



《第64回》鉄鋼熱間圧延プロセスの材質モデル開発

木原 美 怜

1. はじめに

筆者は、TMEICに入社して以降、鉄鋼熱間圧延プロセスのモデル開発に従事している。特に鉄鋼の強度を作り分けるための技術である材質予測システムの開発に携わってきた。鉄鋼材料は、構造物や自動車などに広く使用され、強く、安価で、加工性やリサイクル性にも優れた持続可能な素材である。材質予測システムとこれに関わるモデル開発について紹介する。

2. 鉄鋼熱間圧延プロセスと材質予測システム

図1に一般的な鉄鋼熱間圧延プロセスと金属組織変化の概略を示す。鉄鋼熱間圧延プロセスでは、加熱炉で1,200℃以上に加熱された約250mm厚のスラブを、複数の圧延機で連続的に加工した後、1.2~24.4mm厚の製品コイルとして巻き取る。高温のスラブは、圧延により薄くなると同時に冷却される。製品コイルの強度に大きく影響する巻取温度は、約300~800℃に制御される。鉄鋼材料の機械的性質は、金属組織によって異なる。加工と冷却の組合せにより、高温でのオーステナイト組織から、低温でのフェライト組織又はパーライト組織などの多様な硬さの異なる組織へと変化する。また、鉄鋼材料は多数の結晶粒が集合した多結晶体である。加工と冷却によって結晶粒の状態が変化する。おのおのの結晶粒径が小さいほど強度が高くなる。結晶粒径や各組織の体積率を変えることで、強度を制御することができる。また、鉄鋼材料中に含まれる炭素を主とした化学成分によっても結晶粒径や各組織の体積率が変化する。鉄鋼材料の化学成分構成や加工および冷却プロセスを適切に設計することで、機械的性質の異なる製品コイルを作り分けることができる。

材質予測システムは、目標とする機械的性質をもつ製品コイルを得るために、加工や冷却などの適正な圧延条

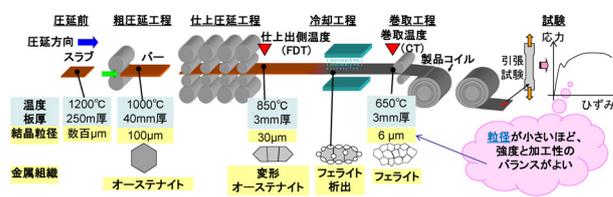


図1 一般的な鉄鋼熱間圧延プロセスと金属組織の変化の一例

件を提示する。材質予測システムの要は、材質予測モデルである。材質予測モデルは、圧延プロセスにおける金属組織の変化と最終的な製品の機械的性質を予測する。

3. 材質予測システムとモデル開発

3.1 析出モデル

最初に、材質予測モデルの一部である析出モデルの開発に取り組んだ。Nbをはじめとする微量添加元素により、鉄鋼材料が高強度化することが知られている。これは、添加元素が炭素等と結びつき、微細な金属化合物となって、元の組織とは異なる組織が出現する「析出」に起因する。析出のモデル化に関する先行研究は多数あったものの、加工と冷却を繰り返す圧延において、添加元素の影響をモデル化することは困難であった。そこで、従来モデルをもとに、それを実際の圧延プロセスに対応するモデルに拡張した。大学にて加工フォーマスタを用いて、連続的な加工と冷却を施す実験を行った。実験結果と圧延結果とを用いて、析出モデルを同定した¹⁾。

3.2 材料設計支援のためのシミュレータ

つぎに圧延プロセスモデルと材質予測モデルを組み合わせた材料設計支援のためのシミュレータを開発した。これは、製品を作りこむための圧延条件の検討や新製品開発に材質予測システムを活用したい、という顧客要求に基づくものであった。たとえば、化学成分や圧延条件から強度に影響を及ぼす複数の因子を選択し、範囲と刻

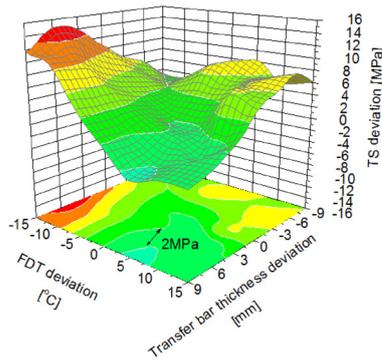


図 2 粗出側板厚（バー厚）と仕上出側温度（FDT）が強度に及ぼす影響をシミュレーションした結果²⁾

みを与えて圧延プロセス計算と材質予測を繰り返し行い、結果を視覚化することで、強度の傾向を把握できる（図 2）²⁾。

3.3 マルチフェーズフィールド法による変態組織予測

金属組織の結晶粒サイズは、数 μm から数十 μm 程度である。結晶粒のような、目に見えるレベルの「マクロ」よりは小さいが、原子レベルの「ミクロ」より大きいスケールは、メソ（中間）スケールと呼ばれる。鉄鋼材料の機械的性質は、メソスケールの金属組織に大きく依存する。よって、材料設計を目的としたシミュレーションには、メソスケール組織予測技術が有効と考えた。結晶粒の分布や方位などより綿密な組織情報の予測や、組織変化過程を視覚的に捉えるための手段として、多結晶体のメソスケール解析手法であるマルチフェーズフィールド法を取り入れた。冷却中のオーステナイト-フェライト変態をシミュレーションし、変態中のフェライト組織の成長や、変態後のフェライト組織の分布や異方性を視覚的に示すことができた（図 3）³⁾。

3.4 材質監視における機械学習の利用

強度や延性は、引張試験で計測し、JIS などで定められた値を満たすかどうかを確認されている。ただし、全製品コイルに対してではなく、数コイルにつき 1 コイルなどの頻度で試験される。材質予測システムの機械的性質の予測値によれば、引張試験が未実施のコイルに対しても、品質の一次判定をすることが可能である。しかし、そのためには、材質予測モデルの予測精度が重要である。予測精度向上のために、引張試験で得られた機械的性質の実績値と材質予測モデルの予測値を比較し、モデルを学習しており、近年では、機械学習も適用することによって、より精度が向上した。

また、圧延によって薄く延ばされた製品コイルは全長 1 km などにもなるが、尾端部などの一か所のみから切り出した試験片で強度を確認することが一般的である。部位によって温度条件が異なるなどの要因で、機械的性質にバラツキが生じるため、コイル全体にわたって強度を確認できるようにしたいという顧客要求があった。従

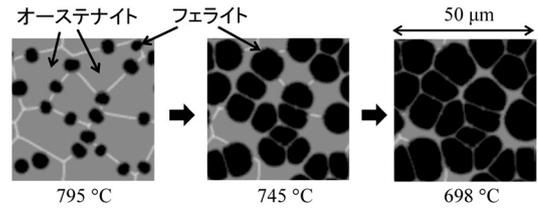


図 3 マルチフェーズフィールド法による冷却中のオーステナイト-フェライト変態のシミュレーション結果

来の材質予測システムは、コイル長手方向中央、先端、尾端などの圧延条件が特に異なる代表点のみの機械的性質を予測していた。よって、顧客要望に応えるためには、計算点の拡張が求められたが、材質予測モデルは、計算負荷が高く、単純に計算点を増やすのでは、応答時間が長くなり、実用上望ましくなかった。そこで、機械学習を利用し、近似的な材質予測モデルを構築した。材料設計支援のためのシミュレータを用い、さまざまな製造条件における機械的性質を予測することで、製造条件（説明変数）と、計算結果である機械的性質（目的変数）が対になったデータセットを用意する。これを用いて機械学習モデルを訓練することで多点のオンライン計算に適用可能な近似モデルを得た。

4. おわりに

鉄鋼材料の振る舞いや性質は奥深く、興味が尽きない。材質予測モデルを充実、進化させる開発を継続したい。また、現実の設備や操業と密接しつつも、先例のない条件で検討するための柔軟性も備えた人間中心の CPS 開発にも取り組んでいる。材質のみでなく、エネルギー効率や生産性などを多角的に最適化するソリューションで、鉄鋼製造の持続可能性に貢献したい。

(2023 年 12 月 27 日受付)

参考文献

- 1) M. Kihara, et al.: Steel Research International Special Edition: 10th International Conference on Technology of Plasticity, 105/110 (2011)
- 2) 木原 美怜ら：電気学会研究会資料 MZK 2014, 12-7, 25/30 (2014)
- 3) M. Kihara, M. Sano, and K. Ohara: A Multi-Phase-Field Simulation of Carbon Steel under Actual Conditions of a Hot Rolling Process, A: COMPLAS XIII. COMPLAS XIII: proceedings of the XIII International Conference on Computational Plasticity: fundamentals and applications, CIMNE ed. Barcelona: CIMNE, 2015, 686/693 (2015)

[著者紹介]

木原 美 怜 君

2008 年首都大学東京システムデザイン研究科システムデザイン専攻修士課程修了。同年 TMEIC 入社。現在に至る。鉄鋼熱間圧延プロセスのモデル開発に従事。

E-mail: KIHARA.mirei@tmeic.co.jp

所属：株式会社 TMEIC 東京都中央区京橋 3-1-1