

湿式化学分析の基盤をなす高度な技術を いかに継承・発展させていくか —鉄鋼化学分析の視点から—

分析値の精確さは、高度な分析技術によって支えられている。ところが、我が国では分析の分野にかかわらず、様々な産業において高度な技術を保持している熟練技術者が既に退職期を迎えてから久しい。熟練技術者の退職による技能の喪失は、我が国の技術体系の根幹を揺るがしかねない。そこで本稿では、我が国の基幹産業の一つである製鉄業に着目し、その中で用いられている湿式化学分析を例にとり、湿式化学分析における高度な技術をどのように継承発展させていくかについて、分析化学とのかかわりから考える。

上 原 伸 夫

1 はじめに

湿式化学分析は溶液内で生じる化学反応に基づいてその溶液に含まれる分析対象物の濃度を決定する方法の総称である。機器分析が黎明期を迎える以前の1960年代頃まで、湿式化学分析は元素分析の主流であった¹⁾。しかしながら、分析法に迅速さといった性能要求に同期するように機器分析が発展すると、湿式化学分析は次第に機器分析にとって代わられるようになった。

現在、湿式化学分析はどんな場面で使われているのだろうか。機器分析と比較した時の湿式化学分析の優位性は、高い精確さ（精度と真度）である。とくに、重量分析法や滴定に代表される容量分析法は、それぞれ測定された質量や体積から直接、含まれている分析対象物の量（物質質量そして質量）を算出できる。このような、検量線を用いない分析法は絶対分析法に分類される。絶対分析法は機器分析の検量線作成のために必要な標準物質の値付けにも欠かせない。鉄鋼分析の分野を例にとると、湿式化学分析は今でも認証標準物質の値付け、鉄鉱石に含まれる全鉄の精確な分析、あるいは工程管理分析により異常と判定された試料の精密分析に使われている。そしてこれらの分析において、湿式化学分析を代替することのできる汎用的な分析法は存在しない。このような特長から、今後も湿式化学分析の必要性は変わらないものと考えられる。しかしながら、製鉄業をはじめとする素材産業を支えている分析法に対する迅速さ、簡便さ、そして高感度といった要求は、この先もさらに強くなるものと予想される。これに加えて、作業時の安全性の確保は企業活動において最重要課題の一つであることから、分析業務においても毒物、劇物といった危険な薬

品はなるべく使用しないようになっている。以上の状況を勘案すると、企業における分析では手間のかかる湿式化学分析が避けられる、という傾向は時代の趨勢なのかもしれない。

現在、湿式化学分析は技術的には成熟期にある。その一方で、実際の分析現場では湿式化学分析が使われる頻度が次第に減りつつある。しかしながら、精度や正確さといった湿式化学分析の優位性は普遍的であることから、湿式化学分析の技術レベルを今後も維持、発展させることが求められている。化学分析の技術レベルを維持、発展させていくことに、分析化学はどのような形で寄与できるのだろうか。分析化学に対する新たな課題のように思われる。

2 湿式化学分析における高度な分析技術

湿式化学分析の技術レベルを維持、発展させることに対して分析化学がどのようにかかわっていくのかを考える上で、湿式化学分析を行う際に必要とされる高度な分析技術とはどのようなものかを明確にしておくことは重要と思われる。ここでは代表的な湿式化学分析である滴定法（容量分析法）を例に取り上げて考える。

現在でも多くの大学の化学系学科では、学生実験において滴定法や重量法を扱っている。このことから判断すると、滴定法や重量法は初学者でも習得しやすかつ重要な分析であると一般的には見なされている。これに対して、鉄鋼関連の企業技術者へのアンケート結果からは、滴定法や重量法は高度な分析技術を要する分析法であると認識されている。両者の認識の違いはどこからくるのであろうか。日本鉄鋼協会において著者らが行った取り組み²⁾によれば、この認識の違いは次の三点に起因しているように思われる。

第一に、分析操作に対する要求水準が学生実験と企業での分析とでは異なる。例えば、企業での分析の場合、

How to Sustainably Develop Sophisticated Techniques Organizing the Fundamentals of Wet Chemical Analyses ?

—From the Viewpoint of Chemical Analyses of Iron and Steel—

スループット（単位時間当たりの処理能力）は重要な因子であり、スループットを上げるために、しばしば複数種の試料の分析が同時に行われている。ここでは、各試料における各操作段階において、迅速かつ確かな判断が求められる。これには経験あるいは熟練が必要となる。これに対して、学生実験では操作の理解や習熟を目的としているため、一つの試料をじっくりと時間をかけて分析する。

第二に、学生実験と企業の分析とでは対象とする試料が異なる。学生実験の性質上、取り扱う試料には性状がわかっている比較的簡単な組成のものが選択される。これに対して、企業での分析の場合、ニーズに対応した的確な分析が試料ごとに行われる。

第三に、得られる分析値に求められる質が学生実験と企業の分析とでは全く異なる。企業の分析では、報告される分析値が企業のその後の様々な活動に影響を与えることになるので、自ずと高い信頼性が求められる。

以上見てきたように、企業における分析には学生実験とは比べものにならないシビアな要件が課せられている。湿式化学分析の場合、このレベルで分析を行うには高度な技術が要求される。これが、湿式化学分析が企業の分析において“難しい”と思われている理由であると推測される。

それでは、湿式化学分析における高度な分析技術とは具体的にはどのようなものであろうか。上記の例から考えると、1) 複数の試料を同時に扱うことができ、2) それぞれ試料の各分析操作を的確にかつ迅速に行い、3) 様々な組成の試料にも対応でき、そして4) 信頼性の高い分析値を得ることのできる技術、ということに集約できるであろう。ただし、湿式化学分析を構成する各単一操作はじっくり取り組めば大学生でも扱うことができる点に留意すべきである。この点において、高度な分析技術は、人間国宝（重要無形文化財の保持者）が持っているような技能とは本質的に異なる。“技能 (skill)” と “技術 (technique)” との違いについては、後に考える。

3 湿式化学分析における高度な分析技術の具体例

ここでは前項にて言及した湿式化学分析において高度な分析技術がどのように使われているのかについて考える。具体的な例として、酸化還元滴定による鉄鉱石中の鉄含有量の分析法を例に挙げる。この方法は日本産業規格に JIS M8212³⁾ として採用されている。分析法の概要を図1に示す。また、以下に簡単に手順を説明する。塩酸を用いて鉄鉱石を分解したのち、塩化スズ (II) 溶液と過剰量の塩化チタン (III) 溶液を加えて、溶解している鉄をすべて二価に還元する。この際、余剰となった塩化チタン (III) だけをニクロム酸カリウム溶液で処理する。処理の完了を判定するのに、指示薬としてインディゴカルミンが添加される。指示薬の青色が5秒

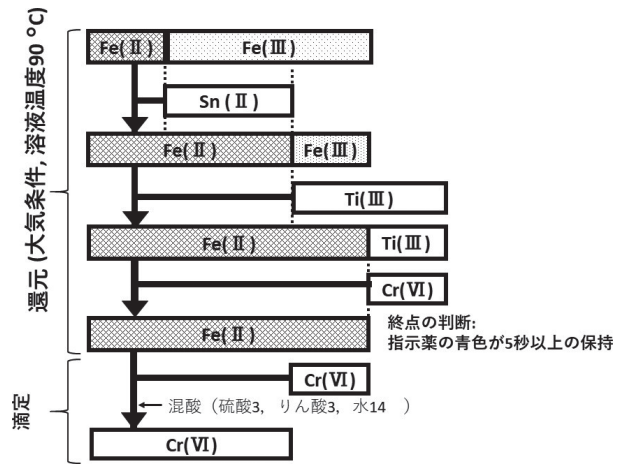


図1 全鉄定量のためのプロトコル

保持された時点において、すべての鉄が二価に還元されたものと判断する。次いで、濃度が決定されているニクロム酸カリウム水溶液を用いて、試料中の鉄 (II) の物質量を酸化還元滴定で決定する。この方法では特に、鉄鉱石分解液中に含まれる鉄をすべて二価に還元する工程において、過不足なく厳密に鉄を二価にするのに高い技術が求められる。特に、90~95℃の試料溶液に還元剤、指示薬、酸化剤を速やかに加え、指示薬の変色を的確に判断する必要がある。

上記の作業を熟練技術者が行っている状況における熟練技術者の所作の概念図を図2に示す。ここでは熟練技術者の心の持ちようを内部情報空間と呼ぶことにする。熟練技術者が持っている技能や技術はこの内部情報空間に“知”として格納されている。熟練技術者は五感を通して収集した試料の情報を内部情報空間に格納されている“知”と参照することにより、瞬時的に的確な判断を下し対処するという作業ループを意識することなく行っている。もう少し具体的に見てみると、熟練技術者は分析手順の全てを熟知していて、正常に反応が進んでいる時のイメージを重ねながら反応の進行を観察している。実際の反応が正常なイメージとずれた場合には、これまで体系化したトラブル事例と参照することにより、そのずれの的確な対処法を探索する。これらの思考はすべて内部情報空間に格納されている“知”に基づいて行

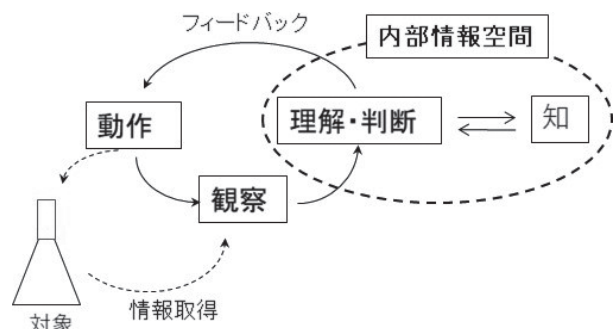


図2 熟練技術者の所作

われている。例えば、上述の JIS M8212 における指示薬の変色による還元が完了した時点の的確な判断は経験によるところが大きい。参照する情報（知）が内部情報空間に格納されているため、迅速な判断が可能となる。プロドライバーの運転をイメージするとわかりやすいかもしれない。このように考えると、熟練技術者が持っている内部情報空間が高度な技術の源泉と思われる。

4 湿式化学分析の基盤をなす高度な技術の言語化

さて、熟練技術者の退職に付随する技能の喪失の問題は 2007 年に顕在化したことから、2007 年問題と呼ばれていた。その頃から、様々な技術継承に関する取り組みが活発に行われてきた。具体的には、技術講習会の開催、映像資料の作成⁴⁾、そして詳細なマニュアルの作成⁵⁾などが挙げられる。筆者らも湿式化学分析の技術継承を目的として、HTML をプラットフォームとした可視化教材を作成した²⁾。これらの取り組みは言語化できる“知”の継承に対しては有効である。では、言語化できない“知”を継承するにはどのようにしたらよいのであろうか。

熟練技術者が持つ技能、および技術といったものを定量的に取り扱う試みも行われている⁶⁾。内部情報空間における知のイメージを図 3 に示す。海野によると⁷⁾、技術者の持つ操作に関する知は言語化できるものと言語化できないものとに分けられる。言語化できる知は“技術 (technique)”と呼ばれ、マニュアルやその解説書といった文書や映像によって伝達することができる。これに対して、言語化できない知は“技能 (skill)”と呼ばれる。余談になるが、非言語系の知は一般に暗黙知と呼ばれる。技能は言語を介して伝達することが難しく、教育訓練により継承されるものと考えられている⁸⁾。事業所などで行われている OJT (On the Job Training) や本会で開催している分析技術講習会などは教育訓練の好例であろう。

興味深いことに、海野は「技能と技術は互いに孤立し

ているわけではなく、非言語系の技能の一部は言語化することにより技術として継承できる」と指摘している⁷⁾。この考え方は湿式化学分析を行うための高度な技術の継承に対して重要な示唆を与える。例えば、化学的な裏付けが不十分な操作の場合、精確な値が得られるような条件を経験的に選択している場合がある。このような場合、各操作における判断は技術者の経験に基づいている。この時、分析操作を行った際に得られる経験は非言語系の知として格納される。このような操作に対して化学的な裏付けを十分に行うことができれば、経験に頼ることなく誰でも最適条件において確実に操作ができる。得られた結果は言語系の知として継承できる。湿式化学分析がほぼ確立した 1960 年代頃に比べると、現在では各種高性能な分析機器が利用できるようになっているだけでなく、関連する科学分野の進展も目覚ましい。これに加えて、コンピュータの発展も著しい。このようなツールを駆使することにより、これまで経験的に行われてきた分析操作をより詳細に化学的に検証できるものと考えられる。

そこで、筆者らが行った JIS M8212 に対する化学的な検証⁹⁾を例にとり、もう少し詳しく考えてみる。滴定の前段階の鉄をすべて二価に過不足なく還元する工程では、大気雰囲気下において塩化スズ (II) による大部分の還元が続いて過剰量の塩化チタン (III) による還元、そして余剰のチタン (III) をニクロム酸カリウムで処理している (図 1)。このメインの反応に隠れて、溶存酸素に関連する酸化還元反応、鉄 (III) との酸化還元により生じたスズ (IV) とチタン (III) との酸化還元反応が進行している。これらの反応に加えて、共存元素として、銅とバナジウムがメインの酸化還元反応を干渉する。これらの酸化還元反応について詳細に検討した結果、指示薬による色調の変化ではなく、窒素雰囲気下において液電位を測定することにより、生じている酸化還元反応を厳密にモニターできる。これにより JIS M8212 に規定されている塩化チタン (III) を過剰に加える手順ではなく、鉄が過不足なくすべて二価になるまで塩化チタン (III) を添加することができるようになった。これにより、スズの酸化還元反応に起因する干渉だけでなく、銅やバナジウムによる妨害も抑制できた。このように液電位をモニターすることにより、“指示薬の青色が 5 秒間保持される”といった感覚的な判断に頼ることなく正確に鉄を還元することができるようになった。この成果は、高純度な窒素ガス、高温においても安定な電位を示す高性能な電極、およびコンピュータによるデータの自動取り込みと解析によって可能となった。

上記の例は、湿式化学分析の操作を化学的に検証することにより、感覚的な判断を数値化することができることを示している。このように、湿式化学分析の操作における非言語系の技能を言語で継承できる技術へと変換す

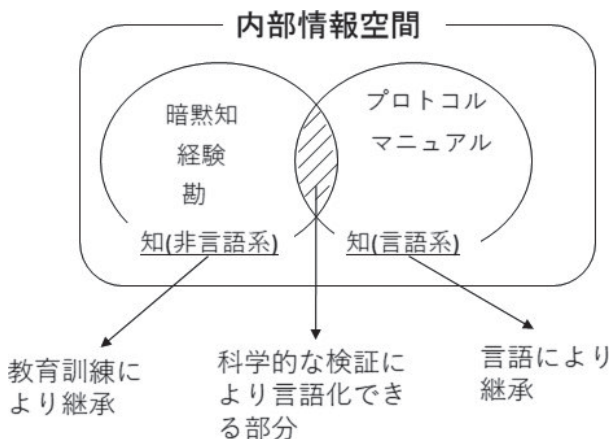


図 3 内部情報空間における知の分類

るため、化学的な検証は重要な作業であり、それには分析化学が重要な役割を果たす。

5 湿式化学分析の基盤をなす高度な技術の継承と発展に対する課題

これまで見てきたように、湿式化学分析の基盤をなす高度な技術は非言語系の技能と言語化により継承できる技術とに分けることができる。両者の境界には、非言語系でありながら言語化により技術となりうるものが存在する。これらの技術の中には化学的な検証を通して言語化できるものがある。分析化学はこの検証作業に対して有効である。

しかしながら、湿式化学分析のうち感覚や経験に頼っていた作業に対して分析化学的な検証を行う際、私たちは次の二つの課題に直面する。一つ目はこの作業を誰が行うのかということ、二つ目はこの作業が分析化学の新規な研究として評価されるのかどうかという点である。化学的な検証を行うことはルーティン分析を主に担当している企業の技術者には負荷が大きいように思われる。では大学教員や研究所の研究者ではどうであろうか。この場合、二つ目に挙げた“新規な研究としての評価”という問題を考えなくてはならない。大学教員や研究所の研究者に成果主義が導入されるようになって久しい。研究者個人にとって成果主義の下では新規性が評価されにくい研究を行うことはリスクを伴う。既存の技術体系の再構築に対して、学術的な意義を見いだす、あるいは付与する必要がある。

湿式化学分析を精確に行うための高度な技術は、我が国の知的基盤を構成する重要な要素の一つである。現在、無機元素を定量するための湿式化学分析に携わる大学教員や研究所の研究者は非常に少なくなっている。近い将来、湿式化学分析のうち感覚や経験に頼っていた作業に対して分析化学的に検証する人材が枯渇してしまう可能性が懸念される。そうなる前に、各分野において重要な湿式化学分析の手法に対して、熟練技術者の“技能”に頼ることのなく、言語による継承が可能な“技術”として体系化する取り組みを行うことが望まれる。

6 まとめ

最後にまとめとして、喪失した技術を復活されるためにはどうしたらよいかについて考えてみることにする。そのヒントを幕末に造られた反射炉に見ることができ。幕末以前の日本の製鉄技術では大砲を製造するこ

とはできなかった。大砲の製造のために必要な純度の高い鉄の製造が難しかったためである。当時は外国からの技術者を招へいすることのできない時代であったため、日本の技術者たちはオランダの技術書『鉄煩鑄鑑図』を参考に、自分たちだけで純度の高い鉄を製造できる反射炉を造った¹⁰⁾。今も各地に残っている実証炉跡を訪ねてみると、当時の技術者たちが数々の試行錯誤、工夫を行っていた様子を知ることができる。文献だけで反射炉を造り上げてしまった当時の技術力には感嘆するしかない。前出の海野は、「特に熟練技能の継承という点で重要なのは、熟練技術者の創意工夫であり、経験に基づく総合的な判断力であり、そしてそれを実践する能力である。」と述べている⁷⁾。こうした史実から、筆者は情報さえあれば熟練技術者の創意工夫と情熱で技術は復活できると考えている。その際、良質な情報が多数あるに越したことは無い。技術継承にかかわる取り組みはそのための有益な情報を与えるであろう。ただ、喪失したものを復活させるには多大な労力と時間を要する。できるのであれば、高度なレベルを保ったまま技術が継承されるに越したことはない。

文 献

- 1) 日本学術振興会製鋼第19委員会編：“新版鉄鋼化学分析全書第1～10巻”，(1963)，(日刊工業新聞社)。
- 2) 上原伸夫：ふえらむ，21，249，(2016)。
- 3) JIS M 8212，鉄鉱石—全鉄定量方法 (2005)。
- 4) 檜山敦，浅田和宏，並木秀俊，宮廻正明，廣瀬通孝：ヒューマンインタフェース学会論文誌，12，249 (2010)。
- 5) 亀山雄高，水谷正義，成瀬哲也，狛 豊，佐々木慶子，大森 整，澤田浩之，松木則夫：砥粒加工学会誌，53，741 (2009)。
- 6) 松本則夫：シンセシオロジー (Synthesiology)，3，47 (2010)。
- 7) 海野邦昭：精密工学会誌，81，30 (2015)。
- 8) K. A. Ericsson, R. T. Krampe, C. Tesch-Römer : *Psychol. Rev.*, 100, 363 (1993)。
- 9) 門脇優人，柳原木綿子，稲川有徳，上原伸夫：鉄と鋼，107, 566 (2021)。
- 10) 中野俊雄：鑄造工学，80，494 (2008)。



上原伸夫 (Nobuo UEHARA)

宇都宮大学工学部 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東8-15-1)。東北大学大学院工学研究科博士前期課程修了。博士(工学)。《現在の研究テーマ》物質の持つ分離・計測機能の開発とそれに基づく高性能分離計測手法の構築。《主な著書》“これからの環境分析化学入門”，(講談社)。《趣味》軽ドライブ，温泉巡り。

E-mail : ueharan@cc.utsunomiya-u.ac.jp