

## 鑄鐵製電氣抵抗體の研究

(昭和 26 年 4 月本會講演大會に於て講演)

岡本正三\*, 岡田厚正\*\*

RESEARCH ON ELECTRICAL PROPERTIES  
OF IRON GRID MATERIALS*Masazō Okamoto, Dr. Eng., and Atsumasa Okada*

## Synopsis:

Electrical properties of iron grid materials containing 3% C and 3~6% Si were discussed metallographically, and the following results were obtained.

1) Assuming the materials as Fe-C-Si ternary alloys, the specific electrical resistance was calculated theoretically in the case of two phase alloys consisting of both silico-ferrite and graphite or cementite, and it was clarified that the specific resistance is influenced significantly by the amount, form and distribution of graphite even in cast iron of the same chemical composition.

2) Ferrite enhances the electric resistance as the concentration of silicon in the solid solution increases. As the electric resistance of graphite is very high as compared with that of ferrite, irons high in both carbon and silicon are suitable so far as the electric resistance is concerned.

3) The higher the concentration of silicon in ferrite, the less becomes its temperature coefficient of the electric resistance. Besides, the value of the coefficient in graphite has negative sign. The temperature coefficient of irons, therefore, is less in the case of high silicon and high carbon irons having large graphite flakes.

4) While the values of specific resistance become high, their temperature coefficients become low in slowly solidified irons containing much silicon, because of the existence of flaky graphite and high silicon ferrite.

5) By the graphitization treatment of cementite-containing irons in the as-cast condition, the amount of graphite increases and the concentration of silicon in ferrite decreases. The increasing amount of graphite enhances the electric resistance, while lowers its temperature coefficient. On the contrary, the lowering of silicon concentration in ferrite causes to decrease electric resistance and to increase its temperature coefficient. As the result of the above mentioned opposite actions, the graphitization of irons generally causes both specific resistance and its temperature coefficient to increase.

## I. 緒 言

高電流の調整に用いる鑄鐵グリッドは電氣抵抗が高く、温度の上昇や長期間の使用による抵抗値の變化が少く、又耐振動性や耐蝕性の大きいことなどが必要であ

る。

本研究では先づ材料の化學組成や相の種類と量及びその分布様式が電氣抵抗とその温度係数とに與える影響を計算によつて検討した。次に種々の化學組成の材料について鑄造時の冷却速度を變え或は熱處理を施すことなどによつて同一化學組成のものでもその顯微鏡組織を變化させ、組織、化學組成及び電氣抵抗の關係を測り、iron grid としての電氣的性能を論じた。

\* 東京工業大學教授, 工博

\*\* 千葉工業大學

## II. 試料

先づ計算の基礎となる数値を得るために、電解鐵に純度 98.5% 程度の Si を配合してタンマン爐で急速に熔製した種々の濃度の Si を含むフェライト固溶體の電氣抵抗を調べ、又市販の黒鉛電極を用いて鑄鐵に現われる黒鉛が電氣抵抗に及ぼす影響を調べる一助とした。別に鑄鐵の素地をなす部分がマルテンサイト、トルースタイト、ソルバイト、パーライト又は粒狀セメンタイト組織になつた場合に電氣抵抗に及ぼす影響を明らかにする目的で、1% C, 0.1% Si を含む炭素鋼について實驗した。

一方、實用のグリッド材では組織が單純でないので電氣抵抗は相の種類や分布又はその化學組成などの綜合的支配を受ける。これらの關係を檢討するために、鹽基性高周波電氣爐によつて電解鐵に電極屑で加炭した 3.7% C の純度高いフェロ炭素をタンマン爐で熔解し、これに電解鐵を加えて 3% C とし、更に Si を 3.0%、4.5% 及び 6.0%、Ni 又は Co を何れも 2%、3% 及び 4% 添加して斷面 5×5mm、長さ 120mm の生砂型に鑄込んで、これら添加元素の影響を調べた。他に 3% C で 3.0%、4.5% 及び 6.0% Si の鑄鐵を上記の寸法の盆型、生砂型及び乾燥砂型に鑄込んで融鐵の凝固に於ける冷却速度の影響を調べた。化學組成を一應上記の範圍内にとつたのは過量の C は高 Si の場合 kish となり易く湯流れを害するおそれがあり、又 Si も多きに過ぎれば鑄鐵の強度を低めることを考慮したからである。

## III. 抵抗値の検討法

一定電流を通じた試料の一定距離間に生ずる電位差を測定し、 $\rho = R \cdot S / l = VS / il$  によつて比抵抗値を算出した。こゝに  $\rho$  は比抵抗値、 $S$  は試料の斷面積、 $l$  は電位差測定に於ける二點間の距離、 $i$  は試料に通ずる電流、 $V$  は電位差である。又試料を温度の均一な電氣爐に挿入して 300°C までの温度に適宜保持し、その状態に於て比抵抗を測定し、 $\alpha = (R_2 - R_1) / [R_1(t_2 - t_1)]$  によつて抵抗の温度係数を算出した。こゝに  $R_1$ 、 $R_2$  はそれぞれ温度  $t_1$ 、 $t_2$  に於ける抵抗値、 $\alpha$  はこの温度範圍での温度係数である。

## IV. 試験結果及び考察

### a. 相の分布による比抵抗値變化の検討

鑄鐵の化學組成や凝固時の冷却速度の相異又は種々の熱處理によつて鑄鐵中の C は黒鉛として現われる他に鐵に固溶又は化合してマルテンサイト、トルースタイ

ト、ソルバイト、パーライト又はセメンタイトなどの形態を取る。黒鉛の電氣抵抗は極めて高い。鐵相では 1% C 鋼のマルテンサイトの状態で  $30.9 \mu\Omega\text{cm}$  の最高値を示し、マルテンサイト+トルースタイトとなつて  $30.3 \mu\Omega\text{cm}$ 、ソルバイトで  $17.2 \mu\Omega\text{cm}$ 、更に粒狀セメンタイトとなれば  $16.1 \mu\Omega\text{cm}$  の最低値を與える。即ち、鐵相では C が固溶の状態に近づくほど電氣抵抗が高くなると云える。もつとも鑄鐵に現われる之等鐵の諸相は Si を固溶して居り、且 C の濃度に於てこれより幾分低いことが考えられるが、各相の電氣抵抗値の關係は上述する所と變らぬであらう。

相の出現條件と電氣抵抗との關係を數値によつて検討するために、3% C で Si が 3.0%、4.5% 又は 6.0% なる如き三種の Fe-C-Si 合金が、フェライトと黒鉛或はフェライトとセメンタイトの二相より成ると假定してその比抵抗値を計算することとする。こゝに Si はすべてフェライトに固溶して黒鉛又はセメンタイトには全く固溶しないと見做した。

### (1) 黒鉛がフェライトと共存する場合

三種の合金を Si 量の増加に應じてそれぞれ A, B, C とし先づこれらの合金の單位體積中に占める黒鉛及びフェライトの體積を計算するに、比重即ち單位體積の重量をそれぞれ  $d_A$ 、 $d_B$ 、 $d_C$ 、合金 100g の體積をそれぞれ  $V_A$ 、 $V_B$ 、 $V_C$  とすれば

$$d_A = \frac{100}{V_A}, \quad d_B = \frac{100}{V_B}, \quad d_C = \frac{100}{V_C}$$

である。今フェライトに固溶する C を無視すれば合金 100g 中の黒鉛は 3g となるから、その比重を  $2.3^3$  とすれば體積  $V_C$  は、 $3 / (2.3) = 1.30\text{cc}$  となる。この場合フェライトの重量は 97g で、それに固溶する Si は合金 A では、 $3 / 97 \times 100 = 3.1\%$  同様にして合金 B, C ではそれぞれ 4.6%、6.2% であるから、これらを R. Frilley<sup>2)</sup> の値に内挿すれば、フェライトの比重は合金 A, B, C に應じてそれぞれ 7.2、7.0、6.8 となる。故に合金 100g 中のフェライトの體積  $V_{FA}$ 、 $V_{FB}$ 、 $V_{FC}$  はそれぞれ  $97 / 7.2 = 13.47\text{cc}$ 、 $13.86\text{cc}$ 、 $14.26\text{cc}$  となる。ところが  $V_A = V_C + V_{FA} = 14.77\text{cc}$  であるから、 $d_A = 100 / 14.77$  となり、同様にして  $d_B$ 、 $d_C$  はそれぞれ  $100 / 15.16$ 、 $100 / 15.56$  となる。従つて單位體積中の黒鉛の體積をそれぞれ  $V_{GA}$ 、 $V_{GB}$ 、 $V_{GC}$  とすれば

$$V_{GA} = (d_A \times 3 / 100) / 2.3 = 0.088\text{cc}$$

同様にして  $V_{GB} = 0.086\text{cc}$ 、 $V_{GC} = 0.084\text{cc}$  となり、單位體積中のフェライトの體積をそれぞれ  $v_{FA}$ 、 $v_{FB}$ 、 $v_{FC}$  とすれば

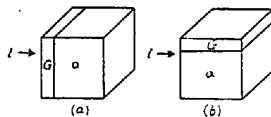
$$v_{\alpha A} = 1 - v_{GA} = 0.912 \text{cc}$$

同様にして  $v_{\alpha B} = 0.914 \text{cc}$ ,  $v_{\alpha C} = 0.916 \text{cc}$  となる。

一方黒鉛の比抵抗値  $\rho_G$  は  $1375 \mu\Omega \text{cm}$  ( $20^\circ\text{C}$ )<sup>4)</sup> であり、フェライトの比抵抗値は、 $\rho = 9.6 + 18.4\text{Si} + 11.1(\text{Si} - 0.35)$  なる Yensen の式<sup>5)</sup> より求められる。こゝに Si はフェライト中の Si% で  $\rho$  はその比抵抗値であり、Si が  $0 \sim 0.35\%$  の範囲内では上式は、 $\rho = 9.6 + 18.4\text{Si}$  として、又 Si が  $0.35\%$  をこえたときは、 $\rho = 9.6 + 18.4 \times 0.35 + 11.1(\text{Si} - 0.35)$  とされる。さて、合金 A, B, C のフェライトの比抵抗値を  $\rho_{\alpha A}$ ,  $\rho_{\alpha B}$ ,  $\rho_{\alpha C}$  とすれば、Si にそれぞれ  $3.1\%$ ,  $4.6\%$ ,  $6.2\%$  を代入して、 $\rho_{\alpha A} = 46.57 \mu\Omega \text{cm}$ ,  $\rho_{\alpha B} = 63.22 \mu\Omega \text{cm}$ ,  $\rho_{\alpha C} = 80.98 \mu\Omega \text{cm}$  を得る。

上に得られた黒鉛とフェライトの體積及びそれ等の比抵抗値を用いて合金の比抵抗値を計算するのに、次の如く黒鉛偏在の二つの場合をとり上げよう。

(1)-i. 黒鉛が第1圖(a)の如く電流  $i$  の向きに直角



第1圖 黒鉛(G)と含珪素フェライト( $\alpha$ )の極限の分布

に偏在して最も電氣傳導を阻害する形態にある場合。

合金 A, B, C の單位體積中にある黒鉛の抵抗値をそれぞれ  $R_{GA}$ ,  $R_{GB}$ ,  $R_{GC}$  とすれば、 $R_{GA} = \rho_G \times v_{GA} = 121.00 \mu\Omega$ , 同様にして、 $R_{GB} = 118.25 \mu\Omega$ ,  $R_{GC} = 115.50 \mu\Omega$  となる。又フェライトの抵抗値をそれぞれ  $R_{\alpha A}$ ,  $R_{\alpha B}$ ,  $R_{\alpha C}$  とすれば、 $R_{\alpha A} = \rho_{\alpha A} \times v_{\alpha A} = 42.47 \mu\Omega$ , 同様にして、 $R_{\alpha B} = 57.78 \mu\Omega$ ,  $R_{\alpha C} = 74.18 \mu\Omega$  となる。従つてこの場合の合金 A, B, C の比抵抗値をそれぞれ  $\rho_{A \text{ max.}}$ ,  $\rho_{B \text{ max.}}$ ,  $\rho_{C \text{ max.}}$  とすれば、 $\rho_{A \text{ max.}} = R_{GA} + R_{\alpha A} = 163.47 \mu\Omega \text{cm}$ , 同様にして  $\rho_{B \text{ max.}} = 176.03 \mu\Omega \text{cm}$ ,  $\rho_{C \text{ max.}} = 189.68 \mu\Omega \text{cm}$  を得る。

(1)-ii. 黒鉛が第1圖(b)の如く電流  $i$  の向きに平行に偏在して最も電氣傳導を阻害しない形態にある場合。

合金 A, B, C の單位體積中にある黒鉛の抵抗値をそれぞれ  $R'_{GA}$ ,  $R'_{GB}$ ,  $R'_{GC}$  とすれば、 $R'_{GA} = \rho_G / v_{GA} = 15613 \mu\Omega$ , 同様にして、 $R'_{GB} = 15988 \mu\Omega$ ,  $R'_{GC} = 16369 \mu\Omega$  となる。又フェライトの抵抗値をそれぞれ  $R'_{\alpha A}$ ,  $R'_{\alpha B}$ ,  $R'_{\alpha C}$  とすれば、 $R'_{\alpha A} = \rho_{\alpha A} / v_{\alpha A} = 51.06 \mu\Omega$ , 同様にして、 $R'_{\alpha B} = 69.06 \mu\Omega$ ,  $R'_{\alpha C} = 88.40 \mu\Omega$  となる。従つてこの場合の合金 A, B, C の比抵抗値をそれぞれ

$\rho_{A \text{ min.}}$ ,  $\rho_{B \text{ min.}}$ ,  $\rho_{C \text{ min.}}$  とすれば、 $\rho_{A \text{ min.}} = (R'_{GA} \times R'_{\alpha A}) / (R'_{GA} + R'_{\alpha A}) = 50.89 \mu\Omega \text{cm}$ , 同様にして  $\rho_{B \text{ min.}} = 68.76 \mu\Omega \text{cm}$ ,  $\rho_{C \text{ min.}} = 87.92 \mu\Omega \text{cm}$  を得る。

(2) セメントイトがフェライトと共存する場合。

三種の合金を Si 量の増加に應じてそれぞれ D, E, F とし (1) と同様に合金の單位體積に占めるセメントイトとフェライトの體積を求める。セメントイト中の C を、 $6.67\%$  とし、その比重を  $7.4$ <sup>6)</sup> とすれば合金 100g 中のセメントイトの體積  $V_{\theta}$  は、 $(3 \times 100 / 6.67) / 7.4 = 6.08 \text{cc}$  となる。この場合フェライトの重量は  $100 - (3 \times 100 / 6.67) = 55 \text{g}$  であり、それに固溶する Si は合金 D, E, F に應じてそれぞれ  $5.5\%$ ,  $8.2\%$ ,  $10.9\%$  であるから、フェライトの比重は R. Frilley の値よりそれぞれ  $6.9$ ,  $6.5$ ,  $6.1$  となる。故に合金 100g 中のフェライトの體積  $V_{\alpha D}$ ,  $V_{\alpha E}$ ,  $V_{\alpha F}$  はそれぞれ、 $55 / 6.9 = 7.97 \text{cc}$ ,  $8.46 \text{cc}$ ,  $9.02 \text{cc}$  となる。故に合金 D, E, F の比重  $d_D$ ,  $d_E$ ,  $d_F$  はそれぞれ  $100 / (6.08 + 7.97) = 100 / 14.05$ ,  $100 / 14.54$ ,  $100 / 15.10$  となる。従つて單位體積中のセメントイトの體積をそれぞれ  $v_{\theta D}$ ,  $v_{\theta E}$ ,  $v_{\theta F}$  とすれば

$$v_{\theta D} = (d_D \times 45 / 100) / 7.4 = 0.433 \text{cc}$$

同様にして  $v_{\theta E} = 0.418 \text{cc}$ ,  $v_{\theta F} = 0.402 \text{cc}$  となり、單位體積中のフェライトの容積を  $v_{\alpha D}$ ,  $v_{\alpha E}$ ,  $v_{\alpha F}$  とすれば  $v_{\alpha D} = 0.567 \text{cc}$ ,  $v_{\alpha E} = 0.582 \text{cc}$ ,  $v_{\alpha F} = 0.598 \text{cc}$  となる。

一方セメントイトの比抵抗値  $\rho_{\theta}$  は  $1.4 \mu\Omega \text{cm}$ <sup>7)</sup> であり、フェライトの比抵抗値  $\rho_{\alpha D}$ ,  $\rho_{\alpha E}$ ,  $\rho_{\alpha F}$  は Yensen の式からそれぞれ、 $\rho_{\alpha D} = 73.20 \mu\Omega \text{cm}$ ,  $\rho_{\alpha E} = 103.17 \mu\Omega \text{cm}$ ,  $\rho_{\alpha F} = 133.14 \mu\Omega \text{cm}$  を得る。

これらの數値を黒鉛偏在の場合と同様に取扱ふと、

(2)-i. セメントイトが第1圖(a)の黒鉛の如く偏在する場合。

合金 D, E, F の比抵抗値をそれぞれ  $\rho_{D \text{ max.}}$ ,  $\rho_{E \text{ max.}}$ ,  $\rho_{F \text{ max.}}$  とすれば、 $\rho_{D \text{ max.}} = 42.11 \mu\Omega \text{cm}$ ,  $\rho_{E \text{ max.}} = 60.63 \mu\Omega \text{cm}$ ,  $\rho_{F \text{ max.}} = 80.18 \mu\Omega \text{cm}$  を得る。

(2)-ii. セメントイトが第1圖(b)の黒鉛の如く偏在する場合。

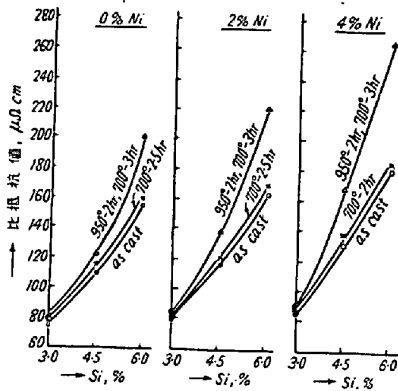
合金 D, E, F の比抵抗値をそれぞれ  $\rho_{D \text{ min.}}$ ,  $\rho_{E \text{ min.}}$ ,  $\rho_{F \text{ min.}}$  とすれば、 $\rho_{D \text{ min.}} = 3.15 \mu\Omega \text{cm}$ ,  $\rho_{E \text{ min.}} = 3.28 \mu\Omega \text{cm}$ ,  $\rho_{F \text{ min.}} = 3.42 \mu\Omega \text{cm}$  を得る。

以上各種の比抵抗計算値は第3圖中に點線を以て示されるが、Fe-C-Si 合金の内黒鉛の量が多く、これが電氣傳導を阻害するように分布するほど、又共存するフェライトの Si 量が高いほど合金全體としての比抵抗値が著しく高くなることを知る。而して鑄鐵グリッドに含まれる C が黒鉛やセメントイトとして如何なる形状で如何

に分布すると、化學組成が上記の Fe-C-Si 合金と同一なる限り、グリッドの比抵抗値が計算値の範囲内になることは容易に推測され、實測値はよく計算値に一致する。

b. 化學組成と比抵抗値との關係

鑄鐵の電氣抵抗に及ぼす Si, Ni 及び Co の影響を調べるため、3% C で 3~6% Si, 2~4% Ni 又は Co を添加した鑄鐵を 5×5×120mm の生砂型に鑄造した試料について、鑄造状態と、これらを 700°C に 2.5hr 加熱後爐冷した状態及びこの焼鈍處理に加えて更に 950°C に 2hr 加熱後 700°C まで爐冷してここに 3hr 保持した後爐冷して黒鉛化を完結させた状態との三つの處理條件の下に於て組織と比抵抗値を測定した。その結果は第 2 圖の如く、



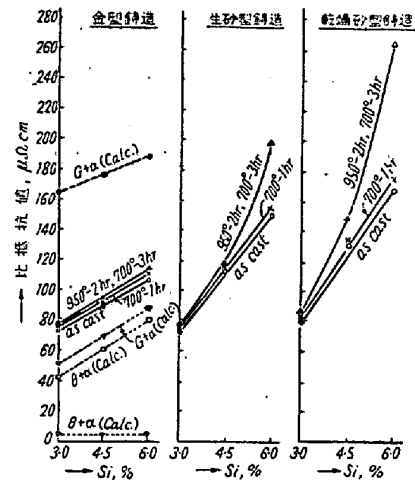
第 2 圖 比抵抗に及ぼす珪素の影響

Si 添加量の多い試料ほど鑄造状態で比抵抗値が高い。これは Si が融鐵の凝固に際して電氣抵抗の高い黒鉛の片狀晶出を促進し、その形状が添加量の多いものほど長大であること及び Si 自體がフェライトに固溶してその電氣抵抗を高めることなどに因る。Ni 及び Co の場合も同様の効果が現われるが Si 添加の際のように著しくはない。焼鈍によりセメントイトは分解して黒鉛量を増し、フェライトは稀釋されて固溶元素の濃度は低下する。黒鉛量の増加は比抵抗値を高め、フェライト中の固溶濃度の低下は比抵抗値を低めるように作用するが、第 2 圖の如く焼鈍試料の比抵抗値は鑄造時に比べて上昇する。そしてこの傾向が Si 量の多い試料ほど大きいのは主に凝固時に出現した片狀黒鉛が更に長大に發達することに因る。

C. 冷却速度と比抵抗値との關係

融鐵の凝固に於ける冷却速度が比抵抗値に及ぼす影響を調べるために、3% C の熔鐵に 3~6% の Si を添加して之を 5×5×120mm の金型、生砂型及び乾燥砂型に鑄造した試料について、鑄造状態と之等を 700°C に 1hr 加熱後爐冷した状態及びこの焼鈍處理に加えて b 項と同

様の完全黒鉛化焼鈍を行つた状態との三つの處理條件の下に於て組織と比抵抗値の測定を行つた。比抵抗値は第 3 圖に示す如く Si 添加量の多い試料ほど、又同一化學



第 3 圖 比抵抗に及ぼす冷却速度の影響

組成でも冷却速度の小さい試料ほど鑄造状態で比抵抗値が高い。これは Si 量の増加と冷却速度の減少が何れも凝固時の黒鉛晶出量を増加し、且その形状を片狀ならしめることに因る。又このような試料が焼鈍處理によつて大きく比抵抗値を上昇するのも、凝固時の片狀黒鉛が更に長大に、そして黒鉛と素地との間隔を擴げるように作用するからである。第 4 圖 (a), (b) は 3% C, 4.5% Si の



(a) ×100 (b) ×100 1/3 縮寫

第 4 圖

融鐵を (a) は金型に (b) は生砂型に鑄造した後何れも黒鉛化を完了した試料の組織を示している。かかる冷却速度の大小による黒鉛形状の相異は Si の増加につれて著しくなるので、冷却速度の影響は Si 量の高いときに一層大きく現われる。以上の實測値は大體に於て第 3 圖に點線で示される計算値の範囲内に在るが、Si 6% の場合の實測値が計算による同濃度 Si の場合の最大値を超えることについては、フェライト素地の純度如何と黒鉛の比抵抗値として採用した値が正しいか否かに疑問が残る。例えば J. Königsberger & O. Reichenheim<sup>6)</sup>氏によれば黒鉛の比抵抗値は 2830 μΩ·cm となつている。

d. 比抵抗の溫度係數の検討

比抵抗の溫度係數も黒鉛の量、形状、化學組成等によつて變化する。之等の關係を Si が 3.0%, 4.5% 或は 6.0% なる三種の Fe-C-Si 合金がフェライトと黒鉛と

より成る場合について考察する。

20°Cからグリッド材の實際使用時に達する300°Cまでの温度範囲に於てフェライト及び黒鉛の温度係数を求めるとフェライトについては第1表の如く Si 濃度の増加と共に温度係数を減少し、黒鉛については50~100°Cに於て-23.9, 250~290°Cに於て-57.1と負の値をとる。

第1表 フェライトの比抵抗値とその温度係数

| Si % | H <sub>FB</sub> | 比抵抗値 $\mu\Omega\text{cm}$ |       |       |       |       | 温度係数 $\times 10^{-5}$ |           |
|------|-----------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------------------|-----------|
|      |                 | 20°C                      | 50°C  | 100°C | 250°C | 290°C | 50~100°C              | 250~290°C |
| 3.0  | 82              | 43.36                     | 43.64 | 45.03 | 51.98 | 53.65 | 63.5                  | 80.1      |
| 4.5  | 87              | 58.38                     | 58.66 | 59.77 | 65.33 | 66.72 | 37.8                  | 53.3      |
| 6.0  | 89              | 74.36                     | 74.50 | 74.78 | 75.89 | 76.31 | 7.5                   | 13.8      |

上に得られた50~100°Cの温度係数を用いて合金の100°Cに於ける比抵抗値を近似的に算出するに、

i. 黒鉛が単位体積中で第1圖(a)の如く偏在する場合。

三種の合金 A, B, C の100°Cに於ける比抵抗値をそれぞれ  $\rho_{Aa}$ ,  $\rho_{Ba}$ ,  $\rho_{Ca}$  とすれば

$$\rho_{Aa} = 121.41 \{1 - 0.000239 (100 - 20)\} + 42.49$$

$$\{1 + 0.000635 (100 - 20)\} = 163.76 \mu\Omega\text{cm}$$

同様にして  $\rho_{Ba} = 176.11 \mu\Omega\text{cm}$ ,  $\rho_{Ca} = 187.42 \mu\Omega\text{cm}$  を得る。

ii. 黒鉛が単位体積中で第1圖(b)の如く偏在する場合。

合金の100°Cに於ける比抵抗値をそれぞれ  $\rho_{Ab}$ ,  $\rho_{Bb}$ ,  $\rho_{Cb}$  とすれば

$$\rho_{Ab} = \frac{15560 \{1 - 0.000239 (100 - 20)\} \times 51.11}{15560 \{1 - 0.000239 (100 - 20)\} + 51.11}$$

$$\frac{\{1 + 0.000635 (100 - 20)\}}{\{1 + 0.000635 (100 - 20)\}} = 53.52 \mu\Omega\text{cm}$$

同様にして  $\rho_{Bb} = 71.44 \mu\Omega\text{cm}$ ,  $\rho_{Cb} = 88.11 \mu\Omega\text{cm}$  を得る。

以上の結果及び之等の値から算出した20~100°Cの抵抗の温度係数を第2表に示す。これより明らかなように

第2表 黒鉛+フェライトの二相合金の比抵抗値及びその温度係数の計算値

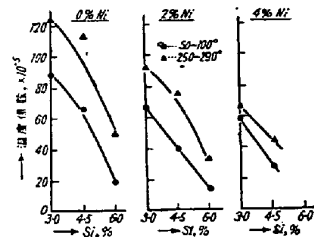
| Si, % | 黒鉛が第1圖(a)の如く偏在する場合        |        |                       | 黒鉛が第1圖(b)の如く偏在する場合        |       |                       |
|-------|---------------------------|--------|-----------------------|---------------------------|-------|-----------------------|
|       | 比抵抗値 $\mu\Omega\text{cm}$ |        | 温度係数 $\times 10^{-5}$ | 比抵抗値 $\mu\Omega\text{cm}$ |       | 温度係数 $\times 10^{-5}$ |
|       | 20°C                      | 100°C  |                       | 20°C                      | 100°C |                       |
| 3.0   | 163.90                    | 163.76 | -1.69                 | 50.93                     | 53.52 | 63.6                  |
| 4.5   | 176.61                    | 176.11 | -3.57                 | 69.30                     | 71.44 | 38.6                  |
| 6.0   | 189.16                    | 187.42 | -11.52                | 87.50                     | 88.11 | 13.0                  |

鑄鐵中黒鉛の形状が長大でこれが電氣抵抗を高めること

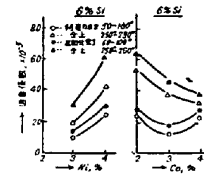
に強く作用する状態にあるほど、又フェライトの Si 濃度が高いほど、抵抗の温度係数が減少することを知らる。而して黒鉛量が一定(この場合は3%)なる限りはその形状、分布がどのようでも温度係数が第2表の数値の範囲内にくることが推測される。

e. 化学組成と比抵抗の温度係数との関係

20~300°Cに加熱された場合の比抵抗変化を、b項に用いた試料の黒鉛化完了後の状態(一部は鑄造状態)で詳細に測定した結果から50~100°C及び250~290°Cの二つの温度範囲内に於ける温度係数を算出すると第5圖及び第6圖のようになる。焼鈍状態に於て Si 量の増加と



第5圖 抵抗の温度係数に及ぼす珪素の影響



第6圖 抵抗の温度係数に及ぼすニッケル及びコバルトの影響

共に抵抗の温度係数が著しく減少するのは長大に発達した黒鉛と、Si量の高いフェライトとの存在に因るものと考え。Ni及びCoを約3%添加すると抵抗の温度係数は鑄造、焼鈍の各状態に於て最小となる。之等の實測値の内、50~100°Cの温度係数は略々第2表の数値の範囲内にあることが知られる。

f. 冷却速度と比抵抗の温度係数との関係

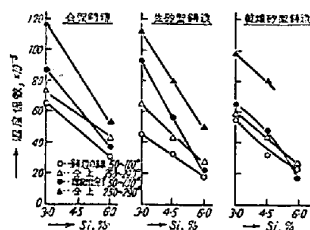
c項に用いた試料及び第3表に示される組成の市場材の鑄造及び黒鉛化完了後の各状態に於てe項と同様の測定を行った。鑄造状態の試料の抵抗-温度曲線に於て200°C附近に小さい折点を認めたがこれはA<sub>0</sub>變態に起因するもので、焼鈍によつて次第に消失する。之等の結果から温度係数を算出すると第7圖を得る。又市場材については第3表に記入してある。鑄造時にあつては冷却速度の減少はSi添加量の増加と同様の影響を示し、多量の黒鉛を片状晶出させるので温度係数が低くなる。黒鉛化が完了すると黒鉛量は増加して温度係数を減少し、又フェライトはSi濃度が小さくなつて温度係数を増大す

第3表 市場材の化學組成、組織及び比抵抗の溫度係數

| 記號  | 斷面積<br>mm <sup>2</sup> | 組成%  |      | 組 織                              |                        |
|-----|------------------------|------|------|----------------------------------|------------------------|
|     |                        | C    | Si   | 鑄造狀態                             | 950°C-2hr<br>700°C-3hr |
| GB1 | 30                     | 3.52 | 4.07 | パーライト, 黒鉛                        | パーライト,<br>フェライト        |
| GB2 | 45                     | 3.52 | 4.07 | パーライト, 黒鉛,<br>ステナイト              | 黒鉛, フェラ<br>イト          |
| GB3 | 9                      | 3.52 | 7.32 | パーライト, 黒鉛,<br>フェライト, セ<br>メントタイト | 黒鉛, フェラ<br>イト          |

| 溫度係數 ×10 <sup>-5</sup> |          |           |                      |           |
|------------------------|----------|-----------|----------------------|-----------|
| 記號                     | 鑄造狀態     |           | 950°C-2hr, 700°C-3hr |           |
|                        | 50~100°C | 250~290°C | 50~100°C             | 250~290°C |
| GB1                    | 33       | 51        | 68                   | 123       |
| GB2                    | 52       | 69        | 80                   | 70        |
| GB3                    | 43       | 49        | 58                   | 100       |



第7圖 抵抗の溫度係數に及ぼす冷却速度と珪素の影響

るように作用する。之等相反する作用が合成されて黒鉛化燒鈍によつて溫度係數は増加の傾向を示すのである。併しその傾向が冷却速度小にして而も Si 量の高い試料ほど少くなるのは、燒鈍によつて黒鉛が長大に發達することゝ、且フェライトの Si 濃度の減少の割合が少いためと思われる。

V. 總 括

3%C, 3~6%Si の鑄鐵製電氣抵抗體の抵抗性を金相學的見地より検討して次の結果を得た。

i. 材料を Fe-C-Si 三元合金と見做し、その組織が Si を固溶するフェライトと、黒鉛又はセメントタイトの何れかとの二相から成ると假定して合金の比抵抗値を理論的に算出し、同一化學組成の鑄鐵でも黒鉛の量、形狀及び

分布が如何に比抵抗値の高低に影響するかを明らかにした。

ii. フェライトは Si の固溶濃度が大きくなるにつれて電氣抵抗を上昇し、黒鉛はフェライトに比して著しく電氣抵抗が高い、従つて電氣抵抗値のみから云えば C も Si も高い鑄鐵がよいことになる。

iii. 抵抗の溫度係數は、フェライトについては Si 濃度の大きい程小さく、黒鉛については負の値をとるから、鑄鐵中 Si 量が高く、且黒鉛が長大に多量に析出しているものほど溫度係數が小さい。

iv. 鑄鐵中 Si 量が高く、凝固時の冷却速度が小さいものほど黒鉛が多量に片狀品出し、且フェライトの Si 濃度も大きいいため比抵抗値は高くその溫度係數は小さくなる。一般に黒鉛化燒鈍によつて黒鉛量が増加しフェライトの Si 濃度が小さくなるが、黒鉛の増加は電氣抵抗を高めその溫度係數を減少し、フェライトの Si 濃度の低下は逆に電氣抵抗を低めその溫度係數を増大する如く作用する。

以上の相反する作用が合成されて、黒鉛化燒鈍によつて一般に鑄鐵は比抵抗値を上昇し、その溫度係數を増大するものである。

最後に試料の一部を提供せられた三菱電機株式會社名古屋製作所の御厚意に對して深謝します。

(昭和 26 年 6 月寄稿)

文 献

- 1) W. S. Owen & B. G. Street, Journ. Iron Steel Inst. (Lond.), 167 (1951), Feb., Part 2, 113~117.
- 2) R. M. Burns & G. A. Hulett, Journ. Amer. Chem. Soc., 45 (1923), 527.
- 3) R. Frilley, Rev. de Mét., Mém., 8 (1911), 457.
- 4) A. S. M., Metals Handbook, (1948), 21.
- 5) Yensen, Trans. Am. Inst. Elec. Eng., 43, (1924) 145.
- 6) O. Ruff & E. Gersten, Ber., 45 (1912), 63.
- 7) H. Masumoto, Sci. Rep. Tohoku Univ., I-16 (1927), 430.
- 8) J. Königsterger & O. Reichenheim, Neues Jarhb. Min., 20 (1906).