

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	http://hdl.handle.net/20.500.12000/25355

一周期分のヒステリシス曲線が囲む面積に相当する磁気損失で、その材料に固有の損失である。ヒステリシス損を減ずるには、材料内部の不純物を除去することや内部応力を除去することによって保磁力を減ずることが課題となる。しかし、珪素鋼板の再結晶粒の成長の仕方は焼鈍条件によって異なり、この焼鈍条件の中に損失が最小となる最適な焼鈍条件があると予想される。

以上のことから、本章では無方向性珪素鋼板の磁気特性改善の一方法として、まず試料の薄板化、そして次に焼鈍温度、焼鈍時間、昇温速度、冷却速度および雰囲気などの焼鈍処理の最適条件を見出すことにより高磁束密度・低損失の無方向性 3%珪素鋼板の作製を試みた。すなわち、冷間圧延により厚さ 0.1 mm とした後、Ar ガス中で焼鈍を行い、無方向性珪素鋼板に焼鈍するときの焼鈍温度(T)、焼鈍時間(HT)、昇温速度(HR)及び冷却速度(CR)の条件を変化させたときの磁気特性を測定した。また、作製した試料の焼鈍条件によるトルク特性を測定した。

3-2 実験試料の作製と実験方法

実験母材として、厚さ 0.5 mm 無方向性 3%珪素鋼板（新日鉄製：50H290）を使用した。試料は母材から長さ 100 mm、幅 25 mm に切り出し、46%のフッ酸(HF)で、表面被膜を除去した後、蒸留水、エタノールを用いて洗浄、乾燥させた後、直径 20 mm のワークロールを有する 4 段圧延機で、一回平均の圧延率を 10%に統一して、所定の厚さ 0.1 mm まで冷間圧延した後、長さ 100 mm、幅 5 mm に切り出して用いた。

焼鈍の際に、試料をアルミナ板で挟んで赤外線集中加熱炉の炉心管内の中心部に配置し、管内を純度 99.999%のアルゴン(Ar)ガスで十分に置換した後、Ar 雰囲気中で熱処理を行った。この時、Ar ガスは完全に閉じ込めた状態で実験を行った。

焼鈍温度(T)、焼鈍時間(HT)、昇温速度(HR)、冷却速度(CR)を焼鈍パラメータとして試料を作製した。焼鈍の過程は Fig.3-1 に示す。作製した試料の諸磁気特性は次の装置を用いて測定した。交流磁気損失は磁気損失測定器(菱和電子社製)により測定周波数 $f = 50 \text{ Hz}$ で測定した。損失分離は 50 Hz と 100 Hz の特性を用いて行った。直流磁気特性は B-H ループトレーサ(テスラ社製)を用いて、800 A/m の磁界印加時における磁束密度 B_0 及び保磁力 H_0 を測定した。また、試料の磁気異方性トルクは磁気異方性トルク計(玉川製作所製)を用いて測定した。トルク測定に用いた試料はフッ酸と硝酸の混合液中で化学エッチングすることによって、直径 4 mm の円板状にした。極点図は透過法により測定した。

3-3 鋼の熱処理による機械的性質の変化

鋼の熱処理による機械的性質の変化は、その熱処理の種類と温度、時間によって異なる。この図は、鋼の熱処理の過程を示している。図の縦軸は温度（Temperature）を示し、横軸は時間（Time）を示している。図の過程は、加熱（HR）、保持（HT）、冷却（CR）の順に進む。保持（HT）の時間は、鋼の機械的性質を安定させるために必要である。冷却（CR）の速度は、鋼の機械的性質に大きな影響を与える。図の過程は、鋼の熱処理の過程を示している。

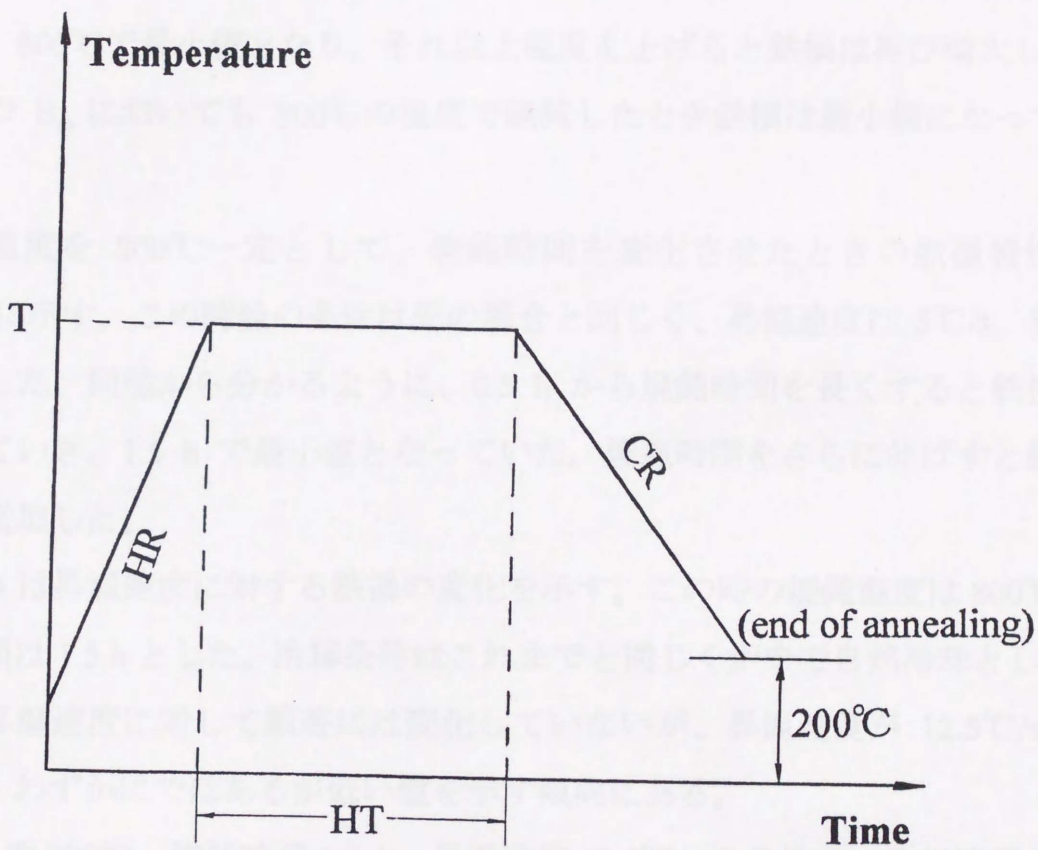


Fig.3-1 Process of annealing.

3-3 焼鈍条件による磁気特性の変化

焼鈍温度に対する鉄損特性変化を Fig.3-2 に示す。ここでは昇温速度を $5^{\circ}\text{C}/\text{s}$ として所望の温度とした後に、1.5 h 保持した後、制御せず炉中で自然冷却させた。Fig.3-2 に示すように、 600°C から焼鈍温度を上昇させると鉄損は減少していき、 800°C で最小値となり、それ以上温度を上げると鉄損は再び増大した。いずれの B_m においても 800°C の温度で焼鈍したとき鉄損は最小値になっていた。

焼鈍温度を 800°C 一定として、焼鈍時間を変化させたときの鉄損特性を Fig.3-3 に示す。この時他の条件は先の場合と同じく、昇温速度は $5^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 、自然冷却とした。同図から分かるように、0.5 h から焼鈍時間を長くすると鉄損は減少していき、1.5 h で最小値となっていた。焼鈍時間をさらに伸ばすと鉄損は再び増加した。

Fig.3-4 は昇温速度に対する鉄損の変化を示す。この時の焼鈍温度は 800°C 、焼鈍時間は 1.5 h とした。冷却条件はこれまでと同じく炉中で自然冷却とした。鉄損は昇温速度に対して顕著には変化していないが、昇温速度が $12.5^{\circ}\text{C}/\text{s}$ において、わずかにではあるが低い値を示す傾向にある。

焼鈍温度 800°C 、焼鈍時間 1.5 h、昇温速度 $12.5^{\circ}\text{C}/\text{s}$ の条件で、冷却速度を変化させた時の鉄損特性を Fig.3-5 に示す。同図から分かるように、鉄損は $0.2^{\circ}\text{C}/\text{s}$ の冷却速度から冷却速度の高くなるにつれて減小し、冷却速度が $1.0^{\circ}\text{C}/\text{s}$ の時に鉄損は最小値 $W_{15/50} = 2.38 \text{ W/kg}$ を示していた。この値は母材 ($W_{15/50} = 2.61 \text{ W/kg}$) に比べて 10% 減少した。その後、さらに冷却速度が高くなると鉄損は再び増大した。この試料の 50 Hz で 1.3 T の磁束密度における鉄損を二周波法によりヒステリシス損失 W_h と渦電流損失 W_e に分離した結果を Fig.3-6 に示す。ヒステリシス損失はバラツキが多少あるがほぼ一定値となっている。一方、渦電流損失 W_e は冷却速度が $0.2^{\circ}\text{C}/\text{s}$ から $1.0^{\circ}\text{C}/\text{s}$ までの間にお

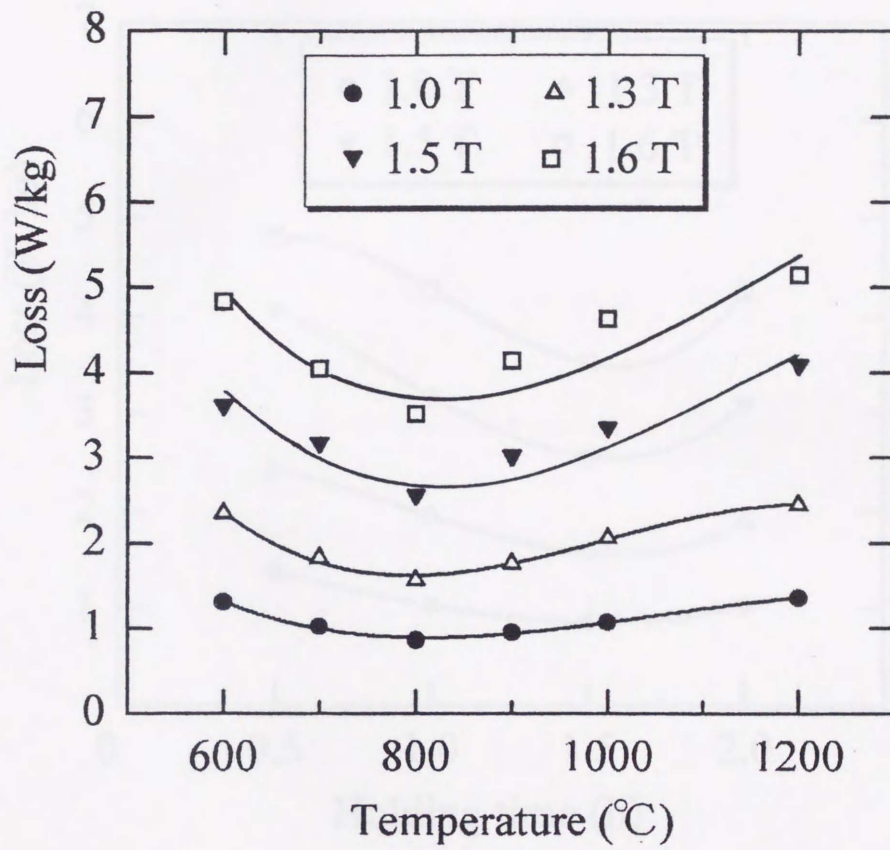


Fig.3-2 Iron loss dependence on annealing temperature. Hold time was 1.5 h, heating rate was 5°C/s and cooling was furnace cooling.

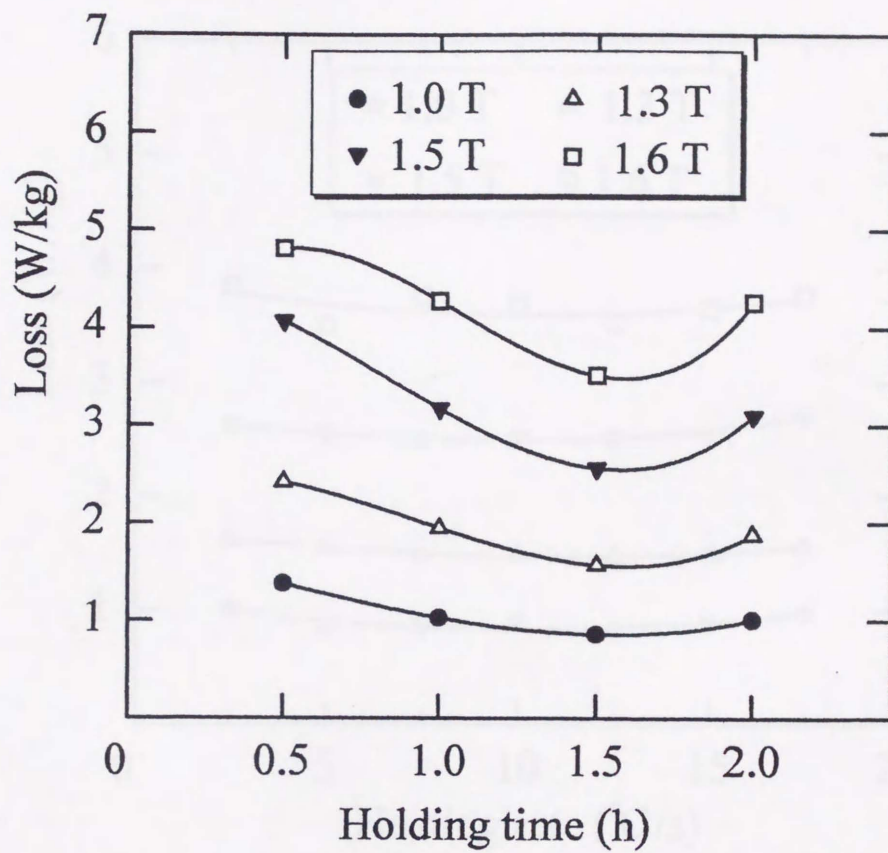


Fig.3-3 Iron loss dependence on holding time. Annealing temperature was 800°C, heating rate was 5°C/s and cooling was furnace cooling.

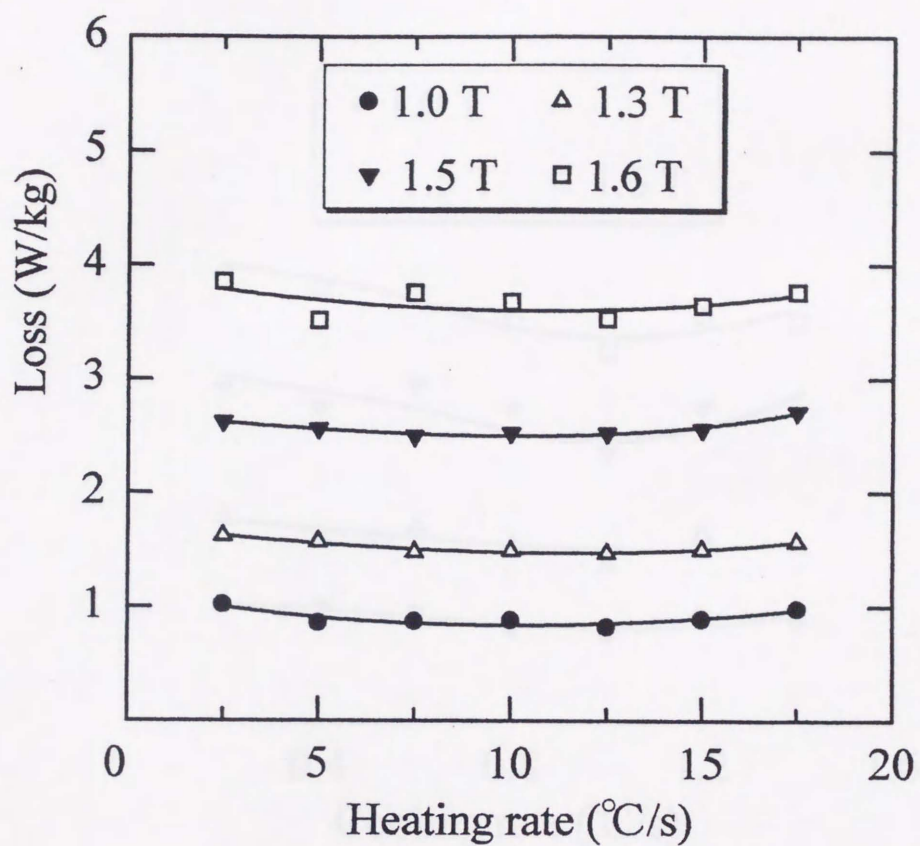


Fig.3-4 Iron loss dependence on heating rate. Annealing temperature was 800°C, hold time was 1.5 h and cooling was furnace cooling.

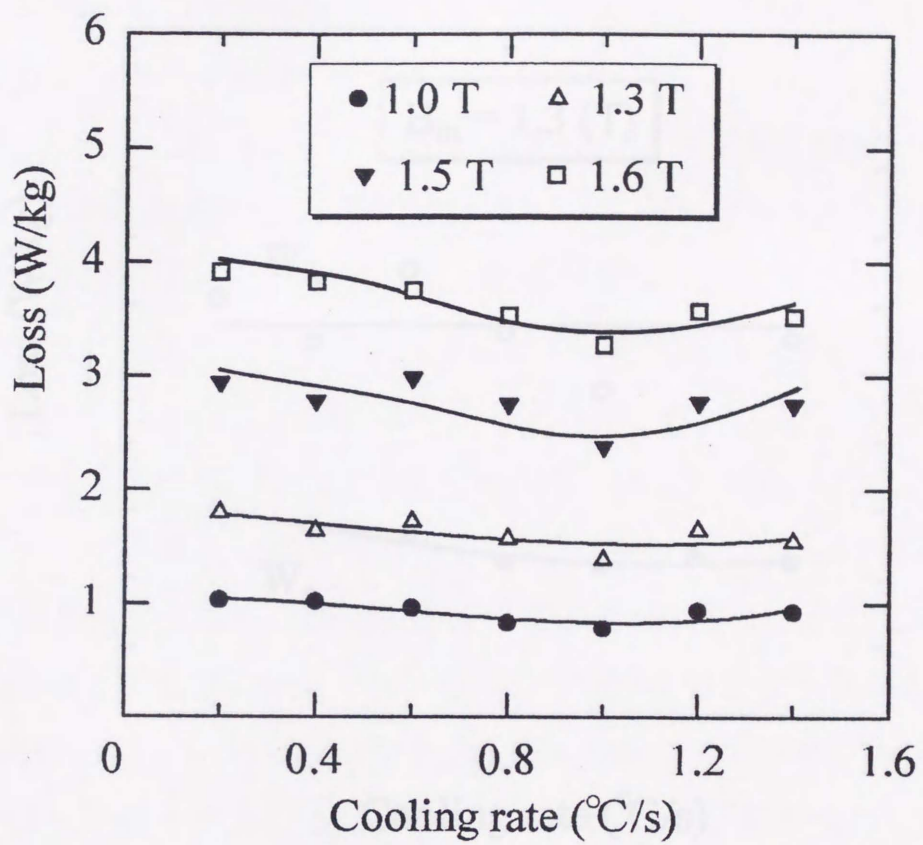


Fig.3-5 Iron loss dependence on cooling rate. Annealing temperature was 800°C, hold time was 1.5 h and heating rate was 12.5°C/s.

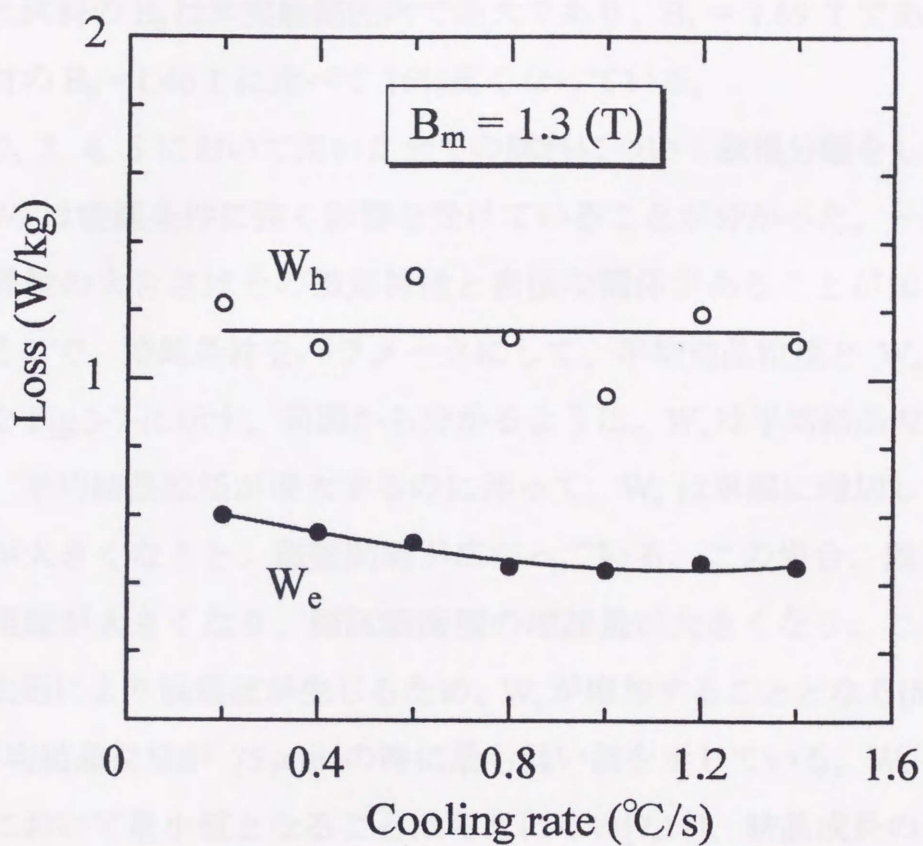


Fig.3-6 W_e and W_h dependence on cooling rate. Annealing temperature was 800°C , hold time was 1.5 h and heating rate was 12.5°C/s .

いて単調に減少しているが、そのあと W_e はほぼ一定値となっている。

以上のことから、本実験における最適な焼鈍条件は、焼鈍温度が 800°C、焼鈍時間 1.5 h、昇温速度 12.5°C/s、冷却速度 1.0°C/s に設定した。この条件下で焼鈍した試料の B_g は本実験範囲内で最大であり、 $B_g = 1.69$ Tであった。この値は母材の $B_g = 1.46$ T に比べて 16% 高くなっている。

Fig.3-2, 3, 4, 5 において用いた全ての試料について鉄損分離をしたところ、 W_e と W_h は焼鈍条件に強く影響を受けていることが分かった。一般に珪素鋼板の結晶粒の大きさはその磁気特性と密接な関係があることが知られている [8,9]。そこで、焼鈍条件をパラメータにして、平均結晶粒径と W_e および W_h の関係を Fig.3-7 に示す。同図から分かるように、 W_e は平均結晶粒径に依存しており、平均結晶粒径が増大するのに伴って、 W_e は単調に増加している。結晶粒径が大きくなると、磁壁間隔が広がっている。この場合、励磁の際の磁壁移動距離が大きくなり、磁区断面積の増加量が大きくなり、この断面に電磁誘導法則により渦電流が生じるため、 W_e が増加することとなる [8,10]。一方、 W_h は平均結晶粒径が 75 μm の時に最も低い値を示している。 W_h が特定の結晶粒径において最小値となることは考えにくい [7,11]。結晶成長の過程において平均結晶粒径が 75 μm となる焼鈍条件下で、好ましい集合組織すなわち H_c が最小になるような集合組織が成長し、 W_h が最小となったと考えられる [12,13]。

前記実験と同条件で焼鈍した試料の磁気異方性トルクを測定した。焼鈍温度、焼鈍時間、昇温速度を変化させて焼鈍した試料を用いて測定したトルク曲線の形はほぼ同じであり、(110)[001]集合組織が強い場合に得られる一軸異方性的なトルク曲線 [14] となっている。一方、冷却速度を変化させた時、測定したトルク曲線の形状に変化が見られた。Fig.3-8 (a),(b),(c) はそれぞれ冷却速度 (CR) を 1.4°C/s、1.0°C/s、0.2°C/s で焼鈍した試料をについて測定したトルク曲線である。同図(a)は先に述べたように(110)[001]集合組織に見られる比較的

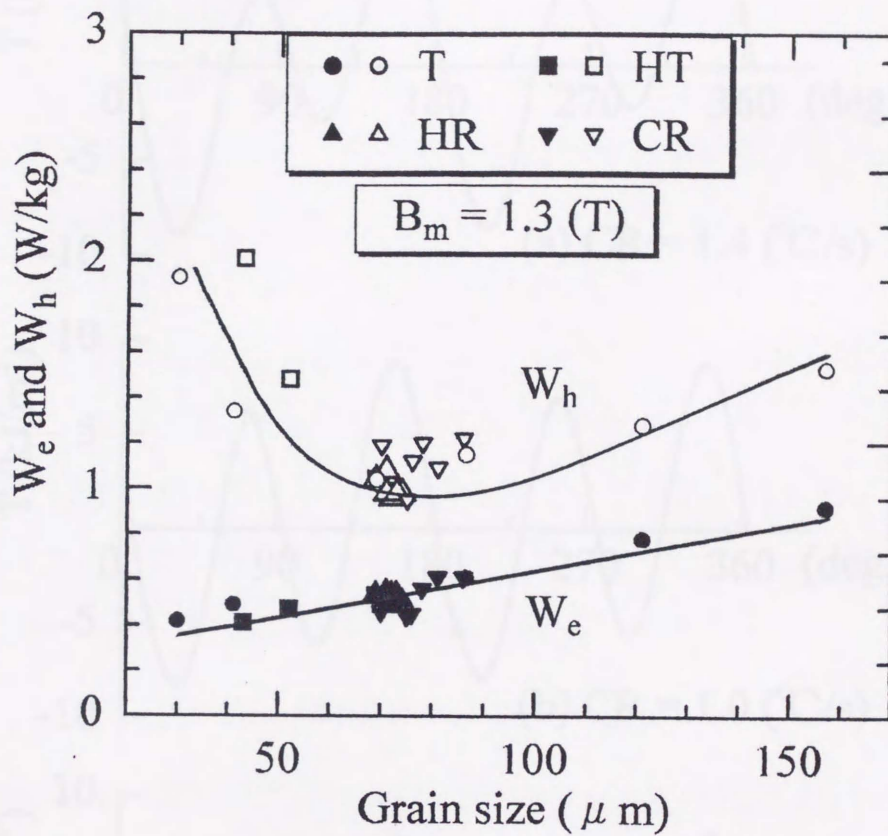


Fig.3-7 W_e and W_h dependence on grain size.
 (T: Annealing Temperature, HT: Holding Time,
 HR: Heating Rate and CR: Cooling Rate.)

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

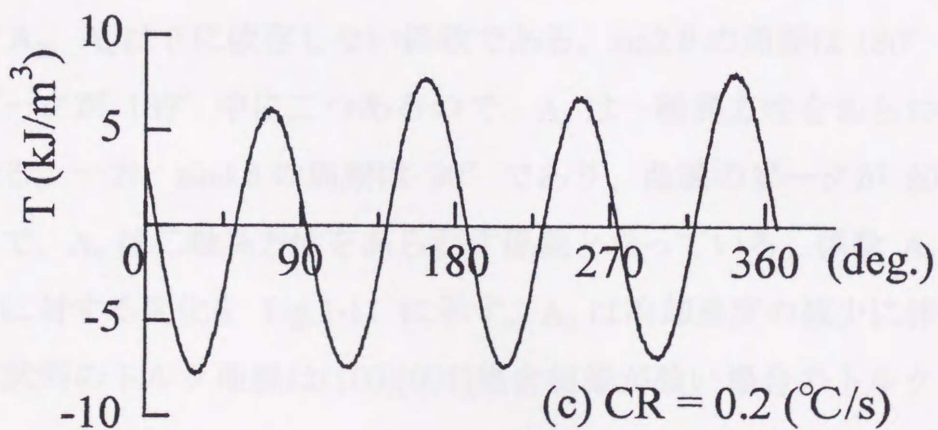
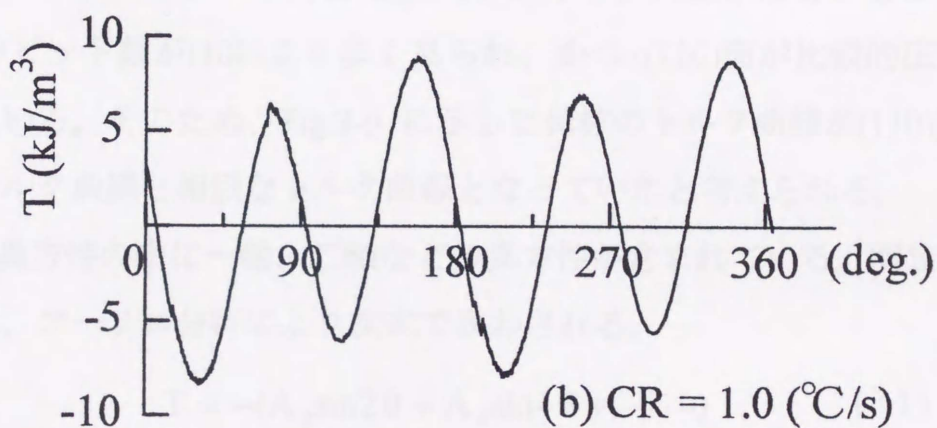
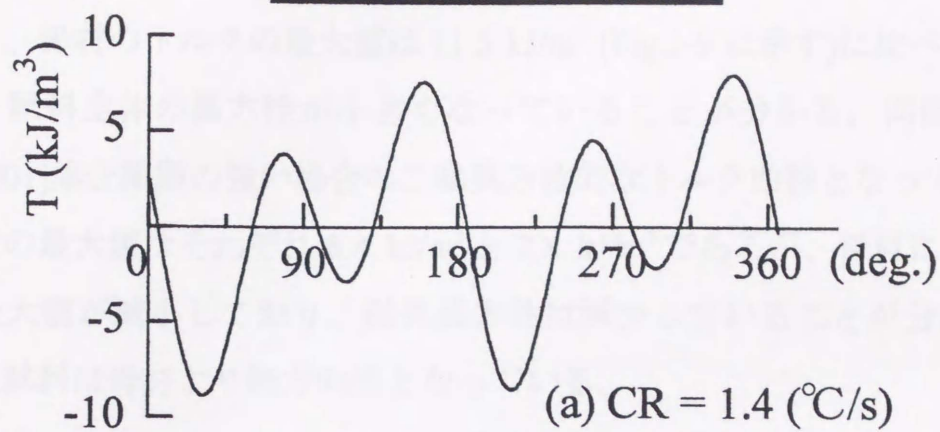


Fig.3-8 Torque curves of samples annealed with cooling rate of (a) 1.4°C/s, (b) 1.0°C/s, and (c) 0.2°C/s.

一軸異方性的なトルク曲線となっていた。このときトルクの最大値は 8.4 kJ/m^3 であり、母材のトルクの最大値は 11.5 kJ/m^3 (Fig.3-9 に示す) に比べて減少しており、試料全体の異方性が小さくなっていることが分かる。同図(b),(c)では(100)[001]集合組織の強い場合の二軸異方性的なトルク曲線となっており[13]、トルクの最大値はそれぞれ 8.8 kJ/m^3 と 7.8 kJ/m^3 であるが、母材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。作製した試料は母材より無方向性となっている。

母材のエッチピット写真を Fig.3-10 に示す、同図から分かるように(111)と(110)のピット数が(100)より多く見られ、かつ(110)面が比較的圧延方向にそろっている。そのため、Fig.3-9 に示した母材のトルク曲線が(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たと考えられる。

磁気異方性の中に一軸、二軸などの異方性が含まれている。測定したトルク曲線は、フーリエ分析により次式で表わされる。

$$T = -(A_2 \sin^2 \theta + A_4 \sin^4 \theta + \dots) \quad (3-1)$$

ここで A_2 、 A_4 は θ に依存しない係数である。 $\sin^2 \theta$ の周期は 180° であり、曲線のピークが 180° 中に二つあるので、 A_2 は一軸異方性をあらわす係数となっている。一方、 $\sin^4 \theta$ の周期は 90° であり、曲線のピークが 90° 中に二つあるので、 A_4 は二軸異方性をあらわす係数となっている。係数 A_2 と A_4 の冷却速度に対する変化を Fig.3-11 に示す。 A_2 は冷却速度の減少に伴い急激に減少し、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。冷却速度が 1.4°C/s 、 1.0°C/s と 0.2°C/s のとき、 A_2 はそれぞれ 2.10 kJ/m^3 、 1.72 kJ/m^3 と 1.18 kJ/m^3 となっており、無方向性珪素鋼板母材($A_2 = 3.88 \text{ kJ/m}^3$) に比べて一軸磁気異方性がそれぞれ 45%、55%と 69%減少していた。一方、 A_4 は冷却速度によらず、ほぼ 4.0 kJ/m^3 と一定になっていた。これらの結果は、CR を低くすると試料面内で圧延方向とそれに直角方向の磁気異方性が同程度

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

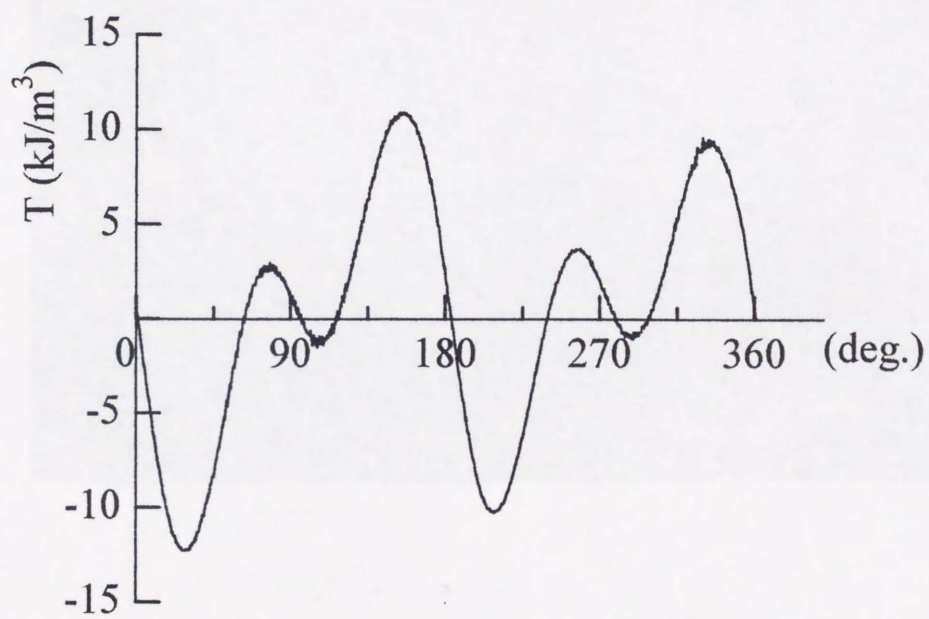


Fig.3-9 Torque curve of original specimen 50H290.

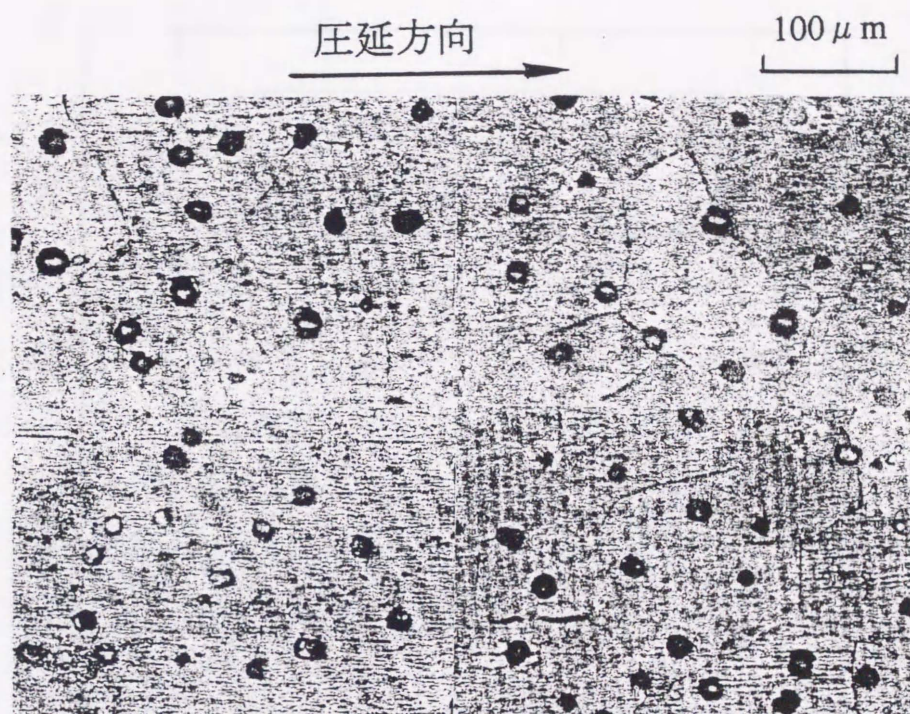


Fig.3-10 Photograph of etch-pits on the surface of original specimen 50H290.