

弾塑性変形解析による連鑄製冷延鋼板の ゴーストライン発生機構解明

糸山 誓司*・反町 健一*・比良 隆明*・豊田 勝*²・鷲尾 勝*²

Elasto-plastic Stress Analysis on Formation Mechanism of Ghost-lines in Cold Rolled Steel Sheet Produced from Continuously Cast Slab

Seiji ITOYAMA, Kenichi SORIMACHI, Takaaki HIRA, Masaru TOYODA and Masaru WASHIO

Synopsis : Ghost-lines (GL) observed at polished surfaces of cold rolled sheets, stretched perpendicular to rolling direction, produced from continuously cast slabs were examined in order to investigate formation mechanism. Results obtained were as follows.

(1) Degree of GL was influenced by conditions of segregations such as size, intensity, and position in the sheet.

(2) Simulations of the GL with elasto-plastic stress analysis were carried out under an assumption that there was a difference in stress-strain curves between the sheet matrix and the segregation. It was revealed that a convex part was formed at a stretched sheet surface and the convex height was proportional to the size of the segregation and inversely proportional to the depth of the segregation part from the sheet surface. The actual behaviors of the GL in the sheet produced from continuous casting slab can be quantitatively explained by the calculated results.

(3) From above, it was concluded that the GL was caused by existence of uneven part of mechanical properties inside the sheet.

Key words : continuous casting ; ghost-line ; centerline segregation ; internal crack ; elasto-plastic analysis ; formation mechanism ; ingot casting.

1. 緒言

自動車の外板用冷延鋼板をドアアウター、フェンダー、フードなどに緩曲面成形すると、金型と接触する加工表面、あるいはその塗装後表面に、ゴーストライン¹⁾(以降GLと称す)と呼ばれる、圧延方向に沿った凹凸状の線状欠陥が検出される場合がある¹⁻⁷⁾。圧延方向と直角方向に3~7%の平面歪みを付与した後、油砥石などで引張り方向に軽く研磨しても、GLは観察される^{1,2,4)}。

従来、GLの報告は造塊材で多く¹⁻⁷⁾、その原因は、リムド鋼の場合では、脱酸剤として使用するアルミニウムの局部偏析¹⁻³⁾やリム層の欠陥⁶⁾、キルド鋼の場合には、冷延板のバッチ焼鈍時の加室^{4,5)}であるが、極端に加室量が多くなると、GLは発生しない⁵⁾。GLの発生形態にも鋼種に差異があり、リムド鋼ではキルド鋼に比較して明瞭である⁵⁾。近年では、連鑄製の連続焼鈍冷延板でもGLが発生する場合がある⁸⁾が、連鑄材でのGLの発生原因については、造塊材同様に、定量的な報告は見当たらない。

GLの発生機構に関しては、造塊材において定性的⁷⁾、あるいは半定量的⁹⁾な説明がなされ、板厚方向中心より外れた

位置に介在物や成分偏析など素地よりも硬い部位の存在が変形抵抗の不均一を招くためとされている^{7,9,10)}。造塊材とは製造方法・プロセスが全く異なる連鑄材のGL挙動を理解するうえでは、製造法や鋼種の影響を統一的に説明できるGLの発生機構の解明が望まれる。

そこで、連鑄製の高張力冷延鋼板に発生するGLの定量的な実態調査によるGLの原因究明と弾塑性変形解析によるGL発生機構の解明を試みた。

2. 実験方法

連鑄スラブより製造した厚さ0.8mmの冷延板(C/0.07, P/0.044, Si/0.01, Mn/0.38, S/0.007, Al/0.050, N/0.0077, O/0.0039mass%)を、プレス成形時の外板パネルの変形にほぼ相当する5%引張り歪みを圧延直角方向に与えた後、砥石掛けしてGL発生位置を明確にし、その直近の砥石掛けしていない部位(Fig. 1)について、(1)マグネスケールによるGL部の板の表・裏面プロフィール測定、(2)GL部の板断面での異常部(介在物、異常組織、偏析等)の有無とその位置の測定、(3)異常部の形状(厚み; t_s , 幅; w_s)測定と

平成9年10月9日受付 平成10年1月23日受理 (Received on Oct. 9, 1997; Accepted on Jan. 23, 1998)

* 川崎製鉄(株)技術研究所 (Technical Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chuo-ku Chiba 260-0835)

* 2 川崎製鉄(株)千葉製鉄所 (Chiba Works, Kawasaki Steel Corp.)

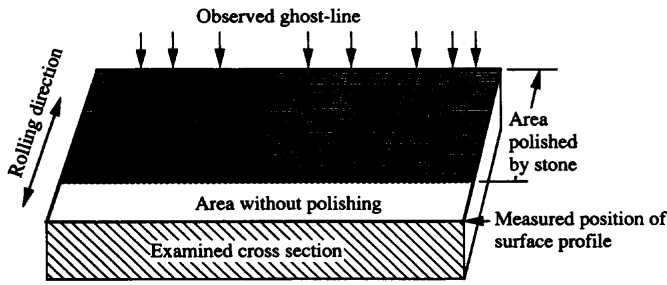


Fig. 1. Position examined surface profile and cross section near ghost-lines appeared in a cold rolled sheet after stretching.

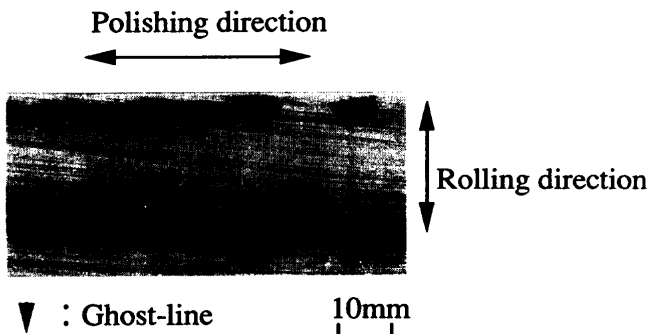


Fig. 2. Appearance of ghost-lines of a cold rolled sheet after stretching.

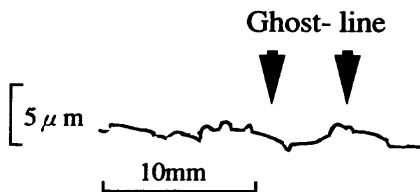


Fig. 3. Surface profile on the sheet after stretching.

EPMAライン分析による同定, 等を実施し, GL強度[0 (GLなし)~3 (強)までの4段階表示した鮮明度]との関係を調査した。

3. 結果

3・1 GL部表面プロフィール

Fig. 2には, GLの外観を示す。砥石掛けされてないGL部の表面は高さ1~4 μmの凸状を呈し(Fig. 3), 鮮明なGLの場合, 凸高さは大きい傾向を示した。

3・2 GL部冷延板内部状況

板断面には連鑄材特有の中心偏析, あるいは連鑄時の固相-液相界面の固相側に発生する内部割れ起因の偏析(以後, 内部偏析と称す)の存在が確認された(Fig. 4)。なお, 内部偏析部には, その発生直後に凝固界面の溶質濃化溶鋼がヒールされるため, 開口部は存在しない。偏析部にはP, Mnの濃化が認められたが, アルミナ等の介在物の集積は認められなかった。

Position of ghost-line

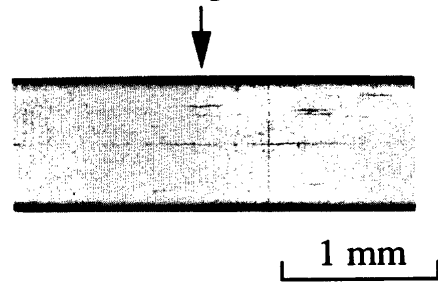


Fig. 4. Cross section of the sheet with ghost-lines (etched by picric acid).

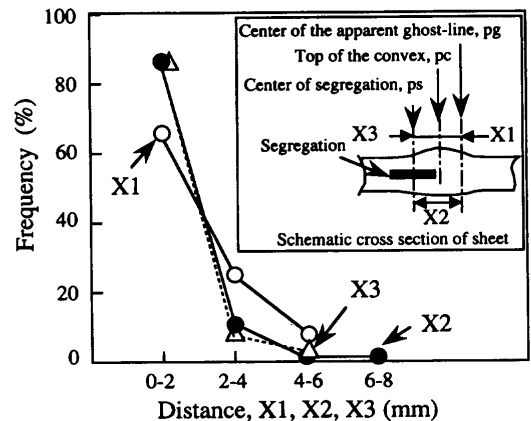


Fig. 5. Fitting frequency of two positions among the apparent ghost-line, the convex of surface profile and the centerline segregation.

3・3 冷延板内部偏析位置とGL位置の関係

GL発生位置が, 冷延板の表面凸部位置, および内部の中心偏析位置とどのような位置関係にあるかをFig. 5に示す。GL部幅中央部, pg, と凸部ピーク部, pc, の間隔をX1, GL部幅中央部, pg, と中心偏析幅中央部, ps, の間隔をX2, および凸部ピーク部, pc, と中心偏析幅中央部, ps, の間隔をX3とすると, X1, X2, およびX3が0~2 mmである割合は, それぞれ, 67%, 85%, および85%であり, GLが中心偏析や表面凸部と密接に関係していることがわかった。

3・4 GL強度と偏析形態の関係

凸高さは, 中心偏析の厚みや幅が大きくなると増加し(Fig. 6), 凸高さが大きい場合には, GL強度は強い傾向を示した。また, P偏析比(P_{max}/P_0 , P_{max} : 偏析部P濃度最大値, P_0 : マトリックス平均P濃度)が大きくなるにつれて凸高さは若干増加する傾向を示した。Fig. 7にはGL強度と鑄造速度の関係を示すが, 中心偏析に加えて内部偏析が存在し易くなる高速鑄造の場合, GLの程度は更に強くなった。

3・5 GL部表裏面の凹凸高さ

Fig. 8には, GL部発生位置の表面凸高さを, その裏面の値と比較した。板断面に中心偏析のみが存在する場合, 表・裏面での凸高さに明瞭な差は認められないが, 中心偏析と

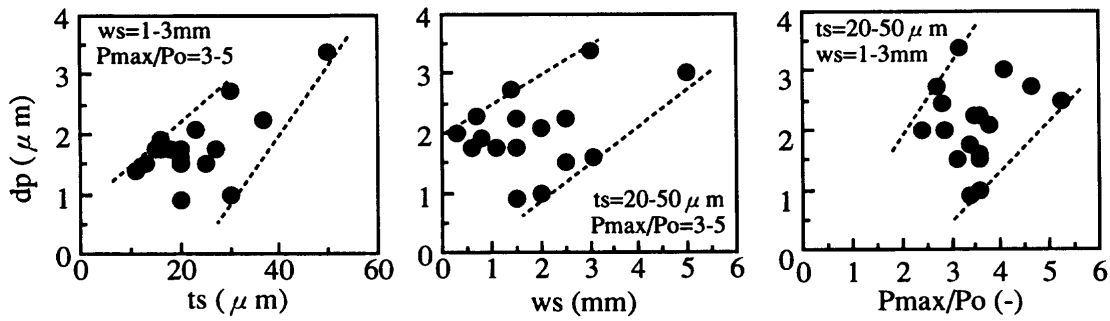


Fig. 6. Effects of thickness, t_s , and width, w_s , of centerline segregation and segregation ratio, P_{max}/P_o , on the convex height, d_p , measured at the ghost-line.

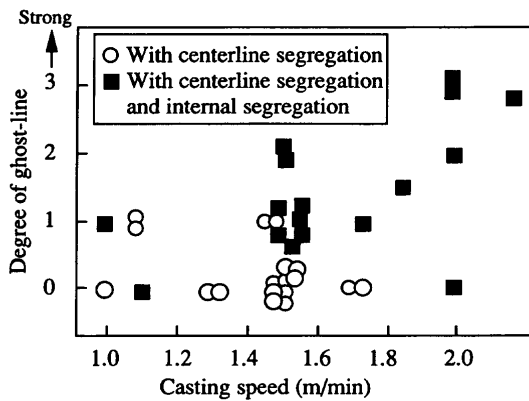


Fig. 7. Effect of casting speed and a type of segregation on the degree of ghost-line.

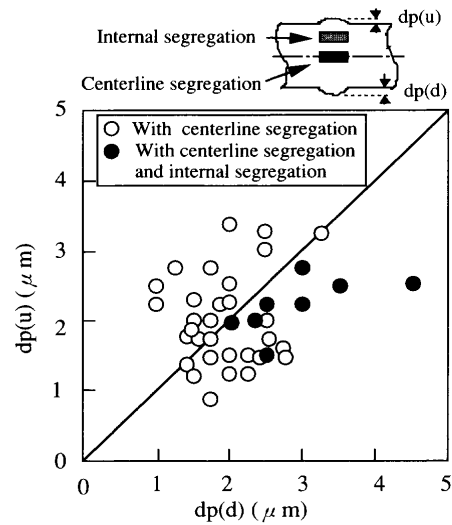


Fig. 8. Comparison of relation between $d_p(u)$ and $d_p(d)$ of the sheet with and without internal segregation.

片面側に寄って発生した内部偏析が同時に存在すると、内部偏析発生位置に近い面(ここでは、便宜上、内部偏析発生側の凸高さを $d_p(u)$ とした。)の反対側面の凸高さ、 $d_p(d)$ 、が大きくなる傾向を示した。

4. 考察

4・1 連鋳材のGL再現シミュレーション解析

4・1・1 解析方法

冷延板内部に中心偏析や内部偏析があると、引張り変形時に板表面に凹凸部が発生するかを確認するため、大変形弾塑性有限要素法(汎用プログラムNIKE 3D)を用いた平面歪み解析を行った。

シミュレーションモデルの境界条件と要素分割をFig. 9に示す。板厚は一般的に自動車用冷延鋼板として用いられている0.8mmとした。偏析の形状、分布を考慮してサンプルの引張り方向の長さを10mmにし、GL試験同様に5%を引張り変形で与えた。変形条件は、引張り方向と直角な圧延方向には変形しない、いわゆる平面ひずみ条件とした。なお引張り方向は、GLが発生しやすい方向である。引張り変形によって生じる板表面のプロフィールから凸高さを求めGL発生の評価とした。板厚方向に19分割、引張り方向に20分割し全節点数は840、要素数は380とした。板厚中心から

偏析中心までの板厚方向の距離、 h 、偏析の厚み、 t_s 、引張り方向の偏析幅、 w_s 、およびその降伏強度をパラメータにして計算した。引張りステップ数は5とした。なお、中心偏析と内部偏析の形状、および物性値は同じとして解析した。

解析に使用した冷延板マトリックス、および偏析部の相当応力-相当歪み関係はFig.10に示されるような直線加工硬化とした。高張力冷延鋼板は、降伏応力、 Y_s 、に及ぼすP濃度の影響が特に大きいので、 Y_s はP濃度のみ依存するとして、(1)式で与えた。

$$Y_s = Y_{s0} + (\partial Y_s / \partial P) (P_{av} - P_o) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 Y_{s0} : マトリックスの降伏応力、 Y_s

P_{av} : 偏析部の平均P濃度

$$[= (P_{max} - P_o) / 2]$$

P_{max} : 偏析部の最大P濃度

Y_{s0} と $(\partial Y_s / \partial P)$ は、実測値から280MPaおよび650MPa/%とした。また、ヤング率、 $E(= \tan \beta)$ 、加工効果係数、 $D(= \tan \alpha)$ 、およびポアソン比は、マトリックスと偏析部で同

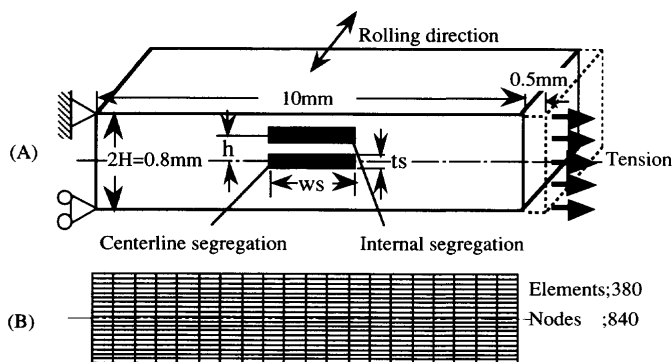


Fig. 9. Analytical model of a ghost-line formation by NIKE3D; (A) schematic image of the model, (B) meshes generated for analysis.

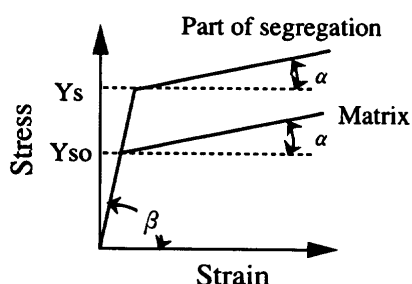


Fig. 10. Stress-strain curves used for analysis.

じとして、それぞれ、210GPa、500MPa、および0.3を与えた。

4.1.2 解析結果および実現象との対比

板引張り後の板厚が最も薄い位置を基準とした場合の板表面の凸高さ、 d_p 、に及ぼす中心偏析部の厚み、 t_s 、幅、 w_s 、および降伏応力比(Y_s/Y_{s0})の影響をFig.11に示す。偏析の厚み、幅が大きく、かつ降伏応力比が大きくなると、凸高さも大きくなり、実現象(Fig. 6)を再現できた。凸高さのオーダーは、実測値とほぼ一致(Fig.12)し、表面の凸高さを定量的にも再現できた。

Fig.13には、凸高さ、 d_p 、に及ぼす中心偏析と内部偏析の板厚方向位置、 h/H 、の影響を示す。中心偏析に加え内部偏析が存在すると、凸高さは中心偏析のみの場合に比べ約2倍になり、かつ、内部偏析発生側の反対面の凸高さが大きくなるという表・裏面で非対称な変形モードとなり、実際の現象(Fig. 8)とも一致した。この現象は次のように解釈できる。マトリクスに比べて相対的に硬い内部偏析の周辺は、引張り方向に延ばされ難いため、偏析近傍の要素板厚は板厚方向に偏析のない場合の要素板厚よりも相対的に厚くなる。偏析部から板表面に近づくにつれて、すなわち偏析部から離れるにつれてこの効果は次第に減少するが、偏析部から板表面までの距離は要素板厚の積算になるので、偏析部から遠いほど積算した板厚は均一変形部に比べて相対的に厚くなる。よって、偏析が板の上面に近い場合(h/H

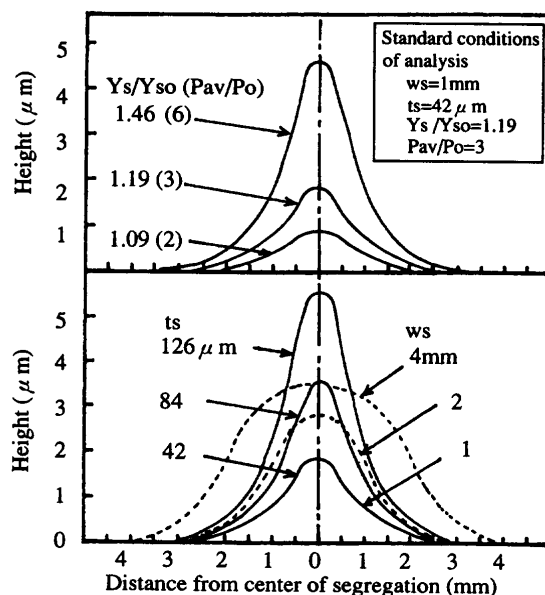


Fig. 11. Analytical results for effects of shape of centerline segregation (t_s , w_s : segregation thickness and width), ratio of yield stress, Y_s/Y_{s0} (Y_s , Y_{s0} : yield stress at segregation and matrix), and centerline segregation ratio P_{av}/P_o (P_{av} , P_o ; average P content at segregation and matrix) on surface profile of a cold rolled sheet after stretched 5%.

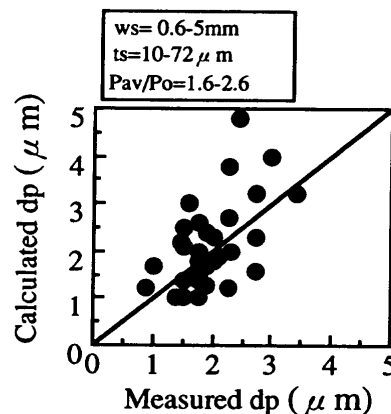


Fig. 12. Comparison between calculated and measured d_p .

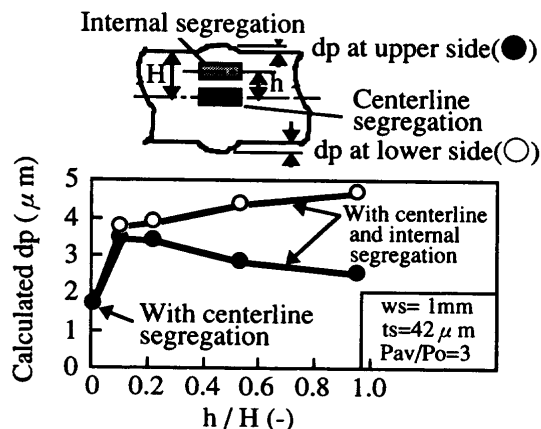


Fig. 13. Effect of the position of internal segregation on the height, d_p , of GL.

が大の場合), 偏析部から上に比べて下の方が相対的に膨らむと考えられる。内部偏析の存在によりGLが鮮明になる現象(Figs. 7, 8)も, Fig.13より理解できる。

さらに, 凸高さに及ぼす引張歪み量の影響を解析した結果をFig.14に示すように, 凸高さが最大値を示す歪み量が存在する。この理由は, 次のように推察される。変形の初期には軟質なマトリックス部の塑性変形が先行するため凸高さが成長するが, 変形が進展して内部偏析部の塑性変形も始まると, 両者に作用する応力比が小さくなり, その結果, 凸高さが成長は遅くなる。さらに引張ると板厚方向に薄くなるため, 凸高さが相対的に目立たなくなる。よって, ある歪み量で凸高さに最大値が現れる。この現象も, 実際のGL発生試験が3~7%で実施されている^{1,2,4)}こと, および凹凸程度が数%程度の歪み量で最大となる事実⁷⁾と定性的に一致する。

4・2 造塊材におけるGL発生挙動の解釈

Fig.13では, 内部偏析位置が表面に近づくにつれて凸高さが増加することが推察された。この現象は, 造塊材でAlの偏析が表面付近に存在する場合, GLが明瞭に現れるとする報告⁶⁾と対応するものと考えられる。

造塊材のアルミキルド鋼の場合に加室量が極端に増加すると凹凸欠陥が発生しなくなる現象⁴⁾も, 連铸材における弾塑性変形解析の考え方で, 次のように説明できよう。つまり, GL再現シミュレーション解析モデルを拡張し, 複数の偏析部の存在のもとで, 凸高さに及ぼす偏析間隔, w_p , の影響を計算した。その結果をFigs.15, 16に示すが, w_p が小さくなると, 凸高さが低くなり, 連続的な偏析の場合には, 表面は相対的に凸状を呈しないことがわかった。つまり, 造塊材において加室量が軽度な場合には, 材料強度が不均一になるが, 極端に加室されてその領域が拡大すると, 隣接する相互の不均一プロフィールの干渉によって不均一度が逆に緩和され, その結果, 凹凸欠陥が発生しにくくなるものと推察できる。

以上の見解, および4・1節から, Fig. 7において, 中心偏析や内部偏析が存在する場合でもGLが認められないケースがあるのは, 隣接する偏析相互の位置関係や個々の偏析のサイズ, および強度が板表面プロフィールに大きく影響を及ぼすためと考えられる。

4・3 GL発生機構

以上の結果より, 連铸製高張力冷延鋼板のGLの発生状況は, 冷延板内部の偏析部の形状, 位置, 偏析強度, および偏析部とマトリックスの材料特性(Y_s, D)を考慮することによって, 定量的に, かつ矛盾なく説明できた。また, 造塊材のGL発生挙動も定性的に説明できることがわかった。

これより, 冷延鋼板のGLの発生機構は, 素材が連铸製, あるいは造塊製に拘らず, 鋼板内部あるいは表面にマトリックスに比べ変形特性が異なる部分(異質部)が存在するために発生する, 不均一塑性変形現象で説明できる。GLの発

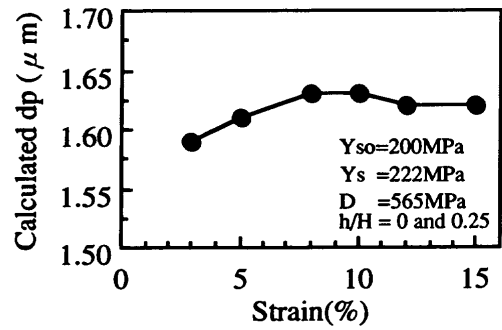


Fig. 14. Effect of strain induced perpendicular to the rolling direction of a cold rolled sheet on d_p .

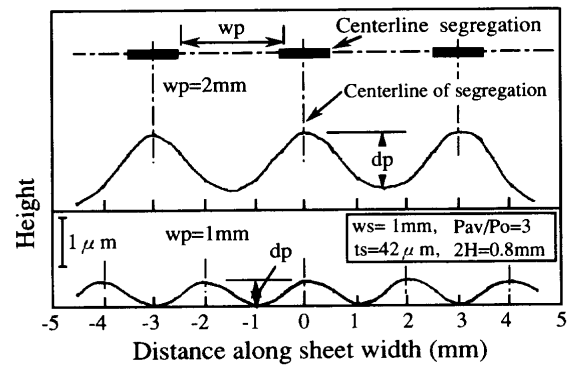


Fig. 15. Calculated surface profile of a stretched cold rolled sheet existing centerline segregations with a pitch, w_p .

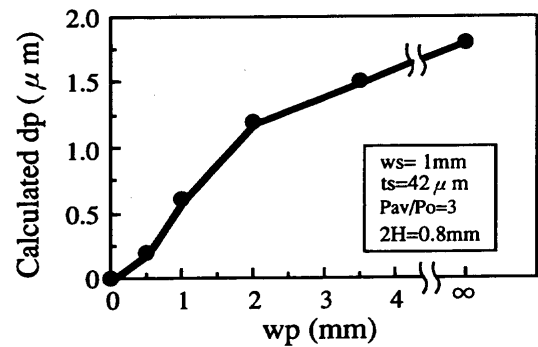


Fig. 16. Effect of a pitch, w_p , of centerline segregation on d_p .

生形態は, 異質部の存在位置が板厚中心に対して対称に, つまり中心偏析のみ, あるいは内部偏析が中心偏析を挟んで対称に存在する場合には, 板表裏面で対称に, また板厚中心からずれば非対称となる。GLの強度(凸高さは), 異質部の厚み, 幅, 存在位置, 材料特性, 異質部の数, 異質部間距離, 等の異質部の存在形態に影響する。

この解釈によれば, 本研究では観察されなかった例えば成分偏析以外の, 非金属介在物や気泡が表層下に存在する場合にも, それらの大きさによっては, 鋼板の塑性変形時に不均一変形の原因となり, 板表面に凹凸を発生させる可能性があろう。この場合, マトリックスよりも強度が小さ

い、例えば気泡が存在すると、板表面に凹みを生じさせることも解析から推察され、種々のGL形態が予見される。

5. 結言

連铸スラブを素材とする冷延板に発生するゴーストライン(GL)の発生機構を解明するため、GLの定量的な実態調査と弾塑性変形シミュレーション解析を行った。結果は、以下に要約される。

(1) GL強度は、連铸時に発生した中心偏析や内部割れ起因偏析の厚み、幅、位置、強度、相互の位置関係等の存在状態に影響され、冷延板内でのこれら偏析の厚み、幅、およびその強度が大きいほど、また偏析位置が表面に近いほど顕著になることがわかった。

(2) 実際のGL発生挙動は、冷延板マトリックス内に偏析部に相当する材料特性の要素を入れた有限要素法による引張り変形解析を行うことにより、ほぼ定量的に、かつ矛盾なく説明できる。また、造塊材のGL発生挙動も定性的に説明できる。

(3) 以上より、GLは、冷延板内の偏析部の降伏応力がマ

トリックスに比べて大きいために発生すると結論づけられる。

(4) GLの基本的な防止対策は、連铸材特有の中心偏析と内部偏析の軽減にあると考えられ、特に内部割れの防止が効果的である。

文 献

- 1) C.F.Schrader and L.Mair: Mechanical Working and Steel Processing V, ed. by N.B.Juster, Gordon and Breach, Science Publishers, New York, (1966), 155.
- 2) Sebastian V. G.: Open Hearth Proc., 54 (1971), 196.
- 3) 沢谷 精, 坂田茂雄: 鉄と鋼, 54 (1968), 455.
- 4) 杉沢精一, 本城 厚, 中居修二, 津島健治, 猪野信吾: 鉄と鋼, 61 (1975), S168.
- 5) 杉沢精一, 本城 厚, 中居修二, 津島健治, 猪野信吾: 住友金属, 28 (1976) Jan., 95.
- 6) 中里嘉夫, 大西建男, 久我正昭, 小西元幸: 鉄と鋼, 61 (1975), S170.
- 7) 林 豊, 須藤忠三, 中居修二: 第27回塑性加工連合講演会, (1976), 111.
- 8) 山崎久生, 別所永康, 富樫房夫, 藤井徹也, 黒瀬芳和, 上田 新: 材料とプロセス, 3 (1990), S213.
- 9) 阿部光延: 第54, 55回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1978), 267.
- 10) プレス成形難易ハンドブック, 薄鋼板成形技術研究会編, 日刊工業新聞社, 東京, (1987), 436.