

鑄鉄炉前試験法としての (C+Si) メータについて

On the (C+Si) Meter, Used as a Cast Iron Foundry Test Instrument

山 田 泰 生* 江 上 種 一*
Yasuo Yamada Tanekazu Egami

内 容 梗 概

鑄鉄の炉前試験は、鑄造前の溶湯性状の管理上、非常に重要な作業である。しかし画一的な方法がないために各工場において独自の試験と判定基準を用いている。

鑄鉄溶湯を金型により急冷して白鉄とし、白鉄の電気抵抗と (C+Si) %との直線的関係を利用した (C+Si) メータは、炉前試験法としてキューボラ・電気炉・反射炉などで熔解した一般鑄鉄溶湯の性質を迅速かつ正確に知ることができる。鑄造条件を一定にし、電気抵抗測定をケルビン・ダブルブリッジ式で行い、あらかじめ決定された相関式に従い (C+Si) %を判定するこの方法は、簡便であり、熔解現場で使用し良好な実績を収めている。

本報は、次の諸点について述べたものである。

- (1) (C+Si) メータを形成する諸要素の決定
- (2) (C+Si) メータの精度に及ぼす試料寸法の問題

- (3) 鑄造欠陥および導線埋込部の接着の問題
- (4) 比電気抵抗と (C+Si) %間の理論的考察
- (5) セメントタイトの比電気抵抗値の導出

1. 緒 言

可鍛鑄鉄を含む一般鑄鉄では、溶湯の C % および Si % が鑄物の健全性を左右し、鑄型注湯前に各種の炉前試験が行われている。この炉前試験は、破断面・湯面模様を肉眼で判定する方式か、チル深さ・頭部のひけ程度で溶湯の性状を推測する方式であり、個人ならびに試料間の判定誤差も大きく、各国各工場によって異なった作業をしているといっても過言ではない。また、化学分析は、分析値が判明するのに 10~30 分の時間を要し、迅速性を欠くとともに一回の分析に要する費用が大きい。したがって迅速・正確で個人誤差のないかつ判定に要する経費の低廉な炉前試験法が望まれている。

従来より知られている事実として白鉄の電気抵抗と (C+Si) % との間には、直線的な相関性がある。筆者らは、この関係を利用して電気抵抗を正確に測定し溶湯の (C+Si) % を知る (C+Si) メータを製作して、試料作製の条件・鑄造欠陥の影響・測定の簡略化などを解明し、現場での使用に便ならしめた。

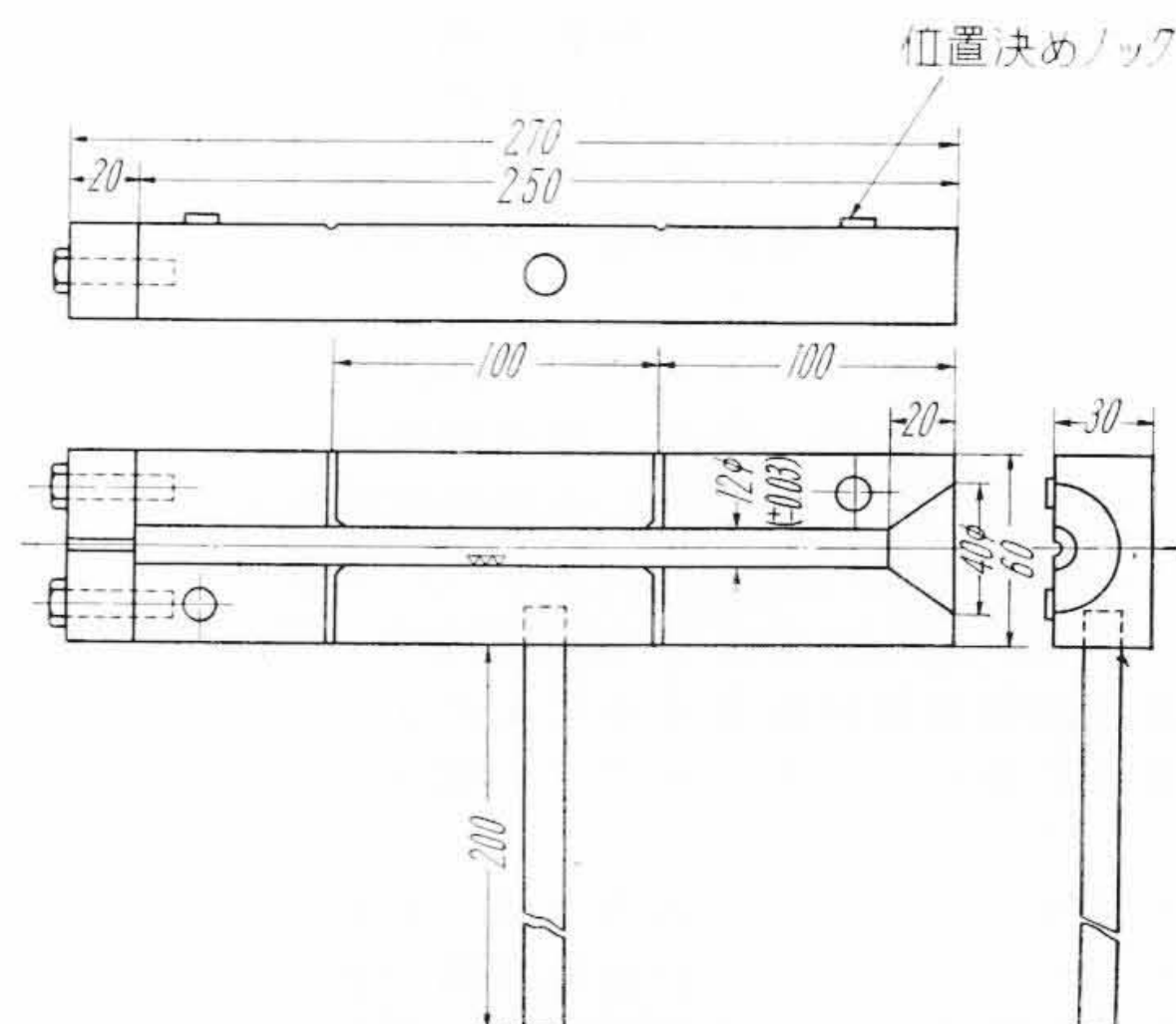
2. 測定法および測定試料

2.1 測定試料作製条件

SKS 2 または 3 の鋼材を焼鈍後加工し第 1 図のような金型ダイスを製作した。一組をクランプして抵抗測定端には、よく研磨した 16# 鉄線を貫通させ注湯した。この 16# 鉄線は、試料に鑄包まれ電圧側端子となるものである。溶湯は、可鍛鑄鉄用キューボラ溶湯・電気炉溶湯および普通鑄鉄用溶湯である。

試料は、湯口が赤褐色になるまで型内で冷却した後、取り出し、0.5~1 分空冷の後、水冷する。試料の注湯温

* 日立金属工業株式会社深川工場



第 1 図 (C+Si) メータ用ダイス

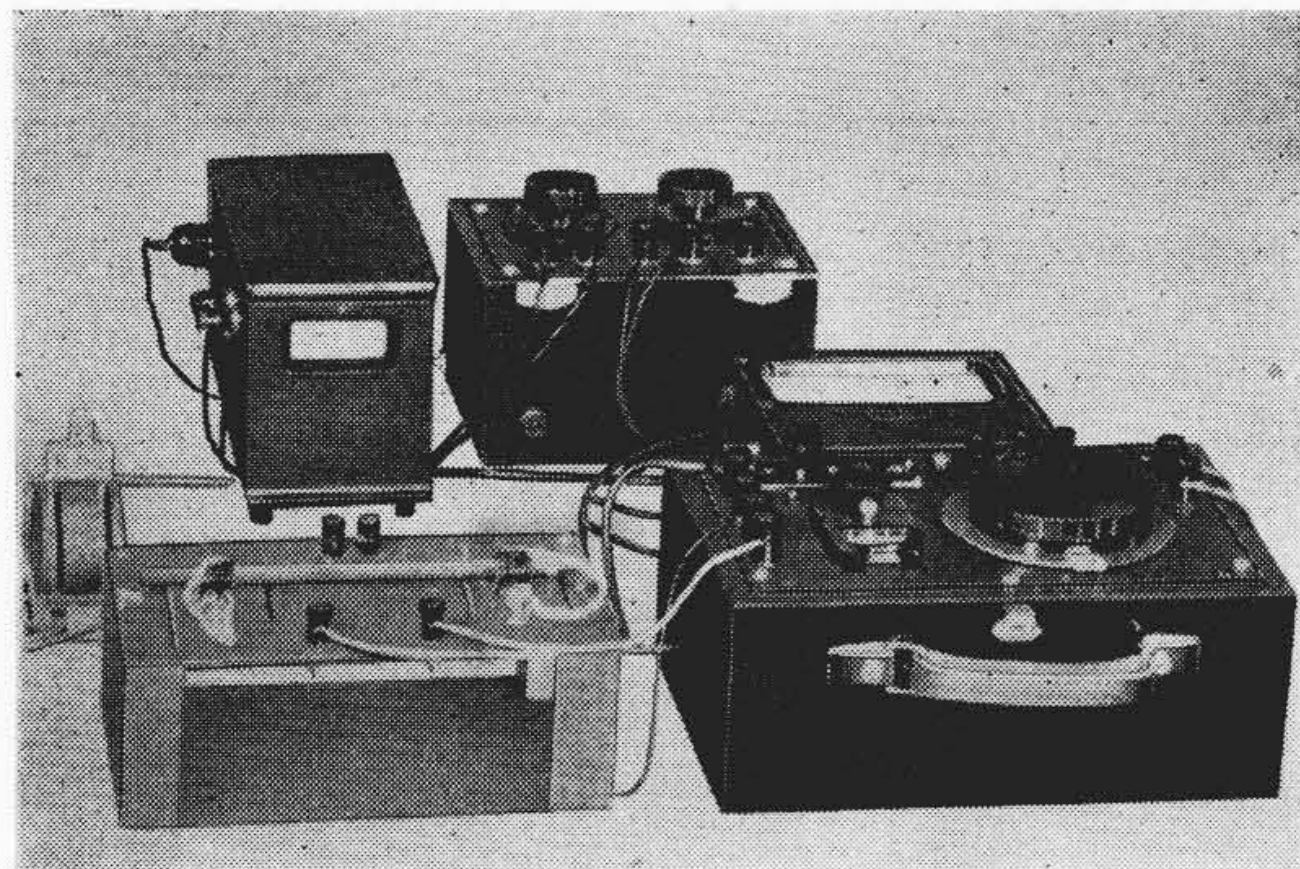
度は 1,350~1,400°C であり、取出温度は 400~500°C、注湯前の金型温度は約 50~70°C である。

2.2 測定条件

抵抗測定は埋込まれた鉄線リード線間で行い、電圧側端子は水銀浸漬接点とする。電流側端子は銅製クリップによって試料を支持した。第 2 図には試料支持装置とケルビン・ダブルブリッジなどの測定装置一式を示す。

2.3 抵抗測定

抵抗を測定するにはホイートストン・ブリッジ法、電位差計法およびケルビン・ダブルブリッジ法などがあるが、ホイートストン・ブリッジ法は測定回路の導体抵抗、導体接続箇所の接触抵抗などのために、誤差が大きく正確な測定は望み得ない。これに反し、電位差計法およびケルビン・ダブルブリッジ法は直接抵抗を測定せず、前者は一定間隔の電圧降下を測定する方式であり、後者は定常電流下の標準抵抗との比較法であるので、導



第2図 (C+Si)メータ

体抵抗, 接触抵抗などは問題にならない。そこで電気抵抗の測定法として電位差計法とケルビン・ダブルブリッジ法を採用して抵抗測定を行い(C+Si)%—抵抗値の関係式を得た。

2.3.1 電位差計法による測定装置

第3図の結線図にし

たがい, 測定電位差は 10 mV 程度で, 3 桁の測定値を得る最小電流は 20 A となる。電位差計は温度更正用電位差計を使用した。

2.3.2 ケルビン・ダブルブリッジ法による測定装置

携帯用ダブル・ブリッジに直流用反照検流計を用いて測定した。試料に流す直流電流は, 4.5 A 程度である。測定に当っては, 直流電流の方向を変えて2度測定し, その平均値をとって, 熱起電力および接続部分の局部電池作用の影響を消去した。第4図は, ケルビン・ダブルブリッジ法の結線図である。使用した計器の仕様は, 次のとおりである。

ダブル・ブリッジ式抵抗測定器

最小目盛 $5 \times 10^{-6} \Omega$

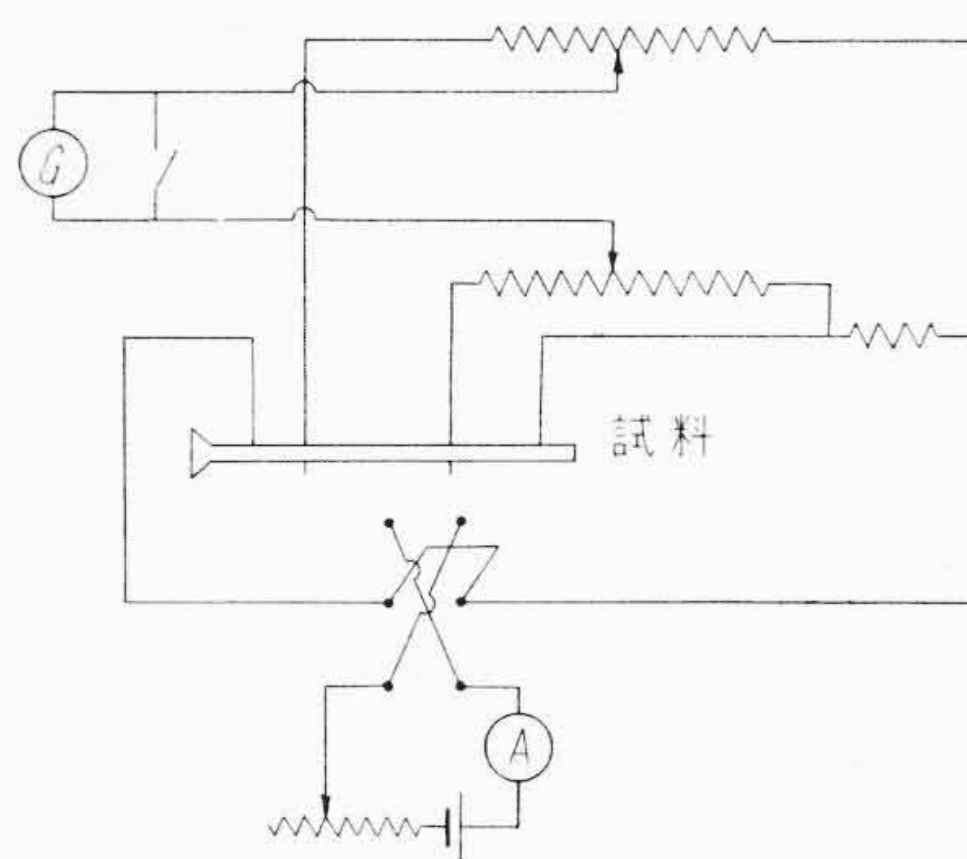
目盛誤差 定格値の $\pm 0.45\%$ 以内

直流用反照検流計

感 度 $5 \times 10^{-8} A$

2.4 試料の化学分析

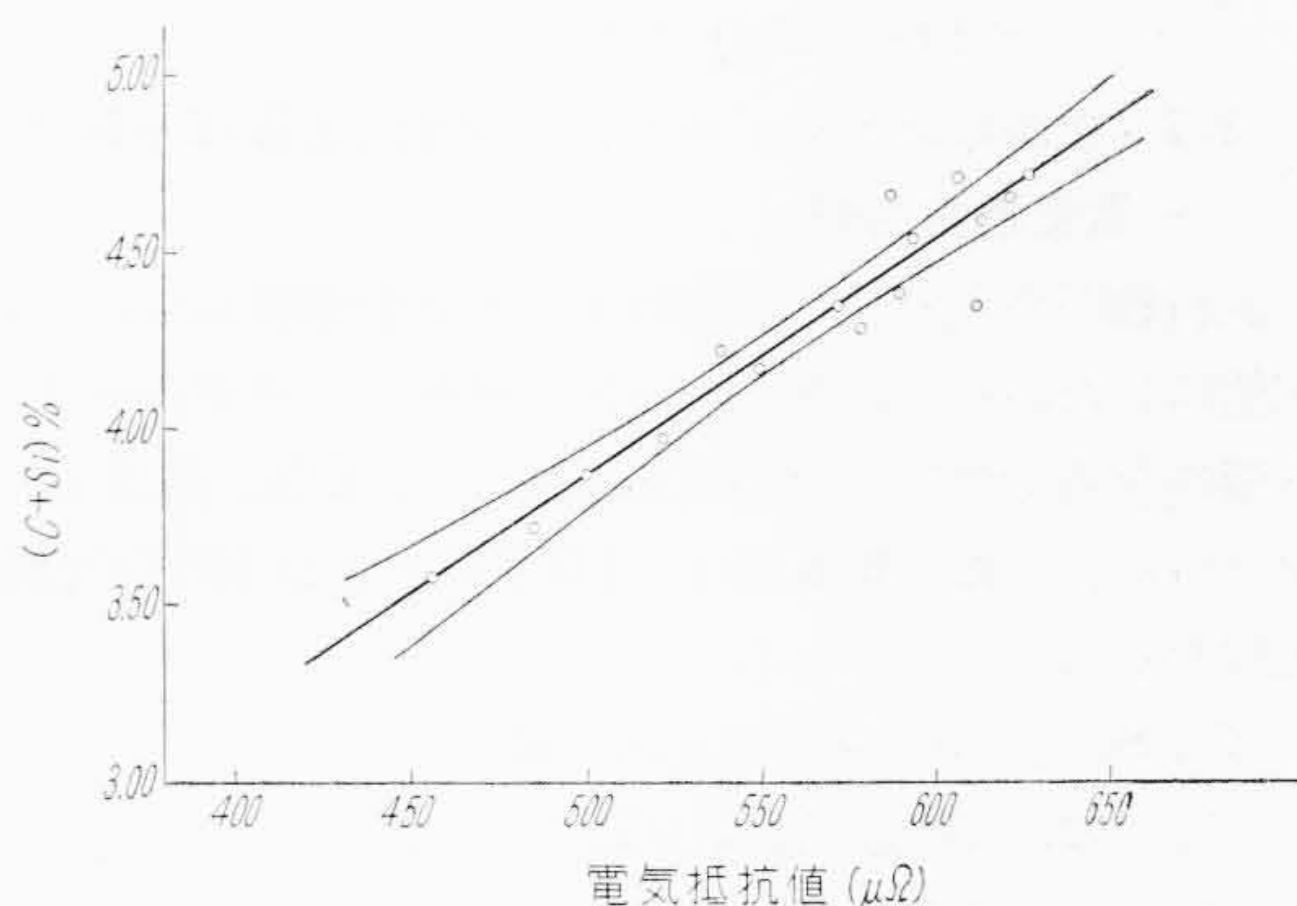
抵抗測定後の試料を破断して鑄造欠陥の有無を調査した後, 白銑試料を分析に供した。炭素の分析は, JIS-G 1211 の容量法で行い, ケイ素の分析は, JIS-G 1212 に準拠した。分析は, 一試料について2回行い, その平均値をもって分析値とした。参考までに, 試料の代表的化学成分を第1表に示す。



第4図 ケルビン・ダブルブリッジ法結線図

第1表 試料化学成分の一例

材 質	C(%)	Si(%)	Mn(%)	S(%)	P(%)	Cr(%)
マレブル電気炉熔湯	2.52	1.09	0.37	0.103	0.063	0.034
マレブルキューポラ熔湯	2.92	1.32	0.43	0.117	0.065	0.035
普通鑄鉄用熔湯	3.09	2.28	0.46	0.114	0.065	0.038



第5図 電位差計法による抵抗値と(C+Si)%の回帰曲線および95%信頼区間

3. 測定結果およびその考察

3.1 電位差計法による(C+Si)%—電気抵抗曲線

試料数 115 のキューポラ熔湯から電位差によって, 16 グループに分類し, 各グループより1個の試料を抽出して, C%, Si% の化学分析を行い, 相関分析法により第5図の回帰曲線および95%の信頼区間を得た。

$$(C+Si)\% = 0.57 + 6.59 \times 10^{-3} R$$

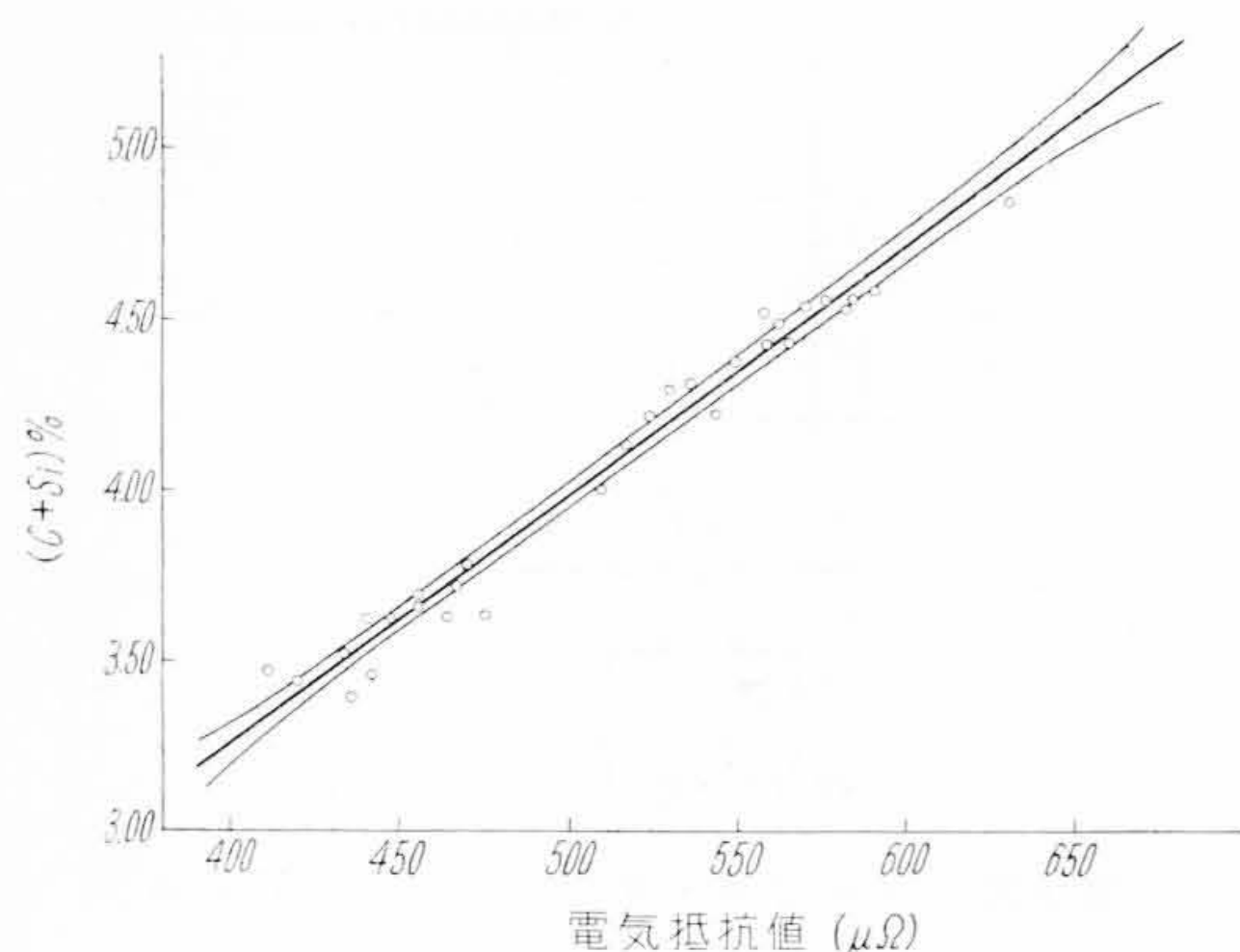
R: 電気抵抗値($\mu\Omega$)

分散分析表を第2表に示す。

この結果は, 有意であり, きわめて正確な直線関係が

第2表 電位差計法による場合の分散分析表

要 因	S.S.	ϕ	V	F ₀	F _{14 (0.01)}
回 帰 に 基 く	1.7620	1	1.7620	166.2**	>8.86
回 帰 か ら の	0.1486	14	0.0106		
計	1.9106	15			



第6図 ケルビン・ダブルブリッジ法による抵抗値と(C+Si)%の回帰曲線および95%信頼区間

存在する。この曲線の回帰係数 β_1 を推定 (95%信頼区間) してみると次のとおりである。

$$\begin{aligned}\hat{\beta}_1 &= (6.59 \pm 1.09) \times 10^{-3} \\ &= (7.68 \sim 5.50) \times 10^{-3}\end{aligned}$$

3.2 ケルビン・ダブルブリッジ法による(C+Si)%—電気抵抗曲線

試料数85のキューポラ熔湯および電気炉熔湯について抵抗値にしたがって、26グループに分類し、各グループから極端な鑄造欠陥のない試料を抽出し、C%, Si%の化学分析を行った。第6図は、回帰曲線および95%の信頼区間を示したものである。

$$(C+Si)\% = 0.32 + 7.33 \times 10^{-3} R$$

R: 電気抵抗値($\mu\Omega$)

分散分析表を第3表に示す。

回帰係数 β_2 の95%信頼区間による推定は次のとおりである。

$$\begin{aligned}\hat{\beta}_2 &= (7.33 \pm 0.43) \times 10^{-3} \\ &= (7.76 \sim 6.90) \times 10^{-3}\end{aligned}$$

3.3 電位差計法とダブルブリッジ法の比較考察

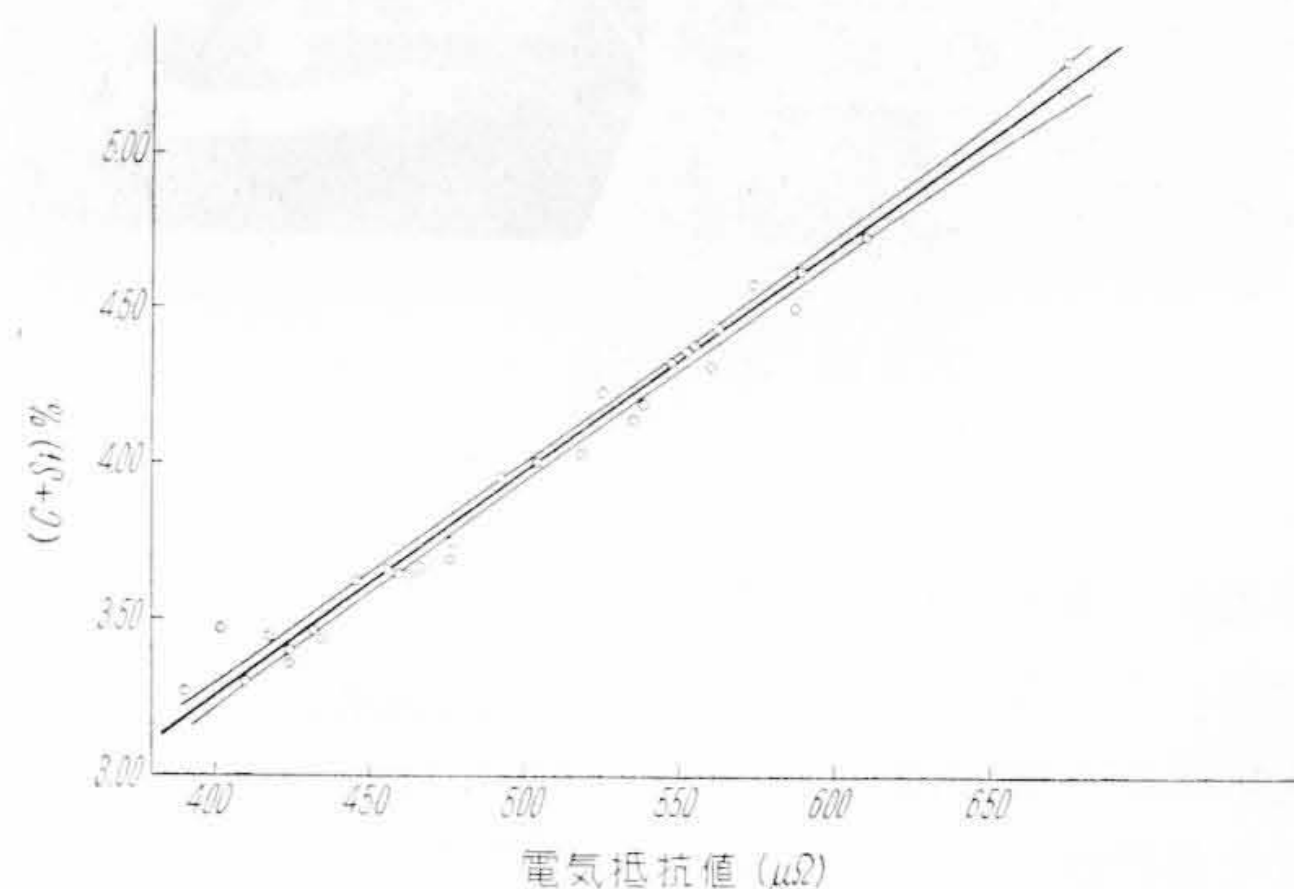
電位差計法による測定はケルビン・ダブルブリッジ法に比して抵抗の測定範囲はせまく、また測定原理上の誤差も少ないにもかかわらず、結果的には信頼区間の幅が大きくなり(C+Si)%測定値の精度が悪いことを示している。この原因は次のようなものと考えられる。

- (1) 試料電流を20Aという高電流にせざるを得ない。
- (2) 試料電流20Aを測定中一定値となしえない。
- (3) 試料に欠陥があった場合、局所的な温度上昇がある。

結局、20Aという高電流が誤差の大きくなる原因であるから、試料に流す定常電流が5A以下で、しかも厳密に電流を保持する必要のないケルビン・ダブルブリッジ

第3表 ケルビン・ダブルブリッジ法の場合の分散分析表

要因	S.S.	ϕ	V	F ₀	F _{129 (0.01)}
回帰に基づく	7.4282	1	7.4282	1217** > 7.06	
回帰からの	0.1766	29	0.0061		
計	7.6048	30			



第7図 Al 0.05%添加した場合のダブルブリッジ法による抵抗値と(C+Si)%の回帰曲線および95%信頼区間

第4表 ダブルブリッジ法により、Al 0.05%添加した場合の分散分析表

要因	S.S.	ϕ	V	F ₀	F _{129 (0.01)}
回帰に基づく	7.7404	1	7.7404	3931** > 7.60	
回帰からの	0.1140	29	0.0039		
計	7.8544	30			

法が、すぐれている結果となった。そこで(C+Si)メータとしては、ケルビン・ダブルブリッジ法を採用し、さらに試験片の鑄造欠陥をなくすためにAlを0.05%添加し、熔湯の鎮静効果を期待した。

3.4 Al 0.05%添加した場合の(C+Si)%—電気抵抗曲線図

3.2のダブルブリッジ法による場合と同一条件の試料85個にAl 0.05%を杓で添加し鎮静時間4~6秒静置してから鑄造した。これについて統計的解析を行い第7図および第4表の結果を得た。

$$(C+Si)\% = 0.36 + 7.22 \times 10^{-3} R$$

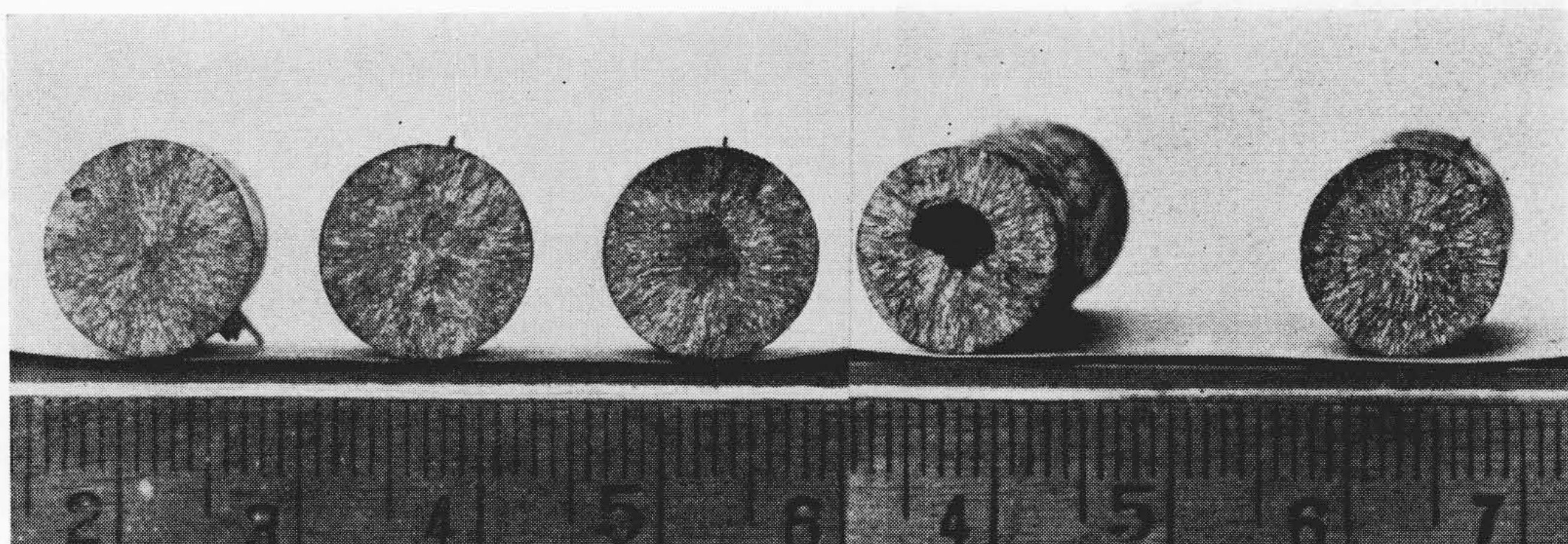
R: 電気抵抗値($\mu\Omega$)

回帰係数 β_3 の95%信頼区間による推定は次のとおりである。

$$\begin{aligned}\hat{\beta}_3 &= (7.22 \pm 0.33) \times 10^{-3} \\ &= (7.55 \sim 6.89) \times 10^{-3}\end{aligned}$$

3.5 回帰係数 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 間の差の検定

3.5.1 電位差計法とダブルブリッジ法による回帰係数の差の検定



ピンホール 健全なもの くされ ブローホール 亀裂

第8図 試料に発生した不良の実態

第5表 抵抗測定部の寸法

		最大値(mm)	平均値(mm)	最小値(mm)
直 径	D	12.00	11.871	11.70
長 さ	L	100.25	98.961	97.50

注：試料数は89個である

 回帰係数 β_1, β_2 間の有意差検定は

$$t = \frac{\beta_1 - \beta_2}{\sqrt{\frac{S_1 + S_2}{n_1 + n_2 - 4} \left(\frac{1}{Sx_1^2} + \frac{1}{Sx_2^2} \right)}}$$

が、自由度 $\phi = n_1 + n_2 - 4$ の t 分布をしていることを利用すると、

$$t = 1.431 < t_{0.50}(43) = 2.021$$

となる。すなわち、電位差計法とケルビン・ダブルブリッジ法の回帰係数 β_1, β_2 には差があるとはいえない。

3.5.2 ケルビン・ダブルブリッジ法によるAl添加の影響

$$t = 0.509 < t_{0.05}(60) = 2.000$$

同様に Al 添加の回帰係数に及ぼす影響はない。

抵抗測定法の差異、Al 添加による影響が回帰係数に現れることは望ましいことではないが、各回帰係数間の差を検定した結果、いずれにも差異は認められない。

3.6 試料の寸法および鑄造欠陥

抵抗測定後の試料について、抵抗測定端距離 L および両測定端部、中央部の径 D を測定した。なお、 L, D の金型寸法は $L = 100.0\text{mm}$ 、 $D = 12.0\text{mm}$ である。

第5表の値を利用し、 L および D が抵抗値 R に与える影響を計算すると

$$JL = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{2} = 1.38$$

$$\left| \frac{JL}{L} \right| < \frac{15}{1,000}$$

$$JD = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{2} = 0.15$$

$$\left| \frac{JD}{D} \right| < \frac{15}{1,000}$$

$$\left| \frac{JR}{R} \right| = \left| \frac{JL}{L} - 2 \frac{JD}{D} \right| \leq \frac{15}{1,000}$$

すなわち、抵抗値の3桁目の値は最小単位が2とすれば有効である。

しかし、試料の径および長さは、金型ダイスの使用中に徐々に変化し、抵抗値に及ぼす影響も大きい。特に試料の径は抵抗測定時にチェックして補正しなければならない。

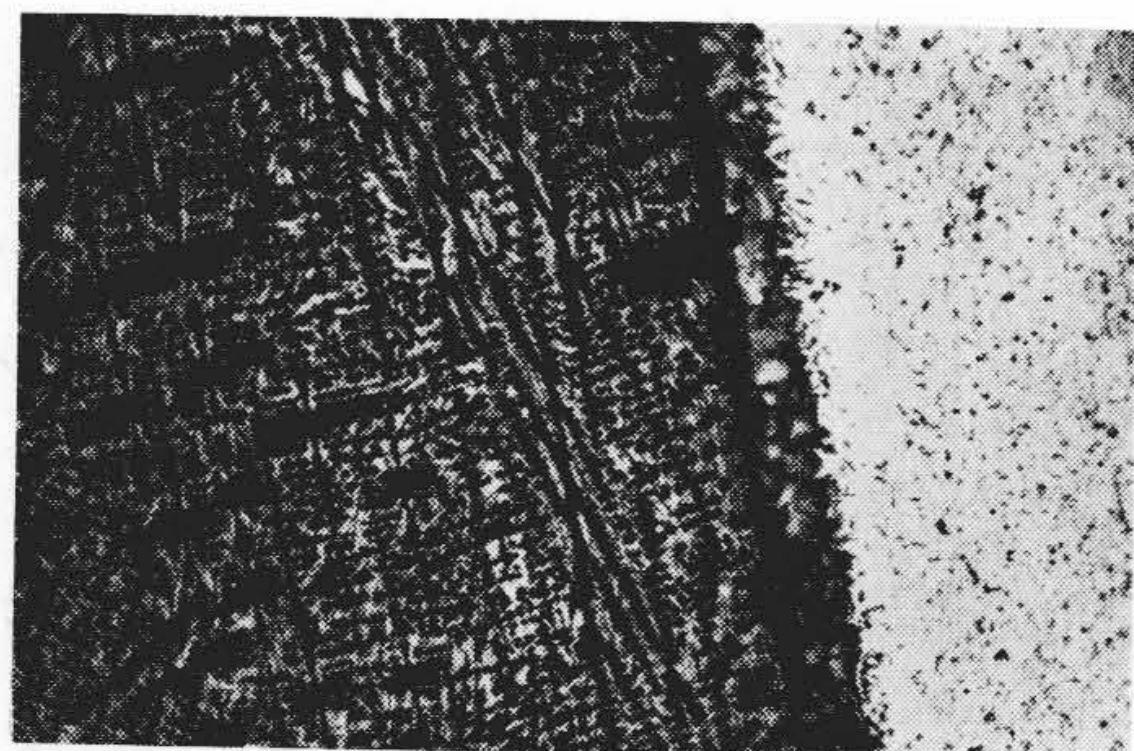
試料の鑄造欠陥はブローホール、ピンホール、亀裂およびくされ (Shrinkage Cavity) であり、その他ノロ入りなどの不良もまれには存在した。その実態写真を第8図に示す。この中でくされ不良およびピンホールは、抵抗値に大きな影響を与えず、ブローホール、亀裂の存在が誤差を大きくする原因と考えられる。

鑄造欠陥をなくすことを目的として Al を 0.05% 添加したが、検定の結果、キューボラ熔湯に対しては、くされ不良が減少したが、電気炉熔湯に対しては、亀裂が増加し、鑄造欠陥減少の目的を達することができなかった。また、鑄造欠陥は鉄線埋込部に多く発生し、特にブローホールが多く、埋込鉄線に対する注意が必要である。埋込部分の接着状況の顕微鏡組織を第9図に示す。

4. (C+Si)メータの現場利用

精度のよい (C+Si) メータとして次の仕様を決定した。

(1) 第3図の金型ダイスを用いる。



第9図 埋込部顕微鏡組織
(鉄線部フェライト組織および白鉄組織)

- (2) 熔湯には Al を添加しない。
- (3) ケルビン・ダブルブリッジ法により抵抗を測定する。
- (4) 試料の径を測定する。

日立金属工業株式会社深川工場では、黒心可鍛鑄鉄のキューボラ熔湯、電気炉熔湯の性状判断に利用し、試料の採取は現場員が行い、測定は組長または係員が操作し、試料採取から測定終了まで2～3分である。この(C+Si)メータの活用によって、熔湯成分のチェックが、迅速化され、熔湯管理上多大の効果を上げている。

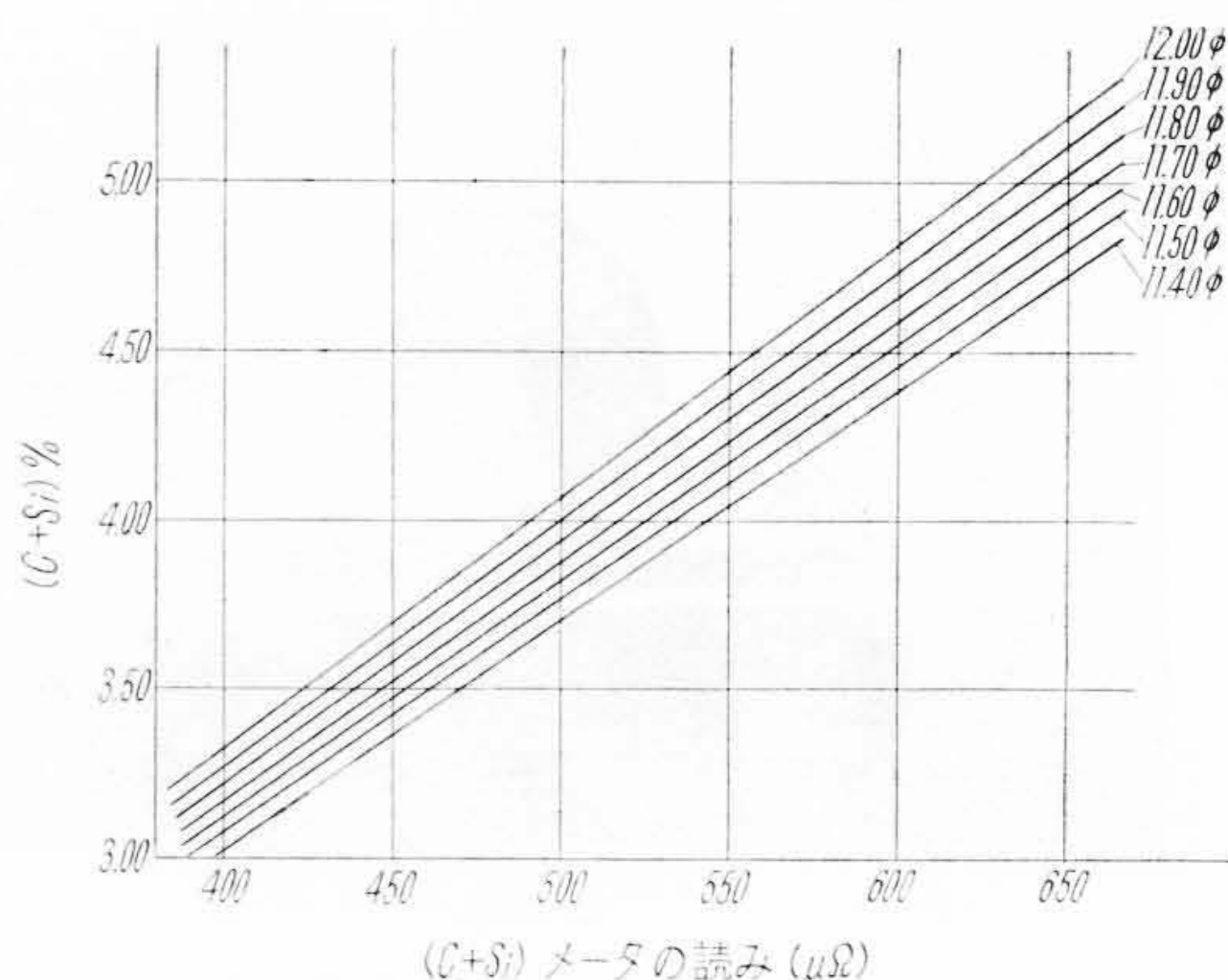
次に試料採取方法と(C+Si)メータ使用方法とを示す。

試料採取方法

- (1) 金型ダイスをしっかりと締めつける。
- (2) 熔湯を杓にとり、表面に被膜が生じ始めたときに注湯する。
- (3) 頭部が暗赤色になってから金型をはずし水冷する。
- (4) 金型が冷えているときは、温めてから使用する。

(C+Si)メータ使用方法

- (1) 検流計の目盛面のランプをつける。
- (2) 試料を装着する。
- (3) 押ボタンを押し、検流計のスケール上に出ている線を0に合わせる。
- (4) スイッチを倒し、電流が4 A以上なることを確認する。
- (5) 押ボタンを押し、ダイヤルを回して検流計のスケール上の線を0に合わせる。
- (6) スイッチを切り、ダイヤルの目盛を読む。
- (7) スイッチを反対側に倒し、同様の操作でダイヤルの目盛を読む。
- (8) 二つの目盛の差が5以下ならば、その平均値をもって抵抗値とする。
- (9) 試料の直径をノギスで測定する。
- (10) 抵抗値と直径から第10図によって(C+Si)%を読む。



第10図 (C+Si)メータ換算図

- (11) 二つの目盛の差が6以上ならば試験片を廃却する。

5. 白鉄の比抵抗と(C+Si)%との理論的關係およびセメンタイトの比抵抗の導出

白鉄は、パーライト中のフェライトおよびセメンタイトと共晶セメンタイトからなる合金である。結晶粒の大きさ、方向性および粒界の影響などを一応考慮外におくと白鉄は、固溶体フェライトと金属間化合物セメンタイトとからなる混合体であると考えられる。

フェライトには、Cが0.04%まで固溶し、Siは18.5%まで固溶しうるが、白鉄のフェライトはCが最大限まで固溶し組成の微少変化によって、Cの固溶度は変化しない。したがってフェライトの電気抵抗は、シリコフェライトなるSi固溶のフェライトによって変化する。一般に固溶体の電気抵抗は、溶質元素が不純物とみなされる程度にわずかに含まれる場合には、溶質の量に比例することが、統計力学から摂動論を用いて証明されている。

また、セメンタイトは平衡状態図から6.67%のCとFeとからなる金属間化合物であり、C%が増すとセメンタイトの量は増加する。セメンタイトとフェライトのような混合体の比電気伝導度は、実験的に見て容量%とともにほぼ直線的に変化するが、(Le-Chatelierの式)正確には、比電気伝導度の対数が、容量%と直線的な関係を有することが理論的にも証明されている。

上記の条件から(1)、(2)式を得る。

$$\frac{1}{\kappa_1} = a q + b \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\kappa = (1-p) \kappa_1 - p \kappa_2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$\kappa, \kappa_1, \kappa_2$: 白鉄、フェライトおよびセメンタイトの比電気伝導度

p : セメンタイトの容量

q : Si

a, b : 常数

常数 a, b は実験的に定めうる。

$$a = 1.3 \times 10^{-3}$$

$$b = 1.0 \times 10^{-5}$$

セメントタイトの容量% p と C% との関係は、(3)式で与えられる。

$$p = \frac{r \cdot f}{0.067 \times c + r(f - c)} \dots\dots\dots (3)$$

r : C%

f : フェライトの比重(7.9)

c : セメントタイトの比重(6.7)

回帰曲線の値を利用して、(1), (2), (3)式よりセメントタイトの比電気伝導度 κ_2 を求める。

$$\kappa_2 = 1.1 \times 10^2 \text{ mh/cm}$$

$$\rho_2 = 9 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$$

この値には急冷による結晶格子のひずみによる抵抗値増加、結晶の方向性など種々の要素が考慮されていない

ので、実際のセメントタイトの比抵抗は $9 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ より少し高い値が出ると思われる。

6. 結 言

鑄鉄熔湯炉前試験法として、白鉄の電気抵抗測定による(C+Si)メータはケルビン・ダブルブリッジ法を採用すれば、正確な測定値を迅速に求められることが判明した。

すなわち $(C+Si)\% = 0.36 + 7.22 \times 10^{-3} R(\mu\Omega)$ なる関係式を得、この信頼限界は(C+Si)%に対して $\pm 0.04\%$ 程度である。

終りに、種々御教示下さった日立金属工業株式会社戸畑工場の正本氏および川井氏に深謝する次第である。

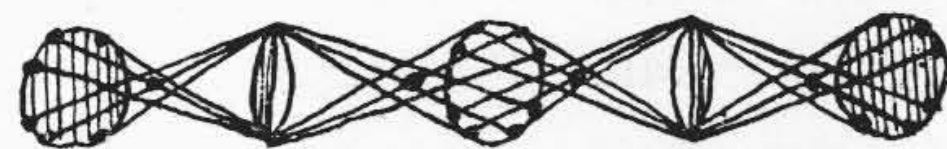
参 考 文 献

- (1) 飯高一郎: 理論合金学 p.240 (昭-11)
- (2) 有山兼孝: 物性論 2 p.104 (昭-22)
- (3) 熊谷ほか3名: 実験技術上 p.143 (昭-24)



特許第244755号

特 許 の 紹 介



渡 部 富 治

正逆転クラッチのインターロック装置

この発明は、ディーゼル機関車用変速歯車の正逆転クラッチにおいて、保安上下記のインターロックを施したものである。すなわち、正逆転クラッチ a は

- (1) 車両が完全に停止している
- (2) 変速歯車は中立位置におかれている

のどちらの条件も満足された状態のときのみ切替操作ができるようになっている。

正逆転クラッチ a は、クラッチ弁 b により支配されるサーボモータ c で操作される。クラッチ弁 b はロックピン d が抜けた状態のときのみ切替え操作ができるようになっている。ロックピン d はバネ e により抜け、ロックピストン f, g に働く油圧ではいる。

車速検出ギヤポンプ h は機関車の車軸により駆動されており、回転方向のいかんにかかわらず一定方向に油を送り出す。したがって、機関車の走行中には常に油が吐出され、その油圧はロックピストン f に働く。

また、中立弁 i はレバー j およびリンク k を介して変速レバー (図示してない) に連なり、変速レバーの中立状態以外は圧油をロックピストン g に作用させる。

ロックピン d はロックピストン f, g のどちらか一方にでも圧油が働いていれば抜けない。

上述した構造により、(1), (2) の両条件が満足された状態のときのみ正逆転クラッチ a の切り替えが可能となる。このため、あやまって走行中にクラッチを切り替えようとして爪を損傷したり、変速レバーが中立にないときにクラッチを切り替えたために急に逆走したりする事故を未然に防ぐことができる。

(富田)

