

Ni-Fe-Nb-Mo 系高透磁率合金 Hardperm について*

増本 量** 比内正勝** 村上雄悦**

Hakaru Masumoto, Masakatsu Hinai and Yūetsu Murakami: High Magnetic Permeability Alloys "Hardperm" in the Ni-Fe-Nb-Mo System. Ni-Fe-Nb-Mo alloys were heated in hydrogen atmosphere at 1150°C for 3 hr and then cooled at various rates from a temperature above the order-disorder transformation points. The highest initial permeability of 103000 are obtained with the alloy of 80.12% Ni, 11.42% Fe, 6.92% Nb, and 1.54% Mo when cooled at the rate of 50°C/hr, and the highest maximum permeability of 434000 with the alloy of 80.19% Ni, 10.71% Fe, 8.10% Nb and 1.00% Mo when cooled at 70°C/hr. The alloy with the highest initial permeability exhibited an electrical resistivity of 75.3 $\mu\Omega$ -cm and 199 Vickers hardness. The high permeability Ni-Fe-Nb-Mo alloys showed very low values of saturation magnetostriction constant.

(Received August 19, 1975)

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周期表の V_a 族に属する Nb⁽¹⁾あるいは Ta⁽²⁾を添加すると磁性が非常に向上し、比電気抵抗および硬度が高くなることを発見した。つづいて Ni-Fe-Nb 系合金に V_a 族に属する Cr を添加して実験を行い、その特性の変化について報告しておいた⁽³⁾。本報では引きつづき Ni-Fe-Nb 系に V_a 族の Mo 添加の影響について研究した結果について述べる。

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% Nb および 99.9% Mo を使用した。試料を造るには、まず全重量 800 g の原料を真空中で高周波電気炉によって溶解し、これに Mn 約 0.2% を加えて脱酸を行った。つぎに、これを直径 25 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、その一部を熱間および冷間圧延により厚さ 0.3 mm の薄板とし、他の一部を冷間 swaging および引き抜きによって直径 2 mm の線とした。薄板からは内径 33 mm、外径 45 mm のリング試料を打ち抜き、線からは長さ 100 mm の棒試料を切りとった。

つぎにこれらを Pd 膜を通して純化した露点 -70°C の水素雰囲気中において、1150°C, 3 hr 加熱した後規則格子変態点以上の温度から 600~3°C/hr の速度で常温まで冷却した。試料の数は Ni 78.92~80.71%, Fe 9.63~15.46%, Nb 3.95~9.16% および Mo 0.30~3.01% となる合金 45 種である。透磁率ならびに磁気履歴曲線はリング試料を用い弾動検流計法および自記磁束計により、また飽和磁束密度、飽和磁気歪み定数ならびに比電気抵抗は

棒試料を用い弾動検流計法、光学的ローラー法、電位差計法によって測定した。硬度は 0.3 mm 厚さの薄板を用いマイクロビッカース硬度計(荷重 500 g)によって測定した。

III. 実験結果および考察

実験結果は Figs. 1~7 および Table 1 にまとめてある。Fig. 1 および Fig. 2 には Ni-Fe-Nb-Mo 系の合金 No. 5, No. 8, No. 14, No. 17, No. 27 および No. 40 の初透磁率 μ_0 および最大透磁率 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 の冷却速度による変化が示してある。 μ_0 および μ_m は冷却速度に強く依存して、それぞれ一つの極大を示す。そしてその極大にはほぼ対応して 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の現われるのは Ni-Fe 系合金⁽⁴⁾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 Ni 79.81~80.19% および Nb 7.95~8.10% を含む Ni-Fe-Nb-Mo 系合金について μ_m の極大値を現わす最適冷却速度と Mo 量との関係が示してある。Mo 含有量が多いほど最適冷却速度は急速に小さくなっており Cr 添加⁽³⁾の場合についてその効果は大きい。そしてこの効果は Ni-Fe 合金に Cr, Mo, Nb および Ta を添加した場合とよく類似している^{(1)(2)(5)~(7)}。

つぎに Fig. 4 には Ni 80.00~80.24% および Nb 6.92~7.08% を含む Ni-Fe-Nb-Mo 合金(a)と Ni 79.81~80.19% および Nb 7.95~8.10% を含む Ni-Fe-Nb-Mo 合金(b) について得られた μ_0 および μ_m の極大値と Mo 量との関係曲線が示してある。 μ_0 および μ_m はいずれの場合も 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 Nb 量の増加に伴い、Mo 量の少ない組成に移行し、一般

** 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, 980)

* 1972 年 10 月金属学会名古屋大会に発表; 財団法人電気磁気材料研究所研究報告第 91 号

に Nb と Mo とは μ_0 および μ_m に対して互いに置換効果を有する。Fig. 5 には、Fig. 4 と同じ合金について μ_m の

極大値を現わす熱処理を施して得られた H_c および B_r 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 の極大にはほぼ対応した一つの極小を示している。また Fig. 6 は μ_m の最大値を現わす熱処理を施した Fig. 4 と同じ合金について得られた飽和磁束密度 $4\pi I_s$ および比電気抵抗 ρ と Mo 量との関係を表わす。 $4\pi I_s$ は Mo の増加とともに単調に減少し、 ρ は直線的に増大している。

測定した Ni-Fe-Nb-Mo 系合金 45 種のうち非常に高い透磁率を示した代表的合金 16 種について冷却速度と高透磁率合金として必要な特性との関係を示すと 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、

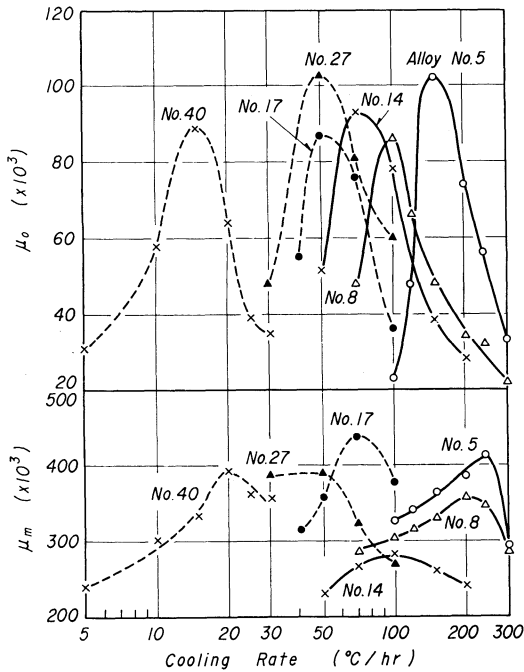


Fig. 1 Variations in initial permeability μ_0 and maximum permeability μ_m with cooling rate for some high permeability Ni-Fe-Nb-Mo alloys. The alloy compositions were: Alloys No. 5 (80.09% Ni, 11.37% Fe, 8.01% Nb, 0.53% Mo), No. 14 (80.15% Ni, 11.27% Fe, 7.55% Nb, 1.03% Mo), No. 17 (80.19% Ni, 10.71% Fe, 8.10% Nb, 1.00% Mo), No. 27 (80.12% Ni, 11.42% Fe, 6.92% Nb, 1.54% Mo) and No. 40 (80.08% Ni, 10.84% Fe, 7.08% Nb, 2.00% Mo).

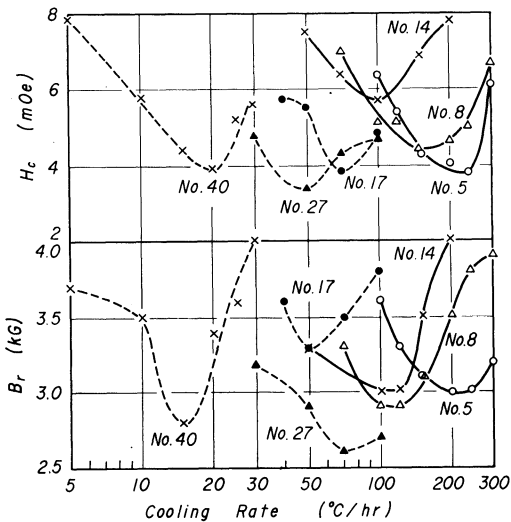


Fig. 2 Variations in residual magnetic induction B_r and coercive force H_c with cooling rate for alloys shown in Fig. 1.

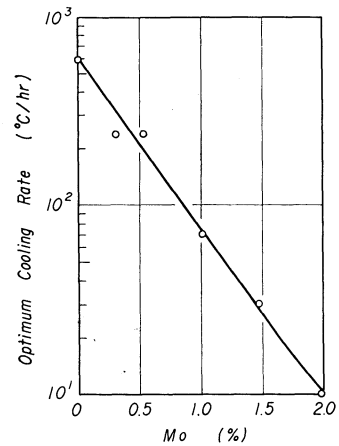


Fig. 3 Optimum cooling rate for the maximum value of μ_m as a function of Mo content in Ni-Fe-Nb-Mo alloys containing 79.81~80.19% Ni and 7.95~8.10% Nb.

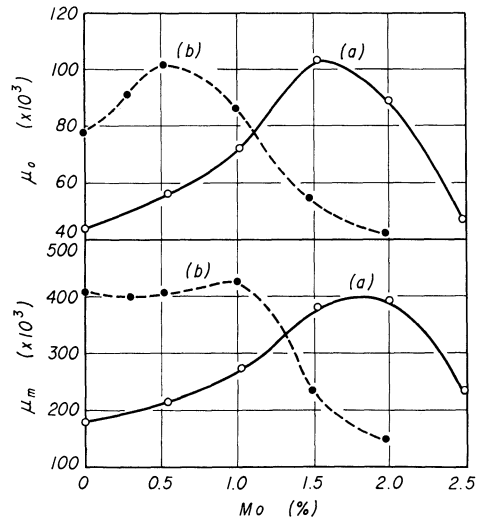


Fig. 4 Effect of Mo content on highest initial permeability μ_0 and maximum permeability μ_m for each of Ni-Fe-Nb-Mo alloys containing (a) 80.00~80.24% Ni and 6.92~7.08% Nb and (b) 79.81~80.19% Ni and 7.95~8.10% Nb.

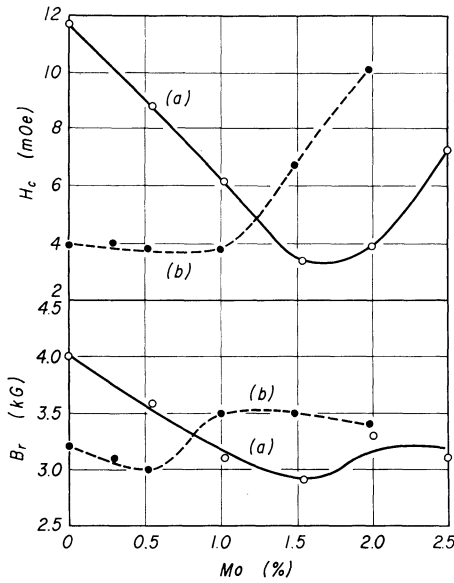


Fig.5 Effect of content on coercive force H_c and residual magnetic induction B_r of alloys(a) and (b) shown in Fig.4.

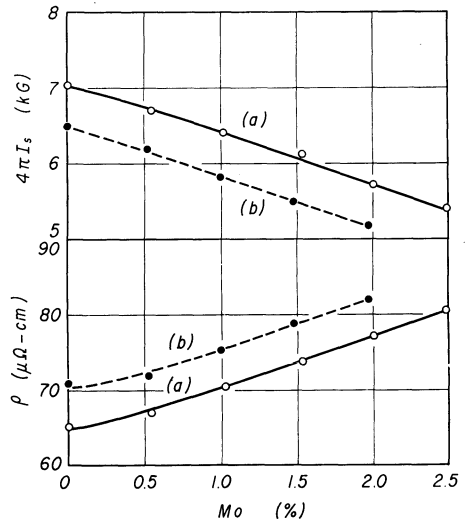


Fig.6 Effect of Mo content on saturation magnetic induction $4\pi I_s$ and electrical resistivity ρ of alloys(a) and (b) shown in Fig.4.

W_h は最大磁束密度 5 kG に対する履歴損失である。また λ_s は飽和磁気歪み定数および Hv はピ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 80.12%, Fe 11.42%, Nb 6.92%, Mo 1.54% からなる合金 No. 27 を 1150°C で 3hr 加熱の後、50°C/hr の速度で冷却した場合の 103000 および Ni 80.19%, Fe 10.71%, Nb 8.10%, Mo 1.00% からなる合金 No.17 を 70°C/hr で冷却した場合の 434000 で極めて高く、また合金 No.17 の ρ は

75.3 $\mu\Omega$ -cm でかなり大きい。そのうえ Ni-Fe-Nb-Mo 系合金は Ni-Fe-Nb 系と同様にその Hv が高い。例えば Permalloy, Mo-Permalloy および Mumetal の Hv が約 120 であるのに対して合金 No.17 は 199 を示している。著者らはこれらの合金が極めて高い透磁率を示し、高い硬度を有することからこれらを Hardperm と称した。

Table 1 中の合金 No.1, No.5, No.8, No.17, No.31 および No.40 について冷却速度による ρ の変化をみるに、

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

Alloy No.	Composition (Rest Ni, %)			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	Nb	Mo											
—	11.65	8.94	0	240	100	115	411	3.3	2.7	3.4	5.9	0.3	74.7	207
1	12.28	7.01	0.55	400	57	62	204	11.9	3.3	9.7	6.7	0.5	67.0	188
1	12.28	7.01	0.55	300	34	36	212	12.7	3.6	8.8	6.7	0.5	67.3	—
3	11.72	8.02	0.30	200	91	99	372	7.5	3.2	4.2	—	—	—	—
5	11.37	8.01	0.53	240	56	62	409	7.0	3.0	3.8	6.2	0.4	72.0	197
5	11.37	8.01	0.53	150	102	118	363	6.3	3.1	4.3	6.2	0.4	72.1	—
8	10.85	8.54	0.53	240	32	42	346	9.0	3.9	5.0	5.9	0.4	75.2	208
8	10.85	8.54	0.53	100	86	101	298	6.6	2.9	5.1	5.9	0.2	75.5	—
11	10.73	8.96	0.53	100	80	88	269	7.3	3.1	5.7	5.7	0.4	78.0	206
12	11.81	6.96	0.99	150	72	83	195	10.4	3.3	6.7	6.4	0.4	70.4	197
14	11.27	7.55	1.03	70	93	105	266	8.3	3.0	6.4	6.1	0.2	73.2	—
17	10.71	8.10	1.00	70	76	98	434	5.9	3.5	3.8	5.8	0.4	75.3	199
17	10.71	8.10	1.00	50	87	97	357	8.0	3.3	5.5	5.8	0.4	75.7	—
25	12.40	6.00	1.53	100	37	39	143	19.8	3.5	13.3	—	—	—	—
27	11.42	6.92	1.54	50	103	127	388	5.7	2.9	3.4	6.1	0.7	73.8	199
31	10.76	7.95	1.48	30	29	38	236	12.0	3.5	6.7	5.5	0.4	78.1	199
31	10.76	7.95	1.48	15	55	59	186	13.3	3.2	8.3	5.5	0.2	78.7	—
36	12.62	4.97	2.04	70	30	31	151	40.8	3.9	15.0	—	—	—	169
38	11.87	5.96	1.95	50	56	58	180	14.3	3.3	11.3	6.5	0.4	70.1	186
40	10.84	7.08	2.00	20	64	90	391	6.2	3.4	3.9	5.7	0.4	76.7	189
40	10.84	7.08	2.00	15	89	112	335	5.9	2.8	4.4	5.7	0.4	76.9	—
43	10.41	7.07	2.52	5	47	50	223	11.6	2.9	7.2	5.4	0.2	80.5	191
45	11.75	5.01	3.01	15	60	64	177	13.9	3.2	11.6	—	—	—	178
45	11.75	5.01	3.01	5	14	16	218	16.9	4.3	10.3	—	—	—	—

冷却速度が小さいときの方が若干大きくなっている。これはすでに Ni-Fe-Mo 合金⁽⁸⁾ならびに Ni-Fe-Nb 合金⁽⁹⁾について考察しているように小さい冷却速度の際には短範囲的な規則格子が生成し易いことによるものと思われる。Fig. 7 には 70°C/hr の速度で冷却した合金 No. 17 および 50°C/hr で冷却した合金 No. 27 について得られた磁気履歴曲線が示してあるが、前者の H_c および W_h はそれぞれ 3.8 mOe および 5.9 erg/cm³/cycle, また後者の値はそれぞれ 3.4 mOe および 5.7 erg/cm³/cycle で、いずれも非常に小さい。

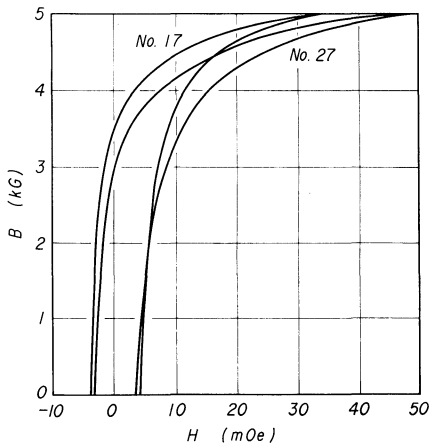


Fig. 7 Hysteresis curves of alloy No. 17 (80.19% Ni, 10.71% Fe, 8.10% Nb, 1.00% Mo) cooled at the rate of 70°C/hr and No. 27 (80.12% Ni, 11.42% Fe, 6.92% Nb, 1.54% Mo) cooled at 50°C/hr.

Ni-Fe-Nb-Mo 系合金の透磁率が極めて高く、優秀な磁性を示す原因としては、第 1 に高純度水素雰囲気中で 1150°C, 3 hr の加熱による組成の均一化、内部歪みの原因となる炭素、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が挙げられる⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。第 2 には最適冷却速度によってもたらされる適度の規則状態による微小な λ_s (Table 1 参照) ならびに微小な結晶磁気異方性定数などが考えられる⁽⁹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

IV. 総 括

Ni 78.92~80.71%, Fe 9.63~15.46%, Nb 3.95~9.16% および Mo 0.30~3.01% からなる Ni-Fe-Nb-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リング試料ならびに棒試料を造り、それを露点 -70°C の水素雰囲気中で 1150°C, 3 hr 加熱し、

規則格子変態点以上の温度から 600~3°C/hr の速度で常温まで冷却し、その磁性、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-Nb-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す。それらの極大値を現わす最適冷却速度は Mo 量の増加とともに小さくなる。そして得られた μ_0 および μ_m の最高値はそれぞれ Ni 80.12%, Fe 11.42%, Nb 6.92%, Mo 1.54% からなる合金 No. 27 を 50°C/hr の速度で冷却したときの 103000 および Ni 80.19%, Fe 10.71%, Nb 8.10%, Mo 1.00% からなる合金 No. 17 を 70°C/hr で冷却したときの 434000 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、50°C/hr で冷却した合金 No. 27 の値はそれぞれ 3.4 mOe および 5.7 erg/cm³/cycle である。

(3) 飽和磁束密度は Mo 量の増加とともに直線的に減少し、比電気抵抗は急速に増大する。合金 No. 17 の値はそれぞれ 5.8 kG および 75.3 $\mu\Omega$ -cm である。そしてこれらの合金には冷却速度を比較的小さくすると、短範囲的な規則格子によるとと思われる比電気抵抗の増加が見られる。

(4) Ni-Fe-Nb-Mo 系の高い透磁率を示す合金は非常に小さな飽和磁気歪み定数 λ_s を示し、また Permalloy, Mo-Permalloy および Mumetal に比してかなり高い硬度 Hv を有する。たとえば合金 No. 17 の λ_s および Hv はそれぞれ 0.4×10^{-6} および 199 である。

文 献

- (1) 増本 量, 村上雄悦, 比内正勝: 金属学会誌, **35** (1971), 985; Trans. JIM, **13** (1972), 182.
- (2) 増本 量, 村上雄悦, 比内正勝: 金属学会誌, **36** (1972), 63; Trans. JIM, **14** (1973), 242.
- (3) 増本 量, 比内正勝, 村上雄悦: 金属学会誌, **39** (1975), 1127.
- (4) H.D. Arnold and G.W. Elmen: J. Frank. Inst., **195** (1923), 621.
- (5) G.W. Elmen: Elec. Eng., **54** (1935), 1292.
- (6) D.J. Snee: J. Appl. Phys., **38** (1967), 1172.
- (7) R.D. Enoch and D.L. Murrell: IEEE Trans. Magnet., **Mag-5** (1969), 370.
- (8) 中村 豊, 片山利一, 中川愛彦, 長島富雄: 電試案, **27** (1963), 935.
- (9) 比内正勝: 1975 年 4 月金属学会東京大会に発表.
- (10) P.P. Cioffi: Phys. Rev., **39** (1932), 363.
- (11) R.E.S. Walters: Acta Met., **3** (1955), 293.
- (12) I.M. Puzei: Izv. Akad. Nauk SSSR., Ser. fis., **16** (1952), 549.
- (13) R.M. Bozorth: Rev. Mod. Phys., **25** (1953), 42.