

44.6.23

気泡に関する文献調査の要約と 実験計画案 について

昭和28年5月

1. 序言

前日までの経過に基き、一研究部関係技官の協力を得て、現在入手し得る範囲で文献を調査し、気泡の発生と運動に関する従来の知識を吸収し、それをもとにして若干の考察を試み、実験計画の一案を作成した。

2. 文献調査

調査の範囲は化学工学、土木工学、船舶工学の多方面に亘り、又外国文献については物理、機械工学等更に多量に亘つてゐるが、重複等も多いため「参考文献」表を作成した。スクリュー、化学工学系所文献には、単一孔又は多くの孔が垂直管の下部に設けられている場合の気泡の大きさおよび昇速などを扱っており、次第にその要約を示す。

次に土木工学系所文献は空気防振環に関する一連の研究であるが、本委員会が目的とする密着を目的とする浮目すべき文献である。これらの研究では海底におかれた管に多くの小孔を設け、そこから噴出する気泡流を主として乱流拡散現象について考察してあり、その要約を4節に示す。

さらに船舶工学関係については、損壊防止の目的で研究されてゐるのに、空気の薄膜を伴ふ事を目的としてあり、現在の目的に沿つてゐるものがとりわけ「一篇のみ」であり、(S-1)の参考文献中実験報告と目されるものは皆、早急に入手し調査するものである。

最後に相似則の検討等については、泡の拡散の観点からは土木系所および土木系所と関係が熱拡散の研究が盛んであり、又単一泡の運動の観点からは土木系所およびS-2を参考にしたい。

3. 孔からの気泡発生

単一の小孔から上昇する気泡の大きさと速度については (C-1), (C-2) に従来の研究結果が紹介されている。

単一の気泡の上昇速度については 図 1 の如くなり
最大の速度は 35 cm/sec を越えない (C-1)。

ガス流量が大きくなり鎖状につながって出る状態について

$$w_B = \frac{g}{\left(\frac{\pi}{6} \delta^2\right)} \quad (3.1)$$

なる仮定がある。なおこの仮定によれば泡径と流量の間に

$$\delta = \left(\frac{72P}{\pi^2 g \Delta p}\right)^{\frac{1}{5}} g^{\frac{1}{5}} \quad (3.2)$$

なる関係がある (C-2)。図 2 に示す関係はこの式を示す。

泡の大きさについては孔径 d も流量も小さく泡が $35/\text{sec}$ の速度では

$$\delta/d = 1.82 \left(\frac{Q}{g d^2 P}\right)^{\frac{1}{5}} \quad (3.3)$$

$$\left(\delta = .354 (10d)^{\frac{1}{5}} \text{ in cm } 20^\circ\text{C WATER} \right)$$

であるとき、流量に 1 割係なれば流量がふえると (3.2) 式に移行すると言う (図 2 参照)

孔数が管底に多くあった場合の気泡群の上昇速度および大きさについては (C-3), (C-5) の研究があり、単一孔の場合に比して上昇速度も大きさもあまり変化はないと言う。なお (C-4) によれば、高気室の大きさが大きくなると流量の小さい場合気泡径が (3.3) 式の約倍になると言う。

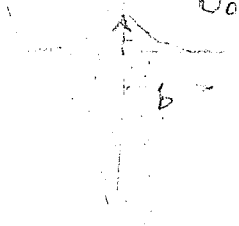
最後に (C-4), (C-5) には流量が多くなると泡の大きさは統計的に対数正規分布で表わす事が出来ると言う。

~~この節で検討する場合~~ の場合の流量は、此等の場合と比して ~~桁違~~ 非常に大きいようであるので、此の点に照して新しく検討が必要であろう。

4. 気泡の拡散

E-系列の研究は前述のように単一気泡には注目しないで、換言すれば“泡は水と一緒に動くものとして”熱の乱流拡散との *Analogy* を用いて、水底に水平にあり、多くの小穴をもつ管からの気泡噴流とその消滅過程に關する実験的・実地応用研究である。

この理論によれば“気泡噴流はくさび状に発達し、その半幅 b は



$$b = 0.28 x \quad (4.1)$$

中心における吐出速度は「 x 方向」一定であつて、

$$U_0 \propto (gQ)^{1/3} \quad (4.2)$$

である。

$$(U_0 \approx 41 Q^{1/3}, \quad U_0, \text{cm/sec}, \quad Q = \text{lit./sec.})$$

である。

今の場合はこれにさらに水平方向の流速が加わるので、熱拡散の *Analogy* で考へる事は理論的には意味のある問題である。

いつれにしても (4.2) 式は物元解析によつて得られる式であつて、今の場合にも水の表面張力の目安として使う事が出来る。

5. 空気吐出量

実用上の問題として、空気カーブに吐出するかどうかの量、圧縮機型式容量等を如何に決定するかの問題がある。

(E-2, 3) によれば、空気流量の問題は、かなり面倒のようであつて、結果は、1.5mmφの穴を1m当り 35.75 3"φの鉄管の穴に於ける圧力損失を10%と見積り、縮流係数Cとして、その値を得ている。

Q (l/sec.m)	5	10	15	20
C	.32	.39	.45	(.47)

充分穴が大きいかつ薄板に於けられたオリフィスのCは約0.6であるが、今の場合のように孔徑より厚肉の管に於けられた穴の場合は、むしろポアゼユ流になるとあるので、詳細な水力学的検討が必要であらう。

なお資料1, 2の図面によれば、空気流量は次の値と推定される。
 圧縮機 回転式 2段 1950 R.P.M. 208HP
 1000 C.F.M. 60PSI (472 l/sec, 4.22 kg/cm²)

孔徑
 キール $\frac{3}{16}$ " (1.7mm) $\times 408 \times 2$
 カース $\frac{1}{32}$ " (1.78mm) $\times 25 \times 3$ (計 966)
 F.W. $\frac{1}{32}$ " (1.78mm) $\times 2$ (計 3.75) $\times 246$
 キール 2mm $\times 2$ 条 2.5
 カース 2mm $\times 3$ 条 2.5
 7mm $\times 2$ 条 1.4
 1m当り空気量 (1.4 kg/sec)

1m当り空気量

Max 44500 cc/sec hole $\frac{3}{16}$ "
 12000 cc/sec hole $\frac{1}{32}$ "
 Max 5 ~ 15 l/sec m

6. 相似則

船の周囲の流場の場で泡が運動する場合の相似則について考えて見よう。

先ず"船の周囲の流場の様子"が"実船と模型船で相似である"場合には、船速を V としてよく知られているように

$$\text{レイノルズ数 } Re = VL/\nu \quad (6.1)$$

$$\text{フルード数 } F = V/\sqrt{gL} \quad (6.2)$$

が一致しなければならぬ。

今の場合は"潜水艦"であるので"フルード"数は一応考慮の外にあととして、レイノルズ"数"をあわせる事も又不可解に近い。一方音の吸収と言う観点から見れば"流れの場"は相似がなくても泡の拡散が同じなればよいと考えられる。

この意味で"とりあえず"レイノルズ"数は" 10^6 以上の値に取る事が望ましい。

次に泡の運動について見れば"まず"簡單の爲に半径 r の1つの泡に働く力は(5-2)

$$\text{浮力 } B = \rho g \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (6.3)$$

$$\text{抗力 } D = \frac{\rho}{2} C_D \pi r^2 (V - V_B)^2 \quad (6.4)$$

$$\text{慣性力 } I = \frac{\rho}{2} \left(\frac{4}{3}\pi r^3 \right) V_B \frac{dV_B}{ds} \quad (6.5)$$

ここに C_D は抵抗係数、 V はその点の流速、 V_B は泡の速度、 ds は泡の軌跡に沿う微小長さとする。

これらの力の釣合状態が相似であれば、泡の軌跡も相似になる筈である。

そこでこれらの力の比の式を用いると、

$$\left[\frac{I}{B} \right] = \frac{V^2}{gL} = F^2 \quad (6.6)$$

となり泡の大きさの關係なくフルード数が等しいければよい。しかし B/D については、

$$B/D = \left(\frac{V_B}{V - V_B} \right)^2$$

ここに V_B は静止流体中の泡の上昇速度であつて、

$$V_B = \sqrt{\frac{8}{3} \frac{gR}{C_D}} \quad (6.7)$$

で与えられるものとする。

あるいは又この W_B を (4.2) 式のような泡群の速度と考える事も出来るが、いづれにせよ

$$[B/D] = W_B/V \quad (6.8)$$

が等しければよい。

このようにして (6.6), (6.8) なる二式が得られるが、泡の運動は相似であると考えられるが両者を同時に満足し、且つ適当な大きいレイノルズ数を得る事は模型では困難である。

さて、3.4 節で考察したように W_B は実験においては V に比しかなり小さい値であるので、模型においてもこの値を充分小さく取る事が出来るならば、フルード数を合せるだけでよい事になる。

従って充分小さい泡を使う事にすれば、泡の軌跡についての相似性の推測は可能であろう。

7. 実験計画案

以上の考察によつて 泡のよう問題点が出て来た。

1. 空気吐出量
2. 気泡の吐出の様相
3. 気泡の船体周りの運動

これらについては大体次の実験が必要であると考えられる。

項目 1.

実用に供するものに船体第1管を用いて、コリプレッサーにて空気を水中に吐出させ、空気流量と温度、圧力の関係を調査する。

又、実船の配管を例として各部の圧力損失を検討し、各部の孔から一様に空気が吐出する為の孔数、径等の決定資料を作成する。

項目 2.

回流水槽等において実用管を用いて空気を吐出させ泡の分布状態を観察し、空気流量、流速と泡の広がり、泡径の分布等の関係を求める。

なお孔は標準型の上蓋に於ける孔の縦は流れに直角とし、それが水平の場合と垂直の場合とを調査するものとする。

又、孔が下蓋に於いている場合には別に円筒(周縁付)を用意し下蓋に孔をあけて実験する。

項目 3.

適当な模型を用意し、実験槽位置より気泡を出して泡の軌跡を観察する。

以上の実験計画等の必要と認められる人等総数は次の通りである。

項目	1	2	3	計
材料費等	管類等	管類等	管類等	
器具費	800	300	300	1400
人件費	300	100	100	500
経費合計	1100	400	400	1900
実施場所	1研3部	防大	防大	
期月	44年11月	44年11月	8月	

予定表

月	7	8	9	10	11	12	1	2	3
1		E		A		S			
2		E	A	A		S			
3		E	A	A		S			

E: 実験

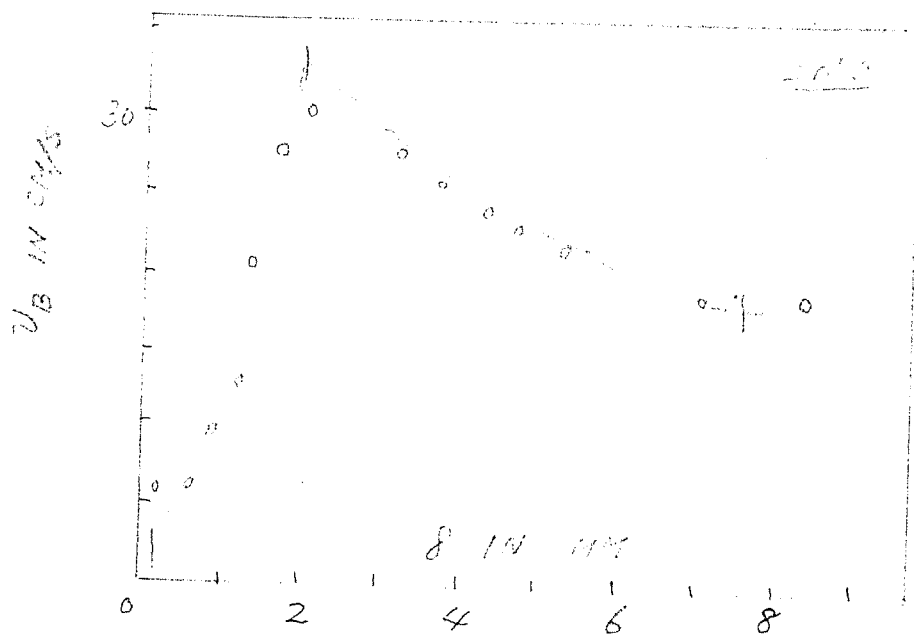
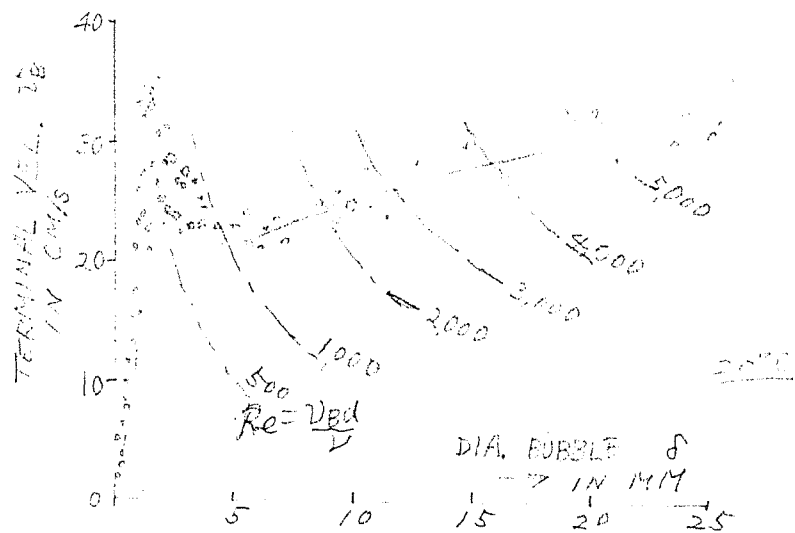
A: データ整理

S: 成果の検討

註) 本案は、1研3部と協議した結果である。

中 / 図

單一氣泡の昇速度



形状

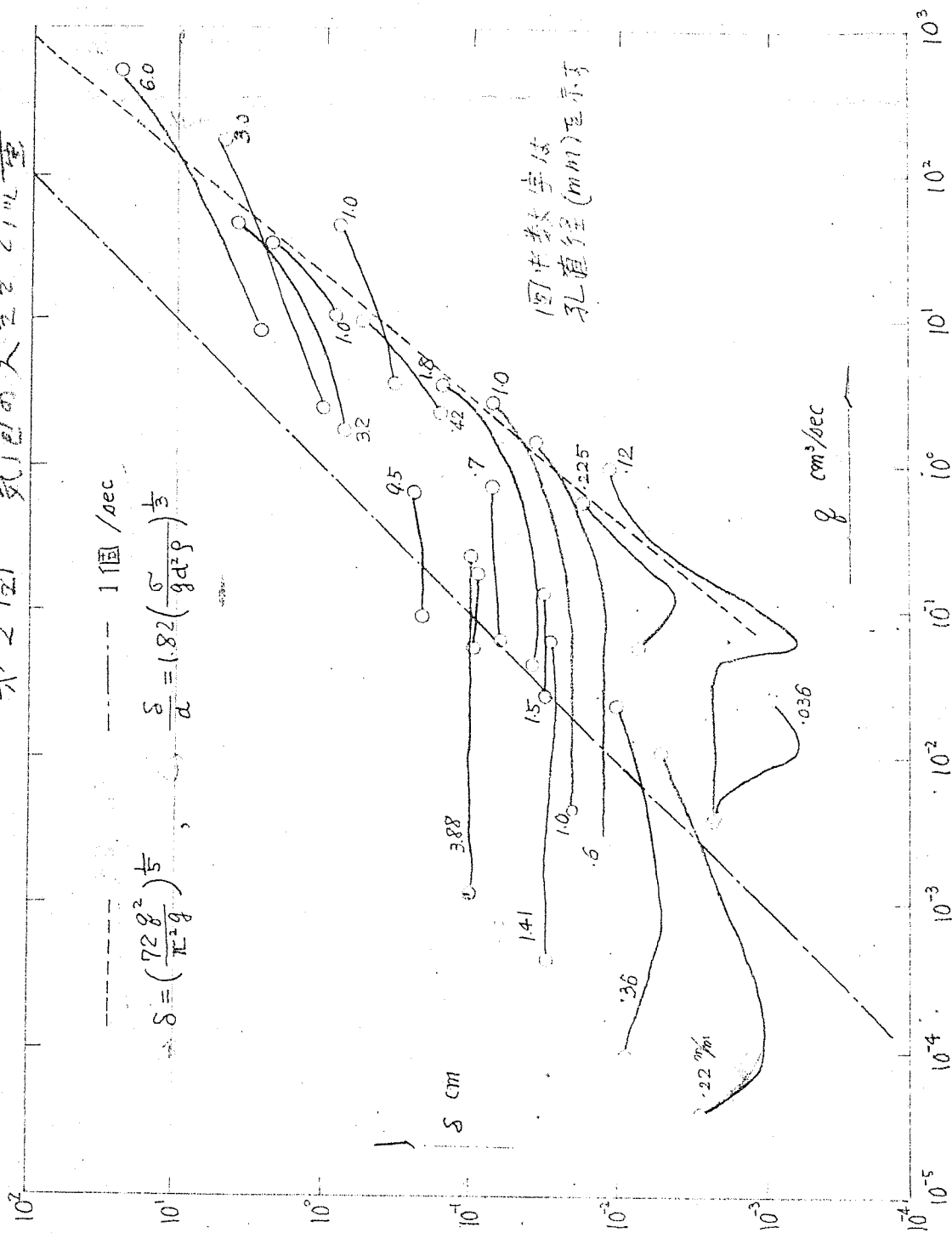
$0 < Re < 400$... 球状

$400 < Re < 1,100$... 変形球 (回転・振動)

$1,100 < Re < 5,000$... 変形 (不安定)

$5,000 < Re$... キ、コ状

表2 図 気泡の大きさとの流量



参考文献

11

番号	著者	表題	出所	年
A-1	Saneyoshi	Measurement of Absorption " Reflection of Bubbles	Bull. Tokyo Inst. Tech. Ser. B	1951
A-2	N. D. R. C.	The physics of sound in the Sea,	Sea. Tech. Rep. vol. 8	1946
C-1	矢木	単一気泡の形状と運動について	化学工学 23, 181	1959
C-2	"	単一孔より気泡の生成について	" 24, 603	1960
C-3	吉留	水中に於ける気泡群の上昇速度について (多孔板を用いた場合)	" 27, 27	1963
C-4	矢木, 前田	単一オリスより射出される気泡の速度について	" 27, 147	"
C-5	" "	多孔板より "	" 402	"
E-1	(栗原)	空気の物理的研究について	九文応研報 5,	昭和27年
E-2	"	" (伊豆島に於ける物理実験)	" 7	30
E-3	"	" (端島に於ける物理実験)	" 9	31
E-4	(栗原, 栗谷)	" (洞窟に於ける物理実験について)	" 9	"
E-5	(栗原)	" (洞窟に於ける物理実験)	" 12	33
E-6	(")	" (洞窟に於ける物理実験について)	" 13	34
S-1	Lumley	The reduction of skin friction. Proc. 5th Symp. of Naval Hydrodynamics		1968
S-2	Johnson & Hazen	The influence of the shape of Gas Nozzle on Cavitation Number of N.H.D.	Proc. 6th Symp.	1969

物性表

12

水の表面張力特性 (4) 空気中

温度 (°C)	0	10	20	30	40	50
σ (dyne/cm)	75.64	74.22	72.75	71.18	—	69.91
μ (g/cm·s)	17.94 ^{20°C}	—	16.9	8.10	6.54	—
ρ (g/cm³)	999.84	999.73	998.23	997.05	995.7	—
$\nu = 1/\rho$ (cm³/g)	0.0010002	0.0010003	0.0010018	0.0010028	0.0010043	—
σ/ρ (cm²/s²)	75.64	74.22	72.75	71.18	68.0	—

$$1 \text{ 気圧} = 1.01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 1.01325 \times 10^6 \text{ dyne/cm}^2 = 14.7 \text{ PSI}$$

塩水の表面張力 (10°C)

$$\text{NaCl} = 1 \text{ g/mol} = 58.54$$

濃度 (g/mol)	0	0.5	1.0	0.15
σ (dyn/cm)	75.577	75.273	75.785	75.872

塩水の密度 (4°C)

濃度 (g/l)	1	3	6	6
密度	1.00147	1.00107	1.00058	1.00007

$$\text{水の表面張力特性} \quad \sigma = \frac{1}{248} \sqrt{\frac{33P_0}{\rho}}$$

$$\sigma = 332/\delta \quad (1 \text{ 気圧})$$

圧力 (kg/cm²)	1	5	10	50
λ	150 ^{mm}	30	15	3
1	.66	.130	.032	.012
2	.94	.186	.046	.018
5	1.46	.300	.074	.030
10	2.08	.420	.104	.042