



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

カナダ・マクマスタ大学での研究留学を通じて

Research in McMaster University, Canada

古米孝平

Kohei Furumai

JFEスチール（株） スチール研究所
製鋼研究部 主任研究員

1 はじめに

筆者は、2008年にJFEスチール（株）に入社し、スチール研究所、製鋼研究部に勤務しており、主に製鋼プロセス内の連続製造に関する研究開発に従事しています。2016年10月から2年間、カナダ、オンタリオ州のMcMaster大学に研究留学し、海外での研究と異国の文化を経験しました。

今回、まず本稿を執筆する機会を与えていただいたことに感謝を申し上げ、留学時の体験を含む、これまで取り組んできた製鋼プロセスに関する研究開発を通じて学んだことを中心に紹介したいと思います。

2 McMaster大学

McMaster大学（McMaster University）は、トロントから南西へ車で約1時間の、カナダの都市として8番目の人口50万人規模を持つハミルトン市にある州立大学です。ハミルトン市は、カナダ/アメリカ国境にあるナイアガラの滝からも車で約1時間と近く、市内には滝の多い地域であることから「滝の街」とも呼ばれております。カナダのイメージ通り、冬は寒さが厳しく、寒い日には -20°C 程度まで冷え込むことがあります。逆に夏は 30°C を超える日が数日しかなく快適に過ごせます。大学周辺は、湖や大きな公園が数多くあり、自然豊かな地域でもあり、治安も良く非常に住みやすいところです。また、市内は重工業も発達しており、StelcoやDofascoなどの大手鉄鋼メーカーも存在し、「製鉄の街」としても知られています。そのため、McMaster大学では、鉄鋼に関する研究においてSteel Research Centerを設立し、(1) 冶金プロセス、(2) プロセス制御、(3) 鋼板開発と応用の3つの部門が存在しており、上工程から下工程に至るまで、鉄鋼メーカー、大学、コンサルタント会社等が密になって、基礎研究から実用的な範囲に及ぶ研究プロジェクトを進めています。

筆者は、このうちの(2) プロセス制御グループに所属し、同じ年にブリティッシュコロンビア大学からMcMaster大学へ移った凝固関係の計算が専門のAndre Phillion先生および圧延組織が専門のHatem Zurob先生の指導の基に、実験と計算の両方の研究を行いました。なお、筆者は、Phillion先生のMcMaster大学での研究室立ち上げメンバーの一人目であり、海外での研究テーマの立ち上げからデータ導出までを、討議を踏まえながら熱心に指導して頂きました（Fig.1）。

3 留学先での研究内容

連続製造プロセスにおいて、スラブ表面割れ抑制は、スラブ品質と高生産化の両立を達成するために重要な課題であります。留学先での研究テーマは、特にスラブ表面割れが問題になりやすいNb添加鋼でのNbC析出物およびオーステナイト粒径の高温脆化への影響評価および亜包晶鋼における鋳型内での $\delta \Rightarrow \gamma$ 変態時の凝固初期シェル変形計算の2テーマを



Fig.1 Building of McMaster University.

実施しました。1つ目のテーマでは、フェライト (α) + オーステナイト (γ) 2相域中のNb添加鋼における脆化に関する研究は古くから行われていますが^{1,3)}、脆化挙動への影響因子としてオーステナイト粒径、Nb系析出物、フィルム状フェライト厚みが報告されているのみで、それぞれの因子の脆化への影響の程度はよく分かっていませんでした。Nb添加鋼においては、溶質Nbによる引き摺り効果により、 γ 粒の成長が抑制され、 γ 粒径が小さくなることが分かっています^{4,5)}。そのため、 γ 粒微細化により高温脆化は軽減することが考えられますが、 γ 粒径減少と同時に起こるNb系析出物の影響も加味して考察する必要があります。筆者らは、オーステナイト粒径、NbC析出物径、NbC析出物割居の脆化への影響を定量化し考察を行うため、Nb添加鋼での γ 粒界移動度から γ 粒成長挙動を定量化した後に、オーステナイト2相温度域での高温引張り試験において、破断後の断面収縮率 (Reduction in Area (RA)) を、異なるオーステナイト粒径、NbC析出物径、NbC析出物個数の条件において評価を行いました⁶⁾。析出条件が同じ場合には、従来の報告と同様に、Nb添加によりオーステナイト粒径が小さくなるため、高温脆化が抑制されることが確認できた一方で、Fig.2に示すように、Nb添加時には、高温脆化に対する、NbC析出物の影響の方がオーステナイト粒径に対して著しく大きくなるためRAが小さくなることが確認できました。さらに、異なるNb添加量、冷却速度においては、RAはNbC析出物間隔と相関があることが分かりました (Fig.3)。また、これらの現象は、2相温度域でのオーステナイトとフェライト間のひずみ分配モデルを用い説明可能であり³⁾、Nb添加時には、溶質Nb引き摺り効果により、 γ 粒界移動度が低減し、 γ 粒径が小さくなるため、 γ/α 間でのひずみ不均一が抑制され高温延性が大きくなるが、Nb添加量が大きくなるとNbC析出物による析出強化に起因する γ/α 間のひずみ不均一増大により、高温延性は低下するが、Nb量の増加によるRAの低下量は、 γ 粒径が小さくなるほど小さくなることが示されました。

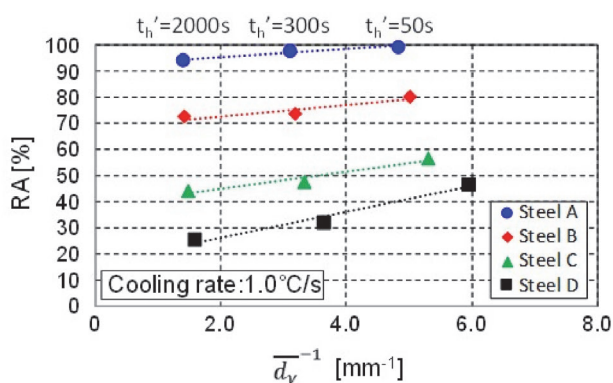


Fig.2 Measure ductility as a function of inverse Austenite grain size, d_{γ}^{-1} for all four tested steels⁶⁾.

次に、亜包晶鋼における鋳型内での $\delta \Rightarrow \gamma$ 変態時の凝固初期シェル変形計算では、これまでに報告されていたスラブ縦割れに繋がる、初期凝固シェルの浮き上がりによるエアギャップ形成⁷⁻¹⁰⁾を、連铸機鋳型内での熱流束条件¹¹⁾を想定したモデル作成を実施しモデル化しました¹²⁾。モデルでは、鋳型内での溶鋼表面に連铸機内での熱流束分布を与え、時間経過と共にエアギャップ形成影響を熱流束に考慮していくモデルとし、変態中の熱膨張係数への冷却速度の影響も加味しました (Fig.4)。これらのモデルを用い、凝固初期でのエアギャップ形成、凝固不均一度、凝固シェルひずみに影響する冷却速度、低熱流束部幅の影響を評価しました。計算結果より、冷却速度および低熱流束部幅は、エアギャップ高さおよび凝固不均一度へ大きく影響することが分かり、鋳型内緩冷却の場合、強冷却に比べ、同じシェル厚における溶鋼静圧が大きいと、エアギャップ高さは小さい値となり (Fig.5)、凝固不均一の計算結果は、実機鋳造時と同じ傾向であることが分かり本計算モデルの有用性を確認することができました。これらのテーマから得られた知見を活かし、今後の業務においてもスラブ表面割れ抑制の技術開発に貢献していきたいと思っています。

4 おわりに

会社内での日頃の研究者としての業務では、実用化を目的とした研究開発業務に偏りがちになり、じっくり腰を据えた研究を実施することがなかなか難しいと感じていたところに、海外留学を経験でき良い経験、刺激となりました。特にMcMaster大学では、カナダ国外からの学生も多く、皆モチベーション高く研究に取り組んでいたことが印象的です。また逆に、海外での、異文化、慣れない言語の中で研究を進めることの難しさも感じ、特に企業内での実験は、実験設備や熟練した実験技術員といった恵まれた環境に囲まれていることも体感しました。また、研究以外においても、海外で生活

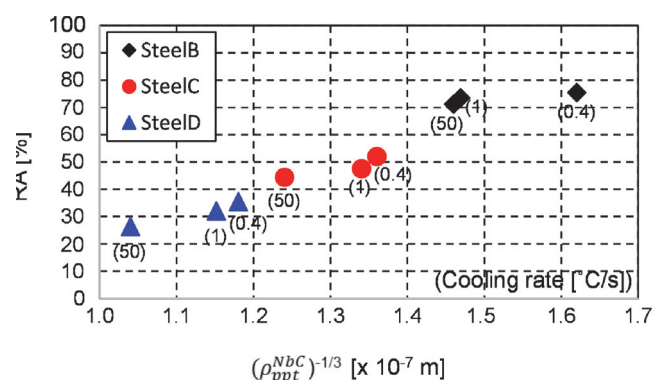


Fig.3 Relation between precipitation spacing and RA⁶⁾.

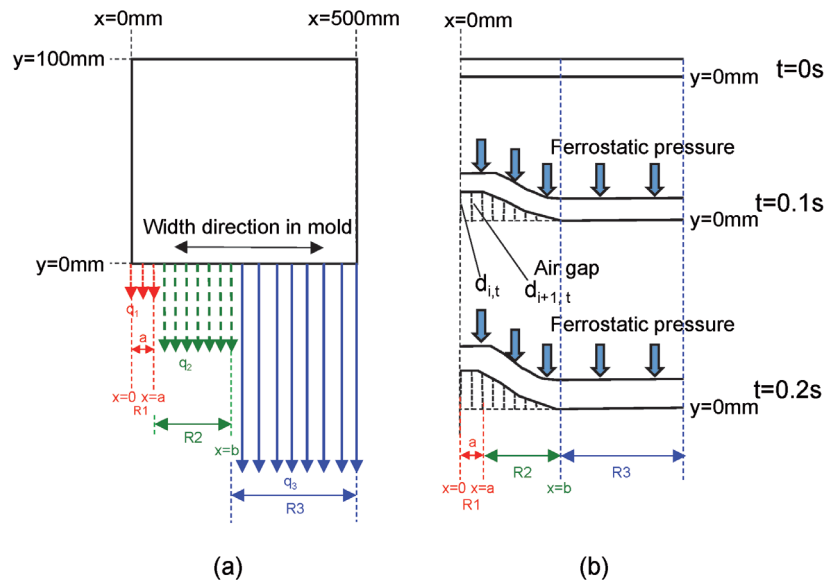


Fig.4 Geometries used for FEA((a) Thermal model, (b) Stress model). Note that $x=0\text{mm}$ correspond to the centerline¹²⁾.

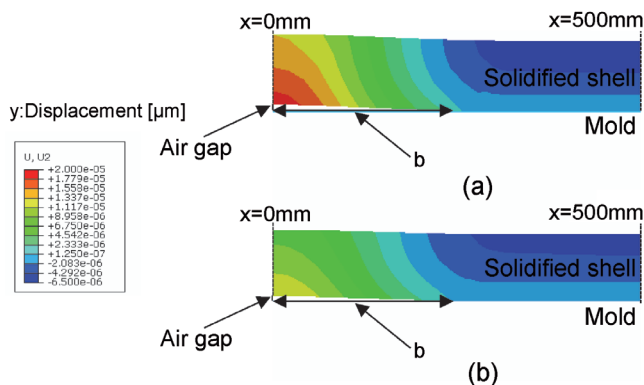


Fig.5 Contour plots of solidified shell displacement calculated by using (a) strong cooling and (b) mild cooling at 1mm of shell thickness in R3. The deformation geometry has been magnified by 5 times. Parameter $a=0.7\text{ mm}$ ¹²⁾.

することにより、普段日本で当たり前前に過ごしている生活スタイル、文化を見つめなおす機会を持つことができ、今後の生活に活かしていきたいと考えております。

最後に、今回の留学に関してお世話になった会社や大学の方々に感謝いたします。また、留学に挑戦したいと考えておられる方々にとって少しでも参考になればと思います。

参考文献

- 1) Y. Maehara, K. Yasumoto, Y. Sugitani and K. Gumji : ISIJ Int., 25 (1985), 1045.
- 2) 松本和明, 大内千秋, 天明玄之輔 : 鉄と鋼, 63 (1977), S722.
- 3) 牧正志, 長道常昭, 阿部直樹, 田村今男 : 鉄と鋼, 10 (1985), 1367.
- 4) M. K. Rehman and H. S. Zurob : Metall. Mater. Trans. A, 44 (2013), 1862.
- 5) T. Zhou, R. J. O'malley and H. S. Zurob : Metall. Mater. Trans. A, 41 (2010), 2112.
- 6) K. Furumai, X. Wang, H. S. Zurob and A. B. Phillion : ISIJ Int., 59 (2019), 1064.
- 7) 村上洋, 鈴木幹雄, 北川融, 宮原忍 : 鉄と鋼, 78 (1992), 105.
- 8) 松宮徹, 佐伯毅, 田中純, 有吉敏彦 : 鉄と鋼, 68 (1982), 1782.
- 9) 溝口利明, 荻林成章, 梶谷敏之 : 鉄と鋼, 81 (1995), 971.
- 10) 金沢敬, 平城正, 川本正幸, 中井健, 花崎一治, 村上敏彦 : 鉄と鋼, 83 (1997), 701.
- 11) M. Terauchi and H. Nakata : 5th European Continuous Casting Conference, Nice, France, 1 (2005), 28.
- 12) K. Furumai, A. B. Phillion and H. S. Zurob : ISIJ Int., 59 (2019), 2036.

(2020年2月26日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

Associate Professor and ArcelorMittal Dofasco Chair in Ferrous Metallurgy,
Dept. of Materials Science and Engineering, McMaster University, Canada

Dr. André Phillion

Mr. Kohei Furumai was a visitor to McMaster University's Department of Materials Science and Engineering for two years from October 2016 to September 2018. The first contact was through McMaster's Steel Research Centre (<https://www.eng.mcmaster.ca/mcmaster-steel-research-centre>; a cooperation between the university and more than ten steel companies from around the world including JFE Steel). Kohei was interested in participating his company's study abroad program, and in particular to learn more about R&D in the area of continuous casting. Our Steel Research Centre had previously hosted visiting scientists from the Japanese steel industry that resulted in very successful outcomes.

As described in the article, the main focus of Kohei's research was to better understand slab surface cracking during continuous casting in Nb containing steels. This defect is a result of shell deformations during δ to γ transformation in the mold, as well as a lack of hot ductility upon further cooling. McMaster's Steel Research Centre has a longstanding and leading expertise in using modelling and experimentation to investigate structure-process-property relationships in advanced steel alloys; for both new alloy development and for process quality improvements. In the

first part of the visit, Kohei collaborated with scientists at the Natural Resources Canada CANMET materials laboratory to perform novel hot-stage tensile tests using a Gleeble Thermo-mechanical simulator. These tests allowed us to examine the competing effects of γ grain size and Nb content affect hot ductility and thus to develop guidelines for preventing surface crack formation. In the second part of the visit, Kohei collaborated with graduate students in my research group to develop a thermal-mechanical finite element model that couples with a purpose-written δ to γ phase transformation model to predict how variations in mould cooling result in strains within the solidified shell. Both parts of this research were of very high quality, resulting in publication in ISIJ and helping to improve product quality at JFE Steel.

Altogether, I was very impressed with Kohei's experimental skills, and perseverance in learning mathematical modelling as a new skill. His kindness and hard work were greatly appreciated, and a great role model for the graduate students in my research group. I look forward to continuing collaborating with Kohei in the future, and further exchanges between McMaster University and the Japanese steel industry.

(株) 神戸製鋼所 鉄鋼事業部門 技術開発センター 製鋼開発部 主任研究員

三宅 孝司

エール執筆の話を戴いた際には、学術的に浅薄な私が古米さんの研究内容にコメント出来るのかと戸惑いしましたが、鋼の連続鋳造に関する研究者が漸減している中、産学の枠を超えて、今後当研究開発分野を大いに盛り上げて下さるであろう次世代のホープに、産側研究者の先輩として応援メッセージをお送りしたいと思い、僭越ながらお引き受け致しました。

古米さんは、近年、特に2019年に入ってからハイペースで学会報告や論文投稿をされており、そのご活躍には目を見張るものがありました。この度の躍動記事を拝読し、2018年までMcMaster大学に留学をされていたご経歴を知り、その際に纏め上げられた研究成果を正に発表なさっていたのだと納得し、留学先で充実した研究生活をお過ごしになったことが窺い知れました。

古米さんが取り組まれている連続鋳造スラブの表面割れは、我々連鋳研究者・技術者にとっては「永遠の課題」とも言える事象です。湾曲型連鋳機が稼働し、高速鋳造が開始された当初から、特にオイルショック後に鋳片の無手入れ直送圧延を志向し出した40年前から現在まで尚も残り続け、対処療法的に何とか落ち着かせたと思っても、生産性向上や、新商品開発を行おうとするとまた現れる極めて厄介な存在です。「解決したと思っても根治出来ていない」原因は、発生の真因を理解出来ていな

いことにあると思います。そして、表面割れに対する包括的かつ定量的な理解を困難にさせている原因は、

- ①小規模実験では割れの再現が出来ないこと。
- ②実機規模での大型実験では溶鋼を含んだ高温高湿で過酷な雰囲気下で、「連続」鋳造ゆえに対象が物理的に移動するため、発生状態の観察や測定が極めて困難であること。
- ③実機では外乱要因となる連鋳機の整備状況を含めた操業条件のばらつきが必ず存在すること。

にあると、私個人は思っています。

かような状況の中、ラボ実験や数値解析を駆使して、脆化機構やその支配因子の解明に改めて地道に真正面から取り組まれているお姿には、同じフィールドで業務を行う私にとっては頭が下がる思いしかなく、大変頼もしく感じます。

今後は得られたご知見と構築されたモデルを大いに活用され（既に実践されていることと存じます）、憎き表面割れを解決する道標を我々に示して下さいを期待しています。諸先輩のご尽力により連続鋳造の主課題は一見解決されたように見えますが、製造現場にはまだまだ「永遠の課題」が山積しています。今後もこれらの諸課題に風穴を開ける御活躍をされることを祈念しています。