水平丘谷管路内気液二相流の流動様式に関する研究^{*}
(第1報, 水平管および水平-緩傾斜下降管における流動様式)

Study on the Flow Pattern of Gas-Liquid Two-Phase Flow
in Horizontal and Hilly-Terrain Pipes

(1st Report, Flow Pattern in Horizontal and
Horizontal-Downward Declined Pipes)

坂口 忠司^{**}
SAKAGUCHI Tadashi

南川 久人^{***}
MINAGAWA Hisato

細川 茂雄^{**}
HOSOKAWA Shigeo

兪 和 俊[†]
YU Kazutoshi

杉浦 守男^{††}
SUGIURA Morio

清水 信寿^{†††}
SHIMIZU Nobutoshi

伊原 賢^{†††}
IHARA Masaru

池田 憲治^{†††}
IKEDA Kenji

Abstract The flow patterns of the air-water two-phase flow in horizontal and horizontal-downward declined pipes were studied experimentally in order to obtain basic information on the flow characteristics of gas-liquid two-phase flows in hilly-terrain pipelines. It is one of the special characteristics of the flow pattern in these hilly-terrain pipelines that the developing and/or unsteady flow patterns occupy almost whole pipes. Flow pattern maps were presented through a new classification and definition. The concept of "basic and auxiliary flow patterns" was introduced. The flow state was expressed by the combination of a basic flow pattern and some auxiliary flow patterns. The flow behavior greatly changes along hilly-terrain pipelines. It is impossible to predict the flow patterns with existing flow pattern maps for single pipes.

Keywords : Gas-Liquid Two-Phase Flow, Flow Pattern, Hilly-Terrain Pipes, Basic Flow Pattern, Auxiliary Flow Pattern

1. 緒 論

近年、エネルギー消費の増加に伴い、原子力
はもとより太陽エネルギーなどの新エネル

ギーが利用されているが、安全性や経済性の
視点から、今後とも、石油を主とする化石燃
料の需要が増加すると思われる。しかし、こ

* 1995.10.2 受付

** 神戸大学工学部・自然科学研究科 〒657 神戸市灘区六甲台町1-1
TEL(078)803-1112(ダイヤルイン) FAX(078)803-1131

*** 滋賀県立大学工学部 † ミノルタ †† 神戸大学大学院 ††† 石油公団

れから開発される新油田が、海岸から数十kmも離れた海域にある場合、海底に敷設される配管系は、真直な水平管、鉛直管あるいは傾斜管だけではなく、海底の地形に応じて、水平管と各種緩傾斜管が例えば水平－緩傾斜上昇－緩傾斜下降－水平などの組合わせて繋がった、起伏に富んだ複雑な形状の長大な丘谷管路となる。この管路の幾何学的形状の特異性を考えると、流れはこれら水平管や緩傾斜上昇管などの各部の接合部で乱されるために未発達でしかも非定常となり、各部の流動様式は相互に影響し合うと思われる。

したがって、水平、鉛直並びに傾斜の各種単独管内の気液二相流に対して従来から提示されている流動様式線図[1-14]を、そのまま用いて、この丘谷管路各部の流動様式を推定することは、必ずしも妥当でないと思われる。すなわち、丘谷管路にはそれ独特の現象が存在すると考えられるので、新たに各部における流動様式の把握はもとより管路全体における流動様式の状況を把握し、それらを従来の単独管における流動様式並びに流動様式線図と比較検討することが重要である。

このような丘谷管路における気液二相流の研究もいくつかあり、層状流やスラグ流などの流動特性が研究されている[15-17]。流動様式に関しては、水平管に傾斜入口部と傾斜出口部を設けた管路において、水平管部に見られる層状流とスラグ流の境界線の移動を論じた論文[14]はあるが、丘谷管路の各部の流動様式を系統的に研究し、その相互関係を検討した論文はまだ公表されていないようである。

本一連の研究では、複雑な幾何学的形状から成る丘谷管路を、水平管に緩傾斜下降管を接続した水平－緩傾斜下降管路、水平管に緩傾斜上昇管を接続した水平－緩傾斜上昇管路などに分解し、これら各基本管路における気液二相流の流動様式を観察し、それを構成する各部の流動様式線図を提示し、それらの相互関係並びに従来の単独管に対する流動様式線図との比較検討結果について述べることに

した。本第一報では、水平－緩傾斜下降管路における流動様式、第二報では、水平－緩傾斜上昇管路における流動様式について報告する。その他の基本管路における気液二相流の流動様式についても順次報告する予定である。

なお、研究対象の実態を考えると、長大な管路と石油系混相流を用いて実験すべきではあるが、実規模の実験装置あるいは現実により近い長大管を用いての実験に先立って、小規模の実験装置で、空気－水系気液二相流の実験を行った。これは、当初から長大管を建設するのは経済的負担が大きいこと、石油系混相流の流動現象の本質的な部分は空気－水系においても同様に認められると見なしたこと、空気－水系二相流が取扱い易く、流れの可視化や光・電気的計測方法が容易に適用できる等の特長を備えているためである。

2. 実験装置と実験方法

Fig. 1 に示す実験装置の主要部は、試験部、気相供給系統、液相供給系統、気液混合部並びに測定系統である。試験部は、水平管とそれに傾斜角度 θ が3から10度の下向緩傾斜管を接続した水平－緩傾斜下降管路である。流動様式を観察しビデオ撮影するために、これらはいずれもアクリル樹脂製の透明円管で、全長Lは約10.3m、管内径Dは40.3mmである。水平－緩傾斜下降管路の屈折部は試験部入口から7.5mのところにある。屈折部は所

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.

定の角度をもって切り落とされた二本の円管を直接接合し、その角は丸められていない。流体として、常温・大気圧の空気及び水道水を用いた。

空気を、圧縮機からクーラー及びフィルターを通して気液混合部に供給した。空気流量を、ガスメーターで計測した。空気の流量を一定に保つため、臨界ノズルを用いた。液相流量をオリフィス流量計並びに受け止め法により計測した。また液相流量を一定値に保つためモノポンプを用いた。

気液混合部は、直径200mmの円管の側壁に試験部を取り付けたもので、上部から流入する空気による水面の波立ちを防ぐために二枚の多孔板を設け空気を整流した。

本実験においては、まず所定の液相を供給し、その後所定の気相を供給する。十分な時間が経過した後、流動様式の観察を行う。順次この操作を繰り返し行った。流動様式の目視観察の手助けとしてHi-8ビデオカメラを用いた。ビデオカメラの設定位置は試験部入口から6.0m, 7.5m, 9.0mである。これらは、それぞれ水平管部、屈折部および緩傾斜管部に対応した位置である。映像は、円管の曲率による光の屈折の影響を減らすために設けられた矩形水槽を通して得られている。シャッタースピードは1/1000秒である。

実験条件は、水平管($\theta = 0^\circ$)、水平-緩傾斜下降管($\theta = -3, -5, -10^\circ$)、また気相体積流量は $\langle J_G \rangle = 1.0 \sim 8.0 \text{ m/s}$ 、液相体積流量は $\langle J_L \rangle = 0.025 \sim 0.200 \text{ m/s}$ である。

3. 基本流動様式および補助流動様式

水平-緩傾斜管路では、入口部の助走区間並びに屈折部前後の助走区間の存在により、ほとんどの場合流れは試験部全長にわたり未発達である。試験部入口付近において認められた層状流、波状流といった分離流が、その気液界面波の成長によって変化し、下流部において異なった流動様式になっていることがある。また、たとえ各相の流量の供給が一定に保たれていても、周期的で非定常な流れが

Fig. 2 Output of liquid level by resistance probe. ($\theta = 0^\circ$, $Z = 9.5 \text{ m}$, $\langle J_G \rangle = 1.0 \text{ m/s}$, $\langle J_L \rangle = 0.150 \text{ m/s}$)

しばしば現れる。その周期が極めて長い場合、二つの異なった流動様式が交互に試験部全体を占めることがある。すなわち液体スラグの発生周期が極めて長い場合、液体スラグが管外に流れ去ってしまうと、その後には分離流のみが残される。液体スラグの存在時間は、例えばFig. 2に示される流動条件では、全体の5%程度であり、極めて短いことが分かる。したがって、これを既存の完全発達・定常気液二相流に用いられた分類と定義に従ってスラグ流あるいは分離流とだけ表現したのでは不十分で、これら両方が認められることを何らかの形で表す必要がある。そこで本研究では、基本流動様式及び補助流動様式と言う新しい概念を導入し、各種の流動様式を併用して未発達・非定常気液二相流を表現することとした。この研究で扱う未発達・非定常流の流動様式の細部の流動特性は、完全発達・定常流の流動様式のものとは必ずしも一致していないと思われるが、その幾何学的形状の類似性に基づいて既知の名称[1-14]を用いた。

どの流動様式を基本流動様式とするかは、大きな問題であるが、本研究対象に対しては、重力の影響によって生じる分離流が管路内に占める時間割合が大きいため、これを、基本流動様式とした。この時間割合を将来は定量的に規定しなければならないだろう。

まず、層状流と波状流がある。波状流は、二次元波状流及び三次元波状流に分類される。水平管部の分離流が屈折部から緩傾斜下降管部に侵入すると、液体は重力により加速される。その気液界面には波高の低い斜めの網目状の波がある。これは気相による気液界面上

Fig. 3 Downward wavy flow.
(basic flow pattern)
($\theta = -10^\circ$, $\langle J_G \rangle = 1.0\text{m/s}$,
 $\langle J_L \rangle = 0.050\text{m/s}$)

Fig. 4 Forward step flow.
(auxiliary flow pattern)
($\theta = 0^\circ$, $\langle J_G \rangle = 2.0\text{m/s}$,
 $\langle J_L \rangle = 0.175\text{m/s}$)

のせん断力と液体の管壁との濡れ特性の両方の作用によって生じたのだろう。この波は二次元あるいは三次元の波状流とは異なるもので、下降波状流と呼ぶ。下降波状流の代表例をFig. 3に示す。以下、緩傾斜下降管部において認められた流動様式の名称には、「下降」を付記し、これらを付記していないものは水平管部の流動様式を表す。

水平管部において液体スラグが通過するとき、その前方の多量の液相が液体スラグによって運び去られ、その後には液位の極めて低い

Fig. 5 Downward forward tilting billow flow.
(auxiliary flow pattern)
($\theta = -10^\circ$, $\langle J_G \rangle = 1.0\text{m/s}$,
 $\langle J_L \rangle = 0.200\text{m/s}$)

液膜が残される。この液膜の液相速度は小さくほとんど淀んでいるようである。本研究論文では、このような液位が低く液相速度が小さい液膜を液膜流と呼ぶ。これは、界面上の波の有無によって層状液膜流と波状液膜流に

分類される。このような液膜流は、気相体積流量が大きくセミスラグが移動する場合にも認められる。この水平管部の液膜流が緩傾斜下降管部に入った場合も液位の低い液膜となって降下していくが、水平管部における液膜流より液相速度は大きい。これを下降液膜流と呼ぶ。なお本実験においては、この液膜上に常に波が存在したので、この場合下降波状液膜流と呼ぶ。この下降波状液膜流は、下降波状流と幾何学的形状はほとんど同じであるが、下降波状流は時空間的に終始認められるのに対し、下降波状液膜流は水平管部のスラグ流ないしセミスラグ流と関連して断続的に認められるものである。

以上の流動様式を基本流動様式とする。なおこれを細かく分類して層状流、波状流、液膜流、下降波状流、下降波状液膜流を主基本流動様式とし、残りを副基本流動様式とした。

基本流動様式を補うために補助流動様式を新たに定義した。これは、管路内各所には比較的短時間存在する流動様式であり、周期性を持つことが多い。これを基本流動様式に添えることによって、その流動条件における流動様式を表すこととした。

スラグ流やセミスラグ流は、すでに在る完全発達・定常流における流動様式を参考にして定義されたもので、液体スラグ部あるいはセミスラグ部の存在を持ってスラグ流あるい

はセミスラグ流と呼んだ。液体スラグやセミスラグは視覚的には目立つが、その存在時間割合が比較的短いので、ここでは補助流動様式とみなした。なお液体スラグあるいはセミスラグが、傾斜下降管部において消失することなく管外へ流出する場合、これを下降スラグ流あるいは下降セミスラグ流と記す。

水平管部において、液体スラグが通過した後、管内は液位の低い液膜流で占められるが、常に液相は気液混合部に供給されているため、その液位は初期状態とほとんど同じ高さに保たれていて、そこから下流側に向かって薄い液膜上を段波状の厚い液膜が移動する。これを前進段波流と呼ぶ。この前進段波は水平管部中流から下流にかけて衰退していき屈折部までには消滅する。この前進段波流も補助流動様式で、Fig. 4 にその写真とスケッチを示す。前進段波はスラグ発生に関連して生じる流動様式で、周期性を持っている。

また気液両相体積流量が大きい領域においては、液体スラグあるいはセミスラグが短い周期で通過した後、管上壁に薄い液膜が残され、この液膜は高速気流により管上壁に保持されているようである。これを環状流と呼ぶ。

液体スラグ、セミスラグあるいは波高の高い波が屈折部から緩傾斜下降管部に侵入した場合、条件によってはこの形が崩壊し、前方の液膜厚さが厚く後方が滑らかな波長の長い

Table 1 Classification of Flow Patterns.

	Basic		Auxiliary
	main	sub	
Horizontal Pipe and Horizontal Part	Stratified Wavy Liquid Film	Two-dimensional Wavy Three-dimensional Wavy Smooth Liquid Film Wavy Liquid Film	Slug Semi-slug Annular Forward Step
Declined Part	Downward Wavy Downward Wavy Liquid Film		Downward Slug Downward Semi-slug Downward Annular Downward Forward Tilting Billow

波になることが認められた。これを下降前傾大波流と呼ぶ。下降前傾大波流は、液体スラグあるいはセミスラグの形が崩壊したものであり、既に述べた液体スラグあるいはセミスラグとは発生の機構が異なるものである。この流れの典型的な様子をFig. 5 (a)-(d)に示す。水平管部での液体スラグ、セミスラグ並びに波高の高い波はそれぞれ別個の流れであるが、これらが変化した下降前傾大波流の幾何学的形状はほとんど同じである。

以上、Table 1 に流動様式の分類を示す。

4. 流動様式線図

64の流動条件での観察結果に基づく流動様式線図をFig. 6, 7 に示す。基本流動様式を白抜き記号で表し、主基本流動様式及び副基本流動様式の境界をそれぞれ実線及び一点鎖線で示した。便宜上境界を線で示したが、流動様式は急激に変化するものでなく、また主観による任意性も加わるので本来帯状のものである。その幅は、線の両側の実験点ぐらいいまでと思われる。白抜き記号の周りの黒塗り記号で、補助流動様式を表した。

4. 1 水平管における流動様式線図

本実験の妥当性を検証するために、Fig. 6

Fig. 6 Flow pattern map for horizontal pipe ($\theta = 0^\circ$).

に示す緩傾斜管を伴わない水平管のみの管路における流動様式線図上に、既存の流動様式線図[9,11]による流動様式の境界を破線で示した。いずれの実験装置も、その管路出口は大気に直接開放されている。

領域①と領域②は、それぞれ層状流と波状流で、後者はさらに領域②-Aの二次元波状流と領域②-Bの三次元波状流に分けられる。領域④では基本流動様式である液膜流以外にスラグ流、セミスラグ流あるいは環状流などが周期的に現れるので、補助流動様式が添えられている。従来これらは単にスラグ流、セミスラグ流あるいは環状流と言われていた。それはスラグなどが特に目に付きやすく印象的であったためかもしれない。気相体積流速 $\langle J_G \rangle$ がほぼ5.5m/sよりも小さい領域では、基本流動様式は層状液膜流であり（領域④-A）、これより大きい領域においては波状液膜流である（領域④-B）。領域④-Aの大部分においてスラグ流が現れ、セミスラグ流は気相体積流速の大きいときのみ現れている。

前進段波流は液相体積流速 $\langle J_L \rangle$ の大きいときのみ現れている。なおこの前進段波の段差は下流へ行くに従って小さくなり、途中で段波が消滅することもある。領域④-Bでは、セミスラグ流が常に現れていて、この領域のうち気相体積流速及び液相体積流速が大きい場合は環状流も認められる。

本研究では用語としてプラグ流を用いていないので、これを除けば本研究の流動様式と既存の流動様式の境界は定性的に一致していて、本実験は妥当であるといえる。

4. 2 水平-緩傾斜下降管における流動様式線図

水平-緩傾斜下降管の水平管部と傾斜下降管部の流動様式線図をFig. 7 に示す。この水平管部の流動様式線図とFig. 6の緩傾斜管を伴わない水平管のみの流動様式線図とを比較すると、細部においてわずかな相違は認められるが、全体的に両者は良く似ている。これは水平-緩傾斜上昇管路で認められた崩壊逆流や後進段波のような水平管部への外乱が、

(a) Horizontal part ($\theta = -3^\circ$)

(b) Downward declined part ($\theta = -3^\circ$)

(c) Horizontal part ($\theta = -5^\circ$)

(d) Downward declined part ($\theta = -5^\circ$)

(e) Horizontal part ($\theta = -10^\circ$)

(f) Downward declined part ($\theta = -10^\circ$)

Fig. 7 Flow pattern maps for horizontal-downward declined pipe.
 ($L=10.3\text{m}$, $D=40.3\text{mm}$)

水平-緩傾斜下降管の場合少ないことによる[18]。したがって、水平-緩傾斜下降管の水平管部の流動様式を推定するのに、従来の水平管のみの流動様式線図を用いても良いようである。

水平管部の層状流並びに波状流が緩傾斜下降管部に入ると、これらは下降波状流となる。一方、液位の低い層状液膜流および波状液膜流が緩傾斜下降管部に入ると下降波状液膜流になる。層状液膜流も、下降波状液膜流になる理由は、液相速度の増加によるものであろう。ここでは下降波状流あるいは下降波状液膜流が、ほとんどの時間存在しているので基本流動様式となる。水平管部と緩傾斜下降管部の流動様式線図を比較すると、水平管部の波状流が、緩傾斜下降管において下降前傾大波流を伴う下降波状液膜流に変化し、その領域が拡大していることがわかる。

また補助流動様式に関しては、水平管部で認められた前進段波が屈折部に達する前に消滅し、緩傾斜下降管においては認められず、セミスラグあるいは波状流の波高の高い波が緩傾斜下降管部に侵入すると下降前傾大波流に変化している。

次いで本研究でパラメータとして注目した傾斜角度 θ の影響について述べる。水平管部に及ぼす傾斜角度の影響はほとんど認められない。この程度の角度の範囲では、水平管部に大きな影響を与えないらしい。一方、緩傾斜下降管部においては、下降前傾大波流の領域は傾斜角度が大きいほど気相体積流束 $\langle J_G \rangle$ が大きいとき液相体積流束 $\langle J_L \rangle$ の小さい範囲にまで拡大している。これは波高の高い波が緩傾斜下降管部に入った場合、傾斜角度の大きいほどこの波が前傾し易く、結果的に下降前傾大波流になるためである。これに対して、下降スラグ流や下降セミスラグ流が現れる領域は、傾斜角度の大きいほど狭くなっている。これは、傾斜角度が大きいほど液体スラグ、セミスラグあるいは波高の高い波が崩壊し平坦になり易いためである。また環状流については、水平管部の領域と緩傾斜管部

の領域は、ほとんど変化せず同じである。

以上より、緩傾斜下降管が存在しても、その流動様式は上流の流動様式へほとんど影響しないようである。もしこれが広範囲にわたって適用できるなら、緩傾斜下降管を管路に適宜配置することによって各部の流動様式の相互作用・干渉を分断することが可能になり、流動様式固有の障害を最小限に収めることもできる。また長大管を緩傾斜下降管ごとに分割した各要素の集合体とみなせるならば、全管路における流動様式の推定が比較的容易となり、管路の設計も各区分毎に分割して実施できるのではないと思われる。これについては、緩傾斜下降管の長さや傾斜角度など検討事項は多く、数多くの丘谷を設けた長大管による実験により検証する必要がある。

5. 単独管に対する流動様式線図との比較検討

すでにFig. 6に示した単独水平管の流動様式線図と水平-緩傾斜下降管路の水平管部の流動様式線図との比較結果について述べたが、ここでは他の研究者による単独下降管における流動様式線図との比較検討を行う。

Stanislav[13]らは、単純傾斜下降管($\theta = -1^\circ, -5^\circ, -9^\circ$)を対象に、Barnea[11]らは、単純傾斜下降管($\theta = -1^\circ, -5^\circ, -10^\circ, -30^\circ, -50^\circ, -70^\circ, -80^\circ, -90^\circ$)の流動様式線図を提示している。さらにDukler[8]らは単純傾斜下降管における流動様式の境界について理

Fig. 8 Comparison with simply declined pipes for declined part.

論的に研究を行っている。Fig. 8 に、 $\theta = -5^\circ$ におけるStanislav、Barnea、Duklerおよび本研究の流動様式線図を示す。

Stanislavらは、単純傾斜下降管においては、 $\langle J_G \rangle$ が小さい領域では波状流が、 $\langle J_G \rangle$ が大きい領域では環状流が認められるとしている。Stanislavらは流体の供給部分にTee mixerを採用しており、流体の供給方法について本研究と異なっている。またStanislavらは液相として石油を使用しているため、流体の物性値も異なっている。本研究において、 $\langle J_L \rangle$ が大きく $\langle J_G \rangle$ が小さい領域では、下降波状液膜流にスラグ流やセミスラグ流あるいはこれらが崩壊した下降前傾大波流が混在したものが認められる。傾斜下降管部からみて上流に在る水平管部の流動様式が単純水平管とはほとんど同じような流動様式を示し、この水平管部の流動様式が傾斜下降管部に侵入するためスラグ流やセミスラグ流が混合するのである。 $\langle J_L \rangle$ 、 $\langle J_G \rangle$ とともに大きい領域では、セミスラグ流、前傾大波流そして環状流が認められ、環状流部については、Stanislavらの研究と部分的に一致している。また $\langle J_L \rangle$ の小さい領域では、下降波状流になっていて、Stanislavらの研究結果と部分的に一致している。その他に使用流体の相違のために生じる部分もあると思われる。使用流体による相違については更に研究を重ねる必要がある。

Barneaらの単純傾斜下降管($\theta = -5^\circ, -10^\circ$)における研究結果によると、本研究の実験条件の $\langle J_G \rangle$ 、 $\langle J_L \rangle$ の全領域において波状流が認められることになる。これは、本研究結果の $\langle J_G \rangle$ 、 $\langle J_L \rangle$ 両方の小さい領域において一致するが、他の大部分においては一致していない。なお、本研究のセミスラグ流と前傾大波流をいずれも波状流とみなすなら、本研究とBarneaらの結果は $\langle J_L \rangle$ の大きく $\langle J_G \rangle$ の小さい領域以外では、よく一致している。本研究並びにStanislavらの単純傾斜下降管の流動様式線図で認められた環状流が、Barneaらの単純傾斜下降管の流動様式

線図で認められないのは彼らの管径が大きいためだろう。

Duklerらは、単純傾斜下降管($\theta = -1^\circ, -5^\circ$)における流動様式線図を提示している。 $\langle J_G \rangle$ が小さい領域においては層状流は認められるとしている。そしてこれ以外の領域においては波状流が認められる。層状流の領域を除くと、Duklerらの流動様式線図とBarneaらの流動様式線図は同じ傾向である。

以上より単純傾斜下降管と水平一緩傾斜下降管の下降管部の違いについては、水平一緩傾斜下降管の場合、傾斜下降管部からみて上流に水平管部が存在することにより $\langle J_G \rangle$ が小さく $\langle J_L \rangle$ が大きい領域、すなわち水平管部において補助流動様式としてスラグ流・セミスラグが認められる領域の存在が単純傾斜下降管の流動様式と大きく異なる点であることがわかった。したがって緩傾斜下降管入口での両相の流量が時間的に変化するような条件下では、単独傾斜管の流動様式線図をこれらの代用とすることはできないことがわかる。

Bendiksen-Malnes[14]は、水平管に傾斜入口部と傾斜出口部を設けた4種類の試験部において、層状流とスラグ流の境界を実験的に検討している。このうち傾斜下降出口部を有する2種類の試験部をとり挙げる。Fig. 9に、その研究結果と本研究の水平一緩傾斜管

Fig. 9 Comparison with Bendiksen's study for horizontal part.

の水平管部の層状／波状流とスラグ流の境界を示す。彼らの2本の境界線は、気相体積流束が大きくなるとほとんど一致するが、それ以外の場合、同一気相体積流束のもとで液体スラグの発生する液相体積流束は、下降－下降形式で大きく、上昇－下降は下降－下降形式よりも小さくなっている。本研究は、水平管に傾斜下降出口部を設けた試験部を用いたことになり、これらと直接比較できないが、下降－下降形式が本研究の水平－緩傾斜下降管の場合の境界線と定性的にはほぼ一致している。

このように、水平－緩傾斜下降管形式の丘谷管路の持っている幾何学的形状の複雑さがもたらす特異性は、単純水平管並びに単純傾斜下降管の流動様式線図から容易に推定できるものでなく、そこには独自性があり、各種の幾何学的形状の管路における気液二相流の研究が必要であることが分かる。

6. 結 言

水平管に緩傾斜管を接続した水平－緩傾斜管路に生じる気液二相流の流動特性の特異性を明らかにする基礎研究として、水平管、水平－緩傾斜下降管における流動様式を観察し、屈折部の上流部と下流部における流動様式線図を提示すると共に、その相互関係と傾斜角度の影響について述べた。そのさい水平－緩傾斜管路の幾何学的形状の特異性によって、流れは未発達・非定常流れとなるため、基本流動様式と補助流動様式という新しい概念を導入し、流動様式を一つの基本流動様式といくつかの補助流動様式の組み合わせにより表した。

従来の流動様式線図において、各流動・流路条件に対する流動様式はただ一つであった。これは流れが定常・完全発達流であるとき、単一の流動様式が時空間的に存在したためである。これに対して、現今研究され始めた非定常・未発達流では、複数の流動様式が時空間的に共存する。これを表現することは必ずしも容易ではない。本研究はこれに対して一

つの提案をしたもので、この萌芽的研究に対し各位のご批判をお願いするものである。

謝辞 本研究に協力された濱田一彰氏並びに吉田文彦氏（当時神戸大学学生）に感謝いたします。

参考文献

- [1] Vermeulen, L.R. and Ryan, J.T., *Can. J. Chem. Eng.*, Vol. 49, 195-201 (1971).
- [2] Mandhane, J.M., Gregory, G.A. and Aziz, K., *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 1, No. 4, 537-553 (1974).
- [3] Spedding, P.L. and Nguyen, V.T., *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 35, No. 4, 779-793 (1980).
- [4] Spedding, P.L., Chen, J.J.J. and Nguyen, V.T., *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 8, No. 4, 407-431 (1982).
- [5] Weisman, J., Kang, S.Y., *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 7, 271-291 (1981).
- [6] Weisman, J. et al., *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 5, No. 6, 437-462 (1979).
- [7] Wambsganss, M.W., Jendrzeczyk, J.A. and France, D.M., *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 17, No. 3, 327-342 (1991).
- [8] Taitel, Y. and Dukler, A.E., *AIChE J.*, Vol. 22, No. 1, 47-55 (1976).
- [9] Sakaguchi, T. et al., *Memoirs of The Faculty of Engineering, Kobe Univ.*, No. 25, 191-202 (1979).
- [10] Barnea, D., Luninski, Y. and Taitel, Y., *Can. J. Chem. Eng.*, Vol. 61, 617-620 (1983).
- [11] Barnea, D. et al., *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 37, No. 5, 735-740 (1982).
- [12] Barnea, D., Shoham, O., Taitel, Y., *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 40, No. 1, 131-136 (1985).
- [13] Stanislav, J.F., Kokal, S. and Nicholson, M.K., *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 12, No. 3, 325-335 (1986).
- [14] Bendiksen, K.H. and Malnes, D., *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 13, No. 1, 131-135 (1987).
- [15] Brill, J.P. and Sarica, C., *Proc. of 5th Int. Conf. on Multiphase Production*, 220-240 (1991).
- [16] Wood, D.G., *Proc. of 5th Int. Conf. on Multiphase Production*, 68-79 (1991).
- [17] Zheng, G., Brill, J.P. and Taitel, Y., *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 20, No. 1, 63-79 (1994).
- [18] 坂口忠司ら、水平丘谷管路内気液二相流の流動様式に関する研究（第2報、水平－緩傾斜上昇管における流動様式）、混相流へ投稿中。