

混気圧送における液相スラグの生成流動 に関する研究

FLUIDITY CHARACTERISTICS OF WATER SLUG FLOW CAUSED
BY COMPRESSED AIR IN HORIZONTAL PIPE FLOW

鈴木理仁¹・落合実²・遠藤茂勝³

Yoshihito SUZUKI, Minoru OCHIAI 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 工修 日本大学講師 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

³フェロー会員 工博 日本大学教授 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

Recently, the high-density mud transport systems using a compressed air are utilizing in the field of coastal zone developments. This system is very useful for high-density slurry transport because it is easily to separating air from slurry. The purpose of this paper is to clarify the mechanism of slurry transporting system using a compressed air in the experimentally. In the experiment, the air-liquid two-phase flows have been focused on liquid of low viscosity in long distance pipelines with narrow diameter and discussed the mechanism of generating, development and breakdown of slug flows. As the results of experiments it was shown that the water depth of slug flow generating is nearly constant for all conditions of air-water mixing ratio in pipe flow.

Key Words : *Slurry transport, slug flow, pneumatic conveyance, two-phase flow*

1. はじめに

これまで、航路水深の確保や埋立地の造成に当たって、浚渫土砂の輸送は大量の海水等を用いて管路輸送してきた。このようなスラリー輸送では輸送対象となる土砂が比較的粘性度が低いか、または高粘性の泥砂の場合それを希釈して輸送してきた。しかし、これらの輸送方法では含泥率15～20%程度で、輸送効率が極めて悪く、輸送水の余水処理や埋立地の容量の確保が難しいなどの問題がある。

一方、これらの状況とは別に、最近の港湾内の浚渫泥は粘性土や粘土質シルトなどを多く含むため粘性度の高い泥土が多く、そのため含水比が著しく高くなるため、従来の方法とは違った圧縮空気を用いた液相スラグの生成を利用した混気圧送輸送システムが検討されてきた。

しかしながら、浚渫泥は極めて流動性の低い高粘性土のため管路輸送にもやや難点があるが、圧縮空気を混入するスラリー輸送では、管内流路の上部に気泡が存在するような流れとなり、圧縮空気を用いた空気混入スラリー輸送では、圧力損失の低減が計れるなどの有利性がある。しかし空気量の増加に伴って、管内の流動状況は著しく変化しプラグ流から

スラグ流へと移行した流れとなる。しかし、スラグ流の発生メカニズムはあまり解明されていない。

この種の研究では管路内の流動の可視化や諸元の計測が難しく、管内でのスラグの流動が明確に把握されるに到っていないと思われる。従って実験としては現実に近い高粘性の流体を用いて実験することが望ましいが、スラグ流の発生や流動速度が著しく速いため目視による観測も難しい。

また一方で、これまでの混気圧送によるスラグ流の研究としては岡山ら^{1), 2), 3)}の水平管内の空気を含んだ軟泥の流動に関するものや、西川ら^{4), 5)}、坂口ら⁶⁾の研究による浚渫泥の混気圧送法における圧力損失に関する研究があるが、スラグ流のモデル化が難しく合理的な圧力損失の算定式を得るには到っていないので、まず流動特性を知るために、可視化できる実験として透明ビニールパイプ中に水と空気を用いてスラグ流を発生させ、液相スラグ流の生成流動特性を把握することを目的とした。

ここでは基礎的な研究として、混気輸送に重要な現象である液相スラグの発生メカニズムの解明を目的として、水と空気を用いた気液二相流を対象にした液相スラグについて、空気量の変化に伴うスラグの物理的な発生メカニズム、スラグ流の特性につい

て長距離管路を用いて実験的に検討を行った。

2. 実験装置及び実験内容

ここでは粘性度の面では現実の浚渫泥とは異なり高濃度軟泥ではないが、スラグ流の可視化と、スラグの発生、成長、崩壊の過程を把握することを目的に実験を試みた。予備的な実験によれば、スラグが発生する部分と、発生したスラグが一種の流れになって走り、成長していく部分の2つに分けられる。スラグの発生は極めて瞬間的で、ある条件が満たされると発生することが明らかとなった。また、スラグ発生条件があまり変わらない場合でも、スラグ流の成長が著しく速い場合などが認められ、それらはスラグの発生時の様子に起因すると思われる。そこで本実験では、主としてスラグ発生地点の様子を把握することに主眼をおいて検討した。

実験に使用した装置は図-1 に示したものである。管路としては内径 32mm のビニールパイプを用い、実験に用いた水平の直線部分は供給口から 35.0m であるが、その先約 5.0m の延長があり、地下タンクへ導かれている。図に示すように送気用として最大容量毎分 150ℓ のコンプレッサと送水用ポンプとして毎分 50ℓ のポンプを用い、空気、水ともに瞬時流量計を通して流量計測をしながら供給できるようになっている。途中空気圧を計測するため、コンプレッサの吐出部と給水部直前および水平部のパイプの末端に圧力計を固定し、圧力チェックをした。これとは別にスラグの流動に伴う圧力損失を計測するための圧力計を、スラグ観測地点である給水口から 5.0m 地点と、19.0m 地点に別途設けてある。また本実験では、スラグの発生の瞬間を調べるために照明付きの CCD カメラを据え付け、スラグの挙動を VTR に収録した。

3. 実験結果および考察

(1) スラグ流と圧力損失

今スラグ流による圧力損失を考える時スラグの流動に伴う圧力損失は、スラグ形状を観察すると西川⁴⁾らが報告しているように、管断面すべてを満たしている主部と、それより前の急斜面を形成している前部および、やや緩やかな斜面を形成している背後の後部に分けられる。そして前部では、管路底に静止状態の液相として存在する水を、スラグと同じ速度まで加速するのに要する圧力損失、また中央の主部では、管壁との摩擦に起因する圧力損失、そして後部では、スラグの移動と共に後部が重力の作用を受けて崩れる時の圧力損失が考えられる。しかし、スラグ発生からスラグの到達地点までの総圧力損失を考えた場合、スラグが発生する地点での圧力損失を、考慮する必要があると考えられる。これは、スラグの発生に起因する圧力損失といえるものである。

スラグの発生経過を見ると、管内に供給された水

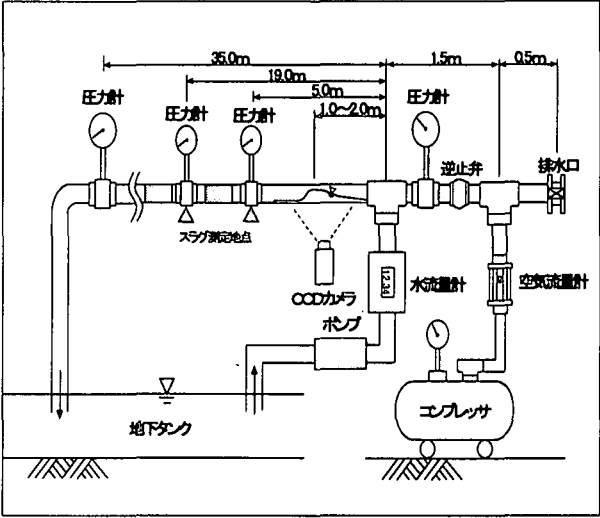


図-1 実験装置概略図

は管内の上部に圧縮空気の流れが存在するため、表面が波打ちながら少しずつ遠方へと吹送されていくが、空気の通過断面が多いため空気の供給口から離れるに従い水の移動は少なくなっていくが、水の供給があるため水面は徐々に高くなり、空気の吹送作用が少なくなる地点で水位が最も高くなり、水と空気の供給口から離れるに従い水位が高くなるような一様な水面勾配の水面が形成される。

このように水面が徐々に高くなってくると空気の流れる断面が少なくなり、ある限界に達すると突然スラグが発生し、瞬間的に周囲の水は水滴となって跳ね飛ばされて、スラグ流が形成される。この現象はきわめて瞬間的であることと、水と空気の供給口の比較的近い地点で発生するために把握されなかったものと思われるが、この一瞬の現象がスラグ流の初速度を決めるものと推定される。そしてスラグ流が発生すると、管断面積全体が水で満たされるため次々に供給される空気により、スラグの主部が押され

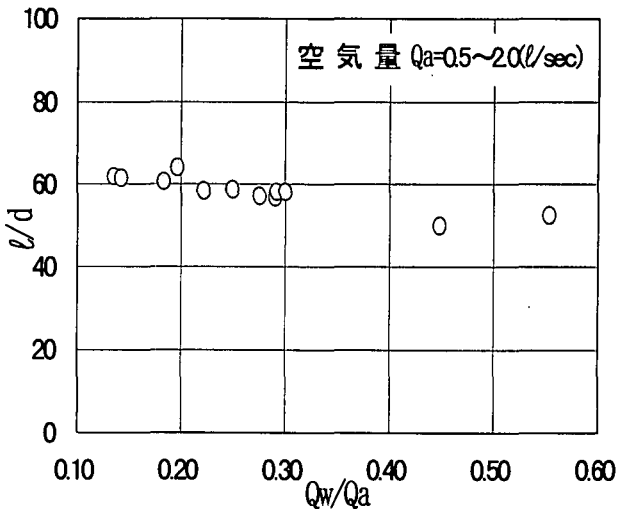


図-2 スラグ発生地点

るような形でスラグは流動し、空気が供給され主部が崩壊しない限りスラグ流は走りつづけるものと考えられる。現実に実験では、1つの大きなスラグが発生するとそのスラグ流は一挙に管路の末端まで流動し途中で止まることは認められなかった。このように瞬間的に起こされるスラグの発生時の圧力損失は、大きいものと推定されるので、この時の圧力損失を十分考慮する必要があると考えられる。

(2) スラグ流の発生と管内水深

スラグ流の発生は上に述べたように供給点付近の管内水深が徐々に増加し、ある水深になって空気の通過断面が減少するとスラグ流が発生すると考えられるので、ここではまず空気量を一定とし水の量を変化させてスラグ発生水深とスラグの発生地点について調べた。それらの結果を示したものが、図-2である。横軸には空気量 Q_a と水量 Q_w の比を、縦軸には管内径 d とスラグ流が発生した地点までの水供給口からの距離 l の比で表したものである。図に示されるように、水量を変化させてもスラグ流の発生地点はほとんど変わらず、この実験の条件では、 $l/d=57\sim59$ であった。すなわち水量には無関係であることが認められる。

一方、水量を一定とし、空気量を変化させた場合の結果もスラグ流の発生地点の著しい変化は認められなかった。

(3) スラグ流発生時の管内水深

スラグ流の発生地点が水量に関係なく一定地点であることが明らかとなったので、その時の管内の水深についての結果をまとめたものが、図-3である。この結果は、図-2で示した結果が得られた時の管内水深をパイプの外部から計測したものである。横軸には同様に Q_w/Q_a をとり、縦軸には、スラグ流が発生した時の管内水深 h と管径 d との比をとって示したものである。

この結果に見られるようにスラグ流が発生した時の管内水深は $h/d=0.75\sim0.80$ とほぼ一定値となっている。空気量が一定であるため、空気が通過するのに必要な一定断面が確保されなくなると、スラグ流が発生するものと推測される。

ただし、水量が極端に少なく $Q_w/Q_a=0.2$ 以下になると水は吹送流として流れ始め、空気量が多いため水表面が乱れ、スラグの発生水深がやや不明確となるが、多少浅くなる傾向にある。

(4) スラグ流発生時の管内の水面形

スラグ流が発生した時の管内の水位を計測したものが、図-4である。この図は、空気量 1.0 l/sec で水量が 0.29 l/sec の結果である。横軸に水の供給地点からの距離 l を、また縦軸には管内の水位 h を示したものである。管内水位は○印のように水の供給地点から離れるに伴い徐々に深くなり、 $l=190.0\text{ cm}$ 付近で最大の水深となって、その後は急に浅くなっていることがわ

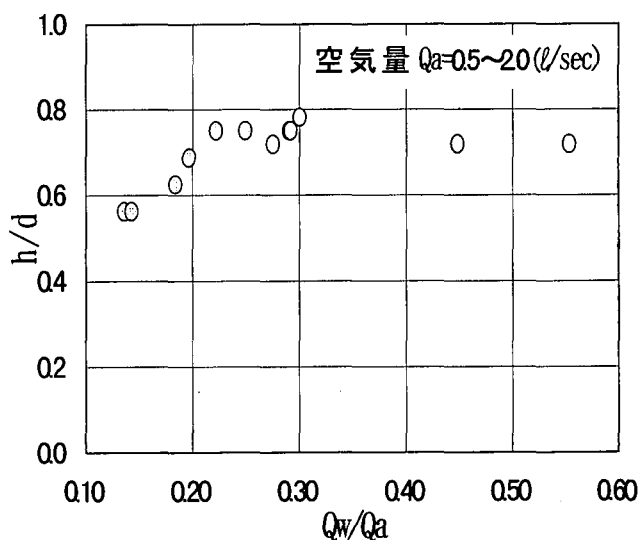


図-3 スラグ発生水深

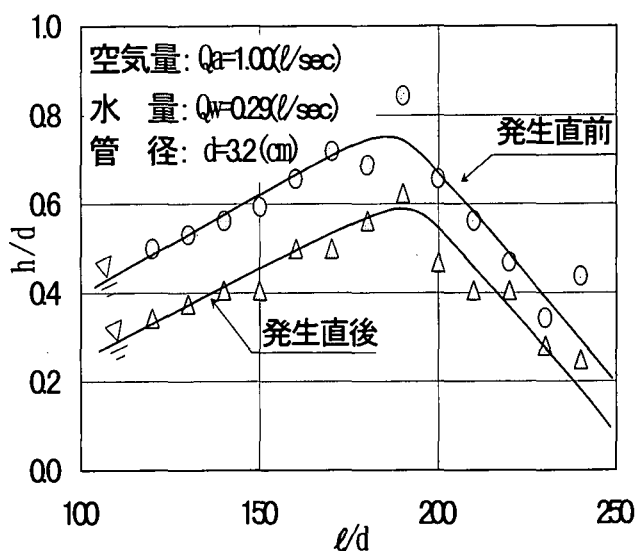


図-4 スラグ発生地点の水面形

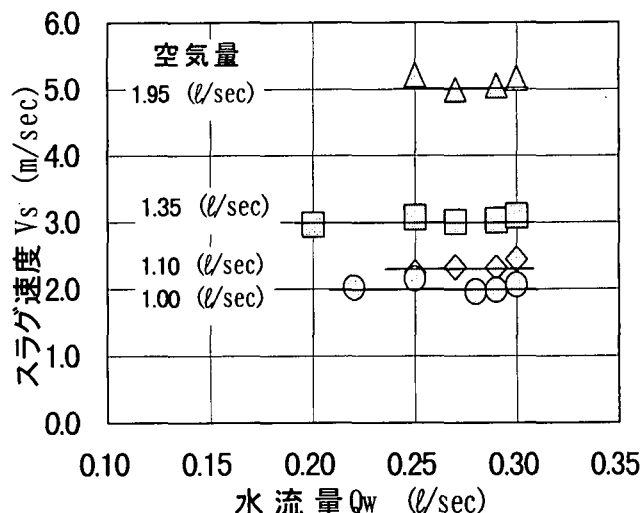


図-5 空気量別スラグ速度

かる。

このように水深が増大して部分的に著しく水位が増大すると、瞬間的にスラグ流が発生するが、スラグ流の発生後も△印で示されるような水位が存在していて、常にある程度の水深となっているために、やがて次のスラグ流が発生することになる。この図のような水面形は他の条件でも良く観察された。また、スラグが発生した時に瞬間的に水塊が飛ばされるために、管のスラグ発生地点の内部の上部には、多数の水滴が付着していて、外部からも爆発的なスラグ流の発生の様子がうかがえた。

(5) スラグ流の速度

スラグ流は瞬間的に発生し、その後は周辺の水塊を押しながら成長して流動していくが、そのスラグ流の移動速度を示したものが、図-5 である。図-5 は、横軸に供給水量 Q_w また縦軸にスラグ速度 V_s をとり、空気量を一定とし、水量を変化させた時のスラグ速度 V_s で、スラグ発生後の 5m 地点から 15m 地点の 10m 区間で測定した結果をまとめたもので、空気量を 4 段階変化させた時の結果である。これらの結果によれば、スラグの移動速度に多少のバラツキはあるが一定値となることが認められる。またスラグ速度は、供給空気量が多いほど速くなることがわかる。

このようにスラグ流の速度は、空気量で支配されることが明らかとなったので、水量を一定として、空気量を変化させた時のスラグ流の速度の結果を示したものが、図-6 である。ここに示した例は、空気量が少ない方の結果であるが、空気量の増加とともにスラグ流の速度はほぼ直線的に増加することが示され、空気の供給量に依存することがわかる。

(6) スラグ流の発生間隔

スラグ流の発生水深は、図-2 でわかるように管内水位が、ほぼ一定値 $h/d \approx 0.7$ 程度で一定であることから、供給水量を変化させた時のスラグの発生間隔について調べたものが、図-7 である。この結果は空気量を $Q_a = 1.0 \ell/\text{sec}$ で一定とした時のスラグの発生時間間隔を水の供給口から 5.0m 地点 ($\ell/d = 156.3$) と 19.0m 地点 ($\ell/d = 593.8$) で目視により観測したもので、横軸に供給水量 Q_w を、また縦軸にはスラグ流の発生時間間隔の平均値 T_s を示したものである。スラグ流の発生時間間隔は時間的にかなりの変動があり、比較的短い時間のものや長い時間のものが、交互に表れるような発生の仕方をして示している。ここでは発生時間間隔の単純平均で示した。○印のスラグ流発生地点に近い部分での発生間隔は、供給水量が多いほどスラグ流の発生時間間隔は短く、供給水量が減少すると、スラグ発生時間間隔はやや長くなることが示される。しかし、スラグ流が移動してスラグの発生地点からかなり離れた地点でのスラグ流の到達時間間隔を示した◇印の結果を見ると、供給水量の変化に対してほぼ直線的に変化し、供給水量が増加すれば、スラグ流の発生時間間隔は短くなり発生時

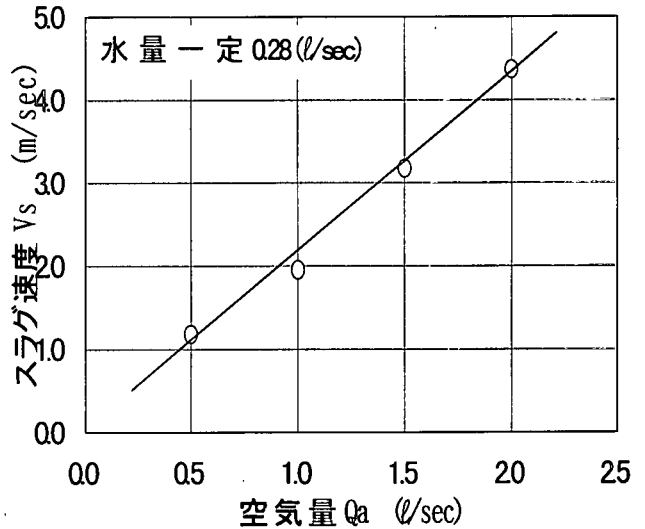


図-6 スラグ速度

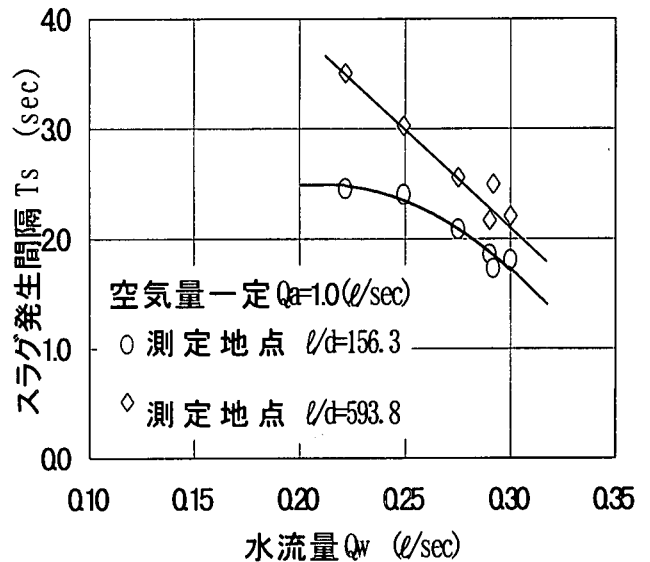


図-7 スラグ発生間隔 (空気量一定)

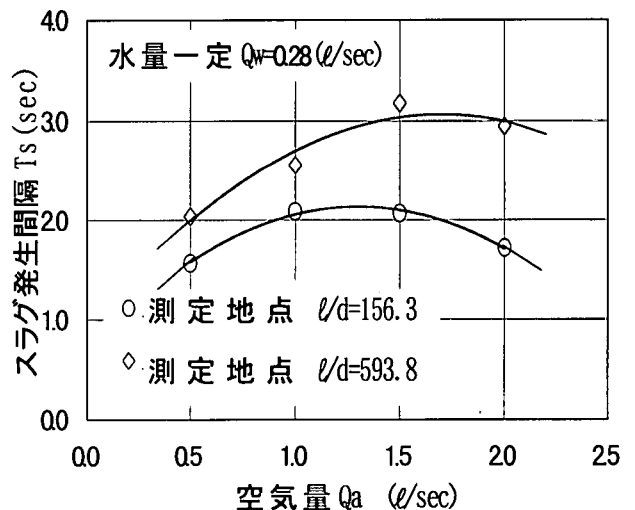


図-8 スラグ発生間隔 (水量一定)

間隔は供給水量に支配されることが示される。水量が少なくなると、効率的な輸送が期待できなくなると考えられる。

また、供給水量を一定とし空気量を変化させた時の結果が図-8 である。この図は横軸に空気量 Q_a を、縦軸にスラグ流の発生時間間隔 T_s を示したものである。この図よりスラグ流の発生地点直後では、空気量はかなり変化してもスラグ流の発生時間間隔はそれほど変化がなく、ほぼ一定の間隔であることがわかるが、かなり離れた地点に来ると、発生時間間隔がやや長くなる傾向になっている。これは空気量が多いとスラグ流の発生地点では、ほぼ一定間隔でスラグ流が発生しても、空気量が多いためと供給水の表面の振動などにより、スラグ流発生時のスラグの規模や、発生間隔が小さなスラグ流と大きなスラグ流の差が顕著になり、小さなスラグ流の中には途中で消滅したり、次のスラグ流に吸収されるものなどがあることによるためと思われる。

(7) スラグ流の発生頻度

スラグ流の発生間隔の平均値は図-7 および図-8 に示したとおりであるが、現実にはかなりのバラツキがある。特に空気量が多くなるとスラグ流の発生が不安定となるので、水量を一定とし、空気量を変えたときのスラグ流の発生頻度分布を示したのが、図-9 である。図-9 は供給水量 $Q_w=0.28\text{ l/sec}$ で一定とし、空気量 $Q_a=0.5\text{ l/sec}$ (上図)と $Q_a=1.0\text{ l/sec}$ (下図)の場合のもので、横軸にスラグ流発生時間間隔の階級を取り、縦軸には発生頻度を取ったものである。図中のヒストグラム上の数字は頻度の多い階級の平均時間を示したもので、□で囲ってあるものは、スラグ流発生直後の地点の測定結果である。これら2つのケースを比較すると、空気量 $Q_a=0.5\text{ l/sec}$ の場合では、スラグ流の発生直後の地点も遠方も各階級の発生頻度は類似分布となっているが、空気量 $Q_a=1.0\text{ l/sec}$ の場合の分布では、 $l=5.0\text{ m}$ 地点の発生頻度階級がほぼ限定されているにもかかわらず、 $l=19.0\text{ m}$ 地点に到達するとスラグ流の階級ごとの頻度はかなり幅の広い分布となり、空気量が増加するとスラグ流の発生タイミングが不安定となり、発生間隔は規則的でもそのスラグ流の規模が異なり、小さいスラグ流の消滅や、大きいスラグ流による吸収が裏付けられる。

(8) スラグ流の発生と管内流動

スラグ流の発生間隔については、それぞれの条件に対する測定結果の平均値で表してきたが、スラグ流の発生時間間隔の時系列グラフを示したものが、図-10 である。スラグ発生直後の $l/d=156.3$ とスラグが十分発達した地点 $l/d=593.8$ の場所における $Q_a=1.0\text{ l/sec}$, $Q_w=0.22\text{ l/sec}$ の条件で行った実験の測定結果で、スラグ流発生直後のスラグ発生時間間隔の時系列を示したものである。この図は横軸にスラグの発生順のスラグ個数で、縦軸はスラグの発生間隔時間を示したもので、それぞれの地点で観測され

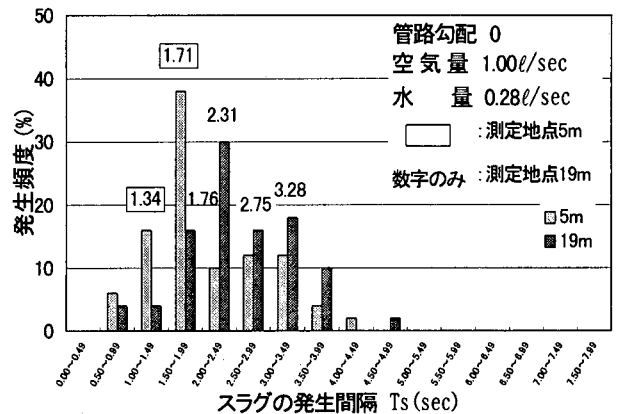
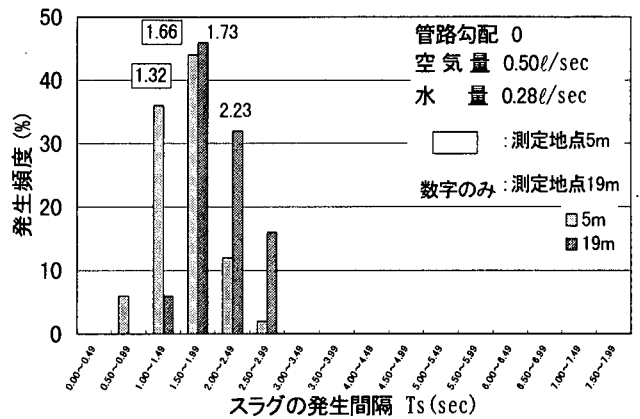


図-9 スラグ発生頻度

た連続 50 個のスラグの発生時間間隔を示した。

$l/d=156.3$ (上図)の方を見ると、スラグ流の発生地点に近い場所でのスラグ流の発生間隔はかなり規則的で、間隔的に長いものと、短いのが交互に現れる発生の仕方をしていて、時々短周期のものが続いたり長周期のものが続いて、発生するような場合も見られるが、ほとんど規則的である。このようにスラグ流の発生地点直後では、極めて規則的に発生していることは、その発生条件が安定しているためと推測される。

一方、 $l/d=593.8$ (下図)の方を見ると、スラグ流発生地点直後の場合とは著しい違いを示している。この図に示されている 50 個のスラグ流の到達時間間隔の時系列は、上図と同一のスラグ 50 個のものではない。すなわち、 19.0 m 地点まで達する過程で消滅したり、場合にはよっては吸収されるものなどがあるためである。従って 19.0 m 地点のスラグ流の到達時間間隔を見ると、スラグ流の発生直後には認められなかったような長い時間間隔のスラグ流が見られたり、また、極端に短い時間のものなどが認められる。これらの結果を見ると、スラグ流 12~13 個毎に著しく周期の長いスラグが発生していて、かなり規則的な出方をしている。また極端に短い周期のスラグ流もその中間に認められ比較的規則性を持って現れている。このようなスラグ流の出現頻度は管内流動の様子を示していると思われるが、主としてスラグ流の発生時の様子に起因するものと考えられる。なぜならば、これら 2 地点間のスラグ流の発生、または到達パタ

ーンを見ると,比較的空気流量が少ないか,多い場合では地点間のスラグ流発生間隔のパターンはあまり変わらないのに対して,中間的な空気流量の場合には,スラグ流パターンの乱れが著しく,そうなる時にスラグ到達時間間隔の大きな乱れが生じている.これは水をスラグの移動直後まで加速するのに要する圧力損失が大きく,水の流動が複雑となるためと考えられる.

4. まとめ

本研究により,水を用いたスラグ流に関し,主としてその発生に主眼を置いてスラグ流の特性を明らかにした.それらをまとめると以下のとおりとなる

- (1) スラグ流の発生地点について,供給水量や空気量を変化させて実験を行った結果,スラグ流の発生地点は供給水量や空気量を変化させても,水の供給口からある一定距離離れた地点で発生し,本実験の範囲では $l/d=60$ すなわち管路径の 60 倍の地点で発生することが明らかとなった.
- (2) スラグ流の発生状況について調べた結果,スラグ流が発生するのは,管内の水位が水の供給口付近より徐々に深くなり,管内の水深が高くなって,供給される空気の通過断面積が小さくなりある限界の水深を超えるとスラグ流が発生した.また相対的に空気量が著しく多くなると,発生水深が浅くなる傾向も見られるが,本実験の範囲では, $h/d=0.7$ と推定された.
- (3) スラグ発生地点付近の管内の水深変化を調べてみると,供給口から離れるに従い徐々に水位が増大し,ある地点から急激に水位が低下するような水面形となり,その水面形はほぼ一様な状態を保っていて,スラグ流発生後も水位は極端に低下せず,比較的短時間に次のスラグの発生水深に到る.このようにして発生したスラグ流は,管路底に残されている水をかき集めながら成長し,スラグ流の実質部は管路断面いっぱいの管路流れとなる.このとき管路底の水が多ければ,実質部の長いスラグ流となることが観察された.
- (4) 発生したスラグ流の速度は,供給水量に関係なく,ほぼ空気量で決まることが明らかとなった.空気量に対するスラグ流の平均速度の増加率は,ほぼ直線的な傾向となる.
- (5) スラグ流発生時の平均時間間隔は,供給水量に支配され,スラグ流発生地点付近では著しい差は認められないが,遠方の地点に達すると徐々に発生時間間隔の差は,大きくなっている.これは水量の増加により,スラグ流の発生の様子が不安定となり,スラグ流の発生規模にムラが生じ,スラグの移動中に消滅や,吸収があるためと推定される.ま

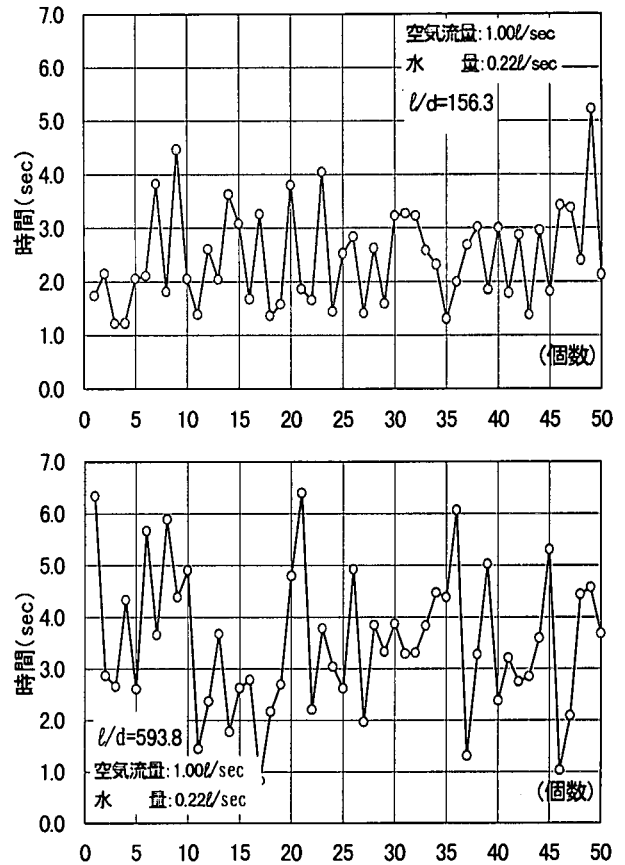


図-10 スラグ発生間隔時系列

たこの傾向は,空気量が著しく多くなると,同様なことが発生し,スラグ流の発生に対して最適な水流量と空気量が存在すると考えられる.

参考文献

- 1) 岡山義邦: 水平管における空気を含んだ軟泥の流動, 作業船, 第197号, pp.23-33, 1991.
- 2) 岡山義邦, 鮎貝基和, 鈴木誠, 福本裕哉: 水平管における空気混入軟泥の流動特性, 港湾技術研究所報告, Vol.30, No.2, pp.533-557, 1991.
- 3) 岡山義邦, 鮎貝基和, 鈴木誠, 福本裕哉: 水平管における空気混入軟泥の流動特性(第二報), 港湾技術研究所報告, Vol.31, No.3, pp.97-126, 1992.
- 4) 西川豊, 橋本文作, 片岡勲, 武居昌宏, 松前祐司, 堀井清之: 浚渫泥の混気圧送法における圧力損失に関する研究, 混送流, 7巻1号, pp.33-40, 1993.
- 5) 西川豊, 橋本文作, 片岡勲, 武居昌宏, 松前祐司, 堀井清之: 混気圧送浚渫泥輸送のシステムにおける液相スラグの流動現象, 混送流, 7巻4号, pp.335-343, 1993.
- 6) 坂口忠司, 小澤守, 浜口八郎, 福永毅: 水平流路内大気泡の流動特性に関する研究(第2報, 流動液体中に侵入する大気泡): 日本機械学会論文集(B編), No.89, pp.27-33, 1990.

(1999. 4. 19受付)