

# 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

田中 和明\*

### 1. はじめに

#### (1) 鉄鋼技術者から見た材料科学

筆者は、30年あまり製鉄所の最前線で鋼づくりの仕事に従事してきた。高炉の溶銑が転炉で精錬されて溶鋼になり、铸造で鋼片になり、加熱・圧延・熱処理により鉄鋼製品になる工程を来る日も来る日も見てきた。一度も仕事に飽きたことがない。毎日知らない事象が発生し、新しい経験を積んできた。筆者にとって製鉄現場は、興味の尽きない宝箱のような場所であった。

鉄鋼の Metallurgy や Process Control, Massproduction や

Products など、知れば知るほど奥深さに驚かされる。先達の積み上げてきた知識体系、それらを支えてきた努力に畏敬の念が沸き起こってくる。いつの頃からか、筆者の興味は、材料科学の歴史と先達の生き様に向かっていった。

#### (2) 材料科学の先達

材料科学は、20世紀後半にでてきた言葉である。18世紀の自然科学勃興期には、物質の性質探求も元素の発見も物理・化学反応も混ざり合っていた。混沌から知識が生まれ、学問体系に分化し発達してきた。

近代の材料科学をみても数多くのパイオニアが存在する。筆者の視点で材料科学の流れをまとめたものが図1である。



図1 材料科学の歴史年表(1)(2)。

\* 新日鐵住金株式会社技術総括部一貫最適化推進室； 席主幹 (〒100-8071 東京都千代田区丸の内2-6-1) 19th Century Development of the Metallurgy and Faraday's Researches on Steel and Alloys No. 1; Kazuaki Tanaka (Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, Tokyo) Keywords: metallurgy, Michael Faraday, Sir Humphry Davy, Robert Hadfield, steel, alloy, wootz 2016年1月12日受理 [doi:10.2320/materia.55.160]

年表の年代は1700年から太平洋戦争終戦までの250年間とした。分野の切り口を「材料科学の爆発」「元素の発見と解釈」「材料工学の奔流」に分けた。各時代を示すキーワードも合わせて示した。この時代は科学技術の発達が急速で、登場人物は膨大である。年表を眺めていると、あちらこちらに教科書の中の知り合いが名を連ねている。先輩から後輩、師から弟子、親から子への科学技術の流れの歴史が繰り返されている。人から人への科学、技術、思想のバトンリレーが起こっている。

### (3) 2組の材料科学の先達

今回2組の材料科学のパイオニアを取り上げる。1組目は、18世紀後半から19世紀前半の激動の歴史の中で、Metallurgyを作り上げてきた人々の縁の物語である。先駆的な金属学が英国や仏国を中心に発達する中、Humphry Davyの戦火の中の欧州大旅行、そしてMichael Faradayの“Steel and Alloys”の研究へと進む。Faradayが突如冶金学研究を打ち切り、電磁気学の大家になっていった経緯を、約百年後に、Robert Hadfieldが解き明かす。

2組目は、我が国の大学で初めてMetallurgyの講義をしたCurt Nettoの物語である。Nettoの講義は、「涅氏冶金学」として上冊と付図が発刊された。明治時代のMetallurgyと幻の下冊の内容を紹介する。また歴史に埋もれた日本金属学の恩人Nettoの離日後の逸話にも触れる。

彼らの業績はあまり世に知られていないが、彼らの先駆的な研究や教育は確実に材料科学の基礎になっている。

## 2. Michael Faradayの“Steel and Alloys”

Michael Faraday (1791-1867) (図2)は、電磁気の発見・発明で有名であるが、研究者としての最初の仕事は化学分析と合金の研究であった。この章ではFaradayと、Faradayを科学の世界に導いたDavy、埋もれていたFaradayの研究

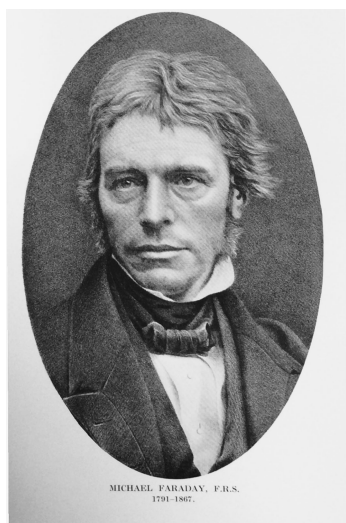


図2 Michael Faraday 肖像写真<sup>(3)</sup>。  
(文献(3)のP8より引用)

成果を1世紀ぶりに世に出したHadfieldの三人に着目して論を進める。

### (1) Metallurgy 研究者としての Faraday

Faradayの鋼と合金の研究期間は1819年～24年である。この間Faradayは4つの論文を出している<sup>(3)</sup>。

1819: “Separation of Manganese from Iron”

1819: “An Analysis of Wootz or Indian Steel”

1820: “Experiments on the Alloys of Steel made with a view to Its Improvement”(Stodartとの共著)

1822: “On the Alloys of Steel”(Stodartとの共著)

共著者のJames Stodart (1760-1823)は、企業家であり、英国王立協会の会員であり、若きFaradayの支援者でもあった。

### (2) 先駆的な金属学の発展

Faradayの研究に触れる前に、当時の金属学の状況を概観する。17世紀から18世紀にかけて、英国では冶金研究や実用化が急速に進んでいた。Robert Hadfield(1858-1940)は、Faradayの研究に先行するものとして、以下の研究や実験をあげている<sup>(3)</sup>。

**Dud Dudley(英国, 1599-1684):**

石炭を用いて初めて溶融鉄を製造。

**Simon Sturtevant(英国):**

著書「Metallica」で石炭を用いた精錬を紹介。

**Sir John Pettus(英国, 1613-1690):**

金属学的な研究の著者。

**Andrew Yarranton(英国, 1616-1684):**

錫めっき板の製造を導入。

**Benjamin Huntsman(英国, 1704-1776):**

るつぼ鑄鋼の製造を完成。

**Abraham Darby(英国, 1711-1763):**

高炉の精錬にコークスを使用。

**Henry Cort(英国, 1740-1800):**

技術者、パドル法と溝付きロールを導入。

**William Reynolds(英国, 1758-1803):**

鋼製造に酸化マンガンを使用する特許を取得。

**David Mushet(英国, 1772-1847):**

黒帯鉄鉱石(Black Band Ore)を発見。

**James Beaumont Neilson(スコットランド, 1792-1865):**

熱風高炉を発明。

Faradayが研究を始めた19世紀初頭の鉄源は、コークス高炉の溶鉄、るつぼ製鋼法、パドル法によって得られる鑄鉄、鍊鉄およびパドル鉄であった。製鋼法はまだ確立しておらず鋼(Steel)は希少だった。

### (3) Sir Humphry Davy<sup>(4)</sup>

Michael Faradayの登場に大いに影響を与えたHumphry

Davy は、1778年に英国のペンザンスで生まれた、1801年に王立研究所の化学教授に就任すると、当時仏国で開発されたばかりのボルタ電池を用いた熔融電解法を活用し、1807年にカリウムとナトリウム、1808年にはバナジウム、ストロンチウム、カルシウムの元素単離に成功し、1810年には塩素ガスの分解回収に成功した。Davy の名は、当時の紛争国である仏国にも鳴り響いていた。1804年に仏国皇帝に即位した Napoleon は大陸封鎖を行い、英国と戦争状態にあった。1807年にその敵国から、Davy は電気化学の功績を称えて科学技術功労賞を贈られた。Davy は1810年ナイトの称号を得、翌年には准男爵の叙され Sir Humphry Davy となった。1812年には教授職を辞し、それまでの研究成果をまとめた“Elements of Chemical Philosophy”を上梓している。まだ Science という概念がなく、Philosophy が使われている<sup>(5)</sup>。この年 Faraday と出会い、実験助手として採用する。

#### (4) Michael Faraday の生い立ち<sup>(4)</sup>

Michael Faraday は、1791年ロンドン郊外で金物屋の息子として生まれた。製本書店の年期奉公に若くして入り、製本する科学書籍の原稿を読みふけり、科学に興味を持ったと、後に当時を述懐している<sup>(3)</sup>。

奉公が終わった1811年に Davy の王立研究所市民講座を聴講し科学者を志す。学校教育を受けていない若者は Davy に面会を求めた。Faraday は、Davy が行った4つの市民講座の300ページ以上にも及ぶ講義録を自分で製本して贈った。図3に Faraday になったつもりで筆者が模写した講義録の表紙を載せた。喜んだ Davy は Faraday と面談し、王立研究所の Davy の助手として採用されることになった。助手が退職し、Davy 本人も化学実験で目を負傷したというタイミングも Faraday の助手採用に有利に働く。1813年3月のこと

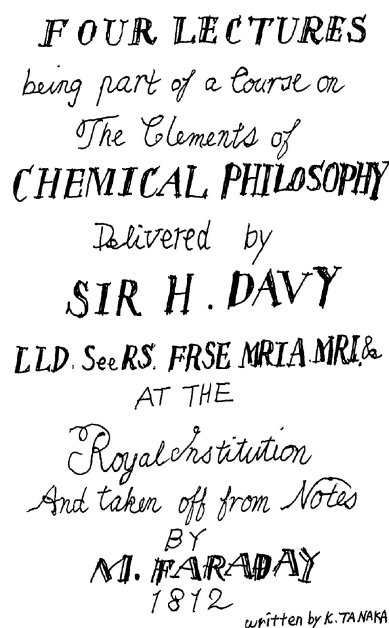


図3 Davy に贈った講義録の製本表紙(筆者模写)。

であった<sup>(3)</sup>。

1813年10月、Faraday は Davy 夫妻と一緒に欧州大陸旅行に出かけた。当時の欧州大陸は、戦争の真っ只中であった。最初の訪問地であった10月のパリは Napoleon がトラファルガの戦いで大敗して逃げ帰った直後で大混乱であった。Faraday による旅行日誌によると、パリには12月まで滞在し、この間 Davy は、パリの実験室を用いてヨウ素実験を行っている。Davy の化学実験を近くで見たことは大きな収穫であった<sup>(6)</sup>。

#### (5) Faraday の「Steel and Alloy」への興味

Faraday の金属研究への強い興味は、1819年から1824年までの6年間だったと自らの手紙で述べている。後に電磁気の発見でよく知られているファラデーが、鋼と合金に深い興味を持ったのは幾つか理由があった<sup>(3)</sup>。

Faraday は「私は金属労働者の息子で、金属製品の店や金属製品に関わることが好きだ」と手紙中で述べている。彼自身も自分は化学者だと考えていた。Faraday が、王立研究所での面談を取り付けた Davy の講義録の一編は金属を扱っていた。さらに Davy を化学教授に推した William Brande 教授が、Faraday の研究を見守り、勇気づけていた<sup>(3)</sup>。Brande が1819年に著した「Brande's Manual of Chemistry」の鋼の項(改訂版 p339)には「Stodart と Faraday が炭化鉄(a carburet of iron)の分析をしている。Wootz もしくはインド鋼が刃物生産に重要である」との記述がある。また「微量のアルミナとシリカ、熱処理が良い刃物鋼に影響している」と記されている<sup>(3)</sup>。

Faraday が合金研究に携わった直接理由は、Wootz、インド鋼への興味と将来性への洞察からであった<sup>(3)</sup>。

#### (6) Wootz もしくはインド鋼

Wootz 鋼で作った刃物は、硬くて刃こぼれせず、錆びず、軽くエッチングするとさざ波のようなダマスカス模様が浮き上がる。当時の西洋のどの鉄よりも Wootz 鋼は優れていた<sup>(7)</sup>。英国 Sheffield は刃物工業の町である。1819年 Faraday に接触してきたのが、Sheffield の刃物商 James Stodart であった。

Stodart は、インド Bombay の Dr. Helenus Scott が英国に送ってきた Wootz 鋼のサンプルを分析して優れた性質の謎を解明し、Sheffield で Wootz 鋼の模倣品を生産しようとしていた。持ち込んだ先が Davy の助手をしていた Faraday であった。以降、Stodart と Faraday は Wootz 鋼の分析と Sheffield での試作合金の実生産に夢中になる(表1)。

#### (7) Faraday の研究環境

当時の化学分析環境は、高分解光学顕微鏡もなければ、発光分析、硬さ試験、電磁氣的試験法もなかった。そうした環境で Faraday は合金鋼の化学分析を行い、小型の実験炉を用いて合金の試作を行っていた。

合金鋼の生みの親である Robert Hadfield は後に「合金鋼

表1 Stodard と Faraday の論文と活動<sup>(3)</sup>.

西暦	著者	報告書	背景
1795	ストダート	刃物商人がウーツ鋼を使う決意	ダマスカスの魅力
1804	ストダート	ダマスカス刀の模倣実験の記事	手探り試験
1805	ストダート	磨鋼や黄銅の保護用白金めっき	防錆めっき保護膜
1812	ファラディ	デービーの科学哲学の講義録清書	デービーの弟子希望
1816	ファラディ	トスカニー地方の苛性石灰の分析	ファラディ初仕事
1818	ファラディ	ストダートと協力開始	ダマスカス鋼提供
1819	ファラディ	鉄からマンガンの分離	
1819	ファラディ	ウーツあるいはインド鋼の分析	化学分析から探索
1820	ファラディ&ストダート	改善面から見た鋼の合金	合金添加鋼
1820	ファラディ	デラリブへの実験や論文抄録手紙送付	
1821	ファラディ	サラ・バーナードへ鋼に触れているラブレター送付	
1822	ファラディ&ストダート	鋼の合金について	貴金属、クロム添加
1822	ファラディ	木箱に合金鋼資料を入れる	論文作成の試料
1823	ストダート	スポンサー客死	ダマスカス鋼中断
1824	ファラディ	「合金鋼」にてクロム防錆報告	ここで冶金学終了

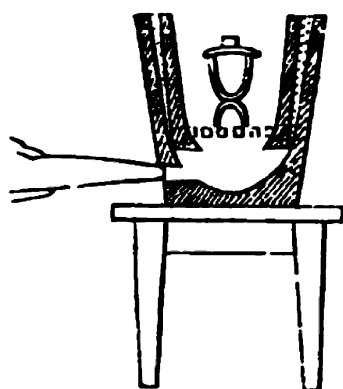


図4 溶解炉の模式図<sup>(8)</sup>.  
(文献(8)のP96より引用)

の誕生の地は1820年頃の王立研究所であった。一方 Sheffield は、Faraday の合金を用いた刃物の大量生産誕生の地であった」と述べている<sup>(3)</sup>。Faraday は、基礎研究には Brande 教授が、大量生産には Stodard という協力者がいた。Faraday は、貴金属も溶かす強力な火力を持つ炉を実験室に設置し貴金属と鉄鋼の溶解実験を始めた。Faraday は、1830年に学生向けに執筆した“Chemical Manipulation”の中で、高温を生み出す冶金炉形状を紹介している<sup>(8)</sup>(図4)。

### (8) Wootz 鋼への道

Wootz 鋼は固くて錆びないため刃物に適していると考えられていた。共同研究を始めた二人の着想は、鋼に貴金属を入れると硬くなるのではないかとということであった。当時鋼に貴金属を入れると硬くなる知見があった。高温溶解を用いて、合金溶解実験が繰り広げられた。

Faraday が用いた合金鋼の素材の種類を表2に示す。貴金属7種類、普通金属6種類、非金属3種類、鉄源4種類の計20種類の素材を用いた実験を行っている<sup>(3)</sup>。

### (9) Faraday と Stodard の研究論文

Faraday と Stodard は、1820年の“Quarterly Journal Science, ix, 319, date 1820”で、「改良の観点から行なった鋼の合金実験」について報告している。この論文において、Faraday は純粋な科学的観点から、Stodard は刃物の実機試

作の観点から論じている。論文はこう始まっている。

「鉄や鋼と種々の金属との合金の一連の実験を提案する目的は二つある。一つ目は刃物に適した合金はどのようなものか、二つ目はその合金がよく似た環境で酸化しにくいことを確かめることである。その研究の結果新しい鏡の素材も得られた<sup>(3)</sup>」つまり硬い刃物鋼と耐食鋼の改良が主目的で、さらに鏡用物質を見つけることが期待されていたのである。

論文中の Wootz またはインド鋼の分析から、合金鋼の優れた性質やエッチングすると浮きだすダマスカス模様は、アルミナやシリカと鋼が組み合わされたものと結論付けている。またニッケルも酸化を防ぐ効果があると指摘している<sup>(3)</sup>。

1822年の二人の論文は、大規模実験の実務と、耐食性合金に関わるものであった。また合金の影響も、ニッケル、銀、ロジウム、イリジウム、オスミウム、白金、パラジウム、チタンおよびクロムなどの合金の優れた性質について詳しく取り上げている。

### (10) 実験の中止と実験資料

精力的に続いていた Faraday の実験は、1824年で突然途切れる。Wootz 鋼の提供者であり、Sheffield での大規模実験の仲介者であり、共同研究者であった Stodard が1823年に突然死去したことが原因だったと考えられている。Faraday は研究を中止し、論文に使った合金試料を木箱に詰めた。有名な実験記録である Faraday's Dials においても、1824年6月28日のニッケル合金の実験以降、合金鋼実験の記載がない。木箱は王立研究所から科学博物館に移され百年が過ぎた。表3に Faraday の発明発見の年表を示す。

### (11) Robert Hadfield の功績

1930年、後に王立研究所長になる Robert Hadfield が Faraday の直筆の“Steel and Alloys”のラベルが貼ってある木箱を開封し、当時の最新分析技術を駆使して試料の調査を行った(図5)。

鉄都 Sheffield 出身の Hadfield は、合金鋼の研究で名高い。1882年「高マンガン耐摩耗鋼」の発明を皮切りに、1889年「鉄シリコン合金」、1890年「アルミニウム鋼」、1892年「鉄

表2 Faraday が合金実験に用いた元素・鉄源。

<b>金属元素</b>
1.クロム、2.銅、3.金、4.イリジウム、5.鉄、6.ニッケル、7.オスミウム、8.パラジウム、9.白金、10.ロジウム、11.銀、12.錫、13.チタニウム
<b>非金属元素</b>
14.炭素、15.ケイ素、16.硫黄
<b>鉄系物質</b>
17.ウーツもしくはインド鋼、18.炭化鉄、19.アルミニウム鉄合金(1820年ファラディによって作られたウーツ鋼、またはダマスカス鋼の模倣品。デービーはアルミニウムを添加と発言)、20.隕鉄

表3 Faradayの発明発見年表<sup>(3)</sup>.

ファラディ		特殊合金鋼
1791	ロンドン郊外で誕生	1797 クロム発見
1812	デービーの講座の聴講録を送付し採用	
1813	デービーのお供で大陸旅行に出発	
1816	初仕事「石灰石の分析」	
1820	ストダートとファラディ貴金属入り合金鋼は錆びないと報告	
1821	電磁気回転実験に成功	1821 ベルチェが鉄・高クロム合金の防錆効果報告
1822	鉄と合金の研究を発表	クロム合金の防錆効果報告
1824	王立協会会員に選抜される。「合金鋼」でクロム添加合金の防錆報告	
1831	電磁誘導発見。磁力線の概念発表	
1833	電気分解の法則を発見	
1845	光と磁場のファラディ効果発見	1854 電解クロムの防錆
1859	「化学と物理学の実験研究」出版	
1860	クリスマス講演「ろうそくの科学」	
1867	ハンプトン・コートで死去、75歳	
1931	木箱発見。ハドフィールド「ファラディ冶金研究」を出版	



図6 Faradayの木箱に入っていた試料<sup>(3)</sup>. (文献(3)のP5より引用)

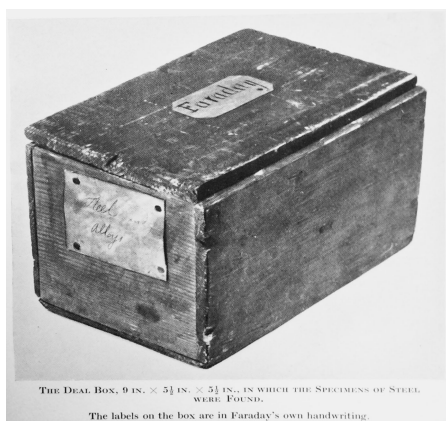


図5 FaradayのWood Box(木箱)<sup>(3)</sup>. (文献(3)のP4より引用)

「クロム合金」の論文を著している。Faraday協会の会長をしていたこともあるHadfieldは、大先輩が1世紀以上も前に合金鋼の研究を詳細に行っていたことに畏敬の念を込め、木箱中の試料の調査にあたったことと思われる。

### (12) Faradayの木箱の中身

木箱の中には、78個の実験試料が収められていた(図6)。Hadfieldは、サンプルに番号をつけ分類分けをしていた。試料は形態と合金種類で分類されている。試料形態は、Ingot(A), Bloom(B), Rough Billets & Forgings(C), Bars(D), Pieces(E), Flat Specimens(F), Stodart's Special Articles(G)の7種類に大別できた。合金種類は炭素鋼、二元系合金、三元系合金の3つに分類できる。炭素鋼には、銑鉄、炭素鋼、高S快削鋼が含まれる。二元系合金は、クロム、ニッケル、銅、金、銀、白金、ロジウム合金が含まれる。三元合金は、鉄-白金-銀、鉄-金-銀、鉄-金-ニッケル合金が含まれる。

合金鋼の元素の影響を本格的に調べて材料設計が始まったのは19世紀後半である。Faradayはそれより半世紀前に合金設計をしていた。後に詳細に分析された金、銀、白金、ロジウムなど貴金属合金鋼の貴金属成分の含有量を見ると、Wootz鋼、ダマスカス模様鋼製造への執念が感じられる<sup>(3)</sup>。

### (13) Faradayの金属実験

木箱に入っていた78個の試料は、1822年の論文に出てくる試料までであった。その後2年間の試料は含まれていない。どんな合金をFaradayは作っていたのであろうか。「Faraday's Diary」の中ででてくる合金鋼の記述を見てみる<sup>(9)</sup>。

#### 1824年2月10日：

溶解のために555グラムの鋼と16グラムのニッケルを炉に詰めて2月11日まで入れる。合金は溶けたが中断したため不完全である。もう一度溶かし直す必要がある、つまるところ操炉の失敗。

#### 1824年6月28日(日記上この日が金属実験の最後)：

Mr Christieのためにクルーシブル炉に1000グラムの鉄に60グラムの純ニッケルを詰めた。大気溶解炉は良好なれど、上部表面が凸状に盛り上がっているし、下面は多孔質になっている。全液体が冷却中に締め固まり、多分発生したガスがそんな形にさせたのだろうと思わざるを得ない

いずれも鉄-ニッケル合金の実験がうまくいかないとの記述である。こうした悪戦苦闘をしながら実験を繰り返していた。

### (14) MetallurgyへのFaradayの貢献

StodartとFaradayが夢見た錆びない鋼は、後のステンレス鋼の発想につながるものであった、しかし、Faradayの研究した1824年は時代が早過ぎた。分析機器もない、まともな鋼も作れない時代であった、Bessemer転炉(1856年発表)もまだ発明されていなかった。こうした時代に、鋼に貴金属を入れると錆びにくいという報告を1820年の論文で行っている。また、1797年に発見されたばかりのクロムを添加金属として使っている。後にクロムやニッケルを利用したステンレス鋼が次々と発明されていくが、Faradayの行った実験の価値は決して減じることはない。白金鋼やロジウム鋼は錆びないという報告、クロムも耐食性に効果がありそうとの報告は、後の研究者の道標になったに違いない。

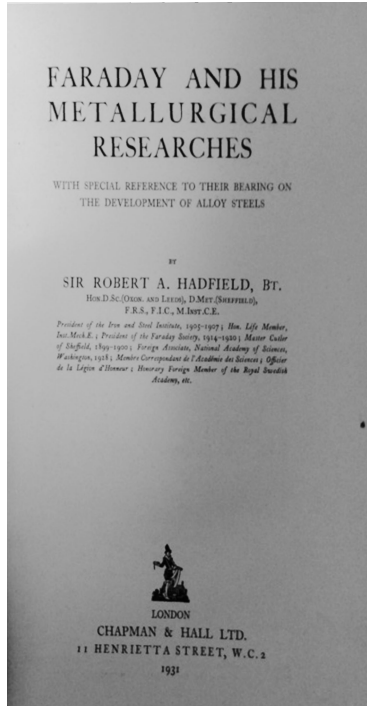


図7 “Faraday and his Metallurgical Researches”.

何より、木箱の中に保管されていた合金サンプルが錆びていなかったという事実、またそれらの合金を用いてSheffieldで刃物が大量生産されていた事実を見ると、時代を先取りした研究であったが十分実用化されていた。

後に、HadfieldがFaradayの研究を再発見し、“Faraday and his Metallurgical Researches”(図7)の大著で、Faradayの研究を徹底的に検証し、百年のギャップを埋めようとしたのも必然の出来事であった。

### 3. おわりに

今回は、若き日のFaradayの早過ぎた合金研究を取り上げた<sup>(10)</sup>。Fafadayは日記魔であった。1813年のDavy夫妻との欧州旅行日記<sup>(6)</sup>、1822年以降の詳細な実験日記<sup>(9)</sup>が残されている。克明な日記の向こうに、Faradayの悩みや希望が見え隠れしている。しかし、その日記にもStodartの死による合金鋼研究の断念についての理由が見えてこない。よほどの理由があったのだろうかと思像するしかない。Davy, Stodart, Faraday, Hadfieldへとつながるパイオニア達の運命の糸が現在の合金鋼基礎を生み出した。(第二部に続く)

### 文 献

- (1) 湯浅光朗：コンサイス化学年表，三省堂，(1988)。
- (2) 松岡正剛監修：情報の歴史，NTT出版，(1992)。
- (3) R. A. Hadfield: Faraday and his Metallurgical Researches with Special Reference to their bearing on the Development of Alloy Steels, Chapman & Hall Ltd. London, (1931)。
- (4) 島尾永康：人物化学史，朝倉書店，(2002)。
- (5) Sir Humphry Davy: Elements of Chemical Philosophy, Bradford and Inskeer, Philadelphia (1812)。
- (6) 山岡 望：化学史談Ⅵ 化学者の旅行日記，内田老鶴園新社，(1959)。
- (7) J. Verhoeven, A. Pendray and W. Dauksch: The Key Roll of Impurities in Ancient Damascus Steel Blades, JOM, **50**(1998), 58–64。
- (8) M. Faraday: Chemical Manipulation : Being Instructions to Students in Chemistry on the Methods of Performing Experiments of Demonstration or Research, with Accuracy and Success. (1842)。
- (9) M. Faraday: Faraday's Diary of Experimental Investigation – 2nd Edition, vol. 1, HR Direct, (2008)。
- (10) 鈴木隆志：ステンレス鋼発明史，アグネ技術センター，(2000)。



田中和明

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★  
 1982年 3月 京都大学大学院工学研究科修士課程修了  
 1982年 4月 新日本製鐵株式会社入社(君津製鐵所勤務)  
 1996年 技術士(金属部門)登録  
 2015年 4月 新日鐵住金株式会社，現職  
 専門分野：製鋼，鋼管，品質管理  
 ◎一貫して製鐵所での鉄鋼製造に従事。企業内技術士としての金属関連の情宣，金属技術史研究活動を中心に活動。  
 ★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★