

構造用鋼の熱間鍛造スケールの侵入挙動に及ぼす ボロン効果の極値統計による解析

石之 茂也*・蔵迫 誠志郎*・大西 一義*²

Evaluation by Statistics of Extreme of the Effect of Boron Addition on the Penetration Behaviour
of Oxide Scale of Hot Forged Structural Steel

Shigeya ISHINO, Seishiro KURASAKO and Kazuyoshi ONISHI

1. 緒言

構造用鋼を熱間鍛造し、機械要素部品として鍛造肌のまま使用する場合、その品質特性は鍛造工程におけるスケール剥離性に大きく左右されると考えられる。例えば、鍛造肌地へのスケールの侵入は、その深さおよび用途にもよるが各種損傷の起点となり得る。しかしこのような観点から熱間鍛造時におけるスケールの挙動を検討した例はほとんどみられず、表面処理技術に関する研究成果としての表面処理特集号^{1,2)}においても、スケールの挙動に関する研究事例はみられない。一方、鋼中におけるボロンの挙動と役割が、日本鉄鋼協会による研究活動の成果として報告³⁾されているが、スケールに関する研究としては、Fe-36%Ni合金についての粒界酸化とボロンの関係を調査した事例があるのみで、構造用鋼におけるボロンと脱スケール性の関係を調査した報告はみられない。最近の報告⁴⁾としては、低炭素鋼の連続焼鈍時におけるボロンの影響を調査した例があるが、この報告はスケールの地鉄への侵入性を調査の目的としたものではなく、ボロンの表面における濃化挙動を調査したものである。

そこで、本報では、ボロンの粒界偏析挙動に着目して、構造用鋼の熱間鍛造スケールの地鉄への侵入性に及ぼすボロンの影響を極値統計を用いて検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材

本試験に用いた供試材はクロムモリブデン鋼 (SCM440) で、断面 300 mm×250 mm の鋳片から実機熱間圧延した直径 65 mm の棒鋼である。化学成分を Table 1 に示す。

2.2 試験片の作成

所定長さに切断した供試材を、丸型側焚式加熱炉（実操業の重油燃焼ガス雰囲気中）で、1200°C で 2 時間保持後、500T 油圧プレスで供試材先端部約 250 mm を型打し、厚さ 48 mm のタイロッド接合部に成型した。その外観を Fig. 1 に示す。試験片は鍛造成型部の外周部より採取した。

2.3 地鉄に侵入したスケールの数および深さの測定

光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡でスケール/地鉄界面の形態を観察すると共に、侵入したスケールの数およびその

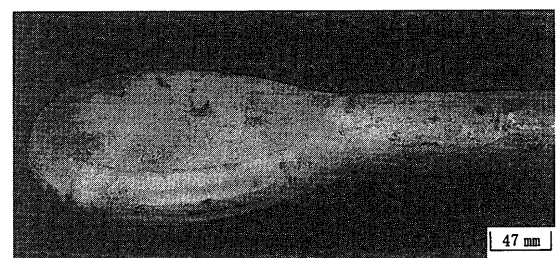


Fig. 1. Appearance of specimen.

Table 1. Chemical composition of steels tested (wt%).

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	SolAl	Ti	B	N
B-added	0.39	0.24	0.82	0.019	0.014	0.97	0.20	0.07	0.10	0.012	0.028	0.0010	0.0068
B-free	0.41	0.22	0.82	0.022	0.015	1.05	0.20	0.10	0.10	0.013	0.002	0.0001	0.0086

平成 15 年 4 月 11 日受付 平成 15 年 7 月 10 日受理 (Received on Apr. 11, 2003; Accepted on July 10, 2003)

* 合同製鐵 (株) 姫路製造所 (Himeji Works, Godo Steel Co., Ltd.)

* 2 日本選鋼 (株) (Nihon Senko Co., Ltd., 2946 Nakajima Shikama-ku Himeji 672-8035)

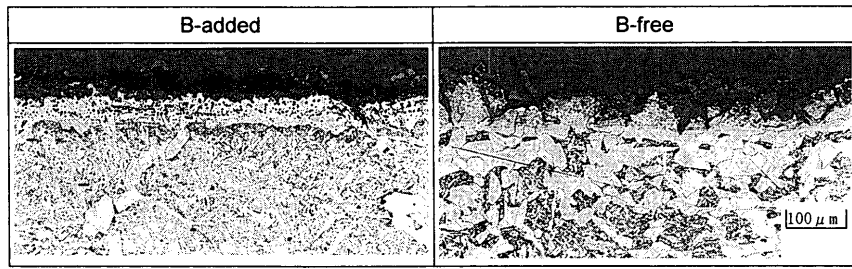


Fig. 2. Optical micrographs at cross section of steels forged at 1200°C.



Fig. 3. SEM at cross section of steels forged at 1200°C.

深さを測定した。測定は倍率100倍における光学顕微鏡の連続20視野の写真上でそれぞれを読み取り、極値確率紙にプロットした。ただし、侵入深さの読み取りは16視野とした。

3. 実験結果と考察

3.1 スケール/地鉄界面の形態

スケール/地鉄界面の形態を Fig. 2 に示す。ボロン（以下、元素記号で記す）含有鋼は、B 無添加鋼に比し界面の平坦性が良い。これは、B が粒界フェライトの生成を抑制する作用と、Bainitic transformation におけるせん断機構との相乗効果によるためであろうと考えられる。Fig. 3 はスケール/地鉄界面の SEM 像であるが、B 無添加鋼では界面における Mechanical keying 状態⁵⁾ が明確に認められる。また、気孔が内在する内部酸化層の厚さは、B 添加鋼の方が薄く、酸化反応が抑制されているように思われる。B は粒界で優先酸化されて保護皮膜として働き、酸素の内方拡散を阻止するとする知見⁶⁾ を参照するならば、スケール/地鉄界面で B の特異的分布が考えられるが EPMA では検出できなかった。

3.2 スケール/地鉄界面におけるスケールの侵入頻度

地鉄界面に侵入したスケール数を 2.3 に記載した方法で測定し、1 視野内のスケール数の合計を視野毎の最大値とし、また、侵入深さの最大値については極値取扱いの概念通りに求めた。これらの値を極値確率紙にプロットした結果が Fig. 4 および Fig. 5 である。

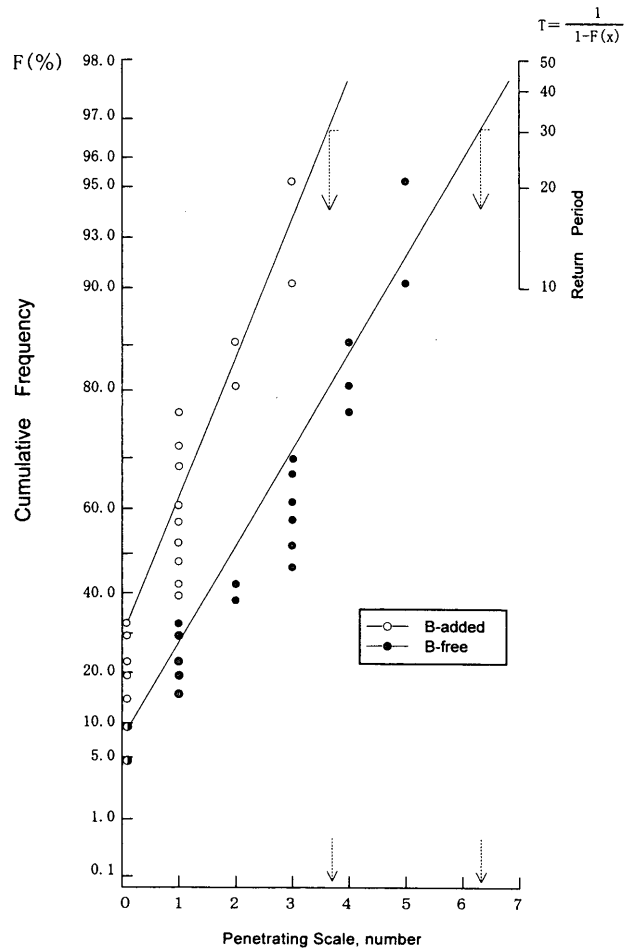


Fig. 4. Cumulative frequency distribution of scale penetrated to the steels forged at 1200°C. (The expected maximum number of the scale is estimated at return period of $T=30$.)

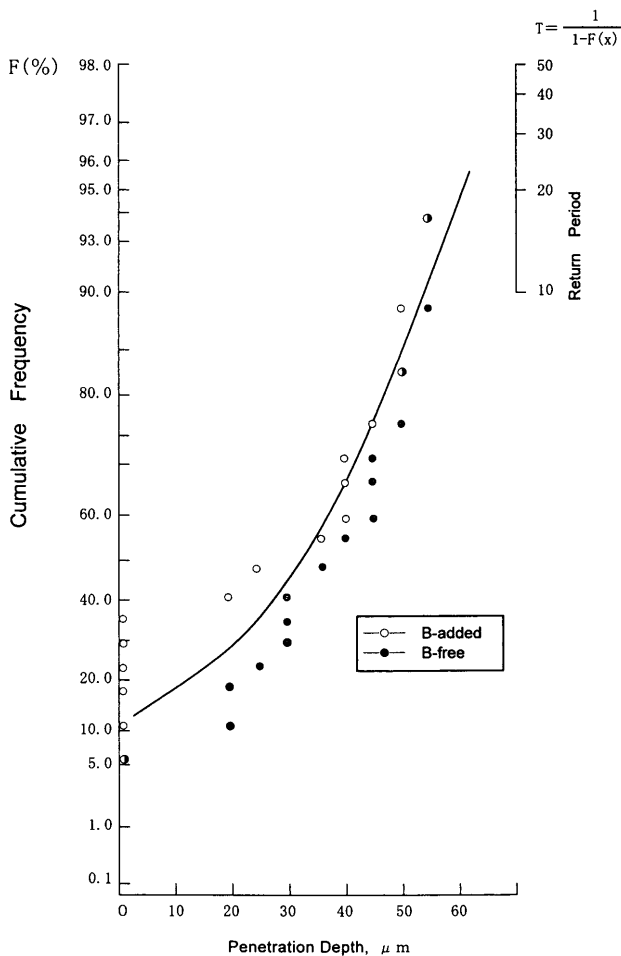


Fig. 5. Cumulative frequency distribution of depth of scale penetrated to the steels forged at 1200°C.

スケール侵入頻度については、Fig. 4 に示すように同一値累積分布の最上位点をプロットすると良好な直線関係を示す。これにより、スケール侵入頻度は2重指数分布に従うものとして再帰期間の概念に基づき、型打鍛造部の全周長におけるスケールの侵入数を推定した。再帰期間は $T = (\text{鍛造部の全周長} / \text{検鏡試験片の周長})$ として求めた。

この解析で B 添加鋼の鍛造スケールの地鉄への侵入数は、B 無添加鋼のほぼ 1/2 でスケールの侵入が抑制されていることが明らかとなった。これは B の粒界保護機能のほかに、粒界エネルギーの不均一性が B の偏析により緩

和される結果であると考えられる。なお、N が固溶している場合、粒界に偏析するフリーボロン (B*として示す) は化学量論的には $B^{* \%} = \text{Total B} \% - 0.77 [\text{Total N} \% - 2.92 \text{ Ti} \%]$ として求められるが、本試験鋼の B 量はその全量が粒界に偏析していることになる。一方、スケールの侵入深さは、Fig. 5 に示すようにそのプロットは両鋼種とも直線回帰とはならず、かつ、同様な傾向を示し差異は認められなかった。

4. 結語

B を添加した構造用鋼 (SCM440) の熱間鍛造時におけるスケールの挙動を、極値統計の手法を適用して解析した。実機熱間鍛造で得られた結果の要約は以下のとおりである。

(1) スケールの鍛造肌地への侵入数は、B 添加鋼は無添加鋼のほぼ 1/2 となる。

(2) スケールが侵入する深さについては、その確率分布は直線回帰とはならず、また、その分布は両鋼とも類似しており B の影響は認められなかった。

(3) 一方、スケール中の気孔の数、その径、および気孔が内在する層の厚さは、B の添加鋼では無添加鋼に比し明らかに小さく、スケールの構成状態に差異が認められる。

(4) 以上のスケールの鍛造肌地への侵入頻度、構成状態からみて、B の添加鋼の鍛造肌地の品質は一段と向上すると思われる。

文 献

- 1) Special Issue on Metal Finishing, *Tetsu-to-Hagané*, **72** (1986), 891–1212.
- 2) Special Issue on Surface Science and Technology, *Tetsu-to-Hagané*, **77** (1991), 861–1206.
- 3) 鉄鋼材料の組織と特性に及ぼすボロンの影響, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1999).
- 4) Y.Suzuki, K.Kyono and T.Katou: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 499.
- 5) T.Fukuzuka, T.Nakamura and H.Kawakami: *Bull. Jpn. Inst. Met.*, **19** (1980), 231.
- 6) 根本力男: 鉄鋼材料の組織と特性に及ぼすボロンの影響, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1999), 139.