解説

Review

圧延における表面疵変形過程の予測

石川孝司*

Prediction of Deformation of Surface Micro-Defects in Rolling

Takashi Ishikawa

Synopsis

Surface micro-defects affect surface quality and cause breakdown and cracks in rolled products. Many efforts have been made to prevent the occurrence of micro-defects in rolling plants, however, producing defect-free products remains very difficult. Many kinds of surface defects occur in rolling processes. The shapes of surface defects after rolling change in various manners, depending on the rolling conditions. Determining the relation between the shape of surface defect before rolling and that after rolling may lead to an effective method for predicting the occurrence of a surface defect and development of a process to eliminate defects. This review is focus on the numerical approach to predict surface micro-defects in rolling.

1. 緒 言

圧延製品の表面には種々の形状の疵が現れる場合がある。これらの疵は鋼材の品質を損ない2次加工時に割れなどの重大な欠陥を引き起こすばかりでなく、製品の製造過程においても、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非常な努力がなされている^{1),2)}。たとえば、製鋼段階で凝固シェルの安定化、モールドパウダーの巻き込み防止、連铸スラブのスカーフイングの徹底、スケールの安定化、デスケール技術の工夫、圧延時の異物巻き込み防止など各工程で取組がなされている。また、古くから表面疵に関する研究も多い。しかし、現段階では疵を発見してからその場しのぎの対策をとるのが一般的であり、しかもその疵を見て原因を同定できない場合も多く、疵の発生を完全に防止することは困難な状況にある。

圧延製品に発生する疵の形状は発生要因などにより種々であり、発生後に幾重にも圧延加工が施されることで、圧延後の疵はさまざま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、これまでに鋼スラブ表面に機械加工で人工疵を施して圧延実験をして疵の変形を調査した例もある^{3)~8)}。時間と経費のかかる実験ではなく、数値シミュレーションで疵の予測が可能となれば非常に有効である。しかし、数値解析を用いた表面疵の変形に関する研究はほとんどない。それは疵部が材料全体の体積に比して微小であるので、マクロ変形と同時に局部的なミクロ領域の変形を非定常で解析する必要があるためである。この圧延疵に対する数値解析手法の開発を目的に、2000年4月より(社)日本鉄鋼協会の中で「表面疵発生過程予測技術の開発」研究会が発足、活動し基礎的な成果が得られている⁹⁾。

ここでは、圧延疵に関係する従来の研究を概説したあと、その研究会での成果をもとに板圧延における圧延疵の変形メカニズムについて解説する。

2. 圧延疵

2.1 圧延疵の種類

圧延時に生ずる表面疵の種類は多種あり、系統的に整理されているものではないが、下記に板圧延における代表的

なものを挙げる (Table 1²⁾).

スケール疵: 表面にスケールが圧着またはかみ込んだものの, 赤スケール, あばた状スケール, 線状スケール, 点状スケールなどさまざまな形態がある.

へげ (Scab): 表面が剥がれやすいラップ状の疵.

スリバー (Sliver): 圧延方向に断続的に出る比較的浅い線状疵.

シーム (Seam): 圧延方向に平行な線状の疵.

ガウジ (Gouge): 核があり, 板表面にくぼみがある.

形態が同じでも原因が異なるものもあるともいわれおり, 発生メカニズムは諸説あり, 不明なものも多い. Fig.1 は考えられる疵の原因を図示したもので, 上流側から CC 鋼塊製造時の表面不良, 割れ, 表面層中の不純物, 介在物, プローホール, 加熱炉から粗圧延, 熱延入口までのかき疵, すり疵, 圧延中のロール疵, スケール巻き込み, 異物飛込みなどである.

Fig.1. Affectors on surface micro-defects in steel making.

2.2 従来の研究

これまでにいろいろな観点から疵の発生原因や進展メカニズム, 疵防止法について報告されているが, ここでは圧延時の疵の変形についての報告例を紹介する. Table 1 に示した各種の疵の原因について西島¹⁰⁾は, 以下の10項目に分類している.

- 1) 鋼塊に存在した内外欠陥から生じるもの.
- 2) 加熱が不適当なために生じるもの.
- 3) 圧延温度が不適当なため生じるもの.
- 4) 圧延の時機械的原因によって生じるもの.
- 5) 非金属介在物によって生じるもの.
- 6) 鋼材表面における濃化元素によって生じるもの.
- 7) 酸洗ぜい化が影響して生じるもの.
- 8) 鋼の材質不良によって生じるもの.
- 9) 疵取り方法, あるいはその手法に原因するもの.
- 10) 鋼材の運搬工程中の疵, その他人為的なもの.

Table 2³⁾ は中炭素 Al キルド鋼のスラブを対象として, ノロカミ (Slag spot), タテワレ (Longitudinal crack), ヨコワレ (Lateral crack) などの代表的な表面欠陥疵を残したまま熱間圧延をした後, コイルの表面を観察した結果である. ノロカミとタテワレは線状の疵に, ヨコワレはへげ状疵になり, 内部にスケールが観察された.

Fig.2⁵⁾ は 80 mm 厚の鋼片に幅 1 mm で深さの異なる (B: 15 mm, D: 5 mm) 矩形状の溝を人工的に施し, 1473 K で圧延した後の溝の変化を示したものである. 図中の 3, 4, 5 は大気雰囲気での加熱で, 8, 9, 10 はスケールを防止した加熱条件である. 浅い疵の場合は圧延とともに開口が生じ,

Table 1. Classification of micro defects on rolled plate²⁾.

Embedded scale	Scale marks Sand dispersed scale	Coil brake
Scab	Sliver	Seam
Gouge	Lateral crack	Edge wrinkle

Table 2. Aspect of slab surface defect and hot coil surface defect³⁾.

Slab		Hot coil			
Name of defect	Sketch	Aspect of defect			Feature of defect
		Name	Surface sketch	Section sketch	
Slag spot		Sliver	—	10μm	Existing inclusions on surface or in sub-surface
Longitudinal crack		Sliver	—	20μm	Existing large scales which contain grained oxide
Lateral crack		Scab		100μm	Same

Fig.2. Deformation of micro-defects in plate rolling⁵⁾.

広く浅いくぼみになるが、条件によっては溝の底部が盛り上がり八の字を呈する。また、深い溝の場合は底部が接触し鍛着現象がみられ、先端にスケールの影響とみられる粒状酸化物の点在が観察された。また、加熱スケールの状態によっても変形が異なることが明らかである。

冷延鋼板で問題となるスリパー疵は、表層近傍のピンホールや連鑄時のモールドパウダーの巻き込みなどが原因で、それが圧延により表面に現れ、表面疵となると考えられている。井上ら⁷⁾は、アルゴンガスやアルミナを封入した人工欠陥を内部に導入して圧延実験を行い、アルゴ

ンガスを封入した場合には圧下率 85 % で消滅するが、アルミナを封入した場合には 96 % で線状に変形し、表面に開口することを示した。福島ら¹¹⁾は、同様な実験により初期内部欠陥の深さと大きさの影響を調査している (Fig.3)。アルミナを封入した人工欠陥は、疵になることを確認し、初期に大きなものほど深い位置にあっても疵になることを示した。

シーム疵は圧延中に側面部に発生したしわ (表面の凹凸) が、板表面にフォールディングで回り込み、圧延方向に線状の疵となって残るもので、初期に欠陥がなくても疵が発生する。側表面の結晶粒の方位の影響¹²⁾、回り込み変形量の検討¹³⁾などが行われている。

フェライト系ステンレス鋼の冷間圧延時に現れる白筋模様と呼ばれる疵 (Fig.4) は、表面研削することによって表面加工層 (Fig.4(a)) の延性が低下し、流体潤滑により表面層に働く付加的引張応力により、圧延中に圧延方向と直角方向に亀裂が現れ (Fig.4(b))、圧延とともに拡大する (Fig.4(c)) との報告¹⁴⁾がある。

Fig.5 はゴールドダスト疵 (鱗状かぶさり疵) と呼ばれるもので、表面の材料の一部が薄片となってかぶさっている欠陥である。これは、初期の表面粗さが関係しており、表面の凹凸が Fig.6 のような変形をするために発生すると報告¹⁵⁾されている。

Fig.3. Critical depth to surface defect¹¹⁾.

スケールは、一般に延性がなく、圧延中に破壊、剥離を起こし、さらに剥離したスケールが異物としてかみ込まれるなど、さまざまな表面欠陥の原因となる。小野田ら¹⁶⁾は、各種のスケール疵の形態と原因について説明しているので参考にされたい。Fig.7 は、うろこ状スケール疵の発生メカニズムを定性的に説明したもので、スタンド間で発生する二次スケールが、体積変化により剥離し盛り上がってプリスタリングを起こし、鋼板表面に疵を発生させると説明されている¹⁷⁾。

Fig.4. SEM of SUS430 sheet through GR process (a: as ground, b: as cold rolled at first pass, c: as cold rolled at final pass)¹⁴⁾.

Fig.5. Optical micrograph of cold rolled surface of steel sheet with roughness of 46 μm after annealing and pickling¹⁵⁾.

Fig.6. Schematic diagram of deformation at tip of uneven surface¹⁵⁾.

Fig.7. Mechanism of secondary scale defect¹⁷⁾. Fig.8. Deformed shape of artificial defects on bar rolling¹⁸⁾.

Fig.8 は、熱間孔型圧延での表面疵の変形を人工疵による実験で確認した結果である¹⁸⁾。孔型圧延でも Fig.2 と同様な変形をするが、断面内での変形の不均一が大きいので、素材断面の場所によって変形状態は大きく異なる。場所により、疵が開口する位置、閉じてラップ状になる位置、疵深さが浅くなる位置がある。このため、角 - ダイヤ - 角、あるいは角 - オーバル - 角などの各パスでの孔型設計により、疵の低減が可能であることが示されている。

以上のように各種の疵低減のための研究、努力がなされてきたが、いまだに表面無欠陥の製造技術が完成しているとはいえない。これまでの技術に数値解析を加えることにより、さらに進んだ表面品質の造り込み技術が開発されるものと期待できる。次に、その数値解析¹⁹⁾について述べる。

3. 解 析

3.1 解析方法

著者らの研究室で開発している剛塑性有限要素解析ソフト RIPAD - 2D は、メッシュサイズの設定などが自由にコントロールできるため、局所変形解析など、微小領域の解析が可能である。

疵は板の上面に圧延方向に対して 90° にあるものとし、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.9 に示す。疵近傍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詳細に表現できるようにした。解析上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

解析条件は、(1) 解析精度検証のためにアルミニウムのモデル実験と同条件と、(2) 低炭素鋼の熱間粗圧延段階を想定して、各種圧延条件の影響を解析的に検討するための条件を設定した。解析に用いた圧延条件を Table 3 に示す。圧下スケジュールの影響をみるために Table 4 に示す2種類のスケジュールで行った。また、パスは一方方向圧延とした。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する。

3.3 対象とした疵形状

ここでは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.10 に示す。ここでは鋼板に存在する、凹状にへこんだ欠陥に対し「疵」と呼び、製鋼時から残留したへこみ疵、圧延過程での引っ掻き疵やスケールがはがれ落ちたくぼみ、あるいは異物飛び込みに

Fig.9. Example of mesh¹⁹⁾.

より表面がへ込んだ疵などを想定した。また、凸状つまり鋼板表面より突出した欠陥に対しては「突起」と表現し、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び込みなどを想定した。

4. 解析結果及び考察

4.1 実験結果との比較

Table 5 に実験に用いたアルミニウム A1050 の変形抵抗と、圧延機の主な仕様について示す。圧延方向に対して 90° 方向に V 字疵を直線状につけ、その深さ $d = 0.5$ mm 一定とし開口部の幅 w 、角度 θ を変化させた (Table 6)。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 293 ± 1 K、潤滑は無潤滑である。圧延後、光学顕微鏡を用いて試験片中央部の疵の深さと開口部の幅を測定した。

実験結果と同条件で行った解析結果を比較して Fig.11

Fig.10. Schematic figure of surface defect¹⁹⁾.

Table 3. Rolling condition.

Rolling temperature	1473 K
Roll rotational speed	0.400 rpm.
Roll radius	$R = 60, 100, 200$ mm
Friction coefficient	$\mu = 0.20, 0.35, 0.50$

Table 4. Pass schedule.

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

t : Plate thickness, : Total rolling reduction

Table 5. Rolling condition.

Material	Aluminum A1050-O (JIS)
F-value	112 MPa
n-value	0.18
Thickness	10 mm
Length	150 mm
Width	47 mm
Roll radius	100 mm
Roll length	250 mm
Roll material	High carbon bearing chrome steel
Maximum load	500 N
Rolling velocity	0.395 rpm.

Table 6. 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 °

Fig.11. Comparison between experimental and analytical result ($\alpha_0=30^\circ$)¹⁹⁾. Fig.12. Comparison between experimental and analytical result ($\alpha_0=112^\circ$)¹⁹⁾.

および Fig.12 に示す．摩擦係数は $\mu = 0.20$ とした．

$w_0 = 0.27$ mm の疵の圧延後の断面形状は，圧下率の増加とともに V 字形状疵の両斜面が盛り上り，疵底部から閉じていく．また， $w_0 = 1.50$ mm の場合の断面形状は，圧下率の増加とともに V 字形状疵が全体的に小さくなっていく．いずれも実験結果と良く一致している．

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．次に本解析により，各種疵形状の変形に及ぼす圧延条件の影響を検討する．

4.2 V 字形状疵

初期 V 字形状疵の圧延による変化を解析した．摩擦係数，ロール半径，圧下スケジュールの表面疵変形に及ぼす影響を調査した．

(a) 1 パスでの疵形状変化

初期疵開口部 0.3 mm，初期疵深さ 1.0 mm，圧下率 30 % の解析結果を Fig.13 に示す．V 字形状疵はロールにかみ込まれる際，若干 V 字が開くが，そのまま V 字の形を残して圧延され，圧延が進行することで疵の V 字の底部から圧着を起こすことが確認できる．

(b) 摩擦係数の影響

圧延による V 字形状疵の変化におよぼす摩擦係数の影

Fig.13. Example of deformation of V-shape defect¹⁹⁾. (thickness $t = 20$ mm, rolling reduction $\phi = 30\%$, $\mu = 0.20$)

Fig.14. Influence of friction on V-shape defect after rolling¹⁹⁾. (thickness $t = 20$ mm, rolling reduction $\phi = 30 \sim 50\%$)

響をFig.14に示す。初期疵開口部長さ w_0 は0.5 mmとした。

摩擦係数が高いほど疵開口部が狭くなる傾向が見られる。疵深さは摩擦係数が高いほど浅くなり、圧着部長さは長くなっている。すなわち、高摩擦条件ほど疵が閉じることがわかる。

(c) 圧下スケジュールの影響

Fig.15 は、Table 4 に示した圧下スケジュールでの疵形状変化である。摩擦係数 $\mu = 0.20$ 、初期疵開口部長さは0.5 mm である。

圧延後の疵開口部長さおよび深さともに Series2 の方が小さくなる。この条件では圧着は見られなかった。高压下で疵を消失させるのに有効であることがわかる。1 パスでの圧下量が大きい圧延では、かみ込み角度が大きいことから材料かみ込み時に圧延材を大きく変形させる。そのため

Fig.15. Influence of pass schedule on V-shape defect after rolling¹⁹⁾. (thickness $t = 20$ mm, $\mu = 0.20$)

Fig.16. Influence of roll radius on V-shape defect after rolling¹⁹⁾. (thickness $t = 20$ mm, rolling reduction $\phi = 0 \sim 30\%$, $\mu = 0.20$)

圧下量が大きい圧延では、疵部がロールにかみ込まれる際にV字がより大きく開くと考えられる。

(d) ロール径の影響

ロール径の影響を Fig.16 に示す。ロール径が大きいほど疵底部で圧着がおこり、結果的に疵深さは小さくなる傾向がみられる。

4.3 矩形状凹形疵

矩形状凹形疵が圧延によってどのように変形するかを調査した。疵開口部長さ w_0 は2.0 mm、疵深さ d_0 は1.0 mm とした。

圧下率 30% の解析結果を Fig.17 に示す。矩形状凹形疵はロールにかみこまれていくと圧延方向前方の壁面が鋼板表面に露出した状態になり、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へと倒れこみ、相対的に盛り上がってくる凹状欠陥の底部と接触し、大きな疵として残る。その結果、「八の字型」の疵が残ることになる。

4.4 三角形状突起

ここでは三角形状の突起、つまり先端がとがった突出物

Fig.17. Example of deformation of rectangle defect¹⁹⁾. (thickness $t = 20\text{mm}$, rolling reduction $= 30\%$, $\mu = 0.20$)

Fig.18. Example of deformation of triangle convex defect¹⁹⁾. (thickness $t = 20\text{mm}$, rolling reduction $= 30\%$, $\mu = 0.20$)

について変形解析を行った。摩擦係数は $\mu = 0.20$ とした。

三角形突起の変形過程を Fig.18 に示す。三角形の突起はロールに接触するとロールに押しつぶされるように圧延方向とは逆方向に倒され、その後ロールにかみ込まれる。結果的に鋼板には突起部分の後方に大きな疵跡を残す

Fig.19. Example of rectangle convex defect deformation. (thickness $t = 20\text{mm}$, rolling reduction $= 30\%$, $\mu = 0.20$)

結果となる。しかし、疵の前方にはほとんど疵は残らない。ロールに接触した時、突起は摩擦により前方へ引っ張られるが、三角形の前方斜面の影響でロールに押しつぶされる効果のほうが大きくなるため、前方への倒れこみはほとんど起こらないと考えられる。

4.5 矩形状凸形突起

突出部分の長さ w_0 を 1.0mm 、突出部分の高さ h_0 を 1.0mm 、圧下率 30% の解析結果を Fig.19 に示す。突起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、バルジングがおり、そのまま突起部は鋼板表層に埋没していく。そのため突起部の前方と後方に大きな「逆ハの字型」の疵が残る。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も倒れこむのが確認できる。

5. まとめ

圧延における表面疵に関する研究を概説し、V 字形状欠陥、矩形状凹形疵、三角形突起、矩形状凸形突起に関して形状、圧延条件を変化させて、その影響と圧延前後の疵形状の関係を数値解析した結果を紹介した。

V 字形状疵に関して：

- 1) V 字形状の疵では圧延前の V 字形状から、鋼板表面に露出することで開く。中心角が小さい疵ほど疵の底部から圧着を起こし閉じる。
- 2) 疵の変形に対しては摩擦が大きく影響する。摩擦が大きい

いほど圧延方向への傾斜が大きくなり、V字疵は閉じる傾向にある。

3) 圧下率の大きいものではV字疵は開く傾向がある。

4) ロール径の大きい条件ほど疵は閉じる傾向がある。

凹形疵に関して：

1) 疵は圧延により前後の壁面が倒れこんだ「ハの字型」に残る。

2) 高摩擦状態では前方の疵は減少する。

凸形疵に関して：

1) 先端が三角形の場合、圧延後は突起が後方に押し倒されることで突起後方に疵ができる。

2) 矩形の突起の場合、突起部は圧縮され、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は前方に倒れこむことで後方の疵は減少する。

Fig.20は、結果をまとめたものである。ここでは圧延時の疵形状の変化を模式的に考えたもので、この数値解析により圧延後の疵形状からその原因をある程度は推定することが可能であると考えられ、疵防止対策の手段となることが期待できる。

従来から現象が明確でないため抜本的な対策が遅れていた圧延疵問題に対して、ここで紹介したように理論的なメスを入れることが可能になり、欠陥フリー圧延製品製造技術が格段に進歩するものとする。

Fig.20. Relationship between initial and final shape of surface defects.

(文 献)

- 1) 日本金属学会・日本鉄鋼協会編：鉄鋼材料便覧。
- 2) 日本鉄鋼協会編：第3版鉄鋼便覧 (1) 圧延基礎・鋼板。
- 3) 榊井明、梶谷英雄、小林周司、矢野幸三、須田豊治、三辻晴夫：鉄と鋼講演概要集() (1982) S360。
- 4) 角南英八郎、寒河江裕：鉄と鋼講演概要集() (1982) S415。
- 5) 小河卓、生嶋栄次：鉄と鋼講演概要集 (1975) S555。
- 6) 肥後裕一、小田桐繁、篠田研一：日新製鋼技報 55 (1986) 18。
- 7) 井上健、安中弘行、松本洋：材料とプロセス 19 (1993) 1167。
- 8) 松井利光、緒方俊治、藤田通孝、浅川基男：住友金属 26 (1974) 3, 324。
- 9) 日本鉄鋼協会：「表面疵発生過程予測技術の開発」研究会報告書 (2004)。
- 10) 高橋徳三郎：塑性と加工 19 (1961) 9, 463。
- 11) 福島傑浩：材料とプロセス 12 (1999) 331。
- 12) 松原行宏、蛭田敏樹、山下道雄、北浜正法：第112回圧延理論部会 (2000) 圧理112-1。
- 13) 間瀬秀里、河野幸三、高瀬 勝、加藤弘之：鉄と鋼講演概要集() (1987) S1062。
- 14) 宇城工：川崎製鉄技報 16 (1984) 53, 46。
- 15) 山本章夫：鉄と鋼 74 (1988) 1028。
- 16) 小野田克巳、岡部央、能美亮一、長谷登：住友金属 20 (1968) 1, 1。
- 17) 富永賢二、小出正人、森田正彦、山下道雄：材料とプロセス 19 (1995) 1242。
- 18) 加藤健三、斎藤好弘、森高満：昭和53年塑性加工春季講演会講演論文集 (1978) 197。
- 19) 石川孝司、湯川伸樹、吉田佳典、殿畑雄飛：鉄と鋼 89 (2003) 1142。