

伸び続ける電磁鋼板

岡見雄二
Yuji Okami

NKK鉄鋼事業部薄板技術開発部 主幹

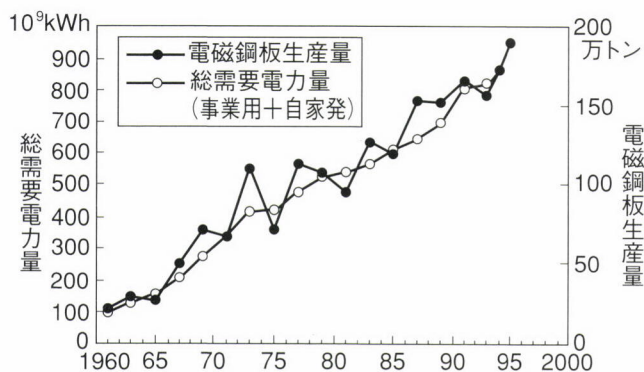
Increasing Magnetic Steel Sheet and Strip

1 はじめに

身の回りを見渡すとほとんど全ての機器がスイッチひとつで動く「電気文明」の中で、私どもは生活している。一般的には水力・原子力・火力発電で発電機を通して、力学・物理・化学的エネルギーを電気エネルギーに変換し、変圧器（トランス）を介して電気エネルギーを輸送・調整し、直接使うか、電動機（モータ）で機械的エネルギーに変換して使う訳である。各家庭で使われているモータ数を数えてみると、自動車に30～40、エアコンに9、換気扇に3、VTRに4……、優に100個は使われている。皆さんご存じでしたか？

これらのモータやトランス等の鉄心に使われているのが電磁鋼板である。磁気を通し易く、鉄損（鉄心によるエネルギーロス）が少なく、効率的なエネルギー変換・調整が可能になる。即ち、電気文明は電磁鋼板があって初めて成り立ち、発展するのである。しかし、電気には馴染みがあるが、磁気、電磁鋼板？なんだそれはという話をよく耳にする。本報告は電磁鋼板の生産動向、歴史や技術動向など全般に亘り客観的に、かつ平易に解説したものである。

2 電磁鋼板の生産動向



参考資料：電力白書、日本鉄鋼連盟生産実績

図1 日本における総需要電力量と電磁鋼板生産量

図1に我が国における電磁鋼板の生産量と総需要電力量を示す。電力量は当然ながら電気文明の発展と共にコンスタントに伸びている。また、電磁鋼板の生産量も景気の波に振られてはいるが電力量とほぼ同じ傾向であり、電気文明を支えている事を証明している。

電磁鋼板は、主にトランスなどの静止器に使われる方向性電磁鋼板と主にモータ等の回転機に使われる無方向性電磁鋼板に分けられる。我が国における方向性電磁鋼板の生産量比率は全体の20～30％であり、世界全体で見てもほぼ同じ比率である。

国別生産量の最近の統計を得るのは難しいが、1988年の統計（図2）によれば、日本は世界のほぼ30％を生産し、世界最大の生産国である。日本の輸出比率は50～60％であり、日本は世界最大の供給国でもある。世界的には電磁鋼板の供給能力は不足気味である。また現在東南アジア各国を中心に電気文明化の進展が目覚ましく、電磁鋼板使用量の伸び

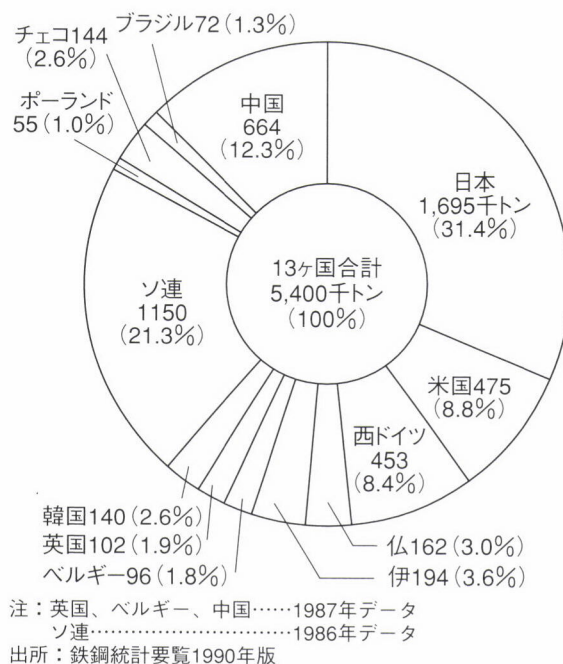


図2 電磁鋼板の国別生産量（1988年）

が顕著である。日本が今後これらの国、更には全世界に対してどのような形で貢献して行くのかに興味を持たれる。

3 電磁鋼板の歴史

表1に日本を中心にした電磁鋼板の歴史を示す。鉄に珪素を添加すると鉄損が非常に小さくなることを1900年英国人Hadfieldが発見した。以来珪素鋼板として発展してきた訳であるが、現在は電磁鋼板と呼ばれる様になった。歴史を振り返る時全てを電磁鋼板と呼ぶのは問題との指摘を理解し

表1 日本を主体にした電磁鋼板の歴史

年	主な事項
1900	Hadfield (英) が電磁鋼板の発見
1904	米、独で熱延電磁鋼板の工業生産開始
1924	新日鉄 (当時の官営八幡製鉄所) が熱延電磁鋼板の工業生産開始
1926	本田、茅による鉄の磁気異方性の発見
1929	新日鉄がトランス用T級熱延電磁鋼板の生産開始
1931	川鉄が熱延電磁鋼板の生産開始
1934	Goss (米) が方向性電磁鋼板の発明
1935	Armco社が方向性電磁鋼板の生産開始
1954	川鉄が無方向性冷延電磁鋼板の生産開始
1956	新日鉄が無方向性冷延電磁鋼板の生産開始
1958	新日鉄、川鉄が方向性電磁鋼板の生産開始
1961	新日鉄が熱延電磁鋼板の生産中止
1968	新日鉄が高磁束密度方向性電磁鋼板 (HI-B) の生産開始
1972	川鉄が高磁束密度方向性電磁鋼板 (RG-H) の生産開始
1983	新日鉄がレーザーによる磁区幅制御材 (ZDKH) を生産開始
1987	川鉄がプラズマによる磁区幅制御材 (PJ) を生産開始
1993	NKKが珪素6.5%含む特殊電磁鋼板 (通称6.5%珪素鋼板) の生産開始

注) 現在の製造メーカー

＜方向性:新日鉄,川鉄
無方向性:新日鉄,川鉄,NKK,住友金属,神鋼

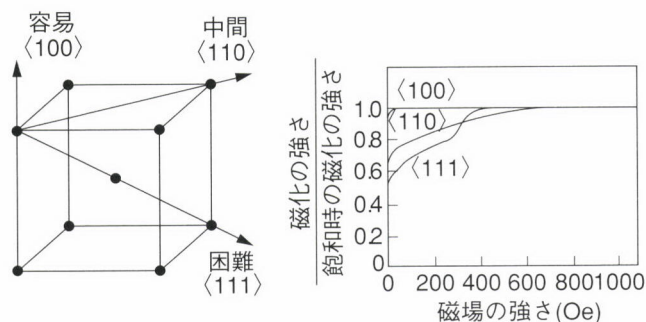
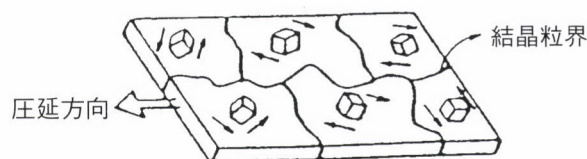


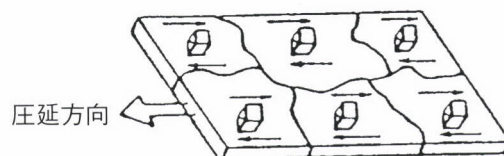
図3 鉄の結晶方位と磁化特性¹⁾

ながらも全て電磁鋼板と呼ぶことにした。

1904年頃から欧米各国で熱延電磁鋼板の工業生産が開始されたが、日本では1924年当時の官営八幡製鉄所（現新日鉄）で製造が開始された。1926年に本田、茅により鉄の結晶磁気異方性の発見¹⁾ (図3) があり、Armco社のGossによって、この磁化しやすい<100>軸を圧延方向に揃えた方向性電磁鋼板が発明された。これは(110)<001>方位を有している。この組織は現在でもGoss組織と呼ばれている。またランダム組織のものは無方向性電磁鋼板として区別された(図4)。



(1) 無方向性電磁鋼板 (ランダム組織)



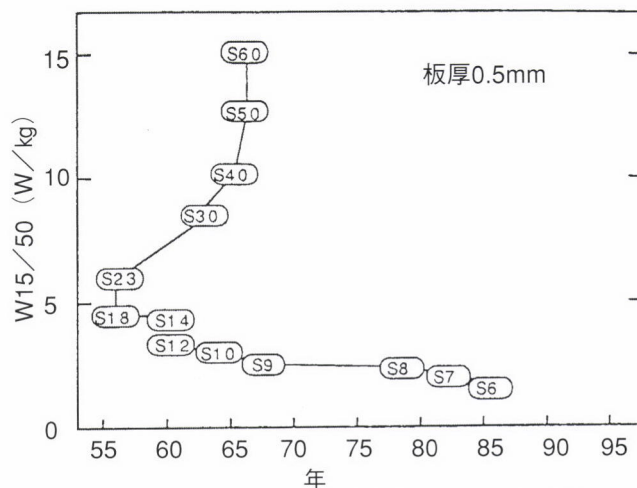
(2) 方向性電磁鋼板 (Goss 組織)

(注) →磁化容易方向 (<001>軸) を示す

図4 電磁鋼板の結晶配列

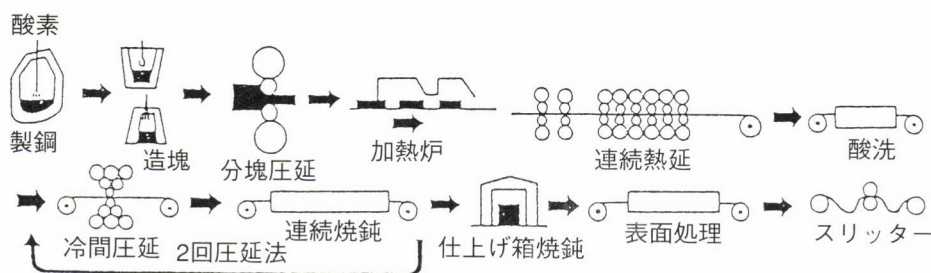
3.1 無方向性電磁鋼板の歴史

熱延電磁鋼板は1925年珪素量1～2%のB級材の製造に始まり、C級、D級……、更には変圧器用のT級（珪素量4～4.5%）と特性は向上したが、プルオーバーミルによる生産性の悪い切板圧延であった。その後溶接によるコイル化の



(注) W15/50: 周波数50Hz, 磁束密度1.5テスラ時の鉄損

図5 無方向性電磁鋼板のグレード別開発推移²⁾

図6 Armco社（米）の方向性電磁鋼板製造プロセス³⁾

動きもあったが、1954年特性の優れた、高品質の無方向性冷延電磁鋼板がコイル状で量産され、1967年熱延電磁鋼板は生産中止となった。無方向性冷延電磁鋼板（以後無方向性電磁鋼板）は中級品（S23～S18）から製造が開始されたが、低珪素・低コスト化と高珪素・低鉄損化に2極分化して発展し²⁾（図5）、更に全体的に低鉄損化していった。

3.2 方向性電磁鋼板の歴史

Gossによって発明された方向性電磁鋼板は1935年Armco社（米）によって工業化された。その製造プロセス³⁾を図6に示す。この技術は日本に導入され、日本では1958年に生産が開始された。この方法は2回の冷間圧延を行い、2回目の連続焼鈍で脱炭し、最後に1200℃という高温で長時間の仕上げ箱焼鈍を行い、Goss組織を得ると共に成分を純化する方式で、2回冷延法と呼ばれている。その後特性向上の研究が進められ、磁束密度の高い、鉄損の非常に少ない高磁束密度方向性電磁鋼板が1968年1回冷延法（HI-B）で、1972年には2回冷延法（RG-H）で製造された。これらの技術は世界中に輸出されるなど現在は日本が世界をリードしていると言っても過言ではない。

4 現代の電磁鋼板製造プロセス

方向性電磁鋼板の製造プロセスはArmco社の製造プロセス（図6）のうち造塊、分塊工程が連続鋳造に変わってはいるが、大きなプロセス差はない。製造や特性の安定・向上面での付帯的設備（図に表示なし）には差があるが、メインプロセスに差がないということは1935年当時の技術の素晴らしさを物語っている。

無方向性電磁鋼板の製造プロセスを図6で説明すると、まず1回冷延法が主体である。Goss組織を成長させる仕上げ箱焼鈍は必要なく、連続焼鈍が最終の仕上げ焼鈍になっている。また、連続鋳造化と連続冷間圧延化が進んでいる。更に絶縁皮膜（後述）は連続焼鈍の出側でインライン処理されており、表面処理ラインを省くのが一般的である。

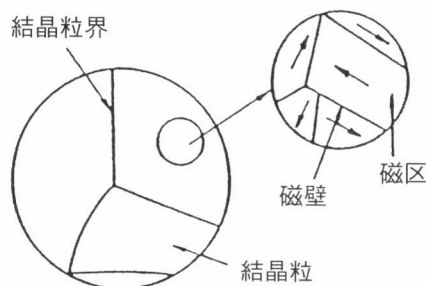
方向性電磁鋼板と無方向性電磁鋼板との製造プロセス差

は意外と少ないように見えるが、方向性のGoss組織を安定して得るために必要な設備と無方向性のものとは設備内容に大きな差がある。例えば加熱炉で比較すると、無方向性電磁鋼板の場合加熱温度は1100℃～1200℃であるが、方向性電磁鋼板の場合1300℃となる。ところが表面の珪素を含むスケール層は1200℃を越えてくると熔融するため、方向性電磁鋼板の場合加熱炉は無酸化方式となる。

5 電磁鋼板の磁化と鉄損および高品質化

皆さんは釘に磁石を近づけると吸いつき、更に釘に釘が連鎖状に繋がった経験を持っていると思う。これは釘が磁化されているのである。このように強く磁化されるものを強磁性体と呼び、鉄、ニッケル、コバルトで代表される。この様な強磁性体は最大限に磁化された自発磁化（小さな磁石⁴⁾）を持つ磁区で構成されている。鉄の場合最も磁化され易い<100>軸と自発磁化の方向が一致している。最も磁化され易い<100>軸とは図3より立方晶の一边を意味しているから、磁化容易軸は互いに平行か直交している。従って、隣りあう磁区は180°（平行）か90°（直交）である。また、磁区の境界は磁壁と呼ばれている⁴⁾（図7）。

1つの結晶粒毎にこの様な磁区に区分され、磁化されていない時は材料全体で磁気を持たない消磁状態になっている。初磁化曲線を図8に示す。模式的に説明すると磁界の強さ（磁化する電流：A/m）を大きくすると最初は動き易い180°磁壁が移動し（図8（b））、続いて90°磁壁が動く（図8（c））。最後に自発磁化が磁化方向に回転し、磁化は飽

図7 結晶粒と磁区⁴⁾

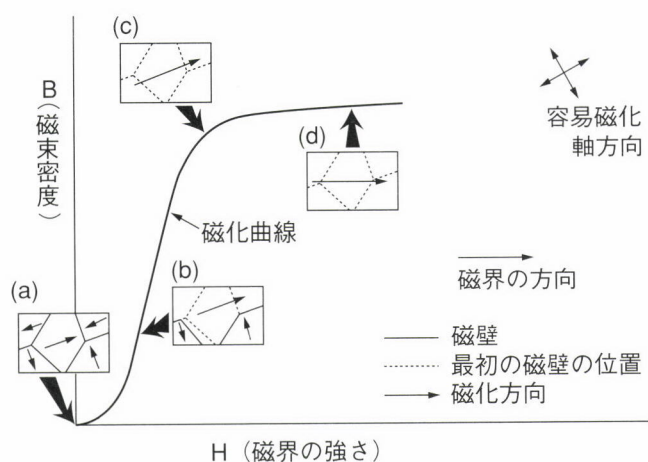


図8 電磁鋼板の初磁化曲線と磁壁の移動⁴⁾

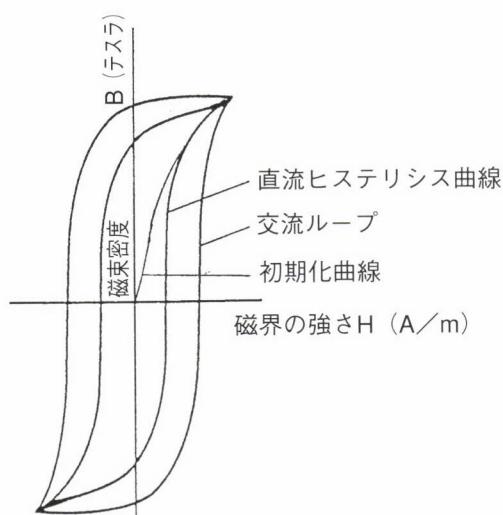


図9 直流ヒステリシス曲線、交流ループ

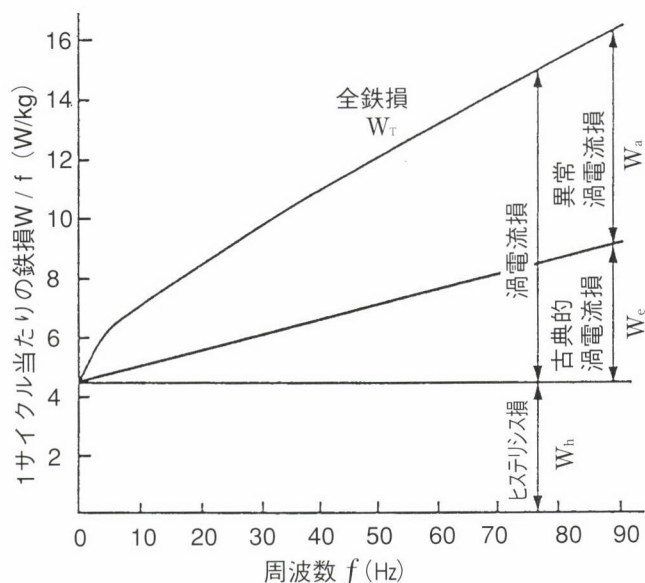


図10 1サイクル当たりの鉄損との周波数との関係

表2 鉄損に及ぼす要因と主な対策

鉄損 W_T	[主な要因]	[主な対策]
ヒステリシス損 W_h	内部歪み	少なく
	不純物	高純度化
	集合組織	
	結晶方位	
	結晶粒径	大きく
渦電流損	表面粗さ	平滑化
	固有抵抗	大きく
	板厚	薄く
	磁区幅	磁区細分化
		張力皮膜
	古典的渦電流損 W_e	
	異常 ^{※1} 渦電流損 W_a	

※1 無方向性の場合、結晶粒が小さいため一般的には無視できる

和する(図8 (d))。なお、鉄心の単位断面積当たりの磁化の大きさを磁束密度(テスラ、または W_b / m^2)と呼ぶ。

磁化後電流を下げて元に戻らず、図9の様な直流ヒステリシス曲線を描く。交流で磁化すると直流ヒステリシスループが更に広がった交流ループになる。この交流ループの面積が1サイクル当たりの鉄損となる。この1サイクル当たりの鉄損 W/f は図10のようになる。1サイクル当たりのヒステリシス損 W_h/f は周波数によらず一定であるが、渦電流損は磁束変化に伴う古典的渦電流損 W_e と磁壁移動に伴う異常渦電流損 W_a の合計となる。これらの損失は色々解析されており、次の式で概略表せる。

$$W_T = W_h + W_e + W_a$$

$$W_h = a_1 \cdot f \cdot B_m^{1.6}$$

$$W_e = a_2 \cdot t^2 \cdot f^2 \cdot B_m^2 / \rho$$

$$W_a = a_3 \cdot B_s^2 \cdot V^2 \cdot t / \rho$$

$$\left[\begin{array}{ll} f: \text{周波数} & \rho: \text{固有抵抗} \\ t: \text{板厚} & V: \text{磁壁の移動速度} \\ B_m: \text{最大磁束密度} & a_1, a_2, a_3: \text{定数} \\ B_s: \text{飽和磁束密度} \end{array} \right]$$

W_e が板厚の2乗に比例するため、電磁鋼板の板厚は一般的には0.2～0.5mmと薄く、積層して使用される。また積層時の板間の絶縁を確保する必要があり、電磁鋼板の表裏面には絶縁皮膜が施されている。更に W_e は鉄の固有抵抗に反比例するが、鉄の固有抵抗を最も効果的に大きくする元素が珪素であり、これが珪素量を増やすと鉄損が低下する理由である。鉄損に及ぼす各種要因を表2に示す。内部歪みは磁気特性を大幅に劣化させるが、製造に当たっては原則的に除去されている。使用に当たって特に注意する必要がある。

5.1 無方向性電磁鋼板

W_a は、結晶粒が小さいため磁区幅が狭く、磁壁の移動速度が遅いため無視できる。一般的に珪素を添加し W_e を下げると W_h 比率が増大し、 W_h を如何に低減するかが過去の歴史であった。現在でも W_h は板厚0.5mmの場合通常全鉄損の60～70%を占めている。 W_h を小さくするには、磁壁移動を妨げる微小な不純物を少なくする(高純度化)ことや残存する不純物を粗大化させ、数を少なくし、悪影響をミニマム化するなどの対策が取られた。更に集合組織面では、磁気を通しにくい $\langle 111 \rangle$ 軸を如何に少なくするかなどの検討が進み、製品の多様化が図られた⁵⁾。

5.2 方向性電磁鋼板

一般の方向性電磁鋼板では $W_h : W_e : W_a = 4 : 3 : 3$ ⁶⁾程度。このうち W_e は板厚と珪素量でほぼ決まる。珪素量は製造上やGoss方位の安定性より3.2%前後で調整余地が少ない為、薄手化が W_e 低減には有効である。また W_h の低減はGoss方位の圧延方向からのずれを如何に小さくするかであり、 W_a の低減は磁区間隔を狭く、均一化し、磁壁の移動速度を遅くかつ均一化することである。以上集合組織制御^{*1}、磁区の細分化と薄手化が特性向上の歴史であった。

Armco社の実現した製造技術は現在に於いても主要技術であるが、当時は何故Goss方位ができるのか明らかではなかった。その後基礎研究が進み⁷⁾、Goss粒がマトリクス粒を喰って成長する時間を与えれば良いことが明らかに成った。そしてMnS、AlNをインヒビター^{*2}とする高磁束度電磁鋼板HI-B (新日本製鉄)、MnSe、SbのRG-H (川崎製鉄)が生まれたのである。これらの製品ではGoss方位の圧延方向からのずれは一般材の平均7°に対し、3°と実に見事なものである。しかし方位のずれが少ないと磁区間隔が広がり、 W_a が増大する。そこで皮膜により張力を掛け、ランセット磁区を消滅させ、磁区を細分化する⁸⁾方法が取られた。更に、磁区細分化の研究が進み、現在ではレーザー照射により磁区を細分化した電磁鋼板 (ZDKH)⁹⁾なども市販されている。

6 技術動向および新材料

方向性、無方向性電磁鋼板とも技術の進歩は目覚ましく、どんどん多様化しているが、今後の方向や注目すべき新材料全てについて言及するのは紙面が足りないので、2～3に絞って解説する。

6.1 方向性電磁鋼板

集合組織・磁区幅制御は今後も進展し、低鉄損化して行く筈であるが、どこまで行くのかを考えた場合、アモルファス(Fe基)を凌げるかに興味を持たれる。アモルファスの板厚は25 μ mと薄く、飽和磁束密度が低く、単純に鉄損だけで比較するのには疑問があるが、その比較を図11に示す。アモルファスが一般的に使われる磁束密度1.3テスラで50Hzの鉄損($W_{13/50}$)で比較すると、HI-Bレーザー磁区幅制御材(ZDKH)で0.43W/kg(新日鉄カタログ)とアモルファスの0.16～0.20W/kg(ラップコア)に届かないが、表面エネルギー差を利用した三次^{*}再結晶電磁鋼板は0.17W/kg(板厚71 μ m)が得られており¹⁰⁾、アモルファスにほぼ届いている。薄物方向性電磁鋼板の研究は進んでおり、その製造には幾多の困難が待ち構えている筈であるが、近い将来アモルファスを凌ぐ方向性電磁鋼板工業化という吉報を期待したい。

6.2 無方向性電磁鋼板

つい最近まで実用化している電磁鋼板の珪素量は3.5%程度までであり、この範囲で高磁束密度化、低鉄損化などの高品質化、多様化が図られて来た。珪素量と諸特性との相関は1950年代迄には明らかにされていた^{11～13)}。それを図12に示す。定性的に見ると、珪素量が6.5%近辺で鉄損が最小になり、透磁率(磁化のし易さ)が最大になり、磁歪(磁

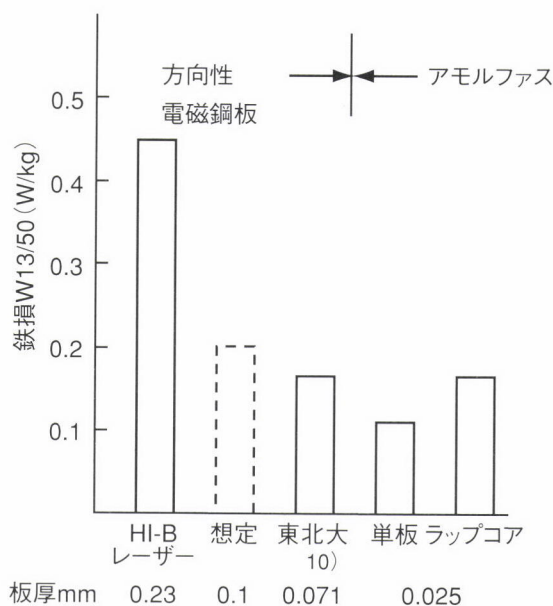


図11 鉄損 ($W_{13/50}$) 比較

*1 磁気を通し易い方位配列とすること。方向性電磁鋼板の場合は $\langle 111 \rangle$ 方位とすること。

*2 抑制剤。地の結晶粒(マトリクス粒)の成長を抑制する析出物。目的: GOSS粒がマトリクス粒を蚕食する時間を確保するため、マトリクス粒の成長を抑制する。

*3 温度を上げると一次再結晶粒が浸食され、二次再結晶による粒成長が進む。薄鋼板の場合、二次再結晶粒が板厚より大きくなってから、真空中では $\langle 110 \rangle$ 方位が他の粒を蚕食して異常粒成長をおこす。荒井らはこれを三次再結晶と名付けた。

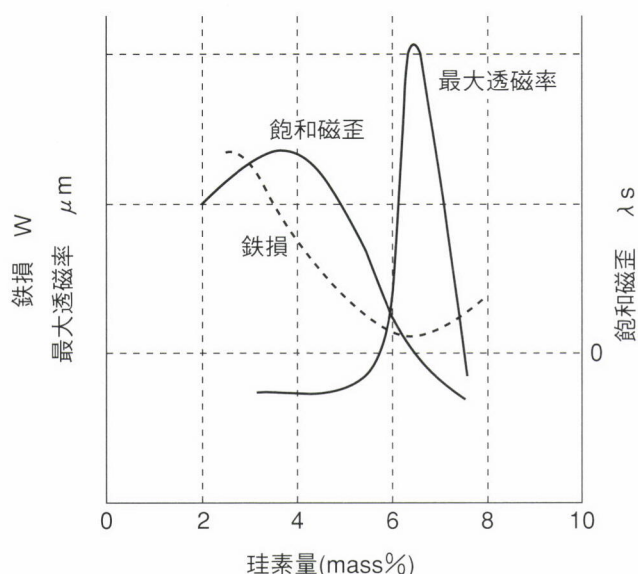


図12 珪素量と磁気特性

化した時の寸法変化)が零になる。磁歪が零とは磁歪振動が起きない、即ち低騒音という観点からも注目された。しかし珪素量が4.5%以上になると常温伸びが零になる¹⁴⁾という壁を破ることが出来ず、工業化されなかった。ところが珪素量3%で薄鋼板を作り、その後珪素を連続的に反応・拡散させる連続珪法^{15,16)}で1993年NKKによって工業化された。この6.5%珪素鋼板は粒界酸化防止などの加工性向上対策により常温伸び5%を示し、高周波用機器を主体に幅広く使用されつつある¹⁷⁾。今後は広い珪素量範囲で高品質化、高機能化、多様化が進むものと考えられる。

6.3 超高磁束密度化

6.1、6.2は従来からの延長線上での動きであるが、更に原点に戻って見よう。機器の小型化より高磁束密度材へのニーズは強い。純鉄の飽和磁束密度は2.15テスラ、3%珪素の電磁鋼板で2テスラ。しかし α 鉄の磁気モーメントの最大値は3dホールの数約3個より約 $3\mu_B$ (約3テスラ)であり、体積膨張が可能ならば、高磁束密度化が期待できる¹⁸⁾。既に窒化鉄($Fe_{16}N_2$)で飽和磁束密度は2.8テスラが得られている。だがこれは相の不安定など電磁鋼板には向かないのが現状である。技術の進歩は目覚ましく、超高磁束密度電磁鋼板の開発が加速することを期待している。

7 おわりに

電気文明が続く限り電磁鋼板の生産量は今後とも伸び続けるであろうし、高品質化、高機能化、多様化が進むであろう。電磁鋼板全般に渡って、筆者の私見も若干は入ったが、出来るだけ客観的に解説したつもりである。電磁鋼板の理解に若干なりとも役立てば幸いである。また文献を引用させて戴いた方々には紙面を借りて厚く御礼申し上げます。

文献

- 1) K.Honda and S.Kaya : Sci-Repts.Tohoku Imp.Univ., 15 (1926) ,p.721
- 2) 電磁・ステンレス技術部：製鉄研究,310 (1982) ,p.150
- 3) 磁性体ハンドブック,朝倉書店,(1988) ,p.1073
- 4) 幸田成康：百万人の金属学(基礎編),アグネ社(1965) ,p.257
- 5) 小原隆史：第155・156回西山記念技術講座,日本鉄鋼協会編,(1994) ,p.192
- 6) J.E.L.Bishop : IEEE Trans.,MAG-16 (1980) ,p.129
- 7) J.E.May and D.Turnbull:Trans.AIME,212 (1958) ,p.769
- 8) N.Baer, A.Hubert and W.Jillek : J.Mag.Mag.Mat, 6 (1977) ,p.242
- 9) 新日本製鉄株式会社：方向性電磁鋼帯カタログ Cat.No.SC 503,p.6
- 10) 荒井賢一,石山和志：第155・156回西山記念技術講座,日本鉄鋼協会編,(1994) ,p.12
- 11) 増本量,山本達治：日本金属学会誌,1 (1937) ,p.127
- 12) W.E.Ruder : Proc.I.R.E., (1942) ,p.437
- 13) W.J.Carr and R.Smoluchowski : Phys. Rev, 83 (1951), p.1236
- 14) R.M.Bozorth : Ferromagnetism, D.Nostrand Co.Inc,N.J., (1951), p.77
- 15) 石川勝,岡田和久,岡見雄二,鈴木絃之,田中靖,高田芳一 : NKK技報,145 (1994) ,p.53
- 16) 岡見雄二,阿部正広,山路常広,高田芳一,二宮弘憲：鉄と鋼,80 (1994) ,p.777
- 17) 日経マテリアル, 144 (1994) ,p.80
- 18) 志賀正幸：日本応用磁気学会誌,3 (1991) ,p.685

(1996年10月29日受付)