ, 測定位置をその装置に入力することで自動的に RCF を算出し, それを用いてシート抵抗や抵抗率を表示するようになっています.

強磁性材料では強磁性の担い手である局在スピン (d スピン) 間の相互作用はこの d スピンと伝導電子 (s 電子) との間の交換相互作用 ($s-d$ 交換相互作用) によって媒介されています. 電気伝導の立場からいうと, 電気伝導の担い手は s 電子で, この s 電子と局在した d 電子との間の交換相互作用は s 電子を散乱し電気抵抗の増大の原因になります. これを磁気抵抗と呼んでいます.

金属純度の指標として残留抵抗比 (Residual Resistance Ratio; RRR) を用いることがあります. RRR は, 物質の抵抗率を高温 (具体的には室温, 例えば 300 K) と低温 (液体ヘリウム温度, 4.2 K) の 2 点で測定し, その比をとることで定義されます. RRR は, 物質の抵抗率の温度依存性を評価するための指標となり, 金属の不純物および欠陥の少なさを, 残留抵抗の低さを表す指標となります. 通常, RRR は以下の式

(2)で表されます。

$$RRR = R_{300\text{K}} / R_{4.2\text{K}} \quad (2)$$

式(2)から、 RRR の値が大きいくほど、物質が高品質であると評価されます。 RRR は、特に超伝導体や金属材料の品質評価、純度の確認において重要なパラメータとなります。

前述したように強磁性材料では磁気抵抗が生じます。磁気抵抗とは、電界に対して垂直方向に磁界をかけると、磁界の強さ(磁束密度) B の二乗に比例した抵抗率(比抵抗) $\Delta\rho$ が現れる現象です。低温では磁気抵抗が不純物による抵抗より大きくなり、見かけの RRR は実際のものより低くなることになります。強磁性材料では、電気抵抗の測定前に消磁を行う必要があります。また通電電流による電流磁場の影響も考慮する必要がありますので、通電電流を100 mA以下にすることが重要です。もちろん地磁気の影響も無視できません。例えば、地磁気内で消磁する場合と地磁気を消した状態で消磁した場合で測定される抵抗が異なることも知られています⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾。

2-4-2-3 渦電流法⁽¹⁴⁾

金属材料を非破壊で、非接触(厳密には非接触ではないかもしれませんが)で導電率(電気伝導度)を測定する方法として代表的な測定方法が渦電流法です。

渦電流法の測定システムは、電磁誘導作用により発生する渦電流を利用することにより、抵抗率の測定を行います。渦電流とは、導体を通る磁束が変化するとき、電磁誘導(レンツの法則)によって導体内に生じる渦状の電流のことです。図11のようなプローブ構造で、一定のギャップで両面(上下)に配置した対となるプローブコア(磁性体)があり、そのプローブコア間に、高周波電流を負荷することで磁束を発生させます。この構造は非接触片面プローブにも対応しています。

変化する磁束のギャップ間に導電試料を挿入すると、それに渦電流が発生します。このとき、渦電流は電磁誘導(レンツの法則)によって磁束の変化を妨げる向きに流れます。試料に渦電流が流れることにより、試料内で電力損失が生じます。電力損失に比例した形で、高周波を発生している回路内の電圧が減少します。回路内の減少した電圧を検出します。検出したその電圧と試料の抵抗は反比例の相関関係にあります。

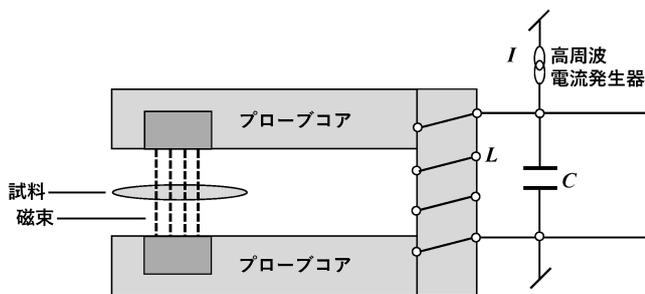


図11 渦電流法測定のためのプローブユニット。上下にプローブコアがあり、そのコア間に高周波電流を印加することで、コア間に挿入されている試料に渦電流が生じます。試料の抵抗は測定される電流値に反比例します。

この反比例の関係から、予め既知の抵抗値をもった校正試料を使用して検出される電圧と抵抗率の校正カーブ(計算式)の作成を行います。作成した校正カーブを使用して、未知の抵抗サンプルより検出した電圧から抵抗率を導き出します。

一般的には導電率(σ)の単位は S/cm となります。導電率(σ)と比抵抗(ρ)の関係は、導電率(σ) = 1/比抵抗(ρ)となります。IACSは international annealed copper standard で、297 K (20°C)での標準焼鈍軟銅の体積抵抗率、17.241 nΩmにける導電率(5.8001 × 10⁷ S/m)を100%IACSとして、相対的に導電率を与えることができます。この%IACSは渦電流法で測定された導電率の単位として用いられています。原則として測定前に標準試料でキャリブレーションすることが必要です。また、ある程度の温度変化は装置で補正できますが、原則室温での使用が望まれます。また、表面被覆についても影響が出る場合があるので、それに関連してのキャリブレーションを行う場合もあります。被膜が存在する場合、次に挙げるような影響が考えられます。(1)信号の減衰：非導電性の被膜は渦電流の発生と伝播を妨げるため、信号の強度が減衰します。このため、測定される導電率が実際の値よりも低くなる可能性があります。(2)信号の位相変化：渦電流法は、信号の位相も測定することができます。被膜の厚さや性質に応じて渦電流の信号の位相が変化し、これが導電率の評価に影響を与えることがあります。(3)周波数依存性：渦電流の深さは周波数に依存します。高周波数で測定する場合、渦電流は表面近くに集中するため、被膜の影響が大きくなります。逆に低周波数で測定する場合、渦電流はより深いところまで届くため、被膜の影響は相対的に小さくなります。被膜厚との相関関係があるので、導電率が明確な試料に被膜厚さの異なる被膜付き試料を作製し、その試料を用いて渦電流法の測定器のキャリブレーションをすることで、被膜付きの試料の導電率は比較的高い精度で導電率が測定できることになります。この導電率測定法は膜厚測定方法にも利用できます。先ほど説明したように、被膜の厚さと渦電流法で測定される抵抗値に相関関係がありますので、事前にその校正曲線を作成しておくことで、膜厚測定が可能となります。

2-4-2-4 電気抵抗測定例；直流4端子法で2定点温度(77 K, 300 K)での電気抵抗測定について(実施例)

これまで、いくつかの代表的な電気抵抗測定法についての説明を行ってきました。ここでは、チタンおよびチタン合金の電気抵抗測定の実例について、電気抵抗測定では重要な2定点温度、具体的には300 Kと77 Kでの測定法について説明を行います。

関西大学の上田が使用している2定点温度測定および引張変形時の電気抵抗測定システムを図12(a)に、測定試料を各々図12(b)、および(c)に示します。定電流直流電源で回路に通電し、試料に生じた起電力をデジタルマルチメータで測定しました。試料に生じる浮遊熱起電力は、回路電流の通電方向を反転させることで消去しました。具体的には前述したように、反転前の通電電流で試料の起電力(V_1)を測定

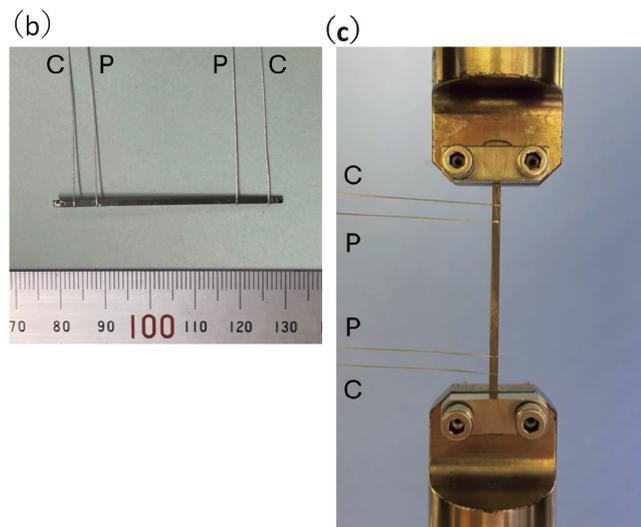
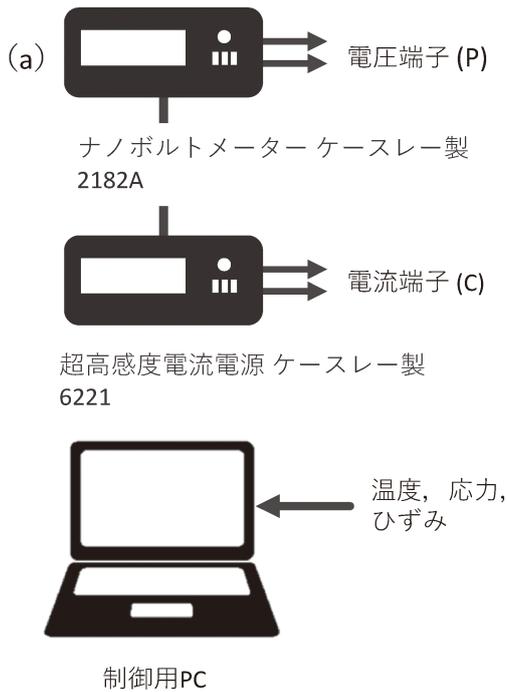


図12 (a) 電気抵抗測定システム(電流計; 超高感度電流電源 ケースレー製6221, 電圧計; ナノボルトメーター ケースレー製2182A, 制御用 PC; 温度・応力・ひずみ制御用), (b) 電気比抵抗(抵抗率)測定試料(フラットバー), (c) 引張試験時の電気抵抗測定. 電気抵抗測定部の寸法例: 1-2×1-2×50 mm, リード線: Mo ワイヤ (線径 0.3 mm)や SUS304ワイヤー(線径 0.5 mm)など.

し, 速やかに通電電流を反転し, その状態で試料の起電力 (V_2) を測定します. 次に $(V_1 + V_2)/2$ で, 浮遊熱起電力を消去した試料の起電力を求めました. 試料の起電力測定, 通電電流の反転等などの測定制御は GP-IB を用いてパーソナルコンピュータで実施しました. さらに, 測定結果を解析するためにも同パーソナルコンピュータを用いました.

試料(図12(b))はチタン材料で, リード線はステンレス鋼線を用いています. 試料(図12(c))もチタン材料でリード線

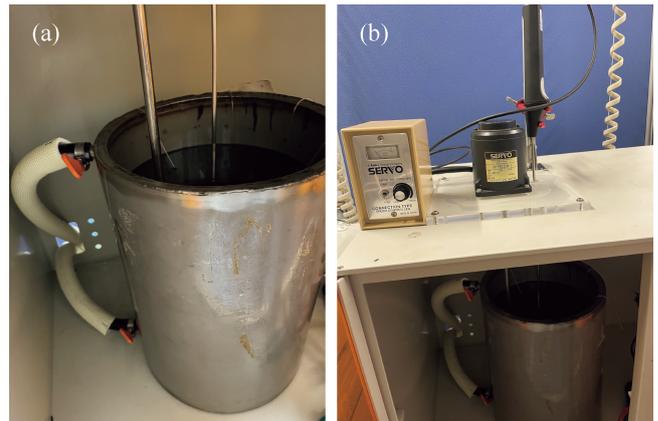


図13 (a) 室温近傍の電気抵抗測定に使用したオイルバス; 2重構造ステンレス鋼製容器の内壁・外壁間に精密恒温水循環装置を用いて水を循環させることで容器の温度を制御. 容器内には絶縁性ならびに発火点が高く, 熱容量の大きなジメチルポリシロキサンを dimethylpolysiloxane) を使用, (b) オイルバス温度測定用デジタル温度計, ジメチルポリシロキサンの攪拌用定速モータおよび取付架台.

は試料(図12(b))と同じくステンレス鋼線を用いています. リード線と測定試料はスポット溶接で接合をしています. チタン合金にはチタンに対して拡散係数の小さいモリブデン線や工業用純チタン線をリード線として用いる場合もあります.

300 K 定点測定ためには 2 重構造のステンレス鋼製容器における内壁・外壁の間に精密恒温水循環装置で水を循環させることで容器の温度を制御しています(図13). 容器内には絶縁性ならびに発火点が高く, 熱容量の大きなジメチルポリシロキサン(dimethylpolysiloxane)を満たし, その中に試料を浸漬し電気抵抗を測定しました. そのオイルは十分に攪拌し, 温度の均一性を保持した. 温度変動は 0.01 K 以下です.

本測定システムでの結果については, 上田らによって発表された文献で確認できます⁽¹⁵⁾.

2-4-3 まとめ

本説明では, 金属材料の物性を調査するための電気比抵抗の測定法として, 直流電流を用いる 2 端子・4 端子法, 2 探針・4 探針法さらに非接触で電気抵抗(電気伝導度)から比抵抗に換算できる渦電流法について, できるかぎりわかりやすく説明することを心掛け, 実施例としてチタン合金の 2 定点温度(室温・液体窒素温度)での電気比抵抗の測定例を示しました. この説明をお読みいただいた方々に, 電気比抵抗の測定で金属材料の物性を評価する方法として利用していただければと思っております.

文 献

- (1) P. L. Rossiter: The electrical resistivity of metals and alloys, Cambridge Science Press, (1986), xiii.

