

エアハンマー現象を伴う気液二相流の 管内圧力変動に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON PRESSURE FLUCTUATIONS IN HORIZONTAL AIR-WATER TWO-PHASE FLOW WITH AIR HAMMER PHENOMENON

佐藤 隆 宏
Takahiro SATO

正会員 工修 (財)電力中央研究所 水理部 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 番地)

Abstract Air entrained phenomena can often occur in hydraulic structures, for example, head-tank spillway of hydro power plant, intake channel, outlet channel, underground rivers, and so on. When the air goes out into the water surface of the outlet, the shock and the noise happen, and the structures may be destroyed at the critical moment. However, these are not enough studied. This study is an experimental investigation for pressure fluctuations created by the two-phase flow of air and water in a horizontal pipe, 100mm ID, on free outlet condition and water surface outlet condition. Measurements are also presented for the local void fraction, the local air velocity, and the local large bubble length using Optical Dual Probe Method. The effect of the outlet conditions was clarified on the pressure fluctuations at multi positions and the relations between the pressure fluctuations and the large bubbles were examined.

Keywords: *Air Hammer Phenomenon, Pressure Fluctuations, Horizontal Air-Water Two-Phase Flow, Outlet Condition, Optical Dual Probe Method*

1. 緒言

水路構造物における空気連行現象に伴う問題として、例えば、以下のようなものが挙げられる。

水力発電所余水路減勢工において、発電停止時に余水が急勾配の管路内を自由水面を持った状態で高速に流下する場合、設計対象流量の2倍以上の多量の空気を連行する。その際、水路系の空気の連通性が確保されないと圧力脈動が発生し、非定常な流れ、いわゆるセルフプライミング現象といった問題が生じる¹⁾。

火力・原子力発電所取水路放水路において、渦や滝落とし等によって海水中に気泡が連行され、いわゆる発泡現象が発生し、場合によっては景観問題が生じる。

都市部の地下河川において、流入立坑を高速で落下する水脈が下部の水面にぶつかって跳水現象をおこし、その際気泡が流水とともに下流に連行される。トンネル内が満管である場合には気泡は空気塊に発達し、それが立坑に達すると噴出し、立坑内水位が変動し、地下河川全体の振動へ発展する可能性がある²⁾。

このように、水路系において様々な形態の気液二相流が発生しうるが、なかでも、流入口や流出口等の開放域の水面が管路天端よりも高い場合、例えば、洪水時に天端よりも水位が高くなる場合には、管路内で発達した

空気塊の排出に伴い激しい振動や騒音が発生し、場合によっては管路天端を破壊するほどの衝撃力となるエアハンマー現象が発生する。これらを防ぐためには気泡の成長を妨げるか、もしくは空気塊を気泡に分散するなど様々な方法がある³⁾が、いずれも多量の空気連行に対して確立したものとは言えない。

これらの現象に関する研究は、著者の知る限り、丸岡ら³⁾や安芸ら⁴⁾によるものがあるが、いずれも開放域近傍場での単一の空気塊による現象を対象とし、多量の空気を連行した管路系を対象としない。一方、機械・原子力分野では、従来より実験・理論の両面から気液二相流の研究が精力的に進められているが、エアハンマー現象が生じ得る出口水位が管路天端よりも高い場を対象として研究したものは少ない。このような現象を対象として研究したものは、著者の知る限り、層状気液二相流を対象として出口条件の影響に関して研究した川路ら^{5, 6)}によるものがあるが、これらもエアハンマー現象のような連行空気自体によって激しい圧力変動が生じる気液二相流を対象としない。

本研究は、比較的大口径(内径100mm)の水平管を用いて、出口での水位条件が異なる気液二相流、すなわち、従来からの知見が多い出口水位が管路底面よりも低

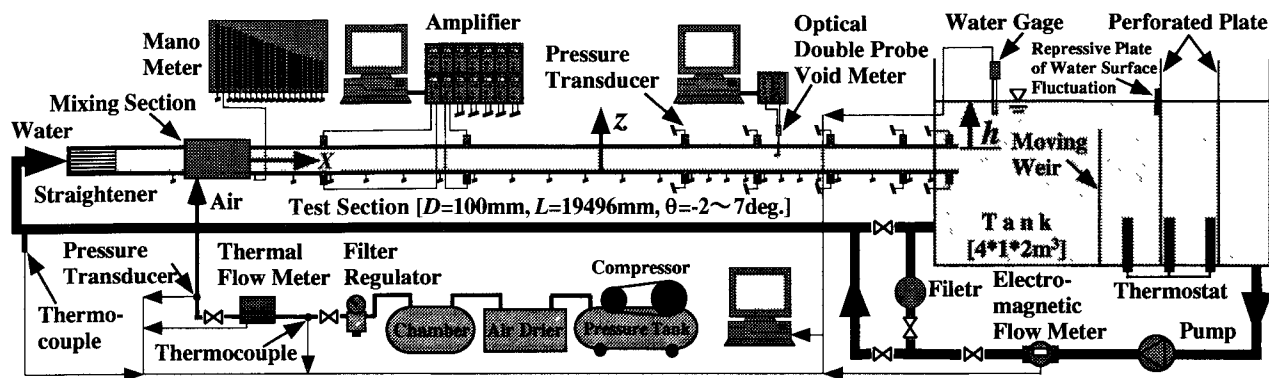


図 - 1: 実験装置

い場合 [自由流出条件と定義する] の気液二相流と、出口水位が管路天端よりも高いためにエアハンマー現象が発生しうる場合 [水面存在流出条件と定義する] の気液二相流を対象とした実験を行い、出口水位条件が管路内の流動様式や壁面圧力変動、空気諸量に与える影響を調べたものである。

なお、本論文は混相流シンポジウム'98にて発表を行ったもの⁷⁾に、出口水位条件の追加実験結果ならびに壁面圧力変動と空気塊の関係の考察を加えたものである。

2. 実験装置および計測方法

実験装置の概略を図-1に示す。実験装置はループ式で、循環管路系、管状式整流装置、気液混合装置、テストセクション、水槽から構成される。気液混合装置は、二重円筒形の多孔管壁から管路内へ空気を気泡状態で供給するタイプで、多孔管壁には長さ150mm、径100mm、40 μ mメッシュの焼結金属円筒を用いた。テストセクションはアクリル管からなり、管内径 $D=100$ mm、長さ L [気液混合装置下流端から出口までの距離]19.496mである。また、テストセクション末端の水槽は長さ0.9m、幅1.4m、高さ2.0mであり、そこにテストセクションを水槽壁面から44mm突き出して設置した。水槽には水面変動等を抑制するため、多孔板や水面変動抑制板等を設置した。液相流量は電磁流量計[精度0.5%以内]で、気相流量はサーマルフローメーター[精度 $\pm 2\%$ F.S.以内]で測定した。

計測装置としては、壁面圧力変動を計測するために、フラッシュダイヤフラム型圧力計[定格容量 ± 19.6 kPa, 固有振動数5.3kHz, 受圧部 $\phi 7$ mm]を、 $X=2.006$ m, 6.004m, 12.019m, 14.021m, 16.021m, 18.024m, 19.486mの上下壁面に、受圧面が管壁と同じ位置になるように直接設置した。ここで、気液混合装置下流端からの距離を X とする。検出した信号は、直流増幅器[DC~10kHz]、ローパスフィルタ[300Hz]を通り、16ch12ビットA/D変換ボード[最高サンプリング周波数102.4kHz]を用いてパソコンで収録した。サンプリング周波数は512Hz、サンプリング時間は1024sec、サンプリング数は524,288/chである。

また、鉛直方向の局所ボイド率分布、局所気相速度分布、局所空気塊長さ分布の計測を、RBI社製Optical Dual Probe[L型, プローブ検出間距離 $\ell 1.8$ mm], Optical Electronic Unit, Signal Processing Interface Board, ならびにパソコンからなるOptical Dual Probe Methodにより行った。Optical Double Probeは $X=14.491$ mの上壁面に設置し、それを鉛直方向に移動して鉛直分布の計測を行った。

実験は、水槽内水位 h を管路底面よりも低くした自由流出条件 [$h < -D$] および $h=0.061$ m, 0.261m, 0.529mとした水面存在流出条件 [$h > 0$] の4ケースに関して、気相体積流速 $J_G \approx 0.10, 0.25, 0.34, 0.49, 0.59$ m/s、液相体積流速 $J_L \approx 0.10, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.50, 2.00, 2.50, 2.89$ m/sの条件で行った。ここで、水槽内水位 h は管路天端を基準とした高さ[図-1]、気相体積流速 J_G は気相流量 Q_G を管路断面積 A で除した値 [= Q_G/A]、液相体積流速 J_L は液相流量 Q_L を A で除した値である。

3. 実験結果

(1) 流動様式

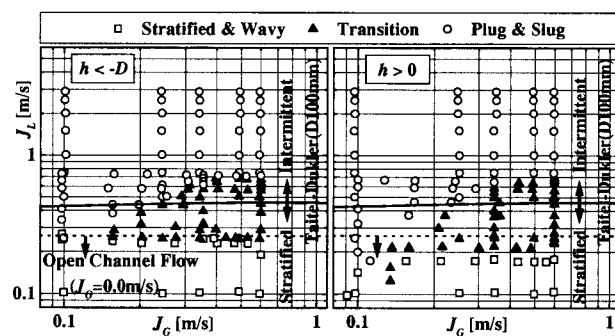


図 - 2: 流動様式図

自由流出条件 [$h < -D$] と水面存在流出条件 [$h > 0$] の流動様式図を図-2に示す。ここに、Stratified & Wavy Flowは実験計測中いずれの断面においても管路天端に水面が達しない[水塊と空気塊が全く発生しない]場合の流動様式、Plug & Slug Flowは空気塊先端が出口に達する前に次の空気塊が発生する場合の流動様式とした。よって、Transition Regimeは、気液混合器から出口までの空気の連通が一瞬でも観察された場合を意味す

る。また、図-2には、Taitel-Dukler⁸⁾による Stratified Flow と Intermittent Flow の遷移条件 [$D=100\text{mm}$ の場合]、ならびに $J_G=0.0\text{m/s}$ の場合にテストセクション全てにわたって閉断面開水路の流れとなる J_L の実験条件式も比較のために示した。これらによると、水面存在流出条件の方が若干小さい J_L で水塊と空気塊が交互に通過する間欠流 (Intermittent Flow) に遷移することが分かる。なお、Stratified Flow と Intermittent Flow の遷移は、管径が大きいほど、より大きな J_L で起こる⁹⁾。

(2) 壁面圧力変動

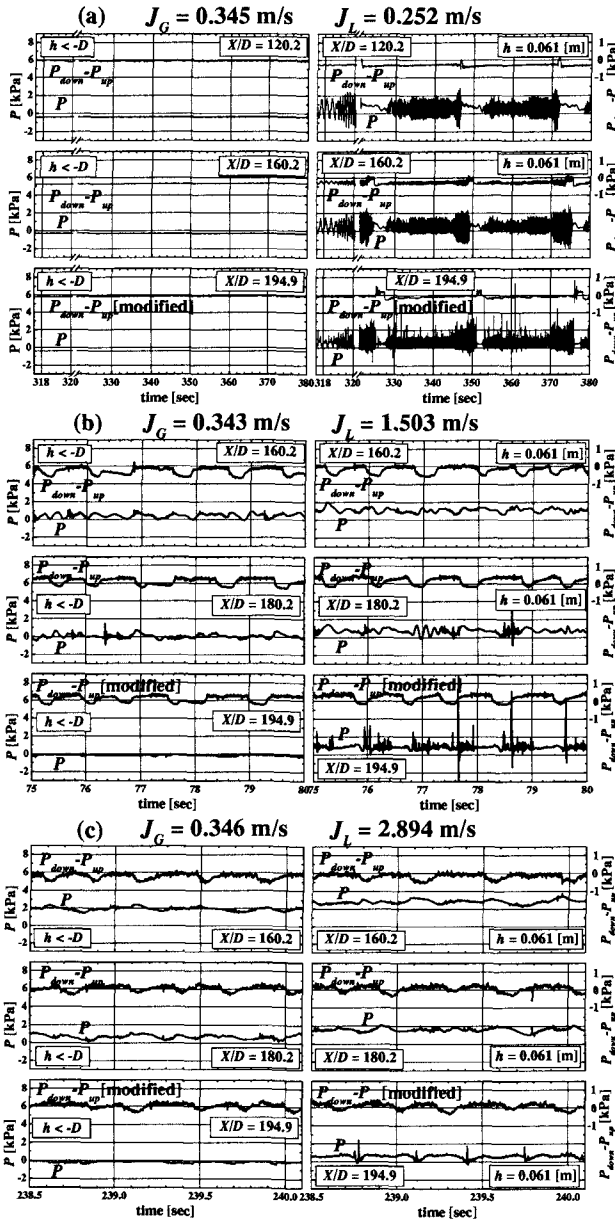


図-3: 上側壁面圧力変動 P と上下差圧変動の一例

自由流出条件と水面存在流出条件の各々のケースにおいて得られた各計測断面の上側壁面圧力変動 P の一例を図-3に示す。また、同図には上下差圧変動 [$P_{\text{down}} - P_{\text{up}}$] を示すが、これに関しては4.(3)にて考察を行う。

これらによると、水面存在流出条件では出口近傍 [$X/D = 194.9$] に大きな変動が生じ、それは位置と体積

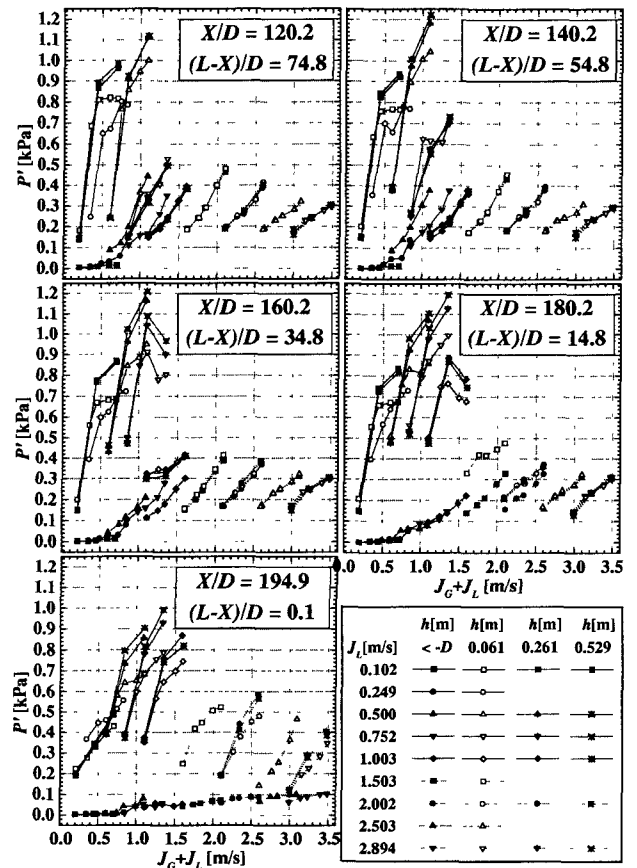


図-4: 壁面圧力変動の標準偏差 P'

流束条件によって異なるが、管路内でも生じることがある。また、出口近傍での大きな変動の影響がない場合の壁面圧力変動は、自由流出条件のそれに類似する。

次いで、各実験ケースで得られた各測定位置の壁面圧力変動の標準偏差 P' を図-4に示す。また、同様に、最大壁面圧力変動量 ΔP を図-5に示す。ここで、 ΔP は確率0.1%以下のデータを除いて得られた最大圧力と最小圧力の差と定義する。

これらによると、自由流出条件 (出口近傍を除く) の場合、 J_L が一定とすると、 J_G が大きいほど変動量は大きい。また、 J_G が一定とすると、 $J_L=1.5\text{m/s}$ 以下では J_L が大きいほど変動量は大きい、それ以上では逆に小さく、その傾向は J_G が大きいほど顕著である。

一方、水面存在流出条件の場合、最大圧力変動量 ΔP は最大で18kPaにも達し、自由流出条件とは異なり大きな圧力変動が発生する。また、出口近傍では、自由流出条件と同様、 J_L が一定とすると、 J_G が大きいほど変動量は大きい。そして、 J_G が一定とすると、 $J_L=1.0\text{m/s}$ 以下では J_L が大きいほど変動量は大きい、それ以上では逆に小さく、その傾向は J_G が大きいほど顕著である。しかし、出口近傍以外では必ずしもその傾向とはならず、 J_L が一定とすると、 J_G が大きいほど、逆に変動量が小さい場合もある。また、 J_L が大きいと出口境界条件によらずに同程度の変動量となり、その傾向は出口から遠いほど小さい J_L で同程度となる。

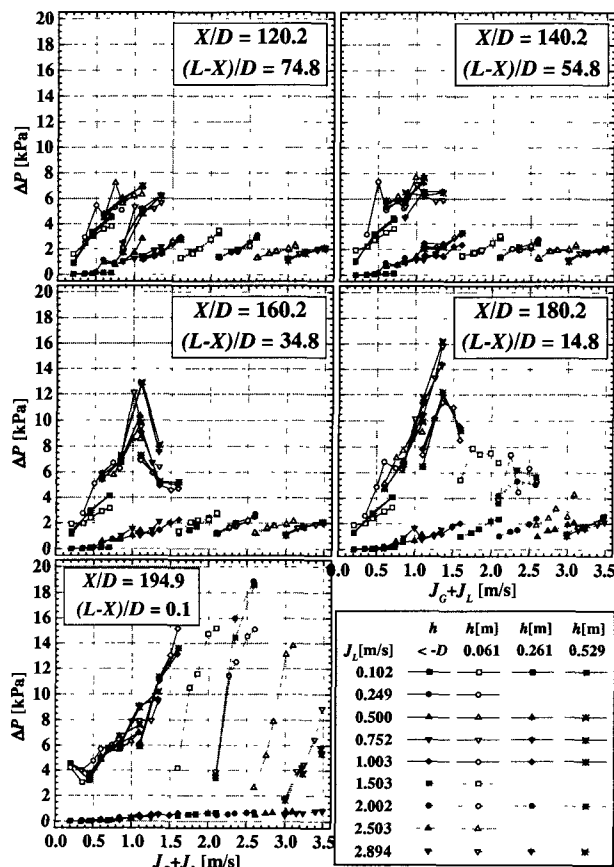


図 - 5: 最大壁面圧力変動量 ΔP

なお、今回の実験では、水面存在流出条件における出口での壁面圧力変動は水槽内水位 $h(>0)$ の影響をほとんど受けず、水位が高いほどエアハンマー圧力が大きい、という従来の研究³⁾とは異なる結果が得られた。これは、水槽面積が小さいほどエアハンマー圧力は大きい、という従来の研究³⁾を考えると、水面存在流出条件における出口での壁面圧力変動は体積流束条件の他に水槽内水位 h と水槽面積の両者の影響も受けるが、今回の実験のような大きな水槽面積では水槽内水位 h の影響を受けないことも考えられる。この点に関しては、今後の課題としたい。

(3) 空気塊諸量

Plug & Slug Flowを対象として、Optical Dual Probe Methodによって計測した鉛直方向の局所ボイド率分布 α_G 、局所気相速度分布 u_G 、局所空気塊長さ分布 L_G の平均値の一例を図-6に示す。ここで、 z は管路底面を基準とする[図-1]。計測において、プローブが空気塊中であるにも関わらず、水滴等の存在により一瞬水中と判断する場合があります、その場合には空気塊を短く評価してしまう。よって、ここでは、ボイド率分布や気相速度分布、そして分布からの換算気相体積流束に影響を与えない範囲で修正を行い、短い液相時間(例えば0.01秒以下)をノイズとみなした。また、空気塊長さ L_G に関しては、気泡を無視し、 $L_G > 100\text{mm}$ を対象とした。

次いで、自由流出条件と水面存在流出条件の各々の

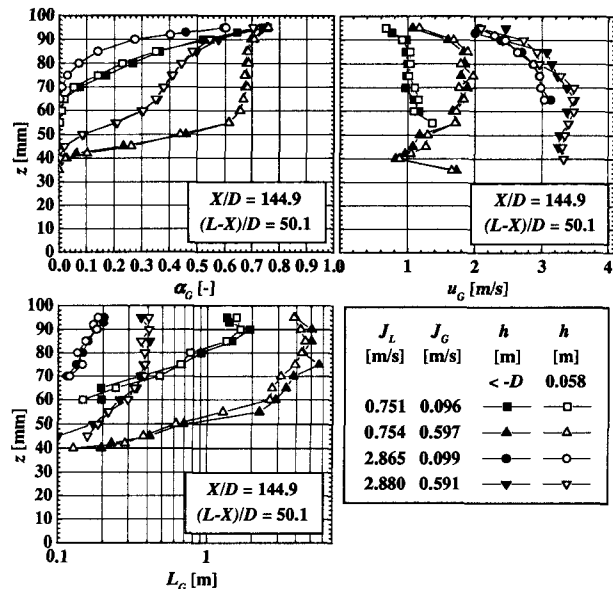


図 - 6: 局所ボイド率, 気相速度, 空気塊長さ分布の一例

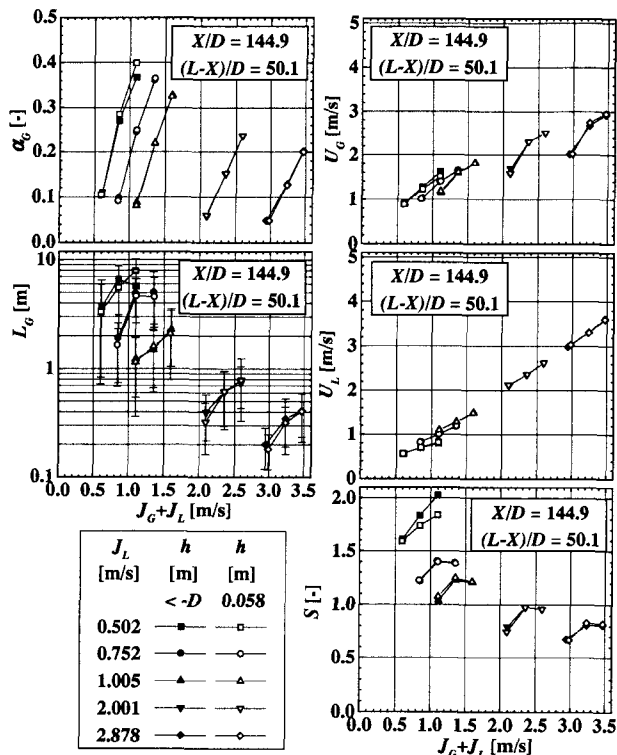


図 - 7: 断面平均ボイド率, 気相平均速度, 液相平均速度, スリップ比, 最大空気塊長さ

ケースにおいて得られた平均ボイド率 α_G 、平均気相速度 U_G 、平均液相速度 U_L 、スリップ比 S 、空気塊長さ L_G を図-7に示す。これらは Optical Dual Probe Methodによって得られた局所ボイド率分布を基に解析を行ったものである。すなわち、平均ボイド率 α_G は式(1)より導いた。

$$\alpha_G = \frac{1}{A} \int_0^D \alpha_G(z) B(z) dz \quad (1)$$

ここで、 A ; 断面積、 $B(z)$; 高さ z での管幅であり、局所ボイド率 $\alpha_G(z)$ は管幅方向に一定と仮定した。そして、平均気相速度 $U_G [= J_G / \alpha_G]$ 、平均液相速度 $U_L [=$

$J_L/(1-\alpha_G)$ は、得られた平均ボイド率 α_G から導き、さらに、スリップ比 $S[=U_G/U_L]$ は U_G 、 U_L から導いた。また、空気塊長さ L_G は同様に得られた局所空気塊長さ分布の平均値のうちの最大長さを示した。なお、 $\{J_G, J_L\}=\{0.10, 0.50\}, \{0.10, 0.75\}$ の条件では、空気塊先端速度よりも後端速度の方が速い、という結果が得られたが、ここでは空気塊先端速度を基に解析を行った。

これらによると、空気塊諸量に与える出口水位条件の影響はほとんどないことが分かる。

4. 壁面圧力変動と空気塊の関係に関する考察

(1) 上下差圧変動と空気塊の関係

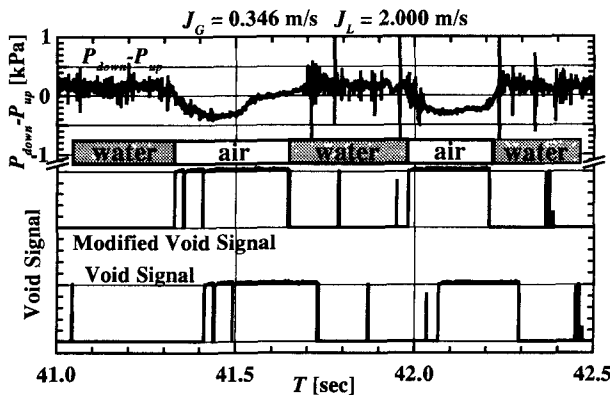


図 - 8: 上下差圧変動とボイド信号

壁面圧力変動 [$X/D = 142.4$] と Optical Dual Probe [$z=90\text{mm}$] の信号を同時にサンプリング [周波数 25600Hz] した場合に得られた上下差圧変動とボイド信号を図-8に示す。ここで、壁面圧力変動と Optical Dual Probe の測定位置は異なるので、Optical Dual Probe より得られた気相速度を用いて時空間的な修正を行い、Modified Void Signal として示した。

これらより、Optical Dual Probe の鉛直方向測定位置の問題もあるため完全な一致には至らないが、上下差圧変動は空気塊と水塊を表す情報として十分使用できることが分かる。

(2) 気相速度の流下方向定常性

4.(1) より、上下差圧変動を空気塊の情報として利用できることが判明したので、各測定断面間の上下差圧変動の相互相関解析を行い、最大相関値を示す時間情報から各測定断面間での速度を導いた。そして、解析結果の不確かさ解析を行った結果、体積流束の小さい条件を除くと $X/D=60.0\sim 180.2$ の区間では精度的に意味のある差はなく、速度は定常であることが判明した。定常性が確認できた結果を図-9に示す。なお、エラーバーは解析結果の誤差範囲である。同図には Optical Dual Probe Method によって得られた気相平均速度、ならびに最大および最小局所気相速度も示した。また、直線は、 $D=95.3\text{mm}$ の場合に Woods ら¹⁰⁾ によって Conductance Probe Method を用いて得られた気相速度の実験式 (2) である。

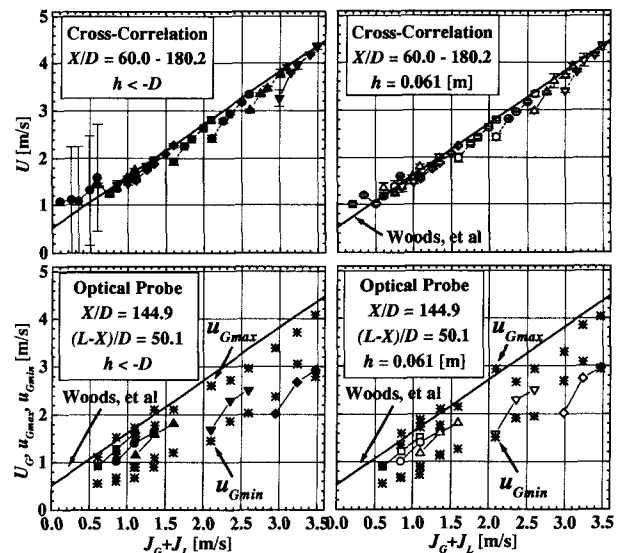


図 - 9: 相互相関解析に基づく速度と Optical Dual Probe Method による気相平均速度と最大および最小局所気相速度

$$U_G = C_2 (J_G + J_L) + \Delta U_G \quad (2)$$

但し、 $C_2 = 1.10$ 、ドリフト速度 $\Delta U_G = 0.52$ である。

これらによると、相互相関に基づく速度は最大局所気相速度にほぼ一致し、また、 J_G が大きい場合には Woods らの実験式¹⁰⁾ にも良い一致を示す。しかし、 J_G が小さい場合には直線から外れる。これは、 J_G によって局所ボイド率分布、すなわち空気塊形状が大きく異なるためであり、逆説的には、空気塊形状が異なれば気相速度と体積流束は線形な関係とはならないことを意味する。

(3) 水面存在流出条件での壁面圧力変動と空気塊の関係

4.(1) より、上下差圧変動を空気塊の情報として利用できることが判明した。ここでは、図-3に基づいて水面存在流出条件における壁面圧力変動と空気塊の関係の考察を行う。なお、 $X/D=194.9$ の上下差圧変動は、大きな壁面圧力変動のために空気塊情報を得られなかったため、 $X/D=180.2$ の上下差圧変動を相互相関から導いた速度を用いて時空間的にシフトさせた値を $P_{down} - P_{up}[\text{modified}]$ として示した。

Transition Regime である $J_L=0.252\text{m/s}$ の場合は、空気塊が出口に達して Wavy Flow になった瞬間から管路全体において単振動的な圧力変動が始まり、それは次の空気塊が発生するまで続く。そして、出口以外の最大圧力変動は空気塊が通過する時に生じる。

$J_L=1.503\text{m/s}$ の場合は、出口の圧力は空気塊が流出している時に大きく変動し、そして抜けきる瞬間に最大圧力変動が生じる。また、出口以外の圧力は一般に、空気塊が達すると一度上昇し、その後比較的周期的な変動が空気塊が通過するまで続き、そして終端が通過する際に圧力は再び上昇する。

$J_L=2.894\text{m/s}$ の場合は、空気塊が達すると圧力は上昇し、そして、出口においては空気塊が抜けきる瞬間のみに一度圧力が減少した後一瞬のうちに上昇する。

(4) 壁面圧力変動と空気塊長さの関係

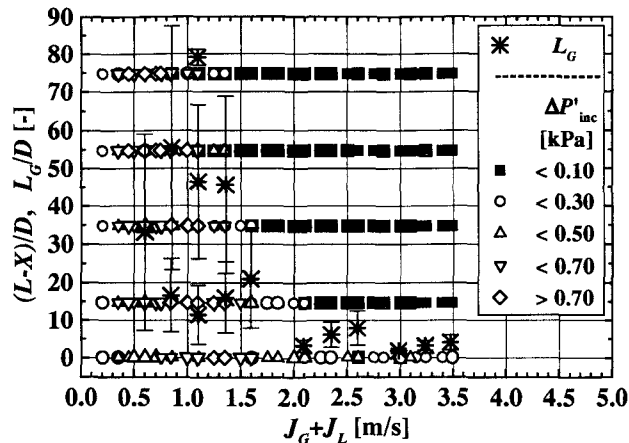


図 - 10: 壁面圧力変動と空気塊長さの関係

3.(2) より、出口水位条件は管路内の壁面圧力変動に大きく影響を与える場合と与えない場合があり、それが位置や体積流束条件に依存することが判明した。一方、3.(3) より、出口水位条件は空気塊諸量にほとんど影響を与えないことが判明した。ここでは、出口水位条件の壁面圧力変動への影響の特性を定量的に把握するため、それらと空気塊諸量との関係について検討を行う。

図-10に水面の存在による壁面圧力変動増加量 $\Delta P'_{inc}$ と空気塊長さ L_G との関係を示す。ここで、 $\Delta P'_{inc}$ は、自由流出条件での各断面の壁面圧力変動が J_G および J_L のみに依存すると仮定し、また、水面存在流出条件では出口天端よりも水面が上に存在することで出口に生じる圧力変動がそれらにさらに加わると仮定して、その影響による増加分に相当する壁面圧力変動増加量 $\Delta P'_{inc}(=P'_{water} - P'_{free})$ を、自由流出条件の標準偏差 P'_{free} と水面存在流出条件の標準偏差 P'_{water} から導いた。図-10は、全体積流束 $J_G + J_L$ を横軸、計測位置から出口までの距離 $(L - X)/D$ を縦軸とし、各計測条件での壁面圧力変動増加量 $\Delta P'_{inc}$ をその大きさに応じて記号を変えて示したものである。また、同図には図-7に示した空気塊長さ L_G/D も示した。

これによると、 $\Delta P'_{inc}$ の小さい領域はいずれも空気塊長さ L_G より右上に位置する。このことは、水面存在流出条件の場合に出口に生じる圧力変動が各断面の壁面圧力変動に与える影響の有無は、 J_G および J_L の条件によって決定される空気塊長さに依存することを意味する。さらに、空気塊長さが計測位置と出口の距離 $(L - X)$ よりも短い場合には、空気塊が緩衝材となるために壁面圧力変動が出口での圧力変動の影響を受けず、 J_G および J_L のみに依存する壁面圧力変動となることを意味する。しかし、これらの検討では、気相体積流束を増加させても壁面圧力変動が増加しない現象を説明することができない。これに関しては今後の課題としたい。

5. 結言

本研究では、内径 100mm の水平管内気液二相流を対

象として、管路出口が自由流出条件である場合と水面存在流出条件である場合に関して流動様式や壁面圧力変動、空気諸量の計測を行い、主に以下の結論を得た。

- (1) 水面存在流出条件の方が、自由流出条件よりも、液相体積流束 J_L が若干小さい条件で水塊と空気塊が交互に通過する間欠流に遷移する。
- (2) 出口水位条件は、管路内の壁面圧力変動に大きく影響を与える場合と与えない場合があり、それは位置や体積流束条件に依存する。
- (3) プラグ流およびスラグ流領域において、出口水位条件は、空気塊諸量に影響を与えない。
- (4) 水面存在流出条件と自由流出条件の壁面圧力変動の相違は、空気塊長さ L_G に依存する。そして、各体積流束条件に応じて決まる空気塊長さ L_G よりも出口からの距離が長い位置では、出口での大きな衝撃の影響は受けない。

本研究では以上の様な結論を得たが、水面存在流出条件における出口境界での圧力変動と流動挙動の関係の解明、ならびに空気塊の大きさ・形状や挙動の決定機構の解明に関しては、今後の研究課題としたい。

謝辞: 実験にあたり、増子善和氏(シー・アール・エス)の協力を頂いた。ここに記し、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 佐藤隆宏:余水路減勢工の水理設計と課題, 第 52 回中小水力発電技術に関する実務研修会テキスト, 新エネルギー財団水力本部, pp.5-42, 1998.3
- 2) 栗城稔:地下河川の水理課題, 土木学会論文集, No.521/II-32, pp.1-12, 1995.8
- 3) 丸岡計, 五十嵐由雄:発電用水路のエアハンマー防止対策とその効果, 電力土木, No.183, pp.49-59, 1983.3
- 4) 安芸周一, 水島増男, 斎藤茂:雨龍発電所取水口空気流入に関する調査, 電中研依頼調査報告書, II 水 6004, 1960.6
- 5) Kawaji, M., Anoda, Y., Nakamura, H. and Tasaka, T.: Phase and Velocity Distributions and Holdup in High-Pressure Steam/Water Stratified Flow in a Large Diameter Horizontal Pipe, Int. J. Multiphase Flow, Vol.13, No.2, pp.145-159, 1987
- 6) 佐田富道雄, 川路正裕:液位に勾配を有する水平管内層状気液二相流の研究, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol.58, No.552, pp.2391-2397, 1992.8
- 7) 佐藤隆宏:水平管内気液二相流の圧力変動に及ぼす出口条件の影響, 混相流シンポジウム'98(第 17 回) 講演論文集, pp.205-208, 1998.7
- 8) Taitel, Y. and Dukler, A. E.: A Model for Predicted Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow, AIChE J., Vol.22, No.1, pp.47-55, 1976.1
- 9) 小泉安郎, 山本信夫, 田坂完二:比較的大きな口径の水平管内水-空気二相流, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol.56, No.532, pp.159-163, 1990.12
- 10) Woods, B. D. and Hanratty, T. J.: Relation of Slug Stability to Shedding Rate, Int. J. Multiphase Flow, Vol.22, No.5, pp.809-828, 1996

(1998.9.30 受付)