

JAERI-Research

96-032



蒸気爆発進展過程における膜沸騰の
崩壊挙動に関する研究

1996年6月

八木理公・阿部 豊*・安達公道*
小林朋能*・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, 1996

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

蒸気爆発進展過程における膜沸騰の崩壊挙動に関する研究

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*

小林 朋能*・山野 憲洋・杉本 純

(1996年5月20日受理)

温度差の大きい二液体を使用する製鉄所や化学プラント、さらに原子炉のシビアアクシデント時において、蒸気爆発の発生が懸念されている。蒸気爆発の発生の有無と発生圧力の評価を行う上では、蒸気爆発のトリガー条件を明らかにする必要がある。本研究では、まず熱的デトネーションモデルに基づく蒸気爆発進展過程のシミュレーションコードを用いた予備解析を行った。その結果から、膜沸騰を崩壊させるために必要となる蒸気爆発素過程の移行条件としての圧力条件が蒸気爆発発生の有無に極めて重大な影響を及ぼすことを明らかにした。そこで、蒸気爆発素過程における粗混合状態を模擬した高音固体球表面上に形成させた膜沸騰の崩壊挙動を観察し、膜沸騰崩壊条件に関する基礎的な実験を実施した。膜沸騰状態は高周波加熱装置で融点以下に加熱した鋼球を冠水させることで形成させ、衝撃波発生装置から発生する圧力波により膜沸騰を強制的に崩壊させる。鋼球は炭素鋼とステンレス鋼を用い、圧力波の大きさ、鋼球の初期表面温度をパラメータとして圧力波と鋼球表面温度の過渡変化を測定し、膜沸騰の崩壊挙動を観察した。実験結果から、炭素鋼、ステンレス鋼共に鋼球表面温度は圧力波の通過により急激に降下することを確認した。また、圧力波が通過した直後の鋼球表面温度は温度降下の度合いに応じて、いくつかのパターンに分類することができた。特に、ステンレス鋼球を用いた実験の場合、膜沸騰の非崩壊、膜沸騰の崩壊、膜沸騰崩壊後に再発生の3つのパターンに明確に分類できることを確認した。以上の結果から、膜沸騰の崩壊挙動は初期条件により明確に分類することが可能となり、本実験条件の範囲においては膜沸騰を崩壊させるのに必要となる圧力が鋼球の初期温度に強く依存することを明らかにした。本研究で得られた膜沸騰崩壊条件に関するデータベースは熱的デトネーションモデルに基づく蒸気爆発解析を行う上で有効な基礎情報となるものである。

Study of Film Boiling Collapse Behavior during Vapor Explosion

Masahiro YAGI, Yutaka ABE*, Hiromichi ADACHI*

Tomoyoshi KOBAYASHI*, 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 May 20, 1996)

Possible large scale vapor explosions are safety concern in nuclear power plants during severe accident as well as steel or chemical plants where two liquids with large temperature difference are involved. In order to identify the occurrence of the vapor explosion and to estimate the magnitude of the induced pressure pulse, it is necessary to investigate the triggering condition for the vapor explosion. As a first step of this study, scoping analysis was conducted with a simulation code based on thermal detonation model. It was found that the pressure at the collapse of film boiling much affects the trigger condition of vapor explosion. Based on this analytical results, basic experiments were conducted to clarify the collapse conditions of film boiling on a high temperature solid ball surface, which simulated the pre-mixing condition. Film boiling condition was established by flooding water onto a high temperature stainless steel ball heated by a high frequency induction heater. After the film boiling was established, the pressure pulse generated by a shocktube was applied to collapse the steam film on the ball surface. As the experimental boundary conditions, materials and size of the balls, magnitude of pressure pulse and initial temperature of the carbon and stainless steel balls were varied. The transients of pressure and surface temperature were measured. It was found that the surface temperature on the balls sharply decreased when the pressure wave passed through the film on balls. Based on the surface temperature behavior, the film boiling collapse

* Yamagata University

pattern was found to be categorized into several types. Especially, the pattern for stainless steel ball was categorized into three types; no collapse, collapse and re-establishment after collapse. It was thus clarified that the film boiling collapse behavior was identified by initial conditions and that the pressure required to collapse film boiling strongly depended on the initial surface temperature. The present results will provide a useful information for the analysis of vapor explosions based on the thermal detonation model.

Keywords: Vapor Explosion, Thermal Detonation Model, Film Boiling, Film Boiling Collapse, Pressure Wave, Heat Release

目 次

1. 緒 言	1
1. 1 蒸気爆発研究の背景	1
1. 2 蒸気爆発の概念	1
1. 3 従来の研究	2
1. 4 研究目的	3
2. 蒸気爆発進展過程のシミュレーション解析	6
2. 1 解析モデルの概要	6
2. 2 基礎方程式および構成方程式	6
2. 3 解析条件	8
2. 4 解析結果と考察	8
2. 5 解析結果のまとめ	9
3. 実験装置および方法	14
3. 1 本実験の狙い	14
3. 2 実験装置概要	14
3. 3 実験装置主要部分の詳細	15
3. 4 テスト部本体詳細	17
3. 5 実験手順概要	17
3. 6 実験条件	17
4. 実験結果	25
4. 1 炭素鋼球直径10mmの実験結果	25
4. 2 炭素鋼球直径15mmの実験結果	27
4. 3 ステンレス鋼球直径10mmの実験結果	29
4. 4 ステンレス鋼球直径14.3mmの実験結果	30
4. 5 実験結果のまとめ	30
5. 実験結果の考察	48
5. 1 鋼球表面熱流束の計算	48
5. 2 放出熱量	49
5. 3 沸騰様式	49
5. 4 初期条件による実験結果の分類	51
5. 5 膜沸騰崩壊挙動の考察	53
6. 結 言	61
謝 辞	62

参考文献	.....	62
付録A 全実験結果	.....	64
付録B 熱流束の算出方法	.....	127
付録C 四流体モデルによる蒸気爆発進展過程の数値解析	.....	138
付録D 実験手順詳細	.....	145

Contents

1. Introduction	1
1. 1 Background of Study on Vapor Explosion	1
1. 2 Outline of Vapor Explosion	1
1. 3 Past Study	2
1. 4 Objectives of This Study	3
2. Simulation Analysis of Vapor Explosion	6
2. 1 Outline of Analytical Model	6
2. 2 Fundamental Equations and Constitutive Equation	6
2. 3 Analytical Conditions	8
2. 4 Analytical Results and Discussion	8
2. 5 Summary of Analytical Results	9
3. Experimental Apparatus and Procedure	14
3. 1 Aim of This Experiment	14
3. 2 Outline of Experimental Apparatus	14
3. 3 Detail of Main Experimental Apparatus Parts	15
3. 4 Detail of Test Section	17
3. 5 Outline of Experimental Procedure	17
3. 6 Experimental Condition	17
4. Experimental Results	25
4. 1 Results of Carbon Steel Ball 10 mm O.D.	25
4. 2 Results of Carbon Steel Ball 15 mm O.D.	27
4. 3 Results of Stainless Steel Ball 10 mm O.D.	29
4. 4 Results of Stainless Steel Ball 14.3 mm O.D.	30
4. 5 Summary of Experimental Results	30
5. Discussion	48
5. 1 Calculation of Heat Flux on the Ball	48
5. 2 Heat Release	49
5. 3 Boiling Pattern	49
5. 4 Categorization of Experimental Results by Initial Conditions	51
5. 5 Discussion of Film Boiling Collapse Behavior	53
6. Summary	61
Acknowledgement	62

Reference	62
Appendix A Experimental Results	64
Appendix B Calculation of Heat Flux	127
Appendix C Numerical Analysis of Vapor Explosion by Four Flow Phase Model	138
Appendix D Detail of Experimental Procedure	145

1 緒 言

1.1 蒸気爆発研究の背景

蒸気爆発が発生する条件として、温度差が大きい二液体が直接接触することが必要不可欠である。特に、高温の溶融金属や低温の水を取り扱う製鉄所等では死傷者を出すほどの事故が起こっている。また、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材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。大規模な蒸気爆発が原子炉内で発生すれば、その爆発圧力により圧力容器または原子炉格納容器が破壊され、大量の核分裂生成物(FP)が大気中に放出されることが懸念されている。

蒸気爆発が原因とされる事故例⁽¹⁾として、1958年の茨城県にある鹿島コンビナートでの事故や、1988年の兵庫県にある製鉄所での事故が挙げられる。前者の事故では電気炉の炉壁に亀裂が入り、約1300°Cの溶融マンガンが約15トン流出し、冷却水との直接接触により蒸気爆発を起こしたものとされている。この事故で工場の一部が壊れたほか、火災も起こっている。後者の事故では高炉から溶けた鉄を流す樋の末端部から約1500°Cの鉄数百キロが漏れ、樋の冷却水に触れて蒸気爆発が起こった。この事故では付近の機械類などが吹き飛び、死傷者がいた。1961年にアメリカで起こった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っている最中に制御棒を引き抜いてしまい、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。工業分野や原子力分野以外では、1986年に起こった伊豆大島三原山の噴火で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り大災害になる危険性が指摘されている。

この様な災害を未然に防ぐために、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あらかじめ知っておくことが極めて重要である。しかし蒸気爆発は極めて短時間で起る現象であるため、観察が難しく未知の部分がまだ残されており、今後更に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求められている。

1.2 蒸気爆発の概念

蒸気爆発現象の進展過程については未だ十分に解明されていないが、そのうちの一つのモデルとして熱的デトネーションモデルに基づく、蒸気爆発現象の素過程を概略化したものをFig. 1.1⁽¹⁾に示す。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を蒸気の膜が覆ってしまい、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。

従来、蒸気爆発の発生機構としては、熱的デトネーションモデルを含め以下の二つのモデル⁽²⁾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。Fig. 1.2⁽³⁾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。蒸気泡核生成率は単位体積、単位時間当たりに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にできる核の個数は、ボルマーラーの式によって温度に対して指數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、①の自発核生成モデルとはFig. 1.3⁽⁴⁾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_i)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. 1.4⁽⁵⁾に示す様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と、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と考えるものである。

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く、二つのモデルのうち何れのモデルが蒸気爆発現象を説明するものであるのかについて解明は十分になされていない。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、これらのモデルについてもその実験的検証は十分ではない。ただし、近年の研究では熱的デトネーションモデルに基づいた解析や実験が多数を占めているのが現状である。

1.3 従来の研究

熱的デトネーションモデルにおける蒸気膜の崩壊過程や高温液の細粒化の様子、急速伝熱過程に関する実験または解析が各国で実施されている。ネルソンら⁽⁶⁾は、水中に落下させた单一高温液滴上に形成される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内で初めて実現させた。井上ら⁽⁷⁾は、円柱状の白金箔線上に形成させた膜沸騰に衝撃波を通過させて、膜沸騰熱伝達率の変化について実験的に調べている。また高島ら⁽⁸⁾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することで蒸気爆発のトリガリングについて調べている。

しかしながら、実際の蒸気爆発現象においては、粗混合状態の高温粒子の形状は球、あるいはそれに近い形状であり、従来の研究において、その形状や境界条件を押さえた実験データベースの整備については未だ十分とはいえない。

1.4 研究目的

本研究では、熱的デトネーションモデルによる蒸気爆発シミュレーション解析の初期条件である膜沸騰崩壊条件を設定するために必要となるFig. 1.1に示した(b)から(c)の膜沸騰の崩壊過程に注目している。つまり、低温低沸点液体中に分散した膜沸騰を伴う高温融体の粗混合状態における膜沸騰の崩壊条件の特定を行うことが目的である。

実際の蒸気爆発現象では、粗混合状態の高温粒子の形状は球あるいはそれに近い形状であると思われる。そこで、球状の高温粒子上に膜沸騰を形成させ、トリガーとなる圧力波が衝いたとき、高温粒子表面に形成された膜沸騰はどの程度の圧力波で崩壊するかを実験的に調べ、膜沸騰崩壊条件に関する基礎的データベースを作成することとする。

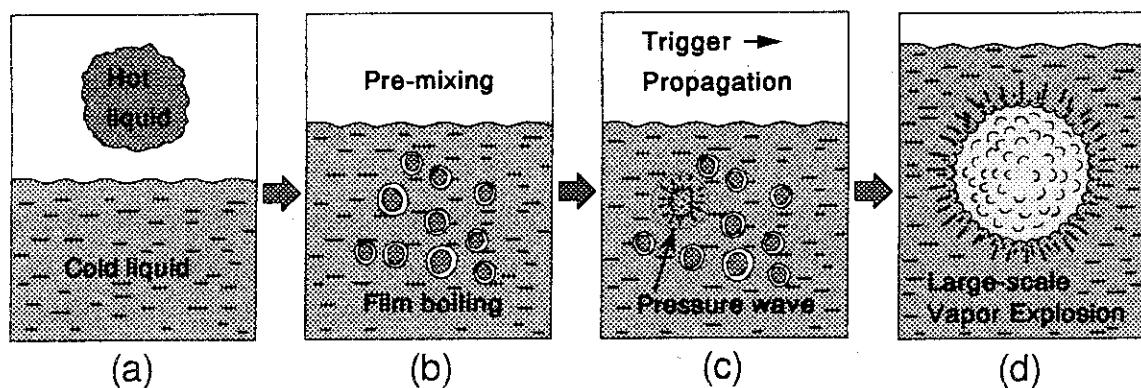


Fig. 1.1 蒸気爆発現象

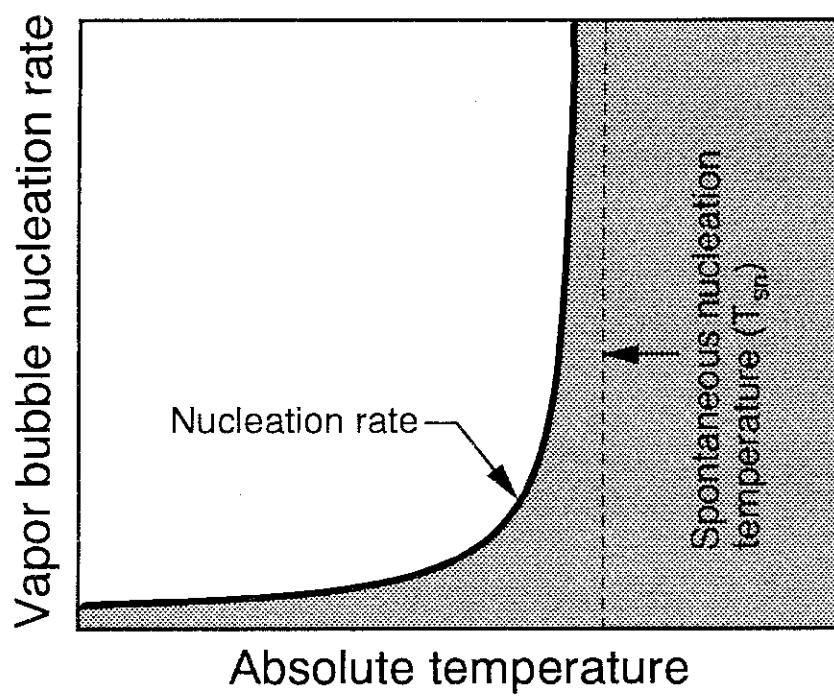


Fig. 1.2 自発核生成温度と蒸気泡核生成率の関係

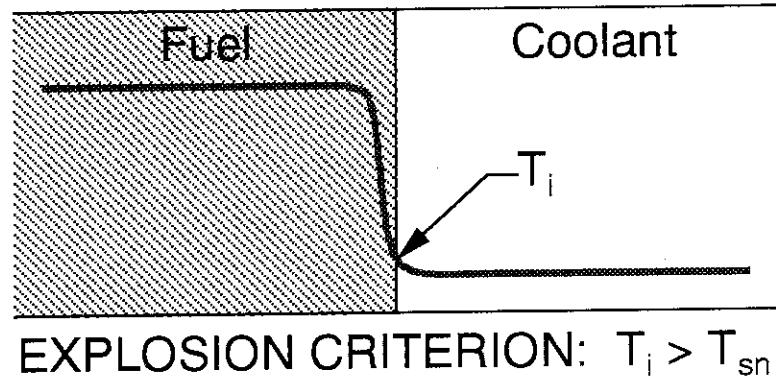


Fig. 1.3 高温高沸点液体と低温低沸点液体の接触時界面温度

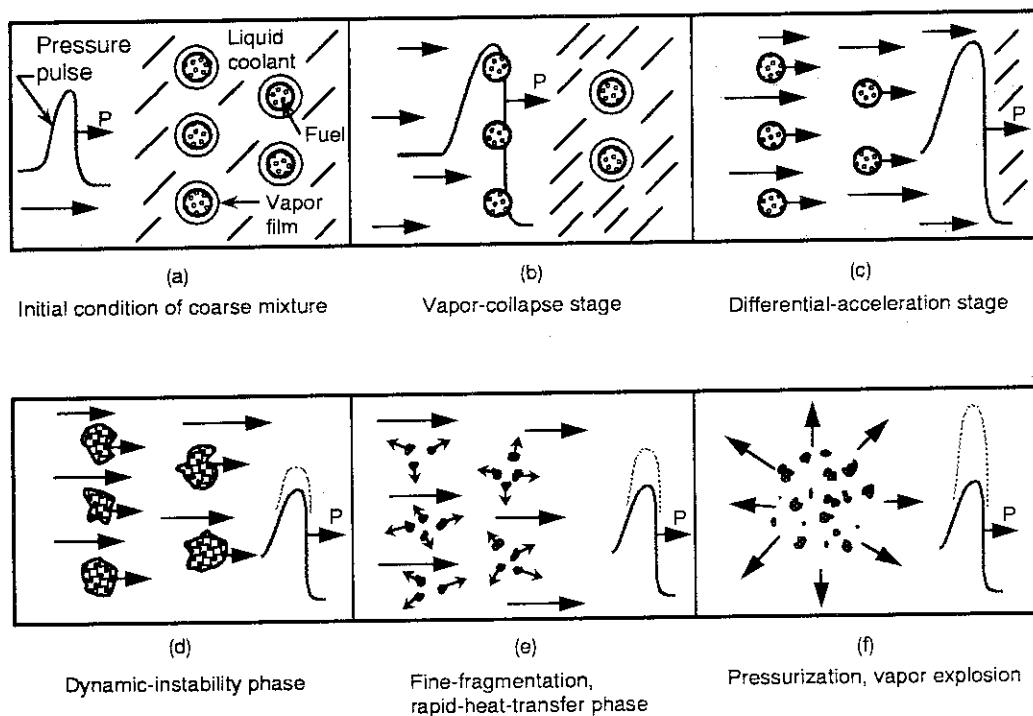


Fig. 1.4 热的デトネーションモデル

2 蒸気爆発進展過程のシュミレーション解析

熱的デトネーションモデルに基づく蒸気爆発進展過程のシュミレーション解析では、高温高沸点液体の落下、膜沸騰を伴う粗混合状態、トリガーによる膜沸騰の崩壊、微粒化、急速熱伝達による圧力波の発生という一連の素過程を切り替えることで計算が行われている。そこで、膜沸騰崩壊条件が蒸気爆発の進展過程に対してどの様な影響を持つかを探るための予備解析として、熱的デトネーションモデルに基づく四流体モデルによる蒸気爆発解析コードを用いた蒸気爆発進展過程のシュミレーション解析⁹⁾を行った結果について述べる。

2.1 解析モデルの概要

本解析においては、冷却材の①液相と②蒸気相、及び燃料流体の③大粒径高温粒子(Droplet)と④Dropletが分裂して小さくなり粒径がある一定の大きさになったもの(Fragment)の四つの成分を対象にして考えることとする。すなわち本研究において取り扱うモデルは融体のDropletとFragment及び冷却材の液相と蒸気相の全てを独立に扱う四成分、四速度場モデル(12方程式モデル)である。分裂過程におけるDropletからFragmentへの質量移行及びDropletの粒径の変化については物理構成式によって考慮している。この四流体モデルによる蒸気爆発解析コードの詳細については付録Cに記載した。

2.2 基礎方程式および構成方程式

2.2.1 基礎方程式

本節では、融体のDroplet(d)とFragment(f)、冷却材の蒸気相(g)と液相(l)の四つの成分の質量、運動量、エネルギー保存に関する偏微分方程式を導く。これらは通常の二流体モデルの偏微分方程式を四成分に拡張したもので、圧力は各成分に共通であると仮定する。また、融体は非圧縮性であると仮定して $\rho_d = \rho_f = const.$ とする。

Dropletは分裂の過程で徐々に小さくなる。そこで、Dropletは球形であると仮定して、その直径 L_d の時間変化に関する方程式もあわせて導いた。以下において、 j や k は各成分を表す添字である。

連続の式

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_k \rho_k v_k}{\partial x} = \Gamma_k \quad (2.1)$$

ここで、 α_k は各成分の体積率であり、 $\sum_k \alpha_k = 1$ を満足する。 ρ_k と v_k は各成分の密度と速度で、 Γ_k は質量交換項である。 $\Gamma_f = -\Gamma_d$ はDropletの分裂の過程における質量移行率を表し、 $\Gamma_g = -\Gamma_l$ は冷却材の相変化率を表す。

運動方程式

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k v_k}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_k \rho_k v_k^2}{\partial x} + \alpha_k \frac{\partial p}{\partial x} = \sum_{j \neq k} K_{jk} (v_j - v_k) + F_{Mk} - \alpha_k \rho_k g \quad (2.2)$$

ここで、 p は各成分に共通の圧力、 K_{jk} を含む項は成分間の摩擦力、 F_{Mk} は質量交換に伴う運動量交換、 g は重力加速度を表す。粘性は右辺の各項に比べて小さいとして無視されているが、圧力振動を緩和するため、冷却材液相の運動方程式に対して人工粘性が付加される。人工粘性に関しては後に述べる。

エネルギー方程式

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k e_{sk}}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_k \rho_k h_{sk}}{\partial x} + p \frac{\partial \dot{\alpha}_k}{\partial t} = \sum_{j \neq k} R_{jk} (T_j - T_k) + Q_{Mk} - Q_{Fk} \quad (2.3)$$

ここで、 e_{sk} は内部エネルギーと運動エネルギーの和 $e_k + \frac{1}{2}v_k^2$ 、 h_{sk} はエンタルピーと運動エネルギーの和 $h_k + \frac{1}{2}v_k^2$ を表し、 T_k は各成分の温度である。右辺の R_{jk} を含む項は成分間の熱伝達、 Q_{Mk} は質量交換に伴う熱量の交換、 Q_{Fk} は摩擦による熱量の交換を表している。摩擦による仕事(drag work)は冷却材を加熱すると仮定している。

Dropletの直径の時間変化

$$\alpha_d \rho_d \frac{\partial L_d}{\partial t} + \alpha_d \rho_d v_d \frac{\partial L_d}{\partial x} = -\Gamma_{frag} \quad (2.4)$$

この式はIshiiによって導かれた二相流における気液界面の断面積の輸送方程式をDropletが球形であると仮定して、Dropletの直径 L_d の式に書き換えられたものである。右辺の Γ_{frag} は分裂によるDropletの質量減少の効果を表しており、 Γ_f から計算される。

2.2.2 膜沸騰崩壊条件に関する構成方程式

本研究は膜沸騰の崩壊条件に注目しているため、本節では膜沸騰崩壊条件に関する構成方程式についてのみ記述する。この解析計算で使用する全ての構成方程式については付録Cを参照のこと。

DropletとFragmentが球形であると仮定し、伝熱断面積をその直径と体積から計算すると、融体と冷却材間のエネルギー交換関数は以下の様な式となる。

$$R_{dg} = 6\alpha_d \frac{h_{vb}}{L_d} \quad R_{fg} = 6\alpha_f \frac{h_{vb}}{L_f} \quad (2.5)$$

$$R_{dt} = 6\alpha_d \frac{h_{lc}}{L_d} \quad R_f = 6\alpha_f \frac{h_{lc}}{L_f} \quad (2.6)$$

ここで、
 h_{vb} : 融体から蒸気膜への熱伝達率($\sim 10^3 \text{ W} / \text{m}^2\text{K}$)
 h_{lc} : 液・液接触の場合の熱伝達率($10^5 \sim 10^7 \text{ W} / \text{m}^2\text{K}$)
 L_f : Fragmentの直径(一定値~ $100 \mu\text{m}$)

解析では、圧力波が到達する前においては、融体は蒸気膜に覆われていると仮定して、熱伝達率として h_{vb} を用いるが、圧力波が到達して圧力が上昇し、圧力がある蒸気膜消滅圧力 p_0 を越えたときに熱伝達率を h_{vb} から h_{lc} に切り替える。すなわち、融体が蒸気膜に覆われている場合には、式(2.6)においても、 h_{lc} のかわりに h_{vb} を用いる。

2.3 解析条件

この解析では飽和温度の水中に融体を落下させ、容器底面からトリガーで起爆させることを想定している。Fig. 2.1に示す様に、融体と冷却材は初期に静止状態にあり、一様な圧力、温度及び体積率を持つと仮定する。また初期冷却材の温度は373Kとしている。爆轟を発生させるために、長さ1cmのトリガー領域を設け、その部分の圧力を0.2~1.0MPaに上げるとともに、トリガー領域にあるDropletの90%がFragmentになるものとする。

2.4 解析結果と考察

Fig. 2.2に2000Kの酸化アルミニウムを373Kの水に入れた場合の圧力挙動の計算結果を0.3msec毎に示す。Fig. 2.2(a)は、トリガー圧力が膜沸騰崩壊圧力として設定した0.3MPaより小さい0.2MPaの場合の計算結果である。トリガー領域にやや圧力上昇がみられるものの、その程度は小さく、時間の経過及び下流側に行くに従い、圧力の減衰が計算されている。Fig. 2.2(b)はトリガー圧力を膜沸騰崩壊圧力の設定値0.3MPaより大きな1.0MPaに設定した場合の計算結果である。時間の経過及び下流側に行くに従い、大きな圧力の上昇が計算されている。蒸気膜崩壊圧力の設定値とトリガー圧力によって圧力の伝播の仕方が大きく異なる。Fig. 2.2(b)では圧力波が増大し爆轟波の様な挙動を示し、Fig. 2.2(a)では圧力波が減衰する結果となった。ここで爆轟とは、音速を超える速さで起こる爆発現象をいう。

Fig. 2.2に示した1.5msec後の計算におけるDropletとFragmentの各成分割合とDroplet直徑の場所による変化をFig. 2.3に示す。蒸気膜が崩壊しなかったFig. 2.3(a)の場合、Droplet直徑に大きな変化はみられず、Fragmentの割合にも大きな違いはみられなかった。蒸気膜が崩壊したFig. 2.3(b)の場合、Droplet直徑の大きさが圧力波の前後において大きく変化し、それに対応してFragmentの体積率も大きくなり細粒化が進展していることを示す結果となった。Fig. 2.2に示す圧力の測定値から得られる圧力波進行速度とトリガー圧力の関係をFig. 2.4に示す。圧力波進行速度は蒸気膜消滅圧力を越えるトリガー圧力において大きく変化し、初期温度が高いほど大きな値となる。またFig. 2.5に圧力進行波のピーク値をDropletの初期温度に対して示す。トリガー圧力が蒸気膜消滅圧力を越える条件において大きなピーク圧力が発生し、トリガー圧力が大きいほど、またDropletの初期温度が大きいほど高いピーク圧力が発生する計算結果となった。これは圧力進行速度がト

リガ-圧力と初期温度の影響を強く受けており、蒸気爆発の発生の有無については蒸気膜崩壊圧力が極めて重要な役割を果たしていることを示している。

2.5 解析結果のまとめ

上述した様に、蒸気爆発の発生の有無については、蒸気膜崩壊圧力が極めて重要であり、2.2.2節で述べた融体と冷却材間のエネルギー交換関数に含まれる h_{w} と h_{le} の膜沸騰崩壊圧力による切り替えに依存している。今回、膜沸騰崩壊圧力を0.3MPaと仮定したが、粗混合状態からトリガーによる膜沸騰崩壊に至る条件としての膜沸騰崩壊圧力についての研究は十分になされていない。よって、熱的デトネーションモデルに基づく大半の蒸気爆発解析においては、膜沸騰崩壊圧力は経験的な判断に頼っており、高温液滴温度や、流体のサブクール度などのパラメーターを考慮していないのが現状である。従って本研究では、熱的デトネーションモデルに基づく蒸気爆発解析コードの計算に必要となる膜沸騰崩壊条件を実験的に明らかにし、熱的デトネーションモデルに基づく蒸気爆発進展過程のシミュレーション解析に資するためのデータベースを作成することとする。

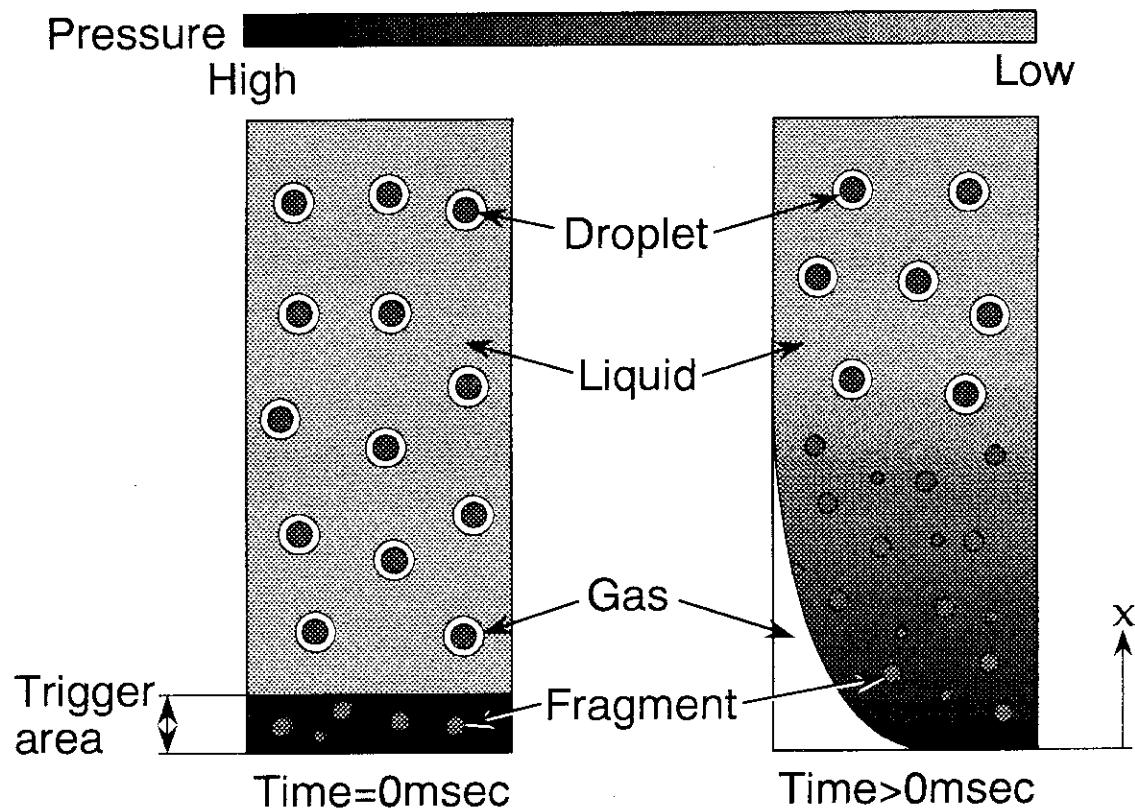


Fig. 2.1 シュミレーション解析モデル概略図

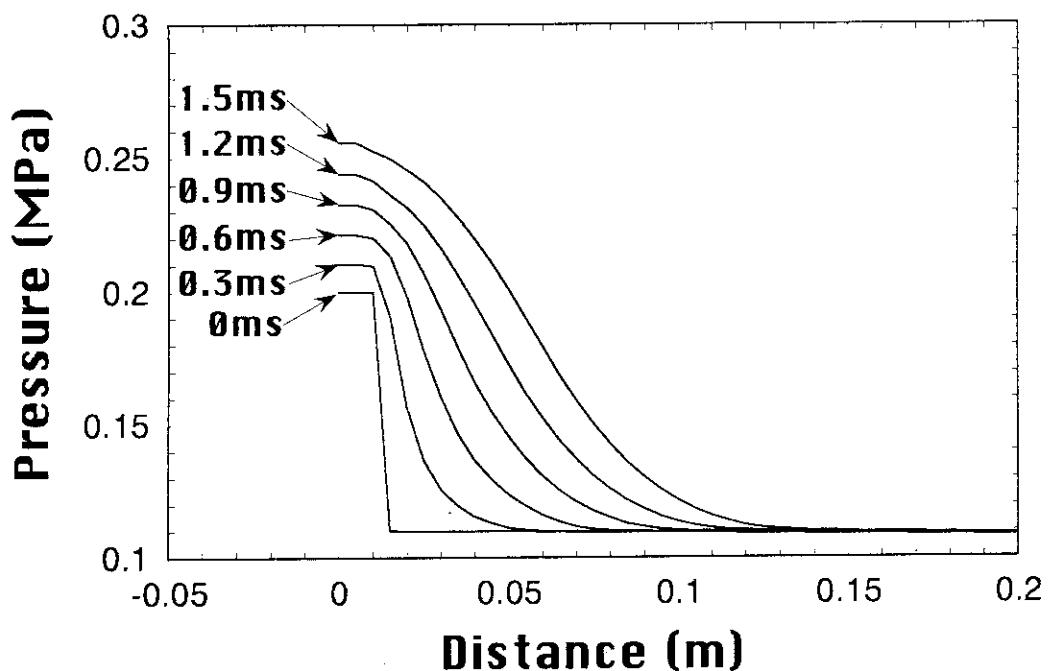


Fig. 2.2 (a) 壓力波の伝播

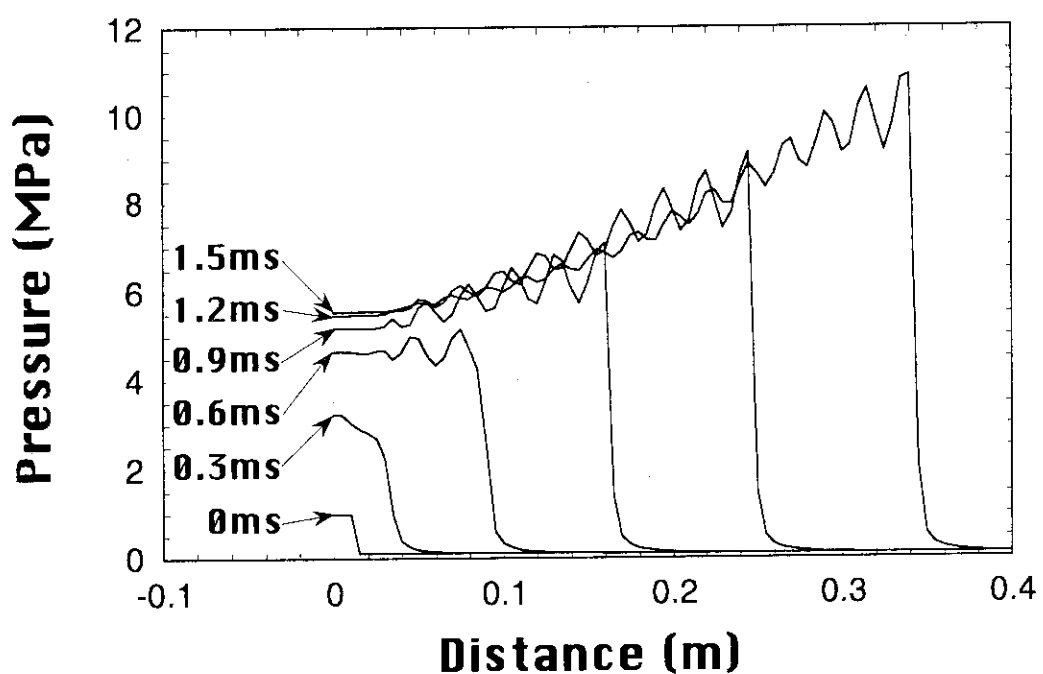


Fig. 2.2 (b) 壓力波の伝播

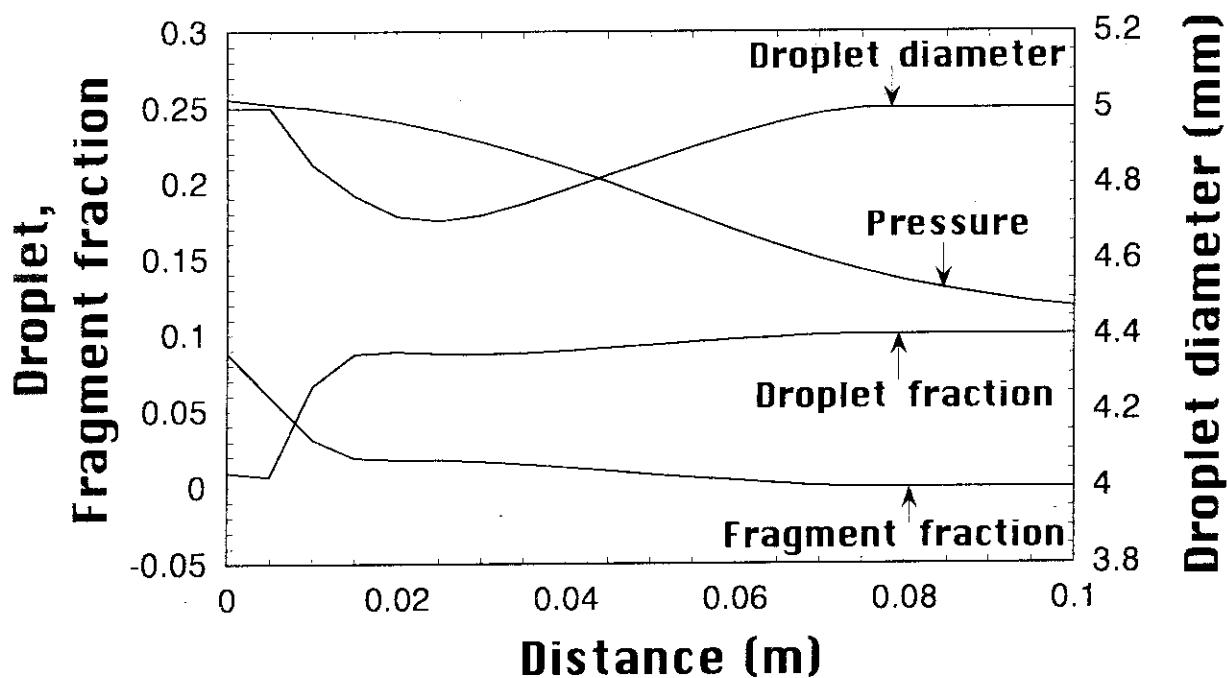


Fig. 2.3 (a) Droplet と Fragment の各成分割合、Droplet 直径

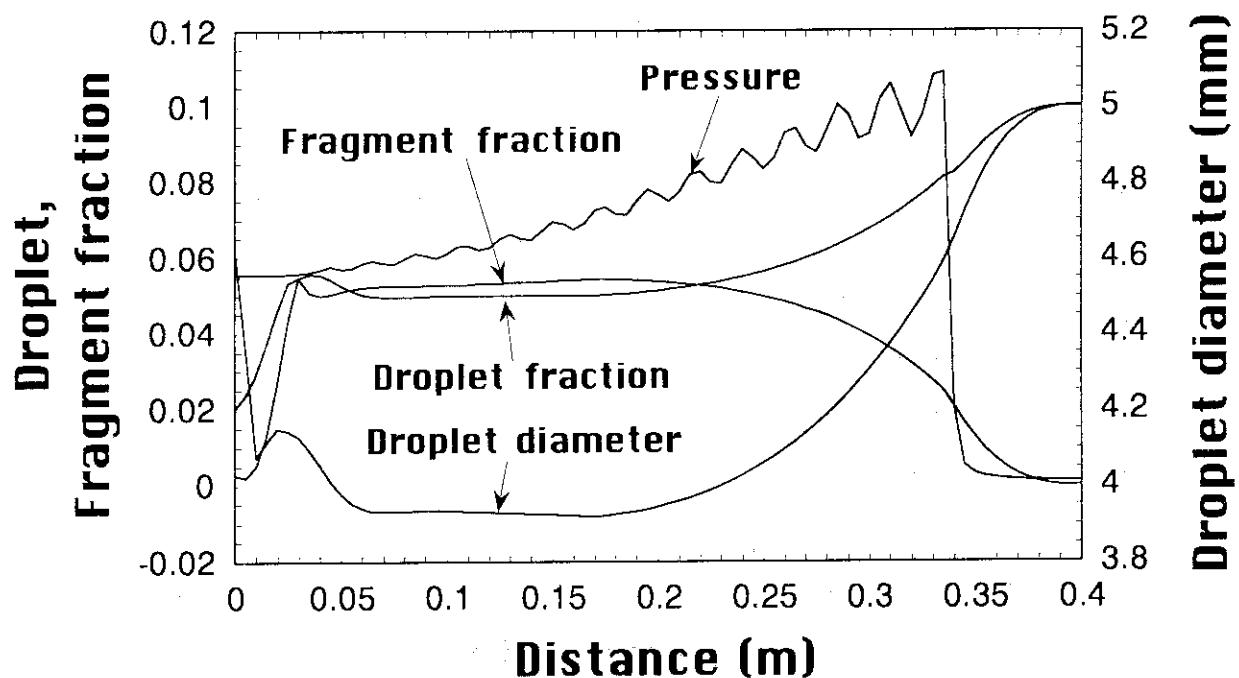


Fig. 2.3 (b) Droplet と Fragment の各成分割合、Droplet 直径

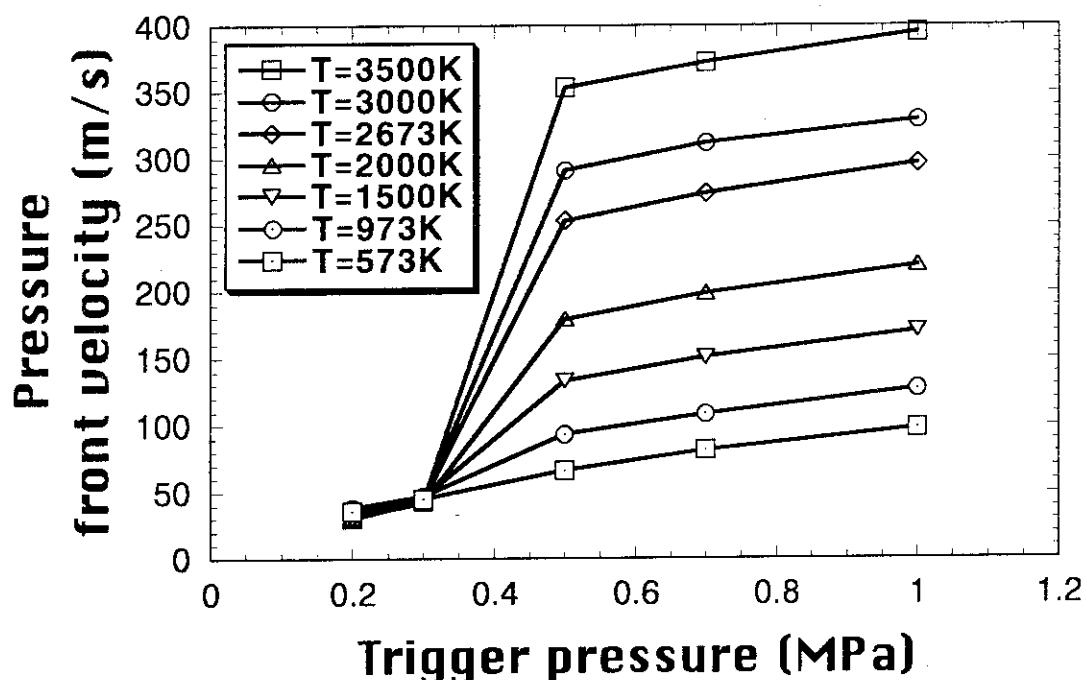


Fig. 2.4 圧力波進行速度とトリガー圧力の関係

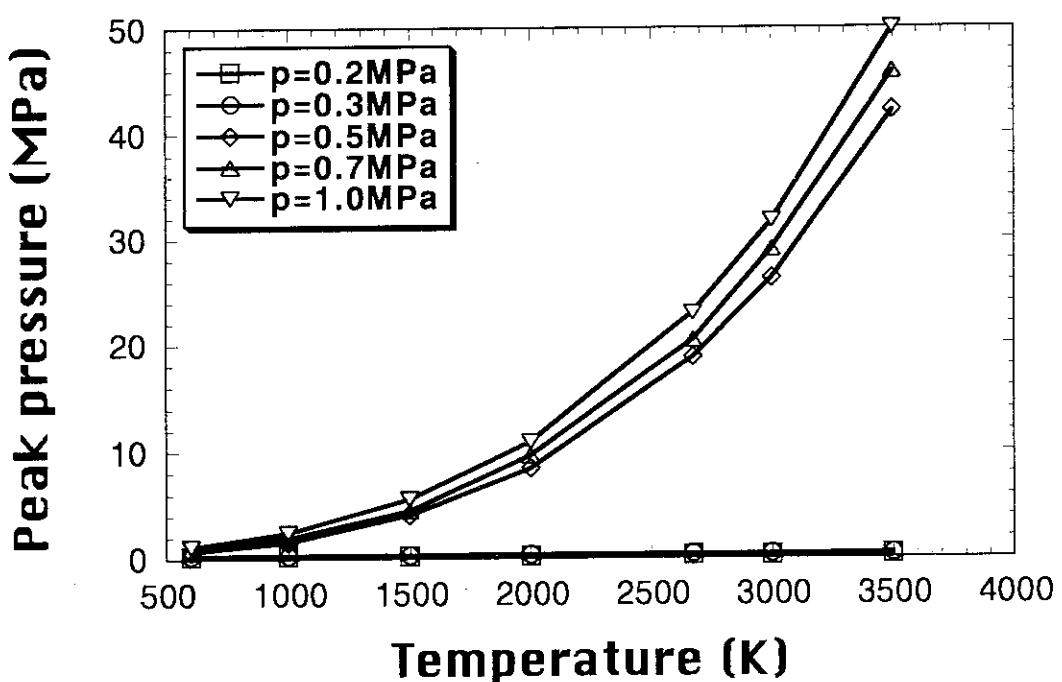


Fig. 2.5 圧力波ピーク値とDroplet初期温度の関係

3 実験装置および方法

熱的デトネーションモデルに基づく蒸気爆発進展過程のシミュレーション解析に必要となる膜沸騰崩壊条件を明らかにするために、単一の高温球体上に形成された膜沸騰に圧力波を通過させることで強制的に膜沸騰を崩壊させる基礎実験を行うこととする。そのために製作した実験装置、実験手順ならびに実験条件を示す。

3.1 本実験の狙い

本実験の狙いは、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。あるトリガーとしての圧力波が加わったとき、粗混合状態における低温低沸点液体中の高温粒子表面に形成された膜沸騰はどの程度の圧力波で崩壊するのかを実験的に調べる。そこで溶融金属の代わりに高周波加熱装置により加熱した1個の高温の鋼球を使用し、その鋼球を低温低沸点液体に冠水させることにより表面上に形成される膜沸騰に対して、圧力波を通過させることでFig. 1.1におけるトリガー状態を強制的に模擬することとする。その際の鋼球周辺の圧力や鋼球表面の温度を、球の径や材質、初期の鋼球表面温度、トリガー圧力の強さ、水温等をパラメータとして測定し、データベースを作成する。

実験では低温低沸点液体として水を使用する。鋼球の加熱については、水の自発核生成温度が約315°Cであること、また高周波加熱装置では炭素鋼を加熱すると約750°Cで磁性体変態が生じることを考慮し、本実験では鋼球の崩壊初期温度が約350~750°Cの範囲で実験を行うこととする。今回の実験では、直径10mmと15mmの炭素鋼球、10mmと14.3mmのステンレス鋼球それぞれ一個の膜沸騰の崩壊特性について調べる。

3.2 実験装置概要

Fig. 3.1に実験装置概要図を示す。これは鋼球上に形成された膜沸騰を圧力波により強制的に崩壊させるための装置である。この装置は主にテスト管、テスト管上部につながる上部管、テスト管下部につながる下部管、衝撃波発生装置に大別できる。テスト管にはパイレックスガラス管を使用し、その他の管はSUS304を使用している。

テスト管は内径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シース熱電対で吊るすことで固定される。このシース熱電対は鋼球の表面温度を測定するために使用する。また、テスト管の周りには高周波加熱装置の銅コイルが巻かれている。これによってテスト部中央の鋼球を加熱する。この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。貯水タンクは200litの水を蓄えることが可能であり、タンク中の水温は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る。また、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。テスト部内の水面は水位感知用の電極プローブを上部管に取り付けてることによって高さを一定にしている。このプローブは一定の水位を感知すると注

水用バルブを閉じる仕組みとなっている。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ることによって圧力波を発生する機構となっている。フィルムは厚さ0.025mmまたは0.05mmのサンドマット製図用フィルムを使用している。圧力波の測定にはテスト部底面に取り付けられた半導体圧力トランステューサを使用している。

実験データは、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。ただし、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おり、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。このアナライジング・レコーダは最低0.02msec、最高1.0secのサンプリング周期で8000データまで記録できる。

3.3 実験装置主要部分の詳細

実験装置本体の代表寸法をFig. 3.2に示す。以下に、実験装置主要部分の詳細を示す。

3.3.1 衝撃波発生装置

本実験では、圧力波を発生させる機構として、ピストン・シリング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ることにより圧力波を発生させる方法を採用している。Fig. 3.3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。最上部の閉止フランジにはシリング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グダに入れ、シリングダキャップを設置した後、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・シリングダ機構は高圧の窒素ガスをピストン上部シリングダ容器内に、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いる。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、片方はひずみゲージ式圧力センサが接続される。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の溝が設けられている。

3.3.2 上部管

Fig. 3.4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、熱電対取付フランジで構成される。ステンレス管側面の4つの座は上から、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。上部管の上には熱電対取付フランジが固定される。このフラン

ジは厚さ30mmの真鍮フランジを使用していて、フランジ上部にはOリングを取り付けるための溝が設けられている。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。フランジ側面には熱電対用コンプレッションフィッティングが固定され、ここから熱電対付き鋼球をテスト部に挿入し固定する。

3.3.3 テスト管

Fig. 3.5にテスト管を示す。テスト管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ためテフロンのブッシュを入れて、プレートで押さえてある。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、コイル中を水が絶えず循環して冷却している。

3.3.4 下部管

Fig. 3.6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。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。水入り口電磁バルブ取付座には入り口水温測定のためにシース熱電対取付用コンプレッションフィッティングが接続可能である。

3.3.5 圧力センサ取付フランジ

Fig. 3.7に圧力センサ取付管、Fig. 3.8に圧力センサ取付フランジを示す。炭素鋼球を使用した実験では圧力センサ取付管を使用し、ステンレス鋼球を使用した実験では圧力センサ取付フランジを使用した。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、圧力センサは管先端のキャップに取り付ける。また、フランジには排水用の鋼管と鋼球の表面温度測定のためのシース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。圧力センサ取付フランジはステンレス10Kフランジのみで構成される。このフランジの中央には圧力センサが取り付けられる。Fig. 3.2から分かるように、この実験装置では鋼球と圧力センサの位置が824mm離れている。そのため、鋼球表面温度データとテスト部下部での圧力データに応答時間差が存在し、鋼球表面温度データの方が圧力データより応答が速いことを実験結果の考察において考慮しなければならない。

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データを基に選定した。高島ら⁽⁸⁾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。今回の実験で爆発が生じることはないが、センサの応答性を優先的に考慮し、10kgf/cm²以上、固有振動数は100kHz以上の圧力センサーを選択した。炭素鋼球を使用した実験では、ティック(株)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(応答周波数

225kHz、絶対最大圧力70kgf/cm²）を使用し、ステンレス鋼球を使用した実験では、KYOWA（株）のひずみゲージ式圧力変換器PGM-30KH（応答周波数46kHz、絶対最大圧力30kgf/cm²）を使用した。

3.4 テスト部本体詳細

Fig. 3.9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。さらに、これら2つのガラス管の外側には内径54mmのガラス管を設置し、保温あるいは高周波加熱装置の保護対策としている。外径48mm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おり、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設置させるために長さを350mmとしている。

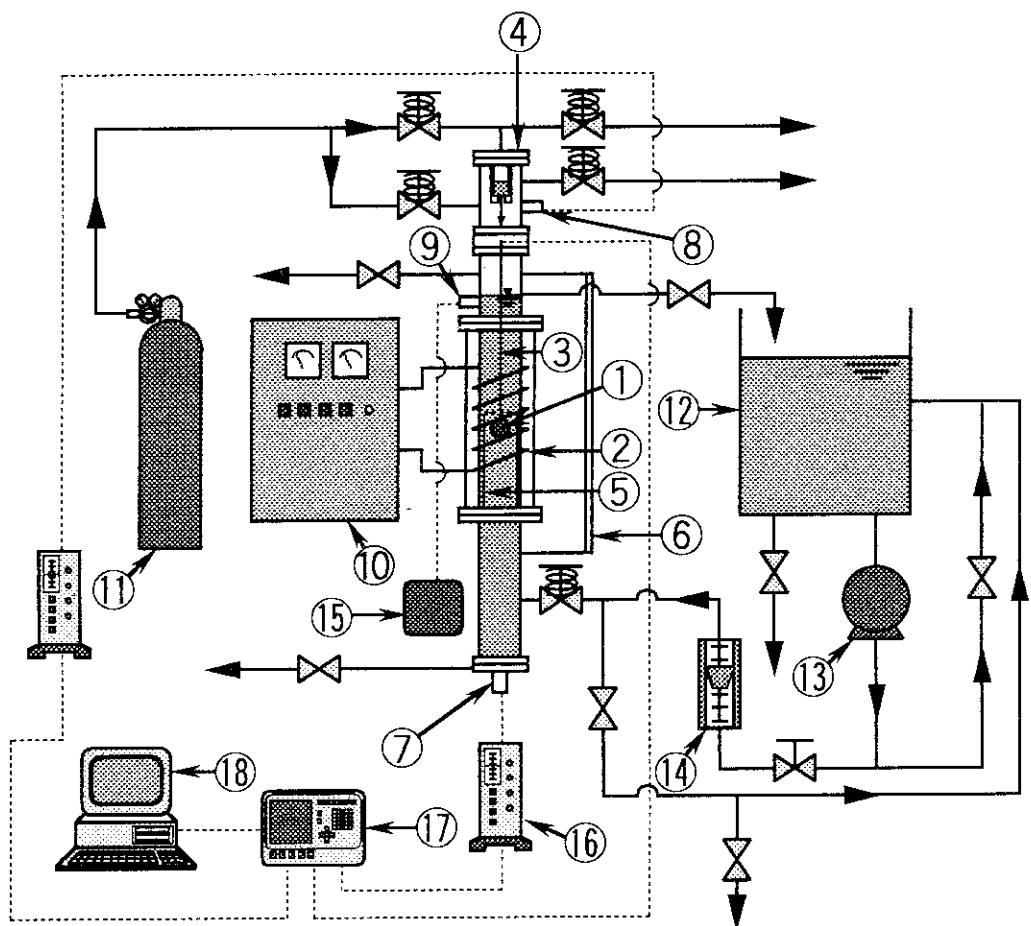
Fig. 3.10に熱電対付き鋼球詳細図を示す。鋼球には直徑0.55mmの孔が中心を通るように貫通している。そこに直徑0.5mmのシーズ熱電対を鋼球に挿入し、挿入する鋼球の手前の方をポンチで打ちつけることでかしめ固定している。熱電対は応答速度を高めるために、熱電対先端の余分なシーズ部分を取り除いて、アルメル・クロム・ニッケル素線が剥き出しの状態にしている。0.5mm径のシーズ熱電対の応答特性は10msec程度であるため、今回の実験には適していないが、実験結果から判断して、上記の加工を施すことにより急激な温度変化でも十分計測できると判断できる。

3.5 実験手順概要

Fig. 3.11に実験手順の概要を示す。初めにFig. 3.11(a)に示す様に、衝撃波発生装置高圧容器内に窒素ガスを注入し初期衝撃波圧力P₀に設定する。またこのとき鋼球を高周波加熱装置で約750°Cに加熱する。次に加熱を止め、Fig. 3.11(b)に示す様にテスト部内に水を注入して鋼球表面上に膜沸騰を形成させる。そして鋼球表面温度が設定した初期鋼球表面温度に達したら、Fig. 3.11(c)に示す様に蒸気膜に向かって衝撃波を発生させる。本実験ではFig. 3.11(b)とFig. 3.11(c)間の現象を観察するため、この間のテスト部底面での圧力履歴、鋼球表面温度、テスト部中の水温を測定した。なお、実験手順の詳細については付録Dに示す。

3.6 実験条件

Table 3.1に実験条件を示す。ここでInitial pressureは衝撃波発生装置圧力容器内圧、Initial temperatureは圧力波が鋼球を通過する直前の鋼球表面温度を示す。本実験では直徑10mm, 15mmの炭素鋼球、直徑10mm, 14.3mmのステンレス鋼球をそれぞれ1個を使用して実験を行った。テスト部に注入する水のサブクール度は約10度、テスト部内圧力は大気圧解放とする。測定する実験データは鋼球表面温度履歴、テスト部下端の圧力履歴、衝撃波発生装置内圧力、テスト部内水温である。



- | | |
|---|-------------------------------------|
| ①: Steel ball | ⑪: N₂ supply bomb |
| ②: Copper coil | ⑫: Water tank |
| ③: Thermocouple | ⑬: Circulation pump |
| ④: Shock tube | ⑭: Rota-meter |
| ⑤: Pyrex glass | ⑮: Relay unit |
| ⑥: Level gauge | ⑯: DC amplifier |
| ⑦⑧: Pressure transducer | ⑰: Analyzing recorder |
| ⑨: Water level sensor | ⑱: Computer |
| ⑩: High frequency induction heater | |

Fig. 3.1 実験装置概略図

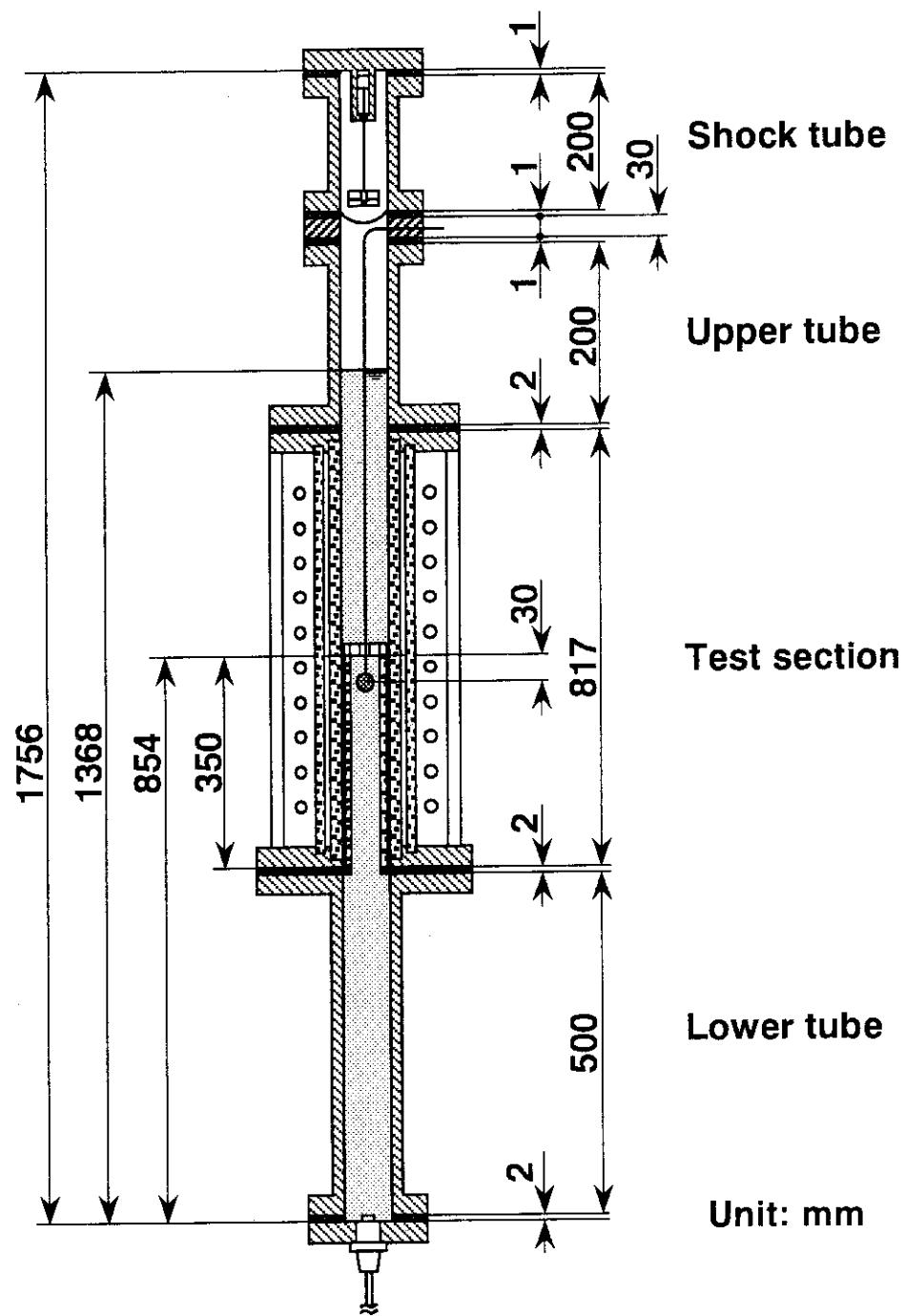


Fig. 3.2 実験装置代表寸法

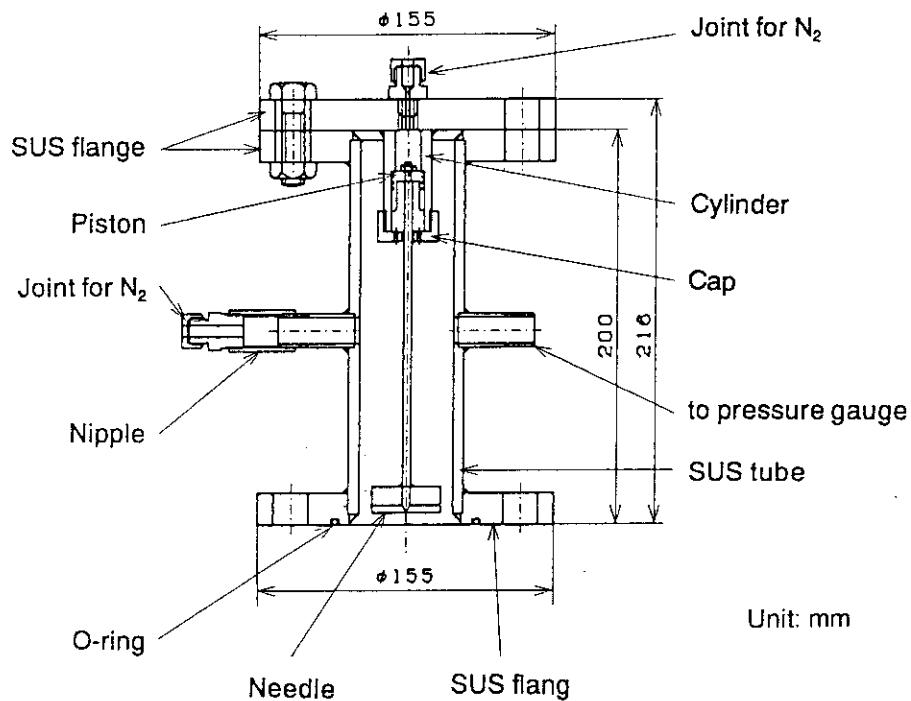


Fig. 3.3 衝撃波発生装置

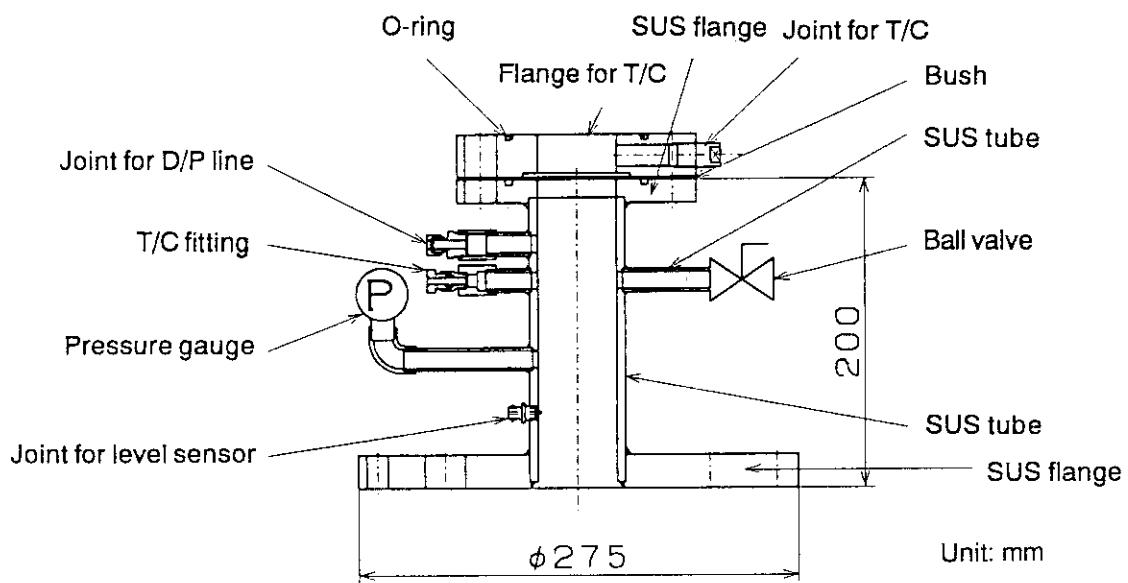


Fig. 3.4 上部管

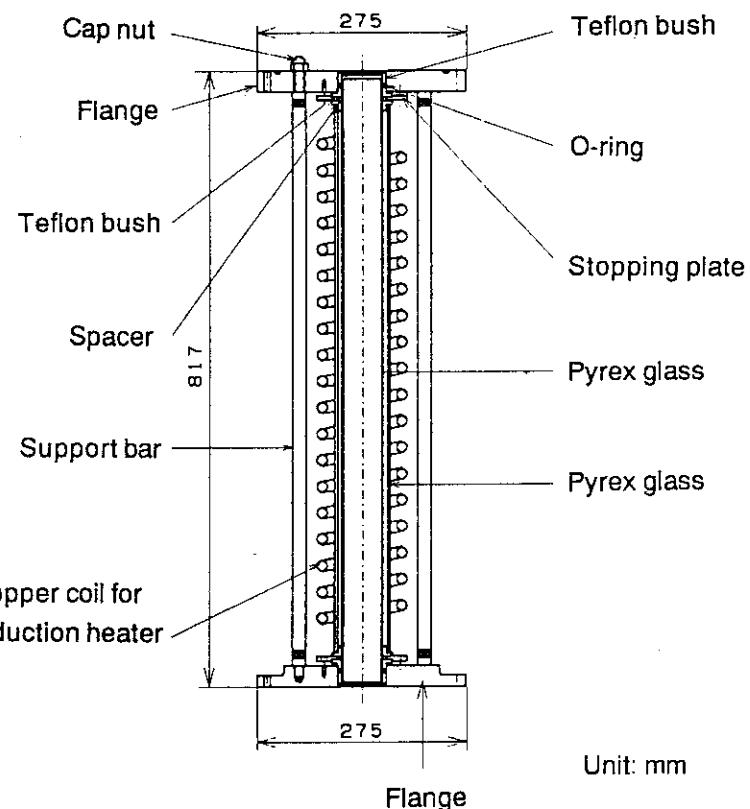


Fig. 3.5 テスト管

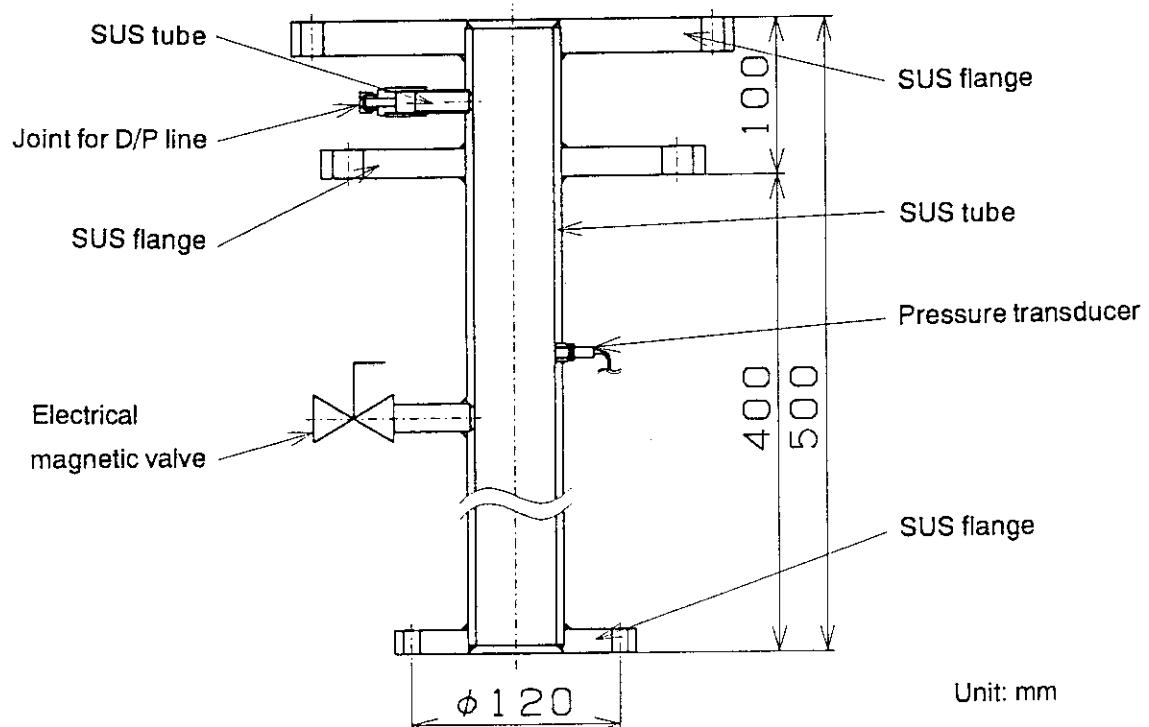


Fig. 3.6 下部管

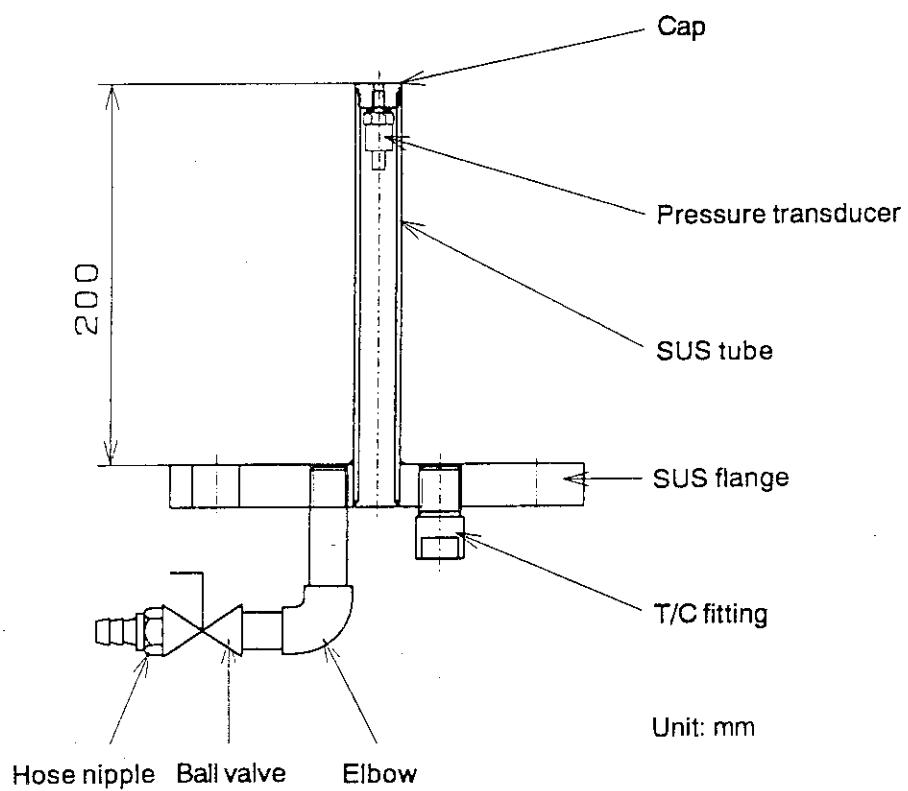


Fig. 3.7 圧力センサ取付管

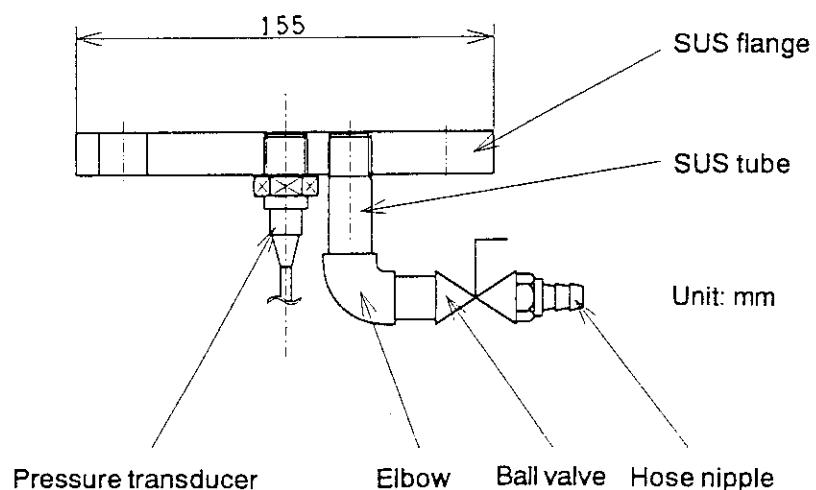


Fig. 3.8 圧力センサ取付フランジ

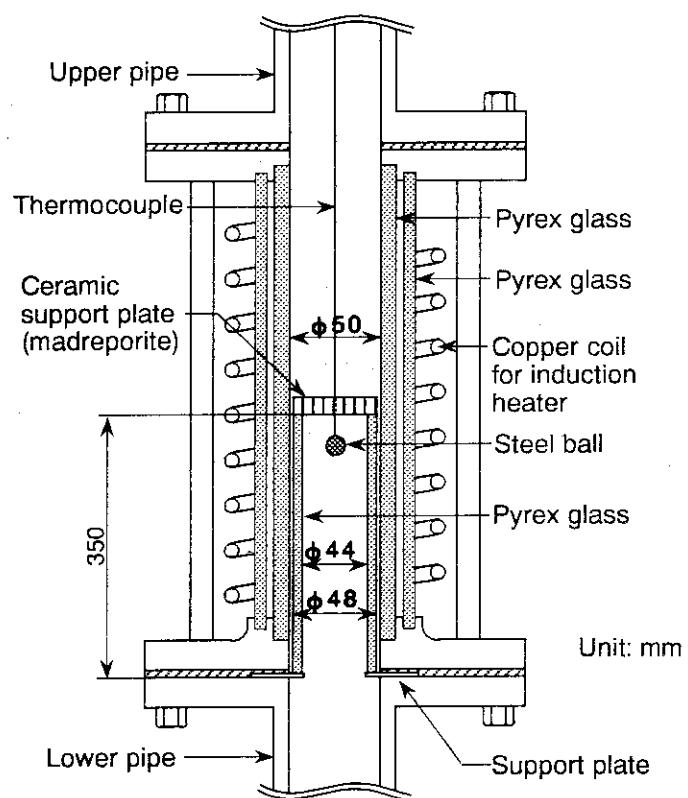


Fig. 3.9 テスト部本体詳細図

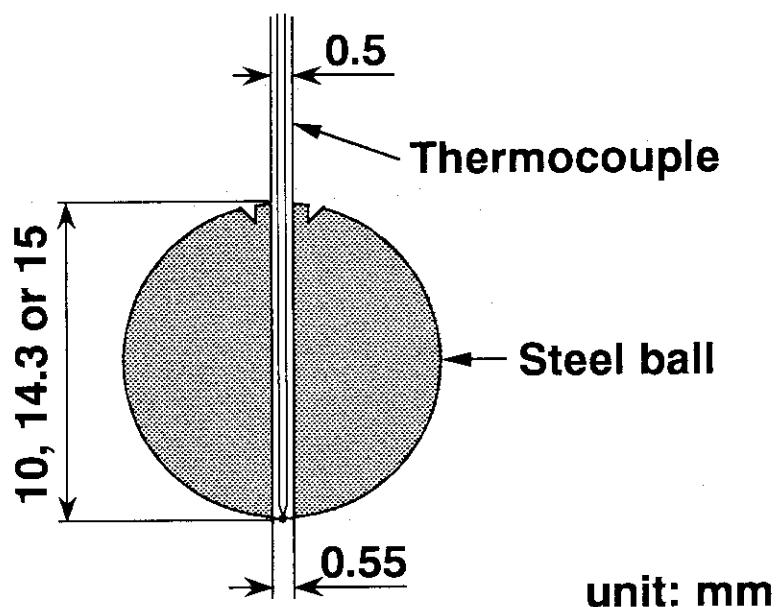


Fig. 3.10 鋼球詳細図

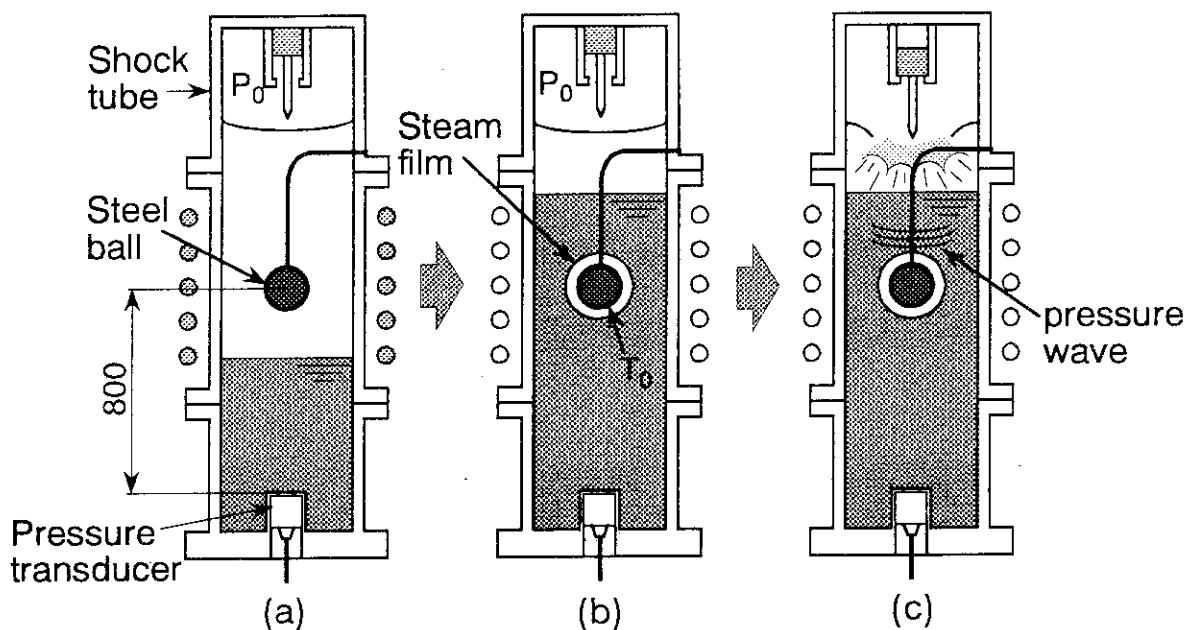


Fig. 3.11 実験手順概要

Table 3.1 実験条件

Material	Carbon steel ball		Stainless steel ball	
Diameter	10mm	15mm	10mm	14.3mm
Initial pressure	0.4~1.0MPa	0.4~0.9MPa	0.29, 0.39, 0.49, 0.59, 0.69MPa	
Initial temperature	300~700°C	450~700°C	350~650°C	
Water subcooling	About 10°C			
Pressure in test section	Atmospheric pressure			

4 実験結果

直径10mmと15mmの炭素鋼球、10mmと14.3mmのステンレス鋼球それぞれ一個を用いて行った膜沸騰の崩壊特性に関する実験結果について以下に述べる。

4.1 炭素鋼球直径10mmの実験結果

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った72回の実験(Exp. 1～Exp. 72)^⑩の代表的な結果をFig. 4.1.1～Fig. 4.1.4に示す。全72回の実験結果は付録AのFig. A.1.1～Fig. A.1.72に示す。本実験では直径10mmの炭素鋼球1個を用いて、鋼球表面温度履歴とテスト部下端での圧力の過渡変化を測定した。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ステューサにより測定したものである。

いずれの実験結果においても、圧力波が測定される直前に鋼球表面温度が急激に下降することが分かった。また、鋼球の位置と圧力測定位置の間が離れているため、その間に圧力波が伝播する時間は圧力信号の遅れとなり、鋼球表面温度信号と圧力信号に応答時間差が生じることを確認した。更に、個々の温度降下は個々の圧力波あるいはその反射波によって生じていることを確認した。そして、圧力波が通過した直後の鋼球表面温度挙動は温度降下の度合い、あるいは状態に応じて4つのタイプに分類することができた。これらの4つの分類タイプをそれぞれType A, B, C, Dと名付けることとした。Table 4.1にこの実験の初期条件を示す。 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、 T_{sub} は水のサブクール温度を示している。また、Typeは先に名付けた実験結果の分類を示している。以下に示すFig. 4.1.1～Fig. 4.1.4は実験結果Type A, B, C, Dの代表的な実験結果を示したものである。

4.1.1 Type Aについての詳細

Type Aの代表例として、Exp. 37の実験結果をFig. 4.1.1(a)に示す。圧力波が通過した直後、鋼球表面温度は A_1 点から一度急激に約520°Cまで降下し、そこから約20°Cの温度上昇を行った後、再び降下し、この実験での最低温度480°C(A_2 点)に達した。その後、鋼球表面温度は次第に上昇し、約600°Cを維持した。この実験結果は、鋼球表面温度が氷の飽和温度に達していないことから、鋼球と水との直接接触が行われていないことを示している。つまり、膜沸騰は崩壊しなかったものと理解できる。この様に、膜沸騰が崩壊しなかった実験結果をType Aとする。

Fig. 4.1.1(a)の時間軸を拡大したものをFig. 4.1.1(b)に示す。この図から、圧力波が立ち上がる直前に鋼球表面温度は急激に降下したことが分かる。これは先に述べた測定位置の違いによる測定信号の応答時間差によるものである。

4.1.2 Type Bについての詳細

Type Bの代表例として、Exp. 33の実験結果をFig. 4.1.2(a)に示す。圧力波が通過した直後、鋼球表面温度は B_1 点から一度急激に約150°C(B_2 点)まで降下し、その後130°Cから120°Cの間をゆっくりと降下した。この B_2 点以降に相当する圧力データの平均は約0.5MPaから0.3MPaの間で変化し

ていた。飽和蒸気表⁽¹¹⁾によると、この圧力変化に対応する水の飽和温度は151.84°Cから133.54°Cに変化することとなり、B₂点以降の表面温度変化とほぼ等しいことが分かる。よって、B₂点以降の150°Cから120°Cの鋼球表面温度変化はテスト部内部の圧力変化による水の飽和温度変化を示しており、鋼球と水とが直接接触していたことを示している。つまり、圧力波により膜沸騰が崩壊したものと定性的に理解できる。この様に、膜沸騰が崩壊した実験結果をType Bとする。

Fig. 4.1.2(a)の時間軸を拡大したものをFig. 4.1.2(b)に示す。Fig. 4.1.2(a)からは判断が困難であったが、厳密には圧力波が立ち上がる直前に鋼球表面温度は急激にB₃点の180°Cまで降下した後、温度降下速度が小さくなり、Fig. 4.1.2(a)において述べた様なB₂点以降の飽和温度降下に至ることが分かった。飽和蒸気表によると、水の飽和温度が180°Cのとき系の圧力は1.0MPaである。よって、最初の圧力波が急激にピークの1.2MPaまで立ち上がる間にあるB₃点の温度は飽和温度以下となっており、この時点において膜沸騰は崩壊し、B₃点以降において鋼球と水は直接接触していたものと考えられる。

4.1.3 Type Cについての詳細

Type Cの代表例として、Exp. 35の実験結果をFig. 4.1.3(a)に示す。圧力波が通過した直後、鋼球表面温度はC₁点から一度急激に約460°Cまで降下し、微小な温度上昇をした後に再び降下した。最終的に約5回の温度降下をした後、鋼球表面温度は水の飽和温度に達した。よって4.1.2節と同様に、鋼球と水とが直接接触し、膜沸騰が崩壊したものと理解できる。この様に、数回に分けて鋼球表面温度が降下し、最終的に膜沸騰が崩壊した実験結果をType Cとする。飽和温度に達した後の鋼球表面温度上昇は、鋼球直径が10mmと大きく、熱容量が大きいため、膜沸騰が再発生したために生じたものと考えられる。

Fig. 4.1.3(a)の時間軸を拡大したものをFig. 4.1.3(b)に示す。この図から、30~40msの間に、鋼球表面温度降下は、C₁-C₂、C₂-C₃、C₃-C₄、C₄-C₅、C₅-C₆の5回が行われ、それぞれの温度降下区間に圧力波ピークP₁~P₅が対応している。ただし、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ーより早いことを考慮しなければならない。この圧力波が音速に近い速度で伝わっているとすれば、テスト部下端の圧力と表面温度との応答時間差は0.6msである。よって実際には、温度降下点C₁~C₅と圧力波ピークP₁~P₅の発生時間はそれぞれ接近しており、圧力波のピーク付近によって、鋼球表面温度は急激に降下したことが分かる。

4.1.4 Type Dについての詳細

Type Dの代表例として、Exp. 32の実験結果をFig. 4.1.4(a)に示す。圧力波が通過した直後、鋼球表面温度はD₁点から3回の温度降下を行った後、約420°Cに達した。その後、表面温度は次第に上昇して約480°Cを維持した。ところが、約110ms経過した時点では大きい圧力波ピークは存在していないにもかかわらず、鋼球表面温度は急激に降下し、最終的に水の飽和温度まで下がった。この様に、圧力波が通過した直後に膜沸騰は崩壊せず、圧力波とは関係なく自発的に膜沸騰が崩壊した実験結果をType Dとする。

Fig. 4.1.4(a)の時間軸を拡大したものをFig. 4.1.4(b)に示す。Fig. 4.1.3(b)同様に断続的な温度降下はそれぞれその温度降下付近の圧力波ピークに対応していることが分かる。

4.2 炭素鋼球直径15mmの実験結果

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った52回の実験(Exp. 1～Exp. 52)の代表的な結果をFig. 4.2.1～Fig. 4.2.4に示す。全52回の実験結果は付録AのFig. A.2.1～Fig. A.2.52に示す。本実験では直径15mmの炭素鋼球1個を用いて、鋼球表面温度履歴とテスト部下端での圧力の過渡変化を測定した。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ステューサにより測定したものである。

直径10mmの実験結果と同じ様に、いずれの実験結果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降下することが分かった。更に、個々の温度降下は個々の圧力波あるいはその反射波によって生じていることを確認した。また、圧力波が通過した直後の鋼球表面温度挙動は温度降下の度合い、あるいは状態に応じて4つのタイプに分類することができた。これらの4つの分類タイプはそれぞれType A, B, C, Dと名付けた。Table 4.2にこの実験の初期条件を示す。以下に示すFig. 4.2.1～Fig. 4.2.4は実験結果Type A, B, C, Dの代表的な実験結果を示したものである。

4.2.1 Type Aについての詳細

Type Aの代表例として、Exp. 29の実験結果をFig. 4.2.1(a)に示す。圧力波が通過した直後、鋼球表面温度はA₁点から一度急激に約440°Cまで降下し、そこから約20°Cの温度上昇を行った後、再び降下し、この実験での最低温度425°C(A₂点)に達した。その後、鋼球表面温度は次第に上昇し、500～600°Cを維持した。この実験結果は、4.1.1節同様に鋼球表面温度が水の飽和温度に達していないことから、鋼球と水との直接接触が行われなかったことを示している。つまり、膜沸騰が崩壊しなかった実験結果である。

Fig. 4.2.1(a)の時間軸を拡大したものをFig. 4.2.1(b)に示す。この図から、圧力波が立ち上がる直前に鋼球表面温度は急激に降下したことが分かる。これは先に述べた測定位置の違いによる測定信号の応答時間差によるものである。

4.2.2 Type Bについての詳細

Type Bの代表例として、Exp. 51の実験結果をFig. 4.2.2(a)に示す。圧力波が通過した直後、鋼球表面温度はB₁点から一度急激に約170°Cまで降下し、一時的に260°Cに上昇した。その後再び降下し、140～110°Cの間をゆっくりと降下した。この140°Cから110°Cの表面温度減少はこの系の圧力変化による水の飽和温度変化に対応している。飽和蒸気表によると、この間に相当する圧力データの平均が約0.4MPaから0.2MPaの間で変化していることから、水の飽和温度は143.62°Cから120.23°Cに変化する。よって4.1.2節同様に、B₂点以降の140°Cから110°Cの表面温度減少は水の飽和温度を示しており、圧力波により膜沸騰は崩壊したものと定性的に理解できる。

Fig. 4.2.2(a)の時間軸を拡大したものをFig. 4.2.2(b)に示す。この図から、B₂～B₃点の間に鋼球表面温度の一時的な上昇を確認することができる。この一時的な上昇は、熱電対近傍にて核沸騰が生じることにより、熱電対先端が蒸気の気泡に覆われ、鋼球内部からの熱伝達によって熱電対先端付近のみ一時的に表面温度が上昇し、その後、熱電対先端の蒸気の気泡は自発的に崩壊した

ものと思われる。

4.2.3 Type Cについての詳細

Type Cの代表例として、Exp. 15の実験結果をFig. 4.2.3(a)に示す。圧力波が通過した直後、鋼球表面温度はC₁点から一度急激に約380°Cまで降下し、微小な温度上昇をした後に再び降下した。約3回の温度降下をした結果、この系の圧力に対応した水の飽和温度に達した。つまり、数回に分けて鋼球表面温度が降下し、最終的に膜沸騰が崩壊した実験結果である。飽和温度に達した後の鋼球表面温度上昇は、鋼球直径が15mmと大きく、熱容量が大きいため、膜沸騰が再度発生したために生じたものと考えられる。

Fig. 4.2.3(a)の時間軸を拡大したものをFig. 4.2.3(b)に示す。この図から、30～40msの間に、鋼球表面温度降下は、C₁-C₂、C₂-C₃、C₃-C₄の3回が行われ、それぞれの温度降下区間に圧力波ピークP₁～P₃が対応していることが分かる。

4.2.4 Type Dについての詳細

Type Dの代表例として、Exp. 23の実験結果をFig. 4.2.4(a)に示す。この実験のみ測定時間を400msに拡張している。圧力波が通過した直後、鋼球表面温度はD₁点から3回の温度降下を行った後、約440°Cに達した。その後、表面温度は次第に上昇して約570°Cに達し、大きい圧力波ピークが存在しないにもかかわらず、再び降下して水の飽和温度に達した。よって、この実験では、測定時間が約240ms経過した時点で、鋼球表面温度はゆっくりと上昇する現象が確認できる。つまり膜沸騰が再発生したものと思われる。他の実験結果から膜沸騰の再発生が確認できない理由は、測定時間が短いためである。

Fig. 4.2.4(a)の時間軸を拡大したものをFig. 4.2.4(b)に示す。Fig. 4.2.3(b)同様に断続的な温度降下はそれぞれその温度降下付近の圧力波ピークに対応していることが分かる。

直径10mm、15mmの炭素鋼球を用いた実験により、鋼球表面上に形成された膜沸騰の崩壊特性を定性的に分類することができたが、定量的な分類にまでは至らなかった。最大の原因としては、鋼球の酸化による膜沸騰の不安定化が挙げられる。実験では鋼球を約750°Cにまで加熱し、更に急冷する。そのため、鋼球表面の酸化が著しく、膜沸騰を安定させることは困難であった。毎回実験を行う前に、鋼球表面を研磨したものの、完全にこの酸化膜をはぎ落とすことは難しく、実験毎に鋼球表面の条件が異なる結果となった。また、圧力波の非再現性も原因として挙げられる。従って、今回の実験のみから鋼球表面上の膜沸騰の圧力波による崩壊特性を一意に同定することは困難であった。

そこで酸化の影響を避けるためにステンレス球を使用した実験を試みた。また、圧力波の再現性向上させるため、衝撃波発生装置のフィルムの厚さを倍の0.05mmにして実験を行うこととした。

4.3 ステンレス鋼球直径10mmの実験結果

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った30回の実験(Exp. 1～Exp. 30)を付録AのFig. A.3.1～Fig. A.3.30に示す。本実験では直径10mmのステンレス鋼球1個を用いて、鋼球表面温度履歴とテスト部下端での圧力の過渡変化を測定した。Table 4.3にこの実験の初期条件を示す。

代表的な実験データとしてExp. 2をFig. 4.3.1に示す。この図は測定開始後30msecから40msec間の鋼球表面温度履歴と圧力履歴を示している。この実験結果に限らずステンレス鋼球を用いた全ての実験結果で、圧力がテスト部下端で急激に増加する0.58msec前に鋼球表面温度は急激に減少することが確認された。この減少と増加の応答時間差は圧力センサと熱電対の測定位置の違いによるものである。圧力センサはステンレス球の下方0.8mの位置に設置してある。この測定区間を圧力波が音速で通り過ぎるとすると、この区間の応答時間差は0.6msecとなり、測定データから得られる応答時間差にほぼ等しいことが理解できる。以下に30回行ったステンレス鋼球10mmの実験の中から代表的な3つの実験結果を以下に示す。

4.3.1 膜沸騰が崩壊しなかった実験結果

Exp. 3の実験結果をFig. 4.3.2に示す。圧力波が通過した直後、鋼球表面温度はA₁点から一度急激に約480°Cまで降下し、更にこの実験での最低温度440°C(A₂点)に達した。その後、鋼球表面温度は次第に上昇し、約560°Cを維持した。この実験結果は、鋼球表面温度が水の飽和温度に達していないことから、鋼球と水との直接接触が行われていないことを示している。この様に、膜沸騰が崩壊しなかった実験結果をType Aとする。

4.3.2 膜沸騰が崩壊した実験結果

Exp. 2の実験結果をFig. 4.3.3に示す。圧力波が通過した直後、鋼球表面温度はB₁点から急激にB₂点まで降下し170°Cに達した。その後、鋼球表面温度はゆっくりと130°Cから105°Cに減少した。この130°Cから105°Cの表面温度減少はこの系の圧力変化による水の飽和温度変化に対応している。飽和蒸気表によると、この間に相当する圧力データの平均が約0.3MPaから0.12MPaの間で変化していることから、水の飽和温度は133.5°Cから104.8°Cに変化する。よって、B₂点以降の130から105°Cの表面温度減少は水の飽和温度を示しており、圧力波により膜沸騰が崩壊したものと定性的に理解できる。またこのとき、表面温度は周期的な振動を示し、変動圧力と同期していたことが分かる。これは表面温度が変動圧力に対応する飽和温度となっていたことを示している。この様に、膜沸騰が崩壊した実験結果をType Bとする。

4.3.3 膜沸騰が再発生した実験結果

Exp. 25の実験結果をFig. 4.3.4に示す。圧力波の通過により、鋼球表面温度はC₁点から急激に降下し、前節の結果と同様に水の飽和温度に達した。これは鋼球と水との直接接觸が行われたことを示している。そしてその約100msec後、C₂点から表面温度は急激な上昇を示した。この温度上昇は、鋼球と水との直接接觸により放出された熱量に比べて鋼球の熱容量が大きかったため、

膜沸騰が再発したことを示しているものと思われる。この様に、膜沸騰が一旦崩壊し、その後再発した実験結果をType Cとする。

4.4 ステンレス鋼球直径14.3mmの実験結果

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った30回の実験(Exp. 1～Exp. 30)を付録AのFig. A.4.1～Fig. A.4.30に示す。本実験では直径14.3mmのステンレス鋼球1個を用いて、鋼球表面温度履歴とテスト部下端での圧力の過渡変化を測定した。Table 4.4にこの実験の初期条件を示す。

直径10mmのステンレス鋼球を用いた実験と同様に、圧力がテスト部下端で急激に増加する0.58 msec前に鋼球表面温度は急激に減少することが確認された。以下に30回行ったステンレス鋼球14.3mmの実験の中から代表的な3つの実験結果を以下に示す。

4.4.1 膜沸騰が崩壊しなかった実験結果

Exp. 1の実験結果をFig. 4.4.1に示す。圧力波が通過した直後、鋼球表面温度はA₁点から一度急激に約530°Cまで低下し、更にこの実験での最低温度480°C(A₂点)に達した。その後、鋼球表面温度は次第に上昇し、約600°Cを維持した。この実験結果より、鋼球表面温度は水の飽和温度に達していないことから、鋼球と水との直接接触が行われなかったことを示している。よって4.3.1節と同様に、膜沸騰が崩壊しなかった実験結果Type Aであると理解できる。

4.4.2 膜沸騰が崩壊した実験結果

Exp. 6の実験結果をFig. 4.4.2に示す。圧力波が通過した直後、鋼球表面温度はB₁点から急激にB₂点まで低下し140°Cに達した。その後、鋼球表面温度はゆっくりと105°Cに減少した。4.3.2節と同様に、この140°Cから105°Cの表面温度変化はこの系の圧力変化による水の飽和温度変化を示している。よってB₂点以降の140から105°Cの表面温度減少は水の飽和温度を示しており、圧力波により膜沸騰が崩壊したものと定性的に理解できる。よって4.3.2節と同様に、膜沸騰が崩壊した実験結果Type Bであると理解できる。

4.4.3 膜沸騰が再発した実験結果

Exp. 5の実験結果をFig. 4.4.3に示す。圧力波の通過により、鋼球表面温度はC₁点から急激に低下し、水の飽和温度に達した。その約140msec後のC₂点から表面温度は急激な温度上昇を示した。よって4.3.3節と同様に、膜沸騰は一旦崩壊し、その後再び発生した実験結果Type Cであると理解できる。

4.5 実験結果のまとめ

4.5.1 炭素鋼球を用いた実験結果

炭素鋼球を用いた実験結果は直径10mm、15mm共に、圧力波が通過した直後の鋼球表面温度曲

線の温度降下の度合い、あるいは状態に応じて4つのタイプに分類することができた。Fig. 4.5.1は以下の分類定義を図示したものである。

- Type A：鋼球表面温度が水の飽和温度にまで達せずに、その後再上昇して、ある温度を維持した場合。この場合、膜沸騰は崩壊しなかったものと考えられる。
- Type B：鋼球表面温度が一回の温度降下で水の飽和温度にまで達した場合。この場合、膜沸騰は崩壊したものと考えられる。
- Type C：鋼球表面温度が数回の温度降下で水の飽和温度にまで達した場合。この場合、膜沸騰は崩壊したものと考えられる。
- Type D：鋼球表面温度が水の飽和温度にまで達せずに、その後再上昇して、さらに温度降下を行った後に、水の飽和温度にまで達した場合。この場合、膜沸騰は圧力波とは無関係に、自発的に崩壊したものと考えられる。

4.5.2 ステンレス鋼球を用いた実験結果

ステンレス鋼球を用いた実験結果は直径10mm、14.3mm共に、圧力波が通過した直後の鋼球表面温度曲線の温度降下の度合い、あるいは状態に応じて3つのタイプに分類することができた。Fig. 4.5.2は以下の分類定義を図示したものである。

- Type A：鋼球表面温度が水の飽和温度にまで達せずに、その後再上昇して、ある温度を維持した場合。この場合、膜沸騰は崩壊しなかったものと考えられる。
- Type B：鋼球表面温度が水の飽和温度に達した場合。この場合、膜沸騰は崩壊したものと考えられる。
- Type C：鋼球表面温度が水の飽和温度に達し、その後再上昇した場合。この場合、膜沸騰は崩壊し、その後再発生したものと考えられる。

以上は膜沸騰崩壊挙動に関する分類であるが、熱的デトネーションモデルに基づく蒸気爆発シミュレーション解析においては膜沸騰崩壊の有無に関する判断が重要となるため、以上の分類パターンをさらに大きく2つに分類する必要がある。炭素鋼球を用いた実験の場合、これらの分類パターンの中で圧力波の通過が原因で膜沸騰が崩壊した実験結果はType Bのみであり、他の分類パターンは膜沸騰が崩壊しなかった実験結果とすることができます。Type Cは膜沸騰が崩壊した実験結果であるが、一回目の圧力波の圧縮膨張過程で膜沸騰が崩壊しないことから、Type AとType Bに属する実験結果とすることが適切であると思われる。ステンレス鋼球を用いた実験の場合、圧力波の通過が原因で膜沸騰が崩壊した実験結果はType BとType Cであり、膜沸騰が崩壊しなかった実験結果はType Aのみとすることができます。ただし、炭素鋼球の酸化や圧力波の非再現性のため、蒸気爆発シミュレーション解析の膜沸騰崩壊条件を定めるための実験データベースとしては、ステンレス鋼球を用いた実験データを導入することが適当であると思われる。

Table 4.1 初期実験条件 (炭素鋼球直径10mm)

Exp.	T ₀ (°C)	P ₀ (MPa)	T _{sub} (°C)	Type	Exp.	T ₀ (°C)	P ₀ (MPa)	T _{sub} (°C)	Type
1	528	0.580	—	A	37	665	0.595	97.2	A
2	653	0.680	—	A	38	659	0.597	97.8	C
3	662	0.470	—	A	39	633	0.592	98.2	C
4	583	0.880	—	D	40	664	0.495	99.0	C
5	640	0.890	—	D	41	668	0.501	99.4	A
6	630	0.860	—	D	42	634	0.501	96.0	A
7	465	0.990	—	B	43	556	0.483	95.6	A
8	500	0.780	—	B	44	570	0.498	96.7	C
9	528	0.680	—	B	45	640	0.591	93.4	C
10	672	0.711	95.4	C	46	579	0.694	95.6	C
11	657	0.711	93.4	D	47	614	0.797	96.4	C
12	560	0.489	94.0	A	48	626	0.889	96.5	C
13	673	0.594	93.7	A	49	666	0.872	96.6	C
14	669	0.789	94.2	D	50	566	0.701	95.9	B
15	635	0.694	93.3	A	51	601	0.485	98.3	A
16	667	0.787	95.5	D	52	501	0.501	97.1	A
17	656	0.781	94.7	D	53	531	0.893	97.2	C
18	640	0.817	95.1	A	54	505	0.499	97.3	C
19	655	0.914	95.3	A	55	492	0.502	97.0	D
20	565	0.837	95.0	D	56	614	0.592	94.6	A
21	558	0.810	94.6	D	57	516	0.594	95.6	B
22	344	0.827	94.6	B	58	464	0.592	96.4	D
23	467	0.897	95.5	B	59	663	0.708	96.9	C
24	632	0.890	96.0	D	60	636	0.690	95.5	B
25	487	0.892	94.8	C	61	642	0.691	96.3	B
26	671	0.805	96.0	D	62	639	0.717	96.2	B
27	625	0.808	94.5	D	63	467	0.702	95.7	B
28	569	0.808	94.9	C	64	465	0.795	93.4	B
29	596	0.805	96.0	A	65	532	0.793	96.3	B
30	551	0.808	95.9	B	66	655	0.796	97.5	B
31	489	0.802	95.5	B	67	603	0.784	96.5	B
32	597	0.715	95.9	D	68	567	0.786	97.7	B
33	348	0.703	93.8	B	69	662	0.687	94.7	C
34	406	0.701	94.7	B	70	658	0.685	96.4	C
35	681	0.703	99.4	C	71	652	0.596	96.3	C
36	671	0.599	94.6	A	72	641	0.489	94.7	C

Table 4.2 初期実験条件(炭素鋼球直径15mm)

Exp.	T ₀ (°C)	P ₀ (MPa)	T _{sub} (°C)	Type	Exp.	T ₀ (°C)	P ₀ (MPa)	T _{sub} (°C)	Type
1	539	0.593	94.9	D	27	557	0.523	88.7	A
2	618	0.600	96.9	D	28	607	0.618	90.9	A
3	609	0.498	95.2	D	29	624	0.493	91.3	A
4	673	0.500	94.8	A	30	571	0.539	91.8	A
5	621	0.500	94.4	A	31	479	0.520	90.8	D
6	681	0.647	97.5	A	32	601	0.604	90.8	A
7	612	0.497	92.9	A	33	564	0.628	89.8	C
8	671	0.685	94.3	A	34	579	0.736	90.2	C
9	650	0.779	95.7	C	35	597	0.713	91.0	C
10	544	0.792	93.2	C	36	495	0.694	87.4	C
11	601	0.596	91.5	D	37	659	0.647	91.8	A
12	673	0.589	95.5	A	38	630	0.715	90.0	C
13	589	0.496	94.4	C	39	581	0.587	88.7	C
14	607	0.585	94.5	D	40	472	0.587	87.9	B
15	617	0.609	94.5	C	41	608	0.606	90.7	A
16	665	0.701	95.1	C	42	544	0.606	90.6	A
17	534	0.696	94.7	C	43	662	0.598	89.1	A
18	662	0.502	95.9	A	44	534	0.505	90.8	D
19	599	0.584	91.5	D	45	542	0.495	88.3	D
20	555	0.606	88.7	D	46	631	0.518	89.7	A
21	634	0.776	90.8	C	47	476	0.707	89.4	A
22	630	0.793	88.6	D	48	483	0.702	92.5	C
23	652	0.805	89.3	D	49	592	0.702	90.5	D
24	689	0.611	93.5	A	50	469	0.728	89.9	C
25	532	0.597	90.7	D	51	484	0.806	91.6	B
26	516	0.611	89.1	C	52	606	0.824	90.9	D

Table 4.3 初期実験条件（ステンレス鋼球直径10mm）

Exp.	T ₀ (°C)	P ₀ (MPa)	T _{sub} (°C)	Type
1	498	0.495	90.0	B
2	349	0.494	90.3	B
3	593	0.495	90.2	A
4	548	0.494	89.1	A
5	449	0.494	88.3	B
6	401	0.493	89.6	B
7	590	0.592	89.4	B
8	548	0.591	89.7	C
9	497	0.592	89.8	C
10	446	0.592	89.1	B
11	401	0.593	89.5	B
12	350	0.591	90.1	B
13	594	0.395	90.3	A
14	547	0.395	90.1	A
15	498	0.396	89.9	C
16	449	0.396	89.9	C
17	401	0.393	90.1	B
18	353	0.395	91.4	B
19	594	0.297	88.6	A
20	550	0.297	91.2	A
21	497	0.298	91.7	A
22	448	0.298	92.2	C
23	400	0.298	90.1	C
24	350	0.297	92.1	B
25	595	0.691	92.8	C
26	546	0.692	91.6	B
27	506	0.692	90.1	B
28	448	0.690	89.9	B
29	400	0.690	90.8	B
30	350	0.690	90.2	B

Table 4.4 初期実験条件（ステンレス鋼球直径14.3mm）

Exp.	T ₀ (°C)	P ₀ (MPa)	T _{sub} (°C)	Type
1	601	0.397	87.9	A
2	552	0.396	94.0	A
3	500	0.396	92.5	A
4	452	0.395	92.5	C
5	401	0.396	89.2	C
6	350	0.396	88.7	B
7	597	0.493	92.3	A
8	552	0.493	92.4	A
9	498	0.494	91.7	C
10	449	0.494	92.5	C
11	402	0.494	88.0	C
12	354	0.493	91.9	B
13	600	0.591	91.4	C
14	550	0.592	91.5	C
15	500	0.591	92.0	C
16	452	0.591	91.9	C
17	403	0.592	90.1	C
18	352	0.591	90.7	B
19	595	0.297	93.2	A
20	545	0.297	90.9	A
21	499	0.297	92.5	A
22	447	0.297	92.6	A
23	408	0.297	91.4	C
24	350	0.297	89.1	B
25	599	0.690	92.2	C
26	547	0.690	91.6	C
27	502	0.690	90.6	C
28	449	0.690	91.2	C
29	398	0.689	91.8	B
30	351	0.689	91.0	B

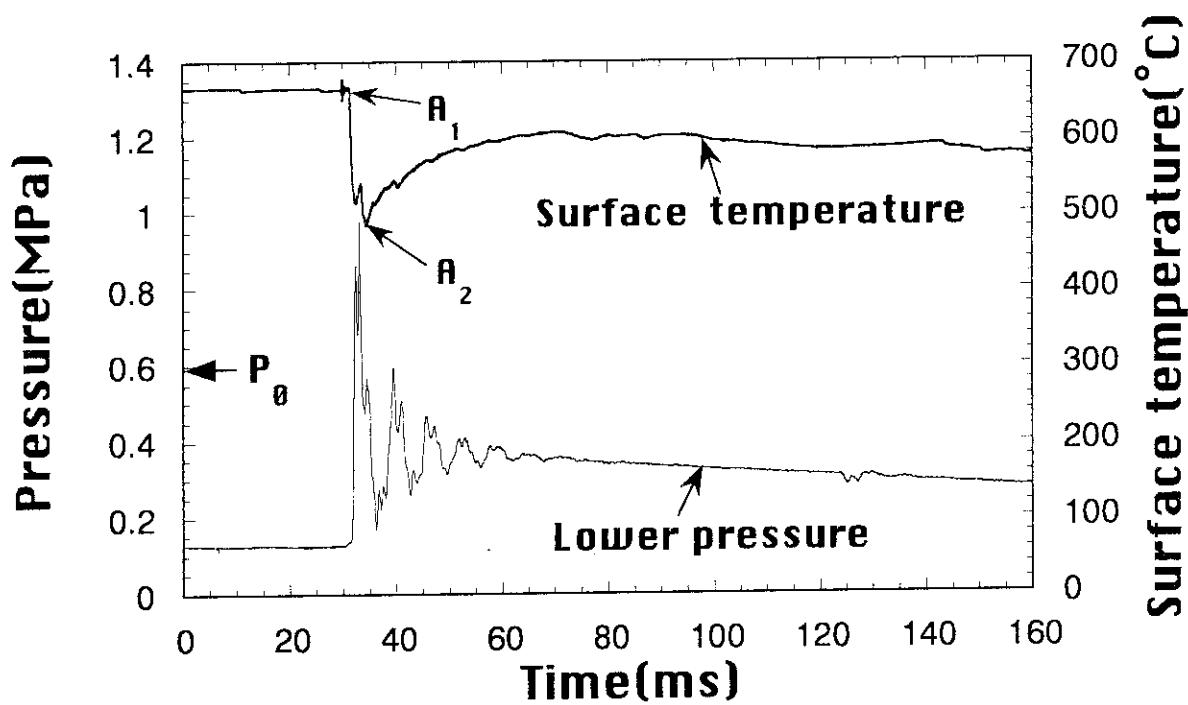


Fig. 4.1.1 (a) 膜沸騰が崩壊しなかった実験結果（炭素鋼球直径10mm）

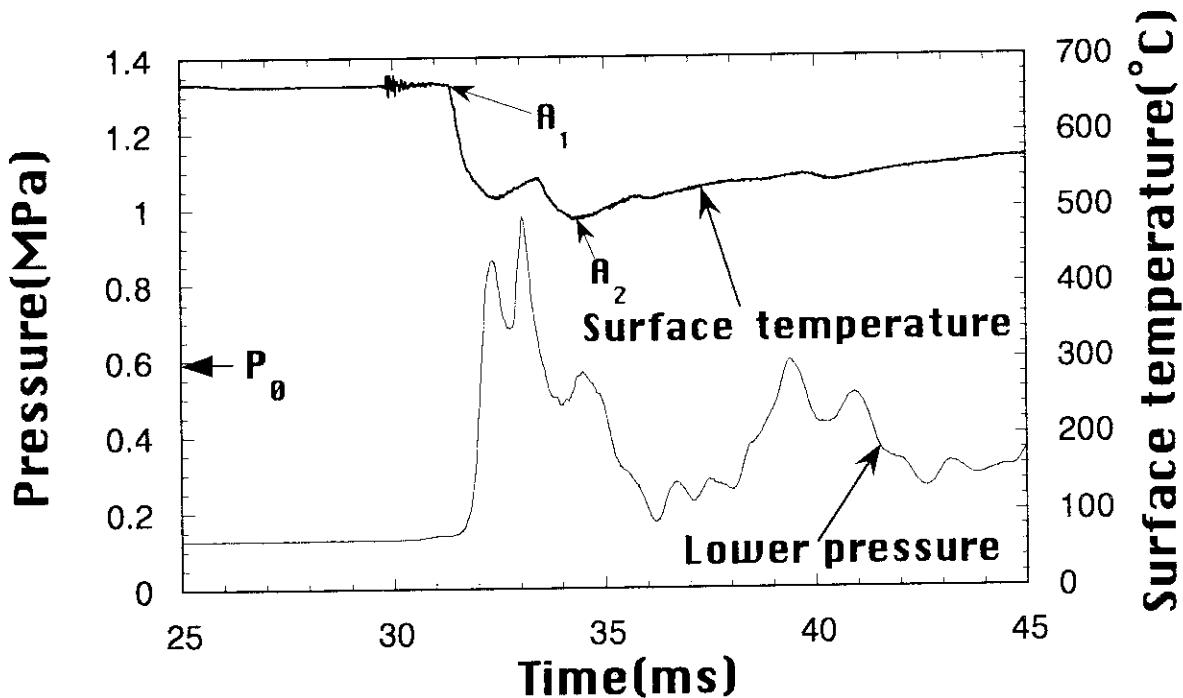


Fig. 4.1.1 (b) 膜沸騰が崩壊しなかった実験結果の時間軸拡大図（炭素鋼球直径10mm）

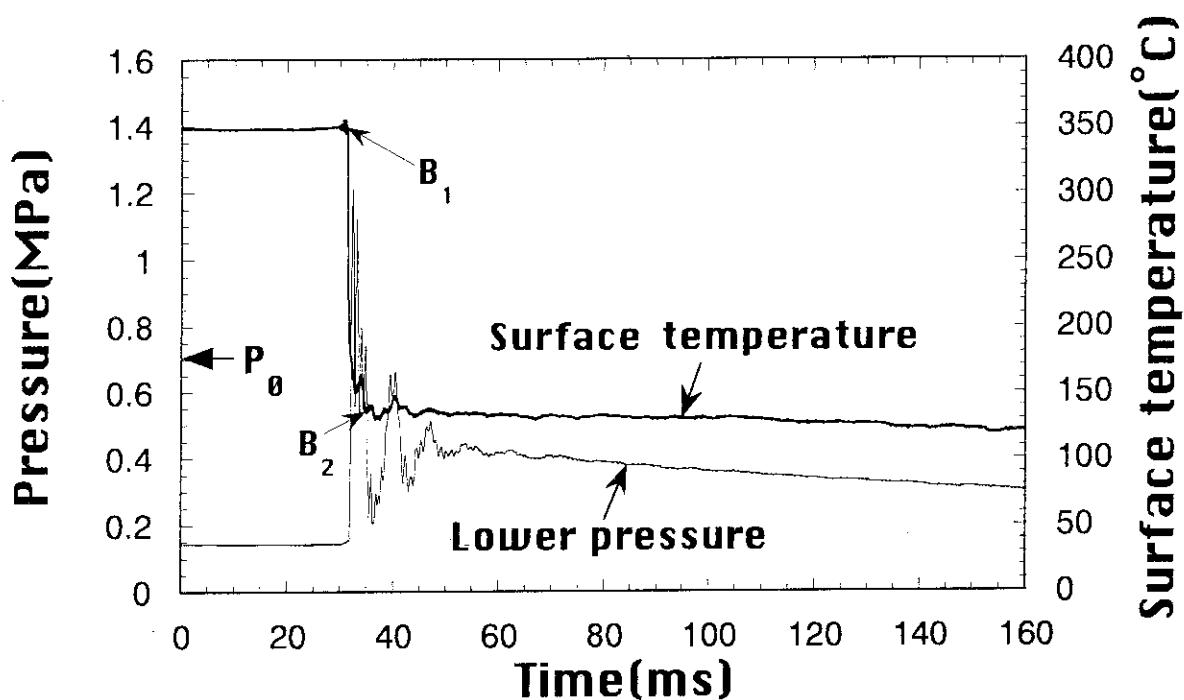


Fig. 4.1.2 (a) 急激に膜沸騰が崩壊した実験結果（炭素鋼球直径10mm）

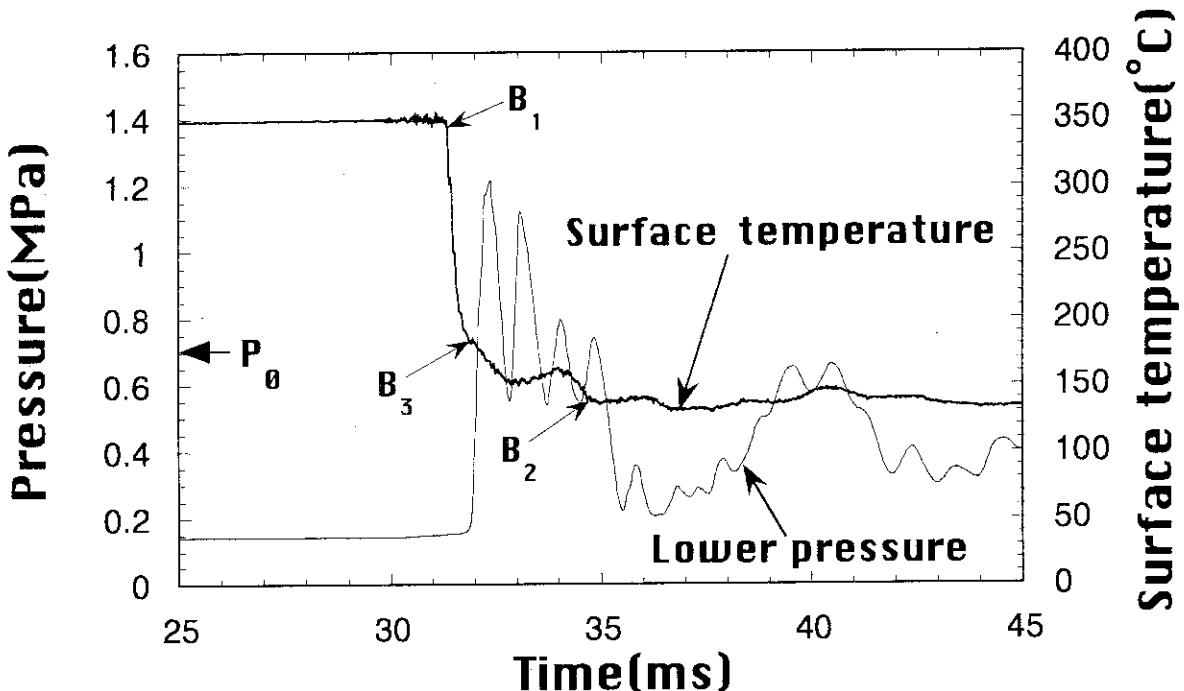


Fig. 4.1.2 (b) 急激に膜沸騰が崩壊した実験結果の時間軸拡大図（炭素鋼球直径10mm）

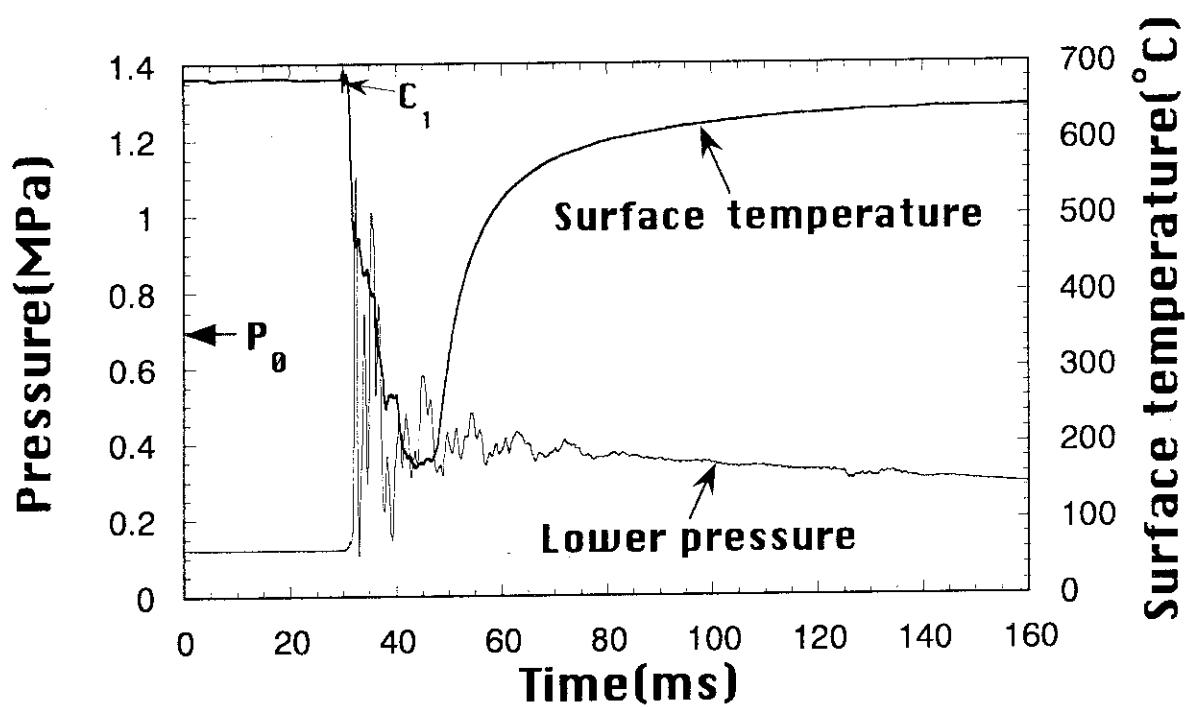


Fig. 4.1.3 (a) 最終的に膜沸騰が崩壊した実験結果（炭素鋼球直径10mm）

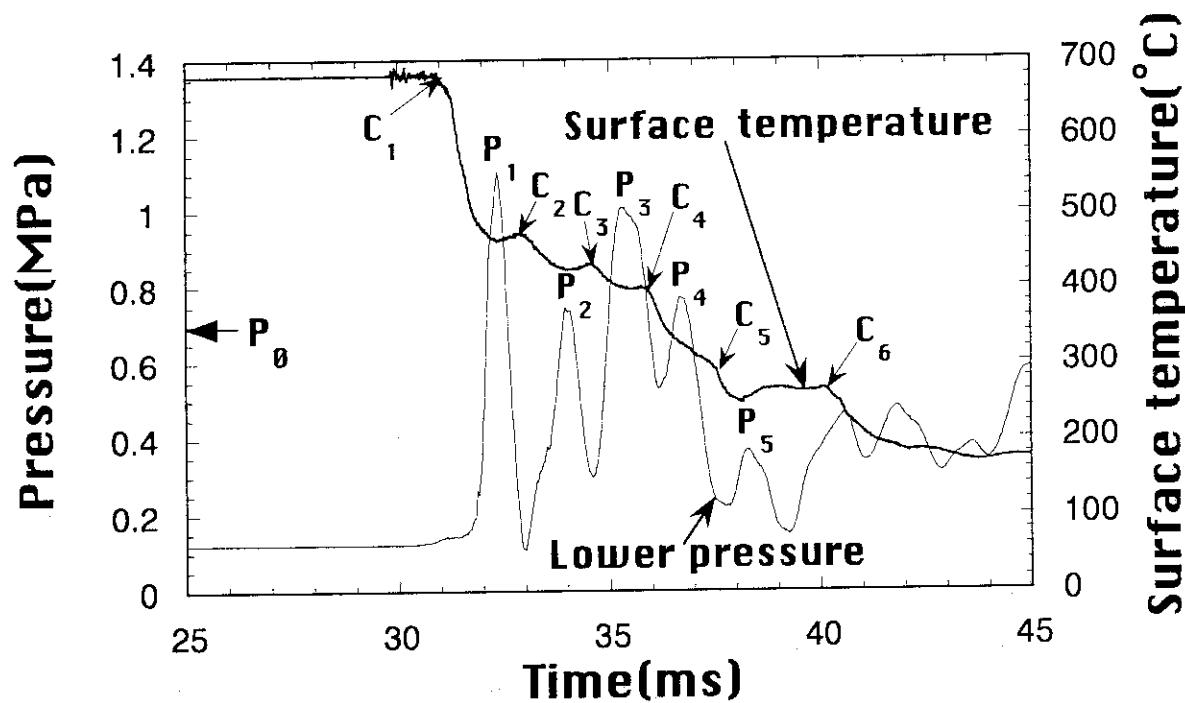


Fig. 4.1.3 (b) 最終的に膜沸騰が崩壊した実験結果の時間軸拡大図（炭素鋼球直径10mm）

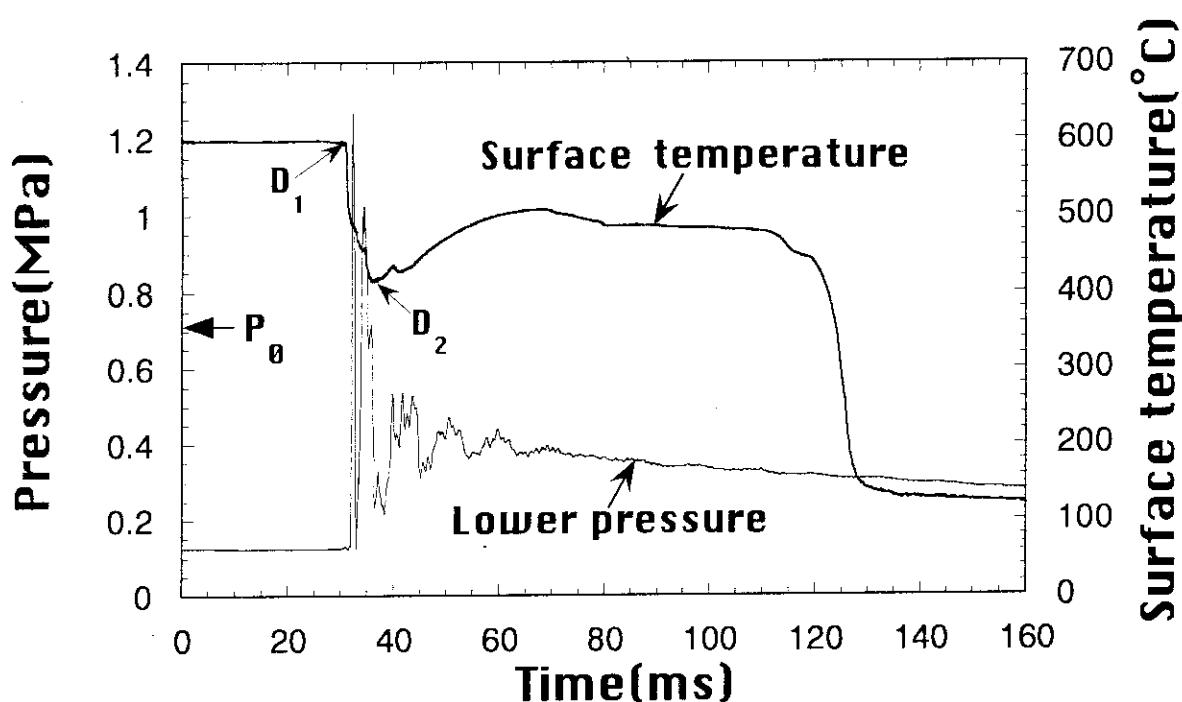


Fig. 4.1.4 (a) 自発的に膜沸騰が崩壊した実験結果（炭素鋼球直径10mm）

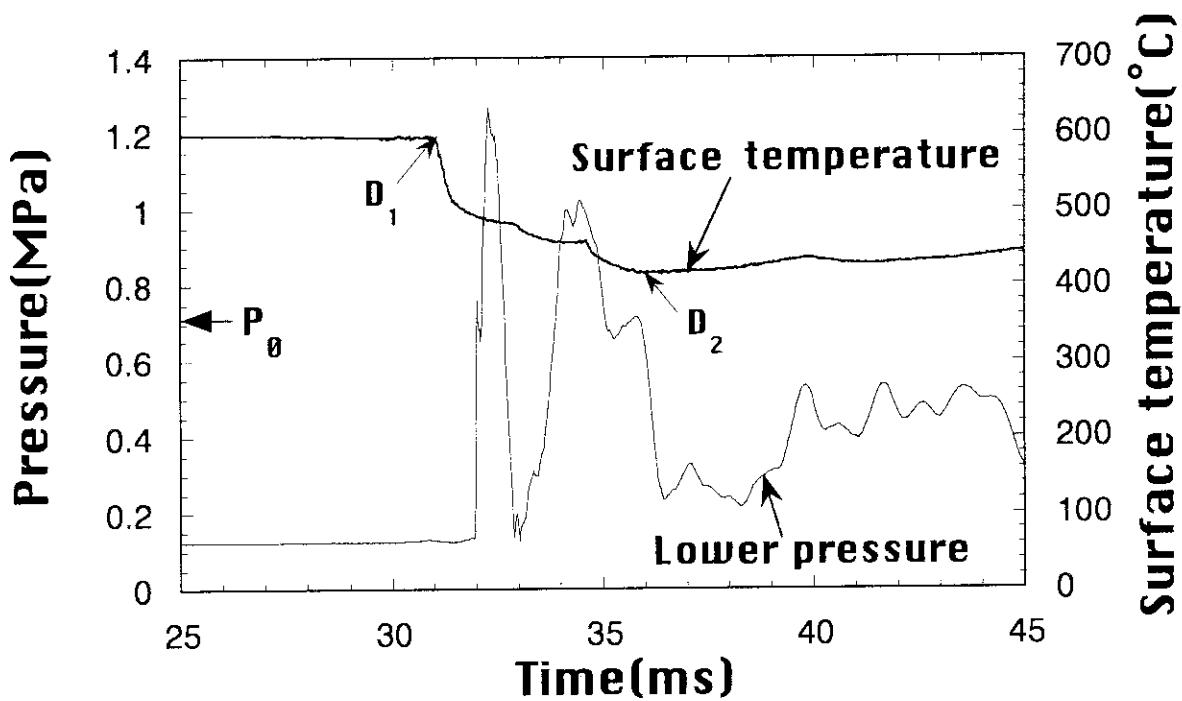


Fig. 4.1.4 (b) 自発的に膜沸騰が崩壊した実験結果の時間軸拡大図（炭素鋼球直径10mm）

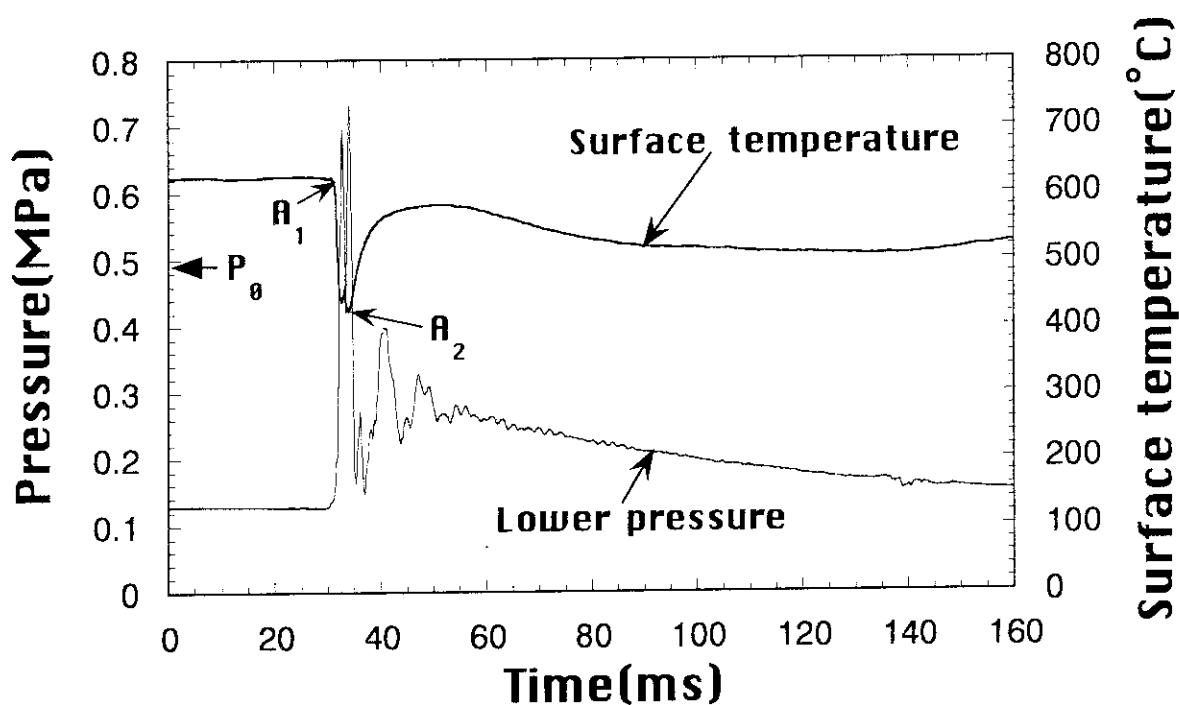


Fig. 4.2.1 (a) 膜沸騰が崩壊しなかった実験結果（炭素鋼球直径15mm）

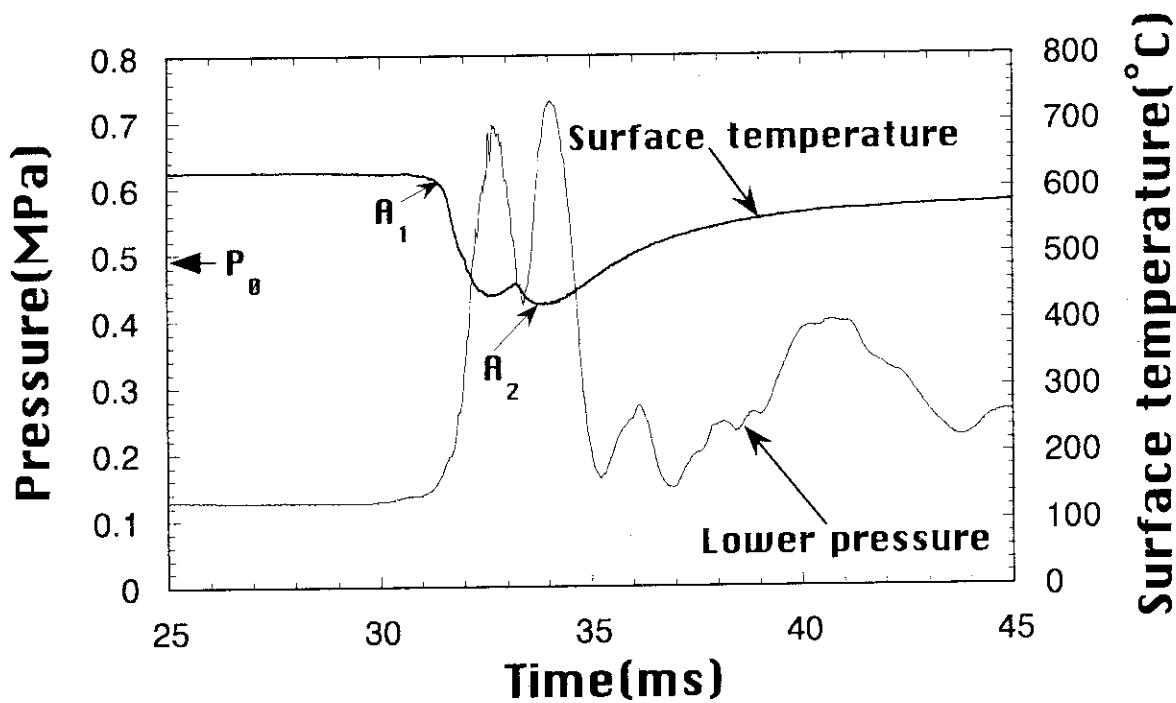


Fig. 4.2.1 (b) 膜沸騰が崩壊しなかった実験結果の時間軸拡大図（炭素鋼球直径15mm）

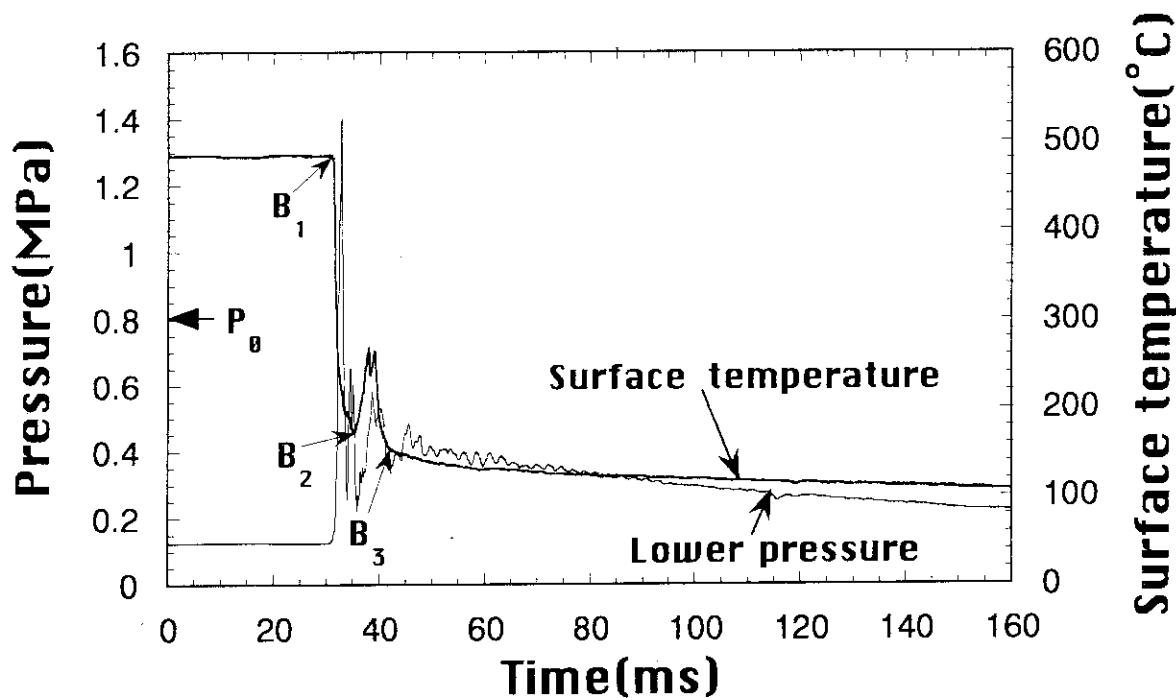


Fig. 4.2.2 (a) 急激に膜沸騰が崩壊した実験結果（炭素鋼球直径15mm）

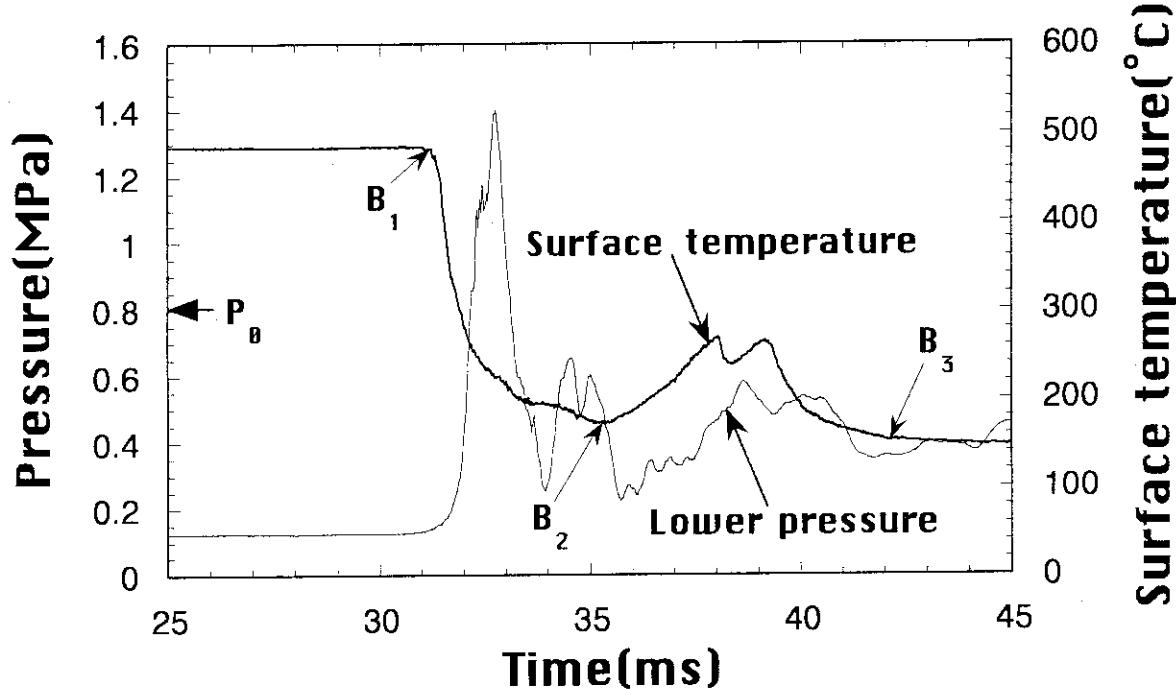


Fig. 4.2.2 (b) 急激に膜沸騰が崩壊した実験結果の時間軸拡大図（炭素鋼球直径15mm）

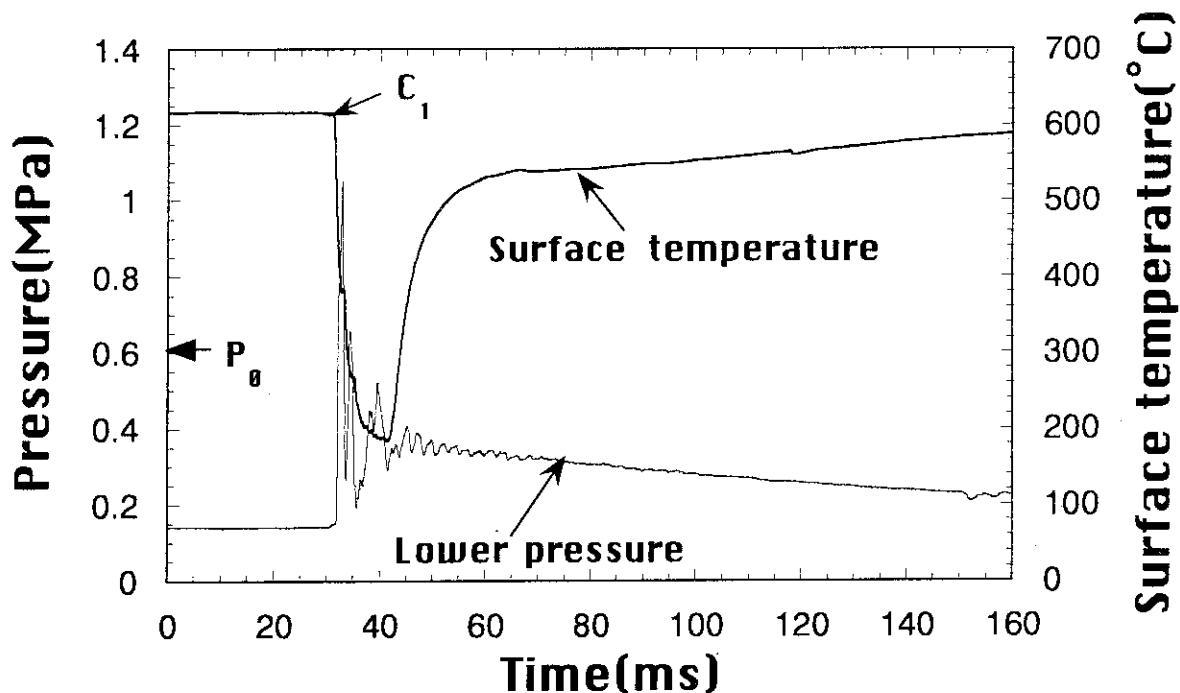


Fig. 4.2.3 (a) 最終的に膜沸騰が崩壊した実験結果（炭素鋼球直径15mm）

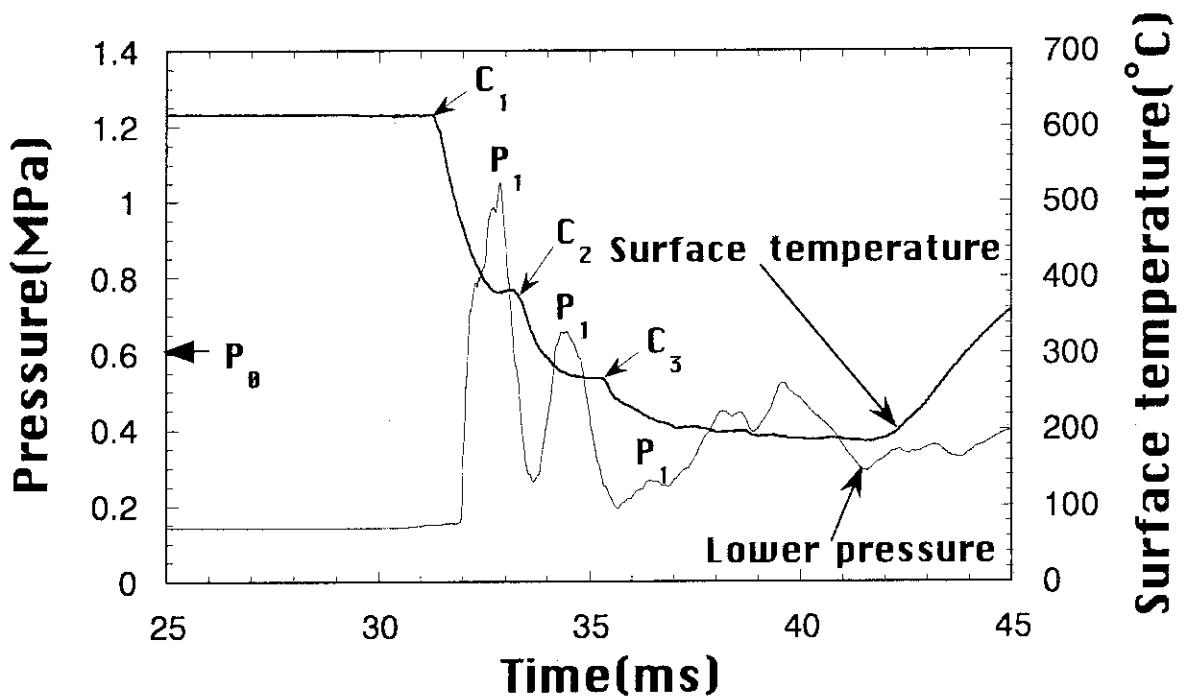


Fig. 4.2.3 (b) 最終的に膜沸騰が崩壊した実験結果の時間軸拡大図（炭素鋼球直径15mm）

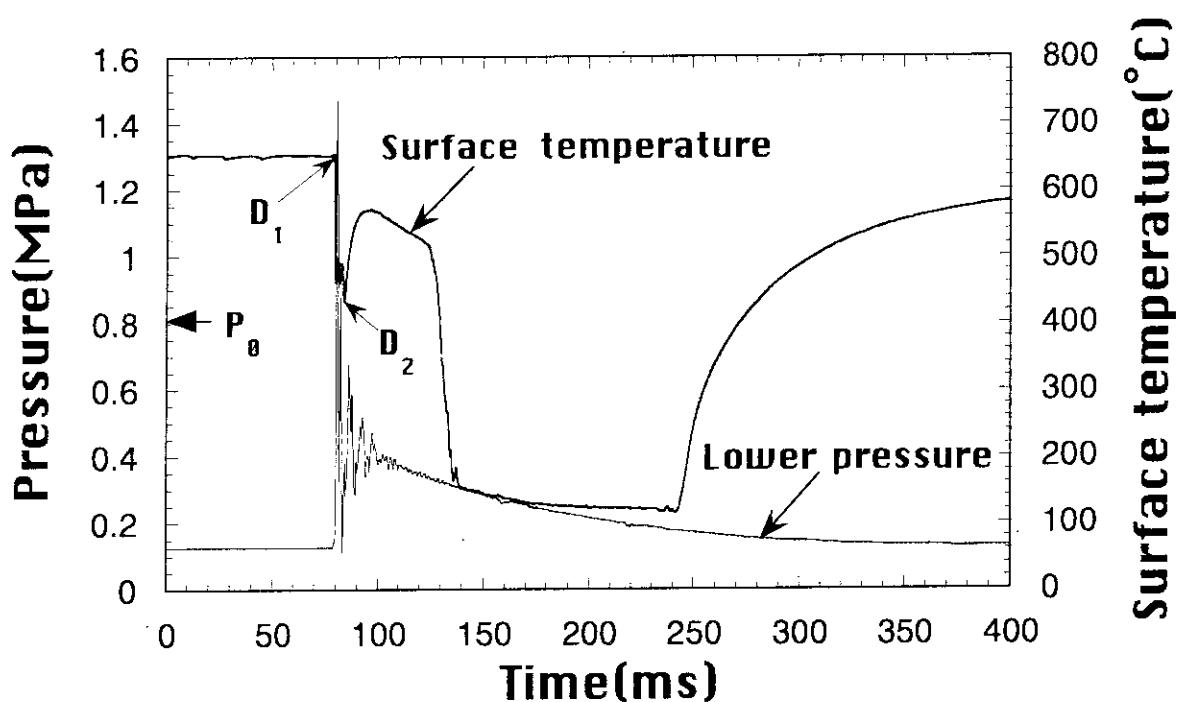


Fig. 4.2.4 (a) 自発的に膜沸騰が崩壊した実験結果（炭素鋼球直径15mm）

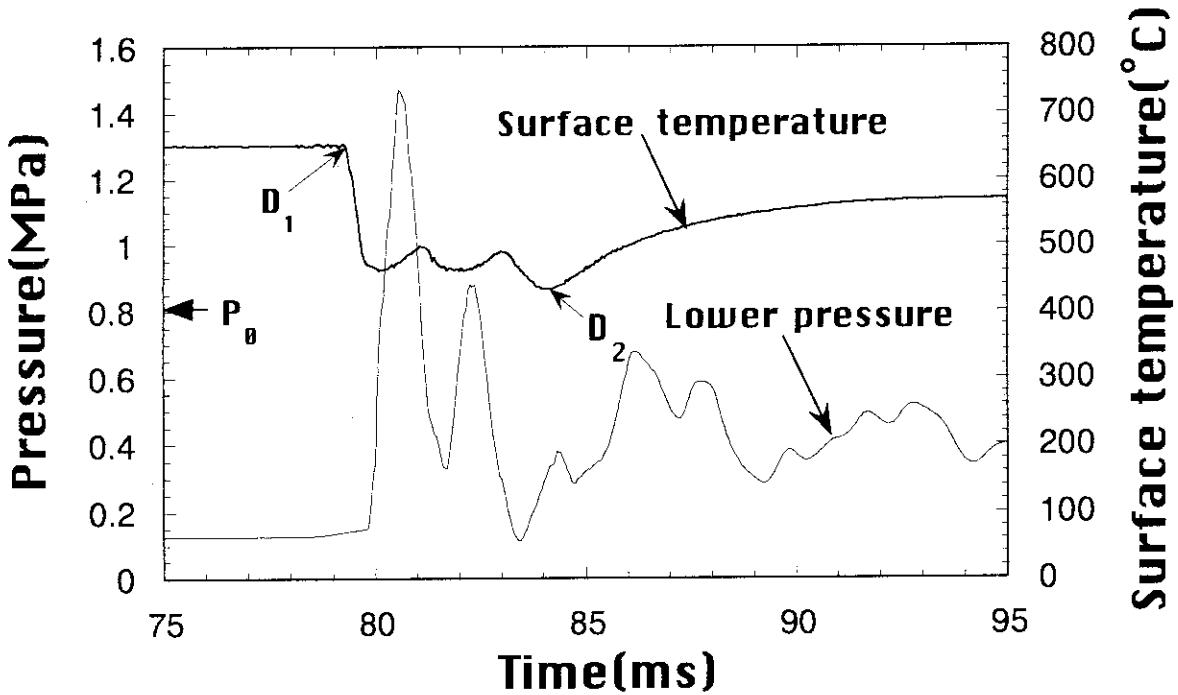


Fig. 4.2.4 (b) 自発的に膜沸騰が崩壊した実験結果の時間軸拡大図（炭素鋼球直径15mm）

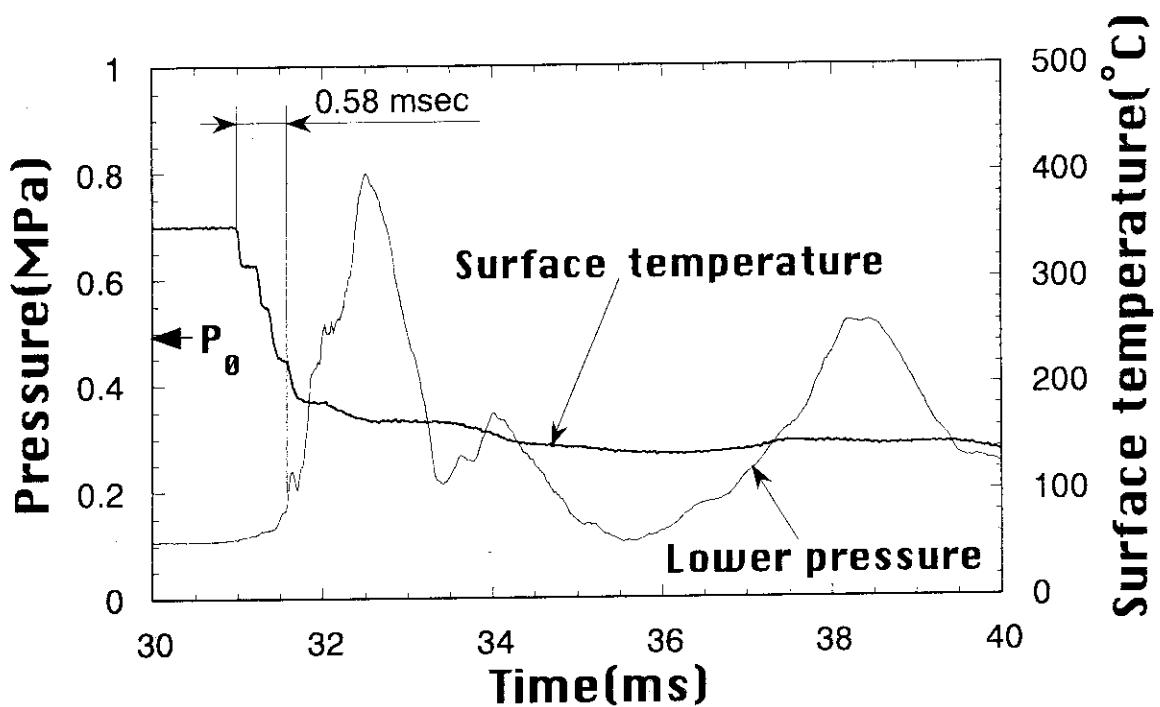


Fig. 4.3.1 温度信号と圧力信号の応答時間差

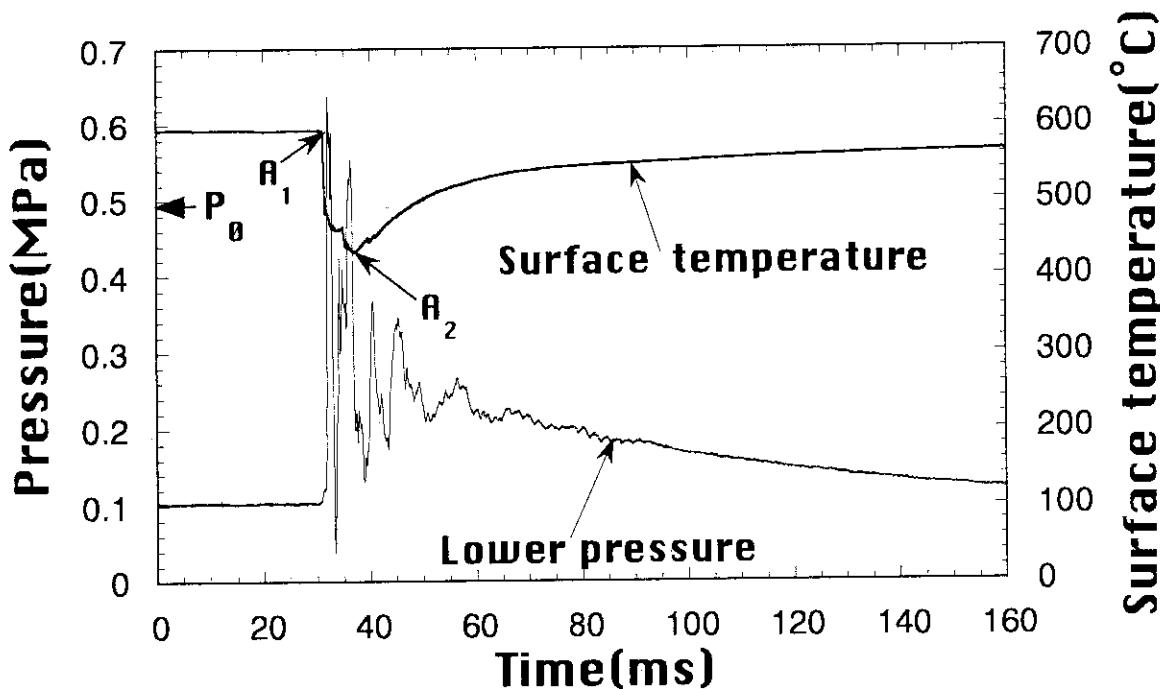


Fig. 4.3.2 膜沸騰が崩壊しなかった実験結果（ステンレス鋼球直径10mm）

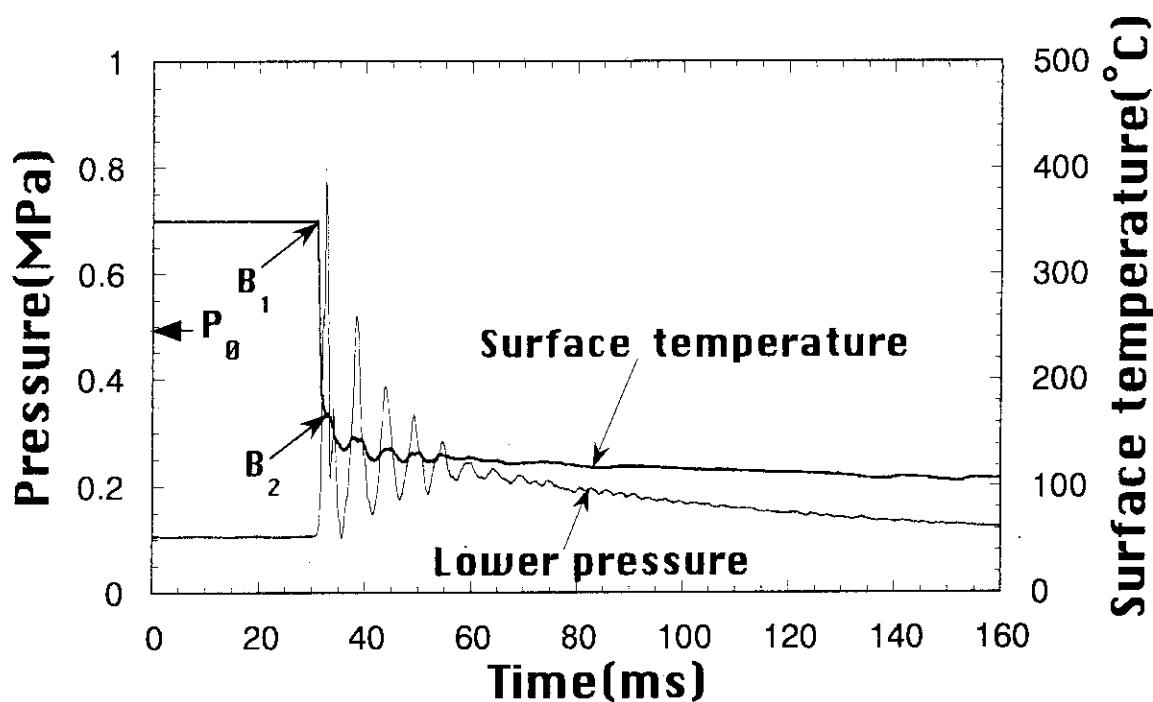


Fig. 4.3.3 膜沸騰が崩壊した実験結果（ステンレス鋼球直徑10mm）

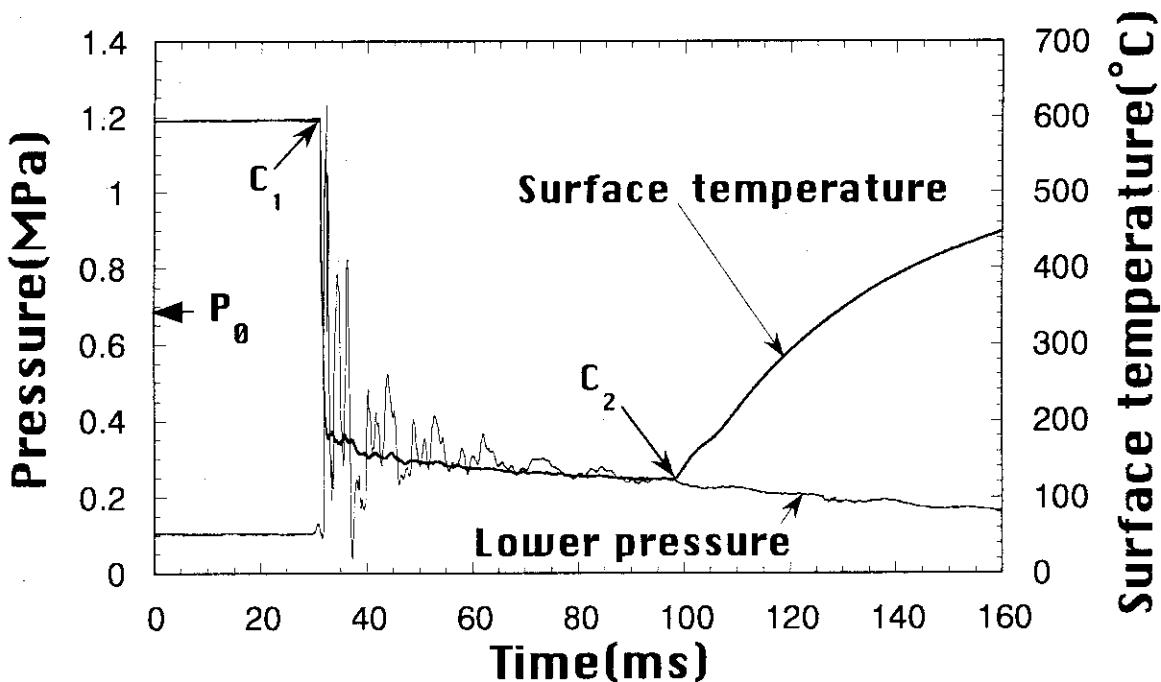


Fig. 4.3.4 膜沸騰が崩壊した後再発生した実験結果（ステンレス鋼球直徑10mm）

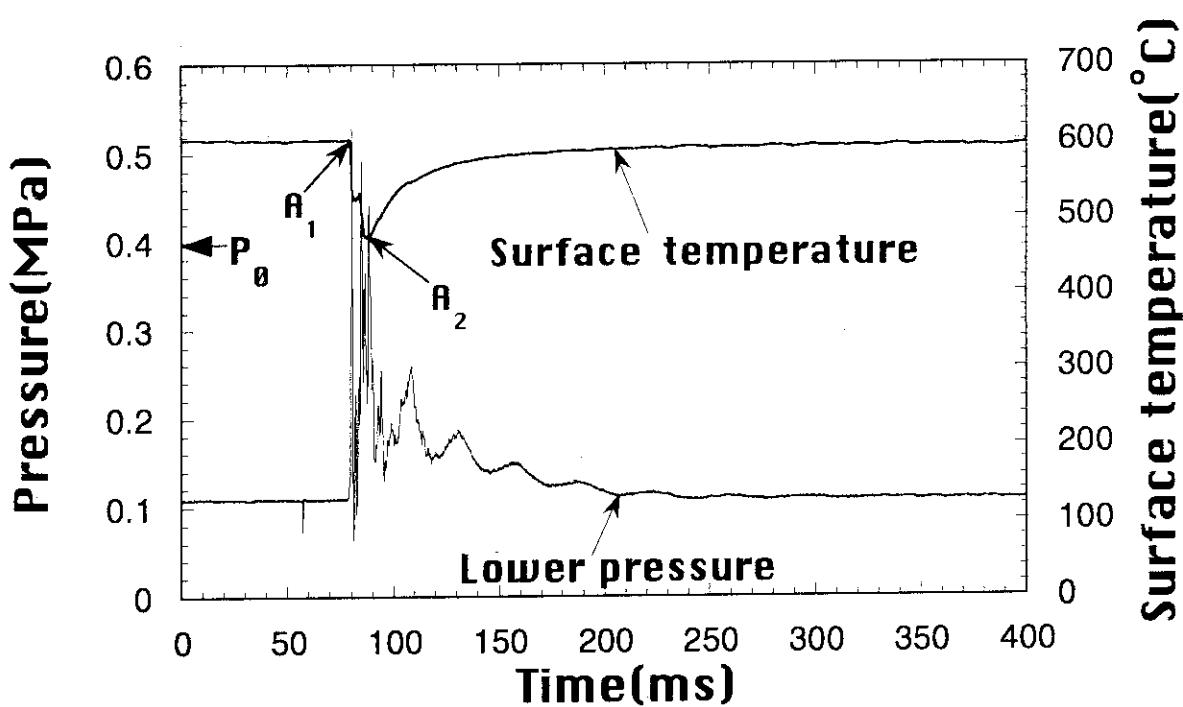


Fig. 4.4.1 膜沸騰が崩壊しなかった実験結果（ステンレス鋼球直径14.3mm）

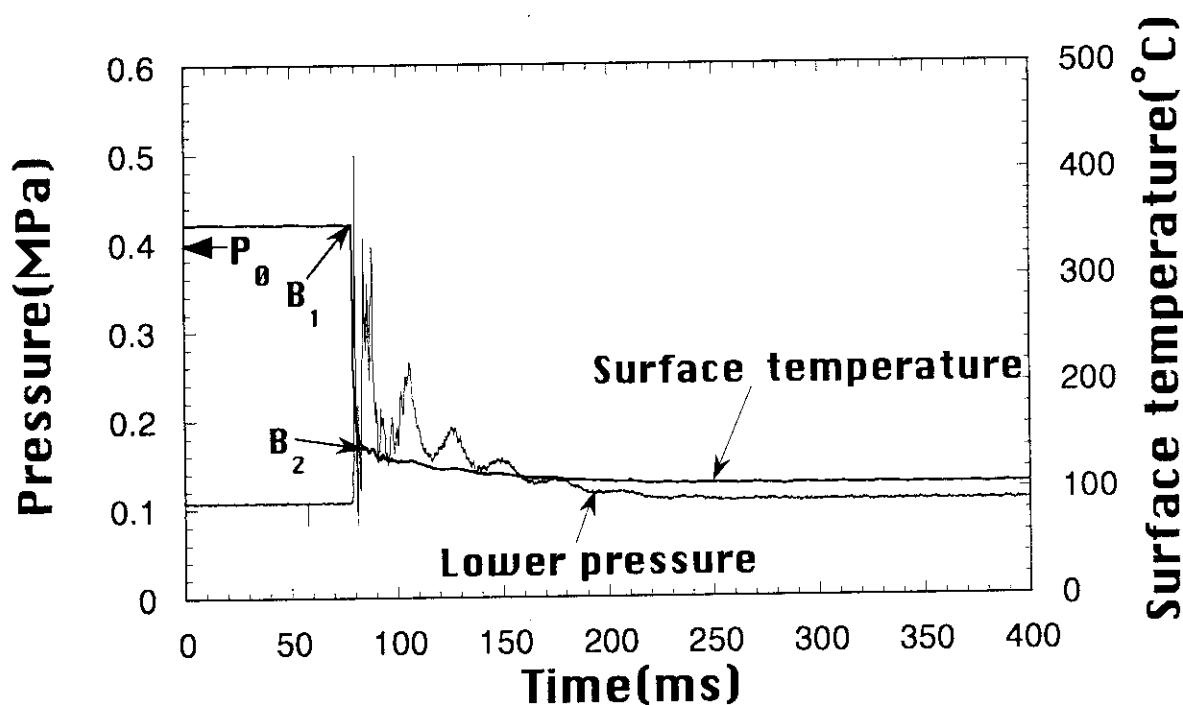


Fig. 4.4.2 膜沸騰が崩壊した実験結果（ステンレス鋼球直径14.3mm）

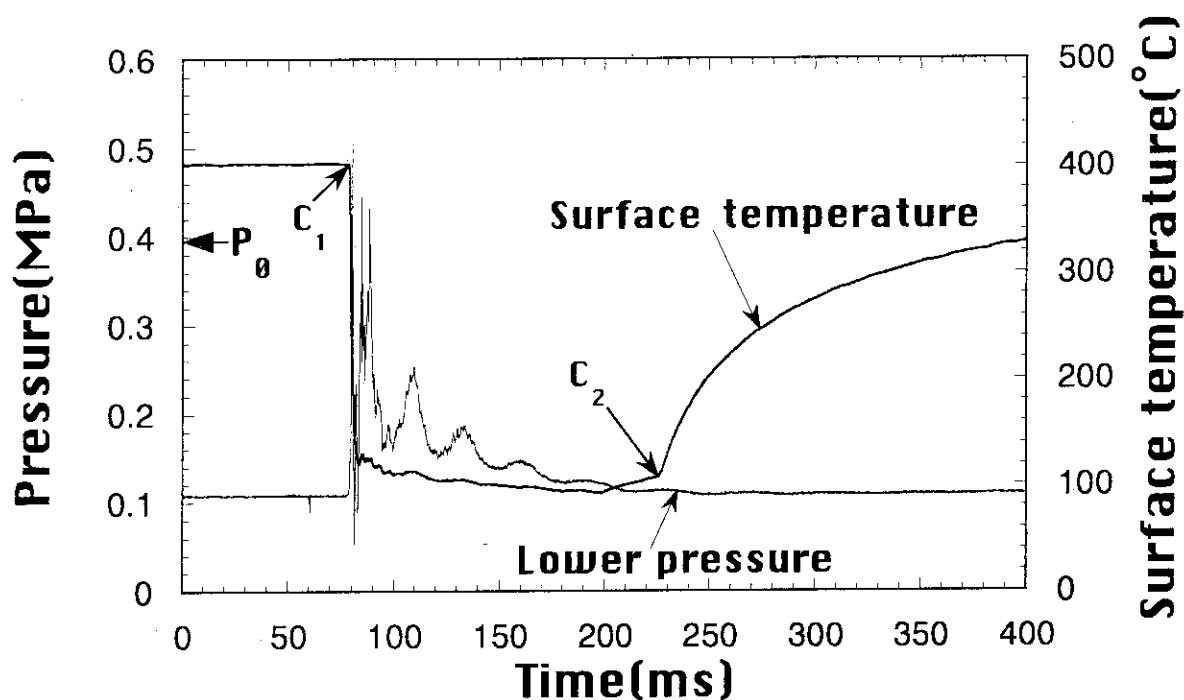


Fig. 4.4.3 膜沸騰が崩壊した後再発生した実験結果（ステンレス鋼球直徑14.3mm）

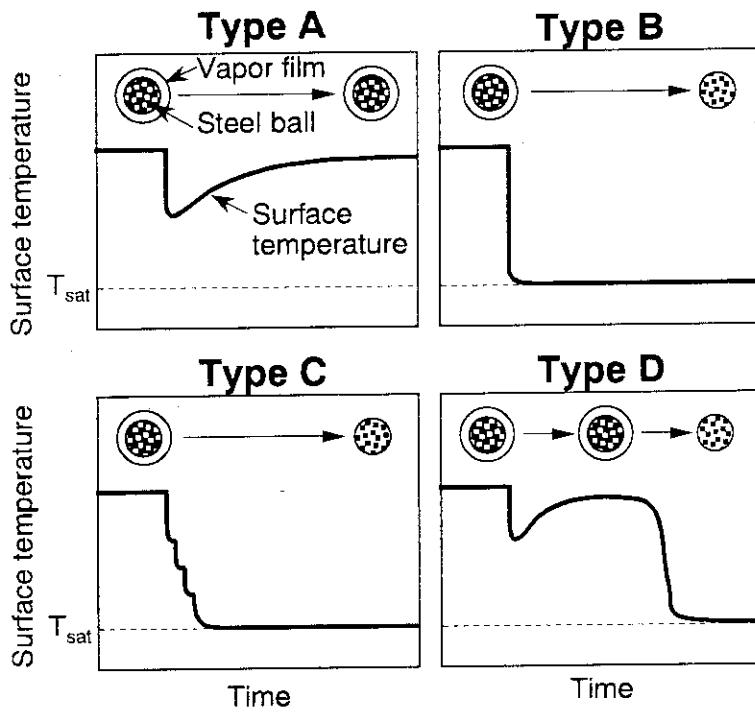


Fig. 4.5.1 炭素鋼球を用いた実験結果の分類定義

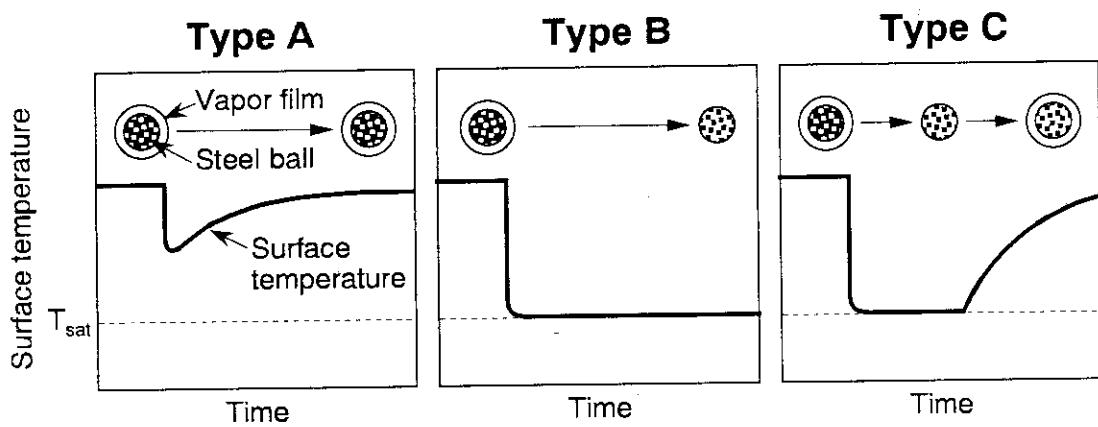


Fig. 4.5.2 ステンレス鋼球を用いた実験結果の分類定義

5 実験結果の考察

この章では、実験結果の伝熱的特性についての考察を行う。具体的には、鋼球からの流出熱量によって膜沸騰崩壊挙動を把握し、初期条件による各タイプの伝熱特性の違いについて検討することとする。

5.1 鋼球表面熱流束の計算

鋼球表面での熱流束を評価するために、鋼球表面温度の測定データを鋼球表面全体の代表値として用い、鋼球内部の温度分布を数値計算することにより鋼球表面の熱流束を算出した。計算は完全陰解差分法による非定常熱伝導の計算をUNIX上のFortranにより実行した。

熱伝導方程式にはEq. 5.1の各半径方向に対して均一な温度分布を持つ球の熱伝導方程式を用いた。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (5.1)$$

Eq. 5.1を完全陰解差分表示すると次式が得られる。

$$-\kappa\gamma \left(1 - \frac{1}{i-1} \right) T_{i-1}^{n+1} + (1 + 2\kappa\gamma) T_i^{n+1} - \kappa\gamma \left(1 + \frac{1}{i-1} \right) T_{i+1}^{n+1} = T_i^n \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (5.2)$$

ここで、 $\gamma = \Delta t / \Delta h^2$, $T_m = T_w$

また、各記号は以下に示す通りである。

κ	: 热拡散係数 [m ² /s]	Δt	: サンプリング時間間隔 [s]
Δh	: 半径方向の分割メッシュサイズ [m]	i	: ノード番号 [-]
n	: 時間番号 [-]	T	: 温度 [°C]
T_w	: 鋼球表面温度測定データ [°C]		

Eq. 5.2のm×m行列をガウスの消去法で解くことにより、鋼球内の半径方向の温度分布が求められる。そして次式から鋼球表面の温度勾配を求ることで鋼球表面の熱流束を求めることができる。

$$q = -\lambda \frac{T_m - T_{m-1}}{\Delta h} \quad (5.3)$$

ここで、 λ は熱伝導係数である。

計算例として、Fig. 4.3.2～Fig. 4.3.4に示した直径10mmのステンレス球の実験結果を用いて熱流束履歴を計算し、それをFig. 5.1～Fig. 5.3に示す。太線は熱流束、細線は鋼球表面温度を示す。どれも熱流束は鋼球表面温度が急激に下降する30msec付近でピークとなり、その後次第に減衰する結果となった。

5.2 放出熱量

Fig. 5.1～Fig. 5.3に示した様な熱流束履歴を時間積分することで、測定時間160msecの間にステンレス鋼球から放出された熱量を算出した。Fig. 5.4は30回行ったステンレス鋼球直径10mmの実験の放出熱量比と初期鋼球表面温度 T_0 との関係を示したものである。放出熱量比は次式により算出した。

$$Q_{rate} = \frac{Q}{Q_0} = \frac{S \int_0^{0.16} q dt}{c \rho V (T_i - T_{sat})} \quad (5.4)$$

各記号の以下に示す通りである。

Q_{rate}	: 流出熱量比 [-]	Q_0	: 鋼球の持つ全熱量 [J]
Q	: 160msec間の流出熱量 [J]	q	: 熱流束 [W/m^2]
c	: 比熱 [J/kgK]	ρ	: 密度 [kg/m^3]
V	: 球の体積 [m^3]	S	: 球の表面積 [m^2]
T_i	: 初期鋼球表面温度 [$^\circ\text{C}$]	T_{sat}	: 水の飽和温度 [$^\circ\text{C}$]

Fig. 5.4から全ての実験結果は2つの線上と1つの領域に分類できることが確認された。膜沸騰が崩壊しなかった実験結果Type Aは図中右下の領域に集中した。また、膜沸騰が崩壊した実験結果Type Bは全て約40%の熱流出を示し、膜沸騰が崩壊後再発した実験結果Type Cは約25%の熱流出を示した。図中の破線は温度履歴がFig. 5.6に示す様なヘビサイト関数であった場合の流出熱量比を算出したものである。つまりこの破線は鋼球が可能な限り急激に水の飽和温度に冷却されたときに流出する熱量を示している。Type Bの実験結果はFig. 5.6と温度履歴が類似するため、すべてこの破線付近に集中したものと考えられる。

ステンレス鋼球直径14.3mmの放出熱量比と初期鋼球表面温度との関係をFig. 5.5に示す。図中の破線はFig. 5.6に示す様な温度履歴から流出熱量比を算出したものである。10mmの場合と同様に、実験結果Type Bはこの破線上に分布した。

5.3 沸騰様式

各Typeの沸騰様式を判断するため、沸騰曲線上にFig. 5.1～Fig. 5.3に示したステンレス鋼球を

用いた実験結果の熱流束履歴を表した結果をそれぞれをFig. 5.7～Fig. 5.9に示す。図中の理論沸騰曲線はJens - Lottes⁽¹²⁾の核沸騰平均熱流束の式 (Eq. 5.5)、Kutateladze⁽¹³⁾のバーンアウト熱流束の式 (Eq. 5.6)、Zuberら⁽¹⁴⁾の膜沸騰最小熱流束の式 (Eq. 5.7)、Bromley⁽¹⁵⁾の膜沸騰平均熱流束の式 (Eq. 5.8) の4つの近似式で構成される。この理論沸騰曲線は大気圧が0.1MPaと1.0MPaの場合の2曲線を表した。

$$q_{NU} = 2.56 [T_w - T_{sat}]^4 \exp(p / 17.3) \quad (5.5)$$

$$q_{BO} = 0.16 L \rho_v \left[\frac{\sigma g (\rho_L - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{1/4} \quad (5.6)$$

$$q_{min} = 0.157 L \rho_v \left[\frac{\sigma g (\rho_L - \rho_v)}{\rho_L^2} \right]^{1/4} \quad (5.7)$$

$$q_{FI} = 0.62 \left[\frac{g (\rho_L - \rho_v) D^3 \Pr_v \left\{ L + 0.5 C_{pv} (T_w - T_{sat}) \right\}}{C_{pv} \rho_v (T_w - T_{sat}) v_g^2} \right]^{1/4} \quad (5.8)$$

各記号は以下に示す通りである。

T	: 温度 [°C]	p	: 工業気圧 [kgf/cm ²]
L	: 蒸発潜熱 [J/kg]	g	: 重力加速度 [m/s ²]
D	: 鋼球直径 [m]	ρ	: 密度 [kg/m ³]
σ	: 表面張力 [N/m]	v	: 動粘係数 [m ² /s]
C_p	: 比熱 [J/kgK]	\Pr	: プラントル数 [-]

各添字は以下に示す通りである。

w	: 表面	sat	: 飽和
V	: 蒸気	L	: 液体

Type Aの場合、熱流束は膜沸騰領域の10MW/m²オーダーまで急激に増加し、その後膜沸騰領域内で、再び減少する。Type Bの場合、Type A同様に膜沸騰領域の10MW/m²オーダーまで増加し、その後次第に1MW/m²オーダーに減少するとともに遷移沸騰領域あるいは核沸騰領域にまで過熱度が低下するものと思われる。またType Cの場合、Type B同様に膜沸騰領域の10MW/m²オーダーまで増加し、次第に1MW/m²オーダーに減少するが、その後再び膜沸騰領域内へ戻ることが分かる。

本実験結果から得られた熱流束が従来提案されている理論的沸騰曲線上で変化しない理由は、

従来の沸騰曲線が定常実験データに基づいて開発されているのに対して、本実験は圧力や鋼球表面温度が過渡的変化しているためと考えられる。特にType AとType Bの過渡変化は膜沸騰領域から開始し、定常実験から得られる限界熱流束以上に増加しているが、これは圧力波による強制的な膜沸騰の崩壊により達成されたものであると理解することができる。

5.4 初期条件による実験結果の分類

全実験データを初期条件である初期設定衝撃波圧力と初期設定表面温度のマトリックス上に整理し、実験結果の分類をFig. 4.5.1とFig. 4.5.2に示した膜沸騰崩壊挙動の分類定義に基づいて行った。

5.4.1 炭素鋼球直径10mmの場合

Fig. 5.10に72回行った直径10mmの実験初期条件を初期設定衝撃波圧力 P_0 と初期設定表面温度 T_0 のマトリックス上に示す。このマトリックス上にはFig. 4.5.1に示した分類定義に基づくType A、Type B、Type CならびにType Dをそれぞれ○、□、◇ならびに△の記号で表した。

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く、 P_0 が低いほど、また T_0 が高いほど膜沸騰は崩壊しにくいと考えられる。よって、膜沸騰が崩壊しなかった実験結果Type Aは図中の右下側に集中し、逆に膜沸騰が崩壊した実験結果Type Bは左上側に集中するといった定性的な傾向が得られた。しかし、Type A、Type Bが互いに混在してしまう領域が存在し、その境界は現在のところ必ずしも明確ではなかった。数回の温度降下で水の飽和温度にまで達した実験結果Type Cは全体的に分散しているが、全体の傾向としては図中の右下側に集中していることが分かった。圧力波の影響を受けずに膜沸騰が崩壊した実験結果Type DはType A、Type Bが混在する領域を中心にして分散した。Type AとType Dと判断される実験結果は明らかに膜沸騰が崩壊しなかった実験結果であるが、段階的に表面温度が水の飽和温度に達し、膜沸騰が崩壊した実験結果であるType Cもまた図中の右下側に集中して分散していることから、Type AとType Bに属する実験結果とすることが適切である。よって、熱的デトネーションモデルに基づく蒸気爆発解析に今回の実験で得られた膜沸騰崩壊挙動分類マップ図を利用する場合、膜沸騰が崩壊しなかった実験結果として、一回目の圧力波の圧縮膨張過程で膜沸騰が崩壊しなかった実験結果Type AとType CならびにType Dは同一の分類領域に属するものと見なすことが適切であると思われる。

5.4.2 炭素鋼球直径15mmの場合

Fig. 5.11に52回行った直径15mmの実験初期条件を初期設定衝撃波圧力 P_0 と初期設定表面温度 T_0 のマトリックス上に示す。このマトリックス上にはFig. 4.5.1に示した分類定義に基づくType A、Type B、Type CならびにType Dをそれぞれ○、□、◇ならびに△の記号で表した。

上記の5.4.1節と同様に、Type Aについては、図中の右下側に集中するといった定性的な傾向を示した。Type Bについては、今回の実験で2回しか確認できなかつたが、やはり図中の左上側に存在し、定性的な傾向を示していた。Type Cは初期温度が650°C以下の時に確認され、図中の左側に分散することが分かった。Type Dは P_0 、 T_0 が共に高い場合、または P_0 、 T_0 が共に低い場合

にも確認され、図中を斜めに横切る様に分散した。5.4.1節と同様に、熱的デトネーションモデルに基づく蒸気爆発解析に今回の実験で得られた膜沸騰崩壊挙動分類マップ図を利用する場合、膜沸騰が崩壊しなかった実験結果として、一回目の圧力波の圧縮膨張過程で膜沸騰が崩壊しなかった実験結果Type AとType CならびにType Dは同一の分類領域に属するものと見なすことが適切であると思われる。

5.4.3 ステンレス鋼球直径10mmの場合

Fig. 5.12に30回行った直径10mmの実験初期条件を初期設定衝撃波圧力 P_0 と初期設定表面温度 T_0 のマトリックス上に示す。このマトリックス上にはFig. 4.5.2に示した分類定義に基づくType A、Type BならびにType Cをそれぞれ○、□ならびに◇の記号で表した。

定性的に、初期設定衝撃波圧力 P_0 が高く、初期設定表面温度 T_0 が低い条件下で膜沸騰は崩壊しやすく、逆に初期設定衝撃波圧力 P_0 が低く、初期設定表面温度 T_0 が高い条件下で膜沸騰は崩壊しやすい傾向を示すと思われる。事実、Fig. 5.12に示した実験結果の分類もこの定性的傾向を示す結果となった。膜沸騰が崩壊しなかった実験結果Type Aは初期設定衝撃波圧力 P_0 が低く、初期設定表面温度 T_0 が高い条件である図中右下側に分布し、膜沸騰が崩壊した実験結果Type Bは初期設定衝撃波圧力 P_0 が高く、初期設定表面温度 T_0 が低い条件である図中左上側に分布していることが分かった。また、膜沸騰が崩壊した後再発生した実験結果Type CはType A領域とType B領域の中間に位置していることが分かった。よって先に述べた定性的傾向を非常によく表す結果となった。

5.4.4 ステンレス鋼球直径14.3mmの場合

Fig. 5.13に30回行った直径14.3mmの実験初期条件を初期設定衝撃波圧力 P_0 と初期設定表面温度 T_0 のマトリックス上に示す。直径10mmの場合と同様に、このマトリックス上にはFig. 4.5.2に示した分類定義に基づくType A、Type BならびにType Cをそれぞれ○、□ならびに◇の記号で表した。

上記の5.4.3節と同様に、定性的に、初期設定衝撃波圧力 P_0 が高く、初期設定表面温度 T_0 が低い条件下で膜沸騰は崩壊しやすく、逆に初期設定衝撃波圧力 P_0 が低く、初期設定表面温度 T_0 が高い条件下で膜沸騰は崩壊しやすい傾向を示すと思われる。Fig. 5.13に示した実験結果の分類もこの定性的傾向を示す結果となった。膜沸騰が崩壊しなかった実験結果Type Aは初期設定衝撃波圧力 P_0 が低く、初期設定表面温度 T_0 が高い条件である図中右下側に分布し、膜沸騰が崩壊した実験結果Type Bは初期設定衝撃波圧力 P_0 が高く、初期設定表面温度 T_0 が低い条件である図中左上側に分布していることが分かった。また、膜沸騰が崩壊した後再発生した実験結果Type CはType A領域とType B領域の中間に位置していることが分かった。よってステンレス鋼球直径10mmの場合と同様に先に述べた定性的傾向を非常によく表す結果となった。ただし、ステンレス鋼球直径10mmの場合と比較すると、Type A領域はあまり変化がみられないが、Type B領域は著しく狭くなり、代わりにType C領域が広くなることが分かる。

5.5 膜沸騰崩壊挙動の考察

炭素鋼球の分類結果Fig. 5.10、Fig. 5.11とステンレス鋼球の分類結果Fig. 5.12、Fig. 5.13とを比較すると、ステンレス鋼球の分類結果の方がより明確に膜沸騰崩壊挙動を分類できていることが分かる。炭素鋼球の分類結果の場合、各Typeの領域が重なり、初期条件による膜沸騰崩壊挙動を一意的に定めることができなかった。これは炭素鋼球表面の酸化が大きく影響しているものと考えられる。強耐食のステンレス鋼球を使用することで実験結果の信頼性を向上させた結果、Fig. 5.12やFig. 5.13の様に、膜沸騰崩壊挙動を初期条件によって一意的に分類することができるマップを作成することができた。以下に、ステンレス鋼球を用いた実験の分類結果についての考察を述べる。

ステンレス鋼球の分類結果Fig. 5.12、Fig. 5.13では、Type AとType Cの境界線は膜沸騰崩壊の有無を区別し、Type BとType Cの境界線は膜沸騰の再発生の有無を区別している。Type Aは終始膜沸騰状態を維持している実験結果であるため、蒸気と水との熱伝達が支配的要素を持つと理解できる。よって鋼球の熱的特性に関係なく、蒸気の温度、蒸気膜厚ならびに水のサブクール度に支配されるため、鋼球直径10mmと14.3mmのType A領域はほぼ同じ範囲となったものと考えられる。またType BとType Cは膜沸騰が一旦崩壊しているため、鋼球表面と水との熱伝達が支配的要素を持つと理解できる。従って、膜沸騰の再形成に関しては鋼球と水の熱的特性に直接関係し、鋼球直径、水のサブクール度に大きく支配される。そのため、より球直径の大きい14.4mmの場合の方が鋼球の持つ熱容量が高いために膜沸騰が再発生しやすい結果となりType C領域が広くなったものと考えられる。この様な鋼球直径が大きくなることで膜沸騰が崩壊し難くなる定的な傾向は、炭素鋼球を用いた実験においても確認された。

熱的デトネーションモデルに基づく蒸気爆発解析に今回の実験で得られた膜沸騰崩壊挙動分類マップ図を利用する場合、膜沸騰が崩壊した実験結果としてType BとType Cは同一の分類領域に属するものと見なすことが適切であると思われる。よって、蒸気爆発のトリガリング条件である膜沸騰の崩壊条件として、Type AとType Cの境界線をより明確にすることが今後の課題である。今回の実験では実験回数が少なかったため、この境界線の定式化までに至らなかったが、膜沸騰を崩壊させるのに必要となる圧力が初期の鋼球温度に強く依存していることは明白である。今回このType AとType Cの境界線を直線で表したが、実際には初期設定表面温度が高くなるにつれてこの境界線の傾きは緩やかになると考えられる。なぜなら、蒸気爆発が起こりうる条件下では高温粒子の温度は融点以上であるので、この境界線をそのまま適用すれば、相当に強い圧力波が通過しない限り膜沸騰の崩壊はあり得ないことになるからである。

以下の課題を克服することにより境界線の定量化が可能となると期待される。

- (1) より高温の鋼球を使用して実験マトリックスの範囲を拡大する。
- (2) 蒸気膜厚、サブクール度、テスト部内圧力等のパラメータを追加する。
- (3) ステンレス鋼球以外の材料や水以外の流体を使用した実験を追加する。

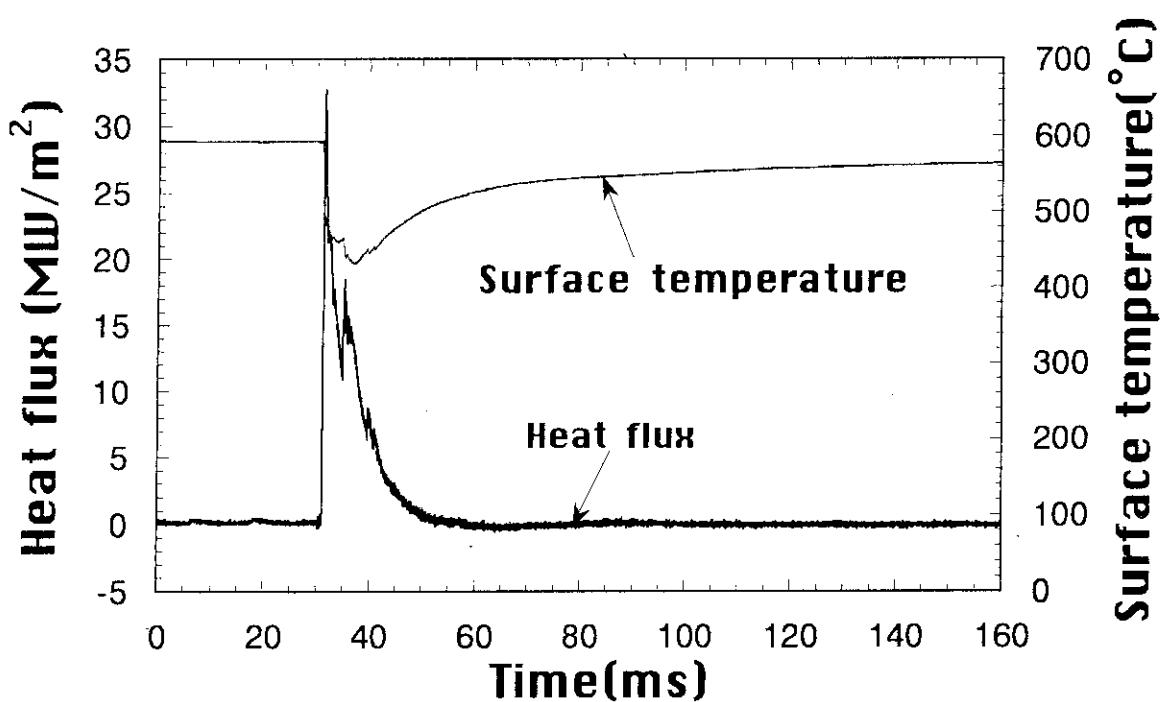


Fig. 5.1 計算により得られた熱流束履歴(ステンレス鋼球直径10mm、Type A)

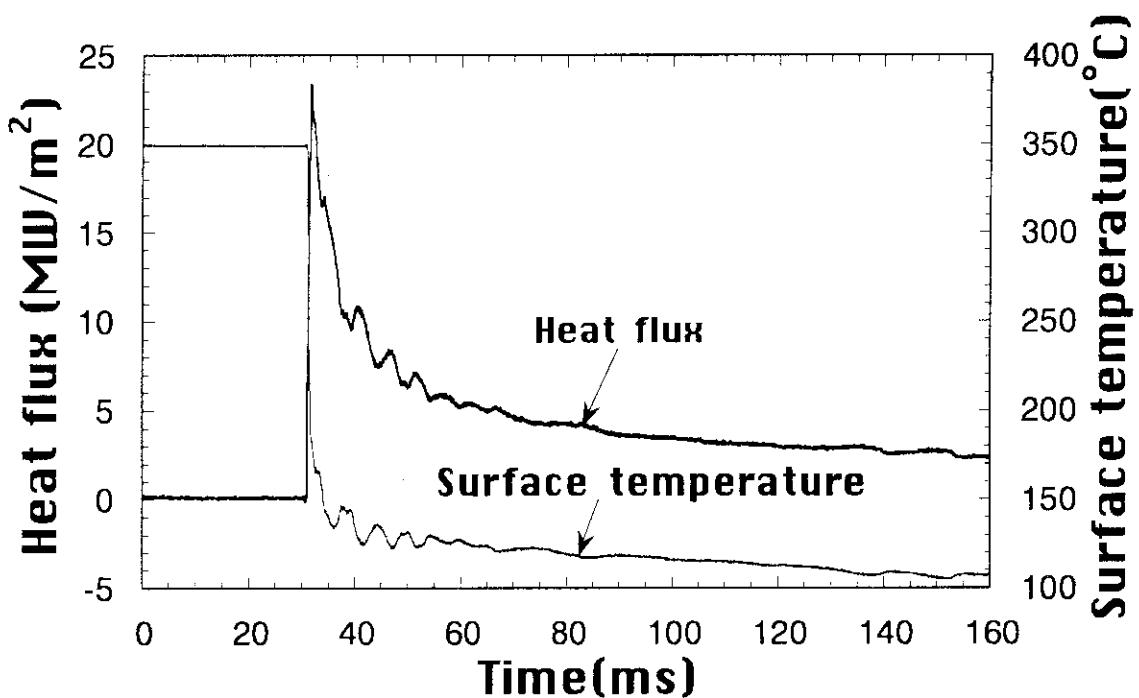


Fig. 5.2 計算により得られた熱流束履歴(ステンレス鋼球直径10mm、Type B)

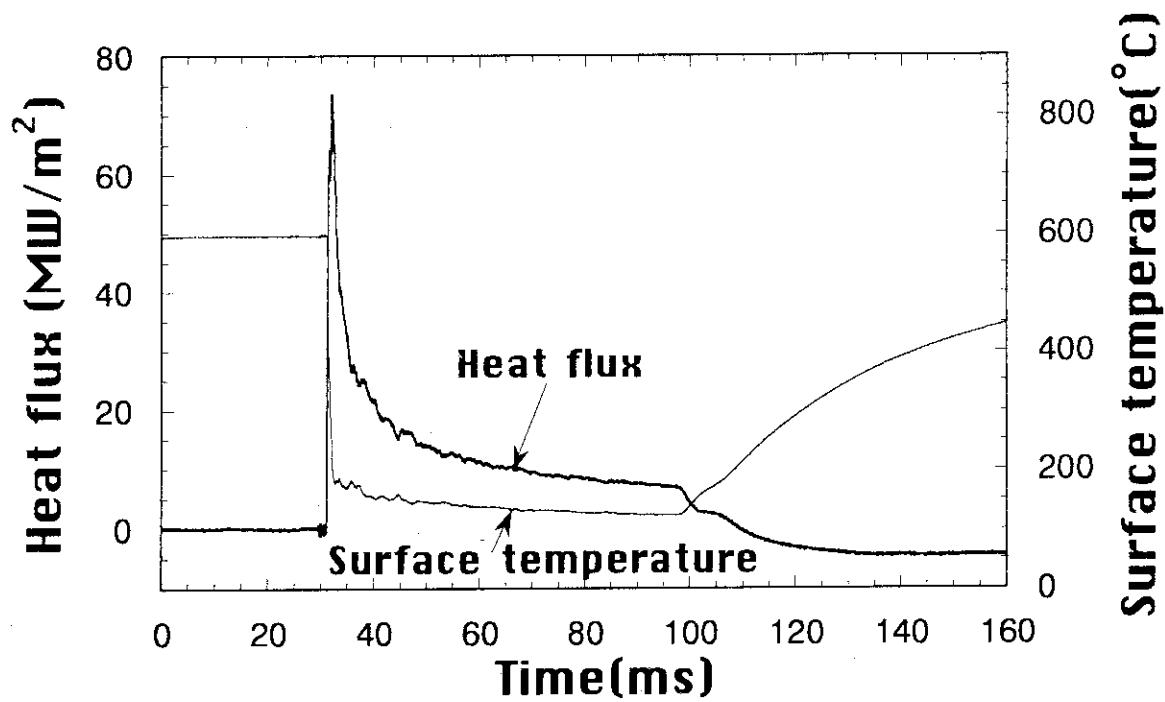


Fig. 5.3 計算により得られた熱流束履歴(ステンレス鋼球直徑10mm、Type C)

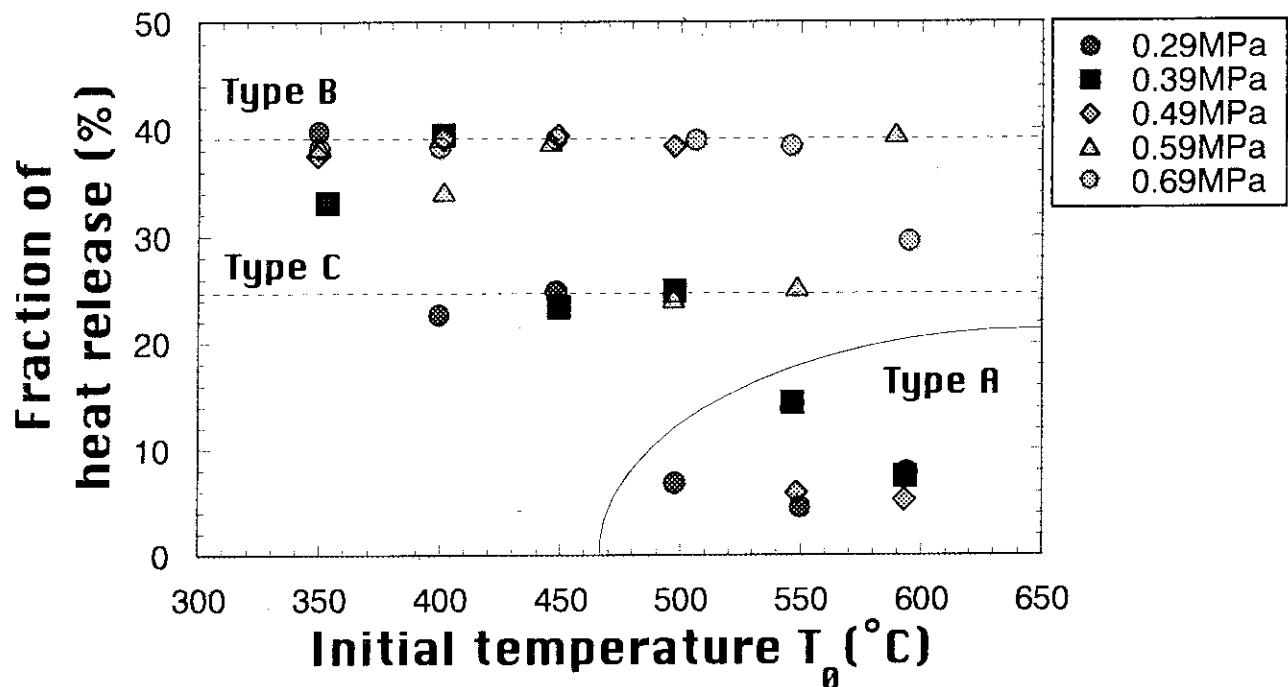


Fig. 5.4 放出熱量と初期鋼球表面温度の関係(ステンレス鋼球直径10mm)

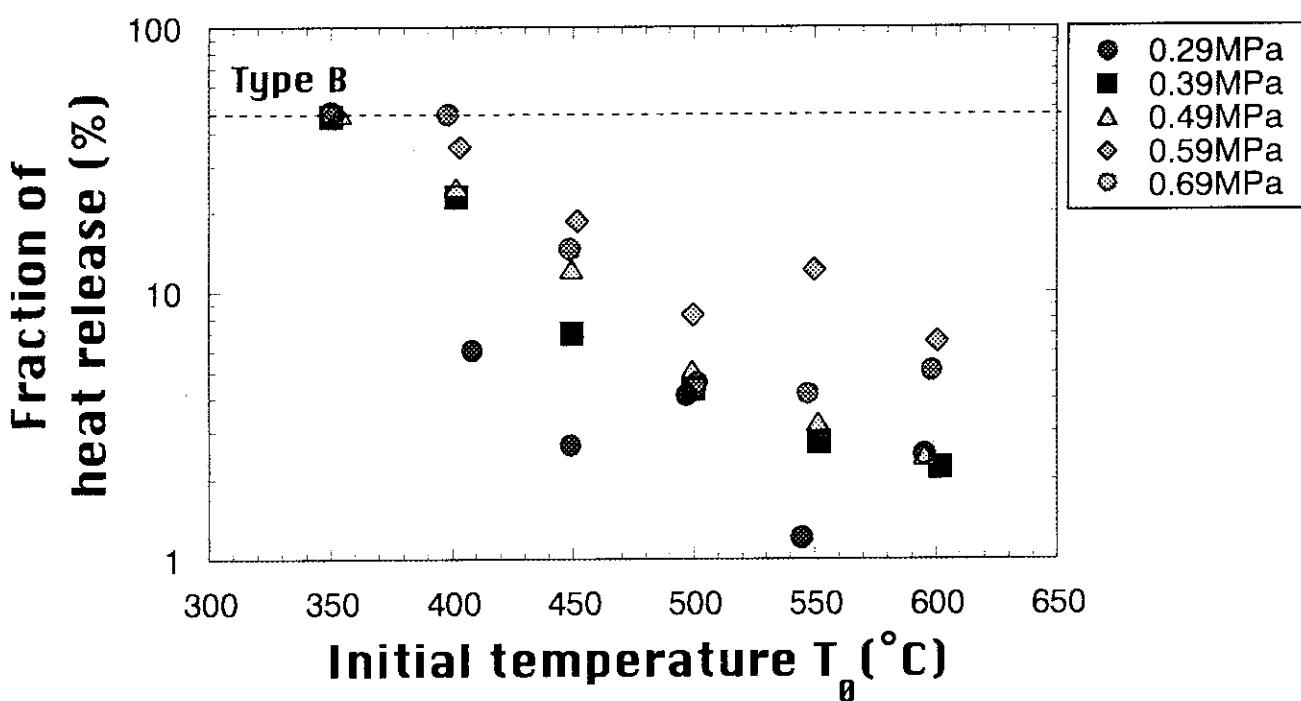


Fig. 5.5 放出熱量と初期鋼球表面温度の関係(ステンレス鋼球直径14.3mm)

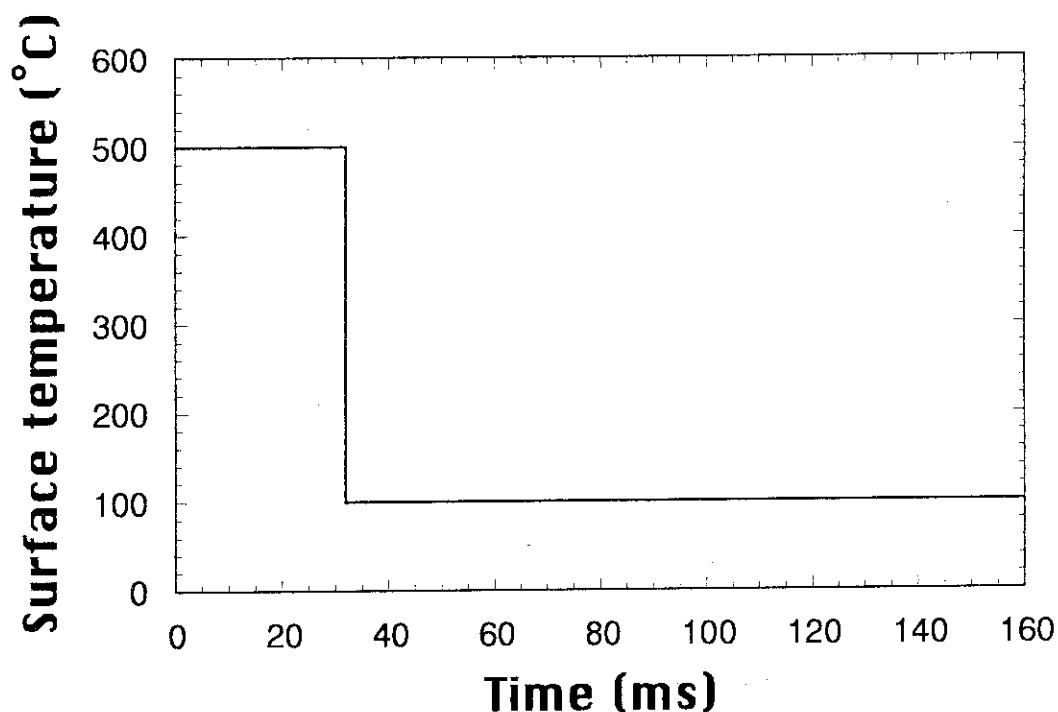


Fig. 5.6 可能な限り急激に冷却した場合の鋼球表面温度履歴

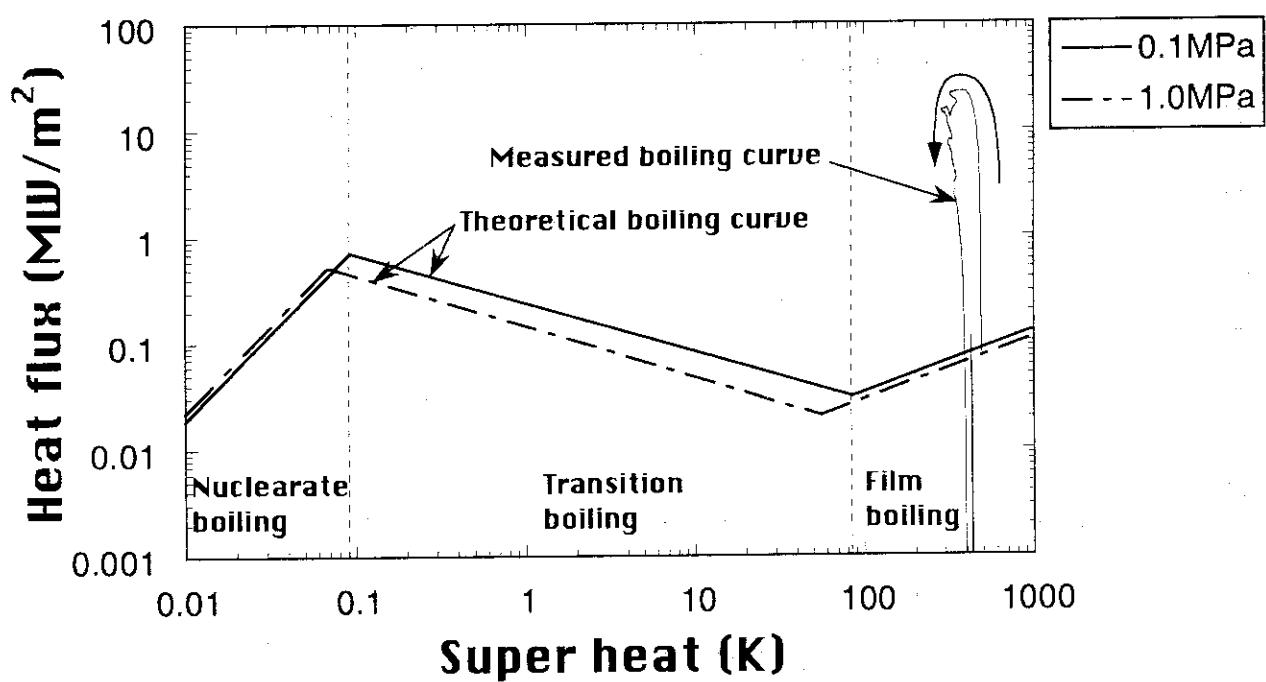


Fig. 5.7 沸騰曲線上における実験結果(ステンレス鋼球直径10mm、Type A)

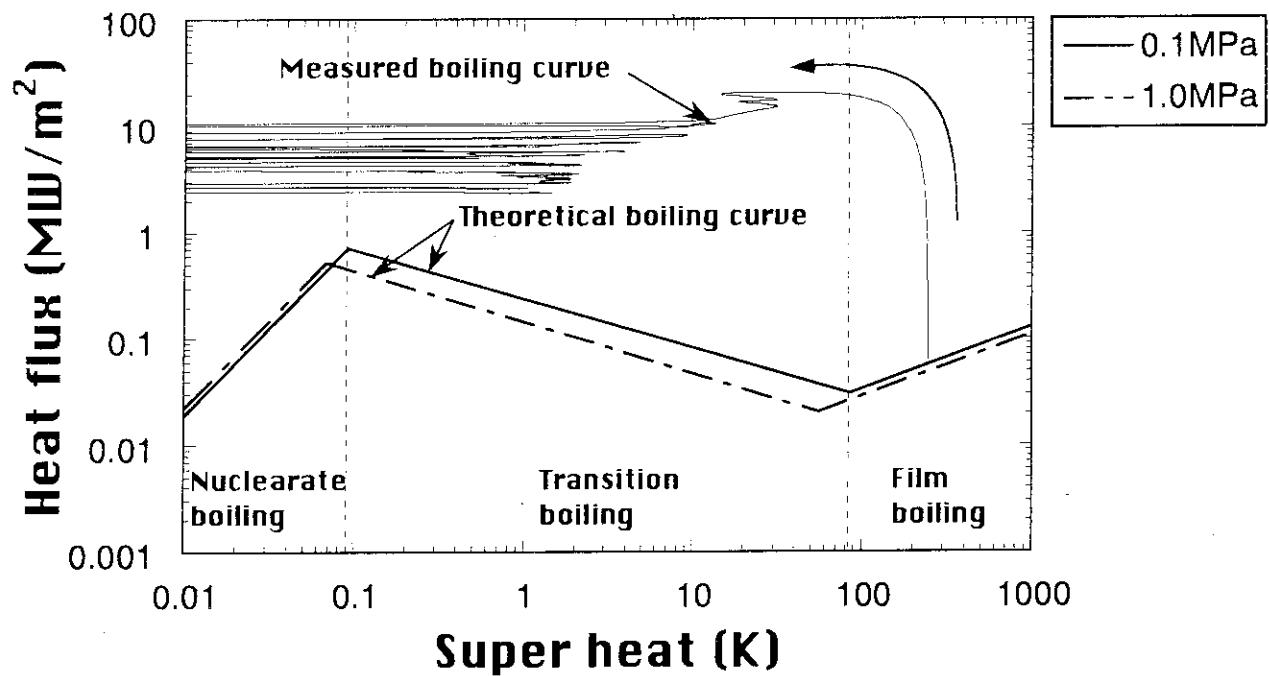


Fig. 5.8 沸騰曲線上における実験結果(ステンレス鋼球直径10mm、Type B)

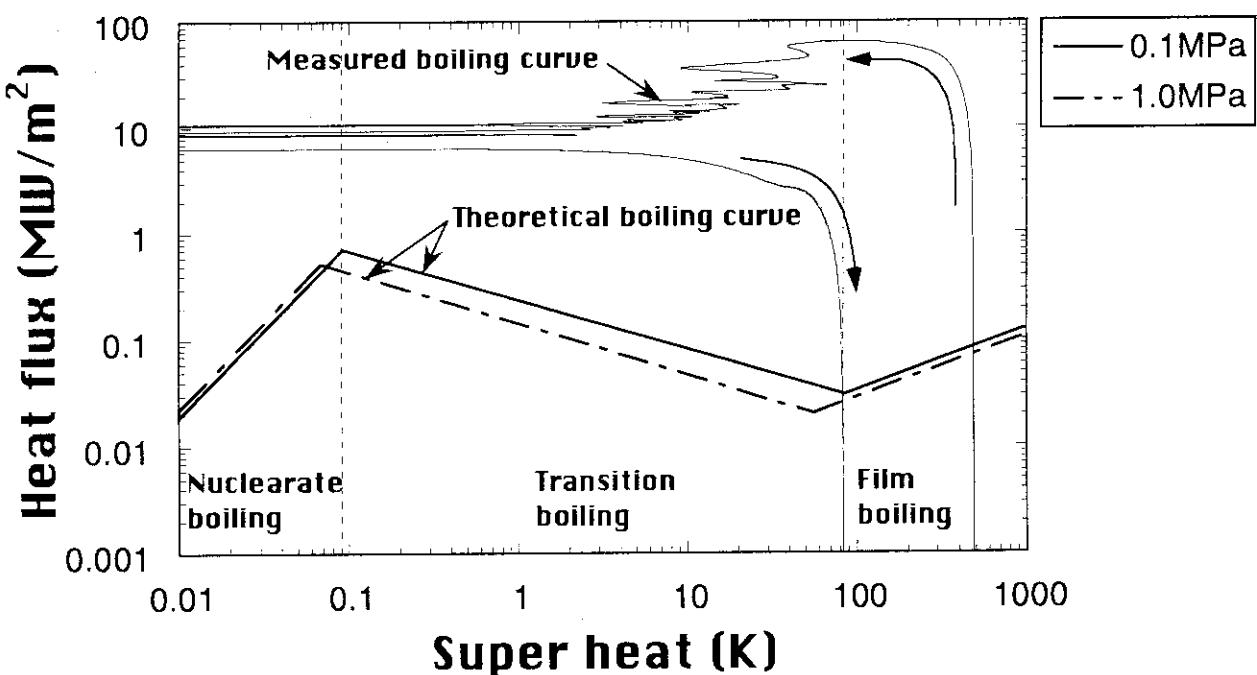


Fig. 5.9 沸騰曲線上における実験結果(ステンレス鋼球直径10mm、Type C)

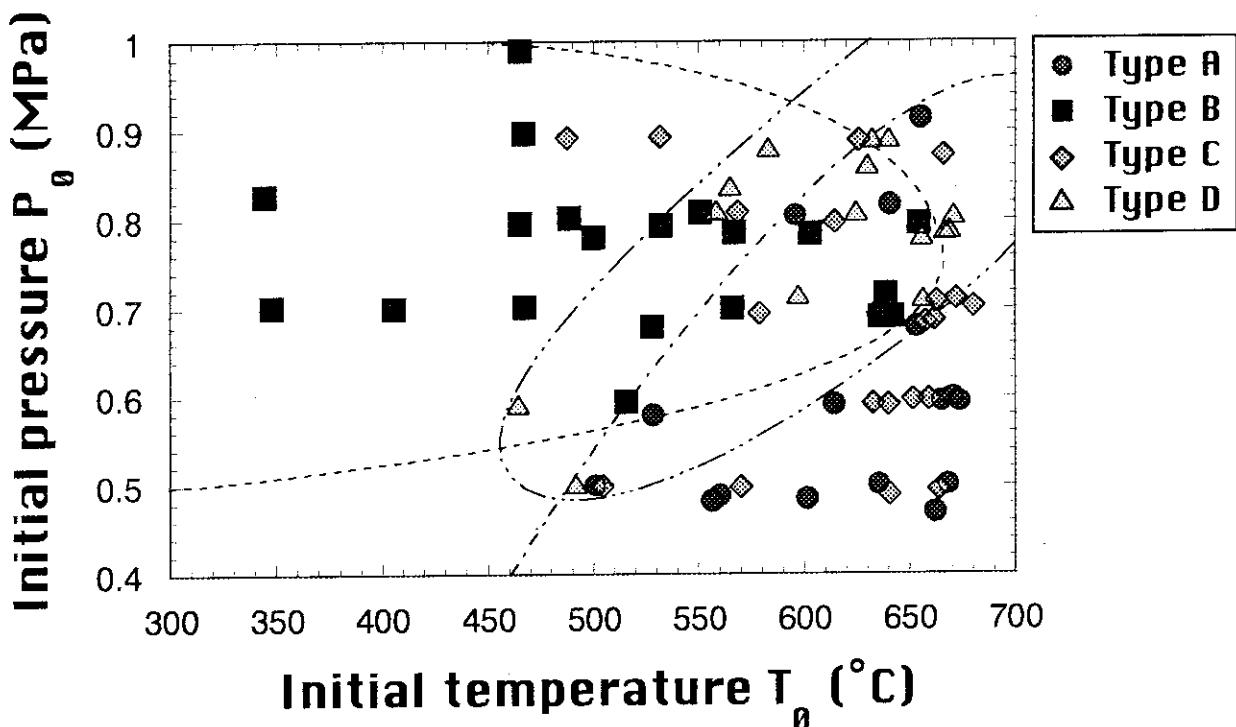


Fig. 5.10 初期条件による実験結果の分類（炭素鋼球直径10mm）

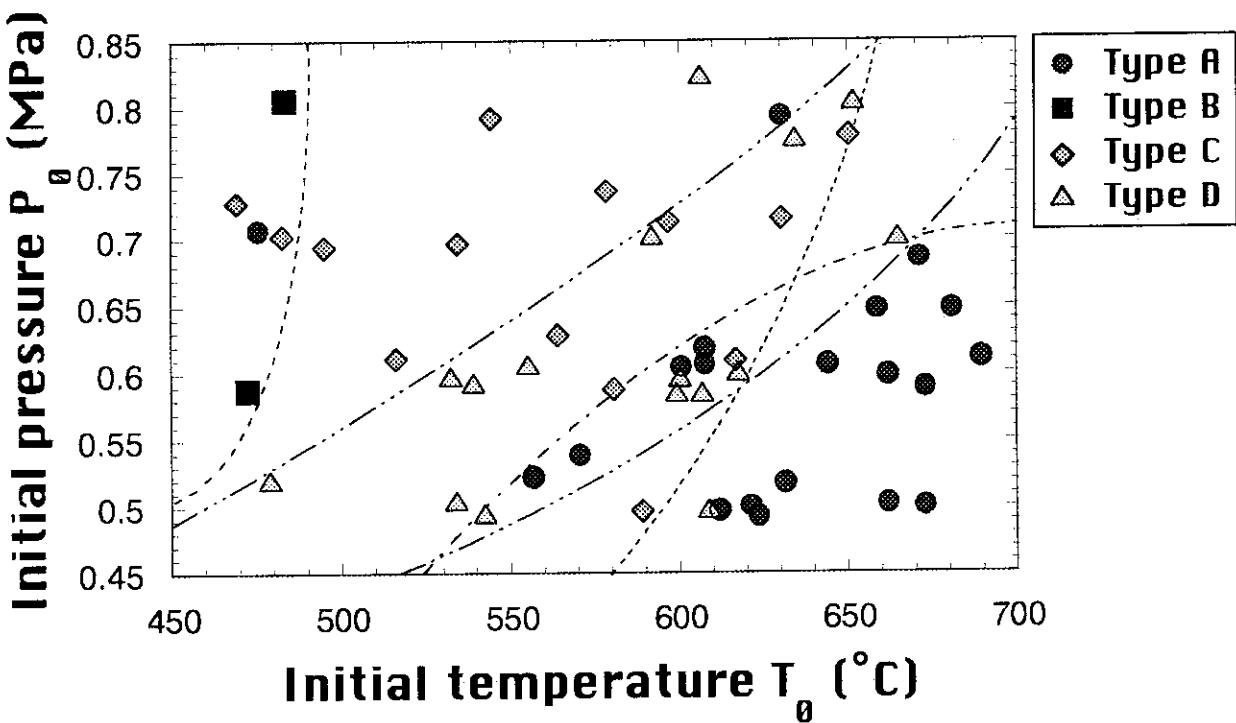


Fig. 5.11 初期条件による実験結果の分類（炭素鋼球直径15mm）

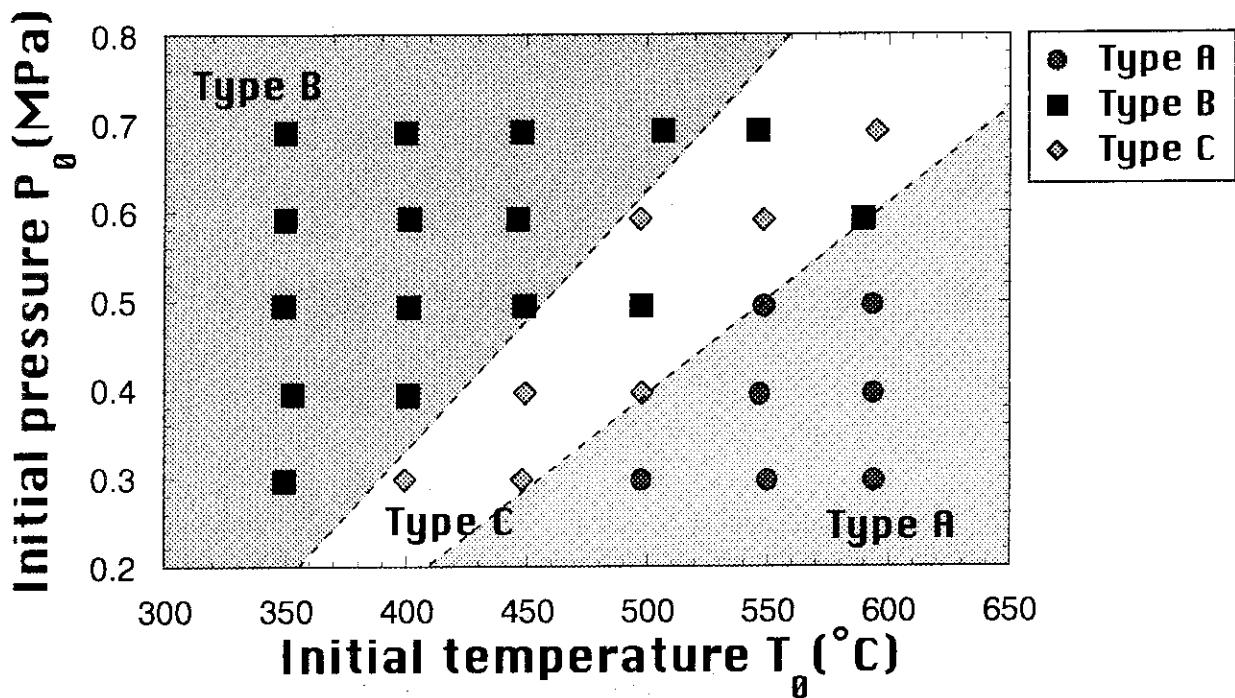


Fig. 5.12 初期条件による実験結果の分類(ステンレス鋼球直径10mm)

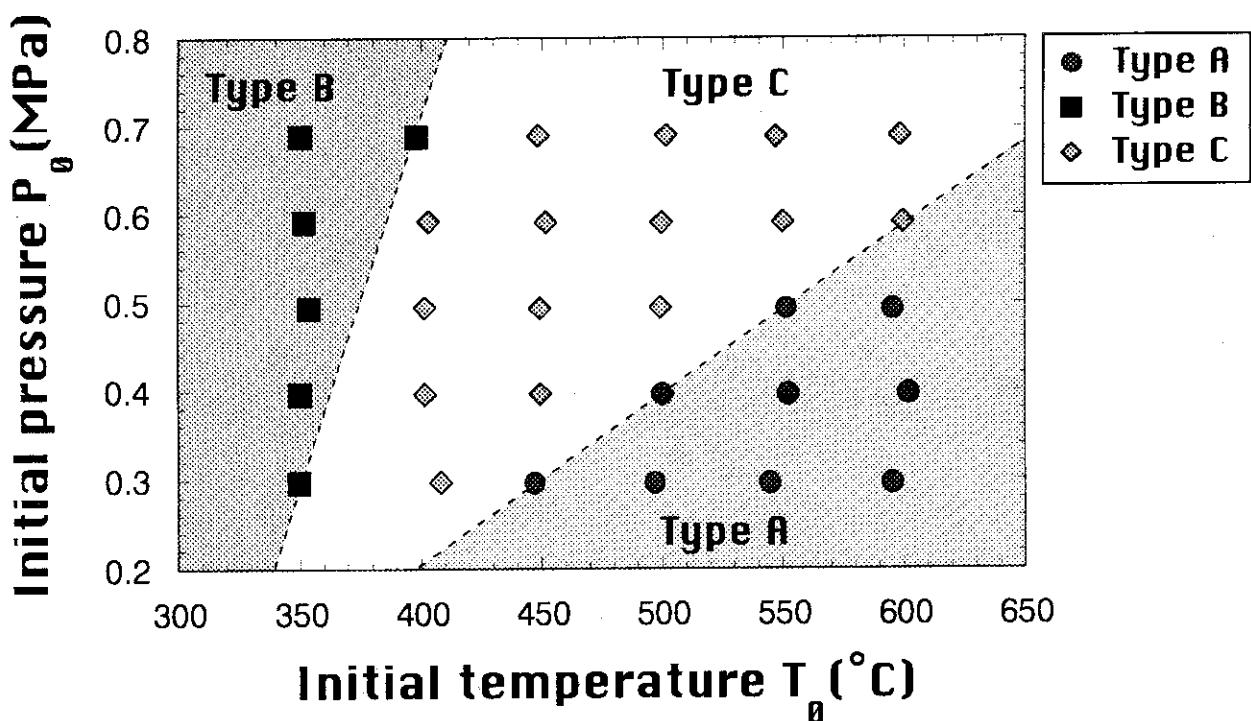


Fig. 5.13 初期条件による実験結果の分類(ステンレス鋼球直径14.3mm)

6 結 言

本研究においては、熱的デトネーションモデルによる蒸気爆発シミュレーション解析の初期条件である膜沸騰崩壊条件を把握するために、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実験的に調べた。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 热的デトネーションモデルにおける各素過程間の移行条件が計算過程の進展にどの様な影響を与えるかを調べるために、熱的デトネーションモデルに基づく蒸気爆発シミュレーション解析を行った。その結果、膜沸騰崩壊圧力の設定値が蒸気爆発の発生の有無に極めて重大な影響を及ぼすことを明らかにした。
- (2) 高周波加熱装置によって加熱された1個の鋼球を冠水させることで形成された膜沸騰に衝撃波発生装置から発生される圧力波を通過させ、膜沸騰の崩壊特性を実験的に調べることとし、そのための実験装置を製作した。製作した装置を使用して、10mmと15mmの炭素鋼球、10mmと14.3mmのステンレス鋼球を用いた合計184回の実験を行うことにより、以下の知見を得た。
 - a. 鋼球表面温度は圧力波の通過により急激に下降することを確認した。
 - b. 何れの鋼球を用いた実験の場合でも、圧力波が通過した直後の鋼球表面温度曲線は温度下降の度合に応じていくつかのパターンに分類することができた。特にステンレス鋼球を用いた実験の場合は、圧力波が通過した直後の鋼球表面温度曲線は温度下降の度合に応じて以下の3つのパターンに分類することができた。
 - Type A : 膜沸騰が崩壊しなかった実験結果
 - Type B : 膜沸騰が崩壊した実験結果
 - Type C : 膜沸騰が崩壊した後再発生した実験結果
- (3) 実験結果を各Type毎に初期条件である初期設定衝撃波圧力と初期設定表面温度によるマップ上に整理した結果、以下の知見を得た。
 - a. ステンレス鋼球を用いた実験の場合、膜沸騰の崩壊挙動が初期条件によるマップ上において明確に領域分けできた。その際、膜沸騰が崩壊しなかった実験結果Type Aの範囲は鋼球の径の違いによる影響があまり見られず、膜沸騰が崩壊した実験結果Type Bの範囲は鋼球の径が大きいほど狭くなった。
 - b. 得られた分類マップ図より、本実験条件範囲においては膜沸騰を崩壊させるのに必要となる圧力が鋼球の初期温度に強く依存することを確認した。

本研究から得られた知見は熱的デトネーションモデルに基づく蒸気爆発進展過程のシミュレーション解析を行う上で有効な情報となるものである。

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。また、本文中に記載した蒸気爆発の進展過程におけるシュミレーション解析は、(株)日本ユニシスの岡野豊明氏の協力によるものであり、ここに感謝の意を表します。尚、本研究の一部は文部省科学研究費補助金重点領域研究(2)(No.07226204)の補助を受けており、著者の一人である八木理公が日本原子力研究所特別研究生として炉心損傷安全研究室での2年間の研究成果をまとめたものである。

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", なかれ, 7, 207 (1989).
- (2)A. W. Cronenberg: "Recent developments in the understanding of energetic molten fuel-coolant interactions", NUCLEAR SAFETY, 21 No .3, 319 (1980).
- (3)A.W.クローネンバーグ,R.ベンツ: 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, 4 (1980).
- (4)A.W.クローネンバーグ,R.ベンツ: 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, 11 (1980).
- (5)A. W. Cronenberg: "Recent developments in the understanding of energetic molten fuel-coolant interactions", NUCLEAR SAFETY, 21 No .3, 321 (1980).
- (6)L. S. Nelson and P. M. Duda: "Steam explosion experiments with single drops of iron oxide melted with a CO₂ laser", High Temperature - High Pressure, 14, 259 (1982).
- (7)A. Inoue and S. G. Bankoff: "Destabilization of Film Boiling Due to Arrival of a Pressure", Transaction of the ASME, Journal of Heat Transfer, 103, 459-471(1981).
- (8)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, 1777 (1986), (第二報、低温液温度の影響と複数滴による実験), 機論53-485, 224 (1987).
- (9)小林朋能・阿部豊・安達公道・岡野豊明: "四流体モデルによる蒸気爆発進展過程のシュミレーション解析", 日本原子力学会東北支部第19回研究交流会, 71 (1995).
- (10)八木理公ほか: 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)
- (11)1980 SI 日本機械学会蒸気表
- (12)W. H. Jens and P. A. Lottes: AEC Report, ANL-4627 (1951).
- (13)S. S. Kutateladze: Zh. Tekh. Fiz., 20, 1389 (1950).
- (14)M. Zuber and M. Tribus: UCLA Report, 58-5 (1958).

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。また、本文中に記載した蒸気爆発の進展過程におけるシュミレーション解析は、(株)日本ユニシスの岡野豊明氏の協力によるものであり、ここに感謝の意を表します。尚、本研究の一部は文部省科学研究費補助金重点領域研究(2)(No.07226204)の補助を受けており、著者の一人である八木理公が日本原子力研究所特別研究生として炉心損傷安全研究室での2年間の研究成果をまとめたものである。

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, 7, 207 (1989).
- (2) A. W. Cronenberg: "Recent developments in the understanding of energetic molten fuel-coolant interactions", NUCLEAR SAFETY, 21 No .3, 319 (1980).
- (3) A. W. クローネンバーグ,R.ベンツ: 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, 4 (1980).
- (4) A. W. クローネンバーグ,R.ベンツ: 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, 11 (1980).
- (5) A. W. Cronenberg: "Recent developments in the understanding of energetic molten fuel-coolant interactions", NUCLEAR SAFETY, 21 No .3, 321 (1980).
- (6) L. S. Nelson and P. M. Duda: "Steam explosion experiments with single drops of iron oxide melted with a CO₂ laser", High Temperature - High Pressure, 14, 259 (1982).
- (7) A. Inoue and S. G. Bankoff: "Destabilization of Film Boiling Due to Arrival of a Pressure", Transaction of the ASME, Journal of Heat Transfer, 103, 459-471(1981).
- (8) 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, 1777 (1986), (第二報、低温液温度の影響と複数滴による実験), 機論53-485, 224 (1987).
- (9) 小林朋能・阿部豊・安達公道・岡野豊明: "四流体モデルによる蒸気爆発進展過程のシュミレーション解析", 日本原子力学会東北支部第19回研究交流会, 71 (1995).
- (10) 八木理公ほか: 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)
- (11) 1980 SI 日本機械学会蒸気表
- (12) W. H. Jens and P. A. Lottes: AEC Report, ANL-4627 (1951).
- (13) S. S. Kutateladze: Zh. Tekh. Fiz., 20, 1389 (1950).
- (14) M. Zuber and M. Tribus: UCLA Report, 58-5 (1958).

- (15)L. A. Bromley: Chem. Eng. Prog., 46-5, 221 (1950).
- (16)高島武雄・飯田嘉宏: "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 318 (1988).
- (17)D. F. Fletcher and A. Thyagaraja, "A mathematical model of melt / water detonations", Appl. Math. Modeling 13, p.339 (1989).
- (18)D. F. Fletcher, "An improved mathematical model of melt / water detonations. --I. Model formulation and example results", Int. J. Heat Mass Transfer 34, p.2435 (1991).
- (19)C. Carachalios, M. Burger and H. Unger: "A transient two-phase model to describe thermal detonations based on hydrodynamic fragmentation", Proc. Int. Meeting on LWR Severe Accident Evaluation, Cambridge, Massachusetts, 1, 6.8.1 (1983).
- (20)S. Medhekar, W. H. Amarasoorya and T. G. Theofanous: "Integrated analysis of steam explosions", Proc. 4th. Int Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Karlsruhe, 1, 319 (1989).
- (21)W. G. Reinecke and G. D. Waldman: "Investigation of water drop disintegration in a region behind strong shock waves", Third Int. Conf. on Rain Erosion and Related Phenomena, Hampshire, England (1970).
- (22)M. Ishii, *Thermo-fluid Dynamic Theory of Two-phase Flow*. Eyrolles, Paris (1975).
- (23)R. D. Richtmyer and K. W. Morton: Difference Methods for Initial-value Problems, Interscience, New York (1967).

付録A 全実験結果

今回行った実験の全結果を以下に示す。

炭素鋼球を用いた実験結果

直径10mm	Exp. 1～Exp. 72	p. 65～p. 88
直径15mm	Exp. 1～Exp. 52	p. 89～p. 106

ステンレス鋼球を用いた実験結果

直径10mm	Exp. 1～Exp. 30	p. 107～p. 116
直径14.3mm	Exp. 1～Exp. 30	p. 117～p. 126

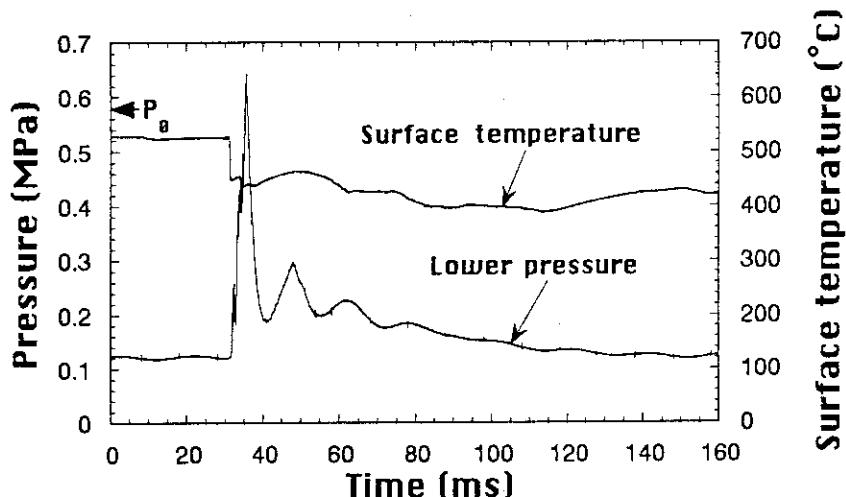


Fig. A.1.1 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 1

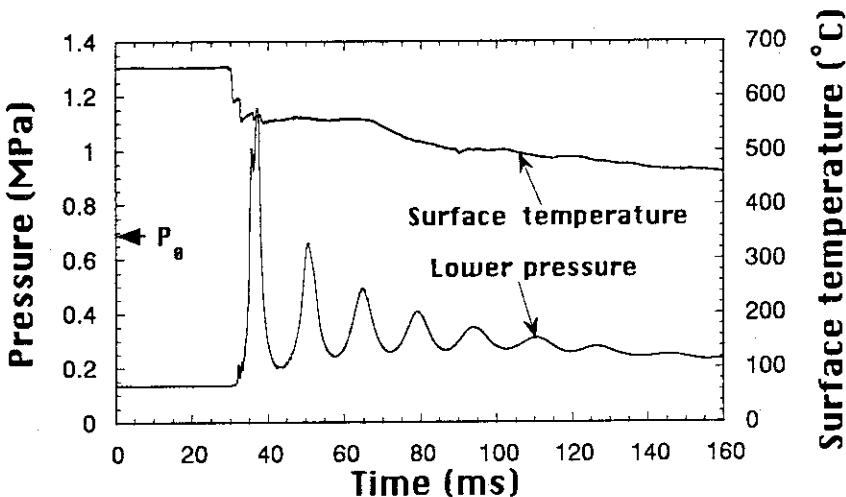


Fig. A.1.2 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 2

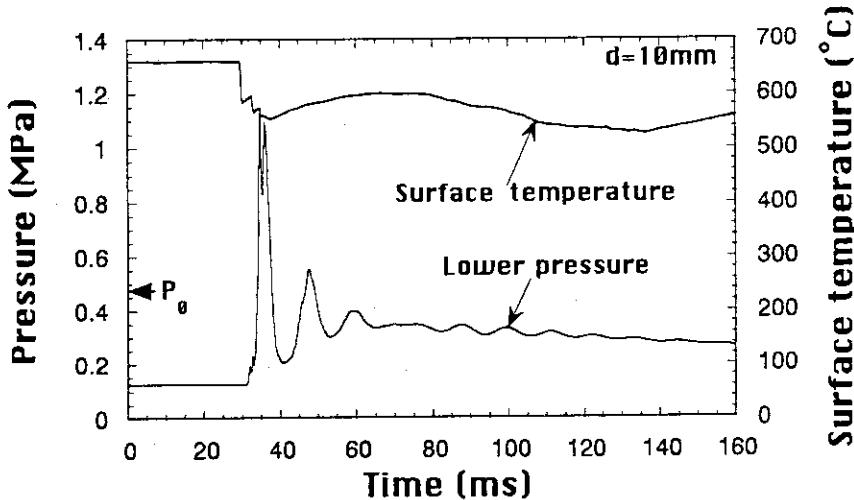


Fig. A.1.3 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 3

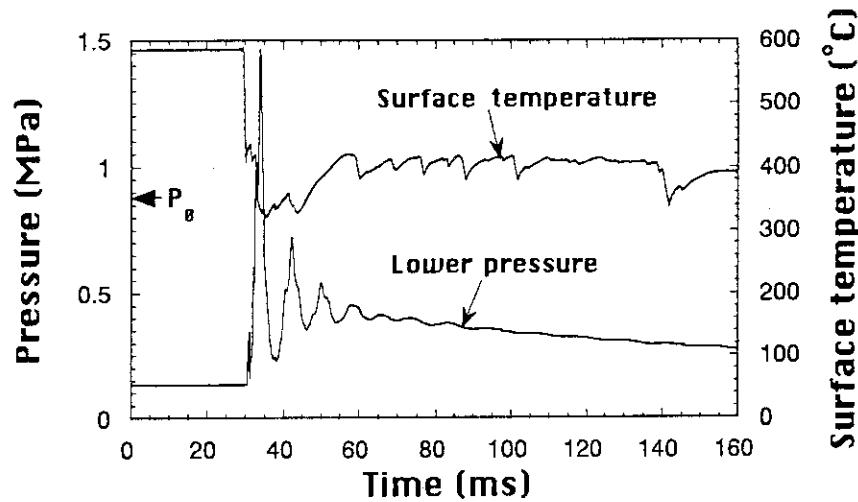


Fig. A.1.4 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 4

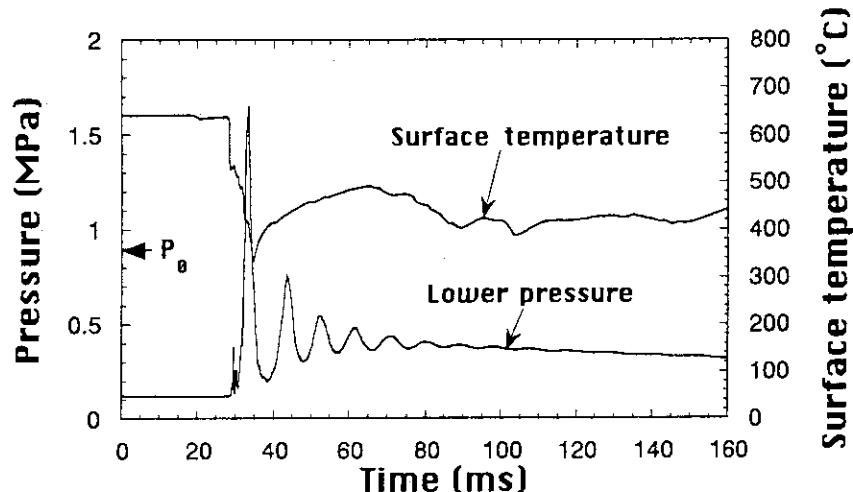


Fig. A.1.5 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 5

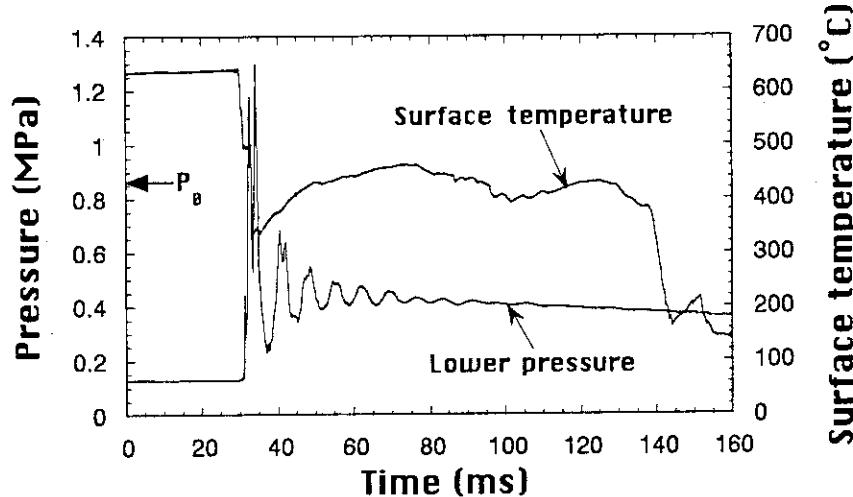


Fig. A.1.6 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 6

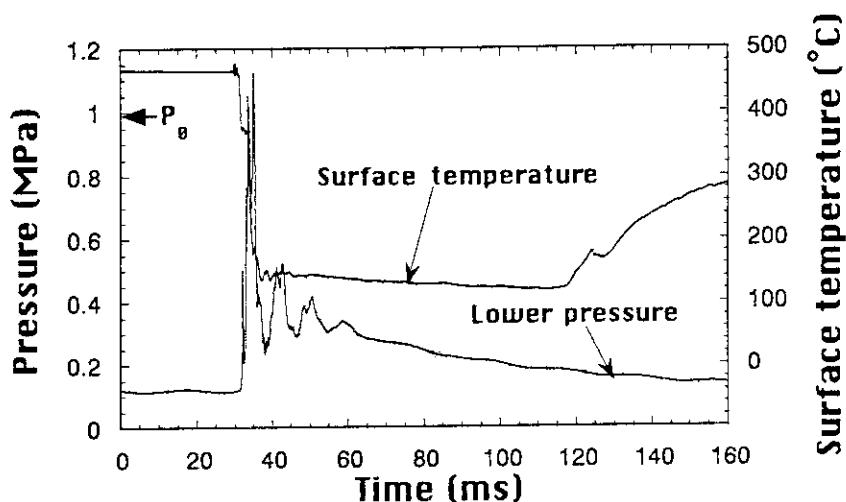


Fig. A.1.7 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 7

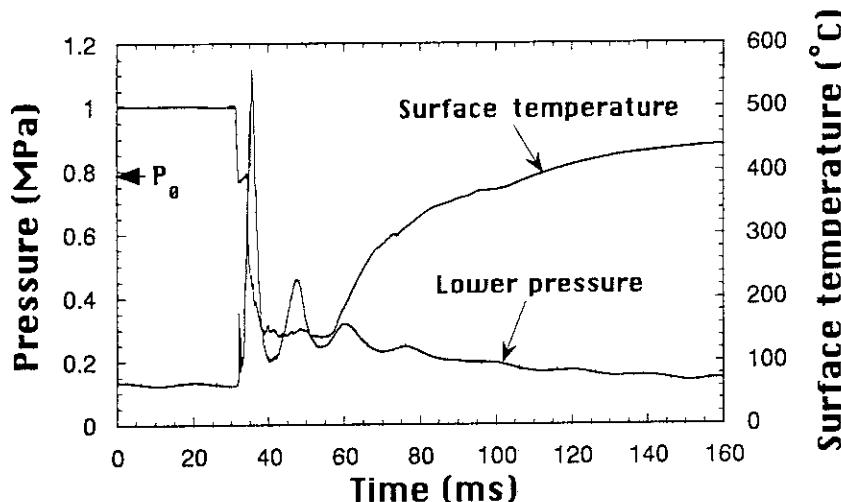


Fig. A.1.8 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 8

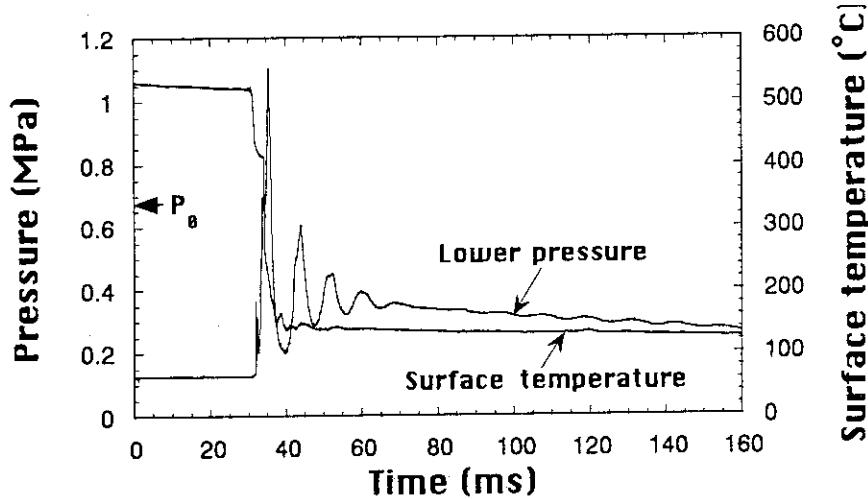


Fig. A.1.9 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 9

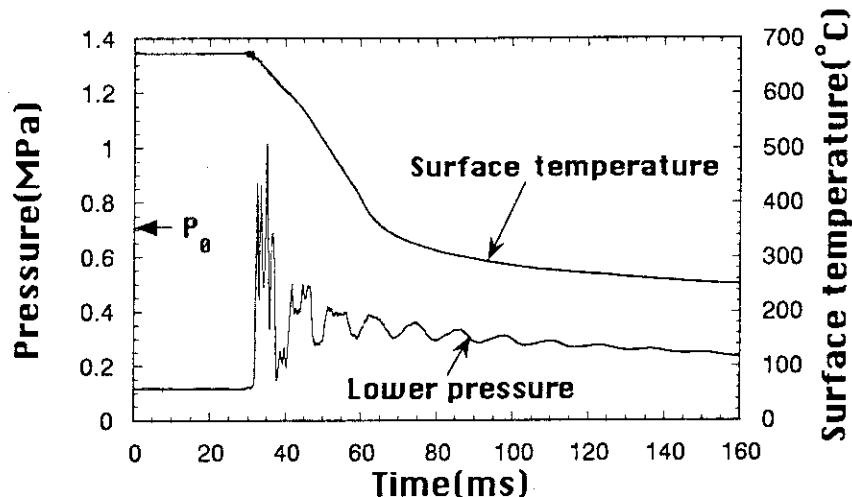


Fig. A.1.10 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 10

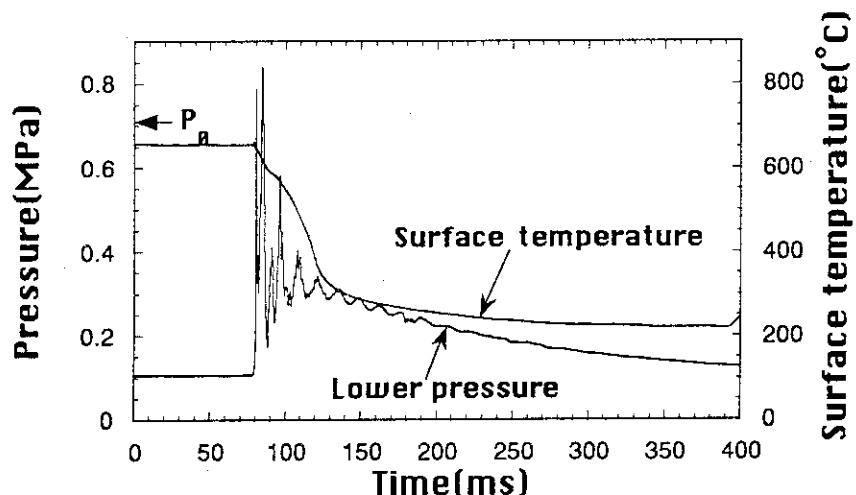


Fig. A.1.11 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 11

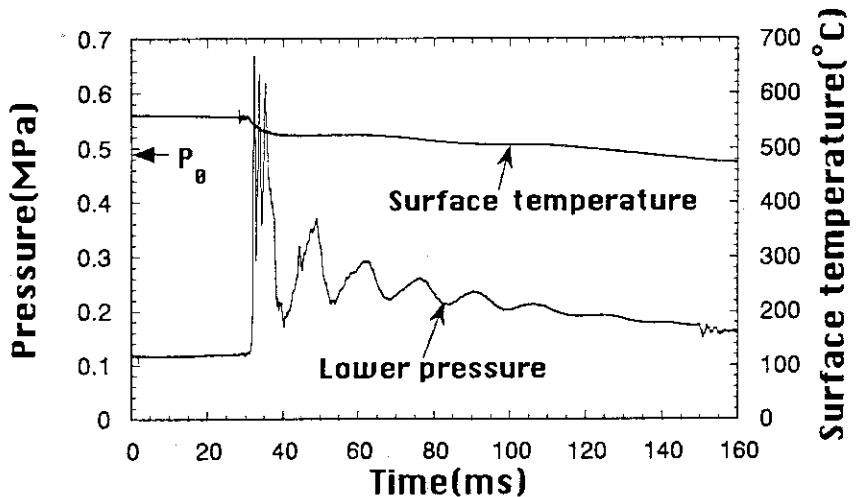


Fig. A.1.12 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 12

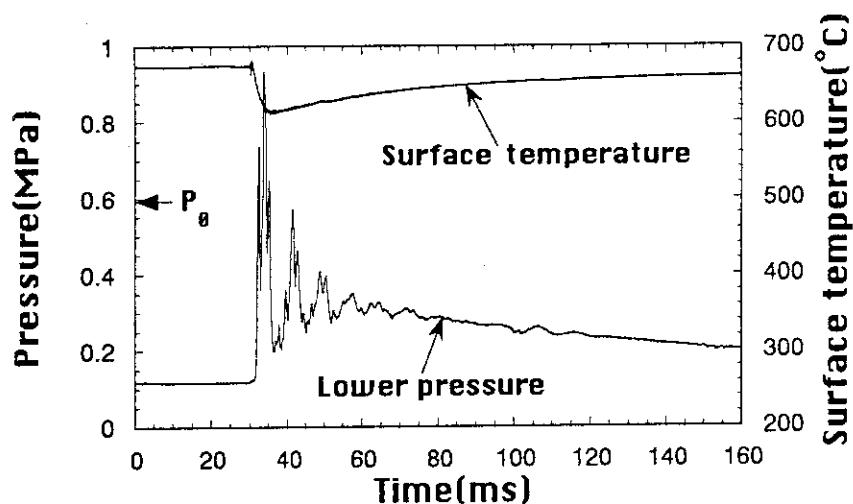


Fig. A.1.13 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 13

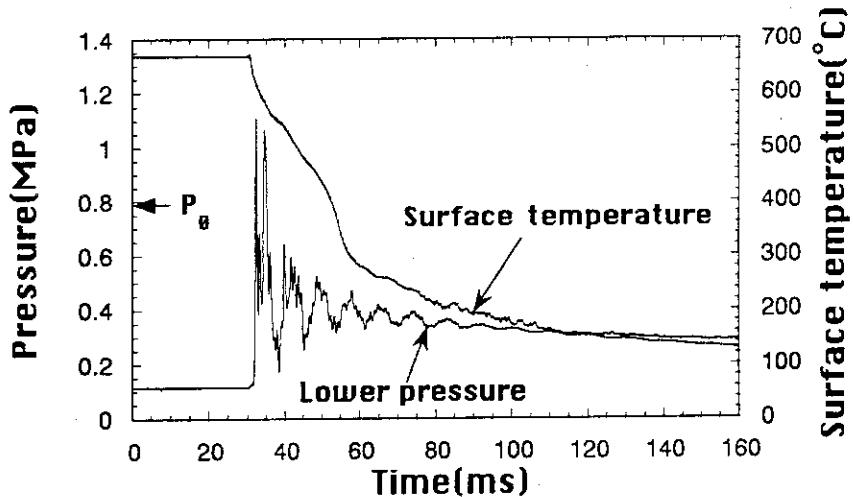


Fig. A.1.14 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 14

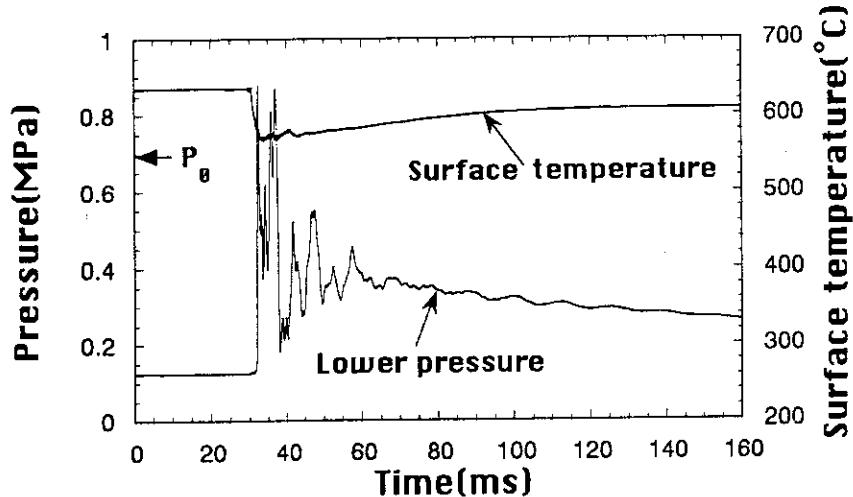


Fig. A.1.15 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 15

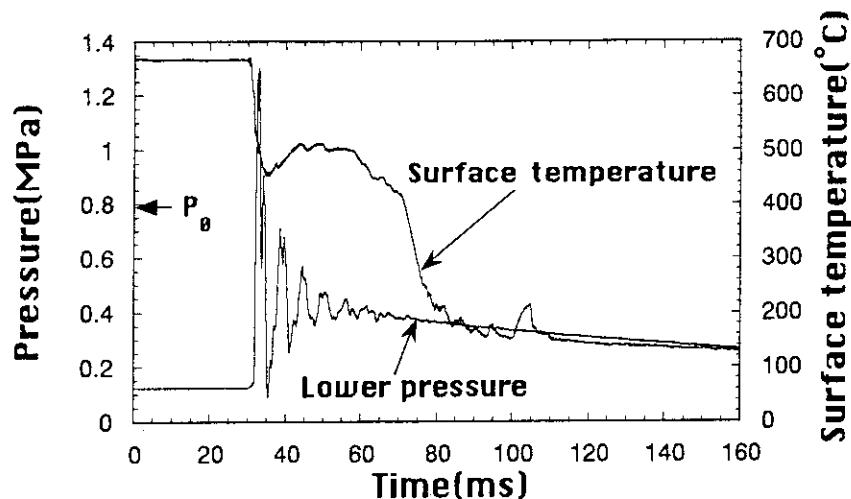


Fig. A.1.16 炭素鋼球直径10mmの実験結果Exp. 16

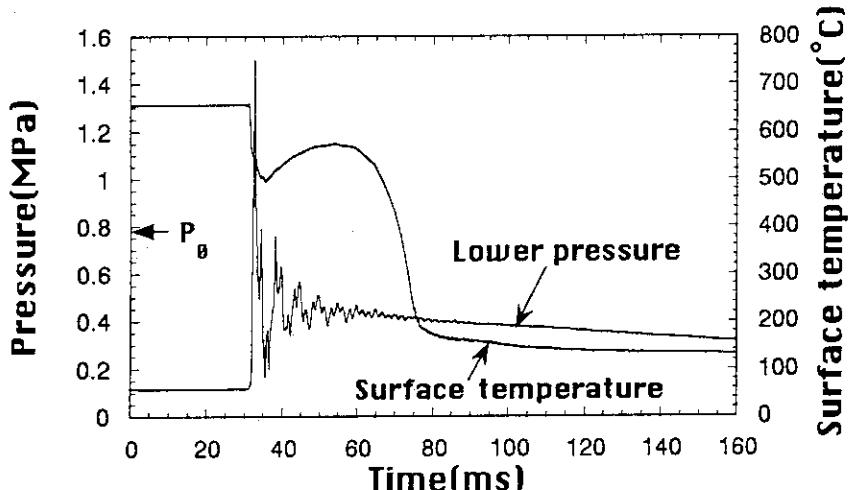


Fig. A.1.17 炭素鋼球直径10mmの実験結果Exp. 17

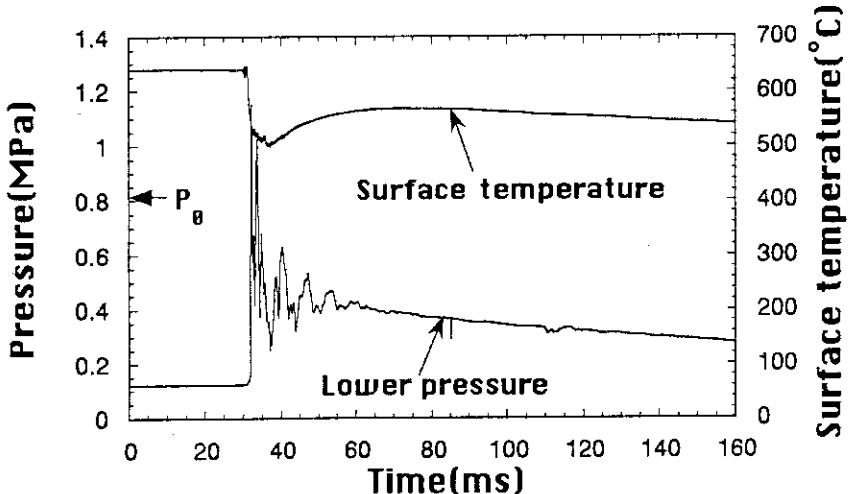


Fig. A.1.18 炭素鋼球直径10mmの実験結果Exp. 18

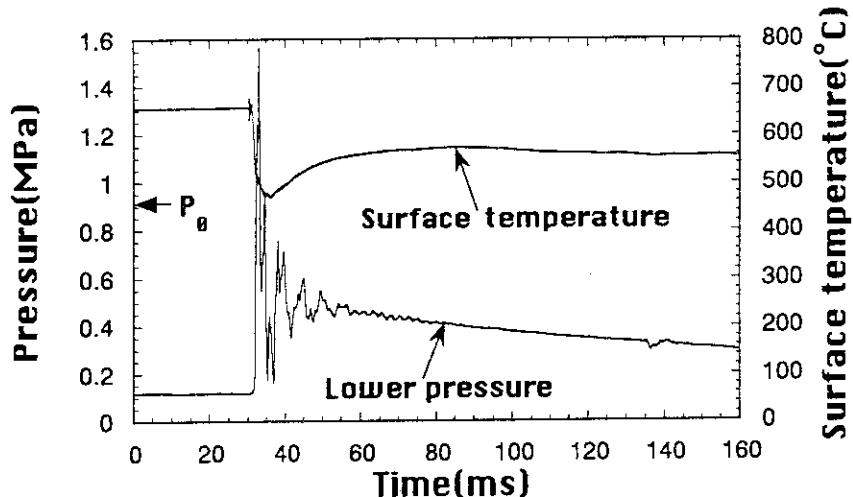


Fig. A.1.19 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 19

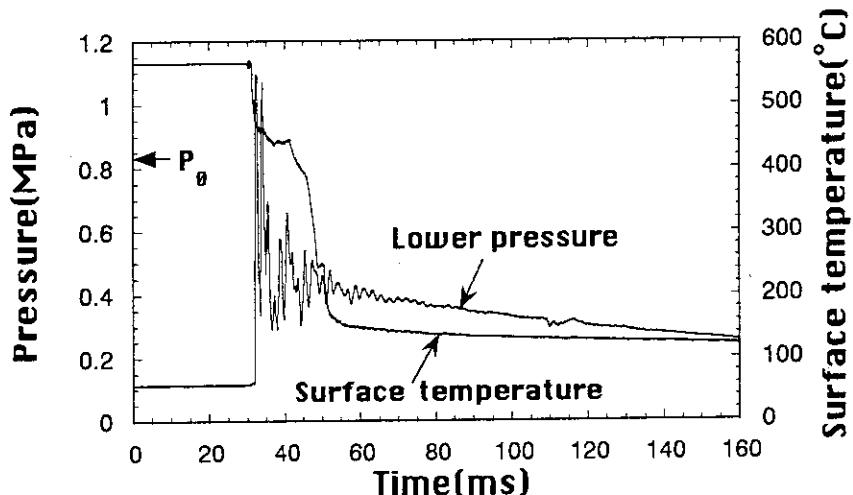


Fig. A.1.20 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 20

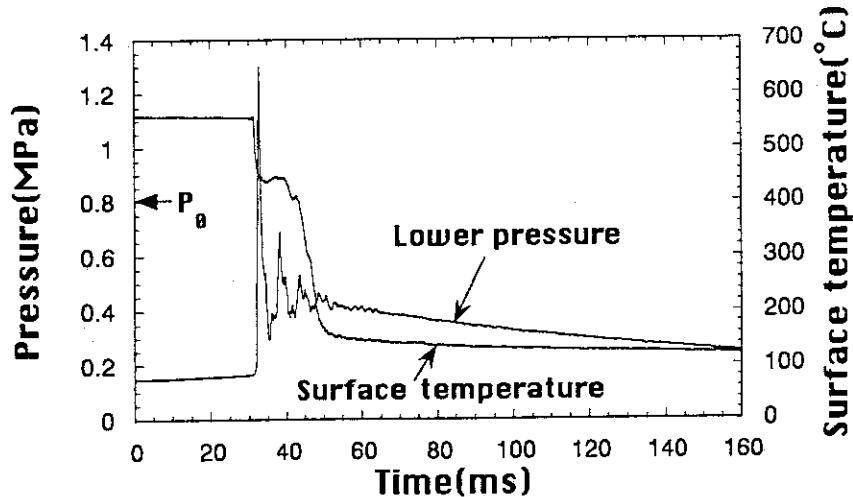
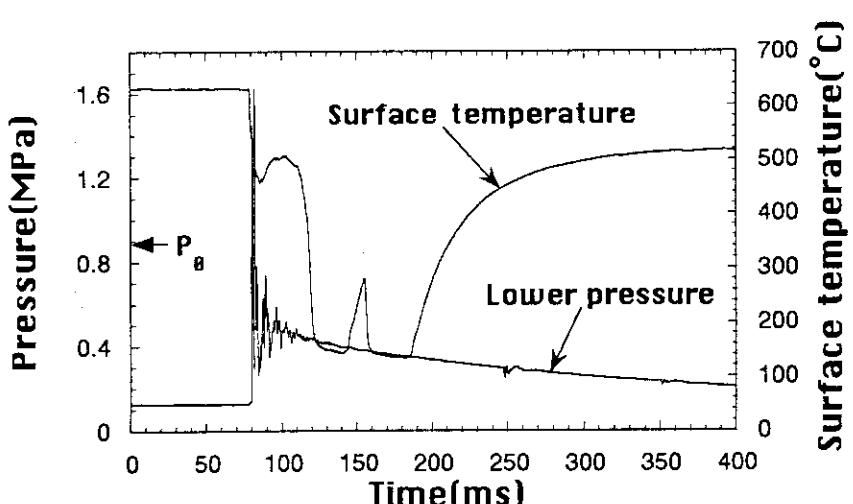
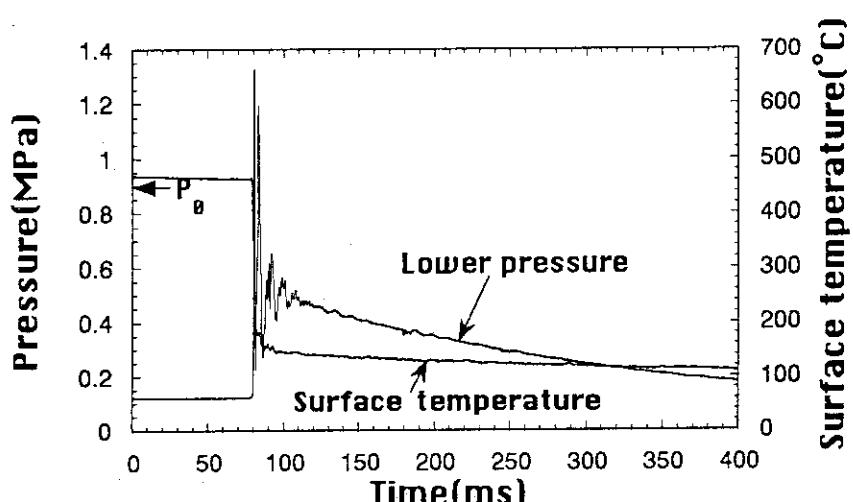
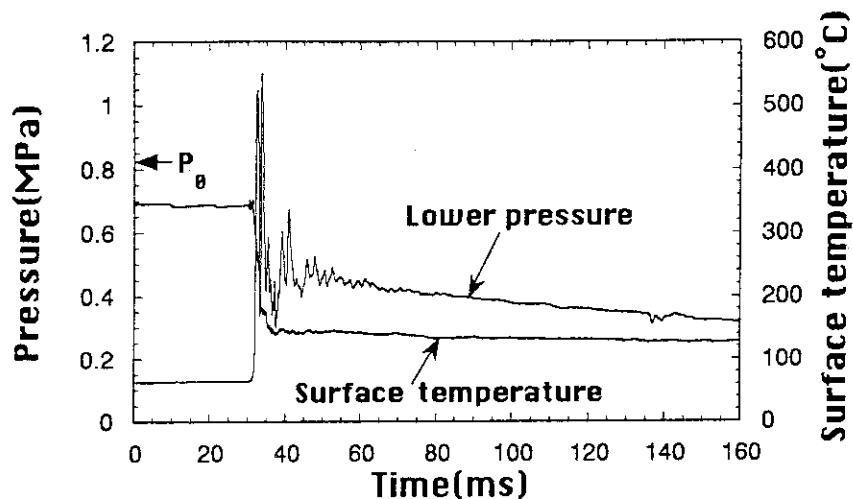


Fig. A.1.21 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 21



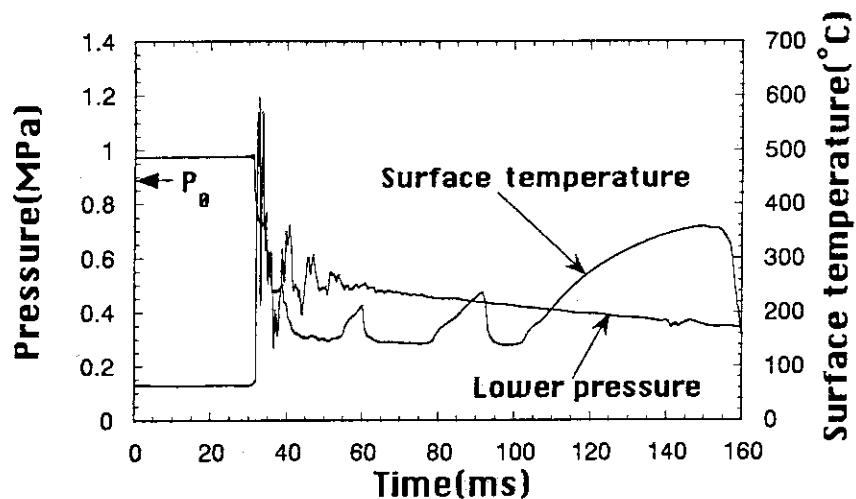


Fig. A.1.25 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 25

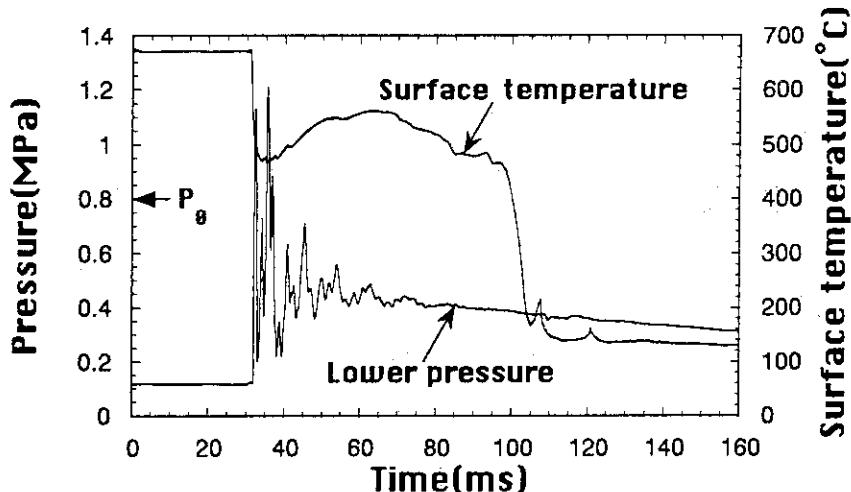


Fig. A.1.26 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 26

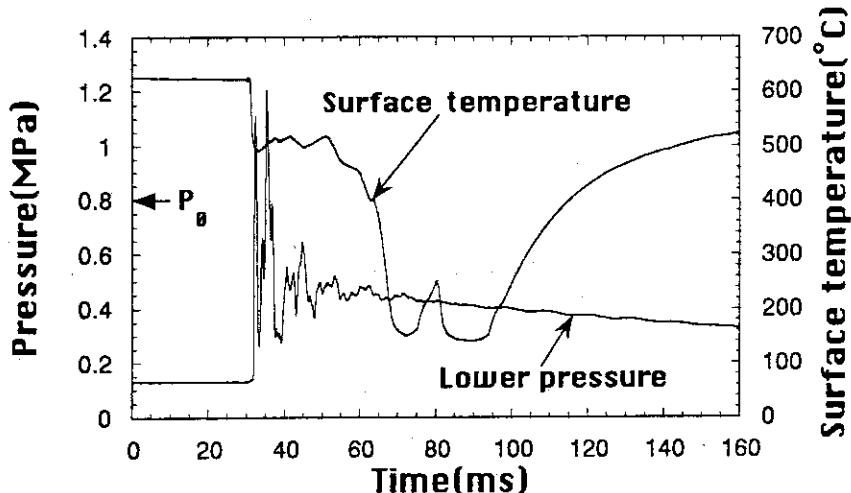


Fig. A.1.27 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 27

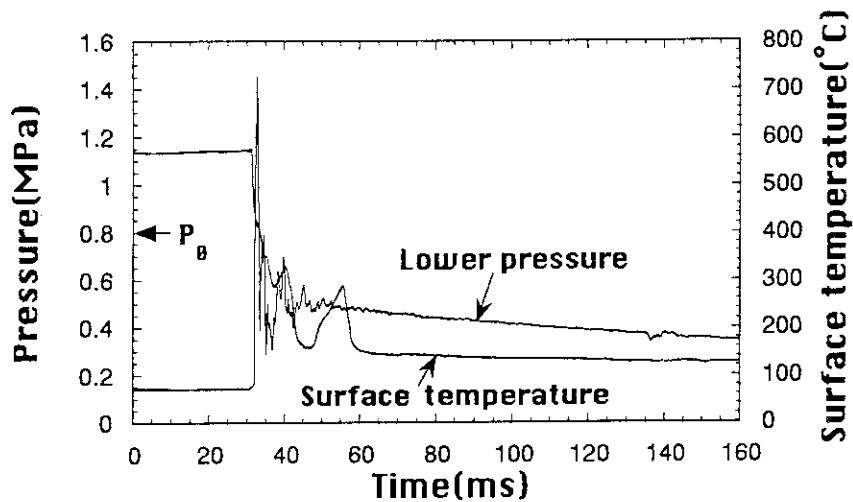


Fig. A.1.28 炭素鋼球直徑10mmの実験結果Exp. 28

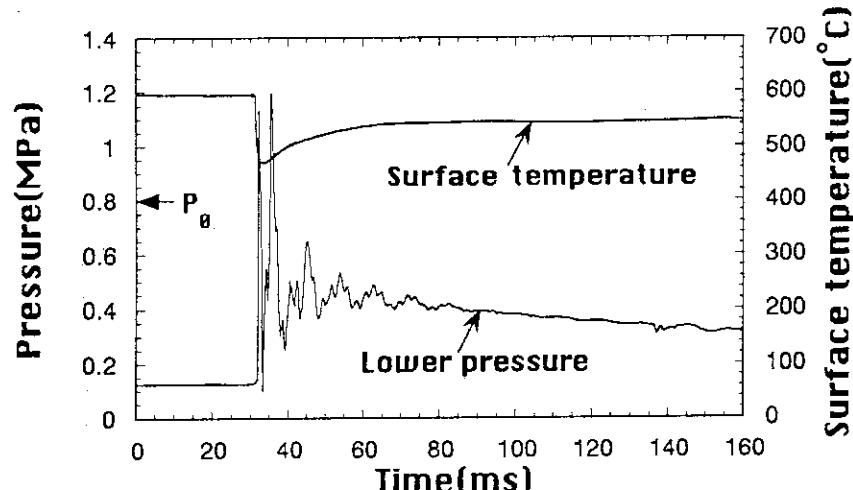


Fig. A.1.29 炭素鋼球直徑10mmの実験結果Exp. 29

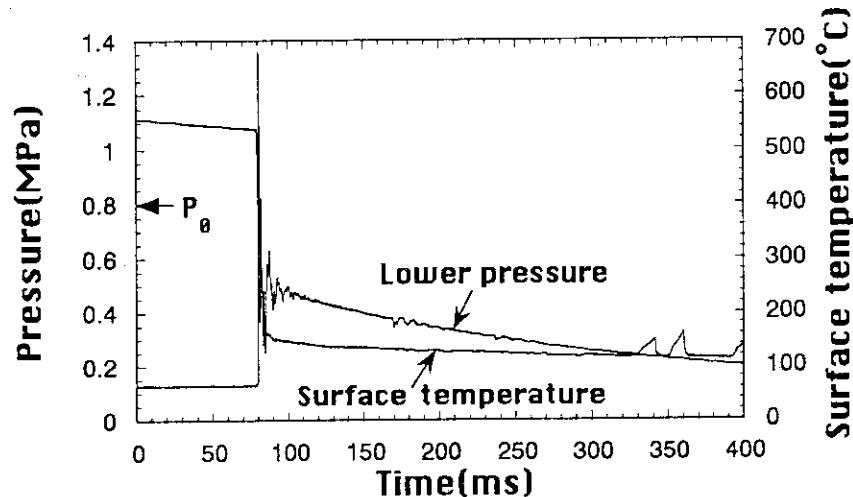


Fig. A.1.30 炭素鋼球直徑10mmの実験結果Exp. 30

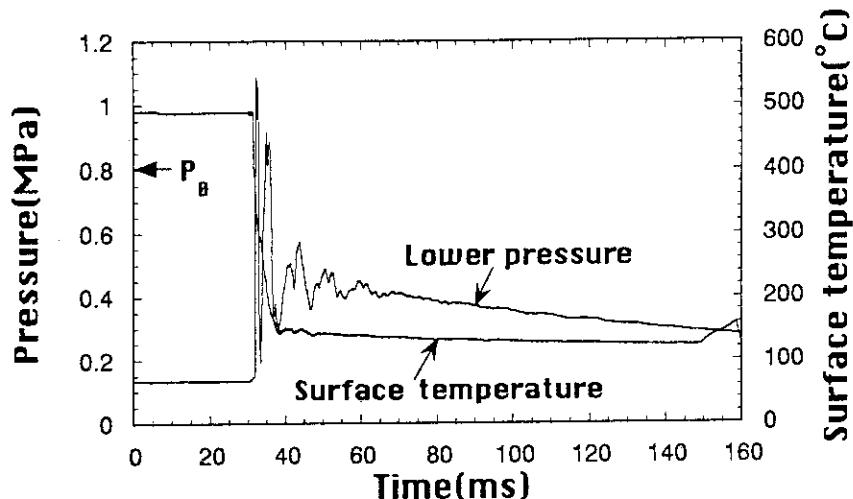


Fig. A.1.31 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 31

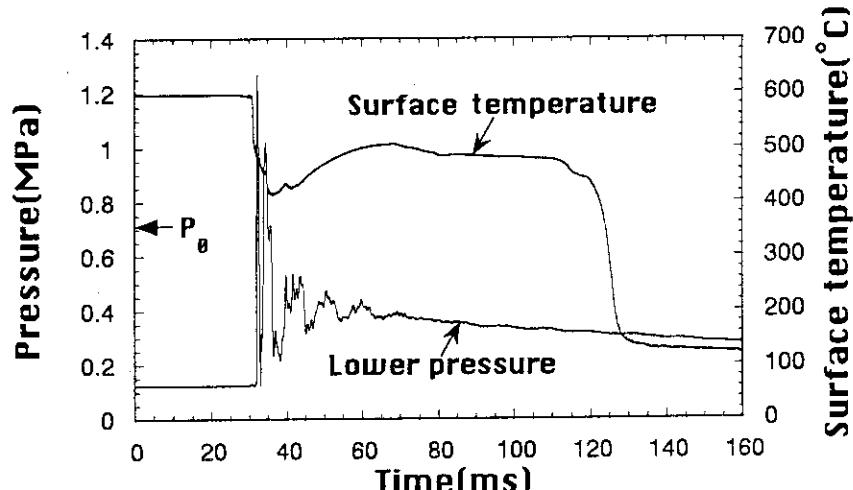


Fig. A.1.32 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 32

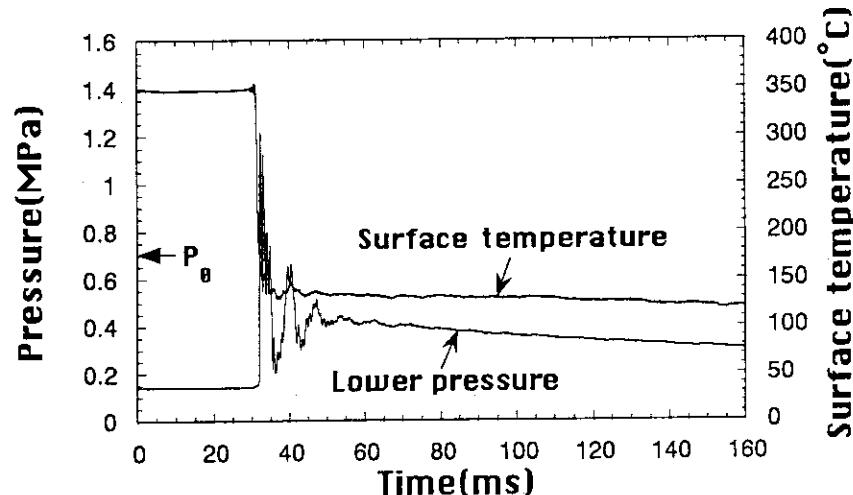


Fig. A.1.33 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 33

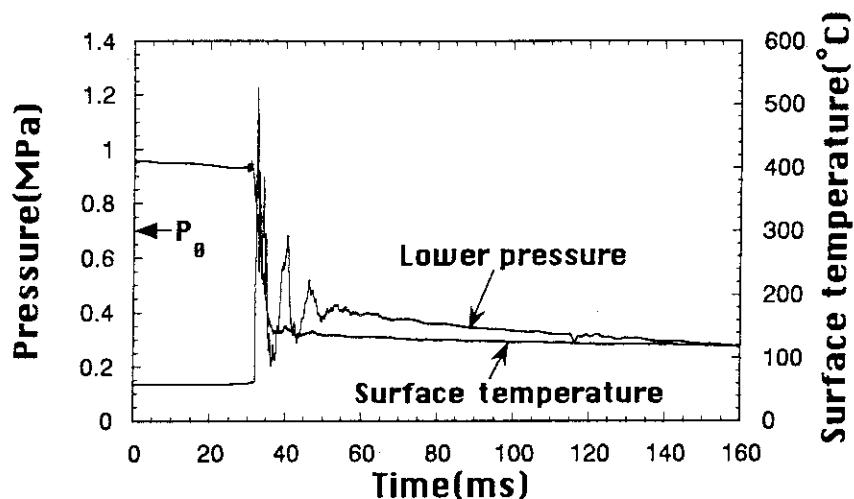


Fig. A.1.34 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 34

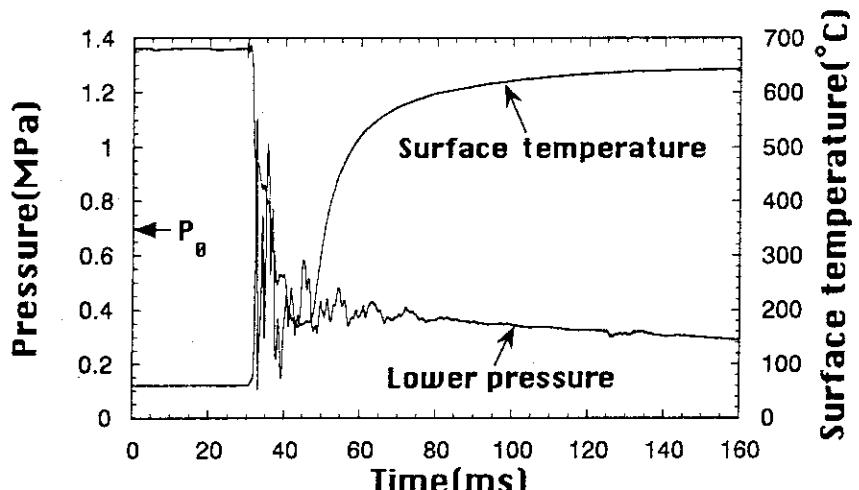


Fig. A.1.35 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 35

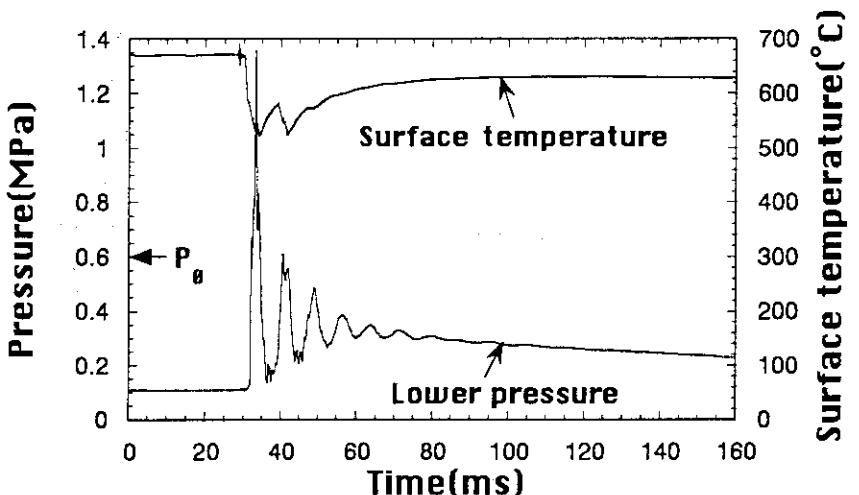


Fig. A.1.36 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 36

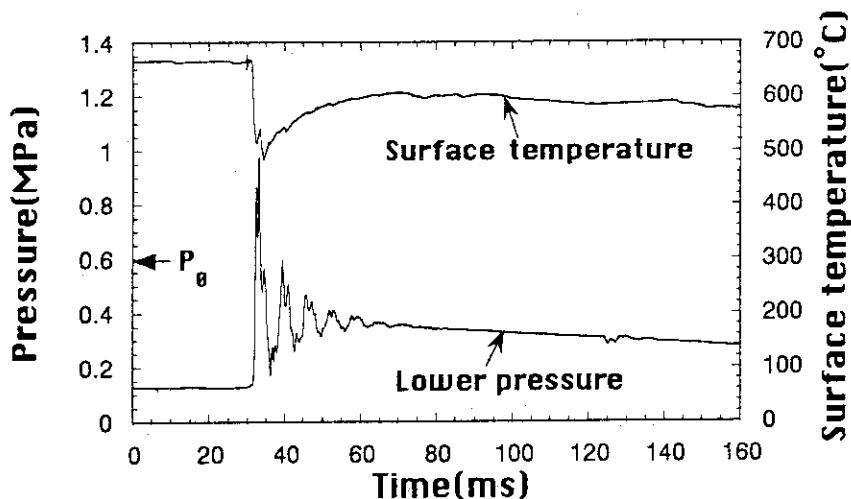


Fig. A.1.37 炭素鋼球直徑10mmの実験結果Exp. 37

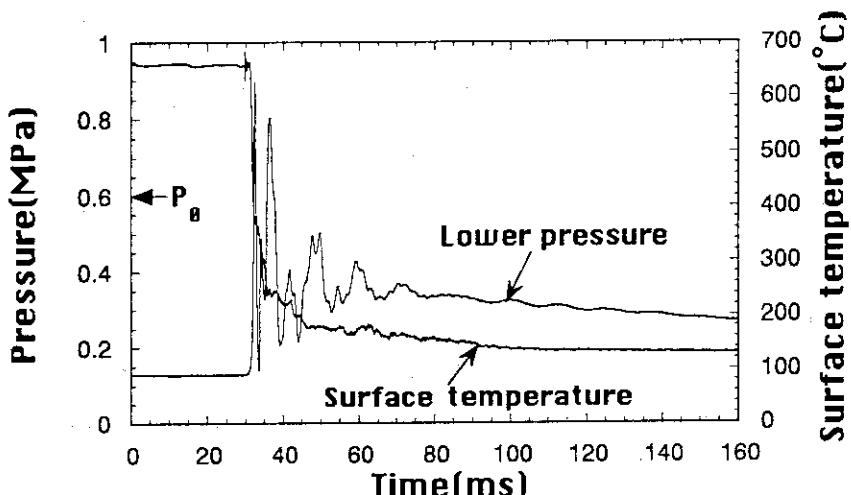


Fig. A.1.38 炭素鋼球直徑10mmの実験結果Exp. 38

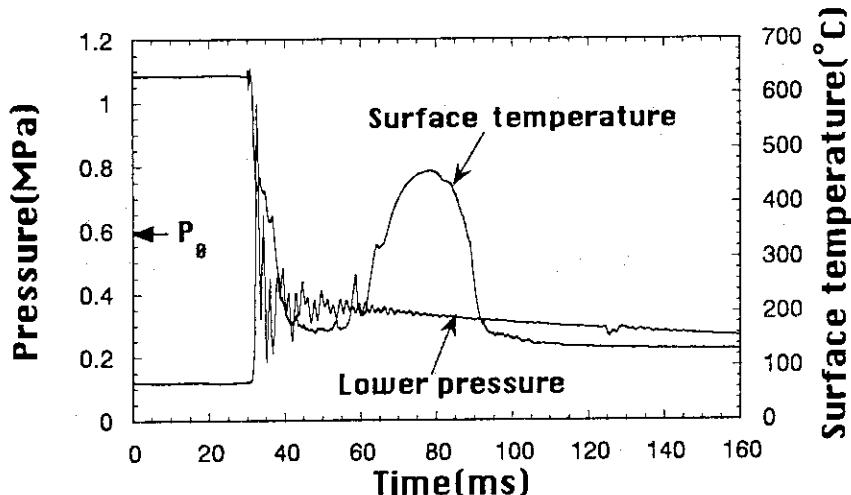


Fig. A.1.39 炭素鋼球直徑10mmの実験結果Exp. 39

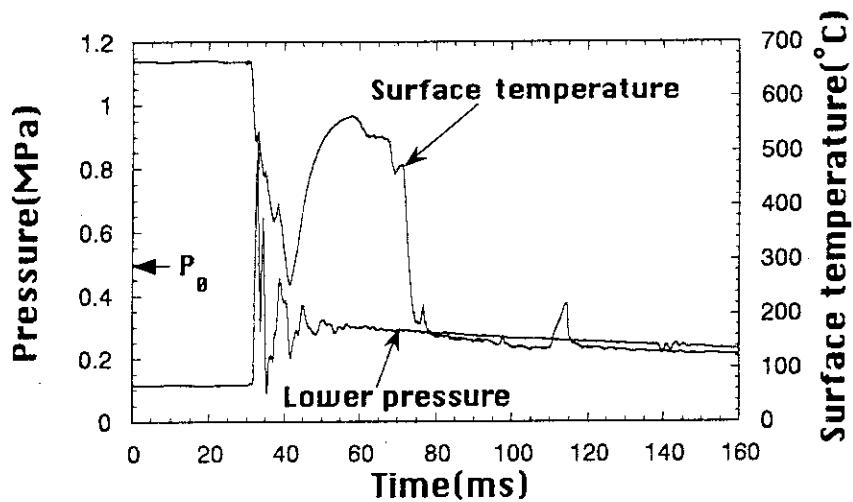


Fig. A.1.40 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 40

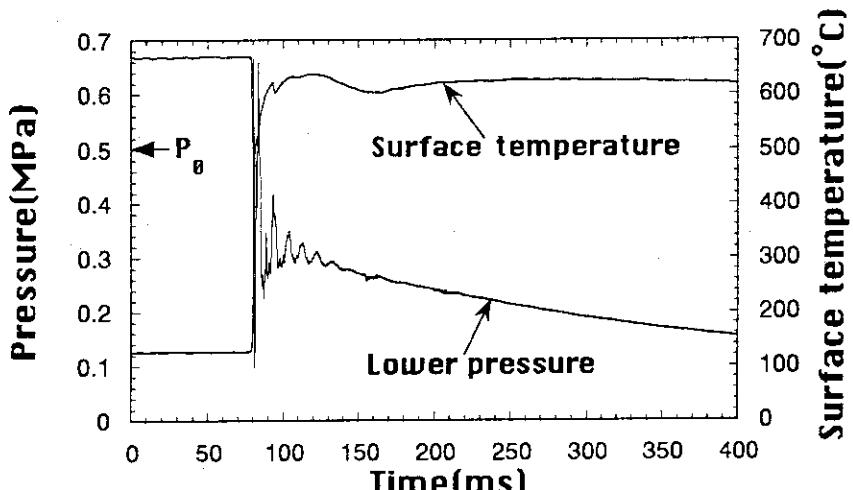


Fig. A.1.41 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 41

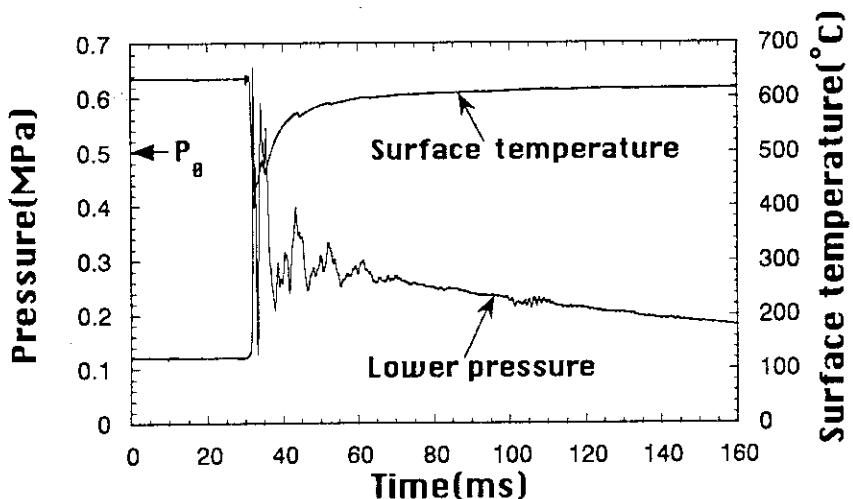


Fig. A.1.42 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 42

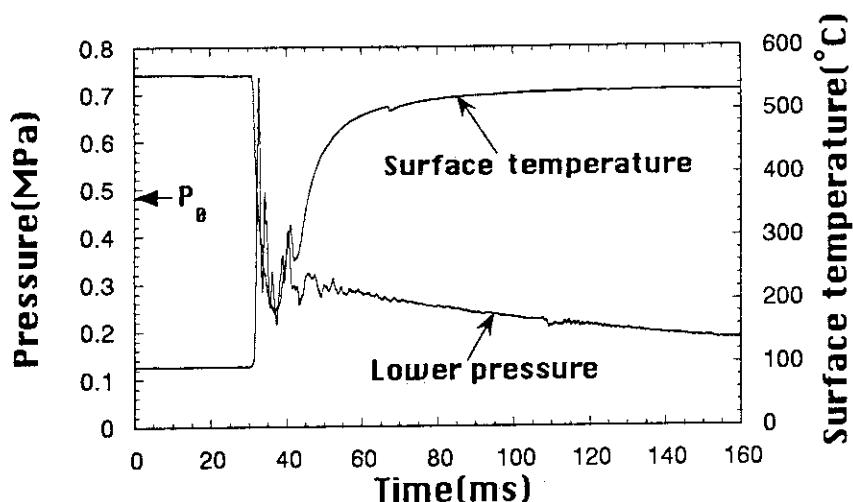


Fig. A.1.43 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 43

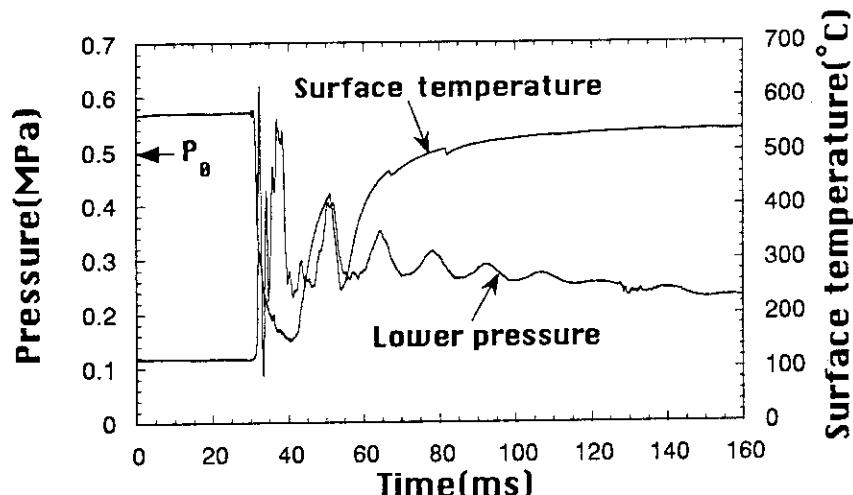


Fig. A.1.44 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 44

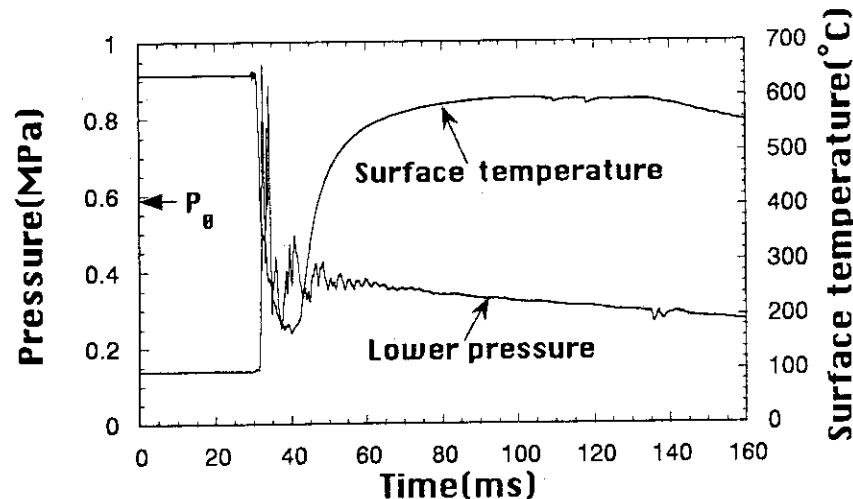


Fig. A.1.45 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 45

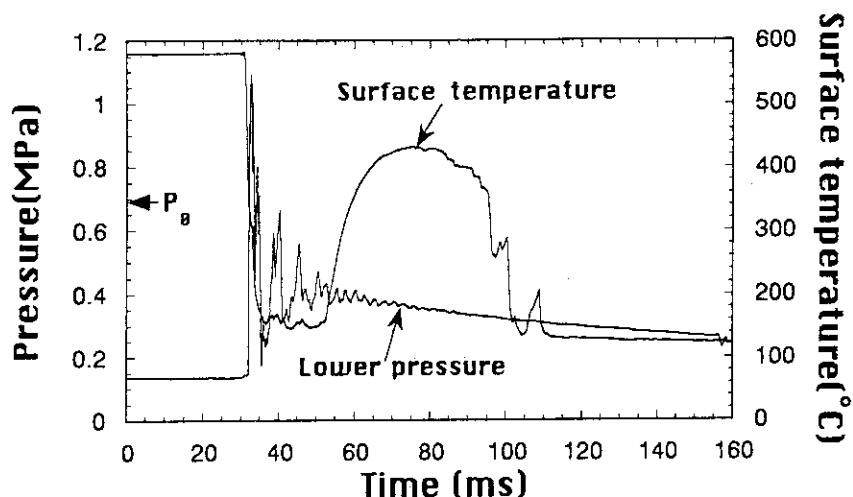


Fig. A.1.46 炭素鋼球直徑10mmの実験結果Exp. 46

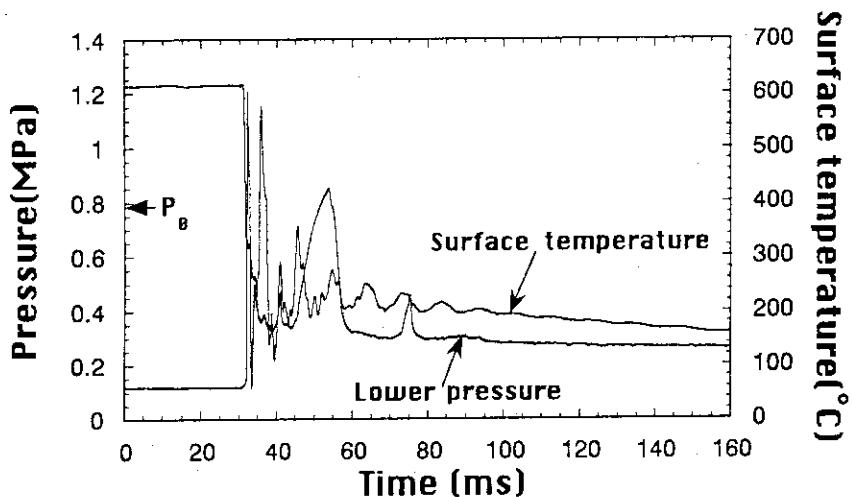


Fig. A.1.47 炭素鋼球直徑10mmの実験結果Exp. 47

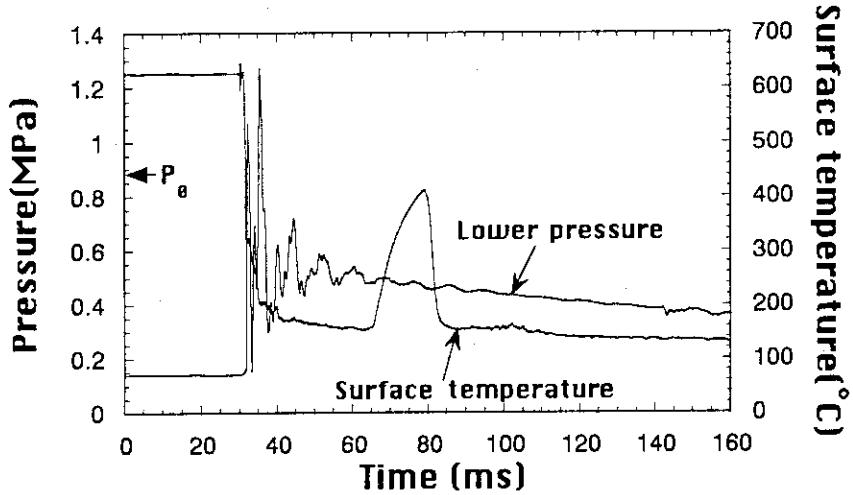


Fig. A.1.48 炭素鋼球直徑10mmの実験結果Exp. 48

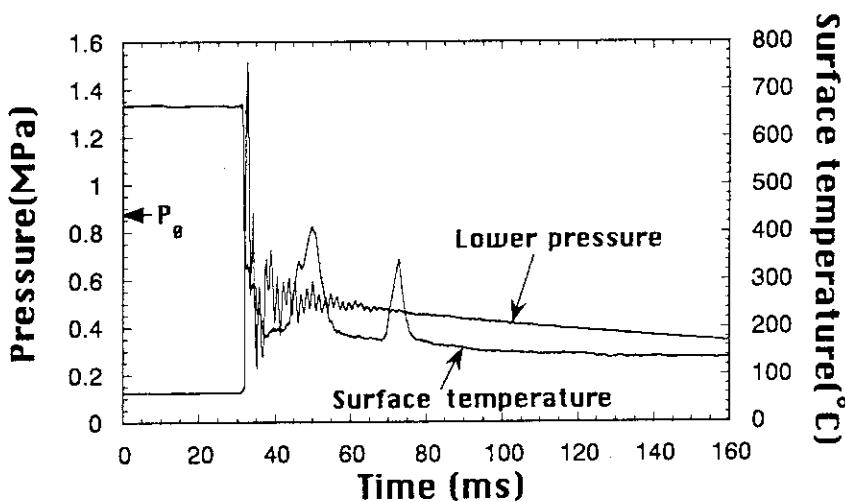


Fig. A.1.49 炭素鋼球直径10mmの実験結果Exp. 49

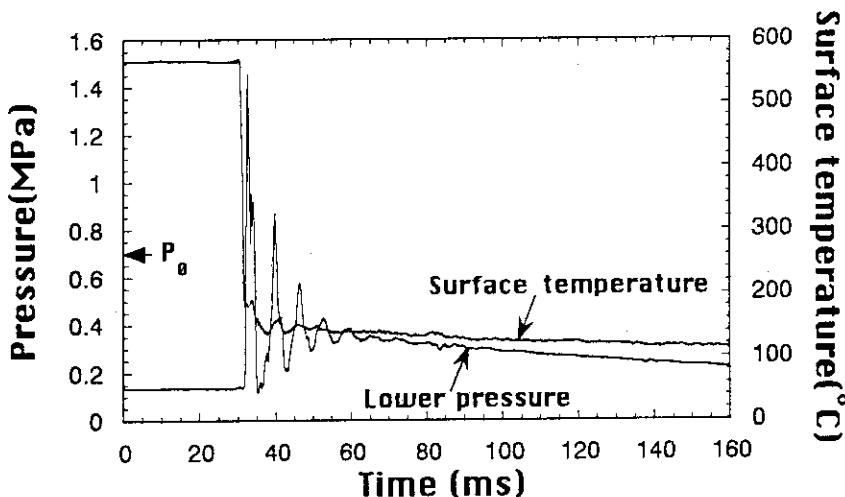


Fig. A.1.50 炭素鋼球直径10mmの実験結果Exp. 50

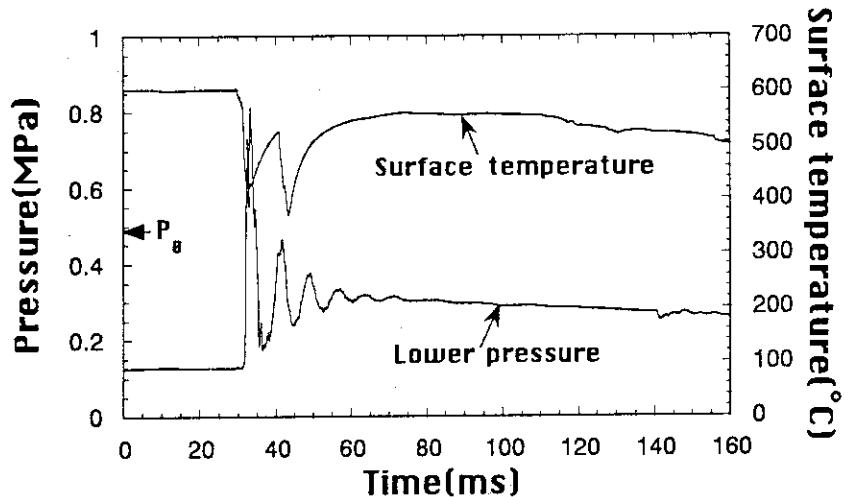


Fig. A.1.51 炭素鋼球直径10mmの実験結果Exp. 51

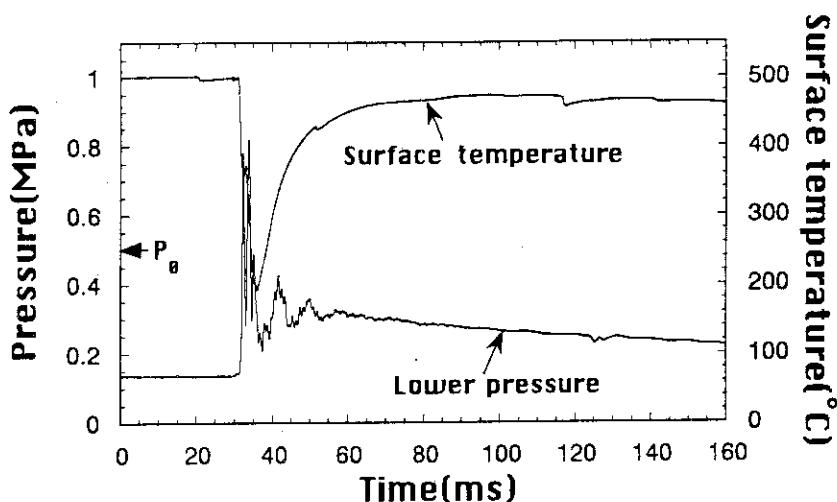


Fig. A.1.52 炭素鋼球直径10mmの実験結果Exp. 52

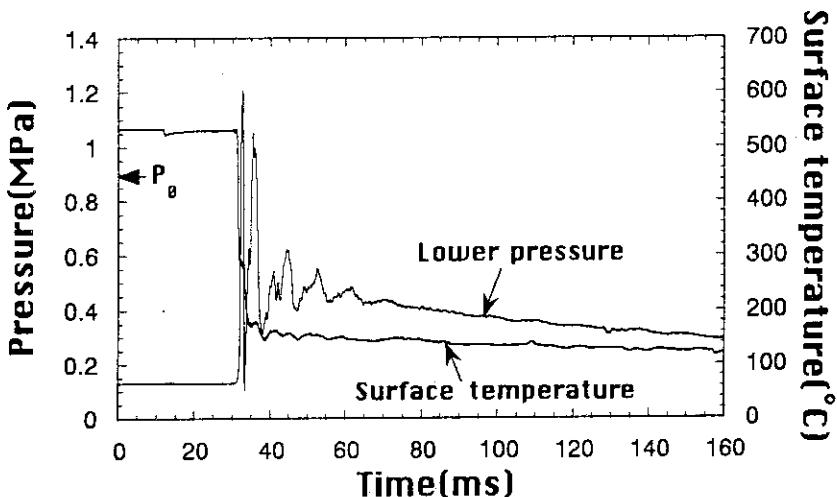


Fig. A.1.53 炭素鋼球直径10mmの実験結果Exp. 53

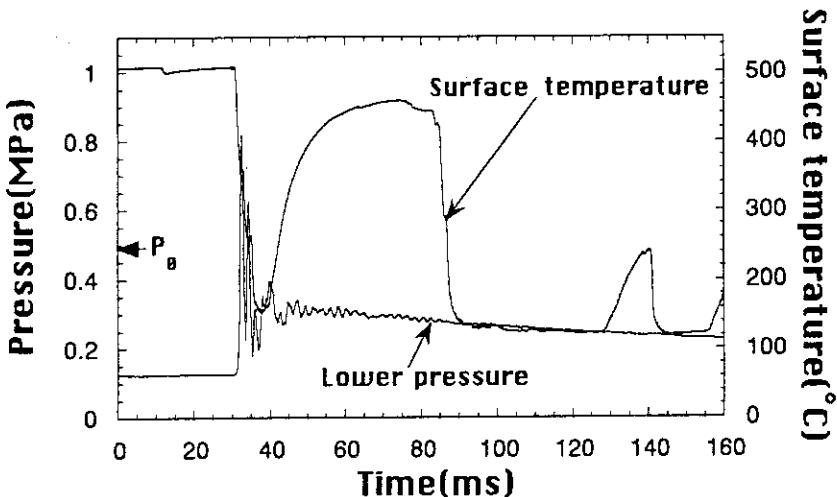


Fig. A.1.54 炭素鋼球直径10mmの実験結果Exp. 54

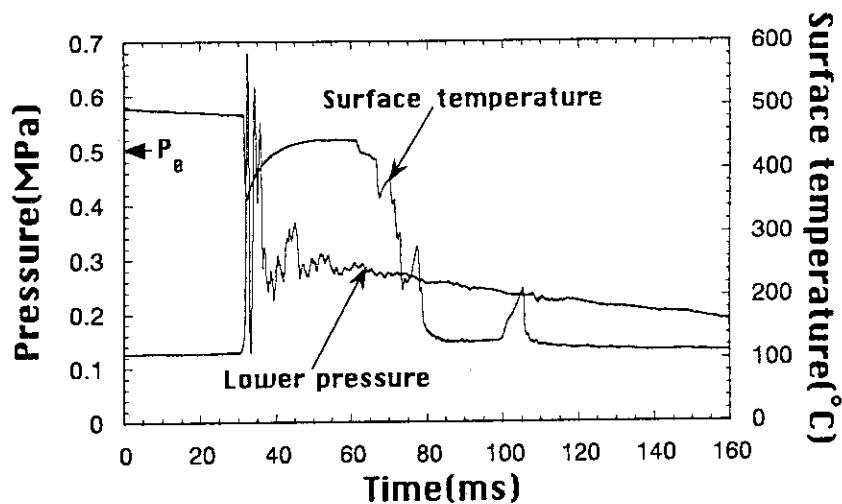


Fig. A.1.55 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 55

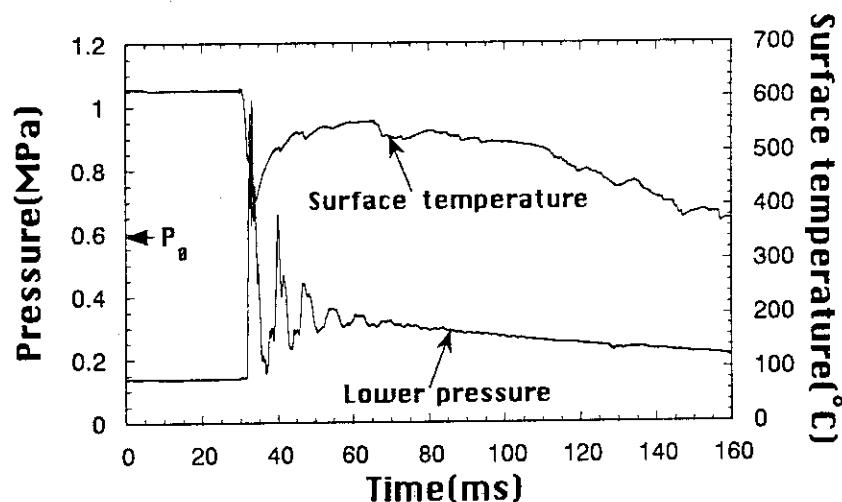


Fig. A.1.56 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 56

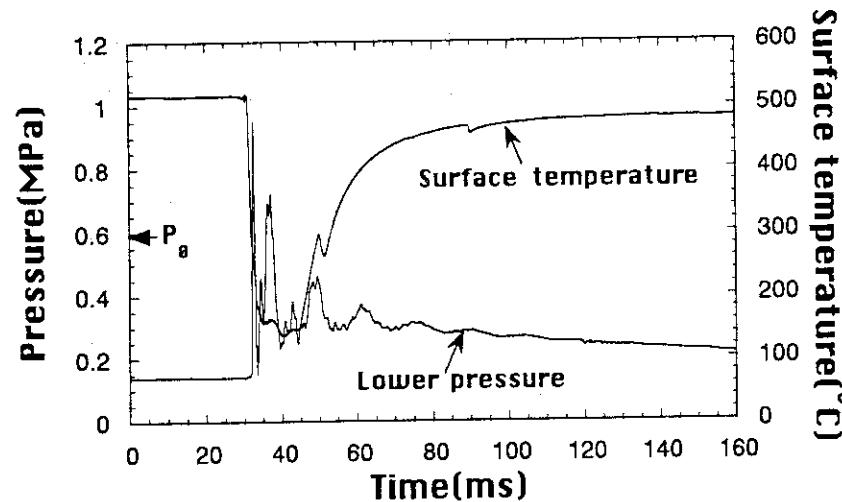


Fig. A.1.57 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 57

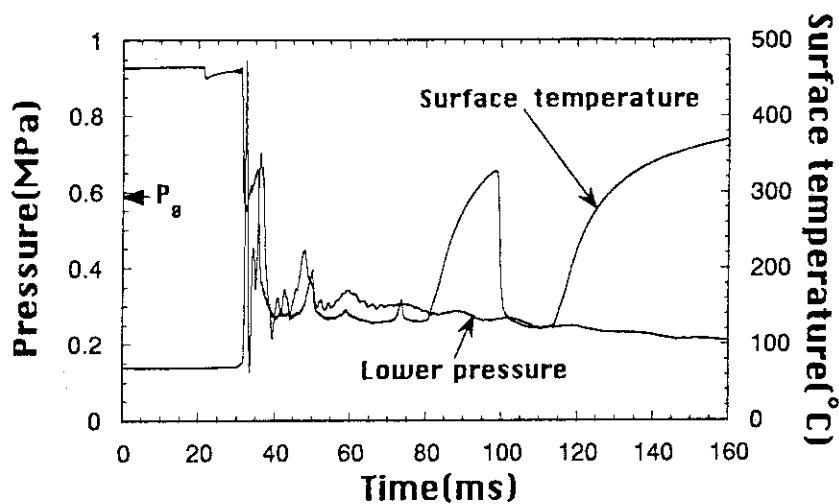


Fig. A.1.58 炭素鋼球直徑10mmの実験結果Exp. 58

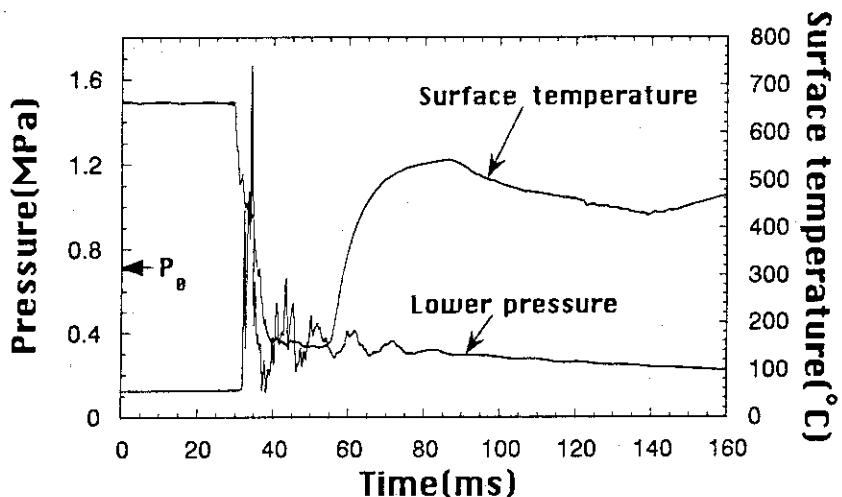


Fig. A.1.59 炭素鋼球直徑10mmの実験結果Exp. 59

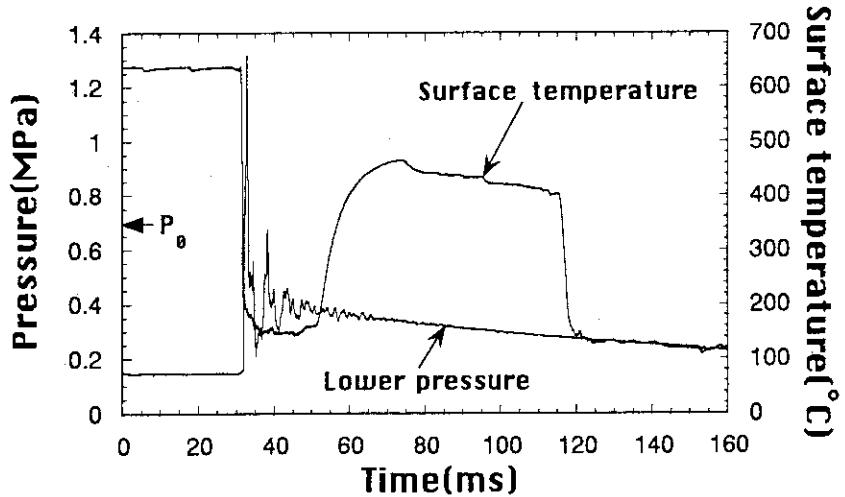


Fig. A.1.60 炭素鋼球直徑10mmの実験結果Exp. 60

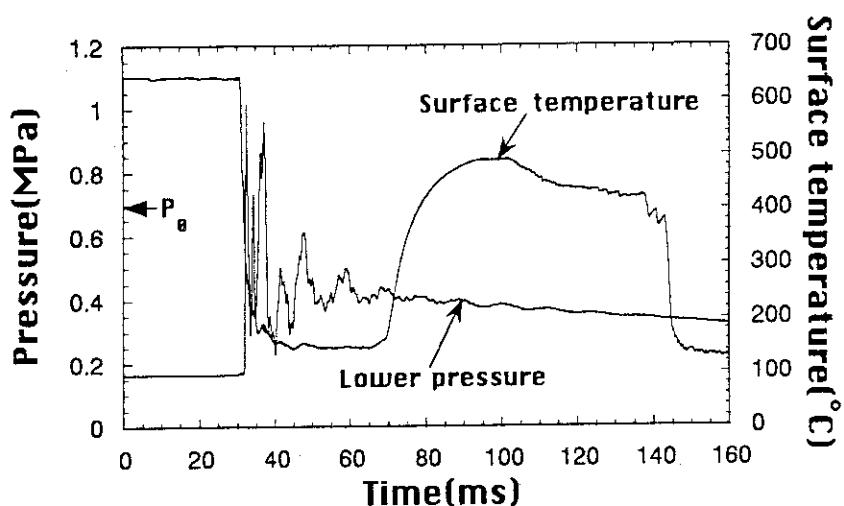


Fig. A.1.61 炭素鋼球直径10mmの実験結果Exp. 61

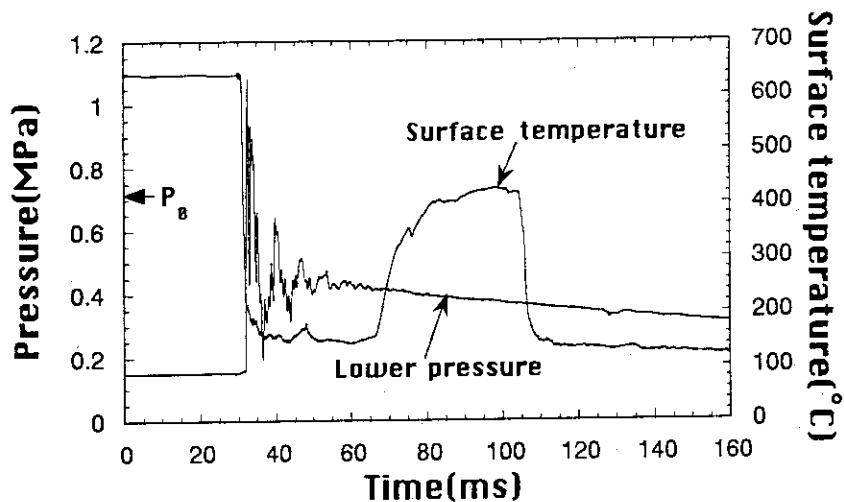


Fig. A.1.62 炭素鋼球直径10mmの実験結果Exp. 62

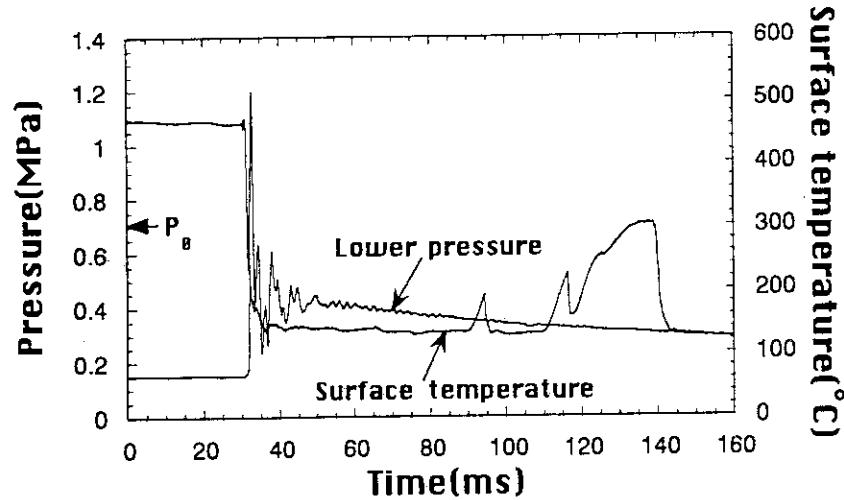


Fig. A.1.63 炭素鋼球直径10mmの実験結果Exp. 63

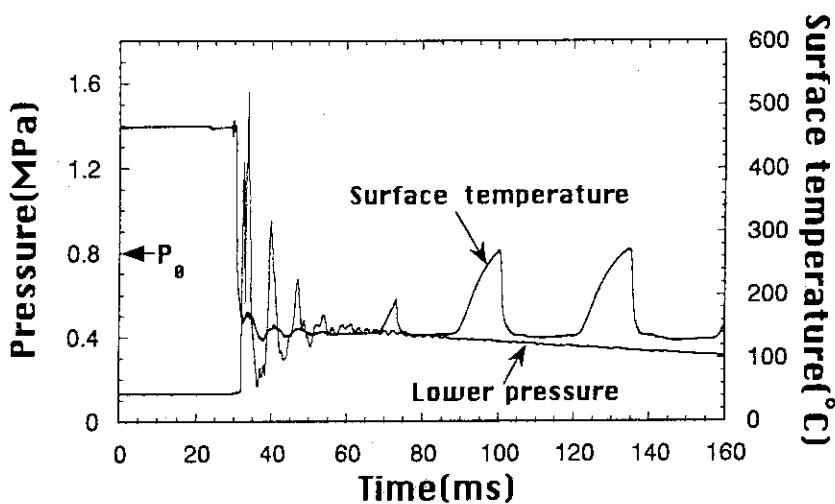


Fig. A.1.64 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 64

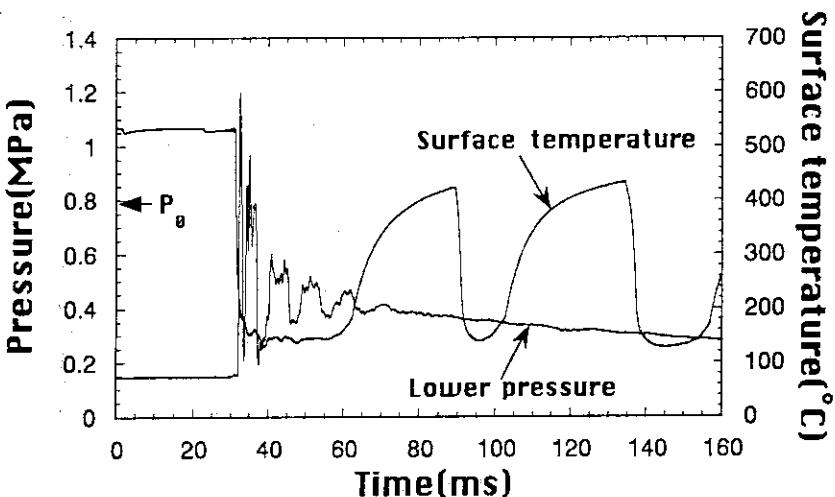


Fig. A.1.65 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 65

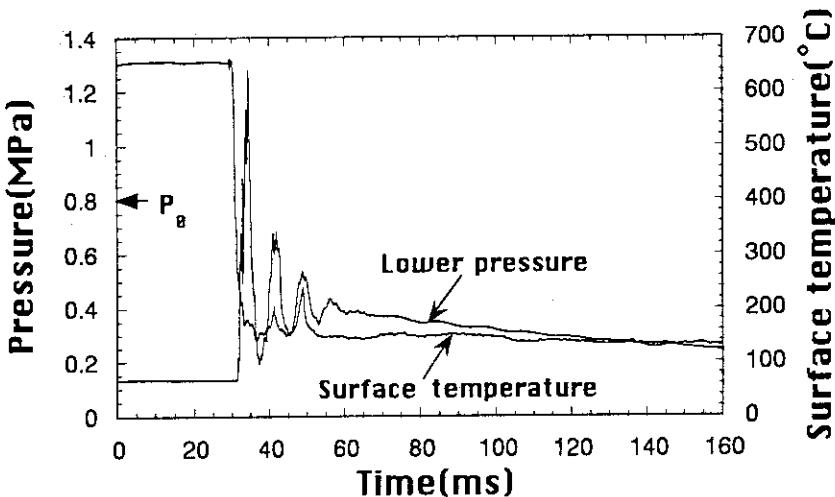


Fig. A.1.66 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 66

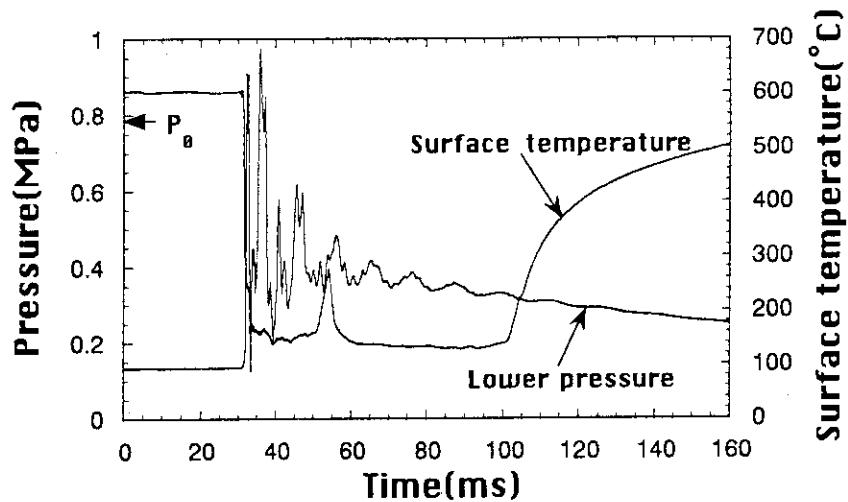


Fig. A.1.67 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 67

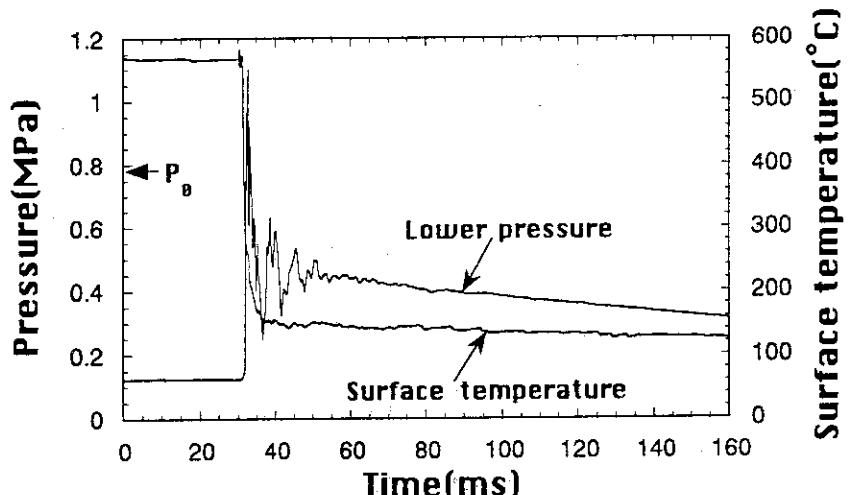


Fig. A.1.68 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 68

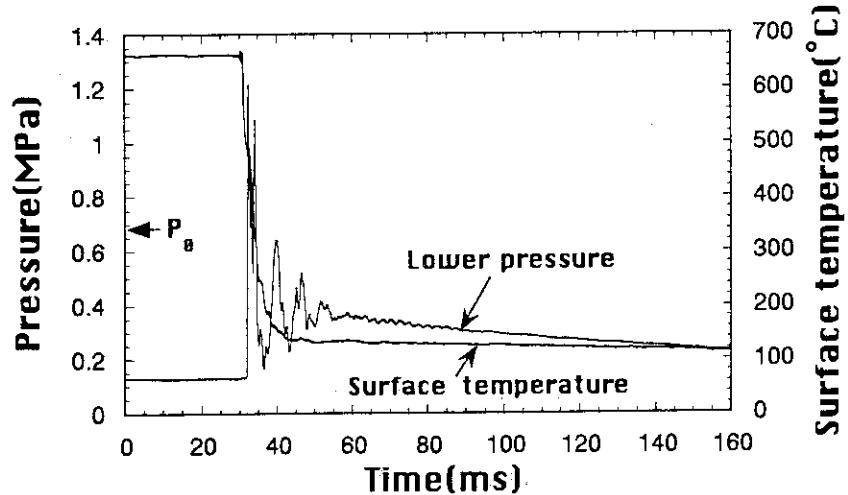


Fig. A.1.69 炭素鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 69

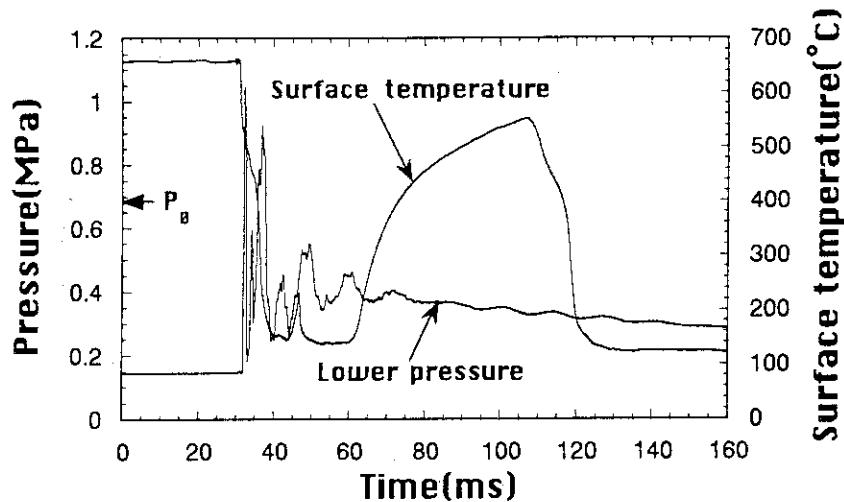


Fig. A.1.70 炭素鋼球直径10mmの実験結果Exp. 70

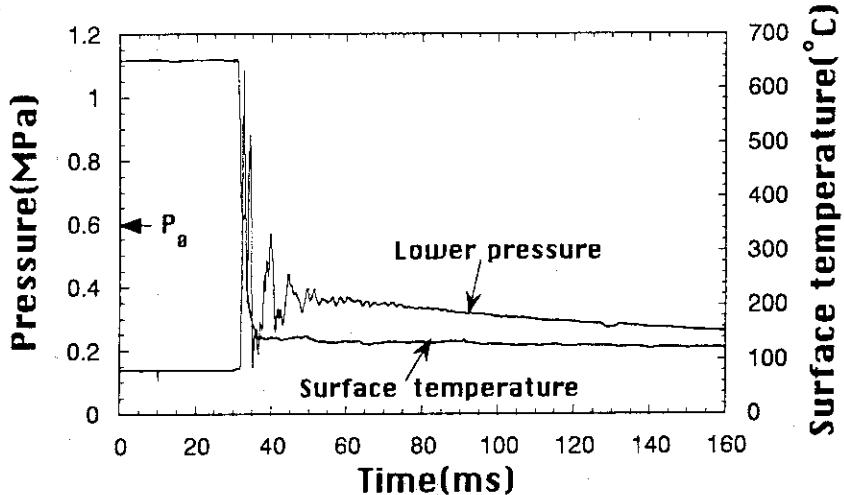


Fig. A.1.71 炭素鋼球直径10mmの実験結果Exp. 71

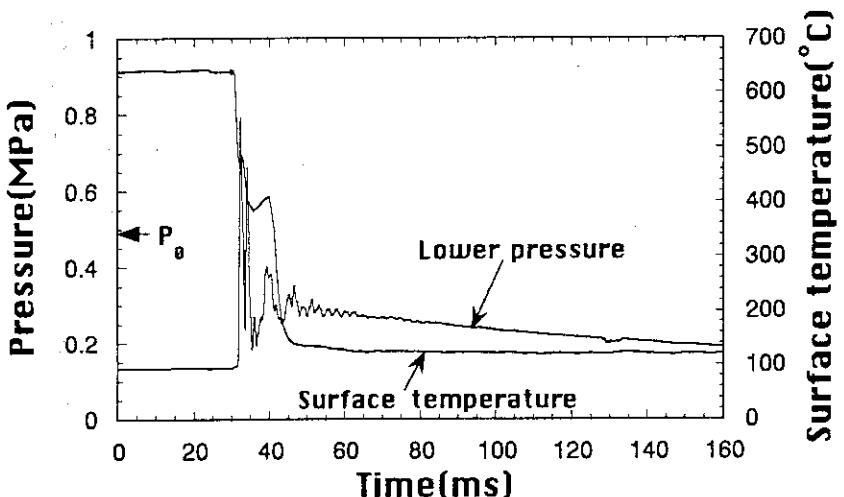


Fig. A.1.72 炭素鋼球直径10mmの実験結果Exp. 72

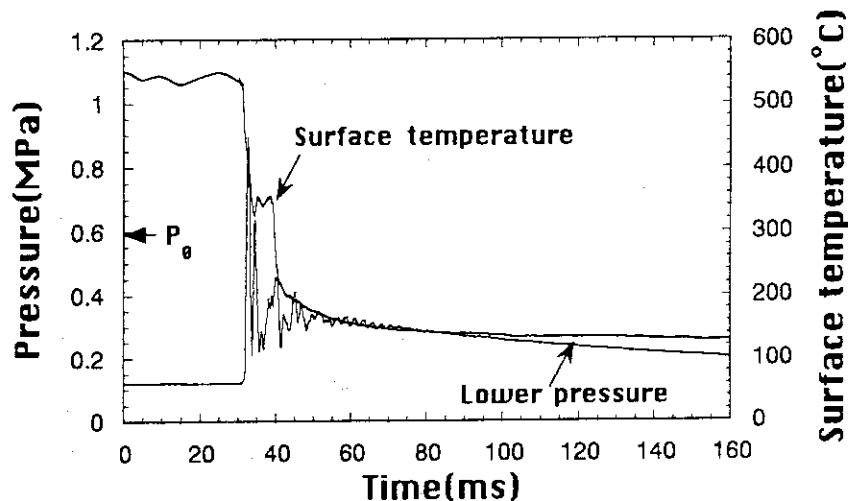


Fig. A.2.1 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 1

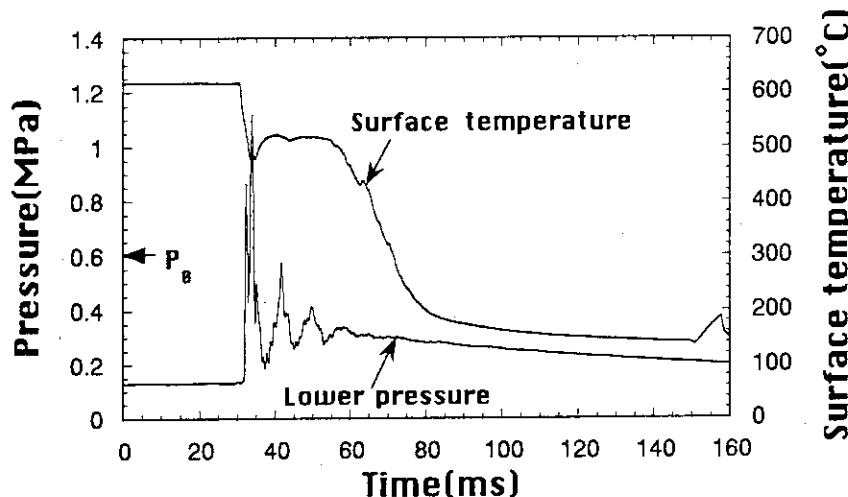


Fig. A.2.2 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 2

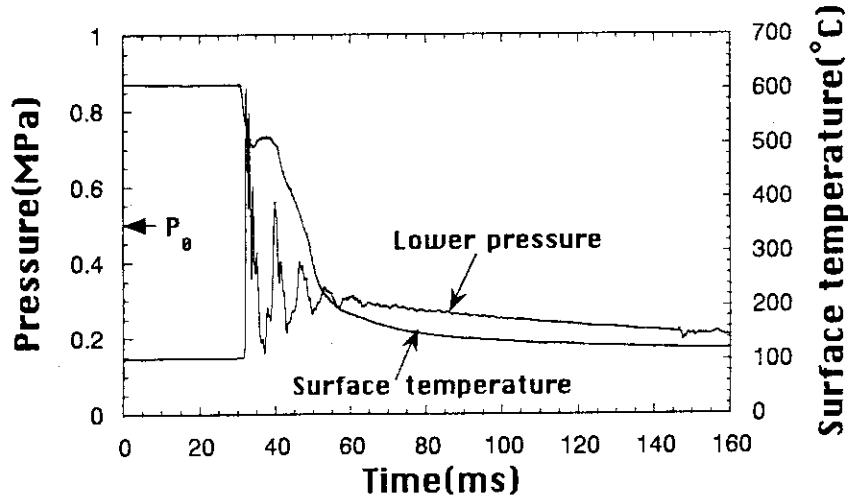


Fig. A.2.3 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 3

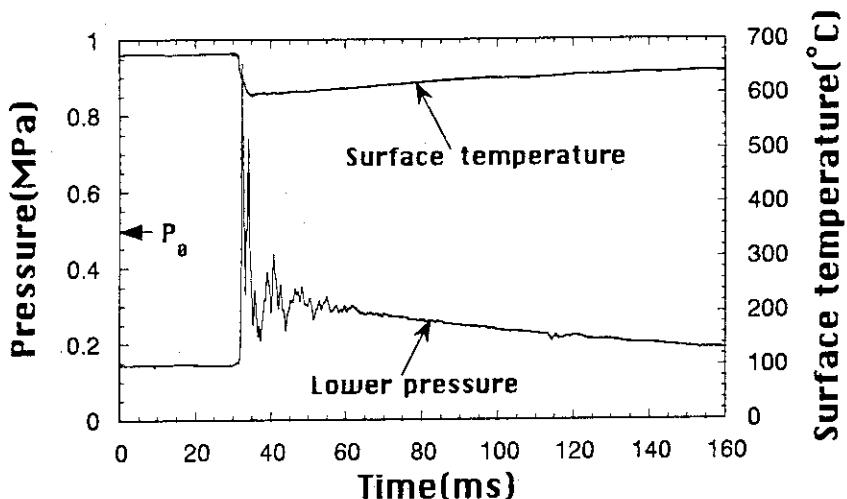


Fig. A.2.4 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 4

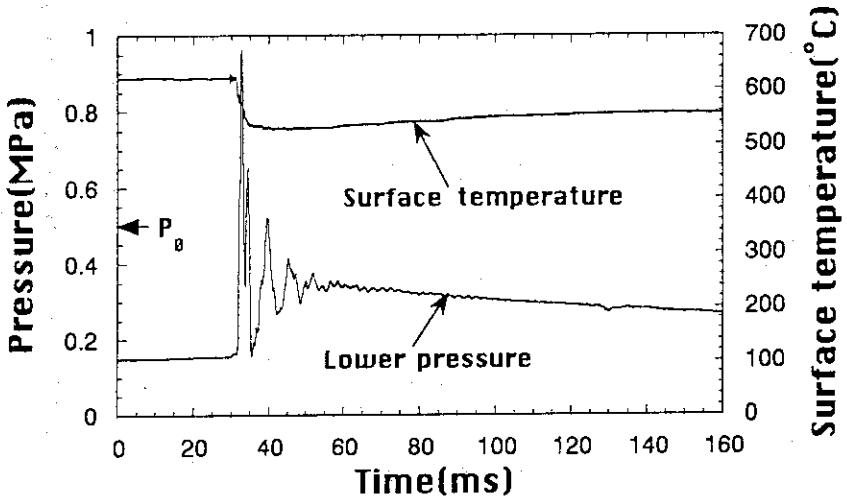


Fig. A.2.5 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 5

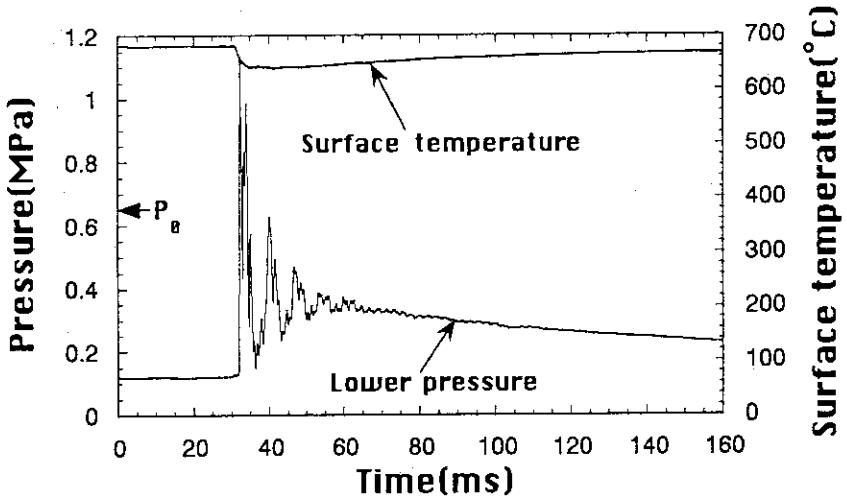


Fig. A.2.6 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 6

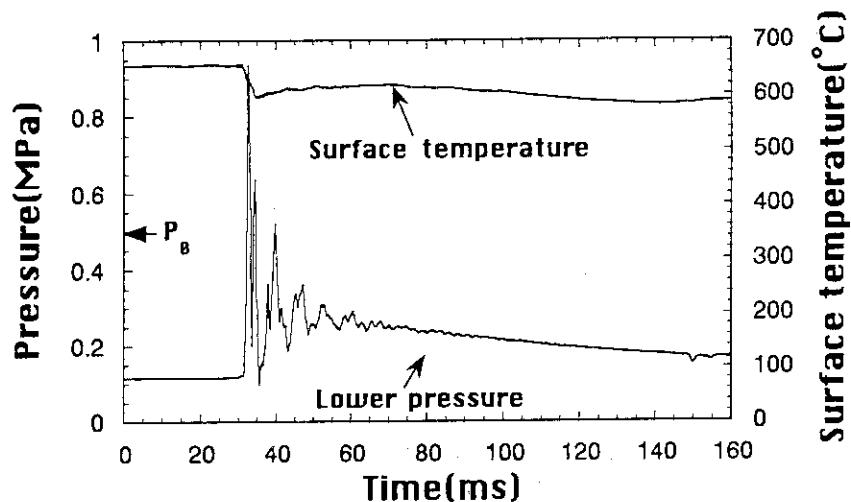


Fig. A.2.7 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 7

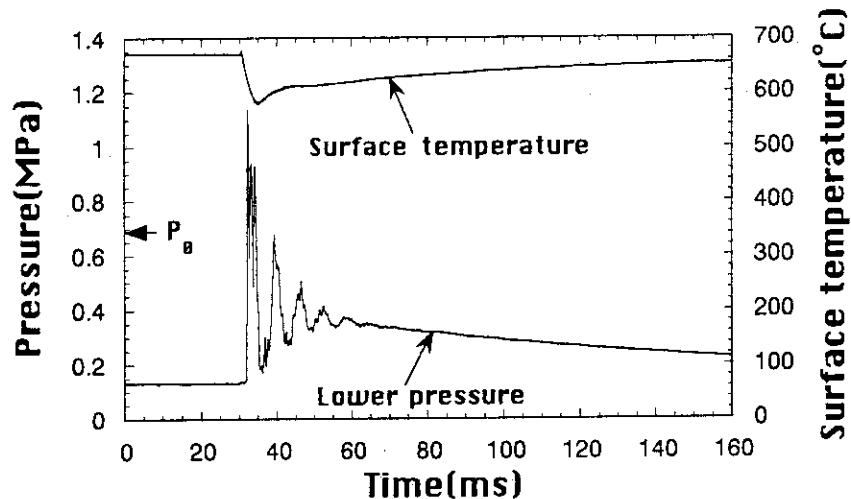


Fig. A.2.8 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 8

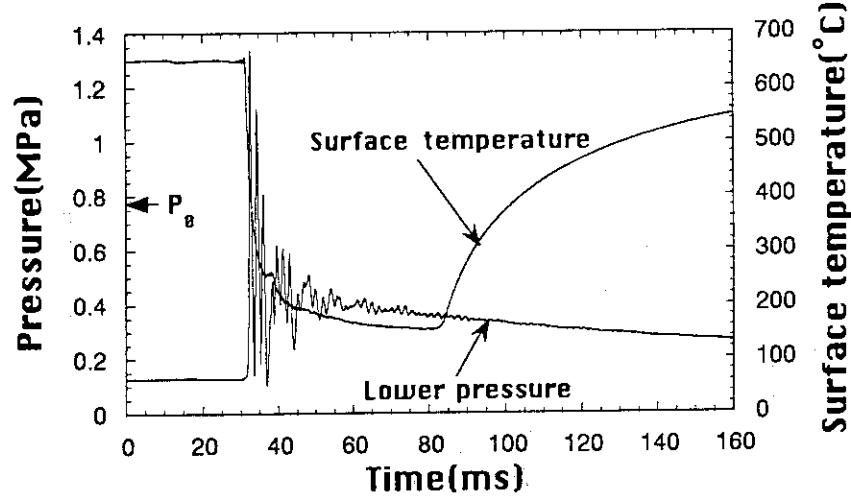


Fig. A.2.9 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 9

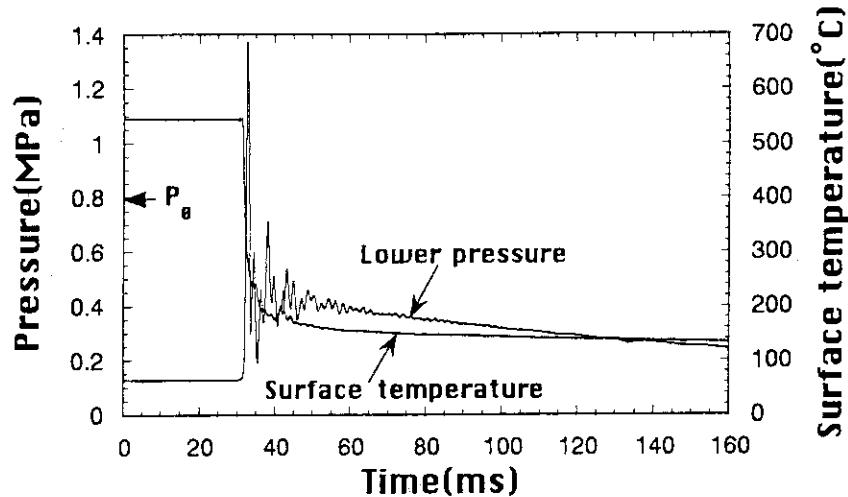


Fig. A.2.10 炭素鋼球直徑15mmの実験結果Exp. 10

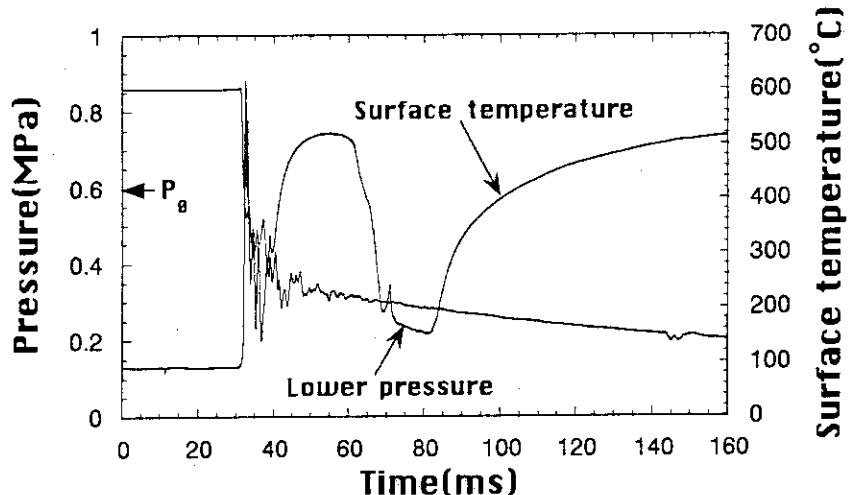


Fig. A.2.11 炭素鋼球直徑15mmの実験結果Exp. 11

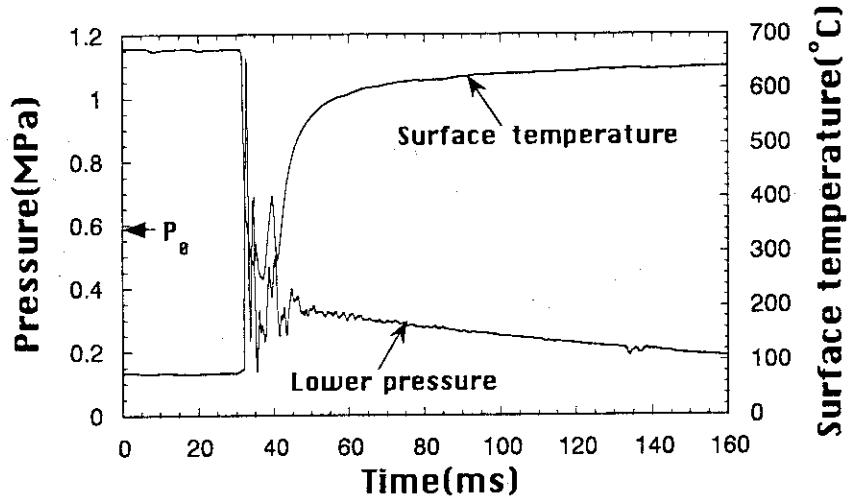


Fig. A.2.12 炭素鋼球直徑15mmの実験結果Exp. 12

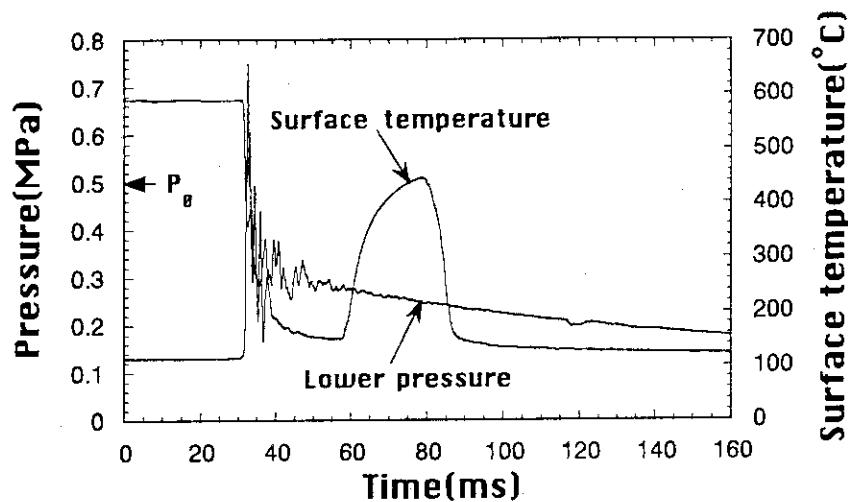


Fig. A.2.13 炭素鋼球直径15mmの実験結果Exp. 13

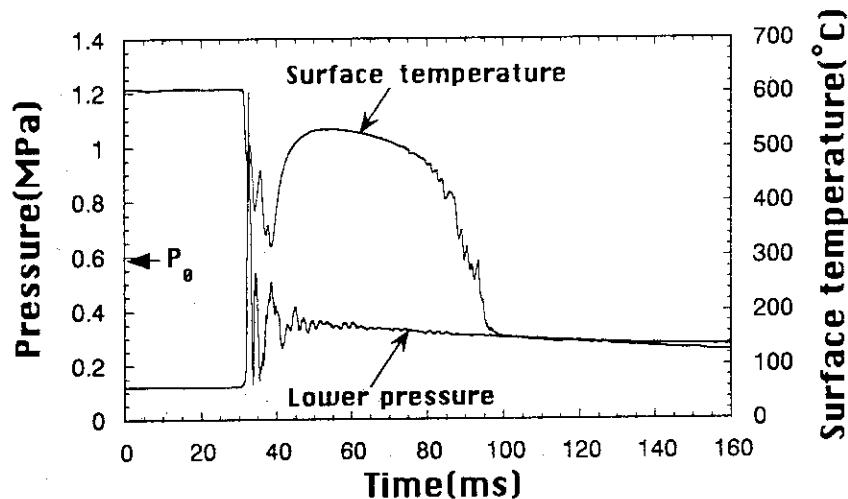


Fig. A.2.14 炭素鋼球直径15mmの実験結果Exp. 14

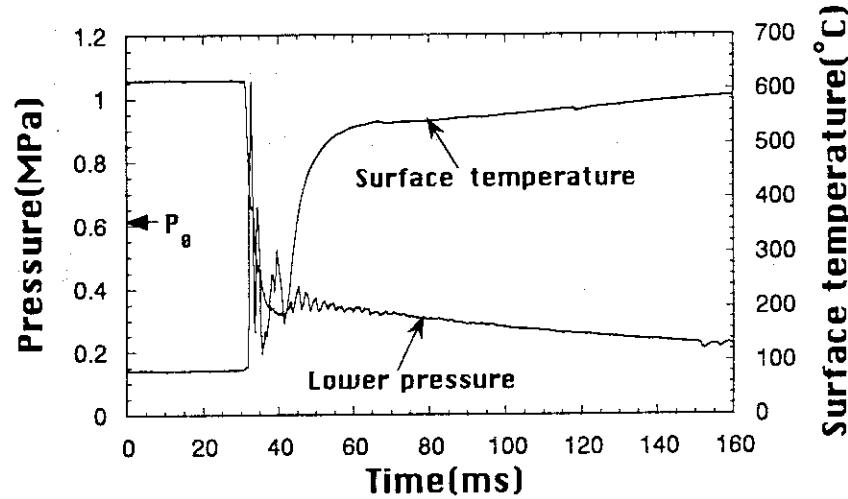


Fig. A.2.15 炭素鋼球直径15mmの実験結果Exp. 15

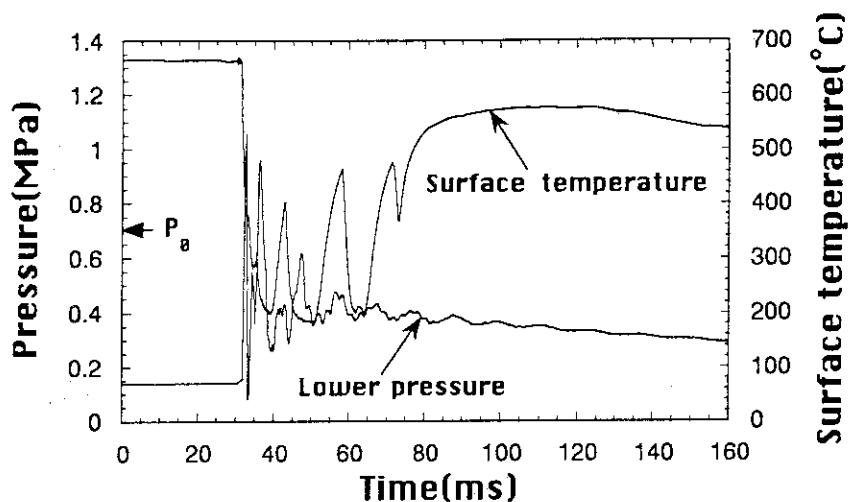


Fig. A.2.16 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 16

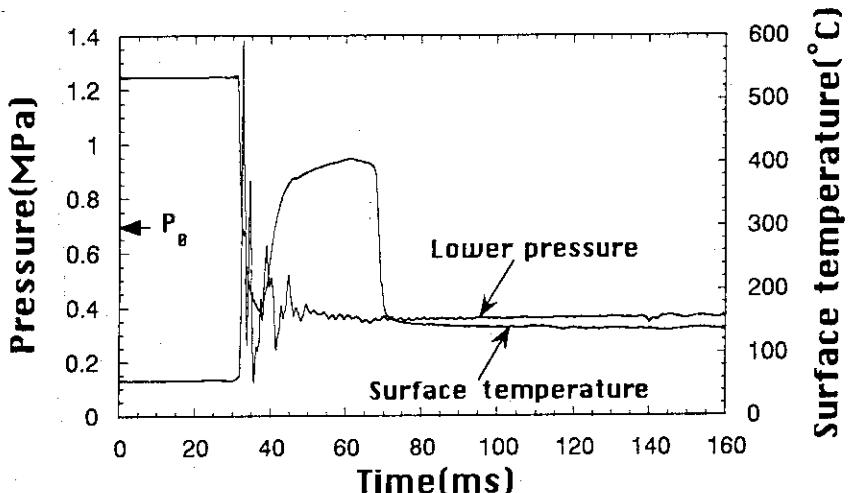


Fig. A.2.17 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 17

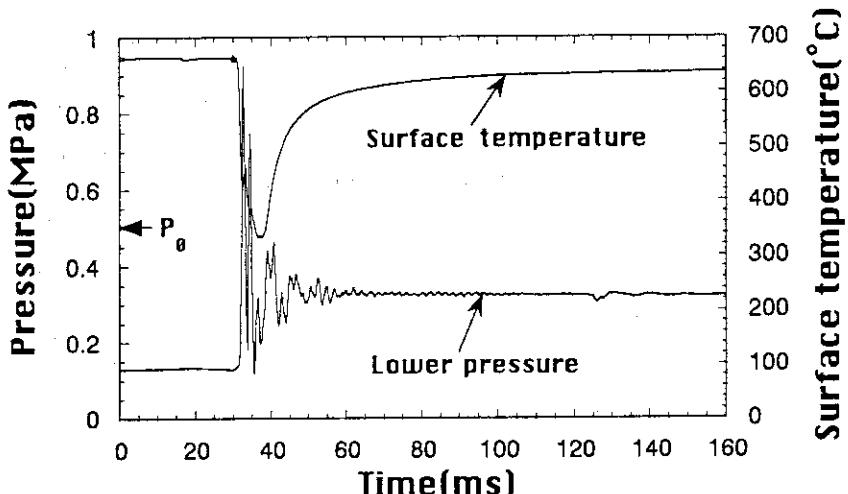


Fig. A.2.18 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 18

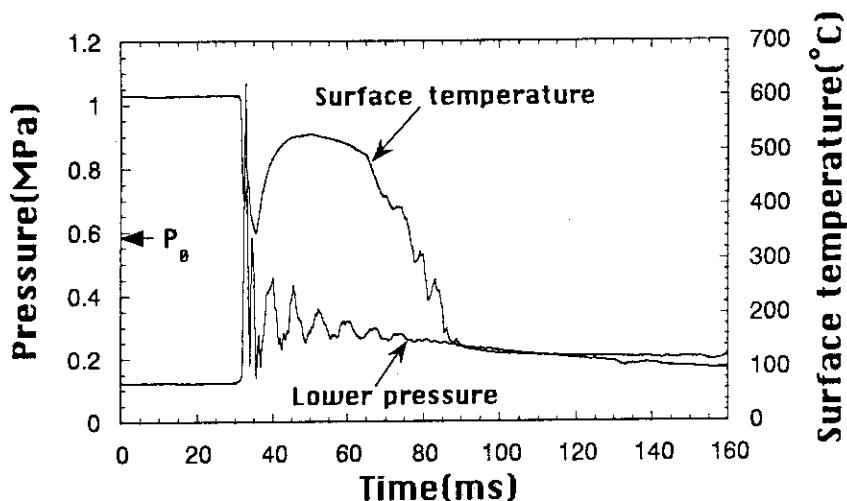


Fig. A.2.19 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 19

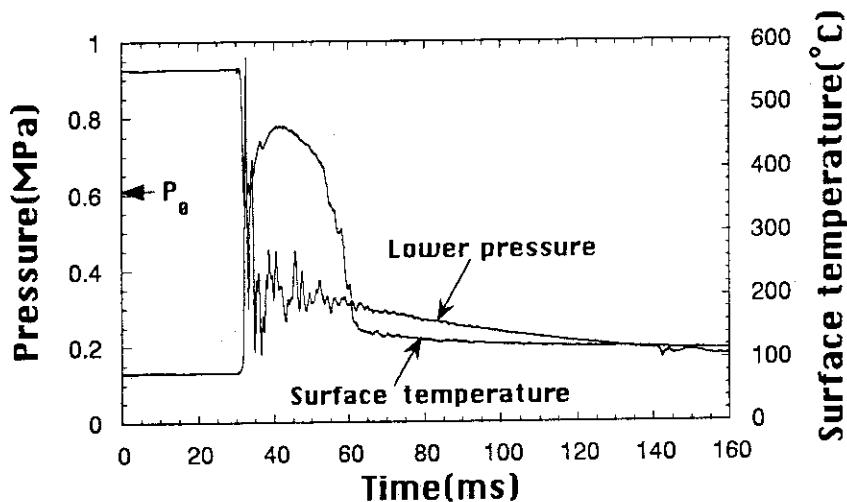


Fig. A.2.20 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 20

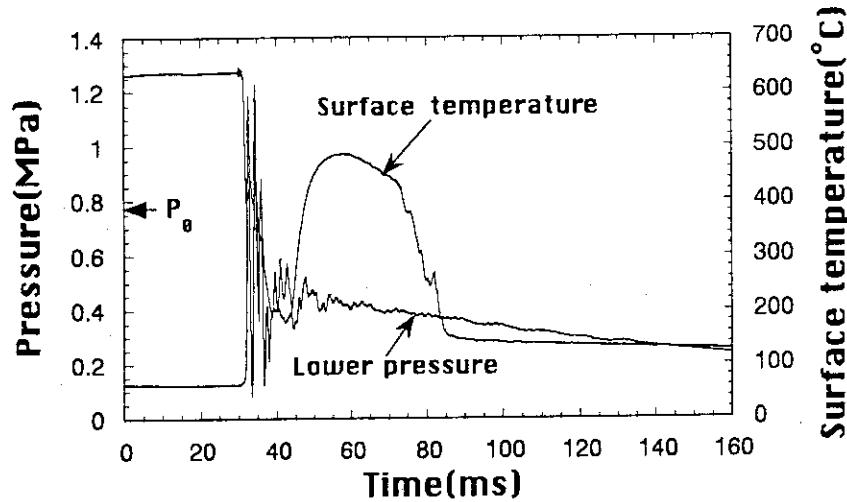


Fig. A.2.21 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 21

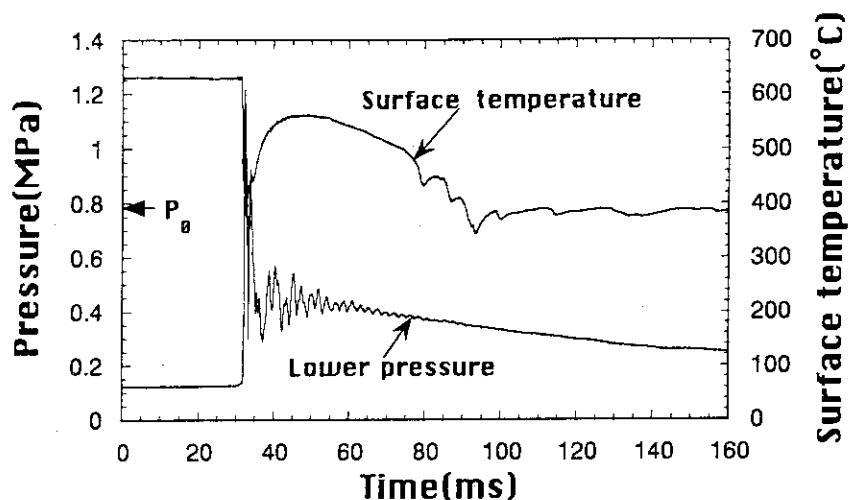


Fig. A.2.22 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 22

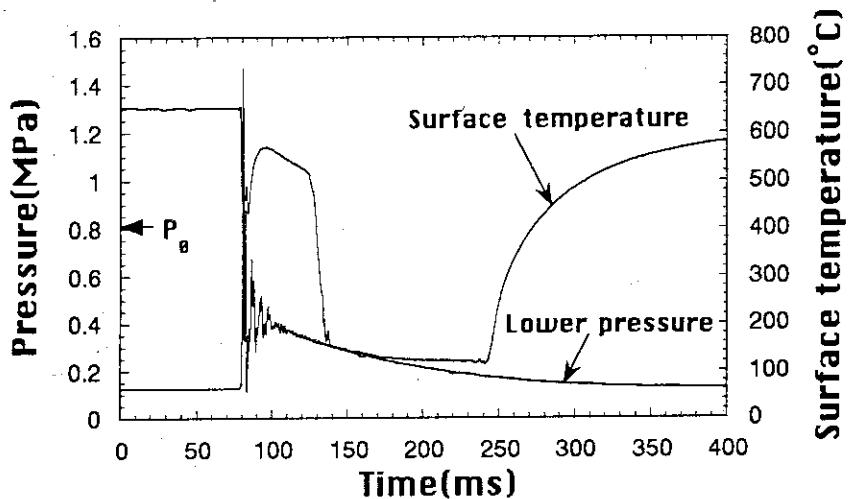


Fig. A.2.23 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 23

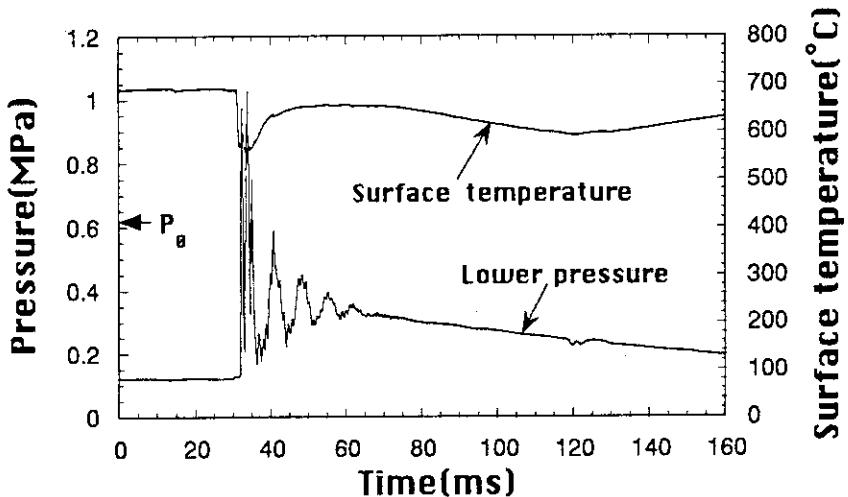


Fig. A.2.24 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 24

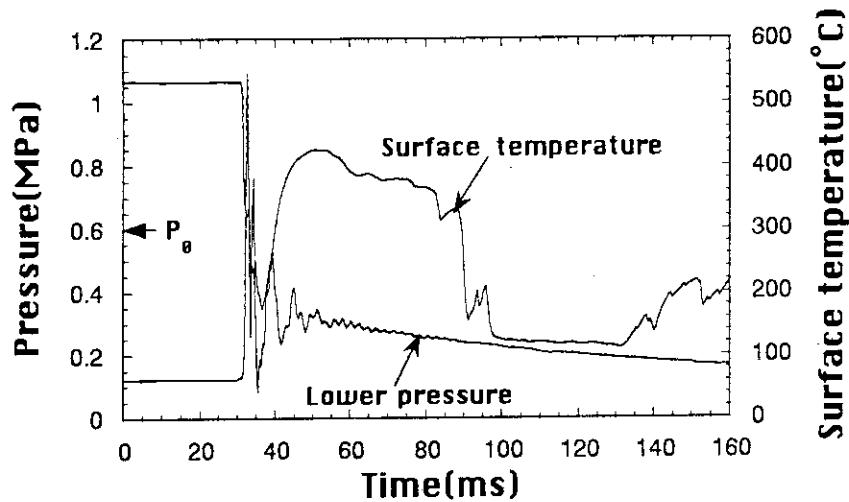


Fig. A.2.25 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 25

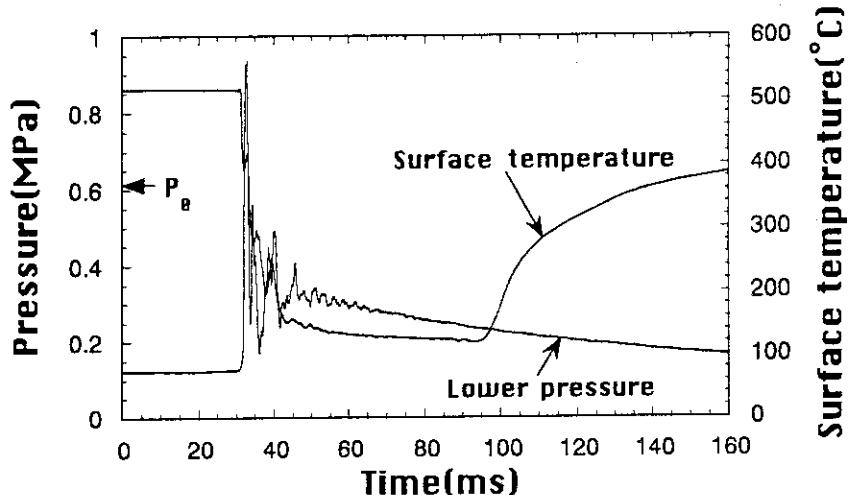


Fig. A.2.26 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 26

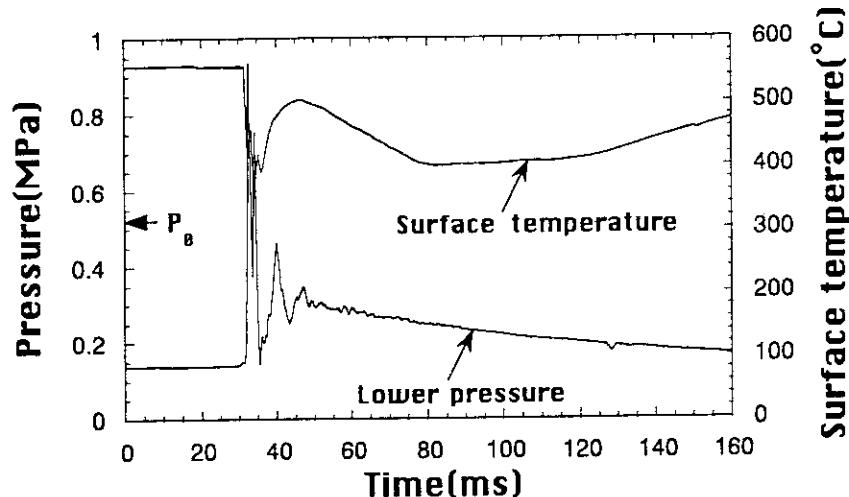


Fig. A.2.27 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 27

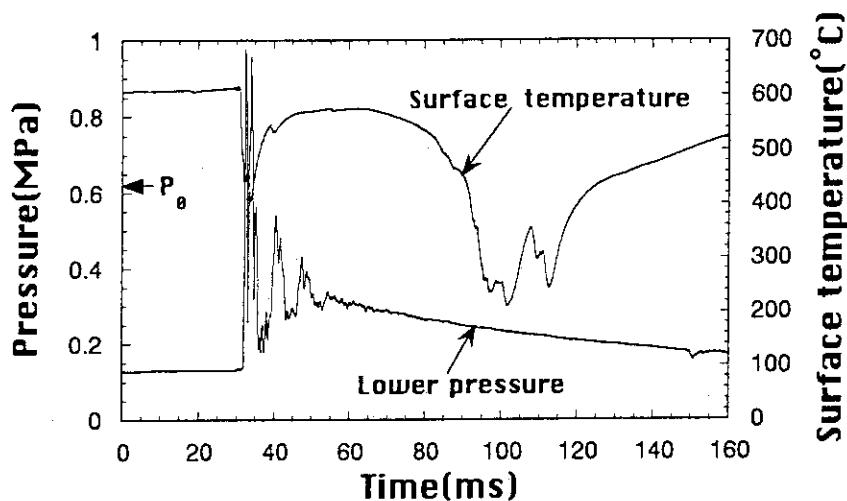


Fig. A.2.28 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 28

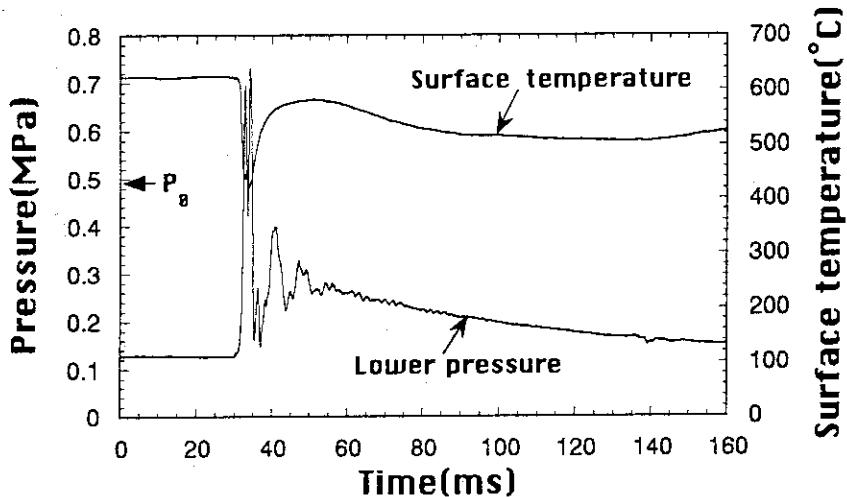


Fig. A.2.29 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 29

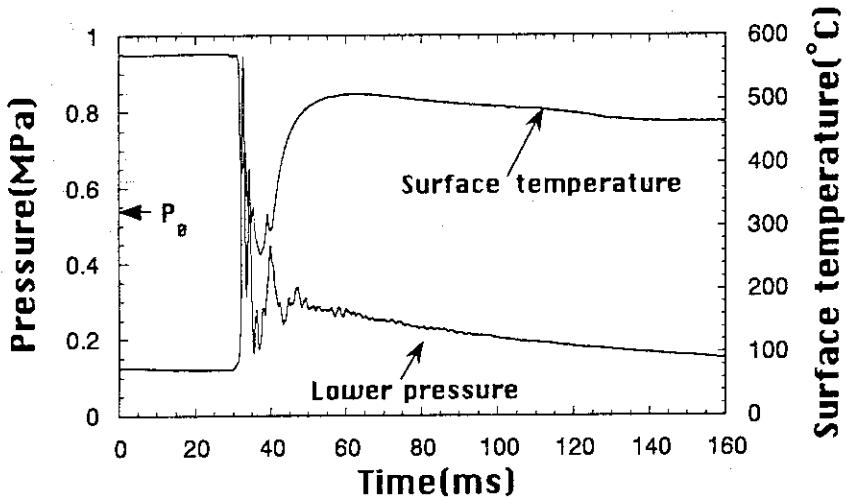


Fig. A.2.30 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 30

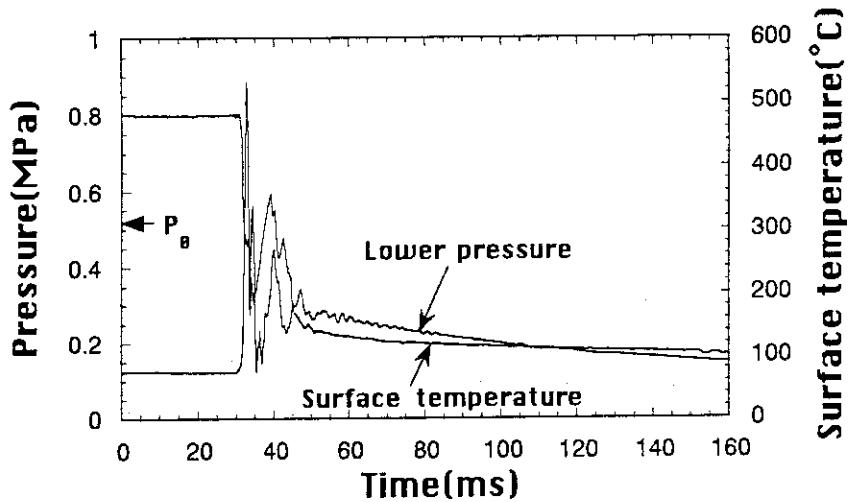


Fig. A.2.31 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 31

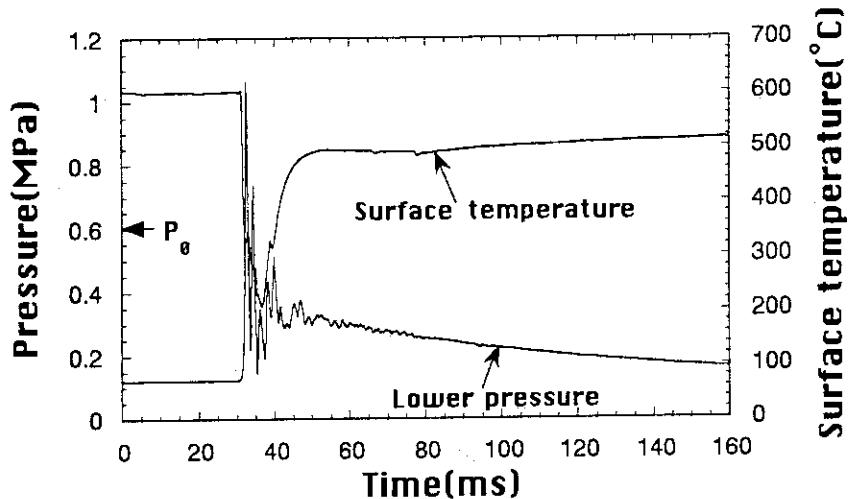


Fig. A.2.32 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 32

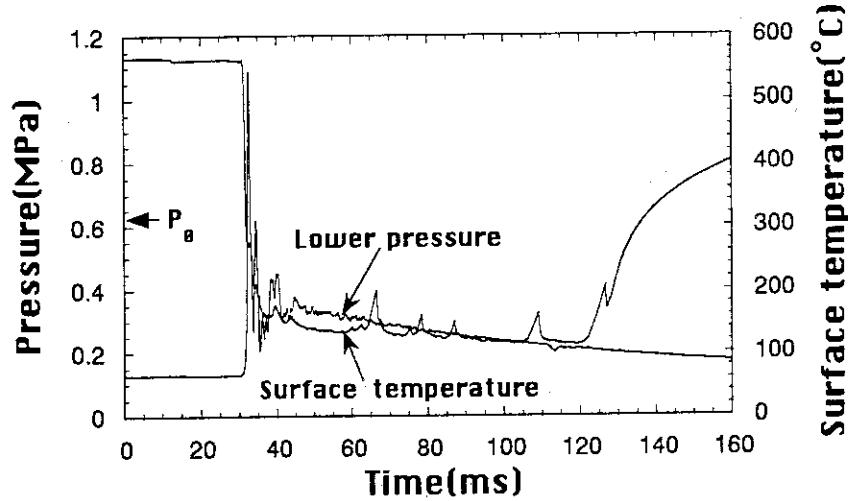


Fig. A.2.33 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 33

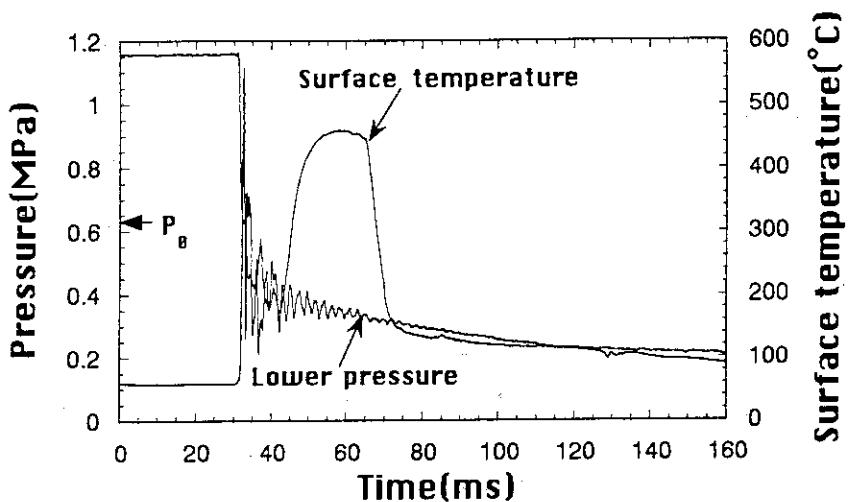


Fig. A.2.34 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 34

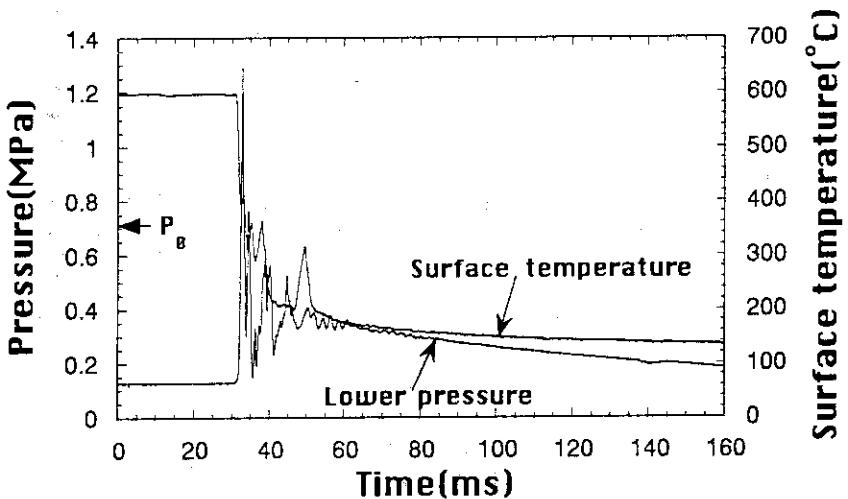


Fig. A.2.35 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 35

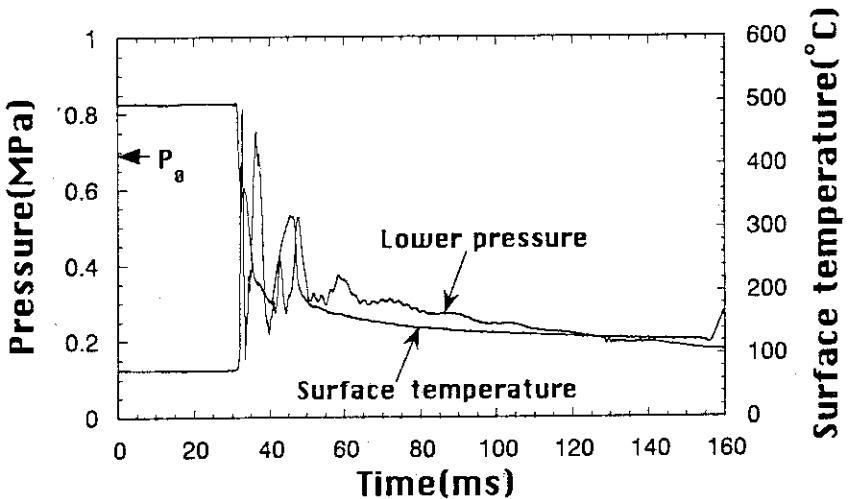


Fig. A.2.36 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 36

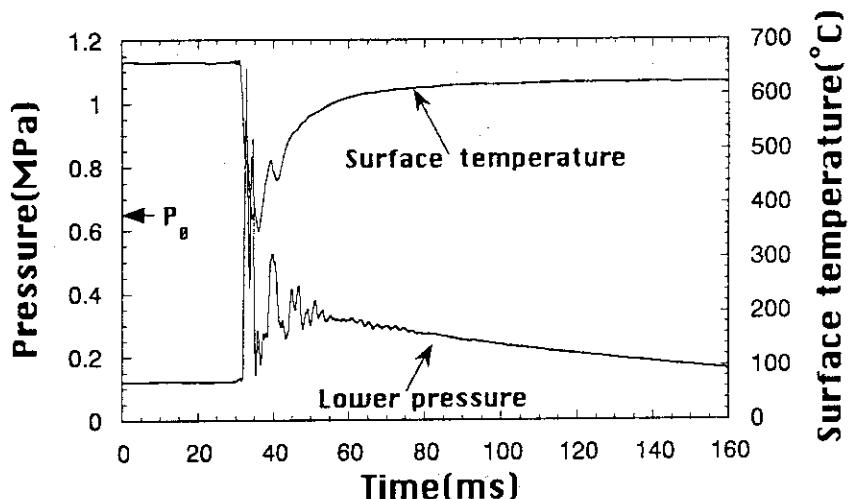


Fig. A.2.37 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 37

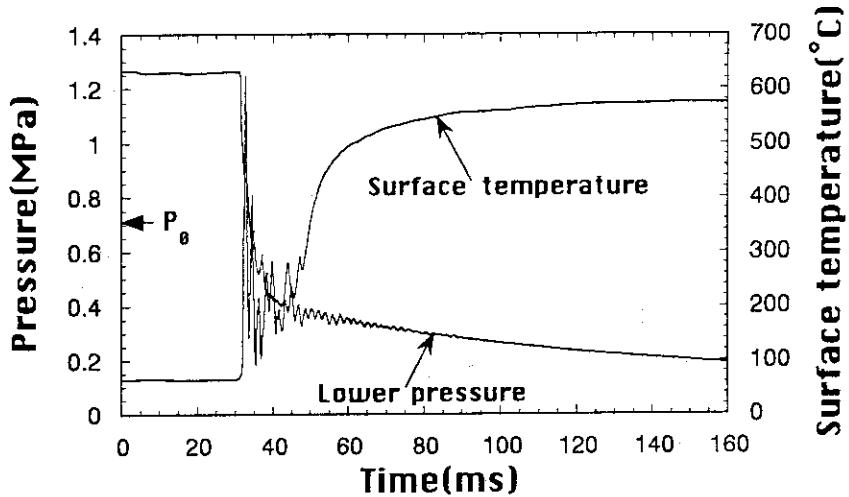


Fig. A.2.38 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 38

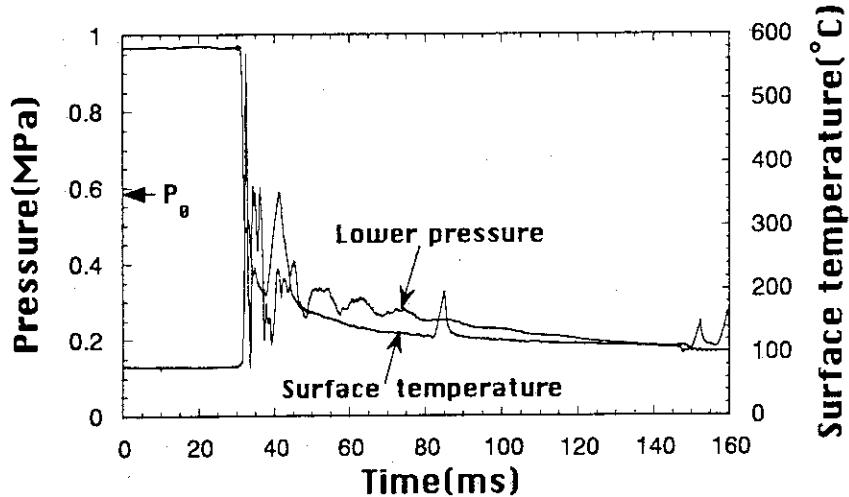


Fig. A.2.39 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 39

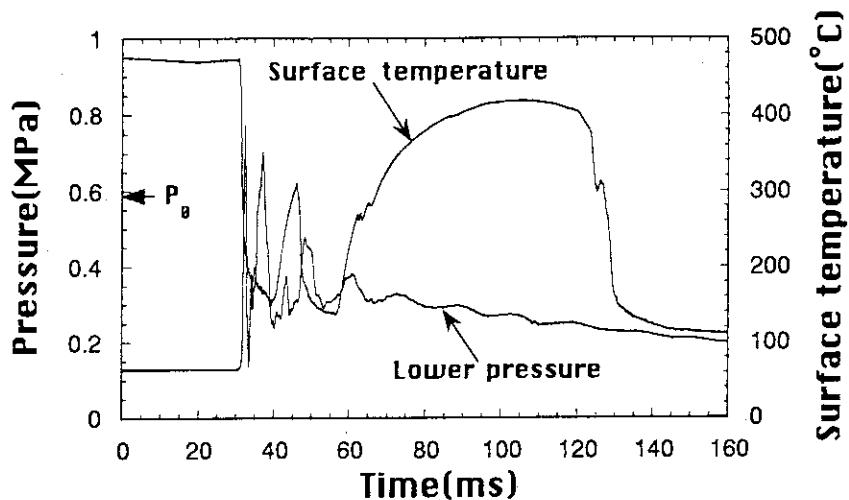


Fig. A.2.40 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 40

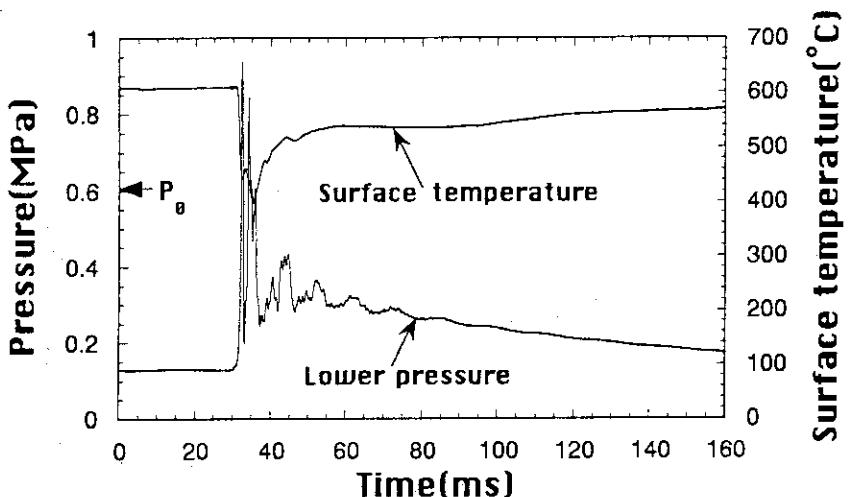


Fig. A.2.41 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 41

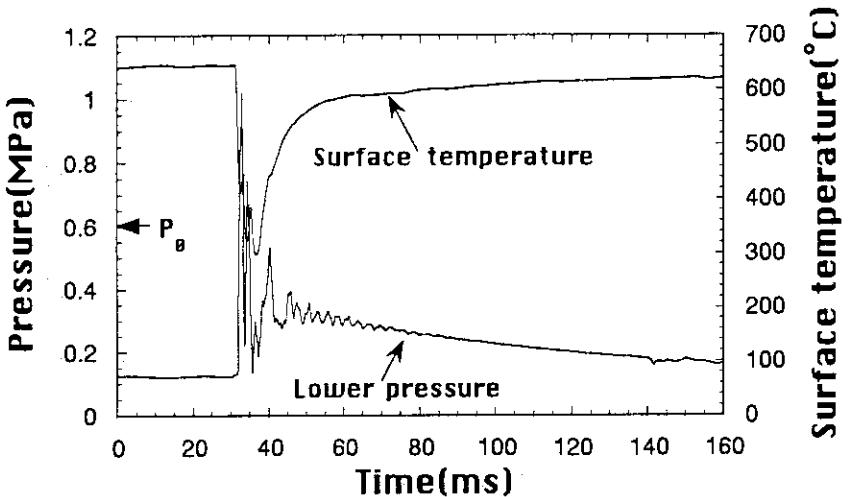


Fig. A.2.42 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 42

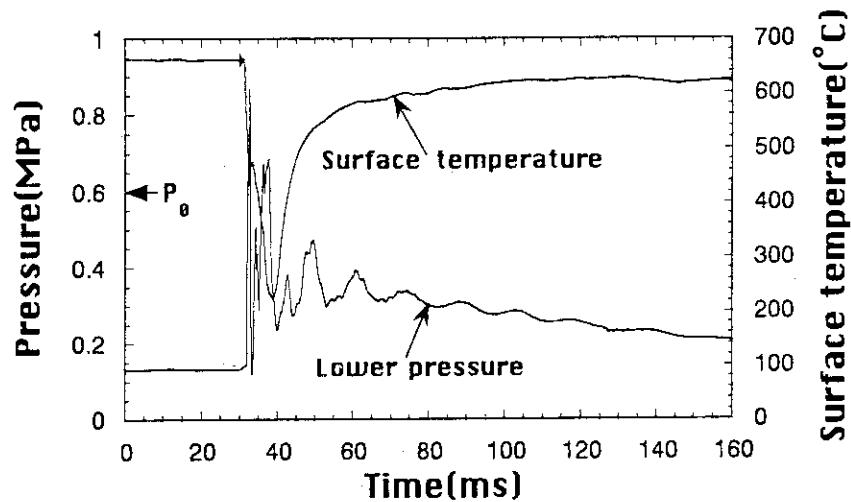


Fig. A.2.43 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 43

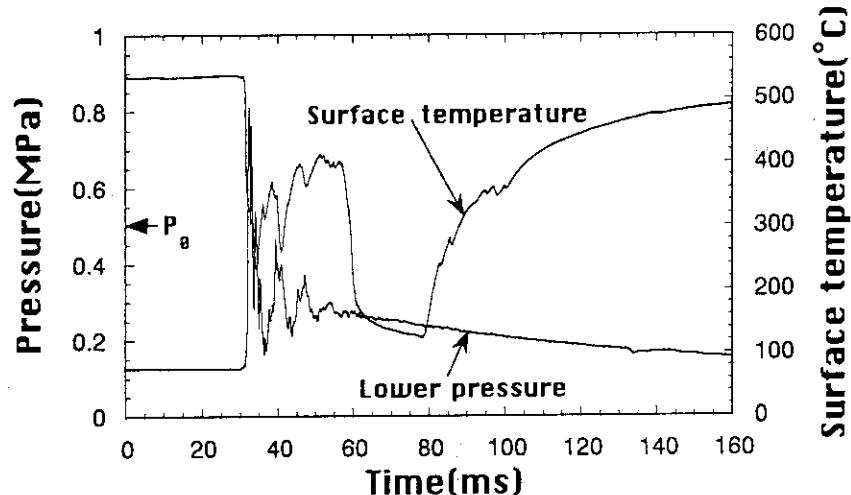


Fig. A.2.44 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 44

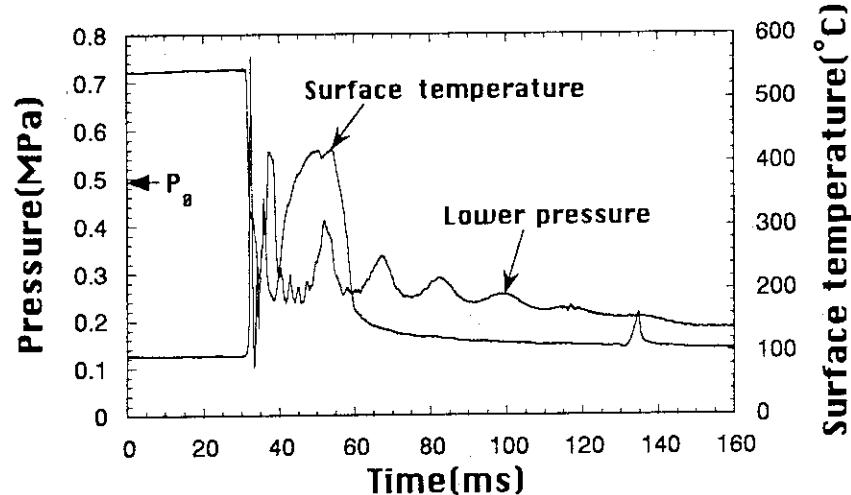


Fig. A.2.45 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 45

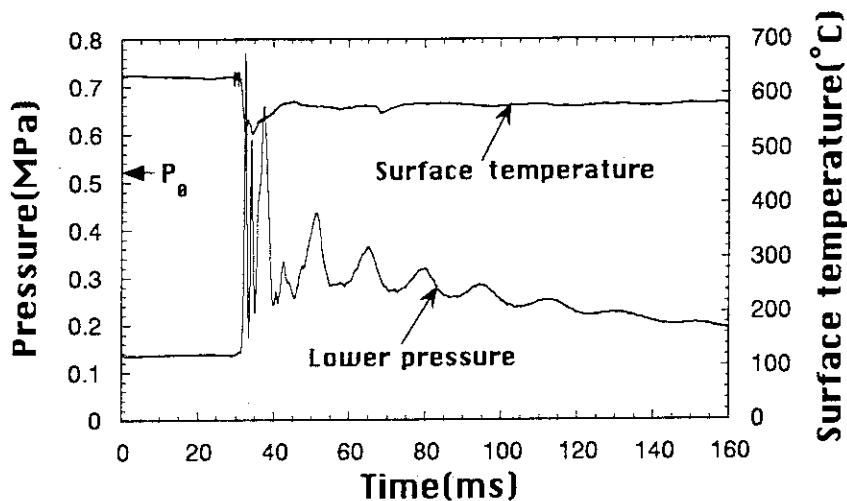


Fig. A.2.46 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 46

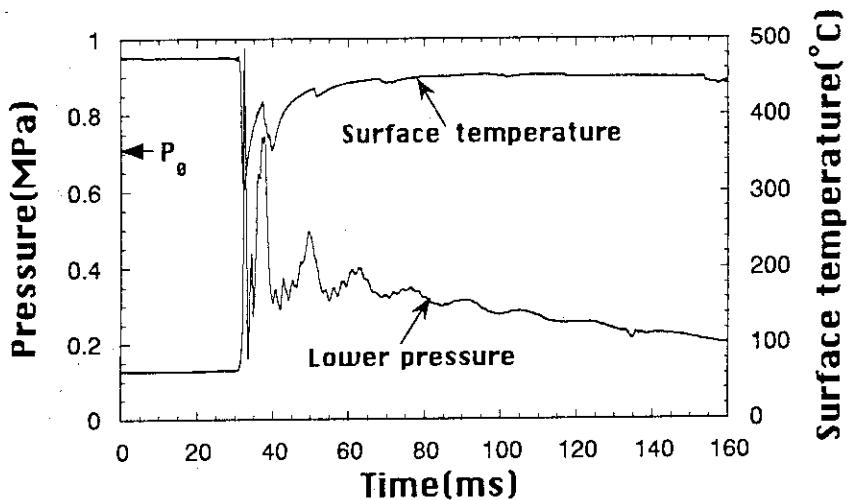


Fig. A.2.47 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 47

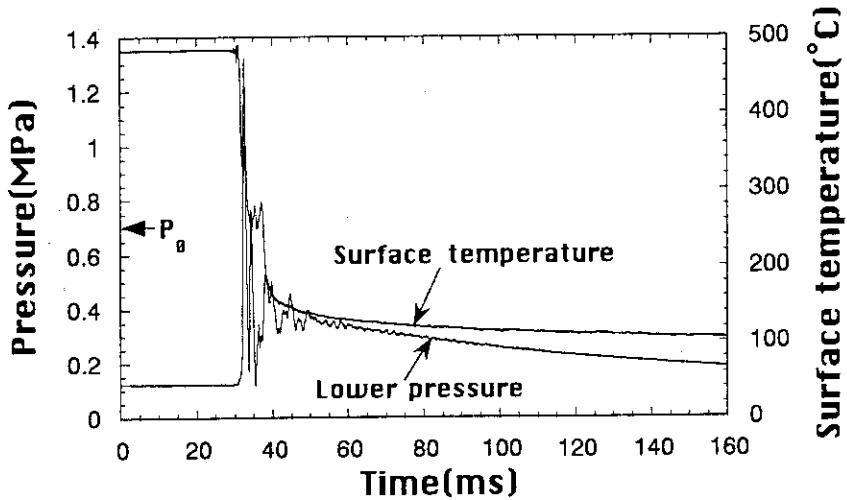


Fig. A.2.48 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 48

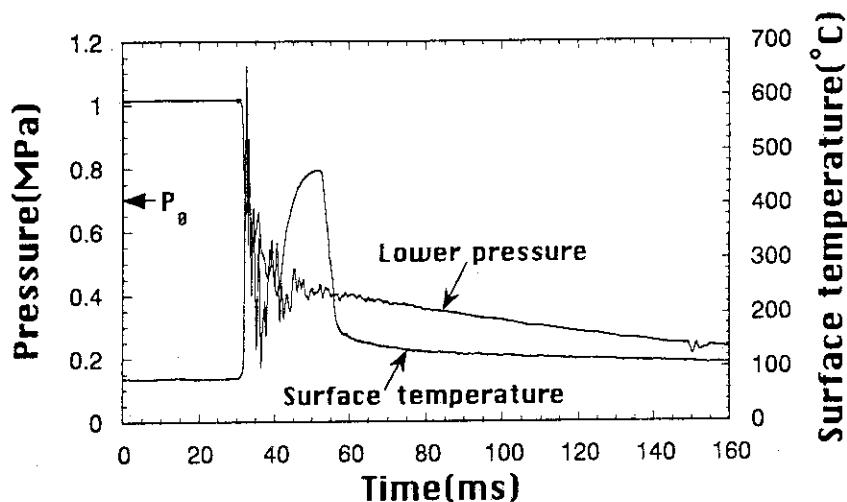


Fig. A.2.49 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 49

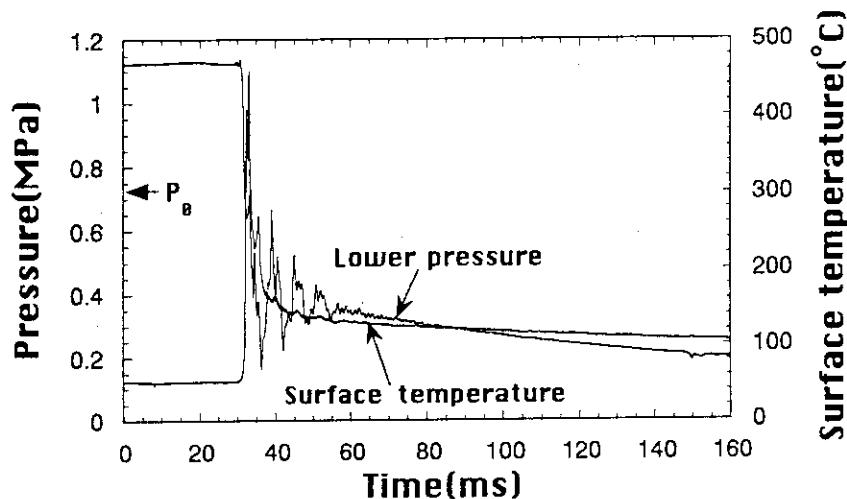


Fig. A.2.50 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 50

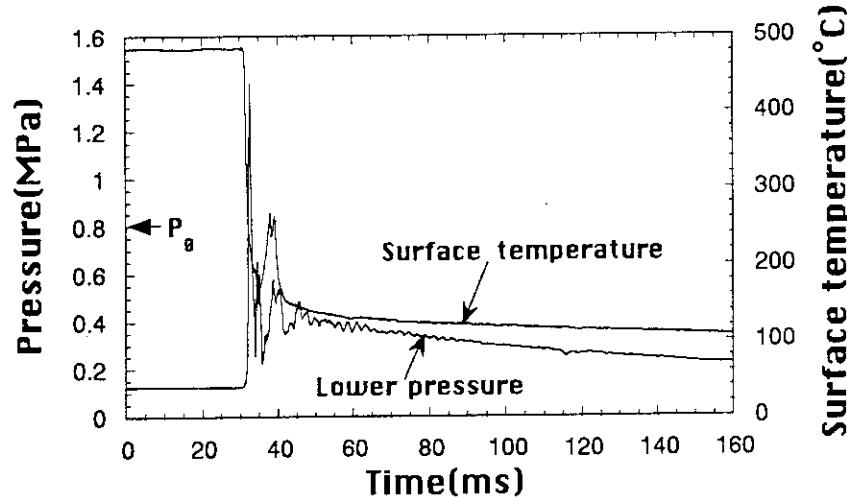


Fig. A.2.51 炭素鋼球直 径15mmの実験結果Exp. 51

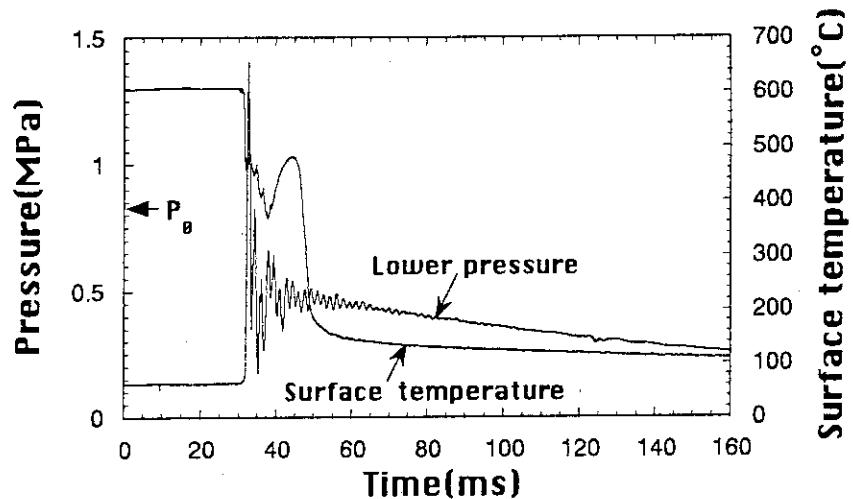


Fig. A.2.52 炭素鋼球直径15mmの実験結果Exp. 52

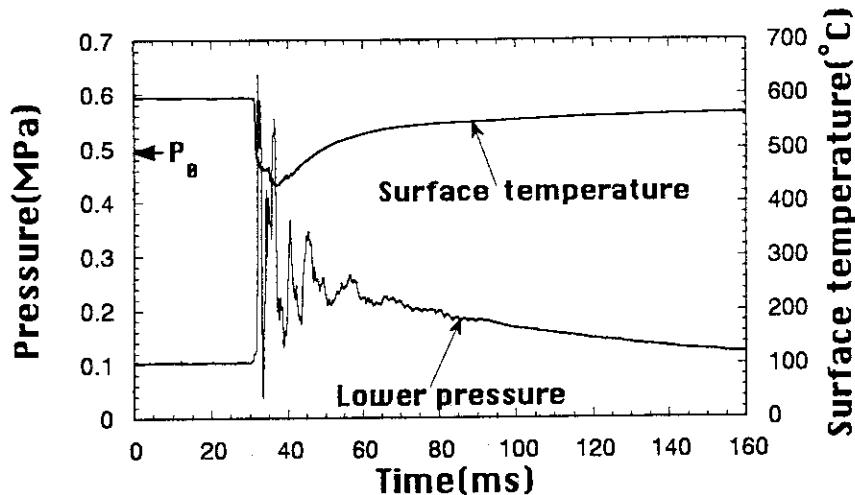


Fig. A.3.1 ステンレス鋼球直径10mmの実験結果Exp. 1

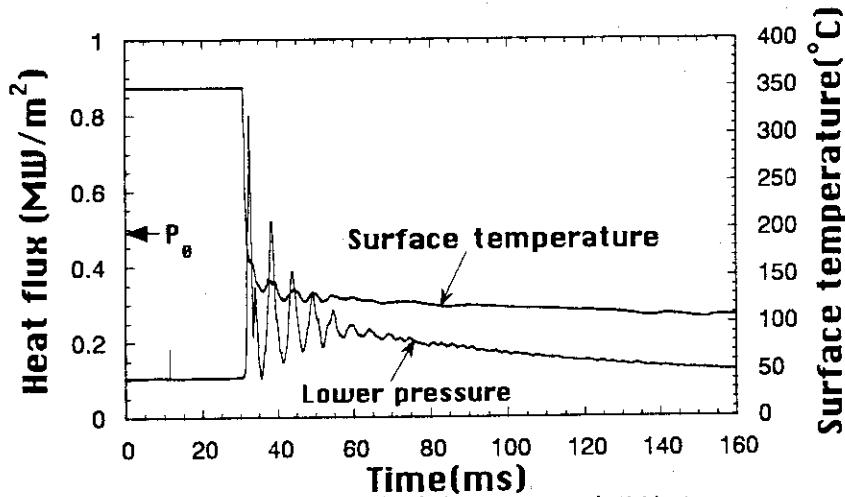


Fig. A.3.2 ステンレス鋼球直径10mmの実験結果Exp. 2

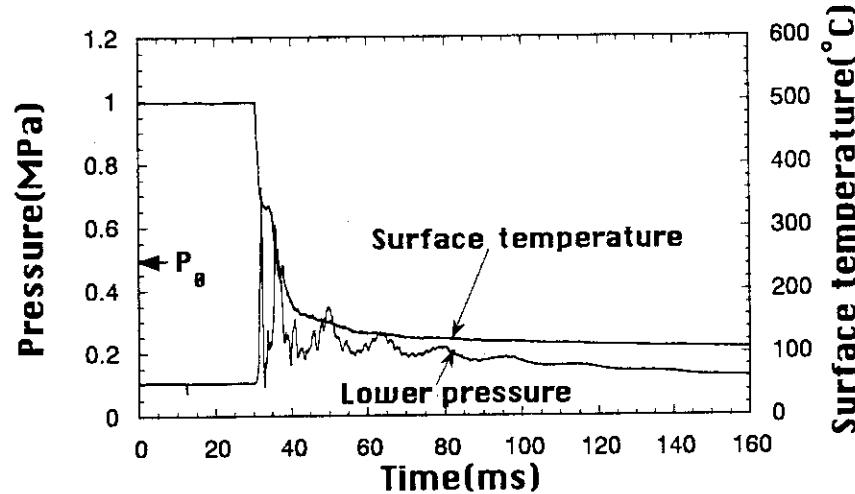


Fig. A.3.3 ステンレス鋼球直径10mmの実験結果Exp. 3

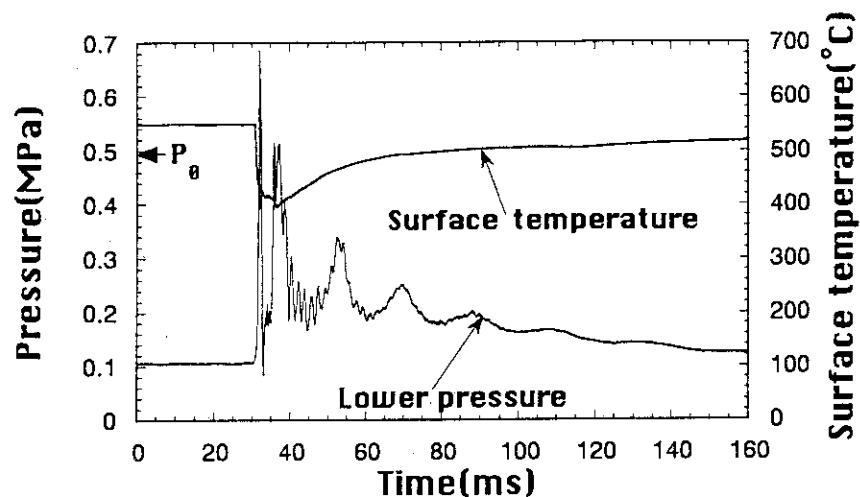


Fig. A.3.4 ステンレス鋼球直径10mmの実験結果Exp. 4

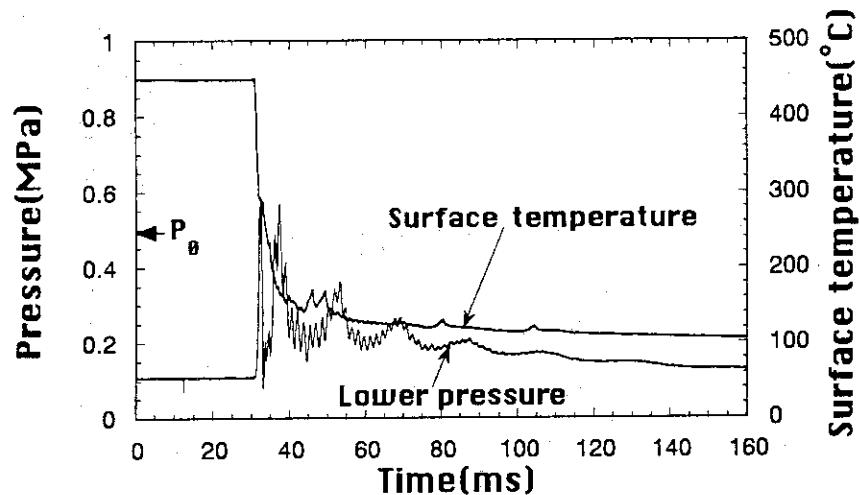


Fig. A.3.5 ステンレス鋼球直径10mmの実験結果Exp. 5

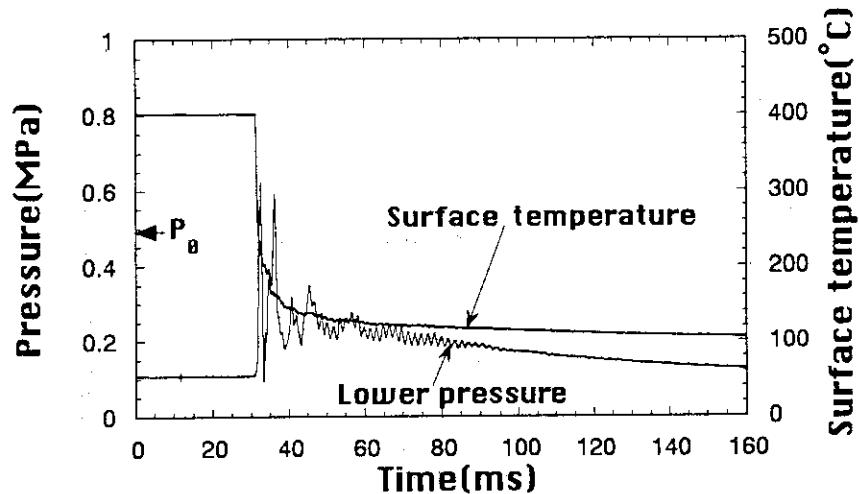


Fig. A.3.6 ステンレス鋼球直径10mmの実験結果Exp. 6

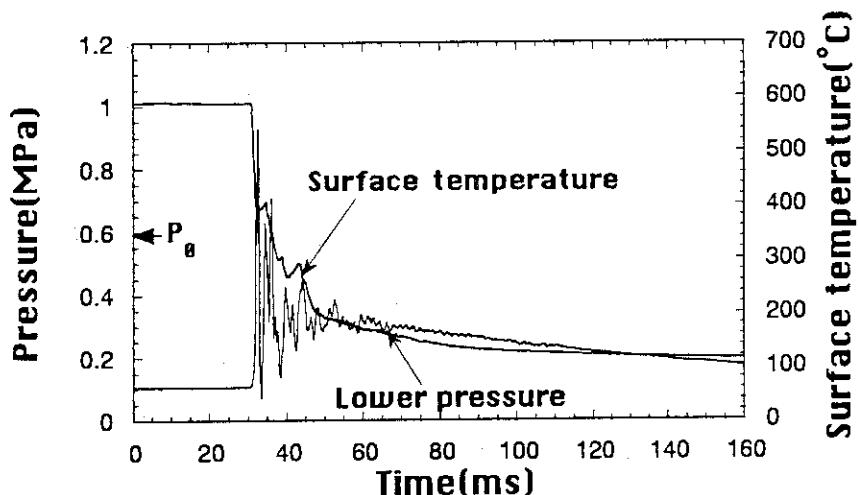


Fig. A.3.7 ステンレス鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 7

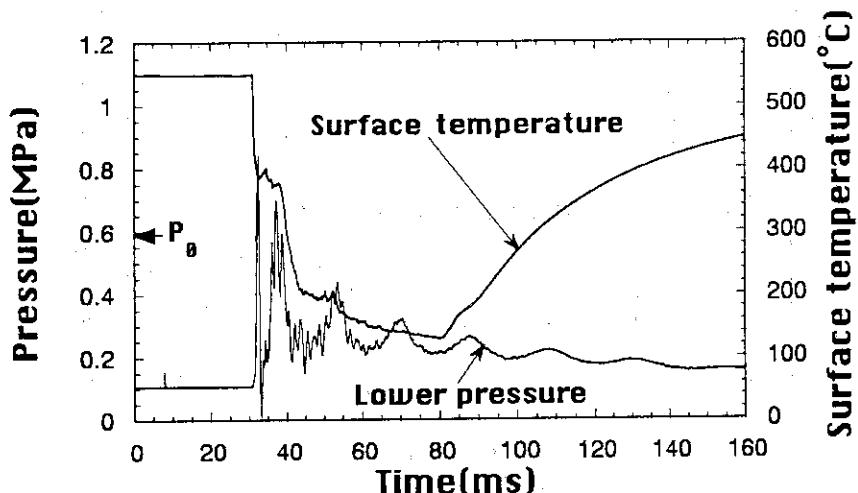


Fig. A.3.8 ステンレス鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 8

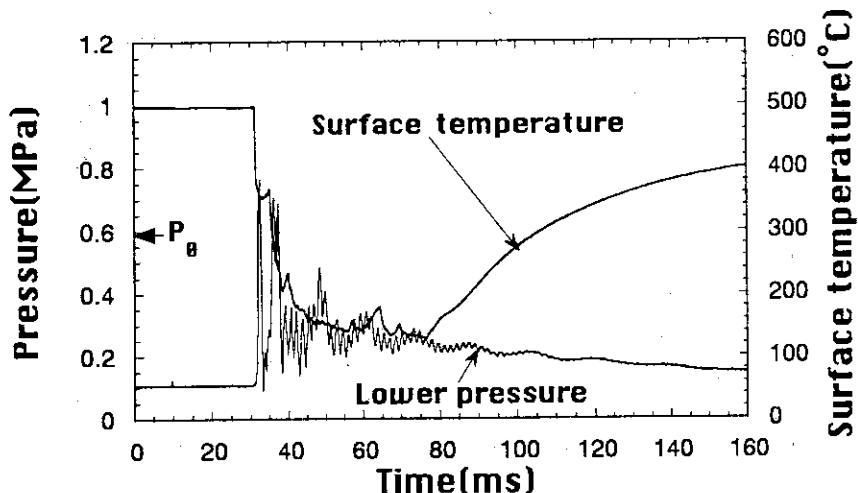


Fig. A.3.9 ステンレス鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 9

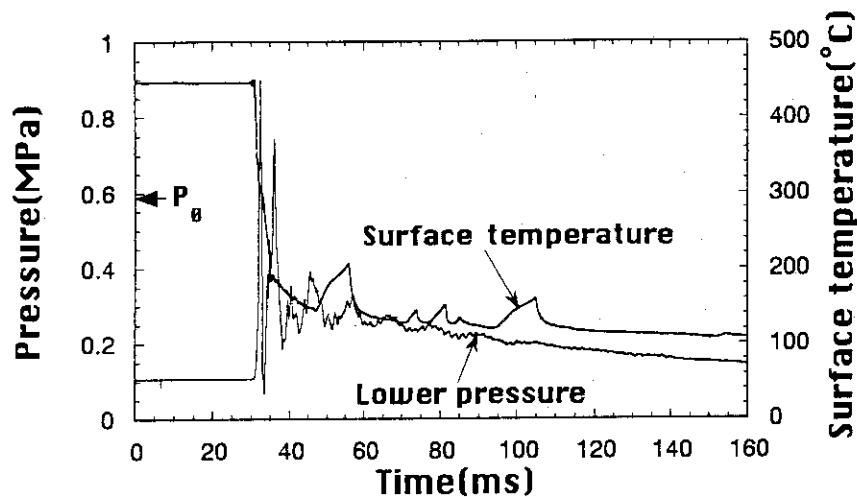


Fig. A.3.10 ステンレス鋼球直徑10mmの実験結果Exp. 10

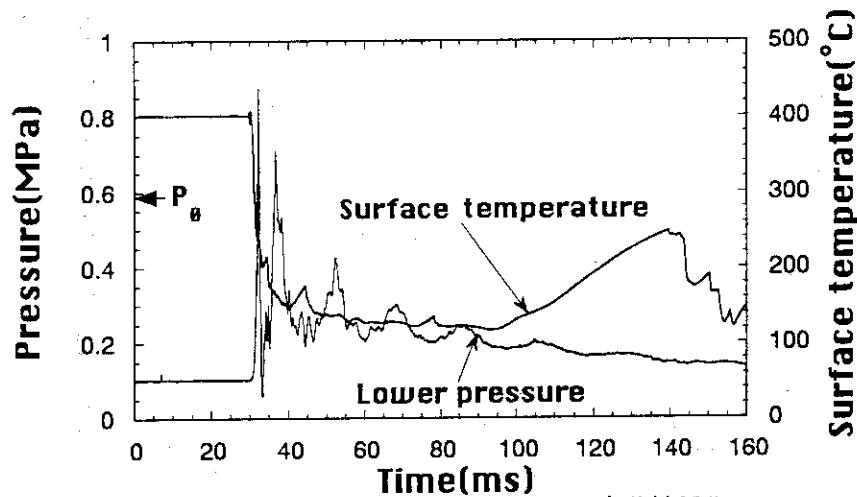


Fig. A.3.11 ステンレス鋼球直徑10mmの実験結果Exp. 11

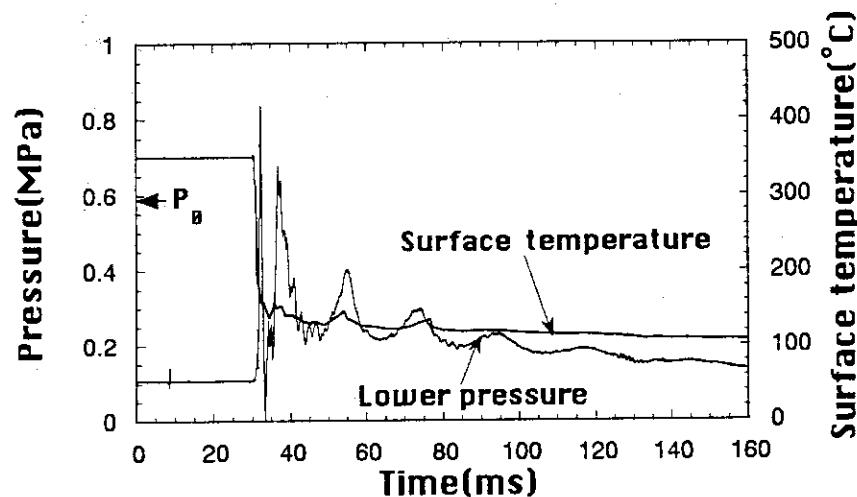


Fig. A.3.12 ステンレス鋼球直徑10mmの実験結果Exp. 12

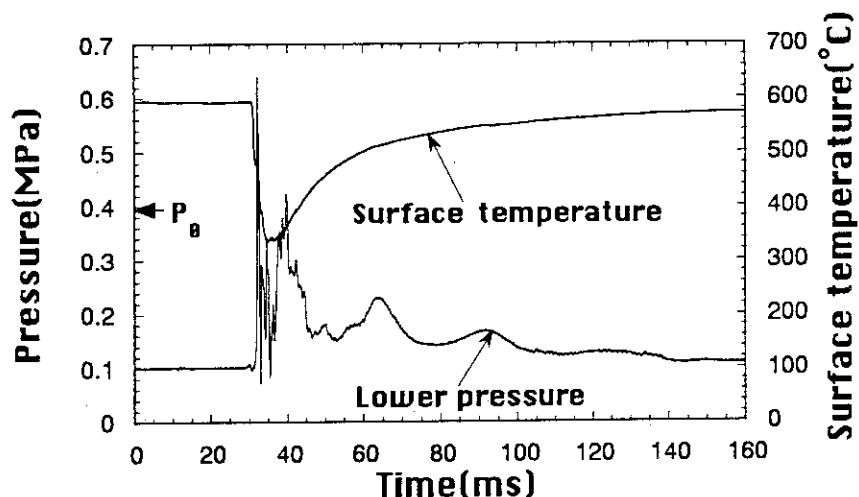


Fig. A.3.13 ステンレス鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 13

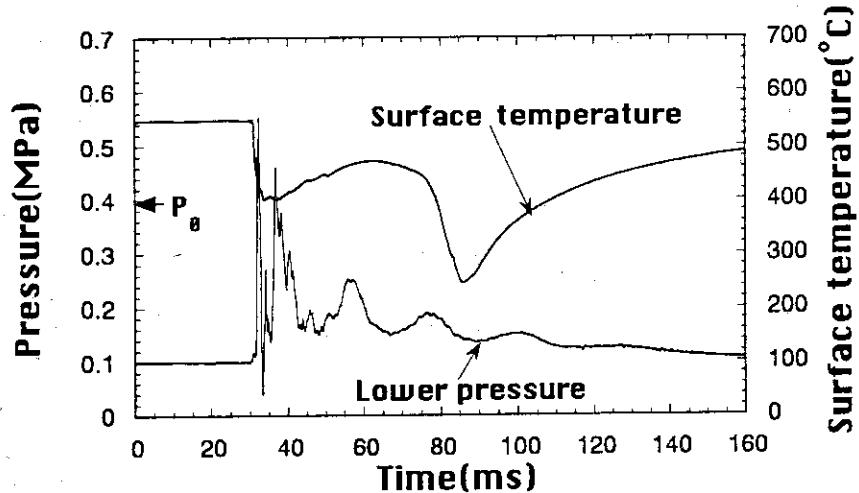


Fig. A.3.14 ステンレス鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 14

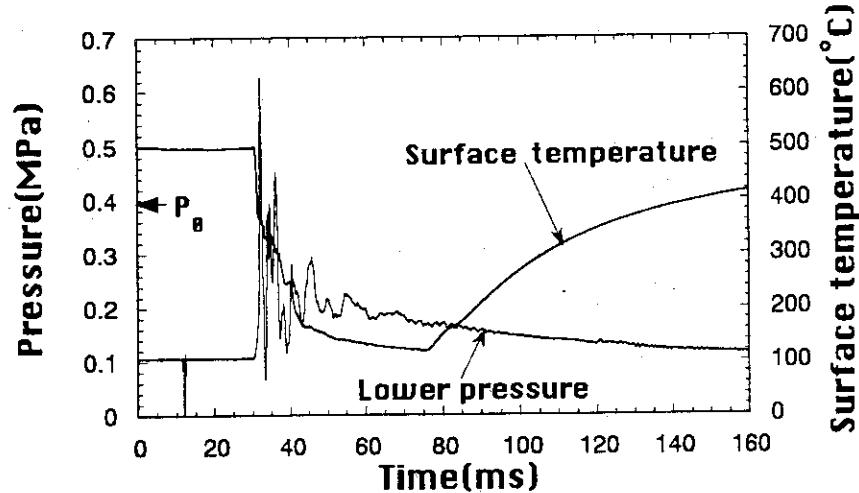


Fig. A.3.15 ステンレス鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 15

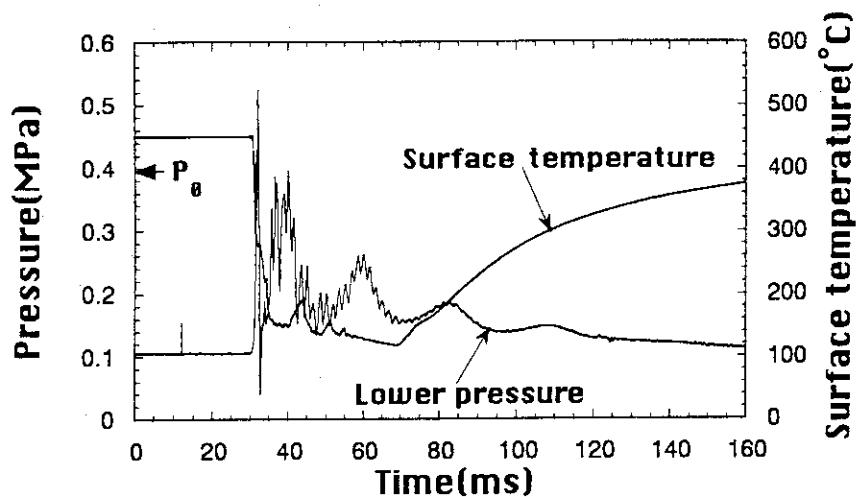


Fig. A.3.16 ステンレス鋼球直径10mmの実験結果Exp. 16

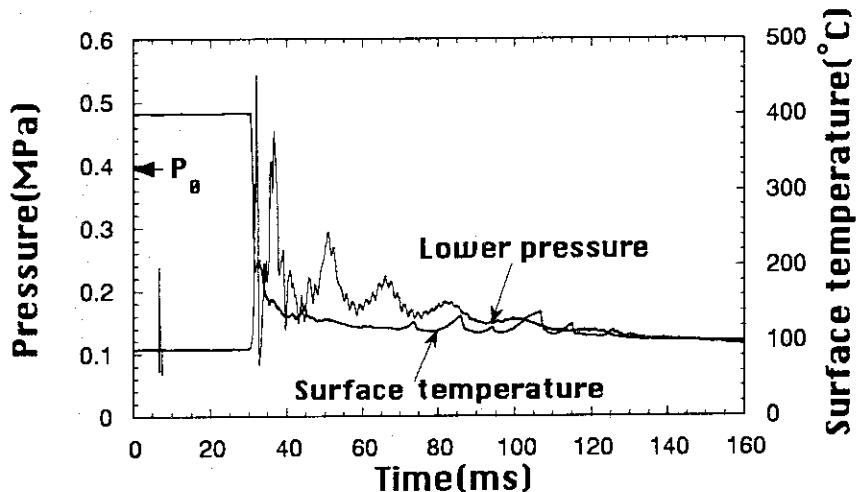


Fig. A.3.17 ステンレス鋼球直径10mmの実験結果Exp. 17

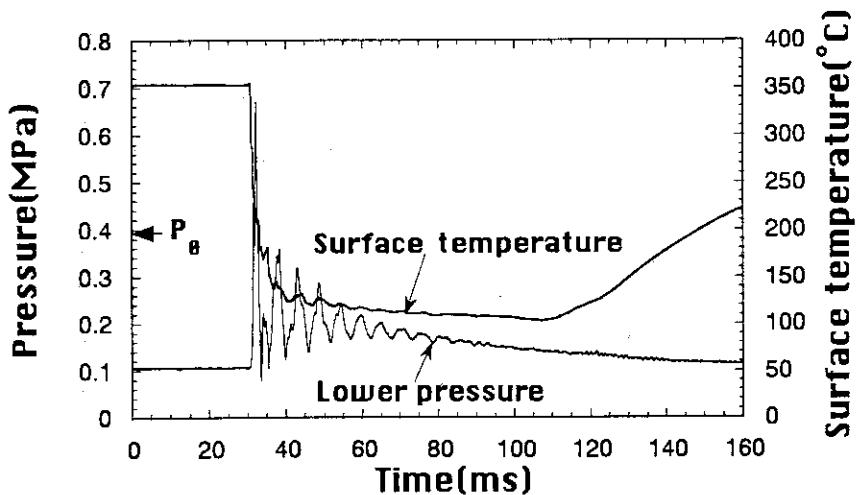


Fig. A.3.18 ステンレス鋼球直径10mmの実験結果Exp. 18

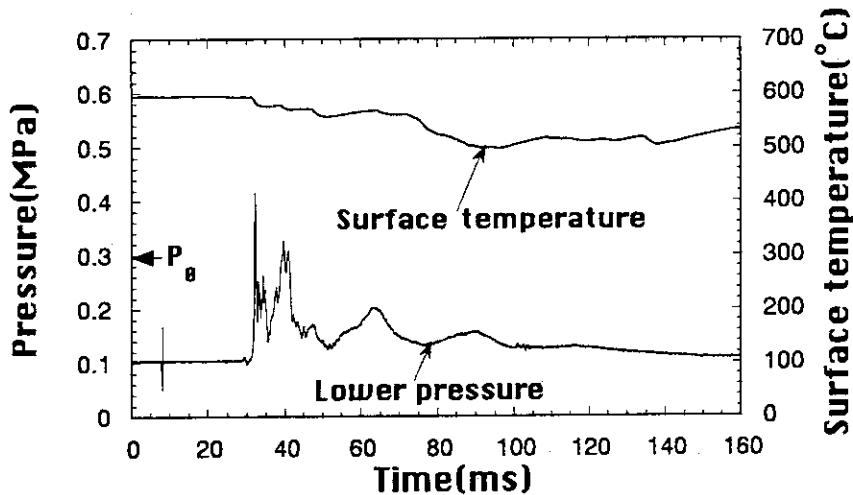


Fig. A.3.19 ステンレス鋼球直徑10mmの実験結果Exp. 19

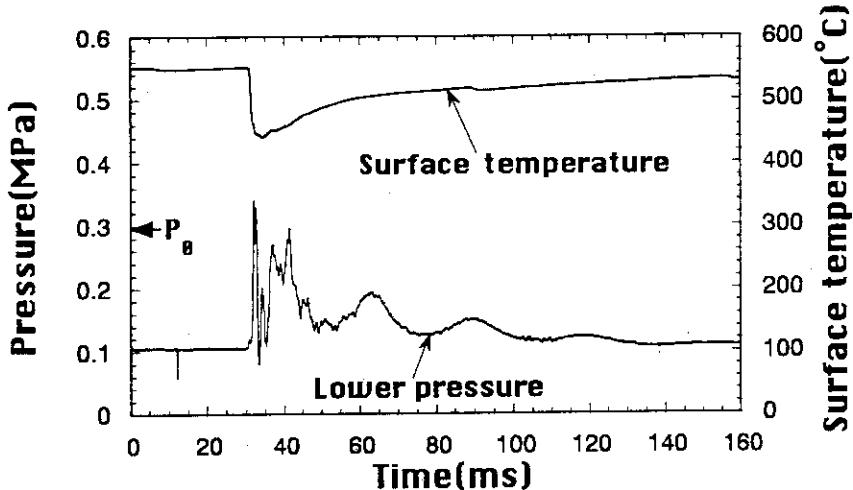


Fig. A.3.20 ステンレス鋼球直徑10mmの実験結果Exp. 20

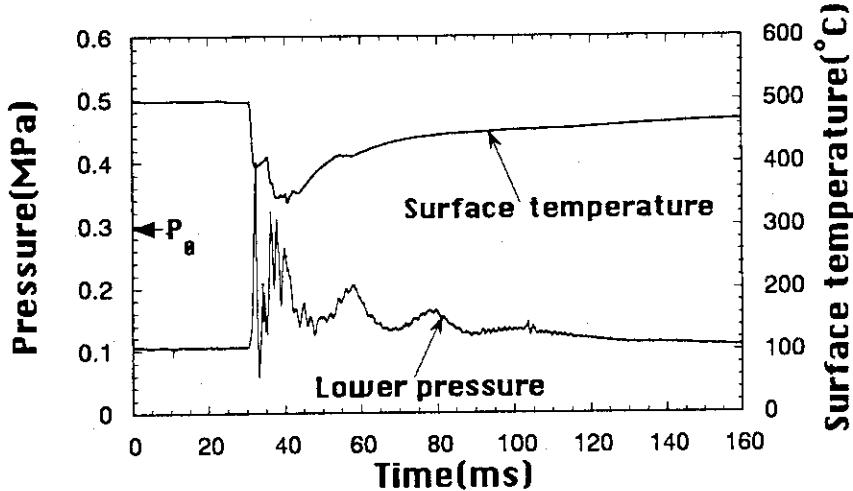


Fig. A.3.21 ステンレス鋼球直徑10mmの実験結果Exp. 21

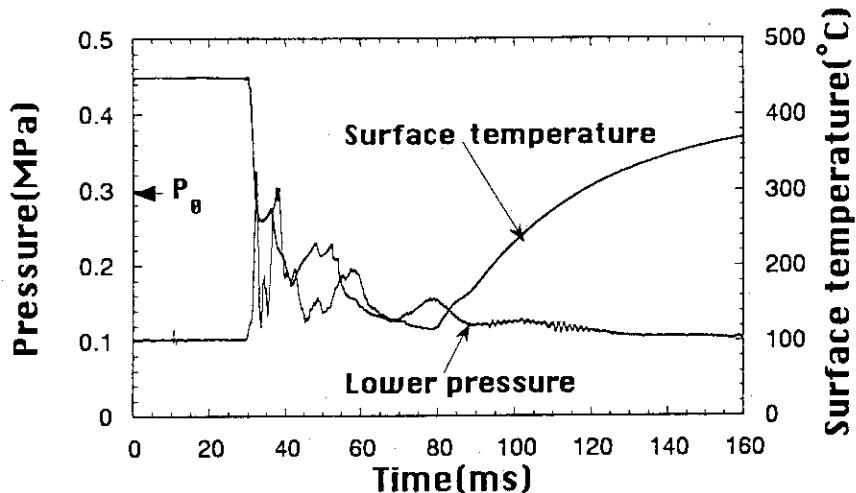


Fig. A.3.22 ステンレス鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 22

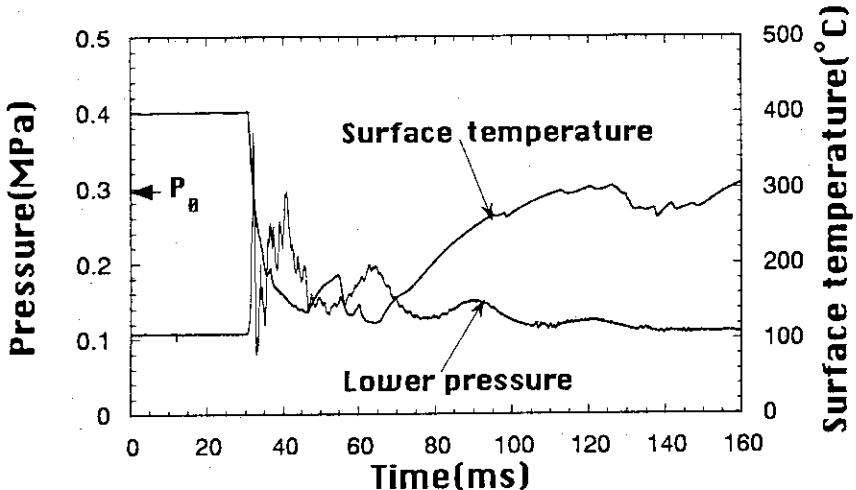


Fig. A.3.23 ステンレス鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 23

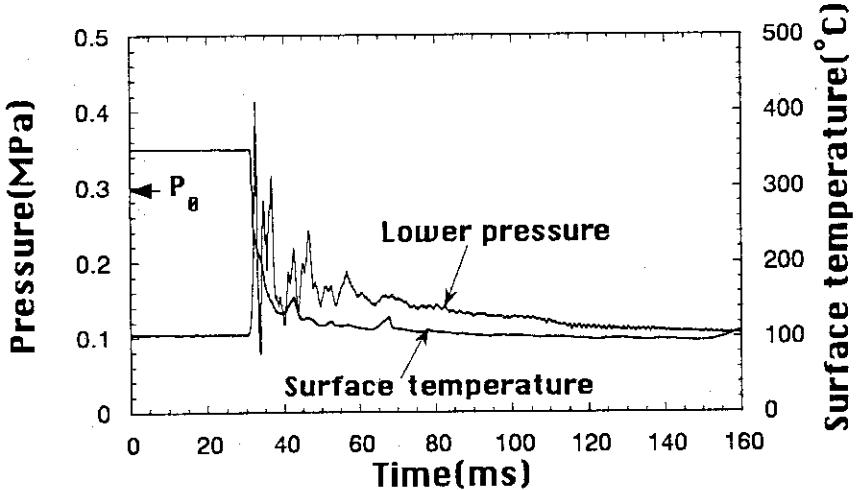


Fig. A.3.24 ステンレス鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 24

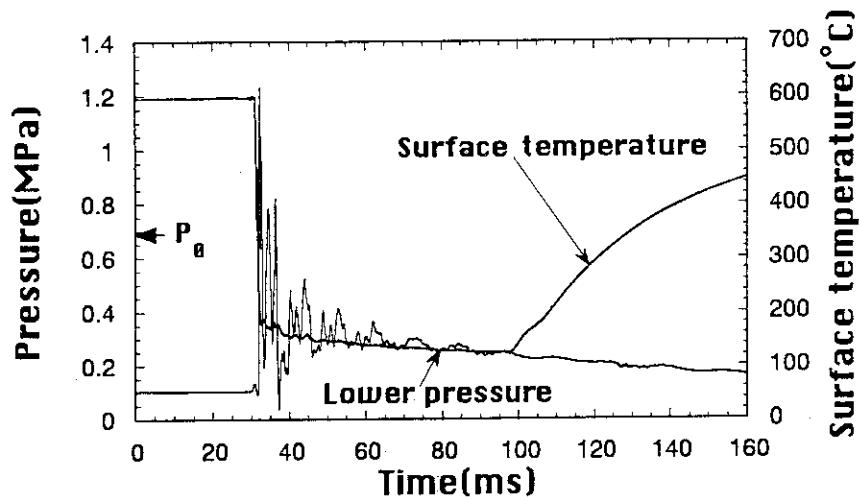


Fig. A.3.25 ステンレス鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 25

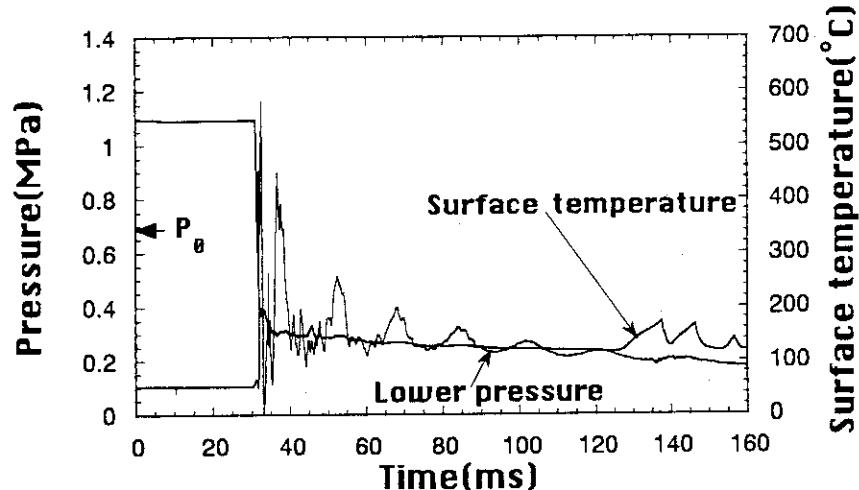


Fig. A.3.26 ステンレス鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 26

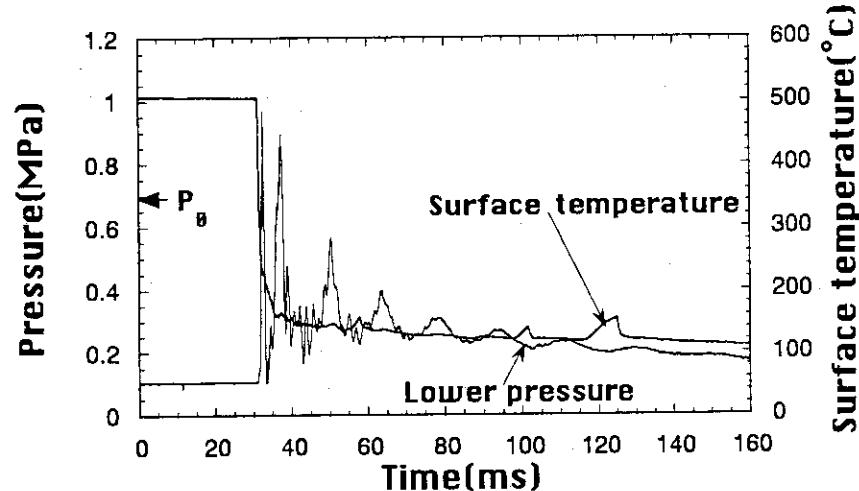


Fig. A.3.27 ステンレス鋼球直 径10mmの実験結果Exp. 27

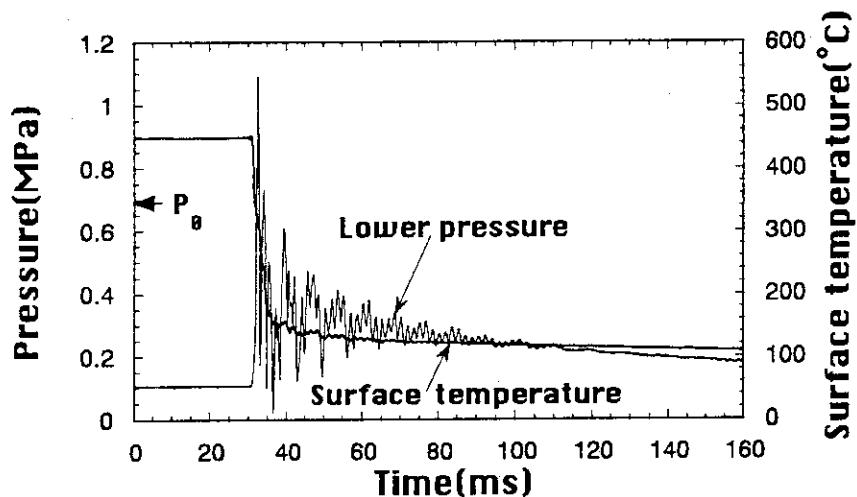


Fig. A.3.28 ステンレス鋼球直径10mmの実験結果Exp. 28

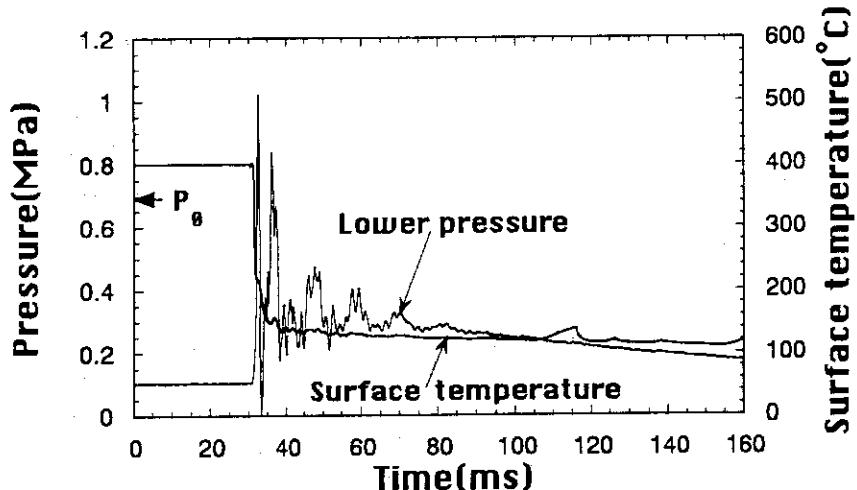


Fig. A.3.29 ステンレス鋼球直径10mmの実験結果Exp. 29

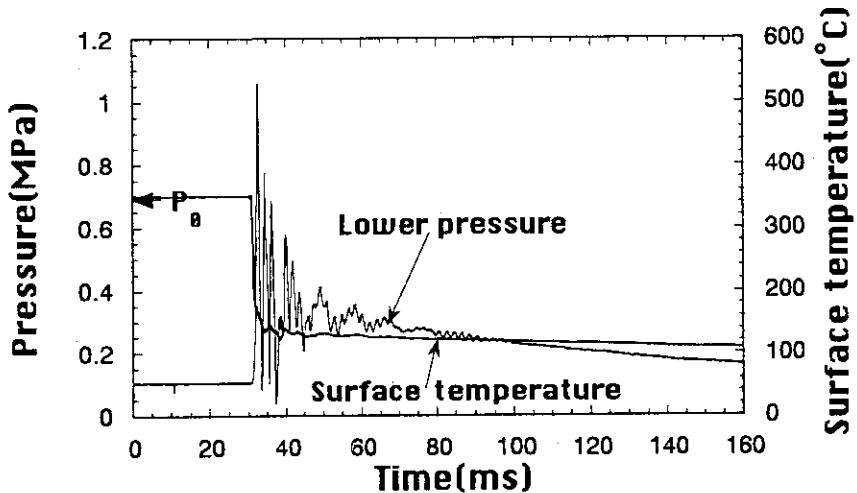


Fig. A.3.30 ステンレス鋼球直径10mmの実験結果Exp. 30

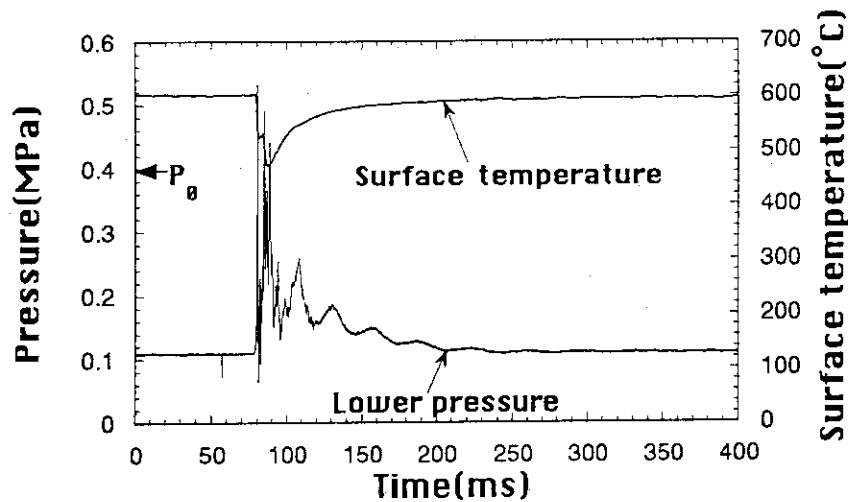


Fig. A.4.1 ステンレス鋼球直徑14.3mmの実験結果Exp. 1

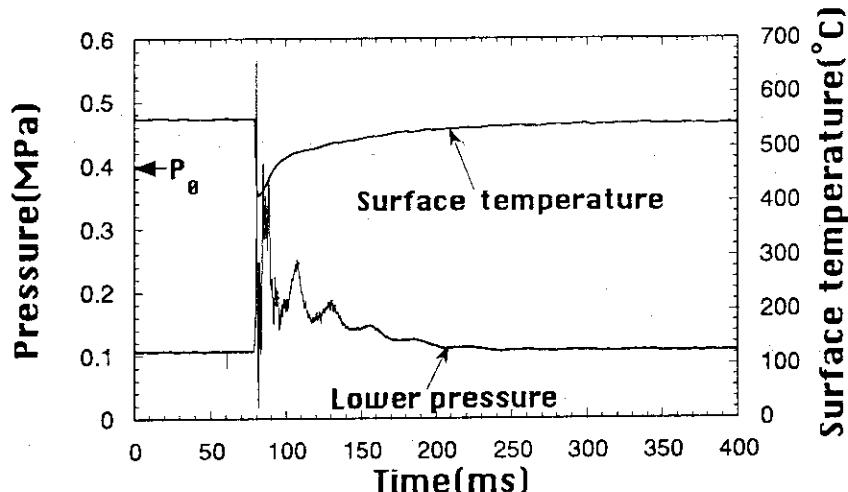


Fig. A.4.2 ステンレス鋼球直徑14.3mmの実験結果Exp. 2

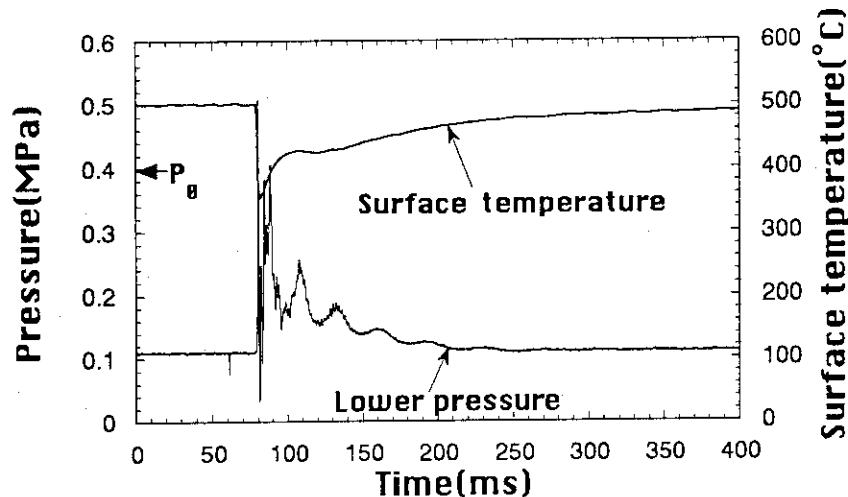


Fig. A.4.3 ステンレス鋼球直徑14.3mmの実験結果Exp. 3

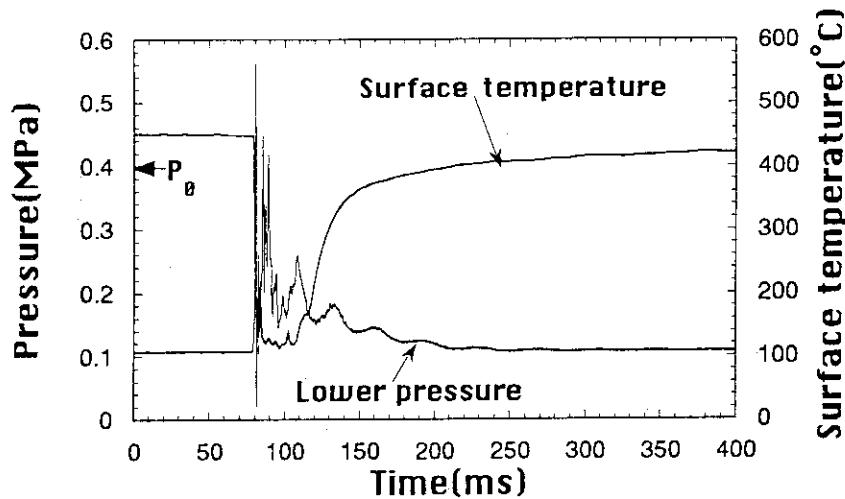


Fig. A.4.4 ステンレス鋼球直径14.3mmの実験結果Exp. 4

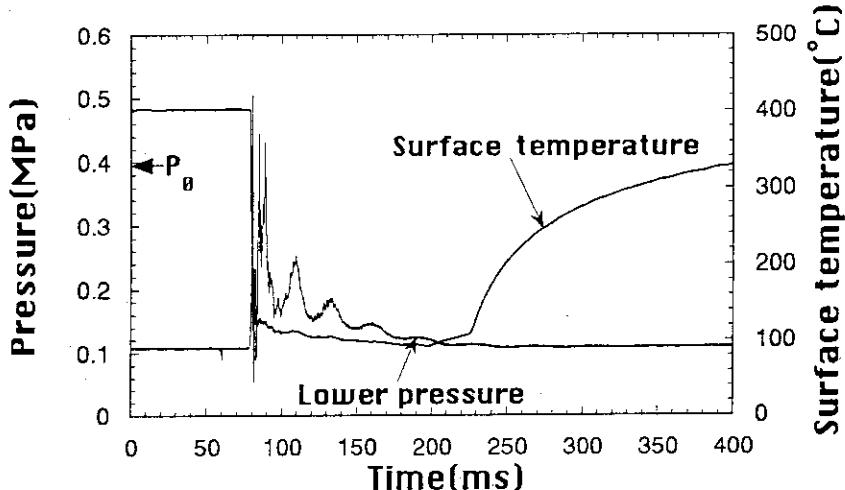


Fig. A.4.5 ステンレス鋼球直径14.3mmの実験結果Exp. 5

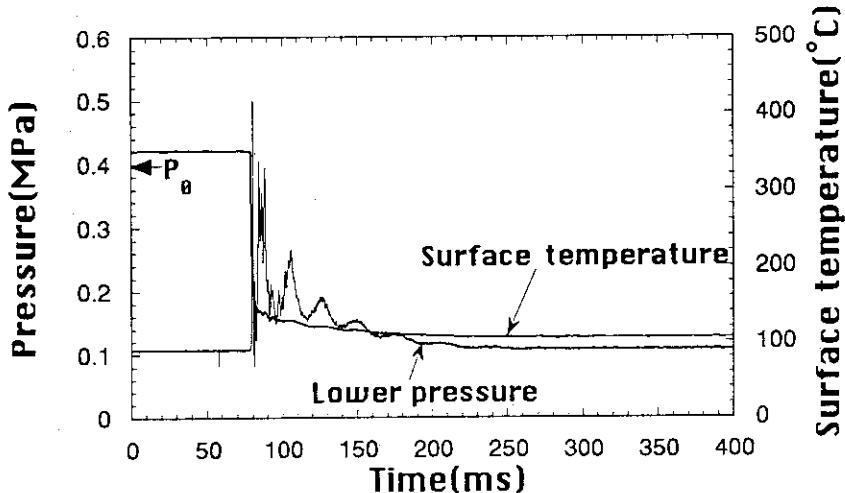


Fig. A.4.6 ステンレス鋼球直径14.3mmの実験結果Exp. 6

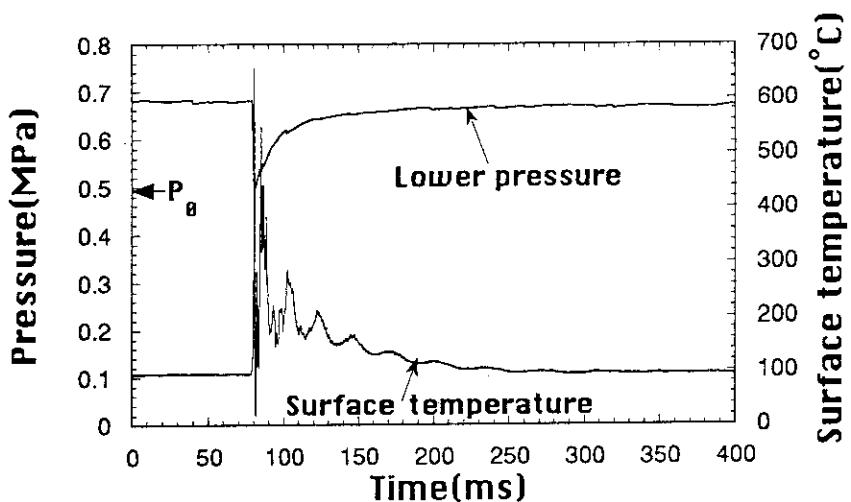


Fig. A.4.7 ステンレス鋼球直徑14.3mmの実験結果Exp. 7

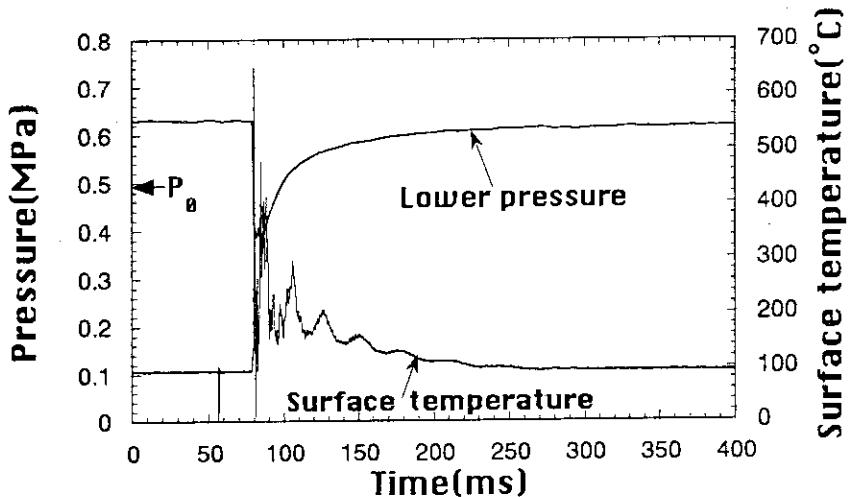


Fig. A.4.8 ステンレス鋼球直徑14.3mmの実験結果Exp. 8

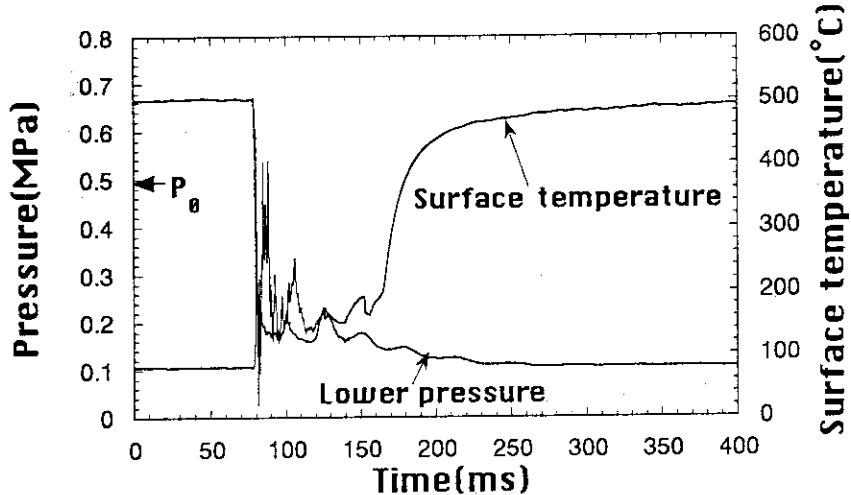


Fig. A.4.9 ステンレス鋼球直徑14.3mmの実験結果Exp. 9

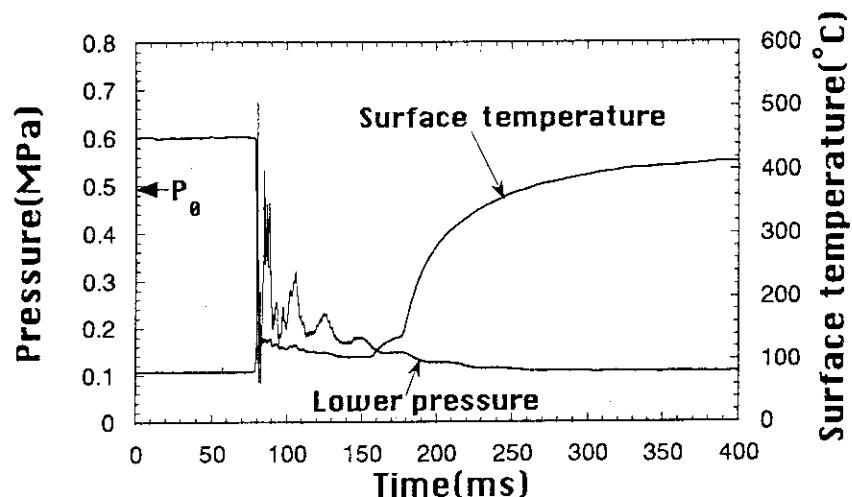


Fig. A.4.10 ステンレス鋼球直徑14.3mmの実験結果Exp. 10

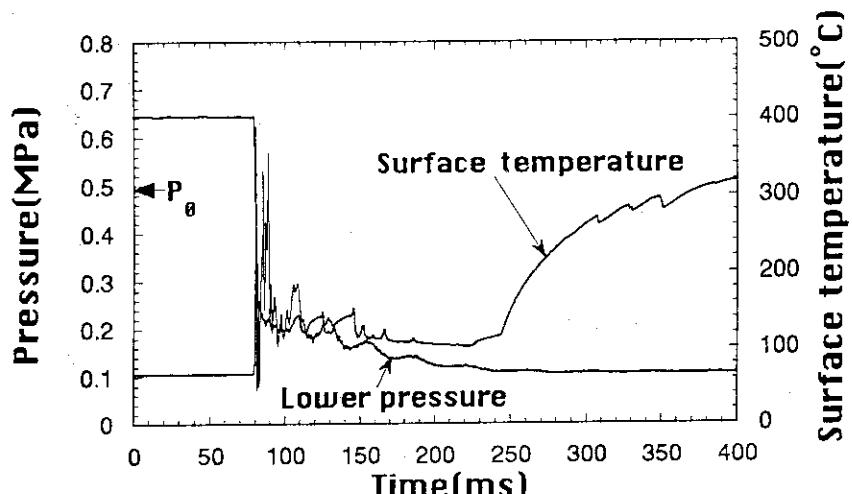


Fig. A.4.11 ステンレス鋼球直徑14.3mmの実験結果Exp. 11

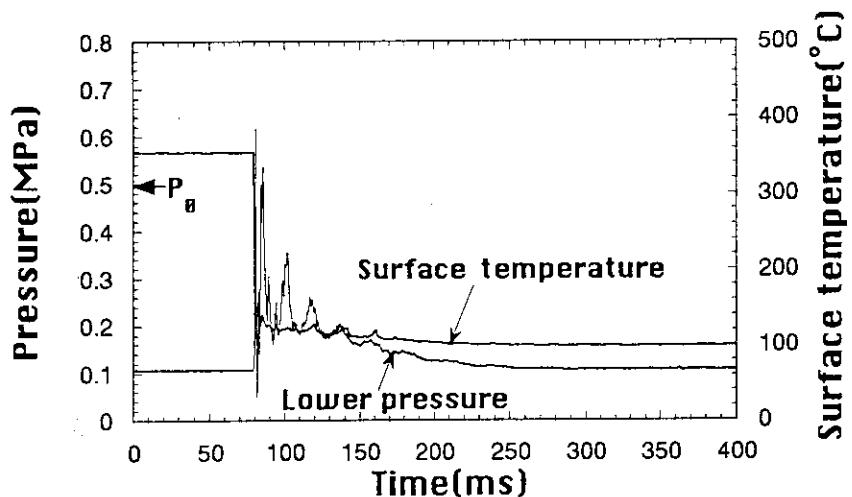


Fig. A.4.12 ステンレス鋼球直徑14.3mmの実験結果Exp. 12

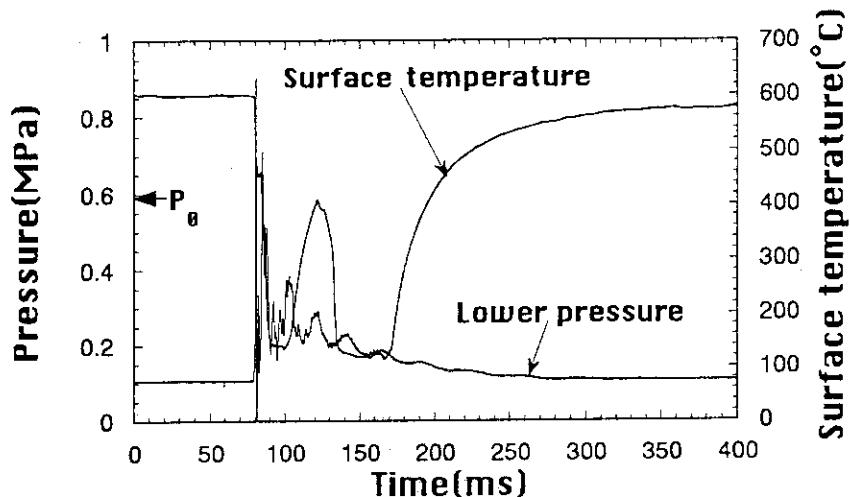


Fig. A.4.13 ステンレス鋼球直徑14.3mmの実験結果Exp. 13

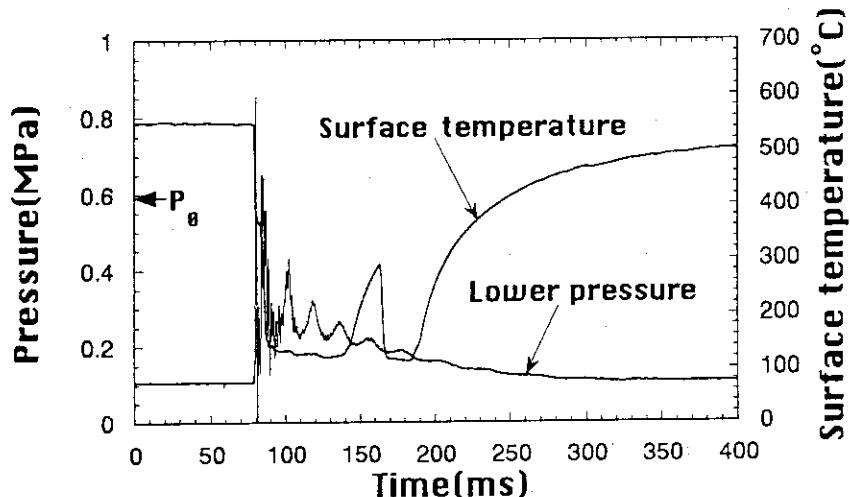


Fig. A.4.14 ステンレス鋼球直徑14.3mmの実験結果Exp. 14

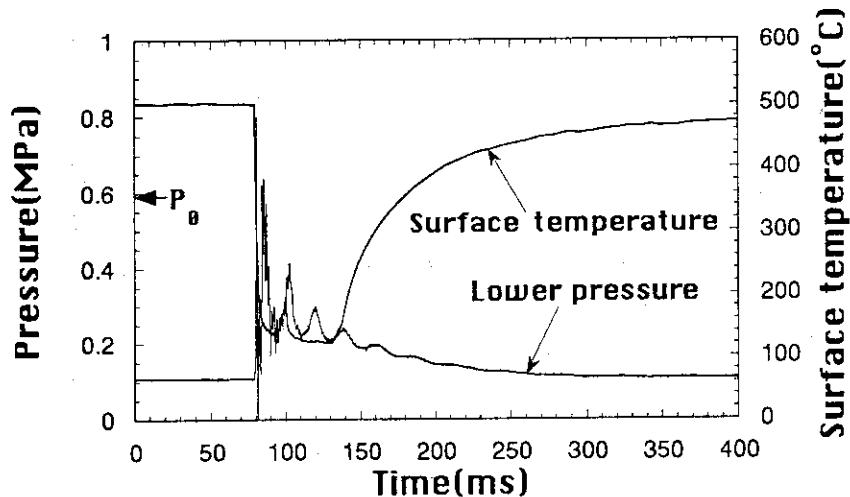


Fig. A.4.15 ステンレス鋼球直徑14.3mmの実験結果Exp. 15

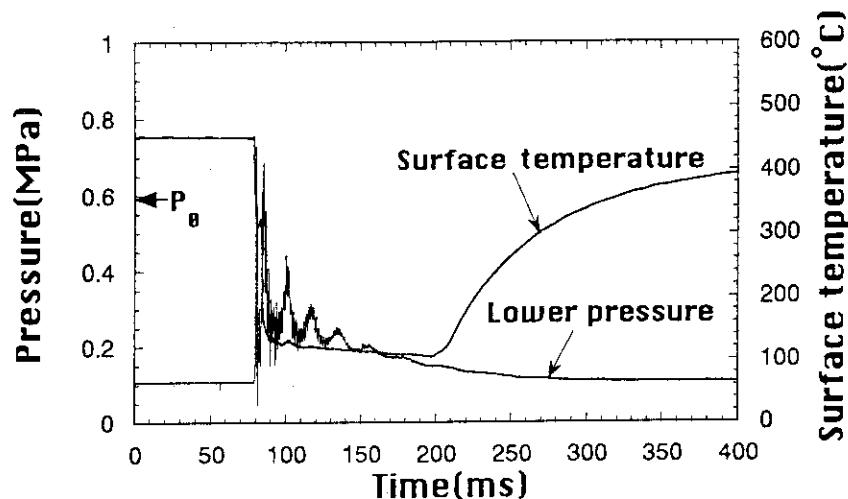


Fig. A.4.16 ステンレス鋼球直徑14.3mmの実験結果Exp. 16

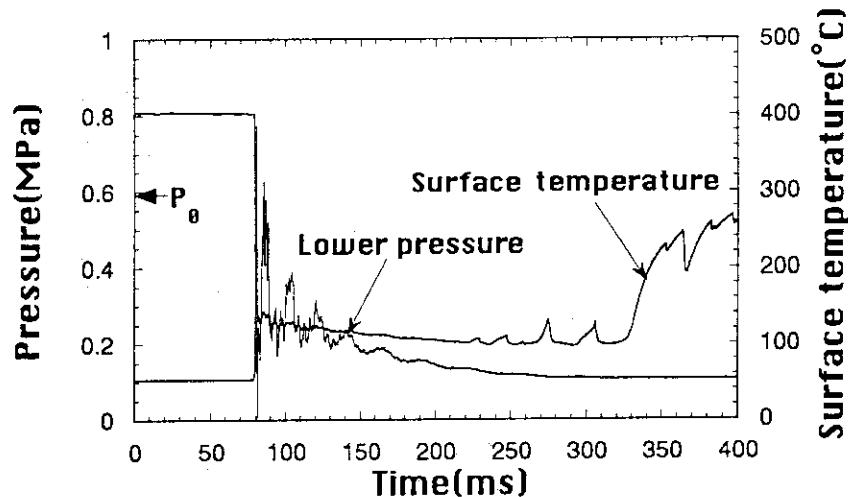


Fig. A.4.17 ステンレス鋼球直徑14.3mmの実験結果Exp. 17

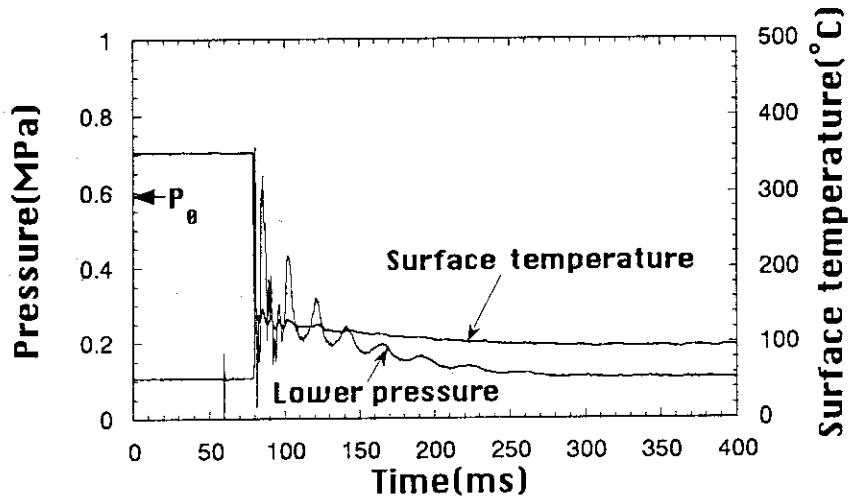


Fig. A.4.18 ステンレス鋼球直徑14.3mmの実験結果Exp. 18

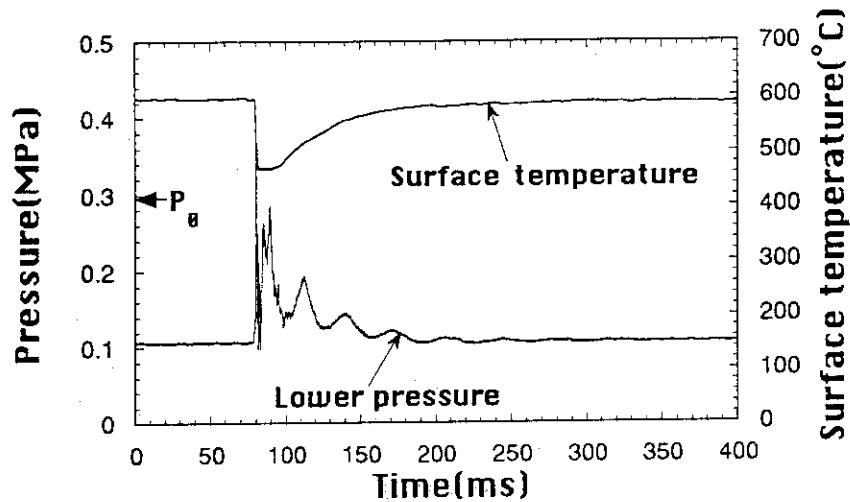


Fig. A.4.19 ステンレス鋼球直徑14.3mmの実験結果Exp. 19

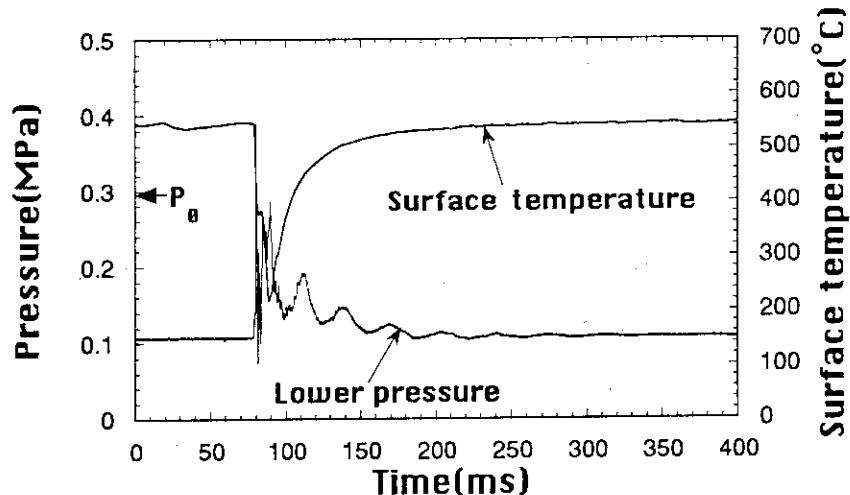


Fig. A.4.20 ステンレス鋼球直徑14.3mmの実験結果Exp. 20

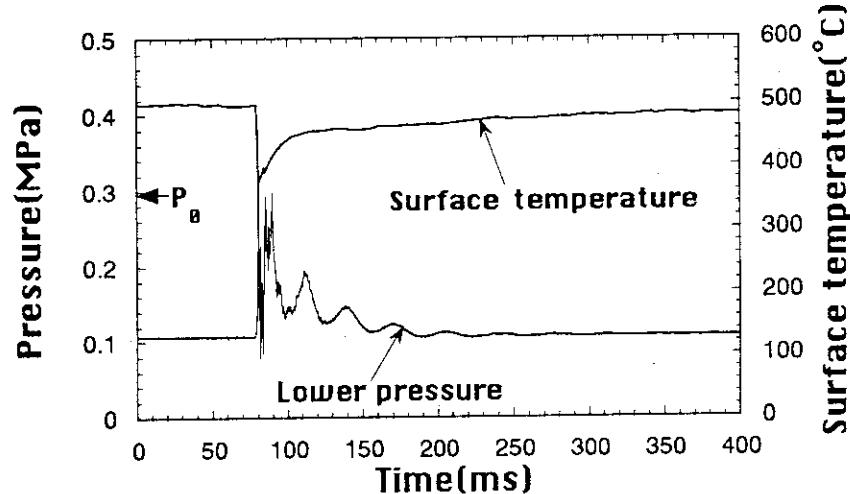


Fig. A.4.21 ステンレス鋼球直徑14.3mmの実験結果Exp. 21

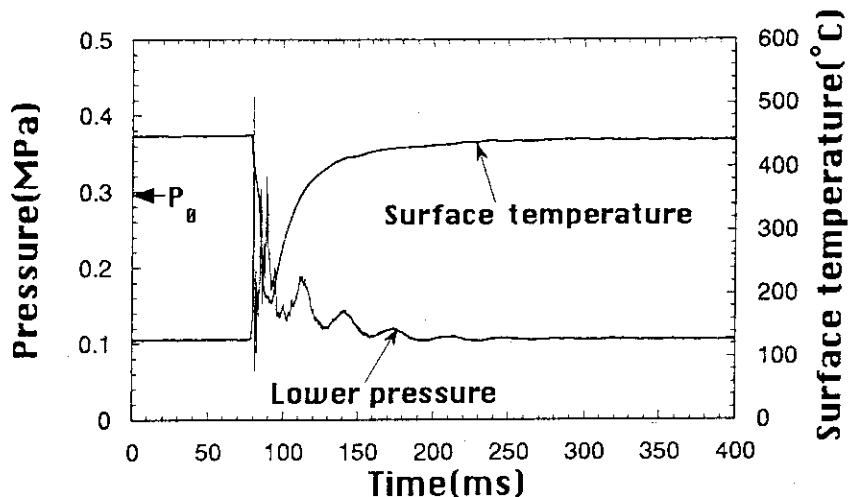


Fig. A.4.22 ステンレス鋼球直徑14.3mmの実験結果Exp. 22

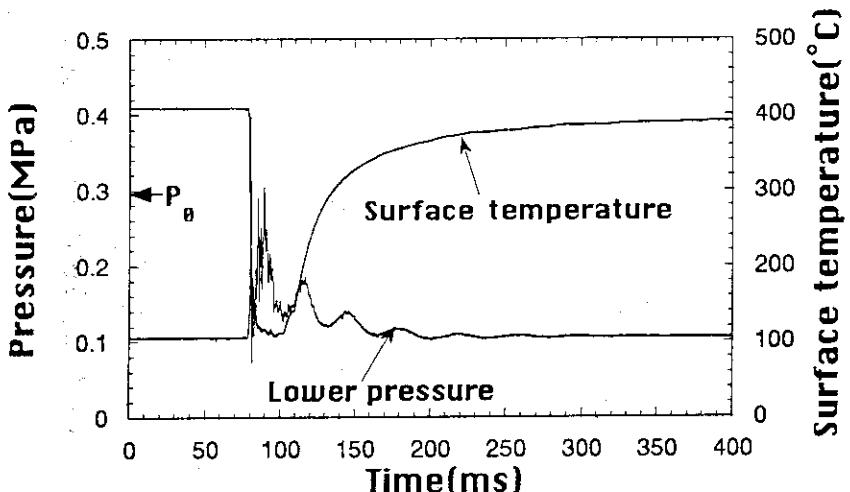


Fig. A.4.23 ステンレス鋼球直徑14.3mmの実験結果Exp. 23

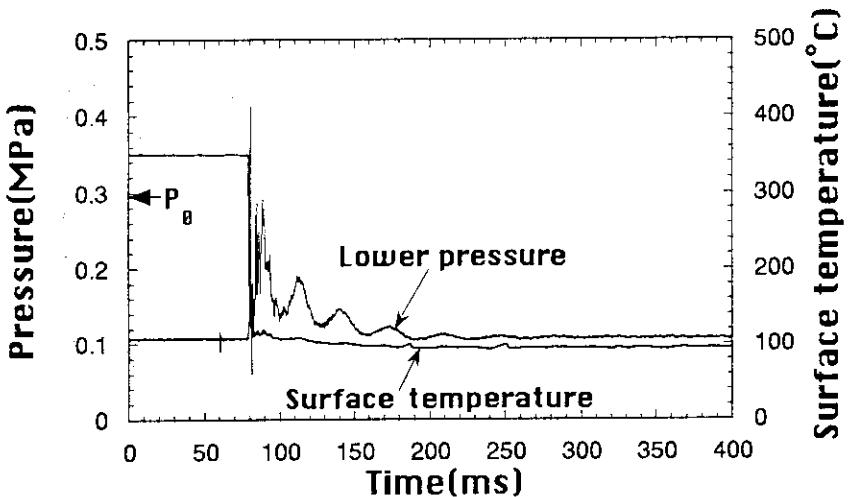


Fig. A.4.24 ステンレス鋼球直徑14.3mmの実験結果Exp. 24

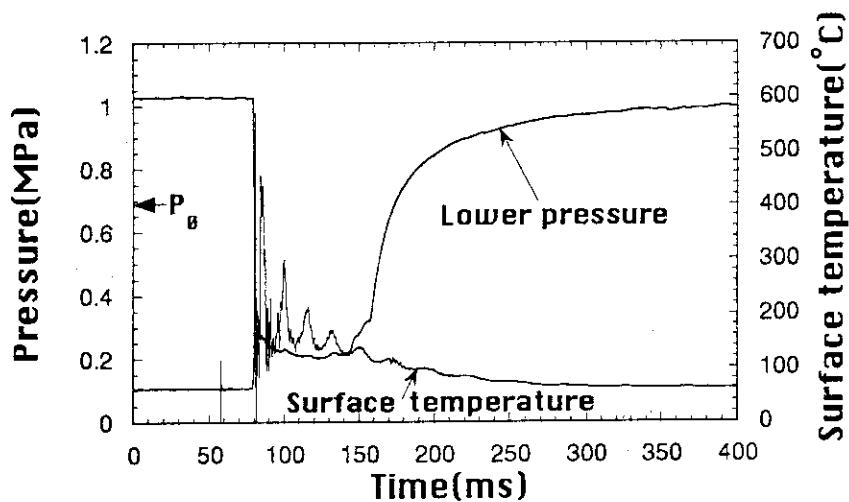


Fig. A.4.25 ステンレス鋼球直徑14.3mmの実験結果Exp. 25

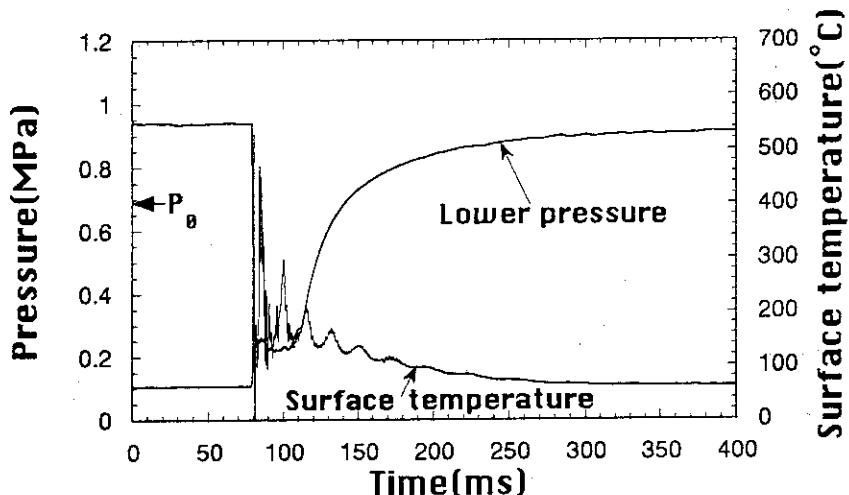


Fig. A.4.26 ステンレス鋼球直徑14.3mmの実験結果Exp. 26

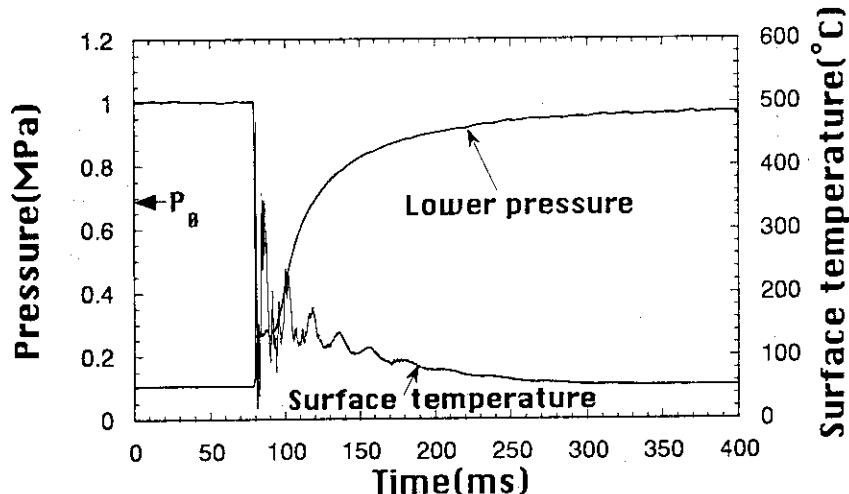


Fig. A.4.27 ステンレス鋼球直徑14.3mmの実験結果Exp. 27

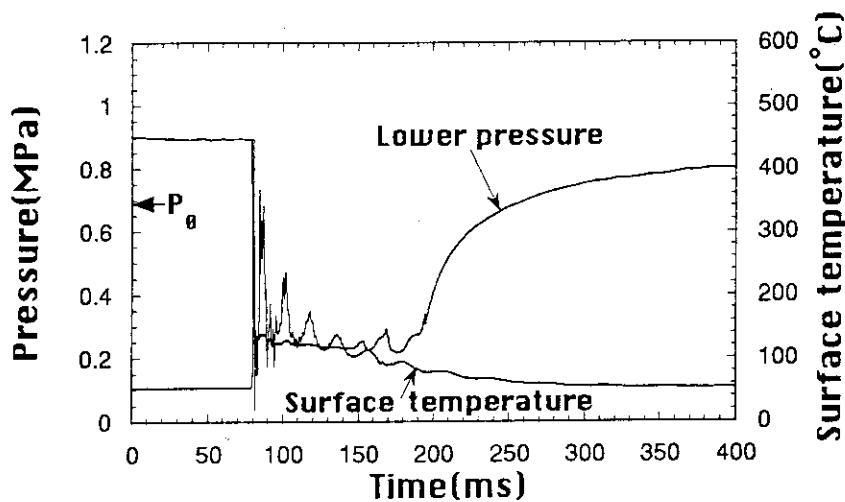


Fig. A.4.28 ステンレス鋼球直径14.3mmの実験結果Exp. 28

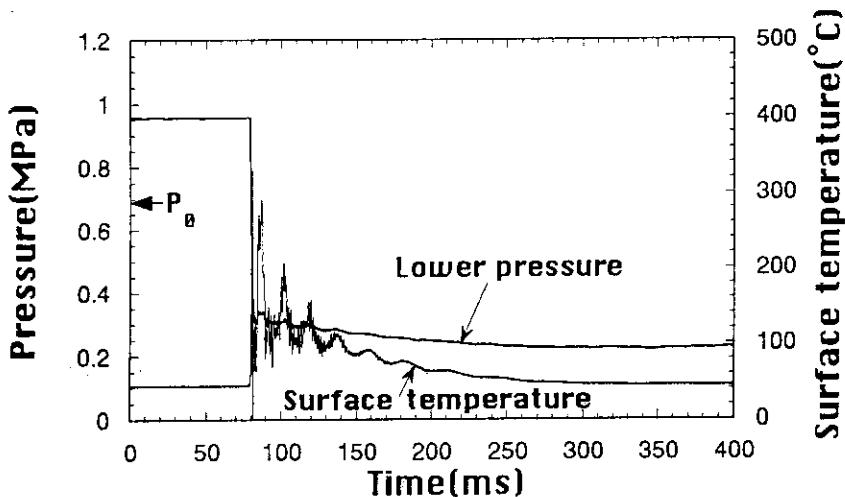


Fig. A.4.29 ステンレス鋼球直径14.3mmの実験結果Exp. 29

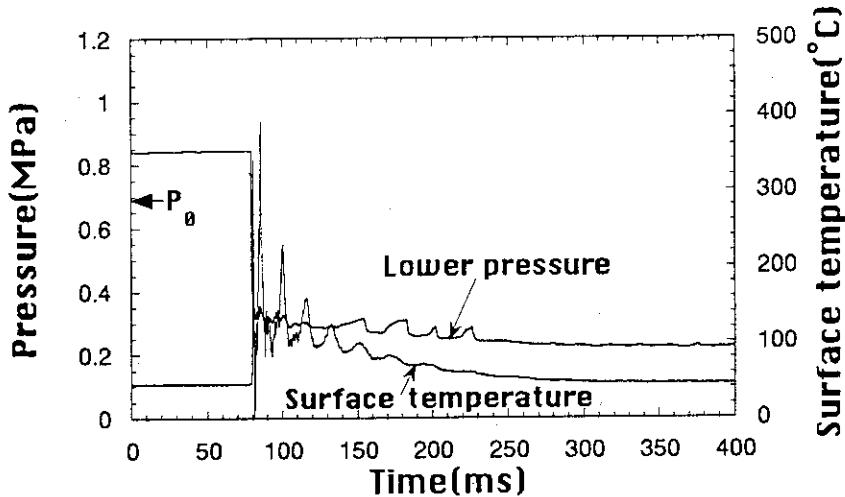


Fig. A.4.30 ステンレス鋼球直径14.3mmの実験結果Exp. 30

付録B 热流束の算出方法

実験で得られた球表面温度データから球表面における熱流束を算出した。温度分布が半径方向のみに依存すると仮定したFig. B.1のような球をFig. B.2のように半径方向にメッシュを切り、各点の温度を完全陰解法で求めて球内部の温度分布を求ることにより熱流束を算出した。

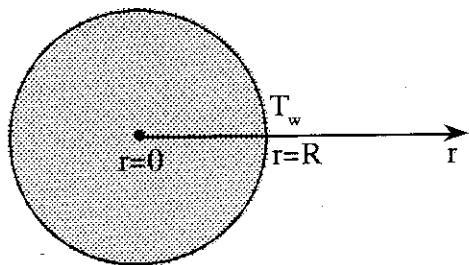


Fig. B.1 球

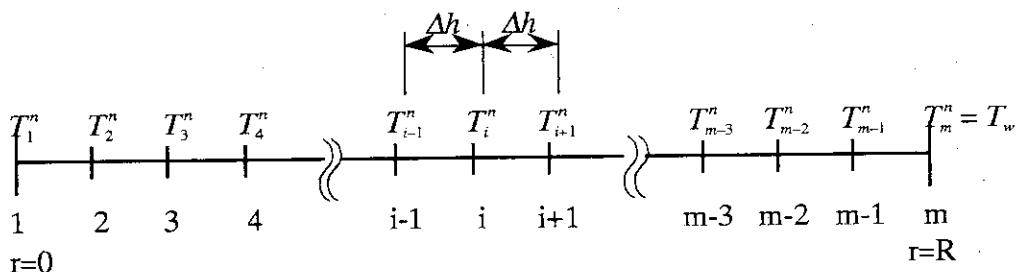


Fig. B.2 球半径方向のノーディング

B.1 热伝導方程式

球内部の温度分布が半径方向のみに依存すると仮定した球に関する熱伝導方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (\text{B.1})$$

Eq. B.1中の微分式をテーラー展開してEq. B.1を差分表示する。

$$\frac{T_i^n - T_{i-1}^{n-1}}{\Delta t} = \kappa \left(\frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta h^2} + \frac{2}{r} \frac{T_{i+1}^n - T_{i-1}^n}{2\Delta h} \right) \quad (\text{B.2})$$

$\gamma = \Delta t / \Delta h^2$ 、 $r = (i-1)\Delta h$ とすると、

$$-\kappa \gamma \left(1 - \frac{1}{i-1} \right) T_{i-1}^n + (1 + 2\kappa\gamma) T_i^n - \kappa \gamma \left(1 + \frac{1}{i-1} \right) T_{i+1}^n = T_{i-1}^{n-1} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (\text{B.3})$$

ここで、 $T_m^n = T_w$ である。

ここで、 κ は熱拡散率、 Δt は測定時間間隔、 Δh は球半径分割間隔、 T は温度、 T_w は実験で得られた球表面温度データ、添字の*i*はノード番号、*n*は時間番号を示している。

B.2 球表面上の熱流束

差分表示された熱伝導方程式Eq. B.3をGaussの消去法により、球内部の温度分布を求めた（完全陰解差分法）。熱流束は得られた球表面での温度勾配により求められる。

$$q = -\lambda \frac{T_m - T_{m-1}}{\Delta h} \quad (\text{B.4})$$

ここで、 λ は熱伝導率を示す。

B.3 初期条件

初期の球内部温度分布は、圧力波を加えずに、内部の温度分布が均一とみなされた球をただ冠水させたときの表面温度履歴データ"quench1.dat"から、熱伝導方程式Eq. B.3を完全陰解法で解くことにより求めた。Fig. B.3に表面温度履歴データ"quench1.dat"を示す。

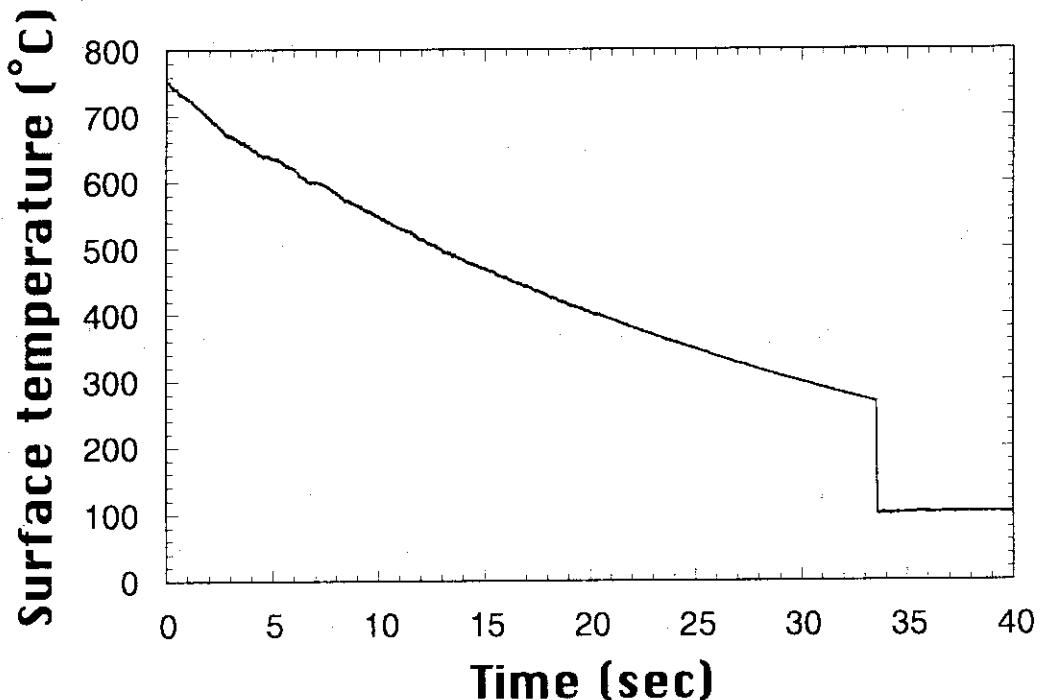


Fig. B.3 球表面温度履歴データ"quench1.dat"

B.4 境界条件

(i) 仮定により球内部の温度分布は半径方向のみに依存するから、 $r=0$ （球の中心）では温度勾配が存在しないものとする。

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad : T_0^n = T_1^n \quad (\text{B.5})$$

(ii) 球表面の温度は実験で得られた球表面温度データ T_w が与えられる。

$$T \Big|_{r=R} = T_w \quad (\text{B.6})$$

B.5 プログラム

プログラム"hfus10.f"は、10mmのステンレス球を使用した実験で得られた表面温度履歴から、球表面における熱流束とある時間内に放出される熱量を算出するプログラムである。これはfortranで作成され、実行するためには、このプログラムが含まれるディレクトリ内に表面温度履歴を含む実験データ、表面温度履歴データ"quench1.dat"、計算結果出力ファイル"cal1.dat"が必要である。プログラムを実行すると、以下のような質問が表示される。

"Input file name:"

ここには読み込む実験データファイル名を入力。

"Output file name:"

ここには計算結果を出力する保存ファイル名を入力。

"How many line skip?"

これは入力実験データの先頭の余分な文字列が何行存在するかを聞いている。今回使用した実験データには4行にわたって初期条件等を先頭に入力してあるため、ここでは4を入力。

"How many column number for surface temperature?(1~5)"

これは入力実験データに含まれる球表面温度データが何列目に存在するかを聞いている。今回使用した実験データは左から、時間、下部圧力、衝撃波管内圧力、球表面温度、水温の順に並べてあるため、ここでは4を入力。

"How many radius divide into?(2~500)"

これはFig. E.2における球半径方向のノーディング数mを聞いている。mが大きいほど計算精度は高くなる。今回は500分割した。

"Steel ball radius R(mm) ="

これは球の半径を聞いている。今回行った実験では直径10mmと14.5mmのステンレス球を使用している。ここでは実験に応じて5か7.15を入力。14.3mmのステンレス球の実験結果を計算する場合には、表面温度履歴データ"quench2.dat"と計算結果出力ファイル"cal2.dat"が必要となる。また、プログラムも変更する必要がある。

"Sample rate dt(ms) ="

これは測定時間間隔を聞いている。今回行った実験では0.02msあるいは0.05msのサンプルレートで行った。ここでは実験に応じて**0.02**か**0.05**を入力する。

"Are you OK?"

全ての質問に正しく答えられたら、yを入力し、計算が始まる。y以外を入力するとプログラムが中断される。

Sun SPARC station 10 では約20秒で計算が終わり、球表面温度と熱流束の時間履歴のデータがoutputファイルに保存される。また、計算結果出力ファイル"cal1.dat"には左から、初期設定圧力、初期設定表面温度、平均水温、流出熱量(+)、流出熱量(-)、流出総熱量が順に保存される。

Eq. B.3、Eq. B.4に含まれる熱伝導率と熱伝達率は温度によって変化する物性値であるため、「機械学会 伝熱工学資料 改訂第4版」の付表にあるオーステナイト系ステンレス鋼SUS304(18Cr-8Ni)の物性値データを最小二乗法で近似して使用した。以下に近似した熱伝導率と熱伝達率を示す。

$$\lambda = 7.924266 \times 10^{-6} T^2 + 4.043021 \times 10^{-3} T + 13.86741 \quad [\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}] \quad (\text{B.7})$$

$$\kappa = 1.692704 \times 10^{-12} T^2 - 5.113006 \times 10^{-10} T + 4.045289 \times 10^{-6} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (\text{B.8})$$

Table B.1 プログラム "hfsus10.f"

```

c -----
c   热流束解析 program (SUS304) -----
c   Pure Implicit Method -----
c   1995.8.3 -----
c -----
c   T    :球内の温度分布
c   T0   :textデータ1行分の読み込み
c   Tw   :球表面温度 (実験データ)
c   q    :熱流束
c   a    :T(i-1,j)の係数の絶対値
c   b    :T(i,j)の係数の絶対値
c   c    :T(i+1,j)の係数の絶対値
c   d    :T(i,j-1)の値
c   s    :ガウスの消去法で用いる代入値 s
c   al   :ガウスの消去法で用いる代入値 α
c   fni  :入力text file名
c   fno  :出力text file名

```

```

c      ok    :合否判定の文字列
c      skip   :頭出し用の文字列
c      ns    :頭出し行数
c      nc    :表面温度データのカラムナンバー
c      n     :球半径の分割数
c      R     :球半径
c      ak    :熱拡散率
c      ra    :熱伝導率
c      dt    :サンプリングレート
c      dh    :dh=R/n
c      rk    :rk=dt/dh**2
c      time  :測定時間
c      hfh   :流出熱量(+)
c      hfl   :流出熱量(-)
c      hf    :流出熱量(total)
c      pi    :円周率
c      Sf    :球表面積
c      P0    :衝撃波初期設定圧力
c      Ti    :球初期設定表面温度
c      Ts    :水温
c
c      implicit real*8(a-h,o-z)
c      dimension T(501),T0(5),a(501),b(501),c(501),d(501)
c      dimension h(3)
c      character fni*20,fno*20,ok*2,skip*80
c
c      ---- 入出力file名の入力 ----
c      write(*,*)"Input file name:"
c      read(*,'(a)') fni
c      write(*,*)"Output file name:"
c      read(*,'(a)') fno
c
c      ---- 初期値等の入力 ----
c      write(*,*)"How many line skip? "
c      read(*,*) ns
c      write(*,*)"How many column number for surface temperature?(1~5)"
c      read(*,*) nc
c      write(*,*)"How many radius divide into?(2~500)"

```

```

read(*,*) n
write(*,*)"Steel ball radius R(mm)="
read(*,*) R
write(*,*)"Sample rate dt(ms)="
read(*,*) dt
time=0.
R=R/1000.
dt=dt/1000.
dh=R/float(n)
rk=dt/(dh*dh)
hfh=0.
hfl=0.
hf=0.
pi=3.141592
P0=0.
Ti=0.
Ts=0.

c
write(*,*)"Are you OK?"
read(*,'(a)') ok
if (ok.eq.'y') go to 10
go to 245

c
10 open(1,file=fni,status='unknown')
open(2,file=fno,status='unknown')
open(5,file='cal1.dat',status='unknown')

c
---- 入力fileの頭出し ----
do 20 i=1,ns
  read(1,'(a)') skip
20 continue

c
---- 初期温度分布の設定 ----
read(1,*) (T0(j),j=1,5)
Tw=T0(nc)
call initial(Tw,n,T,dh,ak)

c
-----

```

```

c      ---- Main ----
c      -----
c
50 continue

c
c      ---- 热伝導方程式の行列式の作成 ----
c
do 30 i=2,n+1
    ai=float(i)
    ax=1./(ai-1.)
    ak=1.692704e-12*T(i)**2.+5.113006e-10*T(i)+4.045289e-6
    a(i)=rk*ak*(1.-ax)
    b(i)=1.+2.*rk*ak
    c(i)=rk*ak*(1.+ax)

30 continue
do 40 i=2,n+1
    d(i)=T(i)
40 continue

c
c      ---- Main routine ----
c
read(1,*,end=80) (T0(k),k=1,5)
Tw=T0(nc)
call gauss(a,b,c,d,n,T,Tw)

c
ra=7.924266e-6*T(n+1)**2+4.043021e-3*T(n+1)+13.86741
q=-ra*(T(n+1)-T(n))/dh
time=time+dt*1000.

c
write(2,60) time,q,Tw
60 format(2x,f7.3,5x,e12.6,5x,f8.3)

c
go to 50

c
80 continue

c      ---- 流出熱量の算出 ----
c

```

```

    rewind 2
180 continue
    read(2,* ,end=200)(h(i),i=1,3)
    dhf=h(2)
    if (dhf.ge.0) then
        hfh=hfh+dhf*dt
    else
        hfl=hfl+dhf*dt
    end if
    go to 180
200 continue
c
    Sf=4.*pi*R**2.
    hfh=hfh*Sf/1000.
    hfl=hfl*Sf/1000.
    hf=hfh+hfl
c
c      ---- 初期設定温度・初期設定圧力 ----
c
    rewind 1
    j=1
c
    do 250 i=1,ns
        read(1,'(a)')skip
250 continue
c
    220 continue
    read(1,* ,end=230)(T0(i),i=1,5)
    ap=T0(3)
    at=T0(4)
    as=T0(5)
    if (j.le.500) then
        P0=P0+ap
        Ti=Ti+at
        Ts=Ts+as
    else
        Ts=Ts+as
    end if

```

```

j=j+1
go to 220
230 continue
c
P0=P0/500.*2.*0.0980665+0.101325
Ti=Ti/500.
Ts=Ts/float(j)
c
      rewind 5
231 read(5,'(a)',end=232) skip
      go to 231
232 write(5,240) P0,Ti,Ts,hfh,hfl,hf
240 format(f8.6,4x,f8.4,4x,f8.4,4x,f8.6,4x,f8.6,4x,f8.6)
c
245 close(1)
      close(2)
      close(5)
      stop
      end
c
c -----
c --- Gaussの消去法 ---
c -----
c
c     Name      Type    I/O      Array      Content
c     a         real*8   In       1001      cofeacient of T(i-1,j)
c     b         real*8   in       1001      cofeacient of T(i,j)
c     c         real*8   in       1001      cofeacient of T(i+1,j)
c     d         real*8   in       1001      T(i,j-1)
c     n         integer  in      ----      divided radius
c     Tw        real*8  in       1       surface temperature
c     T         real*8  out      1001      temperature distribution
c
subroutine gauss(a,b,c,d,n,T,Tw)
implicit real*8(a-h,o-z)
dimension T(501),a(501),b(501),c(501),d(501)
dimension s(501),al(501)
c

```

```

al(2)=b(2)
s(2)=d(2)
do 100 i=3,n+1
    i1=i-1
    r1=a(i)/al(i1)
    al(i)=b(i)-c(i1)*r1
    s(i)=d(i)+s(i1)*r1
100 continue
mad=n+2
T(n+1)=Tw
do 110 i=2,n
    l=mad-i
    T(l)=(s(l)+c(l)*T(l+1))/al(l)
110 continue
T(1)=T(2)

c
return
end

c -----
c ----- 初期温度分布 -----
c -----
c
subroutine initial(Tw,n,T,dh)
implicit real*8(a-h,o-z)
dimension T(501),a(501),b(501),c(501),d(501)
dt1=10./1000.
rk1=dt1/(dh*dh)

c
open(3,file='quench1.dat',status='unknown')
read(3,*) Tw1
do 120 i=1,n+1
    T(i)=Tw1
120 continue

c
150 continue

c
do 130 i=2,n+1

```

```
ai=float(i)
ax=1./(ai-1.)
ak=1.692704e-12*T(i)**2.+4.129159e-10*T(i)+4.031860e-6
a(i)=rk1*ak*(1.-ax)
b(i)=1.+2.*rk1*ak
c(i)=rk1*ak*(1.+ax)
130 continue
do 140 i=2,n+1
d(i)=T(i)
140 continue
c
read(3,*,end=160) Tw1
if (Tw1.le.Tw) go to 160
call gauss(a,b,c,d,n,T,Tw1)
c
go to 150
c
160 continue
write(*,165) T(1),T(n+1)
165 format(' Center temp. =',f8.4,['C'],
& /1h , 'Surface temp.=',f8.4,['C'])
c
close(3)
return
end
```

付録C 四流体モデルによる蒸気爆発進展過程の数値解析

蒸気爆発現象は、これまでの実験研究から(1)Pre-mixing, (2)Triggering, (3)Propagation, (4)Expansion の四つのフェーズに分かれて進展すると考えられている。ここでは、これらのうちのPropagation フェーズにおける爆轟波の拡大、進展過程を解析するための数学モデルとその数値解法について記述する。このモデルでは、爆轟波の通過の際の圧力上昇による蒸気膜の消滅と、爆轟波による加速によって生じる融体と冷却材の相対速度に起因する融体の分裂(Fragmentation)が爆轟波を進展させると仮定している。数値解析アルゴリズムは、二相流解析における IPSA (Inter Phase Slip Algorithm) を四成分、四速度場の混相流体方程式系（四流体モデル）に拡張したものであり、爆轟波を安定に解析するために人工粘性 (Artificial Viscosity) を用いている。以下に、Fletcher - Thyagaraja および Medhekar - Amarasooriya - Theofanous のモデルを拡張した四流体モデルに基づく一次元非定常解析モデルと数値解法について述べる。

C.1 計算モデル

蒸気爆発の解析では、冷却材の液相と蒸気相および燃料融体のDroplet と Fragment の四つの成分を対象とする。Droplet と Fragment は同じ物質であるが、Droplet は粒径の大きなもの、Fragment はDroplet が分裂して小さくなり、粒径がこれ以上変化しないものと考える。そして、分裂の過程における Droplet から Fragment への質量移行およびDropletの粒径の変化を考慮する。蒸気爆発の解析においては、Droplet の分裂(Fragmentation) 過程のモデル化が非常に重要である。

Fletcher ら⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾のモデルは、Droplet と Fragment は独立に扱うが、冷却材の液相と蒸気相は HEM (Homogeneous Equilibrium Model) で解析する 9 方程式モデルである。Droplet の分裂モデルとして、Carachalios ら⁽¹⁹⁾によって開発された境界層はがれモデル (Boundary Layer Stripping Model) を用いている。一方、Medhekar ら⁽²⁰⁾のモデルは、冷却材の液相と蒸気相およびDroplet は独立に扱うが、Fragmentation モデルとして、Reinecke - Waldman⁽²¹⁾モデルを用いている。

以下では、融体のDroplet と Fragment および冷却材の液相と蒸気相の全てを独立に扱う四成分・四速度場モデル（12 方程式モデル）における偏微分方程式と構成方程式、各成分の状態方程式、人工粘性、計算の境界条件と初期条件について記述する。

C.1.1 基礎方程式

本節では、融体のDroplet (d) と Fragment (f)、冷却材の蒸気相(g) と液相(l) の四つの成分の質量、運動量、エネルギー保存に関する偏微分方程式を導く。これらは通常の二流体モデルの偏微分方程式を四成分に拡張したもので、圧力は各成分に共通であると仮定する。また、融体は非圧縮性であると仮定して $\rho_d = \rho_f = const.$ とする。

Droplet は分裂の過程で徐々に小さくなる。そこで、Dropletは球形であると仮定して、その直径 L_d の時間変化に関する方程式もあわせて導いた。以下において、 j や k は各成分を表す添字である。

連続の式

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_k \rho_k v_k}{\partial x} = \Gamma_k \quad (C.1)$$

ここで、 α_k は各成分の体積率であり、 $\sum_k \alpha_k = 1$ を満足する。 ρ_k と v_k は各成分の密度と速度で、 Γ_k は質量交換項である。 $\Gamma_f = -\Gamma_d$ はDropletの分裂の過程における質量移行率を表し、 $\Gamma_g = -\Gamma_i$ は冷却材の相変化率を表す。

運動方程式

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k v_k}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_k \rho_k v_k^2}{\partial x} + \alpha_k \frac{\partial p}{\partial x} = \sum_{j \neq k} K_{jk} (v_j - v_k) + F_{Mk} - \alpha_k \rho_k g \quad (C.2)$$

ここで、 p は各成分に共通の圧力、 K_{jk} を含む項は成分間の摩擦力、 F_{Mk} は質量交換に伴う運動量交換、 g は重力加速度を表す。粘性は右辺の各項に比べて小さいとして無視されているが、圧力振動を緩和するため冷却材液相の運動方程式に対して人工粘性が付加される。人工粘性に関しては後に述べる。

エネルギー方程式

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k e_{sk}}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_k \rho_k v_k h_{sk}}{\partial x} + p \frac{\partial \alpha_k}{\partial t} = \sum_{j \neq k} R_{jk} (T_j - T_k) + Q_{Mk} - Q_{Fk} \quad (C.3)$$

ここで、 e_{sk} は内部エネルギーと運動エネルギーの和 $e_k + \frac{1}{2} v_k^2$ 、 h_{sk} はエンタルピーと運動エネルギーの和 $h_k + \frac{1}{2} v_k^2$ を表し、 T_k は各成分の温度である。右辺の R_{jk} を含む項は成分間の熱伝達、 Q_{Mk} は質量交換に伴う熱量の交換、 Q_{Fk} は摩擦による熱量の交換を表している。摩擦による仕事(drag work)は冷却材を加熱すると仮定している。

Droplet の直径の時間変化

$$\alpha_d \rho_d \frac{\partial L_d}{\partial t} + \alpha_d \rho_d v_d \frac{\partial L_d}{\partial x} = -\Gamma_{frag} \quad (C.4)$$

この式はIshii⁽²²⁾によって導かれた二相流における気液界面の断面積の輸送方程式をDropletが球形であると仮定して、Dropletの直径 L_d の式に書き換えられたものである。右辺の Γ_{frag} は分裂によるDropletの質量減少の効果を表しており、 Γ_f から計算される。

C.1.2 構成方程式

成分間の摩擦係数、熱伝達率の構成方程式およびFragmentationのモデルとして、Fletcher-Thyagaraja⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾のモデルを採用した。冷却材の沸騰および凝縮については、Madhekarら⁽²⁰⁾のモ

ルを修正して用いた。冷却材の物性値としては、水のものを用いた。

冷却材の沸騰および凝縮モデル

$$\Gamma_g = -\Gamma_l = J_e - J_c \quad (C.5)$$

$$J_e = \frac{\alpha_l \rho_l}{\tau_e} \left\{ \left(\frac{P_s}{P} \right)^{\frac{1}{\gamma}} - 1 \right\} \quad (C.6)$$

$$J_c = \frac{\alpha_g \rho_g}{\tau_c} \left\{ 1 - \left(\frac{P_s}{P} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right\} \quad (C.7)$$

ここで、 J_e 、 J_c はそれぞれ冷却材の沸騰率および凝縮率を表し、 P_s は液相温度に対応する飽和圧力、 γ は冷却材の比熱比、 τ_e 、 τ_c は熱平衡に関する緩和時間である。上記のモデルはMedhekar ら⁽²²⁾のモデルを改良したもので、冷却材の液相と気相を適当な割合で蒸発または凝縮させて、冷却材を飽和温度に保つ働きをする。

Fragmentation モデル

Fragmentation モデルとしては、Charachalios ら⁽¹⁹⁾によって提唱された Boundary layer stripping に基づくモデルを採用した。

$$\Gamma_f = -\Gamma_d = \frac{c_{frag} \alpha_d \sqrt{\rho_e \rho_d}}{L_d} |v_d - v_i| \quad (C.8)$$

ここで、 c_{frag} はオーダーが1の定数、 $\rho_e = (\alpha_l \rho_l + \alpha_f \rho_f) / (\alpha_l + \alpha_f)$ は冷却材液相とFragmentとの混合流体の密度である。なお、Fletcher ら⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾に従い、ウェーバー数 $We = \rho_e L_d (v_d - v_i)^2 / \sigma_d$ が臨界ウェーバー数 $We_{crit}(= 12)$ より小さいときには $\Gamma_f = 0$ とした。

Eq. C.4 の Γ_{frag} は、Droplet の直径がその体積の1/3乗に比例することを考慮すると以下の式で与えられる。

$$\Gamma_{frag} = -\frac{1}{3} \Gamma_f L_d \quad (C.9)$$

運動量交換モデル

(1) Droplet と冷却材との間の運動量交換関数 K_{dl}

Dropletを球形と仮定し、その直径を L_d とすると、液相中の1個のDropletに働く摩擦力 F_d は、 c_D を摩擦係数(Drag coefficient)として、

$$F_d = \frac{1}{2} c_D \rho_i \pi \frac{L_d^2}{4} |v_i - v_d| (v_i - v_d) \quad (C.10)$$

となる。Droplet の体積率を α_d とすると、単位体積中に $6\alpha_d / \pi L_d^3$ 個の Droplet があるから、トータルな摩擦力 F_T は次式で与えられる。

$$F_T = \frac{3}{4} c_D \alpha_d \frac{\rho_d}{L_d} |v_i - v_d| (v_i - v_d) \quad (\text{C.11})$$

Eq. C.4 と Eq. C.11 を比較すると、 K_{di} は次式となる。

$$K_{di} = \frac{3}{4} c_D \alpha_d \frac{\rho_d}{L_d} |v_i - v_d| \quad (\text{C.12})$$

係数 c_D の値は通常 0.4 程度であるが、Droplet が分裂する過程においては、もっと大きな値 (~ 2.5) をとることが知られている。

(2) Droplet と冷却材蒸気相との間の運動量交換関数 K_{ds}

Droplet と冷却材蒸気相の運動量交換係数の場合には、Eq. C.12 の ρ_e 、 v_i の代わりに、冷却材蒸気相の密度 ρ_s と速度 v_s を用いればよい。すなわち、

$$K_{ds} = \frac{3}{4} c_D \alpha_d \frac{\rho_s}{L_d} |v_s - v_d| \quad (\text{C.13})$$

c_D の値としては、通常の 0.4 を用いる。

Fragment と冷却材との間の運動量交換関数 K_{fi} 、 K_{fs} も同様に定義される。

(3) 冷却材の蒸気相と液相間の運動量交換関数 K_{gi}

冷却材の蒸気相と液相間の運動量交換関数 K_{gi} に対しては、Medhekar ら⁽²⁰⁾による以下のモデルを用いた。

- $\alpha < 0.3$ のとき

$$K_{gi} = \frac{3}{4} \frac{\alpha_s \alpha_l}{1 - \alpha_s} \frac{\rho_l}{\lambda_T} f[(1 - \alpha)^{\frac{3}{2}}] |v_s - v_l| \quad (\text{C.14a})$$

- $0.3 \leq \alpha < 0.7$ のとき

$$K_{gi} = \frac{3}{4} \frac{\alpha_s \alpha_l}{1 - \alpha_s} \frac{\rho_l}{\lambda_T} (1 - \alpha)^2 |v_s - v_l| \quad (\text{C.14b})$$

- $0.7 \leq \alpha$ のとき

$$K_{gi} = \frac{3}{4} \frac{\alpha_s \alpha_l}{1 - \alpha_s} \frac{\rho_s}{\lambda_T} f(\alpha^3) |v_s - v_l| \quad (\text{C.14c})$$

ここで、

$$\alpha = \frac{\alpha_s}{\alpha_g + \alpha_l} \quad : \text{冷却材のボイド率}$$

$$\lambda_r = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{\sigma}{g \Delta \rho}} \quad : \text{特性長さ}$$

$$f(x) = \frac{1 + 17.67 x^{6/7}}{18.67 x}$$

熱伝達モデル

(1) 融体と冷却材間のエネルギー交換関数

Droplet と Fragment が球形であると仮定し、伝熱断面積をその直径と体積から計算すると、融体と冷却材間のエネルギー交換関数は以下のような式となる。

$$R_{dg} = 6\alpha_d \frac{h_{vb}}{L_d} \quad R_{fg} = 6\alpha_f \frac{h_{vb}}{L_f} \quad (\text{C.15})$$

$$R_{dl} = 6\alpha_d \frac{h_{lc}}{L_d} \quad R_{fl} = 6\alpha_f \frac{h_{lc}}{L_f} \quad (\text{C.16})$$

ここで、 h_{vb} : 融体から蒸気膜への熱伝達率($\sim 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$)

h_{lc} : 液・液接触の場合の熱伝達率($10^5 \sim 10^7 \text{ W/m}^2\text{K}$)

L_f : Fragment の直径(一定値 $\sim 100 \mu\text{m}$)

ただし、融体が蒸気膜に覆われている場合には、Eq. C.16においても、 h_{lc} のかわりに h_{vb} を用いる。解析では、爆轟波が到達する前においては、融体は蒸気膜に覆われていると仮定して、熱伝達率として h_{vb} を用いるが、爆轟波が到達して圧力が上昇し、圧力がある蒸気膜消滅圧力 p_0 を越えたときに熱伝達率を h_{vb} から h_{lc} に切り替える。

(2) 冷却材間およびDroplet と Fragment の間のエネルギー交換関数

冷却材相間エネルギー交換関数 R_{gl} に対して、大きな一定値 $10^9 \text{ W/m}^3\text{K}$ を用いた。これにより冷却材の蒸気相と液相は等しい温度(飽和温度)となる。

Droplet と Fragment は、間に冷却材が存在して直接接觸しないため、融体間のエネルギー交換関数 R_{df} は0であるが、一方の成分が存在しないときにもエネルギー方程式を連立させて解けるようするために、 R_{df} に対して10程度の小さな値を与えた。

状態方程式

融体に対しては、密度一定、比熱一定の状態方程式を用いた。すなわち、

$$\begin{aligned} \rho_d &= \rho_f = \text{const.} \\ e_d &= c_{vd} T_d \quad e_f = c_{vf} T_f \quad (c_{vd} = c_{vf} = \text{const.}) \end{aligned} \tag{C.17}$$

C.2 数値解法IPSA法

前節の偏微分方程式をStaggered mesh 上で差分法を用いて離散化し、二流体モデルの数値解法である IPSA (Inter Phase Slip Algorithm) 法を四つの成分に拡張して適用した。その際、IPSA法をSemi - implicit (半陰解法) に改良して用いた。IPSA法は、単相流のSIMPLE 法を二流体モデルの二相流解析に拡張した汎用的二相流解析手法で、質量保存式とモーメンタム方程式から導かれる圧力補正方程式とエネルギー方程式を逐次的に解いていくため、アルゴリズムが簡単でプログラムの開発が容易である。以下では、その計算手順について簡単に記述する。

(1) 運動方程式Eq. C.2を連立させて 4×4 の行列を解くことにより、タイムステップの初めにおける各成分の速度の推定値 $v_k^{(0)}$ および速度と圧力の補正量の関係を求める。

$$v_k = v_k^{(0)} + d_{pk}(\Delta p_p - \Delta p_E) \tag{C.18}$$

ここで、 v_k は着目セル(P)とその右側のセル(E)の境界における各成分の速度である。 d_{pk} は速度の圧力依存性を規定する係数である。

(2) Eq. C.1を解いて各成分の体積率 α_k を求める。

(3) Eq. C.1を ρ_k で割り、それを加えあわせて得られる混合流体の体積に関する保存式 (Volumetric continuity equation) にEq. C.18を代入して圧力補正方程式を導き、それを解いて各セルの圧力補正量 Δp を計算する。 Δp は三重対角行列を解くことによって求められる。

(4) 圧力と速度を更新する。以下の式において r は反復の回数を表す。

$$p_p^{(r+1)} = p_p^{(r)} + \Delta p_p \tag{C.19}$$

$$v_k^{(r+1)} = v_k^{(r)} + d_{pk}(\Delta p_p - \Delta p_E)$$

(5) エネルギー方程式を解いて温度を求め、温度と圧力から密度を求める。冷却材の内部エネルギー

の温度依存性が非線形であるので、温度を求めるのに、以下のような二段階のステップが必要である。

まず、状態方程式Eq. C.17をDropletとFragmentのエネルギー方程式に代入し、これらを連立させて解いて T_d と T_f のそれぞれを T_s と T_i の一次関数の形で求める。ついで、これを冷却材の液相と気相のエネルギー方程式に代入して T_d 、 T_f を消去すると、冷却材のエネルギー方程式は T_s 、 T_i に関する連立非線形方程式となる。これをニュートン・ラフソン法で解いて、 T_s 、 T_i を求める。 T_s 、 T_i から、前的一次関数を用いて T_d 、 T_f が計算される。

融体の内部エネルギーも温度の非線形関数の場合には、エネルギー式Eq. C.3を全て連立させた非線形方程式を解かなければならぬ。

(6) ステップ(2)～(5)を繰り返して、 $|\sum_k \alpha_k - 1| < \epsilon$ となるまで反復する。

数値粘性

冷却材の初期ボイド率が小さい場合やEq. C.16の h_{lc} が小さい場合、圧力上昇によって蒸気相が凝縮すると、衝撃波の先端において高周波の圧力振動が生じる。この圧力振動を緩和するため、冷却材液相の運動方程式に以下のような数値粘性を付加する。

$$\mu_a = \begin{cases} \rho_i (b_0 \Delta x)^2 \left| \frac{\partial v_i}{\partial x} \right|, & \text{if } \frac{\partial v_i}{\partial x} < 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{C.20})$$

上式は、von Neumann - Richtmyer⁽²³⁾によって衝撃波の解析に用いられたもので、数値粘性は圧縮領域にのみ付加され、希薄波領域では0である。 b_0 の値として、von Neumann - Richtmyer は衝撃波の解析に1のオーダーの値を用いたが、解析においては $b_0 \Delta x$ に0.1のオーダーの値を用いた。初期ボイド率が小さく圧縮性が小さくなるにつれて、大きな b_0 を用いなければならない。

付録D 実験手順詳細

D.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。以下に示す記号はFig. D.1, Fig. D.2, Fig. D.3, Fig. D.4およびFig. D.5を参照のこと。

- (1) 全てのドレンバルブ(BV3-11)が閉じている事を確認。
- (2) 200litタンクに水を注入。注入後、循環ポンプにより配管経路Aで配管内を循環。このとき、試験的にBV2を閉じ、MV5を手動で開けてテスト部内へ水を注入し、NV3、NV2でテスト部注入流量を調節。
- (3) タンク内のヒータによりタンク水温を調節。（ヒータ出力は常時最大とする。水温が設定温度に達したとき、出力は自動的に遮断される。これまでの実験ではタンク水温を100°Cに設定）
- (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気圧ほど高めに調節。
- (5) 高周波加熱装置冷却水タンクに流量40lit/minで水を注入し、給水ポンプを作動させる。このときポンプ出口バルブNV6で圧力計P₁を4.0kgf/cm²G、高周波加熱装置入り口バルブNV7で圧力計P₂を3.0kgf/cm²G、ワクコイル入口バルブNV8で圧力計P₃を2.0kgf/cm²Gに調節。
- (6) データロガの測定準備。（参照1.2節）
- (7) 一度テスト部内に水を注入して、テスト部内での水温が適温であるかを確認。（これまでの実験のサブクール度は一律10°C）
- (8) テスト部内に水が残っていない事を確認。
- (9) 衝撃波発生装置にフィルムを取り付け、加圧または減圧スイッチでMV2、MV3を開閉して所定の初期設定衝撃波圧力に衝撃波発生装置高圧容器を加圧する。このとき、フィルムから漏れないかを確認。
- (10) 高周波加熱装置で段階的に出力を調節して球表面温度が約750°Cになるまで加熱。
- (11) 750°Cに加熱終了後、BV2を閉じて、配管経路Aの循環を遮断し、水注入用のリースイッチをonにしてMV5を開き、テスト部に水を注入する。それと同時に加熱を止める。
- (12) 所定の水位で水の注入が自動的に止まったら、水注入用のスイッチをoffにしてMV5を閉じて、直ちにデータロガの測定開始ボタンを押す。
- (13) 鋼球表面温度が予定している初期設定表面温度に達したら、衝撃波発生装置のスイッチを押してMV1を開き、フィルムを破くことで圧力波を発生させる。

全てが正常に作動すれば、データロガに実験結果が記録される。記録が終了したら、BV2を開き、再び配管経路Aを循環させる。PC-9801VX2でデータ転送プログラム"GPIB05"を起動し、データロガに記録された実験結果をフロッピーディスク又はハードディスクにテキストファイルとして保存する。（参照D.3節）

D.2 アナライジングレコーダの設定

Fig. D.6にアナライジングレコーダ操作パネルを示す。以下にその操作方法を示す。詳細についてはModel 3655 アナライジングレコーダInstruction Manualを参照のこと。

- (1) ①MODEキーを押し、MODEをMEMORY MODEに設定。
- (2) ②RANGEキーを押し、入力結合、測定レンジ、フィルタを以下の設定にする。

CH.	INPUT	RANGE	FILTER
A	DC	20 V	OFF
B	DC	20 V	OFF
C	TEMP	K	20KHz
D	TEMP	K	20KHz

- (3) ③TRIGGERキーを押し、トリガ関連、サンプリング・クロック源の指定、使用メモリ長およびアベレージング処理の有無を以下の設定にする。

TRIGGER SOURCE	:	INT
TRIGGER SLOPE	:	↑
PRE TRIGGER	:	20%
SAMPLE CLOCK	:	INT
BUFFER MEMORY	:	8000
AVERAGING	:	OFF

- (4) ④PROGRAMキーを押し、測定データに対するスケーリング、演算処理に関する設定を以下のように行う。

PROGRAM : OFF	SCALING : ON	
UNIT	LOW	HIGH
Y1 = A	-10.00	10.00
Y2 = B	-10.00	10.00
Y3 = C	0.000	1000.
Y4 = D	0.000	100.0

- (5) ⑤キーでTRIGGER LEVELを6~10%に設定。(TRIGGER LEVELはディスプレイ上端に表示)
- (6) ⑥⑦キーでSAMPLE RATEを設定。(SAMPLE RATEはディスプレイ上端に表示)
- (7) ⑧CHAN SELECTキーを押し、⑨のランプが点灯していることを確認。
- (8) ⑩SINGLEキーを押す。
- (9) ⑪STARTキーを押し、⑫のランプが点灯(トリガ待ち状態)していることを確認。

これら一連の設定が終了した状態で実験を行う。圧力波の急激な立ち上がりに反応してTRIGGERがかかり、計4つのチャンネルの時系列計測データがアナライジングレコーダのメモリに記録される。記録終了後、GP-IBインターフェイスを介して、コンピュータ(PC-9801VX)にデータを転送する。転送したデータはフロッピーディスクに保管しておく。(D.3節参照)

D.3 計測データ転送プログラム操作方法

Table D.1に計測データ転送プログラム"GPIB05.BAS"を示す。以下にこのプログラムの操作方法を示す。

- (1) BASICで計測データ転送プログラム"GPIB05.BAS"を実行する。
- (2) Number of data?と聞いてくる。ここではアナライジングレコーダに設定したBUFFER MEMORYと同じ値の**8000**を入力。
- (3) Sampling rate?を聞いてくる。ここではアナライジングレコーダに設定したSAMPLE RATEと同じ値を入力。
- (4) Pre pressure?と聞いてくる。ここにはなにも入力する必要はないが、衝撃波管初期設定圧力を入力。
- (5) Comment?と聞いてくる。ここには何も入力する必要はないが、適当なコメントを入力。
- (6) 最後にFile name?と聞いてくる。ここには計測データをフロッピーディスクに保存するための保存ファイル名を入力。

これら全ての入力が終了すると、アナライジングレコーダのメモリに納められている計測データがフロッピーディスクへ転送される。転送が終わるまで約20分間掛かるため、その間はなるべくコンピュータやアナライジングレコーダには触れないこと。

Table D.2に保存データファイルの一部を示す。各データの単位は時間Timeがmsec、テスト部下部圧力Lower Pressureと衝撃波管内圧力Upper Pressureが電圧V、球表面温度Particle Tempと水温Water Tempが°Cである。圧力データLower Pressure, Upper Pressureは1kgf/cm²当たり0.5Vで表示している。これらの圧力データは表計算ソフトなどを用いてMPaに単位換算する必要がある。

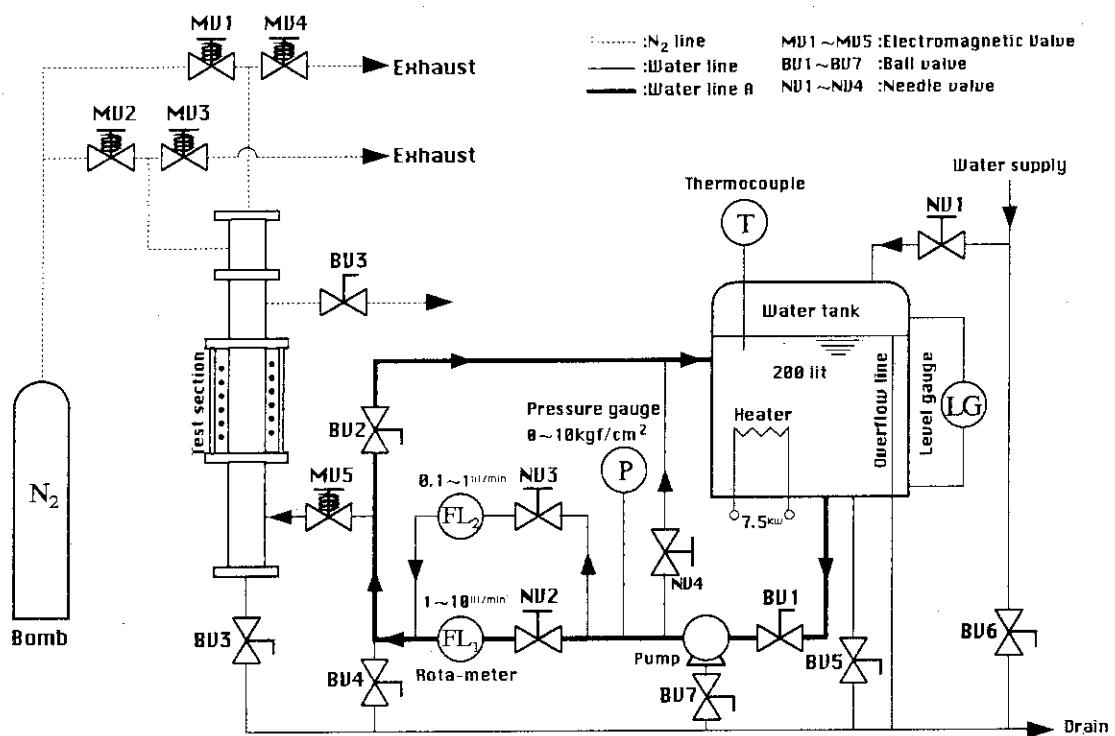


Fig. D.1 配管系統図

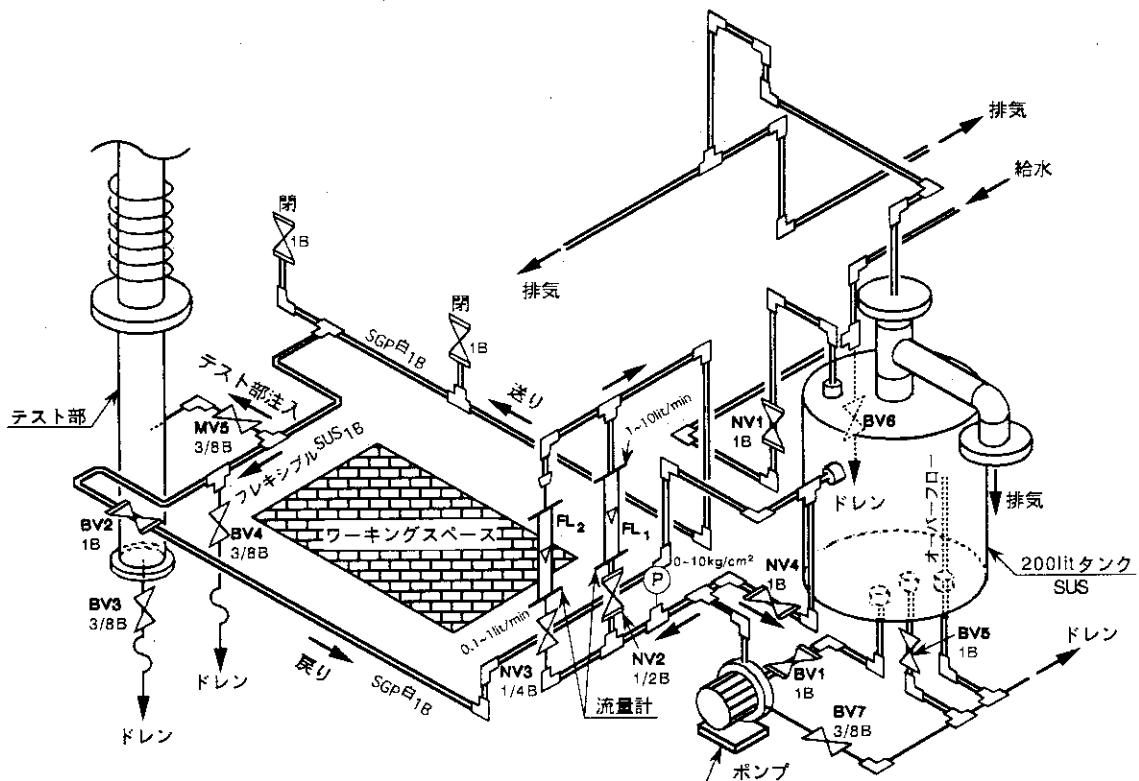


Fig. D.2 注入水用配管配置図

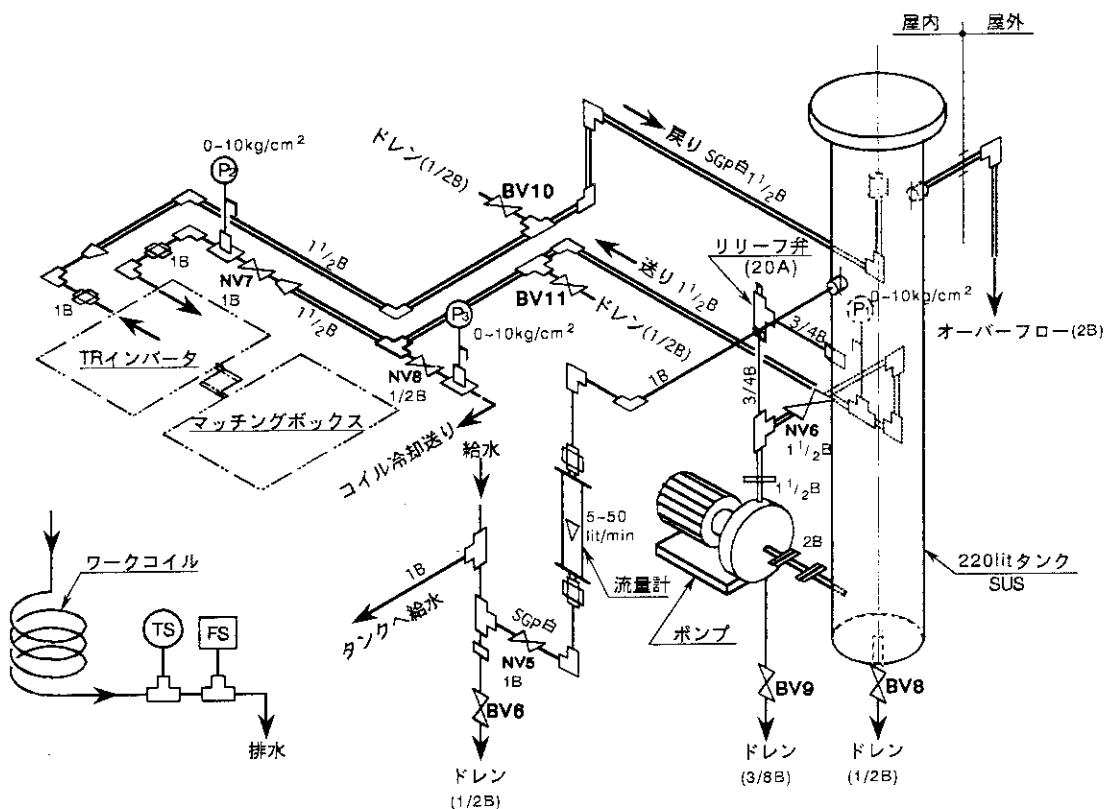


Fig. D.3 高周波加熱装置冷却配管配置図

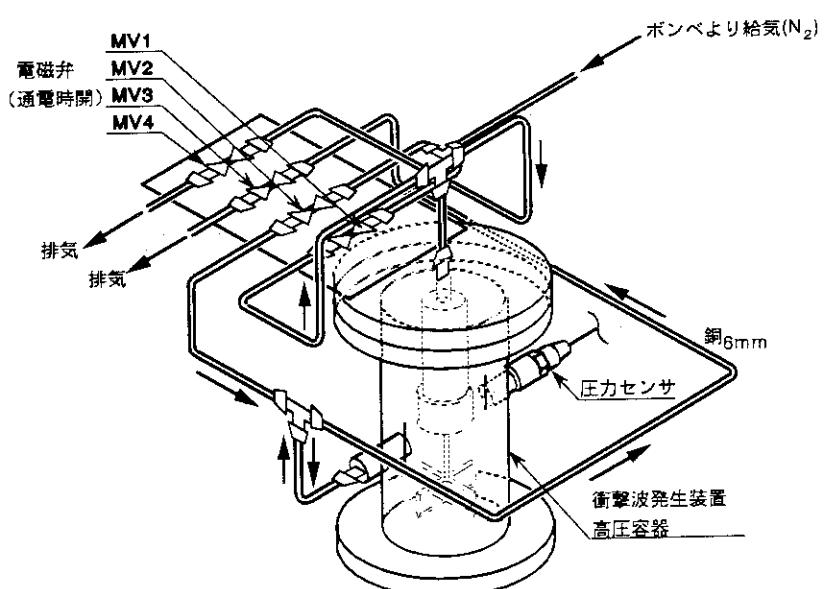


Fig. D.4 衝撃波発生装置操作配管配置図

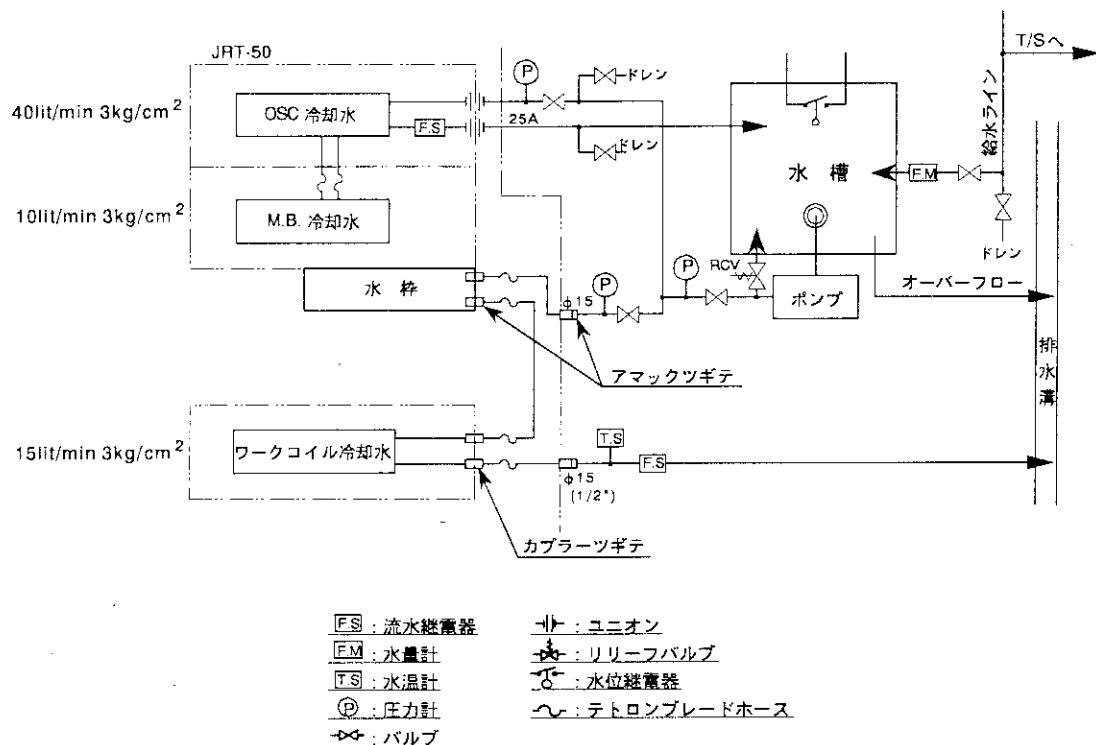


Fig. D.5 高周波加熱装置冷却配管系統図

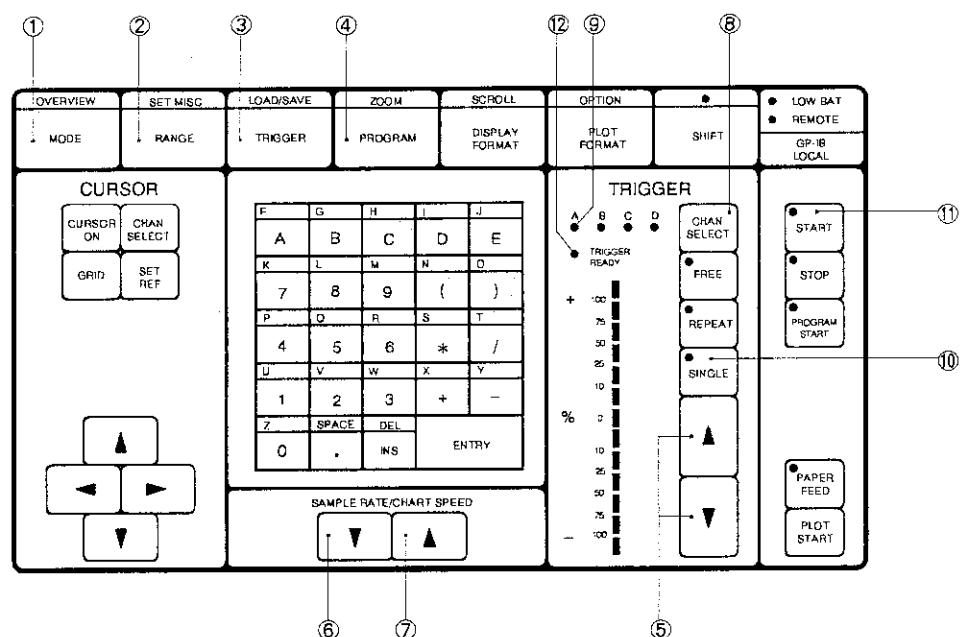


Fig. D.6 アナライジングレコーダ操作パネル

Table D.1 計測データ転送プログラム"GPIB05.BAS"

```

1 '****GPIB TRANSPORT PROGRAM****
2 ****          1994. 8. 12****
3 '
4 CLS 3
5 LINE (100, 100)-(501, 110), 7, B
6 LINE (300, 98)-(300, 112), 7
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$(N/50, 2)
120 DIM DD1(N)
125 DIM DD2(N)
130 RESTORE 440
140 FOR I=1 TO 7
150 READ RNG(I)
160 NEXT I
170 '
180 ISET IFC
190 ISET REN
200 CMD DELIM = 0
210 '
220 FOR J=1 TO 2
221 ST=0:SP=49
222 IF J=1 THEN CH$="A"
223 IF J=2 THEN CH$="B"
230 FOR I=0 TO N/50-1
240 CMD DELIM = 0
250 PRINT @1;"B"+CH$+" "+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) Lower Pressure
Upper Pressure ParticleTemp WaterTemp"
319 '
320 R=RNG(VAL(MID$(T$, 7, 1)))
321 L1=300
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)
380 A=CVI(Q$+P$):DA=R*A/32768!
381 B=CVI(S$+R$):DB=R*B/32768!
383 DD1=DD1(I*50+J)
384 DD2=DD2(I*50+J)
390 PRINT #1, USING"#####.## ";TIME;
391 PRINT #1, USING"###.##### ";DA;
392 PRINT #1, USING"###.##### ";DB;
393 PRINT #1, USING"###.### ";DD1;
394 PRINT #1, USING"###.### ";DD2
395 LINE (L1, 101)-(L1, 109), 1
399 TIME=TIME+DT:L1=(I*50+J)/N*200+301
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 '
501 L2=101
502 FOR J=1 TO 2
503 IF J=1 THEN W$="C"
504 IF J=2 THEN W$="D"
510 CMD DELIM = 0
520 PRINT @1;"0"+W$+" 0,"+STR$(N-1)
521 LINE INPUT @1;TD$
530 FOR I=0 TO N-1
540 LINE INPUT @1;D$
541 IF J=1 THEN DD1(I)=VAL(D$)
542 IF J=2 THEN DD2(I)=VAL(D$)
543 LINE (L2, 101)-(L2, 109), 2
544 L2=I/N*100+J*100+1
550 NEXT I
560 NEXT J
570 RETURN

```

Table D.2 保存データファイルの形式

Sample rate=.02 N= 8000				
Pre pressure= 4 kg/cm ²				
Comment : SUS304, 10mm o. d.				
Time(ms)	Lower.Pressure	Upper.Pressure	ParticleTemp	WaterTemp
0.00	0.01977540	2.00555000	497.400	90.500
0.02	0.02389530	2.00885000	497.300	90.300
0.04	0.01895140	2.00885000	497.400	90.600
0.06	0.02059940	2.00967000	497.400	90.500
0.08	0.01895140	2.00555000	497.400	90.300
0.10	0.02224730	2.00885000	497.300	90.300
0.12	0.02307130	1.99814000	497.500	90.500
0.14	0.02059940	2.00720000	497.300	90.500
0.16	0.02059940	2.00720000	497.500	90.400
0.18	0.02554320	2.00803000	497.500	90.500
0.20	0.02471920	1.99979000	497.500	90.500
0.22	0.01977540	2.00143000	497.200	90.500
0.24	0.01812740	2.00720000	497.500	90.500
0.26	0.02307130	2.00226000	497.700	90.500
0.28	0.02471920	2.00226000	497.500	90.100
		•		
		•		
		•		
		•		