

気液スラグ流の発生メカニズムと
流動周期特性について

THE ONSET AND PERIODIC MECHANISMS ON SLUGGING IN AIR-WATER
TWO-PHASE FLOWS

幕内真一朗¹・山田泰正¹・小川元²・落合実³・北澤賢次⁴・遠藤茂勝⁵
Shinichiro MAKUCHI, Yasumasa YAMADA, Hajime OGAWA, Minoru OCHIAI, Kenji KITAZAWA,
and Shigekatsu ENDO

¹学生会員 日本大学大学院生産工学研究科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)
²正会員 日本大学大学院生産工学研究科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)
³正会員 工修 日本大学助教授 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)
⁴正会員 佐伯建設工業(株) 技術本部技術開発部長 (〒101-8632 東京都千代田区東神田1-7-8)
⁵フェロー会員 工博 日本大学教授 日本大学大学院生産工学研究科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

The long distance pneumatic conduit conveyance of so-called multiphase fluids has recently been attempted in the field of marine construction works and coastal zone developments. This system is very useful for conduit transport on fluidity materials. So far studies have been focused on the onset and periodic mechanisms on slugging in a mixture of air. This paper mainly describe about passage period of slug flow in long pipeline. As the result of this investigation, it was to clarify that the passage period of air-water two-phase flow was controlled by air -water ratio.

Key Words : Air-water two-phase flow, slugging, pneumatic conveyance, horizontal pipe

1. はじめに

流動性のきわめて低い高濃度の土粒子等を含んだ流体や洋上に流出してエマルジョン化した重油、あるいは次世代エネルギーとして注目されているメタンハイドレート掘削時の溶解液やズリを含む混合流体など、一般に混相流体といわれる流体の輸送には、圧縮空気を用いた管路輸送が行われている。通常これらの流体は混合状態の流体で液相と圧縮空気である気相を同時に管路内に供給し間欠的なスラグ流として輸送している。このような圧縮空気を含む混合流体では流れを構成している個々の物質の特性が著しく異なり、加えられた応力に対するひずみやひずみ速度に著しい違いを生じる事から、脈動を起こすなど複雑な挙動を示すため効率的な輸送を行う上で間欠流の流動周期の検討が必要となってきた。

そこで本研究では液相に水や高粘性物質あるいは泥土を用いた実験の内、可視化のできた液相に水を用いた気液二相流についてスラグの発生メカニズムと流動周期特性との関連及び気液混合比や管路内の流動過程における周期分布、また気相の圧縮性に基づく流動周期の乱れなどについて明らかとすること

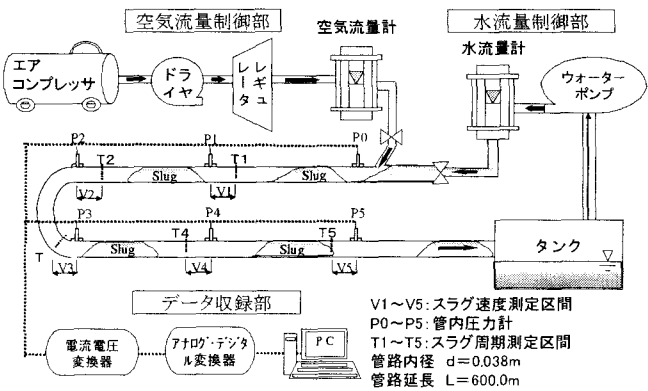


図-1 実験装置

表-1 実験条件

気液流量比 (Qw/Qa)		Qw(L/min)					
		12.0	20.0	28.0	36.0	44.0	52.0
Qa(NL/min)	60.0	0.200	0.333	0.467	0.600	0.733	0.867
	80.0	0.150	0.250	0.350	0.450	0.550	0.650
	100.0	0.120	0.200	0.280	0.360	0.440	0.520
	120.0	0.100	0.167	0.233	0.300	0.367	0.433
	140.0	0.086	0.143	0.200	0.257	0.314	0.371
	160.0	0.075	0.125	0.175	0.225	0.275	0.325
	180.0	0.067	0.111	0.156	0.200	0.244	0.289
	200.0	0.060	0.100	0.140	0.180	0.220	0.260
	220.0	0.055	0.091	0.127	0.164	0.200	0.236
	240.0	0.050	0.083	0.117	0.150	0.183	0.217
	260.0	0.046	0.077	0.108	0.138	0.169	0.200
	280.0	0.043	0.071	0.100	0.129	0.157	0.186

を目的とした。

2. 実験概要

(1) 実験装置および方法

これまでのスラグ流の可視化実験として、管径 32 mm と 38 mm, 管路延長が 50.0 m および 150.0 m のケースについて実験を行い、スラグの発生、成長、流動、崩壊の過程^{1), 2)}および流動過程における速度変動や圧力降下等について検討してきた。^{3)~7)}しかし、管路の総延長が管路内の現象を著しく支配することや、実用的な観点から長距離輸送を考慮し、管路延長を 600.0 m として検討を行った。実験装置は図-1 に示すとおり、管径 38 mm の透明管路を用いた。液相である水はタンクからポンプによって供給され、流量計を通して検定されたのち管内に流入する。また、気相である圧縮空気はエアコンプレッサから供給され、エアドライヤーで水分を除去した後、空気流量計で検定し、管内に流入する。液相、気相共に連続的に供給され両相の合流点で混合流となる。

測定は管内圧力、スラグ流速、スラグ流周期について行った。管内圧力は管路上壁に取り付けた圧力計で計測し、デジタルデータとしてパソコンに収録される。スラグ流速は 10 m 区間の液相の平均管内速度であり、スラグ流周期は各測定地点における液相個々の連続した 60 個のスラグの通過時間間隔である。これらは目視によって観測を行った。実験条件は表-1 に示す合計 72 ケースである。

(2) スラグ流の画像解析

スラグ流は液相と気相の混合地点から約 1.0 ~ 3.0 m 下流へ進んだ地点で発生することが明らかとなっているので、スラグ流の発生状況を把握するために毎秒 500 コマ撮影可能な高速度 CCD カメラをスラグ流発生地点に設置した。また、管路の幅 1 m を撮影できる広角レンズと管路の幅 20 ~ 30 cm を撮影できる望遠レンズを用意した。

3. 実験結果

(1) スラグ流の発生状況

スラグの発生状況を示した画像が図-2 である。図に示されるように、管内水位上昇に伴い水位があるピークに達するとスラグ流が発生し、その後水位は低下する。このような現象の様子は次のようである。

- ①管内に同時に供給された液相と気相は混合状態となるが、ある一定区間吹送された後、重力の作用によって分離流になる。
- ②連続的に液相と気相が供給されているため液相の水位は上昇し、それに伴って水面勾配が増大し、下流に向かって穏やかな水面形が形成され水面がもりあがる。
- ③この水面形は時間と共に成長するが、一方、液相表面の気相の流れによる乱れが卓越し、波が形成される。この水表面を伝わる波は、さらに発達し

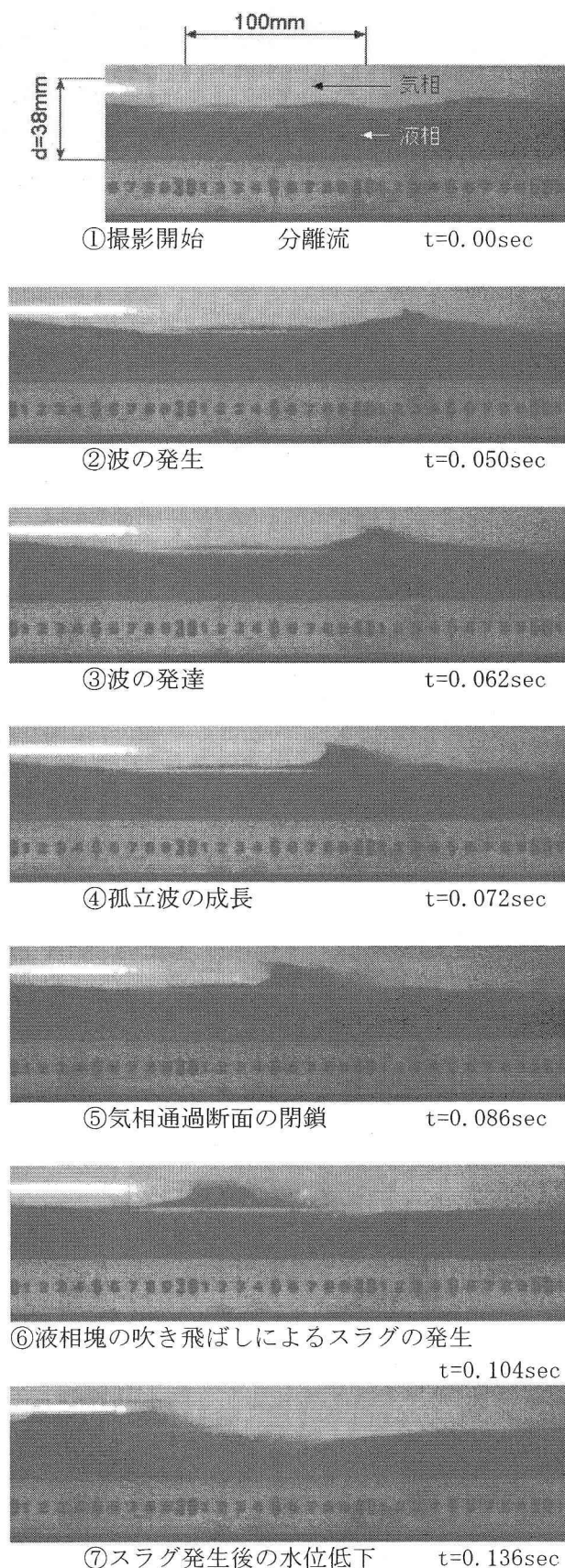


図-2 スラグ発生状況

気相の通過断面積を減少させる。

- ④液相表面の波がさらに発達し、孤立波が発生する。
- ⑤孤立波の発達により、気相通過断面積が閉塞される。
- ⑥これにより液相塊の吹き飛ばし現象が発生する。
- ⑦水塊の吹き飛ばしにより水位の低下が生じる。しかし、連続した分離流によって再び液相表面に波が形成され、次のスラグが形成される。

以上のような現象の繰り返しで、液相および気相が交互に連続的に繰り返す流動状態のスラグ流が発生する。

(2) スラグ流の発生水深

スラグ流が発生する前後の水面形を調べると、その地点は明らかに水深が著しく増大している。今回の実験では水深が最大となる地点の前後約 15d～20d (d は管径) の区間の水面は緩やかな勾配となっていて、気相の通過断面積が最小となっている地点でスラグ流が発生している。

このように管路内の水面形が、ある特定な区間で著しく変化することはすべての実験条件において共通して認められ、最大水深の発生点や水面形の勾配の多少の違い、さらに水面上を伝わる波の不安定性のためスラグ流の発生周期は必ずしも規則的ではない。しかしながら、スラグ流の発生する管路内の最大水深はほぼ一定である。スラグの発生地点ではこの水面形がピークとなり、気相の通過断面積が最も減少する瞬間にスラグが発生することから、その時の最大水深 h に着目し、目視によって水深の測定を行った。それらの結果をまとめて示したものが図-3 である。

横軸には気相流量 Q_a と管路断面積 A から求めたフルード数 $Fra = (Q_a/A)/\sqrt{gh}$ をとり、縦軸にはスラグ流が発生するときの液相の水深 h を管径 d で無次元化した量をとって示したもので管径 $d = 0.032\text{m}$ 、管路長 $L = 50.0\text{m}$ の結果である。 $Fra \approx 2.0$ では管路内の液相の水深が管径の約 8 割程度のときに発生している。一方、 Fra が増大するにつれてスラグ流の発生水深は管径の 6 割程度まで低下する。

(3) スラグ流の周期頻度分布

スラグ流が発生するタイミングは液相の水位とその上に発生する孤立波によって決まる。スラグ発生時における波高は十分発達しているものの、必ずしも波高の大小ではなく水位の変動も関係するために、スラグ流の発生が不規則になるものと思われるので、このように発生したスラグ流の周期について次に検討した。横軸にスラグ流の通過周期 $T_s(\text{sec})$ 、縦軸に通過周期の頻度百分率 P をとり、気相流量 $Q_a = 100.0(\text{NL/min})$ に対し、液相流量 $Q_w = 12.0(\text{l/min})$ 、 $Q_w = 20.0(\text{l/min})$ 、 $Q_w = 28.0(\text{l/min})$ の結果を示したものが図-4(a) (b) (c) である。これらから液相流量を増加させると通過周期が短くなり、ある特定な周期となることが確認できる。図中の曲線は Rayleigh

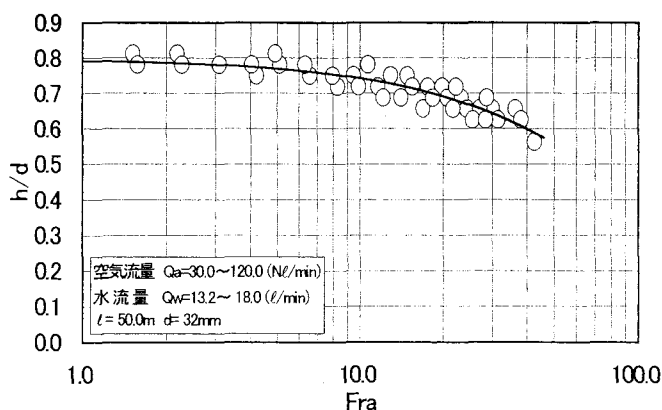


図-3 スラグ流の発生水深

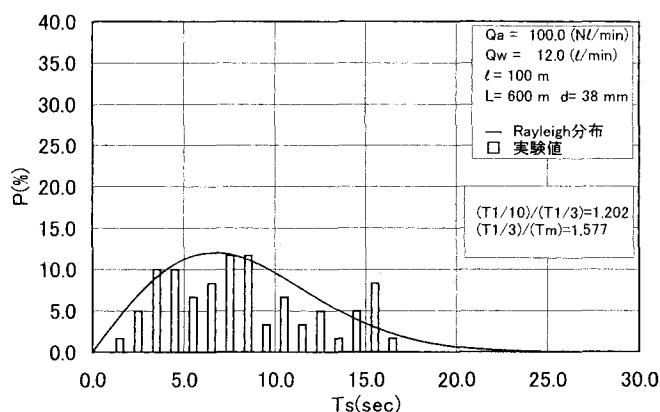


図-4(a) スラグ流の周期分布

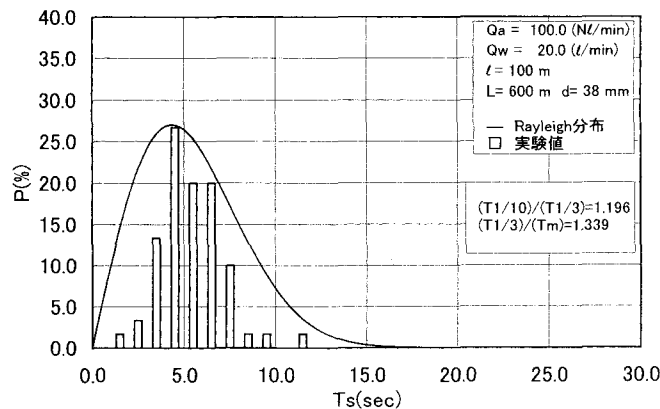


図-4(b) スラグ流の周期分布

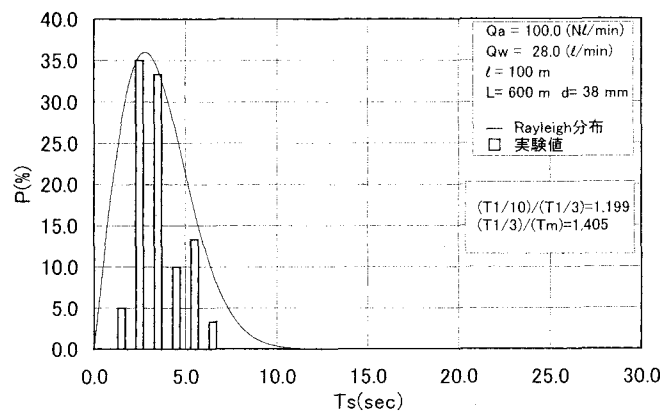


図-4(c) スラグ流の周期分布

分布式によるもので、実験における周期の頻度分布とほぼ一致することが確認できる。

このようにスラグ流の周期は液相流量によってかなり変動幅が変わるため、輸送効率などを検討する上でスラグ流の周期性を把握する必要から、スラグの通過平均周期 T_m や上位 1/3 平均値 $T_{1/3}$ との関係および上位 1/10 の平均値 $T_{1/10}$ との関係を示したものが図-5 (a) (b) で、全実験 72 ケースについてまとめたものである。

これらの結果では、どの気相流量、液相流量においてもそれぞれの関係が直線上に分布することが確認され、 $T_{1/3}$ と T_m および $T_{1/10}$ と $T_{1/3}$ の関係は次のように示される。

$$T_{1/3}/T_m = 1.46 \quad T_{1/10}/T_{1/3} = 1.18$$

このようにスラグ流の発生周期は Rayleigh 分布とかなりよい一致を示すので、 T_m や $T_{1/3}$ 、 $T_{1/10}$ などとの関係はある程度予測され、十分発達した不規則な波の波高分布と同様な結果となっている。このことは液相面での波の発生と発達がスラグ流の発生に関係があるのではないかと考えられる。

(4) 液相流量と平均スラグ周期

スラグ流の周期が気液流量と、どのような関係があるのかについて調べるため、液相流量と通過周期について検討した。横軸に液相流量 Q_w をとり、縦軸に平均スラグ周期 T_m との関係を気相流量 Q_a をパラメーターとして示したのが図-6 である。ここに示したスラグ流の平均周期とはスラグ流の発生地点から $l=100.0\text{m}$ 離れた地点の、気相と液相を含んだ 1 スラグユニットの連続通過周期の平均値を示すもので、目視により観察した結果である。

この結果で示されるように液相流量が多いときにスラグ流周期が短くなるのはスラグが発生する水位となる時間間隔が基本的に早くなるためで、スラグの発生メカニズムを裏づけており、そのため液相流量が多い場合でもスラグ流の液相部分が長くなる事はない。つまり液相水位が上昇し、その水面に発生する波がきっかけとなってスラグ流が発生するが、主要な要素としては液相水位の上昇間隔が支配的な要素と考えられる。そして、その上で断面を閉塞するタイミングとして液相表面に発達する波が関与するような現象となっている。したがって液相流量が少ないときには液相の上昇速度や水面が不安定になるために、気相の流量の影響を受けるために、スラグの平均的な発生周期が乱れるものと考えられる。

(5) 混気比率と平均スラグ周期

スラグ通過周期は液相流量と気相流量に関係するので、混気比率によって総合的に検討する。混気比率とスラグ通過周期の関係について $l=100.0\text{m}$ 地点、 $l=500.0\text{m}$ 地点の結果を図-7 (a) (b) にそれぞれ示した。横軸に混気比率、縦軸にスラグ通過周期をとり気相流量別に示した。

これらの結果、 $l=100.0\text{m}$ 地点の場合では全体的に

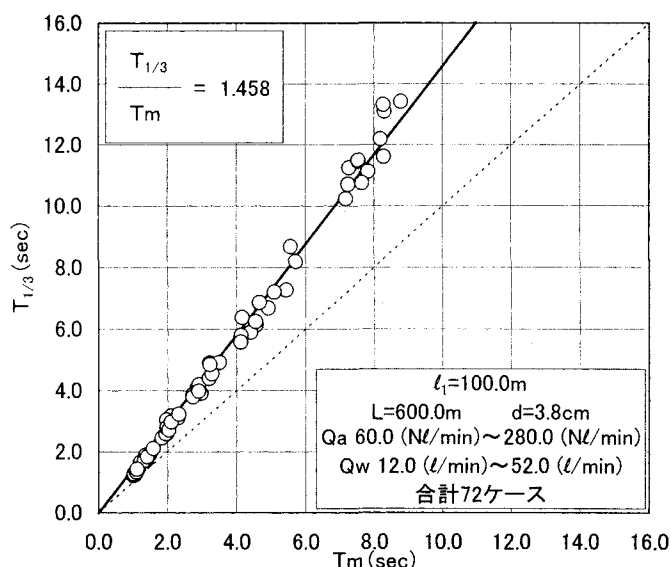


図-5 (a) スラグ流の周期特性

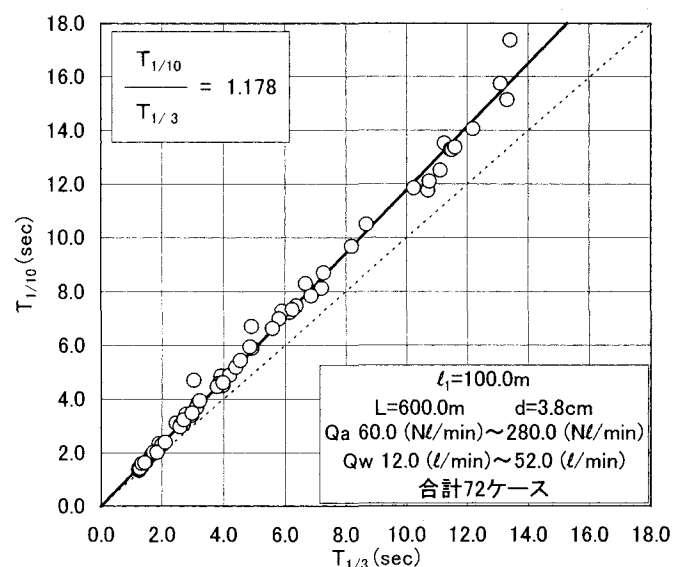


図-5 (b) スラグ流の周期特性

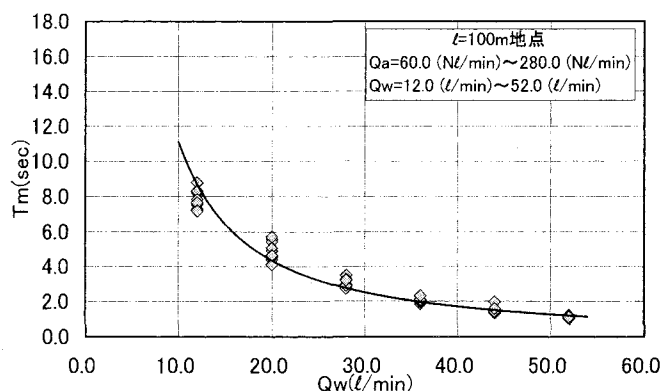


図-6 液相流量とスラグ平均周期

気相流量の増加によりスラグ通過周期が短くなる傾向を示すが、液相流量が少ない場合において気相流量によるスラグ通過周期の変動幅がやや大きくなる傾向を示す。それは気相流量が多いために液相水位が低い時点でも負圧的な効果や波高の小さな波の状態でもスラグが発生するためと考えられる。そして液相流量が 36.0 (ℓ/min) 以上では気相流量の影響は比較的少なく、平均周期はほぼ一定値に近くなることが分かる。

一方、 $t=500.0$ m 地点の結果では液相流量が少ない場合は平均スラグ周期の変動が大きく、流量が増加するとともに変動幅は少なくなる。しかし、気相流量の影響が最も少ない場合と、最も多い場合において平均スラグ周期が長くなり、中間では発生初期の周期が維持されている。

(6) 容積流束と平均スラグ流周期

圧縮空気を用いた混気輸送では気相の圧縮性が問題となるが、特に長距離管路では顕著となると考えられる。そこで気相の膨張を考慮した容積流束とスラグの平均周期について検討する。

スラグの発生直後の $t=100.0$ m 地点では図-6 に示されるようにスラグの平均周期は液相流量でほぼ決定されることがわかったが、スラグ流の流動過程における平均スラグ周期をまとめたものが図-8(a) (b) (c) (d) (e) である。それぞれ 100.0 m ずつ離れた地点の結果で、横軸に容積流束 J_T をとり、気相の膨張による効果を含んだ値である。全体の傾向として $t=100.0$ m 地点においてスラグ周期は液相流量のみに決定されるが、 $t=200.0$ m 地点では平均的なスラグ周期は長くなり、スラグ流の速度が遅くなるか、間隔が広がる傾向のどちらかといえる。しかし、 $t=300.0$ m 地点では一部を除きスラグ周期は短くなり、スラグ流の速度が速くなり、間隔が短くなるかのような結果を示している。また $t=400.0$ m 地点になると気相流量の多いところでは気相の膨張による容積流束が増大するにもかかわらず、周期がやや長くなる傾向が認められる。そして管路の出口に最も近い $t=500.0$ m 地点では気相流量の少ない条件と多い条件の両端の条件において平均周期が長くなっている。

これらのことを総合するとスラグ流の平均的な流れは液相流量によって平均周期は決まるが、その後 $t=200.0$ m 地点程度までは粘性摩擦損失や管路の底部にある水塊が加速するための損失などのために一時的に減速するためにスラグの周期が長くなるものと推測される。しかし、 $t=300.0$ m 地点では気相の膨張のため再び周期が短くなっている。また $t=400.0$ m 地点、 $t=500.0$ m 地点では液相流量が少ない $Q_w=12.0$ (ℓ/min) で $Q_a=60.0$ (Nℓ/min) と $Q_a=260.0$ (Nℓ/min) については特に周期が長くなっている。このような周期特性の変動は液相流量が $Q_w=36.0$ (ℓ/min) 以上では気相流量による変動はきわめて少ない。

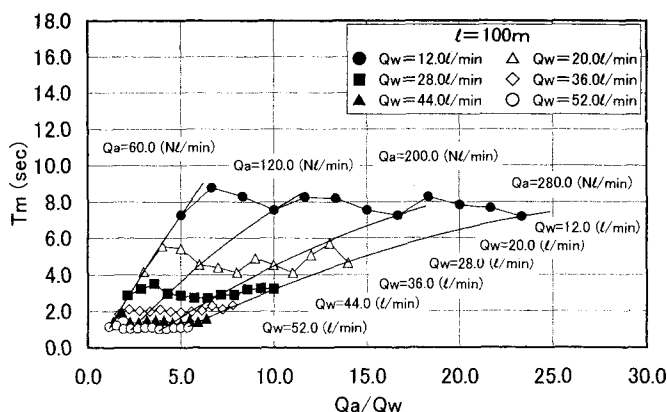


図-7(a) 気液流量比と平均周期

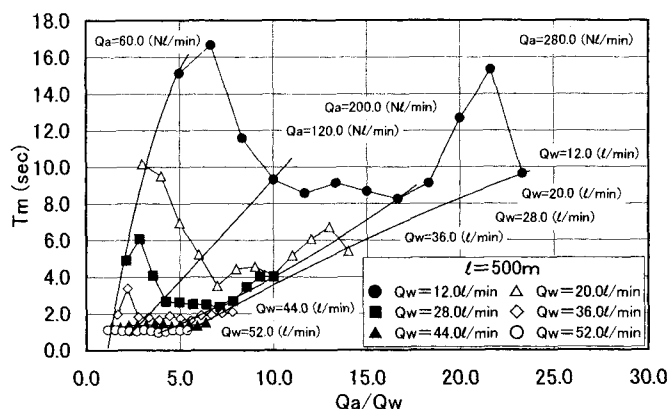


図-7(b) 気液流量比と平均周期

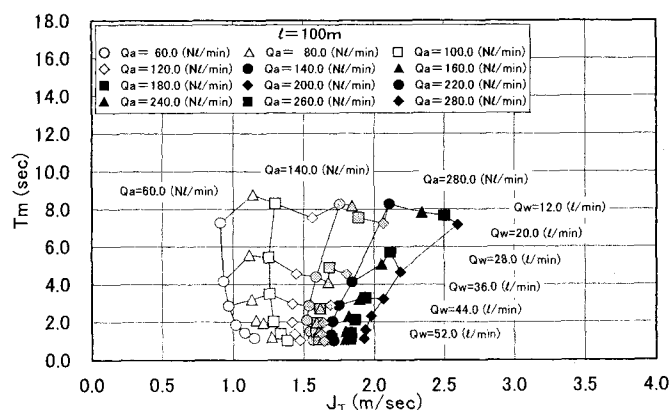


図-8(a) 容積流束と平均周期

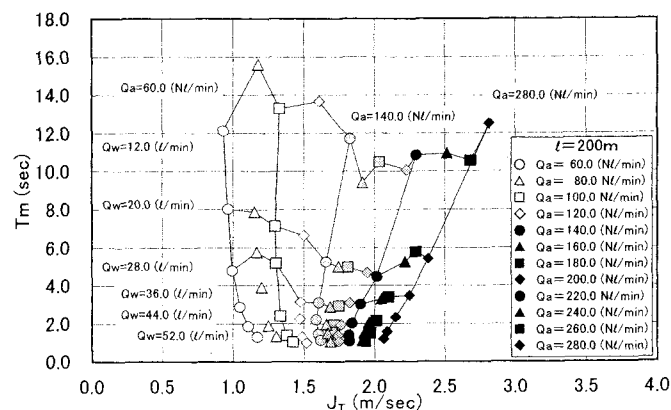


図-8(b) 容積流束と平均周期

これらの詳細については検討中であるが、液相流量が少ないと $l=300.0\text{m}$ 以上の地点から気相の膨張のためスラグ速度が容積流束の2,3倍程度まで加速されるために、前のスラグに追いついたり、場合によっては消滅することもあるためだと考えられる。

5. まとめ

本研究によって得られた結果をまとめると以下のように要約される。

- (1) 気液二相流におけるスラグ流の発生は液相水位の増加とその表面に発生する孤立波に支配され、きわめて不規則である。
- (2) 発生地点に比較的近い地点で観測されるスラグ流の通過周期は Rayleigh 分布に近い分布となることがわかった。
- (3) スラグ流の平均周期は液相流量によって決まり、液相流量が多い場合は気相流量にはほとんど支配されないことがわかる。
- (4) スラグ発生後の各地点の平均スラグ周期を調べると、 $l=100.0\text{m}$ 地点の周期に比べ $l=200.0\text{m}$ 地点ではやや周期が長くなり、 $l=300.0\text{m}$ 地点では $l=100.0\text{m}$ 地点の結果に近くなり発生直後の周期にもどるが、さらに遠方の $l=400.0\text{m}$ 、 $l=500.0\text{m}$ になると平均周期長くなっている。これは気相の膨張により速度が速くなるため、またスラグが合体し個数が減少するためと考えられる。

最後に本研究は日本大学学術助成金平成 13, 14 年度「国際総合研究」の交付を受けたことを付記する。

参考文献

- 1) 鈴木理仁, 落合実, 遠藤茂勝: 混気圧送における液相スラグの生成流動に関する研究, 海洋開発論文集, Vol. 15, pp. 421~426, 1999.
- 2) 鈴木理仁, 落合実, 遠藤茂勝: 混気圧送水平管における液相スラグの流動特性に関する研究, 水工学論文集, Vol. 44, pp. 885~890, 2000.
- 3) 小川元, 田崎道宏, 落合実, 遠藤茂勝: 長距離管路内における液相スラグの流動特性に関する研究, 海洋開発論文集, Vol. 17, pp. 625~630, 2001.
- 4) 小川元, 田崎道宏, 落合実, 遠藤茂勝: 水平スラグ流輸送における圧力, 速度特性について, 海岸工学論文集, Vol. 48, pp. 1006~1010, 2001.
- 5) 小川元, 田崎道宏, 落合実, 遠藤茂勝: 水平管内気液二相流の流動特性に関する研究, 海洋開発論文集, Vol. 18, pp. 617~618, 2002.

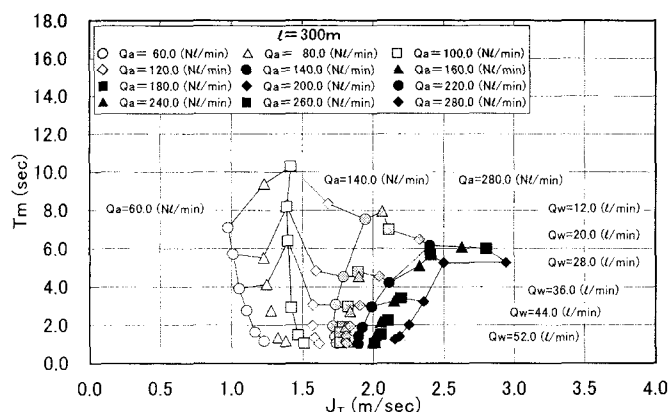


図-8(c) 容積流束と平均周期

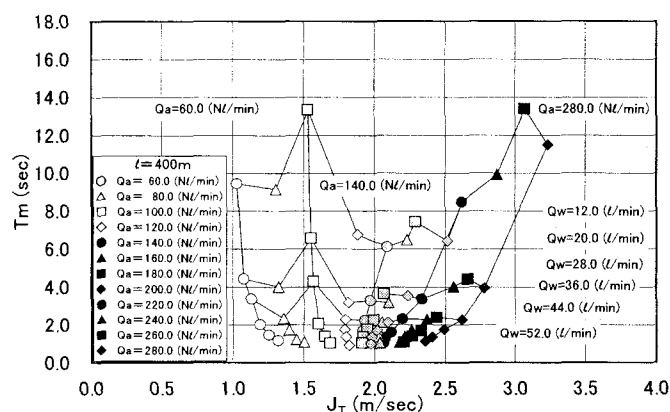


図-8(d) 容積流束と平均周期

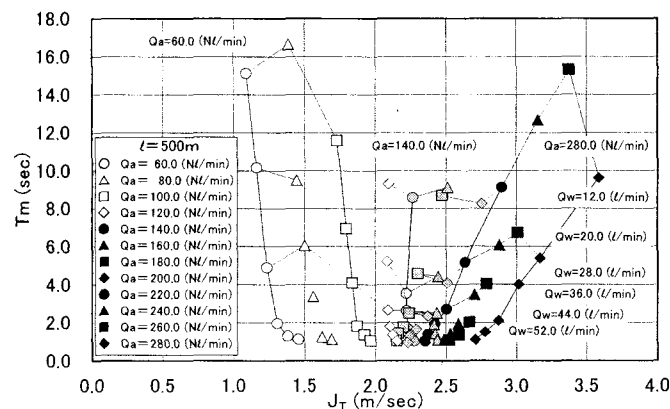


図-8(e) 容積流束と平均周期

- 6) 小川元, 落合実, 遠藤茂勝: 水平管内スラグ流における容積流束とスラグ流速について, 海岸工学論文集, Vol. 49, pp. 891~895, 2002.
- 7) 小川元, 遠藤茂勝: スラグ流の発生メカニズムと流動解析, 流体力の評価とその応用に関する研究論文集, Vol. 2, pp. 77~82, 2003.