

# 赤スケール生成におよぼす 熱間圧延条件と高圧水デスケーリングの影響

岡田 光\*・深川 智機\*・石原 晴彦\*・岡本 篤樹\*・吾妻 正敏\*<sup>2</sup>・松田 行雄\*<sup>3</sup>

Effects of Hot Rolling and Descaling Condition on Red Scale Defects Formation

Hikaru OKADA, Tomoki FUKAGAWA, Haruhiko ISHIHARA, Atsuki OKAMOTO, Masatoshi AZUMA and Yukio MATSUDA

**Synopsis :** Red scale defects usually observed in high Si hot rolled strip were reproduced in a laboratory 3 stand tandem mill. The effects of hot rolling and descaling condition on the strip surface color and scale structure were examined.

Irrespective of Si content in steel, the hot rolled strip surface became red when the scale thickness before rolling was above 20  $\mu\text{m}$  and the rolling temperature was below 900°C. It was found that surface part of the scale (mainly FeO) was broken to powder by the hot rolling at the temperature below 900°C. The red scale of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  was formed by the oxidation of powdered scale during cooling. Thick scale formed during slab soaking was completely removed by hydraulic descaling before rolling in low Si steel, whereas that was not removed in high Si steel. This remained scale caused the red scale defects after rolling and cooling. The application of obtained results to the hot strip mill production of red scaleless strip was discussed.

**Key words :** scale ; red scale ; Si steel ; descaling ; hot rolled product ; rolling ; oxidation.

## 1. 緒言

0.5%以上のSiを有する鋼板を熱間圧延すると、赤スケールと呼ばれる帯状のスケール模様が生成する。この赤スケールを防止するため、加熱温度制御<sup>1)2)</sup>、デスケーリング強化<sup>3)</sup>等の対策が行われてきたが、その防止手段は完全に確立されているとはいえない。

赤スケールが発生するのは、加熱中にスケールと地金界面に生成する低融点酸化物ファイアライト ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) が通常の脱スケール条件ではスケールを剥離しにくくするため<sup>3)</sup>といわれているが、 $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ の生成とスケールの剥離性の関係、デスケーリング不良と赤スケールの生成の関係等不明な点が多い。

そこで今回、連続熱間試験圧延設備<sup>4)</sup>を用いて赤スケールを実験室的に再現し、その生成条件および防止法の検討を行ったので報告する。

## 2. 試験内容

### 2・1 圧延設備

Fig. 1 に試験圧延設備を示す。この試験設備は、電気炉 2 基、エッジャー、高圧水デスケーラー、圧延機 3 基、水冷

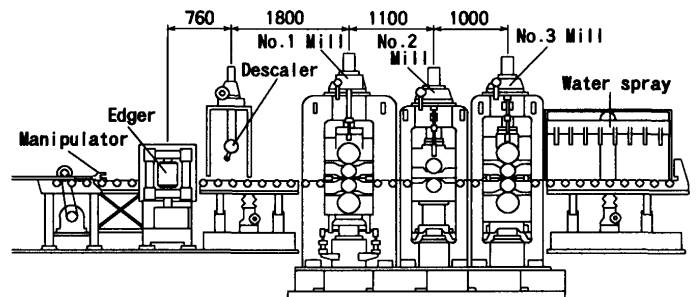


Fig. 1. Experimental apparatus.

ヘッダーから構成されている。

電気炉の最高加熱温度は1300°Cで、 $\text{N}_2$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ ガスを流すことにより、実機加熱炉と同様の雰囲気中で加熱可能である。また、高圧水デスケーラーの前にロール径200mmのエッジャーを設置し、実機におけるVSB (Vertical Scale Breaker) を模擬した。エッジャー、高圧水デスケーラー、圧延機間はマニプレータにより試験片を0.5m/sで搬送した。

高圧水デスケーラーは、実機の仕様とほぼ等しくし、圧力15MPa、流量1.8l/s、スプレー開度25°、ノズルの傾斜角10°、ノズルと供試材間の垂直距離250mmとした。

3基の圧延機の入出側には放射温度計を設置し、圧延前および圧延中の鋼板表面温度を測定した。圧延機は、入側

平成 6 年 2 月 21 日 受付 平成 6 年 9 月 2 日 受理 (Received on Feb. 21, 1994; Accepted on Sep. 2, 1994)

\* 住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 3 Hikari Kashimamachi Kashima-gun Ibaraki-ken 314)

\* 2 住友金属工業(株)和歌山製鉄所 (Wakayama Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

\* 3 住友金属工業(株)本社 (Head Office, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

より4Hi, 2Hi, 4Hiとなっており, それぞれのワークロール径は200, 220, 220mmである。

圧延機出側には, 雰囲気コントロール可能な水冷装置を設置し, 試験片を大気中または窒素雰囲気中(酸素濃度0.06 vol%以下)で水冷した。

2・2 供試材料

Table 1に供試材料の化学成分を示す。鋼1はSiを0.5%含有する高張力鋼板(高Si鋼), 鋼2はSi量の低い低炭素鋼板(低Si鋼)である。

試験片は, 実機連続製造されたスラブ(220mm<sup>t</sup>×1200mm<sup>w</sup>)の表皮下10mmおよび中央部20mmを除いた部分から, 機械加工により30mm<sup>t</sup>, 8mm<sup>t</sup>×70mm<sup>w</sup>×200mm<sup>l</sup>に切出して作成した。その際, 試験片のL, C方向は, 実機のスラブと一致する方向とした。

2・3 試験方法

4種類の熱間圧延試験を行った。模式的にFig. 2に示す。

(1) 試験1

高Si鋼, 低Si鋼(8mm厚)をそれぞれ同一の材料の試験片で2枚重ねにし, N<sub>2</sub>ガス雰囲気中で820~1280°Cに30min加熱した。この加熱方法により, 重ね面にはスケールはほとんど生成しない。試験片を炉より取り出し, マニプレータに固定した後, 重ねた試験片を分離し酸化放冷を開始した。5~50s放冷し所定の圧延温度(750, 800, 850, 900, 1000°C)にした後, 1枚は3パス圧延, 1枚は圧延を行わずにただちに水冷した。この圧延を行わなかった試験片のスケール厚を測定し, 圧延前のスケール厚とした。それぞれの圧延機における圧下率は約20%とし, ロール周速は1.67m/s一定とした。また, 圧延後は大気中で水冷した。

(2) 試験2

Table 1. Chemical composition of specimen (mass%).

Steel	C	Si	Mn	P	S	sol. Al	
1	0.09	0.54	1.46	0.009	0.014	0.019	High Si
2	0.05	0.005	0.15	0.009	0.013	0.024	Low Si

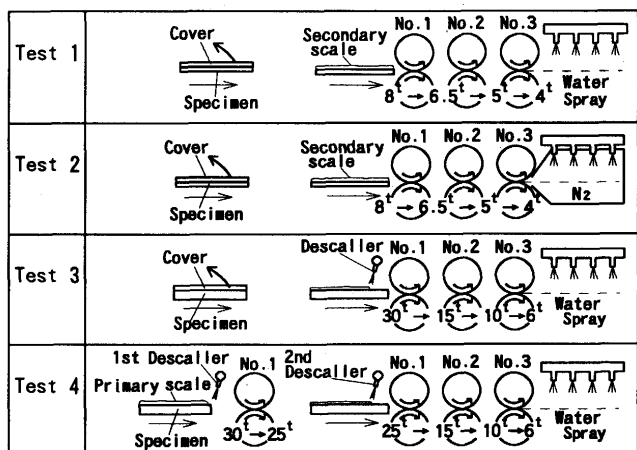


Fig. 2. Schematic illustration of experimental procedures.

低Si鋼(8mm厚)を試験1と同様の方法で1000~1280°C, 30min加熱後, 重ね材を除去, 900°Cになるまで大気中で7~35s放冷し, その後, 3パス圧延を行った。圧延機出側にN<sub>2</sub>雰囲気としたチャンバーを設置し, その中で常温まで水冷した。

(3) 試験3

高Si鋼, 低Si鋼(30mm厚)を試験1と同様の方法で1100°C, 30min加熱後, 重ね材を除去し(約1050°C), 大気中で40s放冷した後(約970°C), 高圧水によるデスクレーリング, 約900°Cより3パス圧延, 大気中水冷を行った。

(4) 試験4

実機の熱延をシミュレートするため, 試験片を1枚ずつ実機の加熱炉を模した雰囲気(77.1%N<sub>2</sub>+14.3%H<sub>2</sub>O+8.6%CO<sub>2</sub>)中で1150~1300°C, 20~120min加熱し, 1次スケールを生成させた後, エッジャーによるスケールブレーキング, 高圧水デスクレーリングを行い, 1次スケールを除去した。その後1パス圧延を行った後, 試験片を40s待機させる事により2次スケールを生成させ, さらに再度デスクレーリングを行い, 圧延, 大気中水冷を行った。

試験1, 試験2については, 色彩色差計を用いて鋼板表面のL\*a\*b\*指数(JIS8729)を測定し, 視覚による赤さの変化とよく対応するクロマティックネス(a\*)値を用いて表面の色を定量化した。また, 試験後, 走査型電子顕微鏡を用いてスケール部の断面観察を行った。スケール厚の測定は, 酸洗によりスケールの重量を求め, スケールの密度を5.7(g/cm<sup>3</sup>)として換算した<sup>5)</sup>。このスケール厚の換算結果は断面観察の結果と一致する事を確認している。

3. 試験結果

3・1 試験1

Fig. 3に試験片を2枚重ねて種々の温度で加熱後, 分離し約900°Cまで放冷, 圧延を行わずにただちに水冷した試験における, 放冷開始温度とスケール厚の関係を示す。両鋼と

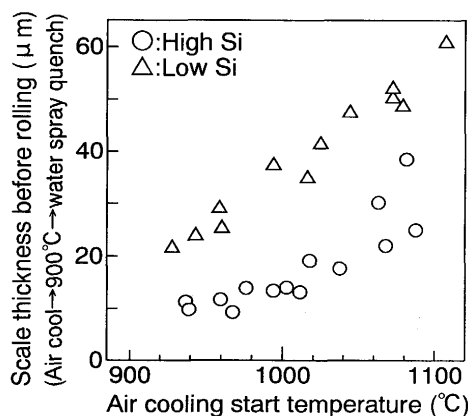


Fig. 3. Effect of air cooling start temperature on scale thickness of steels quenched from 900°C. (Test 1)

もに放冷開始温度が高くなるにつれてスケールは厚くなる。ただし、高Si鋼は低Si鋼に比べ同じ放冷開始温度でもスケールは薄く、高Si鋼の方が酸化速度が遅い。また、いずれの場合でも鋼板表面は黒色を呈していた。この様に、放冷開始温度を変える事により、圧延前のスケール厚を変化させる事ができる。

圧延を行った鋼板の表面観察例として、高Si鋼を1040°Cあるいは1240°Cに加熱、900°Cまで11sあるいは29s放冷後、3パス圧延、水冷を行った場合の表面写真をFig. 4に示す。圧延前の放冷時間が短く、圧延前のスケールが薄い場合(12  $\mu\text{m}$ )には鋼板表面は黒色となり、放冷時間が長くスケールが厚い場合(30  $\mu\text{m}$ )は赤色となった。この傾向は低Si鋼でも同様であった。

両鋼における900°C圧延前スケール厚と圧延水冷後の鋼板表面のクロマティクネス( $a^*$ )値の関係をFig. 5に示す。圧延前スケール厚はFig. 3より求めた。 $a^*$ 値は、灰色の場合0、赤色が強くなるほど大きな値となる。圧延前のスケールが厚くなるにつれて $a^*$ 値は大きくなり、赤色が強くなった。また、図中○は高Si鋼、△は低Si鋼の試験結果だが、鋼種による差は認められなかった。

圧延温度を750~1000°Cに変化させた場合における圧延前スケール厚と $a^*$ 値の関係をFig. 6に示す。Si量によらず圧延温度が900°C以下の場合には、圧延前スケール厚が20  $\mu\text{m}$ 以上では、 $a^*$ 値は1以上となり赤スケールとなるが、圧延温

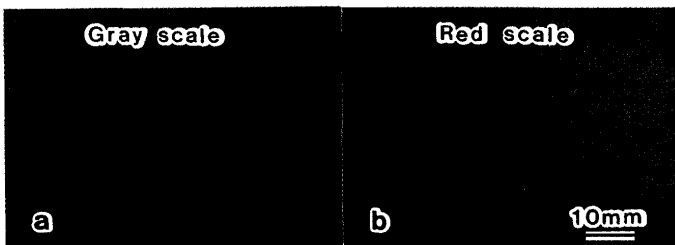


Fig. 4. Surface appearance of high Si steel rolled at 900°C and quenched. (Test 1)

(a) Heat : 1040°C → air cool : 11s → hot roll  
(b) Heat : 1240°C → air cool : 29s → hot roll

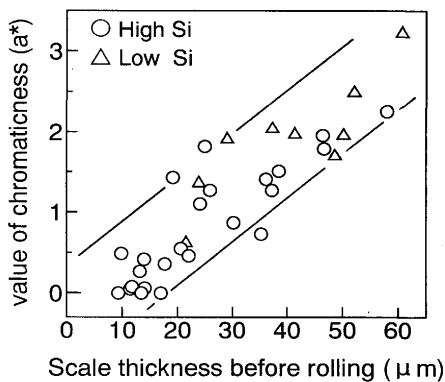


Fig. 5. Effect of scale thickness before rolling on value of chromaticness( $a^*$ ) of steel rolled at 900°C and quenched. (Test 1)

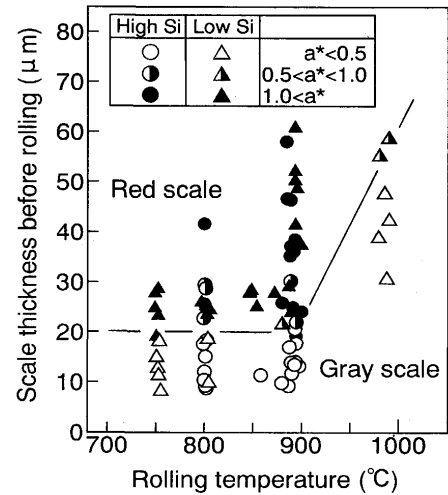


Fig. 6. Effects of scale thickness before rolling and rolling temperature on value of chromaticness( $a^*$ ) of low Si(0.005%) steel and high Si(0.5%) steel. (Test 1)

度が1000°Cの場合には、スケール厚が50  $\mu\text{m}$ でも0.5以下の値となり赤スケールは生成しなかった。この様に圧延前スケール厚と圧延温度が赤スケール発生上重要な事がわかった。

### 3・2 試験2

圧延後の酸化の影響を調べるため、低Si鋼を3パス圧延後、冷却雰囲気を $\text{N}_2$ とした試験を行った。

この場合の圧延前スケール厚と $a^*$ との関係をFig. 7に示す。圧延後の鋼板を $\text{N}_2$ 雰囲気中で冷却すると、圧延前スケール厚にかかわらず鋼板は赤色にならない。 $a^*$ 値も大気中と比べ小さく、スケール厚によらずほぼ一定の値となった。

### 3・3 試験3

2次スケールを大気中40s放冷して生成させた後、高圧デスケリングを行い、その後約900°Cで圧延、水冷した鋼板の表面写真をFig. 8に示す。高Si鋼、低Si鋼共に黒色の表面となり、赤スケールは生成しなかった。

この場合、高Si鋼では40  $\mu\text{m}$ 厚の、低Si鋼では60  $\mu\text{m}$ 厚のスケールがデスケリング前には生成しており、試験1の結果より、デスケリングによってスケールが除去できて

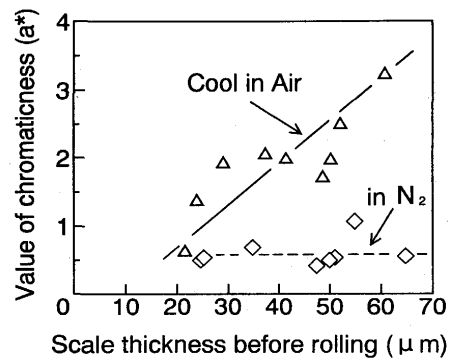


Fig. 7. Effects of scale thickness before rolling and cooling atmosphere of quenching after rolling on value of chromaticness( $a^*$ ). (Test 1,2)

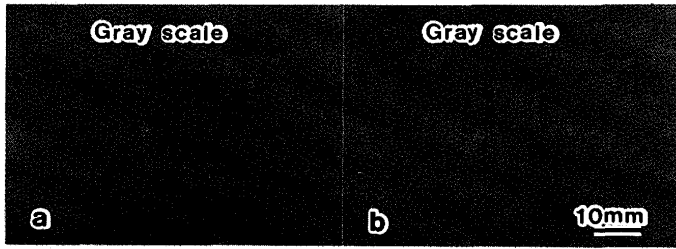


Fig. 8. Surface appearance of steels rolled at 900°C and quenched. (Test 3)  
(a) High Si steel (b) Low Si steel

いなければ赤スケールが生成するはずである。したがって、この試験で赤スケールが生成しなかったのは、高圧水デスケリングによって、Si量にかかわらず2次スケールが完全に剥離したためと考えられる。

3・4 試験4

次に、加熱炉内で生成するスケールの影響を調べるため、高Si鋼、低Si鋼を実機を模した雰囲気中で1220°C、2h加熱した。試験片を炉より取り出し、スケールブレーキング、1次デスケリング、1パス圧延、2次デスケリング、3パス圧延、水冷を行った。この試験では、1パス圧延時の鋼板温度が約1050°C、3パス圧延時の鋼板温度が約900°Cであった。

圧延後の試験片表面写真をFig. 9に示す。低Si鋼では、試験片表面が黒色を呈するのに対し、高Si鋼では赤スケールが生成した。

また、この試験において、1次デスケリング後および2次デスケリング後のスケール断面写真をFig.10に示す。低Si鋼では、どちらもほとんどスケール残りは無いが、高Si鋼では40~180μmのスケールがいずれのデスケリング後にも残っていた。

高Si鋼において、1220°C、2h加熱の場合、鋼板全面に赤スケールが生成したが、加熱条件を変えると、赤スケールの状態が変化した。Fig.11に加熱時間を20、40、60minに変えた場合の、Fig.12に加熱温度を1150、1220、1300°Cに変えた場合の圧延、水冷後の鋼板表面を示す。加熱時間が短い場合、鋼板表面は赤色が薄くむら状となる。また、加熱温度が1150°Cの場合は赤スケールは生成せず、1220°Cで全面

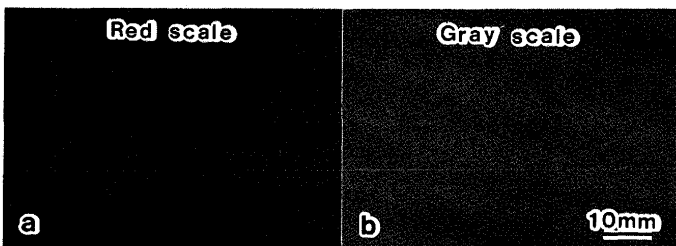


Fig. 9. Surface appearance of steels soaked at 1220°C, 1st descaled, rolled, air cooled for 40s, 2nd descaled, rolled at 900°C and then quenched. (Test 4)  
(a) High Si steel (b) Low Si steel

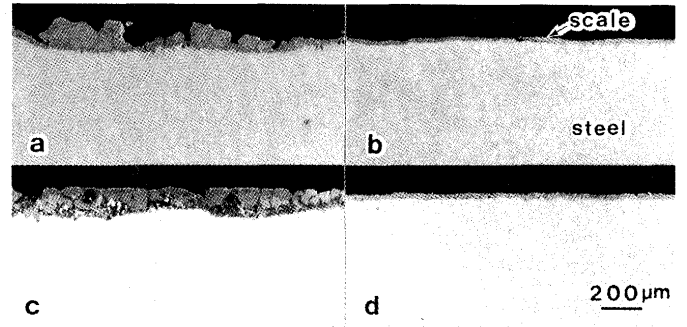


Fig. 10. Cross section SEM micrographs of steels after descaling. (Test 4)  
(a) High Si steel after 1st descaling  
(b) Low Si steel after 1st descaling  
(c) High Si steel after 2nd descaling  
(d) Low Si steel after 2nd descaling

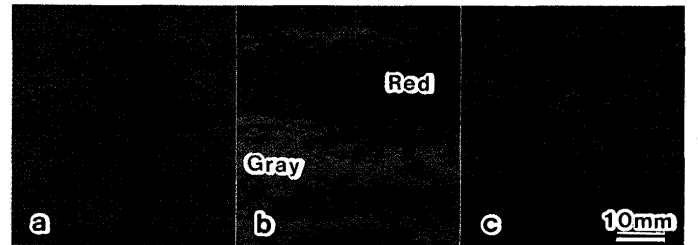


Fig. 11. Surface appearance of high Si steel soaked at 1220°C for (a)20min, (b)40min or (c)60min, descaled and rolled. (Test 4)

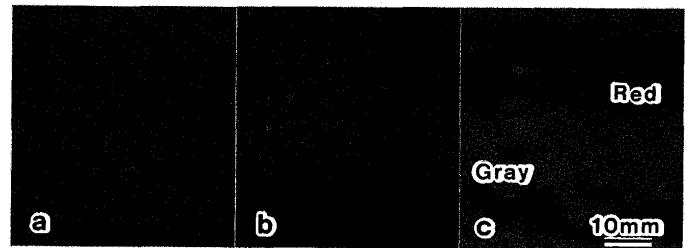


Fig. 12. Surface appearance of high Si steel soaked at (a)1150°C, (b)1220°C or (c)1300°C for 2h, descaled and rolled. (Test 4)

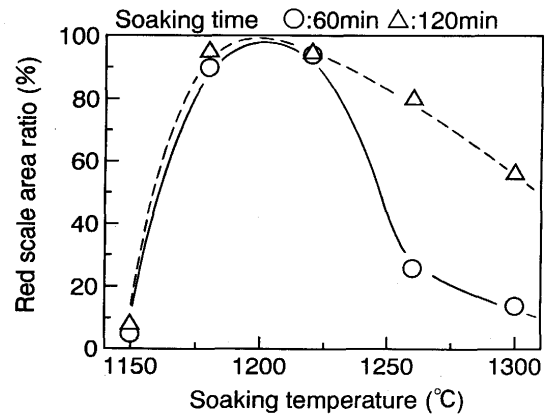


Fig. 13. Effects of soaking temperature and time on red scale area ratio of high Si steel. (Test 4)

に、1300°Cでは部分的に生成した。

Fig.13に加熱時間、加熱温度を変えた時の赤スケール面積比率の変化を示す。加熱温度が1180°C、1220°Cではほぼ全面に赤スケールが生成し、それ以上温度が高くなると赤スケールの比率が下がってくるが、加熱時間が短い方が高温での赤スケールの比率がより小さくなった。

#### 4. 考察

赤スケールの生成について試験結果をまとめると次のようになる。

- 1) Si量によらずスケール厚が20 $\mu\text{m}$ 以上でかつ900°C以下で圧延すると冷却後に赤スケールが発生する。
- 2) 圧延後N<sub>2</sub>中で冷却し、酸化を抑制すると赤スケールにならない。
- 3) Si量によらず短時間放冷(40s)で形成させた、いわゆる2次スケール(40~60 $\mu\text{m}$ )は高圧水で除去され、圧延、冷却後には赤スケールにならない。
- 4) 加熱炉で長時間酸化され形成された厚い1次スケール(0.5~3.0mm)は、低Si鋼では高圧水で除去され圧延後赤スケールとならないが、高Si鋼では除去されず、冷却後赤スケールとなる。
- 5) この高Si鋼での赤スケールは加熱時間が長い方が生成しやすいが、加熱温度は1260°C以上になるとかえって生成しにくく赤スケール面積率は低下する。

以上の結果は次のように整理できる。

- a) Si量にかかわらず、熱間圧延時のスケール厚と圧延温度と冷却時の酸化条件により赤スケールは生成する。
- b) 高Si鋼特有の現象として、高温長時間の酸化で形成されたスケールは高圧水では除去されず、圧延、大気水冷後赤スケールとなる。ただし、加熱温度1260°C以上では赤スケールが減少する。以下これを考察する。

##### 4.1 スケール粉末と赤スケールの関係

浅井らは酸化スケールの色とスケール粉末の関係を調査し、粒径2 $\mu\text{m}$ 以下のヘマタイト( $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ )粉末が存在すると鋼板表面が赤色に見える事を示している<sup>6)</sup>。今回の試験でも赤スケールが生成した場合、鋼板表面に赤色の粉末が生成していた。そこで、鋼板を超音波洗浄を行う事によりこの粉末(粒径0~10 $\mu\text{m}$ )を除去し、その重量を測定した。

低Si鋼において圧延開始温度を900°C、圧延後の冷却を大気中およびN<sub>2</sub>中で行った場合における粉末の重量とa\*値の関係をFig.14に示す。大気中冷却の場合は粉末の重量が多くなるにつれてa\*値が大きくなり、これより、赤色の原因はこのスケール粉末である事が確認できた。しかし、N<sub>2</sub>中冷却の場合には粉末の重量が増加してもa\*値は変化しない。

また、このスケール粉末をX線回折により同定すると大気中冷却の場合はヘマタイト( $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ )であったのに対し、N<sub>2</sub>中冷却の場合は、ウスタイト(FeO)、マグネタイト( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )

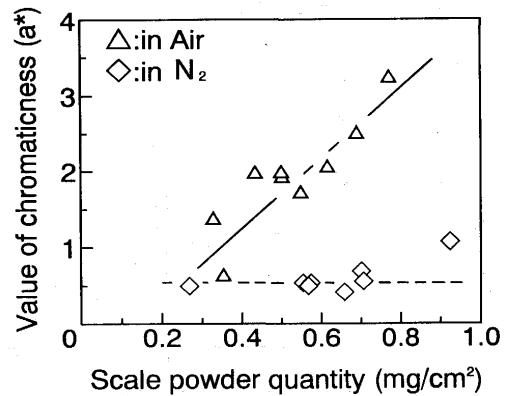


Fig. 14. Effect of scale powder quantity and cooling atmosphere of quenching after rolling at 900°C on value of chromaticness(a\*). (Test 1,2)

のみであり、ヘマタイト( $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ )はほとんど検出されなかった。

従来、高温下で生成するスケールはFe/FeO/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ / $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ の層状構造となりFeOがその大部分を占める事が知られている。スケールが生成した状態で圧延を行うと、その一部が圧延によって破壊され、粉状のFeOが生成し、N<sub>2</sub>中で冷却した場合はこのFeO粉末がFeOあるいは $\text{Fe}_3\text{O}_4$ になるのに対し、大気中冷却の場合には、酸化が進み $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ となり赤色を呈すると考えられる。

また、スケール粉末の重量は圧延前スケール厚に比例していた。Fig.5で圧延前スケールが厚くなるほど赤色が強くなるのは、 $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ 粉末の増加のためと考えられる。

##### 4.2 圧延温度の影響

約30 $\mu\text{m}$ のスケールを生成させた後、750°Cあるいは1000°Cで3パス圧延を行った時のスケール断面写真をFig.15に示す。750°Cで圧延した場合はスケールが粉状に破壊しているのに対し、1000°Cの場合は粉状破壊が認められない。

これらの鋼板のスケール総重量と、超音波洗浄により求めたスケール粉末の重量の比を求めた。3パス圧延温度と圧延後のスケール重量中に占めるスケール粉末の重量比の関係をFig.16に示す。圧延温度が高くなるにつれてスケール粉末の重量比は小さくなるのがわかる。松野らは、スケールの大半を占めるFeOの高温下での3点曲げ試験を行い、高温になるほど降伏強度が下がる事を示している<sup>7)</sup>。これらから高温で圧延した場合にはスケールが変形しやすく、粉状

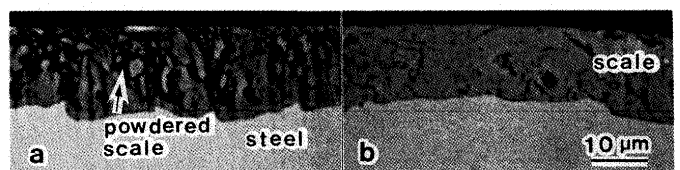


Fig. 15. Cross section SEM micrographs of low Si steel rolled at (a)750°C or (b)1000°C. (Test 1)

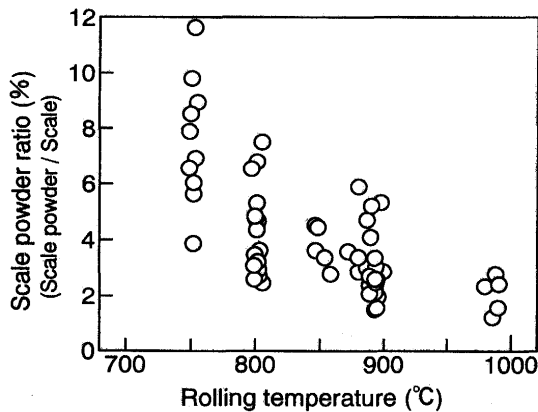


Fig. 16. Effect of rolling temperature on the ratio of scale powder to total scale weight.

に破壊しにくいと考えられる。Fig. 6で、1000°C圧延した場合スケールが厚くても赤スケールにならなかったのはこの為であろう。

一方、圧延温度が低くなると圧延時にスケールが粉末化しやすくなり、圧延前のスケールが薄くても粉末量は多くなる。しかし、低温のためFeO→ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の酸化が進みにくくなり、そのため900°C以下の圧延ではスケール厚が20 $\mu$ m以上の場合のみ赤スケールが生成したと考えられる。

#### 4・3 高Si鋼における赤スケールの生成

試験3で示した様に、鋼板を40秒間放冷し生成させたいわゆる2次スケールは、Si量によらず高圧水デスケーリングによって容易に剥離し、赤スケールとならない。しかし、高Si鋼を加熱炉で長時間酸化した1次スケールは、デスケーリング後でも40~180 $\mu$ mのスケール(FeO主体)が取れ残り、スケールが付いたまま圧延されるので、押し込みになると同時に圧延中にスケールが破壊し粉末が生成して赤スケールとなる。長時間加熱した高Si鋼では、スケール/鋼界面に入り込んだファイアライト(Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>)が生成しており、これがスケールの剥離性を悪化させている<sup>2)</sup>と思われる。

加熱温度が1220°Cを越えると赤スケール面積率が減少し、Fig.12(c)で示したように鋼板表面は赤黒のむらとなる。実機でよく観察される赤スケール模様はこの状態に相当していると思われる。このスケールむらが生じるのは、デスケーリングがFe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>の融点(1173°C)以上で行われるのでスケールが部分的に剥離するためと思われるが、この詳細については別報<sup>9)</sup>にて検討する。

#### 4・4 実機での赤スケール防止法

本実験結果を実生産のホットストリップミルに適用すると、赤スケール防止は、900°C以下の圧延、すなわち仕上圧延機でのスケールの粉化抑制が重要で、具体的には、仕上圧延機前での完全なデスケーリングとデスケーリング後

圧延までの酸化抑制が必要といえる。

特に高Si鋼では、スラブの加熱条件の調整によるFe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>の抑制、デスケーリングの強化、あるいはデスケーリング時の温度条件などによるスケールの除去がより重要となる。

圧延後の冷却条件も粉化したスケールの酸化防止の観点で重要だが、制御は難しいと思われる。

## 5. 結言

Siを0.5%以上含有する鋼を熱間圧延した際に発生する赤スケール疵を実験的に再現し、その生成条件および防止法について検討した。

(1)高Si鋼(0.54%Si)、低Si鋼(0.005%Si)にかかわらず、圧延前のスケール厚が20 $\mu$ m以上で900°C以下で連続圧延、水スプレー冷却を行うと、赤スケールが生成する。

(2)赤スケールの原因は赤い粉状の $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(ヘマタイト)であり、これは、900°C以下の圧延によって粉状に破壊されたFeOおよびFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>が圧延後の冷却時に酸化が進み $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>となる事によって生じる。

(3)圧延中に短時間で生成した2次スケールはSi量にかかわらず高圧水デスケーリングによって容易に除去されるため、圧延前のスケール厚は薄く、赤スケールにならない。

(4)高Si鋼を実機加熱炉を模した雰囲気中で長時間加熱すると、Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>の生成により、高圧水デスケーリングで40~180 $\mu$ mのスケールが取れ残り、これが付いたまま圧延されるため赤スケールが生成する。

(5)高Si鋼における赤スケールの生成は、加熱条件に大きな影響を受け、加熱温度が1180~1220°Cで1~2h加熱した場合全面が赤色となるが、1260°C以上の加熱では赤色のむらが生成した。

(6)以上の様に、実生産では鋼中のSi量、スラブの加熱温度、デスケーリング条件(スケール厚)、圧延温度、圧延後の冷却条件の制御が赤スケール防止に必要な事が明らかになった。

## 文 献

- 1) 石井吉秀, 小土井章夫, 若松郁夫: 材料とプロセス, 6 (1993), p.1340
- 2) 沖田美幸, 永井秋男, 品川岩美, 堀之内耕一: 材料とプロセス, 2 (1989), p.1509
- 3) 小野田克己, 岡部 央, 能美亮一, 長谷 登: 住友金属, 20 (1968) 1, p.23
- 4) 佐々木保, 新城昭夫, 国重和俊, 沖田美幸, 江袋忠男: 住友金属, 44 (1992) 3, p.23
- 5) 松野二三郎: 鉄と鋼, 65 (1979), p.599
- 6) 浅井達也, 中村峻之, 井上 毅: 材料とプロセス, 6 (1993), p.357
- 7) 松野二三郎, 錦田俊一: 鉄と鋼, 71 (1985), S1282
- 8) T.Fukagawa, H.Okada and Y.Maehara: ISIJ Int. 投稿中