

区 分 変 更	
変更後資料番号	J1600
決裁年月日	平成14年2月28日

本資料は17年7月5日付で  
登録区分変更する。 [技術展開部技術協力課]

T  
P N C ~~番号~~ J 1 6 0 0 9 0 - 0 0 8

## 縮尺地層模型試験に基づく空洞 の消滅に関する研究（そのIII）

（動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書）

1991年3月



北海道大学工学部

石島 洋二

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
Tモ	J1600 90-008
この資料は図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

本資料は、核燃料サイクル開発機構の開発業務を進めるために作成されたものです。  
したがって、その利用は限られた範囲としており、その取扱には十分な注意を払って  
ください。この資料の全部または一部を複写・複製・転載あるいは引用する場合、  
特別の許可を必要としますので、下記にお問い合わせください。

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

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

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



-1-

P N C Z J 1 6 0 0 9 0 - 0 0 8

1991年3月

### 縮尺地層模型試験に基づく空洞の消滅に関する研究（そのⅢ）

石島 洋二\*

#### 要旨

地下深部の碎屑性堆積岩中に設けた放射性廃棄物の処分空洞が次第に縮小し、やがて消滅する過程において現れる諸現象を、おもに大型の縮尺地層模型試験によって調査した。その結果、以下の諸点が明らかになった。

- 1) 空洞端のやや前方に生じる応力集中域における応力の値は、初期地圧の1.5～5.0倍の大きさに達した。なお、この応力集中は、空洞幅が長くなるほど大きくなることが確認された。
- 2) 応力集中部では岩盤が圧縮されるために、P波の伝播速度および（最大）振幅が大きくなつた。
- 3) 空洞の上下盤においては、空洞掘削に伴い、空洞縁に垂直方向の地圧成分が減少した。なお、この応力低下の傾向は、空洞の縁に近くなるほど大きくなることが確認された。
- 4) また、空洞の上下盤接近量は、空洞幅の拡大につれて増加し、最後には閉塞した。
- 5) 空洞の拡大に伴い、空洞の上下盤を伝搬するP波には、速度の著しい減少、振幅の減衰と波の形状変化が計測された。これらは、

---

\* 北海道大学工学部・資源開発工学科・岩石力学講座

空洞周囲に緩み域が発生したことを意味する。この緩み域は、空洞の拡大に伴い、空洞縁から奥へと拡大することが確認された。

- 6) 緩みの程度が増すにつれて、その中を伝搬するP波の高周波成分は消滅し、ついで波自体が消滅した。
- 7) 空洞の閉塞とともにP波は再び伝わるようになり、閉塞領域の増加とともに波の振幅が次第に回復する傾向が見られた。
- 8) 閉塞の生じた空洞部分では、天盤から崩落したずりが上下盤に挟まれて圧密されることが確認された。
- 9) 空洞の上下盤に埋設された応力センサーは、空洞の閉塞に伴い（圧縮）応力の増加を示した。

現在考えられている複合的なバリヤーシステムを用いて碎屑性堆積岩中に深地層処分をする場合に、想定されるもっともらしいシナリオは次のようになるであろう。天然バリヤーの遮蔽能力は、処分後の空洞消滅が起こる前後で最低の水準になる。しかし、空洞の設計と処分方法に注意すれば、直にその状態を脱し、時間を経るに従って向上するようになるであろう。これに要する期間（ $10^0 \sim 10^3$  年程度の間）は、システム全体の遮蔽機能を一定水準以上に保つために、専ら人工バリヤーが遮蔽能力のかなりの部分を負担しなければならない。人工的なバリヤーがこのような性能を持っていれば、常に一定水準以上の遮蔽機能を長期間保つことが可能であると考えられる。

## 目 次

1	序論	1
1. 1	本研究の目的	1
1. 2	空洞消滅のシナリオ	1
1. 3	研究方法	3
1. 4	本論文の内容	4
2	縮尺地層模型試験の方法	7
2. 1	緒言	7
2. 2	縮尺地層模型	8
2. 3	模型内の計測と各種センサー	9
2. 3. 1	応力センサー	9
2. 3. 2	変位計測	9
2. 3. 3	P 波センサー	10
2. 4	実験方法	10
3	縮尺地層模型試験の結果	18
3. 1	P M T - 1 1 (図 2. 2 参照) の結果	18
3. 2	P M T - 1 2 (図 2. 3 参照) の結果	20
3. 3	P M T - 1 3 (図 2. 4 参照) の結果	22
3. 4	有限要素法による数値計算結果との比較	24
3. 5	F F T による波形解析とその解釈	24
4	結言	50
4. 1	空洞消滅に関して縮尺地層模型試験で得られた知見	50
4. 2	空洞閉塞に関する補足	51
4. 3	空洞の消滅に伴う天然バリアー機能の消長	52



# 第1章 序論

## 1. 1 本研究の目的

本研究の目的は、碎屑性堆積岩中に設けられた放射性廃棄物の深地層処分施設に関し、処分用空洞の消滅に伴う諸現象を縮尺地層模型試験を中心とした研究に基づき予測・解明することにある。

処分作業中と処分後に空洞とその周辺岩盤に現われる諸現象が予測・解明されれば、放射性廃棄物をもつとも効果的に遮蔽する有効かつ適切な処分方法を見いだすことが可能になる。

この目的を遂行するために、3年間に亘り、縮尺地層模型試験、数値応力解析、岩石の透水挙動に関する室内試験を実施してきた。次に、これらの研究と空洞消滅に係わる諸現象との関係を次に明らかにしておこう。

## 1. 2 空洞消滅のシナリオ

地層処分空洞を碎屑性堆積岩中に設ける場合について、処分作業中から処分後にかけて起こり得る力学的な事象を時系列的に記してみよう。

### ① 処分空洞開削時

初期地圧の下で平衡状態にある深部の岩盤中に空洞を掘削すると、その周囲岩盤には応力集中、応力解放などの乱れが生じる。応力集中部では、もし応力が岩盤強度に達するような条件が満たされれば、破壊が起こる。破壊の生じている領域はひび割れしており、緩み域（または破壊域）と呼ばれる。この緩み域では、岩盤が高い応力に耐えられず応力は低い水準に留まる。また、ひび割れのために、見

かけの空隙率と体積が増し（ダイラタンシーを起こし）、剛性が小さくなっている。増積した岩盤は空洞に押し出され、空洞の狭小化を促進する（図1. 1 a、 b）。同様の原因で、緩み域内の透水性は大きくなる。

### ② 空洞開削後

岩盤の長期強度は瞬間強度よりも小さい。また、緩み域内は空隙率が大きくなっているために、周囲から水を呼び込む。碎屑性堆積岩の含水比が上がれば強度は一層小さくなる。これらの両者の相乗効果で、空洞開削後、時間の経過とともに空洞周囲岩盤には逐次破壊が発生し、緩み域が拡大する。さらに、岩盤は破壊しなくとも応力の作用が持続すれば変形が進むというクリープ変形特性を持っている。両者の効果が重なり、空洞開削後、空洞の狭小化は時間経過とともに進行する（図1. 1 c）。

空洞の狭小化はやがて空洞の部分的な閉塞を引き起こし、時間がさらに進むにつれて閉塞領域が拡大する。ついには、空洞が全て閉塞する事態に至る。すなわち、空洞が消滅する。

空洞の閉塞が起こった段階で、その周囲の岩盤内で地圧応力が回復し始める。これにより、岩盤が緩んでいてもひび割れが閉じ、透水係数が減少する。

岩盤の遮蔽性能の観点から現象をみると、空洞の狭小化が進行している時点では、遮蔽性能が次第に低下する。しかし、閉塞が生じる時点から、遮蔽性能が回復するといえる。

### ③ 処分後

空洞の消滅後、空洞周辺の地圧の回復が進み、空洞開削前の初期状態に近づく。緩み域が形成されていても、地圧の作用の下で圧密現象が起こり、この域内では岩盤の強度復元が起こる。

また、放射性廃棄物から出る熱の作用の下で、石化が加速される。このために、十分な時間（地質的な時間）経過の後には、空洞周辺の岩盤は周囲の岩盤よりも高い難透水性を持つ一種の鉱脈（または

岩脈) が形成されるようになるであろう(同図d)。こういった状況の下では、地層内の浸透流がこの部分を避けるようになり、遮蔽性能は一層向上するであろう。

碎屑性堆積岩中に処分空洞を設けた場合には、このようなシナリオに従う現象が起こりうると想像される。

### 1. 3 研究方法

上記の空洞消滅の過程で現われる諸現象を確認することが本研究の目的である。研究はおもに縮尺地層模型試験によって行われる。この試験においては、実際の岩盤に似た材料を用い、地圧に相当する荷重下での空洞の挙動を調べるので、破壊や緩みなど多くの諸現象が実際に近い形で再現される。このとき、多数のセンサーを模型内に系統的に配置することにより、現象を正確に捉えることが可能であるが、これらは、空洞のモニタリングの方法を確立する上でも有用である(図1. 1 参照)。

しかし、模型試験にも種々の限界・制限がある。まず、模型試験では短時間に現われる力学的な現象しか捉えることができない。このために、長い時間経過に伴って現われるクリープ現象や逐次破壊現象、および、それらによって引き起こされる空洞閉鎖や消滅とこれに付随する諸現象(図1. 2 a 参照)を再現することができない。

また、地層処分で重要な研究対象である浸透流挙動はまったく扱えない。そこで、これらの欠点を次の2つの方法で克服することにした。

① 模型において、空洞の幅を逐次切り広げる。これによって、空洞周辺の破壊域の成長や上下盤接近、空洞消滅といった現象が発生する(図1. 2 b 参照)。これらの現象自体は時間を経て起こる類

似の現象と本質的に同一である。

② 模型試験を補足するために、数値応力解析や岩石供試体を用いた室内透水試験を行う。例えば、岩盤を線形粘弾性体と仮定すれば、この仮定の下での時間依存性の変形現象を追跡することができる。室内透水試験は、所与の地圧と間隙水圧の下で、破壊の影響、応力負荷履歴の影響などについてかなりの知見を得ることができる。

#### 1. 4 本論文の内容

本年度は、模型試験によって空洞周辺の破壊と空洞閉塞に伴う諸現象をより詳細に観察することに主眼が置かれた（第2、3章）。しかし、3年間で計画された本研究の最後の年に当たるので、過去の研究成果を纏めることにも意を用いた（第4章）。

図 1.1 空洞消滅に関する諸現象—実際とモデルの場—

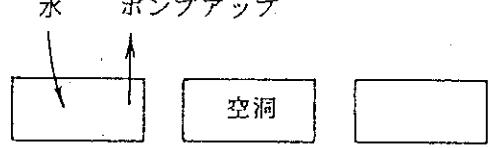
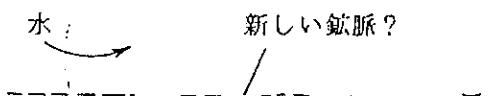
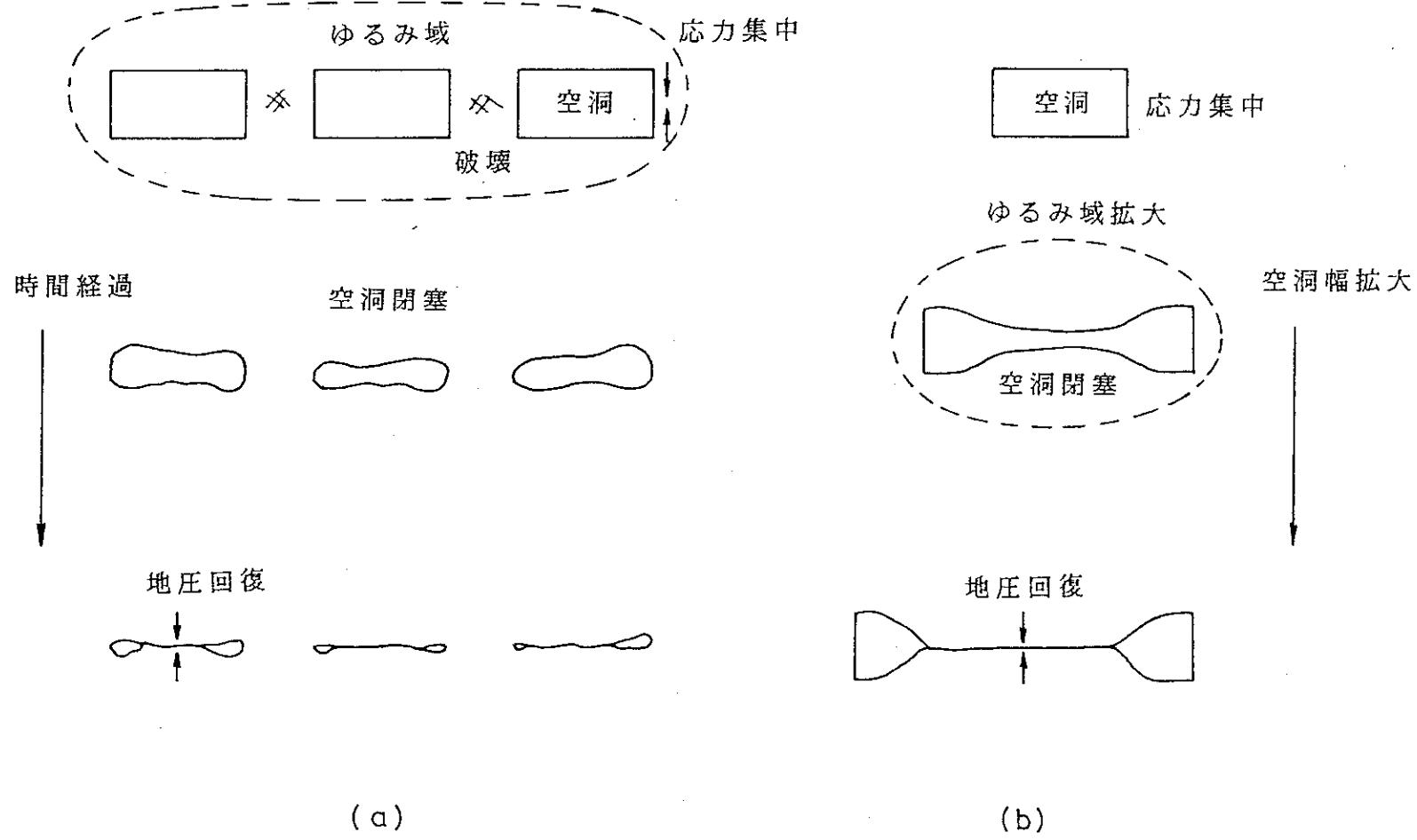
時 刻	原 位 置 の 場 処分空洞と周囲の状態	堆積層中で起り得る現象	模型、数値解析、 室内試験の場
空洞掘削 処分作業 埋戻し	水 ポンプアップ 	(a)	
処分開始 $t = 0$	水 応力集中 ゆるみ域 	クリープ変形や 逐次破壊(亀裂 密度の増大) 空洞周囲の 透水性の増大	模型試験 数値解析
$t = 10^1$	水 空洞の完全閉塞 (=空洞消滅) と ゆるみ域の縮小 	空洞上下盤の 地圧の回復 圧密の促進	室内透水試験
$t = 10^3$	水 新しい鉱脈? 	熱による石化 難透水性の増大	

図 1・2 空洞閉塞の過程。実際の場（a）とこれを模型試験で再現する場（b）

-6-



## 第2章 縮尺地層模型試験の方法

### 2. 1 緒言

物理模型試験は、一定の条件のもとに実際の岩盤の縮尺模型を種々の材料を用いて作成し、これに地圧に相当する荷重を掛けて模型の力学的挙動を観察するものである。本試験は次に述べるようないくつかの利点がある。

(a)複雑な地質条件（地層、断層など）や様々の荷重条件（地圧状態）を実現し、その中で空洞の挙動を調べることができる。

(b)実験の再現性がある。

(c)載荷中に模型の全体的、あるいは局部的な破壊・変形を目視したり、カメラやビデオ等で観察・記録できる。

(d)模型内に多数の様々なセンサーを設置することにより、現場では困難あるいは不可能な計測が可能となり、数多くの貴重な情報を入手することができる。

使用する模型は、本邦では最大級の寸法(200×120×30mm)を持っている。このために、より実寸に近い試験ができ、上記の利点を最大限に生かすことができる。また、本装置では一定の載荷状態下のもとで模型の一部掘削ができるので、掘削過程に伴う現象を追うことが可能であるという特徴を持っている。

さらに、本試験装置では、載荷能力と模型材料の強度の観点から、地表下500～2000mの地層中で起こる現象を実験対象とするのに適しているので、深地層処分空洞の試験に最適といえる。

本研究では、矩形の空洞の切り広げに伴う周辺岩盤の変形・破壊挙動を写真撮影により記録し、また模型内に予め一定の配置に従い埋設した大量のセンサーにより、模型内の力学的挙動（地圧変化やゆるみ域の成長など）に関する計測を行った。計測によって得られる大量のデータの取り込み・転送・保存は、G P - I B を介して 1

台のパソコンにより自動的に行なった。さらに、保存されたデータに対して、いくつかのプログラムにより解析を施し、有用な情報を得た。

## 2. 2 縮尺地層模型

模型は幅2.0m、高さ約1.16m、厚さ0.36mの板状構造（2次元構造）をしている。長さの縮尺は1/30である。

PMT11、12、13と名付けた3つの模型を製作した。これらの模型の地質構造は、図2. 2～4に示すように、平層の累層構造（堆積層）をしており、16～22枚の層から構成されている。掘削は図でハッチを施した中央の層（以下、掘削層と呼ぶ）でなされる。同図には、寸法の他に各種センサーの埋設位置も示されている。

地層模型材料はモルタル系で、それぞれの地層の配合比、単軸圧縮強度等の基本的性質は表2. 1に示すようである。

3つのモデルの内で、PMT11は地層の強度を相対的に他の2つよりも若干、大きくしている。また、PMT13は層間の強度を下げるために層と層の間に油を染み込ませた新聞紙を挟んでいるが、PMT11、12は特別な処理はしていない。すなわち、模型の作成に際しては、後者においては一つの層を打設した後次の層をその上に直接流し込んでいるのに対し、前者では新聞紙を敷いた上に新しい層を流し込んでいる。このため、PMT13の層間の強度は他に比べて相対的に小さくなっている。

模型の製作に際しては、セメントの浮き上がりによる層（の強度）の不均一性を排除し、また層間強度の一定化を計るために、層毎の表面成型を行った。すなわち、1層の打設毎に表面の不均質部を剥ぎ取り、特殊な表面成型用のジグを用いてmm単位の精度で所定の

厚さに仕上げた。また、地層材料の流し込んだ後でバイブレーターをかけ脱気を充分に行つた。このようにして、仕上げ寸法精度の高い均一な模型を製作するように心がけた。

## 2. 3 模型内の計測と各種センサー

### 2. 3. 1 応力センサー

従来の応力センサーに比べて大きさが1／27の超小型センサー(図2. 5(a))を新たに開発・使用した。円柱状をした新型のセンサーは従来と同様に一軸型で、長さ方向の直応力成分だけを計測するようになっている。従来の応力センサーはモルタル製であったが、新型は材料を金属製にすることにより小型化に成功し、感度や耐用性も大幅に向上した。

供試模型と同様の層構造から成る25cm角のモルタルブロックにセンサーを埋設し、実際の模型試験と同じ載荷状態のもとで検定を行つた(図2. 5(b)参照)。検定結果を示した図2. 6から、センサー出力と軸応力は充分な直線関係があることがわかる。感度は約-28μストレーン/kgf/cm<sup>2</sup>と見積られる。また、センサーを1個と2個埋設したブロックの検定結果から、各センサーの出力感度の違いが少ないこと、および近接したセンサーの相互影響のないことが確認された。

このように寸法の小さな特徴を生かして、模型には50個にのぼる多数のセンサーを埋設し、より詳細な計測が行えるようになった。

### 2. 3. 2 変位計測

模型の変位計測・破壊状態の観察は、拘束板に設けられている窓(図2. 1参照)を通して写真撮影した結果を基に行なう。今回は、模型を常に一定距離から撮影できるような専用ジグを新たに開発し、

これによって条件の揃った品質の高い映像が得られるようにした。今後はビデオ撮影とコンピュータによる画像処理を組み合わせた方法の採用を検討している。

### 2. 3. 3 P 波センサー

従来の P 波センサーは発振子・受振子が対になって向き合う一体構造をしていた。今回は電磁ハンマーを発振源として使用し、1 個の発振子に対して複数個の受振子を各層にまたがって埋設する構造に変更した（図 2. 1 ~ 3 参照）。この方法の採用により、各層自身の挙動に加え、層間の挙動も計測できるようになった。また、この方法は弾性波ジオトモグラフィーへも直接的な応用が可能と考えられる。

P 波測定結果をより詳細に解析できるように、FFT による周波数解析プログラムを開発した。

### 2. 4 実験方法

供試模型を載荷装置にセットし、模型の前面と背面を拘束板ではさみボルト締めした後、載荷を開始する。まず、垂直・水平荷重を段階的に増加させ、設定応力値（垂直応力  $\sigma_v = 5 \text{ kgf/cm}^2$ 、水平応力  $\sigma_h = 2.5 \text{ kgf/cm}^2$ ）まで模型を載荷する。応力の縮尺比は 1 / 50 なので、実規模における鉛直地圧成分は  $250 \text{ kgf/cm}^2$ 、あるいは  $1000 \text{ m}$  のかぶりに相当する。

水平の矩形空洞の掘削は、1 ステップを  $15 \text{ cm}$  として、8 ~ 12 個のステップに区切って、高さ  $1.5 \text{ cm}$ （実規模で  $4 \text{ m}$ ）の矩形空洞を水平方法に拡大する。図 2. 2 ~ 4 のハッチを施した層が掘削層であるが、ここに記されている①、②等は掘削ステップを表している。

掘削は、以下の手順を繰り返すことによって進める。

- (a)拘束板に設けられた窓(図2. 1参照)をはずすことにより、  
模型の一部を露出させ掘削する。
- (b)掘削終了後、窓を取り付ける。
- (c)掘削中および掘削終了後に、写真撮影、諸計測を行う。

表2. 1 模型材料の基本的性質

	上盤	下盤
P波速度 (km/s)	0.89	0.91
S波速度 (km/s)	0.52	0.52
圧裂引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.23	0.35
みかけ比重	1.30	1.30
真比重	2.56	2.56
孔隙率 (%)	49.2	49.2
含水比 (重量%)	13.0	13.4

○ 地下 - 土/下地模型  
窓

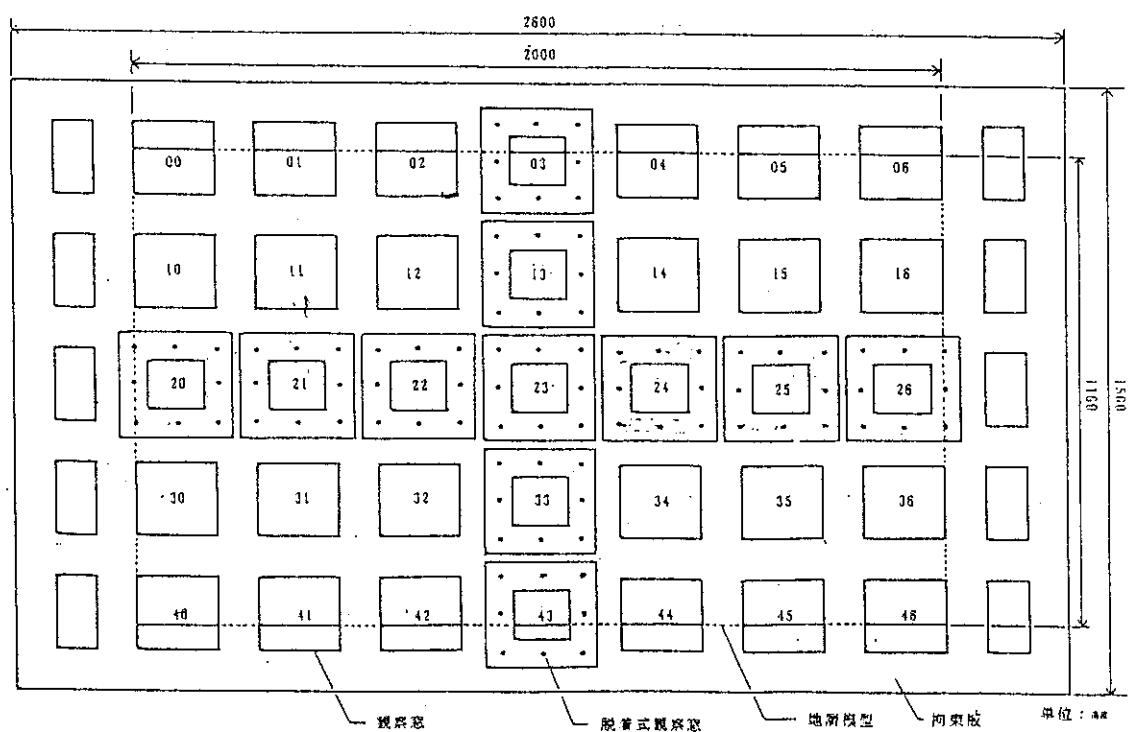


図2. 1 模型拘束板（表側）に付いている窓とその番号。窓は観察や掘削に使われる。

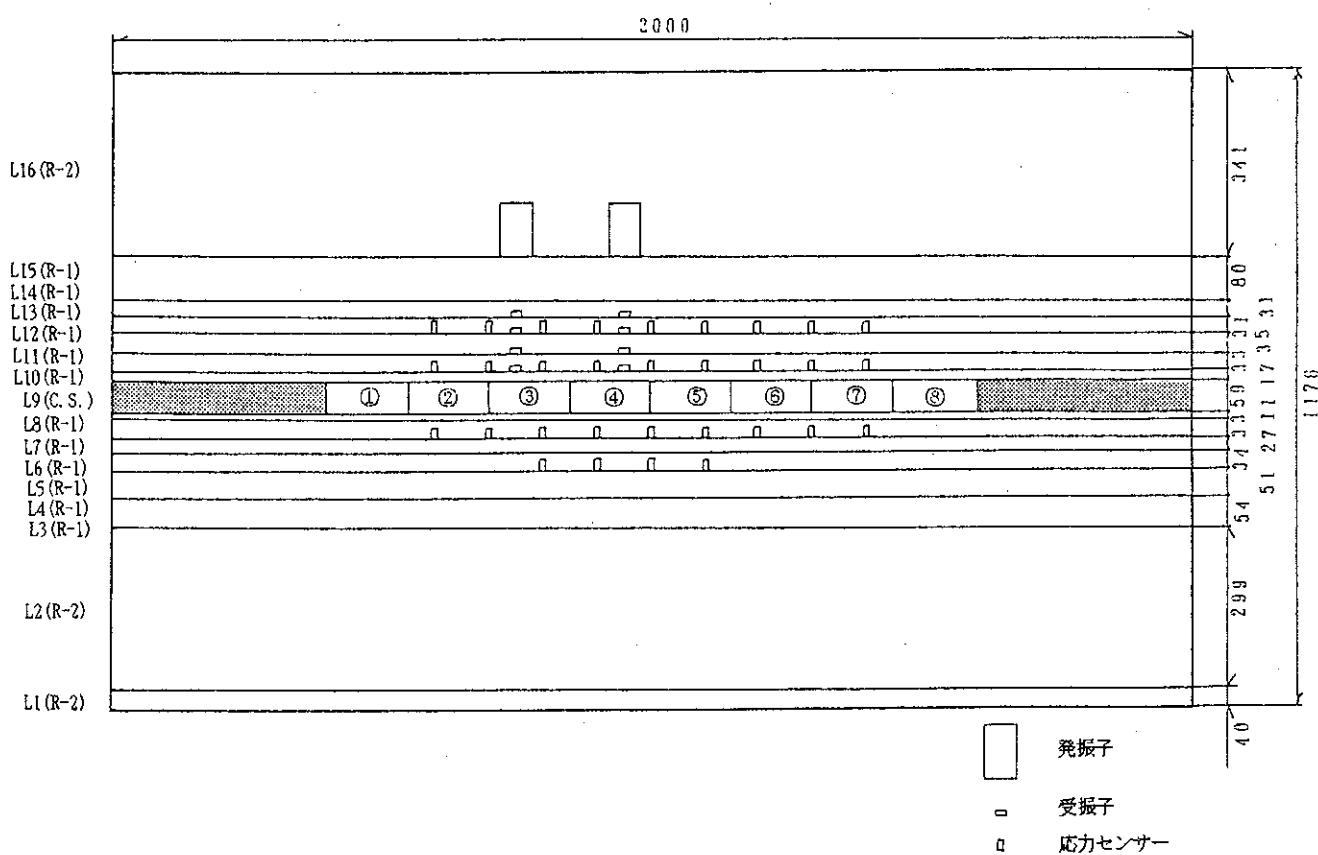


図 2. 2 模型 P M T - 1 1 の地質構造。センサーの埋設位置も示されている。

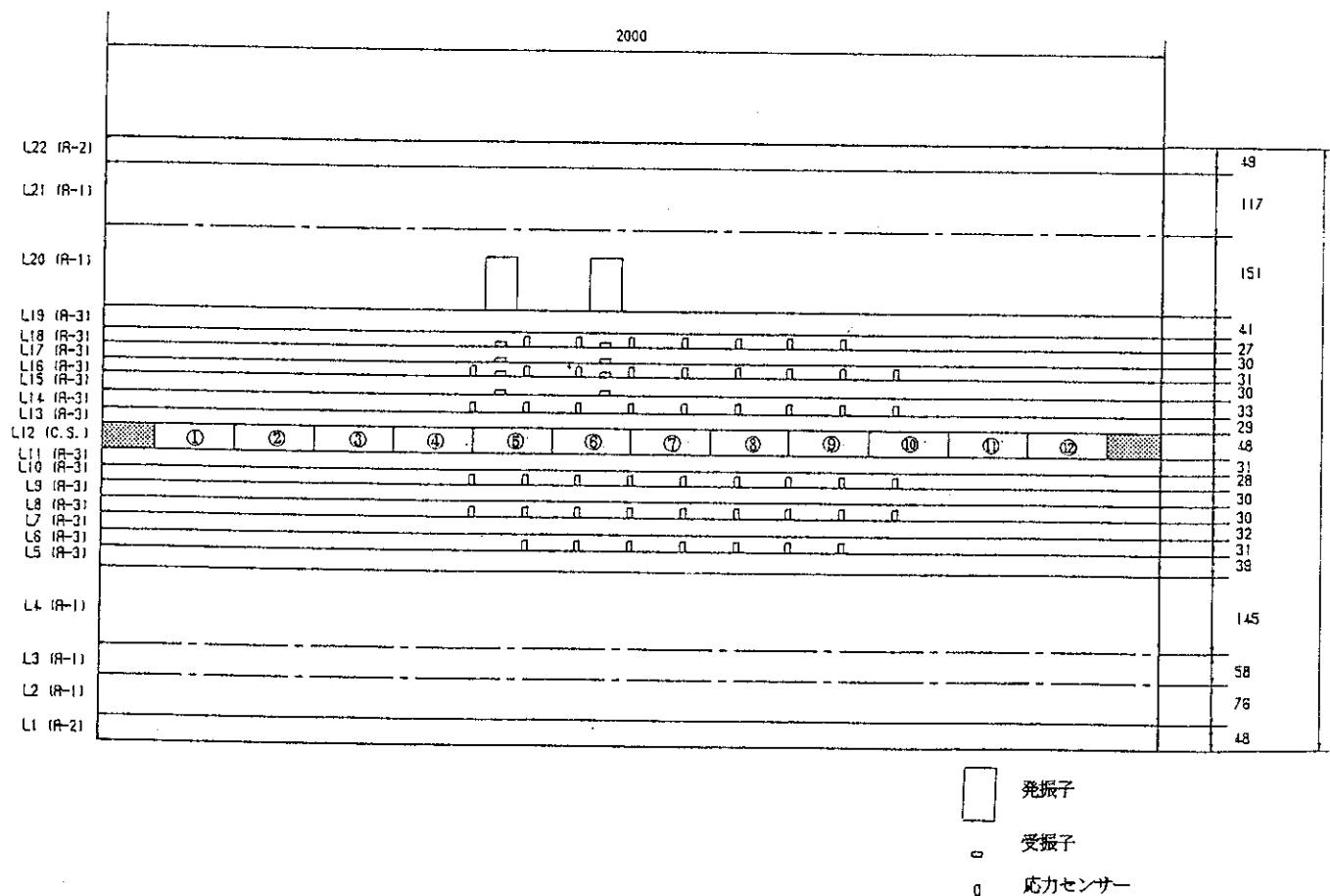


図 2. 3 模型PMT-12の地質構造。センサーの埋設位置も示されている。

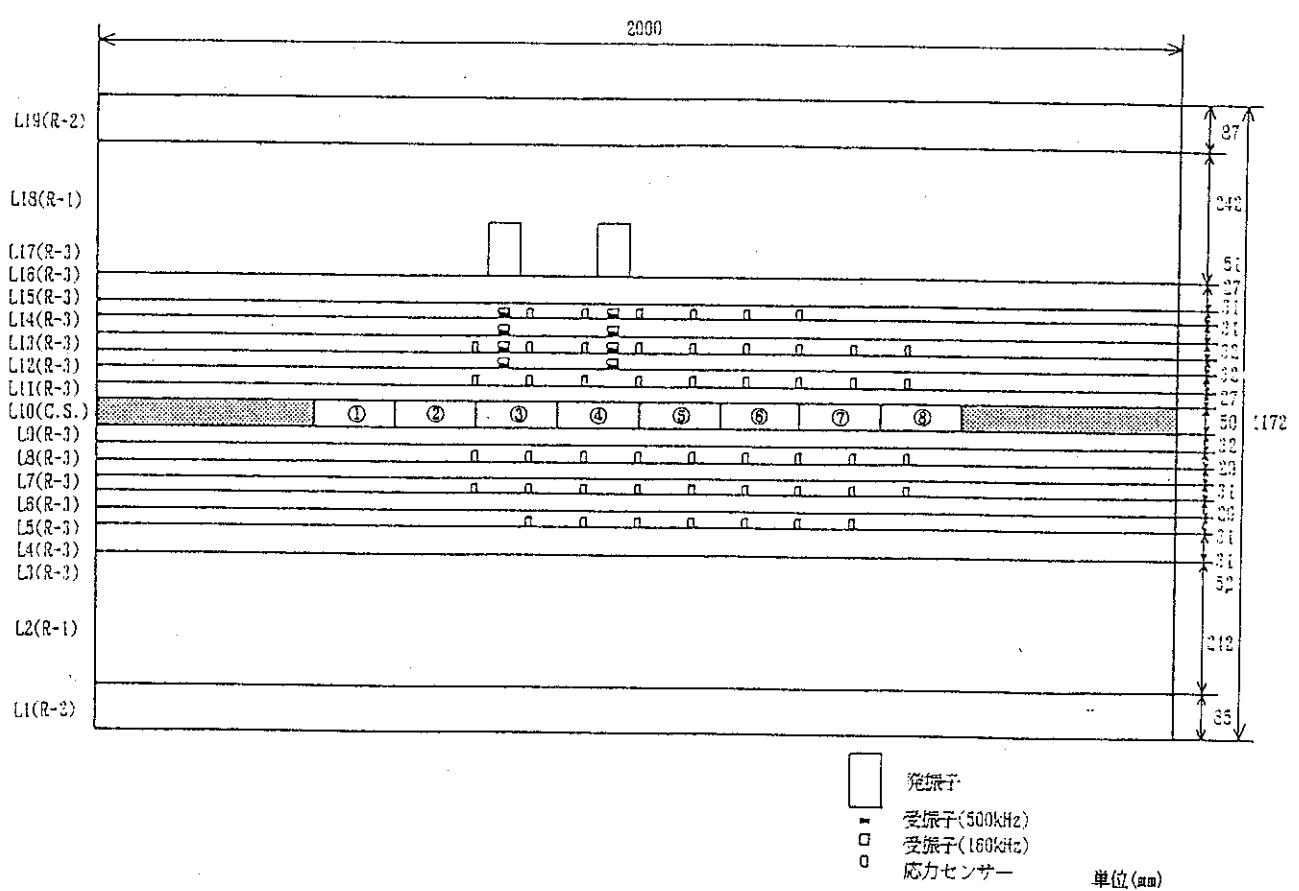
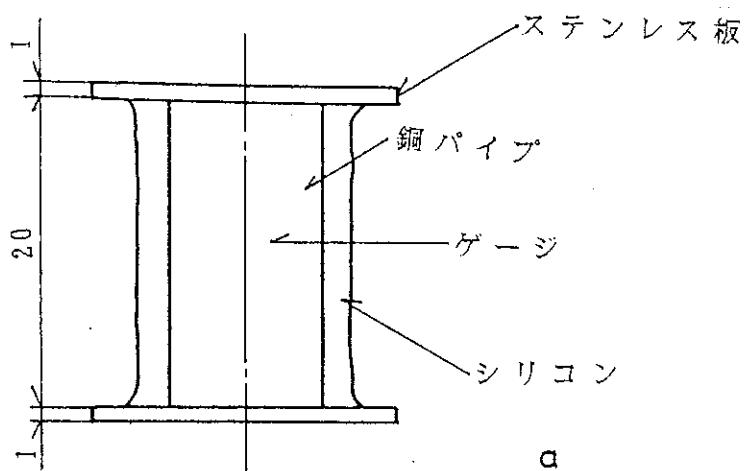
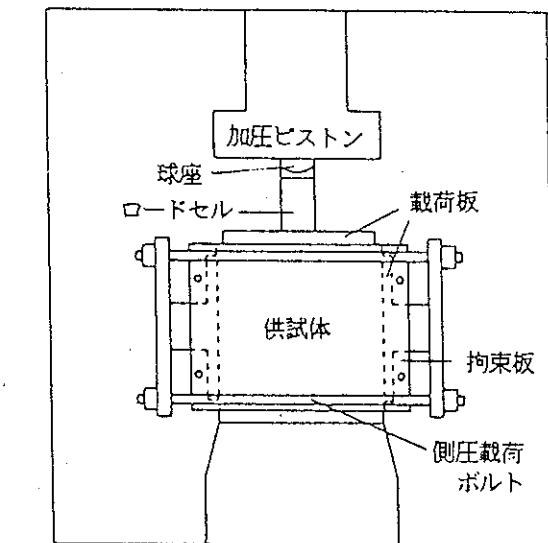
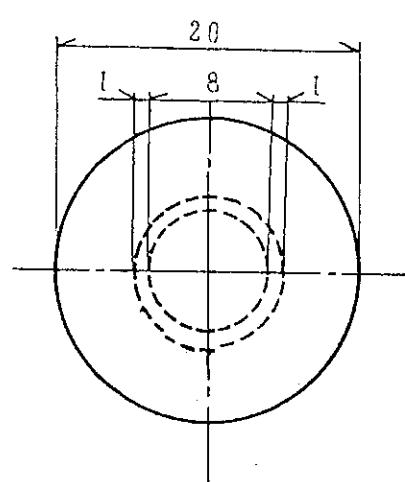


図 2. 4 模型 P M T - 1 3 の地質構造。センサーの埋設位置も示されている。

サーボ制御圧縮試験器



( b )

図2.5 応力センサー (a) と、センサーの検定試験装置の模式  
図 (b)

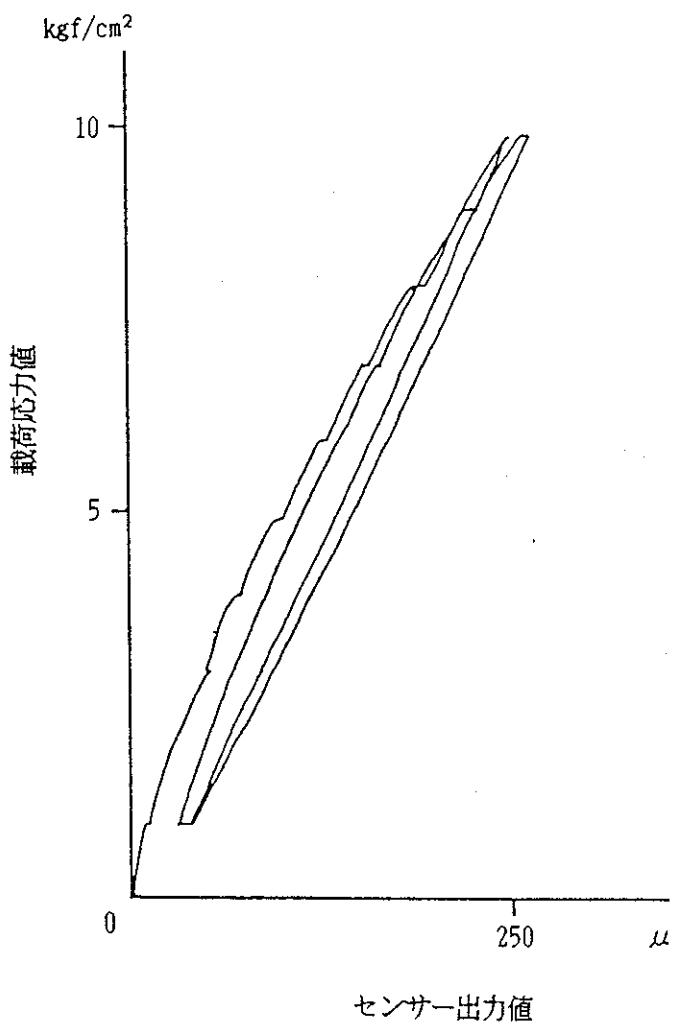


図2. 6 応力センサーの特性。図2. 5 ( b ) の試験装置を用いて得た。

### 第3章 縮尺地層模型試験の結果

PMT-11、12、13の3つの模型を用いて得られた結果を述べる。

#### 3. 1 PMT-11(図2. 2参照)の結果

掘削途中のステップで、掘削開始地点上方部に若干の亀裂が生じた。しかし、天盤の崩落は生じなかった。拘束板の中央部に配置された9枚の観察窓で撮影した写真を基に得た変位と掘削進行長(空洞幅)の関係を図3. 1に示す。下盤ではほとんど変位を生じていない。これに対して、天盤側ではある程度の大きさの沈降が起こっており、空洞の狭小化(おもに上下盤接近)は専ら天盤の沈下に起因していることを示している。空洞幅が拡大するにつれて、変位はほぼこの幅に比例して増大しており、変位-空洞幅の線図には変曲している所はみられない。したがって、掘削の過程で大規模な破壊は生じなかつたとみられる。

次に、空洞の拡大に伴う応力の変化を図3. 2に示す。センサー位置は図2. 2を参照されたい。S44センサーだけは他と異なる挙動を示している。これは本センサーをたまたま横向きに埋設してしまったためであることが、模型解体後に判明した。その他のセンサーは所定の向き、すなわち垂直に埋設されていた。

S44センサーを除くどのセンサーにおいても、掘削がセンサーの埋設されている測定断面を接近・通過するときの挙動は次のようになっていることが認められる。すなわち、断面に対して掘削面が接近するにつれ応力は増加するが、断面を通過する少し前から急激に減少する。この傾向は、空洞長が増大するにつれて顕著に現れた。

空洞下盤のL7層（図2.2参照）に沿った地圧分布を示したのが図3.3(a)である。例えば、ステップ2における分布をみると、応力のピークが空洞端の隣に現れている。このような応力分布の特徴は弾性モデルによる予想（同図b参照）とほぼ一致している。

PS41,11の2つのセンサーにより受感されたP波の波形の例を図3.4、5に示す。ただし合計8個の受振センサーの配置は次のようになっている（図2.2参照）。

模型の正面左側：上からPS42,32,22,12

模型の正面右側：上からPS41,31,21,11

図に示した結果を見ると、PS11のセンサーでは、ステップ4（測定断面を空洞先端が5cm通過している）のときに波形に明瞭な変化がみられ、この時点での最大振幅は40%ほど減少している。ステップ5（掘削長75cm、空洞先端は測定断面を20cm通過）、ステップ6（掘削長90cm、空洞先端は測定断面を35cm通過）と掘削が進むにつれ、波の減衰が進行している。

PS41のセンサーでは、ステップ5において波の立ち上がり部分の波形に変化が認められる。ステップ6で最大振幅が約50%減少するが、その後はあまり変化していない。

PS41,11の2つのセンサーは同一断面にあるが、PS11の方が空洞に近く、それだけ掘削の影響が早く現れていることがわかる。

掘削に伴う速度変化および最大振幅の変化をそれぞれ図3.6、7に示す。これを見ると、速度も振幅も掘削面が測定断面に接近するにつれて若干大きくなるが、掘削面の通過時に大きく減少し、その後はわずかずつ減少している傾向が認められる。P波の速度や振幅の増大は、掘削面の先端における応力集中の発生を意味し、また、その後に現れる速度の減少は、荷抜けやゆるみ域の発生に対応していると思われる。

空洞先端が測定断面から遠ざかっても依然としてP波速度が減少する現象は、受振センサー位置が模型の上部に位置する発振源から

離れている程、つまり空洞天盤により近い程、顕著に現れている。これは、空洞天盤では塑性域の拡大や層間の開口が空洞幅の拡大につれて起こっていることを示していると考えられる。

### 3. 2 P M T - 1 2 (図 2. 3 参照) の結果

模型左端から 10 cm の位置より掘削を開始し、1 ステップ 15 cm の掘削を 12 回繰り返し、合計 180 cm の掘削を行った。

掘削の進行に伴う空洞上下盤の変位と空洞の高さに関する推移の様子を図 3. 8 に示す。変位は拘束板の中央部に配列した 9 枚の観察窓から撮影した写真を基に得たものである。掘削開始からステップ 3 (空洞幅 45 cm) までは、ほとんど変形が起きておらず、ステップ 4 から変化が出始めている。空洞下盤の隆起はあまり起こらず、専ら、天盤の沈降が起こっている。

このような変位の挙動に関して、PMT-11 と異なる点は、ステップ 7 になると、天盤の沈下量に急激な増加がみられることがある。これは、天盤に緩み域の急激な成長があったことを示している。図 3. 9 は、空洞の拡大に伴う形状の変化を示したもので、ステップ 9 以降は空洞の大部分が閉塞していることがわかる。

ステップ 4 (60 cm) のときに、掘削開始点において、約 45 度右上方に向かう (つまり、空洞天盤に向かう) 龜裂が発生した。ステップ 7 (空洞幅 105 cm) になると、この亀裂はさらに発達し、また、下盤にも亀裂が発生した (写真 3. 1)。2 つの亀裂は空洞に対して互いにほぼ対称になっている。また、同じ掘削開始点 (空洞の左端) で側壁と天井に破壊が発生した。

ステップ 9 (145 cm) まで空洞が拡大すると、掘削開始点では破碎ずりで空洞がほぼ完全に埋め尽くされた (写真 3. 2)。また、これに隣接した所では上下盤の接近が進行し、空洞はほぼ完全に閉塞した (写真 3. 3)。ステップ 12 (空洞幅 180 cm) の掘削途

中で天盤全体の沈下が起り、 打跡がほぼ完全に閉鎖したので、 掘削作業を終了した。

掘削に伴う応力値の変化を図3. 10に示す。PMT11における結果と同様に、空洞端がセンサーの埋設断面に近づくにつれて応力値が増大する傾向が認められる。空洞端がセンサー埋設断面の約10センチ手前に達したときに応力は最大値を示し、初期地圧の1.5～5倍の大きさになった。掘削の進行に伴う応力の増加率に着目すると、センサーの位置が空洞に近い程、大きくなっている。

空洞端が測定断面に接近・通過するとき急激な応力低下が起きる。その後の空洞の拡大について、空洞の下盤側のセンサーの応力値は0近くに収束する。これに対して、上盤側のセンサーの応力値はマイナスとなり、初期地圧よりも小さな応力状態が実現される。

掘削の進行に伴う応力の挙動に関してPMT11の場合と異なる点は、空洞端が測定断面を通過した後、応力値が若干増加することである。これは空洞の閉鎖とともに発生しており、空洞の上下盤が接触し、実際に応力が発生する程度に崩落ずりの圧密が起こったことを意味する。

P波の受振波形の一例を図3. 11、12に示す。センサーの配置についてはPMT11と同様である。PS11とPS41のセンサーには、図に示すように、ともにステップ4（空洞幅60cm、空洞端からセンサー埋設断面までの距離5cm）までは大きな変化がみられない。

しかし、ステップ5（掘削長75cm、空洞端は測定断面を10cmだけ通過）になると、波は急激に減衰する。また波形は凹凸がなくなり、滑らかになる。その後、波は著しく減衰し、ついには計測不能な状態になる。センサーPS11はステップ7、センサーPS41はステップ8で波が消えている。空洞に近いセンサーPS11よりも、離れているセンサーPS41の方が遅れて波が消えたことは、空洞縁から発達した緩みが次第に拡大したことを見している。

しかし、ステップ12（空洞幅180cm、空洞端は測定断面を1

15 cm通過)になると、消えた波が再び現れていることが注目される。この現象は先に述べた地圧の増加に対応するもので、波を伝搬できる程度に層間の開口や緩みが小さくなつたことを意味する。

切羽進行に伴うP波の速度変化および最大振幅変化のグラフをそれぞれ図3. 13、14に示す。これを見ると、速度も振幅も、空洞端がセンサーの埋設断面に接近すると若干大きくなり、掘削面の通過時に大きく減少し、その後は滑らかな減少傾向に転じていることがわかる。P波の速度・振幅の若干の増大は、空洞端における応力集中の発生を意味し、減少は応力解放に対応していると思われる。掘削面が通過した後もP波速度が減少する現象は、発振源・受振センサー間の距離が大きいもの、つまり受振センサーが空洞により近いものに顕著に現れている。このためこの現象は、空洞の天盤で塑性域が成長していたり、あるいは層間剥離が進展していることを示していると考えられる。

### 3. 3 P M T - 1 3 (図2. 4参照) の結果

空洞上下盤の変位と空洞幅の関係を図3. 15に示す。変位は、拘束板の中央に配置された9枚の観察窓から撮影した写真に基づいて求めたものである。上盤と下盤の変形はあまり大きくない。しかし、空洞の高さは、ステップ6(空洞幅90cm)から著しく減少し始め、ステップの進行とともに空洞の狭小化が進行している。これは天盤層で顕著な層間剥離が発生したことを意味する。PMT 1 1、1 2の結果と比較して、顕著な相違といえる。

掘削の早いステップから層間剥離が起こっているのは、本模型における層間の引張強度が小さいためである(2. 1節参照)。

ステップ8(空洞幅120cm)における空洞周囲の様子を写真3. 4～6に示す。空洞掘削の進行している右端では、これに隣接する空洞天盤で層間剥離が起り、このため空洞の天盤は空洞側に向い

小さな曲率でたわんでいる。また、天盤には斜め左上に向かう複数の亀裂が認められる（写真3. 6）。空洞右端の隣の空洞部分では、著しい層間剥離が認められる。直接天盤層は下に向かって折れ曲がり、このため空洞はほぼ完全に閉塞している（写真3. 5）。これよりも左（つまり空洞の中央寄り）では、天盤が一様な沈下を起こしているため、直接天盤における層間の開口量はむしろ小さい。空洞はもちろん閉塞状態になっている（写真3. 4）。

応力変化と掘削過程の関係を図3. 16に示す。全体的な傾向はPMT11、12の結果と同様で、掘削面がセンサーに近づくにつれ、応力値が増大している。掘削面がセンサーの埋設断面を通過する約10センチ手前で応力は最大値に達し、初期地圧の1.5～2.0倍の大きさになる。この増大量はPMT12の結果と比較して小さい。

次に、P波の計測結果であるが、前2者の計測結果と比較して、層を跨いで受振された波は概して振幅が小さくなっている傾向が認められる。受振子には共振周波数が500kHzおよび160kHzのものが使用されたが、ともに減衰率が大きかった。例として、PS41の500kHzの波形と160kHzの波形をそれぞれ図3. 17、18に示す。これらはともにステップ4（空洞幅60cm）以降、P波の速度と振幅が減少し、波形に変化が生じている。ステップ7（空洞幅105cm）以降はほとんど計測不能になっている。

図3. 19は空洞拡大に伴うP波速度の変化を示したものである。全体的な傾向は前2回の実験結果とほぼ同様である。切羽進行に伴うP波の最大振幅の変化の例を、図3. 20（センサーの共振周波数500kHz）、図3. 21（センサーの共振周波数160kHz）に示す。ともに同様の傾向を示しているが、160kHzの方が絶対値が大きく、また、掘削面の通過に伴う減少の割合が大きい。

### 3. 4 有限要素法による数値計算結果との比較

模型試験結果を検討する一助として、モデルPMT11を対象に、8節点アイソバラメトリック2次元弾性要素を用いた有限要素法による数値計算を実行し、模型試験と計算の両者を比較した。解析は、ステップ2、4、6に対して実行した。

計算で得た各ステップにおける変形の様子を、模型試験結果と比較したところ、空洞の拡大に伴う変位の増加傾向は互いに類似していることがわかった。

次に、計算で得られた応力分布の一例を図3. 3 (b) に示す。これは、L7 (L11) の水準（図2. 2参照）における応力分布で、対応する模型試験の結果は同図(a) に示されている。応力分布に関する主な特徴は両者で類似していることがわかる。模型内の応力状態は、破壊域が大きくなれば、弾性モデルに基づく予想にほぼ従うようである。

### 3. 5 FFTによる波形解析とその解釈

空洞の拡大に伴って現れるP波挙動に関する注目すべき変化として、速度変化、最大振幅変化、波形の変化の他に、卓越周波数などの周波数特性の変化を挙げることができる。

一般に、材料内部の破壊が進み亀裂が多くなると、P波などの弾性波は伝搬しにくくなり、波の減衰が著しくなる。この傾向は、高周波成分ほど顕著にみられる。逆にいえば、高周波成分の波が伝達しなくなると、その媒質部分で破壊などの現象が生じていると判断できる。したがって、波の周波数特性を解析するFFT（高速フーリエ変換）から、有用な情報を得ることができるので、その検討を行なった。

一例として、PMT-12の模型に関し、センサーPS-32で受感された波形を取り上げ、空洞端がセンサーの埋設断面を通過する前後、つまりステップ4、5について、FFT解析を行った。

解析に際しては、漏れ（Leakage）と呼ばれるノイズを除くために、波の最初の1周期分だけを取り出し、これに対してFFTを行った。その結果を図3.22に示す。ステップ4、5の結果を比較すると、ステップ4で見られる25kHz付近のピークと40kHz付近のピークが、ともにステップ5ではなくなっていることがわかる。

他の測点においても、ステップ4から5への進行に伴い、波の減衰が大きくなり、特に高周波成分（25kHz、40kHz付近）は完全に消滅することがわかった。これは、空洞端が測定断面を通過した後、地圧が解放され、天盤層に緩みが生じたためであろう。

また、PS-12のセンサーで受感された波は、他のものと比較して全体的に振幅が小さく、高周波成分が少なかった。波の減衰が著しかったわけであるが、これは伝達距離が長く、それだけ多くの層間面を伝搬しているためであろう。

写真 3. 1



写真 3. 2

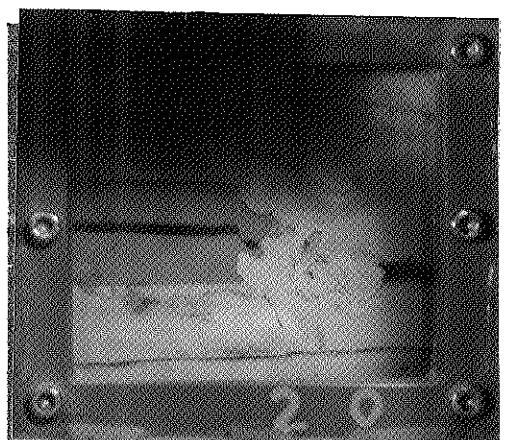


写真 3. 3

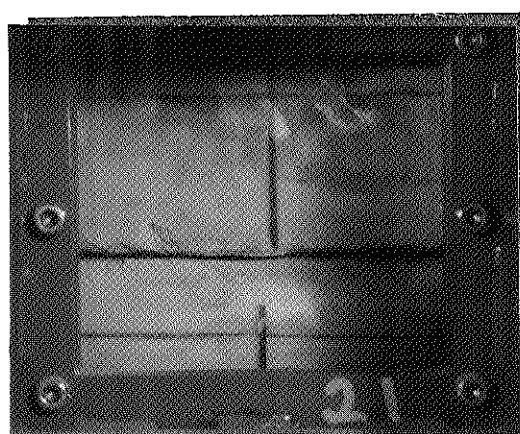


写真 3. 1 はステップ 7、写真 3. 2、3 はステップ 9 のとき撮影。  
撮影した場所については赤い数字で示されている窓の番号（図 2.  
1 参照）を参照されたい。模型は P M T - 1 2

写真 3. 4

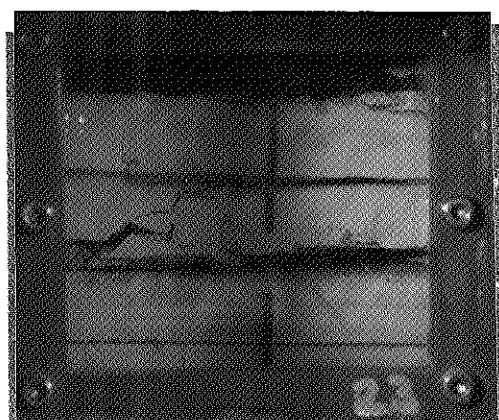


写真 3. 5

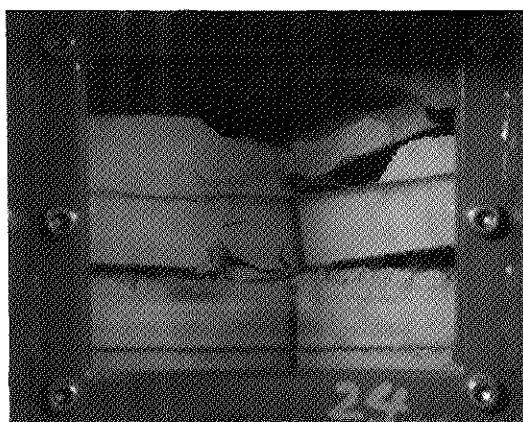


写真 3. 6



写真はすべてステップ8のとき撮影。撮影した場所については赤い数字で示されている窓の番号（図2. 1参照）を参照されたい。模型はP M T - 1 3

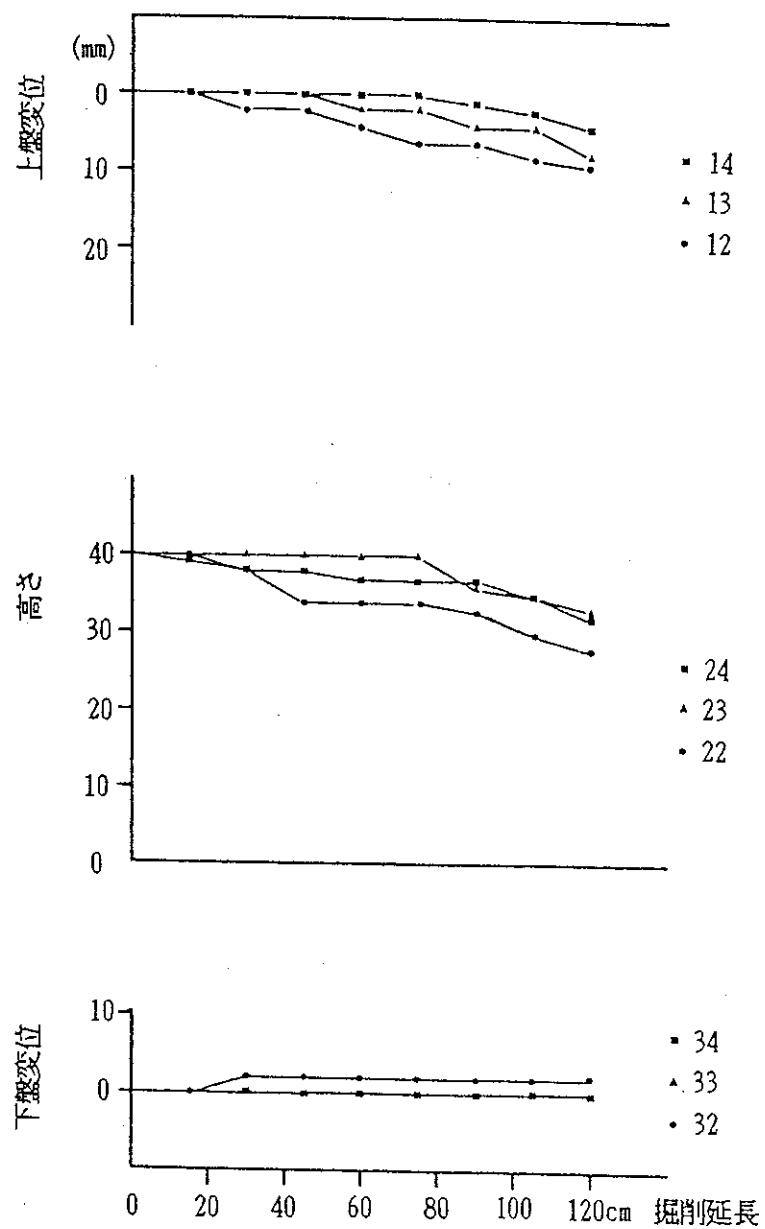


図 3. 1 空洞幅の拡大に伴う上下盤の変位（上、下）および空洞の高さの変化（中央）。模型は P M T - 1 1

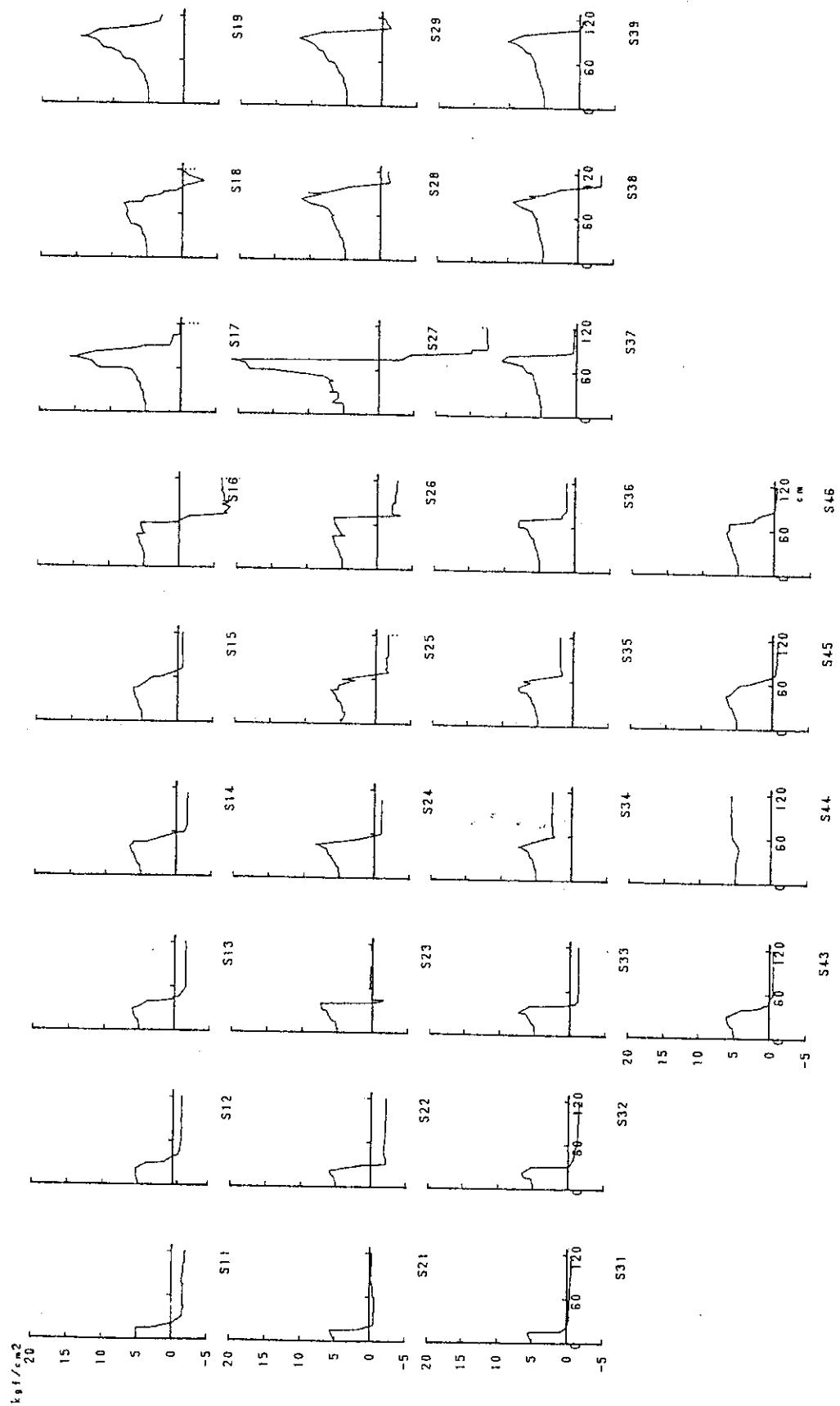


図 3. 2 空洞幅の拡大に伴う地圧の変化。センサーの位置については図 2. 2 を参照されたい。模型は P M T - 1 1

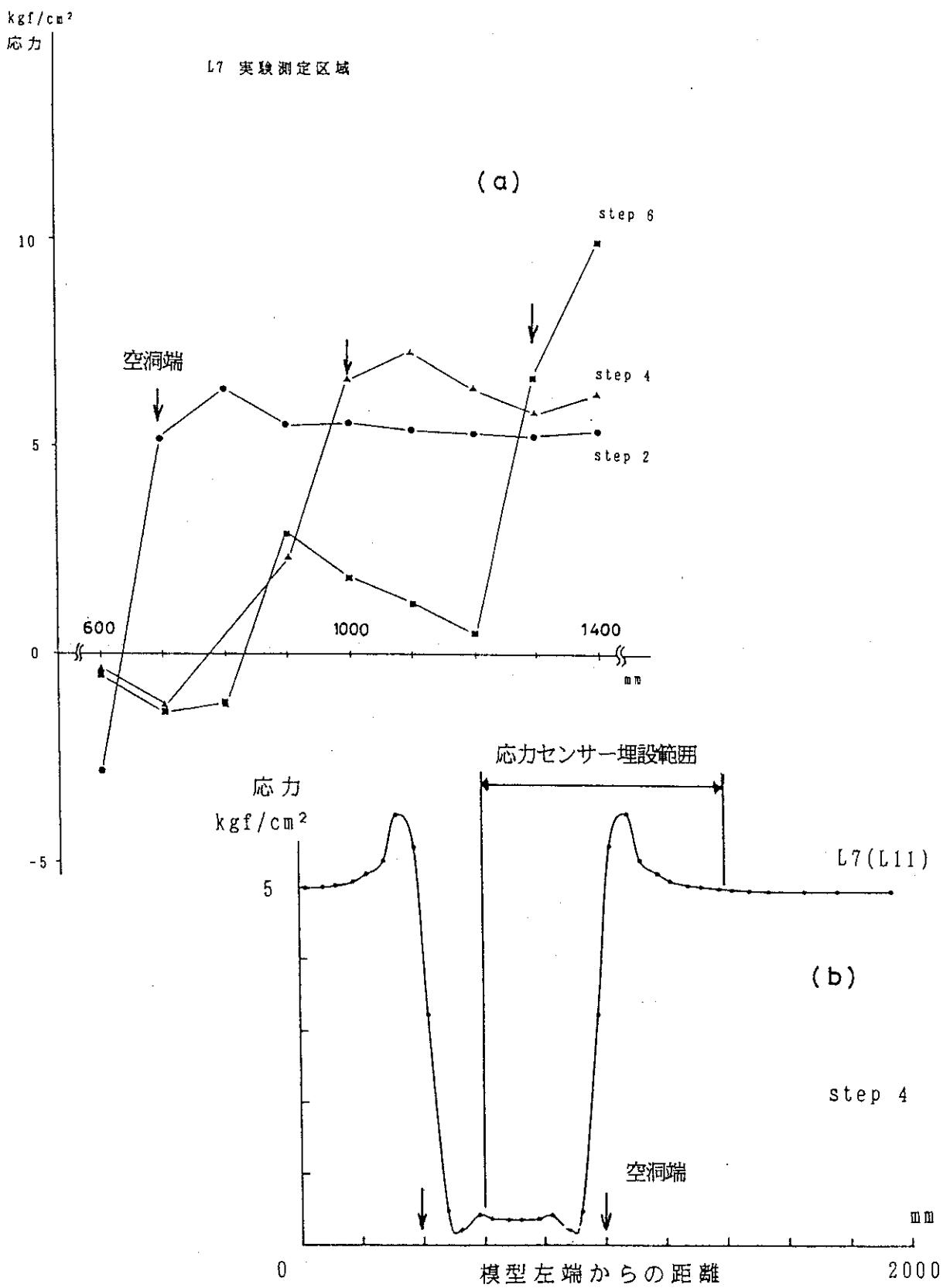


図 3. 3 空洞下盤 L7 層の地圧分布に関する測定値 (a) と有限要素法による予想値 (b)。模型は P M T - 1 1

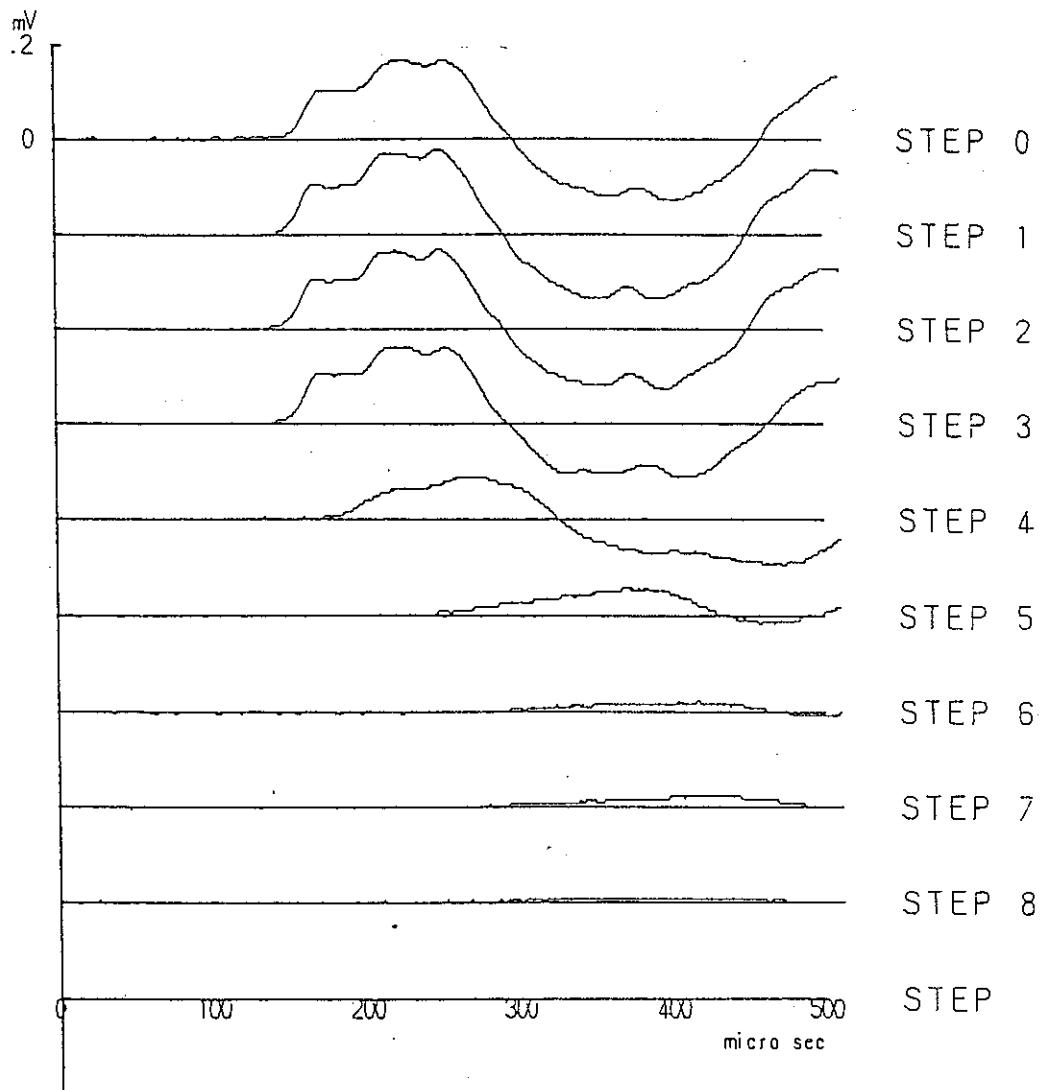


図 3. 4 空洞幅の拡大に伴う P 波の変化。センサーは PS - 11  
でその位置については本文を参照されたい。模型は PM  
T - 11

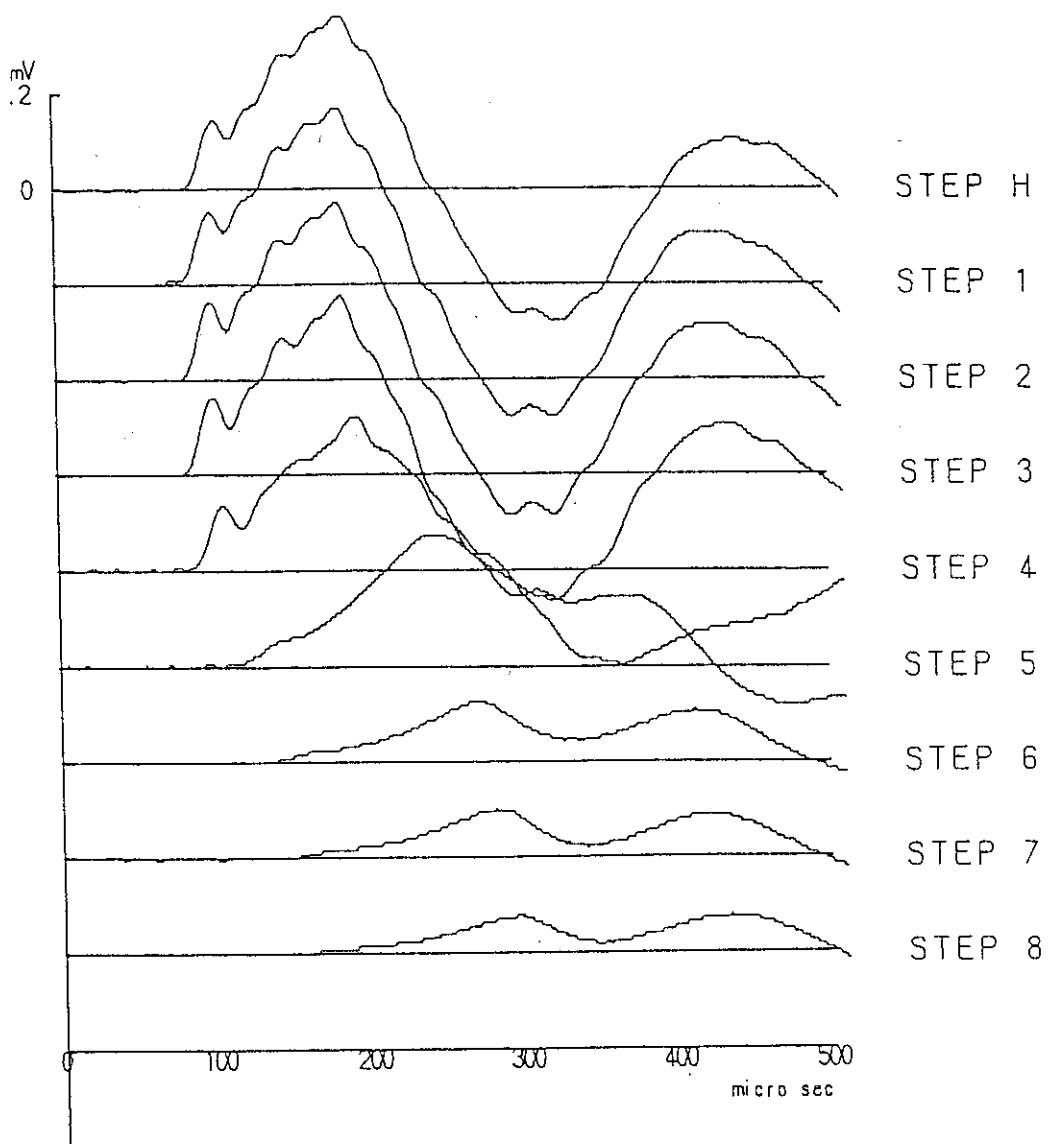


図 3. 5 空洞幅の拡大に伴う P 波の変化。センサーは PS - 4 1  
でその位置については本文を参照されたい。模型は PM  
T - 1 1

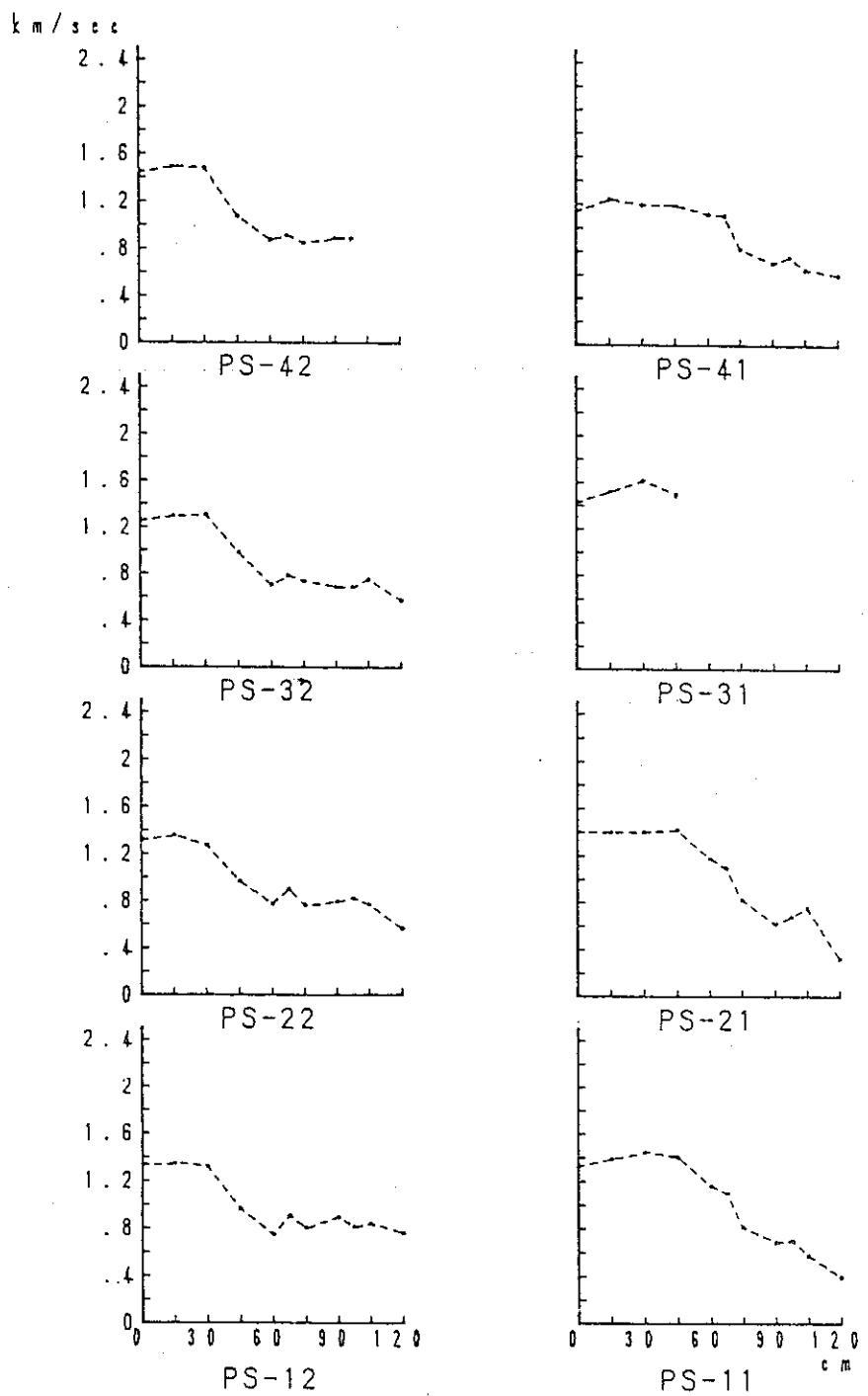


図3.6 空洞幅の拡大に伴うP波速度の変化。センサーの位置については本文を参照されたい。グラフの縦軸はP波速度、横軸は空洞幅を取っている。模型はPMT-11

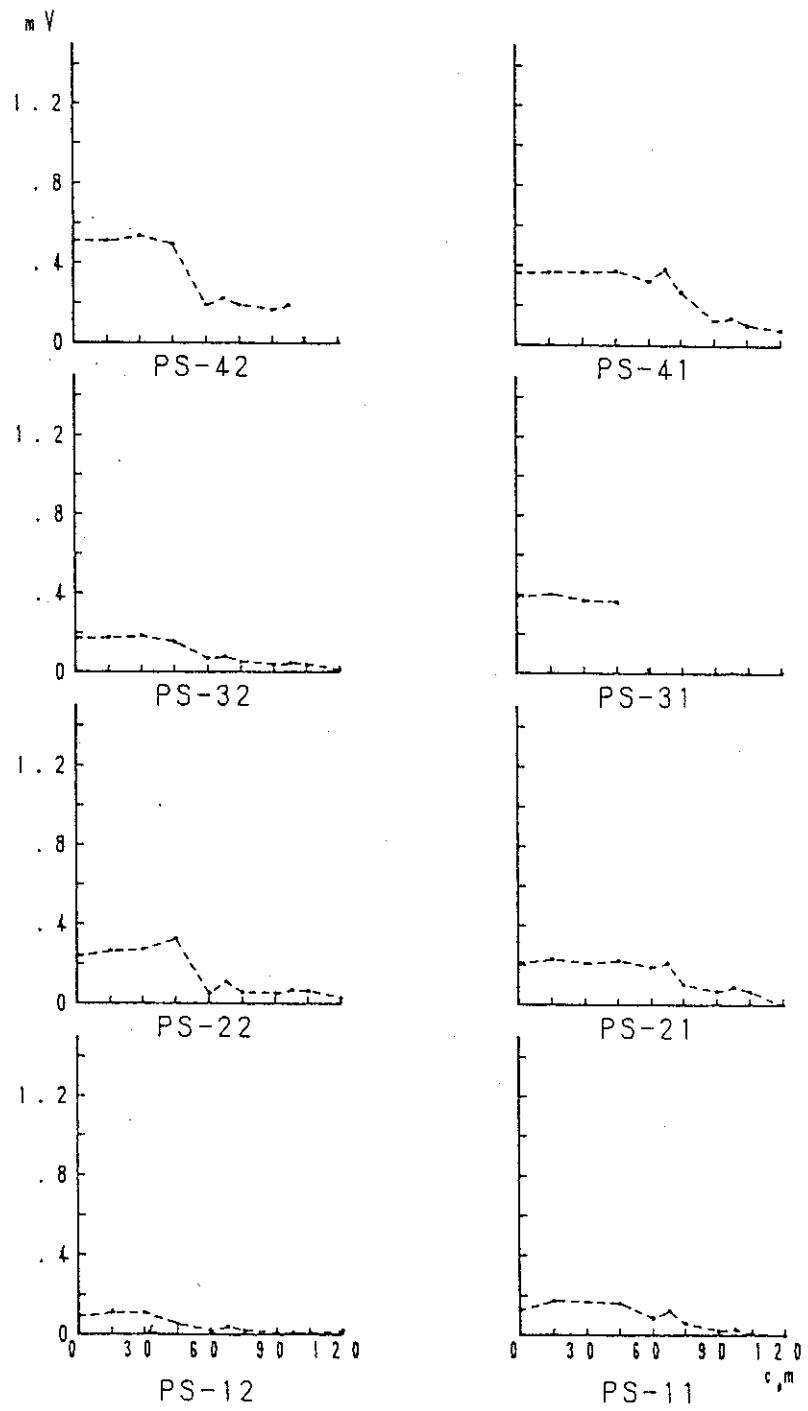


図 3. 7 空洞幅の拡大に伴う P 波速度の最大振幅の変化。センサーの位置については本文を参照されたい。グラフの縦軸は P 波速度、横軸は空洞幅を取っている。模型は P M T  
- 1 1

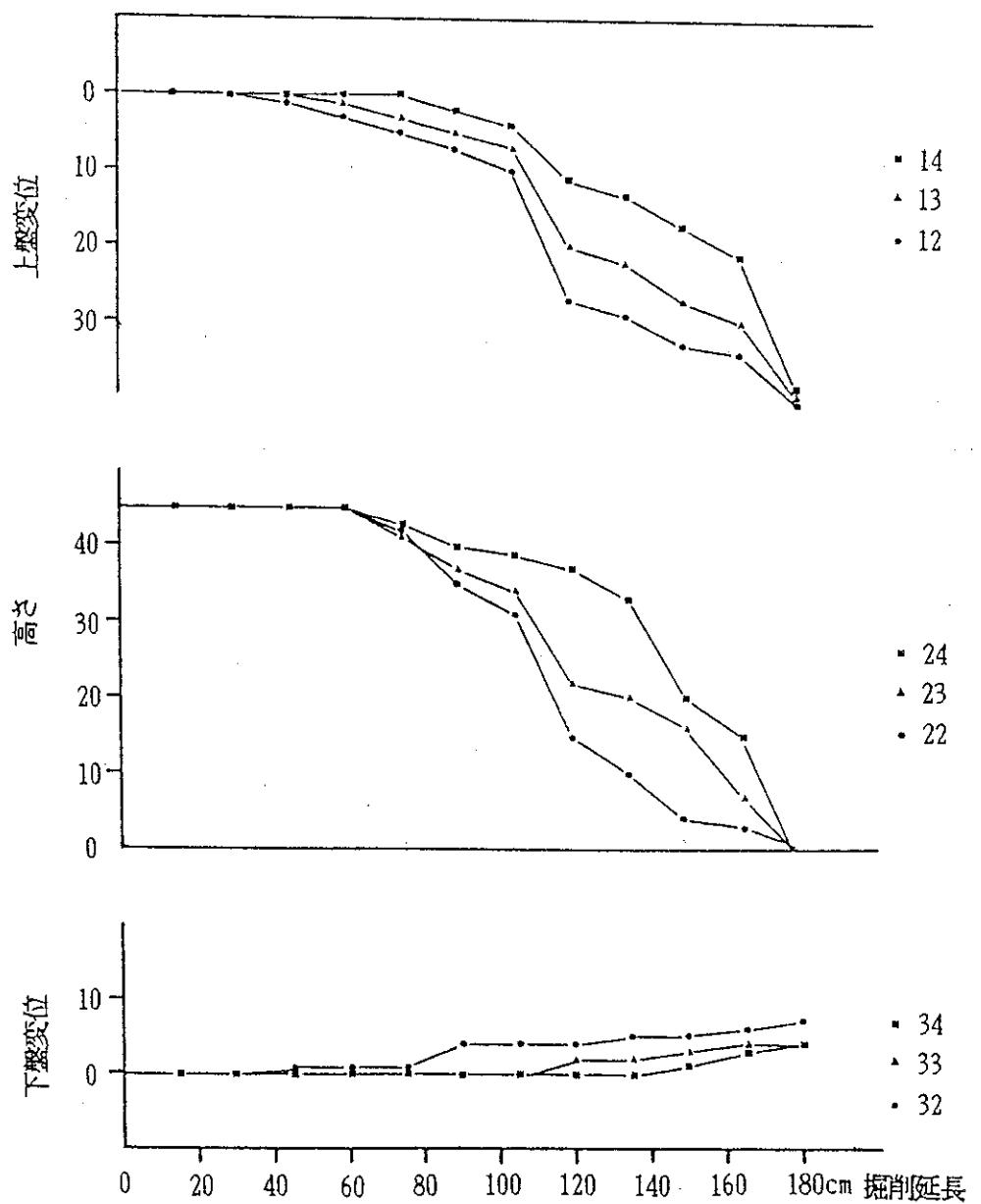


図 3. 8 空洞幅の拡大に伴う上下盤の変位（上、下）および空洞の高さの変化（中央）。模型は P M T - 1 2

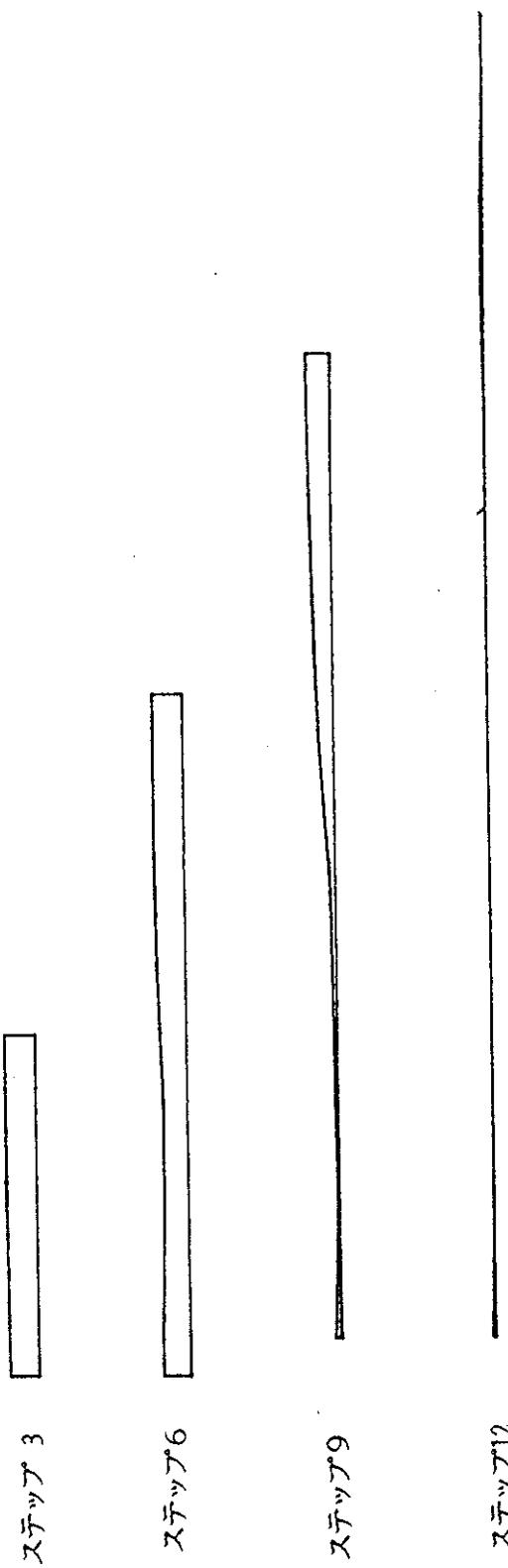


図 3. 9 空洞幅の拡大に伴う空洞の変形。模型は P M T - 1 2

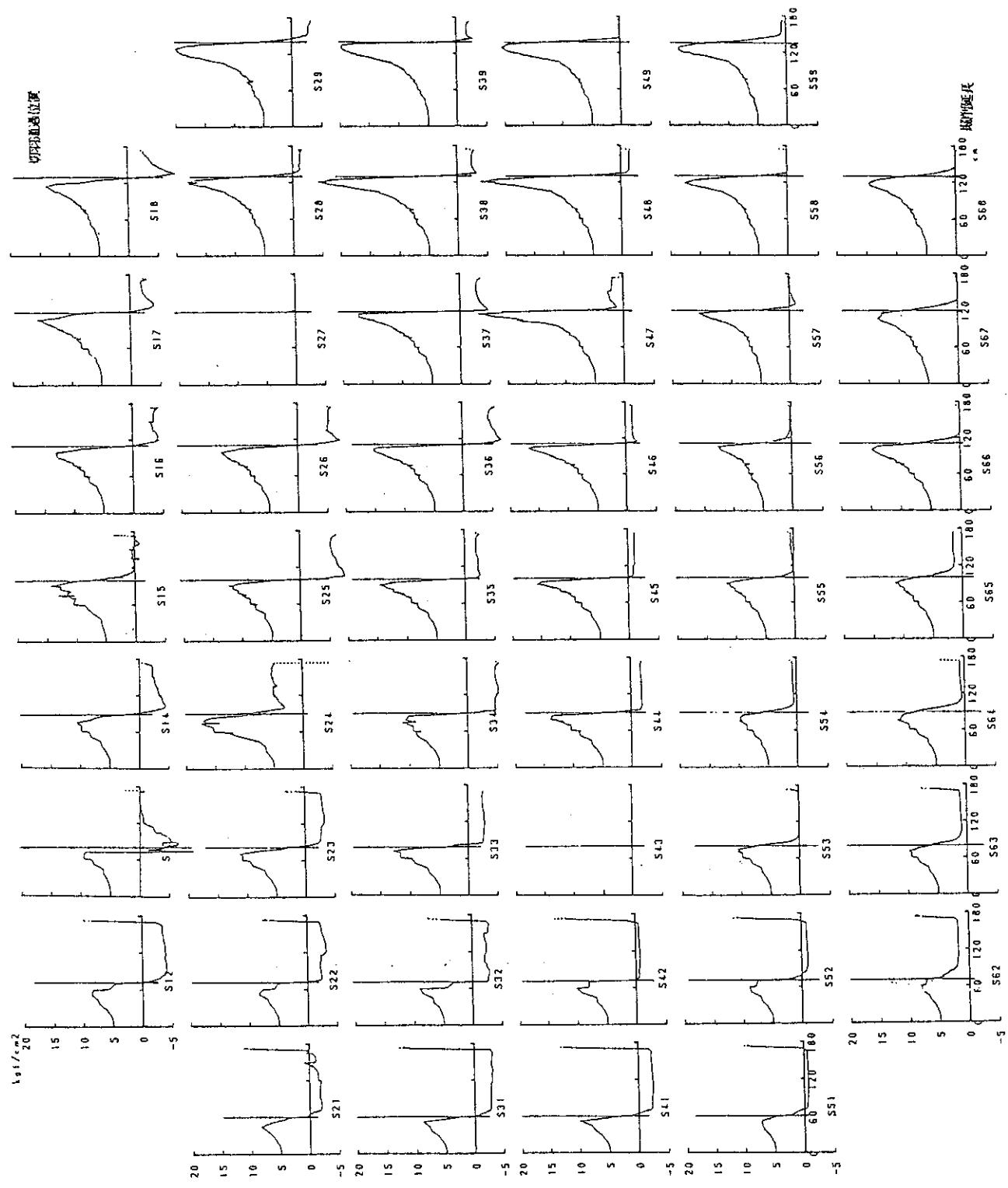


図 3. 10 空洞幅の拡大に伴う地圧の変化。センサーの位置については図 2. 3 を参照されたい。模型は P M T - 1 2

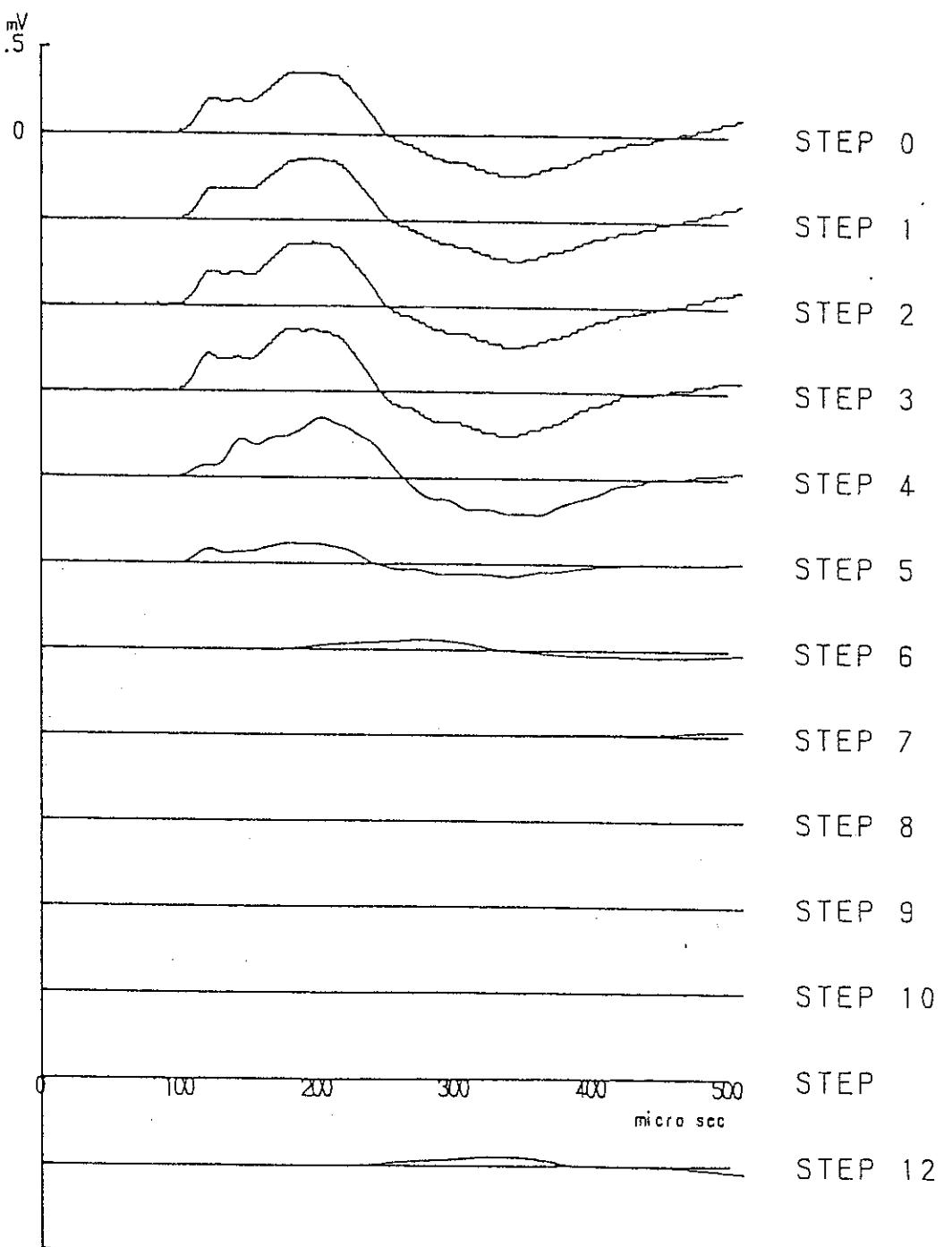


図 3. 11 空洞幅の拡大に伴う P 波の変化。センサーは P S - 1  
1 でその位置については本文を参照されたい。模型は  
P M T - 1 2

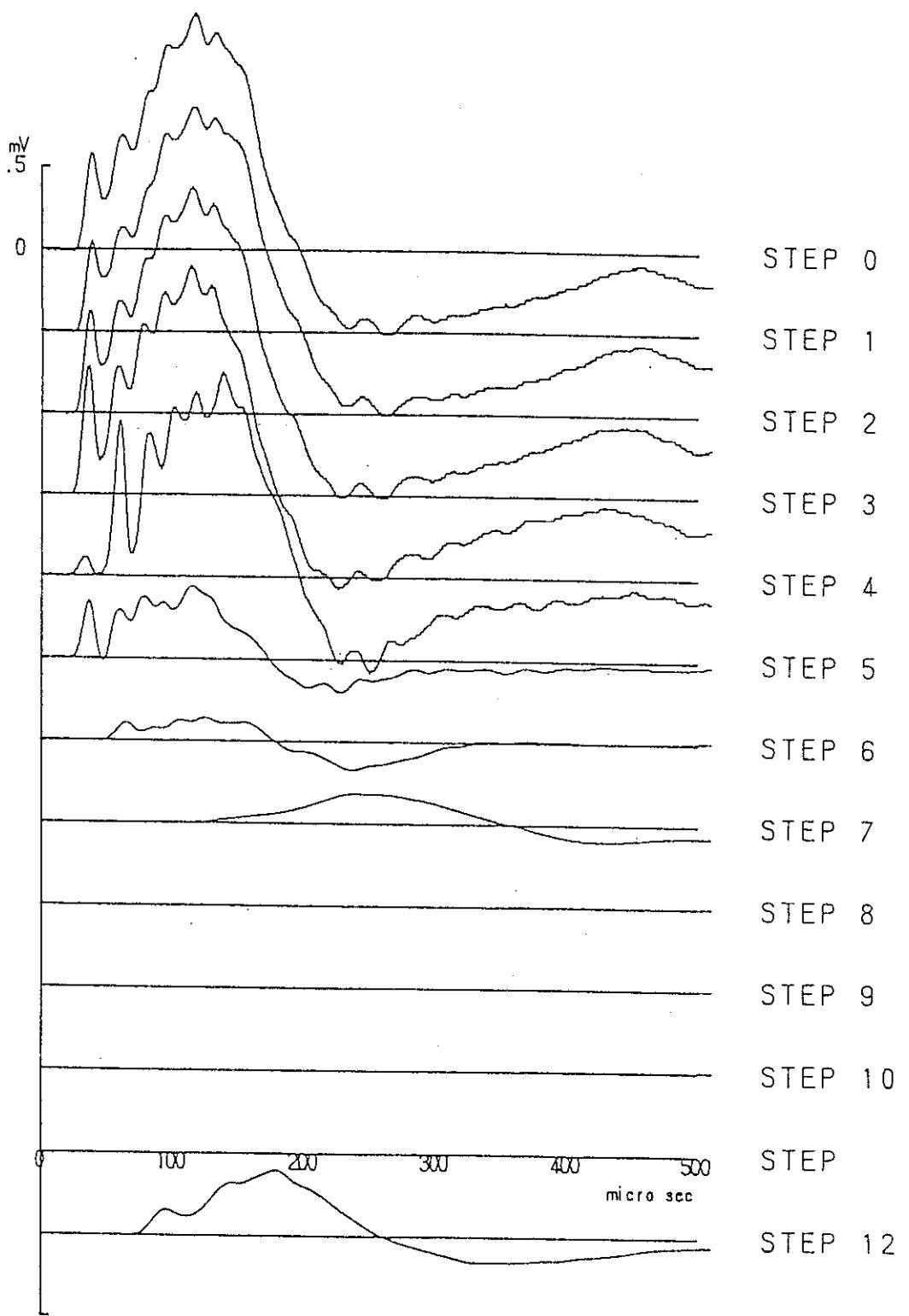


図 3. 12 空洞幅の拡大に伴う P 波の変化。センサーは P S - 4  
1 でその位置については本文を参照されたい。模型は  
P M T - 1 2

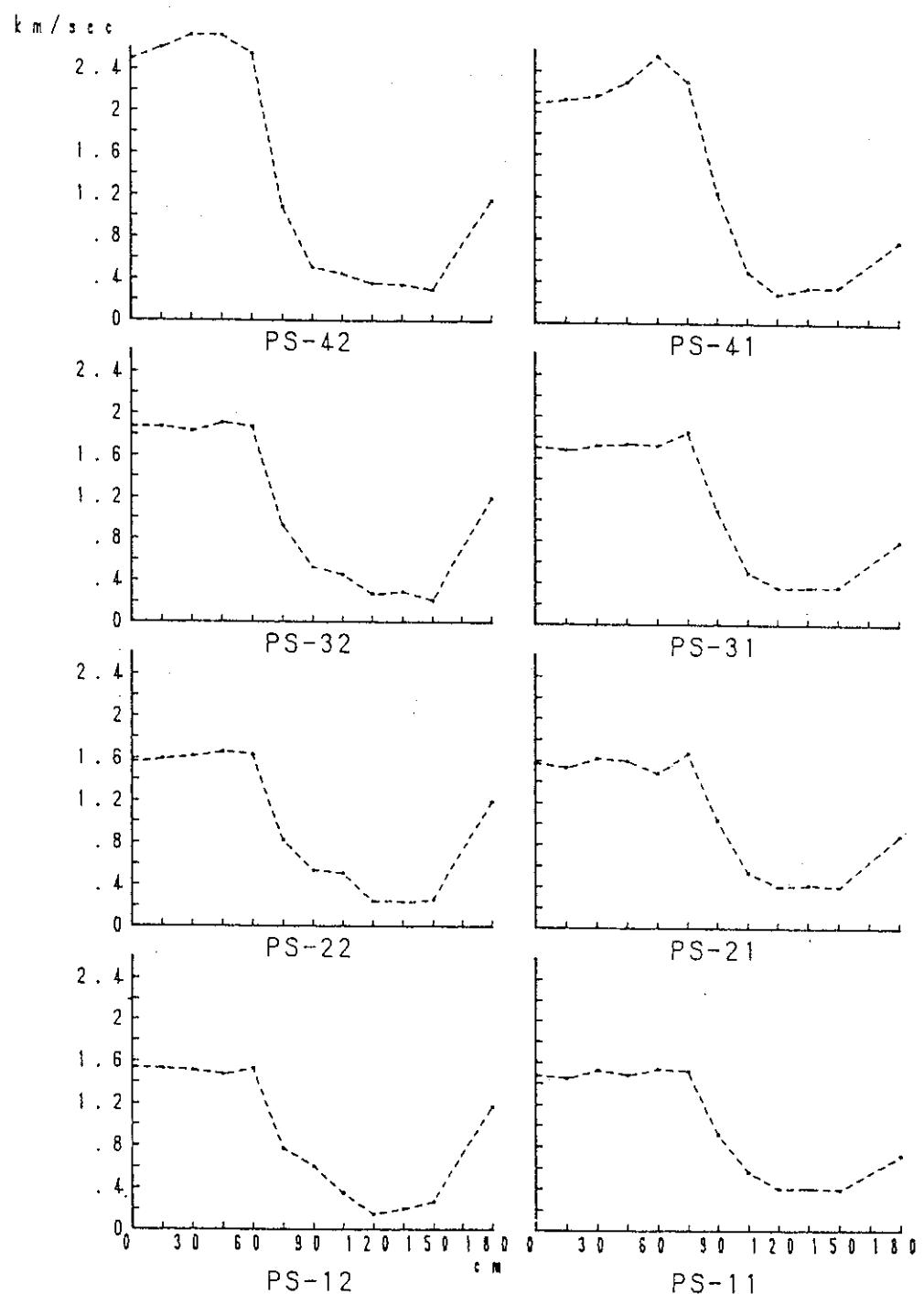


図 3. 13 空洞幅の拡大に伴う P 波速度の変化。センサーの位置については本文を参照されたい。グラフの縦軸は P 波速度、横軸は空洞幅を取っている。模型は P M T - 1  
2

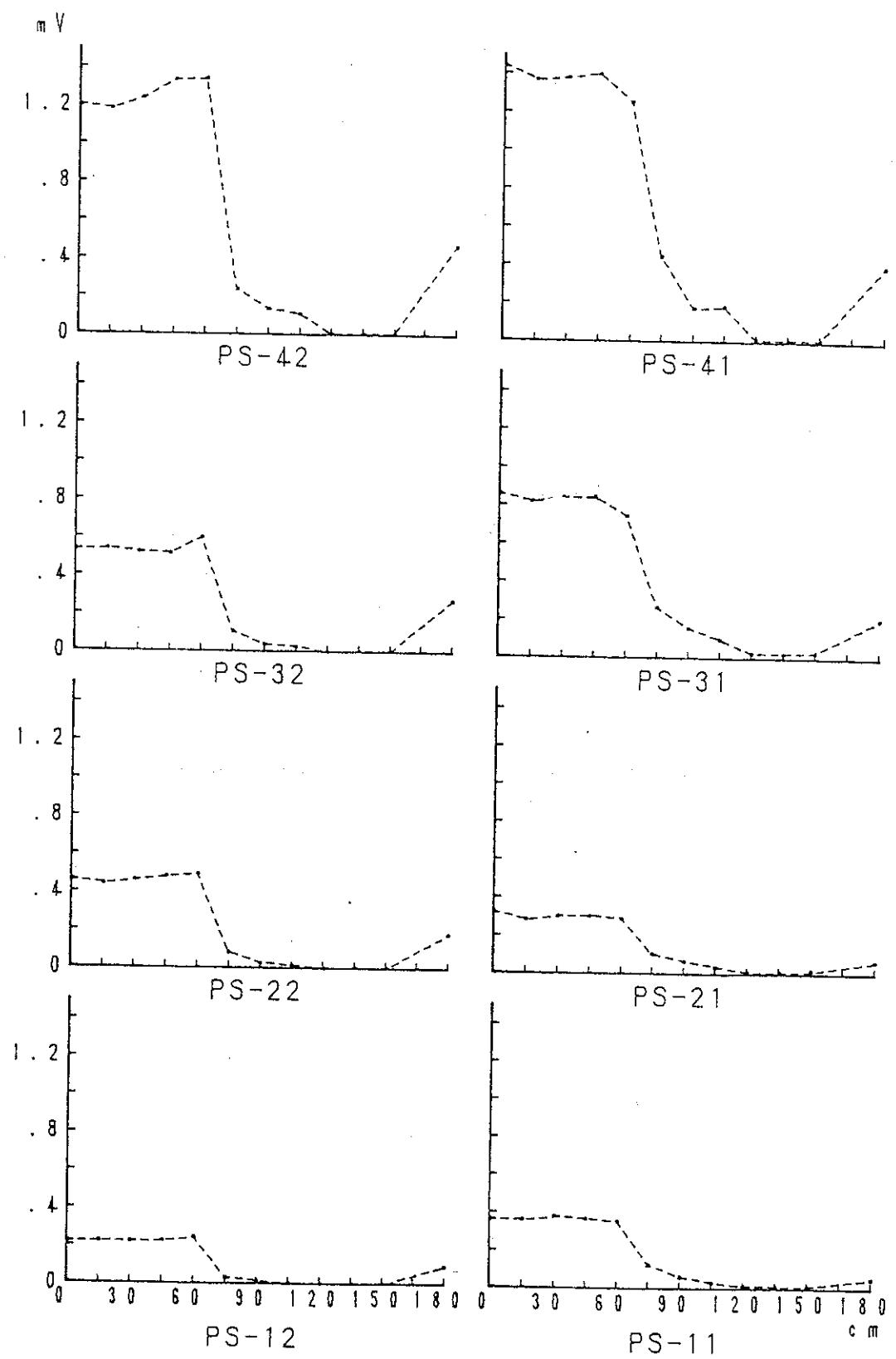


図 3. 14 空洞幅の拡大に伴う P 波速度の最大振幅の変化。センサーの位置については本文を参照されたい。グラフの縦軸は P 波速度、横軸は空洞幅を取っている。模型は P M T - 1 2

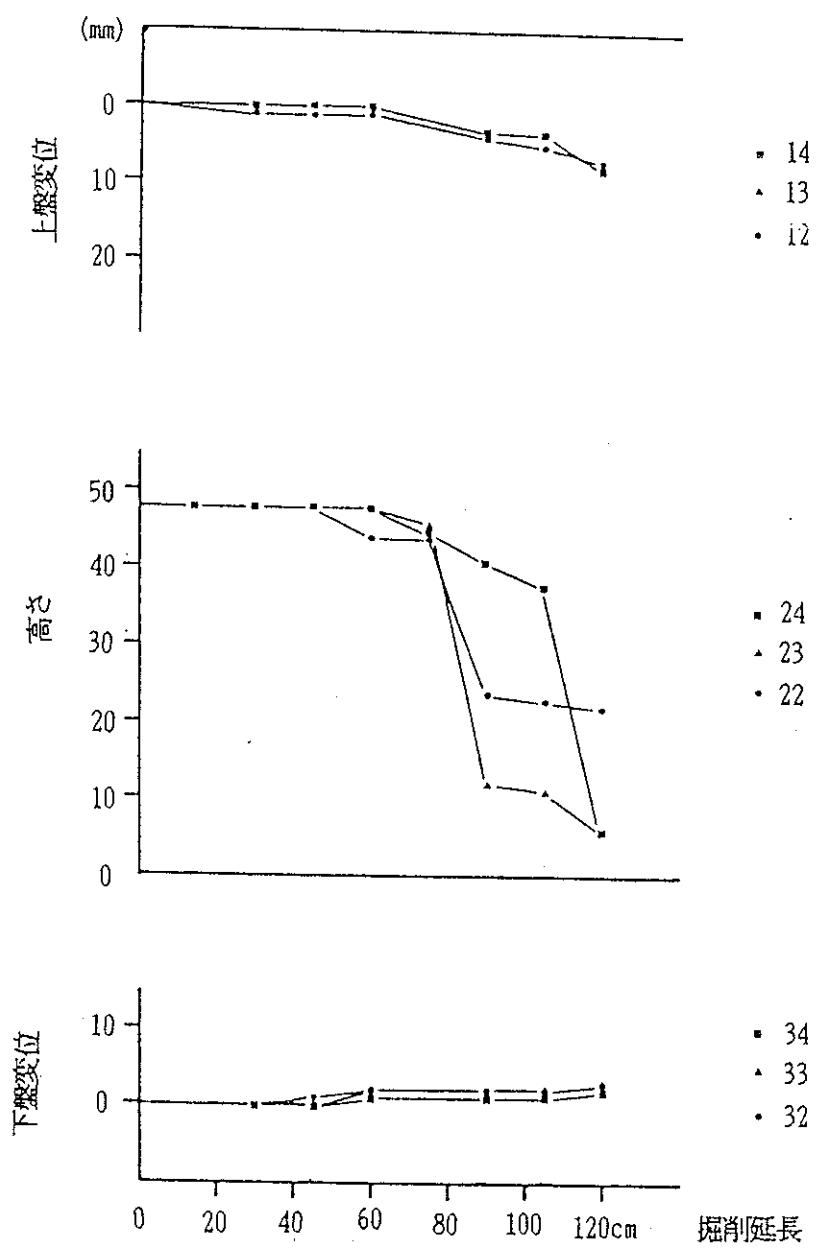


図 3. 15 空洞幅の拡大に伴う上下盤の変位（上、下）および空洞の高さの変化（中央）。模型は P M T - 1 3

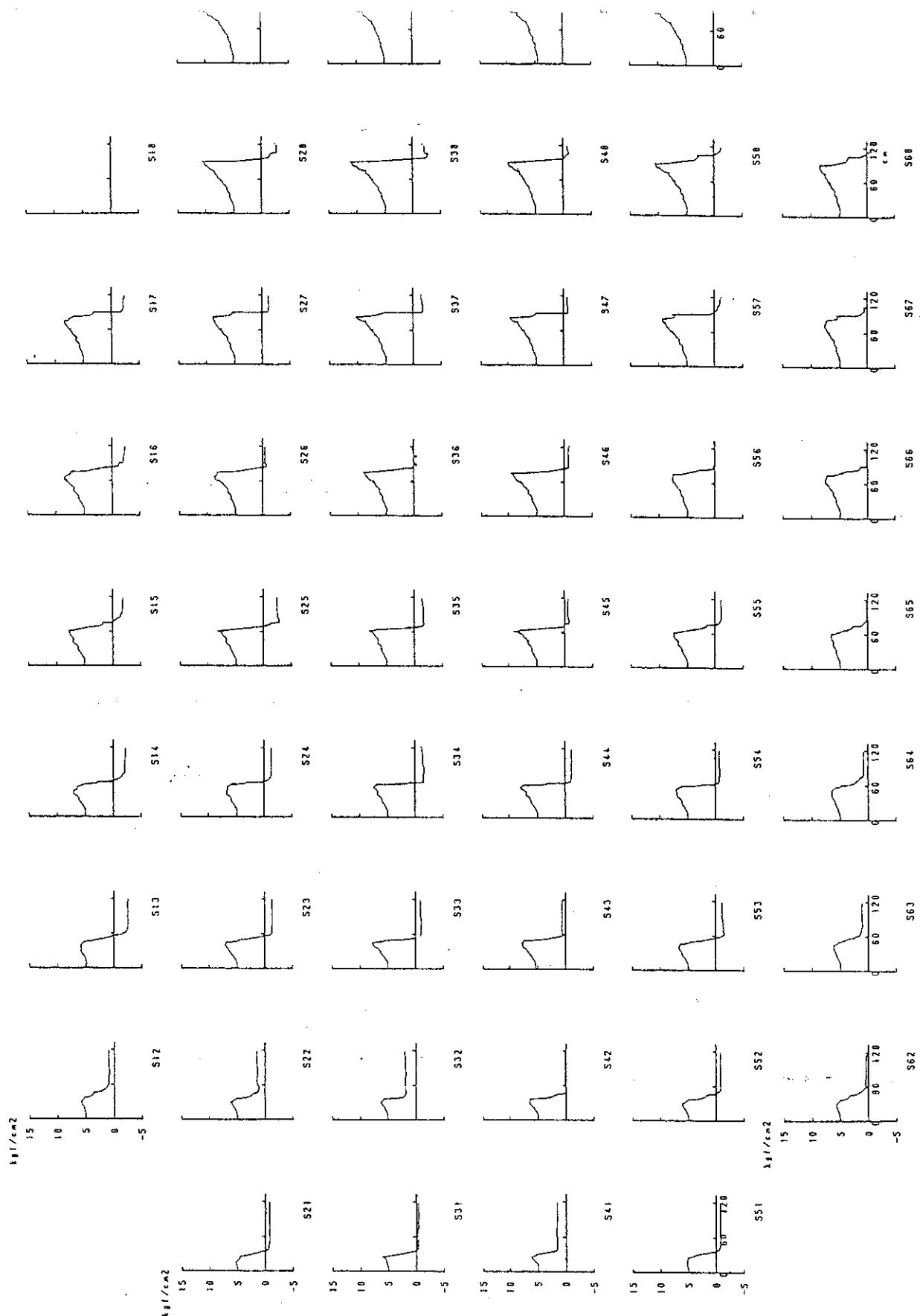


図 3. 1 6 空洞幅の拡大に伴う地圧の変化。センサーの位置については図 2. 4 を参照されたい。模型は P M T - 1 3

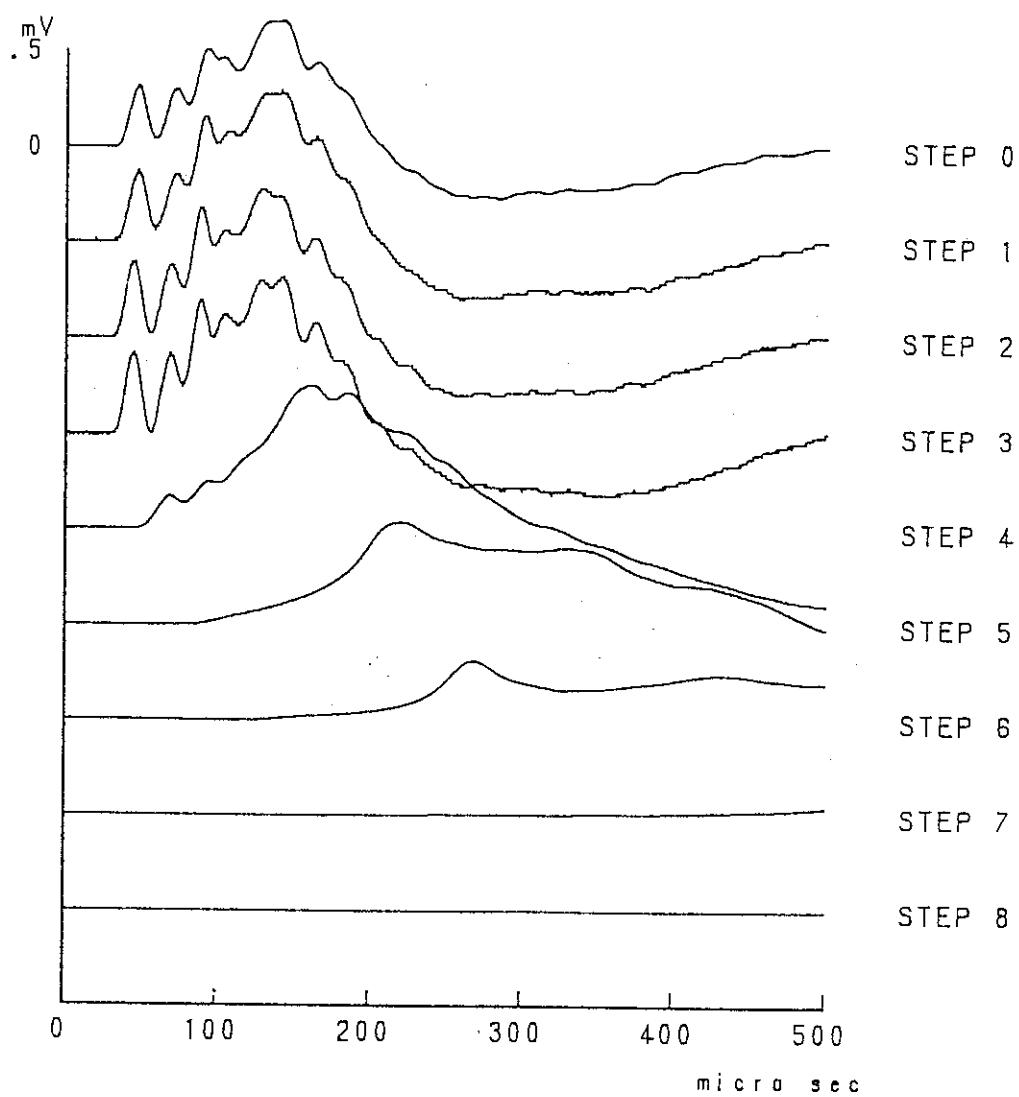


図 3. 17 空洞幅の拡大に伴う P 波の変化。センサーは P S - 4  
1 で共振周波数は 500 kHz。センサーの位置につ  
いては本文を参照されたい。模型は P M T - 1 3

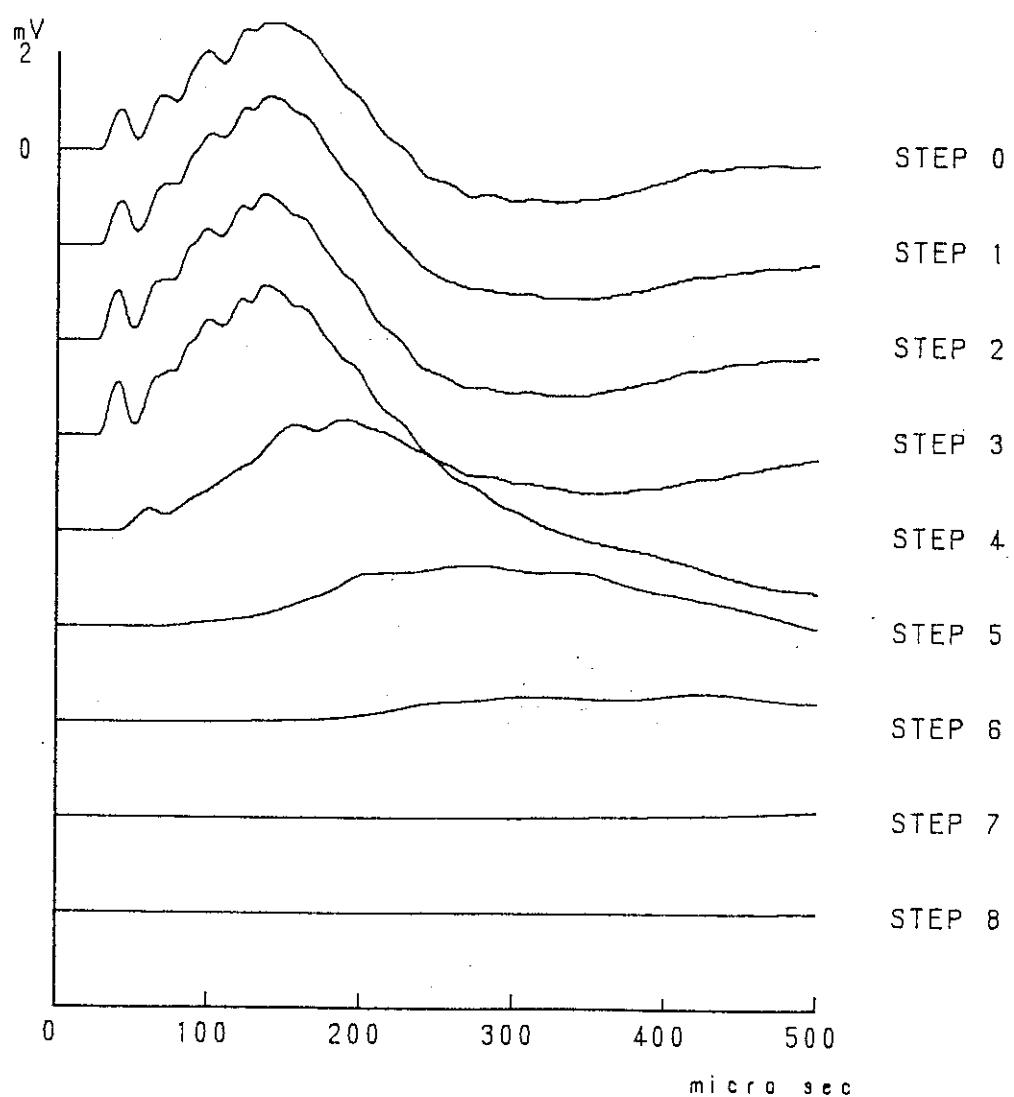


図 3. 18 空洞幅の拡大に伴う P 波の変化。センサーは P S - 4  
1 で共振周波数は 1 6 0 k H z。センサーの位置につ  
いては本文を参照されたい。模型は P M T - 1 3

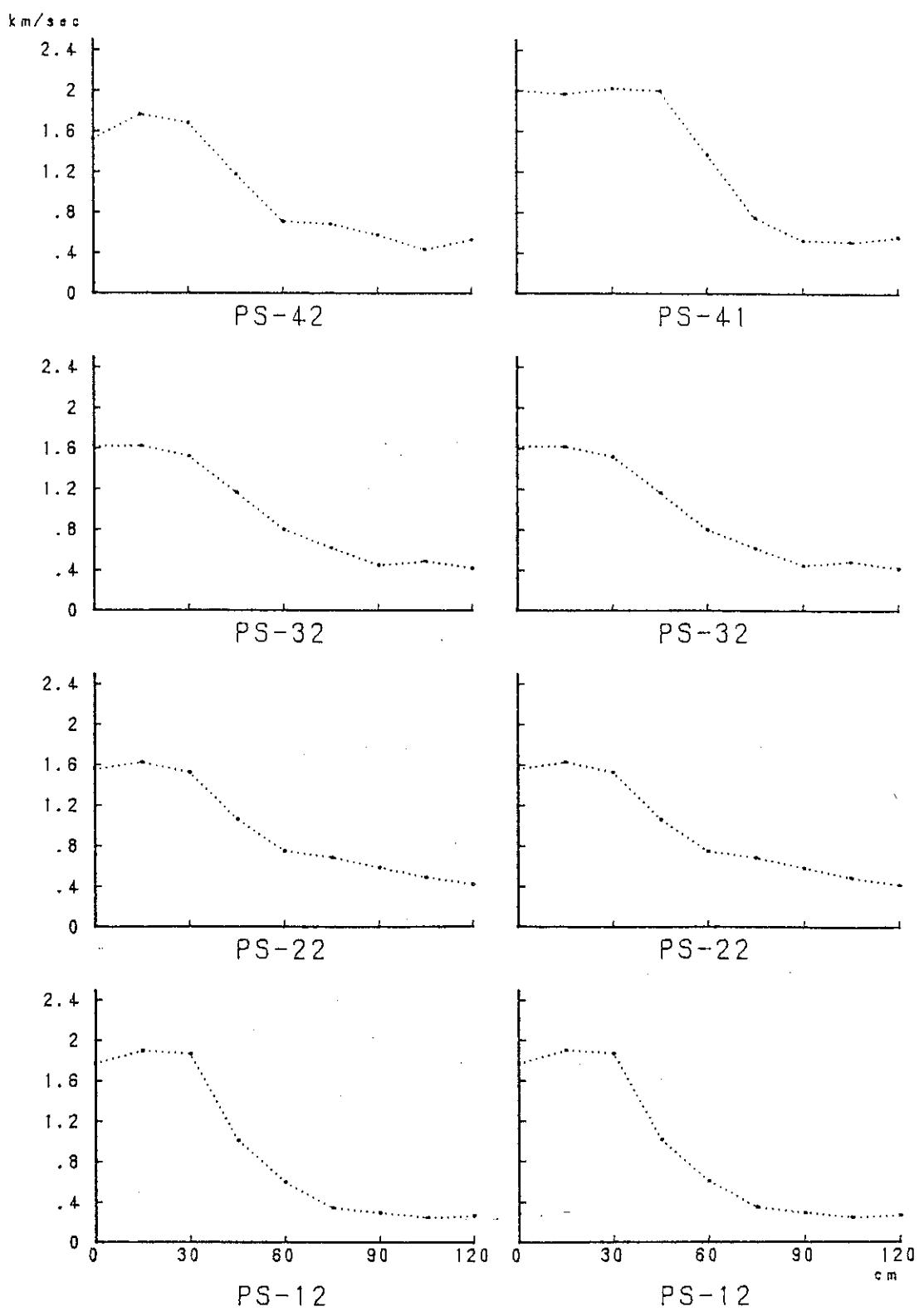


図 3. 19 空洞幅の拡大に伴う P 波速度の変化。センサーの位置については本文を参照されたい。グラフの縦軸は P 波速度、横軸は空洞幅を取っている。模型は P M T - 1  
3

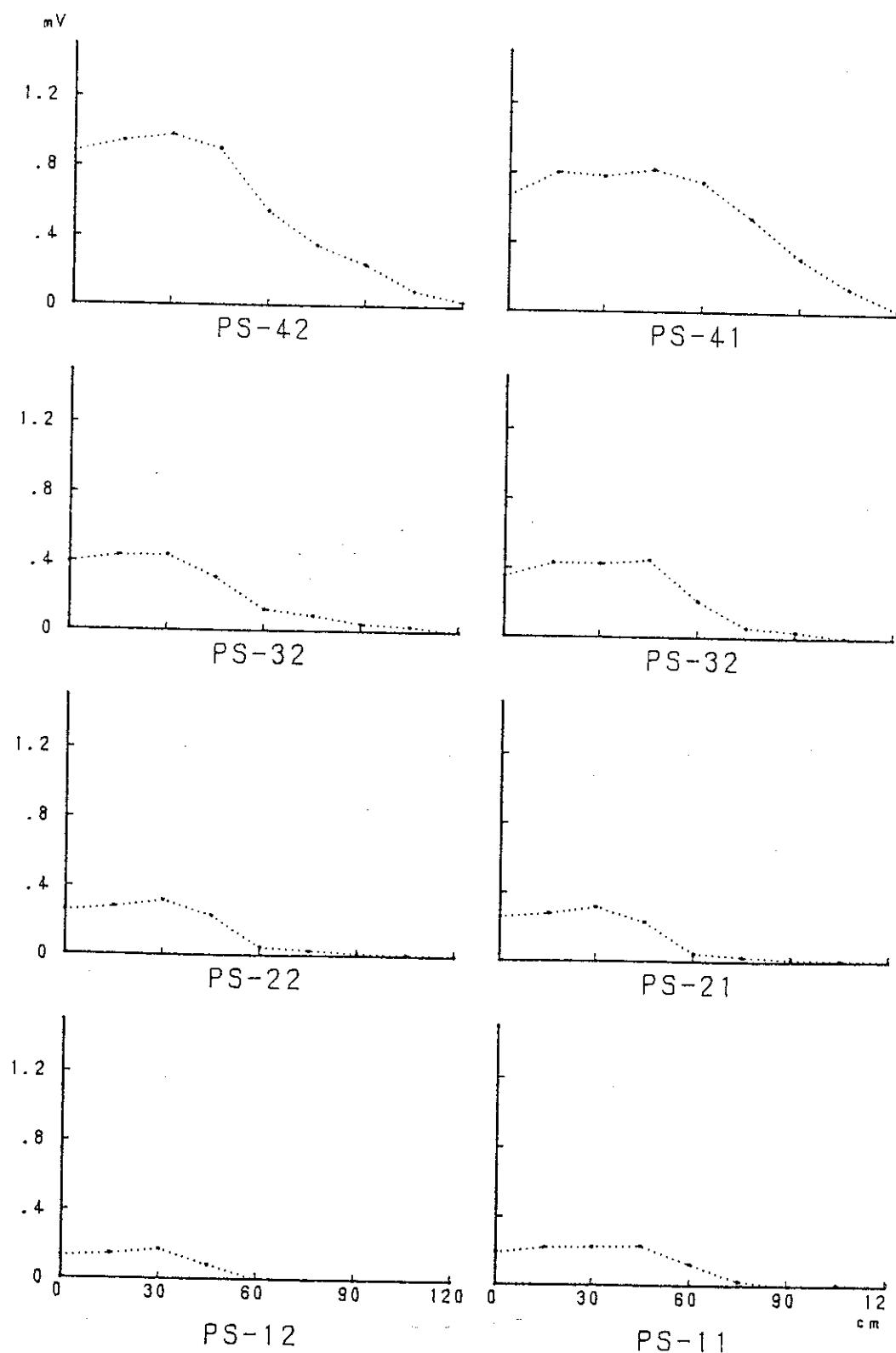


図 3. 20 空洞幅の拡大に伴う P 波速度の最大振幅の変化 (センサーの共振周波数 500 kHz)。センサーの位置については本文を参照されたい。グラフの縦軸は P 波速度、横軸は空洞幅を取っている。模型は P M T - 1 3

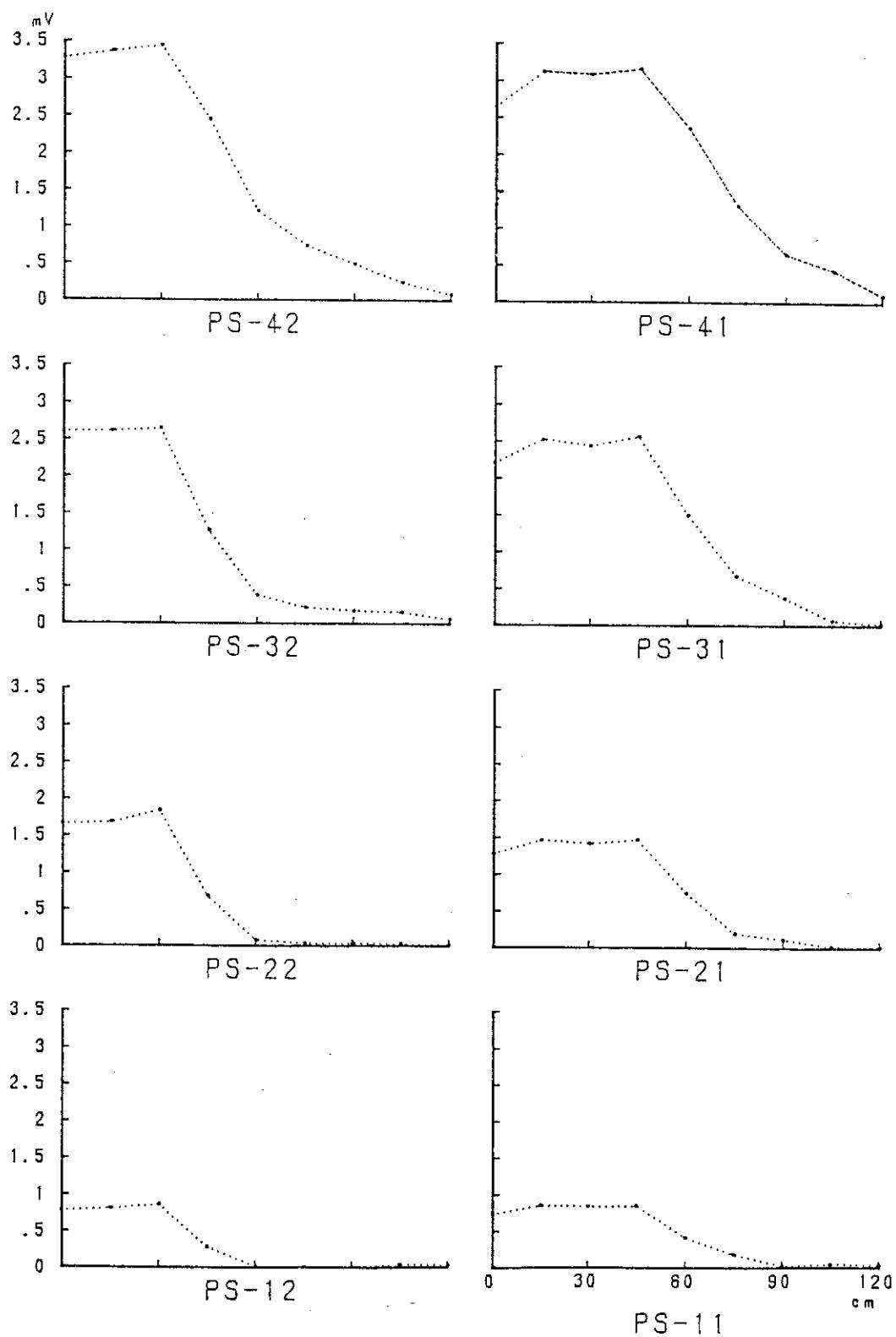


図 3. 21 空洞幅の拡大に伴う P 波速度の最大振幅の変化 (センサーの共振周波数 1 6 0 kHz)。センサーの位置については本文を参照されたい。グラフの縦軸は P 波速度、横軸は空洞幅を取っている。模型は P M T - 1 3

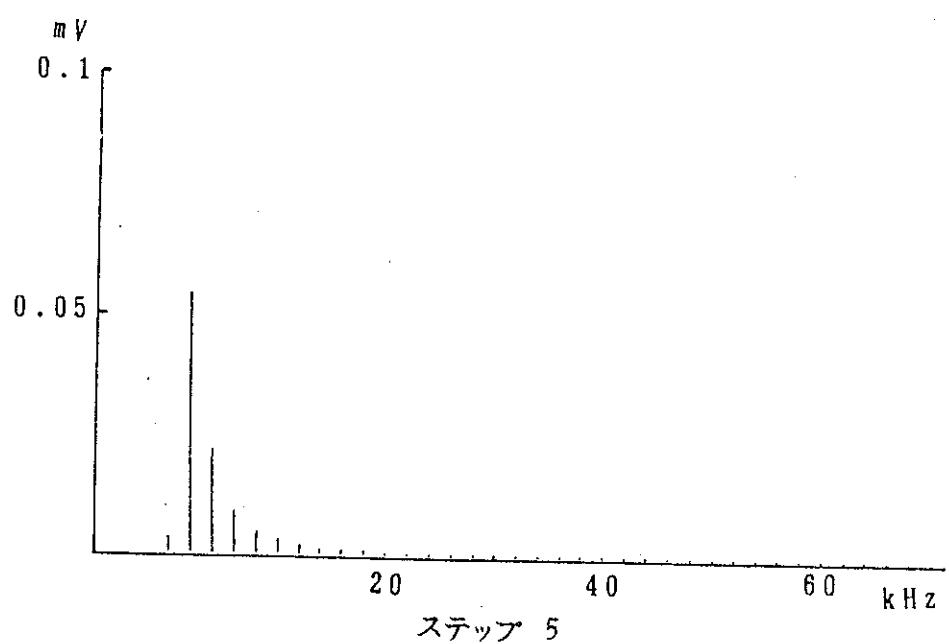
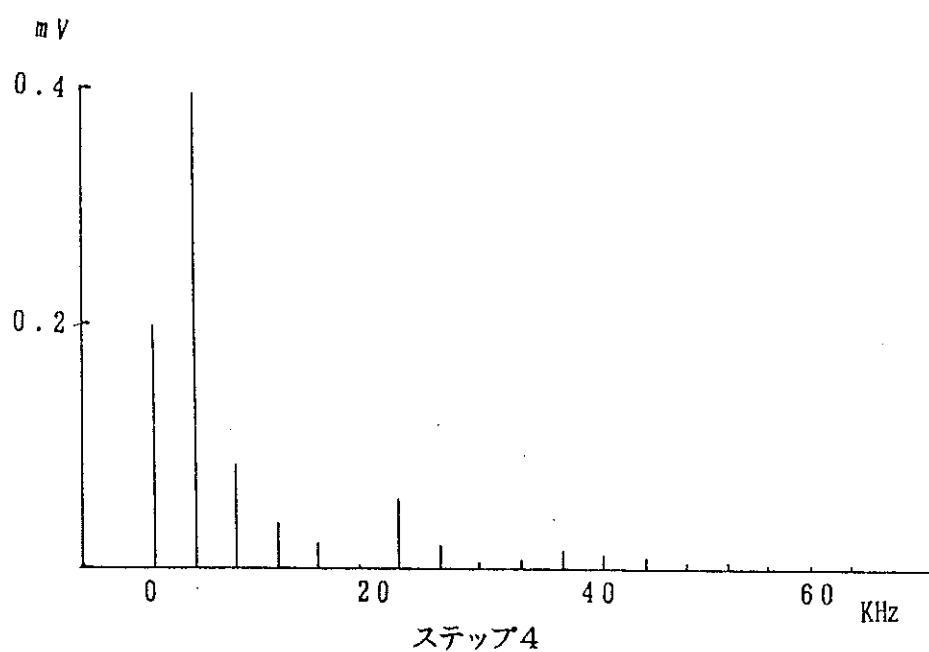


図 3. 2 2 最初の 1 周期の P 波に対して行なった F F T 解析結果。  
 縦軸は波の強さ、横軸は周波数を表す。受振センサー  
 は P S - 3 2。模型は P M T - 1 2

## 第4章 結言

### 4. 1 空洞消滅に関して縮尺地層模型試験結果で得られた知見

碎屑性堆積岩中に深地層処分空場を設ける場合、空洞掘削から空洞消滅に至る過程で現れる力学的な諸現象に関し、大型の縮尺地層模型試験を行った。得られた知見を時系列的に示すと以下のようになる。

- 1) 空洞端のやや前方に生じる応力集中域における応力の値は、初期地圧の1.5～5.0倍の大きさに達した。なお、この応力集中は、空洞幅が長くなるほど大きくなることが確認された。
- 2) 応力集中部では岩盤が圧縮されるために、P波の伝播速度および（最大）振幅が大きくなつた。
- 3) 空洞の上下盤においては、空洞掘削に伴い、空洞縁に垂直方向の地圧成分が減少した。なお、この応力低下の傾向は、空洞の縁に近くなるほど大きくなることが確認された。
- 4) また、空洞の上下盤接近量は、空洞幅の拡大につれて増加し、最後には閉塞した。
- 5) 空洞の拡大に伴い、空洞の上下盤を伝搬するP波には、速度の著しい減少、振幅の減衰と波の形状変化が計測された。これらは、空洞周囲に緩み域が発生したことを意味する。この緩み域は、空洞の拡大に伴い、空洞縁から奥へと拡大することが確認された。
- 6) 緩みの程度が増すにつれて、その中を伝搬するP波の高周波成分は消滅し、ついで波自体が消滅した。
- 7) 空洞の閉塞とともにP波は再び伝わるようになり、閉塞領域の増加とともに波の振幅が次第に回復する傾向が見られた。
- 8) 閉塞の生じた空洞部分では、天盤から崩落したずりが上下盤に挟まれて圧密されることが確認された。

9) 空洞の上下盤に埋設された応力センサーは、空洞の閉塞に伴い（圧縮）応力の増加を示した。

#### 4. 2 空洞閉塞に関する補足

縮尺地層模型試験においては、空洞の狭小化、閉塞、消滅が、空洞幅の拡大によって実現された。実際の場では、これらの現象は逐次破壊やクリープによって発生すると考えられる。

線形粘弾性モデルを仮定した場合、地圧の作用の下で時間の経過について空洞の狭小化が進むことを、有限要素法を用いた2次元数値応力解析により確認した。解析は空洞が閉塞する直前まで実施し、そこで計算を打ち切った。しかし、時間がさらに経過すれば、空洞の閉塞が起こるのは明かであろう（第1報参照）。なお、クリープ挙動の卓越する岩塩中に設けられた空洞がクリープ変形を起こすことは、深部岩塩鉱山で日常的に観察されている。

また、軟弱岩盤で地山強度比が2を切るような条件の所では、逐次破壊により空洞の狭小化が起こることは、トンネルや炭鉱の坑道で極く普通に経験するところである。夕張新炭鉱での1事例を述べると、地下860mに設けられた坑道の上下盤は、計測した200日の間、一定の速度（1mm／日）で接近を続けた。この速度が持続すれば、坑道は10年足らずで消滅することになる。坑道は厚い緩み域で囲まれていたことが計測で確認されている。この緩み域は内部に水を呼び込みやすく、それが岩盤の含水比を高める結果、強度が低下して緩み域が成長するという機構が推定された。

#### 4. 3 空洞の消滅に伴う天然バリアー機能の消長

既に述べたように、碎屑性堆積岩の遮蔽機能は、空洞の開削時から低下し始め、空洞が消滅する前後で最低の水準になる。その後は次第に機能が回復し、石化が充分進んだ段階では、空洞処分前の地山状態のときよりも高い水準になりうる（図4. 1参照）。

空洞の充填は人工的な空洞消滅をもたらす。しかし、例え、充填をしても、その時点で空洞は、既に空洞開削時に誘起された緩み域で囲まれている。時間の経過とともにこの緩み域には地圧が作用するようになる。したがって、緩み域の広がりとそれが遮蔽能力にもたらす負の効果は、次第に小さくなっていくであろう。

岩盤が遮蔽機能を回復しない間は、遮蔽機能を人工的なバリヤーに全面的に依存せざるを得ない。どのくらいの期間、岩盤の遮蔽能力の低下が続くのかが問題になる。これについての詳細な研究は今後に残された課題である。ここでは、参考までに、現場の事例や室内の透水試験結果を紹介しておきたい。

炭鉱におけるスライシング採炭の経験によると、採掘跡の空洞を埋める崩落ずり（おもに頁岩からなる岩塊群）は、数ヶ月から1年の経過の後には互いに固着し合い、その下に採掘空洞を作れる程度の強度が得られる。人工的な処置としては、採掘跡に散水する程度で、専ら地圧が強度の発現に寄与すると考えられる。

スライシング採炭においては板状の空洞が形成されるので、掘削された空洞内は速やかに閉塞し、地圧が作用する。坑道のように、空洞の断面が円に近いものでは、空洞閉塞にはより長い時間の経過が必要であろう。しかし、深部炭鉱における経験によると、前述した事例からもわかるように、古第三紀の頁岩層であれば、地下数百mに設けられた空洞は、 $10^0 \sim 10^1$ 年の内に閉塞が完了すると推定される。

岩石の透水特性は、遮蔽機能の重要な因子の一つに挙げられる。砂岩や泥岩を用いた室内透水試験の結果によると、亀裂ができると透水係数は著しく増大するが、わずかな大きさの地圧の作用の下で

亀裂は速やかに閉じ、元の値を回復する（第2報参照）。また、海底炭鉱の経験から、地圧がなくとも、亀裂の近くに泥や四紀層のような軟岩があると、亀裂は泥によって塞がれ、亀裂を伝わる水の流れは止まることもわかっている。したがって、空洞が完全に閉塞し消滅しさえすれば、比較的短期間に透水特性も元の状態まで回復すると期待される。

岩盤の遮蔽機能が低下する程度と期間は、空洞を囲む緩み域の寸法にも依存する。緩み域が大きければ、遮蔽能力の低下量が大きく、能力の回復に要する時間も長くなる。例えば、処分空洞の上部に不透水層があるような場合、緩み域がこれを越えてそれより上位の透水性の高い層にまで達するようであれば、岩盤全体の遮蔽能力は大幅に低下するであろう。

したがって、緩み域は極力、狭い範囲にとどめるようにしなければならない。これは処分場の設計と処分方法を工夫することによってかなり効果を上げることができるであろう。処分空洞の建設に当たっては、空洞全体を一度に開削し、最終処分まで空洞全体を維持する方式（図4. 2a）よりは、1本の坑道を開削してはすぐに廃棄物を処分して埋め戻すという作業を繰り返す方式（同図b）の方が、緩み域の成長を抑える上で有利である。

複合バリヤーシステムを用いて、碎屑性堆積岩中に深地層処分をする場合に想定されるもっともらしいシナリオは次のようになるであろう。天然バリヤーの遮蔽能力は、処分後の空洞消滅が起こる前後に最低の水準になる。しかし、空洞の設計と処分方法に注意すれば、直にその状態を脱し、時間を経るに従って向上するようになるであろう。これに要する期間（ $10^0 \sim 10^3$ 年程度の間）、人工バリヤーが機能を完全に発揮し続ける必要がある。人工的なバリヤーがこのような性能を持っていれば、図4. 1に示すように、常に一定水準以上の遮蔽機能を長期間保つことが可能であると考えられる。

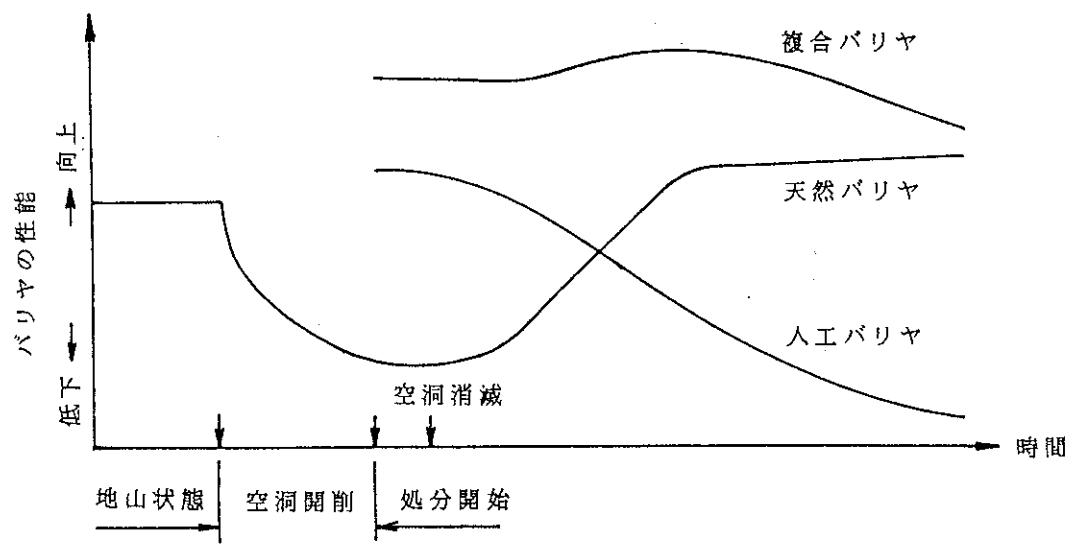


図 4. 1 人工バリアーと天然バリアーから成る複合的なバリアー  
システムに関する遮蔽能力の経時変化（碎屑性堆積岩の場合）

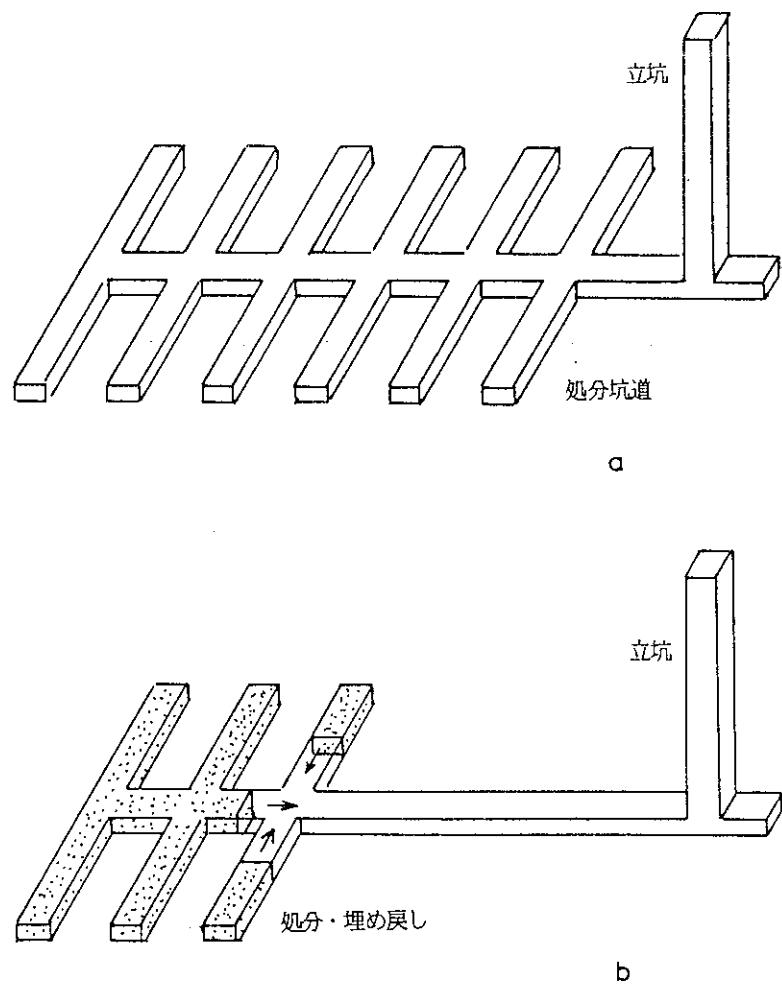


図 4. 2 天然バリヤーの遮蔽能力を落とす緩み域の大きさを制限するには、処分場の空洞全体を一度に開削する方式 (a) よりも、1つの坑道について開削・処分・埋め戻しを行いこれを繰り返す方式 (b) の方が有利である。

## 第5章 参考文献

1. 石島 洋二、縮尺地層模型試験に基づく空洞の消滅に関する研究（そのI）, PNC SJ4600 89-007
2. 石島 洋二、縮尺地層模型試験に基づく空洞の消滅に関する研究（そのII）, PNC SJ4600 90-006
3. 石島 洋二、第三系堆積岩の強度・変形特性に関する調査研究, PNC SJ4600 87-004
4. 石島 洋二、破壊した堆積岩の強度復元に関する研究, PNC SJ4600 88-005
5. Brace, W.F., Walsh J.B., Frangos W.T., Permeability of Granite Under High Pressure, J.G.R. Vol.73, No.6, 1968
6. Yves Bernabe, The Effective Pressure Law for Permeability During Pore Pressure and Confining Pressure Cycling of Several Crystalline Rocks, J.G.R. Vol.92, No 81, 1987
7. R.L.Kranz, A.D.Frankel, T.Engelder, C.H.Sholz, The Permeability of Whole and Jointed Barre Granite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, Vol.16, 1979
8. Brace, W.F., Permeability of Crystalline and Argilaceous Rocks, Int.J.Rock Mech.Min.Sci.&Geomech.Abstr. Vol.17, 1980
9. Hsieh P.A., Tracy J.V., Neuzil C.E., A Transient Laboratory Method for Determining the Hydraulic Properties of 'Tight Rocks', I--Theory, II--Applications , Int.J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.18, 1981
10. Caruso L., Simmons G., Wilkens R., The Physical Properties of A Set of Sandstones Part I, Int.J.Rock Mech. Min Sci.&Geo Mech. Abstr. Vol.22, 1985

- 1 1. 高橋、平田：トランジエント・パルス法を用いた稻田花崗岩の透水係数について、資源・素材学会春季大会、1989
- 1 2. 高橋、平田：稻田花崗岩の透水係数に及ぼす有効封圧及び軸圧の影響について、資源・素材学会春季大会、1989
- 1 3. 高橋、平田：稻田花崗岩における透水係数の異方性について、平成元年度岩盤シンポジウム
- 1 4. 高橋 学他：透水係数の測定に関する二、三の問題点について、地質ニュース、1989
- 1 5. Y.Bernabe, Pore Volume and Transport Properties Changes During Pressure Cycling of Sevarial Crystalline Rocks, Mechanics of Materials, 1986
- 1 6. Y.Bernabe, The Effective Pressure Law for Permeability in Chelmosford Granite and Barre Granite, Int.J.Rock Mech.Min.Sci.&Geomech.Abstr. Vol.23, 1986
- 1 7. J.B.Walsh, Effect of Pore Pressure and Confining Pressure on Fracture Permeability, Int.J.Rock Mech. Min.Sci.&Geomech.Abstr. Vol.18, 1981
- 1 8. J.B.Walsh and W.F.Brace, The Effect of Pressure on Porosity and The Transport Properties of rocks J.G.R. Vol.89, No.B11, 1984
- 1 9. 大友秀夫：ジオトモグラフィ技術の現況，物理探査，No.39, Vol.6, 1986
- 2 0. Saito,H. and H.Ohtomo : Seismic Ray Tomography Using the Method of Damped Least Squares, ASEG/SEG Conference Adelaide, 1988 1165, pp.139-144, 1985
- 2 1. 出口剛太：縮尺地層模型試験による深部坑道維持対策の検討，博士論文，北海道大学，1982
- 2 2. 外尾善次郎 伊志善：炭鉱における坑道盤膨れに関する実験研究，日本鉱業会誌，No.90, Vol.1040, pp.635-640, 1974

- 2 3. 外尾善次郎 伊志善 : 坑道の深度が盤ぶくれに及ぼす影響について - 炭鉱坑道盤ぶくれの実験的研究（第1報）-, 日本鉱業会誌, No.92, Vol.1064, pp.663-668, 1976
- 2 4. 外尾善次郎, 伊志善 : 上部炭層と坑道との距離, および下盤軟弱層の厚さが盤ぶくれに及ぼす影響について - 炭鉱坑道盤ぶくれの実験的研究（第2報）-, 日本鉱業会誌, No.92, Vol.1065, pp.707-711, 1976
- 2 5. 杉浦高広 : 岩石のP波伝播速度特性に関する基礎的研究及びその応用, 修士論文, 北海道大学, 1988