

圧 力 波 伝 播 実 験

第3報 蒸気発生器モデルにおける試験結果

1977年3月

動力炉・核燃料開発事業団

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-arai-machi Higashi-
Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation)

圧力波伝播実験

第3報 蒸気発生器モデルにおける試験結果

報告者 菱田 誠*
佐藤 健**
堀 雅夫***

期間 昭和46年4月1日～昭和51年11月30日

目的

蒸気発生器内でナトリウム-水反応事故が起った時の圧力波が二次系に伝播する様子を調べるための実験で、本報では蒸気発生器単体について圧力波伝播特性を調べた。

要旨

原型炉二次系構成機器のうち、蒸気発生器を取りあげ、実物の約1/12.5の縮尺モデルについて圧力波伝播実験を行なった。

試験条件は、

- (1) 圧力波伝播媒体として水を使用した。
- (2) 立上り時間約1.5m sec, 波高値約2.2～7.0 kg/cm²の第一パルス波を存する入力波形を使用した。

試験結果から次のことが判った。

- (1) 入力波形の第一パルス波の波高値は、蒸気発生器下部プレナムで約1/15に、上部プレナムで約1/30に減少する。
- (2) 計算結果と実験結果では差異を示す場所もあるが、全体的には比較的良い一致を示す。
- (3) 実験結果と計算結果の比較の際に、SG部分に次の三つの計算モデルを用いた。

- (イ) 実際の断面積に従って、一次的に組合せたモデル。
- (ロ) 伝熱管部に平均断面積を用いたモデル。
- (ハ) シェラウド外側(実際のSGではダウンカム-部に相当)のみを考慮したモデル。

比較結果では、各モデルによる計算結果ともかなり良く一致しており、モデル間の差も殆どなかった。

- (4) 使用した計算モデルは、この蒸気発生器と同様の形状の過熱器、再熱器等に使用可能と考える。
- (5) SWAC-5 計算コードは、実機二次系の圧力波伝播解析に使用できると考える。

* 現在、日本原子力研究所

** 現在、北海道電力株式会社

*** 大洗工学センタ 蒸気発生器開発部 高速炉安全性試験室

Experiment on Pressure wave Propagation
(III) The Result of Experiment with steam Generator Model

Makoto HISHIDA*
Ken SATO**
Masao HORI***

Abstract

Pressure wave propagation in and through a steam generator was studied using 1/12.5 scale model of the MONJU steam generator for the purpose of establishing the analyzing method of pressure-wave propagation through the FBR secondary circuit in case of a sodium-water reaction.

The tests were conducted using water as the coolant fluid instead of sodium. The first wave of input pressure had 1.5 msec rise time and 2.2~7.0 kg/cm² peak value.

The test results were compared with the calculation results by SWAC-5H and SWAC-5K codes which were developed for analyzing the pressure wave propagation in an FBR secondary circuit.

Following conclusions were obtained from this study;

- (1) Peak value of the first wave was decreased from that of the input wave to about 1/15 in the lower plenum of SG and to about 1/30 in the upper plenum of SG.
- (2) The agreements between the experimental results and calculated results were fairly good as a whole.
- (3) Following models were used for the calculation of pressure propagation in SG;
 - (a) One-dimensional variable cross-section model
 - (b) Average cross-section model
 - (c) Down-comer cross-section model (Omitting the tube bundle path and center pipe path)

All of the above models showed a fairly good agreement with the experimental results and there were not much differences between the calculated results by each model.

- (4) The above calculation models can be applied for the calculation of pressure wave propagation in and through a superheater and reheater which have the similar configura-

* Presently with Japan Atomic Energy Research Institute
** Presently with Hokkaido Electric Power Company
*** Fast Reactor Safety Test Section, Oarai Engineering Center

tion with this steam generator model.

- (5) The SWAC-5 codes can be used for the analysis of pressure wave propagation in the actual FBR secondary circuit.

目 次

1. まえがき	1
2. 実験装置と実験方法	2
3. 実験結果	10
3.1 実験条件及び圧力波形の測定結果	10
3.2 圧力波伝播速度測定結果	11
3.3 各測定点における第一パルス波の波高値の減少	12
4. 実験結果と計算結果の比較	26
4.1 計算モデル	26
4.2 計算結果と実験結果の比較	27
5. 結 論	46
謝 辞	47
参 考 文 献	48

図 表 リ ス ト

図 2. 1	蒸気発生器モデル実験装置図	4
図 2. 2	試験部立面図	5
図 2. 3	試験部平面図(1)-発生管からSGモデルまで-	6
図 2. 4	試験部平面図(2)- SGモデルから吸収管まで-	7
図 2. 5	蒸気発生器モデル	8
図 2. 6	圧力波測定点	9
表 3. 1	実験条件	12
図 3. 1	測定データ(GA-3)	13
図 3. 2	測定データ(GB-4)	14
図 3. 3	測定データ(GC-5)	15
図 3. 4	測定データ(GD-2)	16
図 3. 5	測定データ(GD-5)	17
図 3. 6	測定データ(GD-6)	18
図 3. 7(a)	測定データ(GF-6 その1)	19
図 3. 7(b)	測定データ(GF-6 その2)	20
図 3. 7(c)	測定データ(GF-6 その3)	21
図 3. 8	測定データ(GE-2 計算機処理)	22
図 3. 9	測定データ(GE-14 計算機処理)	23
表 3. 2	実物SGと試験モデルとの寸法比較	12
表 3. 3	伝播速度の計算値と測定値の比較	24
図 3.10	圧力波伝播速度の測定値	24
図 3.11	各測定点における第一パルス波の波高値の比較	25
図 4. 1	試験部の計算モデル	30
図 4. 2	SGモデルの概略寸法	31
図 4. 3	SGの計算モデル	32
表 4. 1	計算ケースの比較	33
図 4. 4	伝熱管の配列	33
図 4. 5	SG前方での圧力波比較[PG-4, GD-2]	34
図 4. 6	SG前方での圧力波比較[PG-4, GD-6]	35

図 4.7	SG前方での圧力波比較〔PG-4, GE-14〕	36
図 4.8	SG下部プレナムでの圧力波比較〔PG-6, GD-2〕	37
図 4.9	SG下部プレナムでの圧力波比較〔PG-6, GD-6〕	38
図 4.10	SG下部プレナムでの圧力波比較〔PG-6, GE-14〕	39
図 4.11	SG上部プレナムでの圧力波比較〔PG-10, GD-2〕	40
図 4.12	SG上部プレナムでの圧力波比較〔PG-10, GD-6〕	41
図 4.13	SG出口部での圧力波比較〔PG-14, GD-2〕	42
図 4.14	SG出口部での圧力波比較〔PG-14, GD-6〕	43
図 4.15	SG出口部での圧力波比較〔PG-14, GE-14〕	44
図 4.16	SG後方での圧力波比較〔PG-18, GE-14〕	45

1. ま え が き

高速原型炉「もんじゅ」の蒸気発生器内でナトリウム-水反応（大リ-ク・ナトリウム-水反応）事故が起ると、ピーク圧の高い圧力波が発生し、この圧力波が二次系中の各機器（例えば中間熱交換器，再熱器，ポンプ，弁，配管など）へ伝播する。

この圧力波によってもし機器が破損すると，ナトリウム火災の発生，プラント利用率へ悪影響を及ぼす。また万一中間熱交換器が破損し，一次系の放射化されたナトリウムが二次系中に混入する事になると，原子炉システムの安全性上問題となる。

従って，ナトリウム-水反応事故が生じた時の圧力波が，二次系中の各機器にどのように伝播するかを検討する必要がある。

本報告書は，「もんじゅ」蒸気発生器の約1/12.5の縮尺モデルについて行った試験結果について記した。

2. 実験装置と実験方法

実験装置

実験装置の概略図を図 2.1 に示す。

実験装置は大別して、下記のものにより構成されている¹⁾。

(1) 圧力波発生系統

試験部へ入射させる圧力波を発生させる系統で、窒素ガス室、ラブチャ-ディスク、圧力波発生管により構成されている。窒素ガス室内の窒素ガス圧(2~7 kg/cm²・G)をラブチャ-ディスクを破壊させることにより、圧力発生管の上部液面へ加え、圧力波を発生管の内に発生させる。発生した圧力波は、圧力波発生器の下方にある分岐管から試験部へ導かれる。

(2) 給水系統

試験部へ十分脱気した水を供給するための系統で、給水加熱器、脱気器、給水ポンプがある。

(3) 圧力波計測系統

試験部各部に於る圧力波を計測する系統である。圧力波測定用センサーとしては、豊田工機製半導体歪ゲ-ジ式圧力計(固有振動数約50KHz以上、フルスケ-ル10kg/cm²・g)を使用した。圧力計からの出力信号は増巾器で増巾し、デ-タレコ-ダ(AMPEX FR-1300)に記録する。再生記録は電磁オシロ(YEW 2902)によった。

上記(1)~(3)の系統は第一報¹⁾、第二報²⁾で記したものと全く同一であり、詳しくは第一報に記してある。

(4) 蒸気発生器試験部

蒸気発生器モデルの(以下SGモデル)試験部は、試験対象物であるSGモデルとSGモデル前後の配管等により構成されている。本実験の主な目的は、SGモデル単体内における圧力波の伝播を調べることである。従って、SGモデルに接続した配管はかなり長くとり、SGモデル内以外での反射波の影響が入らないよう試験時間を長くとれるようにした。

試験部の寸法を図 2.2~図 2.4 に示した。

SGモデルの各部寸法を図 2.5 に示す。

本実験に使用したSGモデルは、原型炉もんじゅの二次系第一次概念設計書を参考にして製作した。SGモデルには下部プレナム、上部プレナム、伝熱管部とセンターパイプがある。各部の寸法は、実物の約1/12.5の大きさにしてある。SGモデルの伝熱管部には、2mmφの針金を軸方向ピッチ4mm×半径方向ピッチ4mmでフラフ-ブ状に巻いてある。

実験方法

実験方法は第1報、第2報と同じである。SG下部プレナムには入口ノズルが2つあるが、図2.1に示すように、一方のノズルにのみ圧力波発生管から配管がしてある。他方のノズルには詰め物がしてあり、こちらのノズル内への圧力波の伝播はない。圧力波発生管からの圧力波は、片方のノズルからのみSG内へ伝播してくる。上部プレナムには出口ノズルが2つあり、両方のノズルから圧力波吸収管までは両者ともほぼ同じ配管がしてある。

圧力波測定点

図2.6に圧力波測定点を示す。圧力波の測定場所は、試験部への入力波形を測定するための圧力波発生管下部の分岐部(PG-06)、SGモデルへの入口配管(PG-4)、SG下部プレナム(PG5~PG-9)、上部プレナム(PG-10)、上部二重管部(PG-14~PG-17)、出口配管部(PG-18)等である。

データレコーダが6チャンネルであるため、ラブチャ-ディスクを破り一度圧力波を発生させる度に上記測定点から6ヶ所をえらび、その圧力を記録させた。

表2.1(圧力計との照合が容易となるように図2.6と一緒に記載した)に行なった実験の種類について記したが、GA(実験番号)ではSGの前方について調べ、GBでSG下部プレナムにおける円周方向の対象性、GCで上部プレナムにおける対象性、それにGFではSG後方配管での波形を調べた。GDとGEでは計算コードとの比較がしやすいようにSG各部(GD)、それにSG前後を加え(GE)で測定した。

各シリーズにつき、入力圧力約2, 4.5, 7 kg/cm²・gで各最低2回の測定を行った。

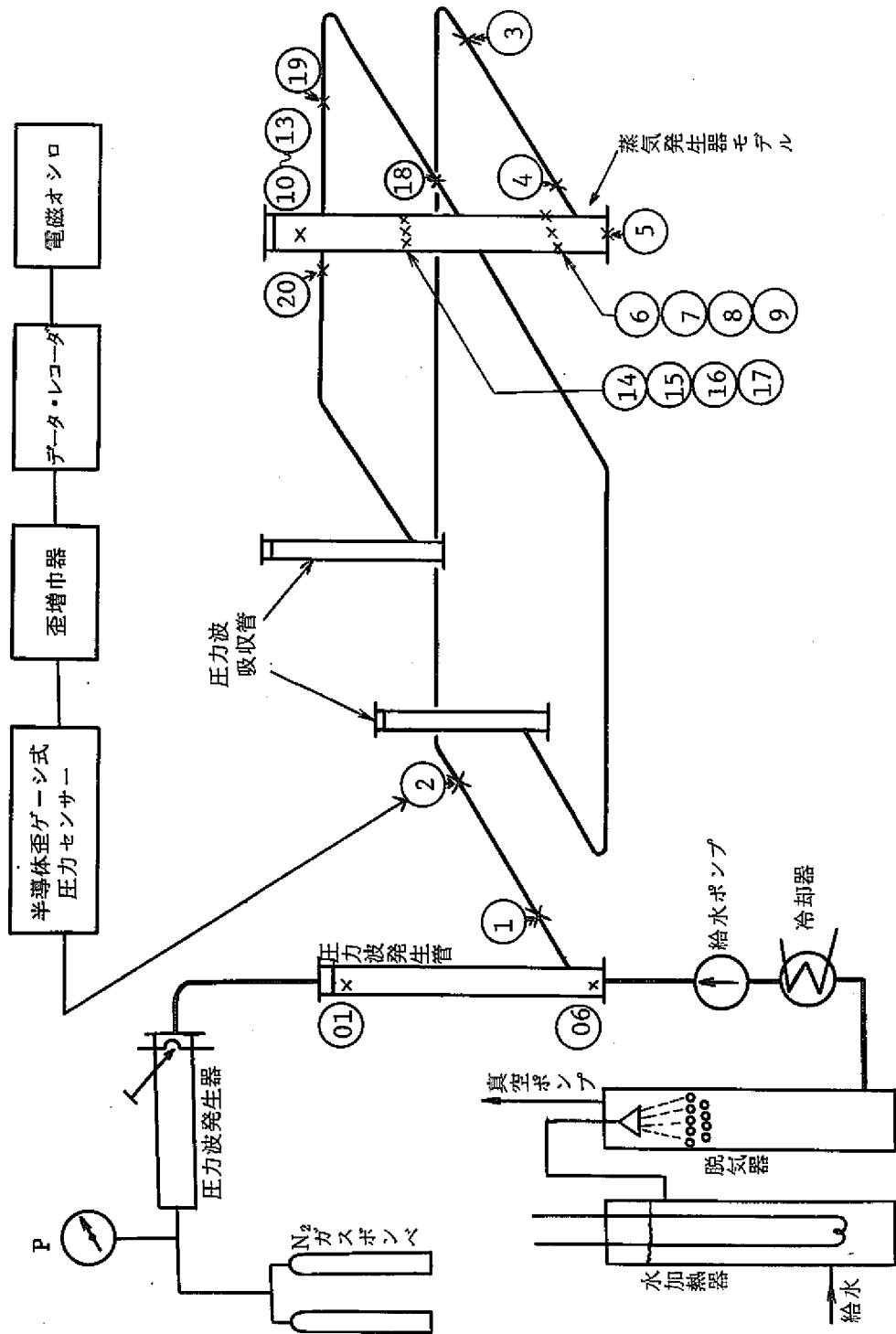


図 2.1 蒸気発生器モデル実験装置図

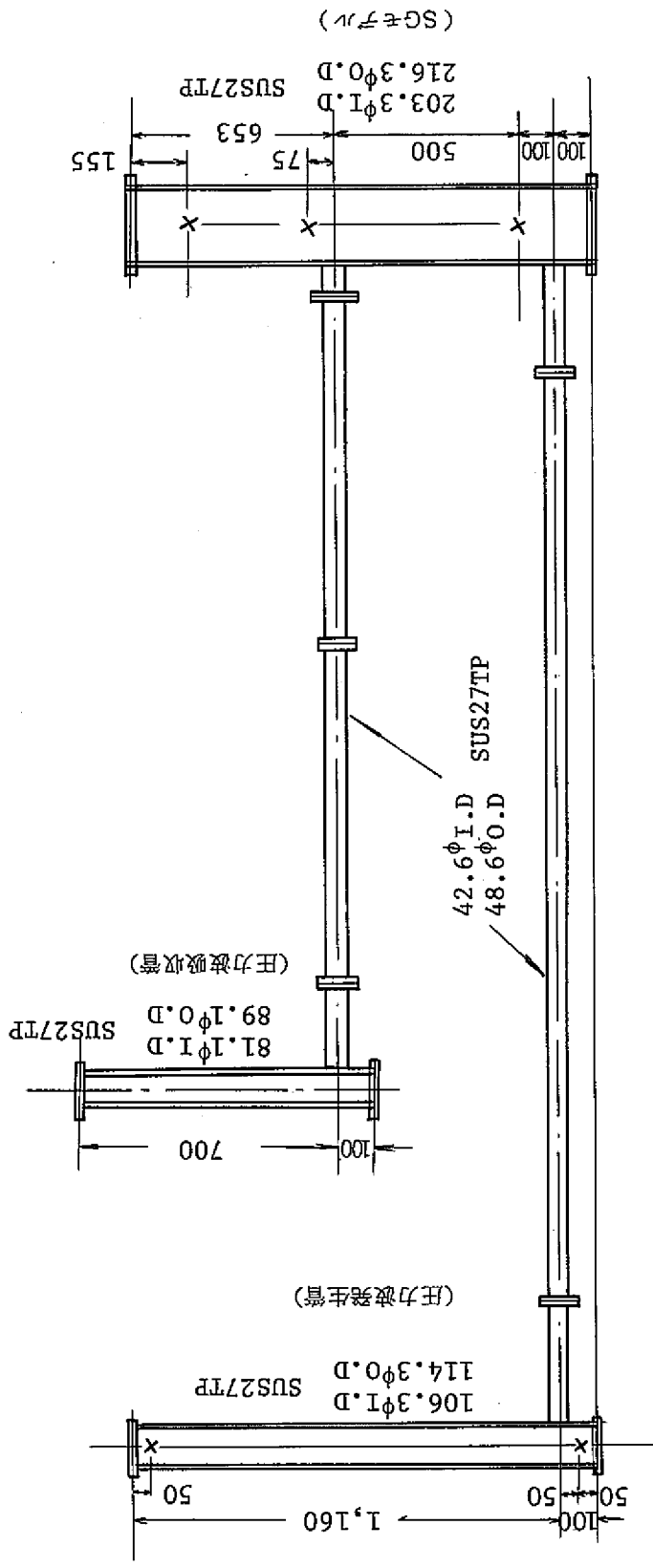


図 2.2 試験部立面図

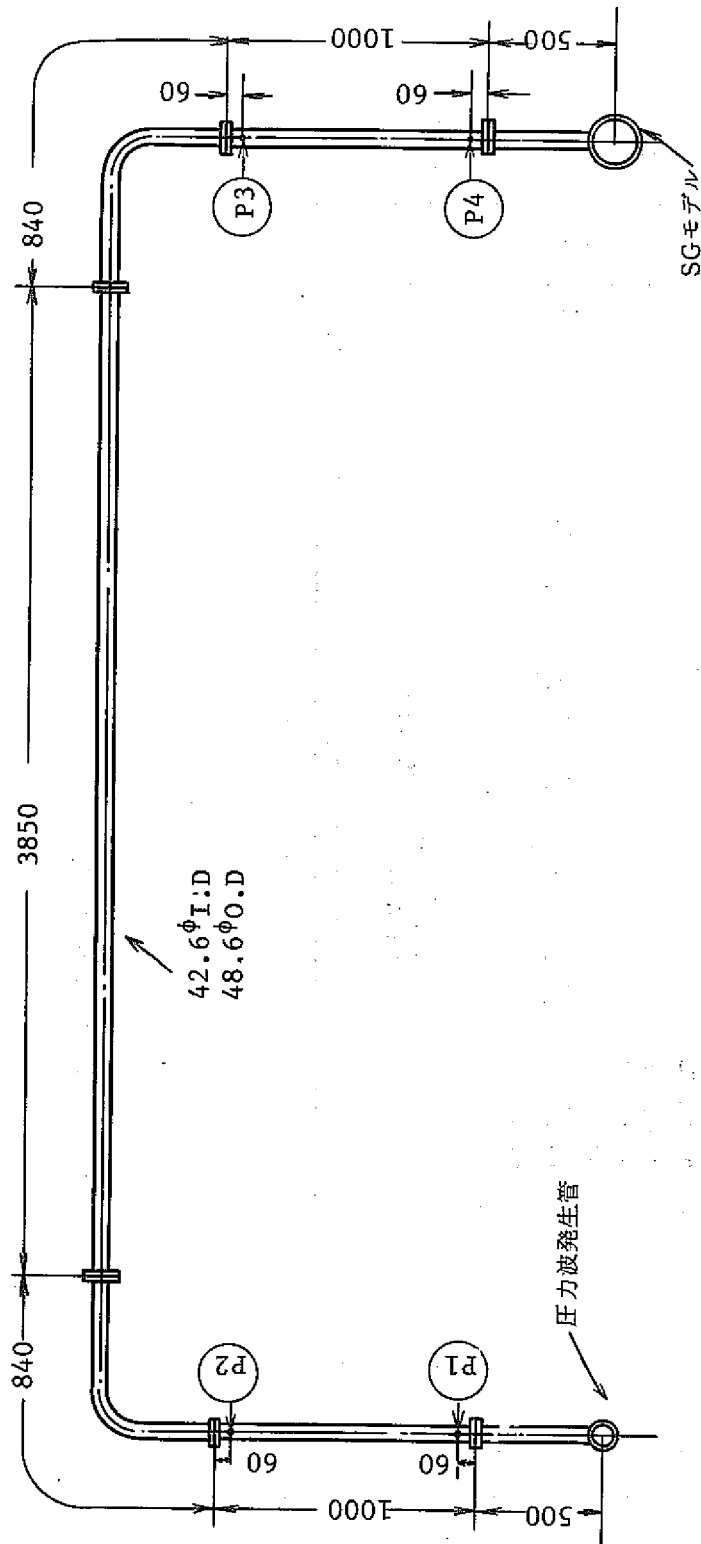


図 2.3 試験部 平面図(1)一発生管からSGモデルまで

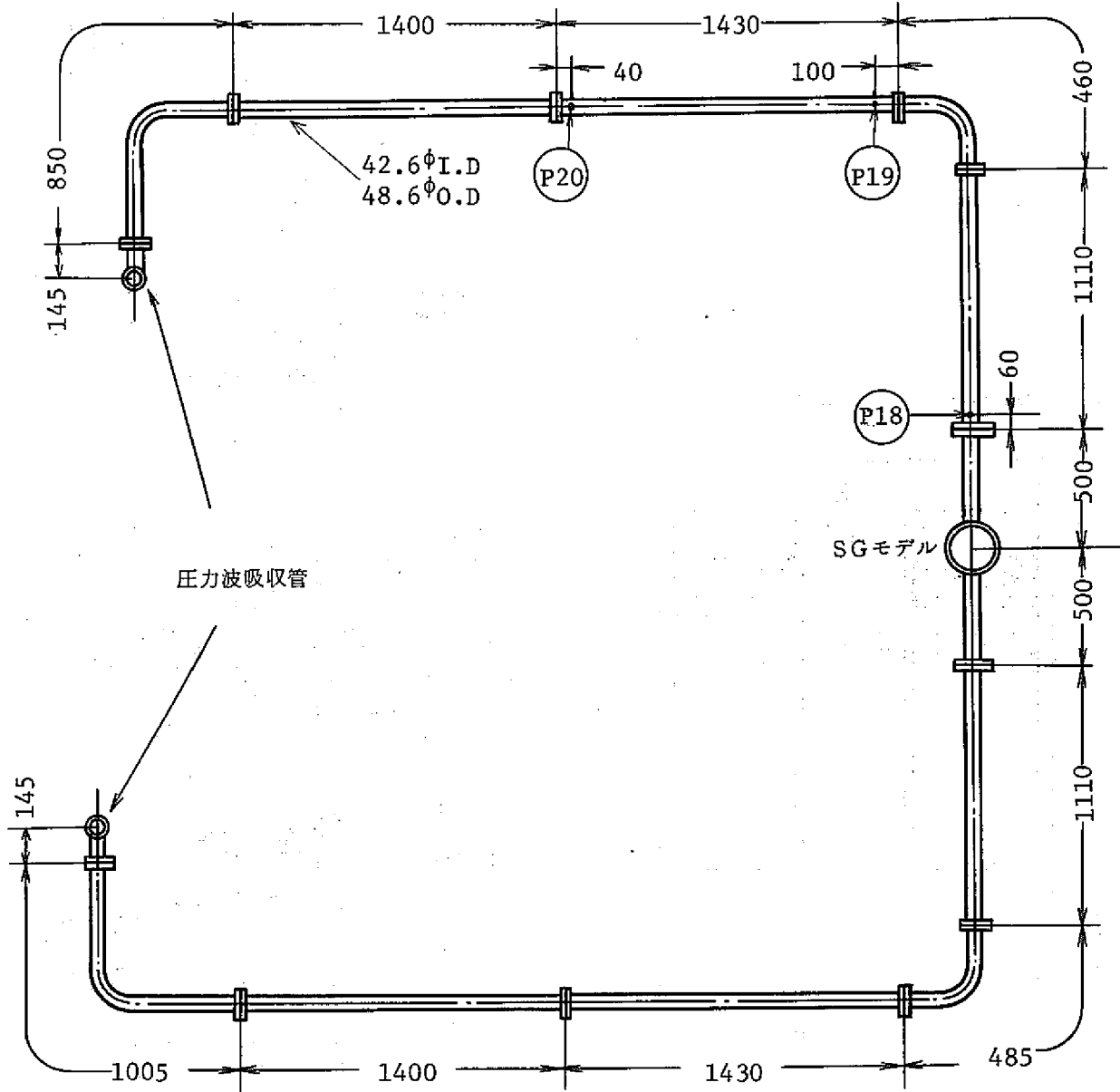


図 2.4 試験部 平面図(2) - SGモデルから圧力波吸収管まで

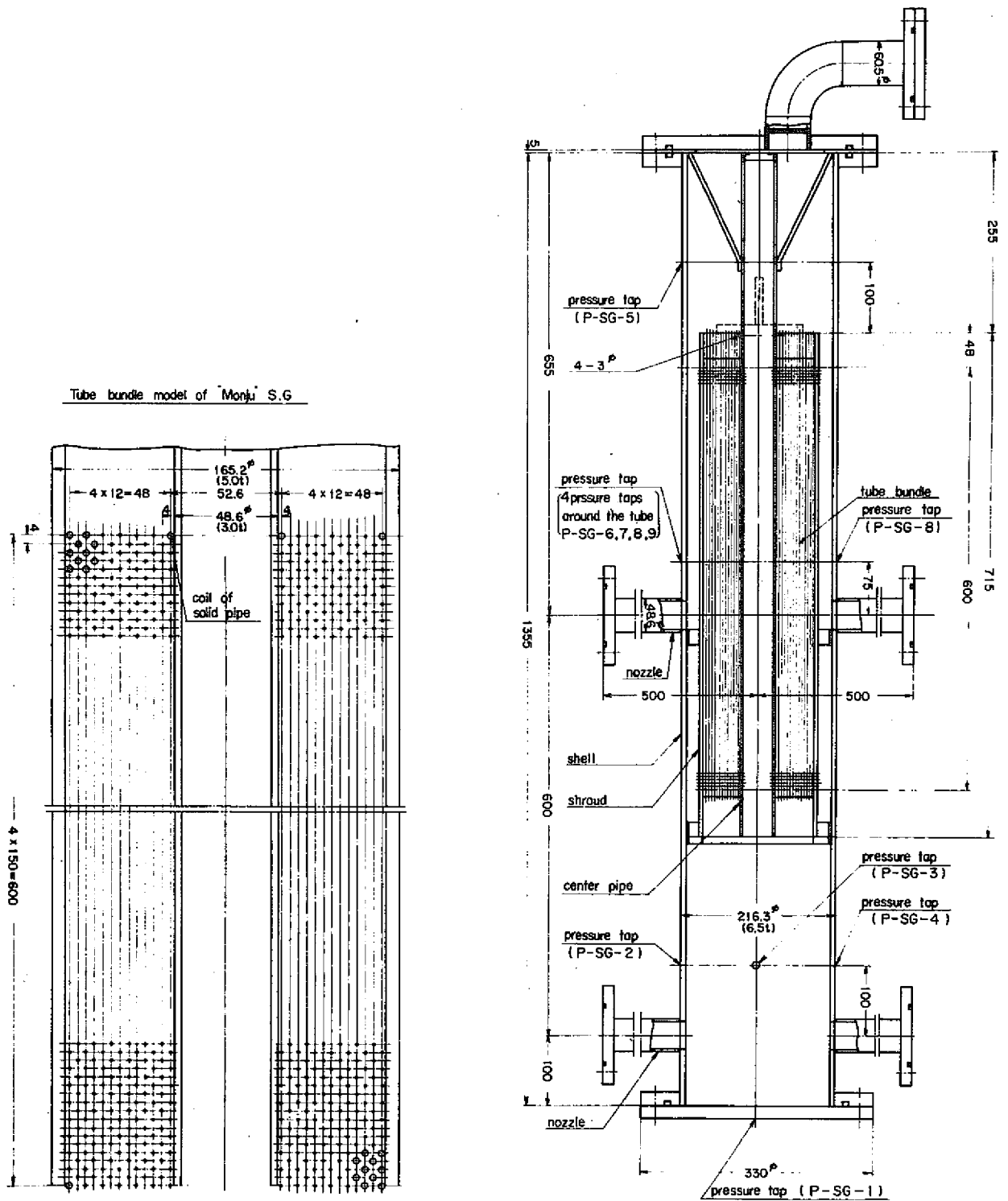
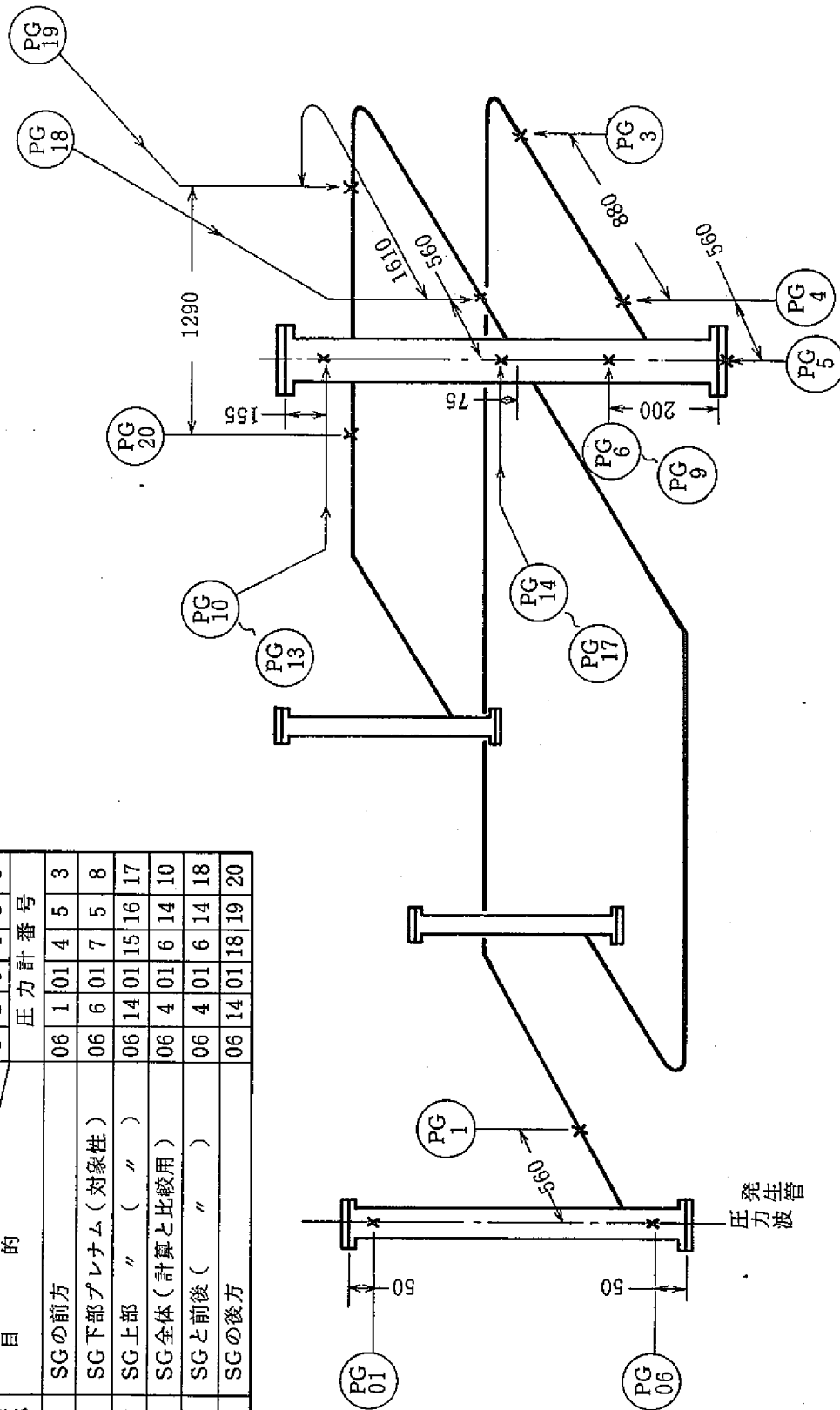


図 2.5 蒸気発生器モデル

表 2.1 各実験に於ける測定点

実験名称	目的	手マシナル					
		1	2	3	4	5	6
GA	SGの前方	06	1	01	4	5	3
GB	SG下部プレナム(対象性)	06	6	01	7	5	8
GC	SG上部 (")	06	14	01	15	16	17
GD	SG全体(計算と比較用)	06	4	01	6	14	10
GE	SGと前後 (")	06	4	01	6	14	18
GF	SGの後方	06	14	01	18	19	20



SGモデル

図 2.6 圧力波測定点

3. 実験結果

3.1 実験条件及び圧力波形の測定結果

実験条件

表 3.1 に実験条件を示す。圧力波伝播媒体としては、ナトリウムのかわりに約 25℃の水(音速約 1,385 m/s)を使用した。実験に使用した入力圧力波形(試験部入口での圧力波形)の 1 例が、図 3.1 の PG-06 である。

入力波形は、圧力波の立上り時より約 1.5 msec 後に最初のピーク値をもっている。このピーク値の波高値は、約 2.0~7.0 kg/cm²・g である。また最初のピーク値に達するまでの時間は約 15 msec である。

表 3.2 に実物 SG と試験モデルの寸法比較を示す。試験モデルの寸法は“もんじゅ”第一次概念設計の SG の約 1/12.5 である。

測定データ

図 3.1 ~ 図 3.9 に各試験シリーズにおける圧力波形の測定結果を示す。

図 3.1 ~ 図 3.7 は実験データを約 20 msec トレースして見やすく整理したもので、GA からは 2 kg/cm²・g の例(GA-3)、GB からは 4.5 kg/cm²・g の例(GB-4)、GC からは 7 kg/cm²・g の例(GC-5)、GD からは 2, 4.5, 7 kg/cm²・g の 3 種類(GD-2, 5, 6)、GF からは 7 kg/cm²・g の例(GF-6)を選んだ。

以上はそれぞれ横軸は時間軸を表わしている。

図 3.8、図 3.9 はスケールを統一して再生するために、電子計算機により処理を行った。GE シリーズから、2 kg/cm² と 7 kg/cm² の例として GE-2、GE-14 を選んだ。

図中Ⓐで示される時点は SG 入口下部プレナムでの反射波が到達する時点、Ⓑは SG 上部液面からの反射波が到達する時点、Ⓒは SG 出口(上部)ノズルからの反射波が到達する時点、Ⓓは圧力波吸収管の入口分岐部からの反射波が到達する時点を示す。

GA-3(図 3.1)では、圧力波発生管からの圧力波が配管中をどのように伝播し SG へ到るかが解る。GB-4(図 3.2)では、SG 下部プレナムでの圧力波は円周方向と底部においてほとんど同一であることが解る。GC-5(図 3.3)では、SG 出口部(分離シェラウドとシェル間)での円周方向の対象性がみられる。GD(図 3.4~図 3.6)と GE(図 3.8~図 3.9)では、SG 前後部及び内部での圧力波の推移が解る。PG-10 では、自由液面に近いため圧力値は極端に減少している。GF(図 3.7)では SG 後方への圧力波伝播の様子が知られる。

3.2 圧力波伝播速度測定結果

圧力波の立上り時点、あるいは最初のピーク値が二点間を通過する時間から、SGモデルの入口配管及び出口配管における圧力波の伝播速度を求めた（配管は内径42.6mm、外径48.6mm、SUS27TP）。

二点間として、図2.6の圧力波測定点PG-06~PG-4、PG-06~PG-5、PG-06~PG-6、PG-1~PG-5それにPG-18~PG-20を通過する時間から伝播速度を求めた。

測定結果を図3.10に白丸で示す。測定結果は平均値1,329m/secの±10%以内に入っている。測定値のバラツキは、通過時間を求めるための2点間の距離が比較的短いことと、圧力波の立上り時点、ピーク時点の判定が難しいことに起因すると考えられる。しかし各測定値の平均値は、計算値と良い一致を示している。このことは第1報、第2報と同様であり、円管内を伝わる圧力波の伝播速度はパイプの肉厚、パイプ材料の弾性等を考慮したアリエビの式(3.1式)で計算した値と一致する点を確認された。(表3.3)

この事実は、また本実験において、圧力波伝播媒体した中に空気泡の混入が無かった事をも示していると考え。アリエビの式による伝播速度 V_{lr} は次式で表わされる。

$$V_{lr} = \sqrt{\frac{1}{\frac{W}{g} \left(\frac{1}{K} + \frac{C_1 \cdot D}{E \cdot e} \right)}} \dots\dots\dots (3.1)$$

- ここで W : 流体の比重量 (kg/m³)
- K : 流体の体積弾性係数 (kg/m²)
- E : 配管材料の縦弾性係数 (kg/m²)
- D : 配管の直径
- e : 配管の厚み
- g : 重力加速度 (=9.8m/sec²)
- C₁ : 配管の固定条件により決る定数で、C₁ = 0.95とした。

図3.10には参考資料として、伝播経路中にSGを含む場合の平均の圧力波伝播速度の測定結果を黒丸で示す。SG内の圧力波の伝播経路は、伝熱管部、2重管部等が含まれており、これらの流路中の伝播速度は(3.1)式とは異なる。しかし伝熱管部、2重管部の長さは伝播速度と比べるとかなり短かく、実験結果からこれらの流路における伝播速度を求めることはできなかった。ここでは参考までに、2点間PG-06~10、PG-06~14、PG-06~18での測定値から伝播速度の平均値を示した。

この値は配管中の速度より小さくなることが予想されたが、少々大きめの値がでていいる。これは圧力波の立上り時点の判定の難しさの他に、SG内の伝播経路は実際は三次元的であるのに、一次

元的におきかえる時に、PG間の距離を長く見積りすぎていることが考えられる。

3.3 各測定点における第一パルス波の波高値の減少

PG-06での圧力波の波高値を1とした時の各測定点での圧力波の減少の様子を図3.11に示した。

SG入口で約1/1.8, 下部プレナムで約1/16.7, 上部プレナムとSG後方で約1/33.3である。これは、各測定点での第一パルス波の波高値を、PG-06における第一パルス波の波高値と比較したものである。(PG-06の圧力波形は、立上り始めてから約4 msecの間は第一パルス波のみであり、PG-1~20で得られた波形の第一パルス波は、おおよそ3 msec 巾以下の三角波であるので、これらの波高値は、PG-06の第一パルス波のみの減少が測定されている。)

表 3.1 実験条件

実験シリーズ番号	水温	伝播速度	入力圧力波高値	入力波立上り時間
GA	25 °C	1,385 m/s	2.0~46 kg/cm ² . g	約 1.5 ms
GB	"	"	1.4~44 "	"
GC	"	"	2.0~46 "	"
GD	"	"	2.0~45 "	"
GE	"	"	1.9~50 "	"
GF	"	"	2.3~49 "	"

表 3.2 実物SGと試験モデルとの寸法比較

		MONJU	モデル	寸法比
高	さ	17,700	1,360	1/13
上部プレナム	直 径	3,300	203	1/16.3
	高 さ	4,800	255	1/18.8
下部プレナム	直 径	2,600	203	1/12.8
	高 さ	2,900	385	1/7.5
二次系入口ノズル内径		525	426	1/12.3
二次系出口ノズル内径		429	426	1/10.1
伝 播 管	外 径	27.2	2	1/13.6
	ピ ッ チ	40×40	4×4	
シュラウド内径		1,970	155	1/12.7
センターパイプ		610	42.6	1/14.3

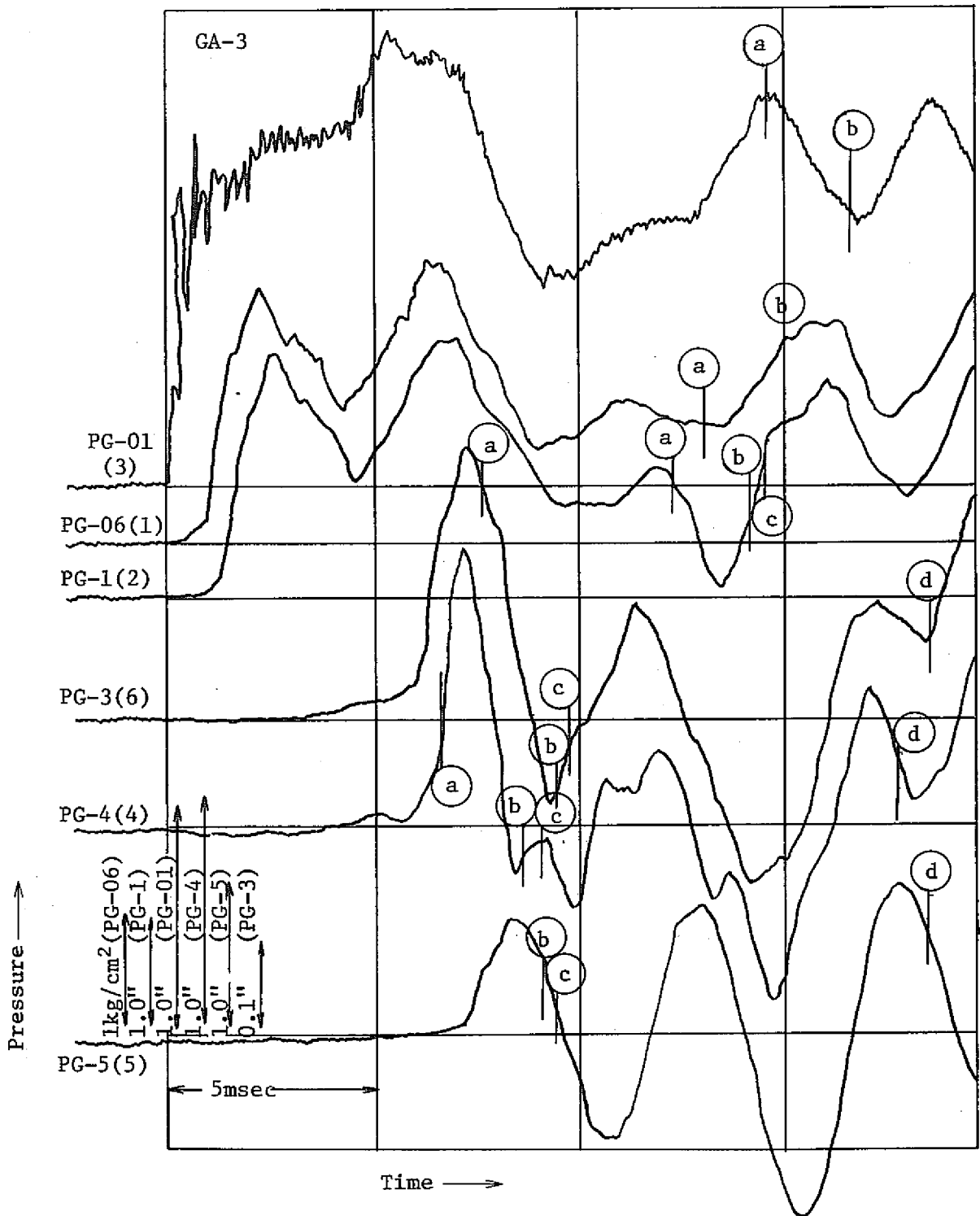


図3.1 測定データ (GA-3)

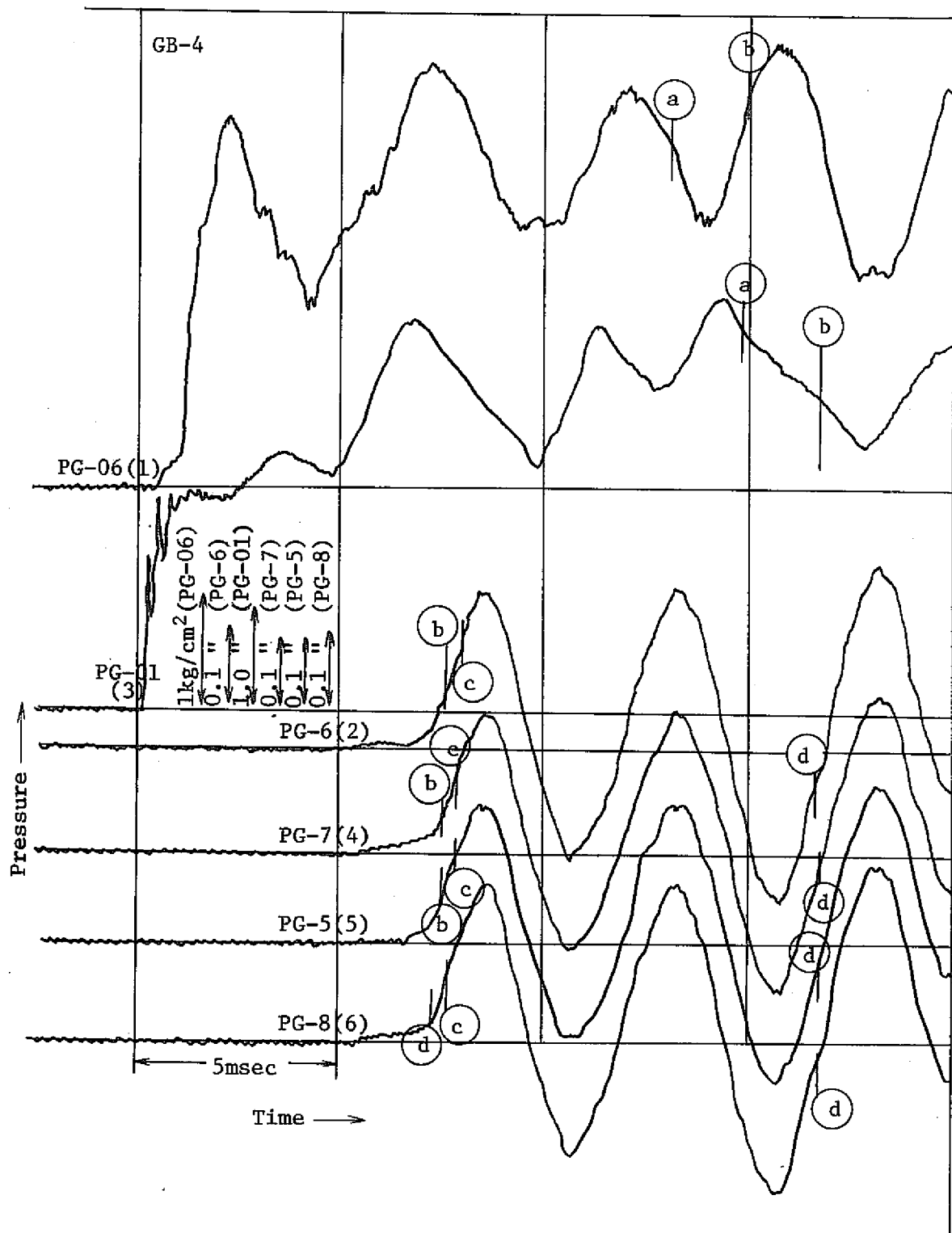


図 3.2 測定データ (GB-4)

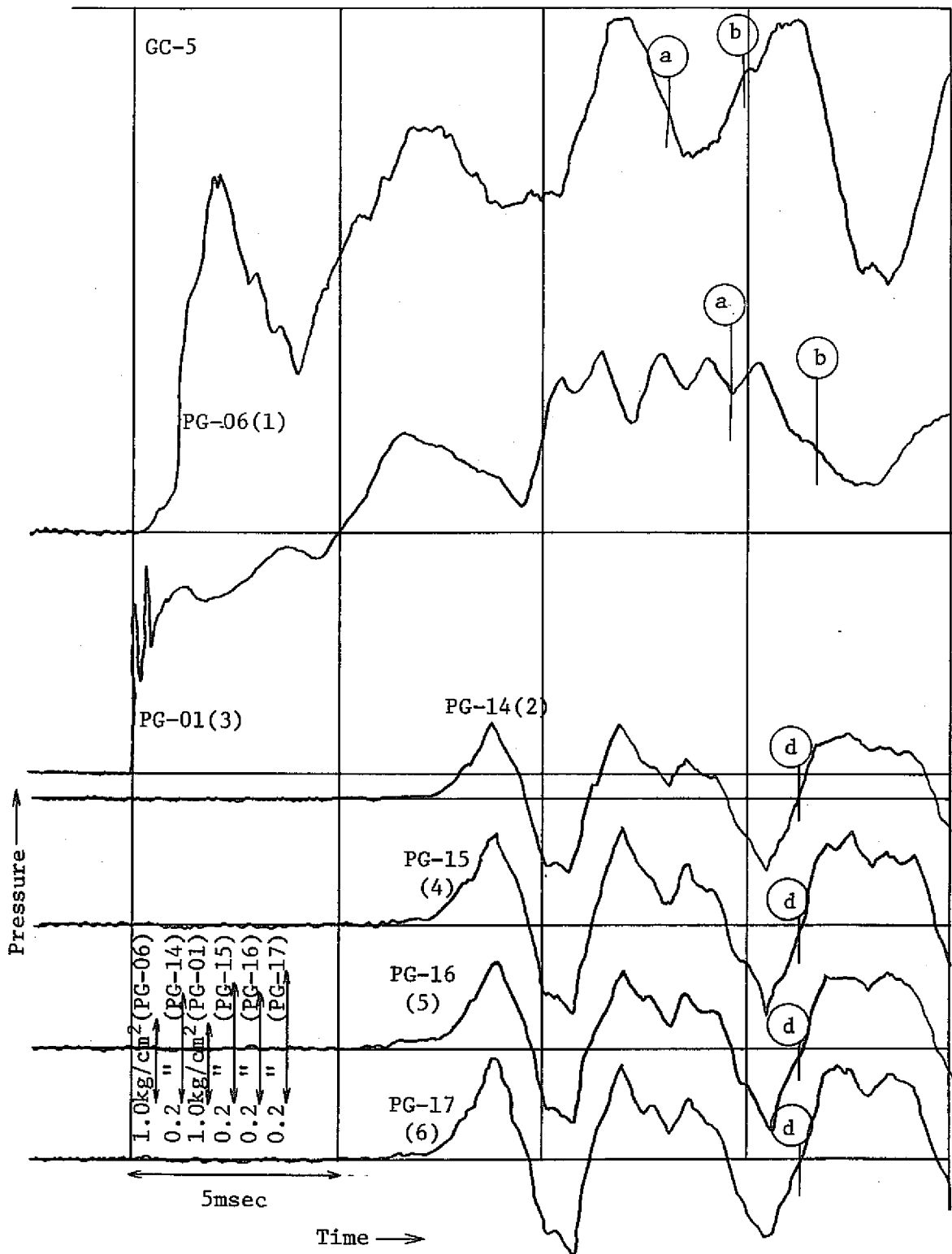


図 3.3 測定データ (GC-5)

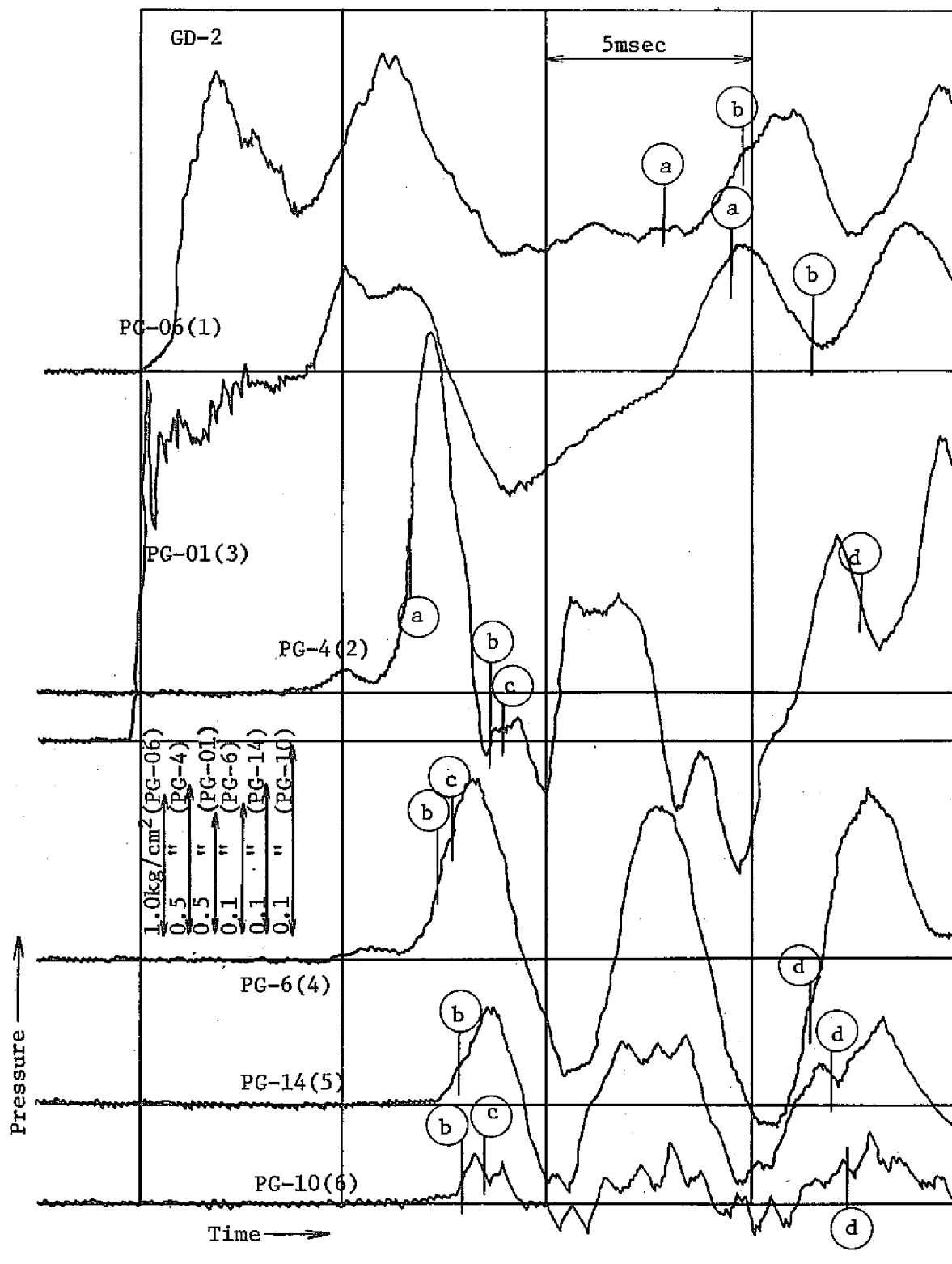


図 3.4 測定データ (GD-2)

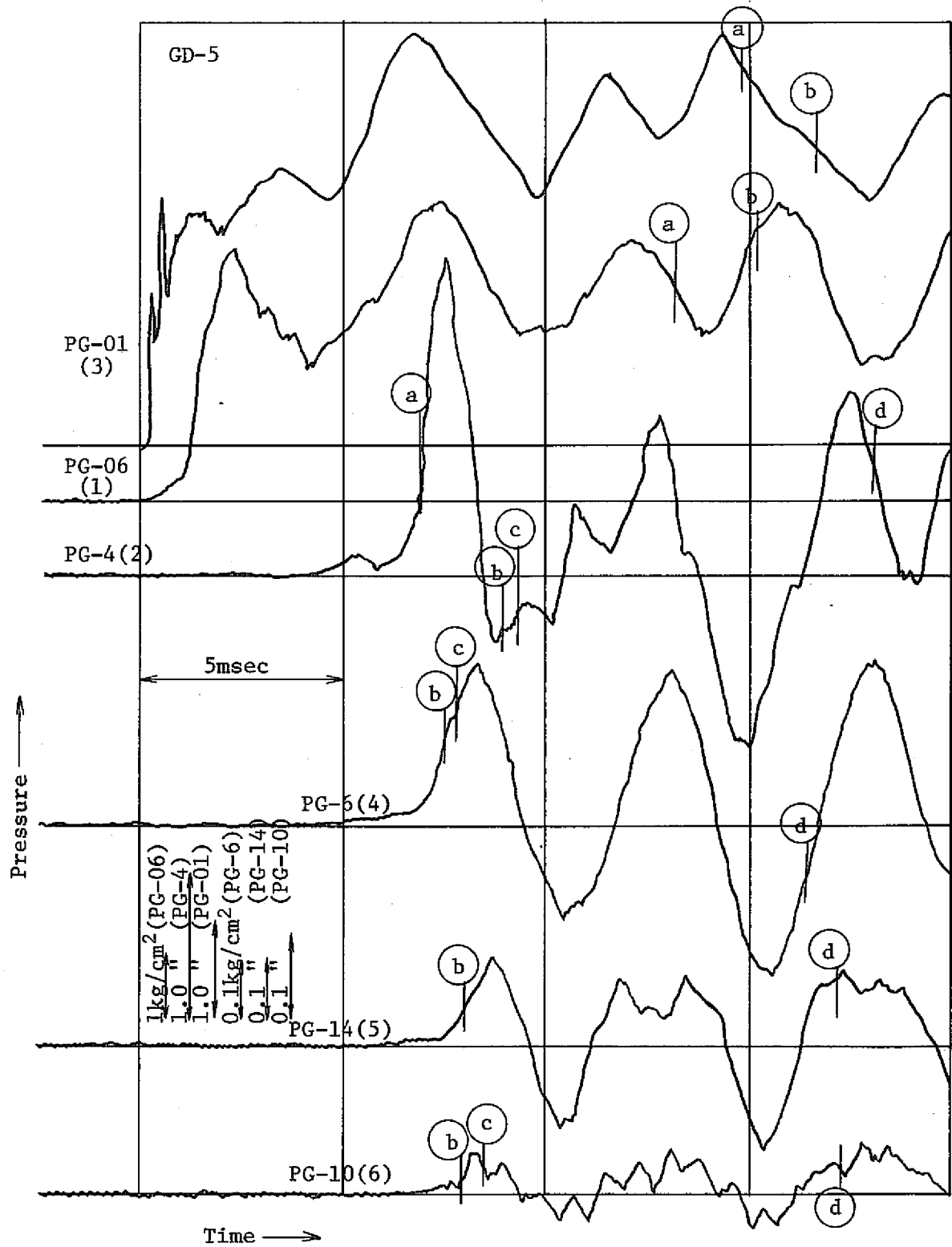


図 3.5 測定データ (GD-5)

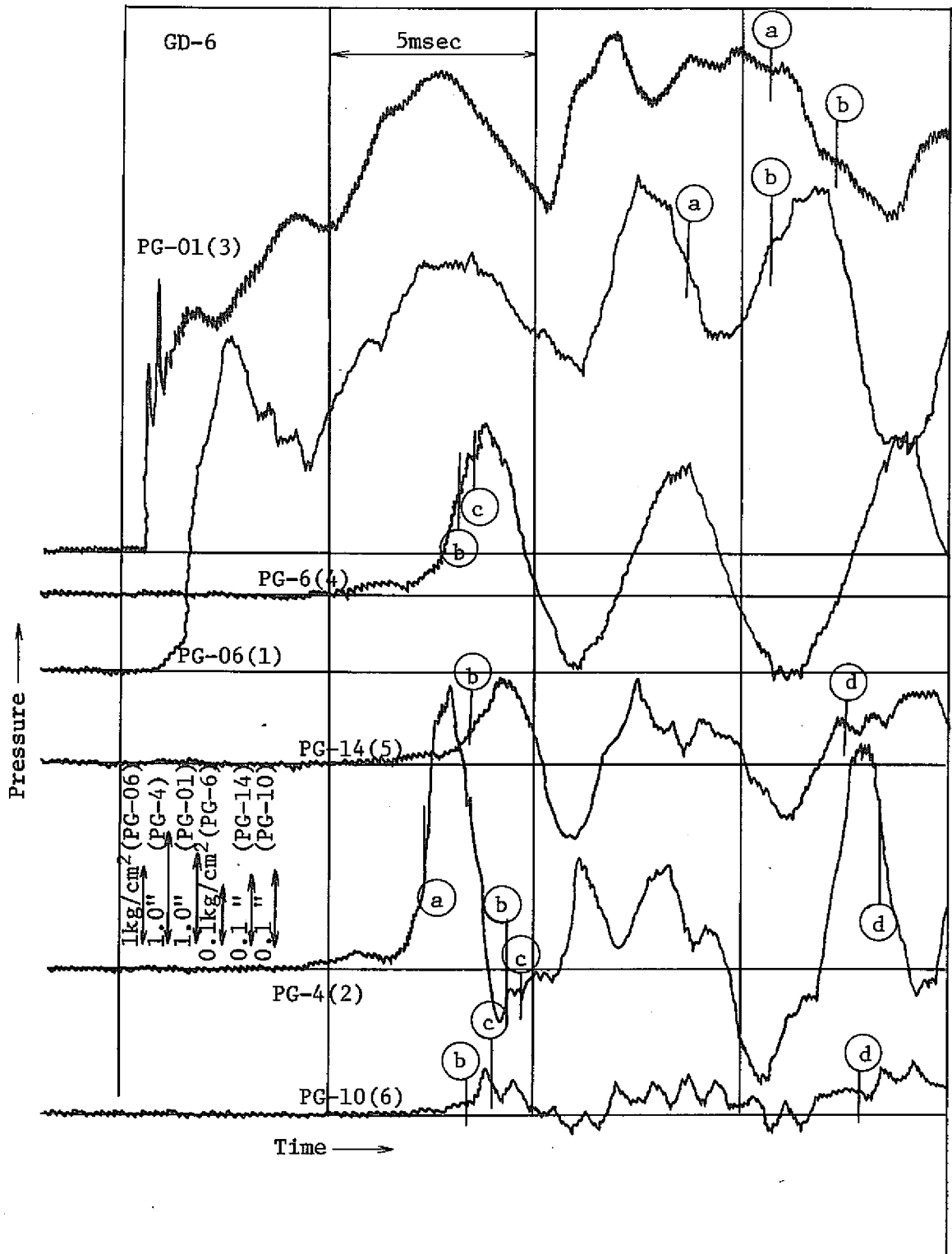


図 3.6 測定データ (GD-6)

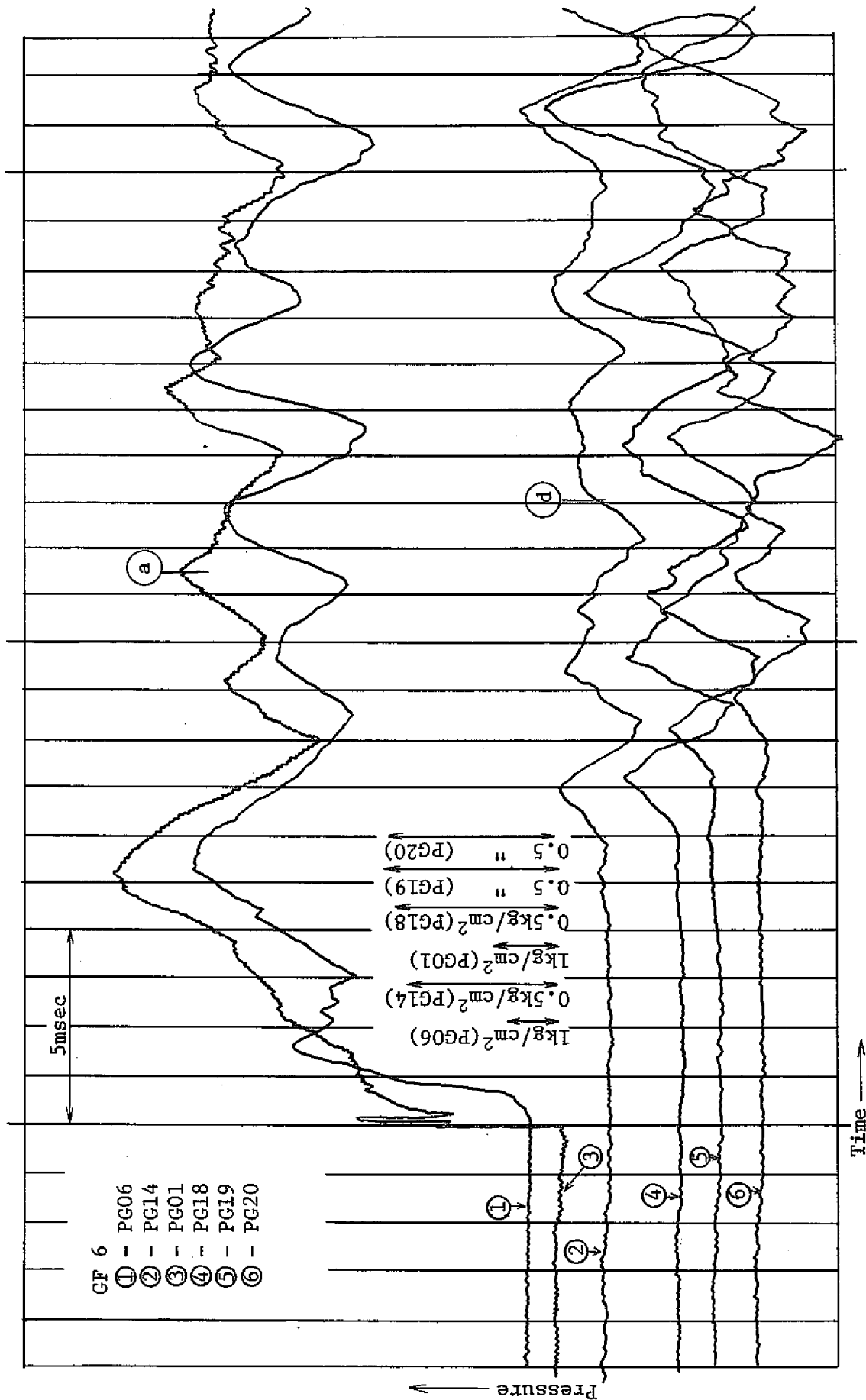


図 3.7(a) 測定データ (GF-6 その1)

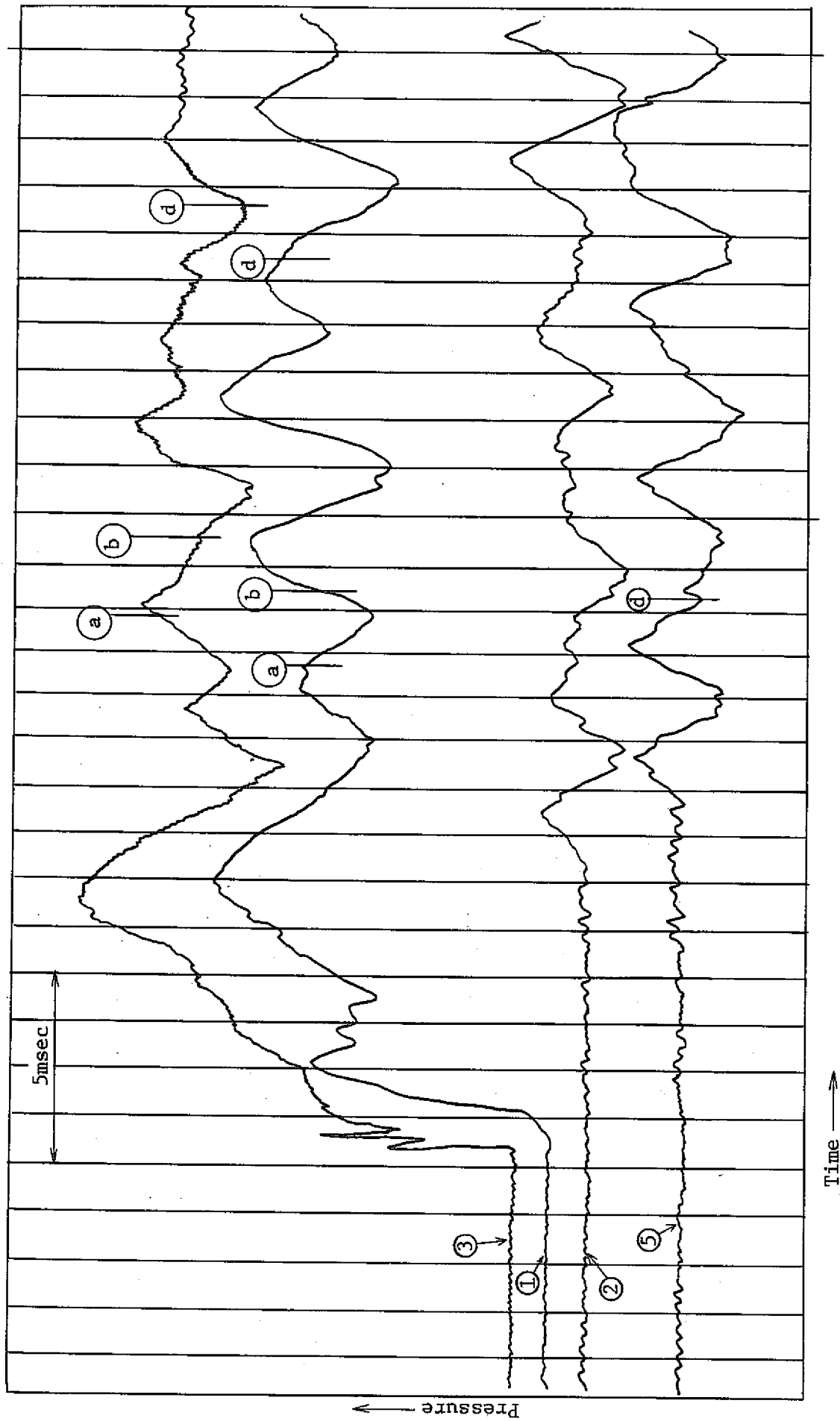


図 3.7(b) 測定データ (GF-6 その2)

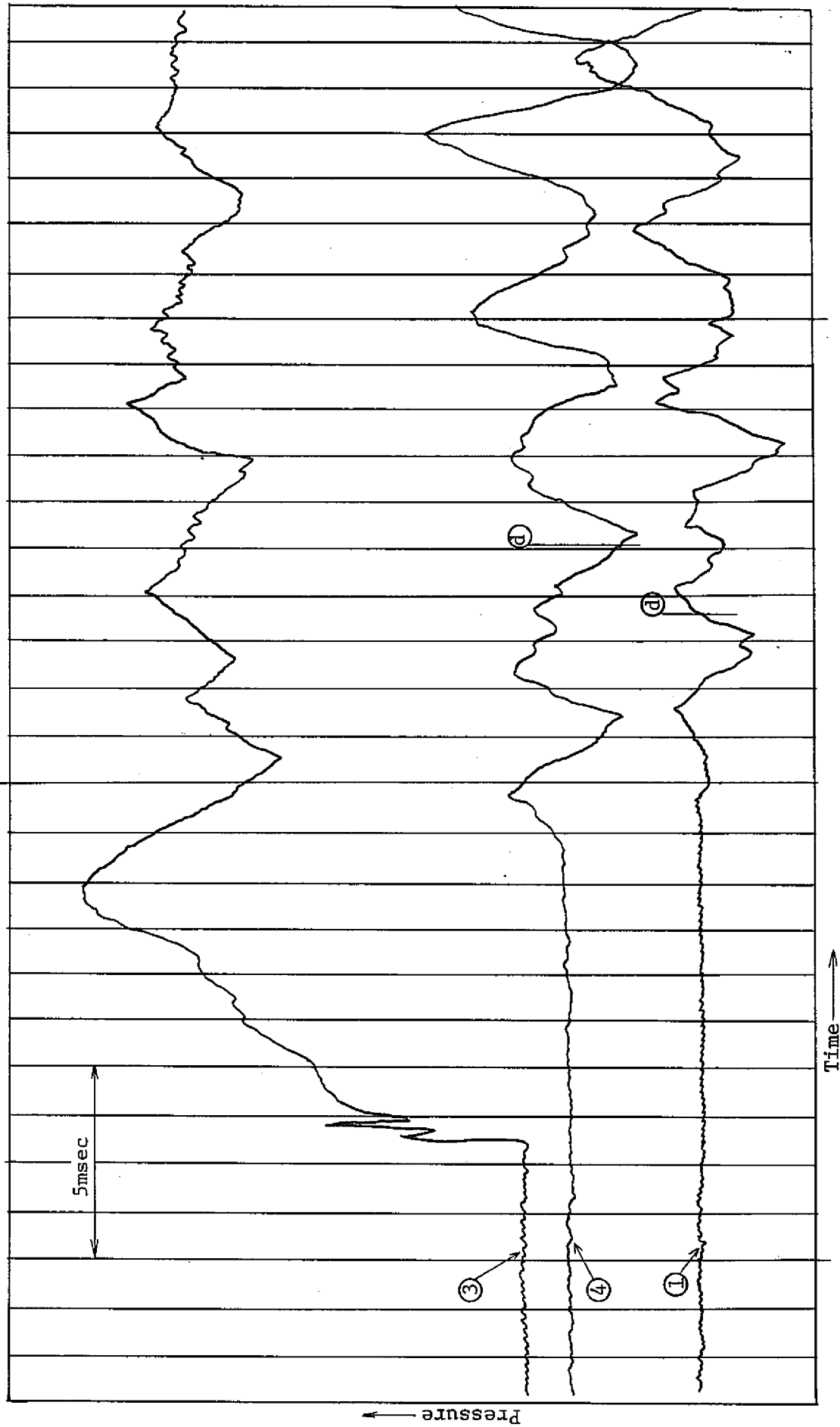


図 3.7(c) 測定データ (GF-6 その3)

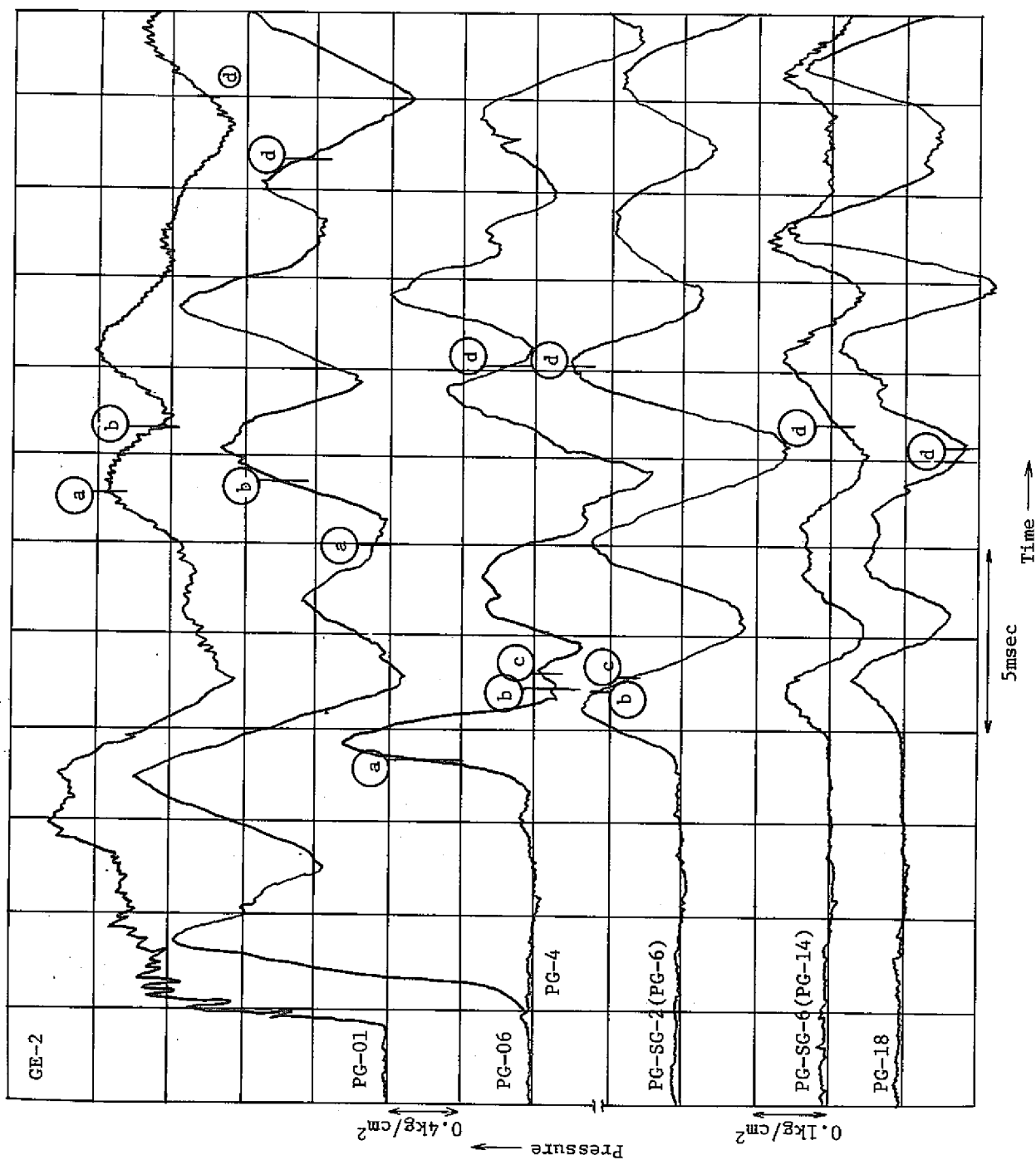


図 3.8 測定データ (GE-2 計算機処理)

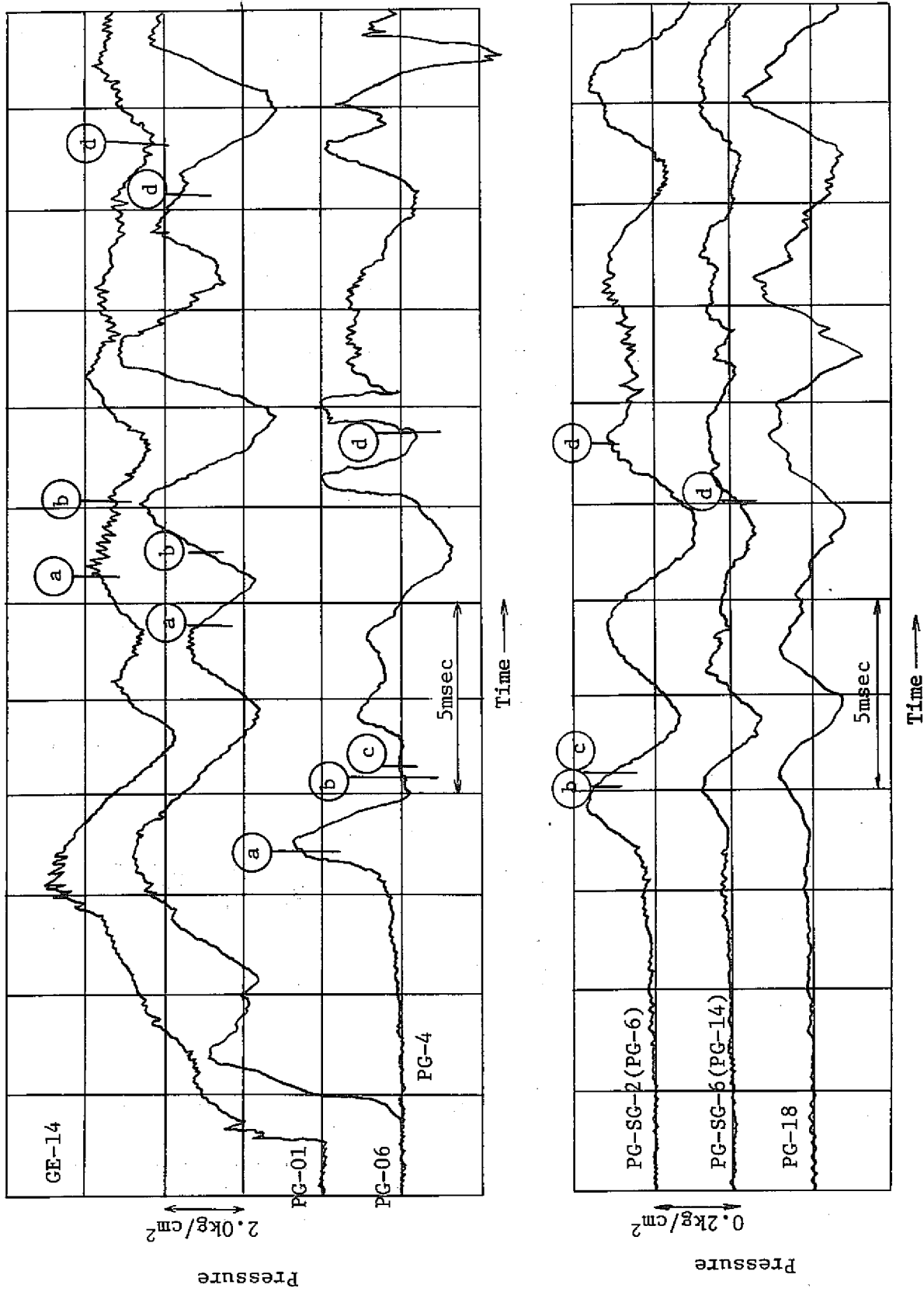


図 3.9 測定データ (GE-14, 計算機処理)

表 3.3 伝播速度の計算値と測定値の比較

測定区間	計算値	実験値(平均値)	誤差
①⑥ - ④	1,338 m/sec	1,370 m/sec	+ 2.4 %
①⑥ - ⑤	1,338 "	1,316 "	- 1.7 %
①⑥ - ⑥	1,338 "	1,305 "	- 1.7 %
①⑥ - ⑤	1,338 "	1,282 "	- 4.2 %
①⑧ - ②⑩	1,338 "	1,326 "	- 0.9 %
配管内伝播速度測定値の平均	1,338 "	1,329 "	- 0.7 %
①⑥ - ⑩	————	1,365 "	————
①⑥ - ⑫	————	1,370 "	————
①⑥ - ⑱	————	1,380 "	————

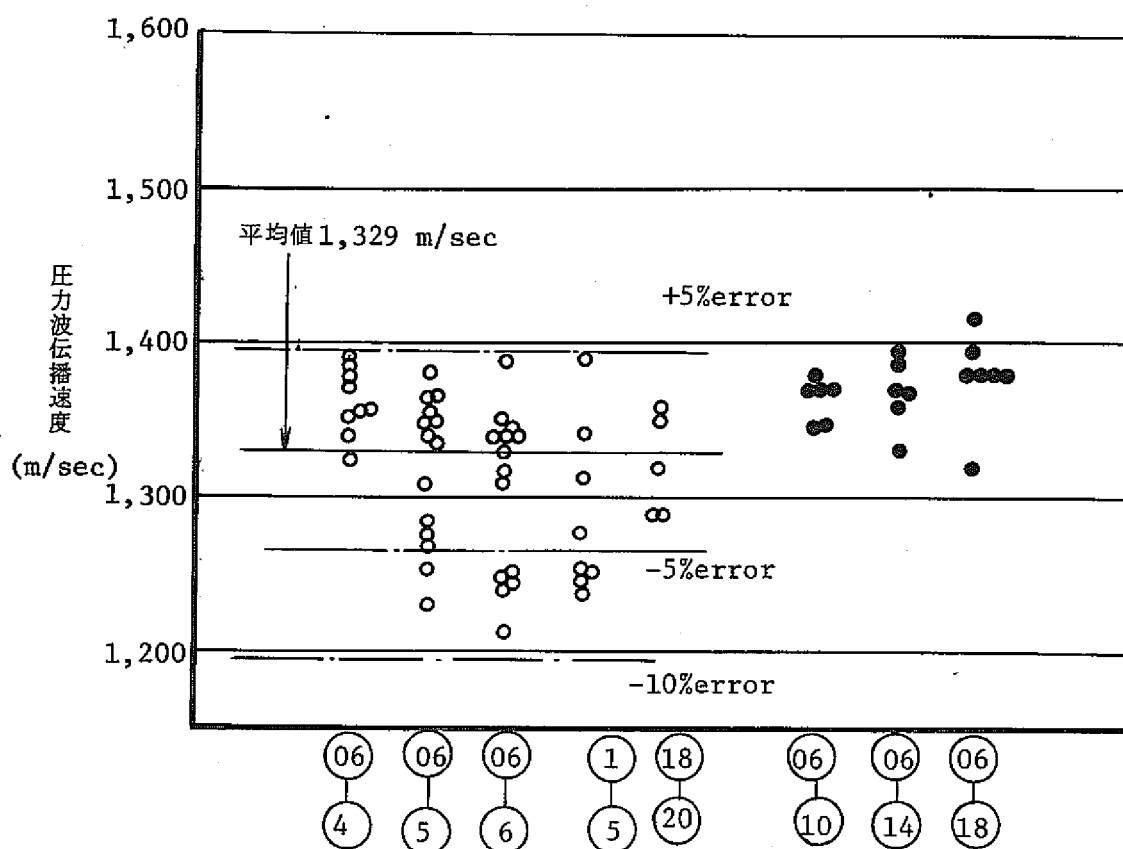


図 3.10 圧力波伝播速度の測定値

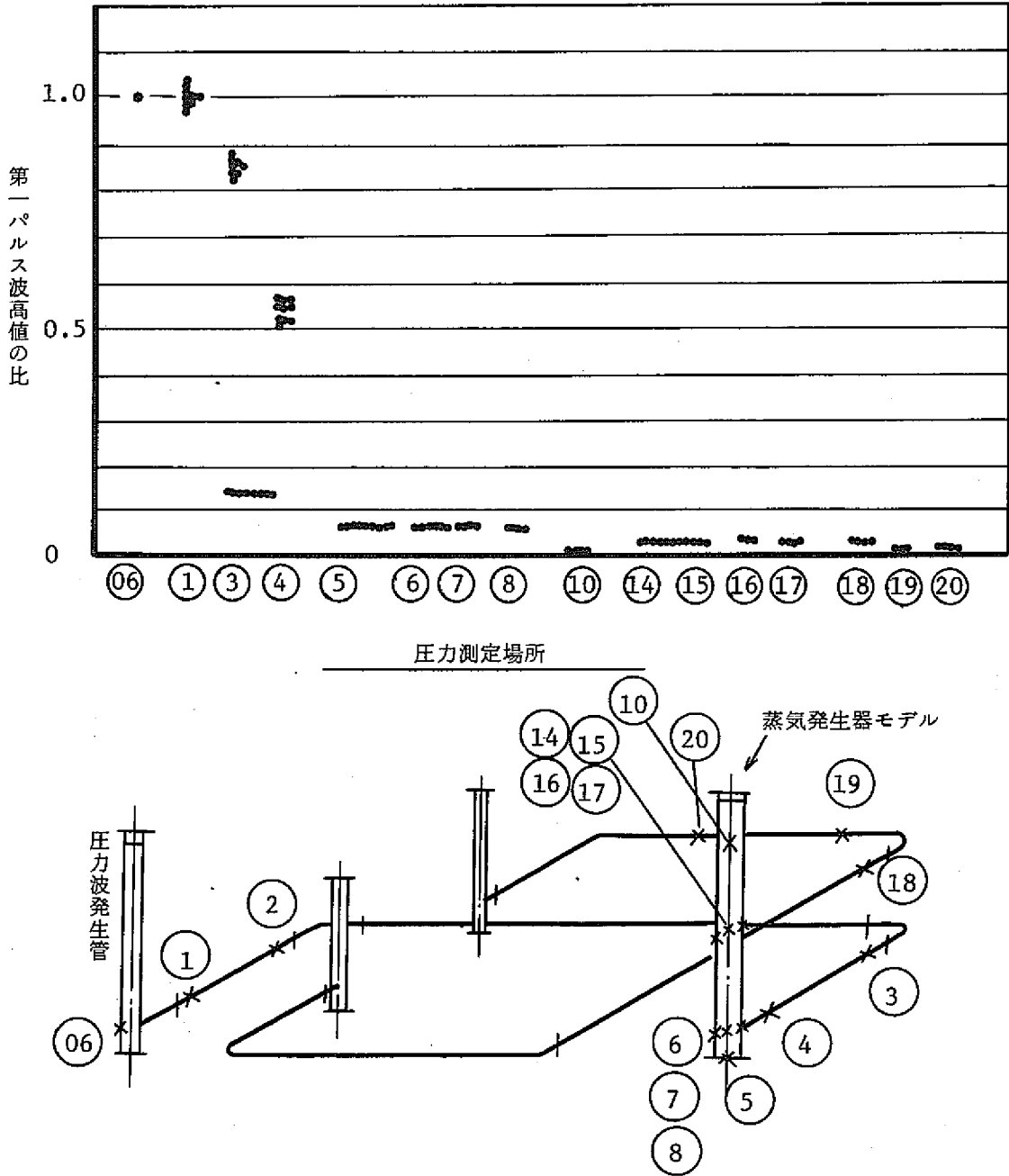


図 3.11 各測定点における第一パルス波の波高値の比較

4. 実験結果と計算結果の比較

3章で得られた実験結果と、従来の一次元的解析方法との比較を行った。解析は、動燃事業団からの委託研究として、川崎重工株式会社と株式会社日立製作所に作成を依頼した圧力波伝播計算コード、SWAC-5K、SWAC-5Hを用いて行った。

SWAC-5K、SWAC-5Hについては、それぞれの報告書を参照されたい。^{3),4)}

4.1 計算モデル

試験部の計算モデルを図4.1に示した。SGモデルの計算モデルは図4.3に示してある。

モデル化にあたっては、下記の考え方に沿って行なった。

- (1) ベンドはすべて直管として扱う。
- (2) 配管と圧力波吸収管との接合部は三分岐で取り扱うことも考えられるが、簡単のため異経管とした。SGと吸収管の距離は6mと十分に長いため、圧力波吸収管での反射波がSG近辺の計算値に与える影響は十分時間が経った後である。
- (3) 圧力発生面としては図4.1のS点を考え、入力圧力波としてはPG-06の値を使用した。Sを出た波がSGモデルの下部プレナムで反射してS点に戻り、ここで絶対値がほぼ等しく、符号の反対な圧力波として試験部へ伝播されていく。この波が各測定点へ到達した後は、計算値は実際と違ったものとなるため、実験値との比較はこの時点までと考える。PG-4で17.3ms、PG-18で18.8msecまでである。
- (4) SGのモデル化

図4.2にSGモデルの概念図を示した。これを計算モデル化したのが図4.3である。SGのモデル化は①～④に注意して、図4.2と図4.3を比較することにより理解できる。SG入口部、出口部は三分岐として扱った。

図4.3の(イ)はSG内の圧力波伝播径路を一次元流路の組み合わせでモデル化したものであり、伝熱管部の取り扱いが複雑である。(ロ)は簡略化したモデルであり、センターパイプと伝熱管を省略したモデルである。

(イ)の場合の伝熱管の取り扱い方について述べる。

伝熱管は、センターパイプを中心に直径2mmの針金がフラフープ状に巻かれている。そのピッチは図4.4に示す。 S_3 はシュラウド部の断面積からセンターパイプの断面積を引いた値であり、コイルの存在しない部分の断面積に相当する。 S_1 は S_3 からコイルの流れ方向への投影面積を引いた値であり、コイルの数の多い部分の流路断面積を示す。 S_2 はコイルの数の少ない部分の流路断面積を示す。

伝熱管部を、この S_1 、 S_2 、 S_3 の組合せでモデル化したのが表4.1に示すCASE1であ

り、 S_1 、 S_2 、 S_2 の平均値を用いてモデル化したのがCASE2~4である。いずれの場合も伝熱管部は異経管と考え、その断面積は S_1 、 S_2 、 S_3 を使った場合とその平均値を使った場合との2通りである。伝熱管部流路の代表直径としては水力等価直径を使用した。各ケースの計算に際し、時間メッシュの中は約0.035m sec（圧力波の伝播距離にして約50mmに相当する）とした。

計算を行なった5ケースについて伝熱管部の取り扱い、使用計算コード、比較した実験データを表4.1に示す。実験データGD-2は、入力圧力が 2 kg/cm^2 のものであるが、SG内では圧力波の大きさが約 $1/15 \sim 1/30$ に減少するため、実験精度上問題のあることも考えられる（圧力波の測定にはフルスケール 10 kg/cm^2 の圧力センサーを使用している）。従って、CASE-3では入力圧力波のピーク値が $7 \text{ kg/cm}^2 \cdot g$ の実験結果（GD-6）と比較した。SG後方での比較のため、CASE-4では実験データGE-14との比較を行なった。CASE-5では伝熱管とセンターパイプ省略の影響をみた。

CASE1~3はSWAC-5K、CASE4、5はSWAC-5Hを使用した。

4.2 計算結果と実験結果の比較

SG前方配管での比較（PG-4）

図4.5~図4.7に、SG前方配管（PG-4）での計算結果と実験結果の比較を示す。

図4.5は、CASE1及びCASE2の計算結果と実験結果（入力波の波高値約 $2 \text{ kg/cm}^2 \cdot g$ ）との比較を示す。計算結果と実験結果とは比較的良く一致している。図で17.3m secの位置は、圧力波発生管の下部3分岐（図4.1のS点）を出た圧力波がSG入口プレナム部で反射し、その反射波がさらに圧力波発生管の下部3分岐で反射した後、PG-4に到達する時点を示す。この時点以降では前述の如く、図4.1のS点を圧力波発生面と考えることができなくなる為、計算結果と実験結果を厳密に比較することはできない。図4.5から明らかなように、CASE1とCASE2の計算結果は一致しており、伝熱管部の取り扱い方法の差は計算結果にはあらわれていない。図4.6は、入力波の波高値が $7 \text{ kg/cm}^2 \cdot g$ の実験結果（GD-6）と計算結果との比較を示す。この場合も実験結果と計算結果は比較的良く一致している。また、図4.5の結果と比較し、波高値が大きくなったことによる差異はほとんどあらわれていない。

図4.7に、伝熱管とセンターパイプを省略した簡略化計算モデルと省略しない計算モデルで計算した結果の比較を示す。図から明らかなように、伝熱管とセンターパイプを省略したことの影響はほとんどあらわれていない。

SG下部プレナムでの比較（PG-6）

図4.8~図4.10にSG下部プレナムでの計算結果と実験結果の比較を示す。

図4.8は、CASE1及びCASE2の計算結果と実験結果（入力波の波高値約 $2 \text{ kg/cm}^2 \cdot g$ ）と

の比較を示す。下部プレナムにおいても伝熱管部の取り扱い方法の差は計算結果にほとんどあらわれていない。計算結果と実験結果では波形（圧力変動の位相等）は、ほぼ一致しているが、波高値は、計算値の方が第1ピーク値で実験値の約1.7倍、第2ピーク値で約2.8倍と高い値となっている。

図4.9は、入力波の波高値が約 $7 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ の実験結果（GD-6）と計算結果との比較を示す（CASE3）。CASE3の場合は、CASE2の場合よりは実験結果と計算結果との一致は良い。この原因は、CASE3の方がCASE2の場合より実験精度が良いためである。しかし、この場合においても、計算結果は実験結果より第1ピーク値で約1.3倍、第2ピーク値で約2.4倍高い値となっている。

計算結果と実験結果の不一致が生ずる原因としては、①実験精度が悪い（CASE3の場合でも、SG下部プレナムでの波高値は $0.3 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ 程度である）。②入口、出口プレナム部、伝熱管部等における流路断面積の急拡大、急縮小に伴う圧力損失として定常流の値が使用できない。③入口プレナム部、出口プレナム部等における3次元圧力波伝播を一次元3分岐の圧力波伝播として取り扱うことができない。等が考えられる。これらの点については、今後検討が望まれる。

図4.10に、CASE4（伝熱管部を単一直管でおきかえたモデル）とCASE5（伝熱管とセンターパイプを省略したモデル）の比較を示す。図から明らかなように、CASE4とCASE5の計算結果には、それ程大きな差はない。むしろ、簡略モデル（CASE5）の方が実験値に近い結果が得られている。

SG上部プレナムでの比較（PG-10）

図4.11、図4.12にSG上部プレナム（自由液面下約150mm）での計算結果と実験結果の比較を示す。実験結果は、細かい（約1msec）圧力変動をしながら、全体としては約4.5msecの周期の圧力変動をしている。計算結果には、周期が約1msecの細かい圧力変動は得られていないが、全体的な圧力変動は計算結果と実験結果でほぼ一致していると考えられる。

図4.11から明らかなように、上部プレナムにおいても、伝熱管部の取り扱い方の差は計算結果にほとんどあらわれていない。

SG出口部での比較（PG-14）

図4.13～図4.15にSG出口配管より75mm上方で、シュラウドとシェル間の圧力波の実験値と計算値の比較を示す。

図4.13は、CASE1及びCASE2と実験結果（入力波の波高値約 $2 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{g}$ ）の比較を示す。実験結果と計算結果は良く一致している。また、SG出口部においても、伝熱管部のモデルの差は計算結果にあらわれていない。図4.14は入力波の波高値が高い場合（CASE3）の結果である

が、CASE2の結果と同じく、実験結果と計算結果の一致は良い。

図4.15に、伝熱管とセンターパイプを省略した簡略化モデルと、省略しない計算モデルで計算した結果の比較を示す。図から明らかなように、SG出口部においても、両者の結果に大きな差はない。

SG後方配管における比較 (PG-18)

SG後方(560mm)の配管における計算結果と実験結果の比較を図4.16に示す。実験結果と計算結果は比較的良く一致している。伝熱管とセンターパイプを省略した簡略化モデルで計算した結果と、省略しないモデルで計算した結果とは、約17m sec以降で多少差異が生ずる。SG後方配管においては簡略化しないモデルで計算した結果の方が実験値に近い結果が得られる。

実験結果と計算結果の比較のまとめ

上記の如く各測定点における実験結果と計算結果の比較を行なったが、これらの結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 実験結果と計算結果は、入口プレナム部 (PG-6の場所) を除き比較的良く一致している。
- (2) 入口プレナム部においても、圧力変動の波形 (圧力変動の位相等) は計算値と実験値で比較的良く一致しているが、波高値は計算結果の方が高い。
- (3) SGの計算モデルとして3種類のモデルを考えたが、計算モデルの差による相違は計算結果にほとんどあらわれない。
- (4) 以上の結果から、SWAC-5K、SWAC-5Hの計算コードは、実機二次系の圧力波伝播の解析に使用できると考えられる。(入口プレナム部においては、計算結果と実験結果との間で良い一致は得られなかった。しかし、入口プレナム部では実験値は低い値であり、実験精度に疑問がある。むしろ、SG上部プレナム部、SG出口部等における計算結果と実験結果の比較的良い一致から、SWAC-5計算コードは、実機二次系の圧力波伝播の解析に使用できると考えられる。また、入口プレナム部においても、計算結果の方が波高値が高い結果が得られるので、安全性の検討には、計算結果を使用して差し支えないと考えられる。)
- (5) SGの計算モデルとしては、上記の計算モデルを使用できる。

	断面積 (m ²)	直径 (m)
配管部	1.425×10^{-3}	42.6×10^{-3}
圧力波 吸収管	5.166×10^{-3}	81.1×10^{-3}
SGシールド	32.46×10^{-3}	203.3×10^{-3}

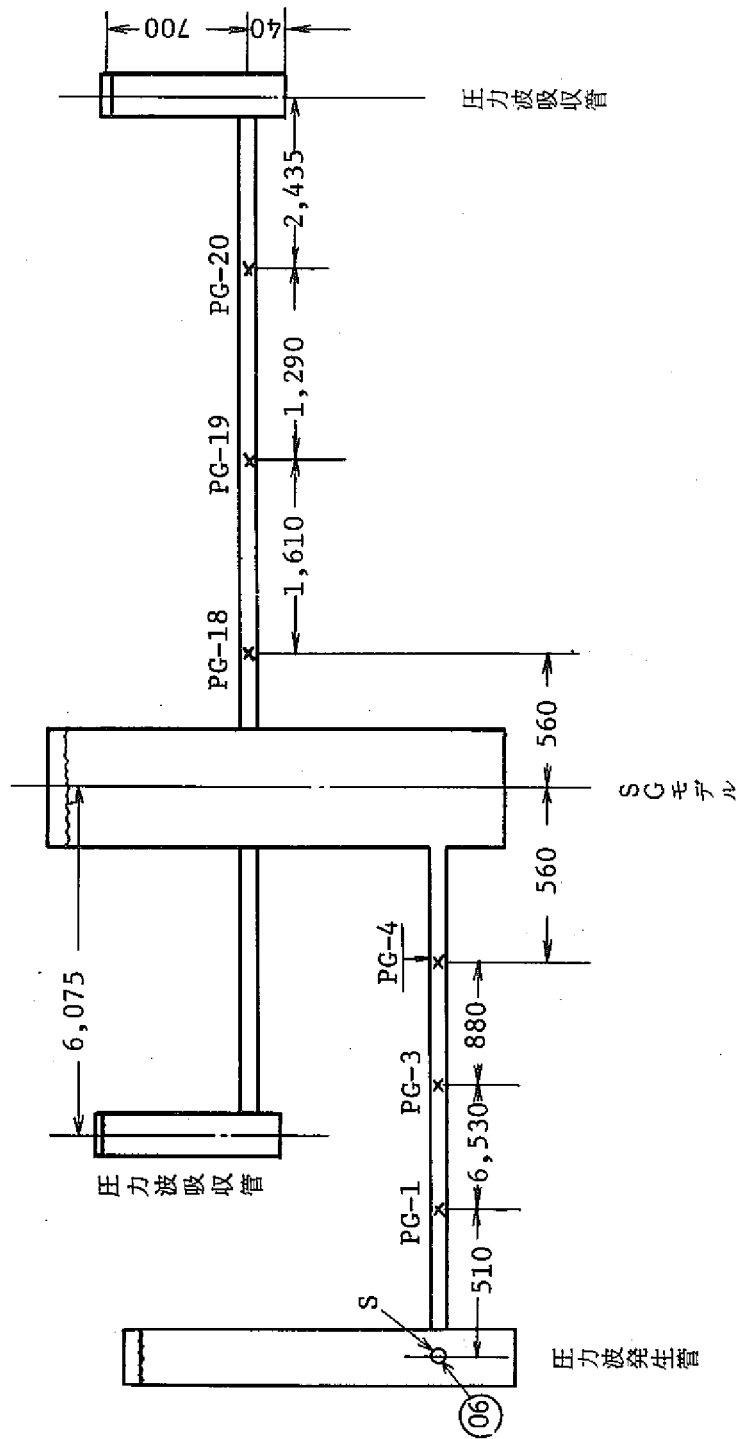


図 4.1 試験部の計算モデル

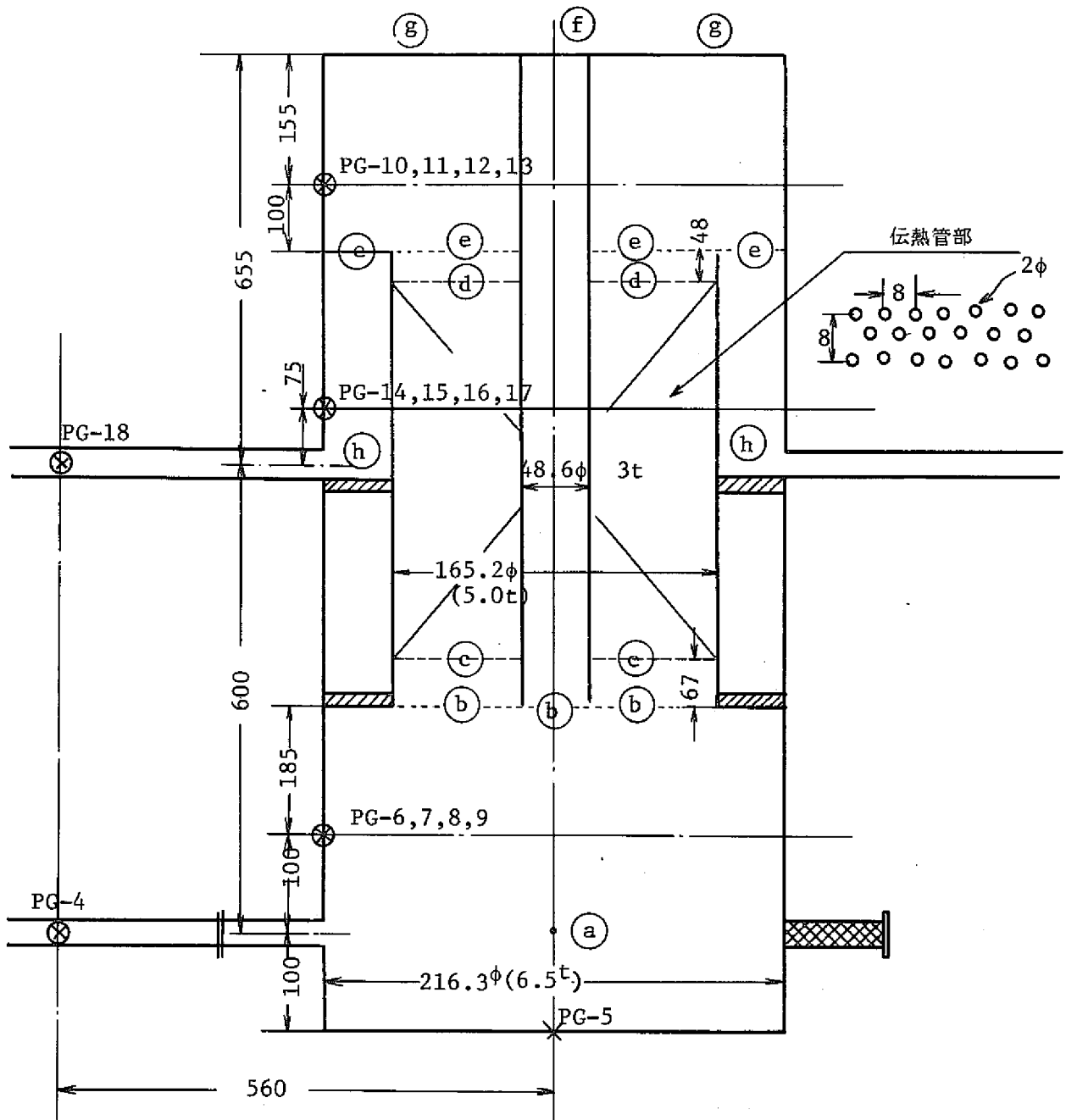


図 4.2 SGモデルの概略寸法

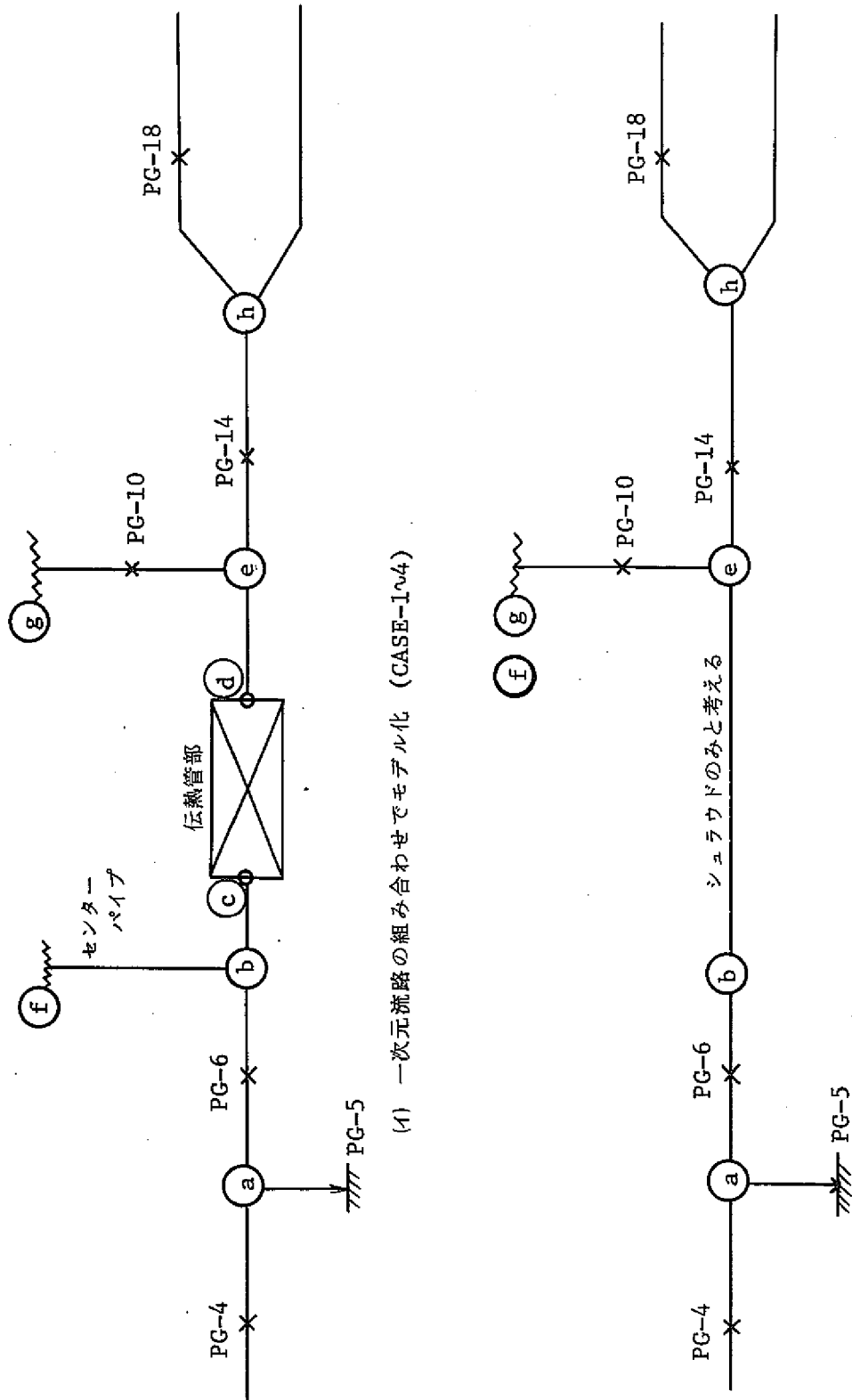
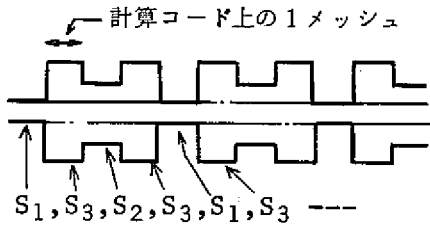


図 4.3 SGの計算モデル

表 4.1 計算ケースの比較

CASE	伝熱管部の取扱い	使用実験データ	使用計算コード
1	 <p>計算コード上の1メッシュ</p> <p>$S_1, S_3, S_2, S_3, S_1, S_3$ ---</p>	GD-2 (2 kg/cm ²)	SWAC-5K
2	$(S_1 + S_2 + 2 S_3) / 4$	同上	同上
3	同上	GD-6 (7 kg/cm ²)	同上
4	同上	GE-14) (7 kg/cm ²)	SWAC-5H
5	伝熱管とセンターパイプを省略	同上	同上

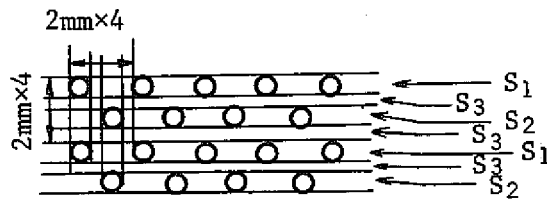


図 4.4 伝熱管の配列

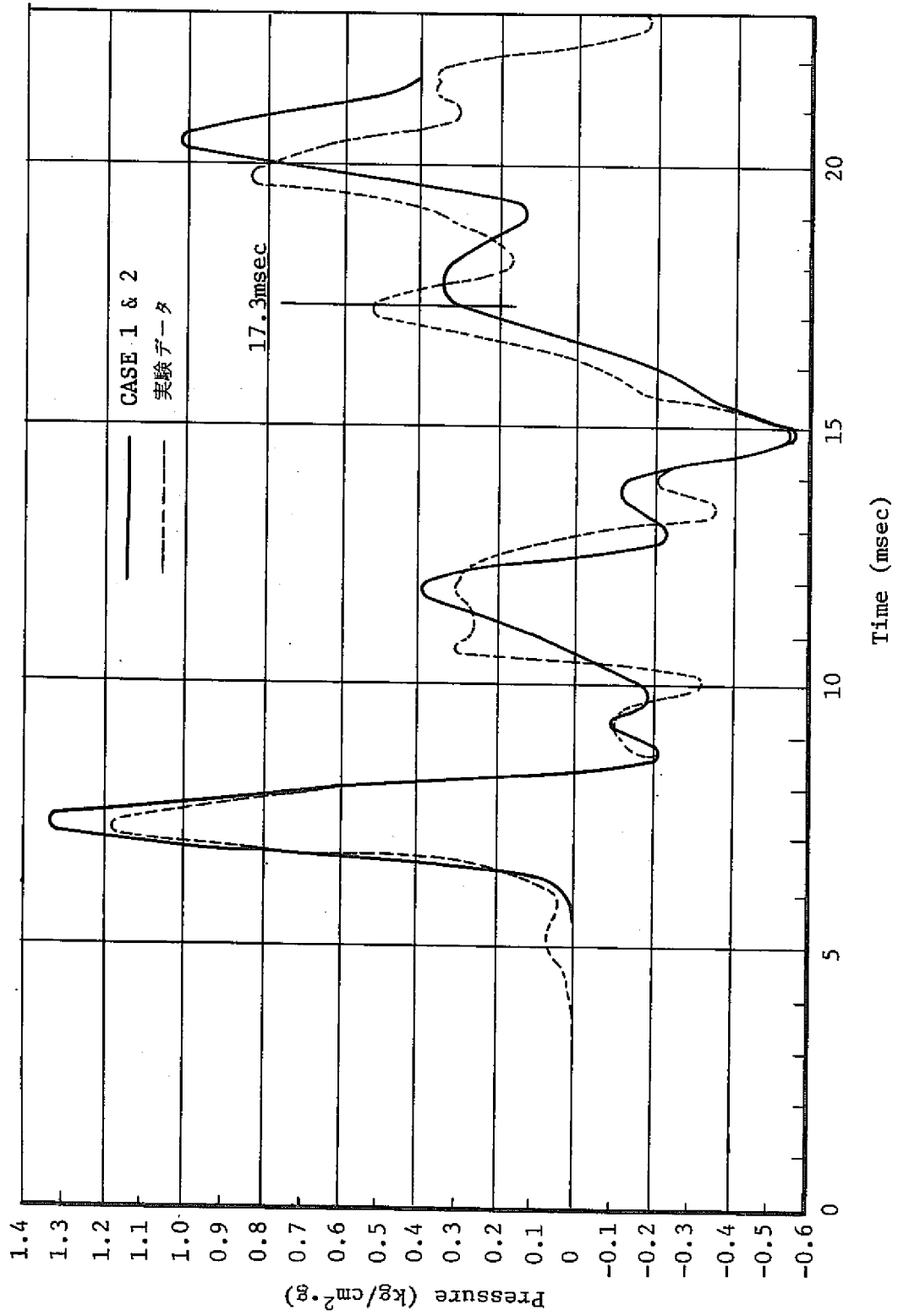


図 4.5 SG前方での圧力波比較 (PG-4, GD-2)

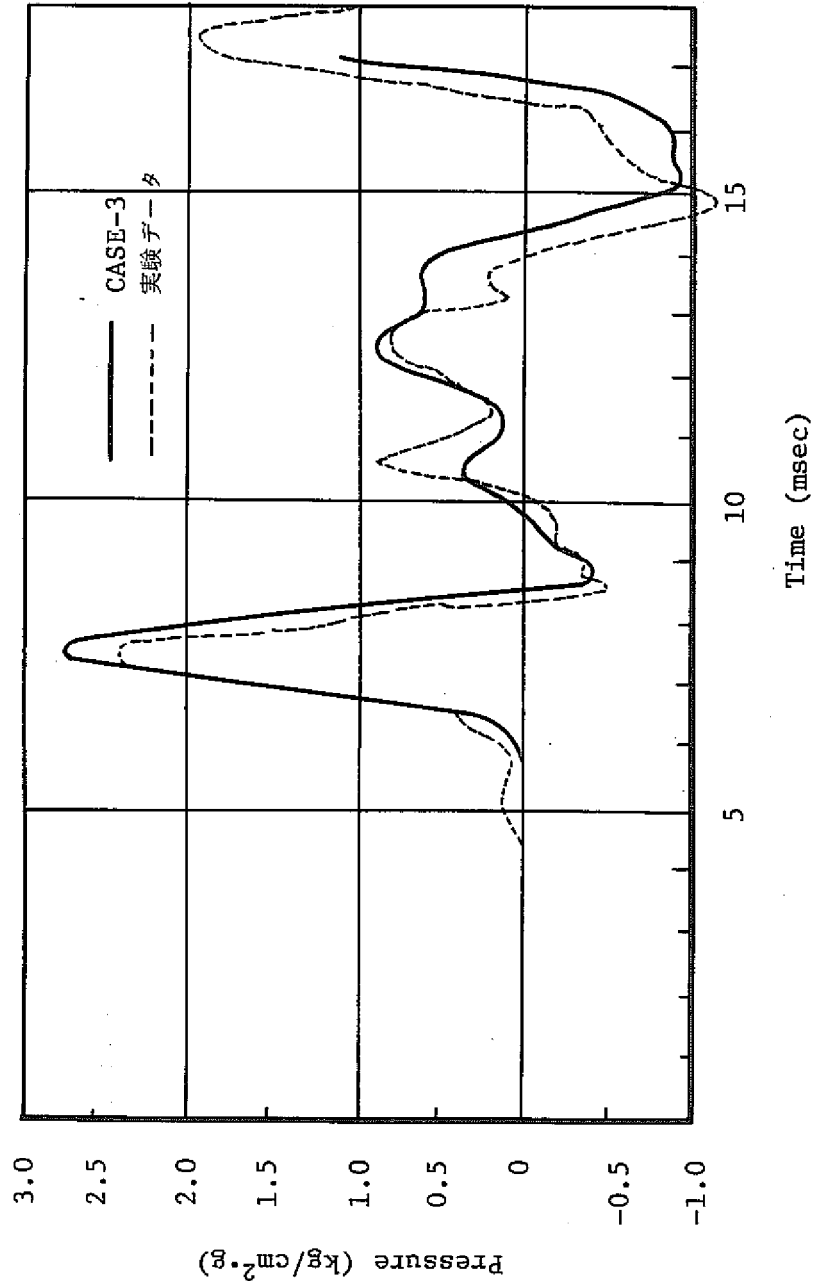


図 4.6 SG前方での圧力波比較 [PG-4, GD-6]

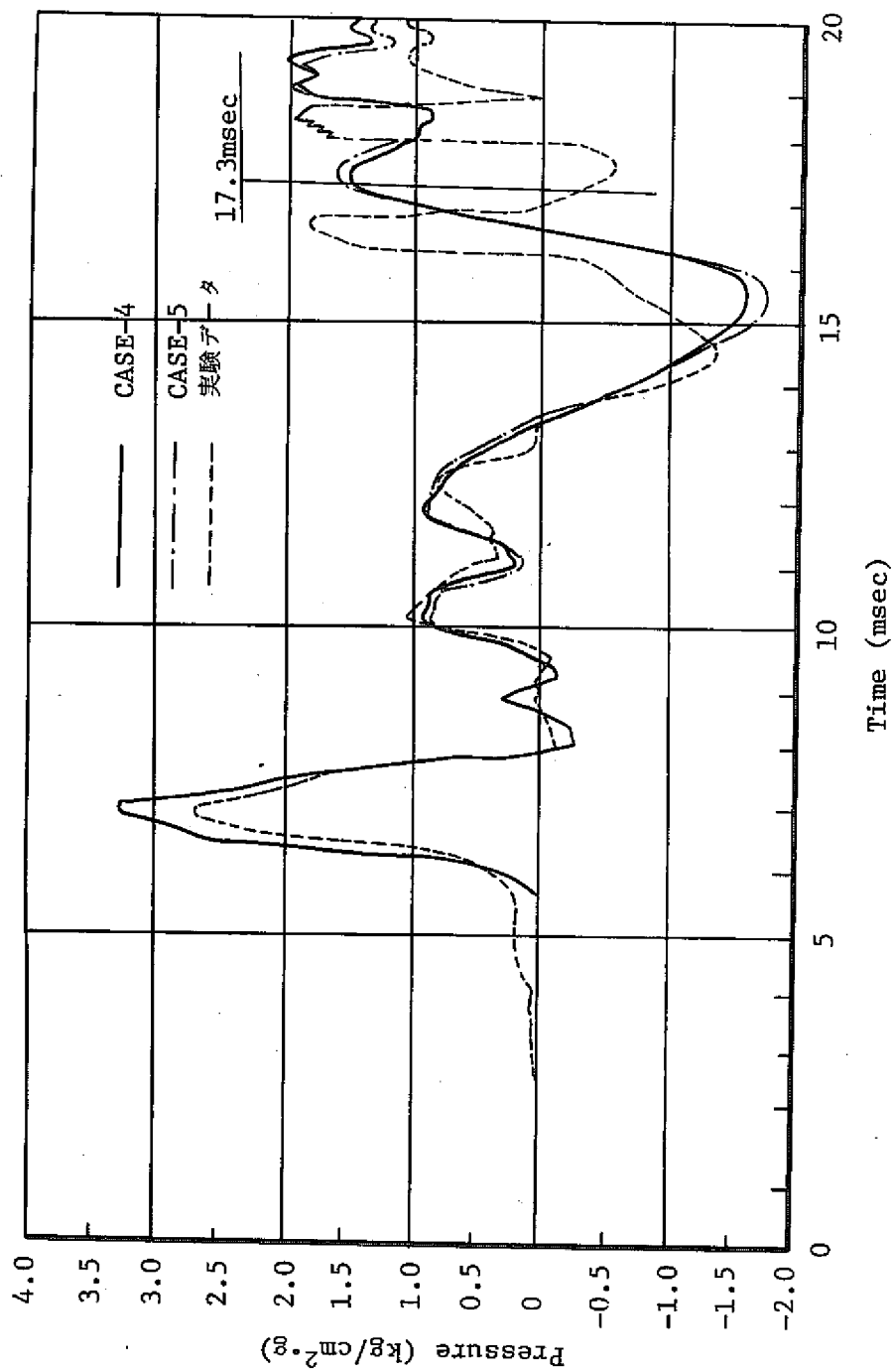


図 4.7 SG前方での圧力波比較 (PG-4, GE-14)

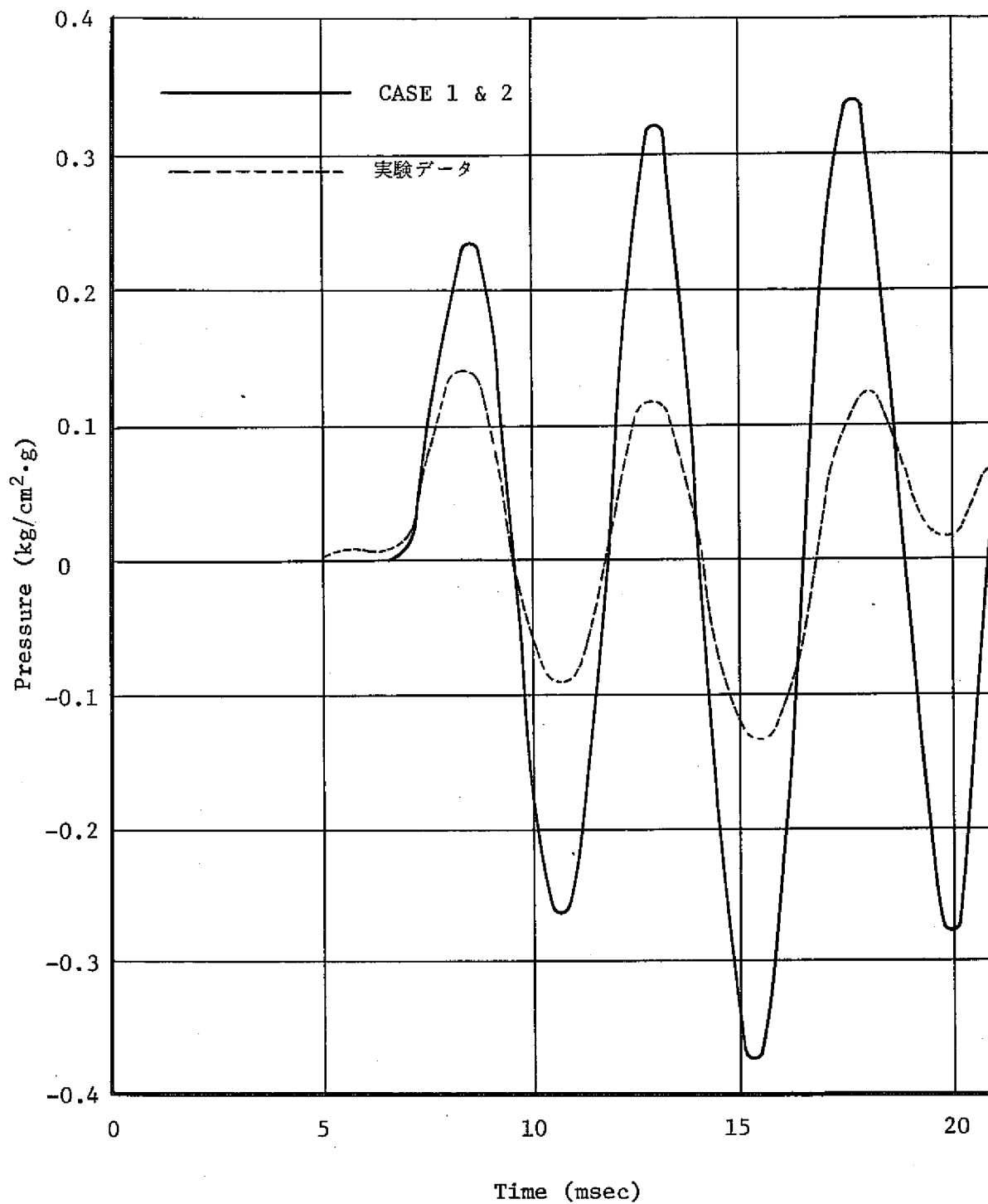


図4.8 SG下部プレナムでの圧力波比較〔PG-6, GD-2〕

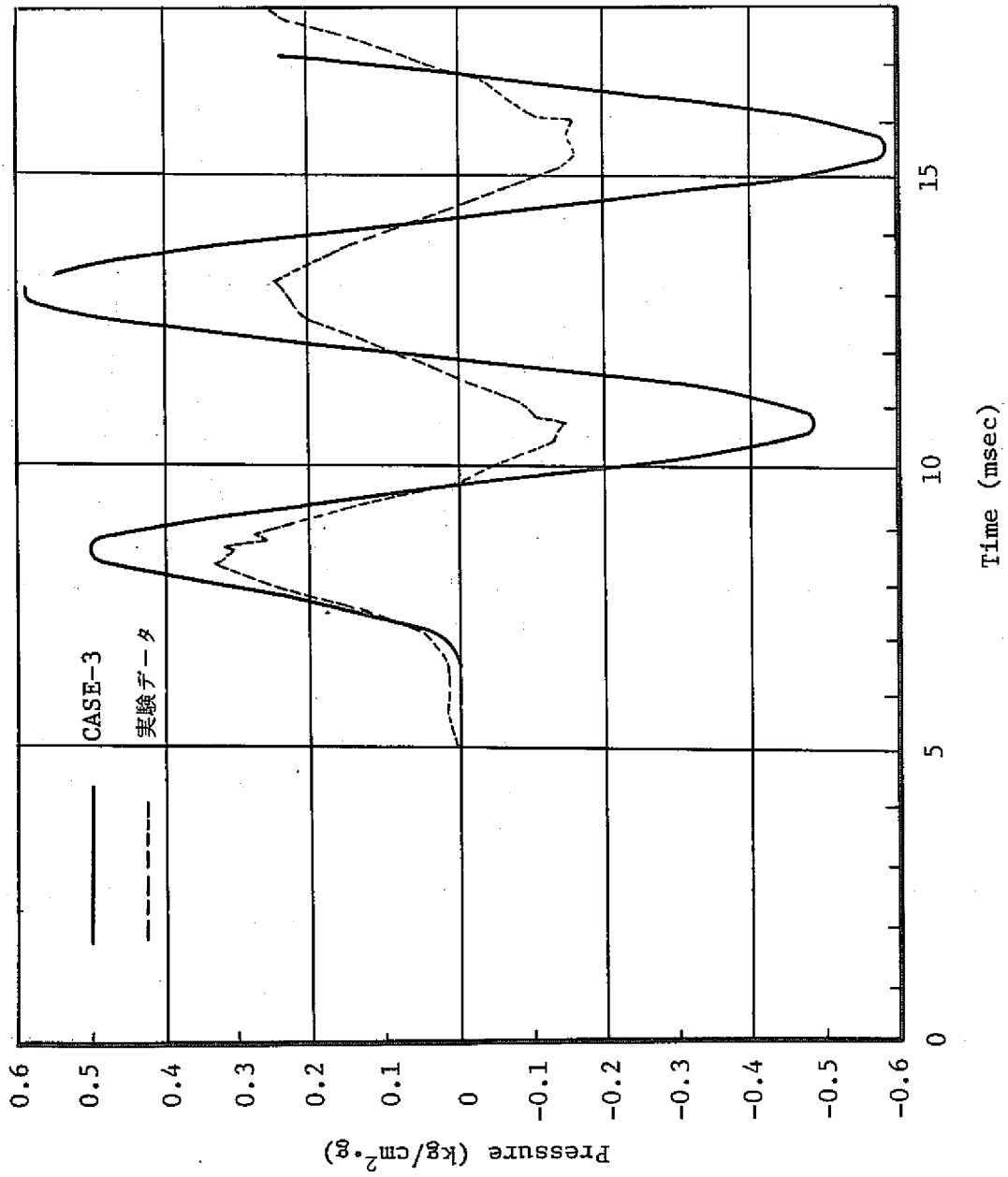


図 4.9 SG下部プレナムでの圧力波比較 [PG--6, GD--6]

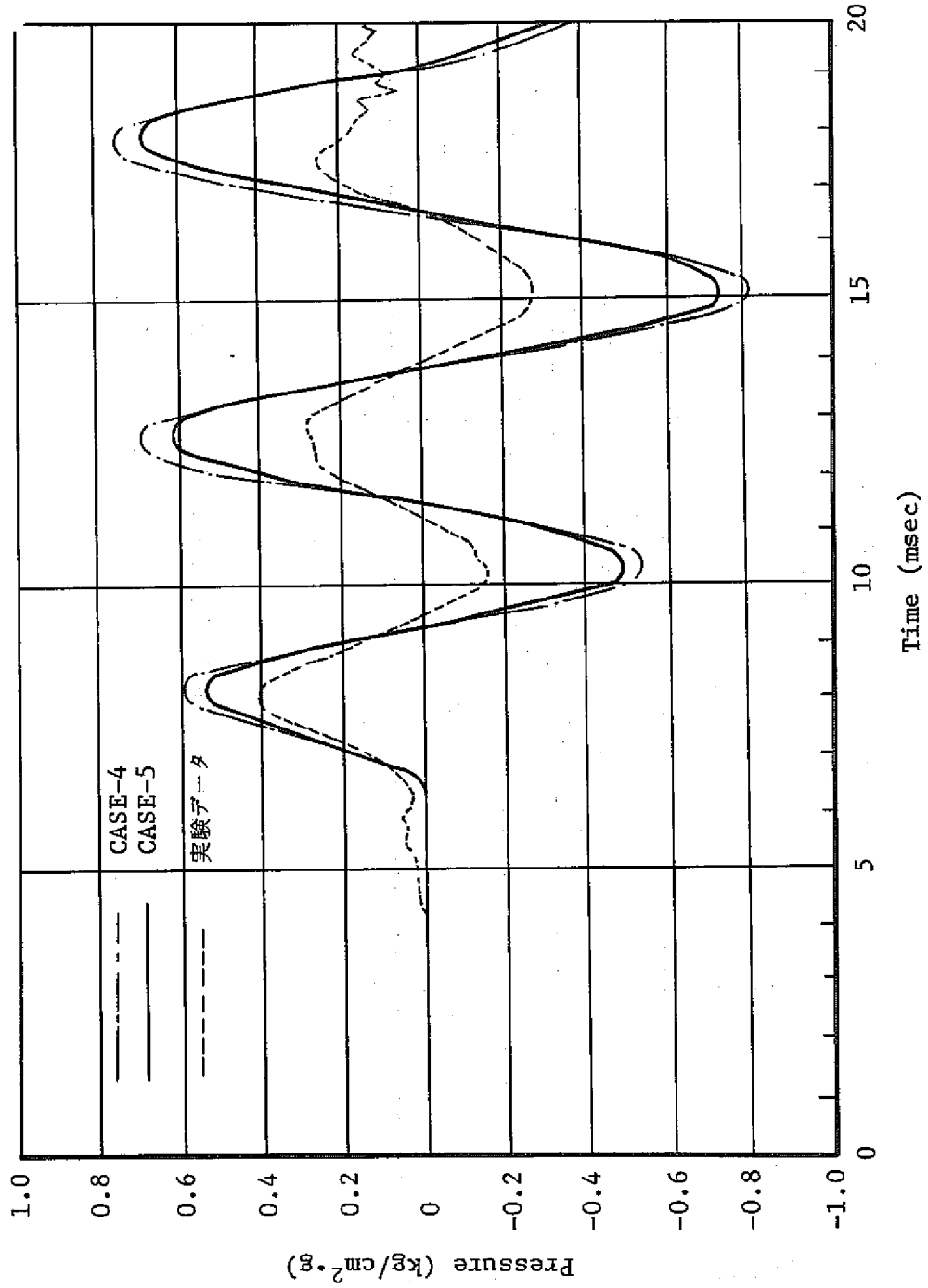


図 4.10 SG下部プレナムでの圧力波比較 (PG-6, GE-14)

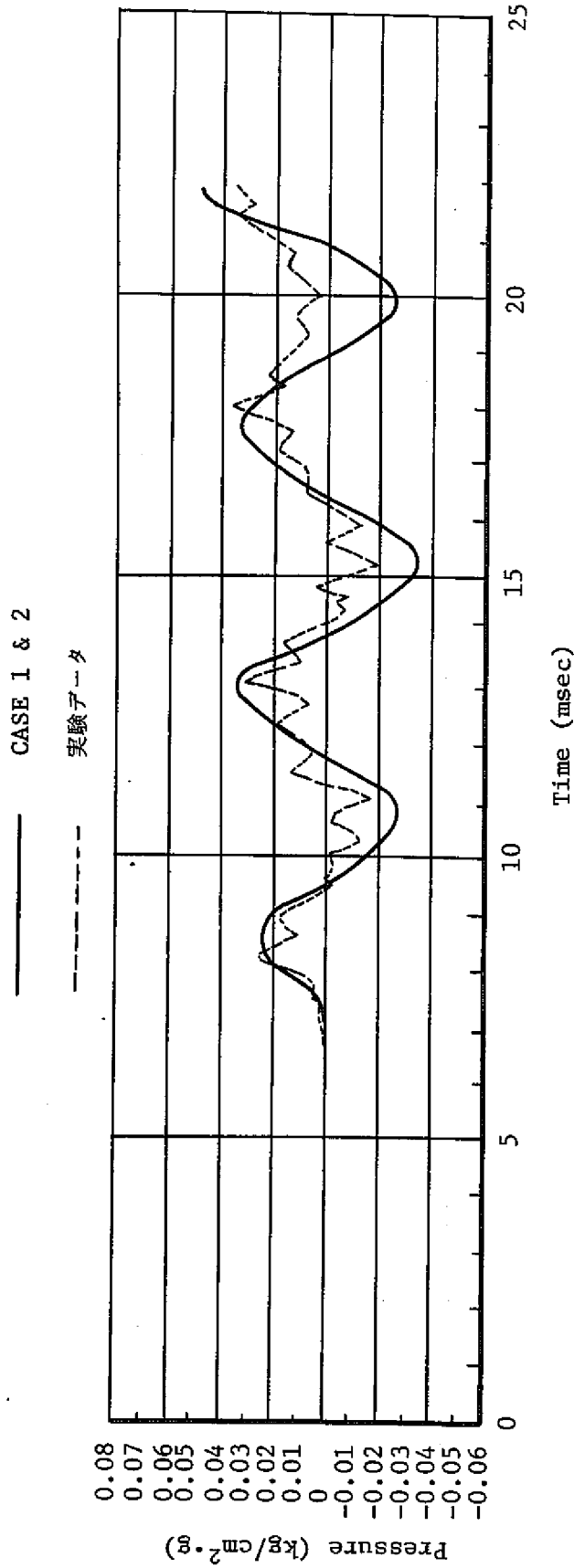


図 4.11 SG上部プレナムでの圧力波比較 [PG-10, GD-2]

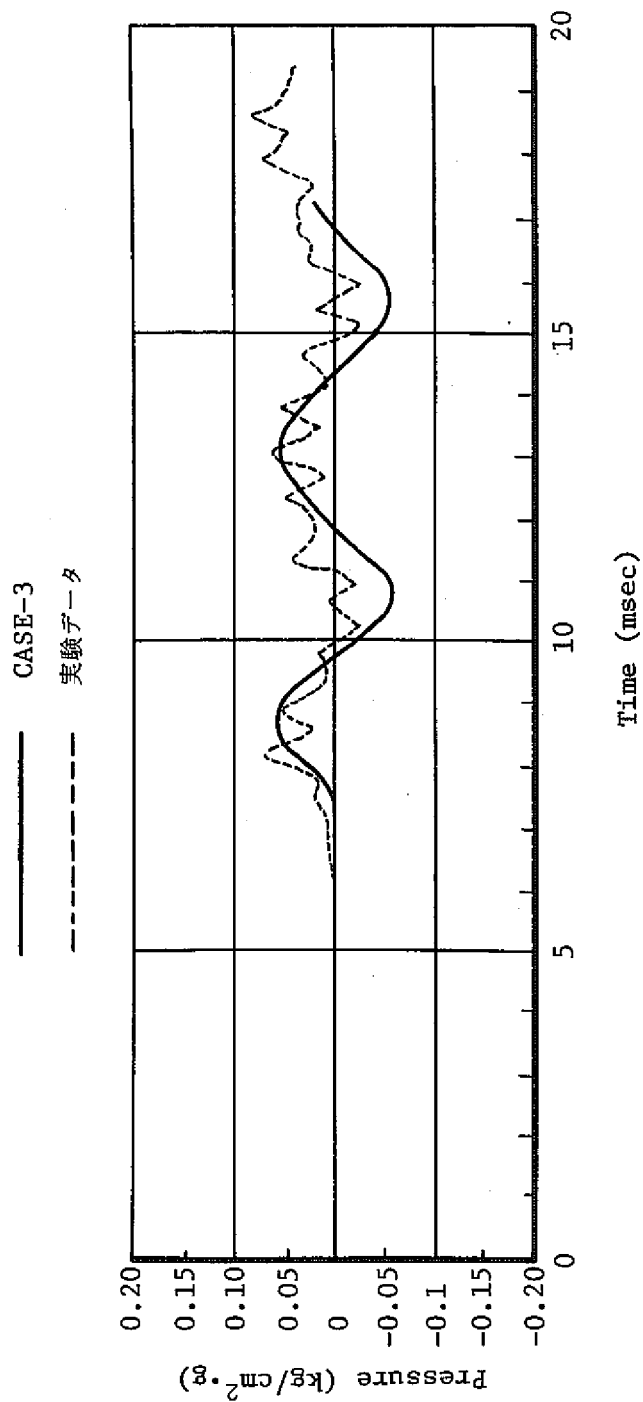


図 4.12 SG上部プレナムでの圧力波比較 [PG-10, GD-6]

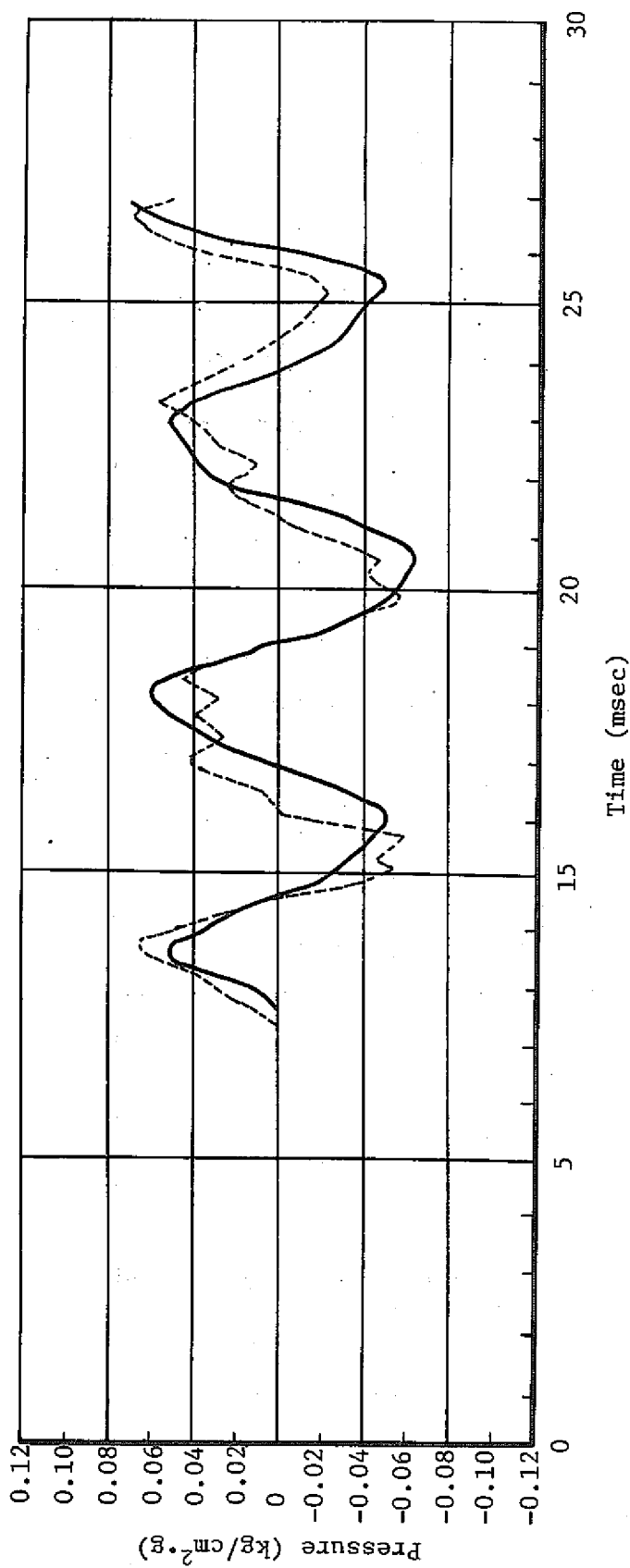


図 4.13 SG出口部での圧力波比較 (PG-14, GD-2)

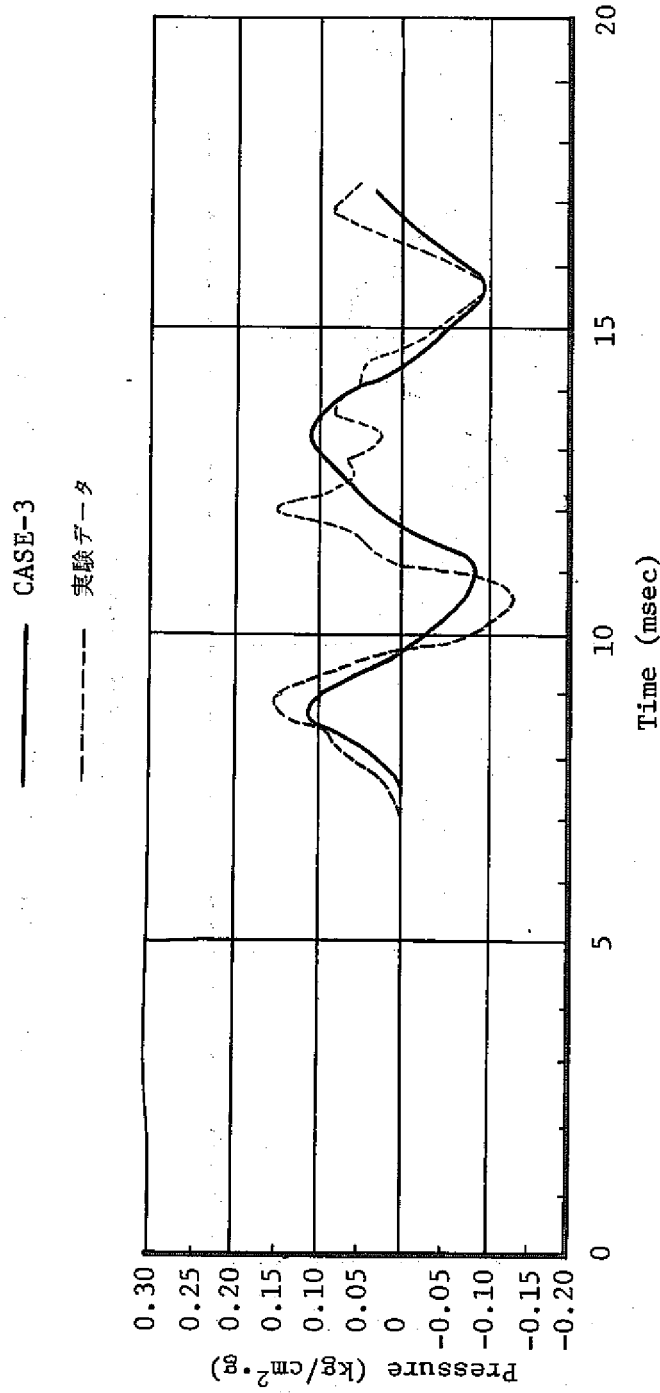


図 4.14 SG出口部での圧力波比較 (PG-14, GD-6)

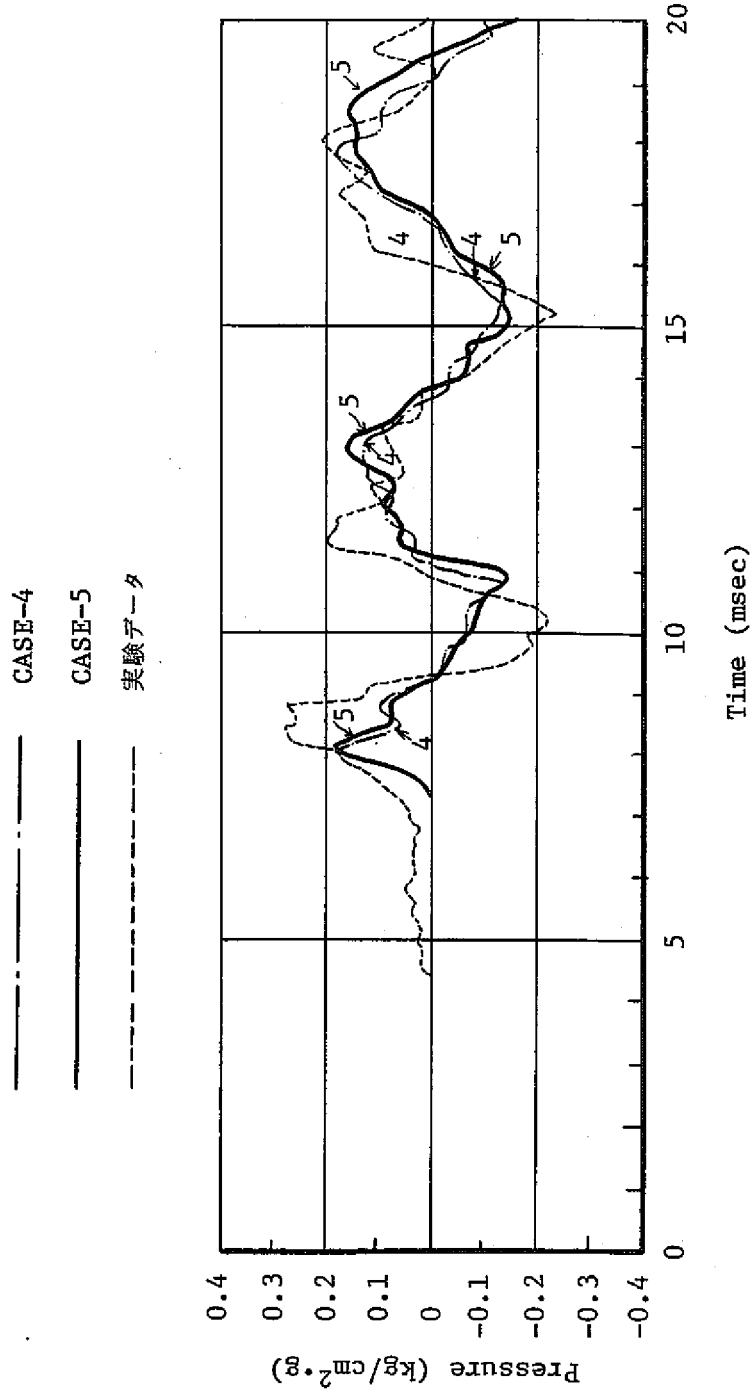


図 4.15 SG出口部での圧力波比較 (PG-14, GE-14)

--- CASE-4
--- CASE-5
--- 実験データ

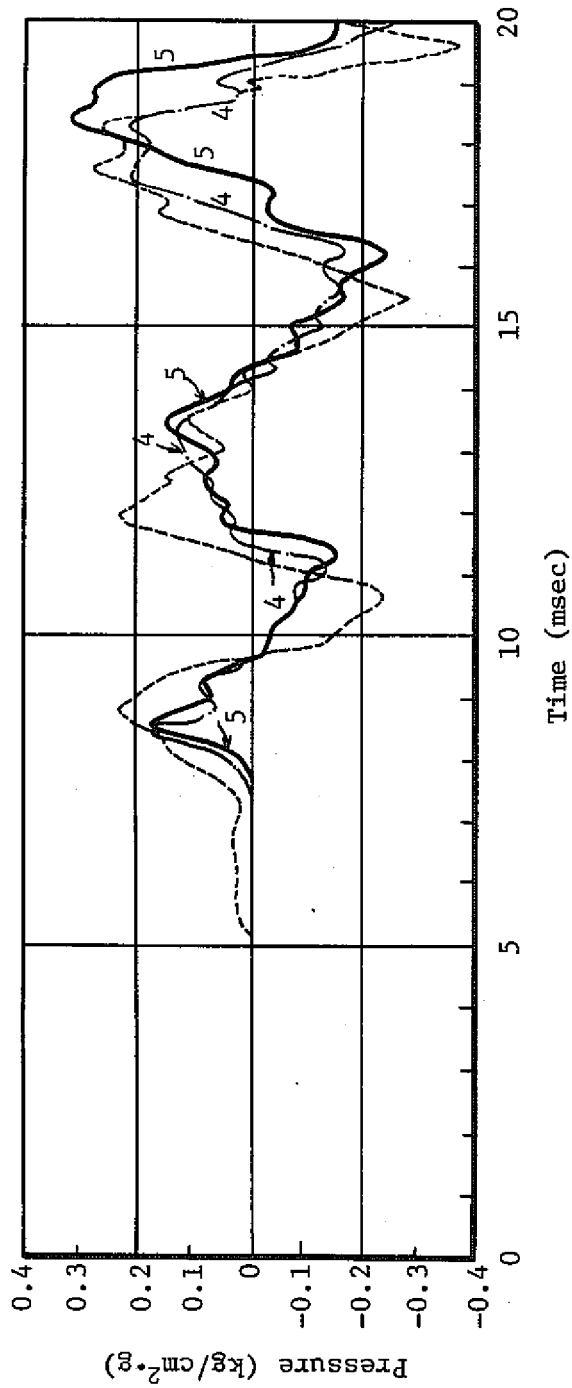


図 4.16 SG後方での圧力波比較 [PG-18, GE-14]

5. 結 論

原型炉二次系構成機器のうち、蒸気発生器について約 $1/12.5$ の縮尺モデルを用いて、圧力波伝播実験を行った。この実験結果を、計算コード、SWAC-5K、SWAC-5Hによる計算結果と比較した。本研究の結論は次の通り。

- (1) 入力波形の第1パルス波は、蒸気発生器下部プレナムで約 $1/15$ 、上部プレナムで約 $1/30$ に減少する。
- (2) 計算結果と実験結果では差異を示す場所もあるが、全体的には比較的良い一致を示す。
- (3) 実験結果と計算結果の比較の際に、SG部分に次の3つの計算モデルを用いた。
 - (イ) 実際の断面積に従って一次元的に組合せたモデル
 - (ロ) 伝熱管部に平均断面積を用いたモデル
 - (ハ) シェラウド外側(実際のSGではダウンカム-部に相当)のみを考慮したモデル比較結果では、各モデルによる計算結果ともかなり良く実験値と一致しており、モデル間の差もほとんどなかった。
- (4) 本報で使用した計算モデルは、本報の蒸気発生器モデルと同様の形状の過熱器、再熱器等に使用できると考えられる。
- (5) SWAC-5コードは、実機二次系の圧力波伝播解析に使用できる。

謝 辞

本研究を行うにあたり、終始ご指導、ご助言を頂いた高速炉安全性試験室 佐藤 稔主任研究員およびナトリウム-水反応グループの方に、および、FBR本部齊藤 毅氏に深甚の謝意を表します。

また本稿をまとめるに当り、内容の検討、整理、報告者間の連絡などにご尽力をされた高速炉安全性試験室の広井 博研究員に心から感謝の意を表します。

参 考 資 料

- 1) 菱田 誠, 堀 雅夫: “圧力波伝播実験第1報”, 動燃所内報告書 SN941 72-20
- 2) 菱田 誠, 佐藤 健, 堀 雅夫: “圧力波伝播実験第2報”, 動燃所内報告書 SN941 73
-02
- 3) 坂野他: “圧力波伝播計算コードの開発研究(I)”, SJ 213 72-02
- 4) 川辺, 小笠原他: “圧力波伝播計算コードの開発研究(II)”