

技術資料

高強度・高透磁率めっき鋼板の開発

洲崎 恒年* 平田 健太郎** 松元 孝***

 Development of Coated Steel Sheet with High Permeability
and Tensile Strength

Tsunetoshi Suzaki, Kentaro Hirata, Takashi Matsumoto

Synopsis:

Steel sheets used in structural components of electrical must expected to exhibit both high strength and high permeability for magnetic shielding from terrestrial magnetic fields. This paper first describes a laboratory investigation into the effects of different chemical compositions and manufacturing conditions on permeability and yield stress in extra low carbon steel sheets. It also investigates other properties of manufactured trial steel sheet. The laboratory investigation revealed that the carbon and nitrogen content, the ferrite grain size and the applied strain after annealing all affected the permeability. It further revealed that an adequate way to achieve high permeability and high strength was the addition of solid solution strengthening elements, control of interstitial element content, and minimizing the applied strain. Trial steel sheet exhibited a high strength of 490MPa grade as well as high permeability of shielding terrestrial magnetic fields.

1. 緒言

家電製品には、その性能に外部磁界が影響を及ぼす場合があり、この際、使用される鋼板には磁気シールド性が求められる。一方、薄肉化による軽量化を目的として、鋼板の高強度化が望まれている。

ところで、外部磁界が直流磁界の場合、磁束を吸収できる強磁性体にて防磁対象物を取り囲むことが磁気シールドに有効であり、シールド性能の向上には高い透磁率および飽和磁束密度の向上が必要であることが知られている¹⁾。直流磁界の中でも地磁気程度の低磁界においては、シールド材が磁気飽和には達しないため、シールド性向上には高い透磁率が必要である。高透磁率を有する材料としてけい素鋼板が知られている。本材料は二次再結晶を利用した集合組織制御により優れた磁気特性が得られる。けい素鋼板の製造プロセスでは1000℃を超える高温焼鈍が必要であり、一般の冷延鋼板の製造プロセスを想定している本研究の主旨と

は異なるものである。冷延鋼板の製造プロセスにおいて、連続焼鈍後に板形状改善のため調質圧延などが行われる場合があるが、微弱な直流磁場での透磁率に及ぼす付与歪および鋼成分の影響を詳細に調査した例は少ない。

さらに、高透磁率化と高強度化は相反する特性であることが知られている。すなわち、鋼の強化機構として有効な析出強化、加工強化および結晶粒微細化強化を利用した場合、いずれも透磁率は低下する。これは、各強化機構において、おのおの微細析出物、導入された転位および結晶粒界が磁壁の移動を妨げるためであることが知られている^{2~6)}。しかし、固溶強化の場合、磁壁の回転に与える影響は小さいと考えられ、高透磁率を維持したまま高強度化を達成しうる可能性がある。

本報告では地磁気のみならず磁界の強さとして28A/m(0.35Oe)を選び、この磁界での透磁率(以下、 $\mu_{0.35}$ と記す)の向上と高強度化を両立できる鋼成分および焼鈍後の歪付与の影響を実験室的に検討した結果と、その実験室検討結果に基づき実施した実機製造材の諸特性について

*技術研究所 鋼材研究部 鋼材第一研究チーム 主任研究員

**技術研究所 鋼材研究部 鋼材第一研究チーム

***技術研究所 鋼材研究部 鋼材第一研究チーム チームリーダー

て述べる。

2. 供試材および実験方法

2.1 供試材

表1に供試材の化学成分を示す。Aシリーズでは、侵入型元素であるC量は30ppm、N量は20ppmにて一定と

表1 供試材の化学成分

Table 1 Chemical compositions of steels used. (mass%)

	C	Si	Mn	P	N
A series	0.003	0.3~0.7	1.0~1.5	0.06~0.10	0.002
B series	0.001~0.007	0.65	1.1	0.08	0.002~0.005

し、固溶強化元素としてSi、MnおよびP量を変化させた。一方、Bシリーズでは、0.65mass%Si-1.1mass%Mn-0.08mass%P鋼を基本成分とし、C量を10~70ppm、N量を20~50ppmの範囲で変化させた。

供試材は真空溶解炉にて溶製後に、1200℃にて熱間鍛造を行い、その後熱間圧延を実施した。熱間圧延では1250℃に加熱し、オーステナイト温度域の920℃にて仕上げ圧延を行った後に、熱延巻取り相当処理として680℃×3.6ks保持した後に空冷を施した。

得られた熱延材を研削した後に、冷延率10~60%にて冷間圧延を行い、連続焼鈍を模した急速加熱・短時間均熱焼鈍を行った。得られた焼鈍板は必要に応じて調質圧延およびレベラー通板を行った。

2.2 実験方法

材料特性として引張特性および磁気特性を調査した。引張試験は圧延方向より採取したJIS5号試験片を用いて、破断まで歪速度一定 ($3.3 \times 10^{-3}/s$) で実施した。磁気特性としては透磁率 ($\mu_{0.35}$) を、JIS C 2504に記載のリング状試験片 ($\Phi 33 \times 45mm$) を用いて測定した。また、金属組織はTD面の板厚中心部を観察し、切断法によりフェライト粒径を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 透磁率に及ぼす影響因子

3.1.1 フェライト粒径および固溶強化元素の影響

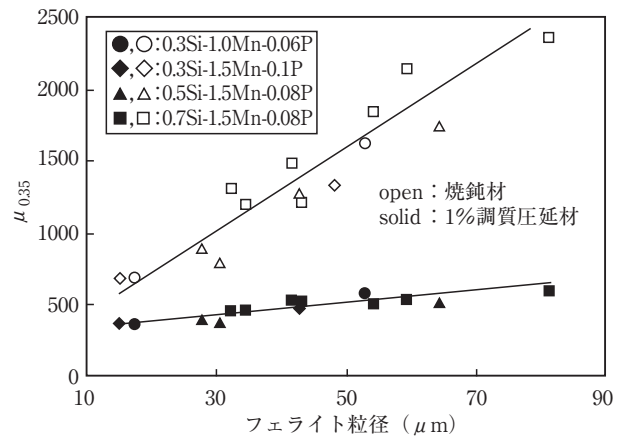


図1 $\mu_{0.35}$ に及ぼすフェライト粒径および調質圧延の影響

Fig. 1 Effect of ferrite grain size and temper rolling on permeability in A series steels.

図1にAシリーズ鋼について、冷延率により変化させた焼鈍後のフェライト粒径と $\mu_{0.35}$ の関係を示す。焼鈍材では、フェライト粒径の粗大化に伴い $\mu_{0.35}$ は単調に増加した。これは粒径粗大化により、低磁界での透磁率の支配因子とされている磁壁移動⁷⁾を阻害するフェライト粒界の単位体積あたりの面積が減少するためと考えられる。一方、Feは結晶磁気異方性を有するため、集合組織が磁気特性に影響を及ぼすことが知られている。しかし、本実験ではフェライト粒径が異なる各試料において圧延面の結晶方位分布に違いは認められないことを確認しており、図1において集合組織は $\mu_{0.35}$ に影響を及ぼしていないと考えられる。

また、今回の検討範囲内においてSi、MnおよびPの固溶強化元素の種類および添加量を変化させても、 $\mu_{0.35}$ はフェライト粒径のみにて整理でき、固溶強化元素量の影響は認められない。これらの元素の添加により飽和磁束密度は低下する⁸⁾ことが知られているが、地磁気程度の微弱な磁界での透磁率に及ぼす影響は小さいと判断される。

焼鈍後に1%の調質圧延を施すと、いずれの粒径においても $\mu_{0.35}$ は著しく低下した。これは、調質圧延にて導入される転位が形成する弾性応力場により、磁壁移動が困難になったためと考えられる。

3.1.2 焼鈍後の歪付与方法の影響

図2に焼鈍後のフェライト粒径が56 μm である0.5mass%Si-1.5mass%Mn-0.08mass%P鋼の $\mu_{0.35}$ に及ぼす調質圧延率の影響を示す。 $\mu_{0.35}$ は伸び率0.3%の軽度の調質圧延を行うと著しく劣化し、伸び率の増加とともに $\mu_{0.35}$ はさらに低下した。

調質圧延は板形状修正を目的として付与されるが、

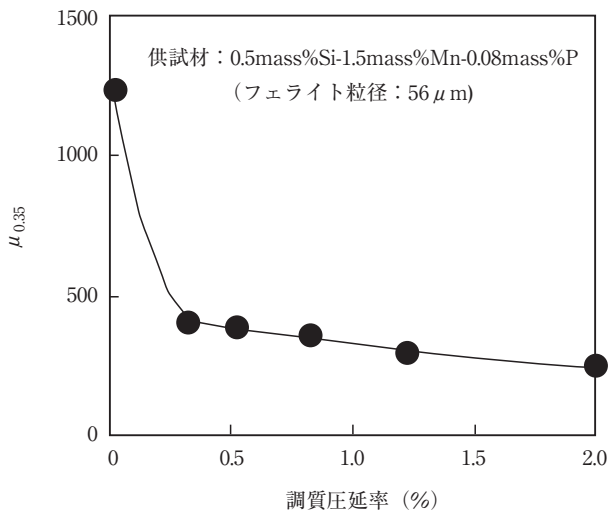


図2 $\mu_{0.35}$ に及ぼす調質圧延率の影響
Fig. 2 Change of permeability on temper rolling reduction.

同様の効果を得る方法としてレベラー通板が挙げられる。そこで、 $\mu_{0.35}$ に及ぼすレベラー通板の影響を調査した結果を図3に示す。レベラー通板の場合、同じ1%伸び率を付与した場合でも、 $\mu_{0.35}$ の低下は調質圧延に

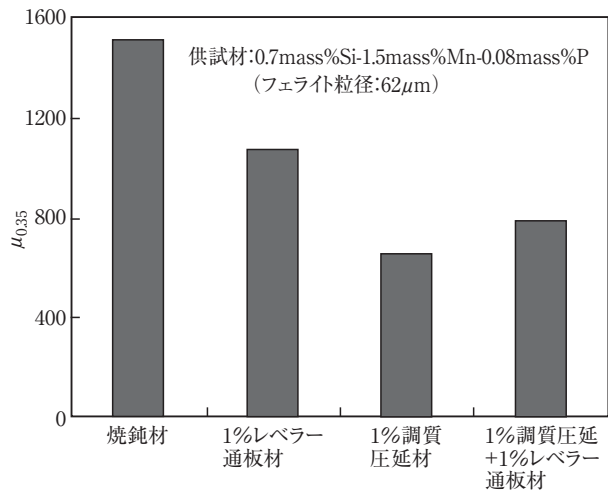


図3 $\mu_{0.35}$ に及ぼす調質圧延およびレベラー通板の影響
Fig. 3 Effect of temper rolling and leveling on permeability.

比べて小さかった。また、調質圧延後にレベラー通板すると $\mu_{0.35}$ は回復した。レベラー通板では繰返し曲げ曲げ戻しにより板表面の残留応力が低下し、板厚方向の残留応力分布がなだらかになることが知られている。本実験においても、調質圧延後における表層部圧延方向の残留応力は約-100MPa、調質圧延後にレベラー通板を行った場合では-20MPaであった。以上の結果よ

り、調質圧延後のレベラー通板により $\mu_{0.35}$ が回復した原因は、調質圧延により導入された板表層近傍の転位が、レベラー通板での曲げ曲げ戻し変形により回復し、残留応力が低減したためと考えられる。

3.1.3 侵入型元素の影響

図4に固溶強化元素量を0.65mass%Si-1.1mass%Mn-0.08mass%Pと一定としたBシリーズ鋼を用いて、 $\mu_{0.35}$

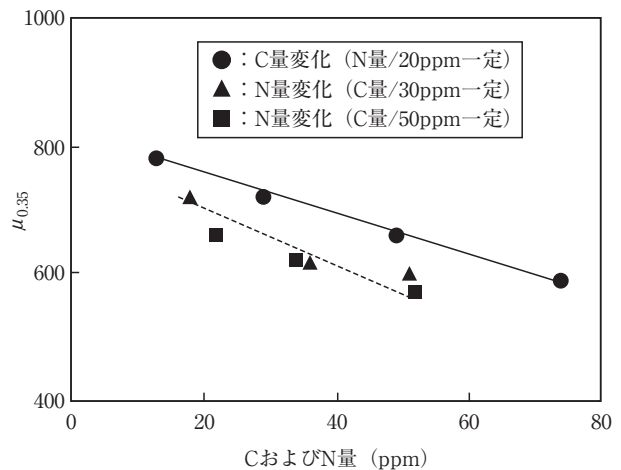


図4 $\mu_{0.35}$ に及ぼすCおよびN量の影響
Fig. 4 Effect of C and N contents on permeability in B series steels.

に及ぼすCおよびN量の影響を調査した結果を示す。ここでは、CおよびN量を一定とした鋼において、おのおのNおよびC量を変化させた。なお、焼鈍後のフェライト粒径は15~19 μ mとほぼ一定であり、CおよびN量の差異によるフェライト粒径を通じての $\mu_{0.35}$ に及ぼす影響は考慮する必要がないと判断できる。図4より $\mu_{0.35}$ はCおよびN量の増加とともに低下した。また、 $\mu_{0.35}$ の低下割合はC量に比べてN量の影響が大きい。侵入型元素量増加による $\mu_{0.35}$ 低下の原因は、Cについては固溶C量およびFe₃Cの析出量、Nについては熱延にて高温の巻取り相当処理を行っているためAlNの析出量の増加と考えられる。以上の結果より、 $\mu_{0.35}$ の向上には侵入型元素の低減が有効であり、なかでもN量の低減が望ましいことが明らかとなった。

3.2 引張特性に及ぼす影響因子

供試材の焼鈍後の組織はいずれもフェライト単相であり、添加したSi、MnおよびPはいずれもフェライト中に固溶している。CおよびN量が一定であるAシリーズの場合、鋼の降伏応力を変化させる影響因子はフェライ

ト粒径と固溶強化元素の種類および量である。そこで、Aシリーズ鋼の焼鈍材についてこの2つの影響因子の加算則が成立すると仮定し、Si, MnおよびPの重量%とフェライト粒径および定数からなる線形近似式から求められる降伏応力の計算値と実験値の相関を図5に示す。実

の影響を示す。CおよびNともに添加量の増加とともに降伏応力は上昇し、その程度はN量に比べてC量の影響が大きかった。これは、大部分のNがAlNとして存在しているのに対して、Cはそのほとんどが固溶Cとして存在し添加量の増加とともに固溶C量が増加するためと考えられる。高強度化の点からは、侵入型元素の添加が有効であり、中でもC量の増加が有効であることが明らかとなった。

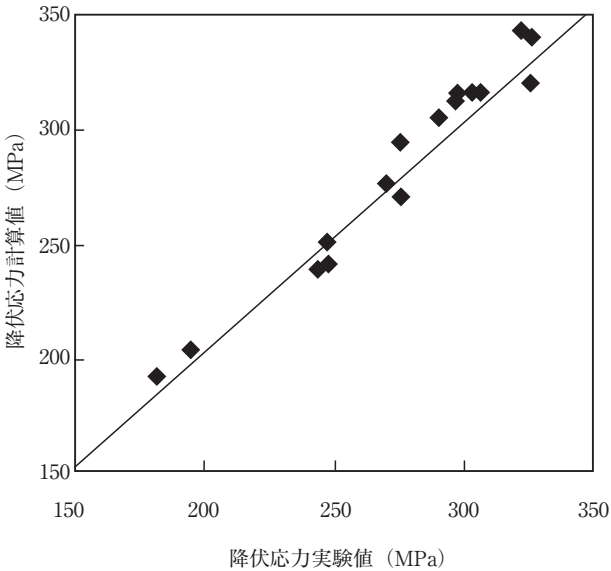


図5 重回帰分析により得られた降伏応力計算値と実験値の相関
Fig. 5 Comparison between calculated and measured yield stress in A series steels.

験値と計算値の差は最大で15MPa程度であり、良好な相関を示す。すなわち、降伏強度はフェライト粒径とSi, MnおよびP量にて制御できると考えられる。

3.3 高 $\mu_{0.35}$ 化と高強度化の両立

これまでに述べた $\mu_{0.35}$ と強度に及ぼす影響因子の調査結果より、 $\mu_{0.35}$ の向上に対してフェライト粒の粒成長促進とCおよびN量の低減が有効であるが、これらの因子は同時に降伏応力を低下させる。図7にAシリーズ

図6にBシリーズ鋼の降伏応力に及ぼすCおよびN量

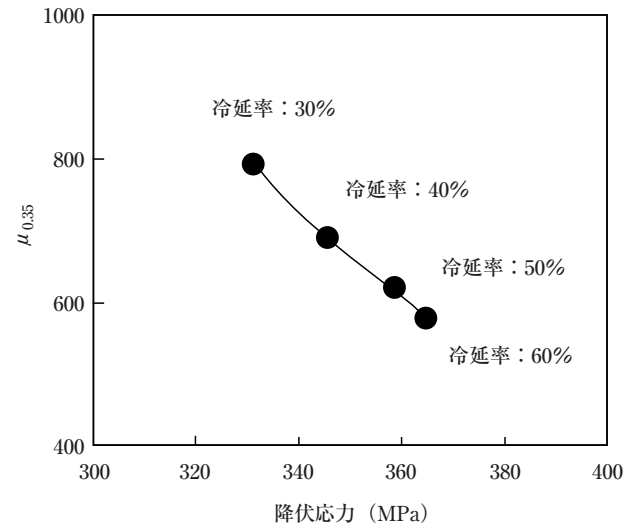


図7 $\mu_{0.35}$ および降伏応力に及ぼす冷延率の影響
Fig. 7 Effect of cold rolling reduction on permeability and yield stress in A series steels.

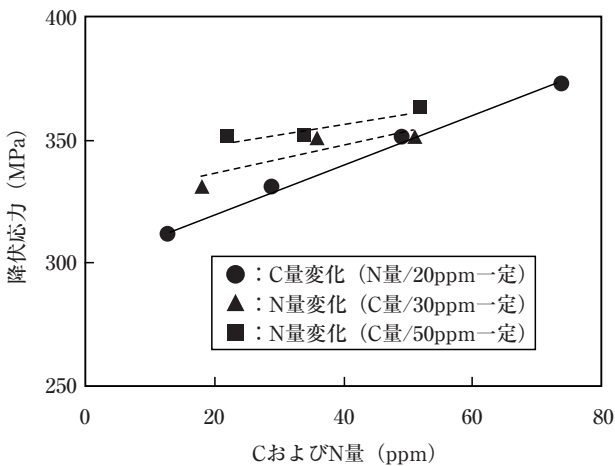


図6 降伏応力に及ぼすCおよびN量の影響
Fig. 6 Effect of C and N contents on yield stress in B series steels.

の0.7mass%Si-1.3%massMn-0.10mass%P鋼において、冷延率により焼鈍後のフェライト粒径を変化させた場合の $\mu_{0.35}$ と降伏応力の関係を示す。冷延率の増加によるフェライト粒の微細化とともに、 $\mu_{0.35}$ は低下する一方で降伏応力は増加するため、両者は相反する特性と言える。

この両特性を同時に向上させる方法として、固溶強化元素の添加が挙げられる。すなわち、固溶強化元素の添加は、図1に示したように $\mu_{0.35}$ に与える悪影響は認められない一方で、降伏応力に関しては図5に示したように、各元素の添加量に応じて増加する。

また、侵入型元素の制御も高 $\mu_{0.35}$ 化と高強度化の両立に有効である。図4および図6に示したように、同一添加量においてNはCに比べ、 $\mu_{0.35}$ を大きく低下させ、降伏応力の増加量は小さかった。図8にBシリーズ鋼の

び降伏応力を得ることが可能と考えられる。

4. 実機製造材の特性

4.1 実機製造工程

これまでに述べた実験室検討結果に基づき、実機製造を行った。実機製造材の化学成分の概要を表2に示す。

通常の熱間圧延が行われた2.3mm厚の熱延鋼板を用いて、圧延率48%の冷間圧延を施し、その後連続焼鈍および電気Zn-Niめっきを行った。

4.2 材料特性

表3に実機製造材の材料特性を示す。SPCC材に比べて固溶強化元素の添加により高強度化されており、390MPa級の降伏応力と490MPa級の引張強さが得られた。一方、 $\mu_{0.35}$ もSPCC材に比べて高く、高強度化と高 $\mu_{0.35}$ 化が同時に達成された。また、他の磁気特性である最大透磁率 μ_m および保磁力HcについてもSPCC材に比べて軟磁性である。その他の材料特性としては、2mmVノッチを導入したサブサイズのシャルピー衝撃試験における延性脆性遷移温度は-120℃であり、極低炭素鋼へのP添加による衝撃特性の劣化は実用上問題ないと考えられる。また、電気抵抗率はSPCC材に比べて高く、高周波誘導加熱される場合には加熱時間の短縮に寄与するものと考えられる。

5. 結 言

地磁気程度の微弱な直流磁界での透磁率($\mu_{0.35}$)の向上と高強度化の両立を目的とし、極低炭素鋼において両特性に及ぼす固溶強化元素、侵入型元素および製造条件の影響を実験室的に検討するとともに、実機試作材の諸特性を調査し、以下の結果を得た。

- (1) $\mu_{0.35}$ に及ぼす固溶強化元素Si、MnおよびP量の影響は認められなかった。また、CおよびN量の低減により $\mu_{0.35}$ は向上し、その効果はCにくらべNの方が顕

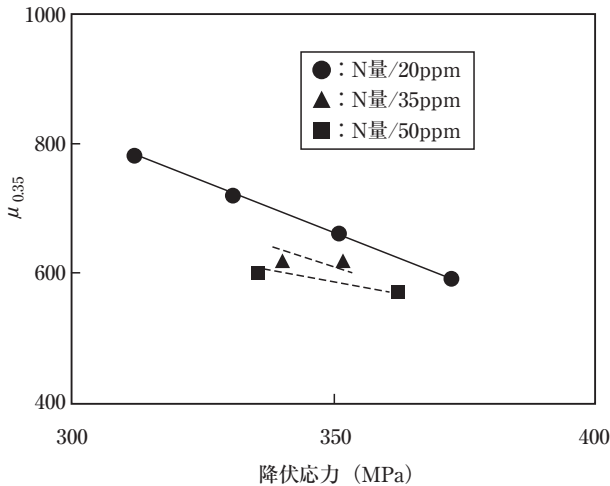


図8 $\mu_{0.35}$ および降伏応力に及ぼすN量の影響
Fig. 8 Effect of N content on permeability and yield stress in B series steels.

$\mu_{0.35}$ と降伏応力の相関を示す。N量の低減により $\mu_{0.35}$ と降伏応力のバランスが向上することがわかった。

以上の結果より、高 $\mu_{0.35}$ 化と高強度化の両立のためには鋼成分として、固溶強化元素を有効に活用し必要強度を確保したうえで、侵入型元素であるN量を低減することが重要と考えられる。一方、製造条件としては、焼鈍後に付与される歪量を極力低減するとともに、冷延率によるフェライト粒径の制御により、所望の $\mu_{0.35}$ およ

表2 実機製造材の化学成分
Table 2 Chemical compositions of manufactured trial steel sheet. (mass%)

C	Si	Mn	P	N
0.005	0.9	1.5	0.10	0.002

表3 実機製造材の材料特性
Table 3 Mechanical, magnetic and other properties of manufactured trial steel sheet.

材料	引張特性			磁気特性			延性脆性遷移温度 (℃)	熱膨張係数 ($\times 10^{-6}/\text{℃}$)	電気抵抗率 ($\times 10^{-8}\Omega \cdot \text{m}$)
	降伏応力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	$\mu_{0.35}$	μ_m	Hc ¹⁾ (A/m)			
開発材	390	490	34	500	4000	180	-120	13.4	32.9
SPCC	280	340	40	240	2000	230	-150	12.3	11.7

1) 印加磁界：796A/m(10Oe)

著であった。

- (2) $\mu_{0.35}$ は焼鈍後の形状修正工程での歪付与により著しく低下した。しかし、その程度は調質圧延に比べてレベラー通板の方がより軽微であった。
- (3) 降伏応力はフェライト粒径および固溶強化の加算則にて表現できた。
- (4) 高透磁率と高強度の両立には、固溶強化元素の添加および低N化が有効と考えられた。
- (5) 実機製造材は390MPa級の降伏応力および490MPa級の引張強さを有し、 $\mu_{0.35}$ はSPCCと比較して優れており、高 $\mu_{0.35}$ と高強度をあわせ持つ電気Zn-Niめっき鋼板が得られることを確認した。

参考文献

- 1) M.Takahashi : Sumitomo Met., 46 (1994), 4.
- 2) T.Ohmori, H.Suzuki, T.Sanpe, K.Hachiko and K.Kanero : J. Jpn. Inst. Met., 29 (1990), 364.
- 3) Y.Tomita, T.Kumagai, K.Koyama, Y.Tsuda : Shinnittetu Giho, 348 (1993), 71.
- 4) T.Ohmori, H.Suzuki, M.Nakagawa : CAMP-ISIJ, 6 (1993), 1838.
- 5) M.Shinozaki, K.Ono, H.Fujino, S.Saeki, O.Tanigawa and J.Mano : Kawasaki Steel Giho, 23 (1991), 83.
- 6) T.Shimazu, M.Shiozaki, M.Oda : CAMP-ISIJ, 6 (1993), 1840.
- 7) 近角聡信 : 強磁性体の物理, 裳華房, (1963).
- 8) H.Brechna : 2nd Inter. Conf. on Magnet Technology, (1967), 305.