

Ni-Fe-Ta-Mo 系高透磁率合金 Hardperm の特性について*

増本 量** 比内正勝** 村上雄悦**

Hakaru Masumoto, Masakatsu Hinai and Yūetsu Murakami : Properties of High Magnetic Permeability Alloys Hardperm in the Ni-Fe-Ta-Mo System. Ni-Fe-Ta-Mo alloys were heated in hydrogen atmosphere at 1150°C for 3 hr and then cooled at rates of 0.75~1400°C/hr from a temperature above order-disorder transformation point. The highest initial permeability of 120000 are obtained for the alloy of 74.35% Ni, 11.35% Fe, 13.85% Ta and 0.45% Mo cooled at the rate of 300°C/hr, and the highest maximum permeability of 610000 for the alloy of 74.20% Ni, 11.22% Fe, 13.96% Ta and 0.62% Mo cooled at 240°C/hr. The alloy with the highest initial permeability exhibited the electrical resistivity of 69.7 $\mu\Omega$ -cm, its Vickers hardness being 199. The high permeability Ni-Fe-Ta-Mo alloys showed the very low values of magnetostriction constant in a proper state of ordering.

(Received August 31, 1974)

I. 緒 言

著者らは先に Ni-Fe 系において規則格子 Ni_3Fe が存在する組成範囲の合金に Va 族に属する Ta を添加する⁽¹⁾と Nb を添加した場合⁽²⁾と同様に磁気的特性が非常に改善され、比電気抵抗および硬度もかなり高くなることがわかった。

本報では Ni-Fe-Ta 系に VIa 族に属する Mo を添加した合金の磁気的および電気的特性について述べる。

II. 試料および実験方法

合金の原料としては純度 99.8% の Ni, 99.9% Fe, 99.9% Ta および 99.9% Mo を使用した。試料の数は Ni 71.12~79.24%, Fe 8.80~15.77%, Ta 5.72~16.63% および Mo 0.21~4.39% からなる合金 58 種である。試料を造るには、全重量 500 g を真空中で高周波誘導電気炉によって溶かしたのち、直径 20 mm, 長さ 150 mm の孔をもつ鉄型に注入し、得られた鋳塊を鍛造の後、熱間および冷間圧延により 0.3 mm の薄板とし、これより内径 33 mm, 外径 45 mm の環状板を打ち抜いた。他方上記鋳塊の一部を鍛造、冷間 swaging および冷間引き抜きによって直径 2 mm の線とした。それから長さ 100 mm の丸棒を切りとった。つぎにこれらの環状板および丸棒を露点 -70°C の水素雰囲気中において 1150°C で 3 hr 加熱し、ついで規則格子変態点以上の温度から種々の速度で常温まで冷却して測定に供した。

環状試料について透磁率および磁気履歴曲線の測定を行い、丸棒試料については飽和磁束密度、磁気歪みおよび比電気抵抗の測定を行なった。そして硬度の測定には 0.3 mm 厚の薄板の小片を用いた。透磁率および飽和磁束密度

は弾動検流計法、磁気履歴環線は自記磁束計、磁気歪みは光学的ローラー法、比電気抵抗は電位差計法、そして硬度はマイクロビッカース硬度計によって測定した。

III. 実験結果および考察

実験結果は Table 1 および Figs.1~7 にまとめてある。Fig.1 および Fig.2 は Ni-Fe-Ta-Mo 系の合金 No.6, No.8, No.14, No.22, No.36 および No.53 について、初透磁率 μ_0 , 最大透磁率 μ_m , 最大磁束密度 5 kG に対する保磁力 H_c および残留磁束密度 B_r と冷却速度との関係を示している。図に見るように μ_0 および μ_m は冷却速度に強く依存し、それぞれ一つの極大を示し、その極大にほぼ対応して B_r および H_c は極小を示している。これらの極大および極小が現われるのは Ni-Fe 系合金⁽³⁾の場合と同様に合金が適度の冷却速度によって最も磁化し易い規則状態におかれることによるものと思われる。Fig.3 には、約一定の Ni 74% および Ta 14% を含む Ni-Fe-Ta-Mo 系合金について、最適冷却速度と Mo 量との関係が示してある。Mo 量が多い合金ほど最適冷却速度が小さくなっており、この傾向は Ni-Fe 合金に対する Cr, Mo, Cu, Ta および Nb 添加の効果とよく類似している^{(1)(2)(4)~(6)}。

つぎに Fig.4 には Ni 74.14~74.67% および Ta 12.75~12.90% を含む Ni-Fe-Ta-Mo 合金と Ni 73.71~74.35% および Ta 13.76~14.28% を含む Ni-Fe-Ta-Mo 合金の各々について得られた最大の μ_0 および μ_m と Mo 量との関係曲線が示してあるが、 μ_0 および μ_m はいずれの場合にも Mo 量に対して一つの極大を示している。そしてその極大は Ta 量の増加に伴い Mo 量の少ない組成に移行し、一般に Ta を Mo 量が置換した組成で現われている。Fig.5 および Fig.6 には Fig.4 と同じ合金について μ_m の最大値を

** 財団法人電気磁気材料研究所 (The Research Institute of Electric and Magnetic Alloys, Higashi 8-bancho, Sendai)

* 1973 年 10 月金属学会福岡大会に発表; 財団法人電気磁気材料研究所研究報告第 85 号

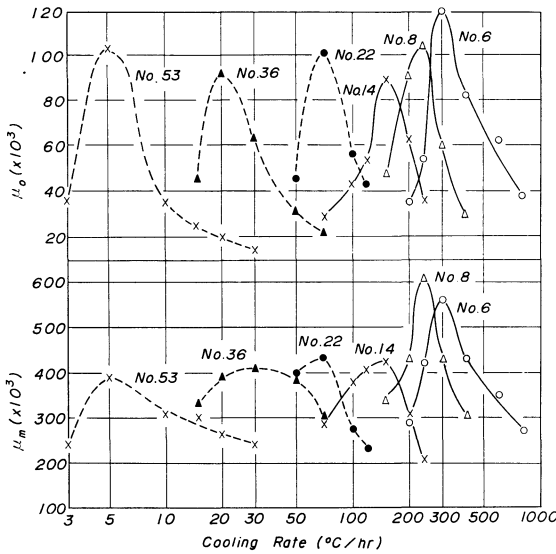


Fig. 1 Variations in initial permeability μ_0 and maximum permeability μ_m with cooling rate for some high permeability Ni-Fe-Ta-Mo alloys. The alloy compositions were: Alloy No. 6 (74.35% Ni, 11.35% Fe, 13.85% Ta, 0.45% Mo), No. 8 (74.20% Ni, 11.22% Fe, 13.96% Ta, 0.62% Mo), No. 14 (74.59% Ni, 11.65% Fe, 12.79% Ta, 0.97% Mo), No. 22 (74.95% Ni, 11.57% Fe, 12.01% Ta, 1.47% Mo), No. 36 (75.58% Ni, 10.50% Fe, 12.06% Ta, 1.86% Mo) and No. 53 (75.82% Ni, 11.10% Fe, 10.20% Ta, 2.88% Mo).

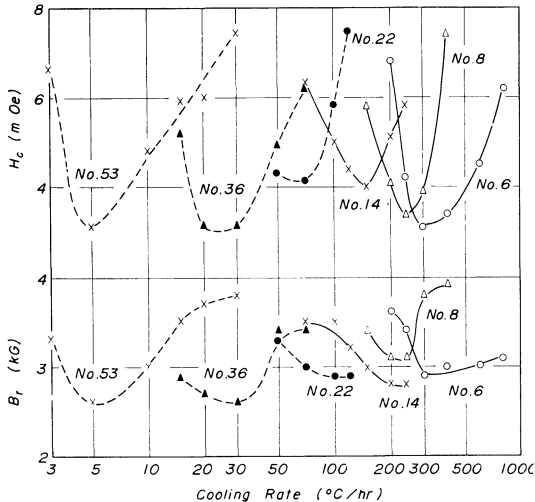


Fig. 2 Variations in residual magnetic induction B_r and coercive force H_c with cooling rate for the same alloys as in Fig. 1.

現わす熱処理を施して得られた H_c および B_r , 1 kOe の有効磁場における磁束密度 $4\pi I_s$ および比電気抵抗 ρ と Mo 量との関係が示してある。 H_c および B_r は Mo 量に対して μ_0 および μ_m の極大にほぼ対応した一つの極小を示し、 $4\pi I_s$ は Mo 量の増加とともに単調に減少し、 ρ は直線的

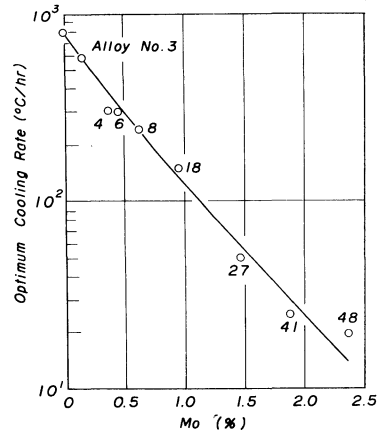


Fig. 3 Optimum cooling rate as function of Mo contents for Ni-Fe-Ta-Mo quaternary alloys containing 73.71~74.35% Ni and 13.76~14.28% Ta.

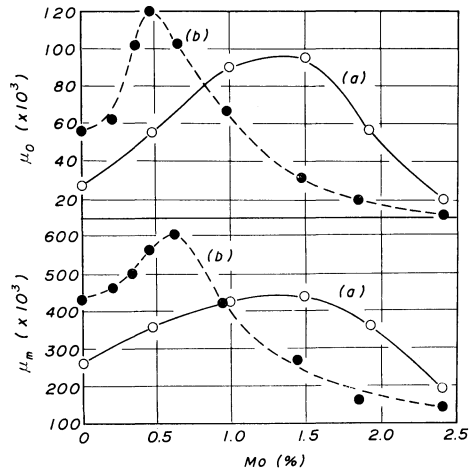


Fig. 4 Effect of Mo on highest initial permeability μ_0 and maximum permeability μ_m for each of Ni-Fe-Ta-Mo alloys containing (a), 74.14~74.67% Ni and 12.75~12.90% Ta and (b), 73.71~74.35% Ni and 13.76~14.28% Ta.

に且つ急速に増大している。

測定した Ni-Fe-Ta-Mo 系合金 58 種のうち、代表的な合金 24 種についてその磁気的特性、比電気抵抗および硬度を掲げると **Table 1** のようになる。ここで μ_1 は磁場 1 mOe における透磁率、 W_h は最大磁束密度 5 kG に対する履歴損失である。また s_0 は 1 kOe の有効磁場における磁気歪み定数および Hv は荷重 500 g におけるビッカース硬度である。得られた μ_0 および μ_m の最高値はそれぞれ Ni 74.35%, Fe 11.35%, Ta 13.85%, Mo 0.45% からなる合金 No. 6 を 300°C/hr の速度で冷却した場合の 120000 および Ni 74.20%, Fe 11.22%, Ta 13.96%, Mo 0.62% からなる合金 No. 8 を 240°C/hr で冷却した場合の 610000 で極めて高く、また合金 No. 6 の ρ および Hv はそれぞれ 69.7 $\mu\Omega\text{-cm}$ および 199 でかなり大きい。よって著者らは

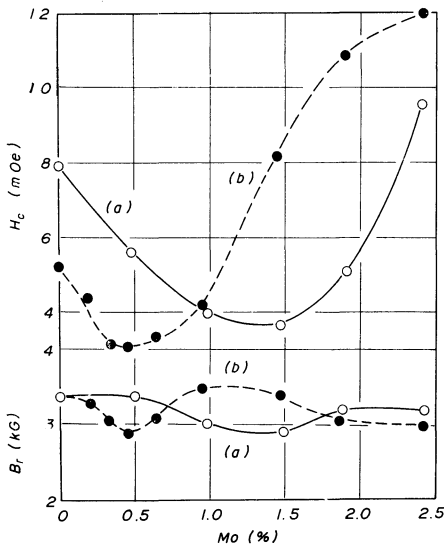


Fig.5 Effect of Mo on coercive force H_c and residual magnetic induction B_r of the same alloys as in Fig.4.

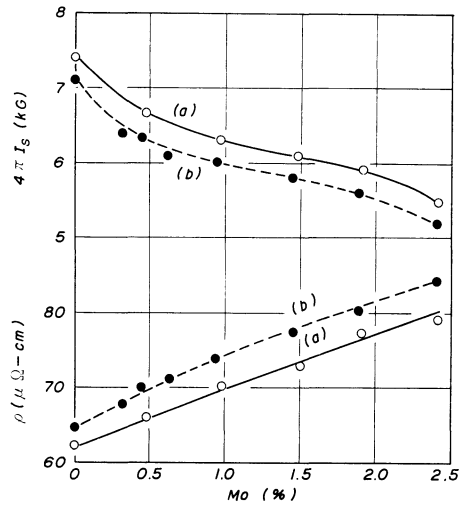


Fig.6 Effect of Mo on magnetic induction $4\pi I_s$ and electrical resistivity ρ of the same alloys as in Fig.4.

Table 1 Magnetic properties, electrical resistivity and Vickers hardness of some high permeability Ni-Fe-Ta-Mo alloys heated at 1150°C for 3 hr.

Alloy No.	Composition (Rest Ni, wt%)			Cooling rate (°C/hr)	μ_0	μ_1	μ_m	W_h (erg/cm ³ /cycle)	B_r (kG)	H_c (mOe)	$4\pi I_s$ (kG)	λ_s ($\times 10^{-6}$)	ρ ($\mu\Omega$ -cm, 20°C)	Hv (Vickers hardness)
	Fe	Ta	Mo											
1	12.14	12.88	0.47	300	56	69	356	8.4	3.4	5.6	6.7	0.4	65.4	194
4	11.46	13.91	0.34	400	102	120	354	5.4	3.0	4.1	6.4	0.5	67.7	197
4	11.46	13.91	0.34	300	72	111	500	5.2	3.2	3.2	6.4	0.7	67.8	—
6	11.35	13.85	0.45	300	120	163	560	3.6	2.9	3.1	6.3	0	69.7	199
8	11.22	13.96	0.62	240	104	126	610	4.0	3.2	3.4	6.1	0.4	71.2	198
10	10.75	14.95	0.45	300	20	30	365	11.0	4.0	6.2	6.0	0.4	71.7	208
10	10.75	14.95	0.45	240	46	52	234	9.2	2.8	6.3	6.1	0.2	72.0	—
12	11.30	12.18	0.94	240	58	72	297	8.7	3.1	5.3	6.7	1.1	66.1	191
12	11.30	12.18	0.94	150	43	59	347	9.5	3.6	5.7	6.6	0.4	66.7	—
12	11.65	12.79	0.97	150	90	118	428	6.8	3.0	4.0	6.3	0	70.2	196
18	10.90	14.28	0.94	150	46	68	416	7.6	3.5	4.2	6.0	0.4	73.6	201
18	10.90	14.28	0.94	120	69	83	295	7.7	2.7	5.6	6.1	0.2	73.9	—
20	11.05	14.87	0.96	100	16	20	230	8.0	2.9	5.9	5.8	0.7	78.6	219
22	11.57	12.01	1.47	70	101	134	433	5.7	3.0	4.1	6.3	0.7	69.8	190
24	10.95	12.90	1.48	50	95	129	436	5.0	2.9	3.7	6.1	1.1	73.1	198
27	11.01	13.76	1.44	50	31	36	194	12.9	3.2	9.4	5.8	0.5	77.5	203
33	13.42	7.96	1.95	70	23	27	204	19.1	4.0	10.2	7.5	1.4	61.3	166
34	11.30	10.70	1.92	50	49	58	212	11.2	3.1	8.0	6.6	0.2	67.1	181
36	10.50	12.06	1.86	30	63	98	416	6.5	2.6	3.6	6.0	0.5	73.7	187
36	10.90	12.06	1.86	20	92	128	390	6.5	2.7	3.6	6.0	1.1	73.9	—
39	11.21	12.75	1.90	30	40	46	364	9.2	3.2	5.1	5.9	0.2	77.5	185
41	10.51	13.87	1.85	25	20	23	170	18.9	3.1	11.1	5.6	0.5	80.2	197
42	11.10	13.94	1.86	50	21	23	142	16.6	3.0	10.8	5.8	0.7	82.1	196
46	10.54	12.77	2.38	30	11	14	199	19.3	3.2	11.0	5.3	0.5	79.1	190
48	10.04	13.87	2.38	20	10	12	154	*21.7	*3.0	*12.0	5.2	0.5	84.5	197
51	12.29	7.81	3.01	15	50	58	201	12.0	3.2	8.6	6.7	0.7	68.7	163
53	10.85	9.98	2.98	5	103	140	390	5.1	2.6	3.6	5.9	0.2	74.4	181
56	10.54	11.94	2.92	10	14	19	281	*11.9	*3.6	*7.3	5.3	0.4	82.2	187
57	11.47	7.38	3.92	1.5	61	73	284	8.1	3.0	5.8	6.2	0.4	76.1	168

* $B_m = 4.5$ kG

これらの合金を Hardperm と称した。なお、表中の合金 No.4, No.10, No.12, No.18 および No.36 において、 ρ が冷却速度の大きいときより小さいときの方が若干大きくなっているのは、長島らが Ni-Fe-Mo 合金で指摘しているように短範囲の規則格子の生成によるものと考えられ

る⁽⁷⁾。一方 Hv は冷却速度により変化しないことが経験的にわかっているから表中のように冷却速度を変えたときの Hv は測定しなかった。

Fig.7 には μ_0 および μ_m の最高値を示した合金 No.6 と No.8 の磁気履歴曲線が示してあるが、合金 No.6 の H_c お

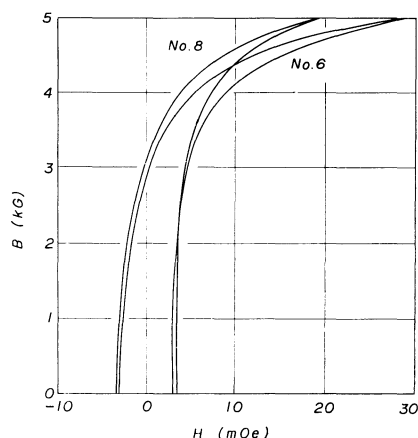


Fig. 7 Hysteresis curves of alloy No. 6 (74.35% Ni, 11.35% Fe, 13.85% Ta, 0.45% Mo) cooled at the rate of 300°C/hr and No. 8 (74.20% Ni, 11.22% Fe, 13.96% Ta, 0.62% Mo) cooled at 240°C/hr.

および W_h はそれぞれ 3.1 mOe および 3.6 erg/cm³/cycle で非常に小さい値である。

Ni-Fe-Ta-Mo 系合金が極めて高い透磁率を有し、優秀な磁気特性を示す原因としては、高純度水素中の高温度加熱による組成の均一化、炭素、窒素および酸素などの不純物の減少および結晶粒の粗大化⁽⁸⁾⁽⁹⁾、さらに規則格子変態点以上の温度からの冷却速度を制御することによってもたらされた適度な規則状態における微小な磁気歪み定数 (Table 1 参照) および結晶磁気異方性定数⁽¹⁰⁾などが考えられる。

IV. 総 括

Ni 71.12~79.24%, Fe 8.80~15.77%, Ta 5.72~16.63% および Mo 0.21~4.39% からなる Ni-Fe-Ta-Mo 系合金について真空溶解後、鍛造、圧延あるいは swaging および引き抜きによって環状板あるいは丸棒を造り、それを露点 -70°C の水素雰囲気中 1150°C, 3 hr 加熱し、規則格子変態点以上の温度から種々の速度で常温まで冷却して試

料とし、その磁気特性、比電気抵抗および硬度を測定してつぎの結果を得た。

(1) Ni-Fe-Ta-Mo 系合金の初透磁率 μ_0 および最大透磁率 μ_m は一般に冷却速度に依存してそれぞれ一つの極大を示し、その極大値を現わす最適冷却速度は Mo 含有量の増加とともに漸次小さくなる。そして得られた μ_0 および μ_m の最高値はそれぞれ Ni 74.35%, Fe 11.35%, Ta 13.85%, Mo 0.45% からなる合金 No. 6 を 300°C/hr の速度で冷却したときの 120000 および Ni 74.20%, Fe 11.22%, Ta 13.96%, Mo 0.62% からなる合金 No. 8 を 240°C/hr で冷却したときの 610000 である。

(2) 最大磁束密度 5 kG に対する保磁力および履歴損失は一般に非常に小さく、また有効磁場 1 kOe における磁束密度は Mo 量の増加とともに減少し、比電気抵抗は急速に増大するが、300°C/hr で冷却した合金 No. 6 のこれらの値はそれぞれ 3.1 mOe, 3.6 erg/cm³/cycle, 6.3 kG および 69.7 $\mu\Omega$ -cm である。

(3) Ni-Fe-Ta-Mo 系の極めて高い透磁率を現わす合金は非常に小さな磁気歪み定数を示す。そしてその硬度は Permalloy 系合金のものに比してかなり高い。

文 献

- (1) 増本 量, 村上雄悦, 比内正勝: 金属学会誌, **36** (1972), 63; Trans. JIM, **14** (1973), 242.
- (2) 増本 量, 村上雄悦, 比内正勝: 金属学会誌, **35** (1971), 985; Trans. JIM, **13** (1972), 182.
- (3) H. D. Arnold and G. W. Elmen: J. Frank. Inst., **195** (1923), 621.
- (4) G. W. Elmen: Elec. Eng., **54** (1935), 1292.
- (5) D. J. Snee: J. Appl. Phys., **38** (1967), 1172.
- (6) R. D. Enoch and D. L. Murrell: IEEE Trans. Magnet., **Mag-5** (1969), 370.
- (7) 中村 豊, 片山利一, 中川愛彦, 長島富雄: 電試彙, **27** (1963), 935.
- (8) P. P. Cioffi: Phys. Rev., **39** (1932), 363.
- (9) R. E. Walters: Acta Met., **3** (1955), 293.
- (10) I. M. Puzei: Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Fis., **16** (1952), 549.