

水平管内を流れる二酸化炭素気液二相流の観察結果

長 田 修*・吉田 紘二郎*

A Visual Study of Two-Phase Carbon Dioxide Flow in a Horizontal Tube

By

Osamu NAGATA and Kojiro YOSHIDA

Abstract

Total flooding high pressure carbon dioxide extinguishing systems are usually used to extinguish fires occurred in cargo holds or engine rooms of ships. Carbon dioxide in the high pressure storage containers or through the distribution piping is in the state of a mixture of liquid and vapor. The energy loss due to friction in the pipeline causes a reduction in pressure and the liquid carbon dioxide boils so as to produce a mixture of liquid and vapor. As the pressure drops, the specific volume of carbon dioxide mixture becomes larger. The pressure or temperature drop is non-linear and increases rapidly near the end of the pipeline.

NFPA code¹⁾ shows the equation of the carbon dioxide two-phase flow to determine the pressure drop in the pipe line. But it defines only the ideal homogeneous two-phase flow.

Before researching for the equation of carbon dioxide two-phase flow in the pipeline, the observations of carbon dioxide two-phase flow in the horizontal glass tube were made with camera, stroboscope and high-speed camera, and the flow regime maps composed of several different carbon dioxide flow patterns were produced. The inner diameter of test section is 10.9mm. Flow rates include the range of 0.0025 to 0.55 kg/sec, and pressures are from 1.1 to 44 kg/cm².

The results were compared with air-water or steam-water two-phase flow by Alves²⁾, Baker³⁾ and others. The characteristics and tendency of the flow regime curves coincided rather well, although carbon dioxide was selected as two-phase fluid.

1. ま え が き

火災発生時、炭酸ガスはその窒息および冷却作用により、可燃性液体や電気、機械装置を消火する。船舶の固定式高圧炭酸ガス消火装置は貨物艙および機関室等の密閉区域内の消火に使用される。高圧容器内の二酸化炭素（以下 CO₂ と略）（本船シリンダールーム内に多数設けられている。）は、100 m 以上の配管内を流れ、所定時間内に火災区域に放出されなければなら

ない。この際 CO₂ は容器下部のサイフォン管より、液体状態で管内に放出され、下流に行くに従い漸次気化する。配管計画が適切でない場合、流量の不足あるいはドライアイスが発生し、管内閉塞の危険が生じる。

このように複雑な CO₂ 気液二相流の流量式については、NFPA の規準があるが、CO₂ 気液を完全に均一化した極めて特殊な理想状態のみを考えている。従って CO₂ 二相流の流量式を求めるための第一段階として、水平管内 CO₂ の流動状況を克明に調べ、各種

* 大阪支所 原稿受付：昭和47年9月1日

の流動状態領域図を作成した。

2. 二相流について

気液二相流はボイラー、冷凍機、化学機械の接触反応装置、沸騰水型原子炉等多くの装置で見られ、極めて応用範囲の広い分野である。これを研究部門的に大

$\left\{ \begin{array}{l} \text{管内に沿い気液比} \\ \text{速度が異なる場合} \\ \\ \text{管長に沿い一定の} \\ \text{場合} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{外部との熱の授受により} \\ \text{蒸発(凝縮)していく場合} \\ \\ \text{圧力降下による自己蒸発} \\ \text{流(断熱变化的)} \end{array} \right.$	<ul style="list-style-type: none"> ○ 貫流式ボイラーの蒸発管 (H₂O) ○ ボイラーのブロー管 (H₂O) ○ 冷凍機の絞り用毛細管(フロン) ○ 消火装置等 (CO₂, N₂, H₂)
		<ul style="list-style-type: none"> ○ 気体と液体の流体が異なる場合 (等温变化的) ○ 空気-水・油

本研究は CO₂ 自己蒸発流について水平管および曲りの圧力損失を求めることを最終目的としているが、圧力損失は管内の流動様式により異なる。

管内の流動状況は流体の物性値(気液の比重、表面張力、粘性係数等)、管径、長さ(助走距離)、方向(垂直か水平か)、全流量、圧力、気液比、熱的条件等により異なる。流動様式の研究としては空気-水(または油等)については Alves²⁾, Baker³⁾, Johnson⁴⁾, Griffith⁵⁾, Al-Sheikh⁶⁾, 勝原⁷⁾, 中西⁸⁾, 佐藤^{9,10)} の研究があり、水蒸気-水については Goldmann¹¹⁾, Suo¹²⁾, 佐藤¹³⁾, R-12 および 22 については Zahn¹⁴⁾, Mikol¹⁵⁾, N₂ については Laverty¹⁶⁾ の研究がある。

別すると次のようになる。

- (1) 流動様式, (2) 気液比, 相対速度, (3) 圧力損失
 - (4) 曲り, オリフィス, パルプ内の流れ, (5) 熱伝達
- 更に二相流は水平管と垂直管に分けられ, 更に蒸発(または凝縮), 加熱の有無等により次の如く分類される。

3. 実験装置

実験装置を Fig. 1~Fig. 2 に示す。高圧容器内に飽和状態で封入された CO₂ を定常に保つため、容器は大容量のものを使用し、水槽に全没させた。流出用サイフォン管は高圧容器の下部まで挿入し、ポンペ直後の管内 CO₂ は飽和液体となるようにした。管は内径 10.9 mm の鋼管を使用し、観測部には同径の硬質ガラス管を使用した。実際は安全、除霜(管内は低温になり、ガラス管外面に霜が付着する。)のため a) 観測部を二重管とし、観測管外側の管内に常温のエチルアルコールを 3.5 kg/min で循環させた場合と b) 530×200×100(mm) の乾燥空気入りケース(前面ガラス)に観測管を収めた場合について実施した。観測

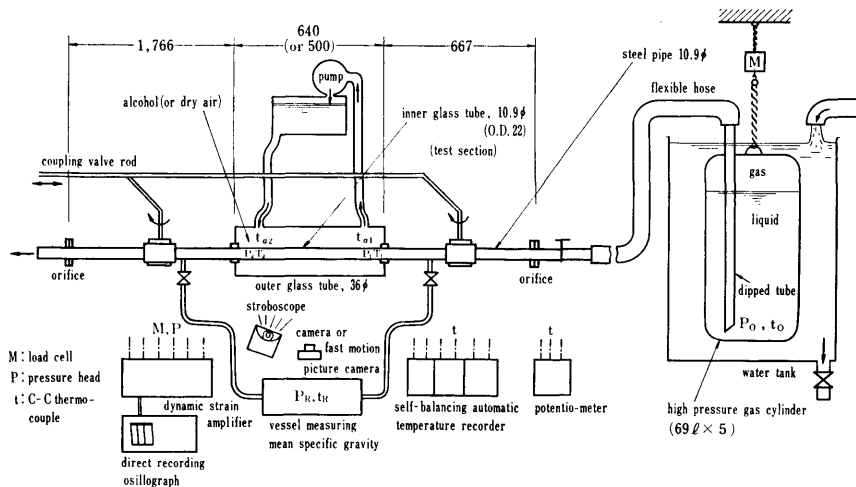


Fig. 1 Schematic diagram of test apparatus

管前後にはオリフィスを設けその径 (0.5~8.0 mm) および組合せを変化させることにより、流量および気液比を変化させた。管内の流動状況はカメラ、ストロボ (1/3000秒) および高速カメラ (5000 PPS) により観察した。その詳細を Fig. 3 に示す。流量 (即ち容器重量変化) および圧力の計測はストレインゲージ式変換器を使用し、温度の計測は C-C 熱電対 (素線径 0.16 mm, 保護管外径 1 mm) を使用し、それぞれ連続的に自動記録させた。なお管内の平均比重を求めるため、観測管前後にボール弁 (全開時抵抗のないもの) を設け連動させた。即ち流動中の CO₂ を弁により瞬時に

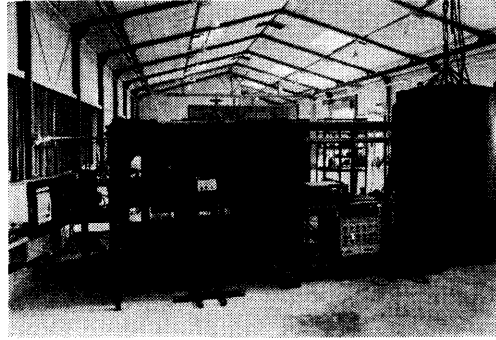


Fig. 2 Photograph of test apparatus

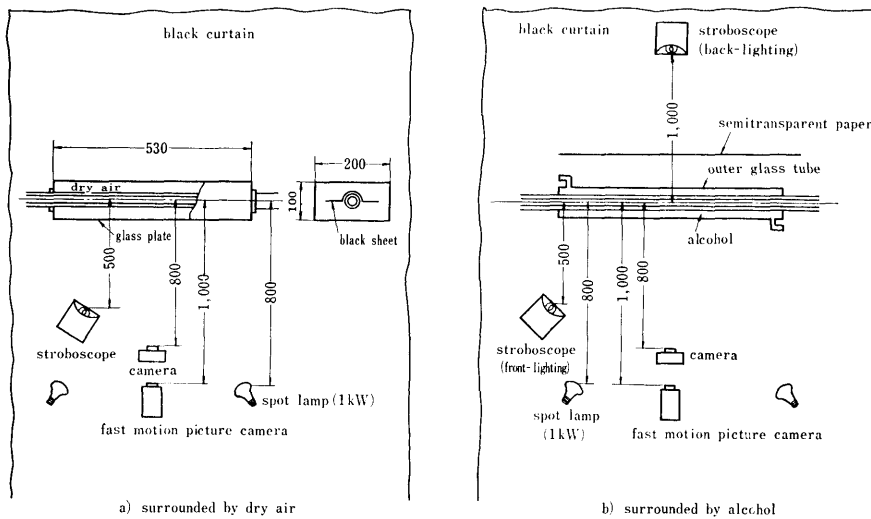


Fig. 3 Plan view of test section

測定管内に閉じ込め、これを比重測定槽に移し気化させ、比重測定槽内の圧力および温度を測定した。

4. 計測および計算方法

Table 1 に記号を示す。Fig. 4 の CO₂ 二相流を Fig. 5 のごとく管内に閉じこめた時、観測部内の容積、CO₂ 平均比重量を V_0 , γ_{m1} とし、実験前の比重測定槽内の容積、CO₂ 比重量を V_1 , γ_1 とする。観測部と比重測定槽の連結コックを開けると観測部の CO₂ は比重測定槽に流れ、CO₂ 液体は全部気化して比重は γ_2 に変化する。即ち

$$\begin{aligned} \gamma_{m1} &= (\gamma_2(V_0 + V_1) - \gamma_1 V_1) / V_0 \\ &= \gamma_2 + (\gamma_2 - \gamma_1) \frac{V_1}{V_0} \end{aligned} \quad (1)$$

一方封入 CO₂ 平均比重量は定義より

$$\gamma_{m1} = \gamma_g f_g + \gamma_l (1 - f_g)$$

故にボイド率

$$f_g = \frac{\gamma_l - \gamma_{m1}}{\gamma_l - \gamma_g} \quad (2)$$

しかるに気体状態式より

$$\frac{P}{\gamma} = ZRT \quad (3)$$

(1) (2) (3) 式より cock 閉止時および開放時における観測部比重測定槽内の温度および圧力を計測すれば γ_{m1} および f_g は計算により求まる。計算に使用した CO₂ の飽和蒸気圧、飽和液および蒸気の比重量ならびに CO₂ ガスの圧縮係数^{17,18)} を 付図-1~付図-3 に示す。ガス流量比 x の値は f_g が 0.7 より小なるときは (4) 式 (Bankoff)¹⁹⁾ を 0.7 より大なるときは (5) 式 (Levy)²⁰⁾ を用いた。(f_g と x の関係を示したものとして、他に Martinelli²¹⁾, 井上²²⁾ 等の論文がある。

Table 1 Nomenclature

T	absolute temperature		(°K)
P	pressure		(kg/m ²)
t	temperature		(°C)
W	flow rate	$W_g + W_l$	(kg/sec)
D	inner diameter of tube		(m)
A	sectional area		(m ²)
G, G_g, G_l	mass velocity	$W/A, W_g/A, W_l/A$	(kg/sec·m ²)
f_g	void fraction		(m ³ /m ³)
x	gas flow quality	W_g/W	(kg/sec/kg/sec)
V_g, V_l	velocity	$G_g/\gamma_g, G_l/\gamma_l$	(m/sec)
V_m	mean velocity	$V_g + V_l$	(m/sec)
γ_m	flow average specific gravity	G/V_m	(kg/m ³)
γ_{m1}	local average specific gravity	$f_g\gamma_g + (1-f_g)\gamma_l$	(kg/m ³)
V_{m1}	local average velocity	G/γ_{m1}	(m/sec)
β	vapor volumetric flow ratio	AV_g/AV_m	(m ³ /sec/m ³ /sec)
N_{Fr}	two-phase Froude number	V_m^2/gD	
	subscript, g	carbon dioxide gas	
	l	carbon dioxide liquid	
	m	mean value of two-phase	
	s	saturation	

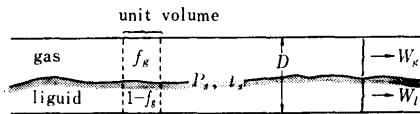


Fig. 4 Two-phase flow

$f_g \leq 0.7$

$$\frac{1}{x} = 1 - \frac{\gamma_l}{\gamma_g} \left(1 - \frac{K}{f_g} \right) \quad (4)$$

$$K = 0.71 + 0.0001P$$

P : 圧力 (psia)

$1 \geq f_g > 0.7$

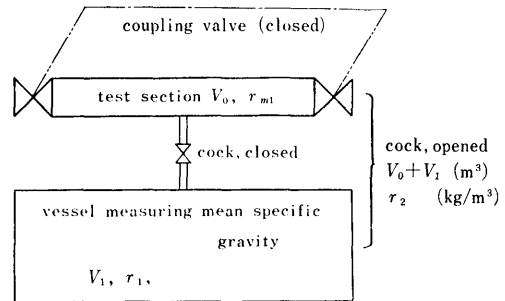


Fig. 5 Measurement of mean specific gravity

$$x = \frac{f_g(1-2f_g) + f_g \sqrt{(1-2f_g)^2 + f_g [(2\gamma_l/\gamma_g)(1-f_g)^2 + f_g(1-2f_g)]}}{(2\gamma_l/\gamma_g)(1-f_g)^2 + f_g(1-2f_g)} \quad (5)$$

5. 実験結果

管内の流動状況を Fig. 6 および Fig. 7 に示す。水平管内二相流動状態は複雑でその判定も厳密なものではない。また研究者によりその方法も異なるが、便宜上次の9種に分類した。なお写真は同一現象につき逆光の場合および順光の場合のそれぞれにつき各2枚宛撮影した。

a) 層状流 (stratified)

液体と気体の境界は波がなく、静かに流れている状態であり、全流量が小なるとき発生する。

b) 波状流 (wavy)

層状流より全流量が増すと、気液間の速度差あるいは脈動により、波が発生する。液面に小気泡が浮遊している場合がある。

c) 乱れ波状流 (turbulent wavy)

波状流より流量およびボイド率が増加した場合に生じ、液面に気泡が多数生じ不規則に乱れる。液面の気泡は一部気体中に舞い上がる。

d) スラグ流 (slug)

波状流よりボイド率が低下し、全流量が増加すると、波頂は管の上壁に到達し、管上部の気体は不

a) stratified



b) wavy



c) turbulent wavy



d) slug



e) annular



f) bubble



g) slug-annular-bubble transition



h) spray



i) dry ice and gas



Fig. 6 Photographs of typical carbon dioxide two-phase flow (back-lighting)

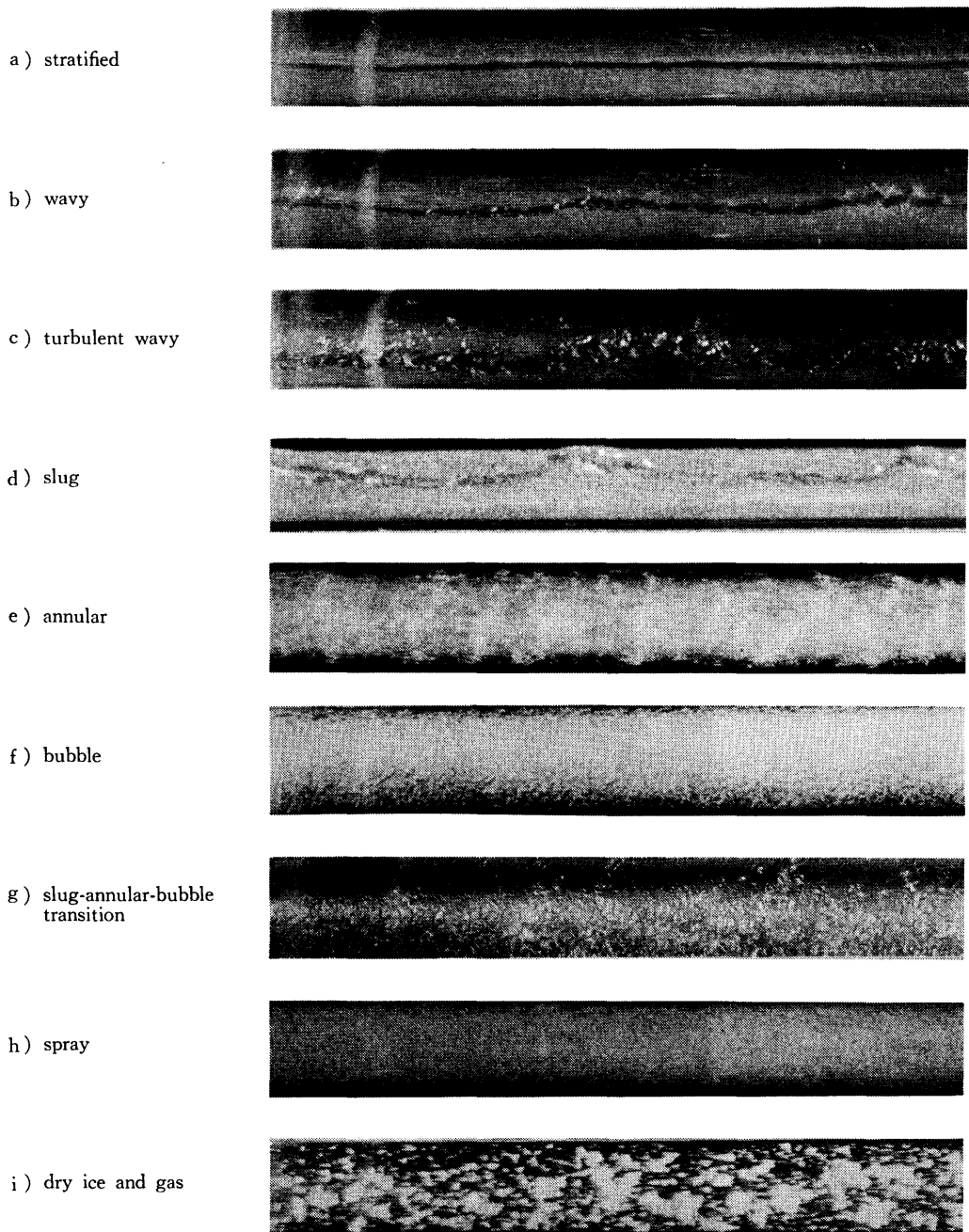


Fig. 7 Photographs of typical carbon dioxide two-phase flow (front-lighting)

Table 2 Test result

Run No.	flow pattern	G	t	γ_{m1}	f_g	x	V_m	β	N_{Fr}
8	St	30	-0.6	338	.707	.336	0.1	.832	0.12
9	St	70	-18.2	319	.727	.283	0.4	.881	1.50
10	Wa	90	-34.9	254	.791	.295	0.9	.936	8.00
11	WaT	120	-50.6	171	.866	.347	2.4	.972	53.5
14	DI	90	-69.2	18	.992	.845	13.3	.999	1650
15	St	120	4.9	445	.574	.268	0.4	.744	1.30
16	Wa	220	-2.5	541	.469	.133	0.5	.617	2.80
17	WaT	260	-15.8	433	.607	.205	1.1	.815	11.40
18	WaT	340	-26.8	302	.744	.269	2.5	.904	56.0
19	WaT	270	-33.4	295	.752	.252	2.3	.918	47.5
20	An	390	-42.5	213	.828	.317	5.4	.956	270
21	An	290	-54.3	174	.862	.321	6.3	.974	373
22	DI	320	-62.0	24	.991	.854	28.8	.999	7670
23	Sp	5820	-18.7	277	.770	.334	40.0	.905	14900
25	Sp	4780	-2.4	661	.330	.068	8.4	.434	648
27	Wa	290	5.6	727	.208	.046	0.4	.270	1.71
28	Bu	1310	4.1	708	.241	.053	2.0	.313	37.7
29	Bu	1620	4.3	883	.015	.002	1.8	.019	31.5
30	Sp	3520	-1.6	708	.270	.053	5.5	.356	284
32	Sl	810	4.8	892	.003	.001	0.9	.004	7.59
33	St	100	5.1	560	.427	.137	0.2	.555	0.429
34	St	80	4.8	444	.575	.267	0.3	.744	0.593
35	Wa	390	4.1	708	.241	.053	0.6	.314	3.27
36	Sl	720	3.3	869	.041	.007	0.8	.054	6.49
37	Sl—An	1150	0.5	843	.094	.015	1.4	.123	18.2
38	Sl—Bu	1120	-1.2	787	.173	.030	1.5	.228	21.2
39	Bu	1760	-6.8	629	.377	.075	3.4	.500	106
40	Sp	2180	-14.0	450	.586	.187	8.3	.787	642
41	Sp	2150	-21.7	359	.686	.386	18.3	.930	3100
42	An	1230	-38.7	205	.836	.346	16.4	.956	2490
43	St	20	3.0	423	.603	.298	0.1	.783	0.070
44	Wa	200	1.5	633	.346	.083	0.4	.452	1.29
45	WaT	440	-2.5	678	.309	.061	0.7	.406	5.18
48	Sl—An	860	-9.3	593	.423	.087	1.8	.563	31.1
49	Sl—An	1020	-16.2	459	.580	.169	3.8	.780	134
50	An	1020	-27.2	305	.741	.263	7.4	.904	501
51	An	1190	-37.7	228	.815	.317	13.9	.948	1800
52	An	1120	-44.0	136	.898	.456	23.3	.977	5030
53	Sp	4100	-26.8	269	.776	.307	33.3	.920	10300
55	Wa	350	4.3	671	.285	.068	0.6	.372	3.02
56	Sl	670	3.2	898	.006	.001	0.7	.008	5.12
57	Sl—An	1160	1.5	849	.080	.012	1.4	.105	18.1
58	Sl— Bu— An	1250	0	678	.298	.062	2.1	.391	40.3
60	Bu	2660	-0.4	684	.293	.060	4.4	.385	178

Table 2 Continue

Run No.	flow pattern	G	t	γ_{m1}	f_{σ}	x	V_m	β	N_{Fr}
61	Sp	3320	-8.1	522	.501	.133	8.9	.666	729
62	Sp	4110	-28.4	248	.795	.329	37.3	.931	12900
63	Wa	180	6.1	450	.566	.268	0.6	.735	2.82
64	Wa	240	3.0	683	.281	.069	0.4	.366	1.35
65	WaT	420	-5.0	614	.391	.085	0.8	.518	6.42
66	WaT	550	-13.5	498	.535	.139	1.7	.718	25.9
67	WaT	580	-19.0	432	.610	.196	2.6	.825	63.1
68	An	600	-28.8	334	.714	.230	4.0	.892	147
69	An	620	-41.2	230	.813	.297	7.8	.950	566
70	An	690	-50.7	162	.873	.362	14.7	.974	1990
71	Sl	620	3.0	684	.277	.062	1.0	.362	9.38
72	Wa	260	4.7	658	.301	.074	0.4	.391	1.76
73	St	40	5.7	352	.693	.541	0.2	.900	0.422
74	Sl—Bu	920	-5.8	530	.487	.133	2.3	.645	50.5
76	Bu	2090	5.6	797	.118	.023	2.7	.153	68.6
77	Sp	2850	2.9	673	.290	.067	4.7	.380	208
78	Sp	3520	-5.7	518	.501	.144	9.4	.665	818
79	DI	140	-58.7	58	.969	.655	7.9	.996	577
80	DI	50	-59.0	0.6	1.0	1.0	3.8	1.0	136
81	An	2590	-36.3	184	.856	.397	35.6	.960	11800
82	An	1560	-42.0	123	.910	.503	33.1	.979	10100
83	DI	530	-63.5	19	.993	.892	55.3	.999	28300
84	DI	170	-72.6	0.8	1.0	1.0	37.4	1.0	13000
86	Sp	3440	5.6	885	.002	0	3.9	.003	141
87	Bu	2400	6.9	978	0	0	2.7	0	69.2
88	Bu	1170	7.8	1014	0	0	1.3	0	16.5
89	Sl	590	8.6	985	0	0	0.7	0	4.34
90	Wa	290	8.9	862	.004	.001	0.3	0.005	1.00
91	St	50	9.1	604	.353	.111	0.1	.455	0.090
92	St	70	9.1	580	.386	.131	0.1	.502	0.170
93	Wa	280	10.4	931	0	0	0.3	0	1.00
94	Wa	230	0.8	643	.336	.078	0.4	.440	1.60
95	St	40	8.6	630	.320	.094	0.1	.413	0.05
96	Wa	240	-12.4	497	.534	.142	0.7	.715	4.80
97	WaT	260	-32.7	326	.722	.223	1.9	.903	34.3
98	St	70	9.7	583	.377	.122	0.1	.485	0.19
99	Wa	270	8.0	827	.066	.013	0.3	.085	1.03
100	Sl	570	5.4	778	.145	.029	0.8	.188	5.40
101	Sl—An	850	-2.4	634	.359	.079	1.6	.474	23.3
102	An	1110	-26.2	341	.706	.231	6.9	.884	445
103	An	1040	-38.8	241	.803	.295	11.8	.944	1300
104	DI	240	-65.3	20	.992	.854	27.6	.999	7050
105	DI	110	-59.9	13	1.0	1.0	10.0	1.0	936

- 連続になる。
- e) 環状流 (annular) 界面表面張力が重力の影響よりも大きくなると、液体は管壁に沿い水膜を形成し、気体は管中央の高速部を流れる。一般にボイド率が大なる場合に生じる。
 - f) 気泡流 (bubble) 液体中に小気泡が主として管の上方に無数に存在する。比較的全流量が大なる場合に生じる。
 - g) スラグ、環状、気泡、遷移域流 (slug-bubble-annular transition) スラグ流、環状流および気泡流の内2者あるいは3者の中間的な流れで、複雑な流動状況を示す。

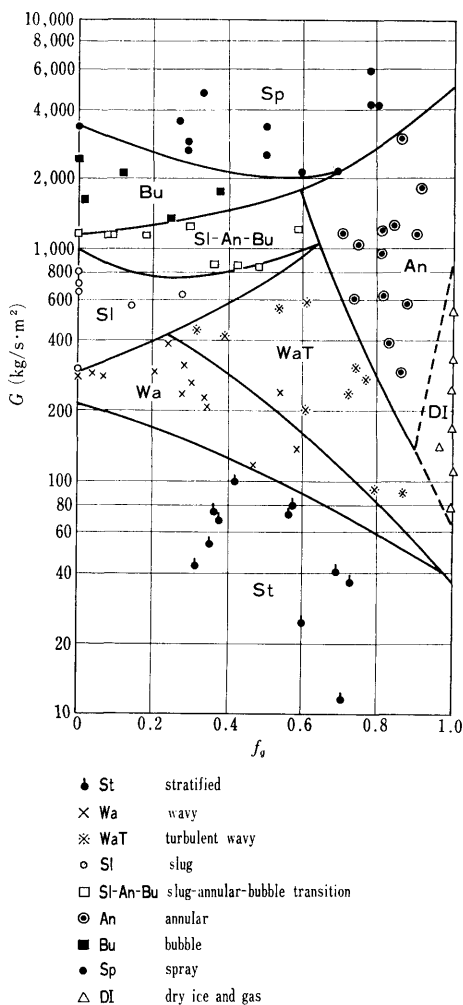


Fig. 8 Flow regime map ($f_g \sim G$)

- h) 噴霧流 (spray) 気泡流あるいは環状流より更に全流量が増すと気液は均一に混合されスプレイ状になる。
- i) 固一気流 (dry ice and gas) 管内圧力が 5.28 kg/cm² (温度 -56.6°C) 以下になると CO₂ は気体と固体 (ドライアイス) の二相流になる。速度および管内圧力が小なるときはドライアイスの粒径は一般に大きくなり、管内閉塞の危険が生じる。流量大なるときは微小粉末になり、管内全体に拡がる。

実験結果を Table 2 に示す。No. 8~No. 84 はアルコール入り二重管を使用した場合であり、No. 86~No. 105 は乾燥空気入りケースに観測管を収めた場合である。いずれの場合も外部流体より観測部への伝熱は少なく共に断熱状態とみなしてさし仕えない。Johnson⁴⁾, Suo¹²⁾, 佐藤¹³⁾ は伝熱量を 10⁶ kcal/hr·m² 程度まで増加させフローパタン領域の変化を検討しているが断熱時のフローパタン領域との差はあまり認められない。

Fig. 8~Fig. 13 に流動状態領域図を示す。Fig. 8

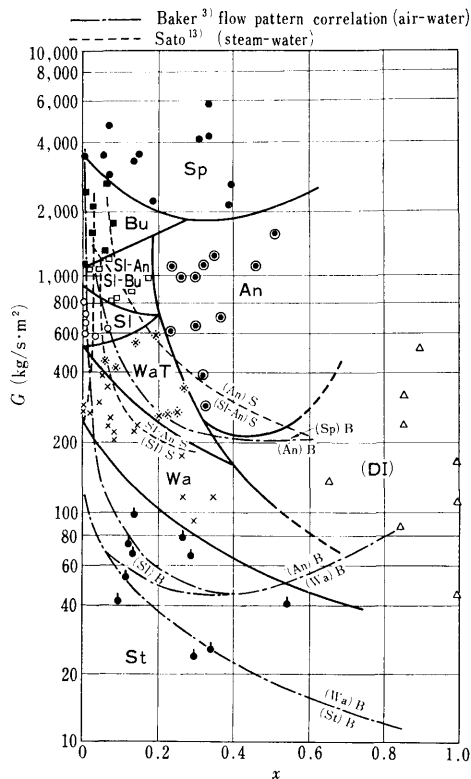


Fig. 9 Flow regime map ($x \sim G$)

は流動状態をボイド率と全流出速度の座標に表わした実験結果であり、Fig. 9 は気体流量比率と全流出速度で表わした場合である。鎖線は Baker⁹⁾ による値で、管径の異なる空気と水の水平管二相流について大気圧下で実験をしたものである。本実験結果と傾向は良く一致しているが、領域は G が小なる方へ移動している。これは管径および流体の違いによるものと思われる。点線は佐藤¹⁰⁾ が水と水蒸気について、15×10 mm の長方形断面垂直上向き被加熱管で実験した平均領域図で、環状流域は良く一致している。

Fig. 10 は無次元化するため、二相流フルード数と気体体積流量比で表わしたもので、Zahn¹⁴⁾ は R-22 について同様の領域図を作成しているが、本実験とは一致しない。鎖線は中西⁹⁾ が空気と水について内径 25 mm の水平管で実験したもので、環状流域および気泡流域はよく一致しているが、同じ文献による 50 mm, 100 mm の管の場合は本実験と一致しない。

Fig. 11 は気体および液体の各速度で表わした場合で、Alves²⁾ の空気と水（または油）による 25 mm の水平管の結果を鎖線で示す。気泡流域および環状流域

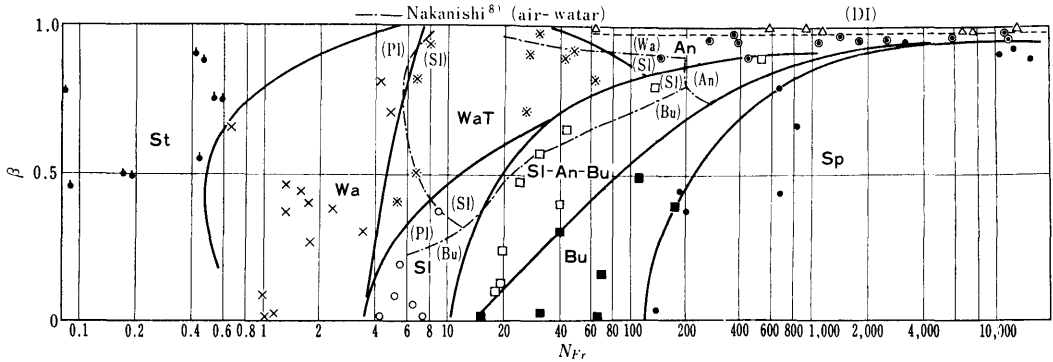


Fig. 10 Flow regime map ($N_{Fr} \sim \beta$)

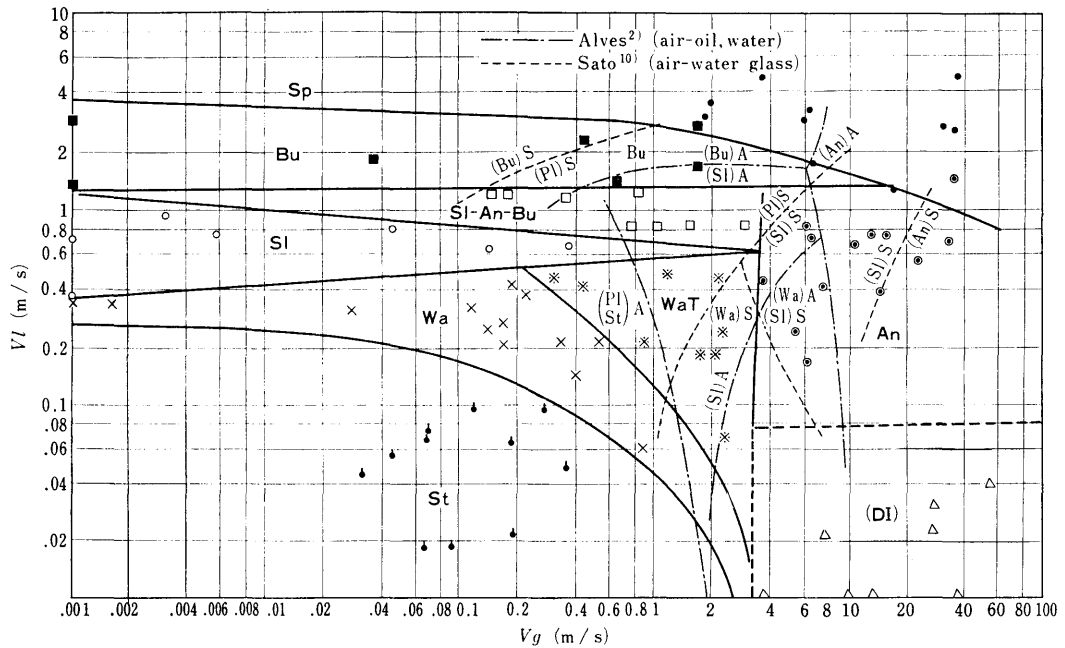
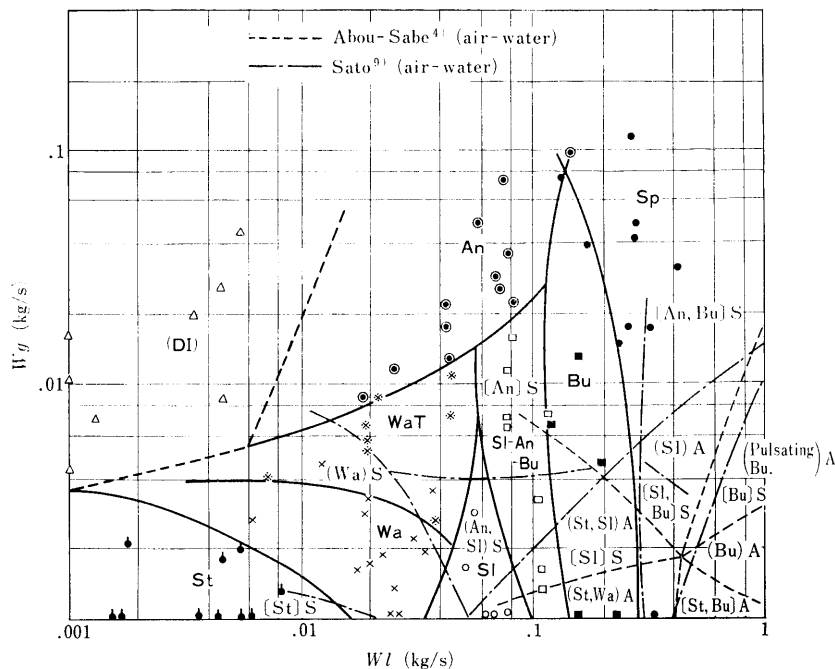
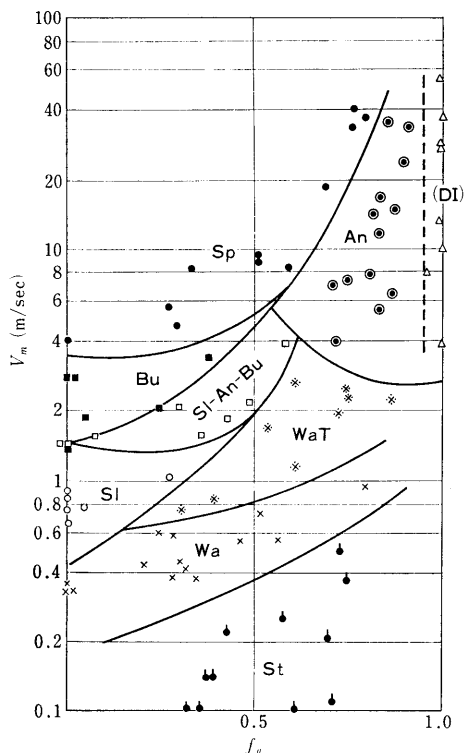


Fig. 11 Flow regime map ($V_g \sim V_l$)

Fig. 12 Flow regime map ($W_l \sim W_g$)Fig. 13 Flow regime map ($V_m \sim f_g$)

は良く一致している。中西⁸⁾は 25 mm の水平管のとき Alves と同じ領域図を示しているが、実験値は不明である。佐藤¹⁰⁾は 18.5 mm の水平管について、空気と水ガラス水溶液により実験をしている。Fig. 11 の点線は水ガラスの体積率が 27.3%、水ガラス水溶液の粘度 4.9 C.P.、比重 1.19 の場合の実験結果である。

Fig. 12 は気液それぞれの流出量で表わした場合で、点線は Abou-Sabe⁴⁾ の空気と水による 25 mm の水平管の実験結果で、領域は本実験よりも液体流出量が大なる方向に移動している。鎖線は佐藤⁹⁾の空気と水による 18.5 mm の水平管の実験結果で、気泡流域およびスラグ流域は本実験値領域よりも右に移動しているが、比較的良く一致している。

Fig. 13 はボイド率と二相流平均速度で表わした領域図である。

6. まとめ

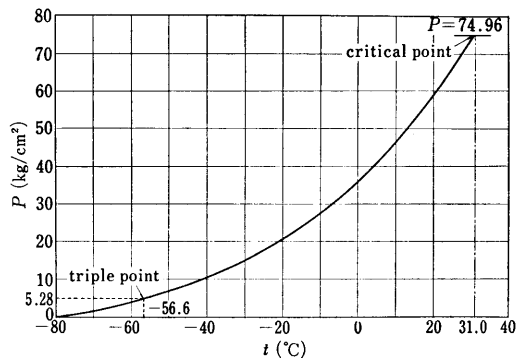
水平管内を流れる CO_2 気液二相流の流動状態領域図を座標の異なる 6 種 (Fig. 8~Fig. 13) について求めた。Al-Sheikh⁶⁾ は空気と水の水平管内二相流について、多数の文献を整理し、領域図を求めた。Quandt²³⁾ は流動状態の数式化を試み、水と蒸気の領域図につい

述べている。しかしいずれも特定の流体について述べたものであり、過去の実験も殆ど空気と水、あるいは水と水蒸気に限られている。従って物性値の異なる他の流体についても種々実験をおこない、流動状態領域図を一般化（例えば無次元化）するための研究が必要である。

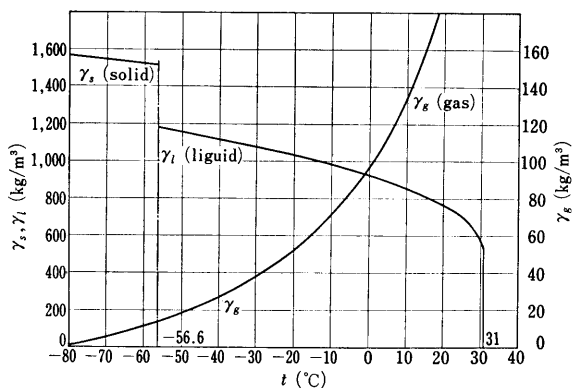
なお、本研究ではペーカー線図あるいは Quandt²³⁾の式との比較、および径が異なる場合の影響について調べなかったが、今後の研究課題である。

参 考 文 献

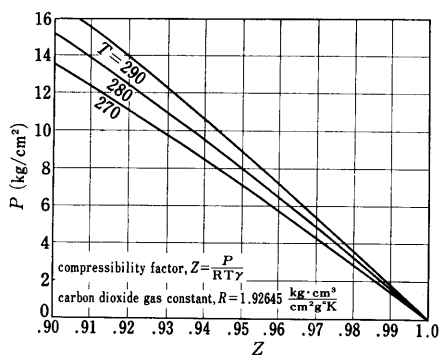
- 1) Carbon Dioxide Extinguishing Systems, NFPA No. 12
- 2) G.E. Alves, "Cocurrent Liquid-Gas Flow in a Pipe-Line Contactor", Chem. Eng. Progress, 50.9, 1954, p. 452
- 3) O. Baker, "Simultaneous Flow of Oil and Gas", Oil and Gas Journal, Vol. 53, July, 1954, pp. 185~193.
- 4) H. A. Johnson and A. H. Abou-Sabe, "Heat Transfer and Pressure Drop for Turbulent Flow of Air-Water Mixtures in a Horizontal Pipe", Trans. ASME, August, 1952, pp. 977~987.
- 5) P. Griffith and G.B. Wallis, "Two-Phase Slug Flow", Trans. ASME, Series C, August, 1961, pp. 307~320.
- 6) J.N. Al-Sheikh, D.E. Saunders and R.S. Brodkey, "Prediction of Flow Patterns in Horizontal Two-Phase Pipe Flow", C. J. Chem. Eng. vol. 48, February, 1970, pp. 21~29.
- 7) 勝原, "気水二相流の流動様式", 機械の研究 第11巻第2号, 1959, pp. 21~26.
- 8) 中西, 古川, 門田, 長畑, "水平蒸発管の口径と流動様式について" 日立造船技報 第29巻 第4号 (昭 43-11), pp. 47~51.
- 9) 佐藤 "気液二相流" 「化学工学」講習会テキスト 1964 化学工学協会関西支部
- 10) 佐藤, 中西, 橋本, 古屋 "管内気液二相流動に関する基礎的研究" 九州大学化学機械工学科1965年卒業論文
- 11) K. Goldmann, H. Firstenberg and C. Lombardi, "Burnout in Turbulent Flow—A Droplet Diffusion Model", Trans. ASME, Series C, May, 1961, pp. 158~162.
- 12) M. Suo, A.E. Bergles, E.F. Doyle, L. Clawson and P. Goldberg, "Investigation of Boiling Flow Regimes and Critical Heat Flux", Dynatech Report No. 517, March, 1965, NYO-3304-3
- 13) 佐藤, 高山, 柳井, 十倉 "管路流沸騰熱伝達に関する研究 (第一報, 加熱管路内気液二相流の流動様式)", 日本機械学会論文集 (第2部), 38巻, 第310号 (昭 47-6), pp. 1478~1486.
- 14) W.R. Zahn, "A Visual Study of Two-Phase Flow While Evaporating in Horizontal Tubes", Trans. ASME, Series C, August, 1964, pp. 417~429.
- 15) E. P. Mikol, "Adiabatic Single and Two-Phase Flow in Small Bore Tubes, ASHRAE J., November, 1963, pp. 57~86.
- 16) W.F. Laverty and W.M. Rohsenow, "Film Boiling of Saturated Nitrogen Flowing in a Vertical Tube", Trans. ASME, Series C, February, 1967, pp. 90~98.
- 17) National Research Council of U.S.A., "International Critical Tables of Numerical Data, Physics, Chemistry and Technology", McGraw-Hill Book Company, 1926
- 18) J. Hilsenrath, et al., "Tables of Thermodynamic and Transport Properties", Pergamon Press, 1960, 1960, pp. 138~253.
- 19) S.G. Bankoff, "A Variable Density Single-Fluid Model for Two-Phase Flow with Particular Reference to Steam-Water Flow", Trans. ASME, Series C, November 1960, pp. 265~272.
- 20) S. Levy "Prediction of Two-Phase Critical Flow Rate", Trans. ASME, Series C, February, 1965, pp. 53~58.
- 21) R.W. Lockhart and R.C. Martinelli, "Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase, Two-Component Flow in Pipes", Chemical Engineering Progress, January, 1949, vol. 45, No. 1, pp. 39~48.
- 22) 井上, 青木, "管内二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, 第288号 (昭 45-8), pp. 1366~1373.
- 23) Quandt, E., "Analysis of Gas-Liquid Flow Patterns", A.I. Ch. E. Preprint 47, 6th National Heat Transfer Conference, Boston (1963)



付图 1 Saturated pressure of carbon dioxide



付图 2 Specific gravity of saturated carbon dioxide



付图 3 Compressibility factor of carbon dioxide gas