注入流のガス吸収挙動に関する水モデル実験

岡山 敦^{1)*}・樋口 善彦²⁾

A Water Model Experiment on Gas Absorption during Tapping

Atsushi OKAYAMA and Yoshihiko HIGUCHI

Synopsis : Gas absorption phenomena during tapping from converter to ladle were studied by water model experiments. Gas absorption rate to molten steel was simulated by oxygen-water system and changes of dissolved oxygen in the vessels were continuously observed. In this study, effects of nozzle diameter and tapping height on volumetric coefficient for gas absorption rate, Ak_o , were investigated and gas absorption phenomena were discussed.

Changes of water amount in both upper and lower vessels were calculated with Torricelli's law and changes of DO in lower vessel were estimated by the kinetics formula considering dilution. Maximum Ak_o was found in the early stage of tapping. Ak_o after the middle stage of tapping were in good agreement with reported values. Changes of Ak_o during tapping could be classified into 3 regions, I: Growth, II: Transition, III: Steady. The growth of plunge pool was also studied by estimating the depth of penetration of bubbles, H_p , during tapping and was associated to gas absorption phenomena. As a result, strong relationship between the gas absorption phenomena and the growth of plunge pool was confirmed. The similar behavior was found in various initial tapping height and nozzle diameter settings by estimating the experimental results with $H_{p,obs}/H_{p,calc.}$ and $Ak_{o,obs}/Ak_{o,calc.}$. By using this similarity, experimental results could be reproduced by the empirical formula.

Key words : tapping; dissolved oxygen; gas absorption; volumetric coefficient; bubbles penetration.

1. 緒言

製鋼工程において、転炉から取鍋への出鋼もしくは連続鑄造の取鍋からタンディッシュへの溶鋼注入時には空気巻込みが生じ、窒素ピックアップもしくは再酸化が生じることが課題となっている。溶鋼へのガス挙動に関してはこれまでに、ガス吹込みによる溶鋼中窒素の脱離速度^{1,2)}、溶鋼への窒素吸収、脱離速度^{3,4)}、脱離速度に及ぼす界面活性元素の影響^{5,6)}、タンディッシュでの空気巻込み挙動^{7,8)}等に関する検討が報告されてきた。しかしながら、これらの報告は基礎研究もしくは二次精錬段階以降での検討である。一方で、化学工学の分野では水モデルを用いた注入流のガス吸収挙動^{9,10)}を始め、多くの研究が報告されているが、これらの多くは注入速度が一定となる定常状態での検討であり、時間とともに取鍋内溶鋼量、出鋼速度、出鋼孔-湯面間距離といったパラメータが変わる転炉出鋼時のガス吸収挙動に関してはAsai and Muchi¹¹⁾、Chohら^{12,13)}による報告があるものの、まだ不明な点が多いと考えられる。そこで、本研究は注入中に注入速度、高さが変わる転炉を模擬した水モデルを用い、容器内の水中溶存ガス濃度を連続測定することで注入中のガス吸収速度を算出し、注入時のガス吸収挙動に及ぼす諸因子の影響を検討した。

2. 実験方法

水中には通常8 ppm程度の酸素が溶存しており、溶存酸素濃度 (Dissolved oxygen, 以下DO) として測定できる。本研究では、窒素が溶鉄に吸収される様子を水-酸素系で再現した。転炉精錬後の低窒素溶鋼を予めDOを低減した水で模擬し、注入中に空気中の酸素を吸収して増加するDOを連続測定することで転炉出鋼中の吸窒挙動を実験的に調査した。

2・1 転炉出鋼模擬水モデル

Fig.1に示すように、転炉を模擬した容器を上部に、取鍋を模擬した容器を下部に配置した水モデルを構築した。実験条件をTable 1に示す。上容器底部には着脱式ノズルを取り付けてあり、ノズルを交換することでノズル径を調整できる。上下容器の中心軸は揃えてあり、ノズルは上容器中心から1/4D離れた位置に配してあり、注入流の落下位置も下容器中心から1/4D離れた位置である。ただし、D: 上容器および下容器の直径である。上下容器内には溶存酸素計 (TOA DKK製, DO-31P) を取り付け、注入中のDOを1秒毎に連続測定できる。溶鋼を模擬した水の量は全体で0.055 m³であり、注入開始前に上容器に0.050 m³、下容器に0.005 m³を準備した。事前に下容器に水を準備したのは、溶存酸

平成28年3月2日受付 平成28年6月20日受理 (Received on Mar. 2, 2016; Accepted on Jun. 20, 2016)

1) 新日鐵住金 (株) プロセス研究所 (Process Research Laboratories, Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, 16-1 Sunayama Kamisu Ibaraki 314-0255)

2) 産業技術短期大学機械工学科 (Department of Mechanical Engineering, College of Industrial Technology)

* Corresponding author: E-mail: okayama.rt6.atsushi@jp.nssmc.com

DOI: http://dx.doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2016-013

素計を予め水中に浸漬させておくためである。また、下容器はリフト上に設置されており、初期注入高さ（ノズル下端から下容器内の水面までの距離）を変更できる。雰囲気は1 atmの大気下で行い、後述するように下容器内でArバブリングした場合であっても注入前に換気し、下容器内の酸素濃度を20.9%に戻してから注入を開始した。飽和DOは水温に影響されることから、水温は 293 ± 1 Kに調整した。また、必要に応じて注入中の上下容器内をビデオカメラで撮影し、水面高さおよび下容器内に生成する滝壺の様子を調査した。

2・2 実験手順

事前準備として上下容器に所定量の水を満たし、水温を調整するとともに水にArを吹き込んでDOを0.80 ppmまで低下させた。ノズルのバルブを開けた時点を実験開始とし、上容器の水が無くなるまでの間、上下容器内のDOを連続測定した。この時、ノズル径、初期注入高さといったパラメータを変え、これらの因子がDO挙動に及ぼす影響を調査した。

2・3 実験条件

実験条件をTable 2に示す。Run.AからDまでは初期注入高さ、Run.EからGはノズル径を変え、Run.Cはベース条件として複数回DO挙動を調査した。また、基礎実験としてRun.HおよびIはビニルホースを通して注入し、注入流を

大気と接触させず、滝壺を生じさせない条件でのガス吸収挙動を調査した。Run.Iは下容器内に用意した水 0.015 m^3 のDOを4.37 ppmに調整し、大気からのガス吸収が生じない条件で上容器からDO = 0.80 ppmの水を 0.040 m^3 注入し、下容器内の水が上容器内の低DOの水で希釈される挙動を調査した。下容器内の初期水量を他条件よりも増量させたのは、初期水量が他条件と同様に 0.005 m^3 とした場合、希釈に伴うDO低下速度が急激であったためである。

3. 実験結果

3・1 上容器内水面高さの経時変化およびDO挙動

事前検討として、本実験装置の上容器内水面高さの経時変化およびDO挙動を調査した。ノズル径を変えた条件としたRun.CおよびRun.EからGにおいて注入中に上容器を撮影し、画像解析して算出した上容器水面高さの経時変化をFig.2に示す。水面高さの低下速度は水面が高い注入初期ほど大きく、ノズル径が大きいほど大きい結果となった。容器からの流出速度は(1)式に示すトリチェリの定理で表すことができる。ただし、 v_0 ：ノズル取付位置での注入流速 (m/s)、 g ：重力加速度 ($=9.81 \text{ m/s}^2$)、 h ：上容器側のノズル取付位置—上容器の水面間距離 (m) である。

$$v_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (1)$$

実験条件を代入して求めた水面高さの計算値をFig.2に実線で示す。計算結果は実測値を概ね再現できており、以後の解析ではトリチェリの定理で求めた注入速度および水量を用いて解析を行った。また、Run.Cの上容器内DOの経

Fig. 1. Experimental apparatus.

Table 1. Experimental settings.

Item	Setting
System	Water-Oxygen
Amount of water	$0.050 + 0.005 \text{ m}^3$
Initial height (from bottom of nozzle to water surface)	0.60~0.90 m
Diameter of vessel	$\phi 400 \text{ mm}$
Diameter of nozzle	$\phi 10.5, 14, 16.5, 21 \text{ mm}$
Temperature of water	$293 \pm 1 \text{ K}$
Atmosphere	Air, 1 atm ($\text{O}_2 = 20.9 \text{ vol\%}$)

Table 2. Experimental conditions.

Run	A	B	C (base)	D	E	F	G	H	I
Diameter of nozzle (mm)	ϕ 14				ϕ 10.5	ϕ 16.5	ϕ 21	ϕ 14	
Initial height (m)	0.60	0.70	0.80	0.90	0.80				0.74
Average tapping rate (m³/min)	0.021				0.011	0.030	0.039	0.021	0.027
Tapping time (s)	140				275	100	77	140	90
Atmosphere	Air (O ₂ = 20.9 vol%)							Covered with tube	
Initial DO in upper vessel (ppm)	0.80								
Initial DO in lower vessel (ppm)	0.80								4.37

時変化を Fig.3 に示すが、注入中の DO はほとんど変化していないことから、以後の解析では上容器内 DO を一定値として取り扱った。

3・2 大気遮断条件での DO 挙動

注入流を大気遮断した Run.H の下容器内 DO の経時変化を Fig.4 に示す。注入中の DO 増加は僅かであり、注入流を大気遮断した条件ではガス吸収がほとんど生じないことが分かる。このことから、ガス吸収は注入流の側面および滝壺部で生じると考えられる。ここで、注入流の側面と滝壺部でのガス吸収量を見積もり、注入流の側面からのガス吸収量は僅かであるとした Choh ら¹³⁾ の報告を踏まえると、注入時のガス吸収サイトは主に滝壺部であると推定される。

3・3 希釈挙動

下容器内の水が上容器内の水で希釈される条件とした Run.I の経時変化を Fig.5 に示す。系外からの酸素供給が無いと考えた場合の酸素収支を考えると (2) 式が成り立つ。Run.I の実験条件を (2) 式に代入して求めた DO 挙動を Fig.5 に示す。

$$C_{DO-t_1} = \frac{w_{DO-t_1}}{W_{t_1}} \cdot 10^3 = \frac{C_{DO-t_0} \cdot W_{t_0} + C_{DO}^u \cdot Q_{t_0} \cdot dt}{W_{t_0} + Q_{t_0} \cdot dt} \quad (2)$$

Fig. 2. Changes of height of water in upper vessel (Run.C, E~G).

Fig. 3. Changes of DO in upper vessel during tapping (Run.C(base)).

ただし、 C_{DO} ：下容器側の溶存酸素濃度 (ppm)、 w_{DO} ：下容器内の溶存酸素の質量 (g)、 W ：下容器内の水量 (kg)、 C_{DO}^u ：上容器側の溶存酸素濃度 (ppm)、 Q ：注入流の質量流量 (kg/s) である。以後、特に断りが無い限り、上付きの u を添えた場合は上容器内の値を表し、上付きの添え字が無い場合は下容器内の値を表すものとする。また、下付きの添え字 t は時間を表し、 t_0 ：現在の値、 t_1 ：次の時間ステップの値である。計算結果は実測値を概ね再現できており、本実験系において希釈に伴う酸素収支が成り立っていることが確認できた。なお、初期水量を変えた別の実験の結果も (2) 式で再現できたことから、希釈挙動に及ぼす初期水量の影響は無いと考えられる。

3・4 注入中のガス吸収挙動

ベース条件として複数回実験した Run.C の DO 挙動を Fig.6 に示す。注入開始後 10 秒あたりから DO が増加し、初期に急激に DO が増加した後、DO は一定値となる挙動を示した。注入流を大気遮断し、滝壺を生じさせなかった条件では DO がほとんど変化しなかったことを考慮すると、Run.C では滝壺の生成に伴って DO が急激に増加したと考えられる。また、同一条件で複数回実験しても概ね同じ DO 挙動が得られており、本実験装置の再現性は良好であることが確認できた。なお、別に調査した実験から、DO 計の分

Fig. 4. Changes of DO in lower vessel during tapping (Run.H).

Fig. 5. Changes of DO in lower vessel (Run.I).

析遅れ時間は3秒程度、応答速度は90%飽和値読み取りまで20秒程度であるが、注入初期のDO変化量は飽和値との差と比較すると小さいことから、注入開始直後にDOが停滞するのは混合遅れに起因すると思われる。

3・5 初期注入高さおよびノズル径の影響

初期注入高さを変えたRun.AからDのDO挙動をFig.7に、ノズル径を変えたRun.CおよびRun.EからGのDO挙動をFig.8に示す。初期注入高さが高い条件ほど注入初期のガス吸収速度が大きく、到達DOも高い結果となった。この結果は、Chohら¹³⁾が報告した出鋼高さが高いほどガス吸収量も大きくなる結果を支持するものである。一方、ノズル径を変えた条件では、ノズル径が大きい条件ほど注入初期のガス吸収速度は大きかったが、ノズル径が小さい条件ほど到達DOが高くなる結果となった。

4. 考察

4・1 ガス吸収量の経時変化

下容器内の水量の経時変化が算出できると、注入中の上容器内のDOは一定であるから、注入速度と下容器内のDOの経時変化から(3)式、(4)式を使って酸素収支を検討できる。

Fig. 6. Changes of DO in lower vessel during tapping (Run. C(base)).

Fig. 7. Effect of initial height on changes in DO during tapping.

$$w_{DO} = W \cdot C_{DO} \cdot 10^{-3} \dots\dots\dots (3)$$

$$w_{DO}^u = (W - w_i) \cdot C_{DO}^u \cdot 10^{-3} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 w_{DO}^u : 上容器から流入した酸素量 (g)、 w_i : 下容器内の入置水量 (kg) である。一例として、ベース条件Run.Cの酸素収支をFig.9に示す。下容器内の全酸素量 w_{DO}^u と上容器内の水が起源である $w_{DO,u}$ の差分が注入に伴って吸収された酸素を示す。下容器内の酸素量は時間経過とともに増加する傾向を示し、注入末期での内訳としては注入に伴って大気から吸収された酸素の割合が大きい結果であった。また、(5)式を使って算出した単位時間あたりの酸素吸収量を算出できる。

$$O_{ab} = \frac{(W_{t_1} \cdot C_{DO_{t_1}} - W_{t_0} \cdot C_{DO_{t_0}})}{t_1 - t_0} \cdot 10^{-3} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 O_{ab} : 酸素吸収速度 (g/s)、 t : 時間 (s) である。(3)～(5)式を用いて算出したRun.Cの酸素吸収速度の経時変化をFig.10に示す。Fig.10に示すように、注入初期は下容器内の酸素量は少ないものの容器内の水量も少ないため、酸素吸収量自体は大きく、中期から末期にかけて徐々に減少

Fig. 8. Effect of nozzle diameter on changes in DO during tapping.

Fig. 9. Changes of cumulative oxygen in lower vessel (Run. C(base)).

する傾向となり、これらの傾向は他の条件でも同様であった。

4・2 希釈を考慮したガス吸収速度式

注入中の下容器には上容器から低DOの水が流入するため、下容器のDOの変化速度を(6)式に示すように希釈を考慮する形で定式化した。

$$\frac{dC_{DO}}{dt} = \frac{Ak_O}{V_t} (C_{DO}^* - C_{DO}) + \frac{C_{DO}^u \cdot Q_t}{\rho \cdot V_t} \quad (6)$$

ただし、 Ak_O ：吸ガス容量係数 (m^3/s)、 V ：下容器内の水の体積 (m^3)、 ρ ：水の密度 (kg/m^3) である。 C_{DO}^* は飽和溶存酸素濃度であり、水温および酸素分圧により変化するが、本報では注入時の酸素吸収に伴う酸素分圧の変化は僅かであり、水温の変化は無いと仮定し、水温293 K、酸素分圧0.21 atmでの $C_{DO}^* = 8.80$ ppmとして解析した。(6)式を用いて算出した吸ガス容量係数 Ak_O をFig.11に示す。ここで、酸素-水系の吸ガス容量係数に関しては、Bin¹⁴⁾により、複数の水モデルでの報告値^{10,15-17)}をもとに算出した(7)～(10)式に示す実験式が報告されている。

Fig. 10. Changes in oxygen absorption rate during tapping (Run.C(base)).

Fig. 11. Changes in Ak_O during tapping (Run.C(base)).

$$Ak_O = 0.13 \cdot v_0^{1.7} \cdot d_0^{1.65} \cdot L_j^{0.5} \quad (7)^{14)}$$

$$\frac{Ak_O}{d_0^3} = 0.222 \cdot (Fr_0')^{0.817} \cdot \left(\frac{g^2}{v_L}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{v_L^2}{d_0^3 g}\right)^{0.2} \cdot \left(\frac{L_j}{d_0}\right)^{0.2} \quad (8)^{14)}$$

$$Ak_O = 4.28 \cdot 10^{-4} \cdot N_j^{0.71} \cdot d_0^{0.2} \cdot L_j^{0.2} \quad (9)^{14)}$$

$$Ak_O = 3.1 \cdot 10^{-4} \cdot N_j^{0.77} \cdot d_0^{0.1} \cdot L_j^{0.5} \quad (10)^{14)}$$

ここで、 d_0 ：ノズル直径 (m)、 L_j ：注入流の長さ (m)、 Fr_0' ：修正フルード数 ($= Q^2 / (g \cdot d_0^5)$)、 v_L ：動粘度 (m^2/s)、 N_j ：注入に伴う動力 (N) である。Fig.11にはこれらの式から求めた吸ガス容量係数 Ak_O を同時に示す。これらの式から求まる吸ガス容量係数 Ak_O は、容器内水量が一定となる循環系の実験装置において、注入に伴って生成する滝壺が十分に生成された定常状態での値である。本実験系はバッチ式の注入挙動を模擬しており、注入初期と末期では滝壺の生成状態も大きく変化するが、下容器内にある程度の水が満たされた注入中期から末期にかけて、吸ガス容量係数 Ak_O を実験式で再現できた。(7)式から(10)式までの違いは、ノズル径および注入流の長さといった装置形状、ならびに、修正フルード数もしくは注入に伴う動力で整理するかの違いである。本報では、ノズル径および注入流の長さが本実験系に近く、実験結果を良く再現できる(10)式を用い、実験で得た Ak_O を計算値で除した値で整理して吸ガス挙動をより詳細に検討する。一例として、Run.Cの Ak_O を(10)式で求めた Ak_O で除して求めた Ak_{O_obs}/Ak_{O_calc} の経時変化をFig.12に示す。Fig.12に示すように注入中の吸ガス容量挙動は、 Ak_{O_obs}/Ak_{O_calc} が急激に増加する領域、増加速度が緩やかになる領域、一定となる領域に分けられ、これらの領域を滝壺の生成に応じて、I：成長期、II：遷移期、III：安定期と大きく3つの領域に分類した。この傾向は初期注入高さやノズル径に関わらず同様に見られた。吸ガス容量係数は気液界面積と物質移動係数の積であり、気

Fig. 12. Changes in Ak_{O_obs}/Ak_{O_calc} during tapping (Run.C(base)).

液界面積に大きく影響する気泡の生成挙動に着目すると、I：成長期では下容器全体に気泡が広がる状態であると考えられる。II：遷移期では、水面が高くなったことで下容器全体に広がっていた気泡が注流入直下に集まって気泡柱を形成しており、I：成長期とII：遷移期の境は気泡柱の生成挙動が関与していると考えられる。また、III：安定期では、気泡柱の成長が飽和する領域であると考えられる。ここで、II：遷移期からIII：安定期に変わる時間を T_c for Ak_0 と定義し、以後の考察に用いることにする。

4・3 注入に伴う気泡到達深さ

注入中の滝壺の様子を撮影した動画から求めた注入に伴う気泡到達深さ $H_{p_obs.}$ を (11) 式に示す実験式¹⁴⁾ とともに Fig.13 に実線で示す。Fig.13 中の白丸は画像解析から求めた気泡到達深さの実測値であり、点線は (1) 式で求めた注入速度から求めた下容器の水面高さである。

$$H_p = 1.20 \cdot V_j^{0.77} \cdot d_0^{0.625} \cdot L_j^{-0.094} \quad (11)^{14)}$$

ここで、 H_p ：水面からの気泡到達深さ (m)、 V_j ：水面位置における注入速度 (m/s) である。注入初期は容器内の水量が少ないため注入に伴う気泡は容器底部に到達する。注入中期から末期に差し掛かると気泡先端が容器底部から離れ、この時の時間を T_c for bubbles と定義する。 T_c for bubbles は容器内の浴深と実験式で求めた気泡到達深さの交差する時間と概ね一致した。ここで4・2項で定義した T_c for Ak_0 と T_c for bubbles を比較した図を Fig.14 に示す。Fig.14 に示した黒丸は初期注入高さ、白丸はノズル径を変更した条件であるが、 T_c for Ak_0 と T_c for bubbles は条件の違いに関わらず一致しており、これは注入に伴う吸ガス挙動が容器内の滝壺生成挙動に強く相関していることを示している。

4・4 気泡到達深さをを用いた注入中の吸ガス挙動の定式化

気泡到達深さを (11) 式による計算値で除した $H_{p_obs.}/H_{p_calc.}$ と $Ak_{O_obs.}/Ak_{O_calc.}$ の関係を Fig.15 に示す。上記した方法で実験結果を整理することで、初期注入高さやノズル径

に関わらず全ての実験結果を統一的に説明することができた。ここで、 $Ak_{O_obs.}/Ak_{O_calc.}$ が 0.80, 1.00 に達する位置で領域を分け、その時の $H_{p_obs.}/H_{p_calc.}$ をそれぞれ 0.50, 0.85 に対応させる。 $H_{p_obs.}/H_{p_calc.}$ は常に 1.00 以下であり、気泡先端が容器底部から離れるまでは $H_{p_obs.}$ は容器内の水位と同じとみなせるため、(12) 式から (14) 式に示すように $Ak_{O_obs.}/Ak_{O_calc.}$ を $H_{p_obs.}/H_{p_calc.}$ で定式化することで、注入中の吸ガス挙動を全領域に渡って表すことができるようになる。

$$\text{I: Growth } (0 < H_{p_obs.}/H_{p_calc.} < 0.5) \\ Ak_{O_obs.}/Ak_{O_calc.} = 15.53 \cdot (H_{p_obs.}/H_{p_calc.})^{4.19} \quad (12)$$

$$\text{II: Transition } (0.5 \leq H_{p_obs.}/H_{p_calc.} < 0.85) \\ Ak_{O_obs.}/Ak_{O_calc.} = 1.05 \cdot (H_{p_obs.}/H_{p_calc.})^{0.31} \quad (13)$$

$$\text{III: Steady } (0.85 \leq H_{p_obs.}/H_{p_calc.}) \\ Ak_{O_obs.}/Ak_{O_calc.} = 1.00 \quad (14)$$

Fig.16 および Fig.17 には (12) 式から (14) 式を用いて算出した Ak_0 を (6) 式に代入して求めた DO の経時変化を示す。ただし、容器内の水量は (1) 式、 $Ak_{O_calc.}$ は (7) 式、 $H_{p_calc.}$ は (11) 式を用いて求めた。初期注入高さが高く、ノ

Fig. 14. Relation between critical time for bubbles and Ak_0 .

Fig. 13. Changes in depth of penetration of bubbles during tapping (Run.C(base)).

Fig. 15. Relation between $H_{p_obs.}/H_{p_calc.}$ and $Ak_{O_obs.}/Ak_{O_calc.}$.

ズル径が大きい条件ほど初期のガス吸収速度が大きく、初期注入高さが高く、ノズル径が小さい条件ほど到達DOが高い結果が再現できており、気泡生成挙動に着目した吸ガス挙動解析が妥当であることが示された。一方で、ノズル径が大きい条件のガス吸収挙動に関しては計算結果のほうがガス吸収量を少なく見積もる傾向であった。本報では Ak_0 を算出する際に d_0 が0.1乗で反映される(10)式を用いたが、報告されている(7)～(10)式における Ak_0 に対する d_0 の冪指数は $-1.89 \sim -1.65$ と幅広く、ガス吸収挙動に及ぼすノズル径の影響に関しては今後の検討が必要な課題であると考えられる。

本報では水-酸素系での吸ガス挙動を滝壺生成挙動と関連付けることで、注入中の吸ガス挙動を概ね再現できた。取り扱う系が溶鋼-窒素もしくは溶鋼-酸素となった場合であっても、気液界面からのガス吸収というメカニズム自体は変わらないため、本報で得られた知見ならびに注入流に関する既往の知見¹⁸⁾をもとに溶鋼系での滝壺生成挙動ならびに吸ガス容量係数を評価することで、実操業における転炉出鋼時のガス吸収挙動を再現できると考えられる。溶鋼系では温度の影響が大きく表れ、測定や可視化の課題も多いことから調査は困難であるが、近年高精度化ならびに大規模化した数値解析が注入流への解析にも適用されてきており¹⁹⁾、数値解析と溶鋼系での実験調査を重ねること

で、未解明の部分が多い転炉出鋼時のガス吸収挙動が明らかにされていくことが期待される。

5. 結言

転炉を模擬した水モデルを用い、容器内の水中溶存ガス濃度を連続測定することで注入中のガス吸収速度を算出し、注入時のガス吸収挙動に及ぼす諸因子の影響を検討した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 注入時のガス吸収挙動は、希釈を考慮した吸ガス速度式で整理できた。また、実験結果から求めた吸ガス容量係数は注入初期に極大値を示し、容器内の浴深が深くなる注入中期から末期にかけて、既往の実験式で再現できた。
- (2) 注入時のガス吸収挙動は容器内の水量および容器内に生成される滝壺生成挙動と密接に関係しており、滝壺の生成に応じて、I：成長期、II：遷移期、III：安定期と3つの領域に分類して整理できた。
- (3) 初期注入高さやノズル径に関わらず、注入時のガス吸収挙動は H_{p_obs}/H_{p_calc} と Ak_{O_obs}/Ak_{O_calc} によって整理できた。また、これらの関係を使うことで実験結果を概ね再現でき、気泡生成挙動に着目した吸ガス挙動解析が妥当であることが示された。

文 献

- 1) M.Sano, K.Kadoguchi and K.Mori: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **24**(1984), 825.
- 2) M.Takahashi, H.Matsuda, M.Sano and K.Mori: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **27**(1987), 626.
- 3) K.Ito, K.Amano and H.Sakao: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **28**(1988), 41.
- 4) T.Kitamura, K. Miyamoto, R.Tsujino, S.Mizoguchi and K.Kato: *ISIJ Int.*, **36**(1996) 395.
- 5) R.Yamanaka, K.Ogawa, H.Iritani and S.Koyama: *ISIJ Int.*, **32**(1992), 136.
- 6) K.Harashima, S.Mizoguchi, M.Matsuo and A.Kiyose: *ISIJ Int.*, **32**(1992), 111.
- 7) H.Tomono, K.Ozaki, S.Ura, K.Iwata and T.Suzuki: *Tetsu-to-Hagané*, **69**(1983), S914.
- 8) K.Yamanaka, M.Tada, Y.Shirota, K.Yamada and T.Nakayama: *Tetsu-to-Hagané*, **71**(1985), S1083.
- 9) E.V.D.Sande and J.Smith: *Chem. Eng. J.*, **10**(1975), 225.
- 10) K.Tojo and K.Miyanami: *Chem. Eng. J.*, **24**(1982), 89.
- 11) S.Asai and I.Muchi: *Tetsu-to-Hagané*, **53**(1967), 746.
- 12) T.Choh, K.Iwata and M.Inouye: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **23**(1983), 598.
- 13) T.Choh, K.Iwata and M.Inouye: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **23**(1983), 680.
- 14) A.K.Biñ: *Chem. Eng. Sci.*, **48**(1993), 3585.
- 15) A.Ohkawa, D.Kusabikari, Y.Kawai and N.Sakai: *Chem. Eng. Sci.*, **41**(1986), 2347.
- 16) R.W.Sneath: *Water Pollut. Control*, **77**(1978), 408.
- 17) K.Funatsu, Y.Hsu, M.Noda and S.Sugawa: *Chem. Eng. Com.*, **73**(1988), 121.
- 18) R.Shimizu and M.Shimada: *Tetsu-to-Hagané*, **45**(1959), 251.
- 19) J.Rodríguez-Avila, R.D.Morales and A.Nájera-Bastida: *ISIJ Int.*, **52**(2012), 814.

Fig. 16. Effect of initial height on calculated DO during tapping.

Fig. 17. Effect of nozzle diameter on calculated DO during tapping.