

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05733

研究課題名(和文) 熱間圧延における酸化スケールの変形挙動評価と最終製品への圧延影響因子の解明

研究課題名(英文) Evaluation of deformation behavior of oxide scale in hot rolling and elucidation of effective factor of rolling for final product factor

研究代表者

瀬川 明夫 (Segawa, Akio)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：10298325

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：熱間圧延工程における酸化スケールの動的な変形挙動の解明に向けて、真空圧延機を用いた直接観察法であるScale Transfer法を用いて、酸化スケールが圧延に及ぼす影響を解明するとともに、最終製品への影響を調査する。変形挙動評価には、酸化スケール厚の定量化に加えて、圧延中の先進率測定、ロール材質の検討も必要である。

酸化スケール厚の定量化について、酸化スケール厚が厚い場合で、校正曲線の適用範囲の拡大を行い、新たな推定式の導出を行った。また、ロール材質について、今後適用が見込まれる高速度鋼を用いたロールを導入し、圧延加工が可能であることを検証し、ロール表面状態に変化がないことを確認した。

研究成果の概要(英文)：For elucidation of dynamic deformation behavior of oxide scale in the hot rolling process, the effective factor of oxide scale during rolling was elucidated using the Scale Transfer method, which is the direct observation method using the vacuum rolling mill, and the influence on final product was investigated. For a deformation behavior evaluation, in addition to the quantification of the oxide scale thickness, the forward slip rate measurement during rolling and the examination of roll materials were necessary.

About the quantification of the oxide scale thickness, in case of thick thickness of oxide scale, the coverage of the calibration curve was enlarged, and the new estimate equation was derived. In addition, the roll using the high-speed steel for future roll materials was designed, then it was inspected that rolling processing was possible, and confirmed that there was not a change in a roll surface state.

研究分野：塑性加工

キーワード：生産工学 成形加工 熱間圧延 酸化スケール 変形挙動 表面性状 ロール

1. 研究開始当初の背景

鉄鋼の熱間圧延工程では、加熱炉で加熱された鋼塊（スラブ）を圧延工程に供するが、この時、鋼塊表面には酸化被膜（酸化スケール）が生成される。通常、酸化スケールは圧延加工前に高圧水を用いたデスクーリングによって除去されるが、酸化スケールの残存や、大気中で高温にさらされるため直ちに再酸化し、常に酸化スケールが付着した状態で操業が進行する。圧延加工は上下ロールによって被加工材を圧下するが、このとき、鋼材表面の酸化スケールも同時に加工の影響を受け、被加工材の表面にスケール疵と分類される表面欠陥発生の要因となる。熱間圧延におけるスケール疵の発生は、歩留を約3割低下させることもあり、生産効率、経済損失の観点から、防止が求められているが、操業条件（圧延時の酸化スケール成分組成、デスクーリング条件、圧延条件、鋼板温度など）との因果関係の定量的解明が不十分であることや、操業時に酸化スケール生成を制御するために必要な因子が不足していること、圧延時の酸化スケールそのものの变形や剥離、破壊といった機械的挙動の知見が乏しいなどの問題が未だに多数残されている。酸化スケールを対象とした研究としては、岡田（参考文献①）、串田ら（参考文献②）による剥離挙動の推定、KRZYŻANOWSKIら（参考文献③）による数値解析での圧延中の酸化スケールの状態を推定などがあるが、特に圧延前の2次スケールの状態に関して、状態はそれぞれ異なり、実験後のスケールの保持が困難とされる。

本研究では熱間圧延中に生成される酸化スケール（2次スケール）を再現し、加工中の酸化スケールの变形・剥離挙動を可視化するため独自に発案した真空圧延機を利用する Scale Transfer 法により、生成されるスケール組成および厚みの表面性状への影響を明解にするとともに、加工条件（加工度、加工温度）による変形を評価し、歩留向上を目指す。

本研究の成果は、鉄鋼材料生産の上工程である熱間圧延に歩留向上と高品質化の指針を与えるものであり、生産ラインの効率化によるエネルギー削減による地球環境改善にも寄与できると考えている。

2. 研究の目的

鉄鋼の熱間圧延工程では、鋼板表面に生成される酸化スケールが仕上表面に巻き込まれることで生じる疵が原因の表面性状悪化による歩留低下が大きな問題である。熱間圧延での酸化スケールの变形・剥離挙動は、大気中では再酸化によって所望の酸化スケールの再現が困難であり、特に加工中の酸化スケールの变形・剥離挙動について未解明な点が非常に多い。本研究では熱間圧延中に生成される酸化スケールをモデル化し、圧延中の酸化スケールの变形・剥離挙動を可視化する

ため独自に発案した真空圧延機を利用した Scale Transfer 法により、生成されるスケール組成および厚みの表面性状への影響を明解にするとともに、加工条件（加工度、加工温度）による変形を評価し、歩留向上を目指す。

3. 研究の方法

(1) Scale Transfer 法により生成される酸化スケールと Fe₂O₃（ヘマタイト）質量変化の定量評価

本研究で対象の酸化スケールは2次スケールである。これは、FeO（ウスタイト）単層の非常に薄いスケールである点が特徴的である。

Scale Transfer 法は、真空圧延機（図1）の真空炉内に配置されたヘマタイトから解離した酸素分子によって新たな酸化スケールを母材側に生成させる方法である。所定の真空度、加熱温度である限り、反応は不可逆的なものである。従来は、黒皮材を酸素供給源としていたが、ヘマタイトの量が定量的ではなく、実験条件によっては、スケールの厚みのばらつきが大きい場合があった。このため、酸素供給源としてヘマタイト粉末を固めたピレットを用いて、ピレットの質量減少量と、生成されるスケール厚みの相関を求め、校正曲線を作成する。また数式化も行い、必要なヘマタイト量を迅速に決定できるようにする。表1に実験条件を示す。



図1 真空圧延機外観

表1 酸化スケール厚定量実験条件

Material	SPHC				
Size [mm]	600l×50w×6t				
Mass of billet [g]	10	20	40	60	80
Degree of Vacuum [Pa]	0.133				
Heating Temperature [K]	1273				
Heating time [h]	1.0				

(2) 熱間圧延用ロール材質の検討

通板実験を行う際に、圧延ロールへの影響

(ロール表面性状悪化)が散見されたため、圧延ロール材質検討の必要性があることが明らかとなった。現在、熱間圧延では、ロール材質として、高速度鋼(ハイス)の適用が進められており、ロール材質を含めた酸化スケールの動的挙動解析を行うことを想定し、新たにハイスロールを導入するとともに、通板実験を行った。

図2にハイスロールの外観を示す。



図2 ハイスロール外観

ロール材質は以下に示すものとする。

- ・スリーブ部：ハイス
(2%C-5%Cr-5%Mo-5%V-2%W)
(硬度：Hs80~85)
内径φ105, 外径φ165
ロールバレル150mm
(内スリーブ90mm)
- ・シャフト部：SUS304 (シャフト外径φ105)

これは、現行の真空圧延機用ロールと同様の構造とし、ロールスリーブ部のみを交換可能なものとしている。

圧延実験条件を以下に示す。

- ・圧延温度：900°C (雰囲気温度)
- ・被圧延材：SPHC
(酸化スケール付与、
サイズ：50w×600l×6t)
- ・設定スケール厚：10μm
- ・圧延速度：10m/min
- ・真空度：0.133 Pa
- ・圧下率：20% (1パス)

4. 研究成果

(1) Scale Transfer 法により生成される酸化スケールとヘマタイト質量変化の定量評価

表2に酸素放出量、図3にビレット質量と酸素放出量の関係を示す。

表2 酸素放出量

Mass of billet [g]		Oxygen emission [g]	
Before heating	After heating	Experimental value	Theoretical value
10.00	9.89	0.11	0.33
20.00	19.69	0.31	0.67
40.00	39.48	0.52	1.34
60.00	59.33	0.67	2.00
80.00	79.16	0.84	2.67

これより、酸素放出量は理論値の約1/3倍となっていることが分かる。金属および酸化物上の酸素の圧力が解離圧より大きくなる

と、系は平衡に向かう傾向を示す。金属は酸化され、閉鎖系の酸素の圧力は平衡状態に到達するまで、あるいは金属がすべて酸化されるまで減少する。ビレット質量が増加すると、炉内の酸素分圧が大きくなり、系を平衡に保つためにヘマタイトから解離する酸素量が小さくなるため、酸素放出量は、理論値に対して差が発生したと考えられる。

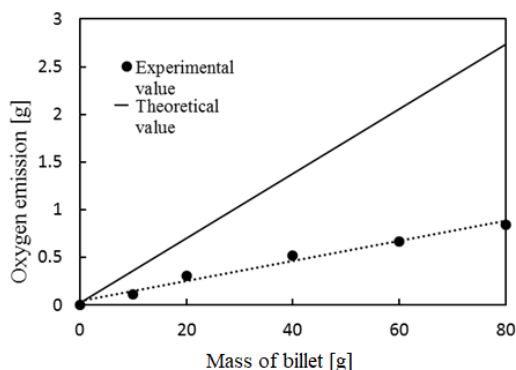


図3 ビレット質量と酸素放出量の関係

ビレット質量が0.09g~3gの場合、炉内の酸素圧はヘマタイトの解離圧より小さく、ヘマタイトから酸素が解離し続けたと推定できる。ビレット質量4gから、炉内の酸素圧はヘマタイトの解離圧と等しくなったと推定でき、ビレット質量がさらに大きい場合、炉内の酸素圧がヘマタイトの酸素の解離圧に達しており、酸素放出量は鋼板の酸化量によって左右される状態であったと考えられる。

このことからヘマタイトから酸素が放出するのにかかる時間より、放出した酸素が酸化スケールの生成に消費されるのにかかる時間のほうが長いことが推定できる。

表3にヘマタイト質量と生成した酸化スケール厚を測定した結果を示す。また、図4に本研究で行った範囲を含めた校正曲線を示す。

表3 生成酸化スケール厚

M.b. [g]	Scale thickness [μm]				
	1	2	3	Average value	Theoretical value
10	2.97	1.48	1.70	2.05	5.06
20	4.67	4.88	4.24	4.60	10.1
40	6.15	5.30	4.67	5.37	20.3
60	9.55	7.00	6.58	7.71	30.4
80	10.4	9.55	8.48	9.47	40.5

M.b.: Mass of billet

これまでの結果より、ビレット質量が3gまで生成酸化スケール量はmol質量から求める理論値に近い値となり、4gより大きい場合、理論値より小さくなっている。今回、使用したビレット質量は10g以上であり、ビレット質量が4gから生成酸化スケール量の傾向が変位することを考慮して、式(1)のように4gより大きい場合から適用出来ると考えられ

る。

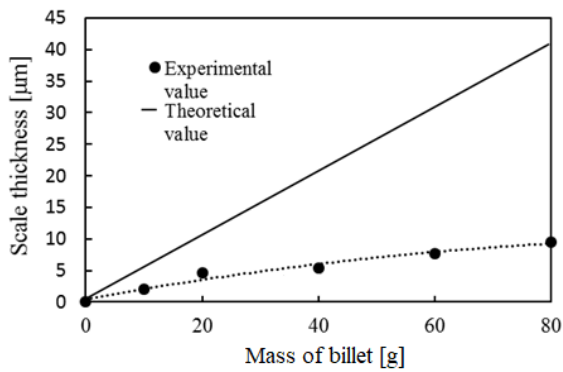


図4 ビレット質量と生成酸化スケール厚の関係 (校正曲線)

$$t_{scale} = \frac{-9.00 \times 10^{-4} W_{Fe_2O_3}^2 + 0.0366 W_{Fe_2O_3} + 0.408}{\rho S} \dots (1)$$

ここで、

t_{scale} : 生成酸化スケール厚 [μm],
 $W_{Fe_2O_3}$: ヘマタイトビレット質量 [g]
 ρ : ヘマタイト密度 [g/cm^3]
 S : 鋼板の表面積 [cm^2]

である。式(1)は、ビレット質量 4g 以上で成立する校正式であり、ビレット質量 4g 未満では、mol 質量換算式を用いることで、生成酸化スケール厚を定量化することが可能である。

(2) 熱間圧延用ロール材質の検討

ハイスロールによる圧延実験に関して、図5に30パス終了後のロール表面写真を示す。

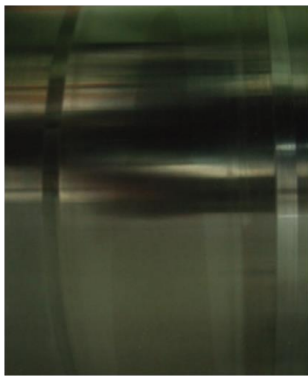


図5 30パス後のロール表面状態

これより、ロール表面には、通板によるロールマークが生じているが、表面状態は良好と言える。

以上の成果より、Scale Transfer 法を行う際に生成する酸化スケール厚の定量化に向けた高精度な校正式の導出と、今後の熱間圧延に期待されるハイスロールを導入することで、酸化スケールの直接観察による圧延加工へ影響について、さらに発展した研究が推進されるものとなった。

<参考文献>

- ① 岡田 光,
熱間圧延におけるスケールの挙動,
塑性と加工, Vol.44, No.505, (2003),
pp.94-99.
- ② 串田 仁, 前田恭志,
スケールの高温密着性評価手法,
材料とプロセス, Vol.19, No.2, (2006),
p.398.
- ③ Mical KRZYZANOWSKI,
Modelling the behaviour of oxide scale in
hot rolling,
ISIJ International, Vol.46, No.11, (2006),
pp.1533-1547.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1件)

- ① 瀬川明夫,
雰囲気制御圧延による高機能材料の創製,
塑性と加工, Vol.58, No.672, (2017), pp.3-7.
査読有
DOI : 10.9773/sosei.58.3

[学会発表] (計 4件)

- ① 瀬川明夫,
熱間圧延試験用スリーブロールの検討,
一般社団法人日本鉄鋼協会第174回秋季
講演大会, (2017).
- ② 西尾拓真, 窪田宗大, 谷口由祐, 瀬川明夫,
熱間圧延中の酸化スケールの動的変形
挙動解明に向けた酸化スケール厚の定
量化,
一般社団法人日本塑性加工学会北陸支
部 第25回北陸支部講演会, (2016).
- ③ 瀬川明夫,
熱間圧延用スリーブロールの検討,
一般社団法人日本鉄鋼協会第170回秋季
講演大会, (2015).
- ④ 瀬川明夫,
熱間圧延中の酸化スケールの動的変形
挙動評価,
一般社団法人日本鉄鋼協会第170回秋季

講演大会, (2015).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

瀬川 明夫 (SEGAWA, Akio)
金沢工業大学・工学部・教授
研究者番号：10298325

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

高野 則之 (TAKANO, Noriyuki)
金沢工業大学・工学部・教授
研究者番号：10236250

(4)研究協力者

()