

鉄と鋼

身近な物と社会の話(下)

徳島経済研究所技術顧問 工学博士

西池氏裕

第4話 身近で多様性のある素材:鉄と鋼

○人間と材料(素材)

私達の周囲には人工のモノがあふれています。それらはじっくりとみると、何らかの材料(素材)を加工してできあがっていることに気づきます。ふだんは生活に忙しくてモノにまでじっくりと目を配り、思いを馳せる機会は少ないと思います。ですが、その気になって眺めると、モノをとおして、人類の歴史、社会のあり方あるいは宇宙の根本にまで思いが広がることもあります。現代の人が、材料というモノを通して社会を考えてみることは、それ以外の領域のことにも大げさに言えば人間の生き方にもなにかしらのヒントになるかと思います。

人間が現代使う材料(素材)は多種多様で、一般には金属材料、無機材料、有機材料に大別されています。セラミックスは無機材料で、プラスチックは有機材料の代表でしょう。それらの複数からなる複合材料というのもあります。

人類が最初に手に入れた材料は、きっと木の実等をたたきつぶす岩石や地面に穴を開けたりする木材、あるいは釣り針にしたりする魚の骨だったでしょう。大別すると石はセラミックス、木材は有機物、骨はまあ有機物にしときましょう。つまり金属ではありません。ほとんど物理的な加工を施すだけでそれらは人類の有力な道具となりました。

人間が金属を使うようになったのは、人間登場後、随分時が経過してからと推察されます。金属を入手するのは、そう簡単ではないからで

す。偶然に自然に転がっている鉄や金等がありますが、そう多くはありません。自然鉄はだいたいが隕鉄、つまり宇宙からの贈り物で、希有ですので信仰の対象になるくらいです。自然金は、これもまた希少価値があるのは、誰でも知っているとおりで、金は美しい色彩を持っているので実用道具の素材というより、主に装飾品として権力者が身につけました。

多くの金属は自然に採取できる素材ではなく原料となる鉱物から化学反応で金属として取り出します、それを冶金と言います。もちろん、そのころの人間社会には化学反応などという言葉はなかったと思いますが、焚き火のあとに鉄が偶然にできていたのかもしれませんが。そのあと試行錯誤を繰り返して、冶金技術を確立していったのだと思われます。材料として金属を使用できる姿にするために、人間は機械的加工ではなく、反応という方法を用いたのです。

動物の中には人間以外にも道具を作り利用するものがあるようですが、化学反応を恣意的に利用することは聞いたことがありませんので冶金技術は人間が他の動物に決定的な差をつけた技術だったと、言えるのではないのでしょうか。

○最も多様性のある素材

特に、前回から扱っている鉄と鋼は、その性質からも、また戦争や経済活動を通して人間社会に与えてきた影響からも、最も重要で多様性のある材料の一つであり続けてきました。

人類は鉄や鋼を最初は、道具の素材として使用しはじめましたが、なかなか入手できない貴重な材料だったのです。構造材として用いるよ

うになったのは比較的新しく前回お話ししましたように近代に入り鉄鋼の大量生産ができるようになってからです。

冶金技術自体は、最初青銅器の使用から始まったとされるのが通説です。青銅の冶金技術で必要とされる温度が、鉄のそれよりはるかに低い温度なので、人類はその温度を比較的容易に得られたのでしょう。道具の素材、例えば農具や武器としては、鉄は格別にすぐれた性能を有しているため、人類は必然的に鉄の冶金技術を追い求めたのでしょう。

しかも、もともと鉄は素材として機械的強度、硬度や靱性が強いということがありますが、材料としての性質を、いろいろな処理を施すことで大きく変化させることができるというのが特徴です。そのいくつかをみれば、材料としての面白さと人間社会との関わり合い方の深さを味わうことができると思います。

もう一つ鉄は宇宙規模で考えても特別な素材（この場合元素という意味ですが）です。宇宙誕生以来、元素が生まれて核融合や分裂を繰り返して変化していきますが、それらの行き着くところが鉄という元素の構造です。つまり最も安定した構造といえるのかもしれませんが。現在私達が暮らしている惑星地球の質量は 5.9724×10^{24} kg でそのうち鉄が約 35% です（次いで酸素、ケイ素、マグネシウムです）。採掘可能な埋蔵量は約 2,320 億トン）とされています。これらのことから鉄は特別な素材と言うことができます。

第5話 鋼を鍛える

○神話と刀剣

私達の社会には、昔から刀にまつわる神話や伝説がたくさんあります。農具などの生産道具として威力を発する鉄や鋼ですが、当時の権力者には自分の集団の武力を飛躍的に増大させることの方が、より重要な関心事だったのでしょうか。

日本神話では八岐大蛇^{やまたのおろち}の尻尾からスサノオノミコトが獲たという「草薙の剣」が有名です。三種の神器の天叢雲劍^{あめのむらくものつるぎ}のことだといわれているように、ヤマト朝廷の武力の象徴だったのでしょね。西洋でもアーサー王が岩から引き抜いたという「エクスカリバー」も伝説の剣です。少年の頃、アーサー王や円卓の騎士に胸を躍らせたモノです。エクスカリバーもいろいろな名称があるようですが、いずれにしても、ブリテン島の権力の象徴でしょう。ドラクエのようなファンタジーRPG（ロールプレイングゲーム）では、神話に近い時代を背景としたモノが多いですね）では、主人公達が最初に持つ武器は槌の棍棒、それから銅の剣になります。ついで鋼の剣になるとなかなかの威力があり、その後に特別な魔力のある剣ということになります。そうなるよう様々な敵を倒すことができるようになるわけです。

実際の世界では、魔法の力を別にすれば、鋼の剣というのは、鍛えれば強くなり、切れ味も強度も増します。そういえば、ワグナーの楽劇ニーベルングの指輪でもジークフリートは岩屋で砕けた剣「ノットゥング」を鍛えなおします。あの金床^{かなとこ}を叩くハンマーの音は強烈に脳裏に残ります。お隣の韓国映画で、高句麗の創始者朱蒙を主人公としたTVドラマがありましたが、ある意味では朝鮮における建国神話です。大変おもしろかったのは、武器として強い鋼の製造技術を開発することがドラマの重要なストーリーをなしていることでした。技術者達が鍛造方法や鋼の成分を変えたりしながら、努力するのですが、なかなか満足する刀を得ることができません。たぶんかつて、先人達は同じように試行錯誤を繰り返しながらその技術を獲得していったのだらうとは思いますが、ドラマ作者にまでそういう技術史の認識が深まっていることにいたく感心しました。加えて塩の生産量を確保することへの苦心もドラマの筋書きには表れていましたが、社会と物との関連で歴史を考察することの重要性を興味深く理解させてくれまし

た。

○何故日本刀は凄いのか（鋼を鍛える）

日本刀は世界的に鋭利で丈夫だという定評があります。つまり良く切れ、折れたり曲がったりしにくいと言うことです。そのうえ、独特の形状と波紋等の美しさは比類のない物です。

刀だけではありません。このごろでは西洋でも日本の包丁が大人気です。以前宿泊したブルガリアの片田舎の民宿の主人が日本の包丁のマニアだといって、私に何本もの土佐包丁等をうれしそうに見せてくれました。日本の刃物は刀鍛冶によって技術が向上しました。刀を鍛える技術です。前回述べましたように鋼は日本では鑪という炉で大鍛冶が玉鋼を製造し、そのあと小分けされた玉鋼を原料に小鍛冶が製品を製造します。この玉鋼の質が良いことが大前提ですが、日本の刃物はそのあとの製造工程が独自の技術です。まさに鋼を鍛えるのです。

○日本刀の製造工程とその意味

簡単に日本刀の製造工程を紹介しましょう。知らない人は、あまりにその製造工程が複雑なのに驚くはずですが、鍛えるという言葉があります。そう刀など刃物は代表的な例ですが多くの鋼は鍛えて造っているのです。

日本刀の凄いところは刀身が単なる均質な鋼の塊ではなく、複合材料的な作り方をしていることです。芯になる部分は靱性がある炭素量の少ない鋼鉄で、その周りを包んでいるいわば皮の部分は、硬度の高い炭素量が多い鋼鉄なのです。それによって鋭利な切れ味と強靱で曲がったり折れたりしない刀身ができあがったのです。

鋼というのは材料工学的には鉄と炭素の合金として定義され、それも炭素が0.02%から2.14%の含有量の合金を指します。一般的に鋼は炭素量が増大するほど硬くなります。また一般的に金属というのは均質な単層でできあがっていません。結晶の集合体で結晶組織といいま

す。顕微鏡レベルから何十 cm にも及ぶ大きな結晶も存在しており、それらの集合体なのです。その結晶も原子が種々の格子を組んでいたり、中に析出物の異相があったり、とにかく一様な状態ではありません。鍛えるというのは、そのような組織の状態を制御することなのです。

その製法工程を図1にしました。

① 玉鋼を炉(ホドと呼ばれます)で熱して厚さ5mm程度に打ち延ばしてから、細かくして(小割り)皮鉄かわがねになる部分と心鉄しんがねにする部分を選び分けます。

② 次にその小割した玉鋼をテコという棒の先に積んで1300度C以上に熱して(沸かす)ひとつの塊にします。積み沸しといいます。

③ 次がいよいよ皮になる皮鉄の鍛錬です。鍛錬の過程で、炭素の含有量は調整され、不純物は除去されます。

鍛錬の方法は、炉で充分沸かした鋼を平たく大槌で打ち延ばします。このとき刀匠は小槌を使い調子を整えます。

そして延ばしては二つに折り曲げ重ねて打つという作業を、15回程度も行います。つまり15回なら32,768枚の層となります。多くの層が重なっている素材は単層の素材より強靱なのです。日本刀が強靱である理由のひとつがここにあります。

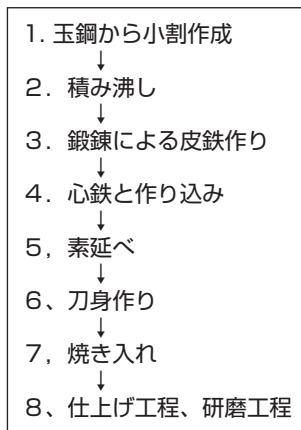
④ 別途、心鉄を鍛造します。心鉄は強靱さを刀身に与えるために炭素量の少ない鋼鉄を使います。周囲は硬くて切れ味が鋭く、中心はやわらかく強靱なことが武器としての実用性を高めます。スパゲッティのアルデンテの逆です。

この心鉄を皮鉄にくるんで刀身の素材とするわけですが、その方法は流儀や個人で異なり種々あるようです。

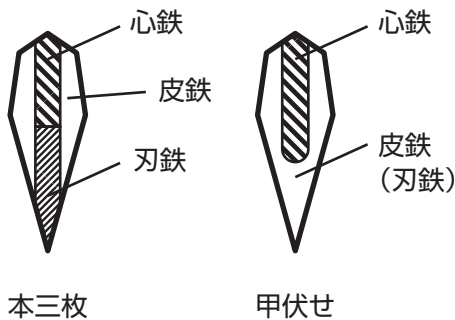
⑤ 素延べというのはその素材をまた大槌で鍛き、ほぼ平たく刀身のように長く伸ばして鍛冶する工程です。

- ⑥ 火作りという工程で小槌を使用して刃部、切っ先、鑄など刀身の原型ができあがります。
- ⑦ 次の工程は刀身に焼き入れを行うことです。その前に刀身に焼刃土^{やきばつち}という泥を塗布してから焼き入れを行うことがポイントです。それによって刀身には日本刀独特の波紋が現れるようになります。実はこの焼き入れが決定的な刀の切れ味を作り出している工程です。

図1 日本刀の製造工程



※製作工程はその産地や人によっていくらかの工程の違いや名称の相違はありますが、ここでは刀匠の堀井氏や刀剣博物館、その他の資料を基におおよそ技術的に重要だと思われる工程を記しました。



○鋼と熱処理

製造工程の途中ですが、熱処理という鋼の性質を変化させる技術のことを述べます。人類が大昔から経験的に見いだして来た鋼の機械的性質を制御する技術です。その物理学的意味が理解されたのは近代に入ってからのことです。「焼

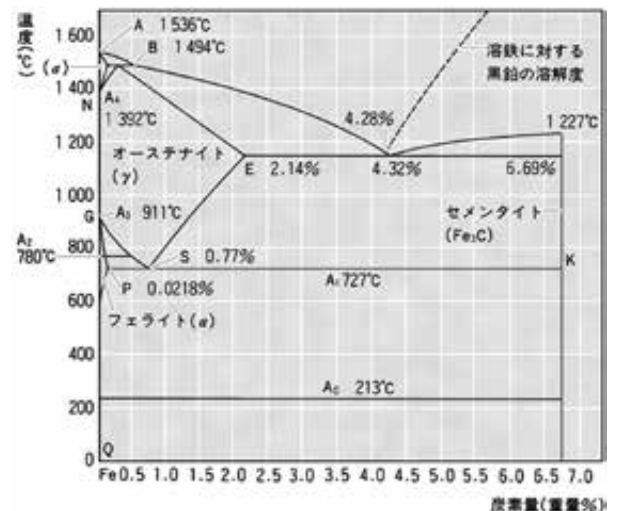
きを入れる」という言葉を耳にしたことがあるでしょう。刀身を高温に(約 800 度C以上)熱しておいて急激に液体の中で冷却する工程です。熱処理には他にも焼鈍とか、焼き戻しとかいくつかありますが、それぞれを組み合わせることで鋼の機械的性質に多様性を生み出すことができるのです。

さきほど炭素の量が異なると硬度がことなることを話しましたが、同じ鋼でも実は原子の並び方が異なる物質となっているのです。それは炭素量とともに鋼の温度によっても変化します。一般的に物質は温度によって状態が変化します。例えば水は常温では水という液体ですが、氷点下の温度では氷という固体になります。逆に高温では水蒸気という気体になります。鋼の場合も同じです。鋼の場合は常温では固体ですが、高温になると溶けて液体になります。物性工学ではこれらの状態を相と呼び、その変化を相転移と呼びます。

実は鋼は、固体になってからも温度を下げていくと中の原子の配列がある温度でがらりと変化します。特別の方法をとれば、見た目にも組織が変化したことは確認できます。この変化を変態、または同素変態と呼びます。

図2は鋼の「平衡状態図」と呼ばれる図です。鋼の炭素量と温度により、鋼がある成分と温度ではどのような相に平衡的になっているかを示

図2 平衡状態図



しています。また炭素の含有量で鋼がどのように変態(結晶の構造が変化します)するかを示してもいます。フェライトとかオーステナイトと呼ばれる相が平衡状態でよく知られた相です。この二つの相では原子の並び方が異なっており、物性も異なります。通常の鋼は変態温度以上でオーステナイトになり、常温になるとフェライト相になります。(このような相変態は鋼だけではなく合金で一般的に生じる現象です)

ところで、鋼の組織の興味深いところは、上述した平衡状態図のように必ずしも相変態が生じない場合があるということです。鋼は上述した焼き入れのように急激に温度を下げると、「マルテンサイト」と言うまた別な硬い組織が生じます。この相は日本刀を硬くしている組織なのです。このマルテンサイトの出来具合は刀身の表面の冷却速度によって変化します。それを制御するために、表面に焼刃土を塗布しているのです。またその塗布層の厚みによって焼き入れ組織が変化しますので、塗布したときの模様が波紋として現れてくるのです。

現代の材料工学は、この鉄鋼の組織を制御するために大きく発達しました。例えば、焼きを入れて刃物を硬くするという経験的技術はマルテンサイトという相の生成にあり、その条件は冷やす前の温度が A3 変態点、もしくは Acm 変態点と呼ばれる温度以上である必要があります。この温度は炭素の含有量が 0.765% のときに最も低くなり、そのときの温度は A1 変態点 (727℃ 程度) と一致。つまりマルテンサイトを作るためには、最低でもこの A1 変態点以上に熱する必要があります。細かい条件が精密に調べられて、変態を起こすための条件は科学的に把握されていると言えます。こういう科学的知見が近代に入り学問として蓄積され、現代の工業に応用されていくようになったのです。

もっともそれで全てが解決されるわけではありません。自然は奥深く多様なものです。たとえば現実の玉鋼には炭素以外の元素も含有されており、上述した概念的な焼き入れの挙動から

少しずつずれるわけです。職人技と言われるモノが尊いのは、そこに実際の自然界とのふれあいがあるからです。未知の技術の発展の源泉は無限です。

○再び日本刀の製造工程 美の追究

- ⑧ 仕上げに焼き入れを終えた刀身は曲がり具合や反りを調整して銘を剪ったり、荒研ぎの作業を行います。ここまでの段階で基本的な刀身の性能は定まってしまう。実はここからが日本刀のもうひとつの特徴、美しさを表現する研磨の段階になるわけです。日本刀の美しさは、まさに美術品であるといえるでしょう。刀匠が一本一本魂を込めて作るからです。
- ⑨ 研磨も複雑かつ高度な技術工程です。どれほど複雑かを理解するために、簡単にその工程を記して見ます。まず下地研ぎには、通常 6 種類の砥石が使用されているようです。砥石の番目(大きい数ほど細かい仕上がり)で # 400 から # 6000 までだそうです。次に仕上研ぎに移ります。刃文の部分とその他の地の部分を、特別な紙で裏打ちした砥石の粉により手で磨きます。その後は、拭いと呼ばれる酸化鉄の微粉を入れた油でいいいに磨きます。これで光沢がでてきます。次は刃取りといって、砥汁で波紋にそって磨きます。次に刀身の棟、^{むね} 鑄地を研磨し、帽子を研磨します。最後に化粧磨きを施して完了です。
- ⑩ 古く鳥羽上皇の時代には、既に専門の研ぎ師が存在していました。その後 1000 年近くにわたり研磨技術の伝統は磨かれ受け継がれてきました。さらなる美的感覚を伝統技術に加味したのは、明治期の名人本阿弥平十郎成重だといわれ、今日見る美術刀剣研磨の技法が確立されました。

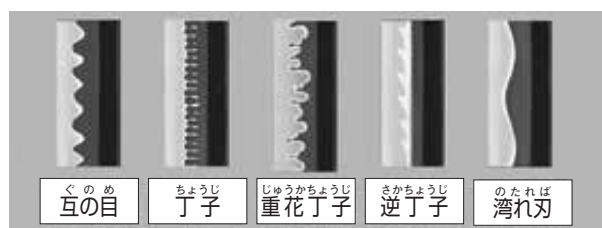
研磨の仕事は、日本刀がもつ独特の曲線美、

鍛えぬかれた地鉄^{じがね}、そして華麗な刃文、これらが美しさを発揮し、日本刀がもつ優雅さと尊厳を導き出すところにあります。

○日本刀の美しさ

日本刀の美しさは、その刀身の姿や拵えにもありますが、私はその刀身の肌の模様にあると思います。実はそのことを教えていただいたのは、まだ私が学生の頃でした。当時私は、気が向くと時々上野の国立博物館に行くことを楽しみにしていました。ある日日本刀の展示をじっとながめていましたら、若い男性が近づいて来ました。お名前は失念してしまいましたが、その方はたぶん博物館の学芸員だったのだと思います。私が金属物性専攻の学生だと分かって、刀や太刀の肌にある模様(組織)の鑑賞のしかた

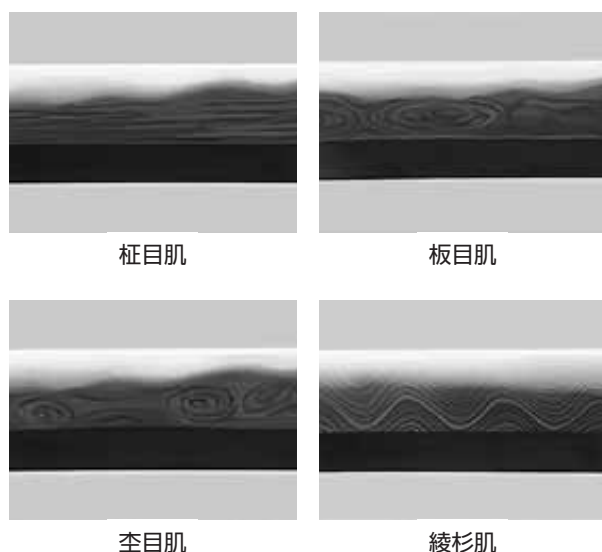
図3 日本刀の刃紋(乱れ刃の例)



乱れ刃の種類(互の目・丁子・重花丁子・逆丁子・湾れ刃)

出典：名古屋刀剣博物館 HP

図4 日本刀の地肌の例



出典：名古屋刀剣博物館 HP

を細かく丁寧に説明して下さったのです。

直刃や乱れ刃という刃紋の美しさ(図3に乱れ刃の例を示します)。互^ぐの目、丁字、三本杉、濤乱刃^{とうらんば}等々、後になって覚えたのもありますが、このとき波紋の存在を改めて知り、それが焼き入れの時に刀匠によって作り込まれることを知ったのです。加えて地肌^{じえ}の見方^{うつり}、沸、映、などの言葉を教えてもらったのもその時でした(図4に例を示します)。そしてこれらの美しさは、日本刀の製造技術工程から必然的に生じた美であることを教わったのです。

第6話 鋼に新しい素材特性を与える

鉄鋼の消費の多くは建築や機械の構造材や船体や自動車のボディなどですが、それらも、材料として必要な機能を持たせるために、日々技術開発が行われています。近代鉄鋼の製造技術は欧州について米国が世界をリードしましたが、バブル期ころまでには技術開発力で日本が他の国を圧倒的にリードするまでになりました。ただ多くの技術の発想が、欧米にあったものが多く、それを実用的に発展させ完成させたという面があるため、1960年代から70年代の工業技術は「日本はオリジナリティが低い」などと悪口をいわれることもありました。しかし鉄鋼をはじめとする日本の物作りは、その後はオリジナリティの高い、高品質な美しい製品を世界中に供給しつづけ、MADE IN JAPAN製品を「JAPAN AS NO1」と言わしめるようにしてきたのです。

○ステンレス鋼の話

私達が鋼を使用しているといくつかの弱点が気がつきます。中でも、錆びることと重たいことは、使いにくさの二大問題でしょう。

鉄鋼は自然の環境では他の金属に比べても錆びやすい物質です。もともとは自然には錆び(酸化物や水酸化物)の姿で存在していたのを化学反応で取り出したのが鉄鋼なのですから。大昔

の鉄器なども錆びて形が崩れてしまうので、なかなか遺跡から発見されることが少なく、いわゆる青銅器文化と鉄器は日本ではほぼ同じ頃に始まっているのではないかと主張する学者もいます。

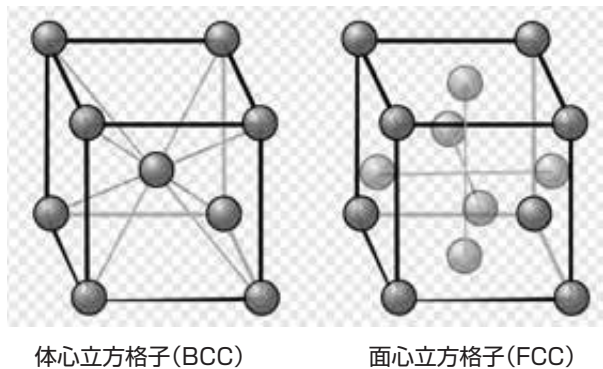
錆びない鉄鋼というのは永年人々の夢でしたが、近代に入って人類はその課題を克服しました。ステンレス鋼の発明です。ステンレス鋼は耐食性、耐熱性、意匠性等に優れているため、食器、建築内装、厨房品から電車にいたるまで多く使われ、今では割に何気なく使っていますが、登場したのは約100年前です。多くの工業的発明がそうであるように、ステンレス鋼の発明にはそれまでに多くの研究が積み重ねられてきていますが、一般にはステンレス鋼を最初に実用化した一人であり、名付け親であるイギリスのハリー・ブレアリーが1914年に発明したとされます。実はステンレス鋼には大別すると三種類あります。オーステナイト系、マルテンサイト系、フェライト系です。すでに述べましたように、これらの名称はステンレスの金属組織の相で、結晶構造が異なっていることを示しています。オーステナイト系ステンレス鋼は、1912年、ドイツのベンノ・シュトラウスとエドゥアルト・マウラーによって発明され、マルテンサイト系ステンレス鋼は、1913年、イギリスのハリー・ブレアリーによって発明されました。フェライト系ステンレス鋼もこの頃に発明されましたが、誰を発明者とするかは決め難いとされています。

ステンレスはクロムを含む合金鋼です。実はクロムという金属は、表面に酸化物ができるとそれが薄い膜になり内部に酸化が進行するのを防ぐ性質があります。その被膜(不動態被膜といいます)は、鉄とクロムの合金においてもクロムの含有量が約13%以上になると生じます。今では、クロムの含有量はそれより低くても不導体被膜を作れるようになりました。この膜(といっても数ナノメートルの厚さです)の凄いところは、加工中に膜が破れても自己修復能力があっ

て内部が守られるということです。

さきほども申し上げましたようにステンレスには3種類あります。フェライト系、マルテンサイト系、オーステナイト系です。ステンレスの鉄鋼では、常温ではオーステナイトの相は存在しません。18%クロム鋼に8%のニッケルを入れると常温でオーステナイト相になります。オーステナイト系ステンレスといいます。通常の鋼はフェライト相(体心立方という結晶構造です)で極低温では非常に脆性が大きくなります。オーステナイト相(面心立方という結晶構造です)は極低温でも靱性が低下しないし、高温の靱性もよいという性質があります。図5に体心立方と面心立方の相では原子がどのように配列しているかを示しておきます。

図5 体心立方格子と面心立方格子



○ステンレスは磁石に付くか

子供のころ磁石にくっつくステンレスは駄目などといって判断していた人もいられるかもしれません。オーステナイト系の面心立方構造の鉄鋼は強磁性を持ちません。当時はオーステナイト系のステンレスがより高級だというイメージがあったからです。高価なニッケルを含有しているのだから当然かも知れませんが。

実際に18-8ステンレス(SUS 304)は、優れた耐食性、耐熱性、低温靱性を持ち、かつ伸び特性も大きく、加工性も良く美しい光沢も持っているため広く用いられています。

○自動車用鋼板の話

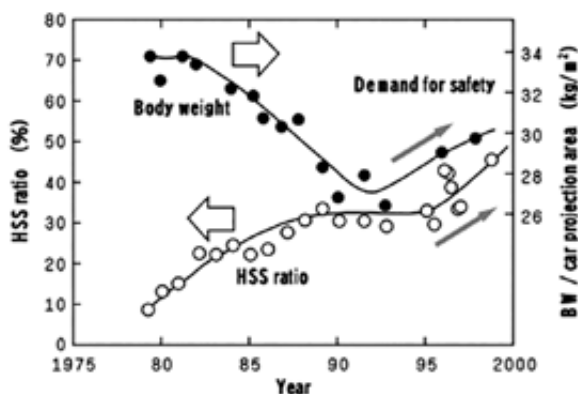
もう一つの鋼の弱点、重いということがあります。特に自動車など移動する機械の重さは、燃費、さらには地球環境上もゆゆしき問題になります。丈夫さを保ちながら軽量化することが、工業化社会になっての大きな課題となります。ここでも日本の物作り技術はいかなく力を発揮しました。自動車を例にとってどういうコトがなされてきたか、眺めてみましょう。

自動車は重量にして約7割を鉄が占めていると言われます。特にボディを作る鋼板は丈夫で軽く、また加工性がよくないと、あのような美しい乗用車のフォルムを作り出すことができません。その為に自動車鋼板用にハイテン(High Tensile Strength Steel; HTSS)と呼ばれる薄鋼板が開発されました。合金成分の添加、組織の制御に関する多種多様な技術があります。

図6はハイテンの使用によって車体が軽くなってきたことを表しているものです。同じように図7はボディの重量と燃費の関係を示したものです。

ボディ以外にも軽量化のための部位に適した性能を持つ素材について、日夜研究が進められています。

図6 ハイテンの使用率と車体重量の変移

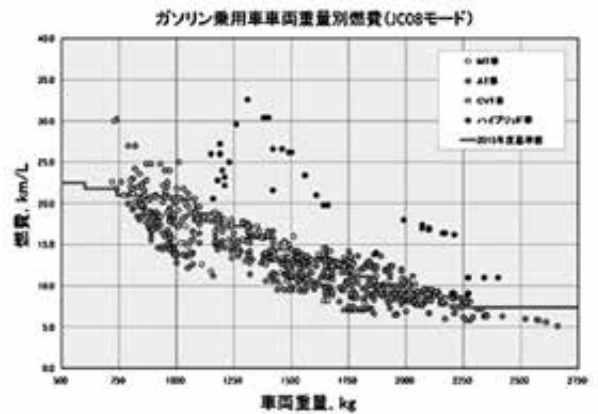


出典：自動車技術、Vol.55, No.4 (2001) ,P51

○メッキは錆から守るためだけではない

自動車鋼板は、錆を防ぐために亜鉛を表面に溶融メッキしたり、電気メッキしたりします。亜鉛は、鋼板に傷がついたときにイオン化傾向の

図7 ガソリン乗用車の車両重量と燃費



出典：国土交通省 HP

違いで鉄より先に酸化して、鋼板の表面を守ってくれるからです。

しかし、成型時に金型に亜鉛が付着したりすることなどが原因で成形性がわるくなりますし、メッキ層が破壊してもいけませんし、溶接性が悪くなくても困るわけです。そこで従来の溶融亜鉛メッキに熱処理を加えて、合金化処理をする合金化溶融亜鉛メッキ(GAと呼ばれます)が登場して、多くの日本の自動車用鋼板に採用されています。防錆、プレス成型性、メッキの密着性、溶接性を同時に改善するために、様々な技術が開発されています。これからは、さらに吸熱性、耐汚れ性、耐摩耗性など、新しい機能の要求に応じる多様な表面処理技術がますます必要とされるようになっていきます。モノづくりのニーズはどんどん多様化・高度化しているのです。

第7話 電気エネルギーロスと電磁鋼板

○変圧器というもの

人類は、1880年代に交流電気を使うようになり電圧を変化させる技術が発達しました。1885年頃になると、効率的に磁束を通すために鉄心を利用する変圧器が発明されました。今我々が使っている一次コイルと二次コイルを閉じた輪になった鉄心の周囲に巻くという変圧器の原型

ができたのがこの時です。

しかし鉄は、透磁率(磁束の通りやすさ)が高いものの交流を流した時に損失するエネルギー(鉄損といいます)が大きいのが欠点でした。

そこで1900年に英国のハドフィールドが、鉄にケイ素を加えた合金、すなわちケイ素鋼を発明しました。

○ケイ素鋼板の発明とエネルギー損(鉄損)

昔の変電所や柱状変圧器、あるいは自分でラジオを作った方は良く経験しますが、変圧器はとて熱くなった上に、ブーンと唸っていたものでした。実はその時に音や熱として大きなエネルギー損が発生しているのです。ところが、近ごろの変圧器はそれらの熱や音がかなり小さくなり、電信柱の上のトランスも形が小さくなると気がつきませんか、それはケイ素鋼板のおかげです。

鉄心を使用した時のエネルギー損が生じる原因の大きな一つに渦電流損があります。鉄心の中で渦電流という無駄な電流が流れる現象があるからです。渦電流は鉄心材料の比抵抗が大きいほど生じにくくなります。ケイ素を鋼に含有させると、磁化の強さを鋼より大きくは下げずに比抵抗を上げることができます。また無垢のケイ素鋼を用いるのではなく、薄板にして(0.23~0.5mm等々)それを巻いたり(巻鉄心)、積層(積鉄心)して用いれば損失が下がります。そのためにケイ素鋼板表面には酸化物や絶縁コートが施されており、非常に複雑な構造の材料となっています。

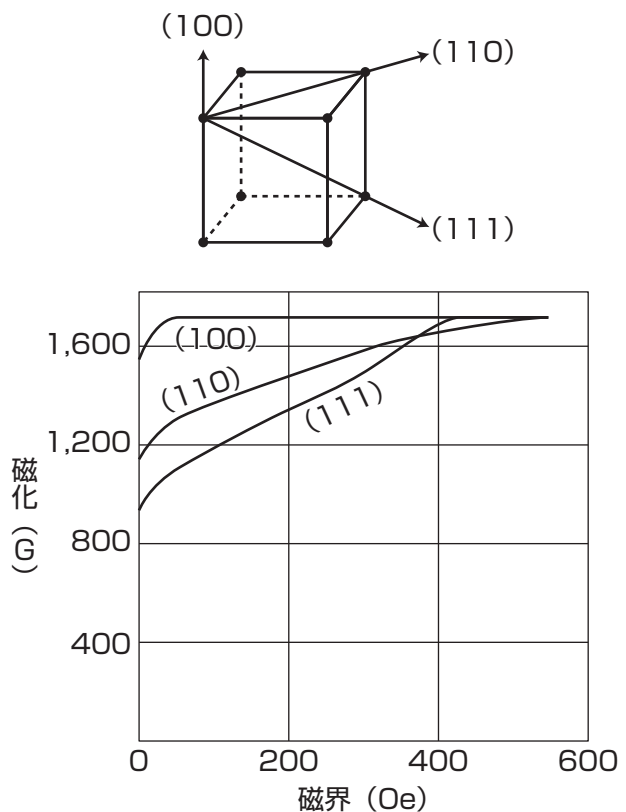
○芸術的鋼板技術：電磁鋼板

もう一つ金属の組織を制御した大きな発明がありました。方向性電磁鋼板の発明です。1934年にアメリカのゴスという人が発明しました。

実は鉄という物質はそれを構成している結晶の原子配列の方向で磁化の様子が異なります。図8は、本田光太郎が最初に測定したという一般的によく知られた磁化の挙動を示していま

す。鉄の炭結晶をその方位に切り出して磁界を増大させていった時の磁化の大きさを示した曲線です。[100]方向の方が簡単に磁化されるので磁化容易軸といいます。ゴスが発明した技術は、ケイ素鋼板の圧延方向にこの磁化容易軸[100]をほぼそろえさせることに成功したことです。これを方向性電磁鋼板と呼びます。ゴスは特殊な析出物と圧延や焼鈍条件を組み合わせることでそれを実現しました。圧延された結晶組織が加熱によってふたたび結晶化するのを再結晶といいます。その結晶の大きさは数十ミクロンです。その再結晶を焼鈍によって巨大な(数センチほど)結晶とする現象を二次再結晶といいます。この二次再結晶を起こし巨大化する結晶は、なんと磁化容易軸を圧延方向にもつ結晶だけなのです。(板幅方向には[110]方位になっています)まことに天の与えてくれた恩恵としか言いようがありません。今でも研究者たちは、圧延方向に[100]方位を有し、板幅方向に[110]方位を持つ巨大な二次再結晶粒を、ゴス方位の結晶

図8 鉄の磁化曲線と鉄単結晶の磁化容易軸



1・6 図 鉄単結晶の主要軸方向の磁化曲線

粒と呼んでその功績をたたえています。

磁化容易軸をそろえることで、鉄損のもう一つの大きな要因(交流の磁化過程で消費されるエネルギーでヒステリシス損といいます)を大幅に下げることができますし、鉄心も小型になります。米国で発明された方向性ケイ素鋼板の技術は、後に1960年代後半から日本で大きく発達することになります。

電磁鋼板の技術は金属の組織を制御するだけにとどまりません。実は電磁鋼板の表面は、焼鈍の際に生じる極薄いフォルステライト(カンラン石と同じマグネシウムと鉄の酸化物)の層と焼き付けた無機質の絶縁被膜に覆われており、それらの皮膜が鋼板表面に張力を付与して鉄損を低下させるという効果をもっています。実は表面の酸化物は、電磁鋼板で必要な高温のコイル焼鈍の際に、鉄板が融着しないように塗布した焼鈍分離剤が化合して生じるもので、張力を与えるために意図したものではありません。その意味ではフォルステライト皮膜は天の配剤だったのかもしれませんが。

そののち高磁束密度の電磁鋼板の表面に、線上にレーザーを施すなど磁性的観点からの処理を行い、格段に鉄損を低下させる技術(磁区細分化技術と呼ばれます)なども発明され、常に日本は世界の先頭を走り続けています。

これらの種々の鉄鋼技術の総合として、また非常に種々の分野の知見が織り込まれて発達してきたので、電磁鋼板はしばしば芸術的鉄鋼製品といわれます。

○良きものづくりの競争時代

方向性電磁鋼板は、近代社会が電力を必要としたときにそれを支える技術として発展し、その後もファンダメンタルな省エネ技術として発展を続けました。特に日本における発展は目覚ましいものがあり、戦後の日本の鉄鋼技術の海外供与の先駆的役割を果たしました。特に、磁化容易軸が圧延方向にそろった方向性電磁鋼板を、画期的に配向性の高くした高磁束密度の電

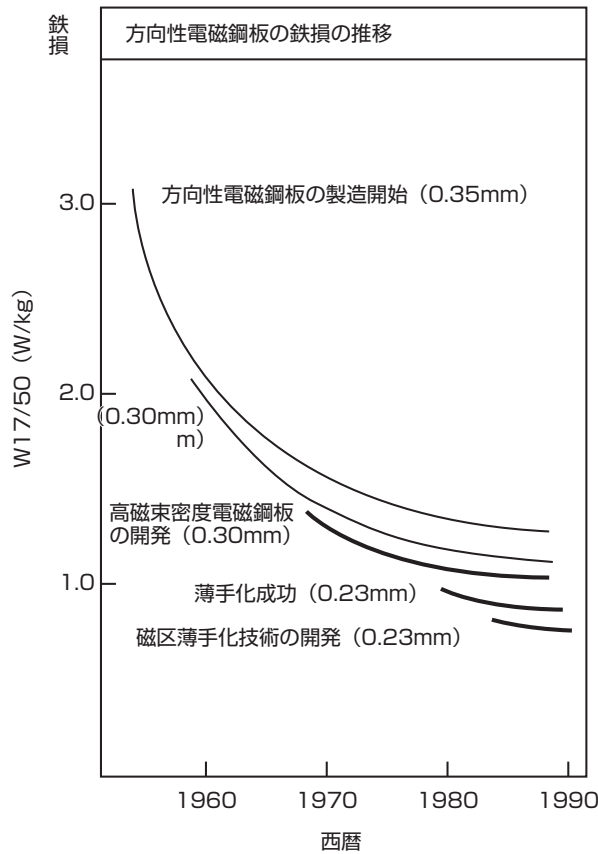
磁鋼板を、当時の八幡製鉄、続けて川崎製鉄が開発し、米国に技術の逆輸出をしたのをはじめ、世界中の電磁鋼板はこの二社の技術で製造されることとなりました。

図9はこの二社の発表している資料(参考文献参照)から、方向性電磁鋼板の開発が、鉄損という指標を通じてどのように省エネに貢献してきたかを表しています。1953年には、方向性電磁鋼板技術が米国から日本に導入されました。大きな技術的前進が日本でなされました。圧延方向に磁化容易軸がそろうためのメカニズムから、新たな窒化物の析出物を使用して二次再結晶の制御精度を高めたのです。新たに画期的な高磁束密度の電磁鋼板が日本で発明されたのは、新日本製鉄(当時)の研究グループによる1968年のこと、それから5年ほど遅れて川崎製鉄(当時)の研究グループによって、別の方法で高磁束密度電磁鋼板が発明されました。両社は鎊を削ってその後開発競争を続けることとなります。続いて大きな鉄損減少の技術開発は、板厚を薄くしてもうまく二次再結晶をさせる技術を開発したことです。薄手化の開発には筆者も加わりましたが、川崎製鉄の方が少し先に開発しました。そのあと、前述しましたレーザーを鋼板表面に照射する磁区細分化技術を新日鉄のグループが開発し、鉄損は方向性電磁鋼板の導入当時と比較すると三分の一以下に低減しました。電磁鋼板は変圧器、発電機、モーター、磁気シールド他電磁気的な機器に広く用いられます。電磁鋼板の鉄損改良は、社会の省エネに多大な貢献をなしたと言えましょう。その貢献は発電所数か所分に相当するはずです。これらの技術開発は、良き競争関係にあるモノづくりに力を注ぐことによって達成できたといえましょう。良きモノづくりの時代だからこそともいえます。

第8話 結言 ものづくりの時代

現代社会の駆動力になっている技術は、情報

図9 方向性電磁鋼板の鉄損の推移



技術であることは間違いありません。しかし情報技術の土台となっているのは、モノづくり技術です。人類は自然というモノに接し、また働きかけることによって発達してきました。モノに接し働きかけることなしには、人間の情報は真の意味では豊かになりません。近い将来、またモノづくりの新たな局面での展開がなされるし、またそうでなければ、人間は経済的にも精神的にも真の豊かさを失っていくこととなると思います。日本の近代化の到達点としてバブル以前の社会があったとしたら、まさにそれはモノづくりが駆動力となっていたのだと思います。日本のモノづくりの一つの典型として鉄鋼産業の技術のことを紹介してみました。

<参考文献>

- * K. Honda and S. Kaya: Sci. Rep. Touhoku Imp. Univ., 15 (1926) , 751
- * N. P. Goss: U.S. Patent No. 1965559 (1934)
- * 里、斎藤、白川「磁性材料」1961年、日本金属学会
- * 新日鐵住金『鉄の未来が見える本』2016年・日本実業出版社
- * 森戸、小松原、清水「川崎製鉄の方向性電磁鋼板の歴史と最近の進歩」、Vol.29 (1997) No.3、川崎製鉄技報

<西池氏裕氏略歴>

1944年生
 1974年4月 川崎製鉄入社技術研究所
 2000年～2004年 東京大学先端科学技術センター客員研究員
 2006年4月 財団法人徳島経済研究所技術顧問（現）
 2007年8月 徳島県経済成長戦略アドバイザー（兼）
 2008年～ ひまわり俳句会主宰
 2011年9月 徳島県教育委員長（～2012年8月）



読者アンケートにご協力ください

いただいた回答は、今後の発行物の
 充実に役立ててまいります。