

熱間圧延におけるスケールの挙動

Deformation Behavior of Oxide Scale in Hot Strip Rolling

岡田 光*
Hikaru OKADA

抄 録

鋼材の熱間圧延において、表面に生成する酸化皮膜は製品表面性状に大きな影響を与える。そこで、実機1/4モデルの試験圧延機を用いて圧延時のスケール変形挙動を調査した。圧延前のスケールが薄い場合、圧延後のスケールは滑らかでほぼ均一な厚みとなる。しかし、スケールが10 μm 以上になると、スケールは分断し、目視でも判別できるような割れが生じる。この割れは、スケールが厚いほど、圧延温度が高いほど発生し易い。圧延前のスケール厚が20 μm 以上で圧延温度が900 $^{\circ}\text{C}$ 以下の場合、圧延後の鋼板表面は赤くなる。これは、FeO主体のスケールが粉状に破壊され、冷却中に酸化が進んで赤色のFe₂O₃が生成するためである。

Abstract

During continuous hot rolling of steel strip, the formation of surface oxide scale can lead to defects in the finished strip. Therefore scale deformation in hot strip rolling is investigated to use the preliminary experiments from a 1/4 sized test mill. If the scale before rolling is thin enough, the scale after rolling was smooth and has constant thickness. On the other hand, if the scale before rolling is thicker over 10 μm , it is divided to form the visible cracks. These cracks appear more, in case the rolling temperature rises and the scale is thicker. The hot rolled strip surface became red when the scale thickness before rolling was above 20 μm and the rolling temperature was below 900 $^{\circ}\text{C}$. It was found that surface part of the scale (mainly FeO) was broken to powder by the hot rolling at the temperature below 900 $^{\circ}\text{C}$. The red scale of Fe₂O₃ was formed by the oxidation of powdered scale during cooling.

1. 緒 言

鋼材の熱間圧延は、800～1200 $^{\circ}\text{C}$ といった高温で行われるため、加熱中あるいは圧延作業中、表面に酸化皮膜（スケール）が生成する。スケールが付着したまま圧延を行うと、表面疵の原因となるため、通常、圧延前に高圧水等でスケールを除去している。しかし、炭素鋼の場合、高温での酸化速度は速く、高圧水でスケールを除去しても直ちに再酸化し、常にスケールが表面に存在した状態で圧延が行われる。熱間圧延時におけるロール・圧延材間のスケールの存在は、トライボロジ¹⁾、熱伝導²⁾および表面性状⁶⁻⁸⁾に大きな影響を与える。特に、スケールの変形・破壊形態により様々な形態の表面疵（スケール疵）が生成する。

本稿では、普通鋼スケールの生成挙動とその機械的性質を紹介し、さらに熱間圧延時におけるスケールの変形について、①均一に伸びる場合⁹⁻¹¹⁾、②割れが生じる場合¹²⁻²²⁾、

③粉状になる場合²³⁻³³⁾にわけて、それぞれの生成条件（スケール厚、圧延温度、圧下率等）および生成メカニズムを報告する。

2. 試験方法

表1に供試材料の化学成分を示す。試験片は、実機連続鑄造されたスラブ（270mm厚×1200mm幅）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8mm厚×70mm幅×300mm長に切出して作成した。

(1) 試験1

図1に試験装置および試験方法を模式的に示す。試験片

表1 供試材の化学成分 (mass%)
Chemical compositions of specimen (mass%)

| C | Si | Mn | P | S | sol.Al |
|------|-------|------|-------|-------|--------|
| 0.05 | 0.005 | 0.15 | 0.009 | 0.013 | 0.024 |

* 鹿島技術研究部 上席主幹研究員 工学博士 茨城県鹿嶋市光3番地 〒314-0014

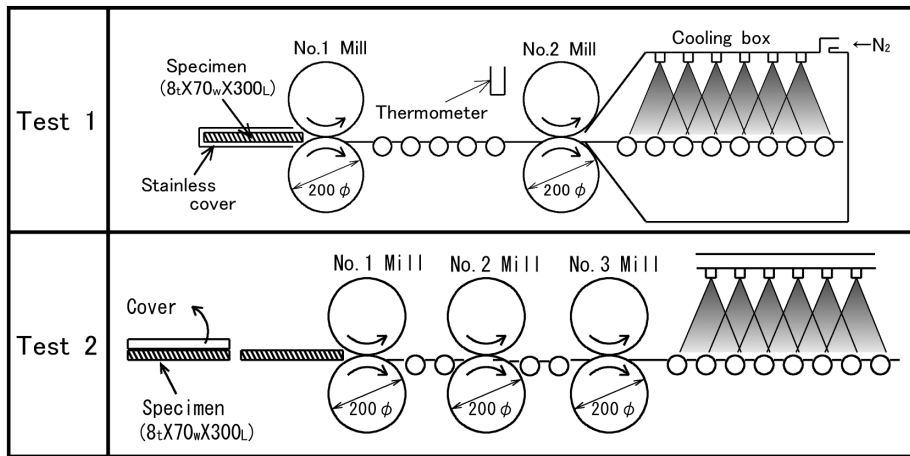


図1 熱間圧延試験方法
Schematic illustration of experimental procedures

をステンレス鋼薄板（SUS304 0.3mm厚×200mm幅×300mm長）で封筒状に梱包した後、電気炉を用いて窒素雰囲気中で900～1200℃に1800s加熱した。加熱後、No.1の圧延機に試験片のステンレス鋼カバーから出ている部分を噛みこませ、試験片をカバーから抜き出しながら圧延した。圧延機の手速度は0.83～5.0m/s、テーブルローラーの搬送速度は0.13～5.0m/sとし、圧延機間の時間を変化させることにより試験片表面に生成するスケール厚を変化させた。No.2圧延機で圧延後、窒素雰囲気中で室温まで水冷し、スケールの表面および断面を電子顕微鏡にて観察した。なお、いずれの試験条件においても、同一の加熱温度、圧延機間時間で、No.2圧延機では圧延を行わない試験を同時に行い、この試験片のスケールを圧延前スケール厚とした。

(2) 試験2

試験片を2枚重ねにし、N₂ガス雰囲気中で820～1280℃に1800s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、マンプレートに固定した後、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℃）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。圧延後は大気中で室温まで水冷した。水冷後の試験片は、色彩色差計を用いてL*a*b*指数（JIS 8729）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。

3. 試験結果

(1) 試験1

試験片を1040℃に加熱後、No.1圧延機で4.5mmに圧延しながらステンレス鋼板から引き抜き、圧延機間を0.13～

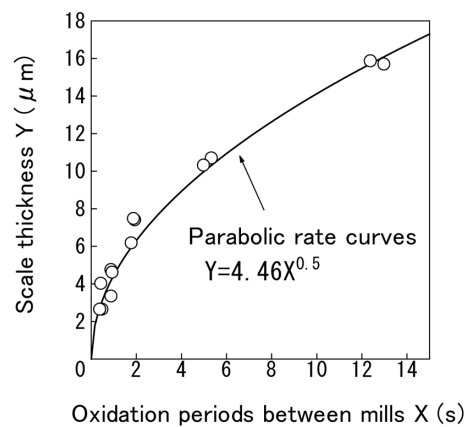


図2 圧延機間の酸化時間とスケール厚の関係
Relation between oxidation periods and scale thickness

5.0m/sで搬送した後、No.2圧延機で圧下率1.5%以下で圧延した試験におけるスケール厚を図2に示す。圧延機間の時間が長くなるにしたがってスケールは厚くなり、時間とスケール厚の関係は、ほぼ放物線則に従った。この様に圧延機間の時間を変えることによりNo.2圧延機における圧延前のスケール厚を変化することができる。

圧延後の鋼板表面観察例として、試験片を1020℃あるいは1080℃に加熱後No.1圧延機で4.5mmに圧延し、No.2圧延機まで1.17m/sあるいは0.35m/sの速度で搬送後、さらに2.9mmに圧延を行った場合の表面写真を図3に示す。それぞれのNo.2圧延機入側での表面温度は945℃、954℃、圧延機間の時間は、2.5s、7.4sであった。圧延機間の時間が短く圧延前のスケールが薄い場合（7.2μm）は滑らかで均一な表面となり、通過時間が長く圧延前のスケールが厚い場合（14.5μm）には幅方向に割れが生じた。

圧延時のスケールが薄く、圧延後の表面が平滑となる場合から詳細を述べる。ミル間での酸化時間を0.8s、鋼板温度を900～920℃とし、圧下率を5、25、55%に変化させた時の圧延方向の断面写真を図4に示す。圧下率が増すにつれて圧延後のスケールは薄くなった。圧下率55%の条件で

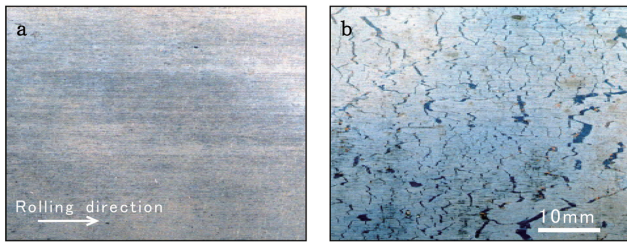


図3 圧延機間の酸化時間を (a) 2.5s, (b) 7.4s とした場合の圧延後表面外観
Surface appearance of steels 1st rolled, oxidized for (a) 2.5s, or (b) 7.4s, and 2nd rolled

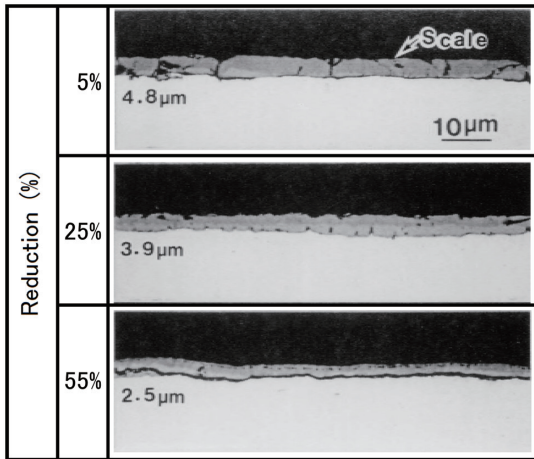


図4 圧延後スケール断面におよぼす圧下率の影響
Effect of rolling reduction on scale thickness after rolling

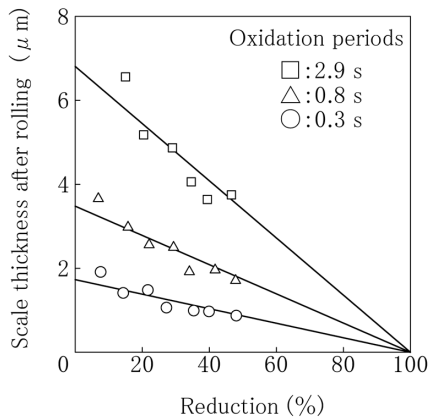


図5 圧延後のスケール厚におよぼす圧下率の影響
Effect of rolling reduction on scale thickness after rolling

もスケール層中のクラックはほとんど認められず、また、スケール厚 (約 2.5 μm) も一定で、スケールの欠け (部分的な剥離) は無かった。圧延後のスケール厚を圧下率で整理した結果を図5に示す。この図中には、ミル間での酸化時間を 0.3s, 2.9s とした時の結果もプロットした。いずれの条件においても、圧延後のスケール厚は、母材の圧下率に等しい割合で薄くなっており、スケールは熱間圧延によって延ばされたと考えられる。

圧延温度を 200~1000 $^{\circ}\text{C}$ まで変化させた時のスケール断面写真を図6に示す。この試験では、No.2 圧延機入側での

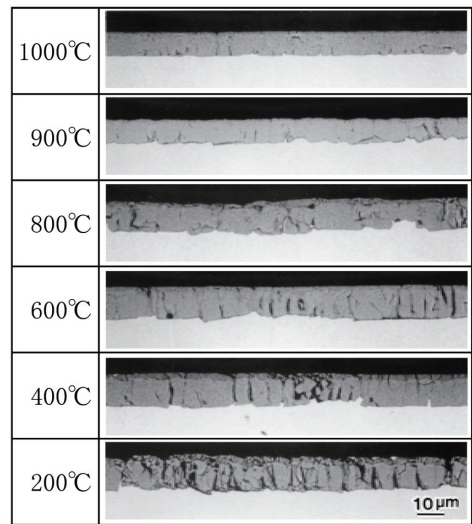


図6 熱間圧延後のスケール形態におよぼす圧延温度の影響
Cross section SEM micrographs of scales after rolling

スケール厚が約 12 μm となる様に加熱温度と圧延機間の酸化時間を変えている。また、圧下率は 35% とした。圧延温度 1000 $^{\circ}\text{C}$ では、ほぼ一定のスケール厚となり割れも無い。温度が下がるにつれスケールの厚み方向への割れが多くなる。特に 600 $^{\circ}\text{C}$ 以下になると厚み方向に貫通した割れが多数見られる様になり、200 $^{\circ}\text{C}$ では、粉々に破壊された。

図3に示したように、圧延時のスケールが厚くなると圧延後の試験片表面に、目視でも判別できるような割れが生じる。加熱温度および圧延機間の搬送速度を変化させることにより、No.2 圧延機入側での鋼板温度を 600~1080 $^{\circ}\text{C}$ 、圧延前のスケール厚を 2~16 μm とし、圧延後表面に割れが発生する状況への影響を調査した。この試験では、No.1 圧延機出側の板厚を 4.5mm, No.2 圧延機出側の板厚を 2.9mm とした。

図7に圧延温度とスケール厚の割れ発生におよぼす影響を示す。圧延温度が高く、スケールが厚い場合に割れが発生する。図8に圧延前スケール厚を 14 μm 、表面温度を 950 $^{\circ}\text{C}$ とし、圧下率 33% で圧延した場合の表面および断面走査型電子顕微鏡 (SEM) 写真を示す。表面写真において、灰色部がスケールで白色部は鋼でスケールがほとんど存在しない。断面観察より、灰色部のスケール厚は、圧延前のスケール厚にほぼ等しいことから、圧延による伸びの変化に対し、スケールは伸ばされるというよりは分断していると考えられる。スケールの厚い部分は、圧延方向の前側の部分 (A 部) は、スケール端面が直角になるのに対し、後ろ側の部分 (B 部) はスケール厚は徐々に減少していた。

(2) 試験2

試験片を2枚重ねて種々の温度に加熱し、分離後、所定の圧延温度まで放冷することによりスケール厚を変化させた。この方法により、試験1では圧延前のスケール厚は最大 20 μm だったが、試験2は、圧延前のスケール厚を 10~60 μm とすることができた。

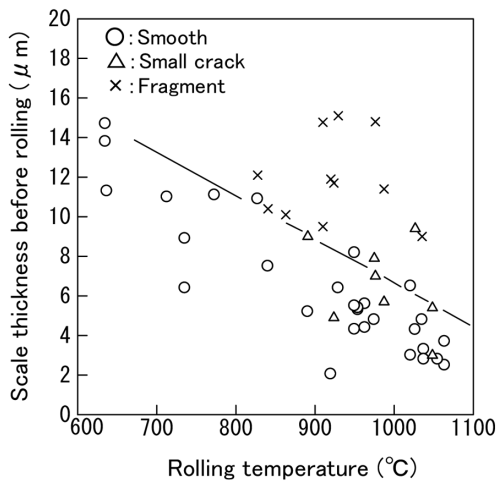


図7 スケール割れ発生条件におよぼす圧延温度とスケール厚の影響
Effect of scale thickness before rolling and rolling temperature on surface appearance

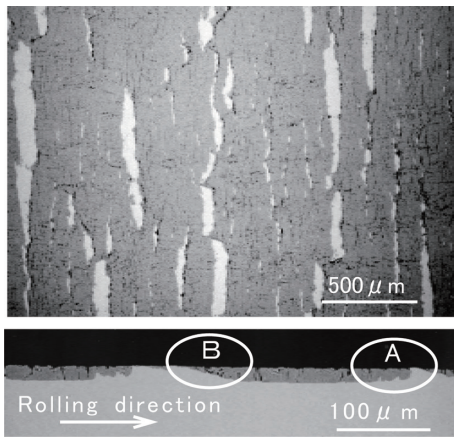


図8 スケール割れ発生時の表面および断面写真
Surface and cross section SEM micrographs of scale after 1st rolling

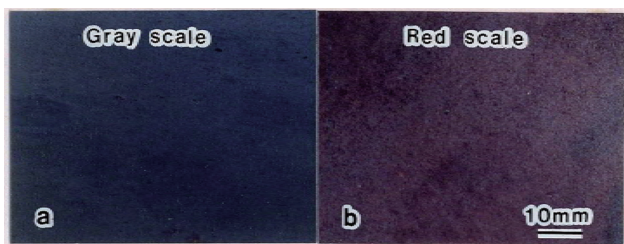


図9 圧延後表面外観写真 (圧延温度 900°C) (Test 2)
(a) 放冷開始温度 1040°C 放冷時間 11s
(b) 放冷開始温度 1240°C 放冷時間 29s
Surface appearance of steel rolled at 900°C and quenched (Test 2)
(a) Heat: 1040°C → air cool: 11s → hot roll
(b) Heat: 1240°C → air cool: 29s → hot roll

圧延後の表面観察例として、試験片を 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図9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 (12μm) 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

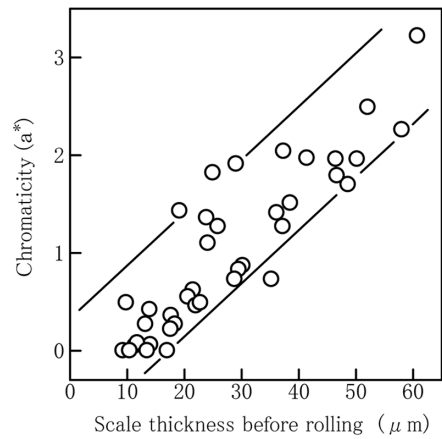


図10 赤スケール生成におよぼすスケール厚の影響
Effect of scale thickness before rolling on value of chromaticity (a^*)

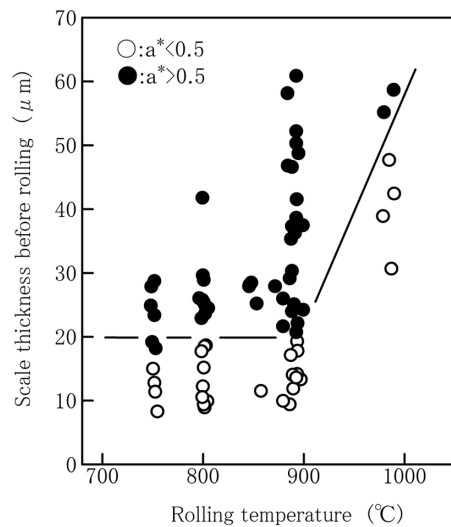


図11 赤スケール生成におよぼす圧延温度とスケール厚の影響
Effect of scale thickness before rolling and rolling temperature on value of chromaticity (a^*)

場合 (30μm) は赤色となった。図10に圧延温度 900°C における圧延前スケール厚と鋼板表面の a^* 値の関係を示す。圧延前スケールが厚くなるにつれて a^* 値は大きくなり、赤色が強くなる。また、圧延温度の影響を図11に示す。圧延温度が 900°C 以下の場合には、圧延前スケール厚が 20μm 以上では、 a^* 値は 0.5 以上となり赤スケールとなるが、圧延温度が 1000°C の場合は、スケール厚が 50μm でも 0.5 以下の値となり赤スケールは生成しなかった。

4. 考察

4.1 スケールの機械的性質と変形挙動

スケールの高温下における機械的性質⁴⁰⁻⁴³⁾について松野ら⁴⁾は3点曲げ試験、高温硬さ試験を、日高ら⁴³⁾は引張試験を行い、FeOは700°C以上において塑性変形することを示している。また、松野ら⁴⁾は表面にスケールを生成させた鋼板の高温引張試験を行い、スケールは鋼と密着を保

ちながら伸びるが、スケール粒界に割れも生じることを示している。

熱間圧延時のスケールが薄い場合、圧延後の表面は滑らかであたかもスケールも伸ばされたような様相を呈する。図5に示したように、圧延前後のスケール厚を比較すると、スケールは母材の板厚変化に等しい割合で減少することから、大まかにはスケールも母材と等しい割合で伸ばされると考えて良い。

しかし、そのように見える場合でもスケールを詳細に観察すると、微細なクラックが認められる。特に、ロール表面粗さが小さく、圧延油を使用する等、潤滑条件の良好な場合にクラックが明確に観察できる。図12、13に圧延前のスケール厚を12 μm 、表面温度を920 $^{\circ}\text{C}$ とし、圧下率を0、3、15、43%に変化させた時の表面および断面SEM写真を示す。

圧下率0%の場合、表面に凹凸が存在し、その凹凸に対応してスケール結晶粒界が観察できる。この結晶粒はFeOで厚み方向に結晶粒は1つで、その上にFe₃O₄の皮膜が薄く覆っている。3%圧下を加えると結晶粒は押しつぶされて表面の凹凸は平坦になる。また、3%圧下の表面写真では、結晶粒界に沿ったクラックが確認できる。15%圧下になると、結晶粒界のクラックはさらに大きくなり、スケールの

結晶1つ1つが圧延方向に分断する。43%圧下になると、1つ1つの結晶が鋼に押込まれるように変形している。スケールが薄く目視ではスケールも圧延で伸ばされているように見える場合でも、微視的にはFeOの結晶粒の粒界が破壊され、スケールが均一に伸びていないことがわかる。この結果は、松野や日高らが示したFeOは高温下では塑性変形が可能だが、粒界も壊れやすいという結果と対応している。

4.2 スケール割れとブリスターの関係

図3に示したように、圧延前のスケールが厚くなると、目視でも判別できるような割れが生じる。スケールの割れと割れの間隔は、大きなものでは10mm以上にもなった。このような割れが、ロールバイト内の変形中に発生しているとは考えにくい。実際、本試験における接触弧長はたかだか13mm程度であり、その中でスケールが10mm間隔に分断されるとは考えられない。

スケールの破断は図14に模式図を示すように、ロールバイト内で発生しているのでは無く、入側においてスケールが分断、剥離することが原因と考えられる。すなわち、入側で剥離したスケールはロール周速と同じ速度で噛み込んでいき、鋼側に残ったスケールは鋼の速度で進むため、

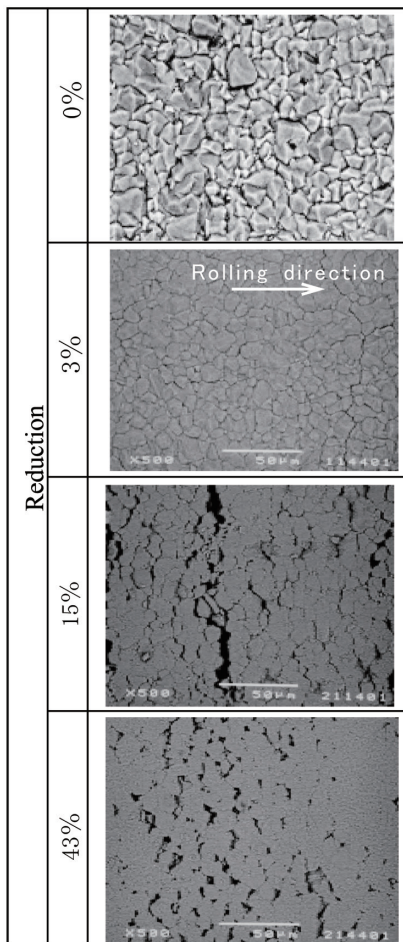


図12 熱間圧延後のスケール表面写真
Surface SEM micrographs of scale after 2nd rolling

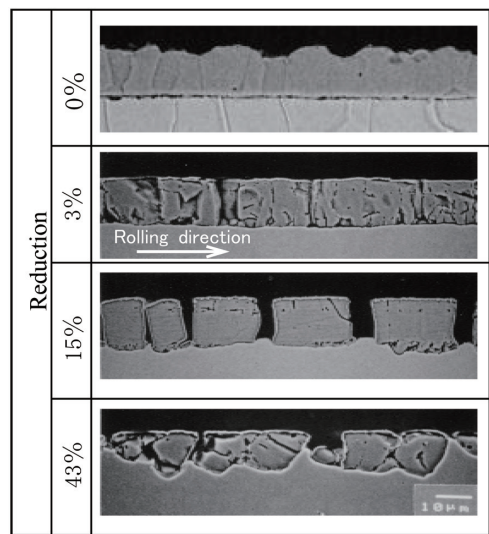


図13 熱間圧延後のスケール断面写真
Cross section SEM micrographs of scale after 2nd rolling

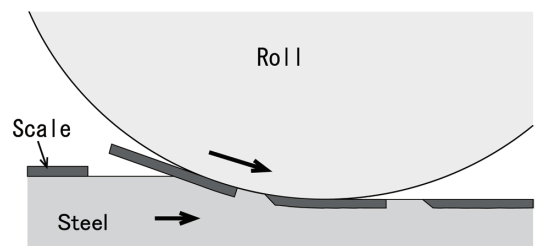


図14 スケール割れ発生メカニズム
Mechanism of scale separates during hot rolling

剥離したスケールと鋼側に残ったスケールの間に隙間が発生し、これが圧延後の割れとなると考えられる。図8で圧延方向の前側の部分（A部）は、スケール端面が直角になるのに対し、後ろ側の部分（B部）はスケール厚は徐々に減少するのは、圧延方向前側では鋼側に残ったスケールが押し込まれるため厚みはそのままとなり、後ろ側は、スケールは拘束されていないため、スケールが崩れながら押し込まれるためと考えられる。

高温下の酸化では、スケールが浮き上がるプリスターが生成する。松野⁴¹⁾、木津⁴²⁾、近藤ら⁴³⁾はプリスター生成挙動を観察し、数秒間の酸化でプリスターが発生することを示している。圧延によって目視でも観察できるようなスケール割れが発生するのは、圧延前にプリスターが発生し、スケールが剥離した状態で圧延されるためと考えられる。圧延温度が低い場合にスケール割れが発生し難くなるのは、プリスターが発生し難くなるためと思われる。

4.3 赤スケールの生成とスケールの粉状破壊

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ことを示している。本試験でも、赤スケールが生成した場合、鋼板表面に赤色のヘマタイト粉末が生成していた。ヘマタイト粉末が生成するのは、熱間圧延時にスケールの一部が破壊され、粉状の FeO が生成し、大気中冷却の間に酸化が進み $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ となるためである。図10で圧延前スケールが厚くなるほど赤色が強くなるのは、スケールが厚いほどスケール粉末量も増加するためと考えられる。また、図11で 1000°C 圧延ではスケールが厚くても赤スケールとならないのは、高温下ではスケールが変形しやすく、粉状に破壊しにくいいためと考えられる。

5. 結 言

普通鋼板の熱間圧延におけるスケールの挙動について試験圧延機を用いて調査した結果をまとめた。圧延時のスケール変形は、圧延温度、ロール、潤滑、スケール厚等の影響を受ける。スケールが薄い場合には、スケールは母材と共にほぼ均一に圧延されるが、スケールが厚くなると割れが生じたり、粉状に破壊しスケール疵の原因となる。これらの挙動をさらに深く理解するには、高温下におけるスケールの機械的性質、熱物性等基礎物性の把握、および圧延時にスケール層内に働く応力といった力学的な検討が必要となる。

参考文献

- 小関智史, 吉田博, 渡邊邦夫: 41回塑加連講論. 1990, p. 105-108
- 金成昌平, 今江敏夫, 渡邊邦夫, 鏑田征雄: 材料とプロセス. 8, 1268 (1995)
- 原健一郎, 土井彰一, 宇都宮裕, 左海哲夫, 柳修介: 鉄と鋼. 96 (8), 492 (2010)
- 小豆島明, 近藤豊: 材料とプロセス. 23, 1065 (2010)
- Fletcher, J.D., Beynon, J.H.: Ironmaking Steelmaking (J. Iron Steel Inst.). 23 (1), 52-57 (1996)
- Blazevic, D.T.: Proc. of 4th. Int. Steel Roll Conf. Vol. 1, 1987, A.38.1.-A.38.13
- 小野田克己, 岡部央, 能美亮一, 長谷登: 住友金属. 20, 1-8 (1968)
- 瀬々昌文, 田中新, 辻野良二: 鉄と鋼. 87 (2), 85-92 (2001)
- 岡田光: 材料とプロセス. 15, 1119-1123 (2002)
- Okada, H., Matsuda, Y., Sakamoto, K.: Proc. 4th ICTP. 1993, p. 711-716
- 岡田光, 佐々木強, 小出太郎, 尼崎順三, 馬場信次: 材料とプロセス. 9, 340 (1996)
- Boelen, R., Curcio, P., Assefpour, M.: Proc. Conf. on Hydraulic Descaling in Rolling Mills. Institute of Materials, London, 1995, p. 27-36
- 岡田光: 材料とプロセス. 14, 447 (2001)
- 石川淳, 栗田俊哉, 山本寛, 小田桐繁, 松本謙一, 竹岡正夫: 日新製鋼技報. 73, 55-62 (1996)
- Tiley, J.B., Lenard, J.G., Yu, Y.: Mech. Work Steel Process. 38, 215-222 (2000)
- 小出太郎, 後藤邦夫, 佐々木強, 岡田光, 芝原隆, 杉本純, 喜多孝夫: 46回塑加連講論. 1995, p. 125-126
- 後藤邦夫, 岡田光, 佐々木強, 小出太郎: 鉄と鋼. 84 (12), 861-867 (1998)
- 関晴彦, 蛭田敏樹, 山下道夫, 今江敏夫, 富永賢二, 小出正人: 材料とプロセス. 9, 972 (1996)
- 賀屋章, 水田桂司, 福森淳三, 川水努, 関庚浚: 三菱重工技報. 36 (6), 300-303 (1999)
- Krzyzanowski, M., Beynon, J.H., Sellars, C.M.: Metall. Trans. B. 31B, 1483-1490 (2000)
- Beynon, J.H., Li, Y.H., Krzyzanowski, M., Sellars, C.M.: Metal Forming 2000. 2000, p. 3-10
- Krzyzanowski, M., Beynon, J.H.: Metal Forming 2000. 2000, p. 331-334
- 番博道, 赤坂清, 大岡俊之: 鉄と鋼. 71, S1281 (1985)
- Fukagawa, T., Okada, H., Maehara, Y.: ISIJ Int. 34 (11), 906-911 (1994)
- 岡田光, 深川智機, 石原晴彦, 岡本篤樹, 吾妻正敏, 松田行雄: 鉄と鋼. 80-11, 849-854 (1994)
- 深川智機, 岡田光, 富士川尚男: 鉄と鋼. 83 (5), 305-310 (1997)
- 深川智機, 岡田光, 前原泰裕: 鉄と鋼. 81 (5), 559-564 (1995)
- 深川智機, 岡田光, 前原泰裕, 富士川尚男: 鉄と鋼. 82 (1), 63-68 (1996)
- 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, 1509 (1989)

- 30) 石井吉秀, 小土井章夫, 若松郁夫: 材料とプロセス. 6, 1340-1342 (1993)
- 31) Ishi, Y., Kodoi, A., Wakamatsu, I.: Mech. Work. Steel Process. 30, 447-450 (1992)
- 32) 覚道茂雄, 森博保, 宮澤雄作, 宅間八國, 森本敬治: 中山製鋼技報. 36, 32-36 (1998)
- 33) 浅井達也, 中村峻之, 井上毅: 材料とプロセス. 6, 357 (1993)
- 34) 浅井達也, 中村峻之, 井上毅: 材料とプロセス. 6, 1734 (1993)
- 35) 浅井達也, 十代田哲夫: 材料とプロセス. 11, 1079 (1998)
- 36) 岡田光, 橘久好, 野村茂樹, 焼田幸彦, 杉本純, 高橋裕之: 材料とプロセス. 23, 1067 (2010)
- 37) Mackenzie, J.D., Birchenall, C.E.: Corrosion. 13 (12), 783-785 (1957)
- 38) 松野二三朗, 錦田俊一: 鉄と鋼. 71, S1282 (1985)
- 39) Tiley, J., Zhang, Y., Lenard, J.G.: Steel Res. 70 (11), 437-440 (1999)
- 40) 日高康善, 安楽敏朗, 大塚伸夫: 材料とプロセス. 13, 1099-1102 (2000)
- 41) 松野二三朗: 鉄と鋼. 65 (6), 599 (1979)
- 42) Kizu, T., Nagataki, Y., Inazumi, T., Hosoya, Y.: ISIJ Int. 41 (12), 1494 (2001)
- 43) 近藤泰光, 多根井寛志, 鈴木規之, 潮田浩作, 前田宗之: 鉄と鋼. 99 (3), 206 (2013)



岡田 光 Hikaru OKADA
鹿島技術研究部 上席主幹研究員
工学博士
茨城県鹿嶋市光3番地 〒314-0014