

# 琉球大学学術リポジトリ

## 無方向性珪素鋼板の磁気特性改善に関する研究

メタデータ	言語: 出版者: 黄柏英 公開日: 2021-12-15 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 黄, 柏英, Kou, Hakuei, B.Y, Huang メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/25355">http://hdl.handle.net/20.500.12000/25355</a>

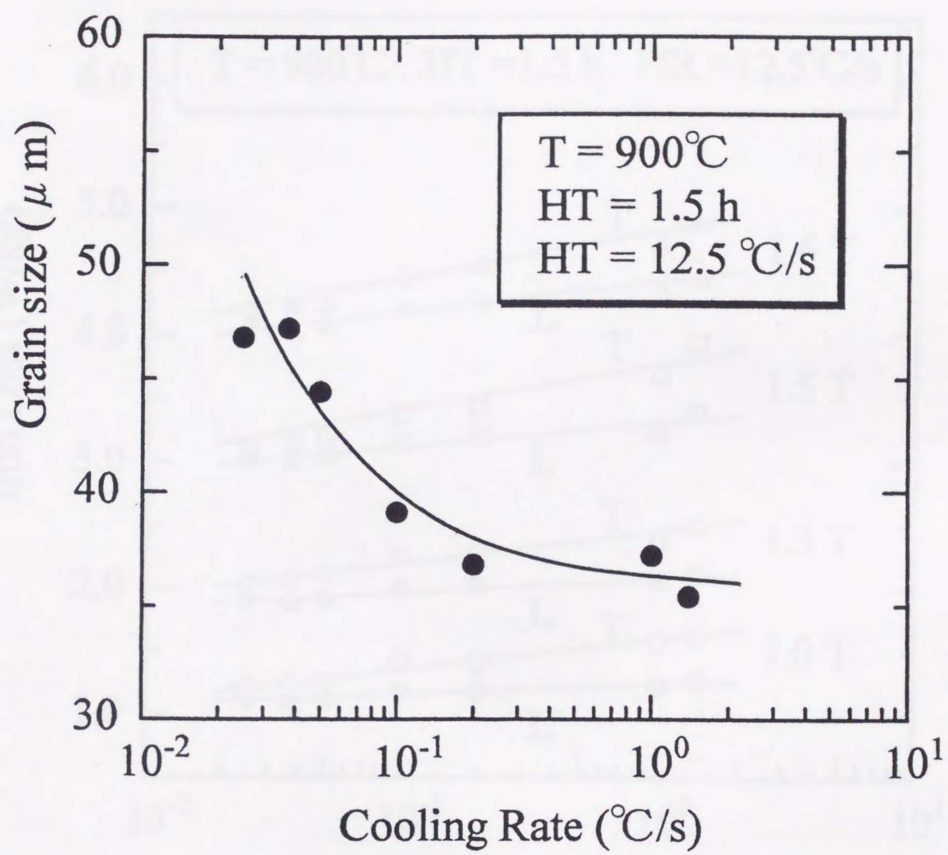


Fig.4-6 Grain size dependence on cooling rate.

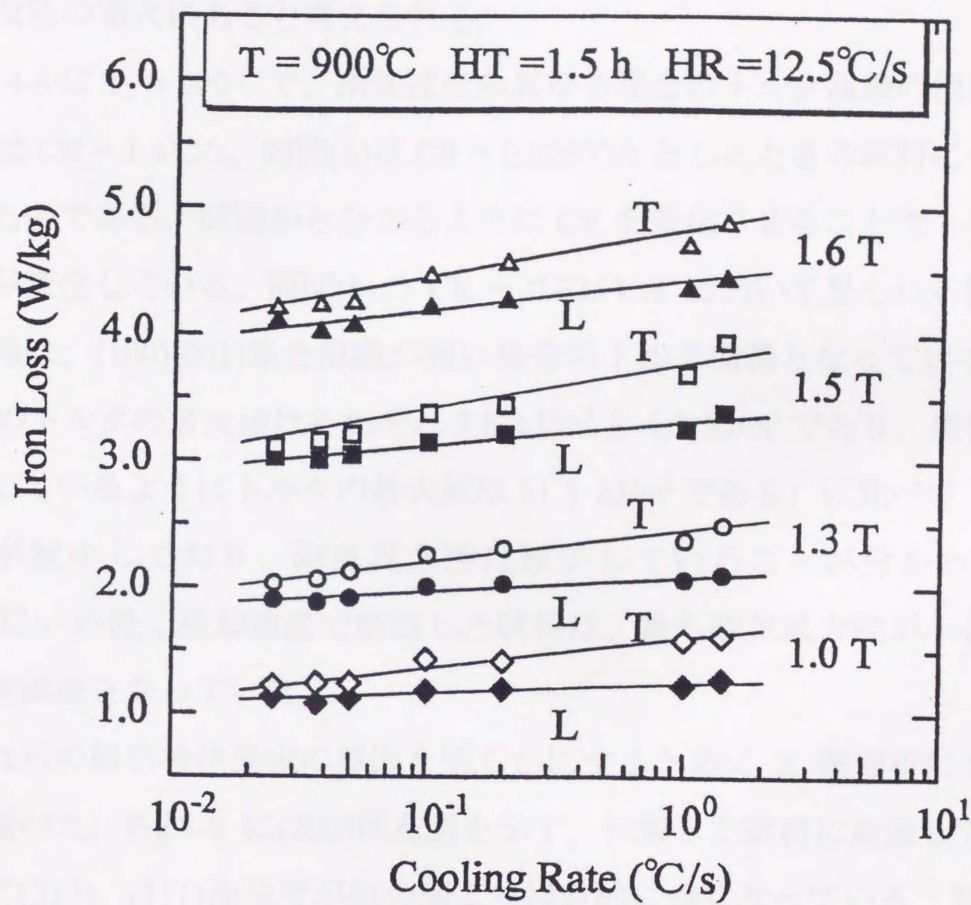


Fig.4-7 Iron loss dependence on cooling rate.

速度が減少すると L と T 方向の鉄損値が近づいてくる。冷却速度が  $0.025^{\circ}\text{C/s}$  のとき、周波数 50 Hz、1.5 T で L と T 方向の鉄損はそれぞれ  $W_{15/50} = 3.00 \text{ W/kg}$  と  $W_{15/50} = 3.10 \text{ W/kg}$  の最小値となっていた。ここで、鉄損が減少する原因は結晶粒径の増大にあると考えられる。

Fig.4-8 に  $T_1 = 900^{\circ}\text{C}$  で、冷却速度の異なる場合のトルク曲線の例を示す。同図(a)は  $\text{CR} = 1.4^{\circ}\text{C/s}$ 、同図(b)は  $\text{CR} = 0.025^{\circ}\text{C/s}$  としたときの試料について測定したものである。同図から分かるように  $\text{CR}$  を変化させることでトルク曲線の形状が変化している。同図(b)の  $\text{CR} = 0.025^{\circ}\text{C/s}$  において見られる試料のトルク曲線は、(100)[001]集合組織が強い場合のトルク曲線となっている。同図(a)と(b)のトルクの最大値はそれぞれ  $7.8 \text{ kJ/m}^3$  と  $4.5 \text{ kJ/m}^3$  であり、母材 (Fig.3-9 に示しているようにトルクの最大値は  $11.5 \text{ kJ/m}^3$  である) に比べてトルクの最大値が減少しており、磁気異方性は減少していることが分かった。 $\text{CR} = 0.025^{\circ}\text{C/s}$  の低く冷却速度で焼鈍した試料は、最も磁気異方性が小さい無方向性珪素鋼板となっていた。

これらの磁気特性変化の原因を明らかにするために X 線回折により結晶組織を調べた。Fig.4-9 に(200)極点図を示す。作製した試料に共通して、(100)面の他に(310)、(111)面強度が他の面より相対的に強くなっている。同図(a)、(b)において面の反射強度は(310)、(100)、(111)の順であった。(310)面の反射強度は図(a)と図(b)において同程度であるが、図(b)において(100)面が特に強くなったが、(111)面も幾分強く観察された。

ここで、 $\text{CR} = 0.025^{\circ}\text{C/s}$  で作製した試料面内の結晶面と配向性を調べるために、エッチピットの観察を行った。観察されたエッチピットを Fig.4-10 に示す。同図から分かるように正方形の(100)ピットの数 が試料全体のピット数の 82% を占め、かつ[100] 磁化容易軸が試料の圧延方向と約  $35^{\circ}$  内に分布している。((100)キューブ組織を構成させる理想的な無方向性珪素鋼板の[100]磁化容易軸が鋼板面内で圧延方向と  $45^{\circ}$  内でランダムに分布する)。そのため、作

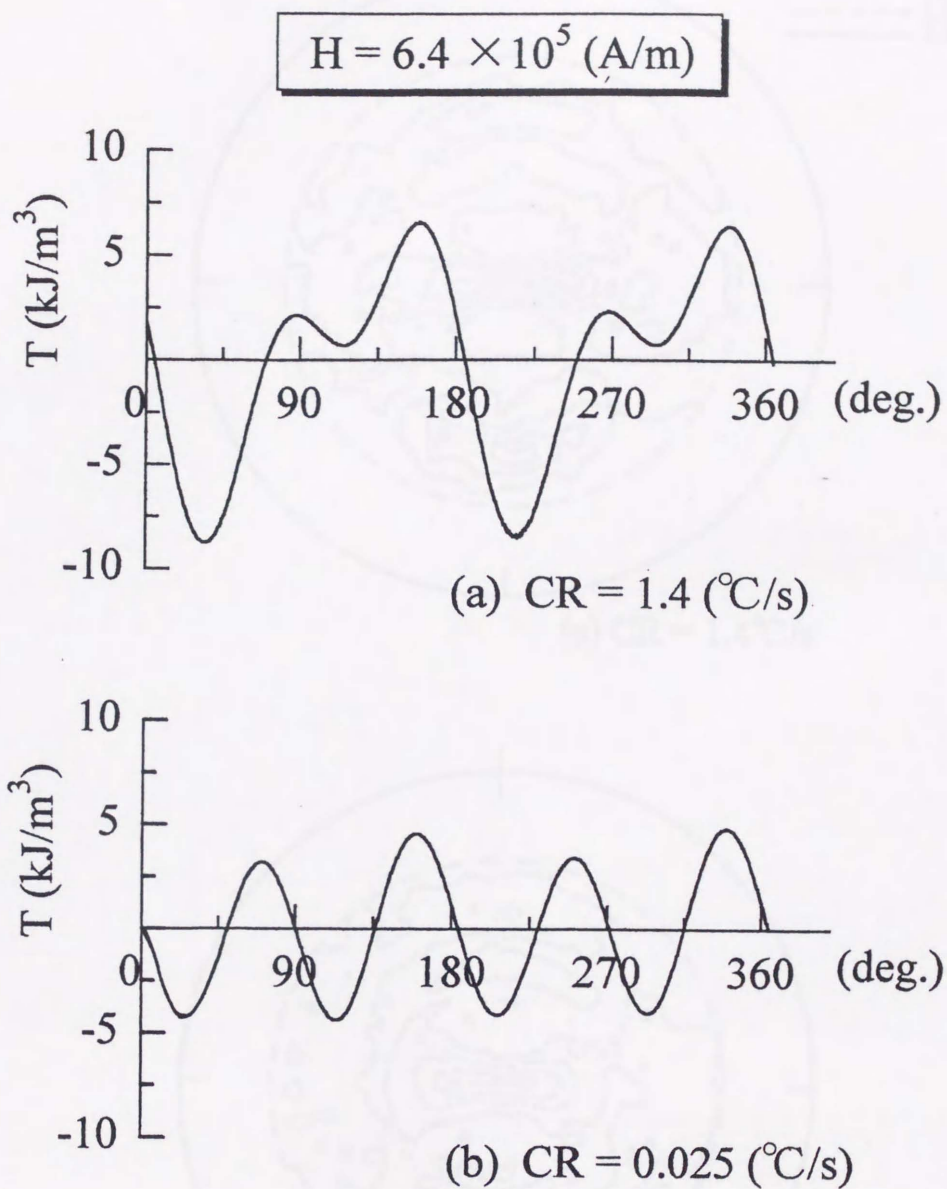


Fig.4-8 Torque curves of samples annealed with cooling rates of (a)  $1.4^\circ\text{C/s}$  or (b)  $0.025^\circ\text{C/s}$ .

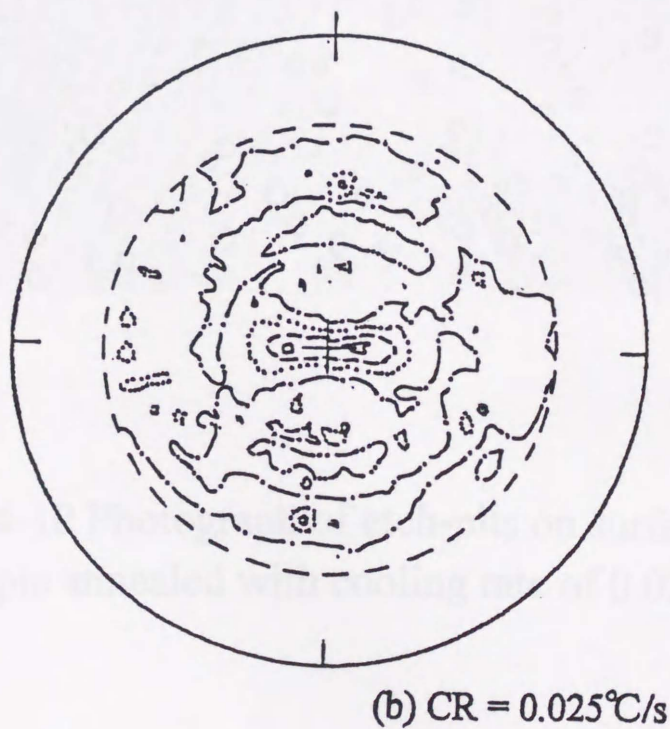
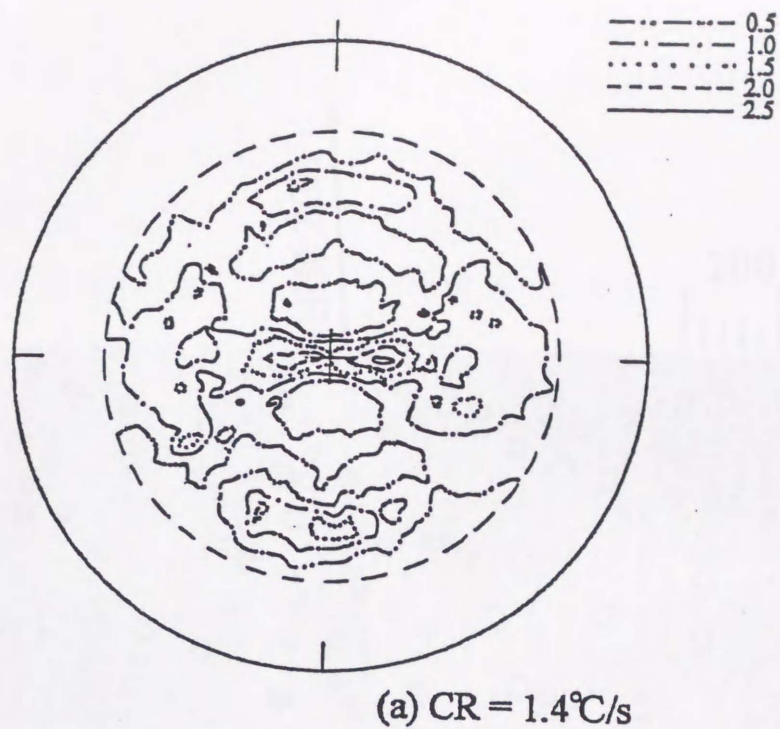


Fig.4-9 (200) pole figures of samples annealed with  $T_1 = 900^\circ\text{C}$ , and (a)  $CR = 1.4^\circ\text{C/s}$ , or (b)  $CR = 0.025^\circ\text{C/s}$ .

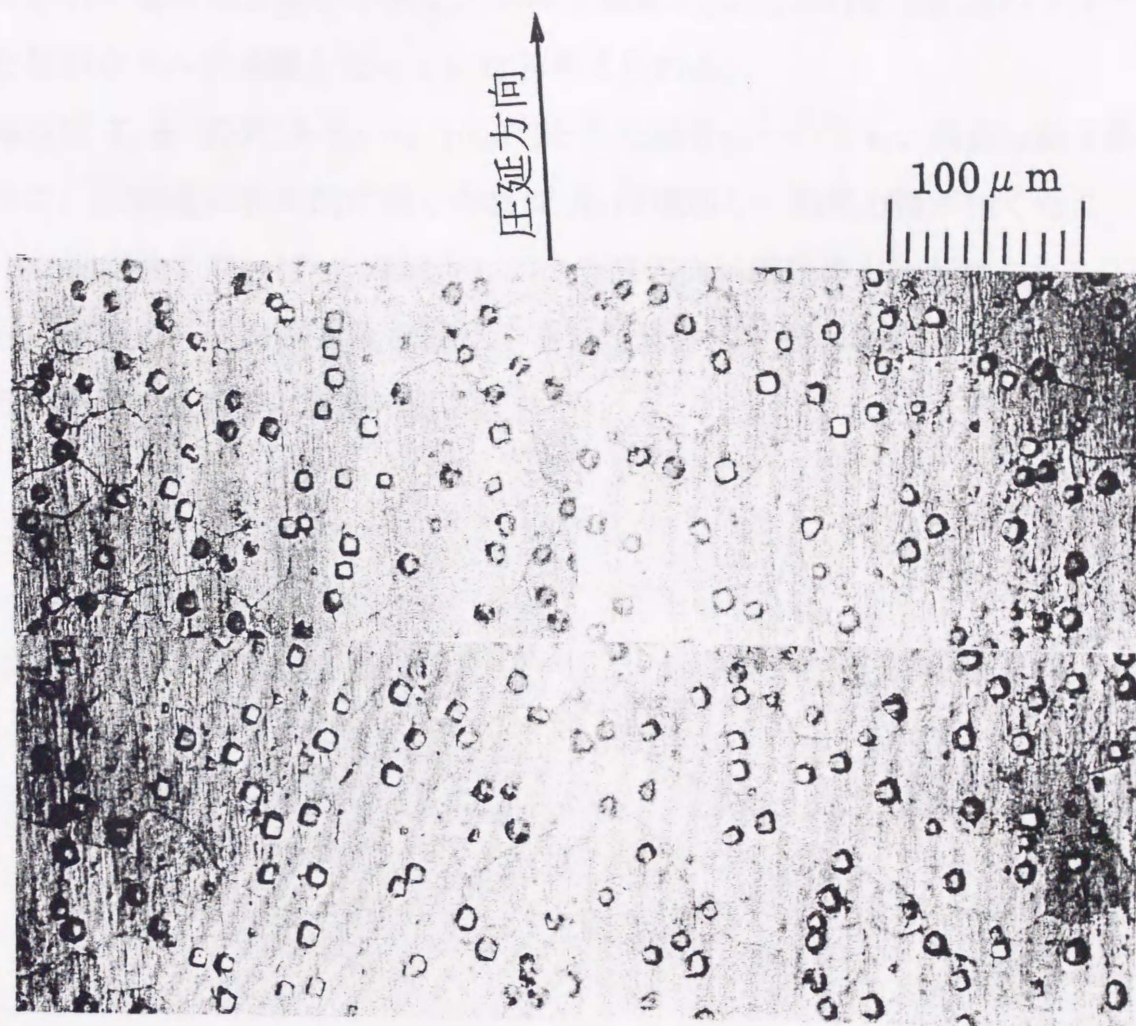


Fig.4-10 Photograph of etch-pits on surface of sample annealed with cooling rate of  $0.025^{\circ}\text{C}/\text{s}$ .

製した試料の磁気異方性が小さく、トルク曲線が(100)[001]集合組織のトルク曲線と相似なトルク曲線となっていたと考えられる。

焼鈍温度  $T_1$  を  $800^\circ\text{C}$  あるいは  $1000^\circ\text{C}$  とした場合についても、同様な結果が得られた。(100)面が相対的に弱くなれば  $A_2$  は増加し一軸異方性が強くなり、逆に(100)面が強くなれば  $A_2$  は減少し二つ垂直方向に磁気異方性が強くなる[3]。これらの理由から、冷却速度を低くすると圧延方向とそれに直角方向の磁気異方性が出現するものと理解できる。



#### 4-4 二段冷却条件による磁気特性の変化

前節では、冷却速度の変化によって磁気特性と結晶組織が変化することを示した。結晶組織が磁気特性に及ぼす影響を調べるために、焼鈍過程に前述の二段冷却過程を導入して検討を行った。Fig.4-11 は直流磁気特性  $B_8$  の  $T_2$  に対する変化を示す。T 方向の  $B_8$  は  $T_2$  に依存せず、かつ焼鈍時間にもあまり依存せず、ほぼ 1.62 T 一定となっている。一方、 $T_2 = 500^\circ\text{C}$ 、 $HT_2 = 5\text{ h}$  で熱処理した時、L 方向の  $B_8$  は 1.64 T で最小となっており、T 方向の  $B_8$  との差が最も小さくなり、Fig.4-8(b)の試料と同程度の異方向性になっていると推定できる。

試料のトルク曲線の例を Fig.4-12 に示す。同図(a) は  $T_2 = 700^\circ\text{C}$ 、 $HT_2 = 5\text{ h}$  で作製した試料について測定したものであり、(110)[001]集合組織のトルク曲線と相似なトルク曲線となっている。一方、同図(b)は、 $T_2 = 500^\circ\text{C}$ 、 $HT_2 = 5\text{ h}$  で作製した試料について測定したものであり、同図(a)に比べて異方性が小さく、(100)[001]集合組織のトルク曲線と相似なトルク曲線となっている。このトルク曲線の形は、冷却速度が最も低い  $CR = 0.025^\circ\text{C/s}$  で作製した試料のトルク曲線 Fig.4-8(b)とほぼ同じ形となっている。

トルク曲線から Fig.4-2 と同様にして得られる係数  $A_2$ 、 $A_4$  の  $T_2$  に対する変化を Fig.4-13 に示す。同図から分かるように  $A_4$  は  $T_2$  および焼鈍時間の変化によってほとんど影響を受けず、ほぼ  $4.0\text{ kJ/m}^3$  と一定になっている。一方、 $A_2$  は焼鈍時間および  $T_2$  によって変化し、1 時間および 5 時間焼鈍の場合とも  $500^\circ\text{C}$  で最小となっている。この値は Fig.4-2 中の  $T_1 = 900^\circ\text{C}$ 、 $CR = 0.025^\circ\text{C/s}$  の試料で得られた  $A_2$  の値と等しい。 $T_2 = 500^\circ\text{C}$  で得られた  $A_2$  は、 $HT_2 = 5\text{ h}$  の方が  $HT_2 = 1\text{ h}$  で焼鈍した様に  $T_2 = 500^\circ\text{C}$  において  $HT_2 = 5\text{ h}$  の方が  $HT_2 = 1\text{ h}$  の場合試料よりも低い値となっている。この結果は Fig.4-11 に示した結果よりも L と T で  $B_8$  が近い値となっていることと一致している。

以上の実験結果は  $CR = 1.4^\circ\text{C/s}$  と冷却速度が高いにもかかわらず、冷却過程

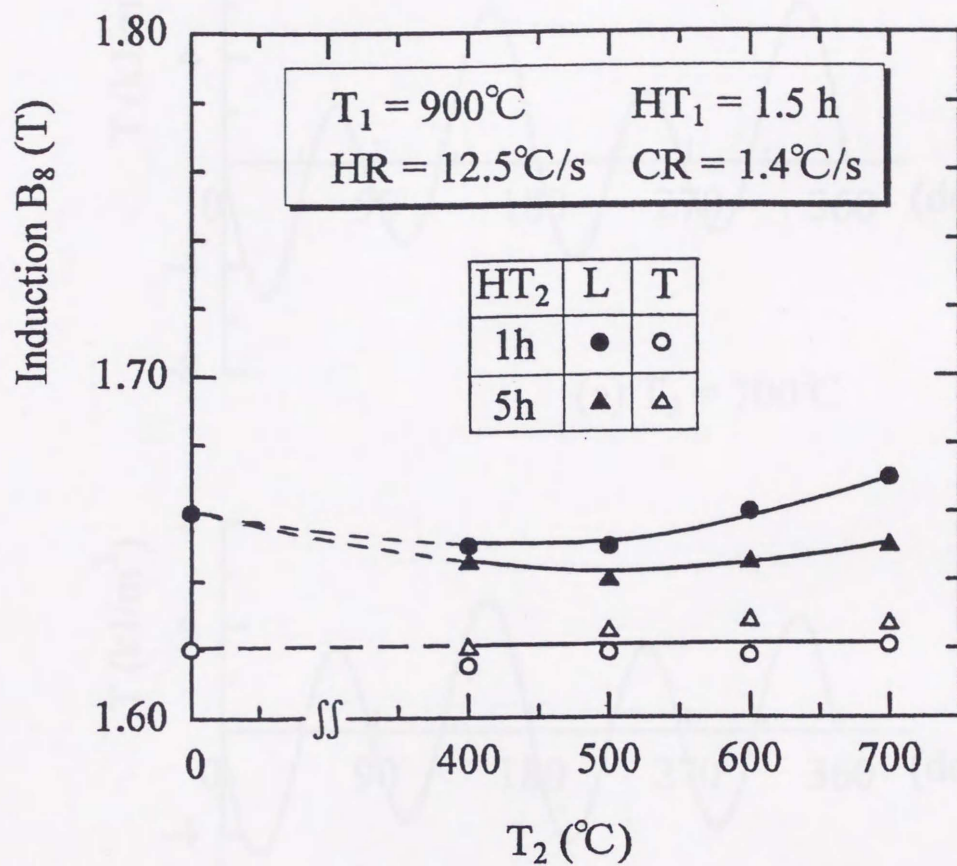
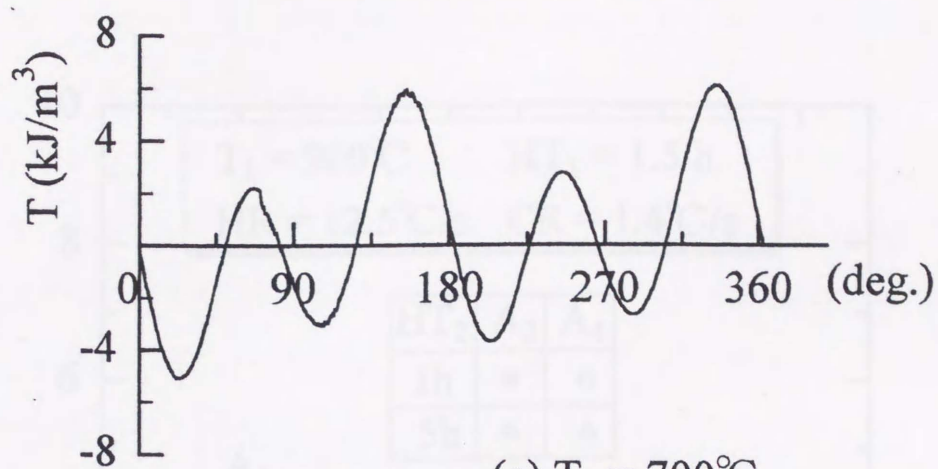


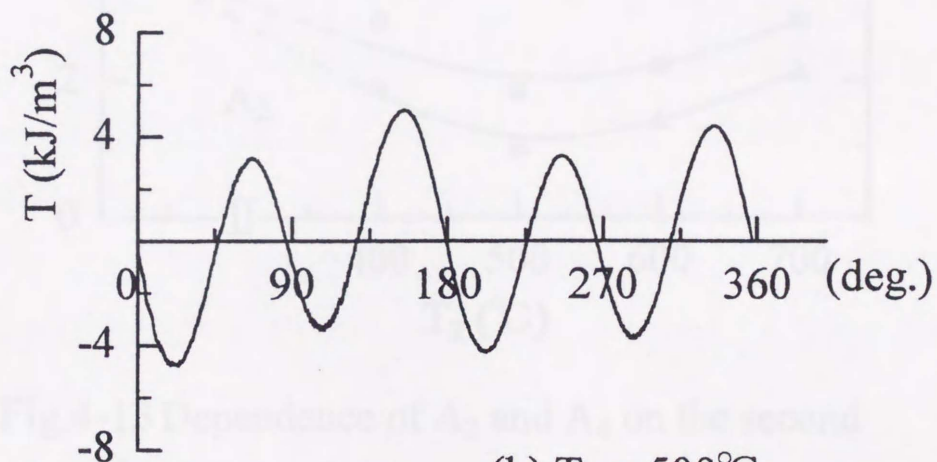
Fig.4-11 Dependence of  $B_8$  on the second annealing temperature.

Fig.4-12 Torque curves of samples annealed with  $HT_2 = 1.5 \text{ h}$ ,  $CR = 1.4^\circ\text{C/s}$ , and (a)  $T_2 = 700^\circ\text{C}$ , or (b)  $T_2 = 500^\circ\text{C}$ .

$$H = 6.4 \times 10^5 \text{ (A/m)}$$



(a)  $T_2 = 700^\circ\text{C}$



(b)  $T_2 = 500^\circ\text{C}$

Fig.4-12 Torque curves of samples annealed with  $HT_2 = 5$  h,  $CR = 1.4^\circ\text{C/s}$ , and (a)  $T_2 = 700^\circ\text{C}$ , or (b)  $T_2 = 500^\circ\text{C}$ .

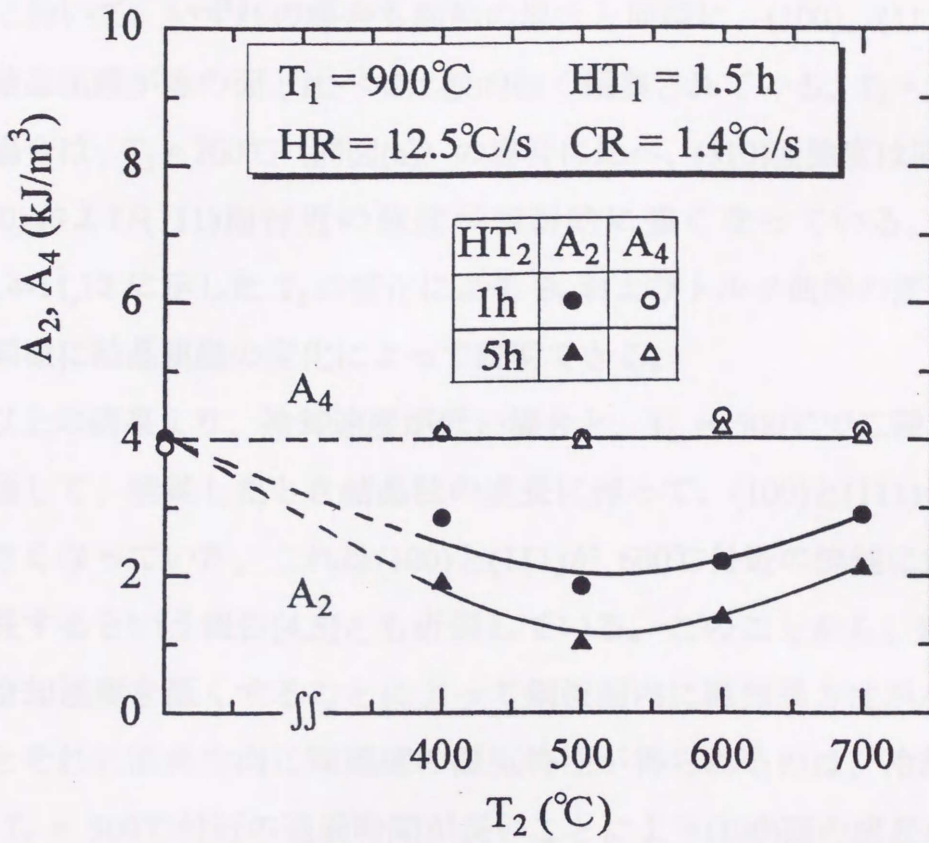
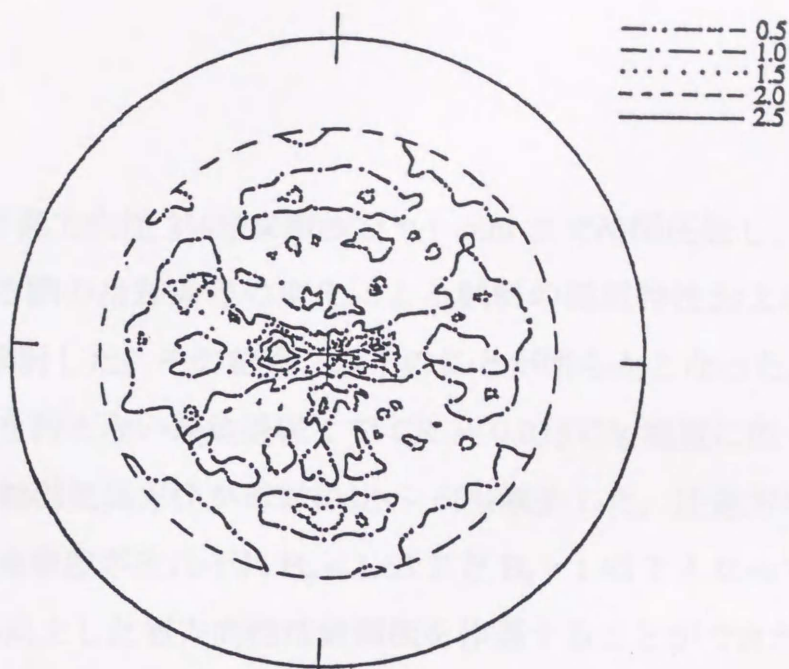


Fig.4-13 Dependence of  $A_2$  and  $A_4$  on the second annealing temperature.

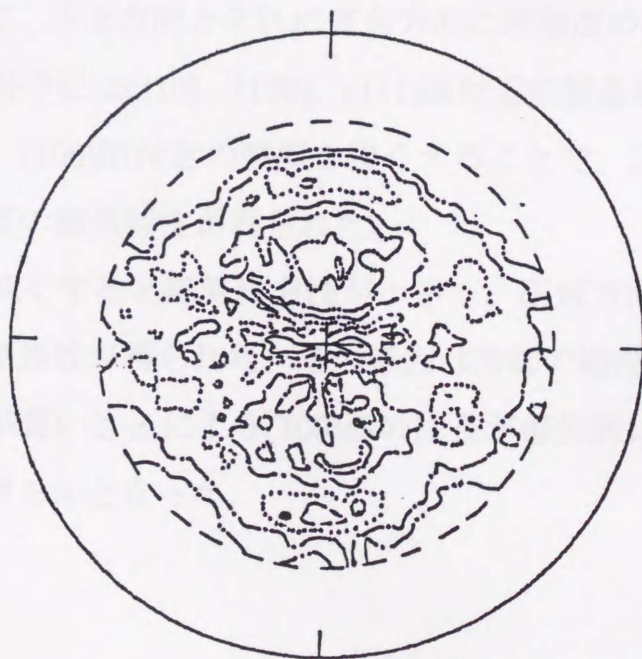
において第二焼鈍温度を 500°C に設けることで、一軸磁気異方性が母材に比べて 69% と減少した無方向性珪素鋼板を得ることができた。

Fig.4-14 に  $T_2 = 500, 700^\circ\text{C}$  で焼鈍した試料における(200)極点図を示す。同図において、いずれの場合も前節の場合と同様に、(100)、(111)、(310)面付近の結晶組織が他の面と比べて比較的強く観察されている。 $T_2 = 500^\circ\text{C}$  (同図(b)) の場合は、 $T_2 = 700^\circ\text{C}$  (同図(a)) の場合に比べ、(310)面強度は同程度であるが、(100)および(111)面付近の強度が相対的に強くなっている。このことから Fig.4-11,12 に示した  $T_2$  の変化による  $B_8$  およびトルク曲線の変化は前節の結果と同様に結晶組織の変化によって説明できる。

以上の結果より、冷却速度が低い場合と、 $T_2 = 500^\circ\text{C}$  で二段冷却の場合とも共通して、焼鈍したとき結晶粒の成長に伴って、(100)と(111)の占める割合が大きくなっていった。これは(100)と(111)が  $600^\circ\text{C}$  付近の焼鈍に対して優先的に成長するという報告[4,5]とも近似している。このことから、前節で示した様に冷却速度を低くすることによって鋼板面内に磁気異方性が小さく、圧延方向とそれに直角方向に同程度の磁気特性が得られるのは、冷却の過程において  $T_2 = 500^\circ\text{C}$  付近の通過時間が長いことにより(100)面の成長が優先的になることに起因していると考えられる。



(a)  $T_2 = 700^\circ\text{C}$



(b)  $T_2 = 500^\circ\text{C}$

Fig.4-14 (200) pole figures of samples annealed with  $HT_2 = 5$  h,  $CR = 1.4^\circ\text{C/s}$ , (a)  $T_2 = 700^\circ\text{C}$  or (b)  $T_2 = 500^\circ\text{C}$ .

#### 4-5 まとめ

厚さ 0.5 mm の無方向性 3%珪素鋼板を 0.1 mm まで冷間圧延し、Ar ガス雰囲気中で焼鈍する際の冷却過程の変化による試料の磁気特性および結晶組織の変化について検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 第二焼鈍温度を持たない焼鈍過程 I で  $CR = 0.025^\circ\text{C}/\text{s}$  程度に低くすれば、鋼板面内の一軸磁気異方性が母材に比べ 69%減少した。圧延方向とそれに直角方向の磁束密度がそれぞれ  $B_g = 1.63 \text{ T}$  と  $B_g = 1.62 \text{ T}$  となっており、母材に比べ 11%向上した無方向性珪素鋼板を作製することができた。
- 2) 第一焼鈍温度を  $900^\circ\text{C}$  とし、冷却過程において  $500^\circ\text{C}$ 、5 h の第二焼鈍温度を設けた場合には、冷却速度  $CR = 1.4^\circ\text{C}/\text{s}$  と高くても、鋼板面内に磁気異方性が小さく、圧延方向とそれに直角方向に同程度の磁気特性が得られた。
- 3) 作製した試料中には(310)、(100)、(111)面付近の結晶組織が比較的多く含まれているが、(100)面付近の強度を強くすることで、圧延方向とそれに直角方向に同程度の磁気特性が得られた。
- 4) 冷却速度を低くすると磁気異方性が小さく、圧延方向とそれに直角方向に同程度の磁気特性が得られた。その原因は冷却の過程において、 $500^\circ\text{C}$  付近の通過時間が長いことにより(100)面の成長が優先的になることに起因していることが明らかとなった。

## 参考文献

- [1] 黄 柏英、山本 健一、山城 康正：日本応用磁気学会誌, vol.22, no.4-2, pp.649-652 (1998).
- [2] 開道 力、脇坂 岳顕：電気学会論文 A, vol.117-A no.7, p.685 (1997).
- [3] 大田 恵造：「磁気工学の基礎Ⅱ」共立全書, p.234 (1973).
- [4] 長嶋 晋一：「集合組織」丸善出版, p.133 (1984).
- [5] C. S. Barrett: Trans. AIME, vol.125, p.516 (1937).