

## 研究

## 振動容量式電位計

小川岩雄 (應物)

表面 (または界面) 現象が大ききものをいう技術分野は廣い。通信技術における鑛石検波器、金屬整流器をはじめ、真空技術における固體面の氣體吸着、電鍍工業における金屬清淨面検査、機械工業反映における潤滑の問題等々枚舉にいとまがない。こういう表面現象は表面 (または界面) 電位に敏感にする。ここに近代的弱電技術がもたらした新鋭表面電位測定装置としての振動容量式電位計の華々しい登場の工業的意義がある。

## I. 緒論

## (1) 表面電位測定と生産技術

異なる金屬間や、金屬と半導體の間の接觸電位差、固體又は液體の表面薄膜による表面電位、或は金屬と溶液間の相境界電位 (電極電位) 等の測定は、單に固體物理學、界面化學、電氣化學等の學問的立場からきわめて重要であるばかりでなく、目ざましく進展している生産技術の立場から見ても日に日に重要性を増してきている。このことはあらゆる工業技術が、絶えず最新の學問の成果の上に立つとき健かに發展するという原則から考えても當然のことといえよう。

例えば今次大戰以來急激に發達した極超短波 (極波) の受信用としての鑛石検波器の整流機構の解明だとか大出力送信管などの製造上大きな問題である熱電子放射體の研究だとか、亜酸化銅セレン等を用いる低周波用整流器の研究だとかにはこの種の靜電測定も必ずや直接間接に貴重なデータを提供するであろうし、實際その方向の努力も始められている。また方面を変えて電極電位の直接測定のようなことが簡便、確實に行われるならば、電解工業電池製造等がさらに確固たる基礎に立脚することになる。また、化學工業上偉大な役割を演じている觸媒作用の研究とか、油脂類の分子構造に關する知見の獲得等にも役立つのではなからうか。

## (2) 表面電位測定の困難と従来の測定法

このように限らない應用領域があるにもかかわらず、表面電位等の測定には二、三の固有の困難がつきまといそのため實用化がひどく阻まれている状態にある。

第一に厄介な點は、物體の表面電位は一般にその表面の不規則な汚れ (酸化被膜、油脂膜、氣體吸着膜等) に大きく影響され、また半導體の接觸電位差はその半導體内の微量の不純物や結晶構造の亂れに甚しく依存するという

事情で、このためになかなか揃つたデータが得られない。こればかりは測定對象の本性上どうにもならないものでせいぜいサンプルの均質性、純度、清淨度に注意し、できるならば真空中で測定したりする外には打つ手はない。

第二の困難は測定方法に關するものである。この種の測定の特徴は或る物體の表面と標準物體面との比較的小さな ( $\geq 1V$ ) 空間電位差 (d. c.) をなら (或は殆んど) 電力を取出すことなく測定しなければならないという點にある。電流が取出せるならば熱電堆の場合のように鋭感電流計を用いて容易に  $1mV$  或はそれ以下まで測れるし、交流電壓 (脈動電壓) であれば簡単に眞空管で増幅することができるのだが、そのどちらでもないところに悩みがある。

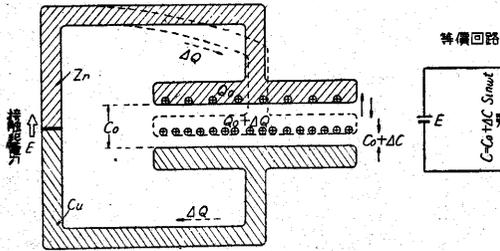
しかしこの悩みは絶望的なものではなく、デリケートな靜電氣機器 (象限電位計等) を驅使しつつ、困難を押しつて努力を重ねた先人達によつて、いくつかの測定法の原理は早くから確立されていた。そのうちで Kelvin 法<sup>(1)</sup> と呼ばれるものは、電位差の存在する二つの物體 (電極) の間の距離を變える際に、靜電容量の變化に伴つて電荷が移動するのを象限電位計のフレとして捉えるものであり、ポロニウム電極法<sup>(2)</sup> と呼ばれるものは標準電極面に着けられた放射性物質 (ポロニウム等) から發射される放射線 (主に  $\alpha$  線) によつて作られる空氣イオンが、求める空間電位差にもとづく靜電場であつめられる際の微弱電流を象限電位計で測るものであつて、前者はいわば直流電位差の脈動化であり、後者は極めて僅かの電力を空間靜電場から取出すことに相當する。

## (3) 振動容量法の原理

このような、古典的方法はいずれも取扱いの煩わしい電位計や放射性物質を用いるにもかかわらず感度はあまり上らず、連續觀測もむづかしく、そのままでは工業面への進出などはとても考えられなかつたのであるが、

その後の電子管技術の著しい進歩と普及はあらゆる分野の測定に大きな革命をもたらし、上記の Kelvin 法も 1932 年 A Zisman<sup>(3)</sup> によつて巧みに近代化され、従来の“1 回限り”の電極の移動は連続的振動でおきかえられ象限電位計の替りには高利得の真空管増幅器が用いられ、面目一新した姿で各研究分野に進出する一方、一層の改良洗練が盛んに行われるようになった。これが以下に述べる(4)、(4a) 振動容量法である。本邦でも既に古賀・加賀美兩氏による研究の一部が発表されている。

いまこの方法の要點を簡単に解析してみよう。ひとつながりの導體系の両端の間に、各接觸部に起因する接觸電位差、表面電位等の總和として、一定の靜電電位差  $E$  が存在するとする。この兩端面を狭い空隙をへだてて向いあわせ、その間に靜電容量  $C_0$  を形成させると第 1 圖兩面にはそれぞれ  $Q_0 = C_0 E$  なる大きさの正負の電荷が



第 1 圖 振動容量法の原理

あらわれる。そこでこの‘電極’の一方(または兩方)を機械的に振動させると上記の容量は

$$\Delta C \cdot \sin \omega t \quad (2\pi/\omega = \text{振動周期})$$

のような變動を受けるであろう。これに伴つて

$$\Delta Q = \Delta C \cdot \sin \omega t \cdot E$$

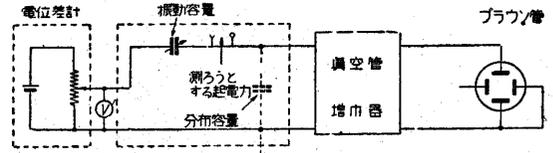
なる電荷が導體系をつたわつて容量部分に追加分として入つたり出たりするので、その導體系には微弱ながら\* ‘直流’電位差  $E$  に比例する振幅の(周波数  $\omega/2\pi$  なる) ‘交番’電流が流れるから、導體系の一部に適當なインピーダンスが挿入されていればその兩端間から同じく  $E$  に比例する交番電圧が取り出されることになる。これを高利得の低周波増幅器で増幅してブラウン管または擴聲器に入れることは大して困難ではない。\*\*

導體回路の一部に電位差計を挿入して振動容量電極間の電位差を連続的に變えられるようにしておくと、ちよつと接觸起電力等が打消されて兩電極面が等電位になつたときに交番電壓の信號が消える。(第 2 圖)。このため容量の變動をできるだけ大きくし、 $C_0$  及び導體系の周圍に對する分布容量を小さくし、増幅器の利得を高くしておく、この装置は、對向する電極面が等電位になる場合の指示器としてきわめて敏感に働くのである。

\* というのは振動電極の大きさはどうせ數平方 cm 止りだから、 $C_0 \sim \mu\mu\text{f}$  況んや  $\Delta C$  はもつと小さく、従つて  $\Delta Q$  も  $E \sim 1\text{V}$  では  $10^{-12}$  Coulomb 以下! そこで  $\omega \sim 600$  としても、この交流は  $10^{-9}$  amp. 程度である。

\*\* 以上の原理はいわゆるコンデンサーマイクロフオンの場合と全く同様である。/ 同種電位計とも通う點がある。

こうしてまず一つながりの導體系について零點を與える電位差計のよみを見ておき、次にその一端の電極に例えばこれと異なる金屬を密着させて全面を覆い、この場合の新しい零點を求めてこれが電位差計のよみで前とどれだけずれているかを見れば、電位差計のよみの精度で電極金屬間の接觸電位差を知ることができる。



第 2 圖 零點法を用いる場合の回路

ここで注意すべきことは、零點法を用いるかぎり、振動容量部分の形状も、電極振動の姿態も、また増幅器の特性も、零點指示の‘感度’(最小識別電位差)に影響を及ぼすだけで、零點(等電位)指示性の正しさには原理的には何ら關係がないという著しい事實である。このお蔭で振動電極や増幅器の設計が随分簡単になるのである。しかし後に述べるように実際に装置を組んでみると、なかなかそのように理想的には行かず、電極配置に相當氣をつけないと零點指示にかなりの系統誤差を生ずることを筆者は経験したのであつた。

それはともかく、このような振動容量法が實際有能であることは Zisman 以來多くの實驗によつて充分に確められている。しかしながらできるだけ簡便でしかも精密、敏感に働く装置を具體的に設計して實用的な‘振動容量式電位計’にまで仕上げることや、そのための立つた理論的考察にはまだまだ研究の餘地がある、筆者もその方向を目指していろいろと試み且つ考へてみた。

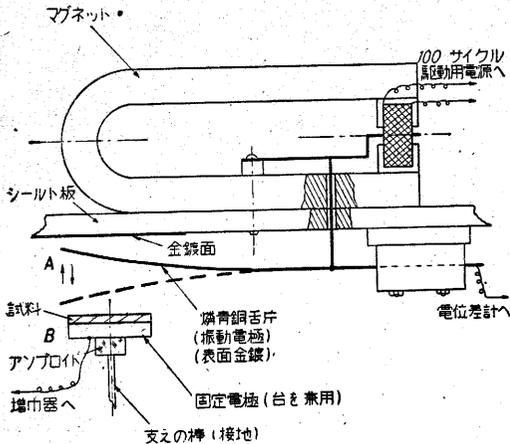
## II. 試作装置の要點

### (1) 舌片の共振を用いた振動容量系

この装置の急所は何と言つても大きい振幅の振動容量系をどのように巧みに實現するかに在る。この部分は直接きわめて利得の高い真空管増幅器に結ばれるのであるし、装置を簡素化するためにも、なるべく小電力で、小型で、かつ増幅器を妨害する火花放電などをやらない動力源が使いたい。ここが工夫のしどころであつて、いままでに報告された方式も十人十色の感があり、鐵片又は鐵線の磁氣的勵振を用いるもの<sup>(5)</sup> 市販のダイナミック・スピーカーを利用するもの<sup>(6)(7)</sup> を始め、電磁式顯示器(自記装置)を使うもの<sup>(4)</sup> その他變つた所では Zisman が最初試みたもので電氣的妨害を恐れるあまり壓搾空氣の噴出で勵振するという泰山鳴動型もある。

筆者は始めマグネチック・スピーカー次にダイナミック・スピーカーの振動棒に軽い電極を取付けて、數百サイクルで強制振動を行はせたが、案じられた電氣的妨害は簡単に遮蔽できた。しかしいづれも電流を喰う割には振幅は小さく、且つ振動系を支える調整がむづかしいの

で中止し、しばらく琴絲の單弦琴を用いることを試みていたが、不規則な振れ振動に閉口して、結局第3圖のような舌片共振型に變更した。\*



第3圖 舌片の共振を用いる振動容量系

厚さ 0.5mm, 幅 10mm, の簧青銅舌片(長さ約 7cm)の一端をしつかりと固定して水平に置き、ありあわせのマグネティックスピーカ-の振動棒で舌片の固定端附近の適當なる場所を勵振する。舌片の長さは豫め固有振動数が約 100 サイクルになるように調整しておく、これはあまり厳密にする必要はなかつた。デリケートなのはむしろ舌片の勵振點の位置であつて、これが悪いと振動棒からの振動エネルギーが舌片に入らずに反射されてしまうために、舌片の振幅がひどく減少する。即ち振動棒系と舌片との機械的インピーダンスの整合が要求される。

マグネティックスピーカ-に入れる駆動用の電流としては、商用交流をセレン整流器で周波数を倍増して 100 サイクルにしたもの(直流分も混つている)を用い、電壓約 10 ボルトで 5~10mA くらい流した。この程度のわずかな電流でも振動系の調整さえよければ、舌片の先端振幅は容易に 3mm くらいとなり、安定した共振を持続するので充分實用になる。

この舌片の表面は豫め金メッキを行つて、酸化等を防いでおき、舌片の先端附近約 2 平方 cm (第3圖中A)を振動容量電極として、もう一つの電極 B を下から支え A と約 2 耗隔で對い合わせた。

振動系全體は電氣的に周圍と絶縁して支え、電位差計につないで、任意 (0~2V) の正又は負の靜電位に保てるようにする。電位差計の他端は接地する、スピーカ-の駆動電流が、増幅器に接続される電極 B に直接磁氣的に作用してハムを發生しないように、磁石全體を舌片と等電位の箱に入れて舌片に對して充分遮蔽し、さらに B を含む全體を大きな遮蔽箱に入れて外部からの電氣的妨害を防いだ。

固定電極 B は増幅器の第一真空管のグリッドと直接結

ばれるもので試料の保持臺を兼ね、極力電氣的絶縁性の高い材料(アンプロイド等)で水平に支えた。この際なるべく周圍に對する分布容量が小さくなるように注意した。

## (2) 増幅器

このような振動容量系から取出される交流は、前に述べたように  $10^{-9}$  アンペア程度の微弱なものなので、これを増幅するためには、初段真空管の入力インピーダンスをできるだけ大きくしなければならない。\* また増幅器全體の利得を大きくするために、各種の回路雑音・真空管雑音を少しでも減らしたい。

そこで筆者は初段真空管として制御グリッド絶縁の比較的良好な UZ-6C6 を選び、B-電源、電壓約 200 ボルト、織條電壓約 4 ボルト(直流)くらいに格下げして用い、制御グリッドは‘浮游グリッド’(グリッド・リーク)を別に着けず、僅かなグリッド電流等による陰極へのコンダクタンスを利用する)として、電極 B に直結した。こうすると、陰極からの熱電子が初速度によつてグリッドに跳付いてグリッドは -1V 程度に帯電し、ひとりでにバイアスが掛る。\*\*

初段球によつて電力増幅が行われた信號波を、さらに 6C6 三段、RC 結合の低周波増幅器 (200 サイクル以上は‘切り落す’)によつて電壓増幅し、ブラウン管オシログラフに入れた結果、装置全體としての最小識別電位差は約 5mV となつた。増幅器の利得は約 110db\*\*\*と推定され、相當に高いので電氣的妨害の遮蔽は慎重に行いまた機械的振動による妨害の除去にも注意した。織條加熱には蓄電池からの直流を用いたが、第二段以下の真空管は注意すれば交流でもよい、B 電源はエリミネーター電源で、平滑用コンデンサ-は充分大きく(並列で 48 $\mu$ F)しないとリップルが除去し盡せなかつた。

## III. 電極配置の不良に基づく系統的誤差

前 (I (3) 項) にも述べたように、この方法ではブラウン管面の交流波形の消失は兩電極間の電位差の消失に常に對應し、電極配置や舌片の振動姿態には無關係なはずであるが、實際の試作装置では信號の消失點(電位差計のよみ)は、電極 B の位置(とくに A との距離)によつて規則的にかなり大きくかわり、ときとしては 0.2V にすら達することがあつた。

また電極間の距離がごく小さいときとか、電極もしくは試料の表面が汚れていたりして表面電位にむらがあると思われる場合にはしばしば、振動電極の電位を電位差計でどのような値にしても信號の完全な消失が行われず

\* 即ち制御グリッド系の絶縁度を十分高くし、分布容量を極力小さくせねばならぬ。

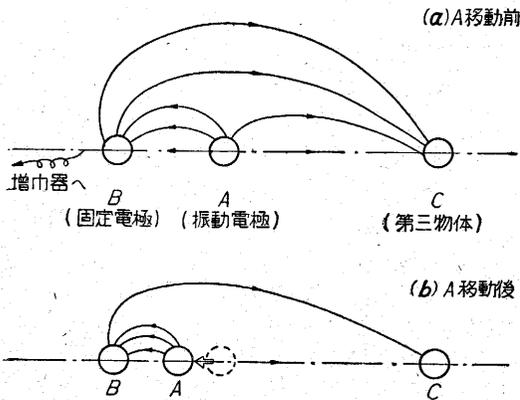
\*\* この場合のグリッド平均電位の時間的變動 (drift) は實驗によると少くとも 10 分以内では 5mV 以下なので、安心して標準電位にすることができる。

\*\*\* 10mV 程度の精度でよいときは、このような高利得の必要はなく初段球以後は 6C6 二段で充分間に合う。また零點檢知にはブラウン管を使わず、スピーカ-またはレシーバ-を用いることもできる。

\* 速報を既に發表した。(『機械の研究』1 (1949), 262)。

一定の振幅以下にはどうしてもならないために、零點の読みがはつきりと決められないで困つたこともあつたこのことも二つの電極だけを考へる簡単な原理的考察では説明することができない。そこでいろいろと調べた結果、このような現象はどちらも、電極 A, B の近くに、そのいずれとも異なる第三の電位の物體 C が顔を出しているために起るのだということがわかつた。

この場合には、任意の瞬間における電極の附近の電場の模様は例えば第 4 圖(a) のようになり、増幅器に結ばれる電極 B に入る電氣力線は振動電極 A からくるもの



第 4 圖 第三の電位の物體が近くにあるときの電場の外に、第三の物體 C に向うものがある。\* (これらの力線の「數」がそれぞれ (A-B), (B-C) 間の容量的結合度を示す) そして、振動によつて A の位置が変わると、A-B の結合度ばかりでなく B-C の結合度も變動するの

\* 簡單のため電極 B の始めの電位を 0 とした。

で、(第 4 圖(b)), A と B が等電位で (従つてその間に力線の結合がなくて) も、電極 B には C の影響で電荷の出入が起ることになり、ブラウン管上の波形は消えない。信號消失 (零點) が観測されるのは、A, C 双方の B に対する影響がちょうど打消し合うような或る電位 (B と C との中間の或る値) を A が取るときとなるのである、ところが A と C との B に対する影響の比\* は、三者の (振動前の) 相對的配置によつてかなり異なるので、始めに述べた 0.2V にも違つる誤差を生ずるのである。

さらに詳しく考へてみると、振動のすべての位相を通じて、上記の比\* が一定になるということは、A の電位をどのように變えても、嚴密には有り得ない。とくに A が B のごく近傍で大きく振動するときには、装置の感度が大きい上に、A による B-C 結合の周期的遮断が著しいので、ブラウン管面には振動のどこかの位相で起る B への電荷の出入によつて信號波形が必ず残留して、完全な「零點」が存在しないことが豫想されるが、これはまさに經驗と一致する。

また電極面の一部分が汚れて異なる電位にあるときにこの現象に出會うというのもこの汚れた部分を C と考へれば、同じようにして説明できる。

このような問題の具體的な解決法は今や明瞭である。要するに電極 A, B のまわりには充分の空間を作つて、B-C の靜電的結合が始めから殆んどないようにすればよいし、もしやむを得ず近くなる第三物體があるときは、その表面電位を A か B の表面電位と等しくなるように

\* 即ち A の變位に伴う AB の結合度の變化と、BC の結合度の變化との比。

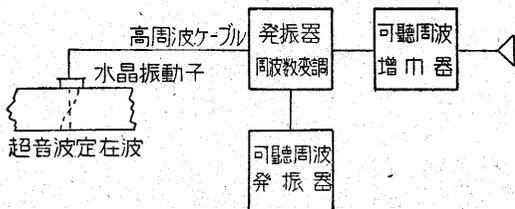
速報 17

超音波厚み計

高木昇・丹羽登・佐下橋市太郎(電氣)

ボイラー、タンクの管壁など、大きな金屬板の一方のみからその厚みを測定したいとき、超音波厚み計を用いると簡便である。

まず圖の如く、厚みを測りたい金屬板に水晶振動子を入れたプローブを押しつけ、高周波ケーブルによつて可變周波數發振器の出力電壓を印加する。水晶の振動によつて金屬板中に超音波が生ずるが、發振周波數を變えて板内の超音波長の 1/2 の整数倍が厚みに等しく



超音波厚み計原理圖

なれば定常波ができ、發振器の出力が増すのでプレート電流が 15~25% 急變する。

その共振點の檢出を容易ならしめる方法として、パイプレーターによつて音聲周波數で發振回路の容量を變化させてわずかな周波數變調を行い、共振時の陽極電流の變化分を變壓器で取り出し、増幅してスピーカーを鳴らす。變調音聲周波數の發振にはネオン管を用いたので (従來のものは眞空管發振器) 使用眞空管は主發振用及び増幅二段、合計 3 本のみですみ (従來のものは 4~5 本) スピーカーも小型なクリスタル型を用いて、わずかに 15×10×8cm<sup>3</sup> の大きさに収め得た。電源用乾電池を含めても、容易に肩から下げて現場へ持ち運びできる。

雑音の激しい工場内ではスピーカーの音は聞き難いので、受話器も使用できる。發振周波數は 1.1~3.5Mc (鋼鐵板内の超音波の波長約 1.5~5mm) で、4Mc の共振周波數を持つ水晶振動子を使用した。約 1.5mm~15cm の厚みの金屬板の厚みを 4% 以下の誤差で測定でき、表面の荒い場合は 4~7% くらいの精度に低下する。(1949.12.4)

しておくのである。筆者の試作装置では舌片の周囲は舌片と同じく金メッキを施した薄板でかこみ、舌片と共に電位差計につなぐと共に、対向電極 B は長さ 5cm くらいの細い柱で箱の底から立てることなどによってこの種のトラブルを避けている。

IV. むすび

上に述べた試作装置は、有り合わせのマグネティックスピーカーの磁石や振動棒を用いて手製したものに過ぎず、構造はもつと簡単で使い易いものに改良できると思われるが、この程度のもので目的によつては充分役立つ。筆者はこれを用いて目下金属の単極電位の直接測定を試みている。さきに練習実験としていろいろの金属相互間の接觸電位差を測定してみたところ、大気中のため再現性は悪いが、だいたい従來の測定値に近い値が得られた。一方もつと簡単な構造のものを真空中に入れる準備を進めている。電極配置の理論的考察は上記の程度で定性的には盡されたものと考えられる。

稿を結ぶに際し、終始親切な御指導を賜つた本研・熊谷寛夫教授、及び舌片用磷青銅を供與された理工研・村川毅教授に深い感謝の意を表すると共に、熱心に協力された東大二工・物理工學科學生村田一、小林寛、柿井俊一郎、辻泰の四君の勞を心から謝する次第である。

(1949・10・24)

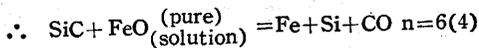
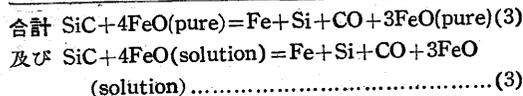
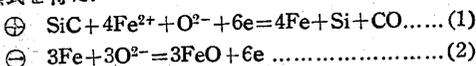
引用文献

- (1) I. d. Kelvin : Phil. Mag., 46 (1898), 82.
- (2) McLennan & Burton : Phil. Mag. 6 (1903), 343.
- (3) Q. Zisman : Rev. Sci. Inst., 3 (1932), 367.
- (4) 古賀正三, 加賀美鏡三 : 應用物理, 1 (1948), 197.
- (4a) 古賀正三 : 科研報告, 25 (1949), 200.
- (5) H. Plevsky, R.K. Schnank & R. Grenchik : Rev. Sci. Inst., 18 (1947), 198.
- (6) Yamins & Zisman : J. Chem. Phys., 1 (1933), 656.
- (7) S. Rosenfeld & W. M. Hoskins : Rev. Sci. Inst., 18 (1945) 343.

速報 18 鐵滓成分の活量の計算

松下幸雄・坂上六郎 (冶金)

すでに報告したように、熔融スラッグ中におけるその構成成分の活量を求めるために FeO-SiO<sub>2</sub> 二元系をとり、電極として Fe-SiC 對を選んでその反應起電力を測定したが、これから活量を計算するためにはまず起電反應式を考えなければならぬ。この場合、(1) Fe-SiC 電極對に對しては、SiO<sub>2</sub> が反應にきいてこないこと、(2) SiC (+) 極に Fe と Si の不均一な合金が附着すること。(3) FeO 100% の場合の起電力は 1400°C で 200mV, 1450°C で 220mV であるが、これから計算した遊離エネルギーの變化の値と反應式に從來の熱化學データを適用して計算した遊離エネルギーの變化の値とが、一致しなければならぬこと等を考慮して次の反應式を得た。



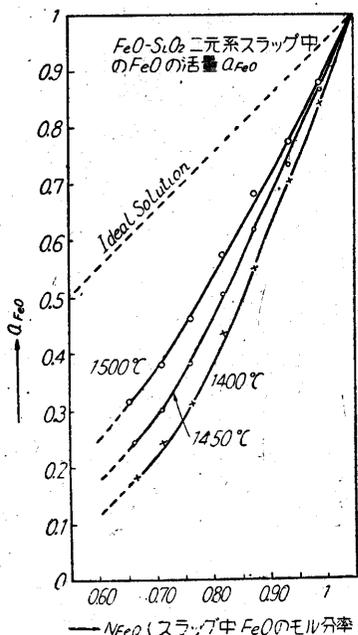
ここで括弧内の pure は純粋な FeO, solution は二元スラッグ中の FeO を意味する。

この式から結局 FeO の活量 a<sub>FeO</sub> は  
 $E E_0 = RT/6F \ln a_{FeO}$  ..... (5)

より求まる。

E は任意の組成のスラッグの場合の起電力; E<sub>0</sub> は FeO 100% の場合の起電力; R は氣體恒數 F はファラデー常數; T は絶對溫度。

結果をまとめて圖に示す。これから直ちに SiO<sub>2</sub> の活量及びいろいろの微分分子量 (Partial Molal Quantities) が計算



できる。

さらに FeO-SiO<sub>2</sub> 熔融スラッグの構造についても定量的な取扱いができ、H. Schenck のいわゆる“遊離成分”を検討できるわけだが、詳細は追つて報告する。

(1949・12・5)

4 月 號 は

『アルミニウムの應』用特集

アート 8 頁 本文 96 頁 倍大號 予價 100 圓  
 詳細は巻末予告を参照