



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

圧延研究とともに With the Research of Rolling

河西大輔
Daisuke Kasai

日本製鉄(株)
技術開発本部 プロセス研究所
研究企画室 主幹

1 はじめに

本稿を執筆する機会をいただき感謝申し上げます。筆者は入社以来、一貫して板圧延技術の研究開発を担当してきた。もともと学生時代は機械工学専攻ではあったものの、修士論文のテーマはマルチボディダイナミクスの数値解析手法に関する研究であり¹⁾、圧延を中心とする塑性加工を研究対象として取り組み始めたのは2006年に当時新日本製鉄(株)ー現日本製鉄(株)に入社して以降である。しかし、そもそも就職活動中に鉄鋼業を志望する決め手となったのは、初めて熱延工場を見学した際にそのダイナミックかつ緻密な操業に魅かれたためであり、圧延を担当する部門に配属され、とても喜ばしく感じたことを覚えている。

本稿では、これまでの研究開発活動の中で、反り現象のメカニズム解明に向けて取り組んだ内容²⁾について紹介する。偶然撮影された、実機における反りトラブル発生の瞬間を撮った動画を見たことが、反り現象を研究対象とするきっかけとなった。このような重大な事象が、未だにメカニズムの説明がつかない、ということを知り、解決の必要性とともに、壁の大きさを実感したものである。

2 反り発生メカニズムの解明

圧延プロセスにおいて、被圧延材が圧延機出側で上下に湾曲する反り現象がしばしば発生する。圧延ラインにおいて被圧延材に過大な反りが発生すると、圧延設備に深刻な損傷を与えると共に、予定外のライン停止を生じる。この反りは上下非対称要因によって生じることが知られている。代表的な事例は、圧延ワークロール(以下、WR)の周速度の上下差、いわゆる異周速圧延や圧延機入側材料に付与された傾斜角³⁾、被圧延材の上下面温度差等による被圧延材の変形抵抗上下差⁴⁾、WR径の上下差⁵⁾、あるいは摩擦係数の上下差である⁴⁾。

また、圧延における反り現象においては、圧延形状比(接触弧長/平均板厚)により反り挙動が整理できること、圧延形状比の大小により同じ上下非対称外乱に対しても反りの方向が反転すること等が、種々の実験事実や計算結果として知られている。しかし、これら反り特性に関わる主因子とその作用、メカニズムについては必ずしも明確には説明されていなかった。

そこで広範な圧延条件下でモデル圧延実験および剛塑性有限要素法による数値解析を行い、解明を試みた。

筆者の研究では、反りを発生させる上下非対称要因として異周速状態、中でも、上下WRの一方を駆動し、他方を非駆動とする片側駆動圧延を対象とした。モデル圧延実験では、被圧延材として純アルミ材を用い、反りの挙動を詳細に観察した。Fig.1に圧延後の被圧延材反り形状を示す。圧下率の低い条件では板は非駆動WR側に反るが、一方で圧下率が高い条件では反り方向が反転し、板は駆動WR側に反ることが確認できる。

反り現象の実験観察の難しさの一つに、ばらつきの大きさが挙げられる。圧延条件を全く同じに揃えたつもりでも、圧延後の反り形状は安定しないことが多い。過去の研究を見ても、文献によって結果が異なるケースを目にする。そこで筆者は、圧延実験での反り挙動の再現性を高めることを目的と

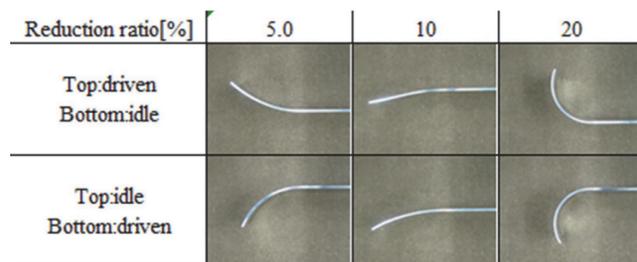


Fig.1 Warped strip shapes after single roll driven rolling.

し、実験方法の確立に取り組んだ。まず、インパクトドロップのばらつきを低減する目的から、被圧延材の先端がWRに噛み込む際の外力、いわゆる押し込み力を最小化する被圧延材の挿入装置を自製した。この装置は押し込み力の測定機構を備えており、種々の圧延条件に対して必要十分な押し込み力を安定して付与することが可能となった。さらに、タッチロール式のロータリーエンコーダによるWRの周速度測定も工夫の一つである。本研究では非駆動WRのみならず駆動側も同エンコーダで測定することとした。これによりスピンドルやジョイント部のねじり変形の影響を排除でき、被圧延材に接触する両WRの表面速度を直接測定することができる。その結果、本論文のFig.2に示すように、噛み込み直後には駆動側の下WRの表面速度が過渡的に減速する、インパクトドロップ現象が直接測定され、これに遅れて非駆動側の上WRが常に駆動側より遅い速度で連れ回る状況を詳細に観察、確認することができた。加えて、アルミ材の無潤滑圧延で不可避のロールコーティングによる摩擦係数の経時変化を防止するため、WRは圧延試験1回毎にアセトンで磨いた。さらに、被圧延材の入射角が反りに影響することが懸念されたため、これも圧延試験1回毎にレベル計で被圧延材の傾斜角度を測定し、水平を維持することに努めた。これらの取り組みにより、Fig.1に示すような精緻でバラツキの少ない試験結果を得ることができた。

続いて、片側駆動圧延におけるロールバイト（以下RB）内の応力・ひずみ状態を明らかにし、反り現象のメカニズムについて考察を行うため、剛塑性有限要素法による2次元平面ひずみ定常圧延解析⁶⁾を行った。モデル圧延実験結果との比較をFig.3に示すが、圧延形状比により反り方向が反転する現象が解析結果でも得られ、曲率も良い一致を示している。今回使用した剛塑性FEMモデルは、同じ剛塑性FEMを用いた圧延反り解析に関する既報告^{4,7)}から下記に紹介する様々な改良を加えてきており⁸⁾、上述の実験方法の工夫を含めて、得られた実験結果とのよい一致を得ることに寄与したと考えている。

1) Newton-Raphson法の組み込みにより力の釣り合い方程

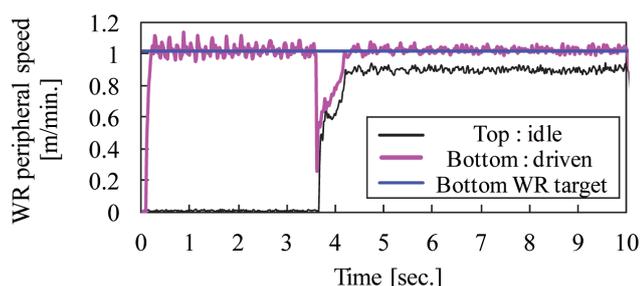


Fig.2 Evolutions of WR peripheral speed. (Top:idle/Bottom:driven)

式（非線形連立方程式）の収束精度が向上した。

- 2) 解析領域出口の境界条件について、それまではモーメントのみをフリーとしていたが、それに加えてせん断力もフリーとし、自重の影響を除き、実験で想定されるRB出口断面での力学的拘束条件を全て満足させた。
- 3) 接触解析機能の導入により、RB入出口点の計算精度および収束安定性が向上した。
- 4) 並列コード化により計算速度が向上し、実用可能なメッシュ分割数が飛躍的に増大した。
- 5) 非駆動WRの周速度の収束計算手法を改善し、安定性、精度が向上した。

Fig.4には上WRを非駆動とした条件の相当塑性ひずみ速度の分布の一例を示す。相当塑性ひずみ速度の集中した領域が、上下のRB入口に始まり、圧下方向に対しおおよそ45°方向に帯状に伝播し、反対側の表面へと進行しているが、これはせん断塑性変形の集中帯、いわゆるせん断帯である。Fig.5にはFig.4で示した計算条件におけるRB内の被圧延材上下面の圧延方向速度を示す。被圧延材表面の圧延方向速度はせん断帯が被圧延材表面と交差する位置で集中的に増加、すなわち被圧延材が延伸していることが観察される。ここで圧延反り現象に着目すると、被圧延材の表面速度はRB出口に最も近い非変形領域においてWR速度に一致し、さらにこれにRB出口のせん断帯で生じる速度変化が加わって被圧延材のRB出口速度が決まり、この速度上下差によって圧延反りの方向および曲率が決定されていると理解できる。

以上のような検討により、圧延変形の実体はRB入口およびRB内に発生するせん断帯であり、このRB入口から45°方向に進展するせん断帯に沿った材料速度変化の力学的考察

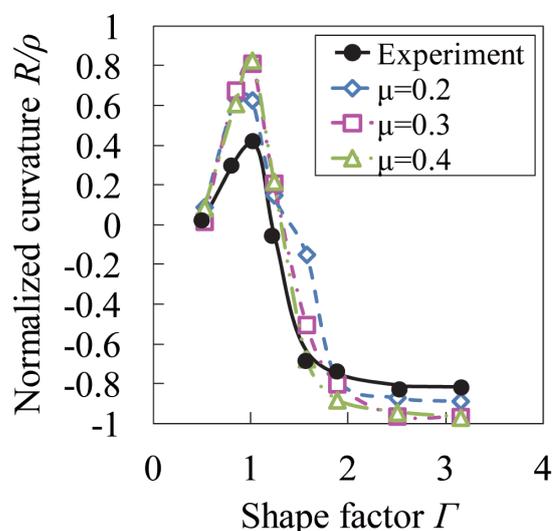


Fig.3 Comparison of curvature between experiments and calculations. (Top:idle/Bottom:driven)

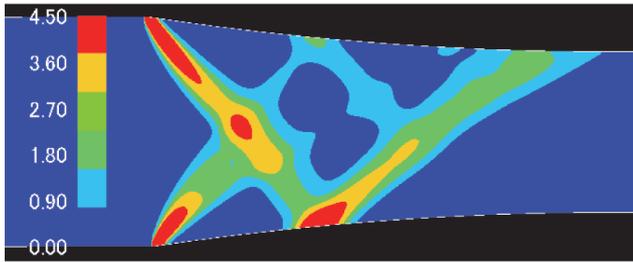


Fig.4 Equivalent strain rate distributions around the roll-bite. (asymmetric conditions;Top:idle/Bottom:driven)

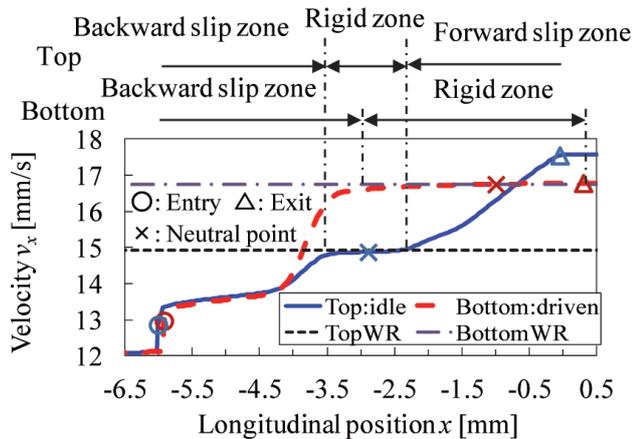


Fig.5 Evolution of material velocity along rolling direction at both surfaces. (asymmetric conditions;Top:idle/Bottom:driven)

と、上下非対称に生じるせん断帯形成の理解を通じて、これまで実験事実として用いられてきた圧延形状比による反り方向の逆転現象を明確に説明することができた。この考え方は、今回対象とした片側駆動圧延だけでなく、被圧延材入射角や上下WR径差、上下摩擦係数差など、他の上下非対称外乱により引き起こされる反り挙動についても成立すると考えられる。

3 おわりに

上記の取り組みにより、反り発生メカニズムについては一つの考え方を提示することができたと考えているが、実操業への貢献という観点ではまだ道半ばである。また、圧延変形を支配するせん断帯の伝播形態やその分散形態の決定機構については、定量性を含め、まだ十分に解明されたとまでは考えていない。反り現象を始めとする圧延における非定常変形挙動解明、解決を目指し、引き続き研究開発に邁進する所存であり、今後とも皆様のご指導、ご支援を賜りたい。

参考文献

- 1) 吉村浩明, 柚木努, 河西大輔: 日本機械学会2005年度年次大会講演論文集, 5 (2005) 7, 325.
- 2) 河西大輔, 古森愛美, 石井篤, 山田健二, 小川茂: 鉄と鋼, 101 (2015), 319.
- 3) 木内学, 向四海: 第34回塑加連講論, (1983), 109.
- 4) 浜渦修一, 上堀雄司, 山田健二, 吉田忠継, 川並高雄: 鉄と鋼, 73 (1987), 59.
- 5) 本村貢, 田中康敏: 第25回塑加連講論, (1974), 165.
- 6) 山田健二, 小川茂, 阿高松男, 菊間敏夫: 第41回塑加連講論, (1990), 63.
- 7) 山田健二, 浜渦修一, 川並高雄, 森謙一郎: 昭61塑加春講論, (1986), 235.
- 8) 山田健二: CAMP-ISIJ, 26 (2013), 560, CD-ROM.

(2019年4月19日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

東京大学 大学院工学系研究科 機械工学専攻 教授

柳本 潤

河西氏とはずいぶん長いお付き合いなのですが、原稿を拝見するに2006年ご入社とのこと。長いお付き合いとを感じるのは、入社後間もないころから、河西氏の研究に触れているからでしょう。圧延における非対称な挙動と言えば河西、といった感じで皆さんが捉えている（親しみを込めて）河西さんに、メッセージを寄せる機会があるのは光栄なことです。

まだ駆け出しの教員であったころ、生産技術部門のある部会で「まっすぐな圧延」をターゲットとした技術検討会に参加する機会を得たことがあります。まっすぐに板が圧延されていくのが当たり前だと思っている方は、機械以外の学科を出た方にはそれなりに多くおられると思います。私は機械工学科の出身なので、機械につきもののガタなどにより、製鉄機械のような複雑かつ大型の機械（プラント）がそう簡単には操ることなどできない、との印象を、予め持っていました。しかし、この技術検討会で語られることは想像をはるかに超えておりました。通常はまっすぐに進む鋼板が、圧延機、板の姿勢やロールなどに起因する何らかの原因で、まっすぐにはいなくなるのです。圧延における非対称な挙動は、これを積極的に利用して、圧延荷重を下げるといった利益を生む場合もあります。しかし、まっすぐな圧延を阻害す

る、そり、曲がりといった好まざる変形は、連続圧延時の通板（つうはん）の不安定さを介して時としてラインの停止につながることもあり、これは毎月の様に、生産性が生命線である圧延ではかなり問題となる程度の頻度で起こっているらしい、のです。非対称な挙動は極端に起こりますと、圧延設備の故障といった重大な事故につながる可能性がありますし、何より圧延の生命線である生産性の向上を阻害する主たる要因なわけですから、昔から解決が求められてきた、根本的な課題の一つです。

河西さんはこれまで、圧延における非対称挙動の解明に理論、実験の両面から取り組んできています。圧延における非対称な挙動にはダイナミック（動的）な現象が関わっている、またはきっかけとなっている、不安定な現象である場合が多いと思います。それゆえ実験での再現も難しいのですが、河西さんの大学での専門を本稿で拝見して、成果に合点がきました。河西さんの一連の仕事のうち公開されている部分を見ると、徹底的に非対称挙動を解明しようとする姿勢と強い意志を見て取ることができます。河西さんはすでに俳論賞を贈賞されており、今後の圧延・加工プロセス分野を担っていかれる新進気鋭の研究者の一人です。今後のますますのご活躍を、お祈りしています。

(株)神戸製鋼所 技術開発本部 材料研究所 加工技術研究室 主任研究員

柳 修介

河西さんから「躍動」へのコメントを依頼された時、私がまとめ役をしていた企画でお世話になったお礼になればと深く考えずにお引き受けしたが、書く段になり安請け合いを後悔している。河西さんのご業績の振り返りについて深くは知らず、学術的な業績にも乏しい自分でよかったのか？と。浅薄なコメントになることをお許し頂きたい。

お世話になった企画とは、圧延理論部会が企画した「圧延反り」に関する技術検討会である。企業委員12名（若手中心）に加え、大学委員の先生方にアドバイザーとしてご参加頂き、反りに関する過去の文献調査と発表という勉強会スタイルの活動を行ったが、その中で第1線の研究者からの講演を、という先生方からのご提案があり、反りに関する研究成果のプレゼンをお願いした。河西さんは二つ返事でお引き受け下さり、素人集団に丁寧なレクチャーをして頂いた。この場をお借りして改めてお礼を申し上げたい。

河西さんも記事の中で触れられている通り、圧延時の反りの問題は過去、様々な研究成果が報告されているが、実操業では反りが解決されたとは言いがたい。過去の研究成果を頭におきつつ、経験と試行錯誤で反りの小さい安定した圧延を実現するのに苦労している、というの

が現状であるように思う。

反りによるトラブルが頻繁に起こるわけではないが、ひとたびトラブルとなると被害が甚大であることが多くその対策は重要であるが、国内の学術発表件数は1980年代をピークに減少している。河西さんらのグループは、一時に比べ少なくなった当該分野の研究を下支えされている。とくに河西さんが記事で触れられている再現性を可能とする精緻な実験技術、実験と完全に同じ境界条件を導入するための定式化とFEM解析への組み込み、これらにより実験と解析で定量的な結果の一致を見る至ったという成果は、同様な実験や解析を多少試みた経験のある者からすれば、大変難しい課題を解決されたことがよく理解され、深く敬意を表したい。FEM解析から得られるロールバイト内の導入ひずみの形態、速度場と反りの方向を対応付けたメカニズムの考察は、大変価値のあるご業績と思う。

その一方、なぜロールバイト内にそのようなひずみが導入されたのか？という問題に関してはより深い理解が必要というご指摘は同感である。河西さんには引き続き反りの問題を深く掘り下げるとともに、圧延研究全般で勢力的にご活躍され、業界をリードする圧延技術者へご発展されるようお祈り申し上げます。