

【研究ノート】

鉄製品を考える

—その1 鉄の基本物性について—

大森 信宏

要旨 ヒトはさまざまな道具を使うことで、自然界を生き抜き、生活域を広げてきた。その中でも金属の使用、特に鉄の導入は人類の歴史を長足に進歩させ、文明を発展させる原動力となった。人類の発展にとって、最も重要な素材は鉄であると言っても過言はないのだろう。日本では、弥生時代以降の遺跡から鉄製品が出土するようになり、古墳時代には副葬品として比較的多く出土するが、その大部分がサビきった状態であるから、鉄としてどのような素材を、どのように加工して、どのような状態で使用していたのか、実際にはほとんど分らない。本稿では、鉄及び鉄製品を基礎から考えることを提起し、鉄という素材と人類の関係、さらに貴重な出土鉄製品を保存していく方法を根本から探してみたい。

キーワード：鉄、炭素鋼、フェライト、オーステナイト、デルタフェライト、セメンタイト、パーライト、マルテンサイト

1 はじめに

鉄を加工し製品として使用するということには、どのような物性的背景があるのだろうか。一口に鉄と言っても、純鉄、鋼鉄、鋳鉄、鍛鉄、鍛鉄などさまざまな状態の鉄がある。これらの違いは、炭素の含有率による性状の違いに基づいている。鉄は炭素と結びつくことで性状が変化する金属であり、私たちはその特性を生かすことによって鉄を加工し、製品として使用しているのである。本稿では鉄の物性、特に炭素との関係について自然科学的な基本事項をまとめて、鉄及び鉄製品を知るための一助としたい。

2 鉄の基本物性

金属は、結晶を構成する原子全体に電子が共有され、電子は結晶全体を自由に動き回って（自由電子）原子同士を結び付けている。これを金属結合と呼ぶ。また、金属原子はすべて等価であるため、外力が加わったときに原子が自由にすべることができ（転位）、延びてもそこで再結合できるので変形する（塑性変形）こともたやすい。したがって、金属はさまざまな形状に整形加工することが容易で、一度形作られた製品を再度整形加工することも可能である。金属結合では、原子同士が特に方向性を持たず自由につながる傾向をもつため、結晶構造は効率的な配置となる。こうした結合には面心立方格子、六方最密充填格子、体心立方格子の3つの形態がある（矢島ほか2017）。

純鉄の基本物性は、原子番号26、元素記号Fe、原子量51.15、遷移元素であり、灰白色の金属光沢を有して

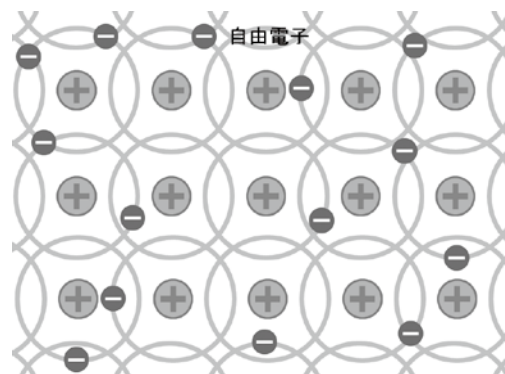


図1 金属結合モデル図

いる。固体の純鉄は、フェライト、オーステナイト、デルタフェライトの3つの相がある。911℃以下ではフェライト（ α 鉄）、911–1392℃ではオーステナイト（ γ 鉄）、1392–1536℃ではデルタフェライト（ δ 鉄）、1536℃以上では液体となる（岩波1998）。

① フェライト（ferrite）

フェライトは、純鉄では911℃以下の温度領域にある鉄の相（組織）であり、 α 鉄（アルファてつ）ともいう。この領域において、鉄は体心立方格子構造（bcc構造）をとり、体心立方格子の原子の充填率は68%である。

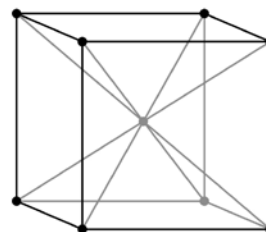


図2 体心立方格子構造（bcc構造）模式図

フェライトは、728℃で最大溶解量0.0218%までの炭素を体心立方格子内に固溶できる（註1）。この炭素の最大溶解量0.0218%以上を鋼と呼んでいる。

② オーステナイト (austenite)

オーステナイトは、純鉄では911℃～1392℃の温度領域にある鉄の相（組織）であり、 γ 鉄（ガンマてつ）ともいう。この領域において、鉄は面心立方格子構造（fcc構造）をとり、面心立方格子の原子の充填率は74%である。したがって、面心立方格子の方が原子の充填率が高く、原子間のすき間が少ないため、フェライトとオーステナイトの変態に際しては、加熱する時は体積が減少し、冷却する時は体積が増加する。

オーステナイトは、1147℃で最大溶解量2.14%までの炭素を面心立方格子内に固溶できる。この炭素の最大溶解量2.14%以下を鋼、この値を超えると鑄鉄と呼ぶ。

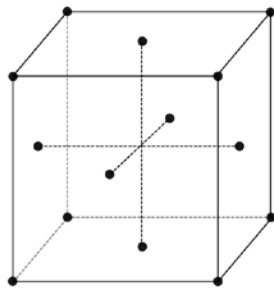


図3 面心立方格子構造（fcc構造）模式図

③ デルタフェライト (delta ferrite)

デルタフェライトは、純鉄では1392℃～1536℃（融点）の温度領域にある鉄の相（組織）であり、 δ 鉄（デルタてつ）ともいう。体心立方格子構造（bcc構造）をとるが、1536℃を超えると液体になる。

デルタフェライトは、1494℃で最大溶解量0.08%までの炭素を体心立方格子内に固溶できる。超高温での相であるため、デルタフェライト自体の性質が鉄及び鉄製品の物性に及ぼす影響はほぼ無い。

固体状態でありながら温度変化で格子構造を変える金属は少ないが、鉄のように格子構造が2度も変化する金属はさらに少ない。このような格子構造の変化、すなわち相の転移現象のことを変態という（矢島ほか2017）。

3 炭素鋼の基本物性

フェライトは体心立方格子内に728℃で最大溶解量0.0218%、オーステナイトは面心立方格子内に1147℃で最大溶解量2.14%、デルタフェライトは体心立方格子内に1494℃で最大溶解量0.08%の炭素をそれぞれ固

溶できる。体心立方格子の原子の充填率は68%、面心立方格子の原子の充填率は74%であるため、充填率だけを比較すると体心立方格子の方が原子間のすき間が大きいように思えるが、実際は、面心立方格子の方が炭素を固溶しやすい。面心立方格子は、すき間の総量は少ないが形状的に原子間の空間が広く等方的で、原子の直径の約40%までの大きさの原子を入れることができる。一方、体心立方格子は、すき間の総量が多いものの原子間のすき間は極端に潰れた円盤状で、その厚さは原子直径の約15%にすぎないため、炭素などの小さな原子でも均等に入れられない（伊藤2006）。

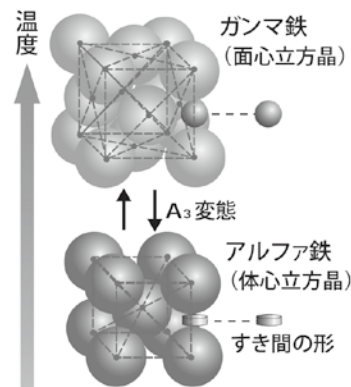


図4 面心立方と体心立方のすき間模式図（伊藤2006より）

フェライト（デルタフェライト）とオーステナイトの炭素固溶量の差は、このような鉄原子の格子構造の違いによっており、一方でこの変化は温度によって生じるため、温度変化に伴う炭素の移動が炭素鋼の物性に大きく関わっている。

付言すると、金属結合による鉄原子の転位は、炭素原子が鉄原子間に侵入して固溶することで、鉄原子の自由な移動を妨げるため起こりにくくなる。これは当然ながら炭素原子の固溶量が多くなればそれだけ増幅される。鉄原子の転位が起こりにくいということは、塑性変形も起こりにくい。つまり鉄は、炭素を多く固溶することで硬くなるのである。炭素鋼は含有されている炭素量が多くなると、引っ張り強さ・硬さが増す半面、伸び・絞りが増え、被削性・被研削性が悪くなる。

炭素鋼のうち、炭素含有量が約0.3%以下を低炭素鋼、約0.3～0.7%を中炭素鋼、約0.7%以上を高炭素鋼と呼んでいる（矢島ほか2017）。

4 温度変化に伴う炭素鋼の相変化（1）

フェライトでもオーステナイトでも、結晶格子内に固溶できる炭素量には上限がある。では、上限値の炭

素を固溶した状態で、この上限値の炭素を固溶できる温度、フェライトで728℃、オーステナイトで1147℃を下回ったならば、固溶しきれなくなった炭素はどうなるのだろうか。この場合、炭素は結晶格子内から外部に拡散移動して、新たに鉄原子と結合して、セメンタイトと呼ぶ化合物を形成する。セメンタイトは金属と非金属の化合物であり、化学式は Fe_3C 、結晶構造は斜方晶で、単位格子中に12個のFe原子と4個のC原子を含んでいる。セメンタイトは非常に硬くて脆い白色の炭化物である（註2）。セメンタイトの炭素量は6.67%であり、Fe-C系2元合金においてFeとCが結合できる範囲は、この6.67%までである。それ以上は炭素がグラファイトとして分離する（矢島ほか2017）。

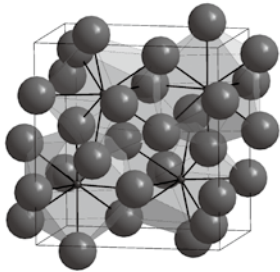


図5 セメンタイト結晶模式図

炭素量4.32%の鉄（铸铁）について、温度変化に伴う相の変化及び炭素の移動について考えてみる。

この炭素含有量は鉄の融点が最も低くなる条件であり1147℃以上では液体である。1147℃を下回ると固体となるが、この温度帯での鉄の固相であるオーステナイトは2.14%までしか炭素を固溶できない。オーステ

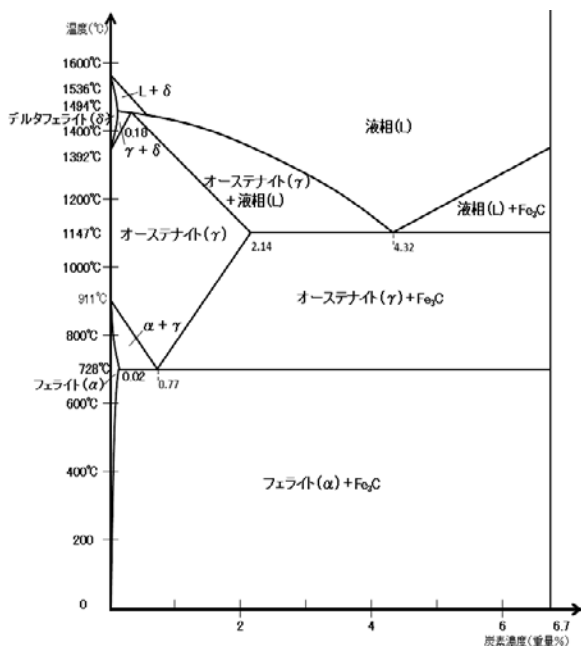


図6 Fe-C系平衡状態図

ナイトに固溶しきれない炭素はオーステナイトの粒界に網目状のセメンタイトとして析出し、これを初析セメンタイトと呼ぶ。この1147℃を共晶温度及び共晶点と呼び、1147℃から温度をゆっくり下げると、その温度での固溶値上限の炭素を固溶したオーステナイトと、そこから拡散移動した炭素が化合したセメンタイトが析出してくる。そして728℃まで下がると4.32%分の炭素は、炭素量6.67%のセメンタイトと炭素量0.77%のオーステナイトに分かれた状態となる。さらに温度をゆっくり下げるとオーステナイトはフェライトに変態するが、フェライトに固溶しきれない炭素はやはりセメンタイトとして析出する。ここでできるフェライトとセメンタイトは、互いに薄い層状の組織が重なり合う構造になり（共析組織）、これをパーライトと呼ぶ。光沢が真珠に似るためパーライトと呼ばれ、非常に薄い板状のフェライトとセメンタイトが交互に積層する。パーライトは、柔らかいフェライトと硬質のセメンタイトの複合材料であり、粘り強い材質である。この728℃はパーライトが生じたり、消滅する共析反応が起こる温度で共析温度及び共析点、そしてこの変態を共析変態及びパーライト変態ともいう（山方2016）。

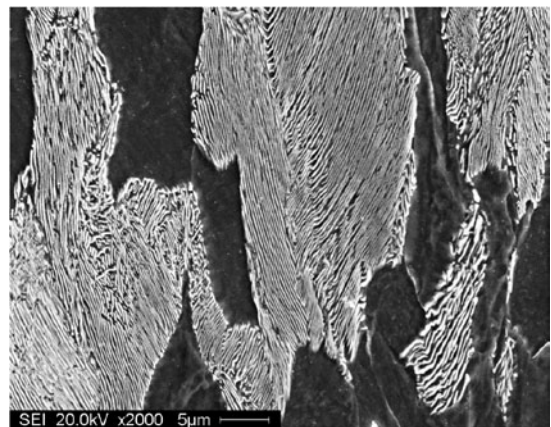


写真1 パーライト組織

次に、温度変化に伴う炭素鋼の物性変化を3パターン詳述する。

① 炭素量C% < 0.77%の場合

炭素量0.4%の炭素鋼を900℃から徐々に冷却した場合の相変化について考えてみる。

900℃ではオーステナイト（ γ ）であるが、温度が低下して図7のGS線と交差するところ（約800℃）でフェライト（ α ）の析出が始まる。ここで析出するフェライトを初析フェライトと呼んでいる。728℃まではフェライトとオーステナイトの2相状態であり、温度低下と共にフェライトの量が増加するが、フェライト

は0.02%の炭素しか固溶できないので、未変態のオーステナイトの炭素濃度がGS線に沿って増加する。728℃まで温度が低下するとオーステナイトの炭素濃度は0.77%に達し、共析変態を起こしてパーライトが生成される。共析変態完了後は、初析フェライト+パーライトの相となり、さらに温度が低下すると、わずかなフェライトが減少しセメンタイトが増加するが、ほとんど無視できる変化であり、共析変態完了後の相が維持されると考えてよい。炭素量0.77%未満の炭素鋼を亜共析鋼と呼ぶ。

②炭素量C% = 0.77%（約0.8%）の場合

炭素量0.77%の炭素鋼を900℃から徐々に冷却した場合の相変化について考えてみる。

900℃ではオーステナイト（ γ ）であるが、温度が低下して図7のS（共析点）で共析変態を起こしてパーライトが生成される。この炭素濃度では、オーステナイトはすべてパーライトに変態し、共析温度以下では上の場合と同様に変化はなく、常温ではパーライトのみの組織となる。炭素量0.77%の炭素鋼を共析鋼と呼ぶ。

③ 炭素量C% > 0.77%の場合

炭素量1.2%の炭素鋼を900℃から徐々に冷却した場合の相変化について考えてみる。これは先に述べた炭素量4.32%の鋳鉄冷却パターンとほぼ重複する。

900℃ではオーステナイト（ γ ）であるが、温度が低下して図7のES線と交差するところ（約800℃）で初析セメンタイトの析出が始まる。728℃まではオーステナイトとセメンタイトの2相状態であり、温度低下と共にセメンタイトの量が増加し、未変態のオーステナイトの炭素濃度はES線に沿って低下する。728℃まで温度が低下するとオーステナイトの炭素濃度は

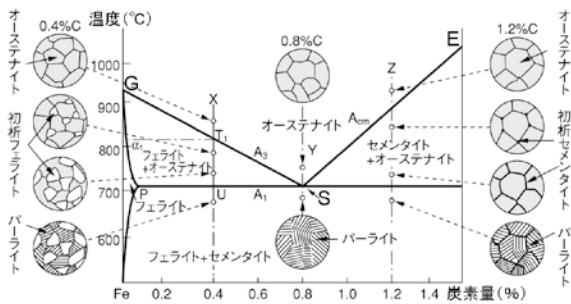


図7 炭素鋼の相変化図（山方2016より）

0.77%に達し、共析変態を起こしてパーライトが生成される。共析変態完了後は、初析セメンタイト+パーライトの相となる。セメンタイトは6.67%の炭素が必要なため、1.2%の炭素鋼では初析セメンタイトはあまり多く析出しない。炭素量0.77%超の炭素鋼を過共析鋼と呼ぶ（矢島ほか2017）。

5 温度変化に伴う炭素鋼の相変化（2）

ここまで鉄と炭素の関係について、炭素鋼の温度変化に伴う相変化をまとめてきたが、これらは時間をかけての最も基本的な変化である。共晶点や共析点での相変化では、炭素の移動（拡散）に一定の時間を要するからである。ここからは加熱した炭素鋼を急冷した場合、すなわち焼き入れを行った場合に、鉄はどのような物性の変化を起こすのか考えてみる。

① マルテンサイトの生成

焼き入れを行うことによって生じる組織をマルテンサイトと呼ぶ。一般的に、鋼に焼き入れを行うと硬度が増すと考えられているが、これがマルテンサイトを生じさせる工程に他ならない。では、どのような条件で冷却を行うとマルテンサイトは生じるのだろうか。

炭素量0.77%の共析鋼を例にとってマルテンサイトの生成について考えてみる。900℃のオーステナイトを徐冷した場合には、オーステナイトに固溶している炭素は、フェライトとセメンタイトに拡散してパーライトを生成する。この通常の相変化が起こるよりも早い速度で冷却すると、パーライトに変態する時間が足りず、マルテンサイトと呼ばれる平衡状態図には示されない相が現れる。この変態をマルテンサイト変態と呼ぶ。

マルテンサイトを生成させるのに必要な冷却速度は、大体160℃/秒以上とされる。冷却速度を遅くすると、マルテンサイト変態の前にパーライト変態が発生するようになり、冷却後の組織にマルテンサイト以外の組織が混入する。この他の組織が発生するようになる限

表1 Fe-C系の相

相の名称	記号等	性質・状態等
フェライト	α	体心立方格子、Cを727℃で最大固溶限0.0218 wt%、純鉄では912℃以下で安定
オーステナイト	γ	面心立方格子、Cを1147℃で最大固溶限2.14 wt%、純鉄では912～1391℃で安定
デルタフェライト	δ	体心立方格子、Cを1490℃で最大固溶限0.08 wt%、純鉄では1391～1536℃で安定
パーライト	$\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$	α 相と Fe_3C が積層された共析組織で、粘り強い材質
セメンタイト	$\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$	FeとCの化合物で、Cを6.67wt%含み、硬くて脆い

界の冷却速度を上部臨界冷却速度と呼び、完全焼入れになる限界速度でもある。上部臨界冷却速度からさらに冷却速度を遅くすると、他の変態が多くなりマルテンサイト変態の比率が下がっていき、遂にはマルテンサイト変態が発生しなくなる。この限界の冷却速度を下部臨界冷却速度と呼び、不完全焼入れになる下限速度となる。また、焼き入れを行う鋼は、すべてオーステナイト化しておかなければならない。加温が足りなければ焼き入れを行う前からパーライトが存在してしまい不完全焼入れとなる。

図8の連続冷却変態線図(CCT線図)を例にすると、Msの線がマルテンサイト変態開始線で、冷却曲線がこの線に掛かるとマルテンサイトの生成が始まり、Mfの線がマルテンサイト変態終了線で冷却曲線がこの線に掛かるとマルテンサイトの生成が終了する。また、この手前のPsの線がパーライト変態開始線、Pfの線が100%パーライト変態線で、これらの線に冷却曲線が掛かると完全なマルテンサイト変態が起こらないことを表している。

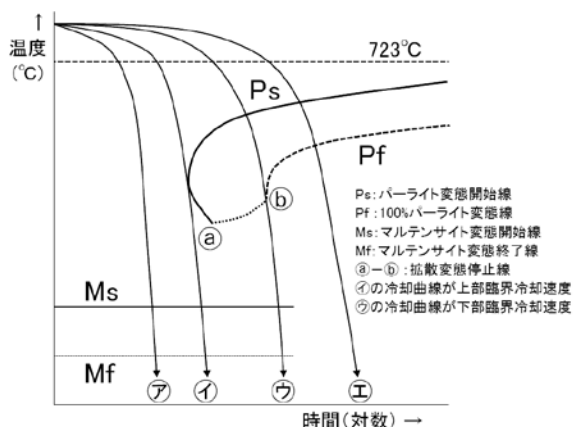


図8 連続冷却変態線図(CCT線図)

①の冷却曲線は、Psのパーライト変態開始線をかすめるが、Pfの100%パーライト変態線には掛からないので、上部臨界冷却速度であることを示している。オーステナイトの一部はパーライト変態を起こすが、大部分はMs線でマルテンサイト変態を開始し、Mf線でマルテンサイト変態を終了する。この場合の冷却速度はおおよそ140°C/秒とされる。

②の冷却曲線は、Psのパーライト変態開始線及びPfの100%パーライト変態線に掛かるので、下部臨界冷却速度であることを示している。この冷却速度では、オーステナイトの大部分がパーライト変態を起こしてしまい、完全な焼き入れにはならない。この場合の冷却速度は約35°C/秒とされる。

①と②の中間(約90°C/秒)で冷却した場合には、Ps線に掛かった時点でパーライト変態を開始するが、①-②の拡散変態停止線でパーライト変態を停止し、そのまま冷却されてMs・Mf線を通過してマルテンサイトを生成する。この場合の常温での組織はマルテンサイトとパーライトの混合組織となる。

⑦の冷却速度(約500°C/秒)では、Ps線に掛かることなくMs・Mf線を通過するため、オーステナイトはマルテンサイト変態を起こし完全焼入れとなる。

一方、⑤の冷却速度(②の冷却速度より遅い場合)では下部臨界冷却速度以下であり、オーステナイトに固溶している炭素は通常に拡散して100%パーライト変態を起こす。

炭素量0.77%の共析鋼を例にとりてマルテンサイト生成の冷却速度について解説したが、炭素含有量の多い過共析鋼では、パーライト変態時に、より多くの炭素を拡散させる必要があるため、パーライト変態開始線は全体的に右へ移動(より時間がかかる)する。パーライト変態が起こるまでに時間的余裕が生じるので、マルテンサイト変態はより容易になる(山方2016)。

② マルテンサイトの相構造

オーステナイトからパーライト変態が起きる際には、面心立方格子のオーステナイトから体心立方格子のフェライトに変態し、フェライト組織に固溶しきれない炭素は追い出されてセメンタイトを生じ、さらにフェライトと積層してパーライトが形成される。この炭素の拡散が間に合わない速度で冷却した場合、炭素が体心立方格子のすき間へ無拡散で強制的に侵入固溶し(炭素原子がフェライト中に過飽和に閉じ込められた状態)、準安定状態だが格子欠陥を多数含む結晶構造となる。炭素原子が鉄原子の結晶格子を拡張するため体積も膨張する。このようにして生成するのがマルテンサイトであり、組織形状が針状の微細組織となる。

マルテンサイト変態によって以下の変化が生じる。

- ⑦ 結晶構造中に炭素が強制的に侵入するため、格子にひずみが生じて体積が膨張する。
- ① 針状の微細組織となるため、組織微細化によって強度が向上する。
- ② 格子欠陥を多数含む結晶構造となるため、転位が起こりにくくなり硬度が増す。
- ⑤ 格子のひずみ、格子欠陥などで硬度や耐摩耗性は向上するが、一方で靱性が低下しもろい状態となる(山方2016)。

日本刀の焼き入れでは、焼刃土を刃の部分には薄く

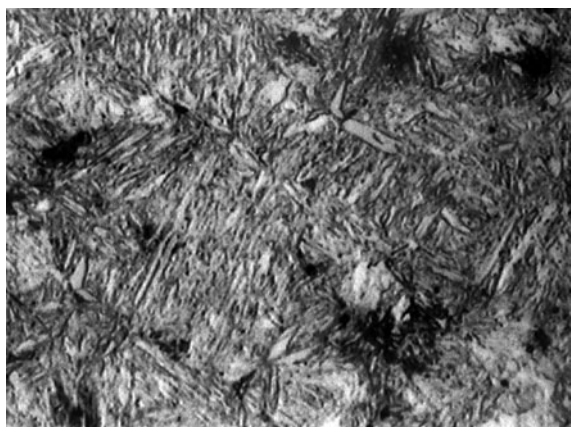


写真2 マルテンサイト針状組織

塗り、他の部分は厚めに塗って加熱し、水に漬けて一気に冷却する。そうすることで薄く土を塗った刃部は急冷されてマルテンサイト化して硬化するが、土を厚めに塗った部分はマルテンサイト化しきれずに韌性が残る。日本刀は低炭素鋼と中炭素鋼を組み合わせることで、硬軟合わせ持った、鋭くて折れない刀身を実現させているが、焼き入れ時に焼刃土の塗り方を工夫することで、この特徴をさらに補強させている。また、この操作で刃側は体積が膨張し、押されて棟側には反りが生じる。日本刀の特徴的な反った形状は、鍛造段階で作り出されるだけではなく、焼き入れによっても付加されるのである（八十2006）。

鉄製品の生産に際しては、炭素鋼の選択、昇温の加減、冷却のさせ方など、鋼の科学的特性が最大限に生かされている。そしてそれらが、すべて積み上げられた経験と技術によることは驚嘆に値することである。

6 おわりに

鉄はすぐれた強度、硬度、加工性などを備えた高性能な材料であるが、温度と炭素の関係だけでこれだけ物性を変化させる金属なのである。人類の鉄製品生産の歴史は、さまざまな失敗を繰り返しながら、経験と知識を積み上げる歴史でもあったのだろう。本稿を通じて、鉄製品の生産にはどのような科学的背景があるのか、鉄と炭素が温度変化によってどのように関係し、炭素鋼の基本物性が決まってくるのか、多少とも理解いただけたらうか。鉄製品を科学的に理解する上で、これらは基礎的な知識なのである。

なお、本稿は既定の先行研究から必要事項をまとめた研究ノートであり、筆者の独自研究が含まれるものではないことを付記する。

註

- 1 1つの固体の中に他の固体が完全に解け合って全体一様な固体を形成することを固溶体と呼び、鉄と炭素のように大きさの異なる原子の場合、炭素原子が鉄原子の間に侵入する形をとるため侵入型固溶体という。
- 2 セメンタイト (Fe_3C) は化合物であり、固溶体とは異なる。鉄と炭素の固溶体では温度によって炭素の固溶量に変化が生じるが、化合物であるセメンタイトは炭素量 6.67% で一定である。

引用・参考文献

- 矢島悦三郎・市川理衛・古沢浩一・宮崎亨・小坂井孝生・西野洋一 2017 『若い技術者のための機械・金属材料』第3版 丸善出版
- 岩波『理化学辞典』第5版 1998 岩波書店
- 山方三郎 2016 『図解入門 よくわかる最新熱処理技術の基本と仕組み』第3版 秀和システム
- 伊藤叡 2006 「金属の中の鉄(2)」『モノづくりの原点科学の世界VOL. 31』新日本製鉄
- 八十致雄 2006 『たたら製鉄と和鋼と日本刀ー傾斜機能材料の視点からみた日本刀ー』傾斜機能材料論文集 vol. 2

図・写真の出典及び使用条件

図1・6・8：筆者作成

図2：BSD

図3・図5：CC表示-継承3.0

写真1・2：パブリック・ドメイン