



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

圧延における反り現象の解明に向けて

Clarification of Strip Warpage Behavior in Rolling Process

河西大輔

Daisuke Kasai

新日鐵住金（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

本稿では、平成29年俵論文賞に選出いただいた拙著「片側駆動圧延における板材の反り挙動とその機構」¹⁾について、研究の背景、工夫した点等について紹介したい。

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し、問題となる。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²⁾、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³⁾、WR径の上下差⁴⁾、あるいは摩擦係数の上下差である³⁾。

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、解明を試みたのが本論文である。

2 論文の骨子

本論文では、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、被圧延材として板厚3mmの純アルミA1050-H24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、Fig.2に本実験結果における圧延形状比とWR半径で

Reduction ratio[%]	Top:driven Bottom:idle	Top:idle Bottom:driven
2.0		
5.0		
7.0		
10		
15		
20		
30		
40		

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

* [今回の対象論文]

河西大輔, 古森愛美, 石井篤, 山田健二, 小川茂: 「片側駆動圧延における板材の反り挙動とその機構」, 鉄と鋼, Vol.101 (2015), No.6, pp.319-328 (第79回俵論文賞受賞論文)

規格化した反り曲率との関係を示す。圧延形状比が1.2以下では板は非駆動WR側に反り、一方で圧延形状比が1.2より大き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。両図には、被圧延材の自重の影響度合いを計るために、非駆動WRを上下換えて実験した結果を表示したが、後述する工夫によりほぼ上下対称な反り形状を観察結果として得ることができた。

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⁵⁾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。

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には上WR非駆動条件における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成域においてWR速度に一致し、

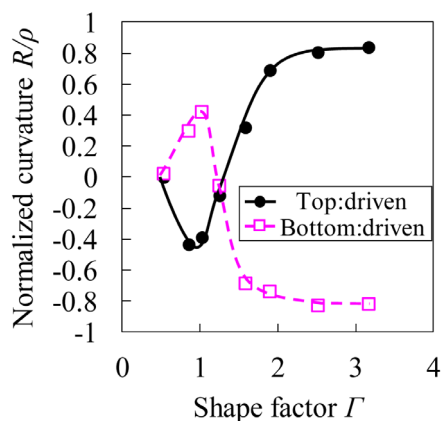


Fig.2 Strip curvature change with the shape factor.

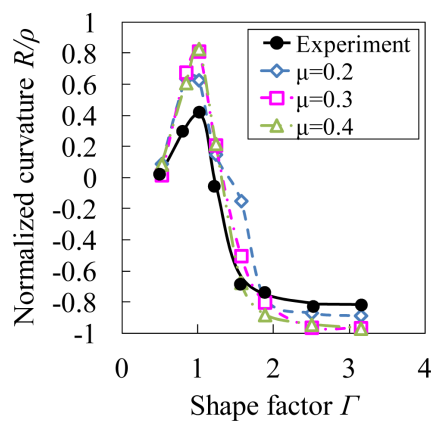


Fig.3 Comparison of curvature between experiments and calculations. (Top : idle/Bottom : driven)

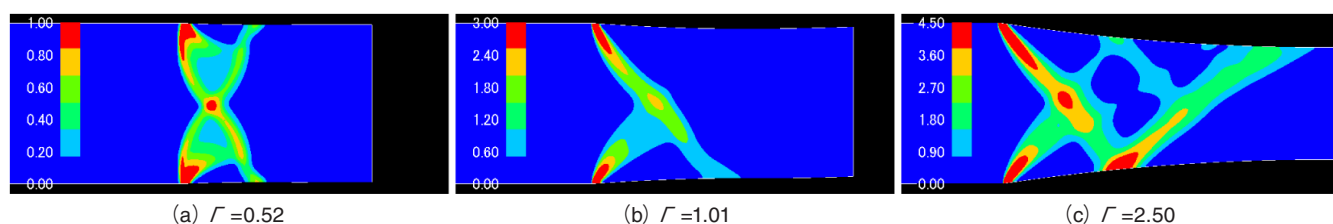


Fig.4 Equivalent strain rate distributions around the roll-bite. (asymmetric conditions ; Top : idle/Bottom : driven)

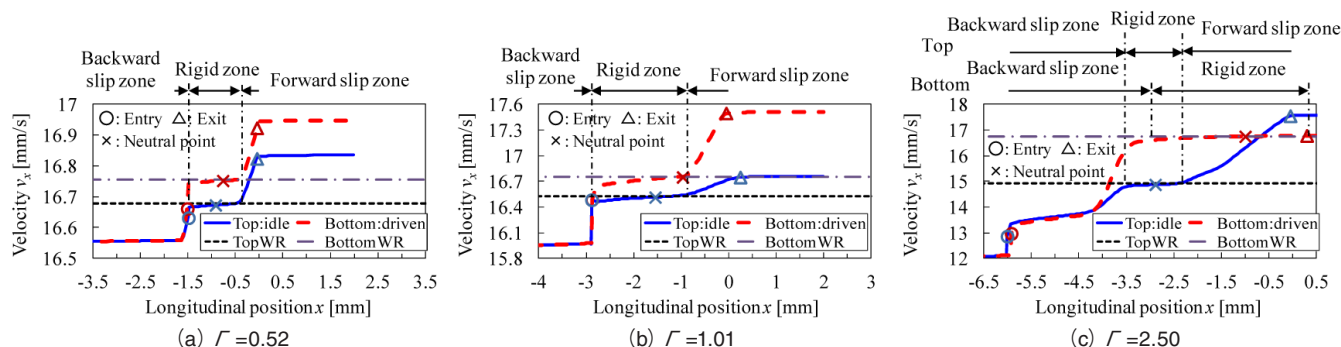


Fig.5 Evolution of material velocity along rolling direction at both surfaces. (asymmetric conditions ; Top : idle/Bottom : driven)

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。圧延形状比 $\Gamma = 1.01$ の条件では、WRが駆動されている下面側のRB出口近傍材料速度が既に上面側より大きく、さらに下面側のRB出口のせん断帯における速度増加も大きくなるため上側に反る。一方、圧延形状比 $\Gamma = 2.50$ の条件では、RB出口近傍には下面側の非変形領域から上面側のRB出口に向かうせん断帯の存在と、このせん断帯に沿って圧延方向速度が加速するという力学的考察から、上面側の速度が下面側の速度を上回り、下反りとなることが理解された。

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本論文において初めて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 圧延実験方法の確立

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の当たりにする。

そこで本論文では、圧延実験での反り挙動の再現性を高めることを目的とし、実験方法の確立に取り組んだ。まず、上下非対称外乱条件として片側駆動圧延を選定したのもそのためである。実際には本研究に先立って上下双方を駆動する異周速圧延実験を試行したが、被圧延材の噛み込みによってミルモータの負荷トルクが急激に増加し、WRの回転速度が低下する、いわゆるインパクトドロップ現象による速度変動が抑えきれず、上下WR速度の大小関係が反転する場合があるなど、反り挙動の再現性を十分に得ることができなかった。これに対し、片側駆動圧延の場合は、非駆動側の圧延トルクが必然的かつ安定して0となり、また、圧延に必要な塑性変形エネルギーは駆動側WRから加えられることになり、被圧延材の極端な減速が生じない限り、駆動側の周速度が高速となると考えた。

また、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.6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、いわば真の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。

その他、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。一方でFig.1より観察されるように、圧下率10%、15%の条件では駆動条件を上下反転させた際の反り形状の対称性が崩れており、圧延反り現象の実験研究のハードルの高さを再認識した。

この他にも様々な圧延状況の実験観察に取り組んだが、芳しくない結果となったのが圧延後の被圧延材に残存したWRの圧痕の観察である⁶⁾。今回の試験では、被圧延材は先端から約50mm圧延して噛み止め、取り出している。被圧延材には、噛み止め時の接触長に相当する圧痕が残るので、その境界位置を正確に測定し、RB形状(上下の接触開始/終了点)の情報を考察に用いることを試みたが、圧延形状比等の圧延条件の変化に対応した圧痕長の特徴を見出すことができなかった。噛み止め中の圧延荷重の時系列変化やRB内の被圧延材の挙動を撮影した動画を詳細に観察した結果、WRの回転を停止する際に、圧延荷重が減少し、WRやハウジングの

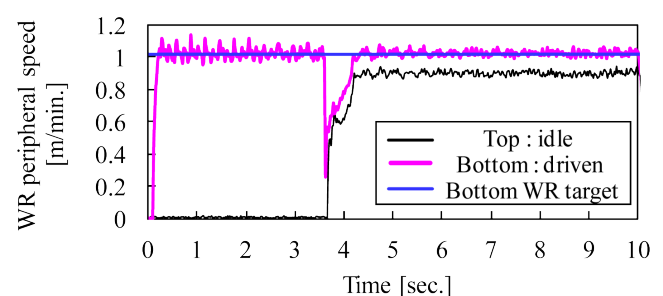


Fig.6 Evolutions of WR peripheral speed. (Top : idle/Bottom : driven)

弾性変形が復元した結果、ロール間隙が減少した状態で圧痕が残ることが判明した。この圧延荷重の減少は、回転停止に伴うWR～被圧延材間の摩擦力の低下に起因すると考えられ、現時点では、噛み止め試験によって圧延中の接触弧長内の状態を正確に観察することはできない、と考察している。

4 圧延FEM解析モデルの進展

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^{3,7)}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。

特に、1)のNewton-Raphson法の組み込みにより、圧延方向の力の釣り合い精度が抜本的に向上したので、変形解はもちろんのこと、5)の非駆動WRの周速度解の収束精度も向上できたと考えている。また、計算機的能力向上と並列コード化によって、数万要素の計算も実用的に行えるようになったことも精度向上に大きく寄与している(既報告では数百要素)。メッシュ数の飛躍的増大により、RB内の応力・ひずみ形態を精緻に観察できるようになったことも、本論文の考察に重要な役割を果たしている。

5 おわりに

圧延技術者にとって、圧延による反り現象の研究は新しいテーマではなく、過去から現在に至るまで取り組まれ続けて

いる課題である。そのようなテーマを題材とした拙著が依論文賞に選ばれたことは大変光栄であると同時に、先人の残された偉大な知見を思うと、改めて身の引き締まる思いである。

私は入社以来、一貫して圧延技術の研究開発を担当してきた。並行して学会活動にも参加してきたが、特に、日本鉄鋼協会生産技術部門 圧延理論部会には私を育てていただいたと感謝している。これまで、若手ステップアップ講演、一般講演と報告し、昨年3回目の挑戦でついに優秀講演賞をいただくことができた。若手圧延技術者の育成にはこれ以上ない最適な部会である。今後も継続して活発な活動をされることを期待したい。

今回受賞した研究内容により、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。本課題の更なる技術進展を目指し、引き続き研究開発に邁進する所存である。

参考文献

- 1) 河西大輔, 古森愛美, 石井篤, 山田健二, 小川茂: 鉄と鋼, 101 (2015), 319.
- 2) 木内学, 向四海: 第34回塑加連講論, (1983), 109.
- 3) 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), A59.
- 4) 本村貢, 田中康敏: 第25回塑加連講論, (1974), 165.
- 5) 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.
- 6) D.Kasai, A.Ishii and S.Ogawa: Proc. of Rolling 2013, Associazione Italiana di Metallurgia, Italy, (2013), CD-ROM.
- 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.

(2017年7月31日受付)