

JAERI-Research

94-041



高温粒子表面における膜沸騰の  
崩壊条件に関する研究

1994年12月

八木理公・阿部 豊\*・安達公道\*  
山野憲洋・杉本 純

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、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。

入手の問合せは、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、お申し越しください。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。

This report is issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 いばらき印刷株

高温粒子表面における膜沸騰の崩壊条件に関する研究

日本原子力研究所東海研究所原子炉安全工学部

八木 理公・阿部 豊\*・安達 公道\*

山野 憲洋・杉本 純

(1994年11月8日受理)

原子炉のシビアアクシデント時における蒸気爆発のメカニズムを解明する上では、高温融体が低温低沸点液体中に分散した粗混合状態における膜沸騰の連鎖的崩壊条件を明らかにすることが不可欠である。本研究においては、この条件を明らかにする第一段階として、粗混合状態において高温液滴表面に形成される膜沸騰の崩壊過程を明らかにすることを目的とした実験を行なった。実験では、高温融体を模擬した鋼球を高周波加熱装置によって加熱した後、低温低沸点液体である水に冠水させることで鋼球表面に膜沸騰を形成し、衝撃波発生装置からの衝撃波を当て、その時の鋼球表面温度やその周囲に生ずる圧力の過渡変化を測定した。その結果、鋼球表面温度は初期の圧力波ピークを境にして、2回あるいは数回に分けて非連続的に下降することが分かった。その時の鋼球表面温度の変化は、衝撃波圧力および初期表面温度の条件に応じて、大きく分けて3つのパターンに分けることができた。この3つのパターンは鋼球表面上の膜沸騰の崩壊条件と関連するものであり、今度更に実験データを蓄積することによって、その境界をより明確にする必要があるものと考えられる。

Study of Collapse Conditions of Film Boiling  
on High Temperature Particle Surface

Masahiro YAGI, Yutaka ABE\*, Hiromichi ADACHI\*  
Norihiro YAMANO and Jun SUGIMOTO

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

(Received November 8, 1994)

In order to clarify the mechanism of the vapor explosion during severe accident of nuclear power plant, it is necessary to identify the chain collapse condition of film boiling on high temperature melted metal particles coarsely mixing in the low boiling point liquid. As the first step of the study, fundamental experiments were conducted to clarify the collapse conditions of the film boiling on the high temperature particle surface, which simulated the pre-mixing condition for the vapor explosion. Film boiling condition was established by flooding water onto a high temperature steel ball heated by a high frequency induction heater. After the film boiling was established, shock wave was generated to attack the steam film on the particle surface. In the experiment, surface temperature on steel ball fell discontinuously twice or several. Transients of the temperature on the particle surface were categorized into three patterns according to the conditions of the magnitude of the shock wave and the initial water temperature. These three patterns seem to be corresponding to the collapse condition of the steam film on a high temperature steel particle. Further study is required to clarify the boundary of these three patterns.

Keywords: Vapor Explosion, Pre-mixing, Film Boiling, Shock Wave

---

\* Faculty of Engineering, Yamagata University

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
1.1 蒸気爆発研究の必要性 .....	1
1.2 蒸気爆発の概念 .....	1
1.3 研究目的 .....	2
2. 本実験の狙い .....	5
3. 実験装置 .....	6
3.1 実験装置概要 .....	6
3.2 実験装置主要部分の説明 .....	7
3.3 テスト部本体詳細 .....	8
4. 実験結果および考察 .....	14
4.1 実験結果 .....	14
4.2 膜沸騰が消滅したときの実験結果の詳細 .....	15
4.3 初期条件による実験結果の分類 .....	16
5. 結 言 .....	24
謝 辞 .....	25
参考文献 .....	25
付録A 従来の蒸気爆発研究 .....	26
付録B ライデンフロスト現象 .....	40
付録C 実験手順 .....	42
付録D 設計計算及び設計過程 .....	47
付録E 実験装置設計図 .....	52
付録F 実験装置 .....	60

## Contents

1. Introduction .....	1
1.1 Needs of Study on the Vapor Explosion .....	1
1.2 Concept of Vapor Explosion .....	1
1.3 Objectives of Present Study .....	2
2. Aim of Present Experiment .....	5
3. Experimental Facility .....	6
3.1 Outlines of the Experimental Facility .....	6
3.2 Main Parts of the Experimental Facility .....	7
3.3 Details of the Test Section .....	8
4. Results and Discussions .....	14
4.1 Experimental Results .....	14
4.2 Details of the Result when Film Boiling was Collapsed .....	15
4.3 Categorization of the Results by Test Condition .....	16
5. Conclusions .....	24
Acknowledgements .....	25
References .....	25
Appendix A Previous Experiments on Vapor Explosion .....	26
Appendix B Leidenfrost Phenomenon .....	40
Appendix C Experimental Procedure .....	42
Appendix D Design Informations .....	47
Appendix E Design Drawing of the Experimental Facilities .....	52
Appendix F Photograph of the Experimental Facility .....	60

## 1. 緒 言

### 1.1 蒸気爆発研究の必要性

蒸気爆発は、原子炉のシビアアクシデント時における溶融炉心と冷却剤との相互作用によって発生し、それによる格納容器破損の可能性が指摘されている。1961年にアメリカで起ったSL-1と呼ばれる軍事用の実験のために作られた沸騰水型原子炉の事故は、原子炉を停止して保守作業を行なっている最中に制御棒を誤って引き抜いてしまい、この結果、原子炉が暴走して燃料要素の部分的な溶解が起こり水と熱的相互作用を起こし蒸気爆発が生じたとされている。1986年に起きた伊豆大島三原山の噴火では高温のマグマが海水や地下水と接触してマグマ水蒸気爆発が起こり大災害になる危険性が指摘された。こういった災害の防止の為に、蒸気爆発の発生条件や蒸気爆発によってどの程度の圧力が生じるのかを知っておくことが大切である。しかし、蒸気爆発は極めて短時間で起こる現象であるため観察が難しく未知の部分がまだ残されている。したがって、蒸気爆発のメカニズムの解明の研究を行っていくことが必要である。

### 1.2 蒸気爆発の概念

Fig. 1.2.1<sup>(1)</sup>に示すように、ひと塊の高温高沸点液体、例えば溶けた鉄が水に代表される低温低沸点液体に落下すると、溶融金属の塊は水中でバラバラに細かくなり粗い液滴として分散する。この状態を粗混合と言うが、溶けた金属の温度は1000°C以上であるから細かく分散した金属液滴の周りには蒸気の膜が出来て覆ってしまい、膜沸騰状態になる。そして、どこか一ヶ所で蒸気膜が壊れると、金属と水が直接接触すると同時に高温液滴の微細化が始まる。そして、表面積増加のため急激な熱移動が行われ、瞬時に大量の水蒸気が発生して、周りの水を押し退けようとして圧力波を発生する。この圧力波が水中を伝播して瞬時に残りの蒸気膜を壊していく、そのため高い圧力ピークが発生して周囲の施設を破壊する。これが蒸気爆発と言われるものである。

蒸気爆発の発生機構としては、以下の二つのモデル<sup>(2)</sup>が提唱されている。

①自発核生成モデル

②熱的デトネーションモデル

70年代に提唱されたこの2つのモデルがその後の研究の進展に大きく影響している。①の自発核生成モデルについて、Fig. 1.2.2<sup>(3)</sup>は自発核生成温度と蒸気泡核生成率の関係を示したものである。蒸気泡核生成率というのは、単位体積、単位時間当たりできる自発核の個数のことである。温度が上昇するにつれてわずかに個数が増えるが、点線の温度に近づいたところで急激に増加する。単位体積単位時間当たりできる核の個数は、ボルマーの式によつて温度に対して指数関数で増加する関係がある。理論的にはこの点線の温度が自発核生成温度になる。つまり、自発核生成モデルとはFig. 1.2.3<sup>(4)</sup>に示す高温高沸点液体と低温低沸点

液体の接触時の界面温度 ( $T_1$ ) が、自発核生成温度 ( $T_{SN}$ ) よりも高いとき、爆発的に蒸気泡が発生して急激な蒸気生成から極めて高い圧力波の発生に至るとするモデルである。

②の熱的デトネーションモデルは、Fig. 1.2.4<sup>(5)</sup>に示すように膜沸騰状態にある高温高沸点液体が低温低沸点液体中に分散した粗混合状態のとき、膜沸騰を破壊するのに十分な強さの圧力が到来し、蒸気膜が破壊される。高温液滴と低温液の密度の相違に基づいて加速度の差が顕著になり、高温液滴が細粒化して伝熱面積の増大と直接接触によって急速な熱の移動が起こり、蒸気の発生によって圧力が上昇して蒸気爆発となる。

以上の二つのモデルが提唱されているが、蒸気膜の崩壊過程や高温液の細粒化の様子、急速伝熱過程を実験的に確認することが難しいこともあって、二つのモデルの解明はまだ十分ではない。その後、より詳細なメカニズムを記述したモデルも多数提案されているが、これらのモデルも実験的検証は十分ではない。参考に、従来の蒸気爆発小規模実験を付録Aに示した。

### 1.3 研究目的

本研究では、低温低沸点液体中に分散した高温融体の粗混合状態における膜沸騰蒸気膜の崩壊条件を調べることを目的とした。そのために、粗混合状態の溶融金属の代わりに鋼球を高周波加熱装置によって加熱し、膜沸騰状態を形成した後、衝撃波発生装置によって発生する圧力波を当てた。その際の膜沸騰の崩壊特性を粒子の個数や粒子の径、衝撃波の大きさ、崩壊前の粒子の表面温度をパラメーターとして調べ、基礎的データベースを作成することとした。今回の実験では、直径10mmの鋼球一個の膜沸騰の崩壊特性について調べた。

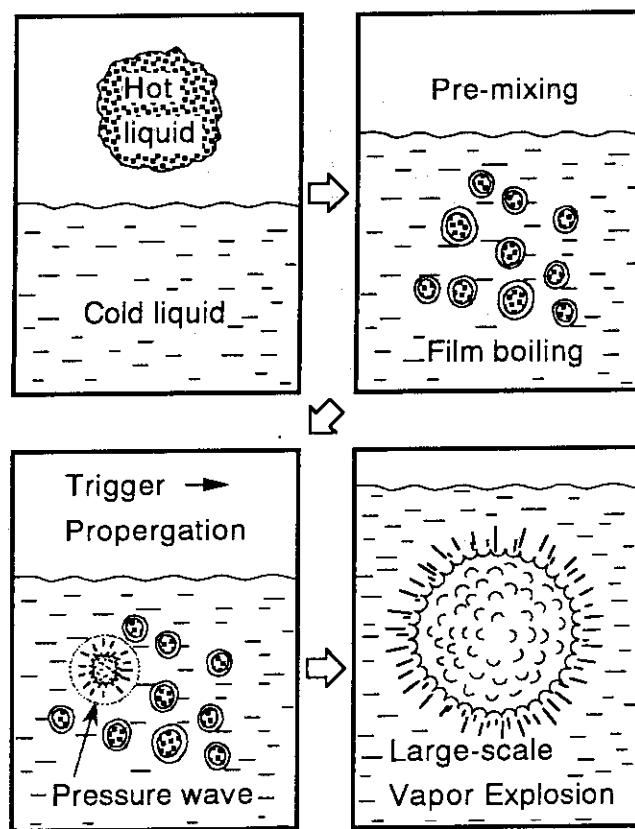


Fig. 1.2.1 蒸気爆発の概念<sup>(1)</sup>

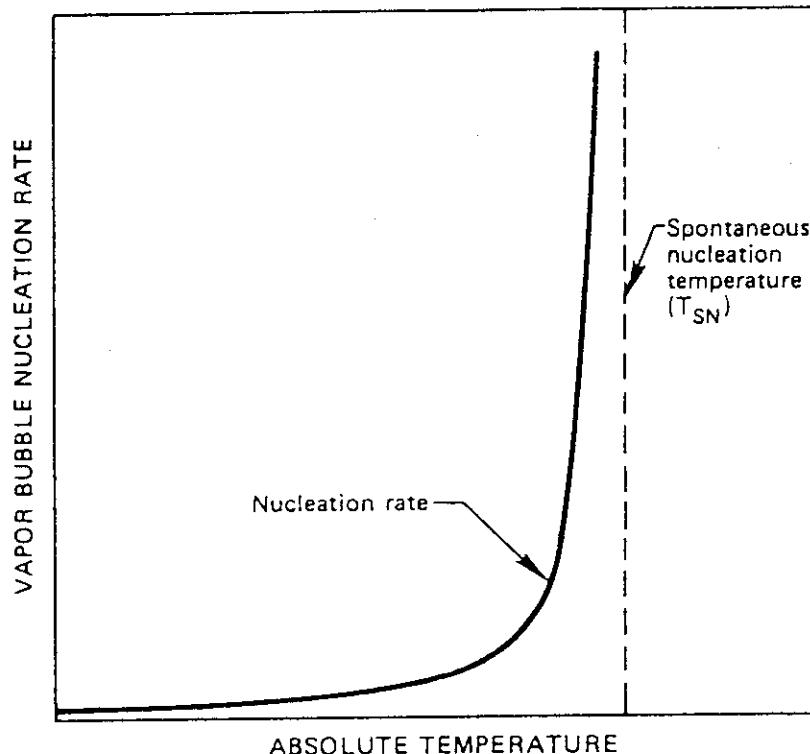


Fig. 1.2.2 自発核生成速度と自発核生成温度<sup>(3)</sup>

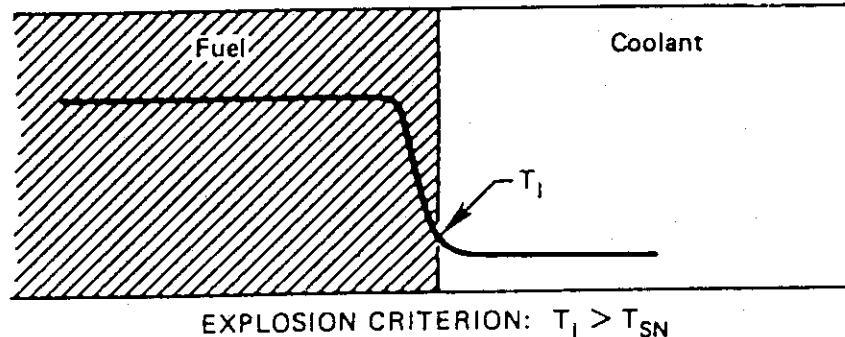


Fig. 1.2.3 二液体が接触した直後の温度分布<sup>(4)</sup>

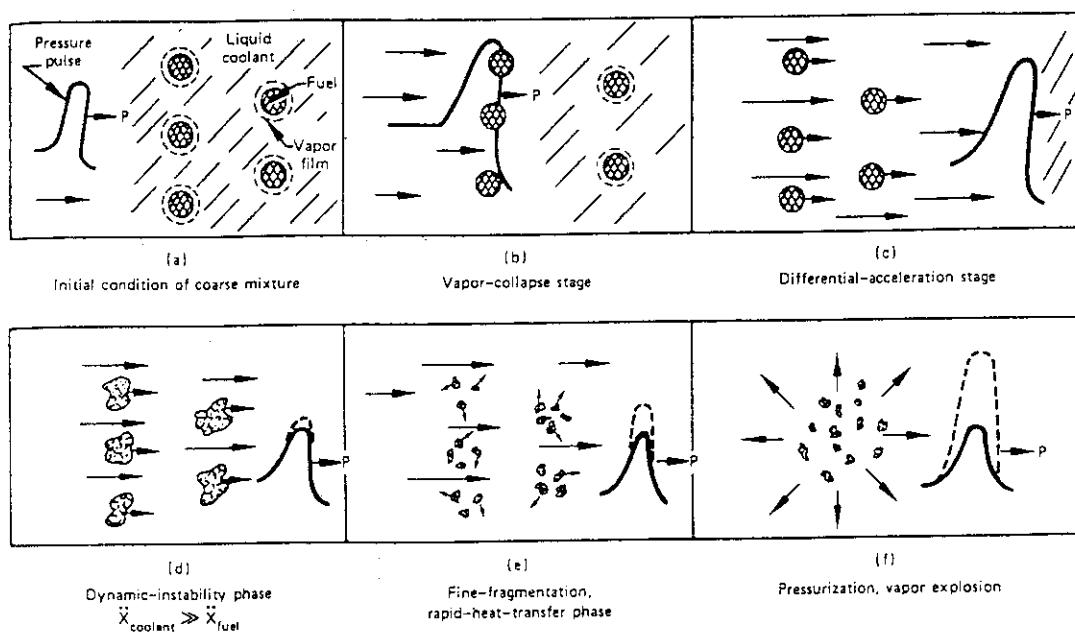


Fig. 1.2.4 热的デトネーションモデルの細粒化の概念<sup>(5)</sup>

## 2. 本実験の狙い

本研究の具体的な狙いは、粗混合状態における膜沸騰の崩壊条件を調べることである。前節のFig. 1.2.1で表した蒸気爆発の概念図の粗混合からトリガーに至る行程を明確にし、蒸気爆発のトリガリングとなる直接の原因についての特定を行う。つまり、あるトリガーが働いたとき、粗混合状態の高温粒子表面に形成された膜沸騰はどの程度の圧力で崩壊して、その高温粒子周囲あるいは高温粒子自体、残りの膜沸騰にどのような影響をもたらすのかを実験的に調べる。そこで低温低沸点液体中に分散した粗混合状態の溶融金属の代わりに複数の鋼球を使用してFig. 1.2.1における粗混合状態を模擬し、その鋼球に衝撃波発生装置によるトリガーとなる圧力波を当てることでFig. 1.2.1におけるトリガー状態を強制的に模擬する。その時、膜沸騰の崩壊に伴って発生する圧力が周囲の他の膜沸騰にどのような影響を与えるのかを鋼球周辺の圧力測定や鋼球表面の温度測定を行うことで上記の狙いを実現するものとした。そして、粒径や粒子密度、粒子間隔、初期の粒子表面温度、トリガーの強さ等をパラメータとしたデータベースを作成し、蒸気爆発におけるトリガリングに必要な条件を把握する。

本実験の特徴は、粒子径や粒子密度さらには衝撃波圧力などを所定の値に設定することによって、初期条件、境界条件を既知のものとすることができることがある。従来の研究においては（付録A 参照）、井上ら<sup>(6)</sup>の実験では白金箔によって膜沸騰を形成し衝撃波管により圧力波を当て、膜沸騰熱伝達率の変化について調べているが、蒸気爆発における粗混合状態の蒸気膜の崩壊に対する模擬性に欠けているものと考えられる。高島ら<sup>(7)</sup>の実験では溶融塩液滴を低温液に落とし、針山状の障害物によって蒸気膜を破壊しその時の圧力波を測定しているが、崩壊条件を調べることは出来ていない。このように、白金箔や液滴による類似の実験は行われているものの、粒子群を用いた実験は行われておらず、本実験によって得られるデータは蒸気爆発におけるトリガリングに関する貴重な基礎データになるものと思われる。

低温低沸点液体は水を使用することにした。理由は、取扱いが容易であり、定電流法によるボイド率測定が可能、サブクール度の制御が可能であるなどの利点があるためである。

圧力センサーについては従来の蒸気爆発研究による圧力波形のデータを基に選定した。高島ら<sup>(7)</sup>の実験結果によると最大圧力値は約1MPaで、テスト部内での反射も含めた圧力ピークの発生間隔は0.5～1msの高振動数であることから、応答性の高いセンサーが必要とされるものと考えられる。圧力測定のためには10kgf/cm<sup>2</sup>以上、固有振動数は100kHz以上の圧力センサーを使用することにし、急激な圧力変化の測定にも対応出来るようにした。

鋼球の加熱温度については、ライデンフロスト温度以上に加熱すれば膜沸騰を形成できるものと考えられる。水の自発核生成温度が約315°Cであることを考慮して、本実験では鋼球の温度を約400°C以上に加熱して行うこととする。なお、ライデンフロスト温度の定義を付録Bに示す。

### 3. 実験装置

#### 3.1 実験装置概要

Fig. 3.1.1に実験装置概要図を示す。主にテスト部本体、テスト部上部につながる上部管、テスト部下部につながる下部管、衝撃波発生装置に大別できる。テスト部本体はガラス管であり、その他の管はSUS304を使用している。

テスト部は内径50mm、肉厚5mm、長さ800mmのパイレックスガラス管を使用している。ガラス管の中央には鋼球がテスト部上部管から熱電対で吊るされている。鋼球には直径0.55mmの穴を貫通させてあり、そこに直径0.5mmのシーズ熱電対を入れ、周りをかしめることによって鋼球に熱電対を固定している。熱電対はガラス管の中を通りテスト部上の上部管からコンプレッションフィッティングを通ってアナライジングレコーダに接続してある。テスト部ガラス管の周りには高周波加熱装置の銅コイルが巻かれていて、これによってテスト部中央の鋼球を加熱する。高周波加熱装置は設計上、発振周波数100～150kHz、定格出力50kWまで加えることができる。

タンク水温は7.5kWヒータのスイッチのオン・オフによって制御されていて、ポンプ出口で主要循環経路から分岐しタンクへ戻る循環経路でタンク内の全体の水温を均等にしている。水面の高さは、上部管に取り付けられた電極プローブがある一定の水位を感じて、水入り口バルブを閉じる仕組みとなっている。このとき同時に、リレー回路を介して、ある一定のタイムラグを置いてから、衝撃波発生装置が作動するようになっている。また、下部管には、出口水温を計測するために、熱電対のコンプレッションフィッティングを取り付けられるようになっている。

衝撃波発生装置は、高圧容器の蓋となる薄いフィルムを槍が破くことによって圧力波を飛ばす機構となっている。槍は電磁弁の開閉によってピストン・シリンダに窒素ガスを注入し、上下に運動するようになっている。高圧容器の圧力調整は2つの電磁弁で加圧、減圧することによって行う。フィルムは厚さ0.025mmのサンドマット製図用フィルムを使用している。

実験データの収録方法は、各計器から得られるアナログの電圧変化をアンプを介してアナライジング・レコーダに一端収録し、計測が完了してから、アナライジング・レコーダのデジタルデータをGP-IBボードを介して計算機に取り込み、フロッピーディスクに保管している。但し、アナライジング・レコーダには各種熱電対用のアンプが内蔵されていて、熱電対はアンプを通さずに直接アナライジング・レコーダに収録させている。

なお、実験手順については付録Cに示す。

### 3.2 実験装置主要部分の説明

#### 3.2.1 衝撃波発生装置

本実験では、衝撃波を発生させる機構として、ピストン・シリンダ機構によって上下に運動する槍が、高圧容器の蓋となる薄いフィルムを破くことにより衝撃波を発生させる方法を採用している。Fig.3.2.1に衝撃波発生装置を示す。高圧容器は2インチ・Sch80ステンレス管とステンレス10Kフランジから構成されている。最上部めくらフランジにはシリンダを溶接で接続しており、ピストン駆動用の窒素ガス配管用銅管ジョイントを取り付けている。これに、槍の付いたピストンをシリンダにいれ、シリンダキャップをしてから、高圧容器本体の上部フランジにガスケットを間にいれて組み付けている。槍の先には幅36mmのカッターナイフを十字型に装着している。ピストン・シリンダ機構は高圧の窒素ガスをピストン上部シリンダ容器内に、衝撃波発生装置本体内部圧力より高い圧力を注入することにより作動する。ピストンは自重で下がってしまうため、これを押し上げておくスプリングをピストンの底に配置した。フィルムは衝撃波発生装置下部のフランジとテスト部上部管の上部フランジの接触面にOリングを2重にして挟み込んで圧力の漏れを防いでいる。そして、圧力に応じて、フィルムの枚数を増やすことにより自発的な破裂を防いでやる。高圧容器本体左右に付く座は片方が容器内圧力を加圧減圧するための窒素ガス配管用銅管ジョイントが接続され、片方はブルドン管圧力計が接続される。高圧容器本体下部フランジにはOリングを取り付けるために溝が彫られている。

#### 3.2.2 上部管

Fig.3.2.2に上部管を示す。上部管は2インチSch80ステンレス管とステンレス10Kフランジで構成される。上部管の最上部フランジはOリングを取り付けるための溝が彫られている。このOリングは衝撃波発生装置のフィルムを挟むために二重にしてあるため、衝撃波発生装置のOリングより大きめのものを使用している。ステンレス管側面には4つの座が取り付けている。上から、差圧を測定するための銅管ジョイント接続座、ブルドン管圧力計接続座、テスト部を大気圧開放にするための排気用ボールバルブ接続座、水出口ボールバルブ接続座となっている。これらの下に水位を感知するための電極プローブが取り付けられる。

#### 3.2.3 テスト部本体

Fig.3.2.3にテスト部本体を示す。テスト部本体は主にパイレックスガラス管と真鍮フランジ、それを支える真鍮の支柱、高周波加熱装置の銅製コイルで構成されている。基本的に金属部分は高周波加熱装置によって加熱されにくい真鍮を使用している。

フランジとガラス管の間には防水の為テフロンのブッシュを入れて、プレートで押さえている。内径50mmのガラス管の外側には内径60mmのガラス管があり、外気との断熱性をもたせ

ると共に、万が一ガラス管が割れたときのために、保護パイプの役割をしている。更にその外側には高周波加熱装置の銅製コイルが周りを囲んでいる。このコイルは加熱中に発熱するため、コイル中を水が循環して冷却している。

### 3.2.4 下部管

Fig. 3.2.4に下部管を示す。下部管は2インチSch80ステンレス管とステンレス10Kフランジ、ステンレス5Kフランジで構成される。中間に位置するフランジは実験装置を架台に固定するためのものである。ステンレス管側面には2つの座が取り付けてあり、上から、差圧や水位を測定するための銅管ジョイント接続座、水入り口電磁バルブ接続座となっている。水入り口の上には入り口水温測定のために、シーズ熱電対取付用コンプレッションフィッティングが接続してある。

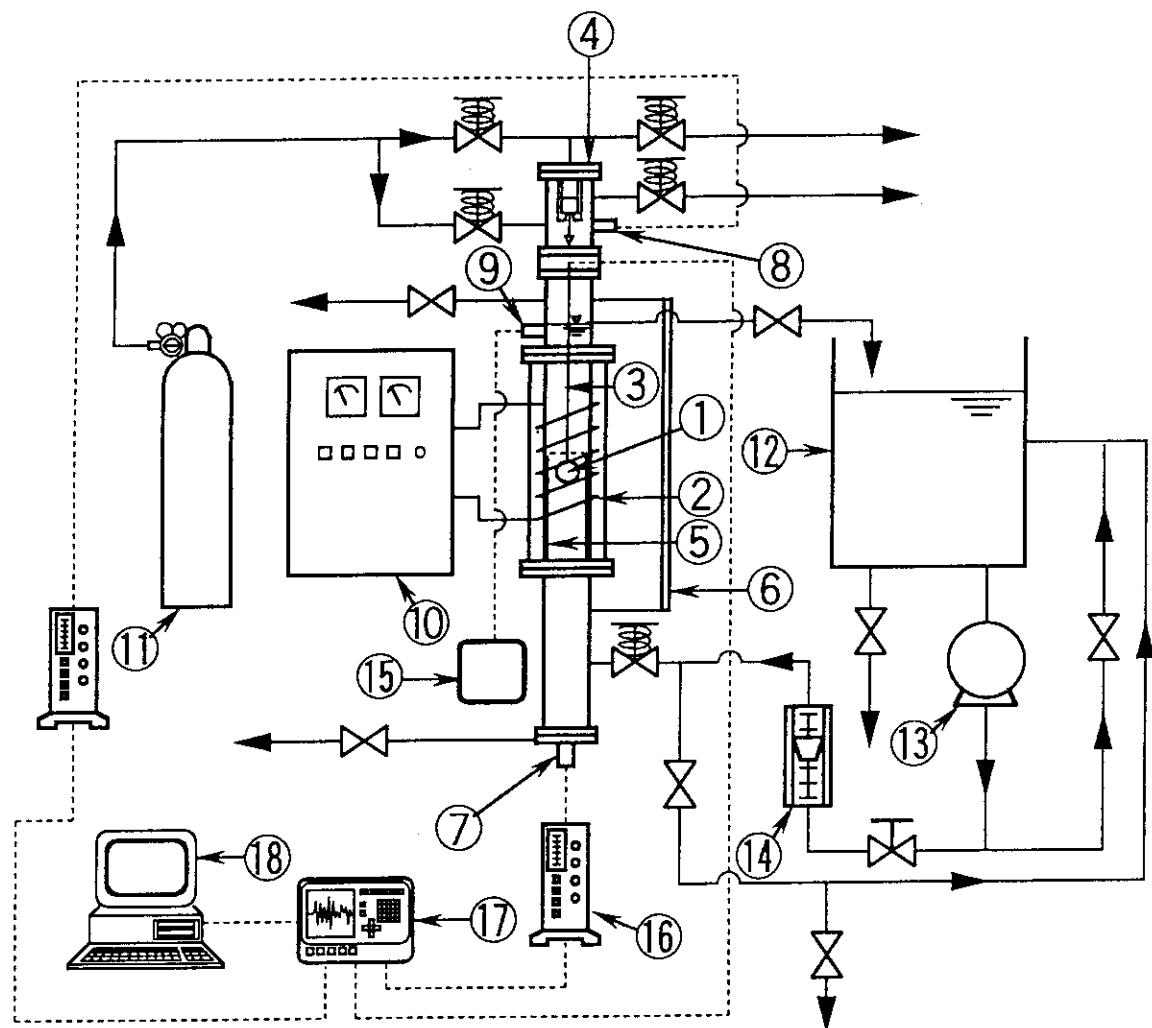
### 3.2.5 圧力センサ取付管

Fig. 3.2.5に圧力センサ取付管を示す。圧力センサ取付管は3/8インチSch20sステンレス管とステンレス10Kフランジで構成される。圧力センサは管先端のキャップに取り付ける。フランジには排水用の管と鋼球の表面温度測定のためのシーズ熱電対取付用コンプレッションフィッティングが接続されるようになっている。圧力センサはテクニカルの半導体圧力トランスデューサ・メタルダイアフラムの標準型XTM-190（参照：Fig.F.8）を使用した。今回は応答周波数225kHz、絶対最大圧力70kgf/cm<sup>2</sup>のものを使用した。

## 3.3 テスト部本体詳細

Fig. 3.3.1にテスト部本体詳細図を示す。テスト部本体は基本的に内径50mmのガラス管の中に外径48mmのガラス管が2重になって構成されている。内側のガラス管は鋼球をテスト部ガラス管の軸中心に位置するように支えておくセラミックス多孔板を固定する台として使用していて、下部管上部のフランジの上に置かれたサポート・プレートによって固定されている。また、このガラス管の長さは、鋼球がテスト部中央に位置するように、鋼球が数段のときの実験のことも考慮して、350mmとしている。予備として400mmのものもある。

Fig. 3.3.2に熱電対付き鋼球詳細図を示す。鋼球には直径0.55mmの孔が中心を通るように貫通していて、そこに直径0.5mmのシーズ熱電対を鋼球に貫通させ、貫通させた鋼球の手前の方をポンチで打ちつけて、かしめ固定している。熱電対は応答速度を高めるために、熱電対先端の余分なシーズ部分を取り除いて、アルメル・クロムメルが剥き出しに近い状態にしている。貫通した熱電対の先端で鋼球の表面温度を測定することができるようになっている。0.5mm径のシーズ熱電対の応答特性は10ms程度であるため、今回の実験には適していないが、実験結果から判断して、上記の加工を施すことにより急激な温度変化でも十分計測できることが分かる。



- |  |                                    |
|--|------------------------------------|
| <b>①:Steel particle</b>                  | <b>⑪:N<sub>2</sub> supply bomb</b> |
| <b>②:Copper coil</b>                     | <b>⑫:Water tank</b>                |
| <b>③:Thermocouple</b>                    | <b>⑬:Circulation pump</b>          |
| <b>④:Shock tube</b>                      | <b>⑭:Rota-meter</b>                |
| <b>⑤:Pyrex glass</b>                     | <b>⑮:Relay unit</b>                |
| <b>⑥:Level gauge</b>                     | <b>⑯:DC amplifier</b>              |
| <b>⑦⑧:Pressure transducer</b>            | <b>⑰:Analyzing recorder</b>        |
| <b>⑨:Water level sensor</b>              | <b>⑱:Computer</b>                  |
| <b>⑩:High frequency induction heater</b> |                                    |

Fig. 3.1.1 実験装置概略図

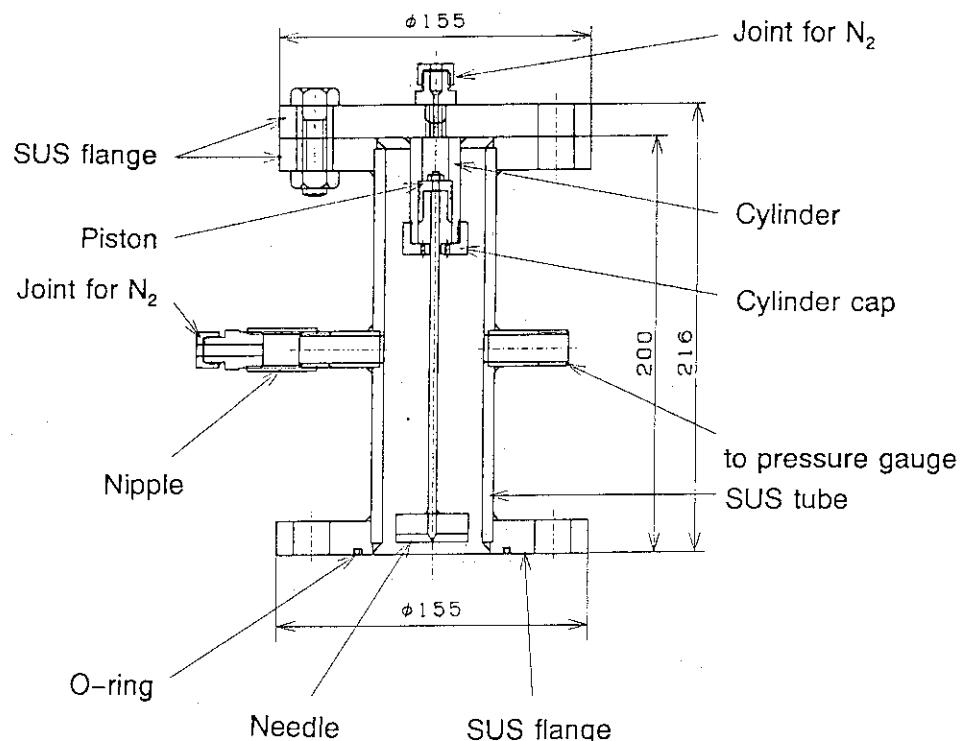


Fig. 3.2.1 衝撃波発生装置

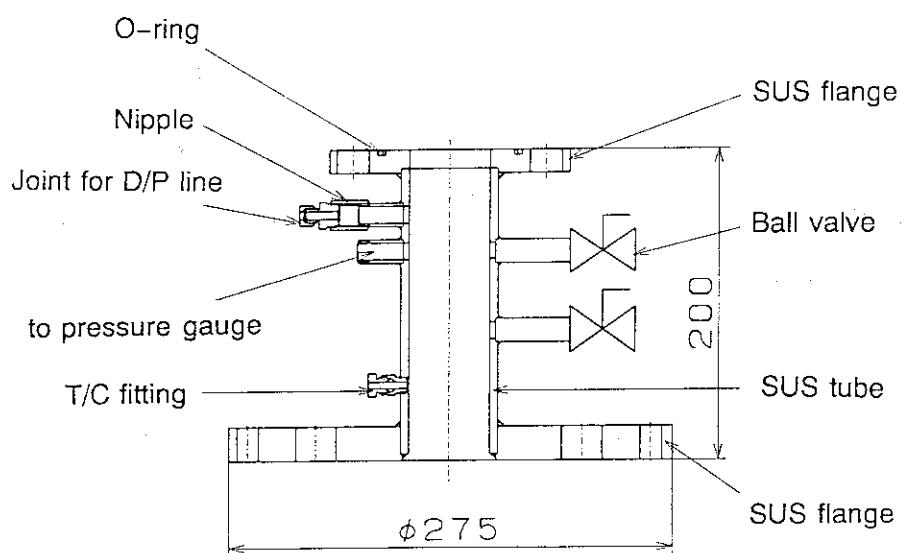


Fig. 3.2.2 上部管

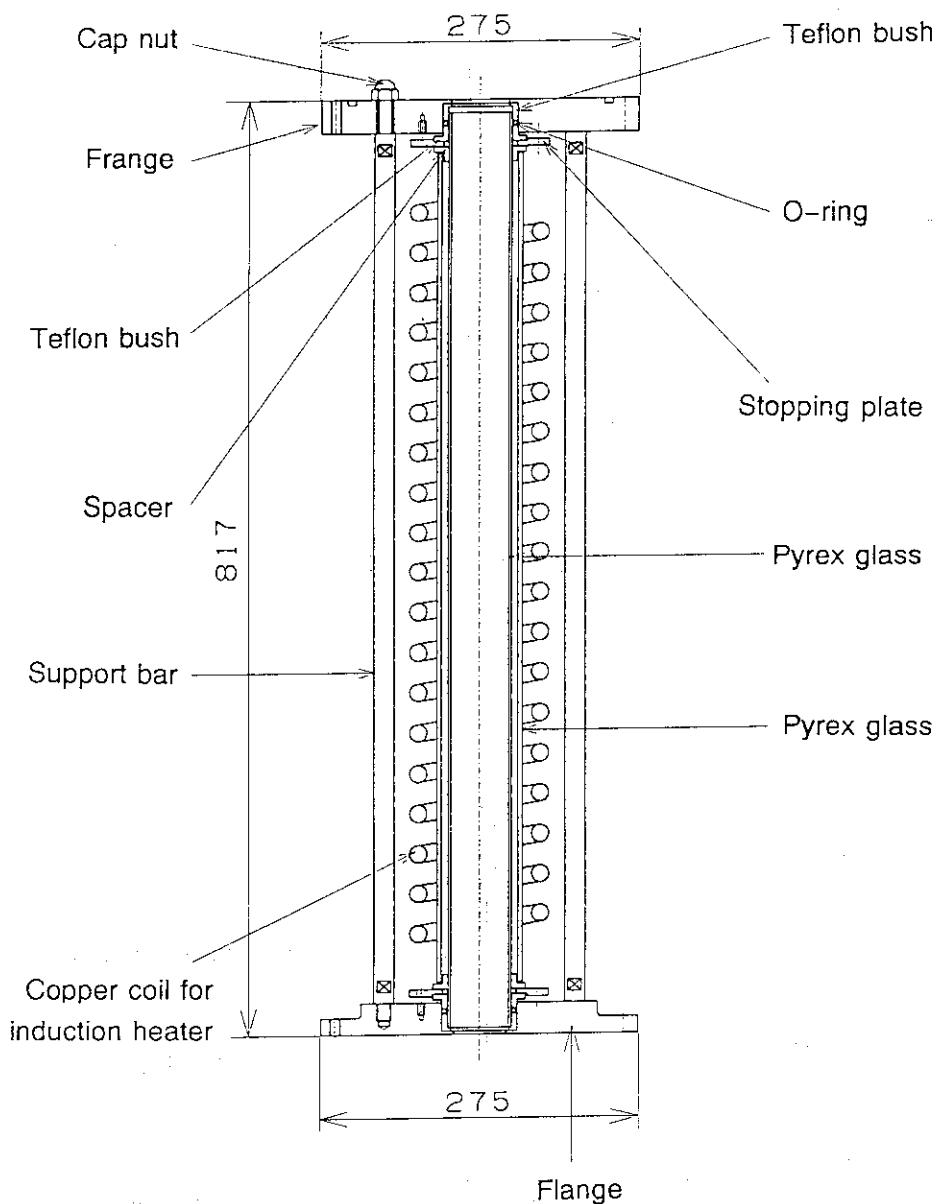


Fig. 3.2.3 テスト部本体

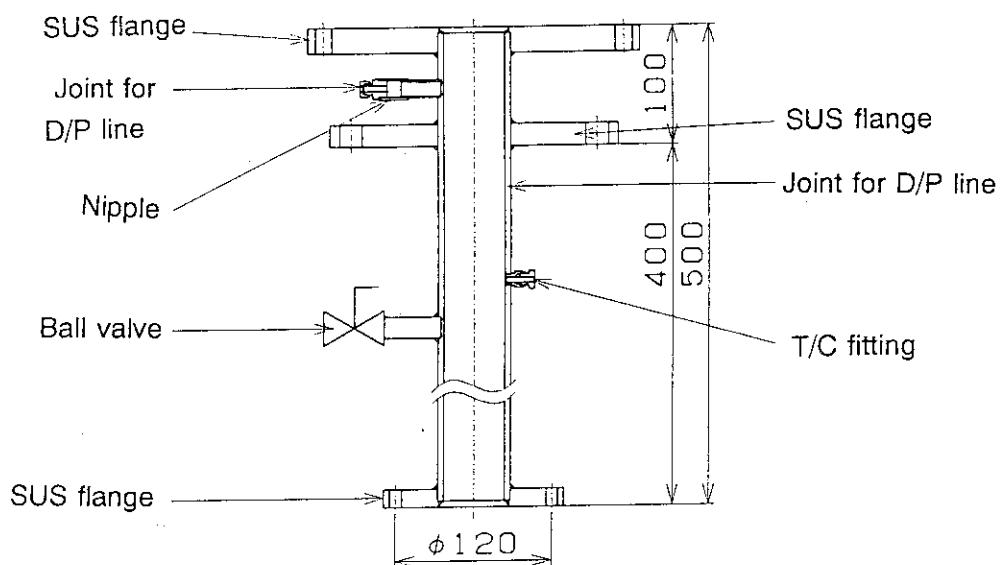


Fig. 3.2.4 下部管

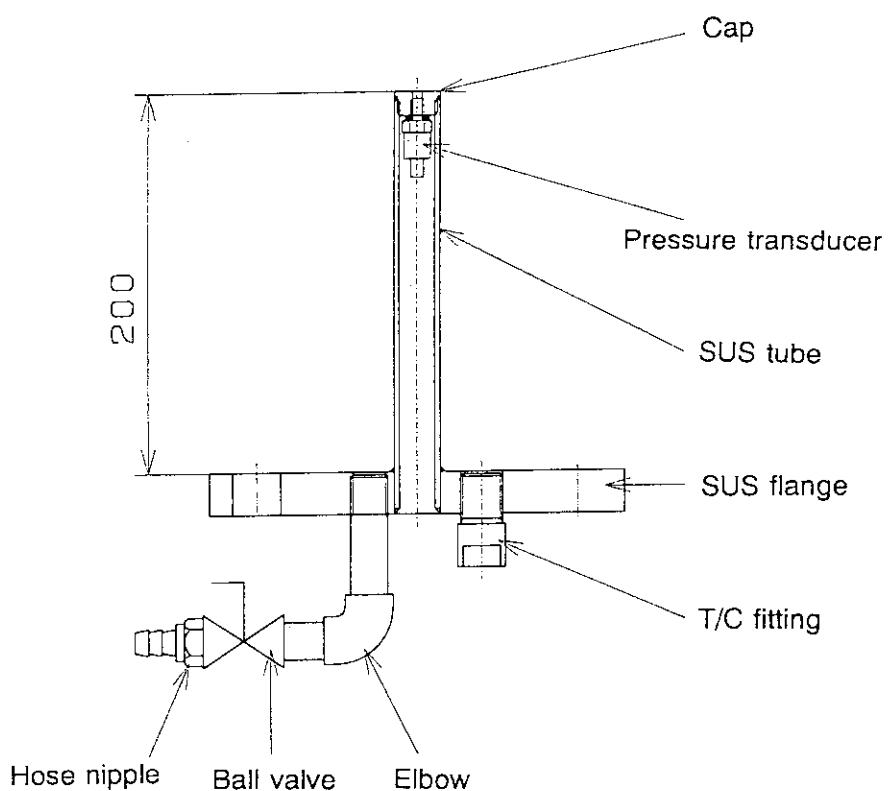


Fig. 3.2.5 圧力センサ取付管

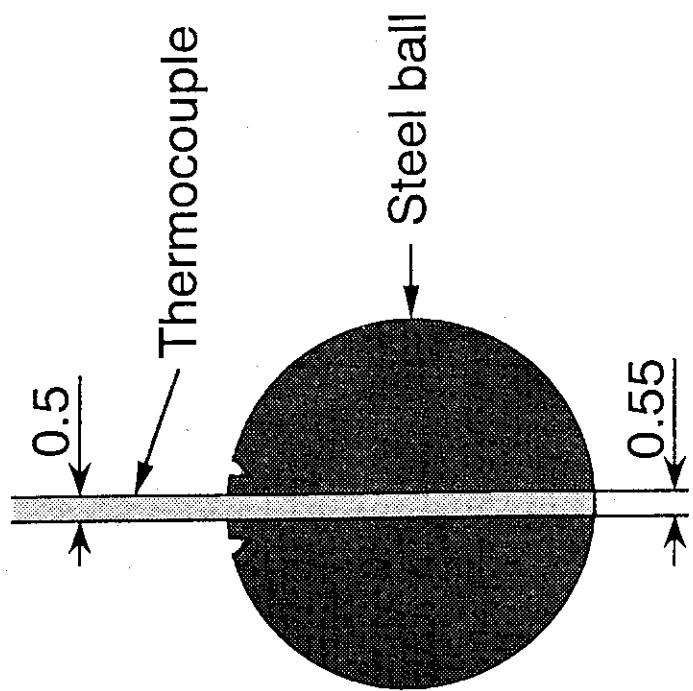


Fig. 3.3.2 热電対付き鋼球詳細図

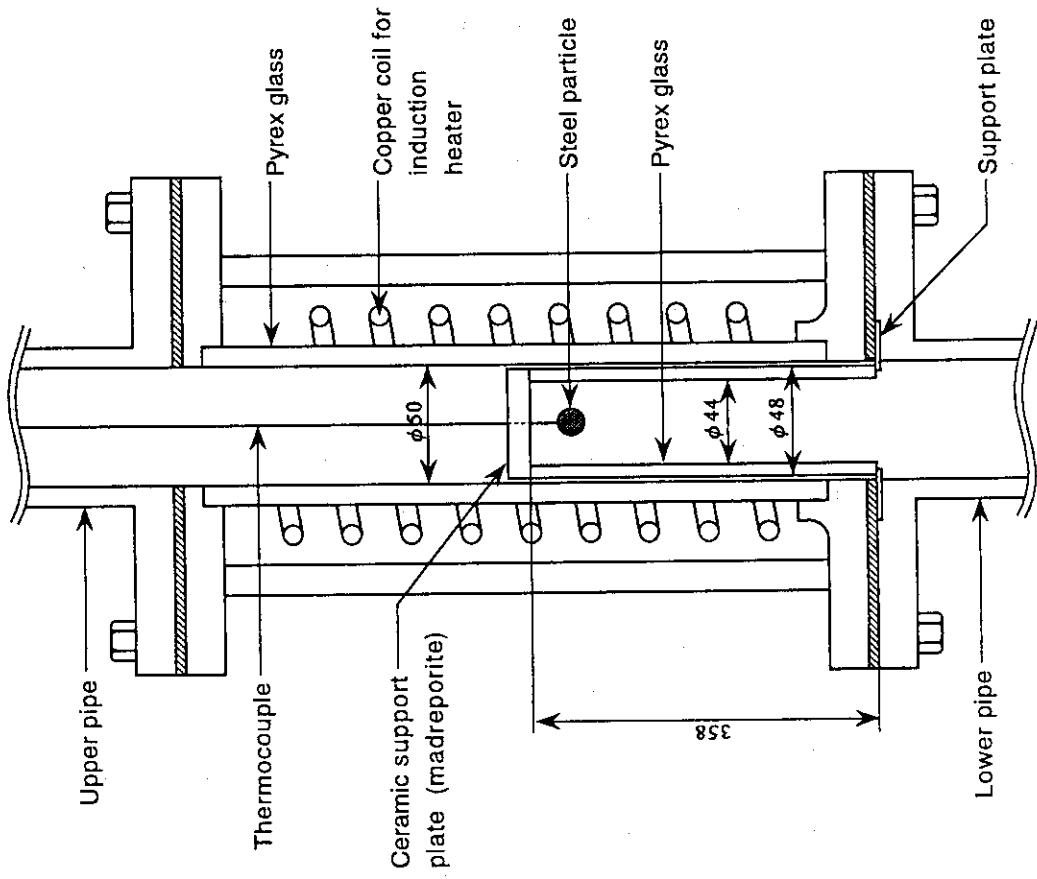


Fig. 3.3.1 テスト部本体詳細図

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 実験結果

衝撃波発生装置の初期設定圧力ならびに鋼球表面温度の設定値を変えて行なった9つの実験(Exp. 1～Exp. 9)を順に、Fig. 4.1.1～Fig. 4.1.9に示す。本実験では直径d=10mmの鋼球1個を用いて、鋼球表面温度変化とテスト部下端での圧力変化を測定した。Table 4.1は各実験の初期条件を示したものである。 $P_0$ は衝撃波発生装置の高圧容器初期設定圧力を示し、 $T_0$ は圧力波が鋼球を通過する直前の鋼球表面温度を示している。各図におけるLower pressureはFig. 3.1.1に示した⑦の半導体圧力トランジスタにより測定した。

いずれの実験においても圧力波が測定される直前に鋼球表面温度が急激に下降していることがわかる。圧力上昇が遅れて検知されたのは、鋼球位置と圧力測定位置の間が離れていたため、圧力波が伝播するための時間が必要であったためと考えられる。

#### 4.1.1 鋼球表面温度が100°C程度下降した実験結果(TYPE A)

Fig. 4.1.1、4.1.2、4.1.3に示された実験結果では、衝撃波が通過した直後、表面温度はA<sub>1</sub>点で急激に下降し、A<sub>2</sub>点からは20～40°C程度の急激な温度下降を数回繰り返した。最終的に初期温度より100°C程下降して、その後不規則で穏やかな温度変化を続けた。これらの測定時間以後、膜沸騰が自発的に崩壊していることを視覚的に確認した。このような実験結果をTYPE Aとする。

#### 4.1.2 鋼球表面温度が約350°Cまで低下した実験結果(TYPE B)

Fig. 4.1.4、4.1.5、4.1.6に示された実験においても、上の節4.1.1と同様に、B<sub>1</sub>点で鋼球表面温度は一度急降下し、B<sub>2</sub>点にまで達した後、二度目の急降下を示した。最終的に330°Cにまで一時的に下がり、間もなく表面温度は上昇してしまう。Fig. 4.1.4では、二度目の温度下降を示した後、約330°C(B<sub>3</sub>点)から450°C付近にまで表面温度が上昇し、不規則な周期で一時的な温度下降を繰り返しながら、約400°C程度の温度を維持した。これは膜沸騰が不安定な状態になり、鋼球の熱電対付近で時々鋼球と水との接触が局所的に生じたため、一時的な温度下降を示したものと思われる。このような実験結果をTYPE Bとする。

#### 4.1.3 鋼球表面温度が約140°Cまで低下した実験結果(TYPE C)

Fig. 4.1.7、4.1.8、4.1.9に示した実験においては、C<sub>1</sub>点から100°C程度温度下降が観測された後、更に250°C程度温度が下降してC<sub>3</sub>点に到達した。その後、Fig. 4.1.9以外は鋼球表面温度はゆっくりと低下し、C<sub>3</sub>点から再び表面温度は上昇する傾向が見られる。大気圧が4気圧から2気圧に変化するときに、水の飽和温度は143°Cから120°Cへ移行する。C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub>点間のゆっくりとした約140°C～120°Cの間での温度下降は、この間に相当する圧力データの平均が約4気圧から2気圧の間で変化していることから、膜沸騰の一時的な消滅を示しているもの

と定性的に理解できる。Fig. 4.1.9では鋼球表面温度はC<sub>3</sub>点にまで温度が降下した後この実験の測定範囲では温度の上昇はみられない。その後、温度上昇し膜沸騰が再び発生したかどうかは確認していないが、Fig. 4.1.7、4.1.8と同様に、C<sub>3</sub>点以降のゆっくりとした温度降下は、約140°Cから120°Cへ移行していることから、このとき膜沸騰は消滅していると理解できる。Fig. 4.1.7、4.1.8において、C<sub>3</sub>点以降の表面温度上昇は、鋼球直径が10mmと大きく、熱容量が大きかったため、再度膜沸騰が形成されたものと考える。このような実験結果をTYPE Cとする。

#### 4.2 膜沸騰が消滅したときの実験結果の詳細

Fig. 4.1.7の時間軸を拡大したものをFig. 4.2.1に示す。鋼球表面温度は初めの衝撃波が通過する直前の約1.5msの間、高周波振動をした後、D<sub>1</sub>点から表面温度の急降下が始まるが、D<sub>2</sub>点で温度の低下は止まり、D<sub>3</sub>点まで一定の温度を保った後、D<sub>3</sub>点より再び二度目の温度降下を行いD<sub>4</sub>点に到達している。これはD<sub>1</sub>点にて瞬間に水と接触した後、D<sub>2</sub>点にて再度膜沸騰を形成させ、その後再び水と接触することで膜沸騰は完全に消滅し、鋼球表面は飽和水で囲まれたものと考えられる。衝撃波が通過する直前の高周波振動は、衝撃波は音速で伝わることから、その前方には何の振動も伝わらないはずである。この箇所以外にこのような高周波振動は見当たらないので、衝撃波発生装置を作動させるための電磁バルブまたは衝撃波発生装置のピストン・シリンダの作動時に発生する振動がテスト部の壁を伝わったものと考えられる。D<sub>4</sub>点以降の温度挙動は前述のように圧力変化による飽和温度の変化を反映しているものと考えられる。

この図において、鋼球表面温度が降下する付近に、測定された圧力波のピークは大きく分けて3つ存在する。圧力センサの測定部が鋼球より約0.8m下方に位置するため、熱電対の反応が圧力センサより早いことを考慮に入れ、この3つの圧力波ピークと表面温度の関係を調べてみる。初めに見られる圧力波は立ち上がりこそ鈍いが、ピークE<sub>1</sub>に近づく程鋭くなり、その後急速に圧力低下を起こす。圧力波ピークE<sub>1</sub>と鋼球表面温度D<sub>1</sub>の応答時間差は約0.7msであった。この圧力波が音速に近い速度で伝わっているものとすれば、テスト部下端の圧力と表面温度との応答時間差は約0.6msであるので、初期の温度低下D<sub>1</sub>-D<sub>2</sub>はこの圧力波ピークE<sub>1</sub>前後の圧縮あるいは膨張過程によって生じた可能性がある。D<sub>3</sub>点からの温度降下はテスト部下端で反射した圧力波によって二度目の温度降下を生じさせたとも考えられるため、この図からはどの圧力変化で生じたのか特定することは困難である。但し、D<sub>3</sub>とE<sub>2</sub>の時間差が1ms程度であることから、測定器の応答時間差を考えると、ピークE<sub>2</sub>前後の圧縮あるいは膨張過程で温度降下が発生した可能性が考えられる。

Fig. 4.1.8、Fig. 4.1.9に表される実験の時間軸の拡大をFig. 4.2.2、Fig. 4.2.3に示す。これらの図から、どの実験においても、前述したような傾向を持つことが理解できる。

#### 4.3 初期条件による実験結果の分類

各実験の初期条件、衝撃波初期設定圧力 $P_0$ 、初期鋼球表面温度 $T_0$ をTYPE A, TYPE B, TYPE Cに分類してプロットしたものをFig. 4.3に示す。今回の実験では、水温は約90°C一定の条件で行ったため、サブクール度は鋼球の表面温度に依存する。定性的に、 $P_0$ が高いほど、また $T_0$ が低いほど膜沸騰は崩壊し易いと考えられる。よって、今回の実験結果を見ても、膜沸騰が崩壊した場合のTYPE Aは図中の左上側に集中し、逆に鋼球表面温度が100°Cしか下がらなかった実験結果TYPE Cの場合は右下側に集中する傾向がある。鋼球表面温度が330°Cにまで下がった実験結果TYPE Bの場合は図中の $P_0$ 、 $T_0$ が両方とも高い右上側に集中している。

今までに行われた実験回数は9回と少ないため、この図における分類を一意的に定めることは今回の実験からは難しい。今後、実験データ数の増大や鋼球の径、サブクール度等のパラメータを変化させることによって、このマトリックス上の分類をより明確にできるものと考える。このような分類により鋼球表面の膜沸騰の崩壊挙動の把握が可能になるものと期待される。

Table 4.1 初期実験条件

	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5	Exp. 6	Exp. 7	Exp. 8	Exp. 9
$P_0$ (MPa)	0.58	0.68	0.47	0.88	0.89	0.86	0.99	0.78	0.68
$T_0$ (°C)	528	653	662	583	640	630	465	500	528

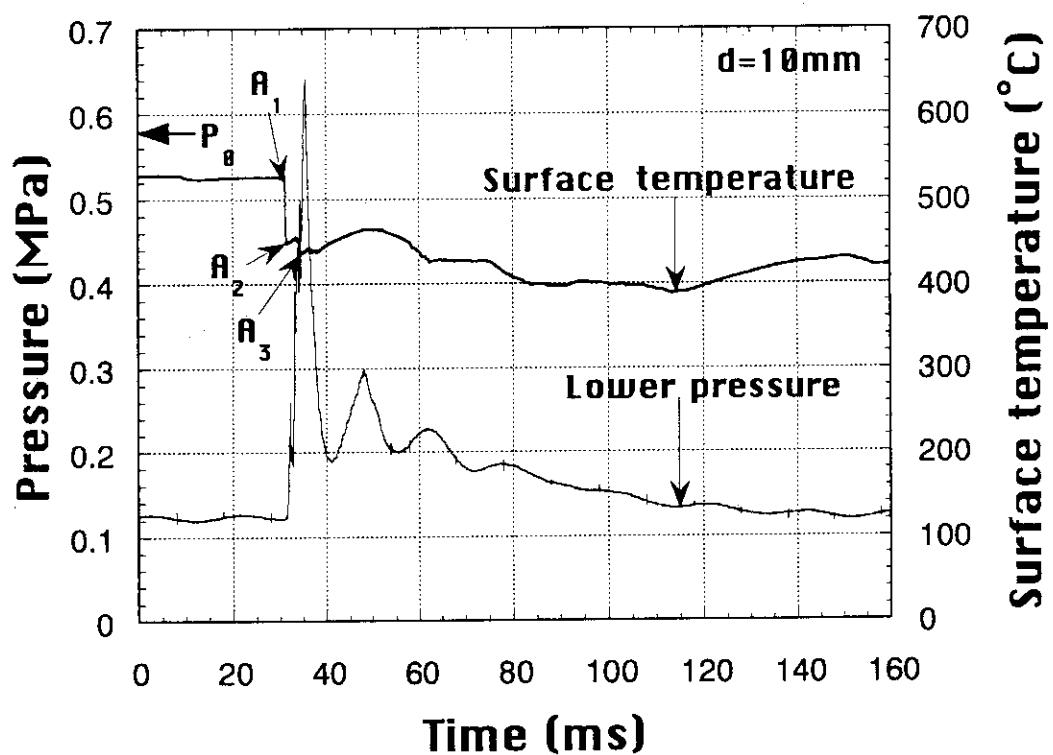


Fig. 4.1.1 鋼球表面温度が約100°C降下した実験結果（その1）

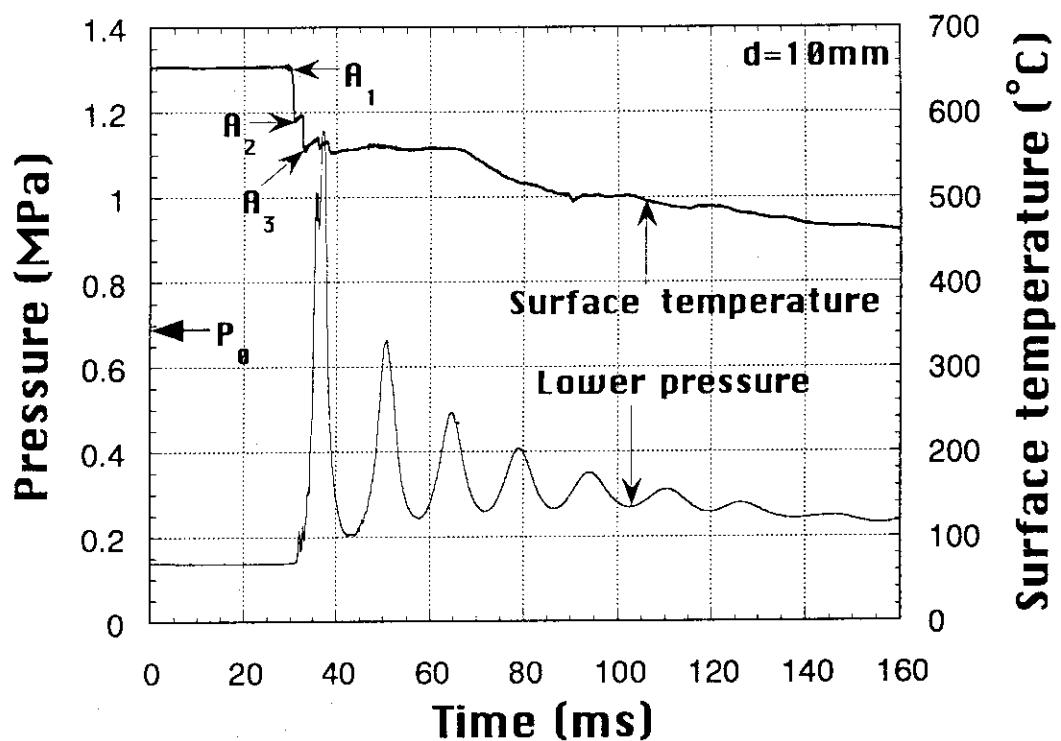


Fig. 4.1.2 鋼球表面温度が約100°C低下した実験結果（その2）

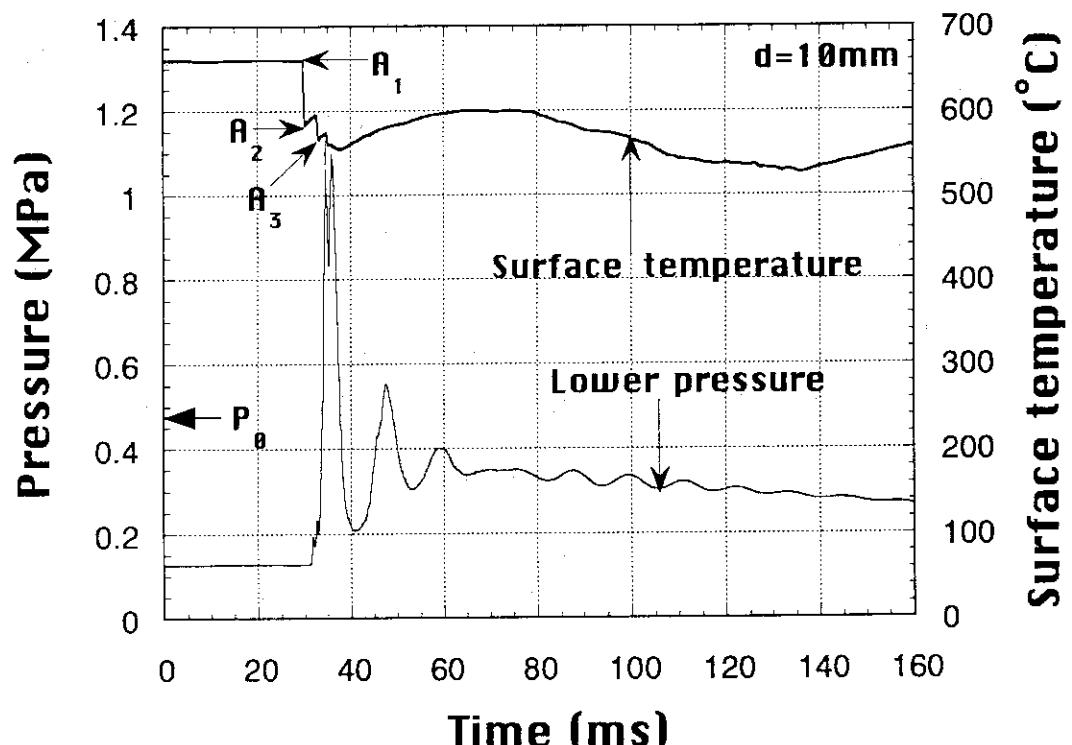
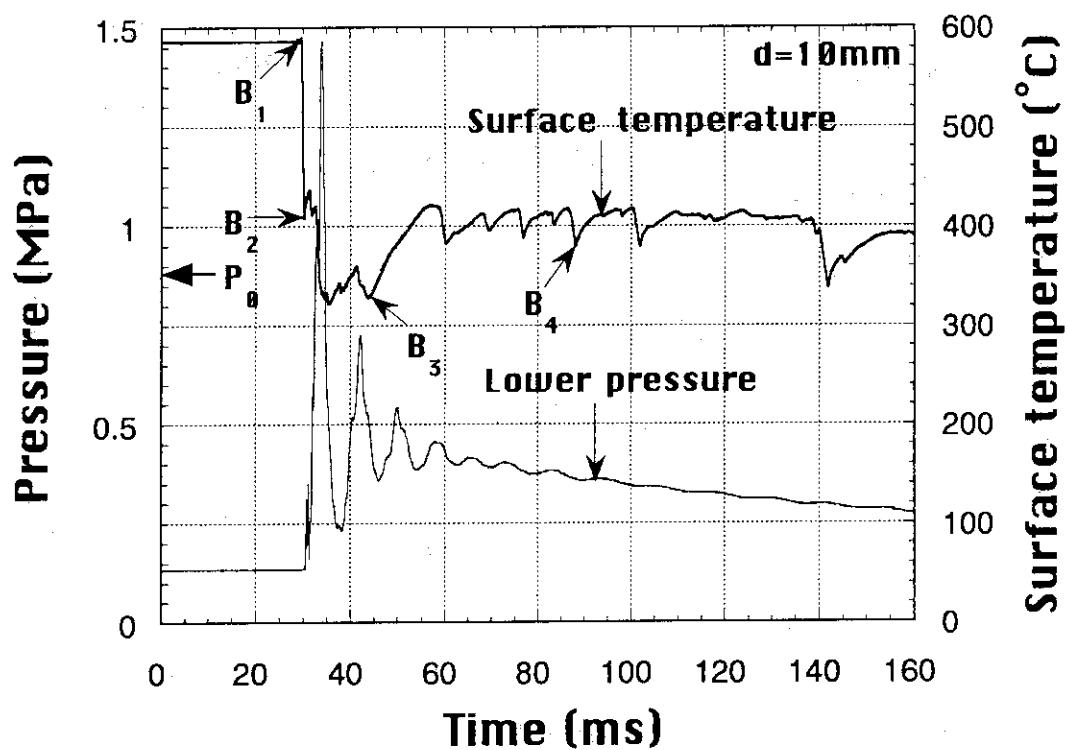
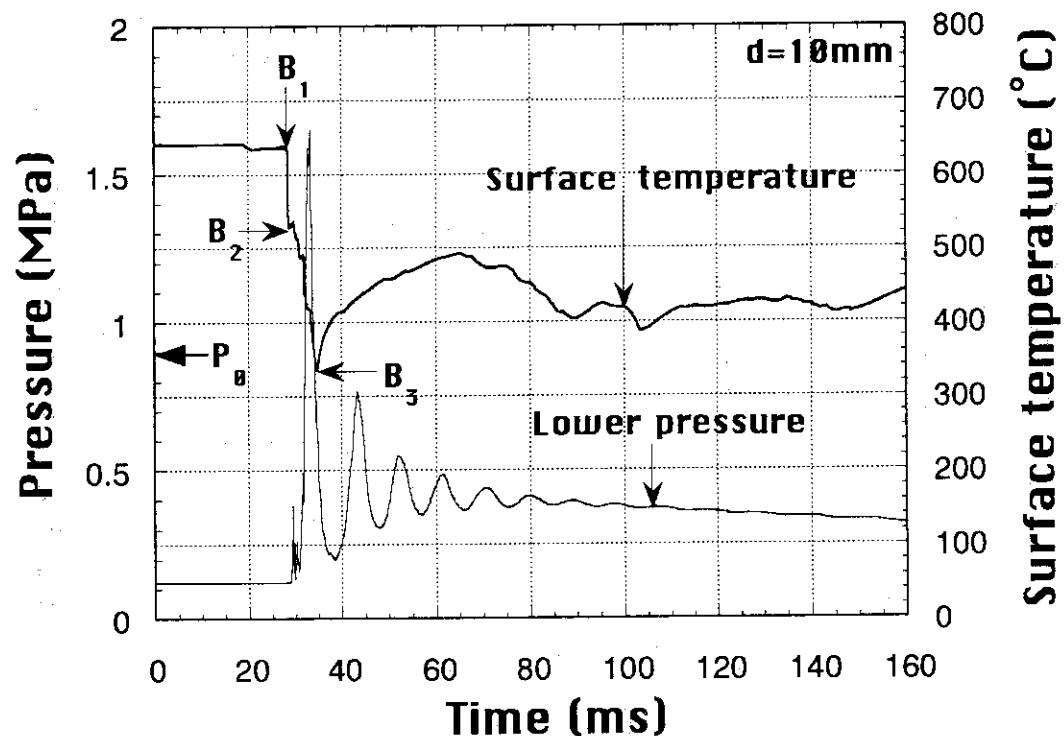


Fig. 4.1.3 鋼球表面温度が約100°C低下した実験結果（その3）

Fig. 4.1.4 鋼球表面温度が約 $350^{\circ}\text{C}$ まで降下した実験結果（その 1）Fig. 4.1.5 鋼球表面温度が約 $350^{\circ}\text{C}$ まで降下した実験結果（その 2）

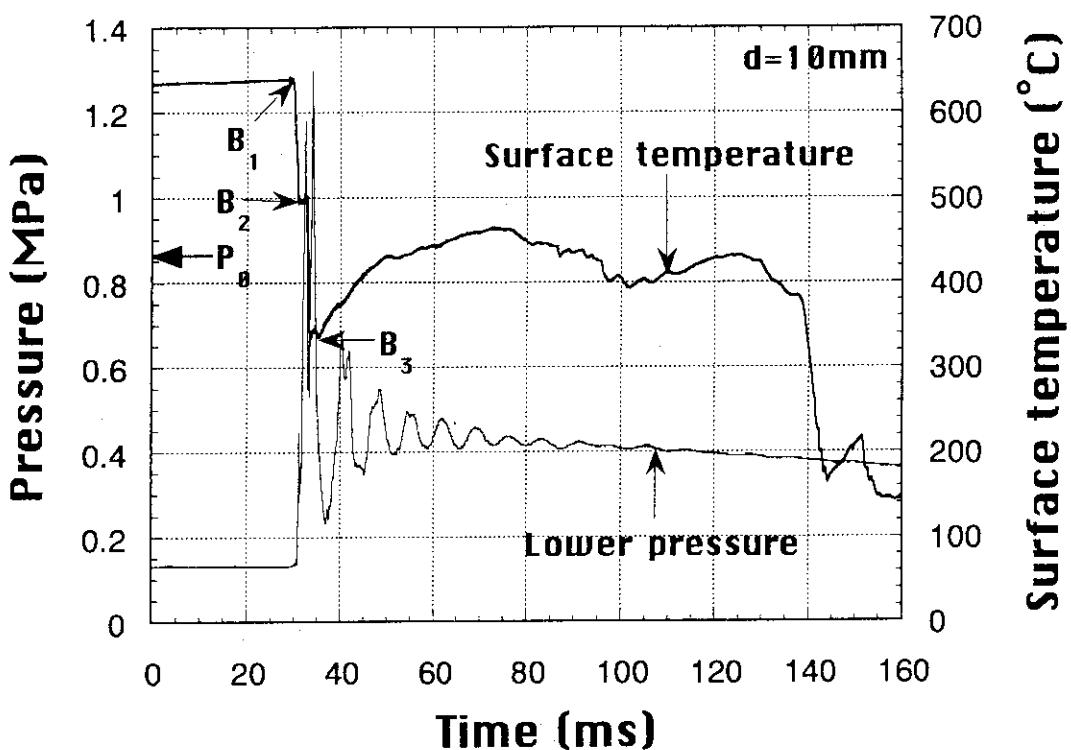


Fig. 4.1.6 鋼球表面温度が約350°Cまで降下した実験結果（その3）

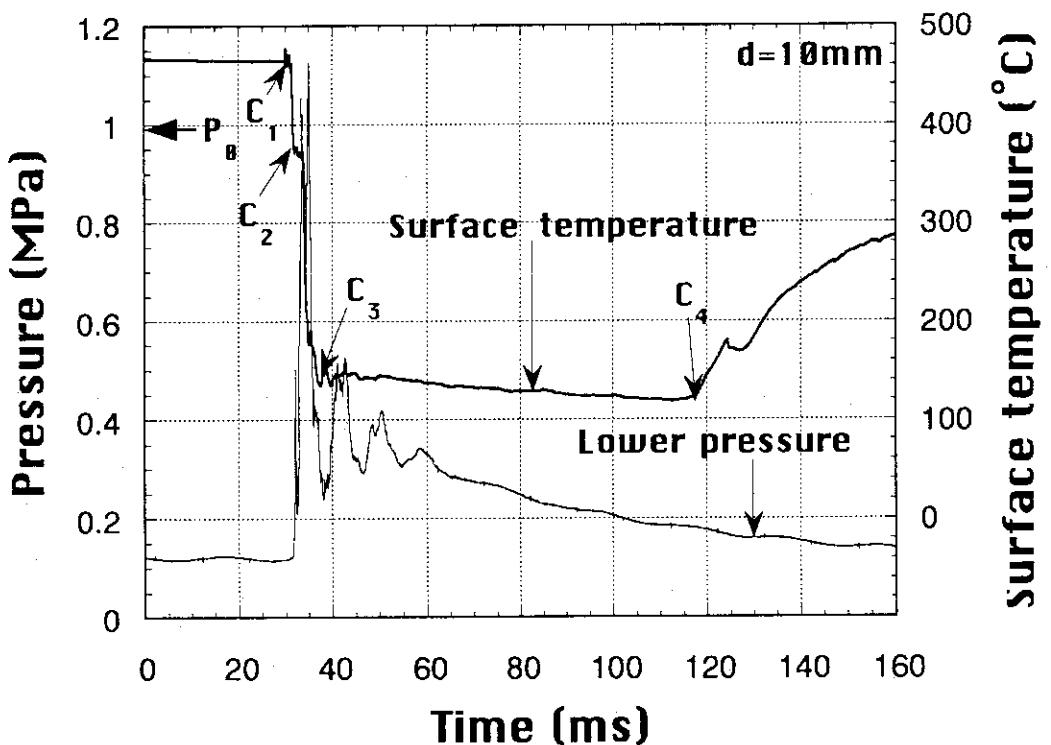


Fig. 4.1.7 鋼球表面温度が約140°Cまで降下した実験結果（その1）

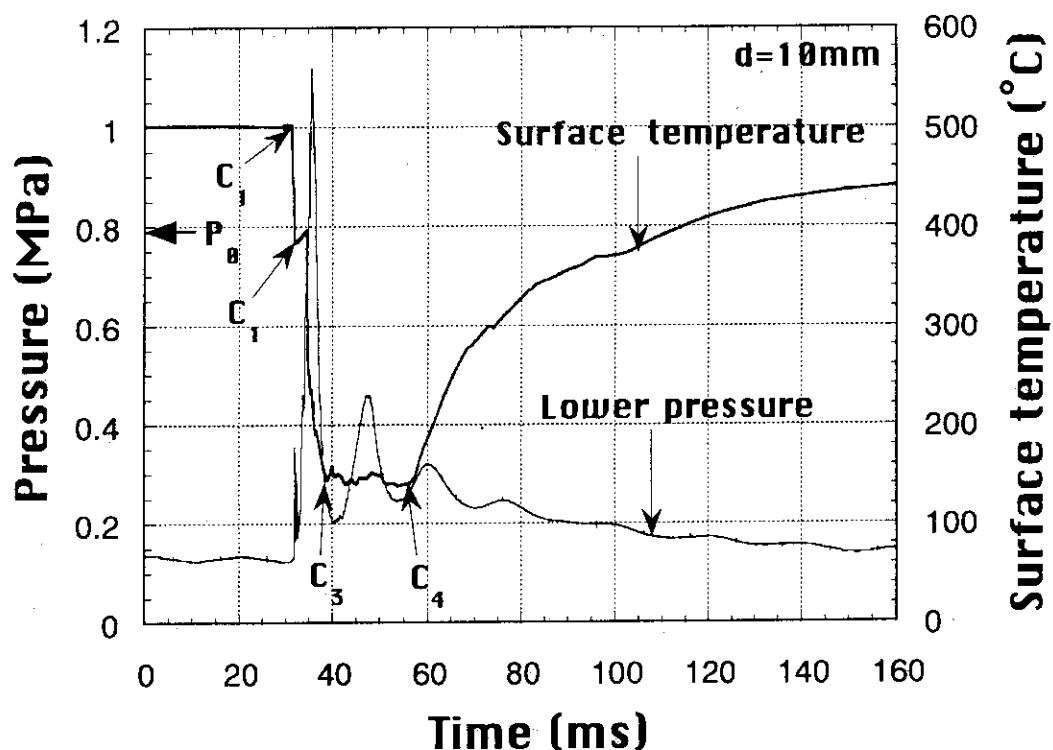


Fig. 4.1.8 鋼球表面温度が約140°Cまで低下した実験結果（その2）

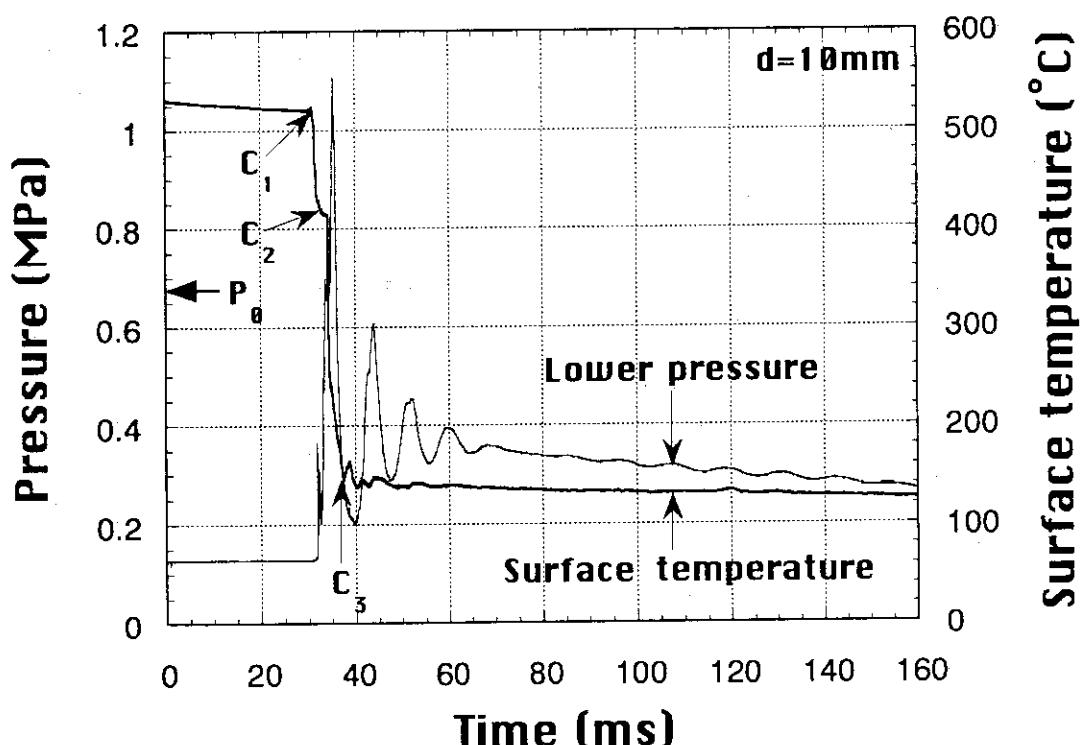


Fig. 4.1.9 鋼球表面温度が約140°Cまで低下した実験結果（その3）

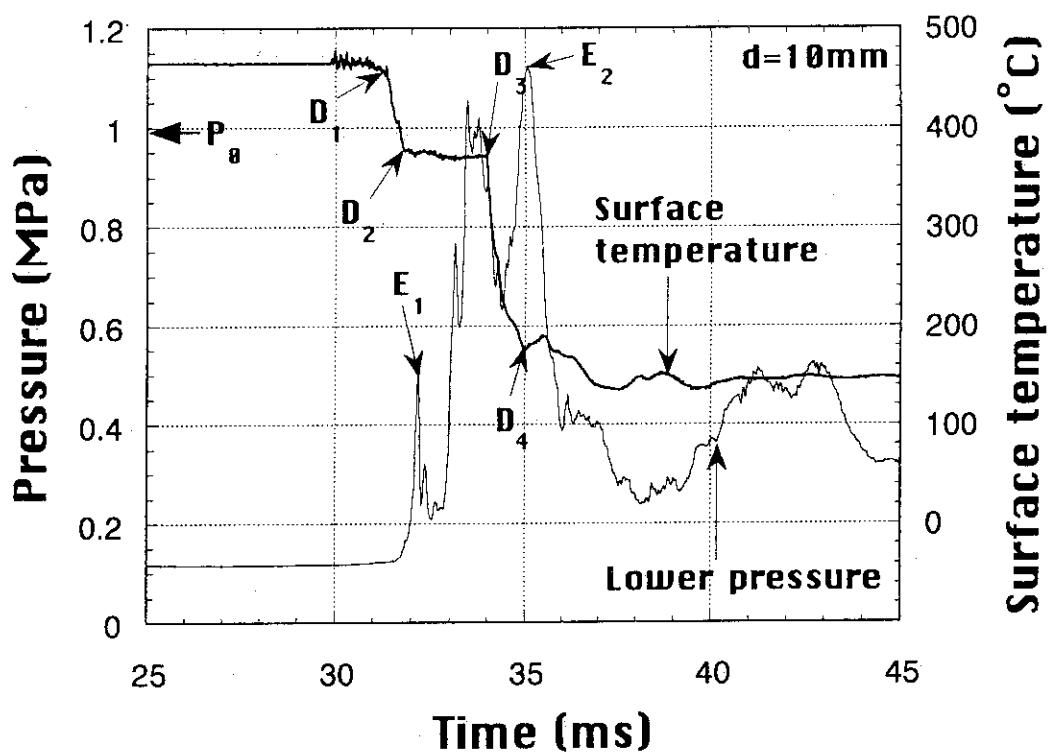


Fig. 4.2.1 Fig. 4.1.7 の時間軸拡大図

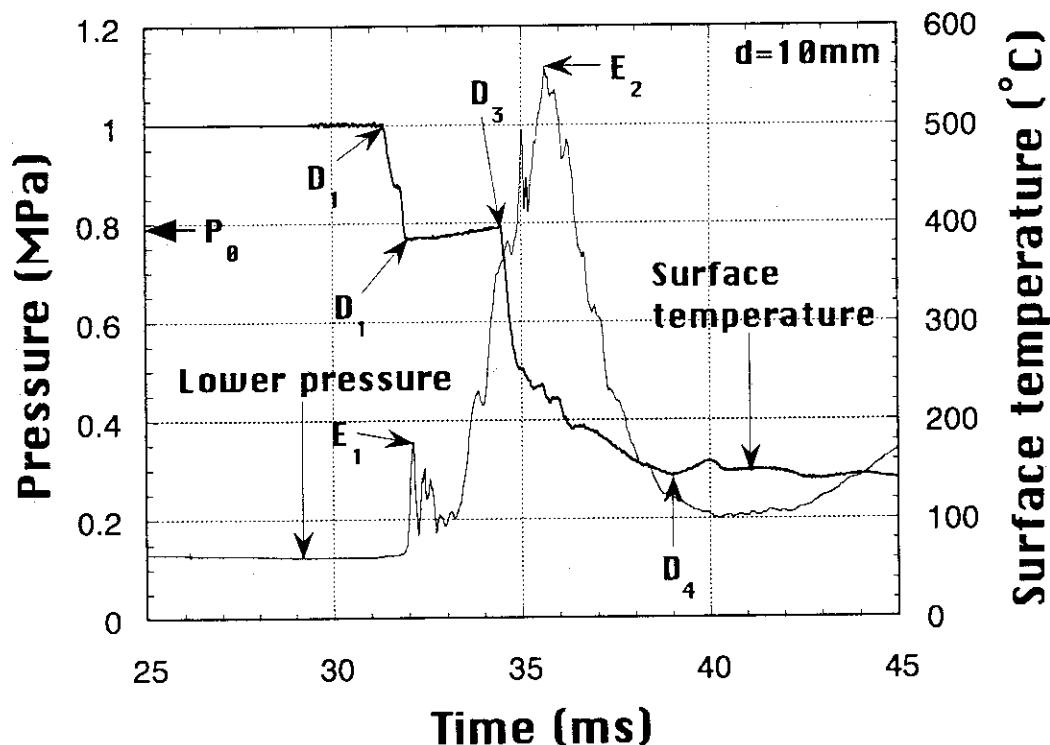


Fig. 4.2.2 Fig. 4.1.8 の時間軸拡大図

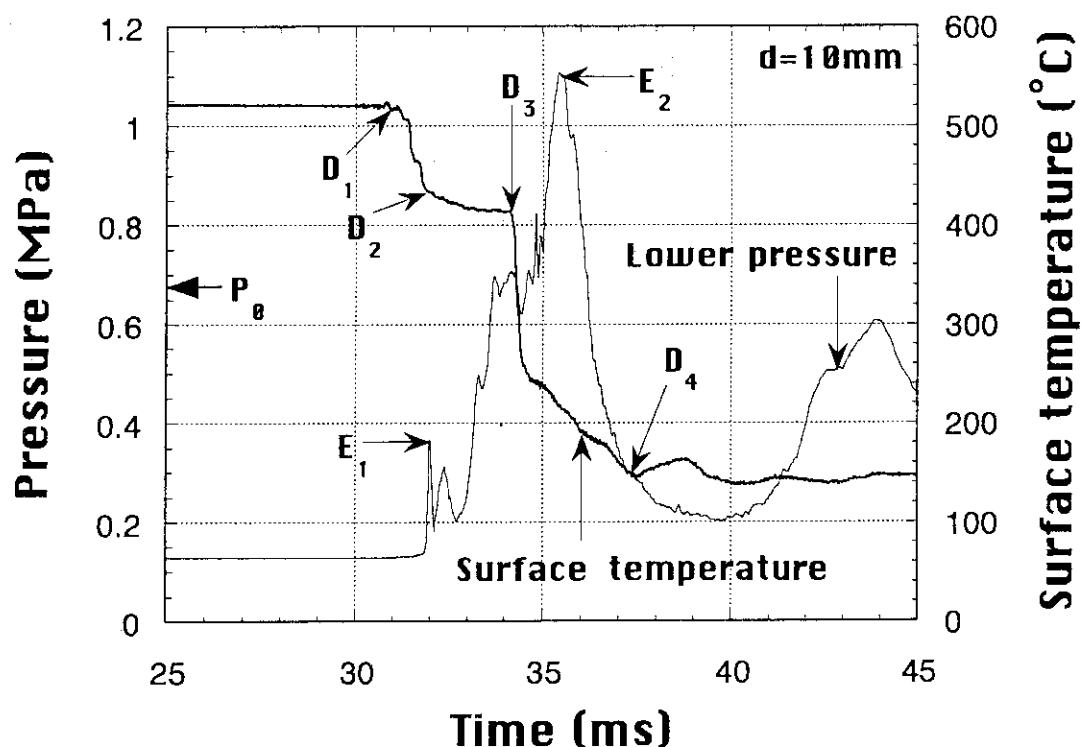


Fig. 4.2.3 Fig. 4.1.9 の時間軸拡大図

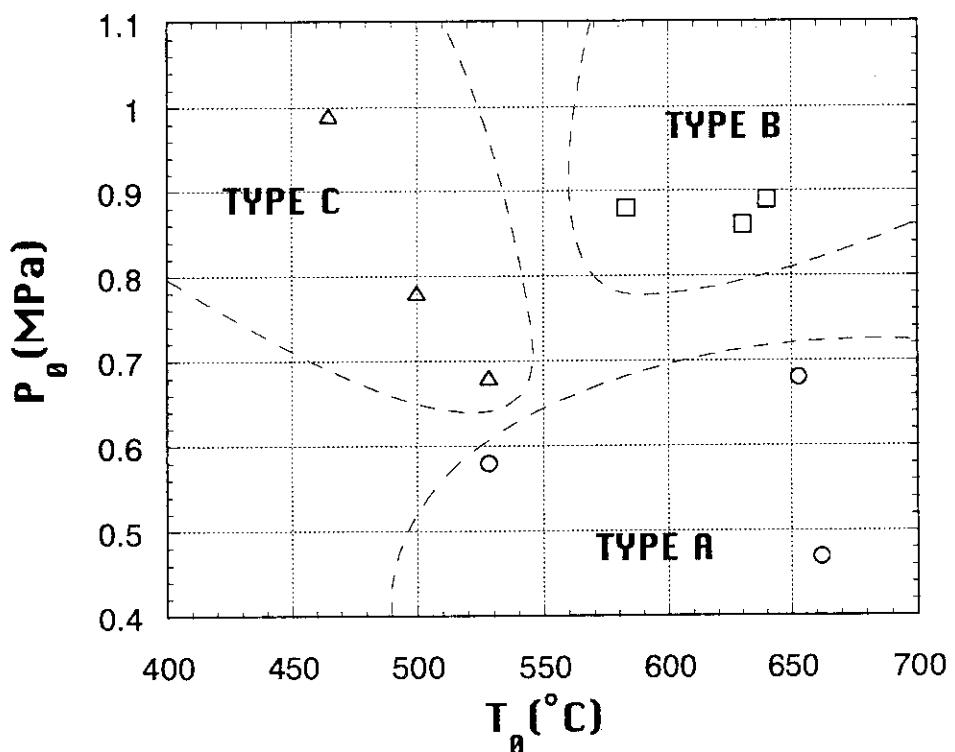


Fig. 4.3 初期条件による実験結果の分類

## 5. 結 言

本研究は、蒸気爆発のトリガリングの直接の原因となる低温低沸点液体中に分散した高温融体の粗混合状態における蒸気膜の崩壊特性を、溶融金属の代わりに高温状態の鋼球を使用しその鋼球に所定の衝撃波を当てることで、実験的に調べることを目的としている。本年度においては、まず本実験の目的を達成するために必要となる実験装置についての設計計算を行い、装置や計測に必要となる諸元を決定するとともに、詳細設計を行った。この詳細設計を基に、所期の目的達成のために必要な実験装置を作成することができた。そして、鋼球1個を高周波加熱装置によって加熱して、その高温粒子表面に形成された膜沸騰に衝撃波を加え、膜沸騰の崩壊特性を実験的に調べ、以下の知見を得た。

- (1) 衝撃波が通過した直後の鋼球表面温度曲線は、温度降下の度合に応じて3つのパターンに分類することができた。
- (2) 鋼球表面温度は衝撃波によって2回あるいは数回に分けて段階的に降下することを確認した。
- (3) 鋼球の熱容量が大きいため、一旦膜沸騰の崩壊が確認された後、再び膜沸騰に戻る現象が確認された。
- (4) 本実験では、圧力変動と表面温度変化との時間的対応を定量的に対応させることはできなかった。しかし、初期の低い圧力波ピークによって、1回目の温度降下が生じている可能性が高いと考えられる。

今後、鋼球の径や鋼球の個数、水温等のパラメーターを追加した実験を行うことにより、Fig. 4.3に示した3つの分類をより明確にできるものと期待している。また、鋼球周りのボイド率や鋼球付近での圧力波測定を行うことで、鋼球表面温度と圧力波の時間的対応を明確にし、解析モデルを用いた検討を行う予定である。

## 謝 詞

本研究を遂行するにあたり終始有益な御助言ならびに御協力を頂きました日本原子力研究所の丸山 結、工藤 保、森山清史、渡辺博典、小森慶一の各氏に心から感謝の意を表します。また、本研究の実験装置設計製作において常日頃より有益な御意見、御協力を頂きました山形大学工学部機械システム工学科安達研究室の辰柳祐司技官、卒業生の小澤淳氏に心から感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) 飯田嘉宏・高島武雄「蒸気爆発とその機構に関する実験」ながれ、第7巻、1989、p. 207-208.
- (2) A. W. Cronenberg, "Recent developments in the understanding of energetic molten fuel-coolant interactions," NUCLEAR SAFETY, Vol. 21 No. 3, 1980, p. 319-337
- (3) A. W. クローネンバーグ, R. ベンツ(1980) : 原子炉安全性評価に関する蒸気爆発現象、動力炉・核燃料開発事業団, p. 4.
- (4) A. W. クローネンバーグ, R. ベンツ(1980) : 原子炉安全性評価に関する蒸気爆発現象、動力炉・核燃料開発事業団, p. 11.
- (5) A. W. Cronenberg(1980), "Recent developments in the understanding of energetic molten fuel-coolant interactions," NUCLEAR SAFETY, Vol. 21, No. 3 p. 321.
- (6) A. Inoue and S. G. Bankoff, "Destabilization of Film Boiling Due to Arrival of a Pressure," Transaction of the ASME, Journal of Heat Transfer, Vol. 103, 1981, p. 459-471.
- (7) 飯田嘉宏・高島武雄・秋吉亮「高温液小滴と低沸点液による蒸気爆発の機構に関する研究」(第一報、単一滴による実験) 機論52-476, 1986 p. 1777-1783. (第二報、低温液温度の影響と複数滴による実験) 機論53-485, 1987, p. 224-226.
- (8) L. S. Nelson and P. M. Duda, "Steam explosion experiments with single drops of iron oxide melted with a CO<sub>2</sub> laser," High Temperature-High Pressure, Vol. 14, 1982, p. 259-281.
- (9) Z. Tamura and Y. Tanasawa(1957) : Evaporation and combustion of a drop contacting with a hot surface, Sventh Symposium(International) on Combustion, Butter-worths, London, p. 517.
- (10) 森谷太郎(編) 「ガラス工学ハンドブック」朝倉書店, 1964
- (11) 高島武雄・飯田嘉宏(1988) : 小規模蒸気爆発時の高温液温度, 第25回日本伝熱シンポジウム講演論文集, p. 318.

## 謝　　辞

本研究を遂行するにあたり終始有益な御助言ならびに御協力を頂きました日本原子力研究所の丸山 結、工藤 保、森山清史、渡辺博典、小森慶一の各氏に心から感謝の意を表します。また、本研究の実験装置設計製作において常日頃より有益な御意見、御協力を頂きました山形大学工学部機械システム工学科安達研究室の辰柳祐司技官、卒業生の小澤淳氏に心から感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) 飯田嘉宏・高島武雄「蒸気爆発とその機構に関する実験」ながれ、第7巻、1989、p. 207-208.
- (2) A. W. Cronenberg, "Recent developments in the understanding of energetic molten fuel-coolant interactions," NUCLEAR SAFETY, Vol. 21 No. 3, 1980, p. 319-337
- (3) A. W. クローネンバーグ, R. ベンツ(1980) : 原子炉安全性評価に関する蒸気爆発現象、動力炉・核燃料開発事業団, p. 4.
- (4) A. W. クローネンバーグ, R. ベンツ(1980) : 原子炉安全性評価に関する蒸気爆発現象、動力炉・核燃料開発事業団, p. 11.
- (5) A. W. Cronenberg(1980), "Recent developments in the understanding of energetic molten fuel-coolant interactions," NUCLEAR SAFETY, Vol. 21, No. 3 p. 321.
- (6) A. Inoue and S. G. Bankoff, "Destabilization of Film Boiling Due to Arrival of a Pressure," Transaction of the ASME, Journal of Heat Transfer, Vol. 103, 1981, p. 459-471.
- (7) 飯田嘉宏・高島武雄・秋吉亮「高温液小滴と低沸点液による蒸気爆発の機構に関する研究」(第一報、単一滴による実験) 機論52-476, 1986 p. 1777-1783, (第二報、低温液温度の影響と複数滴による実験) 機論53-485, 1987, p. 224-226.
- (8) L. S. Nelson and P. M. Duda, "Steam explosion experiments with single drops of iron oxide melted with a CO<sub>2</sub> laser," High Temperature-High Pressure, Vol. 14, 1982, p. 259-281.
- (9) Z. Tamura and Y. Tanasawa(1957) : Evaporation and combustion of a drop contacting with a hot surface, Sventh Symposium(International) on Combustion, Butter-worths, London, p. 517.
- (10) 森谷太郎(編) 「ガラス工学ハンドブック」朝倉書店, 1964
- (11) 高島武雄・飯田嘉宏(1988) : 小規模蒸気爆発時の高温液温度, 第25回日本伝熱シンポジウム講演論文集, p. 318.

## 付録A 従来の蒸気爆発研究

### A.1 ネルソンら<sup>(8)</sup>の実験

単一液滴による実験の代表的なものは、アメリカのサンディア国立研究所のネルソンらによって行われた。実験は1980年前後に行われ1982年に論文にまとめられて公表されている。ネルソンらの実験は、膜沸騰蒸気膜を外部からの力によって破壊する方法で、蒸気爆発の素過程を実験室で初めて実現したものである。Fig. A. 1.1はネルソンらが使った実験装置概略図である。真ん中の四角いのが水槽で、大きさは縦横15cm、水深は15または46cmとしている。透明なアクリルのプラスチック製で高速度カメラによる観察が出来るようになっている。液滴は純鉄のホイールを二酸化炭素レーザーで加熱して溶かし、酸化鉄の液滴として水面下ら23mmの高さから滴下する。液滴直径は2.8mmでほぼ球形、質量はわずか0.05gで温度はパイロメーター（放射温度計）で測定する。29°Cの水に2230K (1957°C) という高温の液滴をソレノイドのショックによって落とし水中を膜沸騰状態で沈降していく途中に水中放電によって発生した圧力波を加えて膜沸騰蒸気膜を破壊して蒸気爆発を起こす。水中放電と蒸気爆発によって発生する圧力変動は、圧力変換器で検出し、オシロスコープで記録する。水中放電では、高電圧の電力をコンデンサーに蓄えて、ブリッジワイヤーまたはエクスプローディングワイヤーと呼ばれる細線に大電流として一気に流すと、細線が発熱、溶融・損傷して高い圧力パルスを発生させることができる。この高い圧力パルスは、高温の溶融した細線が水と接触したときに発生する蒸気泡が、急成長するときと、成長後に収縮して崩壊するときに生じる。Fig. A. 1.2は高速度カメラによって撮影した結果である。このときの圧力変動と蒸気泡の直径の変化を高速度写真からプロットしたのがFig. A. 1.3である。Fig. A. 1.3の(a)は蒸気爆発の蒸気泡の直径の変化、(b)はブリッジワイヤーによって出来た蒸気泡の直径変化である。1秒間に6700コマの速度で撮影した高速度写真の結果によると、蒸気泡は3回成長と収縮を繰り返し、そのつど高温液滴が細粒化して微粒子が出来ているのが分かる。蒸気泡の直径は、3回目の成長が終了したとき最も大きくなり、最初の液滴の直径の十倍程度になる。圧力波の変化に対応してみると、全部で5個ある圧力パルスの最初のものは、ブリッジワイヤーによって出来た蒸気泡の急成長によるものであることが分かる。1.7ms付近のパルスは、ブリッジワイヤーの蒸気泡の消滅時のもの、そして4ms過ぎの約12気圧の高い圧力パルスは、蒸気泡が最も大きくなつた後の収縮時に記録されている。この値から蒸気泡の圧力を推定すると、100から500気圧もの高圧になっていることが分かった。Fig. A. 1.4は蒸気爆発の後回収された微粒子を解析した結果である。(a)はこの微粒子の粒径分布、直径d $\mu$ mの粒子の個数が全体の個数に占める割合を示す。約5 $\mu$ mの粒子の個数が最も多いことが分かる。(b)は粒子の積算した質量割合を示している。50 $\mu$ mまでの粒子の占める割合は約10%、100 $\mu$ m以下の粒子の占める割合は約50%となっている。わずか0.05gほどの1滴の高温液滴が数百万個の微粒子に、しかも極めて短時間に細粒化することが分かった。

この蒸気爆発実験によって、膜沸騰蒸気膜の崩壊から細粒化の終了まで約5msしかかっておらず、細粒化が瞬時に起こることが明らかになった。

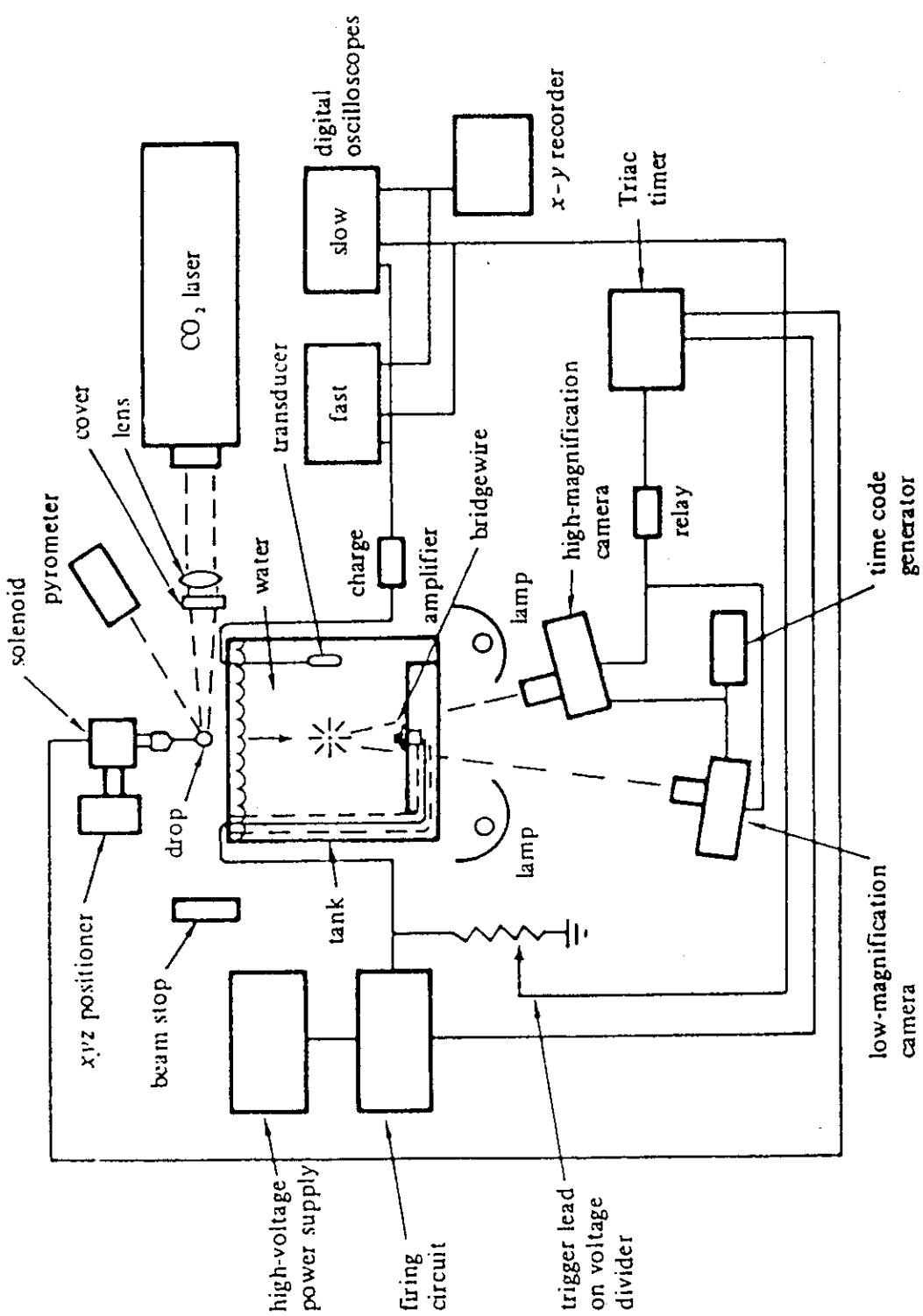


Fig. A. 1. 1 ネルソン氏らの実験装置概略

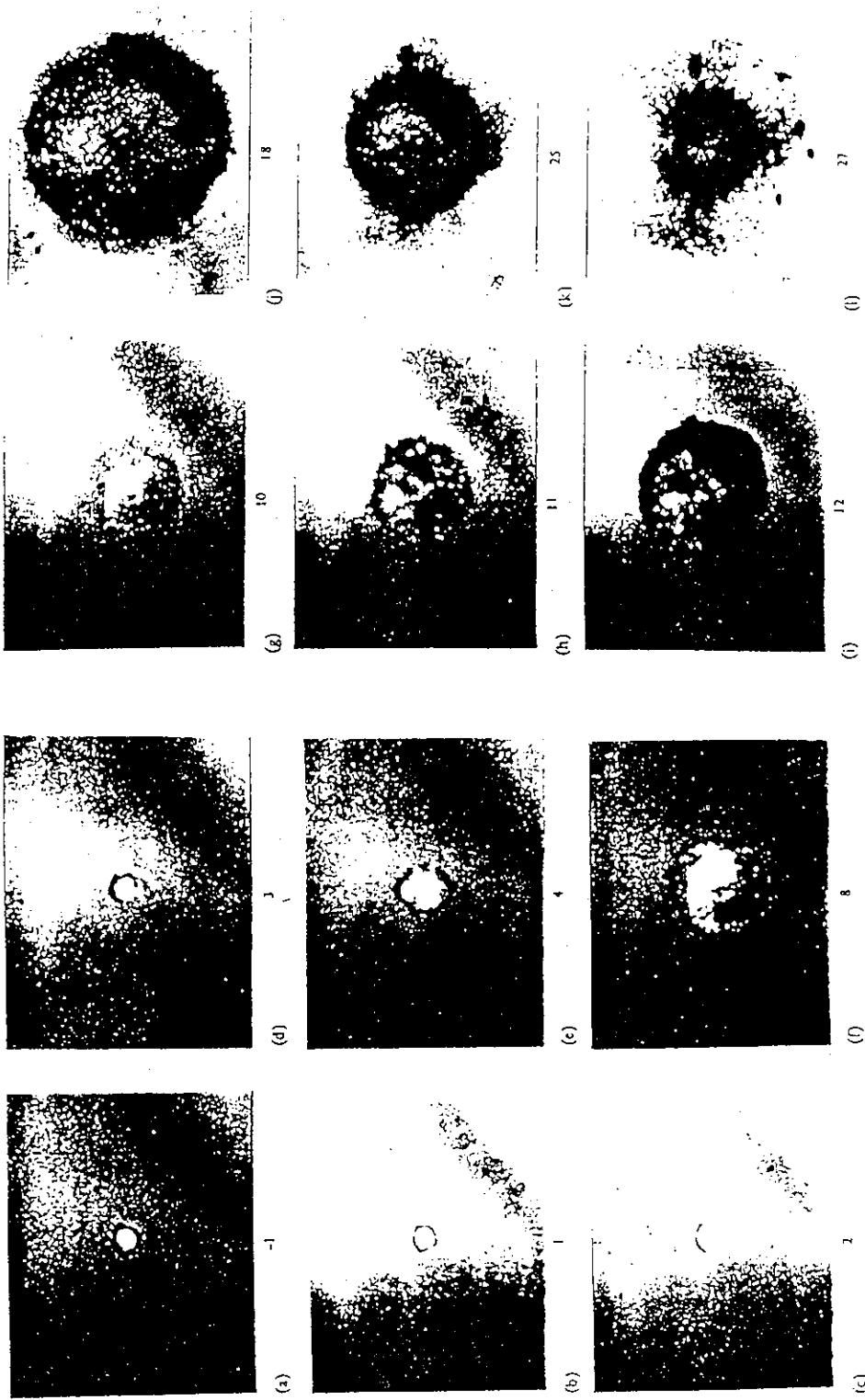


Fig. A. 1, 2 蒸気爆発の高速度写真

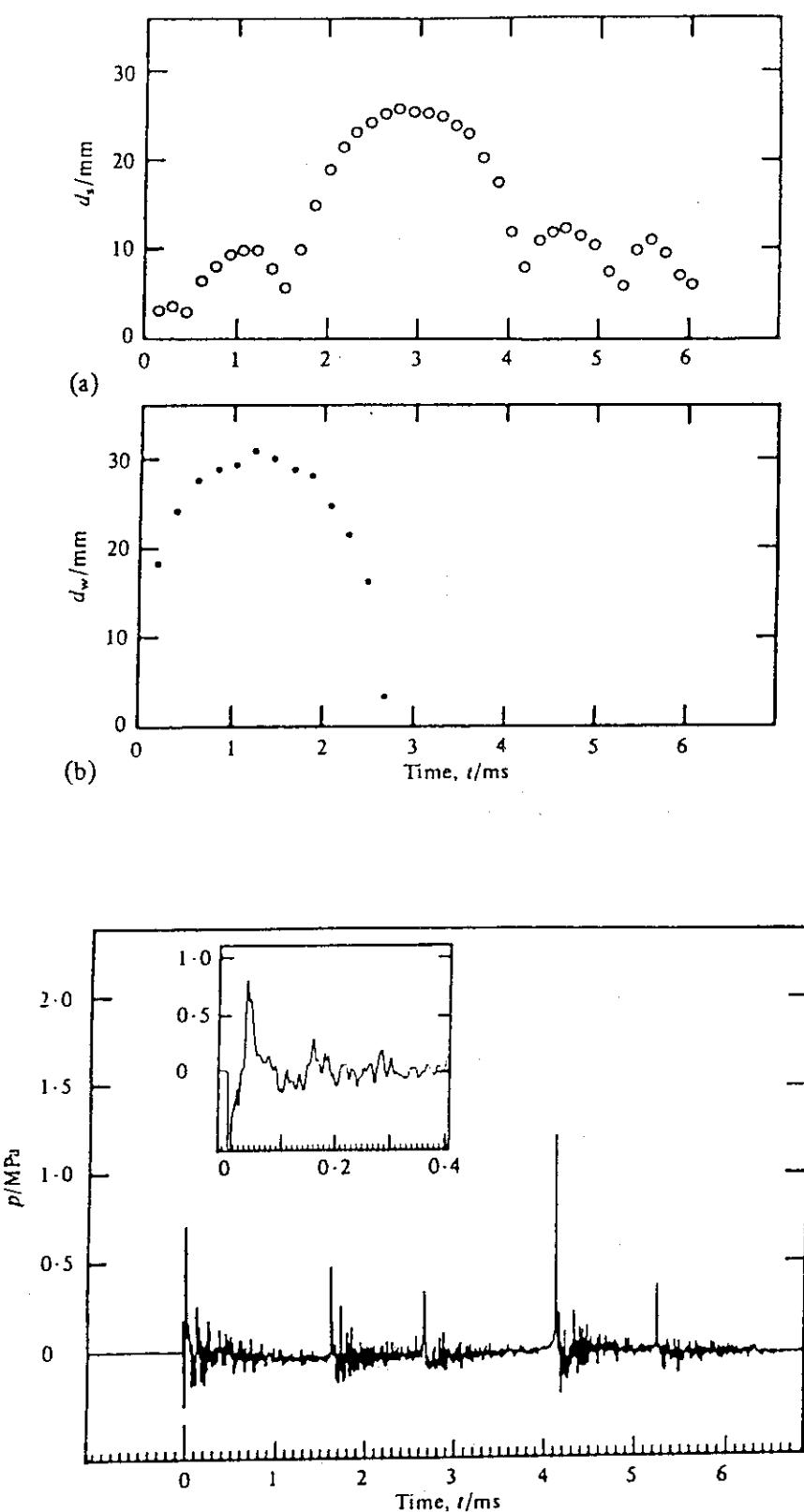
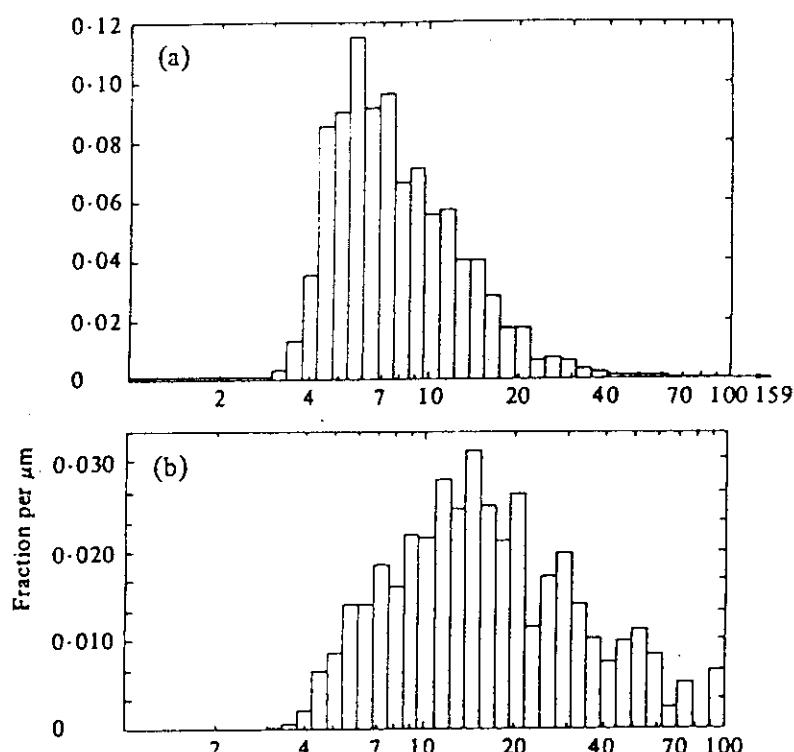
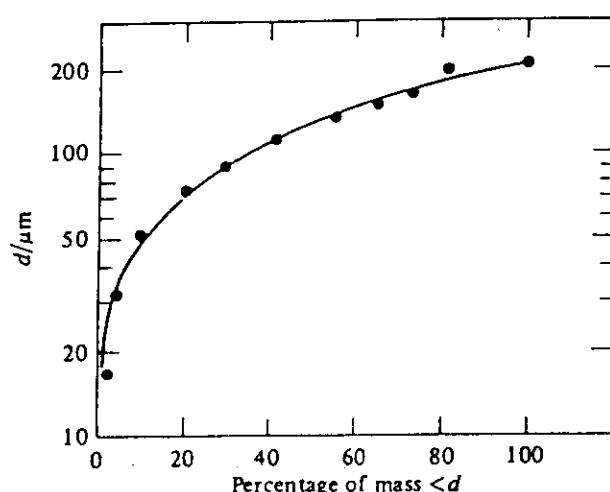


Fig. A.1.3 蒸気泡直径と圧力波の時間変化



(a) 粒径分布 粒子直径  $d \mu\text{m}$



(b) 積算質量割合

Fig. A. 1. 4 微粒子の解析結果

## A.2 高島<sup>(7)</sup>らの実験

Fig. A. 2.1は高島らが設計・製作した実験装置である。高温液滴に硝酸リチウム ( $\text{LiNO}_3$ )、低温液にはエタノールを使用している。これらの液・液の組み合わせを用いた主な理由は、膜沸騰確認後の蒸気爆発を容易に実現できること、硝酸リチウムはそれ自体の酸化が少なく再現性高い実験が出来ることなどである。しかし引火性の危険もあり窒素ガスを流すことにより引火を防いでいる。実験手順は、ステンレス製円筒型の高温液加熱容器に硝酸リチウム粉末を適量いれて、ヒーターで加熱する。熱電対で温度をはかり約500°Cになつたら、ソレノイドとタイマーによって容器のプラグを短時間引き上げる。リレー回路を工夫することによって、任意の液滴を任意の時間間隔で滴下してやることが出来る。液滴は膜沸騰状態で、内径40mmの透明アクリル円筒容器内の常温のエタノール中を沈降していく。液滴は途中にセットされた針山状の障害物に接触して蒸気膜が壊れ、蒸気爆発となる。この間の様子を高速度カメラによって最高毎秒約5000コマで撮影した。圧力変動は低温液容器の底に取り付けた半導体圧力センサーの信号をアンプで増幅して、デジタル波形記憶装置で記録する。蒸気爆発実験で使用する半導体圧力センサーは、固有振動数が数10kHzから100kHz程度と大きくなつており、急激な圧力変化の測定ができるようになっている。針山状の障害物は、蒸気膜を破壊する働きと撮影位置を決める二つの働きがある。Fig. A. 2.2は毎秒2000コマで撮影した蒸気爆発の様相である。液滴の形状は横に少し長い楕円体型で、大きさは約5mmである。液滴は針の先に接触した瞬間に蒸気膜が破壊されるのではなく、液滴がかなり針先に食い込んでから蒸気爆発が始まっている。このことは、液滴によって針先に残って取り込まれたエタノールが加熱される可能性があることを示している。蒸気膜が破壊した後は液滴が黒く写り光を通さないことから、非常に乱れた表面形状になっている。蒸気泡は球に近い形状で成長して12ms付近で最も大きくなる。その後収縮して一度極小値を取り、再び成長するがこの時点で蒸気爆発の主要なプロセスは終了しているといえる。Fig. A. 2.3は、このときの圧力変動を実線で、蒸気泡域の投影面積を膜沸騰時の液滴の投影面積の比  $A/A_0$  を点線でそれぞれ示したものである。圧力波のピークは、A、B群およびC群に分かれるが、圧力の変動と  $A/A_0$  は蒸気爆発の様相と対応している。さらに圧力ピークと蒸気泡域の変化もよく対応している。蒸気膜が崩壊したときの圧力ピークAの後に蒸気泡が成長し、その次の急成長時に圧力ピークBが発生している。最大圧力ピークC<sub>1</sub>は、蒸気泡域が成長してさらに収縮して極小値を取ったときに発生している。圧力ピークC<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>も蒸気泡域の最収縮時に発生している。しかしC<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>の時点では单一の蒸気泡としては存在しておらず、小さい蒸気泡の集合体が慣性力に基づく振動運動を行っているものと思われる。圧力ピークB<sub>2</sub>、B<sub>3</sub>はその後の研究で容器底面と蒸気泡界面間の圧力波の反射によって生じることが分かった。

Fig. A. 2.4は複数液滴によって自発的な蒸気爆発の実験を、単一液滴の場合と同じ装置によって行ったときの圧力変動と蒸気泡径を示したものである。膜沸騰で沈降する先行液滴D<sub>1</sub>が障害物に接触して蒸気膜が壊れた後、約2ms後に後続の液滴D<sub>2</sub>の蒸気膜も壊れている。D<sub>2</sub>の蒸気膜はD<sub>1</sub>の蒸気膜崩壊時に発生した圧力パルスAによって破壊されたものであることが波形から明らかである。次に圧力変動の波形を見ると、Fig. A. 2.3に示した単一液滴の場合

と同じ形になっていることが分かる。すなわち、蒸気膜の崩壊に時間のズレがあるにも関わらず、その後の圧力パルスがバラバラに生ずるのではなく、最大圧力値を同時に記録している。このことは、最大圧力値 $C_1$ が個々の蒸気泡の動きによって発生するのではなく、何か蒸気泡の挙動を支配する要因があることを意味し、それは系の圧力と考えられる。このほか圧力パルス間が減圧されていることや、最大圧力パルス $C_1$ は、蒸気泡が消滅に向かって極小値となるときに発生することが分かった。Fig. A. 2. 5は毎秒約5000コマで高速度撮影したときの圧力波形であるが、单一液滴、二滴の場合と同じ形状の圧力波形を示している。

そして、これまで述べた单一液滴と複数液滴の実験の結果に基づいて、現象の定性的なモデルを作成したのがFig. A. 2. 6である。 $D_1$ は多数の高温液滴のうち、最初に蒸気膜が破壊される液滴を表している。 $D_2$ は $D_1$ の周囲にある液滴の一つで、両液滴の時間経過による挙動を典型的な圧力波形と対応させながら考えている。

Fig. A. 2. 7は硝酸リチウムとエタノールによる実験で、エタノールの温度が3°Cと冷たいときと73°Cと沸点に近いときの圧力波形を比較したものである。低温液の温度が高いと圧力パルスも小さく、蒸気泡の成長も遅く収縮しないことが分かる。

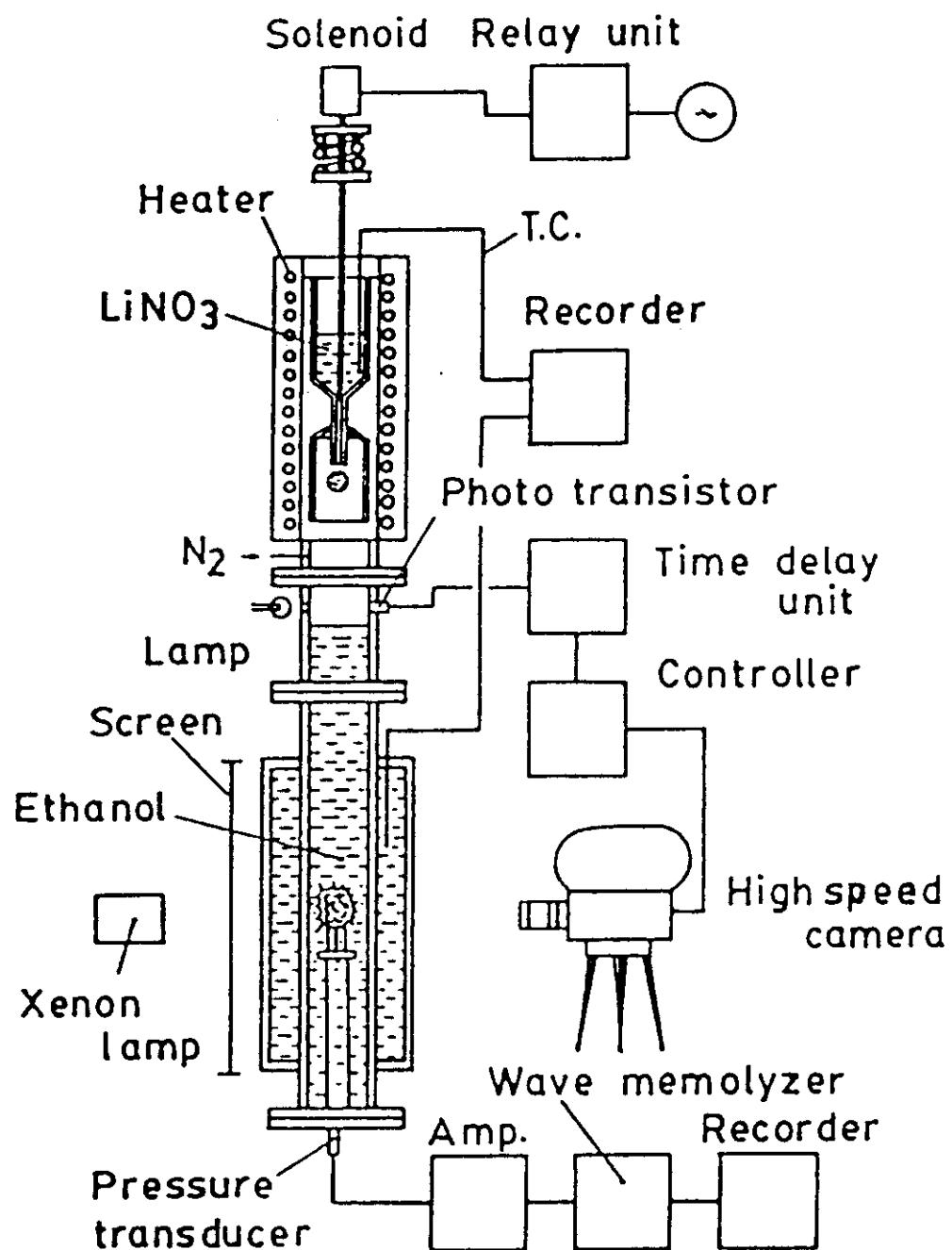


Fig. A. 2. 1 溶融塩液滴とエタノールの蒸気爆発実験装置

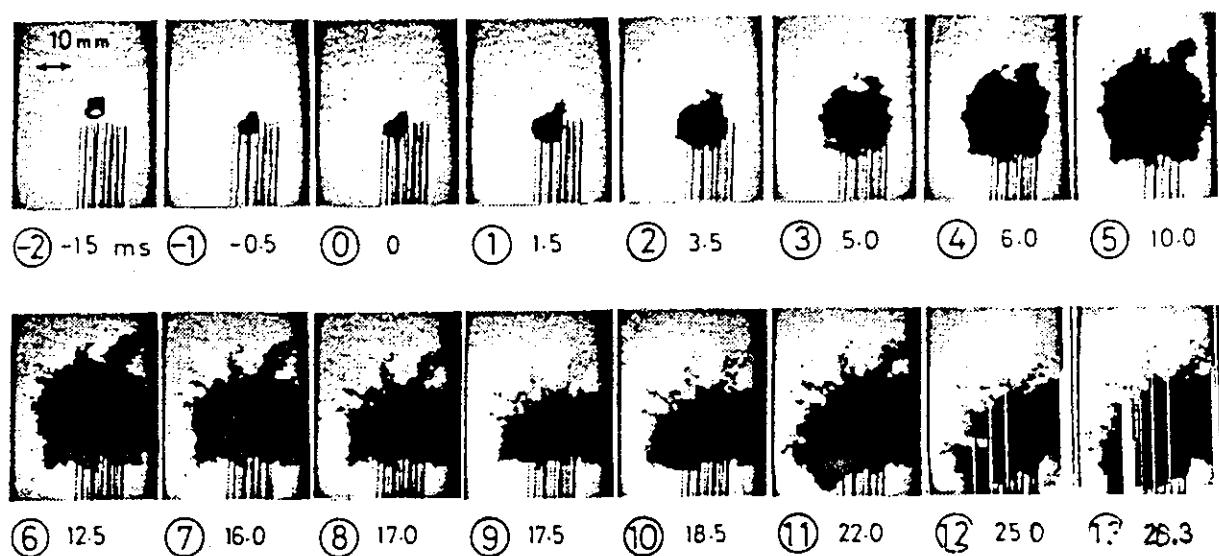


Fig. A. 2. 2 蒸気爆発の高速度写真

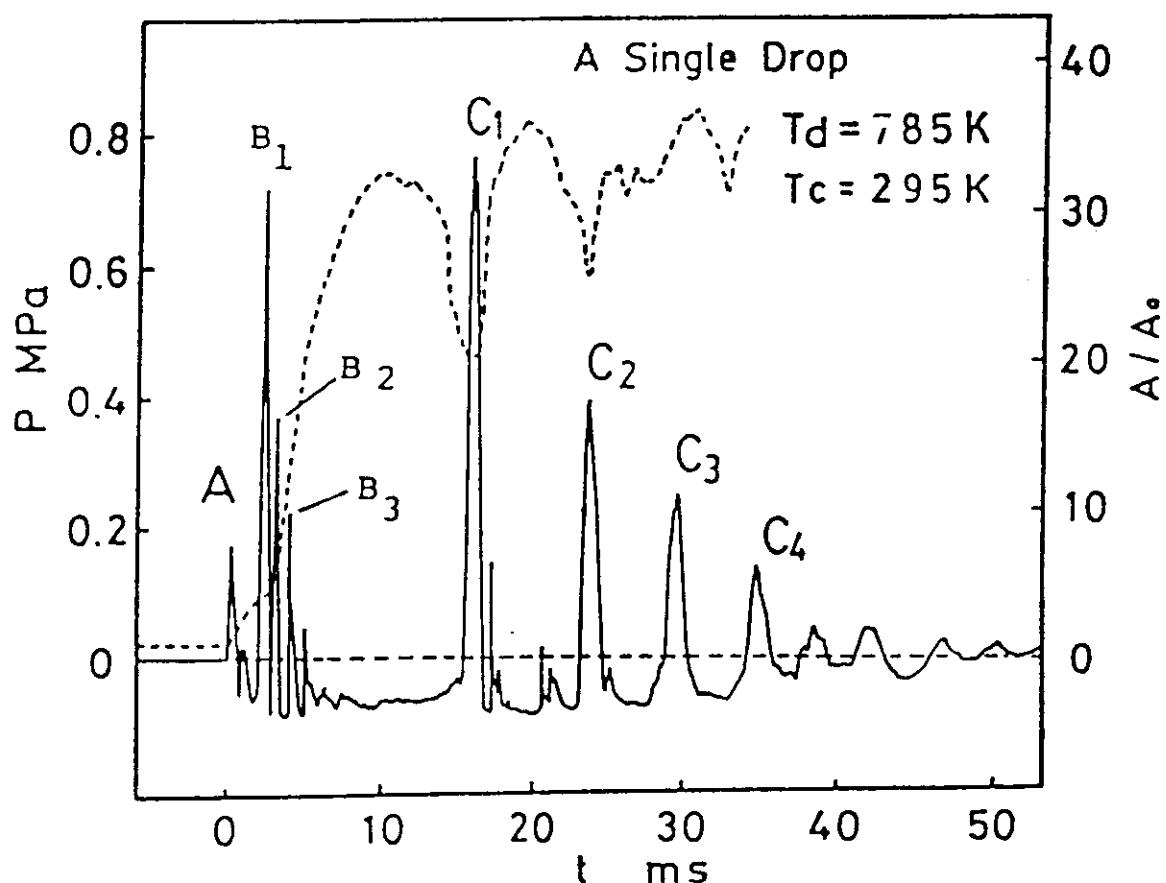


Fig. A. 2. 3 圧力波形と蒸気泡径領域変化

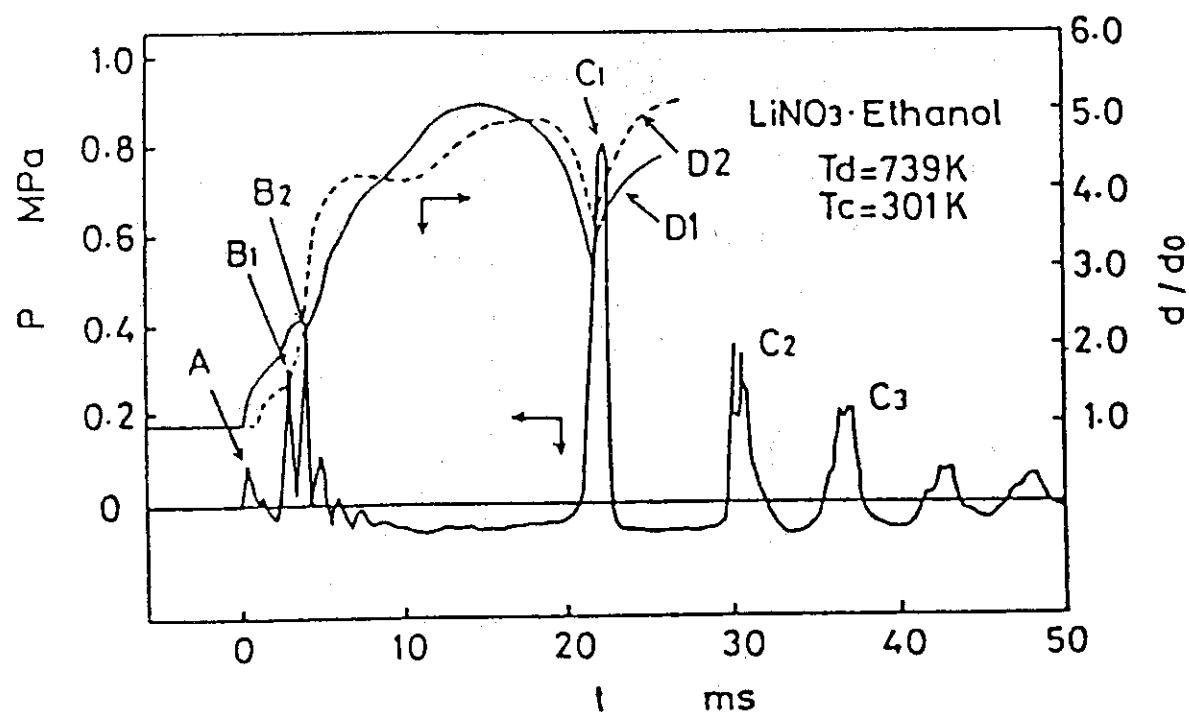


Fig. A. 2. 4 二液の蒸気爆発の圧力波形と蒸気泡の変動

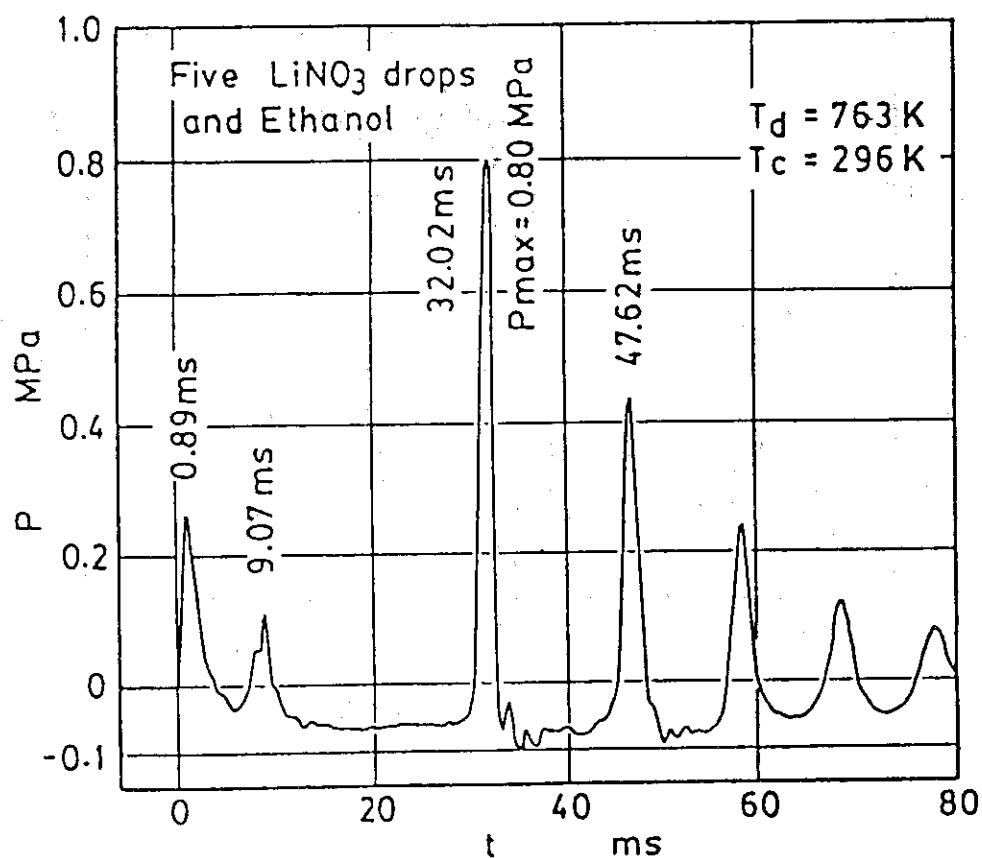


Fig. A. 2. 5 複数滴の圧力波変形

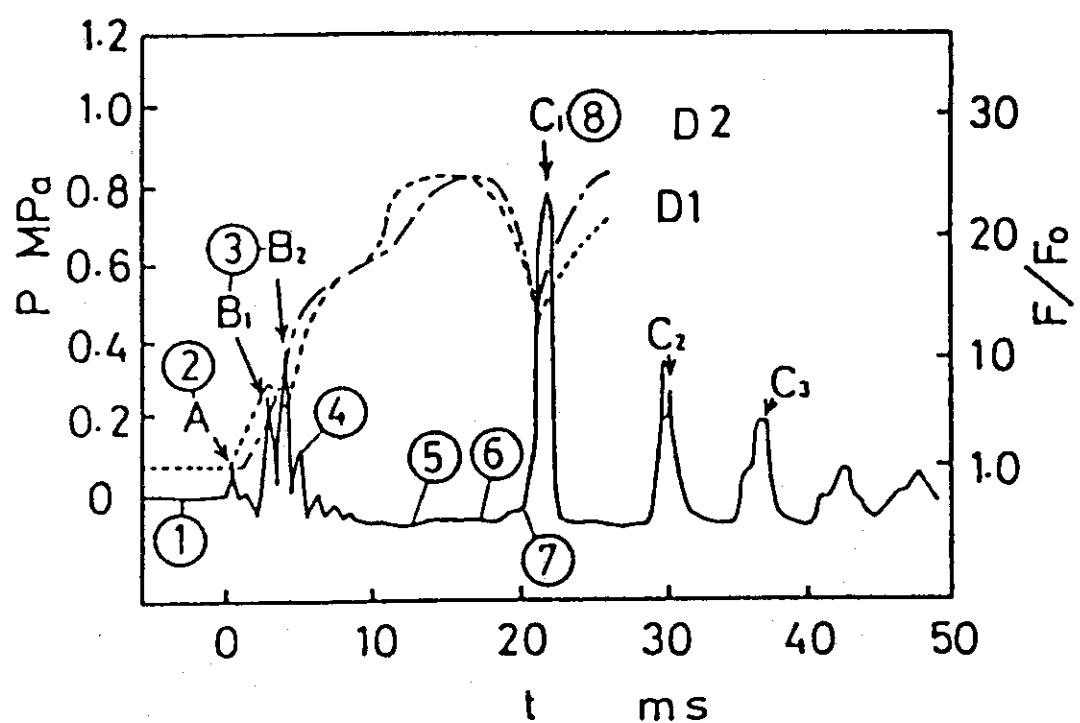
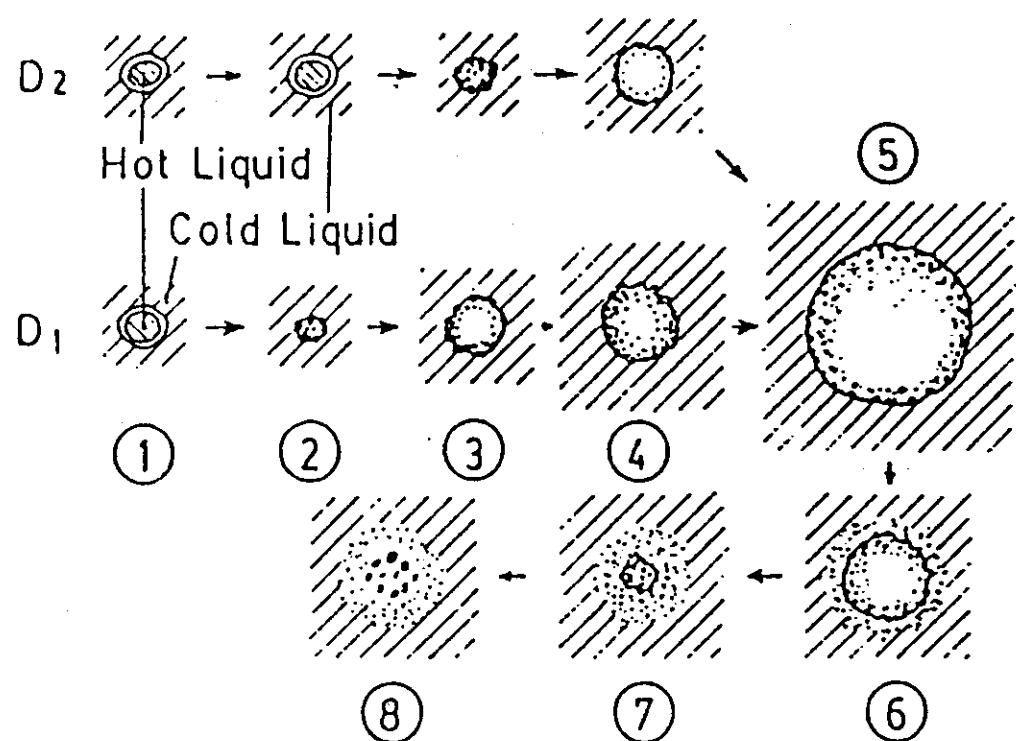


Fig. A. 2. 6 蒸気爆発のメカニズムのモデル化

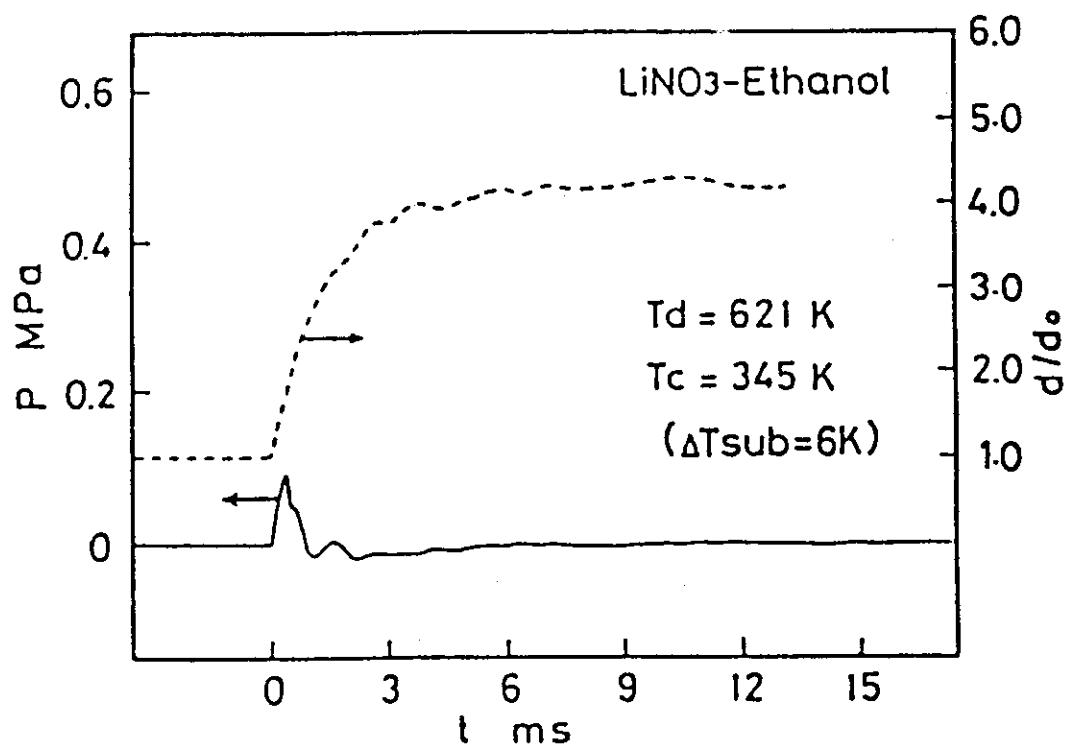
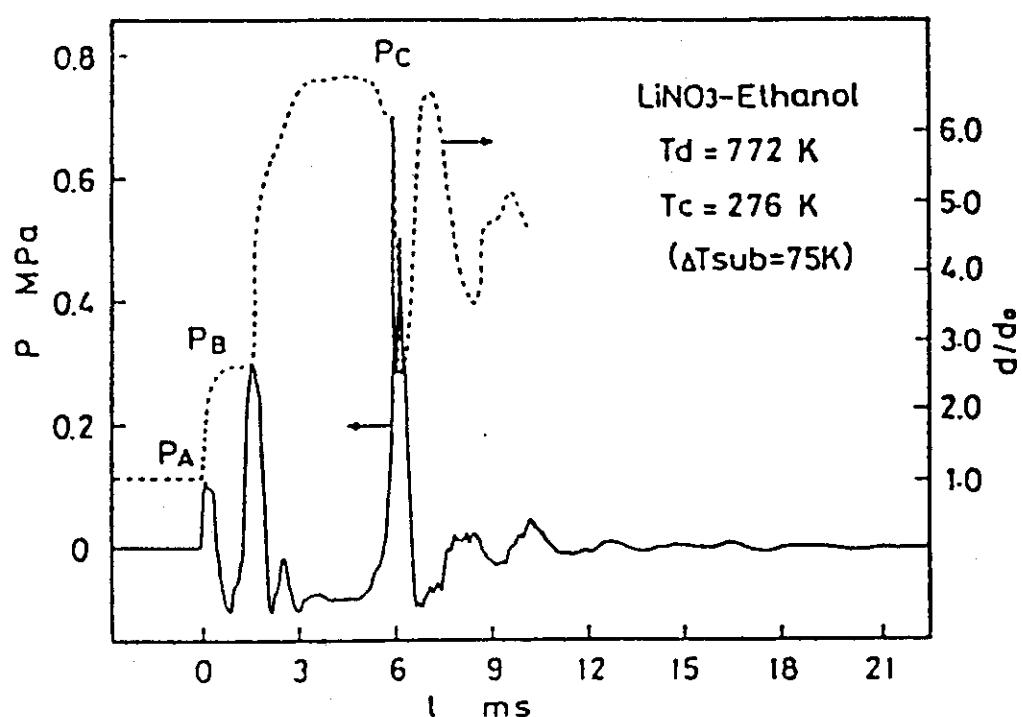


Fig. A. 2.7 低温液温度による圧力波の変化

### A.3 井上<sup>(6)</sup>らの実験

Fig. A.3.1は井上らが設計・製作した実験装置である。本実験装置はテスト部を有する衝撃波管、アナログ計算機、加熱電流制御装置、及び測定系から構成される。

衝撃波管は内径38.1mm、全長約2.3mの垂直型ステンレス管で、中央にテスト部が位置する。管上部にはマイラー膜がはられその上部を窒素ガスで加圧し高圧室としている。テスト部の存在する低圧部は窒素ガスによって加圧、ないしは真空ポンプによって減圧できる。衝撃波は電磁弁の開閉によって空気圧で作動する擊針でマイラー膜を破ることによって発生する。管内面は衝撃波の散乱を防ぐため均一に磨かれている。マイラー膜の10cm下方にはオリフィスが挿入できその径を変えることによって衝撃波の立ち上がりを任意に選ぶことができる。衝撃波は垂直下方に伝播し管の底部で反射するが、反射波がテスト部に戻ってくる以前に伝熱面上の現象は終了しているのでその影響はない。

圧力測定系については、マイラー膜破却前の高圧部と低圧部の圧力はブルドン管型圧力計によって読みとり、衝撃波発生後の圧力変化は、テスト部金箔から40cm上部の管壁に取り付けられたピエゾ型圧力変換器で測定した。この圧力変換器は1μsの圧力立ち上がりに応答する。信号は直流作動增幅器で増幅し、ディジタルメモリーに記録させペンレコーダーで書き出した。窒素ボンベ、真空ポンプ、ブルドン管型圧力計へ通じる全ての配管は、マイラー膜の破却直前に電磁弁で遮断される。実験終了後、大気開放へ通じる配管の電磁弁を速やかに開き、管内を大気圧に減圧する。

水循環、加熱系について、用いた液体はイオン交換樹脂により精製された純水であり管下端にあるヒーターによって加熱される。管内の水温を均一に保つためにテスト部の上下にバイパスを設け、ポンプで水を強制循環させている。水温はテスト部白金箔の約5cm下に位置するシース型熱電対で測定し、実験時にサブクール度を5°Cに保つようにヒーターの出力をスライダックで調節する。管にはテフロンチューブがマノメーターとして取り付けられ、水位を読みとることができる。循環用のバイパスの一部に水溜めが設けてありこの部分の水量を調節することと、衝撃波管底部から水を抜き出すことで衝撃波管内の水位が調整できる。マイラー膜破却直前に、水系の全ての配管は電磁弁で閉じられる。

テスト部の詳細をFig. A.3.2に示す。テスト部は厚さ150μm、幅2mm、有効発熱長さ約15mmの白金箔である。箔は両端をはんだ付けされ、伝熱面を鉛直方向にして水平に取り付けられている。蒸気膜は直流直接通電によるジュール加熱で形成される。伝熱面の温度変化は、白金箔の抵抗変化による電圧変動から求めており、この電圧測定のため白金箔の有効発熱部の中央に約4mmの幅で50μmの白金線をスポット溶接し、この間の平均温度を求めている。テスト部は衝撃波管の窓から肉眼で観察できる。通常の実験時には耐熱性を考慮してポリカーボネート製の窓を、高速度カメラによる写真撮影時には透明度に優れるアクリル製の窓を使用した。衝撃波の散乱防止のために、窓の内面は衝撃波管の内面に合わせて磨かれている。

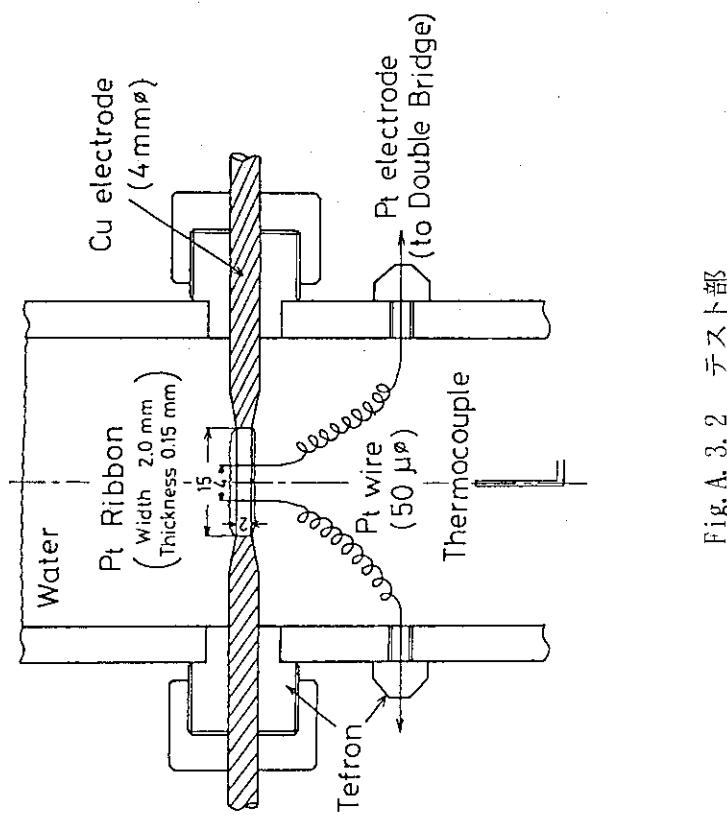


Fig. A. 3. 2 テスト部

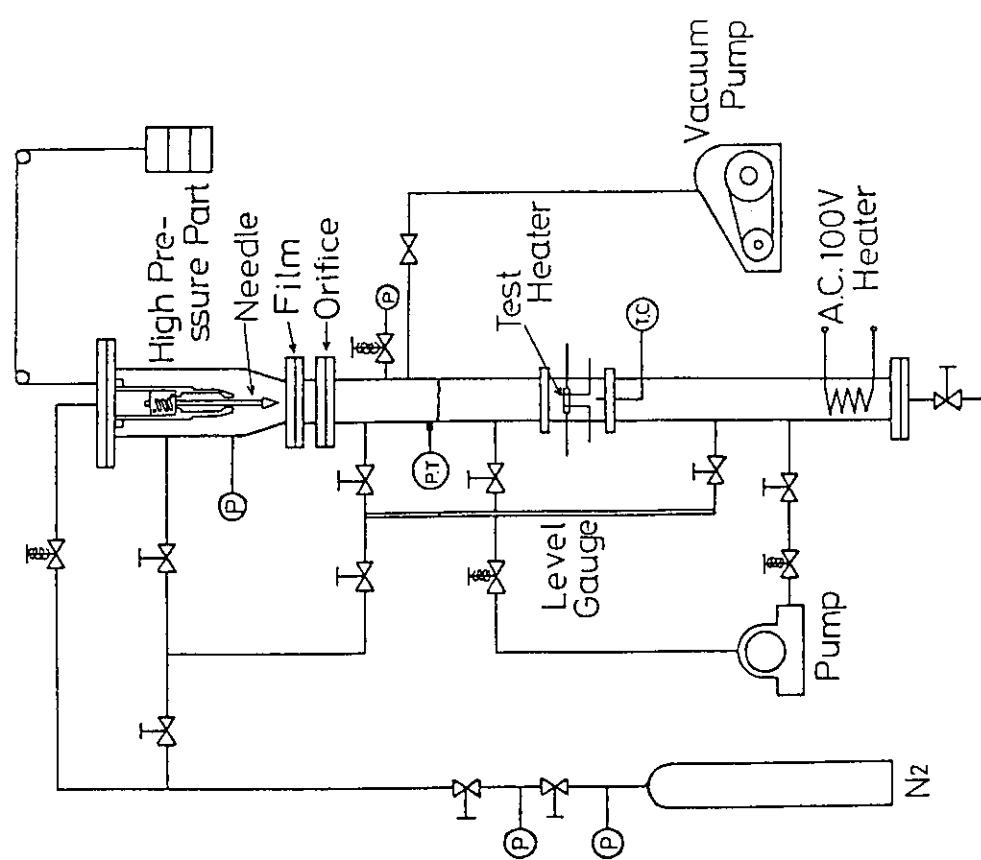


Fig. A. 3. 1 実験装置概略図

## 付録B ライデンフロスト現象

ライデンフロスト現象とはFig. B. 1のように、高温のフライパンなどに小量の水を落としたとき、水滴とフライパンの間に薄い水蒸気膜が出来て水滴が急に蒸発するのを妨げ、水は広がらずに水滴となって転がったり、お供え餅のような形のままじっとしている現象である。Fig. B. 2<sup>(9)</sup>は金属面の温度を少しづつ上げていきながら一滴の水滴を滴下して、水滴が蒸発し尽くす時間を測定したものである。金属面の温度が高くなるにしたがって蒸発時間が短くなっていくが、150°Cぐらいから再び長くなる。そして、300°C付近で極大値となる。この蒸発時間が極大となる温度をライデンフロスト温度と定義されている。ライデンフロスト温度以上では液滴と加熱面は完全に蒸気膜で隔てられた状態になり、蒸発の時間が再び短くなる。



Fig. B. 1 ライデンフロスト現象

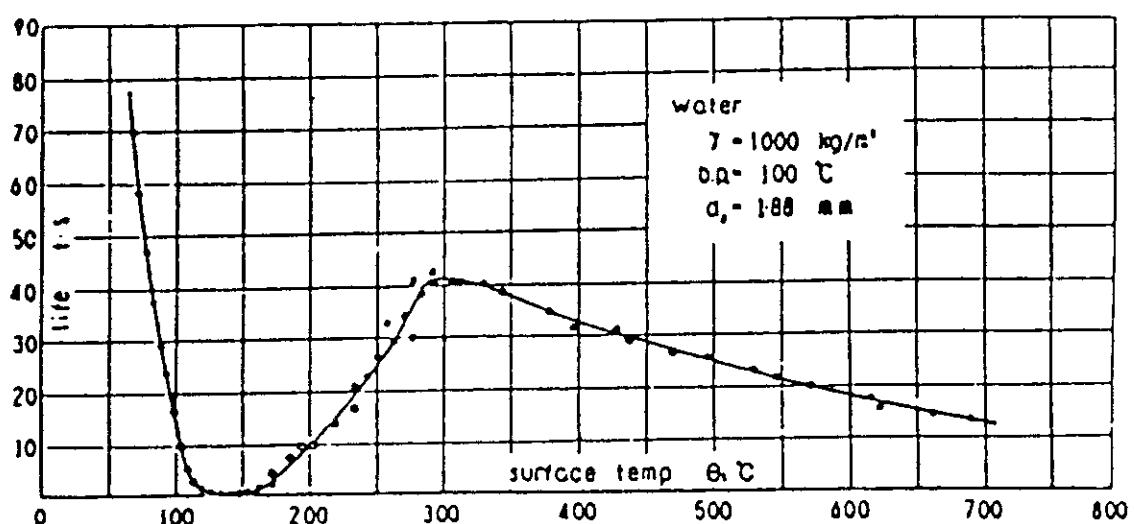


Fig. B. 2 高温固体表面上の水滴の蒸発時間<sup>(9)</sup>

## 付録C 実験手順

### C.1 実験手順

実験を始めるにあたっての準備を以下に示す。 (記号はFig. C.1を参照のこと)

1. 全てのドレンが閉じている事を確認。
2. 200l itタンクに水を注水。注水後、循環ポンプにより配管経路Aで配管内を循環。このとき、NV3, NV2により流量を調整。
3. タンク内のヒータによりタンク水温を調整。
4. ボンベ出口圧力を予定している衝撃波発生装置高圧容器内圧より2気圧ほど高めに調整。
5. 衝撃波発生装置にフィルムを取り付け、加圧して、漏れがあるかを確認。
6. データロガの測定準備。 (参照C.2節)
7. 高周波加熱装置冷却タンクに水を注水し、給水ポンプを作動させる。このとき、ポンプ出口バルブを4.0kgf/cm<sup>2</sup>G、高周波加熱装置入口バルブを3.0kgf/cm<sup>2</sup>G、ワークコイル入り口バルブを2.0kgf/cm<sup>2</sup>Gに調節。
8. 水温が適温であるかを確認。
9. 鋼球を高周波加熱装置で加熱。

実験直前の操作を以下に示す。これらの操作は迅速に行わなければならない。

10. 衝撃波発生装置の高圧容器内圧をMV1、MV2で調節。
11. 鋼球表面温度確認。
12. BV2を閉じて、配管経路Aの循環遮断。
13. 制御回路 ON
14. 高周波加熱装置 OFF
15. データロガ ON

以上の操作が終了した時点で実験が開始され、測定終了となる。以下の操作を行って実験は終了する。

16. 制御回路 OFF
17. BV2を開き、再び配管経路Aを循環させる。
18. データ転送プログラム"GPIB04"を走らせ、データロガのデータをフロッピーディスクに保管する。 (参照C.3節)

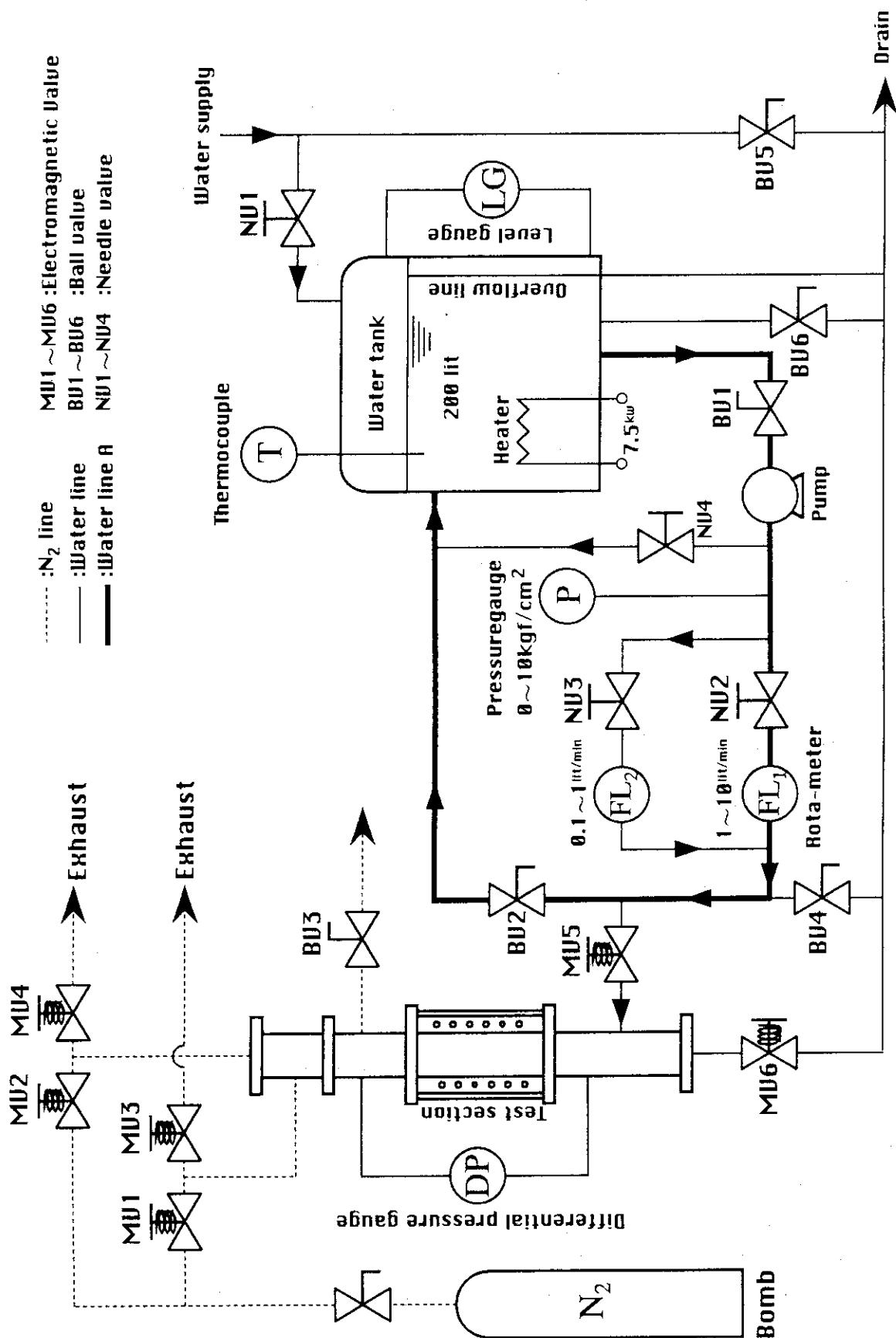


Fig. C. 1 配管系統図

## C.2 アナライジングレコーダの操作手順

Fig.C.2にアナライジングレコーダ操作パネルを示す。

以下に操作方法を示す。

1. ①MODEキーを押し、MODEをMEMORY MODEにする。
2. ②RANGEキーを押し、INPUTとRANGEには圧力測定であればDC, 20Vに、温度測定であればTEMP, Kに設定する。FILTERは圧力測定であればOFFにし、温度測定であれば20KHzに設定する。

3. ③TRIGGERキーを押し、圧力測定であれば、

TRIGGER SOURCE: INT

TRIGGER SLOPE: □(立ち上り)

PRE TRIGGER: 20% (状況に応じて調節)

BUFFER MEMORY: 8000

AVERAGING: OFF

とする。そして、⑯キーで、TRIGGER LEVELを6~10%に 設定する。

4. ④PROGRAMキーを押し、表示範囲を指定する。

5. ⑮⑯キーでSAMPLE RATEを設定する。

6. ⑰SINGLEキーを押す。

7. ⑪STARTキーを押し、⑯のランプが点灯していることを確認する。

これら一連の設定が終了してから、実験を行う。計測データがアナライジングレコーダに収録し終わったら、アナライジングレコーダには一切触れず、計算機にGP-IBインターフェイスを介して取り込み、フロッピーディスクに保管するまでそのままの状態にしておく。

## C.3 計算機操作手順

Fig.C.3にデータ転送用プログラムを示す。

以下に操作方法を示す。

1. BASICでGP-IBインターフェイス測定プログラム"GPIB04.BAS"を実行する。
2. 実験No.を入力する。
3. サンプルレートを入力する。
4. 測定データ数を入力する。
9. コメントがあれば入力する。
10. ここで、アナライジングレコーダに測定データが納められているのであれば、フロッピーディスクにデータの転送を始める。(5min/2000data)

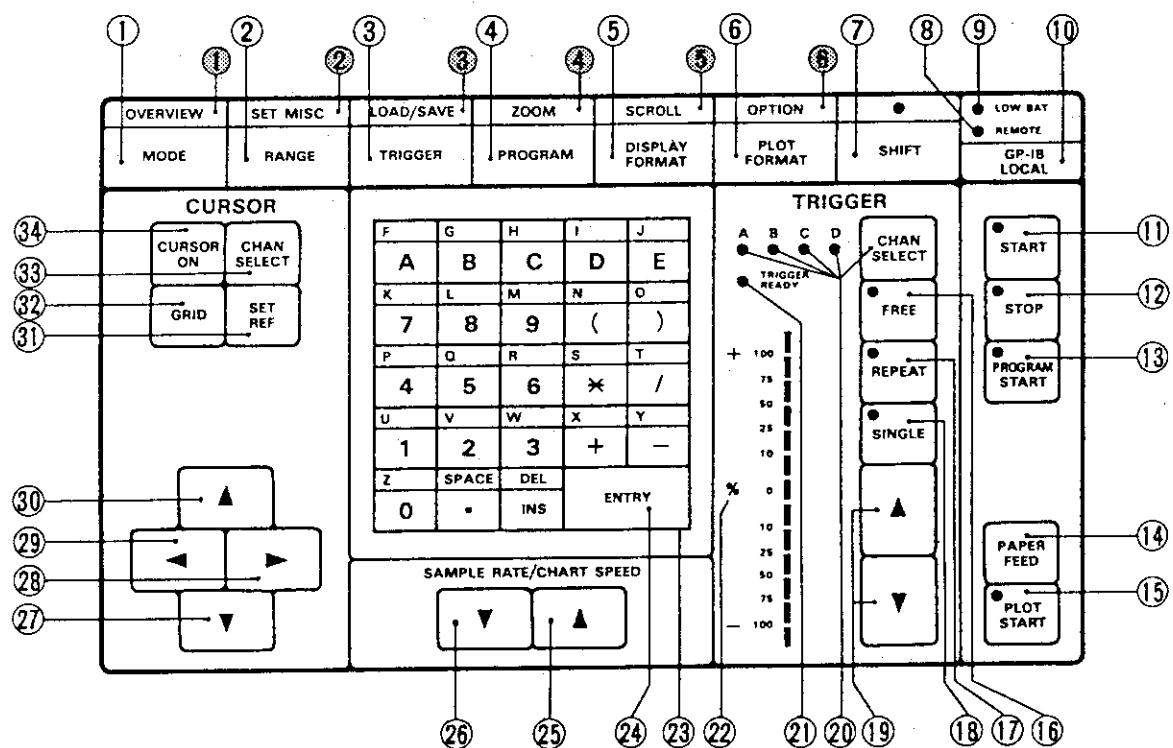


Fig.C.2 アナライジングレコーダ操作パネル

```

1'*****GPIB TRANSPORT PROGRAM*****
10 INPUT "Number of data";N
20 INPUT "Sample rate";DT
30 INPUT "Pre pressure";P
40 INPUT "Comment";C$
50 INPUT "File name";F$:FILE$="a:¥"+F$
110 DIM DA$(N/50,4)
120 DIM DD(N)
130 RESTORE 440
140 FOR I=1 TO 7
150 READ RNG(I)
160 NEXT I
170'
180 ISET IFC
190 ISET REN
200 CMD DELIM = 0
210'
220 FOR J=1 TO 3
221 ST=0:SP=49
222 IF J=1 THEN CH$="A"
223 IF J=2 THEN CH$="B"
224 IF J=3 THEN CH$="C"
230 FOR I=0 TO N/50-1
240 CMD DELIM = 0
250 PRINT @1;"B"+CH$+
" "+STR$(ST)+"," +STR$(SP)
260 LINE INPUT @1:T$
270 CMD DELIM = 3
280 LINE INPUT @1:D$
281 DA$(I,J)=D$
290 ST=ST+50:SP=SP+50
300 NEXT I
301 NEXT J
302 GOSUB 500
310'
311 TIME=0!
312 OPEN FILE$ FOR OUTPUT AS #1
313 PRINT #1,"Sample rate=";DT;" N=";N
314 PRINT #1,"Pre pressure=";P
315 PRINT #1,"Comment :";C$
316 PRINT #1," Time(ms) Upper.pressure
Lower.pressure Inner.pressure temperature"
319'
320 R=RNG(VAL(MID$(T$,7,1)))
340 FOR I=0 TO N/50-1
350 FOR J=0 TO 49
360 P$=MID$(DA$(I,1),J*2+1,1)
361 Q$=MID$(DA$(I,1),J*2+2,1)
362 R$=MID$(DA$(I,2),J*2+1,1)
363 S$=MID$(DA$(I,2),J*2+2,1)

364 T$=MID$(DA$(I,3),J*2+1,1)
365 U$=MID$(DA$(I,3),J*2+2,1)
380 A=CVI(Q$+P$):DA=R*A/32768!
381 B=CVI(S$+R$):DB=R*B/32768!
382 C=CVI(U$+T$):DC=R*C/32768!
383 DD=DD(I*50+J)
390 PRINT #1, USING"####.###" ;TIME;
391 PRINT #1, USING"####.#####";DA;
392 PRINT #1, USING"####.#####";DB;
393 PRINT #1, USING"####.#####";DC;
394 PRINT #1, USING"####.#####";DD
399 TIME=TIME+DT
400 NEXT J
410 NEXT I
411 CLOSE #1
420 IRESET REN
430'
440 DATA 0.081,0.27,0.81,2.7,8.1,27,81
450 END
500'
510 CMD DELIM = 0
520 PRINT @1;"OD 0," +STR$(N-1)
521 LINE INPUT @1:T$D$
530 FOR I=0 TO N-1
540 LINE INPUT @1:D$D$
541 DD(I)=VAL(D$)
550 NEXT I
560 RETURN

```

Fig. C. 3 データ転送用プログラム

## 付録D 設計計算及び設計過程

### D.1 ガラス管の強度計算

円管の内径をd、肉厚をt、その材質の引っ張り限界応力を $\sigma$ とすると、円管に加えることのできる限界圧力Pは、

$$P = 2\sigma \frac{t}{d} \quad (\text{D.1})$$

で表される。ガラスの引っ張り限界応力は、3~9MPaであり、今回使用したガラス管の寸法は内径dが50mm、肉厚tが5mmであるから、円管に加えることのできる限界圧力は6~18MPa(60~180kgf/cm<sup>2</sup>)となり、今回予想される本実験での圧力の範囲が10kgf/cm<sup>2</sup>程度であるため、十分耐え得ることが期待できる。

以上は静的な圧力を加えた場合の強度計算である。但し、文献<sup>(10)</sup>によるとFig.D.1.1のようにガラスの破壊強度は加重時間に反比例していることから、衝撃波のような急激な圧力変動に対しては瞬時的であるほどガラスは破壊しにくくなるため、本実験で圧力がかかりすぎることによってガラスが割れる可能性は極めて少ないといえる。

### D.2 圧力センサの決定

Fig.D.2.1はこれまでに報告されている蒸気爆発実験で観測された圧力値を、高温液と低温液の温度差を基準とした熱エネルギーに対してプロットしたもの<sup>(11)</sup>である。縦軸は最大圧力値と観測距離の積をとっており、その値は単位面積あたりのエネルギーとなるので、この図は熱エネルギーが力学的エネルギーにどの程度変換されるかを表している。

図の中実の印は、外部圧力波などによって蒸気爆発を発生させた場合、白ぬきの記号は自発的な蒸気爆発の場合である。Aグループは、全て金属以外の液体の組み合わせで、Bグループは、全て金属と水の組み合わせによる実験値である。AとBとでは10倍も圧力値が異なっており、それだけ金属と水の蒸気爆発は高いエネルギー変換効率となっている。Cグループは、单一液滴による実験や高温液を容器に入れ拘束された条件で蒸気爆発を発生させたときのもので、最も高いエネルギー変換効率となることを示している。また、外部からの要因で蒸気爆発が発生した場合でも発生圧力にはほとんど影響しないことがわかる。

さらに、付録のFig.A.1.3、Fig.A.2.3、Fig.A.2.4、Fig.A.2.5、Fig.A.2.7のような各蒸気爆発実験において圧力波の最大値は1MPa前後である。

以上から本実験で使用する圧力センサは本実験が多数滴の場合も含むことから、余裕をみて2MPa以上の測定範囲を持っていれば良いだろうということになる。しかし、蒸気爆発は非常に高速の現象であるため、高い応答周波数をもつ圧力センサが更に望まれることになる。

そこで、本実験では<sup>(株)</sup>ティアックの半導体圧力トランステューサ（参照：Fig.F.8）を使用することにした。半導体圧力トランステューサの感圧部にはメタルダイアフラムとシリコ

ンダイアフラムの2種類があり本実験では水中下で使用するため、メタルダイアフラムの標準型XTM-190、定格としては、応答周波数の高いものを優先として、225kHz, 70kgf/cm<sup>2</sup>のものを選択した。

### D. 3 実験装置の設計

Fig. D. 3. 1に実験装置組立図を示す。以下は各主要部分の設計に至るまでの過程である。

#### D. 3. 1 衝撃波発生装置の設計

本実験では、衝撃波を発生させる機構として、ピストン・シリンダ機構によって上下に運動する槍が、高圧容器の蓋となる薄いフィルムを破くことにより衝撃波を発生させる方法を採用している。

ピストン・シリンダ機構は高圧の窒素ガスをピストン上部シリンダ容器内に、衝撃波発生装置本体内部圧力より高い圧力を注入することにより作動する。これは、ピストンにガスケット等を使用していないため、シリンダ容器内圧力が本体内部圧力と同じである為である。それ故ピストンは自重で下がってしまうため、これを押し上げておくスプリングをピストンの底に配置した。実際には1気圧ほど高めの圧力をシリンダ容器内に注入すると確実な衝撃波が得られた。

フィルムは衝撃波発生装置下部のフランジとテスト部上部管の上部フランジの接触面にOリングを2重にして挟み込んで圧力の漏れを防いでいる。そして、圧力に応じて、フィルムの枚数を増やすことにより自発的な破裂を防いでやる。また、先のとがった槍ではフィルムは破裂せずに小さな穴が開くだけといった可能性があるため、槍の先には幅36mmのカッターナイフを十字型に装着している。これにより、フィルムはきれいに十字型に開き、破片が落下することも少なくなり、確実に衝撃波が得られるようになる。

#### D. 3. 2 テスト部本体の設計

本実験装置は当研究所の損傷炉心冷却実験装置の高周波加熱装置を利用した。テスト部本体は高周波加熱装置用のコイルが周囲を覆う構造となるため、そのコイルの長さに合わせて設計を行った。

#### D. 3. 3 上部管・下部管の設計

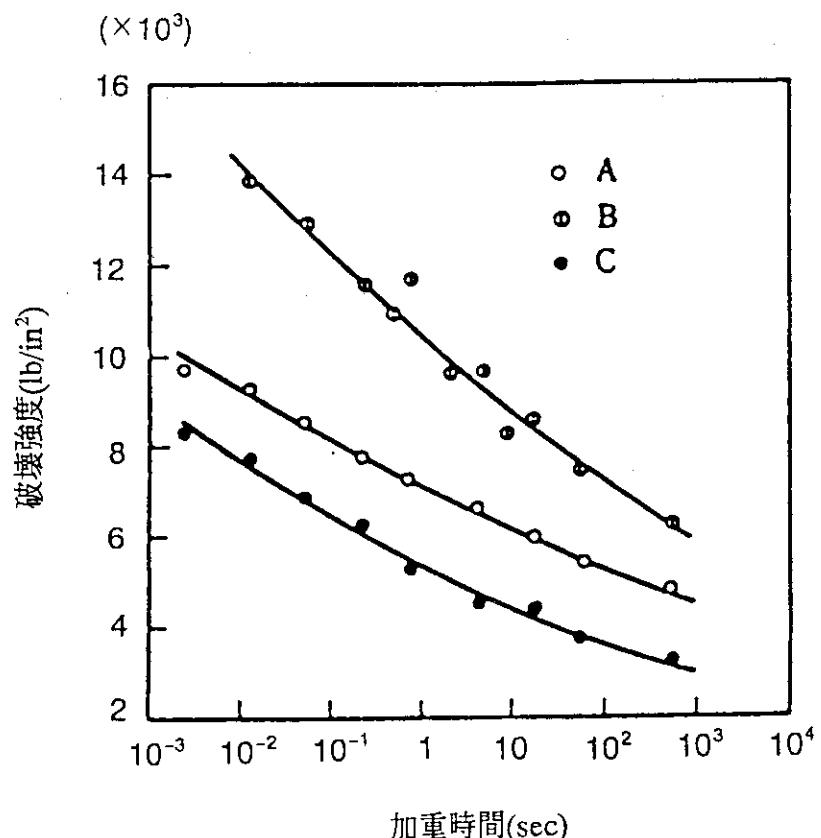
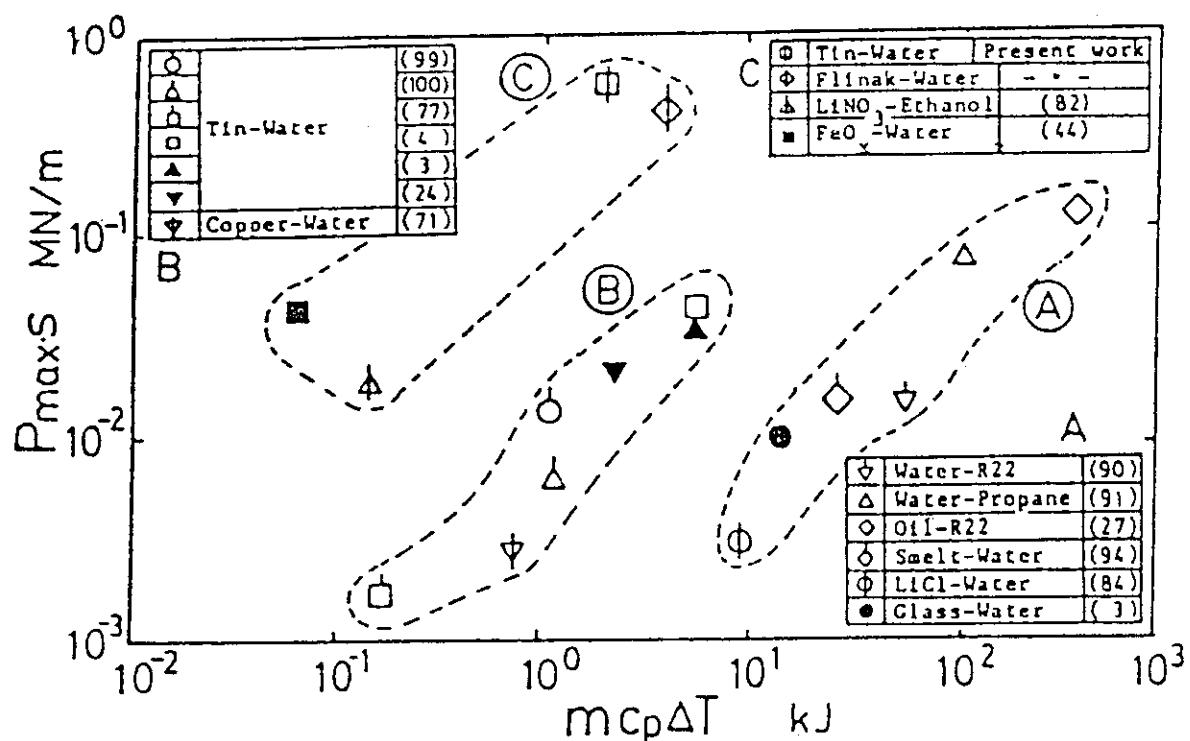
本実験装置は当研究所の損傷炉心冷却実験装置の一部分を流用しているため、架台はそのまま使用している。よって、上部管と下部管の設計に当たって、僅かに制約を受ける。

上部管の寸法は、テスト部の条件設定で、鋼球の入れ替え作業ができるよう、最低でも450mm持ち上げられるような設計とした。

下部管は高周波加熱装置の影響が圧力センサに受けないように、なるべく測定距離を稼ぎたかったため、床から200mmのところに圧力センサ取付フランジがくるよう設計した。

#### D. 3.4 圧力センサ取付管の設計

実験にて、衝撃波は圧力センサが取り付けてある実験装置最下部で反射し、更に他の場所で反射して、再び圧力センサに戻ってきてしまう可能性がある。本実験では最初の衝撃波以外は余計であるため、メタルスponジでこれを吸収し反射波を減衰させている。そのため圧力センサは衝撃波を反射させないように、できるだけ小さいものにし、これを細いステンレス管に入れ、メタルスponジを周りに詰める空間を確保している。

Fig. D. 1. 1 ガラスの強度に及ぼす加重時間の影響<sup>(10)</sup>Fig. D. 2. 1 蒸気爆発で発生する圧力値の予測<sup>(11)</sup>

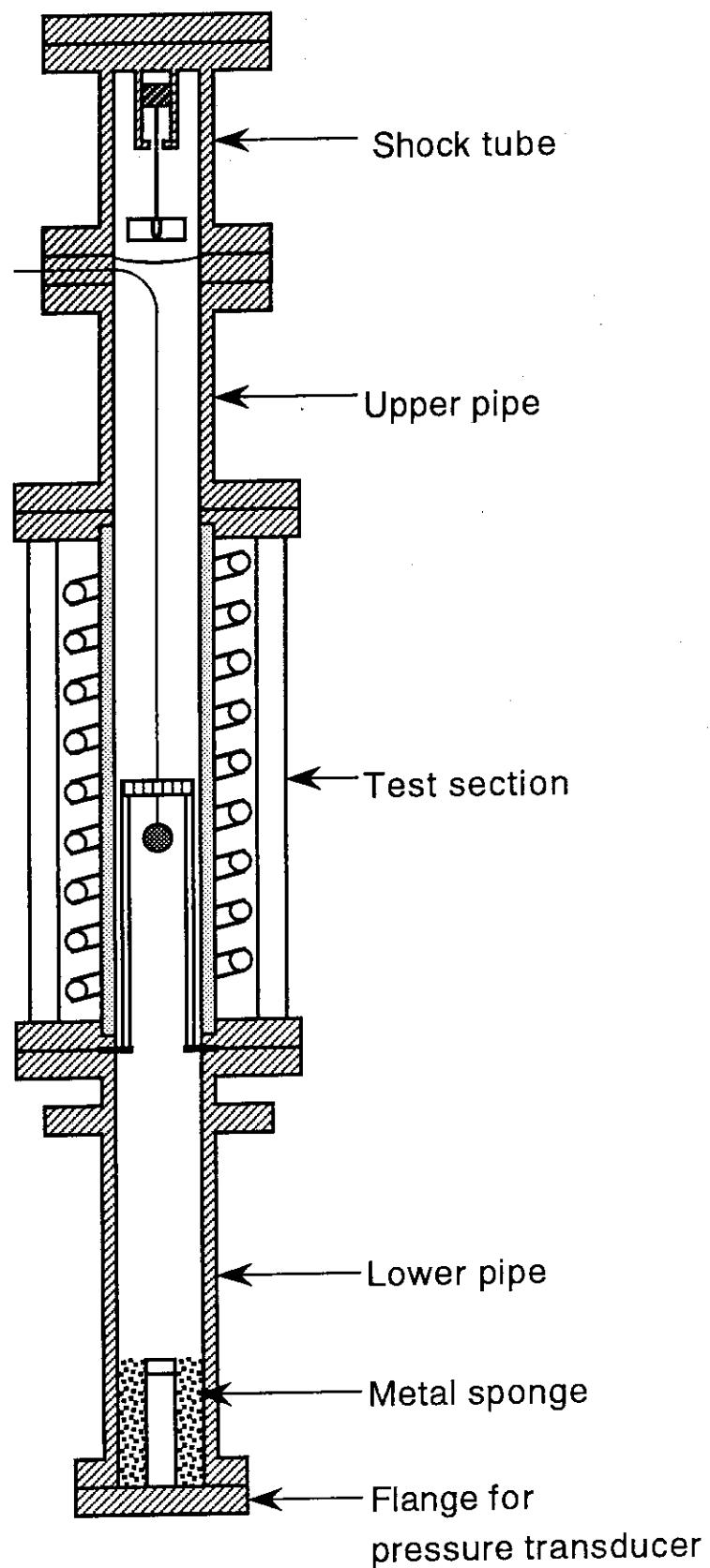


Fig. D. 3. 1 実験装置組立図

## 付録E 実験装置設計図

実験装置の主要部分をFig.E.1~Fig.E.13に示す。実験装置はこの設計図を元に製作されている。

以下に各図面名称を示す。

- Fig.E.1 衝撃波発生装置組立図
- Fig.E.2 衝撃波発生装置部品図No.1
- Fig.E.3 衝撃波発生装置部品図No.2
- Fig.E.4 上部管組立図
- Fig.E.5 上部管部品図No.1
- Fig.E.6 上部管部品図No.2
- Fig.E.7 テスト部本体組立図
- Fig.E.8 下部管組立図
- Fig.E.9 下部管部品図No.1
- Fig.E.10 下部管部品図No.2
- Fig.E.11 下部管部品図No.3
- Fig.E.12 圧力センサ取付管組立図
- Fig.E.13 圧力センサ取付管部品図

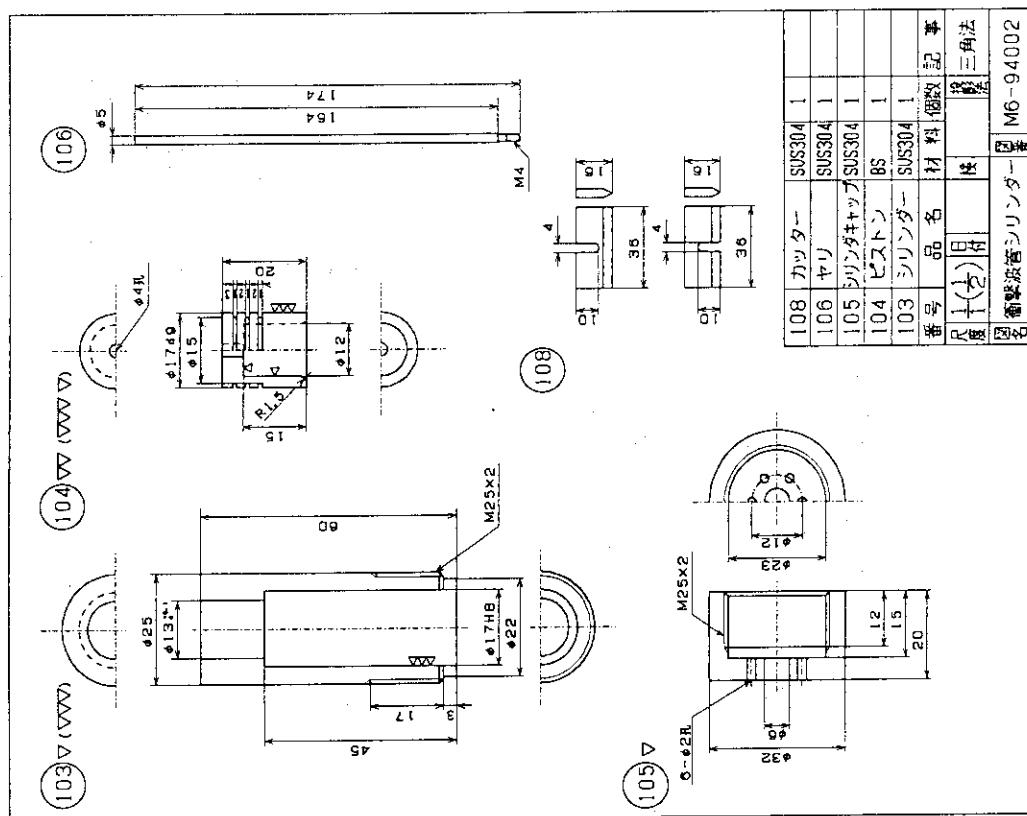


Fig. E. 1 衝撃波発生装置組立図

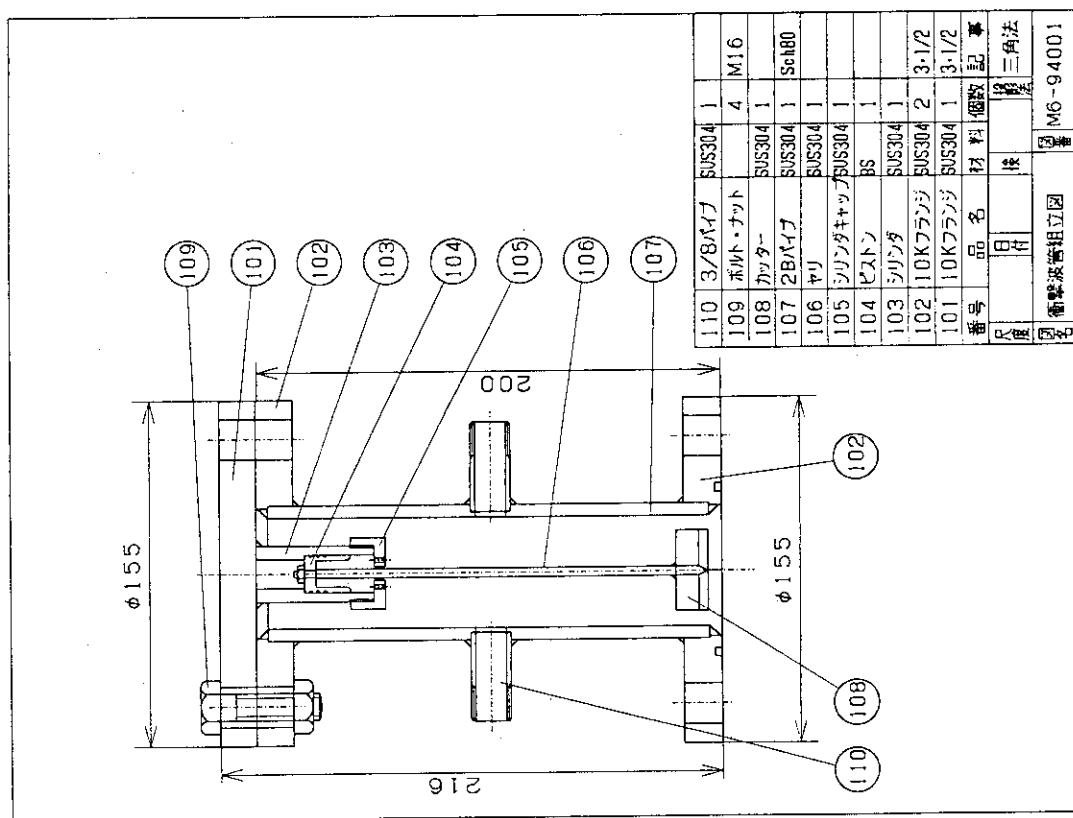
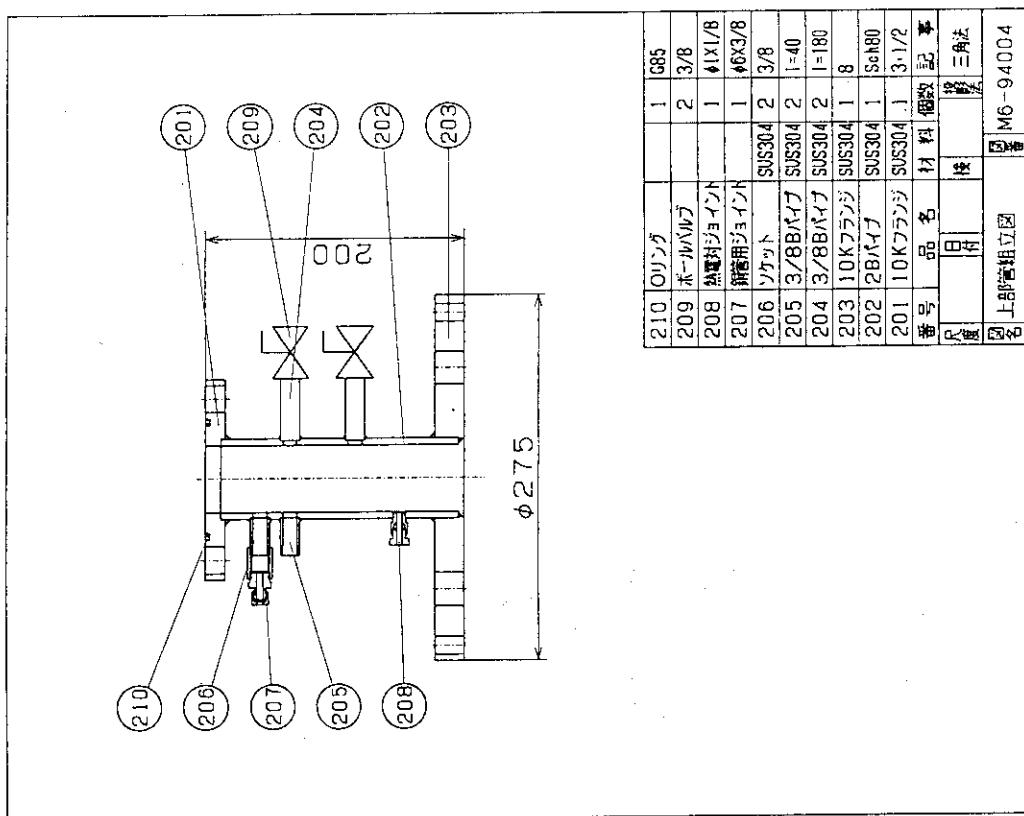
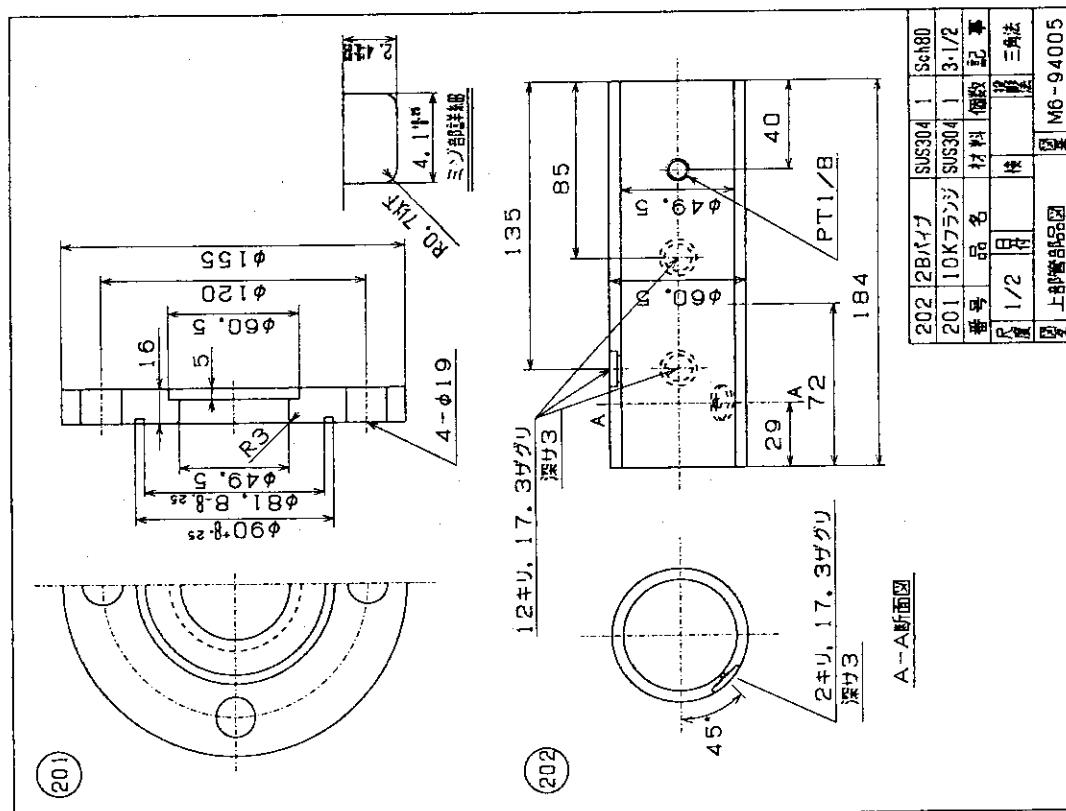
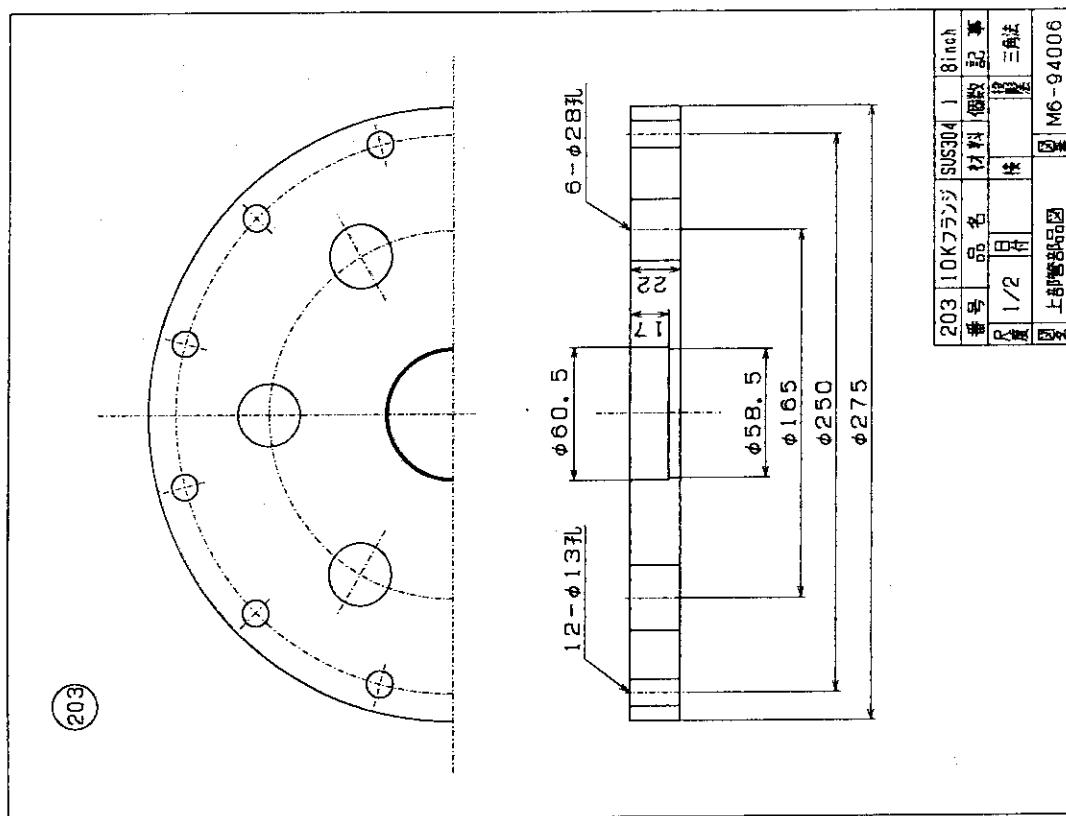


Fig. E. 2 衝撃波発生装置組立図





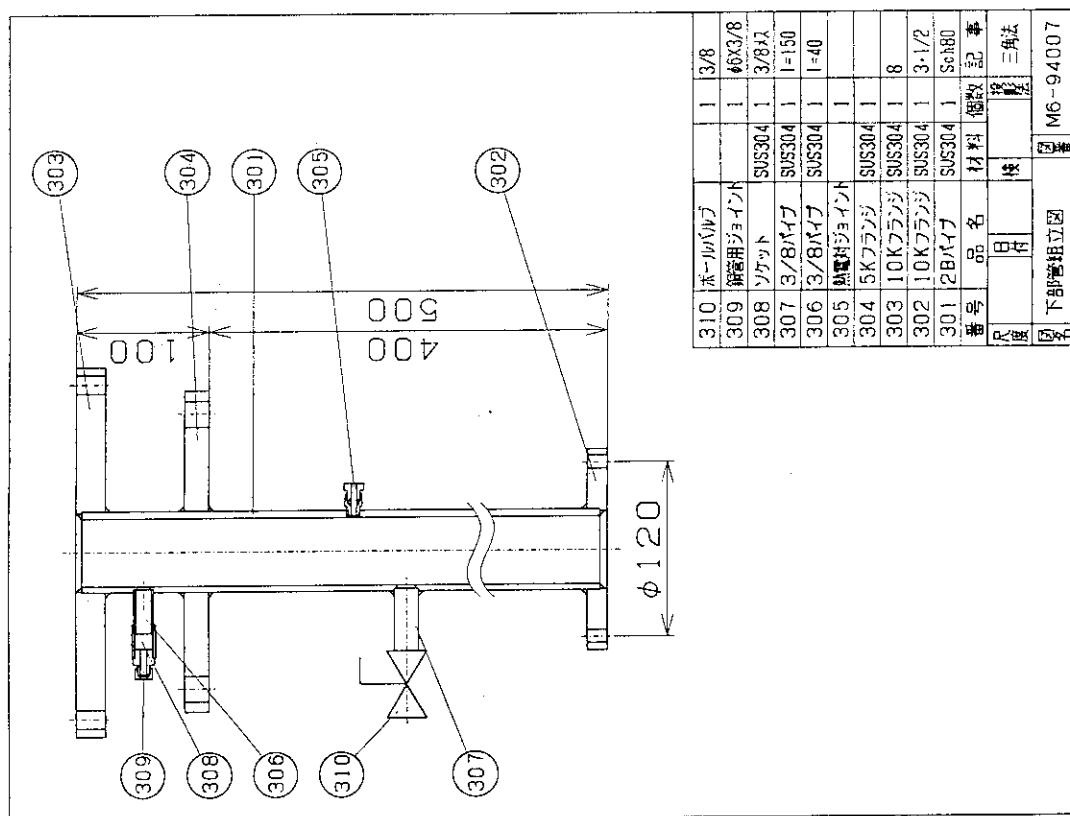


Fig. E. 8 下部管組立図

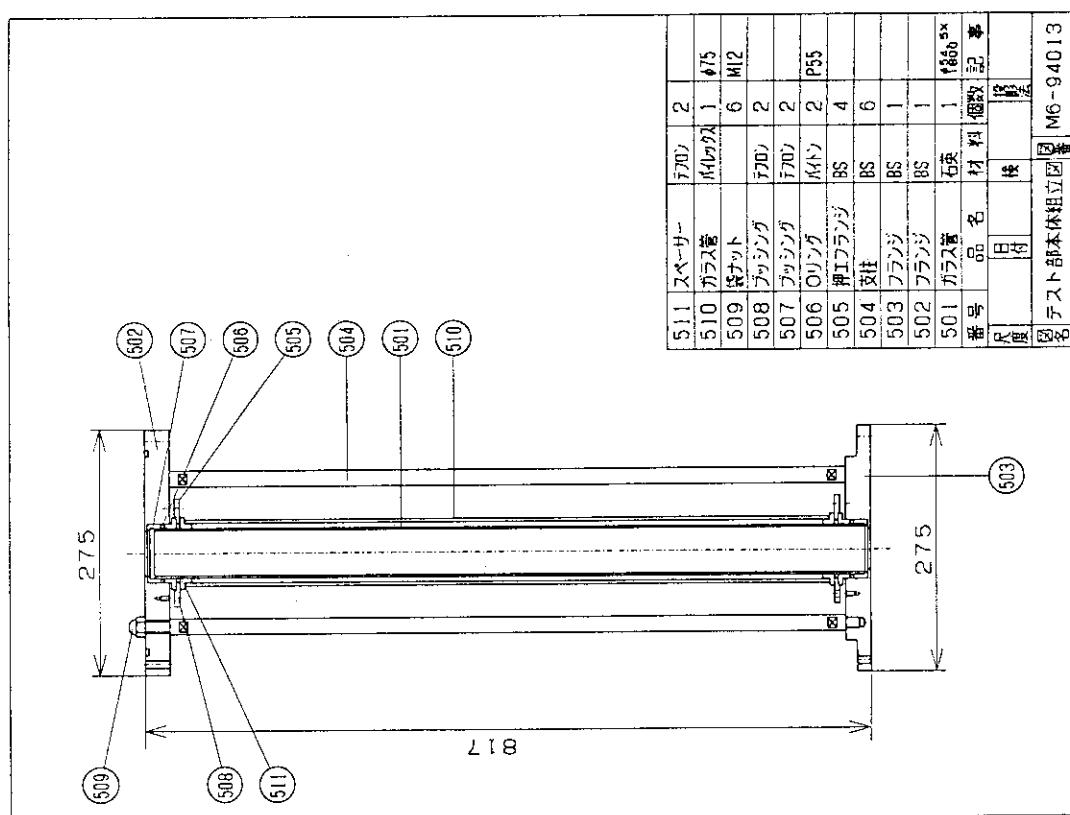


Fig. E. 7 テスト部本体組立図

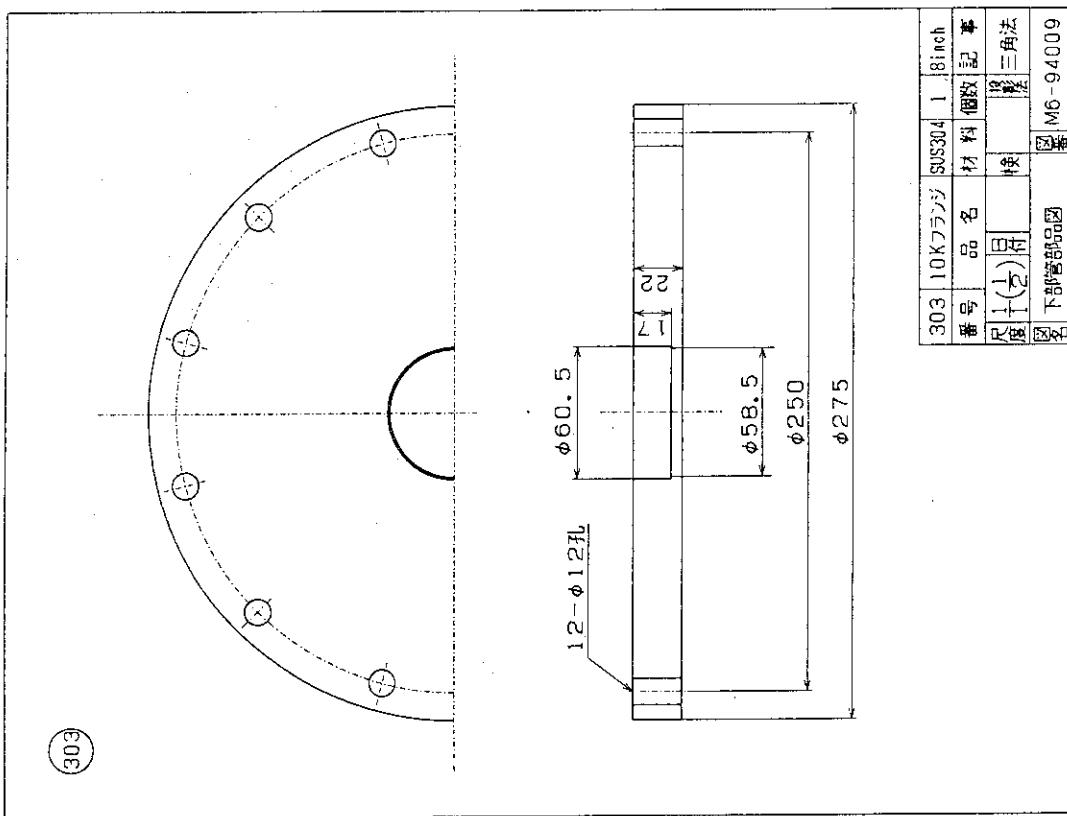


Fig. E. 10 下部管部品図No. 2

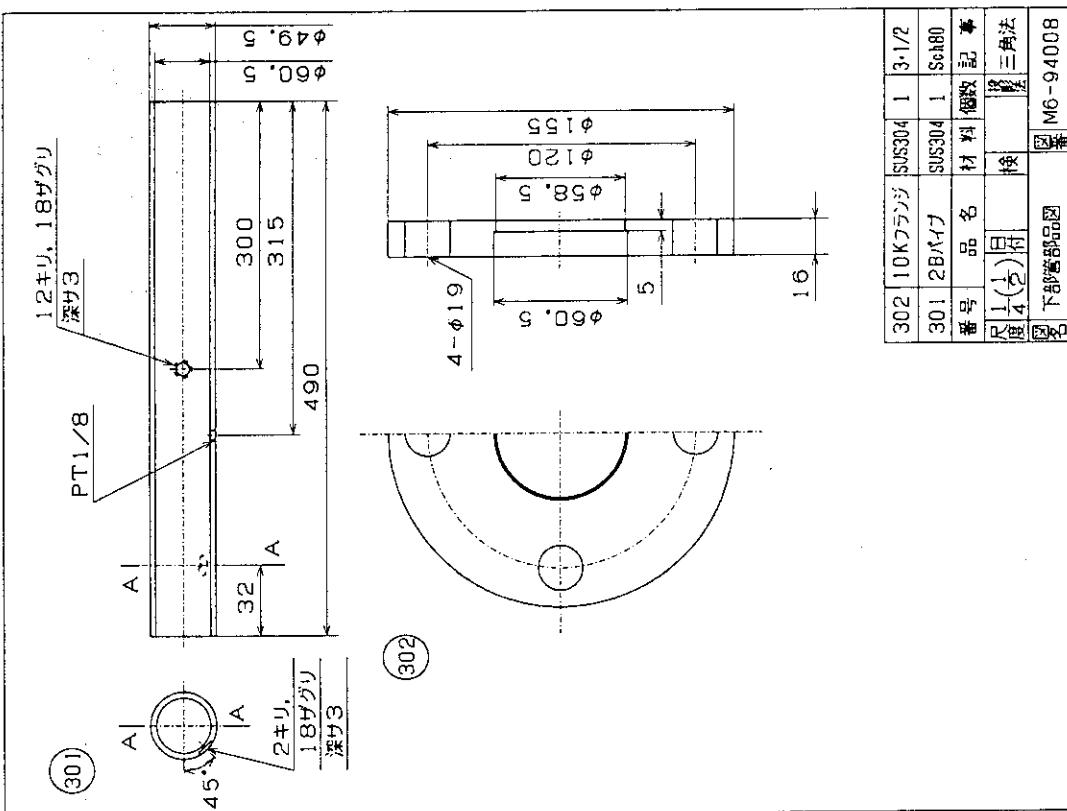


Fig. E. 9 下部管部品図No. 1

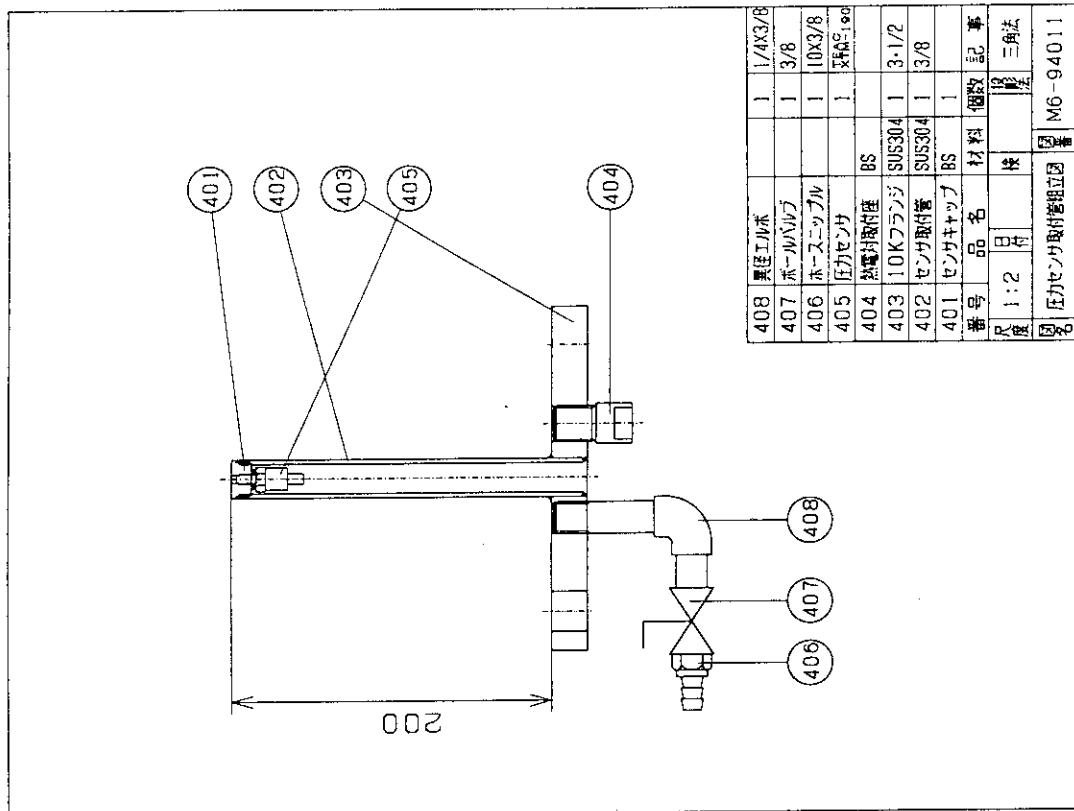


Fig. E.12 圧力センサ取付管組立図

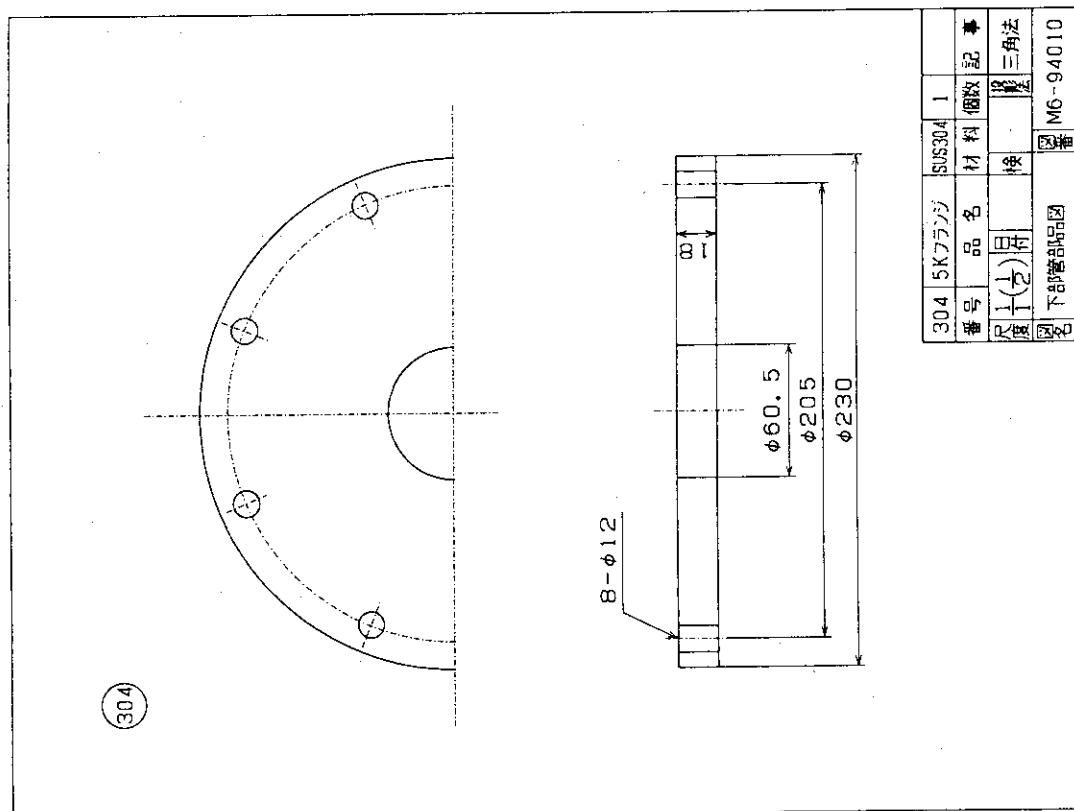


Fig. E.11 下部管部品図No.3

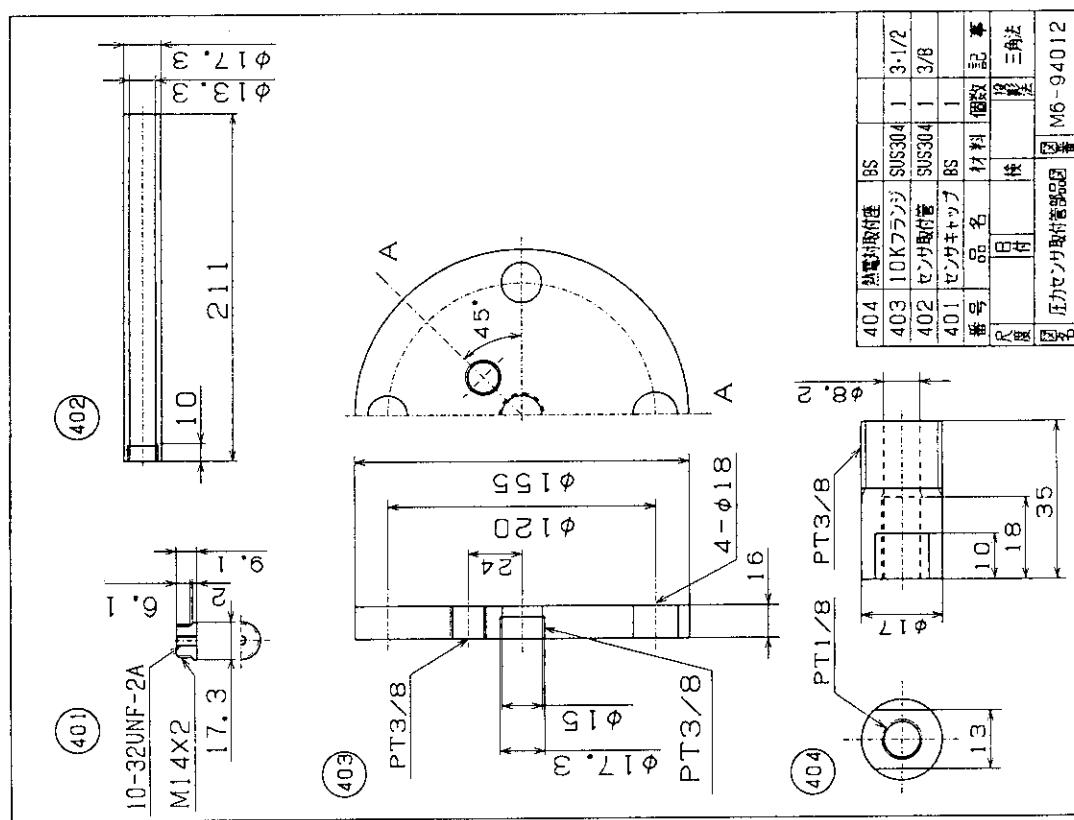


Fig. E.13 圧力センサ取付管部図

## 付録F 実験装置

本研究で製作した実験装置の写真をFig.F.1~Fig.F.8に掲載しておく。  
以下に各図の名称を示す。

- Fig.F.1 実験装置
- Fig.F.2 テスト部本体
- Fig.F.3 セラミックス多孔板
- Fig.F.4 シース熱電対付き鋼球及び熱電対取付座
- Fig.F.5 実験装置上部
- Fig.F.6 実験装置下部
- Fig.F.7 圧力センサ(30kgf/cm<sup>2</sup>, 46kHz)
- Fig.F.8 圧力センサ(70kgf/cm<sup>2</sup>, 225kHz)

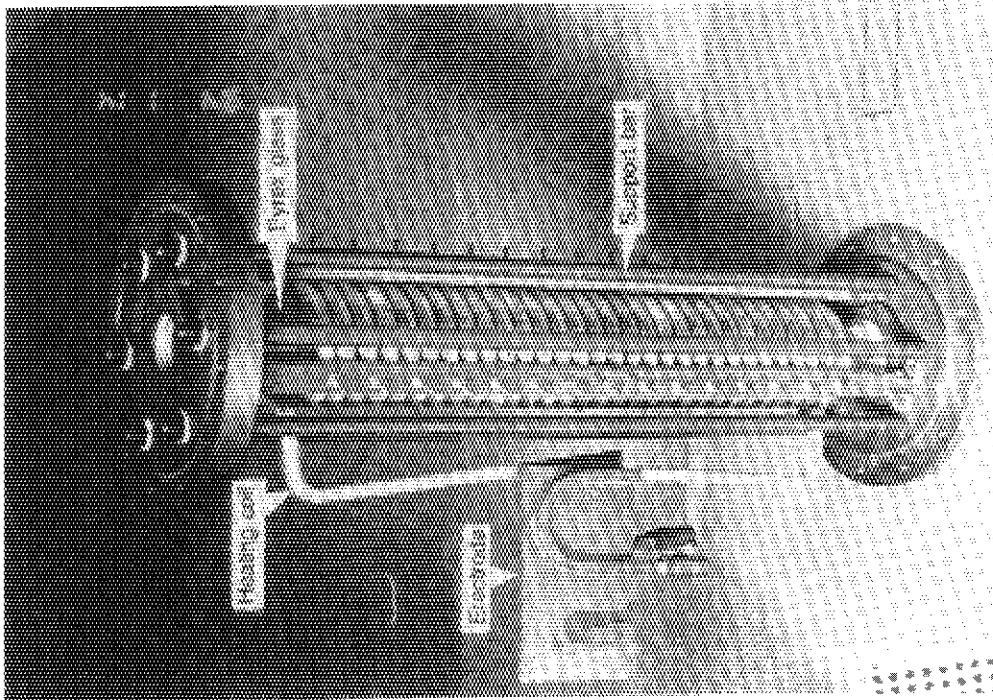


Fig. F. 2 テスト部本体

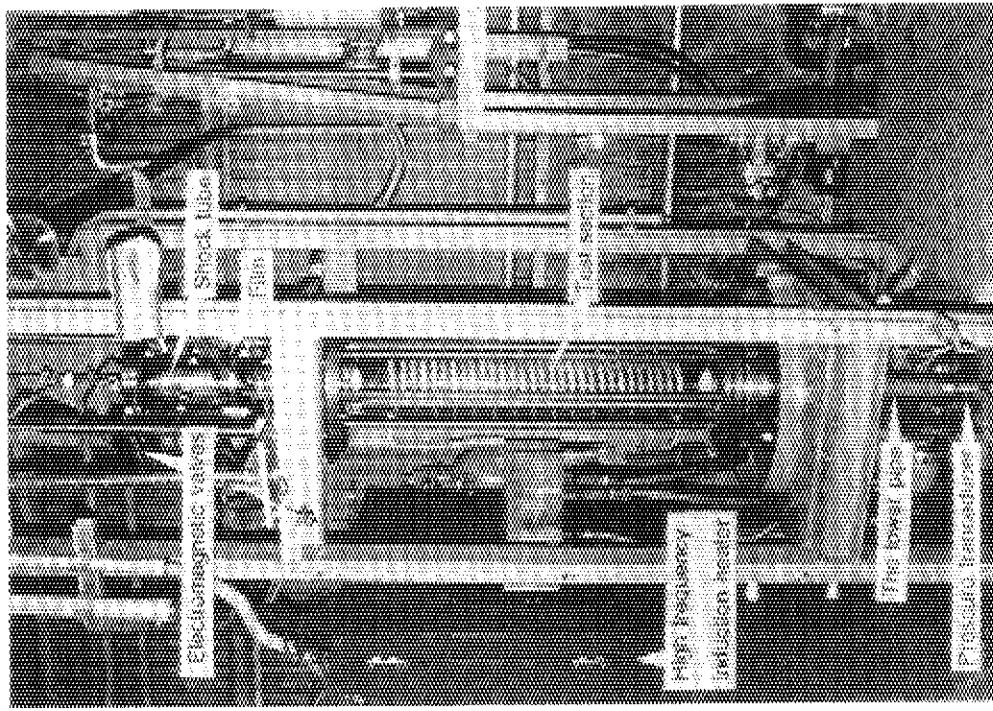


Fig. F. 1 実験装置

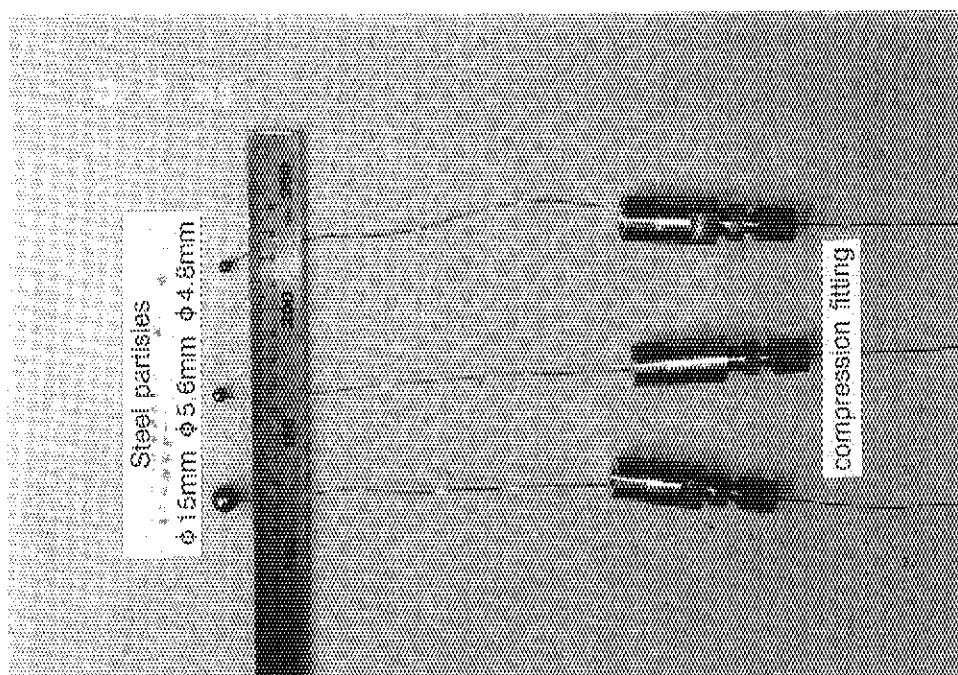


Fig. F. 4 シース熱電対付き鋼球及び熱電対取付座

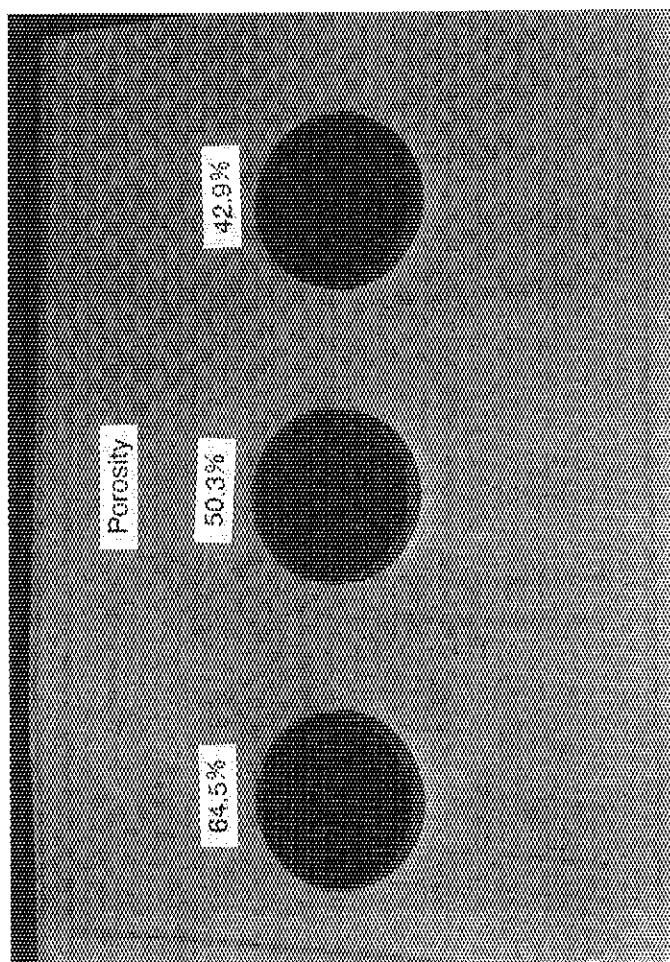


Fig. F. 3 セラミックス多孔板

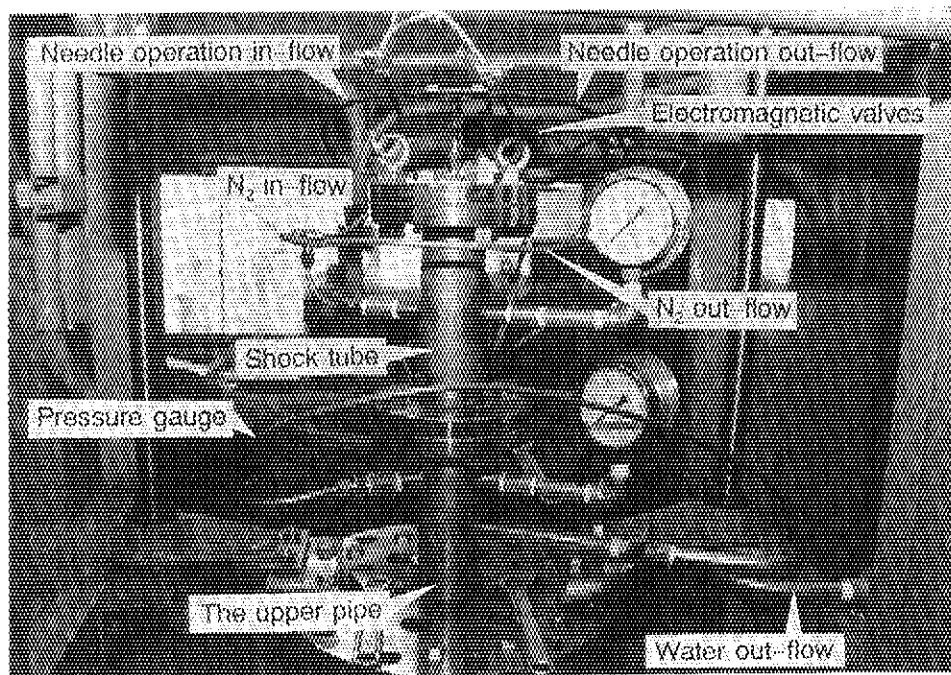


Fig. F. 5 実験装置上部

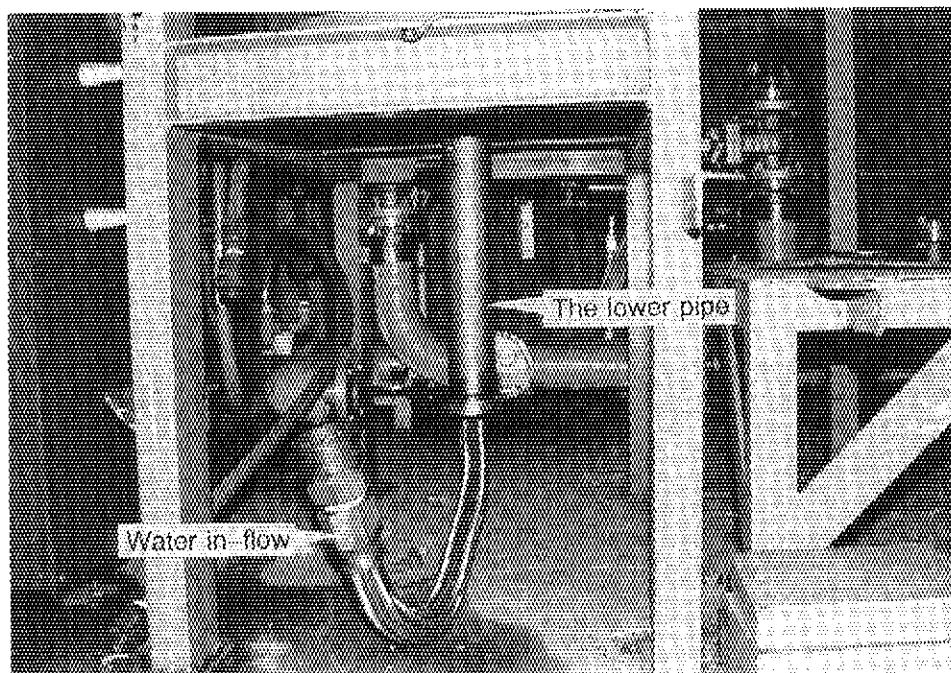


Fig. F. 6 実験装置下部

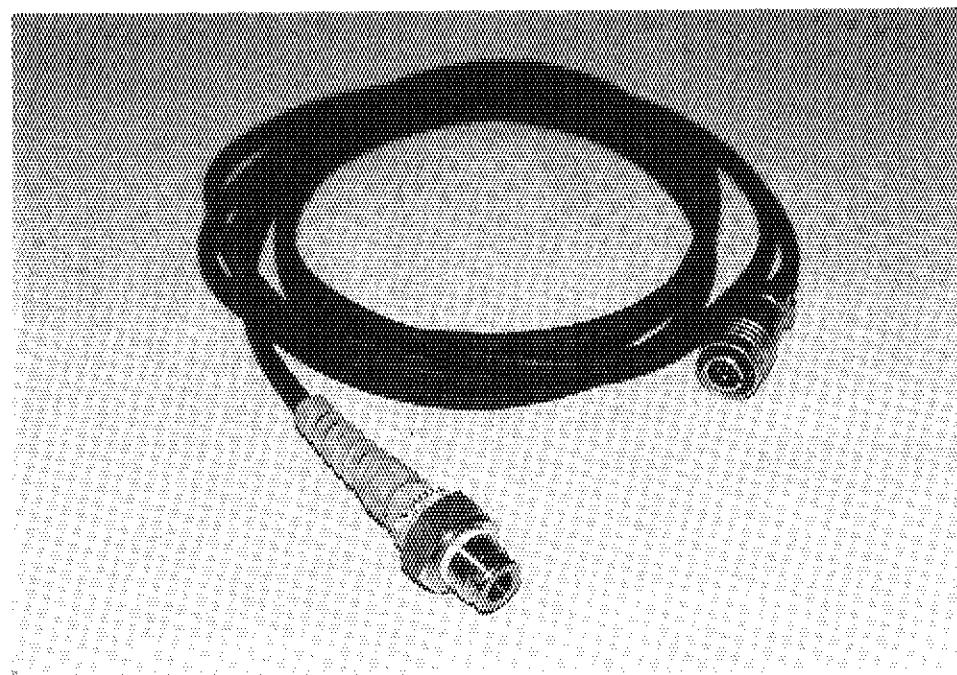


Fig. F. 7 圧力センサ( $30\text{kgf/cm}^2$ ,  $46\text{kHz}$ )

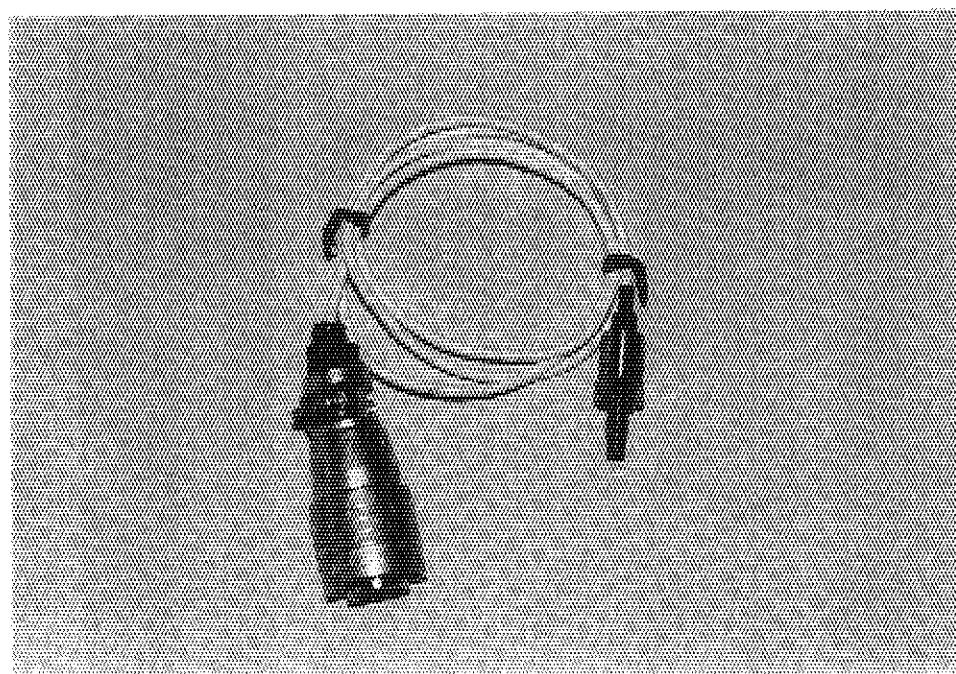


Fig. F. 8 圧力センサ( $70\text{kgf/cm}^2$ ,  $225\text{kHz}$ )