



私の論文

／ 今振り返ってみて、行間にこめた思い、エピソード

書いて考える

Write to Think

須佐匡裕

Masahiro Susa

東京工業大学
物質理工学院
教授

1 はじめに

毎月届く「ふえらむ」にはざっと目を通してあるので、「私の論文」というトピックがあるのは知っていた。が、「どうい
う人が執筆しているのだろうか?」と思っていた。このたび、
その執筆依頼のメールを受け取って初めて、論文賞受賞者に
依頼が行っているのだと認識した。2020年に澤村論文賞をい
ただいた一人であるために、私にも白羽の矢が立ったという
ことらしい。その表彰式は、同年3月に東京工業大学大岡山
キャンパスで開催予定であったが、COVID-19の感染拡大の
ため中止となってしまった。そのため、楽しみにしていた懇
親会もなくなってしまった。表彰状は郵送されてきた。それ
とともに、受賞論文の「鉄と鋼」への転載や「私の論文」への
寄稿といった依頼も、変更なく届いている。編集業務が滞り
なく動いているということで、喜ばしい限りである。

ところで、「私の論文」のトピックには、「今振り返ってみ
て、行間にこめた思い、エピソード」というサブタイトルが
ついている。さらに「読者の研究推進や論文執筆の一助」と
なることも期待しているとのことである。「私の論文」の詳細
は、ISIJ Internationalに掲載された原著論文、あるいは2020
年12月号の「鉄と鋼」に掲載された転載論文に当たってい
ただくのがよいだろう。ここでは、論文についてはざっくりと
した説明とさせていただき、思いやエピソードに重点をおい
て記したい。また、私自身、協会の論文誌編集委員会に18年
間関わり、うち2年間は委員長を務めさせていただいた。編
集委員会の当事者としては、なかなか言い出しにくい思いも
あったが、そこから離れた今だからこそということで、論文
執筆の促しと編集委員会への提案について少々述べたい。

2 モールドフラックスの研究について

モールドフラックスについては、釈迦に説法とは思われる
が、ストーリーの展開上ここで少し触れさせていただく。図1
は、連続鋳造機の鋳型部分とモールドフラックスの模式的断
面図である¹⁾。モールドフラックスは鋳片と鋳型の間に存在
する。その主成分はCaO, SiO₂, CaF₂であり、Al₂O₃, Na₂O,
MgOの成分も添加されている。さらに、鋼種に応じて、各会
社で他の成分も添加しているようである。今風の言葉でい
うと、きわめて「ハイエントロピー」なシリケートである。

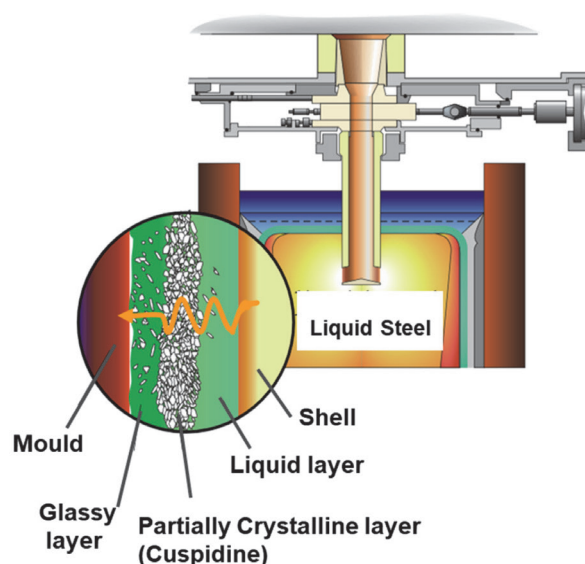


図1 鋼の連続鋳造機の鋳型部分とモールドフラックスの模式的断面図

* [今回の対象論文]

高橋俊介, 遠藤理恵, 渡邊 玄, 林 幸, 須佐匡裕: 「Mechanism of Mild Cooling by Crystallisation of Mould Flux for Continuous Casting of Steel - A View from Apparent Thermal Conductivity under Steep Temperature Gradient -」, ISIJ International, Vol.58(2018), No.5, pp.905-914 (第30回澤村論文賞受賞)

私がモールドフラックスを研究テーマとして取り上げ始めたのは、今から約30年前のことである。1992年～1993年に、私は文部科学省（当時は文部省）と日本学術振興会の派遣事業で英国物理研究所（NPL）に留学させていただいた。そのときスーパーバイザーだったK. C. Mills先生からモールドフラックスについて多くを学んだ。また、Mills先生には英語の論文を数報、直してもらった。1報目はひどかった。ダブルスペースで打ち出した原稿の各行間に赤のボールペンでびっしりと修正してくれていた。「これは英語だけれど、イギリス人はこういう風には書かないよ」というコメントをいただいた。たとえば、ある文法的に正しい英文一文があったとしよう。それをあるコンテキストの中に入れたときに適正な文章であるかどうかは、一文として正しいかどうかとは別問題である。コンテキストの中で、何を主語とするか、能動態がよいのか、受動態がよいかなどは自ずと決まる。確かに、当時の私はそこまで考えては書いていなかった。これは、日本人が日本語の論文を書く際にも気をつけなければならないことで、そのとき私は英語論文だけではなく、日本語論文もまともに書いていなかったのかもしれない。

とにかく、その修正を読んで全部タイプし直し、言葉の使い方だけでなく、英語的な文章構成を覚え、論理の構築を体得するしかなかった。もちろん、周りにいるイギリス人にも、英語の使い方については聞きまくった。2報目は、修正は半分くらいになった。3報目は、1ページに数か所になっていて、「Your English is much much better.」と嬉しそうに言ってくれた。嬉しかったのは私のほうだ。今も英語で論文などを書くときは、そのときの論文を傍らに置き、見ながら書いている。

Mills先生は2018年にご逝去されたが、その直前に「The Casting Powders Book」というモールドフラックスについての500ページを超える大著をSpringerから出版された²⁾。モールドフラックスについての彼の知識がすべて系統的に収録されていて、まるで大英博物館の展示を見るような感じだ。自分の知識など、その10%にも満たないような気がする。それはともかく、私はモールドフラックス中の伝熱に関心を持ち、細々とではあるが、これまで研究を続けてきた。これは、Mills先生だけのお陰ではなく、国内外の鉄鋼会社の方々からご助言やご支援があったからでもある。

私の関心事をもう少し詳しく、図1を用いて説明したい。モールドフラックスは、層状に近い構造をしており、各層は鋳片側から順に液相、結晶相（主にカスピディン）、ガラス相から成っている。この液相部分は潤滑を担っており、その存在は鋳片のスムーズな引き抜きには欠かせない。一方、モールドフラックス全体は、溶鋼から鋳型への伝熱制御の役目を担っている。すなわち、抜熱速度をモールドフラックスの相構成で制御している。

経験的には「結晶化が進んだフラックスのほうが、抜熱速度が小さく、緩冷却になる」ということが言われていたが³⁾、それはなぜだろうという点がとても気になった。液体よりも、ガラスよりも、結晶のほうが熱伝導率は高いはずというのが普通のセンスだからである。これを基礎的な実験から明らかにしたいというのが、「私の論文」のきっかけである。もちろん、それまでも考え方は示されていた。たとえば、図1をよく見てもらうと、鋳型とガラス相の間に少し隙間がある。この部分はエアーギャップあるいはガスギャップと呼ばれている。普通、液体やガラスのほうが、結晶より密度が低いため、それらが結晶化すると体積が収縮する。このために、その隙間が形成されるという考えがある⁴⁾。この隙間があれば抜熱速度が下がることは間違いない。ただし、溶鋼から高い静水圧を受ける状況下で、本当に隙間があるのかどうか、確かめようもない。私自身は、もともとから溶融スラグの熱伝導率など、物性値測定に携わっていたこともあり、結晶化によってモールドフラックス自体の性質がどのように変わるのか、そういった観点で研究したいと思った。

そこで作製した装置図を図2に示している。大きな温度勾配下で熱伝導率を測定できるように、定常平行平板法の原理を採用した⁵⁾。今回の測定では、位置2と5間の温度差から、より精度よく熱流束を決定できるように、上部の冷却用ブロックにSUS304を用いた。この部分に銅が用いられることもあるが、SUS304のほうが、熱伝導率が小さいため、位置2と5の温度差の計測精度の向上が見込める。さらに、試料としては固体のモールドフラックスを想定しているので、試料とその上下にあるSUS304との間の接触熱抵抗が問題となる。これを極力減らすために、この界面に銀ペーストを塗布した。

まず接触熱抵抗を評価するために、モールドフラックスと比較して熱伝導率の高いインコネル600を試料として、位置5と7の間の熱抵抗を測定した。それを試料の厚さに対してプロットしたのが図3である。この図の直線の傾きが試料の熱伝導率の逆数に対応し、切片は位置5と7の間の試料部以外の熱抵抗に対応する。この図の直線は、インコネル600の熱伝導率の文献値の逆数を傾きとして引いている。各温度に対する直線の切片には差異があるが、この差異の大きさは $10^{-5} \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$ 程度である。一方で、モールドフラックスを試料とした場合について位置5と7の間の熱抵抗を推定すると、その値は $10^{-3} \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$ 以上の大きさになる。そのため、切片に生じる差異は気にせず、切片の値の平均をとって、位置5と7の間の試料部以外の熱抵抗は $2.27 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$ で一定と決めた。なお、この熱抵抗はSUS304の熱抵抗に由来することがわかり、接触熱抵抗は銀ペーストによって解消された。これは測定を行う上で、非常にありがたい結果であった。

このような方法でまず素性のよい試料として溶融石英を取

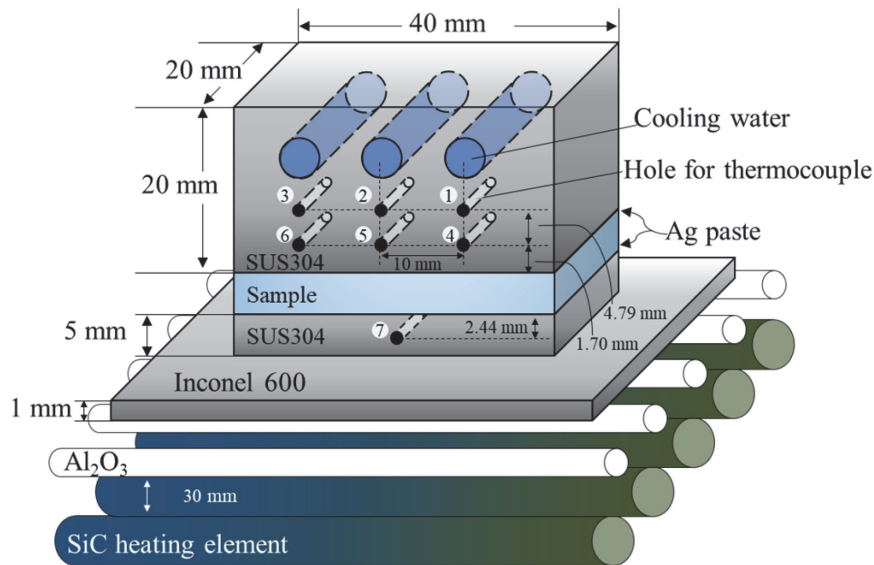


図2 作製した定常平行平板法の実験装置の模式図

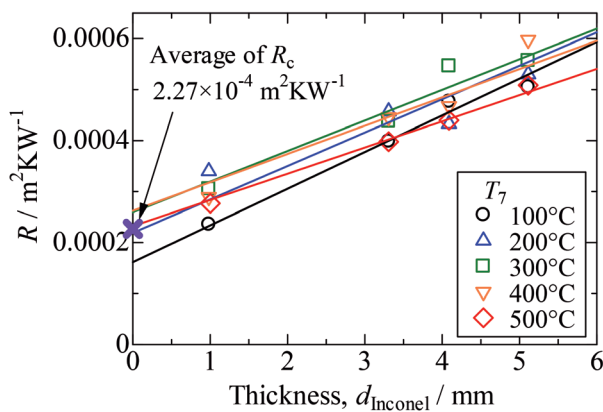
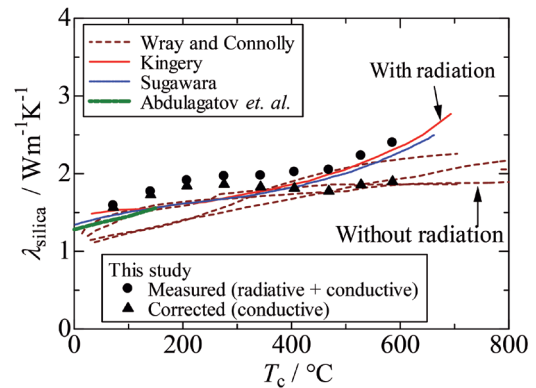
図3 インコネル600で測定した熱抵抗 (R) の値と試料厚さの関係

図4 溶融石英の熱伝導率と試料中心温度との関係および文献値との比較

り上げて、その熱伝導率を測定してみた。その結果が図4であり、文献値とともに示してある⁶⁹⁾。横軸の温度は試料の中心温度である。本研究の測定から出てきたデータは●で示している。これらの値は、文献値の中で「ふく射の影響あり」と注釈された値とよく一致している。また、▲の値は、データ解析の途中で、ふく射伝熱流束を見積もり、それを補正して算出した溶融石英の熱伝導率の値である。これらの値は、文献値の中で「ふく射の影響なし」と注釈された値とよく一致している。すなわち、今回の装置では、ふく射の影響を込みにした見かけの熱伝導率の測定が可能であることがわかった。

図5は、先に書いた6成分から成るモールドフラックスの熱伝導率の測定結果である。ここでも、横軸の温度は試料の中心温度である。試料としては、ガラスの試料とある程度結晶化させた試料を用いて、測定は温度を上げながら行った。室温付近では、結晶化試料のほうが高い熱伝導率を示してい

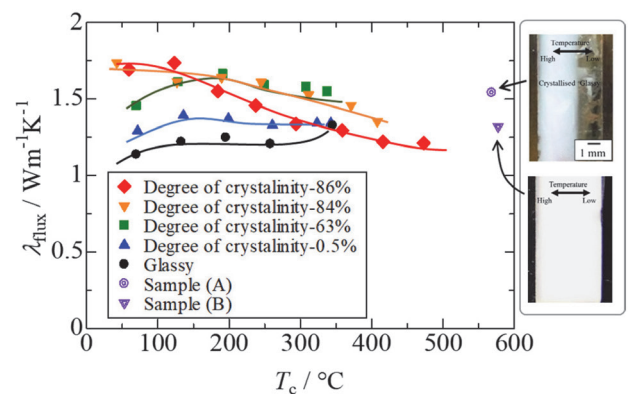


図5 ガラスおよび結晶化試料の見かけの熱伝導率と試料中心温度との関係および測定後の試料の断面写真

る。温度を上げると、結晶化試料の熱伝導率は低下している。これに対して、ガラス試料の熱伝導率はほぼ一定である。測

定の最後に、学生が勇気を出して、この装置で上げられる最高温度まで上げてみた。その結果、600℃付近（試料の最高温度は900℃程度）では、熱伝導率の大きさが、結晶化試料（結晶化率84%だったもの）とガラス試料とで逆転し、後者のほうが大きくなっている。測定後の試料の断面写真も同図に示しているが、ガラス試料は、高温に晒された側は結晶化していたが、低温側はガラス相のままであった。そして、熱伝導率の温度依存性は、図4に示した熔融石英のものとよく似ている。これらのことから、「ガラス相が残っていると、ふく射伝熱の寄与があるために、見かけの熱伝導率は大きくなる」と結論した。先に述べた「モールドフラックスの結晶化率が高いほど、緩冷却になる」という経験的知識は、モールドフラックス自体の性質からも正しそうである。そのことを図5のデータから理解できて、私自身はすっきりしている。

今回は、経験的知識において「おや？」と思ったことを研究対象としたために、実用モールドフラックスに近い複雑な組成の試料を用いた。そういう研究も必要と思うが、学術的にはやはり permanent value を目指しての物性値研究は重要である。今後、鉄鋼の研究においてもAIの活用が一般的になってくると思われるが、その場合でも、単体や単純な系の正確なデータは必ず必要になる。難しい測定になる場合もあるが、若い研究者にはエールを送りたい。

③ 論文を書くということとは

若いころ先生から「論文を書け！」と口うるさく言われた。私は大学の助手になる前に、民間企業で4年間、その研究所に勤めた。博士の学位はとっていなかったの、研究者と言うには憚られたが。そこでも、「特許を書け」、「論文を書け」という号令はあった。助手になってから1年間は、実験はしていてデータも少しずつ出ていたが、まだまだデータが十分でなく、論文としてまとめられていなかった。そんなときに先生から「君は給料泥棒ですか」と言われたことがある。大学の教員は、職業として「教育」と「研究」を行っている。とくに、国立大学の教員は、給与が税金で支払われていることを考えると、納税者への責務の一つとして、研究成果を論文として公表することが必須の業務となる。給料泥棒という言い方は、今ならパワハラとして扱われるかもしれないが、一方で、論文執筆を忌避するのは、今の言葉では、モラルハザードに当たるだろう。このところ、世界各国、とくに中国の論文数が増加するなか、日本の状況は芳しくない聞く。現在、研究者の置かれた環境はどの国でも厳しいものである。日本の若い研究者には、ぜひ頑張ってもらいたい。若いうちに、論文を書く習慣とスキルを身につけるのは大事である。

私は、「書く」という行為は「論理をつくる」のにとっても大

事だと思っている。音楽家でも、モーツァルトのように、はじめから頭の中に音楽ができていて、それを一気に譜面に落としたという人もいるが、ベートーベンは何度も何度も楽譜を推敲したと聞く。我々は、そういった音楽の天才と比較すべきものではないが、①まずあるデータを眺めてみて、それで論文の筋を考える、②考えるだけではなく文章にする、③それによって見つかる論理飛躍や間違いを修正する、場合によっては④データを補強する、⑤他人に意見を求める、といった作業を繰り返す以外に、論文を書き上げる術はないように思う。アインシュタインでさえそうだったようだ。先の夏休みに「神は老獪にして…」というアインシュタインについての伝記を読んだ¹⁰⁾。アインシュタインは誰もが知る大科学者であるが、論文をかなりたくさん出している。また、手紙魔でもあったようだ。手紙のやり取りの中で、自分が投稿した論文の間違いに気づき、前の月に投稿した論文の修正論文を何度も出している。凡人ならなおのこと、考えを一度文章に落とし込まないと、論理を検証するのはなかなか難しい。論文を書かない人（＝書けない人）の多くは、①で止まっているのではないかと考えている。一度文章に落とし込むことは、研究全体を俯瞰して、その方向性を修正することにも役立つ。

④ おわりに

最後に協会の編集業務に関わった者として、少し意見を述べさせていただきたい。

編集業務の中で最も大事なプロセスは査読である。査読の良否が論文誌の質の良否に大きく影響する。査読の最も重要なポイントは、掲載「可」か「否」かの判断である。「オリジナリティが全くない」、「実験原理が明らかに間違いである」、「論理構成が滅茶苦茶でさっぱりわからない」、「データの捏造や盗用などの不正がある」などは「否」である。つぎに、「可」と判断した場合には、どういうコメントをするかが重要となる。自分が著者ならば、「査読コメントをもらってよかった」と思える査読ありがたい。要は、コメントによって、その論文がよくならなければならない。査読者がコメントする場合、査読者ならばその修正は可能であり、それを行えば論文は必ずよくなるという確信の下でコメントをする必要がある。「著者が言っていることも一理あるけど、こういう考え方もあるのではないか」などというコメントは一切不要である。それほど重要なことであれば、査読者がそれを論文にして、その中で反論すればよいことだ。「可」という判断であれば、掲載のためには最低限この修正は必要という点に限定し、重要項目は (M)、軽微な項目は (O) としてコメントし、著者をエンカレジしていくことが重要である。単に著者を困らせ

るだけのコメントは、著者をディスカレジし、優良な著者の ISIJ 離れを引き起こしかねない。

もう一つ、ISIJ International の査読でよくあるコメントが「英語が poor だから、翻訳業者に修正してもらうべき」という類のコメントである。私が同様のコメントをする場合には、「共著者と相談して修正してほしい」と書く。著者の間で可能な修正のみを求める。翻訳業者の介入は、ゴーストライティングに近いものを感じるためである。ここは人によって意見が分かれる点かもしれないが、私は「論文というものは著者が全責任をもって作成すべきもので、翻訳業者の介入の余地はない」と思っている。論文の内容の良しあしだけでなく、表現の良しあしも著者の責任である。といっても、日本人だから英語で書けないという場合もあるだろう。そういうときには、まず「鉄と鋼」に原著論文を投稿し、掲載が決まった後、翻訳業者に英訳してもらい、ISIJ International に転載論文として投稿する。翻訳料は著者負担とし、著者のあとに「〇〇翻訳会社〇〇翻訳」と明記するのはどうだろうか？ 英語著作の訳本には、翻訳者の名前が書かれているように。

参考文献

- 1) 須佐匡裕, 遠藤理恵, 渡邊玄, 林幸: 耐火物, 70 (2018), 580.
- 2) Kenneth C. Mills and Carl-Åke Däcker: The Casting Powders Book, Springer International Publishing, (2018)
- 3) M. Hanao and M. Kawamoto: ISIJ Int., 48 (2008), 180.
- 4) K. Tsutsumi, T. Nagasaka and M. Hino: ISIJ Int., 39 (1999), 1150.
- 5) A. Yamauchi, K. Sorimachi, T. Sakuraya and T. Fujii: ISIJ Int., 33 (1993), 140.
- 6) K. L. Wray and T. J. Connolly: J. Appl. Phys., 30 (1959), 1702.
- 7) W. D. Kingery: J. Am. Ceram. Soc., 38 (1955), 251.
- 8) A. Sugawara: Physica, 41 (1969), 515.
- 9) I. M. Abdulagatov, S. N. Emirov, T. A. Tsomaeva, Kh. A. Gairbekov, S. Ya. Askerov and N. A. Magomedova: J. Phys. Chem. Solids, 61 (2000), 779.
- 10) アブラハム・バイス (西島和彦監訳): 神は老獺にして..., 産業図書, (1987)

(2020年12月1日受付)