D110 水噴流による気泡キャリーアンダー

Carry-under of bubbles by impinging jet

正 大竹 浩靖 (工学院)
○学 大塚 智彦 (工学院)

正 小泉 安郎 (信州大)
原口 直樹 (工学院)

Hiroyasu Ohtake, Tomohiko Ohtsuka, Naoki Haraguchi,
Kogakuin University, 1-24-2, Nishishinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo
Yasuo Koizumi, 3-15-1, Tokida, Ueda-shi, Nagano

The carry-under that bubbles are rolled into a pool when a liquid column/jet or a liquid film on a wall flows down into a liquid pool was examined. When the flow rate was low, the liquid column disrupted into liquid lumps. A dent was formed on the pool surface by the liquid lumps hitting the pool surface. Gas in the dent was pulled down into the liquid pool. The disruption of the jet was well explained with the Kelvin-Helmholtz instability. As the flow rate was increased, the surface of the liquid jet became smooth and the carry-under ceased. As the flow rate was further increased, the surface of the liquid jet became disturbed condition. By the disturbance dents were formed periodically on the pool surface and gas in the dents was pulled down into the pool with the jet flow. The penetration of the bubbles into the pool became deep.

Key Carry-Under, Air entrainment, Water jet, Void fraction)

1. 緒言 液体噴流が液体プール表面に注がれるとき、周囲の気体を巻き込む現象は日常よく見かける現象であり、気泡キャリーアンダーと呼ばれ、いくつかの研究例がある。(1)、(2)液体プール内に強い流れがあり、攪拌混合状態にある場合、さらに液体プールから外部への流出流がある場合、プール内に巻き込まれた気泡が流れに乗って運ばれていくことが起こりうる。軽水炉や高速増殖炉において、このような気泡が冷却材中に混入した場合、循環力低下や炉心反応度に大きな影響を及ぼす可能性がある。本研究では、この現象に関する基礎研究として、静止プール内に液柱が流下する場合のキャリーアンダー現象について調べている。未解明なこの現象の発生について、流下液柱状況の視覚的観察結果をもとに述べる。

2. 実験装置及び実験方法

実験装置の概要図を Fig. 1 に示す。作動流体には室温水道水を用いた。テスト容器である透明アクリル製水槽の大きさは 600 mm×600 mm×600 mm である。ポンプから送り出された水は、浮き子式流量計を通り、ノズルから鉛直下向きに流出し、液柱となってプールへ流入する。出口ノズルはストレートタイプであり、内径 5 mm、ストレート部長さ 10 mm である。プールからポンプへ気泡吸い込みが生じないように水槽内には仕切り板が挿入されている。またポンプ振動がノズルから流出する液柱性状に影響を与えないようフレキシブルチューブを用いてポンプとノズル配管系は接続されている。一定流量でノズルから噴流が流下する状態で、噴流界面状況をノズル出口から水面まで位置を変えて高速度カメラにて 500~6000 frames/s で撮影した。プール内気泡巻き込み状況は水槽側面から高速度カメラにて 500 frames/s で撮影した。水面に噴流が突入する状況は、水槽内に気泡遮蔽板を入れ噴流突入部近傍が観察できるよ

Fig. 1
Experimental
apparatus

うにし、高速度カメラにて 4000

frames/s で撮影した。尚、プール水の温度は K 型熱電対にて測定し、恒温水槽中にコイル状にした配管の一部を沈めることで一定温度に制御した。

3. 実験的考察 3.1 気泡到達深度 流量 0.1~5.0

l/min(ノズル流出時流速 0.085~4.244 m/s)の範囲で行った、液柱流量とプール内気泡最大巻き込み深度の関係を Fig. 2 に示す。高速度カメラ 500 frames/s で 2.14 秒間撮影した動画から気泡の最大到達深度を測定している。Fig. 3 の A~F には、プール水面に突入する液柱の状況とプール内気泡巻き込み状況を合わせて示した。Fig. 3 中のアルファベットは、Fig. 2 中のものと対応している。A のように流量が少ない場合、液柱は途中で途切れ液滴状となり、プール水面に突入する。ある程度の体積と速度をもつ液滴が飛び込むと、プール界面に瞬間的にくぼみが形成される。これが消え去らないうちに、更に液滴が飛び込みことによってくぼみの一部が気泡となってプール中に引き込まれる。この連続により気泡巻き込みが生じているようである。気泡巻き込み深度はそれほど大きくはない。しかし B の状態まで流量が増加すると、液中表面は滑らかなままプールへ突入し、プール界面はほぼ平滑な状態を保つ。この状態では、気泡巻き込みは生じなくなる。更に流量が増加し、C の状態のように噴流界面に乱れを再び伴うようになると、気泡巻き込みは再び発生する。液柱界面には再び乱れが発生するようになり、間欠的に大きな固まりとなってプールに突入する。結果としてプール界面に大きな動揺が再び生じるようになり、また、それにより大きな気泡塊がプール内に引きずり込まれる。気泡はプール内で分裂しつつ下方へ押しやられ、ある深度まで至ると上昇へ転じ、プール界面から離脱するようになる。さらに流速が上がり、E, F の

Fig.2 Maximum Bubble
penetration Depth

状態になると、噴流界面の状態はより複雑になり、プール界面の噴流突入部には気泡ポケットがほぼ常に形成され、気泡量も著しく増大していく。

Fig3 State of Jet flow and Carry-under

3.2 気泡巻き込みのメカニズム 実験結果の観察から巻き込みメカニズムの簡単なモデルを考察した。気泡の巻き込みは Fig.4 に示すようにいくつかのプロセスを経て発生する。まずプール界面に液滴もしくは噴流の膨張部が飛び込む(A)。するとプール界面に瞬間的にくぼみを形成する(B)。これが収縮し終わらない内に、更に後続の液滴もしくは噴流膨張部が飛び込むと、くぼみの底部にさらにくぼみを形成する(C)。場合によってはこれがプール中に取り残されて気泡となり、噴流の勢いによって巻き込まれていくことになる(D)。ここで、気泡巻き込みの条件は噴流の運動エネルギーとプール界面の表面エネルギーのバランスによって決まると想定する。今後、これを検討する予定である。

Fig.4. Mechanism of Carry-under

3.3 噴流界面の波長 噴流界面に波が生じる原因のひとつとして Kelvin-Helmholtz 不安定性が考えられる。Fig.3 中の A と E、について以下の式で求められる Kelvin-Helmholtz 不安定性による臨界波長と、撮影画像から波頭速度と波の周期を得て実測した波長との比較を Fig.5,6 に示す。

$$\lambda_c = \left[\frac{2\pi\sigma(\rho_l + \rho_g)}{\rho_l \rho_g} \right] (u_g - u_l)^{-2} \quad (1)$$

ここで、水の密度 $\rho_l = 1000 \text{ kg/m}^3$ 、空気の密度 $\rho_g = 1.176 \text{ kg/m}^3$ 、水の表面張力 $\sigma = 73.21 \text{ mN/m}$ である。 u_l はそれぞれの測定位置の噴流の平均流速であり連続の式から求めた。また、気速 u_g は静止状態ゼロと仮定した。Fig.5 の条件は液柱が水面に到達する以前に液隕への分裂が生じていたものである。測定された波長は K-H 臨界波長に達しておらず、実際の液柱の分裂と対応していない。Fig.6 は噴流が分裂していない条件である。測定波長は、K-H 臨界波長に至っておらず、液柱は形状を維持していたことに相応している。しかし、界面には多くの擾乱が存在しており、これらが気泡巻き込みを促していることがうかがえる。

Fig.5
Comparison of
wavelength
($u_{l0} = 0.255 \text{ m/s}$)

Fig.6
Comparison of
wavelength
($u_{l0} = 1.698 \text{ m/s}$)

Axial distance from water nozzle outlet [mm]

4. 結言 出口径 5 mm のノズルから液体プール表面に注がれる噴流に対し、その界面の状態および気泡キャリアンダの様子を高速度カメラにて撮影し、キャリアンダについて定性的な以下の結論を得た。(1) 流量が小さく液柱が分断し液滴状となってプールへ流下する場合、プール界面動揺を伴い、それにより小気泡がプール内へ同伴される。(2) 流量が増し、界面に乱れを伴わず平滑な液柱となってプールへ突入するようになると、気泡巻き込みは生じない。(3) 流量が増加し、液柱界面に大きな波が発生するようになると大きな気泡の巻き込みが生じるようになり、気泡到達深度は増大する。(4) 流量が更に増大し、噴流界面に波ではなく不規則な乱れを伴うようになると、気泡巻き込み深度、量は激しく増大する。(5) キャリアンダが起こらない範囲よりも高い流速域では、液柱の分断に

Kelvin-Helmholtz 不安定性が影響を与えている。低い流速域では他の原因によって噴流の乱れ、分裂が発生している。(6) 観察結果として、プール界面突入時の液柱界面状況がキャリアンダ発生と気泡到達深度に大きな影響を持つ。

<参考文献> 1. F. Bonetto and R. T. Lahey, Jr "An experimental study on air carryunder due to a plunging liquid jet" International Journal of Multiphase Flow. (1993) Vol. 19, Issue 2, pp. 281-294.

2. By YONGGANG ZHU, HASAN N. OGUZ AND ANDREA PROSPERETTI, "On the mechanism of air entrainment by liquid jets at a free surface" J. Fluid Mech. (2000), vol. 404, pp. 151-177.