

磁性鉄心用珪素鋼の進歩

川崎製鉄KK 技術研究所*

今井光雄, 五藤 勇

1. 序

近年の各産業の近代化や合理化、或は一般家庭における電化促進の風潮に対し、多数の電気機器が必要とせられるようになって来ている。これに伴ってこれら機器の鉄心として用いられる珪素鋼にも多量の供給と性質の進歩向上とが要求せられており、特に後者の特性の向上だけを取上げてみても、戦後目覚ましい発展が行われて来ている。

ここでは主として電動機、発電機及び変圧器等の強電用交流機器の鉄心として用いられる珪素鋼板と珪素鋼帯とについて、一般にどのような性質が要求せられるか、またその要求を満たすためにはどのような考慮が必要であるかを概括的に述べ、次いでこれらをその方向性によって分類し、その個々について欧米各国とわが国における過去の進歩発展の経過を辿ると共に、現在使用されている製品や研究されている試作品について簡単な解説を試みることにする。

2. 総 論

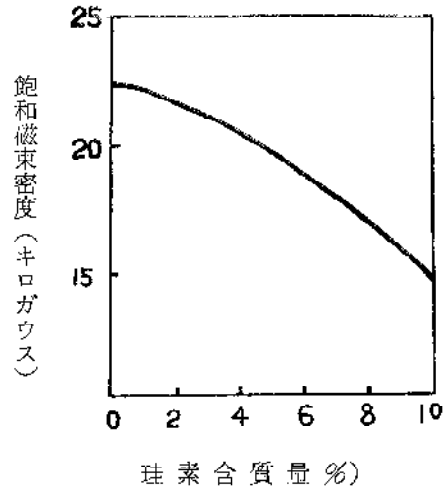
珪素鋼の具備すべき性質の内、重要なもの或はその性質に大きな影響を及ぼすもの、単に必要な要求を満足させるために採るべき手段等を列挙すると次の通りである。

2.1) 化学的成分

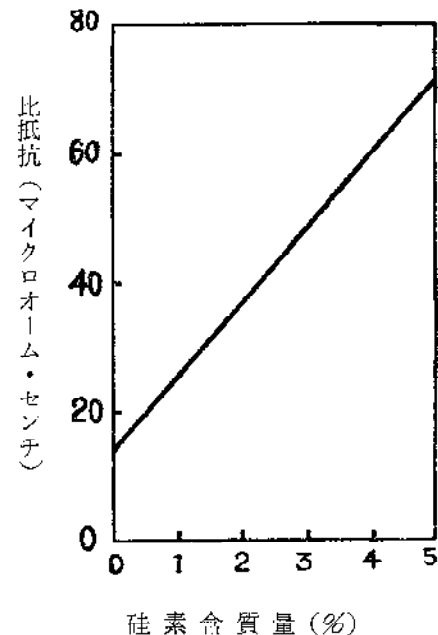
(a) 珪素含有量——5%以下で目的に応じ適宜選定される。後述の磁氣的性質を満足させるためには、鋼に珪素を添加するのが最も好都合でかつ廉価に製造出来る。

元来高純鉄は種々の点より見て磁性材料として秀れたもので、実験室的に作った全不純元素量0.03%程度の純鉄は、珪素鋼の何れよりも遙かに高い透磁率と低い履歴損失を与える。ところが材料の磁氣的性質は非常に構造に敏感で、少量の不純物が磁性に著しく悪影響を及ぼし工業用鉄では全不純元素量を0.3%以下にすることは殆んど不可能なため、透磁率や履歴損失が純鉄のそれに比し数十倍も劣化することがあるのは避けられない。

珪素の添加は鉄の磁氣的性質そのものを改善するので



第1図 鉄の飽和磁束密度に及ぼす珪素の影響

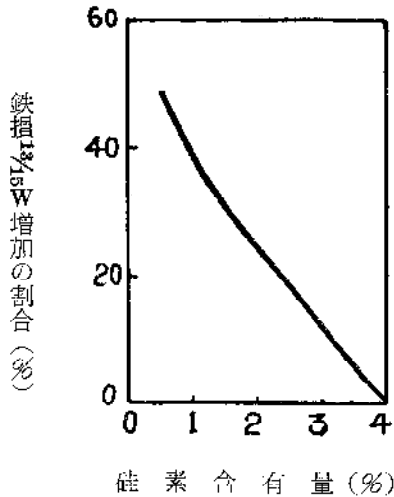


第2図 鉄の比抵抗に及ぼす珪素の影響

はなく、第1図に示されているように飽和磁率密度を下げるだけでなく、機械的性質の面でも材質を脆弱にし加工を困難にするという欠点はあるが、低磁場の透磁率も高く、第2図に示されているように電気抵抗を高め、これによつて渦流損失を減少せしめると共に、更に第3図に示されているように磁氣時効を少なくするという利点を持つている。

(b) 不純物——少ないほど良い。不純物が存在す

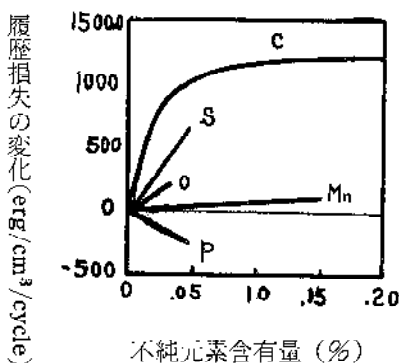
* 神戸市葺合区脇浜町3丁目



第3図 珪素鋼の時効に及ぼす珪素含有量の影響

ると外部から磁場を加えた時の磁界の移動を妨げる歪み或は不規則性を誘起する。即ち置換型固溶原子は結晶格子を歪ませ、侵入型固溶原子は著しい局所歪を起す。固溶限界を起して存在する時は、析出物または介在物となつて磁化の障害となり、材料を磁氣的に稀釈して飽和磁束密度を減じ、局所的減磁作用によつて透磁率を低下させる。不純元素は結晶粒内よりも粒界に存在し易く、製造工程では結晶粒の成長を妨げるが、不純物の少ない材料では結晶粒が大きく、粒界が直線に近く磁性が秀れている。

不純物が珪素鋼の磁性に及ぼす影響については、幾多の実験的研究が行われており、使用試料の相違により幾つかの元素の相互干渉が大きいと、各元素単独の影響については実験者によつて数値的に異つた結果を得ている場合があるが、大体の傾向についてはほぼ意見の一致が見られる。一例として第4図に4%珪素鋼の履歴損失



第4図 4%珪素鋼の履歴損失に及ぼす不純元素の影響 (Yeusen)

に及ぼす不純元素の影響を示してある。この図から炭素と硫黄の害が極めて大きいことが判るが、酸素、窒素、水素等もこれに次いで有害で、満俺と燐はほとんど影響

がないといわれている。唯最近不純元素の間接的効果として、一方向性珪素鋼を処理する時、適量の窒素や硫黄が存在すると方向性の発達が進められることが注目されている。

何れにせよ不純物の低下は珪素鋼の製造上重要な問題となつており、これは熔融精錬の時以外に、鋼塊より薄板状に仕上げる時途中の加熱または熱処理の過程でその条件や雰囲気を制御することにより達成される。

2.2) 磁氣的性質

(a) 鉄損失——小さいほど良い。これは交流で材料を磁化した時に消費されるエネルギーで、主として次の履歴損失と渦流損失の二成分から成り、一定の厚さ、磁束密度及び周波数で測定した単位重量当りのワット数で表わされる。鉄損が大きいとそれだけ余計な電力が熱として消費され、その熱のため機器の寿命を短くするだけでなく、同じ力を出すにも機器を大きくしなければならなくなる。これを少なくするためには次の二項目の対策を合成すれば良い。

(b) 履歴損失——小さいほど良い。これは鉄心中の磁束が変化する時、加えられた磁化力と生じた磁束との間に出来る時間的遅れによるもので、エネルギー損失となり鉄心中の熱となつて現われ来る現象で、磁束密度や交流磁化の周波数が大きくなると著しく増加する。これを少なくするためには不純物の低下、結晶粒の粗大化或は方向性の賦与を図れば良い。

(c) 渦流損失——小さいほど良い。これは鉄心の周囲の導体に電流が流れた時、鉄心中に電圧を誘起し、その結果生ずる循環電流によるもので、鉄心が厚い材料で作られているとこの渦電流は制限を受けないので、大きな渦流損失を生じ鉄心を過熱することになる。この渦流損失も磁束密度や周波数が大きくなると著しく増加する。これを少なくするためには材料の比抵抗を増し厚さを小さくすれば良い。珪素鋼を薄板状に圧延し、これを多数積層して鉄心を組立てるのはこの理由による。

(d) 透磁率——大きいほど良い。これは鉄心に磁化力を与えた時発生する磁力線が鉄心の中を通り抜け易いか如何かの基準になるもので、生じた磁束密度と加えられた磁化力との比で表わされ、これが小さいことは機器の励磁に大きな電流を要することを意味する。これを大きくするためには、不純物の減少、結晶粒の成長促進或は方向性の発達を図れば良い。

(e) 飽和磁束密度——大きいほど良い。これは外部からの磁化力を増す時、材料中に生ずる磁束密度の到達し得る最高値で、これが小さいと機器の出力を大きくするためには、鉄心の寸法や重量を大きくする必要が生ずる。これは第1図にも明らかなように珪素含有量が大きくなると減少する。

(f) 層間損失——小さいほど良い。これは材料固有のものではないが、薄板を積重ねた時の損失で層間が互に完全に絶縁されていないために起る。層間抵抗は鉄心の寸法や締付圧力、磁束密度及び周波数によつて相違する。これを小さくするためには、次に述べるように板面に絶縁被膜を塗布したり、端部のカエリを少なくしたりすれば良い。

(g) 絶縁被膜——抵抗が大きいほど良い。珪素鋼の表面に絶縁被膜を施すのは、前項の層間損失の減少を主目的とし、併せて打抜性を幾分でも高めようとしているが、渦流損失を少なくすることは出来ない。層間損失は小型の鉄心では余り大きくならないが、大型の鉄心では絶縁しないと著しく増大する。

表面を絶縁するには有機物による方法と無機物による方法とがある。有機物はエナメル、ワニス等によるもので将来一般に鉄心組立の時に施されており、耐熱性には乏しい。無機物による絶縁は、珪素鋼を焼鈍する時に珪酸マグネシウムを生成させたり、後で磷酸で処理して磷酸塩を生成させたりすることによつて果される。無機被膜は一般に密着性及耐熱性が良好で、剝離することもなく又歪取焼鈍にも充分耐えられるようになっていゝ。更に被膜の厚さも非常に小さいから占積率を劣化されることもない。

(h) 磁気時効——少ないほど良い。これは時間の経過と共に生じる磁氣的性質の劣化のことで、励磁電流の増大や鉄損の増加等の原因になるものである。この時効現象は現在では材料中に過飽和に固溶している炭素、酸素、窒素などの析出によるものと考えられており、製造中高温で不純物の溶解度が著しく高くなり、冷却後も残存するこれらの過飽和元素が、使用中に漸次析出し磁氣的に障害となる析出物を生じるためである。従つて時効を防ぐには、不純物の量を使用温度での固溶限以内におさえることが必要である。

先の第3図は100°Cで600時間保持した後、常温で測定した鉄損の元の値に対する増加の割合を、珪素含有量に対して表わしたもので、この量が増せば時効が減少することは明らかで、3%以上になれば大体非時効と見てよいようである。

2.3 機械的性質

(a) 占積率——大きいほど良い。これは鉄心を組立てる時の重量と比重から求めた薄板の理論的な積重ね高さと、与えられた圧力における実際の積重ね高さとの比で、鉄心を小さな容積にコンパクトに組立てることが出来るか如何かの目安になる。これを大きくするためには冷間圧延によつて仕上げるのが良く、材料の平坦度を増し、板面を平滑にし、厚さを均一にし更に端部のカエリを少なくすると良い。

(b) 歪み——小さいほど良い。珪素鋼は機械的歪による特性の劣化が著しく、打抜切断による歪み、高温からの急冷による歪み、取扱上の歪み、鉄心組立の時の過大な圧力による歪などは材料自身或は鉄心の磁性を著しく害する。特に方向性のような高品位のものになるほど歪の影響を受け易いので留意しなければならない。この機械的な歪を少なくし磁氣的性質を回復してやるためには、焼鈍を施せばよく、中性雰囲気中約800°C位の温度で材料や鉄心の寸法や大きさに応じ適当な時間歪取焼鈍をしてやるのが良い。

3. 各 論

珪素鋼はその方向性により(a)無方向性、(b)一方向性、(c)二方向性の三つに分けられ、又製造時最終厚に仕上げる時の圧延方法により、(a)熱間圧延、(b)冷間圧延の二つに分けられ、更に珪素含有量の多少により、鉄損の大小により、用途により多種多様に分類されている。

現在製造市販されている珪素鋼は古くから用いられている熱間圧延による無方向性珪素鋼と、近年になつて導入せられた冷間圧延による無方向性珪素鋼並びに一方向性珪素鋼とがあり、二方向性珪素鋼は実験的試作の段階で工業的に大量生産されるところには未だ達していないようである。

以下に方向性の区分に従つて、個々の材料の進歩発展の跡を辿ると共に、その現状について略説する。

3.1) 無方向性珪素鋼

この品種は従来熱間重ね圧延法によつて製造され板状で供給されて来たが、材料を構成する結晶粒の方位が不規則であるため、統計的には各方向にほぼ均一な性質を示すものである。近年圧延技術の進歩により、冷間圧延による帯状製品が現われ、次第に前者に取つて代りつつあるのが現状である。

この品種では、珪素含有量を増して鉄損の低下を図つてゐるが、その反面磁束密度や透磁率の低下と加工性の劣化を来すのは避けられない。従つてその用途により変圧器鉄心には鉄損を重視して高珪素鋼、回転機鉄心には磁束密度や透磁率を重視すると共に脆弱になるのを避けて低珪素鋼というように使い分けられている。

(a) その発展——珪素鋼が発見される前は、電動機、発電機及び変圧器の鉄心には低炭素薄鋼板が使用されていた。尤もこの鋼板は現在でも尚小型の間歇運転電動機には大量に用いられている。前世紀末頃より多数の人々により鋼に珪素を添加した時の研究が行われていたが、1889年英国のハドフィールドが鉄—珪素合金について系統的な研究を発表し、続いて今世紀初頭バレットやブラウンと協同で電気抵抗、透磁率及びその他の磁氣的

生産と技術

性質について調査し、鉄心材料に適した特性を持つていることを確認した。引続き独自のグームリッチは珪素の添加により電気抵抗が増加する利点を発見し、ハドフィールド等の珪素鋼が他にも秀れた点のあることを見出した。これらの研究によつて、鋼に珪素を添加すれば本質的に磁氣的性質の向上することが解明され、設計者にとつては装置の小型化と能率の向上とが可能になった訳で欧米においては珪素鋼が間もなく製造市販されるようになった。

この結果は、渦流損失が予想以上に減少し、時効による磁氣的性質の劣化がなくなつただけでなく、履歴損失も減少し低磁束密度における透磁率も向上した。かくして製造上の困難さはあつたが、それを克服して短時日の間に鉄心材料としての地歩を固めて行つた。しかしながら製造開始当初の製品は、現在の標準によれば極めて粗悪なもので、鉄損 $W^{10\%}_0$ が約 $1.8W/kg$ 程度に過ぎなかつた。

欧米各国においては、今世紀前半約3分の1の年代を珪素鋼の脆弱性に由来する製造上や加工工作上的の困難さを克服すること、磁氣的性質を改善向上させることに努力を払い、相次いで研究が行われた。即ち珪素量の増大により比抵抗を増して渦流損失の低下を図り、各種の有害な不純物を減少させ、熱処理条件を検討して結晶粒を粗大化させ、これらによつて履歴損失の減少を図り、

尚者相まつて鉄損を改良して行つた。その結果、逐年その品質は改善せられ、遂に今日見られるような鉄損 $W^{10\%}_0$ が $0.9W/kg$ 程度の製造開始当初に比較すると約半分位の値にまで向上し、この程度の高級なものが現在では多量に生産されるようになってゐる。

一方わが国では、八幡製鉄で大正中期に熱間圧延無方向性珪素鋼の研究に着手され、大正末期に工業的生産に移された由である。またこれより少し遅れて昭和初期に川崎製鉄でも量産され始めたが、第二次大戦までは何れも鉄損 $W^{10\%}_0$ が $1.3W/kg$ 程度のものでしか出来ていなかった。戦争中の空白時代が過ぎて、戦後諸外国の情報が入り始めると共に、彼我の懸隔の大きいことに気付き再び活発な研究が行われ、鉄損 $W^{10\%}_0$ が $0.9W/kg$ 以下の外国最高級品に遜色のないものが、八幡製鉄では昭和27年、川崎製鉄では昭和29年から量産化の段階に入り市販され始めた。これより少し遅れて冷間圧延による無方向性珪素鋼も、昭和30年八幡製鉄と川崎製鉄から相次いで製品化された。

(b) その現状——第1表は熱間圧延無方向性珪素鋼板の J I S 規格で、表の下の方の T105 以下の三つの低鉄損のものは、昭和30年改訂の時初めて挿入されたもので戦後の開発になる品種である。尚この鋼板を溶接して長く継ぎ、コイル状に巻いて鉄心の連続打抜加工を便利にしたものがあり、米国ではアームコ社、我が国では

第1表 熱間圧延無方向性珪素鋼板の J I S 規格 (1955)

種類	密度 (g/cm^3)	厚さ (mm)	最大鉄損 (W/kg)				最小磁束密度 (G)	
			$W^{10\%}_0$	$W^{15\%}_0$	$W^{10\%}_{60}$	$W^{15\%}_{60}$	B ₂₅	B ₅₀
B	7.75	0.50	2.70	6.90	3.40	8.70	14800	15800
		0.35	2.30	5.90	2.90	7.40		
C	7.70	0.50	2.30	5.90	2.90	7.40	14700	15700
		0.35	2.10	5.30	2.70	6.90		
D	7.65	0.50	2.00	5.00	2.50	6.30	14400	15400
		0.35	1.80	4.50	2.30	5.70		
T 155	7.55	0.20	1.55	3.90	2.00	4.90	13600	14600
T 145	7.55	0.35	1.45	3.60	1.80	4.60	13900	14900
T 135	7.55	0.35	1.35	3.40	1.70	4.30	13900	14900
T 125	7.55	0.35	1.25	3.10	1.55	3.90	13900	14900
T 115	7.55	0.35	1.15	2.90	1.45	3.70	13900	14900
T 105	7.55	0.35	1.05	2.65	1.30	3.35	13800	14700
T 95	7.55	0.35	0.95	2.40	1.20	3.05	13700	14600
T 90	7.55	0.35	0.90	2.25	1.15	3.85	13600	14500

第2表 冷間圧延無方向性珪素鋼帯の JEM 規格 (1958)

種類	密度 (g/cm ³)	厚さ (mm)	最大鉄損 (W/kg)				最小磁束密度 (G)	
			W10%	W15%	W10%	W15%	B ₂₅	B ₅₀
S23	7.75	0.70	3.90	9.80	4.90	12.30	15300	16300
		0.50	2.70	6.90	3.40	8.70		
		0.35	2.30	5.90	2.90	7.40		
S20	7.75	0.70	3.40	8.50	4.30	10.80	15200	16200
		0.50	2.30	5.90	2.90	7.40		
		0.35	2.05	5.20	2.60	6.60		
S18	7.65	0.70	2.50	6.20	3.15	7.80	15100	16100
		0.50	2.00	5.00	2.55	6.30		
		0.35	1.80	4.50	2.30	5.70		
S14	7.65	0.50	1.65	4.10	2.10	5.20	14800	15800
		0.35	1.45	3.60	1.85	4.60		
S12	7.65	0.50	1.45	3.60	1.85	4.60	14700	15700
		0.35	1.25	3.10	1.60	3.90		

八幡製鉄の独占品種である。

熱間圧延のものは鉄損の低下を図ると磁束密度が減少し加工性が劣化するのは避けられない。この意味で最近の冷間圧延無方向性珪素鋼帯の出現は、

- (イ) 同じ鉄損のものが低珪素の材料で得られる。
- (ロ) 従つて磁束密度を増加させることが出来、加工性も改善される。
- (ハ) 冷間圧延により仕上げられるため、酸化膜がなく表面が平滑で板厚も均一で占積率が良くなる。
- (ニ) 帯状で供給されるため、鉄心打抜の歩留が向上し単価が安くなる。
- (ホ) 連続打抜機の使用が可能になり、連続的作業により大量処理が出来、生産費が低下する。
- (ヘ) 均一性が良好で、運搬も便利である。

等の長所を具備しているため、需要者から大いに歓迎され広く使用されるようになった。ただ熱間圧延のものより方向性が幾分出易く、回転機に用いる時はこれが欠点になるので、圧延方向と横方向との比が、鉄損では1.20以下、磁束密度では1.10以下が希望されている。

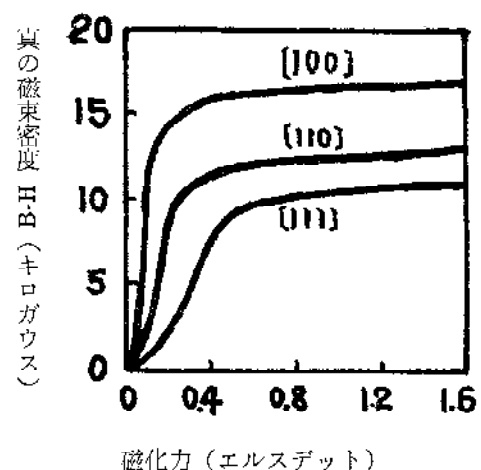
第2表は一昨年制定された冷間圧延無方向性珪素鋼帯の JEM 規格で、第1表の T125程度までのものは冷間圧延によつて製造されていることが判る。熱間圧延によるものに比し、同程度の鉄損を示すものについて対照すると、密度は等しいか又はそれ以下で珪素量の低いもので同程度の性質が得られることを示している。又磁束密度は同じ磁化力で500~900G高くなつており、磁氣的性質の改善されていることが明らかである。

最後の第3表は米国における無方向性珪素鋼の A I S I

規格で、この規格は鉄損だけしか規定してなく、製造方法も熱間圧延によるものと冷間圧延によるものを一緒にまとめてあるようである。珪素量と密度とを括弧内に入れて表わしてあるのは多分熱間圧延によるものと思われ、前者は高く後者は低くなつてはいるが、このことから生産の主体は冷間圧延の方に移つてはいるのではないかと推察される。更にM-15やM-17のような高品位のものも冷間圧延で作られているようで、第2表にはこれに相当するものはないから、この点わが国は一步遅れをとつてはいるようである。しかしわが国のT-90に相当する最高級のM-14は依然高珪素鋼を熱間圧延して作つてはいるようで、この点では、彼我同じ状態にある。

3.2) 一方向性珪素鋼

これは無方向性珪素鋼に対し、従来単に方向性珪素鋼と呼ばれて来たが、次の二方向性珪素鋼が最近現われた



第5図 珪素鉄単結晶の磁化曲線

第3表 無方向性珪素鋼のAISI規格(1958)

種類	珪素量 (%)	密度 (g/cm ³)	厚さ (吋)	最大鉄損					
				W10/50		W15/50		W10/60	W15/60
				W/lb	W/kg	W/lb	W/kg	W/lb	W/lb
M-43	0.6/1.3	7.75	0.0250	1.56	3.45	4.15	9.15	1.98	5.25
			0.0185	1.22	2.70	3.32	7.31	1.55	4.20
			0.0140	1.03	2.26	3.08	6.80	1.30	3.90
M-36	1.0/1.8	7.75	0.0250	1.34	2.96	3.48	7.66	1.70	4.40
			0.0185	1.07	2.35	2.84	6.28	1.35	3.60
			0.0140	0.92	2.04	2.61	5.75	1.17	3.30
M-27	1.7/2.0 (2.0/2.5)	7.75 (7.65)	0.0250	1.03	2.26	2.44	5.39	1.30	3.09
			0.0185	0.90	1.99	2.16	4.78	1.14	2.74
			0.0140	0.80	1.76	1.94	4.29	1.01	2.46
M-22	2.5/3.5	7.65	0.0250	0.87	1.92	2.08	4.58	1.10	2.63
			0.0185	0.74	1.64	1.78	3.94	0.94	2.26
			0.0140	0.65	1.43	1.58	3.48	0.82	2.00
M-19	2.5/3.5 (3.5/3.8)	7.65 (7.55)	0.0250	0.77	1.69	1.86	4.10	0.97	2.35
			0.0185	0.66	1.45	1.60	3.54	0.83	2.03
			0.0140	0.57	1.25	1.41	3.10	0.72	1.78
M-17	2.8/3.5 (3.5/4.6)	7.65 (7.55)	0.0185	0.59	1.31	1.47	3.24	0.75	1.86
			0.0140	0.51	1.13	1.28	2.82	0.65	1.62
M-15	2.8/3.5 (3.5/5.0)	7.65 (7.55)	0.0185	0.54	1.18	1.35	2.98	0.68	1.71
			0.0140	0.46	1.01	1.15	2.54	0.58	1.46
M-14	4.0/5.0	7.55	0.0140	0.41	0.91	1.05	2.32	0.52	1.33

第4表 一方向性珪素鋼の機械的性質の方向性 (Beuford)

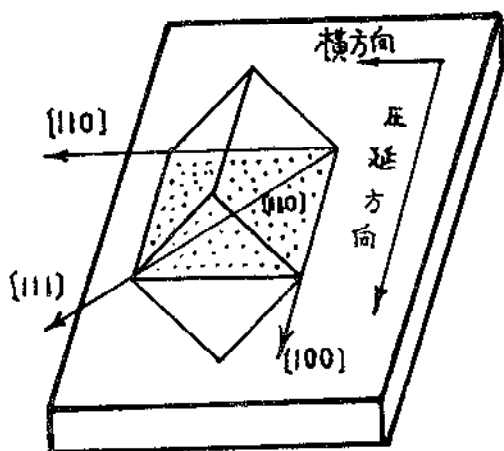
性質	圧延方向に関する角度と対応する結晶学的方向		
	0° (100)	90° (110)	55° (111)
弾性限 (kg/mm ²)	28.8	29.5	38.0
降伏点 (kg/mm ²)	37.2	38.0	43.6
引張強さ (kg/mm ²)	41.5	45.0	47.8
伸び l=50mm (%)	7	33	2
ヤング率 (kg/mm ²)	12.7×10 ³	21.1×10 ³	27.1×10 ³

ため、これと区別する意味で、一方向即ち圧延方向にだけ磁氣的性質が秀れている点から特にこのように呼ぶことにする。

強磁性金属はその結晶学的方向により磁氣的性質を異にする。珪素鉄も鉄と同様の体心立方金属で、その単結

晶の単位立方体の稜の方向即ち(100)軸が最も磁化され易く、面对角線の方向即ち(110)軸がこれに次ぎ、体対角線の方向即ち(111)軸が最も磁化され難い。この関係は第5図の珪素鉄単結晶の各結晶学的方向に対する磁化曲線から明らかである。

一方向性珪素鋼は約3%の珪素含有量で、適当な冷間圧延と熱処理とを組合わせて製造され、特定の聚合組織を持っている。即ち第6図に示されているように結晶の



第6図 一方向性珪素鋼の方位関係

(100)軸が圧延方向に(110)面が圧延面に平行に方位した多数の結晶粒から成立っている。

従つて両方の図を對比させて考えれば、圧延方向に著しく秀れた磁氣的性質を示すことは容易に想像され、鉄心作成の時磁束の経路をこの方向に合致させれば、特性の良好なものが得られるであろうことが判る。

(a)その発展——1926年わが国の本多、茅雨博士によつて解明された鉄の結晶学的方向による磁気異方性により、これを巧く利用すれば磁性材料の特性向上に飛躍的な成果をもたらすであろうことが暗示され、又この間に進歩していた冷間圧延技術は、珪素鋼の製造方法にも必然的に導入されるべくその機会が熟して来ていた。このような背景の下に1934年米国のゴスは、冷間圧延と熱処理との適当な組合わせにより、圧延方向に磁化容易軸を有する一方向性珪素鋼の製造に成功した旨を発表しここに珪素鋼の発達史上に一時期を画することになった。

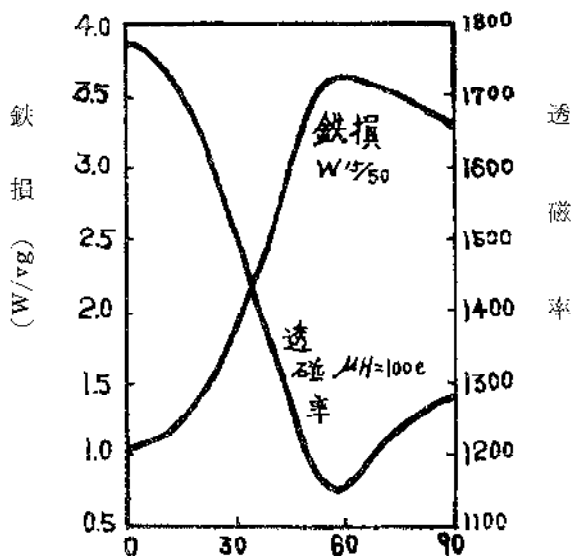
この材料も発明当初は現在の標準から見れば、鉄損は大したものではなかつたが、透磁率の改良に飛躍的なものが認められ米国では直ちに多方面から研究に着手すると共に、工業的生産に移す努力が払われた。今世紀の途中約3分の1の年代は、この一方向性珪素鋼の進歩発展に捧げられ、方向性を賦与するための処理方法の改善や方向性発達の機構の解明に努力が集中され、現在では鉄損 $W15\%$ が1.0W/kg程度のものが量産されるようになっており、先の無方向性珪素鋼の最高級品でも鉄損 $W15\%$ が2.0W/kg程度以上あるのに比べると、約半分に低下している。更に鉄損だけでなく透磁率の間でも著しい懸隔を示し電気機器就中変圧器の小型化には、大きな貢献を果たして来ているが、この材料は現在その進歩の

終末点に近づきつつあるといつても差支えないであろう。

一方わが国でも今次大戦前から研究が行われていたがその実用化は著しく遅れ昭和26年八幡製鉄で未だ不満足な特性乍ら生産が開始され、昭和32年に到つて漸く米国最高級品に比肩すべき製品が発表された。その後米国アームコ社との技術提携により、高級品の生産割合は逐年向上している模様である。川崎製鉄は少し遅れたが、昨年末より米国最高級品に匹敵する製品の量産が開始されており、それについては近く発表されるであろう。

(b)その現状——この材料の低鉄損高透磁率の特性は、変圧器用の打抜積層鉄心或は巻鉄心として各種の設計の下に充分発揮され広く使用されて、その進歩に大きく貢献している。

第7図は一方向性珪素鋼の圧延面内での磁氣的性質の



圧延方向よりの角度(度)

第7図 一方向性珪素鋼の磁氣的性質の方向性

方向性を示す一例で、圧延方向ではその特性が著しく良好であるが、それに直角な横方向(110軸に対応)や約55°をなす方向((111)軸に対応)では劣化が甚だしい。又第4表はこの材料の機械的性質の方向性を示す一例で対応する結晶学的方向に応じて強度、展延性その他も著しい相違のあることが判る。

最後にこの材料の現在日本と米国で市販されている規格を第5表と第6表とに掲げてある。JEM規格は一昨年始めて制定されたが、わが国の製品も米国のものに略々匹敵していることが判る。尚、米国アームコ社では、昨年この規格を上廻るM-5に相当する種類の製造市販を発表しており、それによれば0.012吋厚で鉄損 $W15\%$ が0.58W/lb以下とのことである。何れにせよこの材料は尚暫くは進歩発展を続けるものと思われる。

第5表 一方向性珪素鋼の JEM 規格 (1958)

種類	厚さ (mm)	最大鉄損 (W/kg)				最小磁束密度 (G)			
		W10/50	W15/50	W10/60	W15/60	B ₃	B ₁₀	B ₂₅	B ₅₀
G15	0.35	0.69	1.55	0.89	2.00	14600	15800	16800	17700
	0.30	0.67	1.50	0.87	1.94				
G13	0.35	0.62	1.39	0.81	1.82	15200	16300	17200	18000
	0.30	0.60	1.35	0.78	1.76				
G12	0.35	0.55	1.25	0.73	1.64	15800	16800	17700	18300
	0.30	0.53	1.20	0.70	1.58				
G11	0.35	0.51	1.15	0.68	1.52	16400	17300	18000	18600
	0.30	0.49	1.10	0.65	1.46				

註：密度は何れも 7.65g/cm³

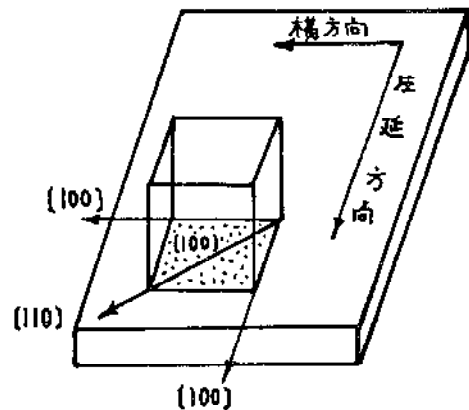
第6表 一方向性珪素鋼の A I S I 規格 (1958)

種類	厚さ (吋)	最大鉄損		
		W15/50		W15/60
		W/lb	W/kg	W/lb
M-10	0.014	0.78	1.72	1.00
M-9	0.014	0.70	1.55	0.90
M-8	0.014	0.62	1.36	0.80
	0.012	0.60	1.32	0.78
M-7	0.014	0.55	1.22	0.73
	0.012	0.54	1.19	0.71
M-6	0.014	0.50	1.11	0.66
	0.012	0.49	1.07	0.64

註：珪素量は何れも 2.8~3.5%。密度は何れも 7.65g/cm³

3.3) 二方向性珪素鋼

二方向性珪素鋼は圧延方向とそれに直角な横方向に磁化容易軸 (100) を有し、鉄心設計に当り一方向性珪素鋼よりは遙かに便利に取扱うことが出来る。この材料は鋼塊の鑄造組織を規制し、圧延温度を制御し更に数段の冷間圧延と熱処理とを適当に施して作られるようであるが、立方体集合組織と称せられる。圧延面が (100) 面に圧延方向が (100) 軸に平行な方位を持つ多数の結晶粒から成立っており、その方位関係は第8図に示されている。この図と先の第5図とを対比させて考えれば、圧延方向と横方向に同程度の秀れた磁氣的性質を示すであろうことは容易に理解される。



第8図 二方向性珪素鋼の方位関係

(a) その発展——一方向性珪素鋼の圧延方向にお

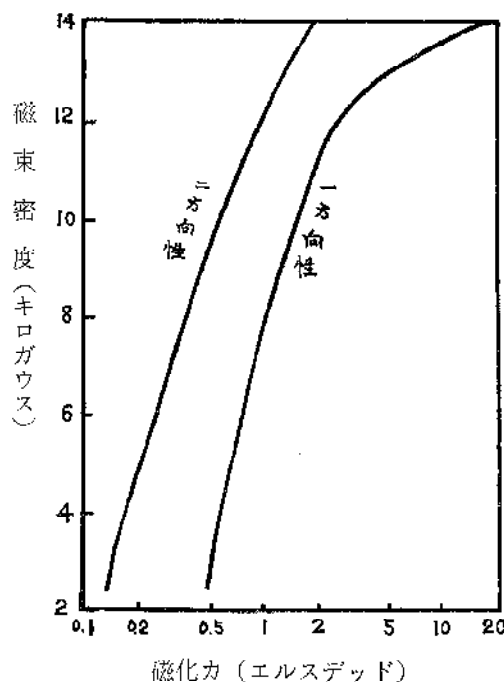
ける優秀性の認識が深まってくるとともに、珪素鋼のような体心立方晶系に属する合金でも、面心立方金属で見られるようないわゆる立方体聚合組織を得ることが出来れば、二方向に秀れた性質が得られることになり、これが理想的な材料ではないかと多くの研究者が考えるようになった。1957年独逸のアスマス等によつてこのような二方向性珪素鋼が初めて発表され、同年米国のジェネラル・エレクトリックとウエスチングハウスの両社からも引続き試作成功が報告せられ、ここに多年の懸案が解決され、珪素鋼の発達史上再び一時期を画することになった。この材料も最適方向の磁氣的性質は一方方向性珪素鋼

のそれと大差はないが、互いに直角な二方向に秀れた磁性を示すので従来の一方方向性のものが、鉄心作成時巻鉄心にするとか打抜に特別な考慮を払つても、用途は殆んど変圧器鉄心に限定されていたのに比べると、これは打抜積層鉄心に著しく便利になるだけでなく、回転機鉄心にも利用出来る。この材料はまだ発表されて間がなく、量産の段階には到達していないと思われるが、今後大いに期待される材料であろう。わが国では昨年東北金属から発表されているだけである。

(b) その現状——二方向性珪素鋼の圧延方向とそれに直角な横方向の磁氣的性質を、一方方向性珪素鋼のそ

第7表 一方方向性及び二方向性珪素鋼の圧延及び横方向の磁氣的性質の比較 (Walter)

種類	方向	最大透磁率	抗磁力	残留磁束密度	磁束密度	鉄損
		μ_{max}	Hc (Oe)	Br (G)	B ₂ (G)	W ^{15/60} (W/lb)
一方方向性	圧延方向	55,000	0.08	9,500	16,300	0.60
	横方向	8,000	0.27	1,750	11,000	1.60
二方向性	圧延方向	116,000	0.07	12,200	16,600	0.56
	横方向	65,000	0.08	11,500	16,000	0.65

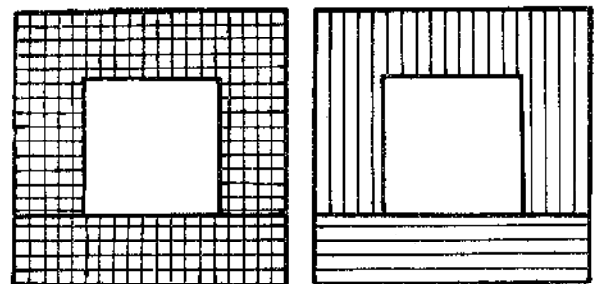


第9図 一方方向性及び二方向性珪素鋼の横方向の磁化曲線 (Iron Age)

れに対比させて列挙すると第7表のようになる。又第9図は一方方向性と二方向性珪素鋼の横方向の磁化曲線である。これらによれば、一方方向性珪素鋼の横方向の磁性は圧延方向のそれに比べて著しく劣っているが、二方向性珪素鋼では両方向の性質にほとんど差がなく、何れの方

向方向の優秀性がどのように活用されるか、即ちラミネーションの採取に当り、一方方向性の時は採取方法に考慮を払わねばならず、工作も面倒であつたのに反し二方向性の場合には簡単な採取方法で充分その特性を発揮させることが出来る例を挙げて見よう。

例えば第10図のような、変圧器用のU I ラミネーション



(a) 一方方向性 (b) 二方向性

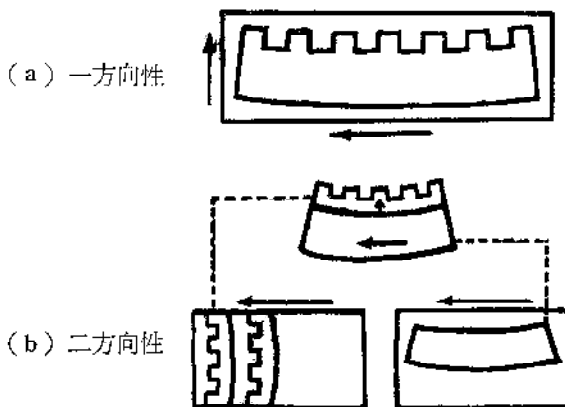
第10図 方向性珪素鋼の打抜ラミネーションによる四角閉磁気回路 (Mat. Des. Eng.)

ンを打抜き磁気回路を作る場合、一方方向性珪素鋼では (a) のように I 型ラミネーションは圧延方向に平行に、また U 型ラミネーションは両腕を圧延方向に平行に打抜いたとしても、四辺の内三辺しか容易磁化方向が利用出来ないのに対し、二方向性珪素鋼では、I 型及び U 型の何れのラミネーションも圧延方向に平行或は直角に任意に採つて良く、しかも (b) で見られるように四辺で磁

(以下12頁へ)

(21頁より続く)

磁化容易方向が利用出来る。その上 (a) では隅角の損失がかなりあるが、(b) ではそれが著しく少なく、鉄心の損失も (a) の 2.0 に対し (b) は 1.5 の割合であるといわれている。



第11図 方向性珪素鋼より発電機固定子鉄心の打抜 (Walter)

また第11図のような発電機の固定子鉄心を打抜く時、一方向性珪素鋼では a のようにラミネーションの内周部と歯型の部分とを、それぞれ圧延方向との関係を眺み合わせて別々に打抜き、後でそれらを組合わせて溶接しなければ磁化容易方向が利用出来ないが、二方向性珪素鋼では b のように両者を一緒に同時に打抜いても、磁化容易方向が利用出来、非常に好都合である。

4. 結 び

以上交流電気機器の鉄心として現在用いられている無方向性及び一方向性珪素鋼の進歩の跡を辿るとともに、その現状を説明し併せて近年の発明にかかる二方向性珪素鋼も簡単に紹介したが、これらの材料は今後一層の開発が期待され、実用化の域に達する日も近いことと考えられる。

唯硬質磁性材料や珪素鋼以外の軟質磁性材料の分野における、日本の過去の世界的地位に比較する時、珪素鋼のみが欧米技術に追隨の形を取るの止むなきに至っているのは、甚だ残念なことである。