

論 文

UDC 669.14.018.584 : 669.15'74-194.56 : 536.413

オーステナイト系高マンガン鋼の温度 0°~100°C 間での
平均熱膨張係数におよぼす合金元素の影響加藤 哲男*・藤倉 正国*・矢萩慎一郎*²Effects of Alloying Elements on the Mean Thermal Expansion
Coefficient of Austenitic Manganese Steel in the Temperature
Range between 0°C and 100°C

Tetsuo KATO, Masakuni FUJIKURA, and Shin-ichiro YAHAGI

Synopsis :

In order to develop new austenitic manganese steels for structural nonmagnetic and wear resistant applications that have almost same mean thermal expansion coefficient as carbon steel in the temperature range between 0°C and 100°C, an investigation has been made of the effects of various alloying elements, C, N, Cr, Mn, on the thermal dilatation curve and Néel temperature that is found from the temperature dependence of the magnetization. The results obtained are as follows :

Mean thermal expansion coefficient $\bar{\alpha}$ of austenitic manganese steels increases with increasing content of C and N, while it decreases with increasing manganese content. $\bar{\alpha}$ vs. Cr content curve shows a minimum value. Following linear regression equation that relates $\bar{\alpha}$ to the chemical composition is obtained.

$$\bar{\alpha} (\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}) = 19.72 + 2.32(\% \text{C}) + 1.39(\% \text{N}) - 0.31(\% \text{Mn}) \\ + 0.028(\% \text{Cr})^2 - 0.41(\% \text{Cr}) + 0.14(\% \epsilon')$$

where, (% ϵ') represents the volume percent of HCP ϵ' martensite. The effects of alloying elements on the Néel temperature show a reverse tendency comparing with those on $\bar{\alpha}$. It is also found that $\bar{\alpha}$ tends to decrease with raising Néel temperature. The dependence of the α below Néel temperature on chemical composition can be estimated by the change resulting from substantially the variation of spontaneous volume magnetostriction by alloying.

1. 緒 言

最近、高マンガン非磁性鋼がリニアモーターカーや核融合炉の構造用強度部材として採用されたのを機にその性能改善のため種々研究が行われ、その性能は著しく向上した¹⁾。一方、オーステナイト系高マンガン鋼は従来から耐摩耗用鋼として使用され鉄道用マンガンレールはその代表的な用途である。しかし、オーステナイト系高マンガン鋼の常温付近での熱膨張係数は普通鋼にくらべ約 40% も大きく、オーステナイト系 18Cr-8Ni ステンレス鋼とほぼ同程度の値であり、このような大きな熱膨張係数は気温の変化に伴う伸縮の度合いが大きくなる原因となり圧延レールや異形鉄筋棒鋼として使用する場合の留意点であるといわれている。したがって、オーステ

ナイト系高マンガン鋼の圧延レールが普通鋼圧延レールのように一般レールに使用されずトンネルや地下鉄用などの気温変化が少ない限定された用途に使用されてきたのはこのためである²⁾。

熱膨張係数が小さい合金として強磁性の Fe-36%Ni Invar 合金がよく知られており、その強磁性 Invar 効果に関する研究が従来から数多くなされてきた。しかし、非磁性鋼や耐摩耗鋼など実用オーステナイト系高マンガン鋼の熱膨張係数におよぼす合金元素の影響を系統的に調査した報告は極めて少ない³⁾⁴⁾。著者らは構造用高マンガン非磁性鋼について実用的な見地から所定の強度レベルを有ししかも被削性、溶接性などの所要特性をも具備した一連の新鋼種体系を確立するため種々研究^{5)~8)}を行ってきた。本研究はその一環として常温付近で普通

昭和 56 年 1 月 20 日受付 (Received Jan. 20, 1981)

* 大同特殊鋼(株)中央研究所 工博 (Central Research Laboratory, Daido Steel Co., Ltd.)

*² 大同特殊鋼(株)中央研究所 (Central Research Laboratory, Daido Steel Co., Ltd., 2-30 Daido-cho Minami-ku Nagoya 457)

Table 1. Chemical compositions of the steels investigated (wt %).

	C	N	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
15Mn-1Ni series	0.68	0.029	0.24	14.7	<0.048	<0.005	<0.06	1.0	<0.28	<0.02
	0.77	0.053	0.46	15.9				1.2		
20Mn-Cr series	0.01	0.032	0.06	18.7	<0.014	<0.058	<0.02	<0.19	3.64	<0.02
	0.56	0.180	0.35	21.8					6.11	
25Mn-Cr series	0.01	0.015	0.04	22.9	<0.019	<0.048	<0.05	<0.07	0.01	<0.04
	0.90	0.265	0.41	27.3					7.07	
30Mn-Cr series	0.01	0.15	0.07	30.5	<0.010	<0.061	<0.06	<0.08	0.02	<0.03
	0.61	0.23	0.29	35.3					6.05	

鋼なみの熱膨張係数を有する高マンガン非磁性鋼の合金設計に必要な基礎資料として熱膨張係数におよぼす主要合金元素 C, N, Mn, Cr の影響について調査した結果である。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材の化学組成は Table 1 に示すように Mn 量によつて4つのシリーズからなり、(1) 15Mn-1Ni シリーズ鋼は Mn 量が比較的少ないため固溶化焼なまし状態でオーステナイト組織とするためオーステナイト安定化元素としてCを 0.7%, Ni を 1% 添加した。(2) 20Mn-Cr, (3) 25Mn-Cr, (4) 30Mn-Cr 各シリーズ鋼の場合はいずれも C, N, Cr の添加量を種々変化させた。溶解は 60 kg 高周波誘導炉で大気溶解を行い、所定の化学組成となるよう合金元素を適宜添加し 30 kg 鋼塊 2 本に分注した。鋼塊の数は全部で 54 個である。鋼塊は 1200°C に加熱し直径 15 mm の棒に鍛伸した。熱処理は 1050°C に 1 h 加熱後水冷して固溶化熱処理を行い、この熱処理の後供試材として各種試験片を切り出した。

2.2 熱膨張係数の測定

熱膨張係数は横型熱膨張測定装置 HPC-5000 を用いて行い、試験片寸法は直径 5 mm, 長さ 50 mm である。測定温度の制御は試験片を設置した真空容器中に液体窒素を導入してあらかじめ試験片の温度を -50°C とし、ついで 2°C/min の加熱速度で試験片を加熱することにより行つた。伸びは差動トランスで検出し、伸び-温度曲線を X-Y レコーダーで記録した。温度 0°~100°C 間の平均熱膨張係数 $\bar{\alpha}$ は(1)式により計算した。

$$\bar{\alpha} = (l_2 - l_1) / l_0 / (T_2 - T_1) = (\Delta l / l_0) / \Delta T \dots (1)$$

ここで、 $\Delta l = l_2 - l_1$, $\Delta T = T_2 - T_1$ である。また、 l_0 は 20°Cでの長さ、 l_1, l_2 はそれぞれ温度 T_1, T_2 での長さ

である。本研究では $T_1 = 0^\circ\text{C}$, $T_2 = 100^\circ\text{C}$ 一定とした。したがつて、 $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ である。

2.3 Néel 点の測定

Néel 点の測定は振動試料型磁力計 VSM-3 型を用いて行つた。試験片の寸法は直径 5 mm, 長さ 5 mm であり真空容器に試験片を保持し、あらかじめ液体窒素を導入して試験片の温度を -150°C としておき、ついで試験片を加熱速度 5°C/min で加熱し、磁化-温度曲線を X-Y レコーダーに記録し、曲線のクニックから Néel 点を求めた。なお、外部磁界は 7 kOe である。

3. 結果と検討

3.1 熱膨張係数

Mn 量を連続的に変えた 0.55C-6Cr-Mn シリーズ鋼の伸び率 $\Delta l/l_0$ と温度の関係、すなわち熱膨張曲線を Fig. 1 に示す。熱膨張曲線はなだらかな曲線ではなく図中矢印で示した位置に屈折点があり、Mn 量が 24.7% 以上の鋼にこの傾向が明らかに認められる。また、C量を変えた 25Mn-6Cr-C シリーズ鋼および Cr 量を変えた 0.55C-25Mn-Cr シリーズ鋼の熱膨張曲線をそれぞれ Fig. 2, Fig. 3 に示す。熱膨張曲線はいずれも Fig. 1 に示した 0.55C-6Cr-Mn 鋼の場合と同様の傾向を示し、屈折点は C量, Cr 量で異なる。これら熱膨張曲線をもとに(1)式から算出した温度 0°~100°C 間での平均熱膨張係数 $\bar{\alpha}$ (以下、たんに熱膨張係数と呼ぶ)を求め合金元素の変化量に対してプロットして Fig. 4~Fig. 6 に示す。Fig. 4 は 0.55C-6Cr-Mn シリーズ鋼の熱膨張係数が Mn 量の多いほど減少することを示す。Fig. 5 は C量を変えた 2つの Mn レベルの 20Mn-6Cr-C シリーズ鋼および 25Mn-6Cr-C シリーズ鋼の熱膨張係数と C量との関係を示したものであり、いずれも C量が少ない範囲では熱膨張係数は C量に対して

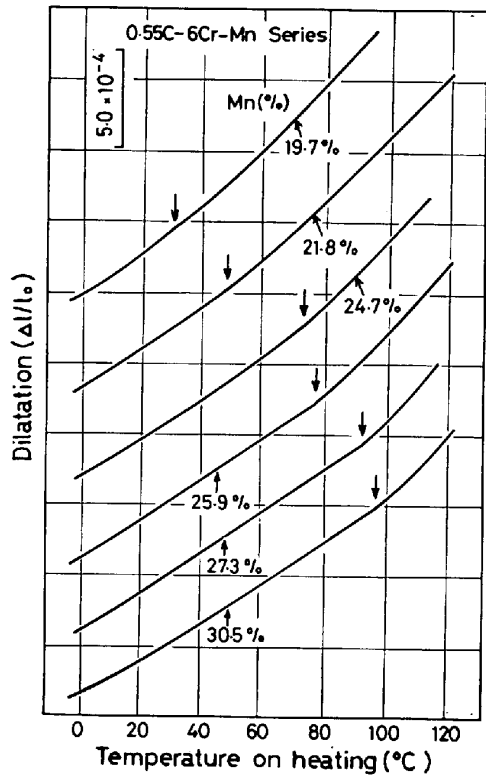


Fig. 1. Effect of manganese content on the thermal dilatation curves for 0.55C-6Cr-Mn series steels.

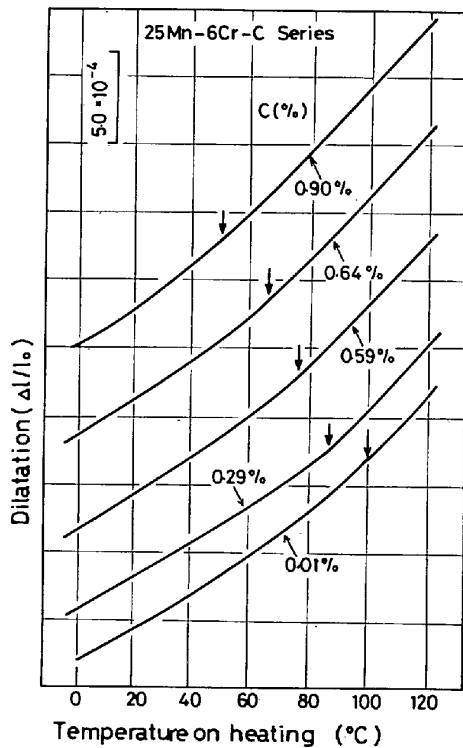


Fig. 2. Effect of carbon content on the thermal dilatation curves for 25Mn-6Cr-C series steels.

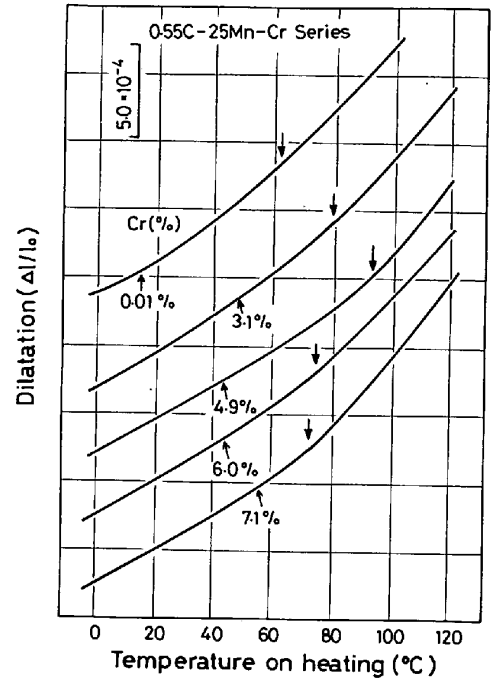


Fig. 3. Effect of chromium content on the thermal dilatation curves for 0.55C-35Mn-Cr series steels.

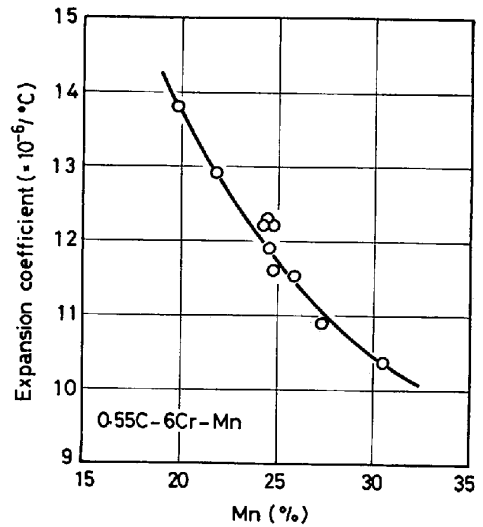


Fig. 4. Effect of manganese content on the thermal expansion coefficient for 0.55C-6Cr-Mn series steels.

ほとんど変化せず、C量がある量を越えるとほぼ直線的に増加する傾向を示す。また、同一C量でもMn量が多い方が熱膨張係数は小さい。Fig. 6はCr量を変えた0.55C-25Mn-Crシリーズ鋼の結果であり、熱膨張係数はCr量約5%で最小値を示す。

(3)式はTable 1に示した全供試材について熱膨張係数 α と化学成分との関係を線形回帰分析により求めた結果である。なお本実験ではオーステナイトが不安定な一部の供試材に ϵ' マルテンサイトが認められたので、

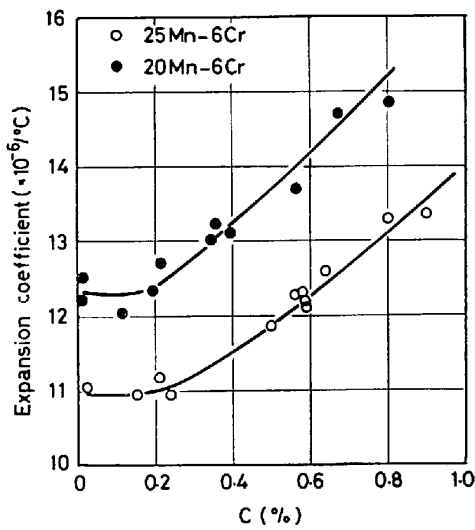


Fig. 5. Effect of carbon content on the thermal expansion coefficient for 25Mn-6Cr-C series steels.

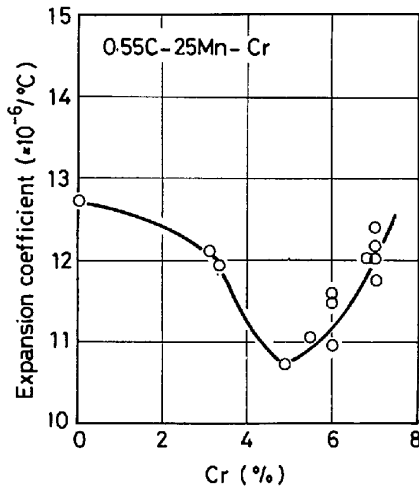


Fig. 6. Effect of chromium content on the thermal expansion coefficient for 0.55C-25Mn-Cr series steels.

X線回折法で定量し、その寄与も考慮した。(3)式は ϵ' マルテンサイトが熱膨張係数を増加させることを示している。しかし、本実験の範囲では BCC α' マルテンサイトは認められなかつた。なお、(3)式の決定係数 $R^2=0.933$ である。

$$\begin{aligned} \bar{\alpha} (\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}) = & 19.72 + 2.32(\%C) + 1.39(\%N) \\ & - 0.31(\%Mn) + 0.028(\%Cr)^2 - 0.41(\%Cr) \\ & + 0.14(\%\epsilon') \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

Fig.7 は(3)式から計算した熱膨張係数と実測値とを対比してプロットしたものであり、両者の相関はよい。20Mn-6Cr-C シリーズ鋼および 25Mn-6Cr-C シリーズ鋼の熱膨張係数は C 含有量が少ない範囲では C 量に対してほとんど変化しないということは Fig. 5 に示したとおりである。Fe-Cr-Mn 三元合金の 27°C での組織

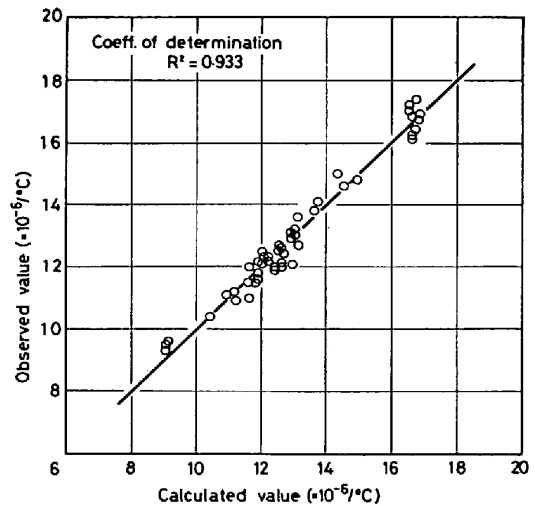


Fig. 7. Comparison of calculated and observed thermal expansion coefficient of austenitic manganese steels.

図⁹⁾によるとCを含有しない 20Mn-6Cr 鋼、ならびに 25Mn-6Cr 鋼はいずれも高温からの固溶化熱処理状態での金属組織はオーステナイトと ϵ' マルテンサイトの二相組織である。しかし、Cを添加するとCは強力なオーステナイト安定化元素であるためC含有量が増加するにつれ $\gamma \rightarrow \epsilon'$ マルテンサイト変態の Ms 点が急激に低下し¹⁰⁾、ついに常温での組織はオーステナイト一相となる。 ϵ' マルテンサイトの定量結果と(3)式とから、Fig. 5でC量が0.2%未満の低C側でC量に対する熱膨張係数の変化が小さい理由は ϵ' の寄与が重複したためと考えられる。C含有量が多いオーステナイト一相域でのC含有量に対する熱膨張係数の変化から推してオーステナイト系高マンガン鋼の熱膨張係数はCの添加によつて単調に増加するものとみなしうる。(3)式はまた、NがCについて熱膨張係数を増加させる度合いが大きいことを示す。本研究でNの影響をとくに重要視したのはNがオーステナイト安定化元素であり、また有力な強化元素として実用上重要なためである。さらにNを合金元素として添加しなくても供試材の溶解の際、大気中で溶解するとオーステナイト系高マンガン鋼はNの溶解度が大きいので、Nが不純物として無視できない量、すなわち鋼組成によつては 0.05% を越える場合もあるので全チャージについてNの分析を行った。

3.2 常磁性-反強磁性磁気変態点におよぼす鋼組成の影響

常温付近の熱膨張係数が小さい合金として Fe-36% Ni Invar 合金がよく知られている。この合金の Curie 点は通常 280°C 前後であり、その熱膨張係数は Curie 点以上では純鉄程度の値であるが、Curie 以下では温度

に対して複雑な変化を示す。いずれにせよ、この合金の常温付近の熱膨張係数は0に近い値である。Invar合金がCurie点以下の温度で熱膨張係数が異常に低下するのは温度の低下により正の自発体積磁歪 ω_s の発生、すなわち自発磁化の発生によつて体積が相対的に膨張し、通常の格子振動による熱収縮を打ち消すことに起因するとされている¹¹⁾。一方、オーステナイト系Fe-Mn二元合金の場合ではNéel点すなわち常磁性-反強磁性磁気変態点以下に温度が下がるとInvar特性が現れると報告されている¹²⁾。したがつて、熱膨張係数を制御するうえで、まずNéel点におよぼす鋼組成の影響を定量的に理解する必要がある。

Fig. 8はMn量のみを系統的に変えた0.55C-6Cr-Mnシリーズ鋼の磁化-温度曲線を示したものであり、Néel点 T_N を図中矢印で表した。Fig. 9, Fig. 10はそれぞれC量のみを変えた25Mn-6Cr-Cシリーズ鋼およびCr量のみを変えた0.55C-25Mn-Crシリーズ鋼の

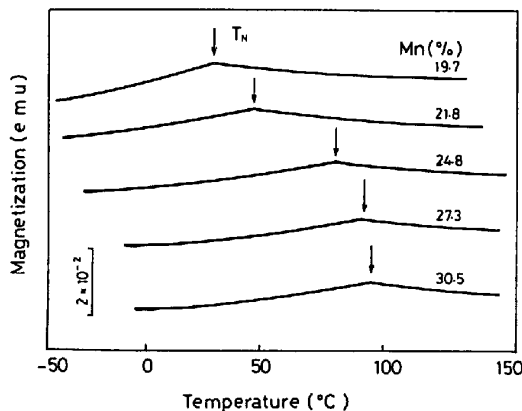


Fig. 8. Effect of manganese content on the magnetization vs. temperature curves for 0.55C-6Cr-Mn series steels. Arrow indicates Néel temperature T_N .

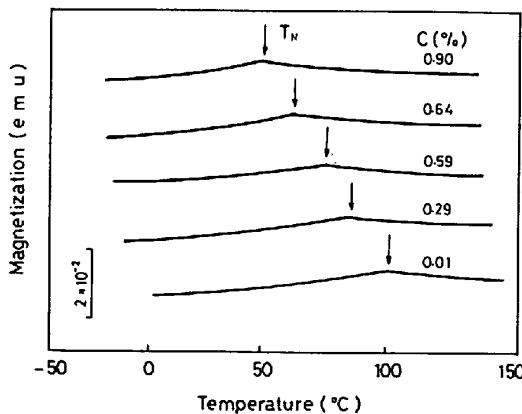


Fig. 9. Effect of carbon content on the magnetization vs. temperature curves for 25Mn-6Cr-C series steels. Arrow indicates Néel temperature T_N .

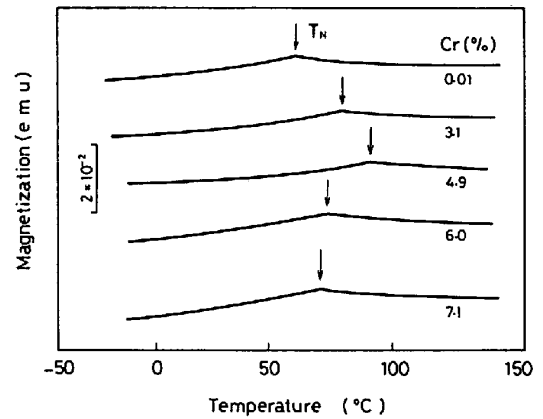


Fig. 10. Effect of chromium content on the magnetization vs. temperature curves for 0.55C-25Mn-Cr series steels. Arrow indicates Néel temperature T_N .

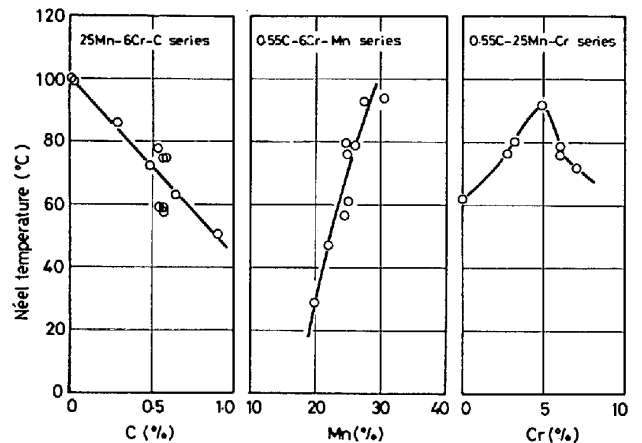


Fig. 11. Influences of alloying additions on the Néel temperatures of various austenitic manganese steels.

磁化-温度曲線である。いずれの場合も、Néel点以下の温度で磁化が減少している。この現象は磁気スピンの反強磁性規則化に伴つて起こると理解されている。Fig. 11はこれらNéel点の測定結果をまとめたものである。図はCがNéel点をほぼ直線的に低下させるが、Mnは逆に上昇させることを示す。Crの影響はCやMnのように単純ではなく、CrはいつたNéel点を上昇させるがCr量約5%でNéel点は最大値を示し、さらにCr量が増えるとNéel点は逆に減少する。

Table 1に示した供試材のうち組織がオーステナイト相で ϵ' マルテンサイトが発生しなかつたものについて線形回帰分析を行い、Néel点と化学成分との関係を求めた結果(4)式を得た。ただし、決定係数 $R^2=0.92$ である。

$$T_N (\text{°C}) = -91.3 - 35.9(\%C) - 55.3(\%N) + 7.8(\%Mn) - 0.11(\%Cr)^2 - 1.16(\%Cr) \dots\dots\dots (4)$$

Mn についての本実験の結果は調査した範囲の Mn 量について ENDOH ら¹³⁾, KHOMENKO ら⁴⁾¹⁴⁾ の結果と一致している。しかし、C の影響については KHOMENKO ら¹⁴⁾も Néel 点を下げると報告しているがその度合いは本実験の結果とくらべかなり大きい。その他 N, Cr の影響については実用上の重要性にもかかわらずこれまでほとんど報告されていない。

3.3 熱膨張係数におよぼす磁気変態の影響

強磁性合金の体積は一般に温度 T , 外部磁場 H , 磁化の強さ I の関数として表され, 本実験のように $H=0$ の場合, 体積は Curie 点の上では T のみに, Curie 点より低温では T のみではなく自発磁化の発生で I にも依存する¹⁵⁾. Invar 特性はこの自発磁化に起因する自発体積磁歪が正の大きな値を持つとき発生することが知られている。一方, オーステナイト系 Fe-Mn 合金の同合にも Néel 点以下で正の大きな自発体積磁歪 ω_s が発生することが見出されている¹²⁾. この ω_s の値は化学組成に依存し, Fig. 12 は各種オーステナイト系高マンガン鋼の ω_s におよぼす合金元素の影響に関する KHOMENKO ら⁴⁾, 丹治ら¹⁶⁾, RICHTER ら¹⁷⁾の結果をまとめたものである。図から Fe-Mn 合金の ω_s は研究者により絶対値は異なるが, いずれの場合もある Mn 量で最大となり, ω_s が最大となる Mn 量は 40% 前後である。また, Fig. 12 は Cr が 0.22C-25Mn 鋼の ω_s を, また C が 30Mn 鋼の ω_s をいずれも減少させることを示してい

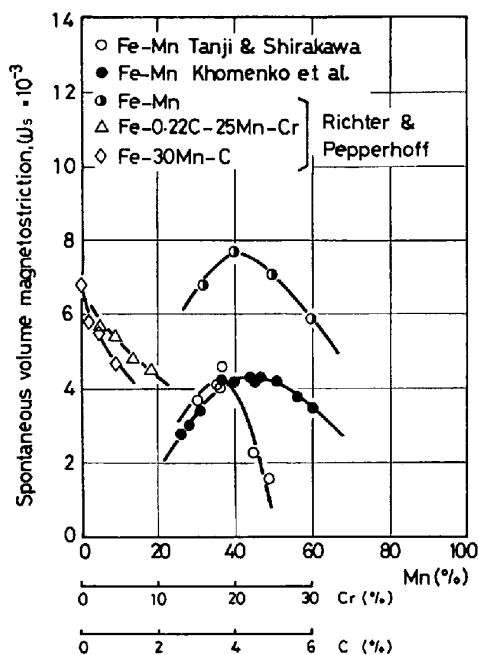


Fig. 12. Effects of manganese, carbon and chromium content on the spontaneous volume magnetostriction.

る。

以上のことから, オーステナイト系高マンガン鋼の場合, Néel 点以下で Invar 特性が現れる温度範囲での線膨張率の実測値は格子振動によるもの $\left(\frac{\Delta l}{l_0}\right)_L$ と自発体積磁歪の寄与分 $\frac{\omega_s}{3}$ の和であり, 温度が上昇し Néel 点に近づくと ω_s は急激に減少し Néel 点より高温側では格子振動による線膨張率のみとなる。ただし, 厳密には Néel 点で ω_s は 0 にはならないがその値は極めて小さいので¹⁸⁾無視できると仮定すると前述の温度範囲でのオーステナイト系高マンガン鋼の伸び率 $\left(\frac{\Delta l}{l_0}\right)$ は(5)式のようになる。

$$\left(\frac{\Delta l}{l_0}\right) = \left(\frac{\Delta l}{l_0}\right)_L + \frac{\omega_s}{3} \dots\dots\dots (5)$$

ただし, (5)式中 $\omega_s > 0$ である。また, 本実験では 2.2 節で述べたように一定温度区間の平均熱膨張係数を問題にしているので鋼種間の平均熱膨張係数の差はその温度区間の伸び率の差を考えることに帰着する。Fig. 13 は以上のことがらを模式的に示したものである。図中 T_N は Néel 点である。いま温度 $T_1 \sim T_2$ ($T_2 > T_1$) 間の平均熱膨張係数を考える場合, A 鋼の Néel 点は B 鋼のそれより低く T_1 よりもさらに低温であり, この温度区間での A 鋼の伸び率の差 $\left(\frac{\Delta l}{l_0}\right)_A$ は自発体積磁歪の効果を含まず B 鋼のそれ $\left(\frac{\Delta l}{l_0}\right)_B$ にくらべ大きい。したがって, A 鋼の平均熱膨張係数が B 鋼のそれより大きいことは $(\Delta l/l_0)_A/\Delta T > (\Delta l/l_0)_B/\Delta T$ から明らかである。しかし, Néel 点が T_1 と T_2 の間にある 2 つの鋼種間の伸び率の差を考える場合, (5)式右辺の $\left(\frac{\Delta l}{l_0}\right)_L$ の両鋼種

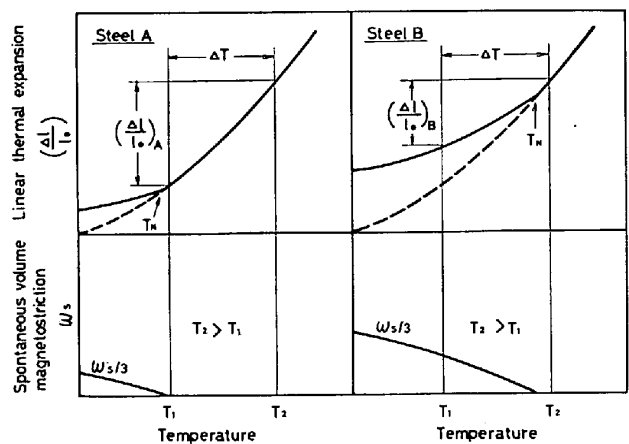


Fig. 13. Schematic representation for the temperature dependence of the linear thermal expansion of austenitic manganese steel. ω_s and T_N represent spontaneous volume magnetostriction and Néel temperature.

間の差の寄与が大きいのか、また $\omega_s/3$ の差の寄与の方が大きいのかは興味のあるところである。KHOMENKO¹¹⁾は Fe-Mn 合金について Mn 量や温度を大幅に変えた多数の供試材について実測できない Néel 点以下での仮想上の常磁性状態の熱膨張係数 α_p を計算で求めており、その結果によると α_p は Mn 量 25~59% の範囲で Mn 量によらずほとんど一定である。Fe-Mn 合金についての RICHTER¹⁷⁾の結果もほぼ同様である。また、オーステナイト系高マンガン鋼について、C 量や Cr 量を変えた場合の α_p も同様の傾向を示している¹⁷⁾。一方、 $\omega_s/3$ の化学組成に対する変化は Fig. 12 に示したとおりであり鋼組成依存性が大きい。したがって、Néel 点以下の線膨張率に対する鋼組成の影響は実質的に $\omega_s/3$ を通じて現れるものと考えられる。事実、Fe-Mn 合金の熱膨張係数は Fig. 12 に示した ω_s が最大となる Mn 量 40% 付近でもつとも小さい値を示す¹⁷⁾。

Fig. 4~Fig. 6 に示した熱膨張係数の測定結果と Fig. 11 に示した Néel 点の測定結果を対比すると、いずれの場合とも本実験の結果は Néel 点が高いほど熱膨張係数が小さいことを示している。とくに、Cr 量を変えた 0.55C-25Mn-Cr 鋼の場合、熱膨張係数は Cr 量約 5% のとき最小値を示し、Néel 点は逆にこの Cr 量のところで最大であり同様の傾向を示している。このような熱膨張係数と Néel 点の関係を Cr, C, N の添加量を種々変えた Mn 量 20% と 25% の各種供試材について調査した結果、前述の傾向と同様、Fig. 14 に示したように熱膨張係数は Néel 点が高いほど小さい。Invar 効果

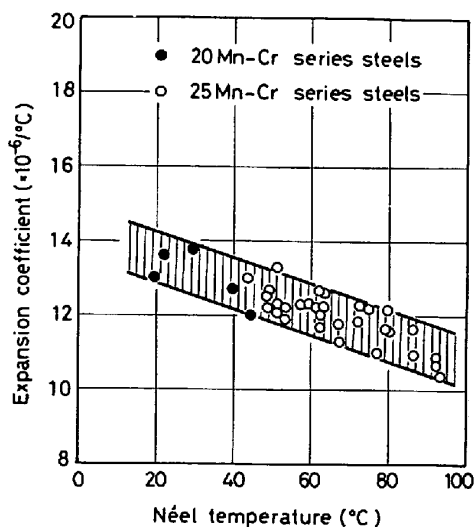


Fig. 14. Relationship between Néel temperature and thermal expansion coefficient. Néel temperatures plotted in this figure are between 0°C and 100°C.

に関するバンドモデル理論によると自発体積磁歪 ω_s は Néel 点の関数であり、Néel 点が高いほど ω_s が大きくなると考えられており¹⁹⁾、本実験の結果はこのような考え方と合致する。

4. 結 言

オーステナイト系高マンガン鋼の温度 0°~100°C 間での平均熱膨張係数におよぼす主合金元素 C, N, Mn, Cr の影響ならびに本鋼に特徴的な HCP ϵ' マルテンサイトの影響についても調査した。また、磁化-温度曲線から Néel 点を求め、熱膨張係数におよぼす鋼組成の影響を常磁性-反強磁性磁気変態挙動との関係で考察した。得られた結果は要約すると次のとおりである。

(1) 熱膨張係数 $\bar{\alpha}$ と鋼組成ならびに ϵ' マルテンサイトとの関係を線形回帰分析により求め次式を得た。

$$\begin{aligned} \bar{\alpha} (\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}) = & 19.72 + 2.32(\% \text{C}) + 1.39(\% \text{N}) \\ & - 0.31(\% \text{Mn}) + 0.028(\% \text{Cr})^2 - 0.41(\% \text{Cr}) \\ & + 0.14(\% \epsilon') \end{aligned}$$

なかでも、Cr はいつたん熱膨張係数を減少させるが Cr 量が限界量を越えると熱膨張係数は逆に増加の傾向を示す。侵入型元素 C, N はいずれも熱膨張係数を大きく増加させるが、その度合いは N より C の方が大きい。

(2) 磁化-温度曲線から Néel 点 T_N を求め鋼組成との間に次の関係を見出した。

$$\begin{aligned} T_N (^{\circ}\text{C}) = & -91.3 - 35.9(\% \text{C}) - 55.3(\% \text{N}) \\ & + 7.8(\% \text{Mn}) - 0.11(\% \text{Cr})^2 - 1.16(\% \text{Cr}) \end{aligned}$$

Néel 点は侵入型元素 C, N の添加で低下し、またその Cr 量に対する変化は熱膨張係数の場合と逆で、Néel 点は Cr 量が増えるといつたん上昇し最大値に達した後さらに Cr 量が増えると低下する。

(3) オーステナイト系マンガン鋼の Néel 点以下の熱膨張係数におよぼす鋼組成の影響を常磁性-反強磁性磁気変態挙動との関連で考察し模式図を提示した。また、Néel 点以下での熱膨張係数におよぼす鋼組成の影響は実質的に自発体積磁歪の鋼組成依存性を通じて生じると考えられる。

(4) 本研究で調査した 20% Mn シリーズ鋼、および 25% Mn シリーズ鋼の熱膨張係数は Néel 点が高いほど低下する傾向を示し、この結果は Néel 点が高いほど自発体積磁歪が大きいとする Invar 効果に関するバンド・モデル理論と合致する。

本研究を遂行するにあたり終始御指導、御鞭達を賜った当社専務取締役藤原達雄博士、常務取締役研究開発本部長澤繁樹博士に深く感謝致します。また、本研究に協力いただいた中央研究所第 3 研究室および第 7 研究室の

各位に感謝致します。

文 献

- 1) 澤 繁樹: 日本金属学会会報, 18 (1979), p. 573
- 2) Steel Times, 207 (1979) 5, p. 331
- 3) F. RICHTER: Arch. Eisenhüttenw., 48 (1977), p. 239
- 4) O. A. KHOMENKO, I. F. KHILKEVICH, G. Ye. ZVIGINTSEVA, and L. A. VAGANOVA: Fiz. metal. metalloved., 45 (1979), p. 729
- 5) 加藤哲男, 藤倉正国, 矢萩慎一郎, 石田清仁: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 587
- 6) 加藤哲男, 阿部山尚三, 藤倉正国, 木村篤良: 昭和 56 年度春期大会「高マンガン鋼の特性と問題点」シンポジウム講演概要投稿中, 電気製鋼, 49 (1978), p. 177
- 7) 加藤哲男, 藤倉正国, 竹内宥公, 川崎成人: 電気製鋼, 51 (1980), p. 287
- 8) T. KATO, M. FUJIKURA, K. ISHIDA, A. KIMURA, Y. TAKEUCHI, N. KAWASAKI, and S. YAHAGI: Trans. ISIJ, 投稿中
- 9) T. Kato, S. FUKUI, M. FUJIKURA, and K.

ISHIDA: Trans. ISIJ, 16 (1976), p. 673

- 10) K. ISHIDA and T. NISHIZAWA: Trans. JIM, 15 (1974), p. 225
- 11) 例えば, 斎藤英夫, 藤森啓安: 日本金属学会会報, 7 (1968), p. 263
- 12) H. FUJIMORI: J. Phys. Soc. Jahan, 21 (1966), p. 1860
- 13) Y. ENDOH and Y. ISHIKAWA: J. Phys. Soc. Japan, 30 (1971), p. 1614
- 14) O. A. KHOMENKO, I. F. KHILKEVICH, and G. Ye. ZVIGINTSEVA: Fiz. metal. metalloved., 37 (1974), p. 1325
- 15) E. KNELLER: Ferromagnetismus, (1962), p. 217 [Springer-Verlag]
- 16) 丹治雅典, 白川勇記: 日本金属学会誌, 34 (1970), p. 897
- 17) F. RICHTER and W. PEPPERHOFF: Arch. Eisenhüttenw., 47 (1976), p. 45
- 18) D. A. COLLING and M. P. MATHUR: J. Appl. Phys., 42 (1971), p. 5699
- 19) M. HAYASE, M. SHIGA, and Y. NAKAMURA: J. Phys. Soc. Japan, 30 (1971), p. 729

統 計

主要先進国の産業ロボット設置台数
(1979年3月)

下表に示すように, 我が国は生産工程の合理化が他の先進国に比べても著しく進んでいることがわかる。逆に西ドイツやイギリスにおけるこうした合理化の遅れが製造業の生産性向上の遅れ, 競争力低下の背景となつているといわれている。特に, エレクトロニクス商品生産額(右表)と並べて考えると, かつて欧州経済の牽引車であり, 自由貿易主義の一方の旗頭であつた西ドイツの最近における経済不調の原因の一端が理解されるように思われる。

主要先進国の産業ロボット設置台数 (79年3月)
(単位: 台)

西ドイツ	日 本	アメリカ	イギリス
850	14 000	3 255	185

- (備考) 1. プログラムブルのもののみ。
2. アメリカのみダイカスト及び成型機用非サーボロボットが含まれていない。
3. 下記における推計値である。

(通商産業省編: 昭和 56 年版通商白書 (昭 56), pp. 38~39)

主要先進国のエレクトロニクス産業
主要商品生産額 (1979年)

下表のように, アメリカが世界をリードし, 日本は2位ながらアメリカにかなり水をあけられている。3位はフランス, 次いでドイツ, イギリスの順となつている。

主要先進国のエレクトロニクス産業主要商品生産額
(79年)(単位: 百万ドル)

品目	西ドイツ	日 本	アメリカ	イギリス	フランス
コンピュータ (計算機本体)	1 109	2 037	4 821	738	1 391
集積回路	401	1 745	4 671	349	136
半導体素子	211	1 157	1 944	172	370

- (備考) 日本は円建の計数を年平均対ドルレートで換算した。
(通商産業省編: 昭和 56 年版通商白書 (昭 56), pp. 38~39)