

## 歯科鑄造した Fe-Pt 系磁石合金の磁気特性

Magnetic Properties of Hard Magnetic Fe-Pt Alloys in Dental Casts

中山孝文・渡辺雅人・本間基文\*・菅野太郎\*\*・木村幸平\*\*・奥野 攻\*\*

(財)電気磁気材料研究所, 仙台市太白区八木山南 2-1-1 (☎982)

\*東北大学工学部, 仙台市青葉区荒巻字青葉 (☎980-77)

\*\*東北大学歯学部, 仙台市青葉区星陵町 4-1 (☎980-77)

T. Nakayama, M. Watanabe, M. Homma,\* T. Kanno,\*\* K. Kimura,\*\* and O. Okuno\*\*

Research Institute for Electric and Magnetic Materials, 2-1-1 Yagiya-minami, Taihaku-ku, Sendai 982

\*Faculty of Engineering, Tohoku Univ., Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-77

\*\*School of Dentistry, Tohoku Univ., 4-1 Seiry-cho, Aoba-ku, Sendai 980-77

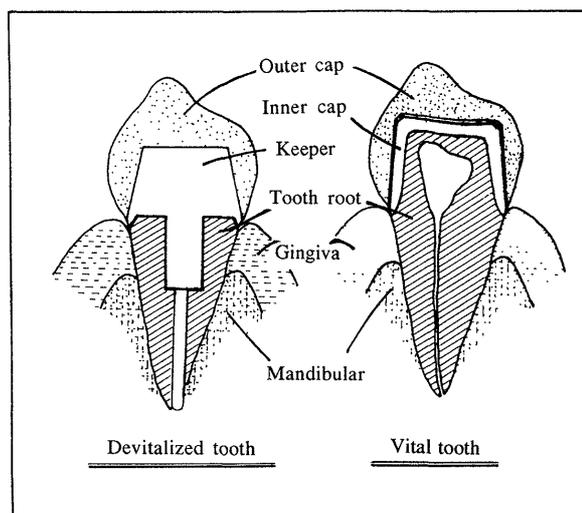
Application of a hard magnetic alloy, Fe-39.5%Pt-0.75%Nb, to dental parts such as crowns and bridges, was investigated. The material has excellent magnetic properties and corrosion resistance. All of the samples were produced by the dental casting method, and the optimum conditions for producing good hard magnets for crowns and bridges were determined. The results obtained were as follows: Casting by means of alumina and magnesia investment showed good results as regards the surface roughness of alloys. The alloys made by dental casting showed energy products as high as 15 MGOe. The attractive force was in the range from 600 to 700 gf, which is required in applications for removable dental parts.

**Key words:** Fe-Pt alloys, dental cast, magnetic properties, surface roughness, attractive force, crowns and bridges

### 1. はじめに

Fe-Pt 系合金の磁石特性は, Graf と Kussmann によって初めて測定され, 化学量論組成の FePt において約 1.8 kOe の保磁力が報告されている<sup>1)</sup>. その後, 規則相が  $7 \times 10^7 \text{ erg} \cdot \text{cc}^{-1}$  のように非常に大きな結晶磁気異方性を有することが報告され<sup>2)</sup>, 永久磁石材料として高い保磁力が得られることが期待された. 他方, 本系合金と同じ構造を有する Co-Pt 系合金も, ほぼ同時期に研究され, この合金の場合, 結晶磁気異方性が一桁低いにもかかわらず, 約 10 MGOe に及ぶ最大エネルギー積  $(BH)_{\text{max}}$  が得られた<sup>3)</sup>が, Fe-Pt 系合金においては, 磁化が低く, かつ, 保磁力も約 2 kOe 以下であったため,  $(BH)_{\text{max}}$  は 2.9 MGOe 程度の値にとどまっていた. この原因は, 不規則-規則相変態点が 1300°C と非常に高いため, 均一な不規則相が得られないためと考えられた. そこで著者らは, 不規則-規則相変態点が低下し, 飽和磁化が高くなる, Fe-40 at%Pt 付近の組成を選び, 詳細に検討した結果, SmCo<sub>5</sub> 系磁石に匹敵する高い  $(BH)_{\text{max}}$  を示す磁石合金を得た<sup>4)</sup>. さらに, 著者らの一人は, この合金が非常に優れた耐食性を有することを見だし<sup>5)</sup>, 医用, 特に歯科補綴用材料として有望であることを示唆した<sup>6)</sup>.

現在, 歯科補綴の分野で用いられている歯科用磁性アタッチメントは, Sm-Co 系あるいは Nd-Fe-B 系磁石をステンレス鋼で密封した構造をとるため, 鑲着などの方法が使えないこ



**Fig. 1** Schematic diagrams of dentures made of a magnetic alloy (outer cap) for vital and devitalized teeth.

と, あるいは寸法適合性や磁性ステンレス鋼の口腔内環境における耐食性などが問題視されている. これらの問題を解決するため, 著者らは, Fig. 1 に示したように, 外冠 (outer cap) 自体が磁石合金からなる可撤式クラウン・ブリッジの作製を考え, 歯科精密鑄造法による対応の可能性を探ることとした. すなわち, 本研究は, 歯科鑄造法によって, クラウン・ブリッジへの応用が可能な磁石合金の開発を目的とし, Fe-Pt 系合金の鑄造性, 磁気特性ならびに吸引力などの基礎的な特性を検討することに加え, 最適な鑄造条件を探るため, 鑄造時に用いる埋没材の材質が諸特性に与える影響, ならびに鑄型温度依存性について調べた結果である.

### 2. 実験方法

実験に用いた試料には, 最大特性を有する Fe-39.5 at%Pt-0.75 at%Nb 合金を選択した<sup>4)</sup>. 原料には純度 99.993% の電解鉄, 純度 99.9% 以上の Pt, および純度 99.9% 以上の Nb を用いた. これらを全量 25 g になるように秤量し, アルゴン雰囲気中でアーク溶解して母材とし, 歯科鑄造に供した. 歯科鑄造では, 初め, ワックスを用いて鑄造模型を成形する. 本実験においては, 大白歯のクラウンの咬合面を想定し, 表面粗さおよび

Table 1 Compositions and mold temperatures during casting for six kinds of investment

Investment	Simpler form	Mold temperature(°C)	Contents
Selevest C&B	SV	200	MgO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZrO <sub>2</sub>
Titavest C&B	TV	600	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO
Titan mold	TM	800	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZrO <sub>2</sub> , MgO
Titan-Crown master	TC	R.T.*	SiO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub> , MgO
T-Invest C&B	TI	R.T.*	SiO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub> , MgO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Univest non-precious	UV	800	SiO <sub>2</sub> , Cristobalite

\*R.T. : room temperature

吸引力測定に用いる直径  $\phi=10$  mm, 厚さ  $t=2.1$  mm の円板状試料, および, 磁気測定に用いる直径  $\phi=2$  mm, 長さ  $l=20$  mm の棒状試料に対応した2種類を作成し, これらを  $\phi=3.2$  mm のランナーバーに植立し, 鑄型を形成する埋没材中に埋めこみ, 焼成した。

Table 1 には, 鑄造に用いた6種類の埋没材の名称, 各々の製造元の指定する鑄造時鑄型温度および構成成分が示してある。これらの埋没材は, 高融点合金, 特にTi合金用に開発されたものであるため, その熱特性が本系合金に与える影響は明らかでない。なお, 本文では表中に記した略号によってそれぞれを示した。鑄造には, 高周波溶解炉とガス圧迫鑄造機を組み合わせた歯科用精密鑄造装置を使用し, 各種埋没材および各鑄型温度ごとに, 同一組成の試料3個を作成した。鑄造後は室温まで徐冷し, プラスター処理によって埋没材を除去した。熱処理は, 試料を不透明石英管中に真空封入して行った。溶体化処理は1325°Cで行い, 0.5h保持後, 氷塩水中に焼入れた。ついで, 所定の温度で時効処理を施した。表面粗さは, 表面形状測定装置を用い, 円板状試料の中心線平均粗さ  $R_a$  と最大高さ  $R_{max}$  を測定し, 同一組成の3試料について求めたものの平均値を算出した。磁気特性は, 直流自記磁束計を用い, 時効処理を施した棒状試料により, 外部磁場20kOeで測定した。上記の円板状試料を時効処理後, 片面を鏡面研磨した状態で, 円板の直径方向に外部磁場24kOeを作用させて2極着磁した。吸引力の試験は, 鏡面研磨した磁性ステンレス鋼(SUSXM27; Fe-26%Cr-1%Mo合金)から円板状試料が離れる瞬間の応力を精密引張試験機によって測定し, その値を吸引力とした。

### 3. 実験結果および考察

Fig. 2 は, 棒状試料を時効処理した場合の磁気特性の変化を示している。これらの変化は, 渡邊によって報告された結果<sup>4)</sup>と同じ傾向を示すが, ここに示した鑄造体ではいずれも絶対値が20~30%低い値を示している。これは, 鑄造体の場合, 凝固後の冷却時間が長いこと, 結晶粒の粗大化が著しく, 結晶方位による磁気特性の影響が顕著になるためと考えられる。すなわち, 著者らの二人による本系合金薄膜の実験では,  $c$  軸方向に強く配向した試料において30MGOeに及ぶ  $(BH)_{max}$  が得られることが示された<sup>7)</sup>が, 鑄造体では結晶配向が平均化される。また, 凝固時に, 合金と埋没材の熱膨張の相違などに由来する大

きな引張応力が作用することも知られており<sup>8)</sup>, これらが原因となって, 渡邊と異なった結果が得られたものと考えられる。

Fig. 3 は, 本系合金を640°Cで9時間時効処理後の磁気特性を示している。(a)は埋没材依存性を, その結果を参考に, (b)はTVを用いた場合の鑄造時温度依存性である。磁気特性に及ぼす埋没材の影響は, 総体的には明らかではない。なお, TCにおける磁気特性の顕著な劣化は, Table 1 に示したようにTCがシリカを多く含むため, 高温において本系合金と反応し, 発生したガスなどが湯中に巻き込まれた結果生じた鑄造欠陥が原因と考えられる。次に, TVを用い, 鑄造温度を変えた場合, 磁気特性は室温から温度が上昇するに伴って改善される傾向を示すが, 800°Cでは低下する。鑄造温度が600°Cの時に最も高い特性を示し,  $H_c$  が3.8kOe,  $4\pi I_r$  が9.96kGで  $(BH)_{max}$  は15.3MGOeの値が得られた。なお, (a)に示したTVにおける結果が上記の値よりも低いのは, 鑄造時の湯温に関わるものと考えられる。すなわち, 埋没材依存性を調べた実験において湯残りを生じた例があったため, (b)では湯温の高い状態で鑄造した。大きな温度差の下で, 棒状試料の鑄造組織が微細化し, 良好な磁気特性が得られたものと考えられる。

さて, Fig. 1 に示したクラウン・ブリッジの形態をとる場合, 磁石構造体による外冠と磁性ステンレスによる内冠(keeperあるいはinner cap)は精密な寸法精度によって組み合わせられているため, 表面粗さは非常に重要な要素であり, より

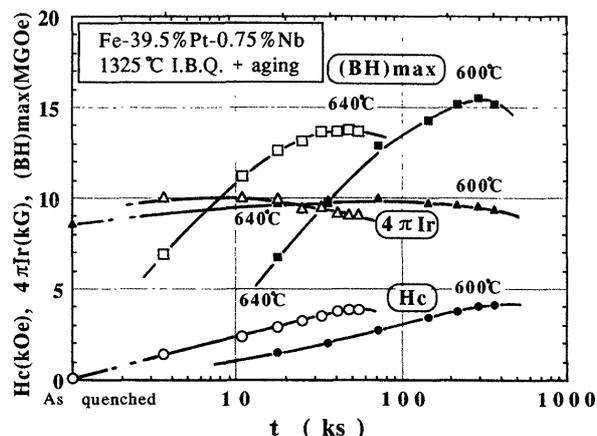


Fig. 2 Dependence of the aging time on the magnetic properties of an Fe-39.5%Pt-0.75%Nb alloy.

平滑な表面状態が望まれる。

Fig. 4には、鑄造体の表面粗さを比較して示した。(a)は埋没材依存性を、(b)はTVを用いた場合の鑄造時温度依存性である。図中、UVは比較材としてNi-Cr合金を鑄造した結果である。TCでは、磁気特性で見たように、埋没材と合金が反応し、いわゆる焼き付きを起こした結果、表面粗さは非常に劣化している。それに対し、TVを用いた場合は $R_a$ が $1.2\mu\text{m}$ 、 $R_{\text{max}}$ が $12.9\mu\text{m}$ のように小さく、最も平滑な表面が得られている。また、TVを用い、鑄造時の温度を室温から $800^\circ\text{C}$ まで変化させた場合、鑄造体の表面粗さが比較材を超えることはなかった。なお、埋没材を焼成後、その温度を室温まで冷却すると、その過程で吸収した大気中の水分が、鑄造時の急激な温度上昇によって分解し、鑄造体の酸化などの悪影響を及ぼすものと考えられ、低い埋没材温度を選択する場合は注意が必要である。鑄造時の埋没材温度が室温の場合、良好な結果が得られなかったのは上記の理由によるものと思われる。最も良好な結果は $800^\circ\text{C}$ で得られ、 $R_a$ が $1.0\mu\text{m}$ 、 $R_{\text{max}}$ が $9.5\mu\text{m}$ である。

以上の結果から、アルミナ、マグネシア系の骨材によって構成される埋没材を使用し、本系合金に最適な鑄型温度ならびに鑄造後の冷却速度を選択することによって良好な結果が得られることがわかった。

磁性ステンレスに対する吸引力については、Table 2 に示し

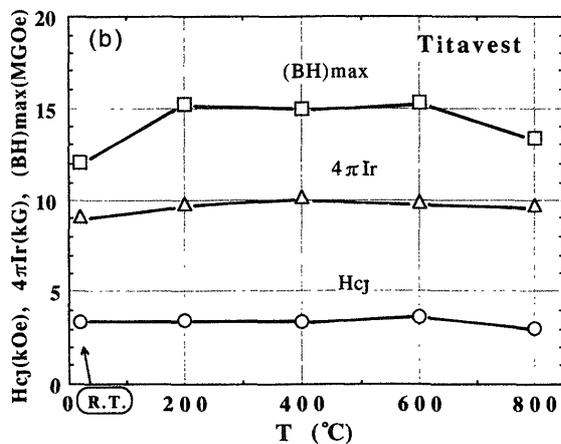
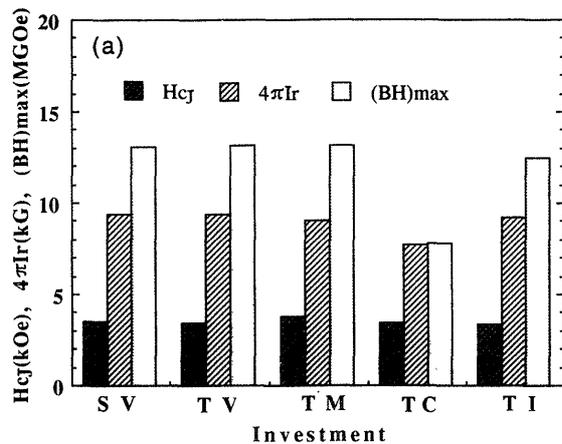


Fig. 3 Dependence of (a) the kind of investment and (b) the Titavest mold temperature on the magnetic properties of the cast Fe-39.5%Pt-0.75%Nb alloy.

てある。吸引力は、作用面を通過する磁束密度の2乗に比例する<sup>9)</sup>ため、鑄造体の内部構造に影響を与える多くの因子に依存する。ここでは、埋没材の他に、試料形状や着磁形態、ならびに試料の結晶粒径と配向性などによって変化すると考えられ、そのために値がかなり上下している。本実験ではTVにおいて最も強力な700 gfが得られた。また、TVを用い、鑄造時温度を変えた場合、温度の影響は明確でなく、平均して600 gf程度の値となっている。歯科補綴の分野において、磁性アタッチメントの吸引力は約500 gf以上<sup>8)</sup>、また、コーンスクローネの維持力は500~1000 gf<sup>9)</sup>が必要であるとされており、大臼歯のクラウンの咬合面を想定した本系合金試料において上記の値が得られたことは、体積の大きな外冠自体を磁石合金で作製するという発想による、Fe-Pt系合金の応用の可能性は十分高いものと考えられる。

#### 4. まとめ

以上の結果をまとめると、

(1) Fe-Pt系磁石合金は歯科鑄造が可能であり、アルミナおよびマグネシア系埋没材を用いることによって、表面が平滑な鑄造体を得られた。

(2) 歯科鑄造によって作製されたFe-Pt系合金の磁気特性

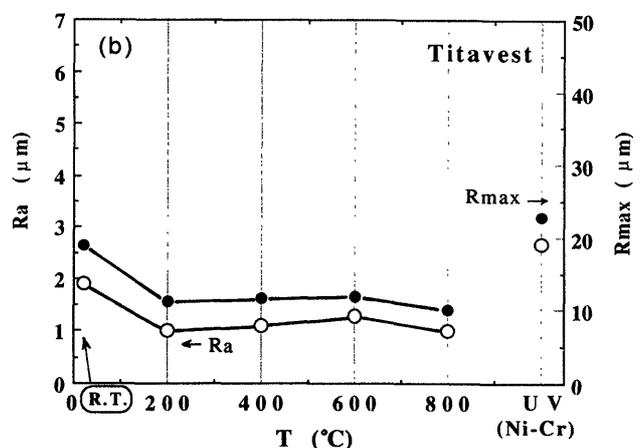
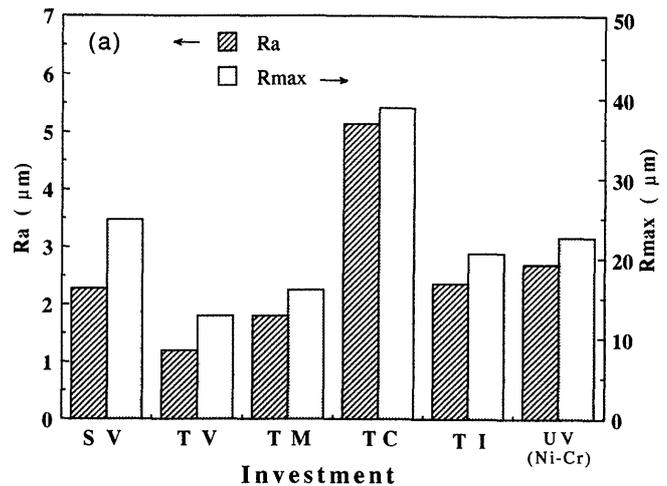


Fig. 4 Dependence of (a) the kind of investment and (b) the Titavest mold temperature on the surface roughness of the cast Fe-39.5%Pt-0.75%Nb alloy.

**Table 2** Dependence of (a) the kind of investment and (b) the Titavest mold temperature on the attractive force of an Fe-39.5%Pt-0.75%Nb alloy

(a)

Investment	SV	TV	TM	TI	TC
Attractive force (gf)	556	701	334	504	679

(b)

Mold temperature (°C)	R.T.	200	400	600	800
Attractive force (gf)	526	606	596	591	540

は、時効処理することによって 15 MGOe の最大エネルギー積を示した。

(3) 大白歯を想定した寸法を有する円板状試料の、磁性ステンレスに対する吸引力は、応用可能な 600~700 gf を示した。

**謝 辞** 本研究をまとめるに当たり、有益な御助言を頂いた(財)電気磁気材料研究所所長 増本 健氏に感謝致します。ま

た、本研究の一部は、文部省科学研究費(課題番号 07555505 および 07457465)の援助により行われた。

## 文 献

- 1) L. Graf and A. Kussmann: *Z. Phys.*, **36**, 544 (1935).
- 2) O. A. Ivanov *et al.*: *Phys. Met. Metallog.*, **35**, 81 (1973).
- 3) 金子秀夫, 本間基文: 日本金属学会第 56 回大会講演概要集, p. 106 (1965).
- 4) 渡邊 清, 増本 量: 日本金属学会誌, **47**, 699 (1983).
- 5) 奥野 攻, 飯室隆子・フロレンチーナ, 中野 毅, 浜中人士, 木内陽介, 松井康浩: 日本磁気菌科学会雑誌, **1**, 14 (1992).
- 6) 奥野 攻: 日本金属学会会報, **32**, 6 (1993).
- 7) M. Watanabe and M. Homma: *Jpn. J. Appl. Phys.*, pt. 2, **10A**, L1264 (1996).
- 8) 田中貴信, 星合和基, 中野和彦, 他: 日本磁気菌科学会雑誌, **1**, 35 (1992).
- 9) 河野正司, 五十嵐順正訳 (K. H. Korber 著): ケルバーのコーヌスクローネ (医歯薬出版, 東京, 1986).

1996 年 10 月 15 日受理, 1997 年 1 月 16 日採録