



鉄の歴史

日本鉄鋼業における方向性珪素鋼板の発展と現在

On the Development of Grain Oriented Silicon Steel in Japan

坂倉 昭

Akira Sakakura

(株) マグネテック 代表取締役・会長

1 はじめに

「ふえらむ」編集委員の方から珪素鋼板に関する執筆のご依頼があった。筆者は八幡製鉄に入社してから昭和50年までの22年間、田口悟氏のもとで方向性珪素鋼板ハイビー(ORIENTCORE・HI-B)の研究を行い、引き続き製造現場での開発に携わった経験はあるものの、その後は珪素鋼との接触は無いため現状についての情報はない。ただ有難いことに、平成8年から九大名誉教授成田賢仁氏の「日本における珪素鋼板技術史調査専門委員会(電気学会)」の方向性担当委員として鉄鋼、電気機器メーカー各社の委員とご一緒できたおかげで多少は執筆内容の確実性に自信が戻った。

また、昭和57年に豊橋技術科学大学で藤元克巳教授にお会いし、お互い方向性珪素鋼板に対する懐かしさからその歴史を二人でまとめようということになり、先生はHadfieldの論文や肖像画、Armco(American Rolling Mill Company)社でタンデムミルを初めて開発したJ.B.Tytusの活躍と肖像画を探り出し、更には方向性珪素鋼板の発明者であるGoss氏のお嬢さんとも文通しその趣味などについて聞かれていた(H.3.8.30私信)。一方筆者は先生のご依頼でC.Borthの著書「True steel」¹⁾を入手し先生に進呈したが、これは長年の友人でライバルでもあったArmco社のD.M.Kohlerが探して送ってくれたものである。この本はArmco社の生い立ちとその創始者であるG.M.Verity(1865年生)の生涯に加えてその哲学を記したものであるが、その背景には当時の米国における鉄鋼業と電機業界との力関係や珪素鋼板誕生の経過などが詳細に述べられていて興味が尽きない。先生はこれを一気に読まれ、自らのお考えを入れての退官記念講演を昭和62年2月にされ、これを「珪素鋼物語・回想断片」²⁾として筆者にもくださった。

過去にも方向性珪素鋼板の歴史に関しては多くの方々が発表しておられる^{3, 4, 5, 6, 7, 8, 36)}。従って、本稿では、多少違っ

た側面から珪素鋼板の生い立ちとその背景、方向性珪素鋼板の世界及び日本での成長の様子を故藤元先生の貴重な記述もいただいて紹介し、次の解説記事では結晶方向性のより一層の向上に役立ったインヒビターAINの謎について筆者の研究から述べることをお許しいただきたい。

2 珪素鋼の発明と発展

2.1 変圧器鉄心材料への薄板の利用

珪素鋼板が電気機器の鉄心材料として使用されることは衆知の事実であるが、その応用原理はもちろんM.Faraday(1791~1867)の電磁誘導の法則である。1884年、国際フェアを訪れたO.Blathyというハンガリーの機械技術者がFaradayの実験結果を参考に平行回路を持つ閉磁気回路を思いつき、それまでの呼び名「Secondary generator」に替えて「Transformer」と命名した。G.Westinghouseはこの考えを米国に広めるとともに、機械によるコアの製作や油絶縁の考え方を普及させ、そして1886年にはW.Stanleyが積層鉄心の考え方を発表し2, 3年の間に変圧器の概念が確立していった。19世紀も終わりに近い電力事業黎明期には、変圧器鉄心に高級錬鉄や軟鉄線が用いられたが、積層鉄心が普及してから15年間は従来の屋根板や錫めっきをした食缶用の薄板が用いられていた。

2.2 珪素鋼の発明と展開

珪素を加えると磁気特性の良くなることは、英国人R.A.Hadfield(1858~1940)(図1)によって初めて見出された。Sheffield大学卒業後、父の経営する鋳物工場に勤めていた1882年24歳のとき、クレームとなった圧延機ピニオンの割れの原因が珪素であったことがキッカケで、鉄の機械的性質に対する多くの元素の影響を調べ1889年には論文⁹⁾を発表する。当時珪素は貴重品で1オンス100ドルもしたため、

Mnの研究を優先した結果生まれたのが有名な「Hadfieldの高Mn鋼」である。更に彼は、各種合金鋼について18年間じっくりと研究を続け、1900年には共同研究者のW.F.Barrett, W.Brownとともに珪素鋼の磁氣的性質に関する大論文¹⁰⁾を発表し、珪素鋼の電気抵抗が最も高く鉄心材料として好ましいことを結論した。この成果をドイツではPTR (Physikalische-Technische Reichsanstalt) のE.Gumlich教授やアーヘン工科大のP.Goerens教授らが主導し、鉄鋼メーカーのKrupp, Capito und Klein社が協力して実用化の試験を行い、1903年から工業化が可能となった。

欧州におけると同様に米国においても開拓者たちは辛酸を舐めた。電気機器技術者たちは、鉄心材料としての食缶用薄板の磁気時効を始めとする不安定な磁気特性に不満ではあったが、幼年期の電気工業が必要とする珪素鋼の量は知れており、当時のCarnegie, Schwabといった大製鐵会社は儲からない鋼板に対して真剣に取り組もうとはしなかった。こうした難しい状況の中で珪素鋼が市場に食い込んだ背景には幾つかの事象の合体があった。

2.3 珪素鋼が市場に食い込んだ背景

(1) Hadfieldによる珪素鋼の発明

これについては2.2項で述べた通りである。

(2) ナイアガラの電源開発

1880年代に、電力利用について直流か交流かの論争 (The current war) があり、G.WestinghouseがT.A.Edison (1847～1931) に勝って交流方式となり、1894年にはナイアガラの豊富な滝水から2相交流方式で発電し、1896年には35 km離れたバッファロー市に送電するシステムが完成した。

(3) 電気炉の発明

W.Siemensが1879年にパリ万博に展示したのを始めとして、1886年にはC.M.HallとP.Heroultが独立に考案した。現在ではSiemens-Hall-Heroult炉と3人の名前を連ねて呼んでいる。ナイアガラの電力を使用する電気炉は従来にない高温を作り出し、優れたSilicon carbideを、次いで偶然にも純粋なSiを作り出した。これで珪素の値段は1オンス100ドルから1ポンド0.1ドルと大幅に下がり、間もなくFerro-siliconが作られて脱酸剤として利用されるようになる。

(4) 電機屋と鉄屋の協力

急進展する巨大製鐵会社との競争を避け、電機産業と共同で珪素鋼の展開を企画した米国中西部の弱小屋根板メーカーArmco社の創始者であるG.M.Verity (1865年生) (図2) の戦略が、世界の特殊鋼メーカーに飛躍させることになる。1903年にWestinghouse社と共同研究を始め、悪戦苦闘の末に熱延珪素鋼板の商業生産に成功し1905年には月3300トンの規模に成長するのである。この技術はその後20年の歳

月を経て1925年に日本にも導入された。

2.4 方向性珪素鋼板誕生の息吹

(1) 熱延珪素鋼板の問題点

熱延珪素鋼板のその後の展開については別稿に譲るが、Armco社における磁性向上の努力も中々実らず、また三重仕上ロールによる板の圧延はパス毎に人力で板を折り重ねて通板する高熱重労働 (図3) で、いずれは淘汰される宿命にあった。

1904年にArmco社に入社したJ.B.Tytus (図4) は悪戦苦闘の末の1924年に複数個の圧延機を連続に並べた試作第1号機をAshland工場に完成する。そして更に1926年には数々の改良を加えた近代的な熱間連続広幅帯鋼圧延機が完成し、大幅なコストダウンと優れた性質の薄板が得られるようになった。

(2) 近代磁気学の発展¹¹⁾

日本における近代磁気学はA.Ewing卿が1878年東京帝国大学に招かれたことが端緒となって始まった。詳しくは述べる紙面がないが、その伝統を引き継いだ本多光太郎、茅誠司教授 (図5)¹²⁾はFe, Ni, Coの単結晶を独特の方法により作



図1 高Mn鋼、珪素鋼の発明者
Sir R.A.Hadfield

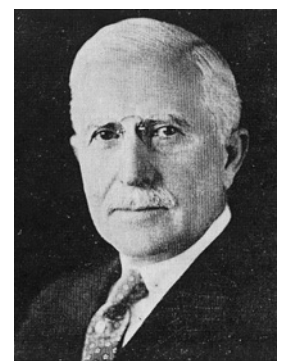


図2 Armco社創始者
G.M.Verity



図3 1900年代初期における熱延珪素鋼板圧延作業 (Armco社)

成してその磁氣的性質を測定し、1926年にはFeの $<100>$ 方向が磁化容易軸であるという画期的な成果を発表した。またP.Weissによって1907年に予言された磁区が存在が、1931年以降多くの研究者によって次々と証明された。これらの概念は方向性珪素鋼板の思考に不可欠の思想である。

3 方向性珪素鋼板の発明と展開

3.1 Gossによる方向性珪素鋼板の発明

Armco社で開発されたタンデム圧延法で珪素鋼板を効率よく生産するため、Ohio地区の鉄鋼会社はIllinois大学に研究を依頼したが、この研究を担当し鉄鋼会社で実地試験を行っていた一人の学生が、鋼帯が時々異常な磁氣的性質を示すことに気付いた。委託研究終了後この若い物理学者は独立し、彼に財政支援を行ったThe cold Metal Process Co.で熱延・冷延・焼鈍条件の数千の組み合わせを忍耐強く研究し、ついに「異常な磁氣的性質」を生み出す方法に手がかりを得た。これが有名なN.P.Gossで、製造法は2段冷延法¹³⁾と呼ばれ1934年に公表された。Gossは本多・茅の結果を何時も頭に置きながら、「微細粒であってしかも単結晶の性質をもつ新しい鋼板が私の理想であり、これは熱延・冷延・熱処理の最



図4 熱延タンデムミルを開発したJ.B.Tytus



図5 本多光太郎教授と茅誠司教授

高の組み合わせによって得られる」と現代に通じる思想を論文¹⁴⁾で述べている。残念ながらGossの特許に見られるように最終焼鈍がストランド焼鈍であり完全な2次再結晶粒は得られなかったため磁性が不安定で、Gossは絶えずR.M.BozorthにX線試験を依頼しながら研究を進めていた。1960年頃から富士製鐵・広畑製鐵所を度々訪れ技術指導を行っている(図6)。

3.2 Armco社による工業化努力

(1) 技術的内容

Gossの発明は偉大であったが、これを工業製品に仕上げたのはArmco社である。方向性珪素鋼板の市販製品は結晶方位的には理論値の2/5程度に過ぎなかった。方向性の重要性を認識したArmco社は積極的な研究を始め、脆性を克服するため3.3% Siから出発した。1935年には初めて最終箱焼鈍方式による製造法を発表したが、残念ながら磁気時効の問題が解決できなかった。ResearchのボスだったV.W.Carpenterは連続脱炭焼鈍を提案する。この湿水素中で脱炭された660 mm幅の試験用コイルは1939年6月Westinghouse社の研究所で高温箱焼鈍され、当時としては格段に優れた製品が得られた。磁気特性は $\mu 10 = 1684$, $W15/60 = 1.56W/kg$ で、偶然にもMgOとの反応で生成したFayaliteの化学成分をもつ「ガラス被膜」のおまけまで付いていて、これが配電用捲き鉄心のキッカケとなった。

M.F.Littmannはたまたま熱延工場でスラブ加熱炉の異常昇温事故に遭遇する。普通なら捨ててしまうそのバラバラの熱延板を研究室に持ち帰り、2段冷延法で処理してみると目を疑うような優れた方向性であったという。彼の頭には何か

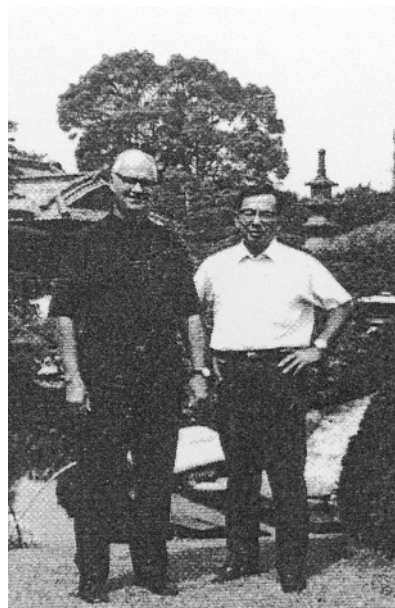


図6 N.P.Gossと上野学氏

ひらめくものがあつたに違いない。 $\mu 10 = 1835$ ($B10 = 1.835T$) が平均的に得られるようになった高温スラブ加熱法¹⁵⁾は1952年に特許発表された。Carpenterが1960年5月に八幡に来た時、得意げに我々に説明してくれた、「S in solution」, 「Fine divided S」の2つの言葉に大きな衝撃を覚えたことを思い出す。この実態はLittmannの論文¹⁶⁾で示された(図7)。

このほかに、清浄鋼を作る技術、各種有用元素の選定と添加技術、高温仕上焼鈍技術、鋼板の平坦化技術、絶縁被膜技術など優れた技術を生み出して方向性珪素鋼板製造技術を完成させた。

(2) Armco社の世界戦略

Gossによる2段冷延法を見事に工業化し、これらの思想とその要素技術は1935年から1975年頃まで世界中のライセンス(米、英、独、仏、白、伊、スウェーデンの欧州各国や日本など)で愛用され、更に現在に至っている。

3.3 日本の対応

1925年熱延珪素鋼板の技術が八幡製鐵に導入されたが、酸化被膜や結晶粒度の問題から輸入品に比べて特性の劣ることが問題となり、電気機器メーカーは電気学会の技術委員会に第3特別委員会を作って対応策を論じた。ここでは方向性に対する要望も1940年頃から強く出され、1940年から1949年にかけて和島¹⁷⁾、和田¹⁸⁾、五弓¹⁹⁾、小野²⁰⁾ら各氏の方向性に関する論文が発表されるまでになっていた。従って八幡製鐵が1958年に方向性の技術を導入し生産を本格的に始めるようになって、漸く日本の電気機器メーカーの要望に応えることができたといえよう。

4 高磁束密度方向性珪素鋼板の発明と展開

4.1 HI-Bの発明と展開

(1) 2段冷延法の限界

M.F.Littmann²¹⁾によれば、約30年間にわたる技術開発に

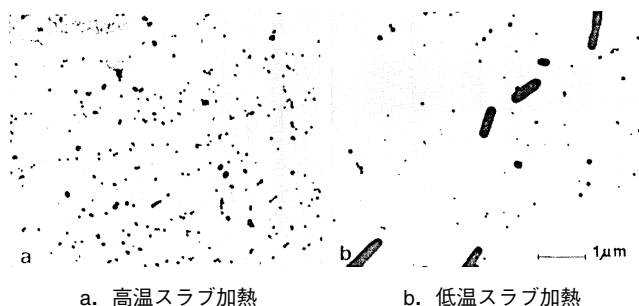


図7 脱炭焼鈍後の析出物, MnS precipitates

よってその特性は頂点に達したが、この方法では磁化容易軸の圧延方向への集積度は約7度であり、磁気特性でいえばB10値で1.83Tが限界であった。鉄損を下げるために板厚を薄くすれば、図8に示す様に渦電流損失の低減には大きな効果があるが、一方履歴損失を損ないこの方法での薄手化には限界があった。

(2) 八幡製鐵における黎明期の研究

日本の電気機器メーカーの強い要望もあり、1942年八幡製鐵所の伊藤正夫鋼材部長が当時北大の茅教授に方向性の研究を依頼した。教授は八幡に出かけて試料を作り精力的な研究を行い1943年に東大に移って後も継続されたが、学術会議などの仕事で忙しくなり、その後を田岡忠美氏と茅研を卒業して八幡製鐵に入社した田口悟氏(図9)が引継いだ。田口氏は1953年八幡製鐵所に転任し、日本で最初の箱型水素焼鈍炉をはじめとする一連の試験製造設備を建設し、スキンパス法による生産を始めた。当時の日本製のフェロシリコンは不純物が多く、このため鋼板にも磁性に有害なAlがかなり含まれていたが、幸運にも0.02%Al前後を含む材料がスキンパス無しで2次再結晶することを見出した。Al入り1段強冷延法²²⁾の発明である。筆者はこの頃田口研究室に入社

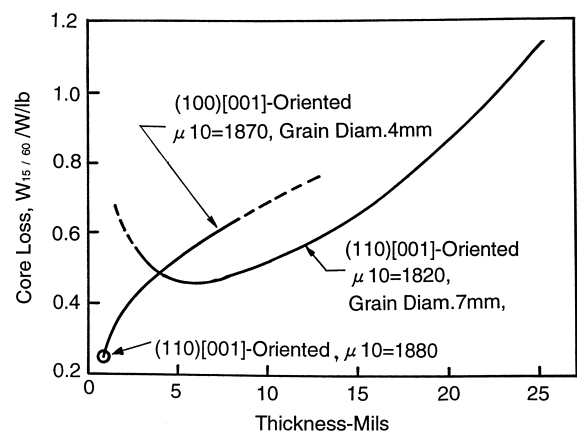


図8 方向性珪素鋼板の鉄損と板厚の関係



図9 田口 悟博士

しこの研究に明け暮れたが、Armco技術の導入によってこの研究は一旦中止された。

(3) 二方向性珪素鋼板の研究が残した遺産

1956年頃から世界的に二方向性珪素鋼板の研究が全盛を迎え、田口研究室はその全精力をこれに注いだ。普通「方向性珪素鋼板」と呼ぶ場合には、磁気特性の優れた<100>方向が圧延方向にのみ出現するのに対して、「二方向性珪素鋼板」は圧延方向と直角方向にも<100>方向が出現した正に理想的な珪素鋼板をいう。A1入り1段強冷延法で出鋼した試料をただクロス冷延し、脱炭し、仕上焼鈍をただけで見事な(100)[001]方位の2次再結晶粒²³⁾が得られた。結晶方向性は理論値の95%でB10特性は圧延方向、直角方向ともに1.91Tという外国他社には見られない優れたものであったが、コスト面の問題を解決できず数年で中止のやむなきに至った。しかしながらその遺産は大きく、A1入り素材で高磁束密度方向性珪素鋼板が必ず得られるという大目標が得られ、これを「19000」と呼んだ。

(4) HI-Bの開発(熱延板高温焼鈍急冷処理の発明)

二方向性用に出鋼した現場電気炉鋼、平炉鋼に加えて、研究所の1トン電気炉鋼、真空溶解炉鋼を素材とし、これをあらゆる熱延条件で熱延した熱延板から出発して冷延・焼鈍条件を検討した結果、高島弘教君は変則2段冷延法²⁴⁾を発明し、1961年頃から時々B10=1.90T前後の試料を手にすることが出来るようになった。1964年時点では研究室処理の標準作業でB10=1.88Tの水準に達した時点で、筆者は製造現場に移籍し開発を担当することになった。しかしながら、2回にわたる平炉鋼の製造現場での処理結果は「19000」の気もない惨憺たるものであった。植野清君との討議の結果ひらめいたのが、製造現場の熱延に比べて研究室の熱延は空冷だからかなり早いぞ!!ということ、1965年10月熱延板を高温焼鈍してバケツの水に放り込んだ試料の処理結果は見たこともない粗大粒の、しかも美しいかにも結晶方位が揃ってるなという外観であった。熱延板高温焼鈍急冷処理²⁵⁾でB10特性は一挙に1000 Gauss向上し、第一のブレイクスルーとなった。図10はこの実験を整理した結果であり、図11は方向性の向上による顕著な履歴損失の低下²⁶⁾を示している。この成果は漆山信夫部長の焼鈍ライン建設指示で1966年12月に生産に直結した。

(5) グラスの生成(MgOの研究)

A1が含まれることによるガラス皮膜不良は深刻であり、このため焼付き防止剤MgOの田口室長による抜本的改善とともにMgOへの一連の元素添加特にB添加の研究が和田、松本、山本、田中ら²⁷⁾により行われ成功した。MgOに対する基礎研究はガラス被膜の生成に役立ただけでなく2次再結晶粒の微細化や結晶方向性の向上にも大きな効果をもたら

し、1968年12月から本格的に製造現場で実施されて第二のブレイクスルーとなった。Bは仕上焼鈍時に緻密な膜を作ってNの浸入を防ぎ、AINの粗大化を防止するのである。

4.2 HI-B高級グレードの開発

(1) 方向性の向上と粗大結晶粒の微細化(パス間時効効果)

初期のHI-BはB10特性は高かったが粗大結晶粒のため鉄損は決して良くなかった。HI-B高級化は優れた方向性、高磁束密度での低鉄損、変圧器の騒音問題に対処可能な低磁歪の3つの特性にかかっていた。

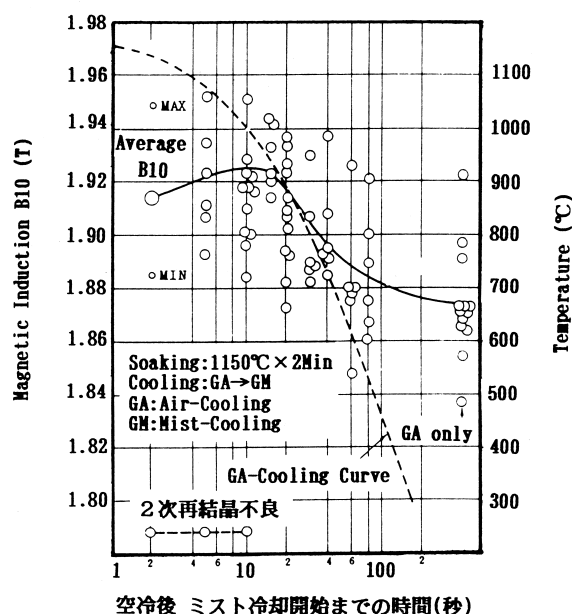


図10 熱延板高温焼鈍急冷の効果

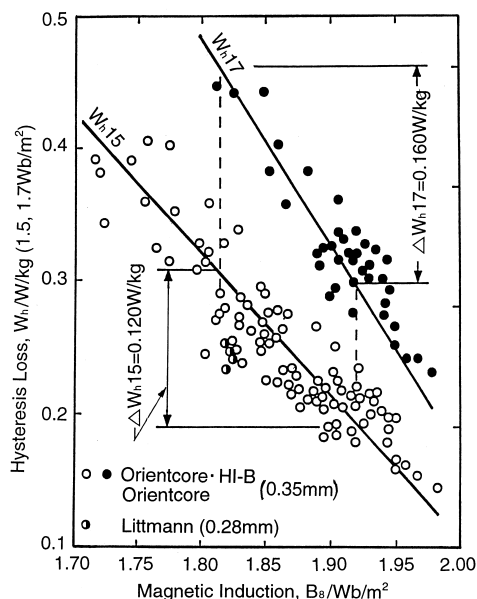


図11 方向性と履歴損失の低減

たまたま筆者の現場開発で、強圧下のために破断事故が増えてタンデム冷延が継続できず、リバース圧延機に変更した結果が優れた方向性、微細粒、低鉄損に結びつき(図12)第三のブレークスルーとなった。新ミルは1974年から稼動したが、松本、高嶋、黒木はこれをパス間時効法²⁸⁾と呼び詳細な基礎研究の結果、冷延パス間に200℃×5分の時効(捲き取り効果)を行うと顕著な磁性向上の効果が見られた。これは一種の歪時効で冷延後の転位サイトにNが固定され、AINの粗大化を防止するものと考えられている。

(2) 磁区構造の改良

結晶粒が粗大でも磁化機構に関与する磁区を微細化すれば良い。田中、山本、高田²⁹⁾の開発した絶縁被膜S2コートは強い張力効果(0.6 kg/mm²)を有し、ガラス被膜の張力効果(0.3 kg/mm²)と併せて鋭い方向性に限った鉄損改善効果³⁰⁾(図13)を示して第四のブレークスルーとなった。これは1973年から市場に出て、磁歪に対する内部歪特に加工に伴う圧縮歪の悪影響を大きく緩和し(図14)騒音問題に貢献した。1974年5月15日付の私信でGEのDr.Pryから、「何故田口、坂倉は方向性は確かに優れているが、あの大きな粗大粒のHI-Bで工業化を決意したのか」という質問を受け取った。磁区理論による鉄損の解明を行ったPryから見れば履歴損失は改善されても、渦電流損の問題があってとても商品にはならないと思ったに違いない。これには、図13に示した山本の実験結果をかなり早い時点で知っていたことを伝えた。それほどこの結果は興味ある技術内容であったと思う。

更に磁区構造の改良法として、スクラッチ法(図15)や、市山、山口、井内³¹⁾によるレーザー法が1981年に発表され、更に小林、黒木、佐々木³²⁾による耐歪取焼鈍性磁区制御法が

1986年に公表され第五のブレークスルーとなった。これらの技術は夫々新日鐵商品名ORIENTCORE・HI-B-LS(ZDKH)及びHI-B-PM(ZDMH)として市販化されている。

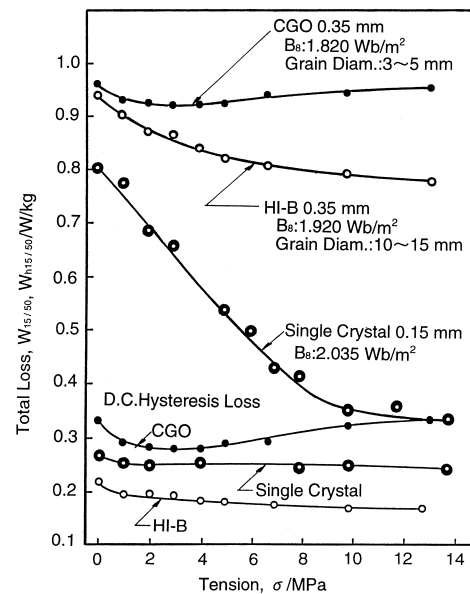


図13 張力効果と磁性

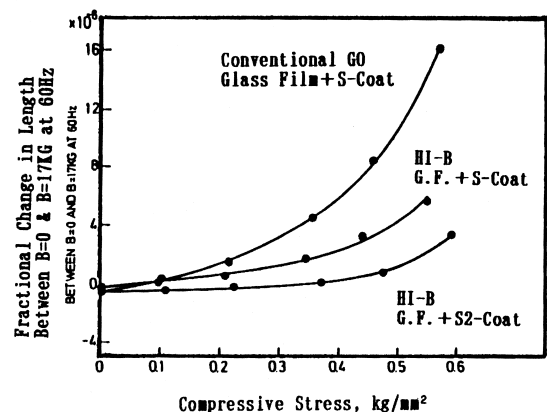


図14 圧縮歪を緩和するS2コートの張力効果

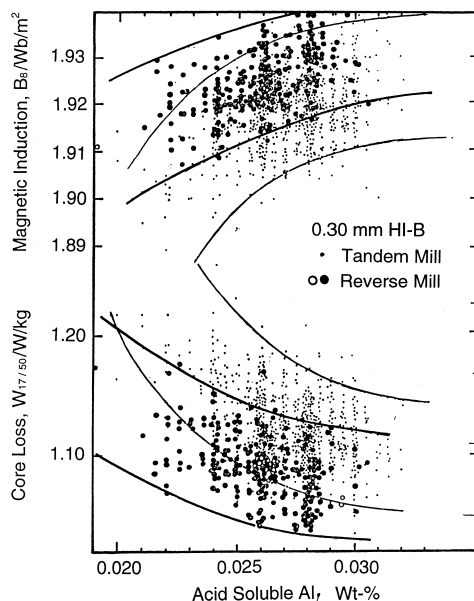


図12 パス間時効法と磁性

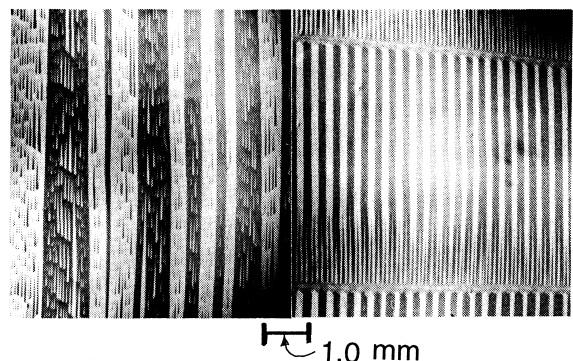


図15 スクラッチ導入による磁区構造の変化

4.3 HI-Bの効果

優れた結晶方向性により鉄損は図16に示すように年々改善された。特に高磁場での鉄損は従来品に比べて40%近く減少し省エネに貢献している。騒音は最大6フォン近く低下しこれは従来品使用の変圧器1台の騒音がHI-B使用の変圧器4台分に相当している。これらの技術は1971年以降Armcoライセンスとほぼ同じ世界の鉄鋼メーカー各社に技術輸出されて今日に至っている。

5 川崎製鐵での研究と開発

川崎製鐵における方向性珪素鋼の研究は、古く前身の川崎重工業時代の1948年に始まり、その後の経過については中山龍夫著「珪素鋼の思い出」に記されている³⁴⁾が、川崎製鐵としては1958年が一つの転機年であった。独自開発で方向性珪素鋼板を生産するというトップポリシーが決定され、7月にWestinghouseからGossの基本特許の実施権を取得し、技術研究所今井光雄部長(図17)の指揮下でインヒビターの開発が始められた。今井部長の発案でSe³³⁾が採用されRGコアとして1960年頃から、Se+Sb添加³⁵⁾によるRGHコアが1973年頃から販売されて以後、Sb+Al添加により一段と方向性の優れたNew RGHが開発された³⁶⁾。また磁区制御材としては、プラズマ照射法によるRGHPJ材が1987年から、耐熱型エッチング溝法のRGHPD材が1994年から販売されている³⁶⁾。これらの開発の陰には多くの方々のご苦労が存在するし、たとえば斎藤達雄氏の無数とも言える元素添加の効果に関する論文³⁷⁾や数多くのオリジナルな研究があ

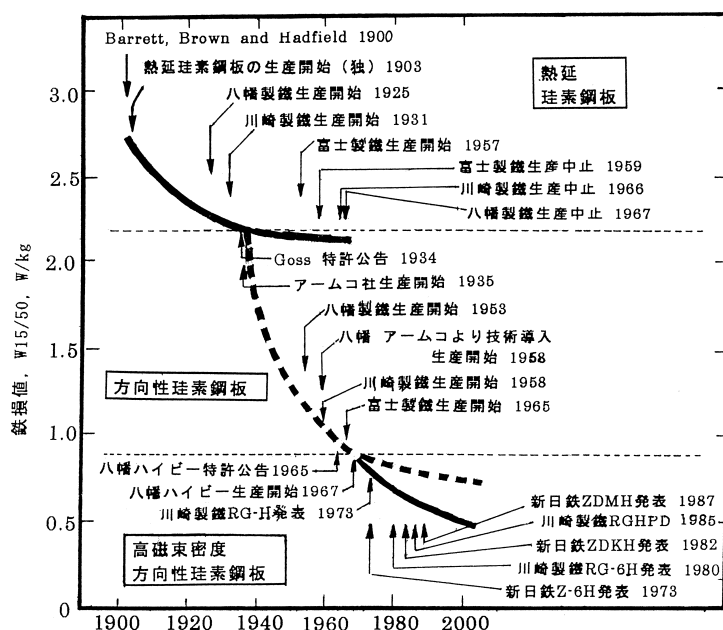


図16 過去100年間における珪素鋼板鉄損最良値の変遷



図17 今井光雄博士

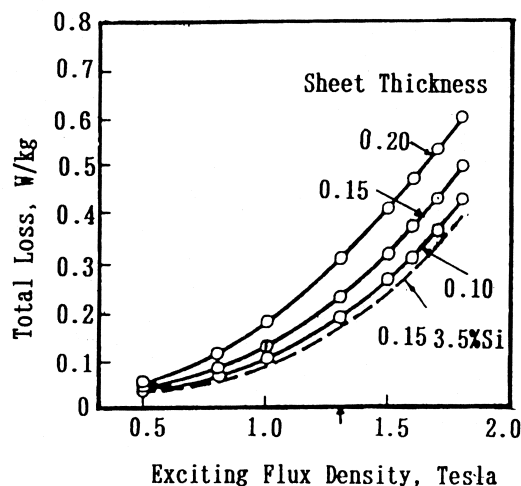


図18 限界処理条件での鉄損値

大きく、今後も珪素鋼板の鉄損向上の課題はその他の要因と併せて推進される。

7 結び

中山龍夫氏から拝受した「珪素鋼の思い出」の最後に、第1回方向性試作実験の基本方針が述べられている。第一は2段冷延法で行うこと、第二は鉄損値を低くするために高純度鉄を理想として極力C, N, O, Sの除去につとめ、Al, Cu, Ni, Cr, Mn等の不純物の排除、特に高温水素焼鈍に適するようAlの排除に留意した。方向性珪素鋼にはこの原理が重要と今井部長が強く主張され、後年方向性を強く出すためこの修正が課題となった、と記されている。またArmco社のDr.Boniは高純度珪素鋼溶製のため、鋼中酸素当量のAl添加を提案、実施しているが、「もう少しAlを添加していればよかった」と残念がった。

川崎製鐵はAlを除外することでRG, RGHに成功され、八幡製鐵は逆にAlに助けられてHI-Bに恵まれたことを考えると大自然の不思議に感動を覚えると同時に、謙虚な研究態度の必要性を今更のように痛感している。

参考文献

- 1) True Steel, Christy Borth, Bobbs-Merrill Co., N.Y., Central Printing Co., Dayton, (1941)
- 2) 藤元克巳：珪素鋼物語・回想断片, 豊橋技術科学大学, (1987)
- 3) 今井光雄：工業技術, 7 (1968), 38.
- 4) N.P.Goss : Industrial Heating, 32 (1965), 1038.
- 5) 五弓勇雄：鉄と鋼, 42 (1956), 53.
- 6) S.Taguchi, Trans : Iron and Steel Inst., 62 (1976), 905.
- 7) 的場伊左雄, 今中拓一, 松村治, 後藤公道, 市田敏郎, 菅孝宏：川崎製鐵技報, 7 (1975), 175.
- 8) 菅洋三：西山記念講座, 日本鉄鋼協会, (1995), 113.
- 9) R.A.Hadfield : Journal of Iron and Steel Inst., (1889), 222.
- 10) W.F.Barrett, W.Brown and R.A.Hadfield : Sci.Trans. Roy. Dublin Soc.7, (1900), 67.
- 11) S.Chikazumi : J.Appl.Phys., 53 (1982), 7631.
- 12) K.Honda and S.Kaya : Sci.Repts. Tohoku University, 15 (1926), 721.
- 13) N.P.Goss : U.S.Patent 1, 965, 556 (1933A, 1934P)
- 14) N.P.Goss, Trans : American Society of Metals, 23 (1935), 511.
- 15) M.F.Littmann and J.E.Heck : U.S.Patent 2, 599, 340 (1948A, 1952P)
- 16) M.F.Littmann : Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 26 (1982), 1.
- 17) 和島藤助：日立評論, No.8, 23 (1940), 412.
- 18) 和田重暢, 中江仁, 伊東庄治：電気学会誌, 68 (1948), 172.
- 19) 五弓勇雄, 阿部秀夫, 高橋久：日本金属学会誌, 13 (1949) 9.
- 20) 小野健二, 渡邊勇司, 佐々木良一：日立評論特集号, No.9, 33 (1951), 697.
- 21) M.F.Littmann : J.Appl.Phys., 38 (1967), 1104.
- 22) 田口悟, 坂倉昭：特公昭 33-4710, U.S.Patent 3, 159, 511 (1962A, 1964P)
- 23) 田口悟, 坂倉昭：特公昭 35-2657.
- 24) 田口悟, 坂倉昭, 高島弘教：特公昭 40-15644, U.S.Patent 3, 287, 183 (1964A, 1966P)
- 25) 漆山信夫, 田口悟, 坂倉昭, 植野清：特公昭 46-23820, U.S.P.3, 636, 579 (1969A, 1972P)
- 26) S.Taguchi and A.Sakakura : J.Appl.Phys., 40 (1969), 1539.
- 27) 松本文夫, 和田敏哉, 山本孝明, 高嶋邦秀, 高田敏彦, 田中収：特公昭 46-42298, U.S.Patent 3, 676, 227 (1969A, 1972P)
- 28) 松本文夫, 黒木克郎, 高嶋邦秀, 高田敏彦, 本田邦康, 安元弘道：特公昭 54-13846, U.S.Patent 3, 933, 024 (1974A, 1976P)
- 29) 田中収, 山本孝明, 高田敏彦：特公昭 53-28375.
- 30) T.Yamamoto, S.Taguchi and A.Sakakura : IEEE Trans.on Mag., MAG-8 (1972), 677.
- 31) 市山正, 山口重裕, 井内徹：特公昭 57-53419.
- 32) H.Kobayashi, K.Kuroki, E.Sasaki, M.Iwasaki and N.Takahashi : Physica Scripta T24 (1988), 36.
- 33) 今井光雄, 五藤勇, 鶴岡一夫, 小野寛, 中山龍夫, 嶋中浩, 的場伊三夫, 鎌田晃郎：特公昭 36-17154.
- 34) 中山龍夫：珪素鋼の思い出, (株) コンテム, (1989)
- 35) 今中拓一, 菅孝宏, 小畑良夫, 佐藤徹：特公昭 51-13469.
- 36) 森戸延行, 小松原道郎, 清水洋：川崎製鐵技報, 29 (1997), 129.
- 37) 斎藤達雄：日本金属学会誌, 27 (1963), 191.
- 38) 野沢忠生：日本応用磁気学会, 12 (1988), 5.
- 39) 西池氏裕, 松村治, 伊藤庸：日本応用磁気学会, 研究会資料, 51 (1987), 21.

(2003年9月10日受付)