

P/M法によるFeCoV合金の磁気特性および機械特性に及ぼすVの影響

相川 芳和*1・柳谷 彰彦*2

The Effect of V on Magnetic Properties and Mechanical Properties of FeCoV Alloy made by P/M process
Yoshikazu Aikawa, Akihiko Yanagitani

Synopsis: The effect of V on magnetic properties and mechanical properties of FeCoV Alloy made by P/M process was studied. Fe-49Co-2V alloy is well-known as the material providing high saturated magnetic flux density (Bs), So it is used as electromagnetic parts, pole pieces of analysis machines and others. Generally it is made by casting process. But it is considered that the homogeneity of composition of a cast material is insufficiency in case of using as the pole pieces of high performed analysis machines. Besides that, the addition of V to improve of workability decreases the softmagnetic properties.

As a result, Fe-Co-V alloy made by hot isostatic press (HIP), containing 0%,1.3% and 1.6% of V, could be hot worked with no crack and be deformed uniform compared with cast material. Coersive force(Hc) of HIP material is found to be much lower than that of cast material. Further more, microstructure of HIP material is very fine and the segregation of composition is sufficiently low.

Key words: FeCoV Alloy; P/M process; Coersive force; Hot isostatic press; Saturated magnetic flux density

1. 緒言

Fe-50mass%Co合金は飽和磁束密度が大きい材料¹⁾として古くから知られているが、室温における脆性が甚だしいために加工性が劣り、あまり広い用途は無かった。その要因としてはFig.1に示すように、Fe-50mass%Coは約1000K以下で不規則(α)-規則(α')変態により脆性相が現われるためと考えられている²⁾。Fe-50%Co合金の加工性が劣るといふ課題に対し様々な検討がなされ、2mass%程度のV添加と適当な熱処理によって不規則-規則変態が抑制され加工性が改善することが見出され³⁾、電磁部品、電磁石や分析機器の磁極材料等に使用されるようになった。

通常、Fe-Co-V合金は鑄造法により製造されるが、鑄造法では成分偏析があることから磁場分布の均一性にも問題があり、前述の磁極材料等に用いる場合にはその機器の精度に問題があった。また、加工性の向上を目的としたVの添加は、飽和磁束密度の低下、保磁力の増大につながり⁴⁾、軟磁気特性の面から考えると好ましくない。

当社では以前から真空溶解-ガスアトマイズプロセスにより高純度の金属粉末を製造している。ガスアトマイズ粉末は微細均一な組織を有するため、高密度成形プロセスを併用することにより従来の鑄造法よりもさらに組織が微細で成分偏析も少ない成形体が得られる。また、組織の微細

化により加工性が改善できればVの低減が可能となり、従来の鑄造品よりも良好な軟磁気特性を有する材料が製造可能と考えられる。

本研究ではFe-Co-V系合金の磁気特性および機械特性の改善を目的として、ガスアトマイズ粉末-高密度成形プロセス(粉末工法)により作製したFe-Co-V合金の材料特性におよぼすVの影響について鑄造材と比較検討したので報告する。

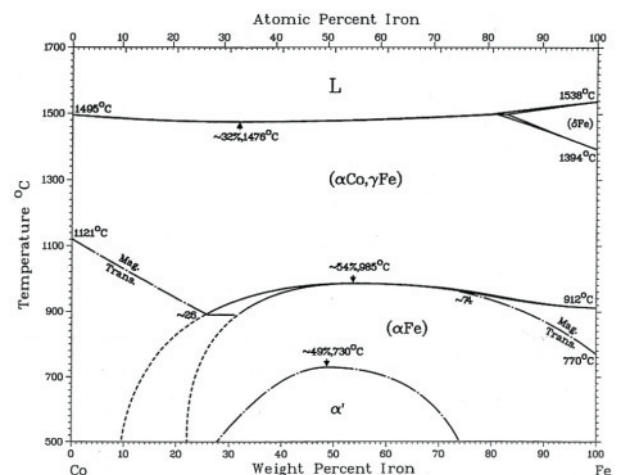


Fig.1 Phase diagram of Fe-Co alloys
(Thaddeus B.Massalski: BINARY ALLOY PHASE DIAGRAMS)

*1 粉末事業部 企画・開発グループ

*2 粉末事業部 企画・開発グループ長

2. 供試材および実験方法

2・1 供試材

本実験では粉末工法と鋳造法により作製したFeCoV合金の特性を比較検討するために、V量を0%, 1%, 1.6%とした供試材を作製した。Table1に本実験で用いたサンプルの成分分析値を示す。

Fig.2に粉末成形工程を示す。N₂ガスアトマイズにより粉末を作製した後、篩により500 μm以上の粉末を除去した。用いた粉末の粒度分布および外観の一例をFig.3に示す。この粉末を内径80mm、高さ100mmの炭素鋼製の金属缶に真空封入し熱間等方圧プレス（HIP）を用いて圧力150MPa、温度1453Kにて5hr保持して固化成形し供試材（以降HIP材と記述）とした。一方、鋳造材は所定の組

Table1. Chemical compositions

	mass%						
	Principal component			Impurity			
	Fe	Co	V	S	Si	Mn	P
HIP -1	bal.	49.95	-	0.003	0.01	<0.02	0.003
HIP -2	bal.	49.22	1.34	0.003	0.02	0.02	0.004
HIP -3	bal.	49.30	1.65	0.002	0.01	<0.02	0.004
Cast-1	bal.	49.91	-	0.002	0.03	<0.02	0.002
Cast-2	bal.	49.31	1.29	0.002	0.01	<0.02	0.003
Cast-3	bal.	49.29	1.71	0.002	0.01	<0.02	0.004

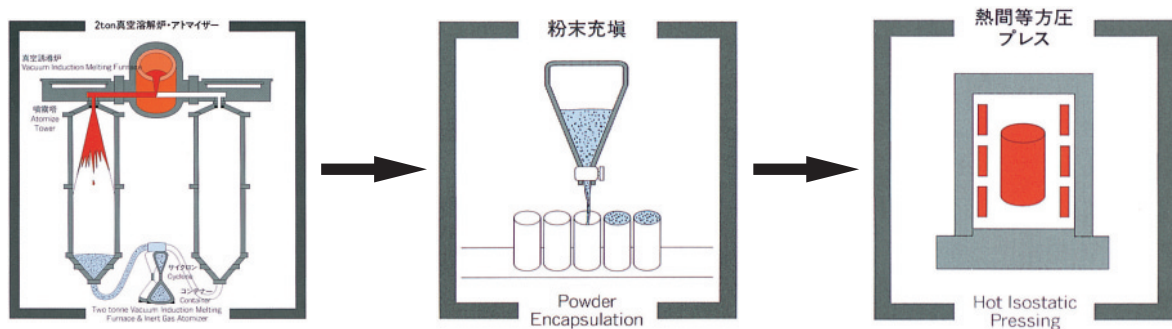


Fig.2 Schematic diagram of gas atomization - HIP process

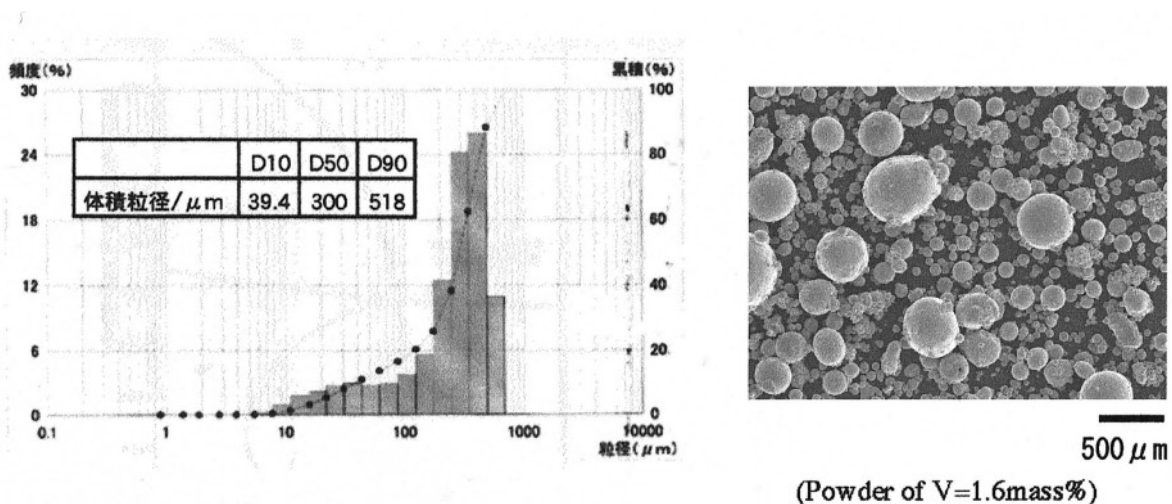


Fig.3 Particle size distribution and SEM image of Fe-Co-V atomized powder

成となるよう原料を配合した後、セラミックス製ルツボ内で溶解してインゴットを作製し外径50mm、高さ100mmの供試材（以降鑄造材と記述）とした。

2・2 実験方法

それぞれの供試材の加工性を熱間加工性再現試験装置（加工フォーマスター）により測定した。外径8mm、高さ12mmの試験片を用いて真空中で973K~1323Kの温度範囲にて10min保持した後、加工率50%、歪速度30/secにおける圧縮加工時の変形抵抗、ならびに試験終了後の外観を確認した。さらにHIP材については旋盤加工を施し、切削加工性および切り屑の外観を評価した。

各供試材の組織は光学顕微鏡により観察した。組成の均一性はEPMA分析装置により評価した。

また、磁気特性を評価するために供試材の外周部、中周部、中心部から外径12mm、内径8mm、高さ4mmのリング試験片を6個作製し、被膜銅線を印加側40ターン、検出側20ターンで巻線したのちBHトレーサーにより最大磁場4kA/mにてその最大磁束密度(Bm)と保磁力(Hc)を測定した。

3. 実験結果

3・1 熱間加工性および被削性

Fig.4に加工フォーマスター試験終了後の圧縮試験片の外観を示す。HIP材はいずれの条件においても割れがなく、変形も均一であることがわかった。一方、鑄造材はV=0mass%の場合、いずれの温度でも割れがみられた。

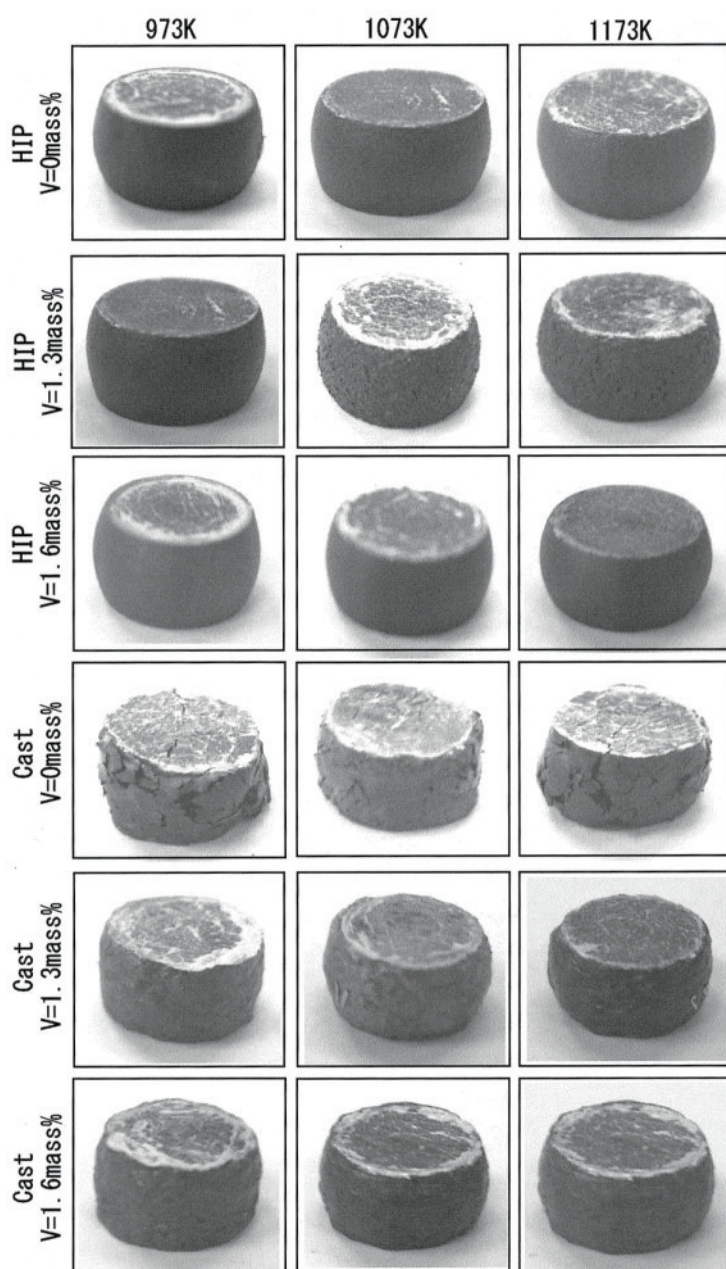


Fig.4 Appearance of specimens after hot processing

V=1.3mass%以上の場合には明確な割れは認められなかったものの、HIP材と比較すると変形は不均一であった。

Fig.5に各温度における最大変形抵抗を示す。HIP材と鑄造材に明確な差異は見られず、温度に対してほぼ同等の挙動を示した。V量が0mass%の場合、1173Kまでは温度の増加に対して単調に低下した後ほぼ一定の値となった。一方、V量が1.3mass%および1.6mass%の場合、1223Kで若干変形抵抗が増加した。Fig.6に示すとおり、Vを1.3~1.6mass%程度添加した場合、1173K近傍で γ 相が析出することから前述の温度域で変形抵抗の挙動に変化が見られたものと考えられる。

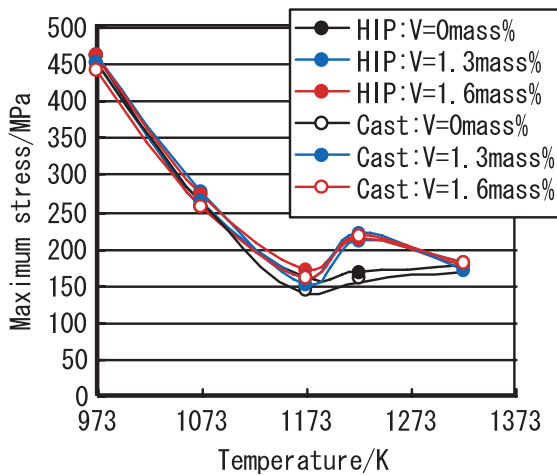


Fig.5 Effect of temperature on maximum stress of Fe-Co-V alloy

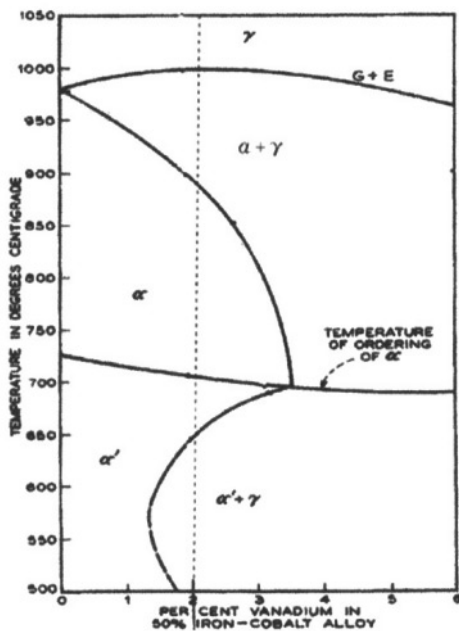


Fig.6 Binary phase diagram of Fe-Co-V alloys containing Fe/Co=1/1 (Bozorth: Ferromagnetism)

Fig.7にHIP材 (V=1.6%) を旋盤加工した後の切り屑外観を示す。旋盤加工は超硬チップにて切削速度80m/min, 送り0.75mm/回転, 切り込み1mmの条件で行なった。本実験によるHIP材は切削加工が良好に行なえることを確認した。

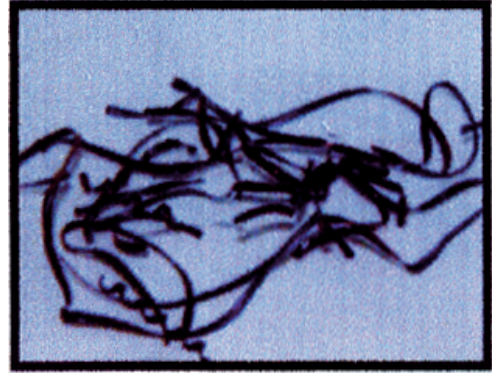


Fig.7 Appearance of chip after machining

3・2 磁気特性

Fig.8にBmに及ぼすV量の影響を示す。HIP材と鑄造材による差はほとんど見られず、いずれもV量の低減によりBmは増加し、V=0mass% の場合は、V=1.6mass%と比較して約5%程度Bmが増加することがわかった。なお、BmについてはHIP材、鑄造材ともに部位によるばらつきはほとんど見られなかった。

Fig.9に各供試材のHcを示す。HIP材と鑄造材のいずれもV量の低減によってHcが低下する傾向が見られた。また、同一のV量で比較するとHIP材のHcは鑄造材の1/2以下になることがわかった。

Fig.10にHcの部位によるばらつきを示す。本実験では各供試材について測定部位を変えてn=6で試験を行なっているが、その平均値に対する標準偏差の割合をばらつきと定義した。HIP材のばらつきははいずれのV量においても鑄造材と比較して1/3程度であり磁気特性の均一性が向上することがわかった。

3・3 ミクロ組織

Fig.11にHIP材および鑄造材の光学顕微鏡によるミクロ組織を示す。HIP材の場合、V量が0mass%では100~500 μ m程度の大きさの結晶粒からなっており、Vの添加に伴って結晶粒は微細化し、1.6mass%V添加では10 μ m~100 μ m程度の大きさとなった。一方、鑄造材はHIP材と比較すると結晶粒は著しく大きくなることがわかった。

Fig.12に1.6mass%VについてEPMAによるFe,Vの組成分析の結果を示す。HIP材はいずれのV量においても均一な組成分布を示しているが、鑄造材の場合は偏析が明瞭に認められた。

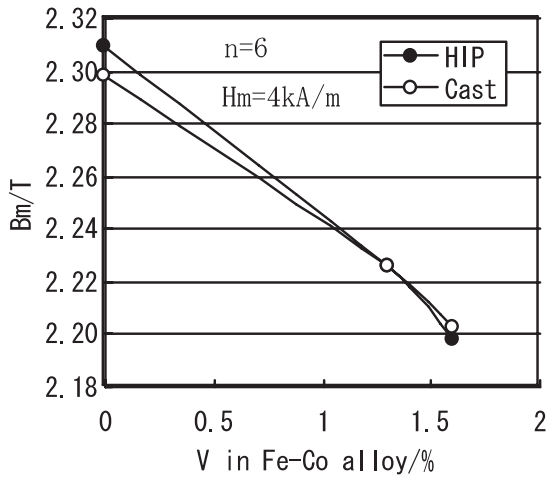


Fig. 8 Effect of V in Fe-Co alloy on saturated magnetic flux density (Bs)

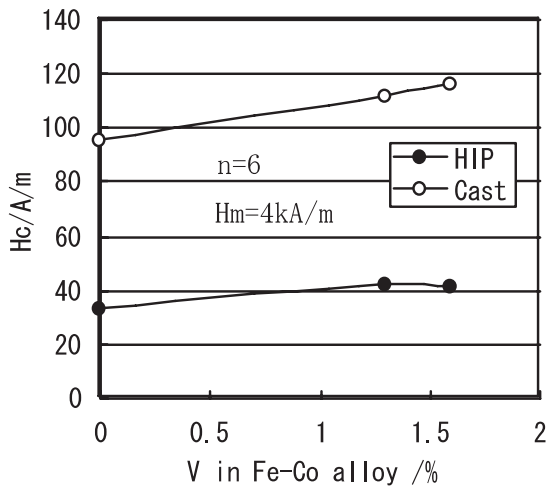


Fig. 9 Effect of V in Fe-Co alloy on coercive force (Hc)

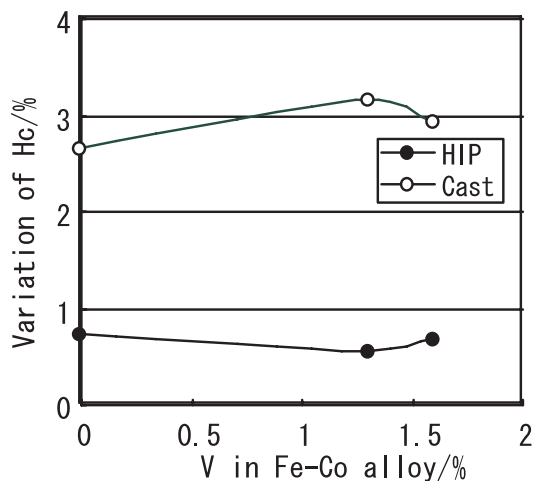


Fig. 10 Effect of V in Fe-Co alloy on variation of Hc

4. HIP材の優位性に関する考察

ガスアトマイズーHIP法と鑄造法を比較した場合、HIP法は特に磁気特性におけるHcが低く、部位によるばらつきも小さいことがわかった。また、Vを0mass%にした場合においても良好な加工性を有していることが確認できた。HIP材の磁気特性のばらつきが低いのは、Fig. 12のEPMAの結果にも示したとおり、組成変動による磁気特性の変化が小さいことに起因しているものと考えられる。また、HIP材の熱間加工性が良好であったのは、結晶粒が微細化された効果によるものと考えられる。

一方、結晶粒径の微細化によりHcは増加すると言われており、これは磁化の反転が結晶粒界により妨げられることが要因と考えられている⁵⁾。本実験結果では結晶粒が微細であったHIP材の方が鑄造材よりもHcが低いことがわかったが、これについて磁気特性の組成依存性の観点から考察した。

Fig. 13にFeCo系合金の最大透磁率 (μ_m)、初透磁率 (μ_0) におよぼすCo量の影響を示す。 μ_m 、 μ_0 はいずれもCo-50mass%Fe近傍でピークとなり、若干の組成変動で大きく減少することがわかる。 μ の増加とHcの低下は同義であると考えられるので、HcはFe-50mass%Coをピークとして若干の組成変動で大きく増加すると考えられる。また、Fig. 9の結果ではV量の増加によってもHcは低下することが確認できている。鑄造材は組成偏析が大きく、ミクロ的にみるとHcが最も低い組成から外れた組成で構成されているものと想定される。一方、HIP材は成分偏析が少ないために μ がピークとなる成分範囲になっていることがHcが低い要因と考えられる。

5. 結言

Fe-Co-V合金の加工性および磁気特性におよぼすV量の影響について、HIP法と鑄造法を比較した結果、本実験条件範囲内で以下のことを明らかにした。

(熱間加工性)

HIP材はいずれの加工条件においても割れがなく、変形も均一であることがわかった。一方、鑄造材はV=0mass%の場合はいずれの温度でも割れがみられた。V=1.3mass%以上の場合には明確な割れは認められないものの、HIP材と比較すると変形は不均一であった。

(磁気特性)

HIP材と鑄造材のいずれもV量の低減によってBmは最大5%程度増加し、Hcは低下することがわかった。また、同一のV量で比較するとHIP材の方がより低Hcであった。また、HIP材の磁気特性のばらつきは鑄造材と比較して1/3程度であった。

(組織)

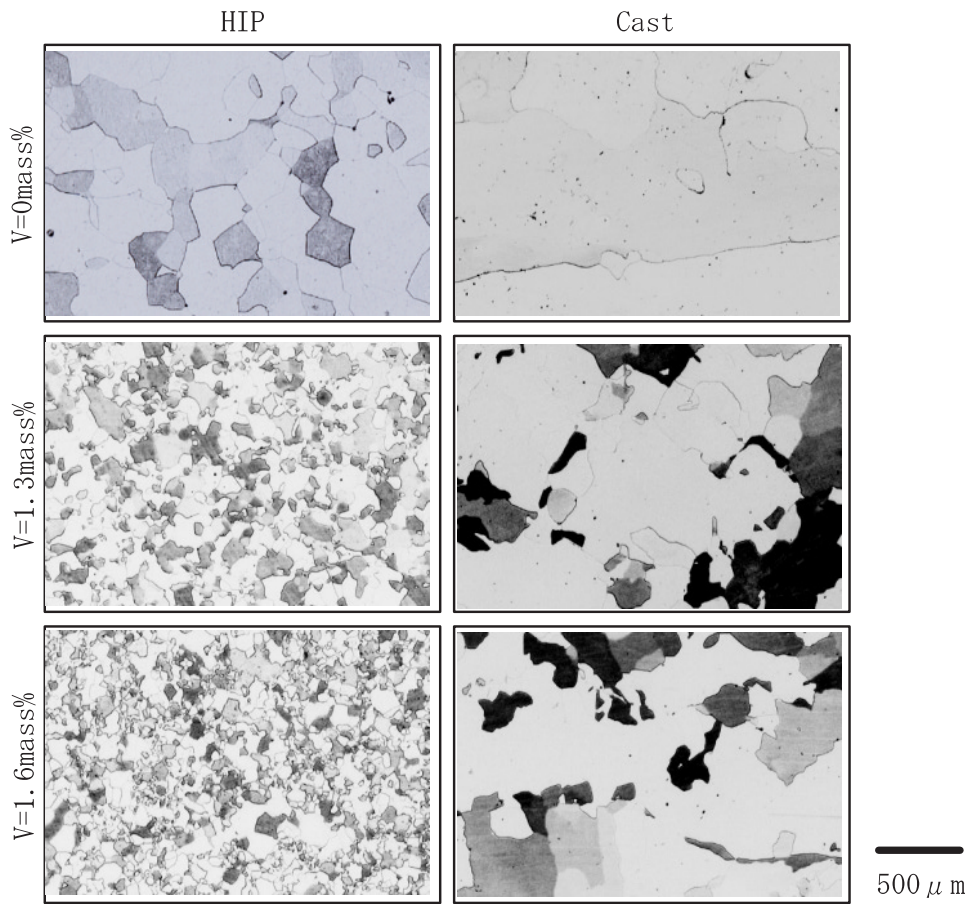


Fig.11 Microstructures of Fe-Co-V alloy

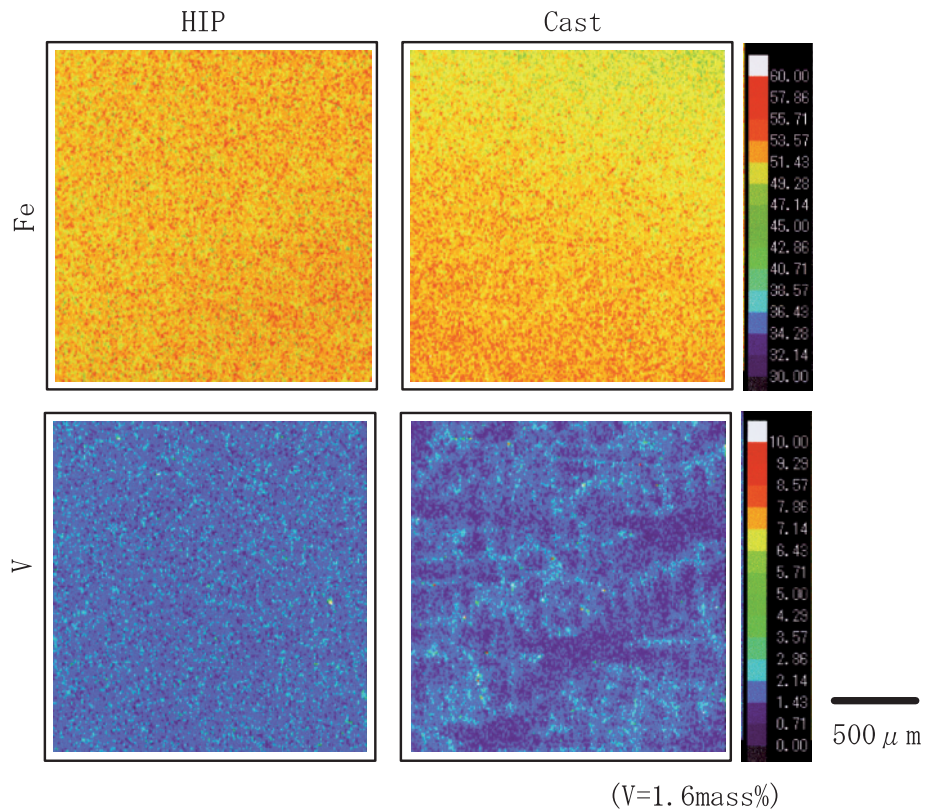


Fig.12 Composition mapping of Fe,V by EPMA

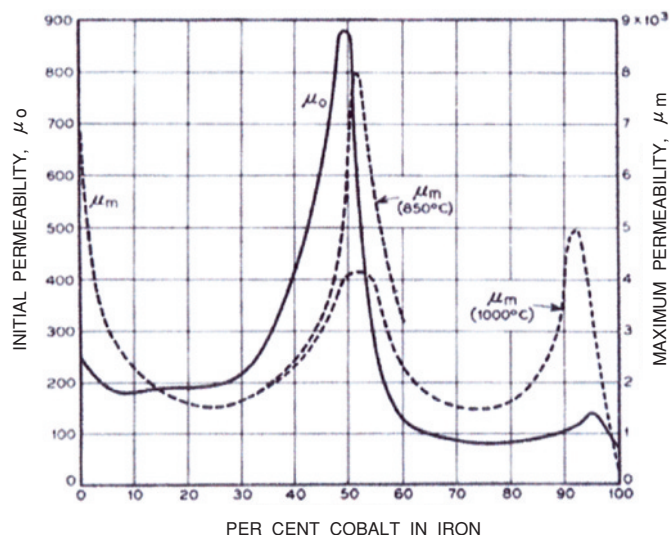


Fig.13 Initial and maximum permeabilities of Fe-Co alloys (Bozorth:Ferromagnetism)

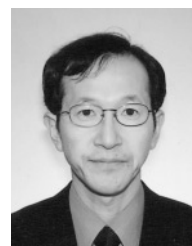
HIP材は鑄造材と比較して結晶粒が著しく微細で、EPMAの結果では組成偏析も十分に小さいことを確認できた。

5) 金子秀夫,本間基史: 磁性材料, 社団法人日本金属学会, (1977), 90

■ 著者



相川 芳和



柳谷 彰彦

6. 参考文献

- 1) 中島陽三: 三菱電機技報, 37 (1963), 29
- 2) Bozorth: Ferromagnetism, D. Van Nostrand Company, Inc., (1951), 190
- 3) Richard W. Fountain and Joseph F.Libsch: Journal of Metals, (1953), 349
- 4) Bozorth: Ferromagnetism, D. Van Nostrand Company, Inc., (1951), 200