

板圧延における表面疵の変形に及ぼす圧延条件の影響

湯川 伸樹*・石川 孝司*・吉田 佳典*・小谷内 章*

Influence of Rolling Condition on Deformation of Surface Micro-defect in Plate Rolling

Nobuki YUKAWA, Takashi ISHIKAWA, Yoshinori YOSHIDA and Akira KOYACHI

Synopsis : The shape change of surface micro-defects in plate rolling was investigated using a rigid-plastic finite element analysis. Rolling of plate with rectangular-shaped scratches or plunges, which lay perpendicular to the rolling direction, was simulated. The influence of rolling conditions, such as reduction, friction coefficient, roll diameter and pass schedule on the shape of existing defect after rolling was evaluated. From these results, the relationship between the shapes of surface defect before and after rolling was obtained, and the optimum condition to eliminate defects was discussed. The proposed prediction method of surface defect can be utilized to make defect free products in rolling and forging processes.

Key words : surface micro-defect; plate rolling; rigid-plastic FEM.

1. はじめに

圧延に関して未だ残されている問題の一つとして、鋼板表面の疵の問題が挙げられる。圧延プロセスにおける疵発生の原因として、連続鋳造時に発生する割れや、スラブから鋼板を作る熱間圧延工程においてローラー-材料間への異物の巻き込み、圧延ロールの欠損の鋼板への転写などが存在する。これらが圧延加工によって最終的に、表面にスケールを圧着したり、かみ込んだりしてできる疵（スケール疵）、表面が剥がれやすいラップ状の疵（へげ）、圧延方向に平行に出る線状の疵（スリバー、シーム）などの表面疵となる^{1,2)}。これらは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は材料の割れや破断を引き起こす原因にもなり、効率的な操業の妨げとなるため作業現場では表面疵を発生させないように、例えば加熱条件の選定や各種ロールの点検、表層部の固形突起物の除去等の、さまざまな努力がなされている。また、発生した疵は目視や磁気探傷検査によって検出され、その程度によって廃棄、疵取りなどの処理が行われている。しかし、現段階では表面疵の発生を完全に防止することは困難である。

疵の形状は発生要因などにより種々であり、発生後に幾重にも圧延加工が施されることで、圧延後の鋼板に存在する疵はさらに様々な形状を呈することになる。このことは、圧延後の疵形状と圧延前の疵形状を正確に対応付けることができれば、圧延後の疵形状から疵の発生原因を推定できるようになることを示している。さらには、疵の発生原因が判明することにより、疵を減少させるための対応策をとることが可能となる。このような観点から、これまでも

圧延前後の疵形状の対応付けに関する知見を得るべく、鋼スラブ表面に代表的な人工疵を施して圧延の実験を行い、疵の変形を調査した例もある³⁻⁸⁾。しかし、数値解析を用いた表面疵の変形に関する研究は、あまりなされていない。

前報⁹⁾において、著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解析プログラムを開発し、熱間圧延時に鋼板に現れる幅方向表面疵・突起の変形挙動を解析して圧延前の疵・突起形状と圧延後に残る疵形状の関係を明らかにした。本報では、その解析法を用いて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い、欠陥フリー鋼板製造プロセスに対する情報を得ることを目的とした。

2. 解析方法

2.1 解析条件

解析方法は前報⁹⁾と同様であり、本報では(1)深さの異なる矩形疵の変形過程に及ぼす圧延条件の影響調査と、(2)異物の巻き込みによる表面疵の発生・変形過程の解析を行った。前報で開発した剛塑性有限要素法プログラムRIPAD-2Dを用い、幅方向疵を平面ひずみ変形を仮定して解析を行った。RIPAD-2Dはメッシュサイズの設定などがコントロールできるため局部変形解析など、微小領域の解析が可能である。今回解析に使用したメッシュの一例をFig. 1に示す。疵近辺に段階的に細かなメッシュをつくることで疵付近の変形を細かく表せるようにした。解析に用いた圧延条件をTable 1に示す。

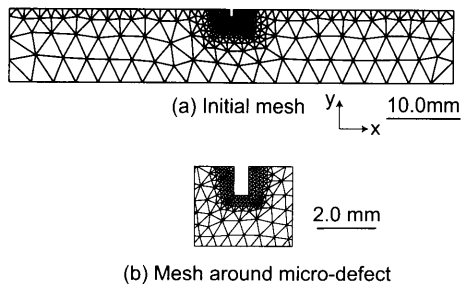


Fig. 1. Example of initial mesh.

Table 1. Rolling conditions.

Material	Low carbon steel(0.08 mass%C)
Rolling Temperature	1473 K
F-value	65.9 MPa
n-value	0.19
Thickness	20 mm
Length	60 mm
Width	47mm
Roll radius: R	60, 100, 230mm
Roll rotation speed	0.400 r.p.m
Friction coefficient: μ	0.20, 0.35, 0.50

2.2 矩形疵の変形解析

連続鋳造された鋼塊表面には割れが発生することがある。この割れは鋼塊の欠陥の大半を占めるもので、変態や温度変化に伴う体積変化が鋼塊の内外あるいは鋼塊と鋳型との間で差があるために発生した応力によって生じると考えられている。実際の作業においては溶鋼の脱酸が不十分である場合や、鋳型形状あるいは内面状況、鋳込み作業が不適当な場合や、鋼塊を鋳型から引き抜いた後の温度制御が不適当な場合に生じる。このような鋼塊欠陥で除去できなかったものが圧延後に「へげ」と呼ばれるような疵として発見される。また、圧延時にロールと鋼材との間に異物が混入することがある。それは大気中に浮遊するごみであったり、熱間圧延過程で発生する酸化物スケールであったり、またロールに付着したごみであったりする。このような異物が板とともに圧延されると、異物が板表面に埋没し、新たな凹状の疵を発生させる場合もある。ここでは以上のような割れやくぼみを矩形の疵で模して、圧延によってどのような変化をするかを解析した。

矩形疵の寸法についてはFig. 2のように定義し、解析に使用した各種条件をTable 1 2に示した。疵の初期開口部幅 w_0 は0.3 mm, 0.5 mmの2種類とし、疵の初期深さ d_0 は浅い疵を模した0.3 mmから深い疵を示す2.0 mmまでの5種類とした。その他、圧延条件による違いを調べるためクーロン摩擦係数 μ は0.2, 0.35, 0.5の3種類、ロール半径 R は60 mm, 100 mm, 230 mmの3種類、圧下率 r は30%, 50%の2種類でそれぞれ解析を行った。また順方向と逆方向

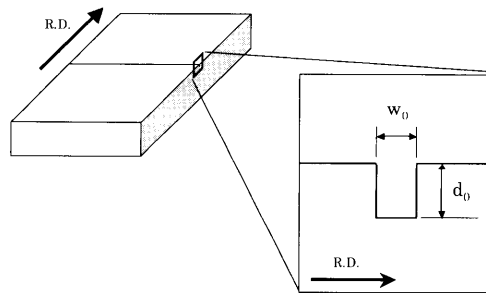


Fig. 2. Initial shape of rectangle defect.

Table 2. Initial dimension of rectangle defect.

Initial defect width: w_0	0.3, 0.5, 2.0mm
Initial defect depth: d_0	0.3, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0mm

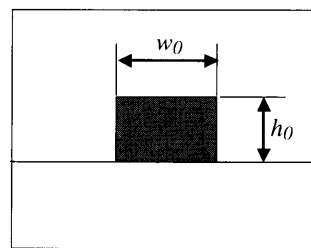


Fig. 3. Initial shape of rectangle plunge.

Table 3. Initial dimension of rectangle convex defect.

Initial width : w_0	0.5mm
Initial height : h_0	0.3mm

(リバース) 多パス圧延の解析を行い、多パス圧延時の疵の変形過程を調査した。

2.3 突起状異物が存在する場合の変形解析

熱間圧延工程では鋼板表面に酸化物スケールが生成したり、空気中の浮遊物など異物が付着したりすることがある。これらが鋼板と同時にロールにかみ込まれると、このような異物の跡が鋼板に残り、新たな疵となると考えられる。本研究では鋼板表面に付着した異物が圧延によってどのような変形をするか、また、異物の変形によって鋼板にどのような疵が残るか、その挙動について調査した。

解析に用いたモデルの突起部分の初期形状をFig. 3に、解析条件をTable 3に示す。突起部分の長さ w_0 を0.5 mm、高さ h_0 を0.3 mmとし、この突起部分の変形抵抗 (F 値, n 値) を変化させることで‘異物’とした。板と異物界面および内部では剥離等の破壊は起こらないとした。

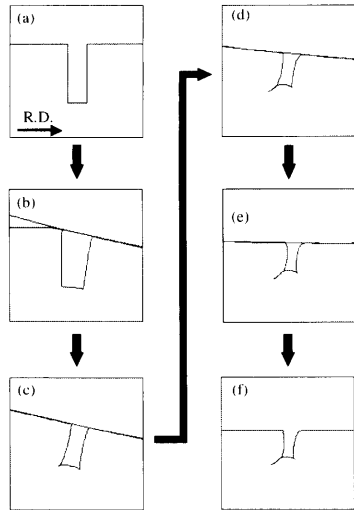


Fig. 4. Deformation of rectangle defect ($w_0=0.5$ mm, $d_0=1.5$ mm, $r=30\%$, $\mu=0.20$, $R=100$ mm).

3. 結果

3.1 疵の変形過程

矩形疵が圧延によってどのように変形するかを調査した。疵の初期開口部幅 $w_0=0.5$ mm, 初期深さ $d_0=1.5$ mm, 圧下率 $r=30\%$ での圧延にともなう変形の様子を Fig. 4 に示す。矩形疵はロールにかみ込まれるにしたがって、疵の側面が圧延方向に倒れ込むようにして変形し、前方側面はその上部がロールに引っ張られる形で板表面にせり出す。同時に疵の底面は、板が圧縮変形を受けるため相対的に表面の方に上昇し、圧延方向に倒れてきた後方側面と接触する。実際の鋼の熱間圧延においては、材料表面は疵の内面も含めてスケールに覆われていると考えられるため、このように材料同士が接触した場合にはそこにスケールを噛み込んで、圧延後も欠陥として残存すると考えられる。

3.2 初期疵形状による比較

解析は圧延前の疵開口部幅 w_0 は 0.5 mm 一定とし、疵深さを $d_0=0.3\sim 2.0$ mm と変化させた。また $d_0=1.5$ mm においては $w_0=0.3$ mm とした解析も試みた。圧延条件は $r=30\%$, $\mu=0.20$, $R=100$ mm で統一した。

各初期形状における圧延前後の疵形状について Fig. 5, Fig. 6 に示す。なお図中に付した矢印は、それぞれ初期形状における矩形疵上方の角と、その圧延後における位置を示している。 $d_0=0.3$ mm のものは圧延前に疵の底面であった部分が、圧延後には板表面まで達しハの字型の疵になるのに対し、それより初期深さが大きくなると底面は相対的に上昇するものの板表面までは到達しない。これは疵底面から板表面までの距離が大きいためであるが、ロールによる圧縮を受けることにより疵の側面が内部へ張り出し、底部の上昇が妨げられるためであると考えられる。

3.3 圧下率の影響

圧下率が変化することによって、疵の形状変化にどのよ

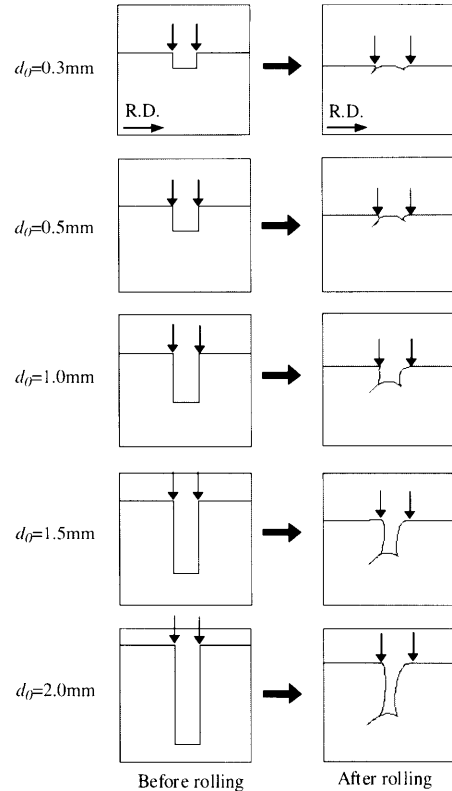


Fig. 5. Influence of initial depth on deformation of rectangle defect ($w_0=0.1$ mm, $r=30\%$, $\mu=0.20$, $R=100$ mm).

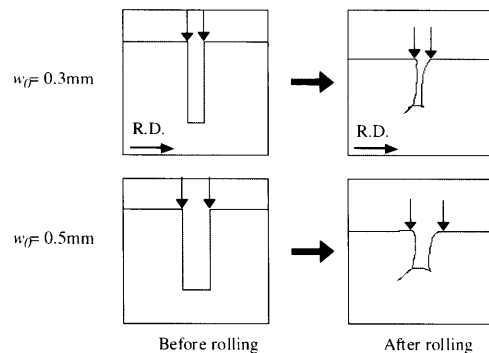


Fig. 6. Influence of initial width on deformation of rectangle defect after rolling ($d_0=1.5$ mm, $r=30\%$, $\mu=0.20$, $R=100$ mm).

うな影響を及ぼすかを調査した。

疵の形状は $w_0=0.5$ mm, $d_0=1.5$ mm とし、圧下率 $r=30\%$, 40% , 50% の3通り、摩擦係数 $\mu=0.2$, ロール半径 $R=100$ mm とした。Fig. 7 に圧下率 50% における疵の変形過程を示す。疵の側面が圧延方向に倒れ込むようにして変形していくが、圧下率が大きいせん断変形量が大きくなり、前方側面が大きく板表面にせり出す状態になる。Fig. 8 に圧延前後の疵形状について示す。圧下率が 40% , 50% と大きくなると、板表面と疵の底面との距離が単純に縮められることに加え、前方側面の板表面へのせり出しが大きくなることによって、それに引っ張られる形で疵底面が大きく上昇し、圧延後の疵深さは小さくなる。

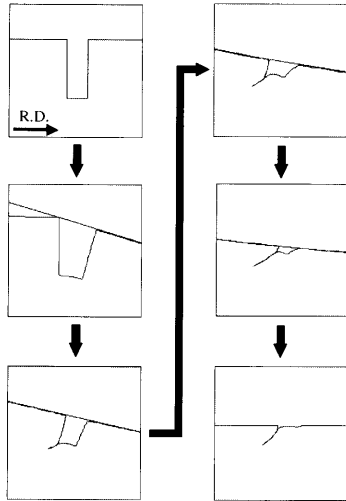


Fig. 7. Deformation of rectangle defect ($w_0=0.5$ mm, $d_0=1.5$ mm, $r=50\%$, $\mu=0.20$, $R=100$ mm).

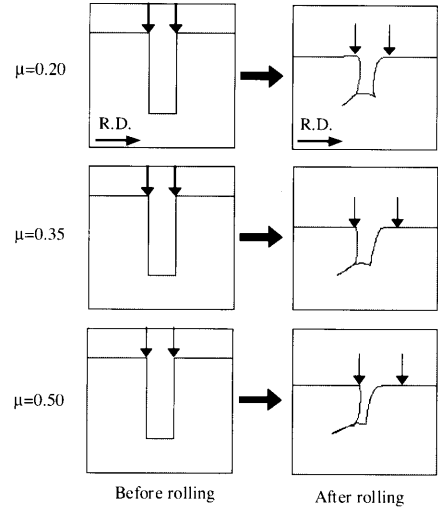


Fig. 9. Influence of friction on deformation of rectangle defect after rolling ($w_0=0.5$ mm, $d_0=1.5$ mm, $\mu=0.20$, $R=100$ mm).

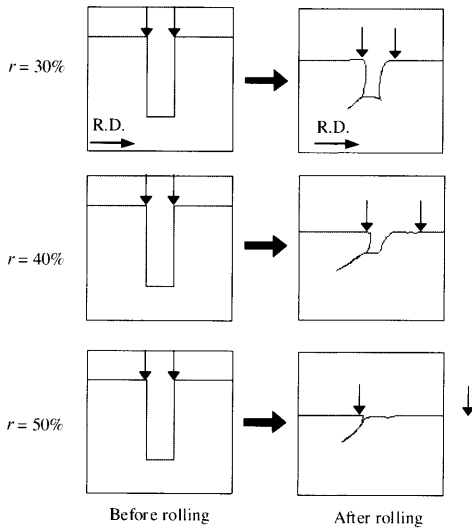


Fig. 8. Influence of reduction on deformation of rectangle defect after rolling ($w_0=0.5$ mm, $d_0=1.5$ mm, $\mu=0.20$, $R=100$ mm).

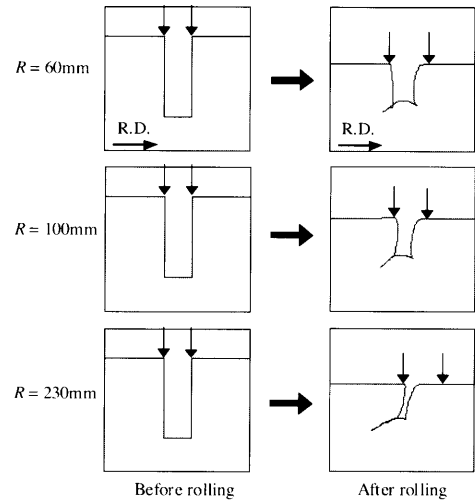


Fig. 10. Influence of roll radius on deformation of rectangle defect after rolling ($w_0=0.5$ mm, $d_0=1.5$ mm, $r=30\%$, $\mu=0.20$).

3.4 摩擦係数の影響

$w_0=0.5$ mm, $d_0=1.5$ mmとし、圧下率 $r=30\%$ 、ロール半径 $R=100$ mmと他の条件は一定として、摩擦係数 μ を0.20, 0.35, 0.50として解析を行った。その結果をFig. 9に示す。

圧延後の疵開口部幅に関しては、摩擦係数が大きいほど狭く、摩擦係数が低いほど広くなる傾向が見られた。疵はロールとの摩擦によって生じるせん断変形を受ける。摩擦が大きいとそのせん断変形が大きくなり、板表面に存在する矩形疵は、両側面がより圧延方向へ傾斜するようになる。そのため圧延後の疵の開口部幅が小さくなると考えられる。

3.5 ロール径の影響

$w_0=0.5$ mm, $d_0=1.5$ mmとし、圧下率 $r=30\%$ 、摩擦係数 $\mu=0.20$ とし、ロール半径 R を60, 100, 230 mmとして解

析を行った。その結果をFig.10に示す。

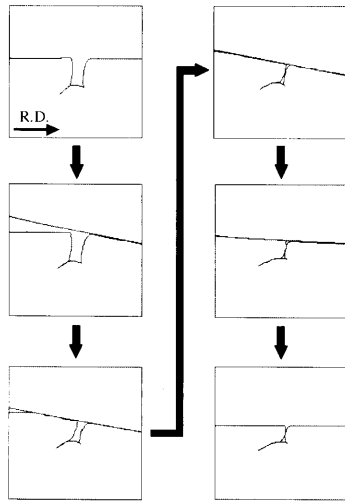
ロール径が大きくなると、ロールのかみ込み角度が減少し、疵を開く作用が小さくなる。また板とロールとの接触長さが長くなり、せん断変形を受ける期間が長くなることによって、疵の後方側面の圧延方向への倒れ込みが大きくなる。そのため、ロール径が大きいかほど圧延によって疵全体が圧延方向に対して大きく前傾した形になり、疵の開口部幅が小さいものとなる。また、ロール径が大きくなると疵の前方側面がロールに引っ張られる効果が大きくなるため、疵の前方側面に接する底面部分が上方へ引っ張られて、疵の開口部深さが小さくなると考えられる。

3.6 多パス圧延における疵の形状変化

前節ではいずれも1パスの圧延での疵の変形挙動について調査したが、実際の圧延工程においては鋼材は何度もの圧延を経て製品になる。そこでここでは、一度圧延によつ

Table 4. Rolling conditions for multi-pass rolling.

Friction coefficient: μ	0.20, 0.50	
Roll radius: R	100 mm	
Rolling schedule	1st pass	30%
	2nd pass: r_{total}	50%
	rolling direction	forward, reverse

Fig. 11. Deformation of rectangle defect in 2nd pass ($w_0=0.5$ mm, $d_0=1.5$ mm, $r_{total}=50\%$, $\mu=0.20$, $R=100$ mm).

て変形した疵が再度圧延加工を受けた場合の変形挙動について、矩形疵を対象に調査した。

3.6.1 順方向圧延

ここでは同じ圧延方向に2パスの圧延を施したときの矩形疵の変形挙動について調査した。

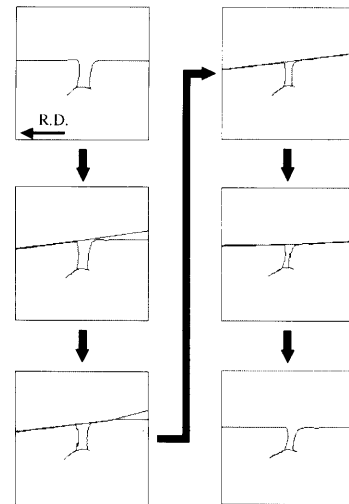
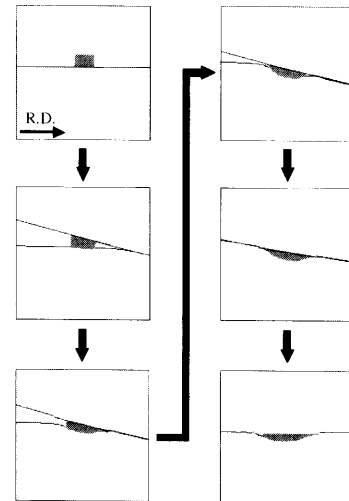
疵形状としては、 $w_0=0.5$ mm, $d_0=1.5$ mmのものを対象とした。解析に用いた各種条件をTable 4に示す。1パス目の圧延は圧下率30%で行った。2パス目は、1パス目圧延前の板厚を基準とした総圧下率 r_{total} が50%となるように設定した。ロール半径 $R=100$ mm, 摩擦係数 $\mu=0.20$ で解析を行った。

1パス目での変形過程はFig. 4に示す通りである。総圧下率50%、摩擦係数0.20での変形過程をFig.11に示す。2パス目に疵側面の前方への倒れ込みが大きくなり、加工中に側面同士が接触する。そのままロールギャップを進み、圧延後にはまだ浅い開口部が残っているものの、側面が閉じた疵になる。

3.6.2 リバース圧延

ここでは2パス目をリバース圧延とした場合に、疵がどのような形状変化をするかを調査した。各条件の値は前節と同じであるが、2パス目のロールの回転方向、すなわち圧延方向が1パス目と逆である。

Fig.12に示すように1パス目で前方側面(2パス目には後方側面になる)が圧延方向に倒れ込む。したがって次に逆方向に圧延される際にはその傾斜が影響して、2パス目では圧延方向への倒れ込みが起きにくくなる。このように

Fig. 12. Deformation of rectangle defect in reverse rolling ($w_0=0.5$ mm, $d_0=1.5$ mm, $r_{total}=40\%$, $\mu=0.20$, $R=100$ mm).Fig. 13. Deformation of plate with rectangle plunge ($F=65.9$ MPa, $n=0.19$, $r=30\%$, $\mu=0.20$, $R=100$ mm).

してリバース圧延では2パス目の圧延方向への疵の傾きが見られず、疵底部の後方圧着部分が長くなる。

3.7 表面上に異物が存在するときの変形

ここでは、板の表面に矩形形状の異物が付着し、それが板とともに圧延された場合を調査した。異物の変形抵抗が母材と同じもの($F=65.9$ MPa, $n=0.19$)で、圧下率30%の場合の変形過程をFig.13に示す。なお、図中灰色部分が異物に相当する部分である。

異物はロールにかみ込まれるとロールにより下方に圧縮変形を受ける。その結果、バルジングが起これ、そのまま異物は鋼板表層に埋没していく。また、異物が鋼板表面に埋没する際、周囲の母材を引き込み、圧延後には異物が圧縮変形によって圧延方向に広がった分以上の幅の疵が残る。

異物に3通りの変形抵抗を与えたときの圧延前後の疵形

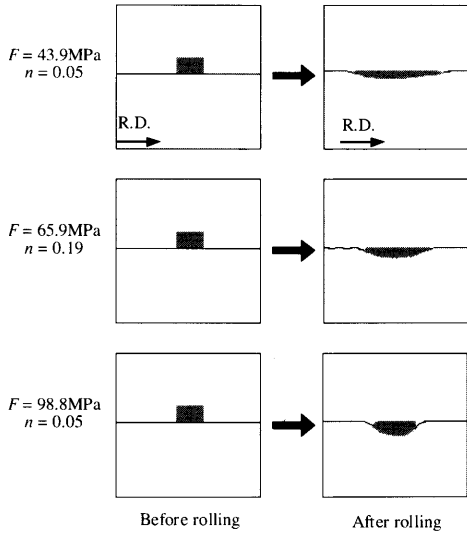


Fig. 14. Influence of plunge property on deformation of plate ($r=30\%$, $\mu=0.20$, $R=100$ mm).

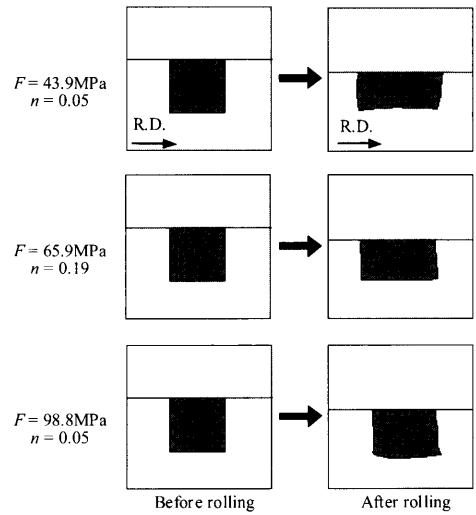


Fig. 16. Influence of material property of extraneous material on the shape after rolling.

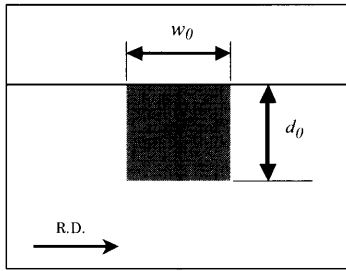


Fig. 15. Initial shape of extraneous material.

Table 5. Flow stress of plunge.

Flow stress of plunge	F-value	43.9, 65.9, 98.8 MPa
	n-value	0.05, 0.19

状について Fig.14 に示す。変形抵抗が大きい場合は異物自身の变形が小さくなり、特に後方側面のバルジングが見られなくなる。また異物はロールによるせん断変形を大きく受け、圧延方向への倒れ込みの動きが顕著に現れ、異物がある程度元の形状を維持しながら鋼板表面に埋没していく。逆に、変形抵抗が小さい場合は異物の圧縮が大きくなり、圧延後は鋼板表面に大きくひろがった疵を残す。

3.8 表面内部に異物が存在するときの変形

ここでは表面に埋没した異物が圧延を受けたらどのような挙動をとるか調査した。

解析に用いたモデルの疵形状を Fig.15 に、疵の初期形状、変形抵抗を Table 5 に示す。圧延条件は Table 3 に示すものと同じである。板材表面に $w_0=1.0$ mm、 $d_0=1.0$ mm の異物が埋没しているとして、その部分の変形抵抗の違いによる圧延時の挙動の変化を調査した。変形抵抗が $F=65.9$ MPa、 $n=0.19$ (母材と同じもの) の場合および $F=98.8$ MPa、 $n=0.05$ の場合、 $F=43.9$ MPa、 $n=0.05$ の場合の3通りの条

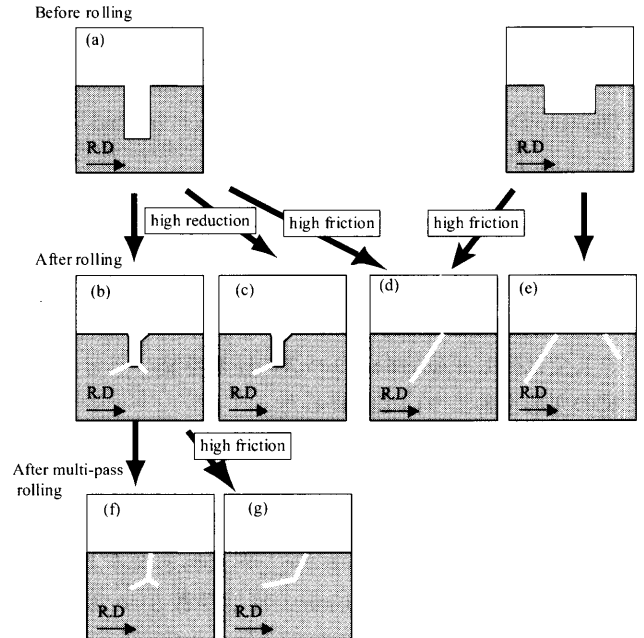


Fig. 17. Relationship between shapes of surface defects before and after rolling.

件で圧延を行ったときの疵形状について Fig.16 に示す。埋没していても、異物領域の材料特性が異なるとその領域の变形挙動が変化し、母材の变形挙動に影響を与える。異物の变形抵抗が大きくなると圧延後に表面に残る疵は深いものとなる。

4. まとめ

本研究で行った数値解析による結果をまとめると、疵・突起の初期形状と圧延後の形状との間に Fig.17 に示すような関係があると考えられる。矩形疵は、初期形状(a)の疵が圧延によって(b)の形状になる。しかし、圧下率が大きくなると(c)のように、矩形疵の前方の角がなくなってい

く。また、矩形疵の縦／横比が小さくなると圧延後に底面が板表面まで達するようになる(d), (e)。1パス目終了後さらに圧延を行うと側面が閉じていく(f)が、摩擦係数が大きい状態で2パス目を順方向に行くと疵の後方側面の移動が大きくなり、逆L字型の疵となる(g)。

本研究は圧延時の疵形状の変化を模式的に考えたもので、実際の現場においては、同じ矩形疵や突起であっても大きさや角度などが様々であり、一様ではない。また、摩擦などの圧延条件、付着異物の材料特性などの要因も変形挙動に影響を与えているのでそれらの考慮も重要となる。しかし本研究の結果から、圧延後の疵形状をもとにその圧延前の形状がある程度推定可能であると考えられる。

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」研究会で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・銅板、(1980)、丸善(東京)、277。
- 2) 日本金属学会・日本鉄鋼協会編：鉄鋼材料便覧、(1967)、丸善(東京)、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.Ogata 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.