

特別講演

□第171回春季講演大会浅田賞受賞記念特別講演
(平成28年3月23日)

鉄鋼関連物質の異分野融合研究

Multidisciplinary Research for Iron, Steel and Related Materials

鈴木 茂
Shigeru Suzuki

東北大学
多元物質科学研究所
教授



*脚注に略歴

1 はじめに

最近、複数の専門分野の間での学際化（異分野融合）が推奨されており、文系と理系にまたがる文理融合という分野もある。鉄の製造技術を歴史や文化と結び付けた異分野融合研究もあり¹⁾、融合により色々なことを発想させてくれる。歴史的な鉄の大型建築物として産業革命後期に建てられたエッフェル塔（1889年竣工；図1）がある。この塔は錬鉄でできており、その色を見ると耐候性鋼を連想させる。実際にはこの塔は塗装されているが、その色は東京タワーのような紅白のツートンカラーではなく鉄さび色をしている。鉄さびは多くの金属酸化物の中でも独特の色をしており、その成分には様々な結晶構造や形態のものがある²⁾。フランス人はこの鉄さび色がパリの街に調和すると感じているようだ。



図1 錬鉄製のエッフェル塔。耐候性鋼を連想させるが、表面は塗装されている

鉄鋼の使われ方は各国の文化などに関わっているが、鉄鋼を共通的に利用するときには、学術や技術の面で共通的アプローチが必要である。たとえば鉄鋼プロセスでは、様々な反応物や生成物等を分析したり、半製品や製品等を評価したりする。これらの分析や評価では各種の分析法や試験法等が用いられるが、それらの方法で得られる結果は異なる機関の間で同様でなければならない。さらに、学術的には測定や解析の結果を何らかのモデルにより整理することが多く、それらの過程でも共通的視点が必要となる。

本稿では、著者がこれまで経験してきた幾つかの例を挙げながら、鉄鋼関連分野における共通的技術の必要性、それによる結果と目的とする実態との関係、信頼性のあるデータ、不均一構造をもつ物質の評価における課題などについて述べてみたい。

2 鉄鋼業を支える基盤技術

2.1 共通的技術の必要性和課題

様々な物質の成分や特性等を評価し比較するには、尺度となる物理単位（度量衡）を用いて標準化された方法を用いる必要がある。これは、プロセス上の物質や実験室で作製した試料の評価において再現性良く定量的な結果を得るためである。その共通的技術を構築するためには、数多くの機関で利用できるように広く合意されたガイドラインを作成し、そのための標準物質等も必要になることが多い。さらに、目的の物質の全体的な特徴を明らかにする上で、一つの方法で得られる情報が不十分なことがある。そのような場合には、異なる方法を組み合わせて調べることも重要であり、分析方法毎に標準化する必要がある。

* 昭和56年東北大学大学院工学研究科後期課程修了した後に、東北大学金属材料研究所、新日本製鐵（株）第一技術研究所、同（株）先端技術研究所等を経て、平成13年に東北大学多元物質科学研究所の助教授となり、平成17年から同研究所の教授を務めている。

たとえば、薄鋼板上の亜鉛めっきや高温で生成する鋼板上の酸化膜の組成や厚さを迅速に定量的に分析するニーズがあり^{3,4)}、複雑な層構造をとる亜鉛めっきや酸化膜などに対し定量的に分析する方法が国際標準化されてきた。このような標準化活動は、華々しい研究に比べ地味であるが、工業分野だけでなく学術分野でも利用されている。このようなプロセス上の分析や試験は一般に迅速かつ効率的に行われることが望ましいが、過剰な分析や試験等を行うとコスト高になる。

一方、新規のプロセスや素材の研究開発においては、実験室やパイロットプラントでの反応などを制御する条件を明らかにする必要がある。工業的な原料や素材は不均一構造をもつ物質で構成されていることが多く、研究開発においてはそれらの複雑な反応過程等を精緻に調べることが求められる。一般にそれらの研究開発には時間がかかり、実験結果は他の特性データ等との整合性をもっていなければならない。このように、研究開発においても、分析値等は標準化された共通的な方法を用いて求めることが多い。

また、鉄鋼の製品や半製品を微視的に見ると、測定箇所によって分析値等に統計的なばらつきが出てくる。たとえば、実用的な鋼板の平滑性は十分でなく、それが鋼板の凹凸やめっき層の組成や厚さの分析値のばらつきに反映される。さらに、高分解能顕微鏡等で観察される多結晶材の組織（例えば結晶粒形状）は同じではなく、観察箇所によって組織の大きさ等にばらつきがある。共通的な評価技術等においては、各種の再現性や繰り返し併行精度等に関係する不確かさについて考慮する。このため、組織のばらつきの情報がこの不確かさの中に入ってしまう、同じ組織を持つ標準物質を作製することが難しくなるという問題がある。

さらに、共通的技術に対し学術分野等で独自技術が重要視されるが、独自技術の応用先は必ずしも広くないことがある。独自技術を共通的技術に展開するには、技術を開示し共通に利用できるようにするなどのユーザーからの様々な要望に応える必要がある。しばしば独自技術で物質を評価したという情報を目にするところがあるが、その技術が共通的でなければ一般の人は確かめようがない。また、独自技術のデータがスポット的で、当該物質を代表するデータになっていないことがある。つまり、試料中のばらつきの中で、都合の良い箇所だけを見ていることがある。いわゆる、「木を見て森を見ず」である。先端材料分野では、超格子のような原子レベルで制御した標準物質を利用することがあるが、その作製や評価に長い時間を費やすことになり、目的の試料の評価時間が少なくなるというジレンマも出てくる。

2.2 測定データと実態との関係

測定データ（例えばカウント数）と知りたいこと（例えば

濃度）との対応が単純な場合には、測定データから比較的簡単な換算により目的の値を得ることができる。しかし実際には、目的の情報が複雑な過程を経て測定データ（スペクトルなど）になることが多く、測定データに処理を施して、目的の情報を得ることになる。また、目的の信号強度と元素の濃度の関係が非線形になることがある³⁾。さらに、固体の表面分析などでは、表面に留まっている元素を分析するのか表面から飛び出た元素を分析するのかで信号強度と濃度の間の関係が異なってくる⁴⁾。

結晶構造解析における実空間と逆空間の関係も、簡単に実態をつかめない例であろう。少し複雑な場合として、結晶回折で得られる回折プロファイルの解析から、結晶中の転位密度等に関する情報を得ることがある。そのプロファイルの解析では、装置で測定されるプロファイルは目的情報の構造プロファイルと装置固有の関数のコンボリューションで表される⁵⁾。このように、装置を用いて実態（真実）を測定しようとすると、測定情報に何らかの関数が入ってくることが多い。もちろん、微小な箇所の解析においては組織のばらつきの効果も入ってくる。

さらに、結晶回折の測定結果には、結晶の弾性定数の結晶方位依存性の効果も入っており、結晶子や転位密度等の解析においてはそれらの効果も考慮される⁵⁾。また、多結晶材料の強度や延性を調べる引張試験では応力-ひずみ曲線が一本の線で表わされる。一方、結晶の変形に伴う格子ひずみを回折現象で調べると、弾性率の方位依存性の影響が見えてくるので、これらのデータにより変形機構に迫ることができる。

以上のように、慎重に吟味した信頼性のある実験や解析の結果はデータベースとして構築することが望まれる。データの正確さや信頼性は測定方法や条件に依存するが、そうしたデータは他の研究者や技術者にも受け継がれ利用してもらえと考える。

3 実態に基づく論理の組み立て

3.1 信頼性のあるデータベースの活用と課題

物質を構成する元素の分析値、温度、構造に関する信頼性のあるデータ等が得られれば、それらをモデルに従ってデータベースとして整理されることが多い。その例として、図2にFeとNbの酸素と炭素のポテンシャル図を示す⁶⁾。この例では、NbCの生成自由エネルギーがFeの炭化物のそれより低いことなどが示されているが、鉄鋼材料中のNbは炭化物のNbCを形成しやすいことと対応している。図2で示されている特性を利用して、フェロニオブにグラファイトを加え、メカノミリング処理によりフェロニオブ中のNbをNbCにして抽出する技術が開発されてきた⁶⁾。このプロセスでは、フェロニオブ中のFeを強磁性のbcc-Feとして分離し、それ

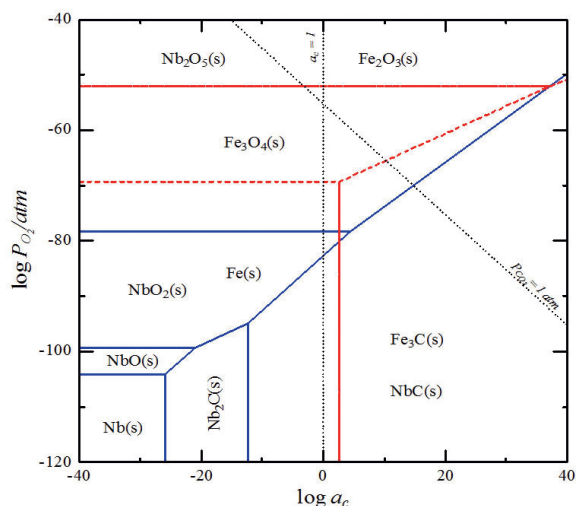


図2 373KにおけるNb-O-C系およびFe-O-C系のポテンシャル図⁷⁾

を酸溶解により除去することによりNbCを抽出するのに成功した。

このようなプロセスは、各種の熱平衡のデータや酸溶解のデータなどを基に大よその反応が予測でき、相同定や化学分析によりそれらの反応を実証することができる。しかし、固相、液相等の反応が混在しているために、一連のプロセスを最適化するには、実験により移動現象論（反応速度論を含む）的な検討も必要になる。ところで、図2を良く見ると高温でのデータを低温に外挿したプロットであり、正確さには課題があることが推測される。この種の熱平衡のデータには、一般に物質の非化学量論組成や欠陥レベルに関する情報は示されておらず、組成等が正確でないことが多い。さらに、高温のデータの精度には試料の素性や測定方法が影響してくることもある。

物質の構造敏感な特性には格子欠陥や不純物等の量が関わっているが、相平衡の自由エネルギーに様々な原子配列をとる結晶粒界や転位等の欠陥の寄与を入れるには限界がある。たとえば、粒界等には微量不純物元素が偏析しやすいことがあり、その偏析の程度は粒界構造等によって異なる⁷⁾。さらに、粒界付近等の原子配列の乱れによって局所的体積が変化し、単位体積当たりの原子数（濃度）に任意性が出てくることもある。

このように、構造敏感な特性に影響する欠陥のある原子配列の乱れに関する情報を一般の相平衡から読み取るのは困難である。要するに、物質の変化を明らかにするには、相平衡論、移動現象論、溶液化学、格子欠陥論、界面物性学等を融合させて考える必要がある。

3.2 不均一構造をもつ物質に対する見方

さらに複雑な不均一構造をもつ鉄鋼分野の物質として、製鋼スラグの溶出挙動について考えてみる。この溶出挙動では、

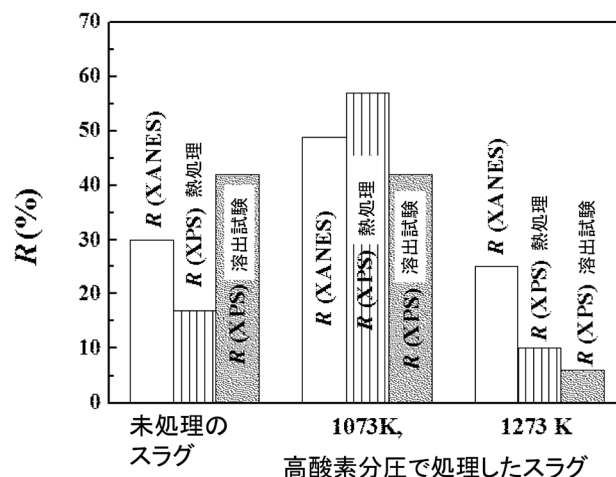


図3 異なる処理を施したスラグのCr K XANES とCr 2p XPSより求めたR値（Cr（VI）の割合）⁸⁾

固相、液相、気相の何れもが安定性に関係しており、共存する相の間での反応も複雑に起こる。このため、それらを調べるときには、幾つかの評価法を適切に使い分ける必要がある。

固相のスラグからの水への溶出においては、固相と液相間での不均一反応が起こるため、固相も液相も調べなければならない。固相の化学状態を調べる方法に、X線吸収分光法（XAFSの中のXANES）やX線光電子分光法（XPS）がある。図3は、ステンレス鋼の製鋼スラグを模擬して作製した試料に様々な熱処理を施した時のXANESとXPSの測定結果をまとめたものである⁸⁾。熱処理条件によってCrの化学状態（RはCr（III）とCr（VI）の中のCr（VI）の割合）が変化するが、バルクの平均情報を示すXANESの結果は表面敏感なXPSの結果と異なっている。これは、破碎したスラグ中の異なる化学状態のCrが不均一に分布していることを示唆している。さらに、XPSによる状態分析の結果は、水溶液中でのスラグの溶出試験によってスラグ表面のCr（VI）の量が減少している。このことは、溶出試験によりCr（VI）が溶け出していることを示唆している。

このように、異なる分析法による結果は必ずしも対応がつくとは限らず、その原因の一つとして測定情報が得られる領域が分析方法によって異なることが挙げられる。このように全体像を明らかにするには、異なる特徴をもつ複数の手法による結果を融合させる必要がある。

4 健全で寛容な人材の育成

情報は色々な過程を経て社会に伝わっていくが、それがどの程度正しく伝わるかが話題となることがある。東日本大震災のときに、被災地に震災に関する情報が届かず、翌日ごろに震災のニュースが新聞集配所の前に張り出されていた（図4）。



図4 東日本大震災を伝える壁新聞。紙面に出ていた数字は過小評価であった

この新聞には震度7、M8.8と出ていたが、あとで震度8、M9.0と訂正された。これらの数字は過小評価であったが、マスコミが懸命に伝えようという姿勢には敬意を表したい。

一方、平常時でも、派手なマスコミ情報が流れることがある。たとえば、「超高純度鉄は塩酸につけても溶けない」という情報が流れていた。この鉄は溶液で分析するときは酸に溶けるというから、不思議である。このような過大評価のマスコミ情報に庶民は惑わされがちであるが、科学的視点から情報は健全に伝えることが大切である。

最近の若者には、話題性のある研究を志向する者も、研究業績数が出やすい分野を志向する者も、また安定志向型の研究に興味を示す者もいると言われる。若手人材は各産業でバランス良く育成されるのが望ましいが、先進諸国において挑戦的な新規事業や技術開発に力を入れている中で、地味な産業に意欲のある若者を集めるのは容易ではない。若者には特定の専門性をもたせるのも良いが、ある程度の立場になれば大所高所からの公正で公平な見方や判断力も必要になる。最近は、「リーダーとなる人材の育成」を目標に掲げている大学があるが、それには足元だけ見るのではなく視野の広い謙虚な人材を養う必要がある。言い換えれば、異分野の動向も寛容に理解することにより、融合的な課題に取り組む能力を養成することが重要である。最近、研究開発における健全性や研究倫理（公正な研究の進め方やオーサiership等）の向上も求められる。こうした時代変化の中で、若者には学術や技術の面でしっかりとした基軸を形成し冷静に将来の社会のことを考えてもらいたいと考える。

5 おわりに

本稿では、鉄鋼関連分野における共通的基盤的な技術、それによる信頼性のあるデータ、それらに基づく多様な物質に対する考え方の例等を書かせていただいた。著者の経験や科学的な事実などから、帰納的なまとめを書いたつもりである。大学の授業では物質の反応や構造等に関する基本的なことが教えられ、そこでの資源や原料は比較的単純化されている。一方、多くの工業分野では原料等是不均一で多成分であり複雑な構造を取っているため、授業等での基本的な内容は、演繹的に展開されるであろう。今後は、鉄鋼関連技術においてはプロセス条件等が複雑になる一方で、様々な効率化も求められることが予想される。若者には、断片的な要素を学ぶだけでなく包括的に思考し、異分野融合研究を推進できるような能力を身に付けることにより、新しい時代を築くことを期待したい。

謝辞

著者自身もまだまだ学ぶことが多いが、鉄鋼関連技術やその周辺技術についてご教示を頂いた多くの皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 永田和宏：ふえらむ, 20 (2015) 7, 321.
- 2) Y.Waseda and S.Suzuki edited : Characterization of Corrosion Products on Steel Surfaces, Springer, Heidelberg, (2006)
- 3) S.Suzuki and K.Suzuki : Zinc-Iron Coatings, Glow Discharge Optical Emission Spectrometry, ed. by R.Payling, D.G.Jones and A.Bengtson, John Wiley & Sons, (1997), 575.
- 4) S.Suzuki and K.Kakita : J.Surf.Anal., 12 (2005) 2, 174.
- 5) S.Sato, T.Shobu, K.Sato, H.Ogawa, K.Wagatsuma, M.Kumagai, M.Imafuku, H.Tashiro and S.Suzuki : ISIJ Int., 55 (2015) 7, 1432.
- 6) J.Kano, Solihin, N.Sato, S.Suzuki, F.Saito, H.Suginobe and T.Shiohara : ISIJ Int., 49 (2009) 3, 458.
- 7) S.Suzuki, M.Tanino and Y.Waseda : ISIJ Int., 42 (2002) 6, 676.
- 8) K.Shinoda, H.Hatakeda, N.Maruoka, H.Shibata, S.Kitamura and S.Suzuki : ISIJ Int., 48 (2008) 10, 1404.

(2016年1月5日受付)