

JAERI-M
90-159

低爆速火薬による円筒容器の耐衝撃応答

1990年9月

丹沢 貞光・藤城 俊夫・吉江 伸二*

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し込みください。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）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1990

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 ニッセイエプロ株式会社

低爆速火薬による円筒容器の耐衝撃応答

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

丹沢 貞光・藤城 俊夫・吉江 伸二*

(1990年8月24日受理)

NSRRにおいて、燃料破損実験に使用するカプセルと同一スケールの耐爆試験体を製作し、低爆速火薬により衝撃的な圧力波を発生させて、燃料破損時の挙動を模擬した実験を実施した。これにより、カプセルの耐衝撃応答を把握する上での基礎的な知見を得た。主な成果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 現状の設計によるカプセル形状において、反射波、スラグ・インパクトを含む圧力波伝播挙動が明確となった。爆源の波高値が $115 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ の場合、試験体は弾性範囲内である事が確認された。また、カバーガス高さ200mmの場合において爆源が $400 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ であっても、変形は試験体下部だけに発生し、その最大残留歪は1%程度である。
- (2) 水塊はカバーガスと爆源の燃焼ガスの存在によりバウンディング効果があり、爆源にスラグ・インパクトに次ぐ二次圧力波が発生することがわかった。
- (3) 水塊は最大速度を有する速度履歴を持ち、速度履歴はカバーガス高さと同様な関係がある。カバーガス高さによって、スラグ・インパクトによる容器首下変形の程度が異なる。
- (4) 耐爆試験体の外側に設置した外部容器と、アニュラス部の流体の存在によって、カプセルの変形が軽減される傾向を把握した。

Shock Structural Response of Cylindrical Vessel
with Slow Explosive

Sadamitsu TANZAWA, Toshio FUJISHIRO and Shinji YOSHIE*

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

(Received August 24, 1990)

Out-of-pile tests for simulating the experimental fuel rupture behavior at NSRR have been executed with slow explosive to generate shock pressure wave. The present model is on an actual scale of an NSRR experimental capsule. The data and fundamental information were obtained to understand shock structural behavior of the capsule. The main results are summarized as follows:

- (1) Pressure wave-propagation characteristics were identified in the present capsule model, including the reflection wave and the slug impact. It was confirmed that the capsule model showed elastic behavior under the pressure source condition of $115 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ peak. Even in the case of $400 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ peak with a 200 mm cover-gas height, only the lower part of the capsule model was deformed and the maximum residual circumferential strain remained within about 1 percent.
- (2) It was revealed that the slug-bounding phenomenon between the upper cover-gas and the lower generated gas caused the secondary pressure wave in the pressure source after the slug impact.

* KAWASAKI Heavy Industries, Ltd.

- (3) The slug makes an impact against the plug after passing the maximum velocity in the case of 200 mm cover-gas height, and in velocity history links closely with the cover-gas height. The deformation degree at the upper part of the capsule depends on the cover-gas height.
- (4) The deformation of the capsule model showed the trend to be mitigated by the existence of an outer vessel and annulus fluid surrounding the capsule model.

Keywords: Slow Explosive, Cylindrical Vessel, NSRR, Fuel Rupture

目 次

1. 概 要	1
2. 試験の構成	1
3. 試験方法	2
3.1 低爆速火薬	2
3.2 試験装置	2
3.3 試験手順	3
3.4 計測方法	3
4. 火薬特性試験	16
4.1 薬量と波高値の関係	16
4.2 薬量と水塊の飛び上がり速度及びエネルギーの関係	16
4.3 剛性容器内の音速	16
4.4 爆源における圧力履歴	17
4.5 容器底部における圧力履歴	17
4.6 音速の低下	18
4.7 圧力波の径方向の分布	19
4.8 液面近傍の圧力履歴	19
4.9 カバーガス圧縮効果	19
4.10 水塊の速度履歴	19
5. カバーガス効果評価試験	33
5.1 スラグ・インパクト圧力	33
5.2 スラグのバウンディング効果	33
5.3 カバーガス圧縮効果	35
5.4 カバーガス高さの効果	35
5.5 カバーガスの存在しない場合の圧力履歴	35
6. 内部容器試験	48
6.1 応力波の到達	48
6.2 二段で形成される試験体下部の変形	48
6.3 スラグ・インパクトとカバーガス高さの効果	49
6.4 歪硬化	49
6.5 現象の時刻歴	50
7. 二重容器試験	71
8. 結 言	79
謝 辞	80

Contents

1. Summary	1
2. Test constitution	1
3. Test method	2
3.1 Slow explosive	2
3.2 Test apparatus configuration	2
3.3 Test procedure	3
3.4 Measuring method	3
4. Energy calibration tests	16
4.1 Relation between quantity of Sk explosive and pressure height	16
4.2 Relation between quantity of Sk explosive and slug velocity and energy	16
4.3 Acoustic velocity in the rigid vessel	16
4.4 Pressure history at pressure source	17
4.5 Pressure history at vessel bottom	17
4.6 Reduction of acoustic velocity	18
4.7 Radial distribution of pressure wave	19
4.8 Pressure history adjacent to the free surface	19
4.9 Effect of cover-gas compression	19
4.10 History of slug velocity	19
5. Cover-gas tests	33
5.1 Pressure by slug impact	33
5.2 Bounding effect of slug	33
5.3 Effect of cover-gas compression	35
5.4 Effect of cover-gas height	35
5.5 Pressure history in the case without cover-gas	35
6. Inner vessel tests	48
6.1 Arrival of pressure wave	48
6.2 Deformation in the vessel lower part	48
6.3 Effect of cover-gas height on slug impact	49
6.4 Strain hardening	49
6.5 Time history of phenomena	50
7. Double containment vessel tests	71
8. Conclusions	79
Acknowledgement	80

1. 概 要

NSRRでは、試験燃料を実験用カプセルに封入してNSRR炉心に挿入し中性子照射することにより反応度事故を模擬し、事故時の燃料挙動の究明を行っている。実験に使用するカプセル類は、試験燃料を効率よく発熱させるためには壁厚を出来る限り薄くしなければならないが、反面、試験燃料が破損した際に発生する衝撃圧力や水撃力に十分耐える構造であることが必要である。特に、照射済燃料を用いた燃料破損実験の場合には、試験燃料が破損した際にカプセル内に放出される放射性生成物の量が多いため、カプセルの健全性を十分留意しなければならない。このため、照射済燃料を用いた燃料破損実験を開始するに当たっては、試験燃料を封入するカプセルの耐衝撃挙動を予め把握しておく必要がある。

今回実施した耐爆実験では、燃料に起因する衝撃挙動を低爆速火薬を用いて模擬し、カプセルの耐衝撃性、内部流体の水撃及び圧力波伝播挙動を把握するための基礎データを取得することができた。

2. 試験の構成

今回実施した耐爆実験は以下に示す4つの試験により構成される。

(1) 低爆速火薬特性試験

カプセルの耐衝撃挙動を調べるに先立ち、圧力源を模擬し得る低爆速火薬を調べた。本試験では圧力源の波高値、持続時間及び水塊の運動エネルギーに見合った低爆速火薬の薬種配合比と薬量を設定した。

(2) カバーガス効果評価試験

カプセルの内のカバーガス層の体積及び圧力源位置をパラメータとして、水撃及び圧力波伝播挙動に与える効果を把握した。

(3) 内部容器試験

現在の設計で採用されているカプセル構造が、安全審査で定められている衝撃圧力及び水撃力に対して弾性挙動を示すことを確認するとともに、カプセルが塑性変形を起こす範囲まで実験を進め、変形挙動に関する基礎データを取得した。

(4) 二重容器試験

内部容器試験に使用したカプセルと同じカプセルを外部容器内に装荷して、外部容器及びアニュラス部流体の存在による衝撃挙動緩和効果を調べた。

1. 概 要

NSRRでは、試験燃料を実験用カプセルに封入してNSRR炉心に挿入し中性子照射することにより反応度事故を模擬し、事故時の燃料挙動の究明を行っている。実験に使用するカプセル類は、試験燃料を効率よく発熱させるためには壁厚を出来る限り薄くしなければならないが、反面、試験燃料が破損した際に発生する衝撃圧力や水撃力に十分耐える構造であることが必要である。特に、照射済燃料を用いた燃料破損実験の場合には、試験燃料が破損した際にカプセル内に放出される放射性生成物の量が多いため、カプセルの健全性を十分留意しなければならない。このため、照射済燃料を用いた燃料破損実験を開始するに当たっては、試験燃料を封入するカプセルの耐衝撃挙動を予め把握しておく必要がある。

今回実施した耐爆実験では、燃料に起因する衝撃挙動を低爆速火薬を用いて模擬し、カプセルの耐衝撃性、内部流体の水撃及び圧力波伝播挙動を把握するための基礎データを取得することができた。

2. 試験の構成

今回実施した耐爆実験は以下に示す4つの試験により構成される。

(1) 低爆速火薬特性試験

カプセルの耐衝撃挙動を調べるに先立ち、圧力源を模擬し得る低爆速火薬を調べた。本試験では圧力源の波高値、持続時間及び水塊の運動エネルギーに見合った低爆速火薬の薬種配合比と薬量を設定した。

(2) カバーガス効果評価試験

カプセルの内のカバーガス層の体積及び圧力源位置をパラメータとして、水撃及び圧力波伝播挙動に与える効果を把握した。

(3) 内部容器試験

現在の設計で採用されているカプセル構造が、安全審査で定められている衝撃圧力及び水撃力に対して弾性挙動を示すことを確認するとともに、カプセルが塑性変形を起こす範囲まで実験を進め、変形挙動に関する基礎データを取得した。

(4) 二重容器試験

内部容器試験に使用したカプセルと同じカプセルを外部容器内に装荷して、外部容器及びアニュラス部流体の存在による衝撃挙動緩和効果を調べた。

3. 試験方法

3.1 低爆速火薬

試験燃料の破損による衝撃挙動の模擬は、圧力源としては低爆速火薬のうちSk火薬を水中発破することにより行った。Sk火薬とは、主成分が $KClO_4$ 68%とAl 26%からなり、これに数%の有機物の糊材を加えたものである。この有機物の糊材が燃焼時にガスを発生し、それにより燃料-水反応による急激な蒸気発生を模擬することが出来る。Sk火薬の組成をTable 3.1に、仕様をTable 3.2に示す。今回の試験では、このSk火薬を薬量に応じてきまった大きさの円筒形のAl製容器に点火玉とともに密封して使用した。Al製容器の外観写真をFig. 3.1に示す。無限水中において標準薬粒($\phi 3$)のSk火薬を用いた場合、以下の式より薬量が求まる。

$$Z = E_a / E_g \times 10^3$$

ここで Z ; 薬量 (g)

E_a ; 評価上の機械エネルギー (MJ)

E_g ; Sk火薬の無限水中における圧力波エネルギー (3.4 MJ/kg)

いま、水塊の運動エネルギーを450 calとした場合、薬量は上式より

$$Z = 0.56 \text{ g}$$

と計算される。これを目安として、実際に火薬特性試験を実施した結果、選択された薬量は0.75~1.35 gとなった。

3.2 試験装置

耐爆試験体には、現行の燃料破損実験用カプセルと同等の内容積を持つ剛性容器、並びにカプセルの形状を模擬した内部容器及び外部容器を製作し、2章で示した4種の試験に使用した。各容器の構造をFig. 3.2~3.4に示す。

剛性容器は、低爆速火薬特性試験等で繰り返し使用するため、変形が生じないように胴部は充分厚肉とし、圧力波の伝播が計測出来るように圧力計取付座を設けた。また、周溶接部には容器内部へのタレ込みがないようにし、水塊の飛び上がりに抵抗にならないように考慮した。

内部容器は、水撃力による変形が発生しやすいように上部フランジ近傍まで薄肉とし、薄肉部には溶接部とその熱影響部による熱歪硬化等の影響ができる限り少ないような構造とした。

外部容器も、内部容器同様、溶接部は薄肉部からは離して設ける構造とした。

3.3 試験手順

試験は、各々の耐爆体内に所定量の水を注入し、Sk 火薬及びアルミ・ワイヤ製の火薬固定台を耐爆体低面にセットして実施した。標準実験体系での火薬のセット位置は容器低面より 200 mm とし、水の液面位置はさらに火薬の上部 200 mm とした。このため、水注水量は火薬及び火薬固定台を除き、約 1580 cc、火薬上部の水量は約 810 cc となる。

現象開始の起点は、火薬表面に取り付けた導線が破断する時刻とし、全ての計測はこの時点に同期させた。また、高速撮影を行う場合には、高速度カメラのフィルム回転速度が一定になった時点でトリガ信号を発破器に送信し、同期させた。

3.4 計測方法

各試験では、その目的に応じて、圧力、歪及び水塊の飛び上がり速度の計測を行った。

各々の信号は、すべてデータ・レコーダに一度収録し、A/D変換処理を行って作図した。変換時のデータ・サンプリング周期は 2.5～5 μ s とした。

各計測器の仕様を Table 3.3 に、また、各試験でのブロックダイアグラムを Fig. 3.5～3.7 に示す。

Table 3.1 Composition of Sk-Explosive

KClO ₄	68 %
Al	26 %
C ₆ H ₁₀ O ₅	5 %
C	0.5 %

Table 3.2 Characteristics of Sk-Explosive

Total Calorie	8.8 MJ/Kg
Specific Weight	1.63 g/cc
Peak Pressure	1 ~ 5 K bar (Charge: 35 ~ 280g)
Energy of Pressure Wave Underwater	0.1 ~ 0.6 MJ/Kg (Charge: 30 ~ 480g)
Gas Expansion Energy Underwater	about 3.4 MJ/Kg

Table 3.3 Specification of Measuring System

Pressure History	Pressure Transducer Model ; PGM-500 KD (KYOWA Electronic Instruments) Range ; 500 kg/cm ² ·g (Allowable Over Load ; 150%) Natural Frequency ; 250 KHz
Strain History	Ultra High Elongation Foil Strain Gage Type ; KFE-2-C1 (KYOWA Electric Instruments) Range ; 8% strain Gage Length ; 2 mm Cement ; CC-15AS Moisture-proofing ; AK-22
Velocity Sensor	Magnetic Float-Sensor (KURS Science & Engineering) Range ; 100 m/sec Maximum Pressure ; 10 kg/cm ² ·g Coil Pitch ; 6 mm Float Specific Weight ; 0.9 g/cm ³ max.
High-Speed Photographing	High-Speed Camera Model ; PHOTEC IV 16 mm Fixed Photographing Speed ; 3000 FPS Precise Frame Interval Time ; 350 μs Film Analyzer ; SANPICO Analyzer 401 & GRADIMATE Digitizer System

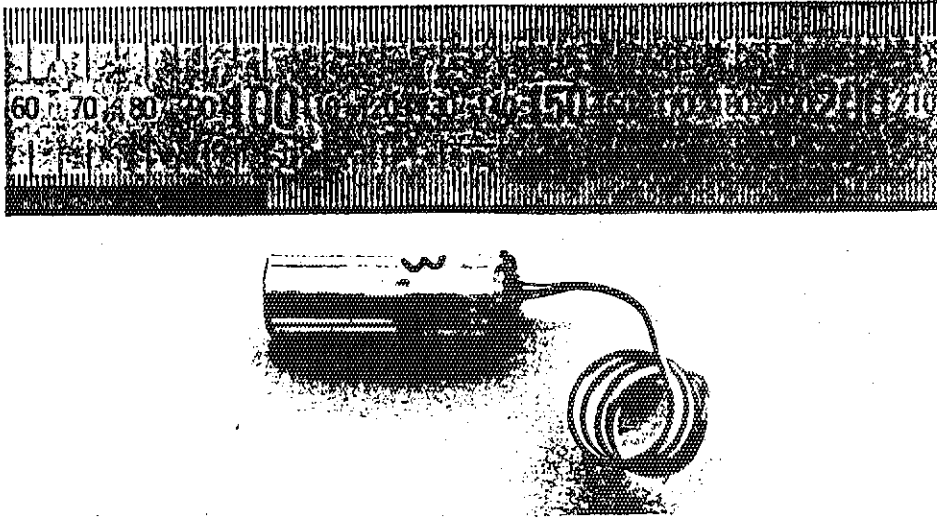


Fig. 3.1 Appearance of Sk-Explosive (3g charge)

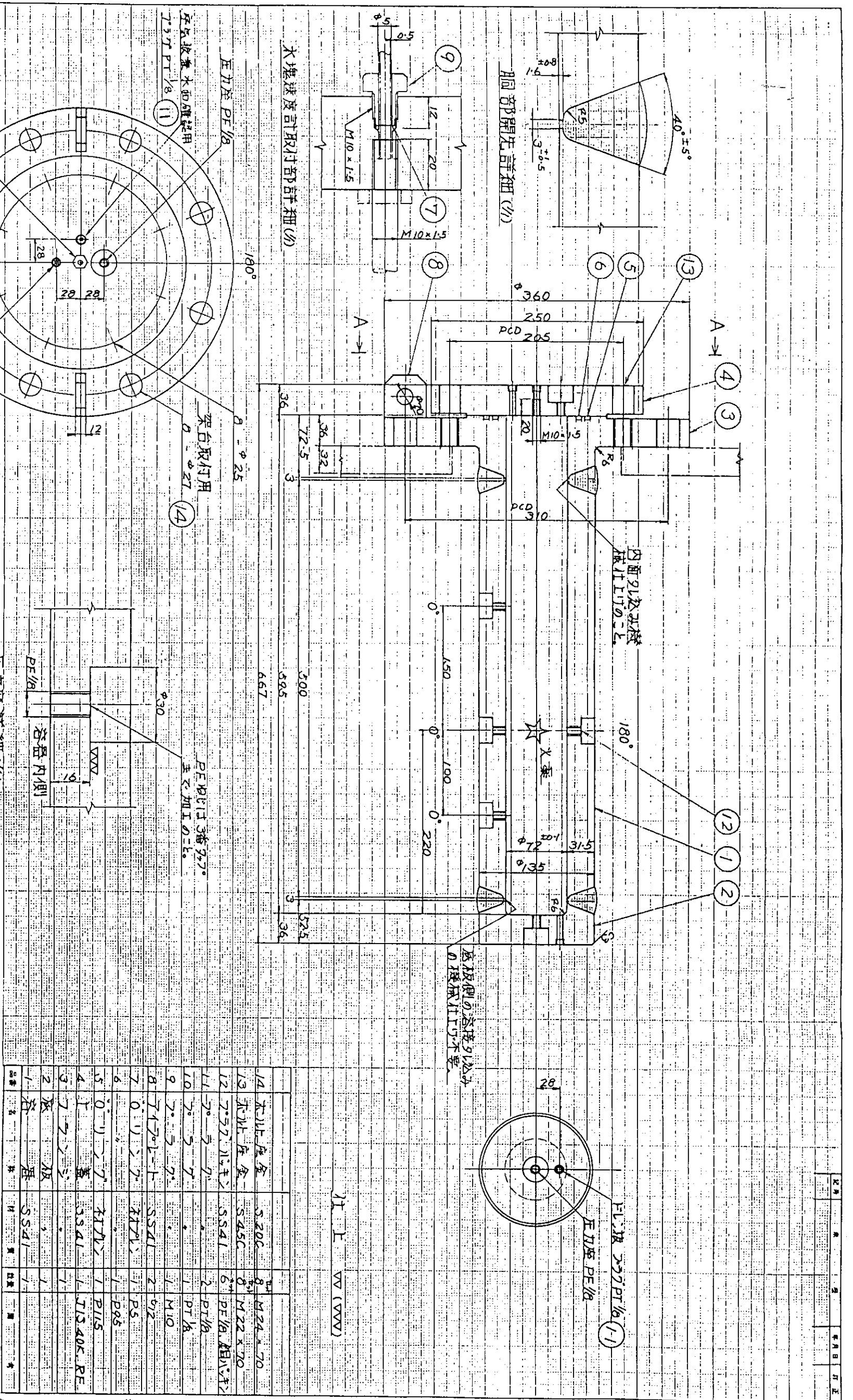


Fig. 3.2 Energy Source Calibration Vessel (DWG NO. D7458-02)

品番	名称	材質	数量	単位
14	本体座金	S20C	8	個
13	本体座金	S45C	0	個
12	水塊速度計	SS41	6	個
11	圧力容器	PT18	2	個
10	圧力容器	PT18	1	個
9	圧力容器	M10	1	個
8	圧力容器	SS41	2	個
7	圧力容器	PT18	1	個
6	圧力容器	P95	1	個
5	圧力容器	PT18	1	個
4	圧力容器	SS41	1	個
3	圧力容器	PT18	1	個
2	圧力容器	SS41	1	個
1	圧力容器	SS41	1	個

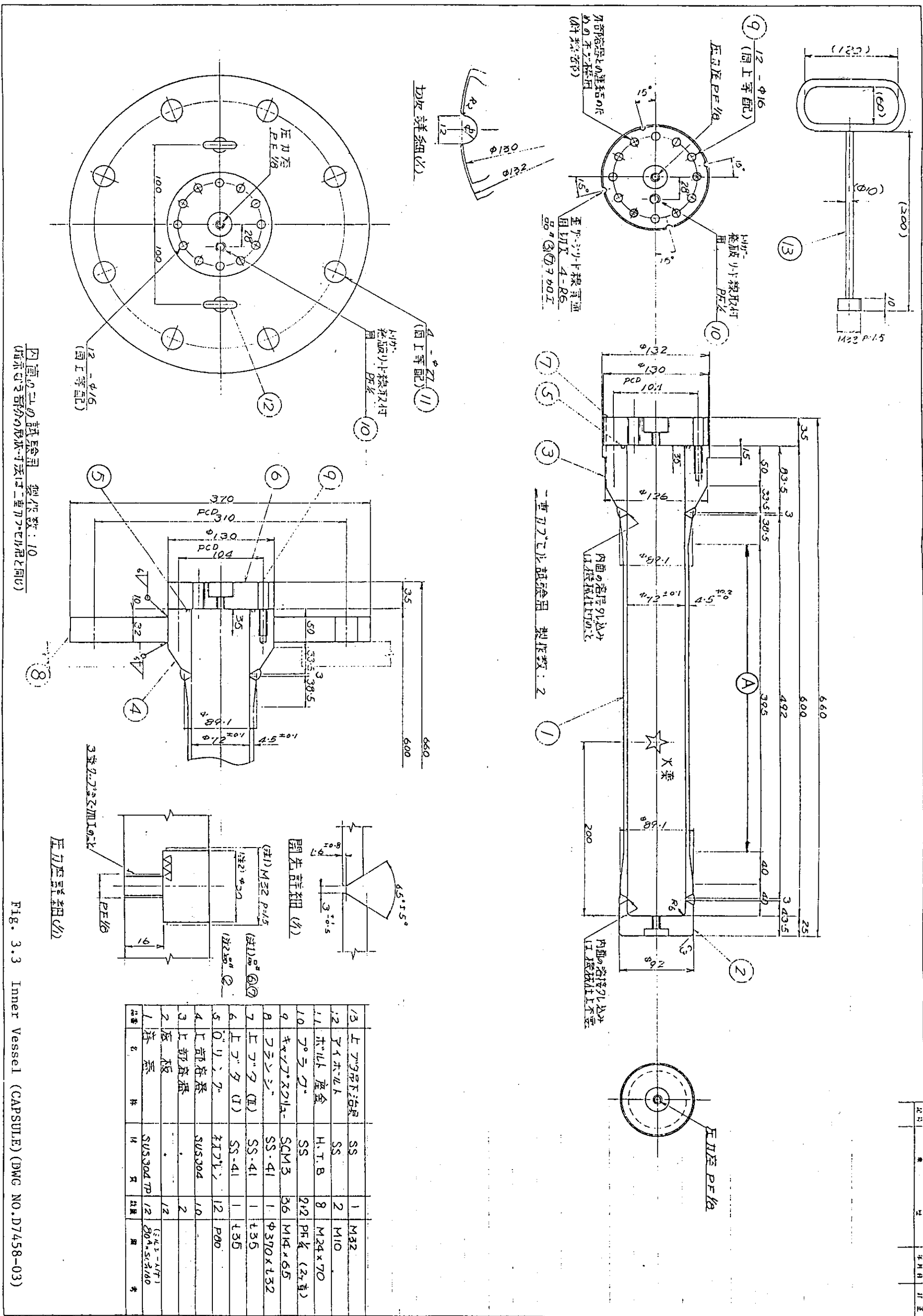


Fig. 3.3 Inner Vessel (CAPSULE) (DWG NO. D7458-03)

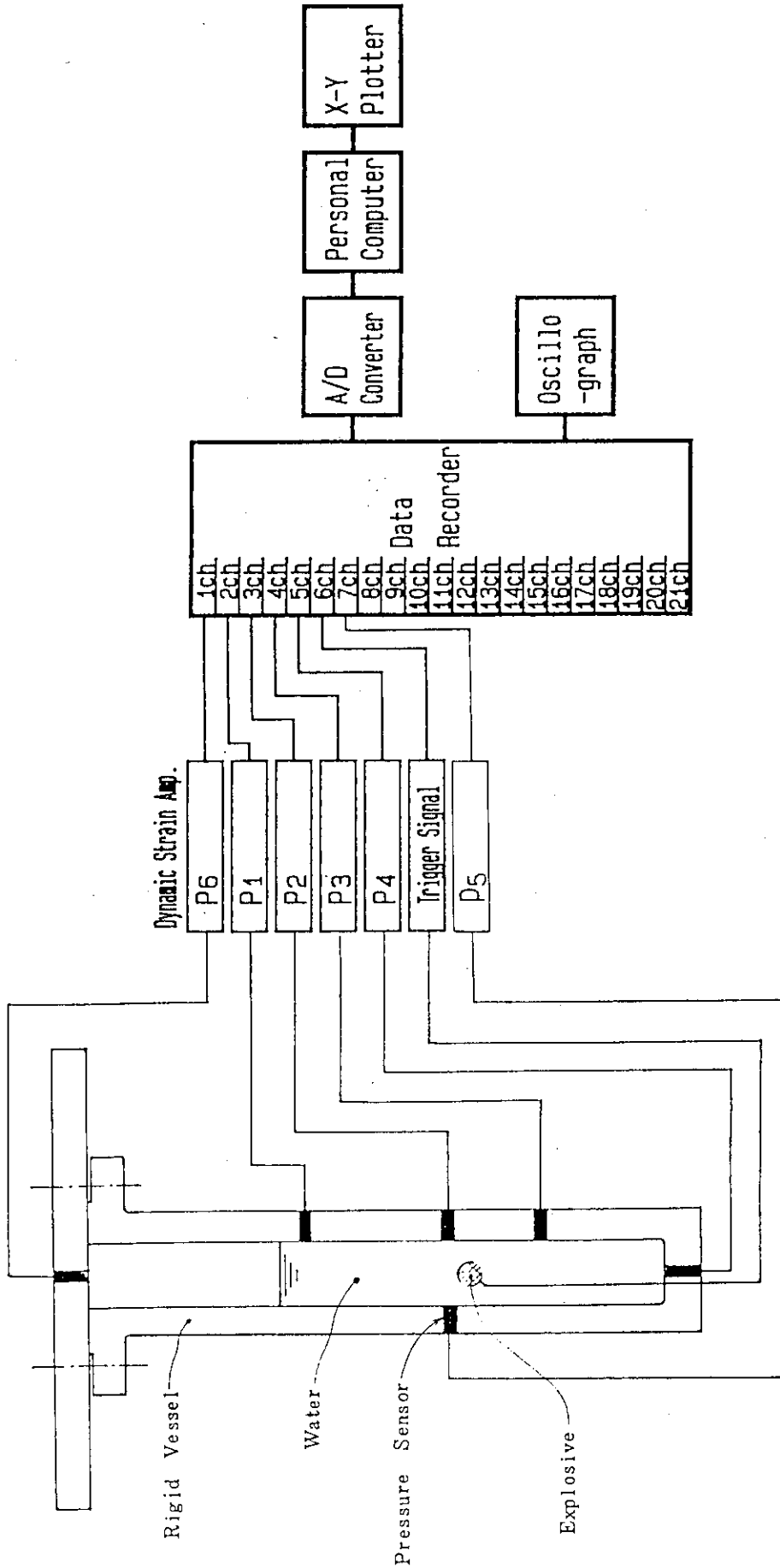


Fig. 3.5 Measuring Diagram of Energy Calibration and Cover-gas Effect Tests

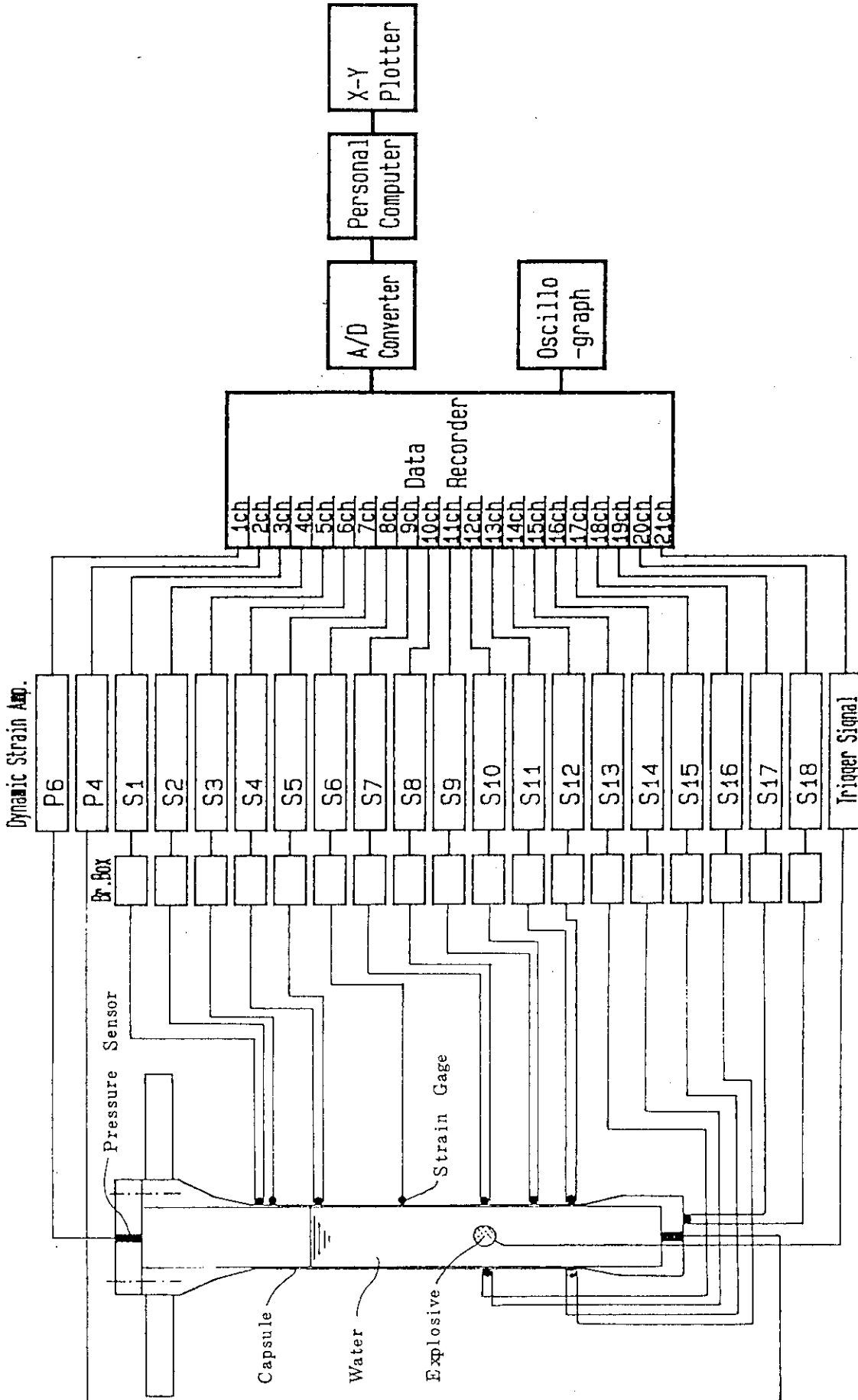


Fig. 3.6 Measuring Diagram for Inner Vessel Tests

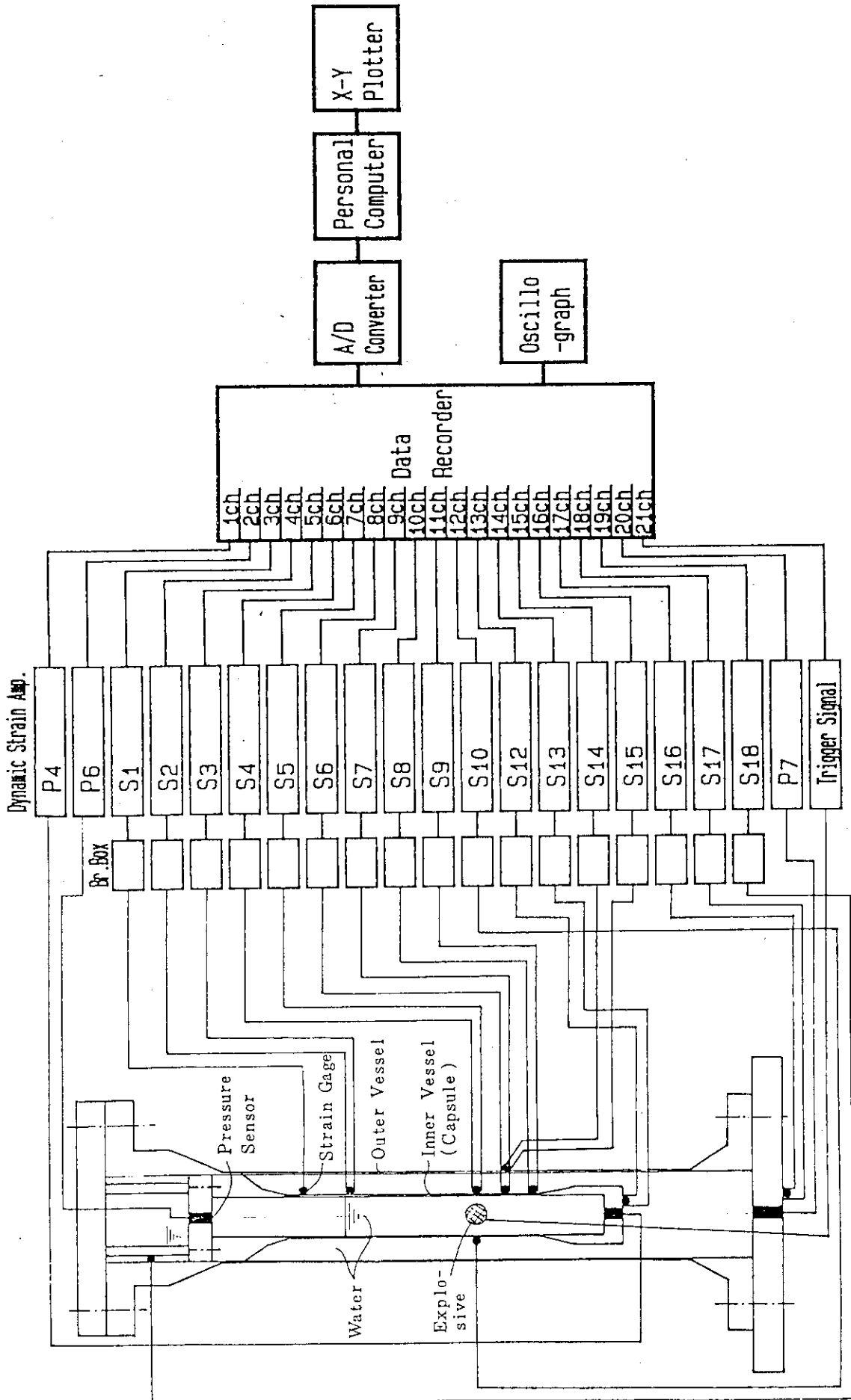


Fig. 3.7 Measuring Diagram for Double Vessel Tests

4. 火薬特性試験

火薬特性試験の試験リストを Table 4.1 に、圧力センサの配置、火薬及び水位の位置関係を Fig. 4.1 に示す。

試験の構成は、Test No. A 001～A 010 において薬量等の調整試験を、Test No. A 011～A 022 において薬量を固定し衝撃圧力と水撃力を調べるための火薬特性試験を実施した。

試験結果の概要を Table 4.2 に示す。

4.1 薬量と波高値の関係

Test No. A 011～A 022 までの爆源 (P_2) における波高値と薬量の関係を Fig. 4.2 に示す。これらの薬量の範囲では、波高値と薬量の関係は線形関係であり圧力波を発生させ得る限界の薬量が存在すると判断される。

この関係により、予定される衝撃圧力の波高値に対する薬量は以下のように定めた。

圧力源の波高値 ($\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{g}$)	Sk 薬量 (g)
130	0.80
180	1.15
210	1.35

4.2 薬量と水塊の飛び上がり速度及びエネルギーの関係

水塊（以下、「スラグ」という）の飛び上がりエネルギーの評価は、火薬より上部のスラグ（814 g）と高速度カメラ用フロート（46 g）の合計重量（860 g）が上昇するとして、その運動エネルギーを算出することにより行った。Fig. 4.3 に薬量とスラグの最大速度及びエネルギーの関係を示す。

この関係により、予定されるスラグ・エネルギーに対する薬量は、前項で定めた波高値に対する薬量の範囲に含まれるため、これと同一とした。

4.3 剛性容器内の音速

剛性容器は十分な肉厚を持っているが、衝撃圧力に対しては弾性範囲内で変形するため、水中での音速 C_e は以下の式で表される。

$$C_e = \sqrt{\frac{g \cdot K / r}{1 + (K / E) \cdot D / t}}$$

ここで、 K 水の体積弾性率 ($2.07 \times 10^8 \text{ kg/m}^2$)
 E 容器材料の縦弾性率 ($2.1 \times 10^{10} \text{ kg/m}^2$)
 r 水の比重量 ($1 \times 10^3 \text{ kg/m}^2$)
 g 重力加速度 (9.8 m/s^2)

これから、容器の内径/肉厚比 ($D/t = 72/31.5$) を用いて

$$C_e = 1400 \text{ (m/s)}$$

と計算される。

一方、実験より得られた音速は、爆源から容器底面までの 200 mm の区間を用いて底面の初期圧力波の立ち上がりを読み取れば 1300 ~ 1500 m/s となり、計算値に見合っている。実験より得られた音速との差は、発破と破裂のトリガの時刻精度及び読み取り誤差に依存する。Fig. 4.4 (Test No. A 001) に示す容器底面の圧力波の場合、音速は約 1350 m/s となり、以下では音速の標準値としてこの値を用いるものとする。

4.4 爆源における圧力履歴

Fig. 4.4 に見られるように、爆源の圧力 (P_1) は発破とほぼ同時に立ち上がり、液面からの負の反射波と径方向の正の反射波とが重ね合わされ徐々に減衰する三角波を形成する。これらの重ね合わされた圧力波を 1 つの圧力波として解釈する時、爆源での圧力波の持続時間は約 1 ms となる。

音速値 1350 m/s を用い、液面より反射される圧力波の現れる時刻は $300 \mu\text{s}$ ($200 \text{ mm} \times 2 \text{ 回} / 1350 \text{ m/s}$) となり、Fig. 4.4 に示す (A) 地点が 1 回目の膨張波の到達時点であることがわかる。

4.5 容器底部における圧力履歴

容器底部 (P_4) における圧力波は、発破後約 $150 \mu\text{s}$ で現れ、爆源より下方への圧縮波が底部で反射されるため、波高値は爆源での 2 倍となる。Fig. 4.4 の Test No. A 001 では、波高値は爆源 (P_1) での $115 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ に対し、底部で $235 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ であった。

P_4 での第 1 の圧力波 (図中 (B)) の持続時間は、爆源より下方へ進む圧縮波と上方へ進む液面で反射された膨張波との到達時間の差となり、液面上昇と燃焼ガスの存在による音速低下を無視すれば、 $200 \text{ mm} \times (3-1) \text{ 回} / 1350 \text{ m/s}$ により $300 \mu\text{s}$ となる。実際は、図中に示すように約 $400 \mu\text{s}$ であり、液面上昇と燃焼ガスの発達による音速低下が現れている。ただし、圧力波の到達時点での液面上昇はほとんどないため、音速低下の主要因は燃焼ガスの存在と判断できる。

容器底部における第 2 の圧力波は、液面からの膨張波が底部へ伝播し、そのまま反射し再度液面に到達して反転し、圧縮波となって底部へ到達した波である。これらの圧力波の伝播挙動を模式的に描けば、Fig. 4.5 のようになる。図中で、圧縮波は実線で、膨張波は波線で示す。この

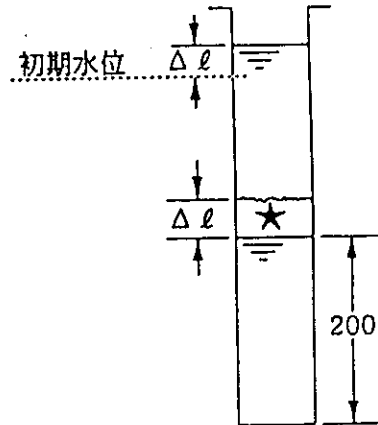
図では、液面上昇及び燃焼ガスの発生がなく、音速の減少がない理想的なモデルを示している。また、音速は図を分かりやすくするため 1333 m/s ($200 \text{ mm}/150 \mu\text{s}$) としている。

第2波の出現時刻は、Fig. 4.5からは $1040 \mu\text{s}$ ($200 \text{ mm} \times 7 \text{ 回} / 1350 \text{ m/s}$) と計算されるが、実際には Fig. 4.4 に示すように $1370 \mu\text{s}$ であり、その差 $330 \mu\text{s}$ が遅れ時間となっている。

ある時点で右図に示すように、もし爆源の燃焼ガスによって爆源上下の水が完全に2分(以下、「スラグ分離」という)されたと考える。発破後 $500 \mu\text{s}$ (スラグ上昇 5 mm) でスラグ分離が起きたとすれば、底面の第2の波の出現時刻は早くなって $740 \mu\text{s}$ ($200 \text{ mm} \times 5 \text{ 回} / 1350 \text{ m/s}$) となる筈である。実際は、出現時刻は $1350 \mu\text{s}$ であって、 $500 \mu\text{s}$ の時点ではスラグ分離は起きていないと判断される。

次に発破後 $1000 \mu\text{s}$ (スラグ上昇 9 mm) で、スラグ分離が起きたとすれば、第2の波の出現時刻はスラグ分離が起きない場合と同様になる。しかしながら、Fig. 4.5の④部に示すように第2波の中で、波高値が上昇している事実があるため、完全なスラグ分離はこの時点でも起きていないことになる。

第2波③の出現時刻の遅れが燃焼ガスによる音速の低下とすれば、この時点での音速は 1020 m/s となる。第2波③の持続時間は Fig. 4.5 より、 $780 \mu\text{s}$ ($200 \text{ mm} \times 4 \text{ 回} / 1020 \text{ m/s}$) と予測されるが、実際には Fig. 4.4 に示すように $450 \mu\text{s}$ であり、反射の繰り返しによる波の減衰によるものと判断される。第2波③の前半の波よりも後半の波の方が波高値が大きく、インパルスとして大きいのは、後半の波が初期に容器底面で反射し2倍の波高値を持つ波だからである。



4.6 音速の低下

前項で述べたように、反射波の出現時刻が遅いのは主として音速の低下によるものと思われる。Fig. 4.6 (Test No. A 002) ではかろうじて、第3の波(図中⑤)が出現しているので音速の減衰が明確となる。図中、波の反射による路程を 200 mm を基準として反射回数を表示した。発破後 3 ms でスラグは約 70 mm 上昇しており、スラグ分離が起きていることが充分考えられるため、第3の波⑤の出現時刻は予測し難い。ちなみに、スラグ分離が起きず音速低下のない場合の出現時刻は $2220 \mu\text{s}$ ($200 \text{ mm} \times 15 \text{ 回} / 1350 \text{ m/s}$) であるが、実際には音速の低下を伴って $3400 \mu\text{s}$ となった。

実験より得た各波の出現時刻を基に音速を算出したものを Fig. 4.4 に示す。Fig. 4.7 (Test No. A 009) において容器底面で第2波以降の波が現れていないのは、第1波の波高値が圧力センサ許容限界を大きく超えたためのセンサ破壊によることが原因と判断される。

4.7 圧力波の径方向の分布

爆源位置では周方向に 180° 隔てて、2つの圧力センサを取り付け、圧力履歴を計測した。この結果、Fig. 4.8 (Test No. A 012) に示すように2つの圧力履歴は酷似し、径方向に圧力分布はないことがわかる。逆に、圧力波形に差がある場合には、火薬位置の中心からのずれであると判断できる。

4.8 液面近傍の圧力履歴

液面近傍 (P_1) における圧力履歴は、例えばFig. 4.8 に示すように液面からの負の反射波により、削られた波 (A) ~ (D) となる。(A) ~ (D) までの波の出現継続時間は爆源の継続時間 (約 2 ms) に等しい。

Fig. 4.8 に示す P_1 の圧力履歴を拡大してFig. 4.9 に示す。第1波 (A) が立ち上って反射波によって削られるまでの時間は、図中に示すように約 $40 \mu\text{s}$ であり、 P_1 位置より液面までの距離 30 mm を音速 1350 m/s で往復する時間と一致する。

第2波 (B) はFig. 4.8 の破線による矢印で示すように、底面で反射した圧縮波が減衰して到達した波である。 P_4 で波高値 $220 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ の波は P_3 で約 $200 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ となり、 P_5 (爆源) では約 $100 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ と半分に減衰し、 P_3 と P_5 の間で燃焼ガスが存在することを示唆する。第1波 (A) が出現後、第2波 (B) の出現する時刻は $300 \mu\text{s}$ ($200 \text{ mm} \times 2 \text{ 回} / 1350 \text{ m/s}$) となり、実際は、Fig. 4.9 に示すように $315 \mu\text{s}$ であった。第3波 (C) 以降も、第2波 (B) は、第1波 (A) の出現後、約 $300 \mu\text{s}$ ($200 \text{ mm} \times 2 \text{ 回} / 1350 \text{ m/s}$) で現れ、第3波以降も、同じような周期で出現する。

4.9 カバーガス圧縮効果

Fig. 4.7 (Test No. A 012) と Fig. 4.10 (Test No. A 018) は同一条件にて、各々容器が解放の場合と密封した場合の各点の圧力履歴を示す。カバーガス高さが 195 mm の場合、爆源 (P_2) あるいは容器底部 (P_4) の圧力履歴はその波高値及び出現時刻は酷似しており、解放しても密閉しても水撃現象を除いて、圧力履歴への影響はなくカバーガスの圧縮効果は無視できる程度と判断できる。

Fig. 4.10 の P_6 で示すように、水撃現象は発破後 5 ms 以降に出現する。一方、 $P_1 \sim P_5$ 各部の圧力は 2 ms 以前に現象が静定している。即ち、 $P_1 \sim P_5$ の各部においてはカバーガスの圧縮によって起きる二次的な現象をフィードバックさせる時間的猶予を持っていないといえる。

カバーガス圧縮効果は、カバーガス高さが標準より少ない場合に現れ、詳細は次章で述べる。

4.10 水塊の速度履歴

水塊の速度履歴は高速度カメラを用いて取得し、別途取得したフロートによる変位履歴と共に

Fig. 4.11 (Test No. A016) に示す。これらの図からわかるように、速度は最大値を持つ2次曲線を形成する。

スラグがプラグ下面に到達するまでの距離は195mmで、衝突時点では速度は最大値を超えて減少し始める傾向を示す。即ち、カバーガス高さが195mmの場合、スラグは最大速度で衝突はしていない。最大速度時点以後のスラグは位置エネルギーの消費にはかならないため、入力としてのスラグ・エネルギーは最大速度で評価する。逆に、カバーガス高さが低く水塊の持つ最大速度を超えないような範囲であれば、衝突時の圧力を抑制することができる。このようなカバーガス高さの限界は今回の実験条件からは70～100mmであることがわかった。

また、Test No. A018～A022の P_6 からは、スラグが衝突（以下「スラグ・インパクト」という）した第1波の波高値からスラグ速度が算出できる。この場合、音速を約800m/sとすると高速度カメラで計測したスラグ速度と見合う。音速800m/sはFig. 4.10で示した P_4 の圧力履歴において発破後3ms後のものと一致し、スラグ・インパクト時刻は発破後5～6msであるから、さらに音速が低下しているものと予測される。ここで、スラグ・インパクト時の音速を仮に800m/sとして各々の圧力履歴よりスラグ速度及びエネルギーに換算し、高速度カメラのデータと併せてTable 4.2に示す。

Table 4.2より、薬量の増加に伴ってスラグ速度が上昇し、プラグ下面へのインパクト時刻が速まることがわかる。また、スラグ・インパクト時刻については、高速度カメラで取得した値と圧力履歴から算出した値がよく一致している。

Table 4.1 List of Energy Calibration Tests

Test No.	Explosive Charge [g]	Plug of the Vessel	memo
A 001	0.75	Open	High Speed Camera
A 002	1.1	ditto.	ditto.
A 003	1.3	ditto.	ditto.
A 004	0.75	Close	Magnetic Sensor
A 005	1.1	ditto.	ditto.
A 006	1.3	ditto.	ditto.
A 007	1.3	ditto.	ditto.
A 008	1.5	Open	for Float Checking
A 009	1.5	ditto.	ditto.
A 010	1.8	ditto.	ditto.
A 011	0.75	ditto.	High Speed Camera
A 012	0.8	ditto.	ditto.
A 013	0.9	ditto.	ditto.
A 014	1.05	ditto.	ditto.
A 015	1.15	ditto.	ditto.
A 016	1.35	ditto.	ditto.
A 017	0.75	Close	
A 018	0.8	ditto.	
A 019	0.9	ditto.	
A 020	1.05	ditto.	
A 021	1.15	ditto.	
A 022	1.35	ditto.	

Table 4.2 List of Source Pressure & Slug Energy

Test No.	Charge [g]	Source Pressure [kg/cm ² ·g]	Maximum Velocity [m/s]	Time of Arrival [msec]	Max. Energy [cal]	Impact Pressure [kg/cm ² ·g]	Velocity at Impact [m/s]	Time of Impact [msec]	Impact Energy [cal]
A011	0.75	106	46	2.9	217	-	38	5.3	148
A012	0.8	124	49	2.5	247	-	-	5.6	-
A013	0.9	131	53	3.0	289	-	49	4.8	247
A014	1.05	168	61	3.1	382	-	52	4.2	278
A015	1.15	150	64	3.4	421	-	57	4.2	334
A016	1.35	200	68	3.2	475	-	62	4.0	395
A017	0.75	85	-	-	-	-	-	-	-
A018	0.8	124	-	-	-	240	29*	5.4	86
A019	0.9	125	-	-	-	300	37*	5.1	141
A020	1.05	156	-	-	-	388	48*	4.8	237
A021	1.15	175	-	-	-	513	63*	4.2	408
A022	1.35	206	-	-	-	763	94*	3.9	908

(* calculated with sound wave:800m/s)

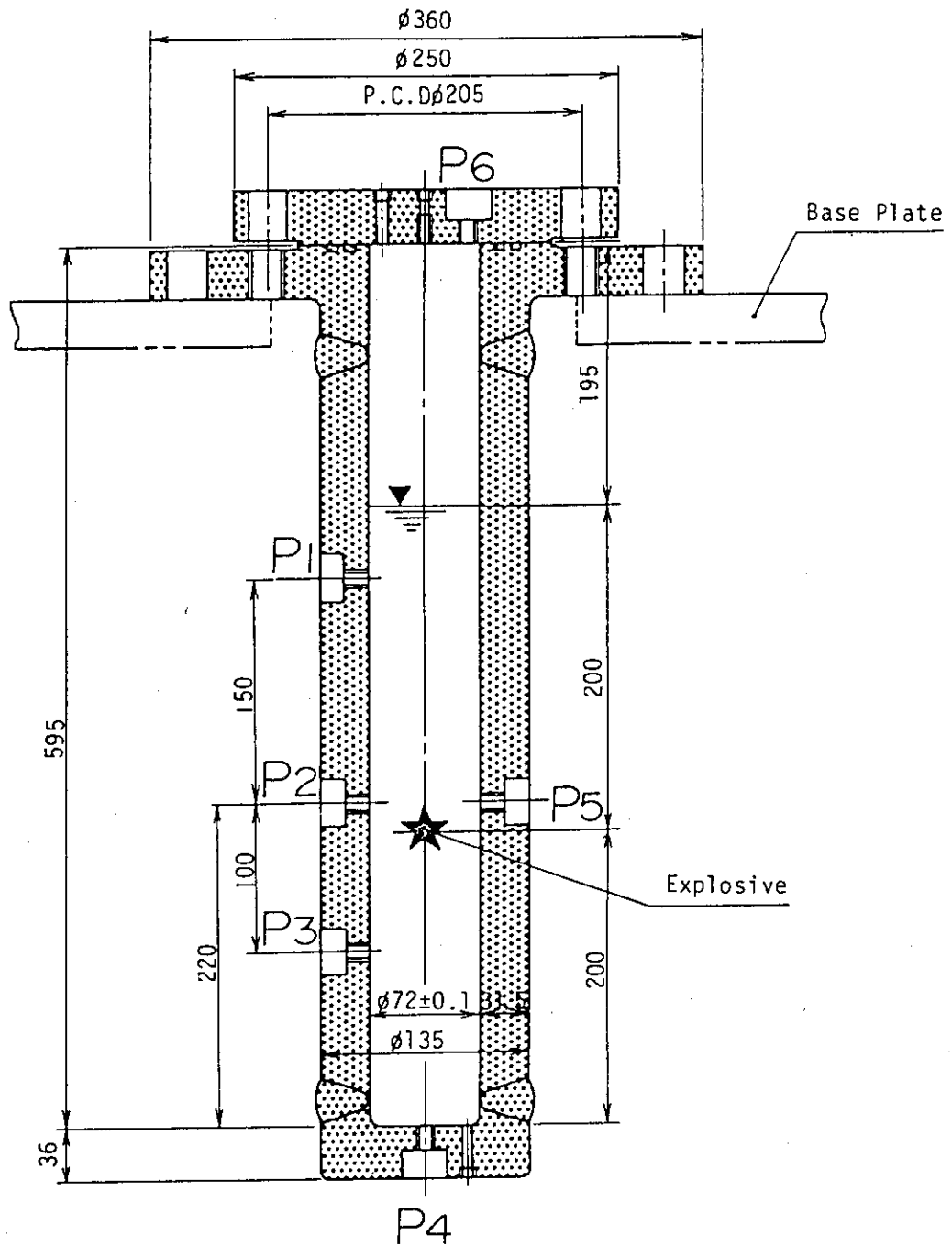


Fig. 4.1 Pressure Transducer- and Explosive-Location

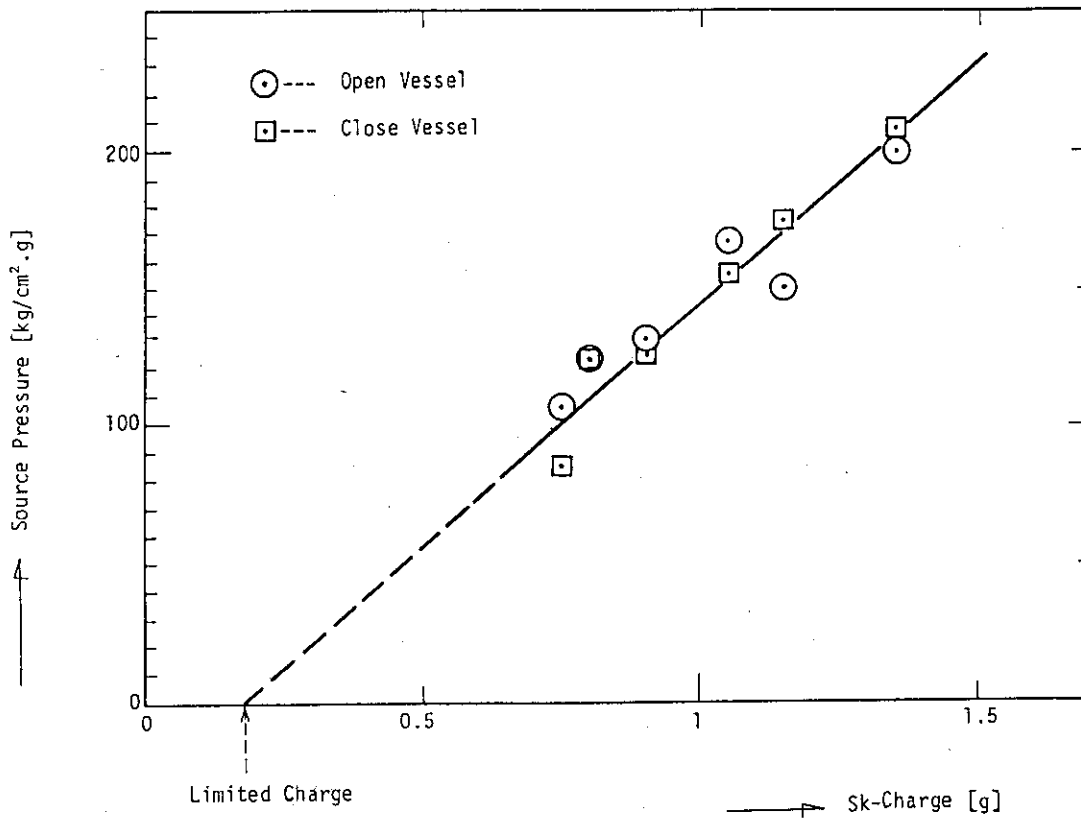


Fig. 4.2 Relation between Pressure and Charge

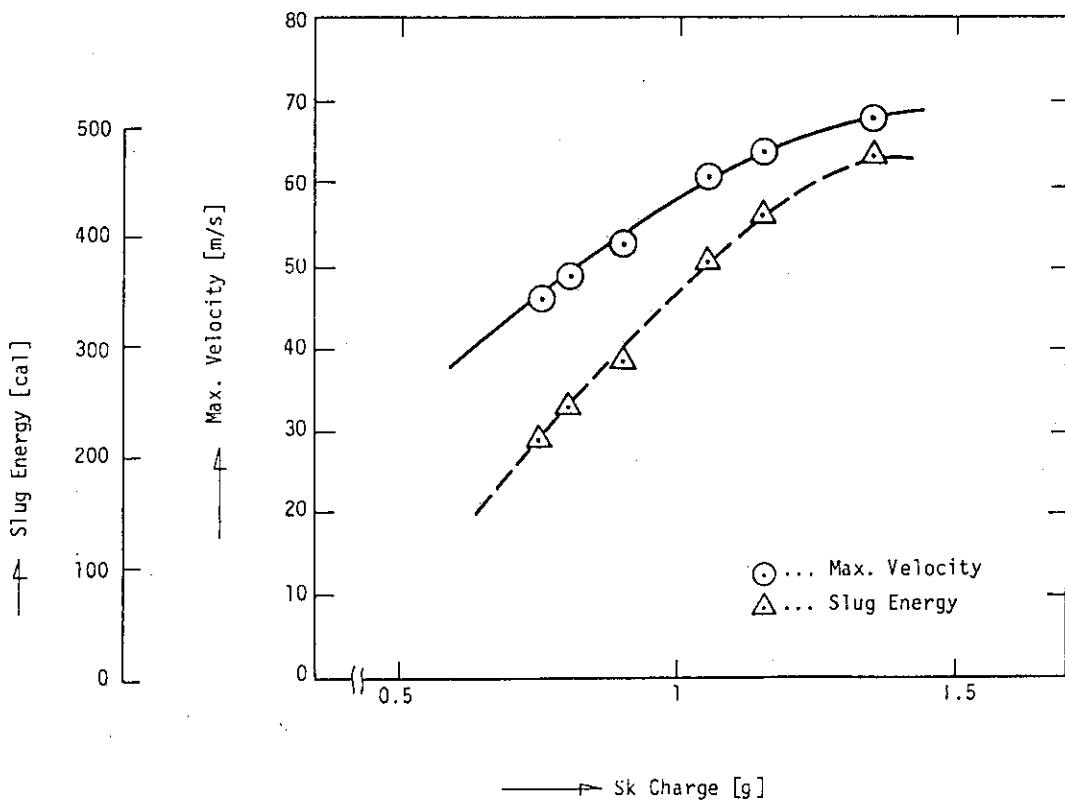


Fig. 4.3 Relation between Slug Energy and Charge

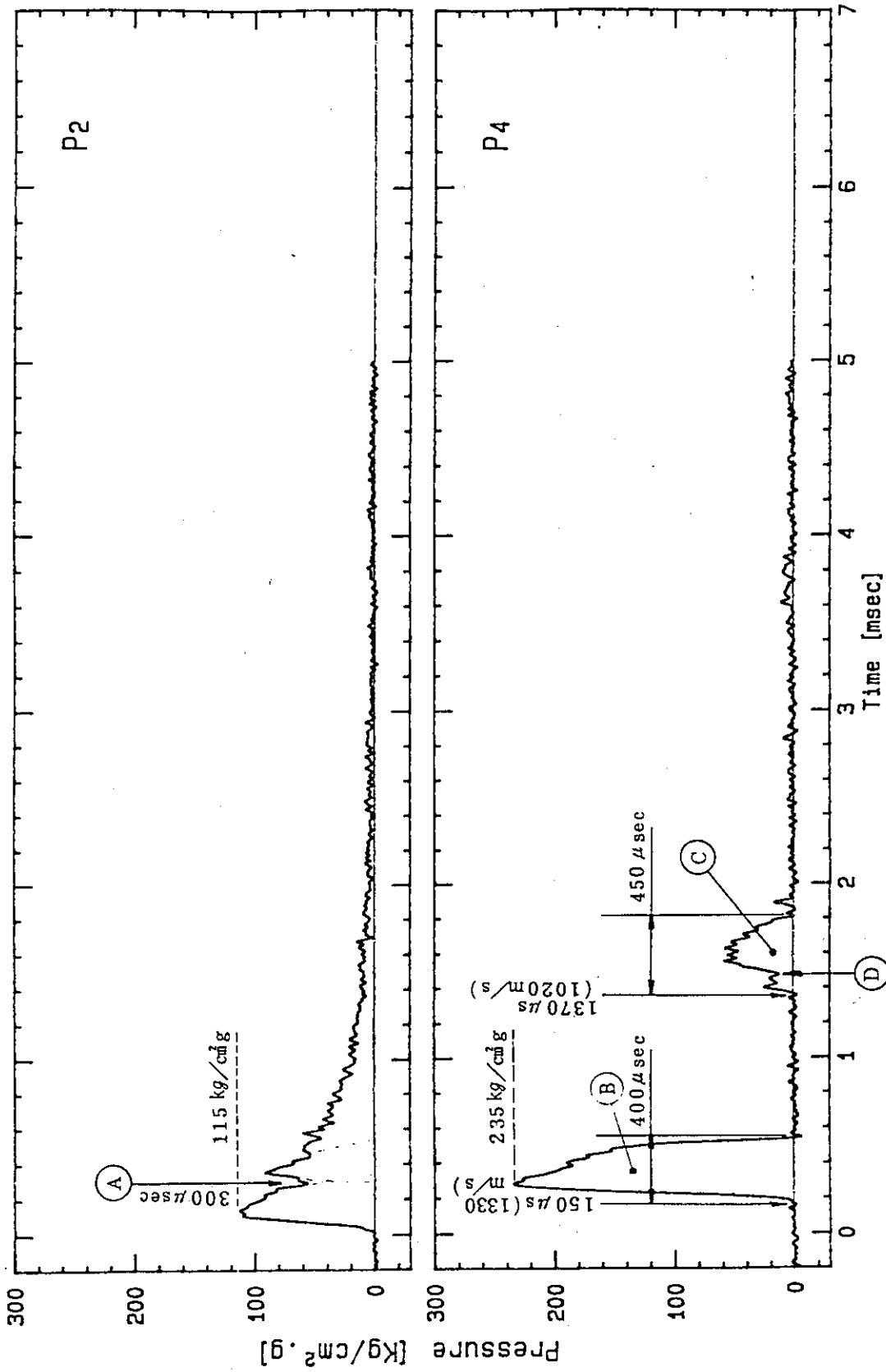


Fig. 4.4 Pressure History (Test No.A001)

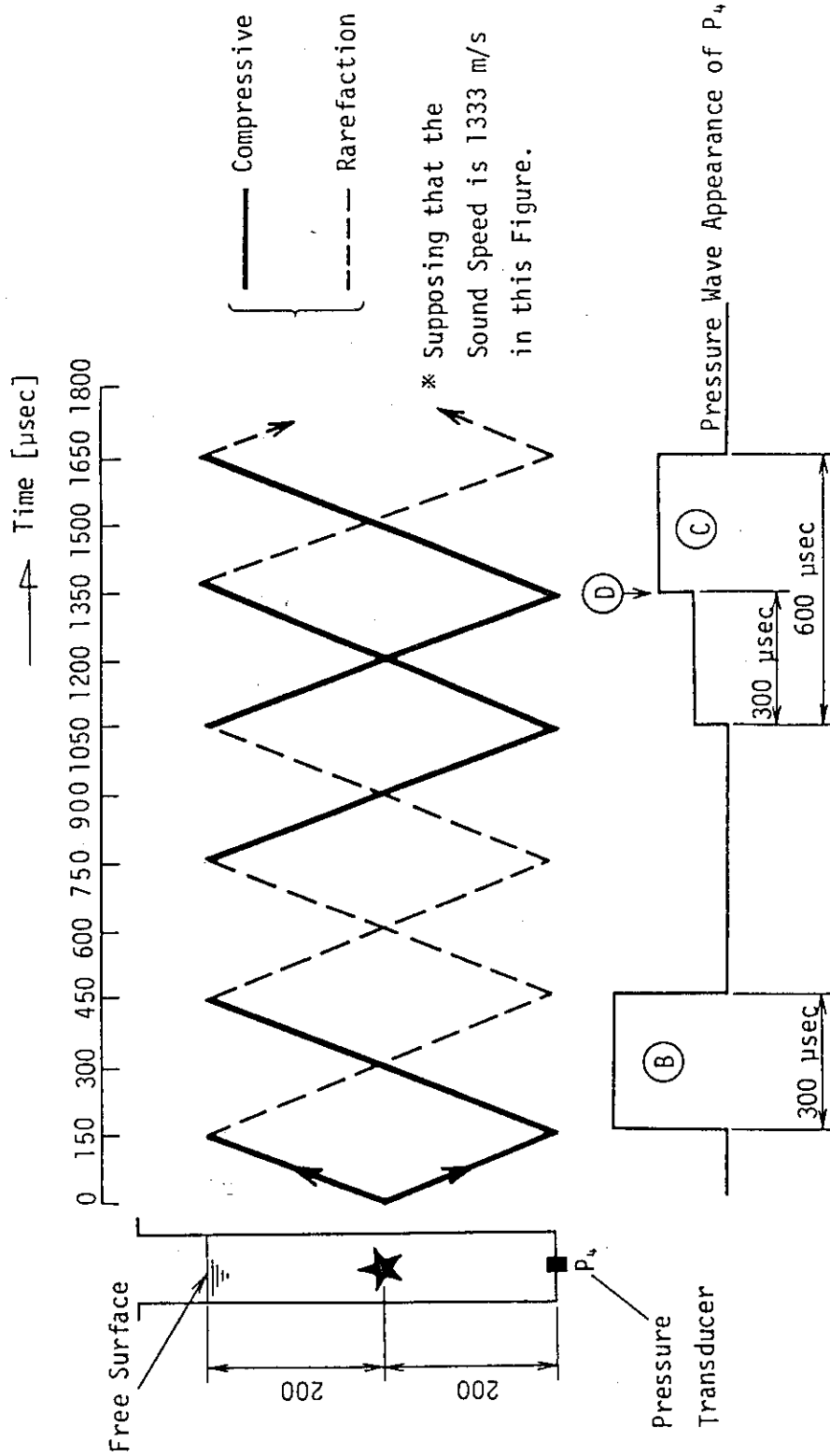


Fig. 4.5 Illustration of Pressure Wave Propagation

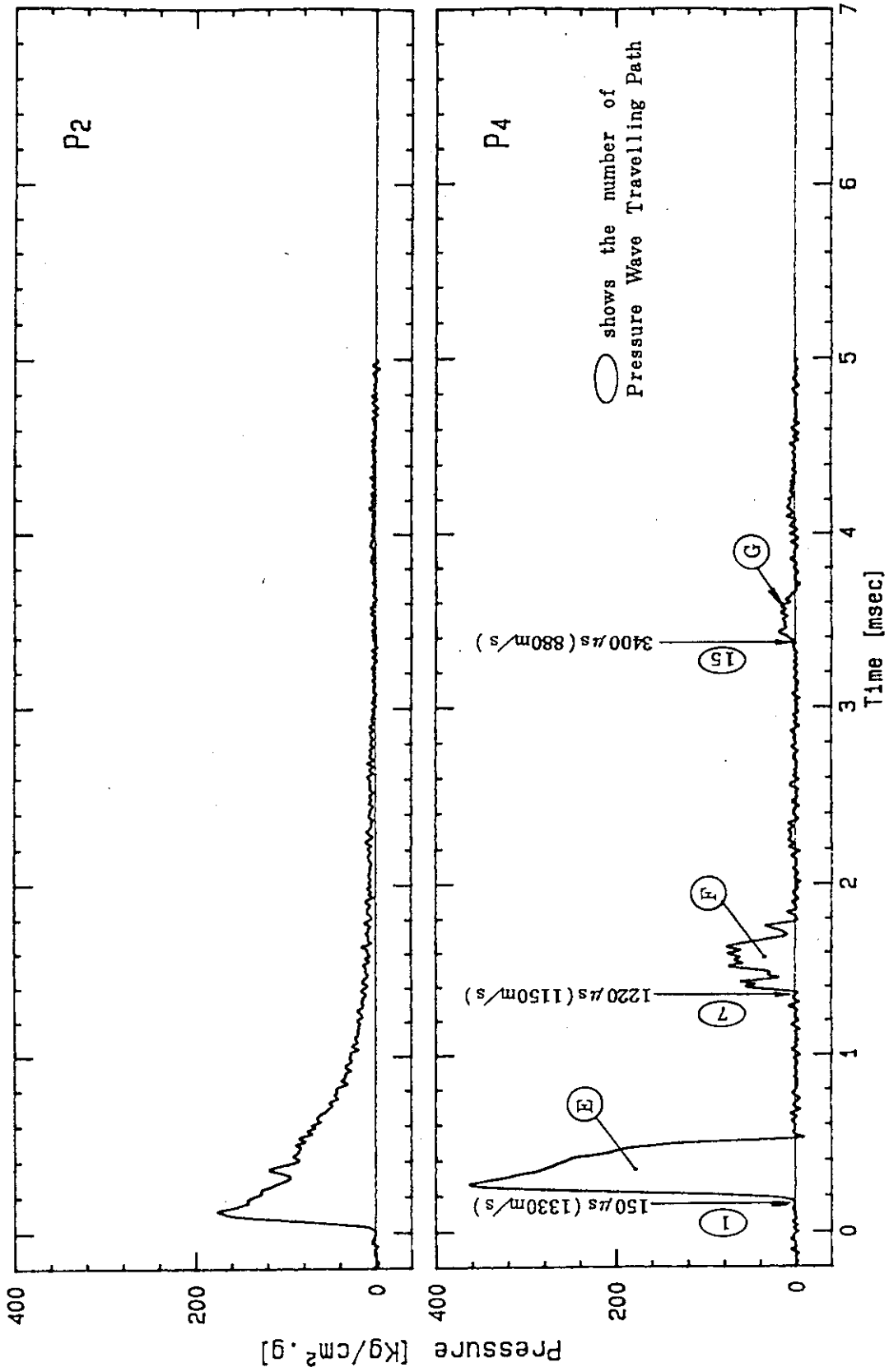


Fig. 4.6 Pressure History (Test No.A002)

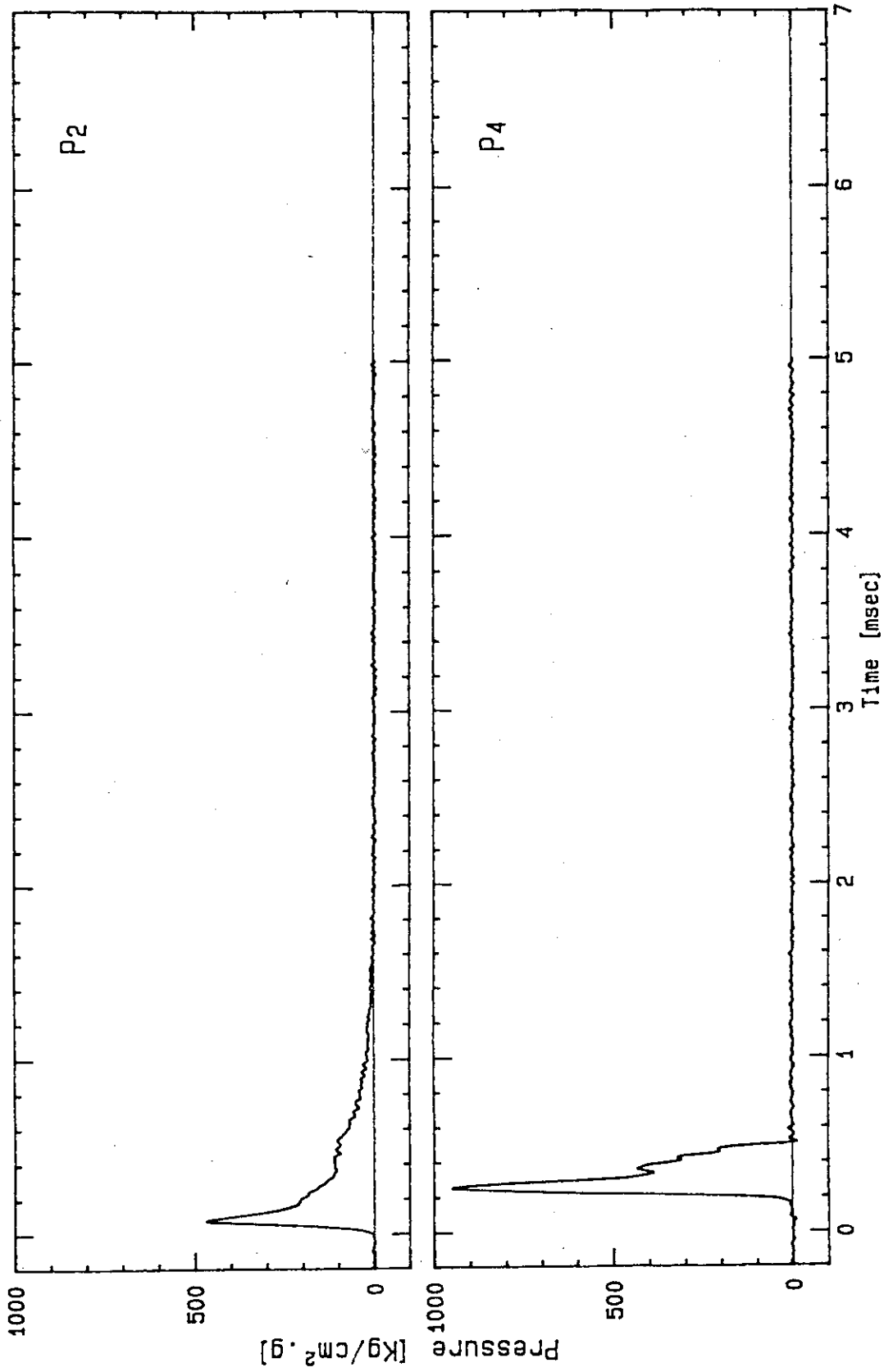


Fig. 4.7 Pressure History (Test No.A009)

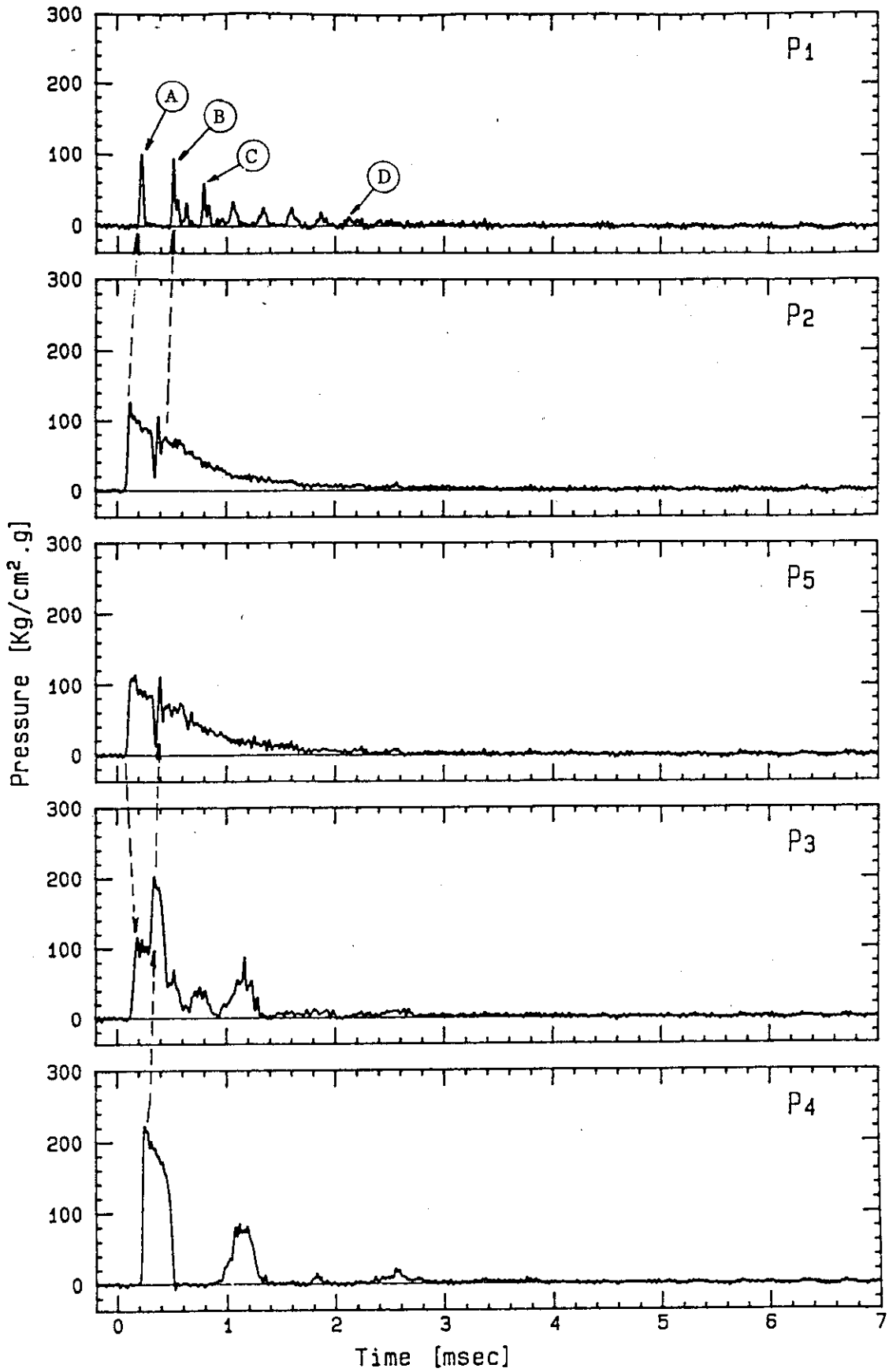


Fig. 4.8 Pressure History (Test No.A012)

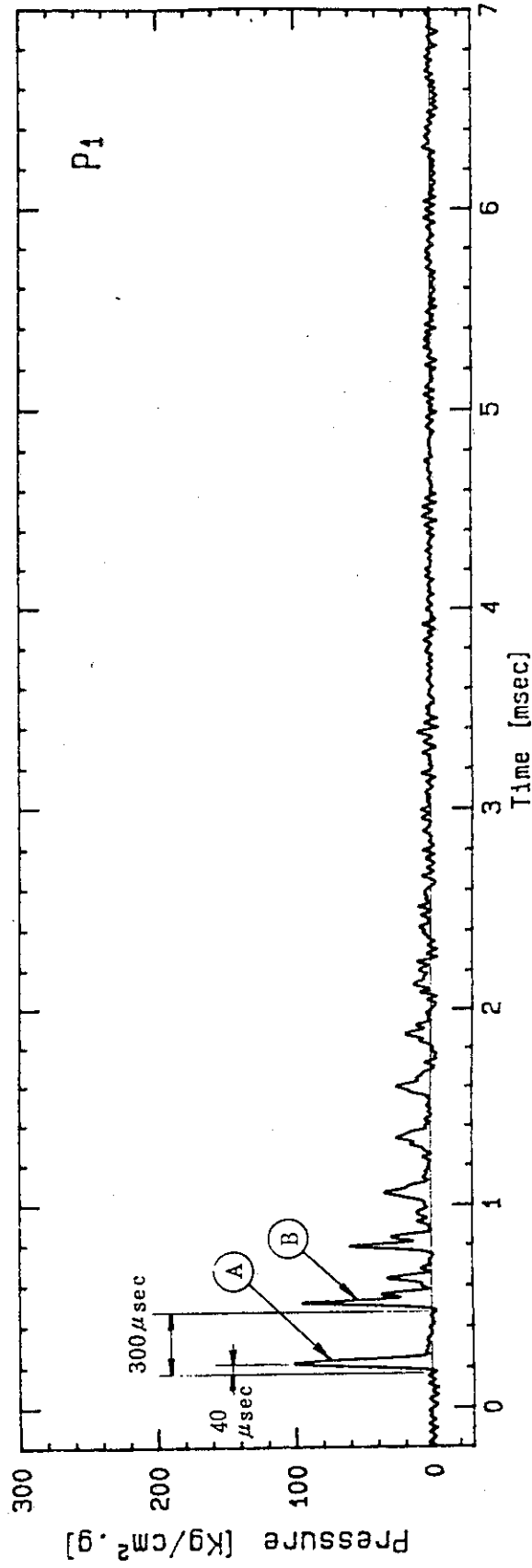


Fig. 4.9 Pressure History (Test No.A012)

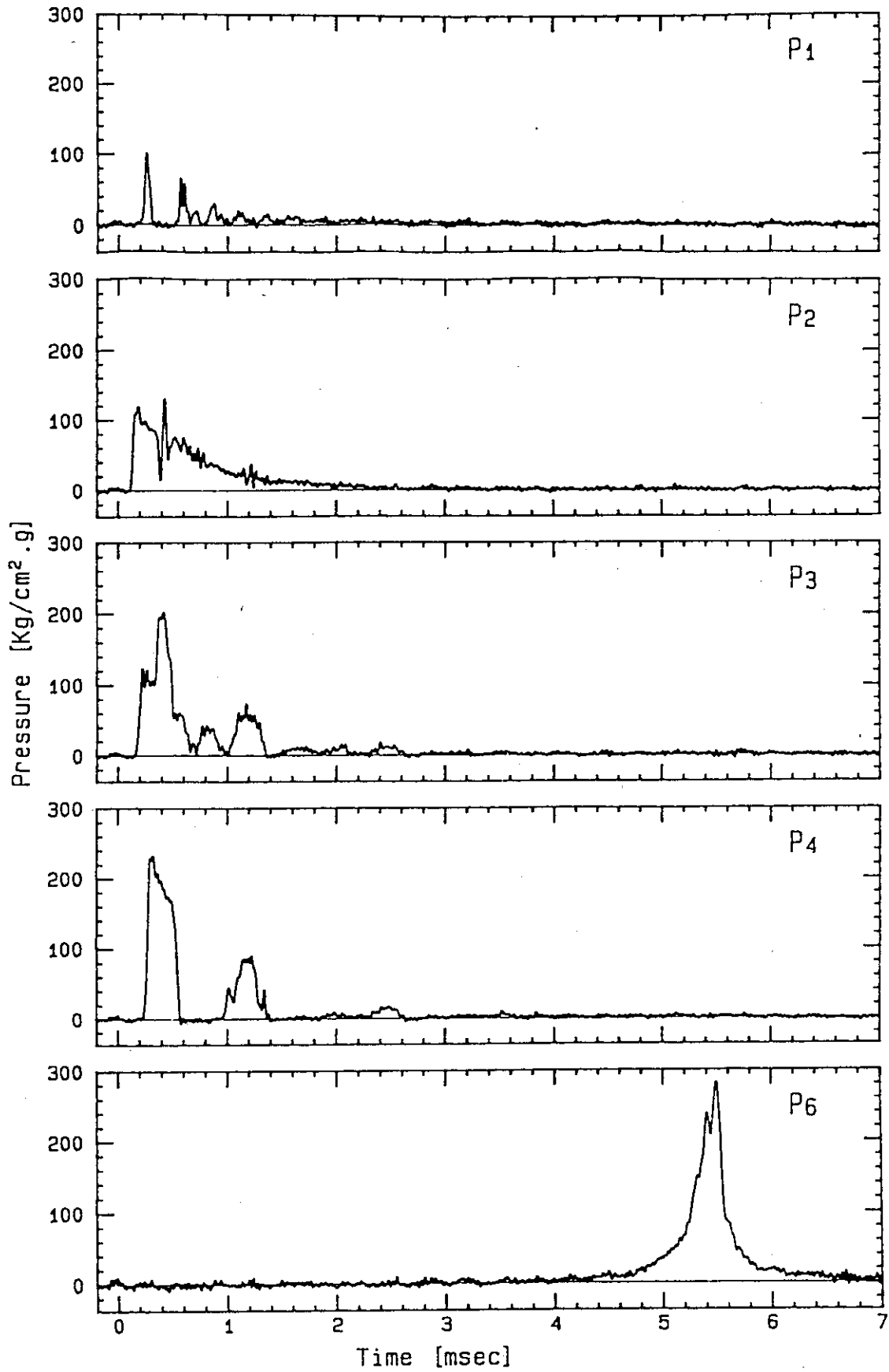


Fig. 4.10 Pressure History (Test No.A018)

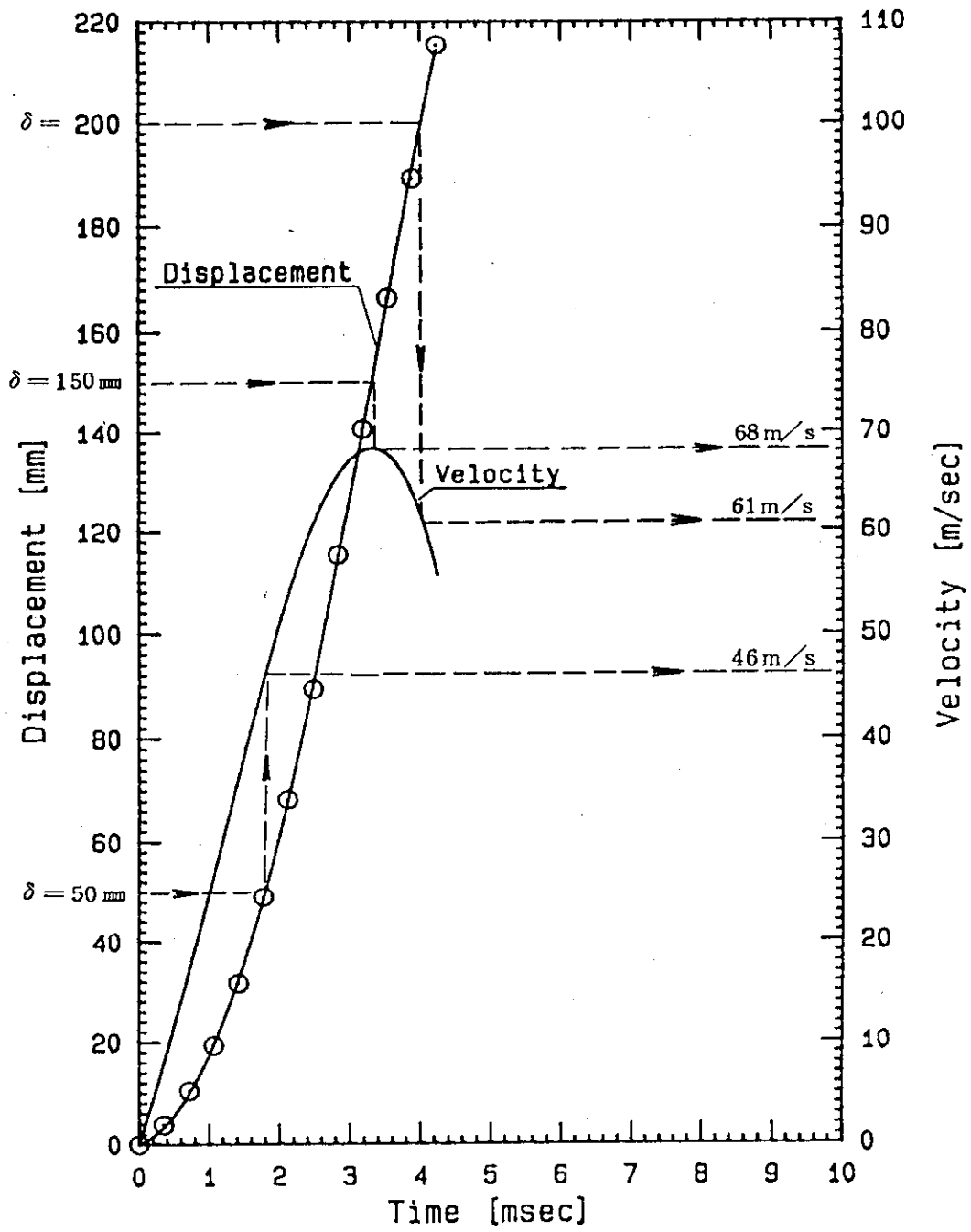


Fig. 4.11 Displacement & Velocity History (Test No.A016)

5. カバーガス効果評価試験

カバーガス効果評価試験の試験条件及び結果の概要を Table 5.1 及び 5.2 に示す。また、試験条件を模式化したものを Fig. 5.1 に示す。本試験での圧力波の第1波の波高値は $220\sim 240 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ でほぼ一定であったが、圧力波の形状は各々のパラメータに応じて変化していた。各試験での圧力履歴を Fig. 5.2～5.7 に示す。

5.1 スラグ・インパクト圧力

火薬特性試験で述べたように、プラグ下面 P_6 の圧力履歴よりスラグ・インパクト圧力を読み取ることができ、また、スラグの上昇速度及びエネルギーが算出できる。これらを各試験ケースについて算出し、Table 5.1 及び 5.2 に示す。スラグ・インパクト時のスラグ速度はカバーガス高さを P_6 の第1波の到達時間で除して平均速度を求めた。スラグ・インパクトは Fig. 5.2 の図中 (A) で示すように、周波数の高い圧力波を発生し、ピーク圧力については現象的にバラツキがある。従って、ピーク圧力から音速を仮定してスラグ・インパクト時の速度を算出するよりもインパクト時刻を読み取って算出する方が好ましいと判断される。火薬特性試験の項で述べたように、インパクト時の音速がどの程度か予測し難いことも理由の1つである。

Fig. 5.2 に示すようにスラグ・インパクト圧 (A) の後に出現する波はインパクト後、圧力波が径方向に伝播し、容器壁より反射し容器中心に集中した波であり、圧縮波が重なり、初期のインパクト圧よりも高い波高値となる。実験では、圧力センサ P_6 は、プラグ中心より 28mm ずれているため波高値のビルド・アップ（センサ位置が中心であれば、2倍の波高値）が明確とはならない。例えば、Fig. 5.2 の (B) に示すようにインパクト圧 (A) よりも低く現れる。従って、Fig. 5.3 で示す (E) は、たまたま径方向の圧縮波の交差が圧力センサ P_6 付近に発生したと判断できる。容器内径が 72mm であるため圧力波往復時間は音速を 1350 m/s とした場合、 $55 \mu\text{s}$ ($72\text{mm} / 2 \times 2 \text{回} / 1350\text{m/s}$) と計算され、周波数は約 10 kHz となる。

Fig. 5.3 において、 P_6 で発生したインパクト圧 (C) 波は、 P_1 において (F) 波として現れ、この間の時間差は約 $170 \mu\text{s}$ ($225\text{mm} / 1350\text{m/s}$) である。また、 P_6 の (E) 波は P_1 で同様の時間遅れを伴って (G) 波として現れている。

Fig. 5.3 において P_1 で現れたインパクト圧 (F) 及び (G) 波が P_2 に現れないことにより、爆源の燃焼ガスが発生してこれらの波の伝播を遮断していることが予測できる。

5.2 スラグのバウンディング効果

Fig. 5.3, 5.6 及び 5.7 に示す、容器底面 P_4 の圧力履歴において (H₁)～(H₃) で示す波は全てスラグ・インパクト後に発生しており、スラグがプラグ下部でバウンディング（はね返り）し、容器底面に水撃の二次波として現れたものである。また、これらの二次波は Test No. E002,

E 005～E 006 のケースだけに現れ、共通していることはカバーガス高さが 50, 150 mm と標準ケースに比べて少ないことである。

カバーガス高さが 50 mm の場合 (Test No. E 005) と 150 mm の場合 (Test No. E 006) を比較すると火薬上部のスラグ量 (816 cc) が同じであるにもかかわらずカバーガス高さが少ない場合の方がバウンディングによる二次波 (Fig. 5.5 ㉔) の出現が顕著で波高値、持続時間とも大きい。これは、上図に示すようなピストンモデルにおいて考えると、同一のピストン仕事量に対してカバーガス体積の少ない方が圧縮効果は高く、即ちバウンディング効果が大きいことからわかる。

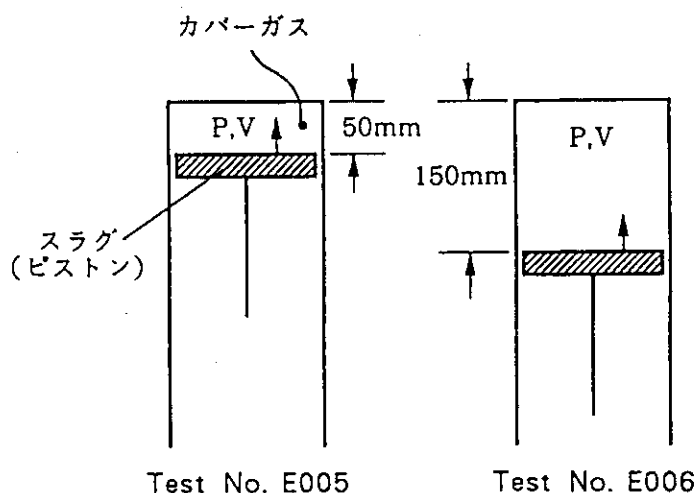


Fig. 5.5 (Test No. E 005) において P_6 に示すスラグ・インパクト終了時刻と P_4 に示すバウンディング二次波の立ち上がり時刻の差 ($5.7 - 1.6 = 4.1$ ms) を用いてカバーガス高さ (50 mm) を除してスラグのバウンディング速度を予測すれば、約 12 m/s となる。ここで爆源より容器底面までに圧力波が伝播する時間 0.26 ms (345 mm / 1350 m/s) は無視した。この速度と音速及び密度の積より、バウンディング二次波の初期波高値を予測すると 165 kg/cm²·g (0.0102 kg·s²/cm²·m² × 12 m/s × 1350 m/s) となる。

実際には、Fig. 5.5 の P_4 に示すように、初期波高値は約 185 kg/cm²·g であり、近い値を示している。この図の P_3 、 P_2 に示すように P_4 で発生したバウンディング二次波は、漸次容器上方へ伝播し減衰していく。減衰速度はインパルス値が小さいため早い。

Test No. E 004 は、E 006 と同様、カバーガス高さは 150 mm であるが、Fig. 5.4 の P_4 に示すように、バウンディング二次波は読み取れない程度であった (図中 ㉑) 。

共にカバーガス高さは、50 mm であり、スラグ量と爆源位置の異なる Test No. E 002 と E 005 を比較すると、バウンディング二次波の形状と出現時刻に差があることがわかる (Fig. 5.3 ㉒) 及び Fig. 5.5 ㉔) を比較して参照)。爆源エネルギーが同じであることから、スラグ量の少ない Test No. E 005 の方が E 002 に比べスラグ速度が大きく、結果的に ㉔) 波の方が波高値が高くなる (波高値はスラグ重量に無関係で、速度に依存して定まる) 。

また、㉔) 波の立ち上がりが急峻なことも、この速度が大きい事に依存する。一方、㉒) 波はなだらかな立ち上がりを示す。㉒) 波の方が持続時間が長いのは、火薬上方のスラグ量が大きく (軸方向距離が大きく伝播時間が長い)、火薬下方の液面にインパクトする時間が長くなることによる。バウンディング二次波の出現時刻は、爆源が容器底面に近い ㉒) 波の方が ㉔) 波よりも早い。この時間差は、この事象における音速が定まらないため、予測が難しい。

5.3 カバーガス圧縮効果

スラグの上昇速度は、火薬特性試験の結果から、最高値を持つ履歴を有し、薬量 1.35g の場合、カバーガス高さが 150mm 付近で速度は減少に向かうことが把握された (Fig. 4.10 参照)。

Fig. 4.10 のスラグ速度履歴が示すように、カバーガス高さが 100mm 程度までは、速度勾配が一定と見なすことができる。従って、カバーガス高さ 50mm の場合のカバーガス効果試験におけるスラグ平均速度と比較することができ、カバーガス圧縮効果が推定可能である。

開放状態で実施した Test No. A016 は圧力源の波高値が $200 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ であり、密閉状態で実施した Test No. E005 は $240 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ であった。これら二者を比較して、カバーガスの圧縮効果を比較してみる。

Fig. 4.10 に示すように、Test No. A016 のカバーガス高さ (δ) が 50mm の時のスラグ速度は 46 m/s である。一方、Test No. E005 のインパクト時点までのスラグ平均速度は、 33 m/s であり、カバーガス高さ 50mm の場合の圧縮効果が大であることがわかる。

同じカバーガス高さ 50mm の Test No. E002 は、スラグ量が標準より多く、圧力源のエネルギーが一定であることからスラグ速度は減少するため、比較することはできない。カバーガス高さが 195mm の標準ケースの場合、50mm の場合に比べて圧縮許容力が大きく、かつ、スラグ速度が十分に発達するため、カバーガス圧縮効果は少ないと判断できる。

5.4 カバーガス高さの効果

Table. 5.1 及び 5.2 を基に、圧力源位置が一定な場合とスラグ重量が一定な場合とに分けて、カバーガス高さに対するスラグ速度、スラグ・エネルギー等の変化を Fig. 5.8 及び 5.9 に示す。入力した圧力源エネルギーは一定であるものの、カバーガス高さに応じてスラグ速度は増加し、結果としてスラグ・エネルギーは増加する。スラグ重量が変わる場合でも、それに見合うようにスラグ速度が変化し (スラグ重量が小さければスラグ速度は上昇する)、カバーガス高さが増加すればスラグ・エネルギーは増加する。

また、カバーガス高さと同じ場合、カバーガス重量の小さい方がスラグ速度は大きい、スラグ・エネルギーは小さい (Test No. E002 と E005, E004 と E006 及び E001 と E003 の比較)。

Fig. 5.8 及び 5.9 にカバーガス高さに対する各パラメータ効果を示す。同図には、スラグ・インパクト圧力を併せて示すが、 P_6 センサ位置が容器中心よりずれていること、液面が同じレベルでプラグ下面にはインパクトしないこと等の理由により、前述のとおりインパクト圧力はバラツキがある。

カバーガス高さが小さい場合には、前述のバウンディング二次波が発生し、かつ、カバーガスが全く存在しない場合には、事項で述べるように圧力の封じ込め (軸方向の上下にデッド・エンドを生じる) によりインパルスが大きく静圧効果が大となる。

今回の実験より得られた最大速度距離とスラグ・エネルギー (Table 7.2 参照) の関係を Fig. 5.10 に示す。

5.5 カバーガスが存在しない場合の圧力履歴

Fig. 5.7に示すように、カバーガスが存在しない体系では、デッド・エンド効果により、全体的に圧力波の持続時間が長くなる。この場合でも、底面 P_4 の初期圧力波の波高値は爆源のその2倍となって出現する。一方、容器上部 P_1 では液面が存在しないため、膨張波が返らないので、爆源と同様、圧力波が持続することになる。さらに、 P_1 では、底面からの圧力波が重なり初期波高値よりも高い波(図中①)が出現する。

また、燃焼ガスは水の圧縮分及び容器弾性変形分膨張し、また、 P_4 では負圧の存在が予測できる。

カバーガスが存在しない場合でも、火薬上方のスラグは容器上部に追い込まれ、スラグ・インパクトに似た圧力が発生する。Fig. 5.7に示すように、発破後約0.3 ms後にインパクトし、インパクト圧力は $420 \text{ kg/sm}^2 \cdot \text{g}$ であった。この場合、爆源からプラグ下面までの距離395 mmを音速1350 m/sで除した値と見合っている。

また、プラグ下面 P_6 で発生したインパクト圧は、容器底面との圧縮波の往復による軸方向の振動が見られる。周期は燃焼ガスによる音速の低下を考慮して約1 ms ($595 \text{ mm} \times 2 \text{ 回} / 1200 \text{ m/s}$)となる。

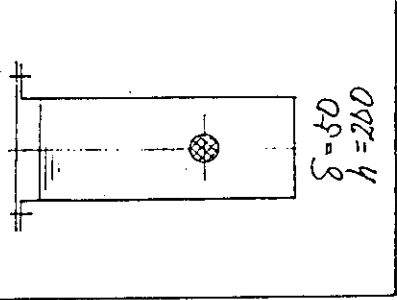
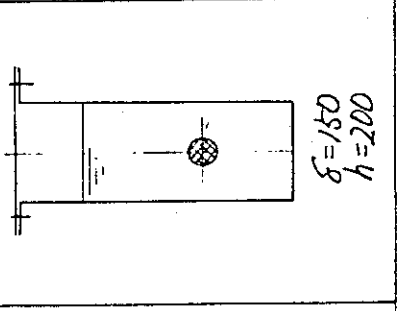
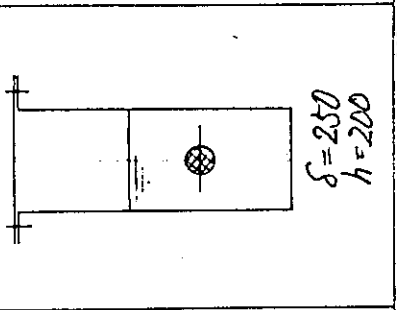
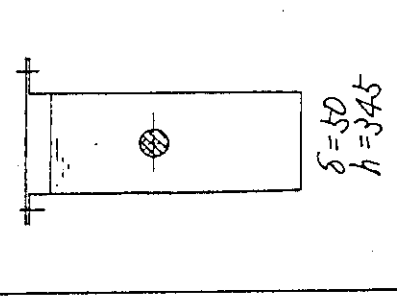
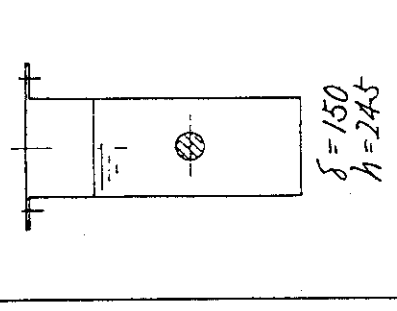
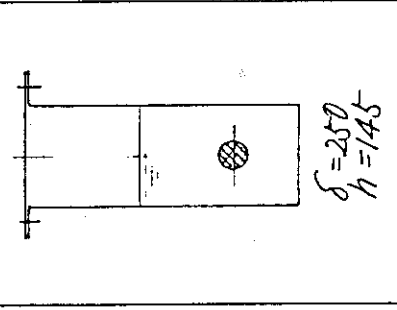
今回の圧力履歴から予想されるように、カバーガスが存在しない場合のカプセルの変形は、ほとんどが爆源近傍で発生し、これに連成した圧力波は急速に減衰するため、たとえスラグ・インパクトがあっても爆源近傍以外の位置での変形はきわめて小さいと判断できる。

Table 5.1 Cover-gas Effects at Fixed Explosion Level

Item	Test No.	E 0 0 7	E 0 0 2	E 0 0 4	E 0 2 2	E 0 0 1
Cover-gas Distance δ [mm]		0	50	150	195	250
Slug Volume upper Explosive [cc]		1608	1404	997	814	590
Source Pressure [kg/cm ² ·g]		225	230	230	210	220
Impact Pressure [kg/cm ² ·g]		420	600	400	760	430
Time of Impact [msec]		0.32	1.85	3.51	3.9	4.15
Average Velocity at Impact [msec]		—	27	43	50	60
Slug Energy at Impact [cal]		—	122	220	243	254
Explosion Height [mm]		200	200	200	200	200
Charge [g]		1.35	1.35	1.35	1.35	1.35

Table 5.2 Cover-gas Effects at Constant Slug Volume

Item	Test No.	E 0 0 5	E 0 0 6	E 0 2 2	E 0 0 3
Cover-gas Distance δ [mm]		50	150	195	250
Source Pressure [kg/cm ² ·g]		240	220	206	225
Impact Pressure [kg/cm ² ·g]		1350	420	760	690
Time of Impact [msec]		1.48	3.25	3.9	4.75
Average Velocity at Impact [msec]		33	46	50	52
Slug Energy at Impact [cal]		106	206	243	263
Slug Volume upper Explosive [cc]		814	814	814	814
Charge [g]		1.35	1.35	1.35	1.35

Cover-gas Level		
Test No. E002	Test No. E004	Test No. E007
		
$\delta = 50$ $h = 200$	$\delta = 150$ $h = 200$	$\delta = 0$ (No Cover-gas) $h = 200$
Explosion Level		
Test No. E005	Test No. E006	Test No. E003
		
$\delta = 50$ $h = 345$	$\delta = 150$ $h = 245$	$\delta = 250$ $h = 145$

(Unit: mm)

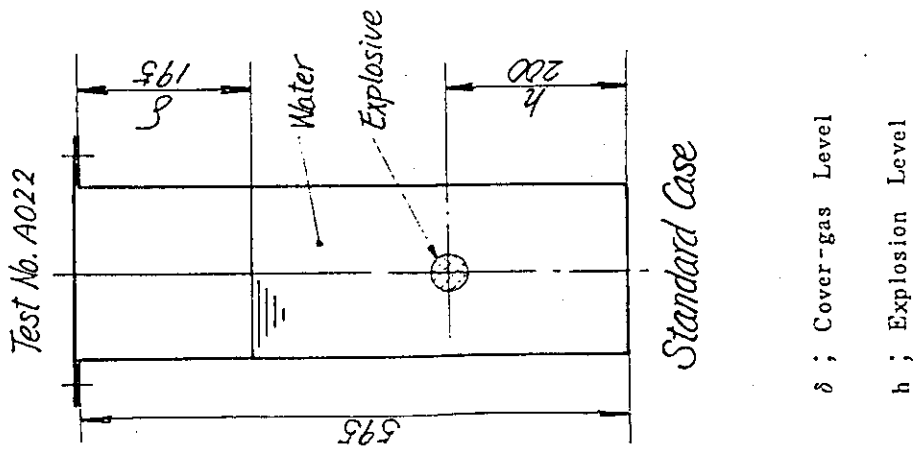


Fig. 5.1 Parameters of Cover-gas Effect Tests

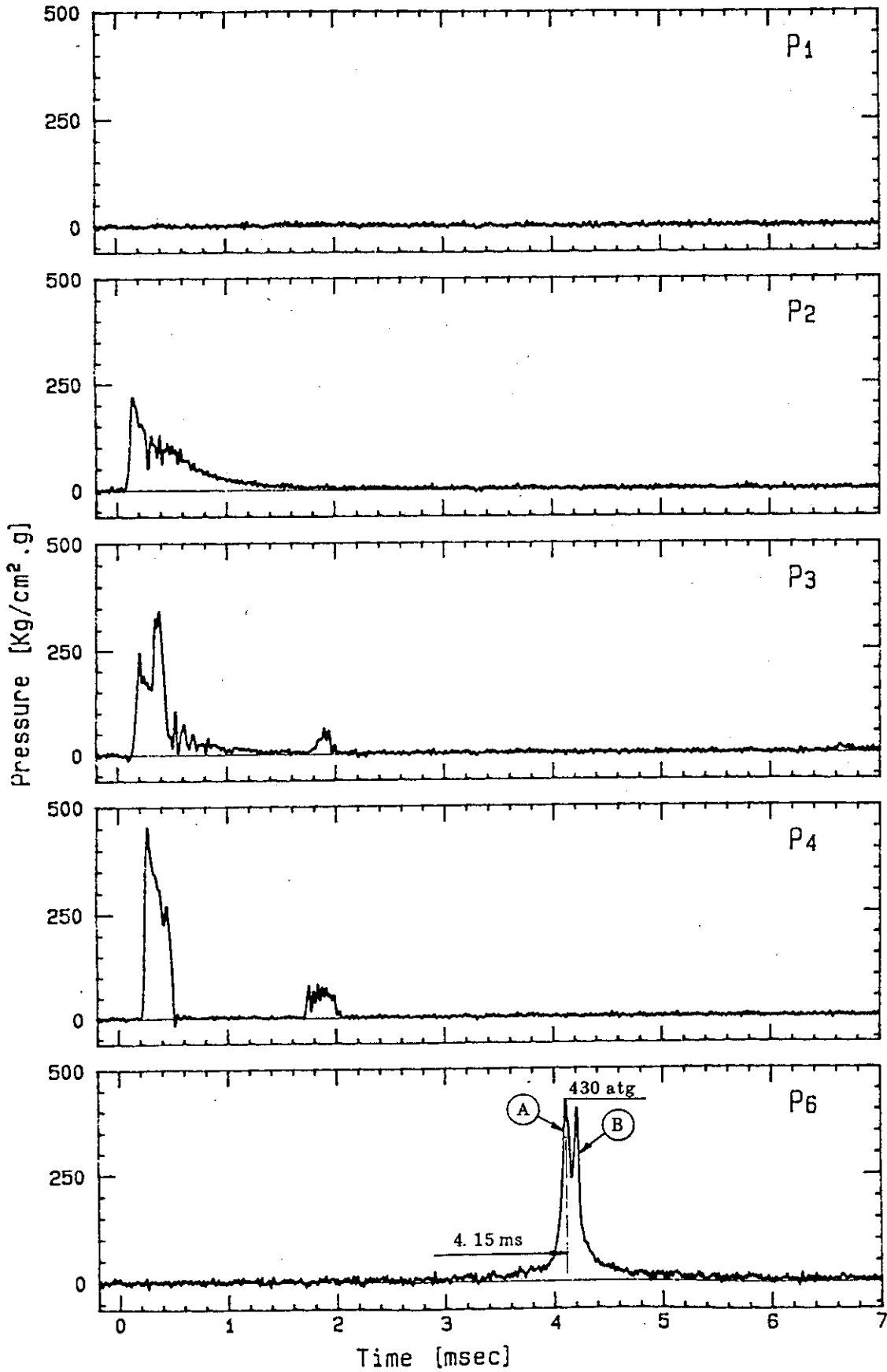


Fig. 5.2 Pressure History (Test No.E001)

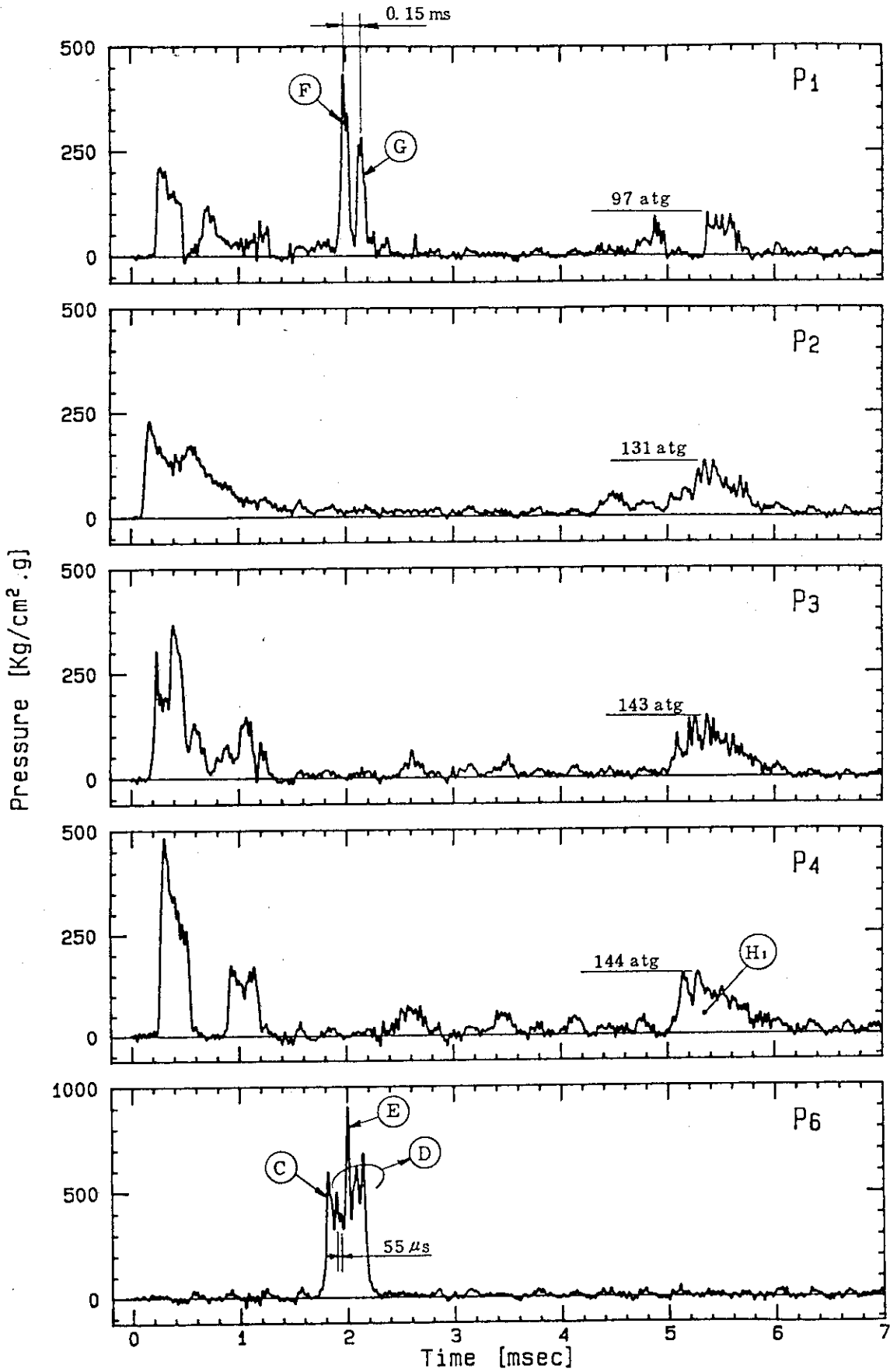


Fig. 5.3 Pressure History (Test No.E002)

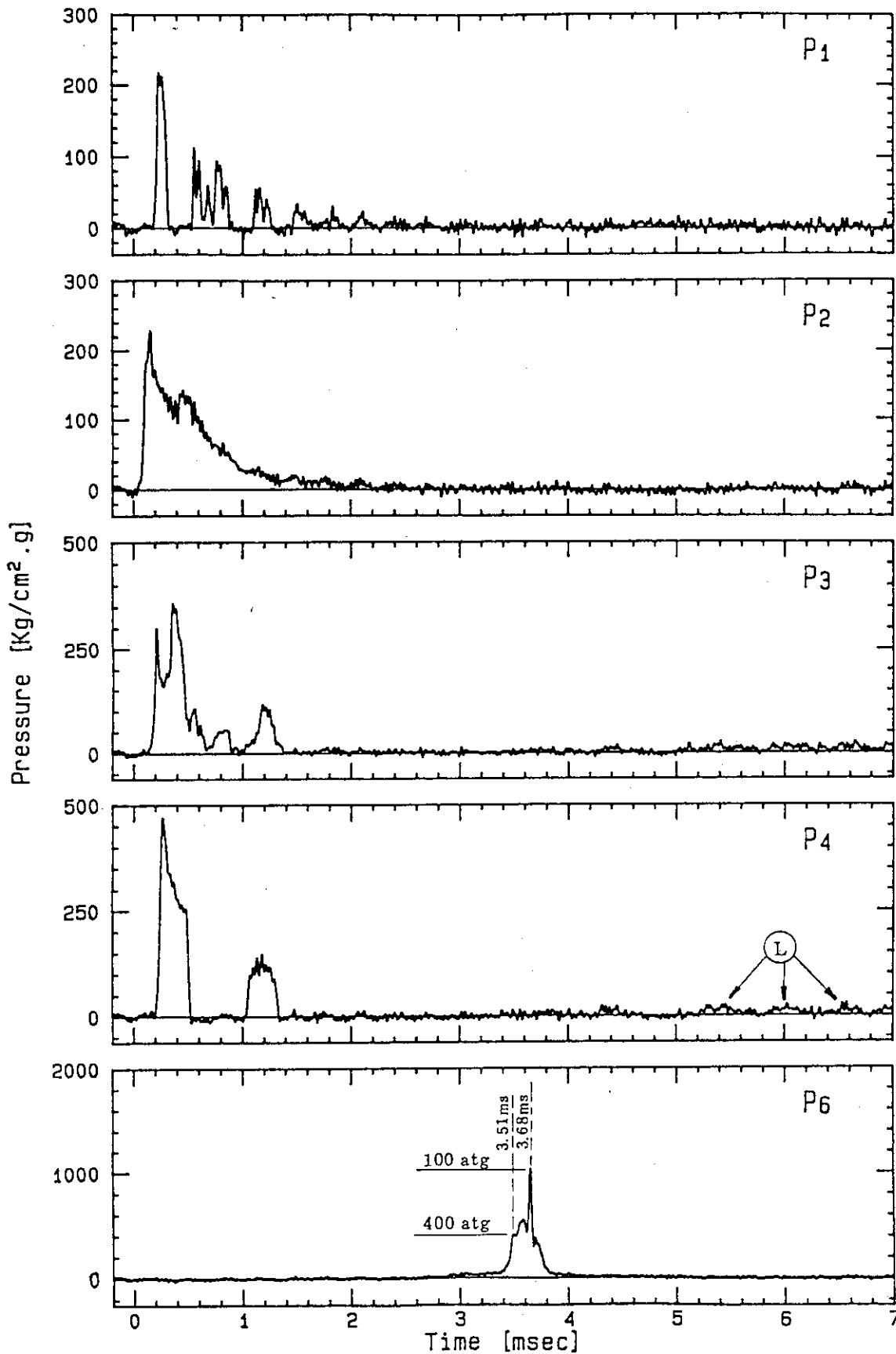


Fig. 5.4 Pressure History (Test No.E004)

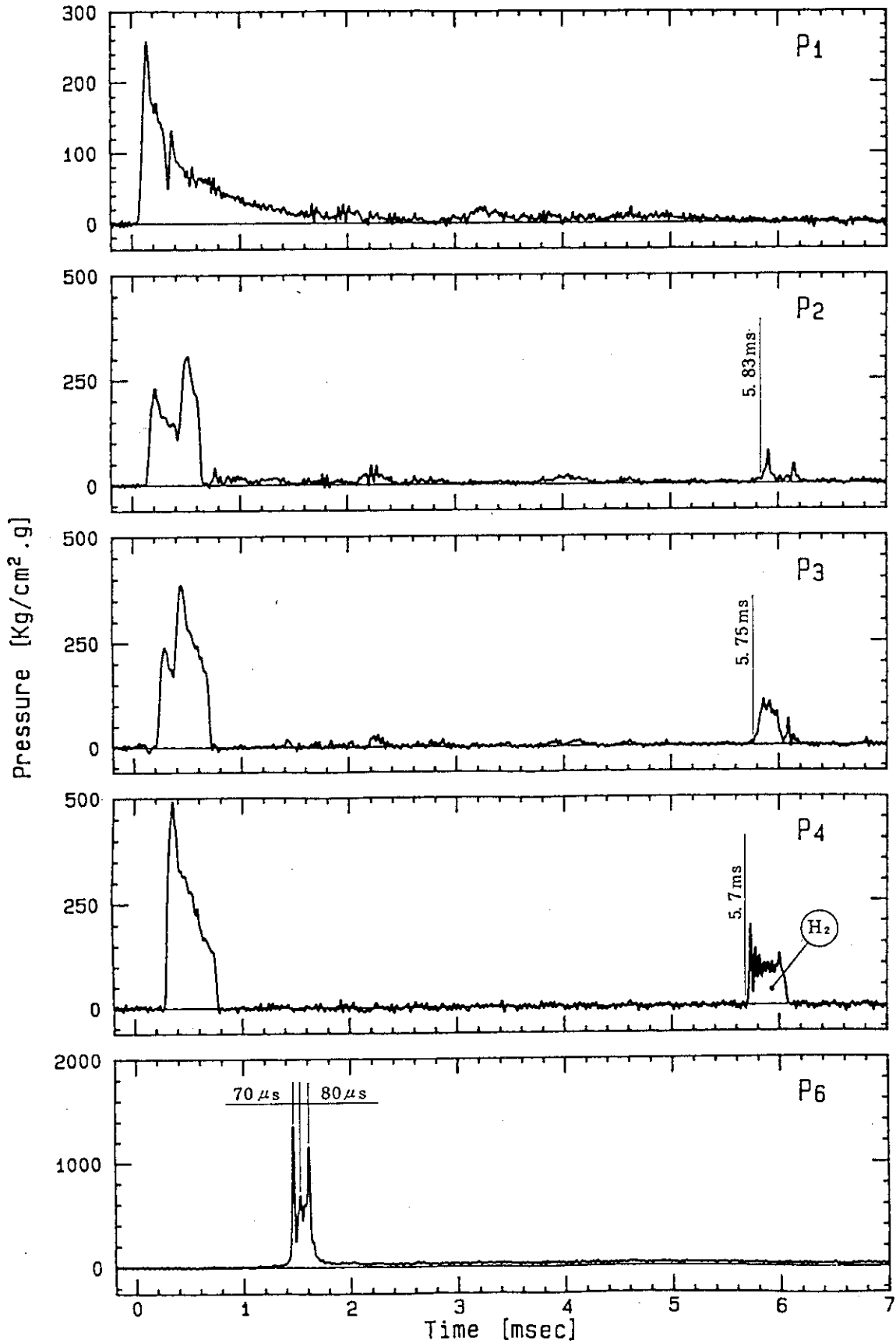


Fig. 5.5 Pressure History (Test No.E005)

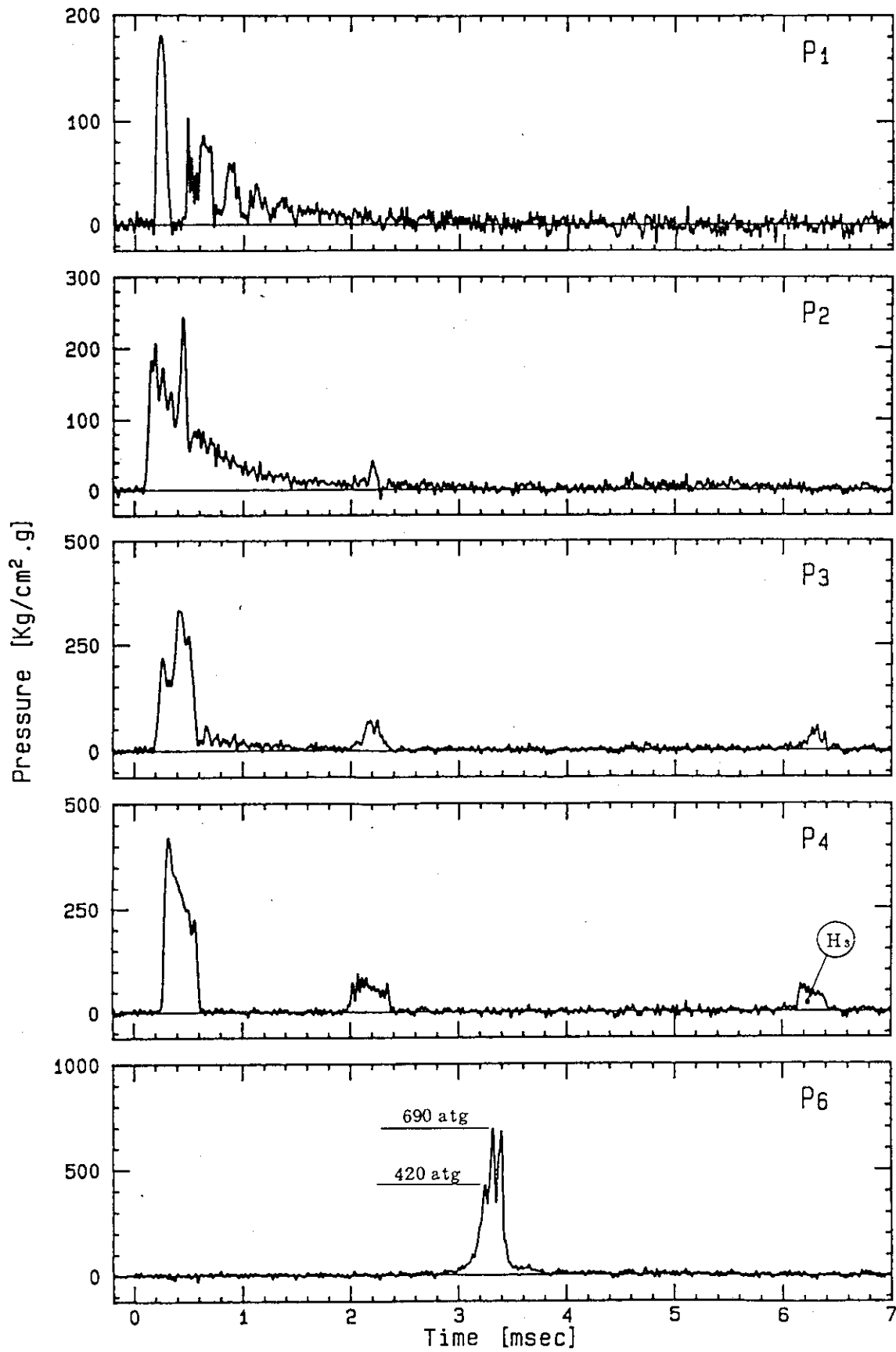


Fig. 5.6 Pressure History. (Test No.E006)

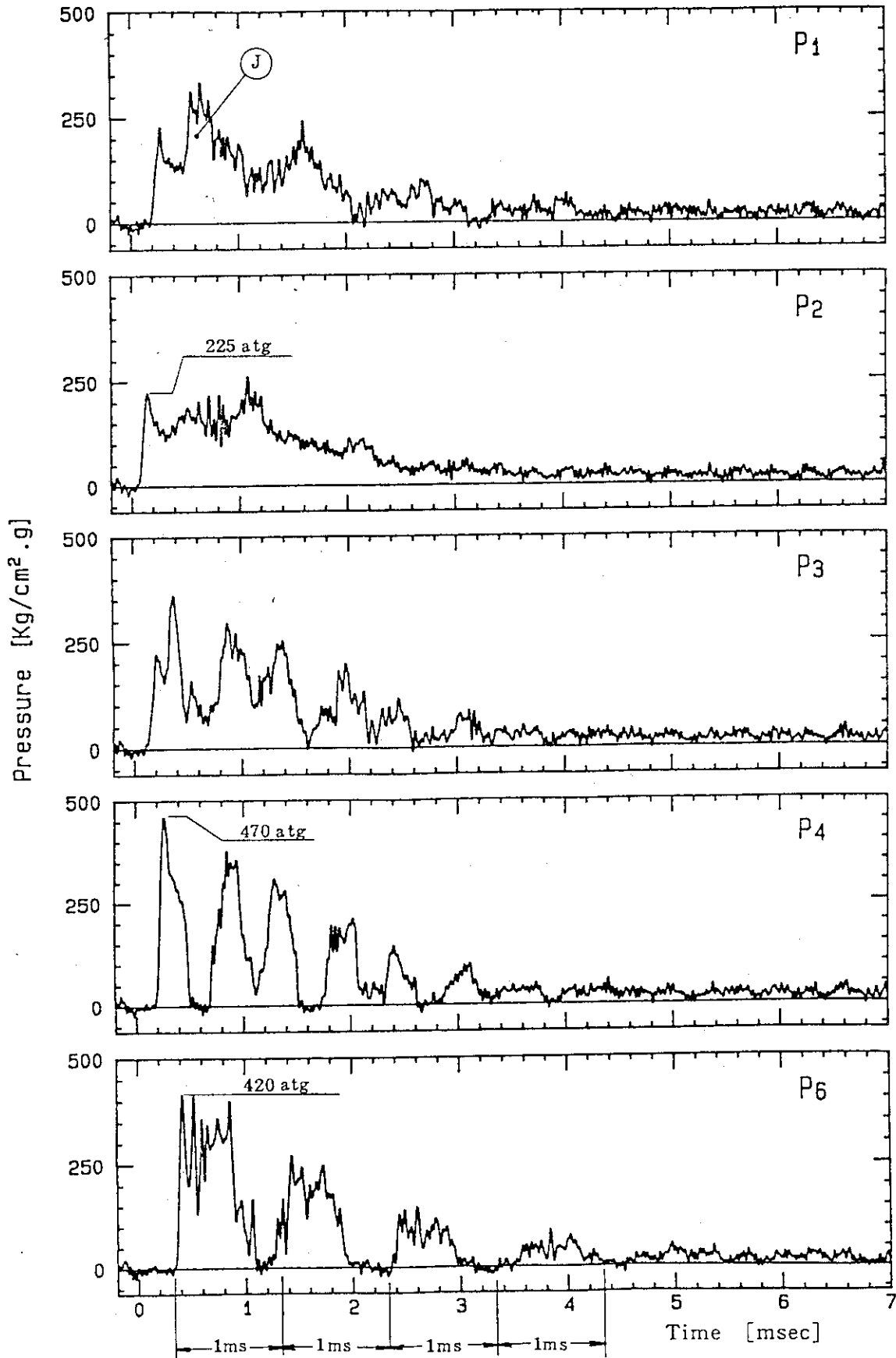


Fig. 5.7 Pressure History (Test No.E007)

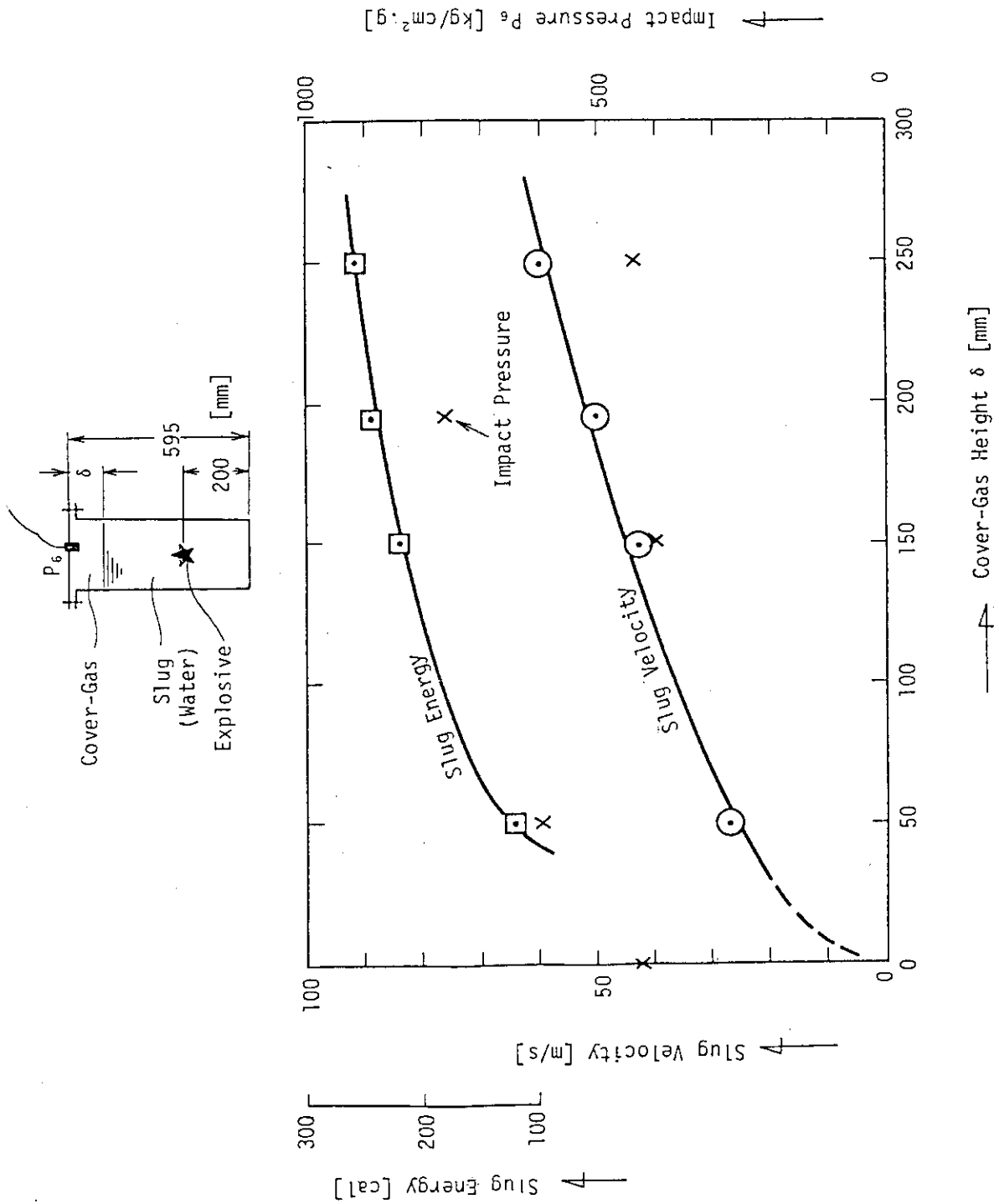


Fig. 5.8 Cover-Gas Effects at Fixed Explosion Level

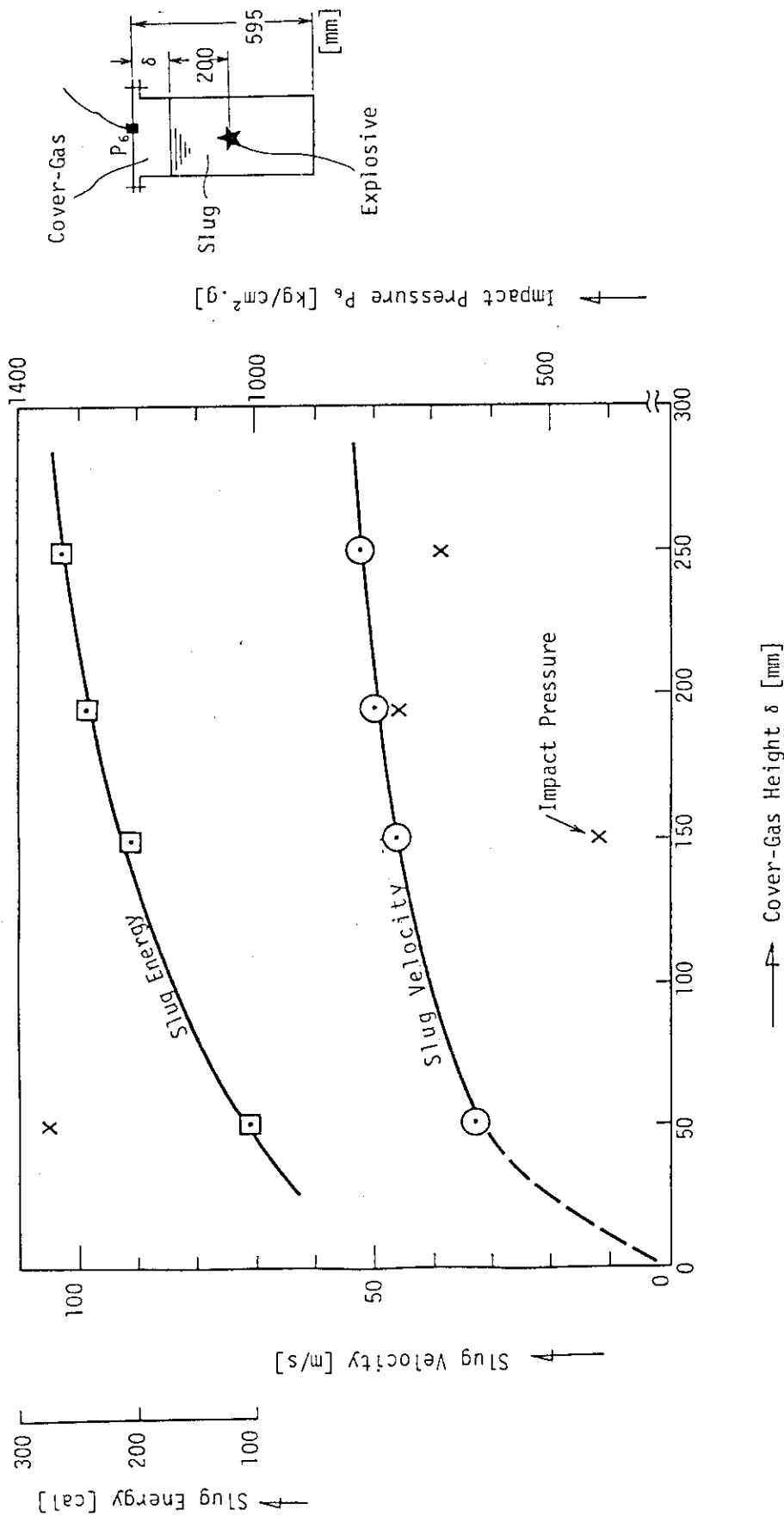


Fig. 5.9 Cover-Gas Effects at Constant Slug Weight

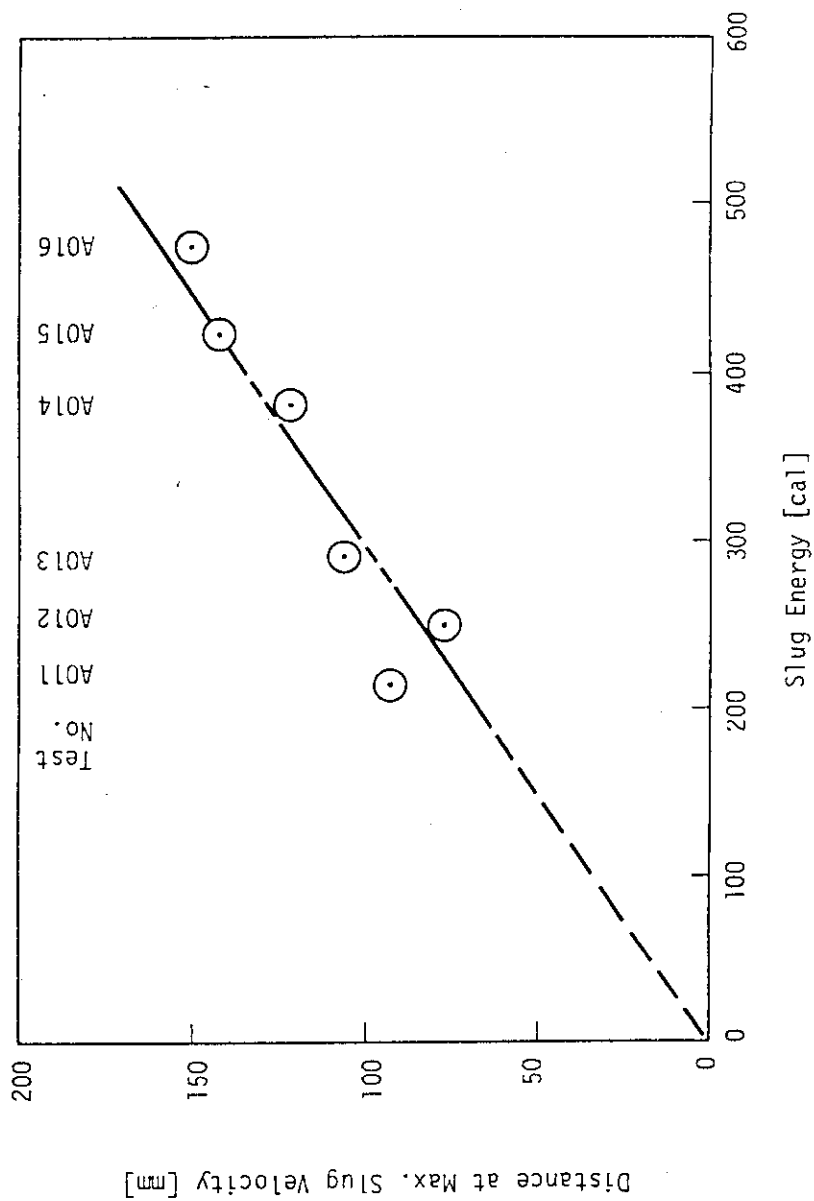


Fig. 5.10 Distance at Max. Slug Velocity v.s. Slug Energy

6. 内部容器試験

内部容器試験の試験リストをTable 6.1に、爆源位置、水量及び計測点をFig. 6.1に示す。圧力は容器底部 (P_4) とプラグ下面 (P_6) の2点、歪は周、軸方向合せて18点の合計20点計測した。また、変形対象部分の直管部には、表面に25mmピッチでマーキング・ラインをつけ、残留歪を計測した。

試験は、同一試験体で6回 (Test No. BP11~BP16)、他にバージン材の試験体を用いて確認 (Test No. BP21) を行った。薬量は、爆源の波高値を $210 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ とするため、当初 1.35 g で行ったが、試験体に有意な変形が生じなかったため、薬量を 3 g に増加した (爆源波高値約 $400 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$)。

各試験での圧力波高値、ピーク歪、各発生時刻及び最大残留歪を整理したものをTable 6.2に示す。Table 6.2の爆源波高値は、容器底部圧力 P_4 の波高値の $1/2$ を示す。また、各試験での圧力及び歪の時刻履歴をFig. 6.2~6.17に示す。

6.1 応力波の到達

Fig. 6.4~6.7 (Test No. BP12) の (A) あるいはFig. 6.14~6.17 (Test No. BP21) の (B)、(C) に示すように、発破直後に応力波が到達する。

右図に示すような軸歪ゲージ S_2 と S_{12} の位置関係とFig. 6.4の S_2 及びFig. 6.7の S_{12} の歪の立ち上がり時刻の差より、応力波の音速を求めると読み取り誤差があり、概略ではあるが約 5000 m/s [($260 - 100$) $\text{mm} / (0.4 - 0.37) \text{ ms}$] となって鋼材中の音速に見合う。

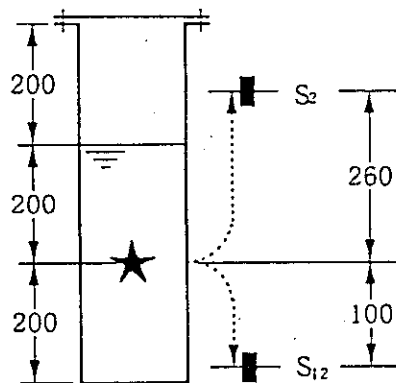


Fig. 6.14の S_1 と S_2 について歪を拡大するとFig. 6.18のようになる。

この図からわかるように、初期応力波の到達により軸方向に伸び (C)、ポアソン比に見合っ
て径方向に圧縮 (B) する弾性挙動が観察できる。

スラグ・インパクト時には、逆転して径方向に伸び、軸方向に圧縮となることがわかる。

6.2 二段で形成される試験体下部の変形

Fig. 6.17の S_{11} あるいは S_{15} に示すように歪は二段で形成される。一段目 (図中 (D)) は、爆源からの正の進行波によって直接立ち上がり、二段目 (図中 (E)) は試験体底面からの正の反射波によってビルド・アップされる。Fig. 6.17の S_{11} の時間軸を拡大してFig. 6.19に示す。

反射波の方が波高値が大きく、それに見合って⑤部の歪速度は④に比べて大きいことが観測される。Fig. 6.9, 6.11及び6.13においても同様なことがいえる。

また、カバーガスが存在しない場合はスラグの上層部からの圧縮波（疑似スラグ・インパクト）によって三段目の歪のビルト・アップが存在する。

6.3 スラグ・インパクトとカバーガス高さの効果

Fig. 6.8に示すように、歪履歴からもスラグ・インパクトに呼応した挙動が観測できる。また、Fig. 6.10と6.12を比較すれば、カバーガス高さが異なる場合の歪挙動効果が明かとなる。即ち、カバーガス高さが200mmの時はスラグ・インパクトが発生しても、歪のビルド・アップがない程度である。一方、カバーガス高さが50mmの場合は、歪硬化があるにもかかわらず周方向歪 S_1 , S_3 が大きくなり S_4 では0.4%の残留歪となった。

カバーガス効果試験で述べたように、カバーガス高さが50mmの場合は、スラグ速度は飽和速度に達していないため増長の一方であり、スラグ量が大きいこともあって、首下部の変形が顕著となる。試験後の直径の測定から算出した残留周歪分布はFig. 6.20に示すとおりとなり、首下部変形がスラグ・インパクトにより局所化する。

Fig. 6.20には、カバーガス高さ200mmの場合の試験結果を併せてプロットして比較したように、この場合は試験体下部だけの変形となる。

薬量3gの場合のスラグ速度履歴は、Fig. 6.3に示すインパクト時刻より平均スラグ速度73 m/s (200mm / 2.73ms) が予測される。Fig. 6.2の P_6 に示すように、平均スラグ速度30 m/s (200mm / 6.53ms) のTest No. BP11では、圧力履歴の立ち上がりが緩慢でピーク圧力が低く、かつ、Fig. 6.3の P_6 のような高周波の波は観測されていない。

6.4 歪 硬 果

同一試験体で残留歪の現れたTest No. BP14とBP15を比較すれば、歪硬果の程度が判断できる。即ち、Fig. 6.9の S_{11} が約0.8%に対し、Fig. 6.11の S_{11} が約0.4%と半減し、歪硬化により降伏点が上昇していることがわかる。

Fig. 6.20では、試験体下部の変形について歪硬化の影響が見られる。

6.5 減少の時刻歴

発破後の衝撃挙動の時刻歴についてまとめると、右図に下すようになる。

今まで述べてきたように、スラグの運動エネルギーが充分カバーガスの圧縮消費と位置エネルギーに転換されれば、スラグ・インパクトが発生しても試験体首下部の変形はわずかとなる。一方、スラグの運動エネルギーが充分残存すれば、それは首下部の歪エネルギーに転換されて減少が終結する。

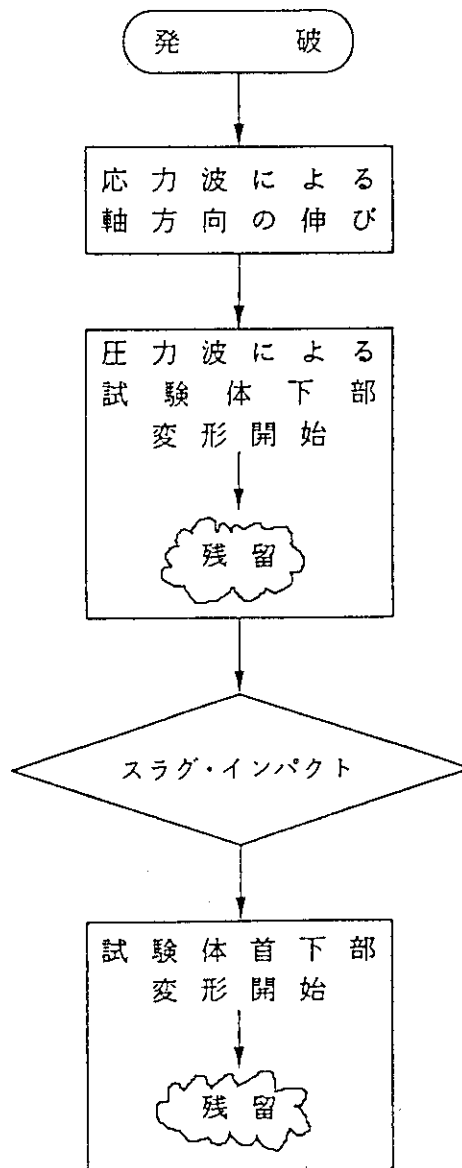


Table 6.1 List of Uni-Capsule Tests

Test Body No.	Test No.	Charge [g]	Level of Explosive [mm]	Cover-gas Height [mm]
1	B P 1 1	0. 8	2 0 0	2 0 0
	B P 1 2	1. 3 5	ditto	ditto
	B P 1 3	ditto	ditto	ditto
	B P 1 4	3. 0	ditto	ditto
	B P 1 5	ditto	ditto	ditto
	B P 1 6	ditto	ditto	5 0
2	B P 2 1	ditto	ditto	2 0 0

Table 6.2 List of Uni-Capsule Test Results

charge [g]	Test No.	Peak Pressure				Peak Strain				Maximum Residual Circumferential Strain [%] (place)
		Expected Source Pressure ($\frac{1}{2} \cdot P_s$) [kg/cm ² ·g]	P _s [kg/cm ² ·g]	Slug Impact		Longitudinal		Circumferential		
				P _s [kg/cm ² ·g]	Rising Time [ms]	S _l [%]	Rising Time [ms]	S _c [%]	Rising Time [ms]	
0. 8	B P 1 1	1 1 5	2 3 0	1 6 0	6. 5 3	-	-	-	-	-
1. 3 5	B P 1 2	2 1 5	4 3 0	7 8 0	4. 0 7	0. 1 8	0. 4 0	0. 1 8	0. 3 7	-
	B P 1 3	2 2 0	4 4 0	7 1 0	4. 1 7	0. 1 0	0. 4 0	0. 1 3	0. 3 4	-
3. 0	B P 1 4	-	-	-	-	0. 2 1	0. 4 5	1. 0	0. 4 0	0. 8 (S _{ll})
	B P 1 5	4 2 0	8 4 0	-	-	0. 2 0	0. 4 0	0. 6 2	0. 4 0	0. 4 3 (S _{ll})
	B P 1 6	4 0 5	8 1 0	-	-	0. 2 0	0. 4 0	0. 6 2	0. 4 0	0. 4 3 (S _{ll})
	Virgin B P 2 1	4 2 0	8 4 0	1 3 2 0	2. 7 3	0. 1 8	0. 4 5	1. 2 2	0. 4 0	1. 1 (S _{ll})

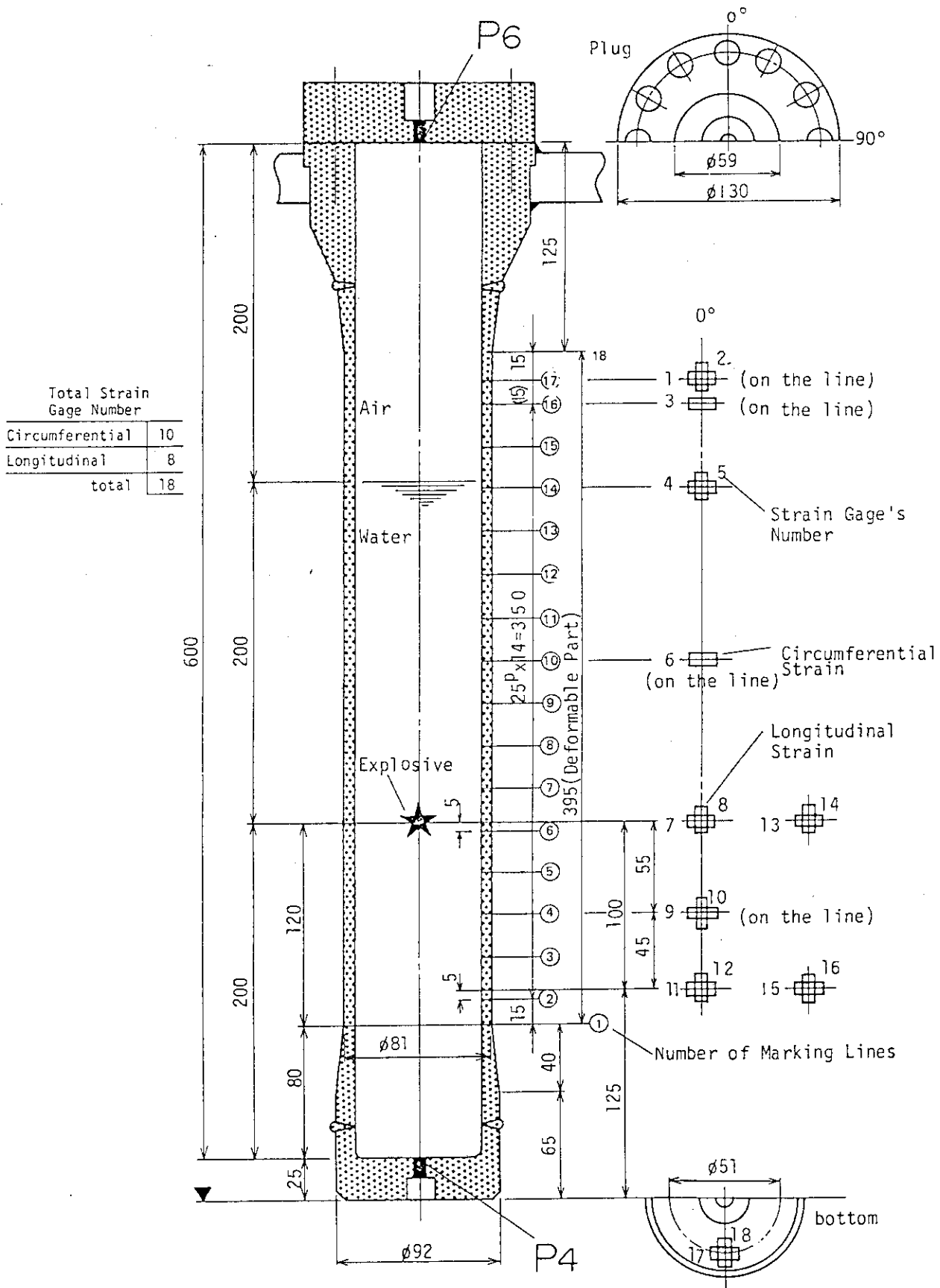


Fig. 6.1 Strain Gage's Location for Uni-Capsule Model

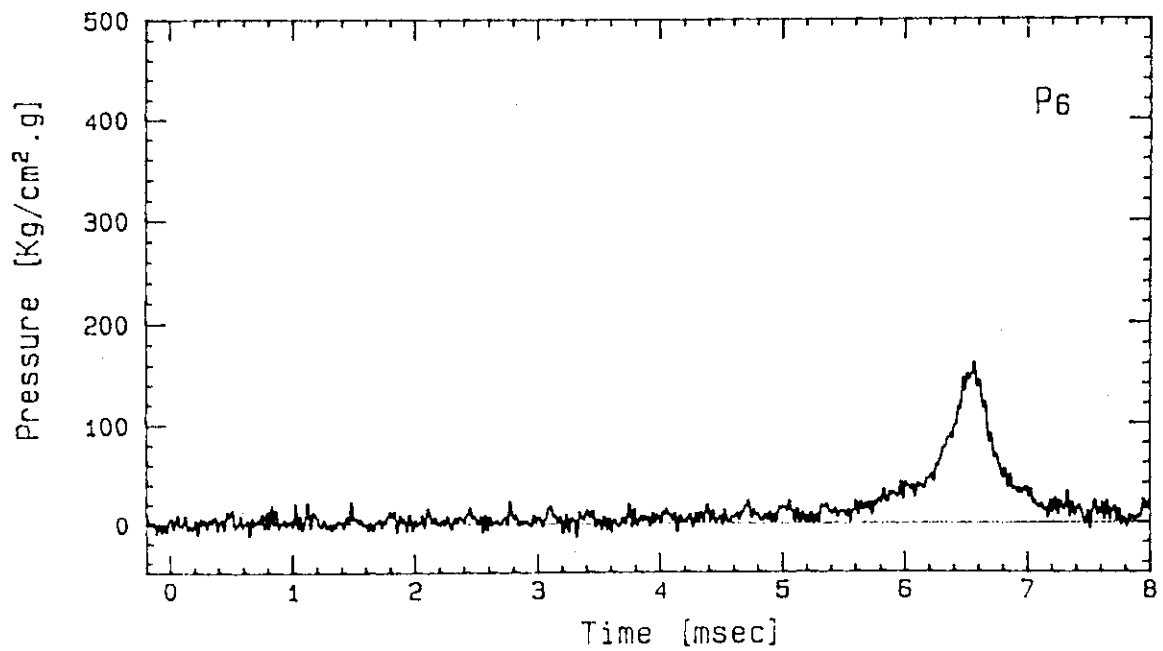
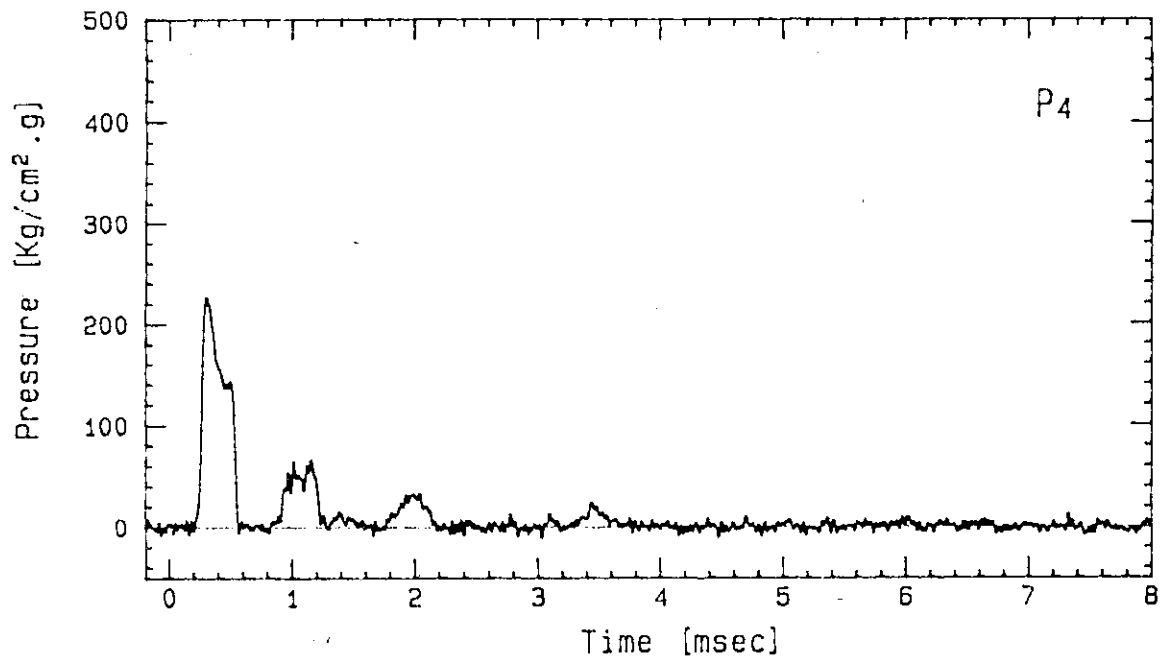


Fig. 6.2 Pressure History (Test No.BP11)

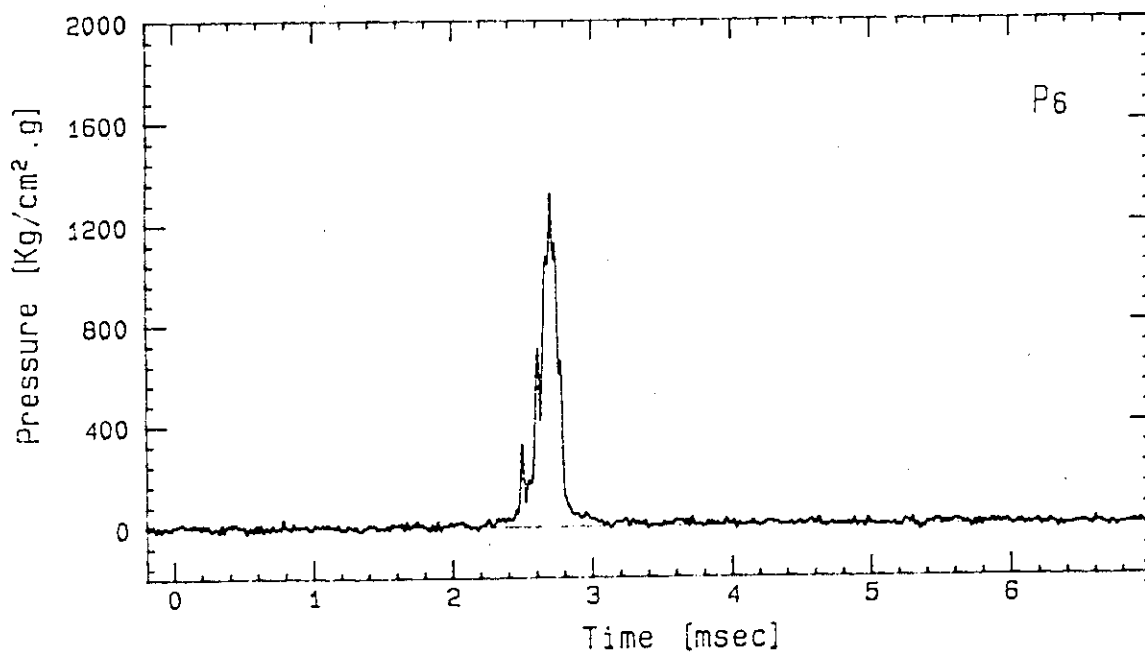
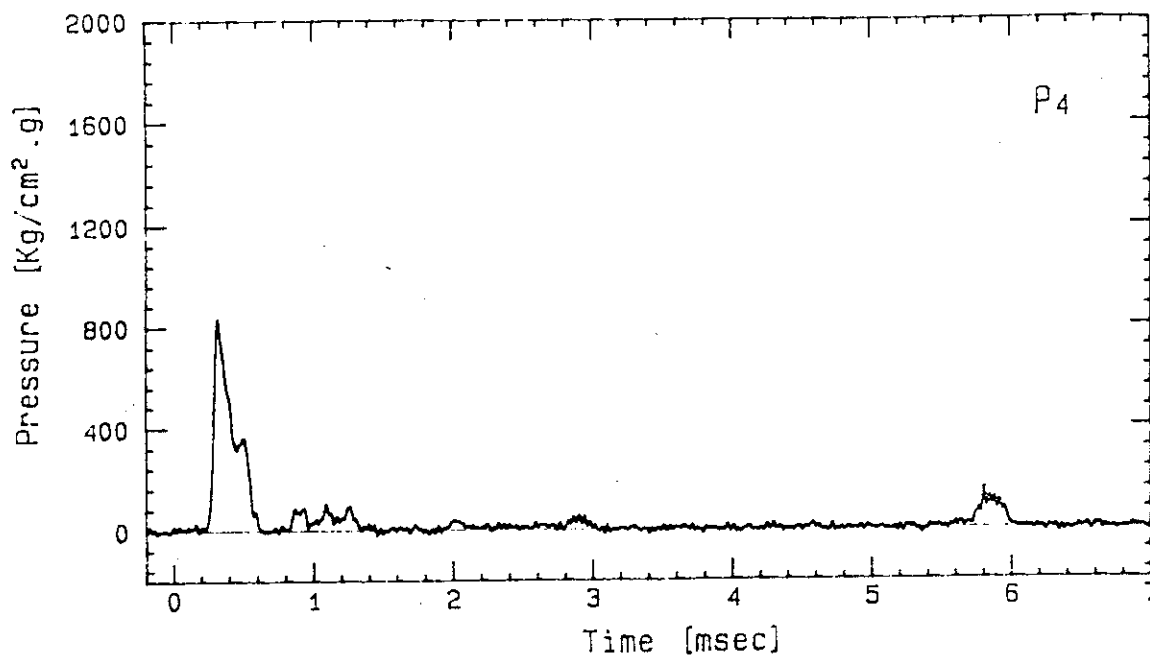


Fig. 6.3 Pressure History (Test No.BP21)

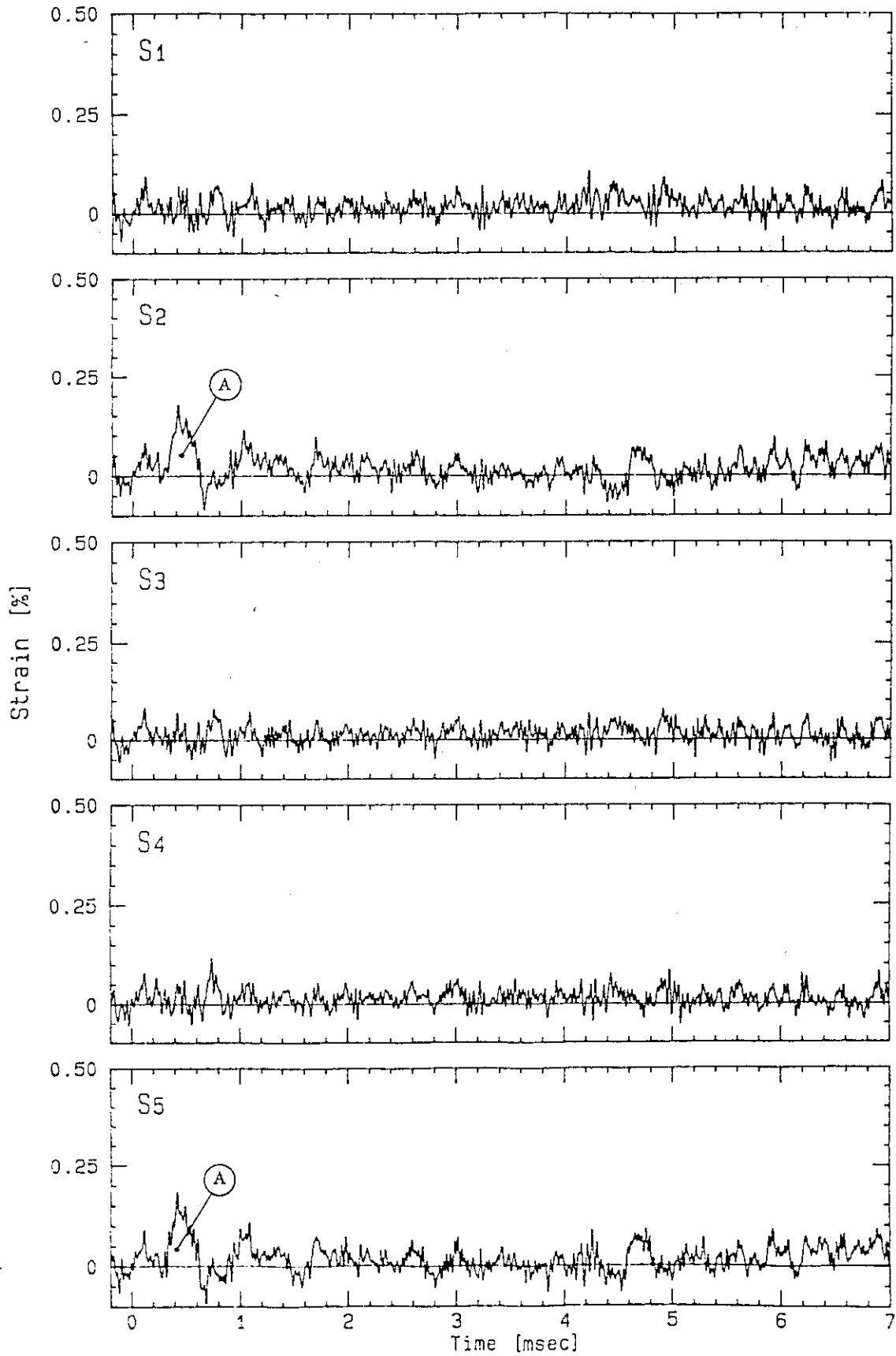


Fig. 6.4 Strain History (Test No.BP12)

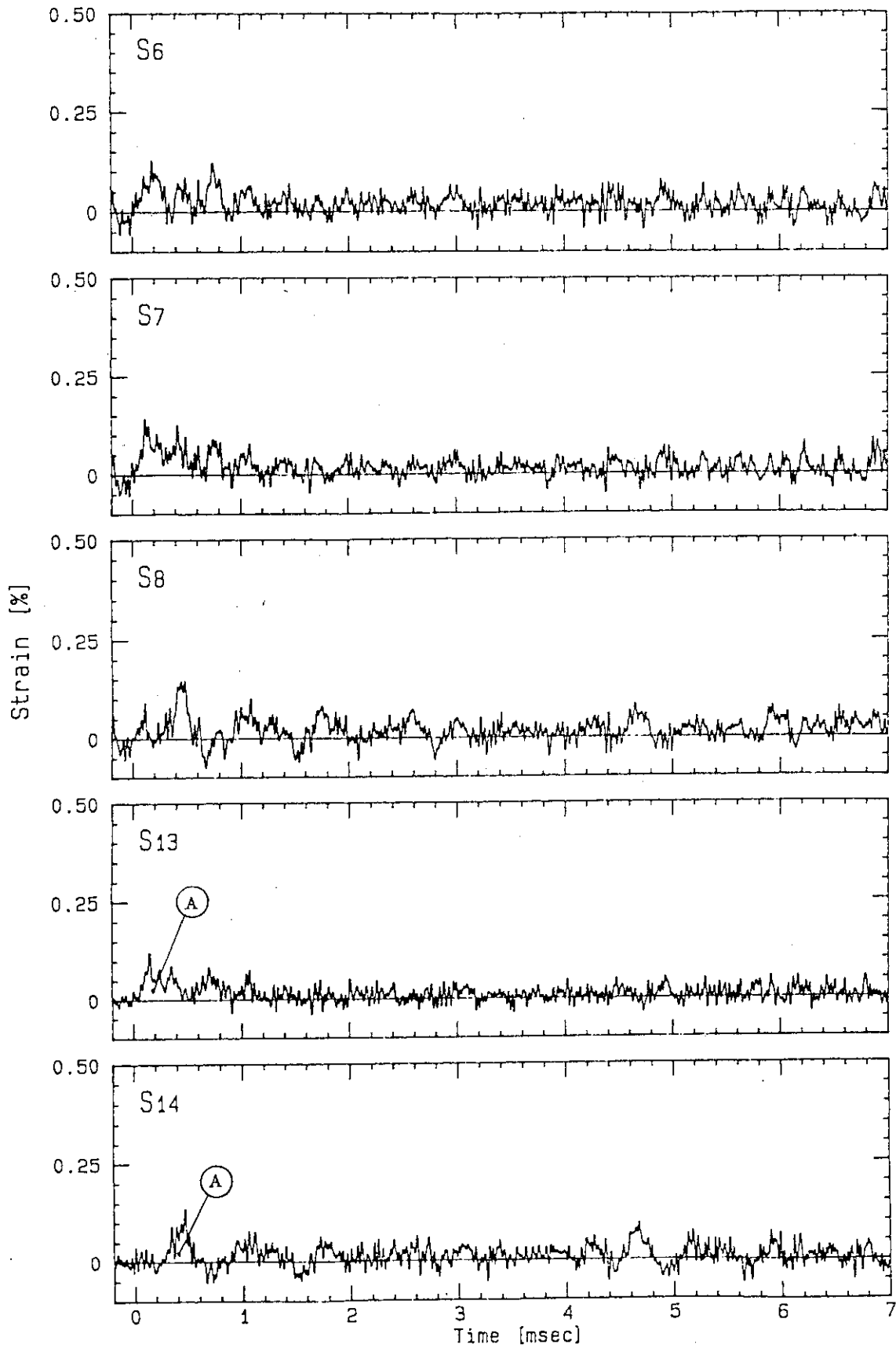


Fig. 6.5 Strain History (Test No.BP12)

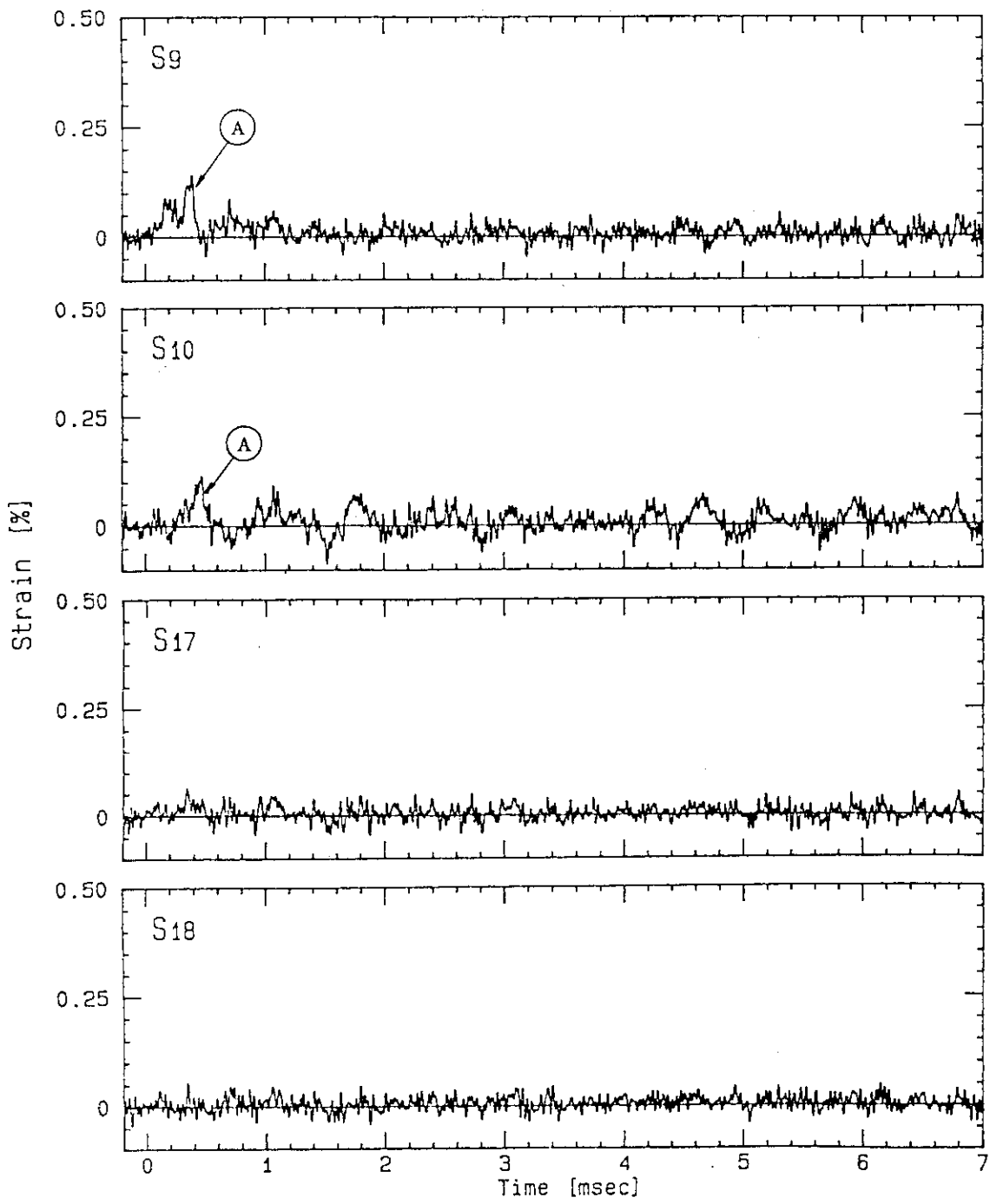


Fig. 6.6 Strain History (Test No.BP12)

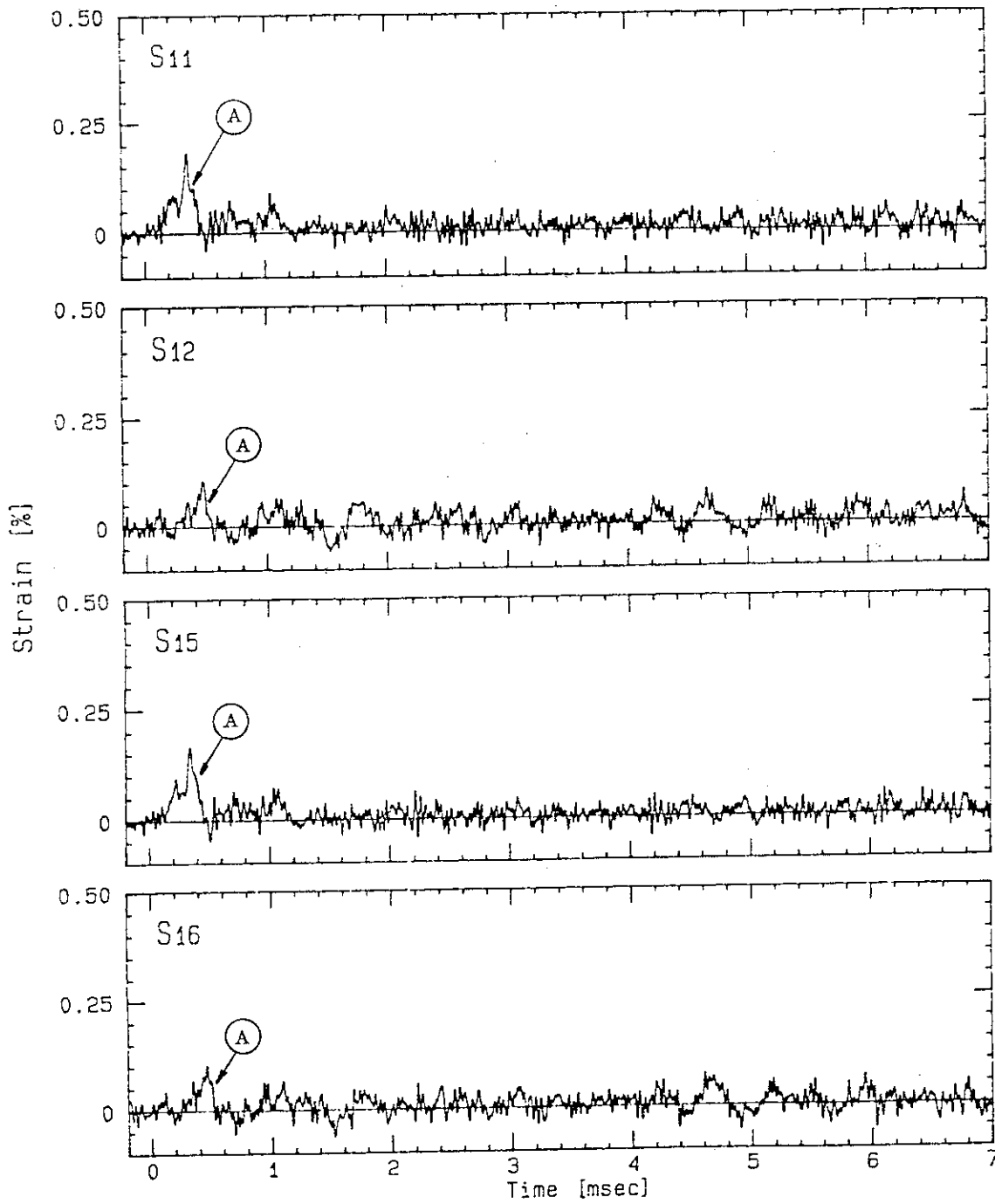


Fig. 6.7 Strain History (Test No.BP12)

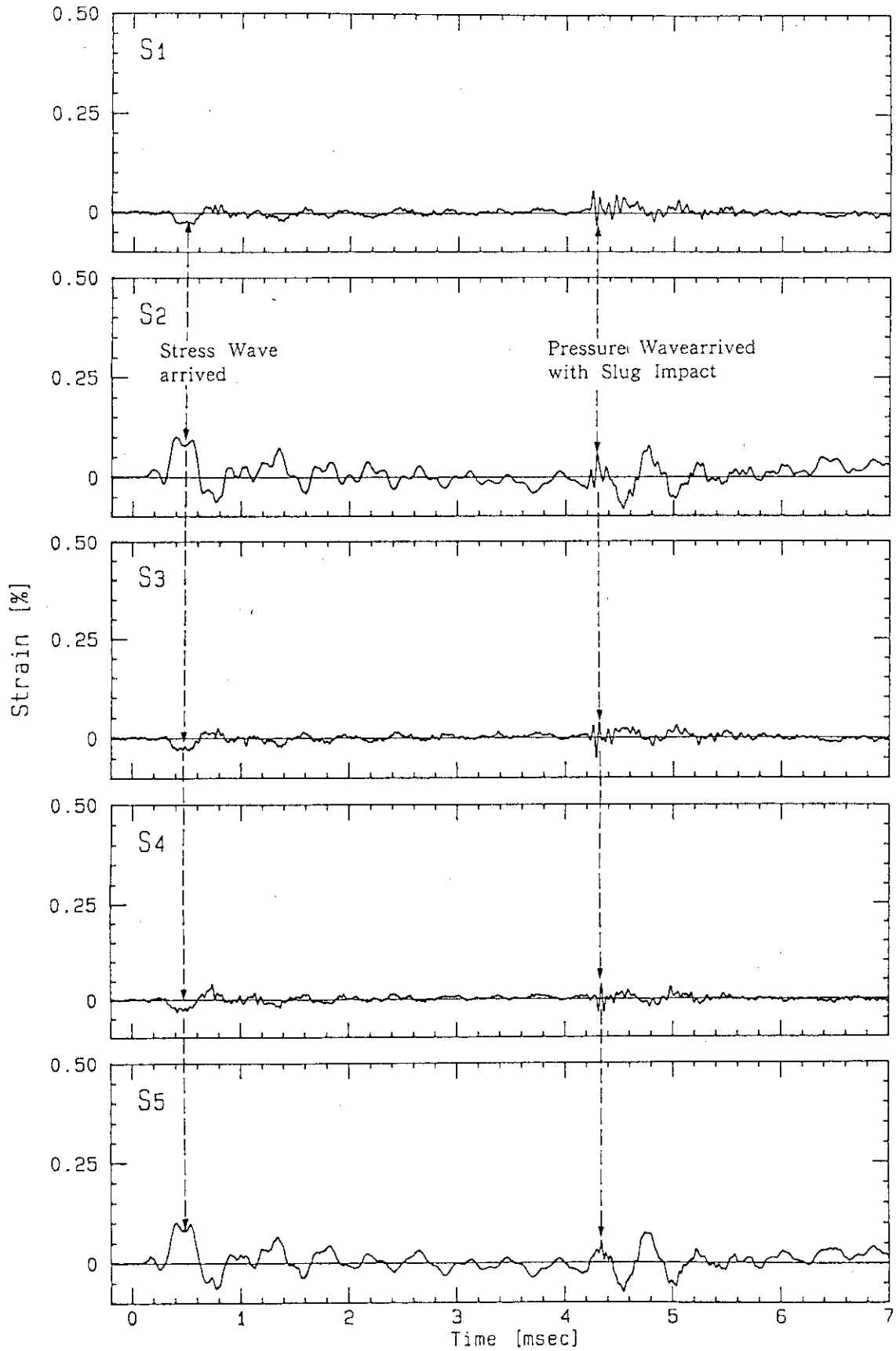


Fig. 6.8 Strain History (Test No. BP13)

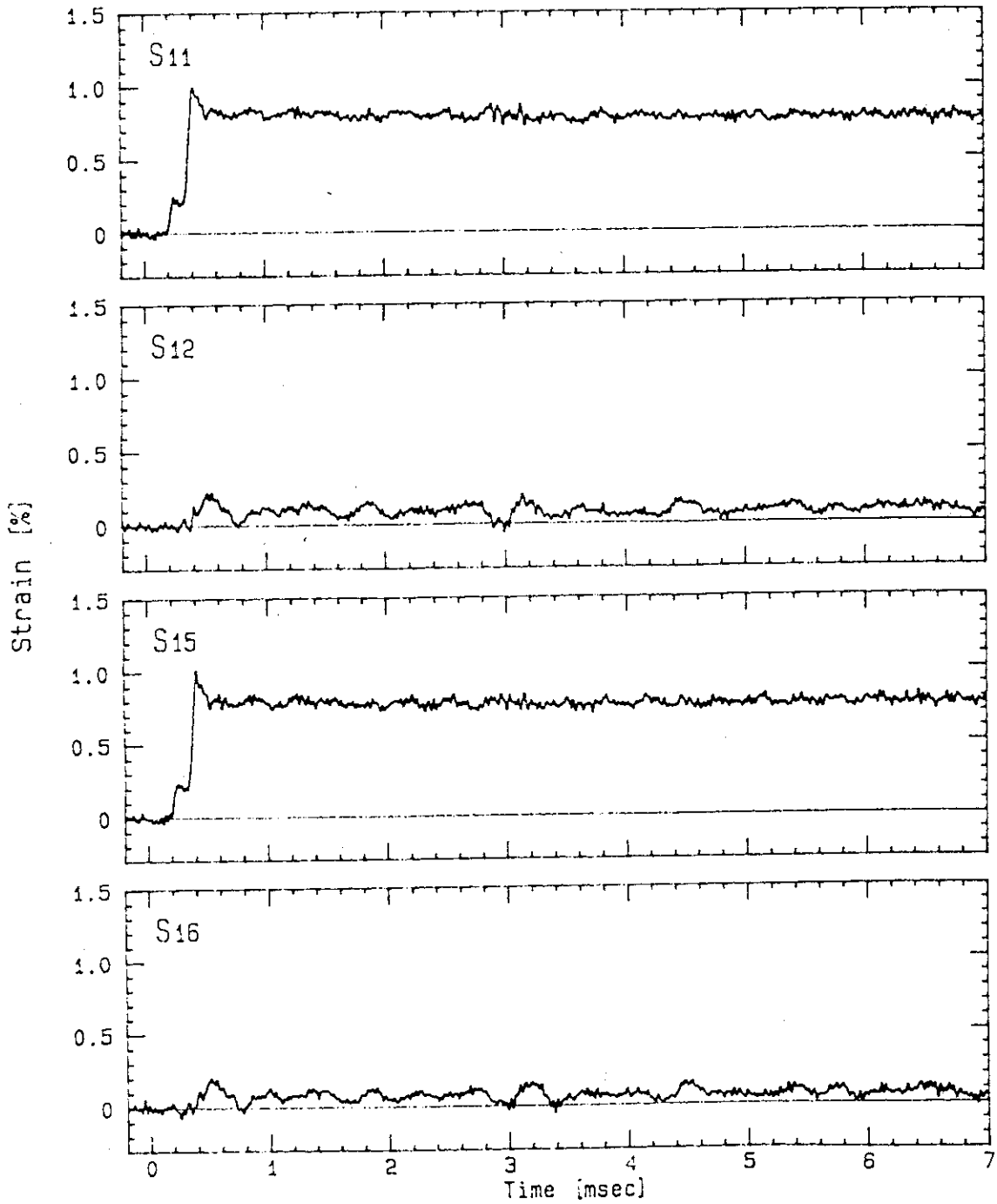


Fig. 6.9 Strain History (Test No.BP14)

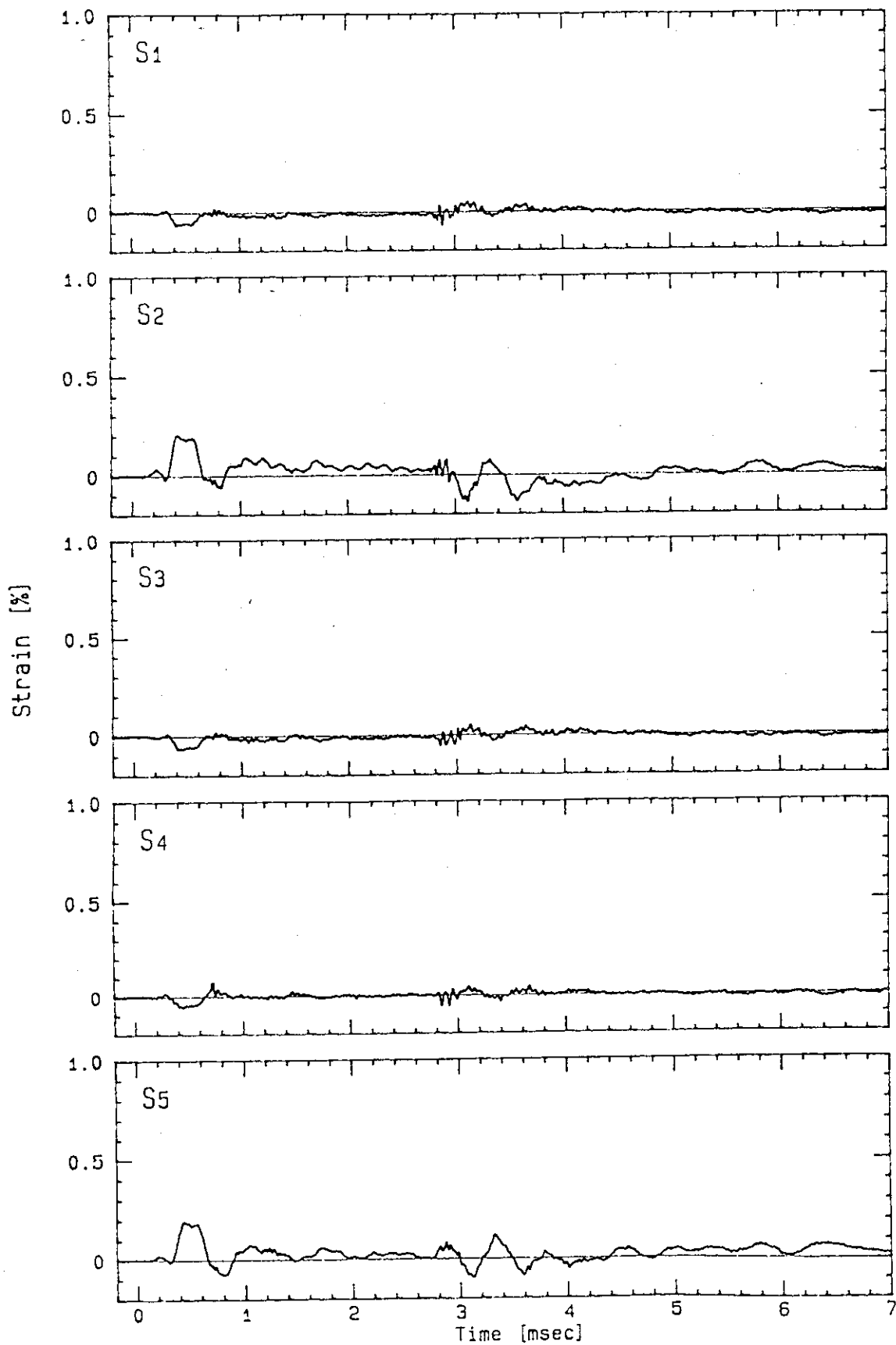


Fig. 6.10 Strain History (Test No.BP15)

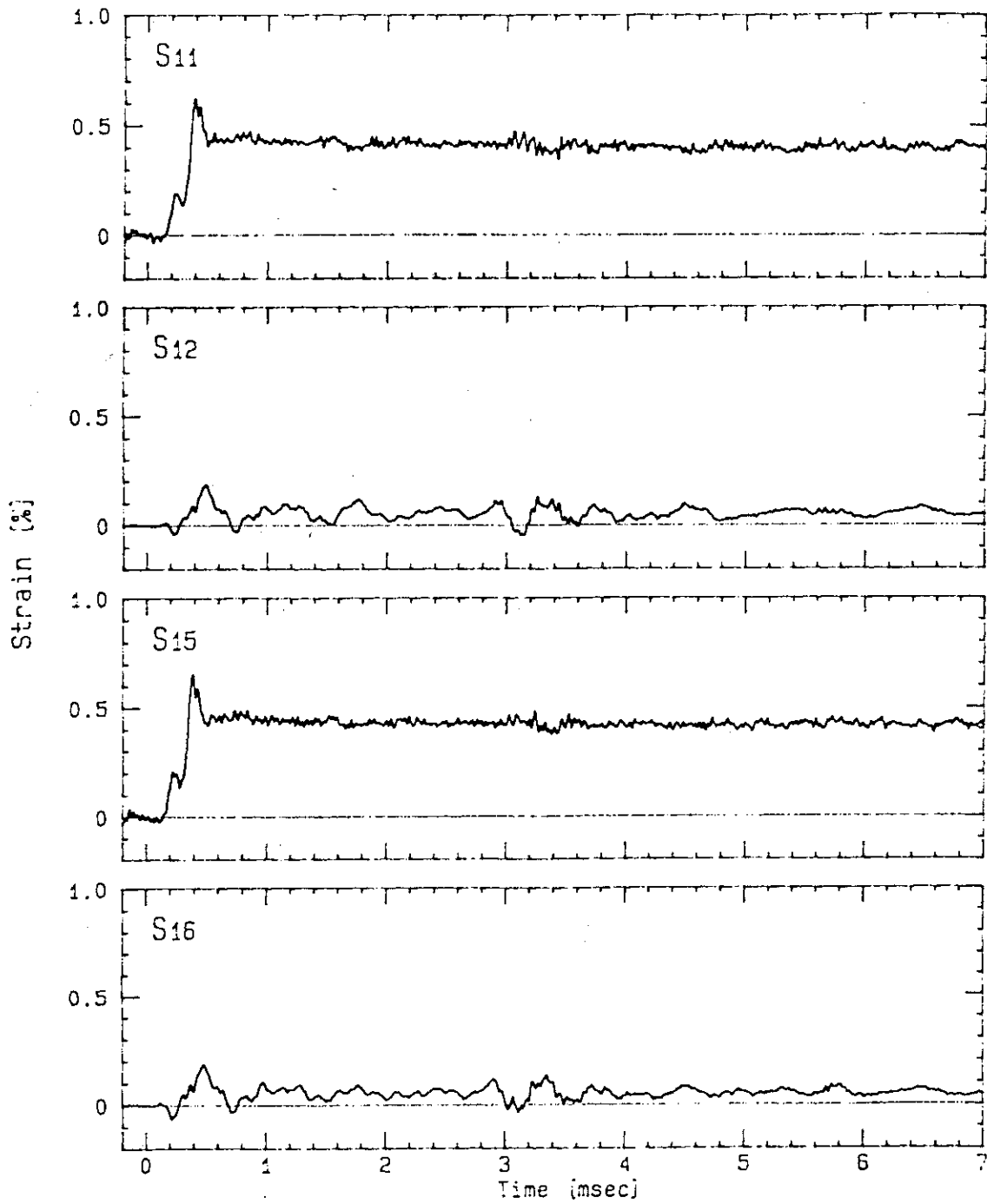


Fig. 6.11 Strain History (Test No.BP15)

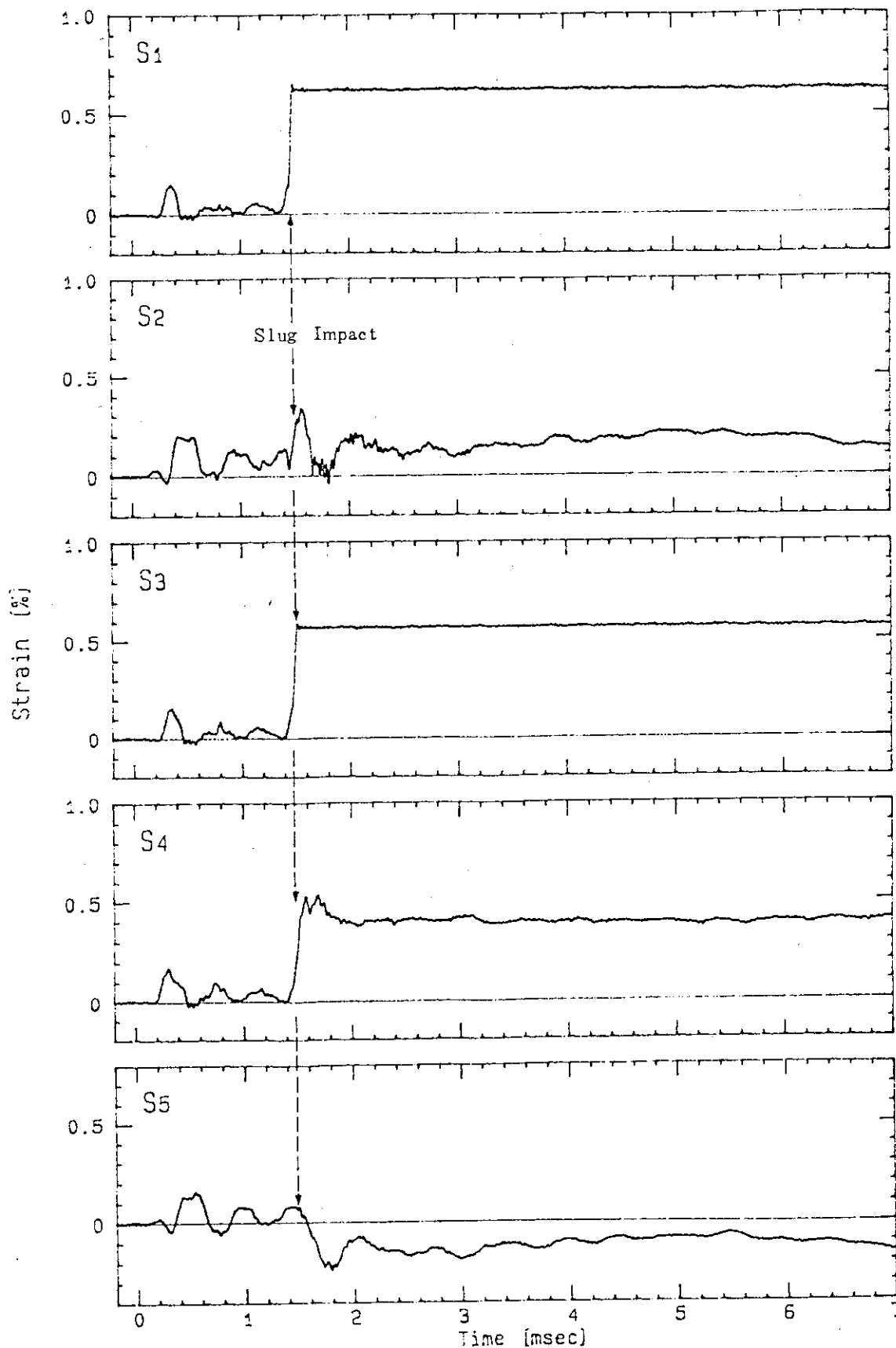


Fig. 6.12 Strain History (Test No. BP15)

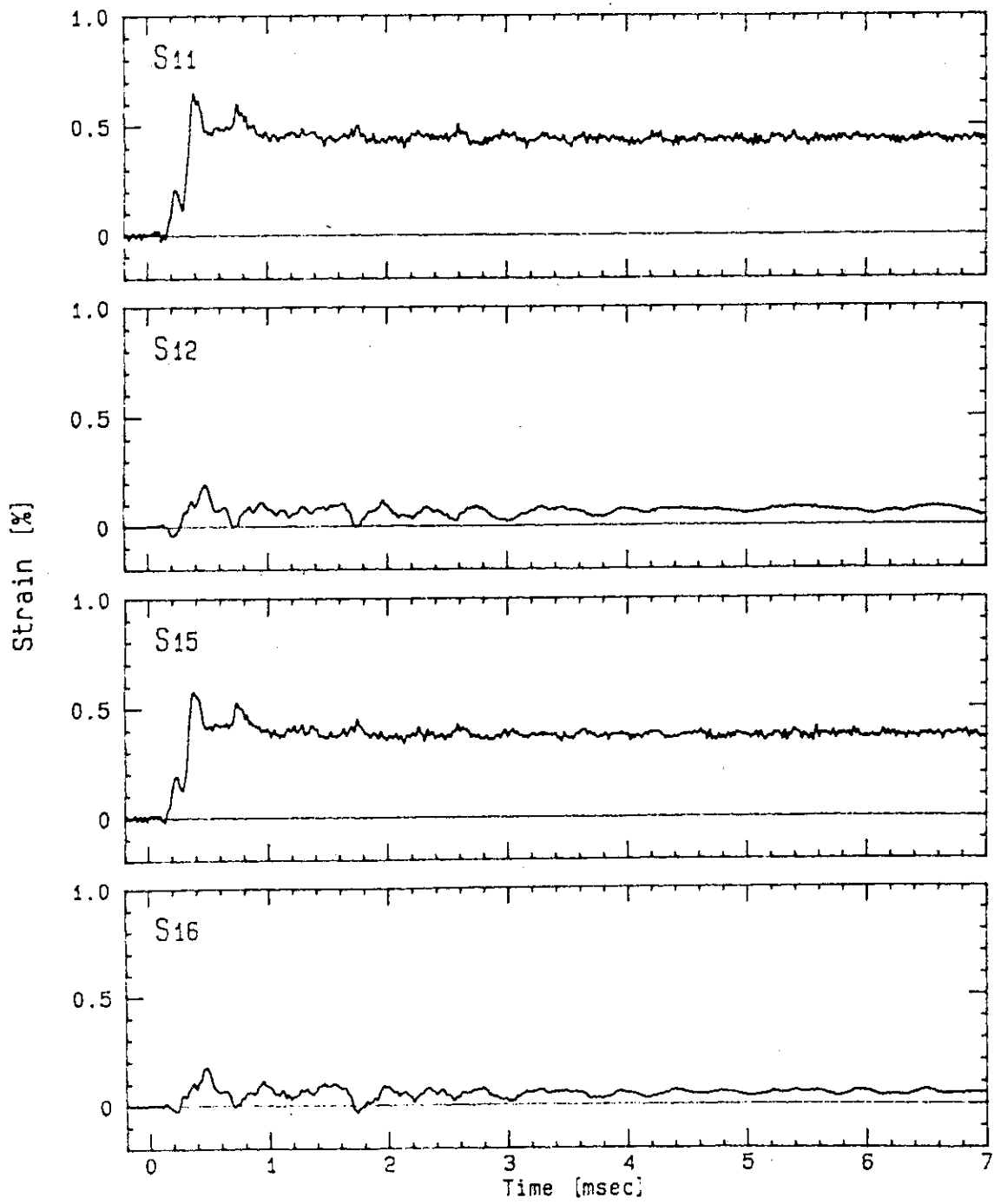


Fig. 6.13 Strain History (Test No.BP16)

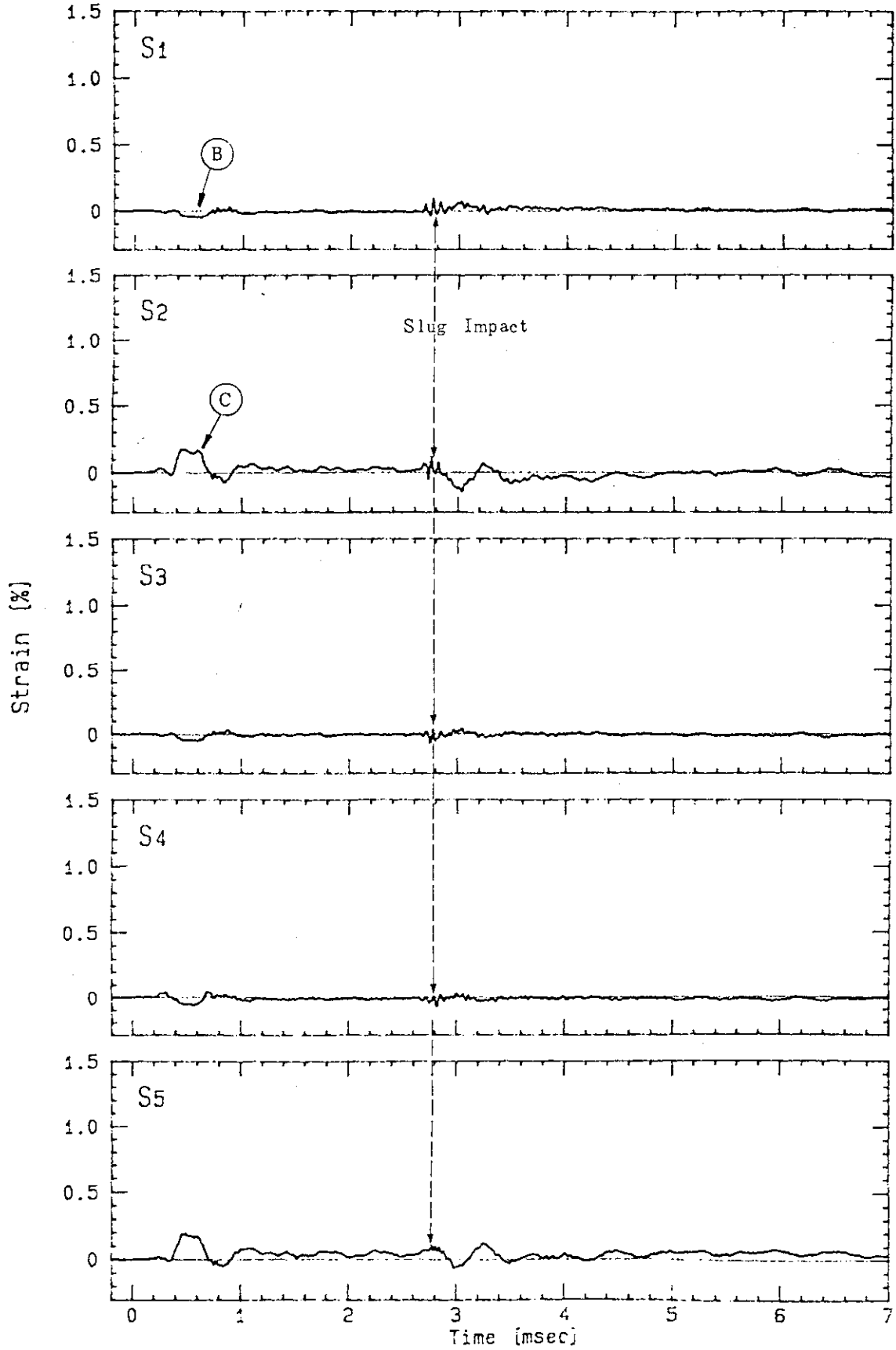


Fig. 6.14 Strain History (Test No. BP21)

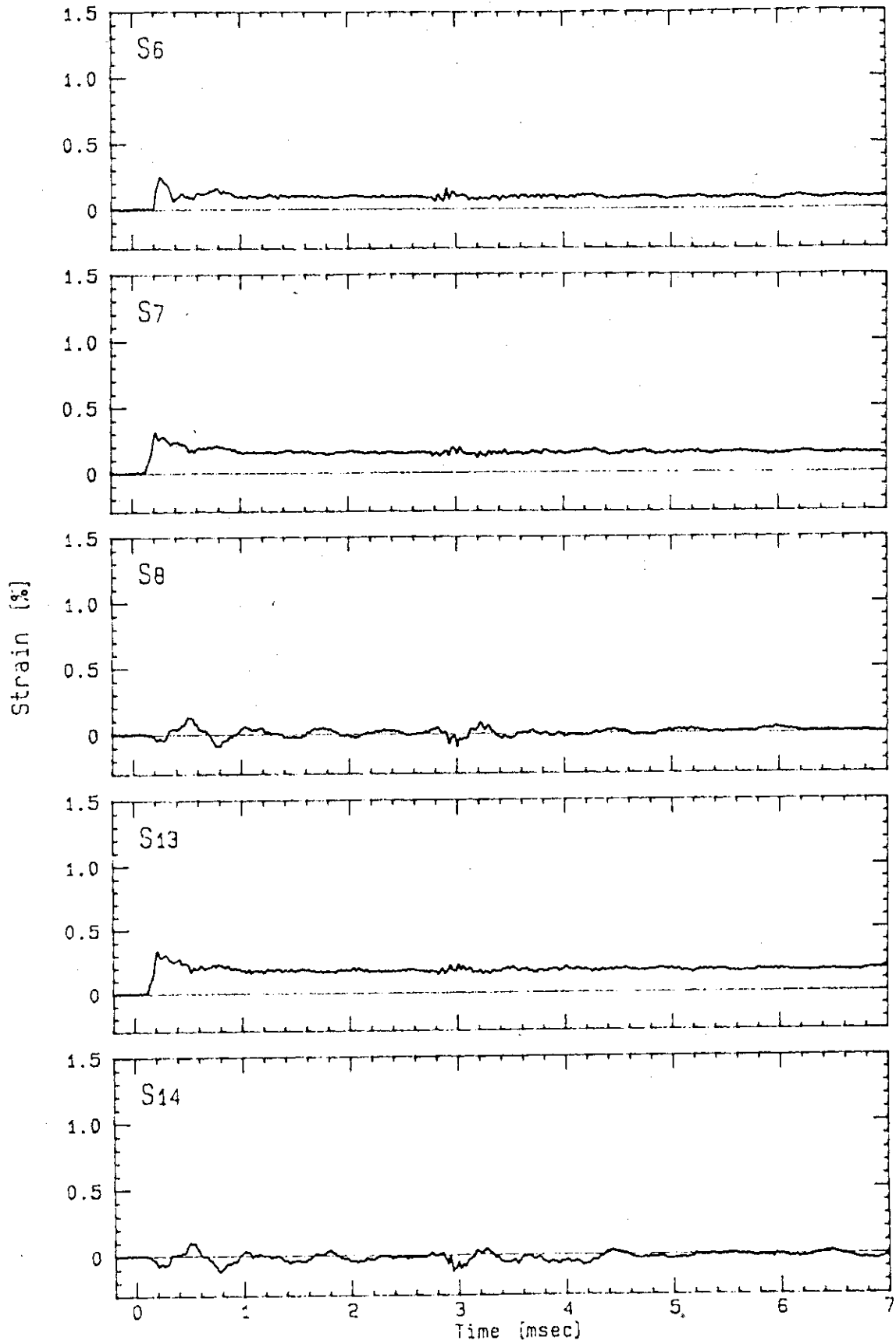


Fig. 6.15 Strain History (Test No.BP21)

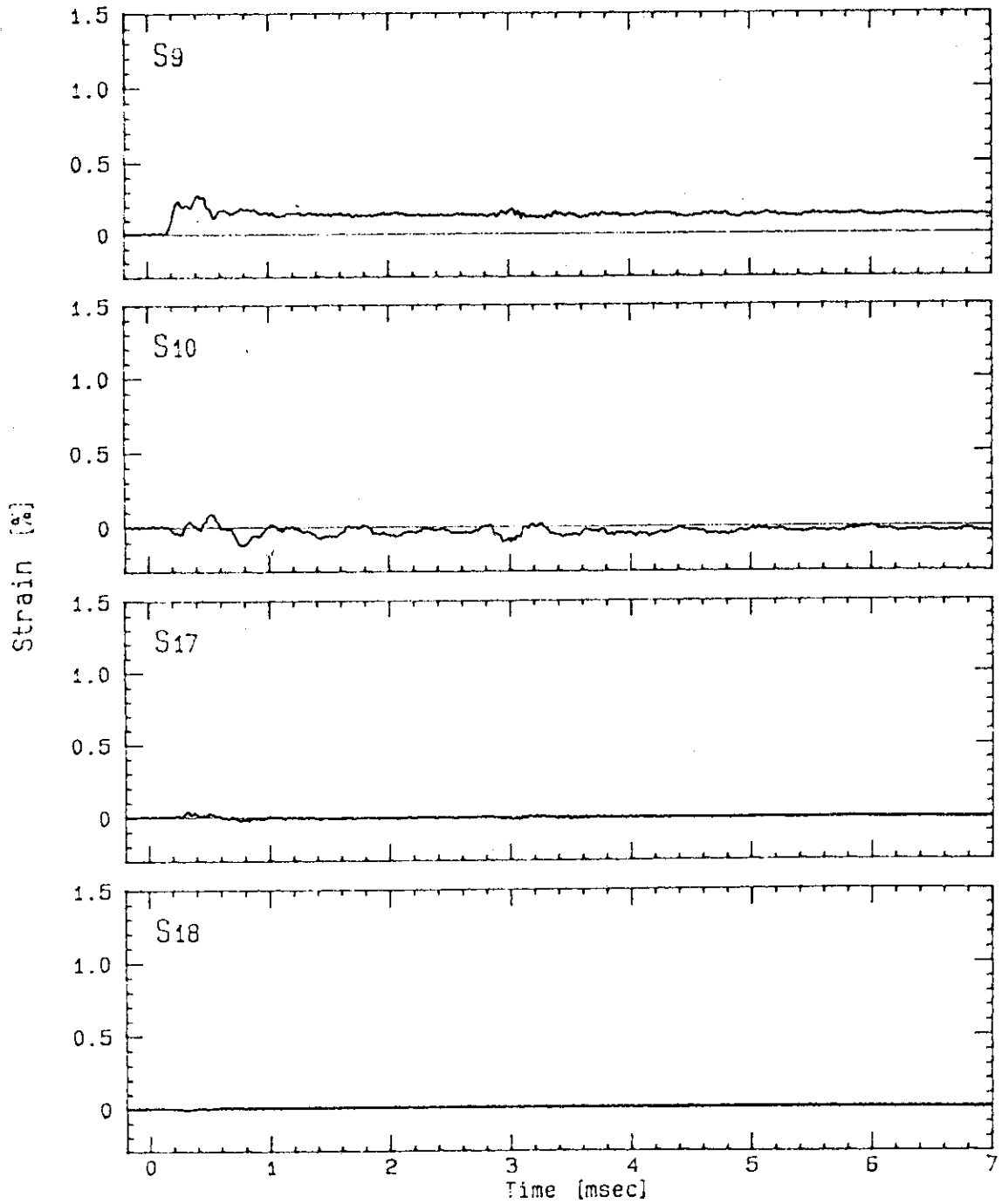


Fig. 6.16 Strain History (Test No.BP21)

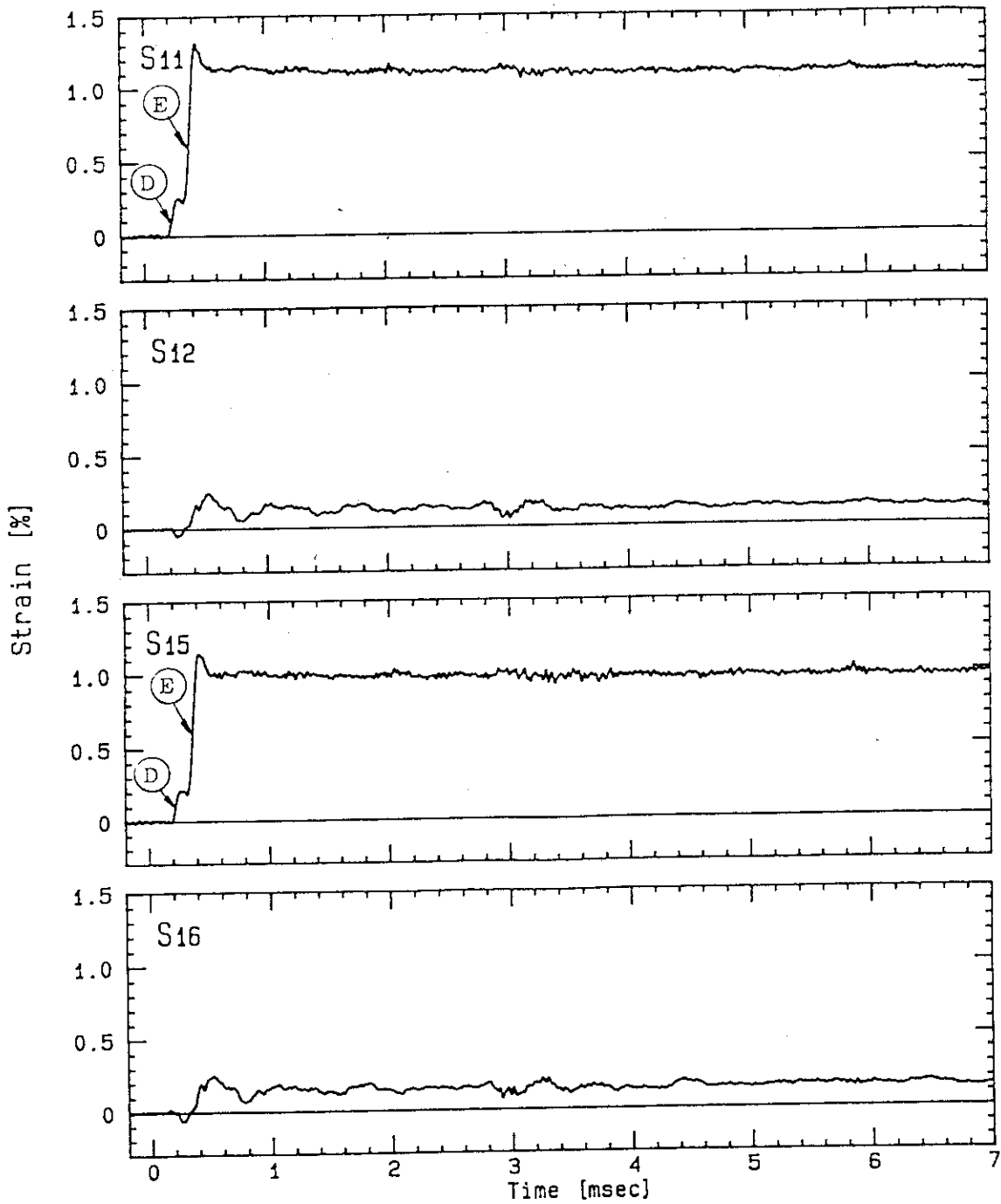


Fig. 6.17 Strain History (Test No.BP21)

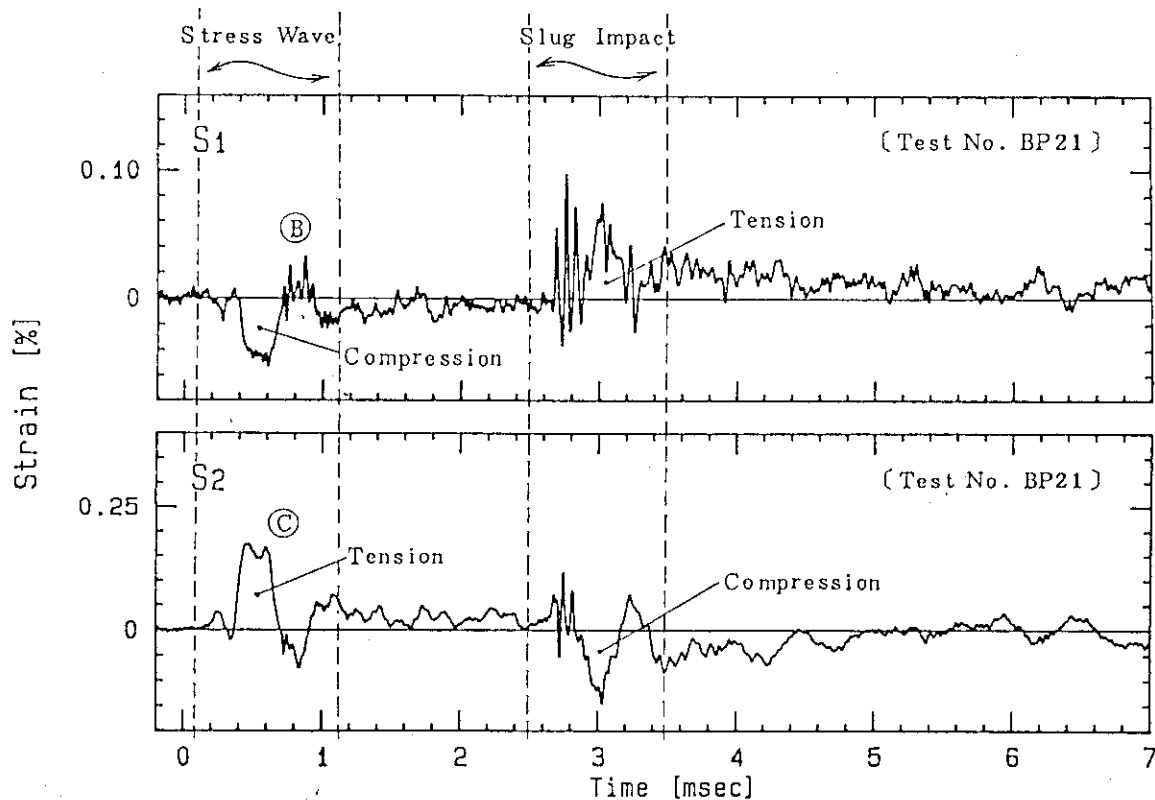


Fig. 6.18 Enlarged Strain History (Test No. BP21)

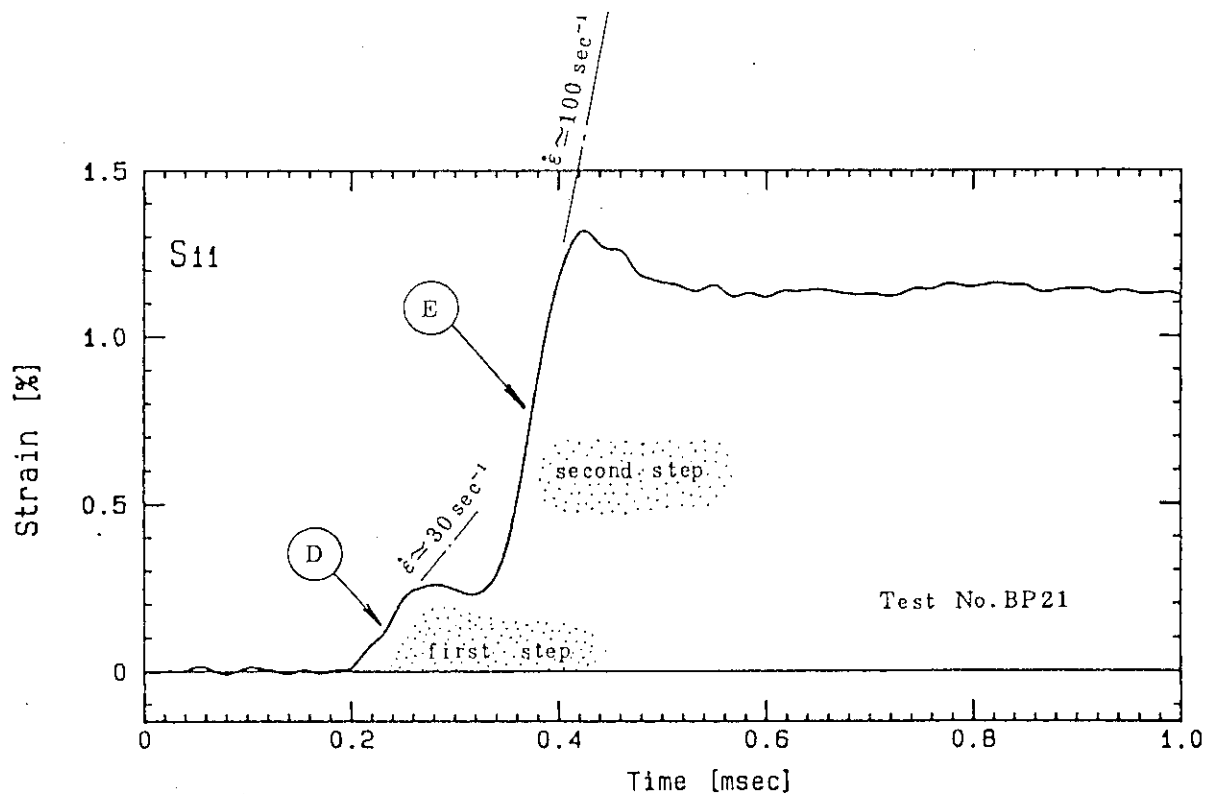


Fig. 6.19 Enlarged Strain Build-up (Test No. BP21)

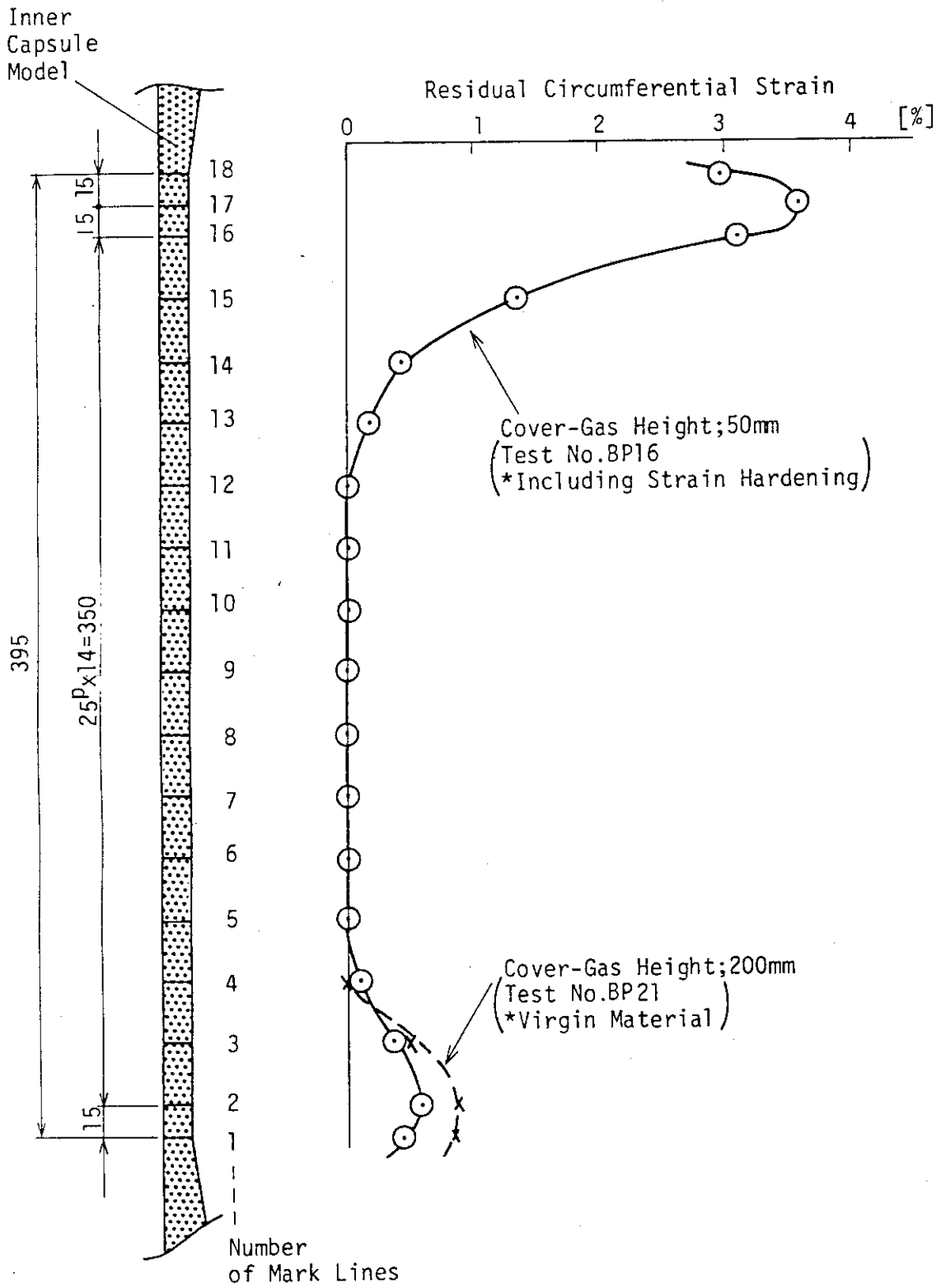


Fig. 6.20 Deformation Effect of Cover-Gas

7. 二重容器試験

Fig. 7.1に圧力センサ及び歪ゲージの取り付け位置を示す。圧力センサは内部容器に2点と外部容器の底面に1点、また、歪ゲージは内部容器に12点、外部容器に4点及び吊り下げボルトに1点取り付け。内部容器及び外部容器の変形対象部には、その表面にマーキング・ラインをつけ、試験前後に直径を計測し、残留歪を算出した。

薬量、内部容器内の爆源位置及びカバーガス高さは、内部容器試験と同一とした。外部容器には、内部容器と同様、水を注入し、水位は内部容器プラグ上面とした。

Fig. 7.2に圧力の時刻履歴を、また、Fig. 7.3～7.6に歪の時刻履歴を示す。

圧力源の破高値は約 $400\text{kg}/\text{cm}^2\cdot\text{g}$ 、スラグ・インパクト時刻から算出される平均スラグ速度は約 $70\text{m}/\text{s}$ であった。外部容器底部(P_7)には、内部容器底部の圧力波到達に呼応した圧力波が発生し、初期波の波高値は約 $25\text{kg}/\text{cm}^2\cdot\text{g}$ であった。

残留歪に移行した場所は、内部容器では周方向で爆源部(S_{16} , S_{17})と容器下部だけで、外部容器に変形はなかった。吊り下げボルトには、初期圧力波(P_4)に呼応して軸方向引張が発生し、ついでスラグ・インパクトにより圧縮を受ける。最大歪は約 -0.25% であり、圧縮荷重はボルト1本あたり約16トンであった。これはスラグ・インパクト圧力約 $1250\text{kg}/\text{cm}^2\cdot\text{g}$ から計算される圧縮荷重に見合っている。

試験前後の直径の計測より求めた残留周歪の分布を比較してFig. 7.7に示す。全体的な変形プロフィールとしては外部容器の有無にかかわらず、容器下部だけが変形している。5章及び6章で述べたように、カバーガス 200mm の場合はスラグ・インパクトによる首下変形は軽微である。Fig. 7.7に示すように、外部容器のある場合の方がわずかながら変形が少ない。両者とも周歪は 1% 程度と少ないため、比較しにくい。歪履歴より獲られた残留歪で比較してみると、Fig. 6.17の S_{11} とFig. 7.4の S_8 から 1.1% と 0.8% (外部容器のある場合)となり、この部分では約 40% の歪軽減効果があった。

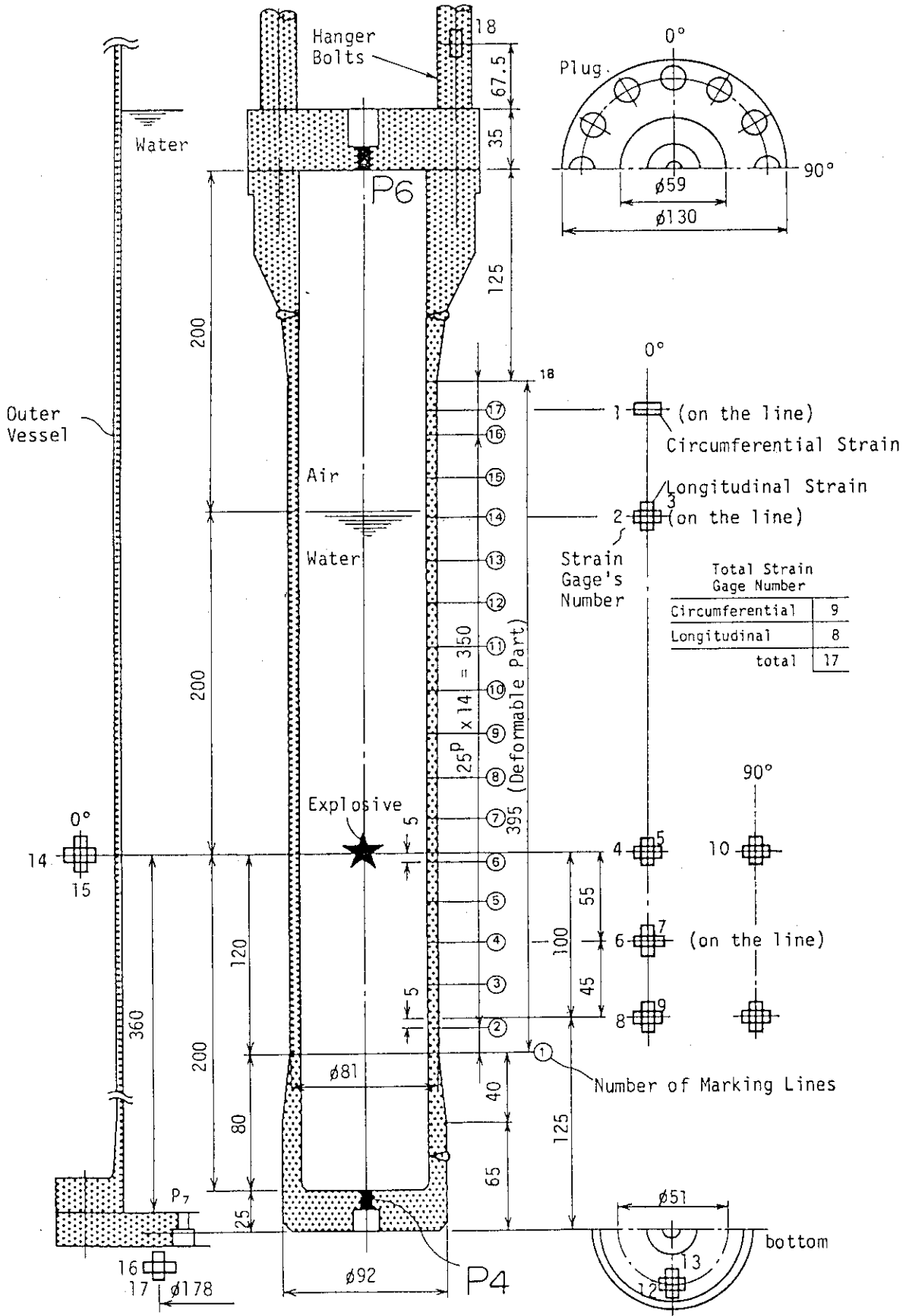


Fig. 7.1 Strain Gage's Location for Double Capsule Model

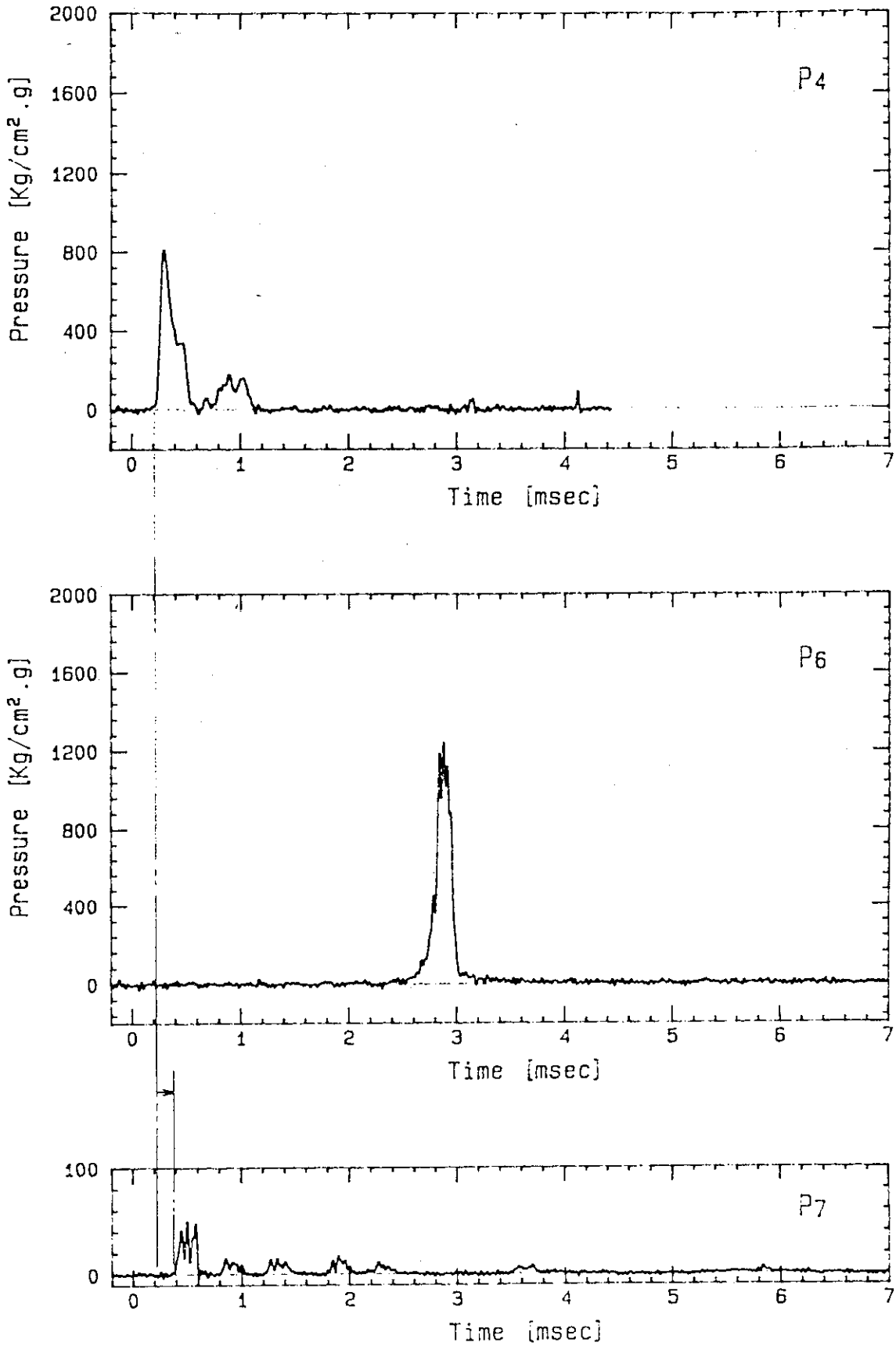


Fig. 7.2 Pressure History (Test No.C111)

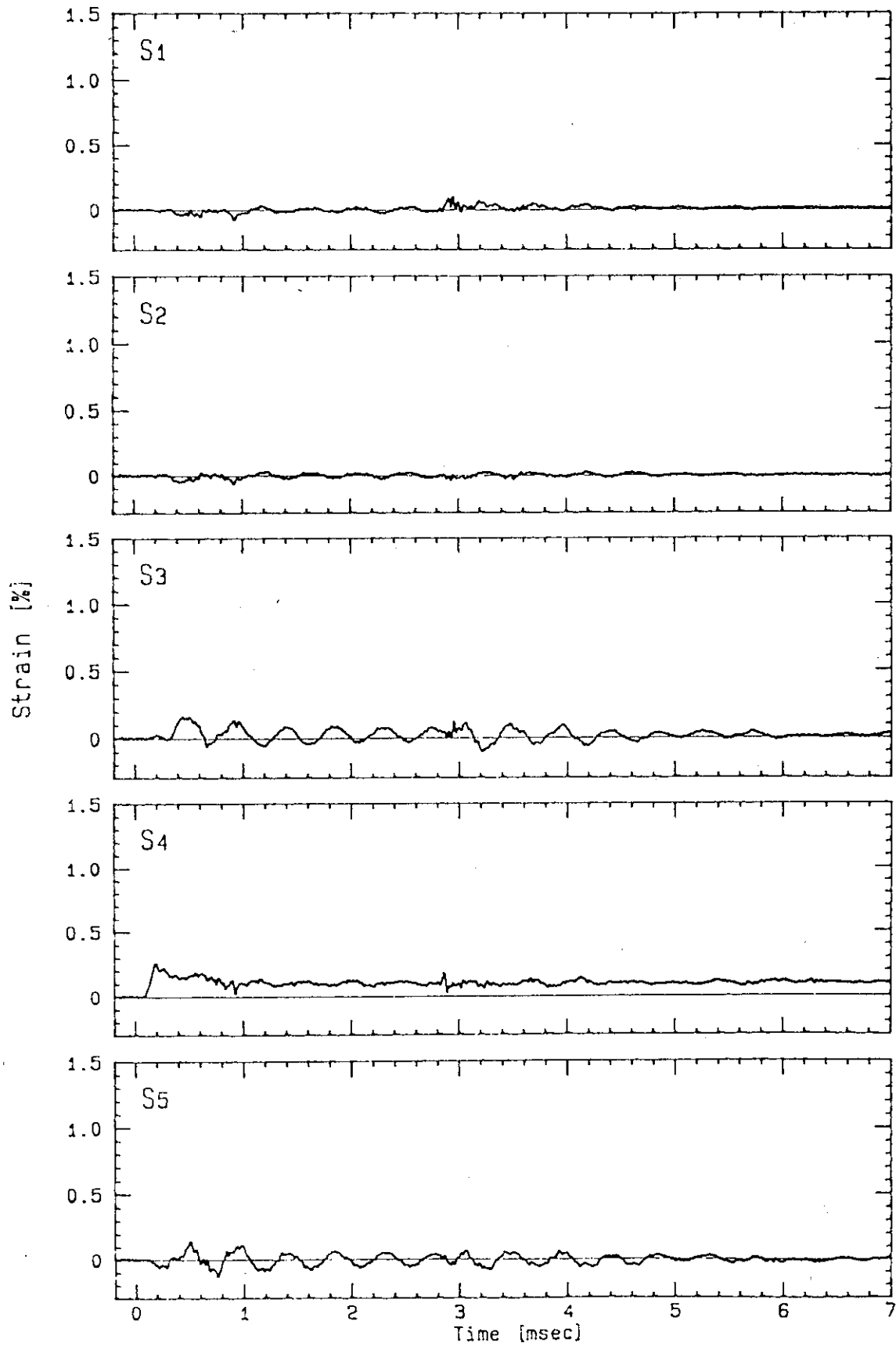


Fig. 7.3 Strain History (Test No.C111)

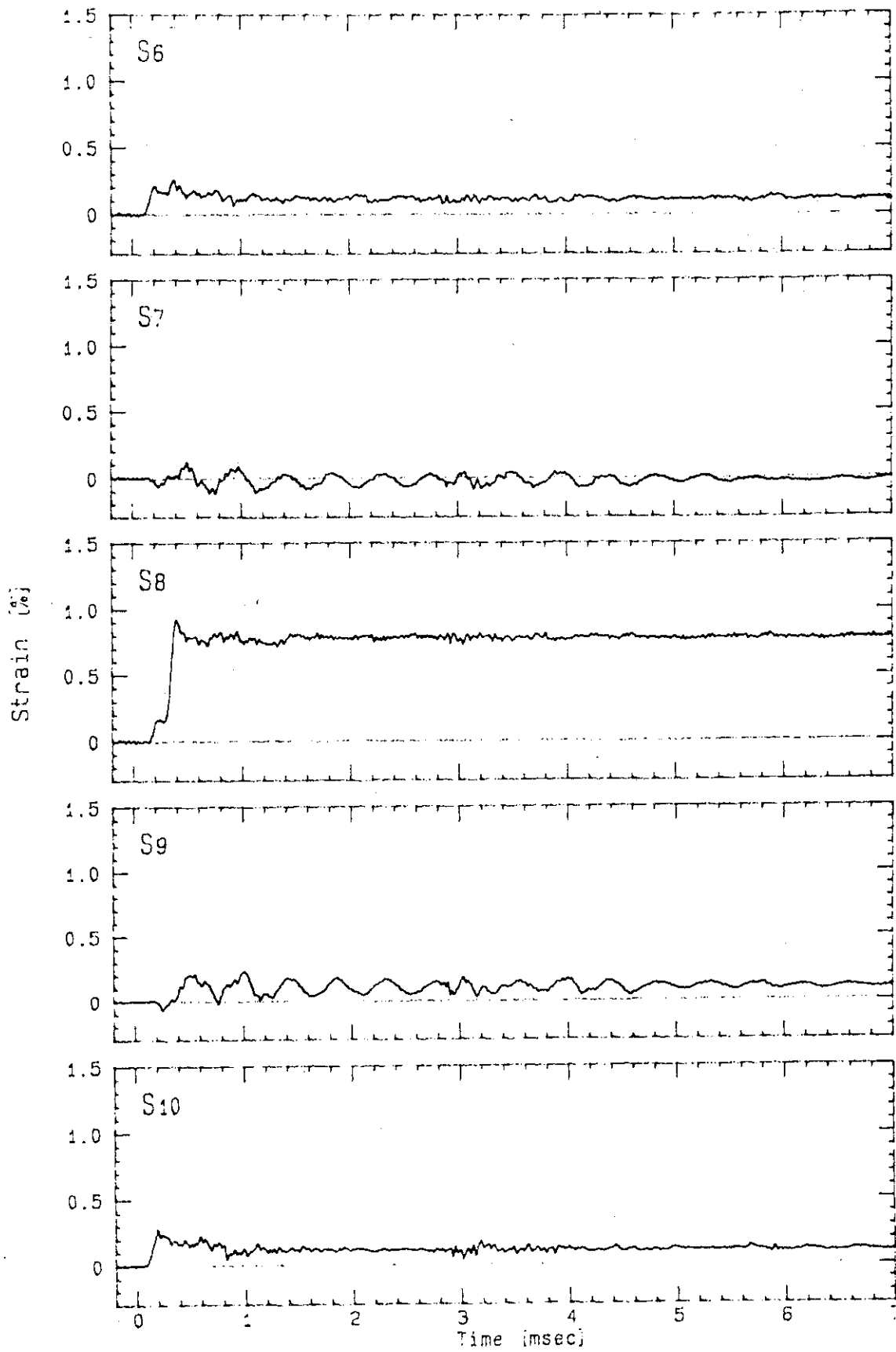


Fig. 7.4 Strain History (Test No.C111)

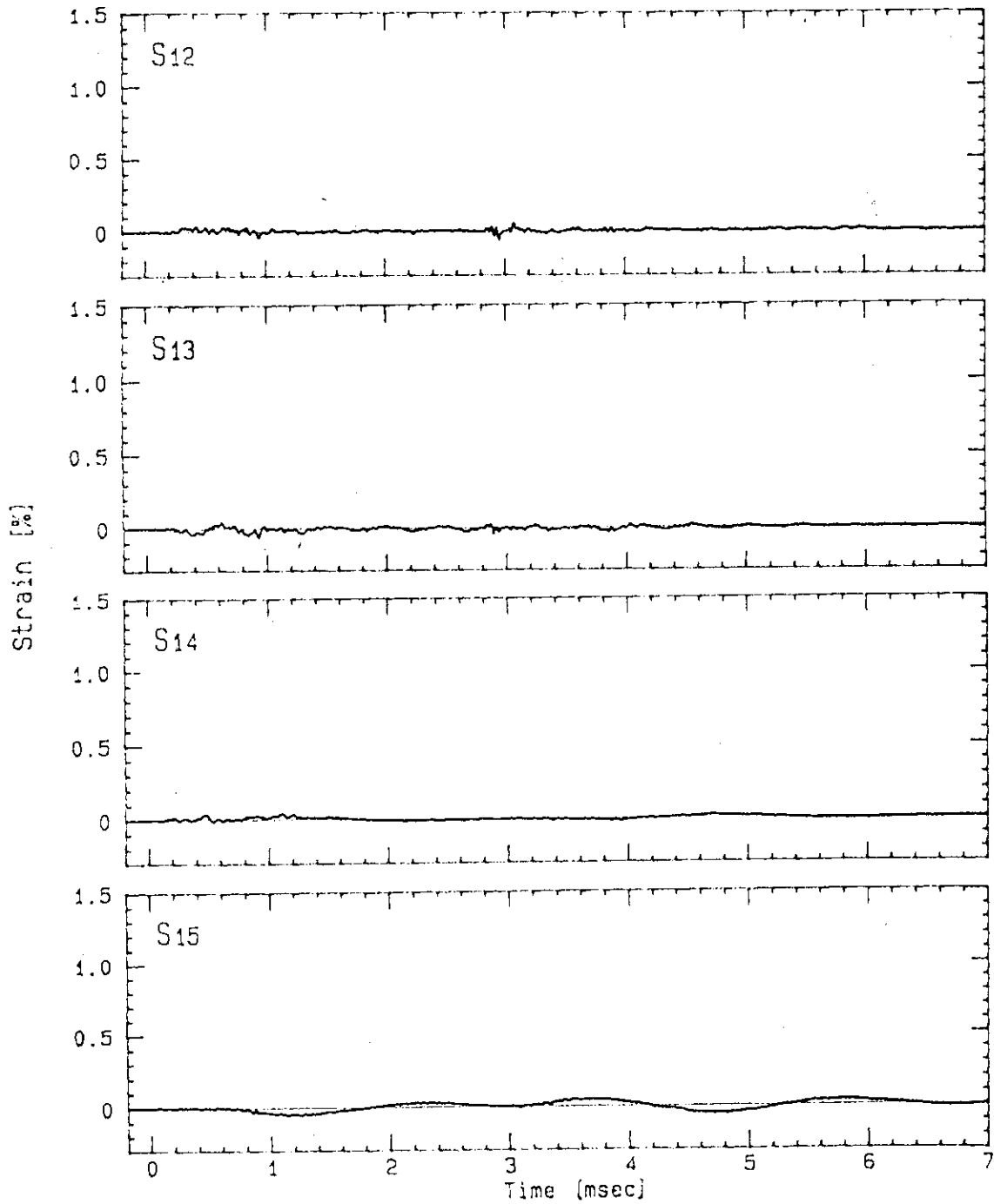


Fig. 7.5 Strain History (Test No.C111)

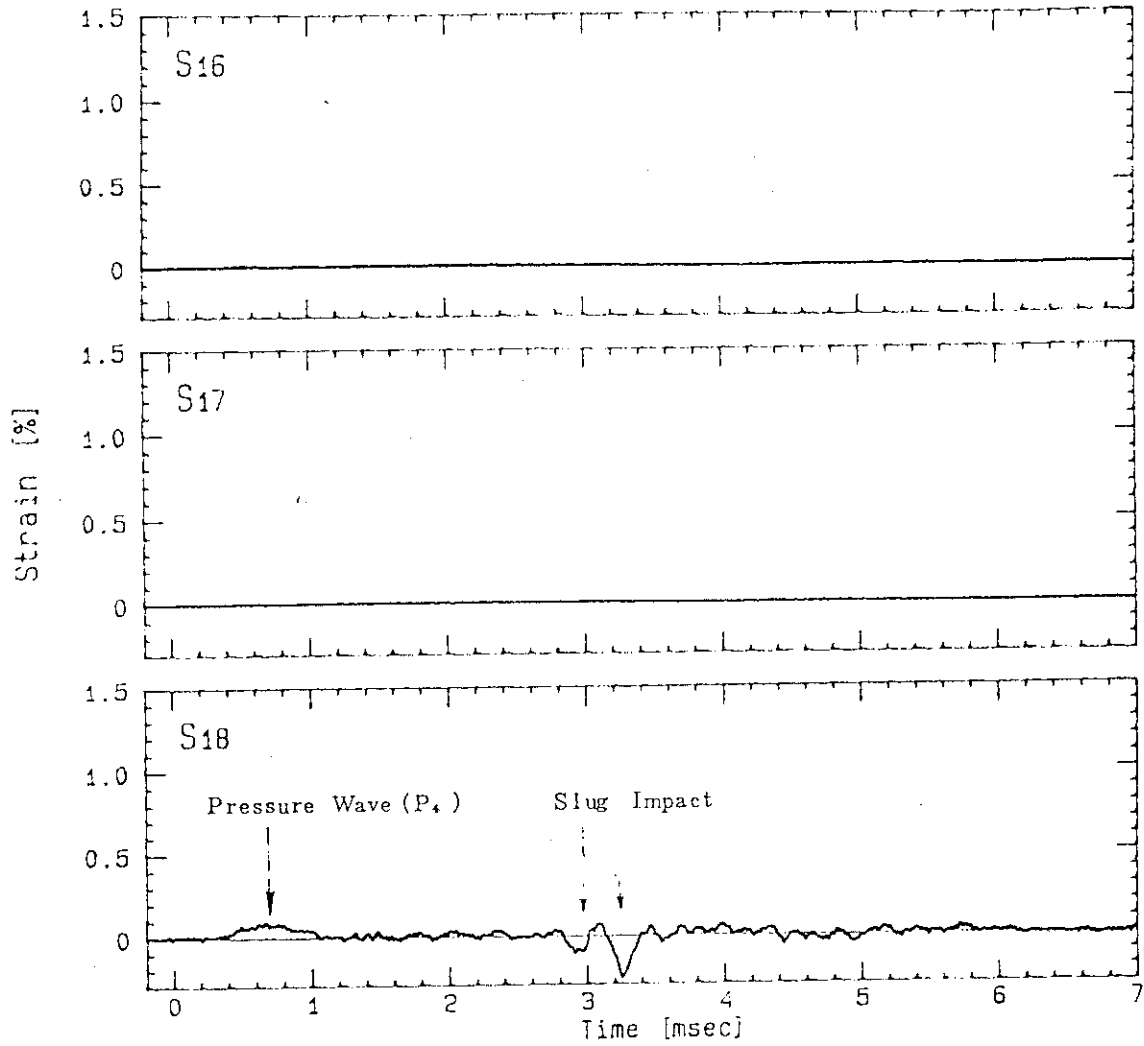


Fig. 7.6 Strain History (Test No.C111)

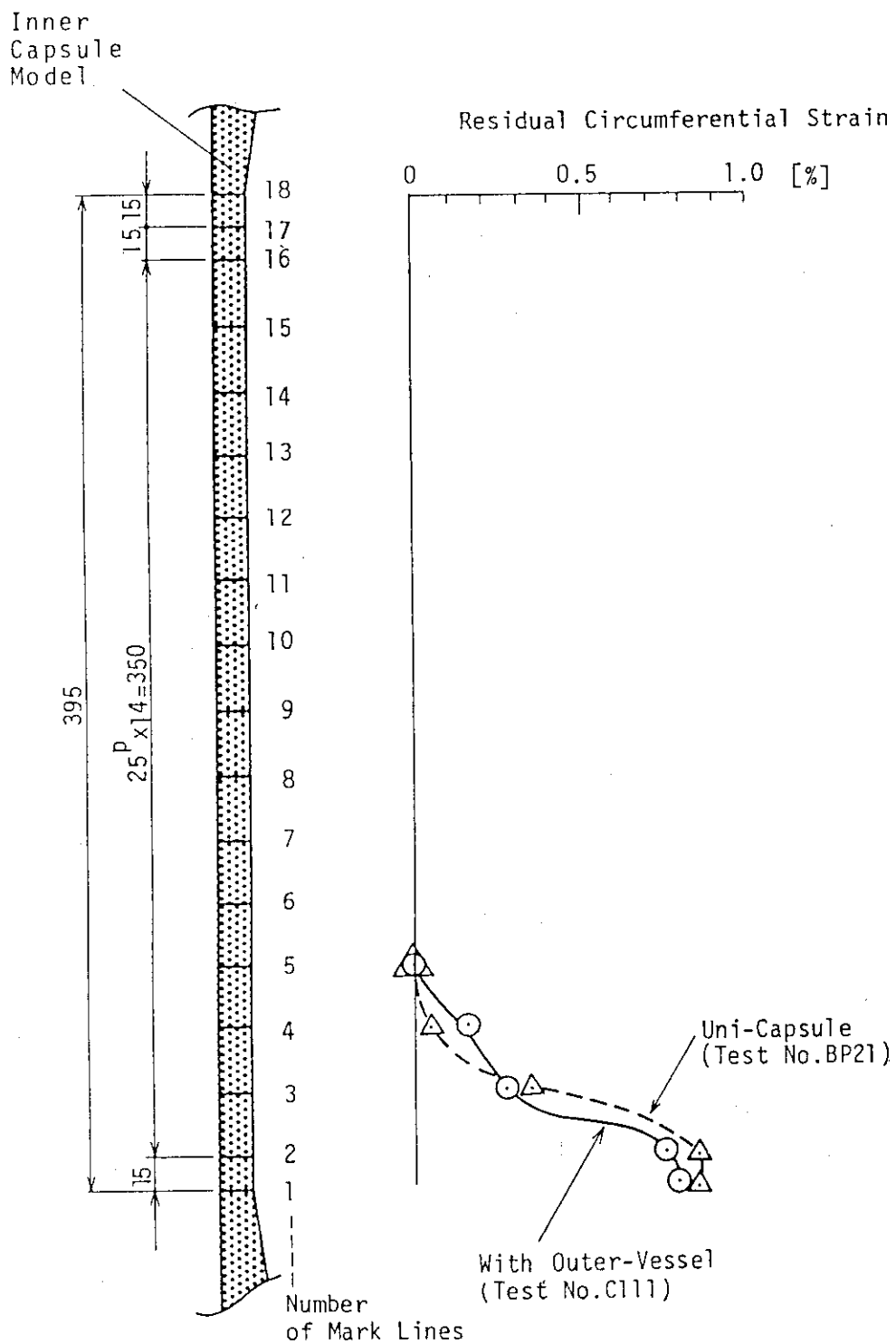


Fig. 7.7 Deformation Profile between Uni- and Double-Capsule

8. 結 言

NSRRにおいて燃料破損実験に使用するカプセルと同一スケールの耐爆試験体を製作し、低爆速火薬による衝撃的な圧力波を発生させて、燃料破損時の挙動を模擬した実験を実施した。今回の実験では、変形を起こさない剛性容器において火薬特性及びカバーガス効果を初めとして、カプセルの変形挙動を把握する上での基礎的な知見が得られた。

これらの成果をまとめると、以下ようになる。

(1) 火薬特性試験

低爆速火薬の薬量に応じた圧力履歴及び速度履歴により、反射後、スラグ・インパクトを含む基本的な圧力波伝播挙動を把握した。

- ① 爆源が $130 \sim 210 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ の波高値を持つ時の薬量は $0.8 \sim 1.3 \text{ g}$ であり、スラグ・エネルギーが $200 \sim 450 \text{ cal}$ の場合もこの薬量範囲内に収まる。
- ② 剛性容器内の初期音速は約 1350 m/s であり、燃焼ガスの膨張により音速は低下する。
- ③ スラグ速度の測定には高速度カメラを用いて行うのが最適であり、また、スラグはカバーガスの高さにより最大速度を持つ速度履歴を有する。

(2) カバーガス効果評価試験

- ① 蓋下面での圧力履歴よりスラグ・インパクト圧とスラグ・インパクト時刻がわかり、これからカバーガス層を上昇するスラグの平均速度が得られる。
- ② カバーガス体積が小さい場合にはスラグのバウンディング効果により、爆源に二次波が発生する。
- ③ カバーガス高さが 200 mm 程度の場合、スラグは今回の薬量ではスラグは最大速度に達した後減少し、また、カバーガス圧縮効果が無視し得る。
- ④ カバーガスが存在しない場合、爆源圧力波がデッド・エンドのため封じ込められこの持続時間が長くなり、また、スラグ上部には高い圧力が発生する。

(3) 内部容器試験

- ① 爆源が $115 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ (容器底では約 $230 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$) の場合、内部容器は弾性範囲内であることが確認された。爆源が約 $400 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ の場合であっても、容器下部において最大 1.1% の周歪が残留する程度であった。
- ② 爆源が $400 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ であってもカバーガス高さが 200 mm の場合には、スラグ・インパクトによる容器の首下変形はないが、同じ条件でカバーガス高さが 50 mm の場合には、首下変形が顕著(歪硬化を含み周残留歪 $3 \sim 4\%$)であった。
- ③ 容器の耐衝撃応答は、発破後の応力波による軸方向の伸びに始まり、耐爆体下部の変形及び残留を得て後にスラグ・インパクトが発生する。
- ④ 耐爆体下部の変形は、容器底部からの反射波によって二段階で歪が形成される。

(4) 二重容器試験

- ① スラグ・インパクト圧に見合った吊り下げボルト圧縮荷重が発生する。
- ② 外部容器とアニュラス部流体の存在効果により、内部容器の変形は軽減する

謝 辞

衝撃波の計測手法と計測結果の妥当性に対し、懇篤な御指導を賜った工業技術院，科学技術研究所，田中一三博士に深甚なる感謝の意を表します。