

本資料は 年 月 日付で登録区分、  
変更する。 2001. 6. 20  
[技術情報室]

## 緩衝材の熱-水-応力連成試験、第2報

### - 加熱試験結果について -

1991年2月

動力炉・核燃料開発事業団  
東海事業所

こ  
製、  
して

本

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

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

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

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2001



## 緩衝材の熱-水-応力連成試験、第2報 —加熱試験結果について—

実施責任者 湯佐泰久\*，佐々木憲明\*  
報告者 佐藤信二\*，小林晃\*\*  
五月女敦\*，原啓二\*

### 要旨

人工バリアの一つである緩衝材中では、廃棄物の発熱、岩盤からの地下水の浸入、地圧や緩衝材の膨潤圧の発生という複数の現象が相互に関連して生じる。処分後のニアフィールドにおける緩衝材の環境を正確に予測するためには、このような熱-水-応力の連成現象を観察し、これを解析する手法を開発することが必要である。

緩衝材大型試験設備は、人工バリアの構成要素の一つである緩衝材に生じる熱-水-応力の連成現象の解明と解析手法・コードの開発を目的として建設されたものであり、試験の第一段階として廃棄物の発熱により緩衝材に生じる伝熱および水分移動状況を調べるための加熱試験を実施した。

本報告書は、加熱試験の結果を報告するとともに、合わせて実施した熱伝導解析および熱-水-応力連成解析結果について報告するものである。

\* 環境技術開発部 地層処分開発室  
\*\*株式会社 間組 技術研究所第一部

## 目 次

	頁
1. はじめに .....	1
2. 試験の実施方法 .....	2
2.1 試験の目的 .....	2
2.2 計測項目 .....	2
2.3 試験装置 .....	3
2.4 緩衝材サンプリングおよび水分測定 .....	8
2.5 試験実施工程 .....	10
3. 試験結果および考察 .....	11
3.1 ヒーター出力、温度 .....	11
3.2 温度分布 .....	13
3.3 熱流束 .....	26
3.4 水分分布 .....	27
3.5 膨潤圧 .....	32
3.6 オーバーパック沈下 .....	33
3.7 人工岩盤の応力 .....	33
4. 热伝導解析 .....	35
4.1 解析条件 .....	35
4.2 解析結果 .....	37
5. 連成解析コードによる解析 .....	42
5.1 解析条件 .....	42
5.2 解析結果 .....	45
6. まとめ .....	52
7. 今後の予定 .....	53

## A p p e n d i x

1. 加熱試験温度測定結果 .....	55
2. 緩衝材水分測定結果 .....	70

## 図・表一覧

	頁
図-1 ニアフィールドにおける事象	1
図-2 緩衝材大型試験設備概念図	4
図-3 緩衝材設置状況	5
図-4 計測断面位置図	6
図-5 サンプリング方法	9
図-6 ヒーター出力	11
図-7 ヒーター温度経時変化(0~10日)	12
図-8 ヒーター温度経時変化	12
図-9 加熱前温度分布(A断面)	15
図-10 加熱前温度分布(B断面)	16
図-11 加熱時温度経時変化(A断面)	17
図-12 加熱時温度経時変化(B断面)	17
図-13 加熱時温度経時変化(C断面)	18
図-14 加熱時温度経時変化(B断面)	19
図-15 気温、室温、地中温度経時変化	20
図-16 深度別温度経時変化	20
図-17 加熱停止時の温度分布(A断面)	21
図-18 加熱停止時の温度分布(B断面)	22
図-19 加熱停止時の温度分布(C断面)	23
図-20 加熱停止時の温度分布(ヒーター中心、水平断面)	24
図-21 加熱停止時の温度分布(ヒーター中心)	25
図-22 热流束の経時変化	26
図-23 抵抗式水分計による測定結果	28
図-24 水分分布(1断面)	29
図-25 水分分布(2断面)	30
図-26 水分分布(3断面)	31
図-27 热伝導解析モデル概念図	36

図-28 解析結果と実測値の比較 (GL - 3.0 m) .....	39
図-29 解析結果と実測値の比較 (経時変化) .....	40
図-30 解析結果比較 (等温線) .....	40
図-31 温度増加と不飽和水分特性の変化 .....	43
図-32 $D_T$ を変えた場合の含水比分布 .....	46
図-33 $D_T$ が $10^{-3}$ と $10^{-4}$ ( $\text{cm}^2/\text{^\circ C} \cdot \text{s}$ ) の場合の含水比分布 .....	46
図-34 $D_T$ を変えた場合の圧力水頭分布 .....	46
図-35 热膨張係数が異なる場合の含水比分布 .....	47
図-36 热膨張係数が異なる場合の圧力水頭分布 .....	47
図-37 $n' = 5$ と 16.4 の場合の Irmat の式を用いた不飽和透水関数 .....	48
図-38 不飽和透水関数が異なる場合の含水比分布 .....	48
図-39 不飽和透水関数が異なる場合の圧力水頭分布 .....	48
図-40 不飽和水分特性曲線が異なる場合の含水比分布 .....	49
図-41 不飽和水分特性曲線が異なる場合の圧力水頭分布 .....	49
図-42 緩衝材の水分分布解析結果 (実測値との比較) .....	50
 表-1 計測項目一覧 .....	2
表-2 緩衝材の密度一覧 .....	3
表-3 センサー仕様一覧 .....	7
表-4 試験実施工工程表 .....	10
表-5 飽和度計算結果 .....	28
表-6 土圧測定結果 .....	32
表-7 人工岩盤応力 .....	34
表-8 初期熱定数一覧 .....	37
表-9 変更熱伝導率一覧 .....	38
表-10 緩衝材物性値一覧 .....	44

## 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、廃棄物と地下水の接触を抑制するとともに、固化体からの核種の溶出・移動の制御効果を有する固化体、キャニスター、オーバーパック、緩衝材等の人工バリアと、地層が持つ核種を吸着する天然バリアとしての機能を組み合わせた多重バリアシステムにより安全確保を図ることを基本的考え方としている。

人工バリアの一つである緩衝材は、ベントナイトを主材料としオーバーパックと岩盤の間を充填するものである。緩衝材中では、図-1に示すように廃棄物の発熱、岩盤からの地下水の浸入、地圧や緩衝材の膨潤圧の発生という複数の現象が相互に関連して生じる。

処分後のニアフィールドにおける緩衝材の性能を正しく評価するためには、処分後の緩衝材のおかれる環境を正確に予測する必要がある。このためには、熱-水-応力の連成現象を観察し、これを解析する手法を開発することが必要である。このためには大型の複合試験により、緩衝材中の伝熱、水分分布、膨潤圧力の発生状況等を調査することが有効である。

緩衝材大型試験設備（Big-Ben）は、熱-水-応力連成現象を実規模大で観察し、連成現象の解析手法とコードの開発を目的として建設されたものであり、試験の第一段階として廃棄物の発熱により緩衝材に生じる現象を観察するための加熱試験を実施した。

本報告書は、第一報の「緩衝材の熱-水-応力連成試験（-緩衝材大型試験設備の概要および試験計画について-）」（PNC N 8410 90-060）に引き続き、緩衝材大型試験の第一段階として実施された加熱試験の結果について報告するものである。

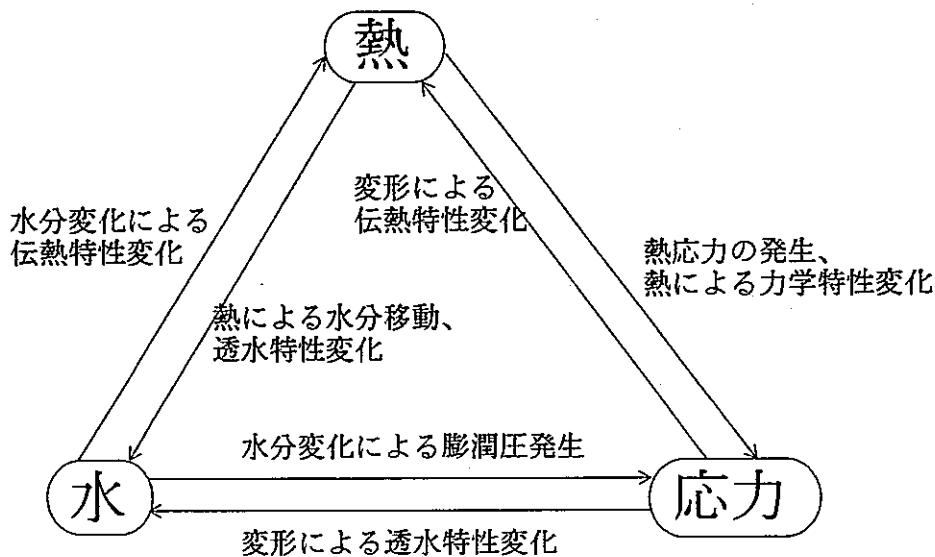


図-1 ニアフィールドにおける事象

## 2. 試験の実施方法

### 2.1 試験の目的

緩衝材大型試験の目的は、処分後に発生するニアフィールドの熱-水-応力連成現象の解明と連成解析コードの開発・確証にある。今回実施した加熱試験は、廃棄物の発熱による①緩衝材中の熱伝達、②熱による緩衝材中の水分の移動（再配分）、③含水率の変化による膨潤圧の発生状況等に関するデータ取得を目的とする。

### 2.2 計測項目

計測項目は、加熱によるオーバーパック、緩衝材およびコンクリート製人工岩盤の温度、熱流束、緩衝材の水分量、緩衝材の膨潤圧、オーバーパックの沈下量、コンクリートのひずみとし、緩衝材の膨潤圧以外はパソコンによる自動計測が可能となっている。

表-1に計測項目一覧を示す。

表-1 計測項目一覧

計測項目	計測位置、方法	計測点数
ヒーター出力	電圧値から換算	1点
温度分布	ヒーター、オーバーパック、緩衝材、コンクリート	128点
熱流束	オーバーパック～緩衝材、緩衝材～コンクリート、コンクリート～地盤	8点
水分移動	緩衝材	5点
オーバーパック沈下	オーバーパック底面	1点
人工岩盤応力	コンクリートひずみ（無応力計1点含む）より算定	12点
緩衝材膨潤圧	コンクリート表面、手動測定	20点

## 2.3 試験装置

緩衝材大型試験設備の詳細については第一報<sup>[1]</sup>で報告済みであるので、ここでは主な装置類について述べる。

本設備は、図-2に示すように円柱状のコンクリート（直径6m、高さ5m）を人工岩盤とし、そこに処分孔を模擬した直径1.7m、深さ4.5mの試験孔を備えたものである。試験孔には実規模大の緩衝材とオーバーパックが設置されている。また、オーバーパック中には廃棄物の発熱を模擬するための電気ヒーターが挿入されている。そして、試験孔周囲の9本の注水管と人工岩盤に設けた人工クラックにより、緩衝材の加熱試験と同時に注水試験が可能な構造となっている。

### (1) 緩衝材

緩衝材は、製作性、止水性、熱伝導性、機械的強度等を考慮して、Na-ベントナイトにケイ砂を混合しこれを湿潤密度約2.0t/m<sup>3</sup>にプレスしたブロックを用いた。緩衝材は、扇型の厚さ10cmのブロックとし、図-3に示すようにb1、b2の2タイプを製作した。試験孔内に設置した緩衝材の密度を表-2に示す。

表-2 緩衝材の密度一覧

項目	単位	算出値	備考
設置した緩衝材の総重量	t	12.9	実測値
すき間に充填した材料の総重量	t	1.8	実測値
緩衝材ブロックの平均湿潤密度	t/m <sup>3</sup>	2.06	
粉体の平均湿潤密度	t/m <sup>3</sup>	1.35	
緩衝材の平均湿潤密度	t/m <sup>3</sup>	1.94	
空隙も含めた緩衝材の平均湿潤密度	t/m <sup>3</sup>	1.90	
緩衝材の含水比	%	11.36	実測値

### (2) オーバーパック

オーバーパックは、外径104cm、高さ195cm、肉厚30cm、重量11.4tの炭素鋼製の容器で、その蓋には直径15cmの孔がヒーター挿入のために設けられている。

### (3) ヒーター

ガラス固化体の発熱を模擬するために、オーバーパック内部にヒーター（シース型カートリッジヒーター3本並列、AC 200V、最大出力4kW）を挿入し、ヒーターとオ-

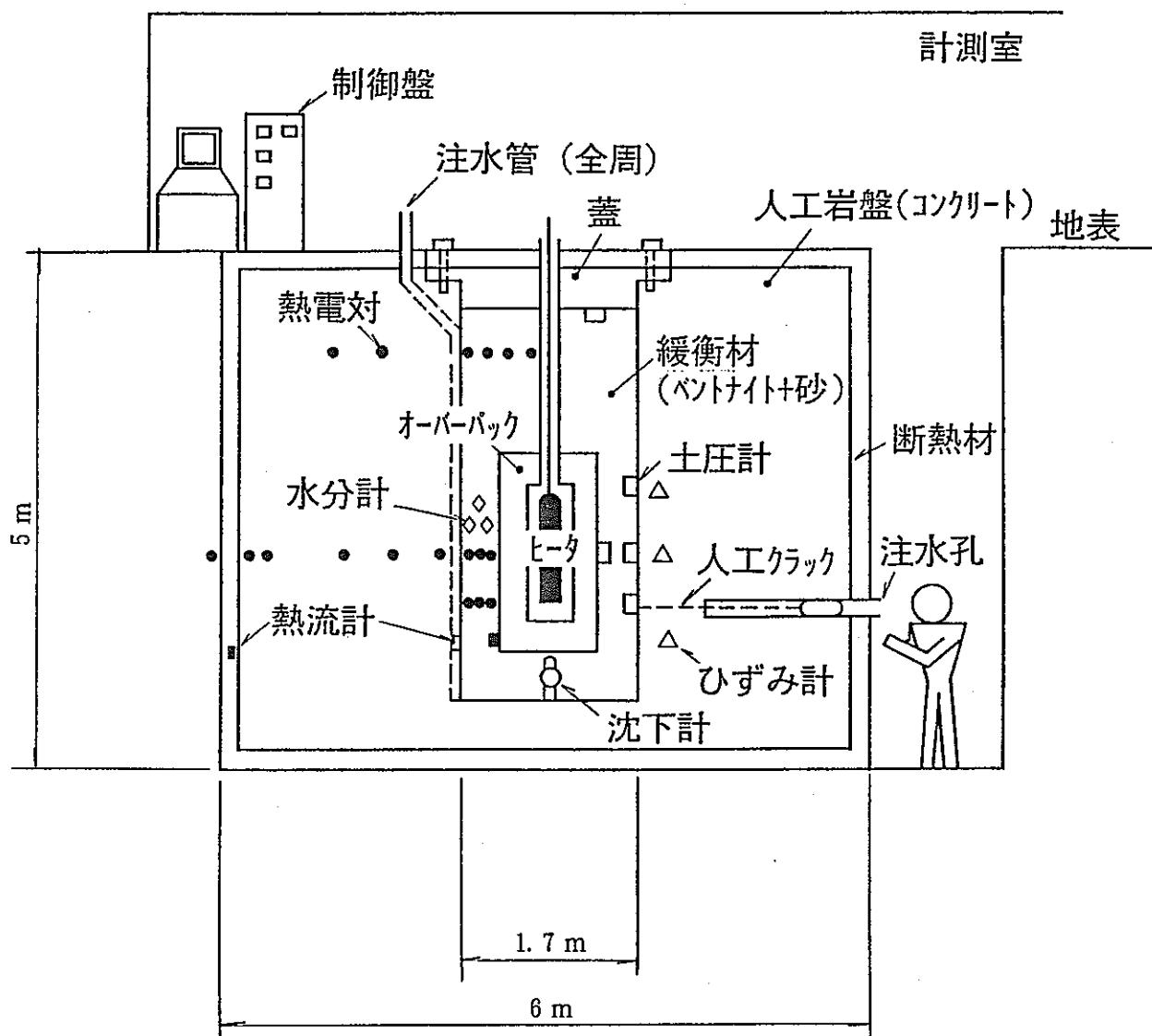


図-2 緩衝材大型試験設備概念図

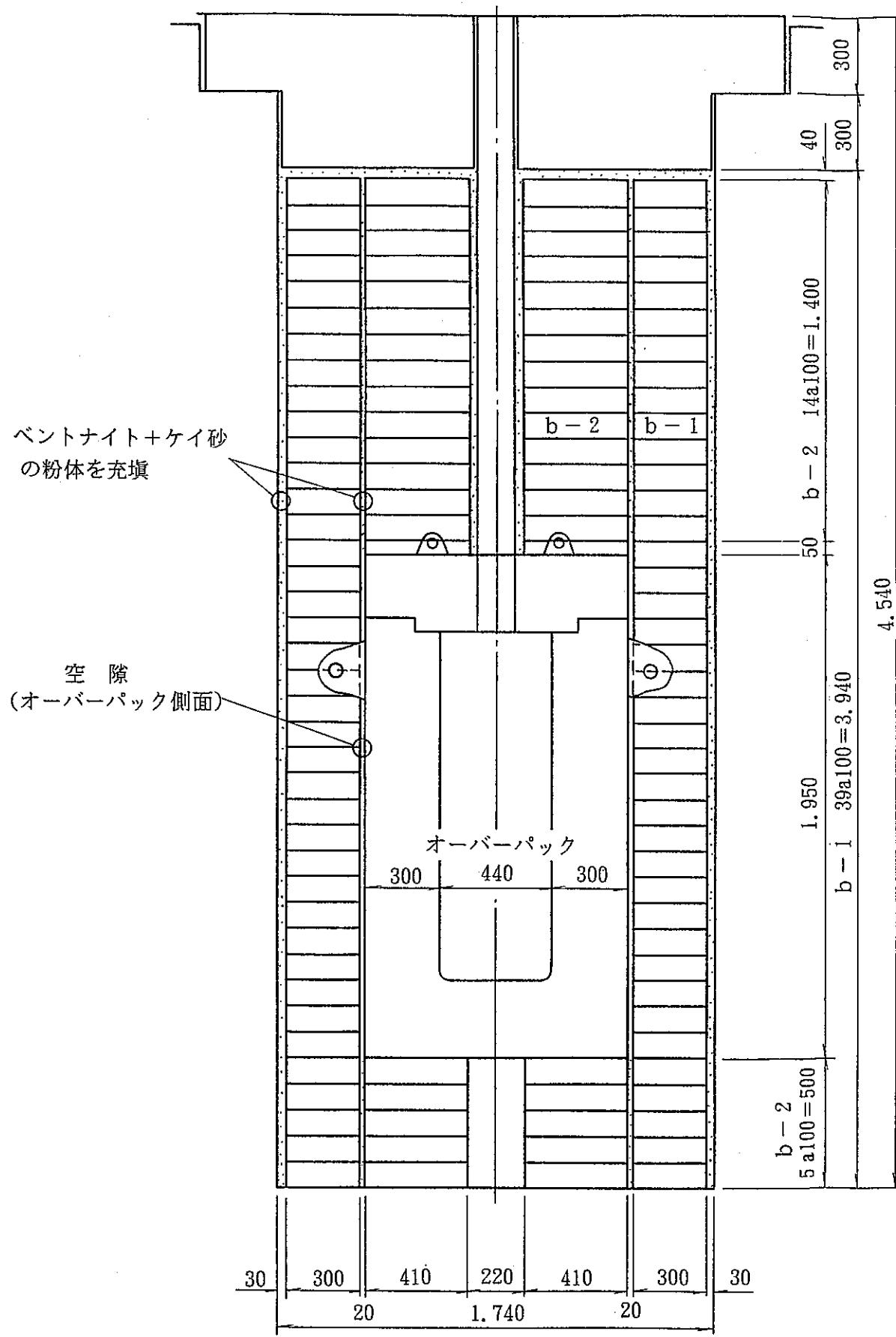
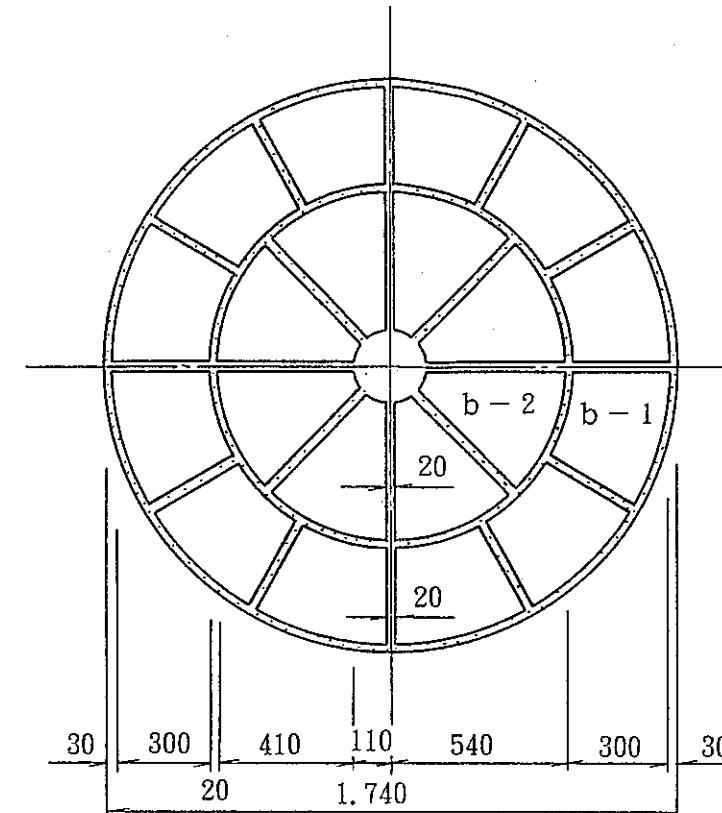
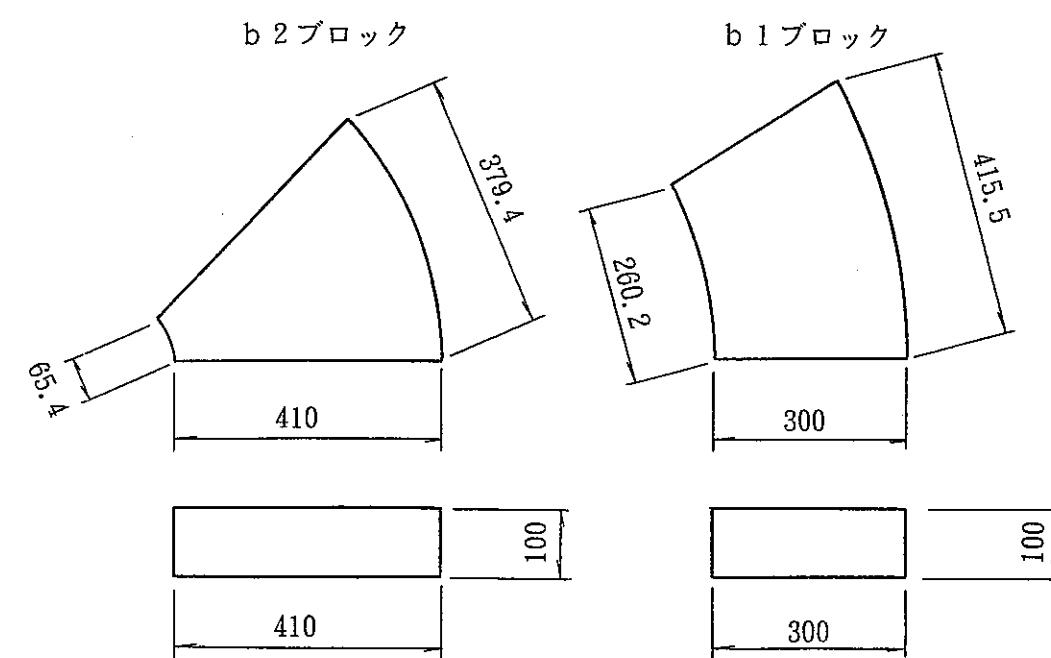
配置図  $S = 1/20$ 平面図  $S = 1/20$ 詳細図  $S = 1/10$ 

図-3 緩衝材設置状況

バーパック内壁との間の空間には、ガラス固化体の原料であるガラスビーズ（粒径1～2mm、2～2.8mm、各50%）を充填した。ヒーター発熱部の中心は、オーバーパックの中心軸上で試験孔の深さ3.0mの位置とした。

#### (4) 計測機器

計測機器は、熱-水-応力の連成現象を測定することを目的に、図-4に示す3断面に配置した。表-3に計測機器、センサーの仕様一覧を示す。

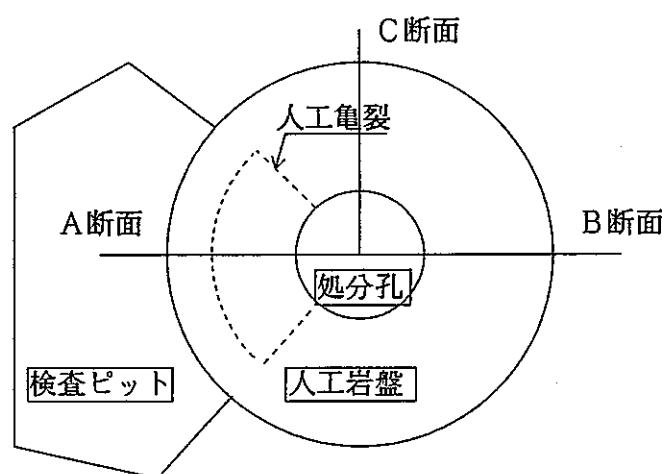


図-4 計測断面位置図

表-3 センサー仕様一覧

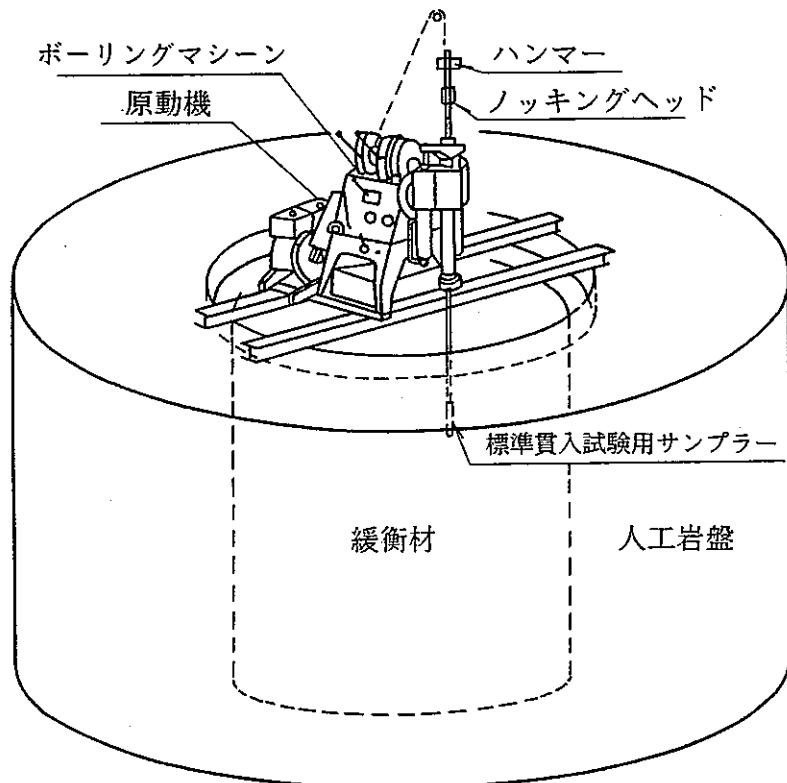
項目	計測対象	使用センサー	測定点数
温度	ヒーター、オーバーパック、緩衝材	シーズ型熱電対T-90、助川電気㈱ JIS C 1602 0.75級、シーズ径φ1.6mm	128ch
	人工岩盤	シーズ型熱電対T-90、助川電気㈱ JIS C 1602 0.75級、シーズ径φ3.2mm	
熱流束	オーバーパック	熱流計、CN-170、英弘精機産業㈱ 使用温度-250～280°C	8ch
	緩衝材、人工岩盤	熱流計、CN-130、英弘精機産業㈱ 使用温度-50～120°C	
膨潤圧力	緩衝材	土圧計、F7/14QM200AZ4、グレーツェル 許容圧力19.6MPa (200kgf/cm²)	20ch
水分	緩衝材	抵抗式水分計、RM-8、㈱ウイジン工業社 φ10×50mm	5ch
オーバーパック 沈下	オーバーパック	変位計、BRD-50A、共和電業㈱ ストローク50mm、使用温度-30～70°C	1ch
ひずみ	人工岩盤	ひずみ計、BS-8F、共和電業㈱ 容量-1000～1000×10⁻⁶、使用温度-30～80°C	12ch

## 2.4 緩衝材サンプリングおよび水分測定

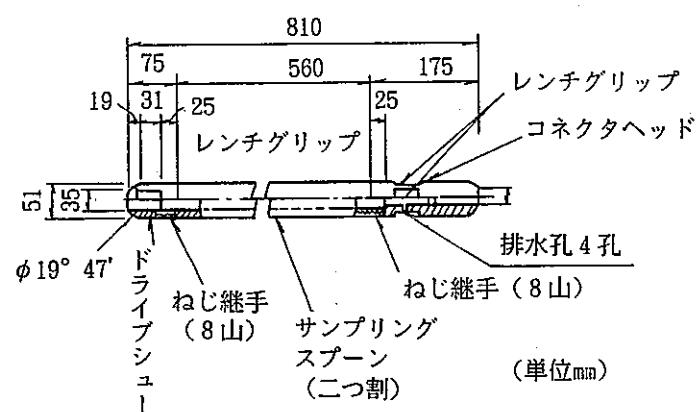
熱による緩衝材中の水分再配分状況を把握するとともに、水分計の測定結果の信頼性確認のために、緩衝材を直接サンプリングし、水分を測定した。

サンプリングは試験孔上部の蓋を撤去した後、最上部試験孔より緩衝材を取り出して切断する方法により、それ以下についてはボーリング機に標準貫入試験用サンプラーを取り付けこれを緩衝材中に貫入させてコアを採取する方法により行った。

含水比の測定は、採取したコアよりブロック中央部分の約5cmを試料として採取し、JIS A 1203に従い、110°C、24時間乾燥させて行った。また、一部の試料については、110°Cで7日間まで乾燥させて乾燥時間と含水比の関係を調べた。図-5にサンプリング方法を示す。



設置概要図



標準貫入試験用サンプラー

図-5 サンプリング方法

## 2.5 試験実施工程

本試験は、1990年3月より加熱を開始し9月に加熱を停止後、サンプリングを実施した。

試験の実施工程を表-4に示す。

表-4 試験実施工程表

項目	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
1. 加 热			0.8 kW					
2. 計 測		温度、熱流束、	水分、変位、ひずみ					
3. サンプリング、含水率測定							3断面	
4. 解 析	予備解析				熱伝導解析、熱-水連成解析			

加熱開始：1990年3月6日午前10時

加熱停止：1990年9月5日午前10時

加熱時間：4392時間（183日）

緩衝材サンプリング：1990年9月17日～10月3日

### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 ヒーター出力、温度

ヒーター出力は、ヒーターの使用上限温度 500°C と緩衝材の最高温度 100°C 以下の条件から、熱伝導予備解析を行い当初 1 kWとした。試験開始直後に、ヒーターの内部温度の上昇が予備解析結果よりも大きく、ヒーターの使用上限温度を越えることが予想されたため、出力を 0.8 kW に下げて加熱を継続した。ヒーター出力の変化状況を図-6 に示す。

ヒーター温度が予備解析結果よりも上昇したのは、ヒーター周囲の空気層、オーバーパックと緩衝材の間の空隙等の影響により、試験設備の伝熱特性が解析モデルよりも低いためと考えられる。

ヒーターの内部温度は、加熱後半日で図-7 に示すように約 450°C まで上昇した後、図-8 に示すように停電による短期間の温度低下を除き試験期間中を通じこの温度が保たれた。

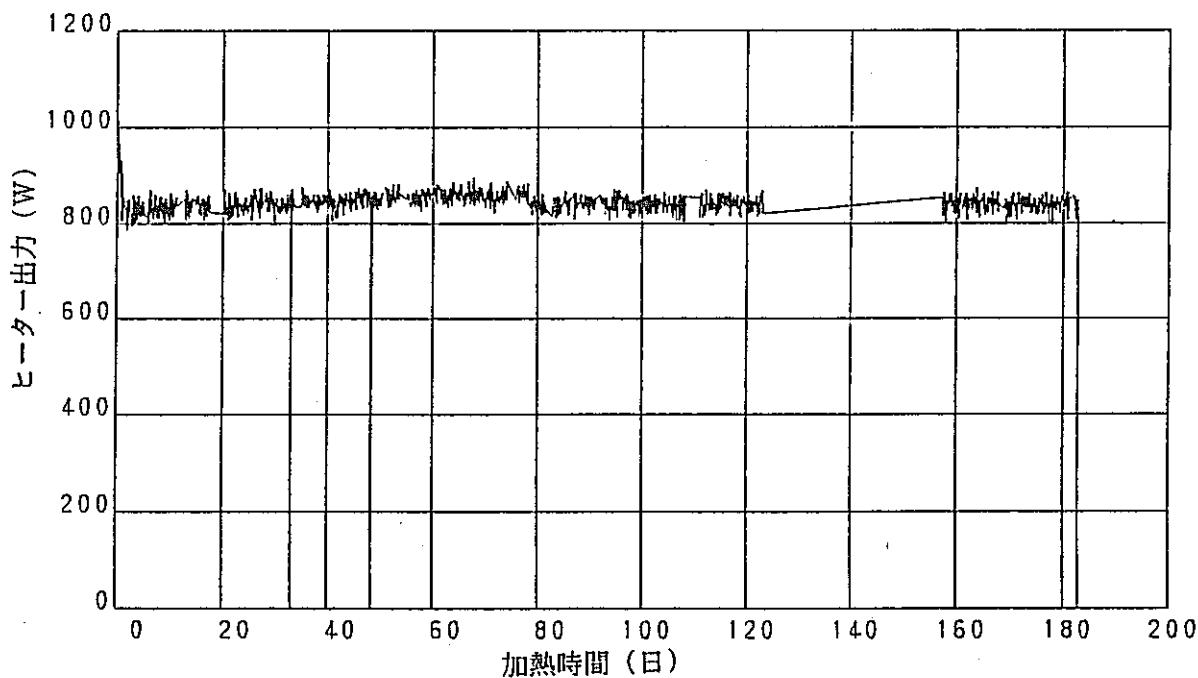


図-6 ヒーター出力

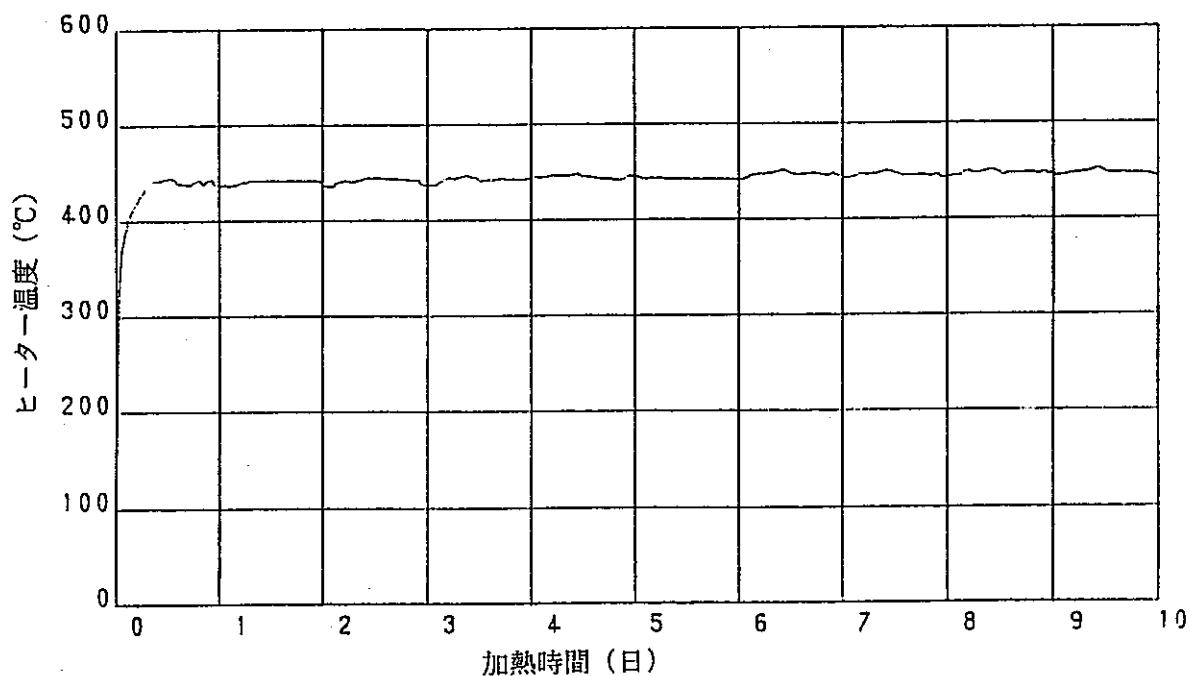


図-7 ヒーター温度経時変化 (0~10日)

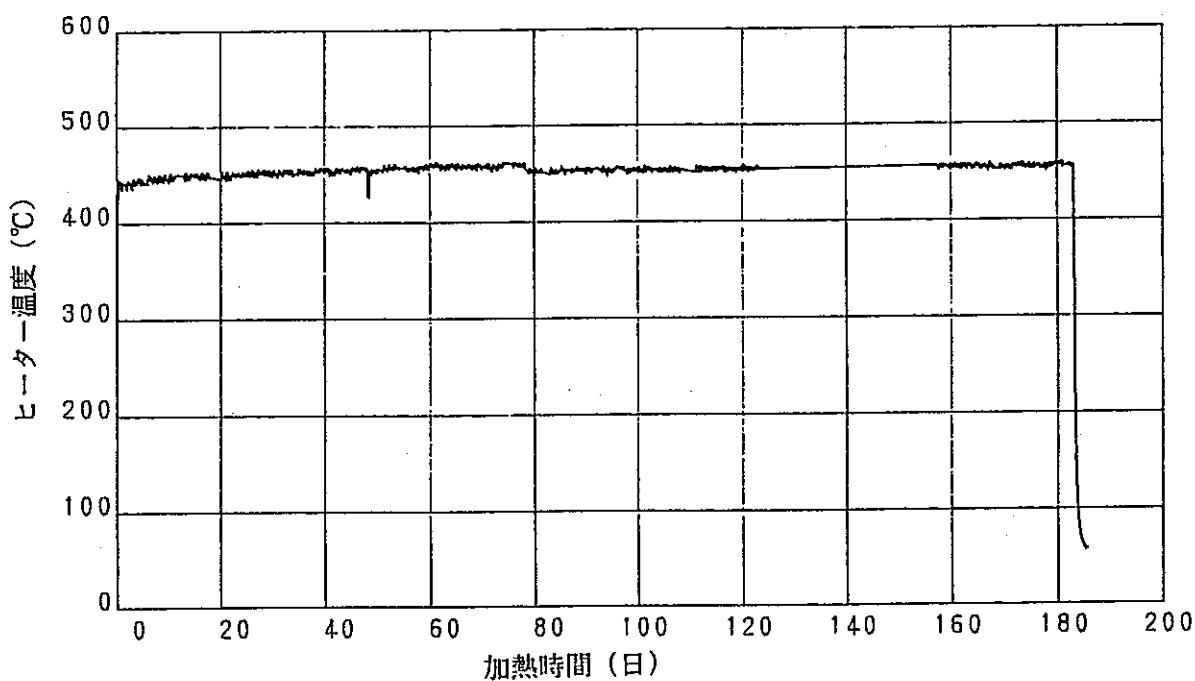


図-8 ヒーター温度経時変化

### 3.2 温度分布

加熱に伴い各部の温度は内部より増加した。加熱期間（4392時間）中の各部の温度の測定結果について以下に述べる。また、温度測定結果をAppendix 1に示す。

#### (1) 初期温度分布

- ① 加熱前の初期温度は、オーバーパック、緩衝材、人工岩盤による差は小さく、人工岩盤上部より下部の温度が高くなる傾向を示した。
  - ② 検査ピットのあるA断面の温度は地盤と接しているB、C断面側よりも低い値を示した。これは、室内温度と地温の差によるものと考えられる。
- A、B断面の温度分布を図-9、10に示す。

#### (2) 加熱時の温度の経時変化

- ① 加熱開始とともに各部の温度は、加熱後約10日までは急激に上昇した後、緩やかに上昇を続けた。各断面の緩やかな温度上昇は、気温の上昇とともに人工岩盤周囲の室温、地温の上昇によるものと考えられる。（図-11、12、13）
- ② 試験期間中の平均気温、室温、地温（1.0、3.0m）の上昇量は、室温が地温に比べてやや低いものの約15°Cであった。なお、A断面の断熱材の温度は室温の変化と同周期で変動しながら、室温の上昇とともに増加した。（図-11、15）
- ③ 試験装置の温度は、各時間ともにオーバーパックと緩衝材、緩衝材と人工岩盤、人工岩盤外周面に取り付けた断熱材の部分で急激に変化した。（図-14）
- ④ 深度別の温度は、ヒーター中心であるGL-3.0mの温度がやや高いもののほぼ同様の上昇傾向を示した。（図-16）

#### (3) 加熱停止時の温度分布

加熱停止時（4392時間、183日）の温度分布の特徴を以下に述べる。

- ① ヒーター中心のGL-3.0mでのオーバーパック内周面の温度は、A断面側が約10°C高く約73~83°Cとなった。これに対しオーバーパック外周面の温度はB断面側がやや高いものの、測定位置による差は小さく64~66°Cとなった。オーバーパックの内周面の温度差はヒーターが偏心しているためであり、外周面で温度差が減少したのはオーバーパックの熱伝導率が大きいためと考えられる。（図-17~21）
- ② オーバーパックと緩衝材の間の空隙部分では、空気層の熱伝導率が小さいため温度差は約4~9°Cとなった。しかし、オーバーパック内外周面の温度差が10°C以上とオーバーパックの熱伝導率から推定される値より大きくなっている、これは外周面の温

度の測定値が空気層による急激な温度低下の影響を含んだためと考えられる。オーバーパックの熱伝導率より内外周面の温度差はほとんど無視できるものとすると、この部分の温度差は約20°Cとなる。（図-21）

- ③ ヒーター中心のGL-3.0mでの緩衝材の温度は、内周面で約57～61°C外周面で約48°Cとなり、緩衝材中の温度差は9～13°Cとなった。また、緩衝材と人工岩盤の間の粉体を充填した低密度層での温度低下は約3°Cとなった。（図-11～14、21）
- ④ 人工岩盤の温度分布はA断面側がB、C断面より低くなった。これは検査ピットのあるA断面側の境界温度（室温）が周辺地温に比べて低いためと考えられる。（図-15、20）
- ⑤ 緩衝材中の温度勾配はオーバーパック上部、オーバーパック側面部で約0.6°C/cm、オーバーパック下部で0.4°C/cmとなった。また、粉体部分のみの温度勾配は1.5°C/cmとなった。（図-17～19）
- ⑥ 今回のヒーター出力0.8kWによる緩衝材の最高温度は約60°Cであり、処分時（発生後30年以上経過）のイライ化の可能性は低いものと考えられる。

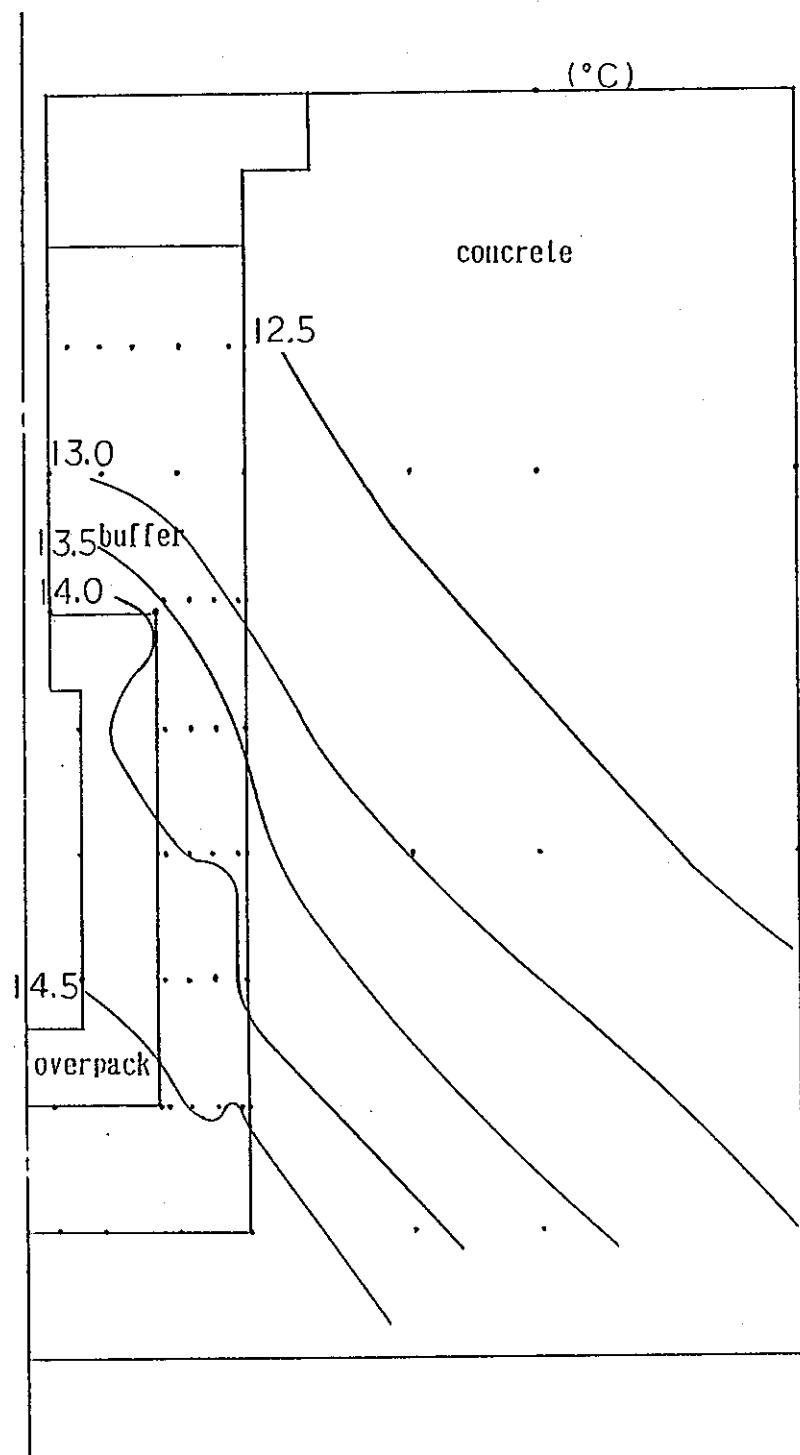


図-9 加熱前温度分布（A断面）

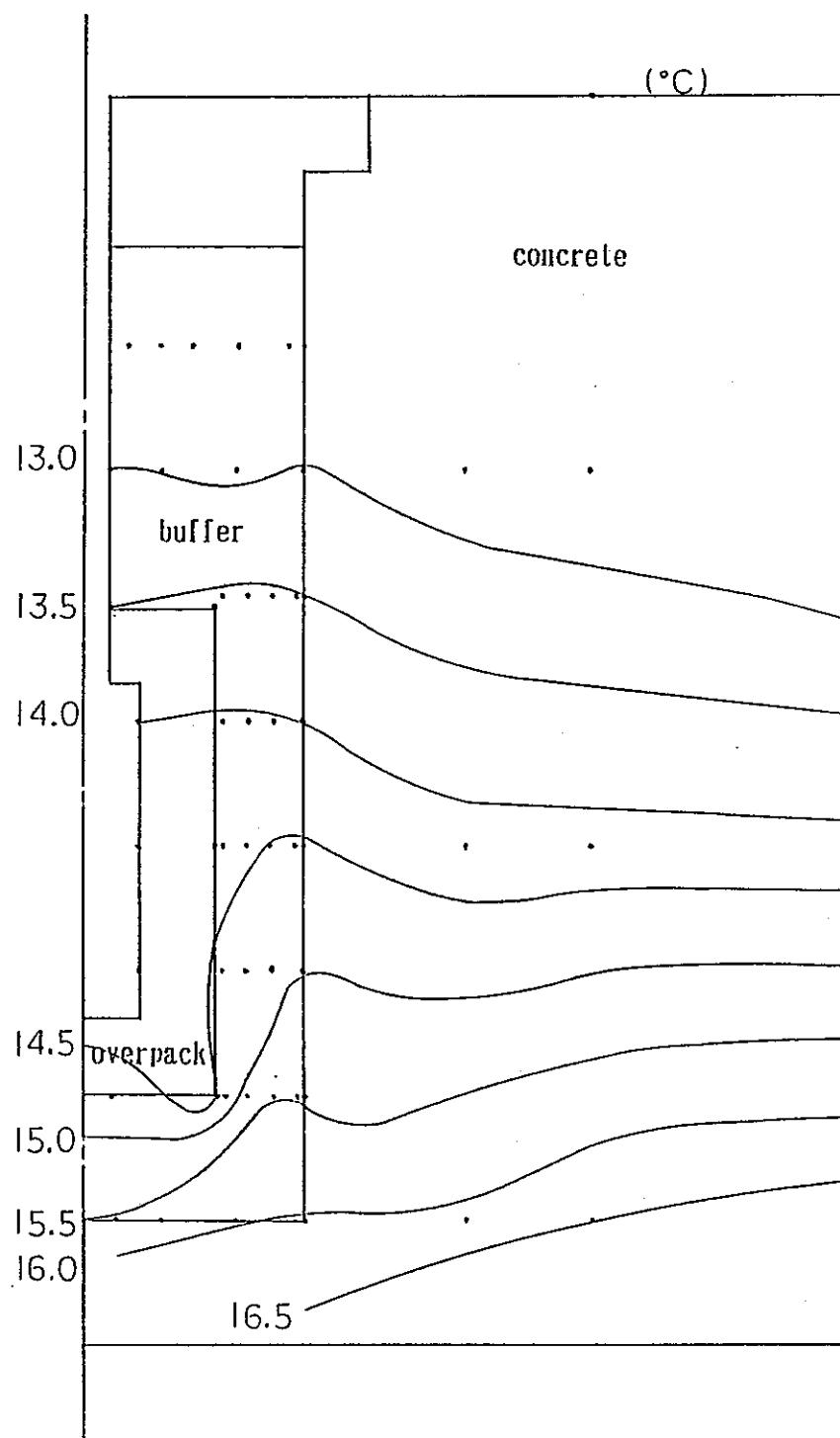


図-10 加熱前温度分布（B断面）

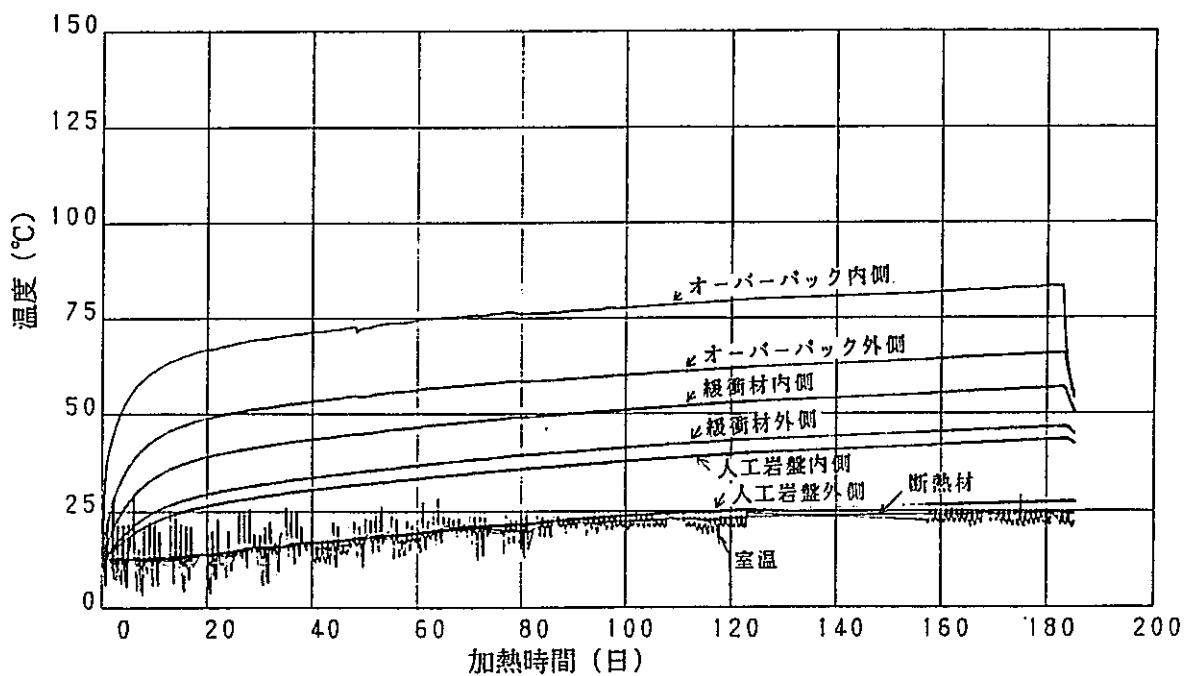


図-11 加熱時温度経時変化 (A断面)

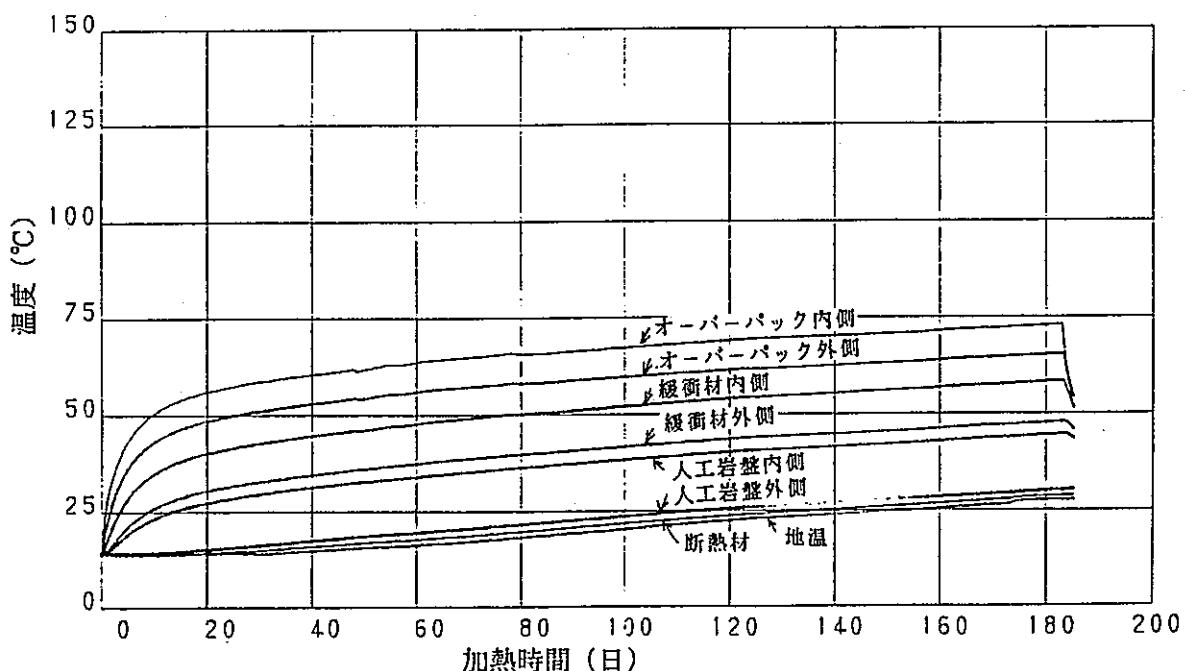


図-12 加熱時温度経時変化 (B断面)

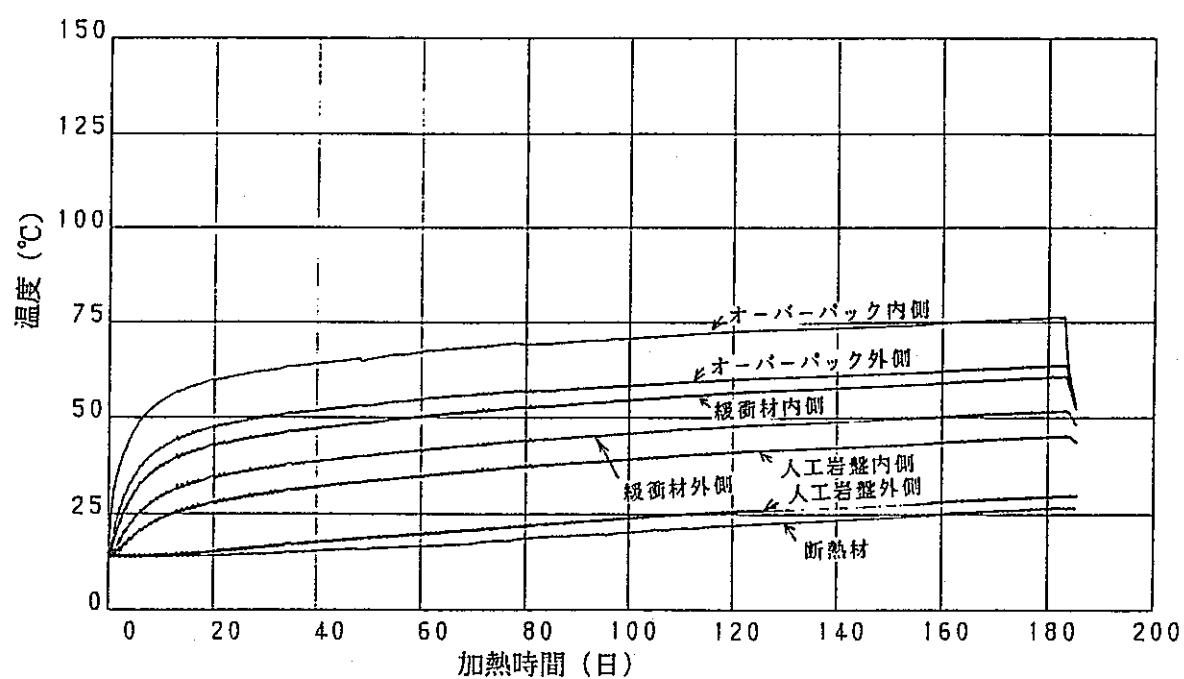


図-13 加熱時温度経時変化 (C断面)

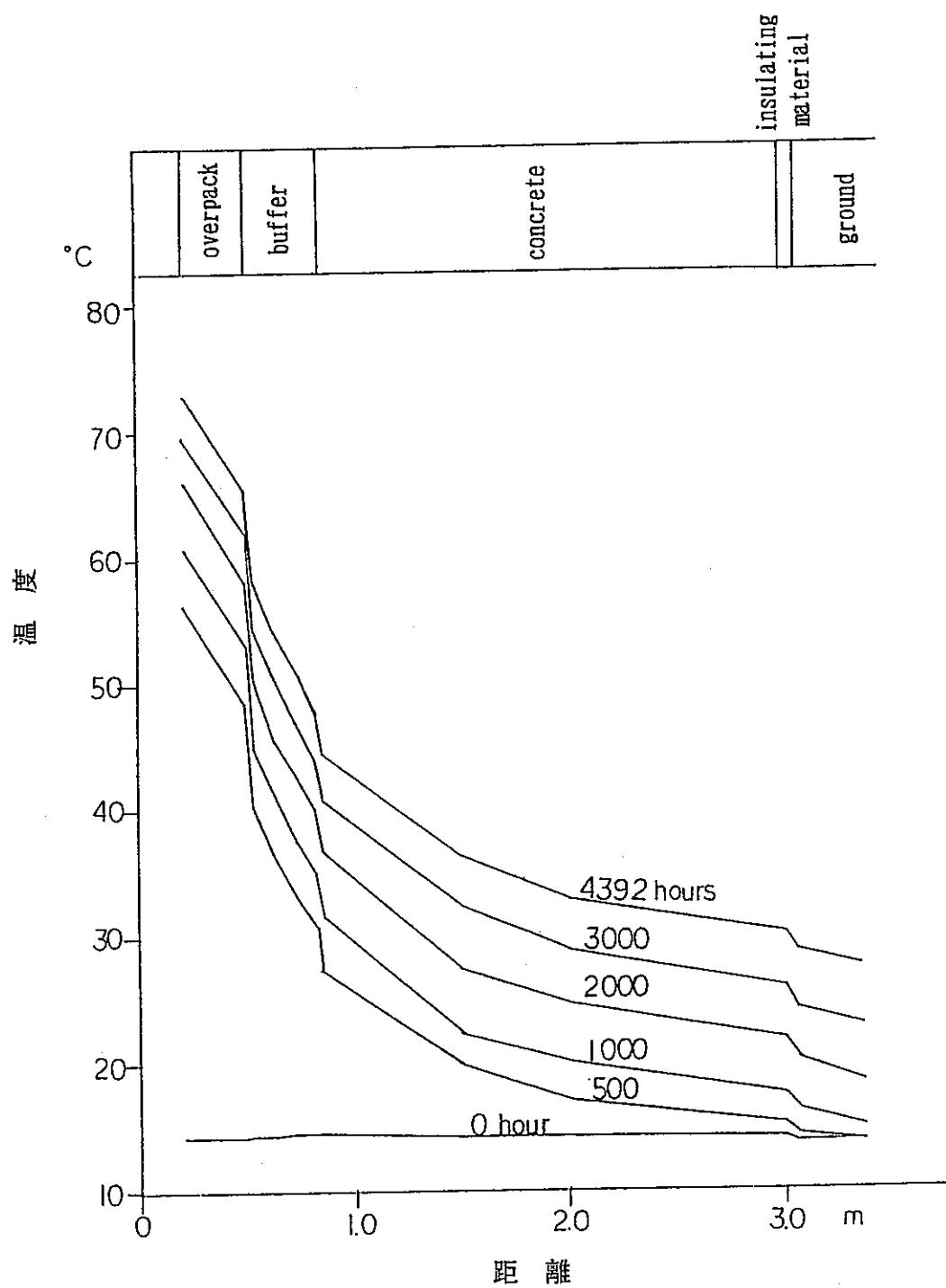


図-14 加熱時温度経時変化（B断面）

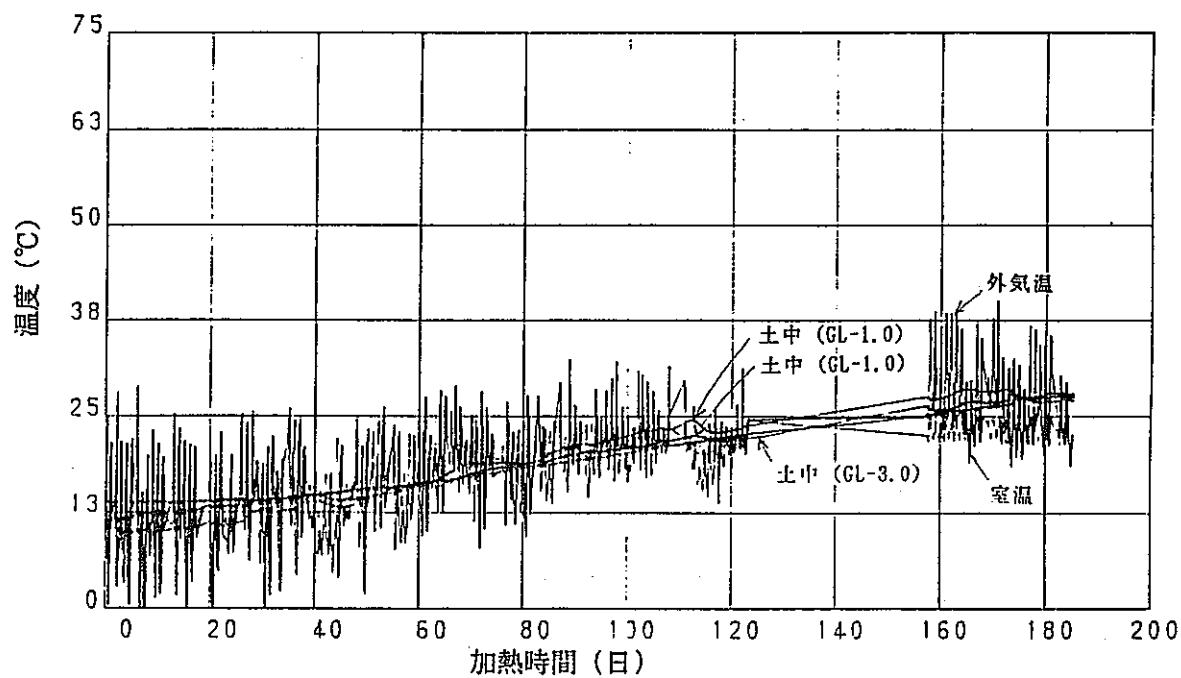


図-15 気温、室温、地中温度経時変化

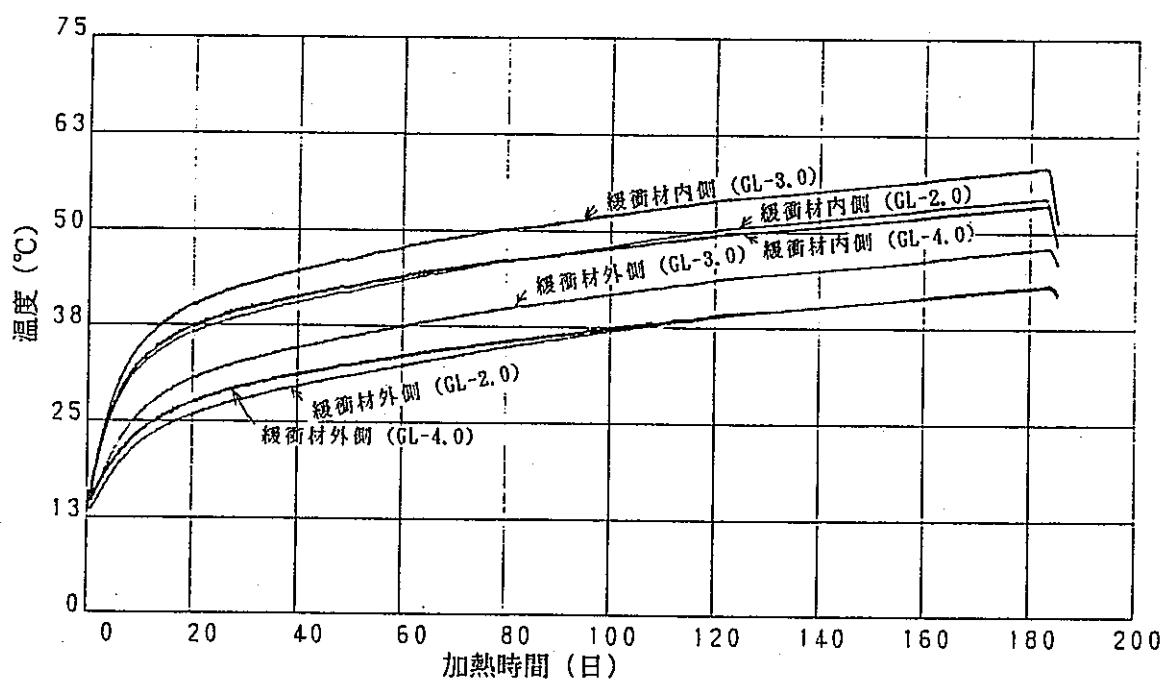


図-16 深度別温度経時変化

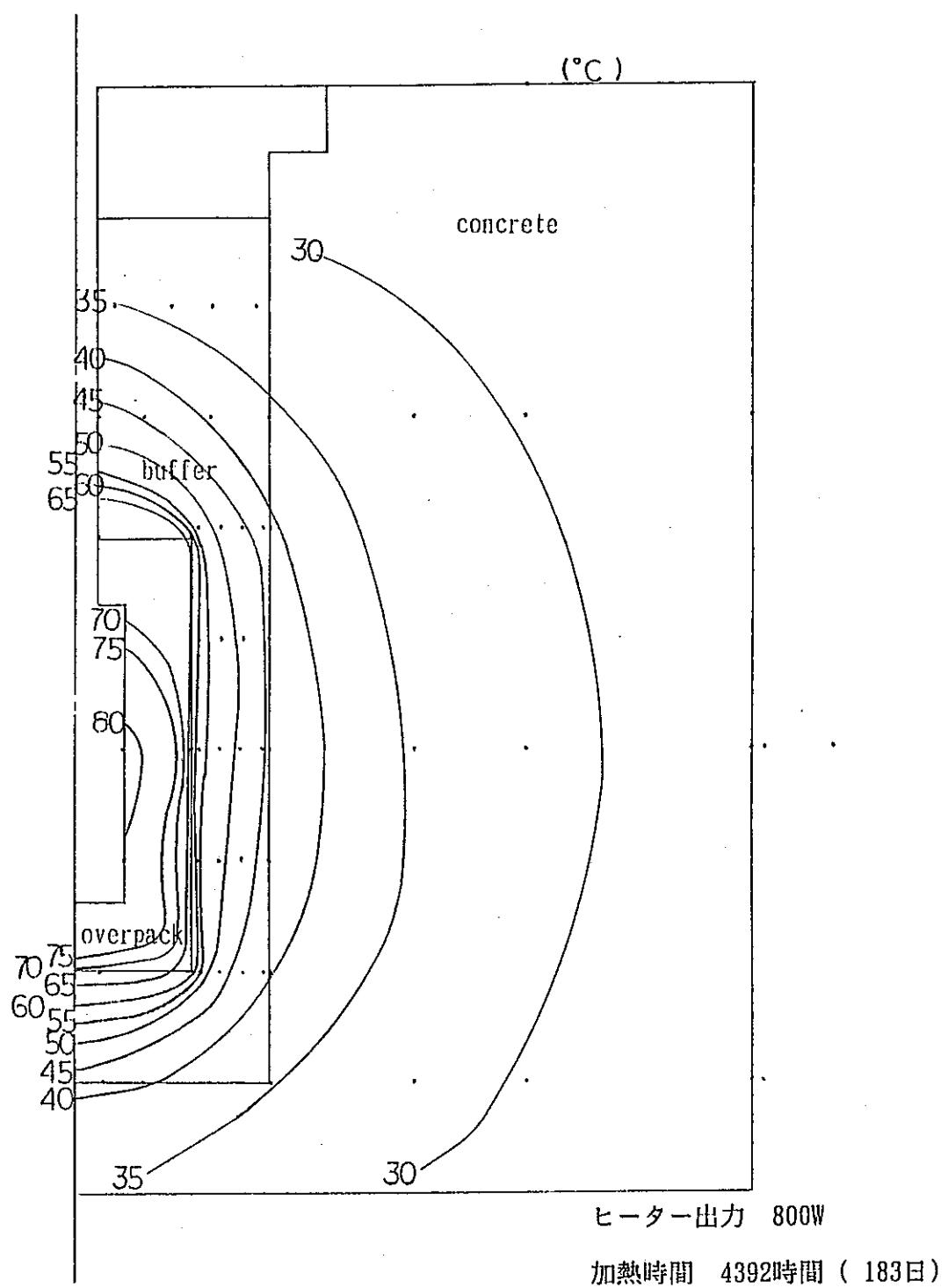


図-17 加熱停止時の温度分布 (A断面)

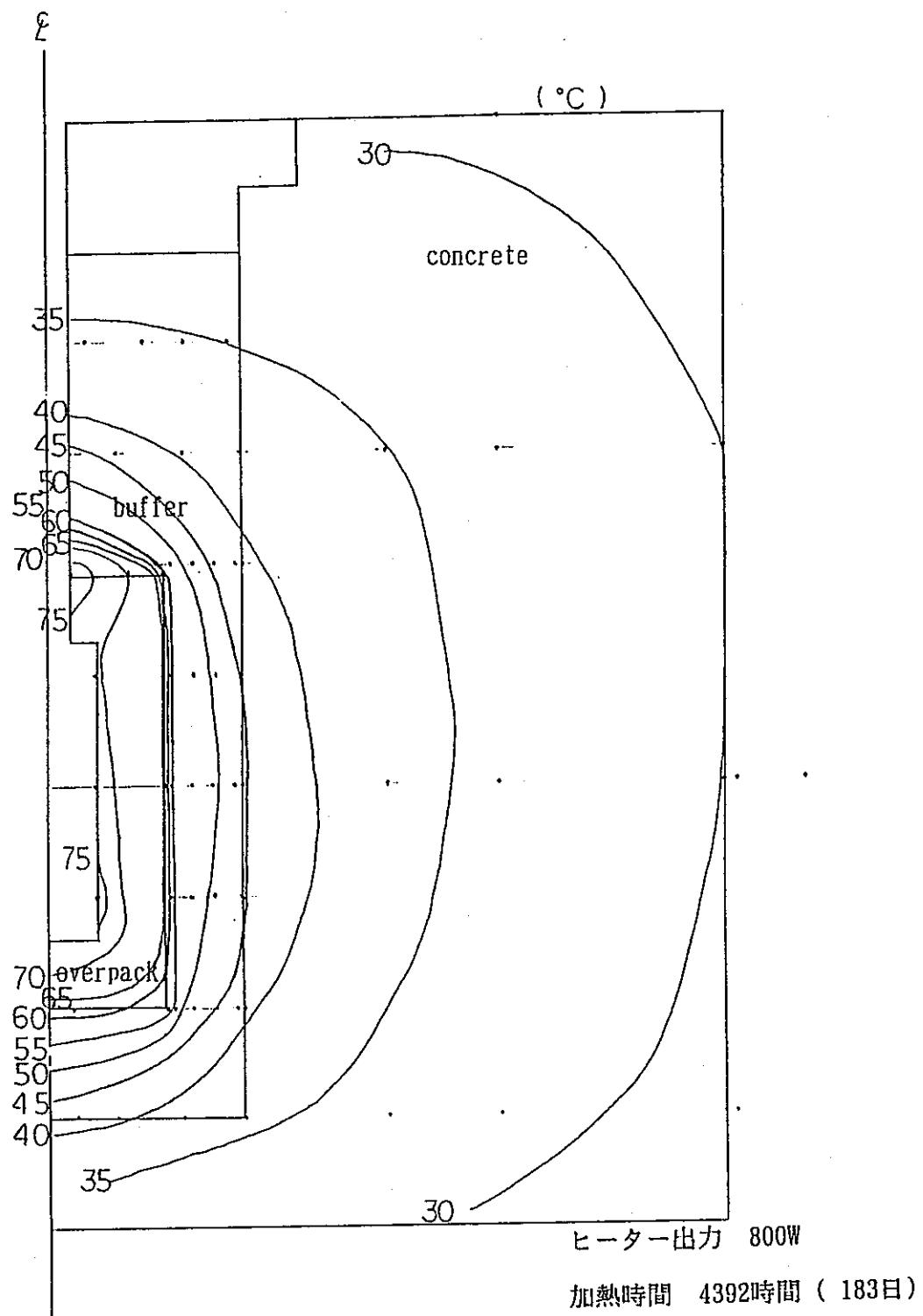


図-18 加熱停止時の温度分布 (B断面)

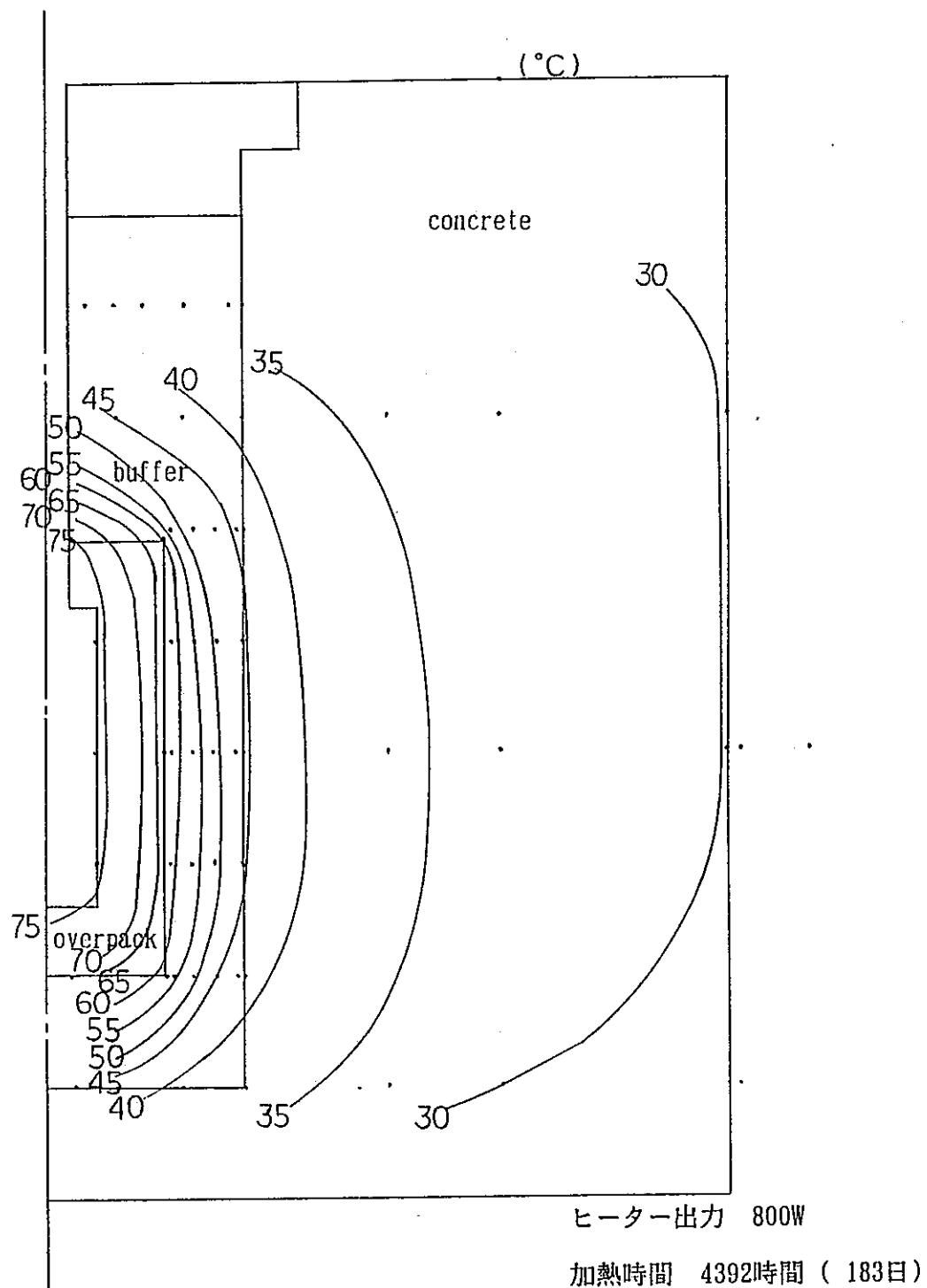


図-19 加熱停止時の温度分布 (C断面)

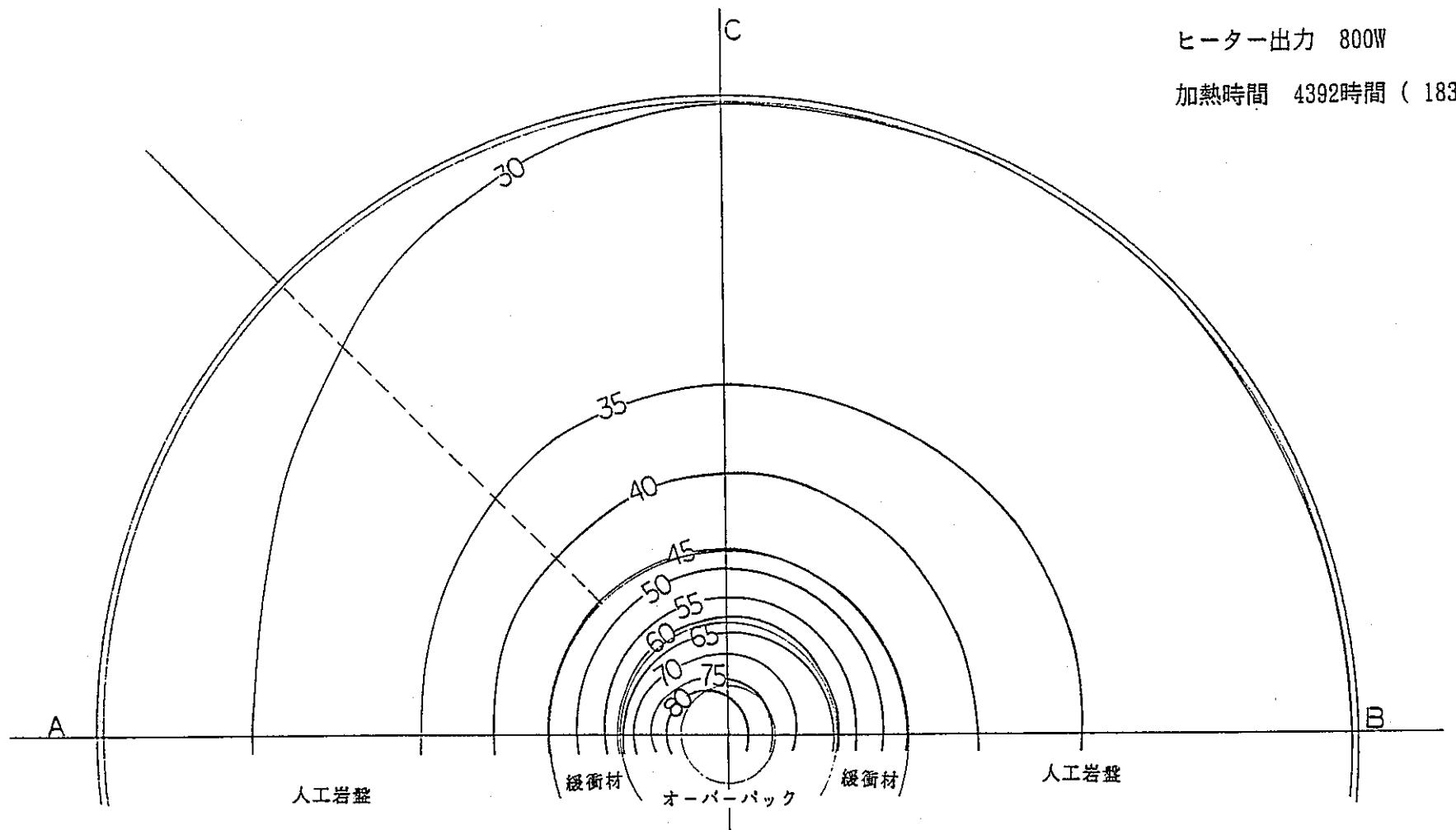


図-20 加熱停止時の温度分布 (ヒーター中心、水平断面)

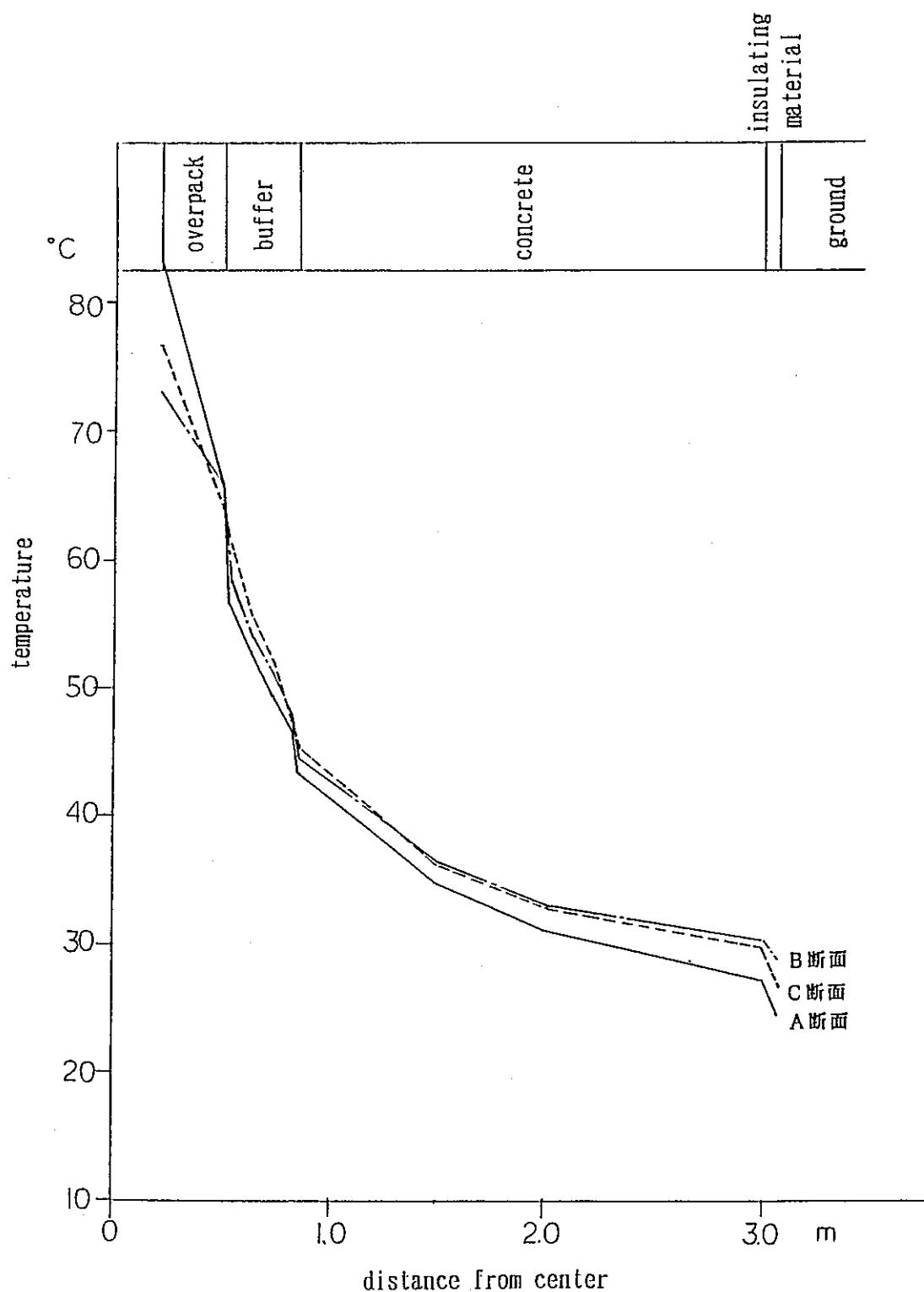


図-21 加熱停止時の温度分布（ヒーター中心）

### 3.3 热流束

热流束分布の测定結果を図-22に示す。

- ① オーバーパック外周面での热流束は外部の気温変動に合わせて変化した。また、加熱開始後 100日まではA断面側の热流束が  $300W/m^2$  とB断面の  $100W/m^2$  より大きかったが、その後逆転し加熱終了時点では両者とも  $100W/m^2$  前後となった。
- ② 人工岩盤内周面の热流束は、温度上昇と同様に20日程度まで上昇した後に、約  $35W/m^2$  とほぼ一定の値となった。
- ③ 人工岩盤外周面の热流束はA断面側では室温の影響を受けて小刻みに変化しているが、A、B断面ともに60日程度まで上昇し約  $3W/m^2$  となった。
- ④ 热流束および温度測定結果より、各部の热伝達係数を計算すると、オーバーパック外周面：約  $10W/m^2 \cdot ^\circ C$  (温度差  $10^\circ C$ )、人工岩盤内周面：約  $10W/m^2 \cdot ^\circ C$  (温度差  $3^\circ C$ )、人工岩盤外周面：約  $1W/m^2 \cdot ^\circ C$  (温度差  $3^\circ C$ ) となる。

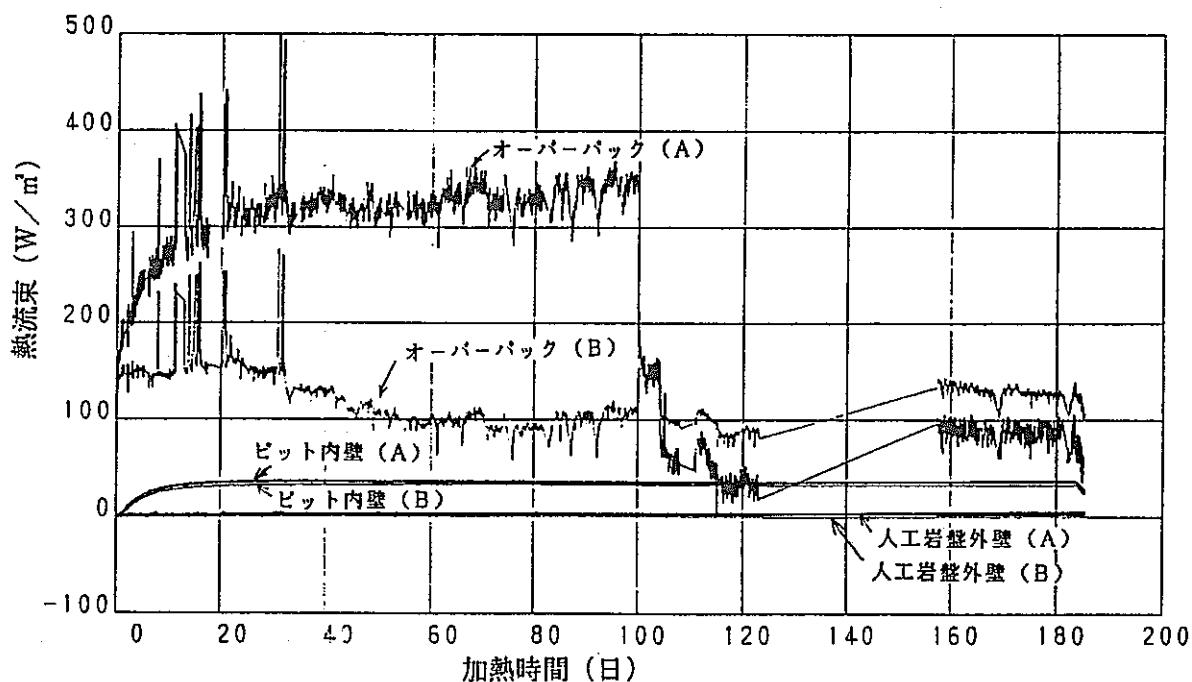


図-22 热流束の経時変化

### 3.4 水分分布

#### (1) 抵抗式水分計

緩衝材に埋設した水分計は、図-23に示すように加熱開始前に飽和度 100%に相当する含水比（約18%）を越える25%以上の値を示した1点（B断面）を除き一定値（約8%）を示した。緩衝材製作時の含水比が約11%であることや、試験開始前に緩衝材に注水を行っていないことから、抵抗式水分計の指示値は緩衝材の含水比を正しく示していないと考えられる。

このため、ボーリングによる緩衝材のサンプリングを行い含水比を測定した。サンプリングによる水分分布測定結果を図-24～26に示す。また、水分測定結果をAppendix 2に示す。

- ① 緩衝材の最上段のベントナイトとケイ砂の粉末を充填した部分は水分を含み軟質化しており、その大部分がコンクリート蓋撤去時に蓋底面に付着した。また、蓋の鋼材に接触していた部分には錆が発生し褐色を呈していた。
- ② 緩衝材の水分分布は、設置時（含水比11.4%）に対してオーバーパック近傍で含水比約8～9%まで乾燥し、外周部および試験孔底部の含水率は増加し最大で約14%となり、今回の試験における0.5°C/cmの温度勾配でも水分分布の変化が生じることが判明した。
- ③ 最上部および下部で採取した緩衝材に接する粉体充填部分は、水分を含み軟質化していた。この部分の含水比は、最上部で約33%、下部で約20%となった。緩衝材と粉末部分では含水状態に大きな差がみられた。
- ④ 緩衝材および粉体充填部分の各含水比に対する飽和度を、表-2に示した平均湿潤密度、含水比とベントナイトおよびケイ砂の混合材料の真比重より膨潤等の体積変化を無視して計算した結果を表-5に示す。
- ⑤ 乾燥期間を7日まで延長し、含水比の測定結果を比較した結果、いずれの試料も乾燥期間による含水比の差は認められなかった。

不飽和領域における水分の測定方法については、①土の水分ポテンシャルを測定する方法、②土粒子間の空隙部分の湿度を測定する方法、③土の電気的特性を測定する方法等があるが、熱-水-応力連成状態における水分測定が確実に行えるものは少ない。本試験で用いた抵抗式の水分計も校正曲線取得のための予備試験において測定可能であった範囲における加熱中の水分変化に追随しなかった。処分環境を長期的に測定するためにも、信頼性の高い水分計と測定方法の開発が必要である。

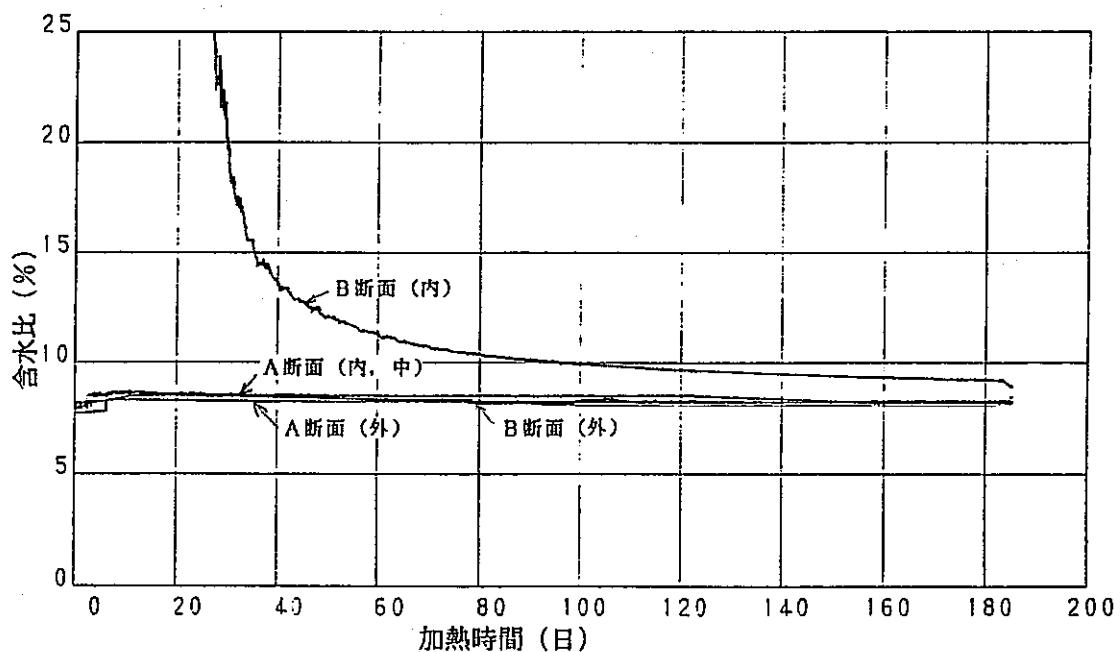


図-23 抵抗式水分計による測定結果

表-5 飽和度計算結果

単位: %

採取位置		含水比	飽和度	備考
緩衝材	設置時	11.4	65.9	(表-2)
	オーバーパック表面	8.7	50.3	
	試験孔底部	14.4	83.3	
粉体部	コンクリート蓋下面	32.6	71.0	
	試験孔周面部	20.8	45.3	隣接緩衝材含水比12.3%
緩衝材平均密度 2.06 t/m <sup>3</sup> (表-2) 粉体充填部平均密度 1.35 t/m <sup>3</sup> (表-2) 緩衝材、粉体真比重 2.72 クニゲルV1 : 2.64、ケイ砂3、5号 : 2.76 設置時含水率 11.4 % (表-2) 緩衝材間隙率 32.0 % 粉体部間隙率 55.4 %				

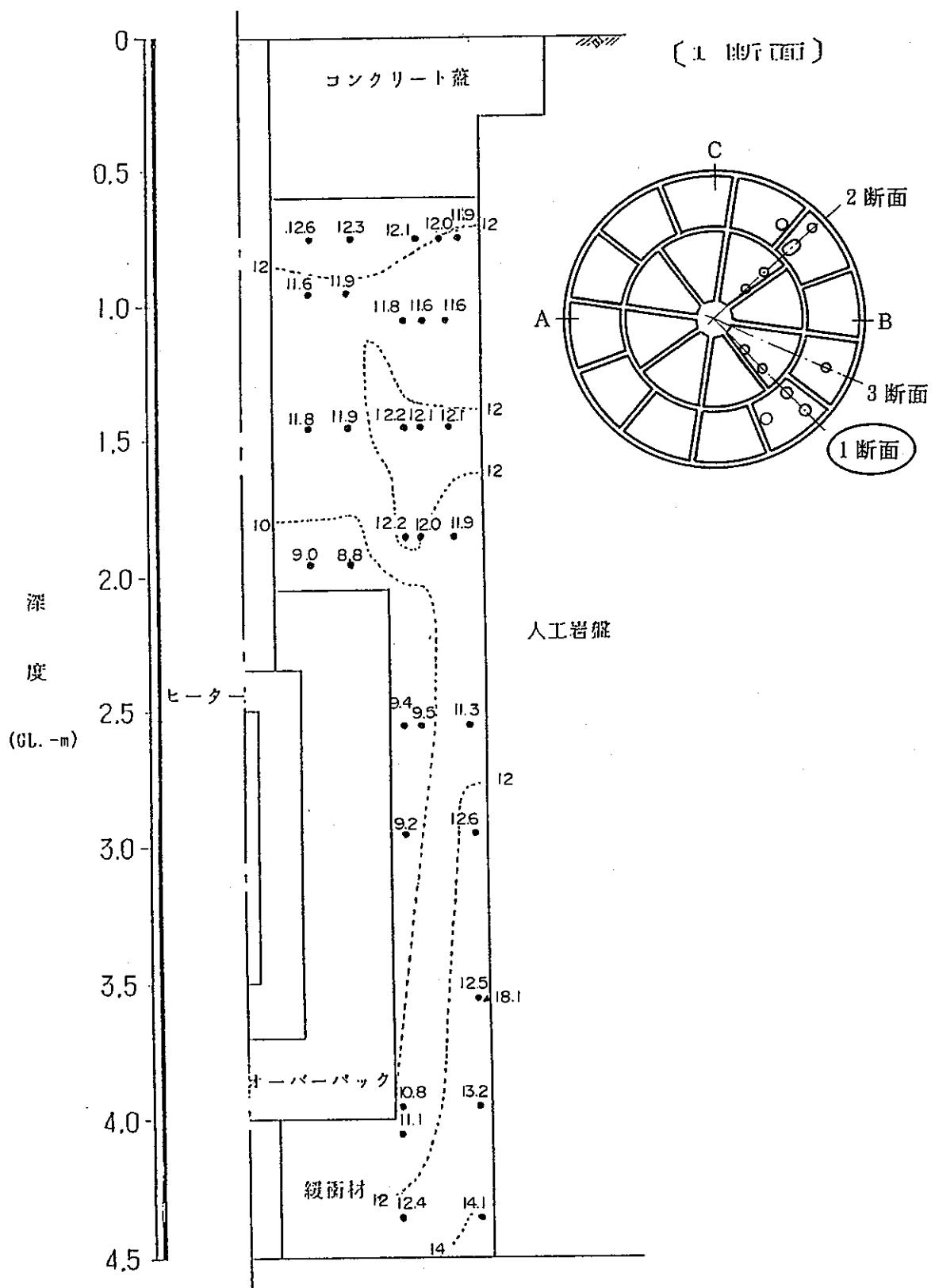
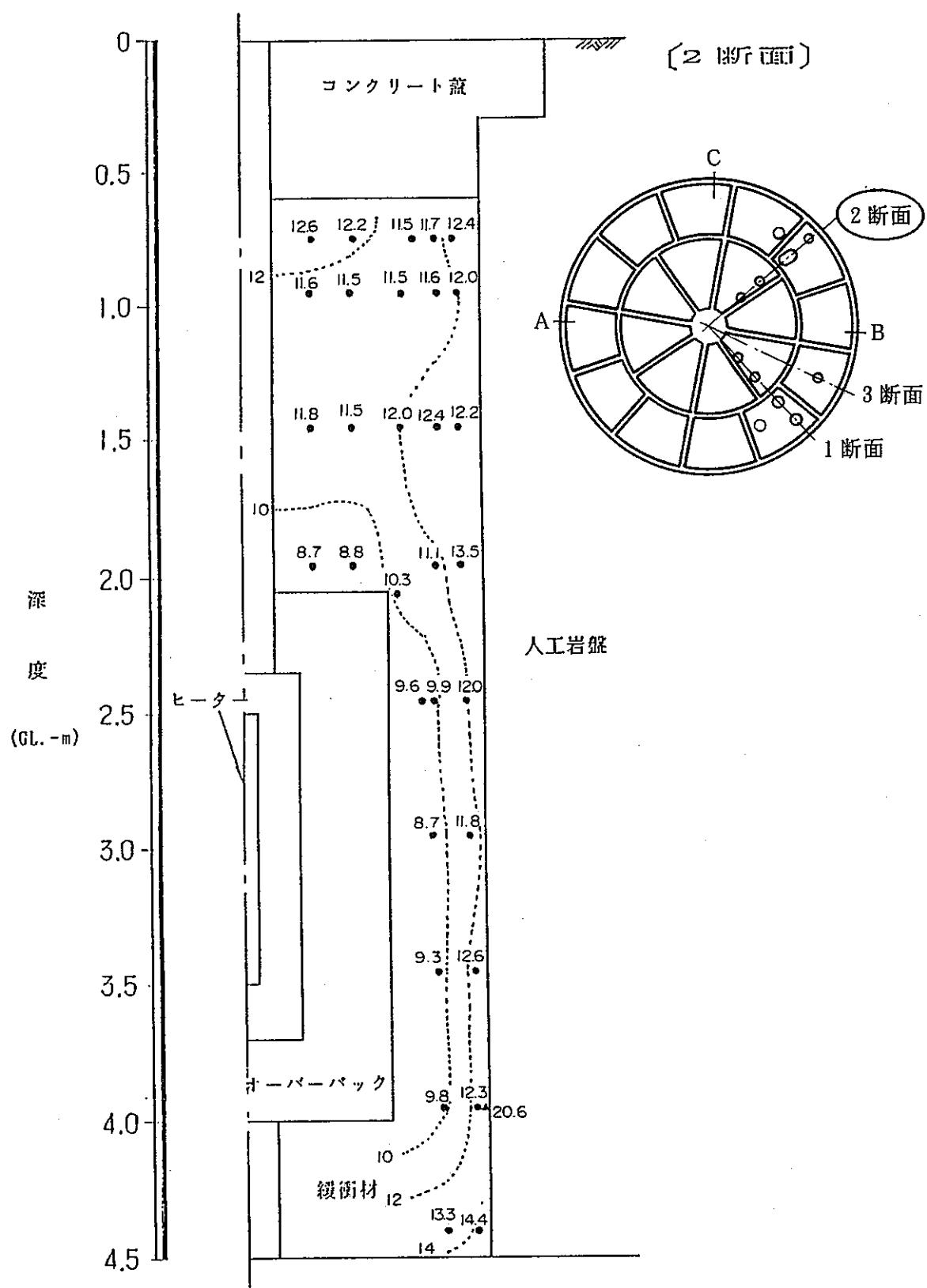


図-24 水分分布（1断面）



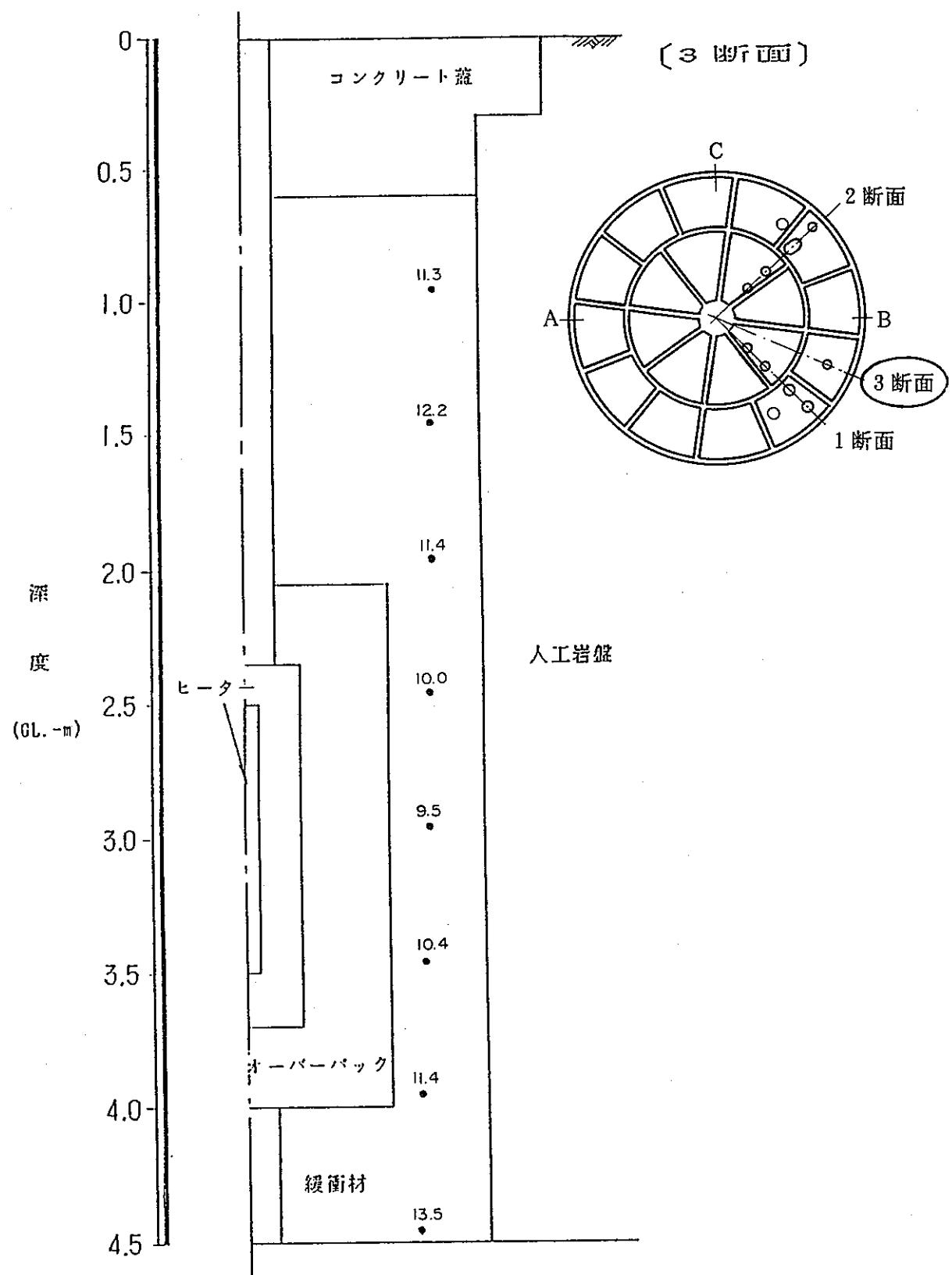


図-26 水分分布（3断面）

### 3.5 膨潤圧

加熱試験継続中に緩衝材の水分移動による膨潤圧とみられる圧力変化は、土圧測定結果(表-6)に示すように確認されなかった。サンプリングによる水分測定の結果、熱による水分の再配分が起こっており、これが圧力変化に結びつかなかった理由として、①緩衝材の水分の増加が試験孔底部の一部分を除き粉体充填部に集中した、②粉体充填部の乾燥密度が小さい<sup>[2]</sup>があげられる。

表-6 土圧測定結果

単位 : kPa

No.	設置位置 (角度、深度)	測定結果			備考
		加熱前	加熱後	増・減	
1	P- 0-4.5	588	490	-98	試験孔底部
2	P- 0-3.5	216	123	-93	ヒータ下部、A
3	P- 90-3.5	98	93	-5	ヒータ下部、C
4	P-180-3.5	69	78	10	ヒータ下部、B
5	P-270-3.5	98	98	—	
6	P- 0-3.0	78	103	25	ヒーター中心、A
7	P- 45-3.0	88	93	5	
8	P- 90-3.0	69	103	34	ヒーター中心、C
9	P-135-3.0	108	98	-10	
10	P-180-3.0	98	98	—	ヒーター中心、B
11	P-225-3.0	98	127	29	
12	P-270-3.0	78	93	15	
13	P-315-3.0	78	98	20	
14	P- 0-2.5	88	108	20	ヒーター上部、A
15	P- 90-2.5	88	108	20	ヒーター上部、C
16	P-180-2.5	118	113	-5	ヒーター上部、B
17	P-270-2.5	118	108	-10	
18	P- 0-1.0	88	137	49	A
19	P-180-1.0	98	127	29	B
20	P- 0- 0	68	118	49	コンクリート蓋

### 3.6 オーバーパック沈下

加熱開始時の変位計指示値59.4mmと加熱停止時の同指示値58.0mmより、オーバーパックの沈下量は1.9mmとなった。また、沈下計設置部分の温度の上昇量(37°C)より、沈下計の長さ(50cm)に対し鉄の線膨張係数( $11 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ )を用いて沈下計の熱膨張を補正した値は1.7mmとなった。

### 3.7 人工岩盤の応力

人工岩盤のひずみ計の測定結果より算出した応力を表-7に示す。人工岩盤は内周部では圧縮、外周部では引張状態となっている。水分の再配分による膨潤圧の発生が確認されていないことから、人工岩盤の応力は人工岩盤内・外周での温度上昇量の差により内周部の熱膨張が拘束されたために発生したと考えられる。

表-7 人工岩盤応力

No	測定位置	ひずみ(MPa)		温度上昇(°C)	備考
		加熱後	増・減		
1	A-970-3.0 半径	(-1.0)	(-1.0)	29.8	無応力計、自由変形ひずみ
2	A-970-3.0 半径	0.6	0.6		
3	A-970-3.0 周	-3.0	-3.1		
4	A-1900-3.0 周	-0.7	-0.7	18.5	
5	A-2900-3.0 鉛直	-0.1	—	14.8	
6	A-2900-3.0 周	1.0	1.1		
7	B-970-3.0 半径	0.6	0.6	30.0	
8	B-970-3.0 周	-3.0	-3.1		
9	B-1900-3.0 周	-0.9	-0.9	18.5	
10	B-2900-3.0 半径	-0.2	-0.4	16.0	
11	B-2900-3.0 周	0.06	0.06		
12	C-970-3.0 周	-4.0	-4.1	29.7	

注1. 測定位置は、計測断面、中心からの距離、深度、応力方向をそれぞれ示す。

注2. 応力算定式

No.2、3、7、8、12

$$\sigma = \{ (\varepsilon_t' - \varepsilon_0') - (\varepsilon_t - \varepsilon_0) \} \times E$$

No.1、4、5、6、9、10、11

$$\sigma = (\varepsilon_t' - \varepsilon_0') \times E$$

ただし、 $\varepsilon_t'$ ：ひずみ値

$\varepsilon_0'$ ：ひずみ初期値

$\varepsilon_t$ ：No.1 ひずみ値

$\varepsilon_0$ ：No.1 ひずみ初期値

E：コンクリートの弾性係数 29,900 MPa (300,000kgf/cm<sup>2</sup>)

## 4. 热伝導解析

热伝導解析結果と加熱試験で得られた実測温度分布とを比較することにより、試験開始前に実施した予備解析<sup>[1]</sup>のモデルと物性値を見直しを行った。

本解析においては計測で明らかとなった、①オーバーパックと緩衝材の間の空隙部分の温度変化、②緩衝材と人工岩盤の間の粉体充填部分の温度変化、③周辺境界の温度上昇を考慮して解析を行った。

### 4.1 解析条件

#### (1) 解析モデル

热伝導解析は予備解析と同様にFEM汎用非線形構造解析コードFINAS<sup>[3]</sup>を用い2次元軸対称モデルで行った。解析モデルの概念図を図-27に示す。

ヒーターは図-2に示したようにガラスビーズ中に埋め込まれているが、予備解析同様に、解析ではヒーターの要素を設けずガラスビーズが均一に発熱するモデルとした。

また、今回の解析においては、新たにオーバーパックと緩衝材の間の空気層および緩衝材と人工岩盤の間の粉体を充填した低密度層をモデル化した。

#### (2) 物性値

解析に用いる物性値は以下のように決定した。

##### ① 発熱密度

発熱密度は、加熱期間中のヒーター出力0.8kWが高さ105cm、半径22cmのガラスビーズに均一に分布するものとして算出した。

$$\begin{aligned} \text{ヒーター発熱密度} &= \frac{[\text{ヒーター出力}]}{[\text{発熱部分のガラスビーズの体積}]} \\ &= 5.07 \times 10^{-3} \text{W/cm}^3 \end{aligned}$$

##### ② 熱定数

実測データおよび文献値より熱定数を決定し、これを基に実測値に合うように修正した。初期の熱定数を表-8に示す。

##### ③ 境界条件

境界条件は予備解析と同じ熱伝達境界とし、実測値に合うように熱伝達係数を1/2とした。

初期温度 15°C

熱伝達係数 0.58W/m<sup>2</sup>・°C (0.5kcal/m<sup>2</sup>・h・°C)

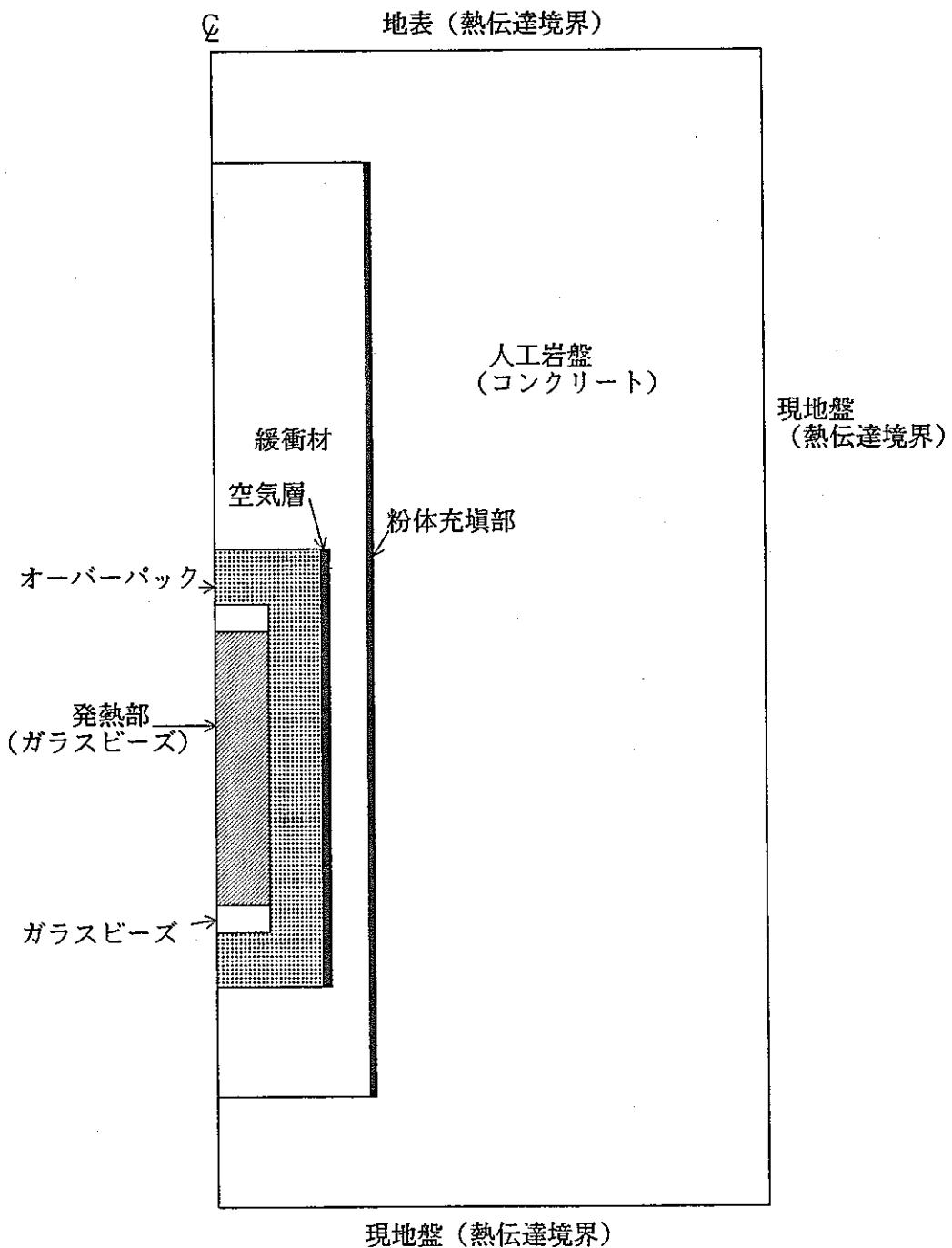


図-27 热伝導解析モデル概念図

表-8 初期熱定数一覧

種類	熱伝導率 W/m・°C	比熱 kJ/kg・°C	密度 t/m <sup>3</sup>	備考
ガラスビーズ	$2.55 \times 10^{-1}$	0.84	1.6	実測値、推定値
オーバーパック	53.0	0.46	7.8	炭素量 0.5%以下
空気層	$2.43 \times 10^{-2}$	1.0	$1.3 \times 10^{-6}$	文献値 <sup>[4]</sup> 、100°C
緩衝材	1.63	0.92	2.0	実測値
粉体充填部	$5.69 \times 10^{-1}$	0.92	1.3	
人工岩盤	1.88	0.75	2.3	文献値 <sup>[5]</sup> 、実測値

#### 4.2 解析結果

##### (1) 初期熱定数を用いた解析結果

実験値および文献値から決定した初期熱定数を用いた解析結果と実測値との比較を図-28に示す。実測値と比較して解析結果は、①オーバーパックと緩衝材の間の温度降下が大きい、②緩衝材中の温度低下が小さい、③人工岩盤外周部の温度が低い値となつた。

##### (2) 実測温度とのフィッティング

以下の手順により実測温度とのフィッティングを行った。

###### ① 热伝導率をパラメーターとしたフィッティング

初期熱定数を用いた解析結果と実測値との比較において明らかとなった3点について、熱伝導率を変えることにより温度分布のフィッティングを図った。表-9に解析に用いた熱伝導率を、図-28に解析結果と実測値の比較を示す。

緩衝材中の温度分布は比較的一致したが、人工岩盤の温度は(1)の解析と同様に実測値に比べて5°C程度低い値を示した。

###### ② 境界部分の温度上昇を考慮したフィッティング

人工岩盤の温度を実測値に近づけるため、実測による周辺温度の上昇にあわせて人工岩盤外周部における境界温度を上昇させる解析を実施した。境界温度の上昇は図-15の地中温度の変化を考慮し、 $10^6 \sim 10^8$ 秒(11.6~116日)の間で上昇させた。また、人工岩盤部分の温度分布を一致させるためにコンクリートの熱伝導率も変化させ

た。解析結果と実測値との比較を図-28、29に解析による等温度分布図を図-30にそれぞれ示す。

表-9 変更熱伝導率一覧

種類	熱伝導率 W/m・°C	備考
ガラスビーズ	$2.55 \times 10^{-1}$	
オーバーパック	53.0	
空気層	$7.12 \times 10^{-2}$	初期値×3
緩衝材	1.26	初期値×3/4
粉体充填部	$5.69 \times 10^{-1}$	
人工岩盤	2.55	

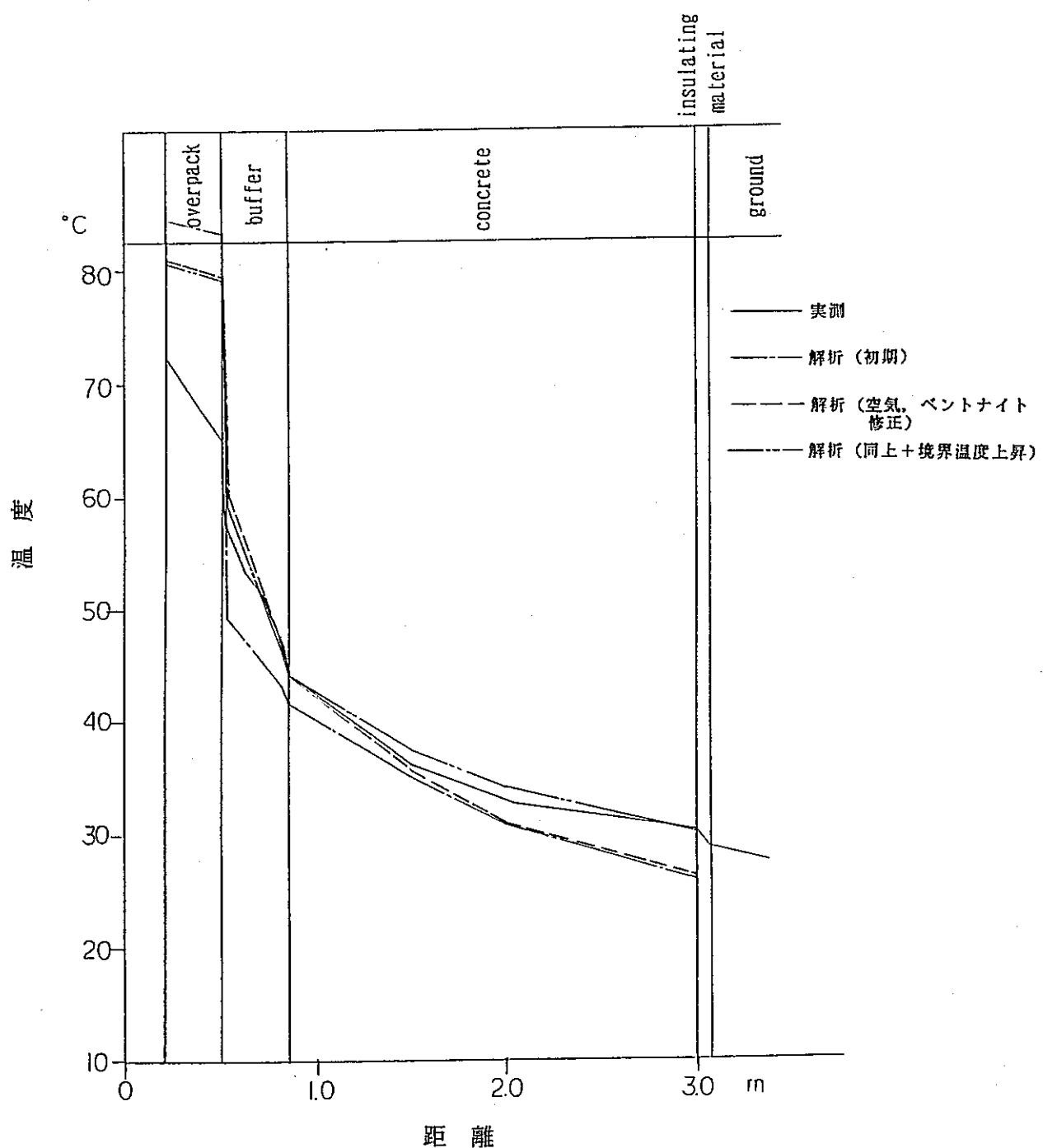


図-28 解析結果と実測値の比較 (G L - 3.0 m)

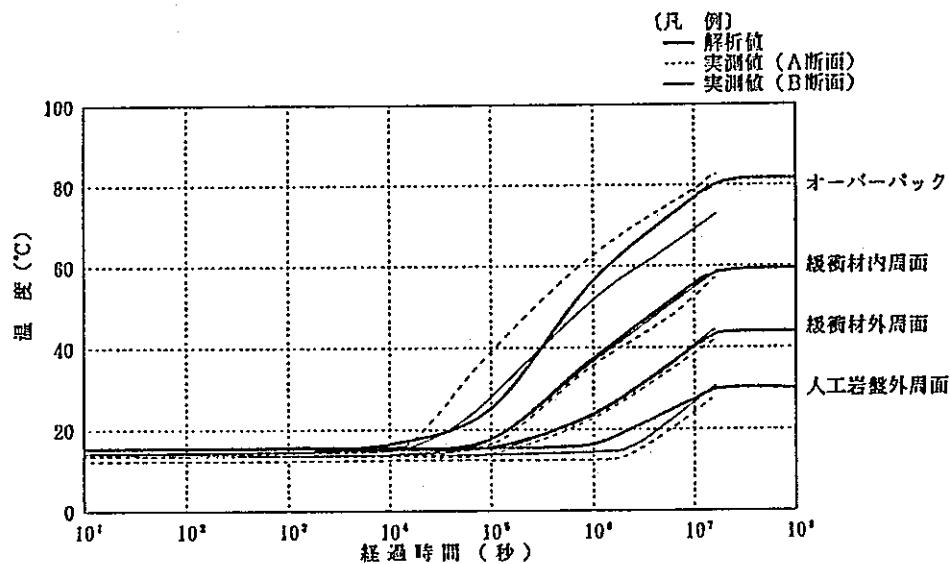


図-29 解析結果と実測値の比較（経時変化）

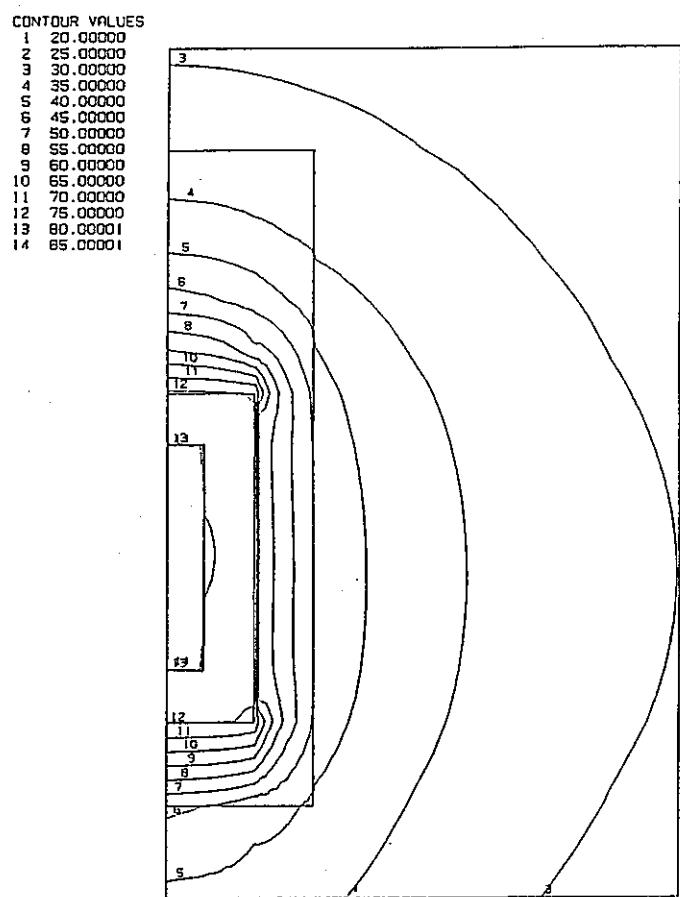


図-30 解析結果較比較等温線

## (3) 解析結果と実測値との比較

解析結果と実測値とを比較した結果を以下に述べる。

- ① オーバーパック内周面の温度は解析に用いた熱定数により変化したが、A、B、C断面の平均値とほぼ同じ温度となった。
- ② オーバーパック内外周面の温度差は、解析値の約1°Cに対し実測値では8~17°Cとなった。これは、オーバーパックと緩衝材との間の空気層における温度低下を含んだ温度がオーバーパック外周部の温度として測定されたためと考えられる。
- ③ オーバーパックと緩衝材の間の空気層（幅2cm）における温度差は、実測値では3~9°Cであるが、②で述べたオーバーパックの温度差を考慮するとこれより大きく14~28°Cであると想定される。解析においては、空気層の熱伝導率を3倍とした結果とほぼ一致した。これは、空気層中において熱伝導に加えて熱放射や対流による伝熱が生じていたためと考えられる。
- ④ 緩衝材と人工岩盤の間の粉体充填部分（幅3cm）において温度が約3°C低下した。解析においては、熱伝導率を緩衝材の値の約1/3としてほぼ一致したが、この部分は実際の充填状況に合わせた物性値の確認が今後必要である。
- ⑤ 热伝導解析では加熱開始後115日で平衡状態となったが、実測値は試験期間中を通じて緩やかに上昇した。これは気温の上昇の影響と考えられたため、解析において境界の温度を上昇させたところ実測値とほぼ一致した。
- ⑥ 热伝導解析の結果、熱流束はオーバーパック外周面で90W/m<sup>2</sup>（実測値100W/m<sup>2</sup>）、人工岩盤内で周面40W/m<sup>2</sup>（実測値35W/m<sup>2</sup>）、人工岩盤外周面で7W/m<sup>2</sup>（実測値3W/m<sup>2</sup>）となり人工岩盤外周部の境界面を除き実測値とほぼ一致した。

今回の解析の結果、廃棄体の発熱による緩衝材中の伝熱現象については、実験で得られた熱伝導率、比熱等のパラメータを用いてほぼ再現できた。今後さらに解析精度を高めるため、実際の処分施設に合わせた熱定数に関するデータの取得および緩衝材とオーバーパック間のような空隙部分における熱放射、対流の影響を含めたモデル化を進める必要がある。

## 5. 連成コードによる解析

既存の熱-水-応力連成解析コードを用いて連成解析を行い、実測値との比較により解析手法の問題点を検討することを目的に解析を実施した。

### 5.1 解析条件

#### (1) 解析手法およびモデル

解析は、有限要素法による連成解析コードTHAMES<sup>[6]</sup>に蒸気による水分の移動の項を加えて改良したコードを用いて行った。

蒸気による水分の移動を含めた水分移動の支配方程式を次に示す。

$$\begin{aligned} & \{\rho_r k(\theta)_{ij} h_{ij}\}_{ij} + \{\rho_v D_\theta \frac{\partial \theta^v}{\partial T}\}_{ij} \\ & - \rho_{r0} n S_r \rho_r g \beta_p \frac{\partial h}{\partial t} - \rho_r C(\phi) \frac{\partial h}{\partial t} - \rho_r S_r \frac{\partial u_{i,j}}{\partial t} \\ & + \rho_{r0} n S_r \beta_T \frac{\partial T}{\partial t} - \rho_v \frac{\partial \theta^v}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} - \theta^v \frac{\partial \rho_v}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho_v - \rho_r) q_T = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $\rho_r$ は地下水の密度、 $k(\theta)_{ij}$ は透水テンソルである。透水係数は体積含水率の関数であり、不飽和部も通じてダルシー則が成り立つと仮定している。 $\rho_{r0}$ は初期状態の地下水密度、 $n$ は間隙率、 $S_r$ は飽和度、 $\beta_p$ は水の圧縮係数、 $C(\phi)$ は比貯流係数で $\partial \theta / \partial \phi$ で表される。 $u_{i,j}$ は変位ベクトル、 $\beta_T$ は水の膨張係数である。 $q_T$ は蒸気発生量、 $\theta^v$ は蒸気水の体積含水率、 $D_\theta$ は蒸気の移動係数、 $\rho_v$ は蒸気密度である。ここでは、蒸気密度の空間微分は微小であると仮定し無視している。また、 $\theta^v$ 、 $\rho_v$ は温度のみの関数であると仮定している。

蒸発による潜熱移動を加えたエネルギーの連続式を次に示す。

$$\begin{aligned} & (\rho C_v)_m \frac{\partial T}{\partial t} + n S_r \rho_r C_v V_{f,i} T_{i,j} - K_{Tm} T_{i,j} + \rho_r H q_T \\ & + n S_r T \frac{\beta_T}{\beta_p} k(\theta) h_{i,j} + \frac{1}{2} (1-n) \beta_T \frac{\partial}{\partial t} (u_{i,j} + u_{j,i}) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $(\rho C_v)_m$ は水と骨格粒子からなる場の比熱、 $C_v$ は流体の比熱、 $K_{Tm}$ は水と骨格粒子からなる場の熱伝導係数であり、 $H$ が単位質量あたりの水の蒸発潜熱である。

(1)式を解く際に必要な不飽和水分特性 ( $\theta \sim \phi$ ) は次の Brooks & Corey<sup>[7]</sup> の式を用いて設定した。

$$S_e = \left( \frac{\phi_{cr}}{\phi} \right)^{\lambda} \quad (3)$$

ここで、 $S_e$  は有効飽和度、 $\phi_{cr}$  は限界毛管高さ、 $\lambda$  は定数である。有効飽和度は、残留飽和度  $S'_r$  と飽和度  $S_r$  を用いて次式で表される。残留飽和度  $S'_r$  は、土の吸着水のようにもはや浸透によって液状では移動し得ない水分の飽和度を示す。

$$S_e = \frac{S_r - S'_r}{1 - S'_r} \quad (4)$$

また、比透水係数  $k_r$  は Irmay<sup>[8]</sup> の式を用いて設定した。

$$k_r = S_e^n \quad (5)$$

以上のような方程式を用いて、図-31に示すようなモデルで蒸発を考慮する。

不飽和水分曲線  $\theta \sim \phi$  は、温度が  $\Delta T$  高くなるにつれ表面張力の減少分だけ  $\Delta \phi$  が下方に移動する。すなわち、あるサクションにおいて、温度が高くなると同図に示したように液状水の体積含水率が  $\theta^t$  から  $\theta^{t+1}$  に変化する。この温度増加によって毛管水から離脱した水分が瞬時に蒸発すると考える。この変化分が瞬時に蒸発するものと仮定し蒸気発生量を決定した。よって蒸気水の体積含水率は次式のようになる。

$$\Delta \theta^v = -\Delta \theta = \theta^t - \theta^{t+1} \quad (6)$$

これを用いて、 $\partial \theta^v / \partial T$  は次のように設定できる。

$$\frac{\partial \theta^v}{\partial T} = \frac{\theta^t - \theta^{t+1}}{T^{t+1} - T^t} \quad (7)$$

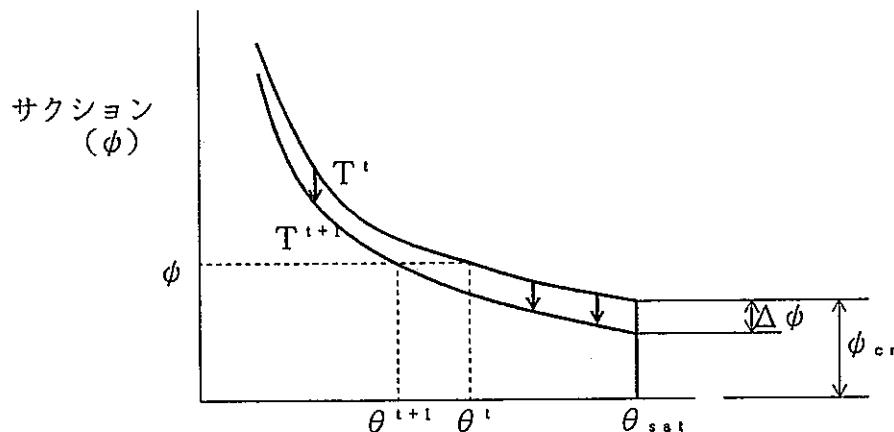


図-31 溫度増加と不飽和水分特性の変化

蒸発した気相の圧力が大気圧と平衡状態にあるとして蒸気密度は1気圧下の値を用いた。

含水率の算定は、次式により行った。

$$\omega = \frac{\rho_w}{G_s} \left( eS_r + \frac{e\theta^v}{n} \right) \quad (8)$$

ここで、 $\rho_w$  は水の密度、 $G_s$  は真比重、 $\theta^v$  は蒸気の体積含水率、 $n$  は間隙率であり、 $\theta^v$  は各時間ステップ毎に発生する蒸気を累積したもの用いた。

水分は、温度の上昇に従い蒸発し、温度勾配により移動する。本解析では、水分の体積は蒸発しても液状の時から変化しないものとする。従って、含水比 $\omega$ は温度勾配による移動と間隙比の変化、およびその時点での不飽和水分特性に支配される。特に不飽和水分特性が温度上昇と共に保水能力が低下する様に修正されるために、温度上昇とともに含水比が低下する傾向になる。

解析に用いるモデルは、オーバーパック周囲の緩衝材を想定し、一次元で $\Delta x = 1\text{ cm}$ 、 $x = 25\text{ cm}$ とし、初期温度15°C、初期体積含水率0.21、両端の温度を加熱試験で得られた実測温度（人工岩盤側46°C、オーバーパック側56°C）に設定して、約180日間の非定常解析を行った。

## (2) 物性値

解析に用いた物性値を表-10に示す。

表-10 緩衝材物性値一覧

項目	値	備考
単位体積重量 ( $t/m^3$ )	2.0	実測値
真比重	2.7	実測値
熱伝導率 ( $W/m \cdot ^\circ C$ )	1.63	実測値
比熱 ( $kJ/kg \cdot ^\circ C$ )	0.92	実測値
熱膨張係数 ( $/^\circ C$ )	$10^{-5}$	
弾性係数 (MPa)	194	実測値
ポアソン比	0.3	
初期間隙比	0.47	
飽和透水係数 ( $m/s$ )	$10^{-11}$	

## 5.2 解析結果

以上のような手法を用いて、以下の影響について検討を行った。

- ① 蒸気の移動係数 ( $D_T$ ) の影響
- ② 熱膨張係数  $\alpha_T$  の影響
- ③ Irmay の式の  $n'$  の影響
- ④ Brooks & Corey の  $\lambda$  の影響

解析結果は以下のとおりである。

### (1) 蒸気の移動係数 ( $D_T$ ) の影響

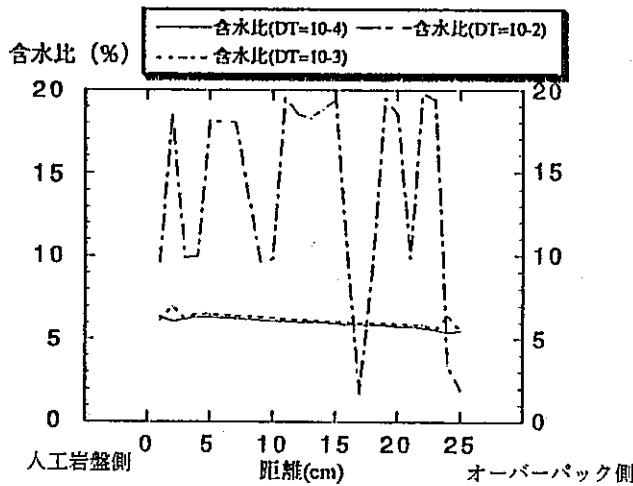
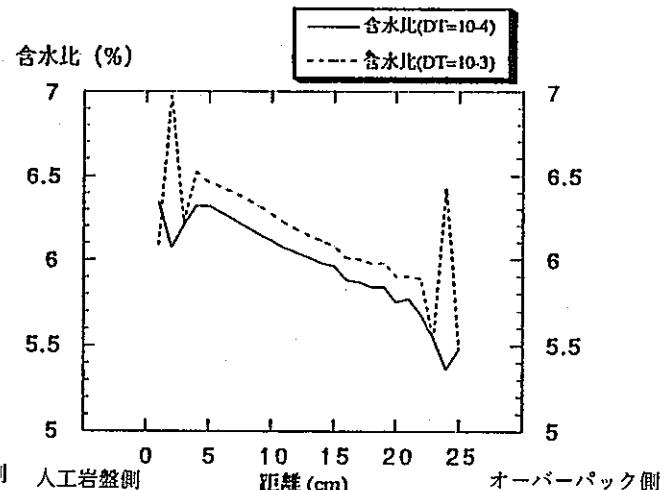
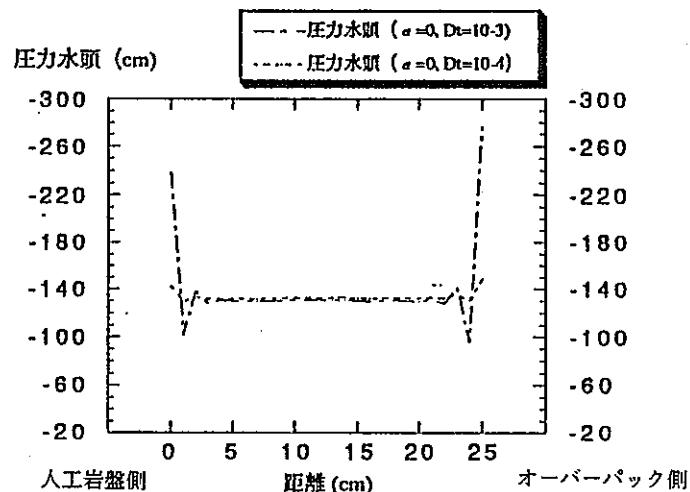
温度勾配による水分移動を表す係数  $D_T$  は本解析では以下の様に表される。

$$D_T = D_\theta \frac{\partial \theta^v}{\partial T} \quad (\text{cm}^2/\text{°C} \cdot \text{s}) \quad (9)$$

蒸気の移動係数については実測例が少ないとより  $10^{-2}$ 、 $10^{-3}$ 、 $10^{-4}$  ( $\text{cm}^2/\text{°C} \cdot \text{s}$ ) の 3 段階とし、熱膨張係数をゼロとして間隙率の変化の影響を削除して、その違いによる傾向を検討した。

解析の結果、含水比は図-32に示すように  $D_T$  が  $10^{-2}$  ( $\text{cm}^2/\text{°C} \cdot \text{s}$ ) となると解が振動した。また、図-33に示すように  $D_T$  が  $10^{-3}$  と  $10^{-4}$  ( $\text{cm}^2/\text{°C} \cdot \text{s}$ ) のケースを比較して判るように、 $D_T$  が小さくなると含水比が小さくなり、両端の振動も小さくなつた。解の振動は、本解析では水の動きに関して閉じた状態となっており、内部の移動が両端で反射するためと思われる。

圧力水頭は図-34に示す。ここでは、 $D_T$  が  $10^{-2}$  ( $\text{cm}^2/\text{°C} \cdot \text{s}$ ) については図の範囲を越えて振動しており省略している。両端の解が振動している部分を除き圧力水頭の差は認められなかった。

図-32  $D_T$  を変えた場合の含水比分布図-33  $D_T$  が  $10^{-3}$  と  $10^{-4}$  ( $\text{cm}^2/\text{°C} \cdot \text{s}$ ) の場合の含水比分布図-34  $D_T$  を変えた場合の圧力水頭分布(2) 热膨張係数 ( $\alpha_T$ ) の影響

$\alpha_T$  が  $10^{-5}$  とゼロの場合の解析結果を図-35、36に示す。両図から明らかなように、含水比、圧力水頭ともに熱膨張係数による変化は認められなかった。これは、今回の解析における温度勾配では間隙比があまり変化しないため差が生じなかったと思われる。

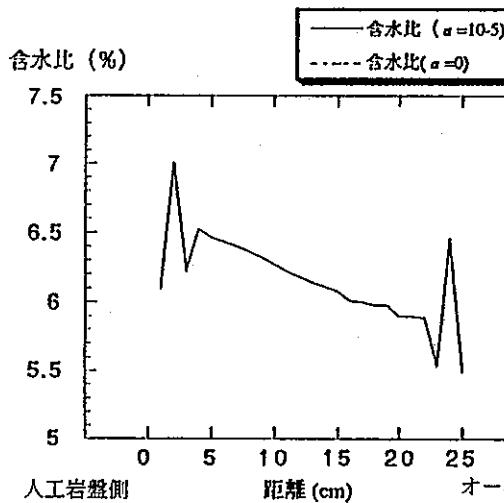


図-35 热膨張係数が異なる場合  
の含水比分布

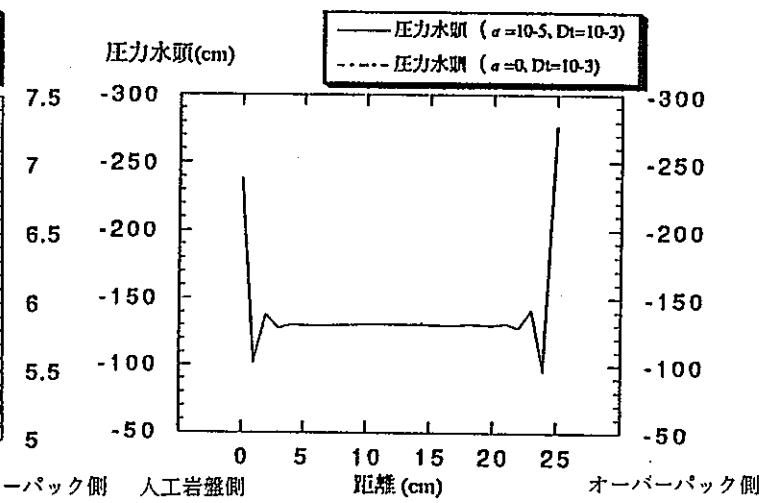


図-36 热膨張係数が異なる場合  
の圧力水頭分布

### (3) Irmayの式の $n'$ の影響

(5)に示す Irmayの式中の  $n'$  は、粘性土では 3~10、砂質土では 2.5~4 の値をとることが知られている。また、この値を飽和透水係数  $k_{sat}$  (cm/s) から換算するための式を次式のように西垣が提案している<sup>[9]</sup>

$$n' = 0.69 - 1.31 \log(k_{sat}) \quad (10)$$

緩衝材の飽和透水係数  $k_{sat} = 10^{-12} \text{ cm/s}$  から、 $n'$  は 16.4 となる。その他のケースでは便宜的に  $n' = 5$  としている。図-37に相対透水係数と体積含水率の関係を、図-38、39に不飽和透水間関数が異なる場合の含水比と圧力水頭を示す。両図から、含水比、圧力水頭ともに、不飽和透水間関数の影響を受けていないことがわかる。これは、飽和透水係数自体が非常に小さいため、透水係数の変化が解析結果に及ぼす影響も小さくなつたものと考えられる。

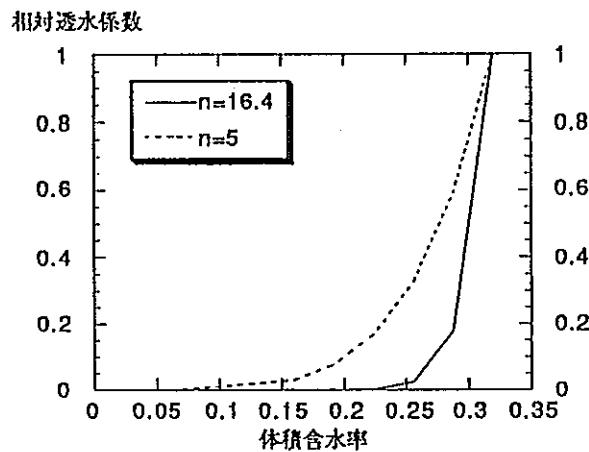


図-37  $n' = 5$  と 16.4 の場合の Irmay の式を用いた不飽和透水関数

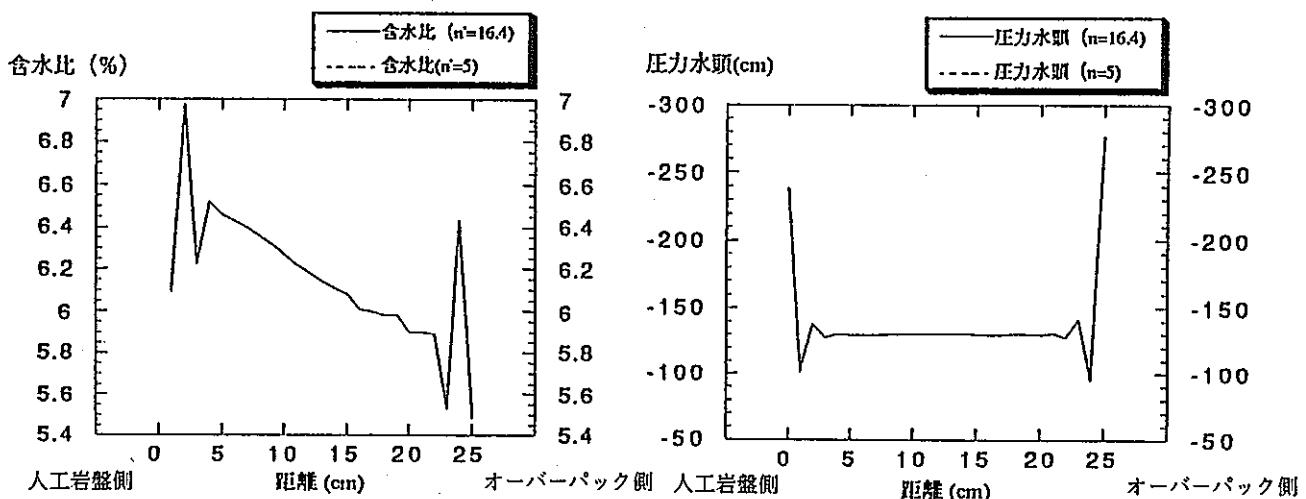


図-38 不飽和透水関数が異なる場合  
の含水比分布

図-39 不飽和透水関数が異なる場合  
の圧力水頭分布

#### (4) Brooks & Corey の式の $\lambda$ の影響

この  $\lambda$  に関しては、Mualem<sup>10</sup>が50種類の試料に関して求めているが、その値は0.2～10の範囲にばらつき、一概に土の種類だけでは決定しがたいことを報告している。今回の検討では便宜的に設定した  $\lambda = 2$  に対し0.30としたケースを比較した。

図-40、41に解析結果を示す。 $\lambda = 0.3$ の場合には含水比分布の変化が小さいことがわかる。これは、 $\lambda$ が小さくなると $\partial\psi/\partial\theta$ が大きくなり（不飽和水分特性曲線の勾配が急になり）、温度上昇により $\psi$ が低下することによる $\theta$ の変化率が小さいため、蒸発量が少なくなったためと考えられる。

圧力水頭に関しては、不飽和水分特性が変わると、初期の含水比を与える水頭が変わるために直接の比較は意味がないが、 $\lambda = 0.3$ の時の方が振動が大きいことがわかる。

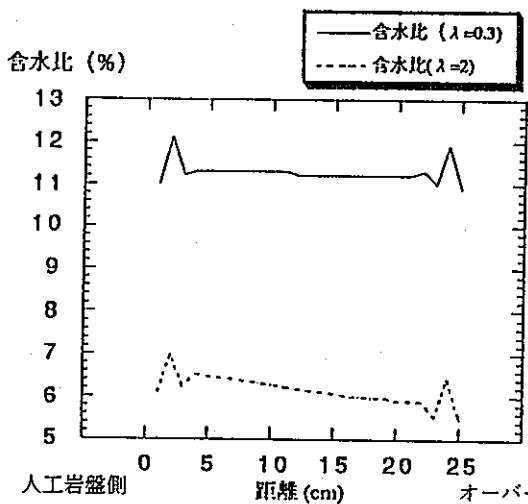


図-40 不飽和水分特性曲線が異なる場合の含水比分布

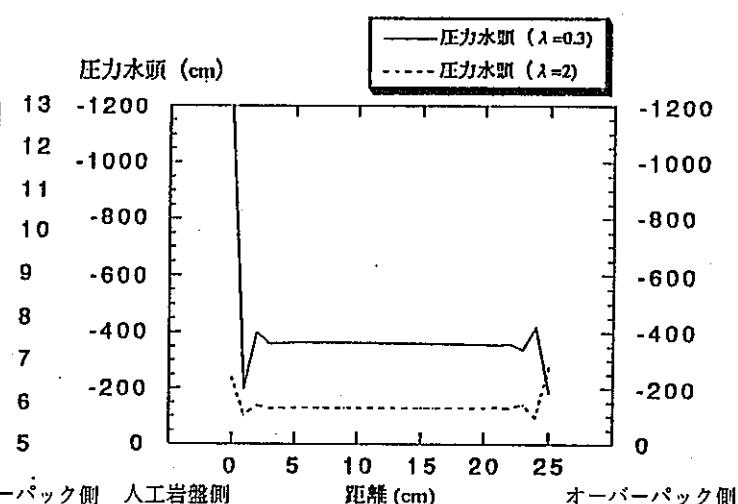


図-41 不飽和水分特性曲線が異なる場合の圧力水頭分布

以上の結果より、温度勾配による水分移動に与える影響としては、不飽和水分特性( $\theta \sim \psi$ )の形状が最も大きいことがわかった。

今回の検討結果をもとに、Brooks & Coreyの式において、 $\lambda = 2$ 、 $\phi_{cr} = 100\text{cm}$ とした時の不飽和水分特性を用いて計算した水分分布と実測値の比較を図-43に示す。含水率の測定点数が少ないため、定量的に比較することは困難であるが、実測値に比較し、計算値の含水率の偏りが小さい傾向にある。これは、解析における蒸発量とその移動が実際より少ないと考えられる。

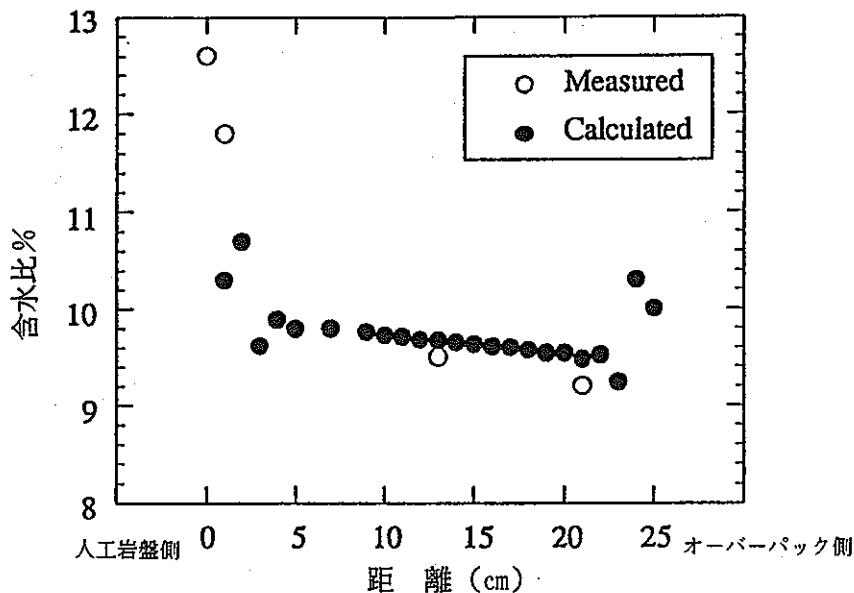


図-42 緩衝材中の水分分布解析結果

## (5) まとめ

今回の解析は、以下に示す仮定にもとづいている。

- ① 温度上昇により、毛管水から離脱した液状水が瞬時に蒸発する。
- ② 蒸気の体積は、蒸発しても変化しない。
- ③ 蒸気の圧力は 1気圧で一定。
- ④ 蒸気の体積含水率と密度を関係付ける定まった関係がない。

これらは実験で確認されたものではない。特に、①は蒸発のメカニズムに関するものであるが、不飽和部での蒸気の発生については観察例も少ないため、今後も緩衝材大型試験で得られる実測値と計算値の差を比較することによりそのメカニズムを検討する必要がある。

また、温度勾配下での水分移動を表すものとして以下に示すPhilip & de Vries<sup>10</sup> の式がある。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\theta \nabla \theta) + \nabla \cdot (D_T \nabla T) + \frac{\partial K}{\partial z}$$

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - L \nabla \cdot (D_{\theta_{\text{vap}}} \nabla \theta)$$

上記の式を組み込んだ熱-水-応力連成モデル<sup>[2]</sup>による解析を行い、今回の結果と比較・検討することにより、温度勾配下での水分移動のモデルを確立して行く必要がある。

## 6. まとめ

緩衝材大型試験は、人工バリアの一つである緩衝材に発生する熱-水-応力連成現象を実規模大で観察し、解析手法およびコードの開発を目的としたものである。本試験の第一段階としての加熱試験を実施するとともに、熱伝導および熱-水-応力連成解析を実施した。試験および解析の結果、以下の点が明らかとなった。

- ① 今回実施した0.8 kW、4392時間の加熱試験において、ヒーター中心における各部の温度は、オーバーパック内側：73～83°C、緩衝材内側：57～61°C、緩衝材中の温度差9～13°C（温度勾配0.6°C/cm）となった。
- ② オーバーパックと緩衝材の空隙、緩衝材と人工岩盤の間の粉体充填部における温度差が顕著であった。
- ③ サンプリングによる水分測定の結果、設置時（含水比11.4%）に比べオーバーパック近傍では8～9%、試験孔外周部および低部で14%と加熱による水分の移動が生じたことが確認された。
- ④ 水分の移動による膨潤圧の発生は確認されなかった。これは、水分の増加が低密度の粉体充てん部に集中したためと考えられる。
- ⑤ FINASを用いた熱伝導解析結果と加熱試験による実測値はほぼ一致した。一方、THAMESを用いた熱-水-応力連成解析では温度変化による水分の移動を評価できなかつた。

## 7. 今後の予定

緩衝材大型試験設備では今後、処分環境で生じることが予想される緩衝材中への水の侵入のうち、岩盤亀裂からの水の侵入を模擬した加熱・部分注水試験を引き続き実施する予定である。また、今回の試験および解析で明らかとなった以下の事項についても合わせて検討を行う必要がある。

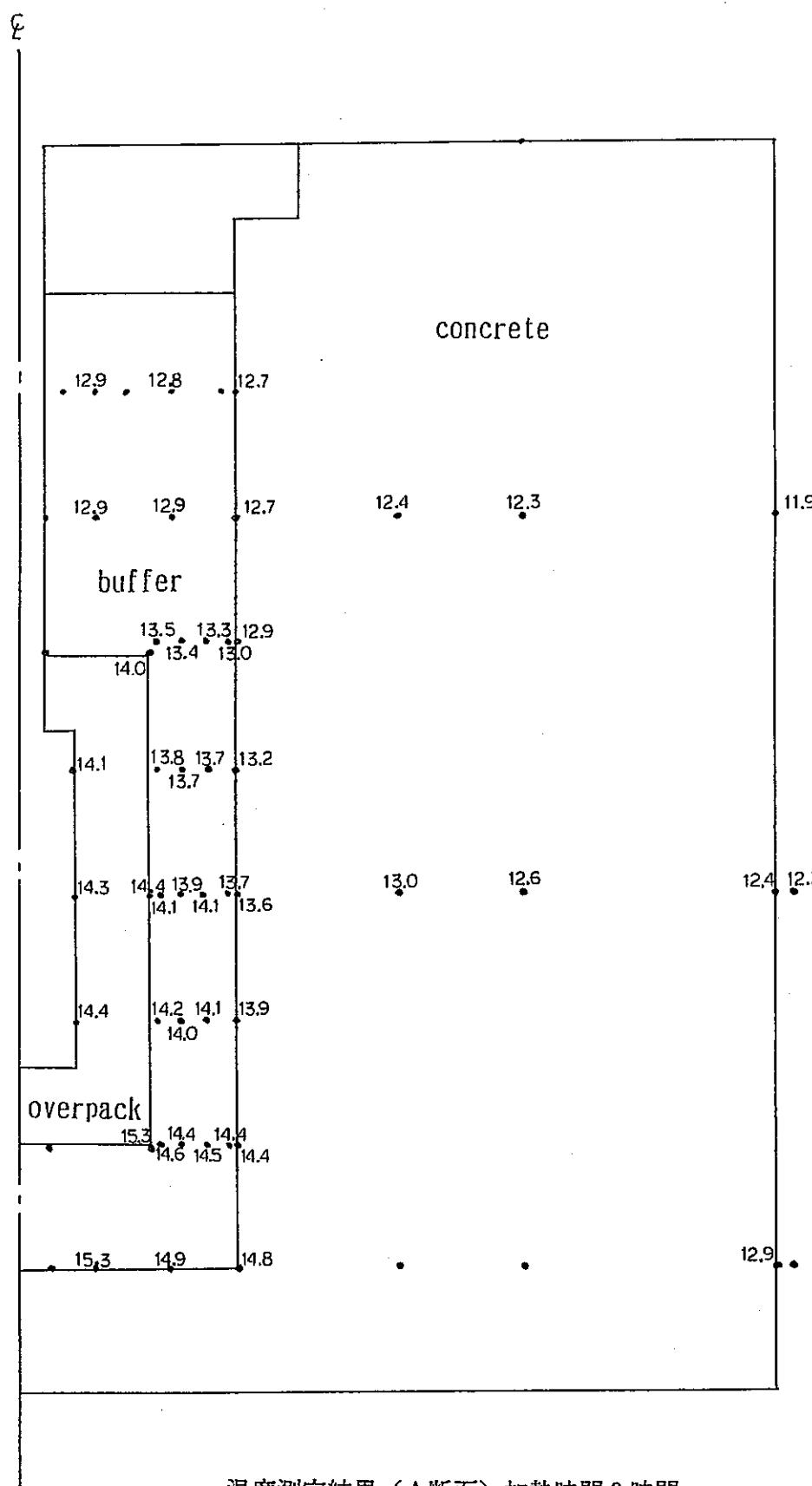
- ① 緩衝材中の水分の変化をモニタリングするため、信頼性の高い水分計・測定方法を開発。
- ② 熱-水-応力連成解析に用いる物性値のうち、不飽和透水特性曲線、温度勾配による水分移動係数等のデータ収集。
- ③ 不飽和部における蒸気発生のメカニズムおよび水分移動のメカニズムの評価・検討。

## 引用文献

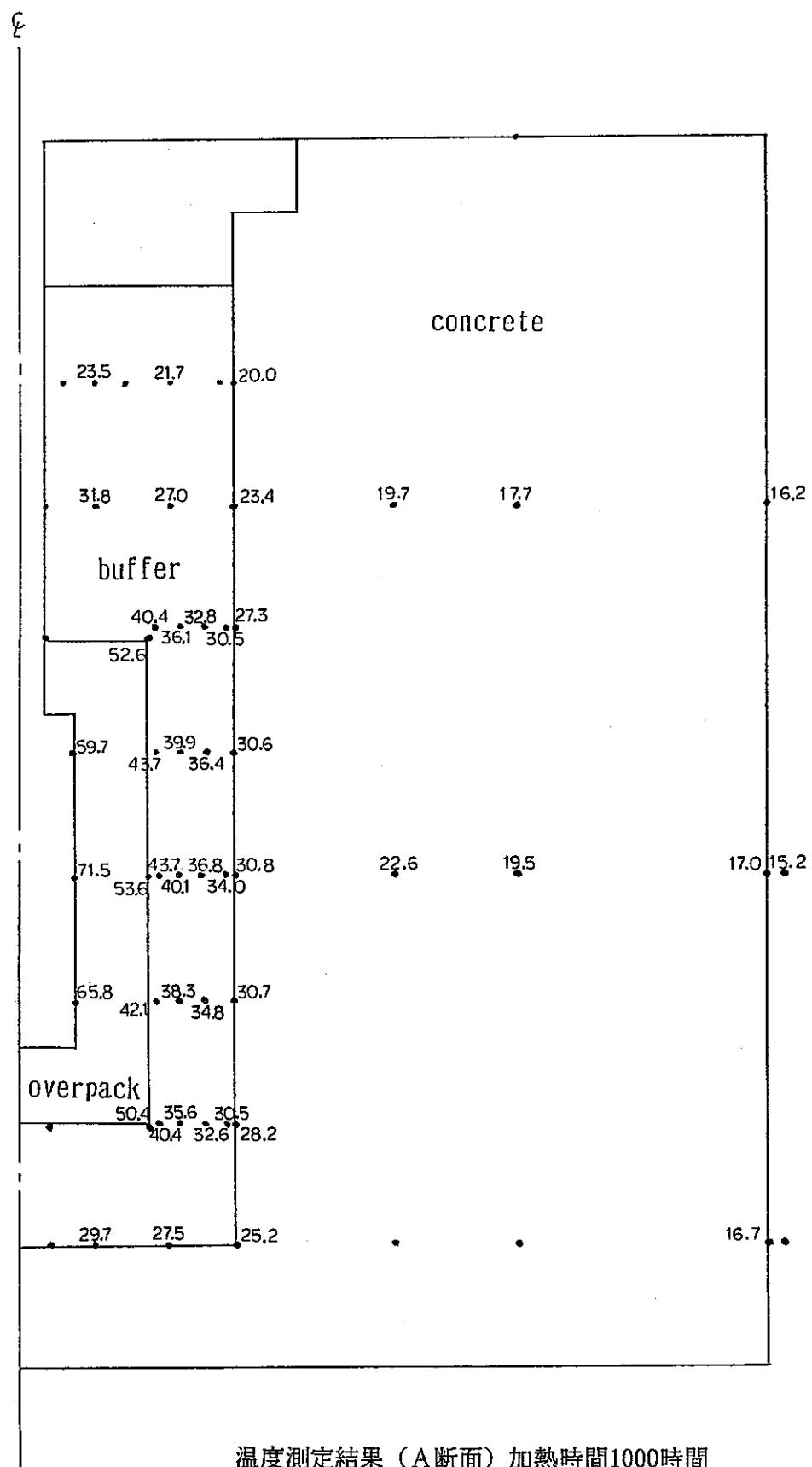
- [1] 佐藤信二他 '緩衝材の熱-水-応力連成試験-緩衝材大型試験設備の概要および試験計画について' PNC N8410 90-060、1990, 6
- [2] M.N. Gray他 'SWelling Pressures of Compacted Bentonite/Sand Mixture' Scientific Basis for Nuclear Waste Management VII, pp523 ~530, 1985
- [3] '汎用非線形構造解析システム F I N A S 使用説明書' PNC N 9520 89-019, 1989. 11
- [4] 国立天文台編 '理科年表' 丸善株式会社
- [5] 岡田 清他 'コンクリート工学ハンドブック' 朝倉書店
- [6] Ohnishi, Y他 'Coupled Processes Associated with Nuclear Waste Repositories' edited by Tsang, C.F., pp. 679-697, 1989.
- [7] Brooks, R.H. and Corey, A.T. 'Properties of porous media affecting fluid flow' ASCE, IR(92), pp. 61-88, 1966.
- [8] Irmay, S. 'On the hydraulic conductivity of unsaturated soil' Trans. Amer. Geophys. union, vol35(3), pp463-467, 1954.
- [9] 西垣 誠 '飽和・不飽和領域内の土中水の浸透特性に関する 2、3 の考察' 土質工学会論文報告集、Vol. 23, No. 3, pp.165-177, 1983
- [10] Mualem, Y. 'Hydraulic conductivity of unsaturated porous media' Generalized macroscopic approach. Water Resoure. Res. Vol. 14, No. 2, pp.325-334, 1978
- [11] Philip, J.R. and de Vries, D.A. 1957, Am. Geophys. Union Trans, 38(2), pp. 222-232.
- [12] T. Fujita 他 'Application of elasto-plastic model to mechanical and hydraulic behavior of buffer material under water uptake in a repository' Materials Reserch Society, Boston, Nov. 26-29, 1990.

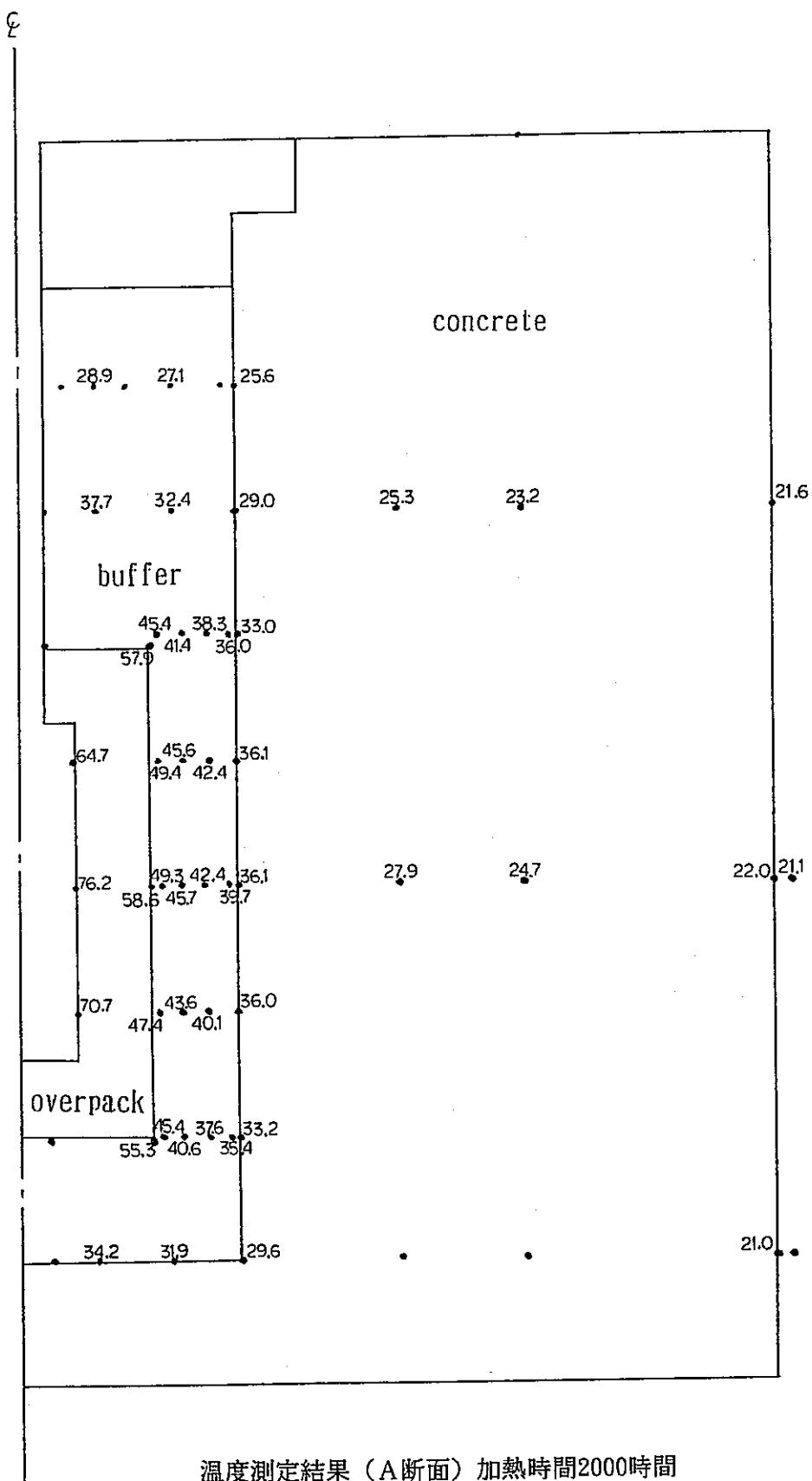
## Appendix 1

### 加熱試驗溫度測定結果

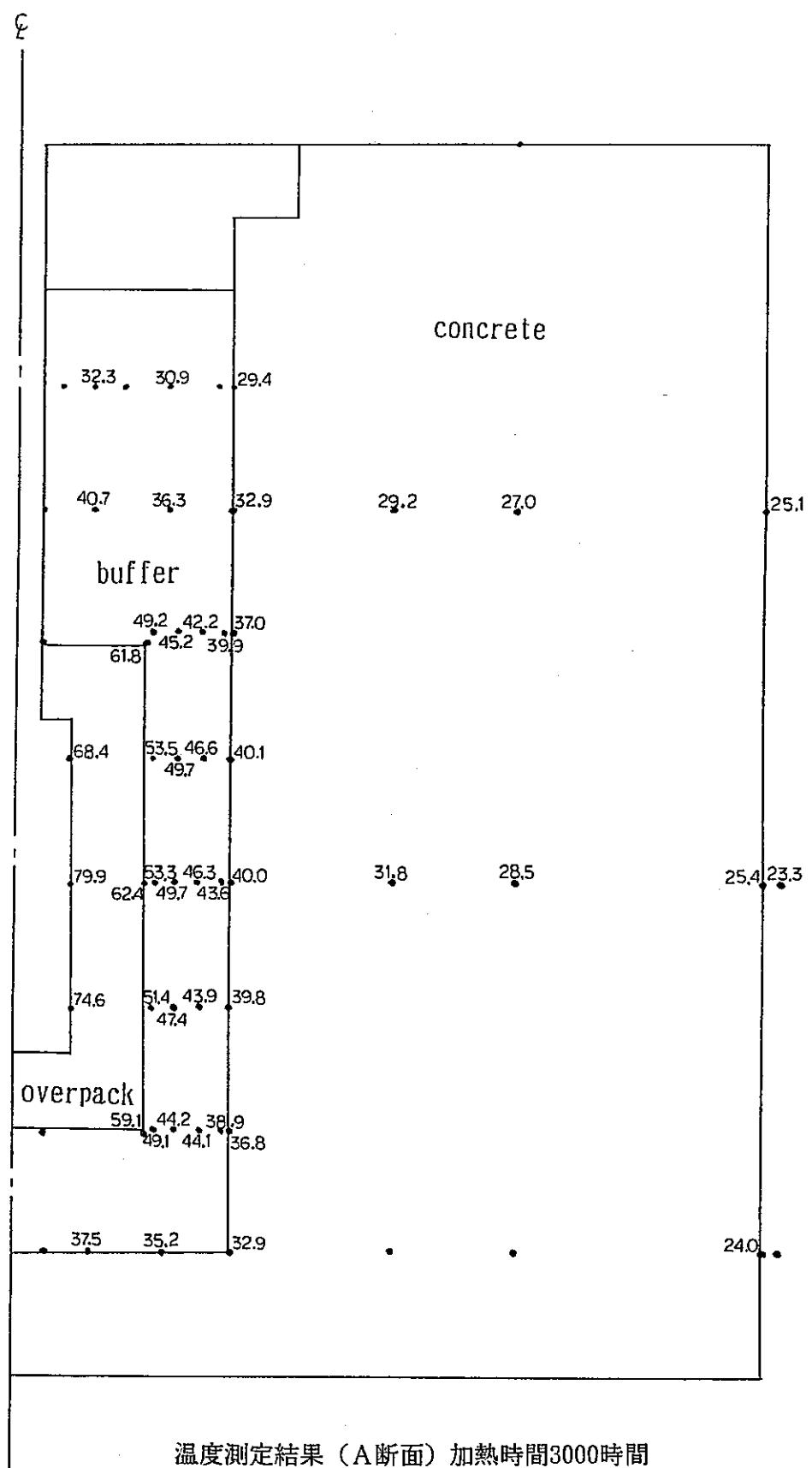


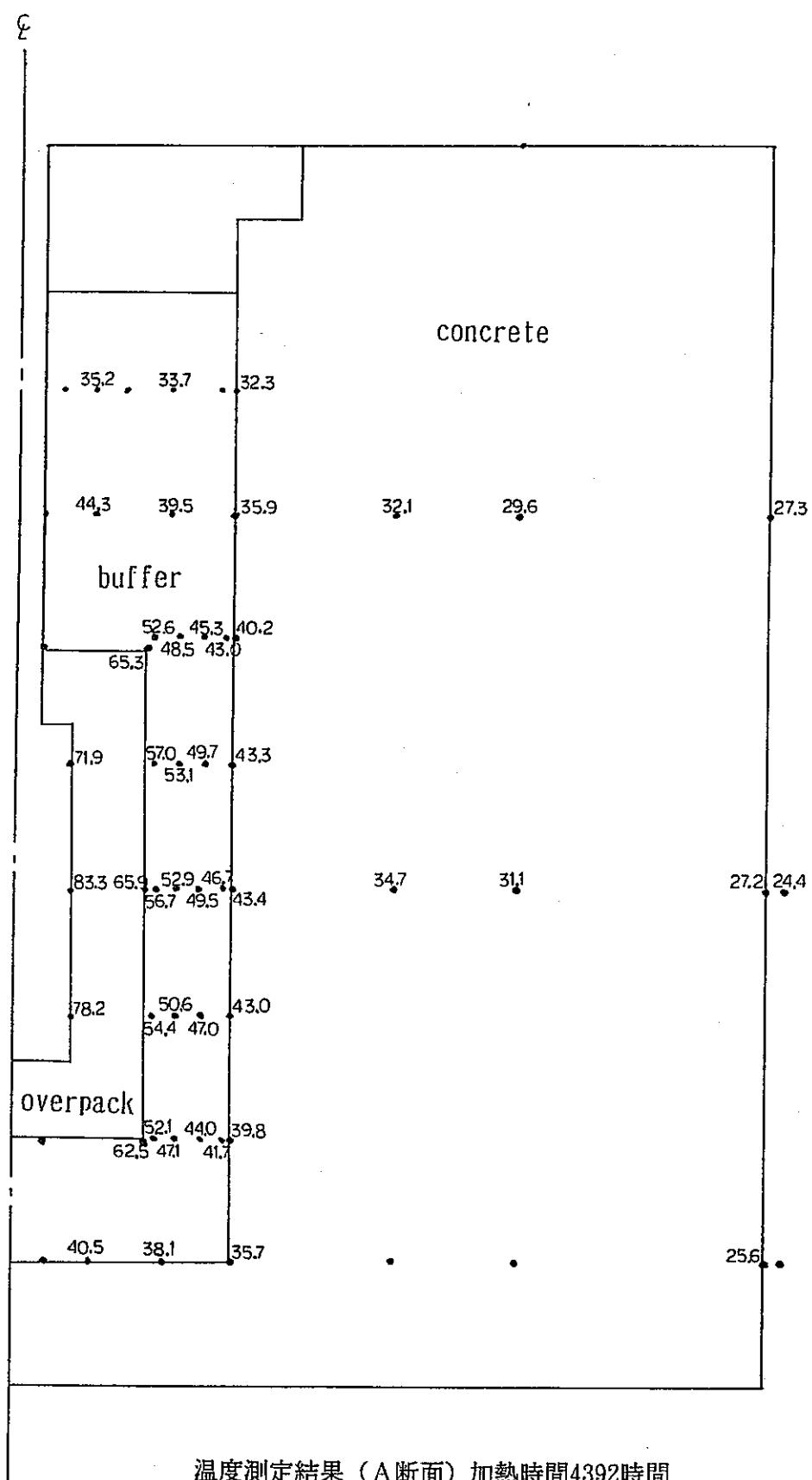
### 温度測定結果（A断面）加熱時間 0 時間

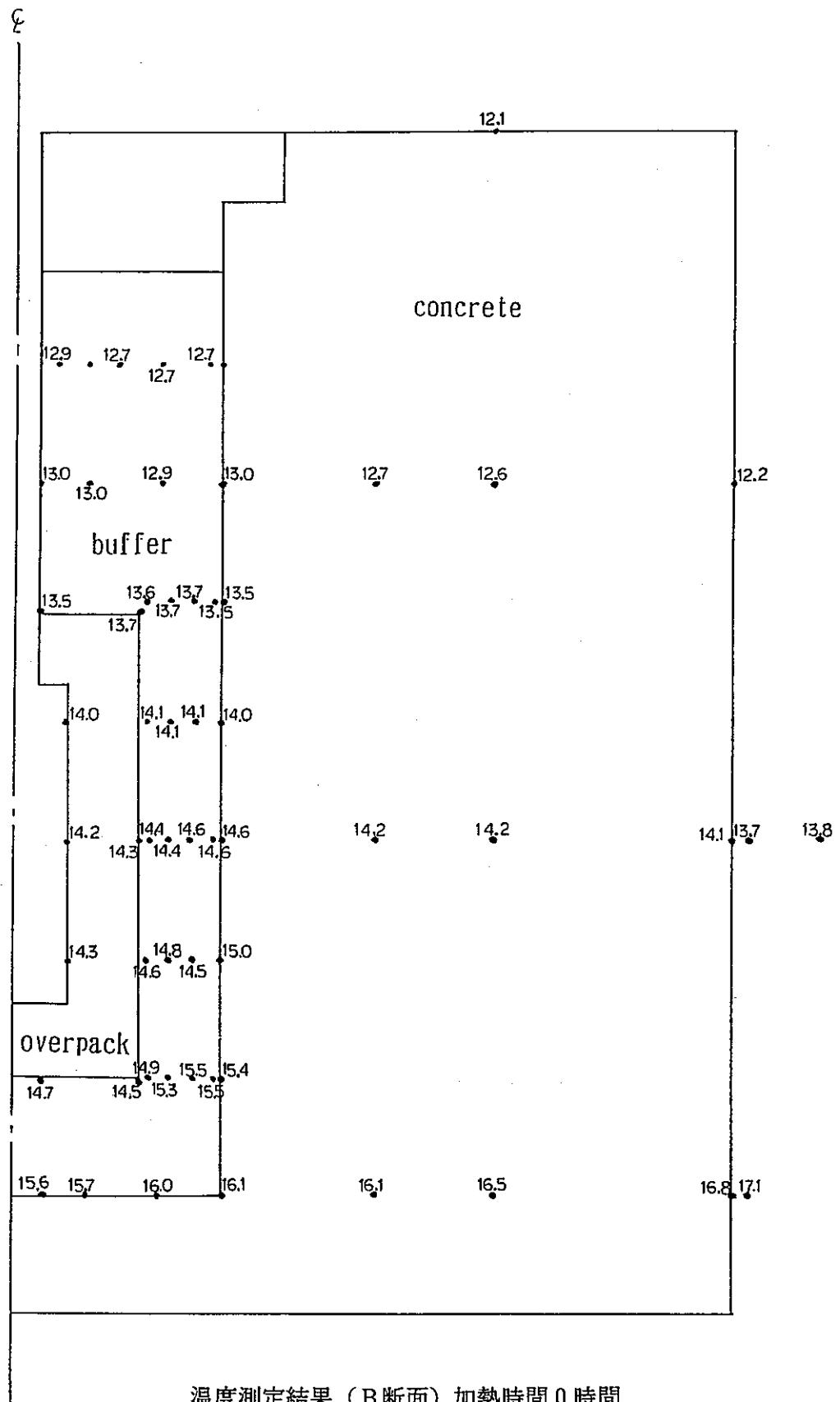


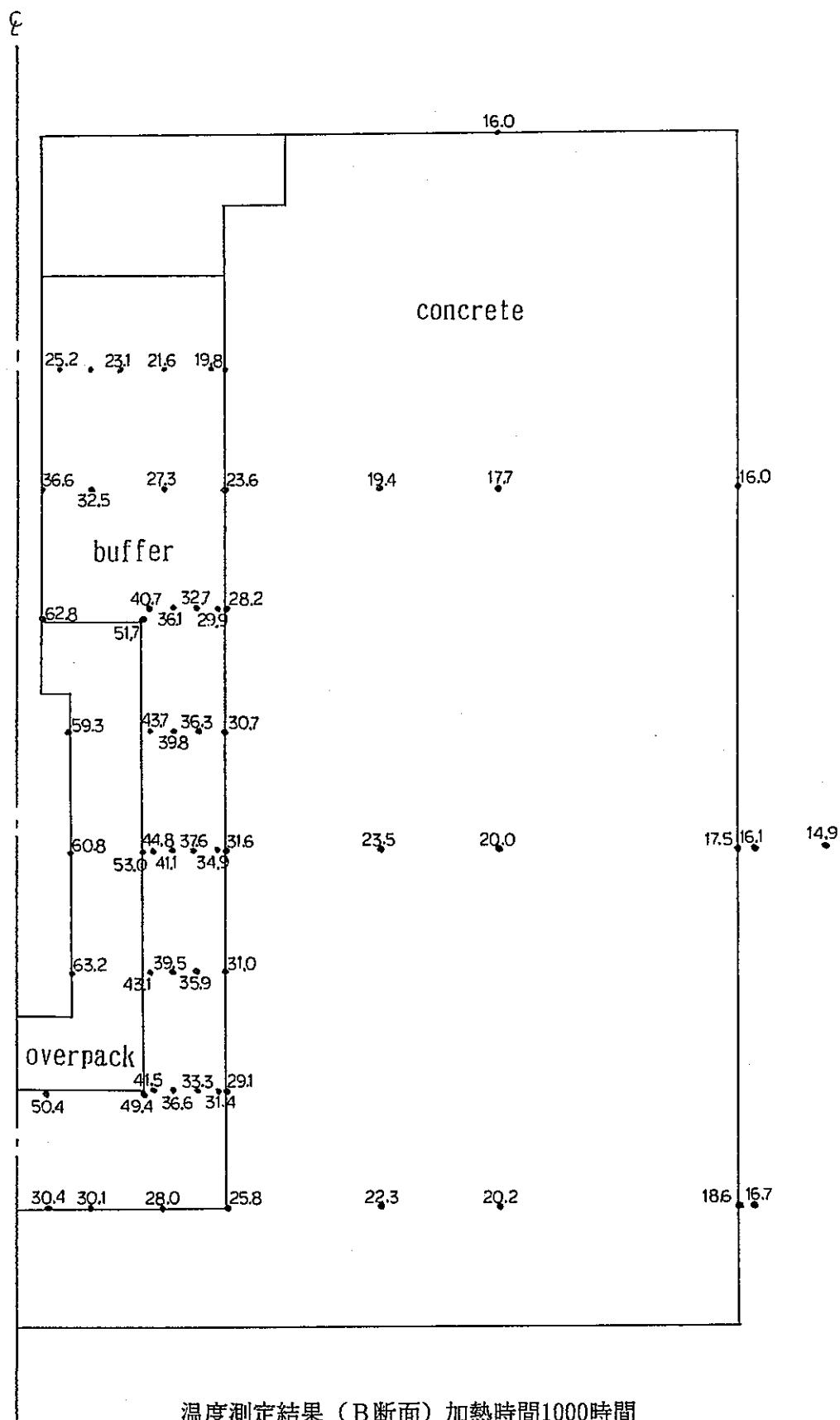


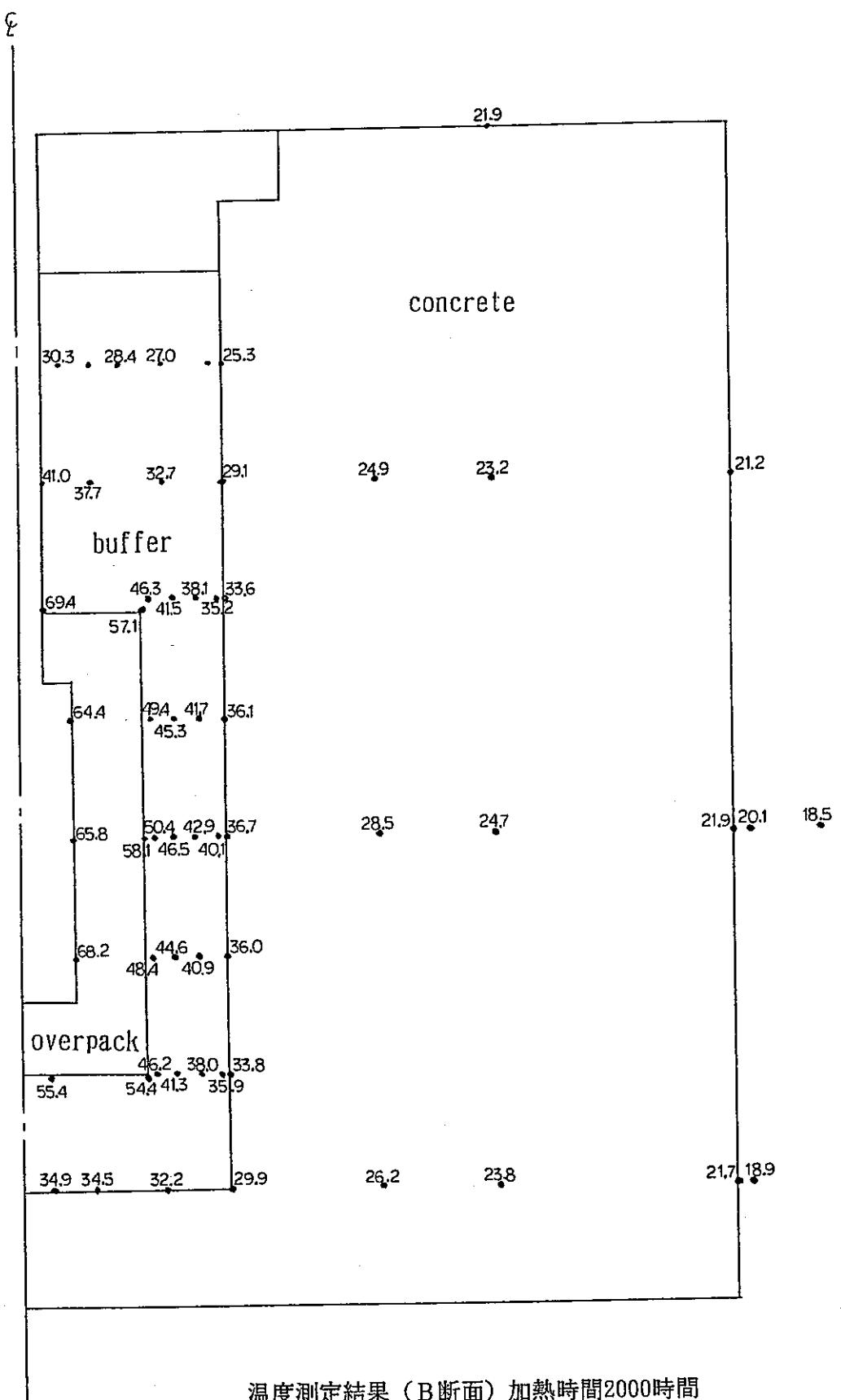
温度測定結果（A断面）加熱時間2000時間

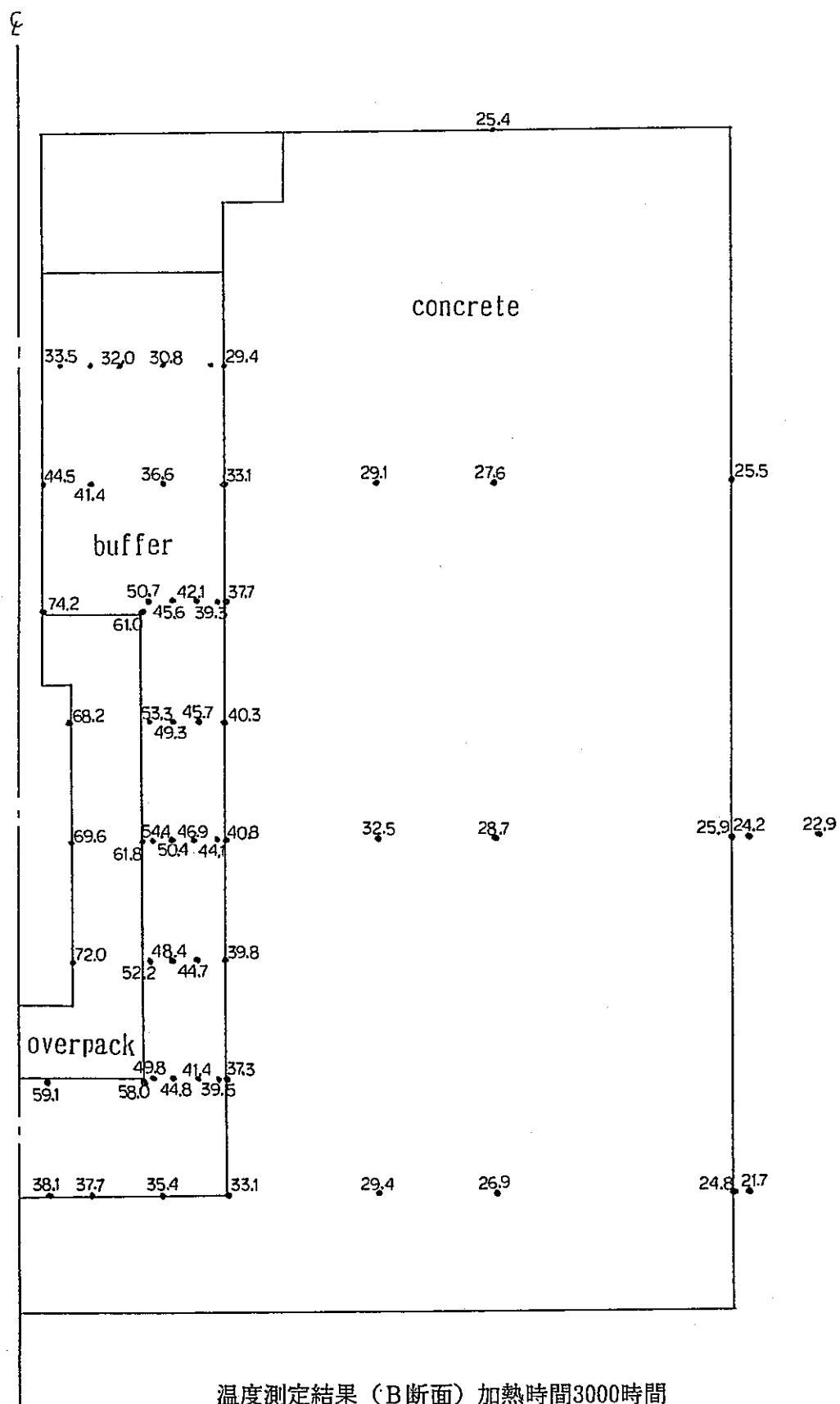


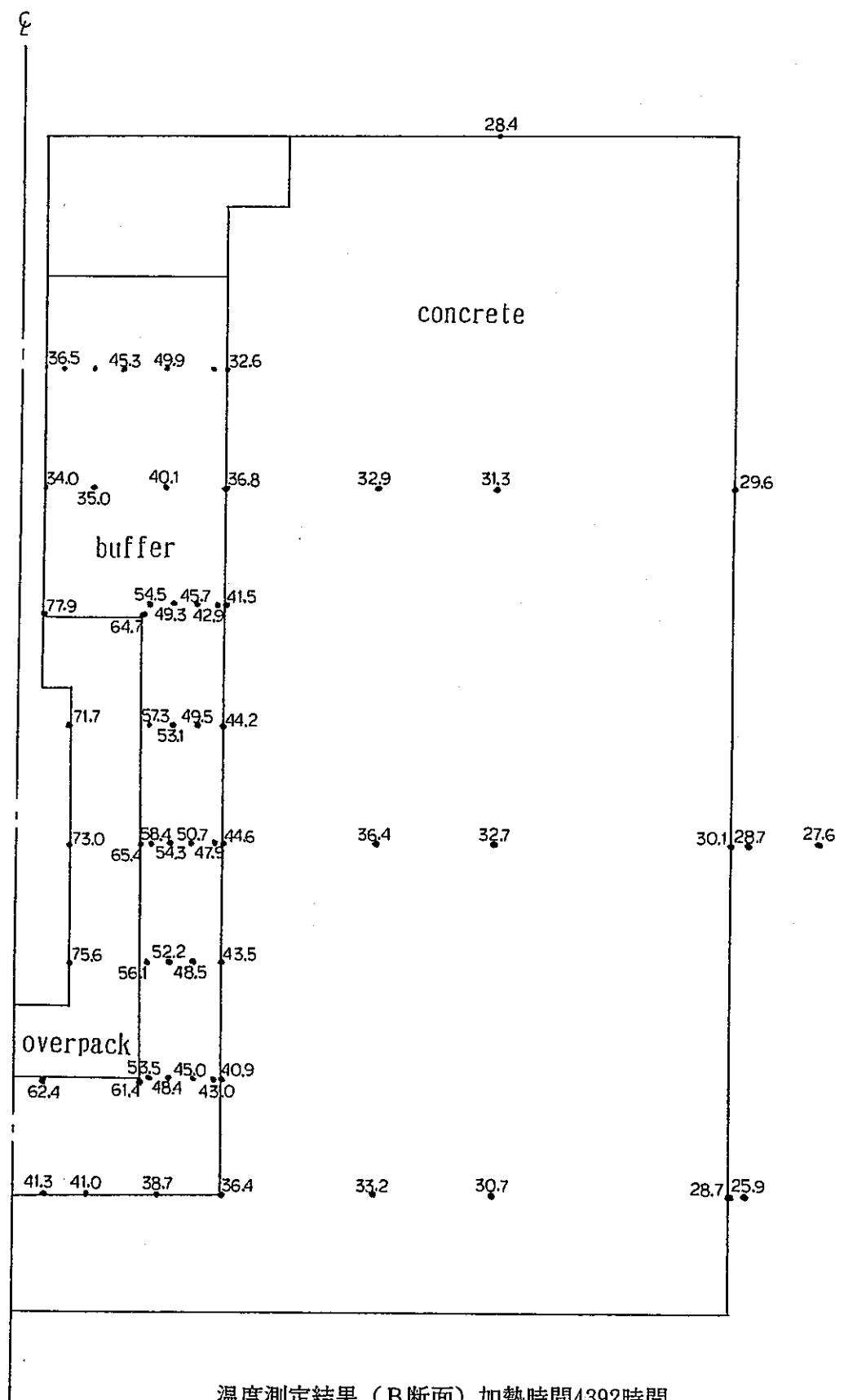




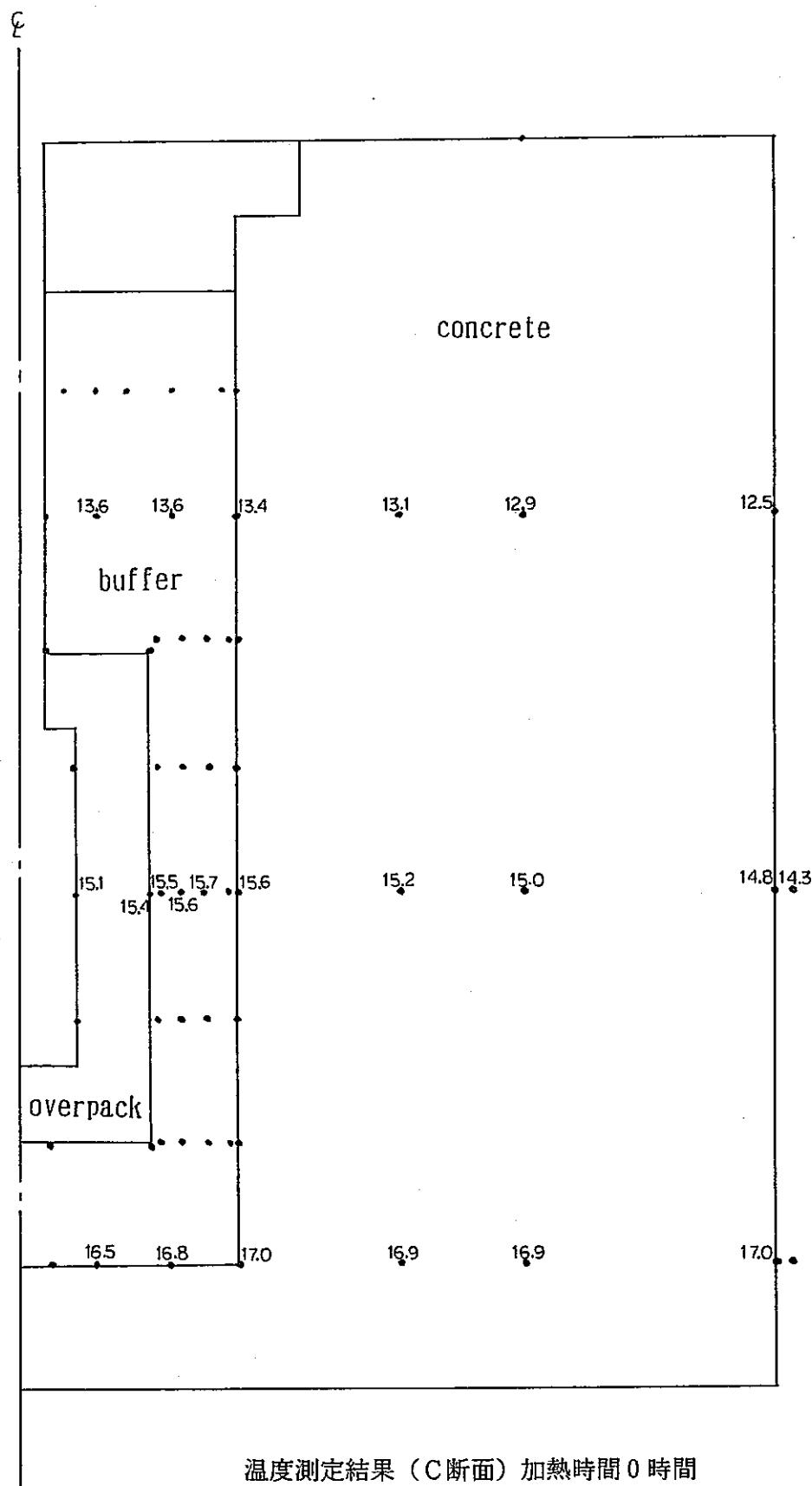


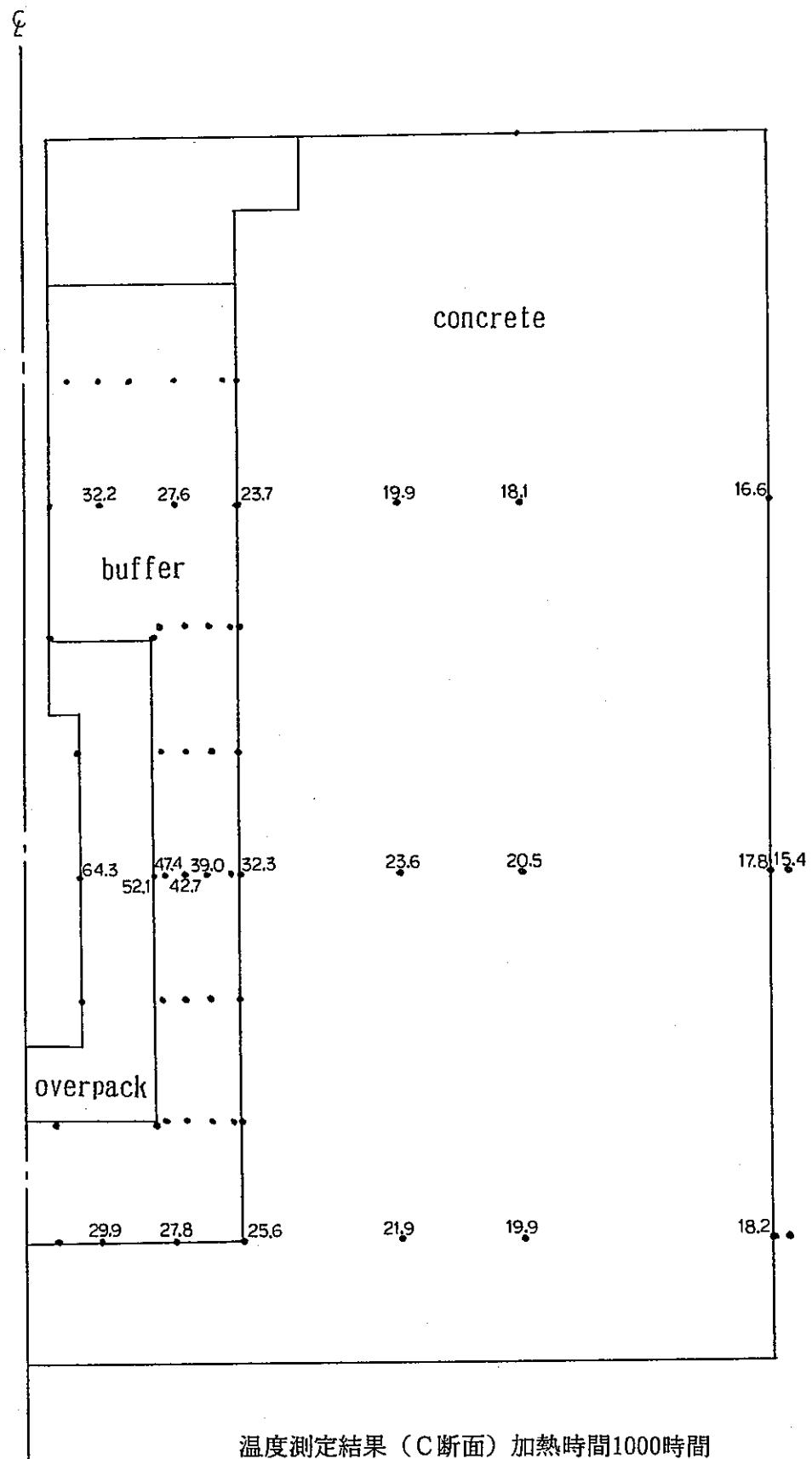


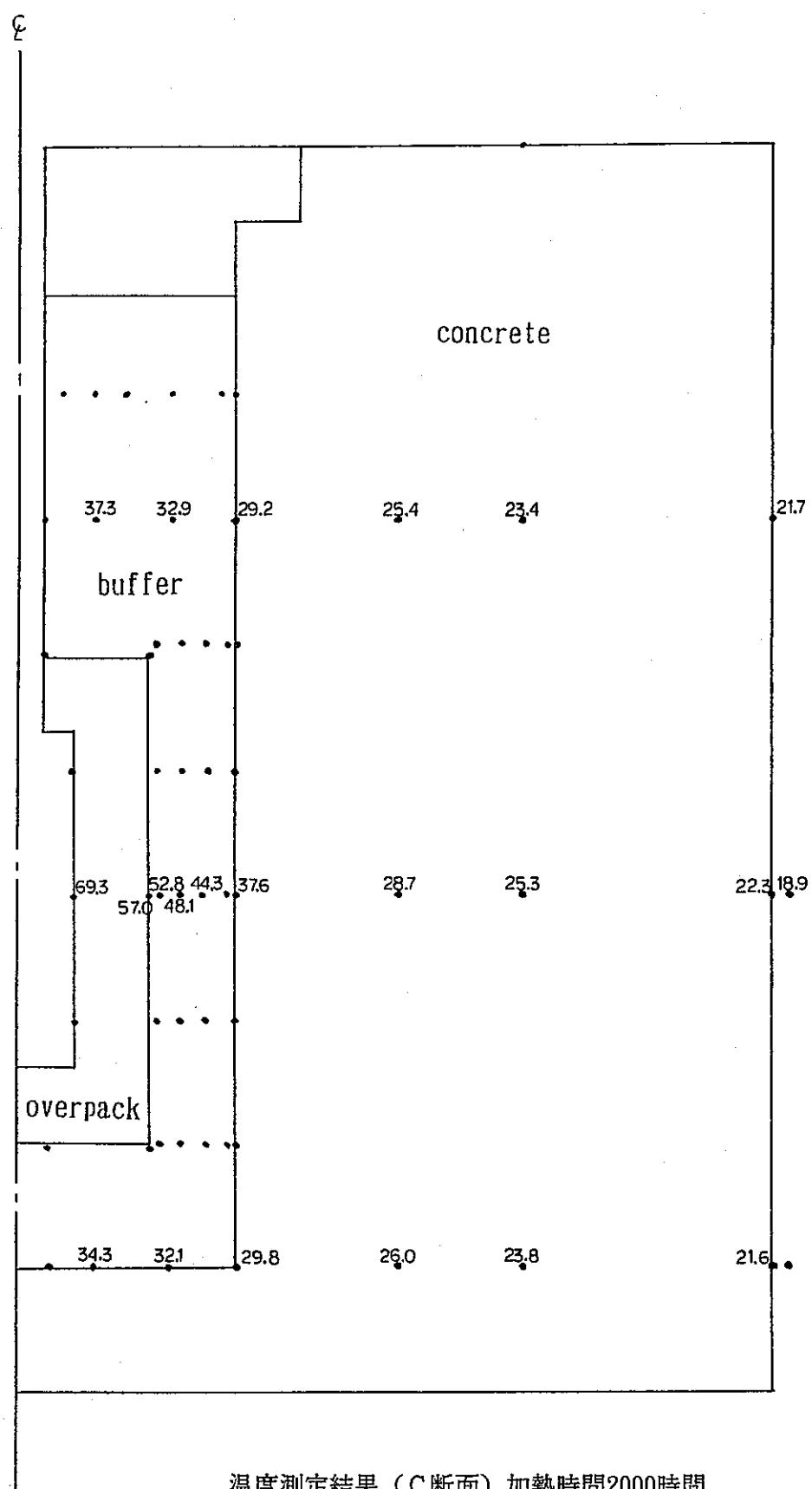


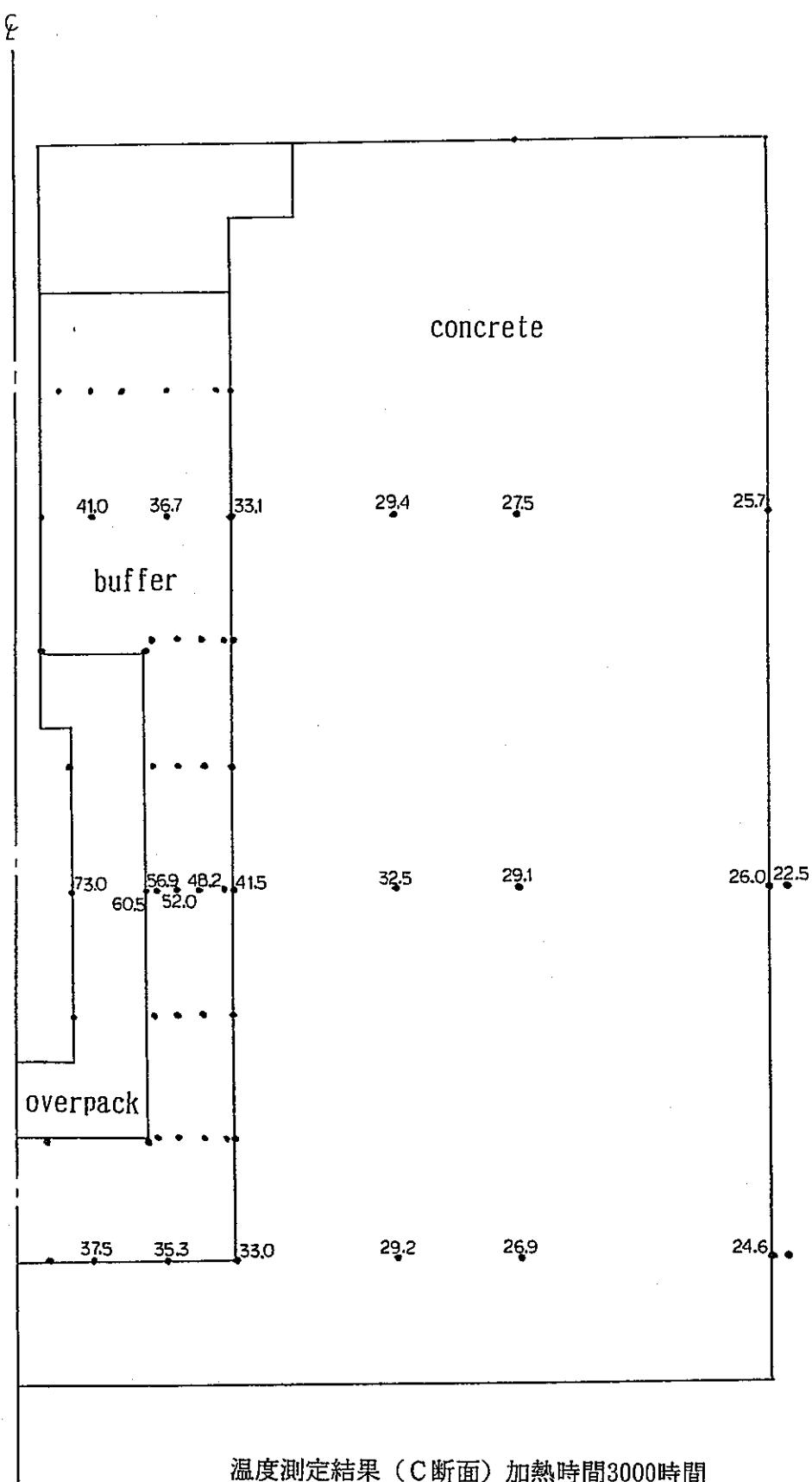


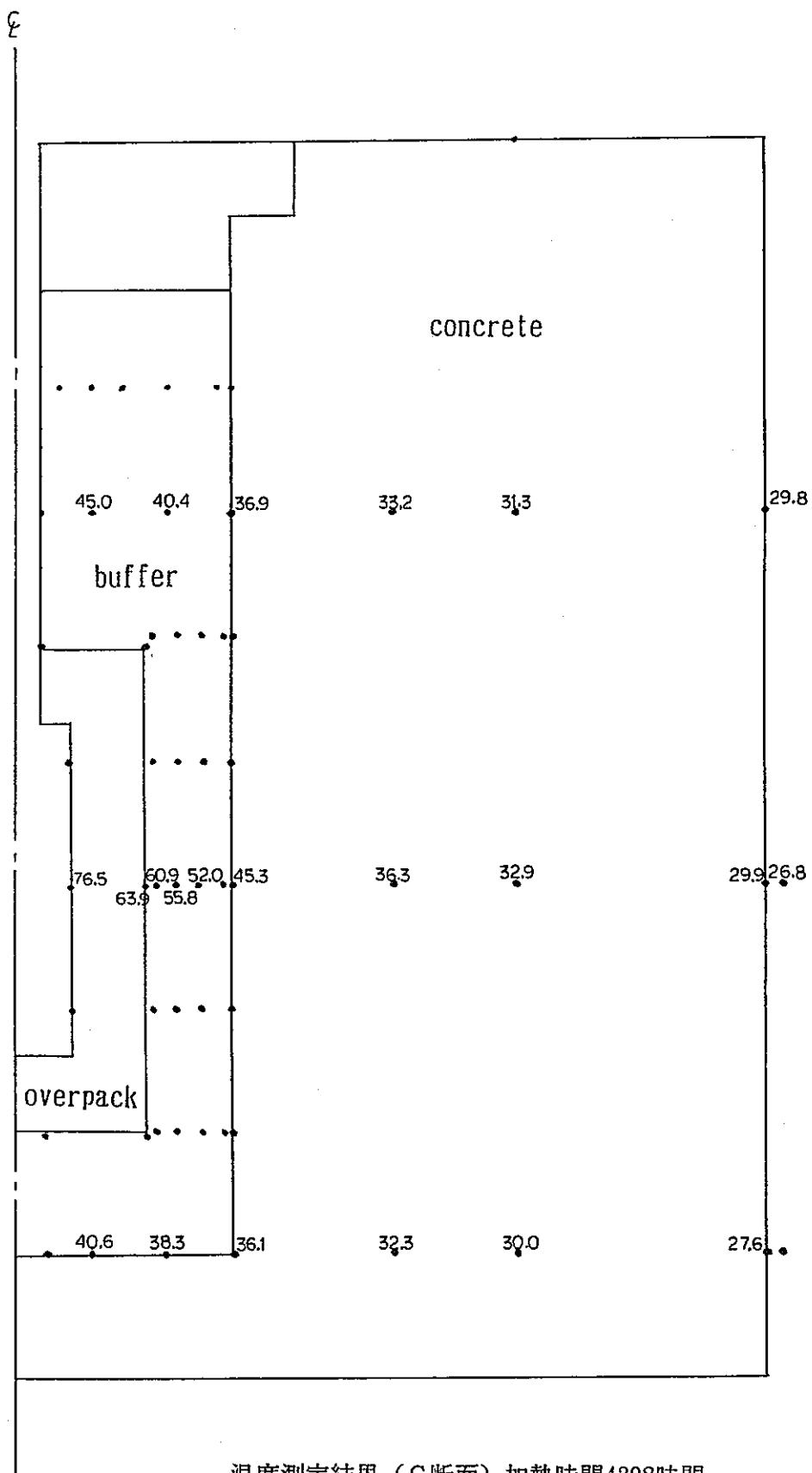
溫度測定結果（B断面）加熱時間4392時間











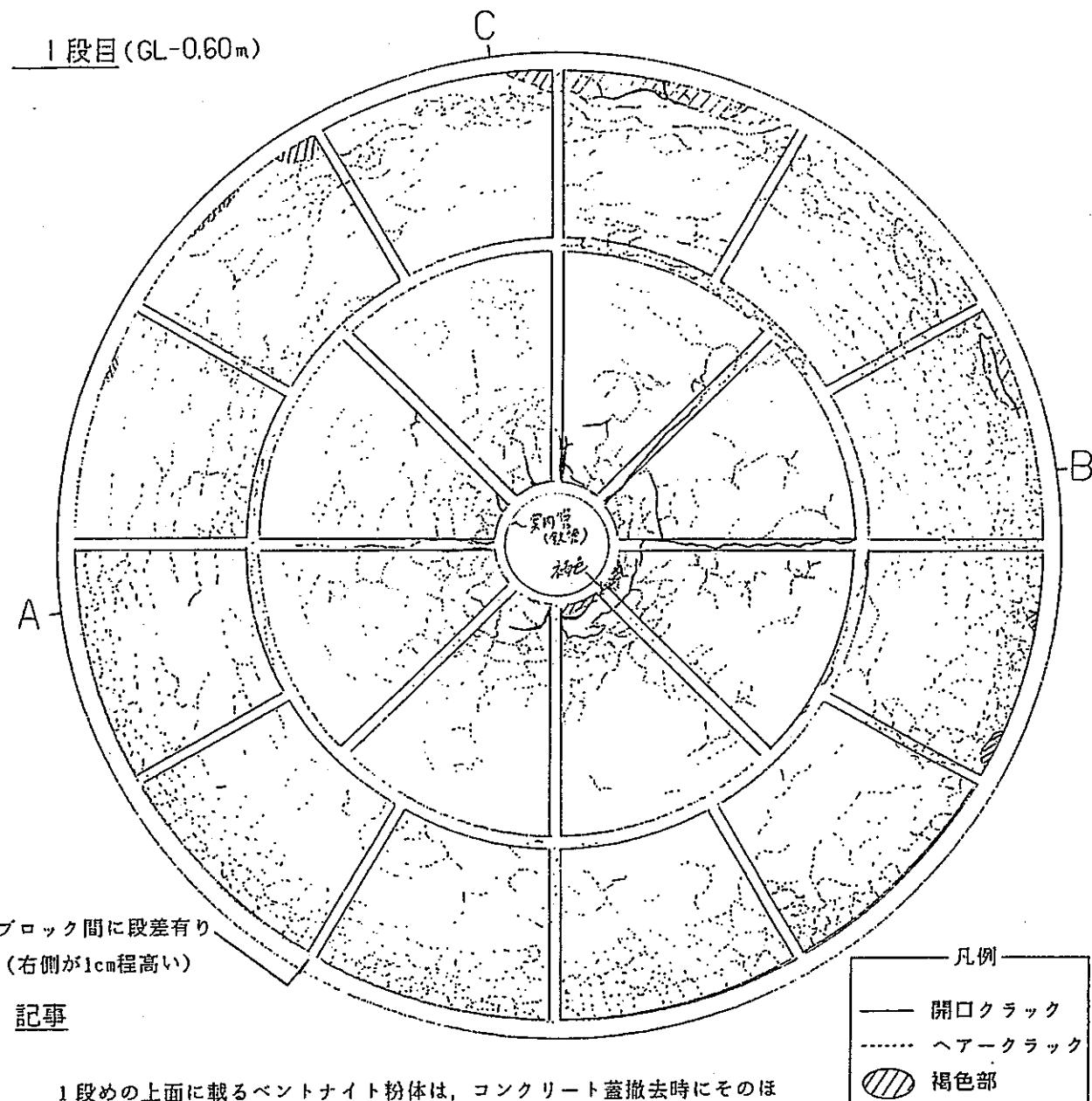
温度測定結果（C断面）加熱時間4392時間

## Appendix 2

### 緩衝材水分測定結果

緩衝材 観察シート (S=1/10)

平成2年9月17日



1段めの上面に載るベントナイト粉体は、コンクリート蓋撤去時にそのほとんどが蓋底面に付着した。そのため、ベントナイト粉体は外周部に僅かに残るのみであった。

緩衝材中心部（鉄管付近）の開口クラックおよび緩衝材外周部（B線～C線付近）の開口クラックは、巾1mm程度。

全体に亀甲状ヘーアクラックが認められるが、特に中心部・外周付近・ブロック境界付近に多い傾向がある。

緩衝材ブロック間に充填されたベントナイト粉体は、ほとんどが水分を含み軟質化している。特に外周部で著しく粘性を有している。

外周部の一部には、サビが付着し褐色を呈す。

図-3 緩衝材表面観察 (1段目深さ 0.6 m)

緩衝材 観察シート (S=1/10)

平成2年9月18日

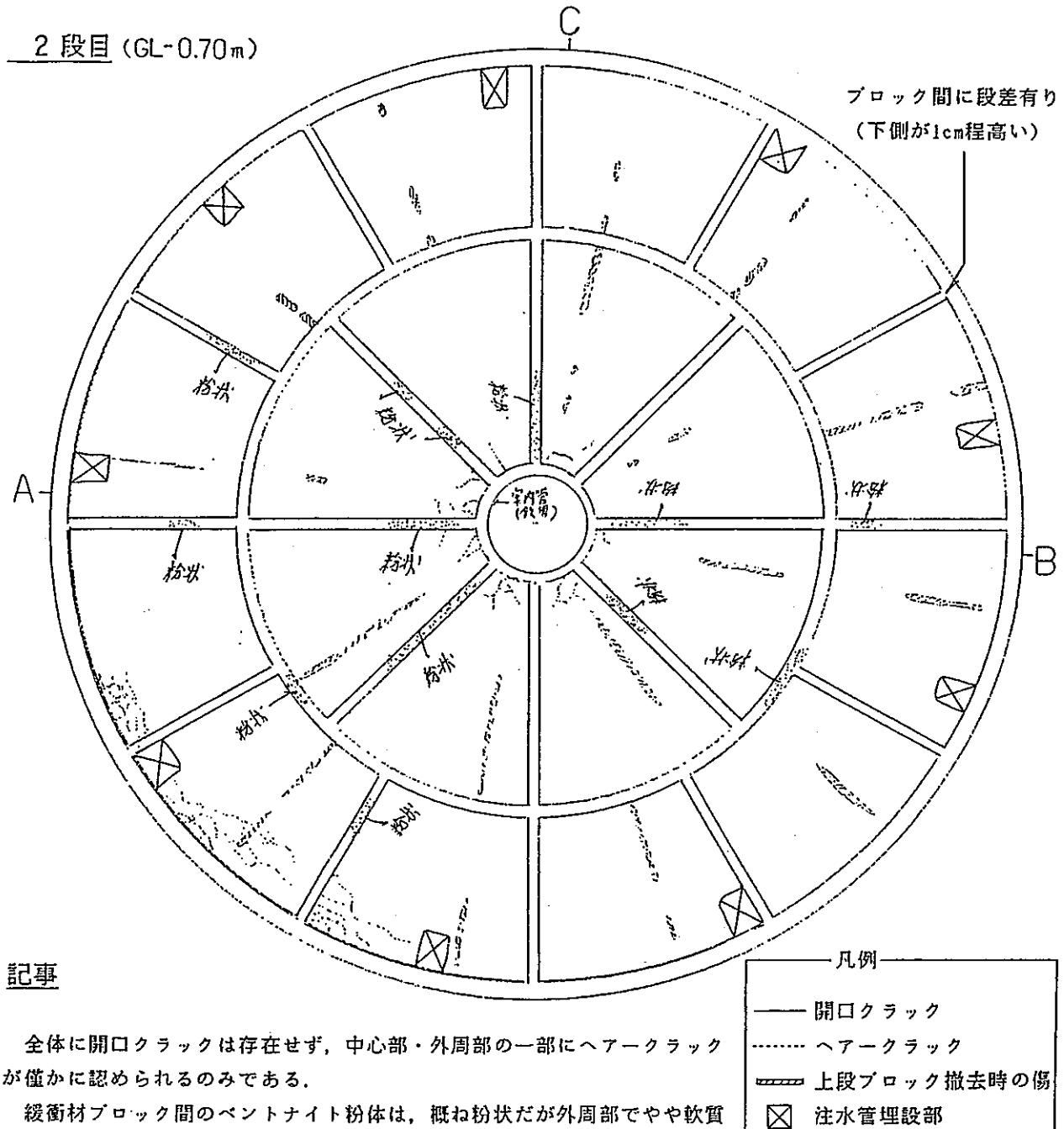
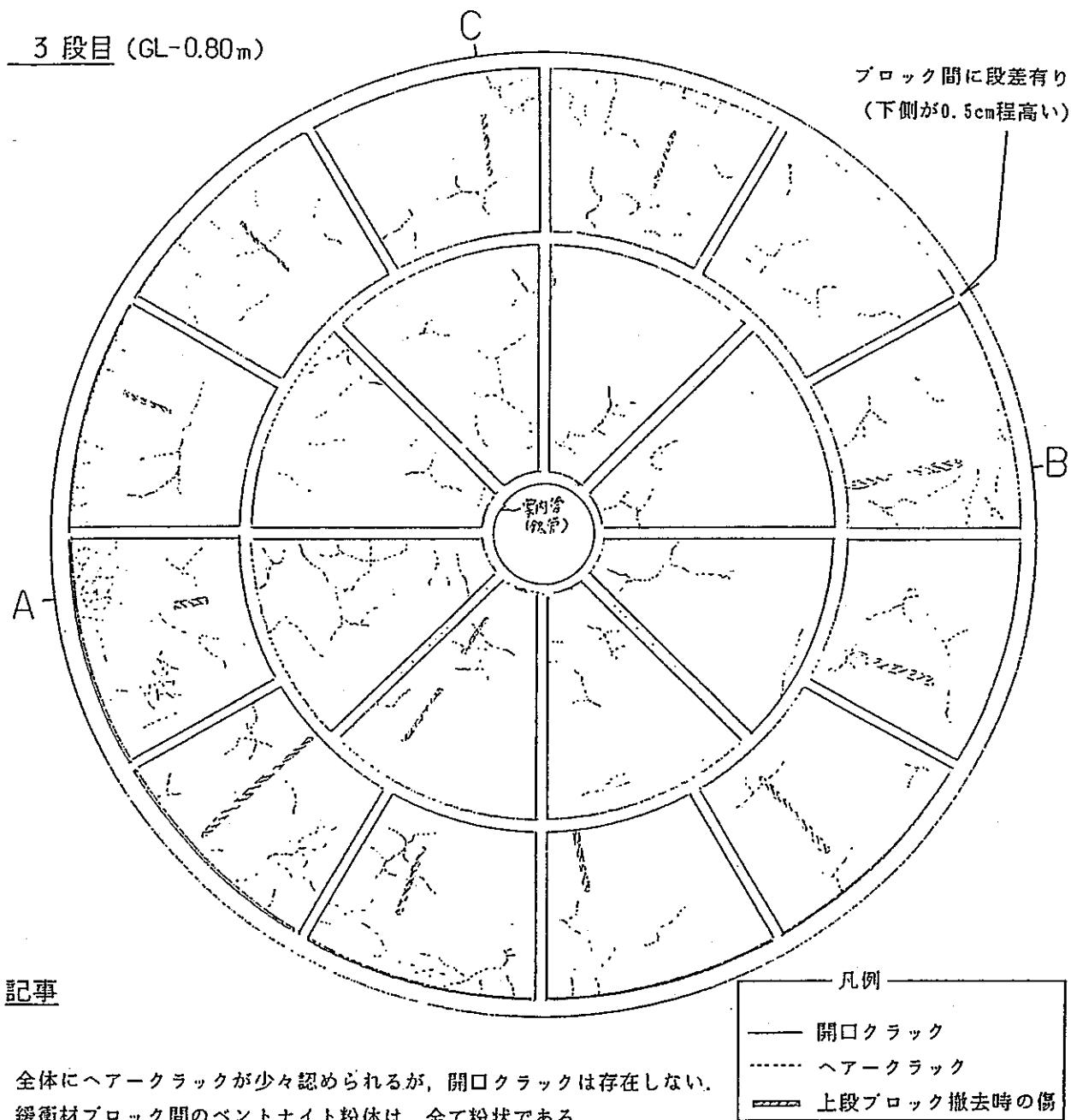


図-4 緩衝材表面観察 (2段目深さ 0.7 m)

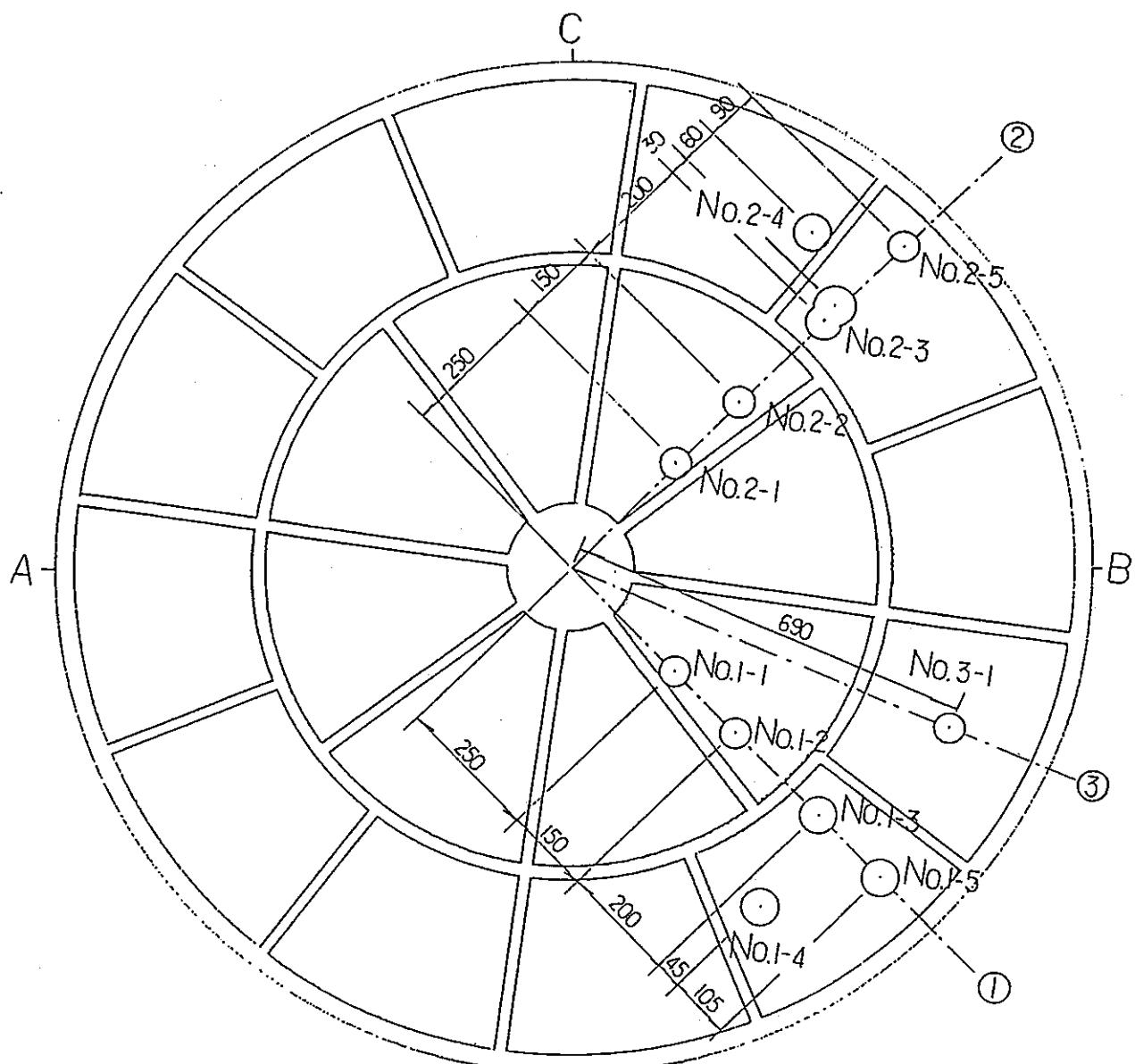
緩衝材 観察シート ( $S = 1/10$ )

平成 2 年 9 月 19 日



全体にヘーアクラックが少々認められるが、開口クラックは存在しない。  
緩衝材ブロック間のベントナイト粉体は、全て粉状である。

図-5 緩衝材表面観察 (3段目深さ 0.8 m)



各孔の孔径	No. 1-1 51mm	No. 2-1 51mm	No. 3-1 51mm
	No. 1-2 51mm	No. 2-2 51mm	
	No. 1-3 56mm	No. 2-3 56~66mm	
	No. 1-4 56mm	No. 2-4 56mm	
	No. 1-5 56mm	No. 2-5 51mm	

図-9 サンプリング孔位置平面図（縮尺 1/10）

但し、本図は掘削開始深度(GL. -0.80m)における図である。

表-1 サンプリング位置座標一覧表

サンプリング番号	サンプリング深度(GL.-m)	サンプリング座標(B、C) 単位cm					備考
		No.1-1	No.1-2	No.1-3	No.1-4	No.1-5	
1	0.75	(18.5,-18.0)	(29.0,-29.0)	(45.5,-45.5)	(42.5,-59.5)	(56.5,-56.5)	
2	0.95	(17.5,-17.5)	(28.0,-28.0)	(42.5,-42.0)	(32.0,-58.0)	(53.0,-53.0)	但し、No.1-3～1-5はGL.-1.05m
3	1.45	(17.5,-17.5)	(28.0,-28.0)	(42.5,-42.0)	(32.0,-57.5)	(54.0,-53.5)	
4	1.95	(17.5,-17.5)	(28.0,-28.0)	(42.5,-42.0)	(31.5,-57.0)	(55.0,-54.0)	但し、No.1-3～1-5はGL.-1.85m
5	2.55			(41.0,-41.0)	(31.0,-56.5)	(58.0,-57.0)	
6	2.95			—	(25.0,-52.5)	(60.0,-58.0)	
7	3.55			(38.5,-38.5)		(60.0,-58.0)	但し、No.1-3はGL.-3.95m
8	3.95			(38.5,-38.5)		(60.0,-58.0)	但し、No.1-3はGL.-4.05m
9	4.35			(38.5,-38.5)		(60.0,-58.0)	

表-2 サンプリング位置座標一覧表

サンプリング番号	サンプリング深度(GL.-m)	サンプリング座標(B、C) 単位cm					備考
		No.2-1	No.2-2	No.2-3	No.2-4	No.2-5	
1	0.75	(18.5,-18.5)	(28.5,-29.5)	(44.5,-44.5)	(41.0,-58.0)	(55.0,-55.0)	
2	0.95	(18.0,-18.0)	(28.5,-28.5)	(41.5,-41.5)	(40.5,-58.5)	(56.0,-56.0)	
3	1.45	(18.0,-18.0)	(28.5,-28.5)	(41.0,-41.0)	(40.5,-58.5)	(56.0,-56.0)	
4	1.95	(18.0,-18.0)	(28.5,-28.5)	(39.5,-39.5)	(41.0,-57.0)	(56.0,-56.0)	但し、No.2-3はGL.-2.05m
5	2.45			(45.0,-46.5)	(41.5,-55.5)	(56.5,-57.0)	
6	2.95			(46.5,-50.0)		(57.0,-58.0)	
7	3.45			(47.0,-51.0)		(58.0,-59.0)	
8	3.95			(48.0,-51.5)		(58.0,-59.0)	
9	4.40			(48.5,-52.5)		(58.0,-59.0)	

表-3 サンプリング位置座標一覧表

サンプリング番号	サンプリング深度(GL.-m)	サンプリング座標(B、C) 単位cm					備考
		No.3-1					
1	0.75	—					
2	0.95	(64.5,-27.5)					
3	1.45	(63.5,-27.0)					
4	1.95	(63.0,-27.0)					
5	2.45	(62.0,-26.5)					
6	2.95	(61.0,-26.0)					
7	3.45	(59.0,-26.0)					
8	3.95	(57.0,-25.5)					
9	4.45	(56.0,-25.0)					

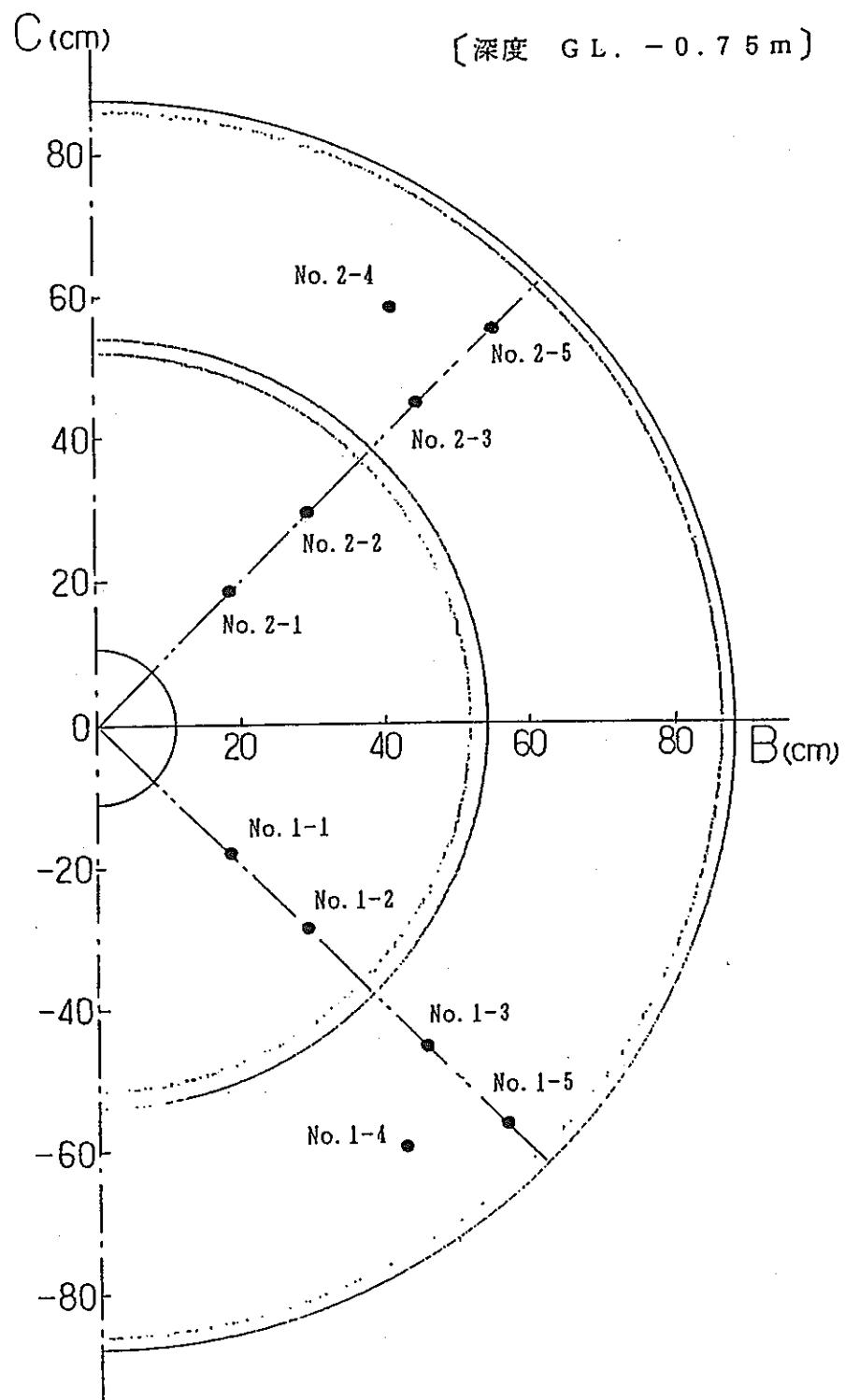


図-10 サンプリング位置平面図 (縮尺 1/10)

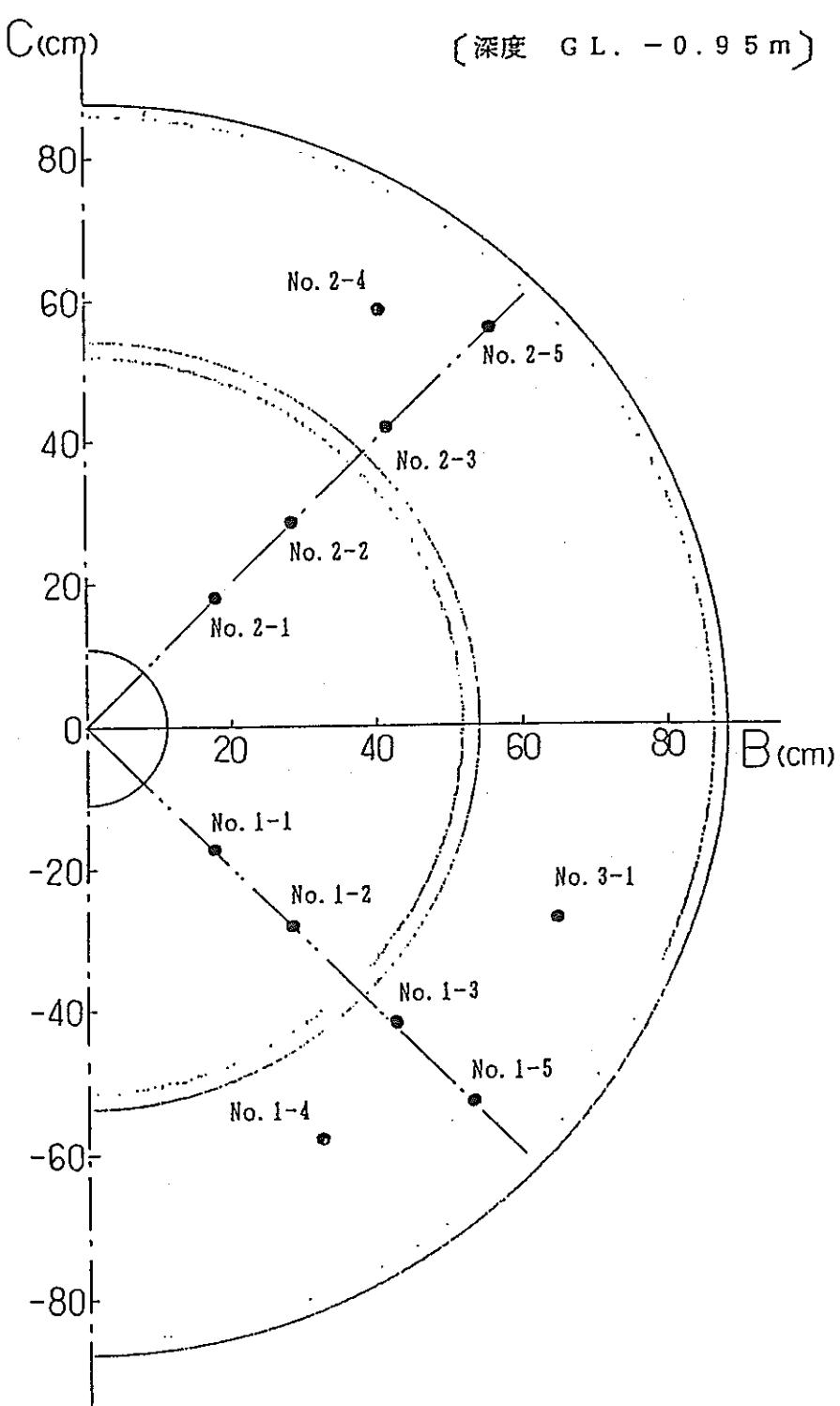


図-11 サンプリング位置平面図 (縮尺 1/10)

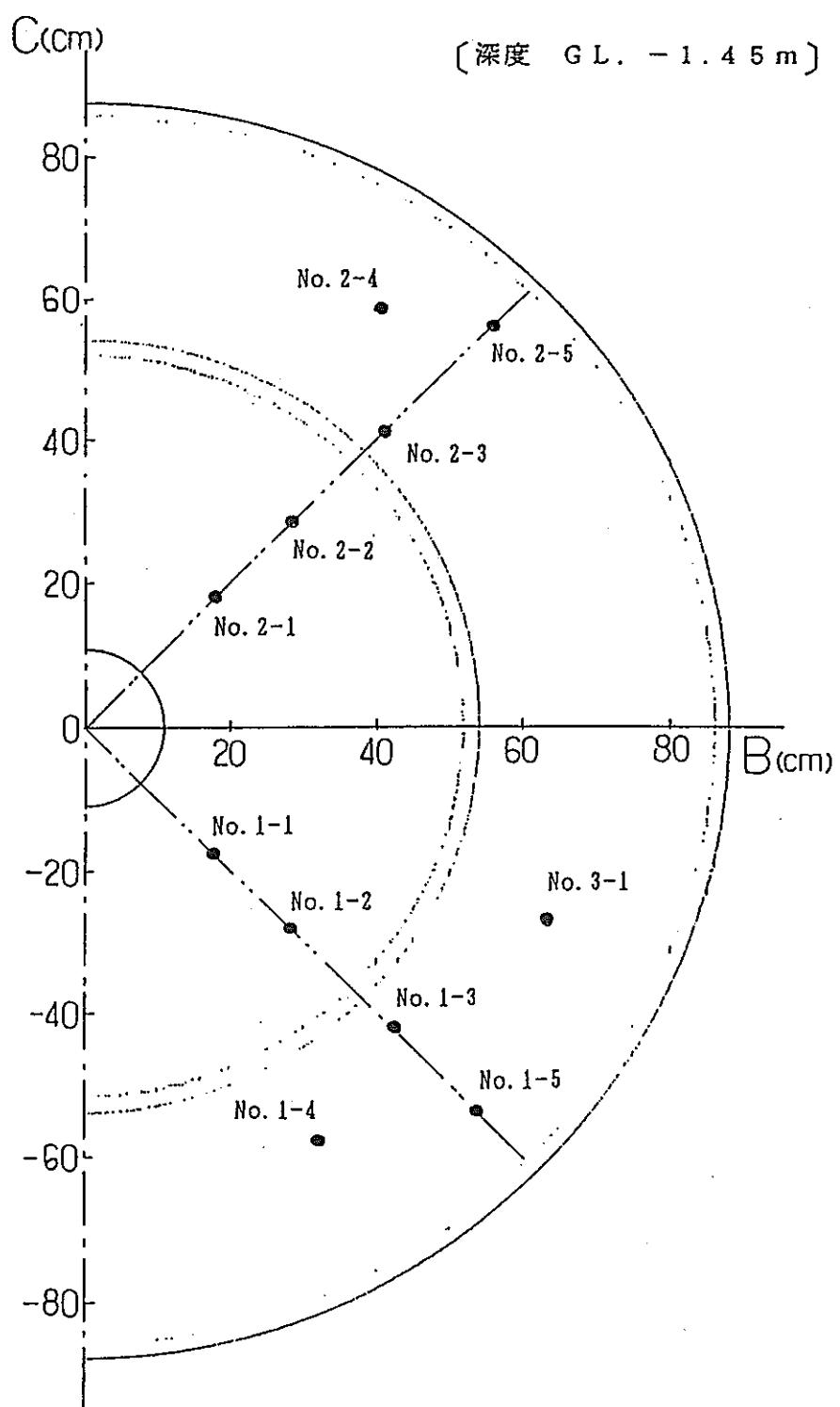


図-12 サンプリング位置平面図（縮尺 1/10）

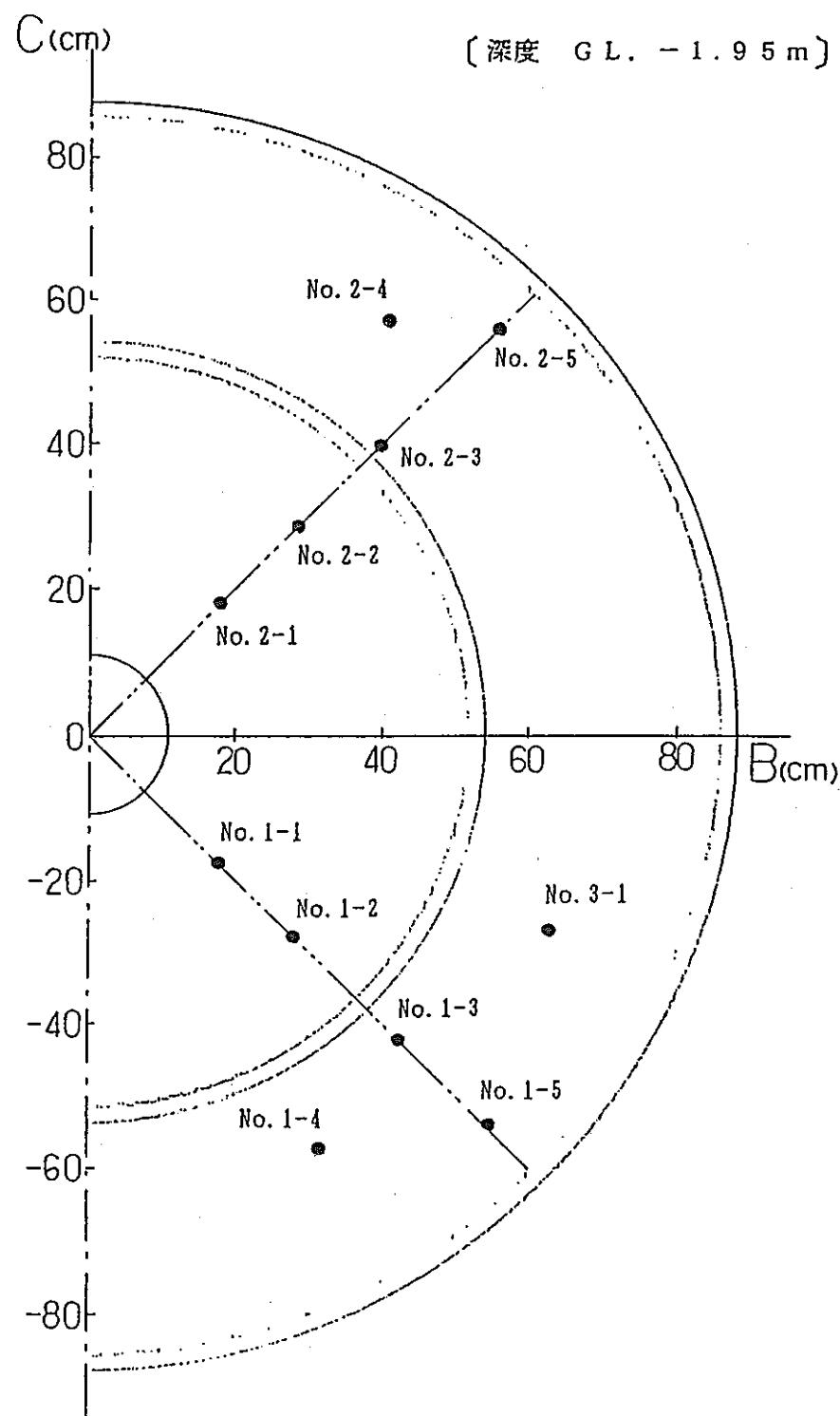


図-13 サンプリング位置平面図（縮尺 1/10）

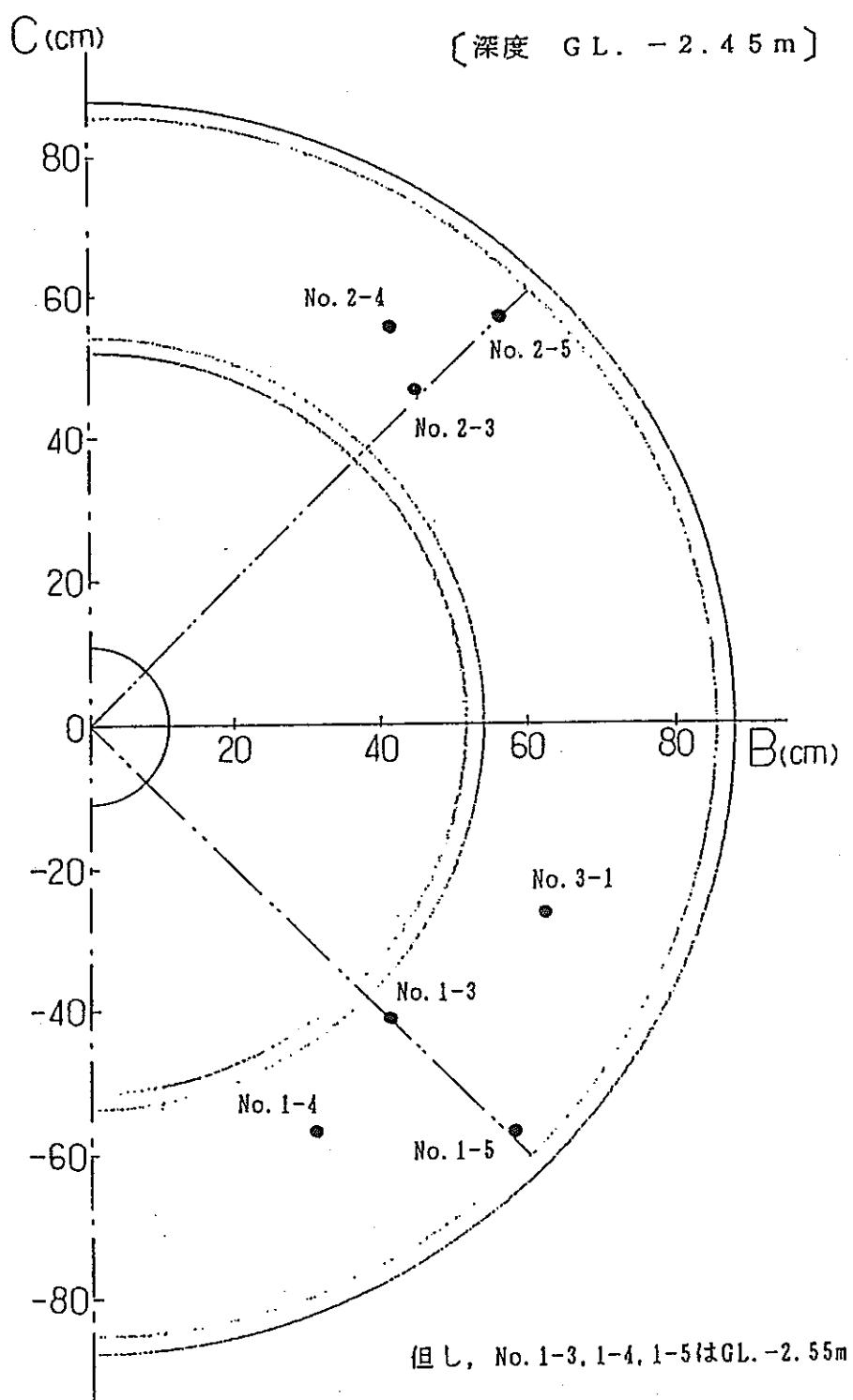


図-14 サンプリング位置平面図（縮尺 1/10）

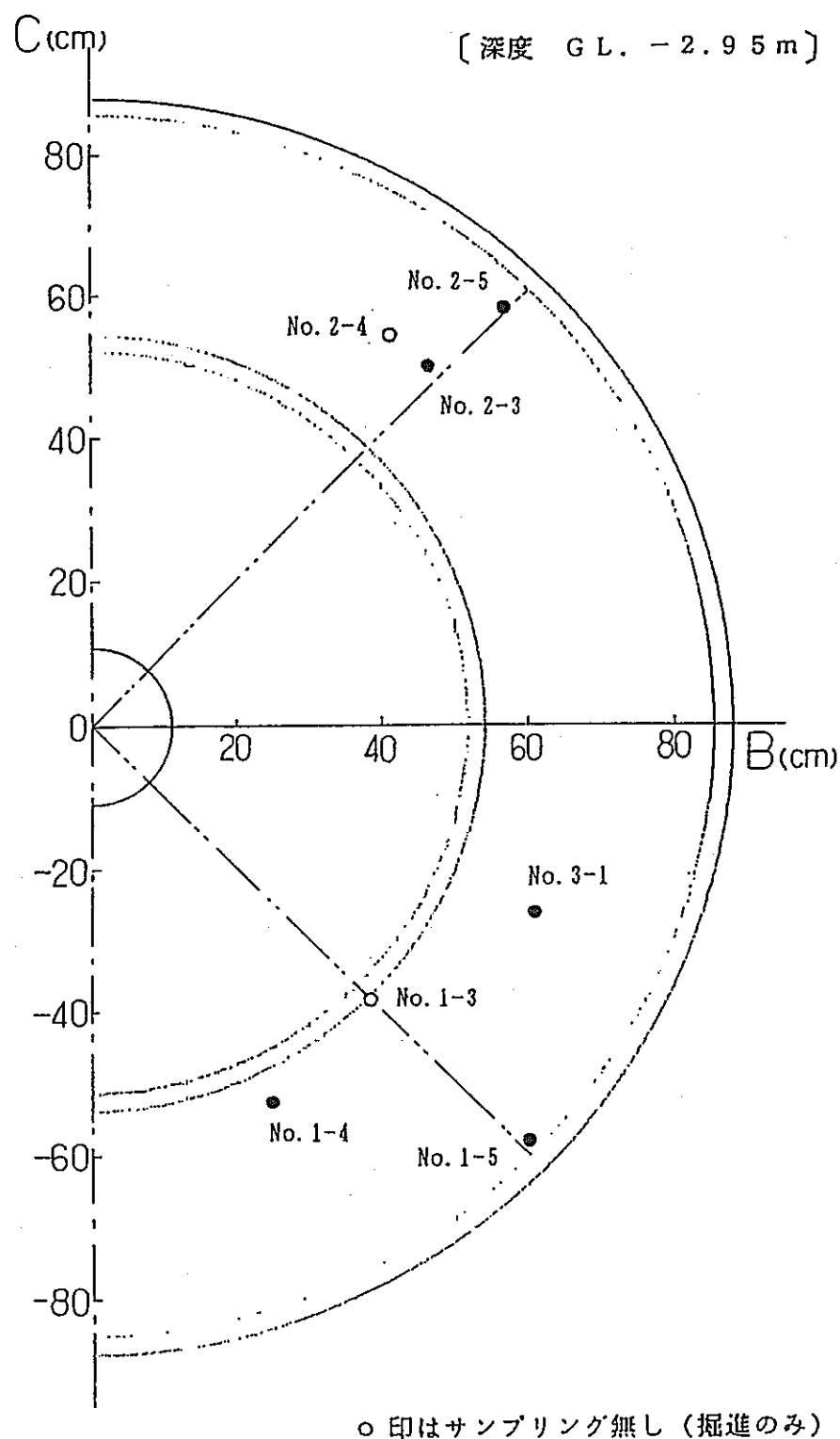


図-15 サンプリング位置平面図（縮尺 1/10）

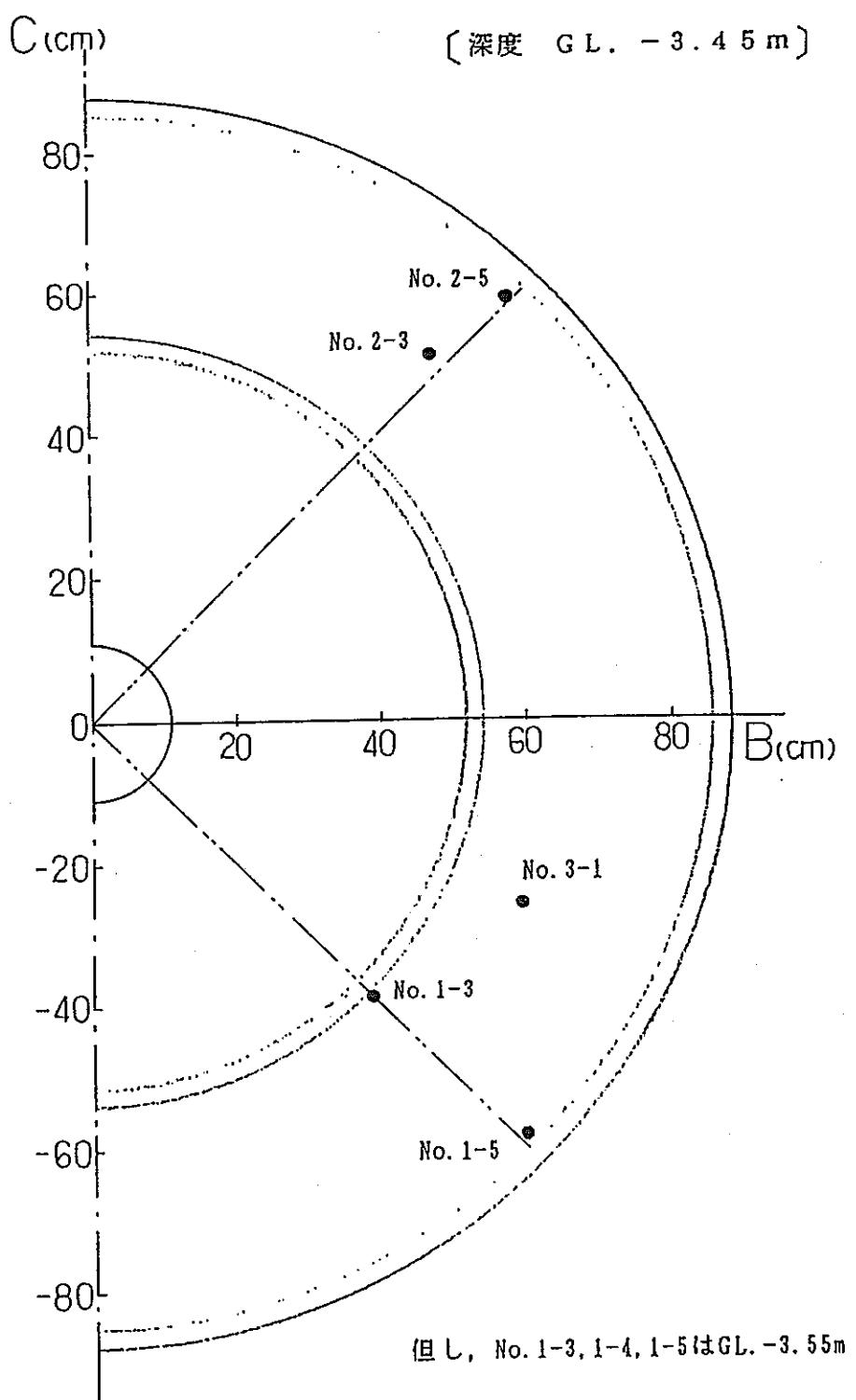


図-16 サンプリング位置平面図（縮尺 1/10）

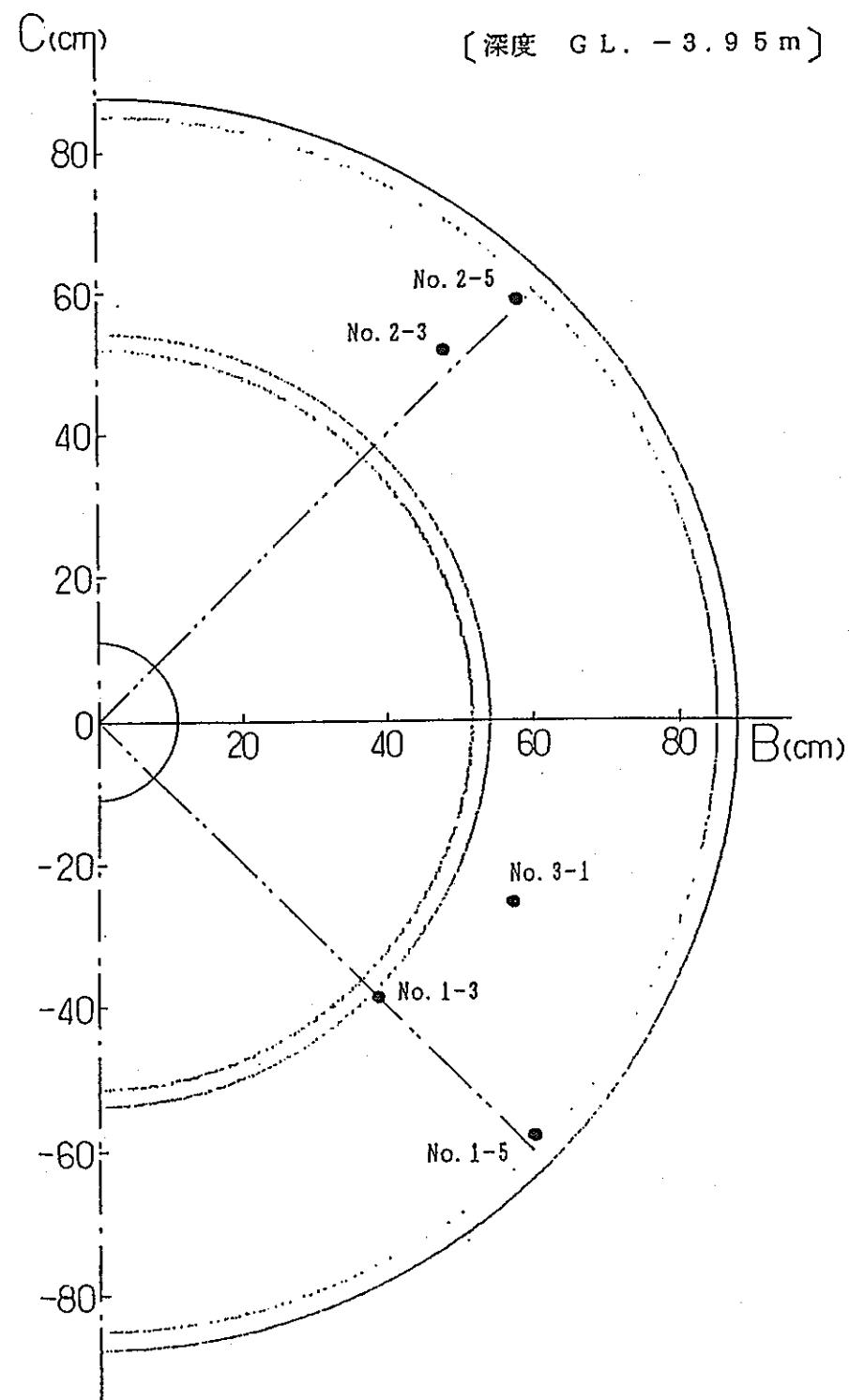


図-17 サンプリング位置平面図（縮尺 1/10）

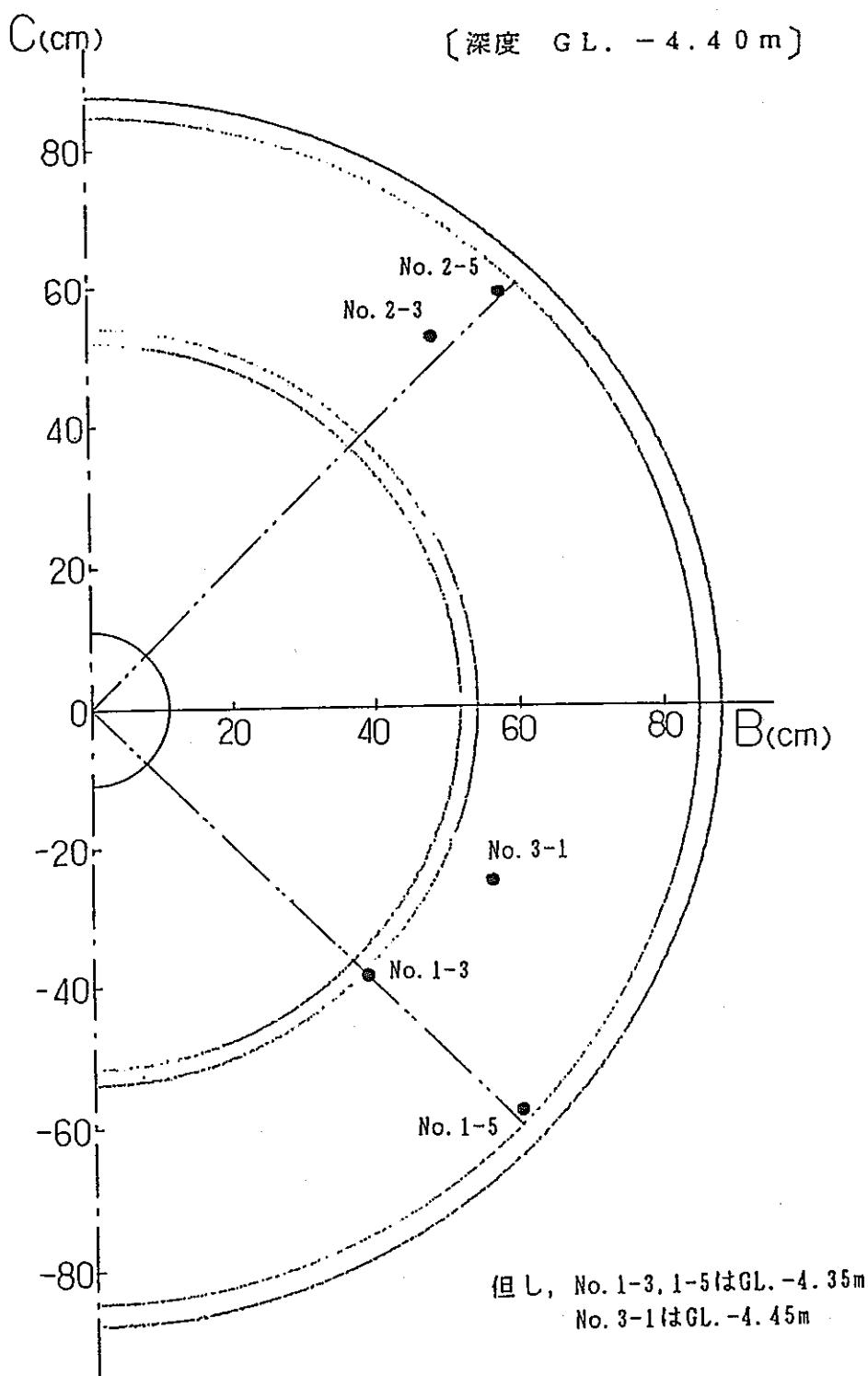


図-18 サンプリング位置平面図（縮尺 1/10）

表-4 含水比測定結果一覧表（1断面）

サンプリング番号	サンプリング深度(GL.-m)	含水比(%)					備考
		No.1-1	No.1-2	No.1-3	No.1-4	No.1-5	
1	0.75	12.6	12.3	12.1	12.0	11.9	
2	0.95	11.6	11.9	11.6	11.6	11.6	但し、No.1-3～1-5はGL.-1.05m
3	1.45	11.8	11.9	12.2	12.1	12.1	
4	1.95	8.96	8.82	12.2	12.0	11.9	但し、No.1-3～1-5はGL.-1.85m
5	2.55			9.44	9.47	11.3	
6	2.95			—	9.22	12.6	
7	3.55			10.8		12.5	但し、No.1-3はGL.-3.95m
8	3.95			11.1		13.2	但し、No.1-3はGL.-4.05m
9	4.35			12.4		14.1	

表-5 含水比測定結果一覧表（2断面）

サンプリング番号	サンプリング深度(GL.-m)	含水比(%)					備考
		No.2-1	No.2-2	No.2-3	No.2-4	No.2-5	
1	0.75	12.6	12.2	11.5	11.7	12.4	
2	0.95	11.6	11.5	11.5	11.6	12.0	
3	1.45	11.8	11.5	12.0	12.4	12.2	
4	1.95	8.66	8.82	10.3	11.1	13.5	但し、No.2-3はGL.-2.05m
5	2.45			9.59	9.94	12.0	
6	2.95			8.66		11.8	
7	3.45			9.26		12.6	
8	3.95			9.84		12.3	
9	4.40			13.3		14.4	

表-6 含水比測定結果一覧表（3断面）

サンプリング番号	サンプリング深度(GL.-m)	含水比(%)					備考
		No.3-1					
1	0.75	—					
2	0.95	11.3					
3	1.45	12.2					
4	1.95	11.4					
5	2.45	10.0					
6	2.95	9.53					
7	3.45	10.4					
8	3.95	11.4					
9	4.45	13.5					

表-7 含水比測定結果一覧表（長期乾燥試料）

サンプリング孔番 №1-5

サンプリング 番号	サンプリング 深度 (GL.-m)	含 水 比 (%)					備 考
		No.2-1	No.2-2	No.2-3	No.2-4	No.2-5	
1	0.75	11.9	11.9	—	11.9	11.9	
2	1.05	11.6	11.6	11.6	—	11.6	
3	1.45	12.1	12.1	12.1	—	12.1	
4	1.85	11.9	11.9	11.9	—	11.9	
5	2.55	11.3	11.3	11.3	—	11.3	
6	2.95	12.6	12.6	12.6	—	12.6	
7	3.55	12.5	12.5	12.5	—	12.5	
8	3.95	13.2	13.2	13.2	—	13.2	
9	4.35	14.1	14.1	14.1	—	14.1	

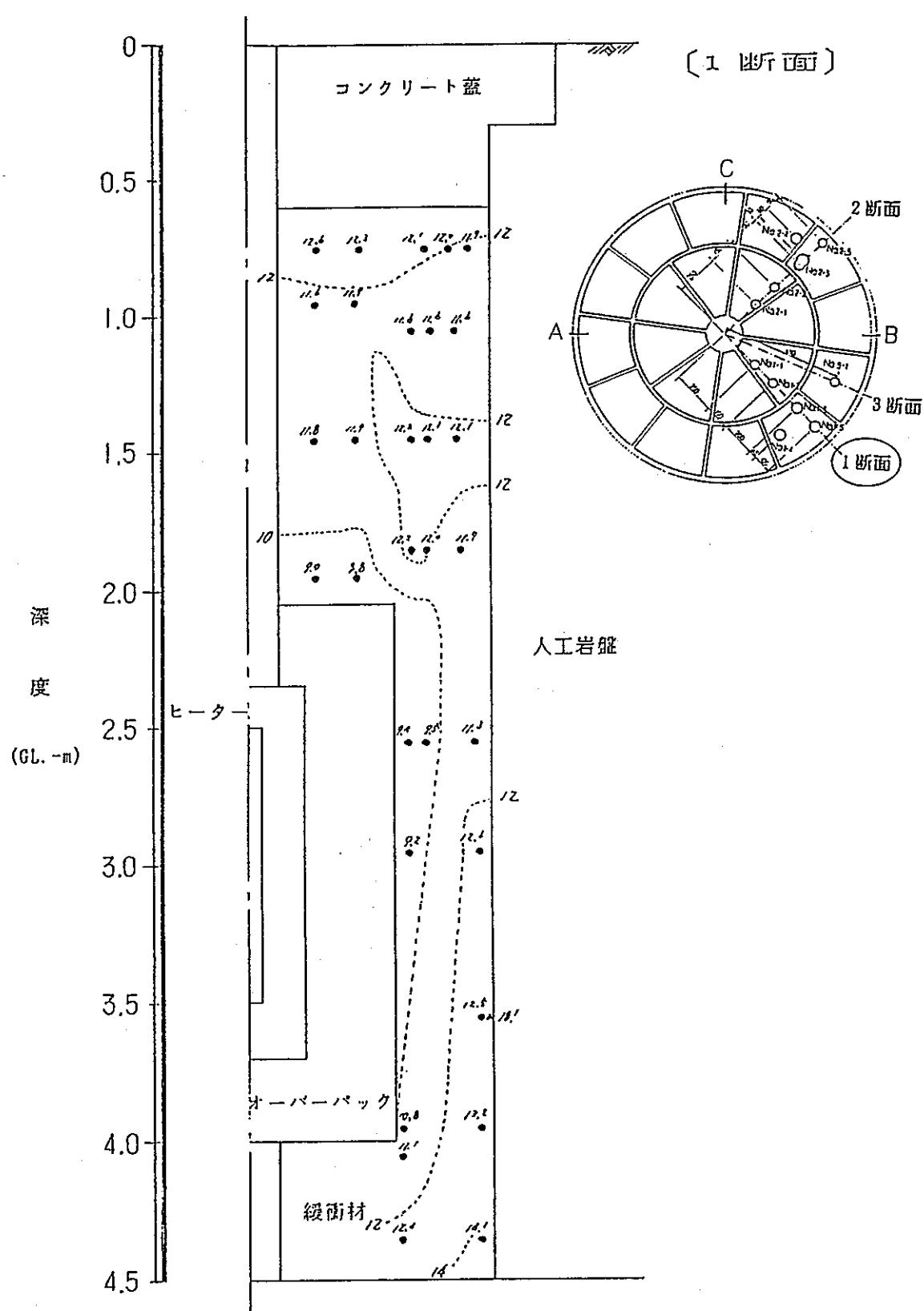


図-19 含水比等值線図 (縮尺 1/20)

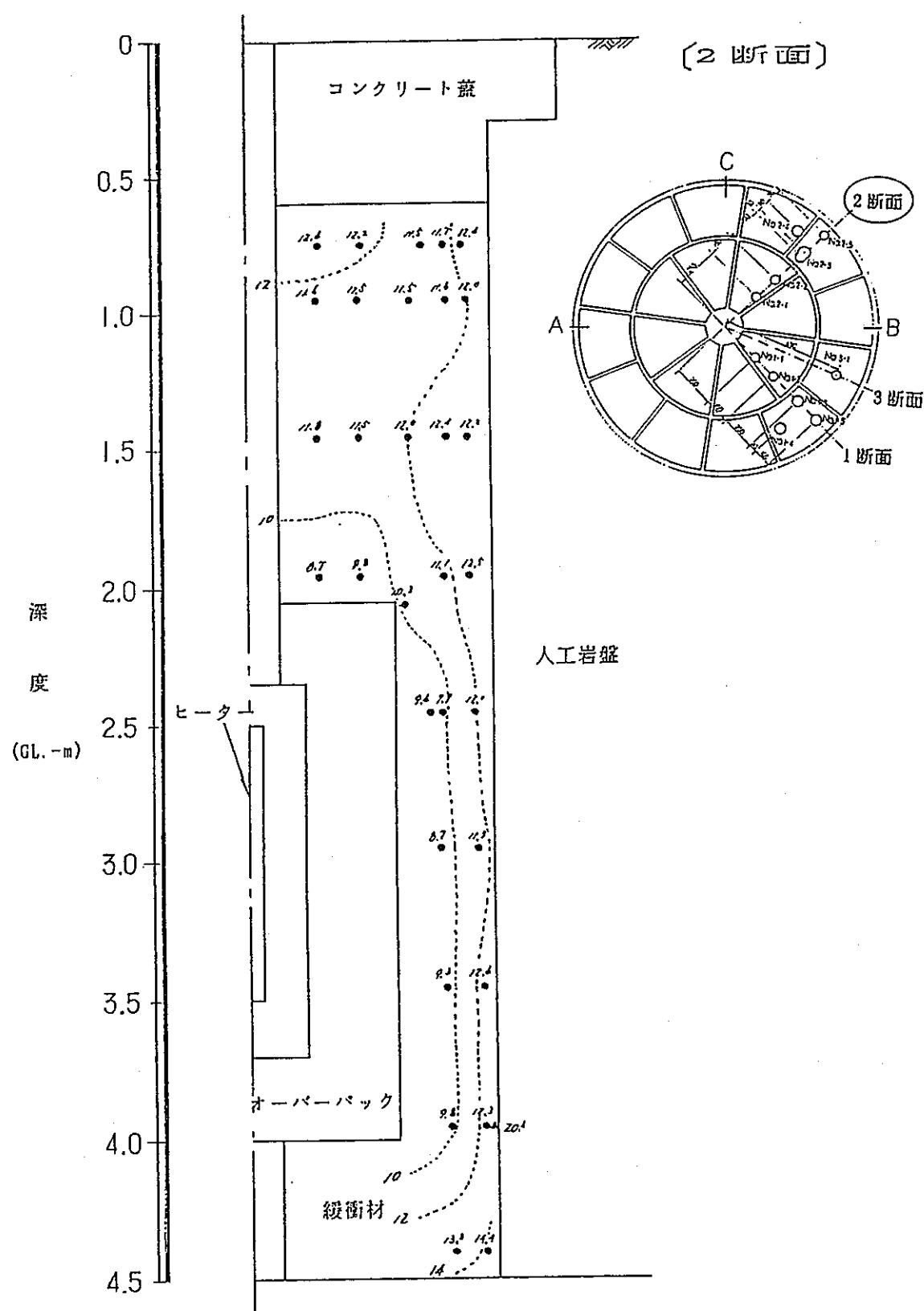


図-20 含水比等值線図 (縮尺 1/20)

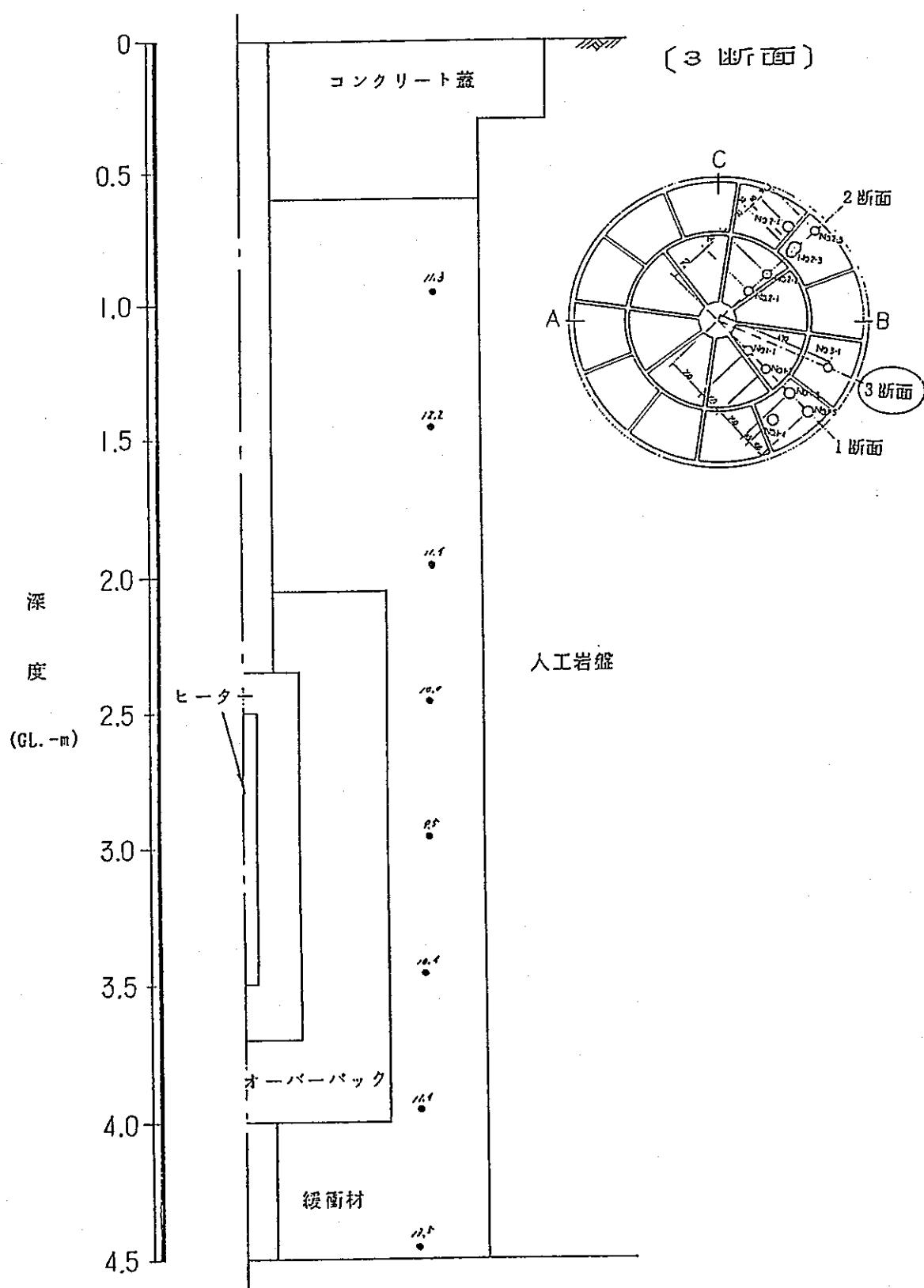


図-21 含水比等値線図（縮尺 1/20）

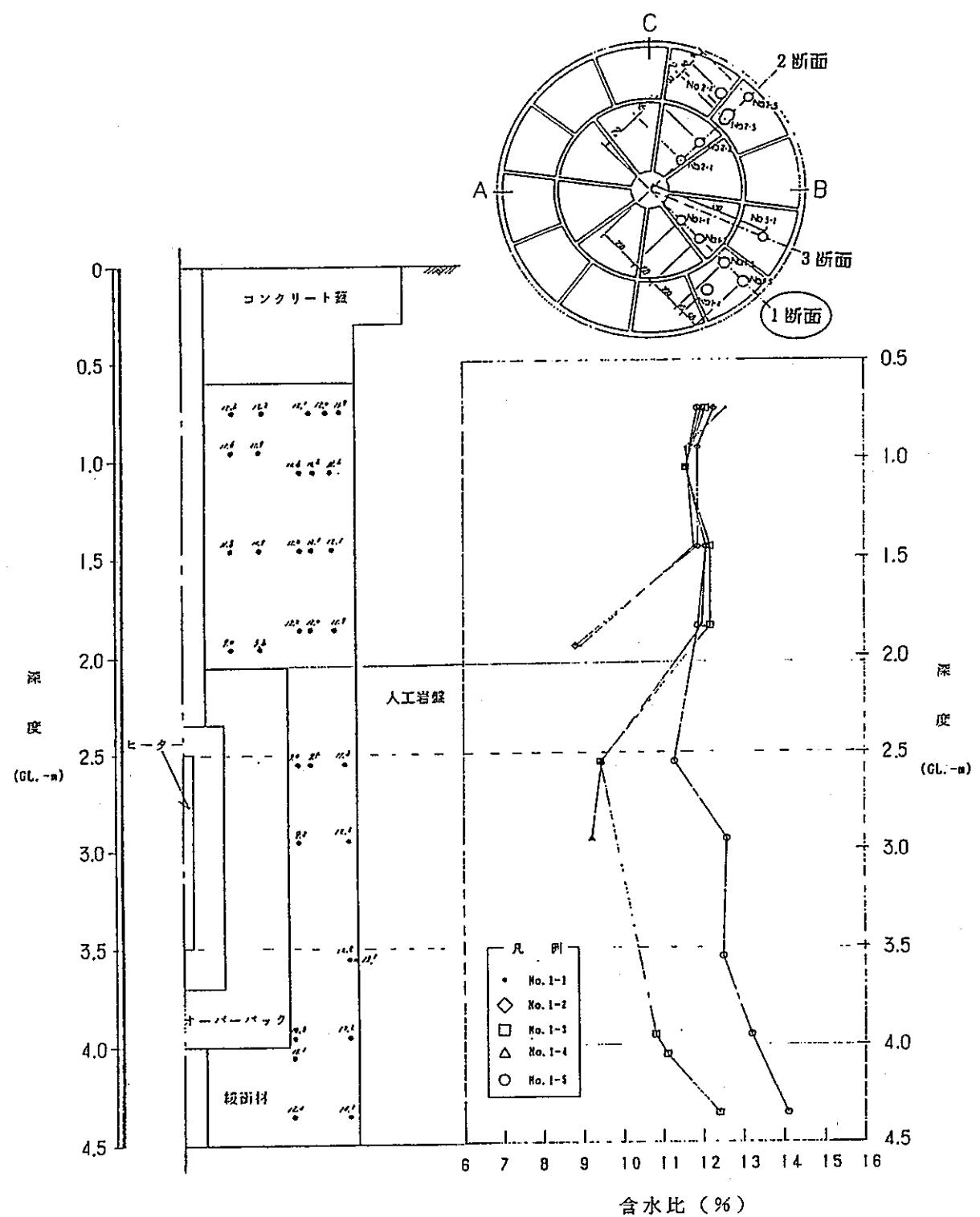
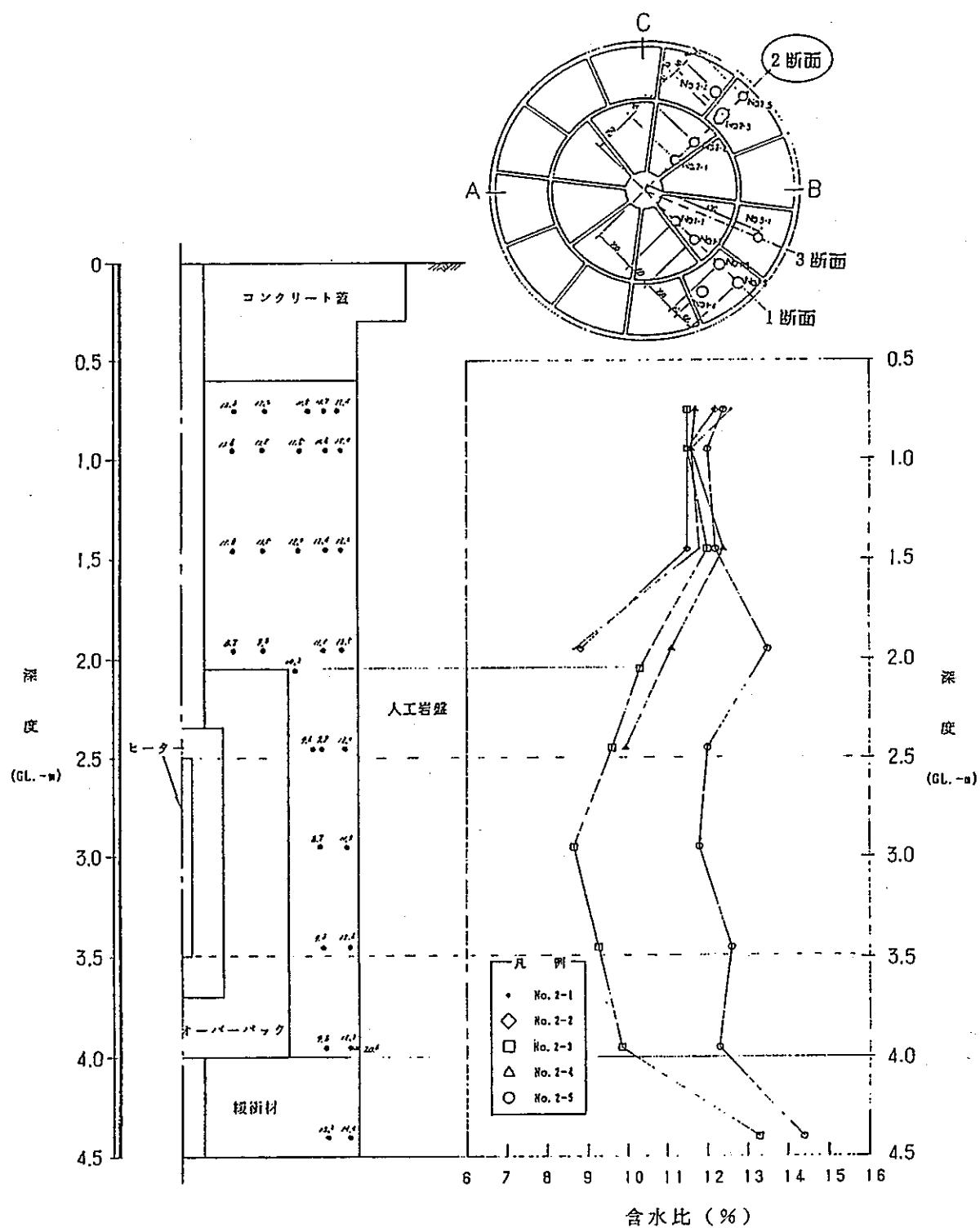


図-22 含水比の深度分布（1断面）



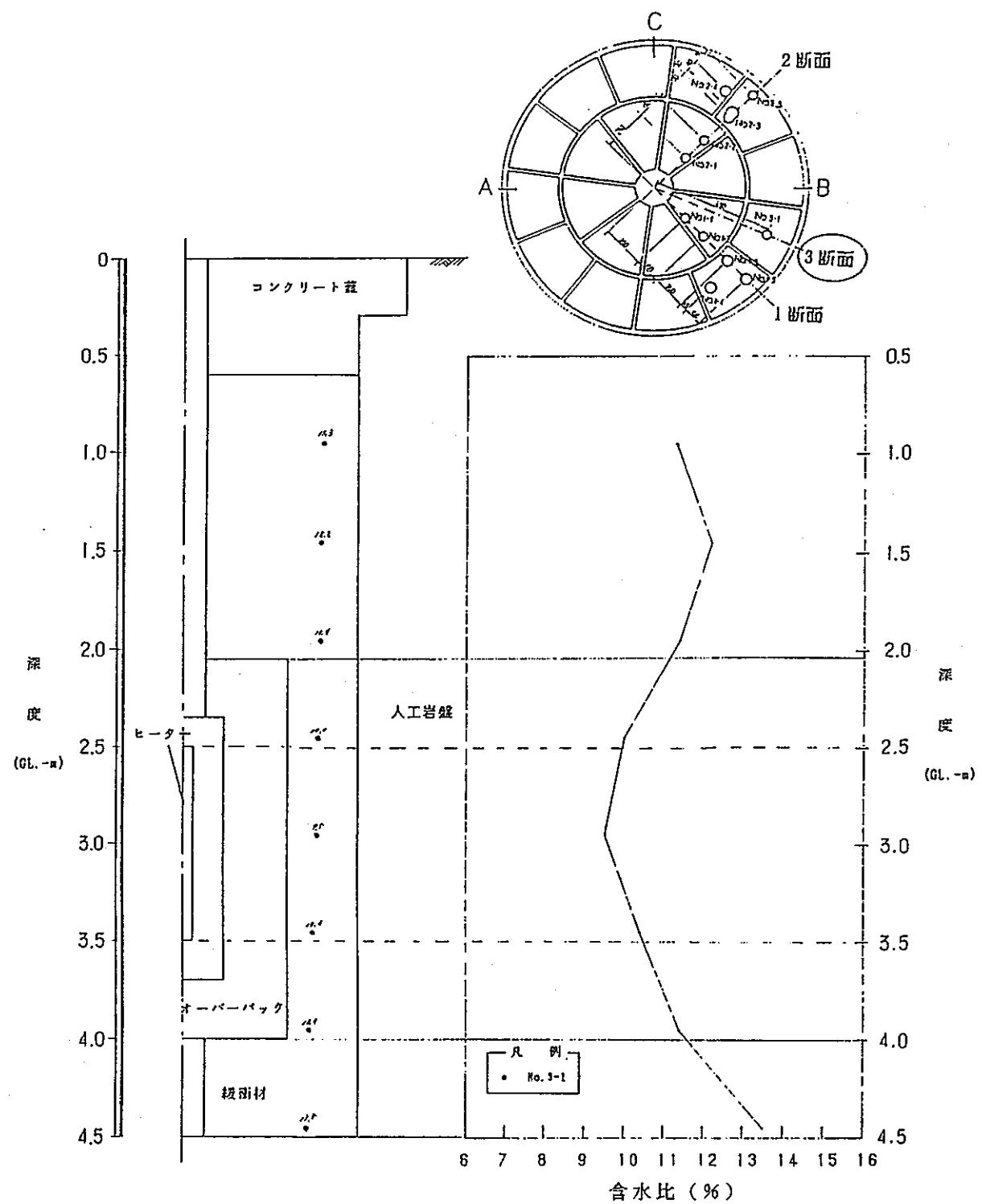


図-24 含水比の深度分布（3断面）