

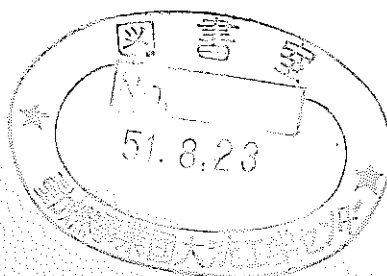
TN 241 71-42

< 成果報告 >

区分変更	
変更後資料番号	111
決裁年月日	平成 13 年 11 月 30 日

液中瞬時溶融金属の圧力挙動に関する実験的研究

1971 年 10 月



技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
	N241 71-42
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

動力炉・核燃料開発事業団

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

液中瞬時溶融金属の圧力挙動に関する実験的研究

東京大学工学部原子力工学研究施設

安 成 弘

東京大学工学部原子力工学科

近 藤 駿 介

今 井 哲

向 井 卓

水中で金属片を急速加熱し，気化に伴う過渡圧力挙動が測定された。

高速炉炉心溶融事故時の蒸気爆発の激しさを支配する要因の1つに試料からナトリウムへの熱伝達の速さがある。本研究はこの熱伝達率に注目するとともに炉心溶融事故そのものの模擬を目指して行なわれ，熱伝達率と周囲ナトリウム温度挙動に関して知見を得るとともに，試料形状の変化に伴う圧力挙動の変化も追究している。ナトリウムが炉内に溜る場合に対応する多孔試料では圧力挙動がゆっくりとしたものになることが示されナトリウム蒸気発生に対応する水蒸気の混入によるものと推定された。

Abstract

Small pieces of lead were vaporized by electrical heating in water contained in a tank. The transient pressure behavior has been measured and the sequence of the event has been motion pictured by 16 mm high speed camera. From the analysis of these data heat conduction around the vapor bubble has been shown to be the probable mode of heat transfer at the bubble boundary. The rate of it has been estimated from the pressure record to be 10^7 kcal/m²hr°C or so. The effects of sample heterogeneity has been also investigated. Samples with many holes or those made of fine copper wire showed slow rising and decaying pressure history without initial shock.

目 次

I	実 験 概 要	1
II	実 験 方 法	2
	1. Test Section	2
	2. 測 定 系	5
	3. 測 定 機 器 リ ス ト	8
	4. 実 験 手 順	8
III	実 験 結 果	12
	1. 実 験 結 果	12
	2. 結 果 の 解 析	35
IV	結 論 と 検 討	45

I 実験概要

前報(1)においては、炉心溶融再臨界事故におけるエネルギーの放出を、特に、溶融燃料から冷却材 Na への熱伝達を考慮することによって理論的な検討を加えて来た。一方、平行して、実験的な評価も行なわれている。これは特に、containment の耐爆設計の側からの要請によっており、通常 TNT 爆発によって近似されている。TNT による核的なエネルギーの近似が、必ずしも妥当ではないということは、先に述べた通りである。explosion の timescale や、衝撃荷重、蒸気膨張による荷重に関しては、各々微妙に異っている。しかし、現在のところ、TNT による近似は、少なくとも安全側であるということで、炉容器設計に指針を与えている。

本章では、炉心の出力逸走によって起こるであろう、様々な現象を、鉛の水中急速加熱という手段を用いて mock up し、主として、圧力挙動の分析から、仕事に転換されるエネルギーを評価していこうとする。

こうした、水中爆発に関しては、特に、放電成形の分野でよく知られており、実験体系の設定においては、少なからぬ情報を得ることができた。電源には 12V の蓄電池を使用し、それを 10 コ並列につなげた。回路は大電流を導くために 2 cm × 5 cm の銅板を用いた。test section は 6 cm × 3 cm × 37 cm のアクリル容器になっており、その中に水を張り、鉛のテストピースに大電流を流す。急激に 103A ぐらいの電流が流れ、鉛は瞬時に蒸気化し、それは explosion として観察される。この間、test piece の両端での電圧、電流、容器上下面の圧力、test piece 上部での温度が測定され、これは、電磁式のオシログラフ (visigraph) に input され、同時に記録される。変化の time scale は非常に短く、chart の送り時間を 1 m / sec にして、1 cm を 10 msec として記録されるようにする。test piece の背後の容器壁面で測定される圧力は、シンクロスコープに導かれ、1 ~ 0.5 msec / cm で記録させる。

一方、水中で起こった現象を観察するため、高速度カメラを用いて撮影する。コマスピードは 2000 コマ / sec であり、生じたバブルの生長・消滅、水面の衝撃による運動などが記録される。これらをもとに実験データの相互比較を行ない、種々の現象の推移を判断し解析モデルの妥当性を検討していく。

II 実験方法

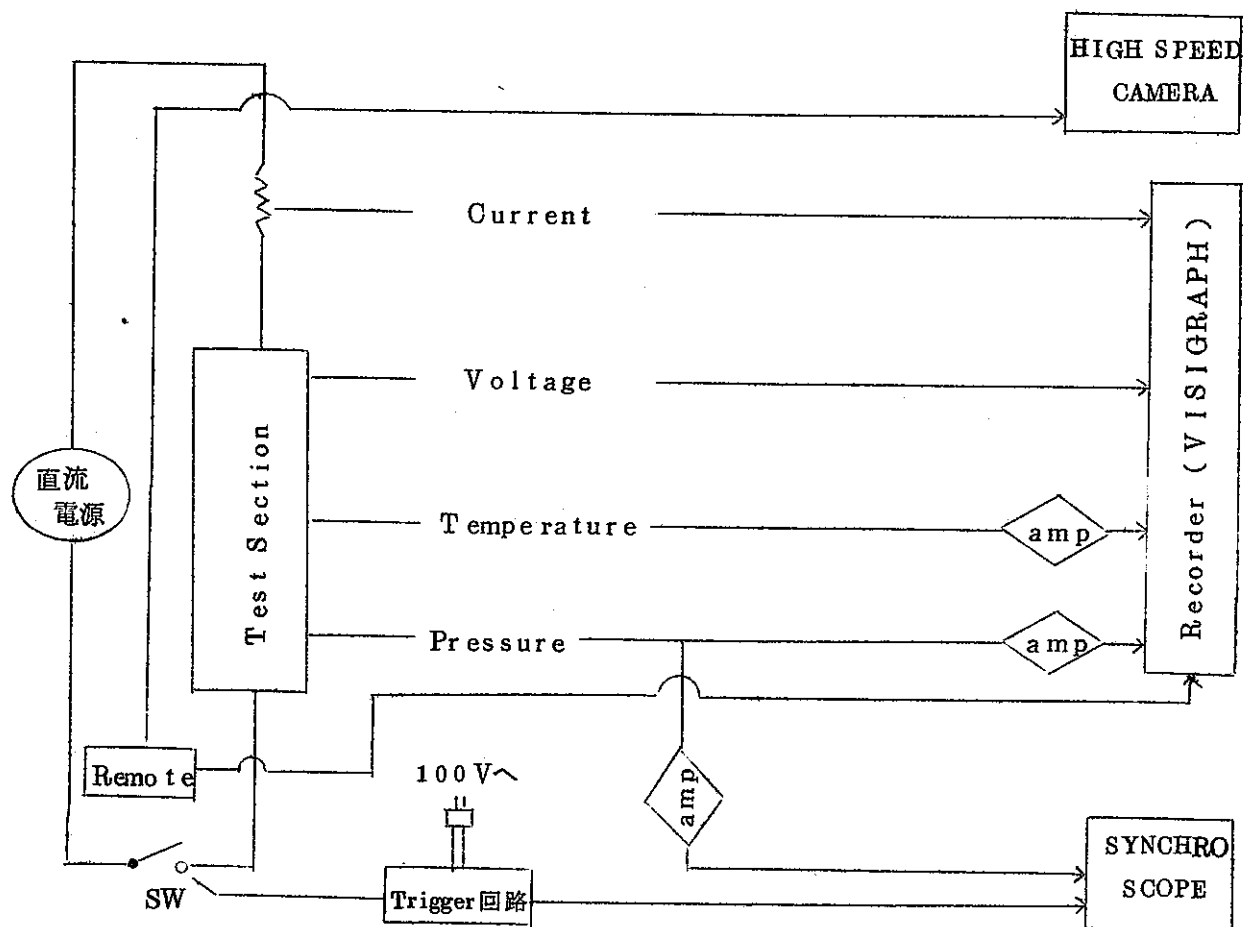


Fig. 3-1

II-1 Test Section

Test section は、アクリル容器（上下蓋は真鍮）の水槽と、銅棒電極、更に test piece から成り立ち、他に、測定系として、熱電対 3 本、圧力計の transducer（上下、中央の 3 カ所）が装備される。水槽は、外部からの観察を容易にするため前後側面をアクリル製、上下の面を真鍮製にしている。サイズは、たて 3 cm 横 6 cm 高さが 3.7 cm の直方体容器になっており、上下、側、後面はネジと接着剤で完全に接着した。正面のアクリル板は、毎回の放電実験で、test piece の取替えができるように、ねじでとめるようになっている。放電時には鉛の蒸気化によって、高圧がかかるため、容器の強度には特に気を払った。アクリル正面の取付けネジは全部で 30 本にもおよび、又、ネジ穴は側面アクリルの板厚部分にあけるため、側面のアクリル板だけは、板厚が 1.5 mm となっている。（後面、正面は板厚 1.0 mm）。アクリル板をねじで取付ける場合は、衝撃時の水もれを防ぐために

2 mm 巾のバックインをはめる。このバックインは、ゴム製で、側面、上下真鍮の板厚部分に溝を掘ってはめこみ、shock によって、変形または飛び出さないように工夫している。上下の真鍮蓋には、圧力計の transducer をとりつけるために 16 mm φ のねじ穴があけてあり、又上の真鍮蓋には液体を水槽内に注入するための銅製 tube とバルブを、下の真鍮蓋には、放電終了後液体を放出させるための tube とバルブをとりつけてある。シンクロヘインブットされる圧力計の transducer は、後面アクリル板の電極の高さの位置に直接はめこめるようにしている。

電極は、15 mm φ の銅棒を使用し、アクリル容器側面から水槽内に貫通、固定される。位置は、高さが 12 cm の所であり、銅棒の固定には、外側から、3 cm 四方の板厚 10 mm のアクリル板をあてた。電極の間隔は 10 mm であり、先端部分は、test piece が設置できるように、1 部分を削りとってある、(Fig. 3-2) 銅棒電極から、主回路 (銅板) への接続には、約 4 cm 巾の銅網線を用い、

Fig 3-2 のように、銅棒電極の端に取付けた、2 枚の銅板で銅の網線をはさみ、ねじでとめるようにしている。接触抵抗を少なくするため、取付け用のねじ穴をあけた銅板は、できるだけ、平らにヤスリをかけた。

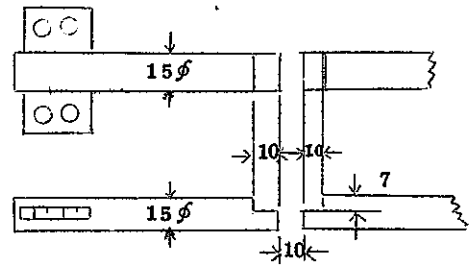


Fig 3-2

test piece は、原則として、鉛の板 (厚さ 3 mm) を Fig 3-3 のようにプレスしてくりぬいたものを使用した。これを、両電極の先端部分に置き、その test piece の上に、15 mm φ 銅棒を長さ 1 cm、厚さ 4 mm

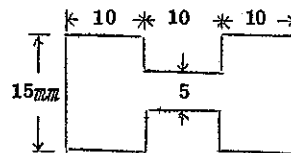


Fig. 3-3 test piece

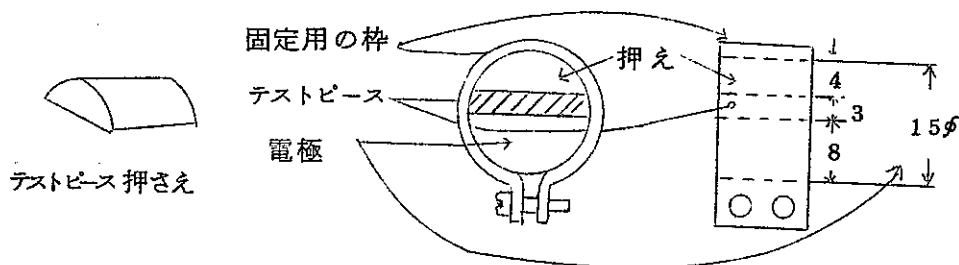
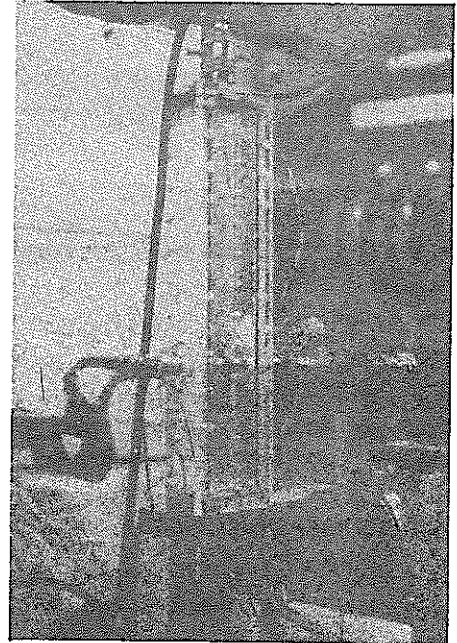
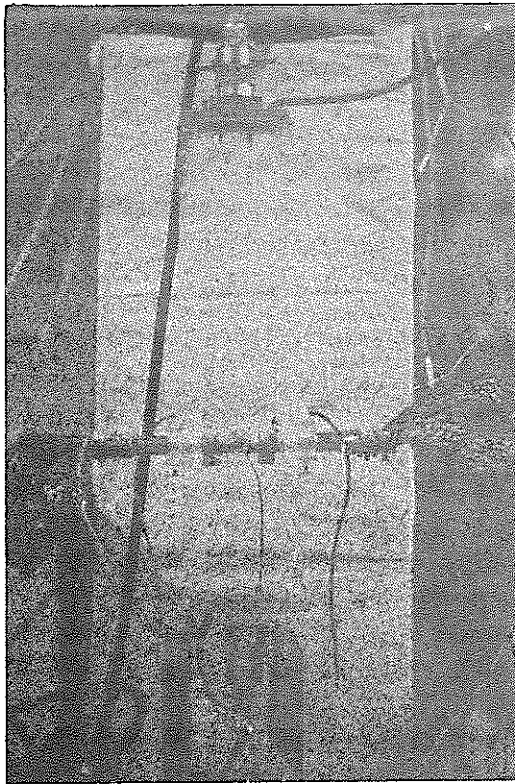


Fig. 3-4 test piece 固定部分の詳細

の弓形断面に切りとったテストピース押さえを乗せ、そのまわりを、電極、テストピース、テストピース押さえをとり囲むかたちで、固定用の枠を取付ける。この枠は、ねじで締めつけることができる。電極とテストピースは密着して接続されていなければならない。実験の度ごとにそれぞれを細目のヤスリをかけるようにした。放電時には、中央の細い部分だけが爆発質量を変える場合には、ヤスリをかけて、自由な質量にすることができる。



II-2 側定系

[A] 温度

test piece の上部, 約 1 cm から 2 cm の間に, 3 本の熱電対の hot junction をとりつけ, test piece が爆発的に蒸気化した後の温度変化を測定する。熱電対は, C・A (クロメル-アルメル) のシース型のものを使用した。急激な温度変化を敏感に catch するために, 熱電対の応答時間を改良する工夫がなされた。ふつう, 熱電対の応答時間は, 温接点の熱容量と伝熱面積に依存している。アルメルとクロメルの先端は spot 溶接によって接合させるが, 応答時間を良くするために後処理を施してやらなければならない。接合部での熱容量をできるだけ小さくし, 伝熱面積を大きくすればよいのだが, これは, 同時に, なかなか満足させるのがむづかしく, 接合部を軽くハンマーで叩くことによって, 伝熱面積を向上する処理をおこなった。こうした処理による応答時間の改良の結果は, 逐次, シンクロスコープで点検された。沸騰している水の中へ, 急激に hot junction を突込んで立上り時間を観察したが, このシース型の Thermo Couple では, 立上り時間を 10 msec 以下に引下げることが, 困難であることがわかった。結局, 測定に供した Therms Cupple の立上り時間は 15 ~ 15 msec の範囲内であった。

Test Section から導かれた, Therms Couple は, cold junction, Amplifier を経て, 電磁式のオシログラフに導かれる。増巾器の Gain は 200 あるいは 500 で測定した。較正は, 増巾器内で 0.5 V を与え, visigraph に記録させることによって行った。ふつう, Gain が 500 で, 0.5 V が 2.3 cm の変動であることから, visigraph で 1 cm の変化は,

$$\frac{0.5}{500} / 2.3 \quad (\text{V/cm}) / 4.0 \times 10^{-5} (\text{V/}^\circ\text{C}) = 10.9 \text{ }^\circ\text{C/cm}$$

となる。

[B] 圧力

test piece が放電によって爆発的にガス化する時の圧力変化は, 上下 (test piece からのきよりは 2.5 cm と 1.2 cm) と, test piece の直後 (この場合, きよりは 1.5 cm) で測定される。圧力計はピエゾ電気を利用したものであり, 上下の圧力計は indicator amp を通じて Recorder に導かれる。一方中央部での圧力計は, 水晶 (quartz) の transducer から, ピエゾアンプ, channel amp を通して, シンクロスコープに input され, 圧力変化の波形が観察される。上下の圧力計は, 周波数特性が良くなく, また, test piece の放電後生じるバブルの内圧により近い圧力を測定するという意味で, 解析に供する圧力波形は, もっぱら中央部の圧力計から入手している。この中央での圧力は, 他の測定諸データのように, visigraph で, switch on から switch off までの全 time scale に渡って記録させるのではなく, 適当な trigger 信号によって現象の time scale だけの圧力変化を記録するようにしている。即ち, 回路を switch

on した瞬間に, trigger 信号を発生させ, シンクロに trigger 入力として入れてやり, 波形を sweep させてやらなければならない。回路を switch on にしてから, 約 3 ~ 4 msec 後に放電が終了し, その後 2 msec 位で主たる圧力挙動は終結してしまふから, 適当な sweep 速度を選んでやって圧力の history を最適に catch してやらなければならない。当初, 圧力挙動の time scale が小さく, switch on から最初の圧力変動が起こるまでの時間が相対的に大きいため, delay 回路を利用して, トリガ入力に switch on からある時間遅れをもってシンクロへ input されることを考慮したが, sweep の point をずらしたり, sweep 速度を調節することによって, 波形の catch が旨く行くようになった。trigger 回路は, switch の両端から lead 線を出しコンデンサ回路を通じて, シンクロに導かれている。test section を含んだ main 回路を switch on すると同時に, trigger 回路は短絡し, コンデンサの放電パルスがトリガ入力としてシンクロに input されるようになっている。

圧力の較正は, 上下の圧力計では, indicator の 10 Kg/cm^2 が visigraph で何 cm に対応するかで行い, 中央の圧力計では, ピエゾアンプのコンデンサ容量と Kistler の transducer 用の較正曲線から行った。

KISTLER の水晶素子の電荷-圧力較正曲線では, 傾きは $0.351 (\text{pcb/psi})$ であり, これは, 電荷 $Q (\text{cb})$, 圧力 $P (\text{Kg/cm}^2)$ の関係として

$$Q = 0.351 \times 10^{-12} (\text{cb}) / 0.07031 (\text{Kg/cm}^2) P$$

$$Q = 5.0 \times 10^{-12} P \quad \text{となる。}$$

又, ピエゾの amp Gain $C (\text{F})$ と, 生じる電圧 $V (\text{volt})$, 電荷 $A (\text{cb})$ の関係は, $Q = CV$ であるから, amp gain を $0.005 \mu \text{ F}$ とすると,

$$P = \frac{5 \times 10^{-9}}{5.0 \times 10^{-12}} V$$

$$= 1.0 \times 10^3 V \quad \text{となる。}$$

シンクロの Gain を 0.05 volt/div とすると, 結局発生圧力 P は, $50.0 \text{ Kg/cm}^2/\text{div}$ となる。但し, ピエゾのアンプと, channel amp をつないだ場合は, 各々感度が 2 倍となるため, channel amp の倍率を 0 dB とすると, 結局, $1.25 \text{ Kg/cm}^2/\text{div}$ となる。

[C] 電流と電圧

電流, 電圧は, 放電時間や, sample への入力エネルギーの評価のために測定される。各々の lead 線は, 適当な抵抗を介して visigraph に導かれる。

電圧は, test piece 両端での電圧降下を測定するが, テストピースの固定部分に端子を設置するのは, 毎回のとりつけの繁雑さと, テストピースとの接触の不安定さから, 銅棒電極の外部で測定することにした。この場合, 銅棒の部分の電圧降下が影響するが, test piece の抵抗は, 電極部にくらべてはるかに大きいため無視できるであろう。

電流は main 回路内の一部分の銅棒 (2 cm × 5 cm 角断面, 約 50 cm にわたる) を標準抵抗として, そこにおける電圧降下から測定される。この銅棒の抵抗値は極めて小さいため, 既知の抵抗を用いて求める, その方法は次の通り,

銅棒電極間に, 適当な既知抵抗を置いて, 回路に電流を流し, (但し, この既知抵抗は大入力に対して発熱破損するものではだめ) 標準抵抗での電圧降下を測定する。標準抵抗での電圧降下は既知抵抗での電圧降下にくらべてはるかに低いから, 回路内に流れる電流は, 電源電池の電圧と, 既知抵抗の抵抗値から評価できる。この電流値と, 電圧降下の測定値から, 標準抵抗の値が求まる。標準抵抗での電圧降下は, かなり小さいため増巾器を使って増巾してやる必要がある。電圧のキャリブレーションは既知電圧 (水銀電池) 1 V) を用いておこなう, 以下に校正の結果を示す。

☆ 既知抵抗の作成

3 Ω の高電力 (25 w) 抵抗を 14 コ 並列につなぐ, この抵抗は Bridge 回路を使用して修正した結果 0.27 Ω となった。この既知抵抗は, 回路に大電流を流すため耐電力の大きなものを使用しなければならない。

☆ 電流

既知抵抗 (0.27 Ω) での電圧降下は, ほぼ, 電源電池の電圧 1.2 V に等しいとみなしてよいから, 回路に流れる電流 I_s は, $I_s = 1.2 / 0.27 = 4.45$ A。

☆ 標準抵抗での電圧降下と標準抵抗値

まず, amp を 1 倍にして, 水銀電池で, 電圧と visigraph の変動を測定。これでは 5.6 cm/V であった。

次に, 回路に電流を流して, 標準抵抗での電圧を測定, この場合, amp gain は 500 倍にする。visigraph での変動が, 1.15 cm であったことから, 電圧降下 V_s は

$$V_s = 1.15 \times \frac{1}{5.6} \times \frac{1}{500} = 4.1 \times 10^{-4} \text{ V}$$

先に求めた, 回路の電流値 I_s から, 標準抵抗の値 R_s は,

$$R_s = \frac{V_s}{I_s} = \frac{4.1 \times 10^{-4}}{4.45} = 9.2 \times 10^{-6} \text{ } \Omega$$

☆ 電流値のキャリブレーション

amp をはずして, 水銀電池によって校正をすると, 1 cm - 0.2 V の関係が得られた。従ってガルバノの変動値 (cm) と流れる電流値 (A) の関係は, 標準抵抗値を用いて,

$$\frac{0.2}{9.2 \times 10^{-6}} = 2.18 \times 10^{-4} \text{ A/cm} \text{ となる}$$

☆ Sample 間の電圧

電源電池の電圧をあらかじめ測定しておき、visigraphでの記路から、各々のtest後にキャリブレーションしていくことにした。代表的には $1.2\text{ V}-3\text{ cm}$ つまり、 4 V/cm なる関係が得られた。(電流値測定の場合は、 0.2 V/cm と、この関係とは違っているが、これは、各々のlead線の間に入れた抵抗値が異なることによる。)

II-3 測定機器リスト

1. VISIGRAPH FR102 (SANEI INS.)
2. 6L2P DC AMPLIFIER (SANEI INS.)
5204 RELAY BOX
3. PRESSURE INDICATOR MODEL DAU-5.
(SHOWA Meas. Ins.)
4. 16M-M日立高速カメラ HIMAC
10M-R rectifier unit.
5. SS-5302 SYNCHROSCOPE.
6. YASHICA OSCILLOSCOPE RECORDING UNIT
TYPE OSP-180B
7. Model 5047 PIEZO AMPLIFIER-A
(NIPPON KEISOKU)
8. Kistler 603H QUARTZ PRESSURE TRANSDUCER
9. Model 5046 AC AMPLIFIER
(NIPPON KEISOKU)

II-4 実験手順

実験の手順としては、まず電極間にtest pieceを置き、それを固定する。それから、容器の前面にアクリル板をはめ、30本のネジで密封する。上の真鍮板の液体注入用の穴から、水を注ぎ、パラメーターとして与えられる自由空間を残して容器を水で満たす。その際、水槽内にたくさんの小気泡ができることがあるから、あらかじめ容器壁面、電極、thermocouple、test pieceなどをよく払っておき、また、水の注ぎ方は、除々にすることが必要である。Thermo Coupleのcold Junctionには、氷を入れて、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ を保つようにしておく。こうした、実験の準備を終えた後、計測系等のcheckを行う。check事項を示すと。

- ① 水温、冷接点、水位の確認。
- ② Remote系の動作確認。

Remote Switchでは、ふつうSwitch onと同時に、high speed cameraにpowerがinputされ、その0.5秒後位に、visigraphのmotorを駆動して、

paper を送り出させるようにしている。Remote 系の確認は、high speed のコマ速度を 0 にし、visigraph の paper 送り速度を最低にして、丁度いいタイミングで high speed, visigraph が作動することを確認しておく。Remote 装置では、switch off の時期を、ある範囲内で変化させるようにしており、switch on してから、1 秒あまりで、high speed と visigraph への power の供給を同時に遮断する。

③ CHART SPEED の確認

Remote 系の確認が終わった後、paper (chart) の送り速度を 10.0 cm/sec にする。これによって、電流・電圧・温度、圧力(上下の圧力計)の変化が $1/10\text{ msec}$ で記録されるようになる。visigraph の chart が送り出されている正味の時間は $0.5 \sim 0.6\text{ sec}$ で、記録すべき確量の変化は、大体数十 msec で終わる。

④ visigraph のガルバノの調達

電流、電圧、温度・圧力の信号は、ガルバノの小さな鏡の回転に変換され、鏡の面の回転は、chart 上での spot の水平移動に変換される。visigraph ではこのガルバノが 12 あり、記録すべき信号は、このどれかのガルバノに input し、鏡の反射光による spot の変動として測定できるようになっている。まずそれぞれの spot がどのガルバノ、即ちどの出口信号から来ているかの確認をし、あらかじめ、放電時にどれくらいの変化巾になるかを知っておくことによって、その spot の位置を、chart 上の適当な場所に定める。本実験では、電流、電圧、温度(3つ)、圧力(上、下)の 6 つの出力を visigraph で同時に測定するが、これらの位置を適当に set する。しかる後、それぞれの spot について、測定系の説明で述べたように、校正を施してやる。

⑤ High SPEED CAMERA の点検

カメラは、水槽から 2 m 位の場所におかれ、画面内に、test piece の部分と、水面がうまく入るようにした。フィルムは、

フィルムは、 16 mm 用 32 m のものを、1 回の実験毎に半分、 16 m にして使用した。コマ速度は 2000コマ/sec であるから、1 コマは 0.5 msec となり、film が全部、回り切るのに要する時間は 1 sec である。(1 コマの長さは 8 mm)。前半の 0.5 sec は、visigraph の chart が送り出されないから、無駄になり、後半の 0.5 sec の間で現象を catch するようにする。絞り、ピントについては忘れずに check する。

なお、50 サイクルのネオンランプを点滅させて、 16 mm フィルムの端(上下)に感光させて、time marker として利用しようとしたが、50 サイクルで点滅するとすると 1 sec 間に 100 コマしか感光せず、film のコマ速度は、 1 sec に 2000コマ であるから、20 コマに 1 つの mark しかつかないことになって、Film の時間決

めには、ほとんど実用的ではなくなってしまった。時間は、誤差はあるけれども、コマ数で決定した。

⑥ ピエゾアンプ、チャンネルアンプの check .

⑦ シンクロスコープの check

シンクロスコープには、水晶の transducer から圧力変動に見合った出力が input されるから、適当な Gain を設定する。又、シンクロに生じる圧力波形は、シンクロ用のレコーディングカメラで撮影するから、position, intensity についても適当に check する。又、トリガ入力、sweep 速度についても check する。

⑧ トリガ信号の確認

Switch の両端の lead 線を短絡させて、trigger 信号をシンクロへ input し、うまく sweep するかどうかを確認する、この場合、trigger level を適当に設定することが必要である。というのは、level を低くしておくと、visigraph の motor 駆動時や、HIGH SPEED 始動時の noise が trigger 入力となって波形を sweep させてしまうことがあるからである。これは、シンクロの性能によっても異なるが、main 回路に switch を入れる前に波形が sweep されると、圧力波形は全く記録されないから注意を用する。又、level をあまり高くしすぎると、今度は、コンデンサー回路による、トリガパルスが有効にトリガ入力としてシンクロスコープに入力されないから、適当なトリガレベルを事前に設定しておくことが必要である。

⑨ シンクロの記録カメラの check

以上の check 事項を確認すると、高速カメラ撮影用のライトをつけて、いよいよ実験に入る。

まず、Remote の switch を on にする。と同時に、高速カメラのモーターが回り出し、0.5 秒に visigraph の chart が 1000 cm/sec の速いスピードで送り出される。chart が送り出された瞬間をみはからって、main 回路のスイッチを入れる。瞬時に最高 10 万アンペアぐらいの電流が回路に流れ、比較的抵抗が大きい test piece 部が発熱し、沸点までエネルギーが投入されて、急速に蒸気化する。エネルギーの入力パルスは約 3~4 msec と非常に短くしかも、ピークが大きいので、test piece の蒸気化は、爆発的な現象として観察される。容器に set された sensor はそれぞれの信号を visigraph に送りこみ、時間軸を同じにして、各諸量の変化が記録される。一方、main 回路を switch on した瞬間には、コンデンサー回路が短絡され、トリガパルスがシンクロに input される。これによって、圧力の時間変化が initiate される。test ピースの explosion によって圧力が発生するには、switch on から、最初のエネルギーパルスが終わるまでの時間が必要であり、この後衝撃的な圧力が transducer によって感知される。この時間は、sample (test piece) の size や材質等の条件によっても変わるが、ふつう 3~4 msec 位である。圧力挙動は、中央の圧力に関しては、ほぼ 1.5 msec

ぐらいで終わるから、sweep 速度を $1 \text{ msec} / \text{div}$ に set しておくと、 8 msec の interval で圧力変化が記録され、シンクロの中央部分で、初期の shock pressure をとらえることができる。(sweep 速度を $0.5 \text{ msec} / \text{div}$ で行くと、switch on から 4 msec までの現象しか catch できず、主たる圧力挙動を完全に記録できないと懸念されたが、これは、initial point をずらすことによって可能になった。 $0.5 \text{ msec} / \text{div}$ であると、圧力の時間変化の精度は、 $1 \text{ msec} / \text{div}$ の場合よりも良くなり、明瞭な圧力波形を得ることができた。)

Ⅲ 実験結果

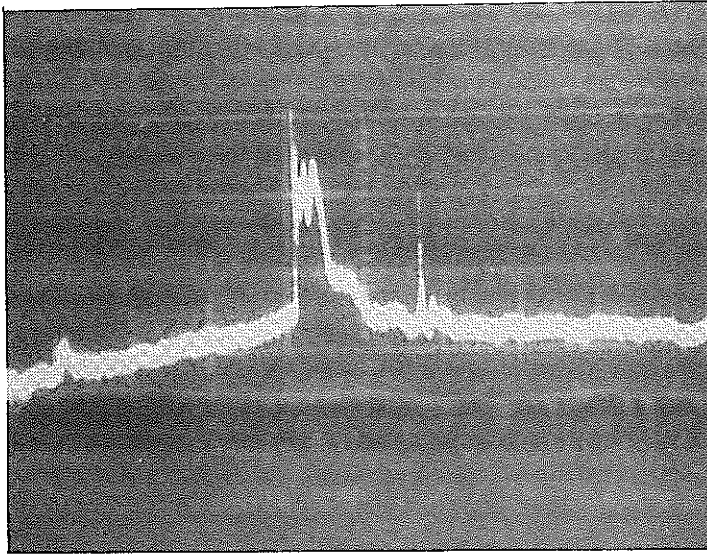
Ⅲ-1 実験結果

Mainの回路がswitch onされると、瞬時に大電流が流れ、test piece は explosion する。この間の容器内の test piece の挙動は、瞬間的であり、ポツという衝撃があったかと思うと、test piece が凝縮、凝固した無数の黒い粒子が、黒鉛のように、pool 内の水の中で拡散していく状況が目に入る。放電直後、test piece が gas 状になるが、この挙動は瞬間的であり肉眼では観察できない。

test が終わり、水溜の水を抜いて、飛散した test piece を観察してみると、一部は全くこなごなになって細粒化しておりこれは、いったん gas になって、それから、周囲の水によって冷却され凝固したものと思われる。又、一部は、ばらばらにはなっているもの、粒径としてはかなり大きく、それらがかなりの数あつまって1つの塊を形成している。これは、test piece が liquid な状態から凝固されたというプロセスを物語っている。このプロセスには2通りが考えられ、一方は、gas 化した test piece がいったん凝縮され、その後凝固するという過程と、放電時に、test piece の沸点にまで加熱されず、はじめから liquid な状態にあり、周囲の水によって冷却されるという過程である。この間隙の多い塊が、liquid から凝固されたという仮定は、test piece の単位 g あたりのエネルギーインプットが小さい場合には、こうした塊が多量に存在するという結果によって支持される。

次に、sample 1 から sample 11 までの実験で、測定された、電流、電圧、温度、圧力（水そう下部）および、中央部での圧力の挙動を示す。中央部の圧力以外は、すべて、visigraph で同時に測定され、中央での圧力は、シンクロスコープの撮影によって得られる。パラメーターとしては、自由空間の体積（水位）と sample 形状、質量であった。

Sample 1



Gain

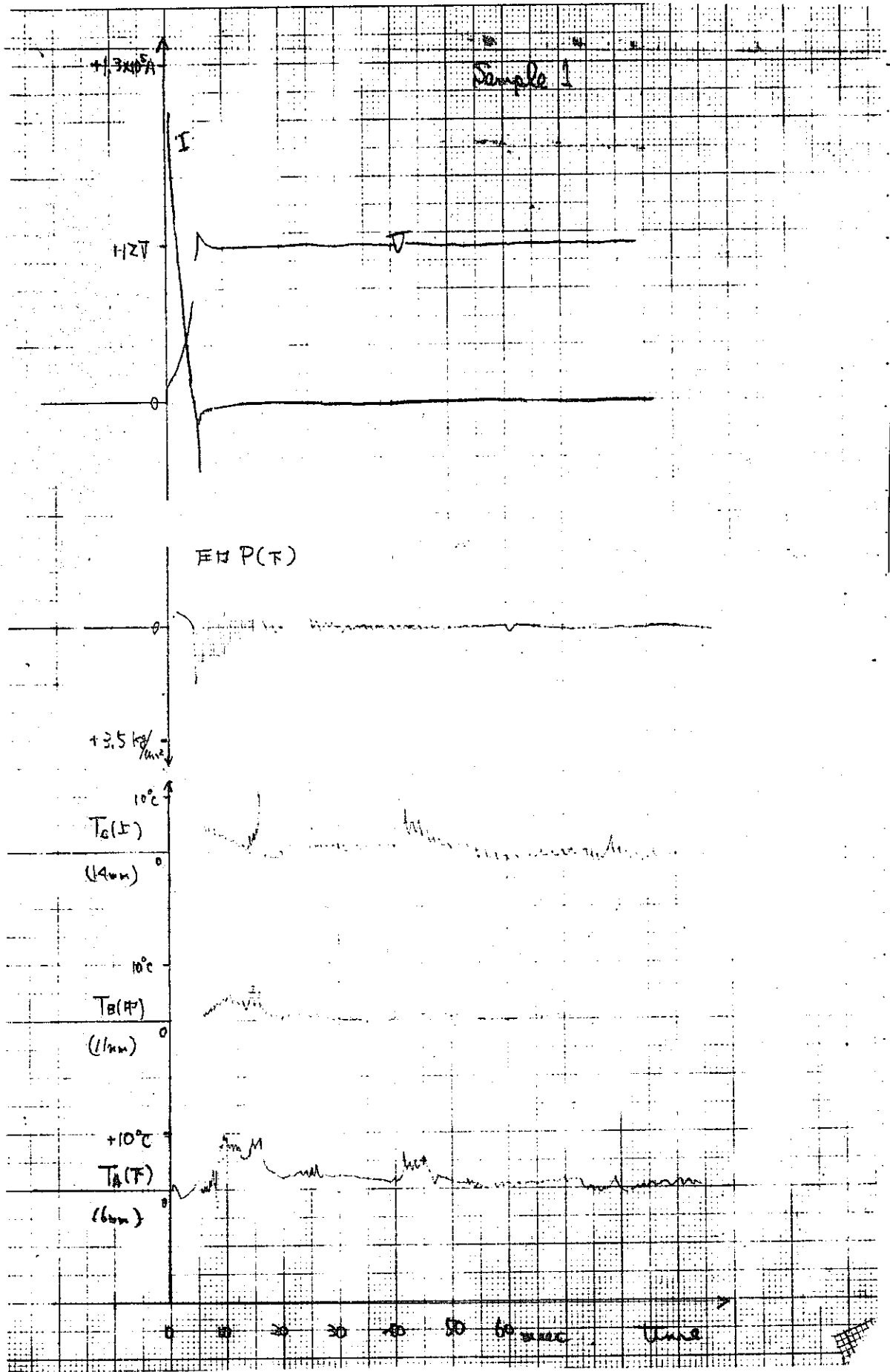
1 2.5 Kg/cm²/div

Sweep 速度

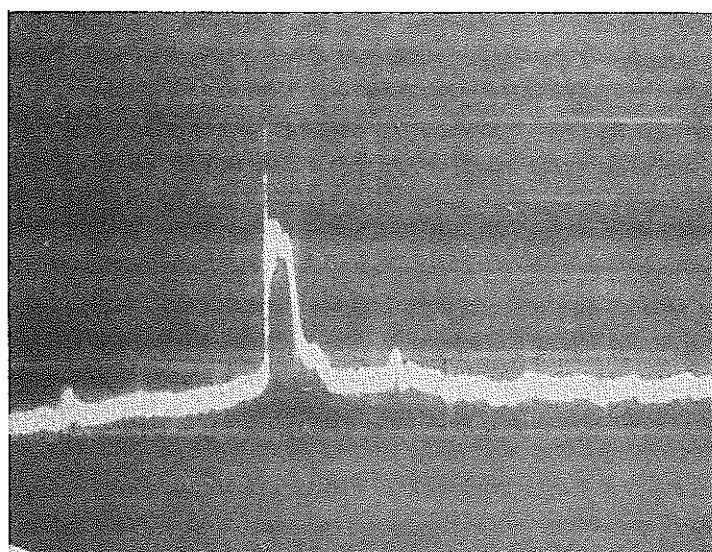
1 msec/div

Pressure History

sample 形状	0.2 (thick) × 0.3 (wide) × 1.0 (long) cm ³
sample 質量	0.69 g
水 位	3.2 cm
Input energy	800 J/g



Sample 2



Gain

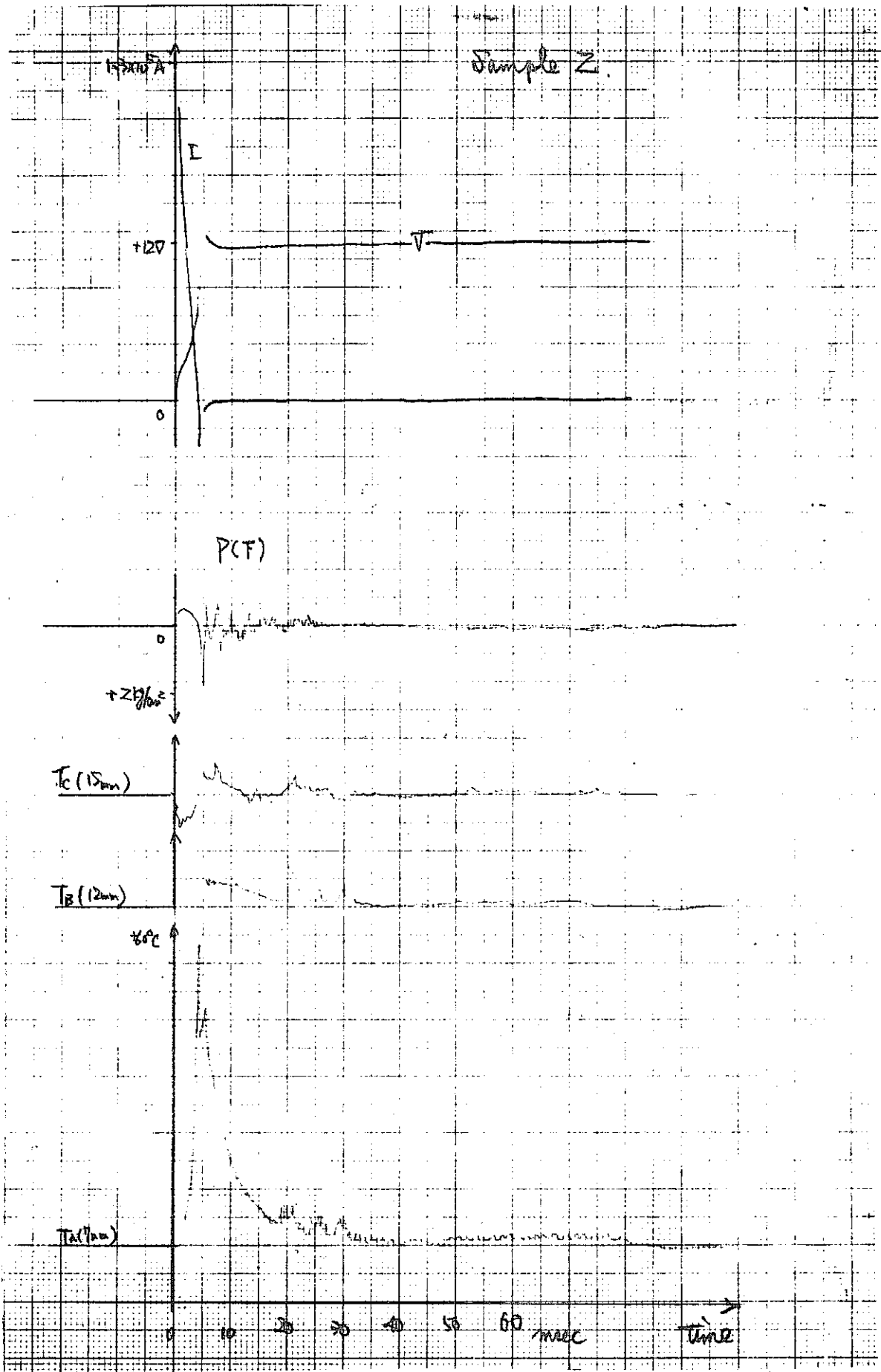
1 2.5 Kg/cm²/div

Sweep 速度

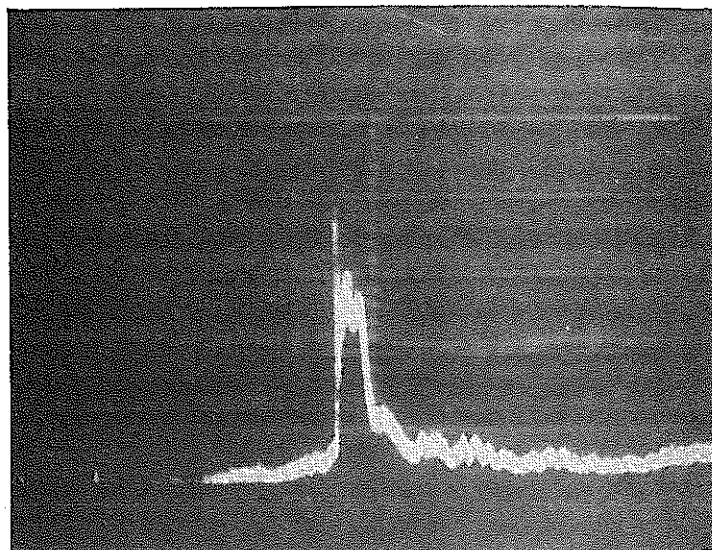
1 msec/div

Pressure History

sample 形状	0.19 (T) × 0.48 (W) × 1.0 (L) cm ³
sample 質量	1.04 g
水位	2.0 cm
Input Energy	543 J/g



Sample 3



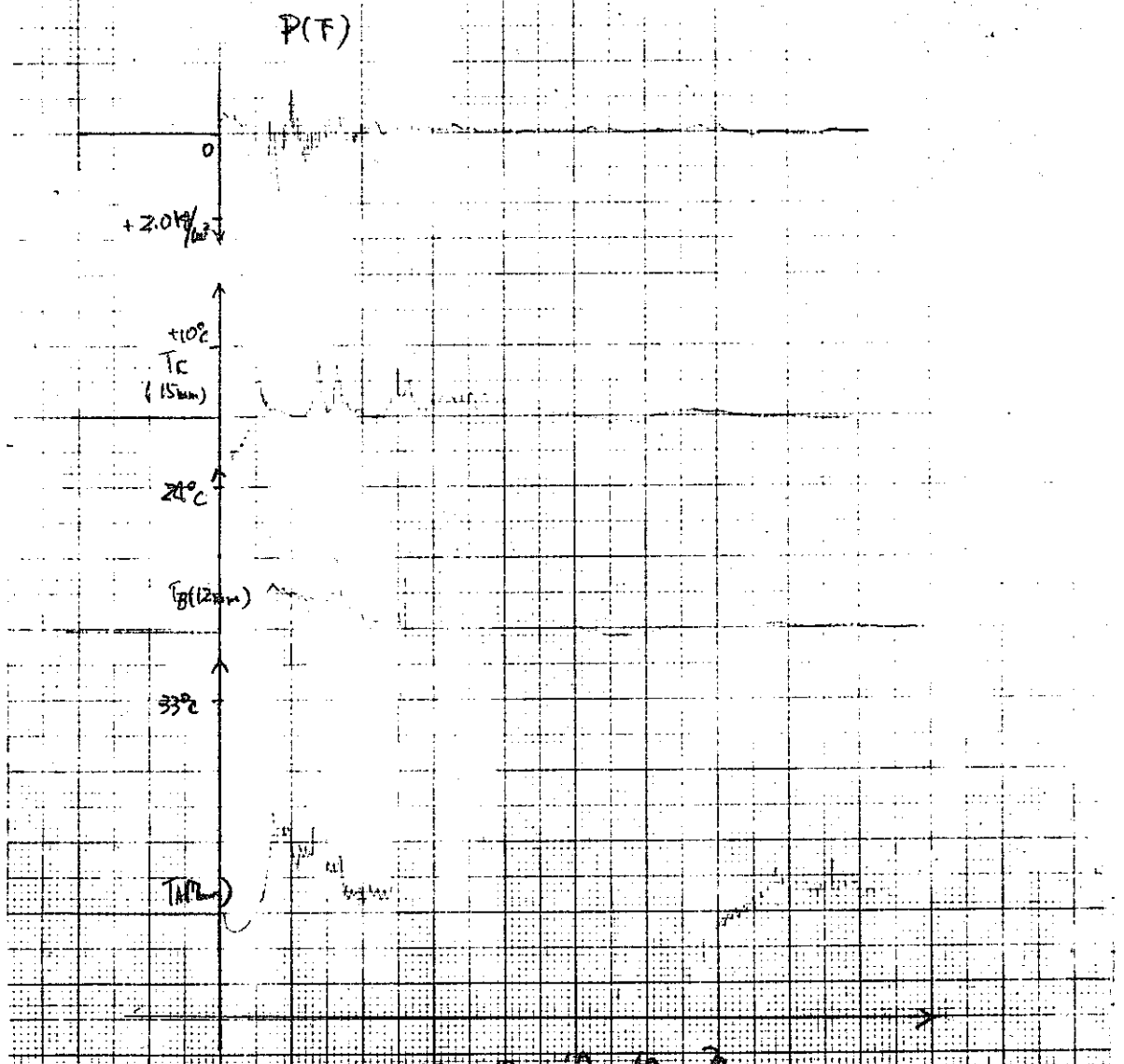
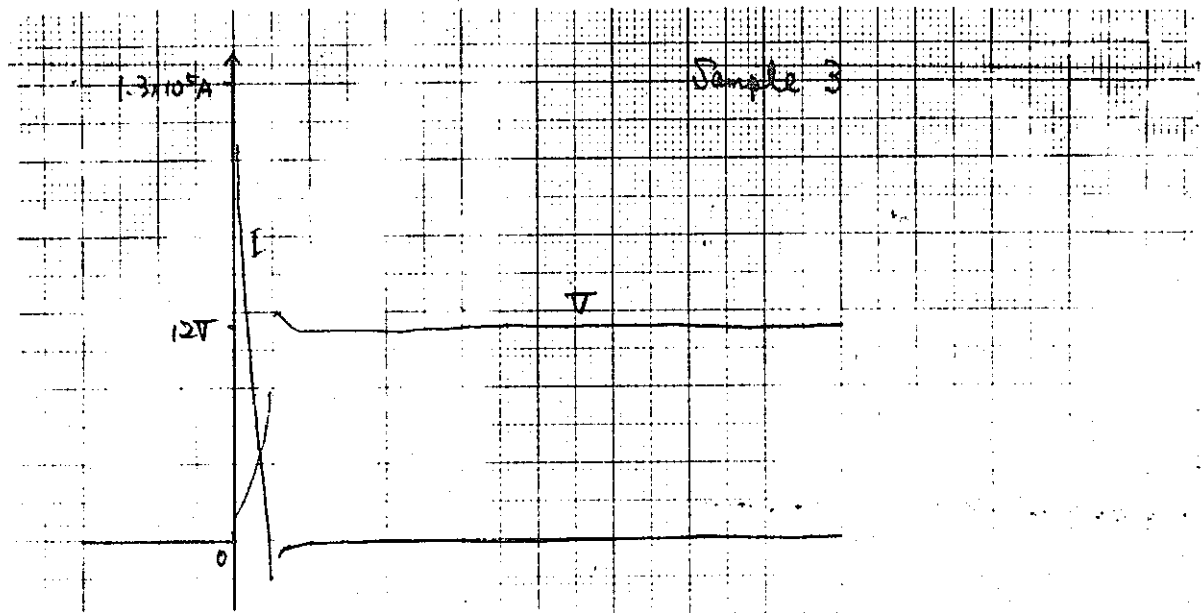
Gain

1 2.5 Kg/cm²/div

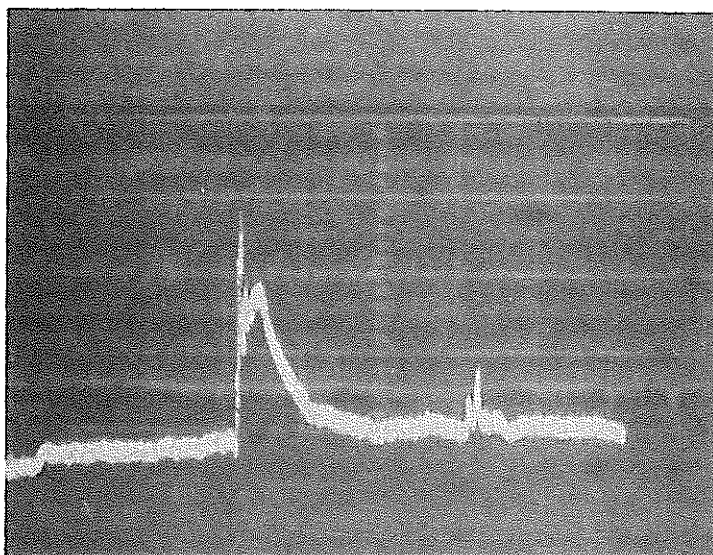
Sweep

1 msec/div

sample 形状	0.22 (T) × 0.50 (T) × 1.0 (L) cm ³
sample 質量	1.25 g
水位	0 cm
Input Energy	453 J/g



Sample 4



Gain

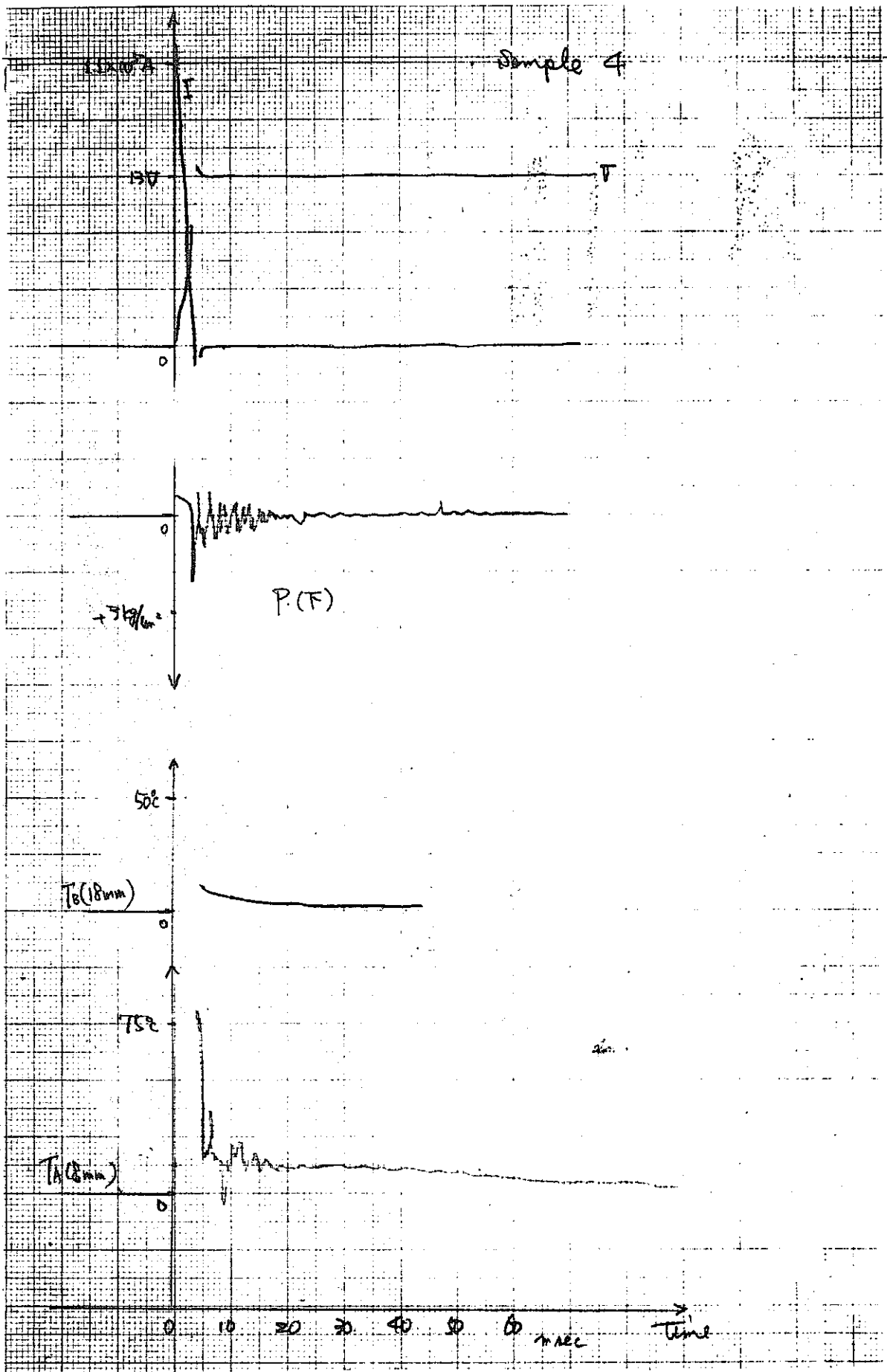
1 2.5 Kg/cm²/div

Sweep

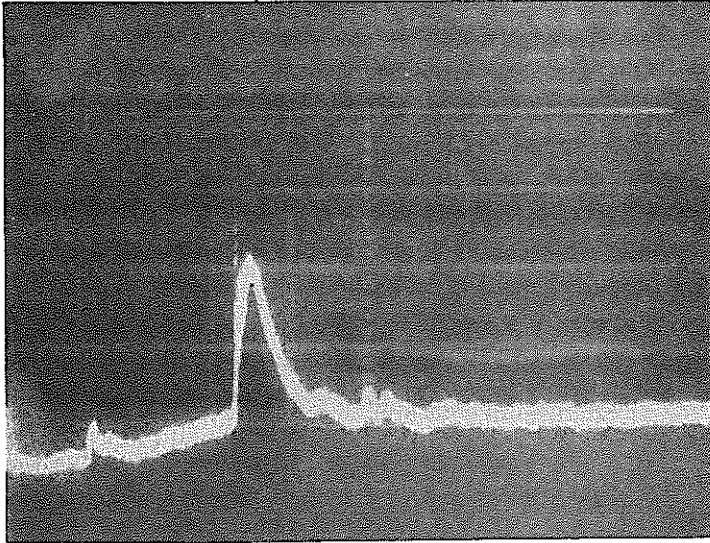
0.5 msec/div

Pressure History

sample 形状	0.20 (T) × 0.35 (W) × 1.0 (L) cm
sample 質量	0.79 g
水 位	6.0 cm
Input Energy	7.40 J/g



Sample 5



Gain

1 2.5 Kg/cm²/div

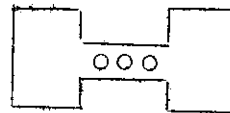
Sweep

1 msec/div

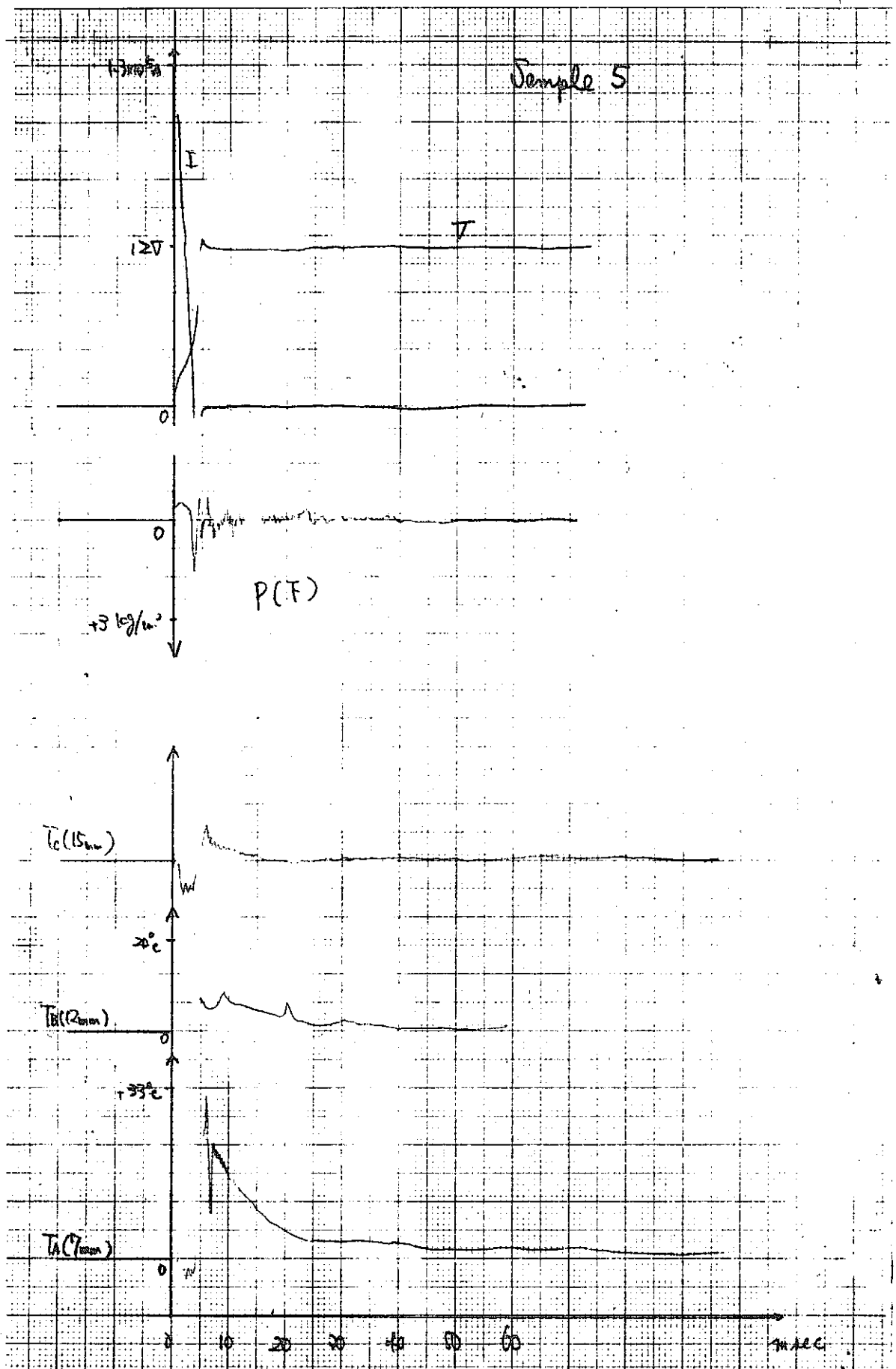
Pressure History

sample 形状 * 0.21 (T) × 0.50 (W) × 1.0 (L) cm³
sample 質量 0.98 g
水 位 2.0 cm
Input Energy 531 J/g

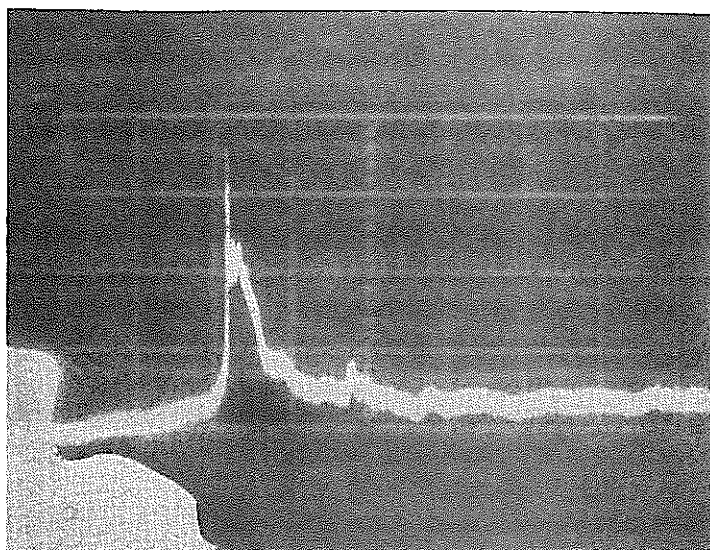
*



ドリルで1.5 mm φの
穴を3つあけた



Sample 6



Gain

1 2.5 Kg/cm²/div

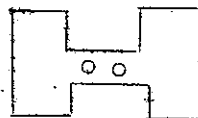
Sweep

1 msec/div

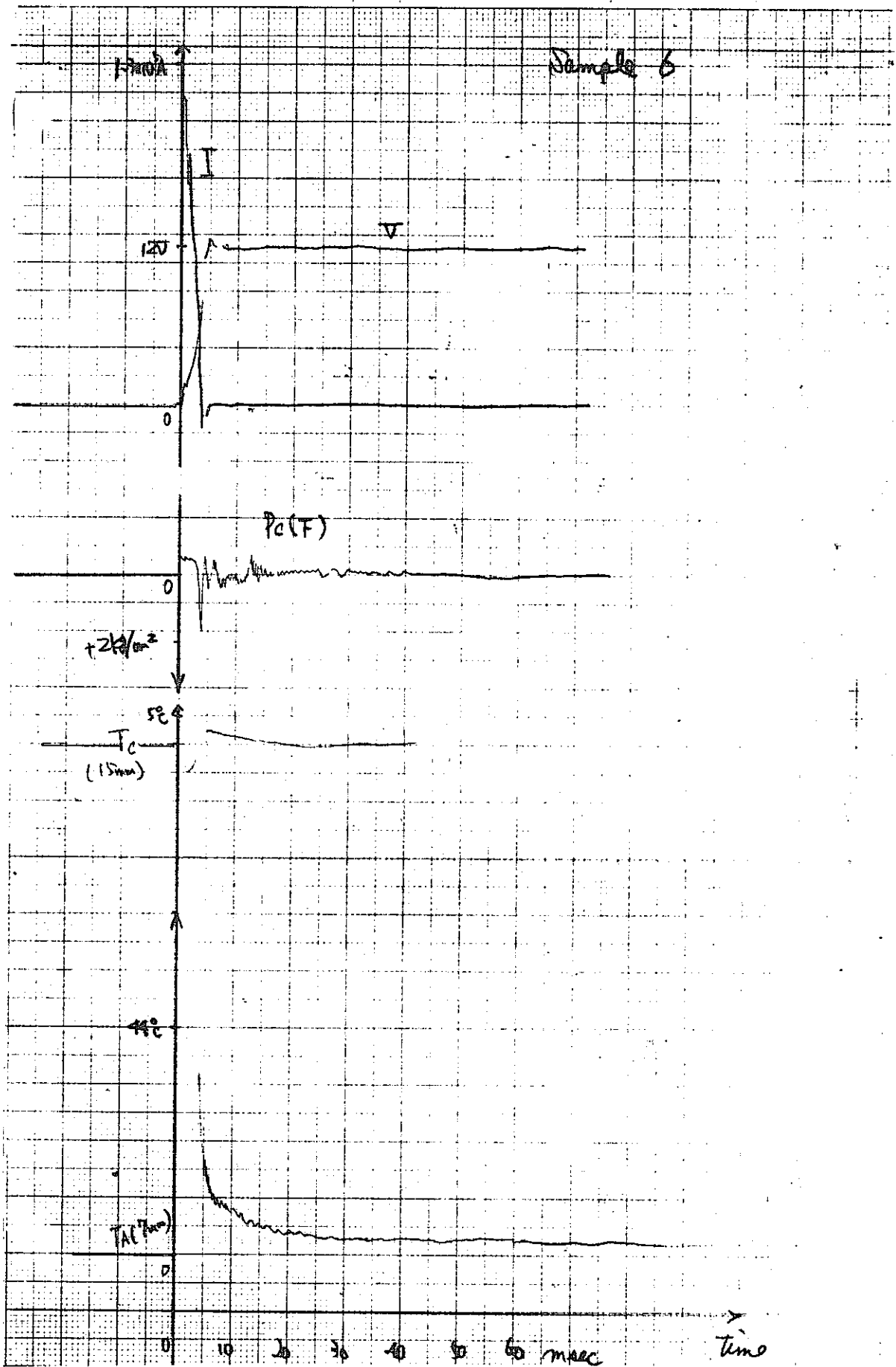
Pressure History

sample 形状*	0.20 (T) × 0.48 (W) × 1.0 (L) cm ³
sample 質量	1.07 g
水位	2.0 cm
Input Energy	550 J/g

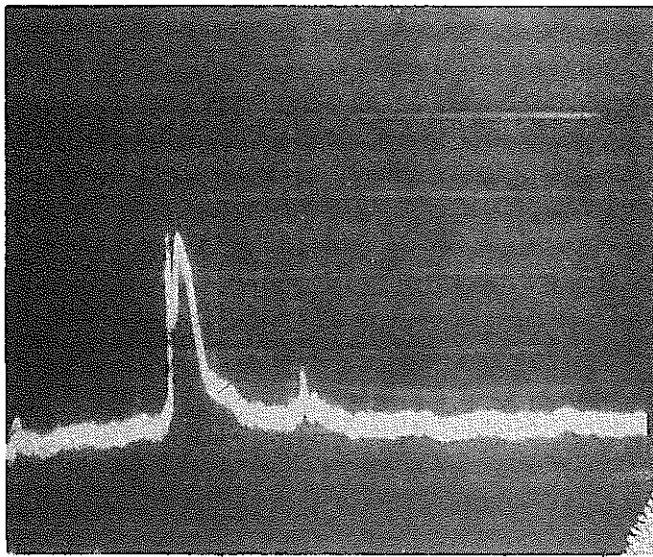
*



1.5 mm φ の穴 2つ



Sample 7



Gain

1 2.5 Kg/cm²/div

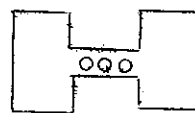
Sweep

1 msec/div

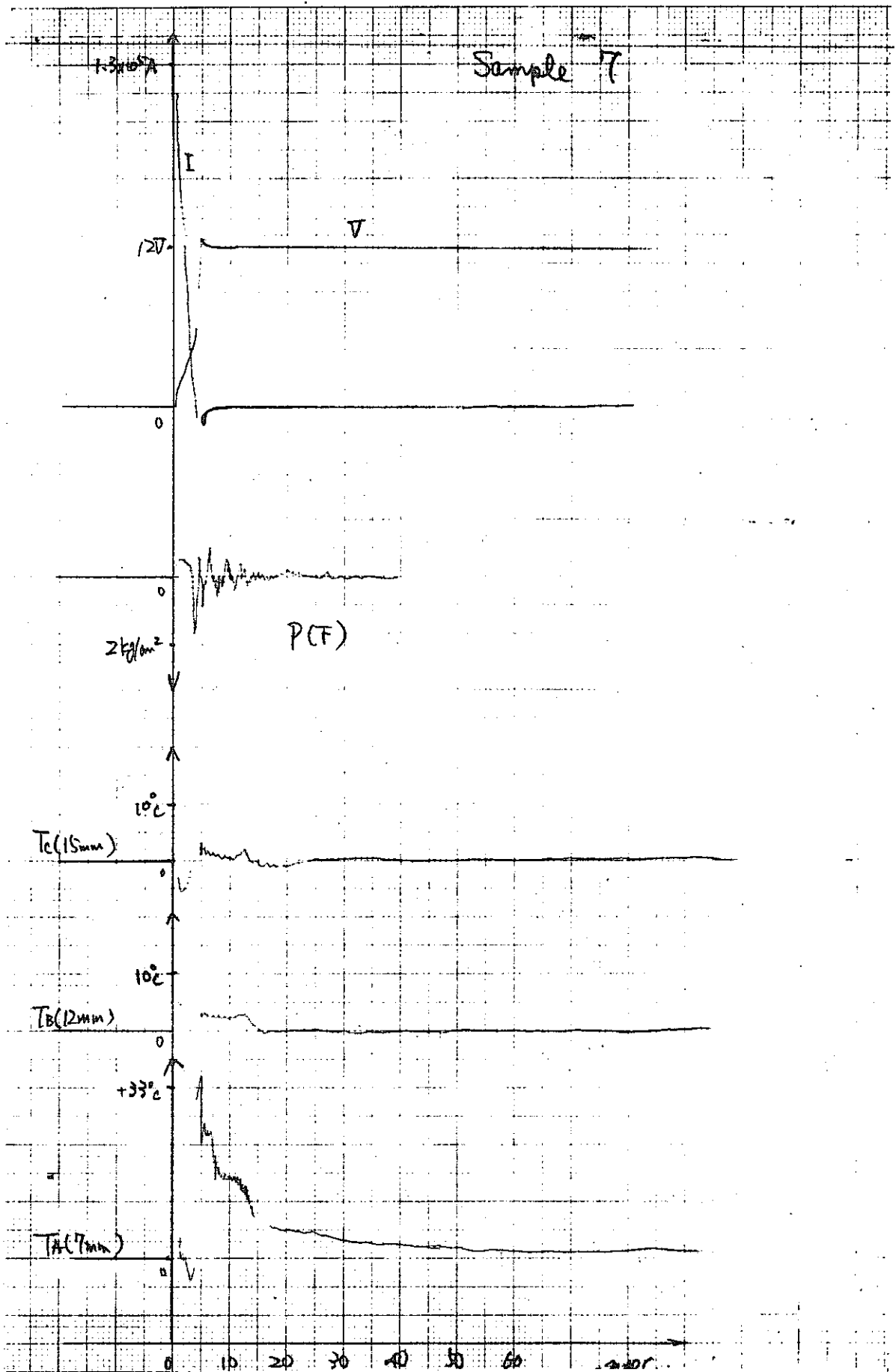
Pressure History

sample 形状*	0.20 (T) × 0.49 (W) × 1.0 (L) cm ³
sample 質量	1.06 g
水 位	2.0 cm
Input Energy	463 J/g

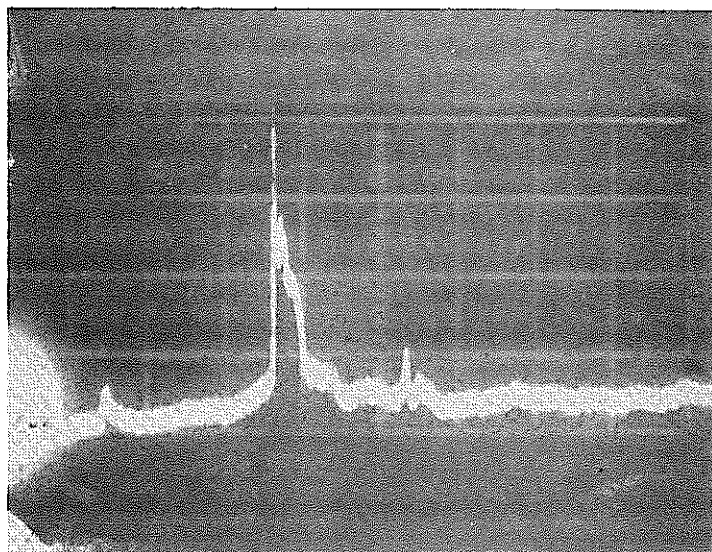
*



1 mm φ の穴 3 つ



Sample 8



Gain

1 2.5 Kg/cm²/div

Sweep

1 msec/div

Pressure History

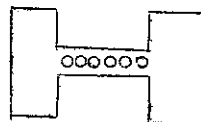
sample 形状* 0.2 (T) × 0.5 (W) × 1.0 (L) cm³

sample 質量 1.03 g

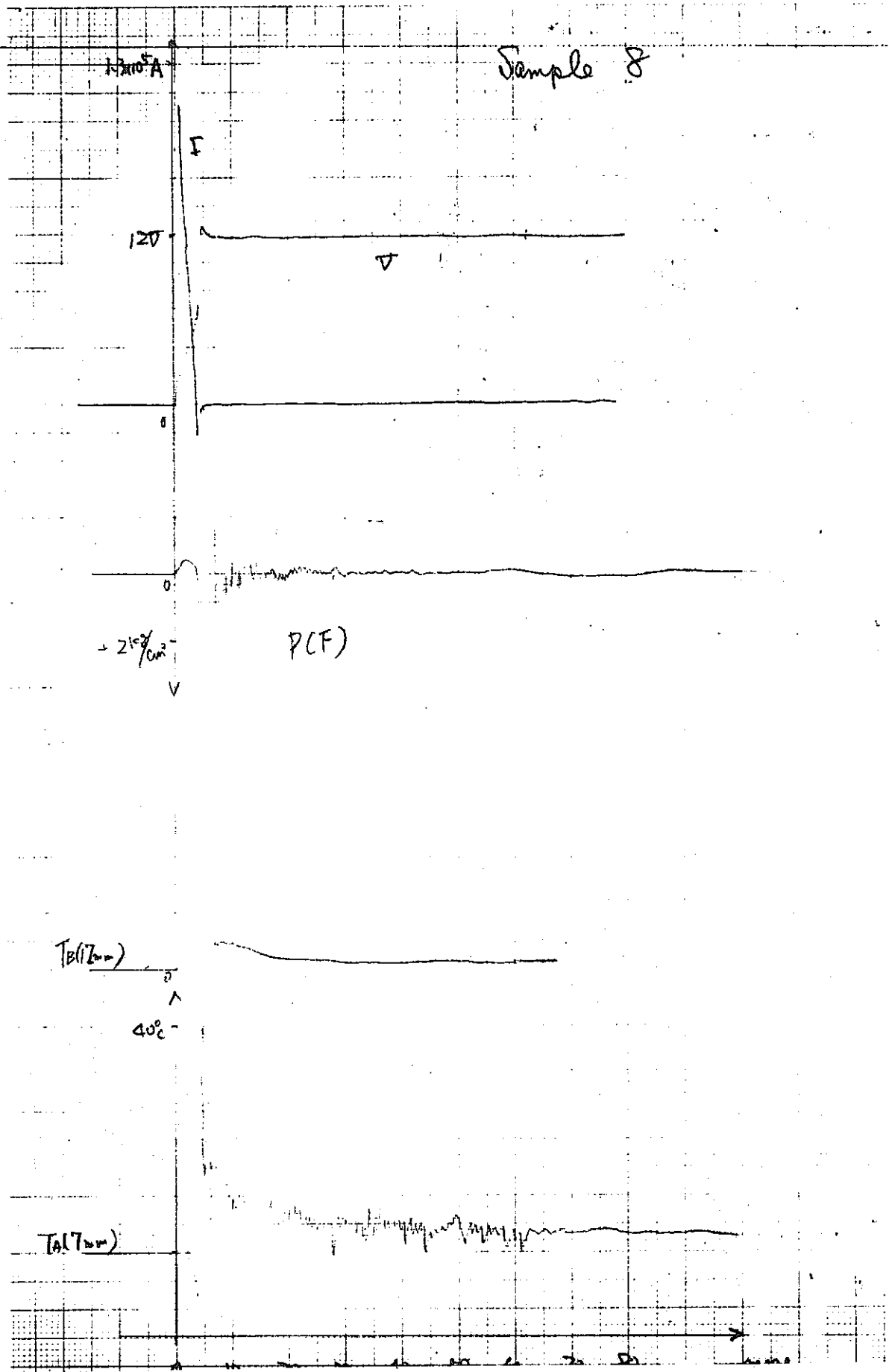
水位 2.0 cm

Input Energy 660 J/g

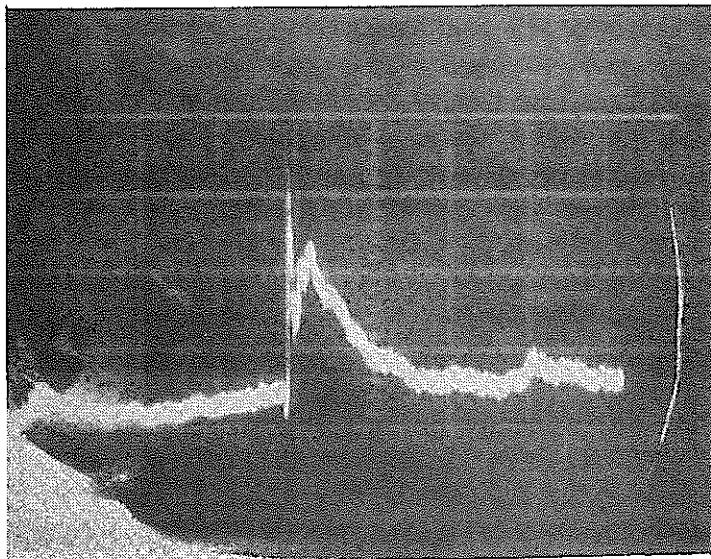
*



1 mm φ の穴 6 つ



Sample 9



Gain

1 2.5 Kg/cm²/div

Sweep

0.5 msec/div

Pressure History

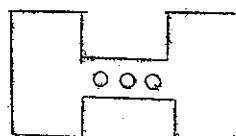
sample 形状* 0.2 (T) × 0.4 2 (W) × 1.0 (L) cm³

sample 質量 0.9 0 g

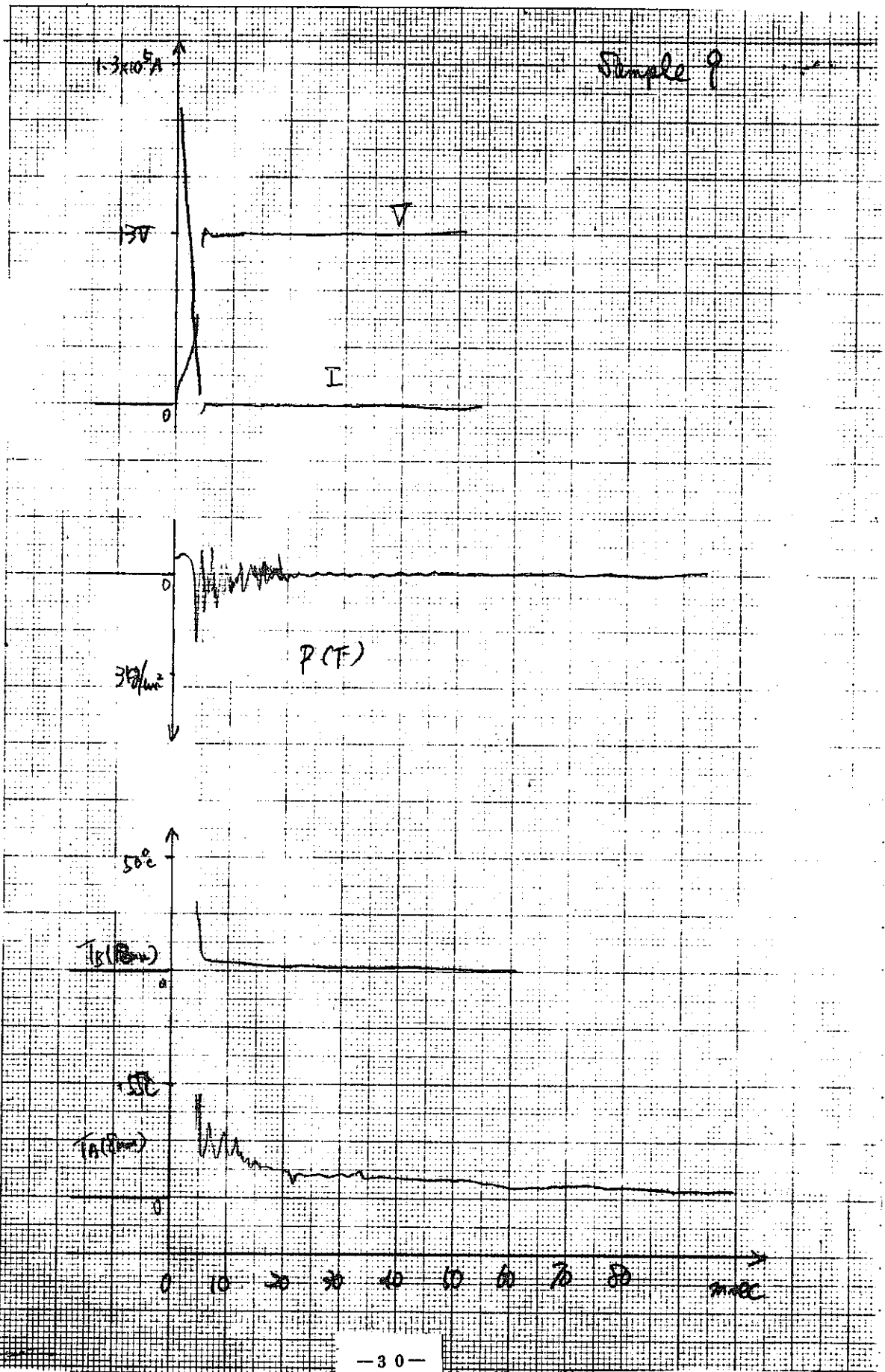
水 位 2.0 cm

Input Energy 7 7 8 J/g

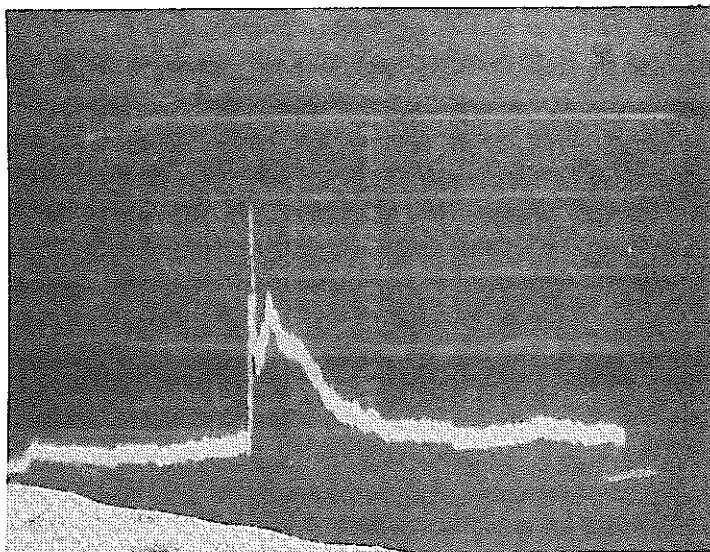
*



1 mm φ の穴 3 つ



Sample 10



Gain

1 2.5 Kg/cm²/div

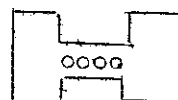
Sweep

0.5 msec/div

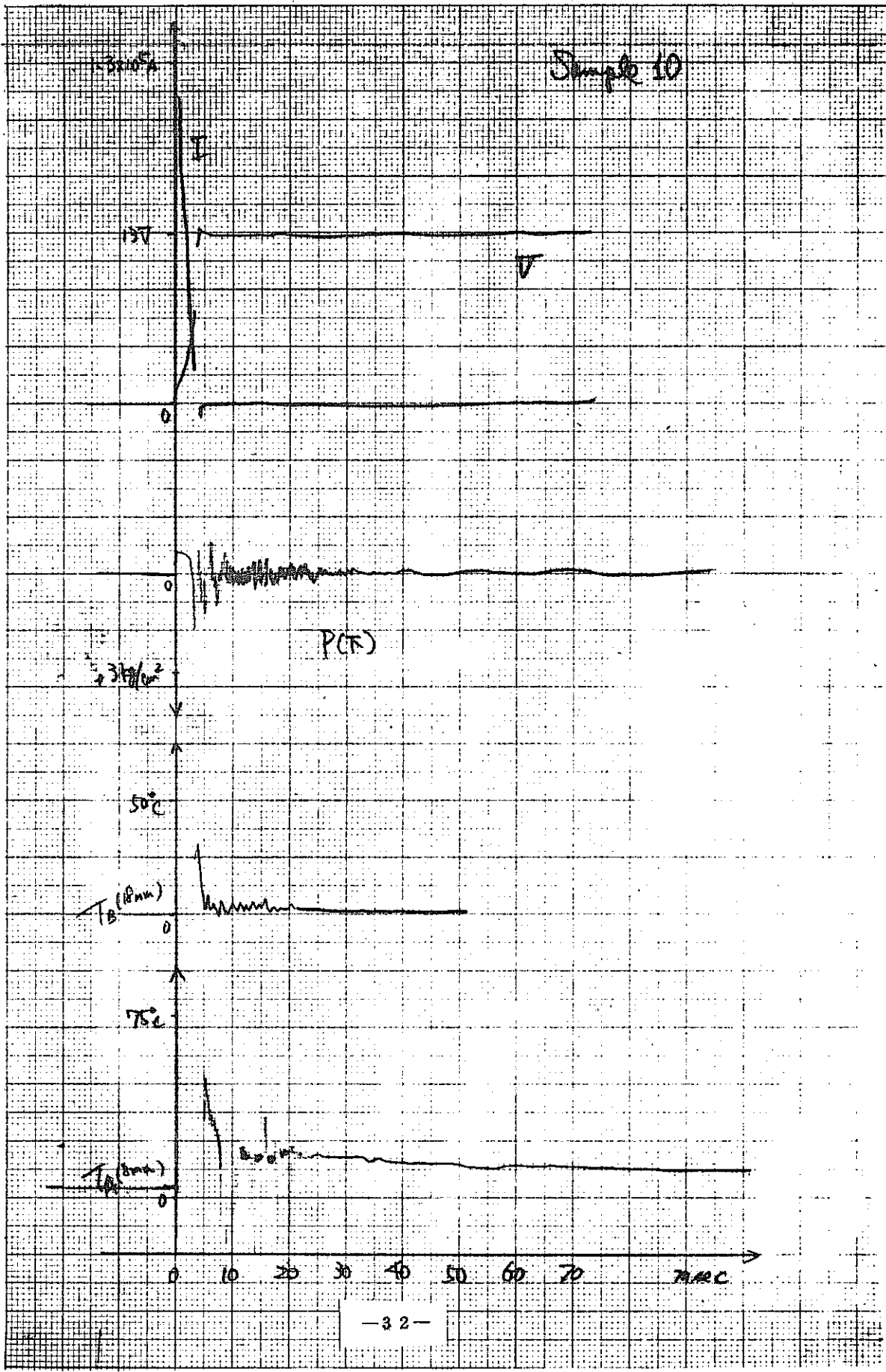
Pressure History

sample 形状*	0.22 (T) × 0.42 (W) × 1.0 (L) cm ³
sample 質量	0.95 g
水 位	14.0 cm
Input Energy	613 J/g

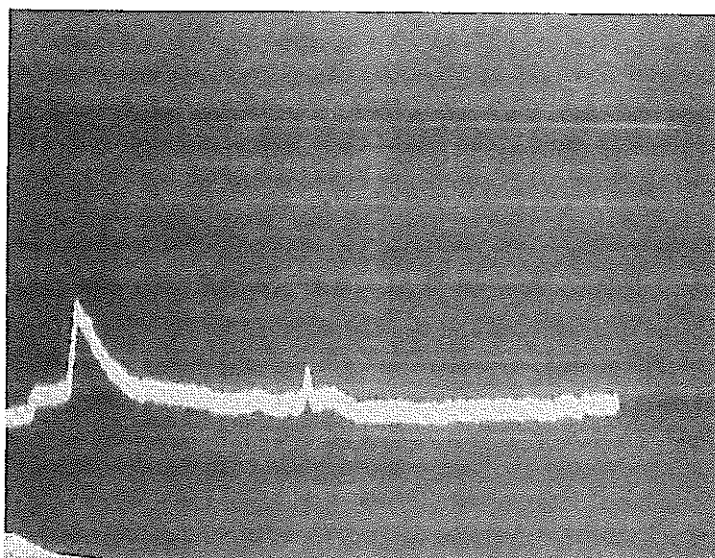
*



1 mm φ の穴 4 つ



Sample 11



Gain

1 2.5 Kg/cm²/div

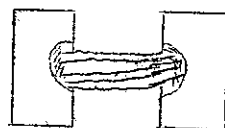
Sweep

0.5 msec/div

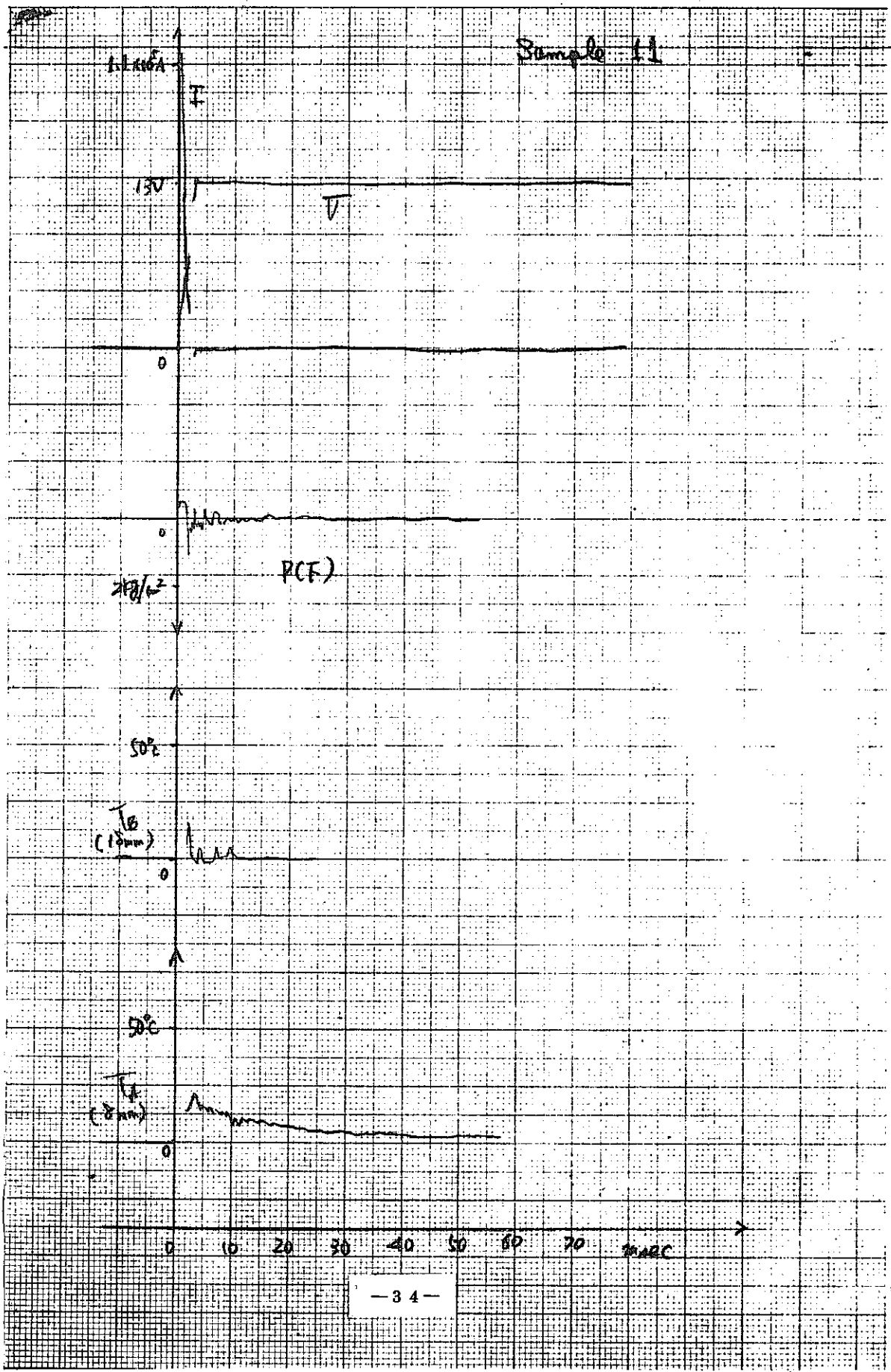
Pressure History

sample 形状*	0.3 mm φ の Fuse (鉛+錫) 線を 28 本よりあわせる。
sample 質量	約 0.3 g
水 位	2.0 cm
Input Energy	1.630 J/g

*



Sample 11



III-2 結果の解析

[A] 入力エネルギーの評価

test piece に、電流が流れることによって、与えられるエネルギーは、電力費によって表現される。インプットされるエネルギーは、test piece の形状（主として、長さ・断面積）、質量に依存しており、test piece の抵抗値と必ずしも linear な関係にはない。水中放電成形の分野での実験では、同じ material の test piece についてエネルギーが最適に input される、長さ、断面積があるということを報告している。本実験では、そうした test piece の形状の他に、電極と test piece の接触による抵抗も、入力エネルギーを決定する因子となっている。これは、同じ形状・同じ質量で実験した2つの case の入口エネルギーが必ずしも同じにはならないことからわかる。

visigraph の chart に記録された、電流、電圧挙動を見てみると、まず、電流は、main 回路を switch すると同時 10 万 A まで立上り、その後 4~5 msec で急激に 0 に落ちる。しかし、電流は、peak からそのまま 0 に落ちるのではなく、かなり大きなマイナス電流を記録してから 0 に戻る。これは放電によってガス化した鉛および水蒸気がイオン化されることによっていると思われる。電圧挙動は、電流と対応しており、0 V から電源・電圧の 12 V まで上昇する。

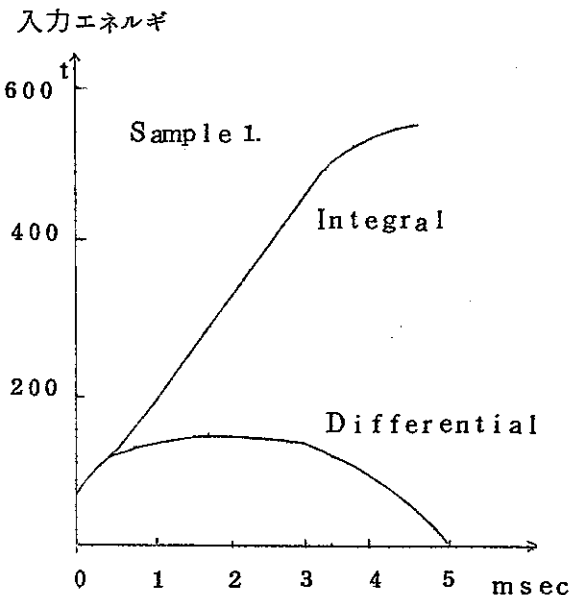
test piece に input されたエネルギーは、この電流と電圧の記録からわかるが、この評価は、1 msec ごとに $I \times V$ を計算することによっておこなった。Sample 1 についてのエネルギーの計算結果を Fig 3-5 に示す。これによると、total なエネルギーとして、550 t が test piece に input され、piece の重量が 0.69 g であるとする

と、単位 g あたりの入力エネルギーは、800 t/g となる。
800 t/g となる。鉛を沸点 1725 °C まで上昇させるに要するエネルギーは、固体での比熱・融融潜熱、液体での比熱などから、285 t/g である。鉛の気化潜熱は 846 joule/g であるから、鉛の test piece の気化割合は、エネルギーが均等に与えられたとして、

$$\frac{800 - 285}{846} \times 100 = 6.1\%$$

即ち、 $0.69 \times \frac{6.1}{100} = 0.42$ g が気化される量になる。

しかし、この気化量は、あくまでも平均的な値であって、test piece 内部での抵抗が一様でないことや、電



流の流れ方が一様でないことを考慮すれば、piece の空間的な温度分布が存在するものと思われる。

(B) 圧 力 (容器底部)

アクリル容器底面での圧力挙動は、まず、放電による衝撃ピークが $1 \sim 2 \text{ Kg/cm}^2$ の大きさで生じ、以後 damped oscillation をくりかえして常圧に落ちついていく。この時間は大体、放電後 $30 \sim 40 \text{ msec}$ である。この oscillation としては2つの原因が考えられる。1つは、test piece の蒸気化によって上方に持上げられた水柱が、自由空間を圧縮して生ずる周期の速い振動であり、1つは、水柱の運動によって、下部の感圧素子が、押されたりひっぱられたりすることによる、周期の大きい、振巾の小さな振動である。衝撃後初期の圧力挙動は、もっぱら前者の振動が支配的であり、後期のゆっくりした振動は、後者の振動によるものと思われる。実験結果を示したところでは、下部の圧力計の記録しか出ていないが、これは実験の過中で、上部の圧力計が動作しなかったことによる。上部の圧力計が動作可能な時にとったデータでは、圧力波計は、かなり鮮明な減衰振動を示していた。これは、水柱の上方へ突上げる運動が、上部の自由空間を加圧し、その運動エネルギーを消費していく過程に対応していると思われる。

(C) 温 度

Thermo Couple は、test piece の上部 1 cm 前後に3本とりつけられたが、測定された、データは、switch on 時に noise をひろってふりきれたり、恒常的にかなりの振巾の交流を拾っていて温度の過渡的な測定の困難さを物語っている。

一番下の thermo couple (test piece に一番近い) は傾向として、急激な exponential な下降を示している。二番目、三番目の thermo couple は、それほど大きな温度変化を感じていない。thermo couple については、応答時間を改良することとしたが、応答は 10 msec 以下には小さくならず、このことがやはり、結果的には、致命的であったかもしれない。1つには、高温の gas 球が、下の thermo couple の hot junction に接触していなくて、加熱された周囲の水の温度を測定しているという考え方があるが、これは、高速度 film の結果からみても妥当ではなく、やはり、gas 球はいったん hot junction に接触すると見た方がよいであろう。しかしながら、gas 球のうちでも、周囲の外側の部分が、T. C. の先端に触れるから、この部分は、水への伝熱によって急速に凝縮され、しかも凝固することによって温度は下がるであろう。この間の非常に速い温度変化を、実際問題として T. C. が感知することができるのかどうか。おそらく chart に描かれた温度記録は、凝固してしまった鉛あるいは水の温度を示しているであろう。

温度のデータから得られたことは、まず、鉛が蒸気化した瞬間には、バルブと水の境界面を境にして急激な温度分布が存在するであろうが、gas phase の凝縮・凝固、周囲への熱伝導によって急速に平均化されるであろう。水の heat sink としての役割は

かなり大きい。もし仮りに、鉛に与えられた熱エネルギー(数百 joule)が、pool 内の水($3 \times 6 \times 35 = 630 \text{ cm}^3$)に瞬間的に伝えられたとすると、水の温度上昇は 0.2°C にもおよばないであろう。

又、下の熱電対のデータは、gas の bubble の大きさを評価できるかもしれない。gas 球の volume の変化は非常に速く、寿命としては 1 m sec を越えないから、高速度 film (2000コマ/sec) では、確固とした volume の評価はできない。熱電対の応答の精度を考慮した上で、volume に対する一定程度の評価は可能であろう。

又、記録では、系が上方に移動しているという事実を裏づけていると思われるものがある。高速度 film の結果では実際にそうであり、温度変化が、放電後 10 数 m sec で非常に乱れているのは、そうした gas 球体(すでに内部は凝縮している)が移動することによって hot junction に接触することによるのであろう。この場合の状況は、厳密に云えば、hot junction の先端に、凝縮した鉛がくっついて凝固してしまっているであろう。

(D) 中央部での圧力挙動

test piece の真後 1.5 cm の容器壁面での圧力が Kistler の quartz pressure transducer を用いて測定されたが、きれいな圧力波形を撮影することができた。得られた波形は、行った実験にわたってほぼ共通しており、test piece の形状や、放電条件によって細な差異を示している。

圧力波形は、まず、立上りの速い、鋭い圧力パルスで始まる。このパルス巾は非常に短く得られた時間スケールでは、ほとんど判別できないくらいである。このパルスは、放電が終わった瞬間、即ち test piece が蒸気化する瞬間に生じる。これは、鉛の蒸気が非常に大きな速度で膨張することにより、ガスと水の境界に、非常に鋭い圧力勾配が生まれ、それが水中を音速以上の速さで伝播して容器の壁面にぶつかることによって、これは衝撃波とよばれ発生してから pressure transducer に到達するまでの時間は、伝播速度を仮りに 1500 m/sec とすれば、

$$1.5 / 1500 \times 10^3 = 10^{-6} \text{ sec} = 10 \text{ m sec} \text{ と極めて短い。}$$

この衝撃波は壁面で反射されて、伝播するが、今考えている体系の大きさと、最初の peak 圧力の大きさから考えて、反射波が、全体の圧力波形に及ぼす影響は、ほぼ最初の 0.1 m sec の間でしか効いてこないと云えよう。

最初の shock pressure が終わると、鉛の gas は、ただちに膨張を開始する。ただし、この時の膨張速度は、最初の放電終了時のそれにくらべて小さいであろう。この膨張によって、gas 球内部の圧力は降下するであろうが、感圧素子は、逆に、この gas 球によって加圧される。この加圧が、圧力波形の 2 番目の立上りに相当する。立上りが終わる時点での圧力、すなわち第 2 のピーク圧力は何を意味しているかという、これは、gas 球の持つ圧力と、アクリル容器壁面の変形による応力との平衡時の圧

力を示していることになる。

壁面の変形が最大になったところで、今度は、gas球は収縮し加圧され、壁面での圧力は降下する。この時点でgas球内部での凝縮が小さければ、gas球は更に膨張し、容器壁面はこれに対応して加圧される。もし永遠にgas球内部でのmaterialの凝縮がないとすれば、圧力波形はなめらかな減衰振動を示すであろう。しかし、gas球の凝縮がこれ以後の圧力挙動に大きな影響力を持つてくる。波形は最後のpeak圧を境にして、急激に降下する。この圧力降下は、前のgas球の振動による内圧変化に対応するというよりも、gas球の凝縮による体積減少に対応しているものと思われる。この過程は、おそらく、凝縮によるvolume減少が支配的であり、同時に、残存gas phaseが収縮、加圧されるプロセスも付随的に含んでいると考えられる。それは、圧力の降下がいったんは、急激に落ちこむものの、常圧に落ちる前に、小さな減衰振動的な挙動を示していることによってもわかる。

圧力が大体常圧に落ちるまでの時間は、大体1~1.5 msecであり、その間、上で述べて来たようなかたちでgas球は、内部エネルギーを失っていく。得られた圧力波形の中には放電後、圧力パルス(衝撃波による)がおこってから1.5 msecぐらいのところまで2次的な衝撃パルスに似たpeakが生じているものがある。特にsample 1では、この圧力パルスはかなりの大きさにまで達する。何故このパルスが生じるかについては明確な回答を用意しえないが、1つの推測としては次のようなことが考えられる。容器壁面の圧力が常圧に降下するプロセスとしては、主として、gas球から周囲の水への伝熱損失によって、ガスが凝縮することによることを述べた。この過程は、残存しているガス部分の加圧をもたらすが、凝縮によるvolume変化によって、容器にかかる圧力がreleaseされるというメカニズムがmainであるために、全体としては、transducerで感知される圧力は、急激な上昇を伴わずに降下していく。ところで残存ガスはそれ自身としてはかなりの高圧状態にあり、それが最後に凝縮した瞬間、圧力は解放され、飽和圧以下に下る。このことによって、凝縮したgas部分が再び急激な速度で蒸気化するであろう。2次的な圧力パルスは、この衝撃波による圧力ではないかと考えられる。このパルスができるのとできないcaseがあるが、それは、系の内部エネルギーがその時点でどれだけあるかということに対応しているであろう。

gas球内部がすべてtest piece 鉛の蒸気によるものであるとすれば、この系に関して次のようなエネルギーバランスが成立つ。

$$-L \frac{d}{dt} (\rho_g V_g) - C_p \rho_g V_g \frac{dT_g}{dt} = C \cdot P_g \frac{dV_g}{dt} + HS (T_g - T_s) \quad (1)$$

ここで、左辺の第1項は、gas phaseの凝縮による、系の内部エネルギーの減少であり、 ρ_g 、 V_g はgas phaseの密度と体積を、 L は、気化潜熱(簡単のためには、 L は、gasの温度 T_g に依存しないとした。)を示す。第2項は、gas phaseの温度減少

による内部エネルギーの減少であり、 C_p は、gasの比熱をあらわしている。系の内部エネルギーの減少は、liquidのエンタルピーの減少も含まれているが、この変化は、gas phaseのエンタルピーの変化にくらべて小さいとして無視し、第1項と第2項の和を近似的に、内部エネルギーの時間変化に等しいとした。又、右辺の第1項は、系の膨張によってなされる仕事であり、 O は換算係数である。左辺の第2項は、系から伝熱によって失われるエネルギーであり、 H は熱伝導率、 S は系の表面積、 T_s は周囲の水の温度を示す。右辺の第1項と第2項の和は系外に失われていくエネルギーを表わし、これが右辺の内部エネルギーの減少に等しいとおいた。

系の圧力の解析をする場合、ピエゾによって得られた圧力波は凝縮のプロセスがmainでない段階すなわち、圧力が立上るphaseで有効であろう。なぜなら、ピエゾによる圧力波は、必ずしも、系の圧力を示していず、凝縮の段階では(1)式の適用が困難であると考えられるからである。従って(1)の適用を、 $\rho_g V_g$ がconstな場合に限るとして、次のように式をたてる。

$$-C_p \rho_g V_g \frac{dT_g}{dt} = O P_g \frac{dV_g}{dt} + HS (T_g - T_s) \quad (2)$$

次に各項について評価していこう。

$$\textcircled{1} \text{ gas phase のエンタルピー減少 } -C_p \rho_g V_g \frac{dT_g}{dt}$$

$\rho_g V_g = m_o = \text{const}$ を仮定したから

$$C_p \rho_g V_g = C_p m_o \frac{dT_g}{dt} \quad (3)$$

一方、圧力と温度の関係は、蒸気圧式として

$P_g = A e^{-B/T_g}$ を用いることにすると、

$$\frac{dT_g}{dt} = \frac{dT_g}{dP_g} \frac{dP_g}{dt} = \frac{T_g^2}{B P_g} \frac{dP_g}{dt} \quad (4)$$

$$\therefore C_p \rho_g V_g \frac{dT_g}{dt} = C_p m_o \frac{T_g^2}{B P_g} \frac{dP_g}{dt} \quad (5)$$

$$\textcircled{2} \text{ 膨張による仕事。 } O P_g \frac{dV_g}{dt}$$

$$P_g V_g = \frac{P_g V_g}{R T_g} = m_o \text{ から } V_g = \frac{m_o R T_g}{P_g}$$

従って

$$\begin{aligned} \frac{dV_g}{dt} &= m_o R \frac{d}{dt} \left(\frac{T_g}{P_g} \right) \\ &= m_o R \frac{T_g' P_g - T_g P_g'}{P_g^2} \end{aligned}$$

(4)を代入して,

$$\frac{dV_g}{dt} = m_o R \frac{T_g}{P_g^2} \left(\frac{T_g}{B} - 1 \right) \frac{dP_g}{dt} \quad (6)$$

$$\therefore C \cdot P_g \frac{dV_g}{dt} = C m_o R \frac{T_g}{P_g^2} \left(\frac{T_g}{B} - 1 \right) \frac{dP_g}{dt} \quad (7)$$

計算の手順としては、得られた pressure history から、 P_g , $\frac{dP_g}{dt}$ の数値を用いて、16 mm フィルムの結果から、適当に V_g を評価することによって、①・②のエネルギー変化を求め、伝熱によるエネルギーを求める。

(5)・(7)を、 $T_g \cdot P_g \cdot \frac{dP_g}{dt}$ を変数として代入すればよいような形に書きなおそう。

$$C_p = 0.155 \text{ J/g} \quad (\text{鉛の比熱})$$

$$C = 0.1 \text{ J/atm}\cdot\text{cm}^3$$

$$P_g = 89400 e^{-22960/T_g} \text{ (鉛の蒸気圧式)}$$

$$R = 0.04 \text{ T/}^\circ\text{C}\cdot\text{g}$$

これから,

$$\frac{dE_{in}}{dt} = -C_p \rho_g V_g \frac{dT_g}{dt} = 1.69 \times 10^{-4} \times V_g \cdot T_g \frac{dP_g}{dt}$$

$$\frac{dW}{dt} = +C P_g \frac{dV_g}{dt} = 0.1 \times V_g \left(\frac{T_g}{22960} - 1 \right) \frac{dP_g}{dt}$$

$$\text{ここで } T_g = \frac{22960}{1.140 - \ln P_g}$$

$$m_o = \frac{1}{0.04} \frac{P_g}{T_g} V_g \text{ であり,}$$

$$V_g(\text{cm}^3) \cdot T_g(\text{oK}) \cdot P_g(\text{atm}) \cdot m_o(\text{g}) \text{ である。}$$

以上から、Sample 1 の pressure history から、エンタルピーの変化・膨張による仕事を求めてみよう。 P_g としては、①点の平衡圧から、 $\frac{dP_g}{dt}$ としては、①点

に立上るまでの圧力変化を採用する。但し、壁面の圧力増加と系の内圧増加は反比例すると仮定するから、

$$\frac{dP_g}{dt} < 0 \text{ となる。}$$

$$P_g = 25.2 \text{ atm}$$

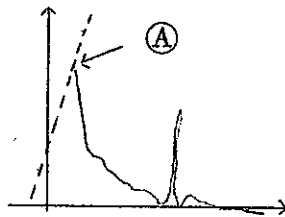
$$\frac{dP_g}{dt} = -125 \text{ atm/m sec}$$

$$V_g = 1.7 \text{ cm}^3 \text{ (filmより推算)}$$

これから

$$T_g = 2810 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$m_o = 0.38 \text{ g}$$



$$\frac{dE_{in}}{dt} = 100 \text{ joule/m sec}$$

$$\frac{dW}{dt} = 20.8 \text{ joule/m sec}$$

従って $\frac{dEt}{dt} = HA(T_g - T_s) = 79.2 \text{ joule/m sec}$

ここで, $A = 7 \text{ cm}^2$

$$T_g = 2810 \text{ }^\circ\text{K} \quad T_s = 290 \text{ }^\circ\text{K} \text{ とすると,}$$

$$H = 4.5 \times 10^{-3} \text{ joule/}^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{m sec}$$

$$= 3.9 \times 10^{-4} \text{ kcal/}^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{ar}$$

Sample 5 についても同じ計算をしてみると,

$$P_g = 25.2 \text{ atm}$$

$$\frac{dP_g}{dt} = -125 \text{ atm/m sec}$$

$$V_g = 1.2 \text{ cm}^3$$

$$T_g = 2810 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$m_0 = 0.27 \text{ g}$$

$$\frac{dE_{in}}{dt} = 71 \text{ joule/m sec}$$

$$\frac{dW}{dt} = 13.2 \text{ joule/m sec}$$

$$\frac{dEt}{dt} = 57.8 \text{ joule/m sec}$$

$$A = 5.5 \text{ cm}^2, \quad T_s = 290 \text{ }^\circ\text{K} \text{ とすると}$$

$$H = 4.2 \times 10^{-3} \text{ joule/}^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{m sec}$$

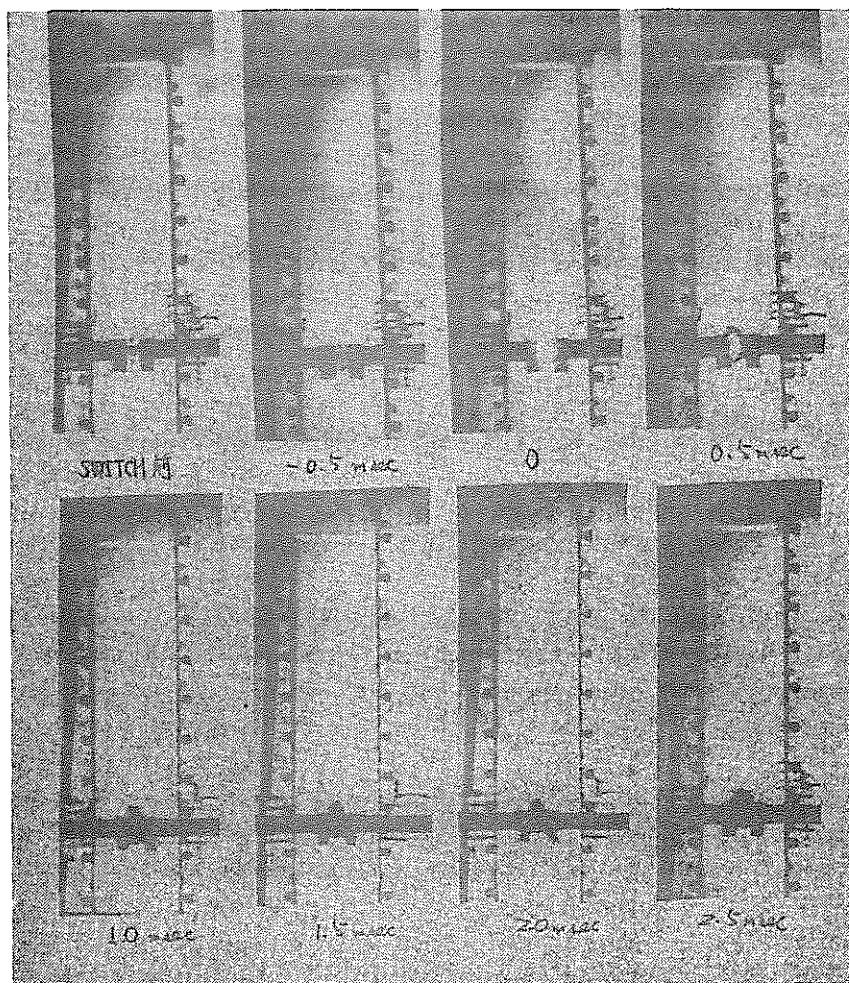
Sample 5 について, 膨張によってなされる仕事は, 衝撃後 0.4 ~ 0.5 m sec までが主であると考えると,

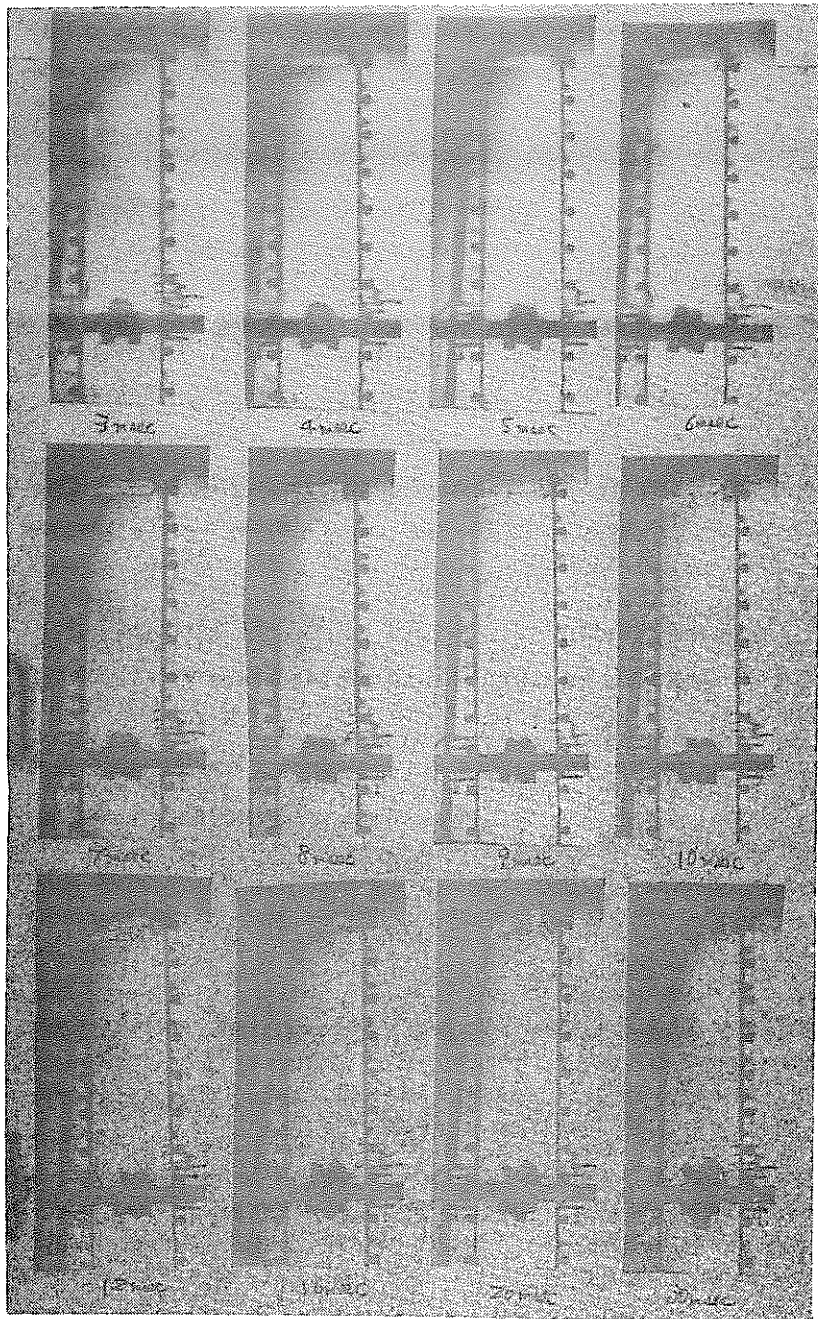
$$13.2 \times 0.5 = 6.6 \text{ joule であり,}$$

全体を通じてなされる膨張仕事はせいぜい 10 joule ぐらいであろう。これは test piece に input されたエネルギーの 2.0 % である。

(E) 高速度 Film による現象の推移

高速度カメラによる撮影で、衝撃後の水の運動や cavitation の生成・消滅など興味ある結果が得られた。しかし、2000コマ/m sec であるため、衝撃時の gas 球の挙動に関しては詳しい情報が得られなかった。sample によっては、放電後 0.5 msec の間で bubble が振動していると思われるものがあったが、(ピエゾ素子による左力測定記録) 1コマが 0.5 msec であるため、その間の推移はあくまで推察にたよらざるを得なかった。以下に Sample 1 についての film を紹介しよう。





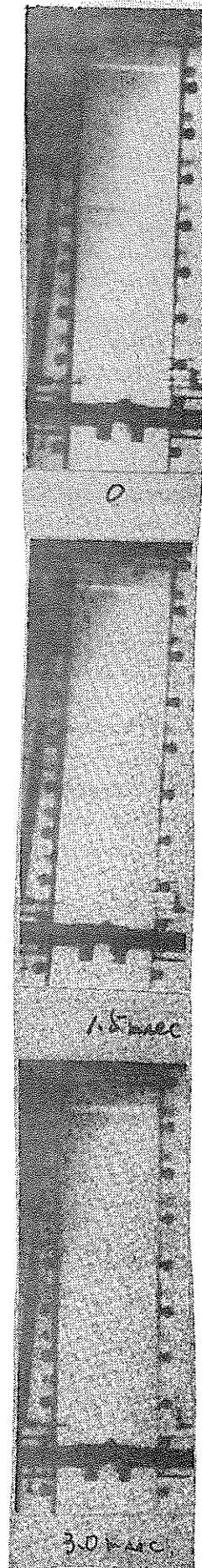
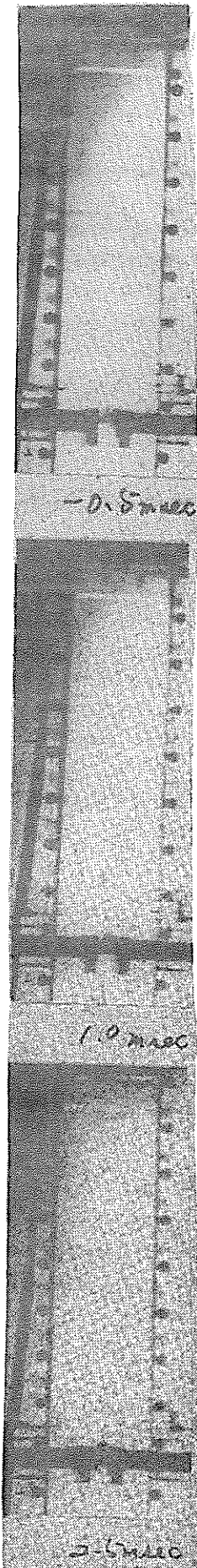
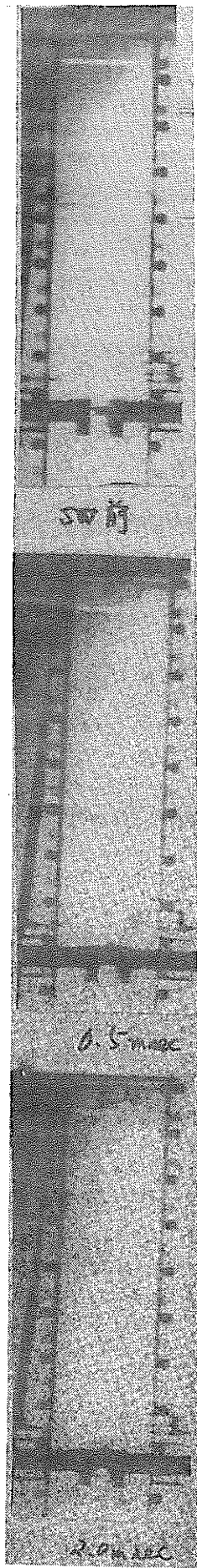
main 回路を switch on して, test piece が explosion を起こすまで 4 msec あるが, explosion 直前の test piece がふくらんでいるのが -0.5 msec の写真でわかる。放電によって, 閃光が生じるが, この時点を経験の開始点としている。しかし, 1 コマが 0.5 msec であるから, 開始点の誤差は最大 0.5 msec である。閃光が生じてから, 鉛のガス球が持続するのは $0.5 \text{ msec} \sim 1.0 \text{ msec}$ である。 0.5 msec のコマでは, ガス球の周囲が凝縮されているのがわかる。凝縮によって gas 球の volume は減少していく。 1.5 msec で gas 球は消滅し, その瞬間衝撃的なパルスが生じる。(圧力のデータ参照) 又, 1.5 msec では, 細いキャビテーションが生じているのがわかる。これは, gas 球の消滅によって, 負圧が生じ, 水がそれに即座に対応できないことによって生成するのであろう。しかしこのキャビテーションも, 負圧が解消されることによって消滅するのが 4 msec のコマをみればわかる。

水面の運動は, 衝撃時からある時間遅れを持って生じる。写真では 3 msec 位から, 水面が上方へ動き出すのが分る。この水の動きによって, 鉛の集困は, つぶれていくことが観察できる。 20 msec ぐらいから, 水面の上方への運動は止まり, やがて波柱は落下崩壊していく。

IV 結論と検討

鉛を水中で急速に蒸気化させることによって生ずる、圧力の変化、全体的な現象が観察されたが、一応次のような結論を導いた。

- ① test piece の後部 1.5 cm の容器壁面での圧力は、まず鋭い衝撃波による圧力と、その後、水が壁面を押すことによる。比較的パルス巾の大きい圧力が測定された。そして、gas 球の消滅に伴う 2 次的な衝撃パルスが生じる場合もあった。
- ② 衝撃波による圧力は、大体 30 ~ 40 Kg/cm^2 であった。
- ③ 鉛が gas 化して、水を媒体として容器を押すことによって生じる圧力は 20 ~ 30 Kg/cm^2 であり、この圧力変化は、衝撃波が記録されたすぐ後に生じ、加圧と減圧の過程が約 1.5 m sec に渡って続く。
- ④ gas 球の運動は、最初、容器壁面の変形による応力と平衡するまで膨張し、その後、凝縮による volume の減少と残存ガスの加圧の過程を経て収縮し、2 次的な衝撃波を放出して常圧に至る。
- ⑤ test piece に穴をあけて、水蒸気が gas 球に包 されることを想定した実験では、最後の圧力減衰の現象において、穴をあけない場合と異なることがわかった。即ち、減衰の速さが遅くなり、これは、水蒸気が含まれることによって凝縮が遅くなるのではないかと想定される。
- ⑥ 0.3 mm ϕ の fuse をよりあわせたものを test piece とした実験では、衝撃波による圧力は発生せず、最初比較的ゆっくり上昇し、17 ~ 18 Kg/cm^2 で平衡圧に達し、ゆっくり下降する。これは、より線の内部に水が浸入していることによって test piece に input されたエネルギーが熱的に損失されることによって、test piece 全部が蒸気化されないということによるのであろう。生じた圧力は、より線内部の水あるいは、鉛自身が少量蒸気化することによるのであろう。次項にその volume 変化の様子を示す。2 次的な衝撃パルスの原因もこれでわかる。
- ⑦ 衝撃波として伝播されるエネルギーは、ピエゾ素子による波形からは定量的に評価することはできなかったが、mechanical なエネルギーとして放出されるエネルギーの大きな割合を占めると考えられる。
- ⑧ gas 球の膨張による仕事は、ある近似を置くことによって定量的に評価できる。gas 球 phase での膨張により失われるエネルギーは、系から失われるエネルギーの 20 % であることがわかる。しかしながら、gas phase の持続時間が短いことによって、全体の放出エネルギーのうち膨張に消費されるエネルギーは 2 % である。
- ⑨ test piece に input されたすべての熱的なエネルギーは、水への伝熱によって多くは失われていく。



Sample 11 of explosion 1905/17A

- ⑩ 水が蒸気化されて、gas 球内にとりこまれて生長するという確証は得られなかったし、又、とりこまれてはいないであろう。但し、sample が explosion する瞬間に、少量の水が蒸気化されるということはあるであろう。穴をあけた sample や、より線での sample ではその可能性は十分ありうる。水の比熱および気化潜熱は鉛にくらべてはるかに大きく、gas 球にとりこまれる水の量は大きくないであろう。
- ⑪ fragmentation の可能性については、gas から急冷された鉛は、かなり細く分散されているが、liquid な状態から凝固したものは、あまり分散されておらず、間隙の多い塊を形成していた。
- ⑫ 自由空間の体積は、 っている体系の場合、ピエゾ素子部分での圧力挙動に大きな影響を与えない。