



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

異分野アプローチとの連携から拓く 高温融体プロセス研究の新展開

A New Prospect of Research on Physical Phenomena in
High Temperature Melts by Combinations with Dissimilar Approaches

鈴木賢紀

Masanori Suzuki

大阪大学
大学院工学研究科
准教授

1 はじめに

この度、日本鉄鋼協会会報委員会からのご依頼により、本記事への執筆を仰せつかることとなった。大変光栄であると同時に、研究紹介をさせて頂く貴重な機会でもあるので、筆者が最近、精力的に進めている研究テーマである「溶融スラグ中に晶出する化合物結晶の高温その場同定と結晶構造の解析」をご紹介したい。

まず、筆者と高温プロセス研究の関わりについて述べる。筆者は2004年に卒業研究を始めてから2010年に博士号を取得するまでの間、恩師である田中敏宏教授よりご指導頂きながら、多成分系ガラスの分相現象の解析とスラグからの微細孔材料の創製に関する研究を行った。同研究は酸化物系の液相に対する熱力学関数を液相線以下の低温へ外挿して、ガラス状態での相分離を予測するものであったが、同研究を通じてスラグの複雑な構造と熱力学的性質、および融体物性との関わりに興味を持つようになった。博士号取得後は豪・クィーンズランド大学にて2011年3月までポスドク研究員を務め、多成分系溶融スラグの粘度推算モデルの構築に関する研究を行った。同年4月に大阪大学にて助教に着任し、その後講師、准教授へと職位を変えながら、鉄鋼製錬を主とする材料製造プロセスの中で高温融体に関わる界面現象の観察、融体物性の計測と推算、および鉄鋼スラグの微視構造解析に関する研究を継続的に進めている。学部時代より、金属材料の熱力学に興味を抱き、研究に従事してからは金属製錬の過程で高温の液体が示す動的な挙動と、高温融体の物理的な性質に魅せられたことが、高温融体の関わる材料プロセスの研究に身を投じてきた理由と考える。

鉄鋼製錬、特に製鋼工程においては、高度に成分調整され

た溶鋼を製造するために、溶融状態の鉄とスラグを同時に扱う高温プロセスが多く存在する。高温融体に関わる現象を高温で直接捉えることは非常に難しく、凝固後の試料に対する分析を主として現象の説明がなされてきたが、未だ明らかでない現象も多く存在する。高温での溶鉄や溶融スラグの振る舞い、およびそれらの界面で起こる様々な現象が、後に得られる鋼材の品質を大きく左右するので、高温融体に関わる現象の解明は今もって重要な研究テーマである。

以下で紹介する研究テーマもまた、鉄鋼製錬において高温の溶融スラグの中で起きる現象に焦点を当てたものであるが、筆者がそれまで行っただけの異分野アプローチとの連携によって、研究を大きく進展させることができた。異分野とのめぐり逢いは、SPring-8にて長年ご活躍され、その後大阪大学の特任研究員としてご指導頂いた、梅咲則正氏からのご紹介がきっかけであり、筆者の研究に対する視野を広げるのに大変役立った。心より感謝申し上げる次第である。

2 溶融スラグ中に晶出する $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 基化合物固溶体の結晶構造の高温その場同定

本節では、鉄鋼製錬の溶鉄脱リン工程において溶融スラグ中に生成するダイカルシウムシリケート ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) 化合物の結晶構造を高温で直接同定した試みについて述べる。

鉄鉱石の還元により得られる溶鉄中には炭素 (C)、ケイ素 (Si)、リン (P) などの不純物が含まれ、特にリンは鋼材の加工性に悪影響を及ぼすので、溶鉄から極微量まで除去する必要がある。脱リン工程では、溶鉄中のリンは酸化されて P_2O_5 となり、溶融スラグへ移動するが、単一液相のスラグではリ

ンの分配能に限界がある。そこで、近年ではリン固溶度の高い固体化合物を液相スラグと共存させることによる脱リンが行われている。この場合、溶融スラグ中には $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 化合物が生成し、スラグ中の P_2O_5 は $3\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ となり、 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 化合物と固溶体を形成する。したがって、脱リン効率においては $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 化合物に対するP固溶度が非常に重要である。ただし、P固溶度は $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 化合物の結晶構造によって大きく異なる。

$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 化合物は、純物質の場合、常温～1123 Kでは γ 相(斜方晶)、1123 K～1698 Kでは α' 相(斜方晶)、1698 K～融点(2423 K)では α 相(六方晶)が安定である^{1,2)}。P固溶度について、過去に報告された $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ - $3\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ 擬二元系状態図³⁾(図1)によると、 γ 相、 α' 相に対するP固溶度は小さい一方で、 α 相は全組成範囲にわたって単一固溶体を形成する。この系は、低温で中間化合物、高温では全率固溶体が安定であるという、酸化物系では極めて稀な形態の相変化を示す。

脱リン反応に対する多くの既往研究⁴⁻⁸⁾は冷却後の試料に対する分析が主体であり、高温の溶融スラグ中に生成する $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 化合物は α 相であることを前提としていた。しかし、多成分系である実際の溶融スラグから晶出する $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 化合物が α 相であることを直接確認した研究はなかった。

筆者はこの研究に関わった当初、様々な異種元素を固溶する $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 化合物の性質に注目し、同化合物へ固溶した重金属元素の存在形態を調べる研究を行っていた⁹⁾。一方で異種元素がPの場合、 α 相では化学量論組成比の異なる $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ と $3\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ が全率固溶体を形成するので、 α 相の $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 結晶中へ固溶したP成分がどんな形態で

存在するのか興味があった。そこでまず、 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 化合物と $3\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ 化合物の混合粉末を1873 Kで長時間保持した後に急冷することによって、 α 相の固溶体試料の作製を試みた。しかしながら、特にP濃度の低い試料については熱処理と粉碎、混合を何度繰り返しても、試料は β 相(単斜晶)または α' 相ばかりで、 α 相は得られなかった。理由の一つとして、試料を熱処理した後に急冷する過程で高温相(α)から低温相(β or α')へ高速に相変態した可能性が考えられる。そこで、高温における α 相の存在を検証する必要があるが、熱処理および急冷による方法では検証ができない。

思案に暮れていた頃、ちょうど梅咲氏のご紹介で、SPRING-8でガス浮遊およびレーザー加熱装置と回折系を組み合わせ高温融体の構造解析を行うビームライン(BL04B2)の見学の機会を頂いた。同装置は、直径1 mm程度の試料を下方からガスジェット流によって浮遊させ、同時に CO_2 ガスレーザー光の照射によって局所加熱するものであり、試料を無容器の状態ですべて2300 K以上へ昇温することができる。さらに、浮遊試料へ高エネルギーのX線を透過させ、散乱光を2次元検出器へ導くことによって、微視構造を反映した動径分布関数を短時間で取得できる¹⁰⁾。筆者は上記の装置系を拝見し、「 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 化合物を溶融させて、その後徐々に冷却しながら、同時にX線回折をしたら、液相から晶出する α 相を高温その場で捉えられるかも?!」という発想を思いついた。図1の状態図に基づく、 α 相は液相からの初晶であるので、液相線温度以下に冷却した際に晶出する固相の回折図を高温その場で取得できれば、 α 相の存在を検証できると考えた。このような実験方法は過去に例がなく画期的であり、かつ高温プロセス研究と構造解析研究の連携によってのみ実現可能である。

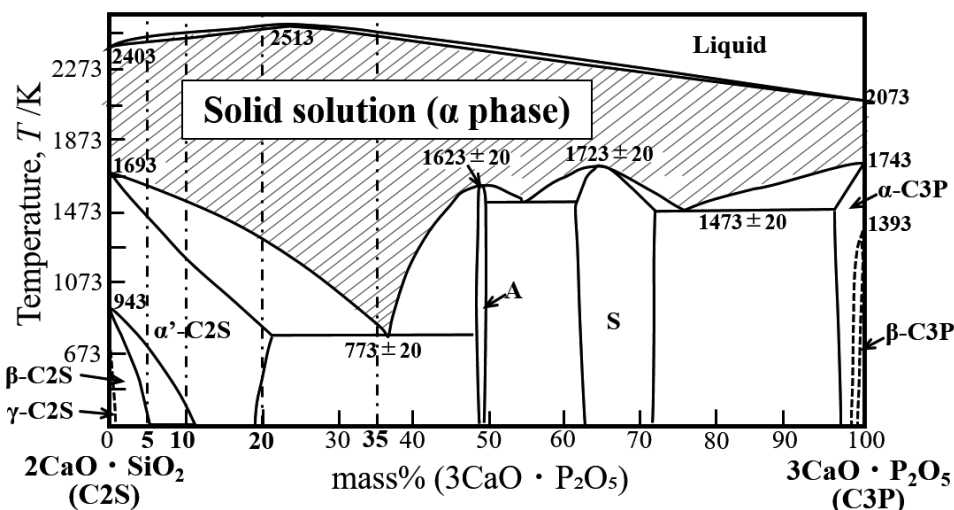


図1 Fixら³⁾による $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ - $3\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ 擬二元系状態図(文献11)より転載)

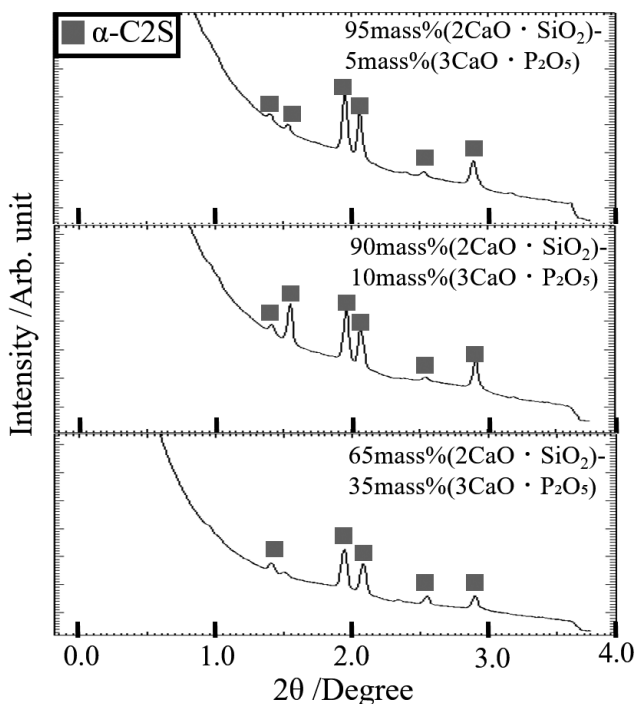


図2 2CaO · SiO₂-3CaO · P₂O₅系の融体から晶出した固相の高温その場1次元X線回折図

同装置系は、元々は液体構造の解析を目的としていたが、当時のビームライン担当者（小原真司氏：現NIMS）と一緒に予備実験を行い、2CaO · SiO₂化合物の融体を作製可能であることを確認した。次いで後任の尾原幸治氏とともに、SPring-8の一般課題へ数年間にわたって応募し続けた。不採択が続いたが、2017年ようやく採択され、実験の機会を得ることができた。

図2には筆者が初めて捉えた、P濃度の異なる2CaO · SiO₂-3CaO · P₂O₅系の融体から晶出した化合物の1次元X線回折パターンを示す（BL04B2で実施）。明瞭なピークパターンではなかったものの、広いP濃度範囲に対して初晶がα相であることを確認できた。

その後、晶出結晶の構造を詳細に調べるために、BL08Wビームラインにてさらに高エネルギーかつ高輝度なX線を使用して、高解像度なX線回折図の取得を試みた。図3には2CaO · SiO₂-3CaO · P₂O₅系の融体から晶出したα固相に対する2次元回折図を示す。実験方法の詳細については既報¹¹⁾を参照されたい。回折図には単結晶のα-2CaO · SiO₂化合物に対応する回折スポットが明瞭に観測される一方で、筋状の散乱も見られた。これは散漫散乱であり、結晶中の原子配列が不規則に乱れていることを示すと考えている。したがって、高エネルギーX線を用いた回折系と高温加熱装置を組み合わせた高温その場X線回折実験によって初めて、融体より晶出したα固溶体結晶が持つ特異な構造を見出すことができた。



図3 2CaO · SiO₂-3CaO · P₂O₅系の融体から晶出した固相の高温その場2次元X線回折図（文献11）より転載）

さらに筆者は、上記の方法を利用し、CaO-SiO₂-FeO_x-P₂O₅系の溶融スラグから析出する2CaO · SiO₂化合物に対する高温その場X線回折実験も行った¹²⁾。その結果、多成分系の溶融スラグに対しても晶出結晶のX線回折図を捉えることができ、初晶はα-2CaO · SiO₂相であること、また2CaO · SiO₂-3CaO · P₂O₅系の場合から回折ピーク位置が変位していることを明らかにした。後者に関しては、α-2CaO · SiO₂化合物へFe成分が固溶したことが理由と考えている。冷却後のスラグ試料に対する組成分析の結果、2CaO · SiO₂化合物中にはPのみならずFeが同時に、それぞれ10 at%程度含まれることが確認された。したがって、溶融スラグから晶出する2CaO · SiO₂化合物は、実際は多成分系の固溶体である可能性が高い。今後は、α-2CaO · SiO₂化合物へのFe固溶が、Pの固溶形態やP固溶度に及ぼす影響を調査していく所存である。

3 第一原理計算を用いた2CaO · SiO₂基化合物固溶体の高温相の結晶構造の解析

純物質のα-2CaO · SiO₂化合物の結晶構造について、中性子回折実験を行ったMummeらの報告¹³⁾によると、Ca²⁺とSiO₄⁴⁻錯イオンが規則的に並んだ対称性の高い構造が提示されている。一方、他の結晶相（α', β, γ）はα相よりも対称性の低い結晶構造が報告されている²⁾。α相は液相からの初晶であるにもかかわらず、なぜα相だけが規則的な原子配置を持つのか、またα相の結晶構造はなぜP成分を高濃度に固溶できるのか疑問である。一方、前節で示したように、融体から晶出したα-2CaO · SiO₂化合物においては一部の原子配列が不規則に乱れている可能性がある。そこで、α-2CaO · SiO₂

の結晶構造を高温に保持した場合、および微量のP成分を置換固溶させた場合の安定な原子配置について、第一原理計算による解析を試みた。

第一原理計算について、筆者は元々専門ではなく、最初は基礎原理や具体的な計算の手順すら理解できていなかった。ちょうど、梅咲氏の計らいにより、2017年に博士号を取得され、大阪大学へ特別研究員 (PD) として赴任された石井良樹氏 (現：兵庫県立大学) をご紹介頂いたことが、上記の研究を進める大きなきっかけとなった。石井氏は、熔融塩、酸化物ガラスおよび融体を対象として、イオン間の分極作用を力場に加えた分子動力学 (MD) 計算を専門としている。特に第一原理計算によって原子間に働く力の分布を求め、それを再現するように分極率の値を決定することによって、大規模な

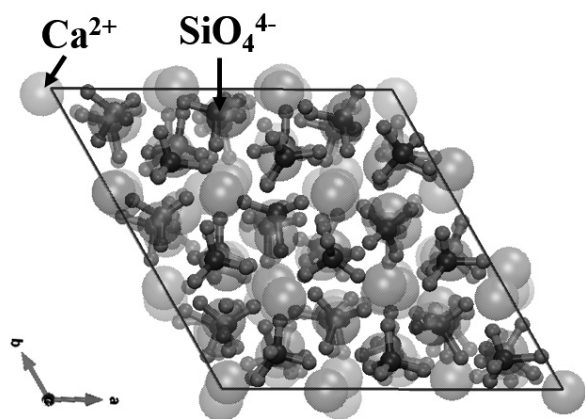


図4 α -2CaO · SiO₂ 結晶を 2000 K に保持した際の原子配置の第一原理 MD 計算結果

原子集団に対しても第一原理計算と同等の精度で微視構造のシミュレーションを実現している¹⁴⁾。筆者は石井氏と協力して、 α -2CaO · SiO₂ 結晶中の原子配置を第一原理および MD 計算によって評価することを試みた。以下に示す結果は、既に投稿され、掲載決定済み¹⁵⁾である。

図4には、Mumme らが報告した α -2CaO · SiO₂ 結晶構造を初期状態として、単位格子を $3 \times 3 \times 3$ 倍した 378 個の原子から成るスーパーセルを作成し、高温に保持した際の原子配置を第一原理 MD 計算によってシミュレートした結果を示す。計算には VASP 5.3.3 コードを用い、NVT アンサンブル (原子数、体積、温度一定) にて 298 K で保持した後、NPT アンサンブル (原子数、圧力、温度一定) にて目的温度まで徐々に加温し、1 ps 保持した。同図より、原子配置の揃った初期構造は安定でなく、 α -2CaO · SiO₂ 結晶中の各原子は初期配置を中心として不規則に乱れた配置を持つことが示唆された。

図5には、 α -2CaO · SiO₂ 結晶中へP原子を固溶させたスーパーセルを作成し、格子定数を変えながら、第一原理計算によって構造最適化を行い、2CaO · SiO₂ と 3CaO · P₂O₅ の混合に伴うエネルギー変化を求めた結果を示す。また、P原子は結晶中では PO₄³⁻ 錯イオンの形態で存在するので¹⁶⁾、2個のSiサイトをP原子に置換し、それらの最近接位置にあたるCaサイトを空孔とすることによって、電気的中性条件を確保した。図5 (a) より、固溶体結晶の格子定数 (a) が元の結晶の格子定数 (a_0) よりもやや小さい ($a/a_0 = 0.98$) 場合で混合エネルギー変化が最小値を示し、最も安定な状態であることがわかった。さらに図5 (b) より、最も安定な結晶構造にお

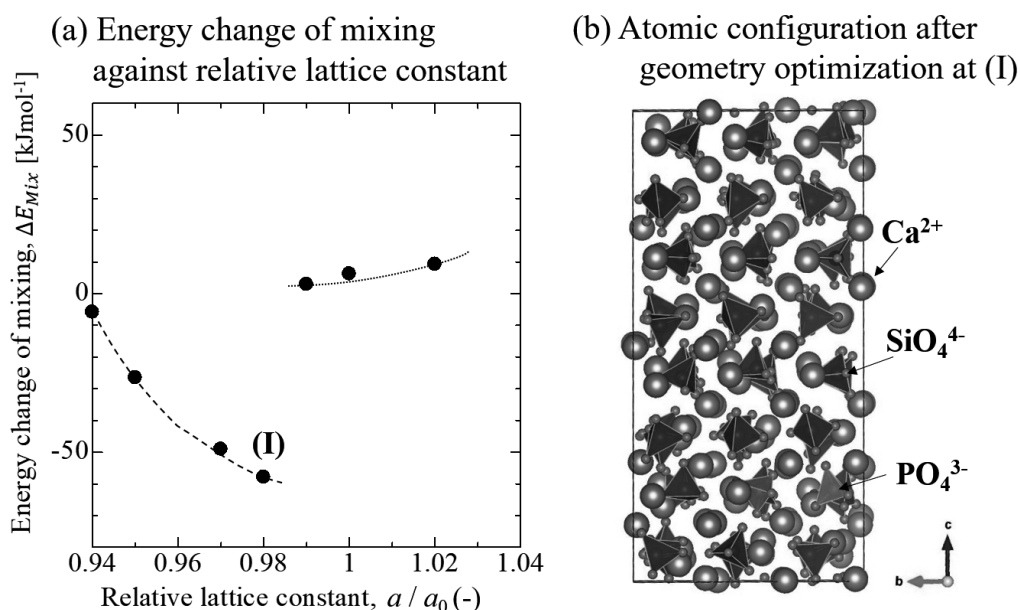


図5 第一原理計算によって得られた、(a) α -2CaO · SiO₂ 結晶へP原子を置換固溶させた場合の混合エネルギー変化、(b) (I) の状態における構造最適化後の原子配置

いて、各原子は不規則に乱れた配置を示した。

以上より、 α -2CaO・SiO₂結晶構造の高温における安定性、およびP成分の固溶し易さにおいては、原子配置の不規則化、それに伴う配置エントロピーの増加が、大きな影響を及ぼしていると考えられる。これは前節で述べた、融体より晶出した α 相固溶体の高温その場同定の結果とも整合する。このような結論に至ったのは、第一原理計算という筆者にとって新しい研究手法を2CaO・SiO₂化合物の高温相(α)に適用したことによるものであり、多大なご協力を頂いた石井氏に感謝申し上げます。

4 まとめと今後へ向けての展望

以上で述べたように、高温融体を扱うプロセスと異分野の研究アプローチを掛け合わせることによって、高温融体における結晶生成現象をこれまでにない別の視点から見つめ、新たな展開の方向性を見出すことができた。特に、高エネルギーX線を用いた高温その場X線回折では、1回あたり0.5～1.0秒の短時間で高分解能な2次元回折図形を取得できるので⁹⁾、相変態挙動を高温その場で追跡することができる。今後は同手法を利用して、様々な異種元素を固溶した2CaO・SiO₂基化合物固溶体の融体からの晶出および相変態挙動を高温その場で捉えることによって、 α 相が安定な温度範囲を把握し、多成分系酸化物の相平衡情報の供給に繋げる方針である。また、第一原理計算を用いた構造解析による知見である、異種元素を固溶した際の原子配置の不規則化(高エントロピー化)は α -2CaO・SiO₂化合物に特有の性質であり、 α 相の構造を安定化させるために自発的に生じる機構と考えられる。同機構に基づいて、P固溶に有利である α -2CaO・SiO₂の結晶構造を安定に形成させることを目指した新たな結晶あるいはスラグ成分の設計が可能であると考えている。

異分野との連携は、自身の専門範囲を超えて新たな展開の可能性を与えるが、それを有効に活用し発展させるためには、基軸とする研究分野に対して強い信念を持ち続けることが大切である。今後も、様々な分野と連携しつつ、高温融体が関わる素材創製プロセス研究の更なる発展のために尽力する所存である。

謝辞

本稿で紹介した研究は、(一社)日本鉄鋼協会による第26回鉄鋼研究振興助成、ならびにJFE21世紀財団による2019年度技術研究助成を受けて実施されました。ご支援に対して深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) I. Nettlehip, K. G. Slavick, Y. J. Kim and W. M. Kriven : J. Am. Ceram. Soc., 75 (1992), 2400.
- 2) Y. J. Kim, I. Nettlehip and W. M. Kriven : J. Am. Ceram. Soc., 75 (1992), 2407.
- 3) W. Fix, H. Heymann and R. Heinke : J. Am. Ceram. Soc., 52 (1969), 346.
- 4) H. Suito and R. Inoue : ISIJ Int., 46 (2006), 180.
- 5) R. Inoue and H. Suito : ISIJ Int., 46 (2006), 188.
- 6) T. Hamano, S. Fukagai and F. Tsukihashi : ISIJ Int., 46 (2006), 490.
- 7) ファンカンスン, 柏谷悦章 : 鉄と鋼, 95 (2009), 241.
- 8) M. Zhong, H. Matsuura and F. Tsukihashi : ISIJ Int., 55 (2015), 2283.
- 9) M. Suzuki, N. Umesaki, T. Okajima and T. Tanaka : J. Am. Ceram. Soc., 99 (2016), 3151.
- 10) K. Ohara, S. Tominaka, H. Yamada, M. Takahashi, H. Yamaguchi, F. Utsuno, T. Umeki, A. Yao, K. Nakada, M. Takemoto, S. Hiroi, N. Tsuji and T. Wakiyama : J. Synchrotron Radiat., 25 (2018), 1627.
- 11) M. Suzuki, S. Nakano, H. Serizawa and N. Umesaki : ISIJ Int., 60 (2020), 1127.
- 12) M. Suzuki, H. Serizawa and N. Umesaki : ISIJ Int., 60 (2020), 2765.
- 13) W. G. Mumme, L. M. D. Cranswick and B. C. Chakoumakos : Neues Jahrb. Mineral. Abh., 170 (1996), 171.
- 14) Y. Ishii, M. Salanne, T. Charpentier, K. Shiraki, K. Kasahara and N. Ohtori : J. Phys. Chem. C, 120 (2016), 24370.
- 15) M. Suzuki, N. Umesaki and Y. Ishii : J. Am. Ceram. Soc., in press, (DOI : 10.1111/jace.18096).
- 16) R. G. Carrodeguas and S. D. Aza : Acta Biomater., 7 (2011), 3536.

(2021年6月21日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

東京工業大学 科学技術創成研究院 教授

小林 能直

鈴 木賢紀先生と初めてお会いしたのは、今から15年くらい前でしょうか、先生が大阪大学で修士1年生でいらしたころ、鉄鋼協会講演大会会期中に開催された「若手懇親会」という、高温プロセス分野を中心フィールドとする全国の研究室の大会参加大学院生が集まって知己の輪を広げるとともに、若手研究者とも懇親する場であったことと記憶しております。田中敏宏先生（現・大阪大学副学長）の研究室の気鋭の学生で、大変礼儀正しく凛々しい雰囲気が好ましく、分相ガラスの研究に着手し始めたころの初々しさの中にも信念のようなものが感じられ、すでに博士後期課程進学も展望されており、厚かましくも長く話し込ませていただいた思い出があります。

先生はその後分相ガラスの研究を順調に進められ、学位取得前くらいのタイミングで、高温プロセス部会・精錬フォーラムの研究会でその成果を披露され、自由エネルギーについての理論解析の展開に感銘を受けた覚えがあります。その後先生は豪州にポスドクとして赴任し、粘度推算の方法論を研究され、高温融体物性と熱力学の融合分野創成に向け、すでに異分野アプローチに向けての土台を形成されておられました。

鈴木先生の異分野アプローチの真骨頂は、やはり $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - 3\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ 固溶体の相図に SPring-8 の X線による高温その場観察を適用したことで、長年のアイデアを分野を超えてのアプローチにより粘り強く実現させ、多くの製鋼研究者が興味を持っていた α 固溶体相

の形成を実証したこと、第一原理計算の適用により異常に広い P 固溶域の考え方を提示したことであると思います。小職も生石灰滓化プロセスにおける $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ の生成機構研究を行っていましたが、このように特異な物理化学現象に evidence base あるいは新理論展開による challenge をし続ける鈴木先生のアプローチに目を開かされた思いがしました。その信念に基づいた理想的な研究姿勢で、今後とも本領域をリードしていただければ、と大きく期待しています。

鈴木先生とは、鉄鋼協会講演大会はもちろんのこと、多くの高温プロセス研究のプラットフォームで一緒にさせていただき、集まればその会に先生がいらっしゃる、というような安心感もあり、多くのアクティビティへのご参画のお願いも悉くお引き受けくださり、この場をお借りして御礼を申し上げます。高温プロセス部会・高温物性値フォーラムにてのご活躍、現在は幹事をお願いしており、小野英樹先生（現・富山大学教授）主査の循環型元素に関する研究会でも酸素センサーを用いた活量測定を展開、製鉄製鋼の科学技術に関する日韓2国間ワークショップにも毎回のように積極的にご参加、またご講演もいただき、さらに日本金属学会では、材料プロセッシング分野の初期メンバーとしてご参画いただくなど、先生のご研究に源流を発する流れが次々と展開されています。鈴木先生のご研究のさらなるご発展、益々のご活躍を強く祈念する次第です。

(一財) 金属系材料研究開発センター 環境・プロセス研究部 部長

加藤 徹

鈴 木賢紀先生とは私が製鋼コースの委員を務めていた2015年の鉄鋼工学アドバンスセミナーでアシスタントをお願いしたことが直接の関わりの始まりかと思っています。セミナーは、2泊3日の合宿形式で、大学および産業界のベテラン講師の講演を聞くとともに、「製鋼工程における次世代高級鋼製造プロセス」というテーマでグループ討議を主体に実施しました。アシスタントの役割は、各グループ討議に参加し主に学術的な観点からアドバイスすること、と位置付けられていましたが、研修での先生との雑談を通じて、非常に興味深い研究に取り組まれていることを改めて認識し、急遽時間調整をして最終日に講演いただきました。突然のお願いに「パワーポイントの準備もしていない」と仰りながらも、オリジナリティのある興味深い研究をいくつも紹介され、受講生にとっても世代の近い先生が製鋼分野の研究に意欲的に取り組まれている姿は、良い刺激になりました。先生のおかげもあり、研修後の受講生のアンケートでも非常に高い評価が得られ、翌年からはアシスタントの先生の講演もプログラムに加えました。

先生は今となっては貴重な、一貫して鉄鋼スラグに係る研究に取り組まれる若手～中堅研究者であり、熱力

学や融体物性という古典的な課題に取り組みながらも SPring-8 や数値解析、機械学習などの情報科学等の新しい視点を積極的に吸収されています。また、鉄鋼スラグの構造や物性値推算といった過去に数多くの研究者が検討しながら、未だ十分な結論が得られていないような難課題にも意欲的に取り組まれています。常に課題認識を持ちつつ、各種交流の場などでも積極的に会話・議論されている姿が印象に残っています。鉄鋼協会の関連でも鉄鋼研究振興助成を受給されたほか、予告セッションなどの提案など、高温プロセスないし製鋼分野で大いに存在感を発揮していただいています。

長く高炉・転炉プロセスと電気炉プロセスを軸に発展してきた我が国の鉄鋼業は、カーボンニュートラルの実現に向けて、プロセスの再構築を含めた大変革を迫られています。熱力学や融体物性などに関しても新たなデータや情報を2050年に向けた時間の制約の中で得ていくことが必要となるものと予想しています。先生のように新しい手法を積極的に取り込みながら意欲的に研究される研究者は大変貴重であり、今後のご活躍を大いに期待しています。