

# 連続鋳造後のブルームの適正冷却条件

北出 真一 \*1・加藤 恵之 \*1・神吉 保宗 \*2・塗 嘉夫 \*3

Suitable Cooling Conditions at Bloom Surface after Continuous Casting  
Shin-ichi Kitade, Yoshiyuki Kato, Yasumune Kanki and Yoshio Nuri

Synopsis: In order to make clear the effect of cooling conditions at bloom surface after continuous casting on surface defects, this study was carried out. Cooling rates were continuously measured using K thermocouples welded on bloom surface. The results obtained were as follows :

- 1) When austenite grain size at starting cooling is large, the critical cooling rate of transformation from austenite to ferrite-pearlite was small and the martensite starting temperature was high.
- 2) The lower the cooling start temperature became, the larger the cooling rate at bloom surface resulted. This may be owing to an increase of the heat transfer coefficient.
- 3) The relation between surface defects and cooling rates at bloom surface were recognized. Surface defects of billets were substantially decreased with an increase of cooling rate. This may be because bloom surface was more uniformly cooled at higher cooling rate.

Key words: continuously cast bloom; continuous cooling transformation diagram; austenite grain size; microstructure; hardness; bainite; martensite; critical cooling rate.

## 1. 緒言

連続鋳造ブルームの表面欠陥の発生は、鋳型内、二次冷却帯および連鑄機外の冷却条件の影響を大きく受けることは良く知られている。特に合金鋼は普通鋼に比べ、合金元素を多く含むため凝固・冷却時に溶質元素の濃化が起こり、炭化物や窒化物、硫化物を生成する。そのため粒界脆化が起こり、連続鋳造、分塊、製品圧延過程で表面疵が発生しやすい。この内、分塊圧延後に見られる表面欠陥は加熱炉挿入前のブルームの組織に大きく依存することから、ブルーム組織の制御技術は重要である。

しかしながら、連続鋳造後のブルームの加熱炉挿入までの冷却時の冷却条件とブルーム組織、ならびに疵発生との関係については必ずしも明らかにされていない。そこで本報では、連続鋳造後のブルームの適正冷却条件を明らかにするために、オーステナイト結晶粒径が大きい状態から冷却を開始するCCT曲線 (Continuous Cooling Transformation Diagram) を作成するとともに、二、三の実機冷却試験を行い、疵を低減する為の冷却条件を検討したので報告する。

## 2. 試験方法

### 2・1 CCT曲線の作成

#### 2・1・1 供試材

供試材を実機のブルーム (断面490×380mm) から採取した。試料の大きさは直径3mm、長さ10mmである。供試材はクロムモリブデン鋼鋼材 (SCM420) であり、その化学成分をTable 1に示す。

#### 2・1・2 加熱パターンと冷却速度

試験には自動変態点測定装置を用いた。用いたヒートパターンをFig.1に示す。すなわち、1613Kまで120sで加熱しその温度で600s保持した後、0.18K/sで1173Kまで冷却し

Table 1. Chemical compositions of material used. (mass %)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni
0.22	0.23	0.80	0.023	0.013	0.16	0.08
Mo	Cr	sol. Al	N			
0.15	1.05	0.031	0.0138			

\*1 技術研究所プロセス研究室

\*2 製鋼部製鋼技術T (現:東京営業部営業技術室)

\*3 技術研究所プロセス研究室, 工博

た。1613Kの温度に保持したのはブルームの初期凝固組織に近い組織を得るためであり、これ以上の高温に保持すると試験片の一部が熔融するからである。1173Kからの冷却速度は、0.05, 0.2, 0.6, 1, 2, 3, 5, 10, 20, 50, 70, 100, および200K/sである。

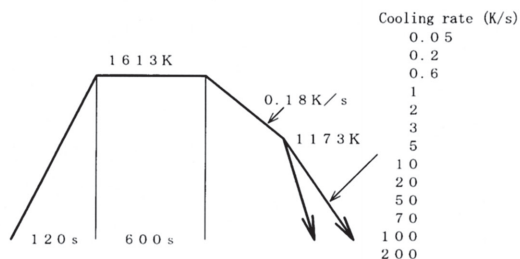


Fig.1. Cooling pattern adopted for continuous cooling transformation diagram.

## 2・2 ブルーム冷却時の連続測温試験

### 2・2・1 試験条件

試験条件をTable 2に示した。実機でのブルーム表面温度の測定を、ブルームの広面上面中央部、側面中央部およびコーナー部で行った。上面の冷却水量密度は、 $4.91 \times 10^{-4}$ ,  $5.57 \times 10^{-4}$ ,  $6.16 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ の3条件であり、さらに鋳造開始からガスカッターまでの到達時間も鋳造速度を変えることによって変化させ、ブルーム冷却開始前でのブルーム表面温度を制御した。

### 2・2・2 測温方法

ブルームの表面温度をFig.2に示したように、直接ブルームの表面に熱電対を溶着して測定した。溶着にはスタッド溶接機および溶接銃を用いた。熱電対はシース部が10m, 補償導線部が10m, 計20mのKタイプである。また、赤外線温

度解析装置によりブルームの表面温度分布も一部測定した。

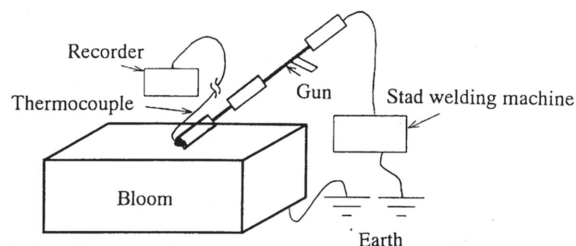


Fig.2. Welding procedure of the thermocouple used to measure for temperature of bloom surface.

### 2・2・3 組織観察法

ブルーム表面の組織観察位置をFig.3に示した。広面、側面部をできるだけ広く観察できるように試料を採取した。研磨後、3%ナイトールで約15秒エッチングを行い、光学顕微鏡により組織観察を行った。

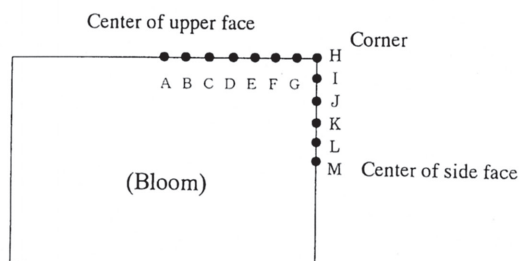


Fig.3. Positions for observation of microstructures of bloom surface.

### 2・3 ビレット疵の評価方法

表面疵の評価には、圧延後のビレットの超音波探傷(UST)検査法を用い、USTのチャートから5dBと7dB以上の波数を読みとり、それをUST欠陥指数として用いた。

Table 2. Experimental conditions and results obtained.

Experimental No.	Water pressure (kgf/cm <sup>2</sup> )		Specific water volume ( $\times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )		Cooling start temperature (K)			Cooling rate (K/s)			
	Upper	Side	Upper	Side	Upper	Side	Corner	Ave.	Max.		
1	3	3	4.91	7.36							
2								1101		39.9	115
3								1143		12.4	102
4	4	5	5.57	9.25		1013		19.0	128		
5							1103		65.7	144	
6											
7	5	4	6.16	8.36				1083	86.4	235	
8							1093		91.1	225	
9							1143		73.8	181	
10							1101	973	56.5/61.1*	215/245*	
11					1013		45.8	255			
12	4	4	5.57	8.36							
13						988	893	33.2/61.4*	90/310*		
14						1013	933	76.6/84.2*	193/167*		

\* : Upper number shows the cooling rate at upper part of bloom surface.

Lower number shows the cooling rate at side or corner of bloom surface.

### 3. 試験結果

#### 3・1 CCT曲線

連続鋳造時におけるブルームの冷却速度を考慮してCCT曲線を作成した（オーステナイト化条件：1613K, 600s, オーステナイト結晶粒度番号；-2~-3）。その結果をオーステナイト化条件が1198K, 1200s, オーステナイト結晶粒度番号7のCCT曲線とともにFig.4に、また試験片の組織をFig.5に示した。これら二つのCCT曲線を比較すると、ブルームの組織に近い試験片より作成したCCT曲線はオーステナイト結晶粒径が小さい試験片より作成したそれに比し、フェライトの析出領域が低冷却速度側に移動していることが分かる。これはフェライトの核発生と成長はオーステナイトの結晶粒界で優先的に生じることと、オーステナイト結晶粒径が大きい場合、ブルームに占める粒界の体積率が小さくなるためフェライトの核形成サイトが減少するためであると考えられる。また、マルテンサイト変態開始（Ms）点も高温側に移動していることが分かる。

イト結晶粒径が大きい場合、ブルームに占める粒界の体積率が小さくなるためフェライトの核形成サイトが減少するためであると考えられる。また、マルテンサイト変態開始（Ms）点も高温側に移動していることが分かる。

#### 3・2 ブルーム冷却時の連続測温結果

##### 3・2・1 冷却速度

測温結果をTable 2に併示した。この結果から、ブルームの最表面の最大冷却速度は100~300K/sと大きく、Fig.4-A)のCCT曲線から明らかなようにマルテンサイトあるいはベイナイト変態するのに十分な冷却速度になっている。また、平均冷却速度も10~100K/s程度であり、マルテンサイトあるいはベイナイト変態するのに十分な大きさである。ここで、平均冷却速度とは、ブルームの表面温度が423Kまで冷却される間の平均的な冷却速度で

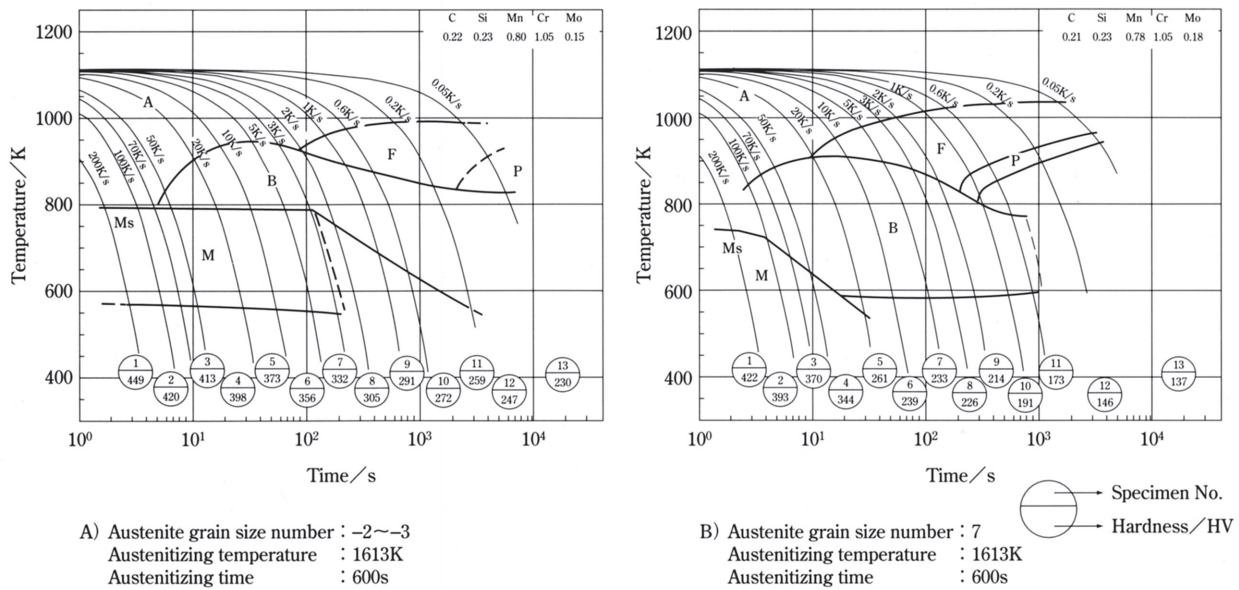


Fig.4. Effect of austenite grain size on the continuous cooling transformation diagram.

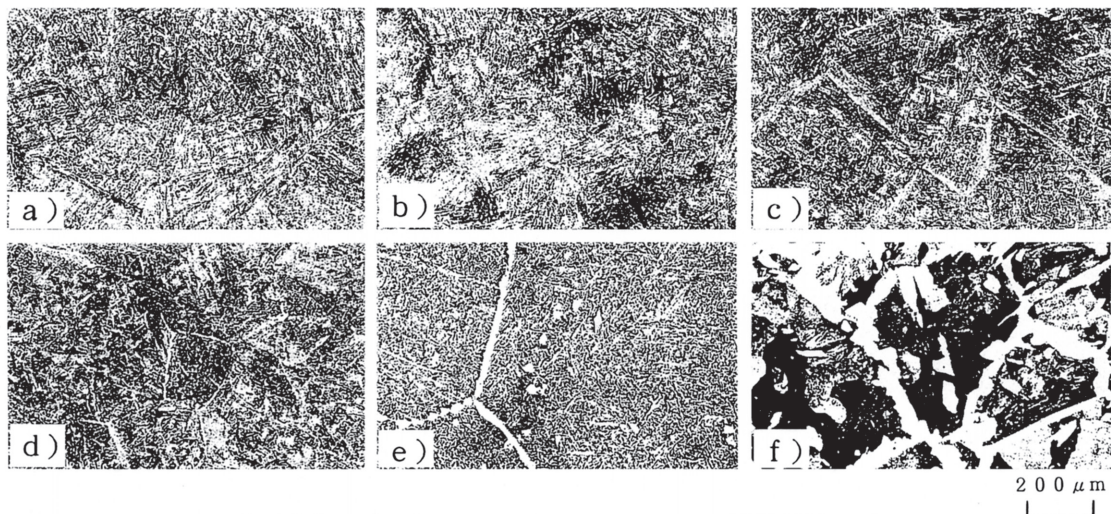


Fig.5. Effect of cooling rate on the microstructures of SCM420 steel.

- a) Cooling rate : 100K/s, No. 2 specimen
- b) Cooling rate : 30K/s, No. 5 specimen
- c) Cooling rate : 7K/s, No. 7 specimen
- d) Cooling rate : 2K/s, No. 9 specimen
- e) Cooling rate : 0.2K/s, No. 12 specimen
- f) Cooling rate : 0.05K/s, No. 13 specimen

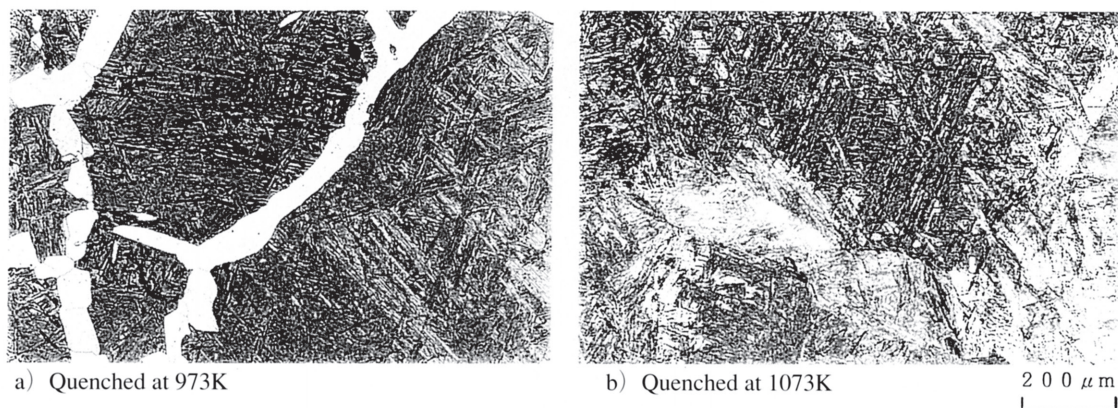


Fig.6. Effect of starting cooling temperature on the microstructures of the bloom surface.

ある。しかし、冷却開始前の温度が低い場合にはフェライトが析出し始めるので、そこから急冷するとフェライト+マルテンサイトあるいはフェライト+ベイナイトの組織となり、冷却による粒界割れや、その後の昇温過程でAINがオーステナイト粒界に析出する恐れがある<sup>1~4)</sup>。このフェライトの析出温度は、Fig.4-A)のCCT曲線の0.2K/sの冷却速度から判断すると約980Kである。実際に自動変態点測定装置によって1073Kから急冷した試験片と、973Kから急冷した試験片の組織を比較したところ、Fig.6に示すように1073Kから急冷したものはマルテンサイト組織であるが、973Kから冷却するとフェライト+マルテンサイト組織であることが分かる。

冷却速度におよぼす冷却開始前のブルームの表面温度と冷却水量密度の関係をFig.7に示す。冷却速度は冷却開始前温度が低いほど大きくなる。この理由は、本実験範囲においては、冷却開始前温度が低いほど、熱伝達係数が増加するためと推定される。また水量密度が大きいほど冷却速度は大きくなることが分かる。

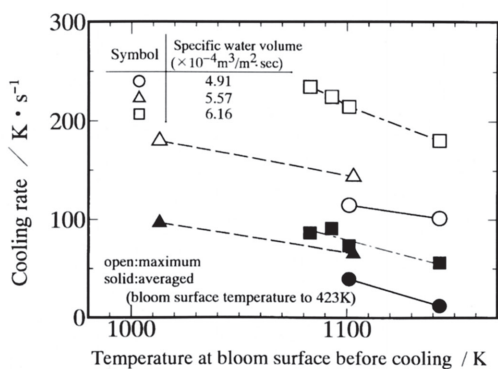


Fig.7. Effects of temperature before cooling and specific water volume at bloom surface on cooling rate.

### 3・2・2 冷却速度とブルームのミクロ組織

冷却速度とブルームのミクロ組織の関係をFig.8に示す。冷却速度の大きい方がブルームのコーナー部と上面中央部のいずれも旧オーステナイト粒径が小さくなっていることが分かる。また、その組織に着目すると、冷却速度の大き

い方がブルームのコーナー部と上面中央部の組織のバラツキは小さいように見える。また、コーナー部では冷却開始前温度が低いためフェライトが析出しているが、各面中央部ではフェライトが析出していないことも分かる。

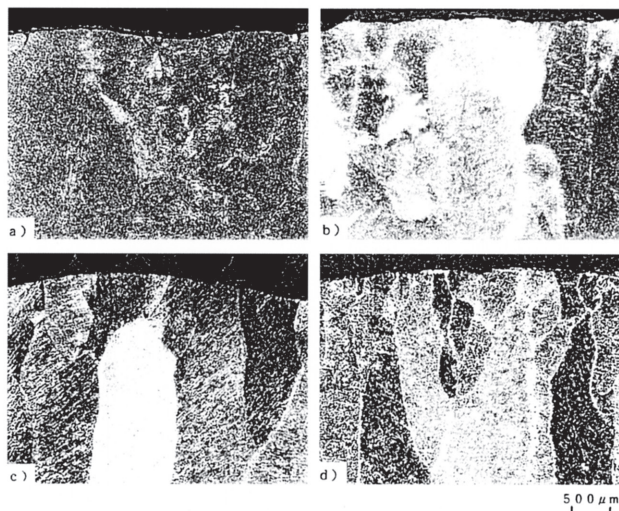


Fig.8. Effect of cooling rate on the microstructures of middle of wide surface and corner surface of bloom.

- a) Middle of wide surface, Average cooling rate=39.9 K/s
- b) Middle of wide surface, Average cooling rate=91.1 K/s
- c) Corner surface, Average cooling rate=61.1 K/s
- d) Corner surface, Average cooling rate=61.1 K/s

## 4. 考察

### 4・1 ブルームの冷却速度を想定したCCT曲線と従来のCCT曲線との相違

3・1で述べたように、連続鋳造ブルームの冷却速度を想定して作成したCCT曲線と従来のCCT曲線には主に2つの相違点が見られた。すなわち、前者は後者に比べフェライト析出領域が低冷却速度側に、またMs温度が高温側に変化していた。前者の理由については前述した通りであるが、ここではMs温度が高温側に化する現象を取り上げる。

二つのCCT曲線の作成条件の相違点はオーステナイト結晶粒度番号と化学成分の違いである。Fig.9に(1)式

$$M_s (^{\circ}C) = 550 - 350 \times C\% - 40 \times Mn\% - 35 \times V\% - 20 \times Cr\% - 17 \times Ni\% - 10 \times Cu\% - 10 \times Mo\% - 5 \times W\% + 15 \times Co\% \quad \dots (1)^5$$

を用いてその成分から計算したMs温度およびCCT曲線から決定したMs温度とオーステナイト結晶粒度番号の関係を示した。

当然のことながら、計算式には粒度番号は考慮されていないので粒度番号が変わってもMs温度はほとんど変化しない。しかし、Ms温度が成分のみの影響を受け、オーステナイト結晶粒径の大きさの影響を受けないならば、図中のオーステナイト結晶粒度番号7~8における実測値の差は、成分の変化による計算値のその差と同程度になるはずである。しかし、実測値における差はかなり大きい。また粒度番号-3の場合の実測値は793Kとかなり高くなっている。以上のことから、これらの原因はオーステナイト結晶粒の大きさはMs温度に影響をおよぼし、結晶粒径が大きくなるとMs温度が上昇するからであると考えられる。

つぎにオーステナイト粒径の増大とともにMs温度が上昇する理由を考察する。

オーステナイト化温度が高いほどMs点は高いという事実はA.S.Sastriら<sup>6)</sup>によって報告されている。Fig.10はその一例で、オーステナイト結晶粒径も点線で示すように大きくなる。同様な結果は、この研究の前にも今井ら<sup>7)</sup>によっても得られている。この理由について西山<sup>8)</sup>は、高温加熱による格子欠陥の除去が変態における補足変形に要するエネルギーを小さくしてMs点を上げるはずである、と述べている。

上述の内容は加熱熱処理時の現象であるが、連続鋳造のように凝固冷却時の現象に適用できるかどうかは定かではなく、今後の検討課題の一つであろう。

以上に述べたように、冷却開始時のオーステナイト粒径が大きくなりMs温度が上昇すると、冷却後のブルームの温度を高く保ち、注水時間も短縮することができるのでエネルギー面からは有利な冷却方法となろう。このことから、Ar<sub>3</sub>変態点直上の冷却開始時の最適オーステナイト粒径の検討も今後重要と考えられる。

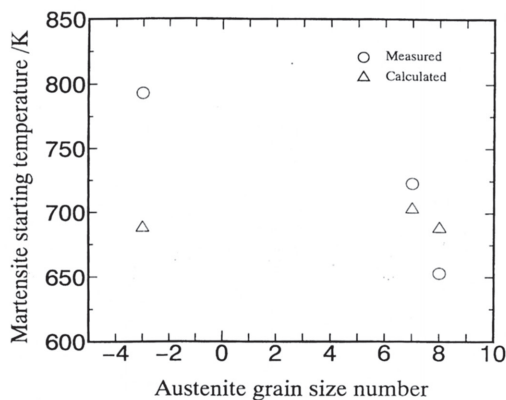


Fig.9. Relation between martensite starting temperature and austenite grain size number.

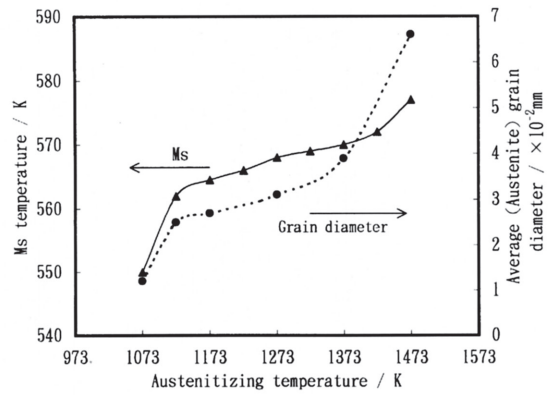


Fig.10. Variation of Ms with austenitizing temperature for medium-alloy steel (Ni-Cr-Mo)<sup>7)</sup>.

#### 4・2 冷却条件とビレット疵

ここでは、表面疵におよぼす冷却条件の影響について述べる。Fig.11はUST欠陥指数と水量密度の関係について示したものである。水量密度が少ない場合はビレットにUST欠陥が発生しやすいことが分かる。冷却速度はFig.7に示したように水量密度が $4.91 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ であっても組織をマルテンサイトあるいはベイナイトにするのに充分であるので、ブルームの表面欠陥の程度を支配するのはブルームの組織だけでなく、冷却速度の相違によるブルームの幅方向の組織変化に起因する現象が関係しているものと考えられる。冷却開始前と冷却開始後のブルーム表面温度の幅方向の変化を赤外線温度解析装置により測定した一例をFig.12に示した。ブルームの幅方向中央部とコーナー部とはかなりの温度差があり、コーナー部と幅方向中央部では冷却速度がかなり異なることが分かり、これがブルーム幅方向の組織の不均一の原因の一つであると考えられる。

Fig.8に示したような幅や厚み方向のブルーム組織の差を数値で表すのは困難であるため、ブルームの硬さを用いてそれらの評価を行うことにした。その結果を指数表示してFig.13に示した。これより明らかなように、水量密度が小さいほど上面中央からコーナー部にかけての組織の変化が大きい。

このブルームのコーナー部と上面中央部の硬さの測定結果から幅方向の変化を回帰分析するとTable 3に示したようになる。上面の水量密度が $6.16 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ の場合、その勾配は0.0022となり、水量密度が小さいほど大きくなっていることが分かる。このことが表面割れの一因となる結晶粒の粒界に加わる歪量を局所的に大きくし、割れを発生させやすくしたのではないかと考えられる。

表面疵の発生がFig.13に示したような組織差で議論可能であれば、さらに疵を低減させるには水量密度の増加が望ましいと言える。ちなみにその値は水量密度が $6.16 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ の場合を基準にとると、水量密度で1.08倍、数値解法で算出した熱伝達係数<sup>9)</sup>では1.16倍程度と推定される。

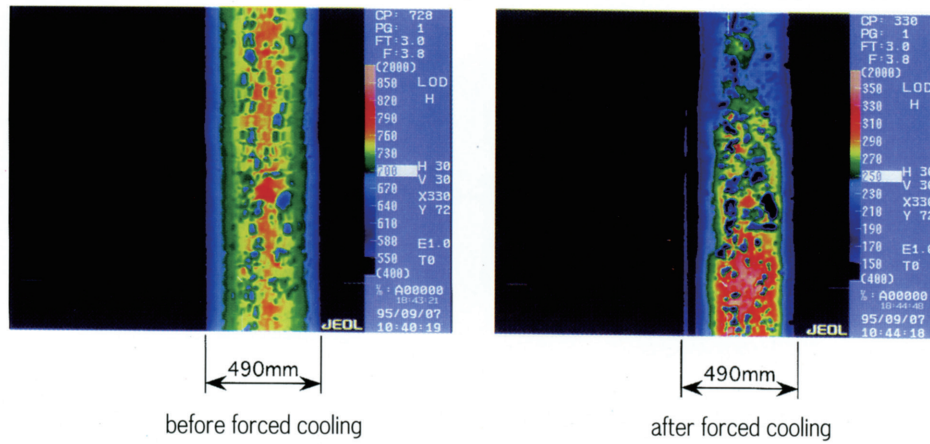


Fig.12. Temperature distribution on bloom surface measured by an infrared radiation thermometer.

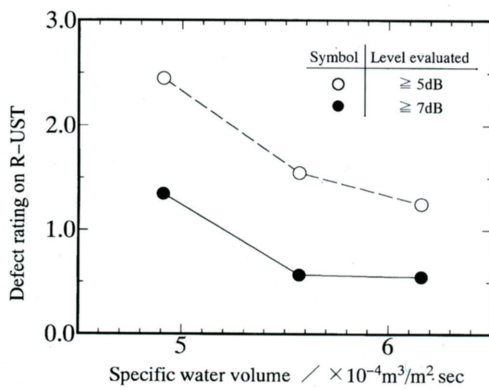


Fig.11. Relation between surface defects of billets and specific water volume.

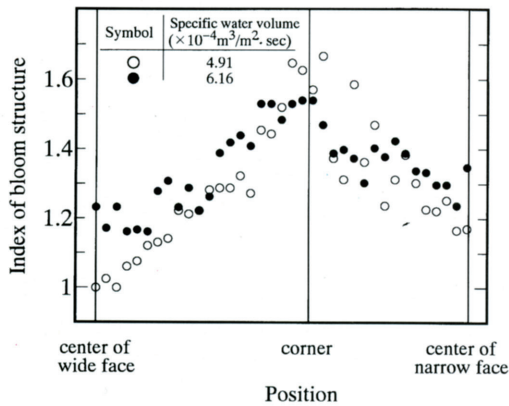


Fig.13. Effect of specific water volume on indices of bloom structure estimated by hardness.

Table 3. Results of regression analysis of specific water volume on the microstructure variation estimated by hardness.

Specific water volume ( $\times 10^{-4} \text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{sec}$ )	Linear regression	Correlation coefficient
4.91	$Y=0.0032X+0.9646$	0.9644
5.57	$Y=0.0030X+0.9822$	0.9070
6.16	$Y=0.0022X+1.1303$	0.9162

Y : Microstructure indices estimated by hardness,  $\text{mm}^{-1}$   
 X : Distance from center of wide face to corner part of bloom, mm  
 Bloom :  $490 \times 380 \text{mm}$

## 5. 結言

連続鋳造されたブルームより圧延したピレットの表面欠陥に及ぼす連続鋳造後のブルーム表面の適正冷却条件を明らかにする為に、本研究を実施した。得られたおもな結果は以下の通りである。

- 1) 冷却を開始する時のブルームのオーステナイト結晶粒径が大きいほど、オーステナイトからフェライト・パーライトへ変態する時の臨界冷却速度は小さくなる。
- 2) ブルームの表面の冷却速度は冷却開始前温度が低いほど大きくなる。この理由は、冷却開始前温度が低いほど、熱伝達係数が増加するためと推定される。
- 3) ブルームの表面の冷却速度が大きくなるほど、圧延ピレット表面の欠陥の発生は減少する。この理由は、ブルームの表面の各部分がより均一に冷却されるためではないかと推定される。

## 文献

- 1) 山川真一郎, 拓殖敏行, 花田 健 : 材料とプロセス, 6 (1993), 1188.
- 2) 愛知製鋼 : 私信, (1995)
- 3) 橋本康裕, 鈴木功夫, 菅原 健, 石山和雄, 杉本要一, 佐藤 洋, 伊藤誠司 : CAMP-ISIJ, 7 (1994), 309.
- 4) 新日本製鐵 室蘭製鐵所 : 私信, (1995)
- 5) 鋼の熱処理改訂5版, 日本鉄鋼協会編, 丸善, 東京, (1969), 51.
- 6) A.S.Sastri and D.R.F.West : J.Iron Steel Inst., 203 (1965), 138.
- 7) 今井勇之進, 泉山昌夫 : 日本金属学会誌, 21 (1957), 437.
- 8) 西山善次 : マルテンサイト変態基本編, 丸善, 東京, (1971), 221.
- 9) 化学工学便覧改訂四版, 化学工学協会編, 丸善, 東京, (1978), 268.