

遷移流動スラグの生成・崩壊について

日大生産工（院） ○幕内 真一朗 日大生産工（院） 村上 康博
日大生産工 遠藤 茂勝

1 はじめに

港湾工事における浚渫土砂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，液相にあたる輸送対象の流体と気相にあたる圧縮空気を管路内に同時に供給し，スラグ流を発生させることで輸送している。しかし，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している。また，実験の観察から輸送途中においてスラグの生成・崩壊も確認されており，これらのことから効率的な輸送を行うためには管路内における流動状況を把握することが必要である。

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生成・崩壊の原因を解明すると共に，この現象が管路内の流動に与える影響について検討を行った。

2 実験概要

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 600.0m として検討を行った。実験装置は Fig.1 に示すとおり，管径 38mm の透明管路を用いた。液相である水は

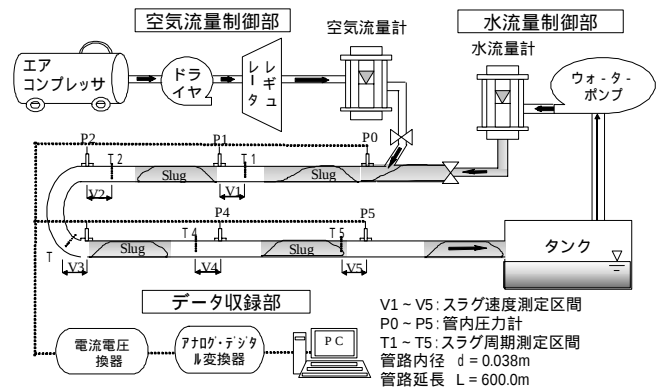


Fig. 1 実験装置

Table. 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

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 10m 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

Study on Generating and Breaking Behavior the Transition Slug Flow

Shinichiro MAKUCHI, Yasuhiro MURAKAMI, Shigekatsu ENDO

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 Table.1 に示す合計 72 ケースである。

3 結果

スラグの生成・崩壊はスラグ一つ一つの通過時間間隔であるスラグ流動周期に大きく左右される。そこで、周期特性を検討することで生成・崩壊の原因，起こりやすい条件，発生位置などについて検討を行った。

(1) 混気比率と平均スラグ周期

スラグの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 $T_m(\text{sec})$ 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 Fig.2(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液相流量別に示している。距離が進むほど各条件の混気比率が大きくなっているのは出口に近づくにつれ圧力が低下し，気相の膨張が起こるためである。どの地点においても液相が多いほど通過周期が短くなり，液相流量が増加することでスラグが発生しやすくなることに起因する。また 100.0m 地点では気相の影響がほとんどなく，どの液相流量においてもほぼ一定の周期となっている。これにより発生地点およびその付近では通過周期は一定であるといえるが，一方で 500.0m 地点においては液相が少なくなるほど気相流量の少ない条件，多い条件において通過周期が長くなる傾向がみられた。条件による通過周期の変動が非常に大きいことから Baker 線図を用いて各条件の流動様式の検討を行った。

(2) Baker 線図による流動様式

二相流における流動様式の遷移は連続的に徐々に進行することがあり，断面での局所的条件ではなく，気液の混合法や混合位置からの距離などの設備条件にも関係する。このことから各地点における圧力，液温を考慮した気相，液相の容積流量を用いて代表的な流動の状態図である Baker 線図から流動様式を検討した。それぞれ 100.0m 地点と 500.0m 地点における全気液流量条件をプロットしたも

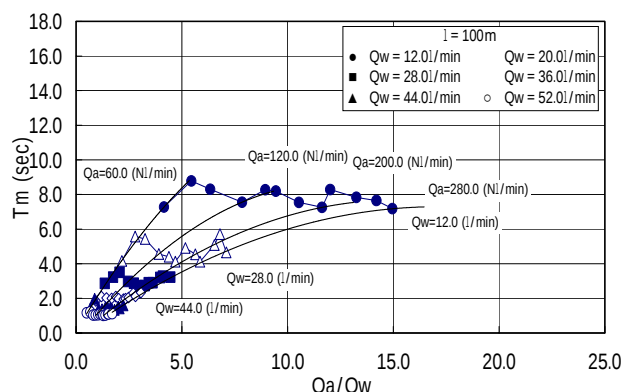


Fig. 2(a) 気液流量比と平均周期

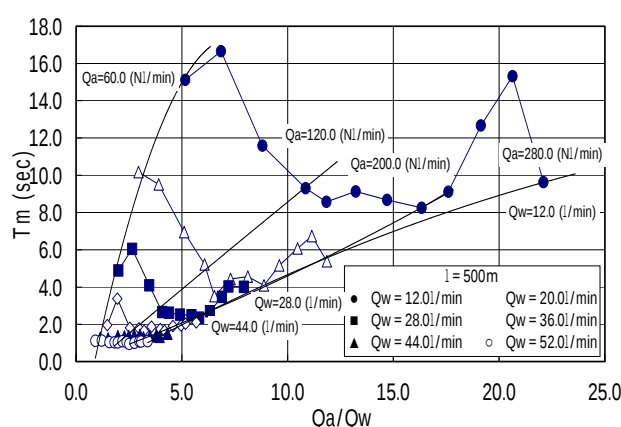


Fig. 2(b) 気液流量比と平均周期

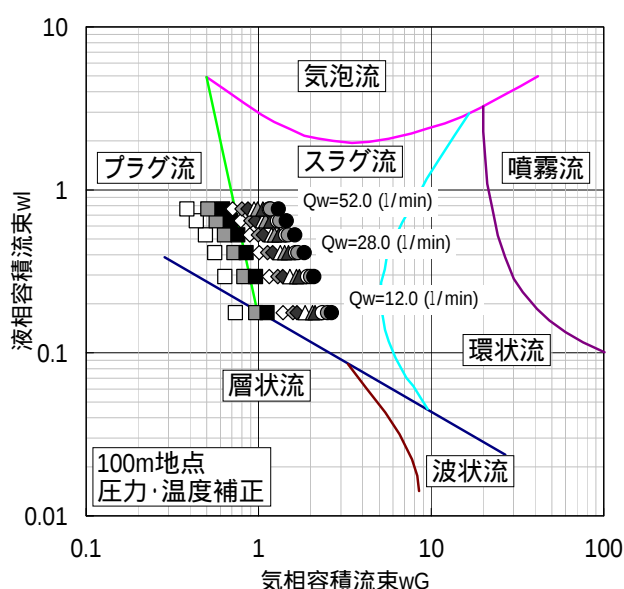


Fig. 3(a) 気液流量比と平均周期

のが Fig. 3(a)(b)である。100.0m地点では約半数の条件がプラグ流の領域に属しているが、500.0m地点においてはほとんどがスラグ流の領域に入ることがわかる。また、どの地点においても $Q_w=12.0$ (l/min) の条件は層状流に近い領域となっている。層状流は管の底部を液相が流動する流れであり、これに近い領域ということはスラグを維持しにくい状況であるといえる。そのため、この条件での周期の乱れはスラグの崩壊が起こりやすいためだと考えられる。

以上のことからスラグ流と流動様式が異なる条件が存在するため、それらの条件を除いた上で再度、混気比率と平均スラグ周期の検討を行った。

(3) 特定条件での混気比率と平均スラグ周期

Baker 線図からプラグ流、または層状流に近い領域に入ると考えられる $Q_a=60.0, 80.0, 100.0$ (Nl/min) および $Q_w=12.0$ (l/min) の条件を除き、混気比率とスラグ通過周期の関係について $l=100.0$ m 地点、 $l=500.0$ m 地点の結果を Fig. 4(a)(b) にそれぞれ示した。これによりどの地点においても液相の流量が少なく気相が多い条件、つまり混気比率が大きいほど周期が長くなる傾向が確認できる。さらに、距離が進むほどその傾向は大きくなるといえる。これはスラグの崩壊が原因と考えられ、崩壊の条件を明確にするために We 数を用いて検討を行うこととした。

(4) 混気比率と We 数

管内を流動する液滴はその慣性のため気流の速度に追従できず気液間に速度差が生じ、この速度差のために変形と崩壊を生じる。その際の We 数は 6 ~ 7 以上であるとされており、スラグ流においても同様のことが考えられることから We 数について検討を行った。 We 数と混気比率について 100.0m 地点と 500.0m 地点の結果を示したのが Fig. 5(a)(b) である。Fig. 4(a)(b) と同様に距離が進むほど、また混気比率が大きいほど We 数が高い値を示していることがわかる。また、通過周期が長くなっている条件を考慮すると We 数が 6 付近、

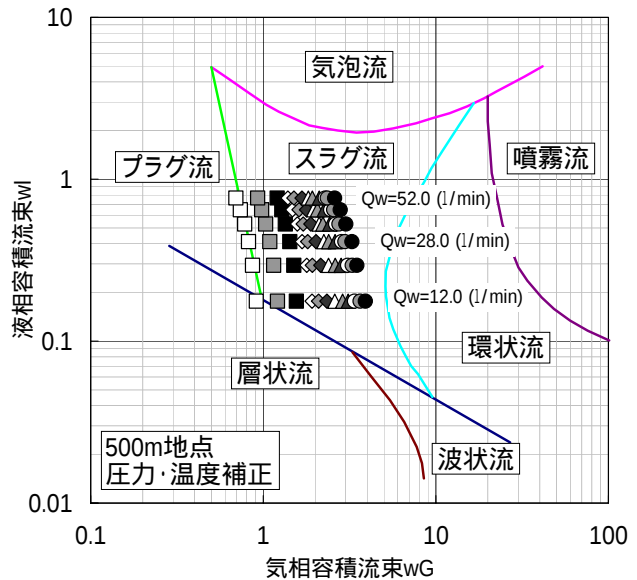


Fig. 3(b) Baker 流線図

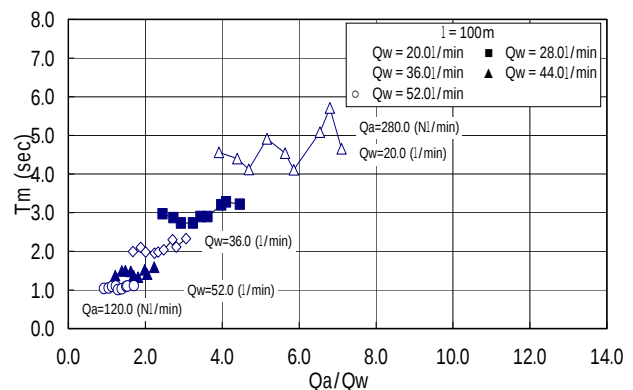


Fig. 4(a) 気液流量比と平均周期

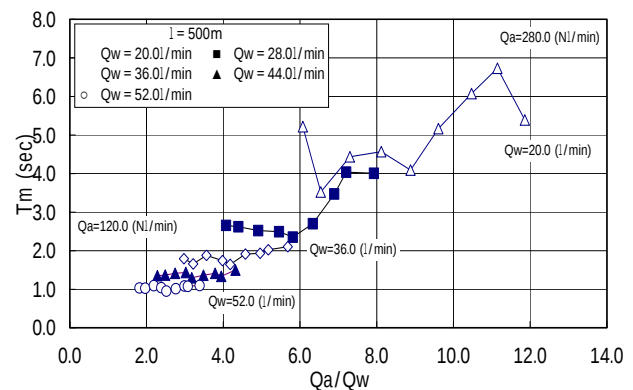


Fig. 4(b) 気液流量比と平均周期

またはそれ以上でスラグの崩壊が起こりやすいと考えられる。

スラグの崩壊については原因や起因する条件を把握することができたが、発生に関しては実験の観察から発生後すぐに崩壊するスラグも確認されており、不確定な要素といえる。そのため、より詳細に把握するために通過周期の頻度分布について検討を行った。

(5) スラグ流の周期頻度分布

距離が進むほどスラグの崩壊が起こりやすくなることから出口に一番近い地点である500.0m地点において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 $Q_a=200.0(\text{Nl/min})$ に対し、液相流量 $Q_w=12.0(\text{l/min})$ の100m地点、500m地点の結果を示したのが Fig.6 である。この条件はスラグの生成・崩壊の起こりやすい条件の一つであり、距離が進んだ地点ほど生成の影響と考えられる短い周期から、崩壊の影響と考えられる長い周期まで幅広い分布となっている。また、500m地点における頻度分布の一番多い周期を中心に考えると長い周期より短い周期の頻度が少ないことから、スラグの生成は崩壊に比べ発生しにくく、かつ発生後再び崩壊する傾向が強いことが考えられる。崩壊したままのスラグは管の底部に停滞し、次のスラグに吸収される。これによりスラグの長さが長くなる現象が発生しており、これは崩壊と共に周期が長くなる要因の一つとして考えられる。

4 まとめ

スラグ流におけるスラグの崩壊は気液流量比が大きく、かつ距離が進むほど起こりやすいことが明らかとなった。また供給口における気液流量の条件は距離が進むほど変動し、条件によっては流動様式が変化してしまう場合もあるといえる。そのため現地混気輸送において効率的な輸送を行うためには輸送距離を考慮しての気液流量条件を設定することが必要であると考えられる。

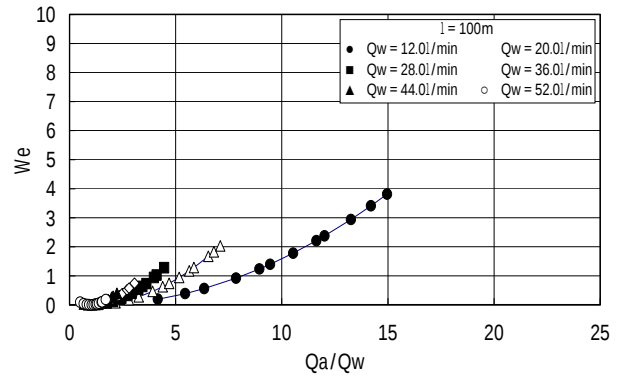


Fig. 5(a) 気液流量比と We 数

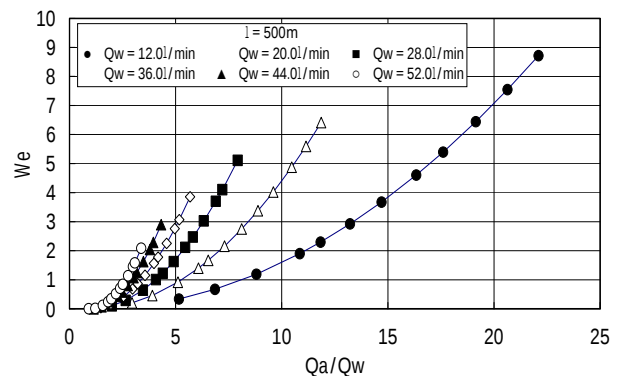


Fig. 5(b) 気液流量比と We 数

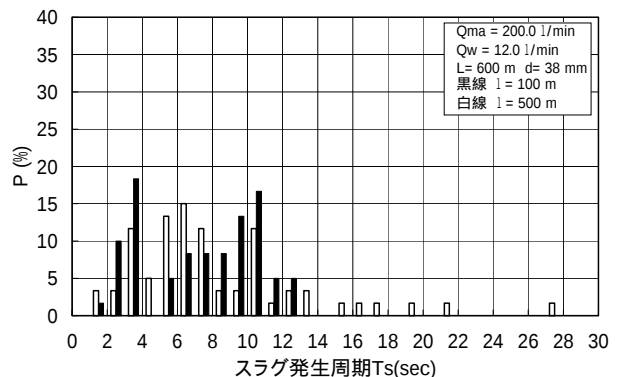


Fig. 6 スラグ流の周期分布

「参考文献」

- 1) 幕内, 山田, 小川, 落合, 北澤, 遠藤, 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, 海洋開発論文集, VOL. 20, (2004), pp.905 ~ 910
- 2) 赤川浩爾, 気液二相流技術ハンドブック, 日本機会学会編, コロナ社, (1989), pp.152