Fe-Nb-Ta-Co-Mo 系半硬質磁性合金「Recalloy」の特性について*

中 村 直 司**

J. Japan Inst. Metals, Vol. 48, No. 2 (1984), pp. 220-226

On the Properties of Semihard Magnetic Alloys "Recalloy" in the Fe-Nb-Ta-Co-Mo System

Naoji Nakamura*

Measurements of the magnetic properties, the thermal expansion, the electrical resistivity and the hardness were carried out for Fe-0.3 mass%Nb-4.0 mass%Ta-20 mass%Co-3 mass%Mo alloys. All the alloys used in this study were water-quenched from 1323 K, cold-drawn to 97.2% reduction in area and subsequently reheated at 673-1273 K for the period less than 18 ks. The magnetic properties of alloys depend remarkably on the contents of niobium and tantalum, and the reheating temperature and time.

When water-quenched, cold-drawn and subsequently reheated at 973 K for 1.8 ks, an Fe-1.5%Nb-1.5%Ta-20%Co-3%Mo alloy exhibits the following values: B_g at $8 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1} = 1.96 \text{ T}$, $B_r = 1.86 \text{ T}$, $B_r/B_g = 0.95$, $H_c = 1.89 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$, $\sqrt{(BH)_{\max}/B_r H_c} = 0.95$, the mean thermal expansion coefficient α_T at 273-313 K $= 9.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, the electrical resistivity $\rho = 0.262 \mu\Omega \cdot \text{m}$ and Vickers hardness $H_v = 391$. Also, using ferro-niobium for metallic niobium as raw material, an Fe-1.5%Nb-0.5%Ta-20%Co-3%Mo alloy reheated at 1023 K for 0.6 ks exhibits the following values: $B_g = 2.00 \text{ T}$, $B_r = 1.86 \text{ T}$, $B_r/B_g = 0.95$, $H_c = 1.75 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$, $\sqrt{(BH)_{\max}/B_r H_c} = 0.95$, $\alpha_T = 8.8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\rho = 0.265 \mu\Omega \cdot \text{m}$ and $H_v = 444$.

Thus the Fe-Nb-Ta-Co-Mo alloys "Recalloy" is practically suitable to the reed blade in remanent reed switch. Further, there is such a big merit that the expensive cobalt content in Recalloy is 1/2-1/4 as compared with that of semihard magnetic materials having most practical use.

(Received August 4, 1983)

Keywords: semihard magnetic alloy, iron based-alloy, Recalloy, rectangular magnetic hysteresis, remanent reed switch, thermal expansion, electrical resistivity, hardness, precipitation, fiber texture

I. 緒 言

著者および増本と村上は Fe-Nb 系⁽¹⁾⁽²⁾, Fe-Ta 系⁽³⁾, Fe-Mo 系⁽⁴⁾, Fe-W 系⁽⁴⁾, Fe-Nb-Co 系⁽⁵⁾ならびに Fe-Ta-Co 系⁽⁵⁾の Fe 側の合金について, 比較的高温度における γ 相あるいはその他の相領域から急冷し, ついで冷間加工を施した後, 再結晶開始温度付近から変態までの温度範囲で適当時間再加熱することにより角形性の良好な半硬質磁性が得られることを報告しておいた。これらの合金の内 Fe-Nb-Co 系および Fe-Ta-Co 系合金の諸特性は電子交換機の話路系におけるリマネントリードスイッチ⁽⁶⁾のリード片の要求する条件をほぼ満足しているが, それらの保磁力 H_c は必要とされている値 $1.6 \sim 3.2 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ ⁽⁶⁾ よりやや低い欠点を有している。そこで著者はその H_c を向上さ

せるために, 磁氣的硬化を發揮し得る Mo を添加した Fe-Nb-Co-Mo 系および Fe-Ta-Co-Mo 系合金についてさらに研究を進めた結果, 角形比 B_r/B_g および H_c が著しく増加するばかりでなく, 熱膨張係数 α_T もかなり改善されるなど, 従来の実用材にみられない多くの利点があることが明らかになった⁽⁷⁾⁽⁸⁾。その後さらに W を添加した Fe-Nb-Co-W 系および Fe-Ta-Co-W 系合金についても研究を続けたが, これらの特性も Mo を添加した合金の場合と類似していることがわかった⁽⁸⁾⁽⁹⁾。これら Recalloy† は合金に含まれている Co 量が実用材の $1/2 \sim 1/4$ であるため省資源的材料として大いに期待できるものと考えられる⁽¹⁰⁾。

しかしながら, Nb を含む Recalloy を工場規模で量産する場合には, 通常フェロニオブを用いるのが一般的である。ところが市販のフェロニオブ中にはかなりの量の不純物が含まれている。例えば JIS 規格によるフェロニオブ††

** 財団法人電気磁気材料研究所 (The Research Institute of Electric and Magnetic Alloys, Yagiyanaminami 2, Sendai)

* 1979 年 10 月日本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 137 号

† 角形 (Rectangular) 磁気履歴を有する Fe-Nb 系や Fe-Ta 系の Fe 側の合金 (Alloy) に名づけた名称。

†† JIS G2319

中に含まれる [Nb+Ta] 量の許容量は 60% 以上となっており, Ta 含有量も無視できないほどである. そこで著者は Nb と Ta の両元素を含んだ Fe-Nb-Ta-20%Co-3%Mo 5 元合金の諸特性およびフェロニオブの効果について研究を行った.

II. 試料ならびに実験方法

合金の原料は 2 元系合金⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ならびに 3 元系合金⁽⁵⁾で用いたのと同じ純度の電解鉄, 金属 Nb, 金属 Ta, 金属 Mo, 電解コバルトであった. そして一部の合金については金属 Nb の代りにフェロニオブを用いた. その化学分析値は Table 1 に示すとおりである.

金属 Nb を用いた試料は Fe-0~3%Nb-0~4%Ta-20%Co-3%Mo 合金の 16 種で, またフェロニオブを用いた試料は Fe-0.5~2%Nb-1.5~0%Ta-20%Co-3%Mo 合金の 4 種類であった†. 試料の製造法, 熱処理法および実験法は前報の Fe-Nb 系合金⁽¹⁾の場合と同様であったが, その概略を述べると, まず合金を真空中溶解铸造後, 鍛造により丸棒とし, ついで α - γ 変態点以上の温度 1323 K で 3.6 ks 間溶体化処理後水焼入れし, さらに減面率 97.2% の冷間線引をして直径 0.5 mm の細線とした. 最後にこれを 673~1273 K で 18 ks 間以下再加熱して試料とした. そしてその磁気, 熱膨張係数, 比電気抵抗およびビッカース硬さを測定し, 光学顕微鏡による組織観察ならびに X 線回折をも行った.

Table 1 Chemical composition of ferro-niobium used.

Metal	Nb	Ta	C	Si	P	S	Al	Sn	Fe
Mass%	64.13	4.34	0.045	1.760	0.067	0.020	0.005	0.110	rest

III. 実験結果および考察

1. 磁気特性

Fig. 1 は 1323 K で 3.6 ks 間溶体化処理後水焼入れし, ついで減面率 97.2% で冷間線引し, さらに 973 K で 1.8 ks 間再加熱した Fe-0~3%Nb-4~0%Ta-20%Co-3%Mo 合金の磁気特性 (16 kA $\cdot$ m⁻¹ における磁束密度 B_{16} , 残留磁束密度 B_r , 角形比 B_r/B_{16} , 角張率 $\sqrt{(BH)_{\max}/B_r H_c}$ および保磁力 H_c) と Nb 量との関係を示している. 図において —○—, —△—, —×— および …●… は [Nb+Ta] の総量がそれぞれ 1%, 2%, 3% および 4% に対する曲線である. B_{16} は Nb 量および [Nb+Ta] 量の増加とともにほぼ単調に減少するが, その値は 2.0~2.2 T で非常に高い. B_r は曲線 [Nb+Ta]=2% の Nb 1% の組成で極小を示すが, 一般にその変化は B_{16} と類似しておりその値は 1.8 T 以上で高い. B_r/B_{16} および $\sqrt{(BH)_{\max}/B_r H_c}$ は曲線 [Nb+Ta]=3% および 4% において, Nb 0~3% の組成範囲で

0.9 以上の高い値を示すが, [Nb+Ta] 量が少いと Nb 量に対して複雑に変化ししかも両者の値は小さい. また H_c は [Nb+Ta] 量および Nb 量に対して大きな変化はみられず, ほぼ 2 kA $\cdot$ m⁻¹ の値を示す.

つぎに Fig. 1 と同じ合金について, 磁気特性と Ta 量との関係が Fig. 2 に示してある. 図中の記号は Fig. 1 に示したものと全く同じである. B_{16} および B_r は [Nb+Ta] = 1~4% のいずれの曲線においても大体 Ta 量の増加とともに増加しており, Nb 量に対する変化 (Fig. 1 参照) と比較して著しく異っている. このように非磁性である Nb を同じく非磁性の Ta で置き換えるほど強磁性が増す理由は, Nb と Ta との原子量の差異が大きく寄与しているものと考えられる. すなわち曲線 [Nb+Ta]=3% において, 各元素を原子量で表わすと, Ta 0% の組成では約 1.8 原子% の Nb 量, Nb 0% の組成では約 0.9 原子% の Ta 量となり, 後者は前者の半分の原子% しか含んでいないため, それだけ B_{16} および B_r が増すわけである.

Fig. 3 は Nb と Ta を等量含んだ Fe-Nb-Ta-20%Co-3%Mo 合金 4 種について, 磁気特性と [Nb+Ta] 量との関係を示している. すなわち B_{16} および B_r は [Nb+Ta] 量とともに漸次減少するが, その量が 4% 以下の組成においてはそれぞれ 2.0 T および 1.8 T 以上の高い値を示す. B_r/B_{16} は [Nb+Ta]=1% において小さな極小値 0.88 を示す以外は一般に高い値である. $\sqrt{(BH)_{\max}/B_r H_c}$ は [Nb+Ta] 量が 2% までは緩やかに, その後急激に増加して

3% および 4% では 0.95 以上の極めて高い値を示す. また H_c については, [Nb+Ta]=2% において小さな極大を示すのみである. これはこれまで研究してきた Fe-Nb 系⁽¹⁾, Fe-Ta 系⁽³⁾, Fe-Mo 系⁽⁴⁾および Fe-W 系⁽⁴⁾合金には全くみられない特性である.

以上のように [Nb+Ta] 量を 3~4% 含む合金は, 角形性および角張性において優れておるだけでなく, B_r も高い値を示している.

Fig. 4 は Fig. 3 の合金の中で磁気特性の優れた Fe-1.5%Nb-1.5%Ta-20%Co-3%Mo 合金を選び, それについて Fig. 1~Fig. 3 と同様の水焼入れおよび冷間線引を施し, さらに 873~1173 K で再加熱した場合の磁気特性と再加熱時間との関係を示している. B_{16} , B_r および B_r/B_{16} は一般に再加熱時間とともにはじめ急激に増加し極大を経た後緩やかに減少するが, 再加熱温度が低い場合には, 0.12~0.6 ks 間の曲線にみられるような緩慢な変化を伴って増加する. また H_c は 873 K と 973 K で再加熱した場合にだけ, 極大が現われ, それより高い温度でははじめ急激に, その後緩やかに減少するだけである.

† 合金組成はすべて mass% で示す.

Fig. 1 Relation between magnetic properties and Nb content of Fe-0.3%Nb-4.0%Ta-20%Co-3%Mo alloys reheated at 973 K for 1.8 ks after water-quenching from 1323 K and subsequent cold-drawing to 97.2% reduction in area.

—○—: [Nb+Ta]=1%, —△—: [Nb+Ta]=2%,
—×—: [Nb+Ta]=3% and —●—: [Nb+Ta]=4%.

Fig. 5 は Fig. 4 の合金について、1.8 ks 間再加熱した場合の磁気特性と再加熱温度との関係を示す。図からわかるように B_{16} および H_c は 873 K, また B_r および B_r/B_{16} は 973 K に 1 つの極大を示している。873 K における H_c の極大値約 $2.4 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ はその線引状態および Fe-Nb-Co 系⁽⁵⁾と Fe-Ta-Co 系⁽⁵⁾合金に比較して、それぞれ $0.4 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ および $0.8 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ 大きい、Fe-Nb-Co-Mo 系⁽⁷⁾⁽⁸⁾ならびに Fe-Ta-Co-Mo 系⁽⁷⁾合金の約半分の値である。

Fig. 6 には Fig. 5 と同じ合金について最高磁界 $8 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ で測定した磁気履歴曲線が示してある。図から 973 K で再加熱した場合の磁気履歴曲線が冷間線引状態あるいは 973 K 以外の温度で再加熱した場合に比べて高い磁束密度を有し、しかも良好な角形性および角張性を示していることがわかる。ちなみに 973 K で 1.8 ks 間再加熱した場合の磁気履歴曲線から磁気特性を求めると、磁界 $8 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ における $B_8 = 1.96 \text{ T}$, $B_r = 1.86 \text{ T}$, $B_r/B_8 = 0.95$, $H_c = 1.89 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ および $\sqrt{(BH)_{\max}}/B_r H_c = 0.95$ である。

以上 Fig. 4~Fig. 6 から、Nb と Ta 両元素を含む合金の磁気特性は Fe-Nb-Co-Mo 系⁽⁷⁾および Fe-Ta-Co-Mo 系⁽⁷⁾合金と同様に再加熱の温度および時間に大きく依存し、 $H_c = 1.6 \sim 3.2 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ を必要とするリマネントリー

Fig. 2 Relation between magnetic properties and Ta content of Fe-0.3%Nb-4.0%Ta-20%Co-3%Mo alloys reheated at 973 K for 1.8 ks after water-quenching from 1323 K and subsequent cold-drawing to 97.2% reduction in area.

—○—: [Nb+Ta]=1%, —△—: [Nb+Ta]=2%,
—×—: [Nb+Ta]=3% and —●—: [Nb+Ta]=4%.

ドスイッチのリード片には 973 K で 1.8 ks 間再加熱した Fe-1.5%Nb-1.5%Ta-20%Co-3%Mo 合金が最適であることがわかる。

2. フェロニオブの効果

以上述べた磁気特性の良好な合金 Recalloy は高価で高融点の Nb および Ta を添加元素として用いた結果である。よってつぎには金属 Nb の代りに安価なフェロニオブを使用した研究の結果について述べよう。

実験は Fig. 1~Fig. 3 の Fe-Nb-Ta-20%Co-3%Mo 合金の内、[Nb+Ta]=2% 一定とし Nb 0.5~2% および Ta 1.5~0% の組成範囲の 4 種類の試料について行った。ここで [Nb+Ta]=2% を選んだ理由は [Nb+Ta]=3~4% の場合には磁気特性は優れていても加工性が劣っているからである。合金の水焼入れ、冷間加工および再加熱などの処理は Fig. 1 の合金の場合と全く同様である。

Fig. 7 は合金の磁気特性と Nb 量との関係を示している。図から磁気特性の変化は Fig. 1 における [Nb+Ta]=2% の曲線と類似しており、Nb 1% では B_{16} と B_r は極小また H_c は極大を示すが、それらの値は Nb 0~2% の組成範囲においてそれぞれ 2.0 T 以上、 1.8 T 以上および

Fig.3 Relation between magnetic properties and $[\text{Nb}+\text{Ta}]$ content of Fe-Nb-Ta-20%Co-3%Mo alloys containing equivalent niobium and tantalum, which were reheated at 973 K for 1.8 ks after water-quenching from 1323 K and subsequent cold-drawing to 97.2% reduction in area.

Fig.4 Magnetic properties of Fe-1.5%Nb-1.5%Ta-20%Co-3%Mo alloy reheated at 873 K (—○—), 973 K (—△—), 1073 K (—×—) and 1173 K (—●—) for various times after water-quenching from 1323 K and subsequent cold-drawing to 97.2% reduction in area.

1.6 kA·m⁻¹ 以上の高い値を示す。また B_r/B_{16} および $\sqrt{(BH)_{\max}/B_r H_c}$ はそれぞれ Nb 0.75~2% および Nb 0.5~2% において 0.9 以上の高い値を示す。特に Nb 1.5

Fig.5 Magnetic properties of Fe-1.5%Nb-1.5%Ta-20%Co-3%Mo alloy reheated at various temperatures for 1.8 ks after water-quenching from 1323 K and subsequent cold-drawing to 97.2% reduction in area.

Fig.6 Hysteresis loops of Fe-1.5%Nb-1.5%Ta-20%Co-3%Mo alloy reheated at various temperatures for 1.8 ks after cold-drawing to 97.2% reduction in area.

%を含む合金の磁気特性は総合的に判断して金属 Nb を使用した合金に劣らず極めて優秀である。

要するに金属 Nb の代りにフェロニオブを原料として用いると磁気特性はあまり変わらず、リマネントリードスイッチのリード片に要求される条件を十分に満足し、しかもその価格が安価になることがわかった。

3. 組 織

Fig.1~Fig.7 から Nb 0~3% および Ta 0~4% を含む Fe-Nb-Ta-20%Co-3%Mo 合金は 1.6~3.2 kA·m⁻¹ の H_c 、高い磁束密度、良好な角形性および角張性を有する半硬質磁性を示すことが明らかになったが、つぎにはその光学顕

Fig.7 Relation between magnetic properties and Nb content of Fe-0.5-2.0%Nb-1.5-0%Ta-20%Co-3%Mo alloys having ferro-niobium as a raw material, reheated at 973 K for 1.8 ks. The reheating was performed after water-quenching from 1323 K and subsequent cold-drawing to 97.2% reduction in area.

微鏡による組織観察およびX線回折による構造決定を行った。

Fig.8 および Fig.9 は磁気特性の良好な Fe-1.5%Nb-1.5%Ta-20%Co-3%Mo 合金について求めたそれぞれ組織およびX線回折の写真である。Fig.8 (a), (b) および (c) はそれぞれ線引状態, 973 K で 1.8 ks 間および 1273 K で 1.8 ks 間再加熱状態の試料 (直径 0.5 mm) の縦断面の組織である。また Fig.9 は Fig.8 (b) の試料面についてのX線回折写真で、矢印方向が繊維軸 (F.A.) である。明瞭なデバイ環のミラー指数は内側から (110), (200), (211) および (220) である。また金属間化合物に相当する回折線は写真からは判別できない。その理由は析出粒子の全量が少ないため回折線の強度が非常に弱いものと考えられる。Fig.8 および 9 から得られた結果はフェロニオブを用いた合金の場合についてもほぼ類似しており、前報⁽¹⁾⁽³⁾⁻⁽⁵⁾⁽⁷⁾⁽⁹⁾の結果と大きな違いは見い出せなかった。すなわち Fig.4~6 にみられるような再加熱による H_c の増加の原因は Fe-Nb 系, Fe-Ta 系および Fe-Mo 系の平衡状態図⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾から推察して、微細化した α 相のマトリックス中に過飽和な α 相から析出した非磁性金属間化合物 $Fe_2(Nb, Ta, Mo)$ の球状微粒子が多数分散して、磁壁をピン止めし、その移動を困難にするためであると考えられる[†]。またその良好な

† 組織と H_c との関連性については、例えば文献 (14) にも述べられている。

Fig.8 Microstructures on the longitudinal section of wires of Fe-1.5%Nb-1.5%Ta-20%Co-3%Mo alloy. (a) As cold-drawn to 97.2% reduction after water-quenching from 1323 K, (b) reheated at 973 K for 1.8 ks after the same treating as (a), and (c) reheated at 1273 K for 1.8 ks after the same treating as (a).

角形磁気履歴曲線は強度の冷間加工後の再加熱により、線引方向を $\langle 110 \rangle$ とする繊維組織が微細に発達し、繊維軸に近い容易磁化成分が増加することによるものと考えられる。また良好な角張性は繊維組織と析出物の分布状態に強く依存しており、析出物にピン止めされた多数の 180° 磁壁が H_c 近傍の極く狭い磁界内において一瞬の内に解放され、一斉に磁化反転が行われるために得られるものと考えられる。なお Fig.5 および Fig.6 における再加熱温度 1173 ~ 1273 K の範囲において B_{16} , B_r および B_r/B_{16} が急激に減少し、 H_c が増加する原因は前報⁽¹⁾⁽³⁾⁻⁽⁵⁾⁽⁷⁾⁽⁹⁾の場合と同様に繊維組織の崩壊と α - γ 変態に起因するものと考えられる。

最後に代表的な Fe-Nb-Ta-Co-Mo 合金 (Recalloy) の室温で得られた特性を、実用材の Remendur および Nibcolloy のそれと比較して示すと Table 2 のとおりである。

Recalloy の磁気特性についてみると、 B_8 と B_r は Remendur と同程度、 B_r/B_8 は Remendur や Nibcolloy と同程度、 H_c は Nibcolloy と同程度の値、また $\sqrt{(BH)_{\max}}/B_r H_c$ は Remendur の 0.85 に比し 0.95 の極めて高い値を示している。このように Recalloy の磁気特性は Remendur および

Nibcolloy の優れた長所を兼ね備えているので、高性能なリマネントリードスイッチのリード片の要求条件を十分に満たしているものと考えられる。また磁気特性以外については、 α_T が前報の合金⁽⁷⁾⁽⁹⁾よりさらに低下して $9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 以下の小さい値を示し Remendur のそれに近い値、リマネントリードスイッチのガラス封着に際しては、あまり特殊なガラスを使用しなくともよく、Remendur を用いる場合の製造工程の一部を利用できるものと考えられる。 ρ は Remendur および Nibcolloy の中間の値で、ビッカース硬さ H_v は約 400 以上の比較的高い値を示し、リード片のばね性を得るためには十分である。なお Recalloy は Co 含有量が少ないことと、フェロニオブを用いても磁気特性には大きな影響がなく、材料費が比較的安価となるなどの特長があるため、高 Co 半硬質磁性材料の代替材料としての可能性が期待できる。

IV. 総 括

Fe-0~3%Nb-4~0%Ta-20%Co-3%Mo 合金について、真空中溶解鋳造後、鍛造により丸棒とし、ついで α - γ 変態点以上の温度 1323 K で加熱し、溶体化した後水焼入れした。そしてさらに冷間線引により減面率 97.2% の細線(直径 0.5 mm)となし、これを 673~1273 K で 18 ks 以下の時間再加熱して、その磁気特性、熱膨張係数 α_T 、比電気抵抗 ρ およびビッカース硬さ H_v を測定し、組織観察および X 線回折を行ってつぎの結果を得た。

(1) Fe-Nb-Ta-Co-Mo 合金の磁気特性 (B_8 または B_{16} 、 B_r 、 H_c 、 B_r/B_8 または B_r/B_{16} ならびに $\sqrt{(BH)_{\max}}/B_r H_c$) は

Table 2 Properties of Fe-Nb-Ta-Co-Mo alloys, Remendur and Nibcolloy.

Composition (Rest Fe)					B_8 T	B_r T	B_r B_8	H_c kA·m ⁻¹	$\sqrt{(BH)_{\max}}$ $B_r H_c$	α_T 273- 313 K 10^{-6} K ⁻¹	ρ Room temp. $\mu\Omega \cdot \text{m}$	H_v at 1.96 N	Remarks ^(d)	Refer- ences
Nb	Ta	Co	Mo	W	mass%									
3	—	20	—	—	1.95	1.80	0.92	1.10	0.94	11.0	0.206	345	1323 K WQ→97.2%C. Red →973 K for 1.8 ks RH	(5)
—	3	20	—	—	2.03	1.84	0.92	1.08	0.94	10.5	0.205	350		(5)
2	—	20	3	—	2.01	1.91	0.95	2.08	0.91	9.5	0.274	394		(7), (8)
—	3	20	3	—	2.05	1.95	0.95	2.13	0.93	10.1	0.234	429		(7)
2	—	20	—	5	1.97	1.85	0.94	1.84	0.94	9.8	0.263	404		(9)
—	3	20	—	5	2.02	1.89	0.94	2.03	0.94	9.3	0.234	446		(8), (9)
1.5	1.5	20	3	—	1.96	1.86	0.95	1.89	0.95	9.0	0.262	391		Presented
1.5	0.5	20	3	—	2.00	1.86	0.93	1.73	0.95	8.8	0.265	444		Presented
Remendur					2.10	1.83	0.87	2.0	0.85 ^(a)	10.3 ^(b)	0.421 ^(a)	481 ^(a)	1093 K WQ→97%C. Red →973 K for 0.36 ks RH	(15), (16)
V 2~4	—	49	—	—	1.92	1.84	0.96	3.6						
Nibcolloy					1.56	1.45	0.93	1.6	0.91 ^(a)	12.5 ^(c)	0.14 0.16	340 440	1373 K ST→90%C. Red →973K for 3.6 ks RH	(17), (18)
Nb 3~5	—	rest	Fe 12~15	—	1.50	1.43	0.95	2.6						

(a) presented, (b) 303-823 K, (c) 303-653 K, (d) WQ: water-quenched, ST: solution treated, C.Red: cold reduction in area, and RH: reheated.

Nb 量, Ta 量, 再加熱の温度および時間に強く依存する。そして B_{16} および B_r は $[\text{Nb} + \text{Ta}]$ 量の増加とともに単調に減少し $[\text{Nb} + \text{Ta}] = 4\%$ においてそれぞれ 2.0 T および 1.8 T 以上の高い値, B_r/B_{16} および $\sqrt{(BH)_{\max}/B_r H_c}$ は $[\text{Nb} + \text{Ta}] = 2 \sim 4\%$ の組成において 0.9 以上の高い値および H_c は $[\text{Nb} + \text{Ta}] = 2\%$ において極大値 $2.3 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ を示す。

(2) 原料に金属 Nb の代りにフェロニオブを使用した合金の場合には, Nb 1% の組成において B_{16} と B_r は極小および H_c は極大を示すが, それらの値は Nb $0 \sim 2\%$ の組成範囲でそれぞれ 2 T 以上, 1.8 T 以上および $1.6 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ 以上で高い。また B_r/B_{16} および $\sqrt{(BH)_{\max}/B_r H_c}$ はそれぞれ Nb $0.75 \sim 2\%$ および Nb $0.5 \sim 2\%$ において 0.9 以上の高い値を示す。

(3) Fe- 1.5% Nb- 1.5% Ta- 20% Co- 3% Mo 合金について, 1323 K から水焼入れし, ついで 97.2% の冷間線引した後, 973 K で 1.8 ks 間再加熱した場合の特性は, $B_8 = 1.96 \text{ T}$, $B_r = 1.86 \text{ T}$, $B_r/B_8 = 0.95$, $H_c = 1.89 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$, $\sqrt{(BH)_{\max}/B_r H_c} = 0.95$, $273 \sim 313 \text{ K}$ における $\alpha_T = 9.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\rho = 0.262 \mu\Omega \cdot \text{m}$ および $H_v = 391$ である。

(4) フェロニオブを原料に使用した Fe- 1.5% Nb- 0.5% Ta- 20% Co- 3% Mo 合金を 1323 K から水焼入れし, ついで 97.2% の冷間線引した後, 1023 K で 0.6 ks 間再加熱した場合の特性は, $B_8 = 2.00 \text{ T}$, $B_r = 1.86 \text{ T}$, $B_r/B_8 = 0.93$, $H_c = 1.73 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$, $\sqrt{(BH)_{\max}/B_r H_c} = 0.95$, $\alpha_T = 8.8 \times 10^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\rho = 0.265 \mu\Omega \cdot \text{m}$ および $H_v = 444$ である。

(5) Fe-Nb-Ta-Co-Mo 系合金 Recalloy は単独で従来の実用材料である高 Co 半硬質磁性合金の高い B_r , 良好な角形性と角張性を兼ね備えており, さらに熱膨張係数が実用材料のそれに近いのであまり特殊な封着用ガラスを用いなくともよいものと考えられ, その上含有されている高価な Co 量が実用材料に比較して $1/2 \sim 1/4$ で非常に少ないばかりでなく, 安価なフェロニオブを原料として使用しても特性

にさほどの影響がみられないので, 応用上優れた材料を提供できるものと考えられる。

終りに, 本研究を進めるに当り終始懇切なる御指導ならびに御助言を賜った東北学院大学工学部教授 阿部 健博士, 同学教授 遠藤義夫博士, 東北大学名誉教授 当研究所所長 増本 量博士, 当研究所研究部第2研究室長 村上雄悦博士ならびに試料の製造に御協力下さった当研究所試作部の各氏に対し深く感謝の意を表する。

文 献

- (1) 増本 量, 村上雄悦, 中村直司: 日本金属学会誌, **41** (1977), 1014; Trans. JIM, **19** (1978), 191.
- (2) 未踏加工技術協会編: 新時代の磁性材料, 工業調査会, (1981), 97.
- (3) 増本 量, 村上雄悦, 中村直司: 日本金属学会誌, **42** (1978), 280.
- (4) 増本 量, 村上雄悦, 中村直司: 日本金属学会誌, **43** (1979), 506.
- (5) 増本 量, 中村直司, 村上雄悦: 日本金属学会誌, **42** (1978), 960.
- (6) 川口寅之輔, 山元 洋: 金属, **44** (1974), 30.
- (7) 中村直司: 日本金属学会誌, **44** (1980), 461.
- (8) 機能材料入門・上巻, 本間基文, 北田正弘編, フグネ, (1981), 88.
- (9) 増本 量, 中村直司, 村上雄悦: 日本金属学会誌, **45** (1981), 1271.
- (10) 増本 量, 村上雄悦, 中村直司: 金属, **49** (1979), 63.
- (11) R.Genders and R.Harrison: J.Iron Steel Inst., **140** (1939), 29.
- (12) A.K.Sinha and W.Hume-Rothery: J.Iron Steel Inst., **205** (1967), 671.
- (13) A.K.Sinha, R.A.Buckley and W.Hume-Rothery: J.Iron Steel Inst., **205** (1967), 191.
- (14) J.W.Shilling and W.A.Soffa: Acta Met., **26** (1978), 413.
- (15) 飯田三郎, 味岡恒夫: 沖電気研究開発, **41** (1975), 73.
- (16) 日本国特許 特公昭 43-25818.
- (17) 岡田正法, 葛西 誠, 鈴木悠一, 佐々木達治, 辺見善三: 日本金属学会誌, **35** (1971), 942; Trans. JIM, **13** (1972), 391.
- (18) 辺見善三: 金属, **48** (1978), 4.