

# 連続铸造中炭素鋼スラブにおける 表皮下気泡の集積メカニズム

笠井 宣文\*・渡辺 吉夫\*・梶原 孝治\*<sup>2</sup>・豊田 守\*<sup>3</sup>

Mechanism of Fine Bubbles Entrapment beneath the Surface of Continuously Cast Slabs

Norifumi KASAI, Yoshio WATANABE, Takaharu KAJIWARA and Mamoru TOYODA

**Synopsis :** Origin of fine bubbles beneath the surface of continuously cast slab has been verified. In addition, the influence of fluid flow condition in mold on entrapment of the bubbles beneath meniscus has been investigated through a simulation experiment with water models. The results are summarized as follows.

- (1) The gases compositions in the bubbles were  $N_2$ , Ar,  $H_2$  and  $CH_4$ , and the origin of each composition was air leakage, Ar gas injected at slide gate, diffusive hydrogen in molten steel, and coal-tar pitch soaked in refractory of slide gate respectively.
- (2) Air leakage at the slide gate increased with passage of casting time, and the volume of leakage was estimated to be 100~550Ncm<sup>3</sup>/s.
- (3) The size of bubble contained  $N_2$  gas was smaller than that contained Ar gas and found in mainly center of slab width direction.
- (4) The distribution of bubbles existence in slab width direction depended on bubble size and molten steel flow beneath meniscus.
- (5) An application of the airtight slide gate reduced the number of bubbles beneath the slab surface in the middle of width direction.

**Key words :** beneath meniscus ; gas bubble ; bubble size ; slide gate ; air leakage ; airtight slide gate.

## 1. 緒言

連続铸造(以下、CCと略す)铸片の表皮下に集積する気泡は圧延過程において表面に露出し、ヘゲ疵と呼ばれる欠陥として製品に残存する場合がある。

この気泡の生成起因として、浸漬ノズルの閉塞防止を目的に上ノズルもしくは、スライディングゲート(以下、SGと略す)上固定盤から吹き込まれるArガスであることが知られており<sup>1,2)</sup>、SG耐火物の構造変更<sup>3,4)</sup>または、 $Al_2O_3$ の付着を抑制する浸漬ノズル耐火物の開発<sup>5-7)</sup>等が進められている。また、铸造中に侵入する大気はノズル内の $Al_2O_3$ 付着を助長するとともに、表皮下気泡の生成起因となっている<sup>8)</sup>。

一方、これらの気泡生成起因となるガスがノズル内に侵入した後、铸型内においてどのように分散するかは不明な点が多く、ガスの種類の違いによって気泡の形態がどのように異なるかを言及した例は少ない<sup>9)</sup>。

本報告ではスラブ表皮下に捕捉された気泡の生成起因を特定し、铸型内における気泡の分散挙動を把握することを目的に、気泡内のガス組成分析を行った結果について述べ

る。さらに、スラブ幅方向における気泡形態別の分布を調査し、気泡の形態の違いによるCC铸型内溶鋼流動の影響について検討を行った。また、水モデル実験を行い気泡の分散挙動を調査した。

これらの結果をもとに、大気の侵入を抑制することを目的に開発した密閉式SGを実機に適用した結果、気泡を形成するガス組成の違いによってCC铸型内における分散挙動が異なることを確認した。

## 2. 実験内容

### 2・1 気泡生成起因の調査方法

調査の対象とした鋼種は含Nb490N鋼(C: 0.09%, Mn: 1.35%, Si: 0.05%, P: 0.02%, S: 0.001%)であり、スラブ表皮下に残存する気泡が比較的多い鋼種である。

铸造は鹿島2号連铸機で行った。主な仕様ならびに、铸造条件をTable 1に示す。

Fig. 1にスラブの調査方法概略を示す。スラブサンプルは铸造条件が一定になった定常条件下において、任意の位置

平成8年7月4日受付 平成8年9月9日受理 (Received on July 4, 1996; Accepted on Sep. 9, 1996)

\* 住友金属工業(株)鹿島製鉄所 (Kashima Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 3 Hikari Kasima 314)

\* 2 住友金属工業(株)総合技術研究所 (Corporate Research and Development Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

\* 3 住友金属テクノロジー(株)鹿島事業部 (Technical Department Kashima Division, Sumitomo Metal Technology Inc.)

Table 1. Casting conditions.

Machine Number	Kashima No.2CCM
Arc radius	R12.5 (m)
Mold size	250×800~1600 (mm)
Casting speed	0.85~1.00 (m/min)
Ar flow rate	83.3~166.7 (cm <sup>3</sup> /s)
Kind of steel	490N Al Killed steel

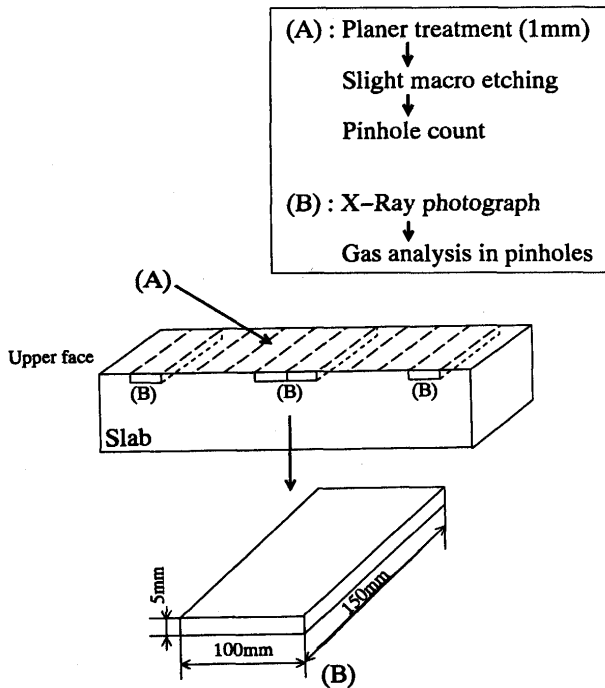


Fig. 1. Sampling position and test item of slab.

より採取し確性試験に供した。機械加工により表面1mmを研削後、軽度のマクロエッチングを行い目視にて残存気泡の個数をカウントした。

表皮下気泡内のガス組成分析は、同一のサンプルから幅方向の任意の位置において、5mm厚のサンプルを切り出した後、X線透過法によって気泡の位置を特定し、気泡内ガス分析装置<sup>10)</sup>による半定量分析を行い解析に供した。

### 2・2 SGからの大気侵入量の測定

大気侵入の評価は、浸漬ノズル内の圧力測定を行い評価した。Fig. 2に測定方法の概略を示す。

はじめに鋳造状態が一定になった時点において、吹き込みArガス流量を変更してノズル内の圧力変動を測定し、ノズル内ガス流量と圧力の関係を求めた後、鋳造中のノズル内圧力推移を連続的に測定し、後述する方法にて浸漬ノズル内への大気の侵入量を求めた。

### 2・3 密閉SG適用実験内容

Fig. 3に密閉SGの概略構造を示す。SG用耐火物を固定するプレートを箱型形状とし、嵌合部全てにシリコンゴム製

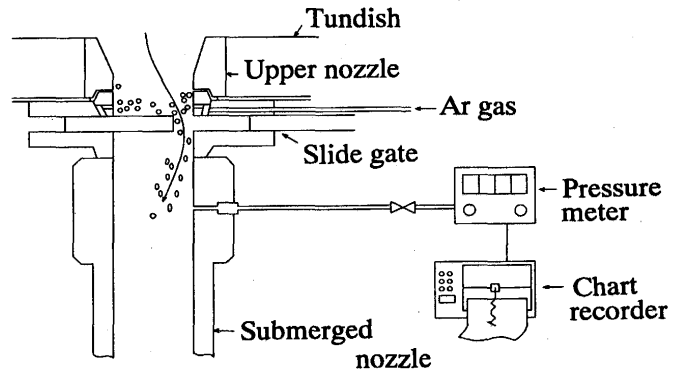


Fig. 2. Measurement of pressure in the submerged entry nozzle of experimental apparatus.

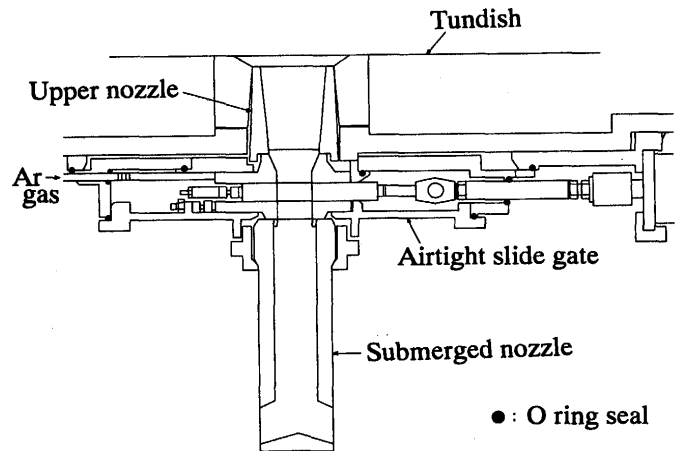


Fig. 3. Schematic drawing of the airtight slide gate.

のOリングを配した。また、Oリングがタンディッシュの手熱ならびに鋳造中に焼損することを防止するために、Oリングを配設した直下に冷却溝を付設し空冷した。

実験の対象とした鋼種ならびに、鋳造条件はTable 1に示した鋳造条件に合わせて比較検討を可能として、スラブ幅方向における気泡の分布の差異ならびに、気泡の生成におよぼす外気侵入の影響について評価した。

## 3. 結果および考察

### 3・1 気泡内ガス組成とスラブ表皮下気泡分布

Fig. 4に幅方向の気泡数分布の一例を示す。気泡は幅中央部に密集しており、鋳型内容鋼流動ならびに気泡の形態が影響をおよぼしていることを示唆している。

Fig. 5に幅中央部ならびに、1/10幅位置における気泡径分布を示す。幅位置によって気泡径の分布は異なっており、1/10幅位置では気泡径が0.2mmから0.8mmの範囲で気泡数が低いかつば一定であるのに対して、幅中央部では、気泡径が0.3mmに気泡数のピークを持ち、1/10幅位置に比べて小さい気泡が多い結果を示した。

幅位置別に採取した気泡について気泡内ガス組成を調査し整理すると、Fig. 6のとおりである。幅中央部においては、N<sub>2</sub>が検出されているのに対して1/10幅位置では検出されていないことがわかる。このN<sub>2</sub>の検出分を除外して他の組成比率を求めると、Ar、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>の比率は1/10幅位置とほぼ同等となる。

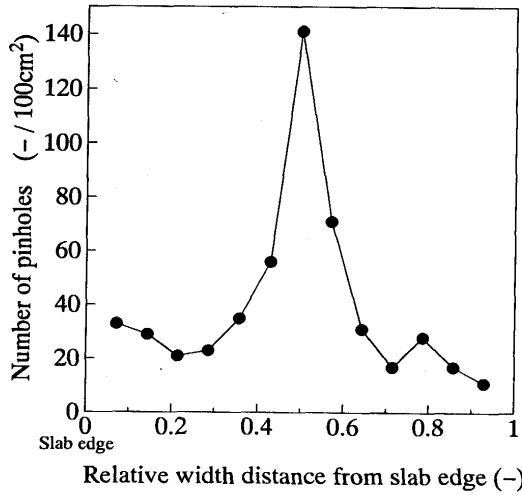


Fig. 4. Distribution of pinholes on the slab surface.

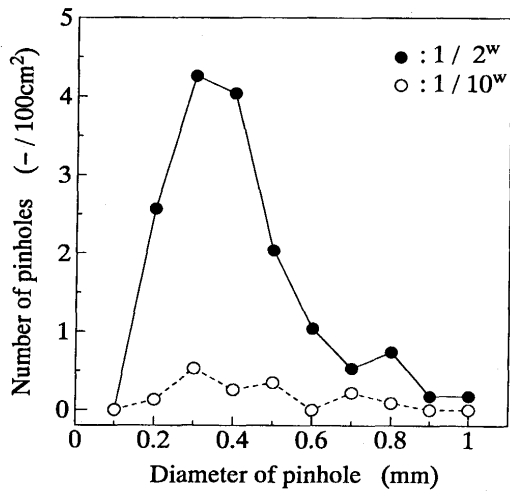


Fig. 5. Size distribution of pinholes.

となる。

検出されたこれらのガス組成から気泡の生成起因を推察すると、CH<sub>4</sub>が検出されているのは、SG耐火物中に含浸させているタールが製造中に気化したためと考えられる。

また、H<sub>2</sub>は気泡内において単独で存在することはなく、他のガス組成と混在しており、凝固後に鋼中の拡散性水素が集積したために検出されたものと推察される。

一方、検出されたN<sub>2</sub>が大気への侵入によると判断される理由は、溶鋼中に溶存する[N]が気化すると考えた場合、CC 鋳型内における[N]の溶解度は100ppm程度であり<sup>11)</sup>対象とした鋼種の溶鋼中[N]値(約30ppm)に比べて大きいことと、ミクロ検鏡法によって観察した気泡の表面において多くの場合は酸化物の付着は認められないのに対して、N<sub>2</sub>が検出された気泡では、Fig. 7に示すように内面をEPMAで同定すると大気中の酸素によって生成したと推察されるAl-Ti-O系酸化物が認められることによる。

Fig. 8にArならびにN<sub>2</sub>が検出された気泡について気泡径分布を測定した結果を示す。N<sub>2</sub>が検出された気泡の径は0.5 mm以下であるのに対して、Arが検出された気泡の径は比較的大きな値も存在し、大気への侵入して生成される気泡の方が小さいことがわかる。

このことは、SGから吹き込まれるArの場合、一定流量吹

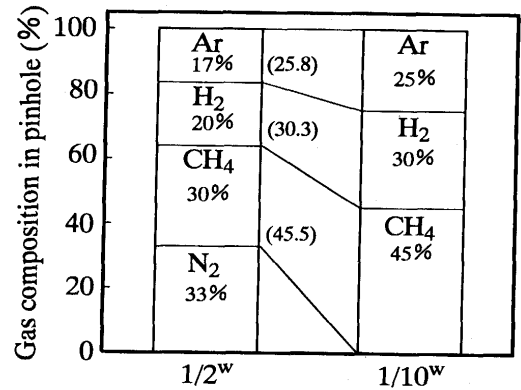


Fig. 6. Mean gas composition in pinholes.



Fig. 7. EPMA image on the inside of a pinhole.

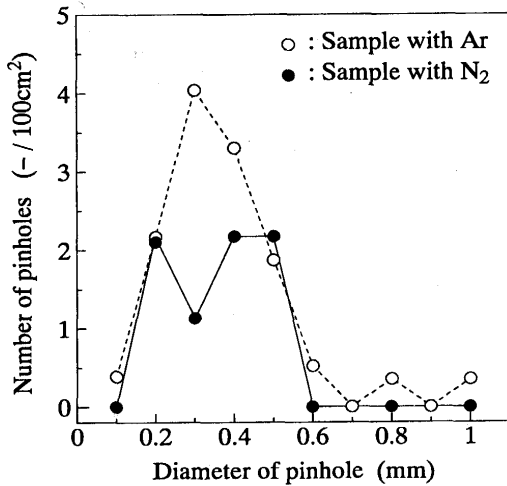


Fig. 8. Size distribution of pinholes.

き込んでいる条件下にあり、初期に生成される気泡は比較的大きく、浸漬ノズル内の溶鋼流動によるせん断力が気泡径分布に影響を与えること<sup>12)</sup>、ならびに吐出口からの噴流の流速分布の影響を受けるため、比較的大きな気泡が残存するものと考えられる。

一方、大気侵入の場合、浸漬ノズル内の負圧分布の影響を受けているものと推察され、侵入した大気は負圧が大きい領域、すなわち、浸漬ノズル内の流速が速い領域に優先的に侵入し、溶鋼流動のせん断力をより強く受けることによって、比較的大きな気泡が生成しにくいものと推察される。

このことから、幅中央部の表皮下気泡の集積は $N_2$ 起因の気泡が主因であり、他のガス組成で形成される気泡とは形態の差ならびに浸漬ノズル内における溶鋼流動の影響の違いによって、鑄型内の挙動が異なるものと推察される。

### 3・2 気泡径分布におよぼす鑄型内流動の影響

気泡の分散挙動を評価し、CC鑄型内における流動の影響を知ることを目的に、水モデル実験を行った。Table 2 に水モデル実験条件、Fig. 9 に実験方法の概要を示す。

スラブ上面側 5 mm に相当する位置(モデルでは 2 mm の位置)において、スリット光線に投影される気泡の軌跡を撮影し、0.4 mm 未満と 0.4 mm 以上に弁別して幅方向 3 箇所の気泡数を求めた

Fig. 10 に気泡の幅方向個数分布を示す。本実験において 0.4 mm 未満の気泡数は、浸漬ノズル近傍に多く、気泡径が 0.4 mm 以上では逆に短辺側が多い。

この結果は Fig. 5 に示したスラブ幅方向気泡径分布の調査結果を間接的に説明し得る結果である。

すなわち、小さい気泡は鑄型内において浮上分離がしにくく、溶鋼流動の影響を受けやすいことから幅中央部に集積しやすいのに対して、短辺近傍では吐出反転流の影響を受け、気泡の大きさの影響が小さくなることによるものと推察される。

Table 2. Experimental conditions of water model.

Mould size (mm)	108 × 640 (1 / 2.5)
Water flow rate (cm <sup>3</sup> /s)	730
Gas flow rate (cm <sup>3</sup> /s)	33.3
Nozzle port angle	-20° (Without box)
Nozzle depth (mm)	80

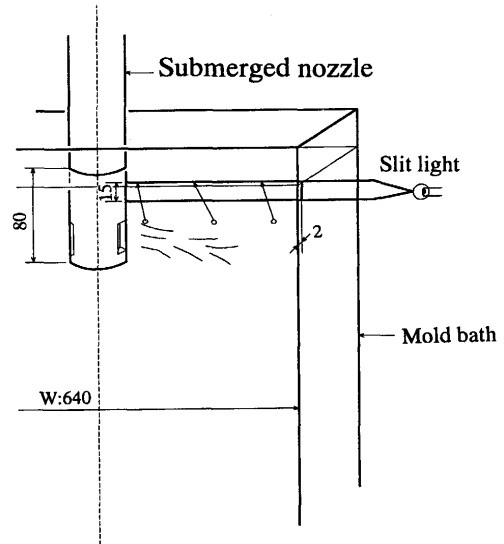


Fig. 9. Simulation of rising bubbles in mold by means of water model.

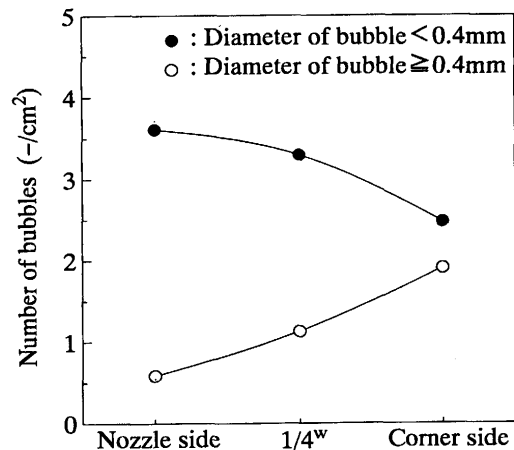


Fig. 10. Distribution of bubbles in mold with water model.

また、水モデルでは 1/10 幅位置において 0.4 mm 以上の比較的大きな気泡が多いのに対して、スラブの調査結果ではその傾向が認められないのは、スラブの結果は凝固シェルに捕捉された気泡をカウントしているのに対して、水モデルではその位置を通過した気泡をカウントしている違いによるものと考えられる。

このことより、Fig. 11 に示すように、鑄型幅方向における気泡の分散は、気泡形態の違いによる浮上速度の差異なら

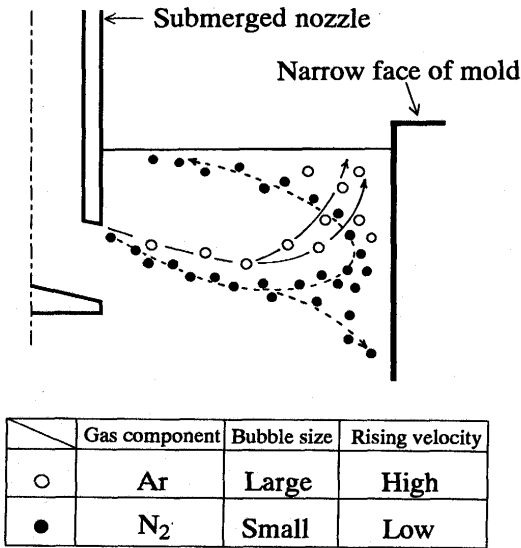


Fig. 11. Comparison of the bubble rising behavior with gas components.

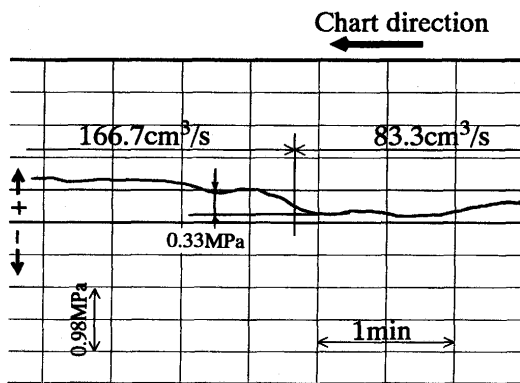


Fig. 12. Measurement of pressure in the submerged nozzle.

びに、メニスカス直下の流れの影響を受け、Fig. 5 に示したような気泡分布になると推察される。

### 3・3 浸漬ノズル内への大気侵入量

今村ら<sup>13)</sup>は、浸漬ノズル内の圧力を充満流を想定しベルヌーイの式から求めている。本報では大気の侵入がなく、 casting 条件が一定である場合、ノズル内は充満流として、今村らが提案している式を用いて、ノズル内の圧力を求め、 casting 中に変動する圧力差を大気の侵入によるものとした。

Fig.12に casting 条件が一定になった時点でSG上固定盤から吹き込むArガス流量を83.3cm<sup>3</sup>/sから166.7cm<sup>3</sup>/sに変化させた時の浸漬ノズル内圧力の変化を示す。

この結果より、浸漬ノズル内の圧力が0.33MPa変化することによって浸漬ノズル内へのガスの侵入量は83.3cm<sup>3</sup>/s程度と見積もられ、浸漬ノズル内の圧力1MPaあたりの変動に伴う大気の侵入量は247.5cm<sup>3</sup>/sとなる。

これより、 casting 中の浸漬ノズル内圧力の変動から算出した大気の侵入量を求めると、Fig.13のとおりとなり、 casting 中

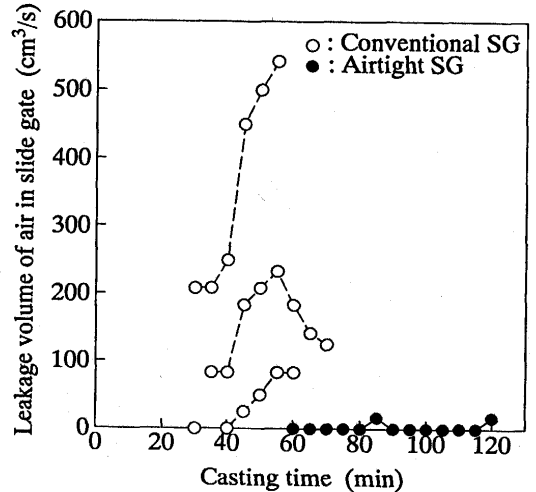


Fig. 13. Relationship between casting time and leakage volume of air in slide gate.

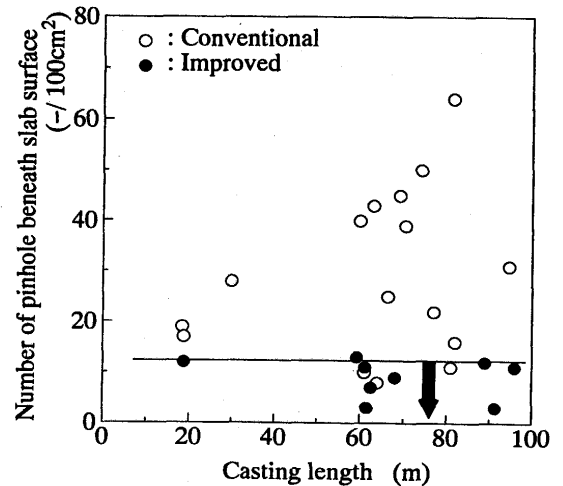


Fig. 14. Relationship between casting length and number of pinholes.

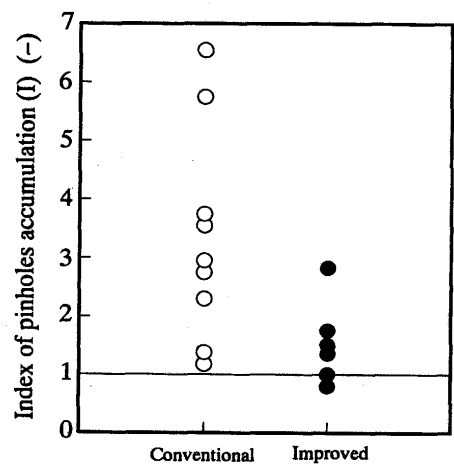


Fig. 15. Influence of shielding conditions on pinholes accumulation.

の大気の侵入量は100~550cm<sup>3</sup>/s程度である。また、大気の侵入量は casting 後半で増加しており、 casting 中の熱変形または、耐火物の亀裂の進展が起きているものと推察される。

### 3・4 密閉SG適用試験結果

前述した結果から、表皮下の残存する気泡の集積に対して、大気の侵入を防止することが有効であると考え、密閉SGによる大気侵入の抑制を図った。

Fig.13に示すように、密閉SGを適用することによって大気の侵入量はほぼ0となり、鑄造長さとともに増加する表皮下気泡数はFig.14に示したように低減している。

また、Fig.15に示すように、密閉SGを適用し、大気の侵入を抑制することによって、幅中央部の気泡の集積が大幅に改善され、前述した気泡形態が気泡の集積に影響を与えている点について、証明する結果となった。

## 4. 結言

合金入り490N鋼において、スラブ表皮下に集積する気泡の分布ならびに気泡内ガス組成を調査した。また、上記の調査にともない鑄型内流動の影響を定性的に評価するために水モデル実験を行った。

さらに、これらの調査結果を踏まえて大気の侵入を抑制することを目的に開発した密閉SGを用いて実機実験を行った。

その結果、以下の知見を得た。

(1)スラブ幅方向において中央部に集積している気泡は $N_2$ が主因であり、他のガスで形成される気泡とは形態が異なることを見いだした。

(2)各ガス組成の起因はArはSG上固定盤から吹き込んであるArガスであり、 $N_2$ は鑄造中の大気の侵入によると推察された。また、 $H_2$ は鋼中の拡散性水素が凝固後に気泡に集

積した結果、検出されたものであり、 $CH_4$ は耐火物中の含浸ターブルと考えられる。

(3)鑄型内において、気泡の分散は気泡の形態ならびに、溶鋼流動に依存する。

(4)浸漬ノズル内への大気の侵入は鑄造後半で増加し、その量は $100\sim 550\text{cm}^3/\text{s}$ 程度と見積もられる。

(5)密閉SGを適用することによって、鑄造後半に増加する大気の侵入を抑制し、幅中央部に集積する気泡を大幅に低減し得ることを確認した。

## 文 献

- 1) 若藤信久, 斎藤 忠, 喜多幸雄, 木村雅保, 石倉俊之: 材料とプロセス, 1(1988), 1270.
- 2) 小林 高, 江波戸紘一, 松尾勝良, 安封淳治, 安中弘行, 井上 健: 材料とプロセス, 5 (1992), 1251.
- 3) 石毛俊朗, 伊吹一省, 桑野清吾: 材料とプロセス, 4 (1991), 1270.
- 4) 高岡隆司, 桐永健次, 中村博巳, 桑野清吾: 材料とプロセス, 5 (1992), 1253.
- 5) 岩城 勇, 日和佐章一, 武 英雄, 小山内寿, 別所永康, 奈良正功: 材料とプロセス, 4 (1991), 1286.
- 6) 笠井宣文, 川崎守夫, 林 安茂, 河合秀和: 耐火物, 42 (1990) 1, 14.
- 7) 辻野良二, 田中 新, 今村 晃, 高橋大定, 溝口庄三: 鉄と鋼, 80 (1994), 765.
- 8) 高岡隆司, 水岡誠史, 高杉英登, 田中 久, 奥村尚丈: 材料とプロセス, 4 (1991), 1287.
- 9) 安中弘行, 山中量一, 井上 健, 斎藤 忠: 鉄と鋼, 81 (1995), 529.
- 10) 大坪孝次至, 後藤俊助, 安田 浩: 鉄と鋼, 68 (1982), 858.
- 11) 日本鉄鋼協会特殊鋼部会: 鋼の真空溶解および真空脱ガス法の進歩, (1969), 67.
- 12) 井口 學, 笠井宣文, 大北雄之, 森田善一郎: 材料とプロセス, 8 (1995), 233.
- 13) 今村 晃, 瀧川家光, 今村 茂, 沖森麻佑巳, 草野昭彦: 材料とプロセス, 4 (1991), 1259.