

# 吹込みガスにより容器壁-液体間に生成する ガスカーテンの挙動

向井 楠宏\*・李 林峰\*<sup>2</sup>・松下 泰志\*

Behavior of Gas Curtain Formed at the Boundary between Container Wall and Liquid by Injection Gas

Kusuhiro MUKAI, Linfeng LI and Taishi MATSUSHITA

**Synopsis** : An almost continuous gas film, which may be called gas curtain, was formed at the boundary between water solution and solid wall with poor wettability when nitrogen gas was injected into the water solution from the bottom end of the solid wall trough porous brick.

Length of the gas curtain was observed and briefly discussed in relation to gas injection rate, inclined angle of the solid wall, NaCl concentration, concentration of surface active agent ( $C_8H_{17}SO_3Na$ ), roughness of the solid wall and porosity of the porous brick.

**Key words**: gas curtain; liquid-solid wall; wettability; gas injection rate; inclined angle; NaCl concentration; surface active agent.

## 1. 緒言

Wangら<sup>1)</sup>は連続鋳造用浸漬ノズル内(水モデル)に吹き込まれたガスの挙動および水の流れパターンを直接観察し、ガス吹込み用ポーラスレンがと水との濡れ性が悪い場合、ノズル内壁に沿ってカーテン状のガスフィルム(以下、ガスカーテンと呼ぶ)が生成することを見出した。このガスカーテンを精錬容器耐火物壁-溶鋼間に定常的に生成させることができれば、耐火物の溶損およびそれに伴う溶鋼汚染等の抑制の方策の一つになりうるものと期待される。

本研究では、そこで、水溶液-固体壁間に生成するガスカーテンの生成挙動、特に、ガスカーテン長さおよびそれに伴う各種実験条件の影響を室温において調べ、簡単な考察を試みた。

## 2. 実験装置

本実験で使用した実験装置の概略図をFig. 1に示す。アクリル製の水槽(100 cm(高さ)×50 cm(幅)×8 cm(厚さ))内に、ガスカーテンを生成させるための板を水槽内部に設置した。板には表面が滑らかなアクリル板を用い、濡れ性を調整する目的で、表面にフッ素樹脂被膜(商標名:テフロン)を被覆したものを主に使用した。窒素ガスは、Fig. 2に示すガス吹込み口から吹き込んだ。ガス吹込み口にはポーラスレンが(主に気孔率33%のもの)を用い、ガスが吹き込まれる際、アクリル板に接触するように板の下部に直接取り付けられた(Fig. 3参照)。実験に使用したポーラスレンの特性をTable 1に示す。

水中に吹き込まれる気泡の挙動は、高速ビデオカメラ(250コマ/s)を用いて観察、記録した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 ガスカーテンの生成条件

水との濡れ性が悪い(接触角:  $120 \pm 1^\circ$ ) フッ素樹脂被覆板を用いて実験を行った。その結果、Fig. 4に示すように、ガス吹込み口からある高さのところまでガスフィルム状の気泡が水と被覆板の間にほぼ連続的に生成することが確認された。壁面と水との濡れ性がよい場合、すなわち、フッ素樹脂被覆板に替えて、濡れ性の良い(接触角:  $72 \pm 2^\circ$ ) アクリル板を用いた場合には、気泡が、しかもその大部分が板表面から分離した状態で上昇していきただけであり、(Fig. 5)フッ素樹脂被覆板を用いたときのような気泡の膜(Fig. 4)は生成しなかった。この結果より、壁面と液体との濡れ性が悪い場合にのみガスカーテンの生成することがわかった。接触角は静滴法により測定した。

### 3.2 カーテン長さおよび各種因子の影響

ガスカーテン長さの定義: ガスカーテンの長さは、Fig. 3に示すように、ガスカーテンがガス吹込み口から壁面に沿ってほぼ連続的に生成している範囲とした。というのも、高速度ビデオカメラ撮影の映像を詳細に観察してみると、その範囲でもガスカーテンが短時間ではあるが途切れる場合がしばしばあり、時間的に完全に連続した状態のものではないことがわかったからである。また、ガスカーテンの上端は次のように定めた。壁面側のガスカーテンの輪郭線は、吹込み口から上方に向かって壁面とほぼ平行に延びて

平成15年10月15日受付 平成15年12月22日受理 (Received on Oct. 15, 2003; Accepted on Dec. 22, 2003)

\* 九州工業大学工学部 (Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology, 1-1 Sensui-cho Tobata-ku Kitakyushu 804-8550)

\*<sup>2</sup> 九州工業大学大学院生 (Graduate Student, Kyushu Institute of Technology)

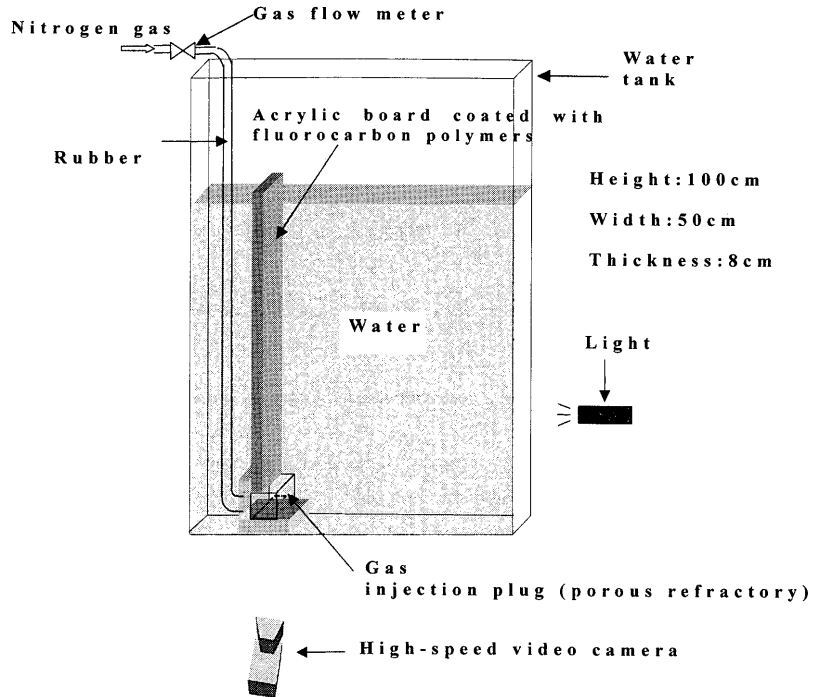


Fig. 1. Schematic structure and arrangement of experimental apparatus for water model study.

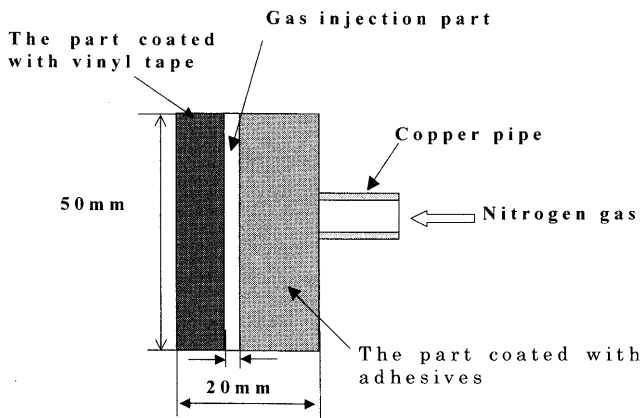


Fig. 2. Upper view of gas injection plug (porous refractory).

Table 1. Chemical composition and physical properties of porous refractory specimens.

Specimen	A	B
Chemical composition	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 3mass% SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 3mass% SiO <sub>2</sub>
Bulk density (Mg · m <sup>-3</sup> )	2.60	3.05
Apparent porosity (%)	33.0	21.2
Mean pore diameter (μ m)	170	110

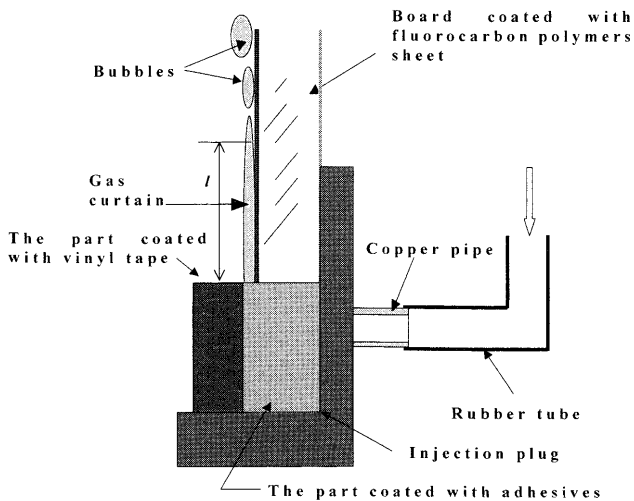


Fig. 3. Side view of the gas injection plug.

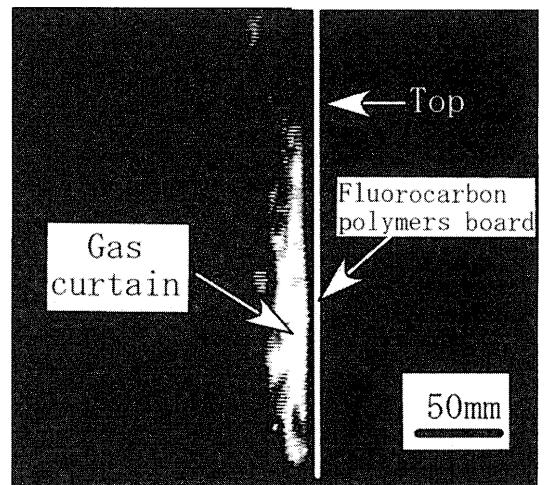


Fig. 4. Gas curtain formed at the boundary between water and fluorocarbon polymers (Teflon) board wall by injecting nitrogen gas into the water at the gas injection rate,  $Q_g = 9.5 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ .

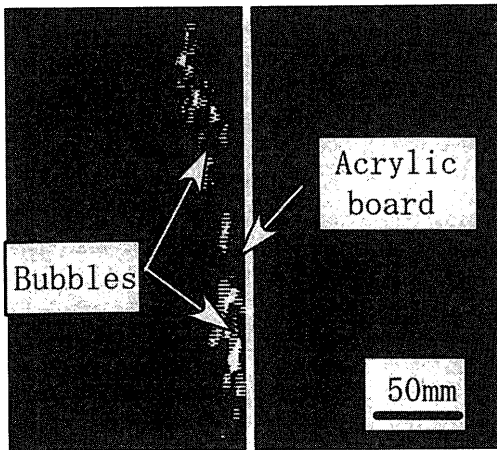


Fig. 5. Gas bubbles formed along the wall of acrylic board by injecting nitrogen gas into the water at the gas injection rate,  $Q_g = 9.5 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ .

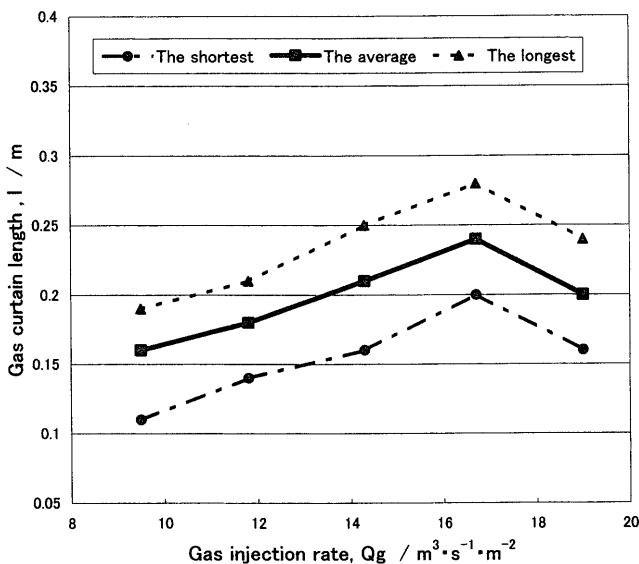


Fig. 6. Relationship between gas curtain length and gas injection rate.

いるが、ある高さに到達すると、殆んどの場合、大気泡が形成されることにより、そこから輪郭線は水側へ急激に傾きはじめる。このような傾きが認められるところを上端とした。ガスカーテンはまた、時間の経過とともに伸縮を繰り返す。そこで測定値としては、最大長さ、最小長さおよびその平均値を求め、図に示した。

ガス流速：Fig. 6にガスカーテン長さとガス流速 ( $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ )との関係を示す。ガスカーテンの長さはガス流速が大きくなるにつれて長くなるが、 $16.7 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ を超えるとガスカーテンは短くなる。ガス流速が増加するにつれて、壁面に沿って上昇するガスが、壁面に接触している水をより上方まで押しよけ、カーテンが長くなる。流速がある値以上になると、カーテン上端部より下の領域で、カーテンが厚くなり、大気泡状の不均一な厚さの部分形成されるようになる。その結果、ガスカーテンが不連続になり

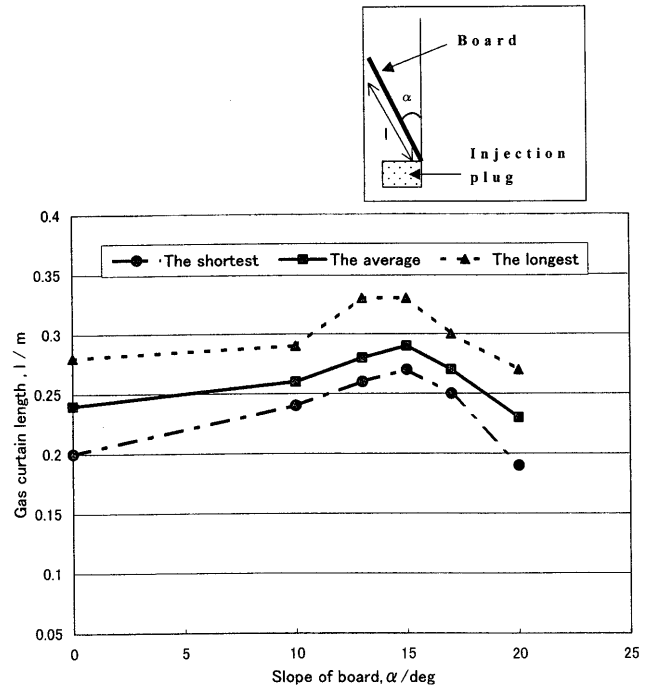


Fig. 7. Relationship between gas curtain length and slope of board.

崩壊し、短くなると考えられる。

板の傾き：板の傾きの違いによるガスカーテンの長さの変化の観察を行った。ここでは、ガスカーテンの長さは、板に沿ったガスカーテンの長さとして定義する。Fig. 7のように板を傾け、傾きの角度を $\alpha$ とした。 $\alpha$ を $2.5^\circ$ 間隔で $10^\circ$ から $20^\circ$ まで変化させ、測定を行い、Fig. 7に示す結果を得た。 $15^\circ$ までは $\alpha$ が大きくなるに従ってガスカーテン長さは長くなるが、 $15^\circ$ 以上では $\alpha$ が大きくなるにつれてガスカーテンは短くなった。板の傾きが大きくなるにつれて、気泡の垂直方向の上昇速度は遅くなり、ガスカーテンの厚さが増し、厚さも不均一になる。その結果、Fig. 6でガスカーテン長さが最大値を超えた流速の場合と同様の理由で、ガスカーテン長さが短くなると考えられる。

気孔率：気孔率21%のれんがを吹込み口に用いた場合、Fig. 8に示すように、気孔率33%の場合に比してガスカーテンが短くなる傾向を示す。Table 1に示すように、気孔率の大きい方が、平均気孔直径も大きい。それゆえ、この効果には、気孔径も影響している可能性がある。

固体板の表面粗さ：実操業に用いるれんが表面は粗い。そこで、アクリル板に替えて、表面の粗い市販のアルミナ質ポーラスれんがを板状にし、その表面にフッ素樹脂被覆したものを用いて実験を行った。その結果は、アクリル板にフッ素樹脂被覆したものとはほぼ同様の結果(Fig. 9)が得られ、両者の間に明瞭な差異は見出せなかった。

NaCl濃度：NaCl濃度が5 mass%から25 mass%までの水溶液を用い、5%間隔で測定を行い、Fig. 10, Fig. 11に示す結果を得た。

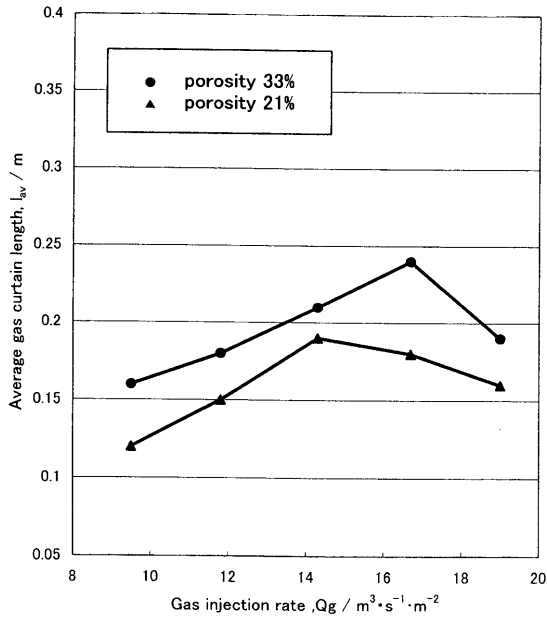


Fig. 8. Effect of porosity of injection plug and gas injection rate on gas curtain length.

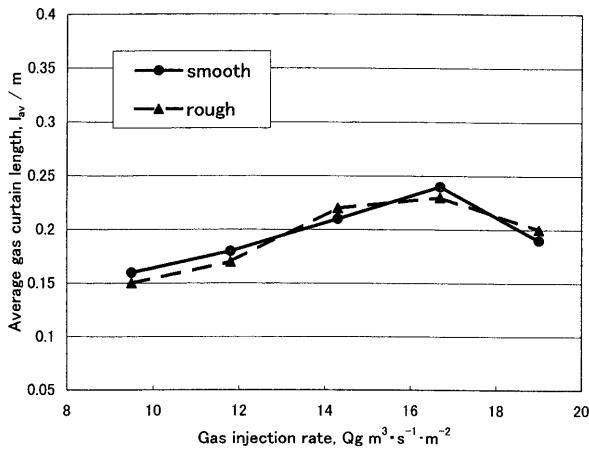


Fig. 9. Effect of surface roughness of board and gas injection rate on gas curtain length.

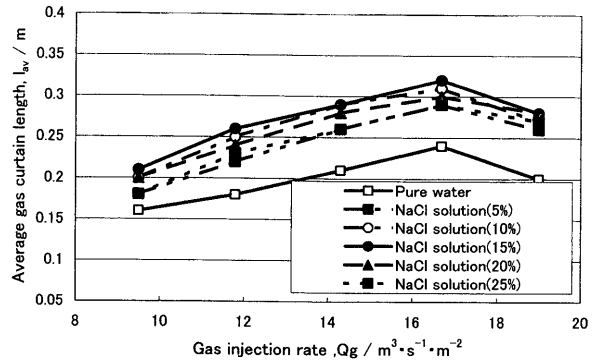


Fig. 10. Relationship between average gas curtain length and gas injection rate for various NaCl water solutions.

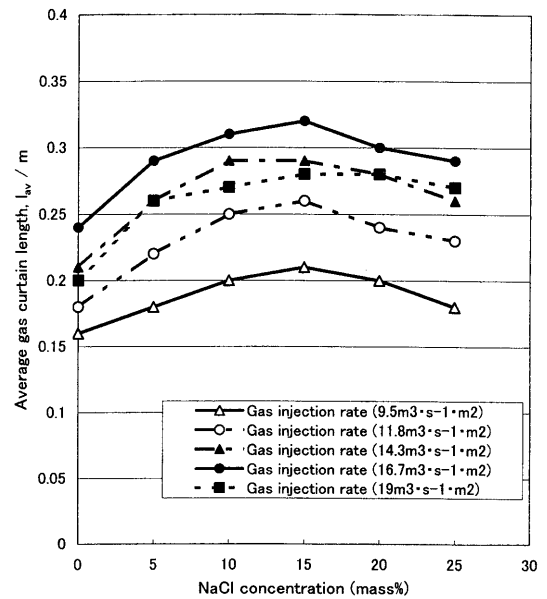


Fig. 11. Relationship between average gas curtain length and NaCl concentration of water solution for various gas injection rates.

Fig.10に示すように、NaCl水溶液でも、水の場合と同様、ガスカーテン長さは、ガス流速が  $16.7 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$  付近で最大値を示す。

一方、Fig.11に示すように、ガスカーテン長さはNaCl濃度の増加とともに増加する。そして15 mass%付近で最大値に達したのち、濃度の増加とともに減少する。

Fig.12にNaCl水溶液の密度<sup>2)</sup>および動粘度<sup>2)</sup>とNaCl濃度との関係を示す。NaCl濃度15 mass%までは、密度、動粘度とも、NaCl濃度の増加に従って直線的に増大する。15 mass%を超えた場合、密度は同様に直線的に増大するのに対して、動粘度はその増加割合が大きくなる。密度の増加は、気相の浮力を増大させるので、ガスカーテン長さの伸長に寄与すると考えられる。一方、動粘度はガスの上昇の際の、その上部の壁面に接する水溶液の排除を防げる方向に働くので、その結果、ガスカーテンが厚く不均一に

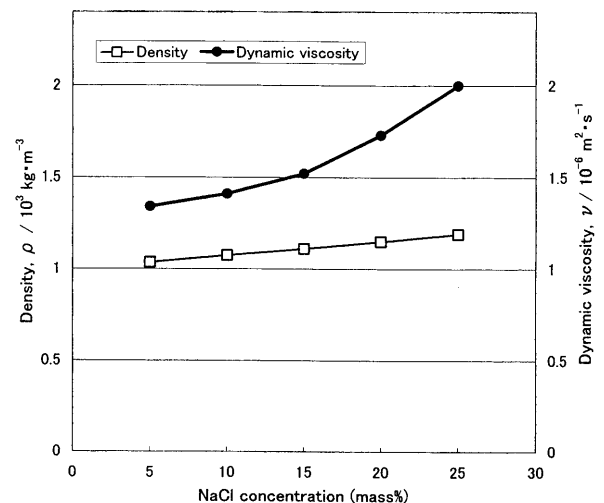


Fig. 12. Relationship between density, dynamic viscosity and NaCl concentration of water solution.<sup>2)</sup>

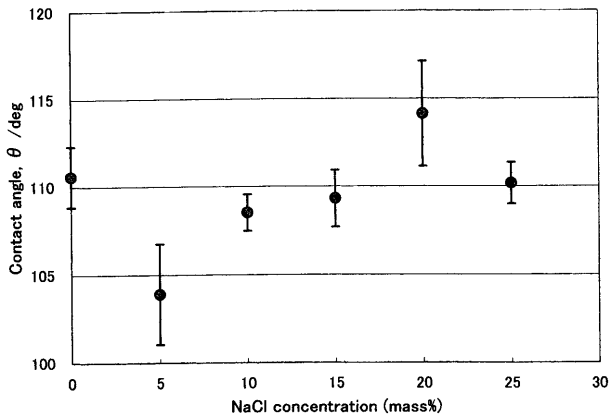


Fig. 13. Relationship between NaCl concentration and contact angle of water solution-fluorocarbon polymers board system.

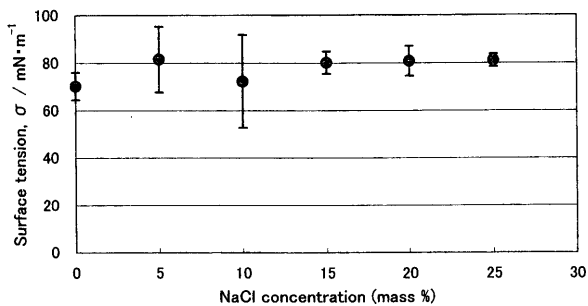


Fig. 14. Relationship between NaCl concentration and surface tension of water solution.

なり, Fig. 6, Fig. 7と同様の理由で, ガスカーテン長さが減少すると推測される。NaCl濃度15 mass%以上になると, 動粘度の増加割合が増大するので動粘度の作用が顕在化し, 15 mass%以上では, NaCl濃度の増加とともに, ガスカーテン長さが減少すると考えられる。

Fig.13に静滴法で求めたNaCl水溶液-テフロン板間の接触角とNaCl濃度との関係を示す。接触角の測定値のばらつきを考慮に入れると, NaCl濃度に対する接触角の明確な変化は認められず, おおよそ一定とみなすのが妥当である。その場合, ガスカーテン長さは接触角が殆んど変化していないにもかかわらず, 変化していることになり, この場合のガスカーテンの長さの変化を接触角の変化に帰因することはできない。Fig.14には, 静滴法で求めたNaCl水溶液の表面張力とNaCl濃度との関係を示す。Fig.14から明らかのように, 表面張力はNaClの濃度の変化に対して, 殆んど変化せず一定の値を示す。それゆえ, ガスカーテンの長さの変化を表面張力に帰因することもできない。

Fig.15には, 水に表面活性剤 $C_8H_{17}SO_3Na$ を0.18 mass%添加した場合のガスカーテン長さの変化を示す。いずれのガス流速においても, ガスカーテンの長さの明瞭な減少が認められる。ガスカーテン長さが最大となる流速は, 純水の場合と殆んど変わらない。 $C_8H_{17}SO_3Na$ は水の表面張力を著しく低下させる<sup>3)</sup>。さらに, 0.18 mass%  $C_8H_{17}SO_3Na$ 水

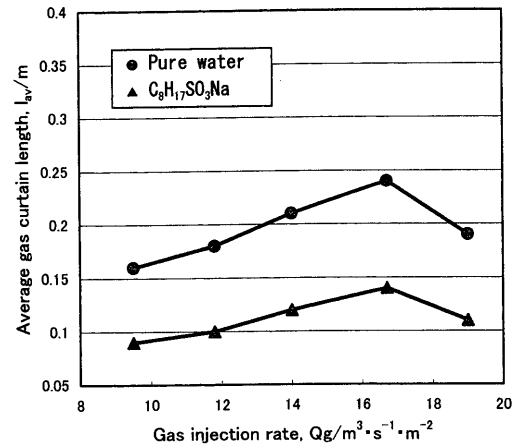


Fig. 15. Effect of  $C_8H_{17}SO_3Na$  addition (0.18 mass%) into water on average gas curtain length.

溶液とフッ素樹脂被覆板間の接触角を, 静滴法で測定したところ, 純水の場合より $5^\circ$  (測定範囲のばらつき $\pm 1^\circ$ )低くなり,  $C_8H_{17}SO_3Na$ の微量の添加により明らかに減少する。 $C_8H_{17}SO_3Na$ 水溶液では, ガスカーテンの先端が壁面から離れやすく, しかもカーテン自体も厚さが不均一な大気泡状になりやすいことが観察された。それゆえ,  $C_8H_{17}SO_3Na$ 添加によるガスカーテン長さの減少は, おもに, 濡れ性がよくなることによってガスカーテンそのものが生成しにくくなることによると考えられる。さらに, 表面張力の低下によってカーテン表面の不安定性が増すことも, カーテン崩壊の一因になりうると考えられる。

以上の簡単な, しかも容器幅等限られた実験条件のもとでの結果と, それについての定性的な考察からではあるが, それをもとにして考えると, 溶鋼-酸化物れんが系は, 本実験に用いた水溶液-フッ素樹脂系より, ガスカーテンの生成とその伸長に有利な性質を持っていると推察できる。すなわち, 1)一般的に, 溶鋼-耐火物系の方が水溶液-フッ素樹脂系の場合に比べ接触角が大きいので, 水溶液-フッ素樹脂系の場合に比べガスカーテンが生成しやすい, 2)溶鋼の方が水溶液の場合より密度が大きく, しかも動粘度は水(20°C)の $1 \times 10^{-6} m^2/s$ に対して, 溶鉄(1600°C)は $0.7 \times 10^{-6} m^2/s$ <sup>4)</sup>程度で, 低い傾向にあるので, 溶鋼-耐火物系の方がガスカーテンが長くなる可能性がある。

なお, 炉壁の角度(板の角度), ポーラスプラグの気孔率, 気孔径は実操業の場合, 調整は可能であろう。また, 耐火物の表面粗さのガスカーテン長さへの影響がないことは, 本実験結果(Fig.10)で示されており, 実操業においても大きな変化はないと推察される。

#### 4. 結言

固体壁-水溶液間に生成するガスカーテンの挙動を観察し, 以下の結果を得た。

(1) 固体壁-水溶液間の濡れ性が良い場合、ガスカーテンは生成しないが、濡れ性が悪い場合、壁面に沿ってほぼ連続的なガスの膜、すなわちガスカーテンが生成する。

(2) ガスカーテンの長さは、ガス流速の増大とともに増大し、最大値（本実験条件のもとでは  $16.7 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ ）を経たのち減少する。

(3) ガスカーテンの長さは、固体壁を液体側へ傾けるにしたがって増大するが、傾きの角度が  $15^\circ$  を越えると、傾斜角度の増加とともに減少する。

(4) ガスカーテン長さは、ガス吹込み用ポーラスレンの気孔率33%の方が21%の場合よりも長くなる傾向を示す。

(5) フッ素樹脂被覆した表面が滑らかなアクリル板と、表面が粗なアルミナ質ポーラスレンが板との間に、ガスカーテン長さの相違は認められない。

(6) ガスカーテンの長さは、NaCl濃度の増加とともに

増大するが、15 mass%で最大値に達したのちは、濃度の増加とともに減少する。

(7) 表面活性剤  $\text{C}_8\text{H}_{17}\text{SO}_3\text{Na}$  を添加 (0.18 mass%) すると、ガスカーテンの長さは著しく減少する。

(8) ガスカーテン長さに及ぼす諸因子についての簡単、定性的な考察からではあるが、溶鋼-酸化物れんが系は、本実験に用いた水溶液-フッ素樹脂系より、ガスカーテンの生成とその伸長に有利な特質を持つと考えられる。

## 文 献

- 1) Z.Wang, K.Mukai and D.Izu: *ISIJ Int.*, **39** (1999), 154.
- 2) 化学便覧基礎編II, 改訂3版, 日本化学会編, 丸善, (1984), II-9, II-47.
- 3) Z.Wang, K.Mukai and I.J.Lee: *ISIJ Int.*, **39** (1999), 553.
- 4) Handbook of Physico-Chemical Properties at High Temperatures, ed. by Y.Kawai and Y.Shiraishi, ISIJ, Tokyo, (1988), 2, 96.