

# 論文の内容の要旨

論文題目      H形鋼および非対称形鋼のユニバーサル圧延変形に関する研究

氏 名          高嶋 由紀雄

## 1. 序論

形鋼は、用途に応じた様々な断面形状を有する長尺の鋼材である。主な品種としては、山形鋼、I形鋼、H形鋼、T形鋼、レール、溝形鋼、鋼矢板などが挙げられ、その多くは熱間圧延によって製造されている。形鋼の圧延は、上下ロールの間隙が幅方向で異なり、圧延材の厚みや圧下率が幅方向に分布している。このため、幅方向への変形が大きく、圧延状態の理論的な考察が困難である。

形鋼の熱間圧延で最も一般的な方法は、上下 2 本のロールに複数の孔型を配置し、素材から製品まで断面形状を順次変化させて成形する孔型圧延法である。一方、本研究の対象とするユニバーサル圧延法は、20 世紀初頭に確立された新たな形鋼の圧延法であり、従来の孔型圧延の様々な問題点を解消する可能性を有している。この圧延法は、ユニバーサル圧延機とエッジャ圧延機を用いて形鋼を圧延する方法であり、製品垂直部（フランジ）の幅が広く厚さが均一な H 形鋼の製造を可能とした。ユニバーサル圧延機は上下の水平ロールと左右の縦ロールを備えており、これらの 4 つのロール軸が同一の垂直な平面上に配置されている。H 形鋼の圧延では、ウェブと呼ばれる水平部を上下水平ロール間で圧下し、フランジと呼ばれる垂直部を水平ロール側面と縦ロールの間で圧下する（図 1）。

ユニバーサル圧延法は孔型圧延に対して様々な優位性を有するため、H 形鋼以外の形鋼にも適用されている。しかし、H 形鋼以外の形鋼に対しては、圧延変形の系統的な調査がほとんどなされていない。ユニバーサル圧延法をより多くの形鋼に適用し、その優れた特徴を生かして高品質な製品を安価に製造するためには、基本的な圧延変形特性の把握と、圧延条件が変形に及ぼす影響の定量的な解明が、極めて重要である。

そこで、本研究では断面形状の異なる形鋼のユニバーサル圧延について、圧延条件が変形に及ぼす影響を詳細かつ系統的に調査した。H 形鋼を基本断面として、その 1/2 断面に相当する T 形鋼と溝形鋼、1/4 断面に相当する L 形断面の不等辺不等厚山形鋼について、

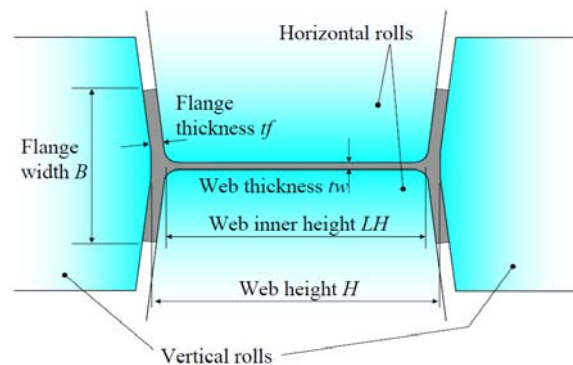


図 1 H 形鋼ユニバーサル圧延

ユニバーサル変形を詳細に調査することにより、これらの形鋼の圧延変形特性を明らかにすると同時に、対称性が異なる 4 種類の形鋼の圧延変形の関連性を解明する。また、これらの形鋼の圧延変形を、モデル実験と有限要素解析の 2 つの手法で調査することによって、実験と解析の結果を詳細に比較し、解析精度を確認するとともに、モデル実験結果から求めていたユニバーサル圧延の変形予測モデルを、有限要素解析による圧延変形調査から簡単かつ高精度に構築する方法を確立する。

## 2. H 形鋼ユニバーサル圧延の変形特性

H 形鋼のユニバーサル圧延においては、フランジ先端が自由表面となるため、圧延変形はフランジ幅の寸法変化として現れる。そして、ウェブとフランジの相互作用が、フランジ幅の変形挙動に大きな影響を及ぼすことが知られている。そして、この相互作用を圧下バランスというパラメータで考慮したフランジ幅広がり予測モデル式が提案されている。

本研究では、鉛をモデル材料としたラボユニバーサル圧延実験により、過去のモデル式を検証し、圧下バランスとフランジ幅広がり線形関係にあることを確認した。さらに、3 次元剛塑性定常有限要素法を用いた圧延変形解析により、メタルフローを含めた詳細な変形挙動を調査するとともに、フランジ幅広がりモデル式を解析結果から求めることが可能であることを立証した (図 2)。

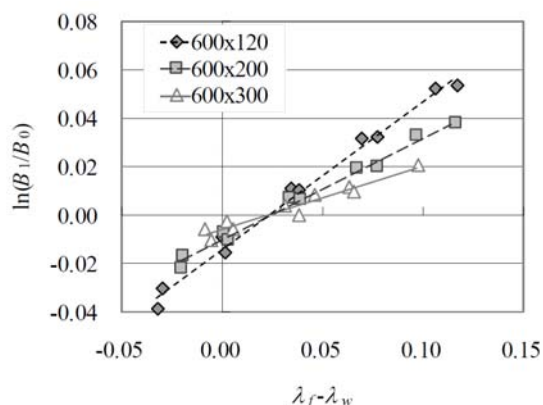


図 2 解析で求めた H 形鋼の幅広がり特性

## 3. T 形鋼ユニバーサル圧延の変形特性

T 形を横にして上下対称・左右非対称な姿勢でユニバーサル圧延する新たな T 形鋼圧延法を提案し、ラボ鉛モデル圧延実験と有限要素解析によってその実現性を検証するとともに、圧延条件と変形の関係を調査した。左右非対称な圧延であることから、大きな左右曲がりの発生が懸念されたが、実験の結果からフランジとウェブの圧下率適正化や左右ガイドの適用によって、左右曲がりの抑制が可能との結果を得た。

また、圧延条件がフランジとウェブの幅広がりにおよぼす影響を調査した。フランジ幅広がり H 形鋼と同様に圧下バランスに対して線形に変化し、圧下バランスが大きいほど幅広がりも大きくなった。一方、ウェブ高さは圧下バランスに対して線形に変化するものの、変化傾向はフランジと逆であることがわかった。

さらに、実際の圧延ラインでの T 形鋼製造 (図 3) を模擬して、ユニバーサル圧延機とエッジャ圧延機を用いて多パス圧延を行うラボ鉛モデル実験を実施し、この方法で実際に T 形鋼の圧延が可能との見通しを得た。

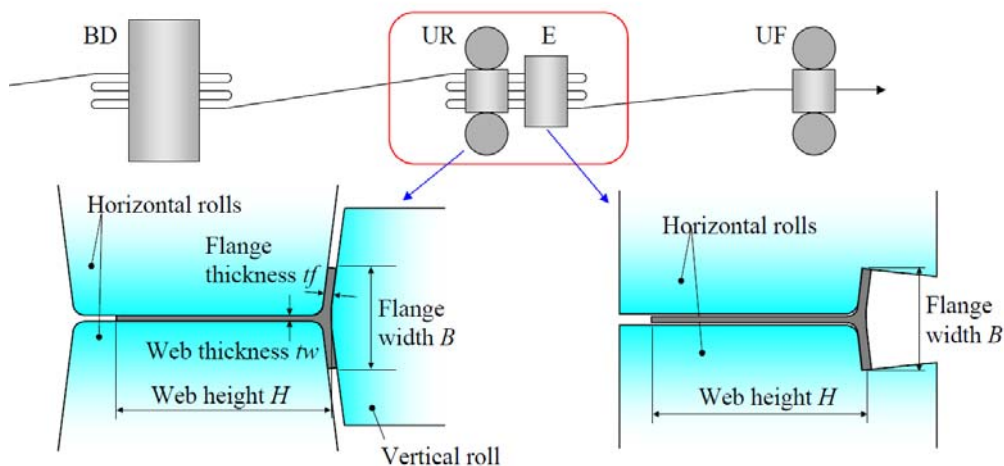


図3 ユニバーサル圧延法を用いた T 形鋼製造プロセス

#### 4. 溝形鋼ユニバーサル圧延の変形特性

溝形鋼のユニバーサル圧延は H 形鋼の圧延法が確立された直後から検討が行われ、様々な報告があるものの、圧延条件と変形特性の関係はほとんど解明されていない。そこで、鉛を用いたモデル圧延実験と有限要素解析によって、圧延変形特性の調査を行った。

フランジ幅広がりや圧下バランスに対して、H 形鋼と同様の線形関係で変化した。また、上下の非対称性に関連するフランジ深さと突起高さ（図 4）の変化を調査した結果、圧下バランスに対してフランジ深さはほぼ一定の減少を示し、突起高さは正の相関の線形関係を有することがわかった。非定常有限要素解析のデータを用いて上下非対称なフランジ変形の要因を調査し、フランジ内面と水平ロール側面の相対すべりによる垂直方向の摩擦力が、大きく影響していることを解明した。

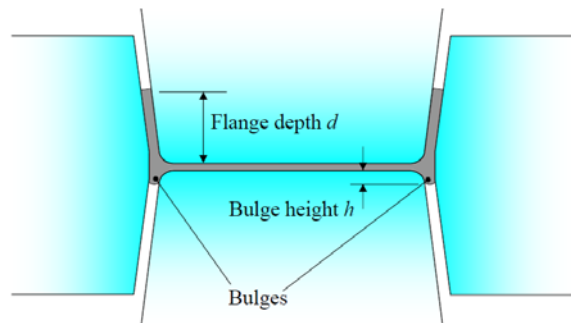


図4 フランジ深さと突起高さ

#### 5. 不等辺不等厚山形鋼ユニバーサル圧延の変形特性

上下左右非対称なユニバーサル圧延として L 形断面の不等辺不等厚山形鋼ユニバーサル圧延（図 5）の変形特性を、鉛モデル圧延実験と非定常有限要素解析で調査した。鉛モデル実験より、ガイドを用いて曲がりと反りを抑制することにより、ユニバーサル圧延が可能とわかった。

圧延条件と変形の関係は、フランジ幅広

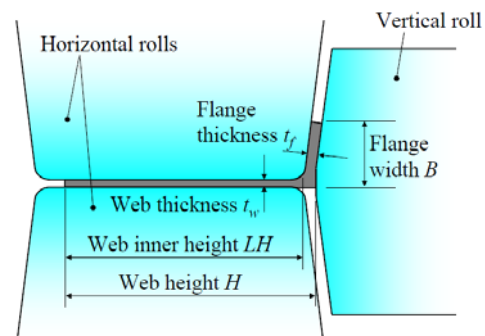


図5 不等辺不等厚山形鋼ユニバーサル圧延

がりとは他の断面と同様の傾向であったが、ウェブ高さは圧下バランスが大きいほど大きくなり、T形鋼と逆の傾向を示した。さらに、フランジ深さは圧下バランスの増加に伴い、減少量が大きくなった（図 6）。

以上の変形挙動を示す要因として、圧延入側での圧延材の回転が大きく影響していることを、有限要素解析で得られた圧延中の変形データから明らかにした。また、実験と解析の結果にはいくつかの相違点があったが、この原因がガイドによる圧延材の拘束度合いの違いであることを解明した。

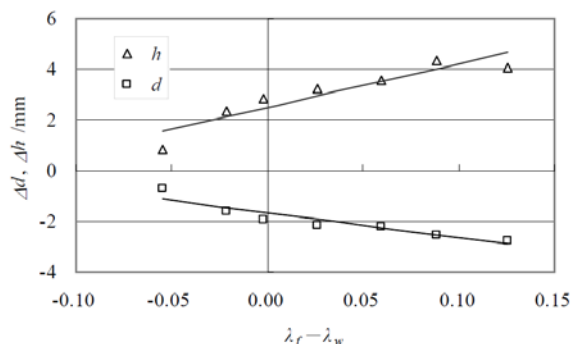


図 6 フランジ深さと突起高さの変化（山形鋼）

## 6. 断面の対称性とユニバーサル圧延変形の特徴

断面の対称性が圧延変形におよぼす影響を定量的に評価するため、H 形鋼とこの 1/2 断面となる T 形鋼のフランジ幅広がりや有限要素解析で比較したところ、両者はよく一致した。一方、同様の比較を溝形鋼とその 1/2 断面の不等辺不等厚山形鋼で実施したところ、両者の変形挙動は相関が低かった。圧延変形を詳細に調査してこの原因を検討した結果、不等辺不等厚山形鋼のような圧延入側での圧延材の回転が、溝形鋼では発生していないためとわかった。圧延材の断面对称性を 4 つに分類して圧延変形の特徴を考察した結果、フランジ内面の垂直方向摩擦力が圧延安定性に大きく影響していることを明らかにした（図 7）。

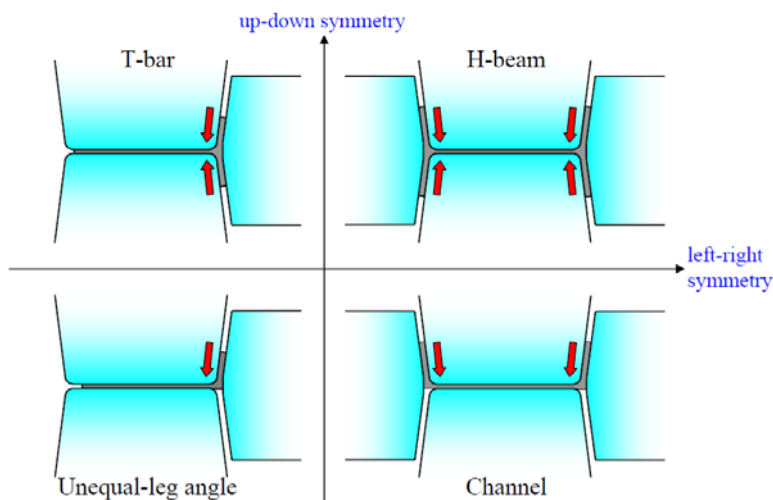


図 7 断面对称性の分類とフランジ内面垂直方向摩擦力

## 7. 結論

断面对称性が異なる 4 種類の形鋼のユニバーサル圧延変形を調査し、H 形鋼ユニバーサル圧延の変形モデル式が他の形鋼にも適用可能であることを明らかにした。また、有限要素解析を用いて変形モデルを定量的に決定する方法を提示した。さらに、断面の対称性が圧延変形におよぼす影響を考察し、フランジ内面の垂直方向摩擦力が圧延安定性に大きく影響していることを解明した。