

# マス・コンクリート新設による熱伝導・熱応力解析

1983年10月

動力炉・核燃料開発事業団  
東海事業所

この資料は、動燃事業団社内における検討及び周知を目的とする社内資料です。刊行物に引用する場合には、事業団の承認が必要です。

## マス・コンクリート打設による熱伝導・熱応力解析

実施責任者	青 木	実**
報 告 者	三 宮 都	一*
	青 木 弘	之**
	大 島 博	文***

## 要 旨

打設したコンクリートは数時間後に発熱する。放熱が少ない場合には、コンクリート内の温度が上昇し、場合によってはこれが原因でクラックが発生する。原子力関連施設ではマスコンクリートの使用が多くなり、単位セメント量が多いため発熱量も大きく、場合によってはクラックの発生等が予想される。原子力施設では遮へい、気密性の要求から極力クラックの原因を取り除く必要がある。

今回、プルトニウム転換技術開発施設及び再処理工場第2排気筒の建設工事において、マスコンクリートの発熱を実測する機会が得られたので、これらデータをもとに一連の熱解析、熱応力解析を試み結果をまとめた。

- 
- \* 再処理工場建設室
  - \*\* 転換技術開発部技術課
  - \*\*\* 転換技術開発部運転課

# 目 次

1. 概 要 .....	1
2. 温度解析 .....	2
2.1 コンクリート発熱 .....	2
2.2 排気筒第1リフト実測値からの発熱量の推定 .....	3
2.3 プルトニウム転換施設基礎コンクリートへの応用 .....	10
2.4 排気筒基礎第2～第5リフトへの応用 .....	16
2.5 排気筒基礎打設終了後の温度変化 .....	24
2.6 熱応力算定用2次元温度分布 .....	30
3. 熱応力解析 .....	40
3.1 概 論 .....	40
3.2 排気筒基礎への応用 .....	42
4. 結 論 .....	55
添附－1 断熱温度上昇試験例 .....	56
添附－2 排気筒基礎コンクリート実測結果 .....	62
添附－3 日射影響による補正 .....	68
添附－4 打設後1週以後の発熱補正 .....	75
添附－5 ひびわれ推定の例 .....	80
添附－6 排気筒基礎コンクリート打設終了後の温度実測結果 .....	82

## 1. 概 要

打設したコンクリートは数時間後に発熱し、マスコンクリートの場合は放熱が少ないため、温度が上昇し、場合によってはそれが原因でクラックが発生する。

マスコンクリートの発熱を考慮した打設計画は米国フーバーダムで実施されたのが始まりであり、土木では 40 年近くの実績がある。

建築ではマスコンクリートがほとんどなかったため歴史が浅く、発熱影響を打設計画にとり入れた例は少ない。

原子力関連施設ではマスコンクリートが多くなり、土木で使用するコンクリートよりも単位セメント量が多いため、発熱も大きく、場合によってはその併害も大きくなることが予想される。①原子力関連施設では遮へい、気密性の要求から極力クラックの原因を取り除く必要がある。クラックは必ずしも発熱だけでなく、乾燥収縮、沈下収縮等の複合現因の結果として考えられるが、マスコンクリートにおいては発熱が大きな要因となることは事実であり、打設計画に発熱を考慮すべきである。

コンクリートの発熱は実験式として日本セメントの塚山氏により詳しく検討され、その常数が一般に使用されている。

今回、再処理工場内のプルトニウム転換施設においてマスコンクリートの発熱を計測する機会を得、日本セメントのデータによって解析を試みたが、よく合わなかった。プルトニウム転換施設で使用された日立セメントの発熱をデータから概算した結果、少し大きいことが分った。さらに、第 2 排気筒の建設工事において実測する機会を得たため、一断面内の測定点を増し、発熱データとして信頼性のあるものが得られた。

本報告書は排気筒実測から得られたデータをもとに、日本セメントの式を補正し、一連の熱解析、熱応力解析を試みたものである。

熱解析は差分法 3 次元非定常熱輸送プログラム「TRUMP」、応力解析は有限要素法応力解析プログラム「SAPM」（いずれも動燃所有）を使用した。

今回のデータは冬及び中間期のものであり、夏のものについては、今後の室内実験、実測等で妥当性の確認が必要と考えられる。

## 2 温度解析

### 2.1 コンクリート発熱

コンクリートの断熱温度上昇（試験方法は添附-1参照）は（2.1）式で表わすことが出来る。

$$T_{ad} = T_{\infty} \cdot (1 - e^{-\alpha t}) \quad (2.1)$$

$T_{ad}$  : 断熱温度上昇 (°C)

$T_{\infty}$  : 実験定数 (°C)

$\alpha$  : " (1/day)

$t$  : 経過日数 (day)

日本セメントの試験結果によれば、 $K$ 、 $\alpha$ は表 2.1、図 2.1 によって求められる。表 2.1 の  $\alpha$  は打設温度 20°C の値であり、20°C 以外は図 2.1 によって補正する必要がある。

表 2.1 単位セメント量と断熱温度上昇式の実験定数の関係（塚山）

セメントの種類	$T_{\infty}$ (°C)	$\alpha$ (/日)
超 早 強	$T_{\infty} = 6.7 + 0.123 W_c$	$\alpha = 1.66 + 0.0016 W_c$
早 強	$T_{\infty} = 1.7 + 0.131 W_c$	$\alpha = 0.63 + 0.0018 W_c$
普 通	$T_{\infty} = 7.8 + 0.095 W_c$	$\alpha = 0.34 + 0.0021 W_c$
中 庸 熱	$T_{\infty} = 10.8 + 0.081 W_c$	$\alpha = 0.14 + 0.0025 W_c$
B 種 高 炉	$T_{\infty} = 8.2 + 0.099 W_c$	$\alpha = 0.55 + 0.0010 W_c$
B 種 フ ラ イ ア ッ シ ュ	$T_{\infty} = 5.6 + 0.097 W_c$	$\alpha = 0.53 + 0.0009 W_c$

$W_c$  : セメント量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

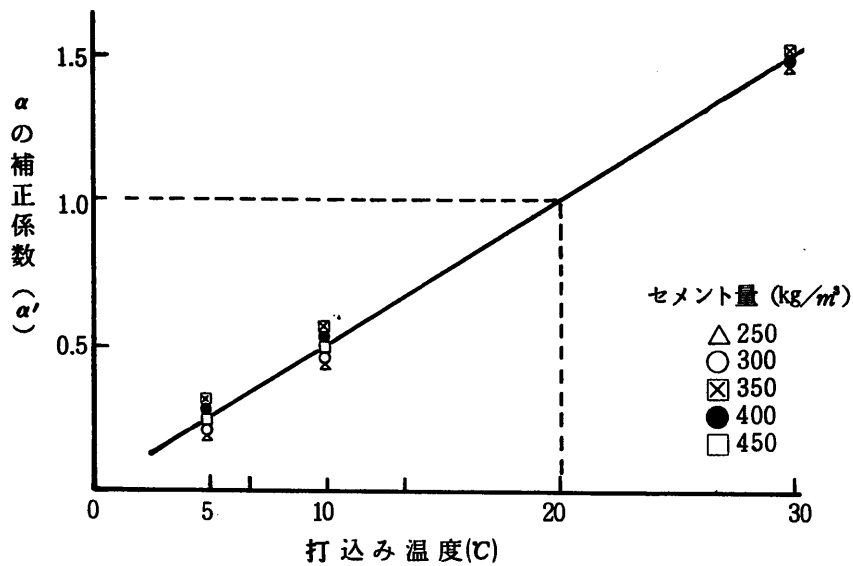


図 2.1 打込み温度 ( $T_0$ ) と発熱温度 ( $\alpha$ ) の関係

(普通ポルトランドセメント)  
 $T_0 = 20\text{℃} \rightarrow \alpha$   
 $T_0 \neq 20\text{℃} \rightarrow \alpha' \cdot \alpha$

発熱量は (2.1) 式の微分として, (2.2) 式で表わすことができる。

$$G = T_{\infty} \cdot \alpha \cdot e^{-\alpha t} \quad (2.2)$$

(2.1) 式, (2.2) 式は 1 週間程度の試験に基づいて提案された式であり, それ以後については適用することはできない。実用上は 1 週以後の発熱は少なく, ほとんど問題とはならない。

## 2.2 排気筒第 1 リフト実測値からの発熱量の推定

### (1) 日本セメントの試験結果からの推定

排気筒第 1 リフトで使用したコンクリートはセメント量  $255\text{ kg/m}^3$  (B 種フライアッシュ) 打設温度  $12\text{℃}$  であった。表 2.1, 図 2.1 から発熱定数を推定すれば以下ようになる。

$$T_{\infty} = 5.6 + 0.097 \times 255 = 30.33$$

$$\alpha = (0.53 + 0.0009 \times 255) \times \alpha' = 0.461$$

$$\alpha' = 0.6 \text{ (12℃補正係数)}$$

添付-2 排気筒実測結果は最高温度  $46.2\text{℃}$  を記録しており, 断熱温度上昇を仮定しても  $12.0 + 30.33 = 42.33\text{℃}$  であり, 記録値より  $4\text{℃}$  近く低くなる。実際は放熱もあり最高温度は  $4\sim 6\text{℃}$  程度低くなると考えられる (打設高さ  $3\text{ m}$  の場合) ため断熱温度上昇は  $46.2 + 4\sim 6 = 50.2\sim 52.6$  と推定される。

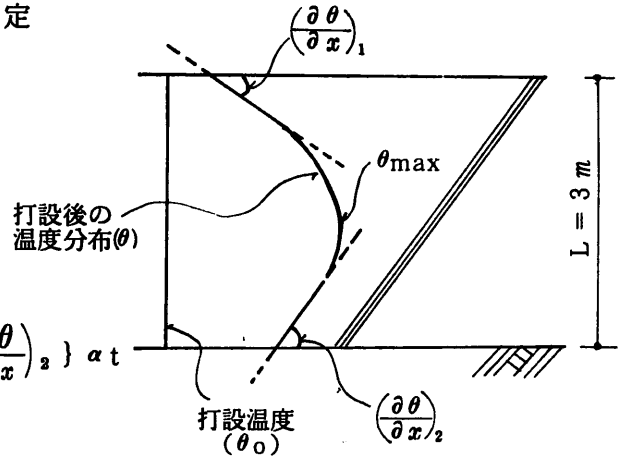
表 2.1 で示した式が, 排気筒で使用した日立セメントにそのまま利用できないため, 実測記録から断熱温度上昇の推定を行なう。

(2) 排気筒第1リフトからの断熱温度上昇の推定

打設後 t 時間経過したときの温度分布を右図のようにモデル化すると、断熱温度上昇は次式で表わすことができる。

$$T_{ad}(t) = \theta_{max} - \theta_0$$

$$+ \frac{1}{\rho CL} \int_0^t \{ K \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_1 + K \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_2 \} \alpha t$$



- $\rho$  : コンクリート単位体積重量
- $C$  : " 比熱
- $Kc$  : " 熱伝導率

計算は1日のステップで行ない、 $(\partial \theta / \partial x)$  は実測値から直線勾配とし、条件は以下の値を使用する。

- $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$
- $C = 0.23 \text{ Kcal/kg} \cdot \text{C}$
- $Kc = 2.0 \text{ Kcal/m} \cdot \text{h} \cdot \text{C}$
- $\theta_0 = 12.0 \text{ C}$

結果を表 2.2 に示す。

これにより  $T_{\infty} = 41.52$   
 $\alpha = 0.54$  となる。



表 2.2 排気筒第 1 リフト断熱温度上昇想定値

日 数	$\theta_{\max}$	$\rho C(\theta_{\max} - \theta_0)$ ①	$(K \frac{\partial \theta}{\partial x})_1$ ②	$(K \frac{\partial \theta}{\partial x})_2$ ③	$(②+③) \times 24/L$ ④	$\Sigma$ ④ ⑤	① + ⑤	$T_{ad}$
日	℃	Kcal/m <sup>3</sup>	Kcal/h·m <sup>2</sup>	Kcal/h·m <sup>2</sup>	Kcal/m <sup>3</sup>	Kcal/m <sup>3</sup>	Kcal/m <sup>3</sup>	℃
1	26.4	7949	10.8	6.5	138	138	8087	14.65
2	37.4	14021	24.0	39.5	508	646	14667	26.57
3	42.5	16836	28.6	64.75	746	1392	18228	33.02
4	45.7	18602	28.4	68.0	771	2163	20765	37.62
5	45.8	18650	26.4	69.0	763	2899	21549	39.03
6	46.9	19264	24.4	70.2	753	3656	22920	41.52

## (3) 理論解析及び実測値の比較

(2)の結果をもとに理論解析を行なう。

方法は差分法3次元非定常熱輸送プログラム「TRUMP」による。メッシュ分割は図2.2の一次元とし、熱物性条件は以下の値を使用した。

コンクリート熱伝導率	2.0 Kcal/m·h·℃
“ 比 熱	0.23
“ 単位体積重量	2400 kg/m <sup>3</sup>
泥 岩 熱伝導率	1.3 Kcal/m·h·℃
“ 比 熱	0.3
“ 単位体積重量	1800 kg/m <sup>3</sup>
表面熱伝導率	15.0 Kcal/m <sup>2</sup> ·h·℃
外 気 温	$7 + 3 \sin \left\{ \frac{\pi}{12} (T + 4) \right\}$

$\left\{ \begin{array}{l} T : \text{打設後の経過時間, 計算上の打設終了は} \\ \text{実際の打設開始と終了の平均とし } T = 0 \text{ は } 0 \\ \text{時 P.M とした。} \end{array} \right.$

(2)で求めた  $T_{\infty} = 41.52$  は放熱量を直線補間温度勾配から求めているため、上記条件で数例計算し温度のピーク値を実測と合うように補間し  $T_{\infty} = 41.0$  とした。 $\alpha$ の値は前章(2)の値 0.54 とした。

計算結果を図2.3 (一部第2リフト結果も含む。第2リフトについては後述)、図2.4に示す。

結果はピーク時以後の誤差がでていますが、この原因については添附3, 4に示す。応力評可上は安全側の値となるため、以後は上記条件に統一する。

100 (外 気)

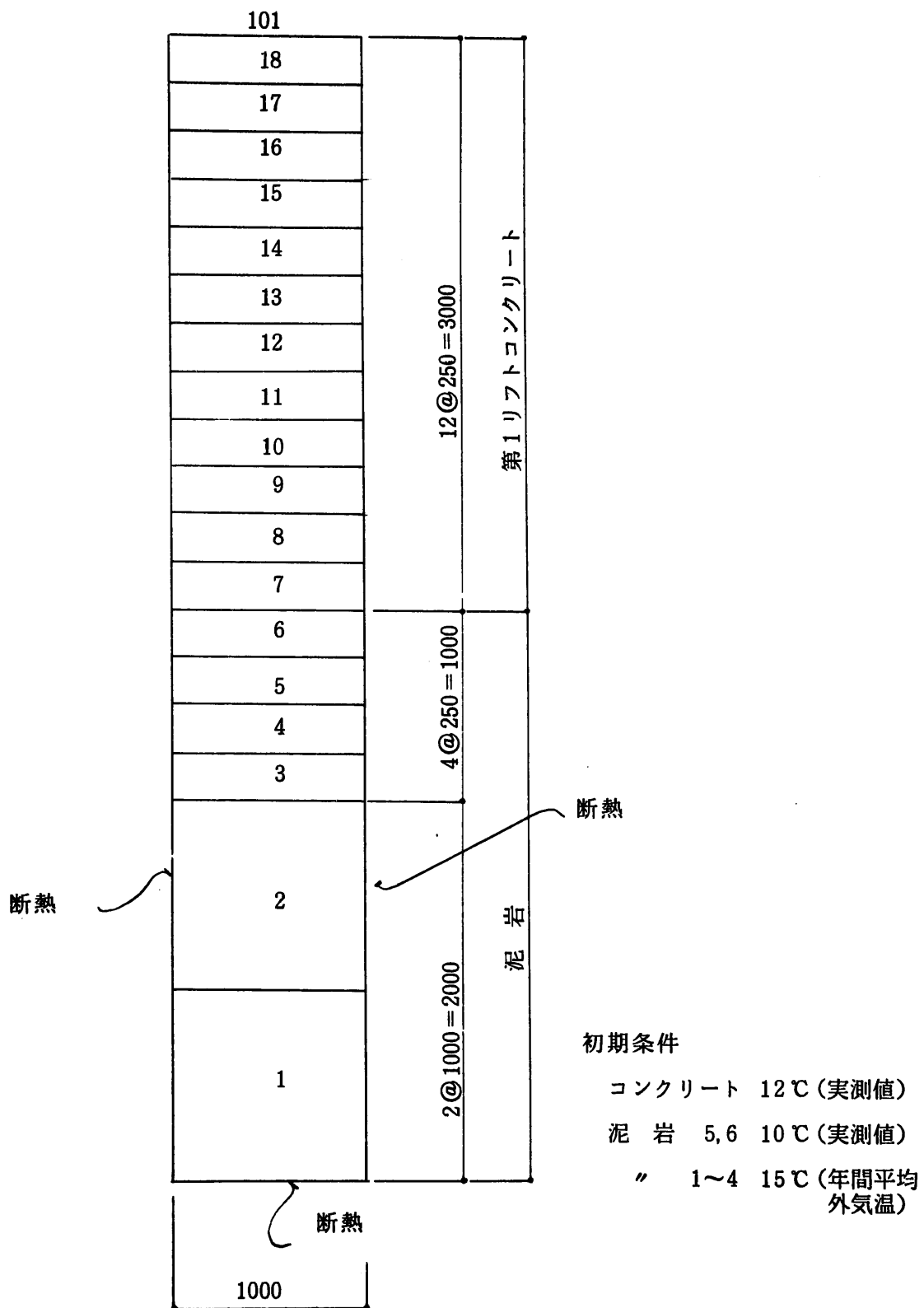


図 2.2 第1リフトメッシュ分割

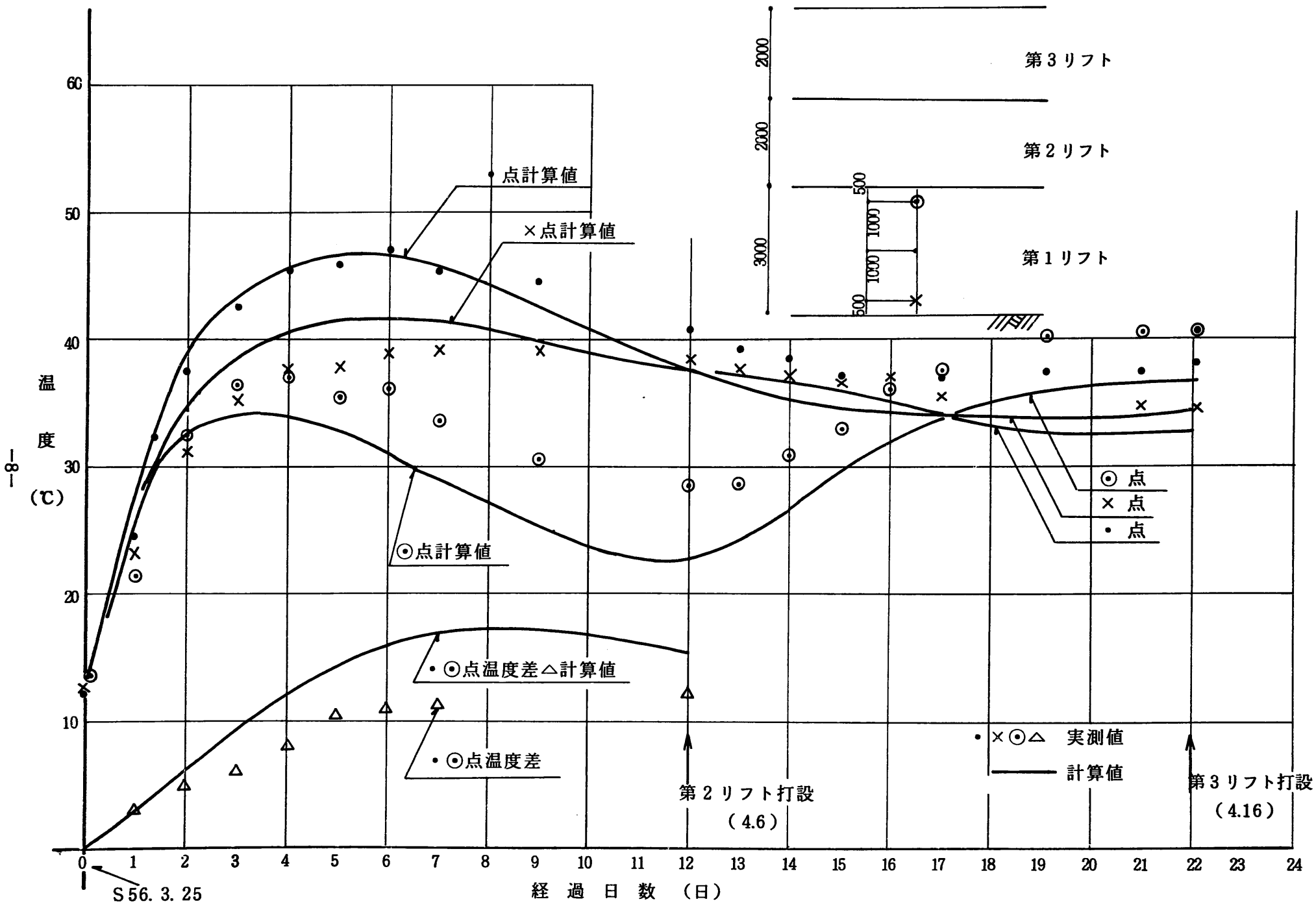


図 2.3 排気筒基礎第1リフト温度経時変化



(4) 日立セメント発熱式の推定

日本セメントの試験結果を以下のように補正する。

(1)より日本セメントの結果に第1リフトを適用すれば

$$T_{\infty n} = 30.33$$

$$\alpha_n = 0.461 \quad \text{となる。}$$

(3)より日立セメントの推定値は

$$T_{\infty h} = 41.0$$

$$\alpha_h = 0.54 \quad \text{となる。}$$

$T_{\infty h}$ ,  $\alpha_h$  は  $T_{\infty n}$ ,  $\alpha_n$  の係数倍率として下記のように定義する。

$$T_{\infty h} = k \cdot T_{\infty n} = \frac{41.0}{30.33} T_{\infty n} = 1.352 T_{\infty n}$$

$$\alpha_h = k' \cdot \alpha_n = \frac{0.54}{0.461} \alpha_n = 1.171 \alpha_n$$

以下の解析は簡素化し

$$T_{\infty h} = 1.3 T_{\infty n}$$

$$\alpha_h = 1.2 \alpha_n$$

即ち、表 2.1, 図 2.2 より求めた値に対して  $T_{\infty}$  は 30% 増,  $\alpha$  については 20% 増 とする。

### 2.3 プルトニウム転換施設基礎コンクリートの応用

Pu 転換施設の基礎コンクリート (高さ 2 m) に対し, 2.2 の結果を応用し, 結果の妥当性を評価する。セメントの種類は排気筒と同じ B 種フライアッシュ, セメント量は  $322 \text{ kg/m}^3$  である。

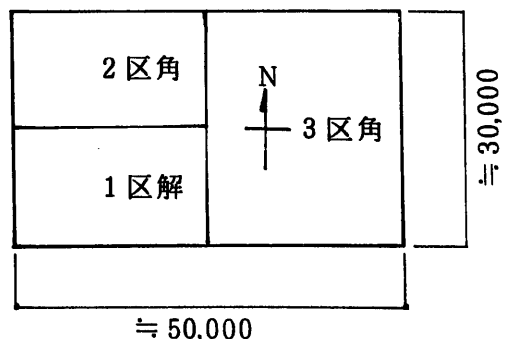
メッシュ分割は図 2.5 とし, コンクリート, 泥岩の熱物性条件は 2.2 (3) と同じものとした。

基礎コンクリートは約  $30 \text{ m} \times 50 \text{ m}$  を 3 区角にわけて打設したが, そのうちの 1, 3 区角の結果を示す。

(1) 1 区角

計算条件

打設温度  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$



$$T_{\infty} = (5.6 + 0.097 \times 322) \times 1.3 = 47.88$$

$$\alpha = (0.53 + 0.0009 \times 322) \times 1.2 = 0.983$$

外気温

$$10 \times 5 \sin \left\{ \frac{\pi}{12} (T + 4) \right\}$$

表面熱伝導率

10 Kcal/m<sup>2</sup>·h·°C (途中からマット養生をしたが、計算上最初からとした。)

結果を図 2.6 に示す。





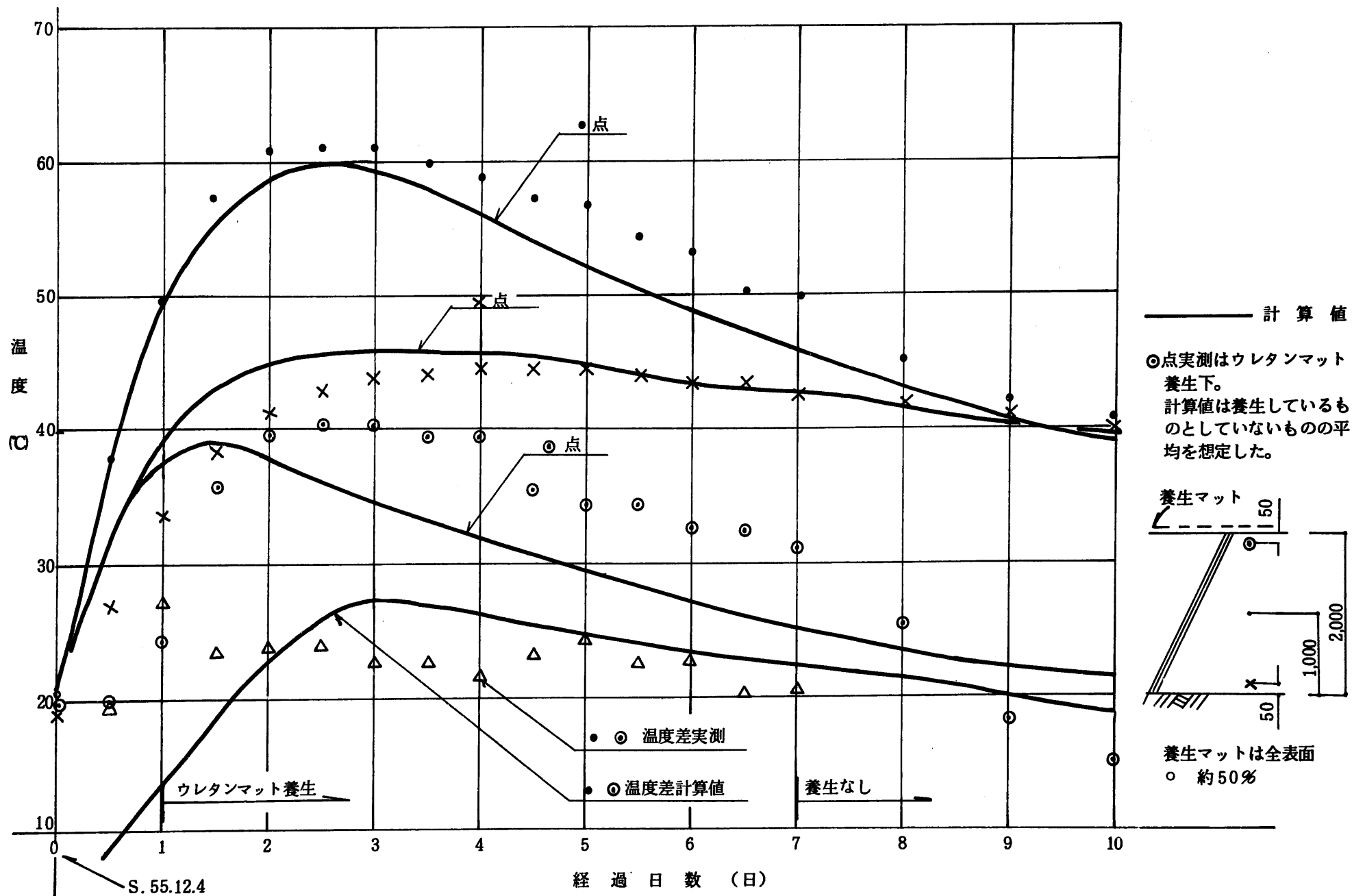


図 2.6 プルトニウム転換施設基礎温度経時変化

## (2) 3 区角

計算条件

打設温度 13 ℃

$$T_{\infty} = 47.88$$

$$\alpha = 0.983 \times (0.5 + 0.5 \times 0.3) = 0.639$$

外気温

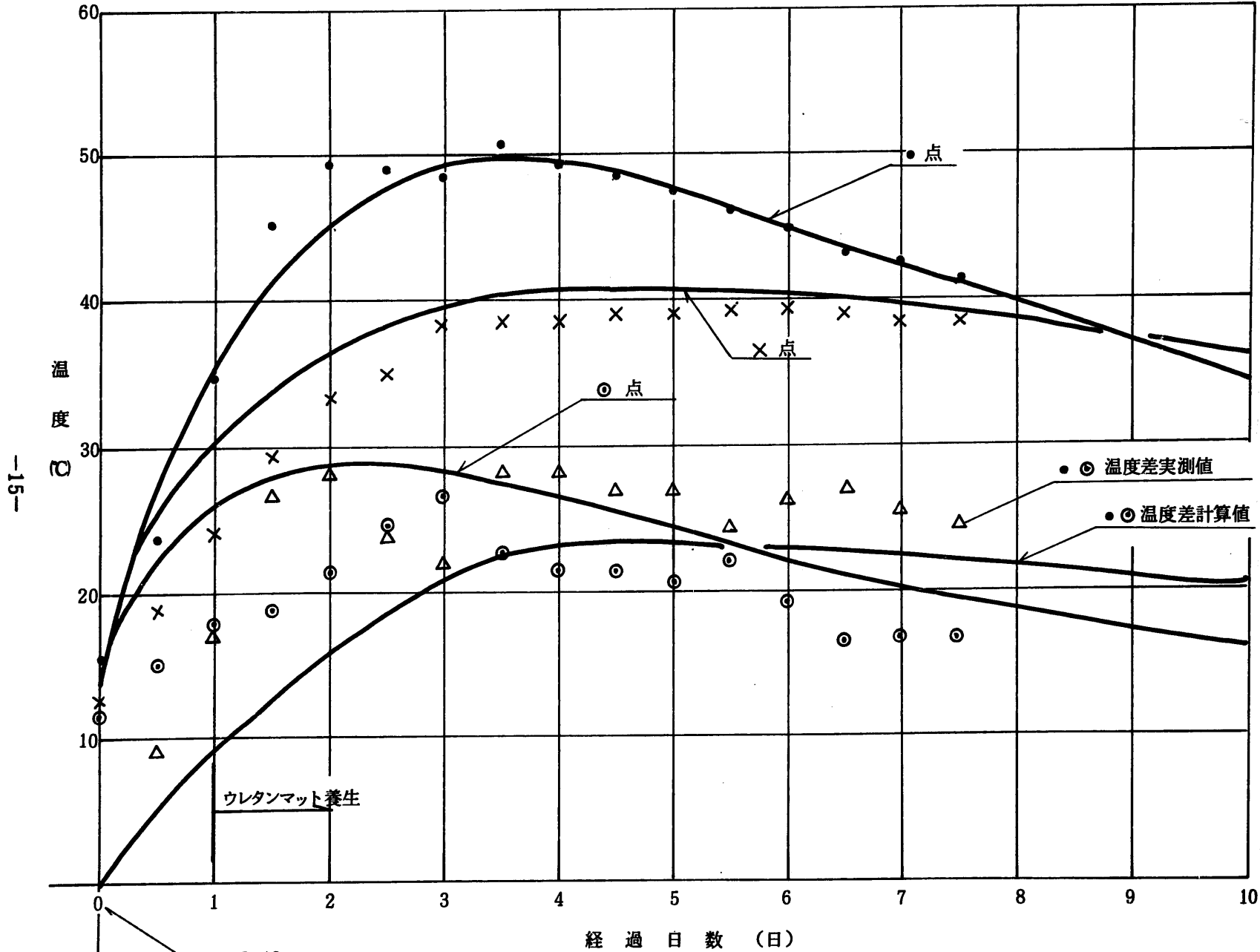
$$5 + 2\text{Sin} \left\{ \frac{\pi}{12} (T + 4) \right\}$$

表面熱伝導率

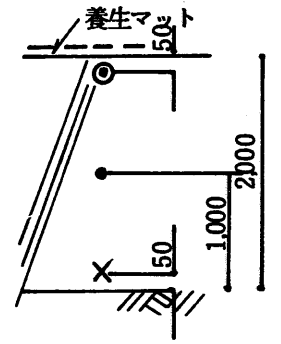
$$10.0 \text{ Kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{℃}$$

結果を図 2.7 に示す。

11), 12), の実測と計算値との比較から, 表面付近で誤差がでていますが, マットの局所的な影響と考えられ, 熱応力算定上はさしつかえないと考えられ, マットの局所的な影響のない点においてはほぼ実測値と合っていることからみて, 2.2(4)の仮定は妥当的なものと考えられる。



○点の上は梁のため養生できず。計算は養生しているものとしていないもの、平均を想定した。



養生マットは全表面  
○ 約50%

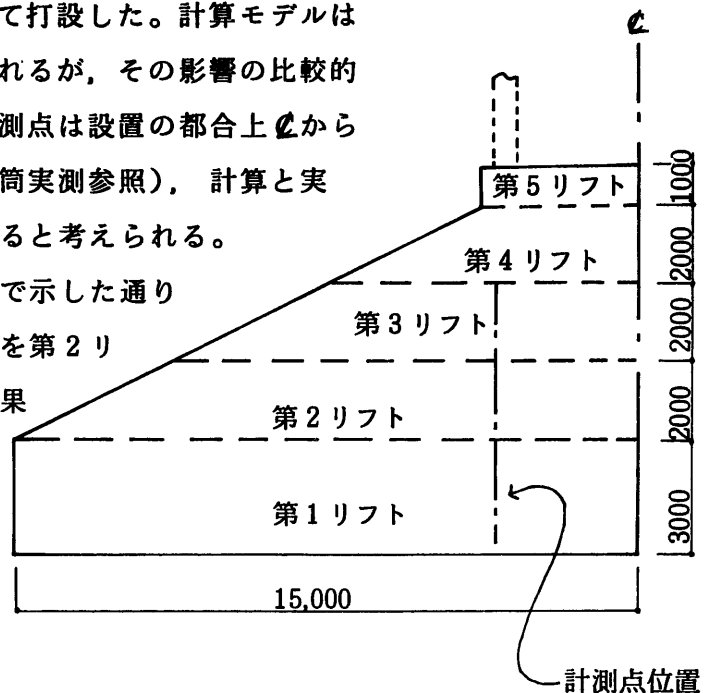
図 2.7 プルトニウム転換施設基礎温度経時変化

## 2.4 排気筒基礎第2～第5リフトへの応用

排気筒基礎は右図のように5回に分けて打設した。計算モデルは上部リフトにおいて2次元的効果が考えられるが、その影響の比較的小さい $\phi$ 部分を1次元モデルとした。計測点は設置の都合上 $\phi$ から離れているため（詳しくは添附2，排気筒実測参照），計算と実測値は第3リフト以後多少違いがでてくると考えられる。

計算方法は、第1リフトにおいては2.2で示した通りであり、第2リフトにおいては初期条件を第2リフト打設時における第1リフトの計算結果を用いた。打設時の温度を初期条件にすれば実測値との誤差は少なくなるが、実用上、有効性がなくなるためである。

第2リフト以後のモデルを図2.8に示す計算条件は熱的物性は2.2(3)と同じものを使用し、発熱量、外気条件は下記の通りである。



### (1) 第2リフト計算条件

打設温度 14℃

第2リフト  $K = 41.0$

$$\alpha = (0.53 + 0.0009 \times 255) \times 1.2 \times 0.7 = 0.638$$

第1リフト  $K = 41 \times e^{-0.54 \times 12} = 0.063$  ,  $\alpha = 0.54$

外気温  $10 + 5 \sin\left\{\frac{\pi}{12}(T+4)\right\}$

結果、図2.9, 2.10に示す。

### (2) 第3リフト計算条件

打設温度 14℃

第3リフト  $K = 41.0$

$$\alpha = (0.53 + 0.0009 \times 255) \times 1.2 \times 0.8 = 0.729$$

第2リフト  $K = 41 \times e^{-0.638 \times 10} = 0.0695$

$$\alpha = 0.646$$

第1リフト  $K = 0.063 e^{-0.54 \times 10} \approx 0$

外気温  $12 + 5 \sin\left\{\frac{\pi}{12}(T+4)\right\}$

結果 図2.11, 図2.12に示す。

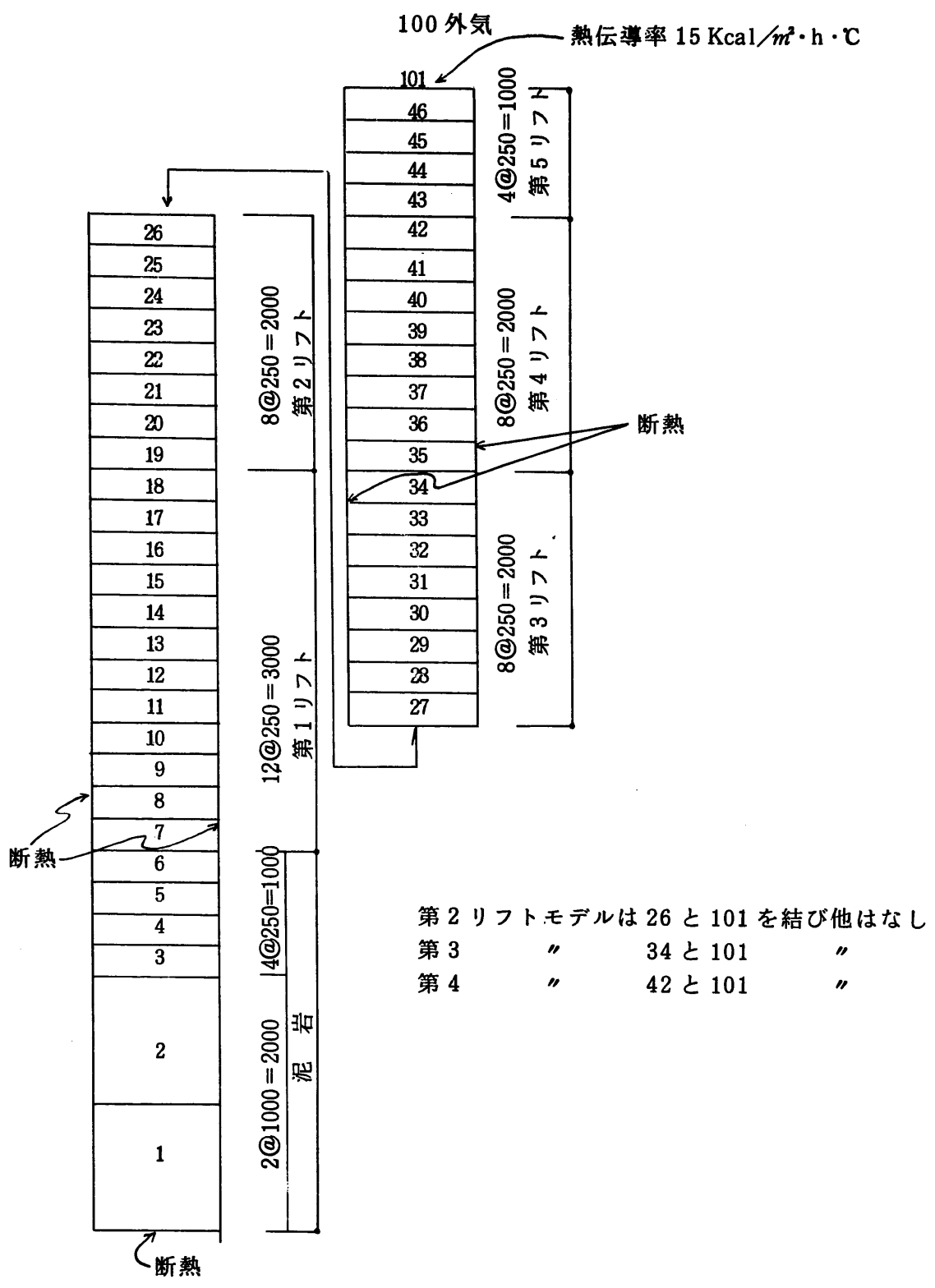


図 2.8 第2リフト～第5リフトモデル分割

(3) 第4リフト計算条件

打設温度 19℃

第4リフト  $K = 41.0$

$$\alpha = (0.53 + 0.0009 \times 255) \times 1.2 \times 0.95 = 0.865$$

第3リフト  $K = 41 e^{-0.729 \times 6} = 0.517$

$$\alpha = 0.729$$

第2リフト  $K = 0.0695 e^{-0.638 \times 6} \approx 0$

外気温  $15 + 5 \sin \left\{ \frac{\pi}{12} (T + 4) \right\}$

結果, 図 2.12 に示す。

(4) 第5リフト計算条件

打設温度 18℃

第5リフト  $K = 41.0$        $\alpha = 0.865$

第4リフト  $K = 41 e^{-0.865 \times 8} = 0.041$

$$\alpha = 0.865$$

第3リフト  $K = 0.517 e^{-0.729 \times 8} = 0.0015$

$$\alpha = 0.729$$

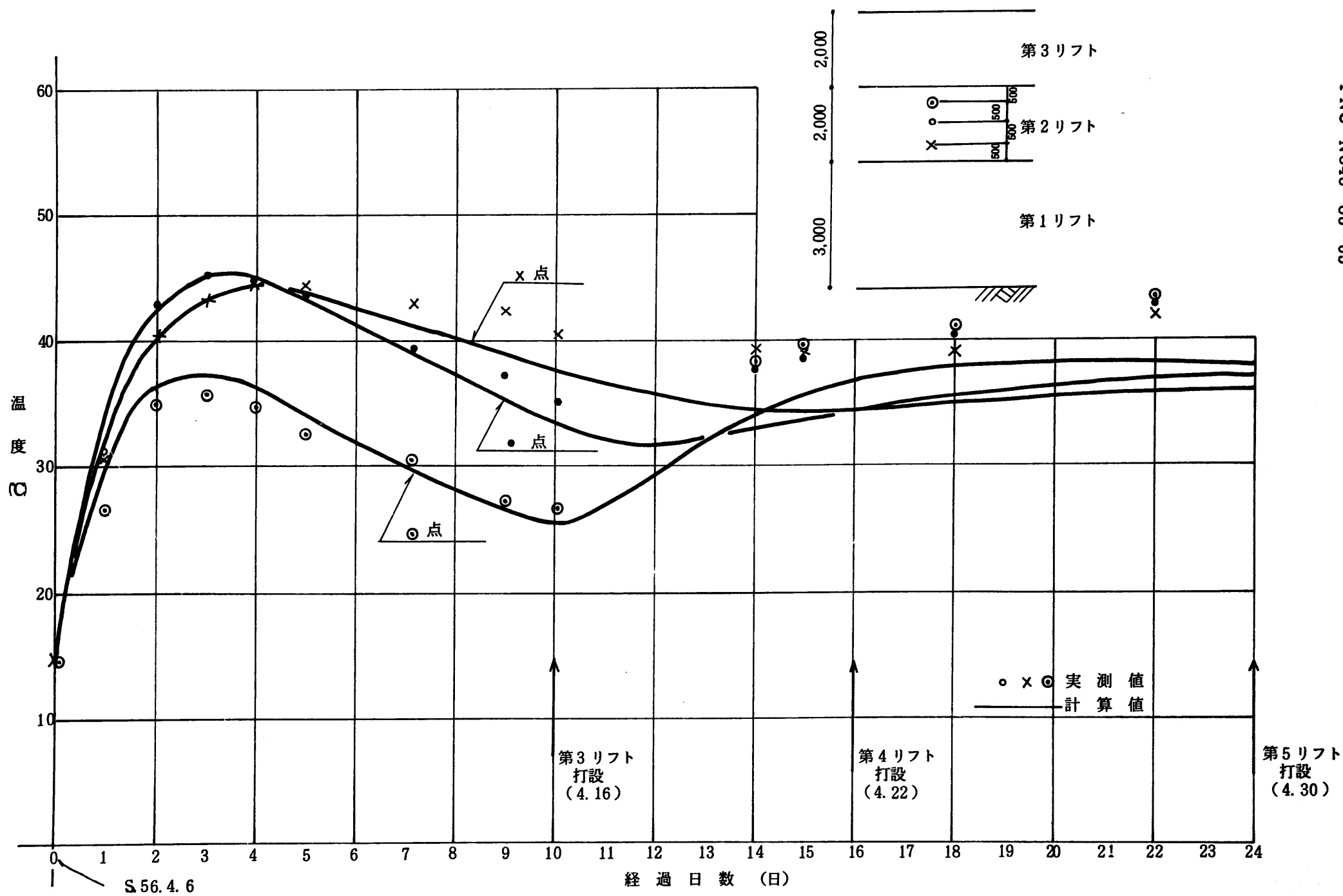
第2リフト  $K \approx 0$

外気温 第4リフトと同じ

結果 図 2.13 に示す。

図 2.9, 図 2.11 において上のリフトを打設した後において, 計算と実測で差がでてくるのは図 2.3 の第1リフトの結果と同じ傾向がある。

この原因は添附 3, 4 で後述するが, 日射及び打設後1週以後の発熱と考えられる。図 2.10, 図 2.13 の断面内の温度分布にその影響がでている。図 2.13 の第3リフトにおいては予想された2次元影響がでている。いずれの結果においても熱応力の3章で後述するが, 応力算定上問題となることはないと考えられる。



S.56.4.6

図 2.9 排気筒基礎第 2 リフト温度経時変化

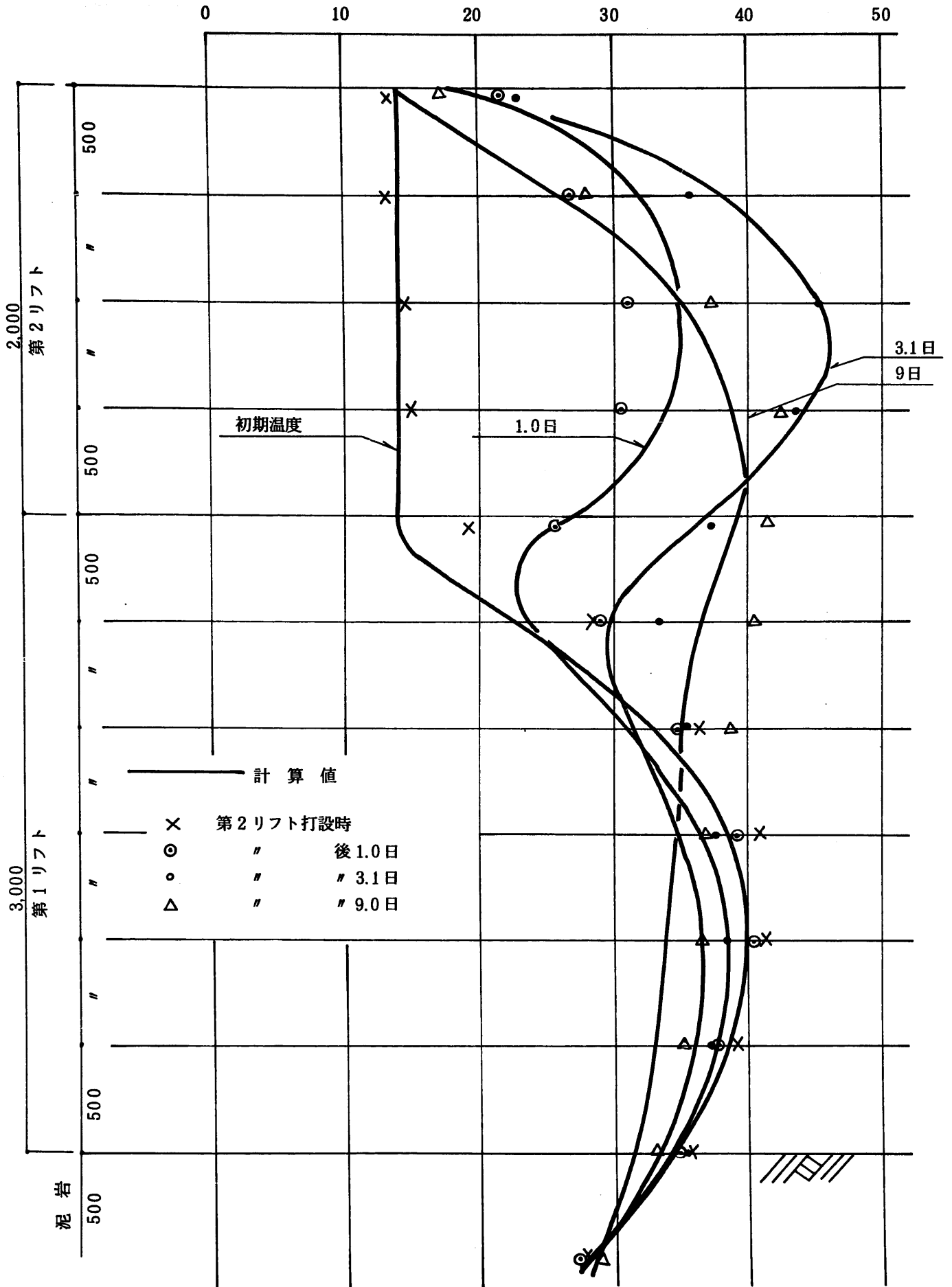


図 2.10 排気筒第 2 リフト温度分布経時変化



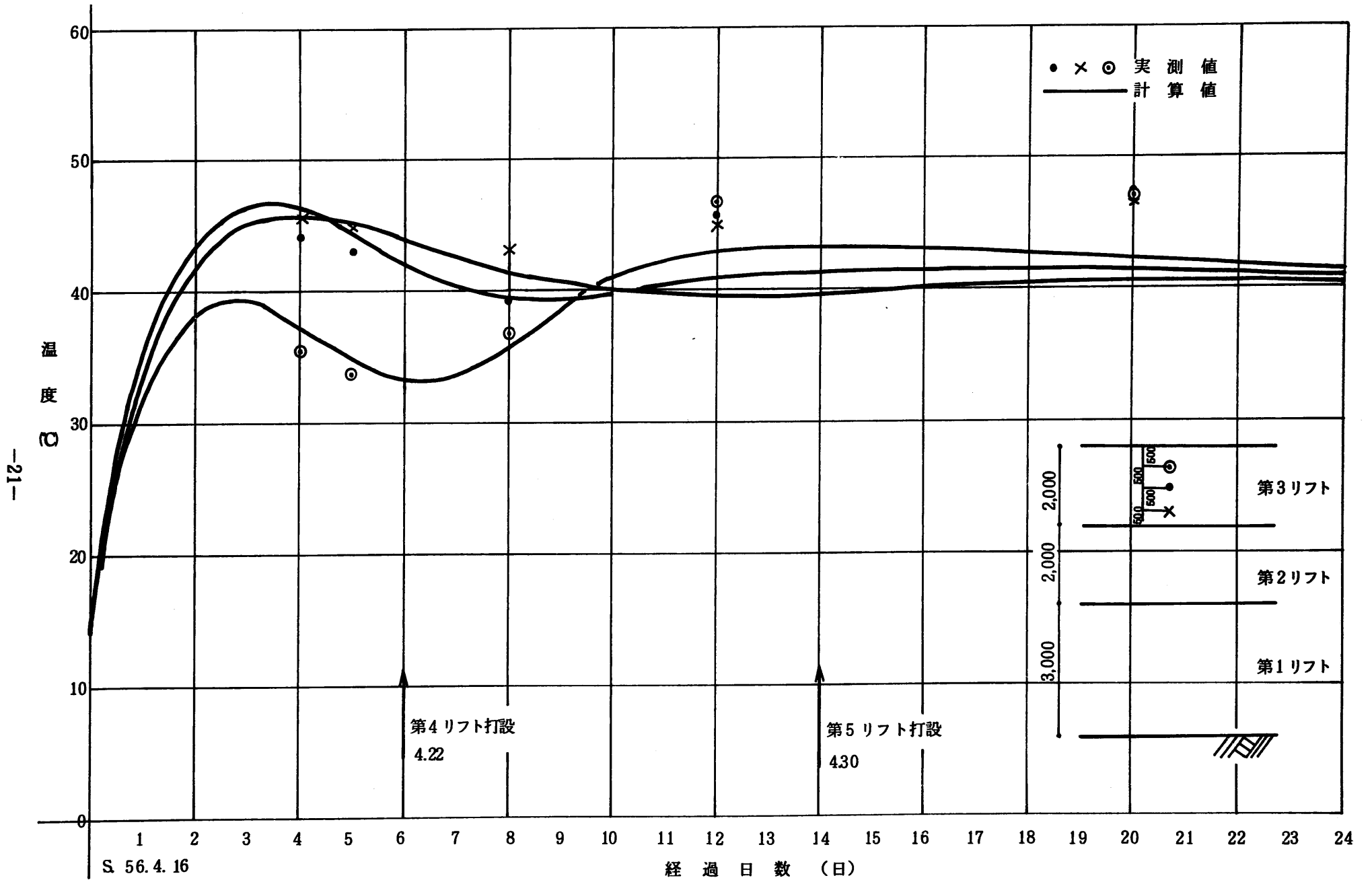


図 2.11 排気筒基礎第3リフト温度経時変化

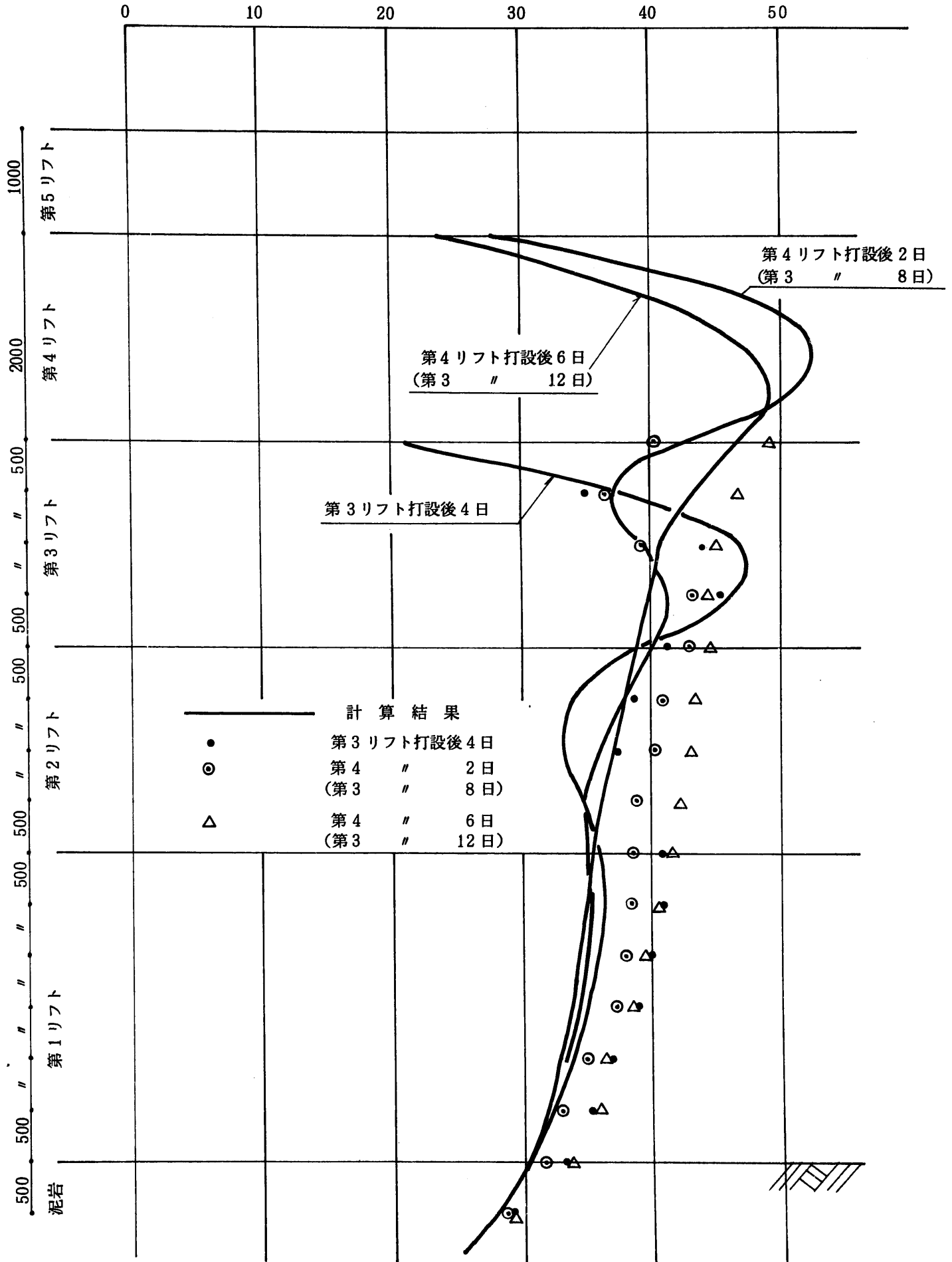


図 2.12 排気筒第3, 第4リフト温度分布経時変化

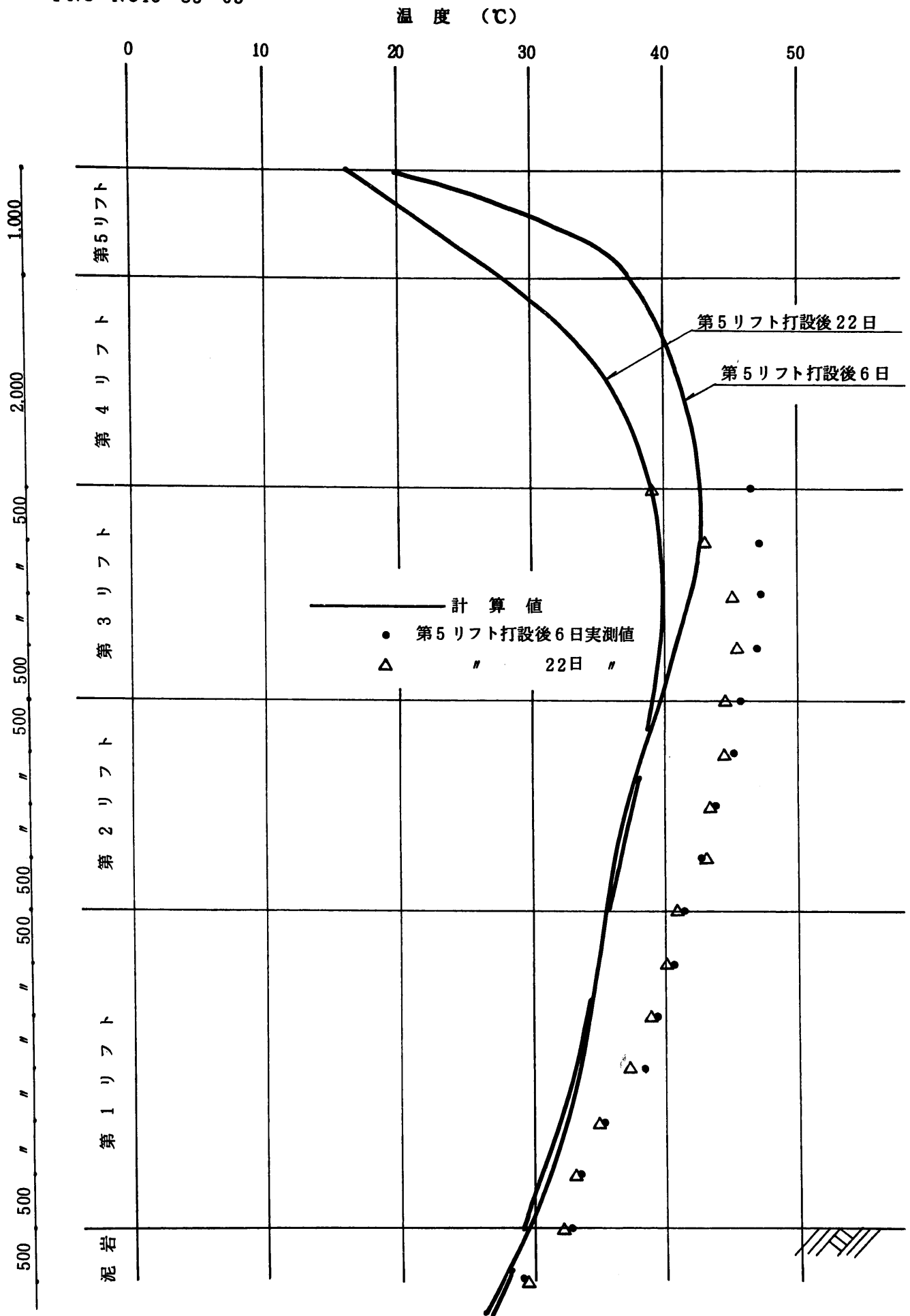


図 2.13 排気筒第5リフト温度分布経時変化

## 2.5 排気筒基礎打設終了後の温度変化

排気筒基礎の埋戻しのほゞ完了した時点（S 56. 5. 22）を打設完了として、どの位の期間で安定温度になるかを推定した。

初期条件はS 56. 5. 22の実測を2次元的に補正したものとし、埋戻しの砂は15℃とした。外気温は年間平均温度15℃一定とした。

熱物性は2. 2.(3)と同じものとし、埋戻しの砂は泥岩と同一とした。

メッシュ分割を図2. 14に示し、結果を図2. 15～図2. 18に示す。

図2. 18からほぼ4～5年で最終温度近くになると考えられる。

実測については添附-6に示す。

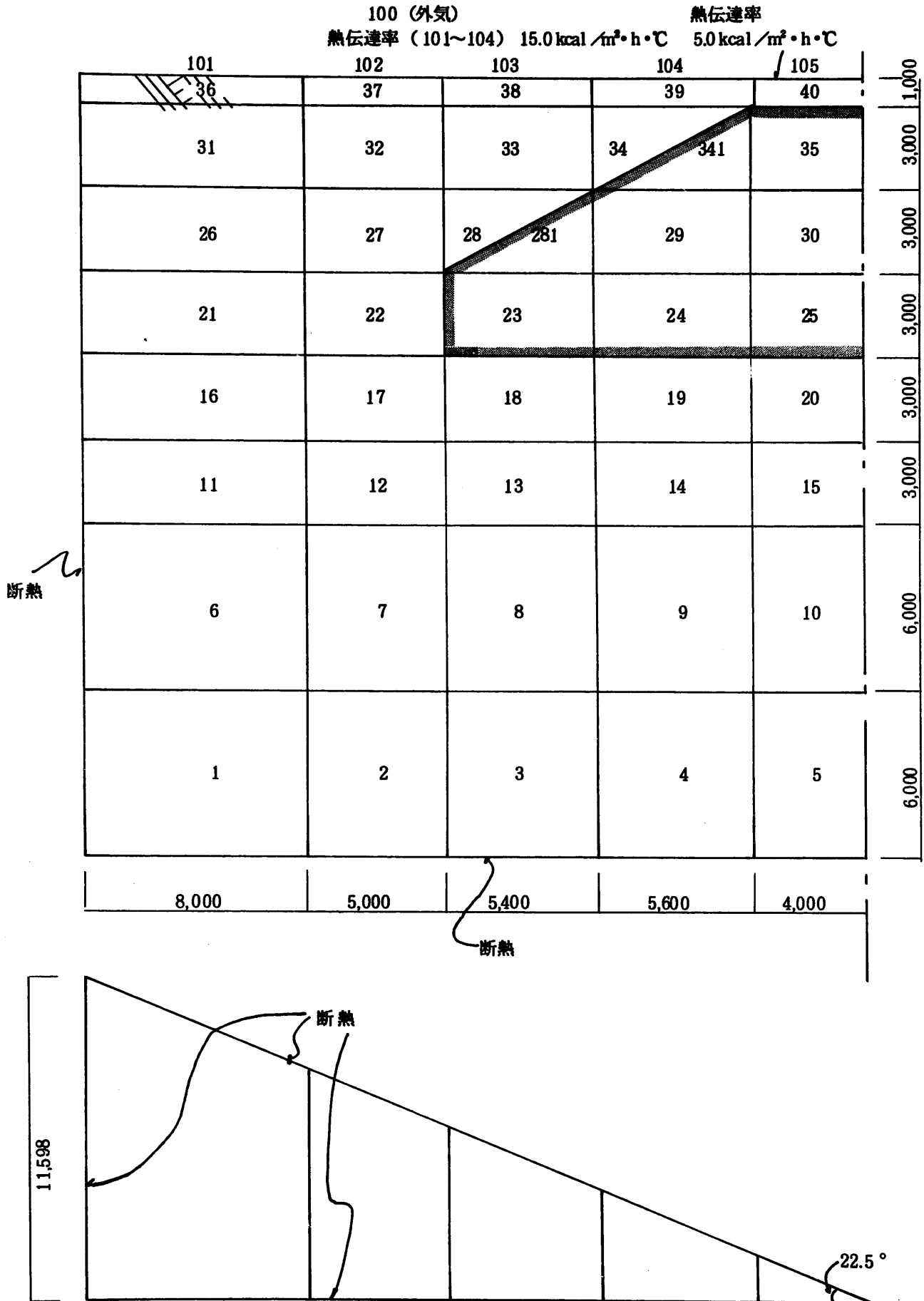


図 2.14 打設終了後温度分布計算用 3次元メッシュ分割

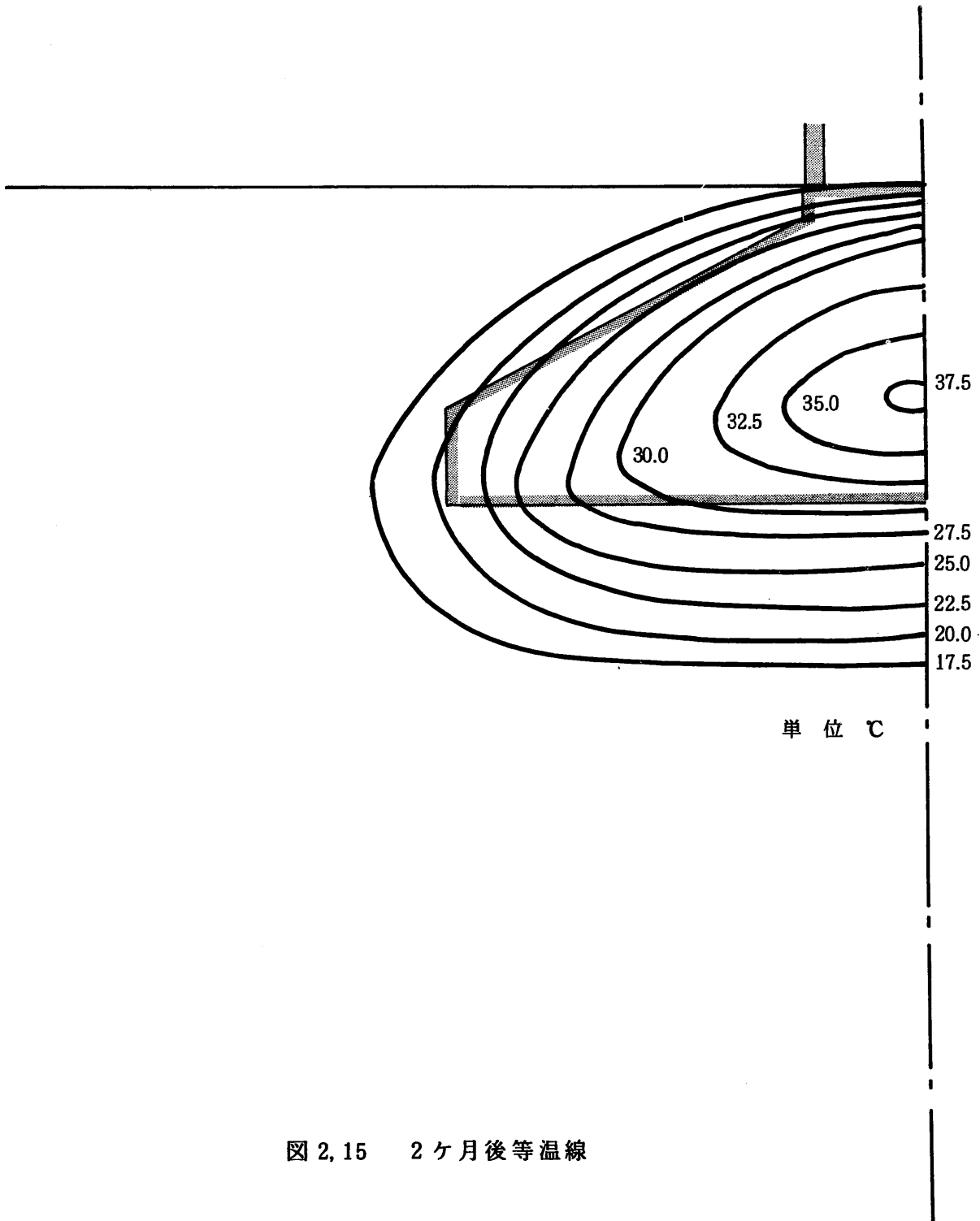


図 2.15 2ヶ月後等温線

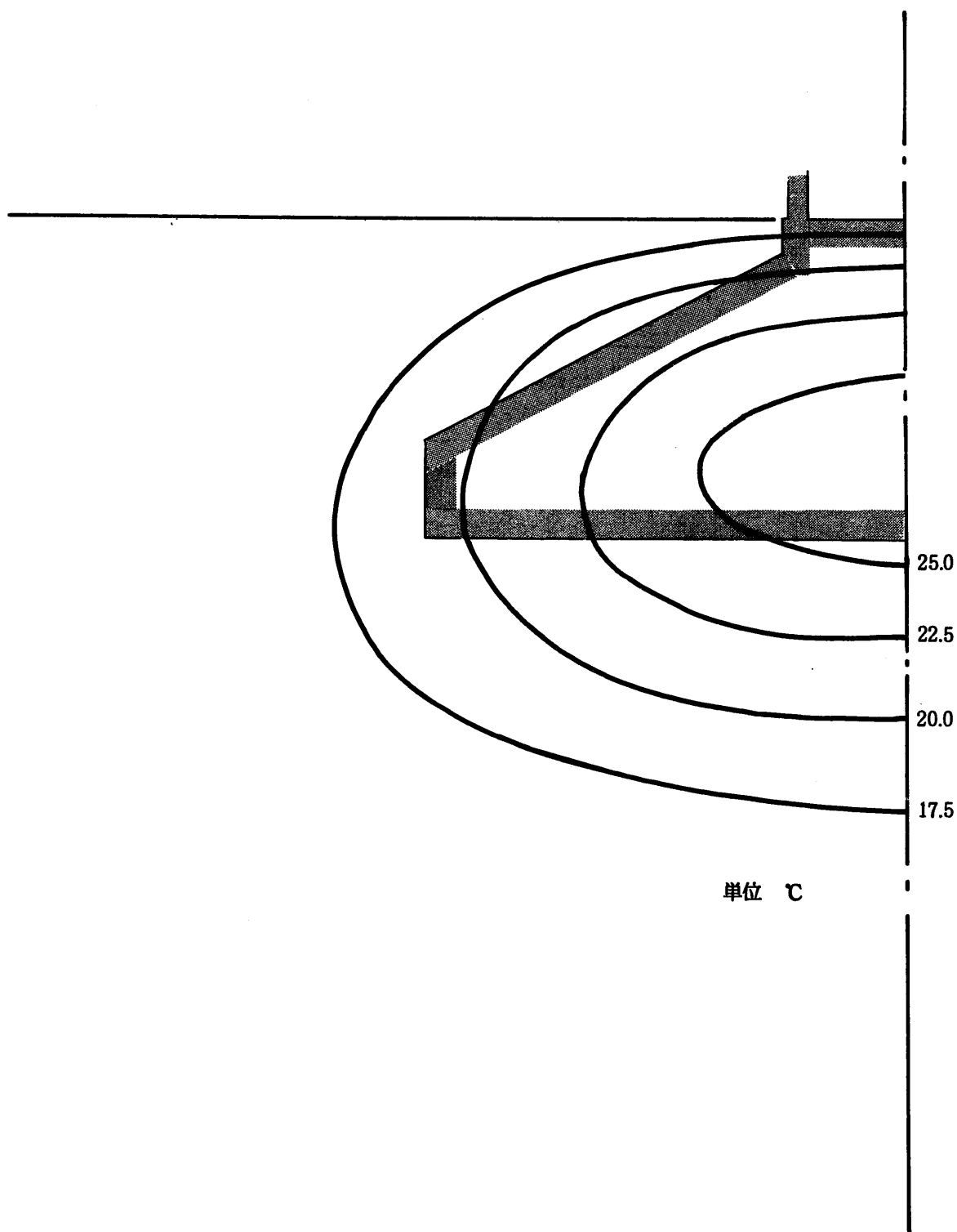


図 2.16 8 ヶ月後等温線

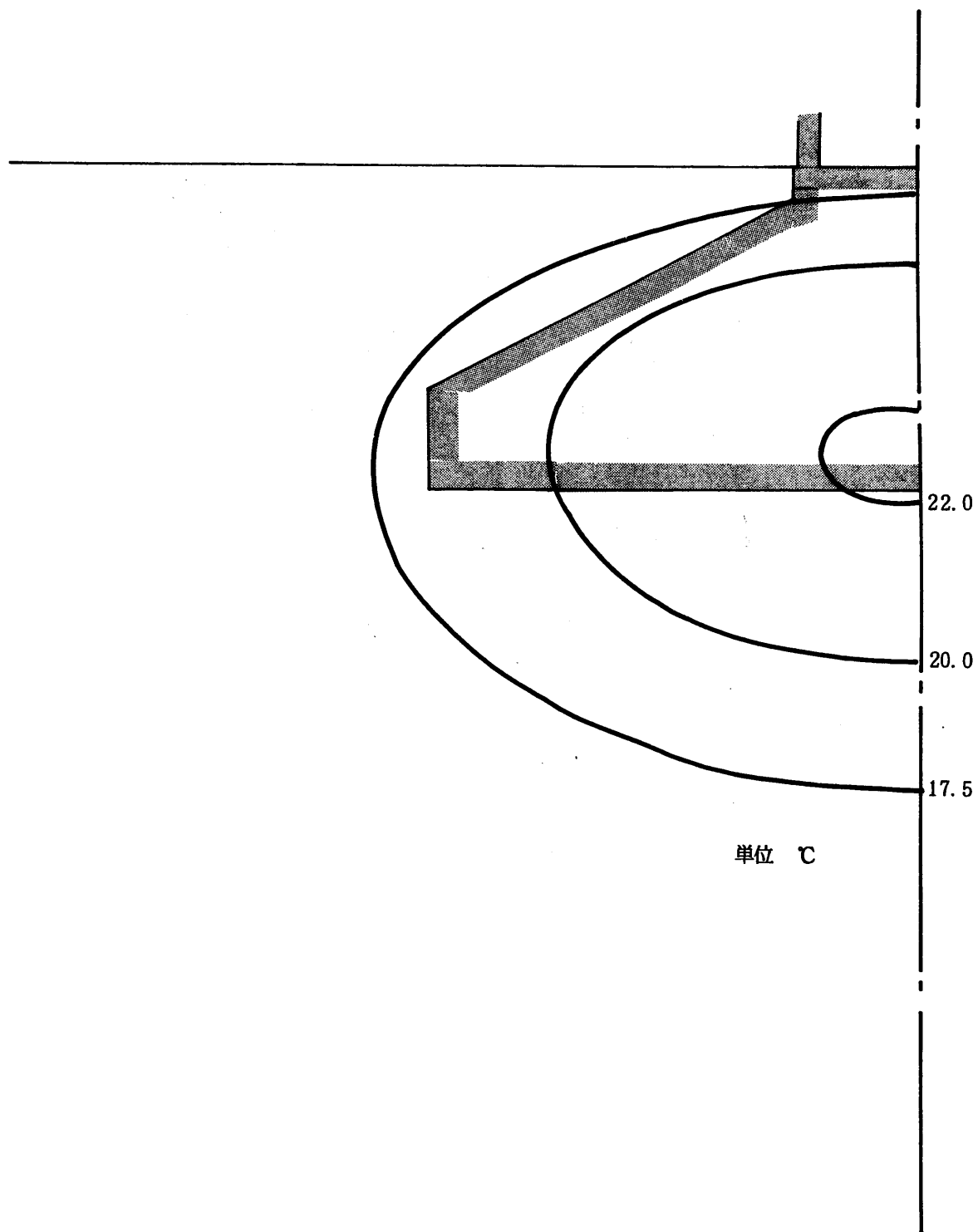


図 2.17 1.2 年後等温線



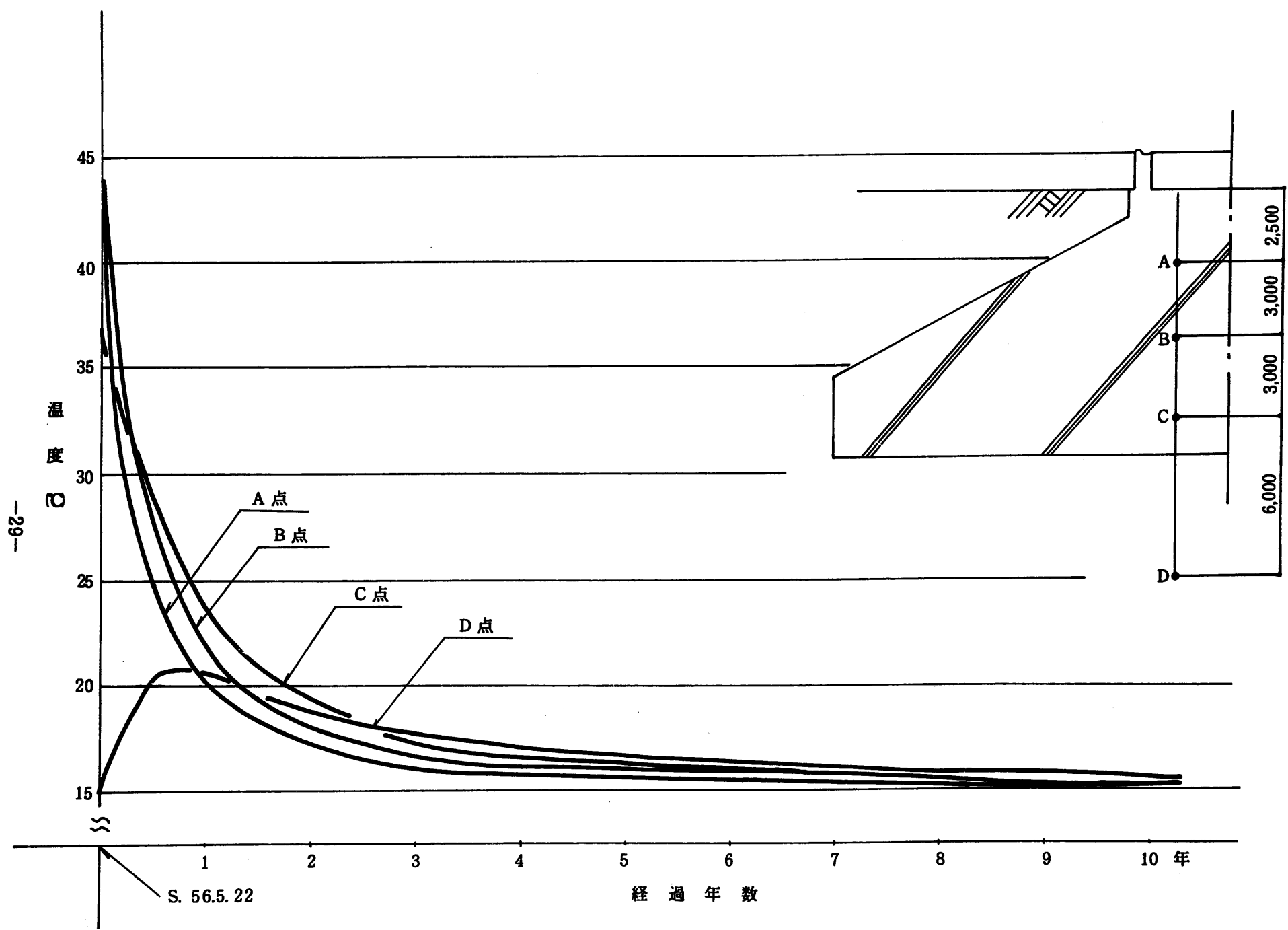


図 2.18 排気筒基礎打設後の温度予想

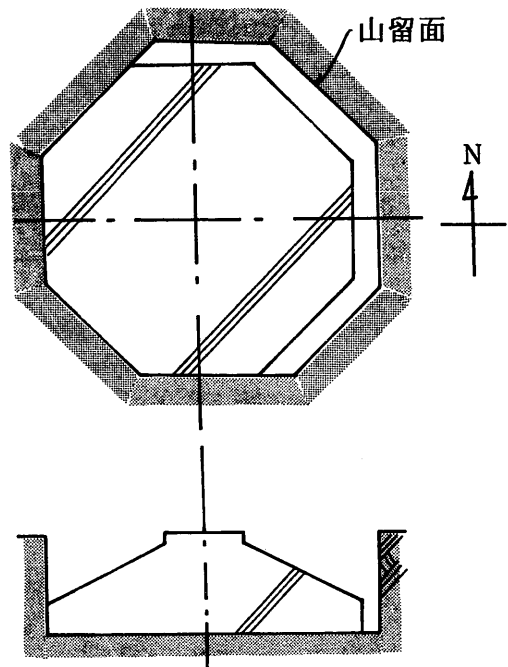
## 2.6 熱応力算定用2次元温度分布

先に計算した一次元温度分布によって熱応力上の影響をある程度評価することはできるが、ここでは応力が最もきびしくなる基礎周辺部に注目するため2次元温度分布を計算する。一次元の比較を温度上も応力上も行なうことが有効と考える。

排気筒基礎は右図に示すように、山留のための境界条件が異なる。このため東側と西側に分けて計算を行なった。

メッシュ分割を図2.19に示す。

山留影響は熱伝導率によって等価的に以下のように処理した。



	山留のある場合	山留のない場合
1001 熱伝導率	0.183 Kcal/m <sup>2</sup> ・h・℃	15.0 Kcal/m <sup>2</sup> ・h・℃
1002 "	0.183	"
1003 "	0.256	"
1004 "	0.625	"
1005 以後 "	15.0	"

計算は応力上きびしいと考えられる第1、第2リフトについて行なった。結果を図2.20～図2.27に示す。

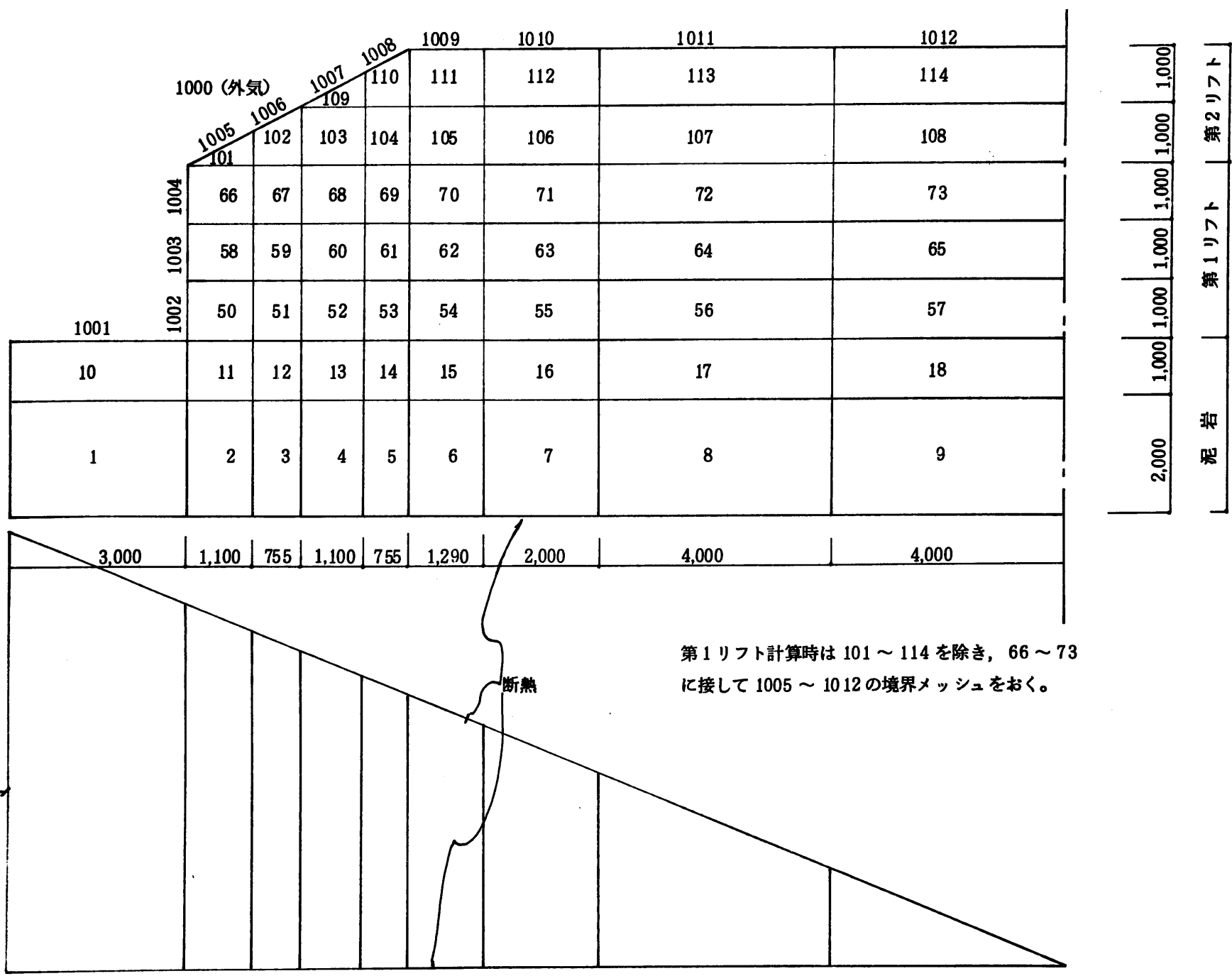


図 2.19 熱応力算定用熱計算モデル分割



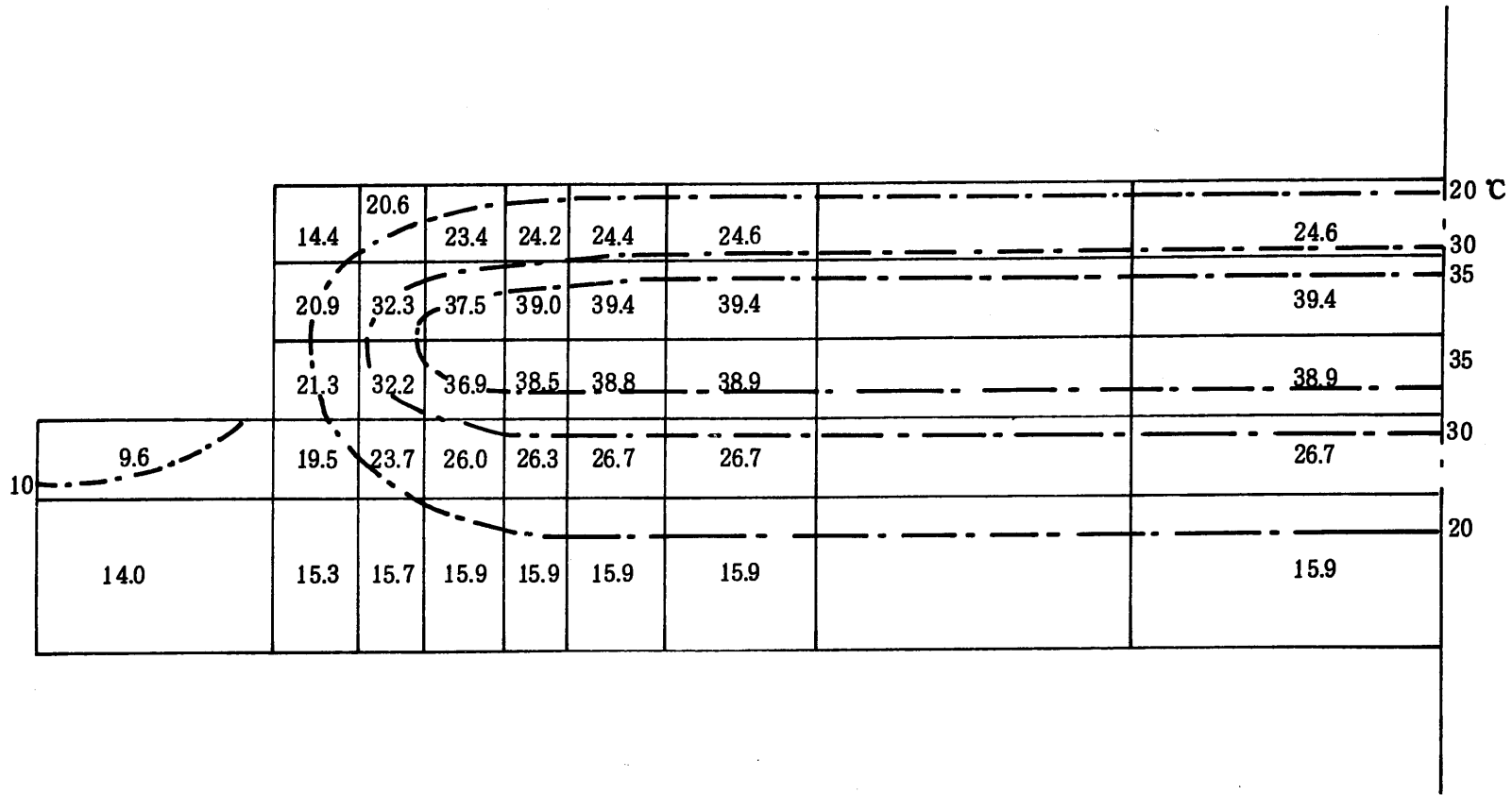


図 2.21 第 1 リフト 12 日後等温線 (東側)

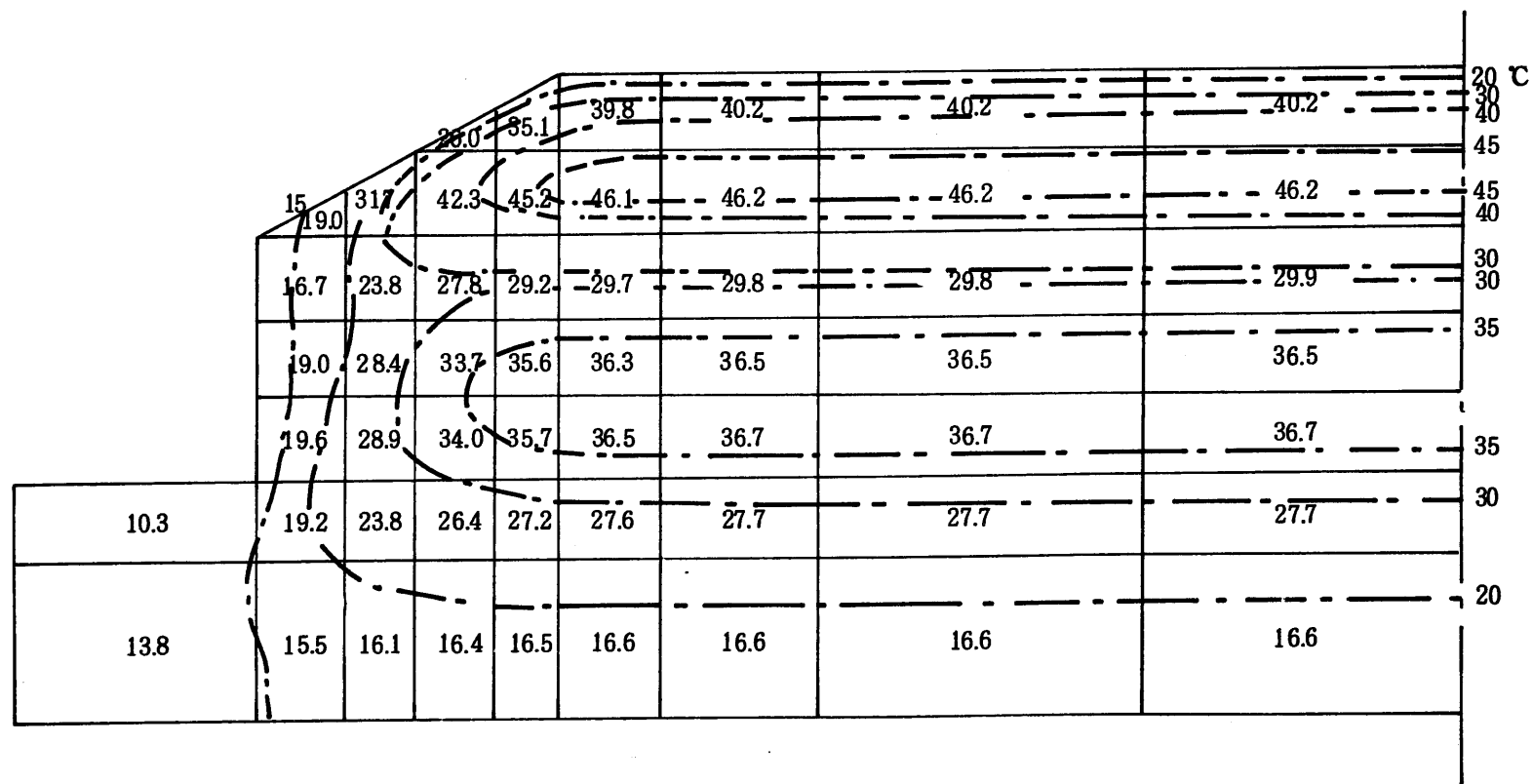


図 2.22 第 2 リフトピーク時等温線 (東側)

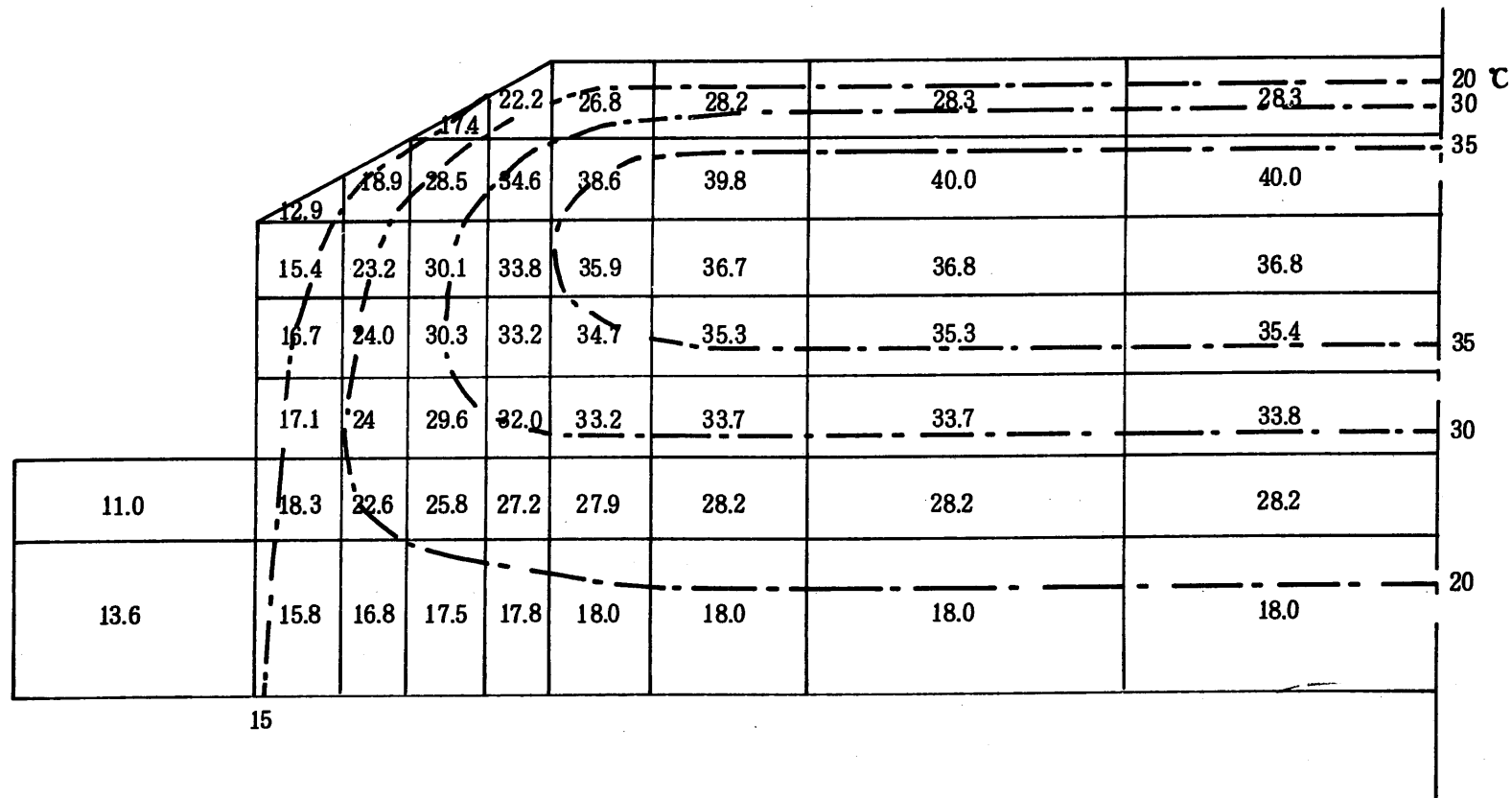


図 2.23 第 2 リフト 10 日等温線 (東側)

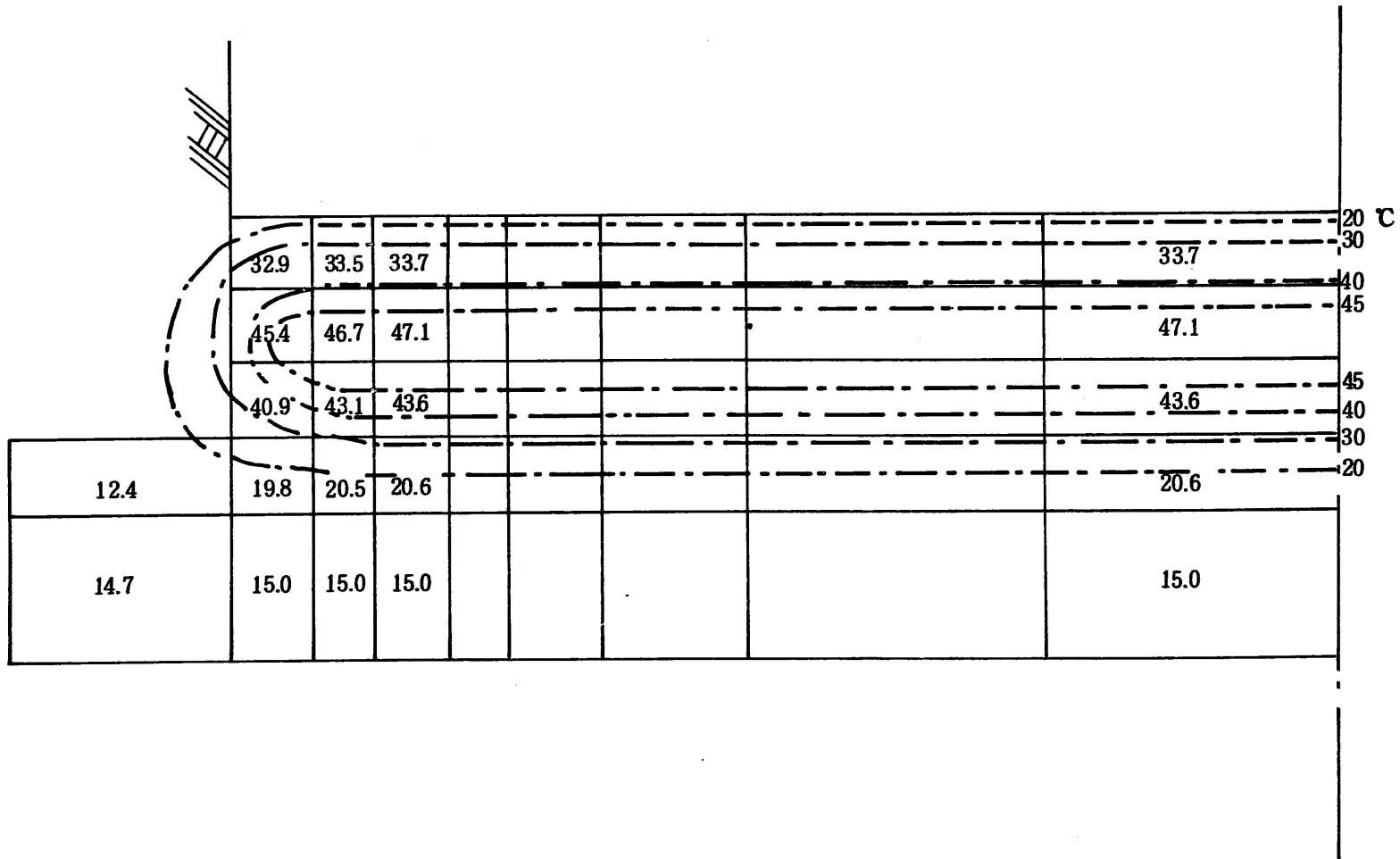


図 2.24 第 1 リフトピーク時等温線 (西側)



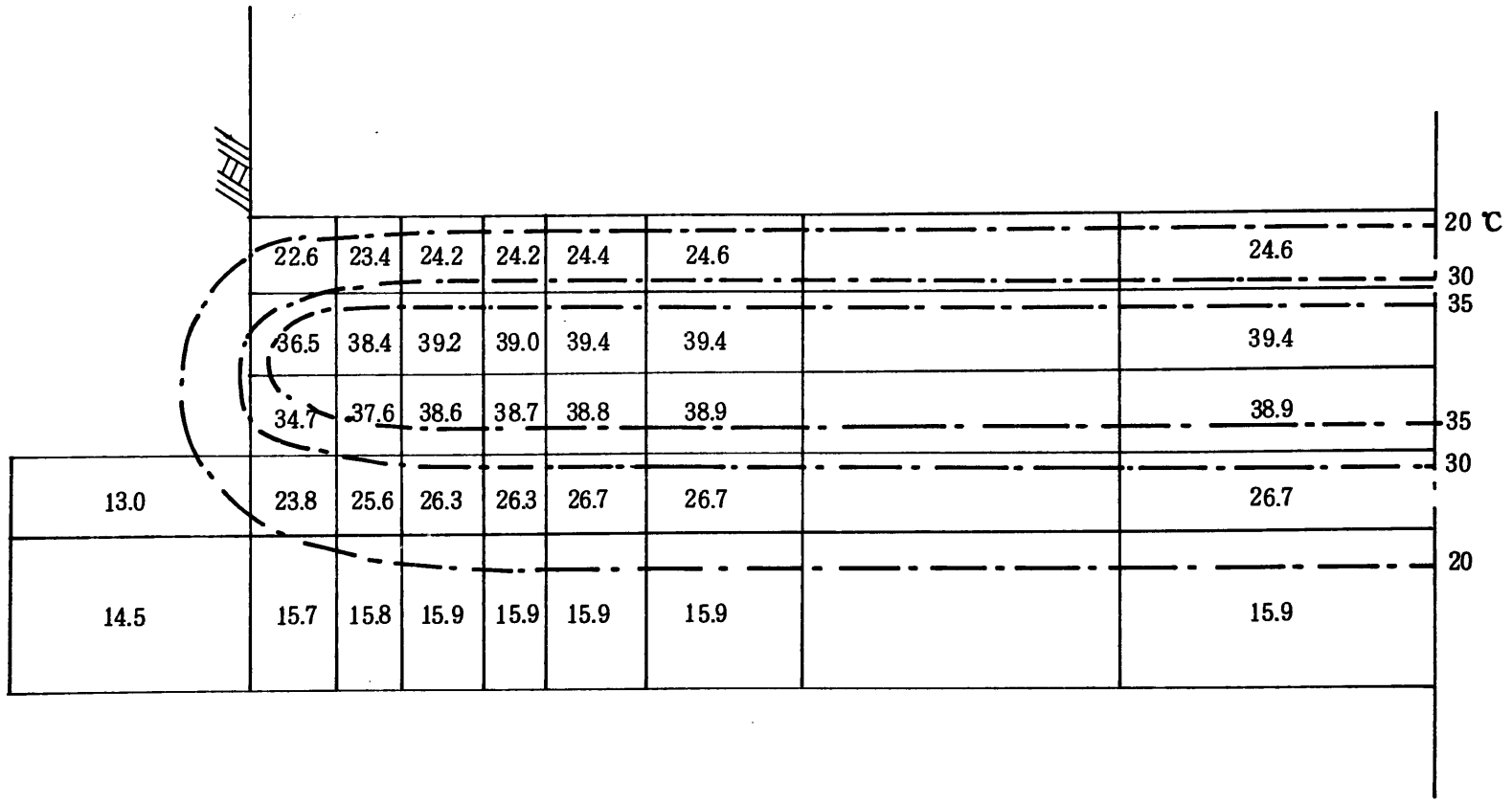


図 2.25 第 1 リフト 12 日等温線 (西側)

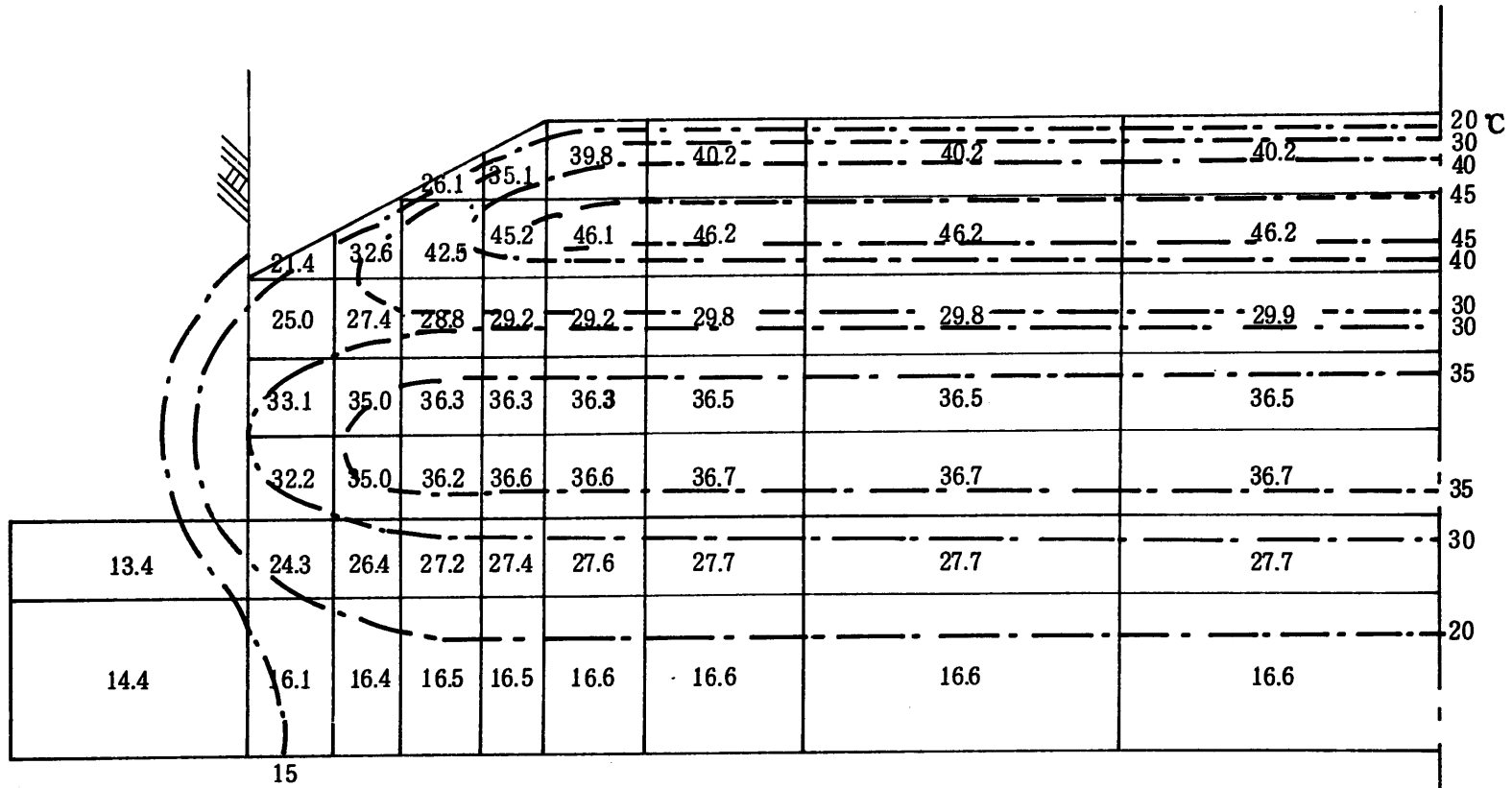


図 2.26 第 2 リフトピーク時等温線 (西側)

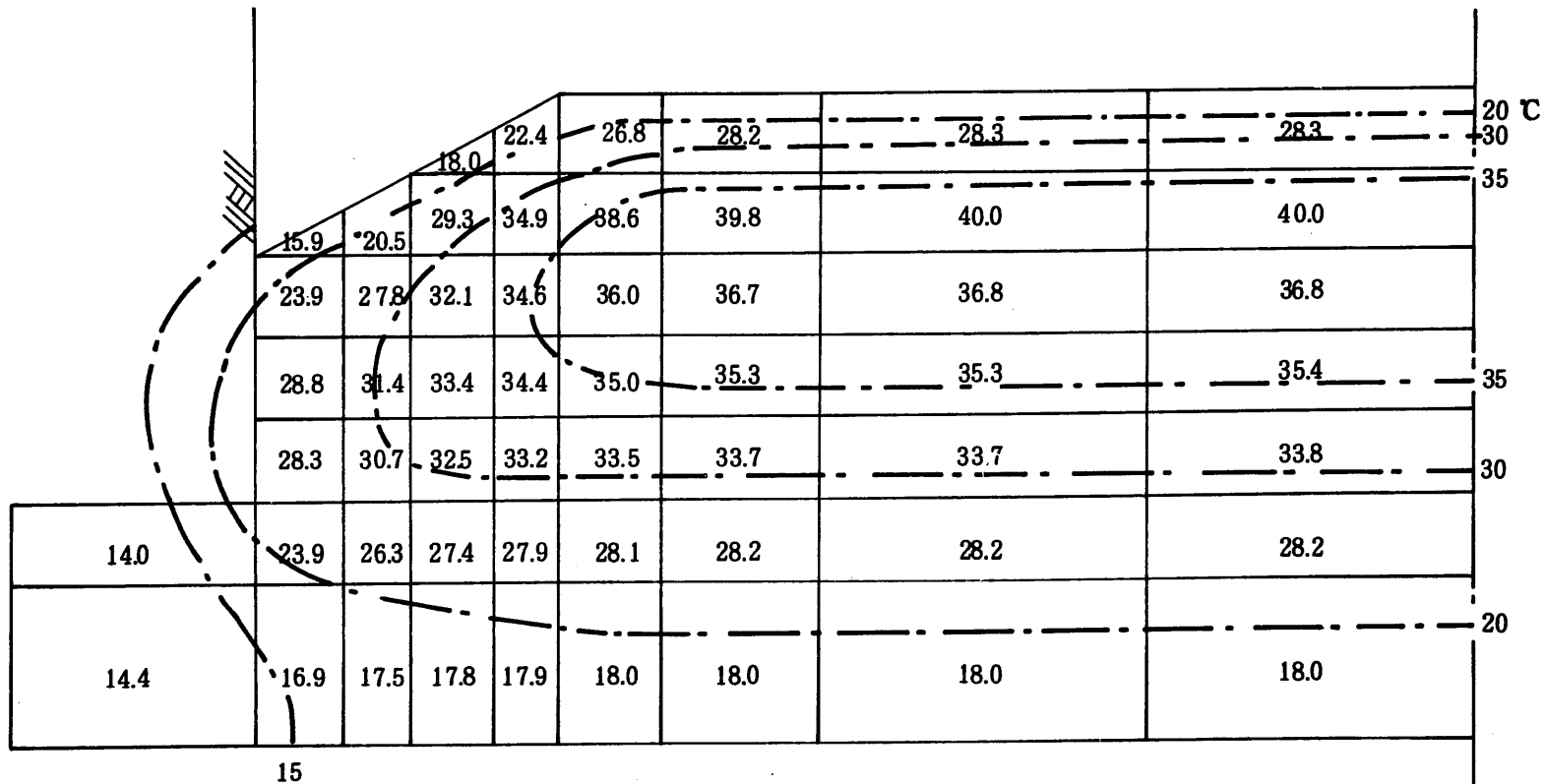


図 2.27 第 2 リフト 10 日等温線 (西側)

### 3 温度応力解析

#### 3.1 概 論

打設したコンクリートは右図のように温度がピークになるまで膨張する。その際、コンクリートはほとんど岩盤の拘束をうけずに内部の温度分布による内部拘束応力が発生する。

ピークに達した以後はコンクリートの岩盤の拘束を受けながら収縮し外部拘束による応力が発生する。

膨張時の応力は

$$\sigma(y) = \frac{\alpha E}{1-\nu} \left\{ -T(y) + \frac{1}{2a} \int_a^a T(y) dy \right. \\ \left. + \frac{3y}{2a^3} \int_a^a T(y) y dy \right\} \quad (3.1)$$

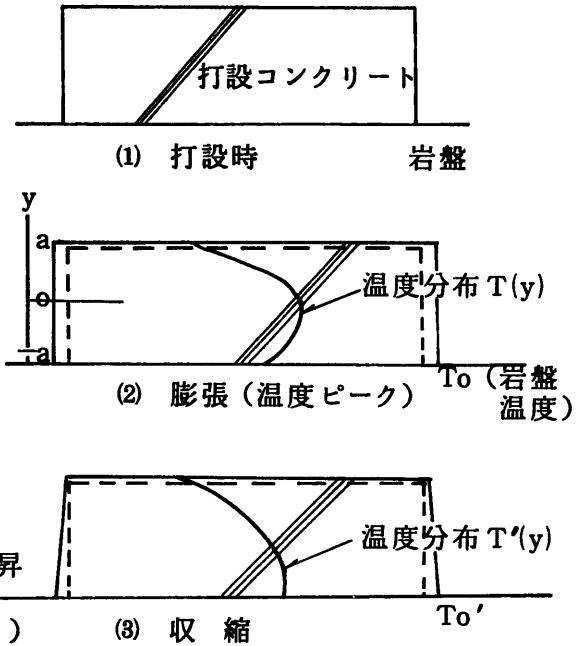
平均温度上昇  
曲げモーメント

収縮時の応力

$$\sigma'(y) = \sigma(y) + \frac{\alpha E}{1-\nu} \left\{ -\Delta T(y) + \frac{1}{2a} \int_a^a \Delta T(y) dy + \frac{3y}{2a^3} \int_a^a \Delta T(y) y dy \right\} \\ + MK_R \alpha (\Delta \bar{T}(y) - T_0 + T_0') E \quad (3.2)$$

- $\alpha$  : 熱膨張率 (検討材令時)
- $E$  : コンクリートの有効弾性係数 ( " )
- $\nu$  : コンクリートのポアソン比 ( " )
- $T(y)$  : コンクリートの温度分布 (ピーク時)
- $2a$  : コンクリートの高さ
- $MK_R(y)$  : 外部拘束度
- $\bar{T}$  : コンクリートの平均温度
- $T_0$  : 下部拘束部材の平均温度
- $T'(y)$  : 収縮後温度分布
- $\Delta T(y)$  :  $T(y) - T'(y)$

なお、外部拘束度は、コンクリートの下部の条件により変化するが、旧コンクリート、または岩盤の場合、 $M, K_a(y)$ はACI207委員会の考え方から



$$M = \frac{1}{1 + \frac{AE}{A_0 E_0}} \quad \text{-----} \quad (3.3)$$

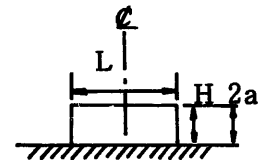
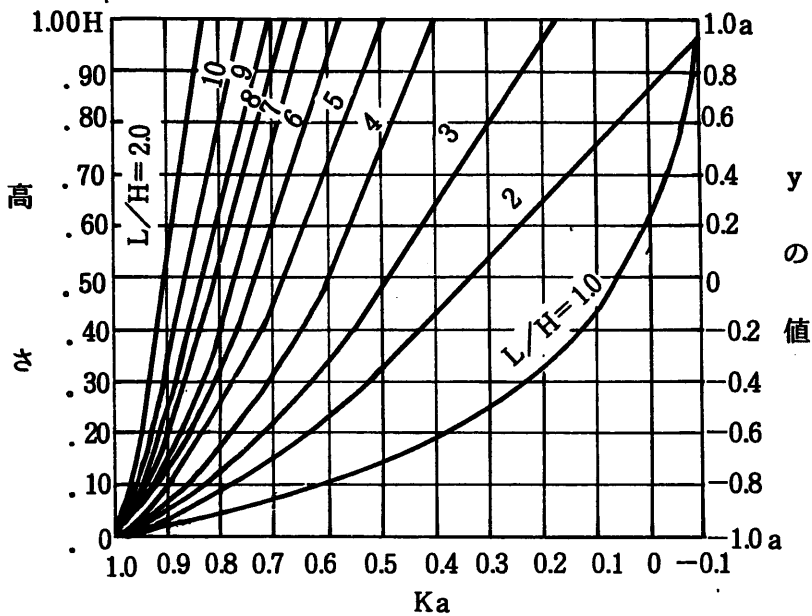
ここに、 $A_0$ : 下部拘束材の断面積 (岩盤の場合  $2.5 A$ )

$E_0$ : " のヤング率

$A$ : 打設コンクリートの断面積

$E$ : " のヤング率

$Ka(y)$ として、下図のようになる。



なお、コンクリートのクリープについては、ヤング率が変化すると考えて考慮する。即ち、ヤング率のかわりに有効弾性係数を用いる。

$$E = \frac{E(t)}{1 + \varphi(t)}$$

ここに、 $E(t)$ : 材令  $t$  時のヤング率

$\varphi(t)$ : 材令  $t$  時のクリープ係数

$E$  : 有効弾性係数

### 3.2 排気筒基礎への応用

#### (1) 温度分布の検討

3.1により温度応力は中心最大温度と表面温度の差が大きいほど、または最大温度に達した後の低下が早いほど大きくなる。いずれにおいても、2章の計算結果は応力上安全側の評価ができる。

また、温度分布については計算と実測の値が部分的に異なるが、分布形は相似であり、宜一温度差もほぼ一致するため応力上の影響は少ない。図2.12において第4リフト打設後の第2リフトで計算と実測で値が異なっているが、第2リフトの分布は第4リフトに応力上の影響が小さいこと、温度変化も小さく、応力変化はクリープに追随すると考えられ、また、第2リフトの応力も少なくなっていることから応力上の問題はないと考えられる。

一般にリフト間で応力上問題となるのは、リフトの打設間隔が長く、下部リフトの温度が低くなっている場合であり、排気筒では第1、第2リフトが問題になると考えられる。第3リフト以後は下部リフトの蓄熱も大きく、上部リフトが冷えにくいいため、これほど問題とはならない。よって以後、第1、第2リフトに着目し、山留面に接していない東側について応力解析を行う。

#### (2) 応力解析条件

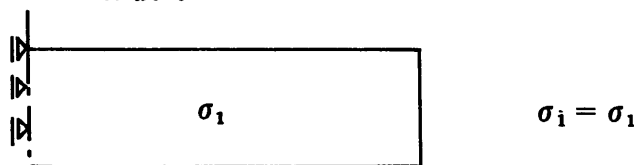
応力解析は図2.20～図2.23の温度条件に従って、第1リフトピーク時、第1リフト収縮時（第2リフト打設時）、第2リフトピーク時、第2リフト収縮時の4ケースについて行なう。

3.1に示した方法は1次元の略算であり、排気筒で応力が最もきびしくなる端部には適用できないため、方法は有限要素法応力解析プログラム「SAPM」を使用する。

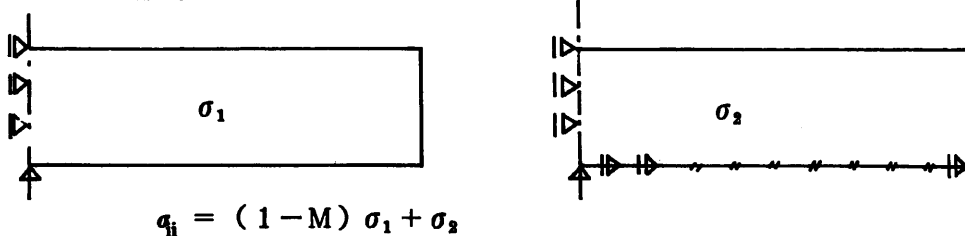
メッシュ分割は図3.1～図3.3に示す、2次元軸対称とする。

境界条件は膨張時と収縮時で異なるため以下のように処理する。

##### i) 第1リフト膨張時



##### ii) 第1リフト収縮時



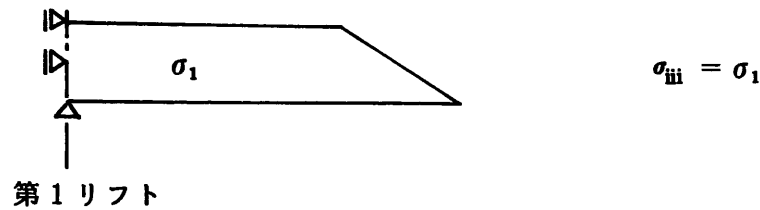
Mは(3.3)式より  $E = 2.1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$   
 $E_0 = 0.1 \times 10^5 \text{ "}$   
 $A_0 = 2.5 \text{ A}$  とし

$$M = \frac{1}{1 + \frac{1}{2.5} \frac{2.1}{0.1}} \approx 0.1$$

iii) 第2リフト膨張時

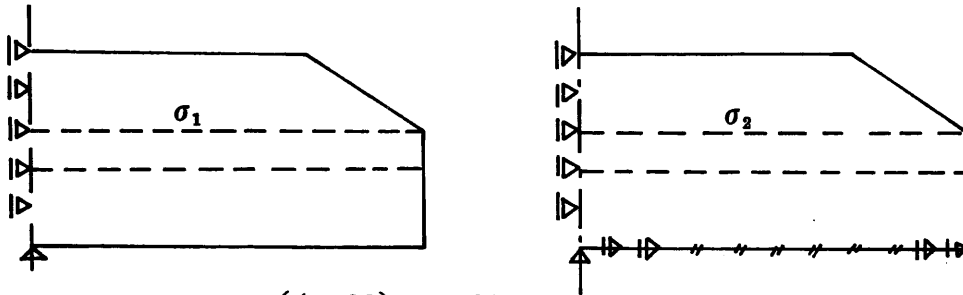
第1リフトと第2リフトは互の拘束なしとして、各リフトに分けて応力算定する。

第2リフト



ii)と同一

iv) 第2リフト収縮時



$$\sigma_{iv} = (1 - M) \sigma_1 + M \sigma_2$$

$$M = 0.1$$

第1リフトと第2リフトは完全な拘束を受けていないため(3.3)式より拘束率を計算し点線内のヤング係数を低減する。

$$M' = \frac{1}{1 + \frac{1.3}{1.5} \times \frac{1.5}{2.1}} \approx 0.62$$

$$[E] = 1.3 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$$

物性条件は以下のものを使用する。

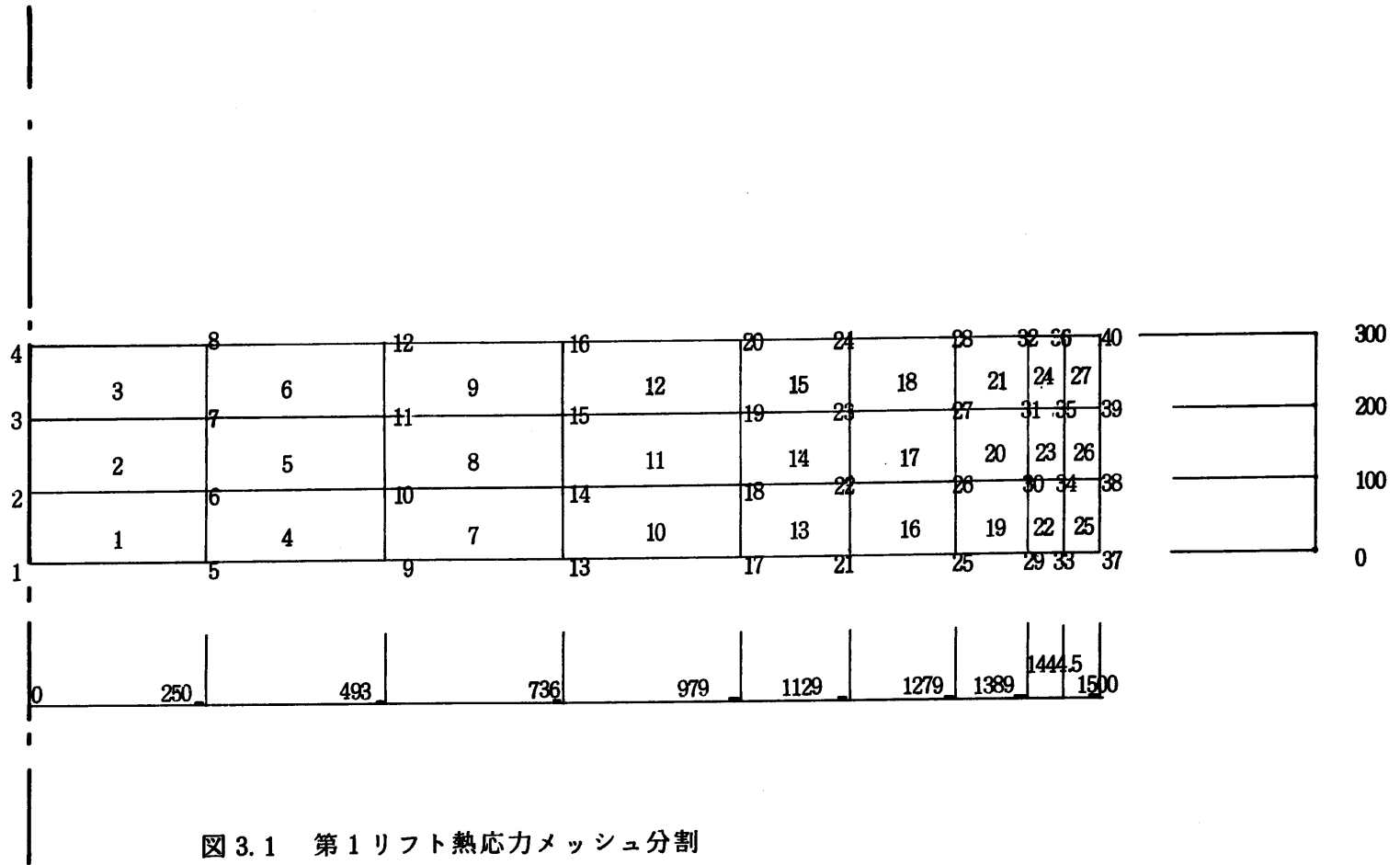
コンクリートヤング係数	$2.1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$
" ポアソン比	0.167
" 線膨張率	$1.0 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$

1)～iv) のストレスフリー温度及び応力算定は以上のように行なう。

ケース	ストレスフリー温度	応力
i)	0℃	$\sigma_i + \phi$
ii)	i) の温度	$(\sigma_i + \sigma_{ii}) \times \phi$
iii)	ii) の温度	$(\sigma_i + \sigma_{ii} + \sigma_{iii}) \times \phi$
iv)	iii) の温度	$(\sigma_i + \sigma_{ii} + \sigma_{iii} + \sigma_{iv}) \times \phi$

$$\phi = \frac{1}{1 + \varphi(t)} = 0.6 \quad \text{とする。}$$





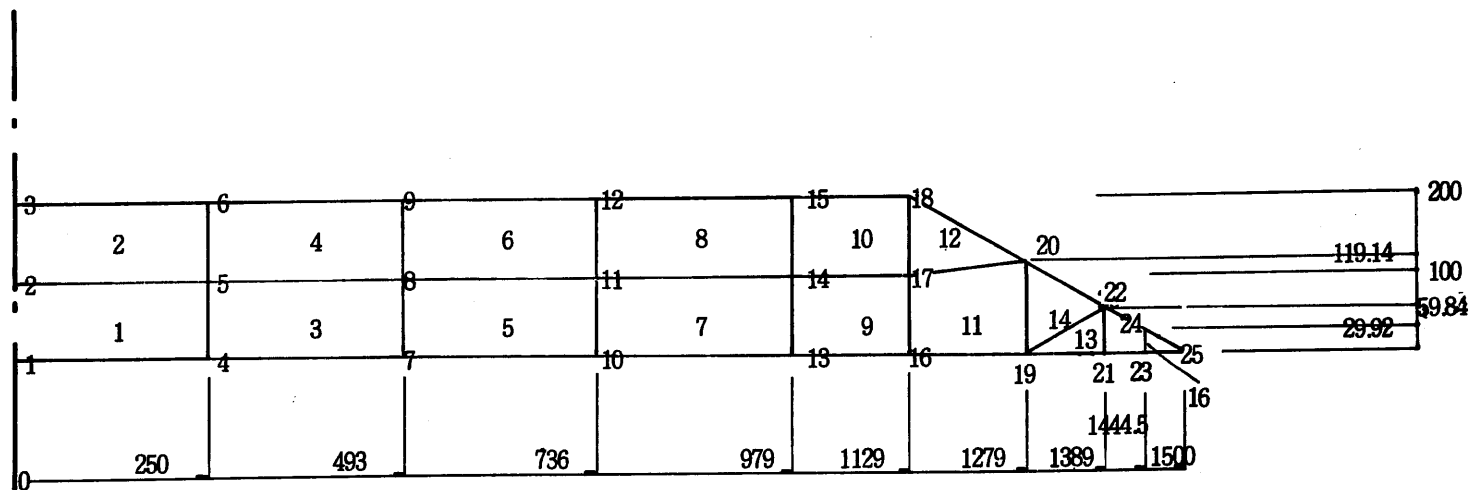


図 3.2 第 2 リフト膨張時メッシュ分割



(3) 解析結果

結果は図 3.4～図 3.9 に示す。応力値は最もきびしい面外方面について記入した。

予想通り端部に最大応力の発生がみられる。

実際の打設結果では右図のように山留に接していない東側で第 1 リフトから第 2 リフトにわたってクラックが入っており図 3.4～図 3.8 の  $21.0 \text{ kg/cm}^2$  以上と一致する。

計算結果から表面クラックの巾を推定すると下記のようになる。

第 1 リフト

最大応力  $30.1 \text{ kg/cm}^2$

クラック巾  $(30.1 - 21) \times 12420 / 2.1 \times 10^5 = 0.54 \text{ mm}$

端部表面最大平均応力  $(27.7 + 24.7 + 20.5) / 3 = 24.3$

クラック巾  $(24.3 - 21) \times 12420 / 2.1 \times 10^5 = 0.19 \text{ mm}$

第 2 リフト

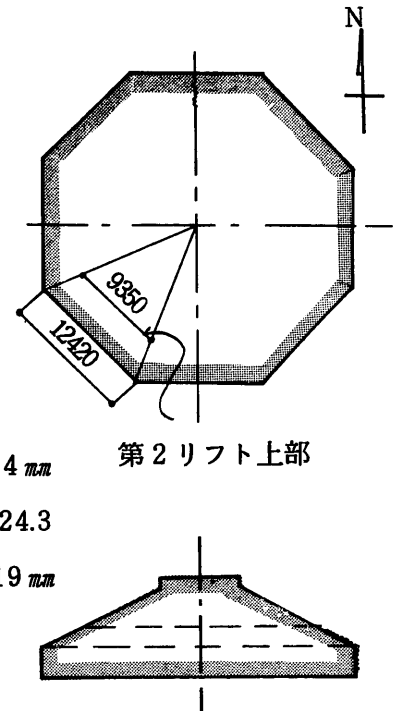
最大応力  $37.5 \text{ kg/cm}^2$

クラック巾  $(37.5 - 21) \times 10885 / 2.1 \times 10^5 = 0.85 \text{ mm}$

端部表面最大平均応力  $(25.6 + 34.5 + 37.5 + 35.3) / 4 = 33.22$

クラック巾  $(33.22 - 21) \times 10885 / 2.1 \times 10^5 = 0.63 \text{ mm}$

第 2 リフトのクラック巾は観察では  $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$  程度であり、計算値はかなり大きくでている。原因は第 2 リフトの端部は薄く第 1 リフトの拘束が計算より小さいと考えられる。



第 2 リフト上部

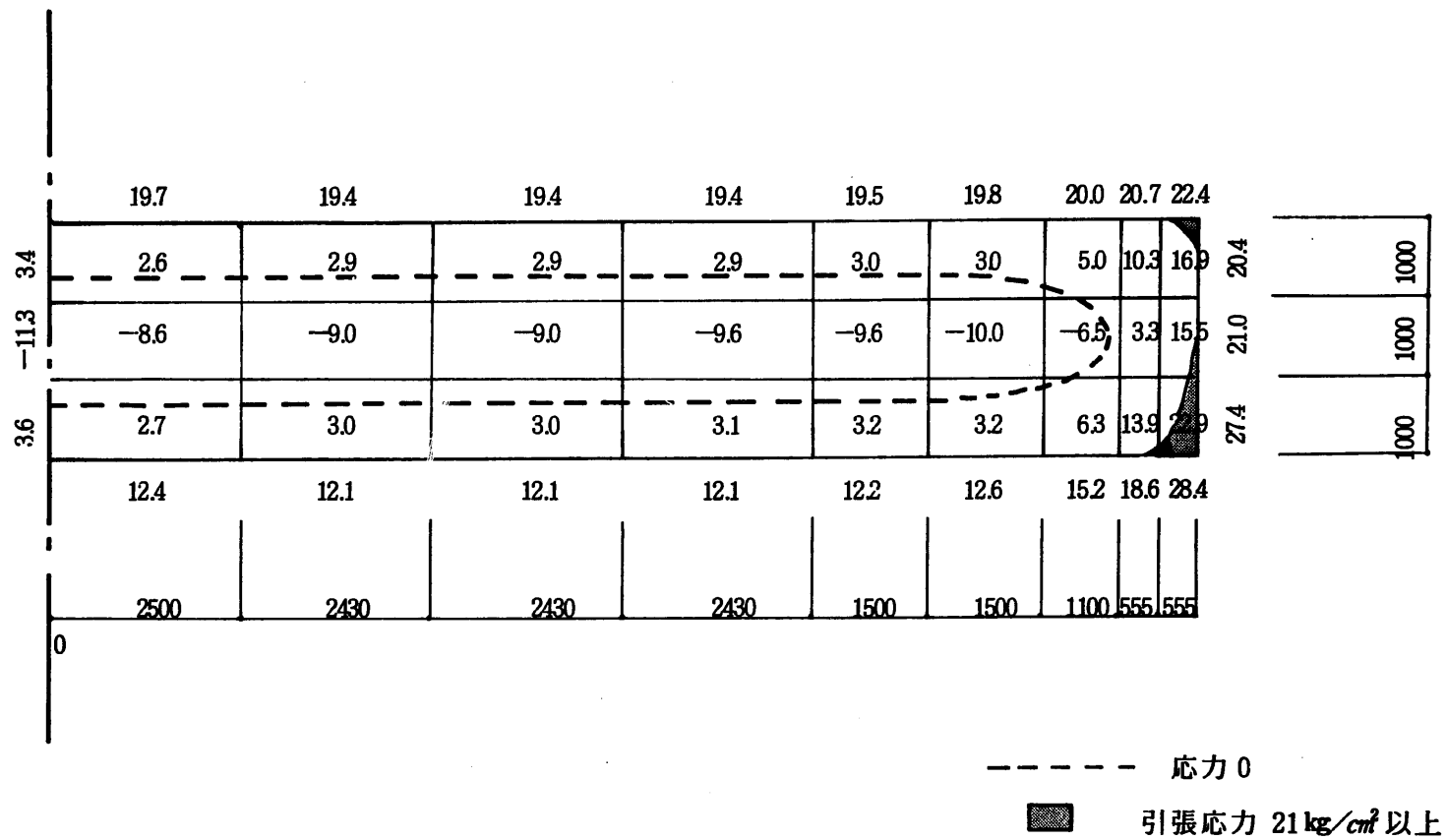


図 3.4 第 1 リフト温度ピーク時 (打設後 6 日) 面外応力

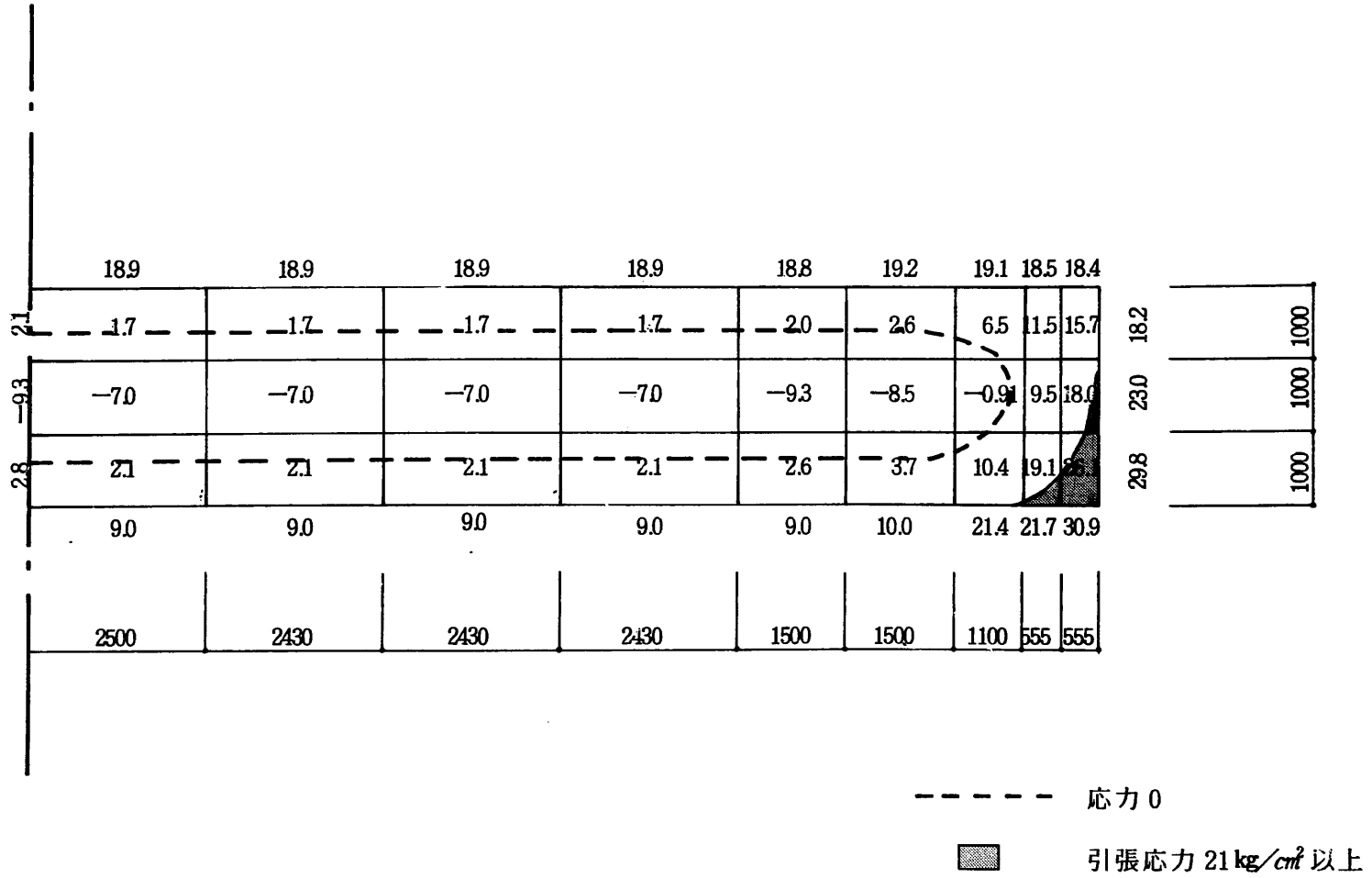


図 3.5 第 1 リフト打設後 12 日の面外応力

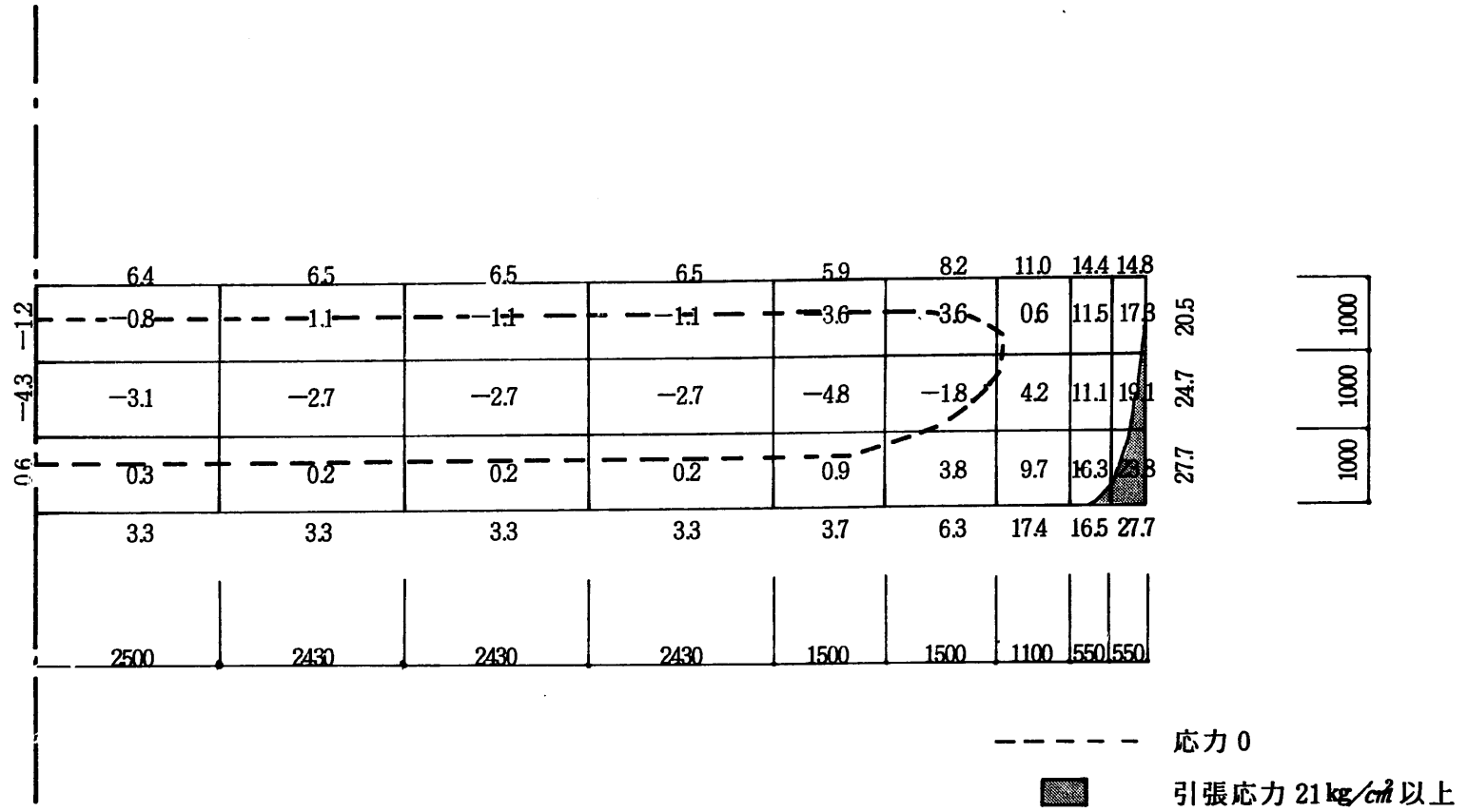


図 3.6 第 2 リフト打設後 3 日, 第 1 リフト面外応力

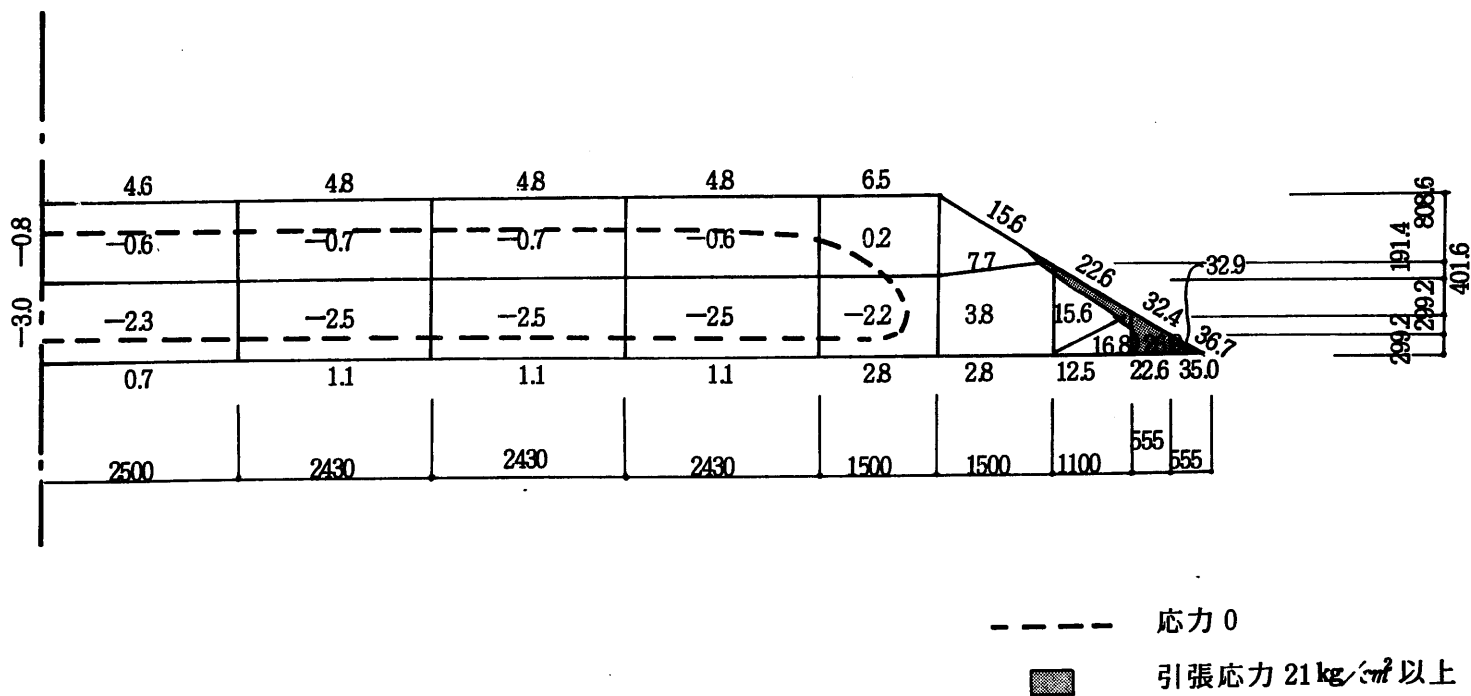


図 3.7 第 2 リフトピーク時 (打設後 3 日) 面外応力





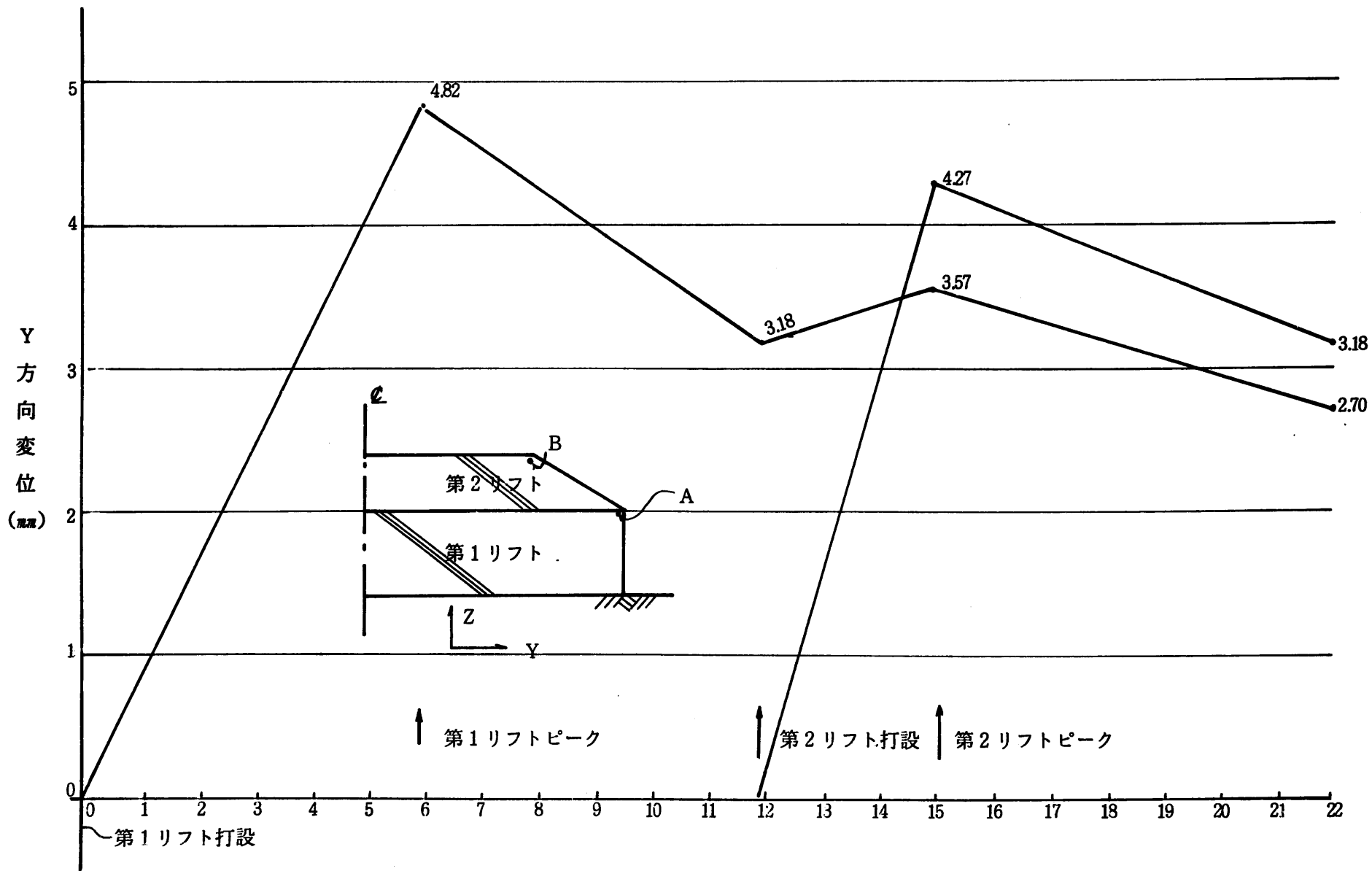


図 3.9 主要部の変位

## 4 結 論

- (1) 日立セメントの断熱温度上昇は日本セメントの試験結果を補正することで実用上十分である。補正は次式による。

$$T_{\infty h} = 1.3 T_{\infty n}$$

$$\alpha_h = 1.2 \alpha_n$$

- (2) 熱応力算定用の温度分布は打設温度と外気温の予測を適切に行なうことによって可能である。
- (3) 熱応力は1次元応力で許可できない端部に発生し、1次元の計算値より5～6割大きくなることから、1次元計算で許可をする場合は引張許容応力を低減する必要がある。
- (4) 外気条件としての日射は表面温度に影響するが、応力上安全側の許可となるので応力算定上無視してもさしつかえないと考えられる。ただし、幾可的条件によっては検討の必要がある。
- (5) リフトが重なっていくにつれ、1週以後の発熱影響が現われるが、上部リフトには影響はほとんどないので応力上無視してもさしつかえない。

## 添附－1 断熱温度上昇試験例

## 1 使用材料

## 1.1 セメント

セメントはフライアッシュセメントB種を使用した。表－1に成績書を示す。

## 1.2 骨材

骨材は表－2に示す那珂川産の川砂，川砂利を使用した。

## 1.3 混和材

混和材として日曹マスタービルダーズ社製ポゾリスNo.70を使用した。尚，混練水は日立市上水道水を用いた。

## 2 コンクリート混練

表－3に示す配合割合に従って50ℓ強制練りミキサーを用いて混練した。混練に先立ち，混練量30ℓに相当する材料をあらかじめ20℃の恒温室に48時間保存し恒温にした。恒温になった材料をミキサーにて2分間混練し，直ちにスランプ，空気量，コンクリート温度を測定し，断熱温度上昇試験用サンプルと10φ×20cm供試体を採取した。

表－3 コンクリートの配合割合

セメント	水	砂	砂利	混和剤	W/C	S/a	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温 (℃)
313	155	767	1080	3.5	49.5	41.6	16.5	4.0	20.5

ただし

呼び強度 240 kg f/cm<sup>2</sup>

C：フライアッシュセメントB種

目標スランプ 15 cm

混和剤：ポゾリスNo.70

骨材最大径 25 mm

表-1 フライアッシュセメントB種  
試験成績表

試料名 11月分

昭和55年12月9日

日立セメント株式会社試験室

様

試験項目	比重	粉末度		凝 結			異常凝結		安定性
		比表面積 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	88 $\mu$ 残分 (%)	水 量 (%)	始 発 (時-分)	終 結 (時-分)	5 分 後 ( $\text{mm}$ )	10 分 後 ( $\text{mm}$ )	
試験成績	2.98	3.140	1.6	27.6	2-31	3-55	33	30	良
JIS R 5213	-	2,500 以上	-	-	60 分以上	10時間以下	15 $\text{mm}$ 以上 (JASS 5T-101)		良

試験項目	フロー値	強 さ						水槽温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
		曲 げ 強 さ ( $\text{kg f}/\text{cm}^2$ )			圧 縮 強 さ ( $\text{kg f}/\text{cm}^2$ )			
		3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日	
試験成績	249	29	43	63	111	204	334	20.0
JIS R 5213	-	-	-	-	60 以上	120 以上	260 以上	20 $\pm$ 2

試験項目	化 学 成 分 (%)								合 計
	強熱減量 (ig.loss)	不溶残分 (insol)	二酸化けい素 ( $\text{SiO}_2$ )	酸 化 アルミニウム ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	酸化第二鉄 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	酸 化 カルシウム ( $\text{CaO}$ )	酸 化 マグネシウム ( $\text{MgO}$ )	三酸化いおう ( $\text{SO}_3$ )	
試験成績	0.6	12.9	19.1	5.0	3.0	55.8	1.3	1.5	99.2
JIS R 5213	-	-	-	-	-	-	5.0 以下	3.0 以下	

試験方法は JISR5201 および JISR5202 による。但し 28 日の強さは、前月分平均値です。

表-2 骨材試験成績表

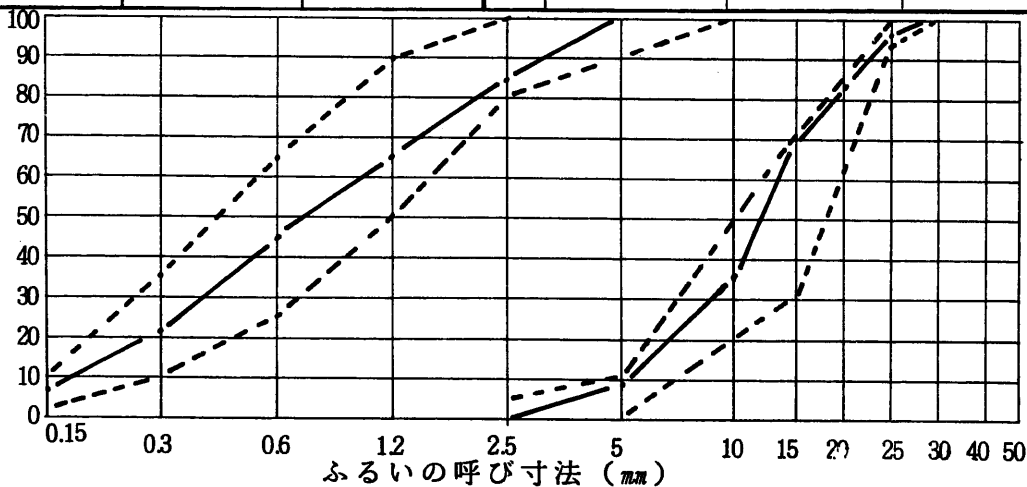
昭和 年 月 日

様

日立セメント株式会社試験室

受入月日	昭和 年 月 日	試験年月日	昭和 年 月 日 ~ 月 日
試料名	砂	砂利(25m)	材料名 ふるい目(mm)
産地	那珂川	那珂川	砂
比重	2.60	2.61	砂利
吸水率(%)	2.46	1.98	40
単位容積重量 (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	30
実績率(%)	-	-	25
洗い試験(%)	2.10	0.65	20
粘土塊含有量(%)	0.8	0.2	15
塩化物(%)	0.000	-	10
有機不純物	合格	-	5
比重1.95の液体に浮くもの	0.06	0	2.5
安定性(%)	2.6	3.5	1.2
スリヘリ減量(%)	-	14.6	0.6
やわらかい石片(%)	-	3.2	0.3
			0.15
			粗粒率
			大きさ

ふるい通過百分率(%)



備考

係	主任	係長	課長
---	----	----	----

### 3 断熱温度上昇試験

混練したコンクリートを直ちに、亜鉛びき鉄板製のコンテナ（ $20\phi \times 20^h \text{ cm}$ ）に充填し、コンクリートの断熱温度上昇を測定した。

図-1に測定装置の概略を示す。

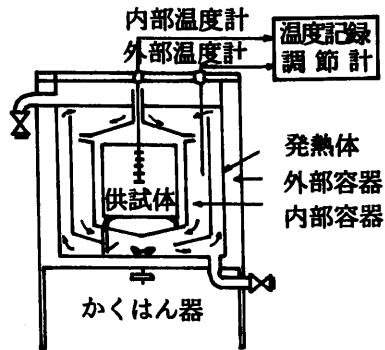


図-1 測定装置の概略

### 4 圧縮強度試験

採取したコンクリートは、24時間後にキャッピングを行ない、さらに24時間後に脱型し材令1.4週まで標準養生を行ない、圧縮強度試験を行なう。

### 5 試験結果

#### 5.1 断熱温度上昇試験

試験結果を表-4、図-2に示す。

#### 5.2 圧縮強度試験

試験結果を表-5に示す。

表-5 圧縮強度試験結果

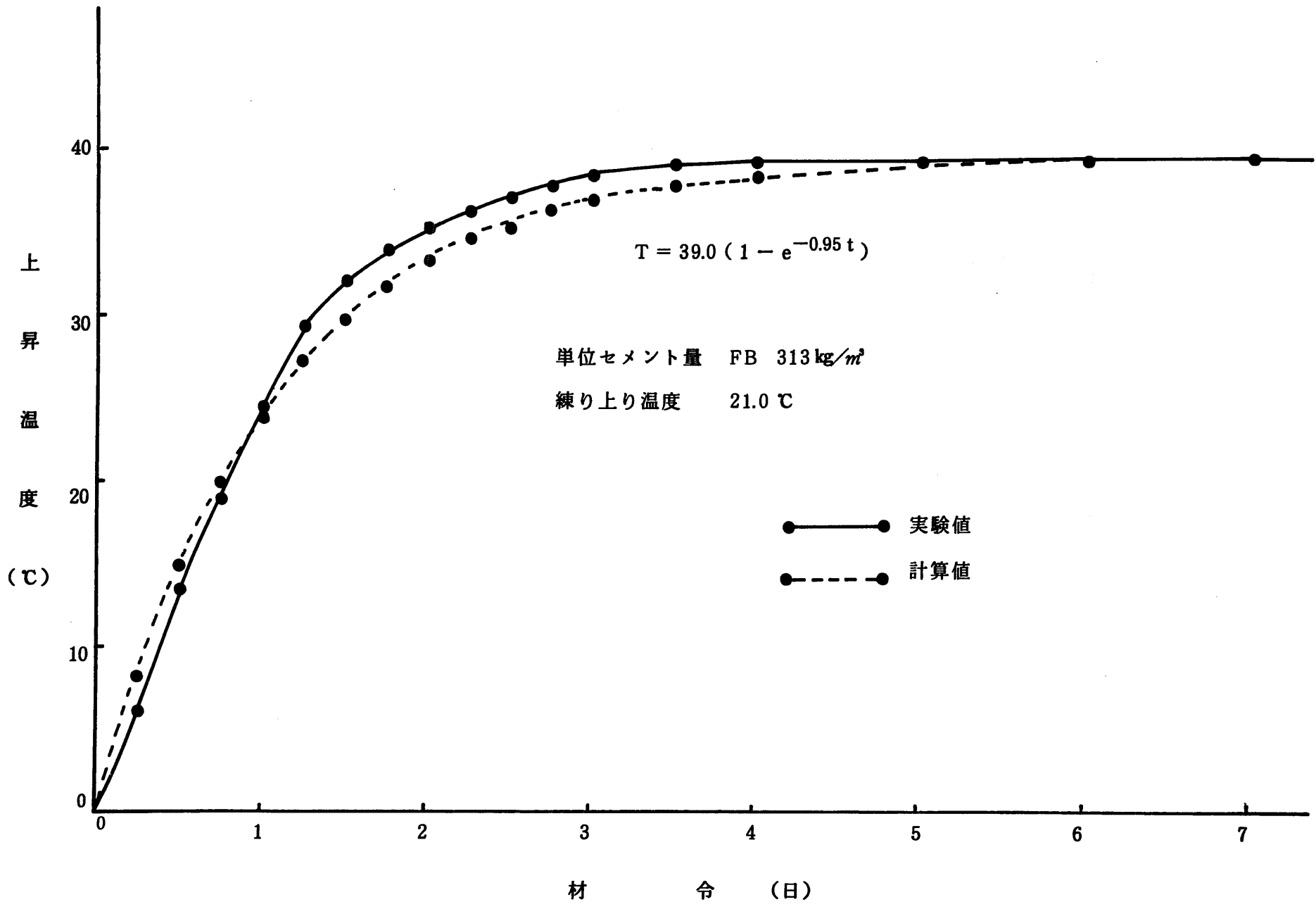
材 令	1 週	4 週
圧 縮 強 度 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	211	325

ただし、供試体3本の平均値を示す。

表-4 供試コンクリートの断熱温度上昇測定結果

材 令 (日)	断熱温度上昇 (℃)	上昇温度 (℃)
0.	21.0	0.
0.25	27.0	6.0
0.50	34.5	13.5
0.75	40.0	19.0
1.00	45.5	24.5
1.25	50.3	29.3
1.50	53.0	32.0
1.75	54.8	33.8
2.00	56.0	35.0
2.25	57.0	36.0
2.50	57.8	36.8
2.75	58.5	37.5
3.00	59.2	38.2
3.50	59.8	38.8
4.00	60.0	39.0
5.00	60.0	39.0
6.00	60.0	39.0
7.00	60.0	39.0





## 添附 - 2 排気筒基礎コンクリート実測結果

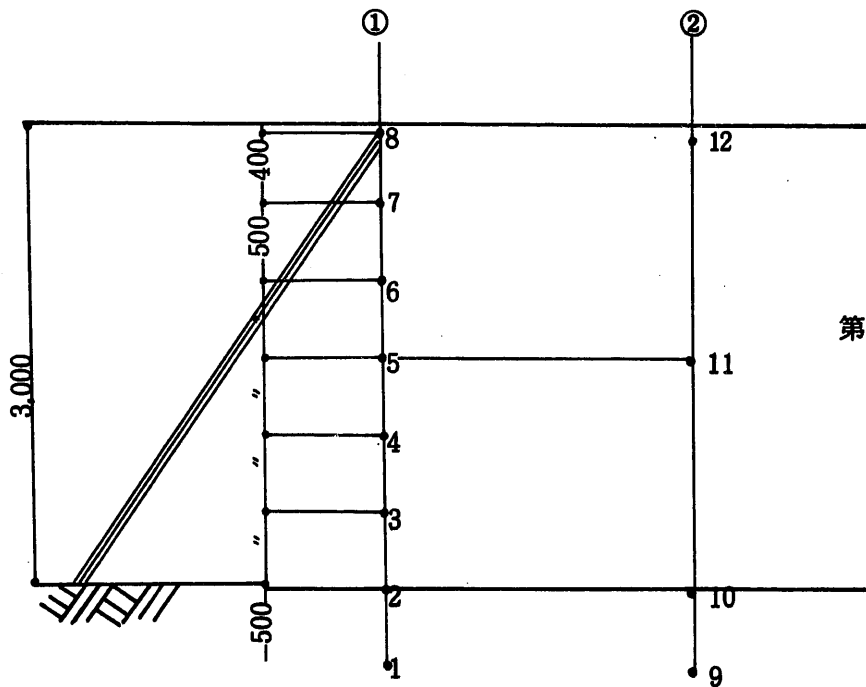
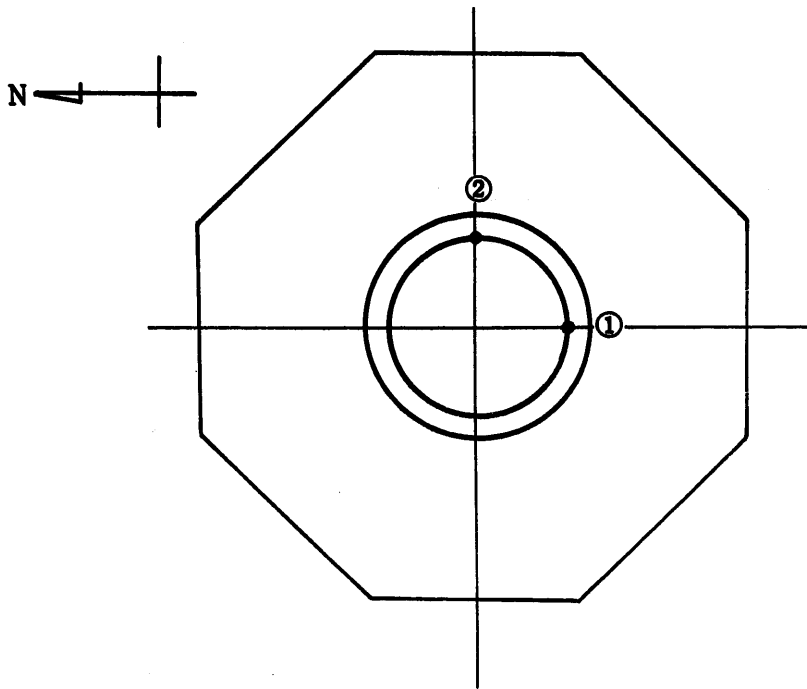
### 1 概 要

測定用センサーはC-C熱電対（0.6 m/m, ガラス繊維被覆）を使用し、別図に示すように20点に設置した。

記録はC-C熱電対用デジタル温度計を使用、計測点とセンサー部の距離は約50 mである。

測定結果は表-1～表-3に示す。

2 排気筒基礎熱電対設置の位置



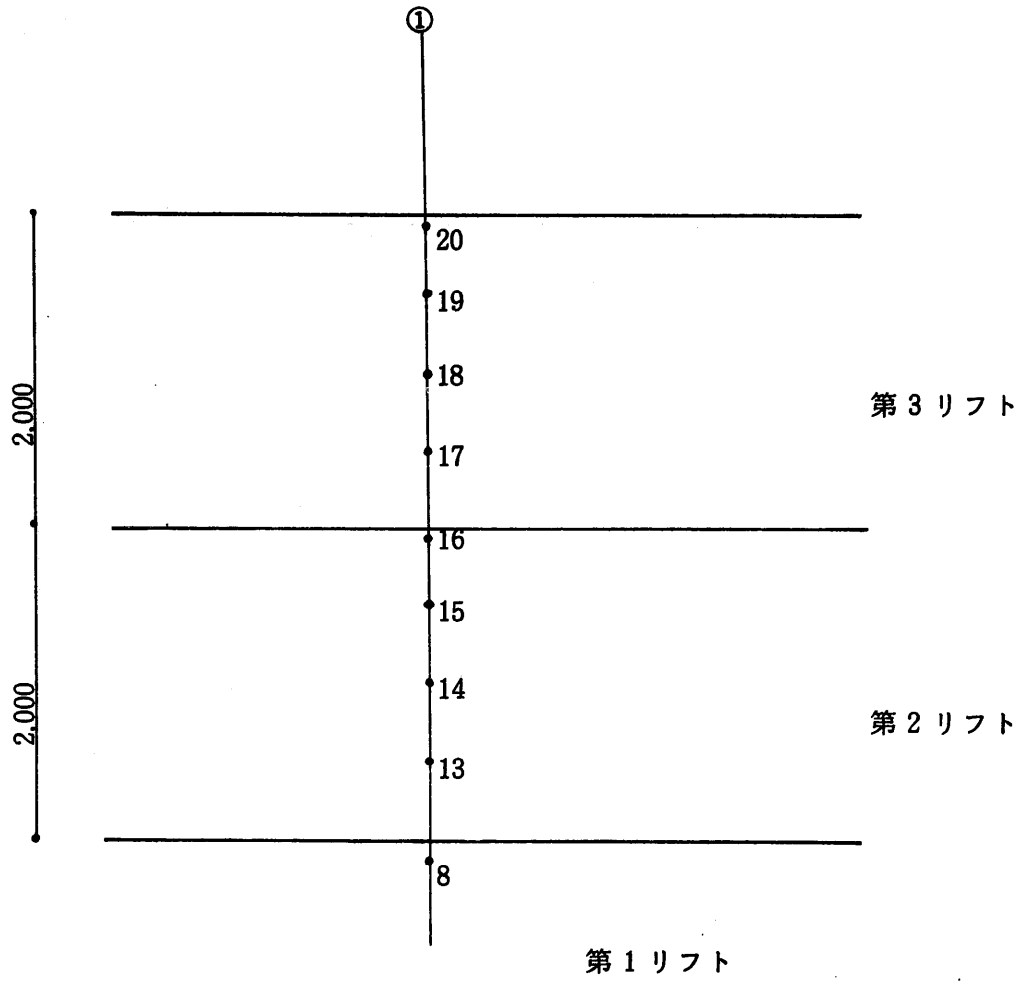


表-2 排気筒基礎コンクリート Mass Con 温度記録 (No.1)

日時				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	外気	
3	25	9	05	10.1	11.9	12.5	13.2	11.7	6.8	6.1	6.1	8.8	12.2	11.0	6.0									No.12と同雨	
		11	00	10.2	12.1	13.2	13.2	12.9	8.5	7.5	7.3	9.3	13.0	11.2	7.3									"	
		14	30	10.0	12.7	13.9	14.0	13.5	13.0	13.9	11.6	10.0	13.7	13.7	7.8									"	
		16	20	10.1	12.9	15.0	14.9	14.3	13.6	14.0	11.6	9.9	14.6	14.3	8.7									"	
		18	05	9.5	13.1	13.7	16.0	14.4	14.2	13.9	11.1	9.3	15.4	15.4	9.1									"	
		19	30	10.3	14.4	17.1	17.0	16.2	15.3	14.6	13.3	10.2	16.9	16.5	12.8									10.0	
X				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	X	
3	26	9	00	10.0	18.5	23.2	24.5	24.5	24.0	21.3	17.6	11.5	22.9	24.8	13.9									8.8 雲	
		11	30	11.1	19.8	25.0	26.3	26.4	26.0	23.4	19.0	12.4	24.3	26.5	14.9									10.3 "	
		17	00	10.4	20.0	25.7	28.3	28.2	27.7	25.5	19.2	12.6	24.9	28.5	14.2									9.7 "	
3	27	9	30	11.4	24.1	31.1	36.2	37.4	36.6	32.4	20.3	15.5	30.2	37.1	16.1									9.8 晴	
		16	00	13.6	25.6	33.2	38.8	40.1	39.4	34.4	24.9	16.8	32.4	40.1	15.9									10.0 "	
3	28	9	30	12.8	28.0	35.3	41.2	42.5	42.5	36.3	22.5	17.8	34.3	43.0	17.6									9.0 晴	
		17	00	16.0	29.9	37.1	43.1	45.1	44.0	43.2	26.9	20.0	35.6	44.8	18.2									7.1 "	

表-1 排気筒基礎コンクリート Mass Con 温度記録 (No.2)

日 時	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	外 気	
3   29   10   30	16.3	30.6	37.5	43.3	45.7	43.7	36.9	23.5	21.0	35.7	45.3	21.0										7.8 晴
16   30	16.9	30.9	37.7	44.0	46.2	44.3	37.3	25.7	22.3	36.7	45.9	16.6										5.0 "
3   30   10   00	18.4	31.3	37.7	43.6	45.8	43.2	35.6	21.3	21.5	35.5	45.1	18.9										6.3 晴
3   31   10   00	23.1	33.6	39.4	45.1	46.9	44.1	36.0	22.2	25.6	38.6	46.6	15.3										7.2 雲
4   1   14   30	22.5	33.9	39.2	44.7	45.3	42.8	33.5	21.1	26.6	38.2	45.6	15.8										8.1 晴雨
4   3   9   00	23.9	35.6	39.6	43.8	44.6	39.5	30.6	16.5	28.6	38.8	43.4	13.5										9.8 晴
X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	X	
4   6   9   45	26.7	35.2	38.6	41.2	40.8	36.3	28.6	19.1	29.7	38.3	40.0	16.3	14.7	14.3	13.4	11.2						11.2 雨雲
16   00	26.8	35.2	38.4	40.8	40.3	35.5	28.2	19.7	30.1	37.5	39.3	19.9	18.1	16.7	15.2	13.9						9.2 "
4   7   12   00	26.8	34.9	37.8	40.1	39.1	34.8	28.8	25.5	30.1	37.5	38.6	28.2	30.3	31.0	26.7	21.9						16.7 晴
4   8   11   00	27.9	34.9	37.6	39.5	38.4	34.9	30.9	31.8	30.5	37.1	38.3	35.5	40.4	43.0	35.0	23.1						11.7 晴
4   9   11   00	27.6	34.7	36.8	38.3	37.2	34.6	33.0	36.0	29.9	36.2	37.0	39.2	43.5	45.2	35.8	22.9						15.8 晴
16   20					37.4	35.1	33.9	37.0					43.6	45.1	35.8	22.9						12.1 "
4   10   11   00	27.7	34.8	37.0	38.3	37.4	35.9	36.1	39.3	30.5	36.2	37.0	41.4	44.4	44.4	34.7	18.9						9.8 雨

表-3 排気筒基礎コンクリート Mass Con 温度記録 (No.3)

日時				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	外気
4	11	12	00	27.6	33.9	35.6	36.9	37.0	36.3	37.4	40.4					44.3	43.5	35.7	24.5					16.4 晴
4	13	15	00	28.3			36.9		38.2		42.2		35.0		43.2	43.1	39.6	30.2	16.0					5.9 雨
4	15	10	20	28.3	33.2	34.8	36.6	37.7	38.8	40.3	41.7	30.0	34.2	37.6	42.0	42.3	37.1	27.3	17.5					12.0 晴
4	16	13	30	28.2	32.9	34.5	36.2	38.0	39.1	40.7	41.4	30.3	34.2	38.6	41.9	40.5	35.2	26.7	20.9	20.1	17.8	17.5	13.8	12.0 晴
4	20	9	30	29.0	33.2	34.4	36.6	38.9	40.0	40.9	40.5	30.5	34.3	39.6	41.1	39.4	37.8	38.1	41.4	45.1	44.0	35.4	17.4	15.2 雨晴
4	21	9	30	28.5		34.1		38.5								39.1	38.4	39.5	42.4	44.9	42.8	33.9	16.2	14.7 晴
X				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	X
4	24	13	30	27.6	31.5	32.8	35.0	37.1	38.0	38.2	38.5	28.9	32.6	38.1	39.7	39.1	40.5	41.0	43.2	43.1	39.4	36.6	40.4	21.3 晴
4	28	9	45	29.4	32.8	33.9	36.2	38.6	39.7	40.9	41.1	30.9	34.7	39.3	41.8	42.1	43.1	43.8	44.3	44.6	45.1	47.0	49.5	12.8 晴
5	6	9	45	29.4	32.9	33.6	35.9	38.3	39.6	40.5	41.8	30.8	34.0	39.0	42.4	42.8	44.0	45.0	45.7	46.7	47.2	47.1	46.2	17.2 雲
5	22	10	00	29.5	32.5	33.5	35.7	37.1	39.1	40.1	41.3	30.8	33.7	38.0	43.1	42.9	43.6	44.1	44.1	43.8	42.9	41.5	39.1	18.1 晴
9	26	10	00	29.4	32.4	32.0	31.7	33.0	32.9	32.5	32.8	28.5	29.8	35.2	34.1	35.8	34.7	34.9	35.7	34.6	34.2	31.3	31.2	雨

## 添附 - 4 日射影響による補正

## 1 概 要

表面近くの温度は日射の影響をかなり受けるため、温度そのものの測定を重要と考える場合は日射量を計測する必要がある。排気筒実測では応力算定上のため日射量の測定は行なわなかったが、温度上、実測と合わない部分があるため、日射補正を試みる。

## 2 方 法

空調計算で用いられる日射影響による相当外気温の概念を使用する。

相当外気温は以下の式で定義される。

$$T_{eq} = T_o + \alpha \frac{I}{h}$$

$T_o$  : 外気温 (°C)

$\alpha$  : 日射吸収率

$I$  : 壁面日射量 (Kcal/m<sup>2</sup>·h)

$h$  : 熱伝導率 (Kcal/m<sup>2</sup>·h·°C)

上記の  $T_{eq}$  を外気温として使用すれば、日射がある場合を等価的に処理できる。

こゝで、 $\alpha = 0.8$ ,  $h = 15.0$ ,  $I = 300$  とすれば

$$T_{eq} = T_o + 16.0 \quad \text{となる。}$$

4～5月において水平面日射量は最大で 500 Kcal/m<sup>2</sup>·h 程度となるが、平均的な値を使用して 300 Kcal/m<sup>2</sup> とした。

上記で算出した 16°C を昼夜の平均として 8°C を平均外気温の上昇として計算を行う。

## 3 結 果

第 1 リフトの結果を図 - 1, 図 - 2 に示す。

外気条件は、 $15 + 10 \sin \left\{ \frac{\pi}{12} (T + 4) \right\}$  とし他条件は 2 章と同じ。

第 2 リフトの結果は図 - 2, 図 - 3 に示す。

外気条件は、 $18 + 10 \sin \left\{ \frac{\pi}{12} (T + 4) \right\}$  とし、他条件は 2 章と同じである。第 1 リフトでは日射補正によりかなりよく実測値と一致したが、第 2 リフトでは 2 章の結果より精度が悪くなっている。これは、第 1 リフトにおいては晴の日が多く、日射補正が妥当であり、第 2 リフトでは雨・雲の日が比較的多く、日射補正が妥当でなかったと考えられる。添附 - 4 において後述するが、日射のみでは説明できない打設後 1 週以後の発熱と日射のかね合いも考えられる。

図 - 5 は、第 4 リフトの日射補正結果である (外気条件は、 $23 + 10 \sin \left\{ \frac{\pi}{12} (T + 4) \right\}$ )



他条件は2章と同じ)。第4リフトは打設時の実測温度を初期条件にしたにもかかわらず、第2・第3リフトの温度分布は第4リフト打設後6日で特に実測値と異なっている。

その原因については添附-4で述べる。

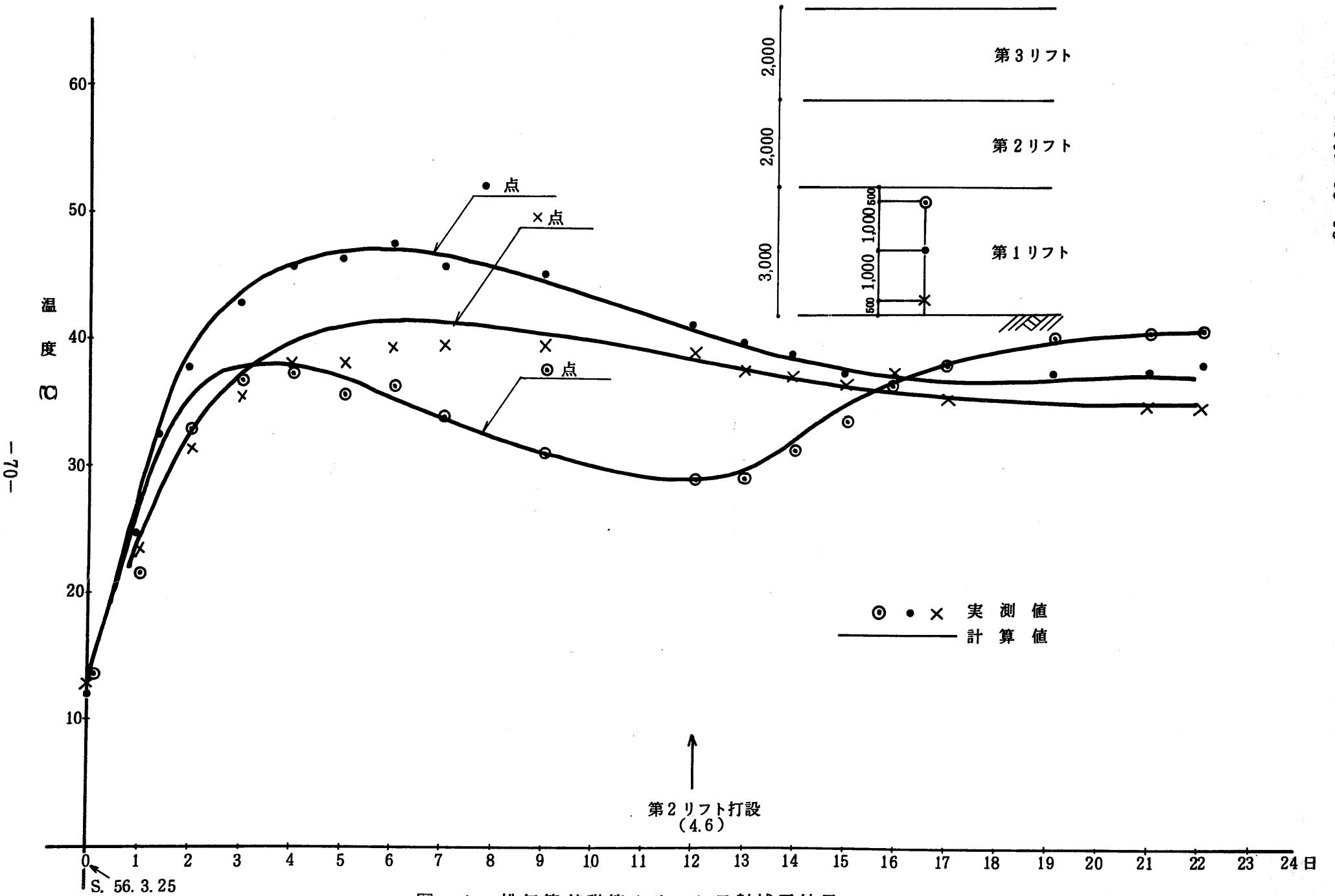


図-1 排気筒基礎第1リフト日射補正結果

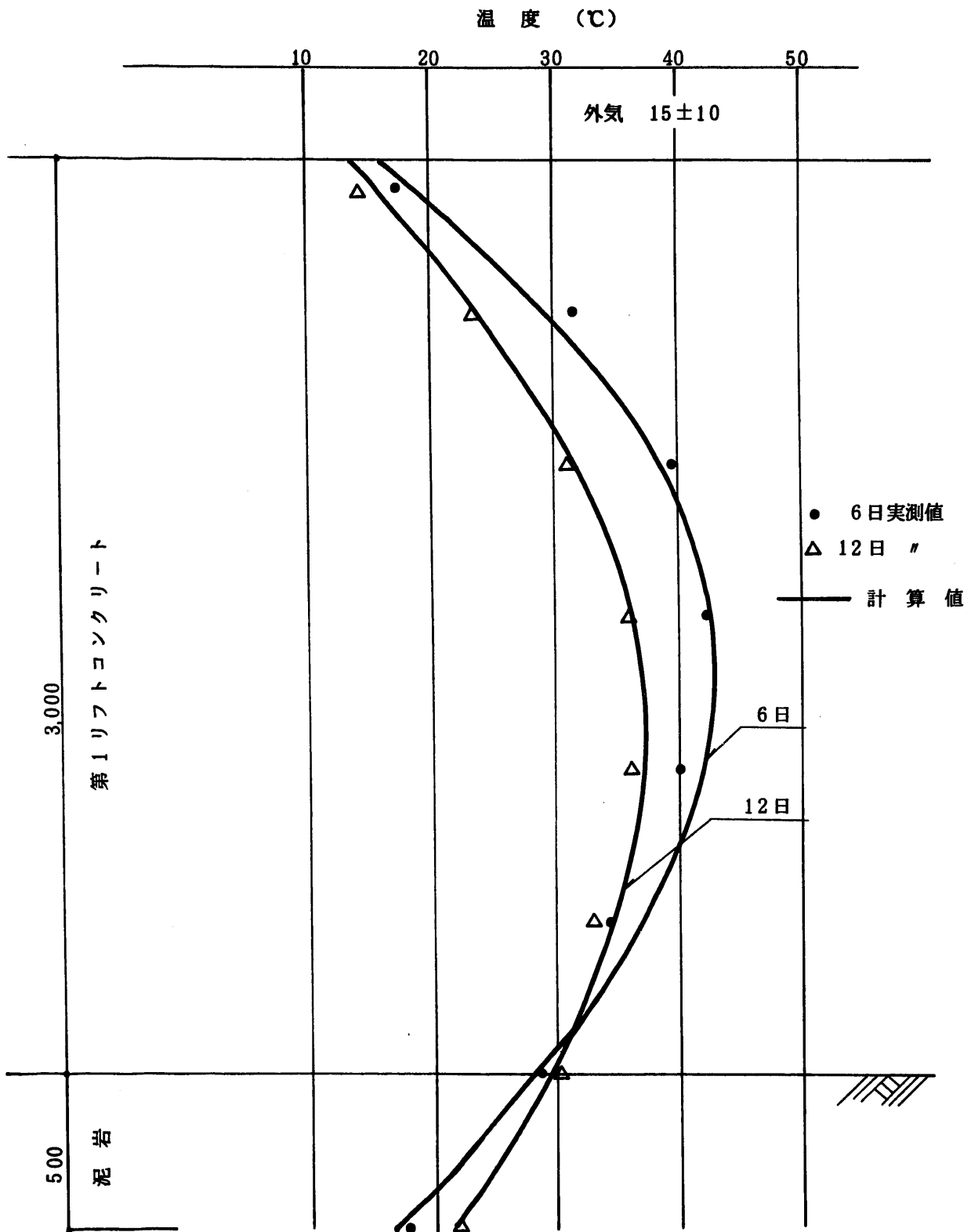


図-2 排気筒基礎第1リフト日射補正結果

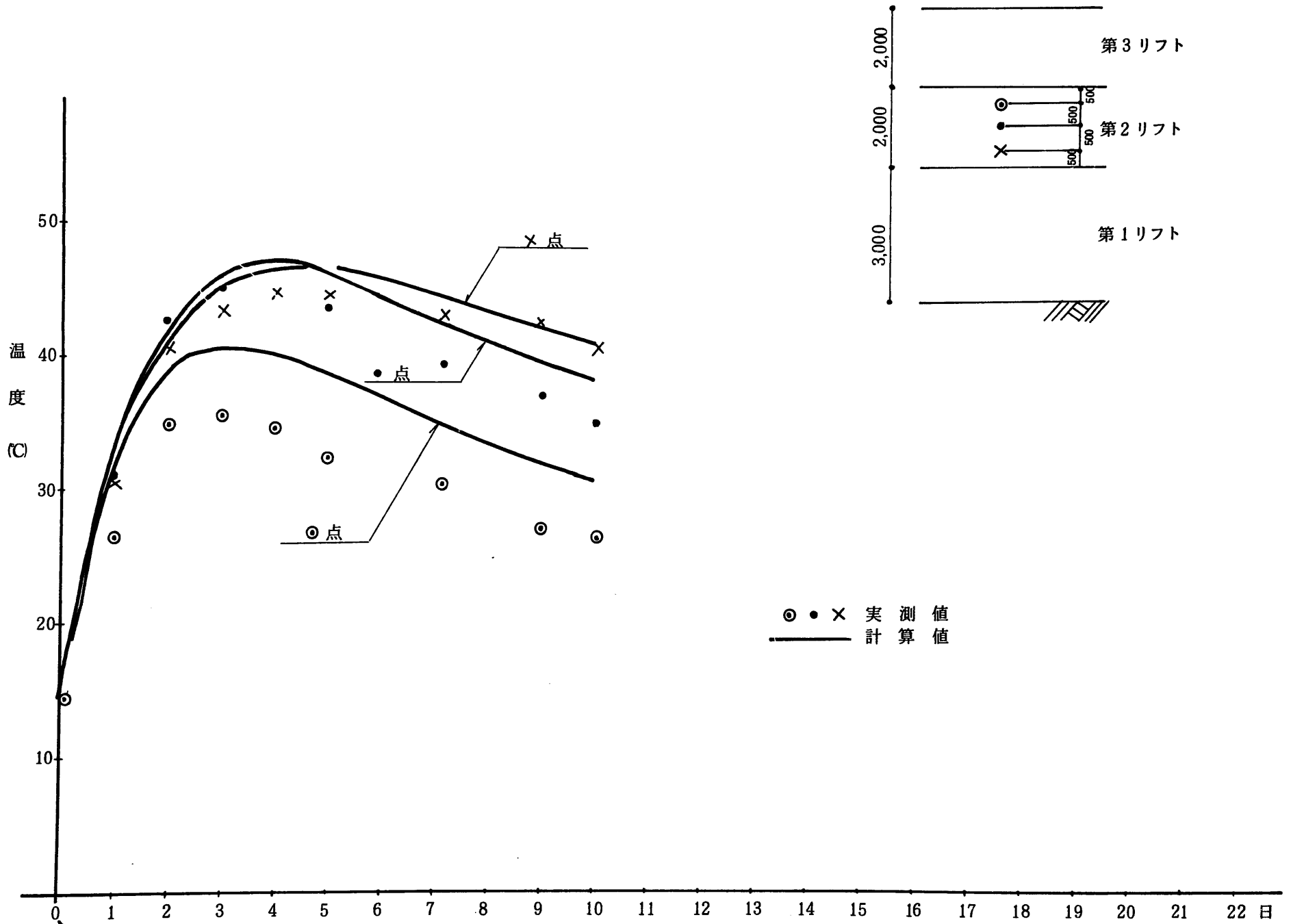


図-3 排気筒基礎第2リフト日射補正結果

S. 56.4.6

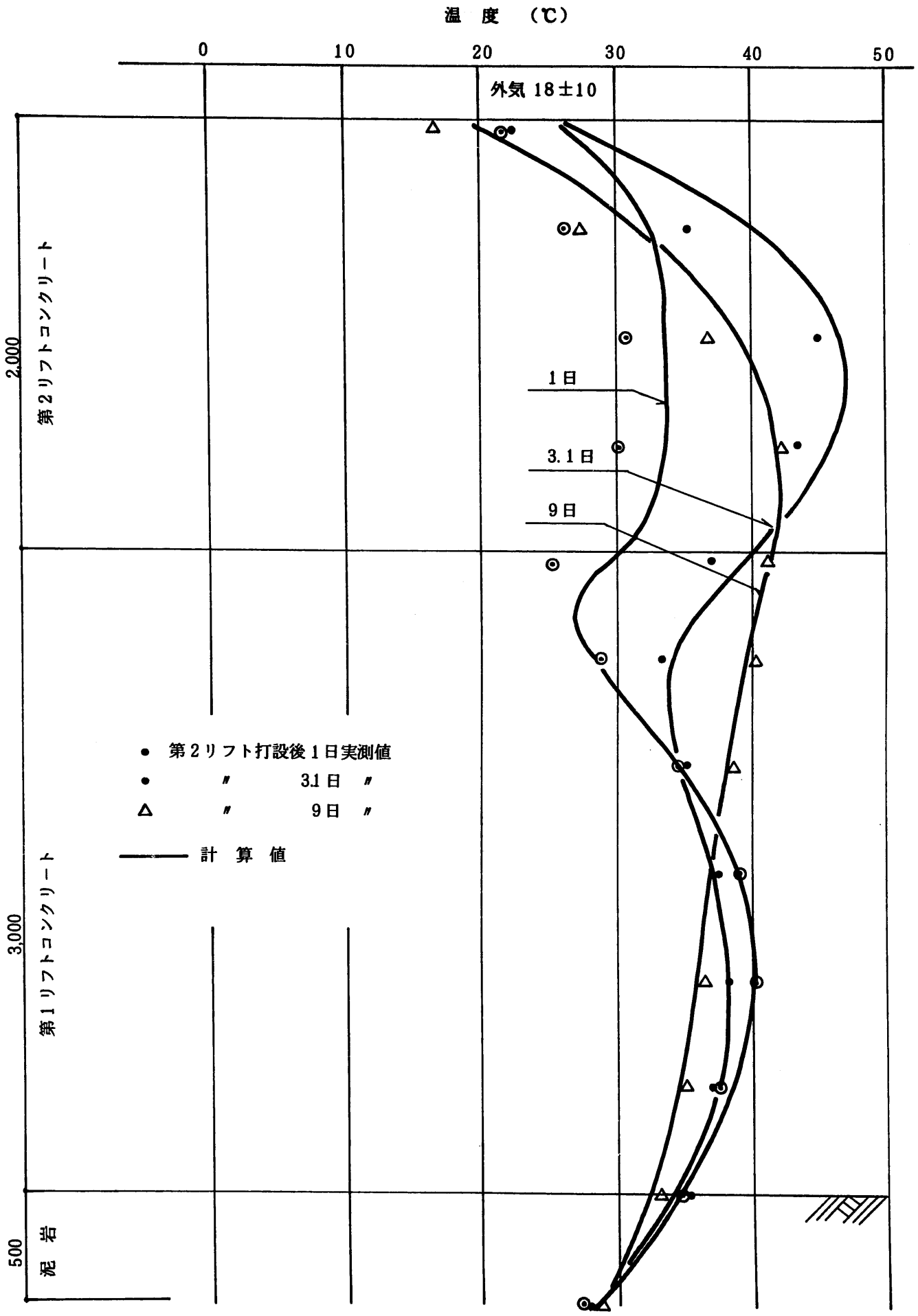


図-4 排気筒基礎第2リフト日射補正結果

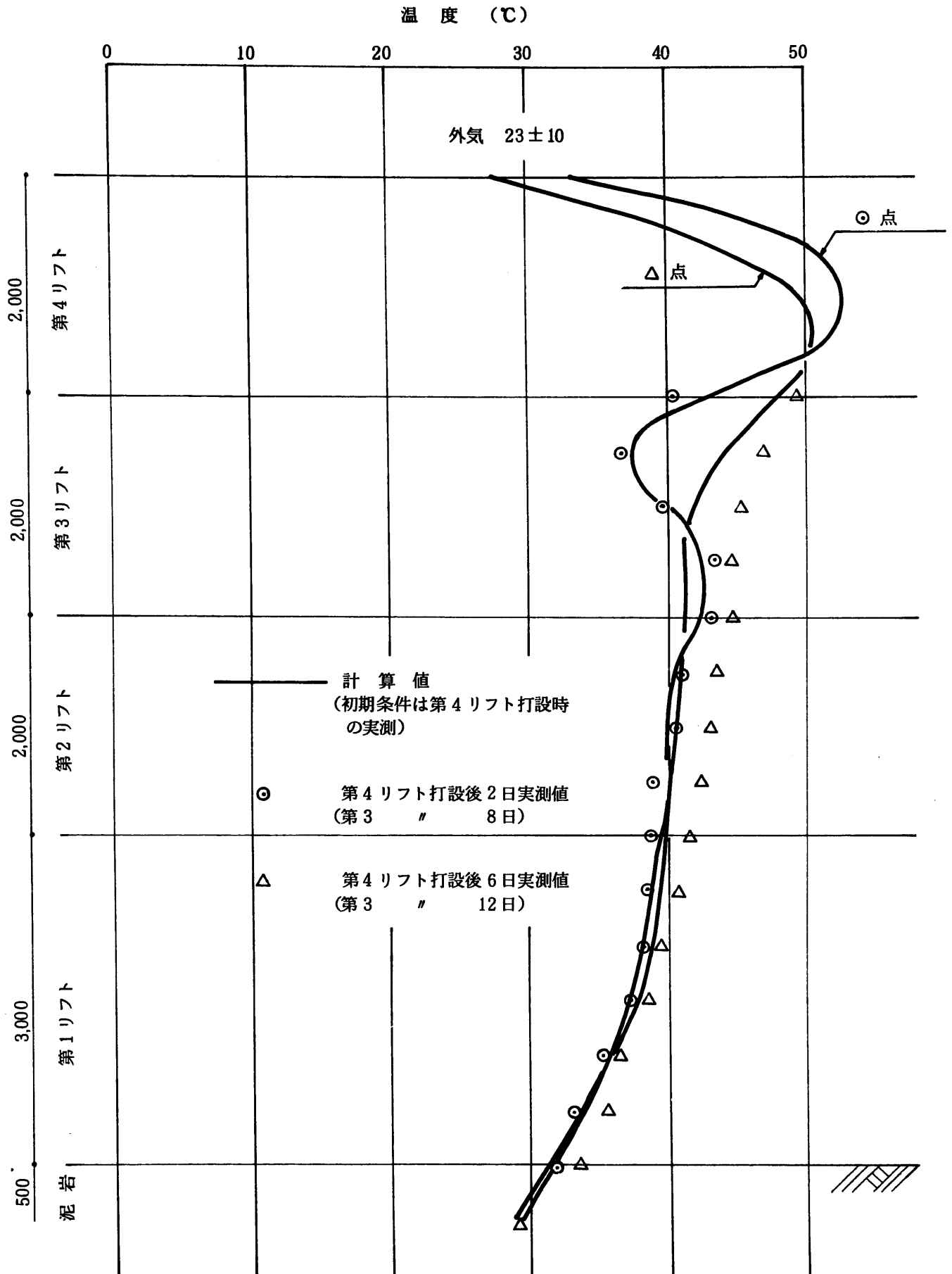


図-5 排気筒第3, 第4リフト日射補正結果

## 添附-4 打設後1週以後の発熱補正

## 1 概 要

添付-3の図-5において第2リフト中心部では4日間で2~3℃程度温度上昇している。第2リフトはこの時点では打設後16日経過して、発熱はほとんどないため温度変化は熱伝導のみによる。

図-1より4日間のコンクリート中の平均応答距離は約50cmであり、最大応答距離でも3mである。最大応答距離をとっていても温度が2℃上がる要因はなく、また発熱が持続している以外の理由はない。

打設後1週以後28日までは表-1のように、1週間までの発熱量の20%程度の発熱がある。

これを加味して発熱補正を試みる。

表-1 混合材を混和したセメントの水和熱

混 合 比		比表面積 (プレーン方法) ( $cm^2/g$ )	水和熱(cal/g)			百 分 比(%)		
セメント	混合材		材 令(日)			材 令(日)		
			7	28	90	7	28	90
普通セメント 100	0	3710	78.2	92.1	99.4	100	100	100
〃 80	別府白土 20	別府白土 5680	68.3	81.1	85.6	87.5	88	86.4
〃 90	フライ アッシュ 10	フライ アッシュ 3580	66.6	77.0		85.4	85	
〃 80	〃 20		61.0	71.6	84.9	78.0	75.4	85.5
〃 70	〃 30		55.0	69.5		70.5	75.5	
中庸熱セメント 100	0		55.7	78.9	87.4	100	100	100
〃 80	フライ アッシュ 20		49.4	69.0	78.3	88.6	87.5	89.6
普通セメント 70	水サイ 30	水サイ 3270	65.5	86.6	93.9	84.8	94	94.6
J I S 規 格 値		中庸熱セメント	70以下	80以下				
		低熱セメント	60以下	70以下				

## 2 条件・結果

1週以後の発熱量は1週までの発熱量の20%とし、第4リフト打設に適用する。

第4リフトの発熱は2章と同じとし、第3リフトについては

$$T_{\infty} = 41 \times 0.2 = 8.2 \quad \alpha = 0.115$$

たゞし、 $\alpha$ は6日で発熱が半減するとし  $\alpha = \ln 2 / 6 = 0.115$

第3リフトについては

$$T_{\infty} = 8.2 e^{-0.115 \times (16-7)} = 2.91 \quad \alpha = 0.115 \quad \text{とした。}$$

日射補正については添付-3のものを使用し、第4リフト打設時の初期温度は実測によった。結果を図-2、図-3に示すが、ほぼ妥当と考えられるが、第1リフトでの発熱も若干あるようである。

添付-3、4は1つの試みであり、仮定の域を出ない。第1リフトから第5リフトまで一連の結果を得るためには、実測において日射量、熱伝導率を計測する必要があり、また一週以後の発熱も詳しく計る必要がある。しかし、これはあくまで温度的な問題であり、打設計画をたてるための応力評価にはほとんど影響しないと考える。



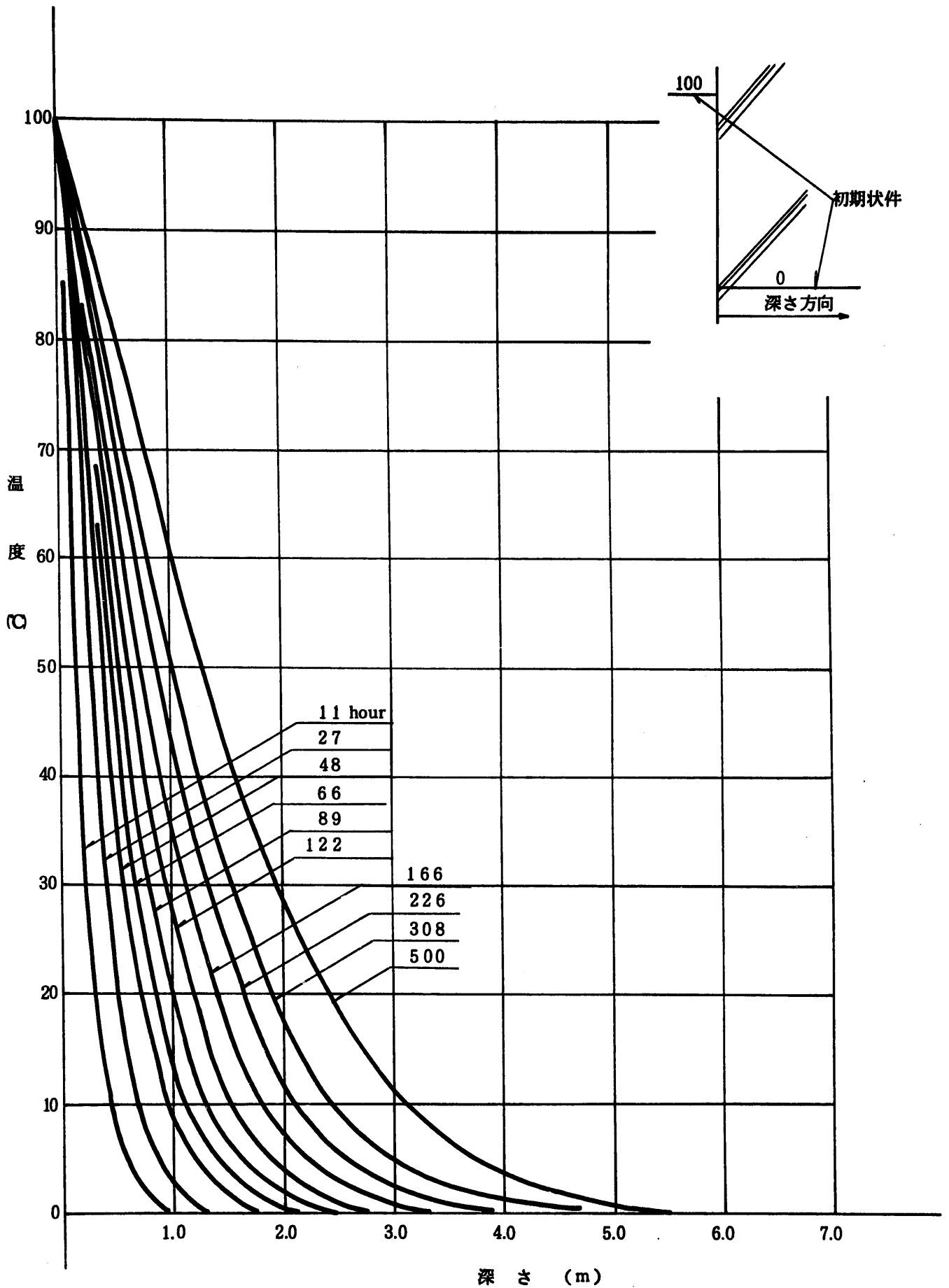


図-1 コンクリートの温度応答距離

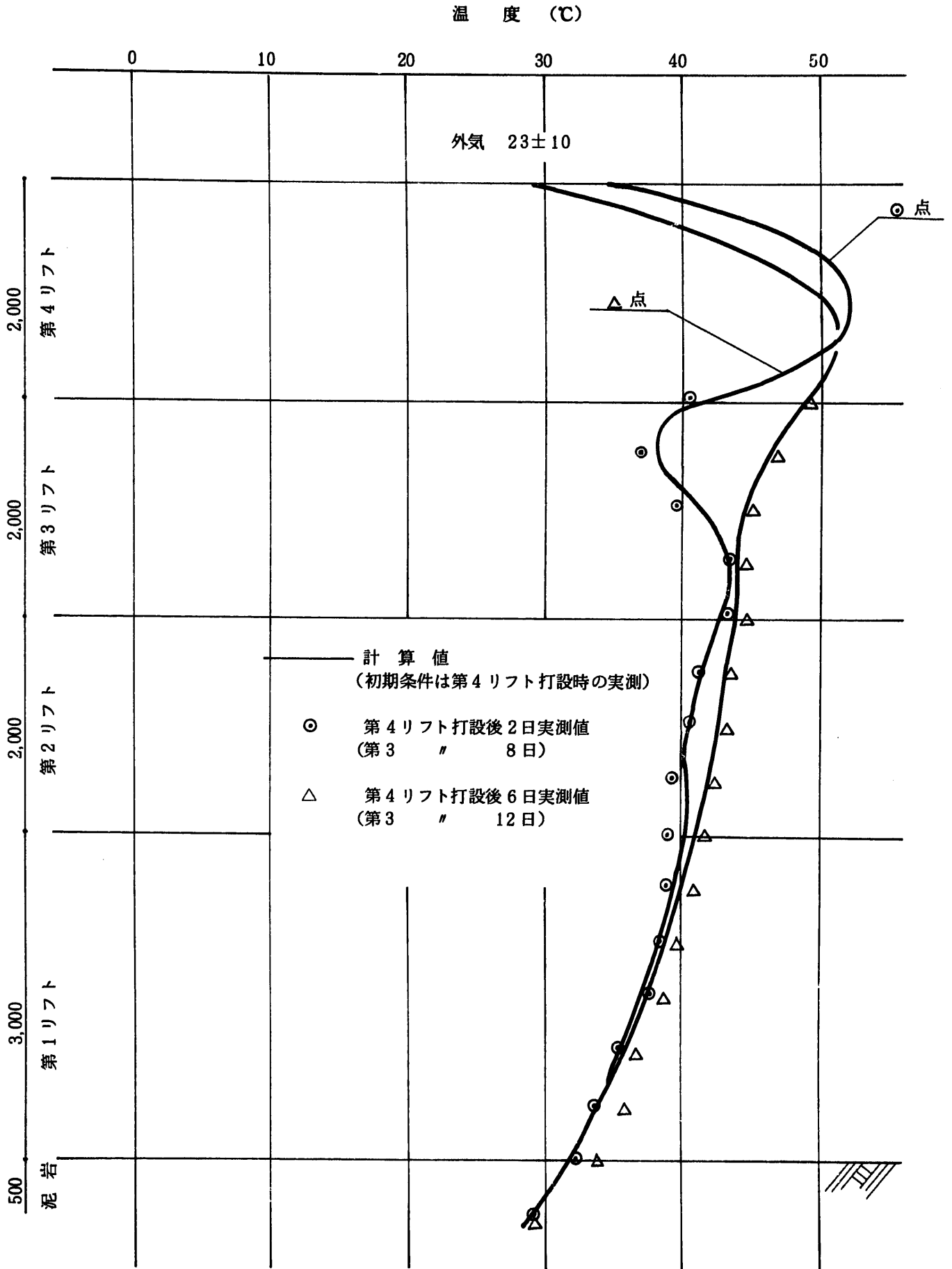


図-2 排気筒第3, 第4リフト日射及び発熱補正

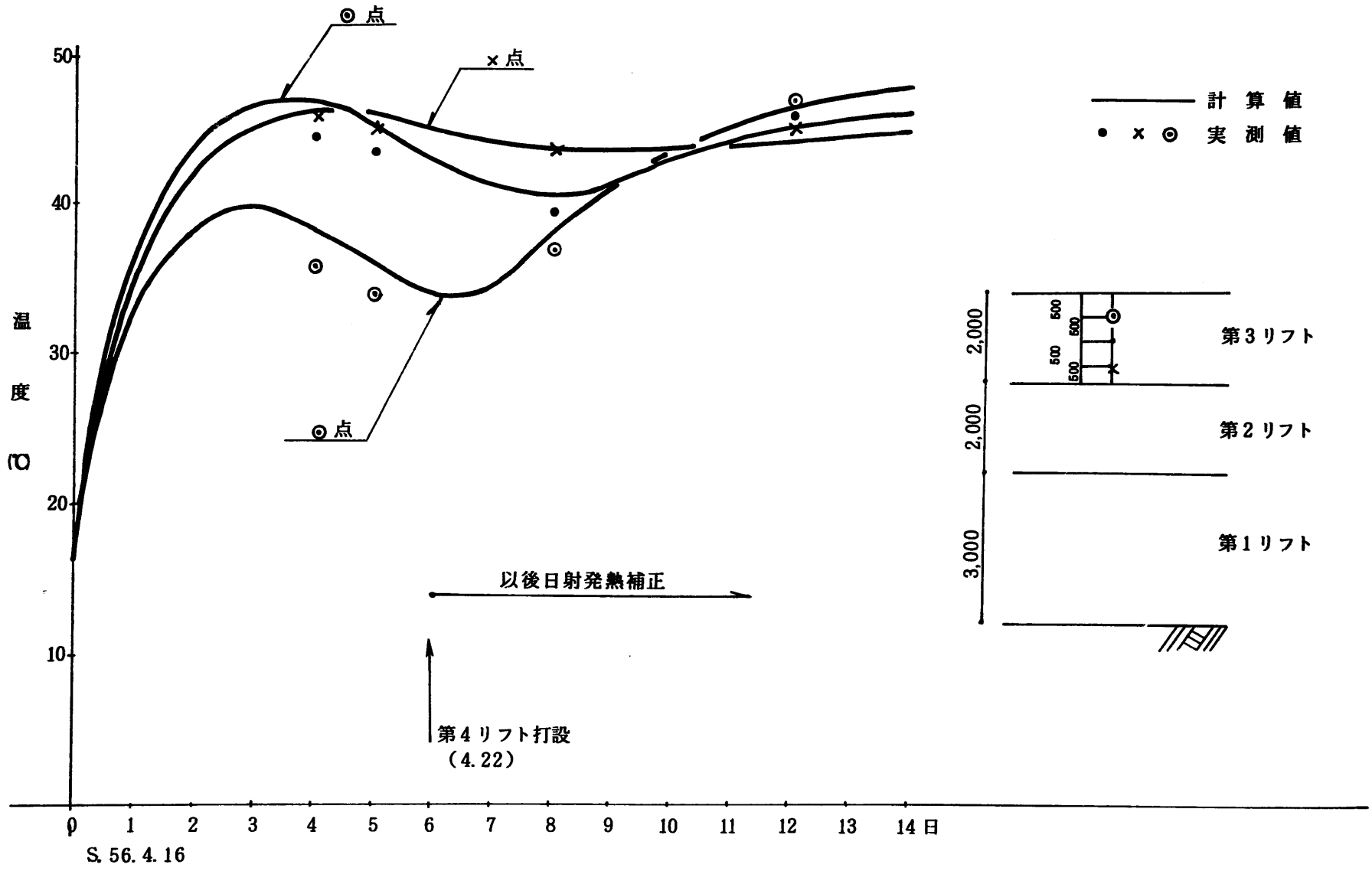


図-3 第3リフト日射，発熱補正結果

S. 56. 4. 16

## 添附-5 ひびわれ推定の例

## 温度履歴からのひびわれ推定

前節までは、軀体の温度分布から弾性論に基づいて引張応力度、或いは引張ひずみを計算してひびわれ発生の有無を検討する方法を示した。こゝでは、過去に施工されたマスコンクリートの温度履歴とひびわれ発生傾向を要因別に分類し、比較対応した文献調査の結果を参考にし簡単にひびわれ発生の可能性を推定する方法を示す。

こゝで使用するひびわれは判定要因は、**昇温速度**と**冷却速度**の2つである。今、軀体の最大温度の履歴が図-1のようになったとすると、昇温速度（ $V$ ）及び冷却速度（ $V_{\text{mean}}$ ）はそれぞれ式(1)、(2)で示される。

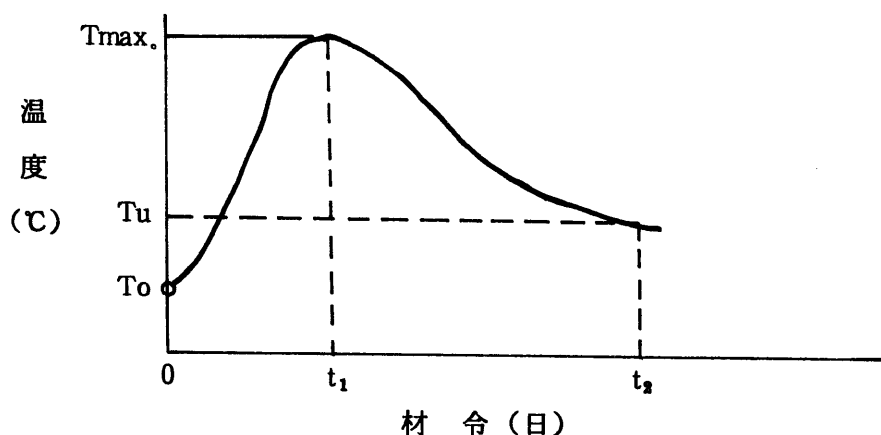


図-1 最大温度の履歴モデル

$$\text{昇温速度： } V = \frac{T_{\text{max}} - T_0}{t_1} \quad \text{..... (1)}$$

$$\text{冷却速度： } V_{\text{mean}} = \frac{T_{\text{max}} - T_u}{t_2 - t_1} \quad \text{..... (2)}$$

上式で計算される昇温速度および冷却速度が、それぞれ 15 °C/日、2.5 °C/日より大きいか、小さいかでひびわれ発生の有無を判定する。これらの境界値はクリープ係数と大きな関係があり、この値以上ではクリープ係数が非常に小さいことが推定される。すなわち、応力がほとんど緩和されないような速度であると言える。

これらの値は、絶対値ではなくあくまでも目安であることを考慮に入れておいて載きたい。文献調査の結果でも両者とひびわれ発生との相関係数は約 0.7 であった。

壁体構造における昇温速度および冷却速度と部材厚の関係を参考までに図-2 に示す。

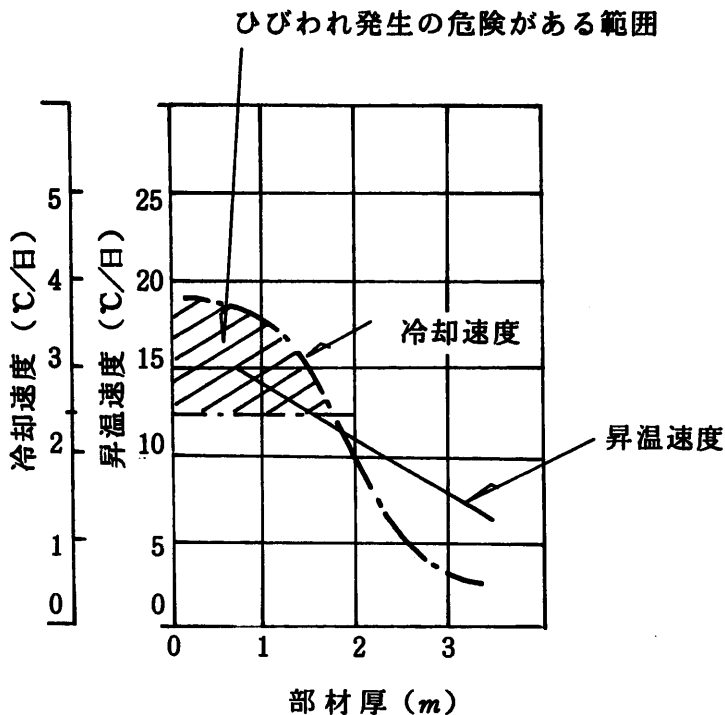


図-2 冷却速度および昇温速度と部材厚の関係 (20℃打込み)

ダムコンクリートの場合のひびわれ推定 (USBR 施工指針)

ここでは、米国の100以上のコンクリートダムの調査結果を参考にしたひびわれ判定方法を示す。

この方法では、ブロック割りが重要であることを示している。図-3に、コンクリートブロックの長さ、ブロックおよび基礎との最大温度差に関する米国開発局(デンバーのUSBR)の規定を示す。

一般に、USBRの許容温度差の規定は28℃以下であり、この場合にはブロックの長さを18m以下にしなければならない。

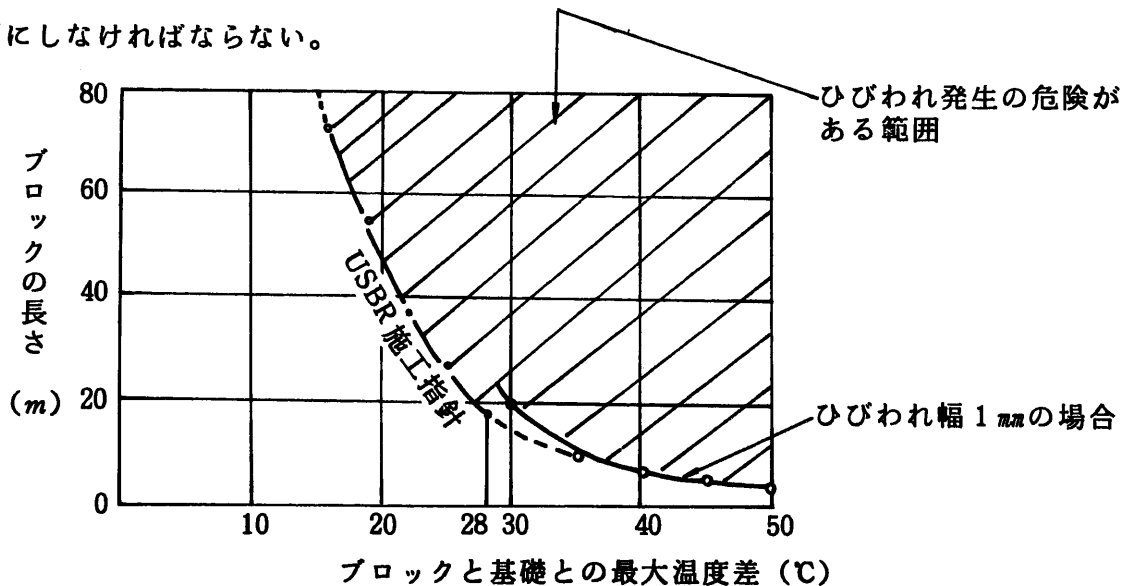


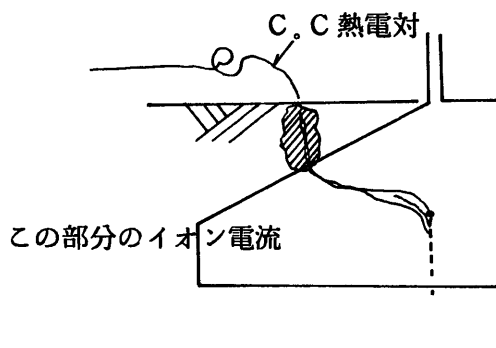
図-3 ブロックと基礎との最大温度差とブロックの許容長さとの関係

## 添付-6 排気筒基礎コンクリート打設終了後の温度実測結果

2.5章で述べた計算結果と実測値の比較を図-1に示す。

打設終了時は昭和56.5.22の埋戻しがほぼ完了した時点とし、実測は4ヶ月後の9月26日のものである。

図-1において実測データにかなりのばらつきがみられるが、これは埋戻し砂のイオン電流を熱電対が拾った結果と考えられる（熱電対は防水保護をしていないものを使用している。コンクリート中、空气中においては防水保護しなくともイオン電流がほとんどないため、その影響はないが、右図のような水を含んだ砂の部分で影響がでる。）



実測データのばらつきを平均すれば妥当的な値と考えられる。計算値と比較して温度が高いのは添付-4で述べた長期の発熱影響が考えられる。

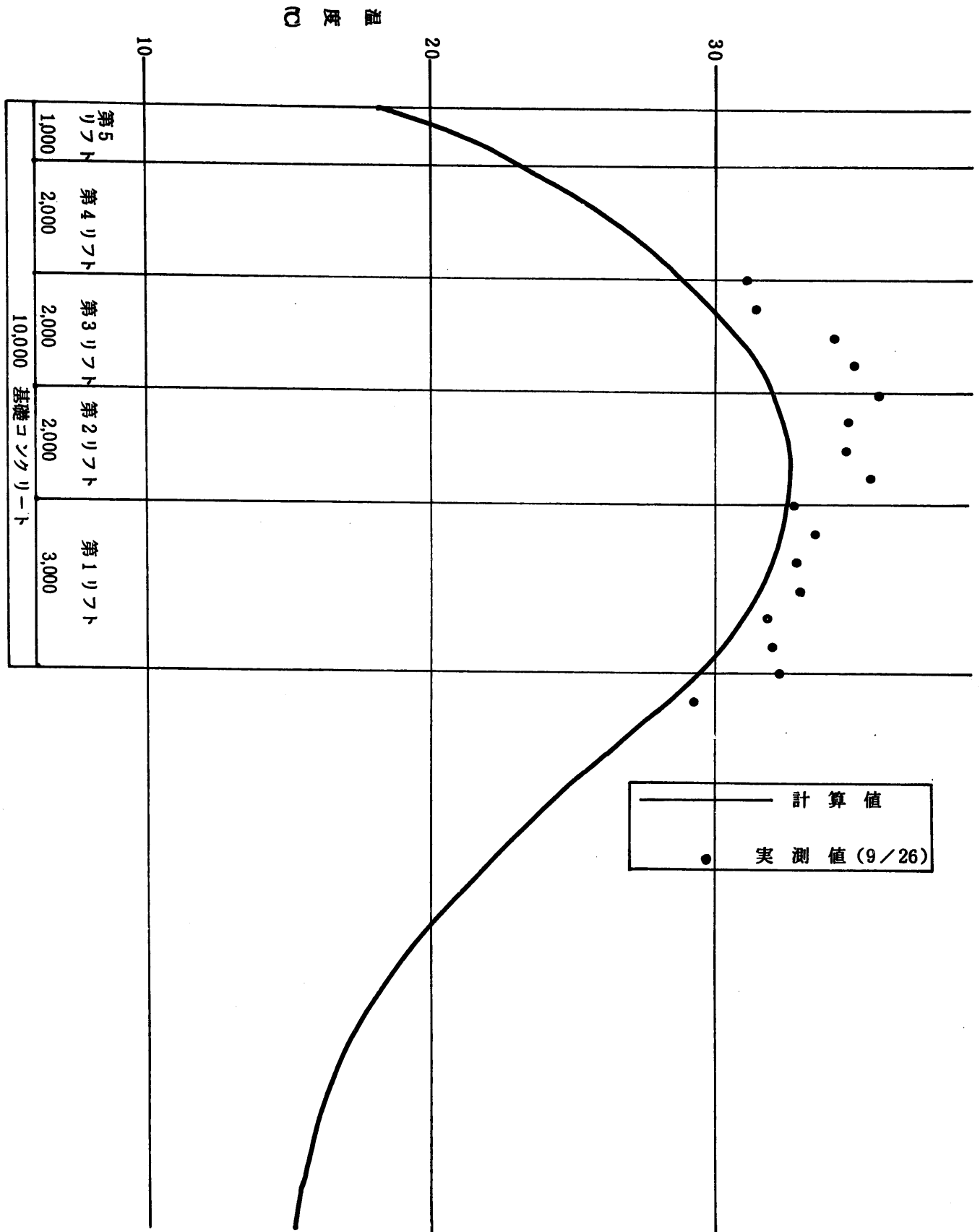


図-1 排気筒基礎コンクリート打設終了後の温度分布  
(打設後4ヶ月経過)