

# 蒸気発生器のダウンコマ部注水実験の初期スパイク圧解析

(SWACSコードによるSWAT-3, Run-7 実験解析)

—大リーク・ナトリウム-水反応解析(第8報)—

1980年2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)

## 蒸気発生器のダウンカマ部注水実験の初期スパイク圧解析

## (SWACSコードによるSWAT-3, Run-7実験解析)

## — 大リーク・ナトリウム-水反応解析 (第8報) —

清水克彦\*\*, 前川 勇\*\*, 坂野耿介\*\*

進藤嘉久\*, 三宅 収\*, 佐藤 稔\*

## 要 旨

ヘリカルコイル蒸気発生器のダウンカマ部でのナトリウム-水反応解析を可能にするために、1978年8月に、SWACSコードの圧力波伝播計算モジュールSWAC-5Kを改造して、SWAC-5KⅡを作成した。本研究はSWAC-5KⅡを用いて蒸気発生器安全性総合試験装置(SWAT-3)で実施されたダウンカマ部注水実験(Run-7)の初期スパイク圧挙動の実験解析を行なった。

まず、初期スパイク圧計算に主要なパラメータである注水率の立上り時間、 $H_2/H_2O$ モル転換比、音速、初期気泡半径およびダウンカマ流路数に関して感度解析を行なった後、実験値との比較計算により、実験値に最適なパラメータ値を求めることができた。これらの検討をとおして、本計算モジュールSWAC-5KⅡの有効性が確認された。

---

\* 大洗工学センター 蒸気発生器開発部 蒸気発生器安全性試験室

\*\* 川崎重工業株式会社 原子力本部技術部

Feb., 1980

Initial Spike Pressure Analysis in a Large-Scale Sodium-Water Reaction Test of Downcomer Region in SG

-Large Leak Sodium-Water Reaction Analysis (Report No.8)-

Katsuhiko Shimizu\*\*, Isamu Maekawa\*\*  
Kosuke Sakano\*\*, Yoshihisa Shindo\*  
Osamu Miyake\*, and Minoru Sato\*

Abstract

Computer analysis for the downcomer water injection test (SWAT-3, Run-7) was performed using the calculation module for initial spike pressure, SWAC-5KII which was revised the SWAC-5K module included in the large leak sodium-water reaction code "SWACS", at August, 1978.

In order to verify this code, the sensitivity study for the significant parameters, such as rising time of water injection rate,  $H_2/H_2O$  conversion ratio, sonic velocity of the sodium in the vessel, initial bubble radius and number of downcomer flow pass, were carried out, and the comparison between calculation and measurements were accomplished.

The suitable values of the parameters to explain the measurements of the SWAT-3, Run-7 experiment were obtained. And the availability of the calculation module, SWAC-5KII, of the SWACS has been demonstrated.

---

\* Steam Generator Safety Section, Steam Generator Division, O-arai Engineering Center, PNC.

\*\* Engineering Department, Nuclear Systems Division, Kawasaki Heavy Industries, Ltd.



## 目 次

	頁
1. はじめに .....	1
2. 試験概要 .....	2
3. パラメータ・スタディ .....	9
3.1 解析条件 .....	9
3.2 パラメータ・スタディのケース選定 .....	14
3.3 解析モデル .....	16
3.4 解析結果 .....	16
3.5 まとめ .....	34
4. 実験解析 .....	36
4.1 解析ケースの選定 .....	36
4.2 解析モデル .....	41
4.3 解析条件 .....	41
4.4 解析結果と実験結果の比較・検討 .....	46
4.5 最適パラメータの選定 .....	61
5. おわりに .....	63
6. 参考文献 .....	64
付録・A 計算モデル .....	65
付録・B 計算時間巾・非圧縮柱半径の検討 .....	80

## 図 リ ス ト

Fig. 2.1	Reaction Vessel and Pressure Transducers Location.....	3
Fig. 2.2	ダウンコマ部立体図.....	5
Fig. 2.3	注水用ラプチャ板 (RD502).....	6
Fig. 2.4	Water Injection System.....	7
Fig. 3.1	Dimension of Run-7 Reaction Vessel.....	10
Fig. 3.2	Analytical Model of Case R.....	17
Fig. 3.3	Analytical Model of Case 1-2.....	17
Fig. 3.4	Analytical Model of Case 1-3.....	17
Fig. 3.5	Flow Area of Downcomer (Case R).....	19
Fig. 3.6	Flow Area of Downcomer (Case 1-2).....	20
Fig. 3.7	Flow Area of Downcomer (Case 1-3).....	21
Fig. 3.8	Effect of No. of Downcomer Flowpass.....	23
Fig. 3.9	Effect of Initial Bubble Radius.....	24
Fig. 3.10	Effect of Sonic Velocity.....	25
Fig. 3.11	Effect of Hydrogen Release Ratio.....	27
Fig. 3.12	Effect of Water Injection Rate.....	28
Fig. 3.13	Effect of No. of Downcomer Flowpass (Pressure Histories).....	29
Fig. 3.14	Effect of Initial Bubble Radius (Pressure Histories).....	30
Fig. 3.15	Effect of Sonic Velocity (Pressure Histories).....	31
Fig. 3.16	Effect of Hydrogen Release Ratio (Pressure Histories).....	32
Fig. 3.17	Effect of Water Injection Rate (Pressure Histories).....	33
Fig. 4.1	Camparison of Experiment and Reference Case of Parameter Study.....	37
Fig. 4.2	Analytical Model.....	42
Fig. 4.3	Flow Area of Downcomer.....	43
Fig. 4.4	Pressure Histories in the Case E-01.....	49
Fig. 4.5	Pressure Histories in the Case E-01 (Continued).....	50
Fig. 4.6	Pressure Histories at Upper Part of Downcomer (U-5, PK-1104).....	51
Fig. 4.7	Pressure Histories at Upper Part of Downcomer (U-20, PK-1109).....	52
Fig. 4.8	Pressure Histories at Lower Part of Downcomer (D-5, PK-1104).....	53
Fig. 4.9	Pressure Histories at Lower Part of Downcomer (D-14, PK-1102).....	54

Fig. 4.10	Pressure Histories at Lower Plenum (Joint 6, P-1111).....	55
Fig. 4.11	Pressure Histories in Case E-05.....	58
Fig. 4.12	Pressure Histories in Case E-05 (Continued).....	59
Fig. 4.13	Pressure Histories in Case E-05 (Continued).....	60

## 表 リ ス ト

Table 2.1	試験条件.....	8
Table 3.1	Conditions of Analysis.....	11
Table 3.2	Downcomer's Dimension.....	12
Table 3.3(1)	Configuration.....	13
Table 3.3(2)	Configuration.....	13
Table 3.4	Main Parameters of SWAC-5KII .....	14
Table 3.5	Calculation Cases for Parameter Study.....	15
Table 3.6	Input Data of Case-R.....	18
Table 3.7	Location of Analytical points and Measured points.....	22
Table 3.8	パラメータの圧力波形への効果.....	35
Table 4.1	Comparison of Reference Case and Experiment, Discussion and Treatment of Parameter.....	38
Table 4.2	Selection of Analytical Case of Experiment.....	40
Table 4.3	Location of Analytical points and Measured points.....	44
Table 4.4	Main Input Data.....	45
Table 4.5	Experiment and Analyses Results.....	56
Table 4.6	Total Estimation of Analytical Cases.....	57



## 1. はじめに

“もんじゅ”型ヘリカルコイルSGのダウンカマ部伝熱管の破断により惹起されるNa-水反応と、それにより発生する圧力波のSG内伝播現象を解析することを目的として、昭和53年上期に川崎重工業㈱に外部委託しSWAC-5Kの機能追加による改造を行ない、SWAC-5KⅡを作成した。

本報告書の目的は、このSWAC-5KⅡを使用して、昭和53年10月に実施されたダウンカマ部注水実験SWAT-3 Run-7の実験結果を比較・検討し、本コードの妥当性を評価するものである。

本文2章ではRun-7の実験結果の概要を示す。

3章では、SWAC-5KⅡでダウンカマ部初期スパイク圧を解析する際の本コードの主要パラメータの計算結果に与える影響度を調査する目的で感度解析を行なった。

4章では3章での感度解析を参考にして実験解析用計算ケースを数ケース選択し、実験結果と最も良く一致する計算ケースを求め、ダウンカマ初期スパイク圧解析をSWAC-5KⅡで実施する際の最適パラメータ値を選定した。

また、付録・AにSWAC-5KⅡのSWAC-5Kより追加された部分のモデル化を説明した。

## 2. 試験概要

### 2.1 試験装置

Fig. 2.1 に SWAT-3 装置の Run-7 試験に用いられた反応容器の形状寸法および圧力センサー取付位置を示す。

同図から分るように、内部構造物は外部シュラウド（ライナ）、シュラウド、センターパイプから構成されており、外部シュラウドとシュラウドの間隙がダウンカマ領域を模擬している。

外部シュラウドと容器壁間には 49 mm のギャップがある。

内部構造物の仕様は下表に、ダウンカマ部立体図は Fig. 2.2 に各々示す。

シェル内径	1,300 mm $\phi$	伝熱管 <sup>〃</sup> サイズ	25.4 $\phi$ ×3.2 t
外部シュラウド O.D	1,202 mm $\phi$	伝熱管 <sup>〃</sup> 本数	128 本
〃 肉厚	12 mm	伝熱管 <sup>〃</sup> ピッチ	50.44 (内層), 54.66 (外層) 50.39 (内外)
〃 長さ	4,000 mm	伝熱管 <sup>〃</sup> 支持方法	スリーブ型
シュラウド O.D	968 mm $\phi$	伝熱管支持板段数	3 段
〃 肉厚	12 mm	伝熱管支持板分割数	16 分割
〃 長さ	3,000 mm	〃 ピッチ	1,350 mm
ダウンカマ部 伝熱管群外層 P.D	1,114 mm $\phi$	〃 分割段数	250 mm
〃 内層 P.D	1,028 mm $\phi$		

注水位置は周方向 90°（北を 0°とし東を 90°とした）の外層伝熱管で FL. 3875（ダウンカマ中間点より 675 mm 下側）である。注水用ラプチャ板（RD502）は、ノズル型を採用し、ノズルは 90°→0°を向いている。（Fig. 2.3 参照）

注水系は水加熱器から蒸発器入口部までは従来のみ変更された。（Fig. 2.4 参照）注水配管は、ヘッダー部（2B 配管）で 90°側と 270°側に分岐され、90°側の注水配管の FL. 3875 に設けられたラプチャ板 RD502 にて注水される。（詳細は参考文献(1)を参照）

Table 2.1 に Run-7 の主な試験条件を示す。

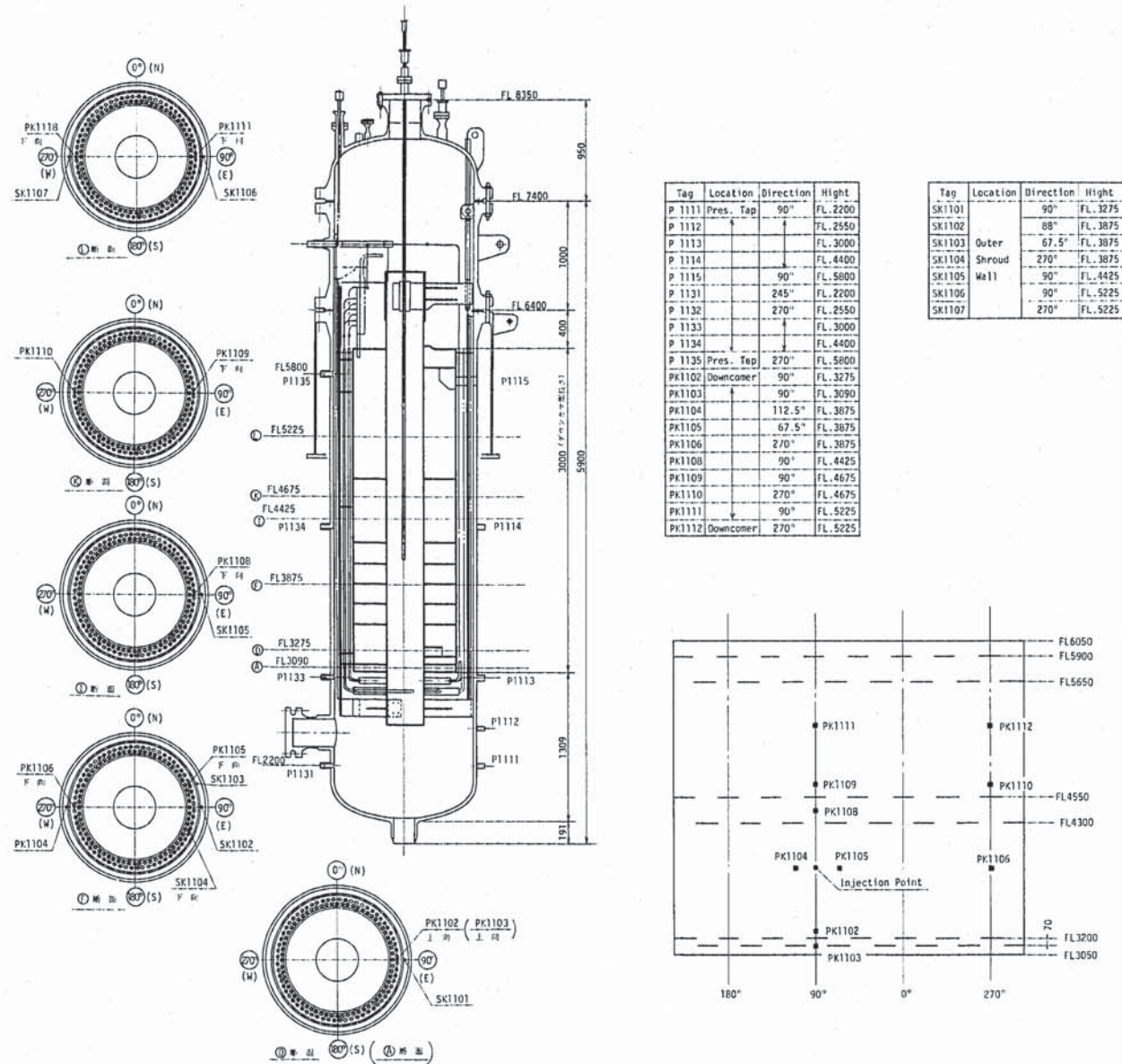


Fig. 2.1 Reaction Vessel and Pressure Transducers Location



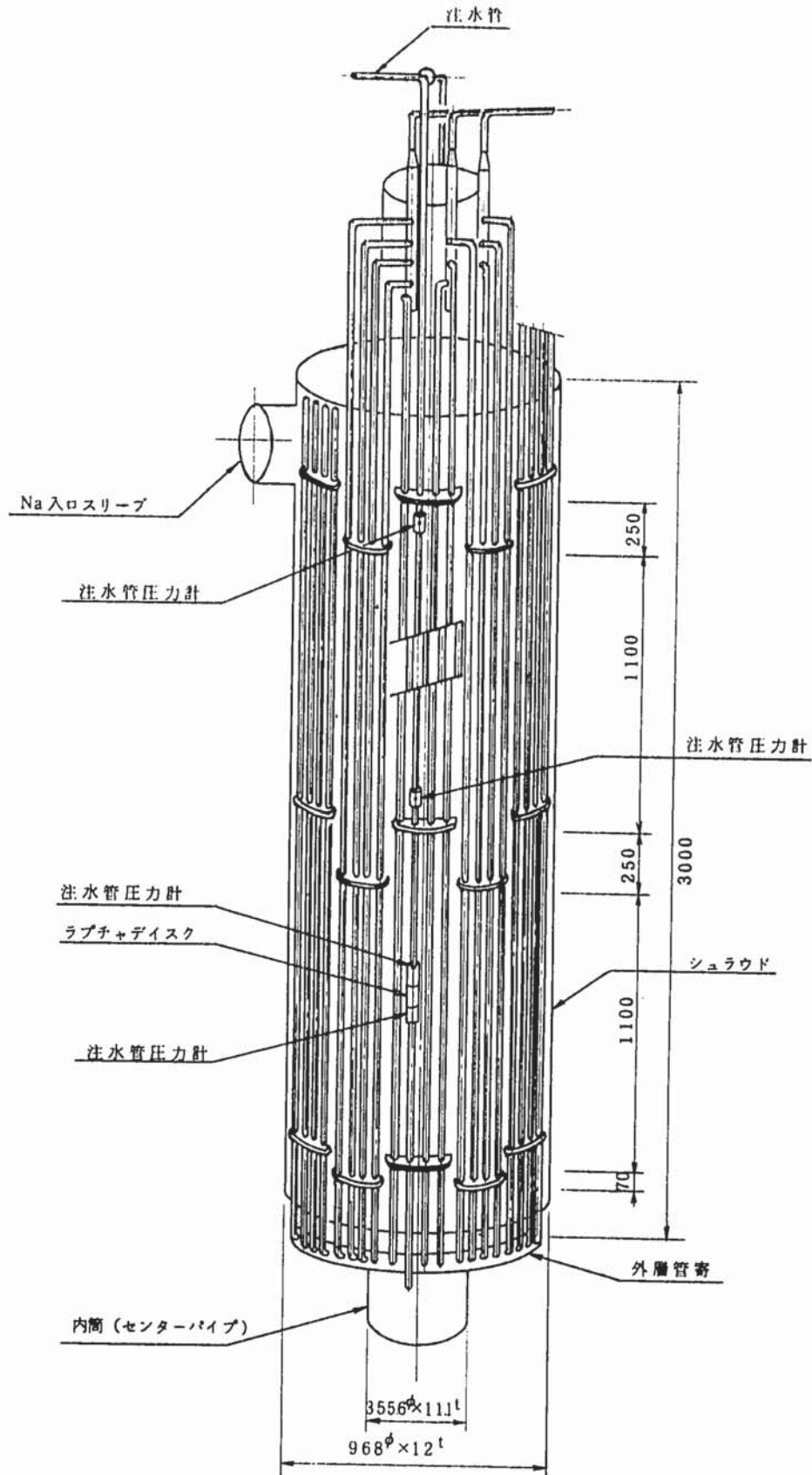
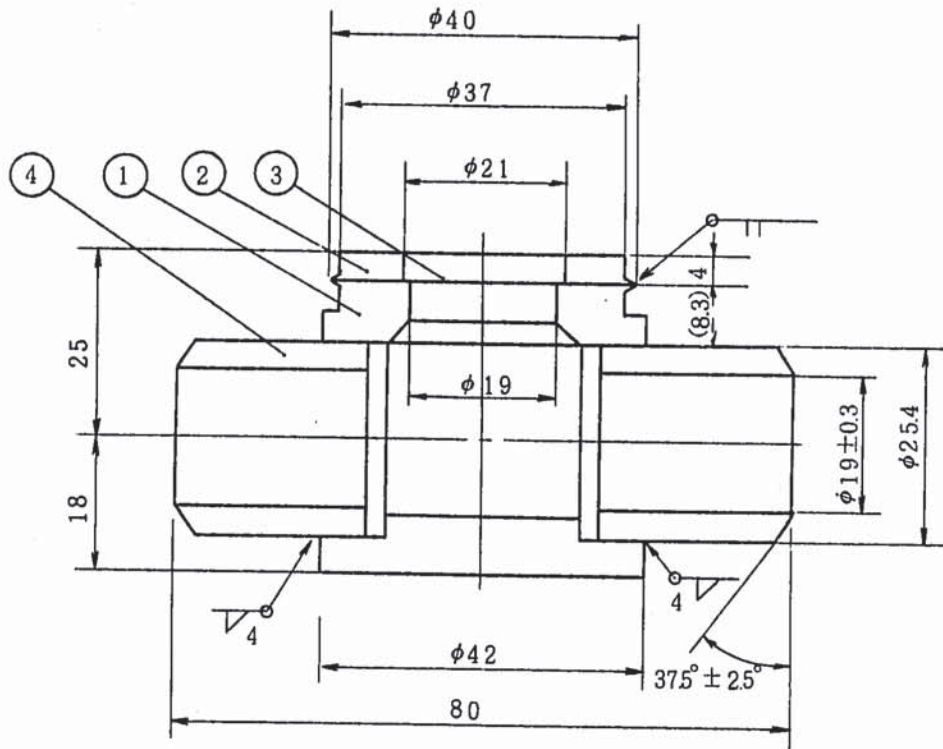


Fig. 2.2 ダウンカマ部立体図





仕 様	
型 式	F
ディスク材質	SUS 316L
流 体	管内 熱水 管外 Na
接 続	BW
破 裂 圧 力	100 kg/cm <sup>2</sup> (G)
許 容 誤 差	± <sub>10</sub> <sup>0</sup> kg/cm <sup>2</sup>
常 用 圧 差	外圧: -1 kg/cm <sup>2</sup> (G)
温 度	破 裂 時 245 °C
	常 用 245 °C

4	パイプ	SUS304
3	ディスク	SUS316L
2	リング	SUS304
1	本体	SUS304
品番	部品名	材 質

Fig. 2.3 注水用ラプチャ板 (RD502)

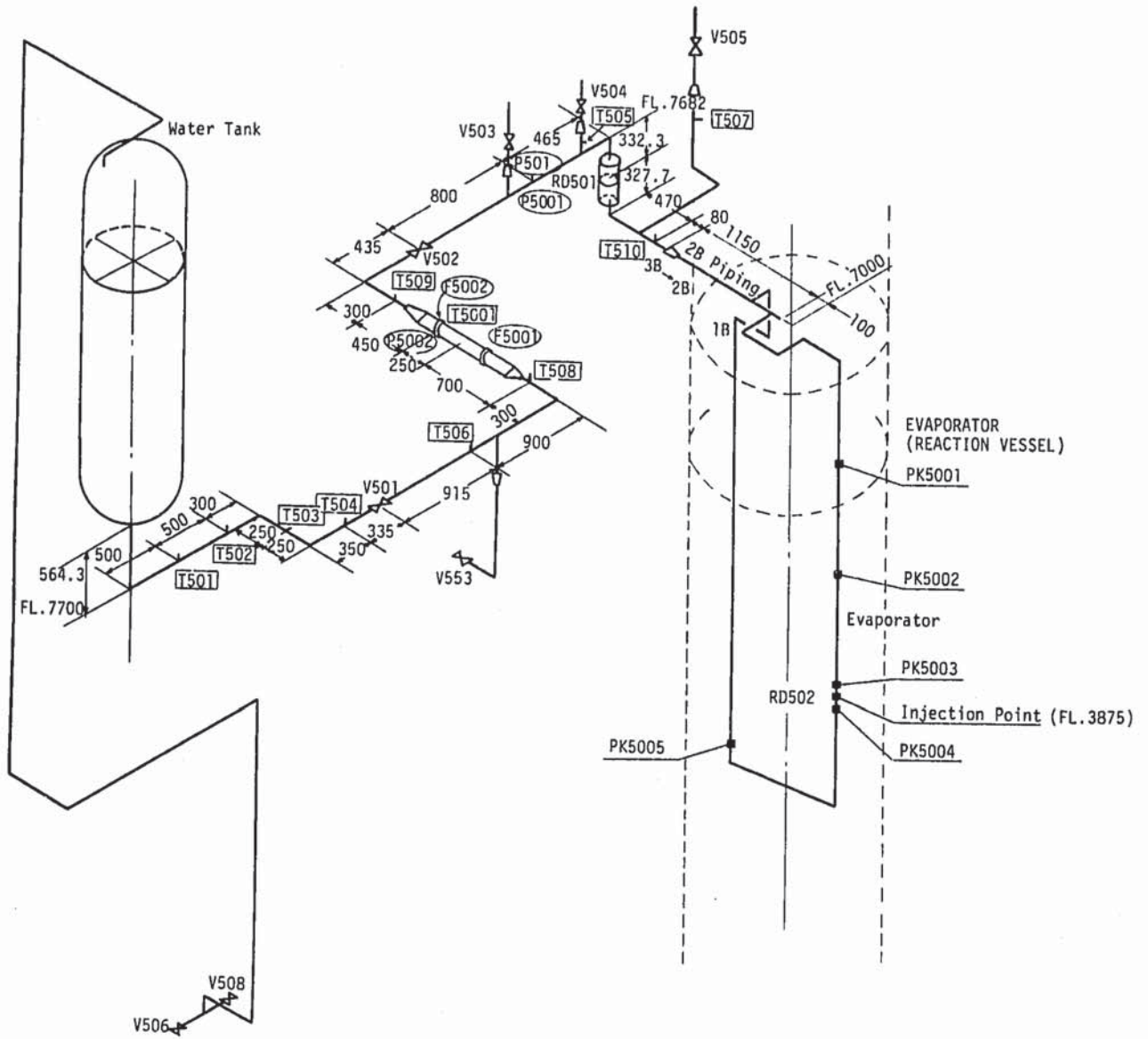


Fig. 2.4 Water Injection System

Table 2.1 試験条件

項	目	単 位	条 件
試験年月日			1978. 10. 26
反応容器 内部構造物 型式	反 応 容 器		蒸 発 器
	内 部 構 造 物 型 式		ダウンカメラ模擬
	反 応 点 位 置		ダウンカメラ部
			FL. 3875
注 水 条 件	注水孔・ラプチャ板形式		ノズル19φ, 円板引張型
	ラプチャ板設定圧		
	RD501	kg/cm <sup>2</sup>	100 <sup>+0</sup> <sub>-10</sub> (350°C)
	RD502	kg/cm <sup>2</sup>	100 <sup>+0</sup> <sub>-10</sub> (245°C)
	準 定 常 注 水 率	kg/sec	10.6(1 sec後)~7.9(9 sec後)
	全 注 水 量	kg	85
	注 水 配 管 温 度	°C	283~357
	水 加 熱 器 温 度	°C	298
	” 圧 力	kg/cm <sup>2</sup> a	124
	” 初 期 給 水 量	kg	445
	注水弁(V502)弁開持続時間	sec	9.5
ナトリウム系条件	ナ ト リ ウ ム 温 度	°C	245
	ナ ト リ ウ ム 流 量	ℓ/sec	静 止
	カ バ ー ガ ス 圧		
	蒸 発 器	kg/cm <sup>2</sup> G	0.5
	過 熱 器	kg/cm <sup>2</sup> G	0.5
	カ バ ー ガ ス 使 用 ガ ス		アルゴン

### 3. パラメータ・スタディ

#### 3.1 解析条件

Fig. 3.1 に反応容器形状寸法を示す。

計算条件をまとめてTable 3.1～3.3 に示す。

- (1) 注水率はHEM<sup>[2]</sup> (Homogeneous Equilibrium Model) 法によって計算した値である。

$$W = A \cdot \frac{\left(\frac{2g}{A_J}\right)^{1/2} \cdot [h_0 - h_L - x_E (h_g - h_L)]^{1/2}}{v_L + x_E (v_g - v_L)} \Bigg|_{\max}$$

- (2) 反応部水素ガス/Na界面と非圧縮柱半径で囲まれる領域は非圧縮性として解かれる。この領域の長さは、初期圧カスパイクの波長に比較して小さく選定すれば、非圧縮性と仮定しても良いと考えられる。本デモンストレーション計算は、初期スパイク圧力 周期を約3 msecと考えると、この波長の1/10以下として非圧縮柱半径(RCYD)を選定した。
- (3) ダウンカマ部の流路面積はコード内で計算される。この際入力データであるダウンカマクリアランス(DCA)は伝熱管総本数分の体積をさし引いて計算した。また対流防止板の効果は無視した。

コイル部では8枚のシュラウド補強板が付いており流路面積は補強板のところで絞られている。この効果を考慮するためにコイル部部材6では、アリエビーの管路定数から得られる次式による等価断面積を使用した。

$$A_e = \frac{L}{\int_0^L \frac{dx}{a}}$$

但し、

$A_e$	= 等価断面積	( $m^2$ )
$L$	= 音速一定時の管路部長さ	( $m$ )
$a$	= 管路断面積	( $m^2$ )
$x$	= 管路長方向長さ	( $m$ )

- (4) ダウンカマ部材の分割巾は非圧縮柱半径の1/2として選定した。

これは、断面積変化率を約2.5倍以下に選定すれば解の精度は保たれることがわかっているからである。(参考文献[3]の3章TEST RUN NO1結果参照)



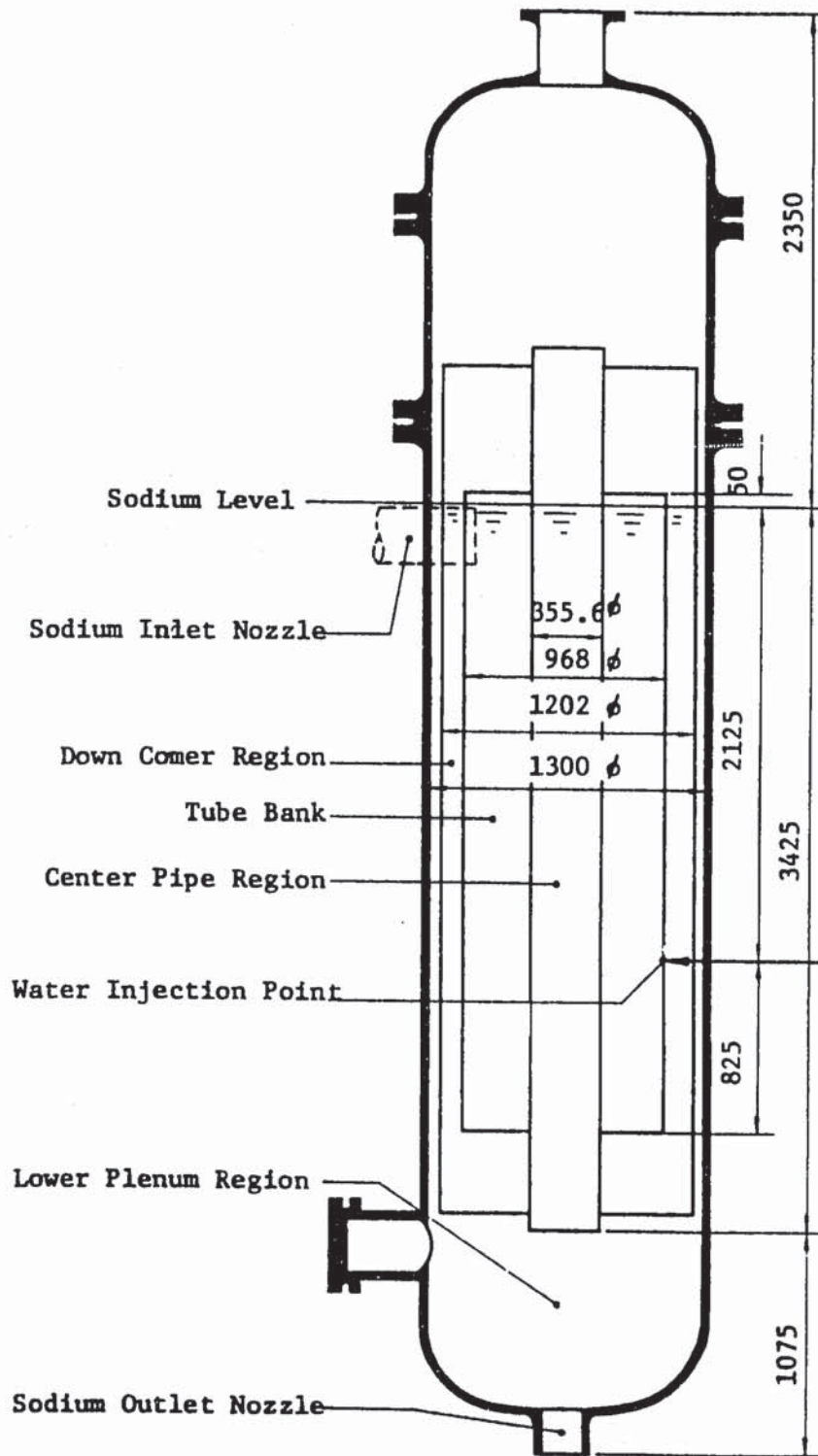


Fig. 3.1 Dimension of Run-7 Reaction Vessel

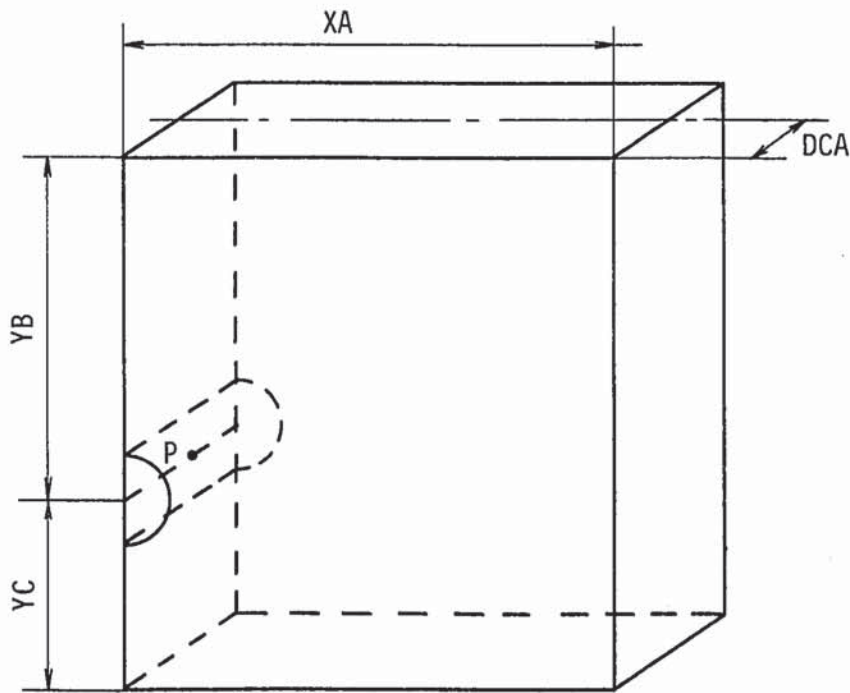
Table 3.1 Conditions of Analysis

Kind of Condition	Item	Description
Initial Condition	Sodium	$V=0$ m/sec, $T=518^\circ\text{K}$
	Reaction Region	$P_0$ =Sodium Pressure at Water Injection Point $R_0=0.0095\text{m}$ (Reference) $T=1000^\circ\text{K}$
	Cover Gas	$P=1.5\text{ata}$ , Volume= $2.07\text{m}^3$
Boundary Condition	Free Surface	$P$ =Cover Gas Pressure
	Bottom	$V=0$ m/sec
	Sodium Inlet and Outlet Nozzle	Neglected
Physical and Chemical Properties	Sodium	Sonic Velocity $1200\text{m/sec}$ (Reference)
		Specific Weight $893\text{kg/m}^3$
		Dynamic Viscosity $4.11 \times 10^{-7}\text{m}^2/\text{sec}$
Reaction Model	Chemical Reaction	$\text{Na} + \text{H}_2 \rightarrow \text{Reaction Products}$
	Hydrogen Release Ratio	0.5 (Reference)
	Water Injection Rate	$5.5\text{kg/sec}$ (Reference)
Configuration		Fig. 3.1, Table 3.2, Table 3.3

P : Pressure  
T : Temperature  
V : Sodium Velocity

Table 3.2 Downcomer's Dimension

Item	Data	Description
XA	1.6949	(Circumferential Length) $\times \frac{1}{2}$
YB	2.125	Length Between P and Free Surface
YC	0.825	Length Between P and Lower Plenum Boundary
RCYD	0.0426	Radius of Incompressible Cylinder Region
DCA	0.0426	(Downcomer Clearance) $\times \frac{1}{2}$



P : Water Injection Point

Table 3.3(1) Configuration

No. of Member	Length (m)			No. of Dismemberment			Flow Area (m <sup>2</sup> )
	Case R	Case 3-4	Case 3-5	Case R	Case 3-4	Case 3-5	
1 *	2.42	2.42	2.42	57	58	81	Fig. 3.5
2 *	0.872	0.872	0.872	20	21	29	
3	0.475			11	6	11	0.991
4	0.3			7	4	7	1.194
5	0.54			12	7	12	1.194
6	0.445			10	6	10	0.598
7	0.76			17	10	17	0.594
8	0.6			14	8	14	0.601
9	1.145			26	15	26	0.601
10	1.713			40	23	40	0.0873
11	1.712			40	23	40	0.0873

Table 3.3(2) Configuration

No. of Member	Length (m)		No. of Dismemberment		Flow Area (m <sup>2</sup> )	
	Case 1-2	Case 1-3	Case 1-2	Case 1-3	Case 1-2	Case 1-3
1 *	2.18	2.42	51	59	Fig. 3.6	Fig. 3.7
2 *	3.02	1.04	71	24		
3 *	0.872	0.803	21	19		
4 , 12	No. 3 ~ No. 11 Member of Case R in Table 3.3(1)					

\* Downcomer Region, Dismemberment and Flow Area are Calculated in the Code.



### 3.2 パラメータスタディのケース選定

#### 3.2.1 パラメータの選定

ダウンカマ部注水実験の初期スパイク圧解析において、圧力ピーク値もしくは周期に大きな影響を及ぼすと考えられるSWAC-5KⅡインプットパラメータをTable 3.4に示す。

このTableより以下の5パラメータについて感度解析を行う。

- i) ダウンカマ流路数
- ii) 初期気泡半径
- iii) 音速（圧力波伝播速度）
- iv) 水素ガス転換比
- v) 注水率

尚、計算時間メッシュ、非圧縮柱半径の検討は付録・Bを参照。

#### 3.2.2 計算ケースの選定

計算ケースは、上記5パラメータのリファレンス値によるリファレンスケース及び、iii) 圧力波伝播速度については、その他4ケース、i), ii), iv), v)の4パラメータについては、その他2ケースを選び、計13ケースについてパラメータスタディを行う。Table 3.5に各パラメータの値を示す。

Table 3.4 Main Parameters of SWAC-5KⅡ

主要入力パラメータ	コード内記号	備 考
1. 計算時間メッシュ	DT	最適値 $DT \leq DCA/CC$ { ダウンカマクリアランスの半分を圧力波が } { 進む時間より小 }
2. 非圧縮柱半径	RCYD	最適値 $RCYD = DCA$ ( 球領域に内接する円筒 )
3. ダウンカマ流路数	NDC	今回のパラメータ・スタディで検討
4. 初期気泡半径	$R\bar{O}$	同上
5. 音 速	CC	同上
6. 水素ガス転換比	$XM\bar{O}L$	同上
7. 水素ガス温度	TGAS	水素ガス転換比と同等の効果があり感度解析は 行なわない。 TGAS = 1,000 °K
8. 注 水 率	WD	今回のパラメータ・スタディで検討

Table 3.5 Calculation Cases for Parameter Study

Parameter Case	No. of Downcomer Flow Pass (Upper/Lower)	Initial Bubble Radius (mm)	Sonic Velocity (m/sec)		Hydrogen Release Ratio	Water Injection Rate		Comment
			Downcomer	Others		Rising Time (msec)	Rate (kg/s)	
Case R	1/1	9.5	1200	1200	0.5	0.0	5.5	Reference Case
Case 1-2	2/1	R	R	R	R	R	R	Sensitivity of No. of Downcomer Flow Pass
Case 1-3	1/2	R	R	R	R	R	R	
Case 2-2	R	4.75	R	R	R	R	R	Sensitivity of Ini- tial Bubble Radius
Case 2-3	R	19.0	R	R	R	R	R	
Case 3-2	R	R	700	700	R	R	R	Sensitivity of Sonic Velocity
Case 3-3	R	R	1700	1700	R	R	R	
Case 3-4	R	R	700	1200	R	R	R	
Case 3-5	R	R	1200	1700	R	R	R	
Case 4-2	R	R	R	R	0.65	R	R	Sensitivity of Hydro- gen Release Ratio
Case 4-3	R	R	R	R	0.35	R	R	
Case 5-2	R	R	R	R	R	0.5	R	Sensitivity of Water Injection Rate
Case 5-3	R	R	R	R	R	1.0	R	

R: Same Value as Case R(Reference Case)

### 3.3 解析モデル

リファレンスケースの解析モデルを Fig. 3.2 に示す。またダウンカマ流路数に関する Case 1-2 (上部流路 2, 下部流路 1), 及び, Case 1-3 (上部流路 1, 下部流路 2) の解析モデルを各々, Fig. 3.3, Fig. 3.4 に示す。

ダウンカマ流路数に関するケース以外の計算ケースにおいては, いずれもリファレンスケースの解析モデル (Fig. 3.2) を使用する。

### 3.4 解析結果

Table 3.6 にリファレンスケースのインプットデータを示す。

ダウンカマ部における部材分割点の位置と, その場所の流路巾を図式化したものを, リファレンスケースについては, Fig. 3.5 に, ダウンカマ流路数に関する Case 1-2, Case 1-3 については Fig. 3.6, Fig. 3.7 に各々示す。他の計算ケースについてはリファレンスケースの図 (Fig. 3.5) と同一である。Fig. 3.5 には計測点の位置と, それに対応する解析点の位置をあわせて示してあり, 計測点と解析点との対応は Table 3.7 に示した。

また, 各パラメータの圧力ピーク値及び周期への影響を Fig. 3.8 ~ Fig. 3.12 に示し, 各点での圧力変化を Fig. 13 ~ Fig. 17 に示した。

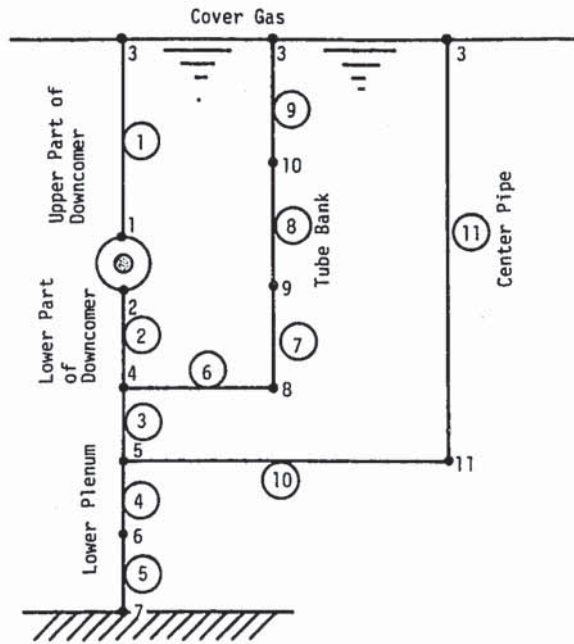


Fig. 3.2 Analytical Model of Case R

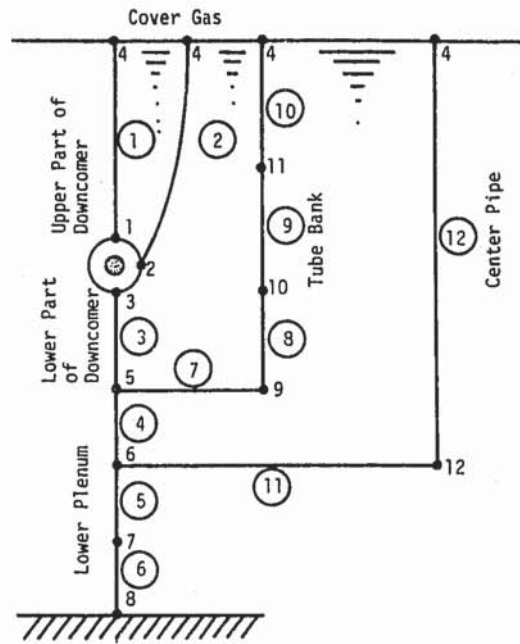


Fig. 3.3 Analytical Model of Case 1-2

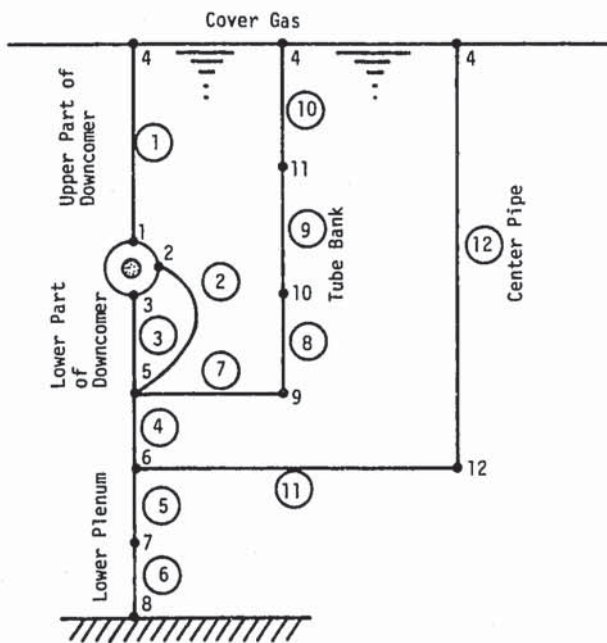


Fig. 3.4 Analytical Model of Case 1-3

- No. of Joint
- No. of Member
- ⊗ Reaction Region



Table 3.6 Input Data of Case-R

DOWN COMER INITIAL SPIKE PRESSURE (SWAT-3 RUN-7)		*** CASE-R 1979.6.				
01	1	6				
05	2	1	1	1	2	4
01	7	2				
05	22	1003	2004	4005	5007	4003
01	27	5003				
05	42	1003	2004	4005	5006	6007
05	47	4008	8009	9010	10003	5011
01	52	11003				
05	92	0	0	11	7	12
05	97	10	17	14	26	40
01	102	40				
01	164	7				
01	174	1000				
05	175	0	1	2	100	5
01	187	1				
02	201	1	3			
02	212	1	3			
01	223	1				
01	231	1				
01	232	10				
02	250	2	1			
02	252	1	5			
01	256	10				
10	0	0				
05	1	0.0	0.0	4.7500E-01	3.0000E-01	5.4000E-01
05	6	4.4500E-01	7.6000E-01	6.0000E-01	1.1450E+00	1.7130E+00
01	11	1.7120E+00				
01	51	1.2000E+03				
05	101	0.0	0.0	9.9100E-01	9.4400E-01	9.4400E-01
05	106	5.9800E-01	5.9400E-01	6.0100E-01	6.0100E-01	8.7300E-02
01	111	8.7300E-02				
05	151	0.0	0.0	8.2300E-01	1.1780E+00	1.1780E+00
05	156	5.8800E-01	5.8800E-01	5.8800E-01	5.8800E-01	3.3340E-01
01	161	3.3340E-01				
02	202	8.9300E+02	4.1100E-07			
01	250	2.1250E+00				
02	255	3.1640E-01	-2.5000E-01			
05	307	0.0	0.0	2.1250E+00	-8.2500E-01	-1.3000E+00
05	312	-1.6000E+00	-2.1400+00	-3.8000E-01	3.8000E-01	9.8000E-01
01	317	4.1300E-01				
01	358	1.5000E+04				
01	359	0.0				
01	369	2.0000E-02				
01	370	1.0000E+03				
01	391	2.0700E+00				
02	401	1.6600E+00	4.0000E+00			
01	421	8.2000E-01				
05	600	1.6949E+00	2.1250E+00	8.2500E-01	4.2630E-02	4.2630E-02
02	609	4.2055E+02	1.6900E+00			
01	611	9.5000E-03				
01	612	3.5500E-05				
05	613	0.0	5.0000E-03	1.0000E-02	2.0000E-02	1.0000E+00
05	713	5.5000E+00	5.5000E+00	5.5000E+00	5.5000E+00	5.5000E+00
01	813	5.0000E-01				
10	0	0.0				

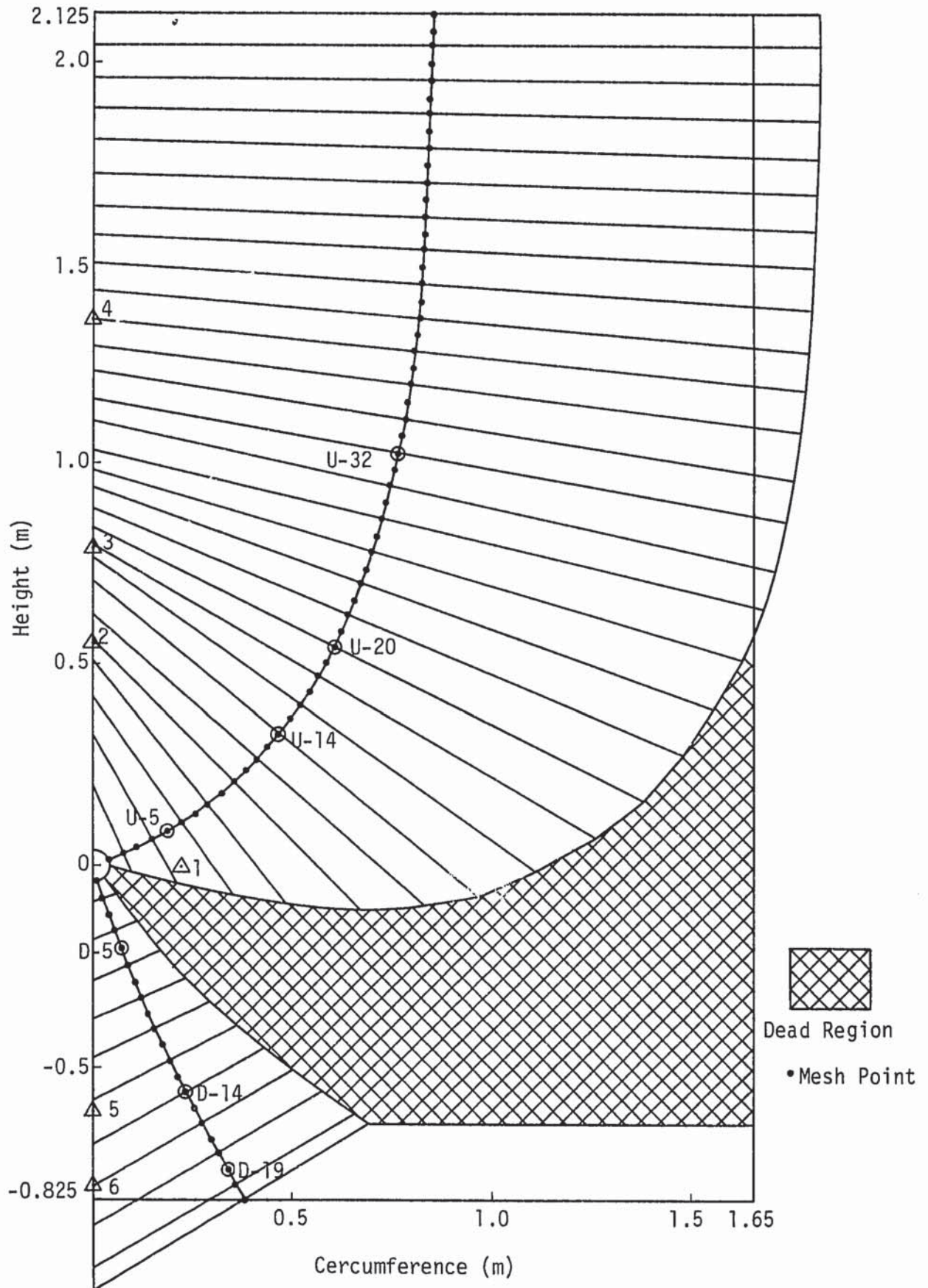


Fig. 3.5 Flow Area of Downcomer (Case R)



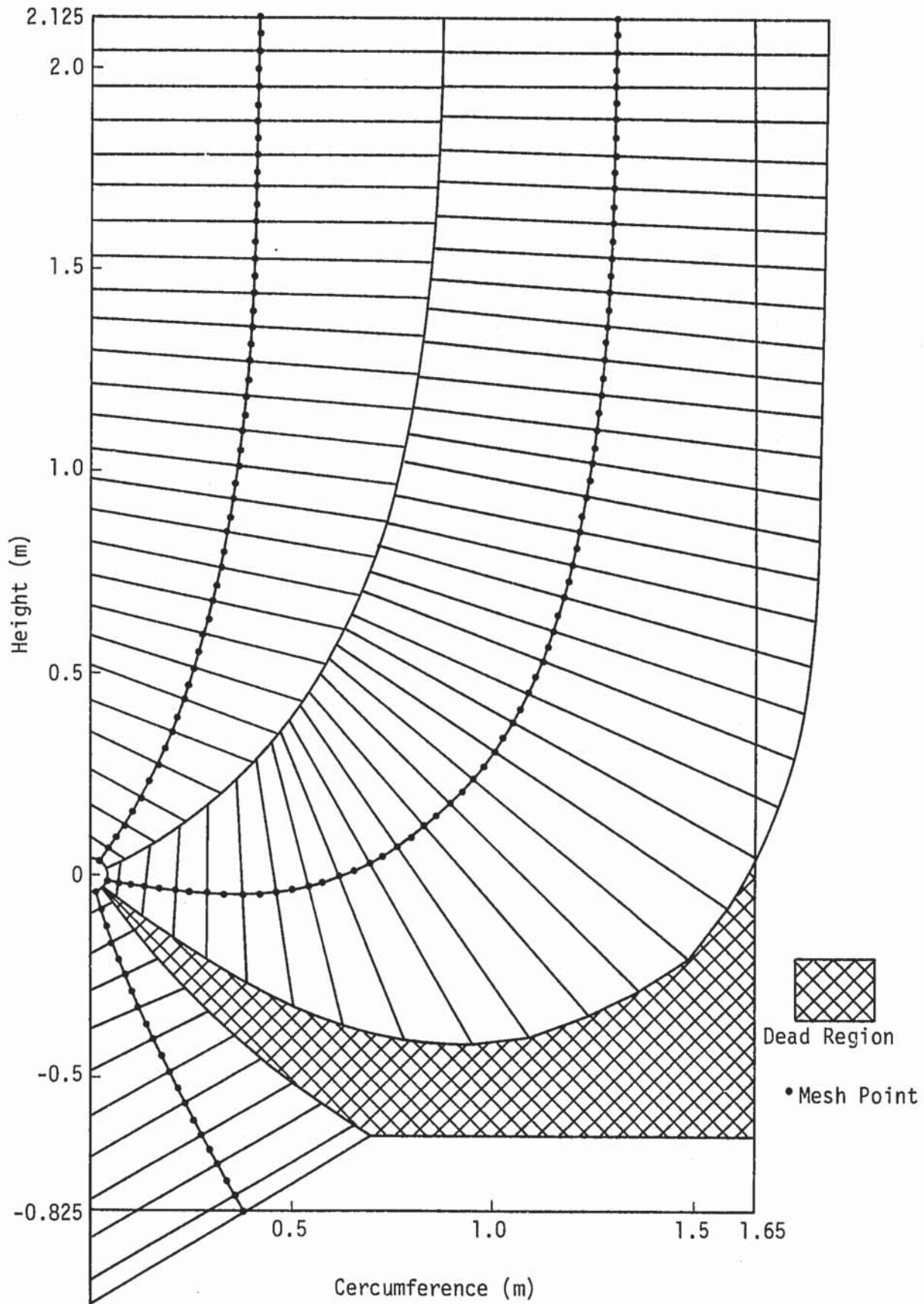


Fig. 3.6 Flow Area of Downcomer (Case 1-2)

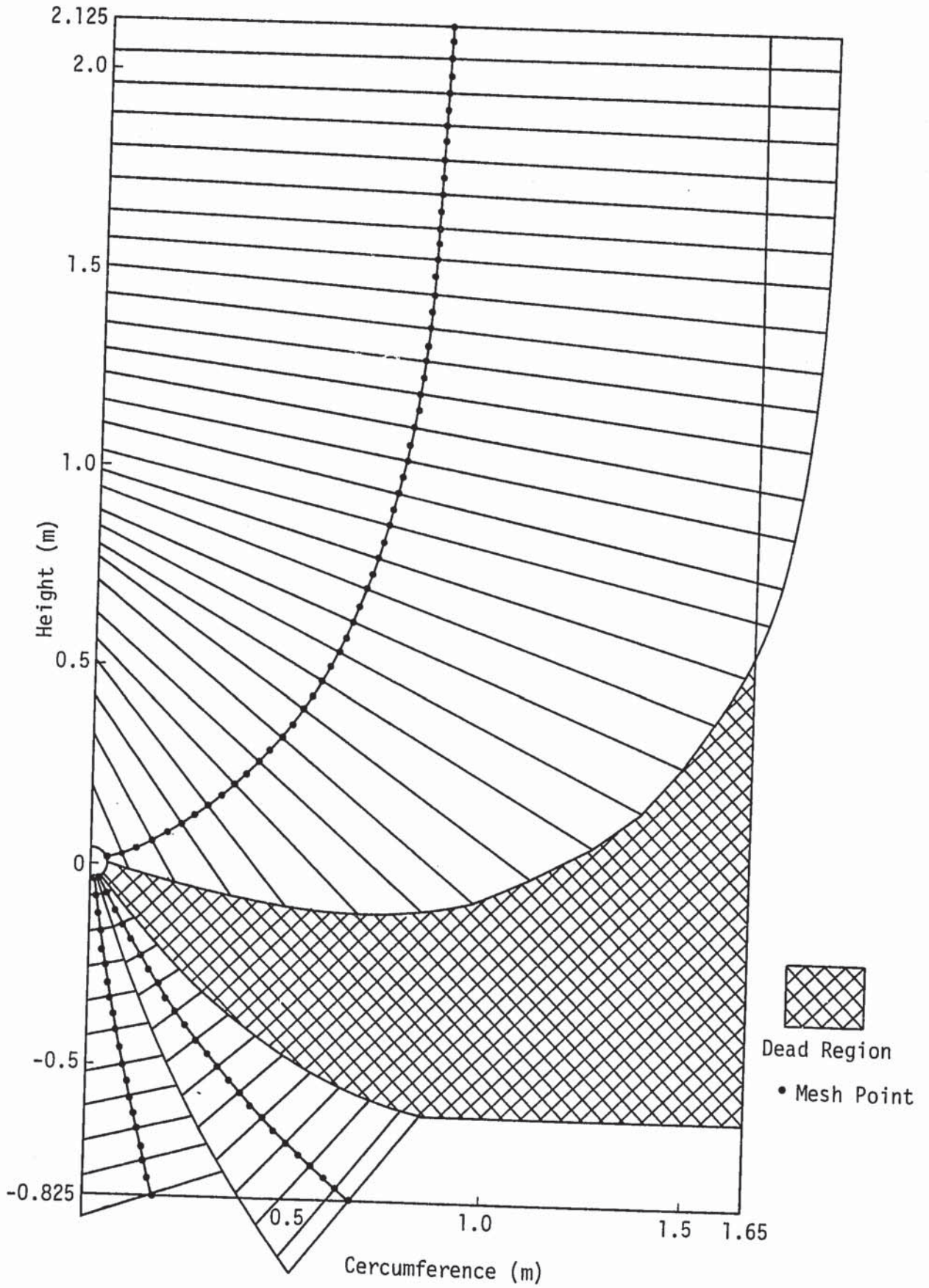


Fig. 3.7 Flow Area of Downcomer (Case 1-3)



Table 3.7 Location of Analytical points and Measured points

Calculated Points			Measured Points		
Mesh, Joint No.	Distance from WIP(mm)	Location at Fig. 3.5	Tag No.	Distance from WIP(mm)	Location at Fig. 3.5
Downcomer (Upper) 5	207	⊙ U - 5	PK 1104	212	△ 1
" 14	585	" 14	PK 1108	550	△ 2
" 20	836	" 20	PK 1109	800	△ 3
" 32	1344	" 32	PK 1111	1350	△ 4
Downcomer (Lower) 5	216	⊙ D - 5	PK 1104	212	△ 1
" 14	- 607	" 14	PK 1102	- 600	△ 5
" 19	- 824	" 19	PK 1103	- 785	△ 6
JOINT 4	- 825		P 1113	- 875	
" 5	-1300		P 1112	-1325	
" 6	-1600		P 1111	-1675	

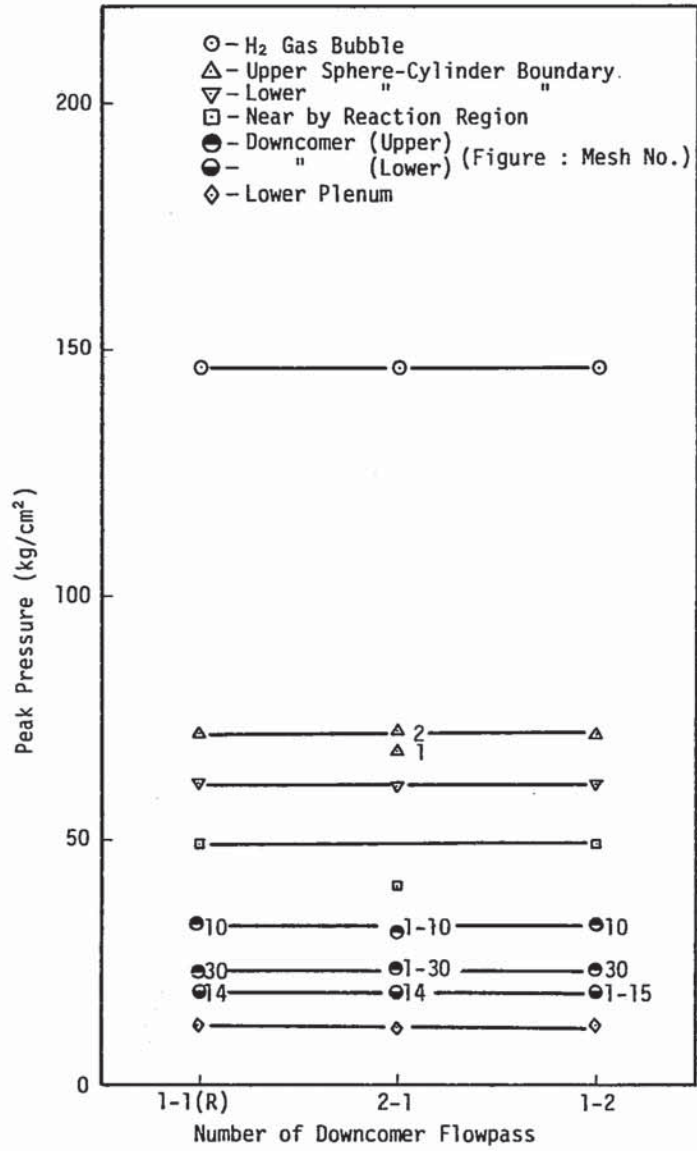


Fig. 3.8(1)

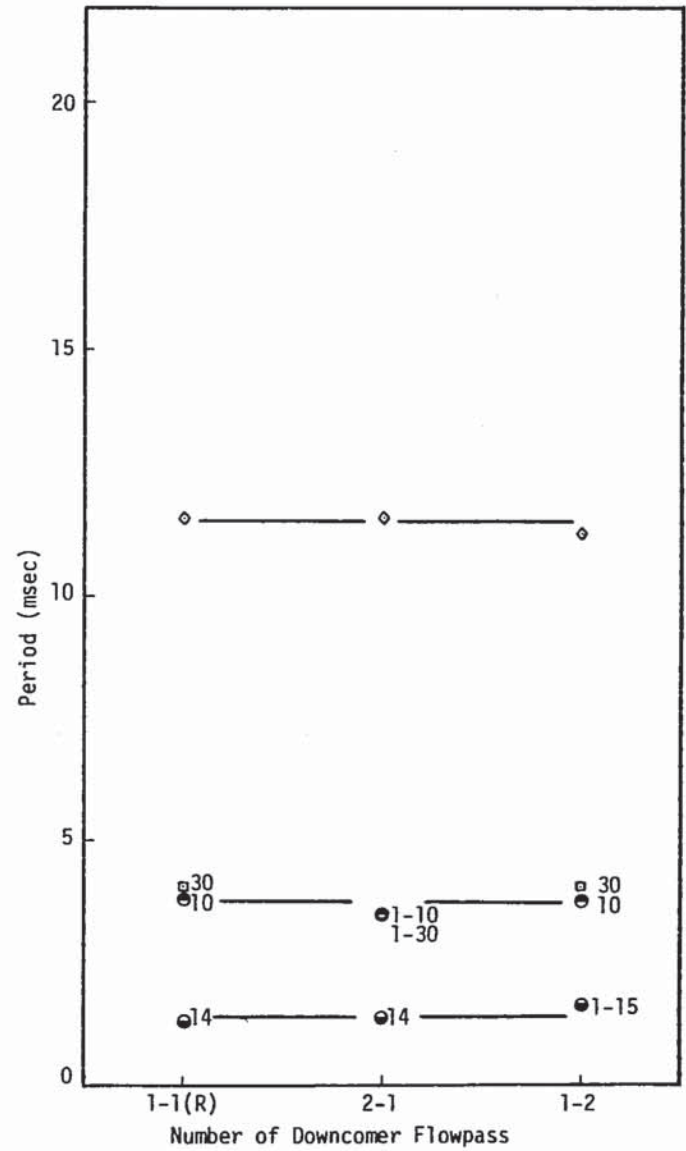


Fig. 3.8(2)

Fig. 3.8 Effect of No. of Downcomer Flowpass

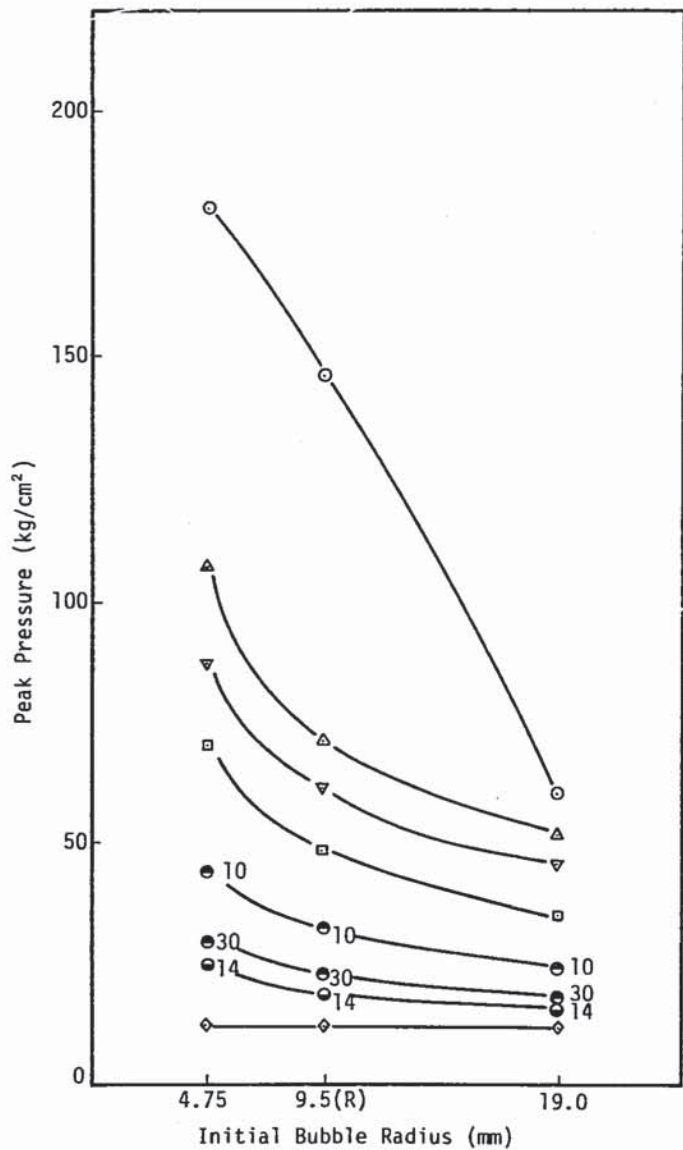


Fig. 3.9(1)

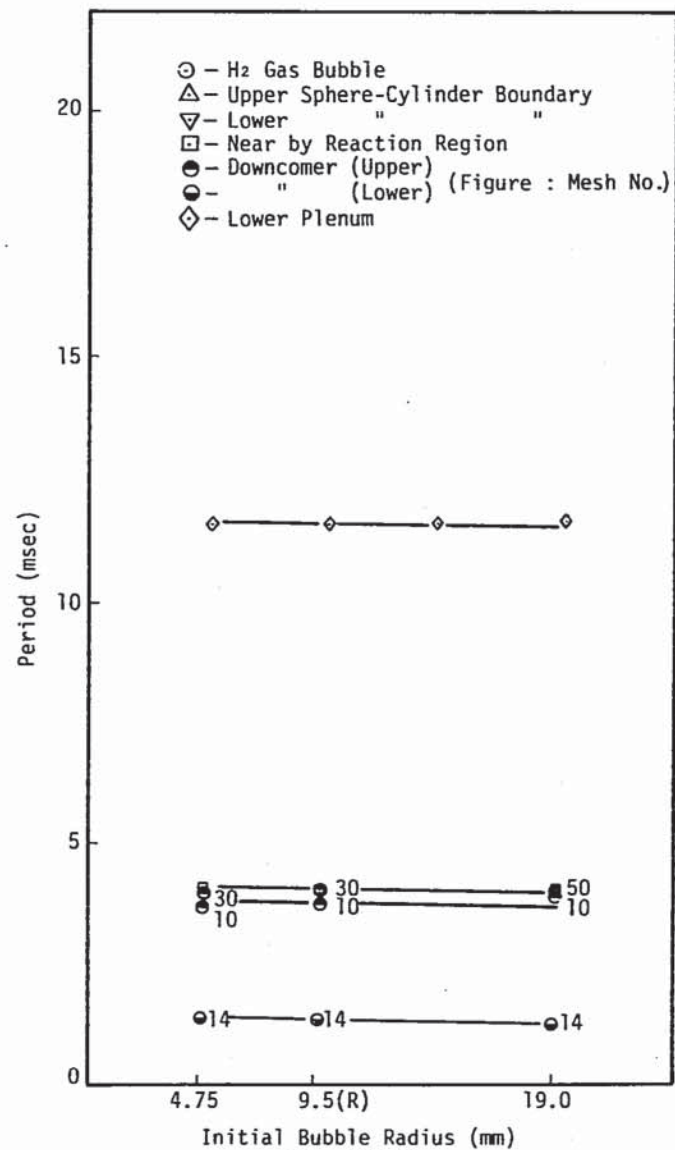


Fig. 3.9(2)

Fig. 3.9 Effect of Initial Bubble Radius

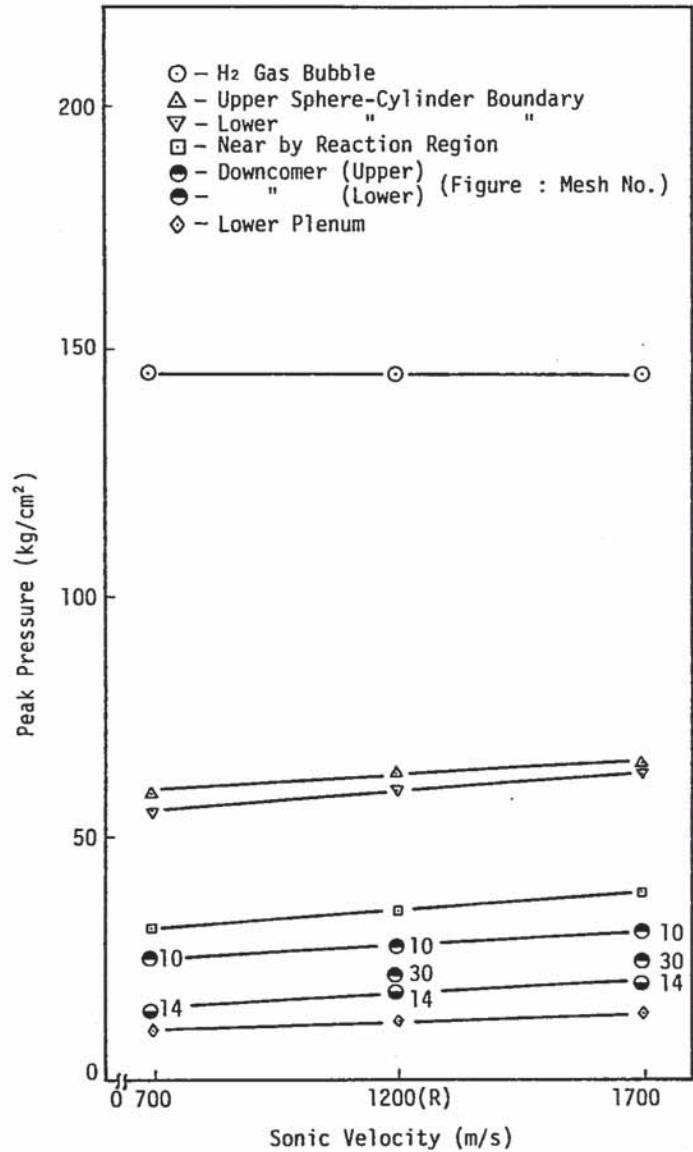


Fig. 3.10(1)

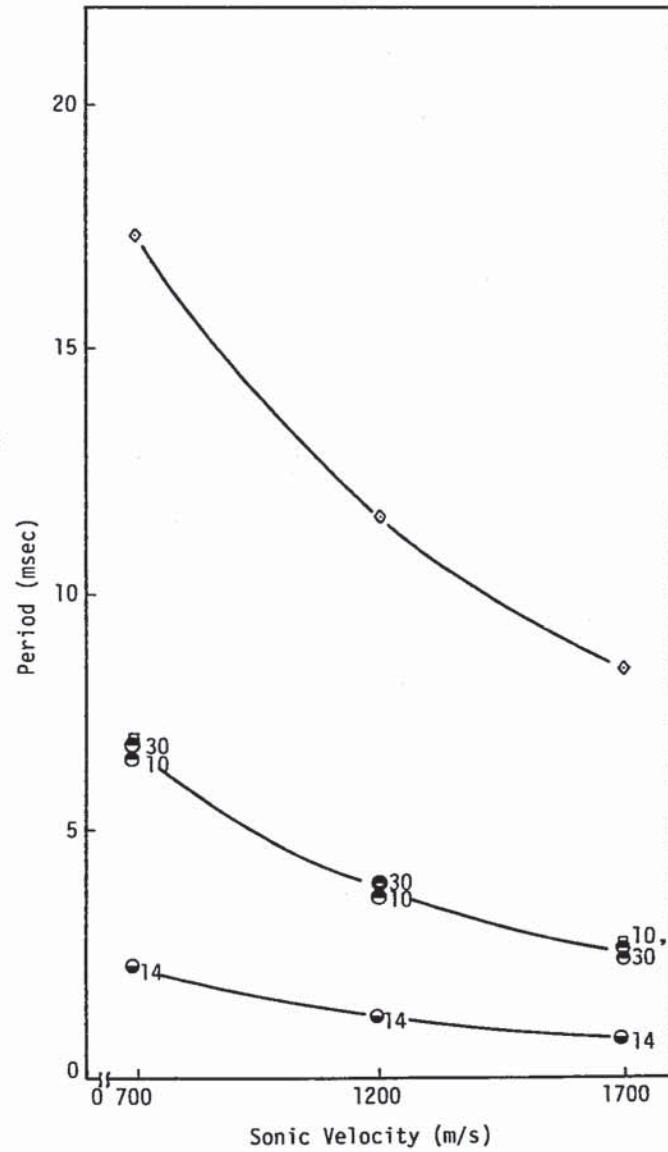


Fig. 3.10(2)

Fig. 3.10 Effect of Sonic Velocity

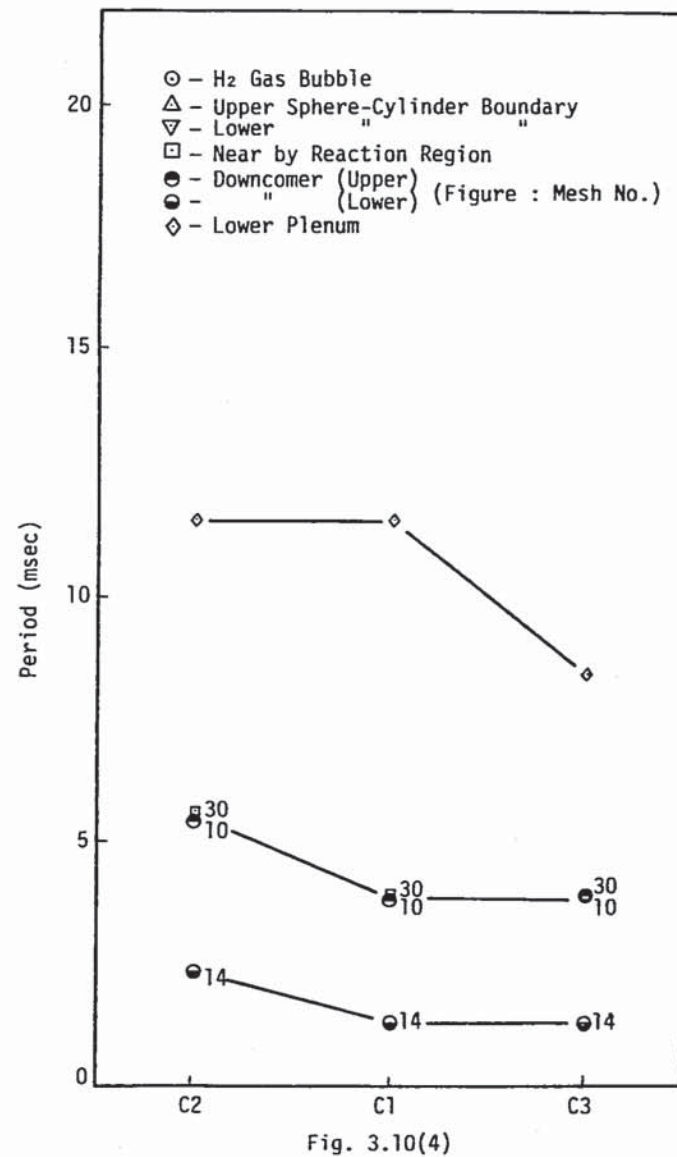
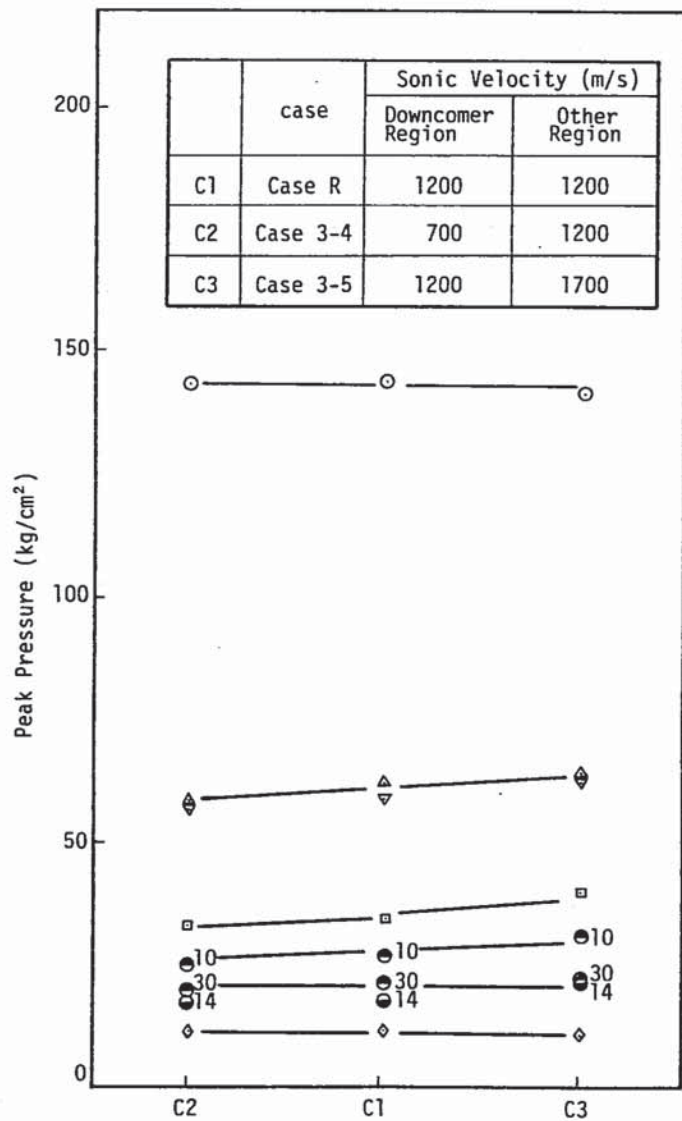


Fig. 3.10 Effect of Sonic Velocity

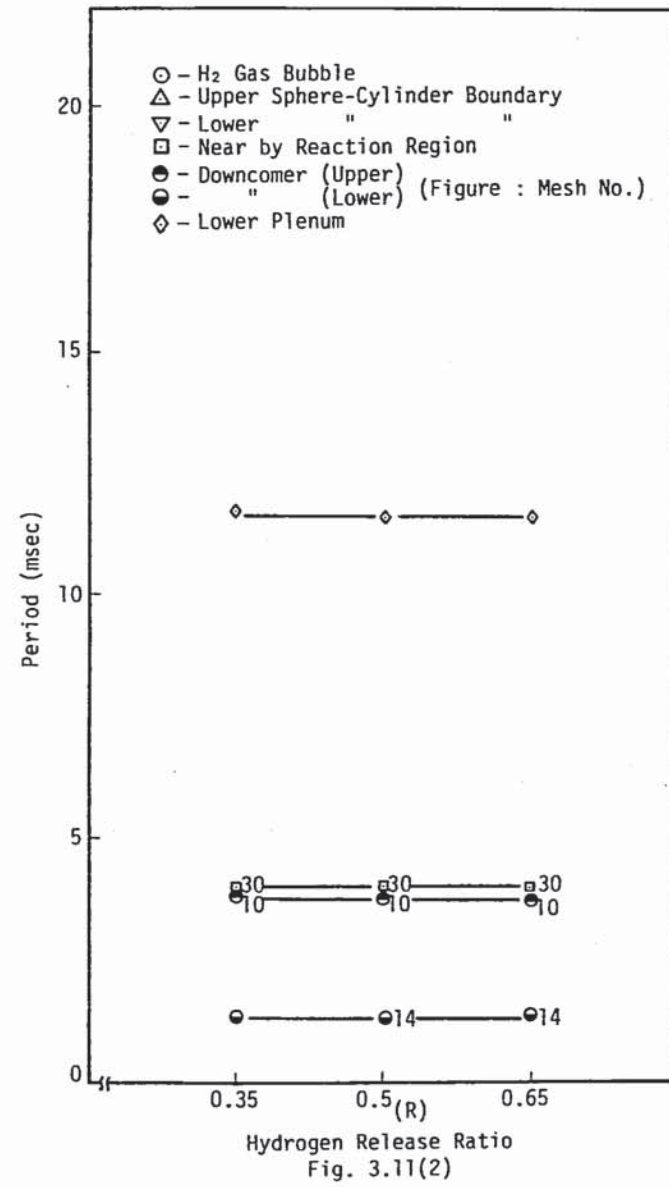
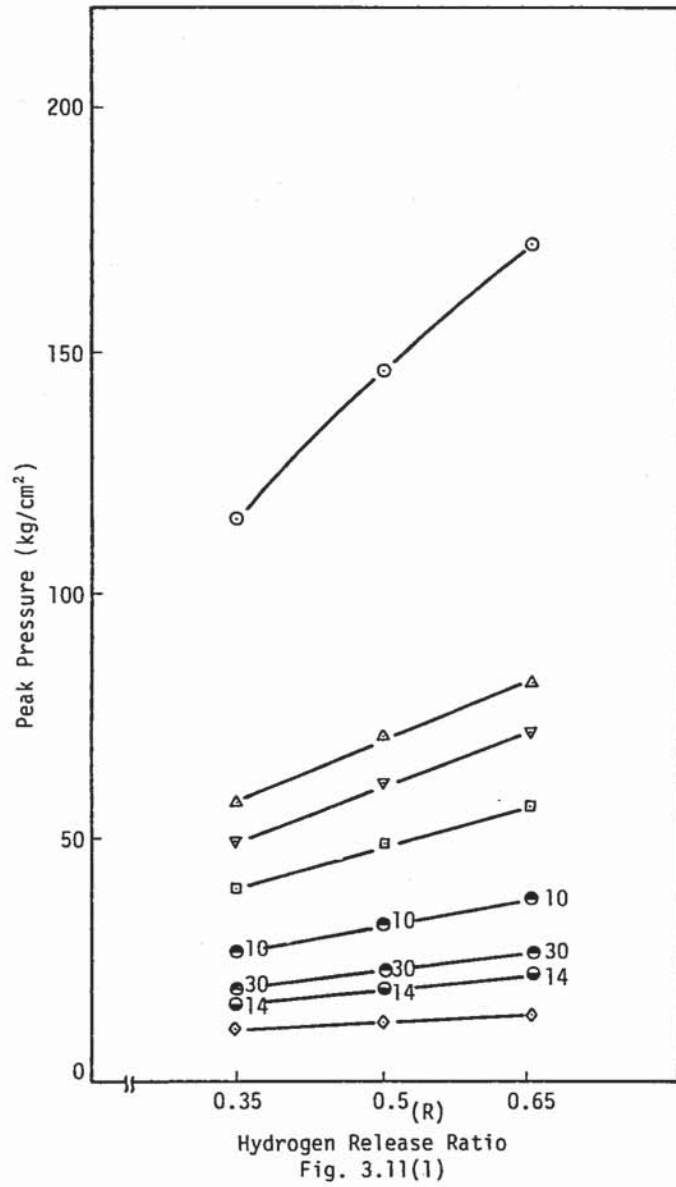
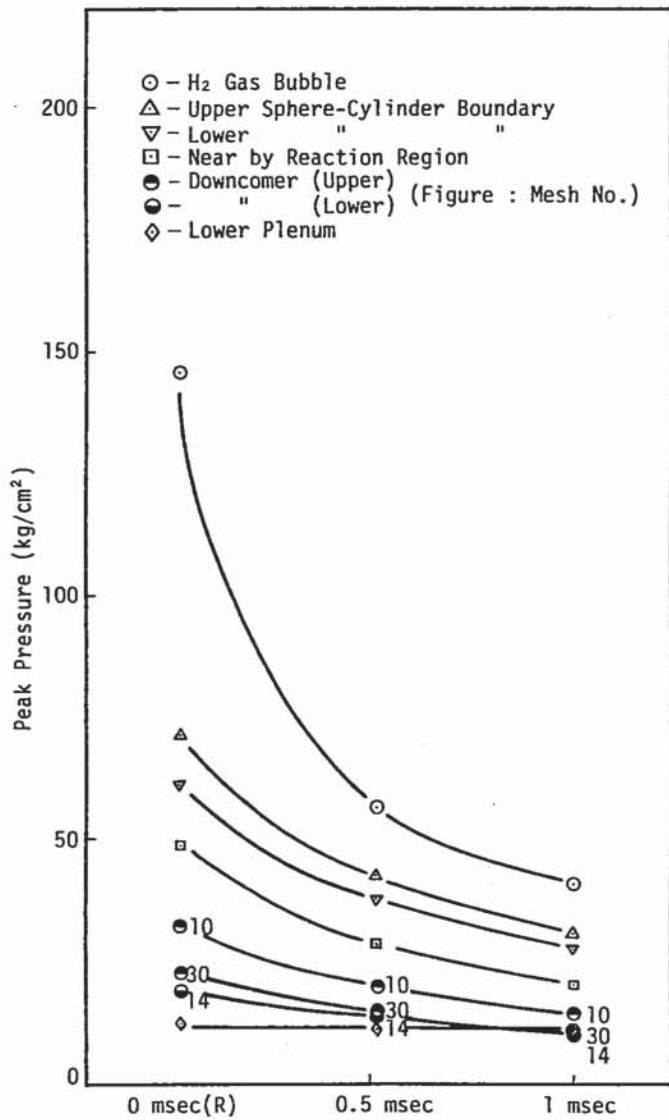
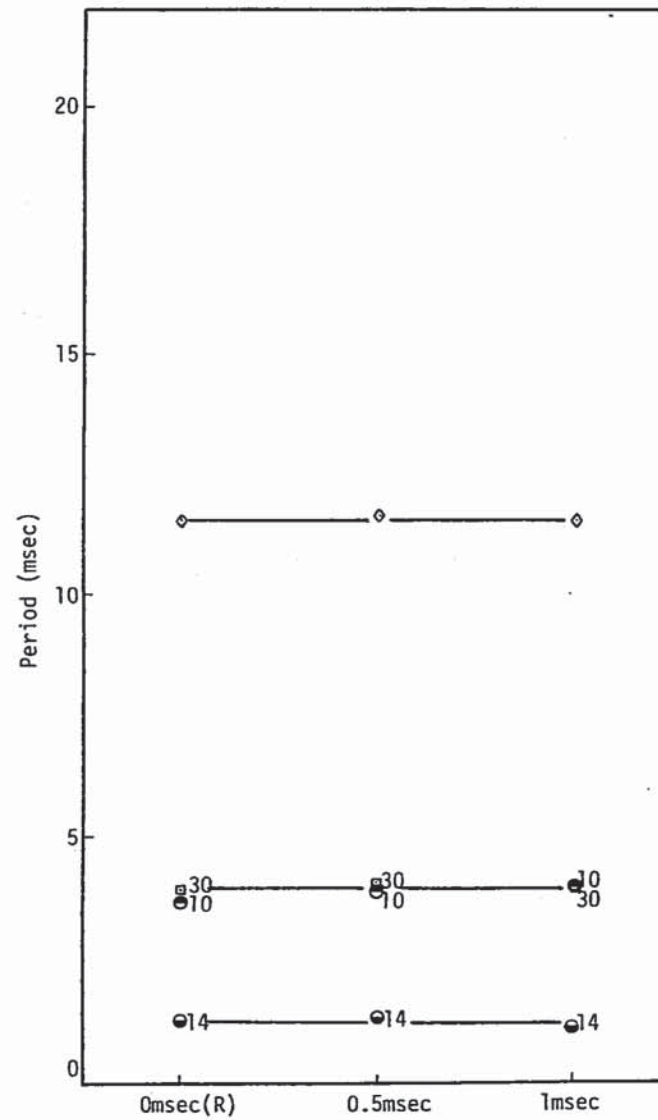


Fig. 3.11 Effect of Hydrogen Release Ratio





Water Injection Rate  
Fig. 3.12(1)



Water Injection Rate  
Fig. 3.12(2)

Fig. 3.12 Effect of Water Injection Rate

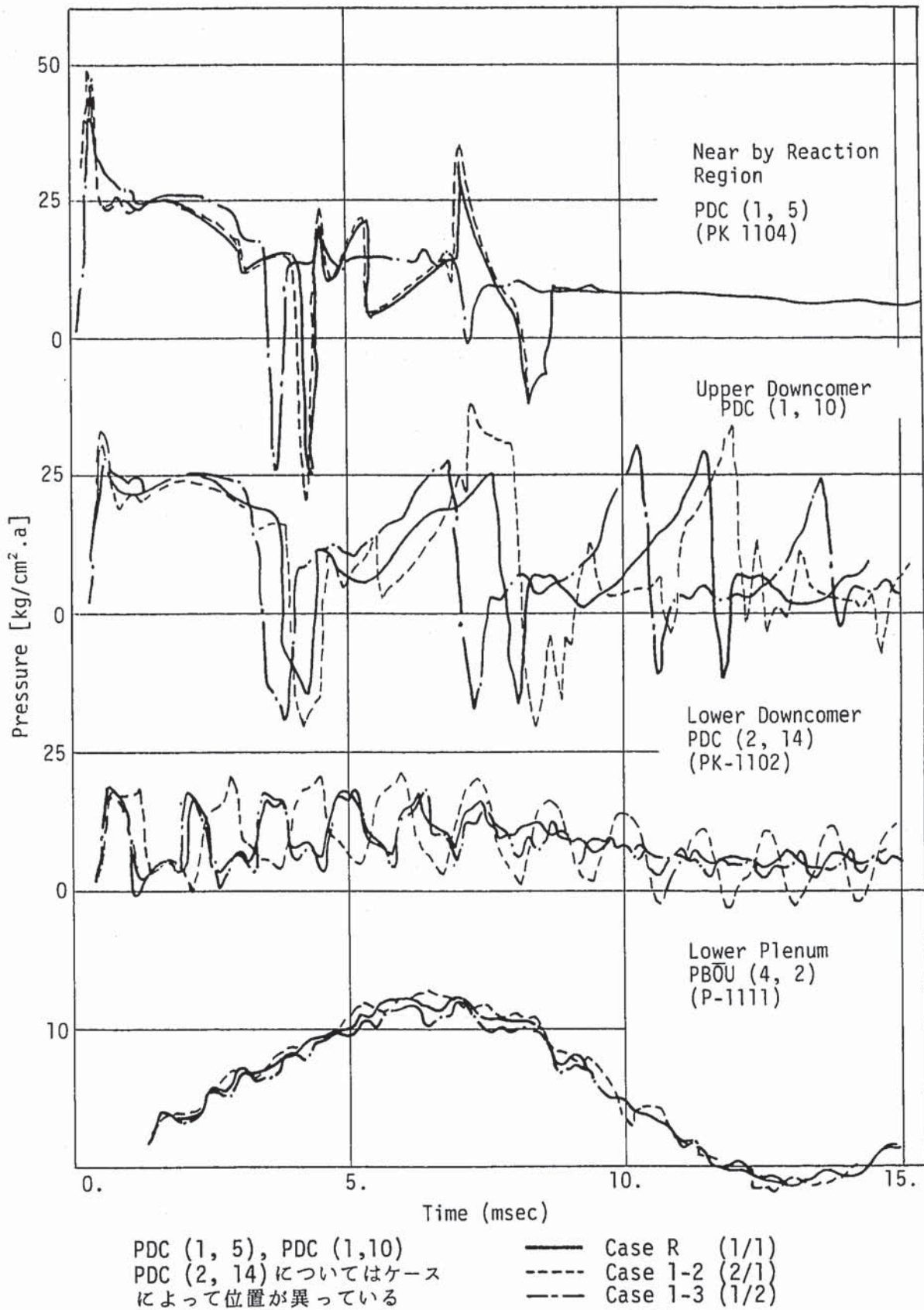


Fig. 3.13 Effect of No. of Downcomer Flowpass (Pressure Histories)



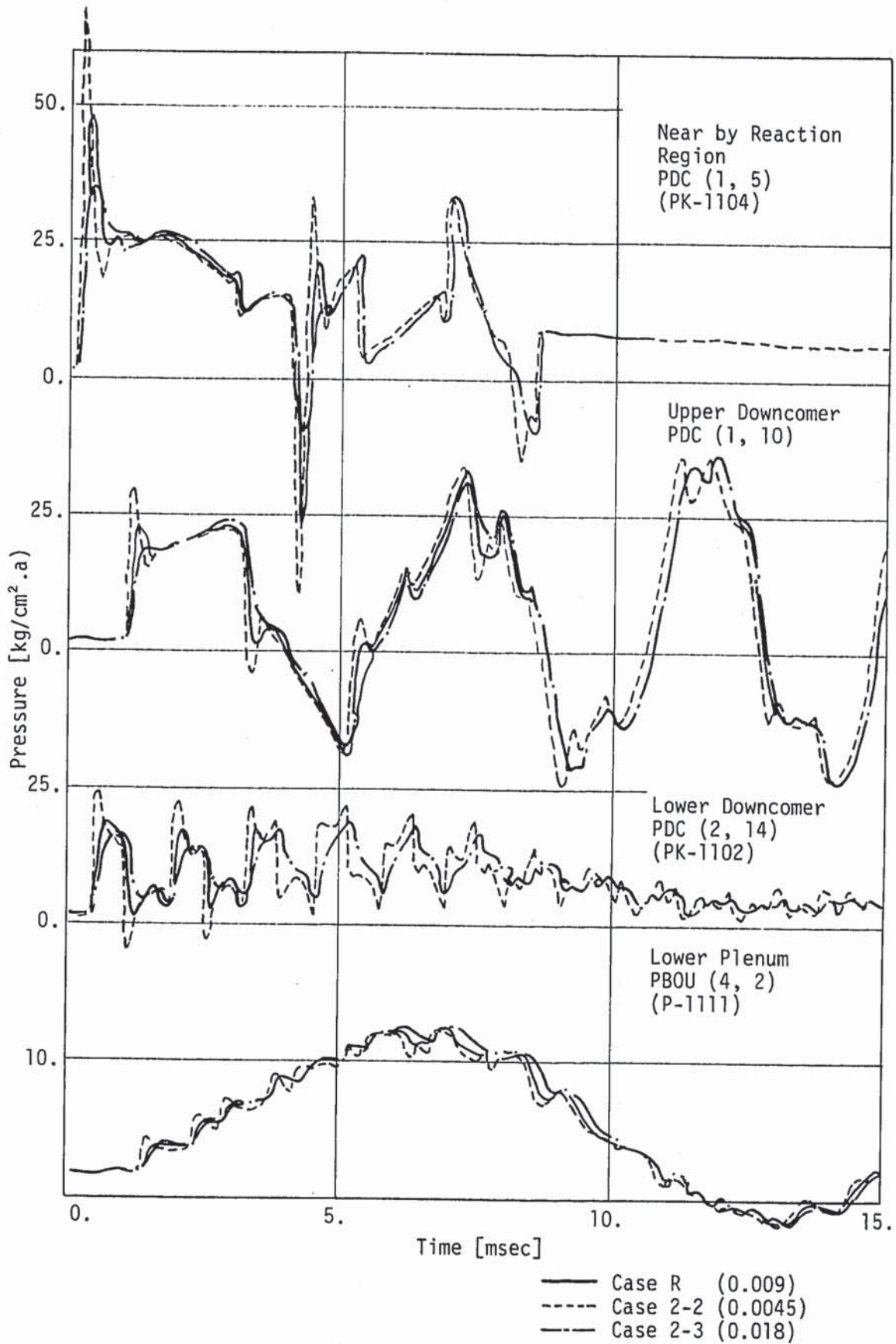


Fig. 3.14 Effect of Initial Bubble Radius (Pressure Histories)

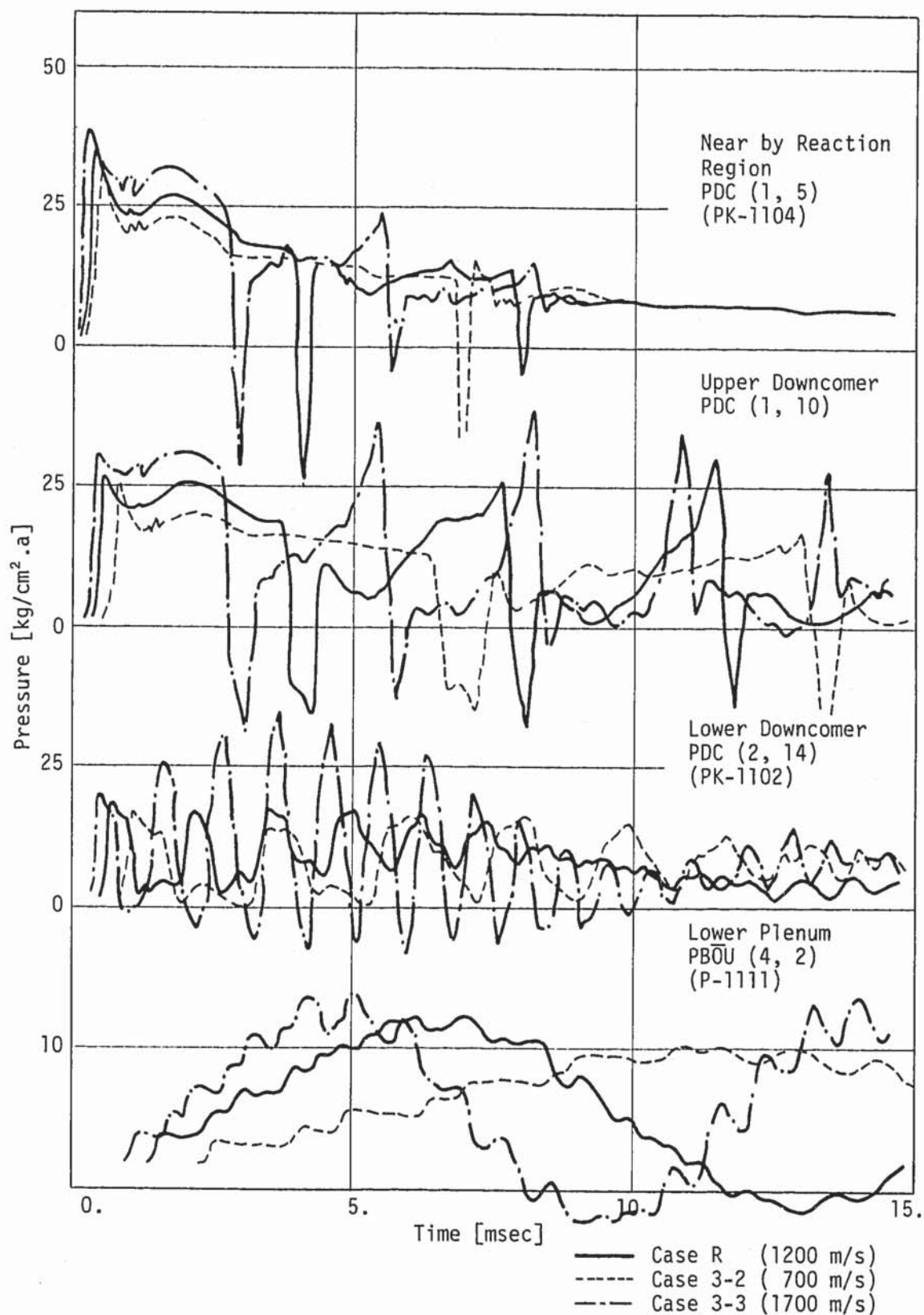


Fig. 3.15 Effect of Sonic Velocity (Pressure Histories)

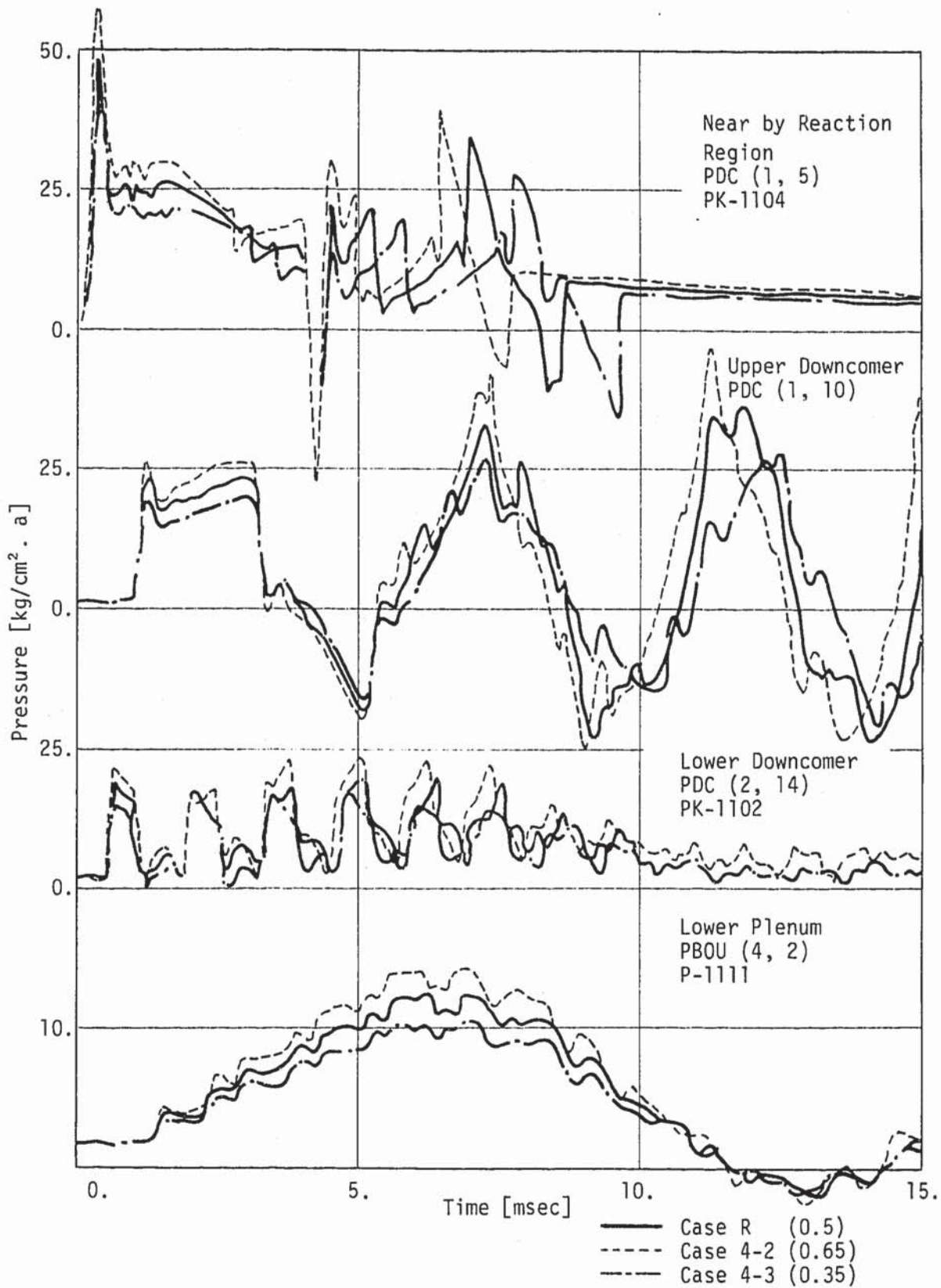


Fig. 3.16 Effect of Hydrogen Release Ratio (Pressure Histories)



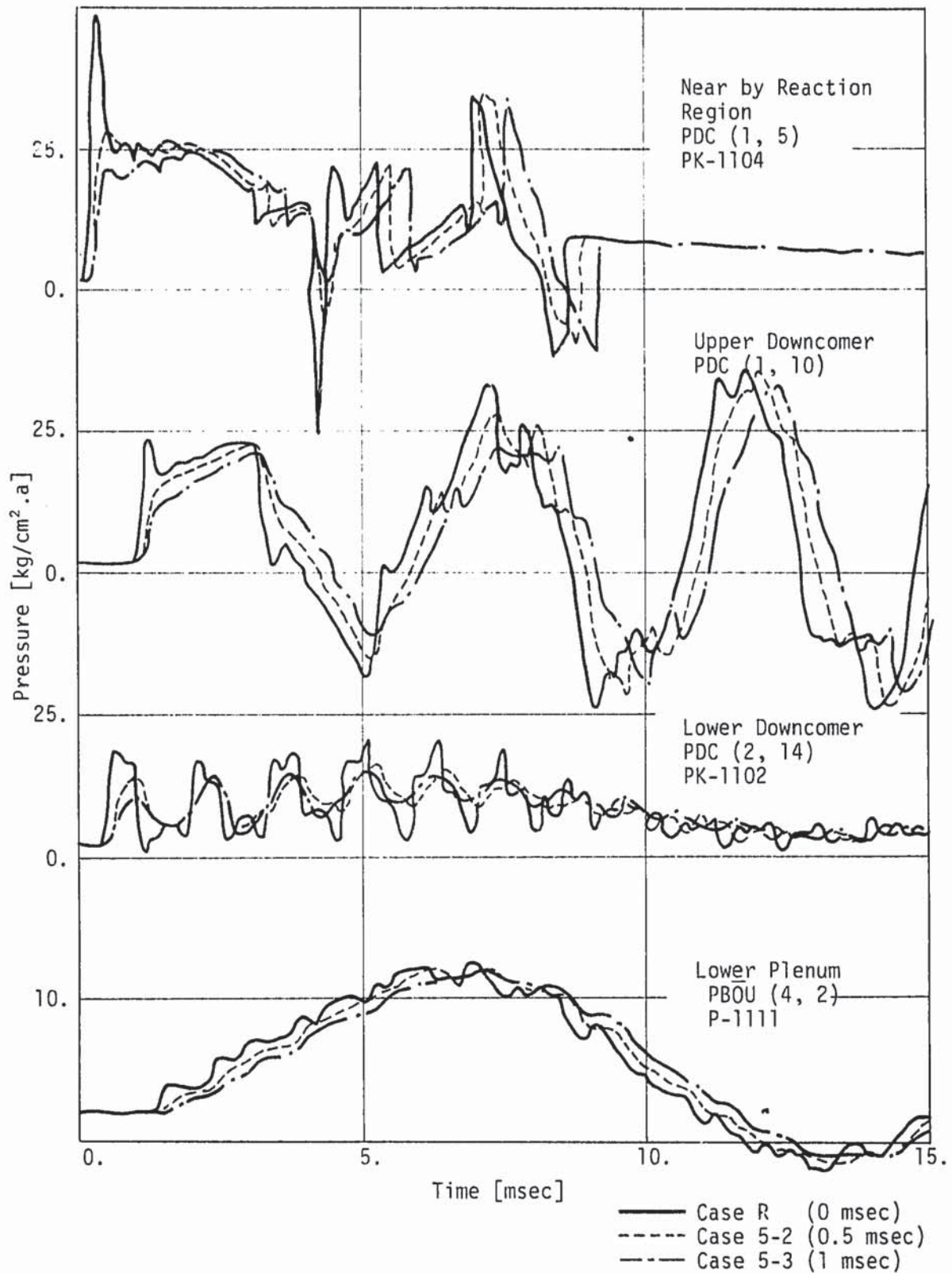


Fig. 3.17 Effect of Water Injection Rate (Pressure Histories)



### 3.4.1 各パラメータの圧力ピーク値への効果

- (1) ダウンカマ流路数
  - i) ピーク圧力への影響は小さい
- (2) 初期気泡半径
  - i) 反応部に近いほど、初期気泡半径によるピーク圧力の依存性が強い。
  - ii) 下部プレナム部には影響なし、
  - iii) 第1ピーク圧力に最も大きく影響するが、その後のピーク圧力への影響は小さい。
- (3) 圧力波伝播速度
  - i) 圧力波伝播速度が速くなるに従い、ピーク圧力もわずかに増加する。
- (4) 水素ガス転換比
  - i) 水素ガス転換比が増加すると、ピーク圧力も増加する。
  - ii) 全期間にわたってピーク圧力に影響している。
- (5) 注水率（立上り時間）
  - i) 初期気泡半径の効果とよく似た傾向を示す。すなわち、ダウンカマ部では立上り時間の影響は大きいが、下部プレナムでは影響はない。
  - ii) 第1ピーク圧力に対して大きく影響し、その後のピーク値への影響は小さい。

### 3.4.2 各パラメータの圧力周期への効果

ダウンカマ流路数、初期気泡半径、水素ガス転換比、注水率は周期に影響を与えない。圧力波伝播速度は周期に影響を与え、以下のことがわかる。

- i) 音速が速くなると周期は短くなる。
- ii) ダウンカマ部だけの音速を遅くすると、ダウンカマ部での周期は長くなるが、下部プレナム部の周期には影響はない。また、下部プレナム部、センターパイプ部、チューブバンク部の音速を速くすると、下部プレナム部の周期は短くなるがダウンカマ部の周期には影響しない。

以上より、ダウンカマ部の周期、その他の領域の周期は各々での音速が支配的である。

### 3.5 まとめ

Table 3.8 にパラメータ・スタディの結果をまとめる。

Table 3.8 パラメータの圧力波形への効果

比較対象 パラメータ	反応点近傍		ダウンコマ中間部		下部プレナム部		備考
	ピーク値	周期	ピーク値	周期	ピーク値	周期	
1. ダウンコマ流路数	-	-	-	-	-	-	
2. 初期気泡半径	○	-	△	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 第1波のみ影響有り</li> <li>○ 半径が小さいほどピーク高</li> </ul>
3. 音速	△	○	△	○	△	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 音速が早いほどピーク高</li> <li>○ 周期短</li> </ul>
4. H <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O モル比較比	○	-	○	-	○	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 転換比が大きいほどピーク値高</li> </ul>
5. 注水率(立上り時間)	○	-	○	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 第1波のみ影響有り</li> <li>○ 立上り時間が長いほどピーク値低</li> </ul>

注) 効果の程度 ○ > △ > -  
(大) (中) (小もしくは無し)

## 4. 実験解析

### 4.1 解析ケースの選定

#### 4.1.1 パラメータ・スタディのリファレンスと実験結果の比較

前章で計算したリファレンスケースとRun-7 実験結果の各部圧力変化比較図を Fig. 4.1 に示す。この比較図の検討結果を Table 4.1 に示す。この表より実験解析ケースを選定するにあたって、以下のパラメータ処理を考える必要が明らかになった。

##### i) 音速

ダウンカマ部はパラメータ・スタディリファレンス値 (1,200 m/s) より低く、下部プレナム部、コイル部および内筒部ではより速くすることがシュミレーションに必要である。

##### ii) 注水率

瞬時ステップ状水リーク率よりも立上り時間を考慮したほうが良い。(なお、絶対量の増減については、水素ガス転換比の効果として取扱う。)

##### iii) 水素ガス転換比

リファレンス値より高くしたほうが良いことが考えられる。

##### iv) 水素気泡半径

注水率立上り時間と同様の効果がある。

##### v) ダウンカマ部流路数

前章のパラメータ・スタディよりリファレンス値 (上部：1 流路，下部：1 流路) でよい。

#### 4.1.2 解析ケースの選定

リファレンスケースおよびその他数ケースをパラメータ・スタディの結果を参考に選択し、実験結果により良く解析結果が合うケースを求めた。

##### (1) リファレンスケースの選択

リファレンスケースとしては、大リーク Na-水反応解析に通常使用されているパラメータの値を用いた。したがって前項の実験結果の比較から得られた結論は、その他数ケースの選択にあたって、リファレンスケースのパラメータ値変更に変更された。

##### i) 音速

以下のアリエビーの式の補正式<sup>(3)</sup>を使用 (ダウンカマ部のみ内壁 ( $D_s$ ) を考慮)

$$C^2 = \frac{g K_{NA} / \gamma_{NA}}{1 + \frac{K_{NA} \cdot D}{E \cdot \sigma} \left( 1 - \frac{D_s^2}{D^2} \right)} \quad (4.1)$$



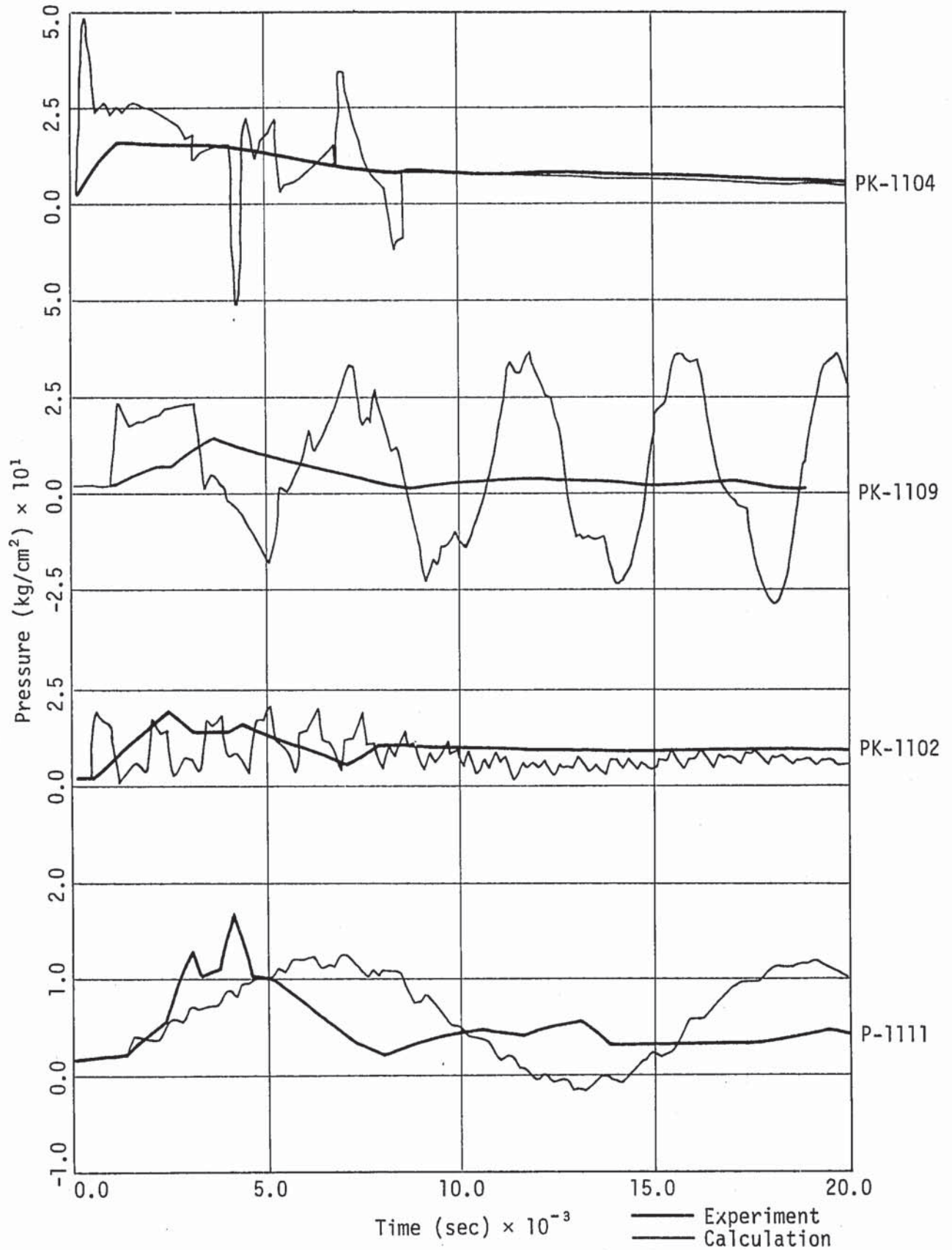


Fig. 4.1 Comparison of Experiment and Reference Case of Parameter Study



Table 4.1 Comparison of Reference Case and Experiment,  
Discussion and Treatment of Parameters

	解析と実験の比較	考 察	対 策
反 応 点 近 傍 (実験: PK-1104点)	<ul style="list-style-type: none"> <li>注水初期に解析ではより高い圧力を示す。 (ピーク値で実験の3倍)</li> <li>その後の圧力は両者ほぼ一致。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>パラメータ・スタディによれば               <ul style="list-style-type: none"> <li>i) 注水率立上り時間を長くする。</li> <li>ii) 初期気泡半径を大きくすると初期ピーク値が生じない方向になる。</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>注水率に立上り時間を考慮する。</li> </ul>
ダ ウ ン カ マ 上 部 (実験: PK-1109点)	<ul style="list-style-type: none"> <li>圧力値は解析が実験より2倍以上高い。</li> <li>周期は解析が約4 msecに対し、実験では7 msecである。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ダウンカマ部音速が解析リファレンス値(1,200 m/s)より遅い。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ダウンカマ部音速をリファレンス値(1,200 m/s)より遅くする。</li> </ul>
ダ ウ ン カ マ 下 部 (実験: PK-1102点)	<ul style="list-style-type: none"> <li>圧力ピーク値は両者ほぼ等しい。</li> <li>周期は解析が1.4 msecに対し、実験は7 msecである。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ダウンカマ部音速が解析リファレンス値(1,200 m/s)より遅い。</li> <li>ダウンカマ上部の影響が伝わらない。</li> </ul>	同 上
下 部 プ レ ナ ム 部 (実験: P-1111点)	<ul style="list-style-type: none"> <li>実験のほうが圧力ピーク値が高い。</li> <li>周期は解析が10 msecに対し、実験は7 msecである。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>下部プレナム部、コイル部および内筒部の音速が解析リファレンス(1,200 m/s)より速い。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>下部プレナム部、コイル部および内筒部の音速をリファレンス値(1,200 m/s)より速くする。</li> <li>注水率を大きくする。</li> </ul>

ii) 注水率

立上り時間を考慮せず，水リーク率は前章で使用された値（ $5.5 \text{ kg/s}$ ）が注水開始と同時にステップで入るとする。

iii) 水素ガス転換比

従来より SWAT-3 実験解析に使用されている値（ $0.5$ ）<sup>(4)</sup>を使用するものとする。なお，水素ガス気泡温度は  $1.000^\circ\text{K}$  であり  $f.T$  値（水素ガス転換比 $\times$ 水素ガス気泡温度）は  $500^\circ\text{K}$  となる。

iv) 水素気泡半径

従来より Na-水反応解析で使用されている方法<sup>(4)</sup>（破断伝熱管口径の  $1/2$  とする。）を踏襲する。したがって注水管ノズル口径（ $19 \text{ mm}$ ）の  $1/2$  として  $9.5 \text{ mm}$  とする。

v) ダウンカマ流路数

ダウンカマ上部流路 1 および下部流路 1 の計 2 流路とする。

(2) その他の解析ケース

Table 4.2 に実験解析に使用される 5 計算ケースをまとめる。

Table 4.2 Selection of Analytical Cases of Experiment

パラメータ 計算ケース	ダウンカマ 流路数 (上/下)	圧力波伝播速度 (m/s)				水素ガス転換比		注水率		水素 気泡半径 (mm)	目的
		D. C	L. P	T. B	C. P	$\frac{H_2 \text{モル}}{H_2O \text{モル}}$	f · T 値	立上り時間 (msec)	注水率 (kg/s)		
E-01	1/1	776	1620	1376	1811	0.5	500	0.	5.5	9.5	リファレンスケース
E-02	N. C	N. C	1900	1900	1900	N. C	N. C	N. C	N. C	N. C	圧力波周期を実験に合わせる。
E-03	N. C	N. C	1900	1900	1900	N. C	N. C	1.0	N. C	N. C	E-02の初期圧力ピークを緩和する。
E-04	N. C	N. C	2100	2100	2100	N. C	N. C	1.0	N. C	N. C	E-03の圧力波周期をさらに改善
E-05	N. C	N. C	2100	2100	2100	0.65	650	1.0	N. C	N. C	E-03の圧力ピーク値を実験に合わせる。

D. C : ダウンカマ部, L. P : 下部プレナム部, T. B : コイル部, C. P : 内筒部, N. C : E-01の値から変更なし。

#### 4.2 解析モデル

Fig. 4.2 に実験解析ケース E-01 より E-05 が使用した解析モデルを示す。またダウン  
カマ部材 (①, ②) の流路模式図を Fig. 4.3 に示す。図中の記号, 数字は実験計測点および  
解析結果表示点の位置を示しており, Table 4.3 にまとめて示す。実験計測点と解析結果表  
示点の対応は, 反応点からの距離がほぼ等しいところとして選定した。

Table 4.4 に E-01 より E-05 ケースまでの解析モデル主要インプットデータを示す。

#### 4.3 解析条件

主要解析条件はパラメータスタディに使用したものと同一である。(Table. 3.1  
(Table 3.1 および Table 3.2))



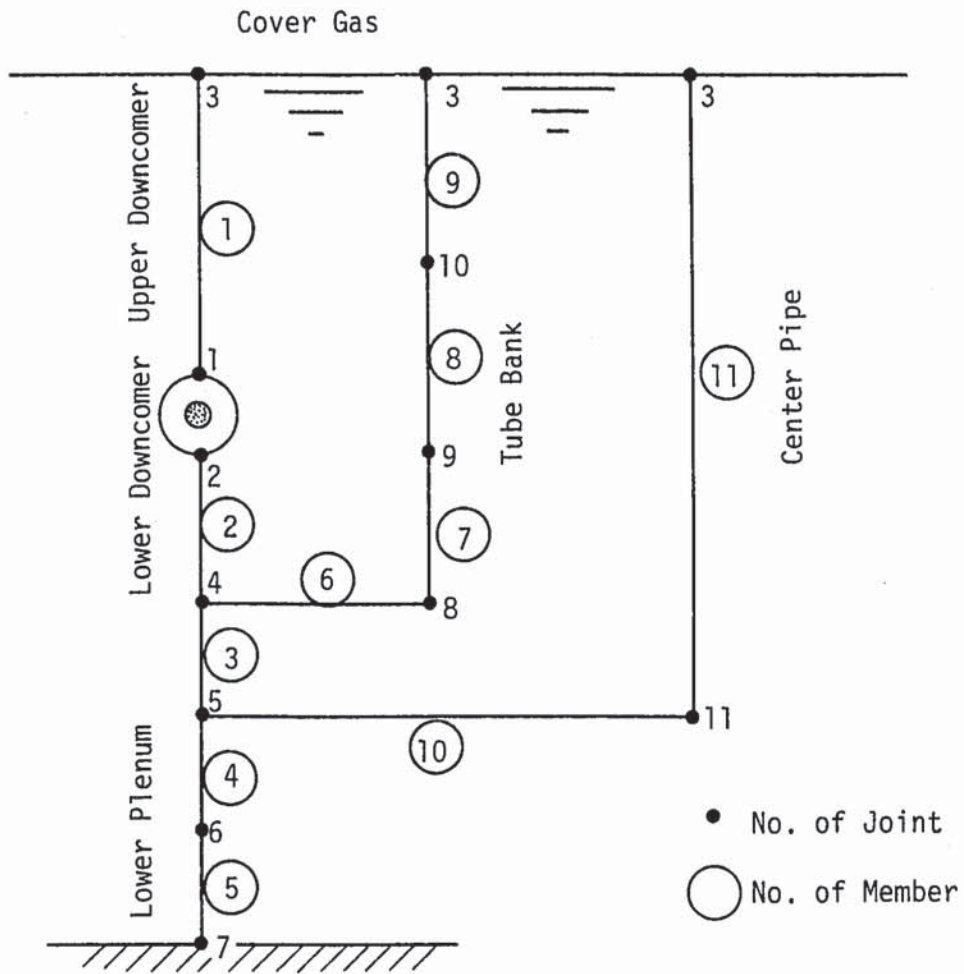


Fig. 4.2 Analytical Model

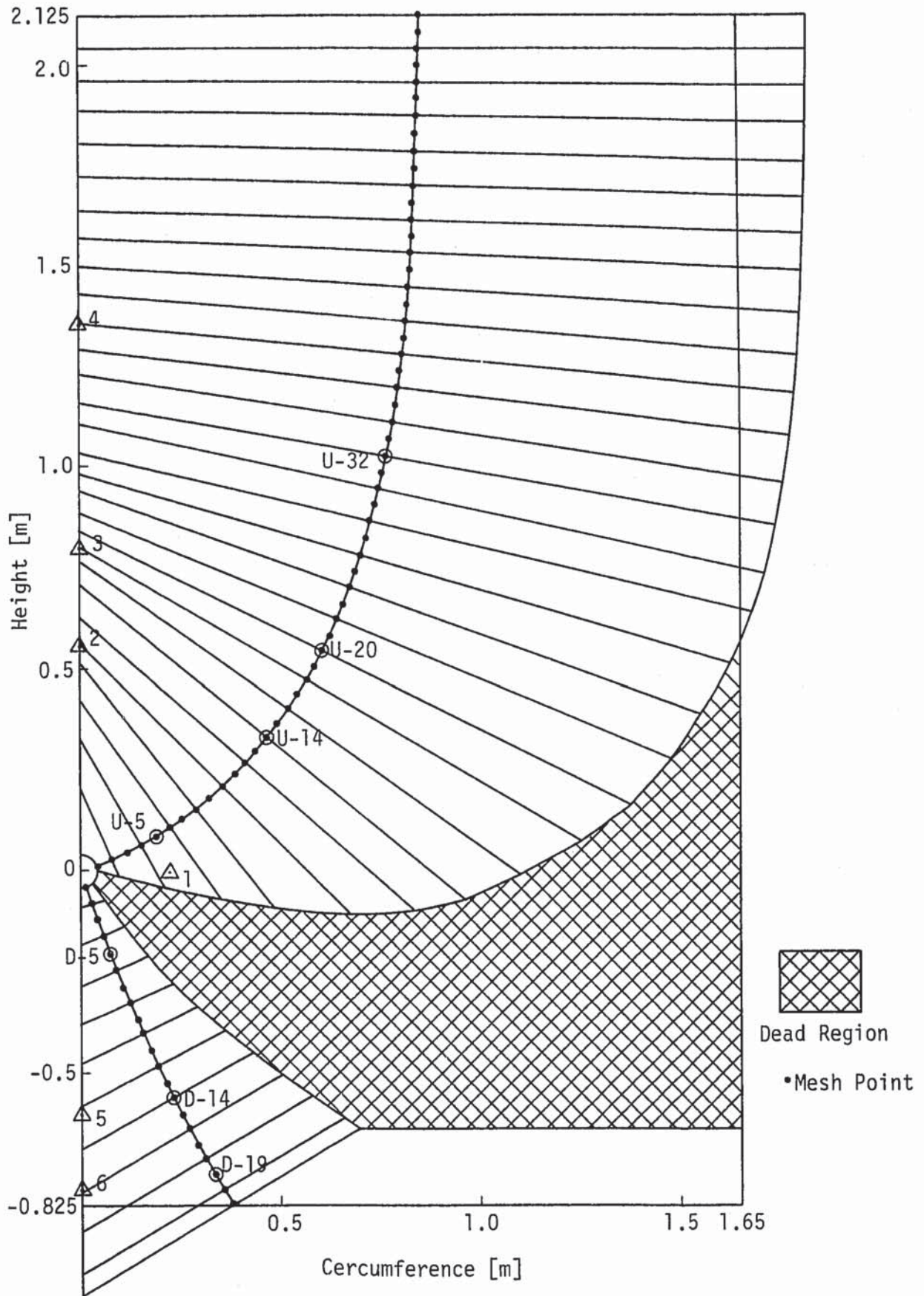


Fig. 4.3 Flow Area of Downcomer

Table 4.3 Location of Analytical points and Measured points

Calculated Points			Measured Points		
Mesh, Joint No.	Distance from WIP(mm)	Location at Fig. 4.3	Tag No.	Distance from WIP(mm)	Location at Fig. 4.3
Downcomer (Upper) 5	207	⊙ U - 5	PK 1104	212	△ 1
" 14	585	" 14	PK 1108	550	△ 2
" 20	836	" 20	PK 1109	800	△ 3
" 32	1344	" 32	PK 1111	1350	△ 4
Downcomer (Lower) 5	216	D - 5	PK 1104	212	△ 1
" 14	- 607	" 14	PK 1102	- 600	△ 5
" 19	- 824	" 19	PK 1103	- 785	△ 6
JOINT 4	- 825		P 1113	- 875	
" 5	-1300		P 1112	-1325	
" 6	-1600		P 1111	-1675	

Table 4.4 Main Input Data

Member No.	Length (m)	No. of Dismemberment					Flow Area (m <sup>2</sup> )
		E-01	E-02	E-03	E-04	E-05	
1 *	2.42	57	57	57	57	57	Fig. 5
2 *	0.872	20	20	20	20	20	
3	0.475	5	4	4	4	4	0.991
4	0.3	3	2	2	2	2	1.194
5	0.54	6	5	5	4	4	1.194
6	0.445	5	4	4	3	3	0.598
7	0.76	10	7	7	6	6	0.594
8	0.6	7	5	5	5	5	0.601
9	1.145	15	10	10	9	9	0.601
10	1.713	17	16	16	14	14	0.0873
11	1.712	17	16	16	14	14	0.0873

\* Dismemberment and Flow area are calculated in the code.



#### 4.4 解析結果と実験結果の比較検討

##### 4.4.1 解析結果

###### (1) リファレンスケース (E-01)

反応容器各部の圧力変化を Fig. 4.4 および Fig. 4.5 に示す。

###### (a) U-1

反応部近傍壁面（注水点より 0.042m 外側）での圧力値であり，最高 60 ata を示しており，約 1 msec 以後は反応部の水素ガス気泡圧力を示している。

###### (b) U-5 (PK-1104)

33 ata のピーク圧力を示した後，約 6 msec で大きな負圧を発生している。この現象はダウンカムノカバーガス境界からの反射波（減圧波）の影響によるものである。しかし，実験結果には明確な反射波の影響はあらわれていない。この差はダウンカマ部のモデル化によるものと考えられる。

###### (c) U-20 (PK-1109)

初期圧力ピーク値 21 ata を示した後は，周期が約 6 msec の大きな負圧をともなった波動が表われている。実験結果では第 1 波以後の圧力波はかなり小さくなっているのに対し，解析は小さくならずピークはむしろ高くなる傾向がある。この傾向はダウンカマ流路面積に依存している。

###### (d) D-1

反応部近傍壁面（注水点より 0.042m 外側）での圧力値である。U-1 との差は，モデル上 U-1 は注水点上部（ダウンカマ上部流路の先頭），であるのに対し，D-1 は注水点下部（ダウンカマ下部流路の先頭）で別々に計算されるため，若干両者に差が生じている。（U-1 点でのピーク圧力 60 ata より約 4 ata 低い）

###### (e) D-5 (PK-1104)

30 ata のピーク圧力を示した後，約 2 msec の周期の波動を示している。また，約 6 msec 以後は反応部発生水素気泡におおわれるため，もはや圧力振動はみられず，気泡圧力を示している。この領域での圧力波周期は反応部水素ガス気泡とダウンカマノ下部プレナム境界間の圧力波往復によって支配されている。実験については U-5 点でも述べたとおり明確な周期はあらわれていない。

###### (f) D-14 (PK-1102)

約 19 ata 程度のピーク圧力が周期 2 msec で振動しており，又各振動はさらに周期が約 10 msec 程度の大きなうねりのような波動を示している。実験には解析ほどの短い周期の圧力が生じていないのは，解析モデル上，ダウンカマノ下部プレナム境界で生じる反射波は再度反応部方向へもどることが宿命づけられているが，実際にはもっと自由

度が存在するためであろう。

(g) Joint 6 (P-1111)

約 12 ata の圧力が周期 9.5 msec で振動している。実験では各圧力の高い部分にさらにピークが存在しているが解析ではみられない、又実験での圧力波周期は約 7.5 msec である。

(2) その他の解析ケース

先に示したリファレンスケース (E-01) およびその他の解析ケース (E-02, -3, -4 および -5) の総計 5 ケースについて、実験結果のある場所を選んで、その解析結果を示す。

(a) U-5 (PK-1104)

Fig. 4.6 にその計算結果を示す。解析結果では、E-01, -02 と E-03, -04, -5, に大別されて、前者では圧力ピーク値、負圧とも激しく変化しているか、後者では緩やかになっている。圧力波はダウンコマ部以外の音速には影響されず、従って本図では注水率立上り時間の差によってのみ効果があらわれている。

(b) U-20 (PK-1109)

Fig. 4.7 に計算結果を示す。傾向は U-5 でのものとはほぼ同様である。周期はいずれもほぼ実験と合っているようである。

(c) D-5<sup>-</sup> (PK-1104)

Fig. 4.8 に計算結果を示す。傾向はやはり U-5<sup>-</sup> 点での結果と同様であり、注水率立上り時間を考慮する (E-03, -04, -05) ことによって圧力波形は実験とよく似てきており、圧力波周期自体も次第に不明瞭な形になっているのがわかる。

(d) D-14 (PK-1102)

Fig. 4.9 に計算結果を示す。どのケースでも短い周期の圧力波振動は変らないが、E-01 と E-02 ケースを比較すると、E-02 ケースでは圧力波がいくつか集まった大きなうねりの周期は E-01 ケースより短くなる傾向がみられる。このことは E-04 および E-05 ケースでもみられる。これはダウンコマ部以外の場所の音速が異なっているためである。一方注水率立上り時間を考慮した場合、最初のいくつかの圧力波ピーク値は低下し、この傾向は第 1 波には特に顕著である。その結果実験結果とは E-05 ケースが周期は異なるものの傾向がよく似ている。

(e) Joint 6 (P-1111)

Fig. 4.10 に計算結果を示す。E-01 における下部プレナム部、コイル部および内筒部の音速を速くすることによって E-02 のように実験値の周期に解析は近づく。また注水率の立上り時間を考慮すると E-02 から E-03 にみられるように、ピーク値がわずか



ではあるが低下する。

水素ガス転換比を各ケース中最も大きく、ダウンカメラ部以外の音速が最も速いE-05ケースが最も実験結果と良く合っている。

以上の各解析ケースでの各部ピーク圧力および圧力周期をTable 4.5にまとめる。

#### 4.4.2 実験結果との比較・検討

Table 4.6 に実験結果に対する各解析ケースの相対総合評価を示す。本表はどの解析ケースが最も実験に近いかを示したものである。

##### (1) 圧力ピーク値

各計算ケースともダウンカメラ上部については実験よりも1.3倍から2倍大きな圧力を示している。E-01およびE-02ケースでは注水率の立上り時間なくしているため特に大きなピーク圧力が発生している。他のケースではいずれも立上り時間を1 msec考慮しているため、急激なピーク圧力はなくなり実験値に近づく。ただしE-05ケースでは水素ガス転換比を0.5より0.65としているためE-03およびE-04よりは高くなっている。

ダウンカメラ下部については、反応部近くではダウンカメラ上部と同様な傾向をもつが、下部プレナムに近い領域ではE-03、-04および-05ではわずかながら実験値より小さくなる。

下部プレナムについては、いずれのケースも実験値より小さくなっているがE-05ケースは圧力波形がほぼ実験と一致し、最も良くシュミレートしていると考えられる。

##### (2) 圧力波周期

ダウンカメラ上部は実験と解析各ケースともよく一致している。ダウンカメラ下部に関しては、注水率に立上り時間を考えないE-01およびE-02においてその周期は明らかに実験とは異なる。一方E-03になると、その周期は前2者と同じではあるが次第に不明瞭なものになり、各波が集合した大きな波が実験結果の周期と合うような傾向をもっている。

E-04およびE-05においてはこの傾向が一層強くなっている。

##### (3) 圧力波形

ダウンカメラ上部、下部および下部プレナム部とも解析ケース番号が進むにつれて実験結果に近づくことがわかる。すなわちE-05が実験結果と最も似かよった派形を示している。以上の総合評価・検討より解析ケースE-05が最もRun-7実験結果をシュミレートしていると考えられる。E-05と各実験点の圧力変化図をFig. 4.11よりFig. 4.13に示す。

なお、総合評価上はE-01ケースとE-05ケースには点数差に大きな開きがあるが、実際上の両者の差は大きなものではなく、いずれのケースもある程度実験をシュミレートしているといつてよいと考えられる。

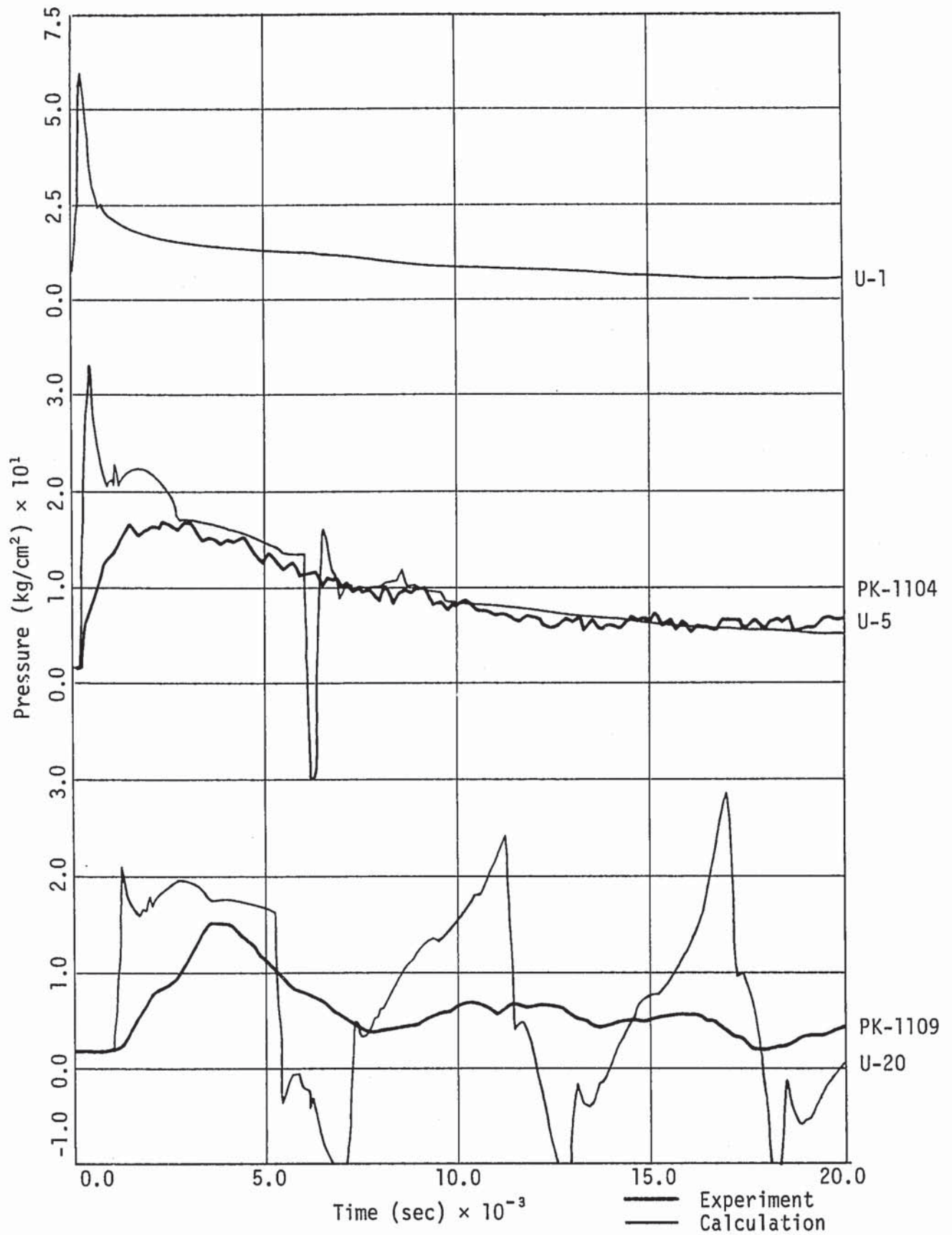


Fig. 4.4 Pressure Histories in the Case E-01



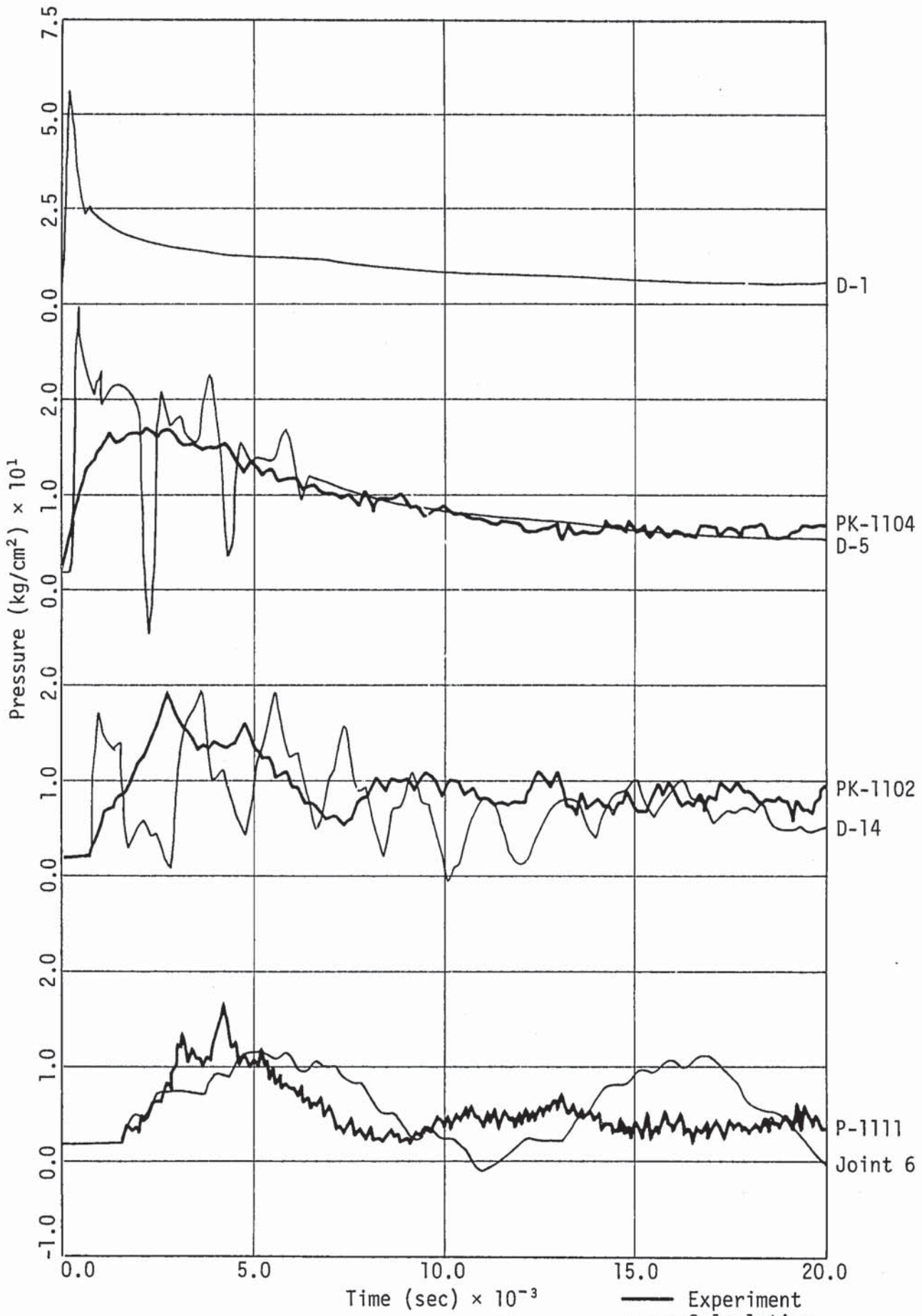


Fig. 4.5 Pressure Histories in the Case E-01 (Continued)

— Experiment  
 — Calculation

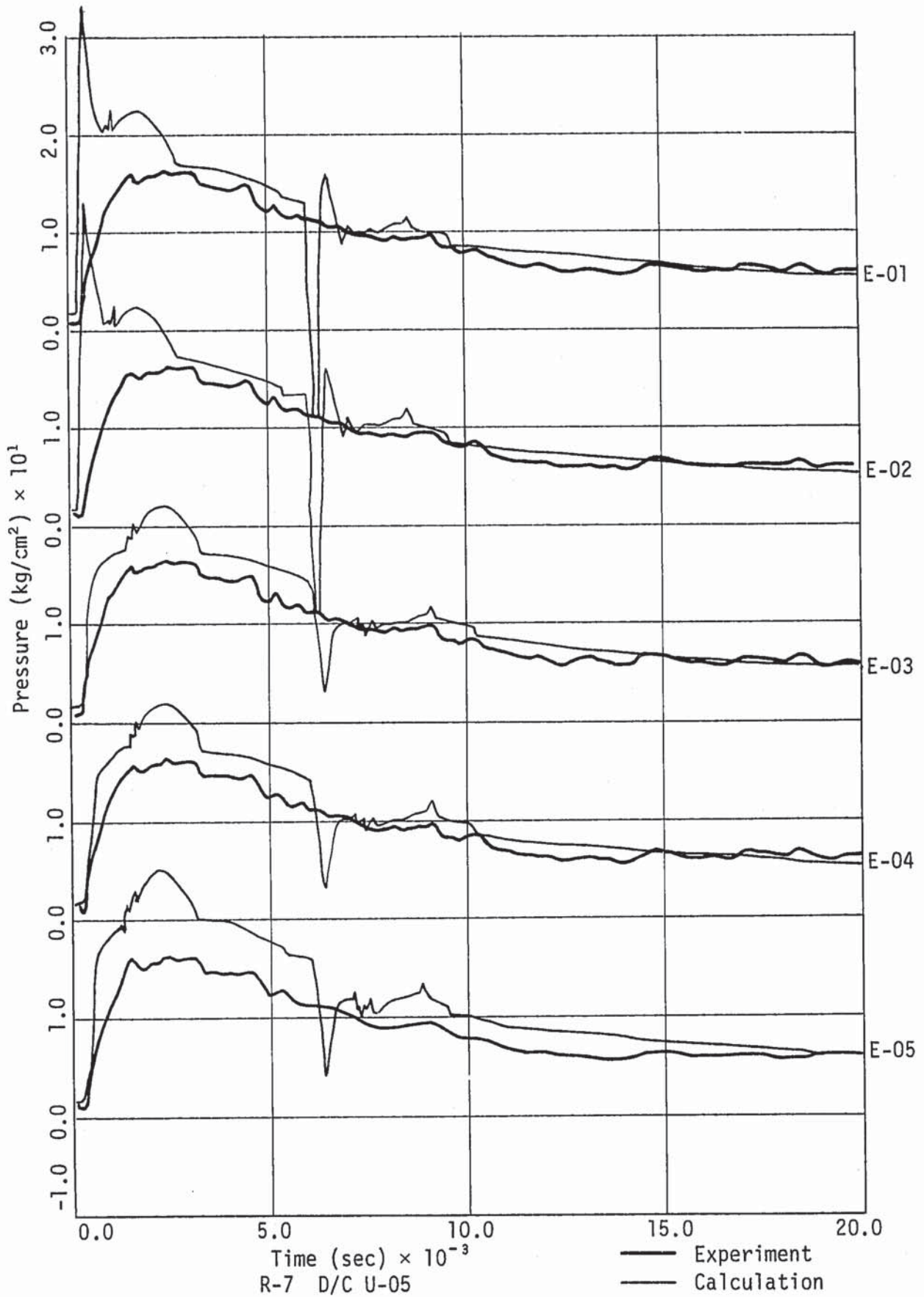


Fig. 4.6 Pressure Histories at Upper Part of Downcomer (U-5, PK-1104)

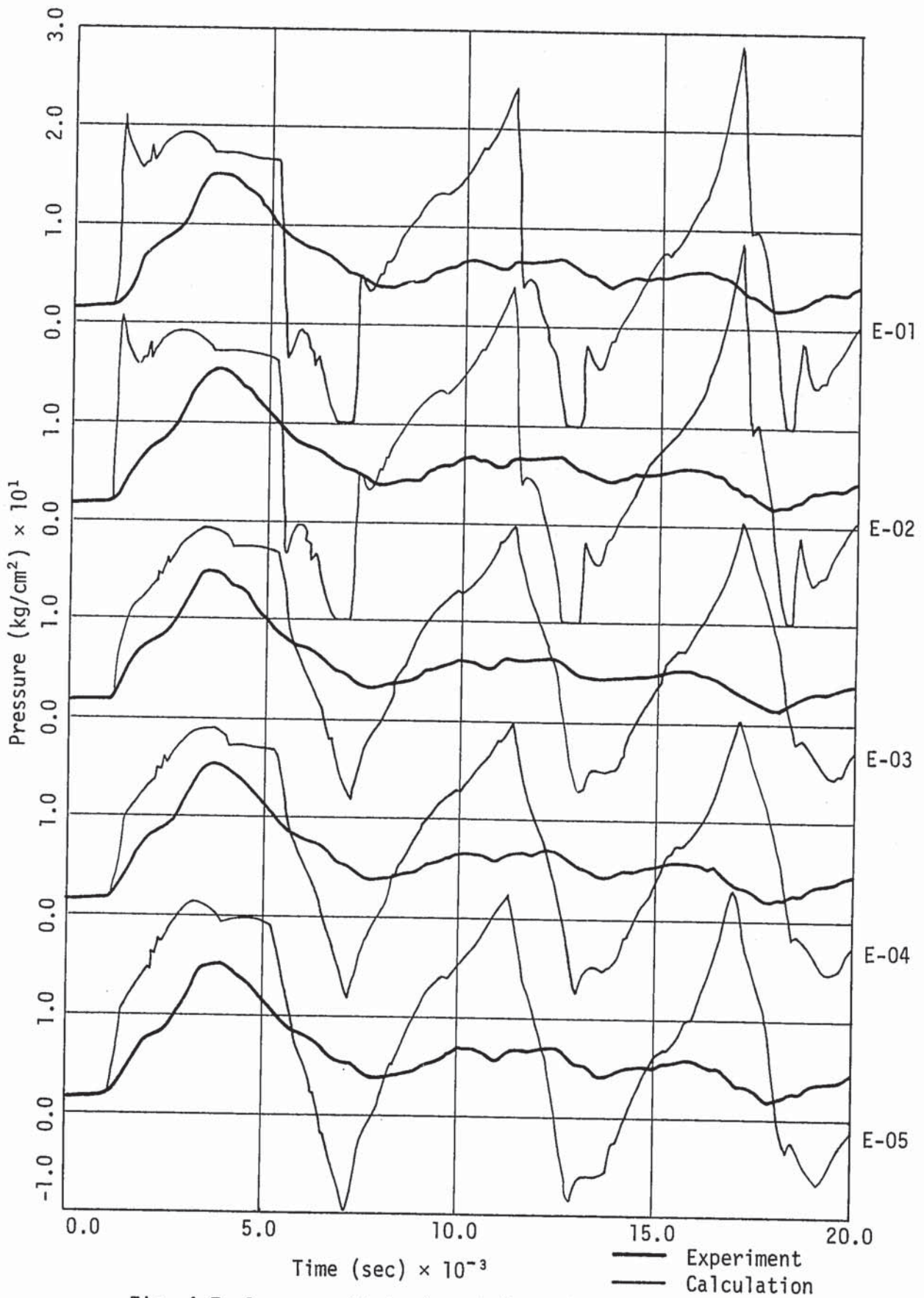


Fig. 4.7 Pressure Histories at Upper Part of Downcomer (U-20, PK-1109)



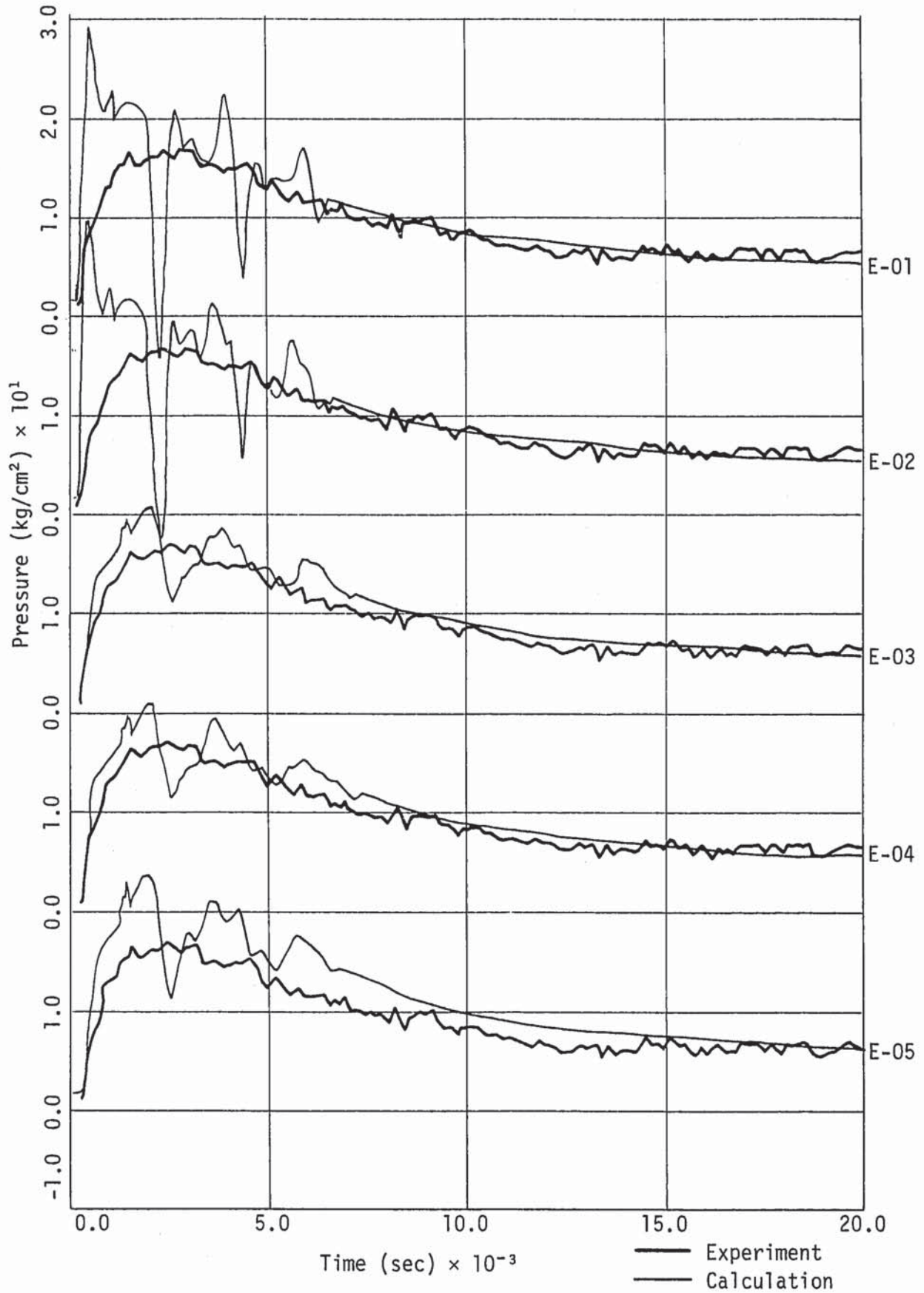


Fig. 4.8 Pressure Histories at Lower Part of Downcomer (D-5, PK-1104)



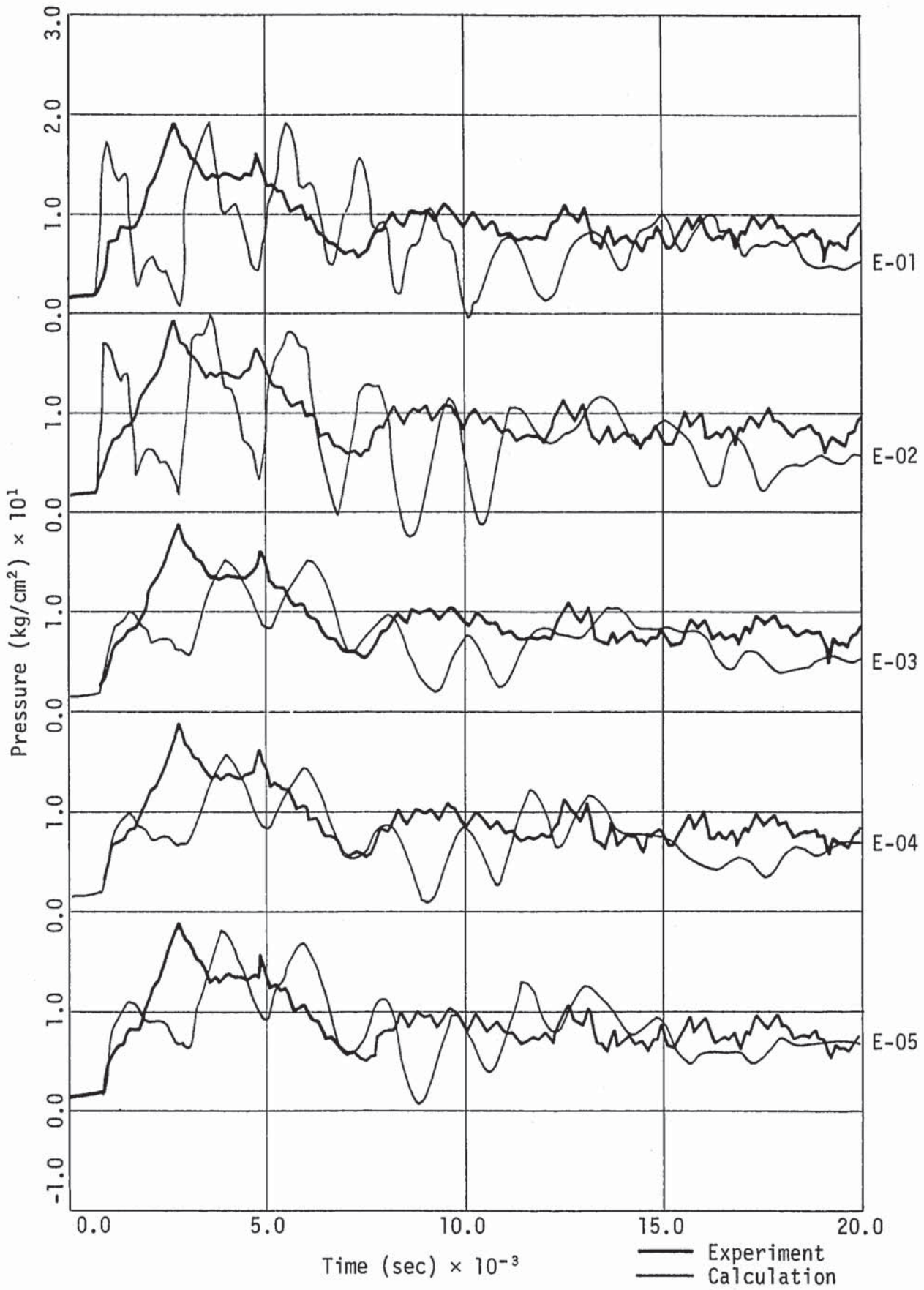


Fig. 4.9 Pressure Histories at Lower Part of Downcomer (D-14, PK-1102)

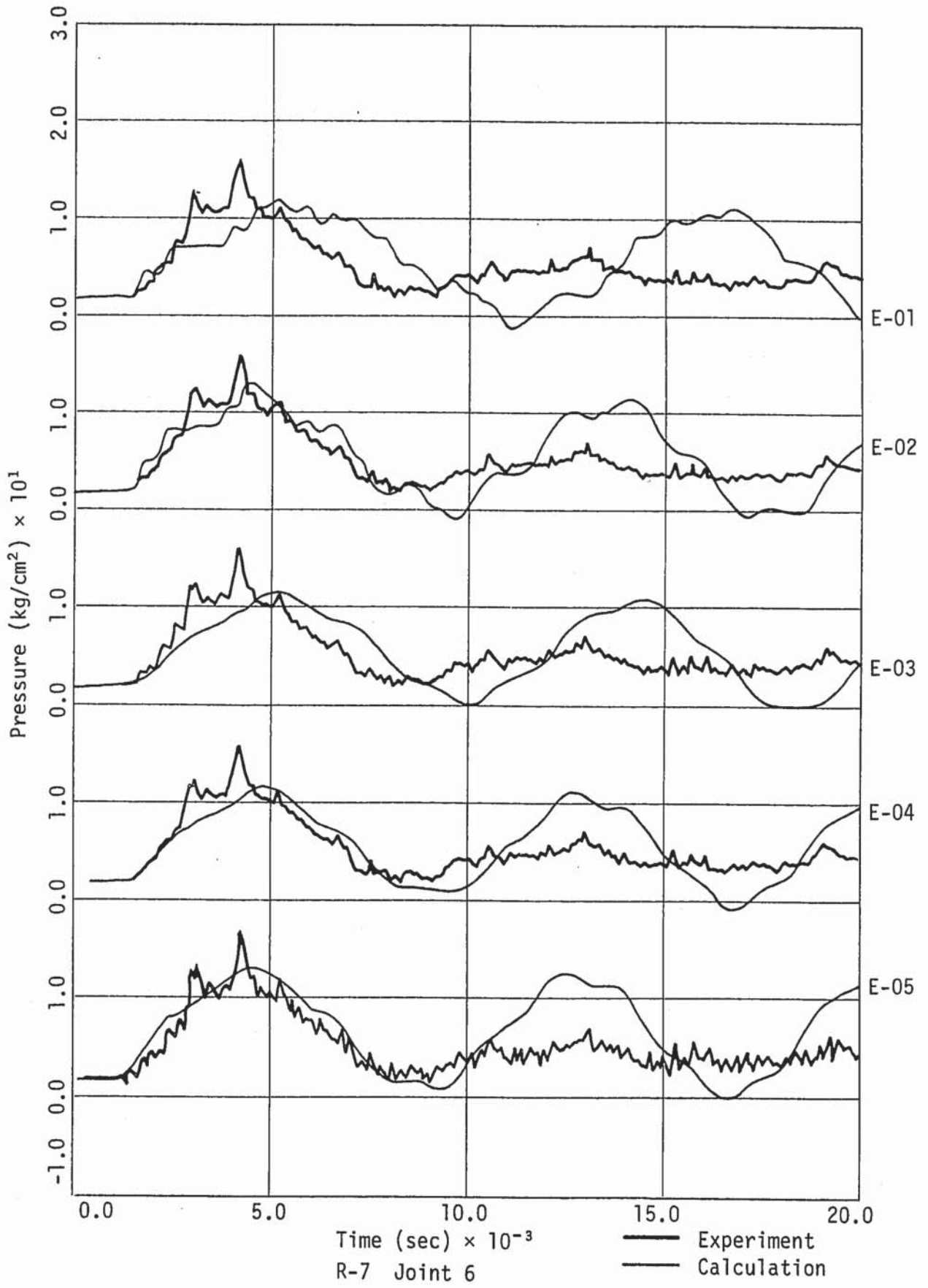


Fig. 4.10 Pressure Histories at Lower Plenum (Joint 6, P-1111)

Table 4.5 Experiment and Analyses Results




P: Peak Pressure (ata), T: Pressure Period (msec)

Place Point Calculation and Experiment	Upper Part of Downcomer						Lower Part of Downcomer						Lower Plenum	
	Nearby Reaction Region		U - 5 (PK 1104)		U - 20 (PK 1109)		Nearby Reaction Region		D - 5 (PK 1104)		D - 14 (PK 1102)		Joint 6 (P 1111)	
	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T
Experiment			17	-	15	7			17	-	19	7	16.5	7.5
E - 01	60	-	33	6	21	6	56	-	30	2	19	2	12	9.5
E - 02	60	-	33	6	21	6	56	-	30	2	20	2	13	8.2
E - 03	25	-	22	6	19	6	25	-	21	2	15	2	11.5	8.5
E - 04	25	-	22	6	19	6	25	-	21	2	16	2	12	7.5
E - 05	28	-	25	6	21	6	26	-	24	2	18	2	13.5	7.5



Table 4.6 Total Estimation of Analytical Cases

Case	Pressure Peak Value			Pressure Period			Pressure Profile			Total Estimation Points/order
	Downcomer Upper	Downcomer Lower	Lower Plenum	Downcomer Upper	Downcomer Lower	Lower Plenum	Downcomer Upper	Downcomer Lower	Lower Plenum	
E-01	0.5	3	1.5	2	2	0	0.5	0.5	0	10 / 5
E-02	0.5	2	3	2	2	2	0.5	0.5	1.5	14 / 4
E-03	3.5	0.5	0	2	2	1	3	3	1.5	16.5 / 3
E-04	3.5	0.5	1.5	2	2	3.5	3	3	3	22 / 2
E-05	2	4	4	2	2	3.5	3	3	4	27.5 / 1

 : Same     
  : Larger (Longer)     
  : Smaller (Shorter),  
 Points are given 4, 3, 2, 1 and 0 according to its degree of similarity



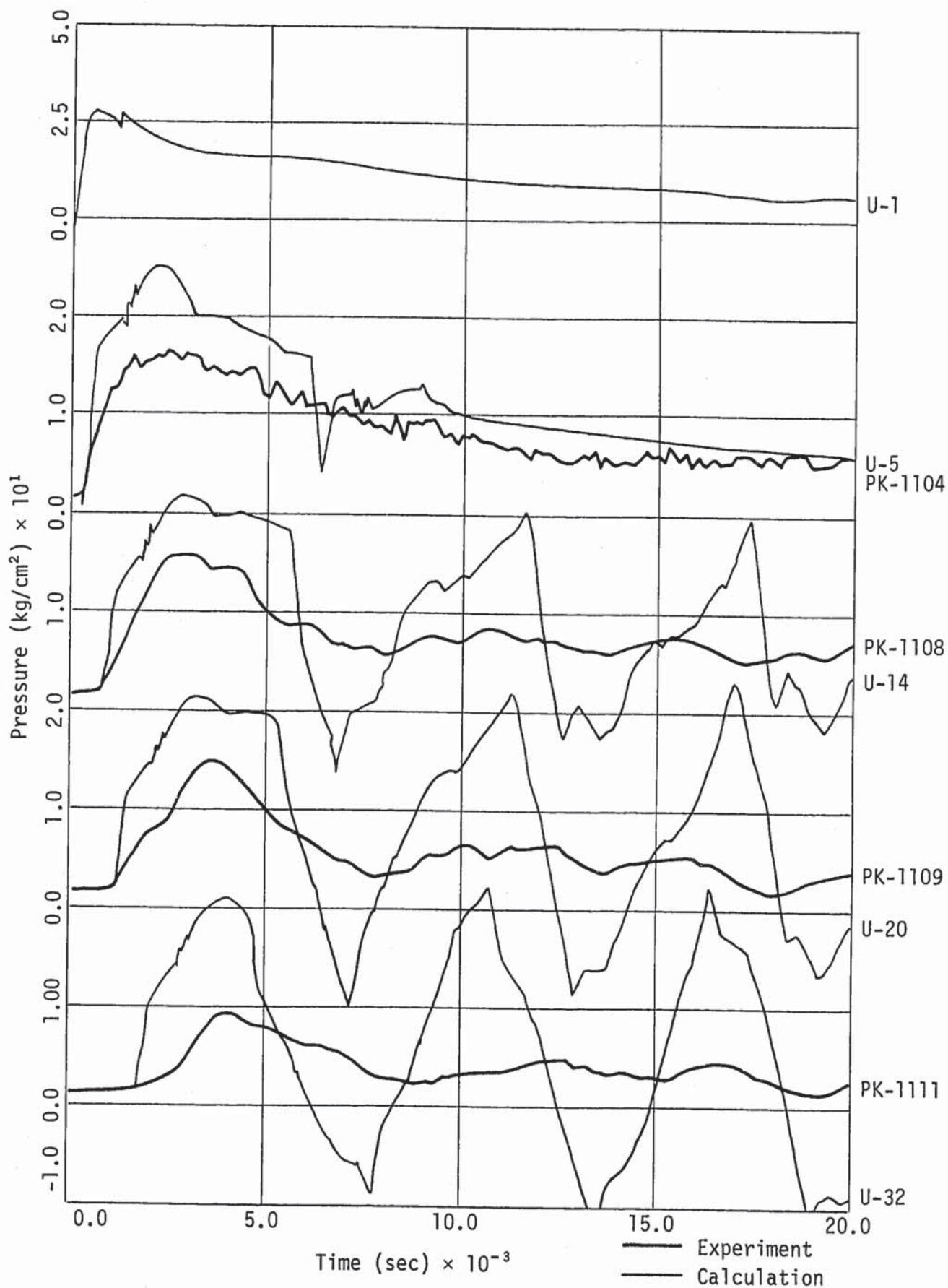


Fig. 4.11 Pressure Histories in Case E-05

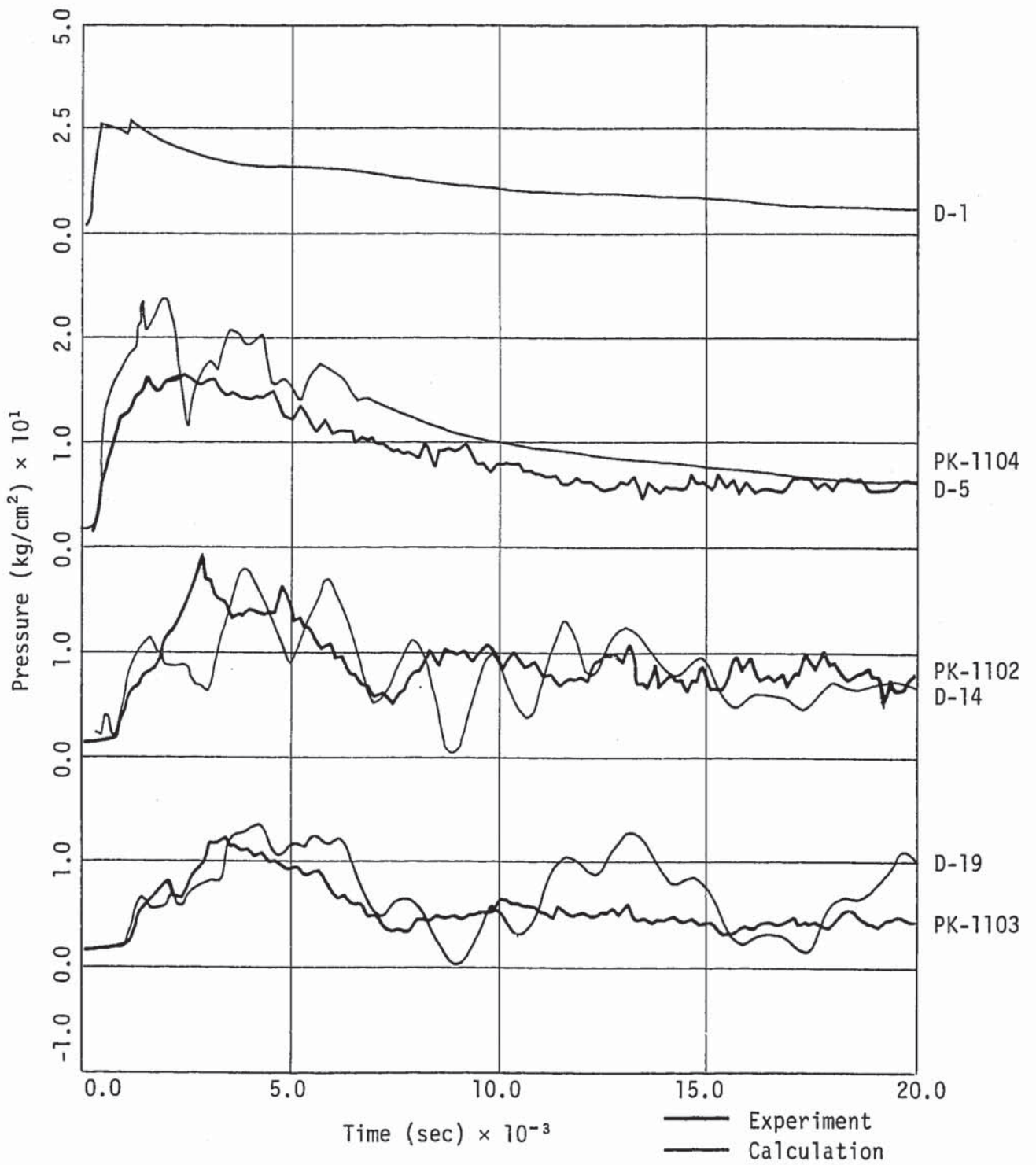


Fig. 4.12 Pressure Histories in Case E-05 (Continued)

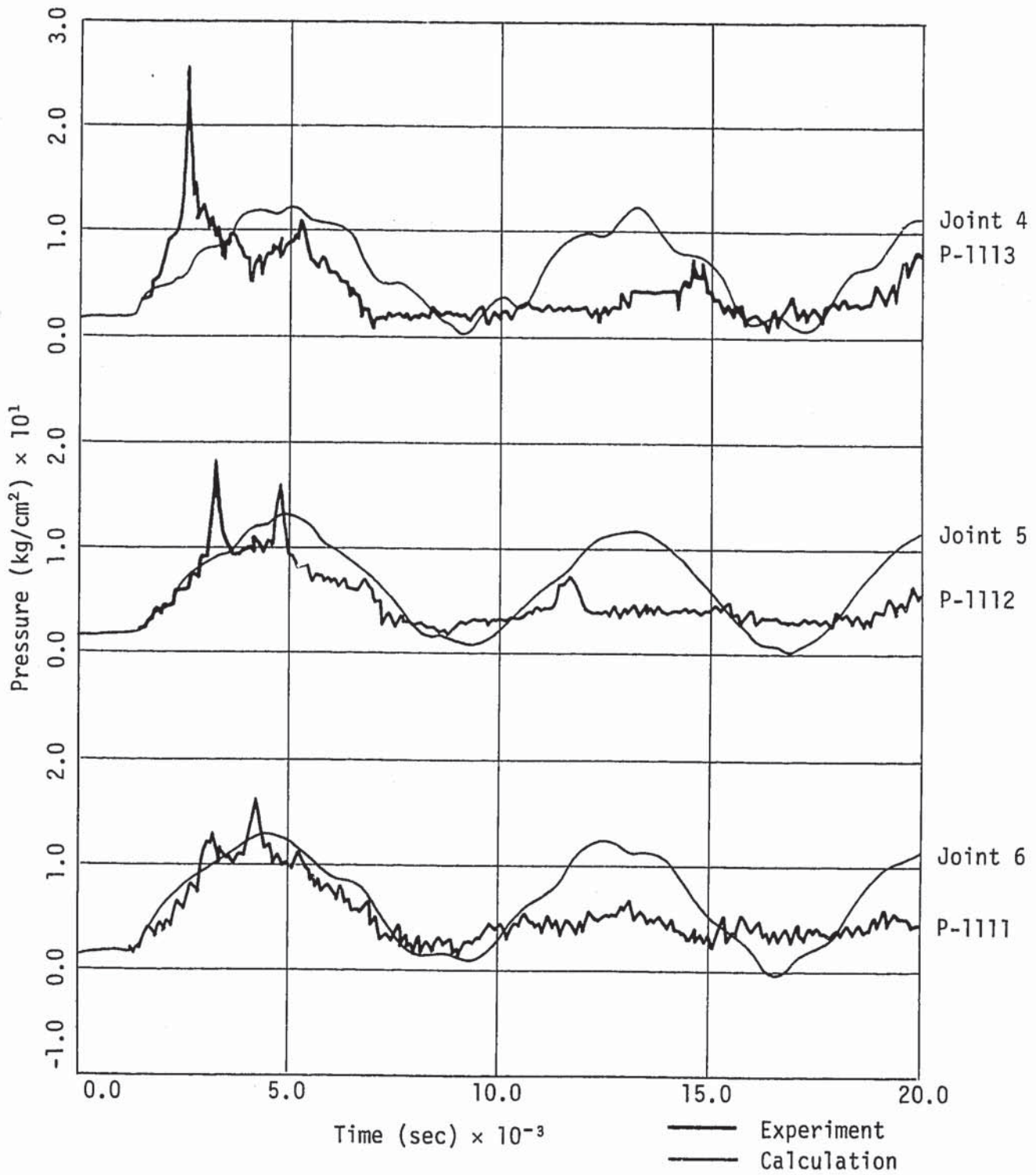


Fig. 4.13 Pressure Histories in Case E-05 (Continued)

## 4.5 最適パラメータの選定

### 4.5.1 SWAT-3 Run-7での最適パラメータ

本実験をシュミレートする最適パラメータは解析ケースE-05の使用したパラメータ値といえる。すなわち、

#### (1) 音 速

i) ダウンカマ部では内、外部シュラウドの弾性変形を考慮したアリエビの式第(4.1)

$$776 \text{ (m/sec)}$$

ii) 下部プレナム, 内筒, コイル部ではアリエビの式より1.3倍から1.5倍速い。

$$2100 \text{ (m/sec)}$$

#### (2) 注 水 率

i) 立上り時間を考慮した注水率

$$1 \text{ (msec) 立上り時間 } 5.5 \text{ (kg/sec) 一定}$$

#### (3) 水素ガス転換比

i) 0.65 [モル/モル]

$$650 \text{ (°K) (f・T値)}$$

#### (4) 初期気泡半径

i) 破断管の内半径

$$9.5 \text{ (mm)}$$

#### (5) ダウンカマ流路数

i) 必要最小流路数

上部…………… 1流路

下部…………… 1流路

なお、付録Bに記述してある最適パラメータについても以下に示す。

#### (6) 計算時間巾 (DT)

i) ダウンカマ間隙の半分長を圧力波が進む時間以下

$$\{ \text{コードへの入力データ: RDATA (612): DCDT} = 5.5 \times 10^{-5} \text{ (sec)} \}$$

#### (7) 非圧縮柱半径 (RCYD)

i) ダウンカマ間隙の半分長

$$0.0426 \text{ (m)}$$

### 4.5.2 原型炉級SG解析のためのパラメータ

原型炉級SGのダウンカマ部大リークNa-水反応を解析する場合、本実験と最も良く合う解析ケースのパラメータ値を使用することが望ましいが、合理的範囲内において最も安全側評価を与える解析ケースも採用出来る。前者はE-05また後者はE-01に該当する。



しかし実際の Na-水反応解析におけるパラメータ値の選定し易さを考えると、E-01 ケースが最も妥当と考えられる。E-01 ケースでは他のどのケースよりもダウンコマ部反応点近傍圧力を高く評価している（約 60 ata）。下部プレナム部では圧力を若干紙目に評価しているがその差は小さい（E-05 ケースより 1.5 ata 低い）。したがって主要パラメータは、E-01 と同様に、大リーク Na-水反応解析に通常使用されている選定方法に従ってよいと考えられる。

ダウンコマ部流路数、初期気泡半径、計算時間巾および非圧縮柱半径等の本コード固有のものは以下の通りである。

- (1) ダウンコマ流路数 : 上部, 下部とも 1 流路
- (2) 初期気泡半径 : 破断伝熱管内半径
- (3) 計算時間巾 :  $\left[ (\text{ダウンコマ間隙の半分長}) \div (\text{ダウンコマ部音速}) \right]$  以下
- (4) 非圧縮柱半径 : ダウンコマ間隙の半分長

また音速、注水率および水素ガス転換比については E-01 ケースの数値は、明確に推奨出来るとい性格のものではなく、まだまだ実験的に不明な所が多いが、このケースの決定方法で安全解析が可能であるといえるので、一応の目安として提示する。水素ガス転換比については、この E-01 ケースよりも安全側であり、原型炉級 SG の安全解析に使用されている値を採用する。

- (5) 音速 : アリエビの式に従う。（但し、ダウンコマ部では内壁の弾性変形も考慮した (4.1) 式を使用するものとする。）
- (6) 水素ガス転換比 : 0.65 (モル/モル)
- (7) 注水率 : 立上り時間を考慮せず。

## 5. お わ り に

SWACSコードの一機能を有するSWAC-5KIIモジュールによってダウンカマ部注水実験(SWAT-3 Run-7)のナトリウム-水反応解析を行い、本実験の解析用最適パラメータ値を選定することができた。

本コードの主要パラメータのうち音速、注水率および水素ガス転換比等については、いぜん実験的に明確になっていないが実験解析各ケースとも実験結果の圧力変化をある程度よくシュミレートしており、本コードの妥当性が検証されたと考えられる。

## 6. 参 考 文 献

- [1] 蒸気発生器安全性総合試験装置 (SWAT-3) Run-7 試験結果  
大リーク・ナトリウム-水反応試験 (第12報)  
SN941 79-155 1979年8月
- [2] 赤川浩爾: 気液二相流 (P176) コロナ社 昭和49年5月
- [3] 前川 勇, 坂野耿介, 井崎 隆: 圧力波伝播計算コード機能追加 - SWACGのダウンカメラ  
部圧力波伝播モジュール J913 78-01 1978年8月
- [4] 大リーク・ナトリウム-水反応時の初期スパイク圧解析  
(SWACSコードによるSWAT-3, Run-3実験解析)  
大リーク・ナトリウム-水反応解析 (第5報)  
SN941 79-27 1979年3月
- [5] Shin, Y.W. and Valentin, R.A., : Numerical Analysis of Fluid-Hammer Waves  
by the Method of Characteristics, ANL - 8090, August 1974.
- [6] 藤本武助: 流体力学, 改訂9版, 養賢堂, 東京 pp. 52-54

## 付録・A 計算モデル

### A.1 計算モデルの選定

ダウンカマ部伝熱管の破断によってはじまる大リーク Na 水反応では、発生圧力波がシュラウドとライナにはさまれるダウンカマ部の狭い間隙を上下および周方向の 2 次元的に広がり、下部プレナム部を通してセンターパイプ部およびチューブバンク部へ伝播する。

従来の管路中圧力波伝播解析コードは管軸方向 1 次元圧力波伝播を解くモデルであるため、ダウンカマ部に対しては適用出来ない。そのためダウンカマ部圧力波伝播モデルを新しく選定しなければならない。モデル化に際しては以下の 2 点を考慮した。

- i) ダウンカマ部流路の 2 次元効果が入るモデルであること。
- ii) 計算時間が少ないこと。

本来この部分に関しては 2 次元圧縮性流動基礎式を解くことが最も正確なモデル化であり、Y. W. Shin らの 2 次元特性曲線法による解析コード [5] などが開発されているが、計算時間が膨大になる恐れがあり、今回のモデル化に関しては、従来の 1 次元流動基礎式をベースとしたモデル化に限定した。

まずダウンカマ部の Na-水反応時の流動を考察する。SWAT-3 実験から初期スパイク圧力波の波長を考えると、周期が 6~7 msec であることから、音速を 1300 m/sec 程度と仮定すると約 8 m 程度と考えられる。本ダウンカマ部は上下方向の長さが約 3 m、周長が 3.8 m 程度であり波長はこの領域寸法よりかなり大きいことがわかる。そのため、初期スパイク圧力のピークが生ずるころには、ダウンカマ内部では、ナトリウムの流動が非圧縮性のポテンシャルフローで近似できると考えられる。

一方、圧力波周期の予測についてはナトリウムの圧縮性を考える必要がある。

以上のことから、以下のモデルを考えた。

- i) ダウンカマ部流路は注水点に吹き出しを置いたポテンシャルフロー場における各流路で囲まれる複数流路でモデル化する。
  - ii) 各流路内ナトリウムは、圧縮性として 1 次元圧縮性特性曲線法で解く。
- また、圧力波長に比べ十分小さな領域では非圧縮性流体近似が使用できるため、
- iii) 反応部近傍のナトリウム領域は非圧縮性流体として取扱う。

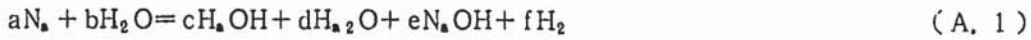
これによって、メッシュ分割巾が初期気泡半径に制約を受けるため多くの分割数を必要とし、計算時間が大きくなる SWAC-7 コードの傾向が改善出来る。以上の 3 点をダウンカマ部モデルとして採用した。



## A.2 計算上の仮定

## (1) 反応部

i) 反応式は (A. 1) 式とする。



ii) 反応速度は無限大とする。

iii) 反応温度は一定とする。

iv)  $\text{H}_2$  ガス気泡は球状成長し、ダウンカマ間隙に気泡面が接してからは円柱状半径方向に成長するとする。非圧縮性柱領域を越えて気泡が成長した場合は、圧縮性流路内ピストン移動を仮定する。

v)  $\text{H}_2$  ガス気泡近傍ナトリウム部は半径  $r_0$  高さ  $2h$  の柱形状を仮定し、この領域内ではナトリウムを非圧縮性流体として扱う。(Fig A. 1)

vi) ナトリウム柱領域は Fig A.1 に示すように範囲を

$$\begin{aligned} -h < Z < h \\ -\infty < r < +\infty \end{aligned}$$

とした2次元軸対称ポテンシャルフローで解く。

vii)  $Z = h$  及び  $Z = -h$  のシュルライナ及びシュラウドは剛壁とし、このモデル化として、座標  $(0, 0)$ ,  $(0, 2h)$  及び  $(0, -2h)$  に吹き出し  $(q)$  を置く。

viii) 球表面の速度ポテンシャル  $(\phi_s)$  は表面平均値を使用する。すなわち

$$\bar{\phi}_s = \frac{1}{4\pi r_s^2} \int_0^\pi \phi_s 2\pi r_s^2 \sin\theta d\theta \quad (\text{A. 2})$$

$$\bar{\phi}_c = \frac{1}{2h} \int_{-h}^h \phi_c dZ \quad (\text{A. 3})$$

## (2) ダウンカマ部

i) 反応部柱領域を除いて、ナトリウムは圧縮性流体とする。

ii) ダウンカマ部は Fig A.2 に示す横  $2a$  縦  $(b+c)$  の平面とする。

但し、 $2a$  : ダウンカマ部周方向長さ

$b$  : 反応点より自由液面までの高さ

$c$  : 反応点よりダウンカマ/下部プレナム境界までの高さ

iii) ダウンカマ部では、複数 ( $\leq 20$ ) の流路が指定できて、2次元ポテンシャルフローの流線に沿って指定するか、あるいは入力データとして任意に流路が指定出来る。

iv) 2次元ポテンシャルフローによる流路指定は Fig A.3 に示すように以下の仮定を使用する。すなわち、

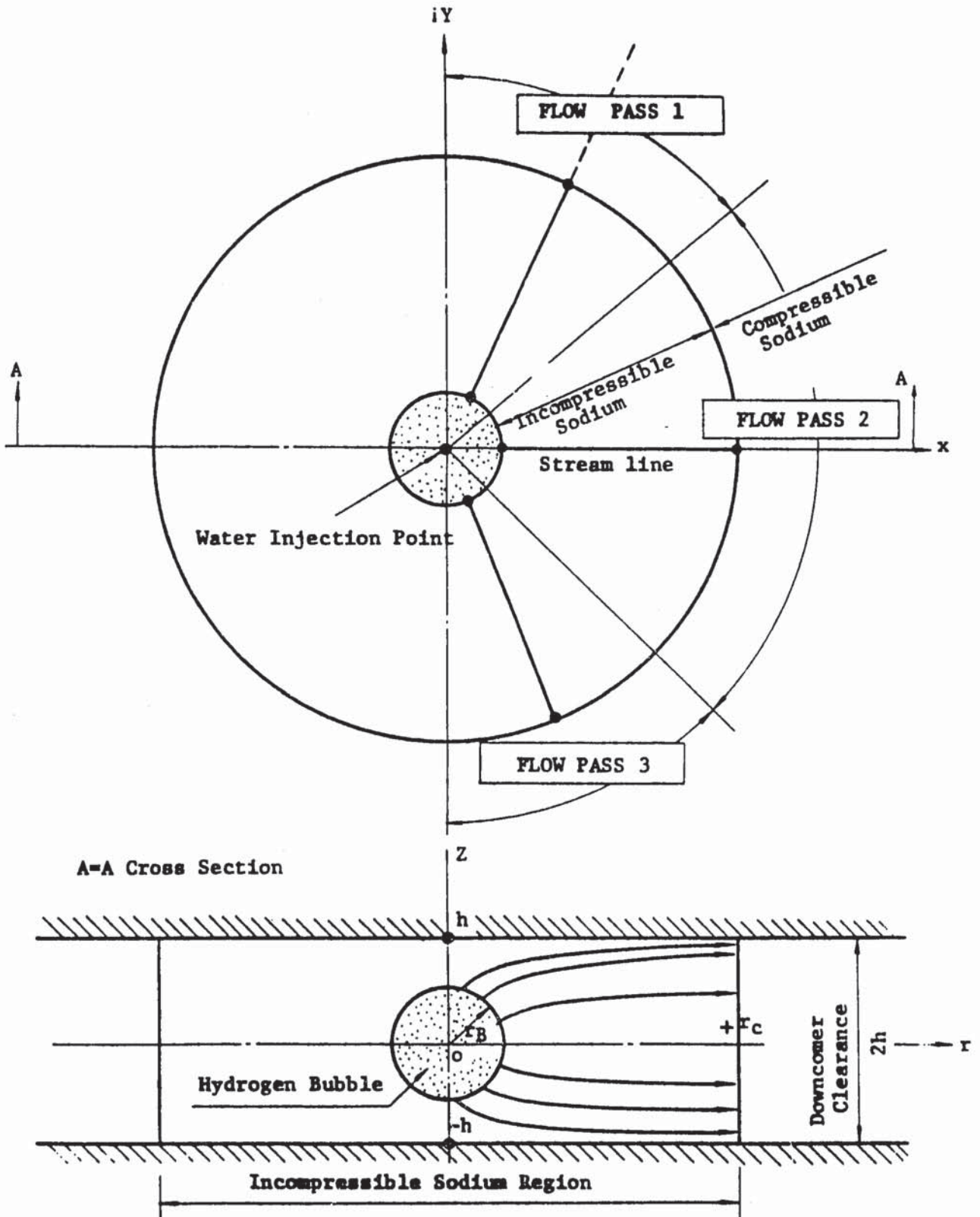


Fig. A.1 Axis-Symmetrical Potential Flow Model of Adjacent Region of Water-Injection Point

- $x = \pm a$  の対称面は剛壁とし、座標  $(0, 0)$ 、 $(2a, 0)$  及び  $(-2a, 0)$  に吹き出し  $(q)$  を置き模擬する。
- $y = b$  の自由液面は等速度ポテンシャル面 ( $\phi = 0$ ) であり、座標  $(0, 2bi)$ 、 $(2a, 2bi)$  及び  $(-2a, 2bi)$  に吸い込み  $(-q)$  を置き模擬する。
- $y = -c$  のダウンコマ/下部プレナム境界は  $y = -\infty$  に吸い込み  $(-q)$  を仮定した場にあるとする。
- 各流路は流線によって囲まれる領域とする。

V) 各流路のナトリウムについては圧縮性水撃方程式により、圧力波伝播計算を行なう。

(3) 水 系

- i) 水は圧縮性流体とする。
- ii) 流出水の相は、液相とする。
- iii) 流出水量は、指定または背圧モデル計算のいずれかとする。

A.3 基礎式

(1) 反応部計算

(a)  $H_2$  ガス気泡上および非圧縮性ナトリウム柱の速度ポテンシャル Fig A.4 のように座標  $(0, 0)$ 、 $(0, 2h)$  及び  $(0, -2h)$  に吹き出し  $(q)$  を置くと、速度ポテンシャル ( $\phi$ ) は以下のように与えられる。<sup>(6)</sup>

$$\phi = -\frac{q}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{Z^2+r^2}} - \frac{q}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(Z-2h)^2+r^2}} - \frac{q}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{(Z+2h)^2+r^2}} \quad (A.4)$$

$r$  = 一定面上の速度ポテンシャル平均値は

$$\frac{1}{2h} \int_{-h}^h \frac{dZ}{\sqrt{Z^2+r^2}} = \frac{1}{2h} \text{Ln} \left| \frac{h+\sqrt{h^2+r^2}}{-h+\sqrt{h^2+r^2}} \right| \quad (A.5)$$

$$\frac{1}{2h} \int_{-h}^h \frac{dZ}{\sqrt{(Z-2h)^2+r^2}} = \frac{1}{2h} \text{Ln} \left| \frac{-h+\sqrt{h^2+r^2}}{-3h+\sqrt{9h^2+r^2}} \right| \quad (A.6)$$

$$\frac{1}{2h} \int_{-h}^h \frac{dZ}{\sqrt{(Z+2h)^2+r^2}} = \frac{1}{2h} \text{Ln} \left| \frac{3h+\sqrt{9h^2+r^2}}{h+\sqrt{h^2+r^2}} \right| \quad (A.7)$$

であるから

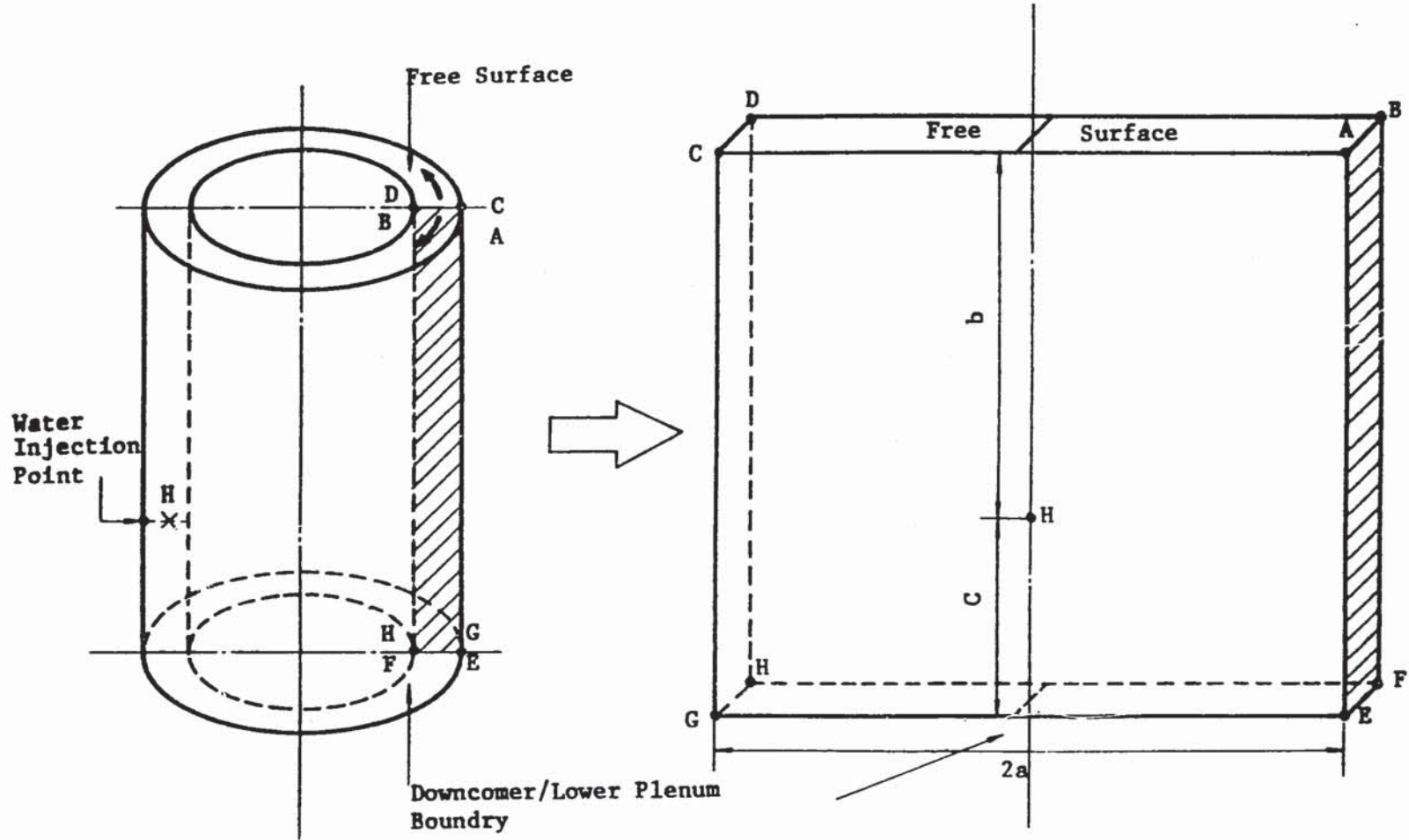


Fig. A.2 Modeling of Downcomer



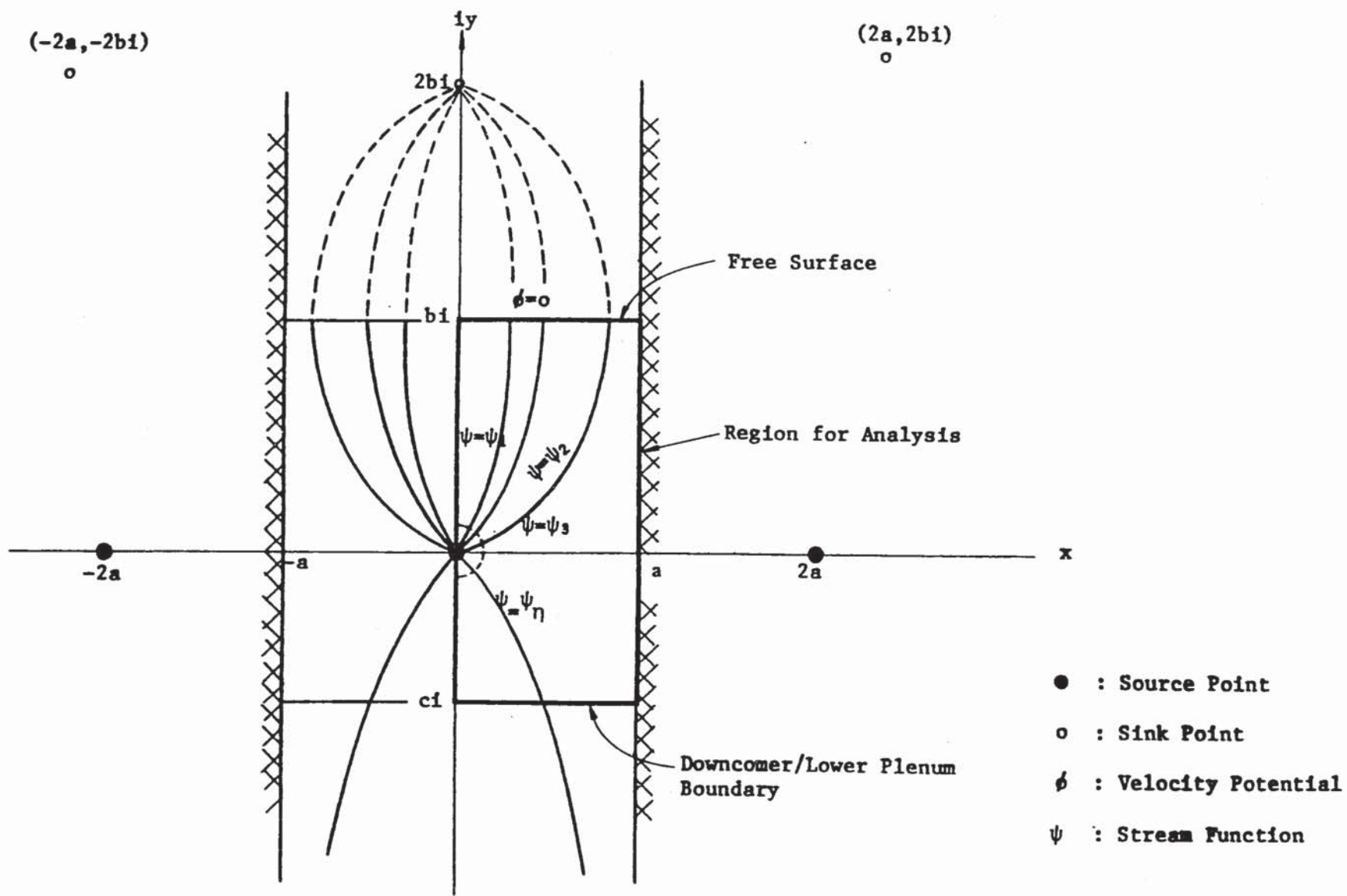


Fig. A.3 2-Dimensional Potential Flow Model of Downcomer

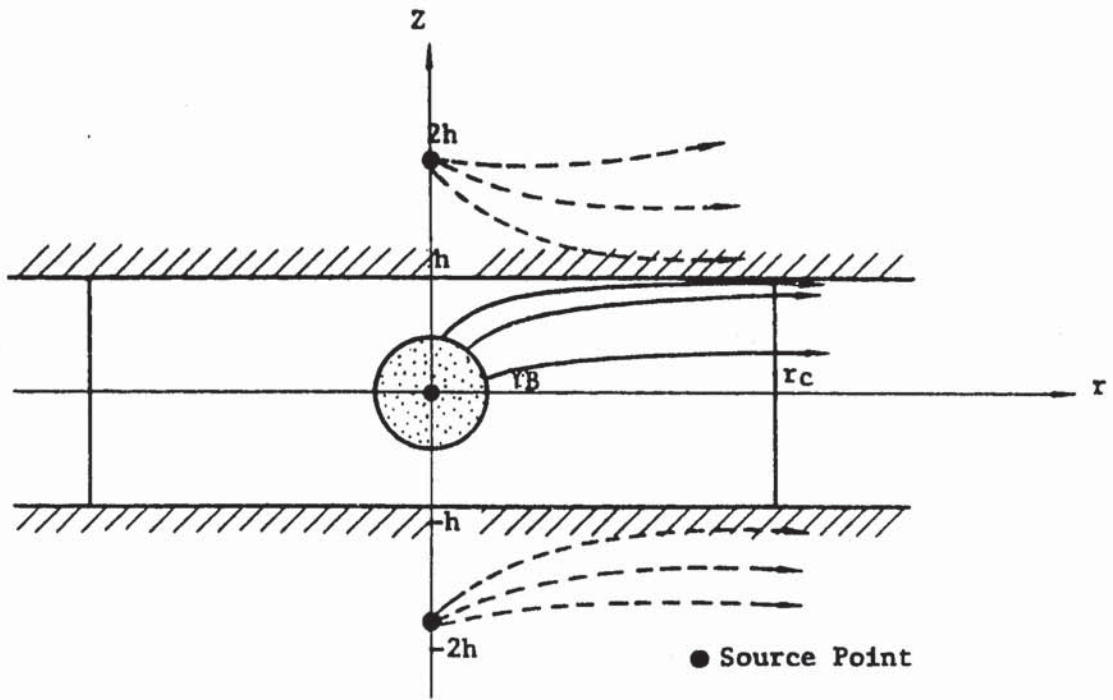


Fig. A.4 Axis-Symmetrical Potential Flow

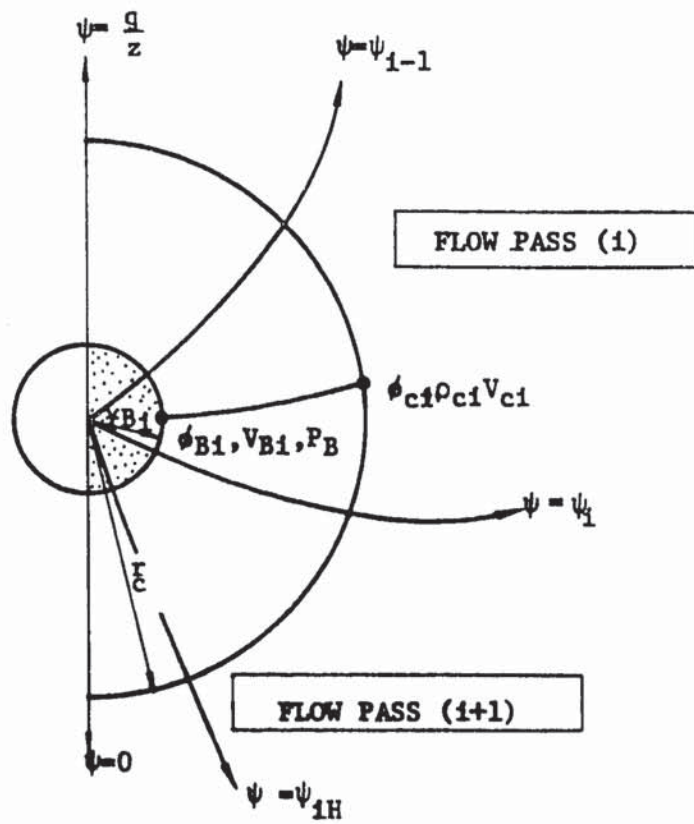


Fig. A.5 Reaction Region Calculation

$$\begin{aligned} \bar{\phi}(r) &= \frac{1}{2h} \int_{-h}^h \phi dZ = \frac{q}{4\pi} \left\{ \frac{1}{2h} \int_{-h}^h \left( \frac{1}{\sqrt{Z^2+r^2}} + \frac{1}{\sqrt{(Z-2h)^2+r^2}} + \frac{1}{\sqrt{(Z+2h)^2+r^2}} \right) dZ \right\} \\ &= -\frac{q}{4\pi} \cdot \frac{1}{2h} \text{Ln} \left\{ \frac{3+\sqrt{9+Kr^2}}{-3+\sqrt{9+Kr^2}} \right\} \end{aligned} \quad (\text{A. 8})$$

但し,  $Kr = r/h$

ゆえに半径 =  $r_c$  の柱面上の速度ポテンシャルは,

$$\bar{\phi}_c = -\frac{q}{4\pi} \cdot \frac{1}{2h} \text{Ln} \left\{ \frac{3+\sqrt{9+Kc^2}}{-3+\sqrt{9+Kc^2}} \right\} \quad (\text{A. 9})$$

但し,  $Kc = r_c/h$

となる。

一方  $H_2$  ガス気泡上の速度ポテンシャルの平均値は以下のように求められる。

半径  $r_B$  の球上 ( $Z^2+V^2=V_B^2$ ) の速度ポテンシャルは (A. 4) 式より

$$\phi_B = -\frac{q}{4\pi} \left( \frac{1}{r_B} + \frac{1}{\sqrt{(Z-2h)^2+r_B^2-Z^2}} + \frac{1}{\sqrt{(Z+2h)^2+r_B^2-Z^2}} \right) \quad (\text{A. 10})$$

$Z = -r_B$  より  $Z = r_B$  までの平均値は

$$\frac{1}{2r_B} \int_{-r_B}^{r_B} \frac{dZ}{\sqrt{-4hZ+4h^2+V_B^2}} = \frac{1}{2r_B} \left\{ \frac{|2h-r_B|}{-2h} - \frac{|2h+V_B|}{-2h} \right\} = \frac{1}{2h} \quad (\text{A. 11})$$

$$\frac{1}{2r_B} \int_{-r_B}^{r_B} \frac{dZ}{\sqrt{4hZ+4h^2+r_B^2}} = \frac{1}{2h} \quad (\text{A. 12})$$

であるから,

$$\begin{aligned} \bar{\phi}_B &= \frac{1}{2V_B} \int_{-r_B}^{r_B} \phi_B dZ = \frac{q}{-4\pi} \left\{ \frac{1}{2r_B} \int_{-r_B}^{r_B} \left( \frac{1}{r_B} + \frac{1}{\sqrt{(Z-2h)^2+r_B^2-Z^2}} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{1}{\sqrt{(Z+2h)^2+r_B^2-Z^2}} \right) dZ \right\} = -\frac{q}{4\pi} \left( \frac{1}{r_B} + \frac{1}{h} \right) \end{aligned} \quad (\text{A. 13})$$

なお気泡が柱状成長となった場合の  $\bar{\phi}_B$  は (A. 8) 式を使用する。

(b)  $H_2$  ガス気泡および近傍ナトリウム圧力計算

計算は各流路の非圧縮性ナトリウム柱領域に対して非定常ベルヌーイ式を使用し,  $H_2$  ガス気泡境界条件および非圧縮性ナトリウム柱/圧縮性ナトリウム境界条件によって解く。

すなわち,

$$\frac{\partial \bar{\rho}_{B1}}{\partial t} + \frac{1}{2} V_{B1}^2 + \frac{P_B}{\rho} = \frac{\partial \bar{\rho}_c}{\partial t} + \frac{1}{2} V_{c1}^2 + \frac{P_{c1}}{\rho} \quad (\text{A. 14})$$

$$P_B = (W_B RT) / V L_B + \rho g Z_B \quad (\text{A. 15})$$

$$P_{c1} = f_{CH} (V_{c1}) \quad (\text{A. 16})$$

但し、関数:  $f_{CH}$  は圧縮性ナトリウム中の特性曲線に沿う関係式

また、 $H_2$ ガス気泡速度 ( $V_B$ ) と非圧縮性ナトリウム柱/圧縮性ナトリウム境界速度 ( $V_c$ ) は

$$V_B = q / 4\pi r_{B1}^2 \quad (\text{A. 17})$$

$$V_c = q / 4\pi r_{c1} h \quad (\text{A. 18})$$

ゆえに未知数7個 (すなわち  $\bar{\rho}_B$ ,  $V_B$ ,  $P_B$ ,  $\bar{\rho}_c$ ,  $V_c$ ,  $P_c$  及び  $q$ ) に対し (A. 9), (A. 13), (A. 14), (A. 15), (A. 16), (A. 17) および (A. 18) 式の7個の方程式が得られ、解くことが出来る。

## (2) ダウンカム部圧力波伝播計算

### a) 流路計算

流路を2次元ポテンシャルフローによる流線によって囲まれる部分として選択する場合は以下の通りである。

複素平面  $Z = x + iy$  を考える。また流体は非圧縮性、完全流体の渦無し2次元流とする。Fig. A. 2 に示した体系にするには吹き出し ( $q$ ) と吸い込み ( $-q$ ) を適当に選定してその複素ポテンシャルを求めれば、考えている場の速度ポテンシャル ( $\phi$ ) と流れ関数 ( $\psi$ ) が定まる。

吹き出し ( $q$ ) を座標  $(0, 0)$ ,  $(2a, 0)$  および  $(-2a, 0)$  に置き吸い込み ( $-q$ ) を座標  $(0, 2bi)$ ,  $(2a, 2bi)$  および  $(-2a, 2bi)$  に置くと Fig. A. 2 に示した体系を十分満足する場が得られる。

複素ポテンシャル ( $F$ ) は

$$F = \frac{q}{2\pi} \ln(Z) + \frac{q}{2\pi} \ln(Z-2a) + \frac{q}{2\pi} \ln(Z+2a) - \frac{q}{2\pi} \ln(Z-2bi) - \frac{q}{2\pi} \ln(Z-2a-2bi) - \frac{q}{2\pi} \ln(Z+2a-2bi) \quad (\text{A. 19})$$



$$G = \frac{F_1 F_3 + F_2 F_4}{F_3^2 + F_4^2} \quad (\text{A. 20})$$

$$G_2 = \frac{F_2 F_3 - F_1 F_4}{F_3^2 + F_4^2} \quad (\text{A. 21})$$

$$\text{但し} \quad \left\{ \begin{array}{l} F_1 = X^3 - 4X - 3k^2XY \\ F_2 = 3kX^2Y - 4kY - k^3Y^3 \\ F_3 = X^3 - 4X - 3k^2X(Y-2)^2 \\ F_4 = 3kX^2(Y-2) - 4k(Y-2) - k^3(Y-2)^3 \\ X = x/a \\ Y = y/b \\ k = b/a \end{array} \right.$$

以上より速度ポテンシャル( $\phi$ )及び流れ関数( $\psi$ )は

$$\phi = \frac{q}{4\pi} \ln(G_1^2 + G_2^2) \quad (\text{A. 22})$$

$$x = \frac{q}{2\pi} \tan^{-1}(G_2/G_1) \quad (\text{A. 23})$$

となる。

#### b) 流路内圧力波伝播計算

流路内圧力波伝播計算は1次元特性曲線法を使用する。

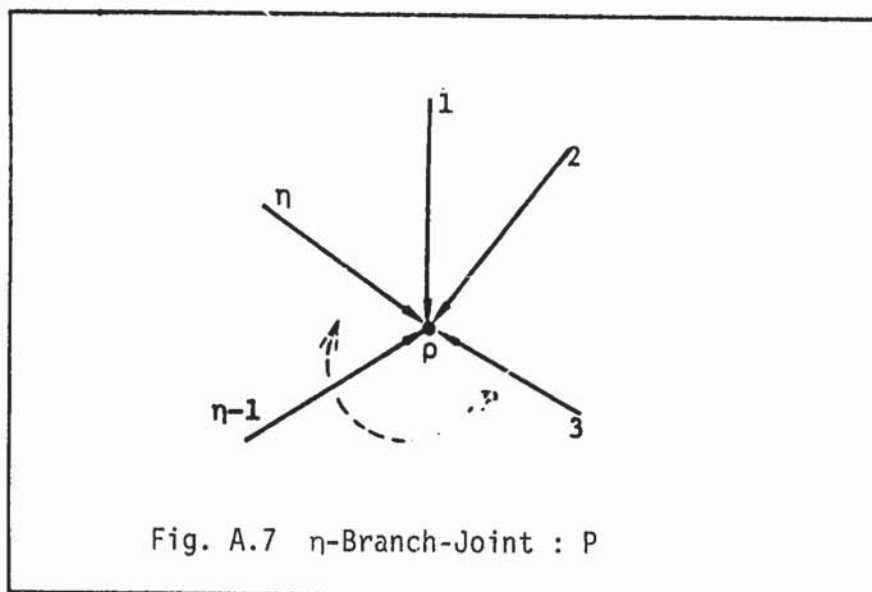
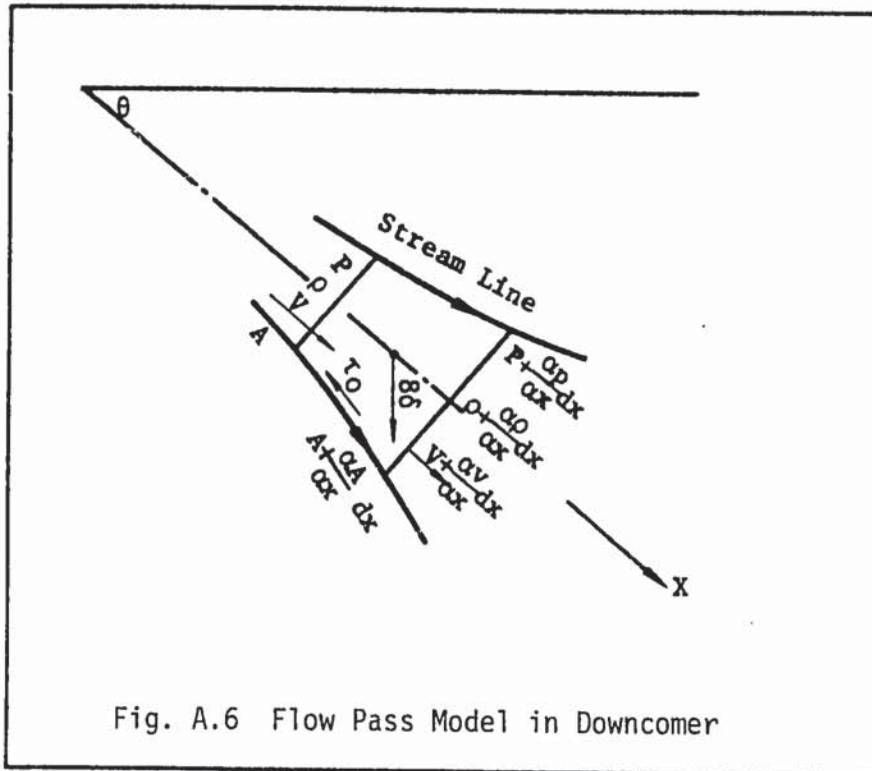
Fig A.6 に示すような水平方向と $\theta$ なる角をなす断面積が異なる流路内の流速・圧力分布は以下の流動基礎式に従う。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial p}{\partial t} + V \frac{\partial p}{\partial x} + \rho \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\rho v}{A} \frac{\partial A}{\partial x} = 0 \end{array} \right. \quad (\text{A. 24})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial v}{\partial t} + V \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{f}{D} \cdot \frac{v|v|}{2} - g \sin\theta = 0 \end{array} \right. \quad (\text{A. 25})$$

また、音速、圧力ヘッドはそれぞれ

$$C^2 = \left( \frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_s \quad (\text{A. 26})$$



$$H = P / (\rho g) \tag{A. 27}$$

であらわされる。(A. 26) および (A. 27) 式を (A. 24) および (A. 25) 式に代入すると以下の式を得る。

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{c^2 v}{Ag} \frac{\partial A}{\partial x} &= 0 & (A. 28) \\ \frac{1}{g} \left( \frac{\partial}{\partial t} + V \frac{\partial}{\partial x} \right) V + \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f |v|}{D} \frac{|v|}{2g} - \text{Sin } \theta &= 0 & (A. 29) \end{aligned} \right.$$

連続の式 (A. 28) と運動方程式 (A. 29) は、流速と圧力ヘッドを従属変数とし、流路にそった距離と時間を独立変数とする 2 つの準双曲型偏微分方程式となる。この方程式は特性曲線法によって以下の 4 つの常微分方程式に変換される。

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dt}{dx} &= \frac{1}{v+c} & (A. 30) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dv}{dt} + \frac{g}{c} \frac{dH}{dt} + cv \frac{1}{A} \frac{dA}{dx} + \frac{f}{D} \cdot \frac{v|v|}{2} - g \text{Sin } \theta &= 0 & (A. 31) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dt}{dx} &= \frac{1}{v-c} & (A. 32) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dv}{dt} \frac{g}{c} \frac{dH}{dt} - cv \frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{f}{D} \frac{v|v|}{2} - g \text{Sin } \theta &= 0 & (A. 33) \end{aligned} \right.$$

(3) 水系計算

背圧モデルによる計算は (A. 28) および (A. 29) 式において流路断面積変化  $\left(\frac{dA}{dx}\right)$  が無い場合の式、すなわち

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \tag{A. 34}$$

$$\frac{1}{g} \left( \frac{\partial}{\partial t} + V \frac{\partial}{\partial x} \right) V + \frac{\partial H}{\partial x} + \left( \frac{f}{d} + \frac{\zeta}{L} \right) \frac{v|v|}{2g} - \text{Sin } \theta = 0 \tag{A. 35}$$

を使用し、SWAC-5K で使用されている圧力波伝播計算式および解法と同一である。

## (4) 多分岐点計算

多分岐点計算は3分岐以上の分岐点を取扱えるようにする。

簡単のためn分岐点P (Fig A. 7)は各部材に対して右境界になるとすると、点Pの圧力ヘッド(Hp)は

$$H_p = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \left\{ V_{R1} + \frac{g}{C_i} H_{R1} + \left\{ \left( \frac{f}{2d} + \frac{5}{2L} \right) v |v| - g \sin \theta \right\}_{R1} \Delta t \right.}{g \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{C_i}} \quad (\text{A. 36})$$

によって求められる。



## A.4 記 号 表

## (1) 記 号

記号	単 位	記 号 説 明
A	m <sup>2</sup>	流路断面積
C	m/sec	音 速
D	m	流路等価直径, 流路外壁内直径
Ds	m	流路内壁外直径
E	kg/m <sup>2</sup>	シェル縦弾性係数
g	m/sec <sup>2</sup>	重力加速度
H	m	圧力ヘッド (Na 部)
h	m	ダウンコマ間隙 × 1/2
K	kg/m <sup>2</sup>	体積弾性係数
L	m	流 路 長
P	kg/m <sup>2</sup>	圧 力
q	m <sup>3</sup> /sec	吹き出し量
r	m	反応点からの半径 (距離)
R	kg-m/kg <sup>o</sup> K	H <sub>2</sub> ガス定数
T	°K	H <sub>2</sub> ガス温度
t	sec	時 間
V	m <sup>3</sup>	体 積
VL	m <sup>3</sup>	体 積
v	m/sec	流 速
W	kg	反応水総量
X	—	無次元 x 座標
x	m	x 座 標
Y	—	無次元 y 座標
y	m	y 座 標
z	m	z 座 標
∅	m <sup>2</sup> /sec	速度ポテンシャル

記号	単位	記号説明
$\psi$	$m^3/sec$	流れ関数
$\delta$	m	シェル肉厚
$\theta$	—	流路傾斜角
$\rho$	$kg\ sec^2/m^4$	密度
$\gamma$	$kg/m^3$	比重量
f	—	摩擦損失係数
$\zeta$	—	形状損失係数

## (2) 添字

添字	添字説明
B	H <sub>2</sub> ガス気泡面
C	非圧縮性/圧縮流路境界
i	i 流路
k	k 部材
$\Delta t$	時間巾 (sec)
t	時間 (sec)
NA	ナトリウム

## 付録・B 計算時間巾・非圧縮柱半径の検討

ここでは、SWAT-3 RUN-7 と同一注水点位置解析ケースをリファレンスとして、上記の項目についてのパラメーター、サーベイ計算を実施し、伝播圧力への効果を調査した。

### B.1 計算条件

Table B. 1 にパラメーター・サーベイ計算ケースとその主要計算条件を示す。この表以外のインプットデータはすべて、リファレンスケース (Case-1) のインプットデータと同一である。

### B.2 計算結果

#### (1) 計算時間巾 ( $\Delta T$ ) の効果

Fig. B. 1 に示した反応部近傍模式図の点 C (非圧縮柱/圧縮流路境界) 及び点 D (非圧縮球/非圧縮柱境界) における圧力変化を Case 1-1, 1-2, 1-3 および 1-4 で比較すると Fig. B. 2 のようになる。

$\Delta T$  がリファレンスケース及び Case 1-2 では点 D 点の圧力が大きく振動しており、解が不安定になっていることが判明した。また  $\Delta T$  が小さくなるにつれて点 D のピーク圧力は減少傾向にあり、点 C のピーク圧力も減少傾向にある。最適  $\Delta T$  はダウンカメラアランスの半分長を圧力波が進む時間、すなわち、

$$\Delta T = DCA/CC$$

が良い。

#### (2) 非圧縮柱領域半径 (RCYD) の効果

Fig. B. 1 における点 C 及び点 D における圧力変化の Case 1-5, 1-6, 1-7 および 1-8 (Case 1-8 では点 C と点 D は同一点) での比較を Fig. B. 3 に示す。

Case 1-5, 1-6 および 1-7 では点 D のピーク圧力が以下の通り

Case 1-5	6 2.7 ata
1-6	6 2.3 ata
1-7	6 4.1 ata

となりほぼ等しい値を示している。一方、Case 1-8 では 72 ata を示し前 3 ケースとは異なっている。

前 3 ケースからは、非圧縮柱半径の効果には差がないと考えられる。Case 1-8 のみより高い圧力値を示しているのは、非圧縮柱半径の効果よりは、むしろ次項で検討した流路部材数に関連した、流路断面積変化率のためと考えられる。

### B.3 ま と め

以上のパラメータ・スタディの結果以下のことがわかった。

- i) 計算時間巾は大きすぎる場合、非圧縮球／柱境界での安定な解が得られないので、ダウンカマクリアランスの半分長を圧力波が伝播する時間程度がよい。
- ii) 非圧縮柱半径による圧力波高値への影響は少ない。



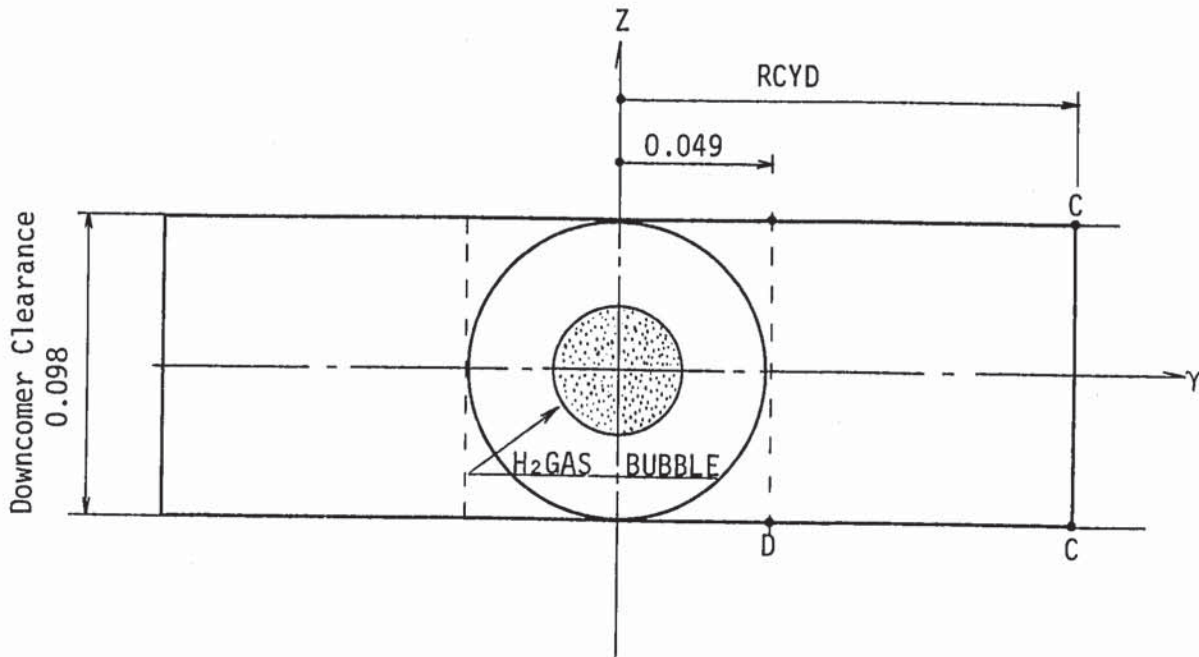


Fig. B-1 Schematic of Reaction and the Adjacent Regions

Table B.1 パラメータ・サーベイ計算ケースの主要計算条件

項 目	計 算 ケ ー ス	計 算 時 間 巾 ( $\Delta T$ ) msec	非 圧 縮 柱 半 径 (RCYD) m
リファレンス計算	Case-1	0.108	0.3
計算時間巾 ( $\Delta T$ ) の 効 果	Case 1-1	0.108	0.3
	Case 1-2	0.081	"
	Case 1-3	0.054	"
	Case 1-4	0.027	"
非圧縮柱半径 (RCYD) の 効 果	Case 1-5	0.0281	0.3
	Case 1-6	0.0289	0.15
	Case 1-7	"	0.075
	Case 1-8	"	0.049

注) ダウンカマ内流路部材収 (上, 下) 2, (1, 1)

Table B.2 Input Data of Case-1

DEMONSTRATION	ANALYSES	CASE-1				
01	1	6				
05	2	1	1	1	1	4
01	7	2				
05	22	1003	2004	4005	5006	4003
01	27	5003				
05	42	1003	2004	4005	5006	4007
05	47	7008	8009	9003	5010	10003
05	92	0	0	3	6	3
05	97	5	4	8	11	11
01	164	6				
01	174	350				
05	175	0	1	0	100	1
01	187	1				
02	201	1	3			
02	212	1	3			
01	231	1				
01	232	9				
02	250	2	1			
02	252	1	25			
01	256	10				
10	0	0				
05	1	0.0	0.0	4.7500E-01	8.4000E-01	4.4500E-01
05	6	7.6000E-01	6.0000E-01	1.1450E+00	1.7130E+00	1.7120E+00
01	51	1.3000E+03				
05	101	0.0	0.0	9.9100E-01	9.4400E-01	5.9800E-01
05	106	5.9400E-01	6.0100E-01	6.0100E-01	8.7300E-02	8.7300E-02
05	151	0.0	0.0	8.2300E-01	1.1780E+00	5.8800E-01
05	156	5.8800E-01	5.8800E-01	5.8800E-01	3.3340E-01	3.3340E-01
02	202	8.9300E+02	4.1100E-07			
01	250	2.1250E+00				
02	255	3.1640E-01	-2.5000E-01			
05	307	0.0	0.0	2.1250E+00	-8.2500E-01	-1.3000E+00
05	312	-2.1400E+00	-3.8000E-01	3.8000E-01	9.8000E-01	4.1300E-01
01	358	1.5000E+04				
01	359	0.0				
01	369	3.0000E-02				
01	370	1.0000E+03				
01	391	2.0700E+00				
02	401	1.6600E+00	4.0000E+00			
01	421	8.2000E-01				
05	600	1.6949E+00	2.1250E+00	8.2500E-01	3.0000E-01	4.9000E-02
04	609	4.2055E+02	1.6900E+00	9.5000E-03	1.1540E-04	
05	613	0.0	2.0000E-04	4.0000E-04	6.0000E-04	8.0000E-04
05	618	1.0000E-03	1.5000E-03	2.0000E-03	2.5000E-03	3.0000E-03
05	623	3.5000E-03	4.0000E-03	4.5000E-03	5.0000E-03	6.0000E-03
05	628	7.0000E-03	8.0000E-03	9.0000E-03	1.0000E-02	1.2000E-02
05	633	1.4000E-02	1.6000E-02	1.3000E-02	2.0000E-02	1.0000E+00
05	713	5.7000E+00	6.6000E+00	9.1000E+00	1.0700E+01	1.1400E+01
05	718	1.1400E+01	9.9000E+00	7.7000E+00	6.0000E+00	5.1000E+00
05	723	4.8000E+00	5.1000E+00	5.6000E+00	6.4000E+00	7.2000E+00
05	728	6.7000E+00	5.8000E+00	5.8000E+00	6.8000E+00	7.9000E+00
05	733	6.7000E+00	6.7000E+00	6.7000E+00	6.7000E+00	6.7000E+00
01	813	5.0000E-01				
10	0	0.0				

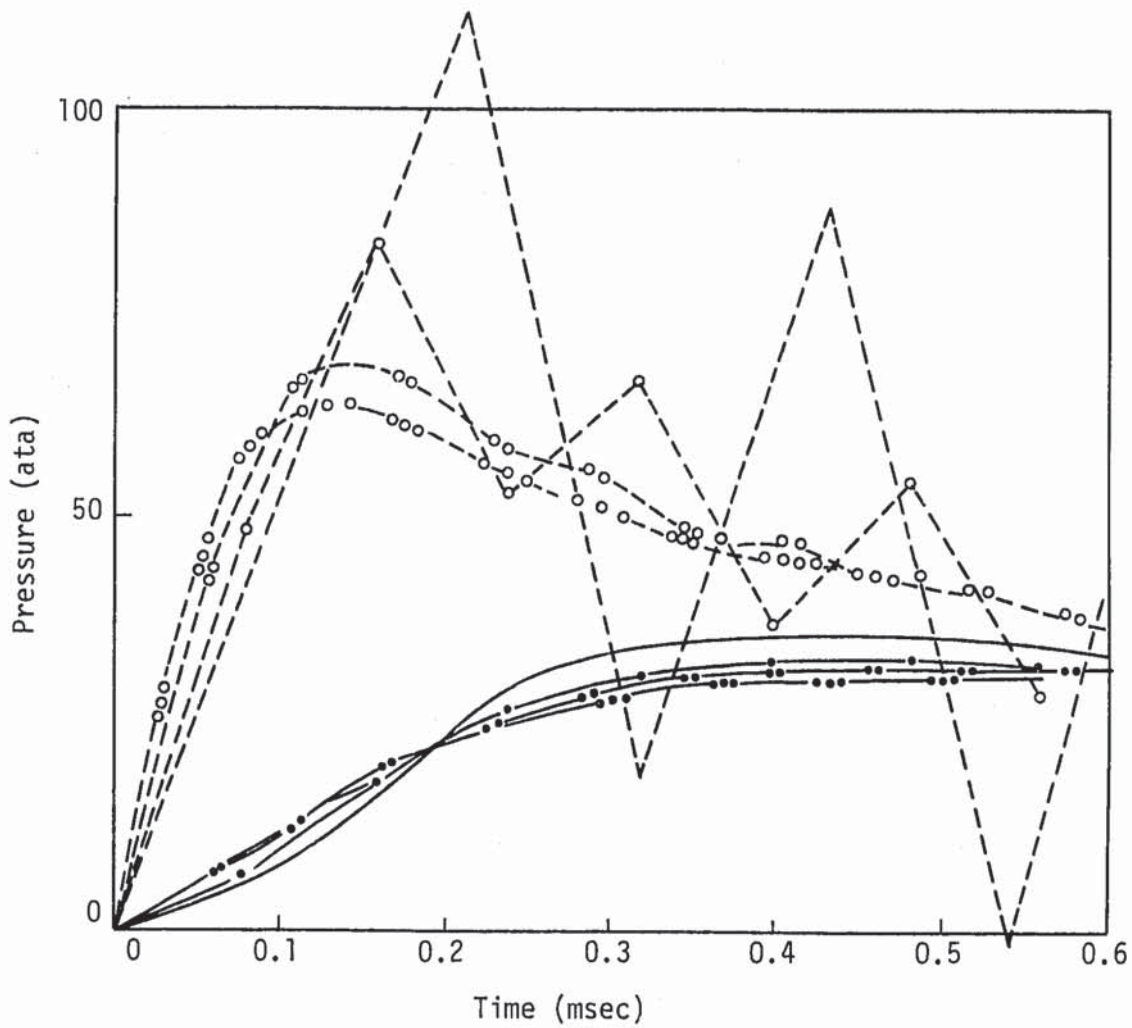
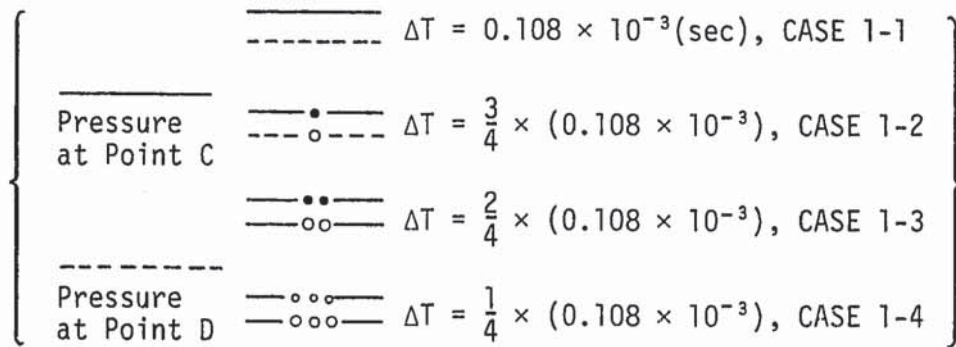


Fig. B-2 Time Increment ( $\Delta T$ ) Effect in Pressure Histories of Incompressible Cylinder Part



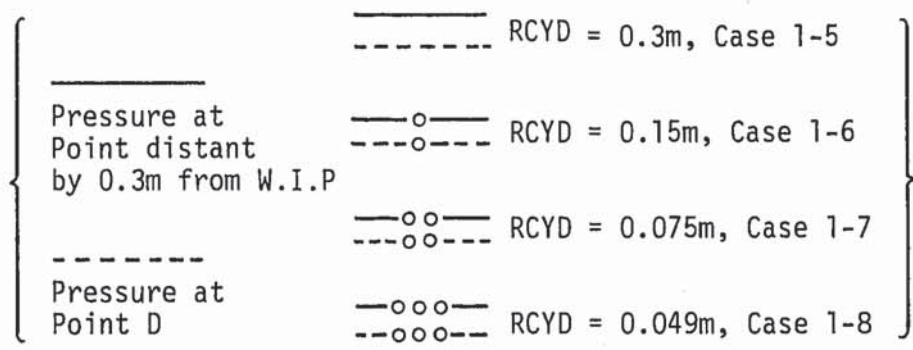
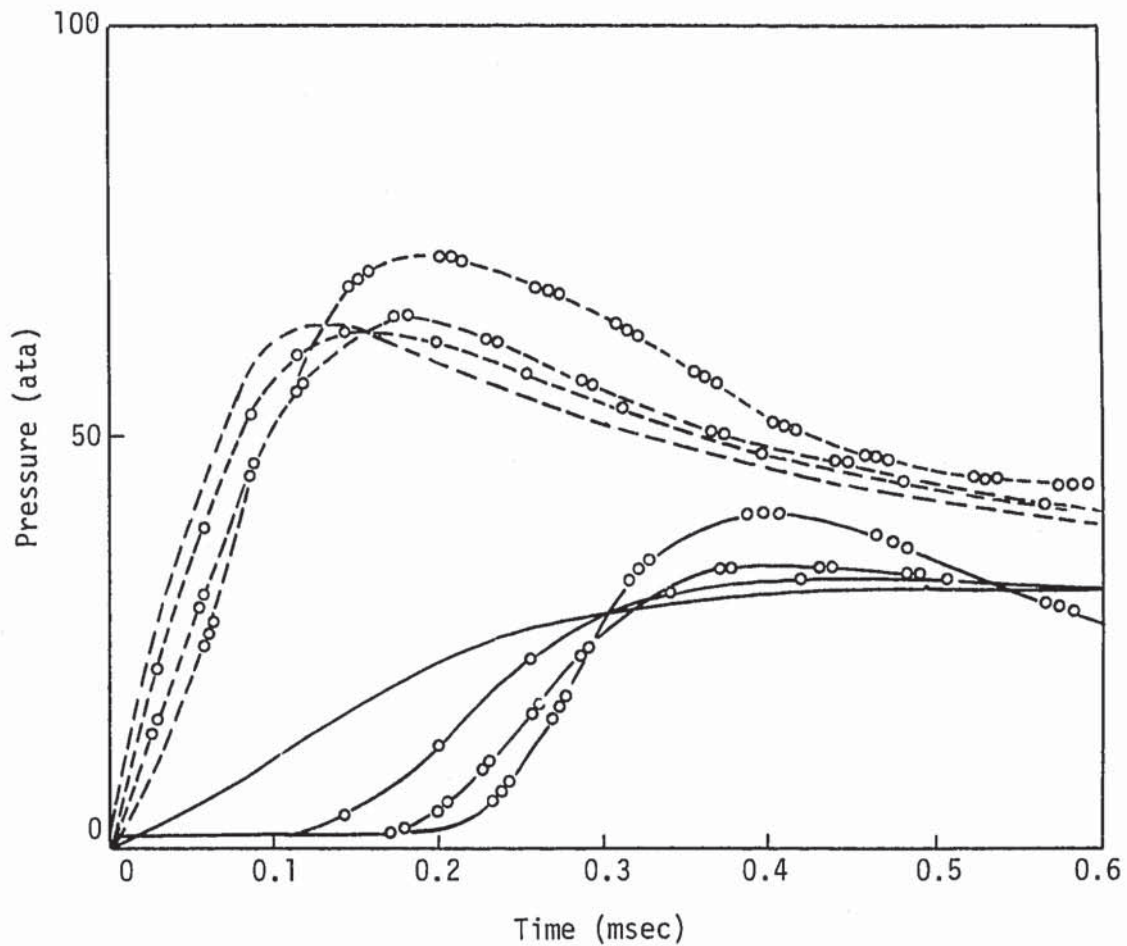


Fig. B.3 Incompressible Sodium Cylinder Radius (RCYD) Effect in Pressure Histories