

板圧延における表面疵変形過程のシミュレーション

石川 孝司*・湯川 伸樹*・吉田 佳典*・殿畑 勇飛*

Deformation Analysis of Surface Defect on Plate Rolling

Takashi ISHIKAWA, Nobuki YUKAWA, Yoshinori YOSHIDA and Yuhi TONOHATA

Synopsis : Micro-defects sometimes appear on the surface of rolled plate and they affect the surface quality and cause the breakdown and cracks in the rolled sheet and strip. It is very difficult to make defect free products now. The shape of defect after rolling changes variously due to the rolling conditions. If the relation between the shape of the defect before rolling and that after rolling is clear, it leads to the effective method to predict the reason of the surface defect and to develop the process to remove the defect. The finite element analysis seems to be an influential technique, but it is difficult to calculate the deformation of micro-defects since the size of the defect is very small and the deformation is concentrates in small area. In this study, finite element analysis with an effective meshing and adaptive remeshing system was newly applied to calculate the change of surface micro-defects in plate rolling. A small mesh under sub-millimeter size was used around the defects. Rolling of plate with several types of surface defects, for instance V-shaped and rectangle scratch or denticle was calculated and the existing defect after rolling was investigated. The validity of simulated results was checked by experiments. There were mainly two cases in the change of defect shape in rolling *i.e.* opening type and closing type. The influence of rolling condition (roll diameter, lubrication and pass schedule *etc.*) on existing defects after rolling was revealed and the optimum condition to eliminate defects was discussed.

Key words: plate rolling; surface defect; finite element method.

1. 緒言

熱間圧延鋼板の表面には種々の形状を持つ疵が現れる場合がある。これらの疵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破断や割れを引き起こす原因にもなり、効率的な圧延作業の妨げとなるため作業現場では疵を発生させないよう努力がなされている^{1,2)}。表面欠陥フリープロセスに対する要求は非常に強いが、疵の発生原因は多様であり、現段階では疵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であり、発生後に圧延加工が何度も加えられることで、圧延後の疵は様々な形状を呈する。圧延後の疵とスラブ表面欠陥との対応は難しく、製造工程中のいかなる時点の欠陥が表面疵となるか明確でない。圧延後の疵形状と圧延前の疵形状を正確に対応づけることができれば、疵の発生原因の有効な推定手段となり、速やかに対応することができる。

このような観点から、これまでも鋼スラブ表面に人工疵を施して圧延実験を行い、疵の変形を調査した例もある³⁻⁷⁾。しかし、表面疵の変形について有限要素法などの数値解析を用いた例はあまり多くない。それは疵が材料全体の大きさに比して非常に微小であり、こ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。

本研究では、板圧延における表面疵変形挙動を解析する

ための数値解析システムの開発を目的とした。まず熱間圧延物理モデル材料であるアルミニウム試料に表面欠陥を模した人工的な凹凸をつけて圧延を行い、圧延における疵の形状変化について実験的に調査した。また同様に表面疵を対象に2次元の剛塑性有限要素法による数値解析を行い、実験結果と比較検討することによってシステムの妥当性を検証した。さらに、圧延前の凹および凸欠陥と圧延後の疵形状との関係、圧延条件が疵変形挙動に及ぼす影響について調査した。

2. 実験方法

Table 1に供試材として用いたアルミニウムA1050の変形抵抗と寸法を、またTable 2に圧延機の主な仕様について示す。なお変形抵抗式は n 乗硬化則 $\sigma = F\bar{\epsilon}^n$ を用いた。ここで σ および $\bar{\epsilon}$ はそれぞれ相当応力および相当ひずみである。

圧延方向に対して90°方向に断面がV字の溝を試験片表面に付与した。深さ $d_0 = 0.5$ mm一定とし開口部幅 w_0 およびV字断面先端角度 α_0 を変化させ(Table 3)、圧延後の疵形状との関係を調査した。また、圧下率は20/1, 30/2, 40/3, 65/4%/passとして段階的に圧延した。実験温度は $20 \pm 1^\circ\text{C}$ とし、無潤滑で実験を行った。

圧延後、光学顕微鏡を用いて試験片幅方向中央部の疵深

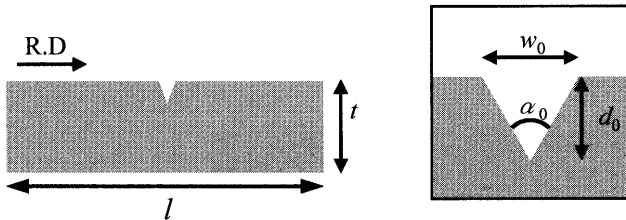
Table 1. Profile of aluminum material.

Material	Aluminum A1050-O(JIS)
F-value	112.45 MPa
n-value	0.18
Thickness	10 mm
Length	150 mm
Width	47 mm

Table 2. Specification of rolling mill.

Roll radius	100 mm
Roll length	250 mm
Roll material	High carbon bearing chrome steel
Maximum load	500 N
Rolling velocity	0.395 r.p.m.

Table 3. Initial dimension of V-shape defect.



Defect width : w_0	0.27 mm	1.50 mm
Defect depth : d_0	0.5 mm	0.5 mm
Defect tip angle : α_0	30 °	112 °

さ d と開口部幅 w を測定した。

3. 解析

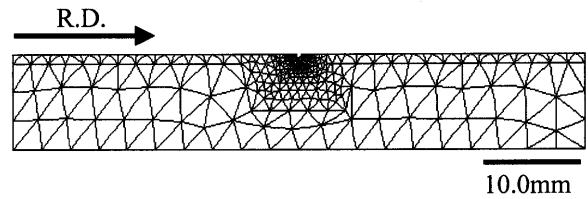
3.1 解析方法

変形解析には著者らが開発した剛塑性有限要素解析ソフト RIPAD-2D を用いた。このソフトはメッシュサイズが自由にコントロールできるため、局部変形解析などの微小領域の解析が可能である。

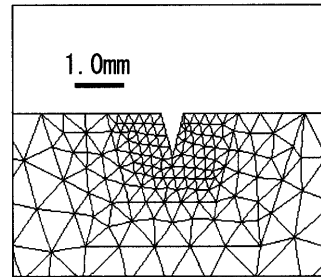
板表面における疵方向は圧延方向に対して 90° とし、平面ひずみ問題として解析した。解析に使用したメッシュの一例を Fig. 1 に示す。疵の大きさは板厚に対して非常に小さい。微小な疵周辺の変形を詳細に解析するためにはメッシュサイズをできる限り小さくする必要がある。そこで、疵から遠い領域には比較的大きなメッシュを配置し、疵に近くなるにつれて段階的に細かなメッシュを分布させることで、計算時間を抑えながら疵付近の詳細な解析を可能にした。解析は上下対称であるとみなして板の上半分のみを解析対象とした。

3.2 解析条件

(1) 解析精度検証のためのアルミニウムを用いたモデル実験と同一の条件、また(2) 疵変形挙動に及ぼす各種圧延



(a) Initial mesh



(b) Mesh around defect

Fig. 1. Example of mesh.

Table 4. Rolling condition.

Rolling temperature	1,473 K
Roll rotational speed	0.400 r.p.m.
Roll radius: R	60, 100, 200 mm
Friction coefficient: μ	0.20, 0.35, 0.50

Table 5. Pass schedule.

	Series 1		Series 2	
	t (mm)	ϕ (%)	t (mm)	ϕ (%)
Initial	20.0	0	20.0	0
1st pass	14.0	30	10.0	50
2nd pass	10.0	50	-	-

t : plate thickness, ϕ : total rolling reduction

因子の影響を解析的に検討するための低炭素鋼の熱間粗圧延段階を想定した条件の2種類を設定した。解析に用いた圧延条件を Table 4 に示す。圧下スケジュールの影響を調査するために Table 5 に示す2種類のパススケジュールを用いた。また、圧延方向は一方向とした。ただし、摩擦係数 $\mu=0.20$ 、ロール半径 $R=100$ mm を標準の圧延条件とした。

3.3 対象とした疵形状

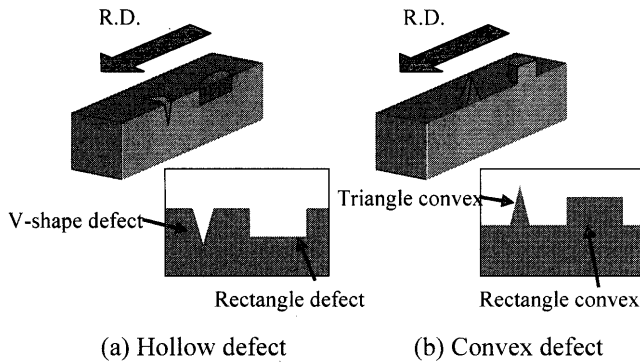
本報では4種類の疵・突起形状を解析対象とした。それらの外形と疵・突起の概要を Fig. 2 に示す。ここでは鋼板表面に存在する凹状の欠陥について「疵」と呼ぶ。これらは製鋼時にスラブ表面に残留したへこみ疵、圧延過程での引掻き疵、スケール脱落あるいは異物飛込みによる表面のくぼみなどを想定している。鋼板表面より突出した凸状の欠陥に対しては「突起」と表現する。これは、圧延過程でロール表面異常が材料に転写された場合や異物の飛込みなどを想定している。

4. 解析結果および考察

4.1 実験結果との比較

実験と同条件で行った解析結果の比較を $\alpha_0=30^\circ$ の場合について Fig. 3 に、 $\alpha_0=112^\circ$ の場合について Fig. 4 に示す。摩擦係数は $\mu=0.20$ とした。

$\alpha_0=30^\circ$ の場合、圧下率の増加とともに疵の左右両斜面



(a) Hollow defect (b) Convex defect

Fig. 2. Schematic figure of surface defect.

が盛り上がり、疵底部から閉じていく。 $\alpha_0=112^\circ$ の場合、圧下率の増加とともに疵先端が閉じることなく、大きさが全体的に小さくなっていく。いずれの場合も解析結果は実験結果とよく一致している。

以上より、本解析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。そこで以下、本解析手段を用いて、各種疵形状変化に及ぼす圧延条件の影響を検討する。

4.2 V字形状疵

Table 6 および Table 7 に各種解析条件を示す。疵深さは 1.0 mm (板厚の 5%) で一定とし、疵開口部長さは 0.1 mm から 1.0 mm までの 4 種類とした。摩擦係数、ロール半径、圧下スケジュールの表面疵の形状変化に及ぼす影響を調査した。

(a) 1パスにおける疵形状変化

初期疵開口部幅 $w_0=0.3$ mm, 初期疵深さ $d_0=1.0$ mm, 圧下率 30% の解析結果を Fig. 5 に示す。V 字形状疵はロールにかみ込まれる際に若干開くが、そのまま V 字の形を残した

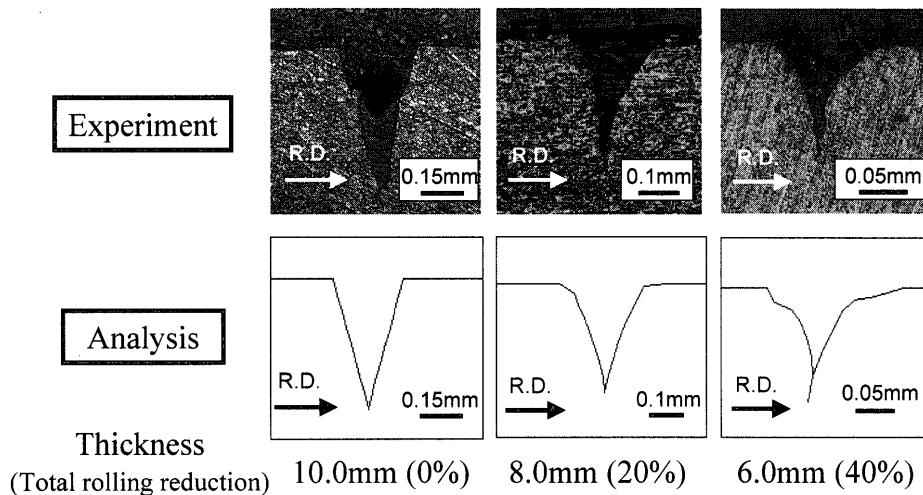


Fig. 3. Comparison between experimental and analytical result ($\alpha_0=30^\circ$).

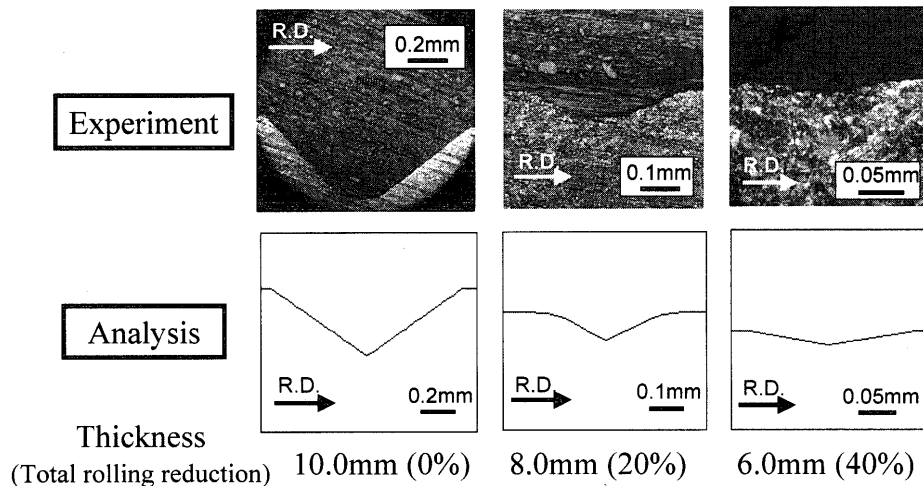


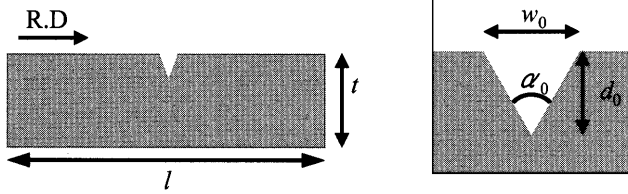
Fig. 4. Comparison between experimental and analytical result ($\alpha_0=112^\circ$).

Table 6. Profile of hot strip steel.

Material	Ultra low carbon steel (0.08%C)
F-value	65.8 MPa
n-value	0.19
Thickness: t	20 mm
Length: l	60 mm

Table 7. Initial dimension of defect.

V-shape defect



Defect width: w_0	0.1, 0.3, 0.5, 1.0 mm
Defect depth: d_0	1.0 mm
Defect tip angle: α_0	5.7, 17.1, 28.1, 53.1°

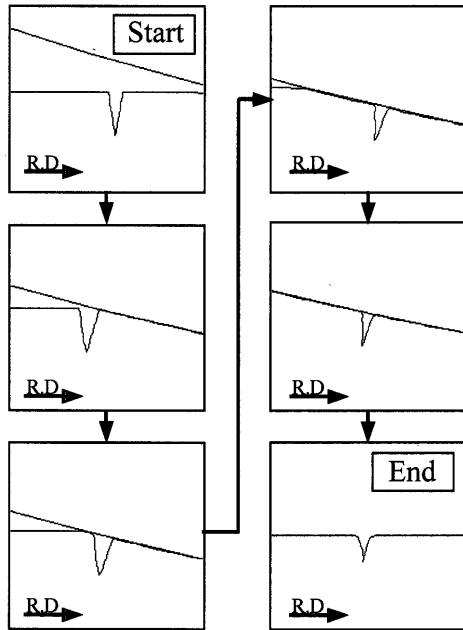


Fig. 5. Example of deformation of V-shape defect (thickness $t=20$ mm, rolling reduction $\phi=30\%$, $\mu=0.20$).

まま圧縮され、圧延が進行するにつれて疵底部から表面同士が接触して閉じていくことが確認できる。

(b) 摩擦係数の影響

圧延によるV字形状疵の変化に及ぼす摩擦係数の影響をFig. 6に示す。初期疵開口部幅は $w_0=0.5$ mmとした。

摩擦係数が大きいほど疵開口部幅が狭くなる傾向が見受けられる。また疵深さは摩擦係数が大きいほど浅くなり、圧着部は長くなっている。すなわち、高摩擦条件ほど疵が閉じることがわかる。

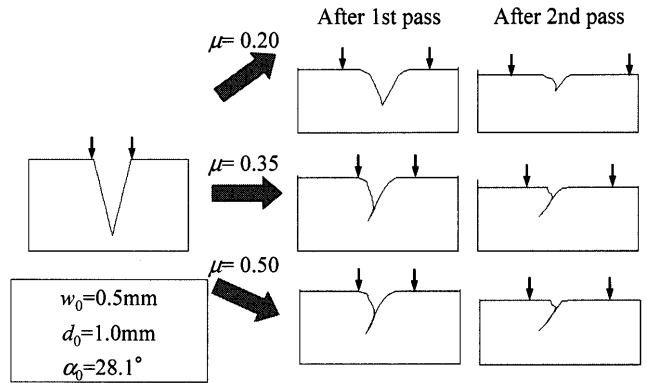


Fig. 6. Influence of friction on V-shape defect after rolling (thickness $t=20$ mm, rolling reduction $\phi=30 \rightarrow 50\%$).

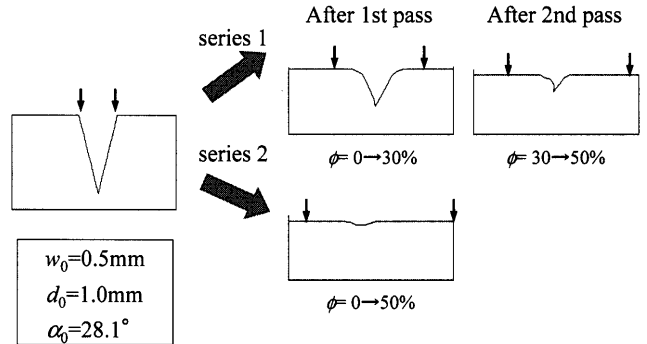


Fig. 7. Influence of pass schedule on V-shape defect after rolling (thickness $t=20$ mm, $\mu=0.20$).

(c) 圧下スケジュールの影響

Fig. 7に、Table 5で示した圧下スケジュールにおける疵形状変化の様子を示す。摩擦係数 $\mu=0.20$ 、初期疵開口部幅は $w_0=0.5$ mmである。

圧延後の疵開口部幅および深さともにSeries 2の方が小さい。また、疵の圧着も見られなかった。高圧下が疵を消失させるのに有効であることがわかる。1パスでの圧下率が大きい場合、かみ込み角度が大きいため、ロール接触領域におけるせん断変形量は大きくなる。その結果、疵は大きく開く傾向にあると考えられるが、それに伴って疵内壁の大部分はロールに接触するため表面と区別が付きなくなり、実際に残った疵は小さいものとなる。

(d) ロール径の影響

ロール径の影響をFig. 8に示す。ロール径が大きいほど疵底部で圧着が起こり、結果的に開口部深さは小さくなる。これはロール径が大きいほどかみ込み角度が小さくなるためと考えられる。

4.3 矩形状凹形疵

解析に使用した各種条件をTable 8に示す。疵開口部幅 $w_0=2.0$ mm、疵深さは $d_0=1.0$ mmとした。

(a) 1パスでの疵形状変化

矩形状疵が圧延条件によってどのように変化するかを調

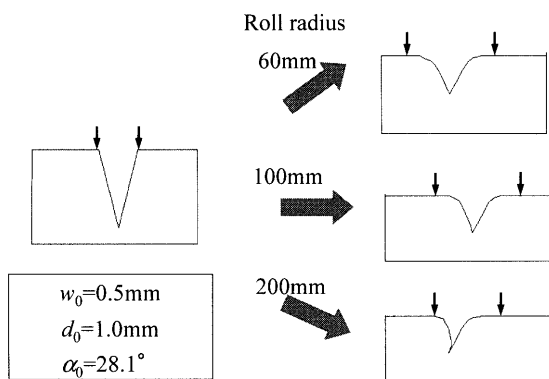
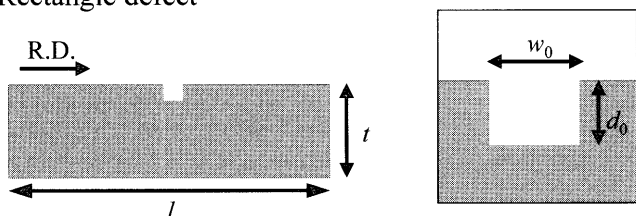


Fig. 8. Influence of roll radius on V-shape defect after rolling (thickness $t=20$ mm, rolling reduction $\phi=0 \rightarrow 30\%$, $\mu=0.20$).

Table 8. Initial dimension of rectangle defect.
Rectangle defect



Defect width: w_0	2.0 mm
Defect depth: d_0	1.0 mm

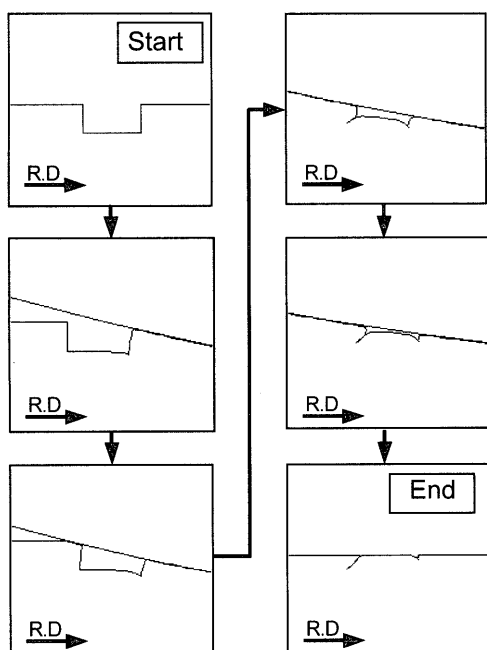


Fig. 9. Example of deformation of rectangle defect (thickness $t=20$ mm, rolling reduction $\phi=30\%$, $\mu=0.20$).

査した。圧下率30%の場合の解析結果をFig. 9に示す。矩形形状疵はロールにかみ込まれるにつれて圧延方向前方の壁面が鋼板表面に露出し、壁面の下方で若干の倒れこみがおこり小さな疵として残る。疵の後方壁面は圧延により前方

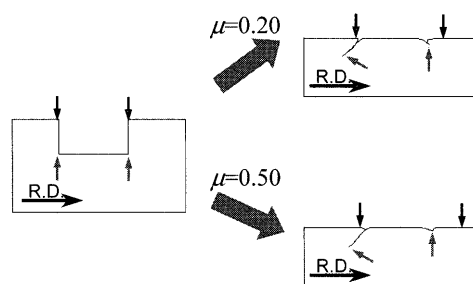


Fig. 10. Influence of friction on rectangle defect after rolling (thickness $t=20$ mm, rolling reduction $\phi=30\%$).

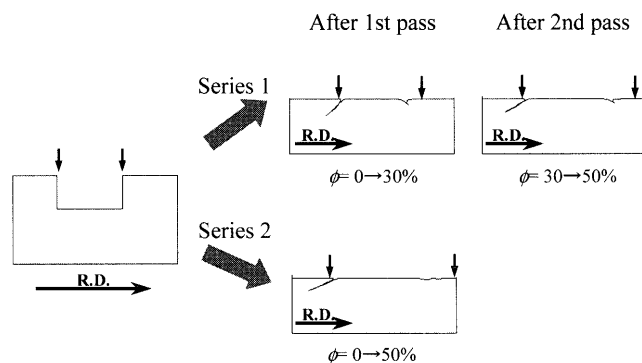


Fig. 11. Influence of pass schedule on rectangle defect after rolling (thickness $t=20$ mm, $\mu=0.20$).

へと倒れこみ、相対的に盛り上がってくる欠陥の底面と接触する。その結果、「ハの字型」の疵が残る。

(b) 摩擦係数の影響

Fig.10に摩擦係数の影響を示す。後方の倒れこみによる疵は、その長さおよび角度ともに摩擦の影響はほとんど見られない。しかし前方の疵については、摩擦係数が大きいほどその深さが減少する傾向にある。矩形疵は圧延に伴い前方壁面が表面にせり出すが、この量が少なく圧縮変形による前方壁面のバルジングが大きくなると、底面との圧着距離も長くなると考えられる。摩擦係数が大きい場合このせり出しの量が大きく、したがって前方壁面と底面との圧着が起きにくくなると考えられる。

(c) 圧下スケジュールの影響

圧下スケジュールの影響をFig.11に示す。摩擦係数は0.20とした。Series 2では前方の疵がほとんど消滅していることがわかる。これは圧下率が大きいことで板表層におけるせん断変形量が大きくなるため、前方壁面を大きく鋼板表面にせり出させる状態になる。そのため前方壁面のバルジングが小さく、底面との接触も起こることなく結果的に疵が消滅したと考えられる。また、後方圧着部の表層との角度はSeries 2の方がより小さい。

4.4 三角形状突起

三角形状の突起、つまり先端がとがった突出欠陥について変形解析を行った。解析条件、突起初期形状をTable 9に示す。圧延条件は摩擦係数 $\mu=0.20, 0.50$, 圧下スケ

Table 9. Initial dimension of triangle convex defect.

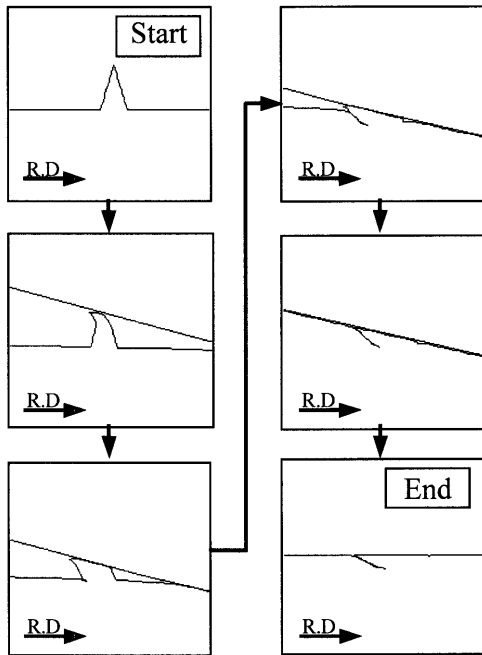
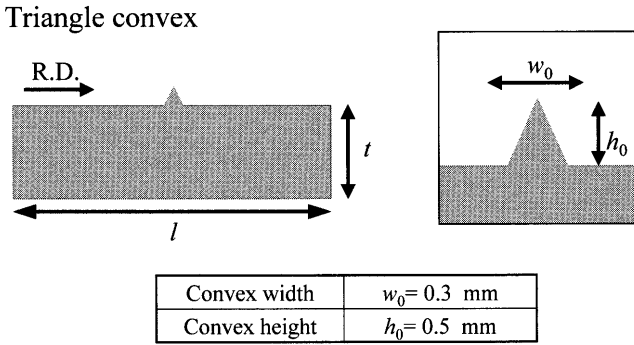


Fig. 12. Example of deformation of triangle convex defect (thickness $t=20 \text{ mm}$, rolling reduction $\phi=30\%$, $\mu=0.20$).

ジュール Series 1, Series 2 で比較検討した。

(a) 1パスでの疵形状変化

三角形突起の変形過程を Fig. 12 に示す。三角形の突起はロールに接触すると圧延方向とは逆方向に倒され、その後ロールギャップにかみ込まれる。結果的に鋼板表面には圧延方向とは逆向きにのり着痕となって残る。

また、突起前方にはほとんど疵は残らない。突起はロールに接触した際に後方へ倒れつつも、ロールとの摩擦により前方斜面は圧延方向へ引張られる。しかしながら、ロールによって後方に倒される効果の方が大きいため、突起前方斜面と鋼板表面との圧着は起こらないと考えられる。

(b) 摩擦係数の影響

Fig. 13 に示すように、圧延後の疵深さおよび疵の角度ともに摩擦の影響はほとんど見られなかった。これは突起部分の変形を受ける際に、ロールによる圧延方向へのせん断的な力よりも後方への圧縮的な力の方が大きく作用するた

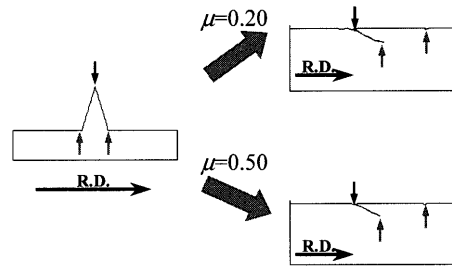


Fig. 13. Influence of friction on triangle convex defect after rolling (thickness $t=20 \text{ mm}$, rolling reduction $\phi=30\%$).

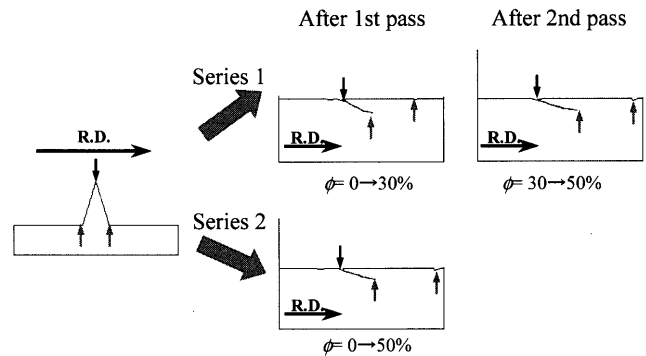
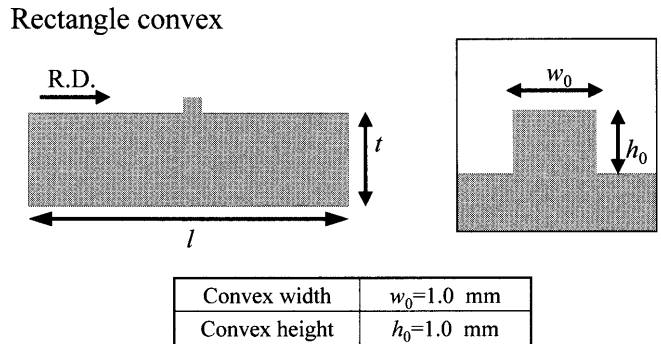


Fig. 14. Influence of pass schedule on triangle convex defect after rolling (thickness $t=20 \text{ mm}$, $\mu=0.20$).

Table 10. Initial dimension of rectangle convex defect.



めと考えられる。突起がロールギャップにかみ込まれた時点で突起は後方に完全に圧着するため、圧延中に受ける摩擦の影響は疵形状にあまり影響しないと考えられる。

(c) 圧下スケジュールの影響

Fig. 14 に示すように、圧延後の疵は圧下スケジュールの影響をほとんど受けないことがわかる。これも、前述の理由により、三角形突起の場合、圧延後の疵は圧延条件よりも初期の突起形状に依存するためと考えられる。

4.5 矩形状突起

解析条件、初期形状を Table 10 に示す。解析に突起幅を $w_0 = 1.0 \text{ mm}$ 、突起高さを $h_0 = 1.0 \text{ mm}$ とした。摩擦条件は $\mu = 0.20, 0.50$ で、また圧延スケジュール Series 1, Series 2 で比較検討した。

(a) 1パスでの疵形状変化

圧下率 30% の解析結果を Fig. 15 に示す。突起はロールに

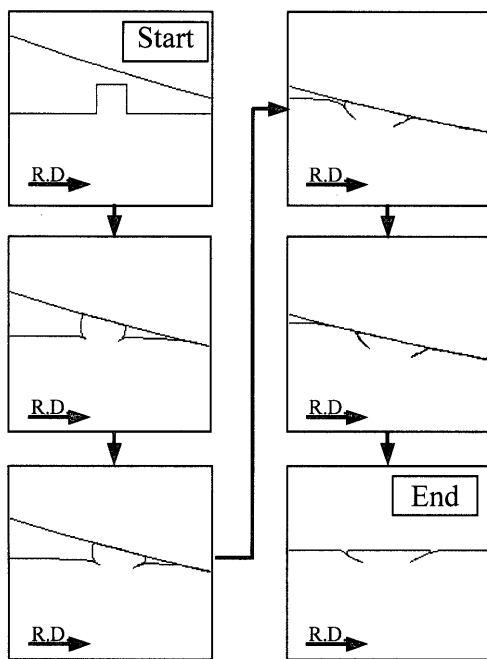


Fig. 15. Example of rectangle convex defect deformation (thickness $t=20$ mm, rolling reduction $\phi=30\%$, $\mu=0.20$).

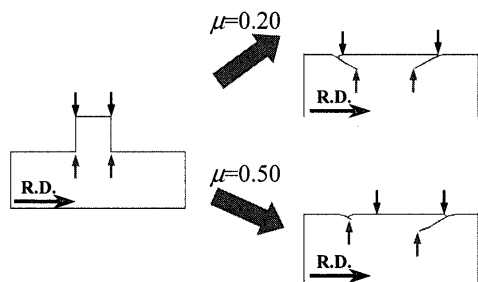


Fig. 16. Influence of friction on rectangle convex defect after rolling (thickness $t=20$ mm, rolling reduction $\phi=30\%$).

かみこ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、前・後方壁面においてバルジングが起り、鋼板表層と圧着する。そのため突起部の前方と後方に大きな疵が残留し、「逆ハの字型」の疵となる。

三角形の突起と異なり、突起の上面がロール表面と広く接触し前方に倒れることが確認できる。

(b) 摩擦係数の影響

Fig.16に圧延後の疵形状を示す。摩擦が大きい場合、後方の疵は小さくなっているが、前方の疵は深くなっている。

矩形の突起はその上面がロールと接触する領域が長いので、突起は前方に倒れ疵を形成する。このとき摩擦が大きいと、より前方への倒れこみが大きくなるため、後方壁面のバルジングは緩和され鋼板表面との接触長さは小さくなる。また前方へのバルジングが大きくなることで突起前方へ移動する材料体積が大きくなり、これらがロールによって深く鋼板内部へ押し込まれたため、前方の疵の深さおよび

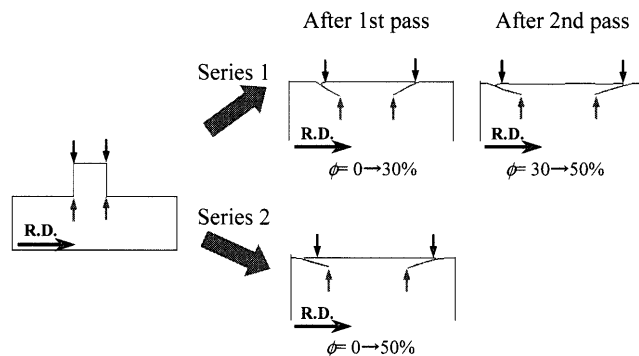


Fig. 17. Influence of pass schedule on rectangle convex defect after rolling (thickness $t=20$ mm, $\mu=0.20$).

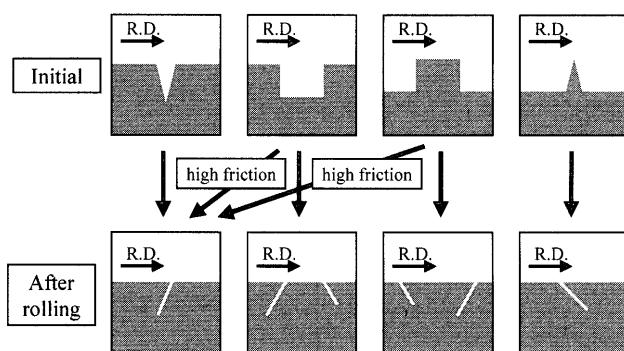


Fig. 18. Relationship between initial and final shape of surface defects.

び角度が大きくなったと考えられる。

(c) 圧下スケジュールの影響

Fig.17から、Series 1, Series 2とも形状に大きな差は見られなかった。三角形突起の場合でもそうであったが、突起状の欠陥では凹型の疵とは異なりロールにかみ込まれた時点で疵形状はほぼ決定される。そのため圧下スケジュールの影響はあまりないと考えられる。

以上より、初期疵・突起形状と圧延後疵形状の間に相関関係が見られた。Fig.18は本報で行った数値解析によって得られた結果をまとめたものである。この中では圧延時の疵形状の変化が模式的に表現されており、圧延後の疵形状と圧延条件から圧延前の疵・突起形状がある程度推定できることが考えられる。

5. 結言

圧延方向に90°の方向にV形状疵、矩形状疵、三角形突起、矩形状突起が存在する板に関して、疵の初期形状および圧延条件を変化させて、圧延後の疵形状に及ぼす影響と、圧延前後の疵形状の関係について数値解析を用いて調査した。これより以下の知見を得た。

(a) V形状疵に関して

- 1) 疵先端角度が大きいほど疵壁面が表面に露出することで開いていく。先端角度が小さい疵ほど疵の底部から

圧着を起こして閉じる傾向がある。

- 2) 摩擦が大きいほど疵は閉じ、圧延方向への傾斜が大きくなる。
- 3) 圧下率が大きい場合、疵は開く傾向がある。
- 4) ロール径が大きいほど疵は閉じる傾向がある。

(b) 矩形疵に関して

- 1) 圧延後、前後の壁面が倒れこんだ「ハの字型」に疵が残る。
- 2) 高摩擦条件では前方の疵長さは減少する。

(c) 突起に関して

- 1) 三角形突起の場合、圧延後は突起後方に圧着疵が形成される。
- 2) 矩形突起の場合、突起の前後に「逆ハの字型」の疵が形成される。高摩擦状態では突起部後方の疵長さは減少する。

以上の結果より圧延後の疵形状から、その原因である欠

陥形状をある程度推定することが可能であり、消滅させるのに有効な圧延状況の選定に利用できると考えられる。

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、謝意を表する。

文 献

- 1) 鉄鋼材料便覧, 日本金属学会・日本鉄鋼協会編, 丸善, 東京, (1967), 471.
- 2) 第3版鉄鋼便覧III(1)圧延基礎・鋼板, 日本鉄鋼協会編, 丸善, 東京, (1980), 403.
- 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.Ogawa and E.Ikushia: *Tetsu-to-Hagané*, **61** (1975), S555.
- 6) Y.Higo, S.Odagiri and K.Shinoda: *Nisshin Steel Tech. Rep.*, **55** (1986), 18.
- 7) T.Inoue, H.Yasunaka and H.Matsumoto: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1167.