

鉄鋼材料の熱処理で出現する組織： その歴史を振り返る*

梅澤 修**・守谷英明***



A History of Metallography and Heat Treatment in Steels

Osamu UMEZAWA and Hideaki MORIYA

** 横浜国立大学 大学院工学研究院 (Faculty of Engineering, Yokohama National University)

*** CCIC・JAPAN (株認証コンサル部 (CCIC・JAPAN))

住 所：〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5 (79-5 Tokiwadai, Hodogaya, Yokohama, 240-8501)

連絡方法：Tel 045-339-3871

Fax 045-339-3871

E-mail umezawa@ynu.ac.jp

[概要]

鉄鋼材料の組織学確立に至る歴史の大きな流れを振り返る。すなわち、鉄との遭遇と鉄器時代の到来、製鉄法の発展、金属組織の現出、金属組織学の誕生、鉄の変態、Fe-C系平衡状態図、金属組織学の発展、金属組織学を支える物理と化学、金属組織と機械的性質について紹介する。

[Abstract]

We look back on the course of history leading to establishment of microstructure in steels. Subjects such as encounter with iron and the arrival of iron age, development of steelmaking processes, development of metallography, phase transformation in iron and steels, Fe-C system phase diagram, microstructure in steels, physics and chemistry supporting microstructural analyses, and microstructure and mechanical properties are introduced.

Key words : Iron and Steels, Metallography, Phase Transformation, Phase Diagram, History

1. はじめに

鉄鋼材料は、熱処理を用いてその金属組織を多彩に変化させ、広範な機械的特性を具備することで、様々な構造材料や機能材料として利用されている。これら鉄鋼材料の金属組織は、先達の優れた研究、そして、解析機器の発展により、微細構造の理解を得るに至っている。本稿は、鉄鋼材料の熱処理で出現する組織についての解説^{(1)~(5)}に先立って、鉄鋼材料の組織学確立に至る歴史の大きな流れを振り返ってみたい。40年以上前に、中沢護人は、我が国における金属学史に関する知識の集積が貧弱であること、一方で、その知識を豊かにする努力が様々になされていることを指摘し、金属学者の伝記的研究を通じて、物理および化学の進歩と金属学の進歩の相互作用を明らかにする重要性を提示している⁽⁶⁾。その取り組みは、鉄鋼材料を主対象に限っても、欧米における代表的な書籍^{(7)~(9)}や中沢の著書⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、そして学協会の連載記事^{(12)~(33)}、例えば、日本金属学会報

「金属学の先人たち」、鉄鋼界「鉄鋼業を築いた人々」、熱処理「特殊鋼の発達史」に多くを見ることが出来る。その後も熱処理「熱処理の古典文献」^{(34)~(39)}をはじめとした関連の解説記事^{(40)~(53)}にまとめられている。時には、これら記事を読み返し、往時に思いを馳せるのはいかがだろうか。

2. 製鉄の歴史

2.1 鉄との遭遇と鉄器時代の到来

紀元前4000年頃になると人類は冶金技術を会得して金属を積極的に使用するようになった。人類が最初に鉄の存在を知ったのは隕鉄(鉄隕石)であろう、鉄の製造法は紀元前2000年頃になって発明されたと言われている。鉄の造り方が進歩すると、鉄器は民衆によって農具や武器として使用され、生産力や軍事力を著しく高めた点において青銅器と異なる。また、銅、錫、青銅や黄銅などが熔融状態で取り出されたのに対し、鉄は鉄鉱石から固体のままあるいは半熔融状態で取り出された⁽¹¹⁾。金属のほとんどは鉄物として地球上に存在し、鉄は、磁鉄鉱(Fe_3O_4 が主成分)、褐鉄鉱($\text{Fe}_3\text{O}_4 + n\text{H}_2\text{O}$)あるいは赤鉄鉱(Fe_2O_3)などの酸化鉄石、およびこれらの砂粒(砂鉄)の形で存在す

* 第85回(2018年春季)日本熱処理技術協会講演大会討論会基調講演概要を改訂

る。酸化鉄の還元は 400℃程度の低温でも可能であり、400～800℃では、鉄は固体のまま、1000℃前後では半熔融状態の **Luppe** が得られる。

古代インドの **Wootz** 鋼は、**Luppe** と生木を坩堝に入れて溶解炉（低シャフト炉）で加熱することにより、直接生木からあるいは発生した炭化水素から炭素を吸収して融点を下げ、熔融状態にして得られた鑄鋼と言われている⁽¹¹⁾。イスラム文明の中心地の一つ、かつ東西貿易の中継地であった **Damascus**（シリア）では、**Wootz** 鋼を刀剣（**Damascus** 刀）に鍛え、ヨーロッパへ輸出していた。古代エジプトや古代ギリシャの流れを継承したイスラム文明の発展により、**Wootz** 鋼の技術は中央アジアで最も発達した（8～12世紀）。このイスラム文明が科学の発達に与えた影響は非常に大きく、ヨーロッパにおける科学革命と今日の金属学へとつながっている。中国に鉄の製造技術が伝わったのは、紀元前 6 世紀頃とされている。製陶技術や青銅の製造技術が発達していた中国では、鉄の鑄造を西洋よりもはるかに早く実用化している。漢時代（前漢：BC202～AD8 年，新：～AD23 年，後漢：～AD220 年）に発明された「土法高炉」と呼ばれるシャフト炉では鑄鉄（銑鉄）が得られた。また、製鉄に石炭を使用したのも最も古い。一方、中世以前のヨーロッパでは、**Luppe** を鍛錬して鉄製品に加工しており、鑄造されていない⁽¹⁰⁾。つまり、製鉄技術は、インドや中国がヨーロッパよりも遙かに進んでいた。

2.2 製鉄法の発展

基本的な製鉄法で特に大きな発展はみられなかったヨーロッパにおいて、14～15 世紀の「高炉の発展」および 19 世紀の「転炉の発明」を契機に製鉄技術は大きく発展し、

鉄の生産量が飛躍的に増大した⁽¹⁰⁾。まず、13～14 世紀頃、高炉（溶鉱炉）が出現し、ドイツからベルギー、フランス、イギリスへ広がった。鉄の鑄造が可能となり、さらに精錬炉により可鍛鉄を得る間接製鉄技術が発展した。14 世紀の火薬の発明とあいまってヨーロッパの高炉製鉄基地は、鑄鉄製の大砲・砲弾の供給を軸とした。そして、1722 年に **René Antoine Ferchault de Réaumur**（仏）が浸炭鋼や可鍛鉄の製造法を開発し、ドイツやイギリスにおいて秘密にされてきた浸炭鋼の製造方法が解明され、可鍛鑄鉄が生まれた。科学史上最初の科学論文と言われ、それら鉄の破面を拡大鏡と顕微鏡で観察し、強度を調べるために引張試験などの機械試験を実施した。**Fig.1** に 18 世紀以降の製鉄プロセスの概要を示す。1735 年には **Darby** 父子（英）による石炭（コークス）製鉄法の完成や **Benjamin Huntsman**（英）によるつぼ鑄鋼（**crucible steel**）法の発明があり、木炭製鉄による直接製鉄法は経済的に困難となった。可鍛鉄が再溶解できるようになり、良質の鋼が作られるようになったことで、刃物や工具鋼の製造法が大きく発展した。この鋼は鑄鋼と呼ばれた。その後、1783 年に **Henry Cort**（英）がパドル法（**puddling process**）と呼ばれるコークスを用いて反射炉で銑鉄を可鍛鉄に変える精錬法、これと圧延法を結合したパドル・圧延法を開発した。これによってイギリスでは製錬・精錬・圧延の全工程が石炭（コークス）を燃料として実施され、パドル鉄／錬鉄（**wrought iron**）が得られた。そして、**Siemens** 兄弟（独）の発明と **Pierre Emile Martin**（仏）による実用化がなされた平炉（**open hearth furnace**）法は、パドル法を発展させたもので、良質な鋼を大量生産できるようになった。一方、1856 年に **Henry Bessemer**（英）が転炉（**converter**）法を発表して工

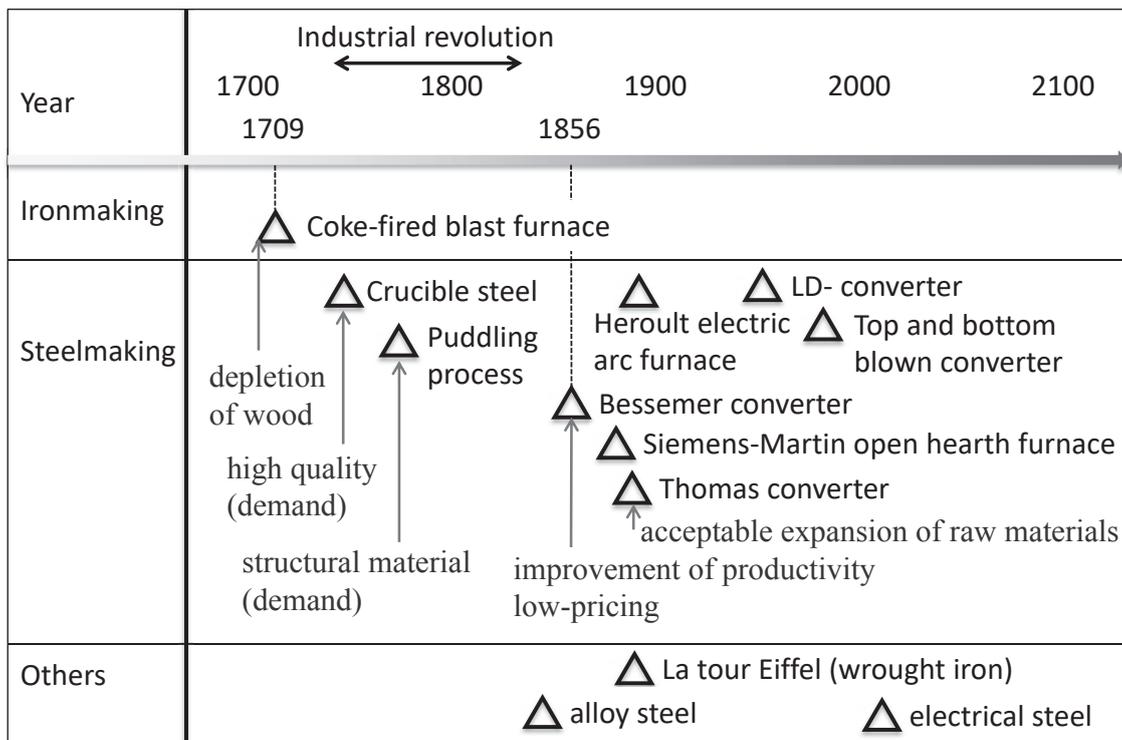


Fig.1 History of modern steelmaking processes.

業化に成功し、今日の礎が築かれた⁽⁵⁴⁾。しかし、当初は品質が低く、高品質鋼に対してはLD転炉の開発を待つこととなる。また、1878年には塩基性転炉(Thomas法)が発明され、ヨーロッパを中心に、含リン鉄鋼石の活用がなされた⁽⁵⁵⁾⁽⁵⁶⁾。

3. 鉄鋼組織とその理解に向けて

3.1 金属組織の現出

1665年にRobert Hook(英)が著書「Micrographia」⁽⁵⁷⁾を発表し、顕微鏡によって観察された針の先端(100倍)とかみそりの刃(50倍)の図が掲載されている。これが顕微鏡で観察された最初の金属とされる。鉄と鋼の酸による腐食の研究は、1782年に「鉄の歴史」⁽⁵⁸⁾(鉄冶金学、材料学の重要事項のほとんどを網羅)を出版したSven Rinman(スウェーデン)によって最初に行われた(鉄および鋼のエッチングについて)。Rinmanは「金属材料の父」と呼ばれる。1808年には、Alois von Widmannstätten(奥)がZagreb(クロアチア)近くに落下した隕鉄(iron meteorite)の表面を研磨、腐食して、いわゆるWidmannstätten組織を現出した。隕鉄は、FeとNiからなる核で、Kamacite(Ni<7.5%, BCC ferrite)とTaenite(Ni>25%, FCC austenite)などから構成される。

3.2 Damascus模様

19世紀にはWootz鋼に劣らない鋼を作ろうとして、「合金鋼の創始者」と呼ばれるMichael Faraday(英)⁽²³⁾⁽³⁶⁾⁽⁴⁸⁾、Jean Robert Bréant(仏)⁽³⁷⁾、Paul Anosoff(露)らによる研究が行われ、鉄鋼材料研究に大きな影響を与えた⁽¹¹⁾。Bréantは、Damascus模様が高炭素鋼の凝固時の結晶化の過程で形成されることを示し、亜共析、共析、過共析の生じる機構についての理論を提示した。そこでは、融体中に2種類の鉄・炭素化合物、すなわち、鋼(低炭素化合物)と高炭素化合物が存在し、鉄(フェライト)と鋼(パーライト)の混合物が別々に凝固=亜共析、鉄のすべてが鋼に=共析、炭素過剰により新しい鉄・炭素結合比の化合物(セメントライト)=過共析のように主張した。AnosoffはDamascus模様を持つ鋼を製造し、Damascus模様が溶解の様式、加熱方法、焼なまし、焼入れ、鍛造、腐食などによってでき、軟鋼であっても冷却速度が非常に小さければ形成されることを示した。

3.3 金属組織学の形成

19世紀には金属組織学の形成をみることができ、Henry Clifton Sorby(英)⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽²²⁾⁽³⁴⁾とAdolf Martens(独)⁽³⁵⁾は、エッチングした鉄鋼組織を光学顕微鏡で観察した。「金属組織学の父」と呼ばれるSorbyは、1863年7月28日にスウェーデン錬鉄中にWidmannstätten組織を発見(実際はsilicate介在物)したと日記に記述し、この日が「金属組織学誕生の日」とされる。隕鉄や鋼の顕微鏡組織観察を行い、1887年に論文「The microscopical structure of iron and steel」⁽⁵⁹⁾として発表した。顕微鏡組織を観察

するために研磨・エッチングによる試料の作成方法や顕微鏡による組織の観察方法に関する研究を行い、鋼の基本組織を「Free Iron(炭素と結合しない鉄)」、「Iron combined with carbon(炭素と結合した鉄)」、「The pearly constituent(真珠色をした鉄)」と呼んだ。一方、18世紀末から鉄鋼研究への顕微鏡の適用が系統的に行われてきたドイツでは、ドイツにおける金属組織学の創始者と呼ばれるMartensが1878年に論文「鉄の顕微鏡調査」を発表し、顕微鏡研究の重要性がヨーロッパで認識された⁽⁶⁰⁾。Martensによる組織スケッチはBundesanstalt für Materialforschung und -prüfungのwebサイト⁽⁶¹⁾にて閲覧することができる。Martensは、様々な機械試験による材料特性評価を行ったことでも知られる。

Dimitri Konstantinovich Tschernoff(露)⁽¹¹⁾⁽²⁵⁾⁽³⁸⁾は、1868年に論文「A critical survey of the papers of Lavrow and Kalakoutzky on steel and steel guns, and his own (Tschernoff's) researches thereon」を発表し(Proceedings of the Imperial Russian Technical Society, 399-400, and Discussion, April 20, May 2 and 11)、焼入・焼戻しを行うためには加熱温度を何度以上にしなければならないか等の臨界温度を求めた。しかし、この段階で変態については分かっていない。また、1878年に論文「On the structure of cast steel ingots」を発表し、鋼の構造と熱処理や成分との関係を調べ、樹枝状晶の観察をしてその成長、粒界と結晶粒の形成などを科学的に論及した。その後、Floris Osmond(仏)⁽¹¹⁾⁽¹⁷⁾⁽²⁴⁾⁽³⁹⁾が鉄の変態を発見し、鋼の焼入れ硬化機構についての研究などを行った。顕微鏡による変形組織も観察され、Neumann bands(隕鉄Hexahedrite)、Lüders bandに続いて、1899年にはすべり線が見いだされている。

1891年にHenry Marion Howe(米)が「The Metallurgy of Steel, Scientific Publishing Co., New York」を出版し、Sorbyが「Free Iron」、「Iron combined with carbon」、「The pearly constituent」と呼んだ鋼の基本組織に対して、ferrite, cementite, pearliteを命名した。この際、岩石学で使用されていた接尾辞“-ite”を適用し、以降金属組織名に“-ite”が付けられるようになった。その後、Osmondが1895年の論文「炭素鋼の顕微鏡的解析に関する一般的方法」, Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale, 10(5), (1895), 480で鋼の非平衡組織にmartensite, troostite, sorbiteを、1901年の論文でausteniteを命名している。これらの組織名はそれぞれMartens(martensiteの発見者ではない)、Louis Joseph Troost(仏)、Sorby, William Chandler Roberts-Austen(英)の功績を讃えて使用したものである。

さらに、1891年にOsmondは、「各粒内において結晶方位は同一であるが、粒が変われば方位も変わる」と指摘した。そして、1898年にJohn Edward Stead(英)が論文「The Crystalline Structure of Iron and Steel, Iron and Steel Institute, 1898, No. I, 145-189, and correspondence」において結晶を「grain」と呼ぶとし、結晶粒の概念が確立した。Steadは鋼中の不純物の研究の開拓者でもある。

3.4 鉄の変態

前述のように、19世紀には鉄鋼の焼入れや鉄鋼組織の研究が盛んに行われた。結晶の概念はあったが、結晶構造を調べるX線回折法がまだ発見されておらず、19世紀後半には、相変態と焼入硬化という2つの問題が混乱して明確な答えが得られないまま、いわゆる「β鉄論争」と呼ばれる激しい論争が繰り広げられた⁽³⁹⁾。

Osmondは、1885年の処女論文「鋼の性質に関するセル構造」(F. Osmond et J. Werth, Structure Cellulaire de l'Acier Fondu, Comptes rendus de l'Academie des Sciences, Vol. C, 450, February 16, 1885)で、「焼入硬化は、加熱中に鋼中の鉄炭化合物が鉄と炭素に分解し、焼入過程でこの炭素の作用によって形成された硬いβ鉄が急冷によって室温に持ち来たされるためにおこる」という解釈を示した。この時はまだ明確に変態という概念は捕らえられていないが、金属の相を α , β , γ , δ , ϵ ・・・と名付けるようになったのは、この論文からだという⁽³⁹⁾。1886年には、Sorbyが「焼入硬化は、高温で安定に存在している鉄と炭素の化合物が急冷によってそのまま常温に持ち来たされるためにおこる」との見解を示した。Tschernoffは鋼の焼入における臨界温度をa点～d点(a: A₁変態, b: A₃変態に対応)と呼んだが、Osmondは1887年に発表した論文「鉄(錬鉄), 鋼および白鉄における鉄と炭素の変態」で、鉄の加熱・冷却曲線上に現れる3つの停留点(変態点)をほぼ正確に示し、この3つの停留点を低温側からa₁点, a₂点, a₃点と名付けた。Tschernoffが「鋼の焼入のためにはa点(700℃)以上に加熱しなければならない」と報告したa点をOsmondはそのまま採用したという⁽³⁹⁾。さらに、a₃点以上ではβ鉄が、a₃点～a₂点ではβ鉄とα鉄が、a₂点～a₁点ではhardening carbonが、a₁点以下ではcement carbonがそれぞれ安定に存在するとの解釈に至り⁽¹⁷⁾、鉄の変態を明確なものにした。なお、1894年John Oliver Arnold(英)の論文「鉄への諸元素の物理的影響」において、臨界点の表記に現在でも使われているA₁, A₂, A₃点などの大文字が使われ、Osmondもこれを受け入れて現在に至る。

さらに、β鉄の存在をめぐって、炭化物説を支持する炭化物論者とβ鉄を認める同素体論者との間で「β鉄論争」が勃発し⁽³⁹⁾、(1)β鉄の実在性、(2)鋼の焼入硬化とβ鉄の関係、(3)結晶構造の変化しないA₂点に変態か、という3つの問題点について、長年にわたり多くの金属学者を巻き込んでβ鉄論争が行われた。1900年には、Osmond自らα鉄とβ鉄がともに同一の結晶構造であることを明らかにした。そして、1922年、Arne Westgren(スウェーデン)の論文「X-ray studies on the crystal structure of steel」(A. Westgren, G. Phragmen, J. Iron Steel Inst., 105 (1922), 241-273)で、α鉄とβ鉄はbcc構造、γ鉄はfcc構造であることが示されて決着した⁽³⁹⁾。

なお、A₂点については、1895年にこの温度で鉄の帯磁率が急激に変化することを見いだしたPierre Curie(仏)の名にちなんでCurie点と呼ばれている。1960年代に入って、A₂点近傍において拡散係数やクリープ速度が急速に減少す

ること、Fe₃C化合物(cementite)も213℃に磁気変態点(A₀点)を有し、磁気変態により機械的性質が変化することが報告されており、磁気変態にもとづく相平衡の異常について論考が与えられている⁽⁴⁴⁾。

その他、1885年、Brinell硬さを提案したことで知られるJohan August Brinell(スウェーデン)が論文「加熱冷却による鋼の構造変化, dans les annales de Järnkontoret, n.s., 40 (1885)」を発表し、鋼の熱処理による構造変化を破面から調べた。この研究成果はHoweによって「顕微鏡的研究を製鋼技術者に受け入れさせるのに大きく役立った」として評価された。

3.5 Fe-C系平衡状態図

Frederic Guthrie(英)がH₂O-NaClの状態図を発表し、水と食塩が分離して同時に凝固することを共晶(eutectic)と呼び、Charles Thomas Heycock(英)とF.H. Neville(英)はAg-Cu合金状態図を発表した。そして、Robert-Austenは、Pb-Sn合金状態図と未完成ながら最初のFe-C系平衡状態図を1897年に発表した。Josiah Willard Gibbs(米)⁽²⁷⁾が1875～1878年の2部からなる論文「On the equilibrium of heterogeneous substances, Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences, 3, 108-248/343-524」を発表した後、Johannes Diderik van der Waals(蘭)がGibbsの相律に着目し、これをHendrik-Willem Bakhuis Roozeboom(蘭)に教え、1900年に論文「Iron and steel from the point of view of the phase doctrine, J. Iron Steel Institute, 2 (1900), 311-316」が発表された。これにより、Gibbsの相律を取り入れたFe-C系状態図が理論的に完成された。

4. 鉄鋼材料の熱処理組織

4.1 金属組織学的发展

種々のMn鋼、電磁鋼板やSi鋼を開発したRobert Abbott Hadfield(英)は、Faradayが1818年～1824年に作った合金鋼が収められた箱を発見し、試料を分析・調査、これをまとめて1931年に著書「Faraday and his metallurgical researches with special reference to their bearing on the development of alloy steels, London, Chapman & Hall」を刊行し、Faradayを「合金鋼の創始者」と呼んだ。また、ledeburiteにその名を残しているKarl Heinrich Adolf Ledebur(独)は「Lecture on ferrous metallurgy」を出版した。明治初期の日本で初めてMetallurgyの講義を行って採鉱冶金学の基礎を築いたCurt NettoはLedebur教授に学び、Netto門下生の渡辺渡や野呂景義などがLedeburの元に留学している⁽⁴⁹⁾。

20世紀に入り、Edgar Collins Bain(米)⁽¹⁸⁾は、γループ、Fe-Ni-Cr系状態図、等温変態(TTT)曲線⁽⁶²⁾、bainiteとaustempering, bainite組織と形成機構、合金元素と焼入性など、様々な優れた研究を行った。martensite変態研究の歴史については、文献(45)に詳しい。Bainがaustenite → martensite変態機構を提案した後、Georgy V. Kurdjumov(露)らの研究により無拡散のγ → α'変態を

martensite 変態と定義するようになった。また、Ernest O. Kirkendall (米) が Kirkendall 効果を発見し⁽⁶³⁾、固体金属中での空孔拡散機構がほぼ確立された。

4.2 金属組織学を支える物理と化学

金属組織を現出し、その理解を与える金属組織学の発展には、様々な分析技術と物理と化学の助けがあった。Antoni van Leeuwenhoek (蘭) は自作の顕微鏡で微生物を発見し、赤血球が毛細血管を流れること、筋肉の横紋、精子などを観察した。Leeuwenhoek の作る顕微鏡 (レンズ) は 500 倍に拡大することができると言われ、「顕微鏡学者の父」、「微生物学の父」と呼ばれる。

Torbern Olof Bergman (スウェーデン) は、鍛鉄、銅、鉄から炭素を化学分析によって分離し、鉄中の炭素を証明した。「化学分析法の創始者」と呼ばれる⁽⁶⁴⁾。1787年、Jacques Alexandre César Charles (仏) が「Charles の法則」を発見した。この「圧力が一定のもとでは、気体の種類に関係なく温度が 1 °C 上がる毎に 0 °C のときの体積の 1/273 だけ増加する」という法則により、-273 °C という低温の極限があると考えられるようになった。Robert Wilhelm Bunsen (独) は、1838 年にガス分析法を用いて高炉内の反応過程を調べ、高炉法の科学的研究のはじまりとなった。

Osmond による鉄の臨界点測定、Robert-Austen らが発表した状態図における温度測定には、1886 年に Henry Louis Le Chatelier (仏) によって発明された Pt/Pt-10%Rh 熱電対が用いられた。また、1860 年代の Augustus Matthiessen (英) による合金の電気伝導率測定は、Ag-Cu 合金の凝固点測定を行った Robert-Austen⁽¹⁶⁾ をはじめ、金属組織の理解に大きな役割を担った。

20 世紀初頭からは、冶金学に物理学を導入した物理冶金学が形成された。Georg-August-Universität Göttingen の Gustav Heinrich Johann Apollon Tammann (独) 一派はその世界的中心にあり、多くの合金系における状態図を作成した。本多光太郎も 1907 年に留学しており、その後の日本における物理冶金学の研究に影響を与えた。光学顕微鏡で観察されない相変化は、磁氣的性質、電気抵抗、比熱など各種の物理学的手法を駆使して研究されるようになった。19 世紀には Miller 指数 (William Hallows Miller, 英) と Bravais 格子 (Auguste Bravais, 仏) が結晶学の基礎を与えた。そして、1895 年 Wilhelm Conrad Röntgen (独) による X 線の発見、1912 年の Max Theodor Felix von Laue (独) による X 線回折法の発見、X 線回折装置を発明した William Henry Bragg (英) と X 線結晶構造解析という新しい科学の基礎を築いた William Lawrence Bragg (英) 父子により結晶構造の解析が進んだ⁽⁴⁵⁾。それとともに、Geoffrey Ingram Taylor (英)、Egon Orowan (ハンガリー)、Michael Polanyi (ハンガリー) らによって結晶のすべり変形という様式とその際の変形抵抗の異常な低さを説明する概念として dislocation (転位) が導入された。その後、金属薄膜中の転位が透過電子顕微鏡で観察されるに至った。このように、X 線回折や透過電子顕微鏡の他、中性子線回折、

Auger 電子分光、X 線光電子分光、電子スピン共鳴、核磁気共鳴、Mössbauer 効果など物理的分析法が開発され、材料組織の観察における強力な道具になってきた。

20 世紀とともに発展した量子力学も金属物理に大きく影響している。Paul Karl Ludwig Drude (独) と Hendrik Antoon Lorentz (蘭) の電子論に始まり、Felix Bloch (米) や Léon Nicolas Brillouin (仏) の量子力学的仕事によって確たる基礎は与えられたが、金属電子論の形成には William Hume-Rothery (英)⁽⁶⁵⁾ と Nevill Francis Mott (英)⁽⁶⁶⁾ が大きな役割を果たした。Hume-Rothery は合金の固溶限や中間相の安定性が原子電子価によって決まるという理論を提案し、伝導電子と冶金学を初めて結びつけた。

4.3 金属組織と機械的性質

15 世紀末、Leonardo da Vinci (伊) が鉄線の引張試験を実施し、構造要素の強さを決めるために力学を適用した (作用する力を見出した) 最初の人と言われる。また、Galileo Galilei (伊) が 1638 年に出版した「新科学対話」の前半は材料力学的考察にあてられている。固体の凝集、膨張、収縮、棒の弾性などに関する問題、構造材料の機械的性質や梁の強さなどが論究されており、材料力学に関する最初の出版物と言われる。その後、Hooke の法則や Young 率、Cauchy の弾性論、Poisson の方程式と Poisson 比の導入を経て、テンソル表示によって弾性論は結晶学と結合し、19 世紀末には今日の弾性論の完成をみている。Thomas Young (英) は、弾性率 (Young 率の単位を重さで定義)、材料力学や材料の性質など多くの業績を残した。20 世紀に入ると、小野式回転曲げ疲労試験機の開発、A. Palmgren と M.A. Miner (米) による疲労被害則 (Miner 則)、R.I. Smith と G.E. Sandland (英) による Vickers 硬さの提案、S.S. Manson と L.F. Coffin Jr. (米) による低サイクル疲労の Manson-Coffin 則、Alan Arnold Griffith (英) によるぜい性破壊条件と破壊じん性など機械的性質の評価法が確立され、鉄鋼材料組織の特徴と機械的性質との関係についても様々な研究が進められてきた。結晶粒径の強度への影響については、Hall-Petch の関係⁽⁶⁷⁾⁽⁶⁸⁾

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{1/2}$$

σ_y : 降伏応力, σ_0 : 単結晶の降伏応力 (摩擦力), k_y : Hall-Petch 係数, d : 平均結晶粒径

が広く知られ、種々の鉄鋼材料について評価がなされてきた⁽⁶⁹⁾。1970 年代以降は、制御圧延プロセス (TMCP) と高強度低合金 (HSLA) 鋼板の開発などが今日に至るまで活発に進められており、Dual Phase 鋼や TRIP 鋼など、強度-延性バランスに優れる複相鋼の活用が図られている。

5. おわりに

黒田⁽⁷⁰⁾ は、20 世紀における材料の大量生産を可能にした冶金学から材料科学への展開を示し、21 世紀に向けた材料科学から材料学へのパラダイム転換について言及した。材料研究の歴史をひもとき、次代の展開を考えるきっかけとなれば幸いである。

(2018年7月30日受理)

参考文献

- (1) 中島孝一, 鉄鋼材料のフェライトに関連する技術レビュー, 熱処理, 58 (2018), 301-303.
- (2) 中田伸生, パーライトの組織と力学特性に関する最近の話題 ~パーライトの温故知新~, 熱処理, 58 (2018), 304-309.
- (3) 森戸茂一, 鉄鋼材料におけるマルテンサイト相の組織とその評価, 熱処理, 58 (2018), 310-313.
- (4) 宮本吾郎, 古原忠, ベイナイト変態研究の最近のトピックス, 熱処理, 58 (2018), 314-318.
- (5) 土山聡宏, 増村拓朗, オーステナイト鋼の合金設計における窒素の役割, 熱処理, 58 (2018), 319-323.
- (6) 中沢護人, 金属学史研究のすすめ, 日本金属学会報, 16 (1977), 291-297.
- (7) Ludwig Beck, 中沢護人訳, 鉄の歴史, 全5巻17分冊, 1968-1986, たたら書房.
- (8) Cyril Stanley Smith, A History of Metallography, reprinted, 1988, MIT Press, Cambridge.
- (9) R.F. Tylecote, A History of Metallurgy, 2nd ed., 1992, IOM, London.
- (10) 中沢護人, 鋼の時代, 岩波新書青版511, 1960, 岩波書店.
- (11) 中沢護人, 鉄のメルヘン - 金属学をきずいた人々, 1975, アグネ.
- (12) 中沢護人, 金属組織学の父クリフトン・ソルビー, 金属, 35-16, 453 (1965), 89-94, アグネ技術センター.
- (13) 中沢護人, 鉄鋼製錬の歴史的発展, 日本金属学会会報, 9 (1970), 569-578.
- (14) 日本科学技術振興財団編, これからの鉄鋼技術, ラティス社, 1971.
- (15) 竹村右, 金属組織学の父 Henry Clifton Sorby, 日本金属学会報, 16 (1977), 373-378.
- (16) 金子恭二郎, ロバーツ=オーステン - 鉄-炭素の平衡状態図の誕生 -, 日本金属学会報, 16 (1977), 502-507.
- (17) 大塚正久, 鉄鋼組織学の偉大な先達 Osmond, 日本金属学会報, 16 (1977), 715-722.
- (18) 柴田浩司, 合金鋼の熱処理論の先駆者 - Edgar Collins Bain, 日本金属学会報, 16 (1977), 865-873.
- (19) 大塚研一, プンゼン=高炉ガスの研究, 日本金属学会会報, 17 (1978), 142-148.
- (20) 衛藤基邦, ギブス=化学熱力学の理論的研究, 日本金属学会会報, 17 (1978), 690-694.
- (21) 衛藤基邦, 鉄鋼業を築いた人々 万能の大科学者トーマス・ヤング=ヤング率の提唱者 -, 鉄鋼界, 20(3) (1970), 74-79.
- (22) 竹村右, 鉄鋼業を築いた人々 ヘンリー・クリフトン・ソルビー=金属組織学の父 -, 鉄鋼界, 20(6) (1970), 58-63.
- (23) 金子恭二郎, 鉄鋼業を築いた人々 マイケル・ファラデー=鋼合金の開拓者 -, 鉄鋼界, 20(10) (1970), 62-68.
- (24) 大塚正久, 鉄鋼業を築いた人々 フロリ・オスモン=物理冶金学の建設者 -, 鉄鋼界, 20(11) (1970), 99-105.
- (25) 竹村右, 鉄鋼業を築いた人々 コンスタンチノヴィッチ・チェルノフ, 鉄鋼界, 20(12) (1970), 60-65.
- (26) 大塚正久, 鉄鋼業を築いた人々 アンリ・ルシャトリエ=高温測定法を革命させた巨匠 -, 鉄鋼界, 21(8) (1971), 51-58.
- (27) 衛藤基邦, 鉄鋼業を築いた人々 孤高の科学者ウィラード・ギブス=化学熱力学の完成者 -, 鉄鋼界, 21(9) (1971), 65-70.
- (28) 柴田浩司, 鉄鋼業を築いた人々 エドガー・コリンズ・ベインと鋼の熱処理, 鉄鋼界, 24(6) (1974), 44-51.
- (29) 三橋鉄太郎, 特殊鋼の発達史 (1), 熱処理, 4 (1964), 210-217.
- (30) 三橋鉄太郎, 特殊鋼の発達史 (2), 熱処理, 4 (1964), 355-361.
- (31) 三橋鉄太郎, 特殊鋼の発達史 (3), 熱処理, 4 (1964), 435-440.
- (32) 三橋鉄太郎, 特殊鋼の発達史 (4), 熱処理, 5 (1965), 149-154.
- (33) 三橋鉄太郎, 特殊鋼の発達史 (5), 熱処理, 5 (1965), 212-215.
- (34) 中沢護人, 熱処理の古典文献 (1) ソルビー: 鉄鋼の顕微鏡組織, 熱処理, 31 (1991), 54-55.
- (35) 中沢護人, 熱処理の古典文献 (2) マルテンス: 成分と構造と性質との相関, 熱処理, 31 (1991), 175-177.
- (36) 中沢護人, 熱処理の古典文献 (3) ファラデー: 鋼の構造と合金鋼の探求者として, 熱処理, 31 (1991), 279-280.
- (37) 中沢護人, 熱処理の古典文献 (4) プレアン: 凝固の科学に悼さして, 熱処理, 31 (1991), 337-338.
- (38) 中沢護人, 熱処理の古典文献 (5) チェルノフ: ロシアの金属学者=樹枝状晶と焼入・焼戻, 熱処理, 32 (1992), 106-107.
- (39) 中沢護人, 熱処理の古典文献 (6) オスモン: 鉄の変態の発見者, 熱処理, 32 (1992), 291-292.
- (40) R.E. Hackenberg, The historical development of phase transformations understanding in ferrous alloys, in: Phase transformations in steels: Fundamentals and diffusion-controlled transformations, Edited by E. Pereloma, D.V. Edmonds, Vol. 1, 2012, Woodhead Publishing, 3-55.
- (41) 小岩昌宏, ヒューム=ロザリー伝, 日本金属学会会報, 13 (1974), 741-750.
- (42) 小岩昌宏, ヒュームロザリー その生涯と業績, 金属, 72 (2002), 64-70.
- (43) 水谷宇一郎, 固体物理学の誕生と Hume-Rothery 則, まてりあ, 48 (2009), 119-125.
- (44) 西沢泰二, もしもベータ鉄があったなら=磁気変態にもとづく相平衡の異常 -, 日本金属学会会報, 17 (1978), 790-797.

- (45) 清水謙一, マルテンサイト変態結晶学の歴史－西山とクルヂュモフの業績を中心に－, までりあ, 37 (1998), 655-658.
- (46) 小岩昌宏, 拡散研究の歩み, までりあ, 37 (1998), 347-355.
- (47) 中嶋英雄, Kirkendall 効果の発見にまつわるエピソード, までりあ, 34 (1995), 461-467.
- (48) 田中和明, 材料科学の先達～その1～19世紀の Metallurgy の発展と Faraday の合金研究, までりあ, 55 (2016), 160-165.
- (49) 田中和明, 材料科学の先達～その2～Curt Netto と日本 Metallurgy 事始め, までりあ, 55 (2016), 215-220.
- (50) 守谷英明, 長井寿, 材料を専門としない若手技術者のための鉄鋼材料ゼミナール(1) 鉄器時代の到来, BOUNDARY, 15-9 (1999), 21-27.
- (51) 守谷英明, 長井寿, 材料を専門としない若手技術者のための鉄鋼材料ゼミナール(2) 鉄の七変化－鉄の結晶構造と変態－, BOUNDARY, 15-10 (1999), 36-43.
- (52) 守谷英明, 長井寿, 材料を専門としない若手技術者のための鉄鋼材料ゼミナール(3) 鉄-炭素2元系平衡状態図, BOUNDARY, 16-7 (2000), 24-33.
- (53) 守谷英明, 長井寿, 材料を専門としない若手技術者のための鉄鋼材料ゼミナール(4) 平衡状態図の応用, BOUNDARY, 16-10 (2000), 28-33.
- (54) 中沢護人, 栄光のいばらの道－ベッセマーの溶鋼法の発明(鉄のメルヘン), アグネ, 1989.
- (55) 土井襄, 転炉製鋼法と平炉製鋼法, 日本金属学会会報, 1 (1962), 591-598.
- (56) 栗田満信, 我が国の製鋼技術の進歩とわたし, 鉄と鋼, 79 (1993), N704-N710.
- (57) Robert Hook, Micrographia: or some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses with observations and inquiries thereupon, The Royal Society, (1665).
- (58) Sven Rinman, Försöck till järnets historia, med tillämping för slögder och handtwerk, Bänden 1-2, (1782).
- (59) Henry Clifton Sorby, The microscopical structure of iron and steel, Journal of the Iron and Steel Institute, (1887), 255-288.
- (60) P.D. Portella, Adolf Martens and his contributions to materials engineering, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (Federal Institute for Materials Research and Testing, BAM), (2006).
- (61) <https://www.bam.de/Content/EN/Image-gallery/How-we-work/adolf-martens.html> (2018.4.6 閲覧)
- (62) E.S. Davenport, E.C. Bain, Transformation of austenite at constant subcritical temperatures, Trans. Amer. Inst. Min. Met. Eng., 90 (1930), 117-154.
- (63) A.D. Smigelskas, E.O. Kirkendall, Zinc diffusion of alpha brass, Trans. AIME, 171 (1947), 130-142.
- (64) 中沢護人, 鉄鋼分析の夜明け, 鉄と鋼, 67 (1981), 2734-2738.
- (65) W. Hume-Rothery, R.E. Smallman, C.W. Haworth, The structure of metals and alloys, Metals Soc. 1936.
- (66) N.F. Mott, H. Jones, The theory of the properties of metals and alloys, Clarendon Press, Oxford, 1936.
- (67) E.O. Hall, The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results, Proc. Phys. Soc. B, 64 (1951), 747-753.
- (68) N.J. Petch, The cleavage strength of polycrystals, J. Iron Steel Inst., 174 (1953), 25-28.
- (69) Setsuo Takaki, Daichi Akama, Nobuo Nakada, Toshihiro Tsuchiyama, Effect of grain boundary segregation of interstitial elements on Hall-Petch coefficient in steels, Materials Transactions, 55 (2014), 28-34.
- (70) 黒田光太郎, 材料研究におけるパラダイム転換と大学教育, までりあ, 37 (1998), 666-670.