

論 文

UDC 669.14.018.8 : 669.15'24'74-194 : 669.15'24'26'74-194 : 620.18
: 537.621.3 : 537.312

高 Mn-Cr-Ni 鋼の組織, 透磁率および電気抵抗について*

吉村 博文**・清水 高治***・山田 直臣****

Microstructure, Magnetic Permeability and Electric Resistivity
of High Manganese-Chromium-Nickel Steel

Hirofumi YOSHIMURA, Takaharu SHIMIZU, and Nao'omi YAMADA

Synopsis:

In order to investigate the austenitic steel with the non-magnetic characteristics, microstructures, mechanical properties, magnetic permeability and electric resistivity of manganese-chromium-nickel steels with much amount of manganese as an austenitizing element have been examined. The results obtained are as follows.

It was found that composition range showing stable austenite phase lays on the higher content side of the line connecting approximately 10Mn-10Cr and 20Mn-0Cr in Mn-Cr-1%Ni phase diagram. This composition range moved to the line connecting approximately 20Mn-10Cr and 23Mn-0Cr in the case of cold rolled steel plate. High toughness and magnetic permeability (μ) under 1.01~1.02 were obtained in the steel with complete austenite phase. Magnetic permeability markedly increased by small amount of martensite in austenite phase. Therefore, it is necessary that nonmagnetic steel have complete austenite phase. The relationship between electric resistivity (ρ) and alloying element; manganese, chromium, nickel, silicon in austenite phase, can be written as $\rho = 1.27 [\%Mn] + 0.66 [\%Cr] + 1.62 [\%Ni] + 5.90 [\%Si] + 36(\mu\Omega\text{-cm})$. From the above results, 25Mn-5Cr-1Ni steel may be selected as an optimum composition from the view points of stable austenite, high toughness, non-magnetism and suitable electric resistivity.

1. 結 言

オーステナイト鋼は, 18-8 ステンレス鋼のように耐食, 耐熱性がすぐれているほかに, オーステナイト相個々の低温靱性がすぐれかつ非磁性である。著者ら¹⁾²⁾は, すでに低温環境で使用される構造材料としての適用を考えて, 低温靱性, 熱膨張率に注目して組織的にオーステナイト相からなる鋼にするように, 高価な Ni の代りに, より安価でしかも Ni と同じオーステナイト化元素である Mn に注目し, Mn-Cr-Ni 鋼に関する基礎研究を行い, その結果適正成分鋼として 25Mn-5Cr-1Ni 鋼を見出した。これは安定したオーステナイト相を有しているために非磁性鋼としての適用可能性も有している。

そこで著者らは, 最近の磁気浮上式鉄道において使われるガイドおよび超電導機器部材などへの非磁性鋼の要求が高まり, Mn-Cr 系を基本成分とするオーステナイト鋼が注目されてきていること³⁾⁴⁾を背景に, 前報の研究

結果をもとに各種 Mn-Cr-Ni 鋼について, 安定オーステナイト相を示す成分領域, その靱性, 非磁性を表わす物理的性質として, 透磁率, また電気抵抗について調べ, 非磁性鋼としての適用可能性について検討した。

2. 従来の研究結果の概要

Mn, Cr を利用してオーステナイト鋼とし, これを低温用へ適用する研究については前報¹⁾²⁾で述べているので省略する。非磁性鋼としての研究は, まず従来の既知の非磁性鋼⁵⁾を主体とした実用研究である。石田ら⁶⁾は, 15Mn-1.2Ni 鋼を基本成分鋼として, 透磁率におよぼす加工, 熱処理条件の影響を調べ, 実用可能性の調査を行っている。また大野ら⁷⁾の鉄筋材への適用研究, 西村ら⁸⁾の非磁性工具鋼として Mn-Cr 鋼を基本成分鋼として Ni, Mo, V, Co などを多量に添加した研究がある。行方⁹⁾は Mn-Cr-Ni オーステナイト鋼に V を添加して, 時効硬化することにより高耐力オーステナイト非磁性鋼

* 昭和 50 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 53 年 11 月 24 日受付 (Received Nov. 24, 1978)

** 新日本製鉄(株)八幡製鉄所 工博 (Yawata Works, Nippon Steel Corp., 1-1-1 Edamitsu-cho Yawata-higashi-ku Kitakyushu 805)

*** 新日本製鉄(株)八幡製鉄所 (Yawata Works, Nippon Steel Corp.)

**** 新日本製鉄(株)本社 (Nippon Steel Corp.)

がえられることを示している。非磁性鋼は、組織的に安定したオーステナイト相を有している必要があり、著者ら¹⁾²⁾は、そのような観点から、適正成分鋼として 25Mn-5Cr-1Ni 鋼を見出し、液体ヘリウム温度まで安定したオーステナイト相を示し、その温度で使用可能なことを示したが、これも一種のオーステナイト鋼すなわち非磁性鋼の研究の基本になりうる。また、大谷ら^{10)~12)}は Mn 10~20%, Cr 0~15%, C 0.05~0.45% を基本成分にした鋼について同様の調査を行っている。

3. 実験方法

透磁率 (μ) は、オーステナイト (γ) 相およびマルテンサイト (α')[†] 相の存在割合によつて変化する。したがつて、本研究の供試材は、非磁性領域すなわち γ 領域の成分的境界が明確になるように、今までの研究結果¹⁾²⁾ をもとに Mn, Cr, Ni, Si 等を主体に大幅に変化させたものとした。その検討成分範囲を Table 1 に示す。

供試材の製造工程は次のとおりである。

20 kg 溶解 (真空→アルゴン雰囲気)→10~20 kg 鋼塊に分注→1200°C 加熱圧延→950°C 仕上 (板厚 13 mm)→空冷した。このようにして製造した供試材のほかに、これをさらに冷間加工することによつて安定 γ 域が成分的にどのように変化するかを調べるために、冷間圧延によつて圧下率 5, 12.5 および 25% 各々加工を加えた供試材を準備した。

これら各種成分系供試材より化学分析用試片、組織を調べるための光学顕微鏡観察用試片、また機械的性質を調べるための常温引張用 JIS 4 号相似引張試験片および衝撃試験用 JIS 4 号 2 mmV ノッチシャルピー衝撃試験片、さらに透磁率測定のための 9 mm ϕ × 120 mm 丸型試験片、電気抵抗測定のための 5 mm ϕ × 120 mm 丸型試験片を各々作製した。

光学顕微鏡組織の観察は倍率 200 倍で行つた。引張試

Table 1. Chemical composition range of experimental steels (%).

(1) For the influence of alloying element.	(2) Other element
Mn : 5.0~26.0	C : 0.09~0.16
Cr : 0~15.0	P : 0.002~0.046
Ni : 0~6.0	S : 0.002~0.013
Si : 0.1~5.2	Nb : Tr~0.17
	Al : 0.008~0.31
	N : 0.049~0.086

† 以下記述簡略のため透磁率: μ , 電気抵抗: ρ , オーステナイト: γ , フェライト: α , マルテンサイト: α' と記すことがある。但し γ 相中の ϵ 相は光学顕微鏡組織では積層欠陥、双晶境界などによるすじと区別しにくいので、一応 γ 相中の格子欠陥の一種として扱い ϵ 相存在の場合も γ 相として記述した。

験では 0.2% 耐力 (PS) および引張強さ (TS) を求め、衝撃試験は常温 (20°C) と液体窒素温度 (-196°C) で行つた。また光学顕微鏡用試験片についてフェライトインディケータ[†]による α' 量の測定を行つた。また α' 量については一部 X 線回折法による確認も行つた。 μ の測定は ASTM A 342-64 の方法にしたがつて、弾動検流計で検出した。 ρ の測定は、標準抵抗 0.01 Ω を用いて、上記試験片につき電位差標点距離を 50 mm とし測定した。

4. 実験結果および考察

4.1 組織と機械的性質

Ni を 1% 添加した基本成分鋼に Mn, Cr の含有量を変化させた場合の組織 (以下 Mn-Cr 成分状態図と記す) と機械的性質の変化を Fig. 1 に示す。またこのなかで代表的供試材の化学成分の分析結果例を Table 2 に示す。

Fig. 1 に示す Mn-Cr 成分状態図は、光学顕微鏡による組織観察とフェライトインディケータによる α' 量の測定でえられたものであり、前報¹⁾においてえられた状態図とほぼ同じものである。代表成分鋼の顕微鏡組織の一例を Photo. 1 に示す。常温において γ 相を示す領域は、この成分状態図において 10Mn-10Cr と 20Mn-0Cr とを結ぶ境界線 (点線) 以上の Mn, Cr 量の成分範囲でえられる。

強度については、この境界線以下の低 Mn, Cr 成分域 (例えば ① 11Mn-5Cr) では高い TS を示し、これより Mn の増量すなわち γ 相域に入ってくるにつれ TS は低下してくる。 PS は変わらないか、あるいはや

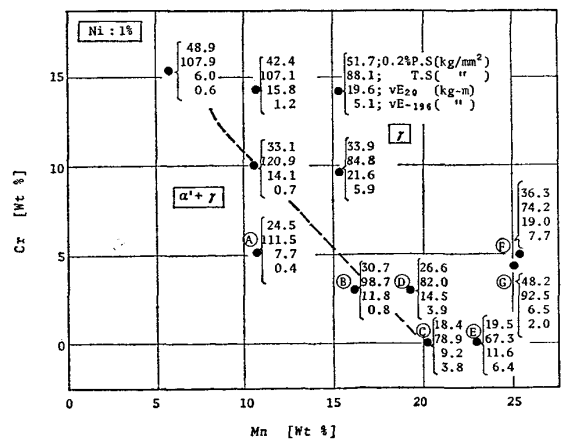
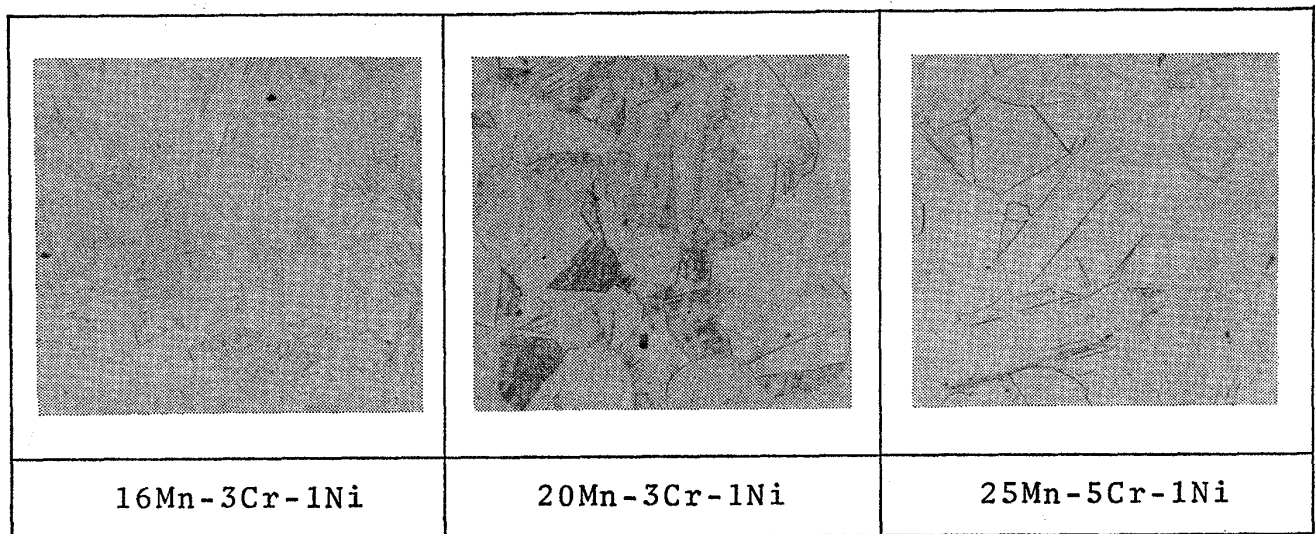


Fig. 1. Strength and toughness of manganese-chromium-nickel steel.

† γ 相に α もしくは α' 相が生成すると強磁性体を示す特性を利用して α もしくは α' 量を定量する装置で、本実験では Helmut Fischer GmbH 社 (西独) 製を使用した。

Table 2. Typical example of chemical composition in experimental steels.

Marks	Alloying system	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	N
A	11Mn-5Cr-1Ni	0.14	0.31	10.78	0.005	0.011	5.13	0.96	0.03	0.059
B	16Mn-3Cr-1Ni	0.15	0.31	16.30	0.026	0.008	2.99	1.09	0.03	0.072
C	20Mn-0Cr-1Ni	0.15	0.31	20.40	0.002	0.008	—	0.82	0.03	0.035
D	20Mn-3Cr-1Ni	0.13	0.31	19.60	0.026	0.010	2.90	1.09	0.04	0.013
E	23Mn-0Cr-1Ni	0.14	0.30	23.10	0.002	0.009	—	0.98	0.03	0.028
F	25Mn-5Cr-1Ni	0.15	0.40	25.50	0.046	0.010	5.00	1.10	0.02 Nb 0.09	0.086
G	25Mn-5Cr-1Ni-5Si	0.16	5.13	25.00	0.019	0.009	4.73	1.08	0.03 Nb 0.10	0.079

Photo. 1. Microstructure of manganese-chromium-nickel steel. ($\times 200$)

や増加の傾向を示す。Cr についてもほぼ同様の傾向がみられるが、さらに γ 相域のみにおいても Cr の増量にともなって、TS, PS ともにやや増加の傾向がみられる。これは Cr の固溶硬化によるものと考えられる。Cr 15% 以上については、FRANKS ら¹³⁾が、これ以上の Cr % 域では、 α' 相が出現してくることを明らかにしているので、ここではとくに調べなかつた。

Fig. 1 において γ 相領域内にある供試材 ①, ③は、25Mn-5Cr-1Ni を基本成分鋼とし、Si を変化させたものであるが、Si 5% 添加 (供試材 ③) すると、0.2% PS で約 10 kg/mm², TS で約 15 kg/mm² の強度増加がある。このように Mn, Cr, Ni が多量に含有されると、 γ 相はきわめて安定であり、フェライト形成元素である Si が 5% 添加されても、 α もしくは α' 相は検出されなかつた。

靱性については常温と液体窒素温度でのシャルピー衝撃値 (vE_{20} と vE_{-196}) を調べた。 vE_{20} では一部 α' 相が存在してもかなり高い値を示す (供試材 ①) が、 vE_{-196} になると α' 相の影響が大きくなり、 vE_{-196} は低下してくる。すなわち靱性に対するこれらの成分の影響は強度

に対するそれと逆の傾向を示している。このことから特に靱性に対して適正な鋼は、その組成が Fig. 1 における安定した γ 相領域内にある必要があり、例えば前報で示した低温用 25Mn-5Cr-1Ni 鋼はきわめて良好な靱性を示している。

4.2 組織と透磁率 (μ)

Mn-Cr 成分状態図と μ との関係を図 2 に示す。 γ 相を示す 10Mn-10Cr と 20Mn-0Cr とを結ぶ境界線 (点線) 以上の Mn, Cr の成分域では、 μ は 1.01~1.02 以下である。境界線以下の領域で α' 相があらわれるにしたがって、 μ は増加してくる。 μ と α' 量との関係をとると Fig. 3 のようになる。すなわちきわめてわずかの α' 量でも μ は急激に増加する。この結果から明らかのように、 μ の低い非磁性材料は、 α' 相の存在しない、きわめて安定した γ 相からなることが必要である。

一般に非磁性材料は、実用に供される場合、冷間で加工をうけることが考えられる。そこで α' 量 (すなわち μ) におよぼす加工の影響を調べた。加工は冷間圧延により、加工度は圧下率をとつた。その結果を Fig. 4 に示す。

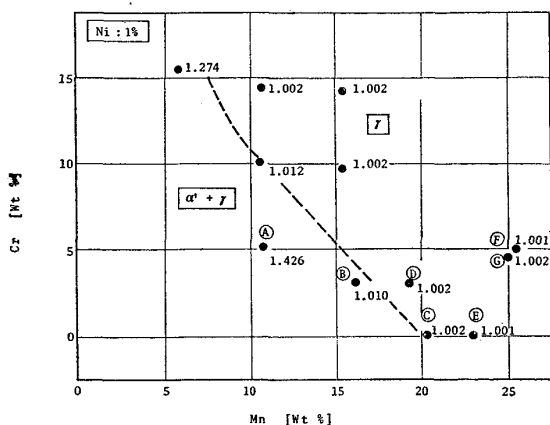


Fig. 2. Magnetic permeability of manganese-chromium-nickel steel.

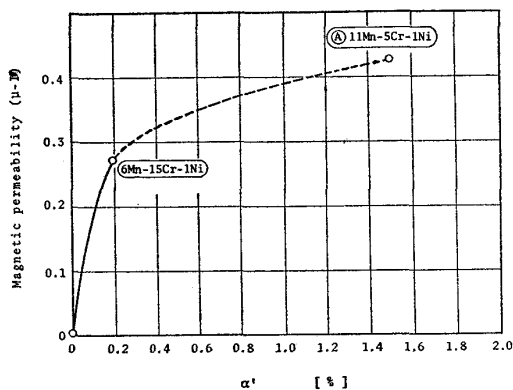


Fig. 3. Relation between magnetic permeability and amount of martensite in austenite of manganese-chromium-nickel steel.

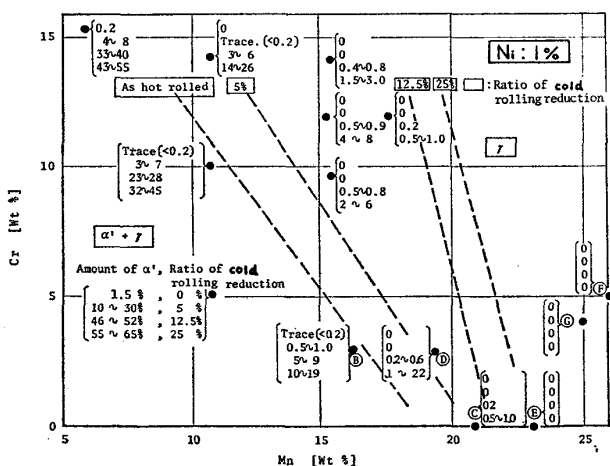


Fig. 4. Relation between amount of martensite (α') and ratio of cold rolling reduction in manganese-chromium-nickel steel.

この結果からすると、素材（すなわち熱間圧延材で冷間圧下率0%のもの）に圧下率5%を加えると、安定 γ 相を示す領域（境界線は点線で示している）は Mn, Cr ともに約3%高 Mn, 高 Cr 側に移行する。さらに圧下

率 12.5% を加えると高 Mn, 高 Cr 側に移行し、圧下率 25% の加工ではその移行の程度は飽和してあまり変化しない。このように加工によつて安定 γ 相域が高成分側に移行することは、この Mn-Cr 成分状態図で圧下率 0~25% の点線範囲内で加工によるマルテンサイト変態点 (Md 点) が存在していることを示している。以上の結果から、強加工されても安定した γ 相のえられる領域は約 20Mn-10Cr と約 23Mn-0Cr を結ぶ線以上の成分である。この成分領域には、前報¹⁾²⁾での極低温で安定した γ 相を有し高靱性を示す 25Mn-5Cr-1Ni 鋼も入っている。

4.3 成分と電気抵抗 (ρ)

各種供試材について ρ を測定し、各種合金元素 (Mn, Cr, Ni および Si) の影響を調べた。その結果を Fig. 5~8 に示す。

まず Mn % の影響 (Fig. 5) であるが、5Cr-1Ni 鋼において、Mn 約 19% 以上 (完全 γ 相を示す領域) では、Mn が増量するにつれて ρ は 1.48 の勾配 ($\mu\Omega$ -cm/%: 以下勾配の単位は略す) で増加する。低 Mn 域 (Mn 12 および 16%) ではこの勾配からややずれてくる (図中 σ 印)。これは一部 α' が生成してくるためと考

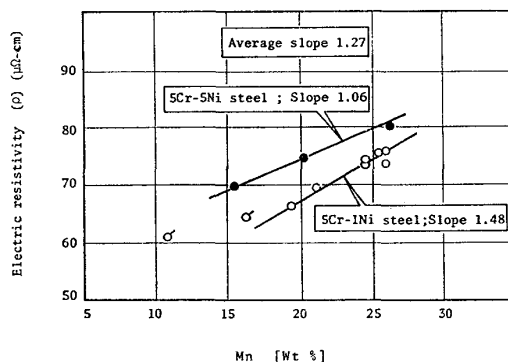


Fig. 5. Influence of manganese content on electric resistivity in manganese-chromium-nickel steel. Mark σ shows plot of $\gamma + \alpha'$ mixed phase.

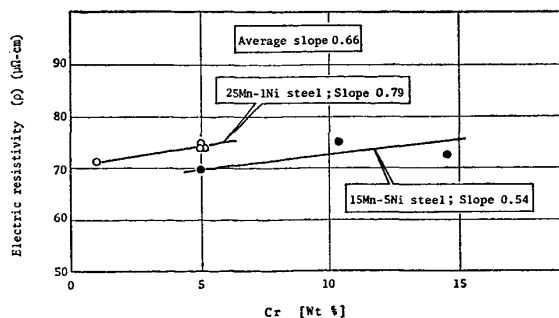


Fig. 6. Influence of chromium content on electric resistivity in manganese-chromium-nickel steel.

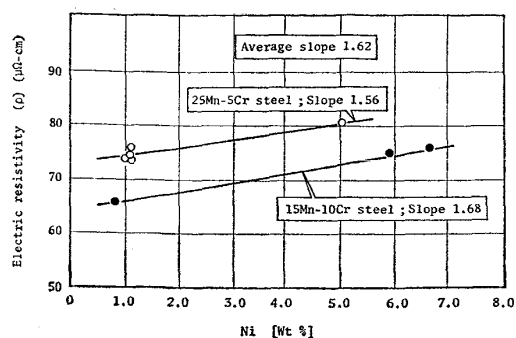


Fig. 7. Influence of nickel content on electric resistivity in manganese-chromium-nickel steel.

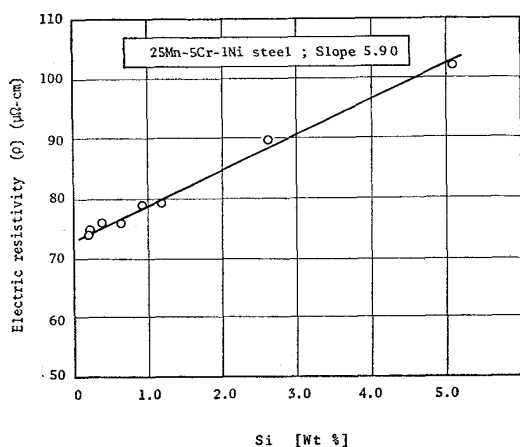


Fig. 8. Influence of silicon content on electric resistivity in manganese-chromium-nickel steel.

えられる。前述のように非磁性鋼を対象に考えた場合は、完全 γ 相である必要があるので、ここでは一応 γ 一相域で整理する。ここで低温用およびさきの μ 測定結果から非磁性用としても適性な 25Mn-5Cr-1Ni 鋼について ρ を測定してみると約 $73 \mu\Omega\text{-cm}$ であり、これは 18-8 ステンレス鋼のそれ⁵⁾ とほぼ同じである。5Cr-5Ni を基本成分とした供試材の ρ に対する Mn の影響は、勾配 1.06 にしたがって変化する。基本成分がやや異なるが、前者の 5Cr-1Ni 系と後者の 5Cr-5Ni 系との平均勾配は 1.27 であり、これが ρ に対する Mn の影響と考えてよいであろう。

ρ に対する Cr, Ni, Si の影響も、Mn の場合と同じ傾向を示し (Fig. 6~8), 各々の平均勾配は、Cr で 0.66, Ni で 1.62, Si で 5.90 であり、なかでも Si の ρ への影響度が大きい。

これら合金元素の影響 (勾配) は、従来調べられている Fe (α 相) に対する合金元素の影響¹⁴⁾ と類似した傾向を示しているが、その程度は小さい。これは組織が γ 相と α 相と異なるためであると考えられる。

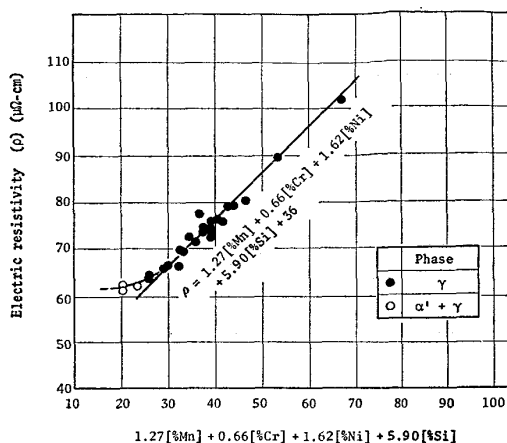


Fig. 9. Relation between electric resistivity and alloying elements in manganese-chromium-nickel steel.

ρ の増加は、例えば金属が温度上昇にともない自由電子が散乱されることによる場合と同じように、添加元素の増加によって原子の周期性が乱れ、自由電子の散乱に起因するものと考えられる。各々の合金元素の影響度のちがいについて、その理由は明確でないが、本研究での検討範囲内では、Si の影響がもつとも大きく、自由電子の散乱度にもつとも大きく影響しているものと考えられる。

Table 1 に示した検討成分範囲内で、これら 4 元素について ρ に関する実験式をもとめてみた。その結果を Fig. 9 に示す。すなわち

$$\rho = 1.27[\% \text{ Mn}] + 0.66[\% \text{ Cr}] + 1.62[\% \text{ Ni}] + 5.90[\% \text{ Si}] + 36 (\mu\Omega\text{-cm})$$

であらわされる。この実験式を、例えば 18-8 ステンレス鋼に適用してみると、Fig. 9 の横軸が約 33 で $\rho = 69 \mu\Omega\text{-cm}$ となり、これは従来調べられている値とほぼ一致する。このように本実験式はオーステナイト系の鋼に対してはかなりの適用性があると考えられる。しかし α' 相が現われると、Fig. 9 の○印で示すように、この実験式からややずれてくる。

5. 総 括

高 Mn-Cr-Ni オーステナイト鋼はその適用範囲が低温用のほかに、非磁性用などの多岐にわたって適用される可能性があるため、今まで低温用として適切な鋼として選定された 25Mn-5Cr-1Ni 鋼を基本成分鋼として Mn, Cr, Ni および Si の異なる各種成分鋼について、組織、機械的性質、透磁率および電気抵抗について調べた。その結果をまとめると、次の通りである。

(1) 常温で γ 相をうるためには、Ni 1% 添加を基本成分鋼とした Mn-Cr 成分状態図において、10Mn-

10Cr と 20Mn-0Cr とを結ぶ線以上の Mn, Cr を加えることが必要である。これ以下の成分領域では α' 相が生じ, 強度は上昇するが靱性は低下する。

(2) 上記 γ 相域では, μ は 1.01~1.02 以下である。 α' 相が現われると μ は著しく上昇する。したがって, 非磁性用として適用される鋼材は, 安定 γ -相でなければならぬ。

(3) 常温で γ 相を示しているも, これを冷間加工すると α' 相があらわれる。強加工(圧延圧下率 12~25%)でも安定して γ 相がえられる鋼は, Mn-Cr 成分状態図で 20Mn-10Cr と 23Mn-0Cr とを結ぶ線以上の Mn, Cr 含有量が必要である。

(4) γ 相を示す鋼において, ρ に対する各種合金元素 (Mn, Cr, Ni, Si) の影響を調べ, $\rho = 1.27[\% \text{Mn}] + 0.66[\% \text{Cr}] + 1.62[\% \text{Ni}] + 5.90[\% \text{Si}] + 36(\mu\Omega\text{-cm})$ なる実験式がえられた。すなわち, 各種合金元素の含有量の増加にともない ρ は増加し, なかでも Si による増加割合が大きい。

(5) 以上の結果から, 適切な非磁性鋼として, 安定した γ 相を示し, 良好な低温靱性, 安定した非磁性さに 18-8 ステンレス鋼並みの電気抵抗を有する 25Mn-5Cr-1Ni 鋼が考えられる。

本研究遂行にあたり, 終始実験に対する御助言御協力をいただきました新日本製鉄(株)生産技術研究所西正氏および矢田浩氏に深く感謝の意を表します。

文 献

- 1) 吉村博文, 山田直臣, 矢田 浩, 本間弘之, 伊藤悌二: 鉄と鋼, 61 (1975) 3, p. 23 および Trans. ISIJ, 16 (1976), p. 98
- 2) 吉村博文, 清水高治, 矢田 浩, 北島一徳: 鉄と鋼, 61 (1975) 4, S. 333, 65 (1979) 6, p. 681
- 3) Y. KYOTANI: Chemical Economy & Engineering Review, 6 (1974) 12, p. 22
- 4) 丹羽俊彦: セメントコンクリート, (1978) 379, p. 30
- 5) ステンレス鋼便覧, 長谷川正義監修, [日刊工業新聞社], (オーステナイト系ステンレス鋼の項)
- 6) 加藤哲男, 藤倉正國, 矢萩慎一郎, 石田清仁: 電気製鋼, 49 (1978) 2, p. 90
- 7) 大野 鉄, 加藤 直, 高橋政司, 相原賢治: 住友金属, 30 (1978) 2, p. 54
- 8) 西村富隆, 菊地侃生, 今村元昭: 電気製鋼, 48 (1977) 1, p. 65
- 9) 行方二郎: 鉄と鋼, 59 (1973) 2, p. 90
- 10) 大谷泰夫, 岡田康孝: 鉄と鋼, 64 (1978) 11, S. 859
- 11) 大谷泰夫, 岡田康孝: 鉄と鋼, 64 (1978) 11, S. 860
- 12) 大谷泰夫, 岡田康孝: 鉄と鋼, 64 (1978) 11, S. 861
- 13) R. FRANKS, W. O. BINDER, and J. THOMPSON: Trans. ASM, 47 (1955), p. 231
- 14) R. M. BOZORTH: Ferromagnetism, (1951), p. 40