

JAERI - M
92-016

大型水平ダクト実験による分離流からスラグ流への
二相流流動様式遷移条件の評価

1992年2月

近藤 昌也・中村 秀夫・安濃田良成・久木田 豊

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1992

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷(株)

大型水平ダクト実験による分離流からスラグ流への二相流流動様式遷移条件の評価

日本原子力研究所東海研究所原子炉安全工学部

近藤 昌也・中村 秀夫・安濃田良成

久木田 豊

(1992年1月27日受理)

加圧水型原子炉 (PWR)において、冷却水喪失事故 (LOCA) 時の1次系水平配管中の二相流流動様式を把握することは炉心の冷却能力を評価する点で重要である。本研究では原子炉の1次系水平配管のような大型水平管における分離流からスラグ流への遷移条件を評価するため、流路高の高い大型水平ダクト (流路高 700mm, 流路幅 100mm, 全長 28.3m) を用いて常温常圧の水/空気の二相流について実験を行った。その結果、流動様式遷移条件を、気液の無次元相対速度とスラグ流の発生箇所での局所ボイド率について整理すると、三島・石井のモデルとその傾向において良く一致したが、実験では気液の相対速度がモデルによる予測値の約60%においてスラグ流への遷移が起こることが判明した。そこで、実験結果を用いて三島・石井のモデルの係数を修正した実験式を提案した。

Experimental Study on Two-phase Flow Regime Transition from
Stratified to Slug Flow in a Large-height Horizontal Duct

Masaya KONDO, Hideo NAKAMURA, Yoshinari ANODA
and Yutaka KUKITA

Department of Reactor Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 27, 1992)

The prediction of two-phase flow regime in the horizontal pipings during a loss-of-coolant accident (LOCA) is important for safety analysis of a pressurized water reactor (PWR). The flow regime transition conditions for a horizontal two-phase air-water flow were studied using a large-height, horizontal rectangular duct test section. The duct dimensions were 700 mm in height, 100 mm in width and 28.3 m in length. The experimental criterion for the flow regime transition from the stratified to slug flow regimes, in terms of the local void fraction and the non-dimensional gas-liquid relative velocity, agreed qualitatively with the prediction by the Mishima-Ishii model that is based on an idea that the interfacial waves with the largest growth rate will develop into a slug. However, the transition in the experiment occurred at systematically lower (by about 40%) relative velocities than the prediction by the Mishima-Ishii model. Therefore, an experimental correlation for this flow regime transition has been developed by modifying the Mishima-Ishii model.

Keywords: Two-phase Flow, Large-height Horizontal Duct, Transition,
Slug Flow

目 次

1. まえがき	1
2. 試験装置の概要	3
3. 水位計の較正	7
4. 実験の手順	9
5. 実験結果	10
6. 結論と今後の課題	17
謝 辞	18
参考文献	18

Contents

1. Introduction	1
2. Test Facility	3
3. Calibration of Water Level Gauge	7
4. Test Procedure	9
5. Test Results	10
6. Conclusions	17
Acknowledgement	18
Reference	18

1. ま え が き

水平配管中を液体と気体が同時に流れる現象（気液二相流）は、化学工業をはじめとする様々な分野でしばしば見られる。しかし、その流れのパターン（流動様式）は一定ではなく、気液の流量並びに配管の形状等の要因により、成層流（stratified flow）、波状流（wavy flow）、せん状流（plug flow）、スラグ流（slug flow）、環状流（annular flow）および気泡流（bubbly flow）等の流動様式のうちの何れかになる（Fig. 1）^[1]。また、流量が一定でも、圧力、配管出入口の水位、流れに対する外乱等に変化が生じると、流動様式が遷移することがある。

気液二相流の流動様式の一つであるスラグ流は、液体が間欠的に流路全体を閉塞する流れであり、気液の流速や圧力に著しい変動が見られる。そのため、配管や構造材等に変動荷重がかかるので、石油パイプライン等の配管・構造材の強度並びに耐久性を評価する上でスラグ流の発生条件を把握することは重要である^[2]。

さらに、加圧水型原子炉（PWR）の安全解析においても、冷却材喪失事故（LOCA）時の1次系水平配管中の流動様式を把握することは炉心の冷却能力を評価する点で重要である。なぜなら、LOCA時の原子炉内冷却材分布は1次系水平配管内における気液の界面摩擦に影響されるものであり、この界面摩擦の大きさは1次系水平配管中の流動様式に依存するからである^[3]。

以上の理由により、スラグ流の発生条件を把握するための実験は現在まで数多く行われてきた。これらの実験によると、気液の流量が小さい条件では、気液が界面を介して上下に分離した流れ（層状流ないし波状流）が生ずるが、液相の流量を増加させると、気液の界面の波の振幅が徐々に拡大してゆき、ある流量においてスラグ流へ遷移する。この時、気液界面の摩擦応力は著しく増加する。このようなスラグ流への遷移条件に関して、経験式や物理モデルが多数提案されている。しかし、そのほとんどは、小口径の円管あるいはダクトを用いて行われた実験に基づいたものであり、大口径配管を用いて行われた実験は希である^[2]。

そこで、本研究では大型水平ダクトを用いて実験を行い、小口径配管を用いた実験より得られた既存の実験式の大口径配管に対する適用性についての評価を行った。特に、原子炉の1次系水平配管をはじめとする大口径水平配管における分離流（層状流ないし波状流）

からスラグ流への遷移条件の把握に焦点を当てて行った。なお、本研究で用いた大型水平ダクトの流路高は700 mmであり、原子炉の1次系水平配管の直径にほぼ等しいものである。

さて、本研究では以上のような目的にも関わらず、実験を行うに際して原子炉1次系配管のような円管を用いずに矩形ダクトを用いた。その理由は、スラグ流の発生にかかわる諸現象を単純化するためである。つまり、円管では水位が円管の上面に近づくにつれて水面（流路）が狭まるため、波の成長過程において気相側の流路面積と波の高さとの関係が非線型となり取扱いが難しくなる。一方、ダクトでは水位に関わらず常に水面の広さが一定であるため、波の成長過程の評価が単純化できる（Fig. 2）。こうしたことから、本研究ではダクトを用いて大口径水平配管における分離流からスラグ流への遷移条件を把握するための実験を行った。また、流路幅については、現象の2次元性（流路方向成分と高さ成分）を確保するために壁面の影響を無視し得る広い幅が望ましいが、空気および水の供給能力の制約から100 mmとした。

2. 試験装置の概要

本研究は日本原子力研究所東海研究所内の機械化工特研に設置されている大型水平ダクト試験装置を用いて行った。この装置は、室温（10～30℃）、大気圧の水・空気二相流を対象とした試験装置で、ダクト本体、入口・出口容器および水・空気の供給系から構成されている。さらに、測定装置として電気抵抗式水位計と高速度ビデオカメラを有している。この大型水平ダクト試験装置の概念図をFig. 3に示す。

2. 1 試験部

大型水平ダクト試験装置の試験部であるダクト本体（Fig. 4）は、流路全長28.3m、高さ700mm、幅100mmのダクトであり、長さ1mないし2mの透明アクリル製のモジュール（Fig. 5）を8ユニットと、長さ2mのステンレス製のモジュール（Fig. 6）を9ユニットそれぞれ流路方向に連結することにより構成されている。

透明アクリル製モジュールは、その天板、両壁面および底面が厚さ15mmの透明アクリル板を用いて製作されており、内部の流動様式を視認することが可能である。また、単にアクリル板を接着剤等で接合しただけでは強度の点で不十分なので、アクリル製モジュールでは2本ないし6本の透明アクリル製のリブ（30mm×38mm）をモジュール外壁に取り付けることにより強度を確保している。さらに、アクリル製モジュールは水位計（後述）を設置するための台座を有しており、台座の位置における局所水位を測定することが可能である。

一方、ステンレス製モジュールは、厚さ3mmのステンレス板（SUS304）を用いて製作されており、内部の流動様式を視認することは不可能である。なお、ステンレス製モジュールもアクリル製モジュールと同様、外壁に補強材（3カ所：ステンレス製）が取り付けられている。しかし、水位計設置用の台座は有しておらず、ステンレスモジュール区間での水位の測定は不可能である。

これら2種類のモジュールは任意の順序で連結できるが、本研究では透明アクリル製モジュールをダクト上流域に重点的に配置し、ダクト上流域で発生するスラグ流の観察・測定を主とした。（Fig. 4参照）

2. 2 出入口容器

入口容器 (Fig. 7) は試験部入口に設置されている長さ1000 mm、幅800 mm、高さ3050 mmのステンレス製 (SUS304番) 容器であり、試験部入口と水および空気の供給ラインに接続されている。この容器の目的は、水・空気供給系の流量の変動を緩和し、試験部入口で安定な成層流を得ることにある。ゆえに、この容器は気密構造になっており、容器上端には容器内の圧力を測定するための圧力計が設置されている。また、試験部入口での流れを断面内で均一とするために、入口容器内部には整流板が設置されている。さらに、容器内部の様子を視認するために容器の上部側面には透明アクリル製の窓が設けられている。

出口容器 (Fig. 8) は入口容器と同様、ステンレス製 (SUS304番) の直方体の容器であり、試験部出口に設置されている。寸法は、長さ2150 mm、幅2650 mm、高さ3400 mmで、 19.4 m^3 の容積を持つ。この容器は、容器内に水位を形成することにより試験部出口の水位を任意の高さに設定する目的で設けられた。ただし、本研究で行ったほとんどの実験では、出口容器水位は試験部の流路底面より低く設定した。そのため、試験部出口において、試験部内の水は出口容器内に自由落下しており、試験部内の水位および流動様式は出口容器の水位の影響を受けていない。なお、出口容器は気密構造ではなく、天板に設けられている作業用ハッチ (実験中は常時開) を通じて容器内の空気が大気に開放される構造となっている。

2. 3 水・空気供給系

次に、実験時の水・空気の供給および循環経路について説明する。大型水平ダクト試験装置では、実験に用いている水は装置内を循環する構造となっている。つまり、水は循環ポンプ (循環能力が $0 \sim 50 \text{ m}^3/\text{h}$ のポンプと $0 \sim 500 \text{ m}^3/\text{h}$ のポンプが使用可能であり、本研究では $0 \sim 500 \text{ m}^3/\text{h}$ のポンプを使用) により入口容器底部に供給された後、整流板により整流されて入口容器から試験部へ流入する。そして、試験部通過後に一旦、出口容器に排出され、その後、循環ポンプによってもう一度入口容器へ送られる (Fig. 3 参照)。

一方、空気は外気をコンプレッサーによって 0.7 MPa に圧縮したものを供給源とし

て用いる。この0.7 MPaに圧縮された空気は圧力レギュレータによって2気圧に減圧されて流量計測用オリフィスを通過する。その後、流量調節弁によりほぼ大気圧に減圧されて入口容器上部（容器内の水面より上方）に供給される。入口容器に供給された空気は水とともに成層流となって試験部に流入し、試験部通過後に出口容器を経て大気に解放される。なお、これらの水および空気の供給量は、オリフィス並びにバルブによってコントロールすることが可能であり、水は約60～500 m³/h、空気は約60～600 Nm³/h（Nm³は標準状態での体積を表す）の範囲内の任意の流量で試験部に供給できる。

2.4 計測器

本研究では測定装置として電気抵抗式水位計と高速度ビデオカメラを使用した。最初に、電気抵抗式水位計の概略について述べる。本水位計は測定箇所における局所水位の経時変化を計測するものであり、その概念図と回路図をFig. 9に示す^[4]。この図からわかるように、電気抵抗式水位計は流れに対して垂直で且つ鉛直に張った1組（2本）の並行金属線（ ϕ 0.1 mmのインコネル線：X-750）と動ひずみ計（共和電業製：DPM-13A）から構成されている。つまり、金属線間の電気抵抗の変動を動ひずみ計で測定する仕組みとなっている。本水位計では測定値は電圧値で出力されるので、出力電圧を水位に変換する作業が必要である。この変換作業については後ほど新たに章を設けて説明する。なお、測定ブリッジの印加電圧は5.0 V、搬送波は10 kHzの正弦波を用いた。

この電気抵抗式水位計はすべて透明アクリル製モジュールにのみ設置した。理由は、水位計の電極（金属線）をステンレス製モジュール部に設置するとステンレスの外壁を通じて回路が短絡して水位を正確に測定できない恐れがあるためである。本研究では当初、この電気抵抗式水位計を試験部に8台設置していたが、後に5台増設して13台で測定を行った。水位計の取り付け位置をFig. 4およびTable 1に記す。しかしながら、本水位計の電極であるインコネル線がスラグ流の衝撃等により何度か断線したので、実験によっては設置してある水位計のうちの数台が使用不能の状態で行ったものもある。なお、水位計の測定データは、気液の流量および入口容器内圧力の測定データと共にマルチチャンネルデータロガー（岩崎通信機製：SY-8503）に収録した。

一方、本実験で用いたもう一つの測定器である高速度ビデオカメラ（Nac製：HSV

—200、HSV-400）は毎秒200コマの速度で2画面の撮影能力があるビデオカメラで、試験部に沿って3台設置した。先述したとおり、透明アクリルモジュール部では内部の流動様式を視認することが可能であるので、本研究では高速度ビデオカメラを透明アクリルモジュールの正面に設置して流動様式を撮影・記録した。なお、この高速度ビデオカメラは撮影用の高輝度照明を必要とするので、透明アクリル製モジュールを挟んでカメラの反対側から撮影用ライトを用いて照明を行った。その際、白紙を透かして（光を散乱させて）照明を行うことにより、均一な光量分布が得られるようにした。また、データ収録時には、試験部内の水位が流路高の半分以下（流路底面から350mm以下）になる場合は少なかったため、ダクトの上半分（流路底面から350～700mm）を撮影範囲とした。

この他、水・空気の物性値の算出のため、試験装置を循環している水・空気の温度および水の電気抵抗値を記録した。

3. 水位計の較正

先に述べたとおり、本研究で用いた電気抵抗式水位計は測定値を電圧（マイナス数ボルト～プラス数ボルト）で出力するため、出力電圧を水位に変換する作業が必要である。

実験開始当初の水位計の較正方法は以下の通りである。まず、試験装置内の気液を静止状態にして、その状態の水位計出力を収録すると共に水位を巻尺で測定する。次に、試験装置に注水あるいは排水することにより水位の変更を行う。そして、先ほどと同様に水位計出力と水位を収録する。本研究では、このような静止水位の測定を3～5通りの異なる水位で行い、水位計出力値と水位との関係を求めた。その結果、水位計出力値と水位との関係は1次式により非常に良好にフィッティングされることがわかった（最小二乗法における決定係数 $R^2 \sim 1.0$ ）。しかし、その後の実験により、実験時間が経過するに従い水質に変化（電気伝導度の上昇、並びにpHの減少）が生じていることがわかった。電気伝導度が上昇すると電気抵抗式水位計はその動作原理上、水位を高め評価するので正確な水位が測定できなくなる。そのため、較正方法の見直しを検討する必要が生じてきた。

電気伝導度は時間とともに徐々に変化するので、測定を行う度に較正を行うことが理想的である。しかし、較正にはかなりの時間を要するため現実的な手段とは言えない。そこで、短い時間内においては、先に述べた較正方法より、水位計出力と水位との関係を1次式により良好にフィッティングできることがわかっているため、各測定毎に異なる2つの水位での水位計出力と水位を収録し、これを基に実験後に較正係数を求めることとした。まず、低い方の水位の測定については先ほどの較正方法と同様、試験装置内に静止水位を形成して水位と水位計出力を収録した。一方、高い方の水位については満水状態（水位：700mm）の流水の水位計出力を収録した。満水状態は、装置内に空気を送り込まずに水流量だけを増やす（400～450m³/h）ことにより容易に形成できる。この方法を用いると水位計出力の較正を比較的良い精度で行えることがわかったが、さらにより精度を得るため以下に述べるように水質の変化を小さくするための処置も併せて行った。

電気伝導度の上昇は、試験装置内のイオン濃度が時間とともに増加しているわけで、試験装置の運転により沈澱していた不純物（水あか、錆等）が攪拌され、電離したことに原因があると考えられる。さらに、実験中は試験装置の運転等により水温が上昇するので、不純物の溶解度が変化したことにも一因があると考えられる。よって、較正方法の見直しをするとともに、不純物の溶解・電離による影響を軽減することを以下の要領で行った。

不純物の溶解・電離による影響を軽減するために講じた手段として、まず、実験実施前に試験装置内の水を2～3時間循環することにより十分攪拌した。しかし、このように攪拌しても水質の変化は収まらなかった。Fig. 10はこの攪拌作業中のある水位計の出力であるが、水位が一定であるにもかかわらず単調に水位計出力が上昇していることを示唆している。次に行ったことは、水質は時間の経過とともに酸性化する傾向があったので、酸性化に対する緩衝剤を混入することにより水質の安定を図った。具体的には、水中に炭酸ナトリウム (Na_2CO_3) を数g～数十g混入した後、2～3時間循環して攪拌した (Fig. 11)。この方法により若干の効果は得られたが劇的な効果は得られなかったので、先述したような水位計較正をこまめに行うことを併せて行った。

一方、電気抵抗式水位計の較正に悪影響を及ぼしたこともある。それは、電気抵抗式水位計の電極の材料を変更したことである。実験当初は白金線 ($\phi 0.1\text{mm}$) を電極として用いていたが、スラグの衝撃による断線が頻発したために、強度の点で優れているインコネル線 ($\phi 0.1\text{mm}$) へ変更した。その結果、白金線のように断線することはなくなったが、白金線を用いていたところに比べ水質の変化による影響をより鋭敏に受けるようになった。

以上述べた方法が本研究で行った電気抵抗式水位計の主な較正方法および変更点である。なお、ここでは触れないがこの他にも様々な較正方法を検討した。現在の較正方法の欠点は、静止水位の形成 (安定) に長い時間 (30分～1時間弱) が必要とされることである。そのため、今後は水の電気伝導度等から水位計を自動較正する手段の確立が望まれる。

4. 実験の手順

実験装置の概要でも述べたとおり、大型水平ダクト試験装置では、水は約60～500 m³/h、空気は約60～600 Nm³/hの範囲内の任意の流量での実験が可能である。そこで、水・空気流量をパラメータとした様々な流量での実験を行った。特に、波状流からスラグ流への遷移条件を評価するために、スラグ流と波状流との境界流量近傍での実験に重点をおいて行った。

スラグ流遷移条件に関する実験は以下の手順により進めた。まず、あらかじめスラグ流と波状流との境界流量付近に気液の流量を調節した。次に、その流量でスラグが発生しない場合、もしくはスラグが多発する場合は、水流量を調節することによりスラグ流と波状流との境界流量に近づけた。そして、気液の流量が安定するまで（約数分間）待ってデータの収録を開始した。なお、本研究で行ったスラグ流遷移条件に関する実験は、ほぼ全て収録周波数100 Hzで5分間データを収録した。

本研究では、スラグ流遷移条件に関する実験の他に、水位計用金属線の材質（白金、タングステン等）の違いによる比較データを得るための実験、および水質安定の為に投入した薬品の濃度と水位計出力との相関データを得るための実験も実施した。

5. 実験結果

本研究で行った実験の流量範囲と、実験結果から得た波状流とスラグ流の境界流量とを、Mandhane線図^{[5] [6]}およびSimpson線図^[7]に重ね合わせたものをFig. 12に示す。本線図は流動様式の境界を気相および液相の見かけ速度により表したものである。この図より、大型水平ダクト試験装置を用いて行った実験はMandhaneが行った実験と比べ、波状流とスラグ流との境界の水の見かけ流速が約10倍大きいことがわかる。これはMandhaneの実験（代表的な流路高50mm）に比べ、本研究で行った実験（流路高700mm）の方が流路高が大きいこと等に起因するものである。さらに、Mandhaneの実験では気相の見かけ流速がおよそ0.8m/sより小さいときはスラグ流は発生しなかったが、本研究で行った実験ではスラグ流が生じた。Table 2に本研究で行った主な実験の気液の流量等を記す。

5.1 観察結果

スラグ流が発生する境界流量近傍で行った実験について、目視および高速度ビデオによる観察結果を述べる。本研究で行った実験では、空気流量の大小によりスラグ流の発生する様子が異なることが観察されたので、観察結果を空気流量が小さい場合（60～150 Nm³/h）と大きい場合（300～600 Nm³/h）に分けて記述する。なお、これら2通りのスラグ発生に関わる諸現象の間には明確な境界値があるわけではなく、空気流量に応じて連続的に変化する傾向が見られた。また、スラグはある一定のパターンを繰り返して周期的に発生するため、説明の都合上、スラグが通過した後の水位が低下した状態から順を追って観察結果を述べる。以下、高速度ビデオカメラで撮影した画像を交えて説明をするが、各々の写真はFig. 13に示したように2カ所で撮影した画像を1枚の写真に合成したものである。なお、空気流量が小さい場合は60 Nm³/hで行った実験の写真を、空気流量が大きい場合は600 Nm³/hで行った実験の写真をそれぞれ用いた。さらに、写真は、同一条件で行った実験のなかで、その状態が一番良好に撮影されているものを抜き出したものである。そのため、特定のスラグについてその成長過程の写真を集めたものではない。

5. 1. 1 空気流量が小さい場合 (60~150 Nm³/h)

この場合、スラッグの発生過程は以下ようになった。まず、試験部内の水位がある一定の高さまで徐々に上昇する。このとき、波長が数十cm程度の定在波が見られるが水面は比較的滑らかである(写真1)。水位の上昇が止まると定在波が消えて水面が平坦になるが、水面に波高が数mmのさざ波が一様に生じる(写真2上段)。そして、やがて試験部の上流で長さの短い小規模のスラッグが突発的に発生する(写真3上段左)。発生したスラッグは成長しながら下流に比較的ゆっくり進んでゆくが、ある位置まで到達するとスラッグの波頭がダクトの天板より離れ大波と化す。これは、試験部の出口水位が入口水位より低いため、試験部内の時間平均水位が上流から下流に向かって緩やかに下降していることによるものである。なお、発生したスラッグは滑らかな形状の界面を持ち、空気をほとんど含んでいない(写真4下段)。

5. 1. 2 空気流量が大きい場合 (300~600 Nm³/h)

この場合も空気の流量が小さい場合と同様な水位の上昇が見られ、ある一定の高さで水位の上昇は止まる。この水位の上昇が止まったときの水位は、空気の流量が小さい場合と同様な水位と比べると低い。水位の上昇が止まると、それまで滑らかな界面を持った定在波が見られた試験部上流に、波高が数mm~数十mmの一群の進行波が生じ、成長しながら下流へと進む(写真5上段)。これらの波は、試験部中流域(試験部入口から十数m)に達する頃には波高が数十mm~数百mmの波に成長しているが波数は減少している(写真6下段)。なお、この試験部中流域で観察される波は、定常的に見られるのではなく波数が数個から数十個の波群の形態をとり、この波群が観察されない時の水面は比較的滑らかである。つまり、試験部中流域では波状流と層状流が交互に観察される。やがて、これらの波群中に時々見られる大きめの波が、空気により加速されて前方にある波を吸収しながら成長し、中流~下流域にて大規模なスラッグになる(写真7)。発生したスラッグは急速に巨大化し、多くの場合、試験部出口まで崩れずに到達する。このスラッグは空気流量が大きくなると、その成長時に巻き波の形態をとるため(波頭が空気により飛ばされる)多量の空気を含有している。さらに、スラッグが試験部出口に到達して出口容器に流れ込むと、試験部内の空気の圧力が急激に変化して気液の界面が不安定になる。そのため、多くの場

合、試験部上流域で新たにスラグが発生する。なお、この上流域で誘発したスラグは、先に中流域で発生したスラグよりも規模が大きい場合が多い。さらに、このように空気流量が大きい実験では、ほとんどのスラグ流は先に発生したスラグと後で上流域で誘発したスラグの2つ1組で発生するので、スラグ通過後は試験部内の水位が著しく下がる。そのため、水流量にもよるが次のスラグ発生までかなりの時間を要する。また、希なことではあるが、このような圧力の変動によるスラグの誘発現象とは別に、スラグが複数個同時に発生する現象も見られた。スラグが複数個同時に生じると、後方（上流側）のスラグが前方（下流側）のスラグに追いつき合体することが多かった。

5. 2 測定データ

次に、本研究で得られた水位計の収録データ例をFig. 14、15に示す。Fig. 14は空気の流量が小さい場合（空気流量 $60 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 、水流量 $250 \text{ m}^3/\text{h}$ ）、Fig. 15は空気の流量が大きい場合（空気流量 $400 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 、水流量 $225 \text{ m}^3/\text{h}$ ）の収録データである。図はそれぞれ1ch～8chの収録データを水位に変換したものを上段から下段に順に表示したものである。各チャンネルのグラフはそれぞれ縦軸に水位（試験部の上半分： $350 \sim 700 \text{ mm}$ ）、横軸に時間（ $0 \sim 300 \text{ s}$ ）をとってある。これら図に見られる大きなノイズのようなものがスラグである。このスラグの部分（10秒間）だけを拡大したものをFig. 16および17に記す。

これらの水位計の収録データを用いて、大型水平ダクト試験装置における波状流からスラグ流への流動様式遷移条件についての評価を行った。この評価に用いた局所ボイド率や速度等のパラメータはすべて水位計の収録データを基にした。これは、もう一方の測定機器である高速度ビデオカメラはその台数が3台と少なく、撮影範囲も非常に狭いためである。ゆえに、高速度ビデオの収録データは、波形の観察および水位計出力との比較に使用するにとどめた。

5. 3 既存のモデルとの比較

さて、スラグ流が発生する境界に相当する流量で行った実験について、気液の無次元相對速度をスラグ流発生点直前の局所ボイド率について整理した図を既存のスラグ流遷移条

件のモデル (Mishima-Ishii^[8]、Taitel-Dukler^[9]) と共に Fig. 18 に示す (Table 2 参照)。本研究で行った実験では、気液の相対速度 (気液の流量とボイド率から各相の平均速度を求め、その差をとったもの) が Mishima-Ishii のモデルによる予測値の約 60% においてスラグ流への遷移が occurring しており、Mishima-Ishii のモデルによる予測値に対して定性的には一致しているが、系統的に差異があることが判る。なお、この図に記載した実験値は、空気流量の大小に関わらず、スラグ流への遷移点に相当する流量で行った実験のうちから評価可能なものを表示した。

Mishima-Ishii、Taitel-Dukler のモデルは以下の通りである。

Mishima-Ishii のモデル:

$$V_g - V_l \geq 0.487 \sqrt{\frac{(\rho_l - \rho_g) g h_g}{\rho_g}} = 0.487 \alpha^{1/2} \sqrt{\frac{(\rho_l - \rho_g) g D}{\rho_g}} \quad (1)$$

Taitel-Dukler のモデル:

$$V_g \geq \left(1 - \frac{h_l}{D}\right) \sqrt{\frac{(\rho_l - \rho_g) g \cos \theta A_g}{\rho_g \frac{dA_l}{dh_l}}} \quad (2)$$

Taitel-Dukler のモデルは 2 次元ダクトにおいては次のようになる。

$$V_g \geq \left(1 - \frac{h_l}{D}\right) \sqrt{\frac{(\rho_l - \rho_g) g h_g}{\rho_g}} = \alpha^{3/2} \sqrt{\frac{(\rho_l - \rho_g) g D}{\rho_g}} \quad (3)$$

ここで、 V_g 、 V_l は気液の速度、 ρ_g 、 ρ_l は気液の密度、 h_g 、 h_l は気液の流路高、 A_g 、 A_l は気液の流路面積、 g は重力加速度、 θ は流路の傾き、 D は水力相当直径である。本研究では試験部の流路高を水力相当直径とした。つまり、

$$D = h_g + h_l = 0.7 \text{ (m)} \quad (4)$$

とした。

Mishima-Ishiiの式は、有限振幅の波が流路上部壁に近づくためにBernoulli効果（すなわち気相部の流路面積が減少することにより気相の流速が増加し、これに伴う気相部の圧力が減少することにより液面がさらに引き上げられる）が顕著となりKelvin-Helmholtz不安定が助長されるとして求めた理論式であり、2次元流路を対象にしている。また、界面が不安定になると最も成長速度の大きな波長に相当する波（most dangerous wave）が発生し、これがスラッグに成長するものと仮定している。

一方、Taitel-Duklerの式は、有限振幅の波に働くBernoulli力と重力との静的釣合いから得られた式であり、円管を対象としている。これを2次元ダクトに適用したものが(3)式である。

Fig. 18にあわせて(1)、(3)式を気液の無次元の相対速度 J_{oi}^* とスラッグ流発生点直前の局所ボイド率 α について整理する。気液の無次元相対速度、

$$J_{oi}^* = \alpha (V_g - V_l) \sqrt{\frac{\rho_g}{gD(\rho_l - \rho_g)}} \quad (5)$$

を用いるとMishima-Ishiiの式は、

$$J_{oi}^* \geq 0.487\alpha^{3/2} \quad (6)$$

となり、Taitel-Duklerの式を2次元ダクトに適用し、(3)式における V_g の代わりに $V_g - V_l$ を用いると、

$$J_{oi}^* \geq \alpha^{5/2} \quad (7)$$

となる。なお、Taitel-Duklerの式で V_g を用いているのは $V_g \gg c$ (c は波の伝搬速度)と仮定していることによる。

さて、本研究の実験結果を最小二乗法を用いて(6)、(7)式と同様な $J_{oi}^* = A\alpha^b$ の形の式で表すと、

$$J_{oi}^* \geq 0.30\alpha^{3/2} \quad (8)$$

という実験式を得た。(6)式と(8)式で異なるのは右辺の係数だけであり、すなわち実験で用いた大型水平ダクト試験装置について、

$$V_g - V_l \geq 0.30\sqrt{(\rho_l - \rho_g)g \frac{h_g}{\rho_g}} \quad (9)$$

という(1)式の右辺の係数のみを変えたモデルを得た。ここでボイド率はスラグ発生直前の状態における時間平均(5秒間)した局所ボイド率であり(Fig. 16、17参照)、速度はこのボイド率と流量から算出したものである。

5.4 浅水度

大気圧下の非圧縮・非粘性の完全流体において表面張力を無視すると、微小振幅波について以下の式が導出される^[10]。

$$\frac{\lambda}{h} \frac{2\pi h}{gT^2} = \tanh \frac{2\pi h}{\lambda} \quad (10)$$

ただし、上式では、 λ は波長、 h は水深、 T は周期であり、波による水の擾乱がないものと仮定している。ここで水深と波長の比 h/λ は浅水度と呼ばれ、一般に値が $1/2$ より大きい場合を深水波、小さい場合を浅水波という。この浅水度が十分に大きいと

$$\tanh \frac{2\pi h}{\lambda} \sim 1 \quad (11)$$

と近似できるので、(10)式は、

$$\lambda = 1.56T^2 \quad (12)$$

と近似できる。

Fig. 19 に空気流量が大きい条件の実験において観察された波群中の波について整理した図を示す (Table 3 参照)。この図より、観察された波群を構成している波は深水波の特性を持っていることがわかる。なお、図では実験結果を波の周期 T を用いて整理してあるが、これは波長 λ と波の速度 c から求めたものである。

$$T = \frac{\lambda}{c} \quad (13)$$

波の速度 c は、隣合う 2 台の水位計から求めた波の見かけ速度 $V_i + c$ と液相の速度 V_i の差をとることによって求めたものである。

6. 結論と今後の課題

大口径水平配管における波状流とスラグ流の流動様式遷移条件について、大型水平ダクト試験装置を用いて実験および評価を行った。その結果、I) 空気流量の大小によりスラグの発生過程に差異がみられた。すなわち、空気流量の小さい場合はスラグが突発的に発生したのに対し、空気流量の大きい場合は一群の進行波が発生し、その中で比較的大きい波が成長してスラグとなった。II) スラグ流が発生する境界流量で行った実験を局所ボイド率と気液の無次元相対速度について整理すると、M i s h i m a - I s h i i のモデルと定性的には一致するが定量的には系統的な差があることが判明した。本研究で行った実験では、気液の相対速度がM i s h i m a - I s h i i のモデルによる予測値の約60%においてスラグ流への遷移が生じた。III) 空気流量の大きい条件の実験で観察された波群（この波群中の波が成長してスラグとなる）は、深水波の特性を持っていることが判った。

今後の課題としては、水位計の較正方法を高精度で且つ短時間で済むように改善する。そして、スラグ流発生実験に関しては、空気流量の大きい条件でみられた試験部の中流～下流域において発生するスラグについてより詳しく評価することが必要である。さらに、評価方法についてはスペクトル分析、並びに波の成長と波形の解析等も行う予定である。

謝 辞

大型水平ダクト試験装置を用いた実験を行うにあたり、装置を整備・運転して頂いた原子力エンジニアリングの方々に感謝いたします。

参 考 文 献

1. 植田辰洋: "気液二相流" (1981)
2. S.L.Scott, O.Shoham and J.P.Brill: "Modelling Slug Growth in Large Diameter Pipes" Proc. 3rd. Int. Conf. on Multi-Phase Flow, pp.55-63, Hague (1987)
3. Y.Anoda, Y.Kukita, H.Nakamura and K.Tasaka: "Flow Regime Transition in High-Pressure Large-Diameter Horizontal Two-Phase Flow" Proc. 26th ASME/AlChE /ANS National Heat Transfer Conf., Philadelphia (1989)
4. E.S.Kordyban and T.Ranov: "Mechanism of Slug Formation in Horizontal Two-Phase Flow" ASME Journal of Basic Engineering, Vol.92, pp.857 (1970)
5. H.Nakamura et al.: "Horizontal Flow Regime Transition in a Large-Height Long Duct" Proc. Int. Conf. on Multiphase Flow, Tsukuba (1991)
6. J.M.Mandhane et al.: "A Flow Pattern Map for Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes" Int. J. Multiphase Flow, Vol.1, pp.537-553 (1974)
7. H.C.Simpson et al.: "Two-Phase Flow in Large Diameter Horizontal Tubes" NEL Report No.677 (1981)
8. K.Mishima and M.Ishii: "Theoretical Prediction of Onset of Horizontal Slug Flow" Trans. ASME J. Fluids Engng., Vol.102, pp.441-445 (1980)
9. Y.Taitel and A.E.Dukler: "A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow" AlChE J., Vol.22(1), pp.47 (1976)
10. 椿東一郎: "水理学Ⅱ" (1974)

謝 辞

大型水平ダクト試験装置を用いた実験を行うにあたり、装置を整備・運転して頂いた原子力エンジニアリングの方々に感謝いたします。

参 考 文 献

1. 植田辰洋: "気液二相流" (1981)
2. S.L.Scott, O.Shoham and J.P.Brill: "Modelling Slug Growth in Large Diameter Pipes" Proc. 3rd. Int. Conf. on Multi-Phase Flow, pp.55-63, Hague (1987)
3. Y.Anoda, Y.Kukita, H.Nakamura and K.Tasaka: "Flow Regime Transition in High-Pressure Large-Diameter Horizontal Two-Phase Flow" Proc. 26th ASME/AlChE /ANS National Heat Transfer Conf., Philadelphia (1989)
4. E.S.Kordyban and T.Ranov: "Mechanism of Slug Formation in Horizontal Two-Phase Flow" ASME Journal of Basic Engineering, Vol.92, pp.857 (1970)
5. H.Nakamura et al.: "Horizontal Flow Regime Transition in a Large-Height Long Duct" Proc. Int. Conf. on Multiphase Flow, Tsukuba (1991)
6. J.M.Mandhane et al.: "A Flow Pattern Map for Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes" Int. J. Multiphase Flow, Vol.1, pp.537-553 (1974)
7. H.C.Simpson et al.: "Two-Phase Flow in Large Diameter Horizontal Tubes" NEL Report No.677 (1981)
8. K.Mishima and M.Ishii: "Theoretical Prediction of Onset of Horizontal Slug Flow" Trans. ASME J. Fluids Engng., Vol.102, pp.441-445 (1980)
9. Y.Taitel and A.E.Dukler: "A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow" AlChE J., Vol.22(1), pp.47 (1976)
10. 椿東一郎: "水理学Ⅱ" (1974)

Table 1 水位計取付け位置

水位計番号	試験部入口からの 距離 L (m)	L/D
1	0.57	0.81
2	1.57	2.24
3	2.07	2.96
4	2.57	3.67
5	3.57	5.10
6	4.07	5.81
7	4.57	6.53
8	5.57	7.96
9	10.6	15.1
10	15.6	22.3
11	20.6	29.4
12	25.6	36.6
13	28.2	40.3

Table 2 本研究で実施した主な実験の気液の流量

実験番号	スラッグ発生時刻 (s)	スラッグ発生場所 L/D	気相見かけ速度 Jg (m/s)	液相見かけ速度 Jl (m/s)	局所ボイド率 α	気液の無次元相対速度 Jgl*
1259	49	4~5	0.689	0.943	-	-
1259	282	4~5	0.689	0.943	-	-
1272	184	~4	0.886	0.948	-	-
1285	122	~16	1.33	0.917	0.15	1.56E-02
1285	167	~16	1.33	0.917	0.16	1.56E-02
1294	113	~18	1.80	0.895	0.18	2.16E-02
1294	149	~22	1.80	0.895	0.18	2.16E-02
1307	71	~23	2.25	0.862	0.20	2.74E-02
1307	257	~24	2.25	0.862	0.19	2.76E-02
1433	117	3~4	0.450	0.958	-	-
1433	137	~4	0.450	0.958	-	-
1436	110	~4	0.678	0.943	0.081	7.95E-03
1436	131	~4	0.678	0.943	0.094	7.75E-03
1439	7	~7	0.908	0.933	0.061	1.13E-02
2038	54	~2	0.263	0.990	0.049	2.82E-03
2038	125	2~3	0.263	0.990	0.049	2.82E-03
2038	224	2~3	0.263	0.990	0.047	2.84E-03
2038	237	~3	0.263	0.990	0.046	2.86E-03
2039	82	2~3	0.449	0.988	0.061	5.10E-03
2039	197	~4	0.449	0.988	0.063	5.08E-03
2039	223	~2	0.449	0.988	0.061	5.10E-03
2040	247	2~3	0.688	0.964	0.081	7.99E-03

Table 3 本実験で観察された主な波の特性

実験番号	波の測定箇所 L/D	スラッグ発生場所 L/D	波の見かけ速度 $v_l + c$ (m/s)	波の速度 c (m/s)	波長 λ (m/s)	波の周期 T (s)	λ/h (1/s)	TxT/h (s ² /m)
1285	6.5~8.0	~16	1.38	0.291	0.245	0.844	0.414	1.20
1285	6.5~8.0	~16	1.33	0.241	0.216	0.897	0.366	1.36
1294	6.5~8.0	~18	1.48	0.393	0.258	0.656	0.448	0.75
1294	6.5~8.0	~22	1.43	0.340	0.215	0.631	0.372	0.69
1307	6.5~8.0	~23	1.43	0.352	0.355	1.008	0.632	1.81
1307	6.5~8.0	~24	1.38	0.309	0.320	1.034	0.564	1.89
1436	3.0~3.7	~4	1.75	0.720	0.212	0.295	0.330	0.14
1436	3.0~3.7	~4	2.01	0.967	0.267	0.276	0.421	0.12
1436	3.0~3.7	~4	1.91	0.872	0.254	0.291	0.401	0.13
1439	3.0~3.7	~7	1.80	0.804	0.155	0.193	0.236	0.06
1439	3.0~3.7	~7	1.80	0.804	0.155	0.193	0.236	0.06
2038	2.2~3.0	~2	1.78	0.744	0.237	0.319	0.356	0.15
2038	2.2~3.0	2~3	1.60	0.562	0.190	0.339	0.285	0.17
2038	2.2~3.0	2~3	1.64	0.598	0.160	0.268	0.240	0.11
2038	2.2~3.0	2~3	1.76	0.725	0.171	0.235	0.256	0.08
2038	2.2~3.0	~3	1.89	0.851	0.249	0.293	0.373	0.13
2039	2.2~3.0	2~3	1.74	0.691	0.176	0.255	0.268	0.10
2039	2.2~3.0	2~3	1.92	0.867	0.386	0.445	0.588	0.30
2039	2.2~3.0	~4	1.67	0.619	0.108	0.175	0.165	0.05
2039	2.2~3.0	~2	1.87	0.820	0.243	0.296	0.370	0.13
2039	2.2~3.0	~2	1.78	0.725	0.209	0.288	0.318	0.13
2040	2.2~3.0	2~3	1.61	0.564	0.156	0.277	0.243	0.12
2040	2.2~3.0	2~3	1.57	0.525	0.137	0.260	0.213	0.11

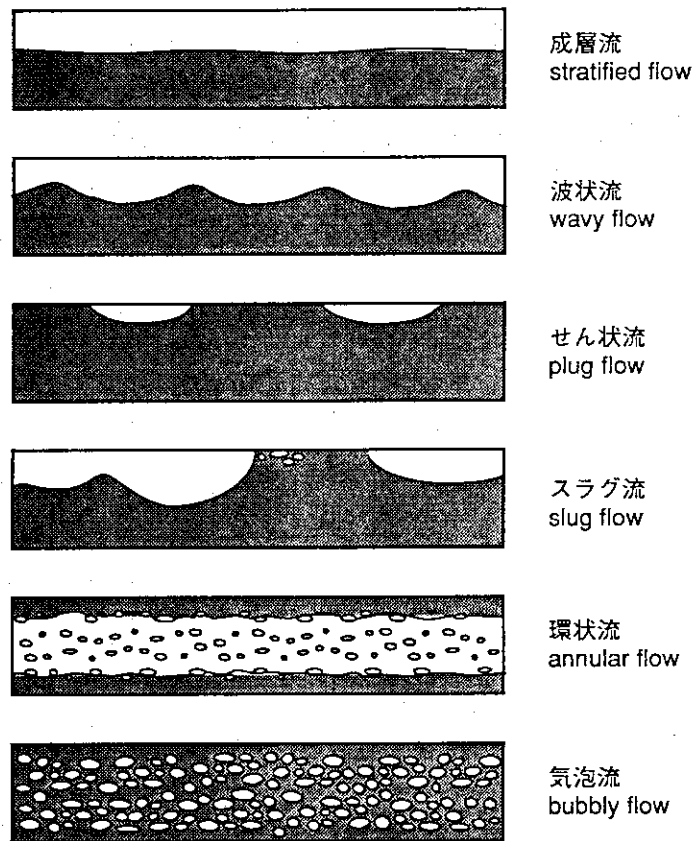


Fig. 1 水平配管における流動様式

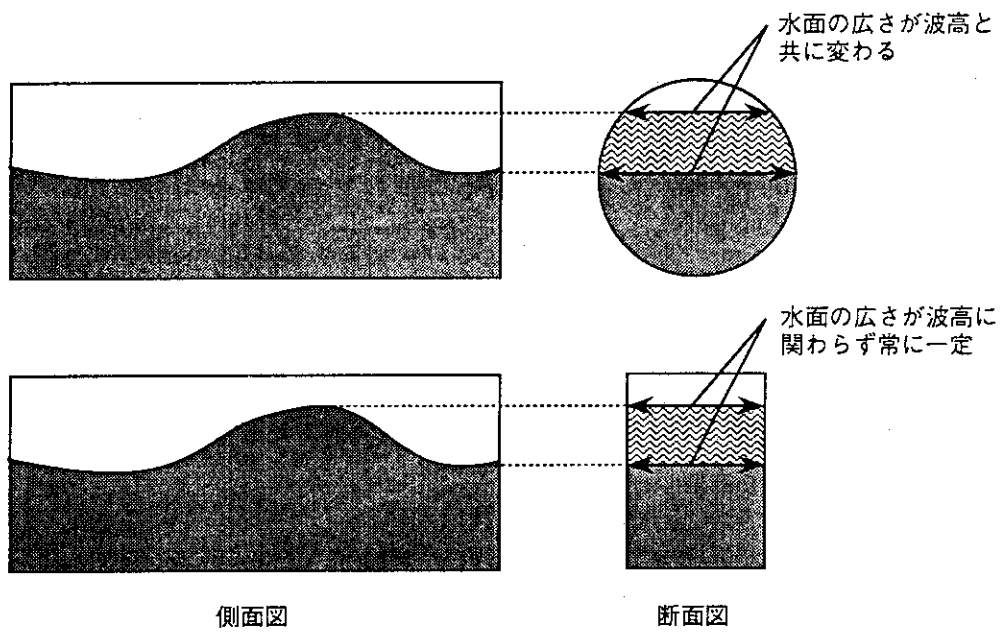


Fig. 2 波の成長過程における円管とダクトの比較

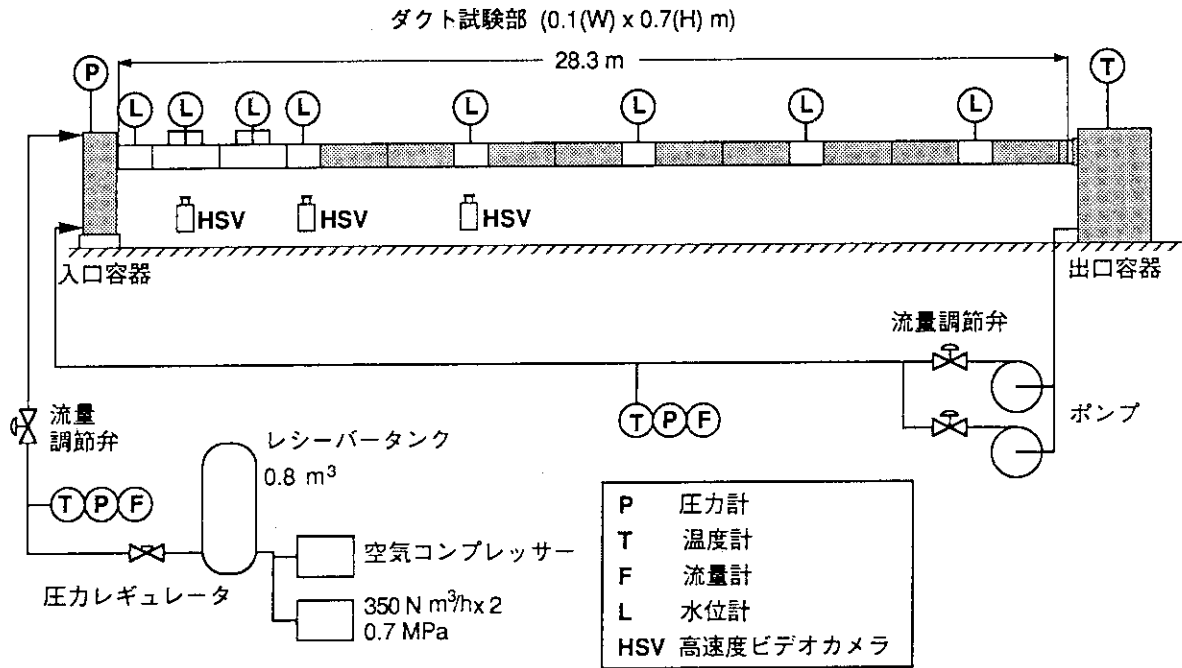


Fig. 3 大型水平ダクト試験装置の概念図

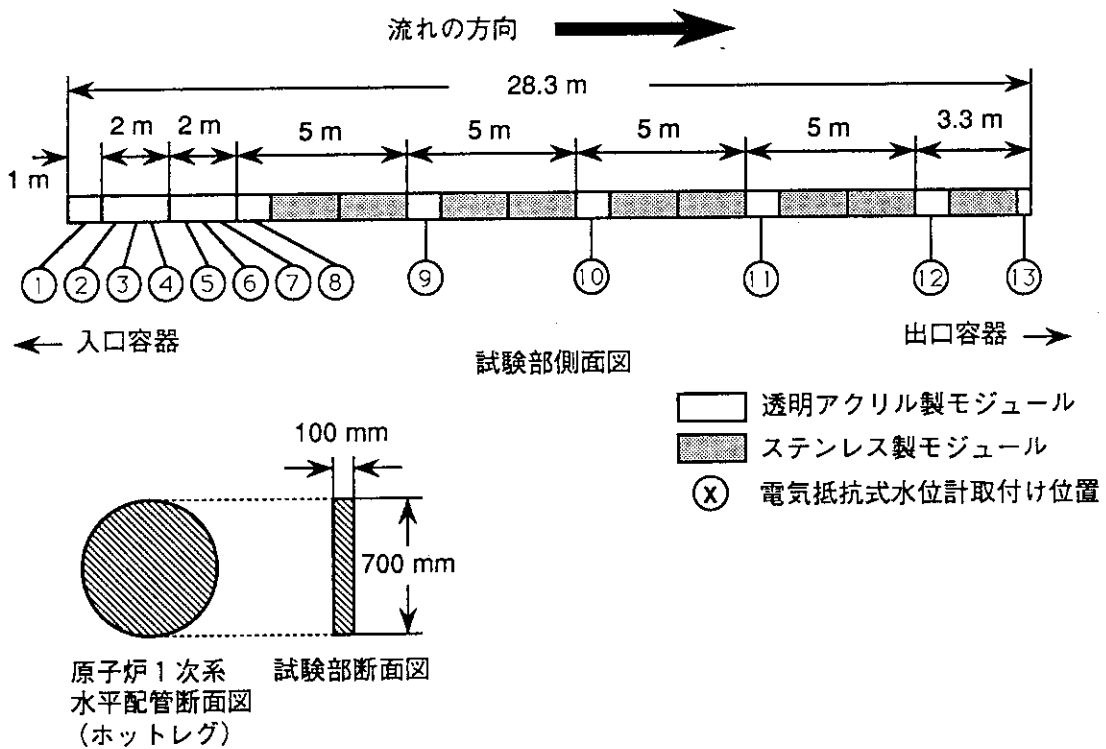


Fig. 4 試験部

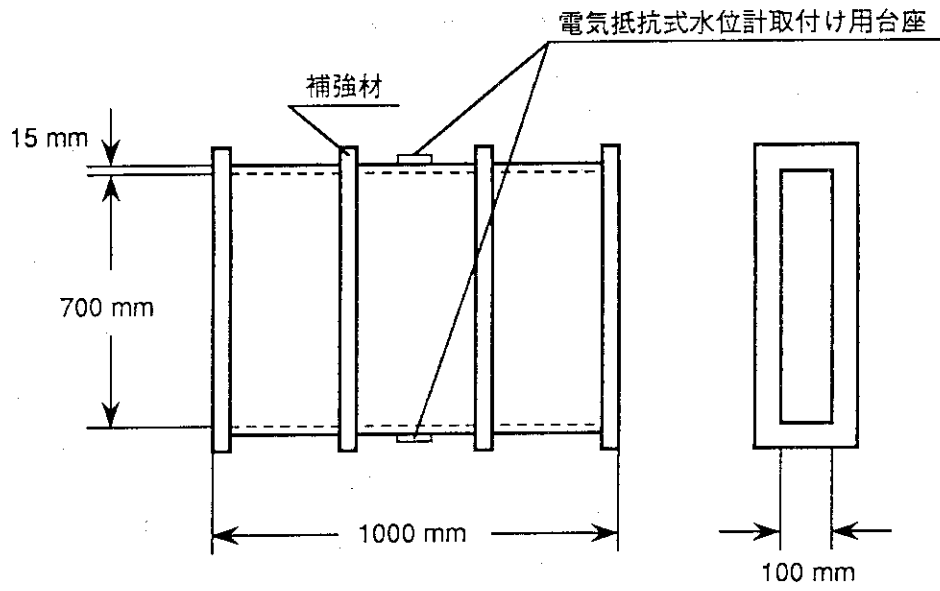


Fig. 5 透明アクリル製モジュール (1 m)

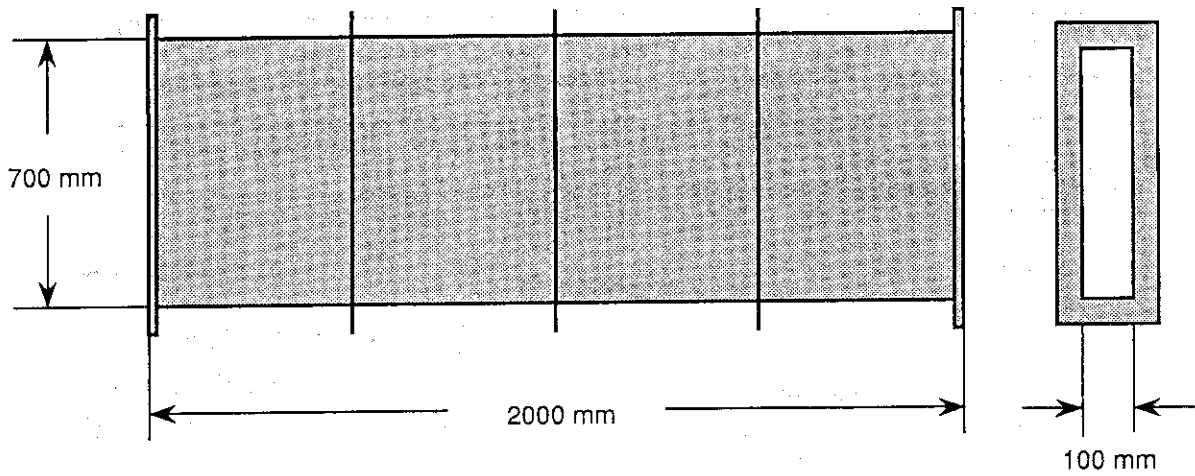


Fig. 6 ステンレス製モジュール

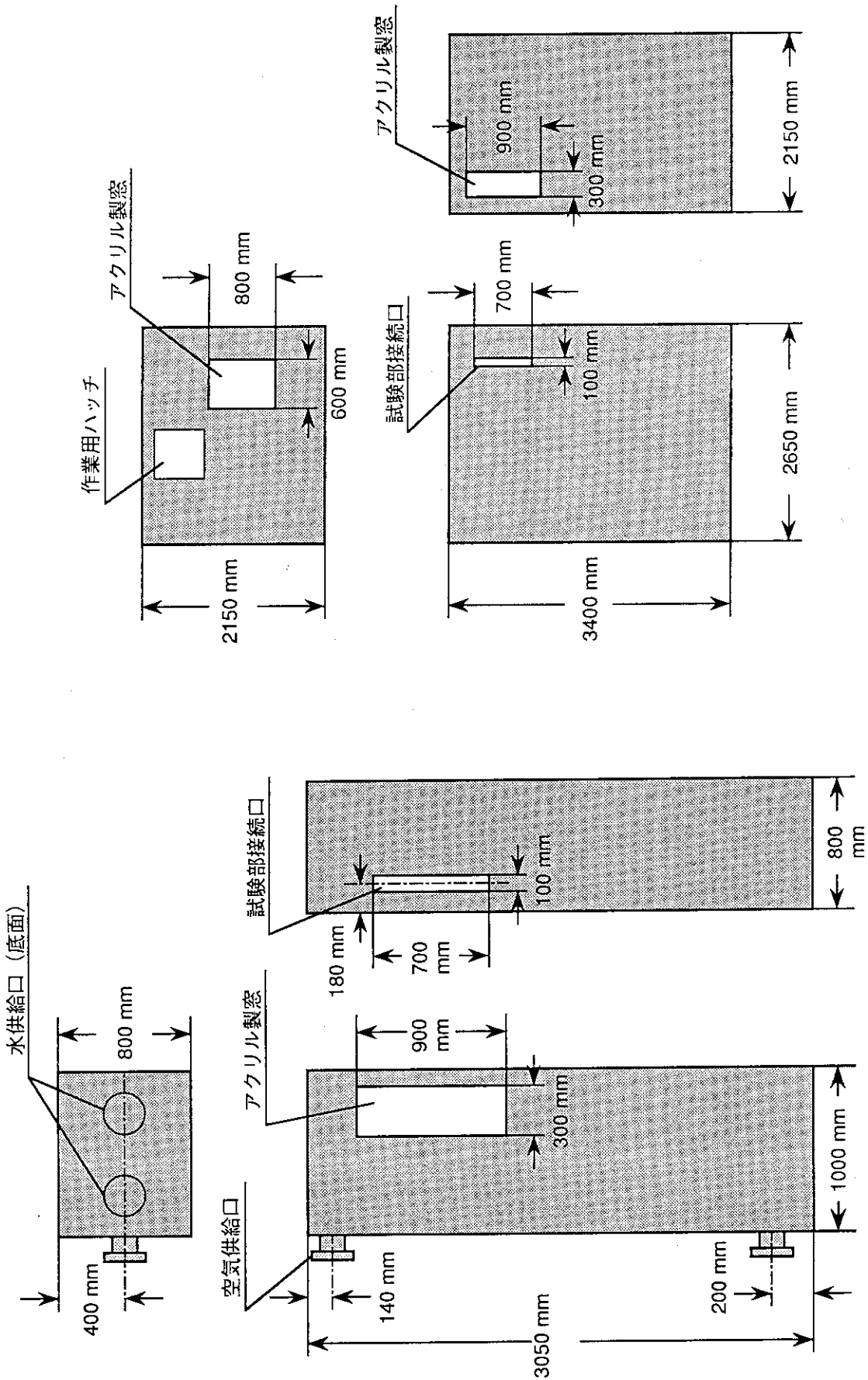


Fig. 8 出口容器

Fig. 7 入口容器

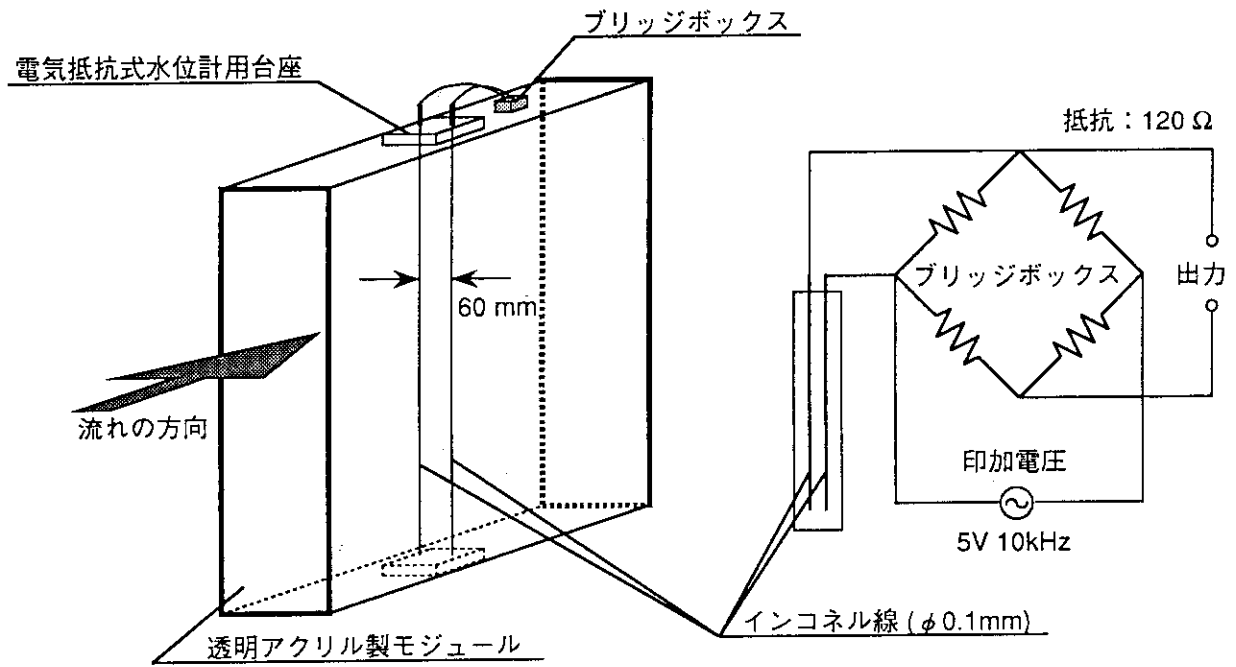


Fig. 9 電気抵抗式水位計

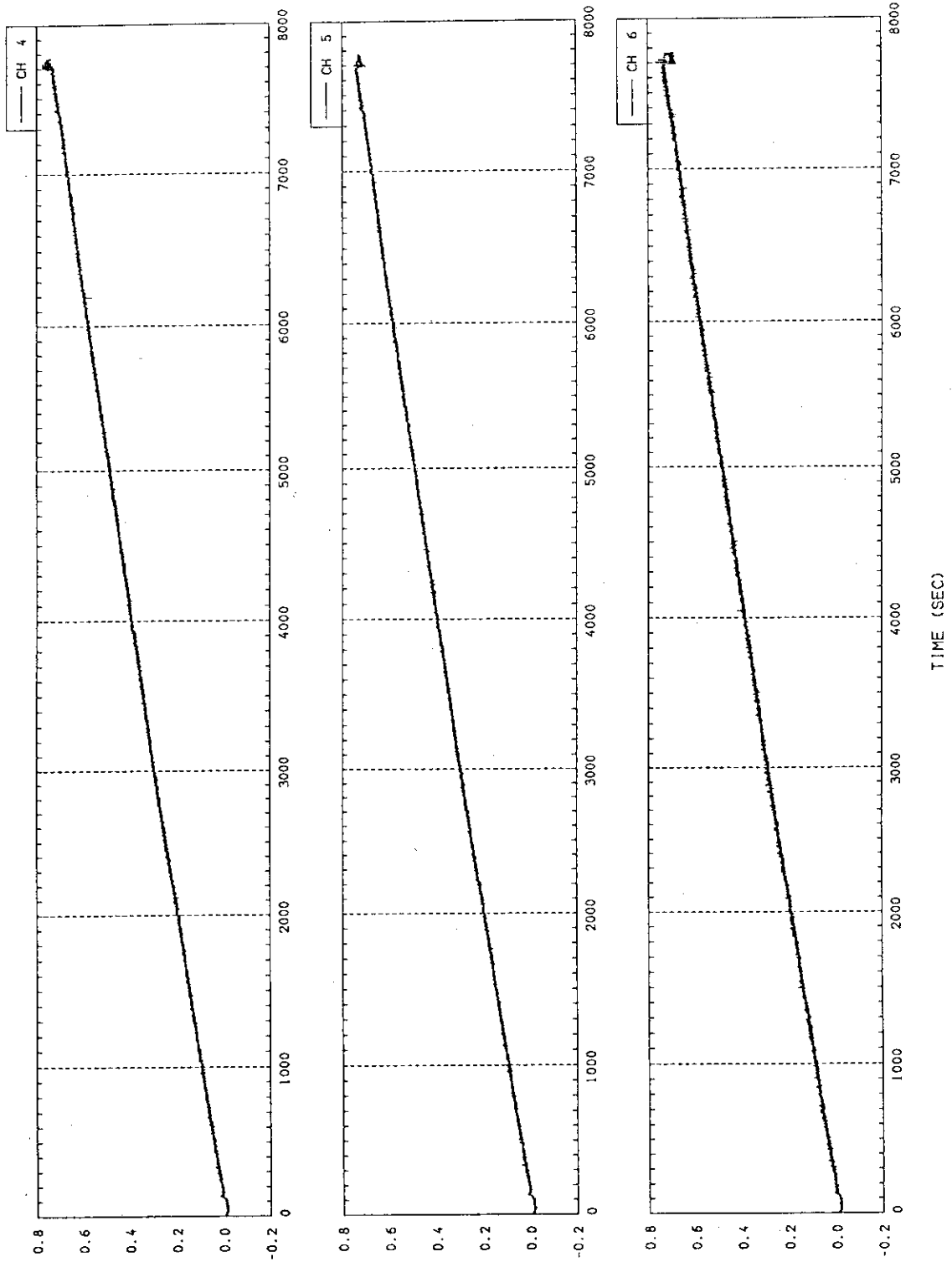


Fig. 10 攪拌作業中の水位計出力

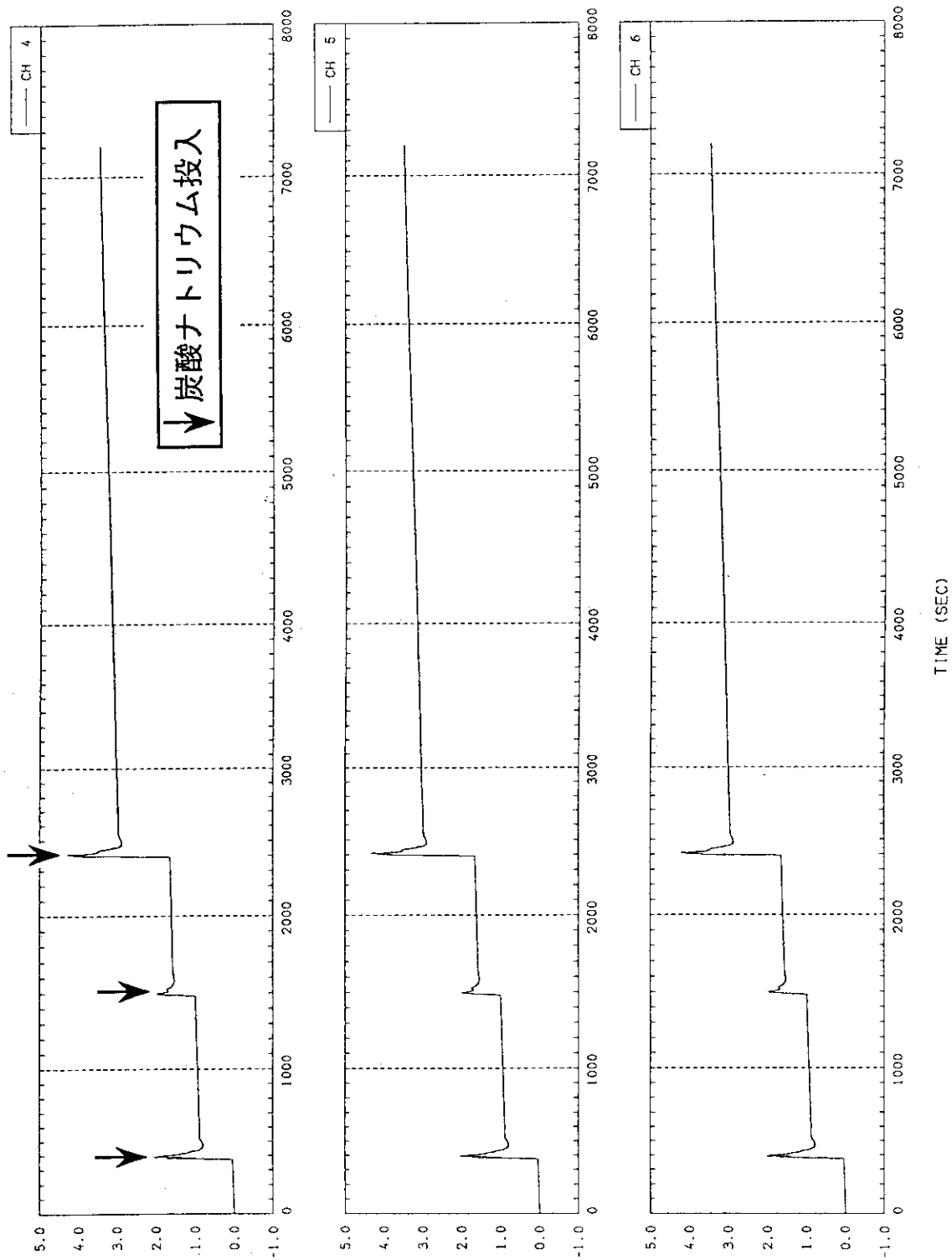
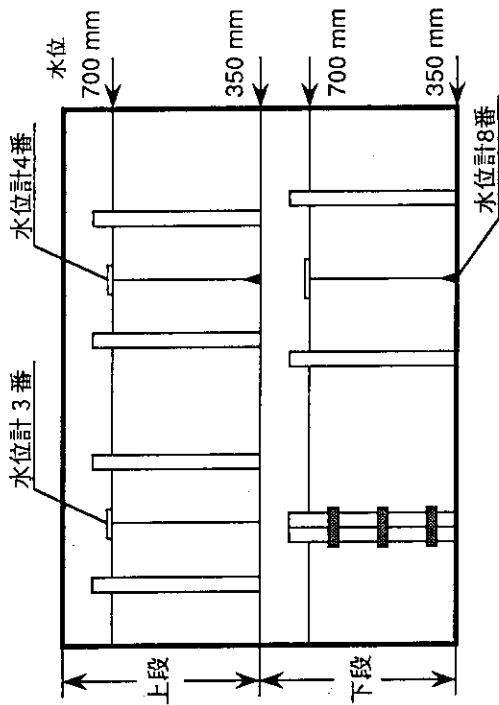


Fig. 11 炭酸ナトリウムの混入・攪拌作業中の水位計出力



上段と下段の縮尺の違いは、ズーム比の違いによる

写真構成図

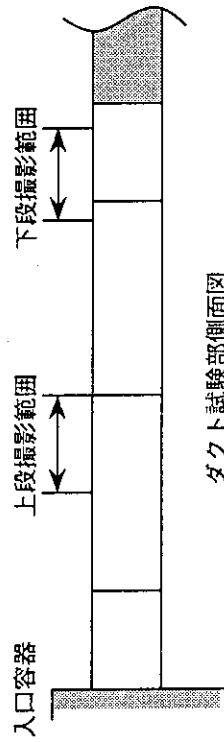


Fig. 13 写真 (高速ビデオ) の撮影範囲

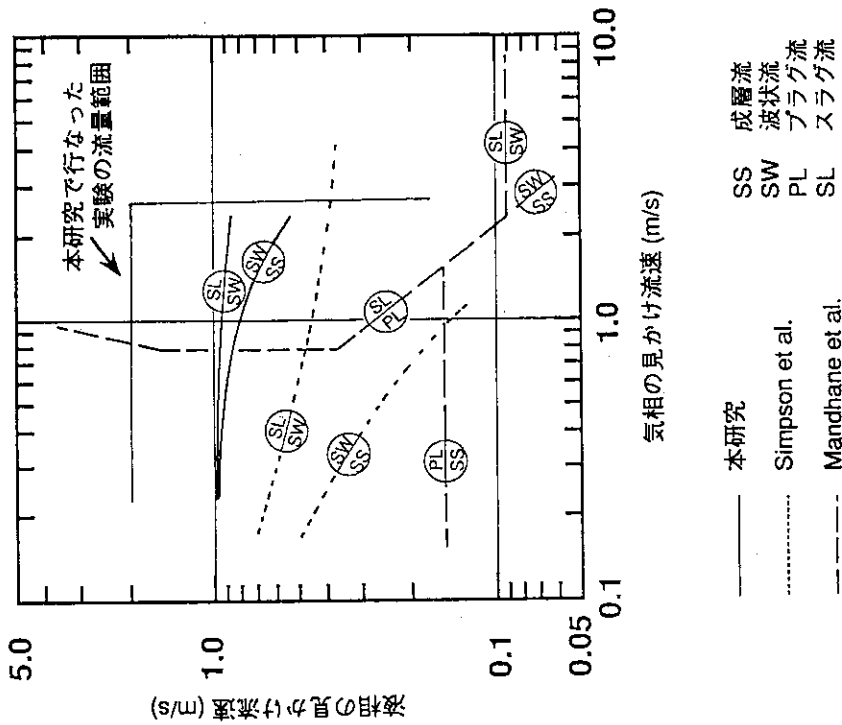


Fig. 12 本研究で行なった実験の流量範囲及び本研究と他研究で観察された流動様式遷移条件の比較

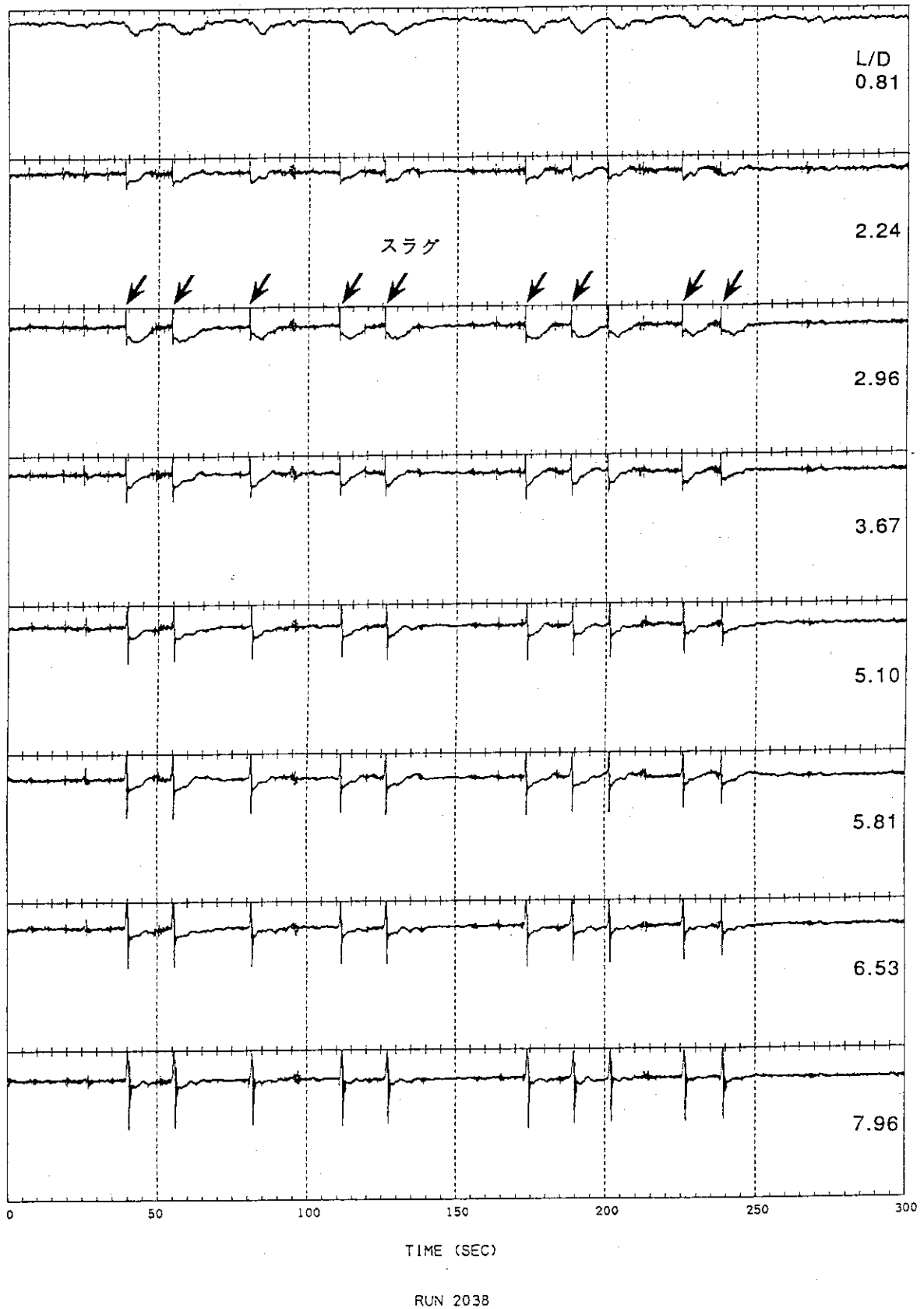
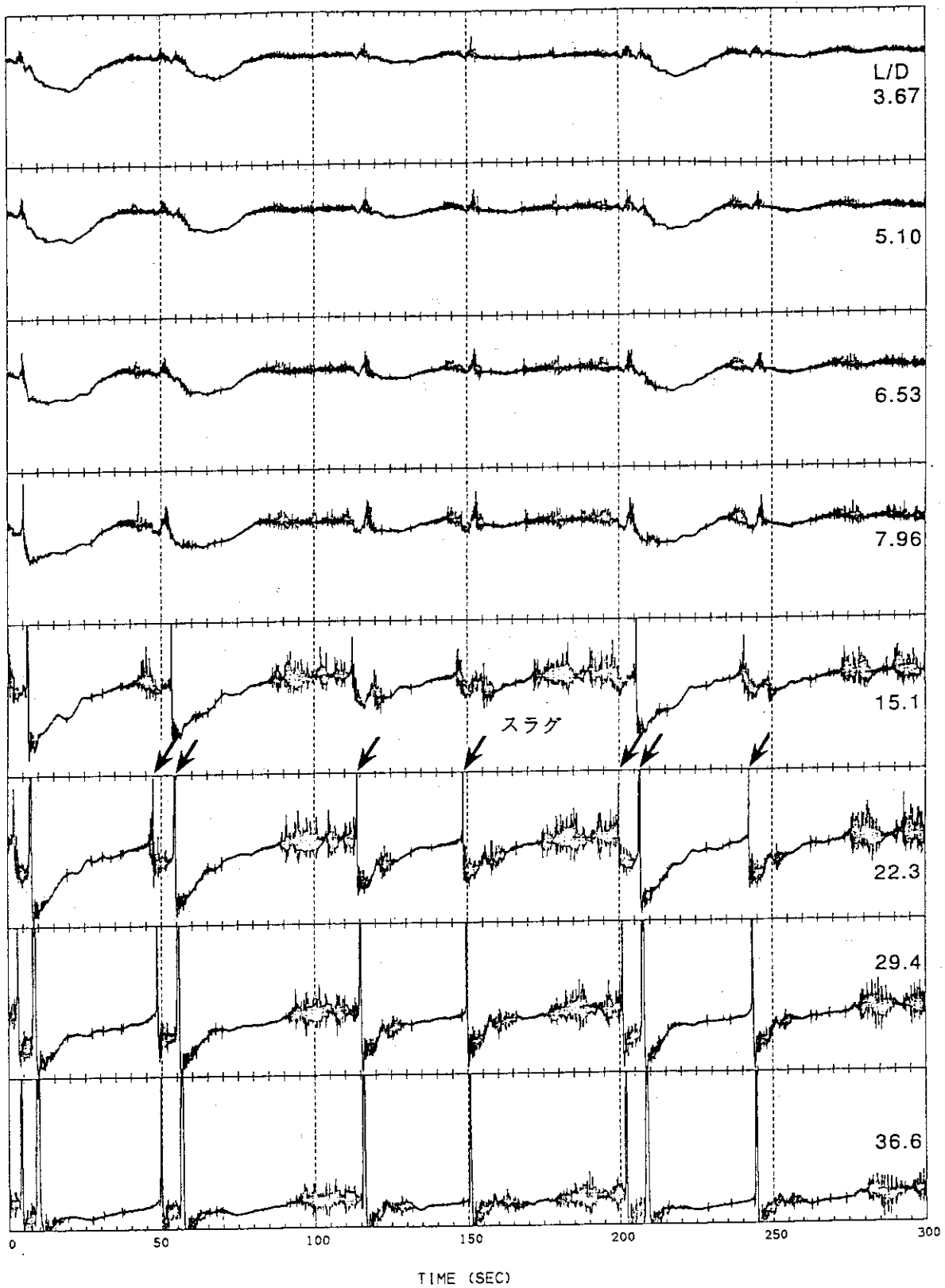
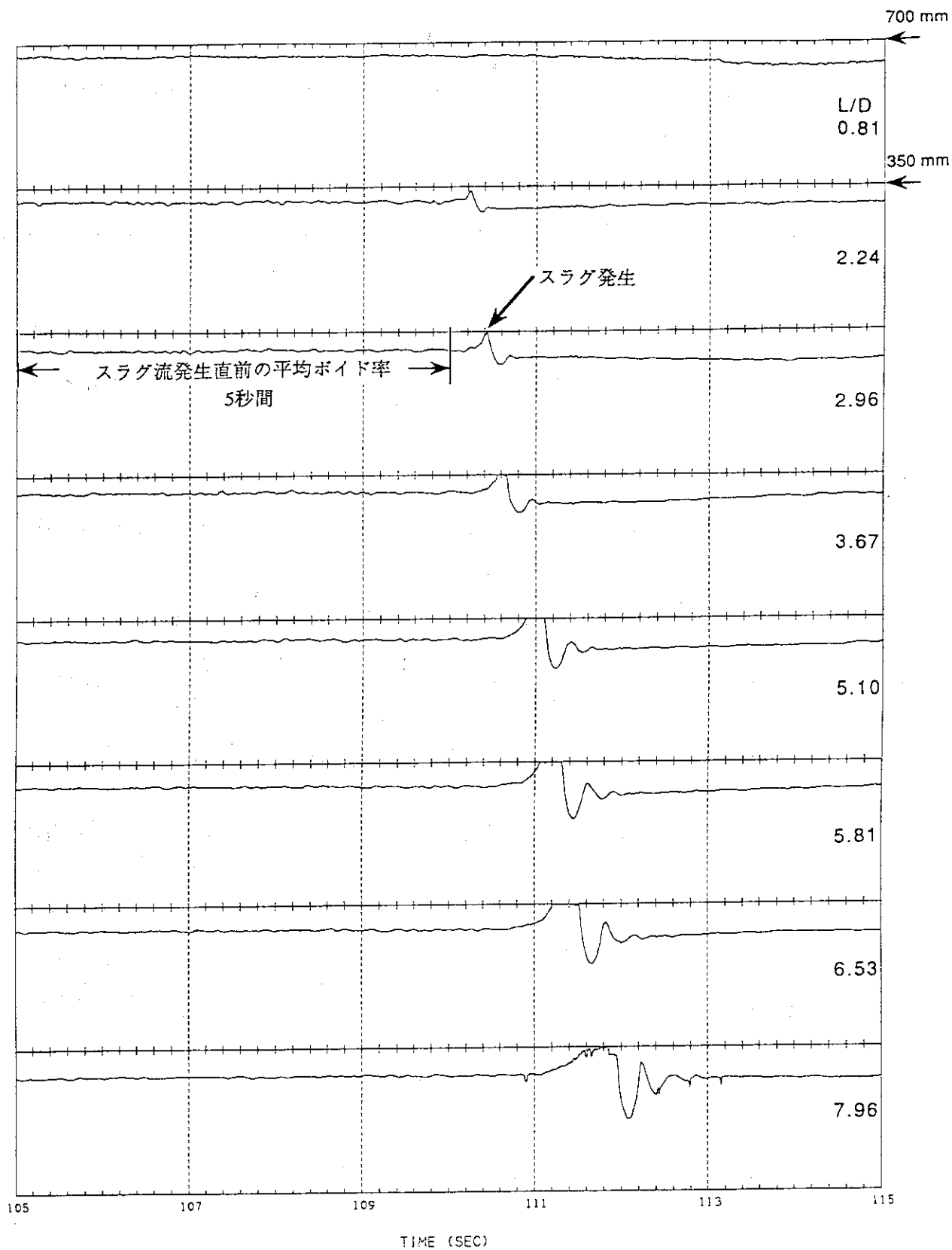


Fig. 14 水位計収録データ例
 (空気流量 $60\text{m}^3/\text{h}$ 水流量 $250\text{m}^3/\text{h}$)



RUN 1294

Fig. 15 水位計収録データ例
(空気流量 400m³/h 水流量 225m³/h)



RUN 2038

Fig. 16 水位計収録データ例
(空気流量 60m³/h 水流量 250m³/h)

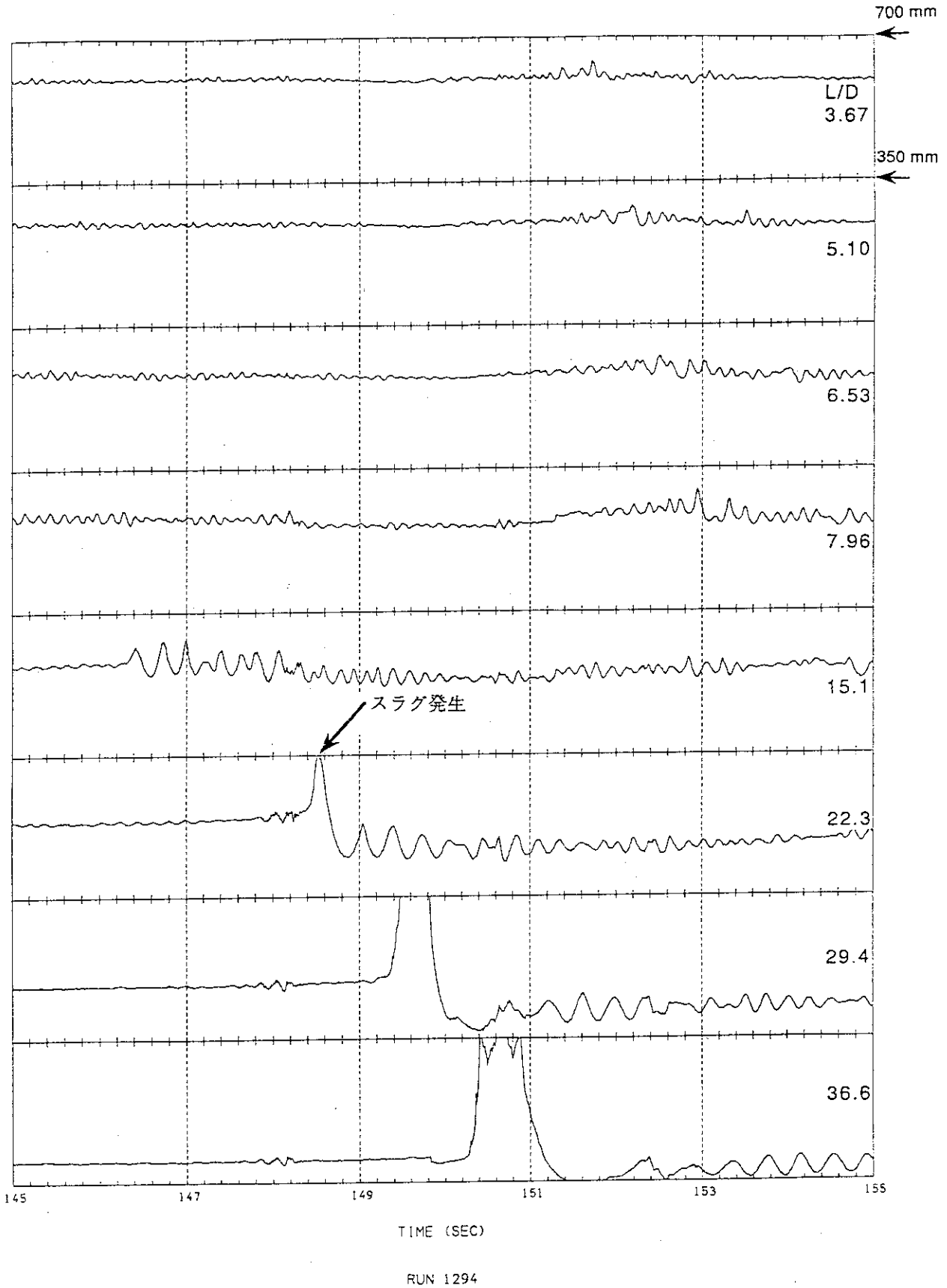


Fig. 17 水位計収録データ例
(空気流量 400m³/h 水流量 225m³/h)

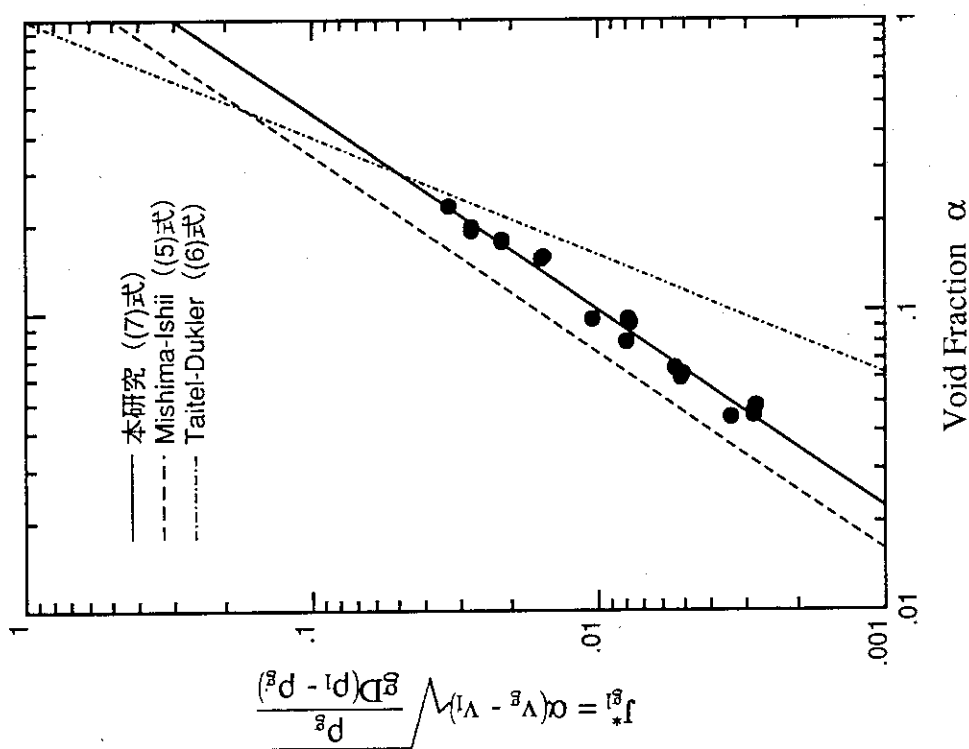


Fig. 18 スラッグ流遷移条件

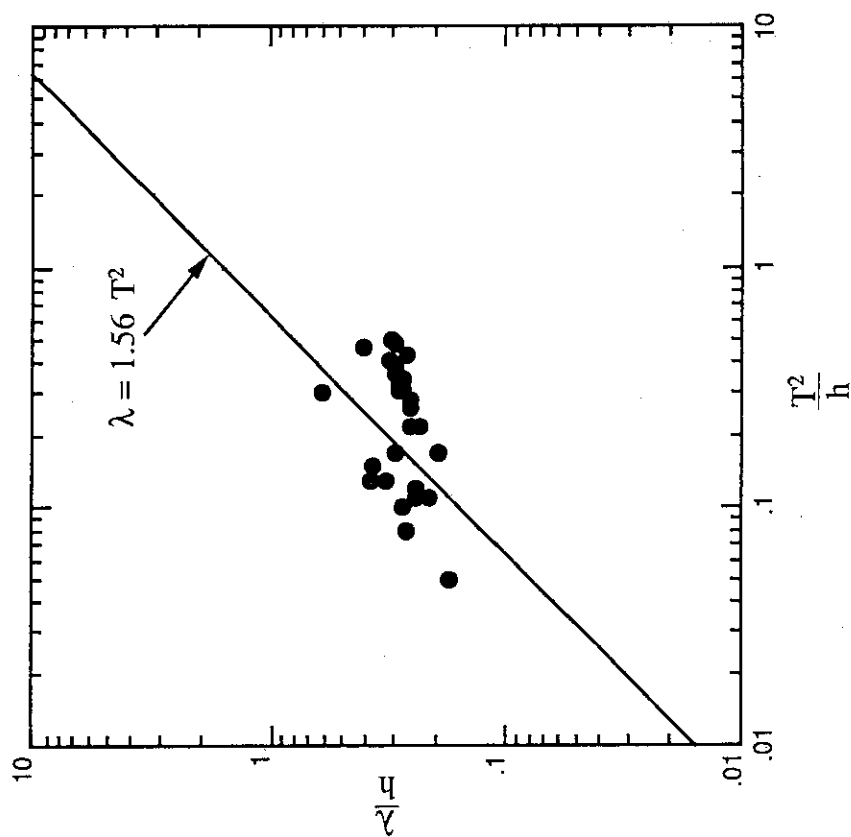


Fig. 19 波の周期, 水深と波長との関係

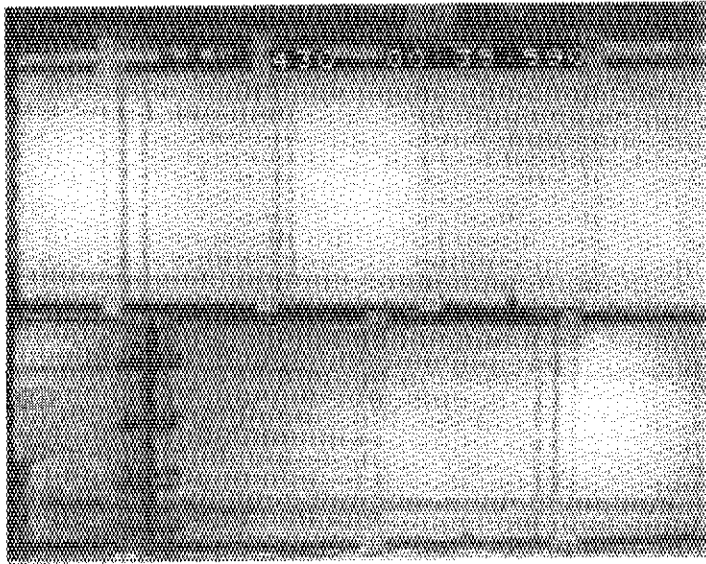


写真1 スラグ通過後に見られる定在波

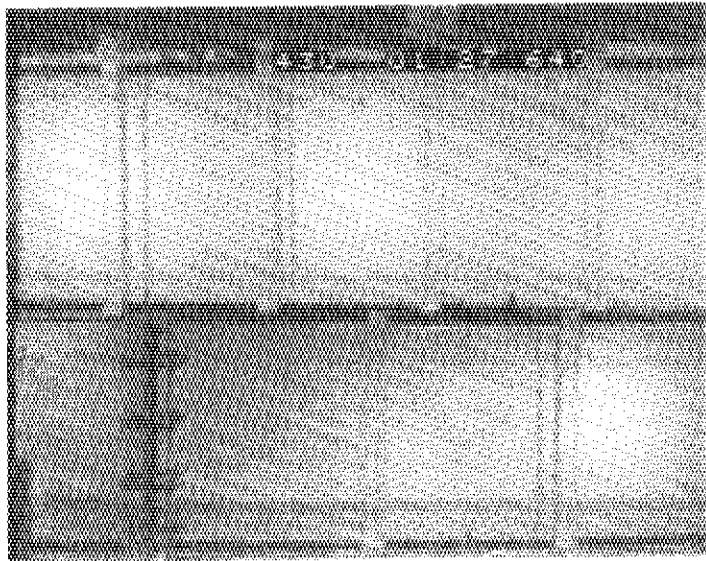


写真2 水位の上昇が止まったときに見られるさざ波（上段）

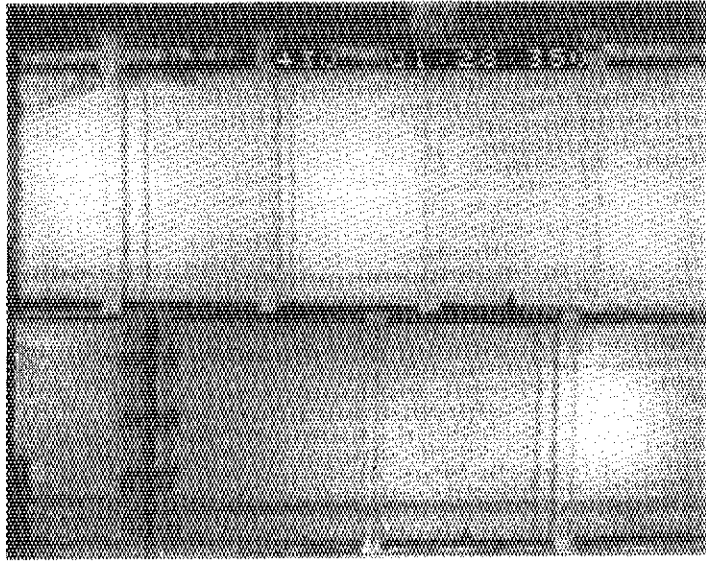


写真3 スラグの発生する瞬間（上段左）

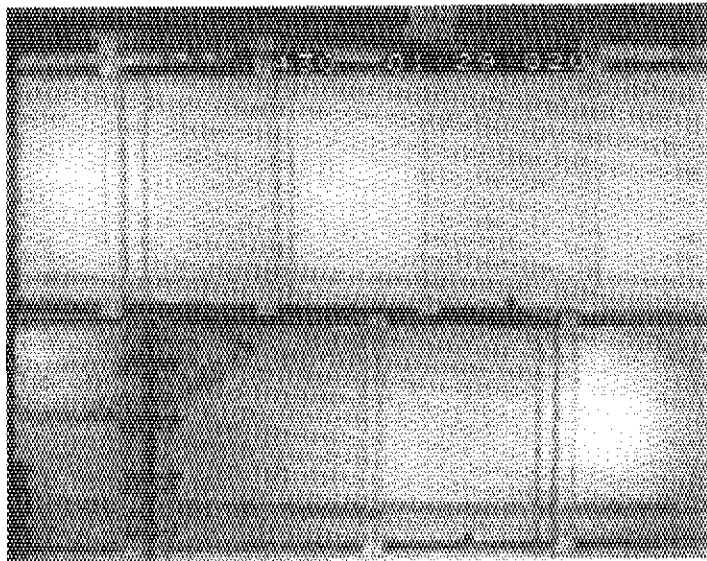


写真4 空気をほとんど含んでいないスラグ（下段）

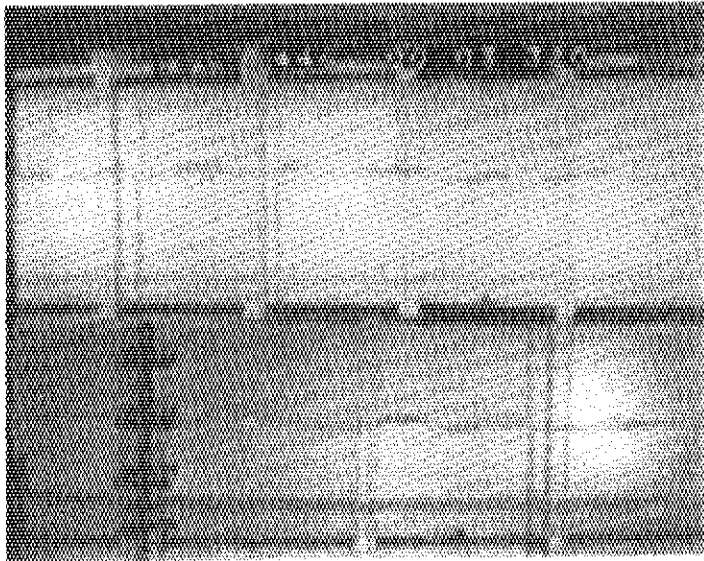


写真5 発生した直後の進行波（上段）

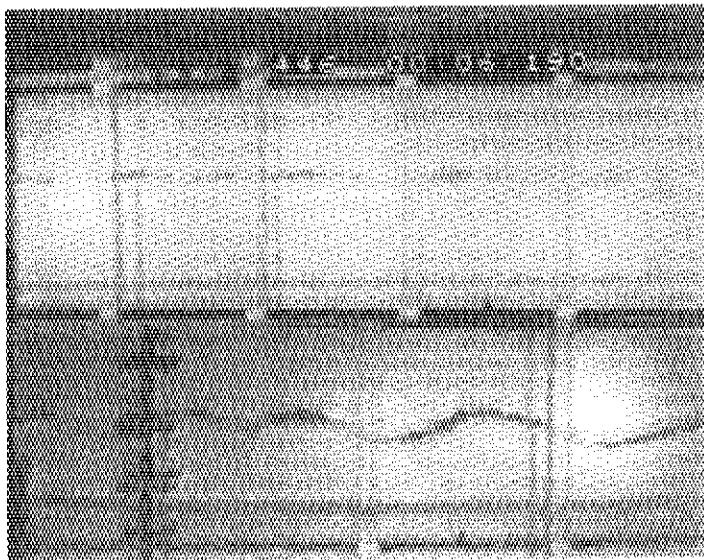


写真6 成長した進行波（下段）

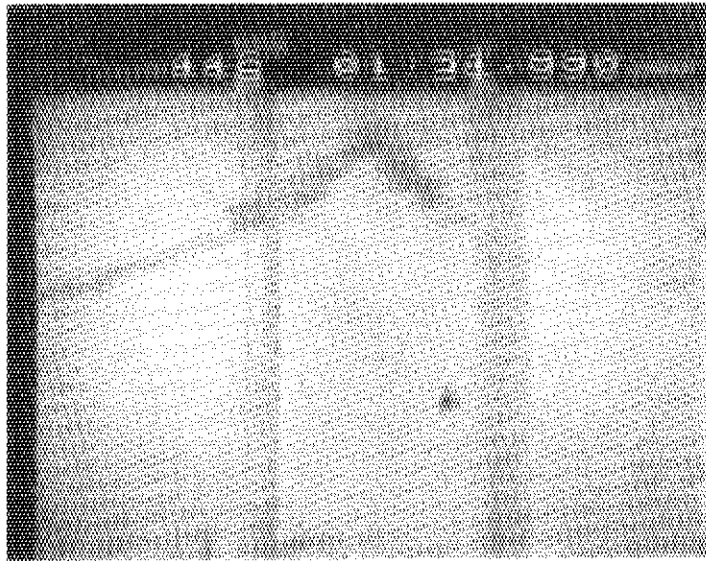


写真7 下流域におけるスラゲの発生の瞬間