

報告番号	※ 甲 第 11075 号
------	---------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 線材圧延における表面疵発生メカニズムの研究

氏 名 串田 仁

論 文 内 容 の 要 旨

本研究では、従来の研究対象として主体的には取り上げられてこなかった、線材熱間圧延中に発生する表面疵（しわ疵）を対象とし、しわ疵の発生を予測する技術の確立とスケールがしわ疵に及ぼす影響の明確化、および実操業でのしわ疵低減指針の導出に取り組んだ。熱間圧延された線材は、熱処理、酸洗、引抜きの後、種々の形状に鍛造される。線材の表面に疵があると、その箇所が鍛造工程での割れの起点となる。近年、鍛造加工の多様化や高精度化、工程省略の促進に伴って要求される表面品質もますます厳しくなっており、よりいっそうの表面疵の低減が求められている。

圧延材の表面疵は、大きく分けて鑄造工程起因（晶出物などの不純物、凝固時の偏析、未凝固：ピンホール・割れなど）と、本研究で対象とした圧延工程起因の2つに分類される。さらに圧延起因の表面疵は、鑄造疵・内部欠陥の成長に代表される圧延素材に元々基点がある疵と、圧延中に新たに発生する疵の2つ分類できる。圧延工程で発生する表面疵を低減する取り組みは従来から様々な検討がなされてきたが、鋼片段階に存在していた疵の変形挙動を調査した例が主流であり、圧延変形独自で発生する疵に関して研究された例は少ない。特に線材において、素材から多段の圧延（30パス前後）で線材に成形しており、圧延中のどの段階で表面疵が発生するのかを同定しにくく、その発生メカニズムも明らかになっていなかった。

1960年代～1980年代にかけて、鋼片段階での疵深さや疵発生位置が、線材圧延特有の孔型圧延後の疵深さに及ぼす影響を実験的に定量化する研究が進められてきた。例えば、正方形断面鋼片の断面内代表位置に矩形状の人工疵を付加した素材をラボ圧延機や実機圧延ラインで圧延し、各ステージの横断面疵深さなどを調査することで、鋼片段階の表面疵深さが最終製品の疵深さに及ぼす影響や、孔型系列による変形挙動を明らかにしてきた。これらの研究成果は、鋼片疵取り工程における疵深さの水準管理（最終の表面疵を保証するための鋼片段階疵深さの定量化）に活用されると共に、素材疵除去の厳格化への対応として、自動探傷技術の高度化や疵取り装置の発展に繋がり、素材疵起因の表面疵への対策はほぼ完成の域まで到達した。

1980年代以降、計算機能力や数値解析技術の高度化が進み、2000年に入って各種欠陥を持った素材を圧延したときの、疵変形挙動を定量化する研究が開始された。例えば、板圧延において長手方向に部分的膨らみを持った素材に対し、2次元圧延変形解析により、折れ込み状疵の再現まで実現できており、実操業への展開が期待されるまでできている。

上述の通り、素材段階で存在していた疵については、従来の実験的研究によって自動探傷装置や疵除去管理基準という形で実機化まで到達している。また、素材の局所的な欠陥が基点となる表面疵については、2次元での圧延数値解析を活用することで予測可能なレベルまでできている。一方で、線材の圧延では、孔型圧延に起因する複雑な3次元変形により、素材が無欠陥であっても圧延によって表面疵が発生することが確認されており、更なる表面疵の厳格化に対応するには、その発生メカニズムの解明と予測技術が必要となる。

線材圧延工程で発生する表面疵は、一般的に圧延後の外観によって分類される。ここで、かき疵、折込疵の発生原因は、前者は圧延後のガイド装置との接触、後者は圧延中に孔型から噛み出した圧延材を続く圧延で押さえ込むことによって生じる疵であり、圧延後の外観、あるいは横断面の疵形状調査からの同定や対策は比較的容易である。また、スケール疵は、鋼材表面に部分的に残存した、あるいは鋼材表面から剥離したスケールが圧延によって押し込まれて生じる疵である。

次にしわ疵は、主として自由圧縮面に生じる疵で、「しわ状」にみえることが特徴である。疵発生位置には円周方向に規則性があり、酸洗後の外観では、複数の凹凸が密集したしわ状となっており、その疵の深さは一般的に0.01~0.05mm程度である。発生部位に規則性があることから圧延変形が起因していると想定できるが、同一条件で圧延しても発生頻度にばらつきがあり、その明確な発生原因は明らかになっていなかった。また、極表層に発生することから、スケールも影響していると考えられ、現場的にはスケール密着性の高い鋼種で発生頻度が高いことなどの知見はあるが、その因果関係は明確になっていなかった。

そこで本研究では、圧延後にしわ状に発生するしわ疵を対象とし、しわ疵の発生を予測する技術の確立とスケールがしわ疵に及ぼす影響の明確化、および実操業でのしわ疵低減指針の導出に取り組んだ。

第1章では序論として、熱間圧延線材の表面疵に関する従来の研究をまとめ、表面疵を分類した上で、発生原因が明確化されていなかった「しわ疵」を研究対象としたことを述べた。

第2章では、表面疵発生機構として、圧延中に発生する表面疵を塑性座屈と仮定し、圧延中の任意横断面において、表面節点の位置、速度ベクトル、法線ベクトルから、各表面節点の法線方向の変位増分を η 、その変位増分の周方向に対する変化量を ψ として定式化し、変形過程における η 、 ψ の局所変化を表面疵（塑性座屈）の起点として判断する新たな評価指標を開発した。この評価指標を開発することで、3次元FEM解析により、しわ疵の発生を予測することを可能にすると共に、表面疵が圧延変形中の自由面での表面座屈形態であることを明らかにした。これは数値解析を活用した新たな疵発生予測技術であり、線材圧延の孔型設計における有効の指針となる。

第3章では特に圧延で加圧加工された2次スケールと母材との垂直方向の密着性を評価することに着目し、熱間圧縮／引張試験を活用した加工後のスケール／母材界面の密着性（剥離応力）を定量的に評価する手法を開発することで、圧延工程における高温状態でのスケール／母材間の密着性を定量化できる実験手法を確立した。

この手法は、スケール／母材間の剥離応力データベース構築の上で広く活用できる評価手法である。またこの手法による実験結果から、圧延ロールバイト入側に大きな垂直応力が作用したとしても、SiやCrを含む鋼種ではサブスケールが素材表層に残存して圧延されるため、特殊鋼が主である線材表面疵の変形挙動を理解するためには極表層のスケールを加味した考察が必要であることを明らかにした。

第4章では、第3章で得られた知見を元に、圧延中のスケールの影響として、スケールと素材の変形抵抗の違いによる表面近傍の塑性流動を第2章の評価指標で調査した。その結果、スケール（表面硬質層）により圧延中の自由表面の局所変形が助長され、表面疵の発生が助長されることを確認した。これを実験的に検証するために冷間模擬実験を行い、数値解析で予測されたように表面硬質層が自由表面の変形および表面疵発生に大きな影響を及ぼすことを検証した。この結果は、従来から経験的に知られている、スケール密着性の高い鋼種で表面疵発生頻度が高いことを示唆しており、圧延変形起因の表面疵発生に及ぼすスケールの影響を始めて示した物である。

第5章では、表層硬質層を考慮した上で、各種圧延条件が表面疵発生に及ぼす影響を数値解析によって定量化し、以下の結果を得た。これらの結果は、局所変形を生じさせない入側素材形状／孔型形状の選択やスタンド間張力の適正化など、実機において表面疵を低減する指針となるものである。

- ・摩擦係数は表面疵深さと発生位置に影響を及ぼし、摩擦係数が大きくなるほど疵深さは深くなる。また、圧延での前方・後方張力も表面疵に影響を及ぼし、その影響は後方張力の方が大きく、圧縮側で表面疵に対して不利な方向となる。

- ・表面疵発生指標として採用した ψ と数値解析上の疵深さは各条件で同一曲線上にあり、幾何学上の関係と速度ベクトルから塑性座屈（表面疵）を予測する本手法の妥当性を数値解析で検証できた。

第6章では、本研究で得られた結果の総括、および今後の課題を以下のようにまとめた。表面疵発生を予測する新たな評価指標の開発、およびスケールを模擬した表層硬質層の導入により、3次元FEM解析によるしわ疵の発生予測を可能にし、実機でのしわ疵低減指針を得た。また、スケールはロール／材料の摩擦係数としての影響のみならず、自由表面の塑性変形挙動に影響を及ぼし、スケール状態の予測が重要であることを明らかにした。

一方、スケール状態（剥離有無）の予測に関しては、密着性の定量評価までは可能となったが、更にスケール剥離の有無を正確に予測するには、スケール自身の力学的な特性等を明確にする必要があり、今後の課題である。