解　説

研究会成果報告－9

鉄鋼分析における熟練技術の継承のための学術的な取り組み

Studies on Inheritance of Sophisticated Techniques in Steel Analyses

上原伸夫
Nobuo Uehara
宇都宮大学大学院工学研究科
准教授

1 はじめに

もう一昔の話になってしまった感があるが、「2007年問題」と呼ばれる熟練技術者の一斉退職に伴う高度な熟練技術の喪失が産業界で取りざたされていた。高度な熟練技術は日本が工業立国であり続けるための知的基盤として欠かせない。その喪失は、鉄鋼業界だけでなく我が国の全て産業の根幹を揺るがす重大な問題である。このため、JSTやNEDOといった国の機関[1]だけでなく、地方自治体[2]においても熟練技術の継承のための様々な取り組みが行われてきた。しかしながら、効率的かつ効果的に高度な熟練技術を継承するための普遍的な方法論についてはこれまで知られておらず、またそのような方法論を開発するための取り組みも筆者らの知る限り行われていない。おそらく、“技術”というものが多種多様であり、それぞれに対して最適な継承方法が異なっていることがその理由ではないかと推測される。例えば、技術継承のためのオーソドックスなやり方として、“見て学ぶ”、“手ほどきを受けて習得する”そして“自ら高い完成度を目指して修練する”、といった段階を経る手法がもっぱらとられてきたものと推測される。この手法は、個から個への小人数を対象とした技術（および技術者スピリット）の継承に有効であるものの、次の二点の課題を抱えている。

1）技術の継承に時間がかかるため、団塊世代技術者の一斉退職といった重大な事態には対応しにくい。
2）継承される技術の取捨選択が事業所などの比較的小単位で決定されるため、その技術の重要性に必ずしも普遍性は伴わない。

さて、“技術”を効率的かつ効果的に継承するための普遍的な方法論は構築することができるのであろうか。もしそれが可能であれば、その方法論は多くの分野で活用できるものと期待される。このような着想から「鉄鋼分析における技術基盤の再構築を目指した統合型データベース開発研究会」（以下本研究会）はスタートした。平成23年度のことであった。

2 II型研究会である本研究会の目標

はたして、上述のような“技術継承のための普遍的な方法論の構築する方法”といった抽象的な議論では研究を進めることはできるであろうか。より具体的なアプローチの一つとして、対象となる技術を分野ごとに分類し、その各々について最適な継承方法を構築し、そこから普遍性を抽出する方法が有望である。このための一つのケーススタディーとして、本研究会では鉄鋼分析に関する高度な熟練技術を取り上げ、それを効率的かつ効果的に継承するための方法論を開発することを目指した。このような取り組みが鉄鋼業界のみならず他の産業分野においても数多く展開されれば、技術継承のための普遍的な方法論を開発するための第一歩になるものと期待される。類似のアプローチとして、すでに、「製鉄所「現場力」の維持・発展に向けたエージェント技術の適用」研究会（平成2-から2-年）が活動しており、その成果が報告されている[3,4]。

技術継承の方法論を開発する対象分野を鉄鋼分析に限ることにより、継承すべき技術を“鉄鋼分析において熟練を要する高度な技術”として具体化できた。そこで、本研究会では活動を始めるのに際し、以下の4つの点について議論した。1）鉄鋼分析において熟練を要する高度な技術とはどのようなものなのか、2）それはなぜ、熟練を要するのか、3）それを効率よく効果的に継承するためには具体的に何をなすべきか、そして4）どのような手段が有効か。

上記の議論に基づいて、本研究会では鉄鋼分析において熟練を要する高度な技術を選定するにあたり、JISに収載されている鉄鋼分析法に着目した。次いで、着目した分析法を構成する要素技術において熟練を要する高度なものに焦点を当

てることにした。JISは鉄鋼分析においても公定法として重要な役割を果たしており、日本における鉄鋼分析の技術基盤そのものを担っている。しかし、JISおよび付属書に書かれている手順は文章や図表から構成されており、それだけで操作手順を習熟するにはおのずと限界がある。またJISの性格上、熟練を要する分析手順要やそのコツという観点からの記述がなされているわけではない。本研究会では、これらに化学的な解説を含む映像情報や音声情報を加えることにより、要素技術の理解と習得を促すデジタル教材を開発できるものと考えた。このデジタル教材を活用することは熟練を要する技術の効果的な継承に役立つものと期待される。さらに開発したデジタル教材をデータベース化することにより、活用の利便性がより一層向上するものと考えられる。

さて、本研究会のメンバーの構成について説明しておくことにする。本研究会は大学関係、公的研究機関そして鉄鋼業界のメンバーから構成された。本研究会はII型研究会ではあるものの、方法論の構築を学術的に目指すことを目的としていることから、活動の主体は主に大学関係と公的研究機関のメンバーである。これは既に活動していた「熟練技術が必要な分析手法の技術伝承」技術検討会との関係によるところが大きい。この技術検討会は分析技術部会の下に設置され、鉄鋼業界のメンバーが活動の中心になっている。“分析技術の継承”という一つの目標に対して別々にプローチするために、本研究会のメンバーの何人かについては、技術検討会のメンバーを兼任して頂くことにした。研究会の体制と技術検討会との関連を図1に示す。話は脇にそれるが、兼任のメンバーの様々な配慮により、本研究会の活動をスムーズに行うことができたことを報告しておく。

3 研究会の活動概要

本研究会では主に二つの活動を行った。一つ目は、上述したJISに準拠した分析手法のデジタル教材の開発である。これについては、芦野幹事を中心に東北大学金属材料研究所のメンバーと谷合委員が主に担当した。そして、二つ目の活動では、大学および公的研究機関のメンバーが各自の専門性を生かし、独自の切り口から鉄鋼分析に関わる高度な分析技術の持つ難しさを化学的に検証した。

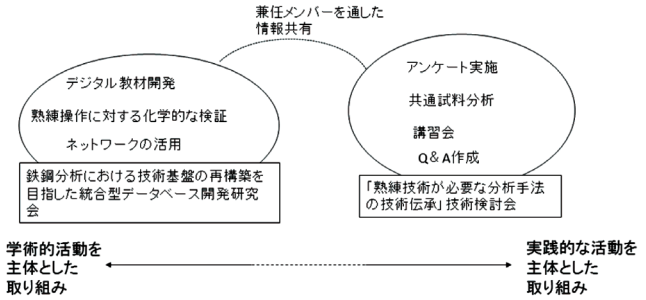

図1 「鉄鋼分析における技術基盤の再構築を目指した統合型データベースを開発研究会」と「熟練技術が必要な分析手段の技術伝承」技術検討会との関連

3.1 データベース化を目指したデジタル教材の開発

本研究会では、高度な技術の習得を支援するための映像情報、音声情報、そして文字情報を高度に統合したデータベースの開発ためのプラットフォームとしてHTMLを採用した。HTMLはデジタルコンテンツをデータベース化するのに最も適したファイル形式の一つである。HTMLはまた、テキスト情報、映像情報、および音声情報を比較的自由に組み込むことができ、リンク機能により必要とする情報に簡単にアクセスできるといった特長を持つ。さらにHTMLはデータベース化したものをアーカイブ化するのにも適している。開発した教材をアーカイブ化することにより、必要に応じて含まれるコンテンツを最新の状態に更新することが容易となる。本研究会では、コンテンツの作製だけでなくWebを介したデジタルコンテンツの編集システムを活用することにより、アーカイブ化に伴う技術的な可能性についても検討した。

データベースの開発に先立ち、まず、「継承すべき熟練を要する鉄鋼分析技術」を具体的に選定する必要がある。これには、鉄鋼分析の現場において分析業務に携わっている作業者の意見の集約が欠かせない。効率的に研究会活動を進めるために、本研究会では、技術検討会がアンケート結果などから熟練を要する分析方法として取り上げた4つの手法（Ni重量法[5]、Mo重量法[6]、Cr滴定法[7]およびP吸光光度法[8]（表1）を対象とすることにした。このうち、重量法と滴定法は検量線を用いなくても測定値から直接分析対象物の含有量を決定できるいわゆる絶対分析法であり、高い桁の精度を有する。

表1 デジタル教材を作成した鉄鋼分析法

鉄及び鋼－りん定量方法：JIS G1214-1998 [5]
「モリブドりん酸青吸光光度法」[6]
鉄及び鋼－ニッケル定量方法：JIS G1216-1997 [7]
「ジメチルグリオキシムニッケル重量法」,
「ジメチルグリオキシム沈殿分離エチレンジアミン四酢酸二水素二ナトリウム・亜鉛逆滴定法」
鉄及び鋼－クロム定量方法：JIS G1217-2005 [8]
「ペルオキソ二硫酸アンモニウム酸化過マンガン酸カリウム滴定法」
鉄及び鋼－モリブデン定量方法：JIS G1218-1994
「ベンゾイン-α-オキシム沈殿分離酸化モリブデン(VI)重量法」

これらの方法において測定精度を保持するために熟練技術が重要な役割を果たしている。一方、P吸光光度法ではモリブデン酸による発色を安定に行う条件を保つのに熟練を要するものと推測される。

測定法ごとの教材の作製手順はおおよそ以下の通りである。4つの元素について、JISに記載されている手順をHTMLに書き込むためにフロー図によるプロトコルを作成した。フロー図の一例として、Mo重量法のプロトコルを図2に示す。ついで、フロー図に記載された各単位手順をビデオ映像に収

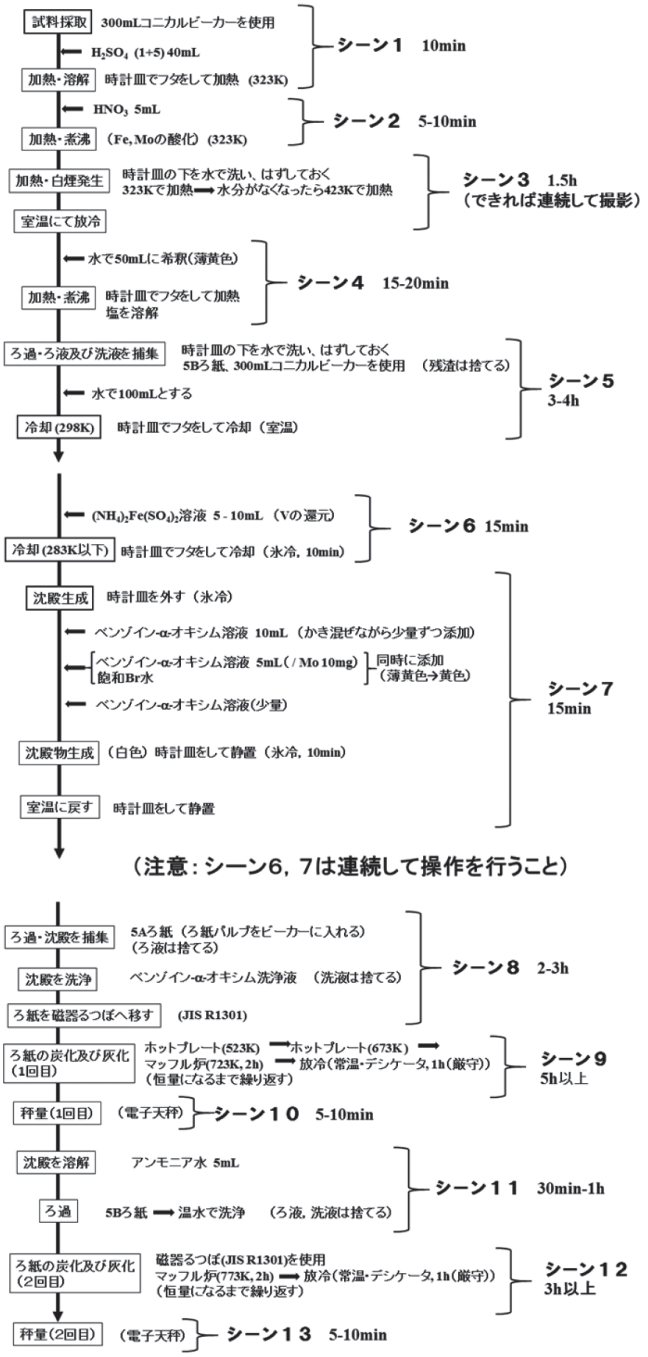

図2　Mo分析法のフロー図

めた。この撮影作業は、東北大学金属材料研究所にて行い、平成24年度にMo重量法およびP吸光光度法について、平成25年度 Ni重量法およびCr滴定法について行った。Webを介して編集作業を行うシステムを導入した。Webを介して編集作業を行うシステムの運用は、将来的にデータベース化したデジタルコンテンツの管理運営を行うことを想定して、そのための試験運用の意味を持つ。

3.2　鉄鋼分析において熟練を要する技術に対する化学的な検証

“鉄鋼分析において熟練を要する高度な技術”を化学的に検証するためのアプローチとして、次の二つの方法で研究を展開した。1) 表1に示した4つの分析法に対して化学的な立場から難しい要素技術を明らかにした上で、その難しさを化学的に検証する。2) 特定の分析法に限定されず、自由な発想に基づいて、“鉄鋼分析において熟練を要する高度な技術”の本質を解明する。

Webを介する編集システムを活用して上記の研究成果をデータベース教材に組み込むことにした。

4　成果について

4.1　データベース化を目指したデジタル教材の開発

成果物は音声や映像情報を含むので、一分析法あたり最大で30MBを超える容量となった。これは32MBのUSBスティックメモリーでぎりぎり入る容量である。しかし、USBスティックメモリーでのデータのやり取りにはウィルス感染などセキュリティー上の問題があるため、一般的には推奨されない。そこで本研究会ではデジタルコンテンツを最終的にはアーカイブ化し、適切なサーバ上で運用することを目指した。しかしながら、実際に運用するには知的財産の取り扱い、公開の範囲など技術的なこと以外で調整しなくてはならない課題が多数あることが明らかになった。そこで、暫定的に、サイズをDVDに収載できるところまで縮小し、元素ごとにDVDに収載することで成果物を作成した。

成果物の一例として、Mo分析法（「ベンゾイン-α-オキシム沈殿分離酸化モリブデン（VI）重量法」: JIS G1218）について作製したデジタルコンテンツのTOPページの一部を図3に示す。操作の概要と適用範囲か示されている。左端に分析法全体を箇条書きに分類している。各項目にリンクが張られており、更に詳細な説明へとアクセスすることができる。例えば、操作の全様をクリックすると、「資料溶液の調製」、「モリブデンの沈殿生成」、および「沈殿の秤量」といった各操作の概要を説明する画面に移る。この三つの個別操作には、左端のメニューから直接アクセスすることができるようになっている。この個別操作をクリックすると、具体的な操作フ

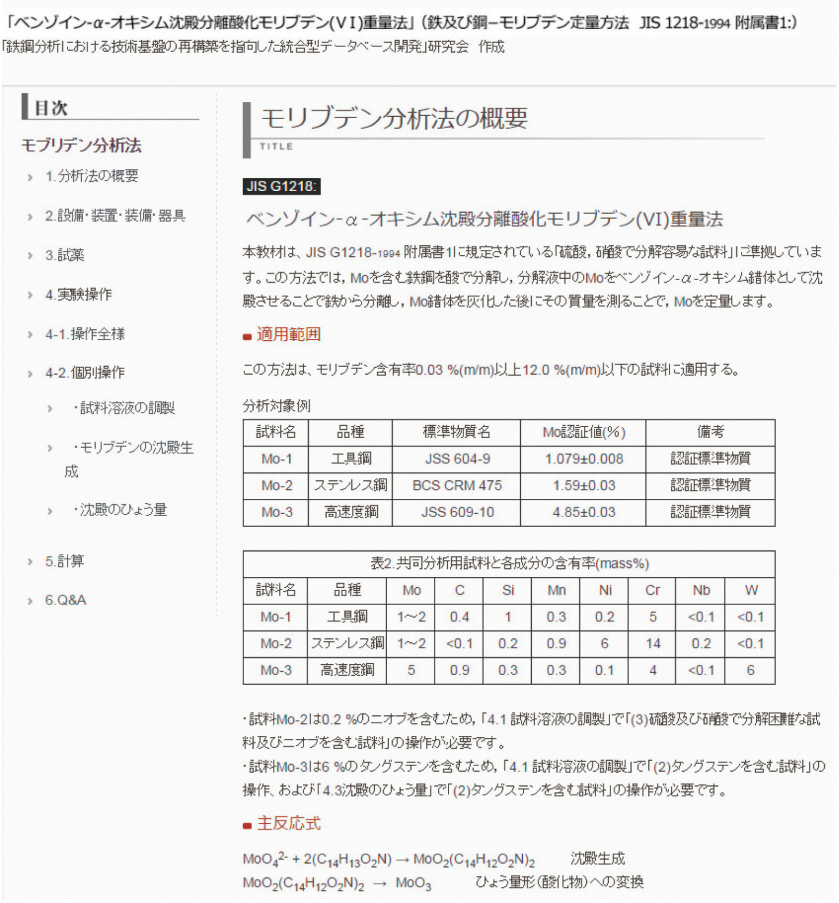

図3　デジタル教材(Mo 分析法) のトップページ

ローを示した画面へと移る。このフローの中には、サムネイル（リンクを張った小さな画像のアイコン）が配置されており、操作手順のビデオ映像を見ることができるようになっている。左端メニューバーの最下部にはQ＆Aが用意されている。このQ＆Aは、「熟練技術が必要な分析手法の技術伝承」技術検討会に寄せられた各元素の分析法における質問に対して本研究会で回答を準備したもので、必要に応じて、操作手順へのリンクが張られている。このように、HTMLをプラットフォームとすることで、分析法の修得にあたり、操作全体の概要を掴むことも、個別の操作について詳しく確認することも容易にできるようになった。

4.2　熟練を要する分析技術に対する化学的な検証

選定した4つの分析法に対して、各委員が行った研究成果を以下に述べる。

P吸光光度法では、モリブデンブルー法によるリン酸の吸光光度定量ではモリブドリン酸の安定した生成が重要な鍵となる。モリブドリン酸の生成は反応温度、反応時間、試薬濃度などに影響されるので、測定値の精度を保つにはこれらの条件を可能な限り一定に保つ。そこで吸光光度法における分析値の精度を向上させるために、FIA（フローインジェクション分析法）を適用した。FIAでは一連の流れの中で呈色反応が起るため、たとえ反応が完結していない条件でも精度の高い分析が行える。このような特長により、FIA は自動分析法の開発において重要な地位を占めてきた。鉄鋼中のP分析のために構築したFIAのシステムを構築した。このフローシステムでは酸分解処理をした空試験液をキャリヤー溶液として流し、発色剤である亜硫酸水素ナトリウム、七モリブデン酸六アンモニウム硫酸溶液、硫酸ヒドラジニウムを合流させる。バルブを介して酸分解された鉄含有P標準溶液あるいは試料溶液100 μLを注入し、825 nmにおける吸光度を測定した。FIAシグナルは直線性、併行精度ともに良好であった。BAM（ドイツ連邦材料試験研究所）標準試料中のPを定量したところ、保証値とよく一致した。

Ni重量法ではマスキング剤としてクエン酸が共存する条件におけるNiージメチルグリオキシム錯体の生成条件をシミュレートすることで、JISで採用されている条件が錯形成の最適条件内に収まっていることを検証した。pH6.0および7.0において、沈殿剤であるジメチルグリオキシムの濃度がニッケル化学種の存在割合に及ぼす影響について図4に示

す。いずれの条件においても、支配的に存在するNi化学種は、ジメチルグリオキシムとの1：2錯体とクエン酸錯体（1：1）である。pH6.0ではジメチルグリオキシム錯体の生成は不十分であるものの、pHが7.0になるとDMG濃度0.003 mol/Lでほぼ完全にジメチルグリオキシム錯体が形成されることがわかる。JISで採用されている条件（pH：9.0, [DMG]/[Ni] >5）はこれよりはるかに、ジメチルグリオキシム錯体の生成に有利であることから、Niはほぼ完全に錯体として沈殿していることが裏付けられた。

Mo重量法では恒量条件における坩堝の質量変動が定量結果に影響を及ぼすことが予想される。そこで、異なる種類の坩堝を用い、恒量条件においてその質量がどのように変化するのかについて検討した。その結果、釉薬なしの磁器るつぼでは加熱や室温での放置により重量の変動が大きく、各るつぼの個体差も大きいことがわかった。これに対して釉薬ありの磁器るつぼでは質量の変動が釉薬なしの磁性坩堝に比べて少ないことがわかった。

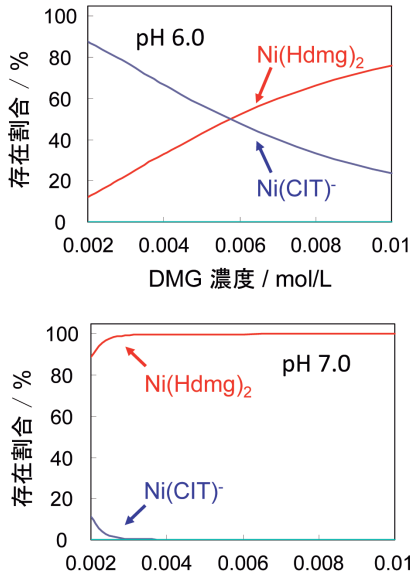

図4　Ni 化学種の存在割合のシミュレーション

Cr滴定法では、あらかじめ試料に含有されるクロム全量を一旦Cr（VI）に酸化し、次に硫酸アンモニウム鉄（II）溶液でCr（III）に還元している。ついで未反応のFe（II）を酸化剤で滴定する。鉄鋼試料の分析においては酸化剤として過マンガン酸カリウム（$KMnO_4$）が用いられているが、ニッケル合金試料の分析では酸化剤として重クロム酸カリウム（$K_2Cr_2O_7$）[7]が用いられている。前者は滴定終点の判別が難しく、一方後者は指示薬を用いるため終点の判別は容易であるがバナジウム含有試料には適用不可である。バナジウム含有試料に適用可能でかつ終点判別が容易な鉄鋼含有高濃度クロムの定量法の開発を目的として、過マンガン酸カリウムや重クロム酸カリウムよりさらに酸化力が強い硫酸セリウムアンモニウム（$Ce(NH_4)_4(SO_4)_4$）を用いた酸化還元滴定法[9]を検討した。しかし二クロム酸カリウムと同様に硫酸セリウムアンモニウムを用いた場合でもバナジウムを酸化することができないことを確認している。バナジウム含有試料にも適用できるようにすることが課題である。

また、Cr滴定法においては、色彩系を用いることで終点において滴定液が示す微妙な色調の変化を数値化した。これにより、この滴定の終点はJISに記載されているような「淡青色→赤紫色」ではなく、「淡青色→灰色がかった暗色→赤紫色」と変化していることが判明した。この変化は、熟練した技術者が終点を判別する際の“赤紫色でなく、暗色となった瞬間”という感覚的な判断と一致している。このように、熟練者の持つ感覚である「終点の直前において滴定液の色が一瞬くすむ」という現象を数値として捉えることに成功した。このときの変化を図5に示す。この研究成果は、Cr分析のデジタル教材に反映されている。

上記の活動の他にも、“標準規格から見た鉄鋼分析の前処理”についての調査研究、“動画を中心とした実験技術教材の

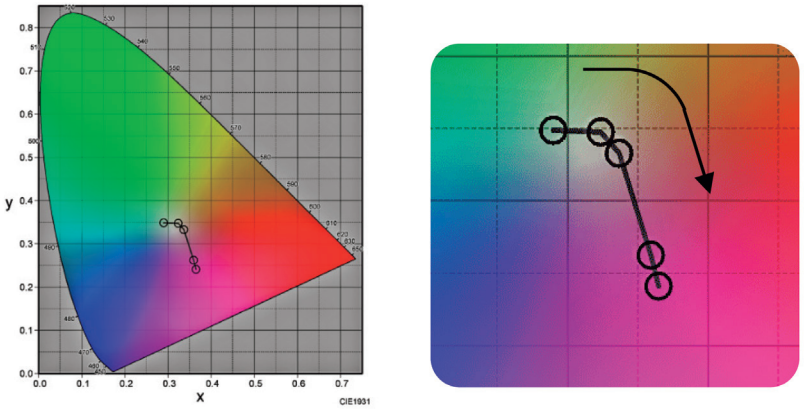

図5　Cr 滴定における xy 色彩ダイヤグラム

開発”、“熟練技術者へのブレインコピーインタビューとその考察”、および“JISの読み方”に関する検討などを行った。

5 まとめと展望

本研究会では、鉄鋼分析に関して高度な熟練技術を取り上げ、それを効率的かつ効果的に継承するための方法論を開発することを目的とした。具体的には、熟練を要する高度な鉄鋼分析法として、4つの分析法（Ni重量法、Mo重量法、Cr滴定法、P吸光光度法）を取り上げ、それについて、データベース化を指向したデジタル教材を開発した。

開発したデジタル教材のメンテナンスやアーカイブ化など、新たに議論する必要のある事項が明確になった。特に、知的財産の取り扱いや公開方法、公開の範囲などについては部会の範囲を超えて方針を議論していく必要がある。それとは別に、データベース化を進めるためには、新しいデジタル教材の開発を順次進める必要がある。しかし、ルーチンにデジタル教材を開発するのにII型研究会は必ずしもふさわしくない。これについても今後議論していく必要がある。

以上のように、本研究会を終了するのにあたり様々な課題が明らかとなった。これらの課題を議論することに加え、開発したデジタル教材のメンテナンスやその活用をために、平成27年度から、「鉄鋼分析技術修得のための可視化教材のデータベース化」フォーラムが発足した。このフォーラムでは、開発したデジタル教材に対するアンケート調査やウエアラブル端末として開発されたゴーグル型端末を用いたデジタル教材の活用試験などを行っている。

6 最後に

本研究会のKick off meetingは2011年の3月18日に鉄鋼協会会議室（当時は神田）にて行った。東日本大震災の発生からちょうど一週間が経過していた。研究会活動の拠点のひとつであった東北大学も甚大な被害を被った。本来、Kick off meetingを行える状態ではなく出鼻をくじかれた格好になったしまった。それでもどうにか新たな研究会の発足を年度内に済ませることができた。震災からの復旧と契約の遅延が重なり、初年度はほとんど活動することができなかった。幸い活動の延長を半年間認められ、どうにか研究会を終了することができた。これも鉄鋼協会事務局をはじめとする関係の皆様の尽力によるものと感謝に堪えない。

最後に震災により亡くなられた方の御冥福を心からお祈りすると同時に、一日も早い復興を祈念する。

参考文献

1）中村肇, 高野研一：社会技術研究論文集, 11 (2014), 82.
2）五十嵐晃, 大野宏, 中部昇, 今泉祥子：工業技術研究報告書（新潟県), 38 (2009)
3）小西正躬, 中野孝一, 今井純：鉄と鋼, 97 (2011), 326.
4）鳩野逸生, 横田勝俊, 福永詩文：鉄と鋼, 97 (2011), 347.
5）JIS G1214-1998：鉄及び鋼－りん定量方法
6）JIS G1216-1997：鉄及び鋼－ニッケル定量方法
7）JIS G1217-2005：鉄及び鋼－クロム定量方法
8）JIS G1218-1994：鉄及び鋼－モリブデン定量方法
9）芦野哲也, 永井満家, 高田九二雄, 我妻和明：CAMP-ISIJ, 26 (2013), 1048.

(2016年2月9日受付)