(Fe_{0.6}-Co_{0.4})_{100-X}M_X (M=金属, 半金属) 合金の結晶構造と磁気特性

Crystal Structures and Magnetic Properties of (Fe_{0.6}-Co_{0.4})_{100-X}M_X
(M=Metal, Semimetal) Alloys

青山信秀・楊 興波・宮崎照宣

東北大学工学部, 仙台市青葉区荒巻字青葉 (〒980)

N. Aoyama, X. Yang and T. Miyazaki

Faculty of Engng., Tohoku Univ., Aoba, Aramaki, Sendai 980

Crystal structures and magnetic properties of (Fe_{0.6}Co_{0.4})_{100-X}M_X (M=Ti, V, Zr, Nb, Y, Cu, Pt, Al, Si, Ge; X=0~10) alloys annealed at 900°C were investigated. The crystal structures are b. c. c. for M=V, Nb, Y, Cu, Pt, a mixture of b. c. c. and f. c. c. for M=Ge, X=2~4, and b. c. c. plus unidentified structures for M=Ti, Zr. The saturation magnetic flux density B_s decreases extremely for M=Ti, Nb, Ge, decreased slightly for M=Al, Si and remains unchanged for M=Pt. The saturation magnetostriction increases up to $\sim 10^{-4}$ for M=Pt, increases slightly for M=Cu, Ti, Zr, X=2 and decreases slightly for other M elements. The saturation magnetostriction constants λ_s are roughly proportional to B_s^2 .

Key words: high saturation magnetic flux density, saturation magnetostriction, Fe-Co-M alloy

1. はじめに

磁気記録の高密度化に伴い、高飽和磁束密度を有する軟磁性薄膜の研究が、特にFe基合金を中心に盛んに行われている¹⁾。Fe-Co合金はバルク状態で最大の飽和磁束密度($B_s=2.4$ T)を有し²⁾、高飽和磁束密度軟磁性薄膜を開発する上で重要である。結晶磁気異方性はCoが約40 at%の組成において零になる²⁾。しかし、 $\lambda_s \sim 10^{-5}$ と大きな磁歪を有する²⁾ために軟磁性化が困難である。したがって、Fe₆₀Co₄₀合金を軟磁性化するためには、磁歪の低減³⁾が必要である。

実用的には薄膜状態で高飽和磁束密度を有し軟磁性を示すことが大切であるが、多くの元素添加の磁性への影響を調べようとした場合、薄膜生成に時間がかかること、また、薄膜の生成条件によって、構造、組織が敏感に磁気特性に影響し、添加元素の影響が不明瞭になることが予想される。そこで、本論文ではFe₆₀Co₄₀合金に0~10 at%の金属(M=Ti, V, Zr, Nb, Cu, Y, Pt)、半金属(M=Al, Si, Ge)を添加したバルク合金を作製し、その構造、飽和磁化、磁歪、保磁力に及ぼす元素添加の影響を

調べた結果について報告する。

2. 実験方法

試料は、真空溶解したFe₆₀Co₄₀合金に、M=Ti, V, Zr, Nb, Cu, Y, Pt, Al, Si, Geをそれぞれ0~10 at%加え、アーク溶解を4回繰り返して、約1 ccのボタン状にした。これをセラミックカッターで、構造解析用(10×5×1 mm³)、磁気測定用(3×1×1 mm³)、磁歪測定用(7×1×0.4 mm³)にそれぞれ切り出し成形した。熱処理は約5×10⁻⁵ Torrの真空中で900°C、10時間行った。昇降温速度は100 K/hとした。構造解析にはX線ディフラクトメータ(Cu-K α 線源)を用いた。飽和磁化、保磁力はVSM(最大印加磁界16 kOe)で測定した。磁歪は三端子容量法(最大印加磁界20 kOe)で測定した。

3. 実験結果ならびに考察

3.1 構造

添加元素濃度と結晶構造との関係をFig. 1に示す。M=V, Nb, Y, Cu, Pt, Al, Siの場合にはいずれの組成においてもb. c. c.の単相となる。Geを2~4 at%添加した場合にはb. c. c.とf. c. c.の混相になり、6~10 at%添加した場合にはb. c. c.の単相となる。このf. c. c.相はFeの γ 相が残存したものと思われ、焼鈍温度と昇降温速度の構造に及ぼす影響についてさらに検討する必要がある。Ti, Zrを添加した場合には添加元素濃度の増加とともにFe-CoとTi, Zrとの金属間化合物によると思われるピークが現れる。

b. c. c.構造の(110), (200), (211)のピークから求めた格子定数 a と添加元素濃度との関係をFig. 2に示す。M=Ti, Vの場合には2 at%の添加で a が減少し、添加元素濃度 X を増すに従って増大していく傾向がある。M=Nb, Si, Geの場合には X の増加とともに a がゆるやかに減少する。M=Ptの場合には a が大きく増大する。

Fig. 1 Dependence of the crystal structure on the content M for $(\text{Fe}_{0.6}\text{Co}_{0.4})_{100-x}\text{M}_x$ alloys.

Fig. 2 Dependence of the b. c. c. lattice constant on the content M for $(\text{Fe}_{0.6}\text{Co}_{0.4})_{100-x}\text{M}_x$ alloys.

3.2 磁気特性

添加元素濃度と飽和磁化との関係を Fig. 3 に示す。Ti, Zr, Nb などの遷移金属添加による飽和磁化 σ_s の減少が著しいのに対して、Al, Si などの半金属添加による σ_s の減少は小さい。添加元素濃度と 1 原子当たりの磁気

Fig. 3 Dependence of the saturation magnetization σ_s on the content M for $(\text{Fe}_{0.6}\text{Co}_{0.4})_{100-x}\text{M}_x$ alloys.

モーメントの変化の割合との関係を Fig. 4 に示す。グラフには、点線および一点鎖線でそれぞれ Fe, Co の不純物効果⁴⁾による磁気モーメントの変化の割合についても併せて載せている。M=Ti, Ge の場合には Fe の不純物効果に比べて磁気モーメントの減少が著しい。これに対して M=Al, Si の場合は、Fe の不純物効果に近い。M=V の場合には V が低濃度の領域で、Fe と Co の両方の不純物効果を反映している。M=Pt の場合には、Fe の不純物効果から磁気モーメントの増大が期待されるが Pt の添加によって μ はほとんど変化していない。

いずれの元素添加においても添加元素濃度を増やしていくと Fe の不純物効果に比べて磁気モーメントの減少の割合が大きい。このことから、Fe-Co 系のように合金を作ることによって磁気モーメントが増大している系に第三元素を添加して軟磁性化を計る場合には高飽和磁束密度の点から添加元素濃度を 5 at% 以下に低く押える必要がある。

添加元素濃度と飽和磁歪 λ_s との関係を Fig. 5 に示す。Pt の添加によって λ_s は 75×10^{-6} から $110 \sim 120 \times 10^{-6}$ へと大きく増大する。M=Ti, Zr, Cu の場合には、2 at% 添加した付近で λ_s がやや増加し、添加元素濃度の増加とともに減少する。半金属を添加した場合には λ_s の変化が比較的小さい。

飽和磁束密度 B_s と飽和磁歪 λ_s との関係を Fig. 6 に示

Fig. 4 Dependence of the reduced magnetic moment on the content M for $(\text{Fe}_{0.6}\text{Co}_{0.4})_{100-x}\text{M}_x$ alloys. ---, —, Fe-M alloys⁴⁾; ----, Co-M alloys⁴⁾.

す。曲線は $\lambda_s \propto B_s^2$ でフィッティングしたものである。半金属や Pt を添加した場合には B_s の高いところで曲線からずれるが、遷移金属を添加した場合には曲線に比較的よくのっている。このことから、高飽和磁束密度を維持したまま飽和磁歪を減少させることは困難であるといえる。

保磁力 H_c についてみると $\text{Fe}_{60}\text{Co}_{40}$ 合金で約 10 Oe であり、 $M=\text{Nb}, \text{Y}, \text{Pt}$ の場合、2 at% の添加により 40 ~ 100 Oe に増大した。 $M=\text{Ti}, \text{V}, \text{Zr}$ の場合には添加元素濃度を増すに従って、ゆるやかに H_c が増大した。また、 $M=\text{Al}, \text{Ge}$ の場合には H_c はほとんど変化しなかった。 H_c を支配する要因として、結晶磁気異方性、磁歪、金属組織などが考えられる。本研究の結果からは、 H_c と λ_s との間に明確な対応関係がみられなかったが、これは結晶粒の大きさとそれに伴う実効的な磁気異方性ならびに金属組織などが複雑に磁化機構に関与しているためであると思われる。

4. ま と め

$(\text{Fe}_{0.6}\text{Co}_{0.4})_{100-x}\text{M}_x$ ($M=\text{Ti}, \text{V}, \text{Zr}, \text{Nb}, \text{Cu}, \text{Y}, \text{Pt}, \text{Al}, \text{Si}$,

Fig. 5 Dependence of the saturation magnetostriction λ_s on the content M for $(\text{Fe}_{0.6}\text{Co}_{0.4})_{100-x}\text{M}_x$ alloys.

Fig. 6 Relationship between saturation magnetostriction constant λ_s and saturation magnetization B_s . Solid line shows $\lambda_s = 1.7 \times 10^{-13} B_s^2$.

Ge; $x=0 \sim 10$) 合金の構造と磁気特性についてバルク試料を用いて調べた。合金の構造は Ge の 2~4 at% 添加により b.c.c. と f.c.c. の混相となり、Ti, Zr の添加により Fe-Co と添加元素との金属間化合物になった。その他の元素を添加した場合には b.c.c. 単相となった。飽和磁化は遷移金属の添加により大きく減少し半金属の添加による減少は小さかった。Pt の添加によって磁気モーメントは変化しなかった。磁歪は、 $M=\text{Ti}, \text{Zr}, \text{Cu}$ の 2

at% 添加によってやや増加し、添加元素濃度を増やすに従って減少する傾向があった。Pt の添加により磁歪は $\lambda_s \sim 10^{-4}$ と大きく増大した。飽和磁束密度 B_s と飽和磁歪 λ_s との間には、 $\lambda_s \propto B_s^2$ の関係がみられた。

謝 辞 Fe₆₀Co₄₀ 合金を真空溶解してくださった電磁研の門脇静穂氏に感謝致します。

文 献

- 1) 島津武仁, 酒井康志, 高橋 研, 脇山徳雄, 平賀賢二: 日本応用磁気学会誌, **15**, 351 (1991).
- 2) R. M. Bozorth: "Ferromagnetism", D. van Nostrand Co. (1951), pp. 195, 664, 572.
- 3) T. Yamamoto and H. Chiba: *J. Japan Inst. Metals*, **14-b**, No. 2, 21 (1950).
- 4) 近角総信, 太田恵造, 安達健五, 津屋 昇, 石川義和: 「磁性体ハンドブック」, 朝倉書店, 東京 (1975), p. 305.

1991 年 11 月 12 日受理, 1992 年 1 月 30 日採録