

論 文

UDC 669.14-412 : 621.745.5 : 620.192.34 : 669.046.55 : 669.046.548 : 669.26

大型キャップド鋼塊の健全な肌性状について*

和田 要**・福田 正博**・荻林 成章**

Sound Surface Quality of Large Capped Steel Ingot

Kaname WADA, Masahiro HUKUDA, and Shigeaki OGIBAYASHI

Synopsis:

To decrease skin blowholes and get a sound surface quality, the effects of deoxidation degree and chromium addition on the size and distribution of blowholes in the rim zone were studied.

The results obtained are as follows;

1. The thickness of solid skin and the distribution of blowholes in the rim zone are greatly influenced by the balance of carbon, manganese, and oxygen in liquid steel.

2. It is believed that the thickness of solid skin is required at least 17 mm to prevent seamy defects of slab. The next relation is obtained as the condition of deoxidation to keep the thickness of solid skin larger than 17 mm.

$[C] \cdot [O] - 0.56 [Mn] \geq 0.0182 v - 5, 135$ Where, $[C]$, $[O]$, $[Mn]$: content in liquid steel (10⁻²%)
 v : teeming rate (mm/min)

3. Chromium addition is effective to decrease the number and size of blowholes in the rim zone. It is considered that this phenomenon is based on the decreasing of surface tension by chromium addition.

1. 結 言

当所では大型転炉による生産性の向上と需要家の要望する大型成品供給の両者を満足させるため、鋼塊の大型化をはかり最大 40 t までの鋼塊を生産している。一般に鋼塊が大きくなると内質が不均一になりやすいので大型鋼塊では内部性状をいかにして健全に保つかが問題であるとされている。

ストリップ用鋼塊の大型化に関しては、当所建設時に広範囲な研究が行なわれ、溶鋼の S % を低くする、キャップド鋼とするの二対策をとることにより、頭部偏析や底部コアの巨大介在物が問題となることなく、40 t 級の大型鋼塊から従来材と同程度または、それ以上の材質を有する製品が製造できるとの見通しが得られ、その結果が、今日の当所大型鋼塊の基礎となつている。

しかしながら、キャップド鋼塊はリムド鋼塊に比し、鋼塊肌近くに針状気泡が発生しやすく表面性状が悪化するなどの傾向があり、これの改善が望まれていた。著者らは大型キャップド鋼塊の製造技術確立を目的とし、当所立上り以降も種々の試験を行なつてきた。本報告はこれら一連の試験から、大型キャップド鋼塊の、特に肌の性状に及ぼす脱酸条件ならびに溶鋼性状の影響に関する

調査結果をまとめ若干の考察を加えたものである。

2. 大型キャップド鋼塊の性状

2.1 40 t 低炭キャップド鋼塊の切断調査

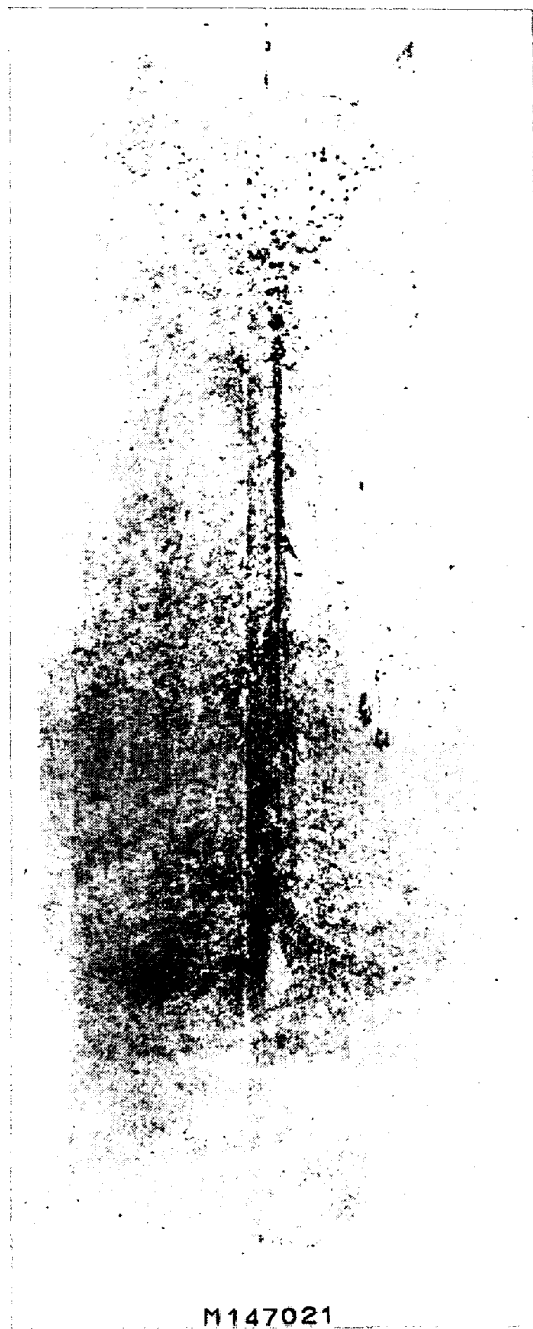
実用大型キャップド鋼塊の例として、当所立上り時に製造した 40 t 低炭キャップド鋼塊の縦断面サルファープリント、およびマクロ組織を Photo. 1 に示す。切断鋼塊の鑄型デイレメンションならびに製造記録は Table 1, Table 2 に示すとおりである。通常リムド鋼に比べ C %, S % をかなり低目に管理している。鋼塊の頭部濃厚偏析に及ぼす型抜時間、トラックタイムの影響を考慮し、切断鋼塊は他の通板鋼塊と同じ凝固条件になるよう均熱炉より抽出した後冷塊にした。Photo. 1 にみられる鋼塊上半部の凹みは均熱炉装入および抽出時のポンチ疵である。

Photo. 1 でみられるごとく、頭部濃厚偏析は比較的軽度で、かつ偏析帯の厚さが 2 次パイプ周辺に薄く限定されており良好なマクロ組織を呈している。鋼塊中心線上の C, S の偏析度を調査したが、C, S の最大偏析度は 2.0 ならびに 4.4 と小さく良好であった。

鋼塊底部リム層の気泡状況を Photo. 2 に示す。ソリッドスキンの厚さは 25~30 mm あり十分に厚いが、ソ

* 昭和 51 年 2 月 16 日 (Received Feb. 16, 1976)

** 新日本製鉄(株)君津製鉄所技術研究室 Kimitsu Works, Nippon Steel Corp., 1 Kimitsu Kimitsu 299-11)



M147021

Sulfur print



M147021 X1/20

Macrostructure

Photo. 1. Vertical section of low carbon capped ingot (40 t).

Table 1. Mould dimension

Mould	Inner dimension (mm)		Height (mm)	Flatness (Ratio of width to thick- ness)
	Bottom section	Top section (At the shoulder)		
MBP 40	1 068 × 2 375	992 × 2 325	Shoulder line 2 500 Total 2 850	2.28

リッドスキン内に細い針状気泡が発生しており表面性状は良好でない。これは低炭キャップド鋼塊の特徴と考えられ、直接には大型鋼塊の特異現象とはいえないが、後述するように大型キャップド鋼塊では材質の点から目標 C% を低くせざるを得ないので、結果的には大型キャップド鋼の特性とみられる。

また、スライム抽出法により鋼塊内の大型介在物を調査した。鋼塊底部のリム、コア境界ならびにコア部に大型介在物が多いが、大半は 250 μ 以下の径のもので

Table 2. Characteristic data on the ingot of which vertical section was examined.

Ladle analysis					Ladle temp.	Al added in ladle	Teeming rate	Shot Al added in mould	Capping time	Track time
C %	Si %	Mn %	P %	S %						
0.052	0.00	0.33	0.007	0.012	1 554 °C	180 g / t	615 mm / min	0	7.5 min	300 min

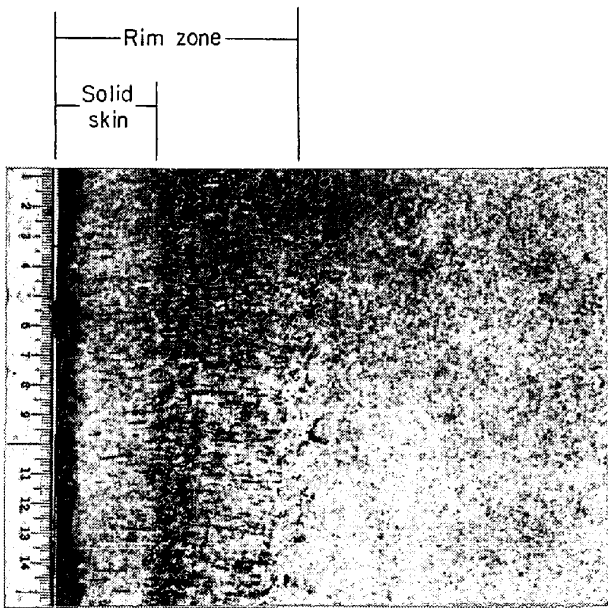


Photo. 2. Macrostructure of vertical section showing the distribution of blowholes at the bottom part of ingot. (scale 1/2) (×13/20)

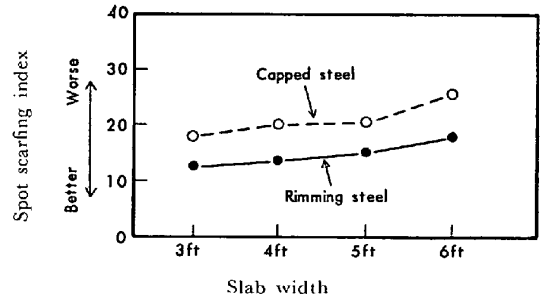


Fig. 1. Comparison of the surface quality between rimming and capped steel slabs.

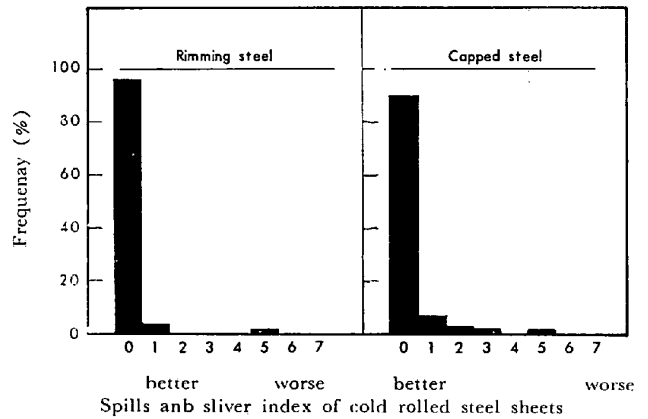


Fig. 2. Comparison of the surface quality between rimming and capped steel coils.

あり、リムド鋼塊の場合にみられる径 450μ 以上の介在物は非常に少なく、従来の研究結果²⁾³⁾と一致している。

2.2 スラブおよび成品板の性状調査

キャップド鋼塊およびリムド鋼塊から製造したスラブおよび成品板の表面性状、C%とO%の関係について大量の比較調査を行なった。対象鋼塊はリムド鋼が18~32t、キャップド鋼が20~40tであり、鋼種は自動車用冷延鋼板に限定し、かつ取鍋目標C%は一定とした。

Fig. 1にスラブ手入成績を示し、Fig. 2に成品板のへげ、スリバー疵成績を示す。両者ともにキャップド鋼がリムド鋼より劣っている。スラブ表面疵は鋭利な刀物で切開したような長さ20~30mmの線状疵で、疵部にはFeOが認められたことから、他の報告⁴⁾にもあるごとく鋼塊肌近くの気泡の酸化末圧着疵であると考えられる。また、成品板のへげ、スリバー疵も顕微鏡観察するとFeOのみ観察されるものが多く、スラブ線状疵の残留に起因する疵が主体のようである。

成品板1/4幅部のC%およびO%をFig. 3に示す。なお図中に取鍋目標C%を示している。リムド鋼

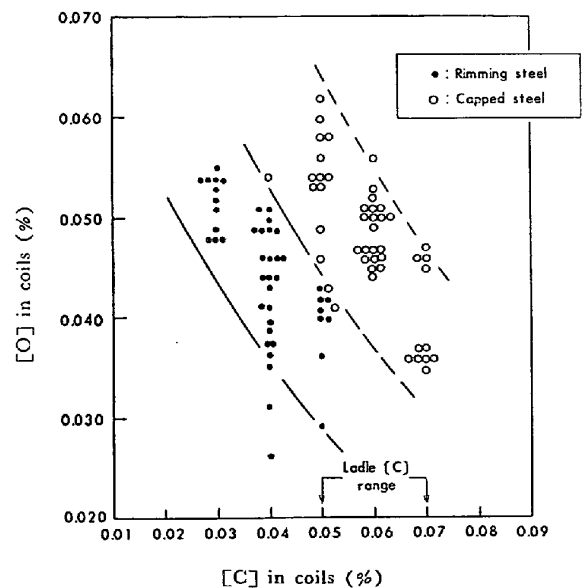


Fig. 3. Relation between [C] and [O] in cold rolled steel sheets.

の成品板 C% が取鍋分析値より平均的に 0.02% ほど減少しているのに対し、キャップド鋼の C% は取鍋分析値と変わらず、O% もリムド鋼より高い値を示している。この理由は、リミングアクションの継続時間の相違によるものであるが、大型キャップド鋼塊の場合特に顕著なようである。

したがって、キャップド鋼塊の成品板 C% をリムド鋼塊並みにし、軟質な材質を得るためには取鍋目標 C% を低くせざるを得ないが、C% を低くすると溶鋼中の O% が高く過剰となり、針状気泡が発生しやすいのでスラブおよび成品板の表面性状が悪化する。大型キャップド鋼塊から良好な冷延鋼板を得るためには表面性状の改善が重要であり、具体的には、硬質化防止のため C% を低くした場合に発生する針状気泡をいかにして防止し、健全な鋼塊表面性状を確保するかを研究する必要があると考え、以下の試験を行なった。

3. 脱酸変更試験

3.1 試験方法

低炭キャップド鋼においては過剰 O% により針状気泡がもたらされるという認識にたち、まずダイレクトに鋼中 O% を大幅に低減する試験を行なった。試験開始にあたり目標とする取鍋成分を Table 3 のように定めた。また、脱酸度の変更は取鍋 Al 投入量で調整した。

試験材は当所第 2 転炉工場 300 t 転炉で溶製し、20 t キャップド鑄型に注入した。調査項目は取鍋内および注入直後の鑄型内溶鋼の O%、鋼塊全高にわたるコーナースンプルの気泡状況ならびに圧延スラブの表面性状である。

3.2 溶鋼の O%

Fig. 4 に吹止 C% と出鋼後の取鍋内 O% の関係を示す。参考のため同一チャージの吹止 O% も併示した。通常脱酸チャージに比し、強脱酸チャージの O% は大幅に低減していることが明らかであり、さらにバラツキが小さいという副次的効果が認められる。Fig. 5 に注入直後鑄型内から汲取ったタコツボ試料の C% と O% の関係をプロットした。図中の実線は予備調査で求めた通常脱酸溶鋼の注入直後の鑄型内 C% と O% の擬平衡曲線であり、通常脱酸チャージがこの曲線に沿っている

Table 3. Aim compositions of liquid steel used for the test of deoxidation.

C %	Si %	Mn %	P %	S %
0.04 ~0.09	≤0.02	0.20~0.35	≤0.025	≤0.020

のに対し、強脱酸チャージは C% とは無関係にほぼ一定の値を示し、かつ低くなっているのが特徴である。

一方、取鍋強脱酸により O% を下げたキャップド鋼の注入状況から次のことが確認できた。

(1) 試験を行なった成分系の範囲内では C<0.05% 以下になると明らかにリミングアクションが弱くなる。

(2) C≥0.05% でも O% が低くなりすぎるとリミングアクションが弱くなり、この現象から判断して脱酸の限界は 350~400 ppm 程度にあると考えられる。

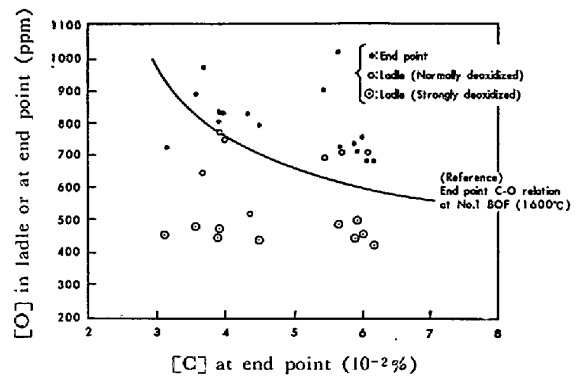


Fig. 4. Relation between [C] and [O] showing the decrease of oxygen content by strong and normal deoxidation.

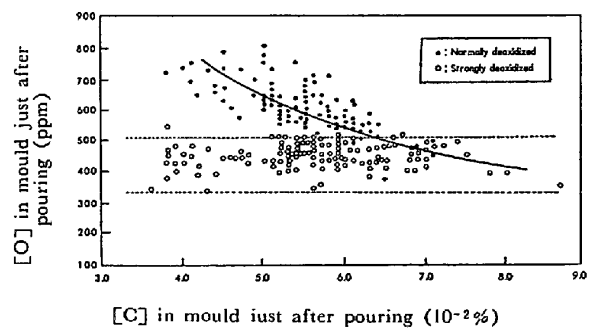


Fig. 5. Relation between [C] and [O] of liquid steel in mould just after pouring.

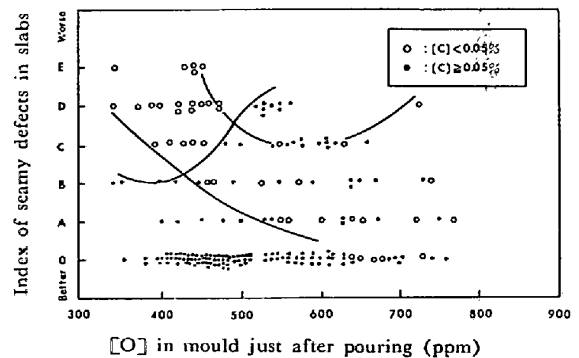


Fig. 6. Influence of deoxidation degree on seamy defects of slab with the comparison of carbon content in liquid steel.

Table 4. Characteristic data on corner samples examined with various degree of deoxidation.

Corner sample No.	Deoxidation degree in ladle	End point temp. (°C)	Ladle temp. (°C)	Al added in ladle (g/t)	Mould analysis (%)				Al-Mg added in mould (g/t)	Teeming rate (mm/min)	Remarks
					C	Mn	S	O			
C 1	Normal	1 610	1 569	121	0.057	0.19	0.012	0.059	38	—	[Mn]=0.20% aiming
C 2	〃	〃	〃	〃	0.060	0.19	0.012	0.054	104	—	〃
C 3	〃	〃	〃	〃	0.056	0.19	0.012	0.057	148	—	〃
C 4	〃	1 624	1 583	193	0.055	0.21	0.010	0.067	76	—	〃
C 5	〃	〃	〃	〃	0.054	0.20	0.010	0.075	149	—	〃
C 6	〃	〃	〃	〃	0.050	0.19	0.008	0.074	124	—	〃
C 7	〃	1 639	1 574	103	0.044	0.20	0.011	0.064	29	—	〃
C 8	〃	〃	〃	〃	0.055	0.20	0.012	0.062	25	936	〃
C 9	〃	〃	〃	〃	0.044	0.19	0.010	0.065	20	853	〃
C 10	Strong	1 617	1 574	203	0.065	0.22	0.010	0.050	78	837	〃
C 11	〃	1 591	1 554	300	0.074	0.20	0.014	0.049	45	821	〃
C 12	〃	1 624	1 564	320	0.057	0.21	0.011	0.035	101	856	〃
C 13	〃	〃	〃	〃	0.062	0.21	0.012	0.042	40	786	〃
C 14	〃	1 619	—	592	0.046	0.25	0.011	0.044	20	759	〃
C 15	〃	〃	—	〃	0.060	0.25	0.010	0.043	0	1 000	〃
C 16	〃	〃	—	〃	0.046	0.24	0.010	0.044	60	1 000	〃
C 17	〃	1 618	1 570	592	0.045	0.24	0.014	0.044	20	850	〃
C 18	Normal	1 602	1 565	76	0.067	0.31	0.013	0.040	39	860	[Mn]=0.33% aiming
C 19	〃	1 581	1 536	93	0.064	0.35	0.021	0.042	34	996	〃
C 20	〃	1 644	1 558	112	0.050	0.30	0.017	0.057	49	890	〃
C 21	〃	1 608	1 561	226	0.055	0.32	0.015	0.052	39	839	〃
C 22	〃	1 603	1 564	91	0.053	0.30	0.019	0.053	39	883	〃
C 23	〃	1 626	1 568	123	0.072	0.32	0.009	0.042	100	734	〃

3.3 スラブ表面性状

Fig. 6 に取鍋強脱酸鋼塊および通常脱酸鋼塊のスラブ線状疵の発生状況をまとめて示す。スラブ線状疵の評点はホットスカーフ後の線状疵の発生状況を大きさ、深さ、面積を考慮して6段階に区分したものである。

線状疵は鑄型内 C% で層別され、C<0.05% では一般的に発生しやすく、かつ O<500 ppm で集中多発する。一方、C≥0.05% では通常 O% のレベル 500~600 ppm に比べ、O% を下げた方が線状疵の発生を防止する方向になっていることが認められる。いずれの場合も線状疵の発生防止に対する最適 O% の範囲が存在することがうかがわれる。

3.4 鋼塊気泡状況

通常鋼塊を含め強脱酸鋼塊のコーナーサンプルを採取し肌部気泡状況を調査した。調査鋼塊は合計 23 本であり Table 4 に製造記録をまとめて示す。Table にみられるごとく脱酸条件は通常脱酸と強脱酸の二水準、Mn% が低目 Mn (Low Mn) と通常 Mn (Nor. Mn) の二水準になっている。

Photo. 3 に脱酸条件および溶鋼成分別に選んだ鋼塊の 1/2 下部のコーナーサンプル例を示す。気泡状況の全般的な特徴は次のとおりである。

(1) Low Mn 通常脱酸鋼塊 (サンプル: C1~C9)

管状気泡がなく針状気泡のみ認められる。全般に針状気泡個数は少なく、気泡径も小さいが、O% が高いため注入中のフォーミングに起因する肌下気泡が認められるものが多い。

(2) Nor. Mn 通常脱酸鋼塊 (サンプル: C18~C23)

(1) の Low Mn 材に比べ、管状気泡が発生しており明確なソリッドスキンを有している。

(3) Low Mn 強脱酸鋼塊 (サンプル: C10~C17)

C% によつて気泡状況に大幅な差が生ずる。C≥0.05% では管状気泡が密集し、ソリッドスキンが明瞭で、針状気泡がほとんどみられず非常に良好である。これに対し、C<0.05% では管状気泡が肌近くから発生し、気泡の径、密度がともに増加する。

以上の結果より強脱酸鋼塊の特徴をさらに整理すると、Low Mn であれば O% を 400~500 ppm 程度に低減してもソリッドスキンは健全で十分な厚みを有する。また、O% の低減によつて針状気泡が消失しソリッドスキンの健全性が増大する。しかしながら、C<0.05% になると急激に気泡状況は悪化しており、鋼塊気泡状況は C%-Mn%-O% のバランスによつて大きく左右されることがわかる。

3.5 スラブ線状疵と鋼塊気泡分布状況との関係

前項で脱酸度別に鋼塊の気泡状況を調査したが、これ

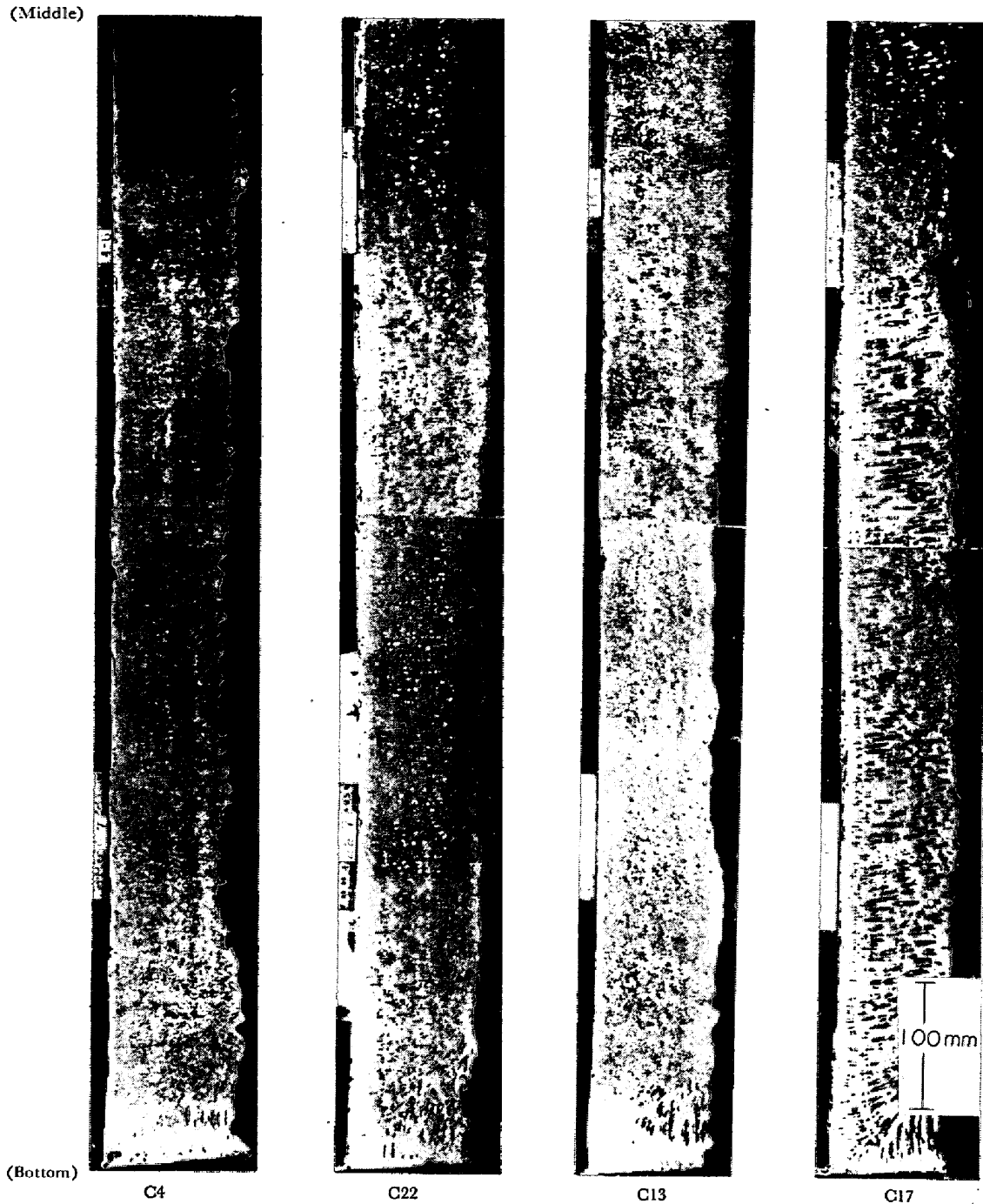


Photo. 3. Typical corner samples of test ingots with different degree of deoxidation.

ら気泡分布の差がスラブ表面の気泡性欠陥とどのような関係にあるかを把握することが実操業では重要なことである。スラブの線状疵評点別に鋼塊の気泡個数分布をまとめたのが Fig. 7 である。ここで、気泡個数は鋼塊のボトム側 20% 位置より切出した横断面コーナーサンプルについて肌より 3 mm 間隔に線を引き、その線上に存在する気泡数を測定し、線長 200 mm 単位の個数として表示した。また同様に、肌側の 5 本の線上に存在する気泡個数の合計を、肌より 15 mm までに含まれる気泡個

数とした。同図によると、リム層内部の気泡個数はスラブ線状疵の発生には直接大きな影響をおよぼさない。スラブ線状疵と直接関係がみられるのは肌近くの気泡個数で、特に肌から 15 mm までに含まれる気泡個数が増加すると急激に線状疵が多発する。(Fig. 8)

また、肌から 15 mm までに含まれる気泡個数はソリッドスキンの厚さと関係がある。Fig. 9 にソリッドスキンとスラブ線状疵の関係を示す。問題となる線状疵(評点 D, E)をおさえるためには、ソリッドスキンの厚さ

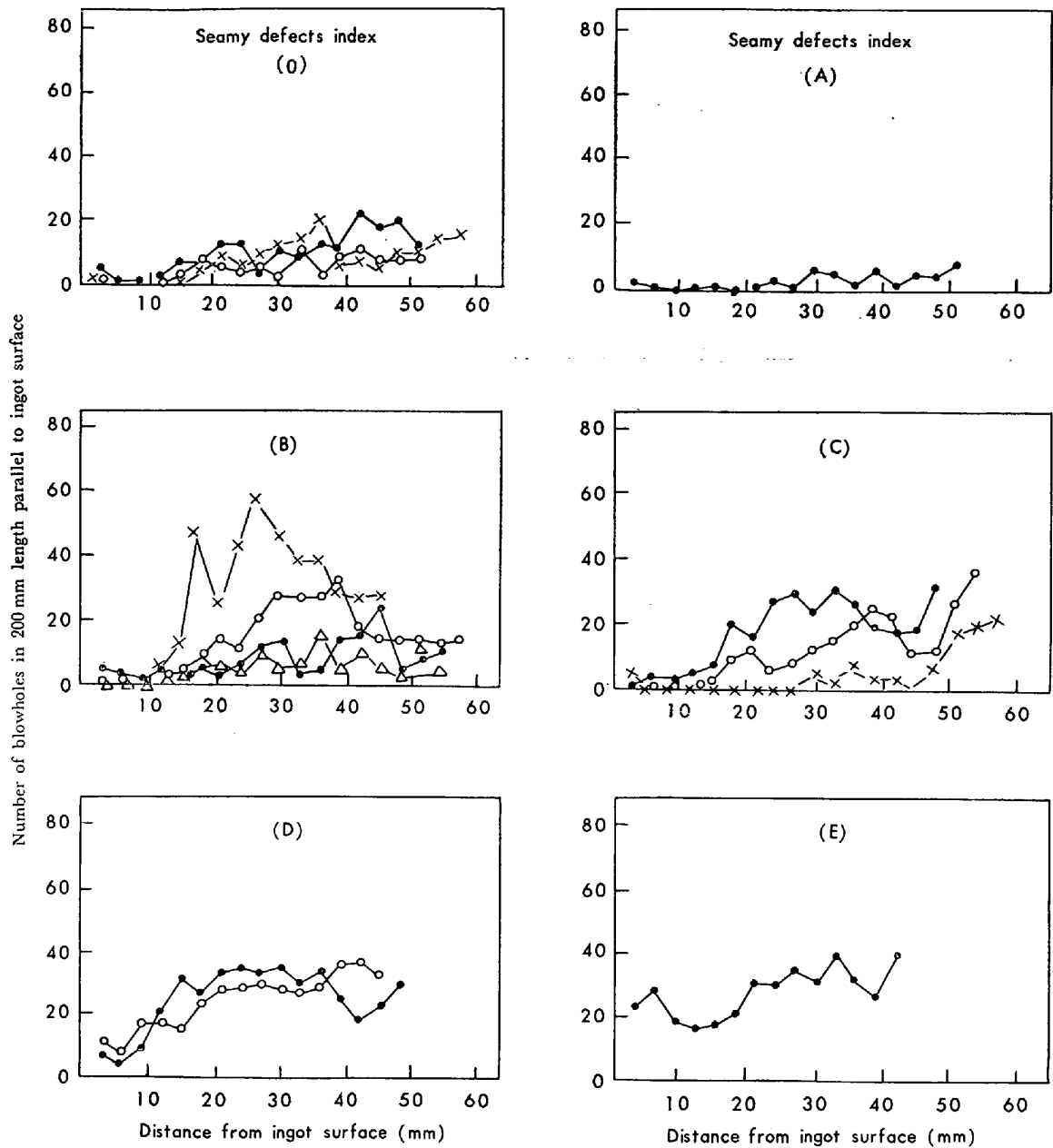


Fig. 7. Distribution of blowholes for each index of seamy defects in slab.

17 mm が最低必要と考えられる。

4. Cr 添加試験

低炭リムド(キャップド)鋼に発生する針状気泡には、溶鋼中の O%¹⁾ や S%⁵⁾ が関係するという報告がある。Cr は溶鋼の表面張力を低下する元素の一種であると考えられる⁶⁾⁷⁾。そこで、特に低炭キャップド鋼が通常 O 過剰の状況にあり針状気泡発生をもたらしていることより、気泡の発生状況に及ぼす何らかの影響が期待された。試験はまずリムド鋼を用いて行ない効果を確認したあとキャップド鋼の適用試験を行なった。

4.1 試験方法

試験は低炭リムド鋼(自動車用冷延鋼板)を対象とし二水準の Mn%, S% をとり、それぞれ Cr 添加有無の 18t リムド鋼塊を製造した。Cr 添加量は一定で 0.040% である。なお、脱酸条件は通常のリムド鋼ベースで行なっている。調査にあたっては鋼塊底部 400 mm 位置より楔型のコーナーサンプルを採取し、これについて気泡発生状況を調査した。Table 5 に試験鋼塊の製造記録を示す。

4.2 試験結果

試験鋼塊の注入状況よりまず次のことが観察された。Cr 添加鋼塊は無添加鋼塊に比べ、

- (1) リミングアクションによる湯の盛り上がり高さが小

Table 5. Characteristic data on cornersamples with Cr addition.

Sample No.		1	2	3	4	5	6	7	8
Ladle analysis (%)	C	0.069	0.085	0.062	0.078	0.065	0.075	0.056	0.059
	Si	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	Mn	0.25	0.29	0.21	0.25	0.31	0.36	0.32	0.35
	P	0.009	0.008	0.009	0.007	0.009	0.008	0.009	0.009
	S	0.013	0.014	0.016	0.018	0.015	0.013	0.016	0.016
	Cr	0.01	0.04	0	0.05	0	0.05	0.01	0.04
Ladle temp. (°C)		1565	1560	1552	1563	1550	1560	1575	1561
Al added in ladle (g/t)		78	137	210	138	122	70	83	163
Shot Al added in mould (g/t)		23	17	40	29	40	29	40	40
Teeming rate (mm/min)		1290	—	1000	1000	—	1100	1050	1050

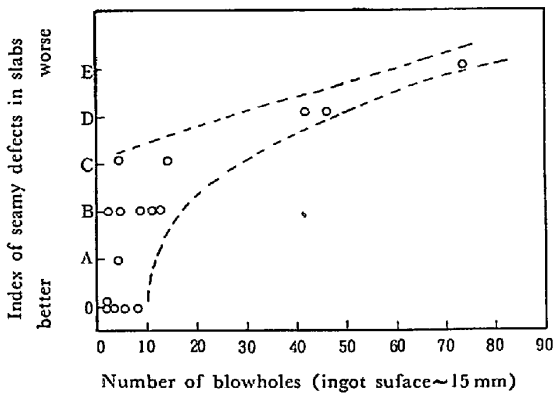


Fig. 8. Influence of the number of blowholes existing within 15 mm from ingot surface on the index of seamy defects in slabs.

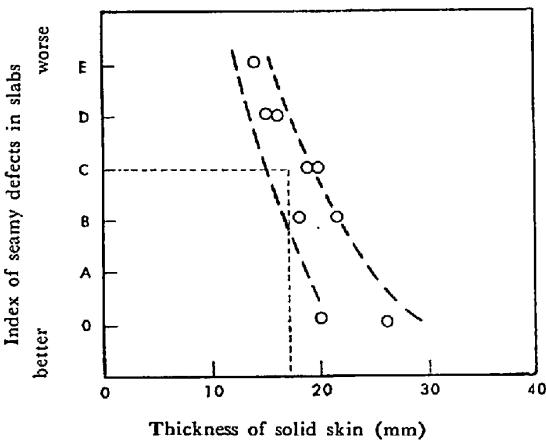


Fig. 9. Influence of the thickness of the solid skin on the index of seamy defects in slabs.

さく反面湯動きはシャープである。

(2) 膨脹速度が相対的に小さい。

このように Cr 添加の有無により、リミングアクション状況に明瞭な差が認められ、このことから鋼塊の気泡状況に何らかの相違のあることが予測される。

Photo. 4 に試験水準別にコーナーサンプル写真を示す。ソリッドスキンの厚さは Mn% によつてほぼ定ま

り Cr 添加による差は明瞭でない。Cr 添加鋼塊は管状気泡の径が小さくかつ長さが短くなつてゐる。また、気泡個数が全体的に少なくリム層の内部側で消失したような特徴がある。この傾向は Low Mn, Low S 鋼塊の場合に顕著で管状気泡はほとんどみられない程小さくなつてゐる。Fig. 10 は肌部気泡個数の深さ方向の分布を示すものであるが上述の傾向がより明瞭に認められる。

4.3 低炭キャップド鋼塊への適用

上述の結果をもとに Table 6 の成分系で 24~27 t プロパー鋼塊を対象とし Cr 添加の低炭キャップド鋼量産試験を行なつた。その結果、Cr 添加材はスラブ線状疵が大幅に減少し、コイル内一級品位が向上する傾向が認められた。また、機械的性質についても一連の調査を行なつたが平板用、加工用ともに全般的にみて Cr 添加による材質の低下はまったく問題なかつた。

5. 考 察

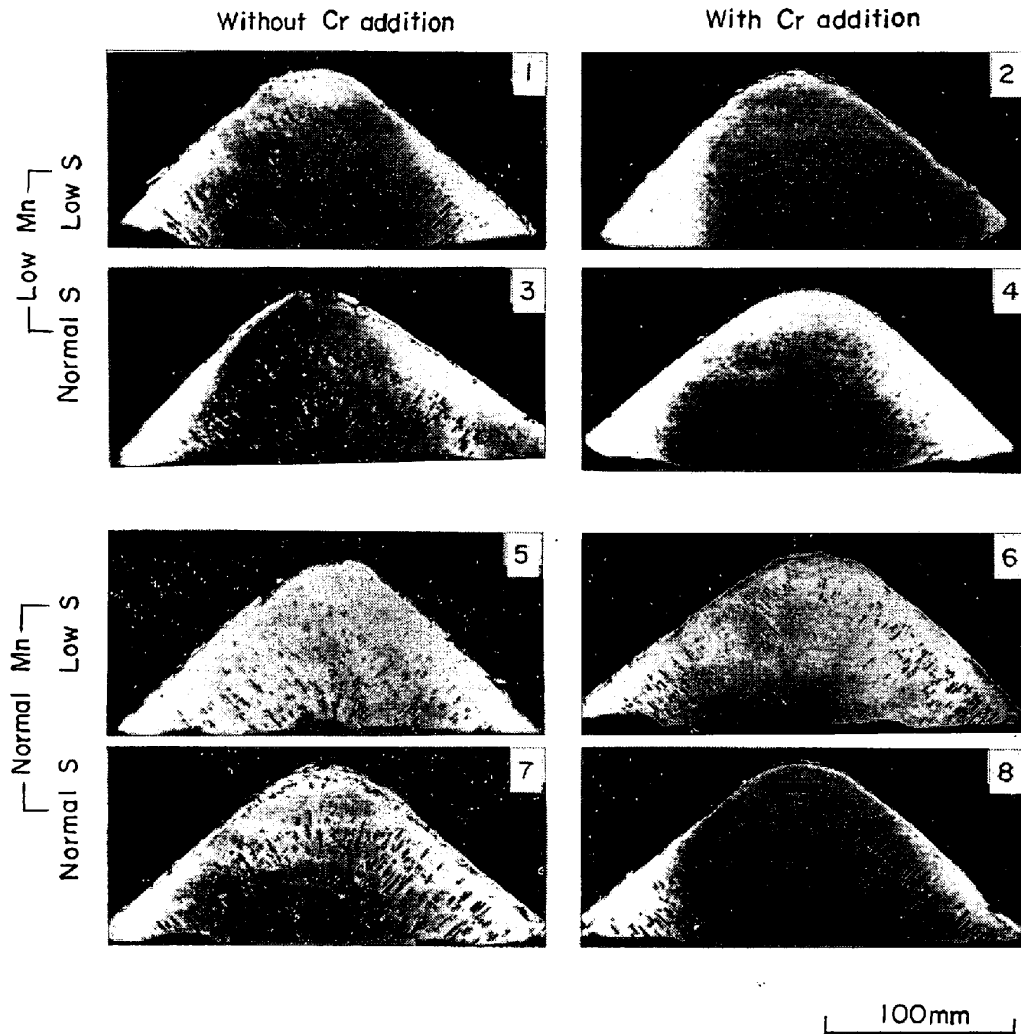
5.1 脱酸限界の把握

ソリッドスキンの厚さは凝固則により管状気泡不発生圏 (h) と関係がある。Fig. 11 にコーナーサンプルによる実測値を示す。図中実線は下記(1)式りの関係式を示すが、実測値は誤差範囲内で一致しているとみなしてさしつかえない。そこで、ソリッドスキン厚さと管状気泡不発生圏の関係として次の式をそのまま適用する。

$$D_s = 2.5\sqrt{h/v} - 6.0 \dots\dots\dots(1)$$

ただし $\left\{ \begin{array}{l} D_s : \text{ソリッドスキンの厚さ (mm)} \\ h : \text{管状気泡不発生圏 (mm)} \\ v : \text{注入速度 (mm/sec)} \end{array} \right.$

管状気泡不発生圏 (h) はリミングアクションの尺度として従来よりしばしば研究の対象となつてゐる。ここでは管状気泡に及ぼす C%, Mn%, O% の影響を調査した。鋼中 O% が h に大きな影響を及ぼすことはすでに知られてゐるが、それには常に C%, Mn% などの



Distance from the bottom of ingot : 400 mm

Photo. 4. Corner samples with and without Cr addition.

Table 6. Aim compositions of liquid steel used for the test of Cr addition.

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr added in ladle(%)
0.05 ~0.07	≤0.02	0.20 ~0.35	≤0.025	≤0.020	0 or 0.05

合せが関係する⁹⁾¹⁰⁾. Fig. 12 に C%×O% と h との関係をも Mn% で層別してプロットした. h と C%×O% との関係は C%, O% 単独でみるより強くなっている. また, Mn% が低いほど h が大きくなる傾向も明らかである. C%×O% と Mn% を要因として h の重回帰式を求めたところ次の結果が得られた. このように h が C%, Mn%, O% の関係式で表わされることは実操業

$$h = 77.1([C] \times [O] - 0.56[Mn]) + 396.0 \dots (2)$$

[C], [O], [Mn]: 溶鋼成分 (10⁻²%)

で成分を適当にコントロールすることにより, 適当なり

ミングアクションを保つことが可能であることを示すものである.

脱酸を強くするとソリッドスキンが薄くなりスラブの気泡性欠陥が発生するので, 問題となるスラブ線状疵をおさえるためには, ソリッドスキンの厚さ D_s を

$$D_s \geq 17 \text{ mm} \dots (3)$$

にする必要があることはすでに述べた. (1), (3)式よりスラブ線状疵をおさえるに必要な管状気泡不発生圏 (h) は

$$h \geq 1.41v \dots (4)$$

で表わされる. (4)式に(2)式を代入すると

$$[C] \times [O] - 0.56[Mn] \geq 0.0182v - 5.135 \dots (5)$$

となり, $[C] \times [O] - 0.56[Mn]$ が(5)式右辺に等しくなる [O] が C% および Mn% と関連させた形での, 気泡性欠陥をおさえる脱酸限界となる.

5.2 Cr 添加効果のメカニズムについて

Cr 添加したリムド鋼塊については一例ながら詳細な

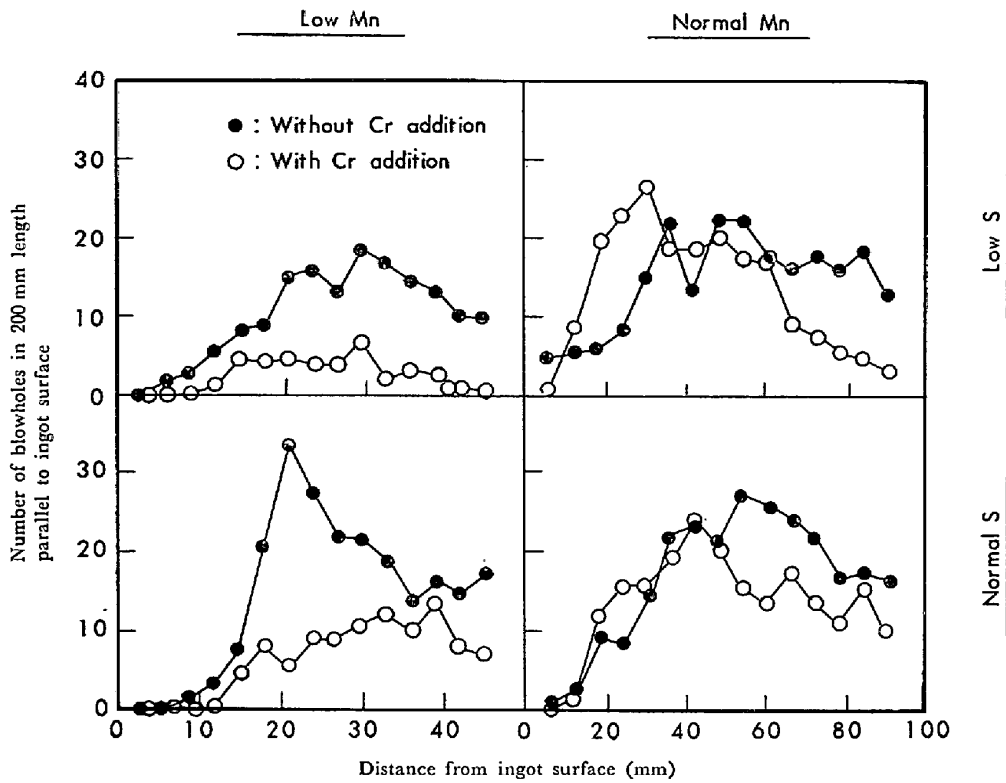


Fig. 10. Influence of Cr-addition on the distribution of blowholes.

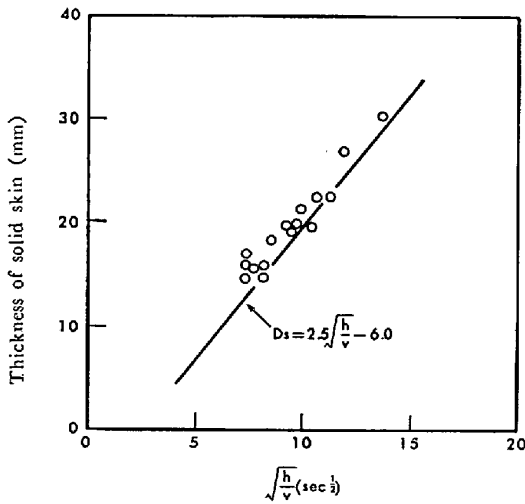


Fig. 11. Relation between the thickness of solid skin and the range free from lenticular blowhole.

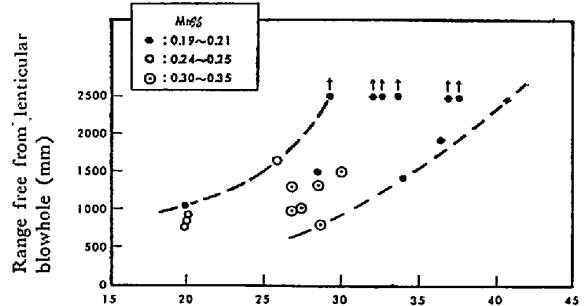


Fig. 12. Influence of [C]·[O] product on the range free from lenticular blowhole.

調査結果が報告¹¹⁾されている。この場合の溶鋼組成はC%が高めであり、Crの含有量も非常に大きい(0.26%)点か本報告の対象溶鋼組成と異なっている。しかしこの報告でもその特徴が認められ、特に4.2で示した本報告の結果で顕著なCr添加鋼塊の特徴は模式的に述べると、写真にみられるごとく、リム部で肌側から内部に向つて三つの領域すなわち

領域Ⅰ：ソリッドスキン、Cr無添加材と変わらず。
 領域Ⅱ：管状気泡帯、Cr添加材で気泡径が細い。
 領域Ⅲ：気泡なしのゾーン、Cr添加材で広く明瞭にわけられる。以下に、このような気泡状況となる理由について気泡生成に関する浅野ら¹²⁾のモデルを用い若干の考察を行なう。

浅野らのモデルによると気泡の離脱、捕捉の条件は

$$2 \frac{dR}{dt} = 2m_1 \leq f \quad \dots \dots \dots (6)$$

気泡核不発生

$$f < 2m_2 + \frac{\delta(m_1 - m_2)}{Ru} = 2 \left(\frac{dR}{dt} \right)_{Ru} \quad \dots \dots \dots (7)$$

気泡離脱

$$2m_2 + \frac{\delta(m_1 - m_2)}{Ru} \leq f < 2m_1 \dots\dots\dots (8)$$

気泡捕捉

- ただし
- R : 気泡半径
 - Ru : 離脱時の気泡半径
 - $m_1 : \frac{R_G \cdot T \cdot k_1 \cdot \Delta C_1}{P}$
 - $m_2 : \frac{R_G \cdot T \cdot k_2 \cdot \Delta C_2}{P}$
 - δ : 拡散境膜厚
 - f : 凝固速度

とされている。

まず、Cr 添加鋼におけるソリッドスキンの厚さ、すなわち領域Ⅰについて考えると、安定な気泡核が生成するまでの時間あるいはその時の限界の f という見方でみると上記より

$$f = 2m_1 = 2R_G \cdot T \cdot k_1 \cdot \Delta C_1 / P \dots\dots\dots (9)$$

$$\Delta C_1 = [C]_i \cdot [O]_i - K_{Ceq} \cdot P_{CO}$$

となり、これは凝固にともなう溶質 C, O の固液分配、および凝固壁前面の拡散境膜厚に係るものであつて Cr の効果は考えにくい。

次に領域Ⅲの生成について考察する。ここでは O¹³⁾ および S¹³⁻¹⁶⁾ の場合と同様に Cr が C 共存下の溶鋼中において界面活性元素として作用することを前提として議論する。この前提にたてば Cr 添加溶鋼では CO 気泡表面に Cr 原子が正吸着し、その結果相対的に気泡表面での C, O の吸着量は減少し、したがつてこの量と直接関係する気液界面での濃度 C_i は低下することになると考えてよいであろう。このように推論すれば

$$\Delta C_2 = C_L - C_i$$

は増加し、したがつて

$$m_2 = R_G \cdot T \cdot k_2 \cdot \Delta C_2 / P$$

が増加することになる。気泡離脱の限界凝固速度は

$$f = 2m_2 + \delta(m_1 - m_2) / Ru \dots\dots\dots (10)$$

$$= \delta m_1 / Ru + m_2(2 - \delta / Ru) \quad \delta / Ru < 1$$

で与えられているが、これより Cr 添加により m_2 が増大することは f がまだ大きい所（肌から深く至らない所）で生成した気泡は離脱し、凝固鋼中に残らないことを意味することになる。

次に領域Ⅱの鋼塊高さ方向での変化については、鋼塊頭部からの距離が大きくなると全圧 P が増し、したがつて、

$$m_2 = R_G \cdot T \cdot k_2 \cdot \Delta C_2 / P$$

は小さくなり(10)式より気泡が離脱する限界の f は小さい方へ、すなわち肌からの距離が深い所まで移動するこ

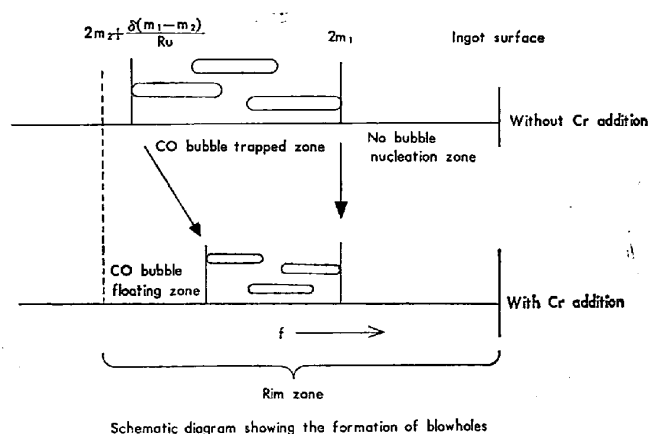


Fig. 13. Schematic diagram showing the formation of blowholes.

とになる。

気泡径についてはやはり界面活性元素としての Cr の作用による表面張力の低下によるものと考えられる。表面張力が低下した場合の気泡径については、水溶液-空気系の場合

$$(\text{気泡径}) \propto (\text{表面張力})^{0.6}$$

が示されている¹⁷⁾が、リムド系溶鋼へ Cr 添加したときの表面張力の低下は文献から推測される値よりもかなり大きいように思われる。

以上の考察により Cr 添加鋼塊の気泡発生状況が無添加鋼と比較して模式的に示すと Fig. 13 のごとくなる。これは 4.2 で述べた実際のコーナーサンプルでの傾向をよく現しているものといえる。

6. 結 言

大型低炭キャップド鋼塊の性状をふまえた上で、針状気泡の発生を防止し健全な鋼塊表面性状を得るための脱酸条件および溶鋼性状について試験を行ない次のような結果を得た。

- (1) 鋼塊肌部の気泡状況は溶鋼の C%-Mn%-O% のバランスによつて大きく左右される。
- (2) 実用上問題となる線状疵を防止するためにはソリッドスキン厚さ 17 mm が最低必要と考えられる。
- (3) スラブ線状疵をおさえるための脱酸限界として次の関係式を得た。

$$[C] \times [O] - 0.56[Mn] \geq 0.0182v - 5.135$$

ただし { [C], [Mn], [O] : 溶鋼成分(10⁻²%)
v : 注入速度(mm/min)

- (4) Cr 添加は鋼塊肌部の気泡個数および大きさを小さくする。これは、Cr 添加により表面張力が低下し安定な気泡径が小さくなるためであると考察される。

文 献

- 1) 梶岡: 学位論文「リムド鋼塊の性状に関する研究」, (1969)
- 2) 浅野, 大橋, 途: 鉄と鋼, 54 (1968) 6, p. 643
- 3) 池田, 丸川, 小林, 浦: 鉄と鋼, 56 (1970) 6, p. 708
- 4) 菅沢, 池田, 丸川, 荒木: 住友金属, 19 (1967) 2, p. 142
- 5) 久芳, 田阪, 伊藤, 前出: 鉄と鋼, 58 (1972) 1, p. 41
- 6) T. J. WHALEN, et al.: Trans. Amer. Soc. Metals, 55 (1962), p. 778
- 7) 長, 井上: 鉄と鋼, 51 (1965) 10, p. 1832
- 8) 大河平, 梶岡, 一戸: 鉄と鋼, 54 (1968) 5, S 78
- 9) P. NILLES: JISI, 292 (1964), 601
- 10) 山崎, 池田, 鳥井, 丸川: 鉄と鋼, 54 (1968), p. 393
- 11) 鉄鋼基礎共同研究会: 「リムド鋼中の非金属介在物に関する研究」, (1969), n-1
- 12) 浅野, 佐伯: 鉄と鋼, 55 (1969) 14, p. 1312
- 13) F. A. HALDEN, et al.: J. Phys. Chem., 59 (1955) p. 557
- 14) D. POHL: Giesserei, 26 (1956) p. 833
- 15) R. D. PEHLKE, et al.: Trans. Met. Soc., AIME, 227 (1963) p. 884
- 16) 井上, 長: 鉄と鋼: 52 (1966) 9, p. 1418
- 17) 化学工学協会: 「気泡・液滴工学」 (1969), p. 86 [日刊工業新聞社]