

港 湾 技 研 資 料

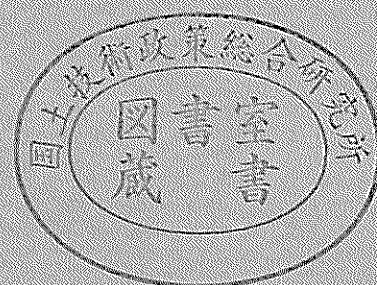
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 656 Sept. 1989

垂直管土砂輸送における空気混入の影響

岡	山	義	邦
中	島		晋
鮎	貝	基	和
鈴	木		誠

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. ま え が き	4
2. 実験装置と実験方法	4
3. 気固液3相流の流動特性	11
3.1 固液2相流	11
3.2 気固液3相流	13
4. 輸送系に対する空気混入の影響	16
5. 結 論	22
6. あとがき	22
参 考 文 献	22
記 号 一 覧 表	23

The Study on the Effect of Air Injection for Vertical Slurry Transport

Yosikuni OKAYAMA *
Susumu NAKASHIMA **
Motokazu AYUGAI **
Makoto SUZUKI **

Synopsis

For slurry transport method in the pipeline such as air-lift, air have been used effectively for many years. In recent years, at marine construction fields, it is increasing the need of transporting the soft mud slurry at high density, so many slurry transport systems using air are developed for its advantages of defending the pipeline from clogging and separating air from slurry easily at reclaimed land. For example air-lift, air mixed slurry transport, compressed air bubble transport, pneumatic slurry conveyer, air plug transport, air jet, slurry transport by compressed air, and so on.

The purpose of this research is to investigate air mixed slurry flow pattern, flow resistance, effect of air injection to the transport system and so on to apply and design those system suitably to the work.

Pipeline using dredging work basically consist of vertical and horizontal pipe and this report describe about the flow characteristic of liquid-solid-gas three phase flow and the effect of air injection to the outlet of the slurry pump on the whole transport system in vertical pipe.

The data was especially analyzed about pressure loss in pipe by air injection to the outlet of the slurry pump, the effect of air injection to the transport system with pump and relation to the velocity of slurry.

The following is the results of this analysis.

- (1) Friction loss of fine sand slurry (solid-liquid two phase flow) in vertical pipe is calculated by Darcy-Weisbach's formula with following λ_m .

$$\lambda_m = 0.3347 R_{em}^{-0.2663}$$
$$R_{em} = \rho_m D v_m / \mu_w$$

- (2) Friction loss of solid-liquid-gas three phase flow is arranged by Lockhart-Martinelli's parameter which applied three phase flow. And the data is almost on the Wallis' formula except the area of small void fraction.
- (3) Pressure loss of three phase flow is calculated by exact void fraction and friction loss. And characteristic of the transport system with pump is estimated with this pressure loss and pump characteristic.
- (4) There is a minimum point of pressure loss of the transport system against certain void fraction. This effect is remarkable at low slurry velocity and does not appear at high slurry velocity.

Key Words : Gas-liquid-Solid Three Phase Flow, Vertical Pipe, Fine Sand Slurry Air, System Loss, Transport System.

* Chief of Dredging and Reclamation Laboratory, Machinery Division
** Member of Dredging and Reclamation Laboratory, Machinery Division

垂直管土砂輸送における空気混入の影響

岡 山 義 邦 *

中 島 晋 **

鮎 貝 基 和 **

鈴 木 誠 **

要 旨

スラリのパイプライン輸送に空気を利用する方法は、エアリフトをはじめとして古くから用いられてきた。近年、港湾工事においても軟質土の高濃度輸送が必要となり、閉塞防止、埋立地での気相—スラリー相分離の容易性などから空気を混入した工法が種々開発されてきている。たとえば、エアリフト、エア混入スラリー輸送、気泡土ポンプ圧送、風力輸送、プラグ輸送、混気ジェット、混気圧送等が試みられている。

本研究は、これらの工法を適切に応用し、設計するための資料として空気混入軟泥の基本的流動パターン、流動損失、輸送系への空気混入の影響等を調べることを目的としている。基本的に浚渫工事で用いられるパイプラインは垂直、水平管より構成されており、本報告はこのうち垂直管部について、気固液3相の流動特性、ポンプ吐出側へ混入した空気による輸送系全体への影響についてとりまとめたものである。

特にスラリーポンプの吐出側に空気を混入した時の管内流動損失、空気を混入することによるポンプ輸送系に与える影響およびスラリー流速への関与について、データを解析した。これによって以下に示すような知見が得られた。

- (1) 気固液3相流の垂直管流動損失を計算するためには固液スラリの摩擦損失計算が基礎となるため、これを高い精度で推定する必要がある。本実験に用いたような比較的小粒径土砂の場合、流動の母体となる固液スラリの摩擦損失は、密度が高く、清水と同じ粘性の流体の単相流として Darcy-Weisbach の式で計算できる。このとき、

$$\lambda_m = 0.3347 R_{em}^{-0.2663}$$
$$R_{em} = \rho_m v_m D / \mu_w$$

で管摩擦係数を求めることができる。

- (2) スラリーに空気を混入した場合の摩擦損失は、Lockhart-Martinelli のパラメータを3相流に拡張したもので比較的良い整理が出来る。また、Wallis の式にこのパラメータを当てはめると、空気混合比の小さい範囲を除いてデータとの一致性はよい。
- (3) 3相流部分の抵抗損失は、ボイド率と摩擦損失を正確に求めることにより計算することができ、ポンプ特性と組み合わせることによりポンプ輸送系の流動特性を比較的精度よく予測することができる。
- (4) 空気を混入していくと系全体の抵抗損失が最小になる点があることを確認した。この効果は水中ポンプとエアリフトとの合成された影響で、固液スラリの流量が小さい程顕著であり、流量が大きい場合には本実験範囲では抵抗の減少傾向は現われなかった。

* 浚渫埋立研究室長

** 浚渫埋立研究室

キーワード：気固液3相流，垂直管，細砂スラリー，空気，管路抵抗，輸送系

1. ま え が き

スラリーのパイプライン輸送に空気を利用する方法は、エアリフトをはじめとして古くから用いられてきた。近年、港湾工事においても軟質土の高濃度輸送が必要となり、閉塞防止、埋立地での気相-スラリー相分離の容易性などから空気を混入した工法が種々開発されてきている。たとえば、エアリフト、エア混入スラリー輸送、気泡土ポンプ圧送¹⁾、風力輸送²⁾、プラグ輸送³⁾、混気ジェット、混気圧送等が試みられている。しかしながらこれらの工法を適切に応用し、設計するための資料は乏しく、もっぱら従来から研究成果の多い気液2相流に関する計算式等を利用している場合が多い。またその利用結果に対す

る検討も十分であるとは言い難い水準である。

本研究は、これらの工法を適切に利用するための資料として空気混入軟泥の基本的流動パターン、流動損失、輸送系への空気混入の影響等を調べることを最終目的としている。その第一段階として本報告では、気液2相流の液相を固液スラリーに置き換えた場合、従来の気液2相流に関する研究成果がどの程度利用可能かという点を中心に調べた。また、浚渫工事で用いられるパイプラインのうち垂直管部について、ポンプ吐出側へ混入した空気による輸送系全体への影響についてもとりまとめている。

2. 実験装置と実験方法

実験装置全体の概略図を図-1に示す。揚水管は内径

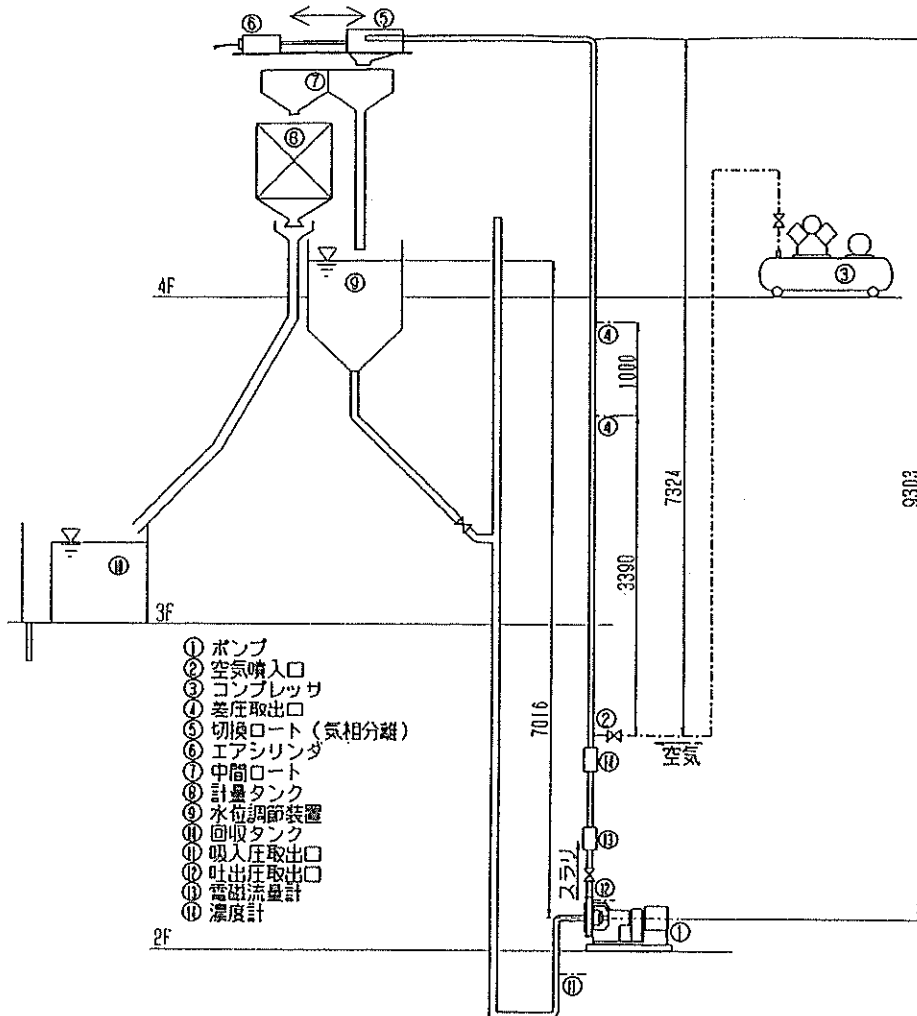


図-1 実験装置

52.9 mm の鋼管であるが、圧力損失測定部は、内径 50 mm のアクリル管になっており流動状態が観察できるようにしている。揚水管の途中に空気ノズルがあり、ここからコンプレッサーにより加圧された空気を揚水管内に混入する。土砂スラリは、ポンプによって加圧され揚水管途中の空気ノズルから空気を混入された後、揚水管を上昇し、切り替えロート内に吐き出され、気相が分離し、スラリはそこからまたポンプへと循環して流れる。3相流部分の揚程は、約 7.3 m である。実験装置の様子を写真-1～3に示す。

スラリ流量は、ポンプ吐出側のバルブで調整され、電磁流量計で測定された。スラリ平均比重は、 γ 線密度計で測定した。圧力損失は、圧力損失測定部に 1m の間隔に取り付けられた圧力取出口から差圧を取り出し、歪ゲージ式差圧計により測定した。スラリポンプについては、ポンプ出口と入口で、吐出圧と吸入圧を測定した。

実験に使用した土砂の粒径加積曲線を図-2に示す。2検体について分析し、それぞれを黒丸と白丸の2種類の記号で示す。土砂は、粒径加積曲線上の50%平均粒径が 0.285 mm、比重 2.68 の細砂を使用した。実験は、スラリのみかけ流速 $j_m = 2.5 \sim 3.5$ m/s、空気のみかけ流速 $j_g = 0 \sim 5.5$ m/s、スラリ濃度 $C_v = 0 \sim 20$ %

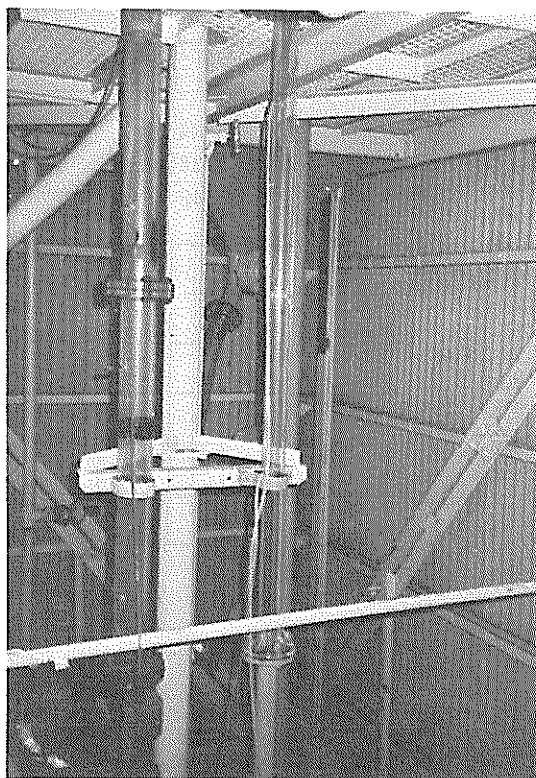


写真-2 実験装置（差圧測定部の様子）

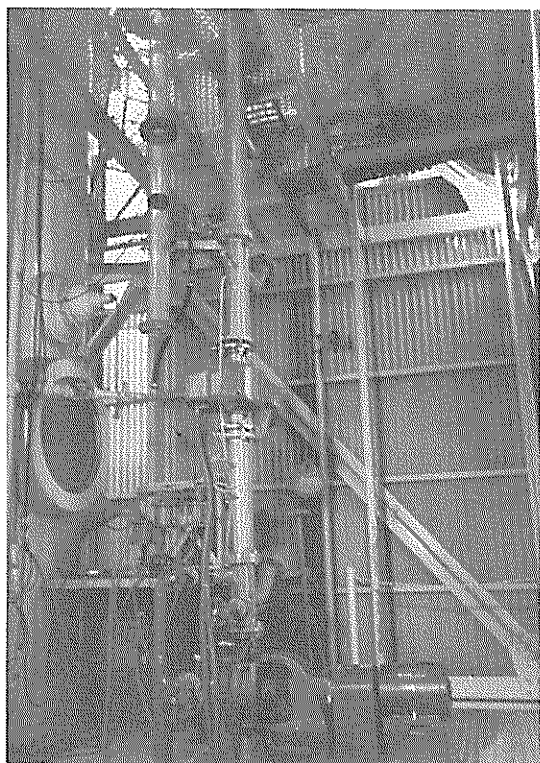


写真-1 実験装置（ポンプ付近の様子）

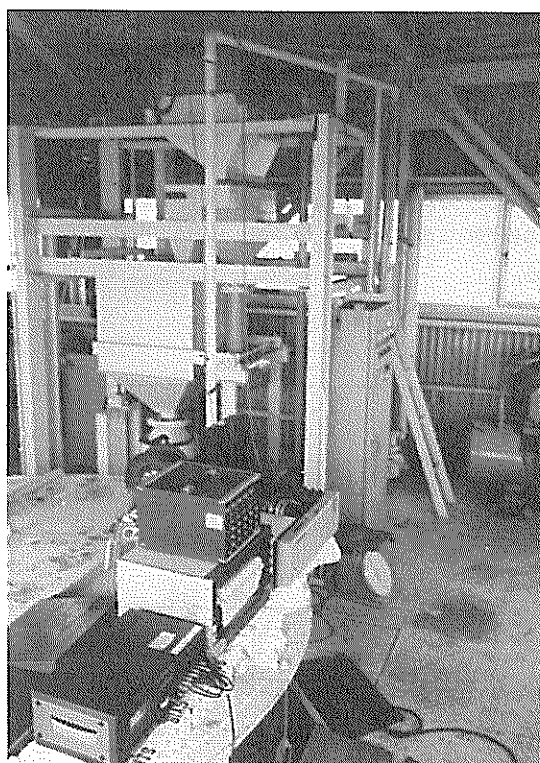


写真-3 記録・計測装置

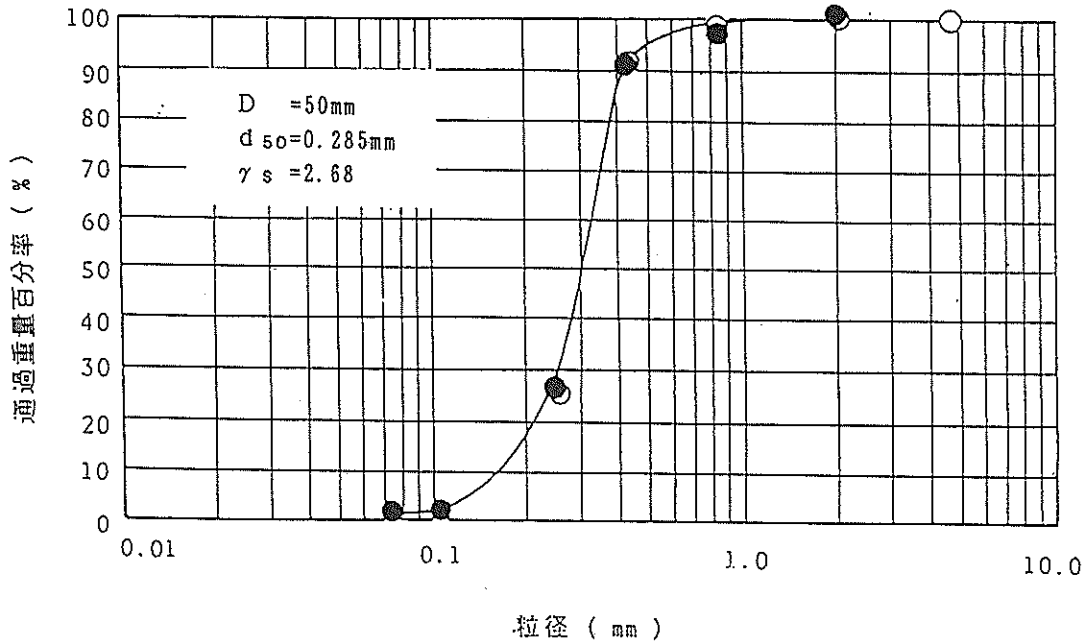


図-2 供試土砂の粒径加積曲線

(スラリー平均比重 $\gamma_m = 1 \sim 1.4$) の範囲で行った。

実験では、清水でポンプを起動させ、水位調整装置から砂を供給し、濃度とスラリー流速をセットした後、空気を徐々に混入し、流れが安定してから各計測を行うといった方法をとった。図-3に実験点を示す。また、表-1~4が測定データである。

みかけ流速とは、スラリーと空気が混合して流動している場合に、それぞれが有している体積流量と同じ体積流量で、一方が単独に管を満たして流れるとみなしたときの仮想的な流速をいう。 j_m と j_g は、次式で定義される。

$$j_m = Q_m / A$$

$$j_g = Q_g / A$$

Q_m : スラリーの体積流量

Q_g : 空気の体積流量

A : 管路断面積

C_v は、この実験では気固液3相流のうちの気固液2相(スラリー)に対する固体粒子の体積濃度のことで次式で求まる。

$$C_v = V_s / V_m \\ = (\gamma_m - \gamma_w) / (\gamma_s - \gamma_w)$$

V_m : スラリーの容積

V_s : V_m 中の土砂の真容積

γ_m : スラリーの平均比重

γ_s : 土砂の真比重

γ_w : 水の比重

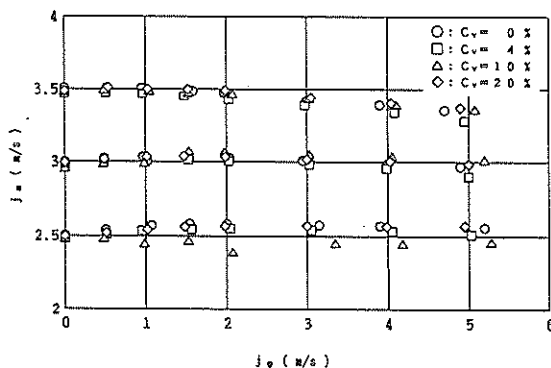


図-3 実験点

表-1 実験結果一覧 (その1)

テスト番号	スラリー比重 γ_m	濃度 C_v (%)	スラリーかけ 流速 j_m (m/s)	空気みかけ 流速 j_g (m/s)	空気体積 流量比 β	差 圧 (mAq/m)	ポンプ 吸入圧 (mスラリー柱)	ポンプ 吐出圧 (mスラリー柱)	ポンプ 全揚程 H_T (mスラリー柱)
T-0100	1.000	0.00	2.502	0.000	0.000	1.119	6.383	16.210	10.028
T-0110	1.000	0.00	2.541	0.501	0.165	1.062	6.369	16.101	9.940
T-0120	1.000	0.00	2.568	1.079	0.296	1.021	6.367	16.030	9.875
T-0130	1.000	0.00	2.580	1.565	0.378	0.998	6.366	16.032	9.880
T-0140	1.000	0.00	2.580	2.051	0.443	0.976	6.368	16.005	9.852
T-0150	1.000	0.00	2.572	3.322	0.564	0.944	6.364	16.002	9.851
T-0160	1.000	0.00	2.568	4.206	0.621	0.936	6.367	16.015	9.860
T-0170	1.000	0.00	2.555	5.860	0.696	0.938	6.385	16.084	9.910
T-0200	1.000	0.00	2.998	0.000	0.000	1.160	6.164	14.611	8.736
T-0210	1.000	0.00	3.025	0.491	0.140	1.115	6.158	14.555	8.692
T-0220	1.000	0.00	3.031	0.977	0.244	1.087	6.160	14.532	8.667
T-0230	1.000	0.00	3.030	1.564	0.340	1.068	6.156	14.521	8.661
T-0240	1.000	0.00	3.023	2.102	0.410	1.053	6.167	14.560	8.687
T-0250	1.000	0.00	3.007	3.087	0.507	1.042	6.170	14.622	8.743
T-0260	1.000	0.00	2.989	4.310	0.591	1.032	6.189	14.685	8.784
T-0270	1.000	0.00	2.966	5.432	0.647	1.032	6.188	14.769	8.864
T-0300	1.000	0.00	3.508	0.000	0.000	1.212	5.907	12.838	7.328
T-0310	1.000	0.00	3.508	0.521	0.129	1.172	5.912	12.835	7.319
T-0320	1.000	0.00	3.507	0.956	0.214	1.153	5.922	12.858	7.332
T-0330	1.000	0.00	3.488	1.605	0.315	1.136	5.938	12.923	7.377
T-0340	1.000	0.00	3.476	2.015	0.367	1.132	5.950	12.998	7.437
T-0350	1.000	0.00	3.425	3.137	0.478	1.121	5.972	13.147	7.554
T-0360	1.000	0.00	3.391	4.177	0.552	1.116	5.999	13.272	7.643
T-0370	1.000	0.00	3.355	5.154	0.606	1.113	6.024	13.407	7.745

表-2 実験結果一覧 (その2)

テスト番号	スラリ比重 r_m	濃度 C_v (%)	スラリみかけ 流速 j_m (m/s)	空気みかけ 流速 j_g (m/s)	空気体積 流量比 β	差 圧 (mAq/m)	ポンプ 吸入圧 (mスラリ柱)	ポンプ 吐出圧 (mスラリ柱)	ポンプ 全揚程 H_T (mスラリ柱)
T-1100	1.062	3.70	2.481	0.000	0.000	1.182	6.347	15.789	9.640
T-1110	1.059	3.50	2.507	0.511	0.169	1.112	6.370	15.743	9.575
T-1120	1.066	3.95	2.534	0.957	0.274	1.075	6.320	15.547	9.434
T-1130	1.057	3.40	2.544	1.585	0.384	1.036	6.371	15.637	9.475
T-1140	1.063	3.76	2.549	2.103	0.452	1.011	6.341	15.565	9.434
T-1150	1.064	3.84	2.542	3.203	0.558	0.982	6.337	15.554	9.425
T-1160	1.063	3.74	2.534	4.379	0.633	0.967	6.346	15.595	9.456
T-1170	1.062	3.70	2.513	5.615	0.691	0.978	6.357	15.654	9.500
T-1200	1.052	3.10	2.978	0.000	0.000	1.213	6.170	14.254	8.369
T-1210	1.054	3.22	3.004	0.491	0.140	1.160	6.158	14.173	8.306
T-1220	1.055	3.26	3.008	1.017	0.253	1.128	6.148	14.123	8.266
T-1230	1.061	3.04	3.012	1.543	0.339	1.105	6.177	14.186	8.301
T-1240	1.052	3.11	3.005	2.079	0.409	1.090	6.169	14.193	8.315
T-1250	1.056	3.31	2.983	3.174	0.516	1.069	6.175	14.223	8.335
T-1260	1.053	3.13	2.956	4.279	0.591	1.060	6.201	14.328	8.408
T-1270	1.058	3.44	2.903	5.544	0.656	1.063	6.206	14.459	8.524
T-1300	1.046	2.75	3.473	0.000	0.000	1.267	5.957	12.581	7.013
T-1310	1.051	3.05	3.477	0.511	0.128	1.224	5.923	12.502	6.968
T-1320	1.050	2.99	3.469	0.977	0.220	1.200	5.943	12.557	7.002
T-1330	1.050	2.96	3.452	1.507	0.303	1.181	5.952	12.601	7.032
T-1340	1.057	3.38	3.428	2.077	0.377	1.169	5.927	12.589	7.040
T-1350	1.056	3.32	3.392	3.112	0.479	1.161	5.961	12.771	7.180
T-1360	1.053	3.18	3.345	4.385	0.567	1.152	6.004	12.973	7.328
T-1370	1.053	3.15	3.285	5.458	0.624	1.139	6.035	13.162	7.475

表-3 実験結果一覧 (その3)

テスト番号	スラリ比重 $\bar{\gamma}_m$	濃度 C_d (%)	スラリみかけ 流速 j_m (m/s)	空気みかけ 流速 j_g (m/s)	空気体積 流量比 β	差 圧 (mAq/m)	ポンプ 吸入圧 (mスラリ柱)	ポンプ 吐出圧 (mスラリ柱)	ポンプ 全揚程 H_T (mスラリ柱)
T-2100	1.198	11.78	2.481	0.000	0.000	1.326	6.346	15.356	9.208
T-2110	1.192	11.41	2.481	0.481	0.162	1.255	6.384	15.424	9.238
T-2120	1.195	11.60	2.444	0.986	0.288	1.198	6.393	15.529	9.329
T-2130	1.190	11.33	2.462	1.541	0.385	1.159	6.414	15.539	9.320
T-2140	1.195	11.62	2.385	2.128	0.472	1.107	6.426	15.699	9.456
T-2150	1.200	11.88	2.450	3.530	0.590	1.077	6.375	15.401	9.219
T-2160	1.203	12.07	2.446	4.507	0.648	1.060	6.356	15.337	9.174
T-2170	1.200	11.91	2.458	5.895	0.706	1.060	6.376	15.407	9.225
T-2200	1.168	10.02	2.956	0.000	0.000	1.352	6.223	13.983	8.041
T-2210	1.165	9.85	2.986	0.481	0.139	1.299	6.228	13.940	7.999
T-2220	1.163	9.72	2.990	0.987	0.248	1.260	6.244	13.944	7.988
T-2230	1.172	10.24	3.072	1.552	0.336	1.245	6.152	13.599	7.750
T-2240	1.167	9.94	3.069	2.025	0.398	1.227	6.181	13.646	7.768
T-2250	1.169	10.07	3.046	3.171	0.510	1.203	6.183	13.675	7.791
T-2260	1.171	10.16	3.036	4.358	0.589	1.188	6.198	13.760	7.859
T-2270	1.167	9.97	3.011	5.800	0.658	1.166	6.235	13.874	7.931
T-2300	1.156	9.28	3.482	0.000	0.000	1.381	5.949	12.133	6.575
T-2310	1.150	8.91	3.498	0.491	0.123	1.340	5.975	12.149	6.568
T-2320	1.159	9.46	3.488	1.058	0.233	1.308	5.945	12.124	6.571
T-2330	1.149	8.86	3.477	1.551	0.308	1.291	6.008	12.273	6.654
T-2340	1.153	9.11	3.466	2.128	0.380	1.277	5.992	12.275	6.670
T-2350	1.155	9.22	3.436	3.163	0.479	1.265	6.010	12.392	6.762
T-2360	1.163	9.68	3.393	4.397	0.564	1.256	6.005	12.479	6.845
T-2370	1.161	9.59	3.358	5.606	0.625	1.239	6.036	12.598	6.925

表-4 実験結果一覧 (その4)

テスト番号	スラリー比重 γ_m	濃度 C_v (%)	スラリーかけ 流速 j_m (m/s)	空気みかけ 流速 j_g (m/s)	空気体積 流量比 β	差 圧 (mAq/m)	ポンプ 吸入圧 (mスラリー柱)	ポンプ 吐出圧 (mスラリー柱)	ポンプ 全揚程 H_T (mスラリー柱)
T-3100	1.403	23.97	2.499	0.000	0.000	1.544	6.201	14.562	8.563
T-3110	1.399	23.75	2.524	0.510	0.168	1.481	6.228	14.552	8.529
T-3120	1.394	23.44	2.544	1.023	0.287	1.432	6.239	14.529	8.499
T-3130	1.396	23.58	2.563	1.494	0.368	1.400	6.223	14.476	8.465
T-3140	1.390	23.19	2.566	2.024	0.441	1.366	6.270	14.524	8.466
T-3150	1.396	23.59	2.574	3.128	0.549	1.321	6.240	14.460	8.434
T-3160	1.400	23.79	2.566	4.255	0.624	1.291	6.230	14.423	8.405
T-3170	1.408	24.31	2.573	5.487	0.681	1.273	6.202	14.338	8.350
T-3200	1.364	21.67	2.996	0.000	0.000	1.560	6.037	13.090	7.342
T-3210	1.358	21.34	3.018	0.492	0.140	1.507	6.052	13.050	7.291
T-3220	1.357	21.25	3.035	1.016	0.251	1.464	6.056	13.024	7.265
T-3230	1.366	21.80	3.041	1.494	0.329	1.442	6.022	12.930	7.205
T-3240	1.367	21.86	3.037	2.023	0.400	1.422	6.032	12.964	7.229
T-3250	1.367	21.85	3.019	3.113	0.508	1.385	6.052	13.033	7.275
T-3260	1.368	21.92	3.009	4.295	0.588	1.364	6.070	13.093	7.315
T-3270	1.373	22.23	2.990	5.472	0.647	1.364	6.064	13.115	7.338
T-3300	1.336	20.00	3.491	0.000	0.000	1.587	5.825	11.355	5.923
T-3310	1.330	19.64	3.515	0.543	0.134	1.542	5.847	11.376	5.928
T-3320	1.334	19.88	3.504	1.039	0.229	1.510	5.835	11.365	5.926
T-3330	1.332	19.75	3.504	1.545	0.306	1.490	5.855	11.415	5.955
T-3340	1.333	19.83	3.497	2.039	0.368	1.475	5.862	11.457	5.988
T-3350	1.337	20.08	3.449	3.162	0.478	1.458	5.879	11.593	6.097
T-3360	1.344	20.45	3.407	4.344	0.560	1.442	5.890	11.689	6.173
T-3370	1.343	20.43	3.376	5.394	0.615	1.444	5.912	11.823	6.278

3. 気固液 3 相流の流動特性

3.1 固液 2 相流

ここでは気固液 3 相流の流動特性を解析するための基礎として固液 2 相流の摩擦損失について考察する。まず清水での摩擦損失について調べる。

円管路の摩擦損失を計算するときには、一般に次に示す Darcy-Weisbach の式を用いる。

$$P_f = \lambda (l/D) \{ v^2 / (2g) \} \text{ (液高さ)} \quad \dots\dots(1)$$

- P_f : 摩擦損失
- λ : 管摩擦係数
- l : 管路の長さ
- D : 管径
- v : 平均流速
- g : 重力加速度

管摩擦係数 λ は、レイノルズ数の関数として表されることが多い。図-4 に清水で行った予備実験の摩擦損失 P_{fw} の測定結果を示す。これより管摩擦係数を求めると次のようになる。

$$\lambda_w = 0.3347 R_{ew}^{-0.2663} \quad \dots\dots(2)$$

$$R_{ew} = \rho_w v_w D / \mu_w$$

- λ_w : 清水の管摩擦係数
- R_{ew} : 清水のレイノルズ数
- ρ_w : 清水の密度
- v_w : 清水の流速
- μ_w : 清水の粘性係数

この管摩擦係数を用いて次式より清水での摩擦損失 p_{fw} を計算した結果を図-4 中の実線で示す。

$$p_{fw} = \lambda_w (1/D) \{ v_w^2 / (2g) \} \quad \dots\dots(3)$$

このように、データと(3)式の一致はよく、清水での摩擦損失は(3)式より求めることができる。

次にスラリの摩擦損失について調べる。図-5 にスラ

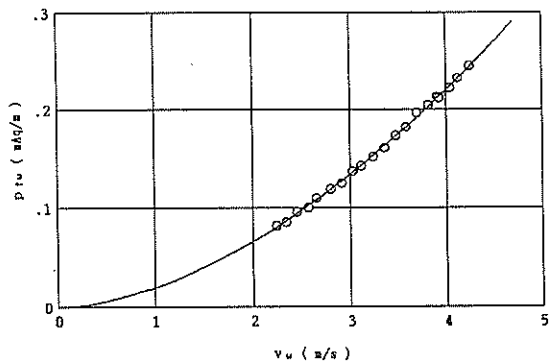


図-4 清水の摩擦損失

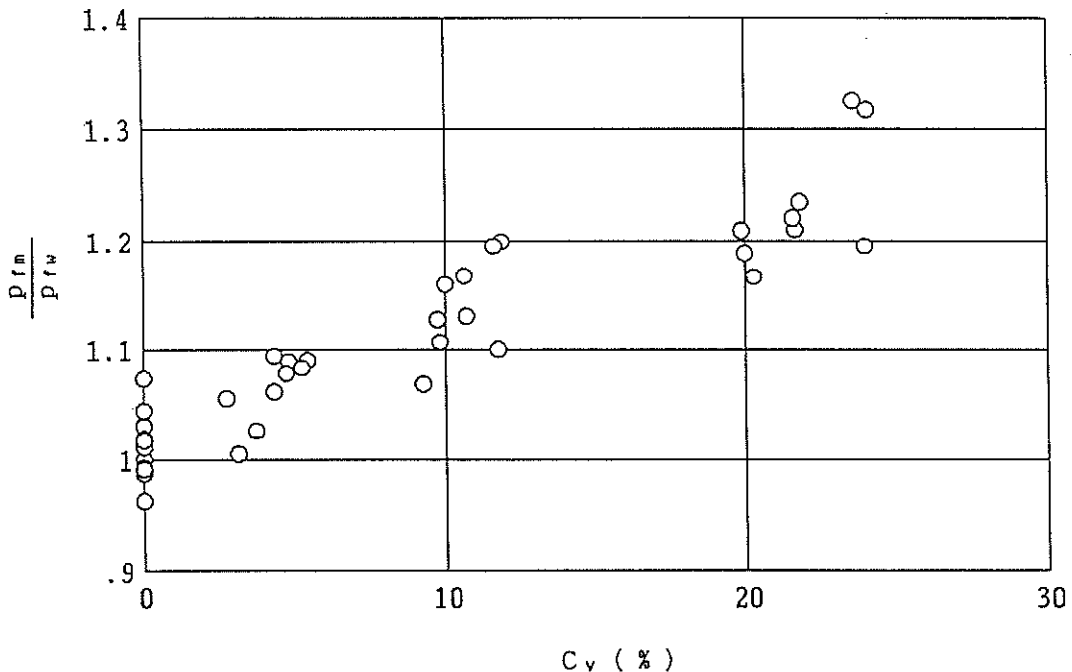


図-5 スラリの摩擦損失と濃度の関係

りの摩擦損失 p_{fm} と清水の摩擦損失 p_{fw} との比と、濃度の関係を示す。従来、垂直上昇固液 2 相流における摩擦損失は、同流速の清水の摩擦損失とほぼ同じであるとされることが多いが、本実験では図から分かるように、スラリの摩擦損失は、濃度が高くなるほど大きくなっている。ここでスラリの摩擦損失が次式に示すように Darcy-Weisbach の式で表されるとする。

$$p_{fm} = \lambda_m (1/D) \cdot \{ v_m^2 / (2g) \} \quad (\text{スラリー高さ}) \quad \dots\dots(4)$$

λ_m : スラリの管摩擦係数

v_m : スラリの流速

管摩擦係数は、清水での実験式(2)が成り立つとして、スラリのレイノルズ数 R_{em} と管摩擦係数を次式で定義する。

$$\begin{aligned} \lambda_m &= 0.3347 R_{em}^{-0.2663} \\ R_{em} &= \rho_m v_m D / \mu_m \quad \dots\dots(5) \end{aligned}$$

ρ_m : スラリの密度

μ_m : スラリのみかけ粘性係数

R_{em} を求めるには、 μ_m を明らかにしなければならぬ。そこで、 p_{fm} と p_{fw} を清水高さで表し両者の比をとると

$$p_{fm} / p_{fw} = (\lambda_m / \lambda_w) (\rho_m / \rho_w) \quad \dots\dots(6)$$

また(2), (5)式より

$$\lambda_m / \lambda_w = \{ (\rho_w / \rho_m) (\mu_m / \mu_w) \}^{0.2663}$$

これを(6)式に代入して

$$p_{fm} / p_{fw} = (\rho_m / \rho_w)^{0.7337} (\mu_m / \mu_w)^{0.2663} \quad \dots\dots(7)$$

p_{fm} , ρ_m は実験データより、 p_{fw} は、(3)式より得るとして(7)式より μ_m / μ_w をもとめて濃度との関係を示したのが図-6である。この図によると本実験範囲において μ_m / μ_w は濃度に関係なくほぼ1であることが分かる。

以上のことから、次のようにして p_{fm} を求めることができる。

まずスラリのみかけ粘性係数を清水と同じにし、密度をスラリの平均密度として、レイノルズ数 R_{em} を求める

$$R_{em} = \rho_m v_m D / \mu_w$$

このレイノルズ数から(5)式より粘性係数 λ_m を求めて、(4)式を用いるとスラリの摩擦損失 (スラリー高さ) を計算することができる。図-7にこの方法による計算

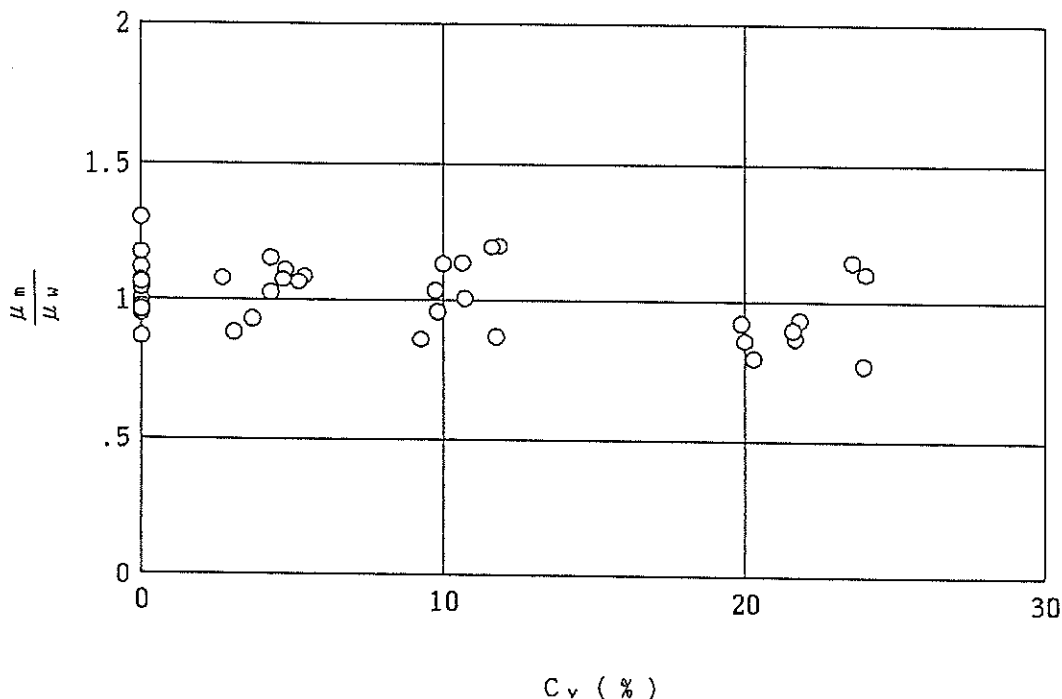


図-6 スラリのみかけ粘性と濃度の関係

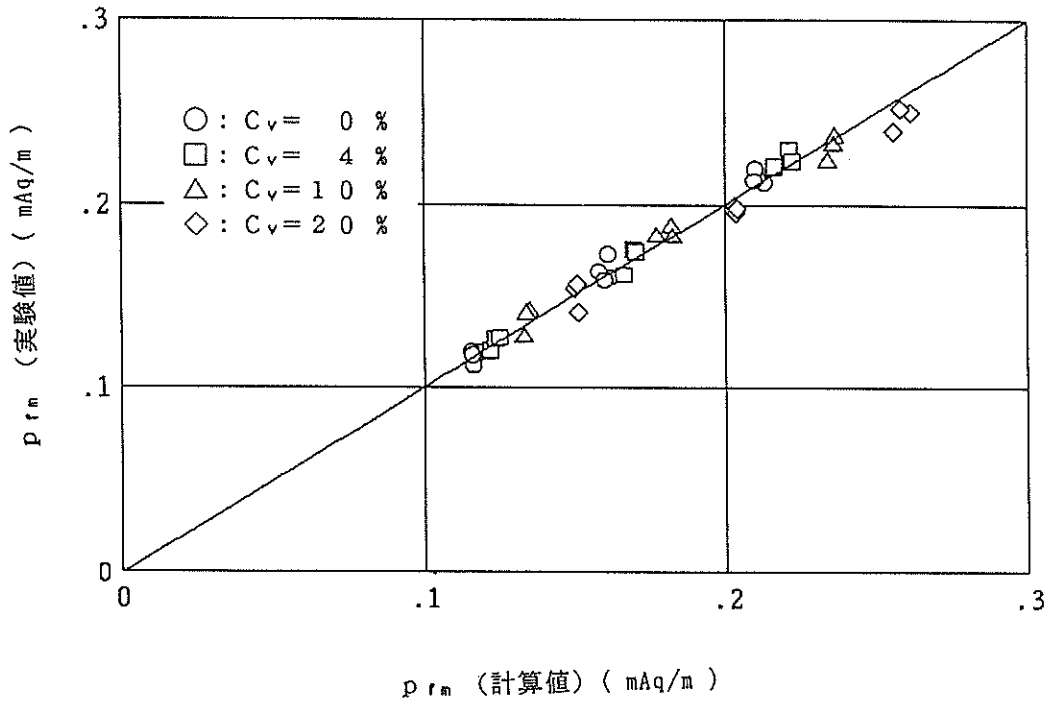


図-7 スラリ摩擦損失の実験値と計算値の比較

結果と実験値との比較を示す。計算値は実験値と比較的よくあっている。よって以後スラリの摩擦損失の算出には(4)式を用いることにする。

ここでは3相流の解析のためにスラリの摩擦損失を精度よく計算する必要があったため、一つの試みとしてこのような手段を用いた。垂直管におけるスラリの摩擦損失算出に関するこの方法の一般性については、まだ十分な検討を行っておらず、今後もデータを積み重ねて確認する必要がある。

3.2 気固液3相流

(1) 流動様式

本実験では、固液2相流であるスラリに空気を混入するようにしており、固体粒子が液相中から気相中に移り長時間そこに存在することは、液相の粘性や重力の影響ではほとんど無いと考えられる。

つまり、気固液3相流での流動様式は、固液2相流(スラリ)を単相として、スラリと空気の2相流と考えることができる。

実験では、固相混入のために流体の透明度が悪く流動様式を、詳しく観察できなかったが、気液2相流の流動状態を見るかぎり、液相と気相がほぼ均一に混合していたことから、スラリと空気の気固液3相流においてもスラリと空気が均一に混合していると思われる。

(2) ボイド率

着目している空間における気相の存在割合(体積率)をボイド率という。ここではボイド率を次式で定義する。

$$\alpha = V_g / V_3$$

α : ボイド率

V_3 : 3相流の体積

V_g : V_3 中の空気の体積

また空気の体積流量比を次式で定義する。

$$\beta = Q_g / (Q_g + Q_m) \\ = j_g / (j_g + j_m)$$

β : 空気の体積流量比

気相とスラリの絶対速度に相対速度がなければ、ボイド率は気相の体積流量比に等しいが、普通気相の絶対速度の方がスラリのそれに比べて大きいため、

ボイド率 < 空気の体積流量比

となる。

ボイド率を正確に知ることは、管路系の圧力損失を求める上で非常に大切である。しかし、実験に使用した装置では直接測定することが困難であったため、次の方法

でボイド率を求めた。すなわち、空気ノズルより下流の3相流部分のボイド率はどこも一定であると仮定し、3相流部分の全管路抵抗損失が、空気ノズル位置での管内圧力に等しいとして、3相流部分全体の平均ボイド率を推算した。3相流部分の全管路抵抗損失は、「4. 輸送系に対する空気混入の影響」で述べてある方法で求めた。

このようにして求めた3相流部分全体の平均ボイド率 α と空気の体積流量比 β の関係を各スラリー濃度について示したのが図-8である。本実験範囲内では、 α と β の関係にスラリー濃度の影響はほとんど見られないようである。

ボイド率の計算式は多数ある⁴⁾。例えば、気液2相流での Nicklin の気相上昇速度 u_{gn} を用いると、

$$u_{gn} = 1.2(j_g + j_l) + 0.35(gD)^{0.5}$$

$$\alpha = j_g / u_{gn}$$

$$= j_g / \{1.2(j_g + j_l) + 0.35(gD)^{0.5}\}$$

j_l : 液のみかけ速度

j_g, j_l が大きい場合には、 u_{gn} の第2項目は無視でき

$$\alpha \approx j_g / (1.2(j_g + j_l))$$

$$= 0.833\beta$$

となる。また、これとは別に、Armand によって $\beta \leq 0.9$ の場合に

$$\alpha = 0.833\beta$$

になることが実験的に求められている。この式も比較のため 図-8 中に示す。ほかにも Bankoff の flow parameter を用いる方法がある。また、気相と液相の絶対速度の比(速度比)からもボイド率を求めることができる。気相と液相の絶対速度 u_g, u_l は、

$$u_g = j_g / \alpha$$

$$u_l = j_l / (1 - \alpha)$$

速度比 s は、

$$s = u_g / u_l$$

$$= (1 - \alpha) / \alpha \cdot j_g / j_l$$

これより α を求めると

$$\alpha = j_g / (j_g + j_l \cdot s) \quad \dots\dots(8)$$

青木、井上らは、気液2相流の比較的 j_l の大きい領域における s の実験式を次のように求めている⁵⁾。

$$s = 1 + 0.025(\rho_l / \rho_g)^{0.46} (j_g / j_l)^{0.75} \quad \dots\dots(9)$$

これらの式は、発達した(ボイド率が安定した)気液2相流についての式である。ボイド率は、空気ノズルから流れ方向へ変化していると考えられ、特に空気ノズル付近ではその変化が著しいと思われる⁶⁾。本実験で求め

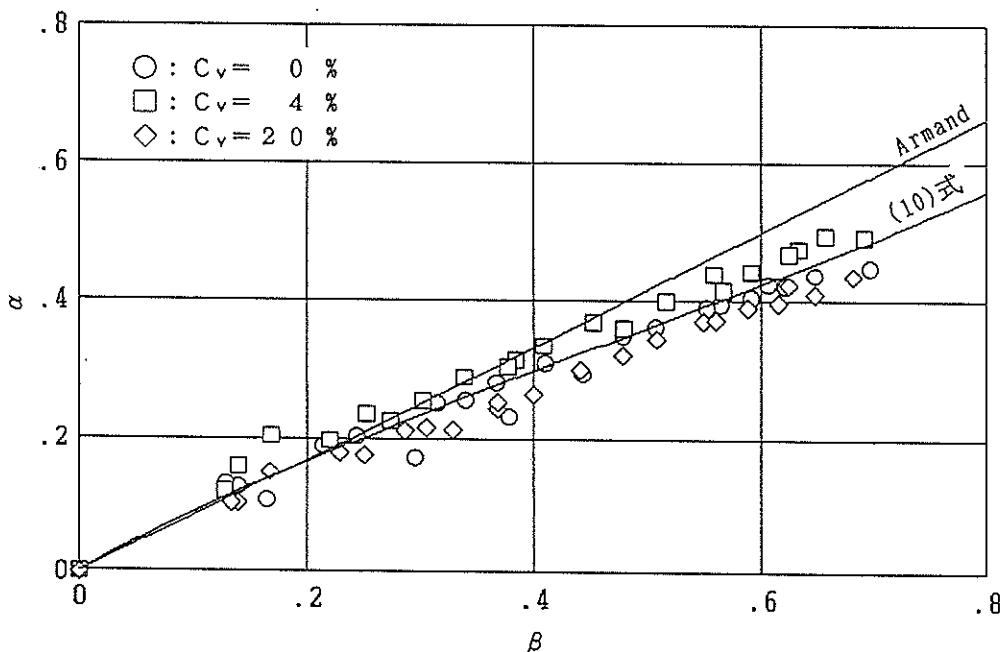


図-8 ボイド率と空気の体積流量比の関係

たボイド率は、空気ノズル直後のボイド率が変化している部分も含めた3相流部分全体の平均ボイド率なので、これらの式とは内容が若干異なる。

(9)式を本実験に合わせてパラメータと係数を変えたものが次式である。

$$s = 1 + 0.04 (\rho_m / \rho_g)^{0.46} (j_g / j_m)^{0.75} \quad \dots\dots\dots (10)$$

これを用いて(8)式より α を計算した結果を図-8中に示す。

(3) 摩擦損失

気液2相流の圧力損失は、次に示す Lockhart と Martinelli によるパラメータ ϕ_l , x で整理される場合が多い。

$$\phi_l^2 = p_{f2} / p_l$$

$$x^2 = p_l / p_g$$

p_{f2} : 気液2相流の摩擦損失

p_l : 気液2相流における液相の体積流量で、液が管内を単独で流れたときの摩擦損失

p_g : 気液2相流における気相の体積流量で、気相

が管内を単独で流れたときの摩擦損失

これらのパラメータをスラリと空気の気固液3相流に次のように当てはめる。

$$\phi_m^2 = p_{f3} / p_m \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$X^2 = p_m / p_g \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$p_m = \lambda_m (1/D) \{j_m^2 / (2g)\}$$

$$p_g = \lambda_g (1/D) \{j_g^2 / (2g)\}$$

$$\lambda_m = 0.3347 Re_m^{-0.2663}$$

$$\lambda_g = 0.3347 Re_g^{-0.2663}$$

$$Re_m = \rho_m D j_m / \mu_w$$

$$Re_g = \rho_g D j_g / \mu_g$$

p_{f3} : 気固液3相流の摩擦損失

p_m : 気固液3相流におけるスラリの体積流量で、スラリが管内を単独で流れたときの摩擦損失

λ_g : 空気の管摩擦係数

ρ_g : 空気の密度

μ_g : 空気の粘性係数

このパラメータにより実験結果を整理すると、図-9のようになる。

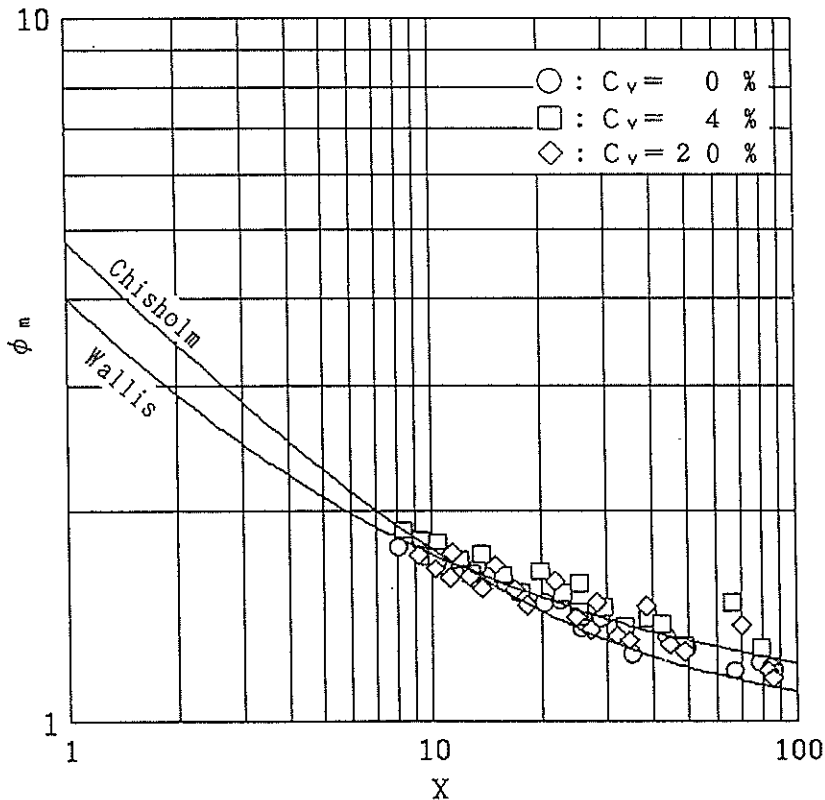


図-9 ϕ_m , X による3相流の摩擦損失の整理

整理した結果は、 j_m が小さいほど ϕ_m が大きいといった流速による影響が若干みられるがほぼまとまっている。

Chisholm と Wallis は気液2相流について、 ϕ_l と x の関係を次のように表した⁷⁾。

$$\begin{aligned} \phi_l^2 &= 1 + 21/x + 1/x^2 && \text{Chisholm} \\ \phi_l &= (1 + x^{-0.5})^2 && \text{Wallis} \end{aligned}$$

これらの式を気固液3相流に当てはめるために、パラメータを(11)、(12)式のものに置き換えると

$$\begin{aligned} \phi_m^2 &= 1 + 21/X + 1/X^2 && \text{Chisholm} \dots (13) \\ \phi_m &= (1 + X^{-0.5})^2 && \text{Wallis} \dots (14) \end{aligned}$$

となる。これらの式も図-9中に示す。

また、 ϕ_m^2 とボイド率 α の関係を図-10に示す。図-10中の線は、Chisholm と Wallis の式である。ボイド率の小さい部分(j_g の小さい部分)を除いてWallisの式の方がデータとの一致性がよい。また図-10中にはデータに合わせた実験式も示す。実験式は、次式で表される。

$$\phi_m^2 = 1 + 2.4 \{ \alpha / (1 - \alpha) \}^{0.88} \dots (15)$$

4. 輸送系に対する空気混入の影響

(1) ポンプ特性

ポンプは、遠心渦巻型のスラリポンプを使用した。ポンプ揚程は、スラリを送った場合清水時より低下する。これは、粒子の大きさや比重、スラリ濃度などで左右され、理論的に揚程低下を予測するのは困難である⁸⁾。図-11に各スラリ濃度におけるポンプ特性を示す。

(2) 気固液3相流の抵抗損失

空気をポンプ吐出側へ混入することによりポンプの動作点はポンプ特性曲線上を移動し、それに伴い流量(すなわち j_m) が変化する。図-12に空気流量とスラリ流量の変化との関係を示す。縦軸に j_m と $\beta = 0$ のときの j_m (j_{m0}) との比、横軸は β である。各スラリ濃度における j_{m0} が、約 2.5 m/s, 3.0 m/s, 3.5 m/s の場合のデータであるが、このデータを見るかぎり j_m の変化には、スラリ濃度はほとんど関係しておらず、 j_m の絶対値と β に関係しているようである。

スラリ流量が変化するのには次の理由によると思われる。

スラリ流量が非常に小さい場合、気相を加えることにより摩擦損失が小さくなることもあるが⁹⁾スラリ流量が大きい場合、気相の混入により摩擦損失は増大する。また、気相の混入によりスラリの絶対速度が大きくなり、スラリを加速するための抵抗損失が生じる。しかし、同

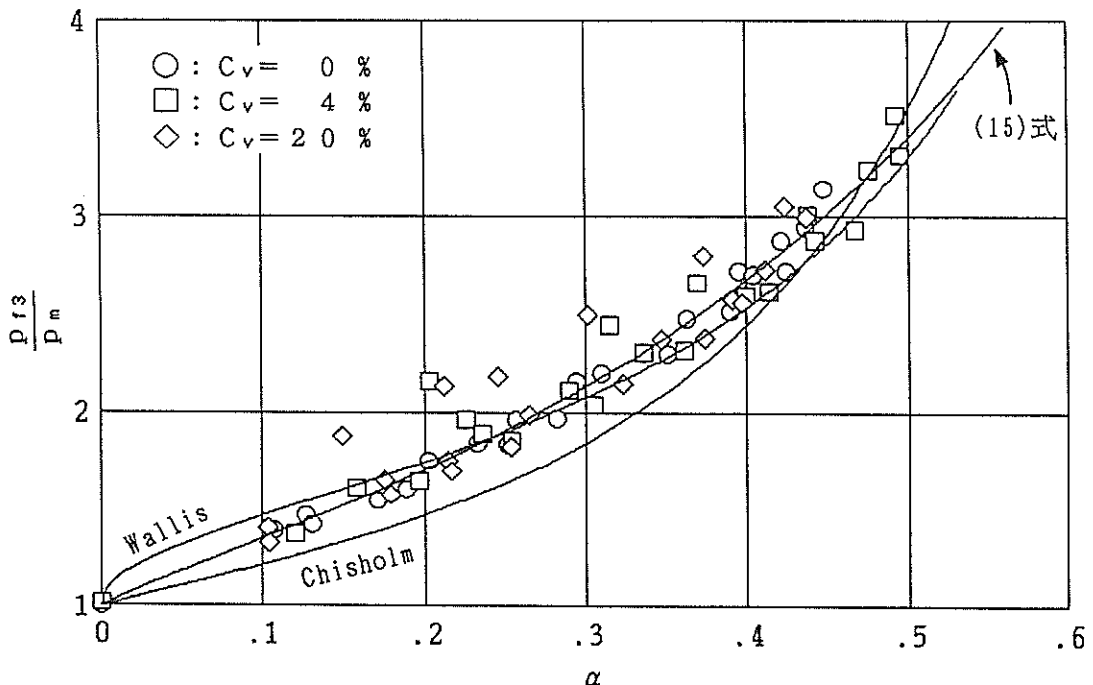


図-10 3相流の摩擦損失とボイド率の関係

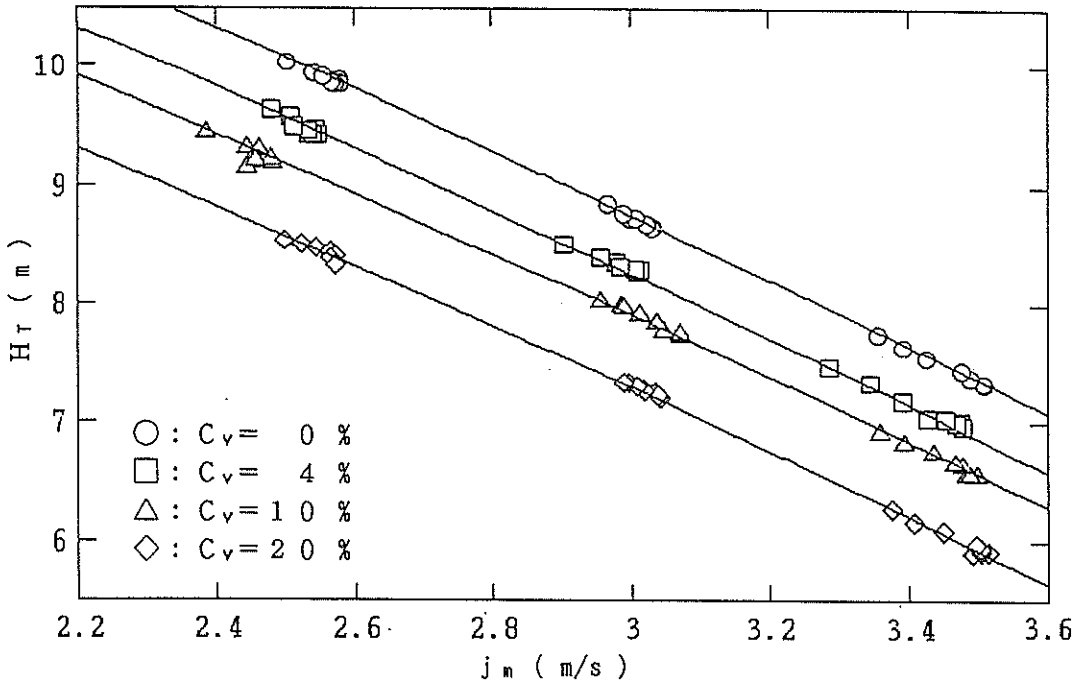


図-11 スラリ濃度によるポンプ特性の変化

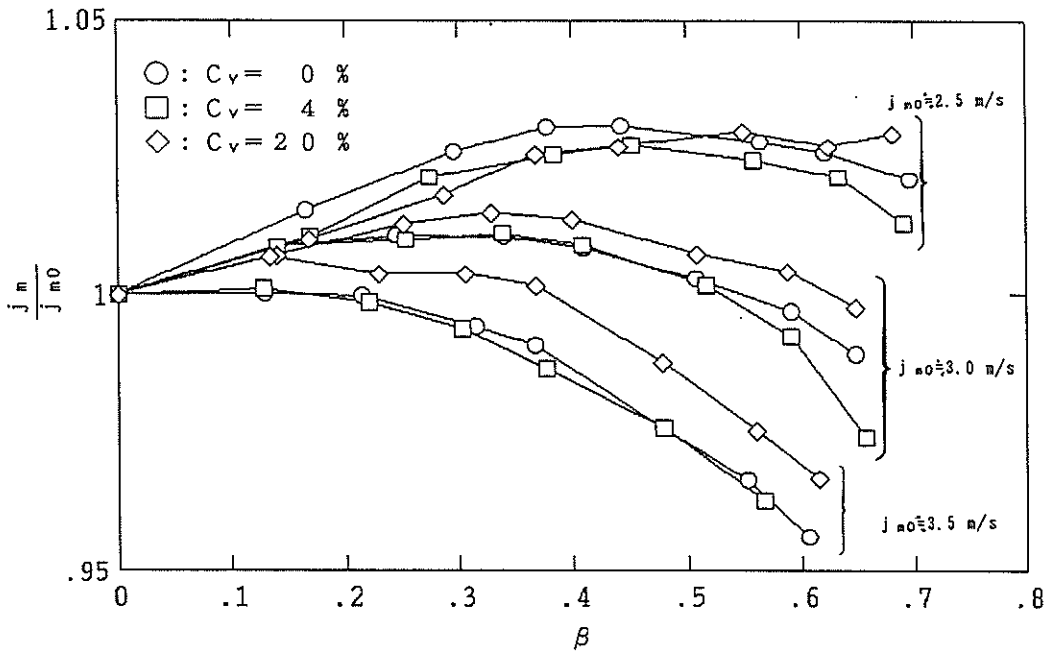


図-12 3相流中の空気量によるスラリみかけ流量の変化

時に気相の混入により管路内の流体（混相流）の平均比重が小さくなり実揚程が減少したのと同じ効果も生じる。この平均比重の減少と、摩擦損失と加速による抵抗の増加とのそれぞれのバランスにより管路の全抵抗が変化しスラリ流量が変化すると考えられる。

即ち、3相流部分の管路の全抵抗は、次の3成分からなる。スラリに比べて空気密度が無視できるほど小さいとすると、各成分は、

$$\Delta P_T = \Delta P_h + \Delta P_f + \Delta P_v \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$\Delta P_h = (1 - \alpha) \cdot l \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$\Delta P_f = \rho_{f3} \cdot l \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_v &= u_m^2 / (2g) - j_m^2 / (2g) \\ &= \{1 / (1 - \alpha)^2 - 1\} j_m^2 / (2g) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (19)$$

(以上単位：スラリ高さ)

- ΔP_T : 3相流部分の全抵抗
- ΔP_h : 3相流部分の平均比重による抵抗
- ΔP_f : 摩擦による抵抗
- ΔP_v : スラリの加速による抵抗
- l : 3相流部分の揚程

となる。

実験データよりこれらの抵抗の大きさの割合を図-13、図-14に示す。 j_{m0} が2.5 m/s のときには、 ΔP_T が最小になるような β すなわち j_g が存在するが¹⁰⁾、 j_{m0} が3.5 m/s のときには、 ΔP_T は、 j_g が増加するにつれ単調に増加している。また、各抵抗成分の大きさは、 ΔP_h が一番大きく続いて ΔP_f 、 ΔP_v の順になっていることが分かる。

系の全抵抗とポンプの全揚程とが釣りあったときに固液2相（スラリ）の流量が決まる。いま、系の全抵抗のうち3相流部分の抵抗は、(16)式で求まる。また、3相流以外の管路抵抗のうち摩擦損失は、一般の管路抵抗と同様に j_m の関数として考えられ、管路の揚程は、実測により求めることができる。ポンプの全揚程は実験データをもとに各スラリ濃度について実験式を求めることができる。ポンプ全揚程の実験式とデータの比較は図-11に示す。図中の実線が実験式である。このようにして、系の全抵抗とポンプの全揚程が計算できれば

$$\text{系の全抵抗} = \text{ポンプの全揚程}$$

としてこの式を j_m について解くことによりスラリ流量を求めることができる。

(17)~(19)式から分かるように、3相流の各抵抗成分は、

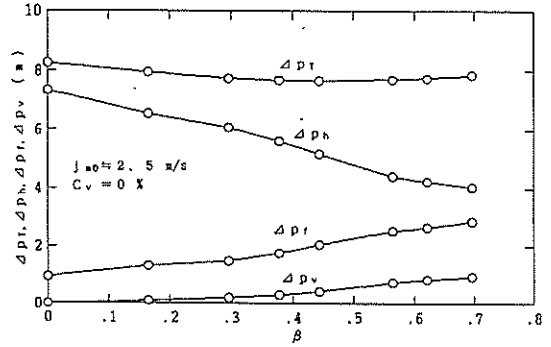


図-13 3相流の各抵抗成分の比較 ($j_{m0} \approx 2.5 \text{ m/s}$)

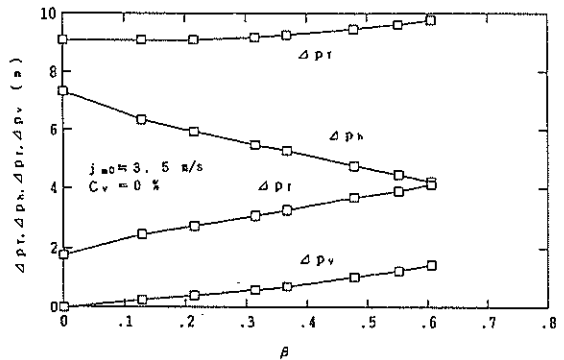


図-14 3相流の各抵抗成分の比較 ($j_{m0} \approx 3.5 \text{ m/s}$)

ρ_{f3} と α で表される。つまり ΔP_T を正確に得るためには、これらを精度よく求めることが重要である。

ここで、 α を求めるために(10)式、 ρ_{f3} を求めるために(13)~(15)式を用い、上記の方法で空気流量に対する固液の流量を計算し予想した結果を図-15~図-17に示す。記号が実験値で実線が計算値である。図-15は、Chisholmの式を用い、図-16はWallisの式を用い、図-17は実験式を用いているが、実験式を除いて、Wallisの式をもちいると、 j_g の小さい部分を除いてデータとの一致はよい。

次に、本実験範囲外のスラリ流速について空気混入による j_m の変化を計算してみた結果が図-18である。図中の記号は、以前に予備実験を行ったときのデータで、厳密には実験装置が現在と若干違うため管路抵抗の計算式が本実験と多少違うが、参考のために示した。図-18から分かるように、計算結果と実験データは同様の傾向を示す。すなわち j_{m0} が小さいほど空気混入による j_m の増加の割合が大きく、 j_{m0} が大きくなると空気混入

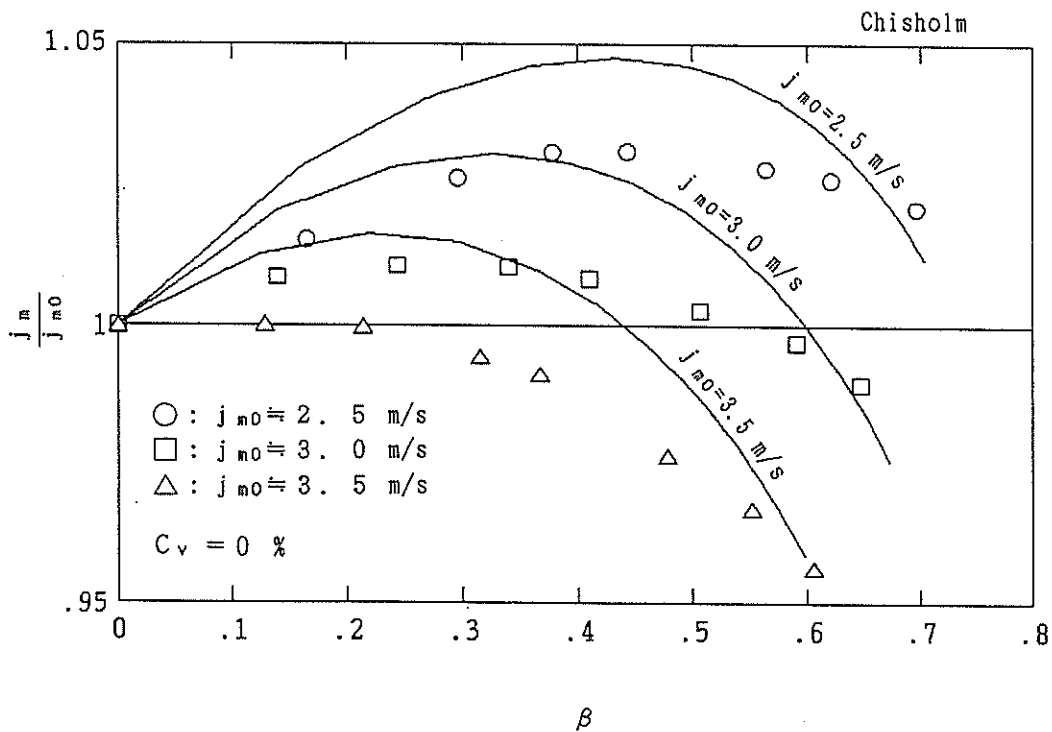


図-15 j_m の計算値とデータとの比較 (Chisholm の式)

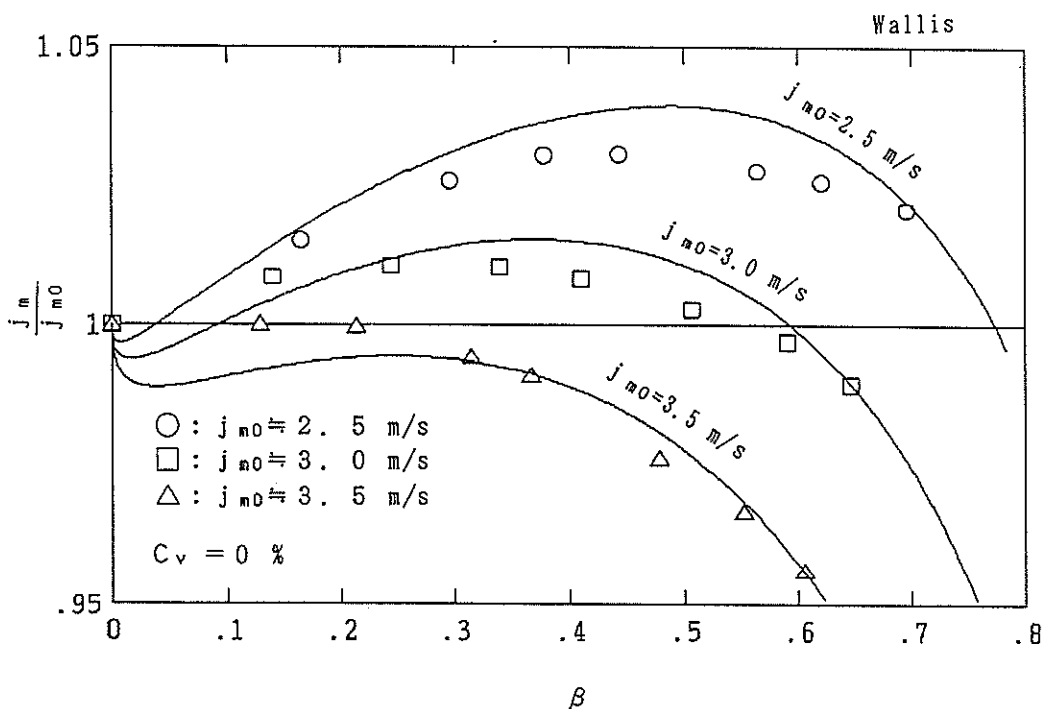


図-16 j_m の計算値とデータとの比較 (Wallis の式)

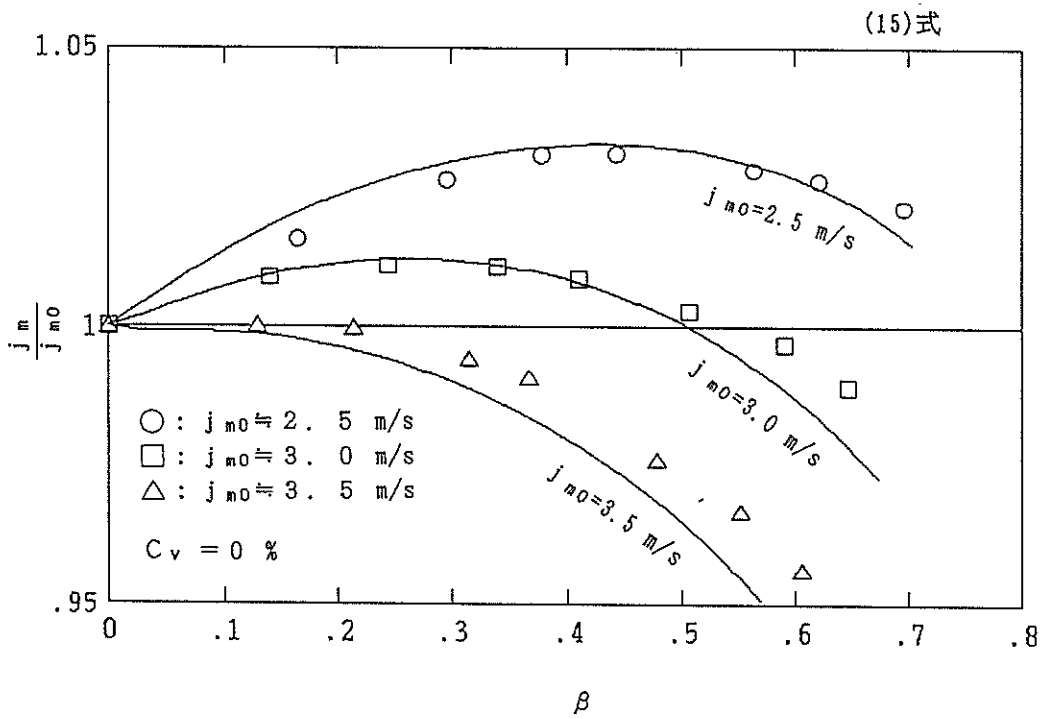


図-17 j_m の計算値とデータとの比較 (15) の式)

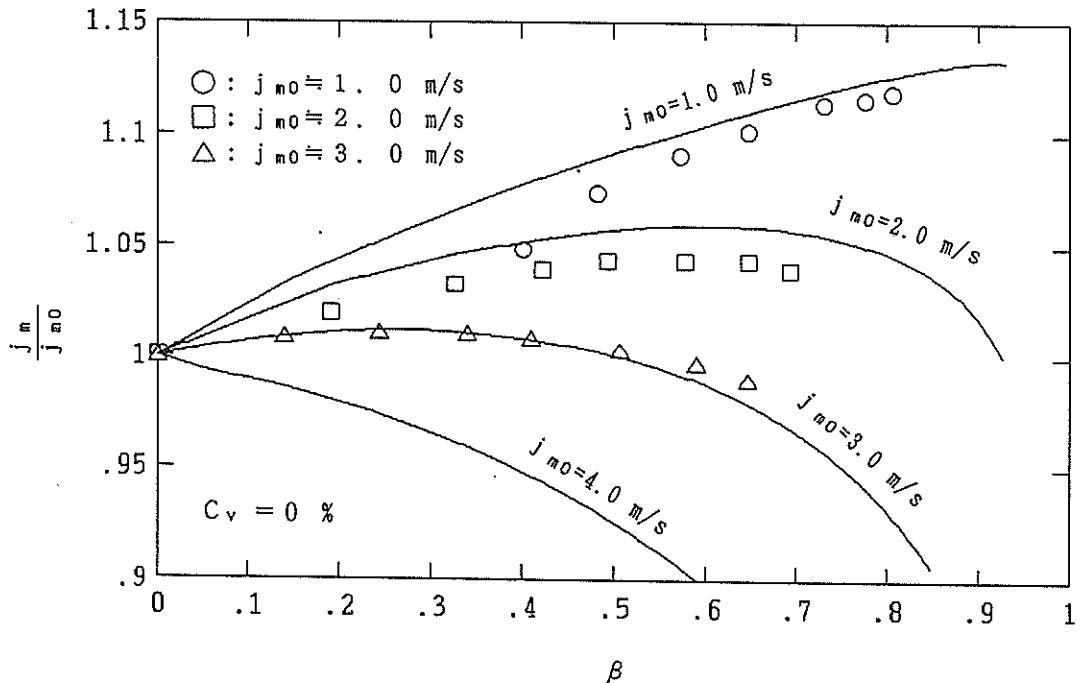


図-18 実験範囲外のスラリ流量の計算結果

により j_m は単調減少を示す。また、 j_{m0} によっては j_m が最大になるような β が存在する。

図-19, 図-20, 図-18 の場合の3相流部分の各抵抗成分の割合を j_{m0} が 2m/s, 4m/s の場合について

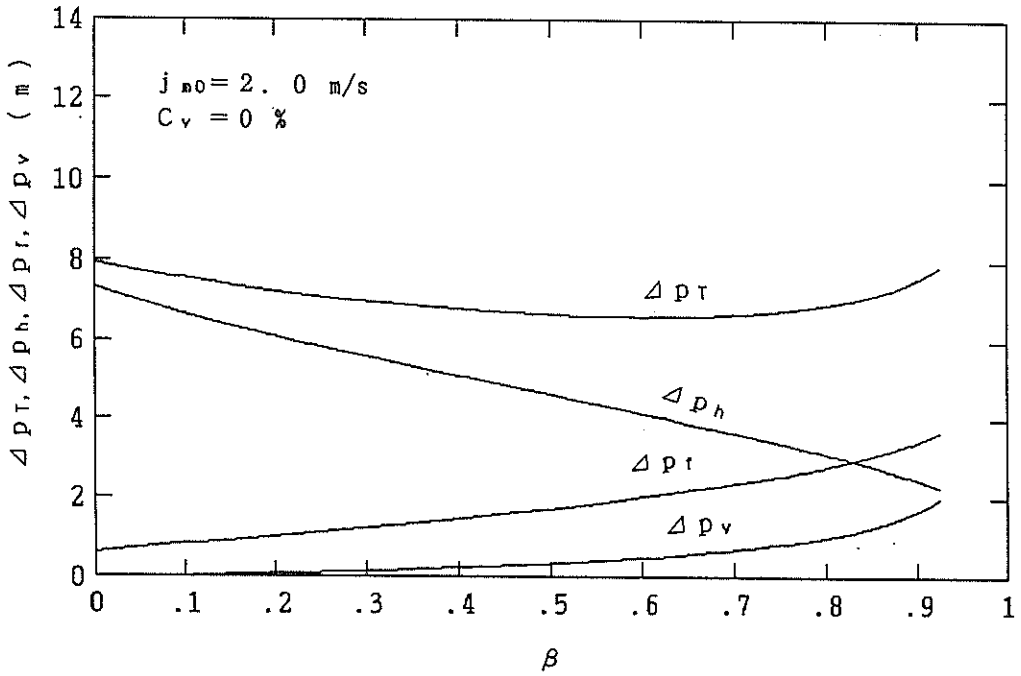


図-19 $j_{m0} = 2.0 \text{ m/s}$ のときの各抵抗成分

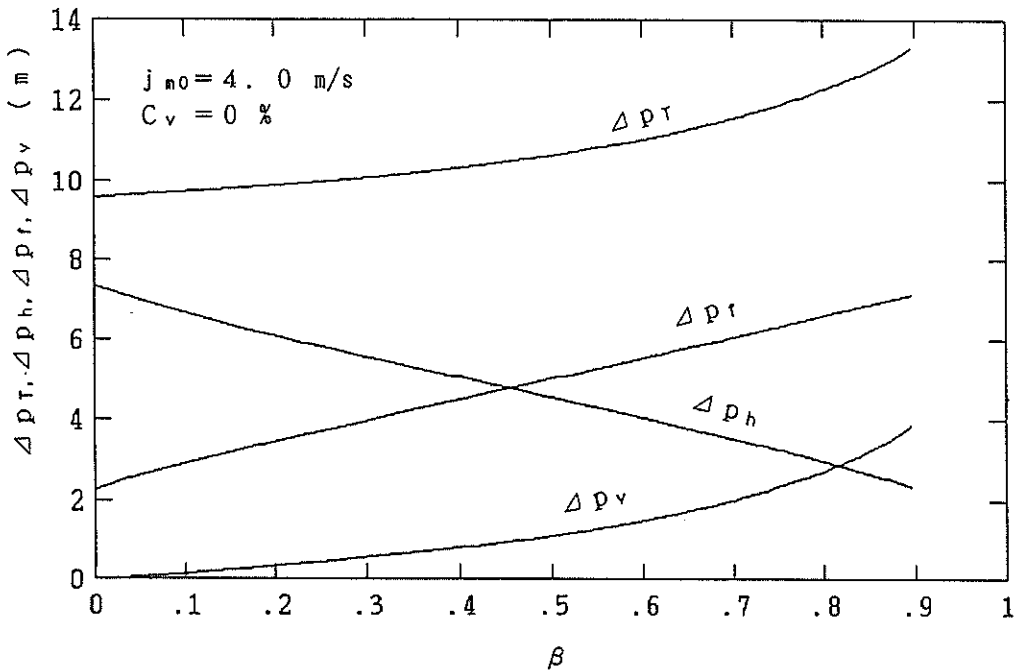


図-20 $j_{m0} = 4.0 \text{ m/s}$ のときの各抵抗成分

て示す。 j_{m0} が 2m/s の場合 ΔP_T は、ある β で最小となり、4 m/s では β とともに増加している。

図を見ると ΔP_h は、 β によって決まっており j_{m0} の大きさによらない。 ΔP_f 、 ΔP_v は j_{m0} によってかなり変化している。つまり、 β に伴う ΔP_f の変化の傾向が j_{m0} によって違うのは、 ΔP_f 、 ΔP_v による影響が大きいと考えられる。しかし ΔP_v は 3 相流部分の揚程 l には関係無いので、 l が大きい場合は ΔP_v が相対的に小さくなり ΔP_h 、 ΔP_f の影響が支配的になる。

5. 結 論

スラリ輸送系において、ポンプの吐出側に空気を混入した時の管内流動特性および空気を混入することによる輸送系全体に与える影響について、その第一段階として垂直管に対するデータを解析した。これによって以下に示すような知見が得られた。

- (1) 気固液 3 相流の垂直管流動損失を計算するためには、固液スラリの摩擦損失計算が基礎となるため、これを高い精度で推定する必要がある。本実験に用いたような比較的小粒径土砂の場合、流動の母体となる固液スラリの垂直流動による摩擦損失は、密度が高く、清水と同じ粘性をもった流体の単相流れとして、Darcy-Weisbach の式より推算できた。このとき、

$$\lambda_m = 0.3347 Re_m^{-0.2663}$$

$$Re_m = \rho_m v_m D / \mu_w$$

で摩擦係数 λ_m を求めることができる。 λ_m は、滑らかな管に対して実験データを基に決定したものであるが、これは従来使われている Blasius の式に近いためにこれを代用することも可能である。

- (2) スラリに空気を混入した場合の摩擦損失は Lockhart と Martinelli のパラメータ ϕ_l 、 x を 3 相流に拡張した次式で定義されるパラメータ

$$\phi_m^2 = \rho_{f3} / \rho_m$$

$$X^2 = \rho_m / \rho_g$$

を用いると比較的良好な整理が出来るが、スラリのみかけ流速の影響が若干見られる。空気混合比の小さい範囲を除いて、気液 2 相流での Wallis の式に上記の ϕ_m 、 X を当てはめるとデータとの一致性はよかった。

- (3) 3 相流部分の抵抗損失 ΔP_T は、次に示す各成分で成り立つと考えられる。

$$\Delta P_T = \Delta P_h + \Delta P_f + \Delta P_v$$

空気流量を変化させることにより各成分が変化し、

ΔP_T はそれらのバランスで増減する。各成分はボイド率と ρ_{f3} によって定まり、それらを正確に求めることによりポンプ特性と組み合わせてスラリ輸送系の流動特性を比較的精度よく予測することができる。

- (4) 空気を混入していくと系全体の抵抗損失が最小になる点があることを確認した。この効果は水中ポンプとエアリフトとの合成された影響であり、スラリの流量が小さい程顕著であり、流量が大きい場合には本実験範囲では抵抗の減少傾向は現われなかった。このことはスラリ流量の小さい範囲で空気混入によって輸送系全体を制御できる可能性を示すものである。

6. あとがき

本研究は沈降性の小さい固液混合スラリに空気を混入した場合、その流動特性を従来の気液 2 相流に対する解析手法を延長することで大略決定し得ることを明らかにしている。シルトや粘土スラリに空気を混入した場合、粘性係数の決定手法は今回の細砂スラリと異なってくるが、全体の流動損失計算においては本報告は有効利用されるだろう。

また、ポンプと空気混入の総合効果について検討した資料は過去ほとんど見られず、この意味で、輸送系全体を考慮する場合貴重な参考資料になるものと思われる。

本研究は、今後高濃度軟泥、水平管、大口径管と輸送条件をかえて続ける予定であり、最終的に全体をとりまとめてゆく予定である。

(1989年4月28日 受付)

参 考 文 献

- 1) 斉藤二郎・藤原紀夫・羽生田吉也・田中俊次：気泡シールド工法における掘削土の連続輸送に関する基礎実験—ポンプによる気泡土の圧送—、大林組技術研究所報、No.27、1983年、pp.107~111
- 2) 栗原和夫：営団地下鉄11号線大手町4工区シールド工事における“土砂風送”によるずりだし、土木施工、21巻4号、1980年4月、pp.26~35
- 3) TSUJI, Y. and MORIKAWA, Y.: Plug Flow of Coarse Particles in a Horizontal Pipe, *Journal of Fluids Engineering*, Vol.104, June 1982, pp.198~206
- 4) 例えば日本機械学会編：気液 2 相流ハンドブック、1989年5月
- 5) 井上晃・青木成文：管内 2 相流の圧力損失に関する基礎的研究(第4報)、日本機械学会論文集(第2部)、36巻288号、1970年8月、pp.1336~1373
- 6) 世古口言彦：伝熱工学の進展—気液 2 相流(I) 流動現象、養賢堂、1973年、pp.321~326

- 7) 赤川浩爾：気液二相流，コロナ社，1974年，pp.79
 8) 中島 勉・木村英二：スラリーポンプ，配管技術，
 1988年5月，pp.93～102
 9) 都田昌之・原田英二・栗山雅文・猿田真司・今野宏
 卓：円管内垂直上昇気液3相流動，化学工学論文集，
 8巻4号，1982年，pp.380～386
 10) KHATIB, Z. and RICHARDSON, J. F. :
 Vertical cocurrent flow of air and shear
 thinning suspensions of kaolin, *Chem. Eng.
 Res. Des.*, Vol.62, May 1984, pp.139～154

- Q_g : 空気体積流量
 Q_m : スラリー体積流量
 Re_m : スラリのレイノルズ数
 Re_w : 清水のレイノルズ数
 s : 速度比
 u_g : 気相の絶対速度
 u_{gn} : 気液2相流における Nicklin の気相上昇速
 度
 u_l : 液の絶対速度
 V_m : スラリー容積
 V_s : V_m 中の土砂の真容積
 v_m : スラリー流速
 v_w : 清水流速
 α : ボイド率
 β : 空気の体積流量比
 r_m : スラリー平均比重
 r_s : 土砂の真比重
 r_w : 清水の比重
 λ_g : 空気の管摩擦係数
 λ_m : スラリの管摩擦係数
 λ_w : 清水の管摩擦係数
 μ_g : 空気の粘性係数
 μ_m : スラリの粘性係数
 μ_w : 清水の粘性係数
 ρ_g : 空気の密度
 ρ_m : スラリの平均密度
 ρ_w : 清水の密度
 ϕ_l, x : Lockhart-Martinelli のパラメータ
 ϕ_m, X : ϕ_l, x を気固液3相流に拡張したパラメータ
 ΔP_T : 気固液3相流部分の全管路抵抗
 ΔP_h : 気固液3相流部分の平均比重による抵抗
 ΔP_f : 気固液3相流部分の摩擦による抵抗
 ΔP_v : 気固液3相流部分のスラリの加速による抵抗

記号一覧表

- A : 管路断面積
 D : 管径
 g : 重力加速度
 H_T : ポンプ全揚程
 j_g : 3相流または2相流における空気みかけ流速
 j_l : 2相流における液のみかけ流速
 j_m : 3相流におけるスラリーみかけ流速
 j_{m0} : 空気を混入する前のスラリーのみかけ流速
 p_{fm} : スラリーのみが管内を流れたときの単位管長あ
 たりの摩擦損失
 p_{fw} : 清水のみが管内を流れたときの単位管長あ
 たりの摩擦損失
 p_{f2} : 気液2相流の単位管長あたりの摩擦損失
 p_{f3} : 気固液3相流の単位管長あたりの摩擦損失
 p_g : 気液2相流または気固液3相流での空気の体
 積流量で空気が単独で流れた場合の単位管長
 あたりの摩擦損失
 p_l : 気液2相流での液の体積流量で液が単独で流
 れた場合の単位管長あたりの摩擦損失
 p_m : 気固液3相流でのスラリの体積流量でスラリ
 が単独で流れた場合の単位管長あたりの摩擦
 損失

港 湾 技 研 資 料 No.656

1 9 8 9 ・ 9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発 行 所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印 刷 所 有限会社 つばさ印刷技研

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.