Ni-Mn 系新高透磁率合金「Nimalloy」の特性に およぼす Si 添加の影響について*

増本 量** 小林 猛郎** 村上 雄悦**

Hakaru Masumoto, Takeo Kobayashi and Yūetsu Murakami: Effect of the Addition of Silicon on Properties of the New High Magnetic Permeability Alloy "Nimalloy" in the System of Nickel and Manganese. Following the discovery of a new high magnetic permeability alloy "Nimalloy" in the system of nickel and manganese, the present authors made a study of the effect of additions of iron and vanadium on its magnetic properties. The highest value of initial and maximum permeabilities obtained were 39,200 and 213,000, respectively. The present investigation on the influence of the addition of silicon on magnetic properties of "Nimalloy" has revealed that the initial and maximum permeabilities of the alloy are increased generally by the addition of a small amount of silicon. Thus the alloy containing 8.77% manganese and 3.55% silicon shows the initial permeability of 22,500 when reheated at 400°C for 80 hr after cooling at a rate of 240°C/hr from 900°C, and the alloy containing 9.24% manganese and 3.57% silicon exhibits the maximum permeability of 140,000 when reheated at 380°C for 19 hr after cooling at a rate of 240°C/hr from 900°C. The alloy containing 8.28% manganese and 4.18% silicon shows the magnetic hysteresis loss of 3.67 erg/cm³/cycle and the coercive force of 0.0076 Oe for the maximum induction of 2,000G when reheated at 400°C for 50 hr after cooling at a rate of 240°C/hr from 900°C, its specific electrical resistivity being 55.7 $\mu\Omega$ -cm at 20°C.

(Received May 15, 1967)

I. 緒 言

著者ら⁽¹⁾はさきに Ni-Mn 系合金に適当な熱処理を施して強磁性規則格子 Ni₃Mn の生成を調整すると、高い透磁率が現われることを発見し、これらの合金に Nimalloy という名称を与えた。つづいて著者らは Nimalloy の特性に対する他元素添加の影響について研究を行ない、Fe 約 4.5% を添加⁽²⁾した場合には初透磁率の最高値 39200、最大透磁率の最高値 213000 の優秀な磁性を得、また V 約 2.2% を添加した場合には初透磁率 22000、最大透磁率 169500 の最高値を得た。著者らは、その後さらに進んで Ni-Mn 系合金に Si を添加して種々の熱処理を施し、その磁性におよぼす影響について研究した。

II. 試料および実験方法

合金の原料は、電解 Ni、電解 Mn および金属 Si であるが、前二者は前報⁽¹⁾の場合と同じもので、Si は Table 1

Table 1 Chemical analysis of silicon used.

Fe (%)	Mn (%)	Cu (%)	C (%)	P (%)	S (%)
1.990	0.113	0.044	0.025	0.026	0.003

** 財団法人電気磁気材料研究所 (The foundation; The Research Institute of Electric and Magnetic Alloy, Sendai)

* 1963 年 10 月本会名古屋大会に発表; 財団法人電気磁気材料研究所論文, No.17.

(1) 増本, 小林, 村上: 本誌, 29(1965), 228.

(2) 増本, 小林, 村上: 本誌, 29(1965), 1101.

(3) 増本, 小林, 村上: 本誌, 30(1966), 837.

に示すような不純物を含んでいる。試料の製造法、熱処理法および測定法も前報⁽¹⁾と同様なので、ここには省略する。なお試料は 121 種で、その組成は Ni 76.69~95.67%, Mn 1.73~21.40% および Si 0.85~5.49% の範囲にわたっている。

III. 実験結果および考察

測定結果は Figs.1~9 に示してある。Fig.1 および Fig.2 には各試料につき真空中において 900°C, 1 hr 加熱の後、それぞれ 9°C/sec, 400°C/hr, 240°C/hr, 100°C/hr, 50°C/hr, 30°C/hr, 10°C/hr および 5°C/hr の 8 種類の割合で常温まで冷却するか、あるいは合金によつてはさらに規則格子変態点以下の種々な温度で加熱して常温で測定された初透磁率 μ_0 および最大透磁率 μ_m のうち、最高の値を採つて濃度に対し統計的に引かれた等値曲線が示してある。なお図中黒点は用いた試料の組成を示している。図に見るように Ni-Mn 2 元合金の μ_0 および μ_m は一般に Si 量の増加とともにはじめ徐々に、後急速に増大して一つの極大に達し、後急激に減少する。その極大値は Mn 8.77%, Si 3.55% の濃度で $\mu_0=22500$ および Mn 9.24%, Si 3.57% の濃度で、 $\mu_m=140000$ で Ni-Mn 2 元合金の最高値 $\mu_0=6860$ および $\mu_m=20400$ に比して格段の増大である。その代表的な合金を選び、その磁気的ならびに電気的特性を掲げると Table 2 のようになる。ここに Wh は磁気履歴損失、 σ は比電気抵抗、 α はその温度係数である。表で見ると、Ni-Mn-Si 3 元合金では Ni-Mn 2 元合金に比して、一般に磁性は非常に優秀となつてはいるが、その $4\pi I$ だけは大きな差がなく、 σ はいくぶん小さくなつてはいる。なお優秀な磁性を得るため

には、Si 量が約 3% 以下を含んでいる合金では 50°~240 °C/hr の速度で徐冷すること、それ以上の Si 量では徐冷

値が Mn 含有量に対して記入してある。図に見るように μ_0 および μ_m は合金の組成および冷却速度によって、非常

Fig.1 Highest initial permeability for each of Ni-Mn-Si alloys cooled to room temperature at various rates from 900°C or further baked at various temperatures.

Fig.2 Highest maximum permeability for each of Ni-Mn-Si alloys cooled to room temperature at various rates from 900°C or further baked at various temperatures.

Fig.3 Initial permeability of Ni-Mn-Si (about 1.7%) alloys cooled to room temperature at various rates after heating at 900°C for 1 hr.

後、さらに規則格子変態点以下の温度で適当時間加熱することが必要である。つぎに、Fig.3 および Fig.4 には約一定の Si 約 1.7% を含む Ni-Mn-Si 合金について 900°C から種々な速度で常温まで冷却して測定した μ_0 および μ_m の

に異なり、透磁率対濃度曲線は一つないし三つの極大を示してある。そして μ_0 および μ_m の極大の最高値は、それぞれ Mn 16.12 および 16.58% を含み、冷却速度が 50°C/hr の場合 10900 および 111780 である。Fig.5 および Fig.6 に

Fig.4 Maximum permeability of Ni-Mn-Si (about 1.7%) alloys cooled to room temperature at various rates after heating at 900°C for 1 hr.

Fig.5 Effect of the temperature and time of baking after cooling at a rate of 240°C/hr from 900°C on initial permeability of a Ni-Mn-Si alloy containing 9.24% Mn and 3.57% Si.

Fig.6 Effect of the temperature and time of baking after cooling at a rate of 240°C/hr from 900°C on maximum permeability of a Ni-Mn-Si alloy containing 9.24% Mn and 3.57% Si.

Fig.7 Intrinsic magnetic induction at an effective field of 900 Oe in Ni-Mn-Si alloys heat-treated to develop the highest maximum permeability for each of them.

Fig. 8 Specific electrical resistivity at 20°C in Ni-Mn-Si alloys heat-treated to develop the highest maximum permeability for each of them.

Fig. 9 Magnetization and hysteresis curves of alloys No. 79 and No. 103.

した後、種々な温度で再加熱した時間と μ_0 および μ_m の関係が、それぞれ示してある。一般に各温度における μ_0 および μ_m は加熱時間に対して一つの極大を示し、その極大の位置は温度が上昇するにしたがい、順次時間の短い方に移動する。そして μ_0 および μ_m の最高値は、それぞれ 400°C で 8 hr 加熱した場合の 17150 および 380°C で 19 hr 加熱したときの 140000 である。したがって最高の透磁率を発揮させるためには、それぞれの合金について最適の熱処理法が存在することがわかる。

さらに Fig. 7 および Fig. 8 には各試料について、それぞれ最高の μ_m を発揮する熱処理を施して得られた内部磁束密度 $4\pi I$ および比電気抵抗 σ と合金の濃度との関係を示した。Fig. 9 には透磁率の最高値を有する合金 No. 79 ならびに履歴損失の最小値を示す合金 No. 103 の磁化曲線と磁気履歴曲線が掲げてあり、磁性が非常に優秀であることを

Table 2 Magnetic and electric properties of typical Ni-Mn-Si alloys.

Alloy No.	Mn (%)	Si (%)	Cooling rate from 900°C	Baking	μ_0	μ_m	B (G) for μ_m	Wh (erg/cm ³ /cycle)	Br (G)	H_c (Oe)	$4\pi I$ (G) $H=900$ Oe	σ ($\mu\Omega$ -cm, 20°C)	α ($\times 10^{-3}$, 0°~40°C)	Density (g/cm ³)
				Temperature, time				$B_m=2000$ G						
33	21.63	—	10°C/hr	380°C, 50 hr	6860	18000	891	18.30	954	0.0315	2790	60.7	0.93	—
35	21.80	—	5°C/hr	—	5090	12490	626	18.50	876	0.0272	2760	60.5	0.94	8.42
37	22.00	—	10°C/hr	380°C, 50 hr	5880	20400	908	19.34	1052	0.0270	2804	60.7	0.93	—
24	16.12	1.76	50°C/hr	—	10900	70500	880	5.43	678	0.0108	3239	56.6	1.29	—
26	16.58	1.82	50°C/hr	—	10700	111780	871	11.58	1073	0.0124	4300	51.4	1.39	8.47
33	17.88	1.34	100°C/hr	—	10500	46800	208	—	—	—	—	62.1	1.01	—
"	"	"	50°C/hr	—	6500	98400	875	25.40	1200	0.0072	3227	61.1	0.95	—
35	18.32	1.35	50°C/hr	—	2940	99000	1412	—	—	—	3463	61.5	1.02	—
50	12.55	2.65	100°C/hr	—	10800	42000	334	* 2.89	* 342	* 0.0061	1450	56.7	1.34	8.52
53	13.02	2.62	240°C/hr	—	10780	42150	751	—	—	—	1200	59.6	1.11	—
75	8.30	3.62	240°C/hr	420°C, 35 hr	17150	106000	566	* 1.97	* 684	* 0.0036	2630	54.5	1.33	—
77	8.77	3.55	240°C/hr	400°C, 50 hr	12500	105000	300	* 1.20	* 406	* 0.0035	2610	54.2	1.63	8.52
"	"	"	240°C/hr	400°C, 80 hr	22500	90000	826	* 1.43	* 689	* 0.0060	—	53.8	1.68	—
79	9.24	3.57	240°C/hr	380°C, 19 hr	15920	140000	760	* 1.07	* 765	* 0.0042	2393	56.3	1.60	8.55
"	"	"	240°C/hr	400°C, 8 hr	17150	129300	853	5.90	1058	0.0052	—	56.5	1.39	—
81	9.83	3.60	240°C/hr	380°C, 60 hr	10280	120300	1070	4.58	1475	0.0070	3132	—	—	—
83	10.70	3.12	240°C/hr	380°C, 10 hr	14470	42000	560	* 3.68	* 572	* 0.0087	1470	55.9	1.28	8.51
87	12.15	3.10	240°C/hr	380°C, 15 hr	10800	72000	1305	8.86	1107	0.0138	3510	57.8	1.25	—
99	6.83	4.59	240°C/hr	400°C, 90 hr	4000	54600	530	* 2.21	* 641	* 0.0080	1870	56.2	1.63	8.48
103	8.28	4.18	240°C/hr	400°C, 50 hr	9100	92700	507	3.67	1132	0.0076	2200	55.7	1.58	—
105	8.78	4.23	240°C/hr	380°C, 130 hr	10770	63000	1030	—	—	—	—	54.8	1.60	8.52
"	"	"	240°C/hr	380°C, 170 hr	7350	133700	1175	6.32	1672	0.0100	2537	—	—	—
106	9.25	4.20	240°C/hr	420°C, 20 hr	14700	52200	615	8.07	1213	0.0112	2680	56.8	1.58	—

* $B_m=1000$ G.

は最高の透磁率を発揮した Mn 9.24%, Si 3.57% を含む No. 79 合金について、900°C から 240°C/hr の速度で冷却

示している。

以上を要するに Ni-Mn-Si 3 元合金においても、他の高

透磁率合金と同様に適当な熱処理を施し、規則度を調整することにより非常に高い透磁率が得られることがわかる。

IV. 総 括

Ni 76.69~95.67%, Mn 1.73~21.40% および Si 0.85~5.49% を含む強磁性 Ni-Mn-Si 系合金 121 種について、環状板の試料を造り、900°C で 1 hr 加熱後、種々な速度で常温まで冷却するか、あるいは合金によつては、さらに規則格子変態点以下の種々な温度で加熱した後、常温における磁性、電気抵抗およびその温度係数を測定して、つぎの結果を得た。

(1) 各試料について得られた最高の初透磁率および最大透磁率は、一般に Ni-Mn 2 元合金に対する Si の添加量

とともにはじめ徐々に後急速に増大して、一つの極大に達し、その後は急激に減少する。その最高値はそれぞれ Mn 8.77%, Si 3.55% および Mn 9.24%, Si 3.57% 濃度における $\mu_0=22500$ および $\mu_m=140000$ である。

(2) 最大磁束密度 2000 G に対する履歴損失の最小値は、Mn 8.28%, Si 4.18% を含む合金の $3.67 \text{ erg/cm}^3/\text{cycle}$ で、またその保持力も 0.0076 Oe で非常に小さい。

(3) 比電気抵抗は一般に大きく、最高の透磁率を示す Mn 9.24%, Si 3.57% を含む合金の値は $56.3 \mu\Omega\text{-cm}$ (20°C) で、その温度係数は 1.60×10^{-3} (0°~40°C) である。

(4) これらの合金は常温においても高温においても、鍛造、圧延が Permalloy 系合金より容易である。

終りに臨み、試料の製造および測定に御協力下さった中村直司および比内正勝の両氏に対し感謝の意を表する。