



入門講座

鉄を知る-3

鉄の物性 金属の王にして異端者である鉄

II 結晶のレベルからみた鉄

松尾宗次

(株)日鉄技術情報センター 主席研究員

Munetsugu Matsuo

Mysteries of the King of Metals

II Wonders of Iron Crystals

1 鉄の結晶構造の不思議

1.1 巨大な鉄の結晶模型

1958年にベルギーのブリュッセルで開催された万国博覧会のモニュメントとしてFig. 1に示す高さ100メートル超の塔が建造されました。このアトミウム原子の塔と名付けられた塔は鉄の結晶模型です。結晶構造は原子を球、原子の間の結びつきを棒で表現することが通例です。つまり塔の9個の球は鉄の原子を表しています。この塔は見方を変えると、8個の原子が立方体をつくり、その立方体の中心に1個の原子が入り込んだ構造と見なせます。この中心位置を体心と呼び、体心に原子を含む結晶格子を体心構造と呼びます。鉄原子がこのような体心立方の結晶構造を組むことは大変不思議であり意味深いことです。今回は鉄の結晶構造の特異性を考えてみましょう。

1.2 鉄の特異な結晶構造

鉄を結晶の観点から知るための情報を盛り込んだ周期表をTable 1に掲げました。この周期表の中段には単体元素

の安定な基底結晶構造が示されています。周期表右端の非金属元素を除いて、単体金属元素の結晶の多くは面心立方(cF4)、最密六方(hP2)、体心立方(cI2)構造をもちます。面心立方と最密六方構造は、ともに球を最も密に充填した状態に相当する構造で、最密充填層の積み重なるの繰り返し順序に違いがあります。それらに比べて体心立方構造は隙間の多い疎な構造です。

ここでまず目立つことは、鉄とその前後のマンガン、コバルトの結晶構造の特異性です。周期表で鉄の縦系列下方の元素が最密六方構造であるから、鉄は最密六方構造であろうと想定されます。事実地球内部のような高い圧力のもとでは、鉄は最密六方構造が安定であることが確かめられています。しかし常圧下での鉄の安定構造は体心立方です。これは鉄の結晶の不思議の一つです。

1.3 鉄の体心立方結晶

次に周期表の横の系列を眺めてみましょう。左端に体心立方構造のアルカリ金属があります。これらの金属は原子容積が著しく大きく、充填構造をとりにくいと考えられます。もう一つ体心立方構造をもつ集団はVAおよびVIA族遷移元素です。こちらのタイプは凝集エネルギーが大きくて原子容積が小さい、つまり原子間の結合が強い金属群といえます。同じ体心立方結晶でも異なるタイプのあることがわかります。遷移金属の結晶構造を左から右にたどっていくと、先ず高温で体心立方で低温になると最密六方に変わる族から、順に体心立方、最密六方、面心立方の族への移り変わりが認められます。

遷移元素では、原子番号が増える順に5つのd軌道を電子が埋めていきます。その際にフントの規則にしたがって、同じ向きのスピンをもつ電子が順に入ります。したがってVIA族までは同符号スピンの電子だけでd軌道が占められます。このような同一軌道に異符号の電子の対をもたない



Fig. 1 鉄の結晶を表す塔-アトミウム

Table 1 鉄を知るための周期表¹⁾

IA	IIA	原子番号 元素記号 高温相結晶構造(Pearson記号による表示) 高温相結晶構造(Pearson記号による表示) 基底結晶構造(Pearson記号による表示) $\gamma \cdot \alpha$安定化元素: 記号はFig. 9に対応 鉄との原子半径比(Fe=100) 鉄との結晶凝集エネルギー比(Fe=1.00)										IIIB	IVB	VB	VIB
3 Li cI2 hR3 123 0.38	4 Be cI2 hP2 α 89 0.78											5 B hR105 α 73 1.35	6 C hP4 γ 60 1.71	7 N hP24 γ 57 1.15	8 O hR2 α 47 0.61
11 Na cI2 cF4 hR3 150 0.26	12 Mg hP2 126 0.35											13 Al cF4 α 112 0.79	14 Si cF8 α 104 1.08	15 P cI2 cF4 oC8 α 97 0.80	16 S cI2 cF4 mP28 α 98 0.66
III A	IV A	VA	VIA	VII A	VIII					IB	II B				
19 K cI2 187 0.22	20 Ca cI2 cF4 155 0.43	21 Sc cI2 hP2 129 0.91	22 Ti cI2 hP2 α 115 1.13	23 V cI2 α 106 1.24	24 Cr cI2 α 101 0.95	25 Mn cI2 cF4 cI58 γ 98 0.68	26 Fe cI2 cF4 cI2 γ 100 1.00	27 Co cF4 hP2 γ 99 1.02	28 Ni cF4 γ 98 1.03	29 Cu cF4 γ 100 0.81	30 Zn hP2 α 109 0.31	31 Ga oC8 α 106 0.65	32 Ge cF8 α 108 0.90	33 As hR2 α 107 0.69	34 Se hP3 α 111 0.57
37 Rb cI2 200 0.20	38 Sr cI2 hP2 cF4 169 0.40	39 Y cI2 hP2 139 1.02	40 Zr cI2 hP2 α 126 1.46	41 Nb cI2 α 115 1.76	42 Mo cI2 α 110 1.59	43 Tc hP2 γ 107 1.60	44 Ru hP2 γ 105 1.57	45 Rh cF4 γ 106 1.34	46 Pd cF4 γ 108 0.91	47 Ag cF4 γ 113 0.68	48 Cd hP2 α 123 0.27	49 In tI2 131 0.59	50 Sn cI2 cF4 dI4 α 124 0.73	51 Sb cI2 cF4 hR2 α 123 0.64	52 Te cI2 cF4 hP3 α 129 0.51
55 Cs cI2 214 0.19	56 Ba cI2 176 0.44	57 La hR4 147 1.04	72 Hf cI2 hP2 124 1.50	73 Ta cI2 α 115 1.89	74 W cI2 α 111 2.07	75 Re hP2 γ 108 1.87	76 Os hP2 γ 106 1.90	77 Ir cF4 γ 107 1.62	78 Pt cF4 γ 108 1.36	79 Au cF4 γ 113 0.89	80 Hg hR1 125 0.16	81 Tl cI2 hP2 135 0.44	82 Pb cF4 137 0.47	83 Bi hR2 133 0.51	84 Po cP1 139 0.35

電子を不対電子と呼びます。VAおよびVIA族元素の強い結合は多数の不対電子をもつd軌道の特徴に関連すると考えられます。d電子軌道には5種類の軌道があり、その内の3つはFig. 2のように8配位6面体の隅の方向に広がっています。この構造は体心立方構造に対応します。このようなd電子軌道が他の軌道と混成あるいは共鳴して強固な体心立方結晶構造の骨格を支えていると考えられます。

独立した鉄原子では外殻電子として6個の3d電子、2個の4s電子をもちます。結晶をつくると鉄の4s電子が格子を動き巡って原子を結びつけ、伝導電子として働きます。そのためすぐ内側の軌道を占める3d電子は外側に顔を出し、隣の原子の3d軌道と交じり合うことができるようになります。このように3d電子は原子に局在した電子と原子の間を遍歴する電子の二面性をもちます。そしてFig. 2のような電子軌道を介した鉄原子の結びつきが体心立方の8配位6面体構造を作り上げていると考えられます。

鉄において体心立方構造が安定であることを第一原理計算とよばれる方法で確かめてみます。第一原理計算は非経験的方法ともよばれ、原子番号や電子配置だけをもとに、仮想的な結晶構造を含めて、元素や化合物の結晶構造の凝集エネルギーなどを求める手法です。コンピュータの能力が飛躍的に向上してきたので、最近広く使われています。この方法によって鉄の体心立方、面心立方、最密六方結晶のエネルギーを計算した例をFig. 3に示します。横軸は原

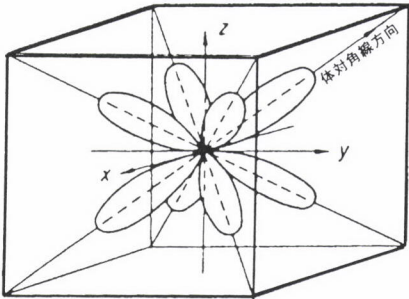


Fig. 2 d電子軌道(dε)の一次結合

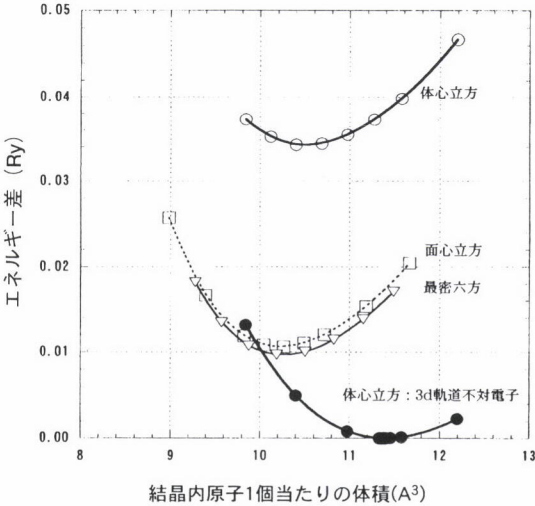


Fig. 3 第一原理計算による鉄の結晶構造安定性比較²⁾

子1個当たりの体積、縦軸は結晶の絶対温度0Kにおける全エネルギーです。曲線の底の位置の低さが各構造の相対的安定性を示します。

体心立方結晶については3d軌道で上下スピンの対をなす状態と不対電子をもつ状態を比較しています。この図から不対電子をもつ体心立方晶が最も安定な構造であることが明らかです。しかし不対電子のない仮想的体心立方構造は面心立方、最密六方結晶よりも不安定です。また最密六方晶が次いで安定であり、極小値に対応する結晶の体積が小さいことが注目されます。これは超高压のもとで圧縮された鉄が最密六方構造となる事実と良く合致し、周期表で鉄の下段にある元素が最密六方の結晶構造をもつことにも結びつきます。逆な見方をすれば、体心立方の鉄は α 軌道電子の拡がりが大きくて原子の体積が大きく、原子間距離が広がっています。この事実と、後で説明するように、不対電子の存在は強磁性の原因となります。鉄の体心立方構造は、鉄が強磁性元素であることにもとづいています。鉄の結晶の特徴は、体心立方だけでなく、温度や合金元素によって別な面心立方構造にもなることです。

2 鉄の変態の不思議

2.1 高温の鉄の高密度結晶構造

金銀銅は面心立方、亜鉛やマグネシウムは最密六方、タングステンやモリブデンは体心立方結晶構造であり、これらの金属は温度によらず一定の結晶構造を保っています。しかし結晶構造が温度や圧力によって変化する多くの元素があります。Table 1の周期表には低温で安定な基底構造以外に高温で現れる結晶構造を上段に小さな文字で記入してあります。構造変化をおこす元素についてみると、周期表でチタンから左寄りの元素で認められるように、低温の最密充填構造から高温で体心立方へ変化するのがその例です。このように構造変化の傾向は、高温になると密から疎な構造に落ち着くのが一般的です。低温相から高温相に変わる時に体積膨張をとまいません。この現象は原子の熱振動が激しくなる結果として理解できることです。ところが鉄の場合には高温になると高密度の面心立方に変わり、さらに高温になると再び体心立方構造になります。これはもう一つの不思議です。この奇妙な結晶構造の移り変わりが、鉄の有用性と大きなかわりをもたらすことを知っておきましょう。

2.2 鉄の変態

「春の海」など多くの箏曲名曲を残した宮城道雄の処女作

は「水の変態」と題されています。その作品では水が雪や霰に、露や霜など様々な態様になる姿を音によって表現されています。このように物質の存在状態、構造や相が環境によって変化することを変態といいます。水が氷に変態すると体積が増大し密度が減少します。そのため氷は水の上に浮かびます。もし氷が水底に沈んでしまうとすれば、どうだろうか、いろいろな不都合がおこることは容易に想像できます。

同じことは鉄についても言えます。約900°Cという実に絶妙な温度を境にして、高温の密な構造から低温の粗な構造に転移することは実に幸運なことです。原子球の間隙の空間という目で見たととき、この密な構造と疎な構造との間には意外な事実があります。

面心立方と体心立方の結晶について、原子を剛体の球とみなしかつ最近接の原子が互いに接しているとします。その時にできる隙間の全体積は簡単な計算で求められて、体心立方結晶の隙間は全体積の32%、面心立方では25%になります。個別の隙間について着目すると、体心立方格子の中では球の半径の15%と29%の大きさの空隙があります。面心立方では体心に相当する位置に6配位の空隙が存在し、その大きさは原子半径の41%に相当します。

これは大変興味深く意味深い事実です。体心立方格子には隙間が多いけれど、個々の空隙は小さく、隙間に入り込みにくい状況にあります。さらに体心立方格子の大きい方の比率29%の隙間では他の原子が入ろうとすると周りの原子に及ぼす影響が大きく、入りにくい事情もあります。したがって僅かに15%の大きさの空間しか用意されていません。一方面心立方格子では原子が密に詰まっていますが、かなり大きさの空隙があります。鉄がこの2種類の結晶構造をもつことは、鉄の合金と熱処理の多様性を生み出します。

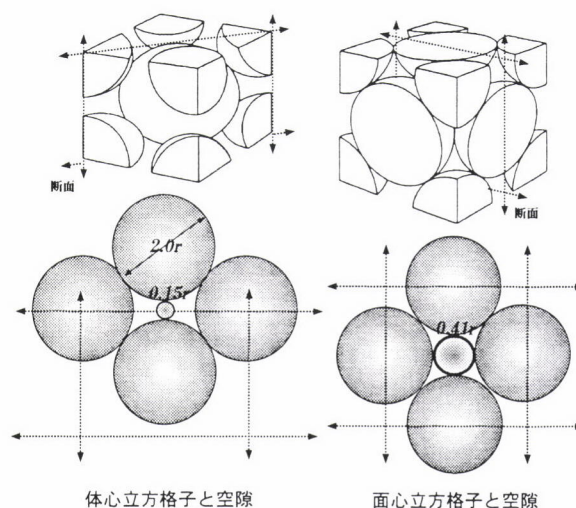


Fig. 4 体心立方と面心立方格子の原子の間隙のすき間

2.3 鉄の豊かな包容力

水は様々な物質を溶かし込む豊かな包容力をもつ優れた溶媒です。鉄もまた多くの元素と親和性に富み、多彩な合金をつくります。合金として溶かし込む重要な因子は原子の大きさです。Table 1 の下から二段目には単体元素が結晶を組むときの原子半径を鉄原子との比率で記入してあります。原子の大きさが15%程度の差であれば結晶格子位置を互換して固溶できると考えられています。固体中に溶け込むので固溶と言います。鉄に対してこの範囲の大きさの原子をもつ金属元素が多数あり、置換型原子として鉄の結晶に固溶して合金をつくります。また炭素や窒素など鉄の原子の半分程度の大きさの原子は鉄の結晶格子の中に侵入する侵入型固溶元素として合金をつくります。さらにこれらの合金元素には2種類の鉄結晶構造のいずれに固溶するか好みがあり、鉄の合金の多様性は拡がります。

鉄の体心立方晶の相をフェライト(α と δ)そして面心立方晶の相をオーステナイト(γ)と呼びます。鉄の合金元素は、そのどちらの相を安定にするかにしたがってフェライト安定化元素とオーステナイト安定化元素に性格分けができます。Table 1 の周期表に記された α と γ の記号は、フェライト安定化元素とオーステナイト安定化元素の区別を示します。

純鉄の $\alpha \rightarrow \gamma$ 、 $\gamma \rightarrow \delta$ 変態温度をそれぞれ A_3 点、 A_4 点と呼びます。オーステナイト安定化元素は A_3 点を下げて A_4 点を上げ、逆にフェライト安定化元素は A_3 点を上げて A_4 点を下げます。さらにそれぞれ鉄と合金元素との間で化合物をつくるか否かで分類されます。それらの4種類の合金の典型的状態図がFig. 5です。このように鉄は合金元素によって多様な状態を実現できます。原子半径が大きい元素はフェライト形成元素、小さい元素はオーステナイト形成元素である傾向があり、また鉄の磁性をもたらし秩序構造に関係しているなどの知見はあります。しかし何故ある元素がオーステナイト安定化元素あるいはフェライト安定化元素になるのか、未だ明確に説明できていません。

炭素や窒素の侵入型原子は、多少無理すればオーステナ

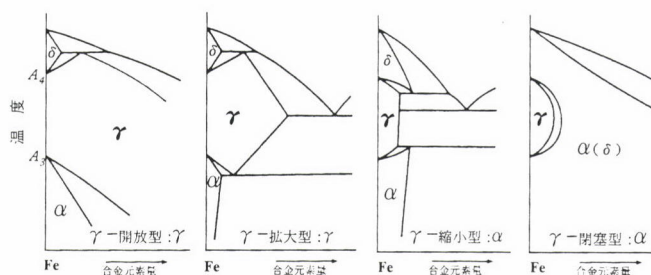


Fig. 5 合金元素によって変化する鉄の状態図³⁾

イトの空隙に入り込めます。ところがフェライトには収容可能な大きさの空隙はありません。収容能力の大きなオーステナイトが高温相であり、収容力の乏しいフェライトが低温相であることは、一般に固溶量は低温になると少なくなることを意味し、高温から低い温度に急冷することにより、析出現象を利用して硬くできます。アルミニウムに固溶した銅を析出させたジュラルミンがその例です。鉄の場合にはこの固溶量の差がオーステナイトとフェライトの間で格段に大きく、大きな析出硬化を利用できます。

銅を焼き入れると生じるマルテンサイトはよく知られています。多量にオーステナイトに固溶した炭素原子は、急速にフェライトに冷却されると無理矢理に鉄の結晶格子に閉じこめられた状態になります。炭素を過剰に収容した鉄の結晶格子はゆがみ、そのために著しく硬くなります。これがマルテンサイトです。鉄の強さは最も軟らかい純度の高い単結晶から、実用材料で最高の吊り橋のワイヤーそして理論的に算定される理想強度に至るまで約1000倍程度の範囲に及びます。このような鉄の結晶の特異性を活用し、さらに合金と熱処理方法の組合せで、多様な材料がつくり出されています。

3 鉄の磁性の不思議

3.1 鉄原子の間の強い相互作用

磁性の基本は自転する電子のスピンにあります。自転の向きにしたがって上向きと下向きの磁気モーメントが発生しています。この上下スピンの打ち消し合わない不対電子をもつ状態が強磁性の第一の条件です。さらにそのようなスピンの向きを総体的に揃える秩序化が必要です。そのために隣り合う原子同士で相互の電子のスピンを同じ向きに揃える働きが及ぶ適切な原子の間隔でなければなりません。

相互作用が有効に及ぶ距離は、原子間隔が3d軌道の拡がりの3~4倍程度である場合です。隣接原子の間隔が近すぎても遠すぎてもだめで、適当な距離であると電子のやりとりができて、強い結合が生まれ、互いの不対電子同士のスピンを平行にする働きが現れます。この条件を満足する単体元素が鉄、コバルト、ニッケルです。周期表で鉄の左に位置するマンガンは原子間隔が近すぎて、強磁性を示しませんが、合金によって大きな結晶格子をつくと強磁性となる可能性があります。このような秩序化の作用も、熱振動が激しくなると乱され、高温になりキュリー点を超えると強磁性を失います。鉄の磁性は結晶構造の特異性をもたらしただけのみならず、磁性をもとにした高い機能性を備えた材料として役立っています。

3.2 鉄結晶の磁気異方性

1926年本多光太郎と茅誠司は鉄の単結晶を用いて結晶方向による磁化の様子を調べ、Fig. 6 のように鉄の体心立方格子の稜方向が最も容易に磁化することを発表しました。この発見は非常に大きな意味をもちます。何故このような異方性が現れるのか考えてみます。

磁性の原因である電子が核の回りを廻っていることは、電子から見れば、電子の回りを核が運動していることになります。したがって電子のところには、核の正電荷にもとづく磁界が発生しています。そこで電子のスピンはこの磁界に沿った方向に向こうとします。言い換えると、電子は自分自身の回転する軌道の公転角運動の方向と逆向きのスピンをもつ傾向を意味し、核の周りの電子分布は偏ります。これをスピナー軌道相互作用と呼びます。

このスピナー軌道相互作用によって、磁性原子(イオン)の周りの電荷分布は、エネルギー的に有利になるように球形ではなくて、特定の方向に伸びた回転楕円体になっています。楕円体は、隣接原子の電子分布との重なり合いの関連で、一定の向きに揃おうとします。このようないびつな非対称形はスピンの方向に起因していて、それは結晶の対称性を反映した方向性をもちます。その結果、結晶方向によって磁化されやすさが異なります。

この異方性を最も良く利用した例が一方方向性電磁鋼板です。方向性電磁鋼板は3%程度のケイ素を含む鉄板であり、ほとんど総ての結晶粒の磁化容易軸が板の圧延方向に平行に配列しています。このような鋼板は高い効率の発電や送電に貢献しています。もし現在日本中の電力用変圧器の総てに最高級の一方方向性電磁鋼板を使用するとしたならば、年間22億kWhの電力を節約できます。これは約50万世

帯の使用量に相当します。しかしこれは未だ上限ではなく、なお一層損失の少ない鋼板も実験室では得られています。また一方向だけでなく二方向に磁化容易軸が揃った二方向性電磁鋼板の製造技術も開発されています。鉄は強さだけでなく、機能面でも省エネルギー効果の大きなエコマテリアルなのです。

3.3 インバー合金

磁化した物体が磁化の方向に伸縮する現象があります。鉄の場合には立方体稜の方向に伸びます。磁歪は磁気異方性と同じように結晶内の原子の周りの電子分布に関連していると考えられます。この磁歪との関連で興味あるインバー合金について紹介します。

同じ磁性元素であるニッケルと鉄の合金で、体心立方の鉄と面心立方のニッケルは完全に固溶し合いますが、ニッケル量にしたがって特異な性質をもつ合金が得られます。結晶構造の違いだけでなく磁性の観点からも鉄とニッケルは対照的です。ニッケルでは磁化容易軸が鉄の立方体稜方向に対して体対角線方向、そして磁歪が鉄の伸長に対して縮小です。ニッケルは鉄の面心立方構造を安定化するオーステナイト形成元素であり、ニッケル量が増すにしたがって体心立方構造から面心立方構造へと変化します。この移り変わりの付近に特異な性質を示す合金が見いだされます。

それは異常に小さな熱膨張率をもつFe-36%Ni インバー合金です。インバー(invar)は不変(invariable)を意味し、百年前(1897年)にフランスのGuilleumeの発明した合金です。これは度量衡や精密機器に欠かせぬ重要な発明であり、Guilleumeはノーベル物理学賞を受賞しました。Fe-Ni以外にもFe-PtやFe-Pdなどの合金でもインバー特性が見いだされています。これらの合金では常温付近で純鉄よりも1桁程小さい熱膨張率になります。ただし磁化の消滅する温度以上では通常の金属と同じ程度の熱膨張率になります。

熱膨張率が異常に低い理由は熱膨張が自発体積磁歪によって打ち消されるためと説明されています。インバー合金は自発体積磁歪が異常に大きいのです。温度が上がるにつれて原子の熱振動が盛んになり、結晶格子は膨張する一方で磁化は弱まるために磁歪は小さくなり体積は収縮します。したがってある温度範囲で両者を加えた全体の長さが不変であることが起こります。では何故インバー合金で自発体積磁歪が異常に大きいのか、このインバー問題に未だ明快な回答は下されていません。

現在インバー合金は精密機器にとどまらず、その低熱膨張率の利点を生かした重要な工業材料として用いられています。たとえばテレビジョンのシャドウマスク、液化ガスの貯蔵運搬容器、送電線など大量に使用される用途も拓け

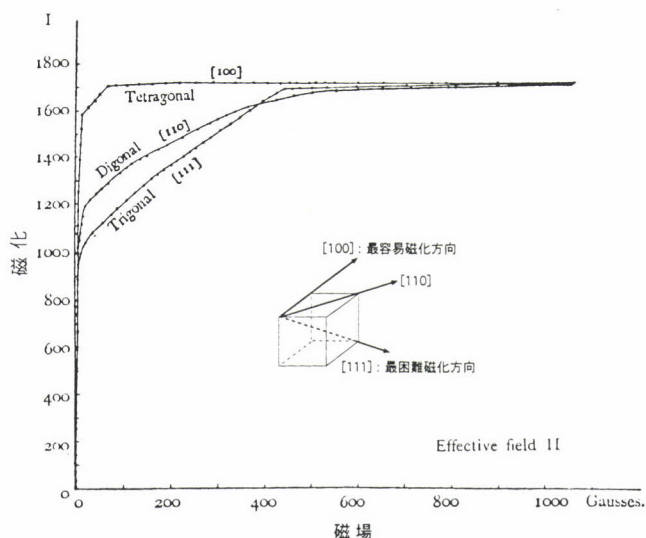


Fig. 6 本多・茅の論文に掲載された鉄単結晶の磁化挙動の図⁴⁾

ています。シャドウマスクでは温度上昇による位置ずれをなくして色ぼけを防ぎます。貯蔵容器では空荷と満載時で約200度に及ぶ温度差があっても長さの変化が僅かであるために、簡単な構造にできます。インバー合金を芯にした電線は支える鉄塔の負担を軽くします。実用材料では熱膨張の問題は不可避であり、今後は異種材料の組み合わせに適応した膨張率の制御された合金が求められるでしょう。

4 鉄の結晶異方性

4.1 鉄のやわらかさ

Fig. 1の鉄のモニュメントの中心を貫く軸が体対角線に相当し、その方向で原子の間隔が最も短くなっています。このだんごを三つ貫いた串の中心軸で原子は最も強く結合しています。鉄の弾性率は結晶方向によって異なり、体対角線の方向で最大です。この事実はこの方向の結合の強さを反映していると考えられます。金属の塑性変形は原子の密度が最高の結晶面に沿ってずれる動き、すべりによっておこります。面心立方や最密六方結晶の金属では、最密充填の結晶面でずれが発生します。鉄結晶の塑性変形は、ペンシル・グライドと呼ばれるように、束ねた鉛筆が相互に滑るようなやり方で進みます。鉛筆の軸は体対角線の方向に相当します。比喩的にいえば、鉄は長い原子のだんごが連なった串で出来上がっていると見なせるでしょう。

高純度の鉄結晶の室温でのすべり変形の抵抗は小さく、基本的には鉄は軟らかな金属です。鉄のやわらかさを示す代表例は自動車のボディの美しく流麗なラインです。やわらかな鉄はデザイナーの描くイメージを忠実に実現します。それだけでなく加工した後の塗装焼付け工程で固溶炭素を有効に使って硬化させることが出来る利点ももっています。これは加工の際のすべり変形で生まれた転位と呼ばれる結晶格子の乱れの中に炭素原子が入り込むことで格子を硬くするためです。自動車用鋼板にはさらに鉄結晶の特徴が活かされています。

4.2 流麗な自動車ボディをつくる鉄

結晶体でつくられる材料の大きな特徴は方向によって特性が異なる異方性をもつことです。前に紹介した磁気異方性はその一例です。結晶は特定な方向へのずれによって塑性変形が進むので、変形は等方的には進まず、変形後の形状に異方性が反映されます。たとえば単結晶の板を引張り変形すると、引張り軸方向によって板試験片の厚さと幅の収縮率が異なります。この異方性を利用して薄板の深絞り加工性を高めることができます。

深絞りとは平らな板をコップ状の形状にプレス加工する

作業です。この過程で板は幅方向に縮みます。一方で加工作業中に薄くなると破断しやすいので、厚さは減少しないことが好ましいことになります。このような幅が縮みやすく薄くなりにくい結晶の向きがあります。実際の材料は単結晶ではなく、無数の結晶粒の集まった多結晶体です。そのような結晶の集まりの統計的結晶方位分布状況を集合組織といいます。深絞り加工性を良好にするためには、集合組織を好ましい結晶方位に調えればよいことになります。そのような集合組織制御の方法により深絞り加工性に好ましい結晶方位分布をもつ鋼板を開発して、自動車の流麗なボディラインが形づくられます。

5 鉄の秘密

『鉄はあらゆる金属のうちで、最も卑賤で最も有益な、最も強力であって最も柔軟な金属である。鉄は私たちのためにその性質を変える。私たちの意のままに硬くもなれば軟らかくもなり、弾力もあれば脆くもある。鋳鉄にもなれば、鍛鉄になり、鋼鉄にもなる。ボイラーは高い気圧の物体を蓄え、長尺の鋼材は橋やアーチを支え、歯車は速度や動力を調節する。旋盤では、鉄が加工材であり、研削材を兼ねている。鉄は私たちの最大の秘密をもっている。鉄は磁気秘密と、血液の秘密を秘めている』⁹⁾。これは、科学啓蒙小説を多数著したドイツの作家シェンチンガアの作品の一つ『小説金属 重金属篇 鉄』の書き出しの一節です。

「鉄は私たちの最大の秘密をもっている」。しかしその秘密は未だ完全に解明されつくしているとは言えません。「鉄は磁気秘密と、血液の秘密を秘めている」のですが、鉄の磁性の理論は完全ではありませんし、鉄と生命の関連も十分に理解されてはいません。鉄は異端の金属ですが、それだからこそ鉄に関する知識は他の金属そしてセラミックスなどの材料を理解する上で大いに役立つ応用のきく一般性に富む知識でもあります。この文章を読まれて、鉄の不思議、未知の鉄に興味をもち、未来の鉄を拓いていく志を一人でも多く抱いていただければ幸いです。

引用資料

- 1) 下記資料を参照して編纂作成。
- (a) E. T. Teatman et al., : Compilation of Calculated Data Useful in Predicting Metallurgical Behavior of the Elements in Binary Alloy Systems, Report LA-4003, UC-25, Metals and Ceramics and Materials, TID-4500, Los Alamos Scientific Laboratory.
- (b) A Physicist's Desk Reference - The Second Edition of Physics Vade Mecum, eds. H. L. Anderson et al.,

- American Institute of Physics, New York, (1989)
- (c) CRC Handbook of Chemistry and Physics (79th ed.), ed. D. R. Lide, CRC Press, (1998)
- (d) Elements Explorer - A Multimedia Guide to the Periodic Table (CD-ROM edition), McGraw Hill, (1998)
- (e) John Emsley : The Elements, Oxford University Press, Oxford, (1998)
- (f) 井口洋夫 : 元素と周期律, 裳華房, (1987)
- (g) 近角聡信他 : 改訂 最新元素知識, 東京書籍, (1985)
- (h) WebElements : periodical table of the elements : www.shef.ac.uk/~chem/web-elements/
- (i) An Online Interactive Periodic Table of the Elements : <http://www.chemicalelements.com/>
- (j) Metals Handbook (Desk Edition), eds. H. E. Boyer and T. L. Gall, American Society for Metals, Metals Park, (1989)
- (k) B. K. Vainshtein et al. : Structure of Crystals, 2nd ed., Springer, New York, (1995)
- (l) P. Villars ed. : Pearson's Handbook (Desk Edition in 2 vols), ASM International, Materials Park, (1997)
- (m) C. Kittel : Introduction to Solid State Physics, 7th ed., John Wiley & Sons, (1996)
- (n) F. R. de Broer et al. : Cohesion in Metals - Transition Metal Alloys -, North-Holland, Amsterdam, (1988)
- (o) Phase Diagrams of Binary Iron Alloys, ed. H. Okamoto, ASM International, Materials Park, (1993)
- (p) Alloy Phase Diagrams, ASM Handbook, Vol. 3, ASM International, Materials Park, (1992)
- 2) 松尾宗次 : 未発表計算データ
- 3) F. Wever : Archiv Eisenhüttenwesen, 2 (1928/29), にもとづき作成
- 4) K. Honda and S. Kaya : Science Reports of Tohoku Imperial University, 15 (1926), 736.
- 5) K. A. シェンチンガ, 藤田五郎訳 : 小説 金属 上 重金属篇 第3部 鐵, 天然社, (1943), 263.

さらに学ぶための参考図書

- (1) K. Fitzgerald : The Story of Iron, Franklin Watts, New York, (1997)
- (2) 中澤護人 : 鉄のメルヘン, アグネ, (1975)
- (3) 松尾宗次 : いろいろな鉄 上下, 日鉄技術情報センター, (1997)
- (4) W. Hume-Rothery : The Structures of Alloys of Iron, Pergamon Press, London, (1966)
- (5) 鉄鋼の物性 I, 鉄鋼工学講座 4, 橋口隆吉編, 朝倉書店, (1970)
- (6) R. W. K. Honeycombe and H. K. D. H. Bhadeshia : Steels - Microstructure and Properties -, Edward Arnold, London, (1995)
- (7) W. C. Leslie and E. Hornbogen : Physical Metallurgy of Steel, in Physical Metallurgy, eds. R. W. Cahn and P. Haasen, Elsevier, (1996)
- (8) Steel - a Handbook for Materials Research and Engineering - Fundamentals, ed. Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Springer, New York, (1992)

(1999年7月7日受付)