

板圧延における圧延方向に平行な表面疵の変形過程の解析

湯川 伸樹*・吉田 佳典*・石川 孝司*

Deformation Analysis of Longitudinal Surface Micro-defects in Flat Rolling

Nobuki YUKAWA, Yoshinori YOSHIDA and Takashi ISHIKAWA

Synopsis : The shape change of longitudinal surface micro-defects in flat rolling was investigated using a rigid-plastic finite element analysis. Rolling of plate with V-shaped scratches or rectangle defects that are parallel to the rolling direction, was simulated assuming a generalized plane strain condition. The calculated results were verified with experiments of model material, and good agreement between both results was obtained. The influence of rolling conditions, such as reduction, friction coefficient and the position of initial defect, on the shape of existing defect after rolling was evaluated. Using the developed FEM, the evolution of seam defects was also simulated, and good agreement with experimental results were obtained. The proposed prediction method can be utilized to make defect free products in flat rolling.

Key words: surface micro-defect; seam defects; flat rolling; rigid-plastic FEM; generalized plane strain analysis.

1. 緒言

近年、圧延鋼板の品質に対する要求はますます厳格になってきている。その中で、圧延に関して未だ残されている問題の一つとして、鋼板表面に発生する疵の問題が挙げられる。圧延後の板表面に疵が発生すると、鋼板の品質を損なうばかりではなく製品の製造過程において材料の破断や割れを引き起こす原因にもなるため、作業現場では疵を発生させないよう多大な努力がなされている^{1,2)}。

表面疵の発生は、連続鋳造時の酸化物等の巻き込みや体積変化によるボイドの発生、再加熱温度の設定ミスによる割れ、圧延工程におけるロール-材料間への酸化物等の異物の巻き込み、ロールについた疵の板への転写、材料や表面酸化物の加工性に関する要因など、様々な原因が指摘されている。しかしこれらは十分に明らかにされておらず、現段階では疵の発生を完全に防止することは困難である。

鋼板に発生する疵の形状は発生要因などにより種々な特徴を有するため、疵形状の変化を知ることができれば疵の発生原因を推定する有効な手段となりうる。しかし実際の鋼板では、疵の発生後に幾重にも圧延加工が施されるため、最終的な板の表面疵とその原因となった初期の疵とを対応づけることが困難であった。このことは逆に圧延後の疵形状と圧延前の疵形状を正確に対応づけられることができれば、疵の発生原因の有効な推定手段となり、疵を減少させるための対応策もとることができることを示している。このような観点から、これまでも鋼スラブ表面に代表的な

人工疵を施して圧延実験をして、疵の変形を調査した研究がいくつか報告されている³⁻⁸⁾。しかし、表面疵の変形に関して数値解析を用いた例はほとんどない。それは疵部が材料全体の大きさに比して非常に微小であり、そのような局所的な微小領域の変形解析は困難を極めるからである。

これに対し、筆者らは微小領域の変形解析が可能な平面ひずみ剛塑性有限要素プログラムを開発し、人工疵を付与した板の圧延実験結果との比較から圧延方向に対して直角方向にある疵や突起の変形に関して高精度に求めることが可能であることを示した⁹⁾。さらにさまざまな形状の表面疵の変形解析を行い、各種圧延条件や異物巻き込みによる疵形状への影響について調査を行った¹⁰⁾。

本研究においては、圧延方向に対して平行な方向に疵が存在する場合の疵変形について調査することを目的として、解析プログラムを一般化平面ひずみ問題に適用できるように拡張を行った。そしてそれを用いて圧延後の疵形状に対する初期疵形状、疵の位置、圧下率や摩擦条件などの影響を調査した。また側面の皺や疵が圧延による板のバルジ変形によって板上面に回り込んで圧延方向に平行な疵となるシーム疵についても、実験および解析を用いて調査し、本解析手法の妥当性を検討した。

2. 解析方法

本研究ではFig. 1に示すように圧延方向に対して平行な表面疵を対象とする。変形解析においては著者らが開発し

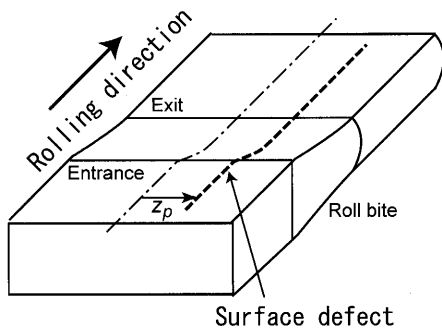


Fig. 1. Defects parallel to rolling direction.

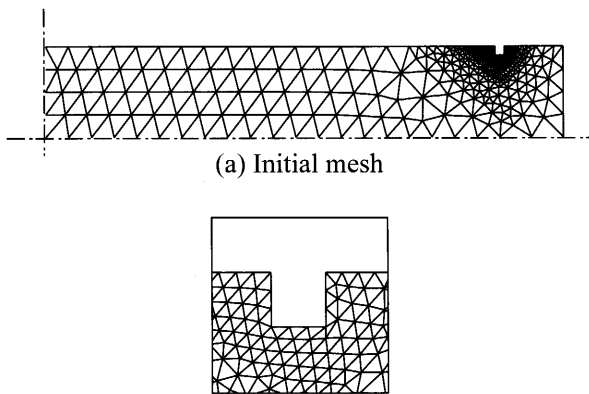


Fig. 2. Example of initial mesh.

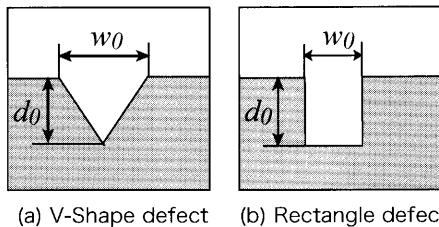


Fig. 3. Shape of defects.

た剛塑性有限要素解析プログラムRIPAD-2Dを拡張して用いた。圧延板はロールギャップ入口面から出口面まで板の垂直断面がそのまま垂直面を保つと仮定し、変形解析は一般化平面ひずみ問題として取り扱った。解析に使用したメッシュの一例をFig. 2に示す。RIPAD-2Dの持つメッシュコントロール機能とアダプティブリメッシング機能を用い、疵の周辺は非常に細かいメッシュを、疵から遠くなるにつれて段階的に粗いメッシュを分布させ、これにより計算時間を抑えながら疵変形の詳細な解析を可能にした。また疵は微小であるため、板全体のマクロ的な変形には影響しないと仮定し、解析は上下対称であると見なして板の上半分のみを解析対象とした。

疵形状は、V字疵および矩形疵の2種類を解析対象とした。それらの外形と疵の概要をFig. 3に示す。

本研究では、板のロールギャップ内の変形挙動を一般化平面ひずみ問題としてモデル化しているため、圧延方向の

Table 1. Properties and profile of aluminum material.

Material	Aluminium A1050-O
Flow stress	$\bar{\sigma} = 112.5\epsilon^{0.18}$ MPa
Thickness	10 mm
Length	90 mm
Width	57 mm

拘束力 F_z を与える必要がある。ここでは F_z はロールギャップ内で一定値を保つと仮定し、スラブ法により求めた平均圧延圧力 p_{ave} と圧縮試験から求めた平均せん断変形抵抗 k_{ave} から、次式により求めた。

$$F_z = (2k_{ave} - p_{ave}) \cdot b \cdot \frac{h_1 + h_2}{2} \quad (1)$$

ここで b は板幅、 h_1, h_2 はそれぞれ入側、出側の板厚である。

3. 解析の妥当性の検証

3.1 実験方法

まず疵の変形形状について実験と比較し、本研究の解析の妥当性を検証した。実験には厚さ10mm、幅57mm、長さ90mmの純アルミニウムA1050-O材を用い、圧延方向に平行に矩形疵を機械加工により一直線につけて試験片とした。これを圧下率40%で圧延した後、試験片を圧延方向に垂直な断面で切断し、研磨後レーザー顕微鏡により疵形状を測定した。試験片の条件をTable 1にまとめた。圧延ロール半径は100mmであり、試験片、ロールともにアルコール脱脂後、無潤滑で圧延を行った。解析においては摩擦係数は0.08とした。疵形状は初期幅 $w_0 = 0.5$ mm、初期深さ $d_0 = 1.0$ mmの矩形で、板の幅方向中心からの位置 $z_p = 0$ mm (板幅中心) および $z_p = 25$ mm (板端近傍) とした。

3.2 結果の比較

解析結果と実験結果の比較をFig. 4に示す。疵が板幅中心にある場合 ($z_p = 0$ mm)、疵の底面および側面が膨らみ、底面角から疵が閉じていく。一方 $z_p = 25$ mmと疵が板端に近い場合、本実験の条件では疵幅は $z_p = 0$ mmの場合ほど閉じず、板の幅広がり量の影響で疵全体が外向きに傾く。いずれもその深さ、形状ともに解析結果と実験結果は良く一致している。

Fig. 5はロールギャップ内の板の幅広がり量 Δb を示したものである。圧延方向の拘束力をロールギャップ内で一定としているため、幅広がり量の解析結果は実験結果といくらかの差が生じている。しかし全体の幅広がり量のレベルは、拘束力を簡単なスラブ法による平均圧延圧力から求めていることなどを考慮すれば、かなりよく一致している

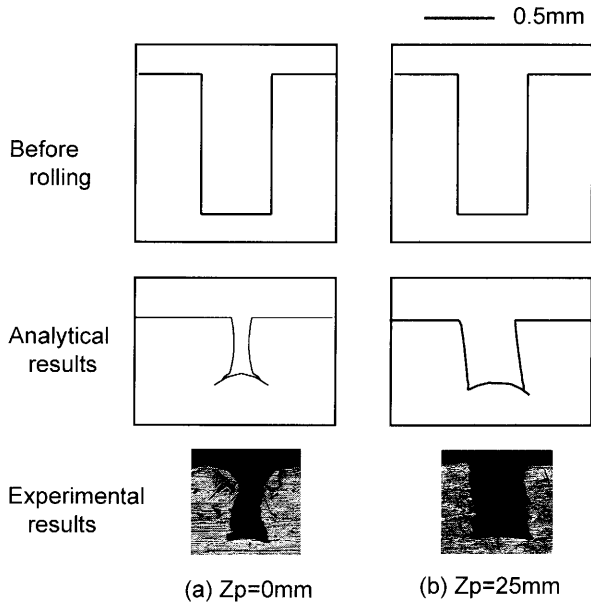


Fig. 4. Comparison of the shape of defects after rolling ($w_0=0.5$ mm, $d_0=1.0$ mm, $r=40\%$).

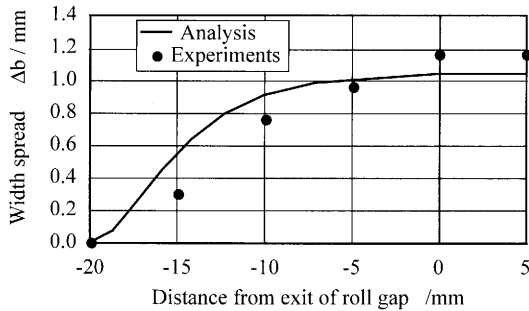


Fig. 5. Width spread in roll gap ($r=40\%$).

いえる。また拘束力を数%変化させ、出側板幅を実験結果とほぼ一致させた場合においても、圧延後の疵形状には大きな変化がなかったことから、以降の解析においては式(1)で示した圧延方向拘束力をそのまま用いた。

以上の結果より、本解析法によって表面疵の形状変化を予測することが可能であると考えられる。そこで次節以降、本解析手段を用いて、鋼板の熱間圧延における各種疵形状変化について検討する。

4. 熱間圧延における疵変形過程

4.1 解析条件

低炭素鋼の熱間圧延を想定して解析を行い、疵変形過程に及ぼす圧延条件の影響について調査した。解析の対象とした圧延材は、厚さ20 mm、幅100 mmの低炭素鋼(0.08% C)である。疵形状はV字形状および矩形状とし、また疵の幅方向の位置の影響を調べるため、板幅中心からの距離を変化させて解析を行った。

解析に用いた条件をTable 2に示す。摩擦係数は $\mu=0.20$,

Table 2. Analysis conditions.

Material	Low carbon steel(0.08%C)
Rolling temperature	1200°C
Flow stress	$\sigma = 65.9 \bar{\epsilon}^{0.19}$ MPa
Strip thickness	20 mm
Strip width	100mm
Roll radius R	100mm
Friction coefficient: μ	0.20, 0.50
Reduction: r	30, 50 %
Width of defects: w_0	0.5, 1.0, 1.5 mm
Depth of defects: d_0	1.0 mm
Position of defects: z_p	0, 20, 40 mm

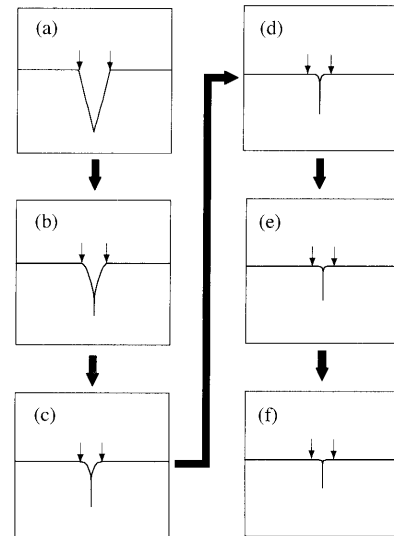


Fig. 6. Deformation of V-shape defect ($w_0=0.5$ mm, $d_0=0.5$ mm, $r=50\%$, $m=0.20$, $R=100$ mm, $z_p=0$ mm).

0.50の2種類とし、ロール半径は100 mm、また圧下率は30%および50%とした。

4.2 V字形状疵

Fig. 6に疵の幅方向位置 $z_p=0$ mm、すなわち板幅中央に幅 $w_0=0.5$ mm、深さ $d_0=1.0$ mmのV字形状の初期疵がある場合の、ロールギャップ内の疵の変形過程を示す。圧下率は50%である。図中の矢印は、圧延前に疵の角であった場所の、圧延中および圧延後の位置を示している。この図からわかるように、初期疵形状がV字の場合は疵がロールギャップ内を進むにつれ疵の底の方から閉じていく。また同時に疵側面は圧縮されることによりバルジ変形をし、上部からロールに接触していく。その結果、圧延後には初期疵の内壁同士が接触してできた疵が残る。

Fig. 7は同じ圧延条件、疵形状で、幅方向位置が $z_p=40$ mmと板端に近い場合の疵の変形過程を示したものである。疵が板端に近い場合では、材料の幅方向の流動のために疵が斜めに傾く。また疵が閉じるタイミングが遅くなっていることがわかる。これは板端に近い領域では材料の幅方向流れの影響で、材料に作用する静水圧応力が板幅中央部に比べ小さいからである。

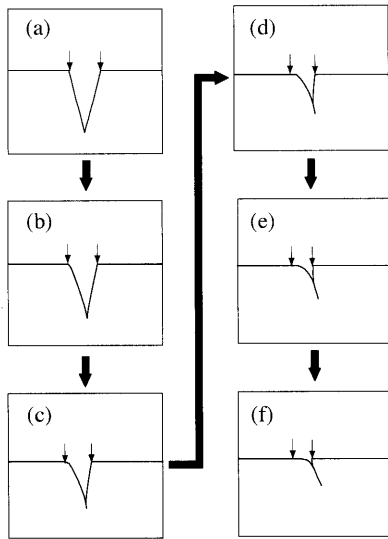


Fig. 7. Deformation of V-shape defect ($w_0=0.5$ mm, $d_0=0.5$ mm, $r=50\%$, $m=0.20$, $R=100$ mm, $z_p=40$ mm).

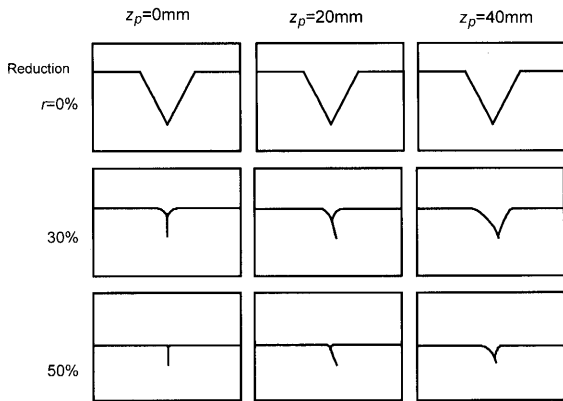


Fig. 8. Influence of lateral position of defect on deformation of V-shape defect ($w_0=1.0$ mm, $d_0=1.0$ mm, $m=0.2$, $R=100$ mm).

Fig. 8は同じく $\mu=0.20$ で、初期開口部幅 w_0 が 1.0 mm の場合、Fig. 9は $w_0=1.5$ mm の場合での解析結果である。板幅中央付近においてはいずれの w_0 においても圧延が進行するに従ってほぼ同様に疵底部より閉じており、この程度の開口部幅の差では疵の変形には影響があまりないことがわかる。しかし板端近くにおいては w_0 が大きくなると疵が閉じにくくなっており、 $w_0=1.5$ mm の場合においては疵は閉じずに広がって、最終的には完全に消滅すると思われる。これは疵の開口角度が大きくなると疵底部の上昇が容易になるが、板端付近においては幅方向流れに対する抵抗が小さいため、その影響が顕著に現れるためと考えられる。

Fig.10は初期開口部幅 $w_0=1.0$ mm で、摩擦係数を $\mu=0.50$ とした場合の結果である。Fig. 6の $\mu=0.2$ の場合と比較すると、摩擦係数が大きい場合には板幅全域に渡って疵が早期に閉じてゆくことがわかる。これは摩擦係数が大きい場合には圧延方向の拘束力が大きくなることによる静水圧応

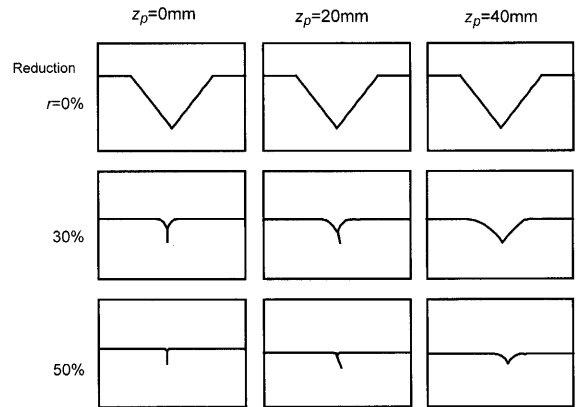


Fig. 9. Influence of lateral position of defect on deformation of V-shape defect ($w_0=1.5$ mm, $d_0=1.0$ mm, $m=0.2$, $R=100$ mm).

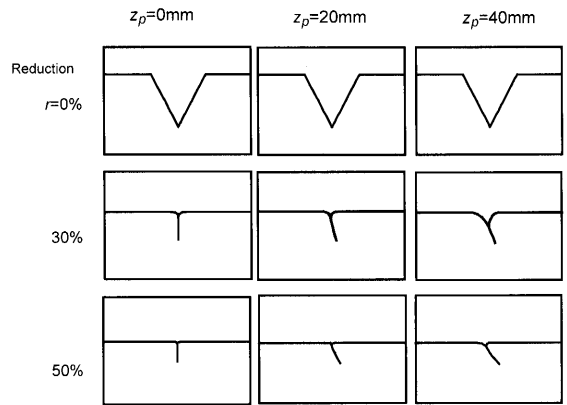


Fig. 10. Influence of lateral position of defect on deformation of V-shape defect ($w_0=1.0$ mm, $d_0=1.0$ mm, $m=0.5$, $R=100$ mm).

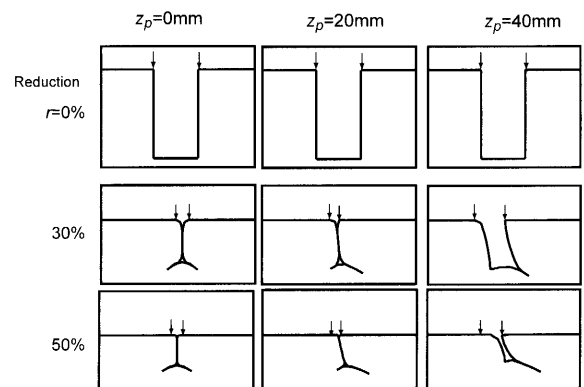


Fig. 11. Influence of lateral position of defect on deformation of rectangle defect ($w_0=0.5$ mm, $d_0=1.0$ mm, $m=0.2$, $R=100$ mm).

力の増大、ならびに幅方向流れに対する抵抗の増大が原因と考えられる。

4.3 矩形状疵

Fig.11に初期開口部幅 $w_0=0.5$ mm、深さ $d=1.0$ mm の矩形状疵の場合の結果を示す。圧下率は 50% 、摩擦係数は $\mu=0.20$ である。疵開口部幅が疵深さに対して比較的狭い場合は、板幅中心付近では疵側面が閉じて逆Y字型になる。ま

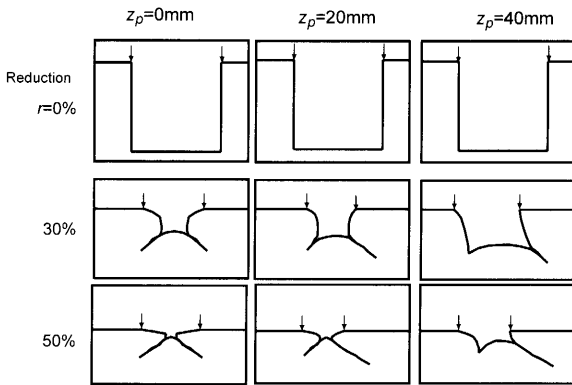


Fig. 12. Influence of lateral position of defect on deformation of rectangle defect ($w_0=1.0\text{ mm}$, $d_0=1.0\text{ mm}$, $m=0.2$, $R=100\text{ mm}$).

た疵が板端に近い場合、幅広がりによる材料流動の影響を受けて疵全体が外向きに傾き、L字に近い形の疵が残ることがわかる。

Fig.12は初期開口部幅 $w_0=1.0\text{ mm}$ 、深さ $d=1.0\text{ mm}$ の矩形疵の場合の結果である。初期開口部幅が広い場合は疵の底がロール表面と接触し、板幅中央付近においてはハの字型の疵が残る。板端に近い領域では、疵が外側に傾くことにより内側の疵が小さくなる。

5. シーム疵のFEM変形解析

ステンレス鋼や極低炭素鋼の熱間圧延工程において、スラブコーナー近傍の表面に圧延方向に平行に線状のシーム疵がしばしば発生する。これは水平ロールによる粗圧延の際にスラブ側面にしわが発生し、その後のパスにおいてこのしわが板の幅広がりに伴う側面のバルジ変形によって板の表面に回り込むことによって生じると考えられている。

本研究では開発した一般化平面ひずみFEM解析を用いて、そのような疵発生過程がシミュレートできるかについて実験と比較して検討を行った。

5.1 実験方法

供試材は長さ90 mm、幅47 mm、厚さ10 mmの純アルミニウム(A1050-O)を用いた。疵は前工程におけるしわ発生を想定してFig.13に示すように板側面にV字の疵を2つ、切削加工によって付けた。疵深さは $d_0=0.5\text{ mm}$ 、角度 $\alpha=30^\circ$ とした。上面から一つ目の疵中心までの距離 l を0.5, 1.0, 2.0 mmと変化させて実験を行った。

疵が表面に回り込む条件を求めるための実験として、1パス目の圧下率を10~60%まで変化させて圧延し、板側面の形状を調べた。その後、さらに3パスで総圧下率80%まで圧延して疵の回り込みの有無を調べた。

5.2 実験結果

5.2.1 疵が表面に回り込む条件

板側面にある疵が板表面に回り込む挙動には、板が圧延

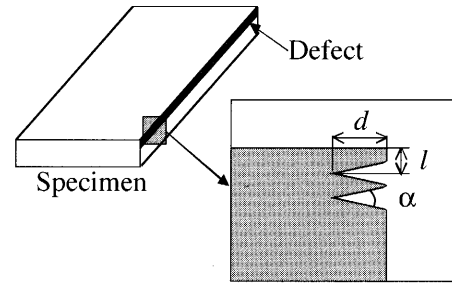


Fig. 13. Shape of initial side defect.

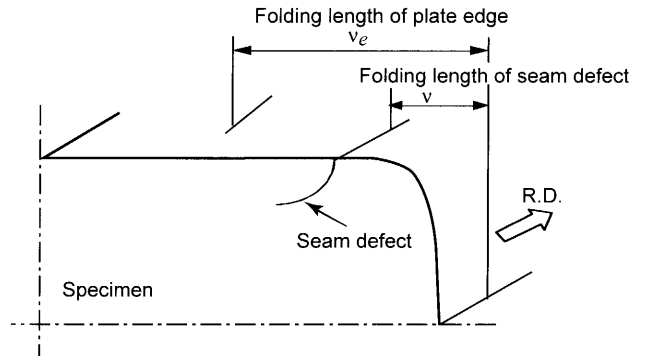


Fig. 14. Measured folding length.

によってどのようにバルジ変形するかが大きく影響する。本実験においては1パス目の圧下率が30%以下の場合には板とロールとの接触面積が小さいために板の変形は板表面近傍で大きく、その結果、側面形状はダブルバルジとなることが分かった。そのような板をさらに総圧80%まで圧下しても疵の表面への回り込みは生じなかった。それに対し、1パス目の圧下率を40%以上にすると板厚中心付近の変形が大きくなってシングルバルジとなった。そしてその板をさらに総圧下率80%まで圧延したところ、疵の回り込みが観察された。この結果から、以降のシーム疵再現実験においては、1パス目を50%とした。

5.2.2 疵の回り込み量に及ぼす圧下率の影響

各パス後のスラブコーナーおよび疵の回り込み量をFig.14に示すように定義し、各パスの初期板厚からの総圧下率を50%, 80%, 90%として測定した。結果をFig.15に示す。50%圧下時には疵の回り込みはまだ生じていないが、初期疵の上面からの位置 $l=0.5\text{ mm}$ および 1.0 mm の場合にはさらに80%まで圧下すると回り込みが生じた。 $l=2.0\text{ mm}$ の場合は90%まで圧下すると回り込みが生じた。

5.3 一般化平面ひずみFEMによる解析

5.3.1 解析条件

解析条件は実験に合わせて幅47 mm、厚さ10 mmのアルミニウム板の圧延とし、一般化平面ひずみ問題として解析を行った。3パスの圧延を想定し、圧下率は5.2.1節の実験結果を踏まえて1パス目を50%、以後総圧下率で80%, 90%とした。またロールと板の界面の摩擦係数は $\mu=0.3$ とした。その他の条件は、上面疵の解析と同様に取り扱った。

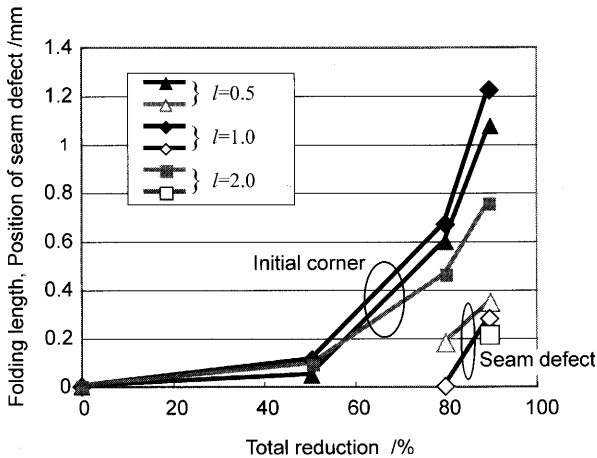


Fig. 15. Influence of initial position of defect on folding length and position of seam defect after rolling.

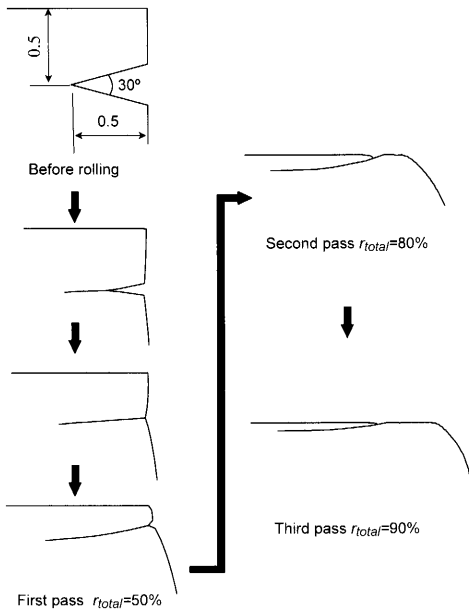


Fig. 16. Shape of seam defect after rolling ($w_0=0.5$ mm, $d_0=0.93$ mm, $\alpha=30^\circ$, $l=0.5$ mm).

側面の初期疵は解析においては1つとし、上面からの位置 $l=0.5$ mm、深さ $d=0.5$ mm、角度 $\alpha=30^\circ$ とした。

5.3.2 解析結果

Fig.16に疵の周辺の拡大図を示す。本解析条件においては板側面の形状は実験と同様に常にシングルバルジであり、圧下率が多くなるに従ってその量が大きくなる。側面の疵は圧延のかなり早い段階で閉じていることがわかる。そして総圧下率が80%以上になると疵が上面に回り込んでくることなど、実験結果の特徴とよく一致している。

8. 結言

圧延板に生じる疵の変形挙動を解析できる数値解析システムの開発を目的として、板表面に圧延方向に平行に疵が

存在する場合、ならびにシーム疵を対象として、疵や欠陥の変形を一般化平面ひずみ剛塑性有限要素法を用いて理論解析を行った。その結果、以下のことが分かった。

(1) 開発したシステムにより、圧延方向に平行方向に存在する微小な疵や欠陥の、圧延による変形を詳細に求めることが可能である。

(2) V字疵の変形について、

(a) 初期疵開口部幅が小さいほど、疵は圧延初期の段階で閉じる、

(b) 板端に近づくにつれ、疵は開きやすくなる。また疵形状による影響の差が大きくなる。

(c) 摩擦が小さいほど疵は開きやすい。

(3) 矩形状疵の変形について、

(a) 初期疵開口部幅が小さい場合、板幅中央付近では疵底面が材料内に残存して、「逆Y字型」の疵となる。板端に近づくにつれ疵は外側に傾き、「L字型」に近くなる。

(b) 初期疵開口部幅が広い場合、板幅中央付近では疵底面が露出してロールと接触し、「ハの字型」の疵となる。また板端に近づくにつれ内側の疵が小さくなる。

(c) 板端に近いほど、疵は開きやすい。

(4) 人工の初期疵を用いたシーム疵の再現実験を行い、板側面の疵の上面への回り込みは板側面のバルジ形状に大きく影響され、1パス目の圧下率が小さくダブルバルジ形状になる場合はその後の圧延でも回り込みが生じないが、1パス目の圧下率が大きくシングルバルジ形状になる場合はその後の圧延で回り込みが生じることが分かった。

(5) 一般化平面ひずみFEM解析により、シーム疵の回り込み現象などをシミュレートできることを確認した。

最後に本論文は日本鉄鋼協会「表面疵発生過程予測技術の開発」研究会の成果の一部をまとめたものであることを付記し、関係者に謝意を表す。

文 献

- 1) 日本鉄鋼協会編：第3版鉄鋼便覧III(1)圧延基礎・鋼板、(1980)、丸善、277。
- 2) 日本金属学会・日本鉄鋼協会編：鉄鋼材料便覧、(1967)、丸善、465。
- 3) A.Masui, H.Kajitani, S.Kobayashi, K.Yano, T.Suda and H.Mitsuji: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), S360。
- 4) E.Sunami and Y.Sagae: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), S415。
- 5) S.Ogaa and E.Ikushima: *Tetsu-to-Hagané*, **61** (1975), S555。
- 6) Y.Higo, S.Odagiri and K.Shinoda: *Nisshin Steel Tech. Rep.*, **55** (1986), 18。
- 7) K.Inoue, H.Yasunaka and H.Matsumoto: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1167。
- 8) T.Matsui, S.Ogata, M.Fujita and M.Asakawa: *Sumitomo Met.*, **26** (1974), No. 3, 324。
- 9) T.Ishikawa, N.Yukawa, Y.Yoshida and Y.Tonohata: *Tetsu-to-Hagané*, **89** (2003), No. 11, 1142。
- 10) N.Yukawa, T.Ishikawa, Y.Yoshida and A.Koyachi: *Tetsu-to-Hagané*, **91** (2005), No. 12, 861。