

## 気液二相流によるステンレス鋼配管の 洗浄特性と洗浄水削減効果

大森智史<sup>1</sup>, 今道純利<sup>2</sup>, 新谷 進<sup>3</sup>, 松長正見<sup>2</sup>, 萩原知明<sup>1</sup>,  
渡辺 学<sup>1</sup>, 渡辺尚彦<sup>1</sup>, 崎山高明<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>東京海洋大学海洋科学部食品生産科学科, <sup>2</sup>NPO 法人食品サニタリ技術協会, <sup>3</sup>和泉工商株式会社

### Efficiency and Water Saving Effect of Rinsing with Air-Water Two-Phase Flow for Stainless Steel Pipelines

Satoshi OMORI<sup>1</sup>, Sumitoshi IMAMICHI<sup>2</sup>, Susumu SHINTANI<sup>3</sup>, Masami MATSUNAGA<sup>2</sup>,  
Tomoaki HAGIWARA<sup>1</sup>, Manabu WATANABE<sup>1</sup>, Hisahiko WATANABE<sup>1</sup>, and Takaharu SAKIYAMA<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>*Department of Food Science and Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology, 4-5-7 Konan,  
Minato-ku, Tokyo 108-8477, Japan*

<sup>2</sup>*Food Sanitary Engineering Association, 4-5-7 Konan, Minato-ku, Tokyo 108-8477, Japan*

<sup>3</sup>*Izumi Kosyo Co. Ltd., 1225 Hagisono, Chigasaki-shi, Kanagawa 253-0071, Japan*

Cleaning-in-place (CIP) of food processing equipment usually requires a huge amount of water. For reduction of water required in its final rinsing step, performance of air-water two-phase flow as a rinsing medium was studied. Horizontal and vertical straight pipes of 23 mm inner diameter were artificially soiled with millet jelly and rinsed with air-water two-phase flow at flow rates of 400, 600, and 800 L/min for air and 2, 3, and 4 L/min for water. At the lowest flow rate of air, the two-phase flow was not completely annular and rinsing efficiency was quite low. At higher air flow rates, however, the two-phase flow was shown to save about 90% of rinsing water with no or slight extension of rinsing time, compared with water flow rinsing at 40 L/min. For non-straight piping parts (tees, elbows, and a diaphragm valve), the air-water two-phase flow was shown to save about 80% of rinsing water but to take twice as much rinsing time as 40 L/min water flow.

**Keywords:** cleaning-in-place, rinsing, annular two-phase flow, water consumption, pipeline

#### 1. 緒 言

食品や飲料を製造する工場では機器の洗浄を日常的かつ確実に行う必要がある。大型の機器が導入されている大規模な製造設備では、機器を分解することなく自動洗浄を行う定置洗浄 (CIP: cleaning in place) が採用されている場合が少なくない。適切な条件で CIP を行えば、確実に安定した洗浄効果を期待できるが、CIP には水や薬剤を大量に必要とするという欠点もある。例えば、原料用や冷却用などに多量の水が必要と

されるビール製造では、全用水量はビール製造量の 10~15 倍で、工場あたりにすると 2,000~7,000 m<sup>3</sup>/日に及び [1]、用途別の水量では洗浄用水が最大の割合を占める [2] とされている。洗浄用水として使用した場合には等量の排水を処理する必要にも迫られるため、とくに生産規模の大きい工場にとって、その多さは無視できない問題である。このため、多くの飲料・食品工場では近年、用水の回収再利用や洗浄時間の短縮などを主な手法として、洗浄用水を含めた使用水量削減の努力が重ねられている [i]。一方で、使用水量の削減が可能な新しい洗浄技術の開発も要望されているが、現在のところ画期的な新技術の開発に係る文献情報は見あたらない。

著者らは、パイプラインの洗浄において洗浄水削減効果をもたらす新たな洗浄手段として、気液二相流の

(受付 2010 年 6 月 1 日, 受理 2010 年 7 月 20 日)

1 〒108-8477 東京都港区港南4-5-7

2 〒108-8477 東京都港区港南4-5-7

3 〒253-0071 神奈川県茅ヶ崎市萩園1225

† Fax: 03-5463-0699, E-mail: sakiyama@kaiyodai.ac.jp

1つである環状流の適用を考えた。洗浄には配管に接した水の流れが重要であり、配管中央部の流れは残留汚れの除去に大きな寄与はしない。したがって、水流に空気を吹き込むことによって中央部が空気流で管壁に近い部分が水流となる環状流を形成することができれば、洗浄効率を低下させることなく、使用水量を大幅に削減することが可能であろう。

空気と水の系に限らず、気相と液相とから構成される二相流については、冷凍・空調装置、ボイラ、原子炉などの様々な機器内部で発生することもあり、その流動様式に関する知見が少なからず蓄積されている。円管の中央部が主として気相で周辺部が液相となる環状流または環状噴霧流とよばれる流れが、条件によって実現可能であることも知られている。例えば水平な円管を流れる気液二相流に関して、Mandhaneら [3] は実験結果を気相と液相の見かけ流速によって整理し、環状流を含む気液二相流の流動様式線図を作成した。また、Taitel と Dukler [4] は水平円管内気液二相流の各流動様式の安定性を力学的に考察し、様式間の遷移が起こる気相と液相の流速条件を与える理論モデルを導出した。なお、Taitel と Dukler の理論により得られる流動様式線図は Mandhane らの結果と概ね一致することが報告されている。以上の知見から、環状流あるいは環状噴霧流とよばれる流動様式が実現可能な気相と液相の流速比に関する情報を得ることができる。

本研究では、CIP の工程の中でも使用水量が多いファイナルリンス工程を主な対象として、環状流に近い気液二相流をすすぎに用いた場合の洗浄効果を検証することを目的とした。すなわち、各種の流速条件における空気と水の二相流を用いた配管系のすすぎ洗浄実験を行って汚れ残存率の経時変化を調べ、水だけをすすぎに用いた場合と比較することにより、洗浄水量削減の可能性について検討した。

## 2. 実験方法

### 2.1 モデル汚れ

ファイナルリンス工程において除去すべき対象は洗剤に代表される水溶性物質である。したがって、水溶性ではあるが、高粘性ゆえに比較的除去しにくいと考えられる水飴をモデル汚れとした。実験日が異なっても常に同じ水分含量の水飴を塗布できるように、粉末水飴（コクミゲン、サンエイ糖化）を用い、実験日毎に粉末水飴 17 g に蒸留水を 3 g の質量比で加え、遊星式攪拌装置（MAZERUSTAR KK-50S, クラボウ）で混合溶解した。なお、継手およびバルブの洗浄実験では、その形状または構造ゆえに水飴の定量塗布が困難であったため、4% NaOH 水溶液をモデル汚れとして使用した。

### 2.2 実験装置

1S 規格（外径 25.4 mm, 内径 23 mm）のステンレス鋼製サニタリ配管を用いて Fig. 1 に示す洗浄実験装置を構築した。ポンプとコンプレッサにより一定流量で送り込んだ水と空気をミキサ部で両者を混合して気液二相流を形成させる装置構成である。空気流を外から巻き込むように水を流入させることを意図して、ミキサ部の入口側は同心二重管構造にし、内管から流入する空気と、内管と外管の間を円周に沿うように流入させた水とを、ユニット内の内管開口部で合流させた。テストセクションには、モデル汚れを内部に塗布した水平直管、鉛直直管、T字管、エルボ、バルブを含む各種の配管系を設置した。運転開始から流動様式が安定するまでは循環流路①で水をタンクに戻しつつ、ポリフェニルサルフォン製の透明サニタリパイプ（サニー工業）で流れの状態を観察した。流動様式が安定した後、バルブ操作によりテストセクション側流路②に流れを切り替えて洗浄実験を開始した。なお、流れの切り替えによる流動状態の変化を避けるため、長さや形が流路②と可能な限り同じになるように流路①を構成した。また、透明配管の長さは 4 m であり、短い接続部分の長さも含めると、ミキサ部出口からテストセクション入口までの助走区間の距離は配管内径の 176 倍であった。水温の制御は行わなかったが、いずれの実験も  $13 \pm 3^\circ\text{C}$  の範囲であった。一部の試験では、工業用ビデオスコープ（IPLEX MX R/IV7630X2D, オリパス）を出口から挿入し、配管内部の流動状況の観察も試みた。

### 2.3 水平直管洗浄実験

汚れモデルとして水飴 1.00 g をステンレス鋼製テストピース管（1S, 長さ 40 mm, 材質 SUS304, #400 パフ研磨仕上げ）内面の最も洗浄し難いと考えられる部

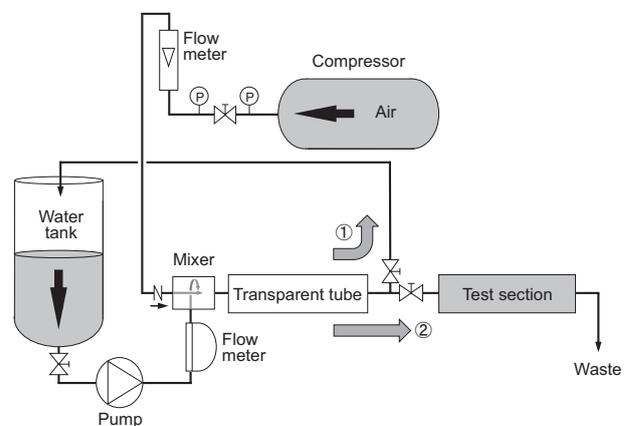


Fig. 1 Schematic diagram of apparatus for rinsing experiments. Direction of flow was switched from ① to ② by valve operation to start rinsing experiment.

分、すなわち洗浄実験時に鉛直上側となる部分に可能な限り均一に塗付した。これに前後の配管を Fig. 2a に示すように接続し、洗浄実験装置のテストセクションに配置した。水流量 2, 3, 4 L/min, 空気流量 400, 600, 800 L/min を組み合わせた計 9 通りの実験条件で、気液二相流を 90~150 秒間流してテストピース管内面を洗浄した。実験終了後のテストピース管を 100 mL の蒸留水とともにレトルトパウチに入れて密封した後、しばらく放置および振とうして管内壁に残存する水飴をレトルトパウチ内の蒸留水に溶かし出した。溶出した水飴に由来する全有機炭素量（不揮発性有機炭素量）を測定（TOC-VCSN, 島津製作所）し、有機炭素量基準で汚れ残存率を求めた。なお、比較のため、空気を混入させない水のみによる洗浄（以下では通常洗浄と称す）も行った。通常洗浄の水流量は 40 L/min とした。これは流速に換算すると 1.6 m/s であり、実際の CIP 洗浄における流速条件に匹敵する。

## 2.4 鉛直直管洗浄実験

水平直管の場合と同様に、ステンレス鋼製テストピース管の内面に汚れモデルとして水飴 1.00 g を塗布した。これを Fig. 2b のように配管してテストセクションに配置した。水流量を 3 L/min とし、空気流量を 400, 600, 800 L/min とした場合、さらには空気流量を 600 L/min とし、水流量を 2 L/min および 4 L/min とした場合の計 5 通りの実験条件において、気液二相流を 90~150 秒間流して洗浄実験を行った。テストピース管内面の水飴の残存率を、水平直管の場合と同様に測定した。

## 2.5 継手およびバルブの洗浄実験

製造現場の配管ラインには直線の配管だけでなく、T 字管やエルボなどの継手や、バルブなどの特殊な配管も含まれ、これらが洗浄できなければ、気液二相流の CIP への適用は難しい。そこで、T 字管、エルボ、ダイヤフラムバルブを対象とした洗浄実験を行った。T

字管およびエルボをテストピースとする場合には、Fig. 2c および Fig. 2d に示す配管系を組み立て、モデル汚れとして 4% NaOH 水溶液 100 ml を入れて蓋で密封し、回転させて NaOH 水溶液を内壁に付着させ、排液した後、テストセクションに配置した。ダイヤフラムバルブについては、バルブ単体を上記と同様の方法で処置して NaOH 水溶液を内面に付着させ、両側に直管をつないでテストセクションに水平に配置した。このようにテストセクションに配置した配管系を、水流量 3 L/min, 空気流量 600 L/min の条件で 10 秒, 20 秒, または 40 秒間の洗浄実験を行った。その後、配管系を分解して対象とした個々のテストピースを 100 ml の蒸留水とともにレトルトパウチに入れ、密封した後にしばらく放置および振とうして管内面に残存している NaOH をレトルトパウチ内の蒸留水に溶出し、pH を測定した。比較のため、水のみを用いた通常洗浄（40 L/min）についても同様に実験を行った。

## 3. 結果と考察

### 3.1 水平直管内の流動様式

まず、水平直管に対して水流量 3 条件と空気流量 3 条件を組み合わせた計 9 つの条件で洗浄実験を行った。透明配管の外から流動様式を観察した結果、空気流量 400 L/min の場合には、すべての水流量条件において、管壁上部には断続的に水の流れている様子が観察できたものの、恒常的に水が流れている状態ではなかった。それ以外の条件では、管壁部全体に水の流れが確認できた。なお、空気流量が大きくなるにしたがって管壁上部の水の厚みが増す様子が外部から観察された。水流量の増加によっても管上部の水の厚みが増す様子は観察されたが、その影響は空気流量の影響ほどには大きくはなかった。さらに、水流量を 3 L/min 一定として、300 L/min 以上の空気流量について内視鏡で配管内の流動の様子を観察したところ、300 L/min の空気流量では管の下側にのみに水が流れていたが、空気流量の増加とともに管の下側を流れる水量が減って管側部に水の流れが観察されるようになった。空気流量を 600 L/min まで上昇させると、管の中央部を細かい水滴が飛んでいる様子が観察できた。環状の流れを明瞭に観察することはできなかったが、管外からの観察結果と併せて考えると、空気流量 600 L/min 以上で環状噴霧流に近い流動様式になっているものと考えられる。

本研究で洗浄実験に用いた条件を、空気と水の配管内の見かけの流速の組み合わせとして Fig. 3 に示す。見かけ流速とは、各々が単独で円管内を流れたと仮定した場合の線速度である。比較のため、Taitel と Dukler [3] の理論モデルに基づいて内径 23 mm の水平

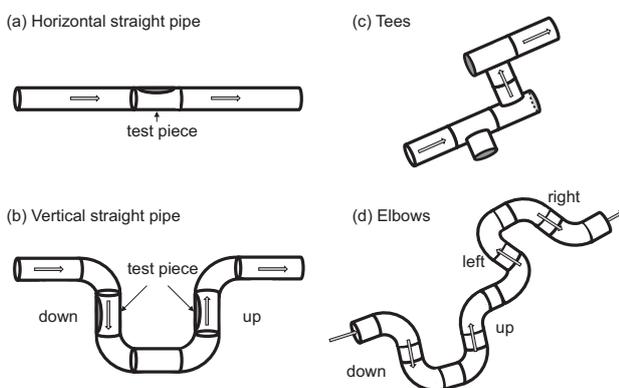


Fig. 2 Various types of pipe assembly employed for the test section.

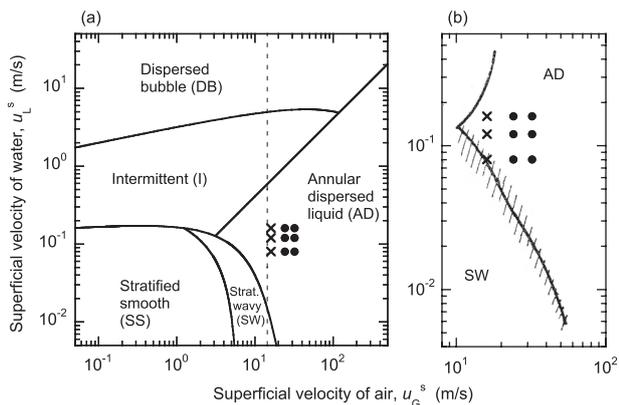


Fig. 3 Flow conditions employed in this study. The flow conditions are shown in two categories on the basis of appearance of flow observed through the transparent tube: (●) annular, (×) non-annular. (a) Flow pattern map estimated for air-water flow in horizontal straight pipe of 23 mm inner diameter at 10°C on the basis of Taitel-Dukler model [4] is also shown. The broken line indicates the minimum air velocity of upward annular flow in vertical tubes. (b) Flow pattern map observed by Sekoguchi *et al.* [5] for air-water flow in horizontal straight pipe of 26 mm inner diameter at 9.1-17.3°C is shown for comparison. Boundary between annular and stratified flows is indicated as the hatched area because flow history affects flow pattern transition.

直管内を 10°C の空気と水が流れる場合の各流動様式の境界を計算し、Fig. 3a に併せて示した。空気と水の物性は温度に依存するが、温度を 20°C として計算しても、理論モデルに基づく流動様式の境界は Fig. 3a に示したのから大きく変化することはない。Fig. 3a からわかるように、本実験に用いた条件はいずれも理論モデル上の環状流または環状噴霧流の領域に含まれる。しかし、上記の観察結果では、図中に×で示す見かけ空気流速の小さな条件では完全な環状流が形成されていなかった。世古口ら [5] は、内径 26 mm の水平管内の気液環状二相流に関して実験的検討を行い、環状流 (AD) と分離流 (SW) との間の遷移境界について報告しているが、その境界は Taitel と Dukler の理論モデルが示す境界とはやや異なっている。また世古口らは、水流量を増加させて流動状態の変化を観測する場合と、水流量を減少させて観測する場合とでは、流動状態の遷移する境界が異なることを指摘している。世古口らの報告した流動様式の境界と本実験の条件とを比較して Fig. 3b に示す。実験条件として水平管の内径が若干異なるものの、図中に×で示す環状流が確認できなかった条件は、世古口らの観測した環状流と分離流との遷移領域に近いことがわかる。以上のように、本実験では Taitel と Dukler の理論モデルよりも世古口らの観測結果に近い流動様式が観察された。ただし、どちらと

比較しても、環状流領域に分類されながら環状流が観察されなかった条件もある。この相違については、世古口らが指摘した流れの履歴が流動状態に影響を及ぼすという問題のほか、空気流と水流との混合様式の差異が影響している可能性もある。

### 3.2 水平直管内部の洗浄効果

水平直管の場合について、気液二相流によって洗浄した際の汚れ残存率の時間依存性を Fig. 4 に示す。なお、

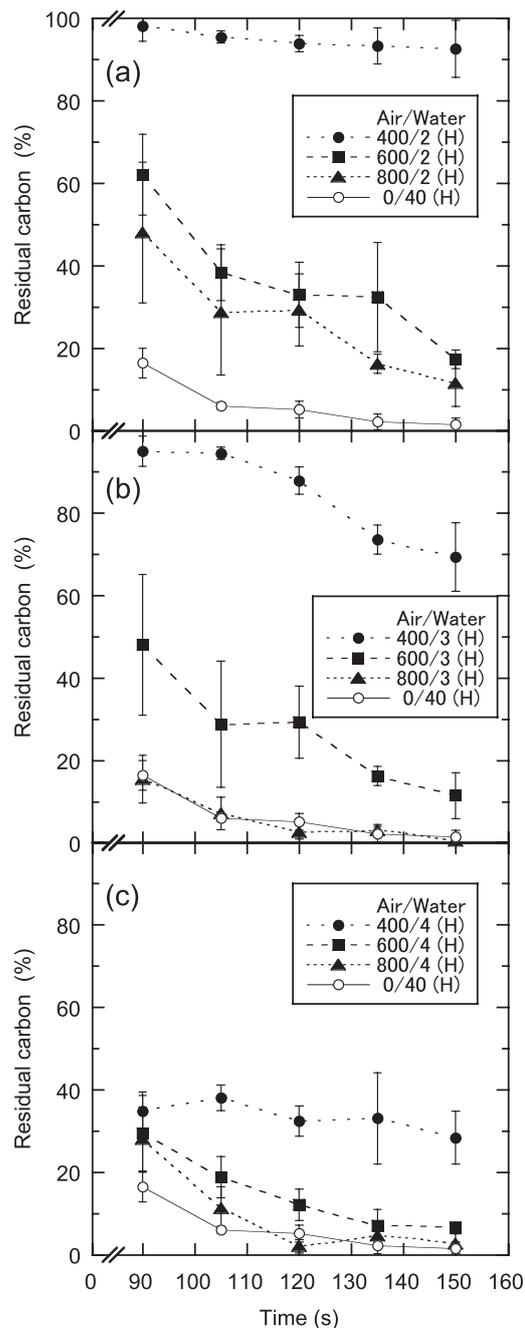


Fig. 4 Results of rinsing experiments for horizontal straight pipe with air-water flow. Air flow rate was 400, 600, or 800 L/min for each water flow rate: (a) 2 L/min, (b) 3 L/min, and (c) 4 L/min. Results of rinsing with water alone at a flow rate of 40 L/min are also shown for comparison.

同一条件における実験を3回ずつ行って平均値と標準偏差を算出した。全般的に、空気流量または水流量が増すほど、洗浄効果の向上する傾向が認められた。空気流量 400 L/min の場合には、いずれの水流量でも 150 秒後の残存汚れが 20% 以下に低下することなく、洗浄が不完全となった。これらの流速条件では、上述のように、洗浄に適した環状流が形成されておらず、配管内壁の鉛直上側部分が洗浄できないため、他の条件に比べて洗浄効率が際立って低いものと考えられる。空気流量 600 L/min の場合でも、洗浄効果は通常洗浄に及ばず、空気流量を 800 L/min に上げると、水流量を 3 L/min または 4 L/min とした場合に洗浄効果が通常洗浄と同等となった。

Fig. 4 の結果をもとに、通常洗浄 90 秒後の汚れ残存率と同じ汚れ残存率の値となるのに必要な気液二相流による洗浄時間を推算した。さらに、推算した洗浄時間と水流量の設定値とから洗浄で消費される水量を算出した。これらの結果を併せて Table 1 に示す。水流量と空気流量が増加するに伴って必要な洗浄時間が短縮されることがわかる。水流量 3 L/min、空気流量 800 L/min の条件では、通常洗浄と同じ洗浄時間で洗浄が可能であり、使用した水量が最少であった。したがって、条件を適切に選べば、洗浄効率を低下させることなく、使用水量を一割程度にまで削減可能であることが示された。

なお本研究では、洗浄効果と洗浄水量を比較するための清浄度の基準を 90 秒間の通常洗浄と同程度とした。本来は残存汚れが検出限界以下になる時間、すなわち洗浄完了時間を以て洗浄効果や洗浄水量を評価すべきではあるが、洗浄完了時間を確定させるためには、実験を極めて多く繰り返さねばならない可能性がある。環状流の洗浄への適用を試みる端緒である本研究では、適用可能か否かの判断を優先するため、上記の評価基準を採用した。本研究で求めた洗浄時間は洗浄完了時

間より短く、実際に洗浄を完了させるにはより多くの時間と水量とが必要であることに留意する必要がある。

### 3.3 鉛直直管内部の洗浄効果

鉛直直管を上向きおよび下向きに流れる場合についても、水流量 3 条件と空気流量 3 条件を組み合わせた計 5 通りの流速条件で洗浄実験を行った。なお、鉛直直管を上向きに流れる気液二相流の流動様式については、Taitel ら [6] が水平直管とは別に理論モデルを提案している。そのモデルによると、10℃の空気-水系で環状流または環状噴霧流が形成される条件は、空気の見かけ速度が 14.4 m/s 以上 (Fig. 3a の破線より右側の領域) となる。今回試みた流速条件はいずれもこれを満たしているが、観察用の透明配管を水平に固定したため、環状流の形成を確認できてはいない。

鉛直直管に対する気液二相流による洗浄実験の結果を、鉛直下向き流路と鉛直上向き流路について、それぞれ Fig. 5 と Fig. 6 に示す。この場合も、各条件で 3 回の実験を行い、平均値と標準偏差を示した。鉛直下向き流路に対しては、水流量を 3 L/min とした場合 (Fig. 5a) の結果を比較すると、空気流量 400 L/min では 150 s 後でも 20% 以上の汚れが残存したが、他の流量では通常洗浄に近い洗浄効果が得られた。空気流量を 600 L/min とした場合 (Fig. 5b) の結果を比較すると、水流量が増す程に洗浄力が向上し、水流量 4 L/min において通常洗浄を上回る洗浄効果が示された。今回の実験では環状流の気相と水相の真の流速は推測できないが、この条件では管壁部の水流の線速度が通常洗浄に比べて高い可能性がある。また、鉛直上向き流路に対しては、水流量を 3 L/min とした場合 (Fig. 6a) の結果を比較すると、空気流量が増す程に洗浄力が向上し、空気流量 800 L/min では通常洗浄を上回る洗浄効果が得られた。この洗浄効果向上の原因としては、空気流量の増加が管壁部の水流の厚みを薄くすることで、一

Table 1 Time and water required for rinsing horizontal straight pipe with air-water flow to give the same degree of cleanliness as after 90 s water rinsing.

Flow	Water (L/min)	Air (L/min)	Rinsing time (s)	Water consumed (L)
Water alone	40	0	90	60
Horizontal air-water	2	400	>150	—
	2	600	150	5.0
	2	800	135	4.5
	3	400	>150	—
	3	600	135	6.8
	3	800	90	4.5
	4	400	>150	—
	4	600	110	7.3
	4	800	105	7.0

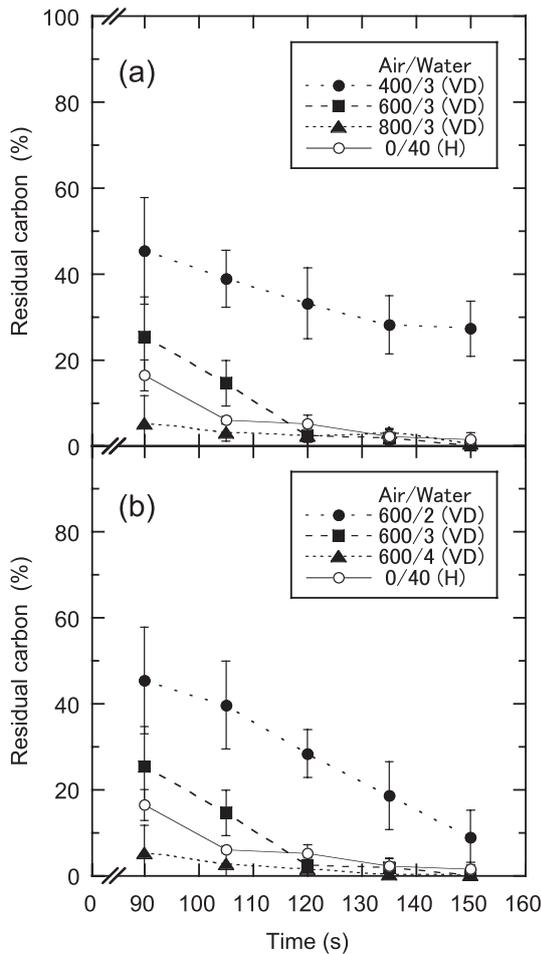


Fig. 5 Results of rinsing experiments for vertical straight pipe with downward air-water flow. Flow conditions: (a) 3 L/min for water, (b) 600 L/min for air. Results of rinsing with water alone at a flow rate of 40 L/min are also shown for comparison.

定の流量で流れる水の線速度を増加させた可能性が考えられる。空気流量を 600 L/min とした場合 (Fig. 6b) の結果を比較すると、水流量 2 L/min では 150 s 後でも 20% 以上の汚れが残存したが、水流量が増す程に洗浄力が向上し、水量 4 L/min では通常洗浄以上の洗浄効果が得られた。

鉛直直管の気液二相流洗浄において、通常洗浄 90 秒後の汚れ残存率と同程度の汚れ残存率となる洗浄時間、使用水量を Table 2 に示す。水流量、空気流量が増えるに伴って洗浄時間が短縮できることがわかる。下向き流路および上向き流路ともに、水流量 3 L/min かつ空気流量 800 L/min の条件において使用水量が最少となり、水流量 4 L/min かつ空気流量 600 L/min または水流量 3 L/min かつ空気流量 800 L/min の条件において通常洗浄と同程度の洗浄時間で洗浄が可能であることが示された。

以上より鉛直直管においても、気液の流量を適切に設定すれば、水だけを流す通常洗浄と同等の洗浄力を

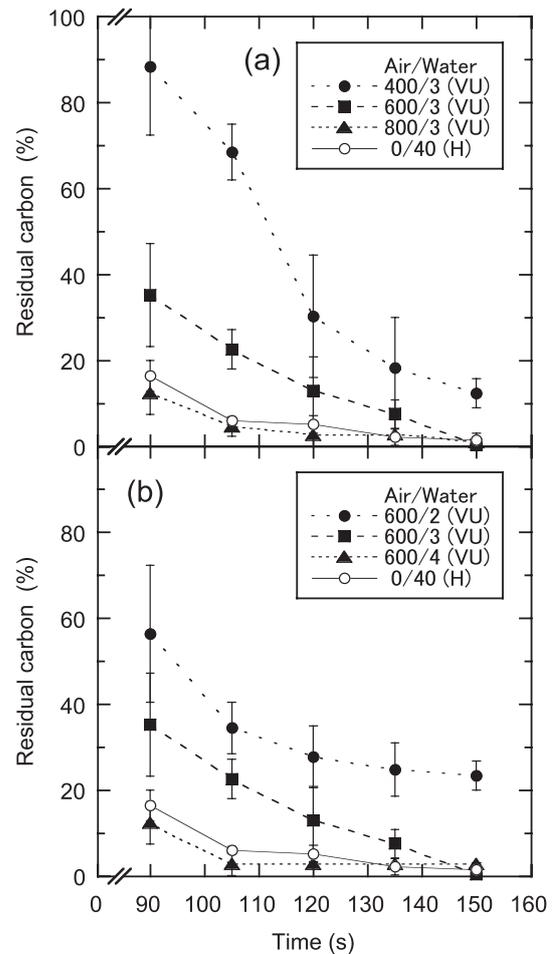


Fig. 6 Results of rinsing experiments for vertical straight pipe with upward air-water flow. Flow conditions: (a) 3 L/min for water, (b) 600 L/min for air. Results of rinsing with water alone at a flow rate of 40 L/min are also shown for comparison.

保ちながら使用水量を 10% 程度にまで低減できることが示された。なお、水平直管と鉛直直管とを同じ洗浄条件で比較すると、鉛直直管の場合の方が水平直管の場合より気液二相流による洗浄効果が高い傾向にあることがわかる。鉛直直管でも、下向き流路の方がやや高い洗浄効果が得られたことから、重力の影響によって環状流の厚みや速度などの流動状態が異なっている可能性もある。

### 3.4 継手およびバルブ内部の洗浄効果

水 3 L/min, 空気 600 L/min の条件で継手またはダイヤフラムバルブを洗浄した際に要した時間と使用水量を、水 40 L/min の通常洗浄の場合と比較して、Table 3 に示す。この場合、10 秒, 20 秒, 40 秒の洗浄時間で実験を行い、測定した pH が 8 より低くなる最小の洗浄時間を洗浄終了時間とした。したがって、Table 3 に示す洗浄終了時間は 10 秒ないし 20 秒間隔の比較的粗い精度で測定したものである。結果を比較すると、

Table 2 Time and water required for rinsing vertical straight pipe with air-water flow to give the same degree of cleanliness as after 90 s water rinsing.

Flow	Water (L/min)	Air (L/min)	Rinsing time (s)	Water consumed (L)
Water alone	40	0	90	60
Downward air-water	2	600	140	4.7
	3	400	>150	—
	3	600	100	5.0
	3	800	90	4.5
	4	600	90	6.0
Upward air-water	2	600	>150	—
	3	400	140	7.0
	3	600	115	5.8
	3	800	90	4.5
	4	600	90	6.0

Table 3 Time and water required for removing alkaline residue from non-straight piping parts with air-water flow.

Piping parts	Water (L/min)	Air (L/min)	Rinsing time <sup>a</sup> (s)	Water consumed (L)
Tee	40	0	10	6.7
	3	600	20	1.0
Elbow	40	0	10	6.7
	3	600	20	1.0
Diaphragm valve	40	0	20	13.3
	3	600	40	2.0

<sup>a</sup>Rinsing experiments were performed for 10, 20, and 40 s under each condition. The minimum duration of rinsing which gave residual pH less than 8 was listed as rinsing time.

継手やバルブについては、気液二相流による洗浄は、水のみによる通常洗浄に比べて、洗浄時間を2倍程度長く必要とするものの、使用水量の80%程度を削減できる可能性が示された。

#### 4. 結 言

本研究では、ファイナルリンスを想定して水溶性モデル汚れを用い、ステンレス鋼製水平直管、鉛直直管、継手およびバルブについて、空気-水二相流を利用した洗浄実験を行った。その結果、空気と水の流量を適切に選定して洗浄を行えば、水のみによる通常洗浄に比べて、同程度の洗浄時間かつ極めて少量の水で洗浄できる可能性が示された。また、環状流を形成できない条件では洗浄が不十分になることも示された。

なお、本研究では1S配管を用いたが、実際の食品製造現場では1Sよりも管径の大きな配管も多い。したがって実用的には、より大きな配管径に対しても環状流を安定して形成可能な条件と洗浄効果の検討が必要

である。また、本研究で主なモデル汚れとして使用した水飴は、NaOHをはじめとする実際のファイナルリンスの対象となる洗剤とは、管壁に対する付着特性が異なる可能性が高い。アルカリ洗剤として多用されるNaOHについては、継手およびバルブの内部を対象としてではあるが、気液二相流で洗浄可能であることが実験的に示されたが、実際に使用される洗剤を用いた場合の洗浄効果の評価も必要であろう。さらに、本研究では洗浄効果や洗浄水量を評価するための清浄度の基準を90秒間の通常洗浄と同程度としたため、推算された洗浄時間と水量は洗浄完了に必要な量より少ない。より実用的な評価のためには、洗浄完了を基準とした検討も行なう必要があると考える。

#### 謝 辞

モデル汚れの作成に用いた粉末水飴（コクミゲン）を試料としてご提供いただいたサンエイ糖化株式会社に深く感謝します。

## 引用文献

- 1) T. Toriu; Industry trend/Waste water treatment technology (Sangyo douko/Haisui shori gijutsu). Chousa (Nissho Iwai Research Institute Ed.), **2002**(4), viii-ix (2002).
- 2) L. Braeken, B. Van der Bruggen, C. Vandecasteele; Regeneration of brewery waste water using nanofiltration. *Water Res.*, **38**, 3075-3082 (2004).
- 3) J. M. Mandhane, G. A. Gregory, K. Aziz; A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes. *Int. J. Multiph. Flow*, **1**, 537-553 (1974).
- 4) Y. Taitel, A. E. Dukler; A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. *AIChE J.*, **22**, 47-55 (1976).
- 5) K. Sekoguchi, A. Ousaka, T. Fukano, T. Morimoto; Air-Water annular two-phase flow in a horizontal tube: 1st report, Circumferential distribution of film thickness (in Japanese). *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. B*, **48**, 346-354 (1982).
- 6) Y. Taitel, D. Bornea, A. E. Dukler; Modeling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes. *AIChE J.*, **26**, 345-354 (1980).

## 引用URL

- i) <http://www.j-sda.or.jp/environmental/conservation/wrc01.html> (May. 27, 2010).

## 要 旨

配管系 CIP のファイナルリンス工程における洗浄水削減を目指して、空気と水から成る環状流の適用を試みた。すなわち、ステンレス鋼製の 1S 配管を水平と垂直に配置した場合について、水飴をモデル汚れとして、空気と水の二相流による洗浄を各種流速条件にて行い、残留汚れの経時変化を検討した。空気の流速が小さい場合には、完全な環状流は形成されず、管壁上部が洗浄困難となり、極めて低い洗浄効率となった。空気の流速を 600 L/min 以上に設定すると環状流が形成され、水のみ通常洗浄に比べて、洗浄効率を大きく低下させることなく、使用水量を 10% 程度にまで低減可能であることが示された。直管以外の T 字管やエルボ、ダイヤフラムバルブを含む配管系についても洗浄効果を検討した。この場合には、二相流洗浄の洗浄時間は通常の水洗浄の 2 倍程度必要であったものの、使用水量は 20% 程度にまで低減可能であることが示された。