

(論文)

ホットスカーフ溶削技術の高度化

Improvement of Bloom Surface Quality in the Hot Scarfing Process



多比良知秀*1
Tomohide TAIRA



小林正宜*1
Masanori KOBAYASHI



高岡克也*2
Katsuya TAKAOKA



宮崎庄司*2
Shouji MIYAZAKI

A hot scarfer is used to remove bloom surface defects in the blooming mill. To manufacture bar and wire rod products with a good surface quality, it is important to maintain the optimum operating conditions of the hot scarfer. The purpose of this study is to investigate the main factors causing uneven hot scarfing performance and to clarify the proper preheating conditions of the hot scarfer. A finite element fluid analysis has been conducted to calculate the mixing ratio of propane and oxygen at the bloom surface, and the a reasonable mixing ratio was estimated by comparing the calculated results and the actual bloom surface after the hot scarfing. This mixing ratio was applied in the actual operation of the hot scarfer and the satisfactory results have been achieved.

まえがき＝線材・棒鋼の高強度化および部品成形時の高加工度化が進められてきた結果、浅い表面疵（きず）であっても加工割れの破壊の起点となるようになってきた。そのため、表面疵に対する許容限度はますます厳格なものとなってきている。この割れリスクの低減のため、最終製品はもとより中間製品においても表面疵除去とその出来映え評価が重要なものとなりつつある。

ホットスカーフ（以下、HSという）は、線材・棒鋼の製造工程の中で、連続铸造したブルームから中間製品であるビレットを製造する分塊圧延工程に配置され、ブルームに存在する表面欠陥（脱炭層および表面疵）を溶削により除去するための設備である。これは、ミーリングなどの機械加工に比べて高い生産性を有することから広く用いられている。分塊圧延後のビレットの表面品質はHSの溶削の良しあしに大きく左右されるものの、HSでの溶削不良につながるメカニズムについて詳しく検討した事例はこれまでほとんどない。そこで、HSによる溶削不良の発生メカニズムと影響因子を調べることで、溶削不良を大幅に低減できるめどを得た。以下にその概要を述べる。

1. HS における溶削むら低減の考え方

図1に示すようにHS直後のブルーム表面には、ブルームの長手方向に平行な凹凸（溶削むら）が形成される。こうした溶削むらは、その程度によっては、HS後の分塊圧延において表面疵（図2）を発生させる原因になることがある。また、これらの表面疵には脱炭層が認められることから、HSによる溶削では元々ブルーム表面を覆っている脱炭層を完全に除去しきれない場合があることがわかる。したがって、分塊圧延後のブルーム表面疵を低減させるためには、HSの溶削深さを十分確保した上で、

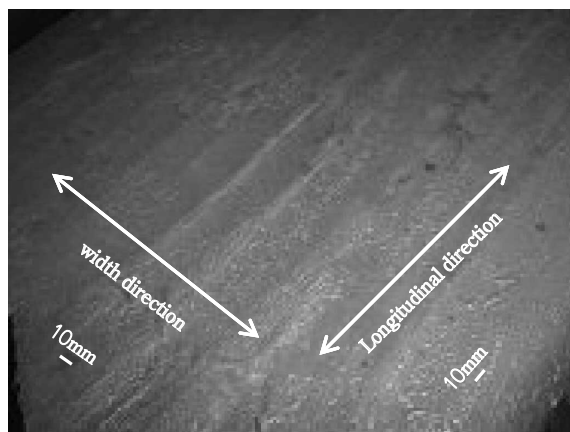


図1 HS後のブルーム表面
Fig. 1 Bloom surface after hot scarfing

No.	Surface	Cross section
1		
2		

図2 分塊圧延後のビレットの表面疵
Fig. 2 Surface defects of billet after blooming

溶削むらの小さい平滑な溶削面を実現させることが必要である。

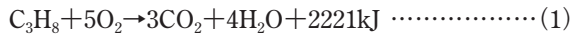
*1 鉄鋼事業部門 技術開発センター プロセス技術開発部 *2 鉄鋼事業部門 神戸製鉄所 線材条鋼圧延部

1.1 HSの溶削原理

HSの概略図を図3に示す。HSは、溶融鉄と酸素の熱化学反応によってブルーム表面層を削り取る設備であり、下記手順によってブルームの4面（上下面と両側面）を長手方向に沿って同時に溶削する。

手順1：ブルーム先端部の予熱

ブルームを停止した状態で火口（ひぐち）からプロパンと酸素を噴付けることにより（図4）、ブルーム先端部に溶融部を形成させる。このときのプロパンの燃焼反応を式（1）に示す。



手順2：ブルーム長手方向の溶削

ブルーム先端に溶融部を形成させた後、ブルーム全長の表面層を削り取るために、ブルームを火口方向に一定速度で搬送する。このときのプロパンと酸素の流量比は予熱時とは異なり、プロパンの流量を下げて酸素の流量が多くなるように設定する。これにより、式（2）に示す溶融鉄と酸素による酸化反応熱を発生させて継続的に溶削を進行させる。



1.2 HSにより生じるブルーム表面の溶削むら

HS直後のブルームの予熱を行った先端部（以下、予熱部という）、および溶削した長手方向位置（以下、溶削部という）における幅方向の溶削深さを測定した（図5）。この図から、溶削部より予熱部の方が深く溶削されていることに加え、予熱部と溶削部の凹部と凸部がそれぞれ

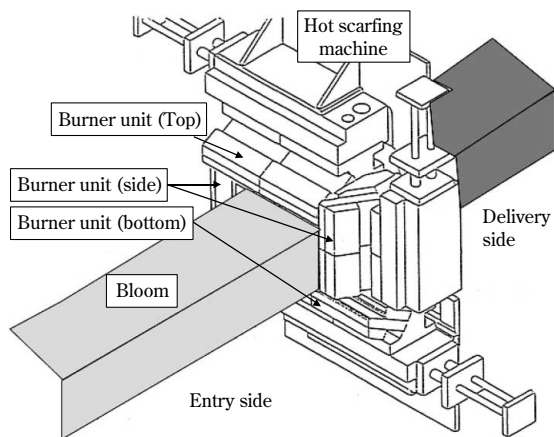


図3 ホットスカーフの概略図
Fig. 3 Schematic diagram of hot scarfing machine

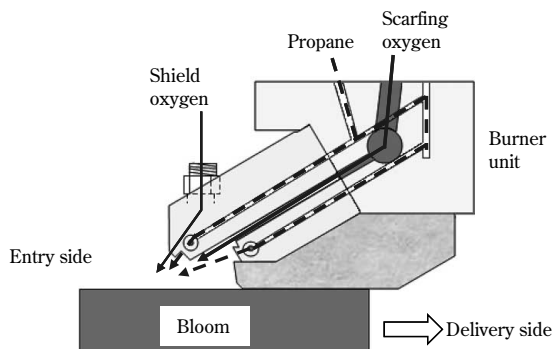


図4 火口の概略図
Fig. 4 Schematic diagram of burner unit

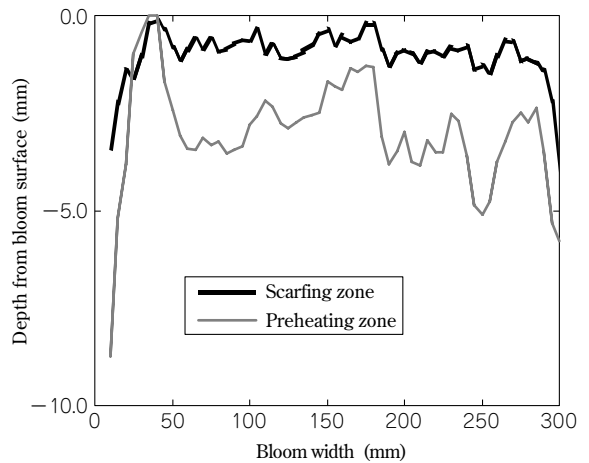


図5 ブルーム幅方向の溶削深さ分布
Fig. 5 Distribution of scarfing depth along width direction

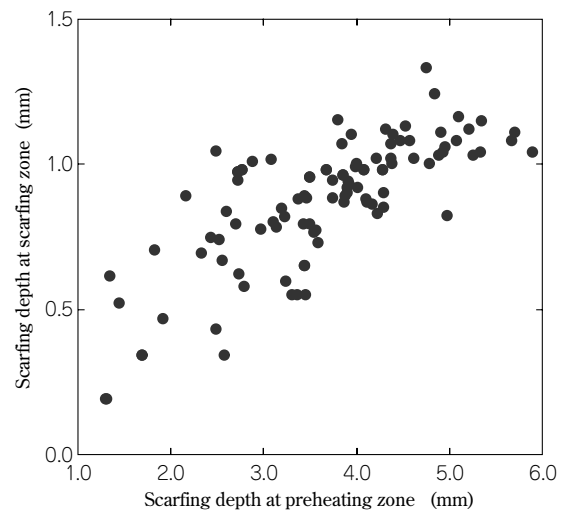


図6 予熱部と溶削部の溶削深さ
Fig. 6 Relationship between scarfing depth at preheating and scarfing zone

れ、幅方向位置においてよく対応することがわかる。また、予熱部と溶削部の溶削深さの対応関係は図6に示すとおりであり、予熱部の溶削深さの減少に伴って溶削部の溶削深さも減少する傾向が認められる。

1.3 溶削むら低減の考え方

HSにおけるブルーム表面の溶削深さには、予熱後の溶削時におけるブルームの搬送速度が影響することが従来から知られている¹⁾。

この知見に加えて、前節で述べた予熱部と溶削部の溶削深さの対応関係に着目すると、HSの前段で行う予熱作業が溶削の良否に大きく影響していることは明らかで、溶削面の健全性を確保するには、予熱時においてブルーム幅方向に均一な溶融部を形成する必要があるといえる。

2. HSにおけるプロパンと酸素の混合比分布と予熱時の溶削状態の対応

ブルーム先端部の予熱時には、ブルーム表面の溶融に式（1）に示したプロパンの燃焼熱を利用していることから、ブルーム幅方向のプロパンと酸素の流量分布、すなわちプロパンと酸素の混合比（以下、混合比という）の

分布が溶削状態に影響すると考えられる。

このため、実機のHS装置における混合比分布を有限要素法（以下、FEMという）解析で明らかにするとともに、それが溶削むらに及ぼす影響を実機実験によって調査した。

まず、火口から噴射されるプロパンと酸素のブルーム表面上での混合状態を明らかにするため、FEMによる流体解析を行った。解析には、FLUENT ver6.3を使用した。HS装置は、ブルーム断面を囲うようにプロパン、燃焼用酸素およびシールド用酸素の噴出ノズルを配置しており、これらのノズルはブルーム幅に対して余剰幅を持たせた設計となっている。FEM解析では対称性を考慮して1/4構造を対象にモデル化した（図7）。また、プロパンおよび酸素の圧力、ノズル配置幅をそれぞれ表1および表2に示す。また図8は、各流体の噴出ノズルのFEMモデルである。

このモデル化の妥当性を検証するため、実操業と同じ圧力条件で火口から流体を噴射させたときの流速分布をブルーム表面上で測定し、その測定結果と計算結果との比較を行った。図9にプロパンおよび燃焼用酸素の流速分布の実測値と計算値を示す。実測値と計算値はほぼ一致しており、解析モデルが妥当であるうえに十分な精度を有していることがわかった。

この解析モデルにより、実機における予熱時の各流体

表1 ガス圧力条件

Table 1 Condition of gas pressure

Status	Gas	Pressure (KPa)
Preheating	Propane	30
	Shield oxygen	180
	Scarfing oxygen	4
Scarfing	Propane	10
	Shield oxygen	30
	Scarfing oxygen	180

表2 ガスの噴射幅条件

Table 2 Condition of gas injection width

	Gas injection width (mm)	
	(a) Conventional	(b) Improved
Propane	Bloom width + 20	→
Shield oxygen	Bloom width + 70	Bloom width + 20
Scarfing oxygen	Bloom width + 50	Bloom width + 20

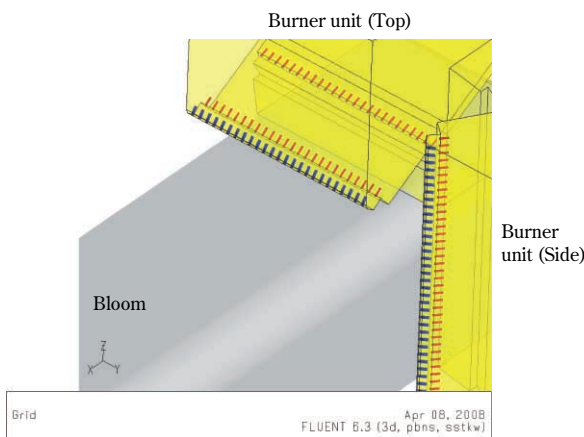


図7 FEM解析に用いた3次元モデル
Fig. 7 3 dimensional model for FEM analysis

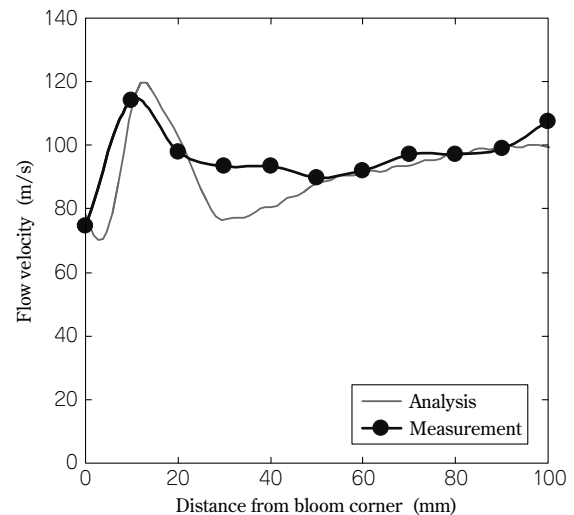


図9 ガス流速の解析結果と実測値の比較
Fig. 9 Comparison of gas flow velocity obtained by FEM analysis and experiment

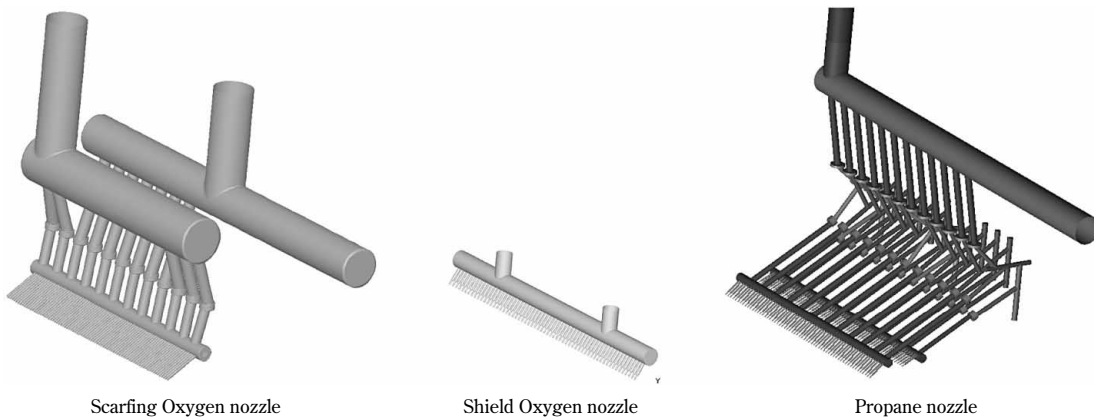


図8 FEM解析に使用したノズル形状
Fig. 8 FEM models of nozzles

の圧力条件(表1)での混合比分布を解析した。図10はその解析結果を示したものである。混合比はブルームの幅方向に様な分布となっておらず、ブルームコーナから30mm程度入った位置でピーク値を示している。一方、ブルームの幅中央付近の混合比は、プロパンと酸素が完全燃焼するときの理論混合比5.0(式(1))にほぼ等しくなっている。ブルームコーナから30mmの位置において混合比のピークが出現するのは、側面火口はプロパン・酸素ともにブルーム幅より広い幅でノズルを配置した設計となっており、さらに酸素のノズル配置幅はプロパンのそれよりも広いことから、酸素リッチな条件になるためと考えられる。

つぎに、混合比分布と溶削状態との関係を調べるため、表1の条件下でブルームを予熱したときに生じる溶削深さを測定した。図11に溶削深さの幅方向分布を示す。この図と図10を比較すると、溶削深さと混合比の間には密接な関係が認められ、混合比が理論値に近い位置で溶削深さは深く、逆に混合比が酸素リッチとなる位置で浅くなっている。この結果より、ブルームコーナ近傍を酸素リッチな状態にする原因と考えられる酸素の余剰ノズル配置幅を削減した条件(表2(b))で混合比分布の解析を行った。

図12にその結果を示す。従来のノズル配置幅では、ブルームコーナから30mmの位置において混合比のピーク

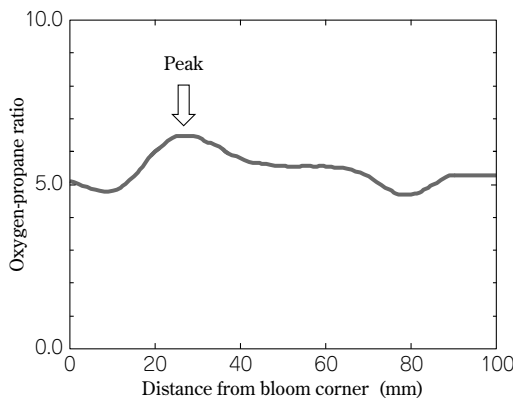


図10 混合比の計算結果

Fig.10 Analysis results of distribution of oxygen-propane ratio

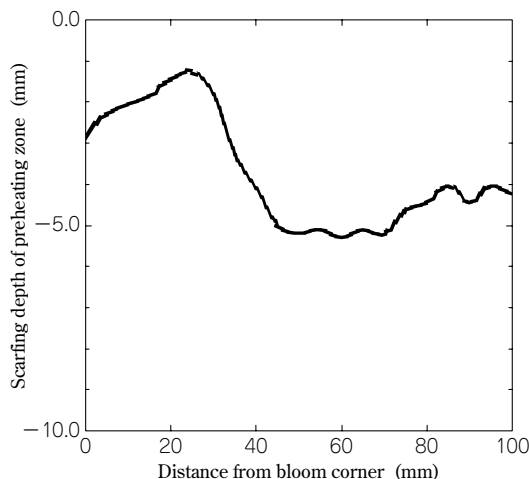


図11 ブルームコーナ近傍の溶削深さ

Fig.11 Scarfing depth near bloom corner

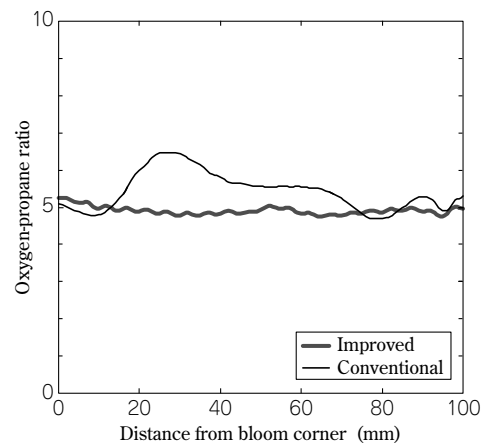


図12 混合比分布の改善結果

Fig.12 Improvement of oxygen-propane ratio distribution near bloom corner

が認められたのに対し、ノズル配置幅を縮小した場合はこのピークが消失し、混合比は解析領域の全幅にわたって5.0に近い分布となっている。この結果から、酸素の余剰ノズル配置幅を縮小することによってブルームコーナ近傍の溶削むらが改善できると考えられる。

3. 予熱部の溶削むら低減実験と考察

FEM解析の結果、混合比が予熱部の溶削深さに大きく影響を及ぼしていることがわかった。この結果を実機において検証し、そこから最適な溶削条件の導出を試みた。

実機における検証では、予熱時に火口に供給するプロパンの流量を固定して投入熱量を一定とした上で酸素の流量を変更し、混合比を3.8~6.0まで6段階に変化させて溶削を行った。このときの予熱部における溶削深さを測定することによって溶削むらの大きさを評価した。

図13に混合比と予熱部の溶削深さの関係を示す。同一面における溶削深さの最大値、最小値および平均値をプロットした。予熱部の溶削深さは、混合比が酸素リッチになるにしたがって減少する傾向を示した。

さらに、図13で示した溶削深さの最大値と最小値の差を溶削むらとし、混合比と予熱部における溶削むらの大きさとの関係を示したのが図14である。溶削むらの大きさは混合比が理論的な条件である5.0のときに最も小さくなり、そこから乖離(かいり)するにしたがって大きくなる傾向を示している。これは、混合比を変化させることによってブルーム表面における混合比の分布のばらつきが変化し、これが溶削深さの分布に影響を与えた結果と考えられる。

図14を見ると、混合比を5.0とすると溶削むらは小さくなるが、この条件においても4.0mm程度の溶削むらが存在する。この溶削むらは、ブルームコーナ近傍の溶削深さが浅いことに起因している。そこで、2章で述べた解析結果から得られた知見を基に、酸素ノズル配置幅の縮小によるブルームコーナ近傍における溶削むらの改善を実機実験によって試みた。このときの各ノズルの配置幅条件は、表2(b)とした。

従来のノズル配置幅の場合と改善後のノズル配置幅の

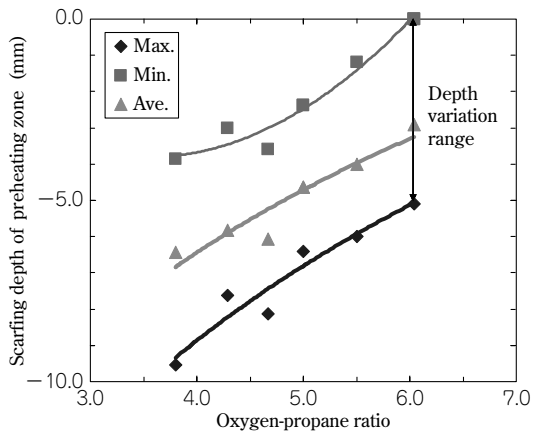


図13 予熱部の溶削深さと混合比の関係

Fig.13 Relationship between oxygen-propane ratio and scarfing depth at preheating zone

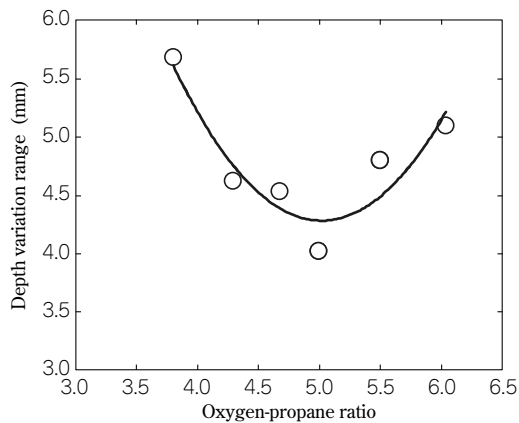


図14 予熱部の溶削むらの大きさと混合比の関係

Fig.14 Relationship between oxygen-propane ratio and depth variation range at preheating zone

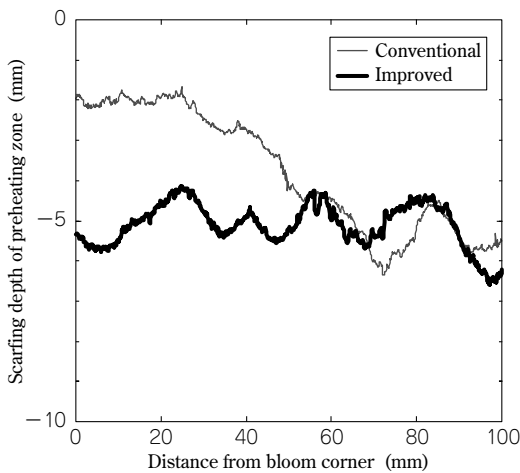


図15 ブルームコーナ近傍における溶削深さの改善結果

Fig.15 Improvement of scarfing depth distribution near bloom corner

場合での予熱部における溶削深さを図15に示す。前述のように従来は、ブルームコーナ近傍に生じる浅い溶削が溶削むらの大きな原因となっていた。一方、酸素ノズル配置幅を縮小したものでは、ブルームコーナ近傍の溶削深さは平面部と同等となり溶削むらは改善された。これは、余剰酸素ノズル配置幅の縮小によって、ブルームコーナ近傍での酸素リッチな状態が解消された結果で

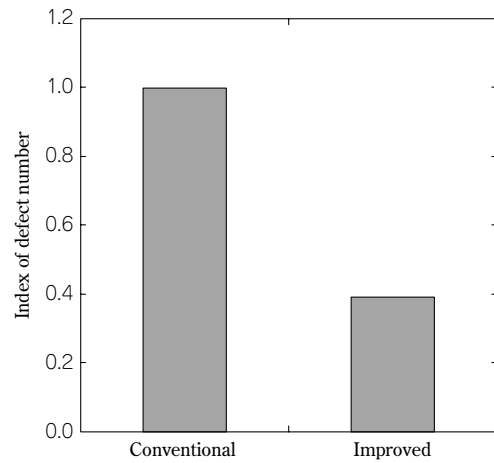


図16 表面疵の改善結果

Fig.16 Improvement of surface defects

あると考えられる。

このように、酸素リッチな状態となることによって予熱部における溶削深さが減少するのは、プロパンの燃焼に寄与しない過剰な酸素が存在する領域では、その過剰な酸素によって加熱部が冷却されるためと考えられる。

以上の実験結果および予熱部の溶削状態の良否がブルーム全長の溶削むらと密接な関係にあることを勘案すれば、一定量の溶削深さを確保しつつ溶削むらの少ない平滑な溶削面を得るためには、予熱時における混合比を5.0程度に設定した上で、ブルーム表面における混合比分布も5.0程度となるようにプロパンおよび酸素の流量分布を均一化させることが重要である。

実験で得られた知見を実機に適用した結果、現在では分塊圧延後のビレットにおける表面疵の発生が大幅に抑制されている(図16)。

むすび＝鋼片疵の発生原因となる溶削むら形成メカニズムの検討を行い、以下のような知見を得た。

- (1) 溶削むらは、HSの初期プロセスである予熱時に形成されたむらが解消されずに残存したものである。
- (2) 予熱部におけるむらは、酸素/プロパンの混合比が理論値よりも酸素リッチとなった箇所の溶削深さが減少することによって起こされる。
- (3) 一定量の溶削深さを確保しつつ平滑な溶削面を得るための最適な溶削条件は、予熱時におけるプロパン/酸素の混合比を理論値である5.0程度とし、混合比分布が均一となるようにブルームに噴射することである。

今回、ブルームコーナ近傍のむらは改善できたものの、平面部のむらの改善は残された課題であると認識しており、これらの知見を基に改善に取り組む所存である。

参考文献

- 1) 人見康雄ほか：鉄と鋼, Vol.78 (1992)-T137.