

**産業廃棄物不法投棄事案に係る
温度及び熱源解析調査**

平成 19 年 3 月

岐阜市 環境事業部産業廃棄物特別対策室

第1章 調査概要

1-1 調査の目的

本調査は、岐阜市北部に不法投棄された産業廃棄物の支障（内部燃焼及び発熱、以下「高温部」という。）に関して、廃棄物層内高温部に関する温度分布状況、廃棄物層内高温部に由来するガス発生状況を調査し、消火対策等の支障除去事業や周辺住民の健康の保護及び生活環境の保全に資することを目的として実施したものである。

1-2 調査概要

1-2-1 浅層温度測定

浅層温度測定は、以下の手順に従って温度を測定行う。

- ・混合物主体層の分布区域に10mグリッド毎（302箇所）に測点を設ける。
- ・日射等の影響を排除するため、地表面下0.5m～1.0m付近の温度を測定する。
- ・浅層温度測定の結果は、測点位置別に深度及び温度を整理する。

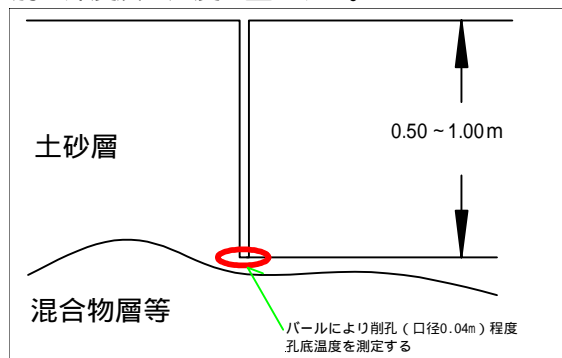


図 1-2-1 浅層温度調査

1-2-2 孔内温度測定

孔内温度測定は、以下の手順に従って温度測定を行う。

- ・混合物主体層の分布範囲にある既存ボーリング観測井戸の孔内温度を測定する。
- ・孔内温度の測定間隔は、2mごととする。
- ・孔内温度測定の結果は、測点位置別に深度、温度を整理する。
- ・既存ボーリング井戸は、13箇所（述べ延長324m）とする。

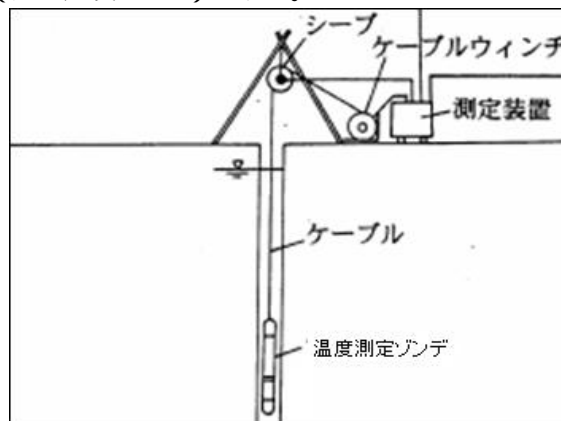


図 1-2-2 浅層温度調査

1-2-3 赤外線カメラによる地表面温度測定

赤外線カメラによる温度測定は、以下の手順に従って温度測定を行う。

- ・現場の表面温度差を赤外線カメラで撮影測定する。
- ・測定は、太陽光の影響を受けにくい早朝に測定する。
- ・撮影箇所は、8箇所とする。

赤外線カメラによる温度測定は、測定時の周辺状況により測定精度の低下が懸念される。影響要因を以下に示す。

- ・地形等状況：測定アングル不良、植生影響
- ・周辺からのノイズ環境：他熱源からの輻射とその反射等
- ・気象条件の影響：日射状況、外気温、降水、強風等
- ・測定対象の条件：放射率、表面粗滑、色調
- ・測定機器の性能・特性：CCD素子分解能、データ深度
- ・その他：熱画像のみでは位置評定精度が低い

表 2-2-1 に測定に際しての影響要因とその排除・低減方法を示す。

表 1-2 1 影響排除の方法

		一般条件	当現場での対処
地形等	測定アングル	正対(90°)～斜め45・60°程度がメーカー推奨	可能な範囲で測定アングルを確保する。
	植生等	疎：影響小、密：影響大	
周辺環境	ノイズ	赤外線・熱源等からの輻射周辺ノイズは可能な範囲で排	赤外線ノイズ源は無い。
気象条件	日射	測定対象の温度によっては、影響回避して測定	早朝5～6時の間に撮影、撮影は3日間を予定する。
	外気温	測定対象の温度によっては、影響配慮して測定	冬季であるため、外気温は、測定温度より低い。
	降水	原則、測定しない	降水時の撮影は行わない。
	強風	測定温度のコントラストが小さい場合は測定待機	早朝5～6時の無風時に撮影を予定する。
測定対象	放射率	物質固有の放射率	可視画像を同時撮影し、異常の有無を判定する。
	表面粗滑	測定対象表面の凹凸や粗滑	
	色調	黒色系～淡色系	
測定器	画素分解能	赤外画像：7.68万画素、可視画像：41万画素	
	データ深度	14bits(16384階調)	
その他	位置評定	熱画像の実では、その分布位置を決められない	可視画像を同機で撮影し、位置判定の目安とする。

第2章 調査結果

2-1 温度調査業務

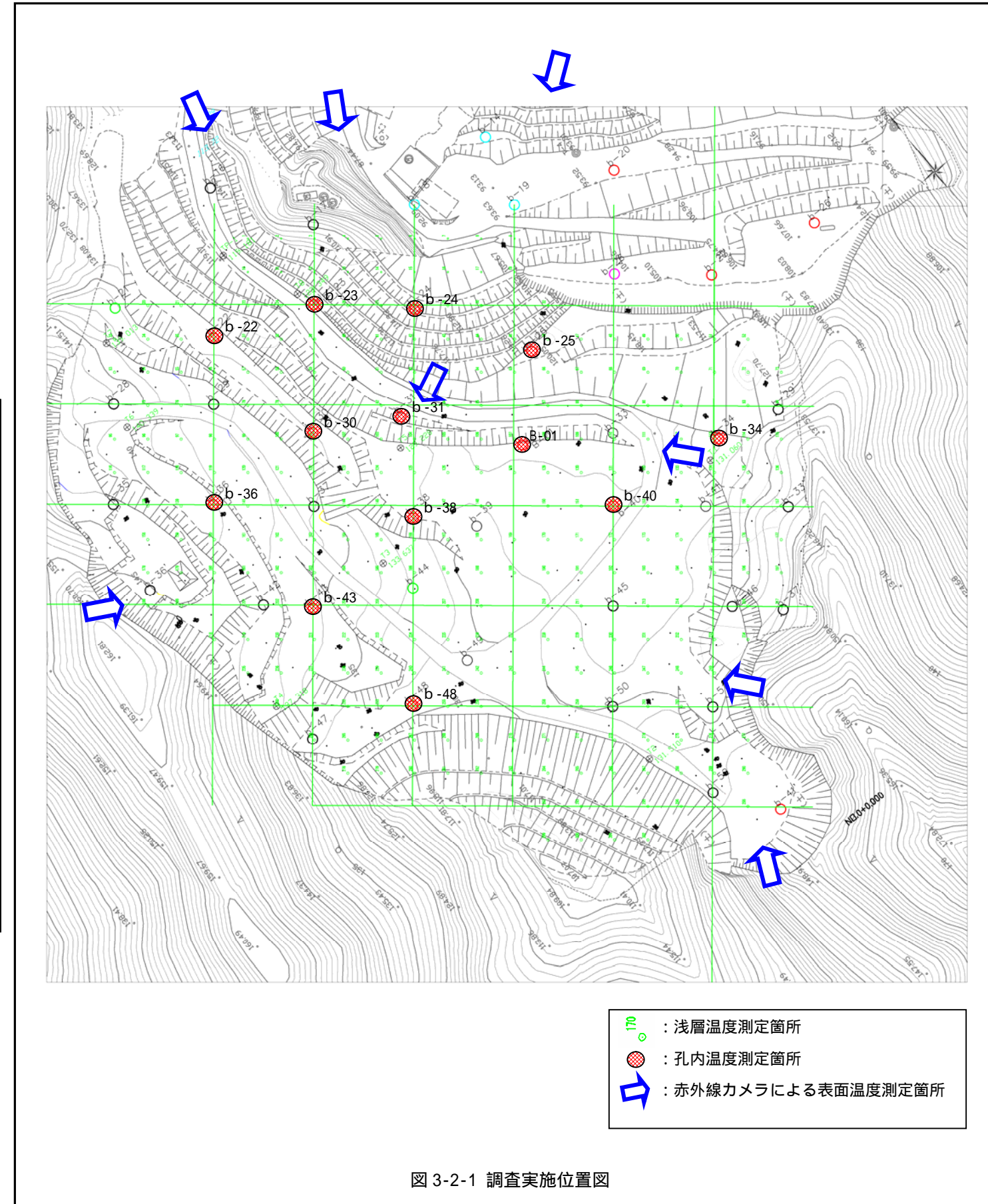
温度調査は、以下の種目と数量を実施した。

- A 浅層温度 302 箇所
- B 孔内温度測定 324m
- C 赤外線カメラによる表面温度測定 7 地点

各調査の実施数量を表 3-2-1 に、実施位置を図 3-2-1 に示す。

図 3-2-1 温度調査実施数量表

調査項目		地点番号	当初数量	実施数量	変更理由
1) 温度調査	(1) 浅層温度調査(箇所)		302	302	
	(1) 合計		302	302	
	(2) 孔内温度調査(m)	b-25	24	22	測定ケーブルのウェイト長(1m)を減 調査孔底の埋塞 観測井戸の損失 再測定 新規追加
		b-30	31	29	
		b-36	21	20	
		b-40	41	39	
		b-43	26	23	
		b-46	5	0	
		b-48	26	24	
		B-01	0	7	
		b-22	0	26	
		b-23	0	38	
		b-24	0	36	
b-31	0	11			
b-34	0	23			
b-38	0	26			
(2) 合計		218	324		
(3) サーマグラフィー(式)			1	1	可視画像同時撮影の機能を追加。
	(3) 合計		1	1	



2-1-1 浅層温度測定

浅層温度測定は、図3-2-1に示す302箇所について実施した。温度測定は、外気温影響を排除するため、地表面下0.5～1.0mの深度まで削孔し平衡温度を測定した。浅層温度の測定結果を用い平面図に温度分布をとりまとめた(図3-2-2参照)。浅層温度の分布特徴を以下に示す(測定結果一覧表は巻末添付)。

最高温度: 57.0
最低温度: 21.5
平均温度: 28.0

温度分布の概況は、有機物の優勢分布箇所が高め、土砂の優勢分布箇所では低めの傾向をなす。また、土砂の優勢分布箇所あっても表層に植生が見られる箇所は温度が若干高めの傾向にあった。

浅層温度測定に併せて、場内の代表的土質等(有機物:C層、土砂:S層、岩盤:B層)の温度を一時間毎に深度1.5mまで測定した(測定間隔0.3m)。測定結果を図3-2-3に結果要点を以下に示す。

外気温影響深度: 各層共にGL-0.0～0.6mまで外気温影響がある。以深は温度上昇傾向にある。
最高温度(0.0m): C層:42.0 S層:26.5 B層:29.0 外気温:34.0
最低温度(0.0m): C層:15.5 S層:13.5 B層:14.5 外気温:11.5
平均温度(0.6m以深): C層:32.0 S層:22.4 B層:20.7 外気温:19.4

代表土質等の温度状況は、GL-0.6mより浅いゾーンでは、外気温の影響を受け、それ以深は比較的安定した温度状況を示している。浅層温度測定結果について代表土質の温度状況を参照し解釈した結果を以下に示す。

廃棄物層内の温度は廃棄物層中の発熱およびその蓄熱により、周辺温度より高い状況にある。

浅層温度は植生による蓄熱効果を若干受けている。

浅層温度が35を超える箇所は、廃棄物内部の発熱が地表面まで熱移動し、大気への放熱箇所となっているものと考えられる。

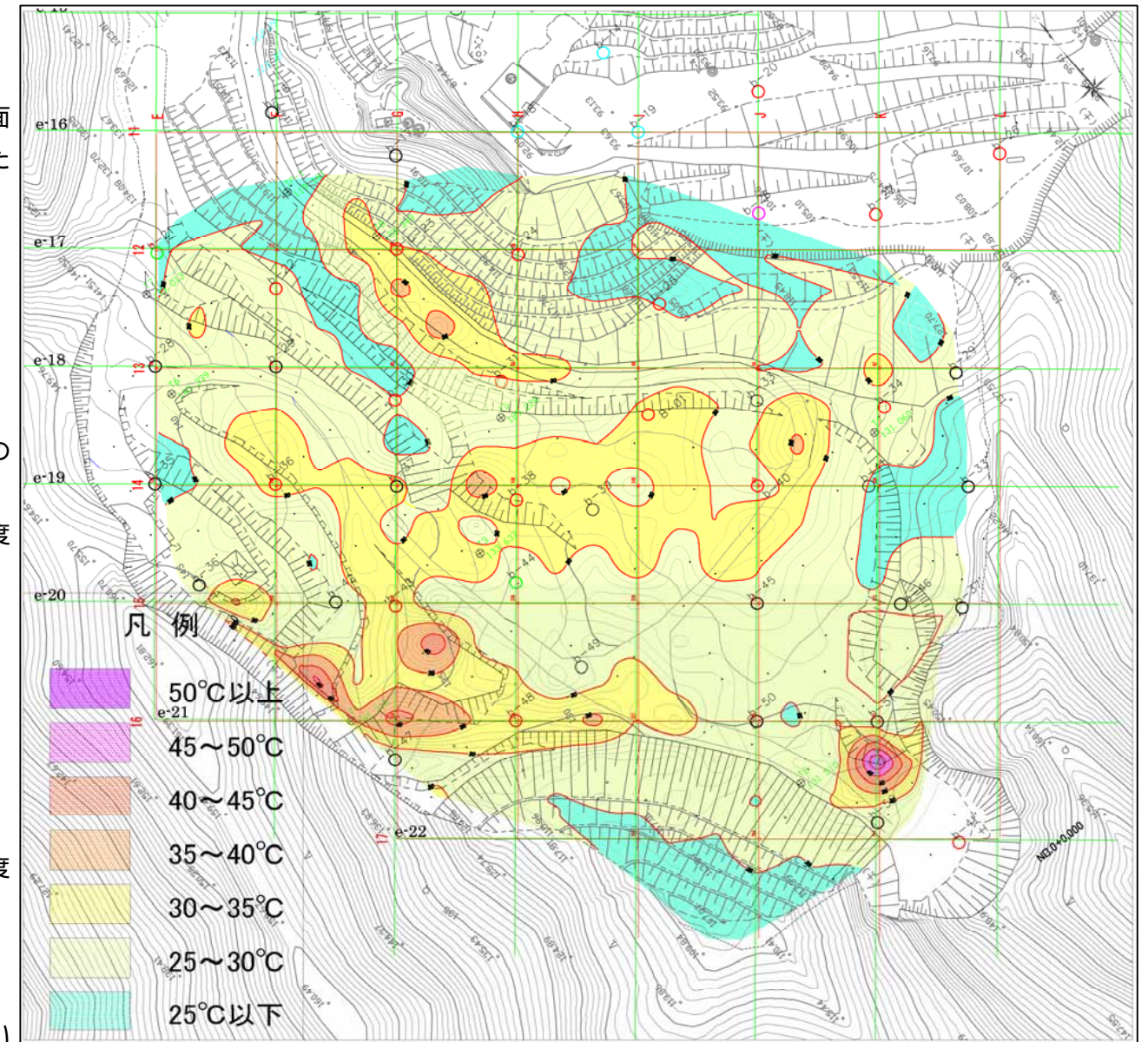


図3-2-1 浅層温度分布

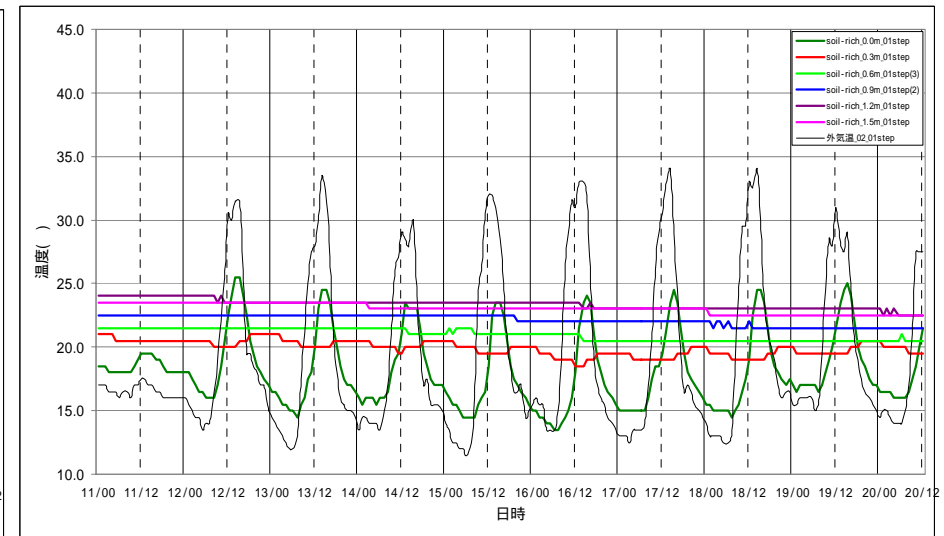
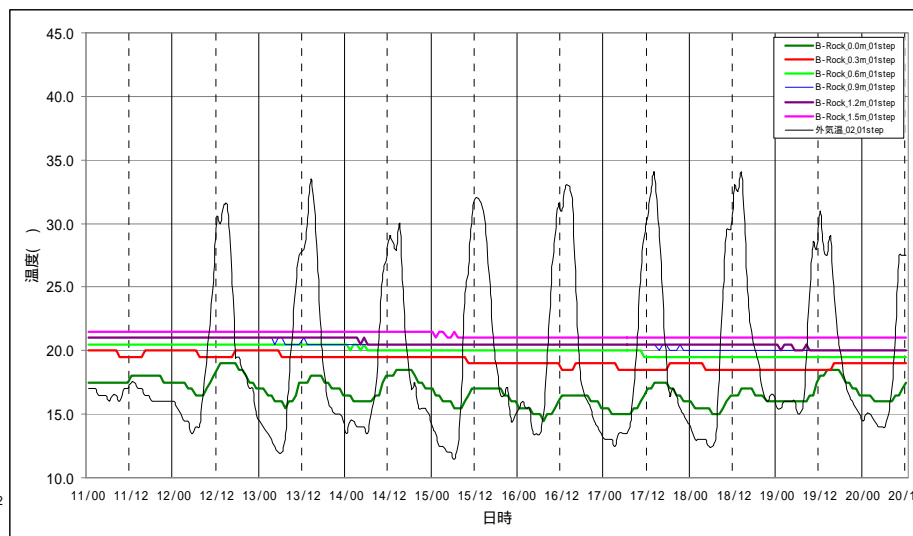
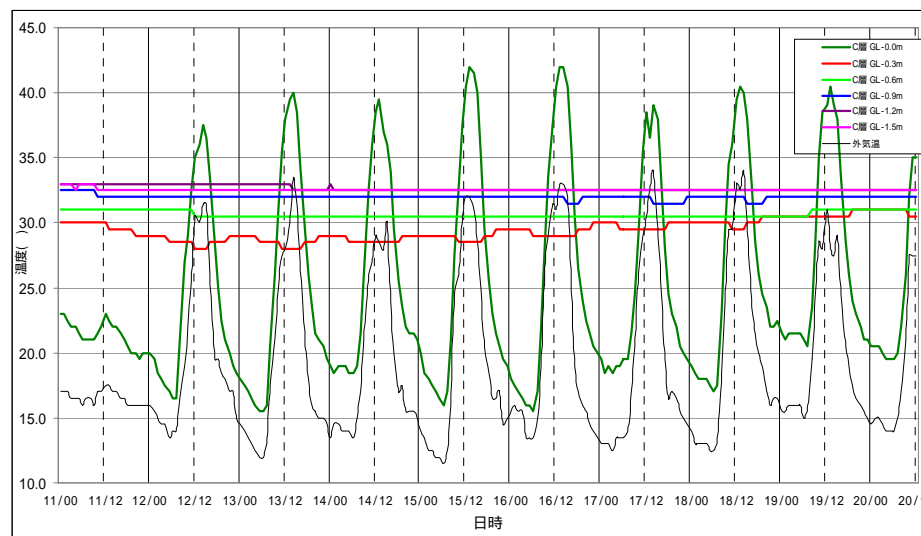


図3-2-3 代表的土質等の温度状況〔左:C層 中:S層 右:B層〕

2-1-2 孔内温度測定

孔内温度測定の結果を表3-2-2に示す。孔内温度測定は、13箇所の既存ボーリングを利用して324mを実施した。なお孔内温度測定は、温度測定端子(熱電対)の感知時間を考慮して、所定深度の平衡温度を測定した。

孔内温度調査の結果のうち代表的ケースを図3-2-4に示す。測定結果全般としては以下の傾向にあった(b-31除く)。図3-2-5~6に全ボーリングの孔内温度状況を示す。

最高温度: 84.7 (563.9 b-31を含む場合)

最低温度: 25.3

平均温度: 49.4 (55.7 b-31を含む場合)

ほとんどの孔内温度は、60以下であり、主に混合物主体層中の有機物の発酵による発熱温度を測定したものと考えられる。ただし、b-31、b-40の2孔は、60以上の温度を測定しており、その付近では、発酵温度を超える発熱現象が生じているものと考えられる。なお、b-31孔で測定した最高温度 約563.9は、温度計の表示が平衡安定しなかったため、揺れ動く表示値の平均的数値を読取った。孔内温度測定に際しての特筆点を以下に示す。

b-31はGL-11m付近まで測定したが、以深は孔が詰まっていた(高温による塩ビパイプ融解炭化-閉塞)。

の際の平衡温度は70~300の幅で揺れており、安定しなかった。

の際に温度計の錘で孔底閉塞部を軽打すると、温度計がわずかに深い箇所へ沈み込んだ。

の状態における測定温度は440~1000で揺れた。ただしそれら温度は平衡温度を示すには至らなかった(写真3-2-1参照)。

b-40の最高温度は84.7を確認しており、周辺部温度より高い傾向にあった。



写真 3-2-1 b-31 孔底部の温度測定状況

表 3-2-2 孔内温度調査結果の代表データ

dep (m)	b-01 T(°C)	b-22 T(°C)	b-23 T(°C)	b-24 T(°C)	b-25 T(°C)	b-30 T(°C)	b-31 T(°C)	b-34 T(°C)	b-36 T(°C)	b-38 T(°C)	b-40 T(°C)	b-43 T(°C)	b-48 T(°C)
0	48.4	29.3	48.4	26.8	26.7	54.8	74.2	28.7	49.4	39.5	25.3	28.4	43.9
2	51.4	33.2	54.4	33.9	27.9	57.2	86.0	33.7	53.0	39.5	43.9	43.2	45.8
4	53.0	44.4	56.7	44.3	32.0	59.4	99.7	40.0	53.5	39.2	59.9	43.9	47.4
6	53.3	54.9	57.5	50.7	38.4	60.7	128.2	42.7	53.5	38.9	65.7	45.0	47.9
8	54.2	56.9	57.5	52.4	45.0	61.5	232.9	44.9	53.0	41.3	72.6	45.8	48.8
10		57.5	57.5	52.1	48.8	61.8	300.6	51.0	48.6	46.1	78.2	46.2	49.7
12		57.6	57.3	51.5	52.4	61.4	563.9	52.8	47.1	46.9	82.5	46.3	50.1
14		57.5	56.6	48.5	56.1	60.8		54.0	46.1	46.8	84.6	46.4	50.0
16		56.0	55.4	46.0	58.8	60.6		54.8	44.5	47.3	84.7	46.4	49.8
18		52.5	53.2	41.9	60.3	60.5		55.4	42.3	47.0	81.9	46.0	49.5
20		49.1	50.7	40.5	60.9	60.2		54.8	40.2	47.6	79.0	46.0	48.8
22		47.1	46.6	39.0	60.3	60.1		51.8		47.4	75.0	45.1	48.1
24		44.0	42.0	36.4	60.2	59.9		50.3		47.3	71.0	45.0	47.8
26		41.7	39.0	35.5		59.4				46.8	65.1		
28			37.4	33.4		58.5				46.8	61.7		
30			35.3	32.2		58.3					59.7		
32			33.4	30.7							55.5		
34			31.0	29.9							50.4		
36			29.3	29.0							46.1		
38			27.0								43.9		
40											39.1		

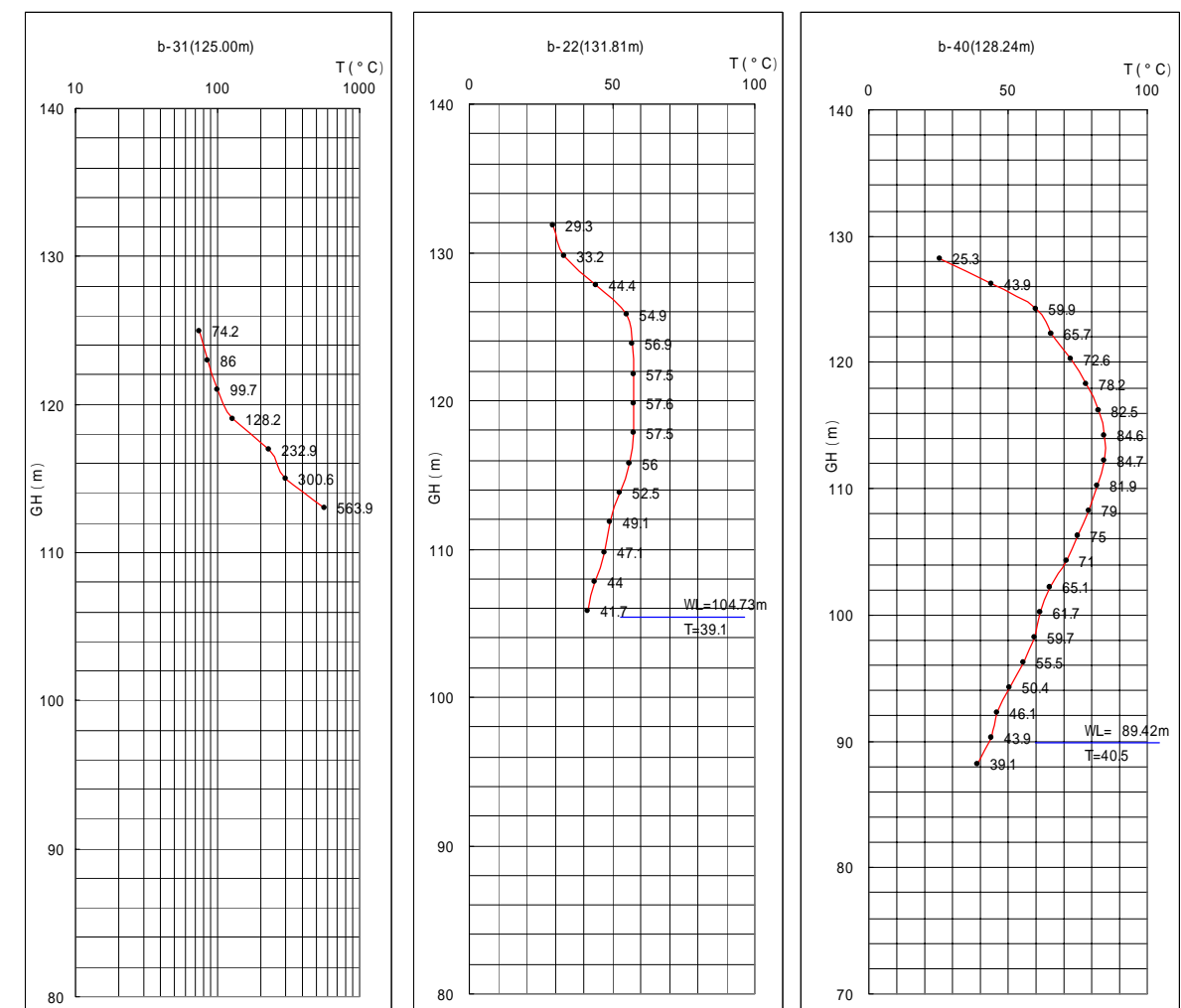


図 3-2-4 孔内温度調査結果の代表データ

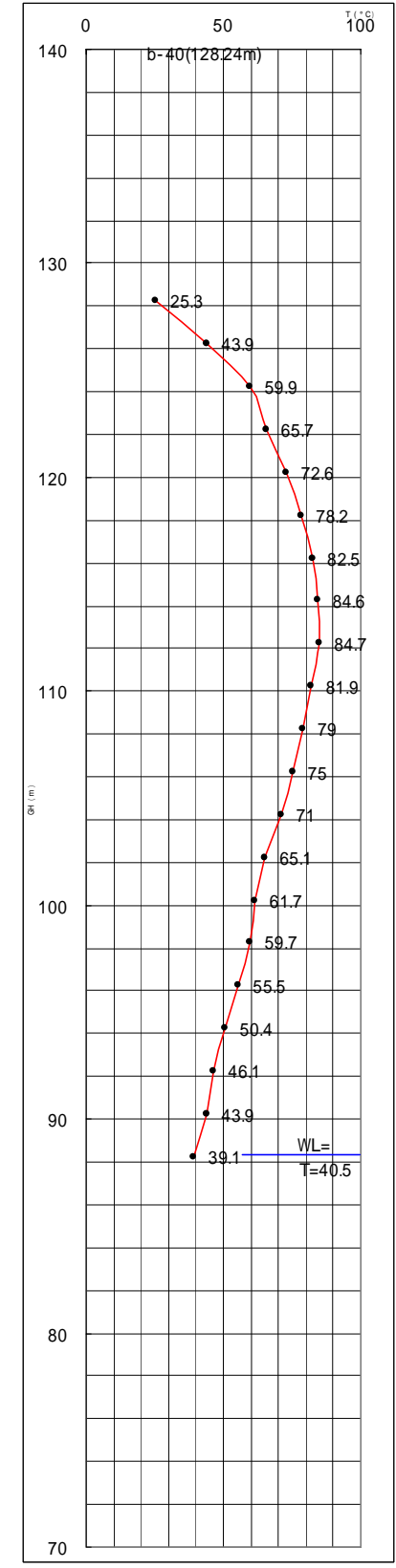
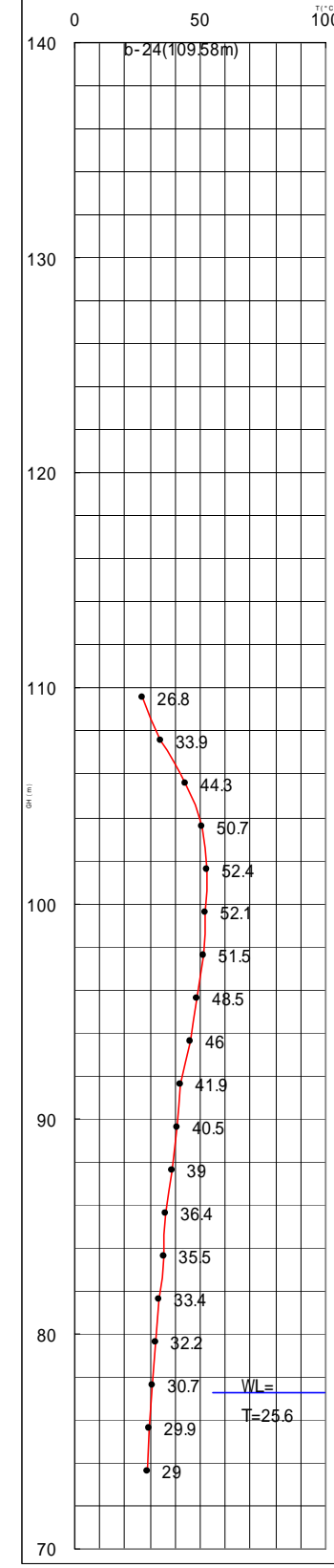
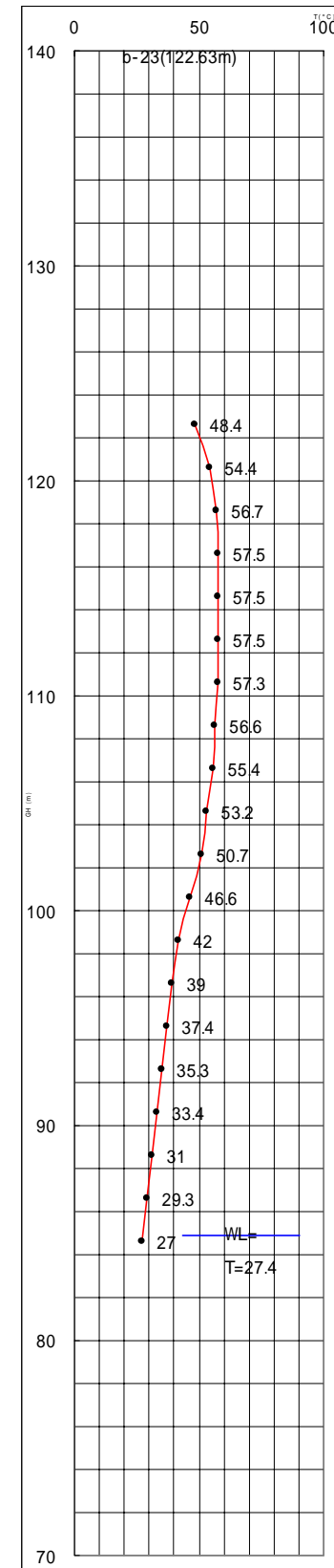
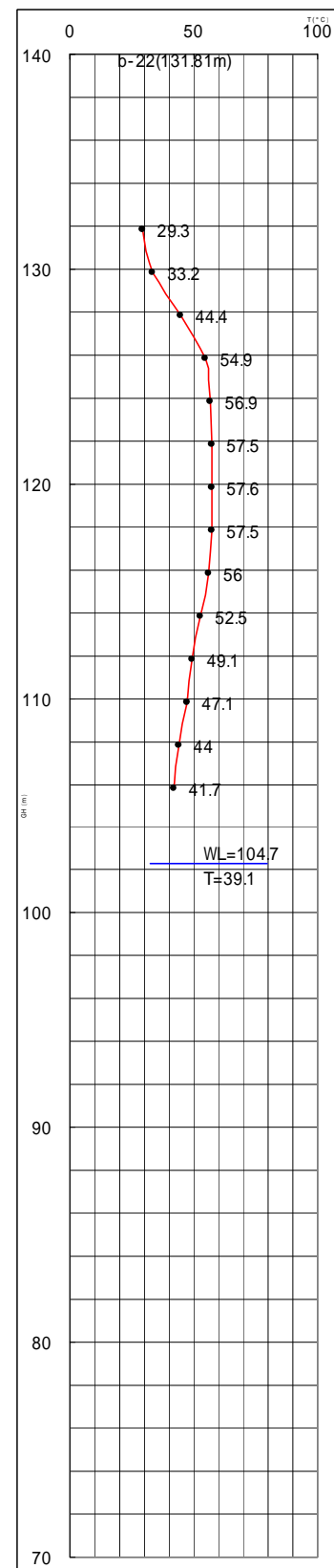
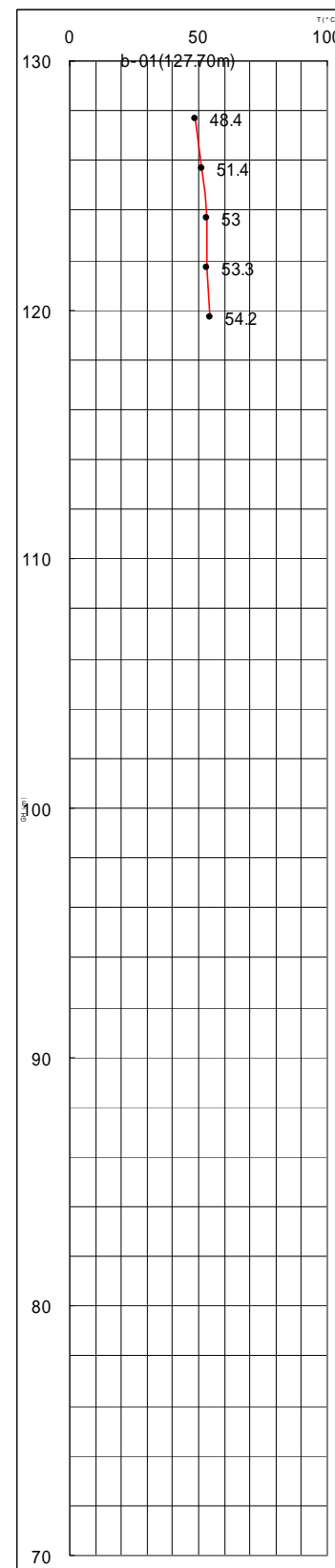
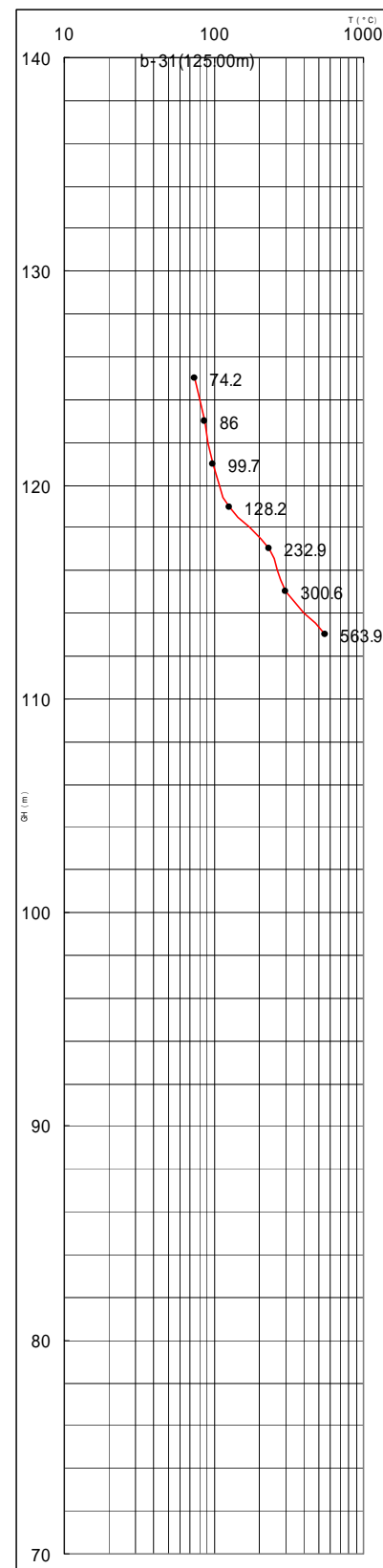


图 3-2-5 孔内温度调查结果

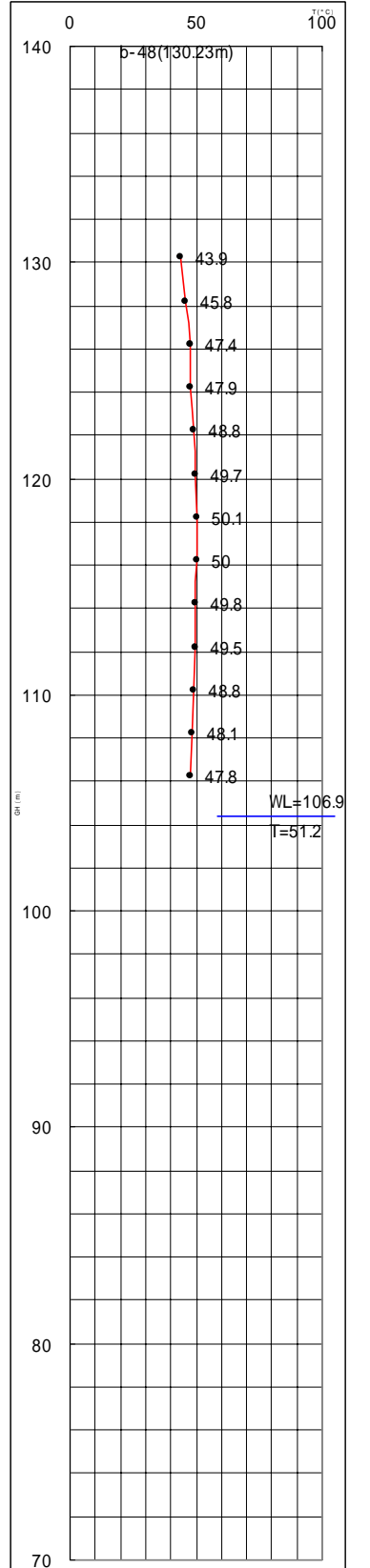
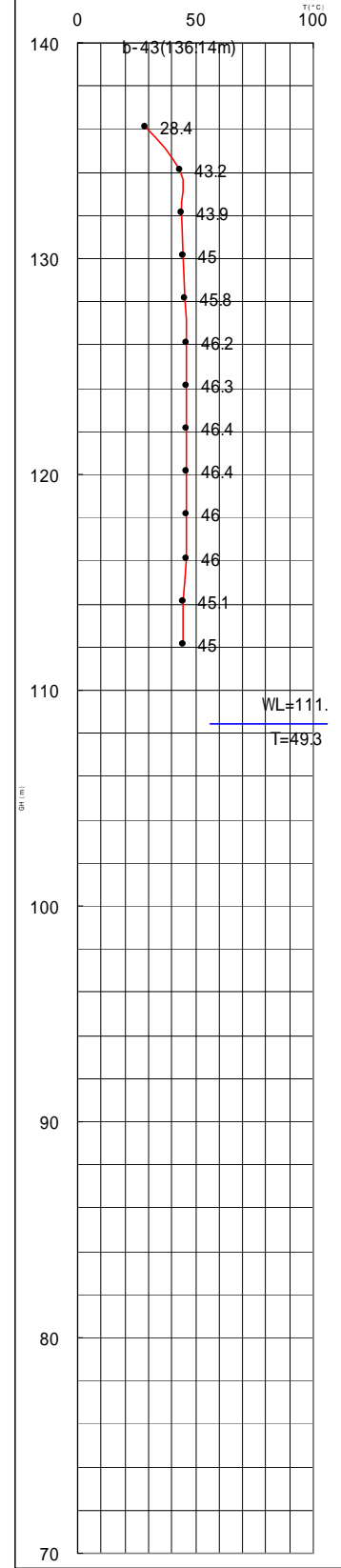
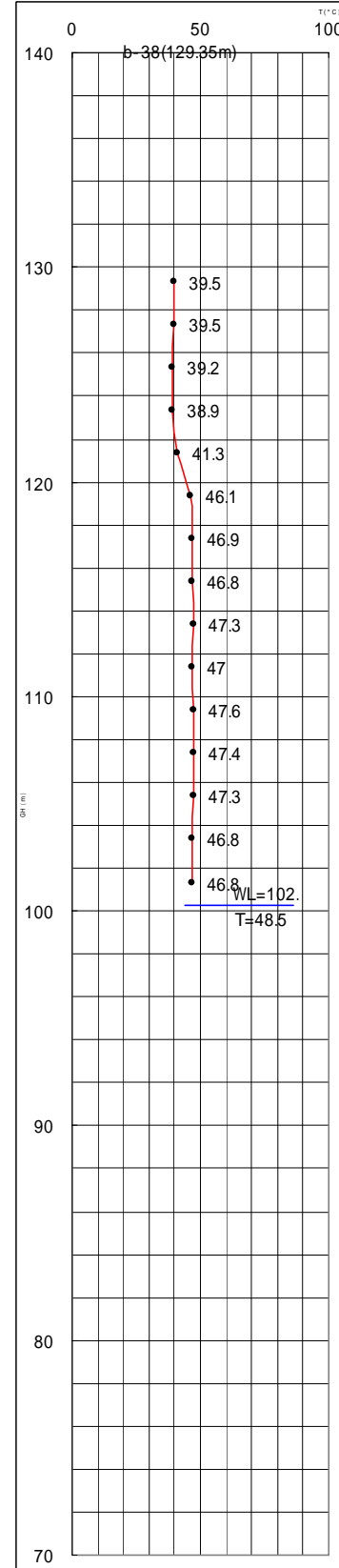
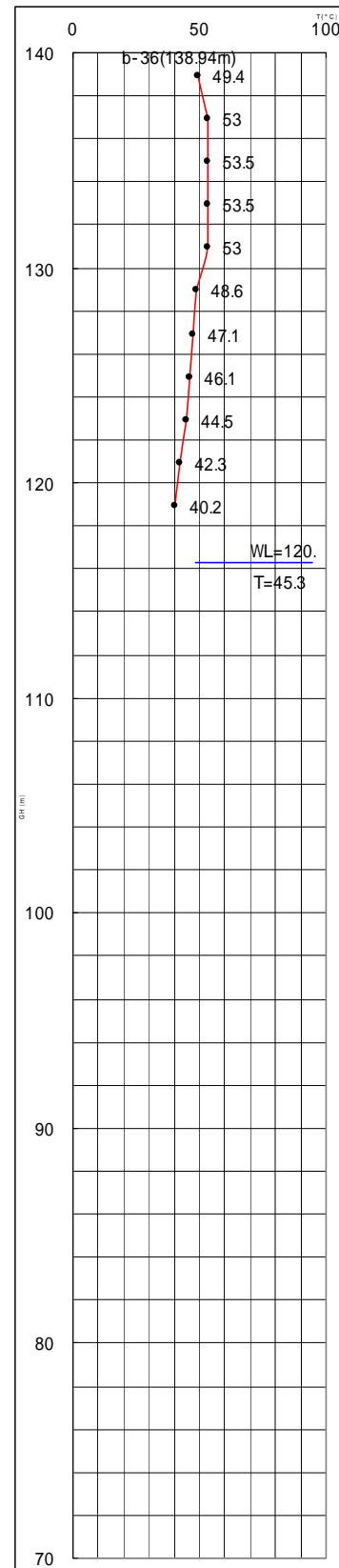
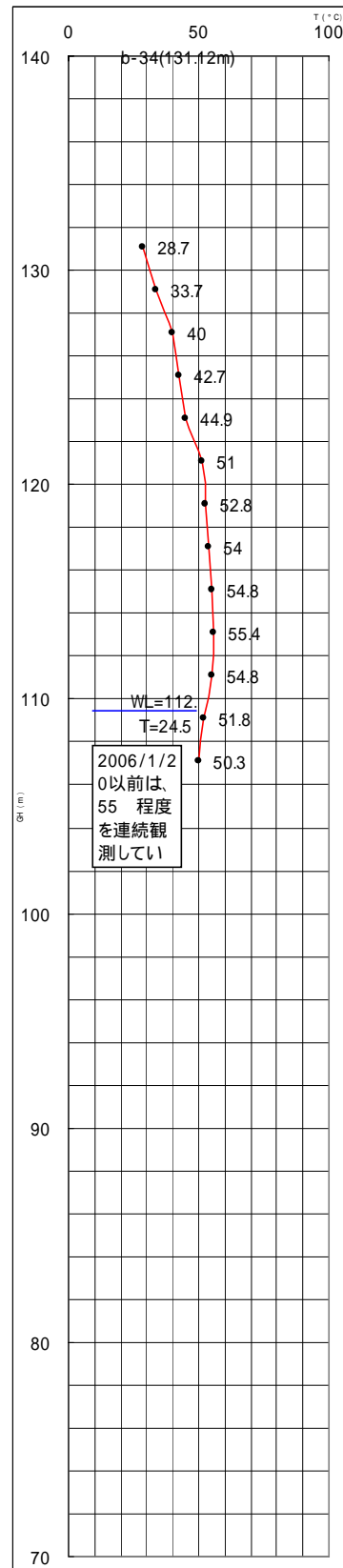
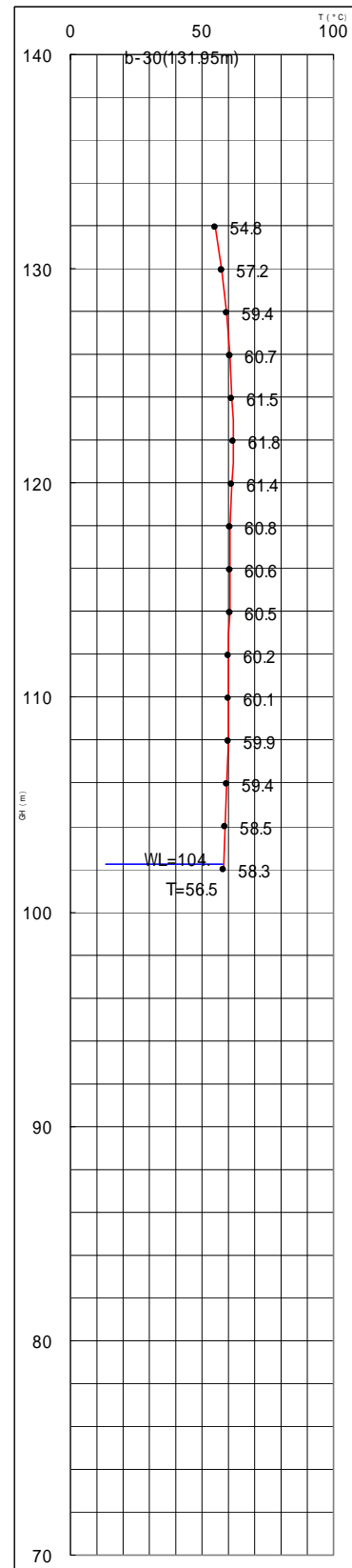
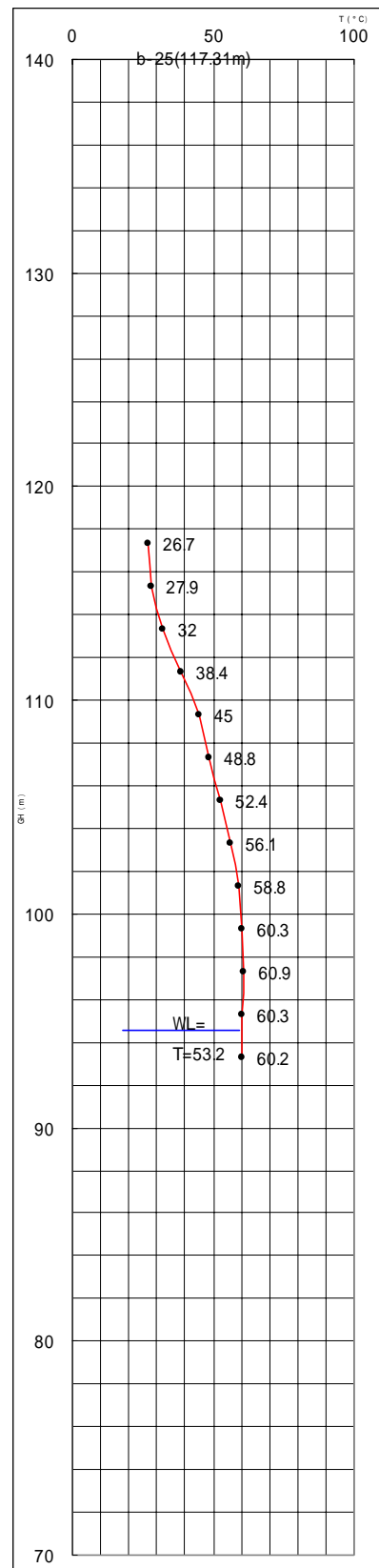


図 3-2-6 孔内温度調査結果

2-1-3 赤外線カメラによる地表面温度測定

赤外線カメラによる温度測定(サーモグラフィカメラ)は、図3-2-1に示す8箇所からの測定を実施した。温度測定は、日射や外気温・湿度の影響を排除するため冬季の早朝に実施した。しかし本年の暖冬影響をうけ、測定日程のうち1日は温暖状態での測定となった。温暖気温の影響排除は解析画像の温度表示帯域を調整し、高温部と低温部の差を可視的に求めた。図3-2-7に測定時の外気温を示す。

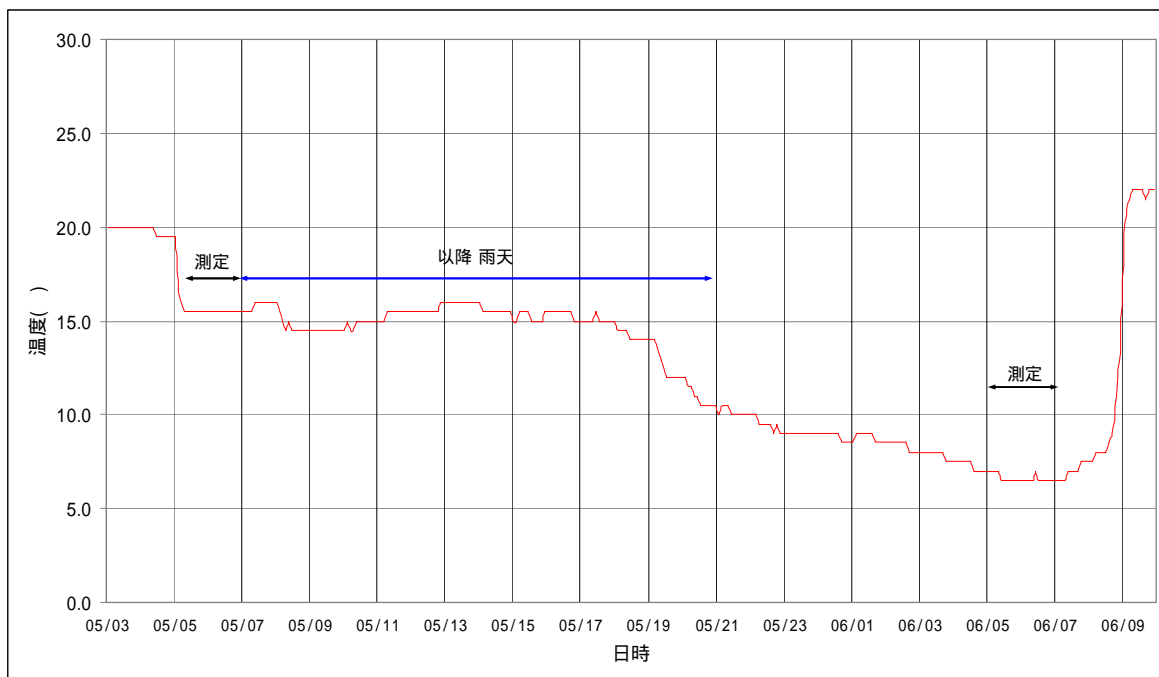


図 3-2-7 測定時の外気温

赤外画像については、観測時には判然としなかったが解析時に赤外画像を調整したところ、植生部の隙間から漏れる僅かな温度差等を捉えることができた。図3-2-8～17にサーモグラフィカメラによる温度測定結果を示す。以下に測定結果の要点を示す。

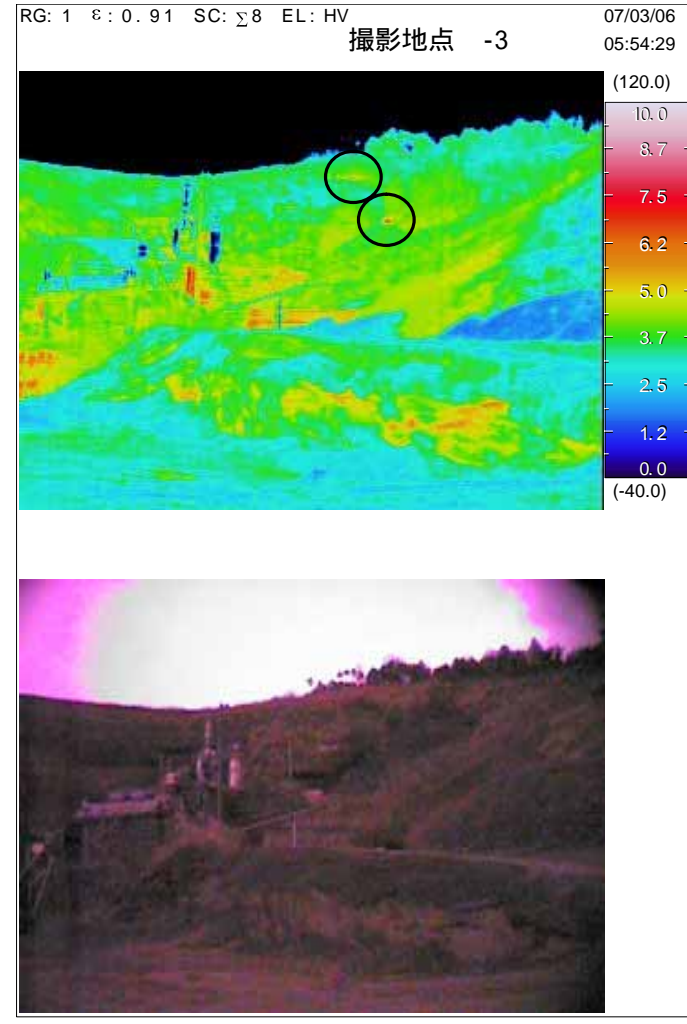
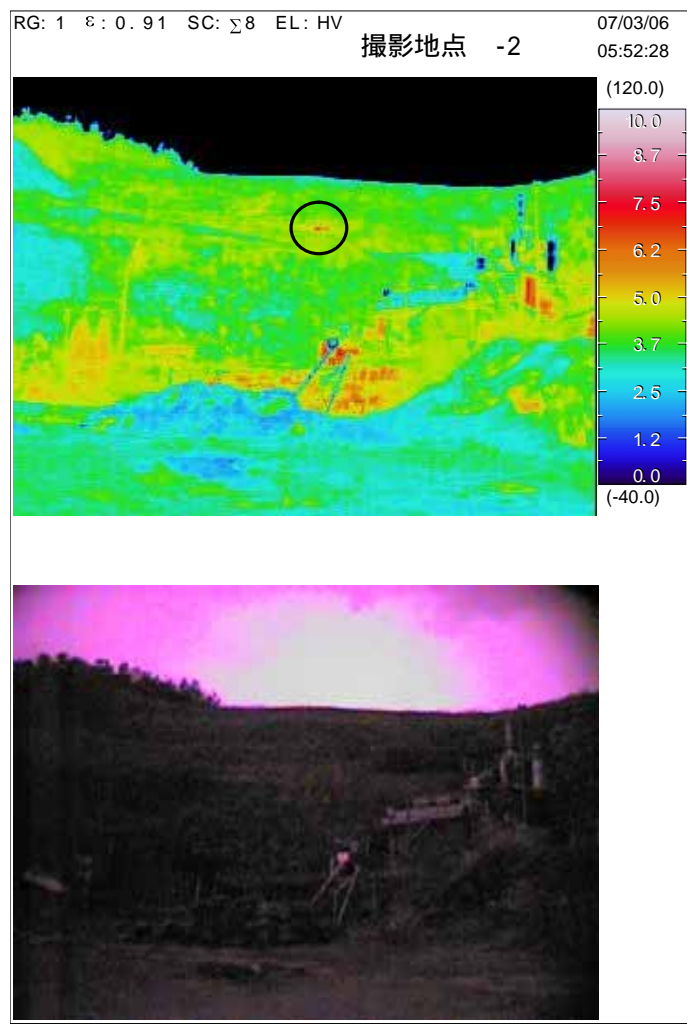
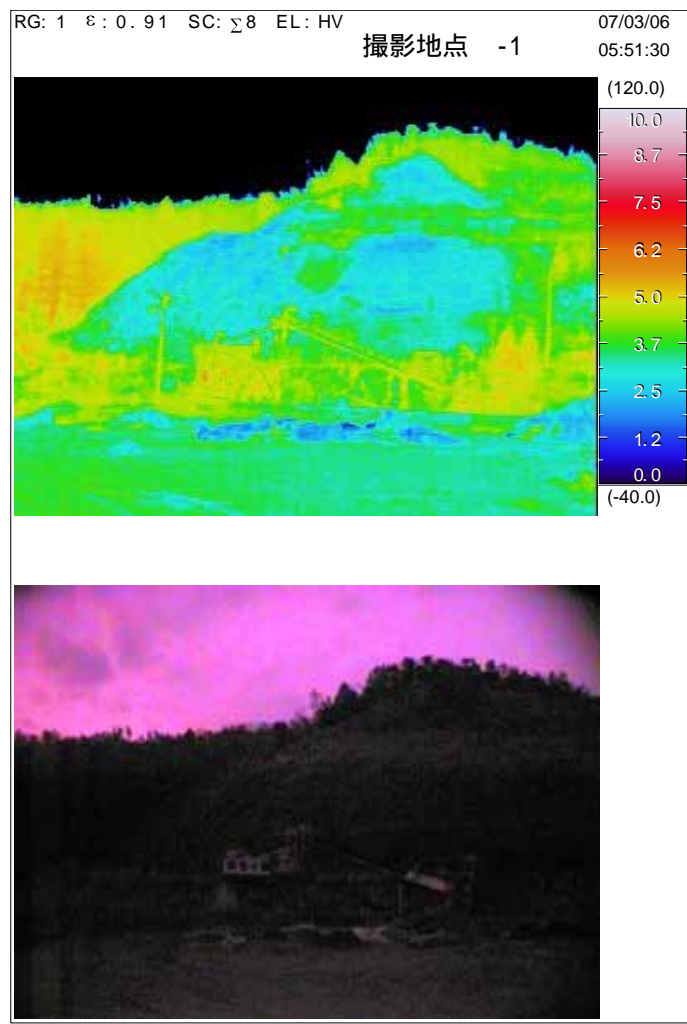
地点 ~ 晴:北側斜面の近景:周辺温度約 2.5～4.0 に約 6～7 が点在。

地点 ~ 曇～雨:西側から頂部全景:周辺温度約 10 中に約 14 超の分布あり。

撮影 晴:頂部北側:周辺温度約 2.5 に 3 を超える箇所が分布する。

撮影 ~ 晴:b-31 付近:周辺温度約 3 に 4.5 を超える箇所が分布する。

なお撮影地点 ~ については、場内通路の端に掘削された排水路状の溝と法尻に高温部が連続している。この原因として、前日の降雨が有機物主体層を通過して温められ溝の部分を流下したケースも想定されるが、別途実施した浅層温度測定でも周囲より高い温度が確認されており、深部からの熱移動による放熱が生じていると考えられる。



撮影地点
 測定日: 2007/03/06 外気温6.5() 再測定
 岩盤と廃棄物に1程度、また植生の多い部分にコントラストが見られる。
 写真 -2の中央上部、廃棄物表面に植生の多い部分に7を超える部分が見られる。
 7を超える部分は、廃棄物の露出箇所付近である。
 写真 -3の中央やや右上部、廃棄物と岩盤の境界付近植生の多い部分に7を超える部分が見られる。

撮影地点
 測定日: 2007/03/06 外気温6.5() 再測定
 岩盤と廃棄物、また植生の多少による温度コントラストが見られる。
 写真 -2~4に7を超える部分が点在する。当該箇所は撮影地点 と同一箇所付近であり、植生の隙間を透過した赤外線を捕捉したものと考えられる。

図 3-2-8 撮影地点

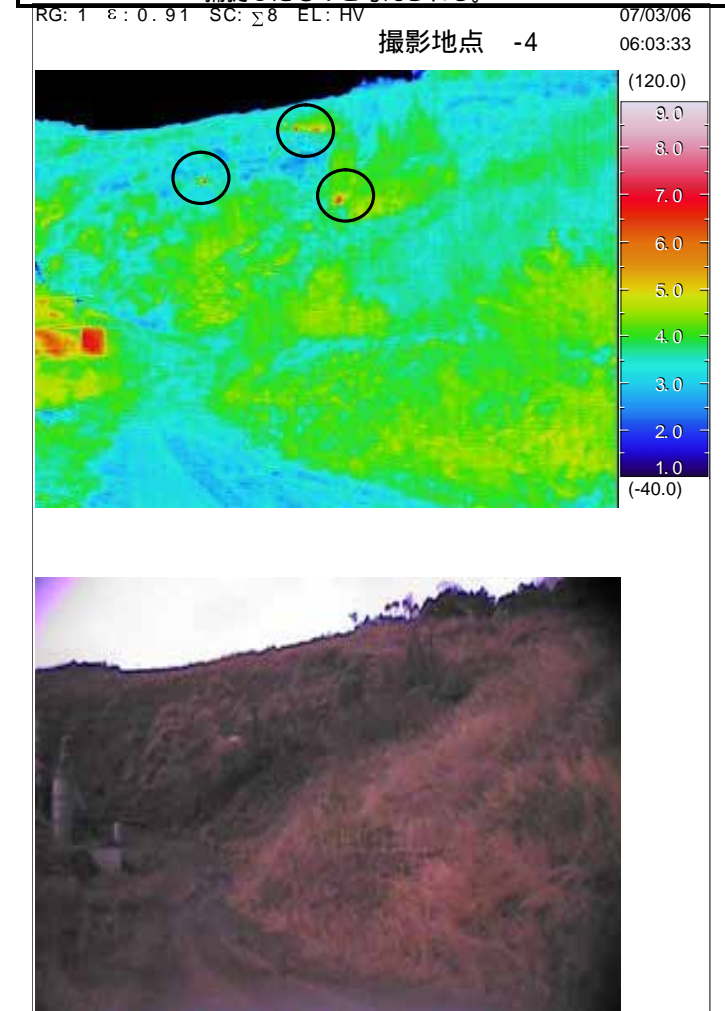
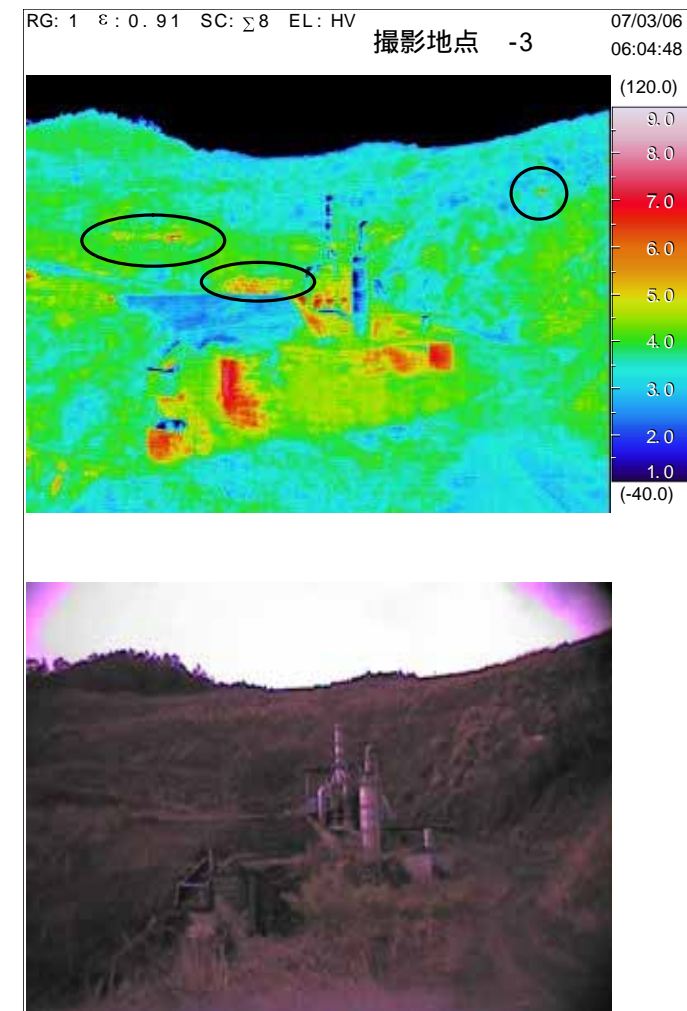
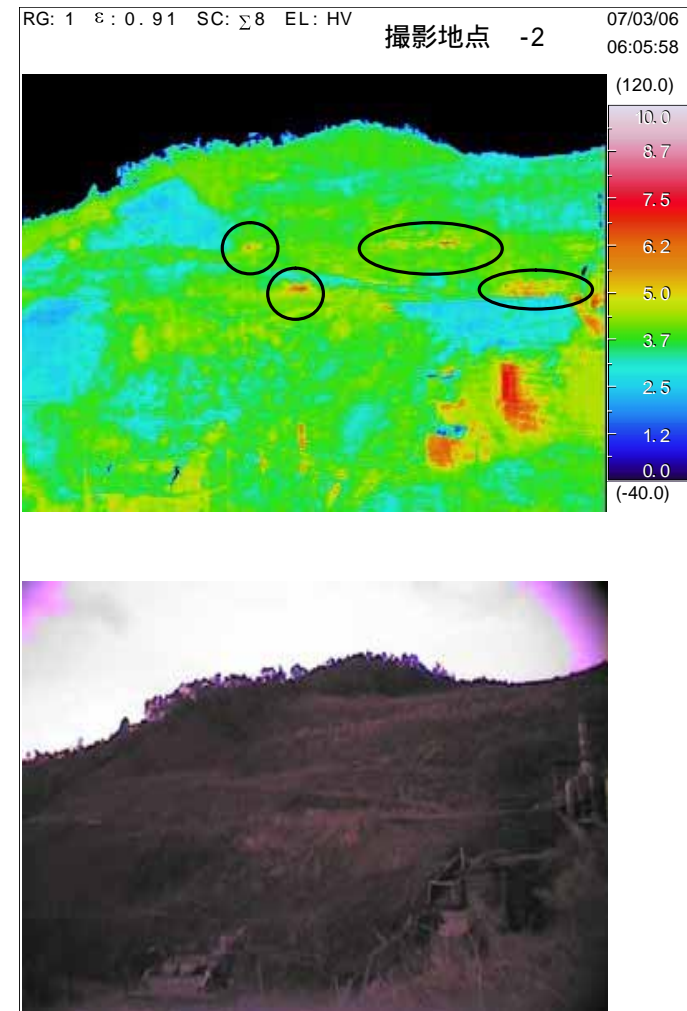
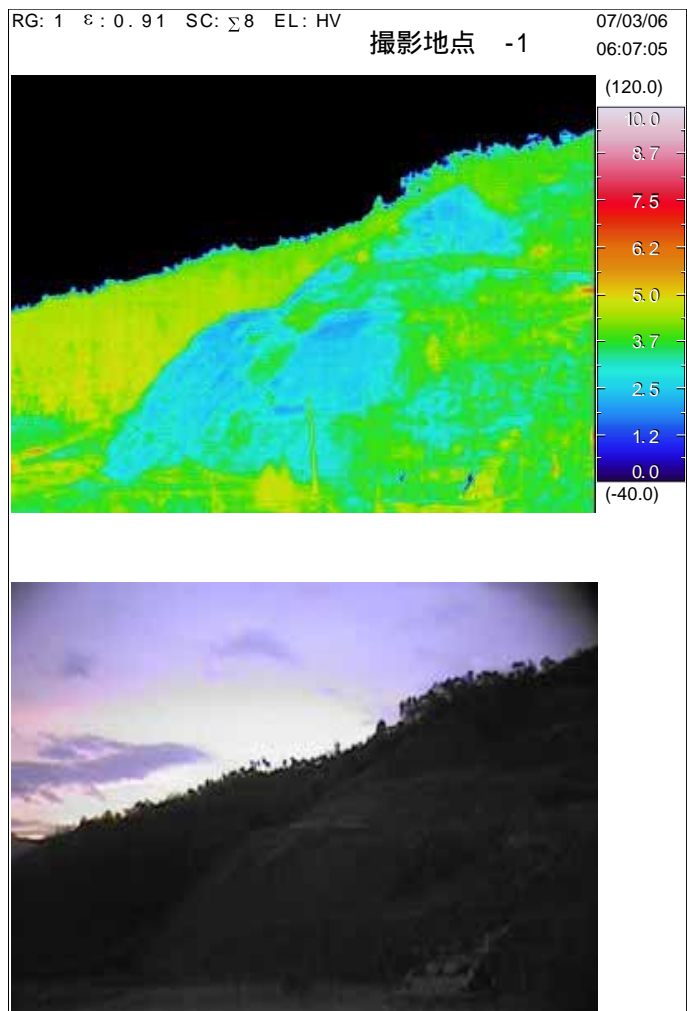
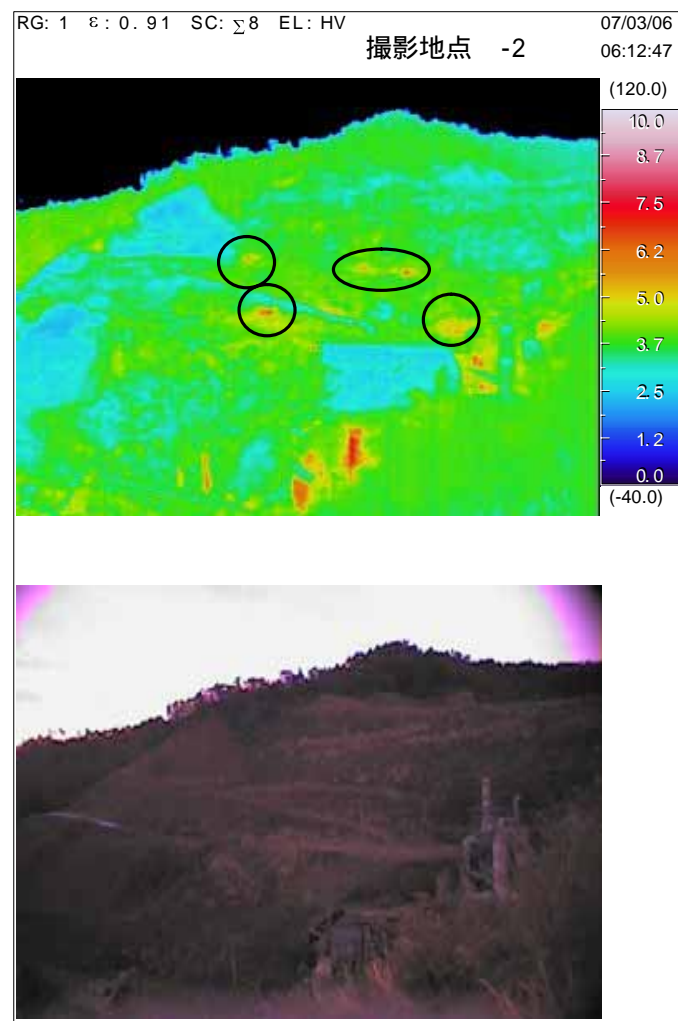
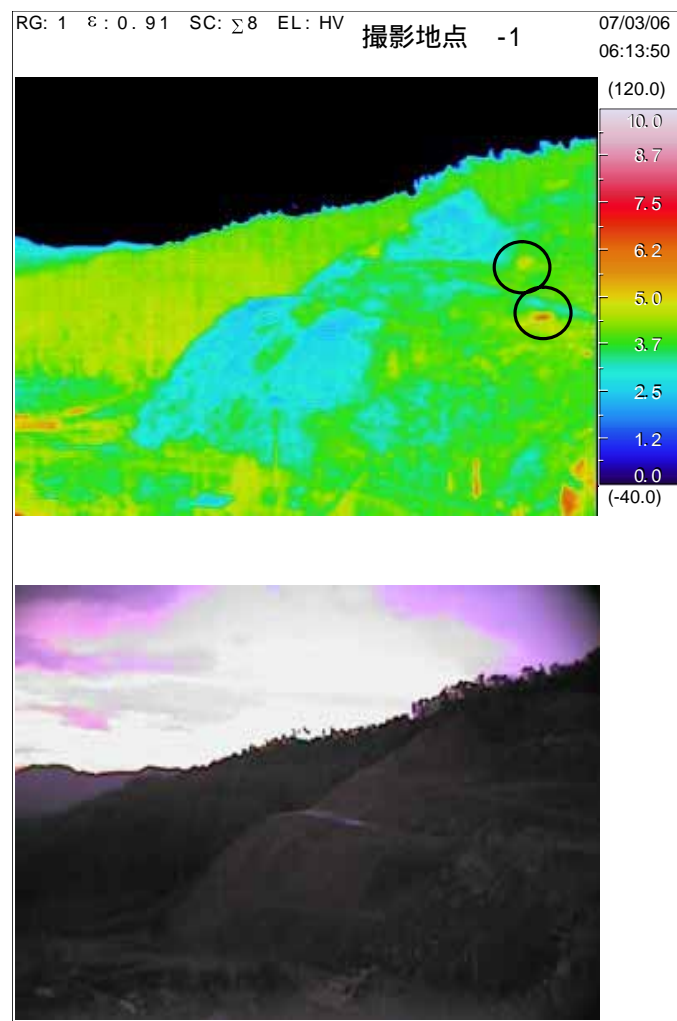


図 3-2-9 撮影地点



撮影地点
 測定日:2007/03/06 外気温6.5() 再測定
 廃棄物と土砂また植生の多少による温度コントラストが見られる。
 写真 -2に7 を超える部分が点在する。当該位置は撮影地点 と同一箇所付近である。
 7 を超える部分は、写真 においても確認されている露出があり、植生の隙間を透過した赤外線を捕捉したものと考えられる。

撮影地点
 測定日:2007/03/05 外気温15.5()
 廃棄物と土砂また植生の多少による温度コントラストが見られる。
 写真 -2~3に15 を超える部分が点在し、有機物主体層の露出箇所と一致する。
 写真 -1~4に12 を超える部分が点在し、植生箇所と一致するが、赤線部は植生疎の状態であった。

図 3-2-10 撮影地点

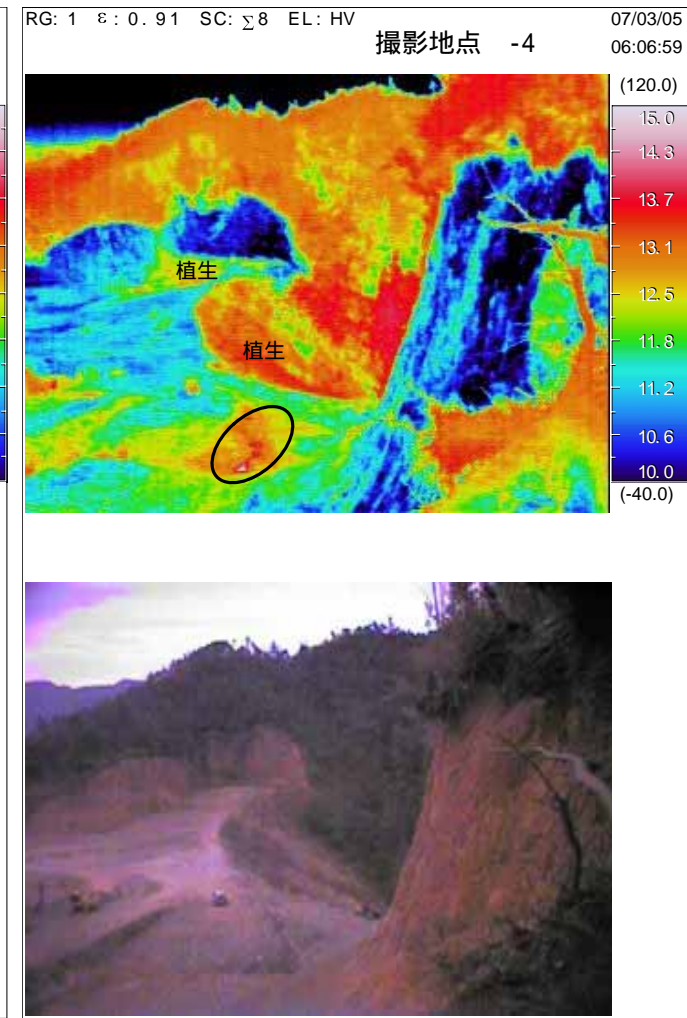
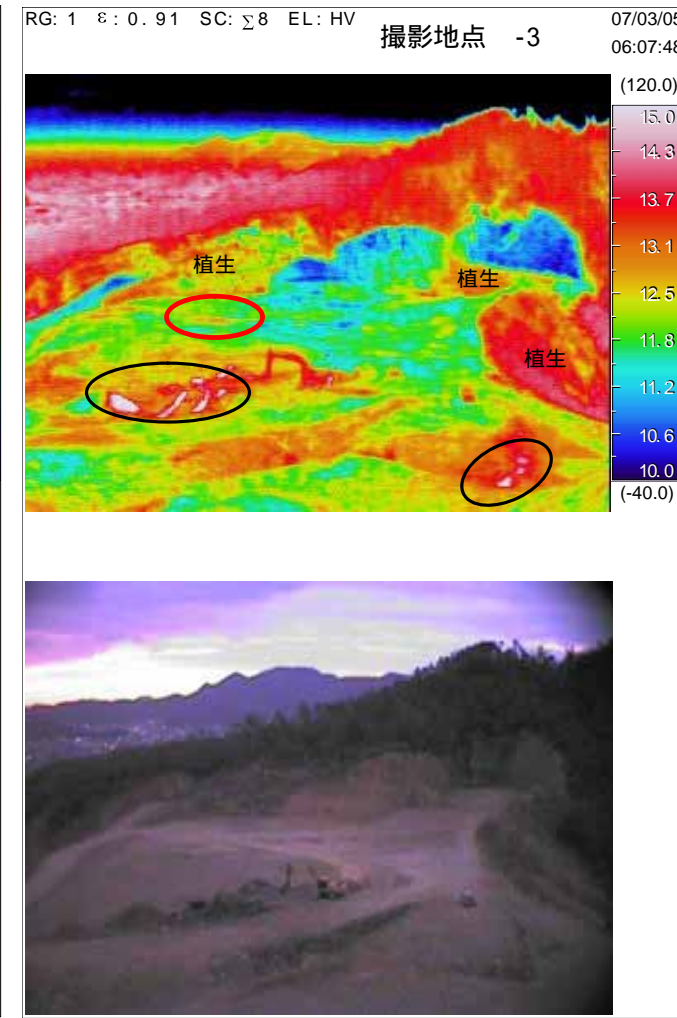
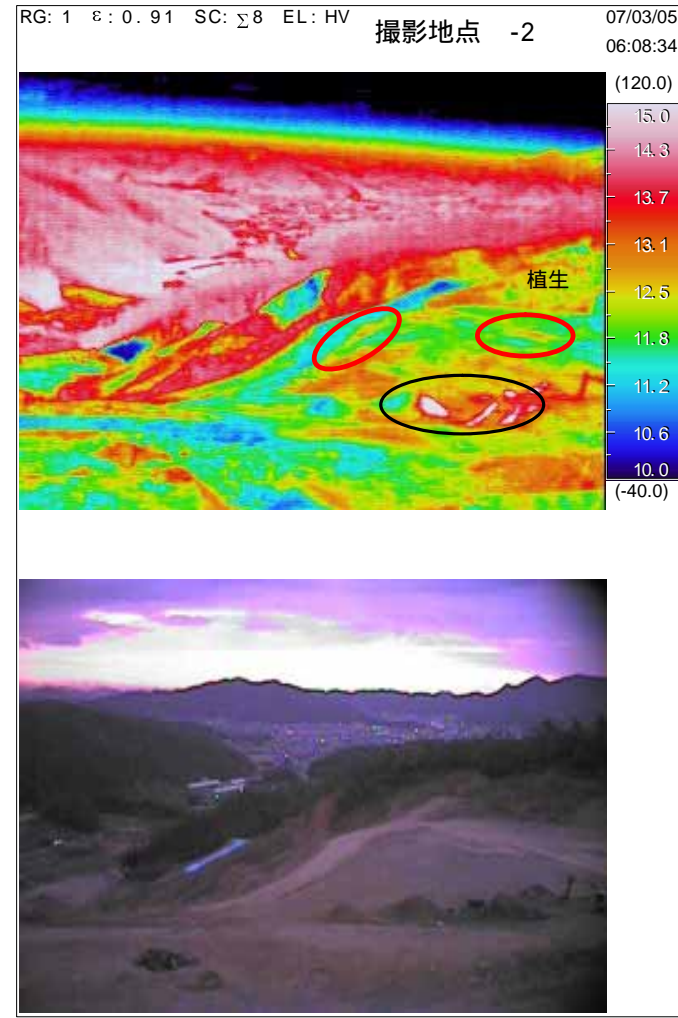
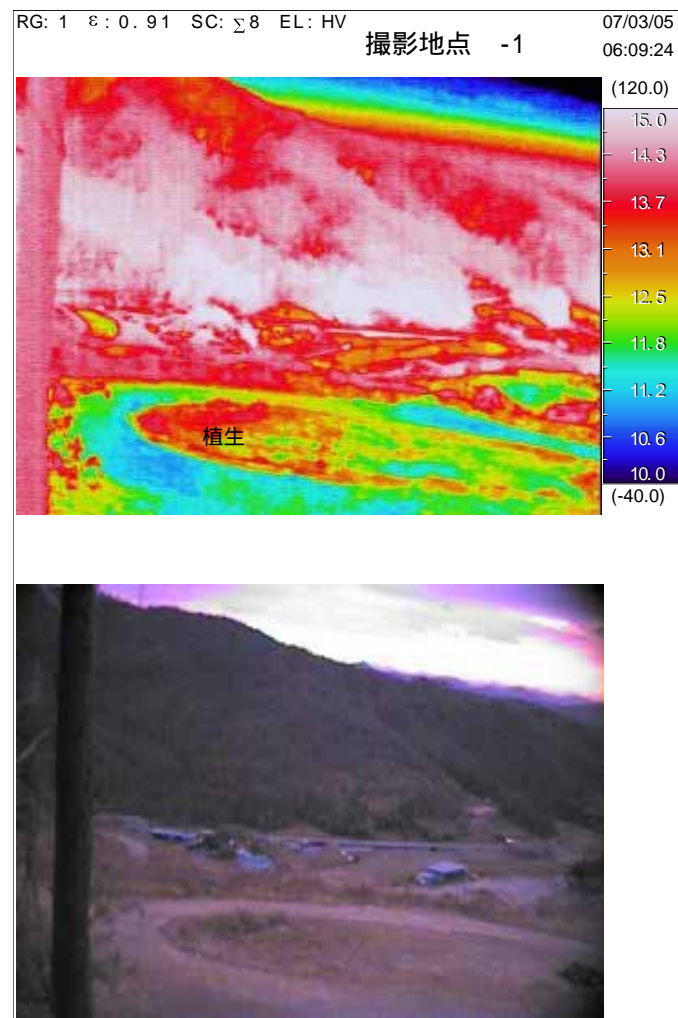
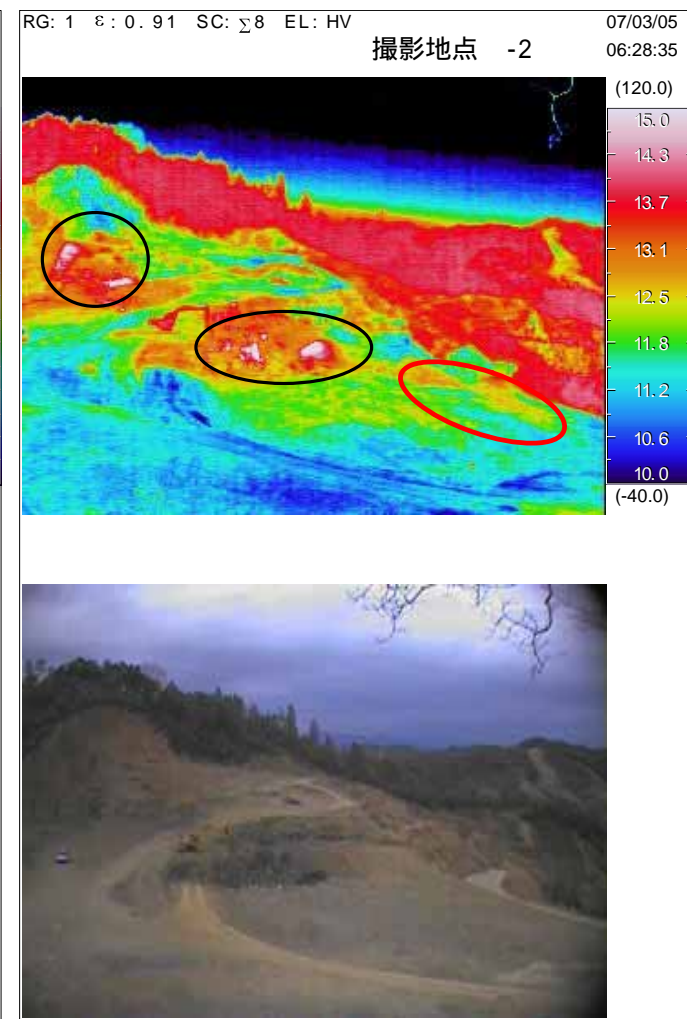
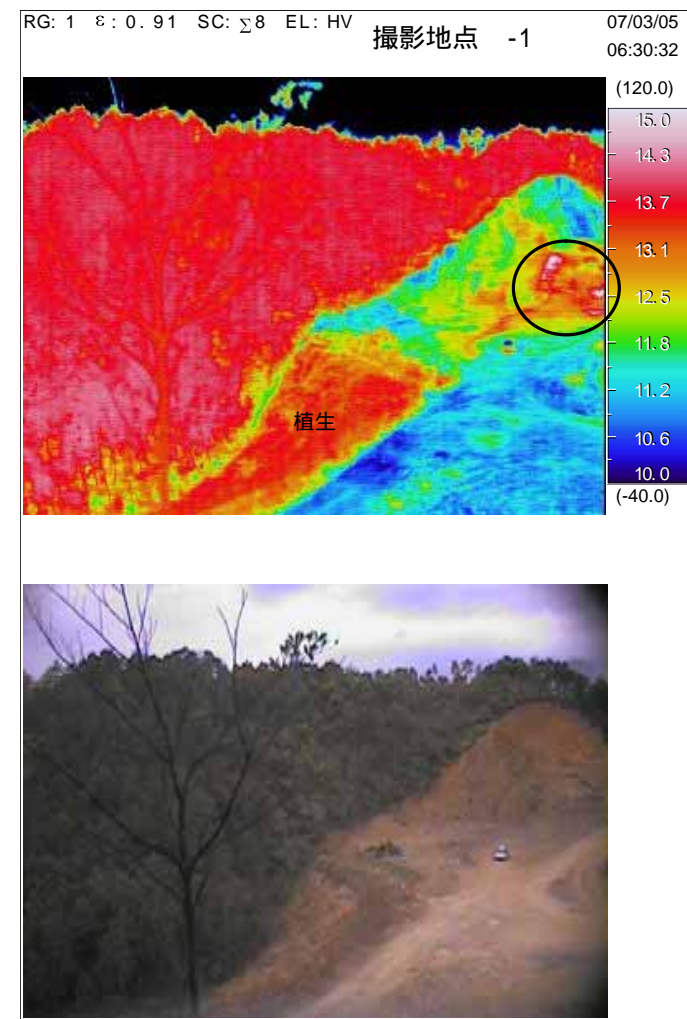


図 3-2-11 撮影地点



測定日: 2007/03/05 外気温15.5()
 廃棄物と土砂また植生の多少による温度コントラストが見られる。
 撮影地点 写真 -1~2, 4~6に15 を超える部分が点在し、有機物主体層の露出箇所と一致する。
 写真 -2, 4~5の赤線部分は、12 を超える部分かつ植生疎の状態であった。

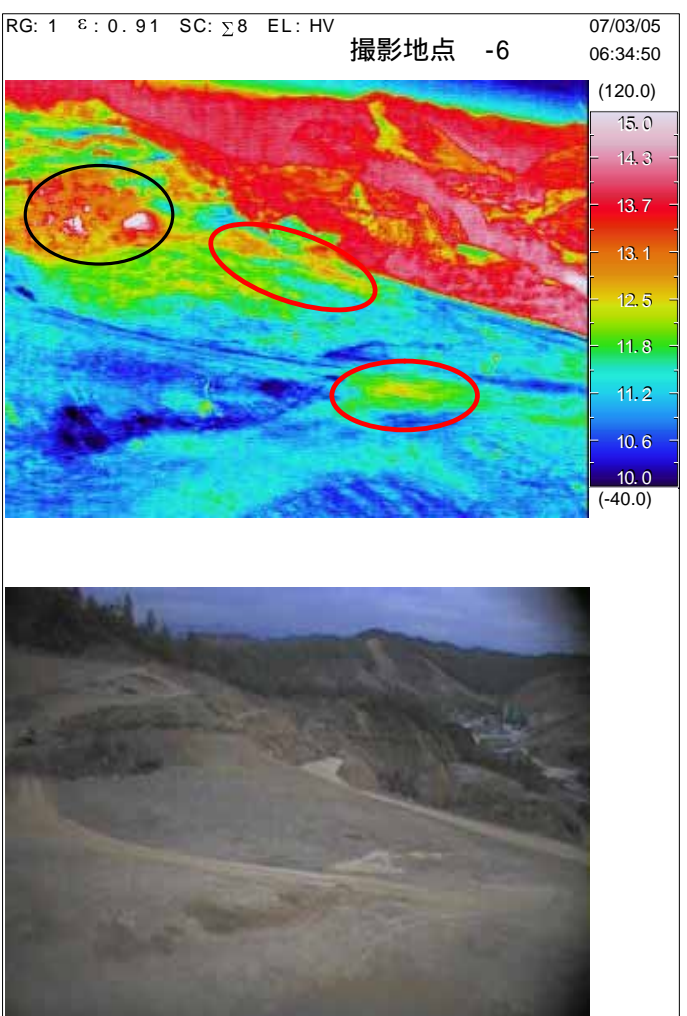
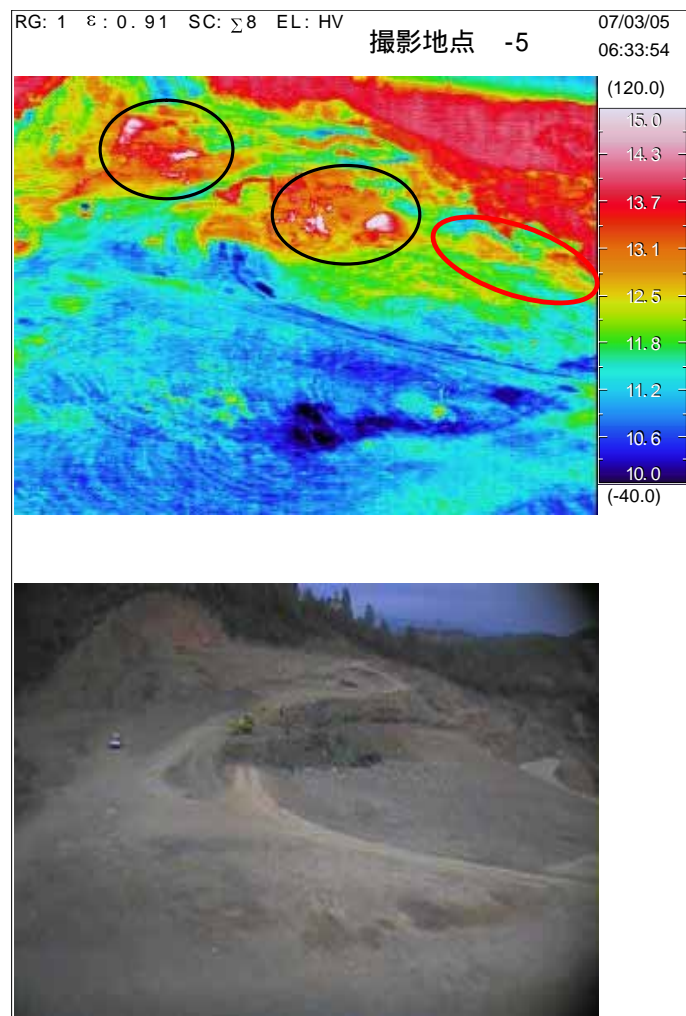
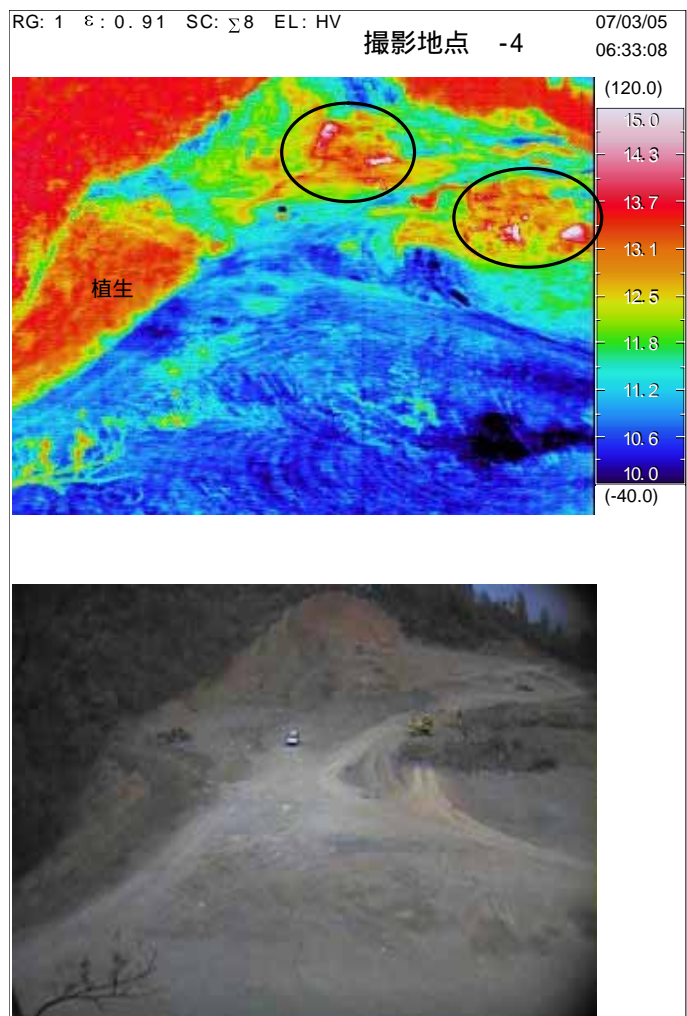
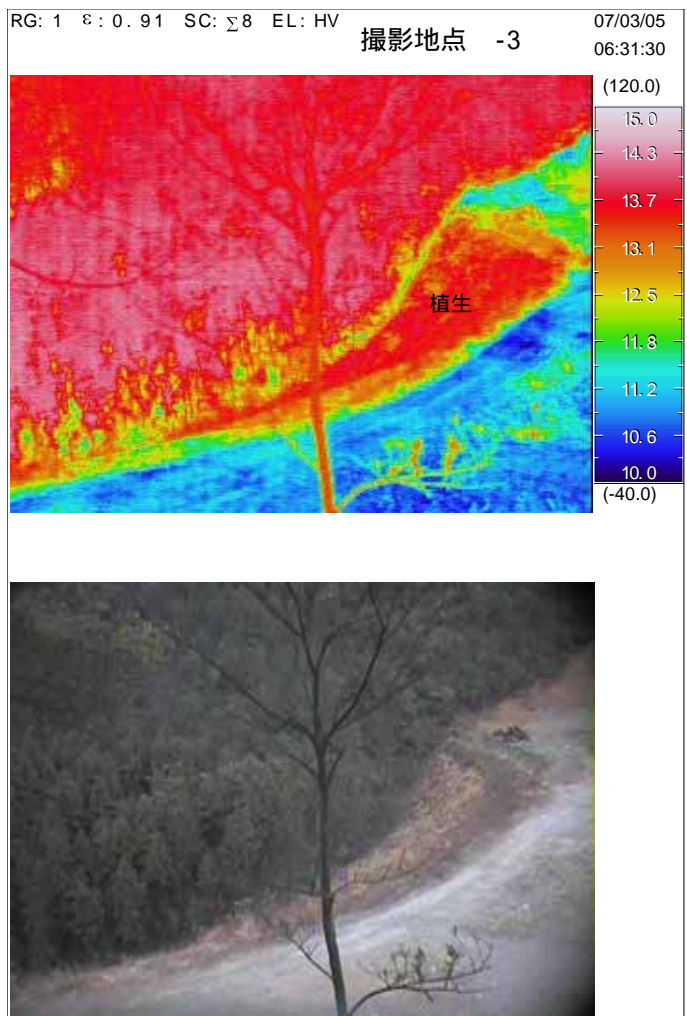
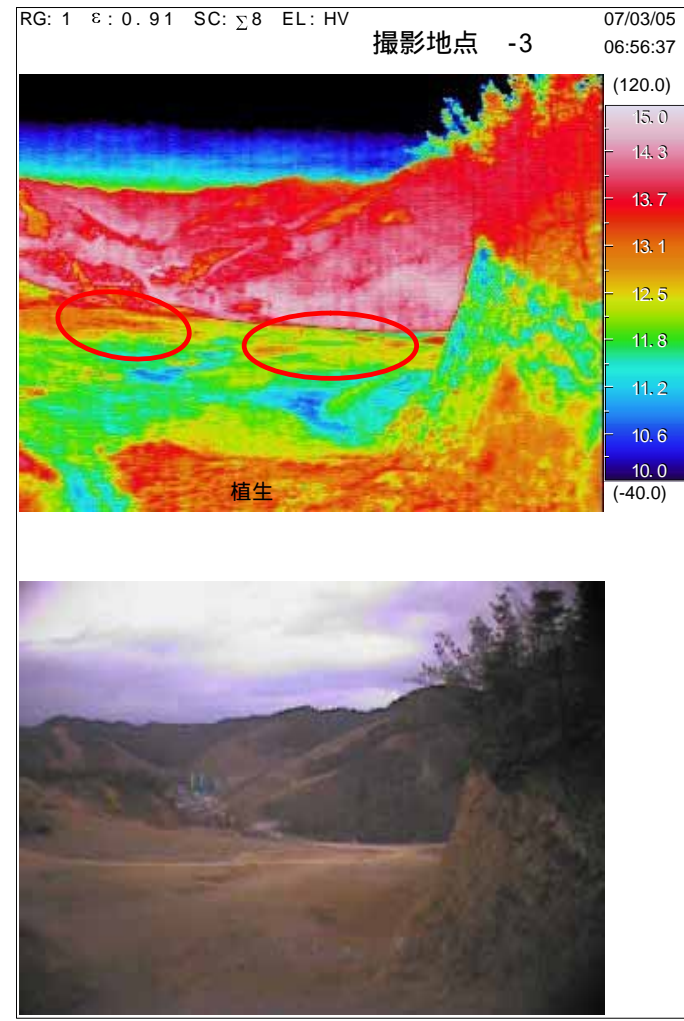
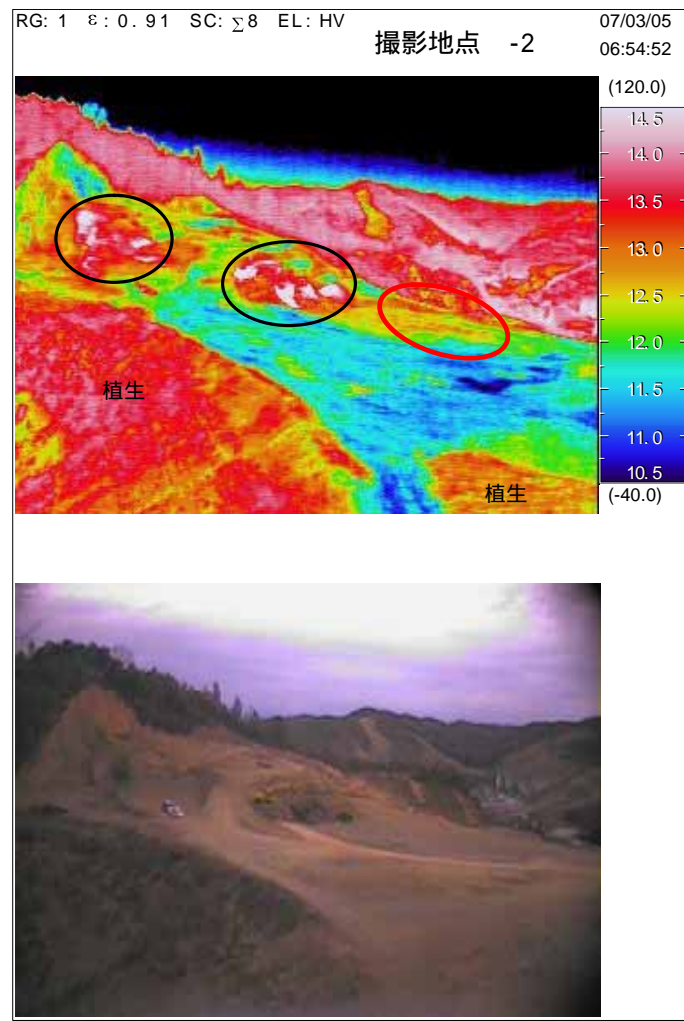
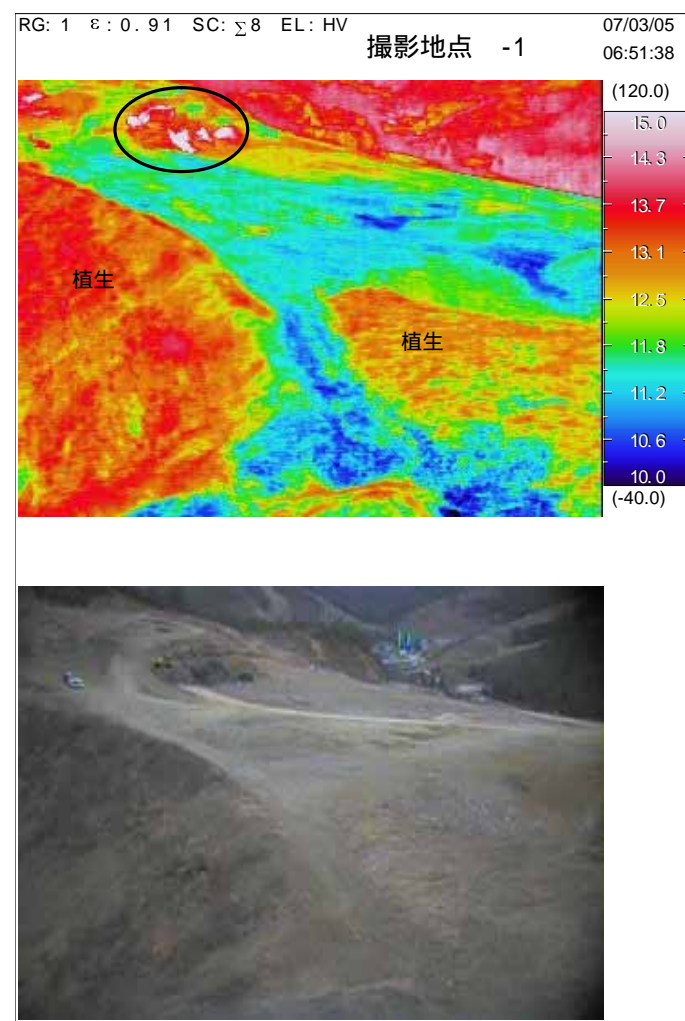


図 3-2-12 撮影地点



撮影地点

測定日:2007/03/05 外気温15.5()
 廃棄物と土砂また植生の多少による温度コントラストが見られる。
 写真 -1~3に15 を超える部分が点在し、有機物主体層の露出箇所と一致する。
 写真 -2~3の赤線部分は、12 を超える部分かつ植生疎の状態であった。

図 3-2-13 撮影地点

撮影地点

測定日:2007/03/06 外気温6.5() 再測定
 岩盤と廃棄物と土砂また植生の多少による温度コントラストが見られる。
 写真 -1~4に4 を超える部分が点在し、岩盤への日射が反射した影響と考えられる。
 写真 -2~3の4 を超える部分のうち輻射以外の部分は、有機物主体層の露出箇所と一致する。
 写真 -1~3の赤線部分は、3 を超える部分かつ植生疎の状態であった。

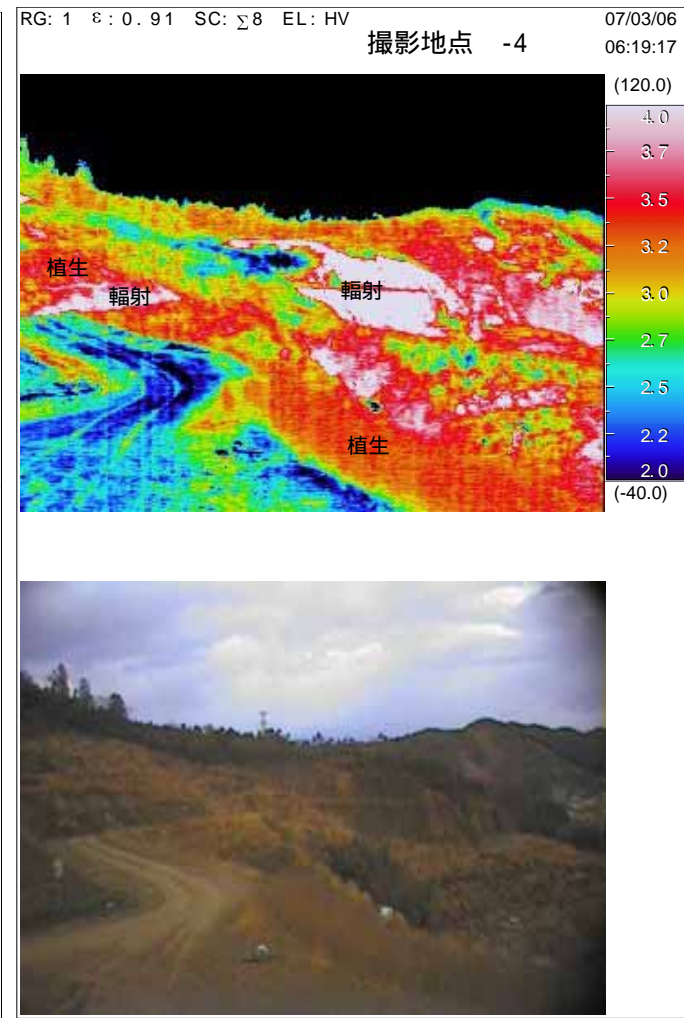
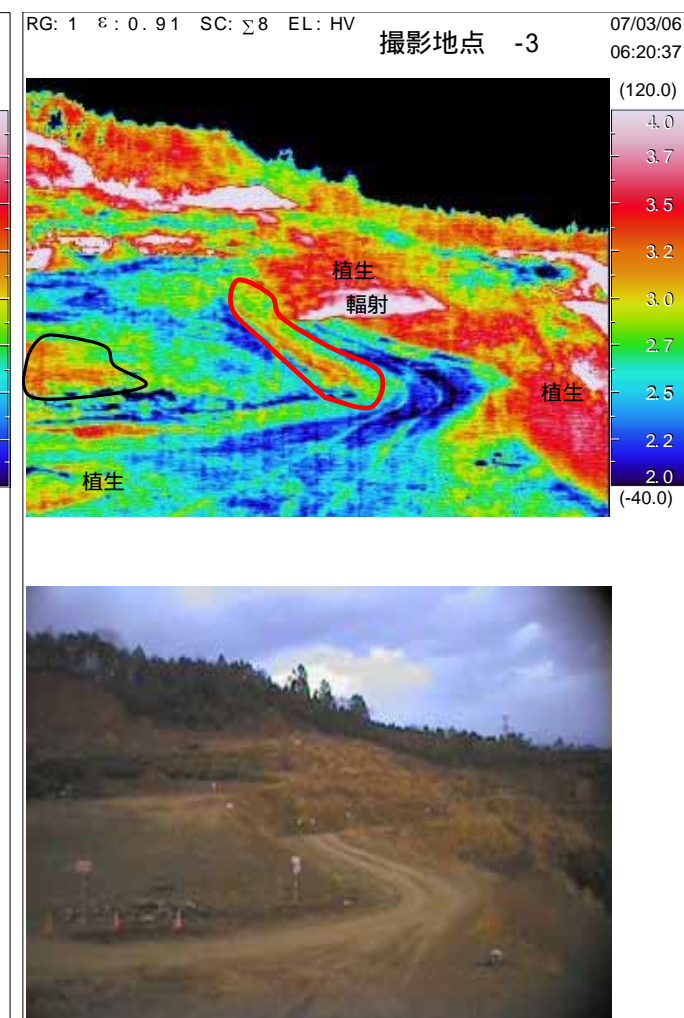
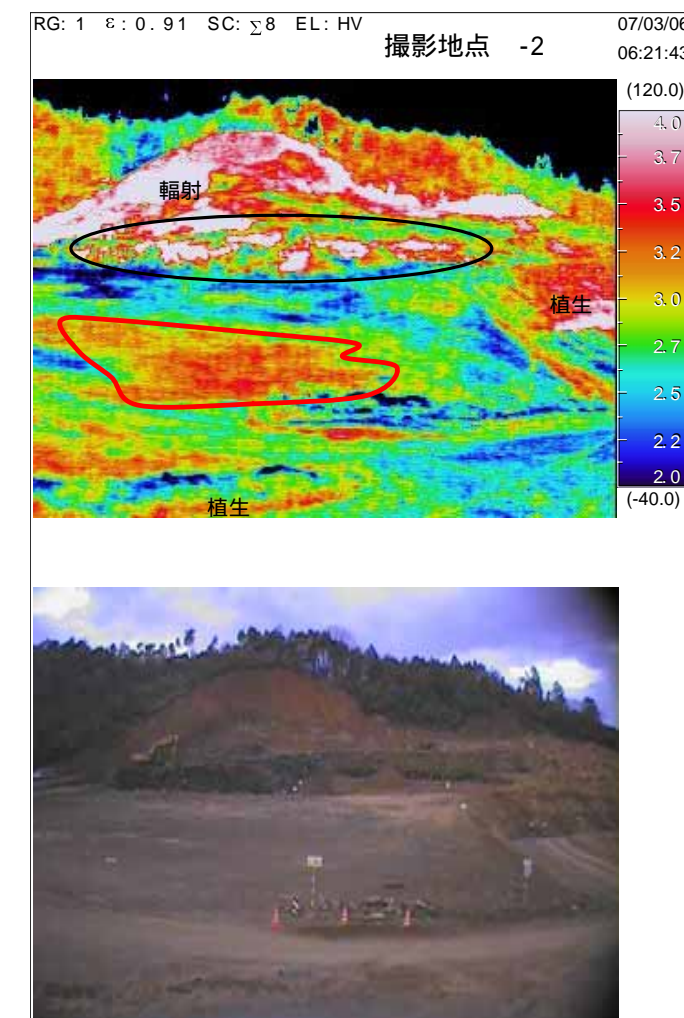
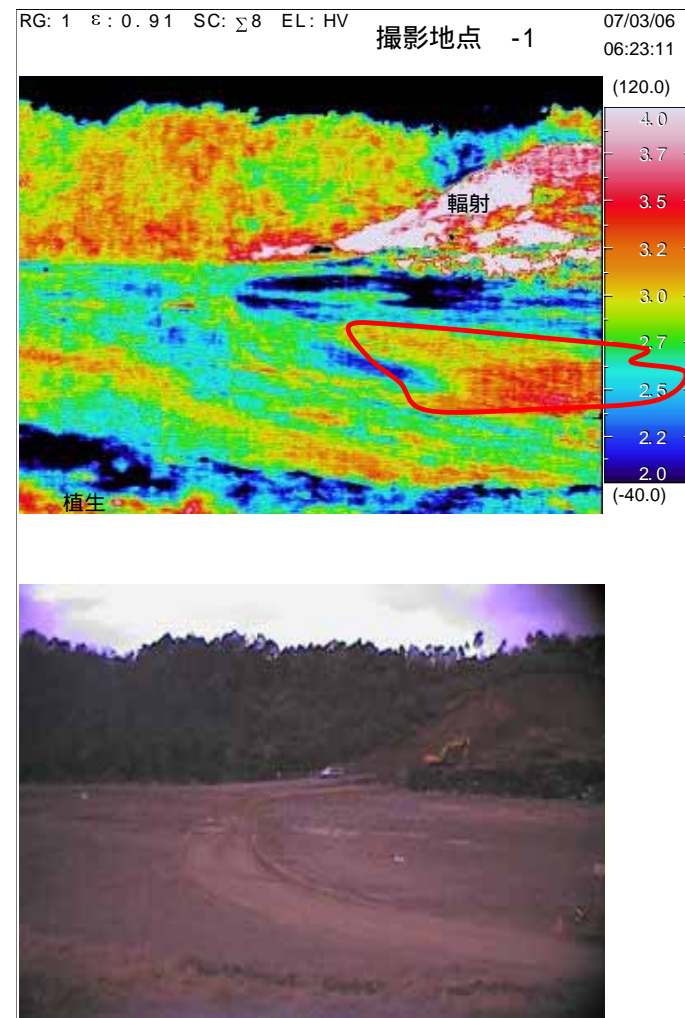


図 3-2-14 撮影地点

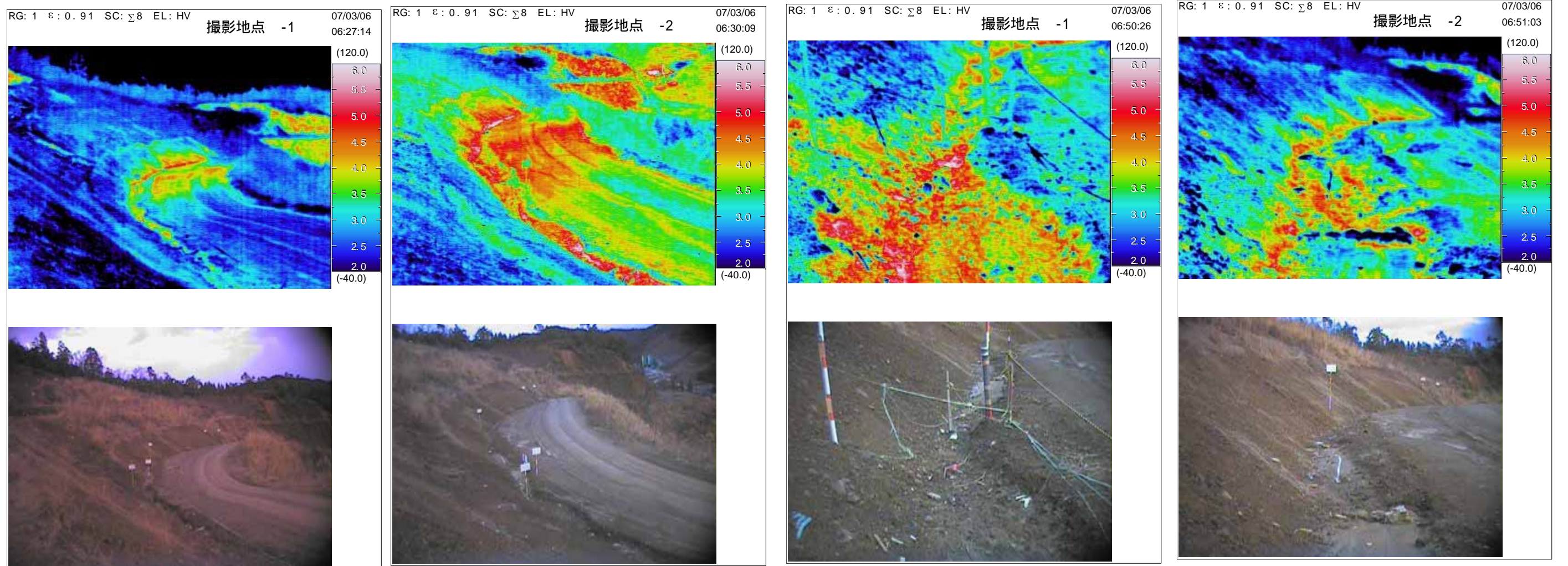


图 3-2-15 摄影地点

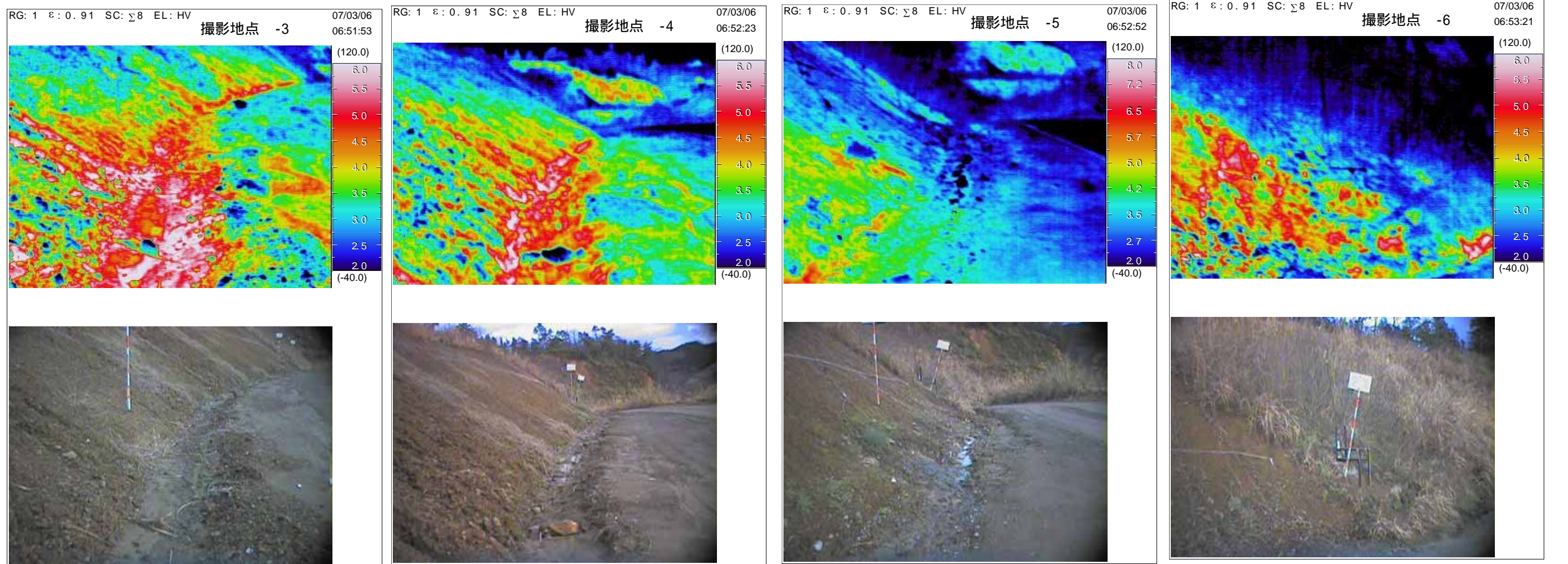


图 3-2-16 摄影地点

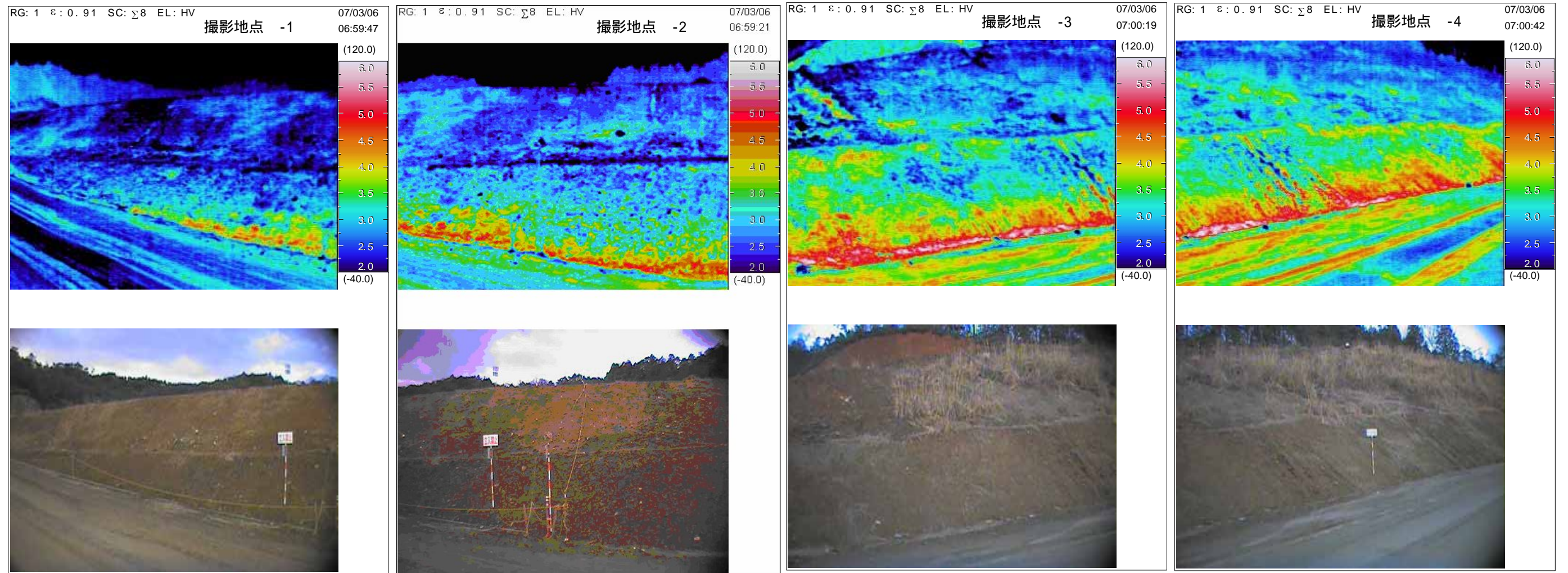
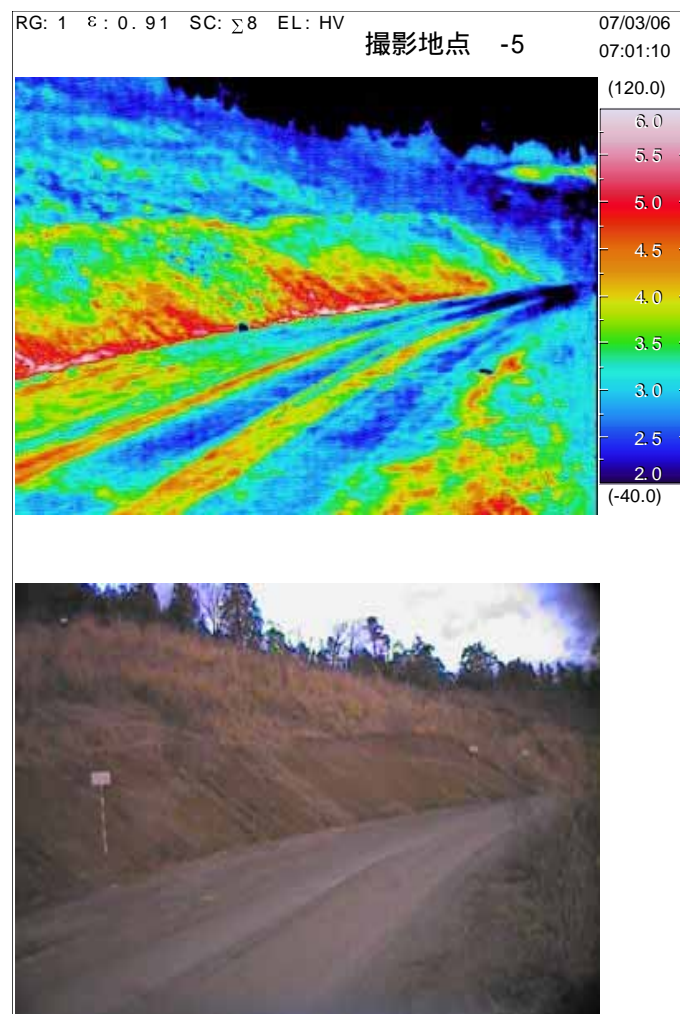


図 3-2-17 撮影地点



撮影地点 ~ 測定日: 2007/03/06 外気温6.5()
 ここで、植生が疎な高温部のうち、b-31ボーリング付近ののり面について詳細な温度観測を行った。
 測定結果は、最上段ののり尻付近に周辺部より高温部分を確認した。

低温部と高温部のコントラストは、外気温:15.5 時のとき 3~4 程度、外気温 6.5 時のとき 2~3 程度で、僅かであった。

低温部の表層状況は土砂や岩石が主体で、植生被覆はほとんどなかった。また高温部の表層状況は有機物主体または植生被覆が主体である傾向にあった。しかし外気温 6.5 時には放射冷却現象により植生部は外気温よりも低温(約 4)を示していた。

サーモグラフィカメラによる熱画像の一部で浅層温度測定結果とほぼ一致する箇所を検出している。それぞれの調査時期の時間的ズレがあっても、両調査の結果が一致する高温部は、恒常的に周辺部より温度が高い傾向にあるものと考えられる。

各地点の代表画像について温度分布を解析した。図 3-2-18~25 に解析結果を示す。

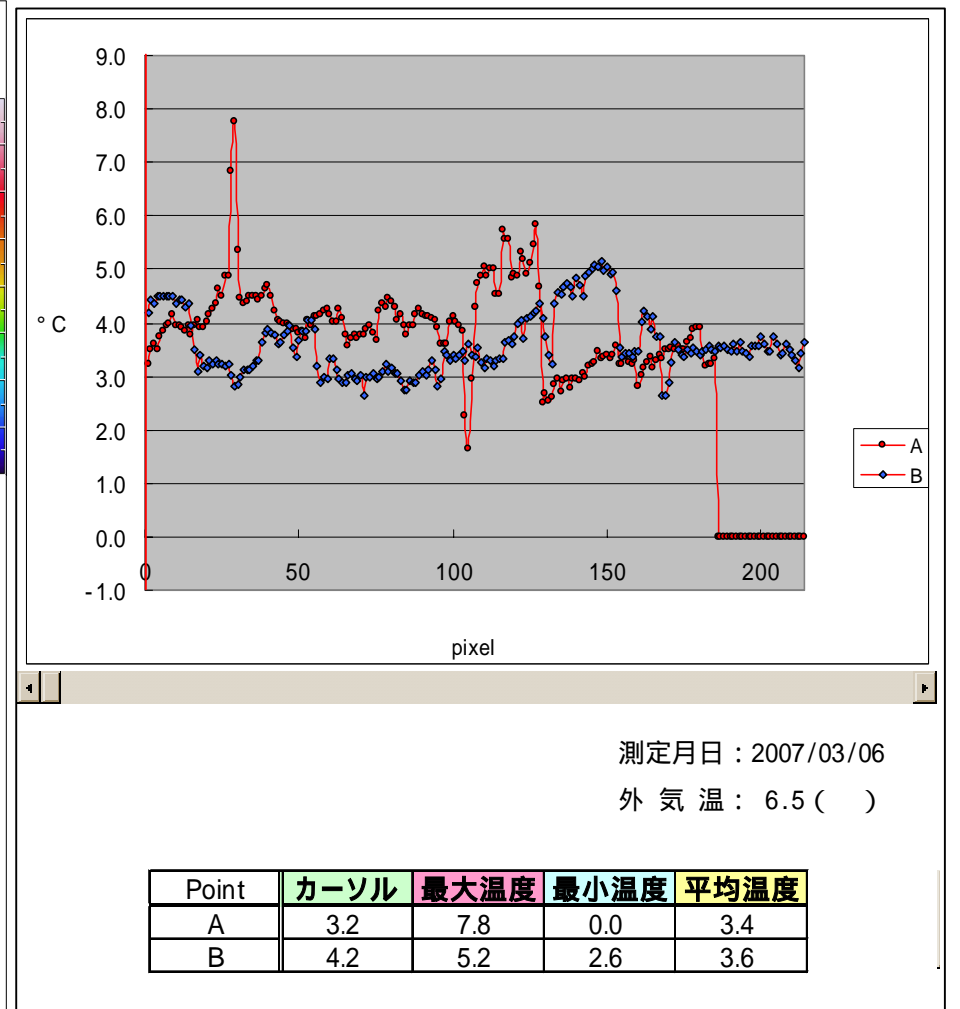
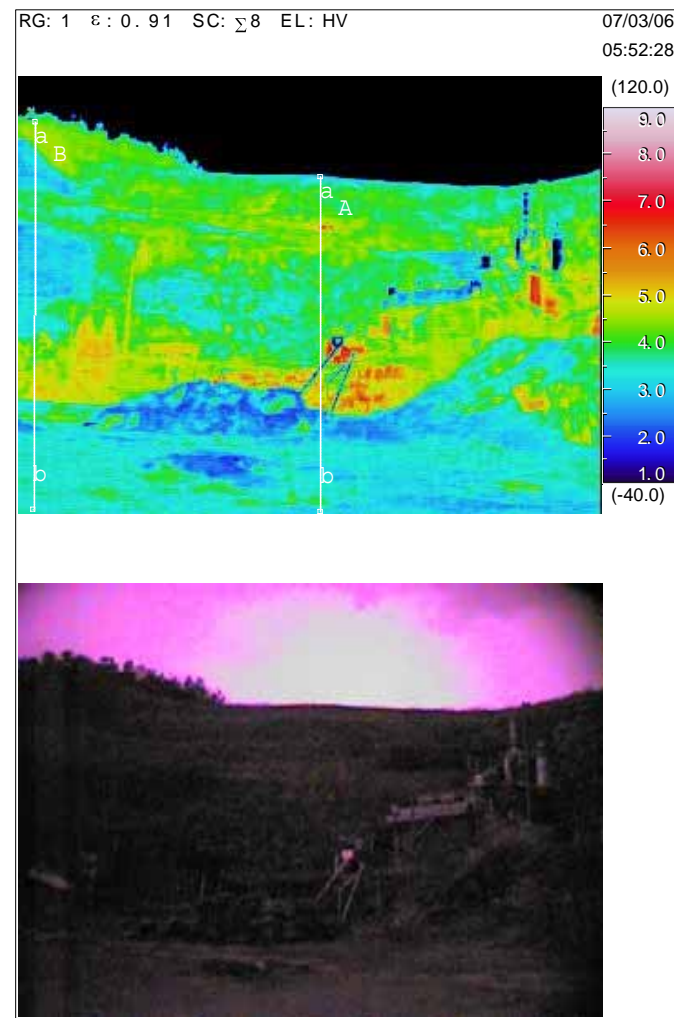
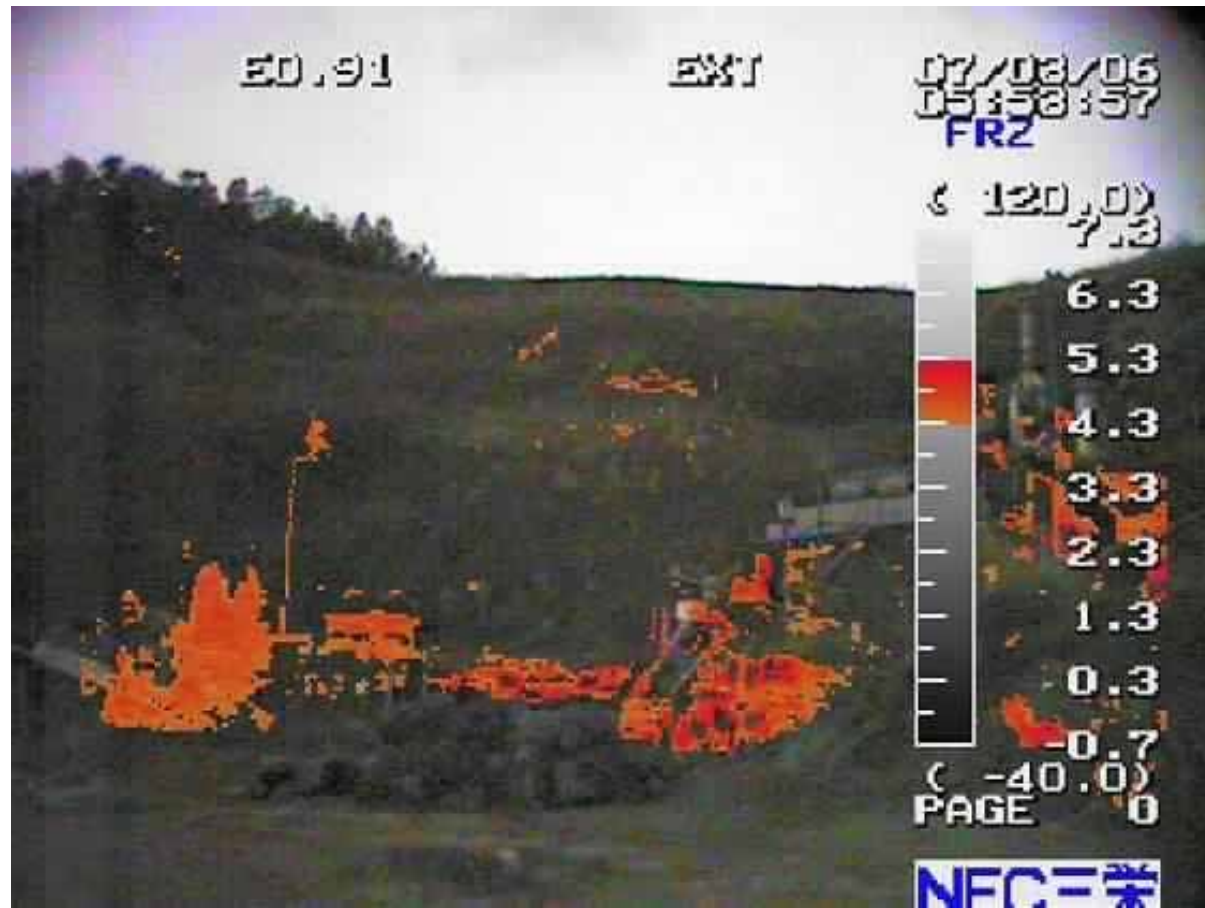


図 3-2-18 撮影位置 温度分布

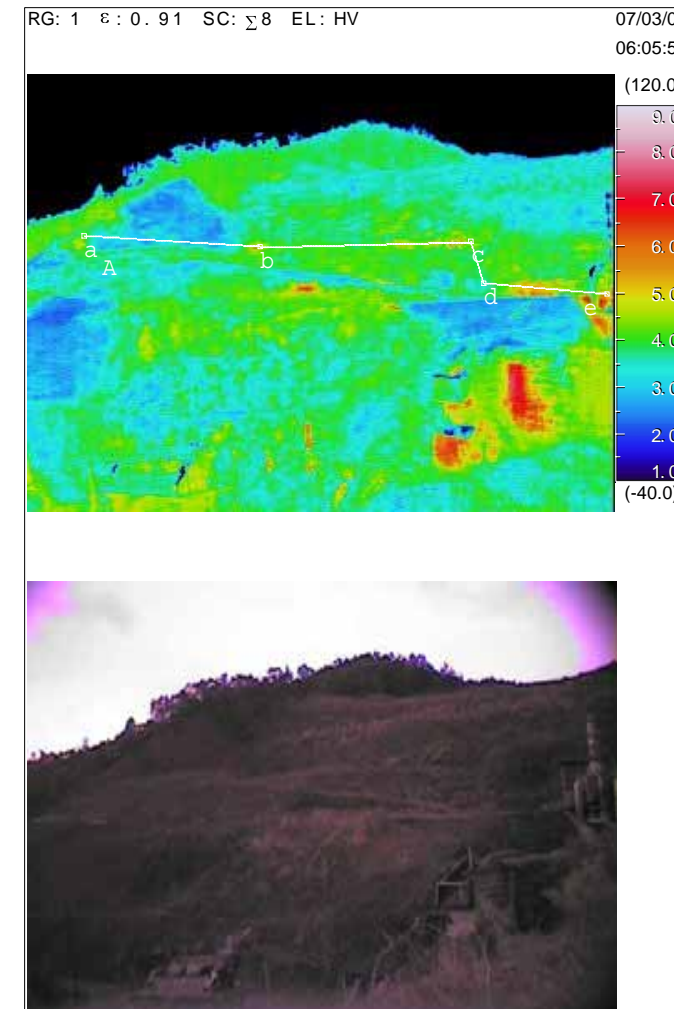
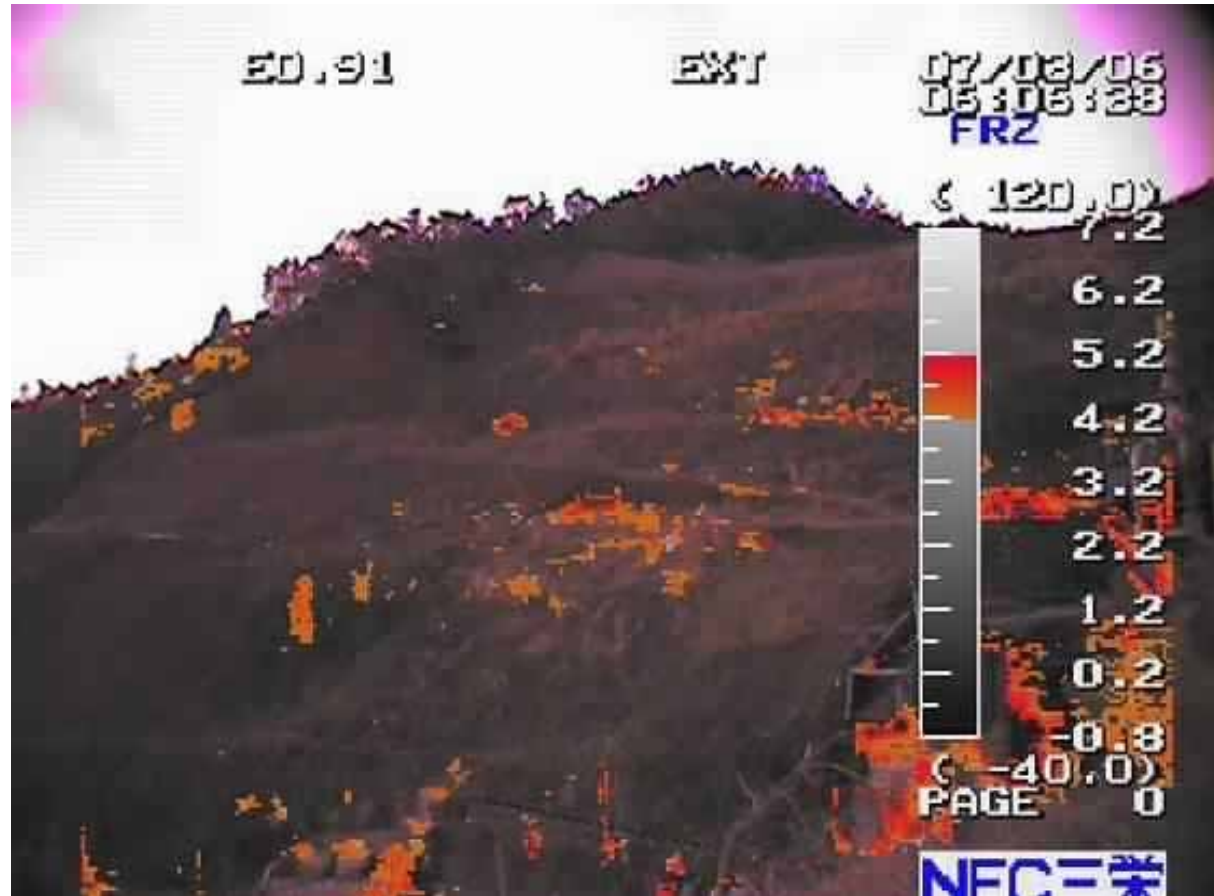


図 3-2-19 撮影位置 温度分布

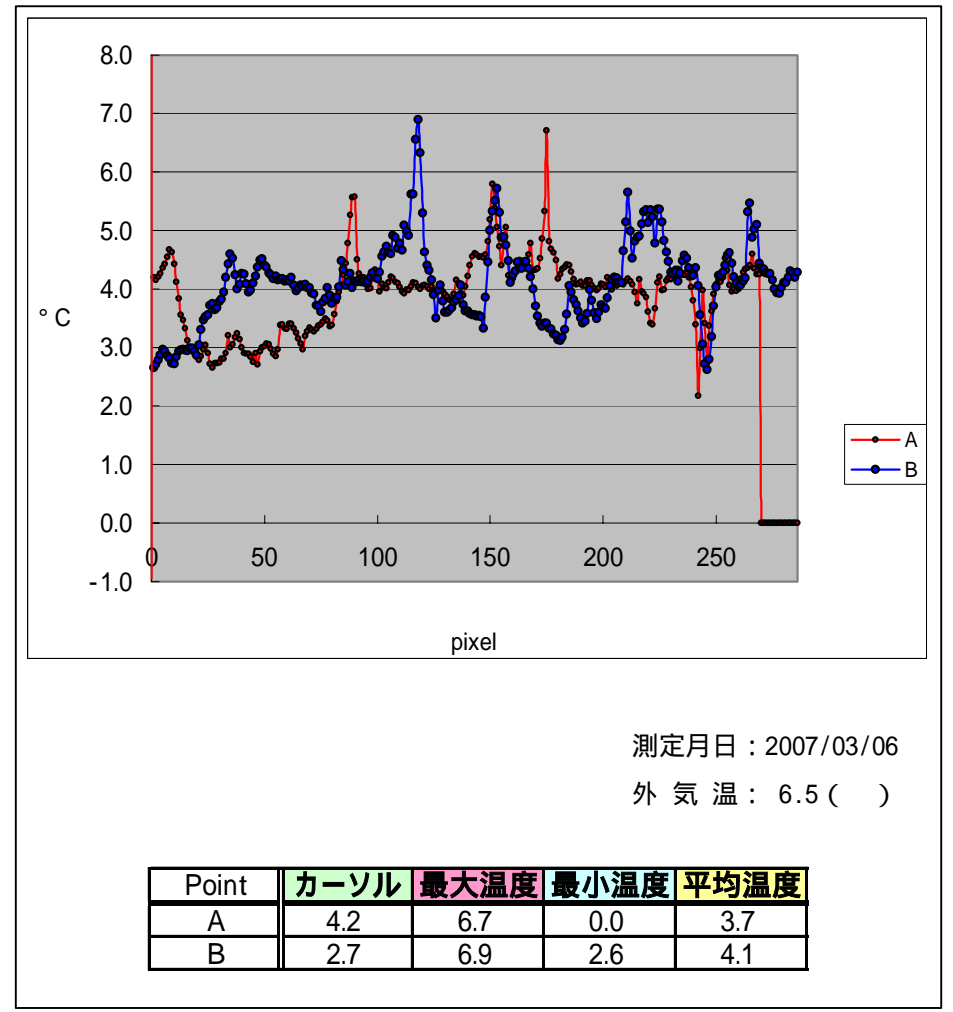
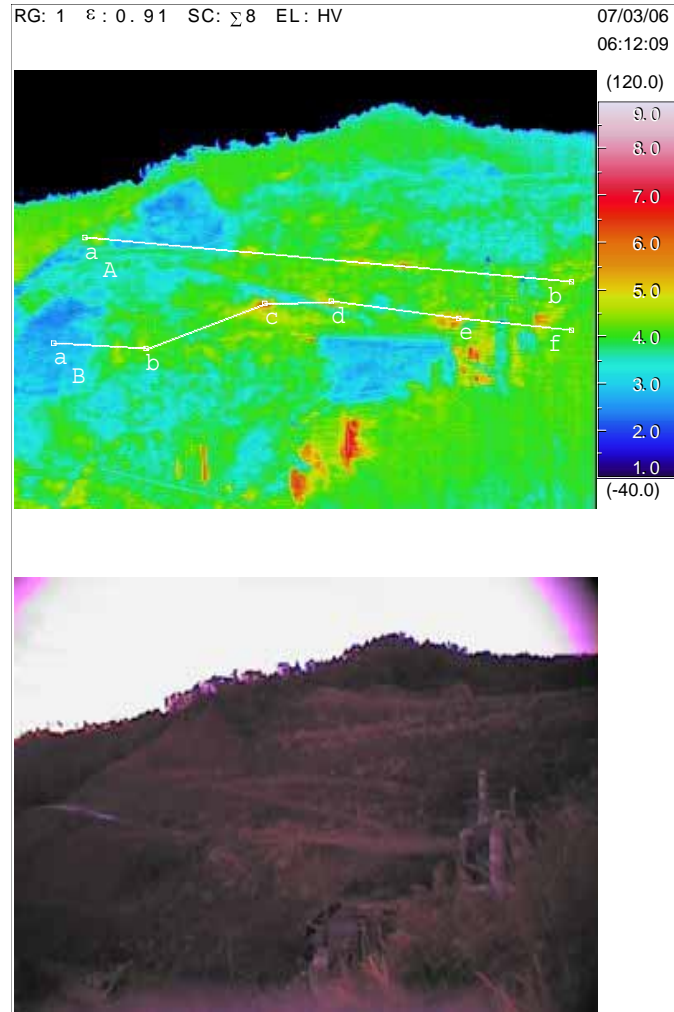


图 3-2-20 撮影位置 温度分布

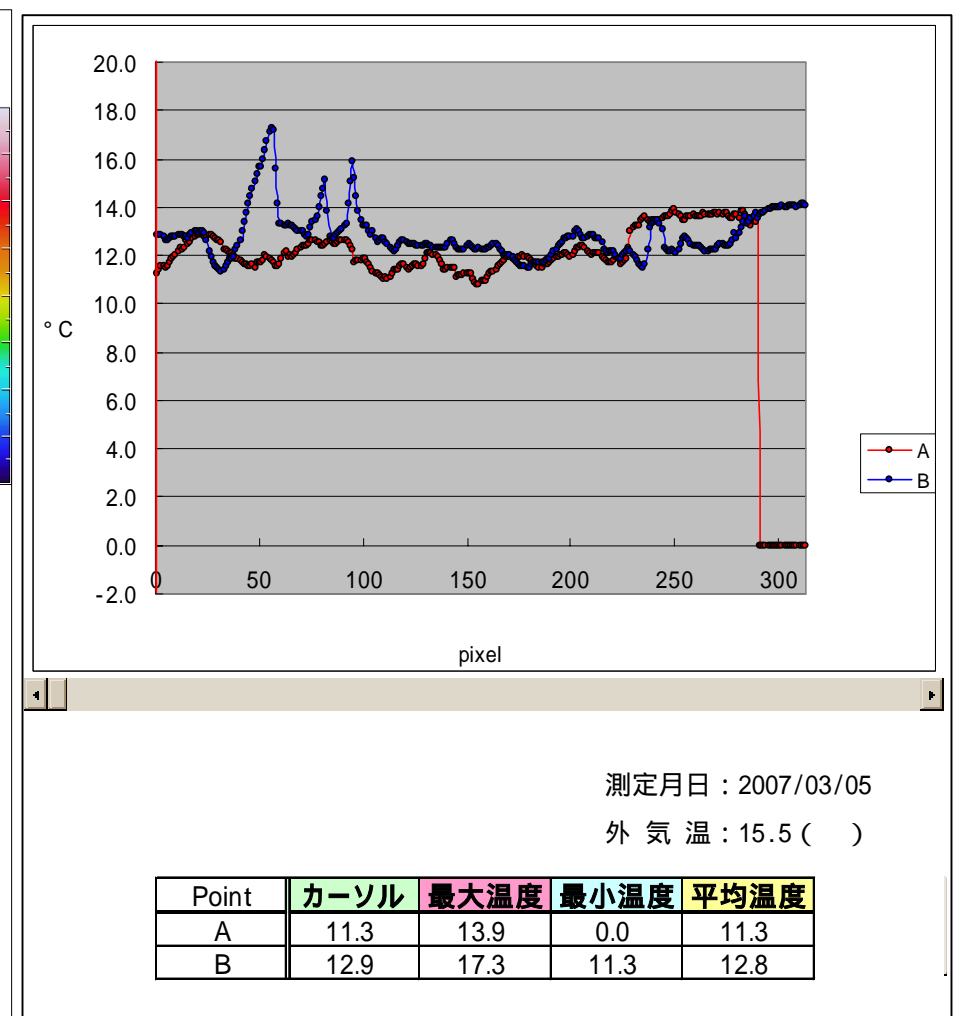
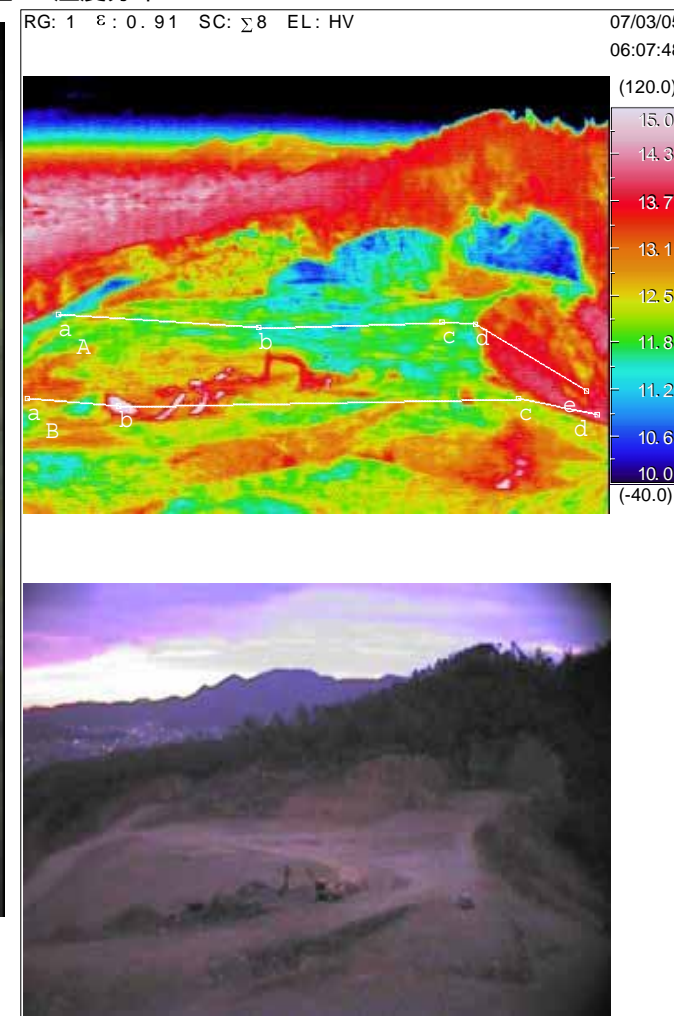


图 3-2-21 撮影位置 温度分布

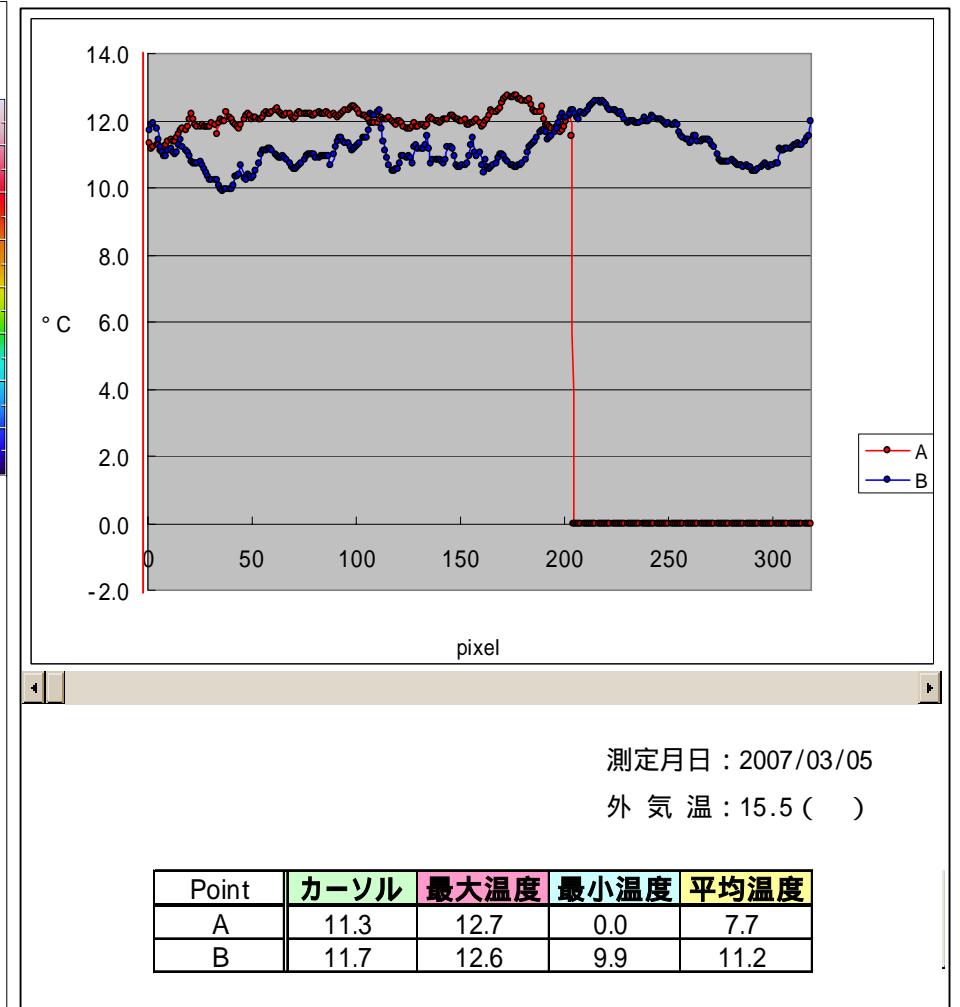
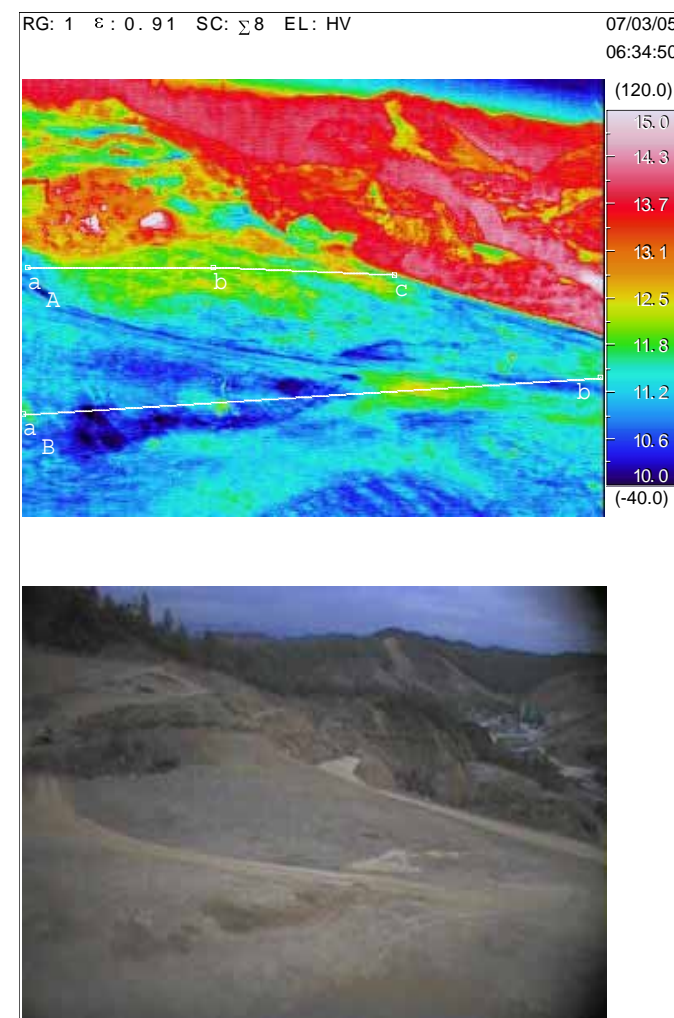
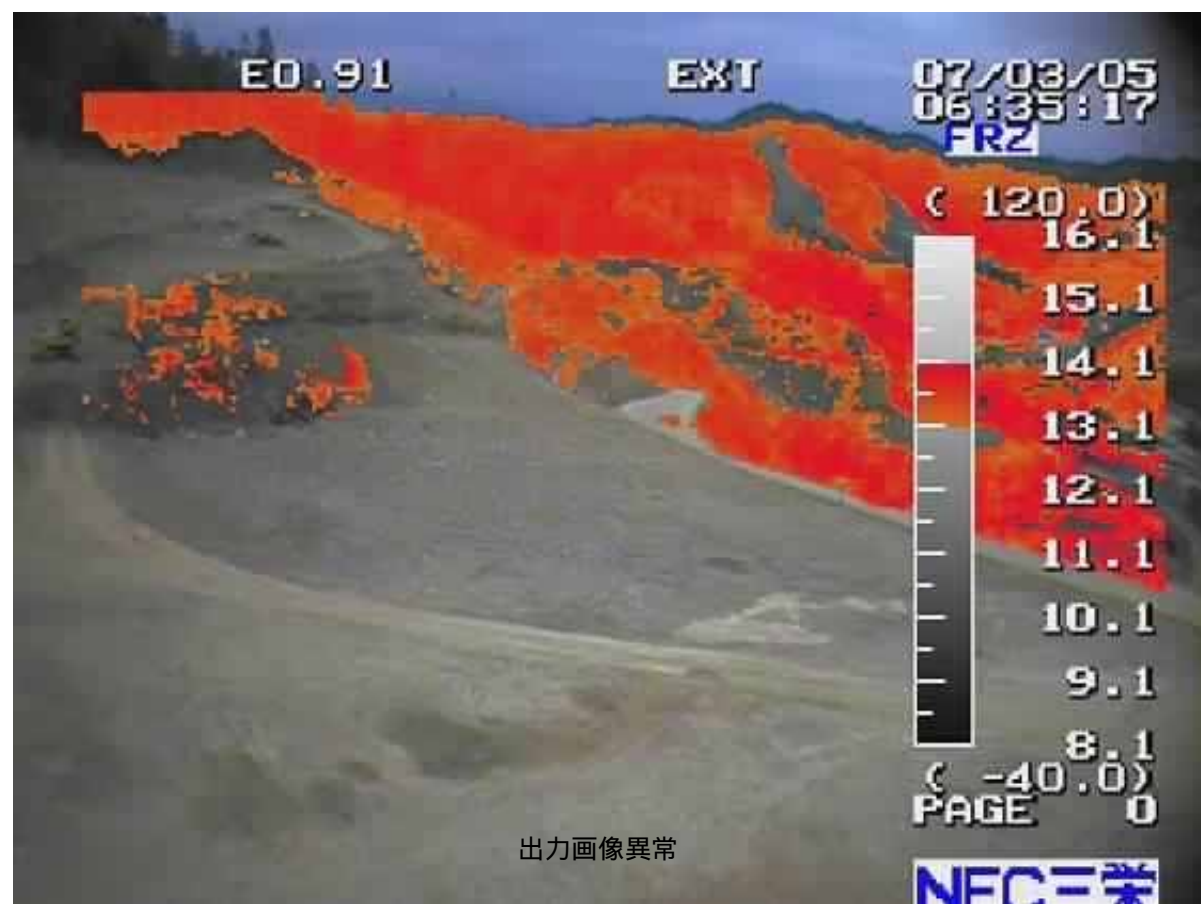


図 3-2-22 撮影位置 温度分布

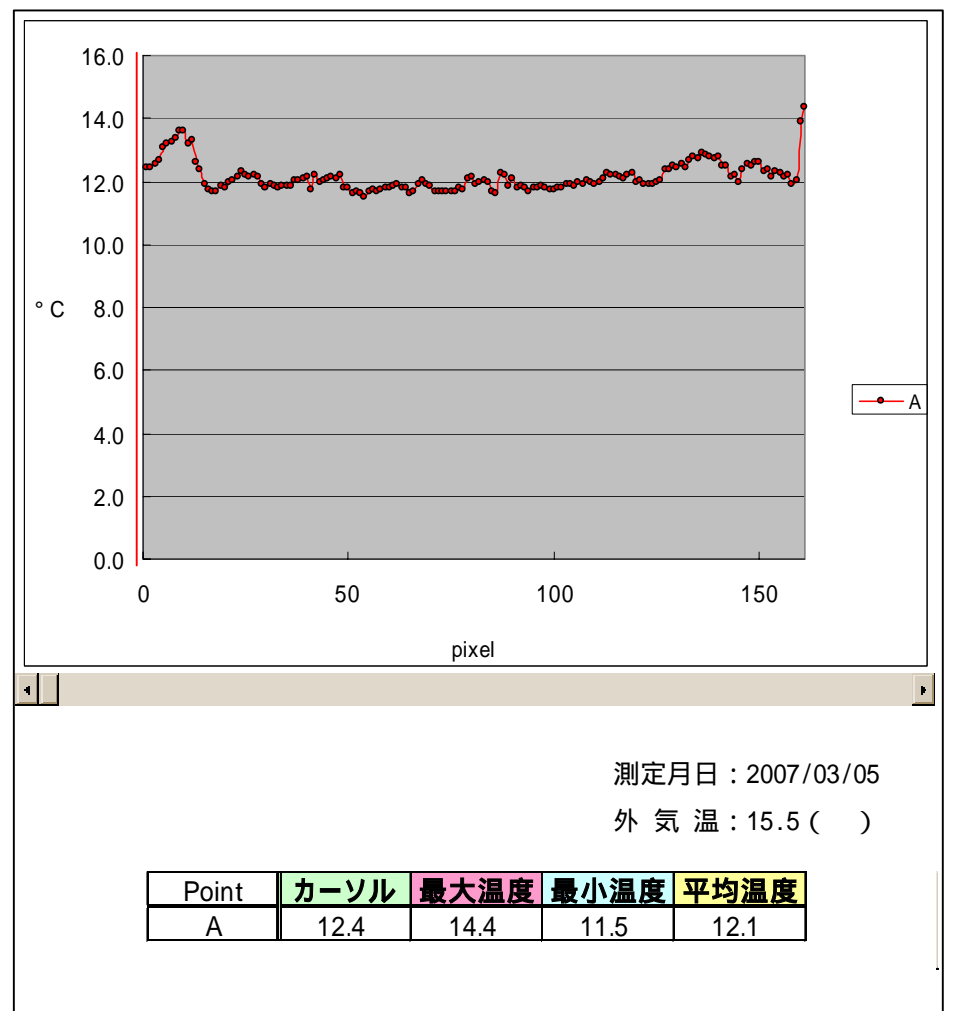
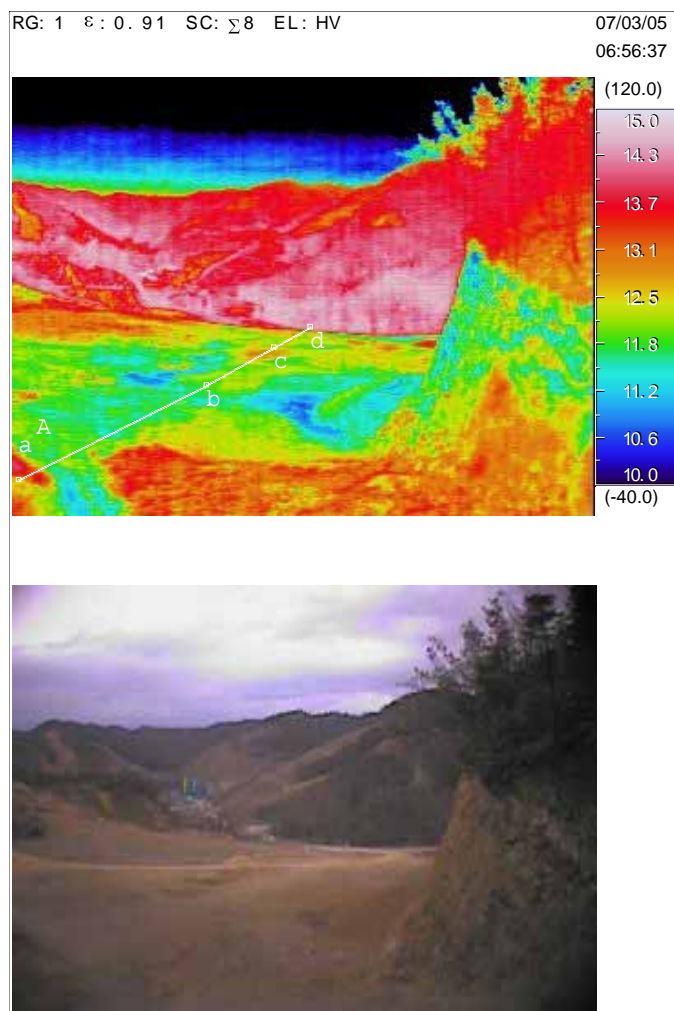


図 3-2-23 撮影位置 温度分布

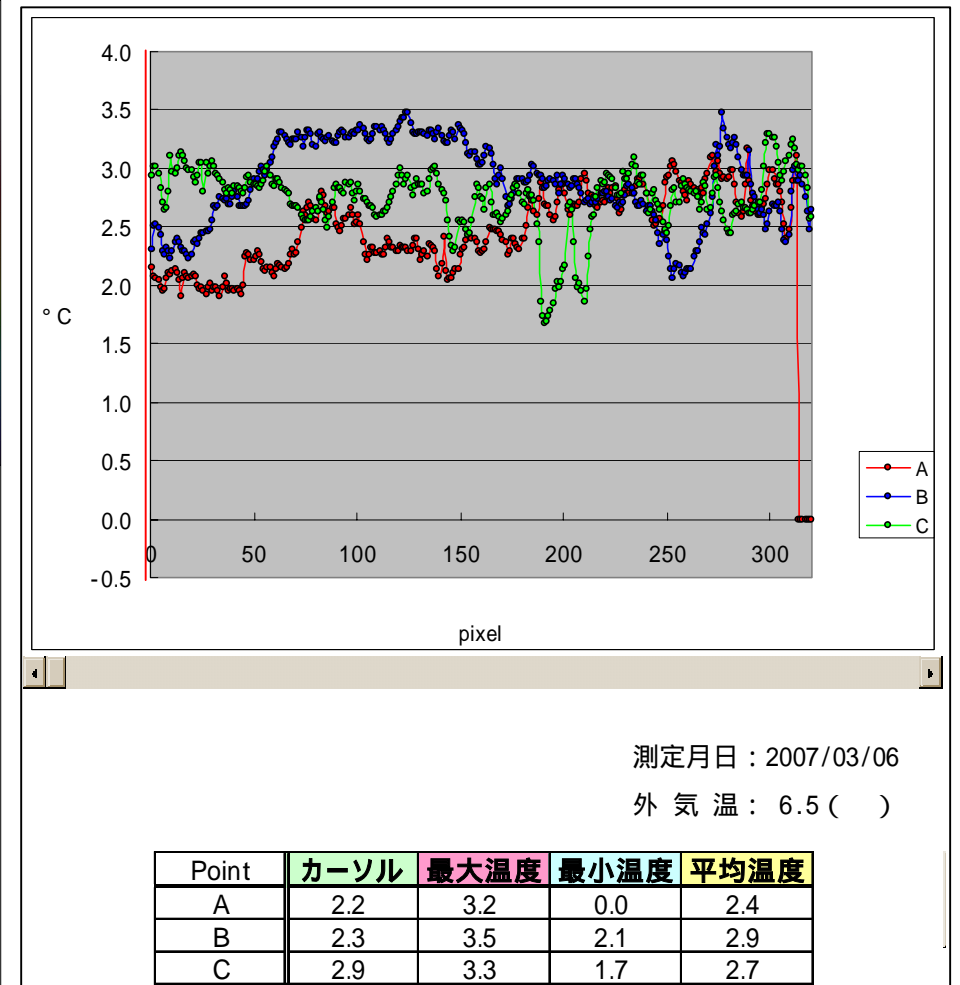
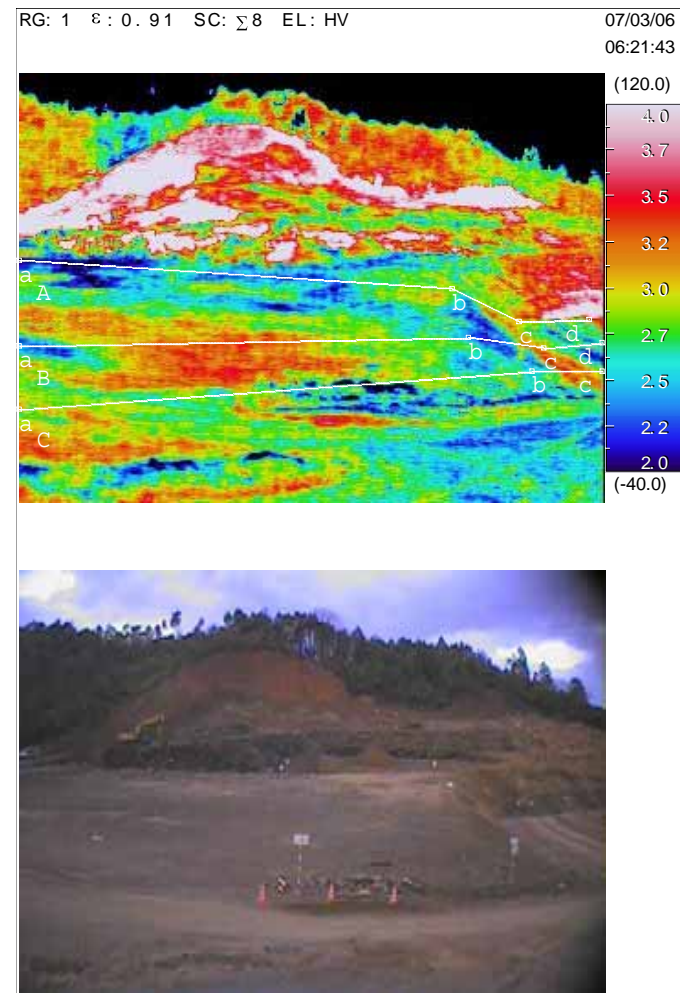


図 3-2-24 撮影位置 温度分布

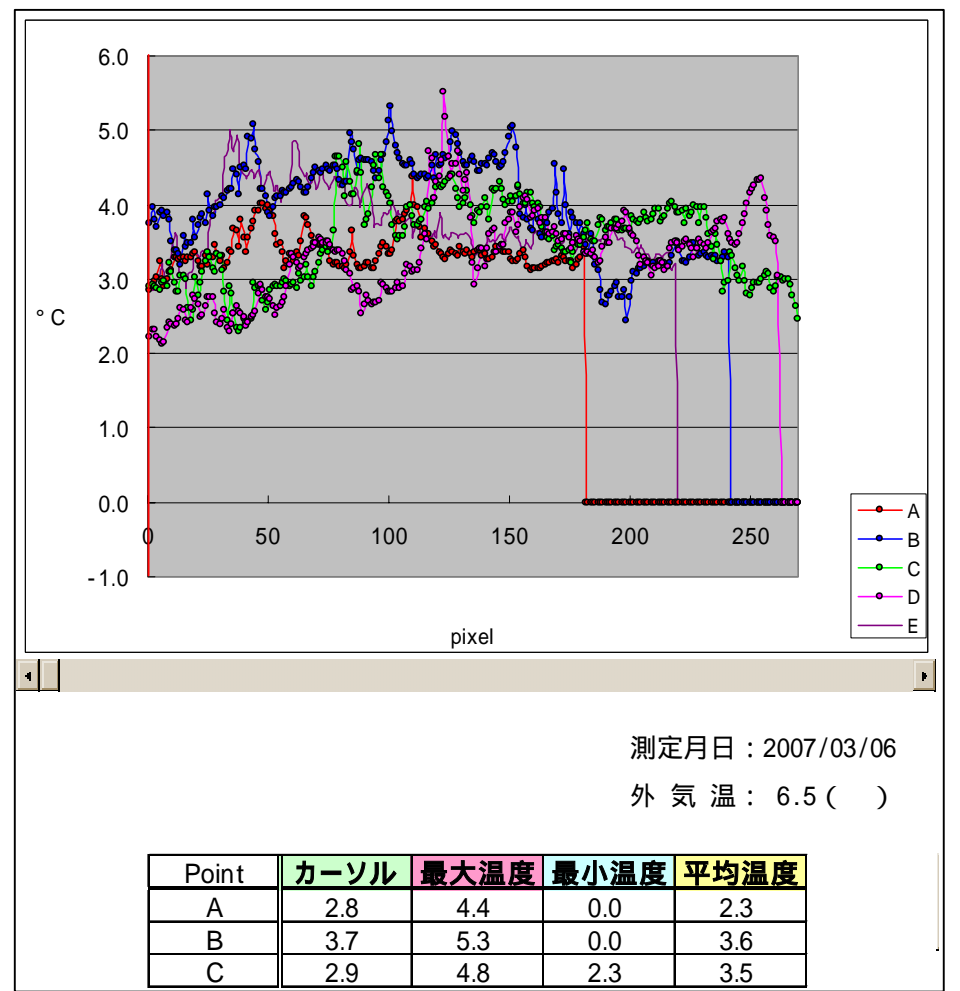
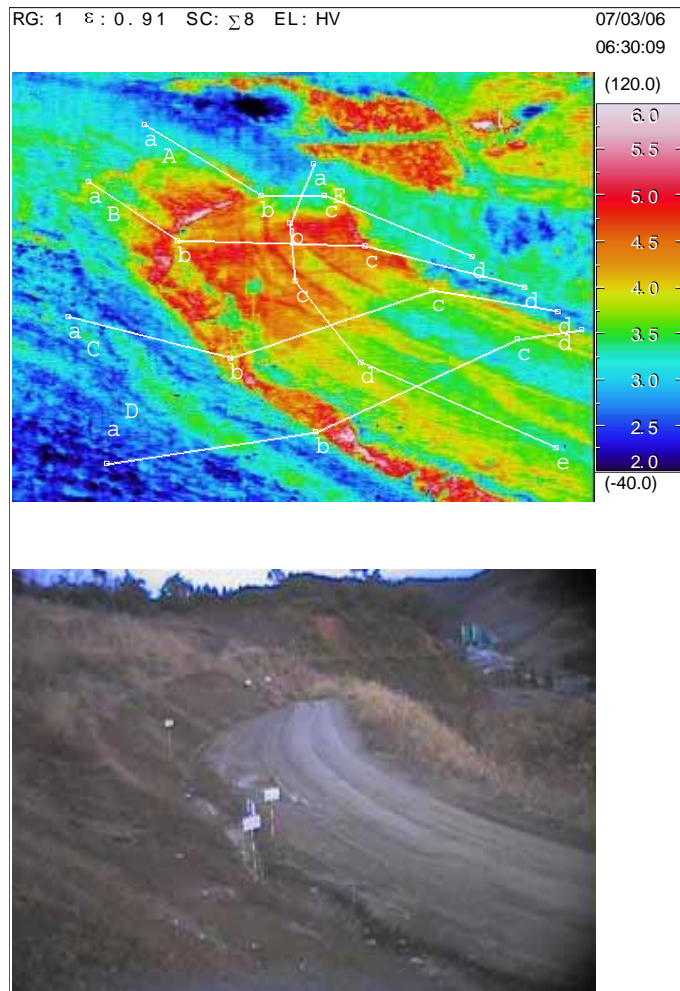


図 3-2-25 撮影位置 温度分布

2-1-4 温度調査のまとめ

温度調査は、浅層温度測定、孔内温度測定、赤外線カメラによる温度測定を実施した。温度調査の結果について取りまとめる。

A 浅層温度	最低位 21.5	最高 57	平均 28
B 孔内温度測定	最低位 25.3	最高 564 (b-31)	平均 49 (b-31 含 56)
C 赤外線カメラによる表面温度測定	図 3-2-26 に緑線で示す位置が周辺より高温部		

浅層温度測定(H18.10実施)と赤外線カメラによる表面温度測定(H19.3実施)は、実施時期は異なるが、ほぼ同様の位置で高温部を検出している(図 3-2-26 緑線囲み部分)。現地測定時の目視観察から、高温の原因として以下が推察される。

- 混合物主体層の露出
- 植生被覆による蓄熱
- 廃棄物内部からの移動熱量が周辺部より多い(高温熱源に近接している)

要因 は、有機物の発酵熱が穏やかでかつ有機物の熱伝導性が土砂よりも小さいため、小範囲であっても発熱が蓄熱され、高温部として観察されるケースである。地表に露出する廃棄物や土砂表面の植生被覆がこれにあたるものと考えられる。

要因 は、表層が土砂優勢で、かつ植生等が少ない場合で、b-31 付近の深部で生じている燃焼等による発熱が影響し、高温を観察しているものと考えられる。ただし、熱の移動は、土砂等の媒体中の伝熱以外に、ガス等の対流も要因となるため、観測される温度分布がより複雑で、かつ熱源が偏在しているものと推察される。要因 による高温と思われる箇所を図 3-2-26 に緑ハッチングで表示した。

ボーリング孔内温度測定結果は、著しい高温を示すb-31 とb-40 を除けば、有機物の発酵による温度の範囲内である。過去のボーリング孔内温度測定結果を対照させた結果を、図 3-2-26 に示す。青丸箇所のボーリング孔では温度変化が小さく、橙丸のボーリング孔では温度が上昇傾向にある(図 3-2-27 孔内温度の比較参照)。

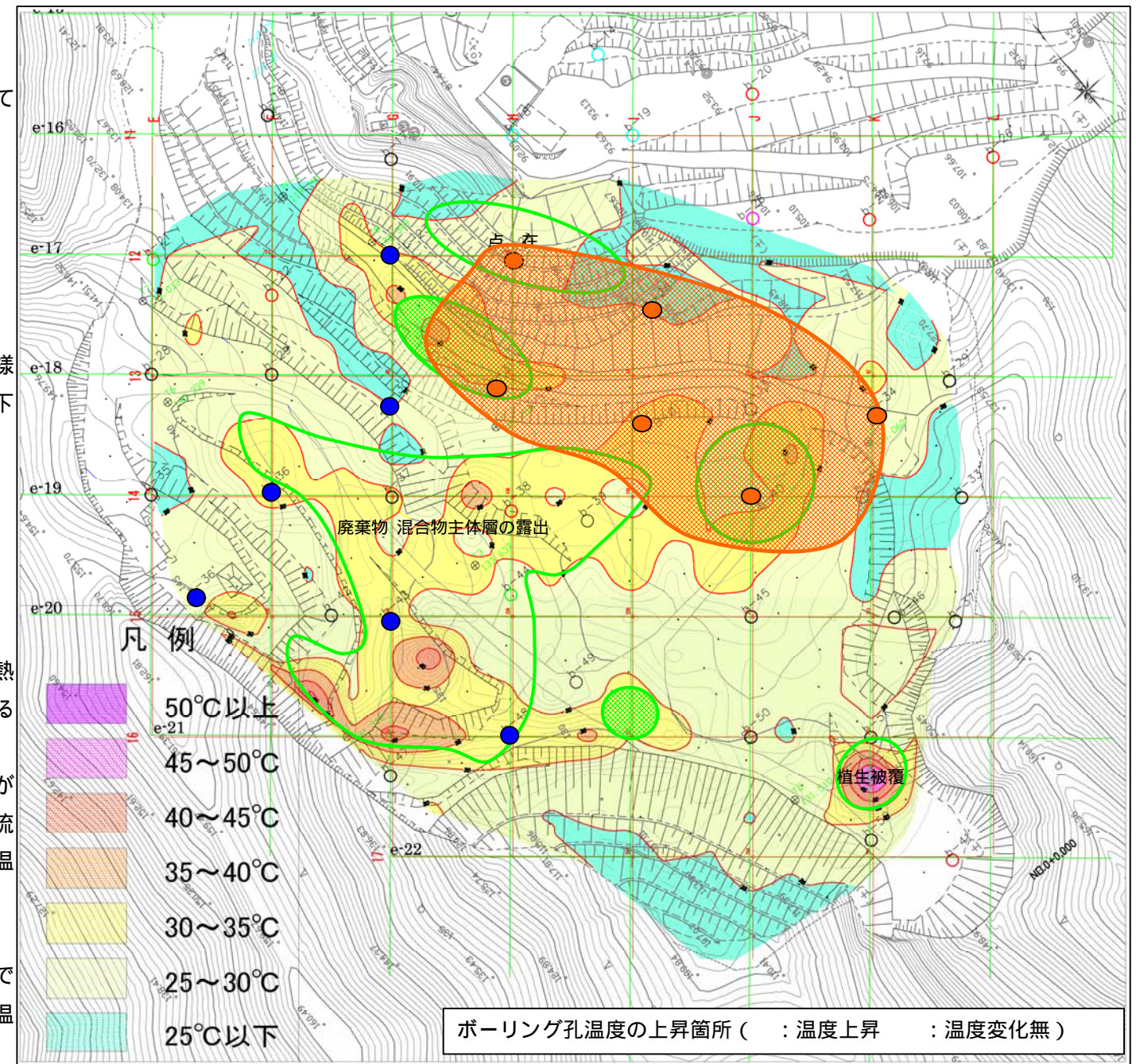


図 3-2-26 浅層温度分布

浅層温度、孔内温度、表面温度測定結果より当該地の温度状況に関する特徴を以下のとおりまとめる。

浅層温度の平均は 30 以下である。30 以上を示す箇所では、廃棄物の露出・植生被覆による蓄熱、燃焼による熱移動の影響を受けていると考えられる。

孔内温度が 50 前後の部分は廃棄物の発酵による蓄熱状態を示しており、60 程度を超える部分では発酵温度を超えて、別の現象による高温を示しているものと考えられる。

b-31 深部では著しく高い温度が測定されており、深部で燃焼が生じていると推定する。

調査時期の異なる温度調査の対比により、廃棄物層の一部で温度上昇の傾向があり、b-31 深部の燃焼領域の拡大と燃焼進行に伴う空洞化が懸念される。

：燃焼に必要な最低温度である「発火点」は次のとおりとなっている。

- ・発火点 (丸善 理科年表より)
- 木材 400 ~ 470
- 木炭 320 ~ 400
- 泥炭 225 ~ 280

なお、木材チップの堆積場では 100 以下でも発火することが古積によって報告されている。

(参考：古積 博 大量貯蔵廃棄物内での蓄熱による火災危険性 環境技術 Vol.34 No.10 (2005) p722~p727)

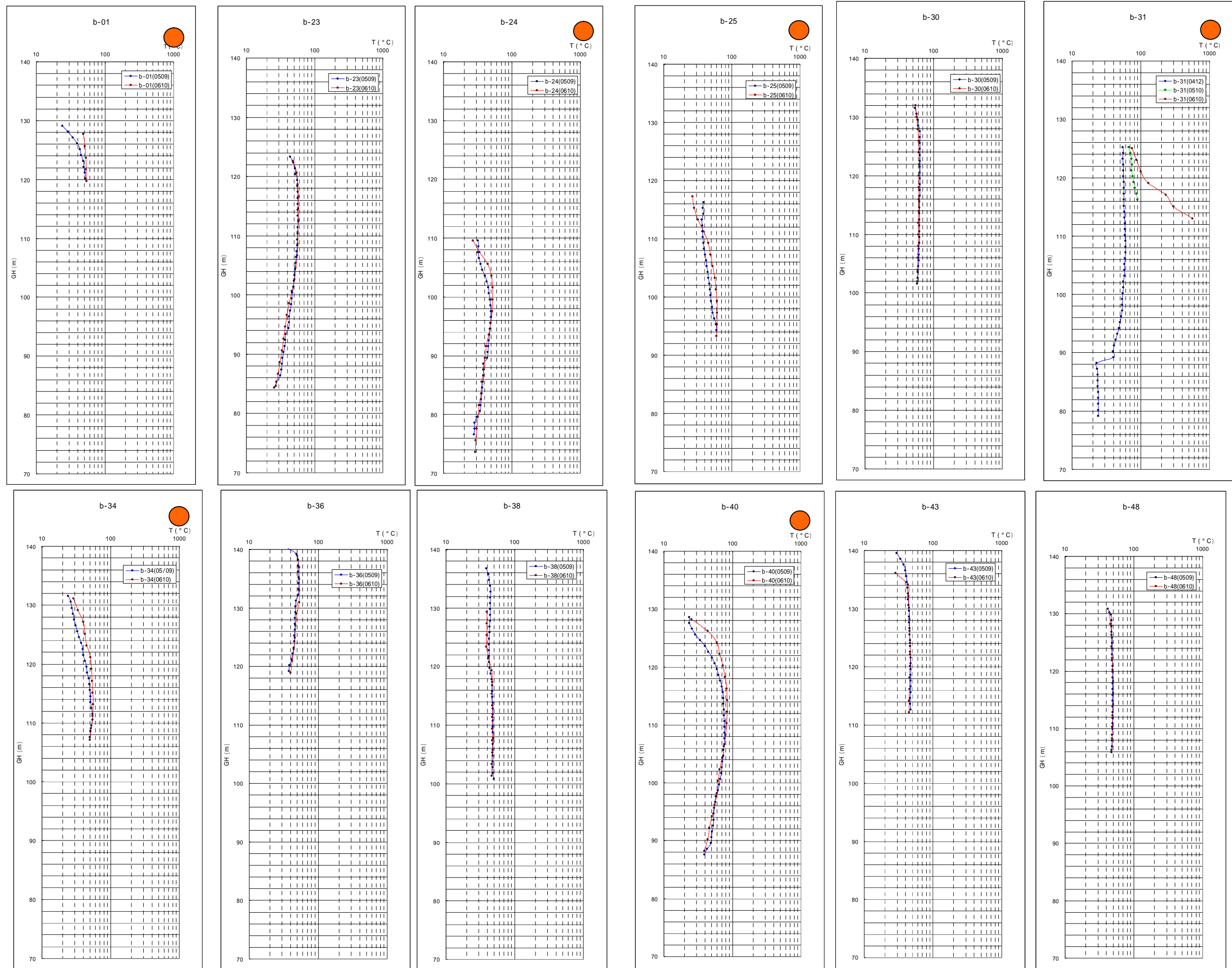


図 3-2-27 孔内温度の比較

第3章 検討業務

3-1 調査・解析業務

3-1-1 熱源解析

廃棄物層の温度分布は、廃棄物層内部の熱が、伝熱・対流・放射等の複合現象により、観測時点の平衡状態を示しているものである。そのため、温度分布の状況は時間経過につれて変化するものであるが、今回の温度調査では、計測に2~3日をかけて温度分布を記録した。

熱移動の様子は複合現象として考慮する必要があり、部分的な温度観測から廃棄物層内の温度分布を推定することは非常に困難である。しかし、複合的な要因の中から、最も大きな影響因子である伝熱現象を解析手法として用いて廃棄物層内部の温度分布を推定することとする。伝熱の解析は、調査時の温度測定結果を再現できるような伝熱解析モデルを試行錯誤により作成し、測定結果に合致する、廃棄物層内の高温部(熱源)の概略位置を推定した。以下に温度調査結果と伝熱解析の概要について示す。

温度調査結果

b-31、b-40 以外の調査孔における孔内温度は、混合物主体層の嫌気性発酵熱による温度を示していると考えられる。一方、b-31、b-40 の孔内温度は、高温発酵で到達する温度を超えており、発熱現象以外に高温を示す要因があるものと考えられる。特に b-31 の孔内温度は著しく高く、廃棄物層内の燃焼によるものと考えられる。

A 調査概要

- ・浅層温度調査 10m間隔グリッド 302箇所
- ・孔内温度調査 既設ボーリング 13箇所
- ・1m地温 混合物主体層、土砂層、基盤岩層において観測

B 調査結果

- ・浅層温度調査 最低位 21.5 最高 57 平均 28
- ・孔内温度調査 最低位 25.3 最高 564 (b-31) 平均 56

伝熱解析概要と解析方法

熱源特定のための伝熱解析は、図3-3-1に示すフローに従って実施した。

A 解析の概要

- ・解析ソフト G-HEAT 2D
- ・解析方法 二次元 定常解析
- ・解析モデル 30m間隔グリッド 横断方向6測線
節点間隔 2.5m
定数設定 表3-3-1に示す一般値の範囲から設定

B 解析方法

- ・Bor31-40間の断面を試行解析して解析条件を決定
- ・試行解析と同条件をもって他の横断6測線を解析
- ・解析結果を座標データに変換して温度分布をコンタリング、縦断方向の温度コンタリングも併せて行った。

以下に試行解析モデルの解析結果を示す。

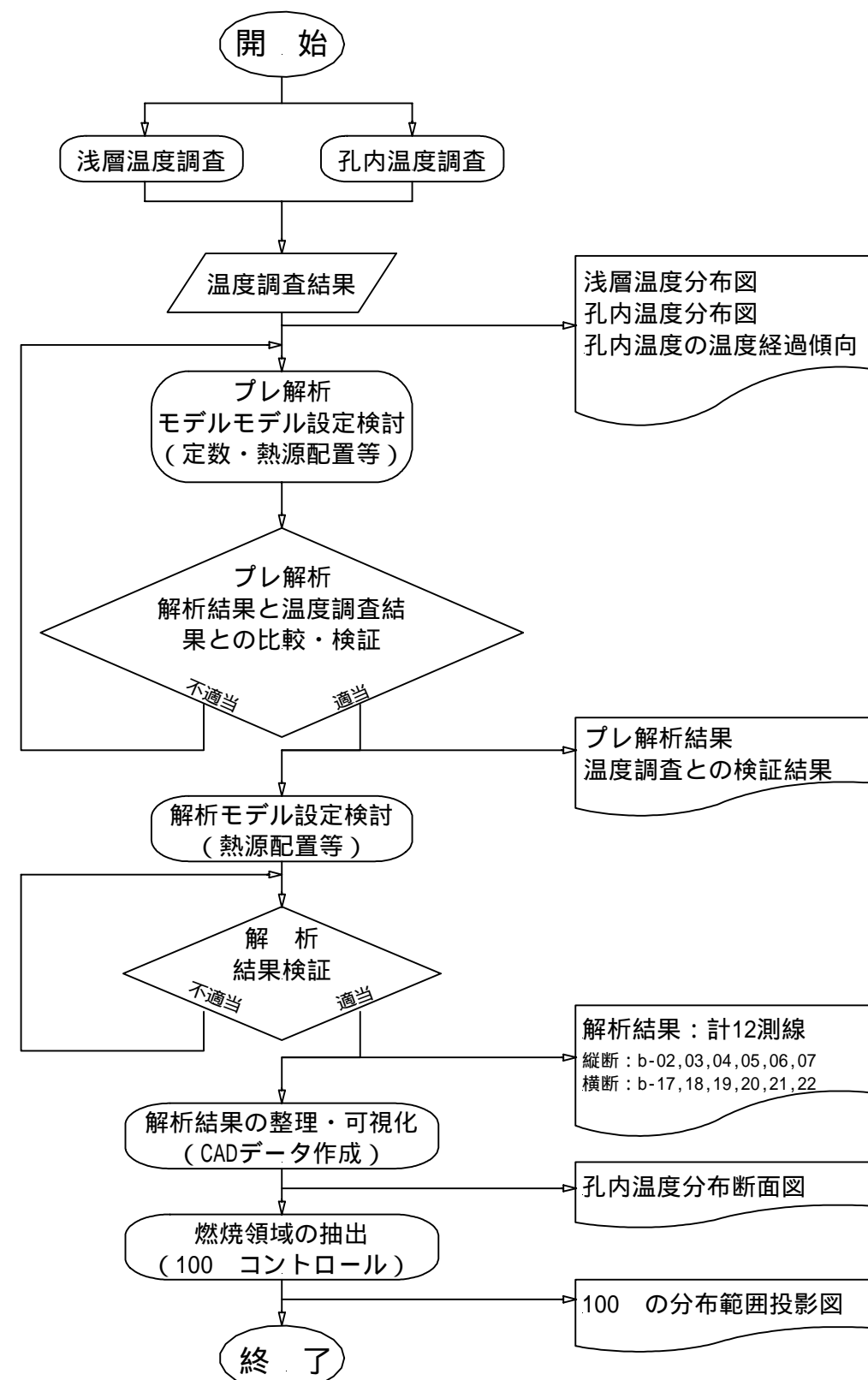


図3-3-1 伝熱解析の順序

試行解析によるモデル設定

試行解析は、以下の順序でおこなった。

- A 解析モデルの設定
- B 熱源仮定(位置・温度)
- C 解析および温度調査結果との検証

解析断面モデル

孔内温度調査結果より、高温を確認したb-31 およびb-40 を結ぶ断面を解析モデルとした(図 3-3-2 参照)。解析モデルには、既往調査ボーリング B-01 と浅層温度調査結果を盛り込んだ。

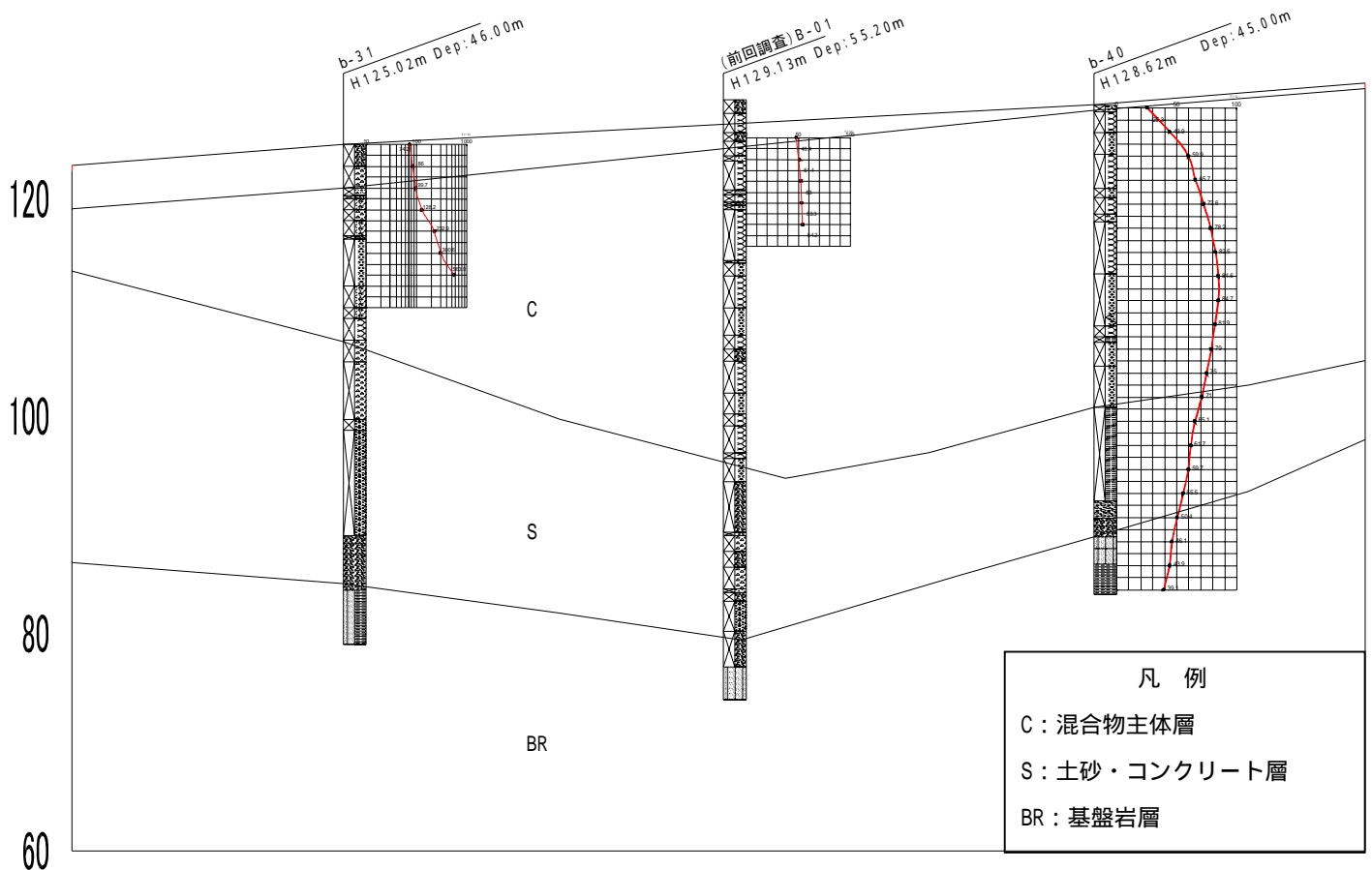


図 3-3-2 試行解析モデル断面図

定数

解析に用いる各定数は、表3-3-1に示す値を用いた。各定数は、一般文献・参考論文等を参照し、一般値を逸脱しない範囲を目安として設定した。

表 3-3-1 定数 (赤枠・太字：採用値)

物質	密度 (kg/m ³)	熱伝導率 (W / m-)	比熱 (J / kg-)	熱伝達率 (W / m ²)	地温勾配	1m深 平均温度()
層区分	区分					
C	木材(乾)	1410	0.14 ~ 0.18	1250	3.33	32.5
	紙		1.50	1170 ~ 1340		
廃棄物(不飽和)		1650	0.57	840	16 10 - 25)	1.70
S	コンクリート	1730		840	4.08	22.5
	砂		0.30	800		
	粘土		0.84			
	火山砂		0.46			
	土壌(乾)		0.14			
BR	玄武岩	2170		840 ~ 1000 1050 (500)	1.18	21.2
	花崗岩			800 ~ 840 800 ~ 840		
	砂岩		1.76 - 3.72 2.10			
岩盤(不飽和)		1900	2.20	1400	16 10 - 25)	6.82

出典： 理科年表 安定型処分場の機能回復に関する研究 岩の工学的性質と設計・施工への応用 応用岩石辞典 図解土質・基礎用語集 槽洞既往調査結果 温度調査結果

試行解析モデルの熱源と初期温度の分布は以下のパターンを設定した。

- ・熱源温度: 300 ~ 600
- ・熱源位置: b-31 と b-40 の間
- ・熱源規模: 5m、10m、20m程度の範囲
- ・熱源箇所: 1箇所、2箇所
- ・初期温度: A: 浅層温度調査および孔内温度調査の結果
B: 初期温度条件 A に S 層と BR 層の境界面の初期温度を設定

試行解析結果

試行解析結果の要点を表 3-3-2 に示す。試行解析モデルの各パターンを図 3-3-3 ~ 12 に示す。

表 3-3-2 試行解析結果の要点

ケース	熱源の仮定					初期温度の設定				解析結果の検証			
	箇所数	温度()				浅層温度	孔内温度	S層境界	BR層境界	浅層温度	b-31	b-01	b-40
1-	1	1	600			有	有	無	無	ov	lev	ov	ov
	2									ov	lev	ov	ov
	3									ov	lev	ov	un
2-	1	2	600	600				無	無	ov -lev	ov -lev	un -ov	ov
	2		600	400						ov -lev	ov -lev	un -ov	ov
	3		500	300						ov -lev	un -lev	un -ov	ov
	4		600	100		ov -un	un -lev			un -ov	lev		
3-	1	3	600	100	60	有	有	ov-lev	un -lev	un -ov	lev		

ov: 全般的に高い lev: 同程度 un: 全般的に低い

試行解析では、様々な想定を行ったが、熱源を 3 箇所配置するモデルが、現地温度調査結果と最も調和する傾向となった。試行解析結果から混合物主体層に伏在する熱源状況は、以下の状況が想定された。

- ・600 程度以上の熱源の大きさは、小規模(1000m³ 以下)であると考えられる(それ以上の大きさでは解析結果が調査結果と大きく異なる)。
- ・熱源位置は、b-31 の直下ではなく b-40 の方向へずれた位置にある。

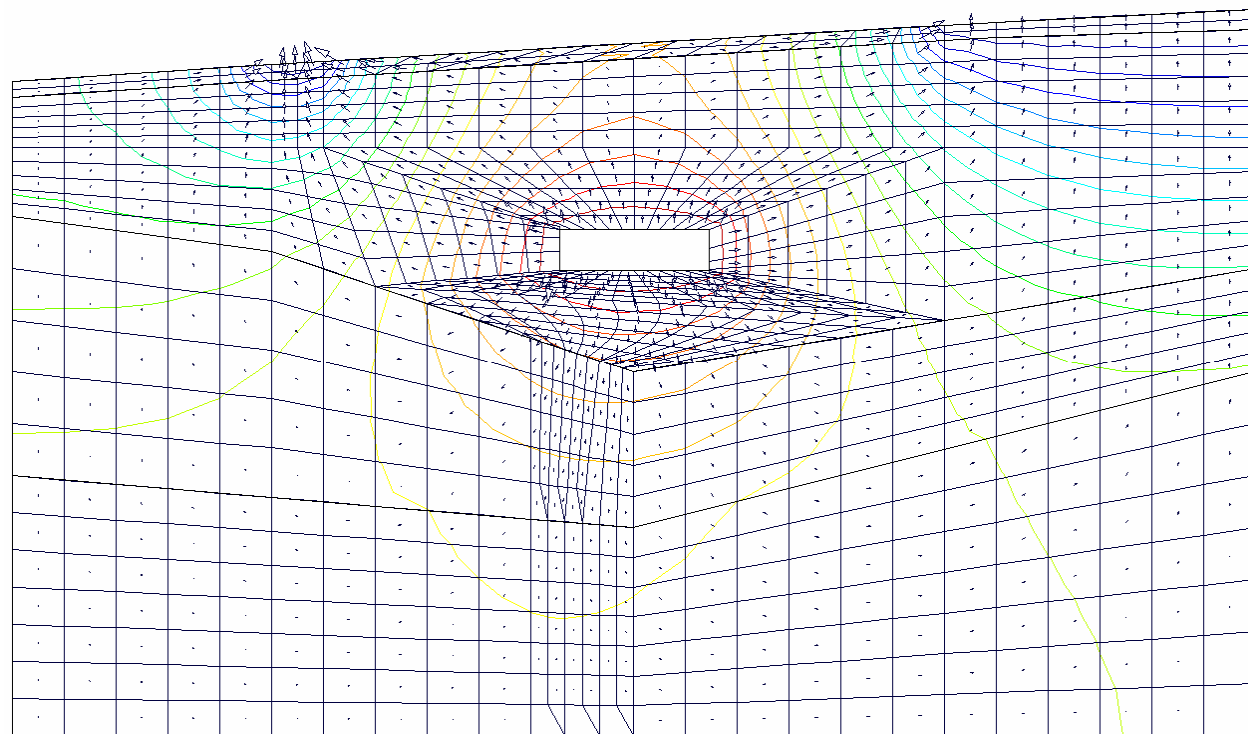
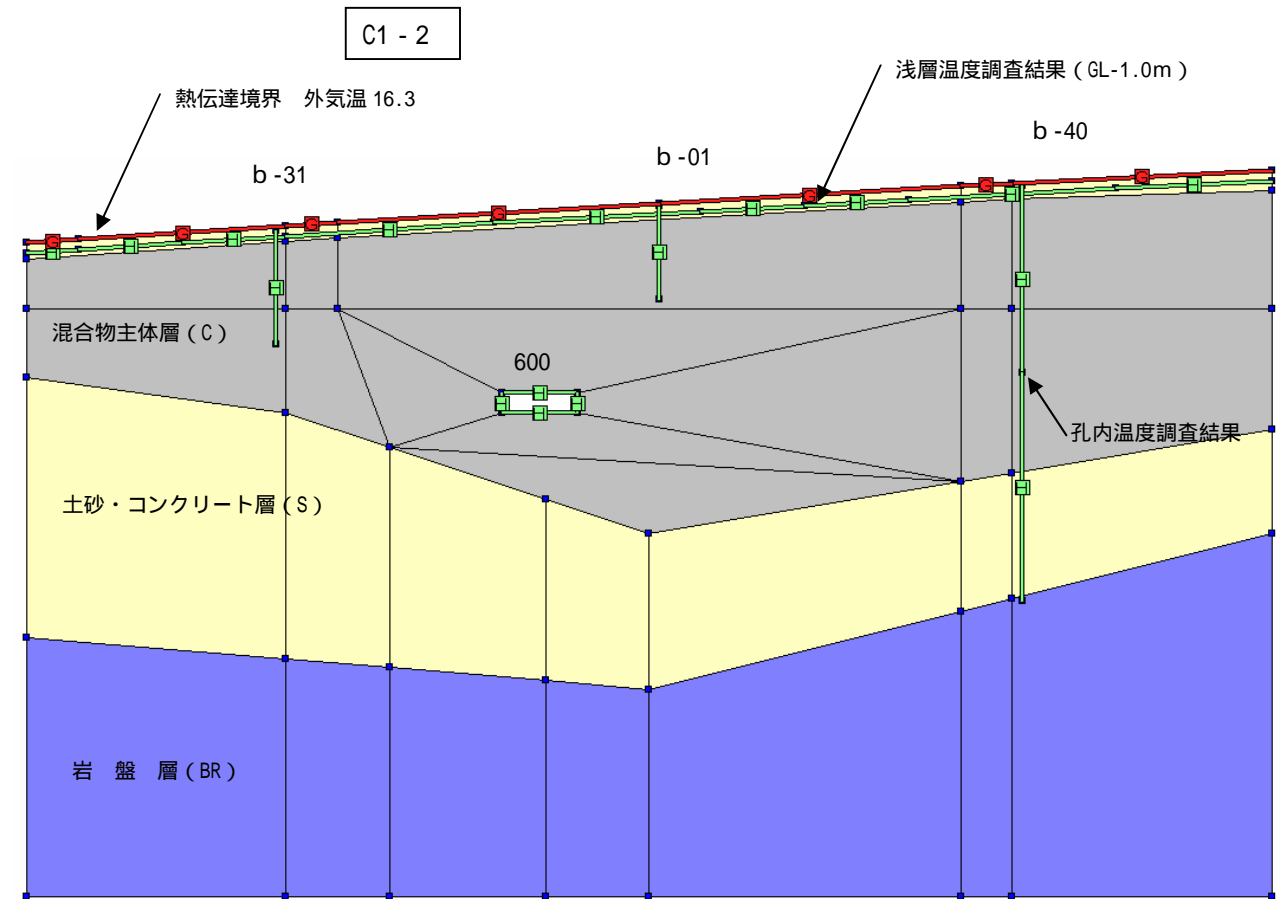
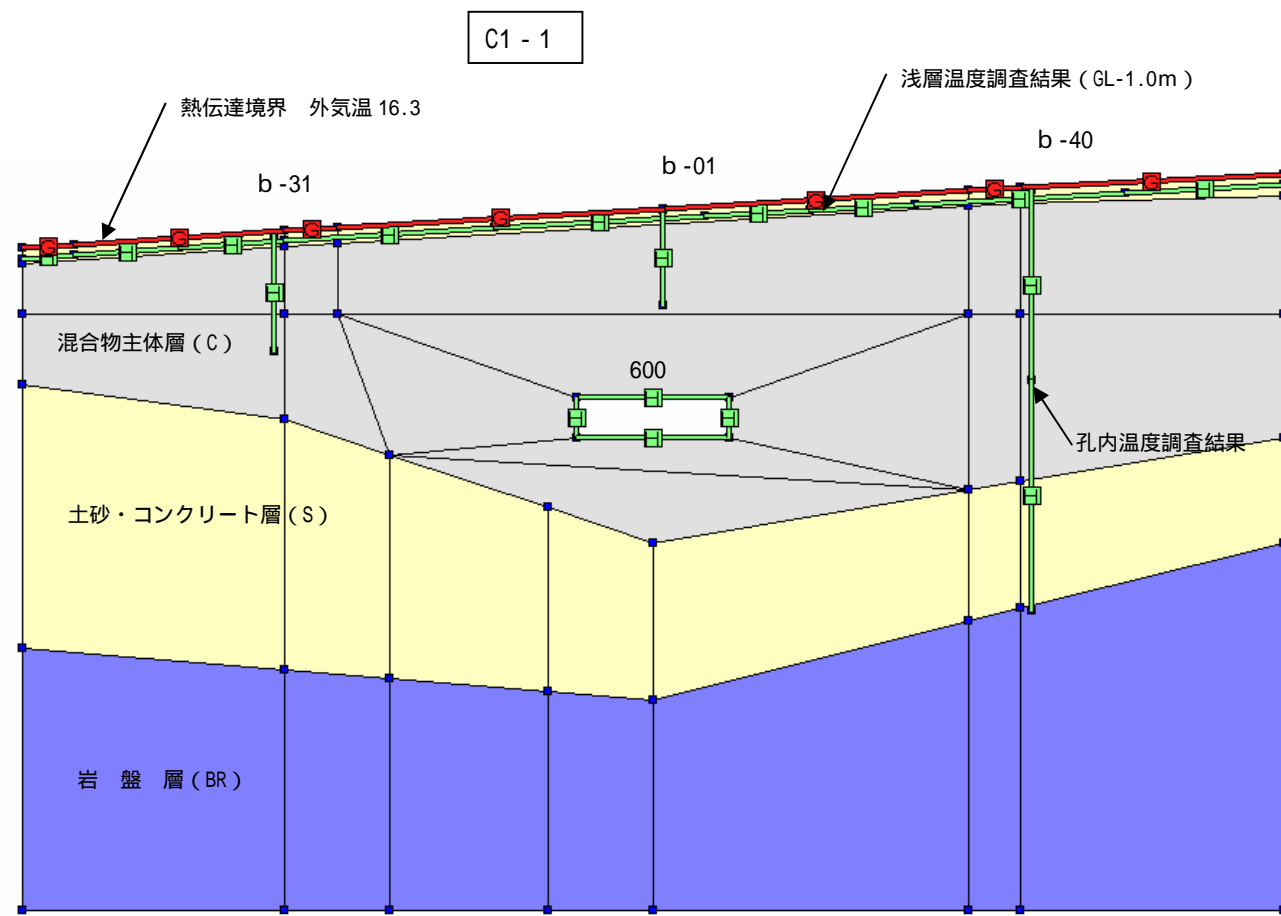


図 3-3-3 試行解析 ケース 1-1

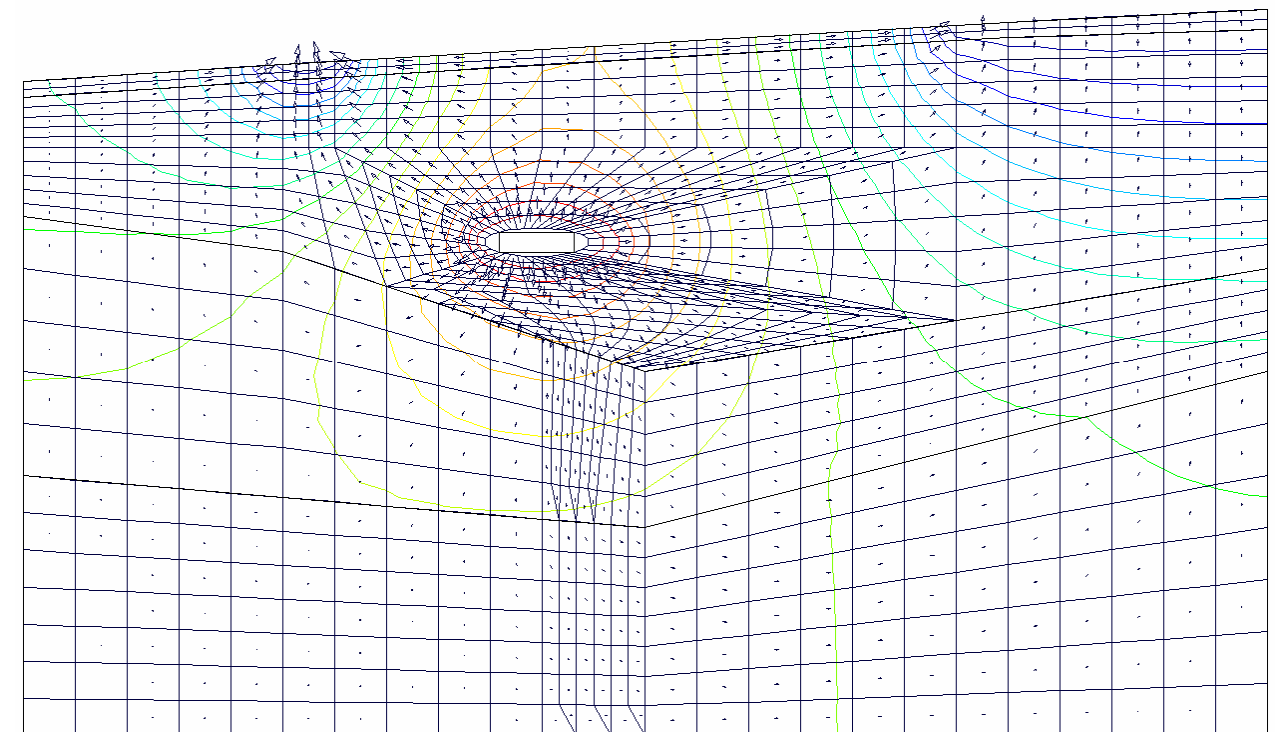


図 3-3-4 試行解析 ケース 1-2

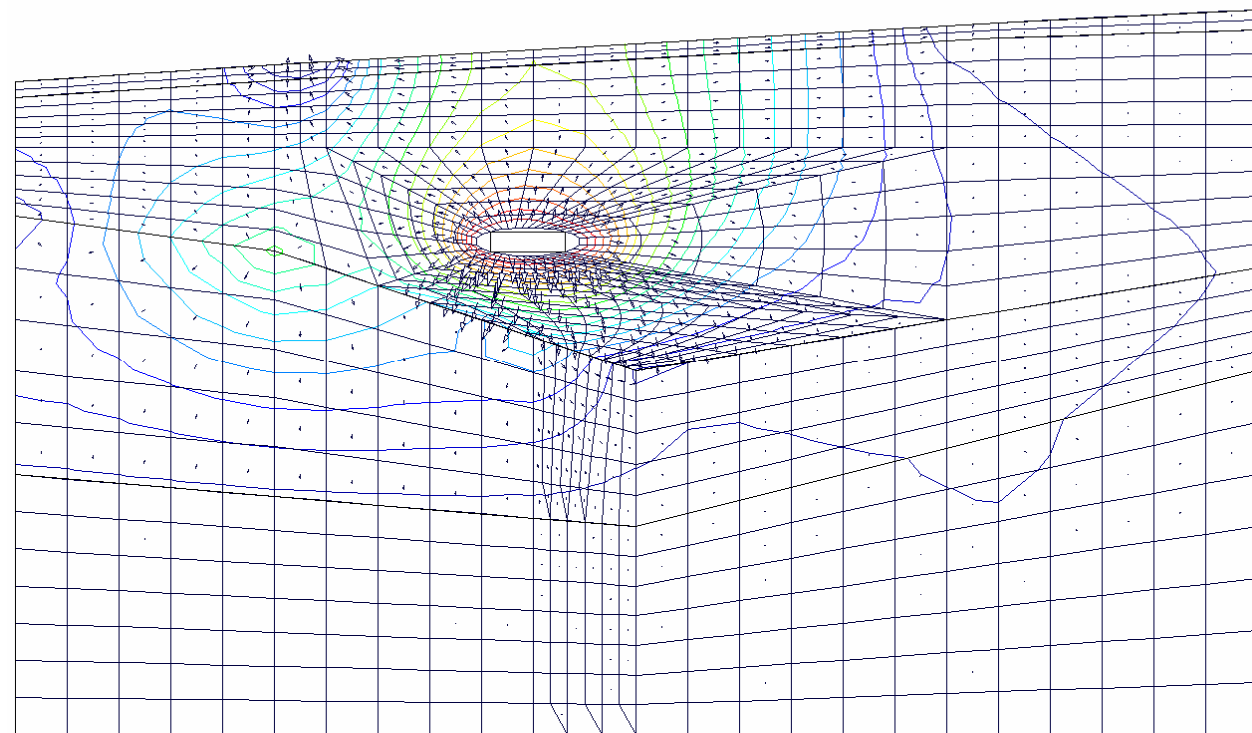
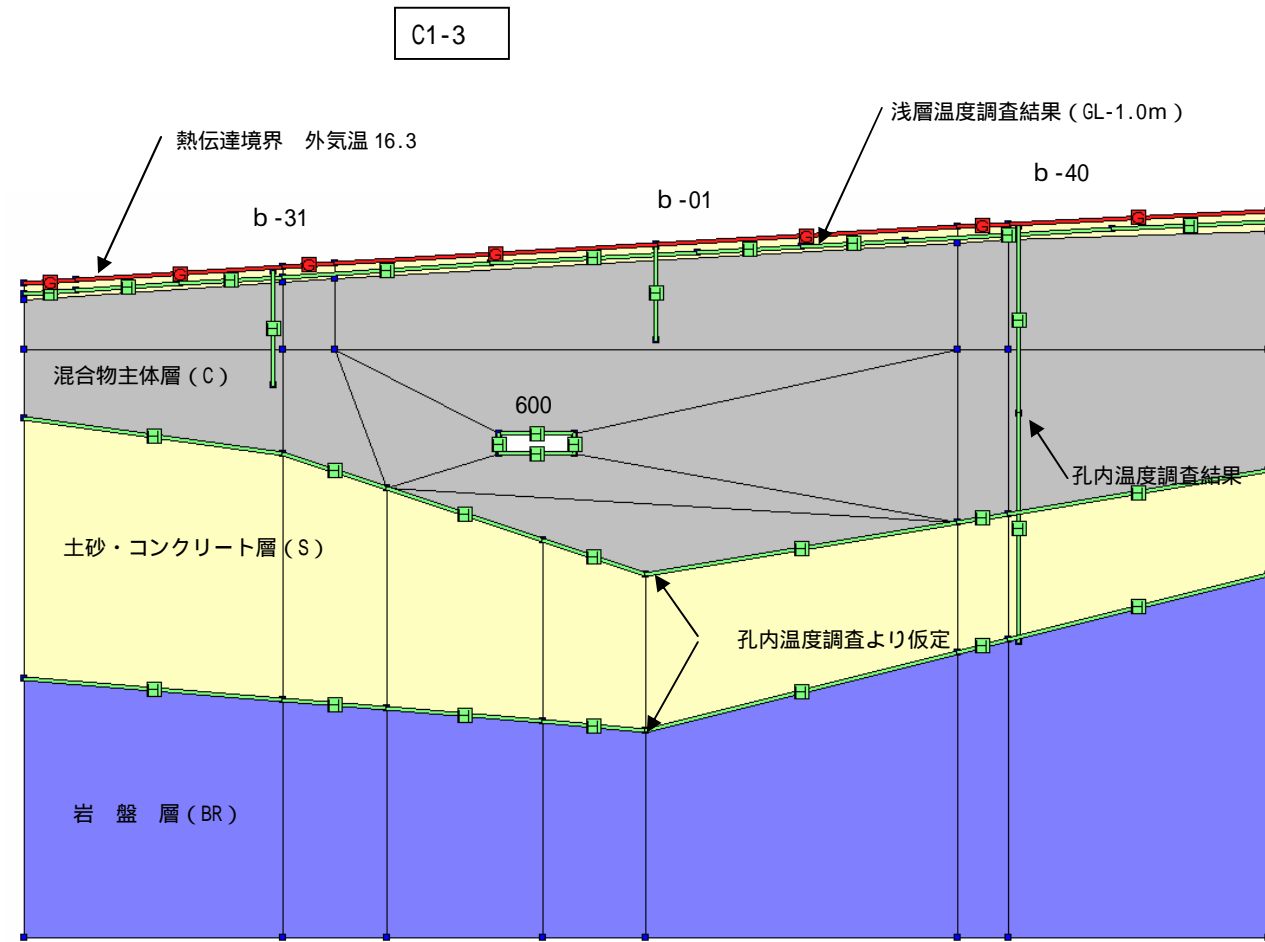


図 3-3-5 試行解析 ケース 1-3

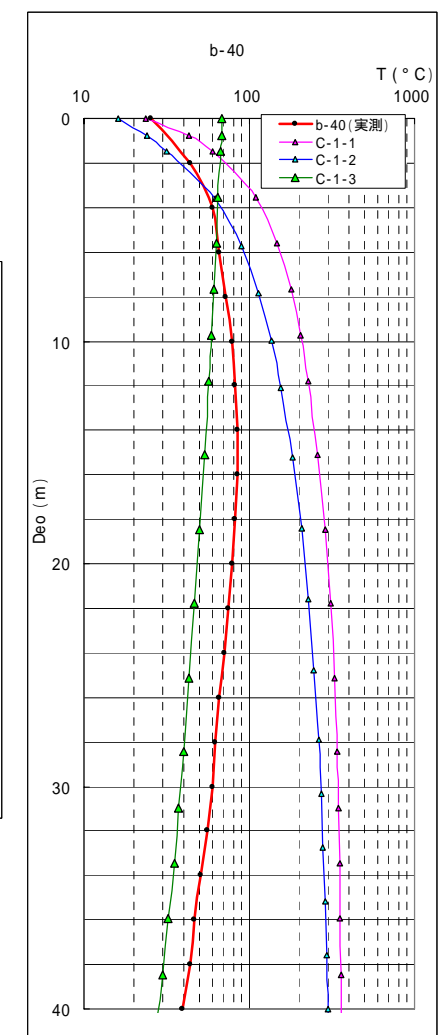
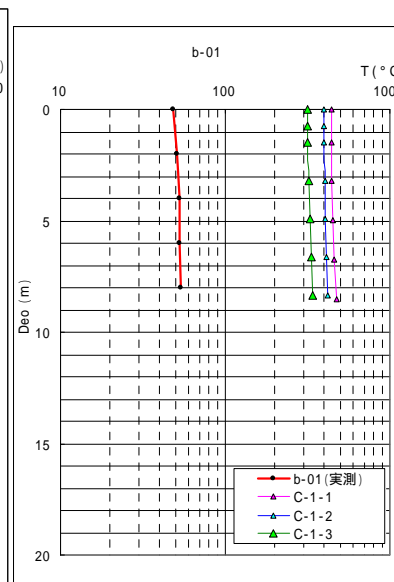
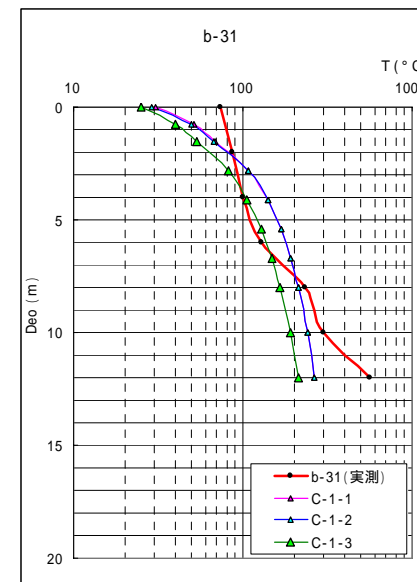
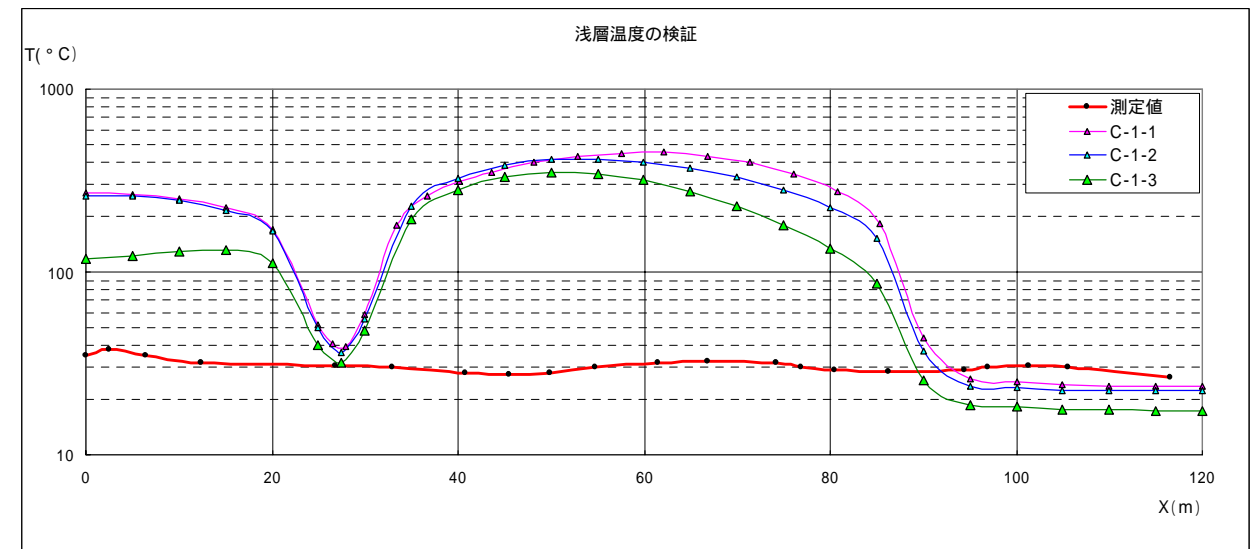


図 3-3-6 試行解析 熱源 1 の検証

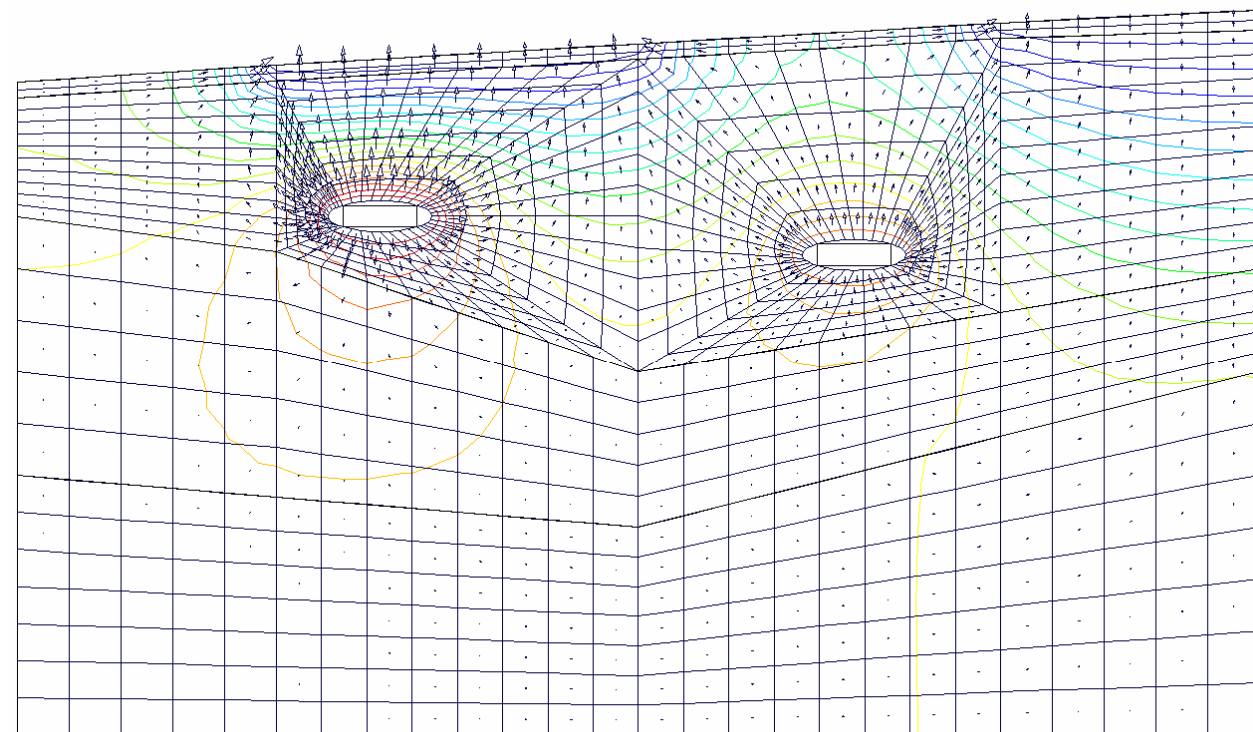
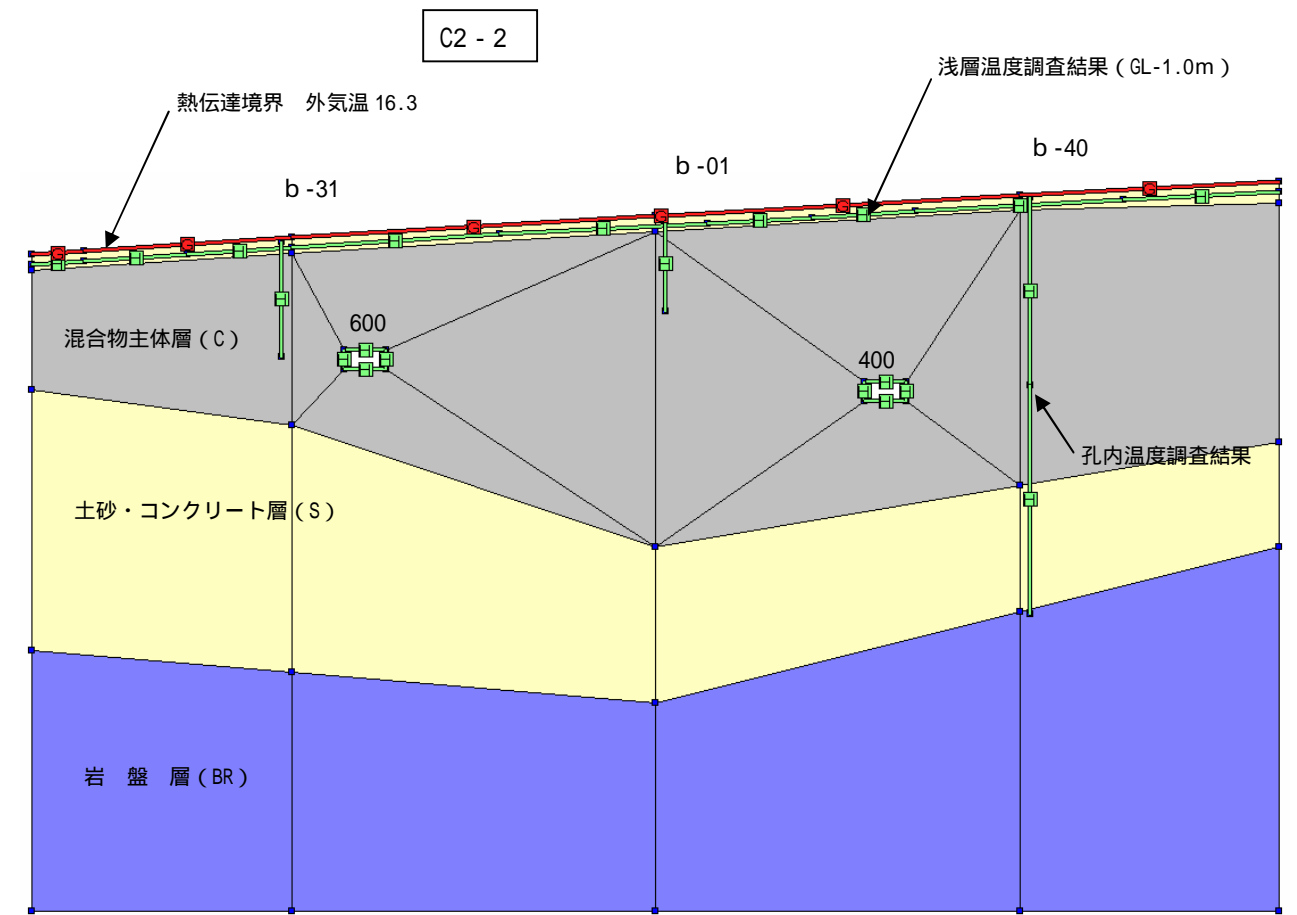
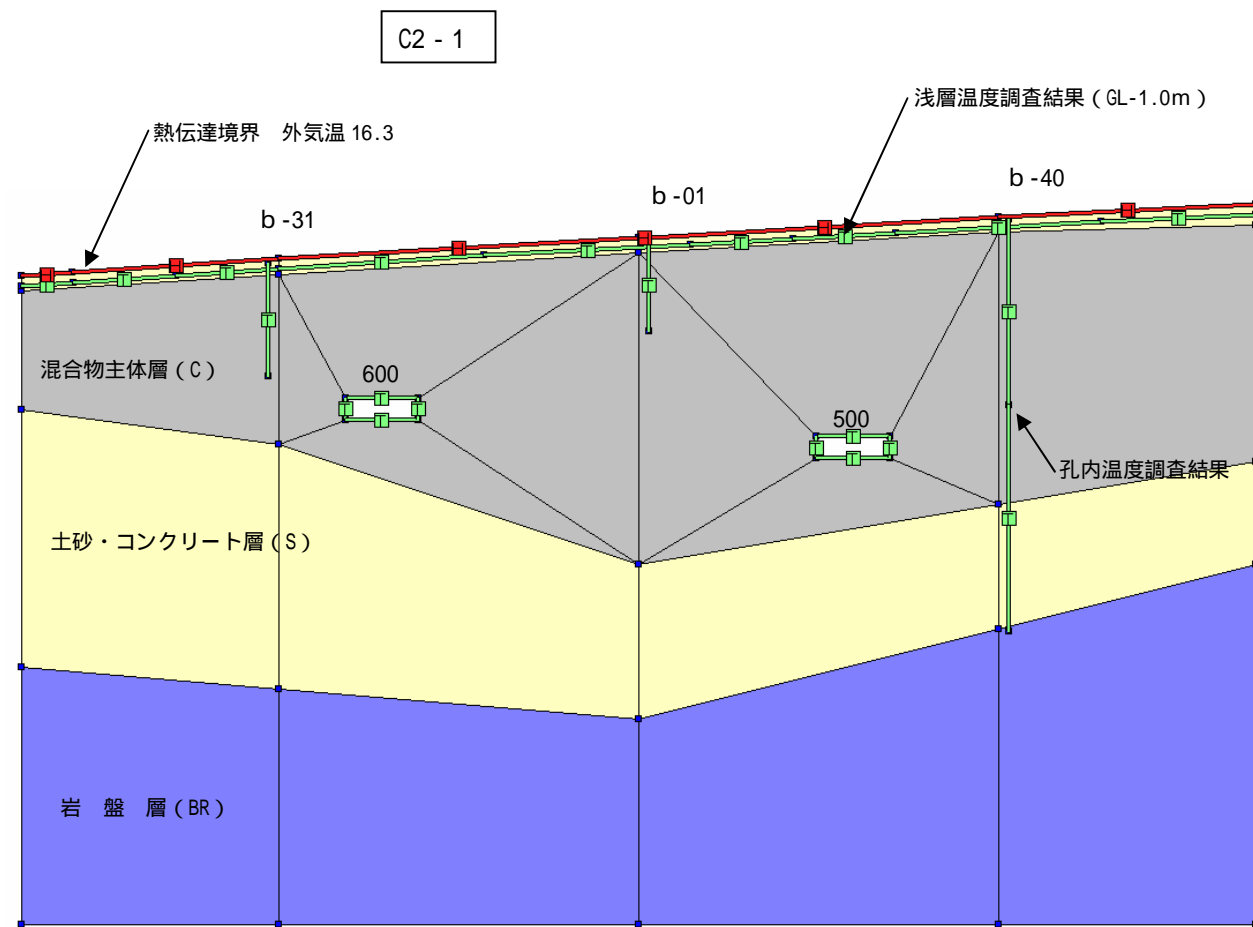


図 3-3-7 試行解析 ケース 2-1

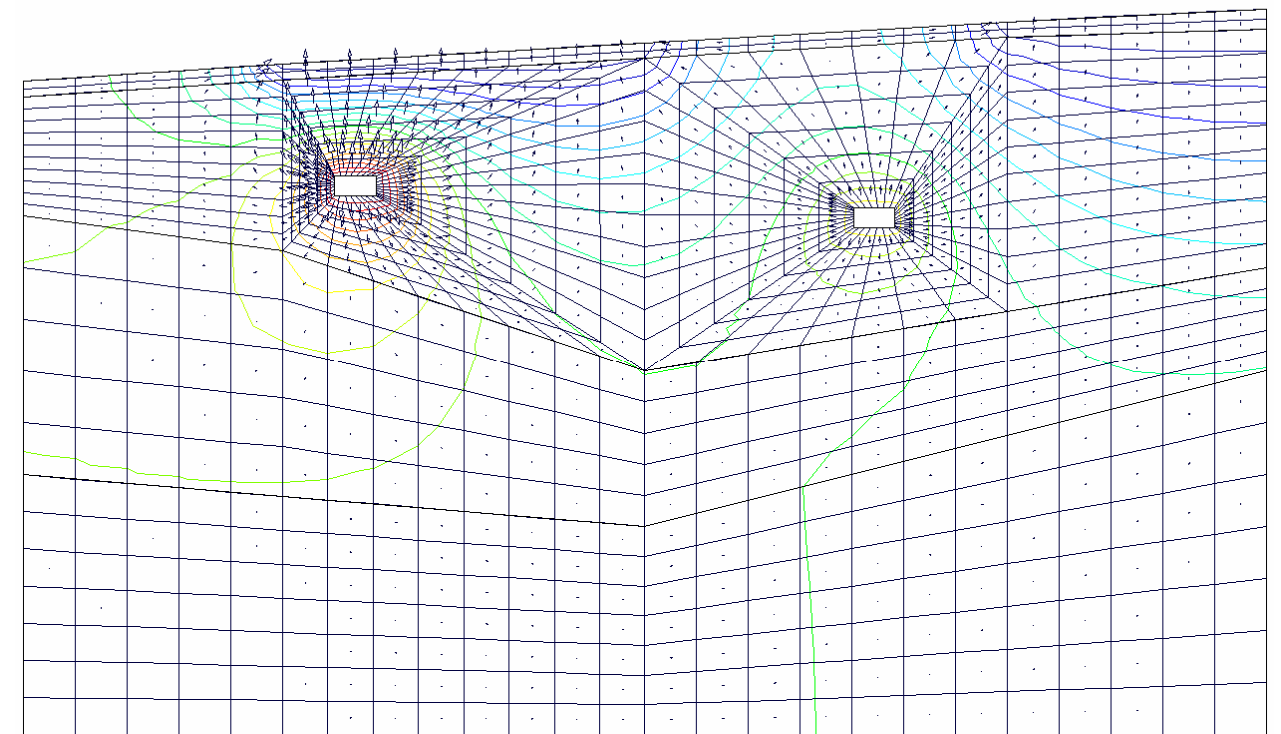


図 3-3-8 試行解析 ケース 2-2

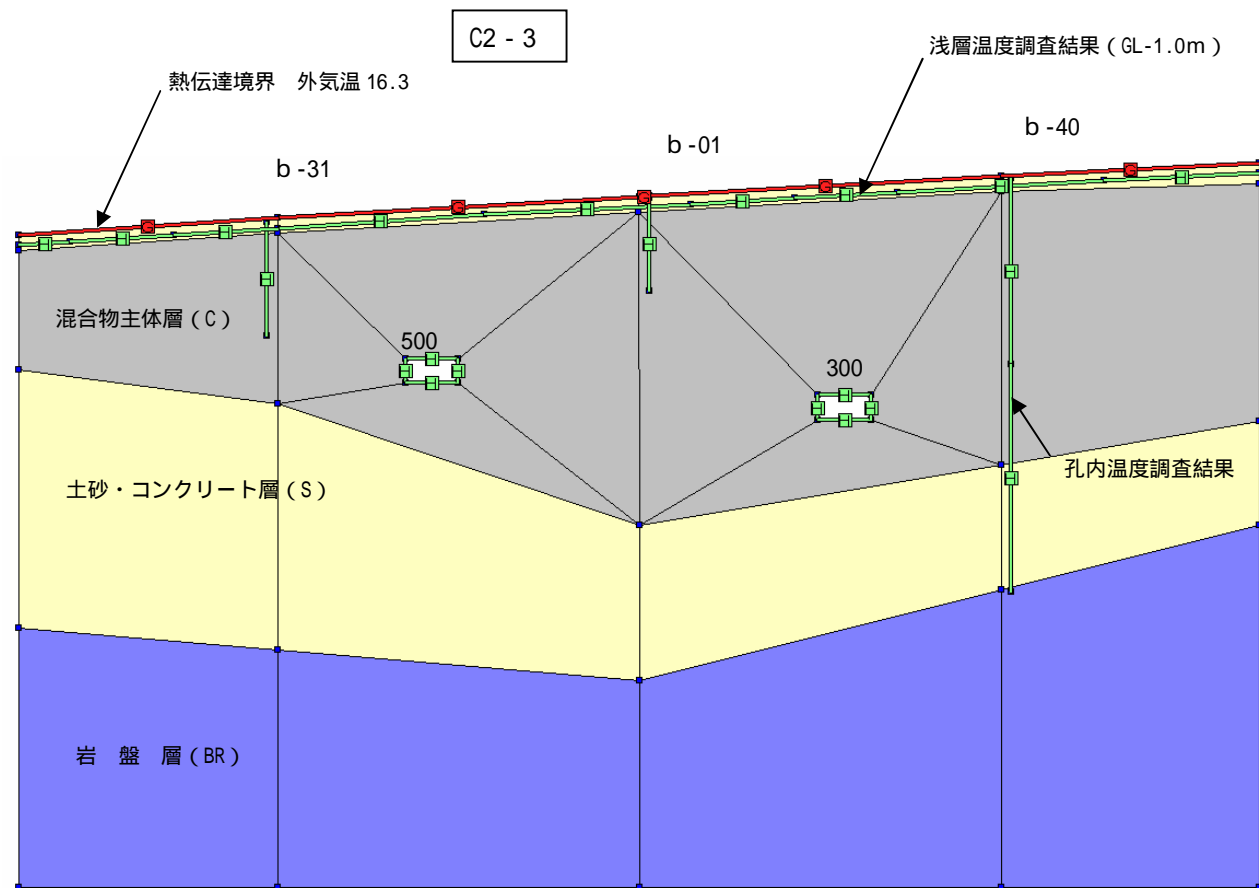


図 3-3-9 試行解析 ケース 2-2

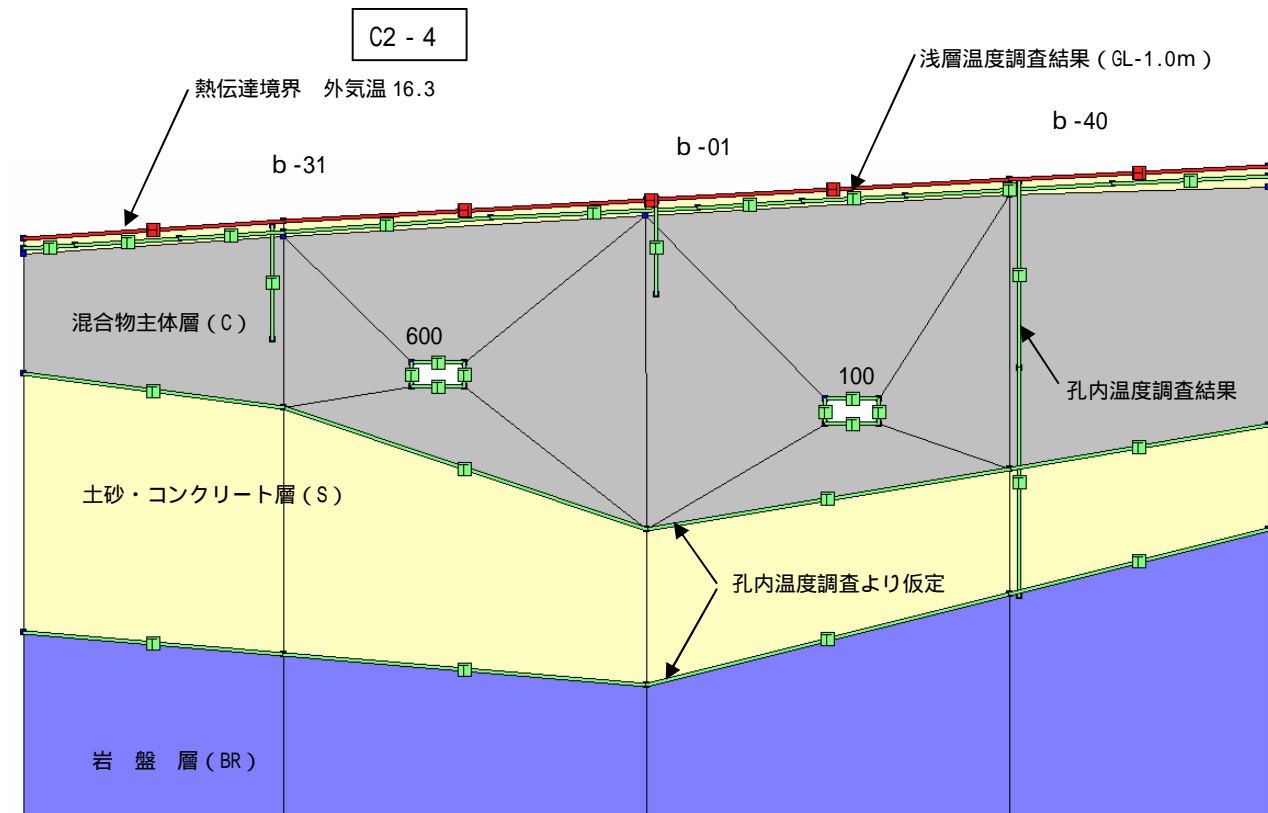
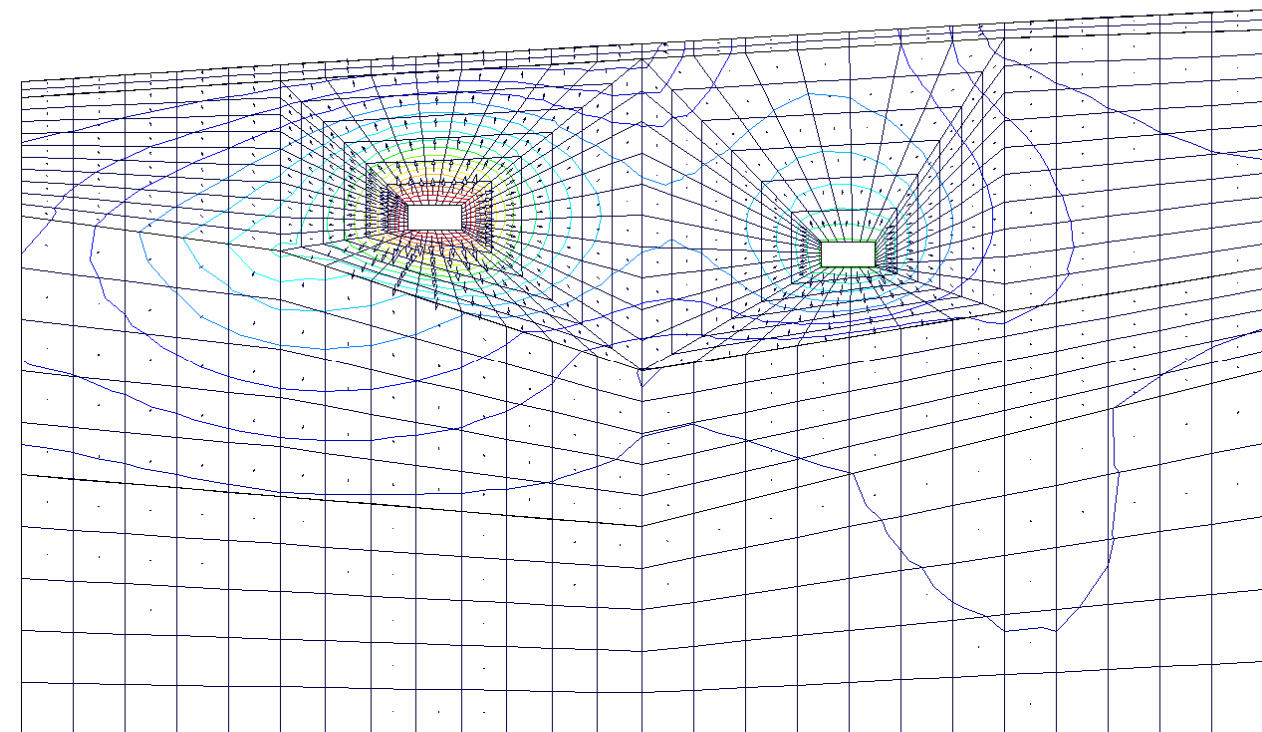
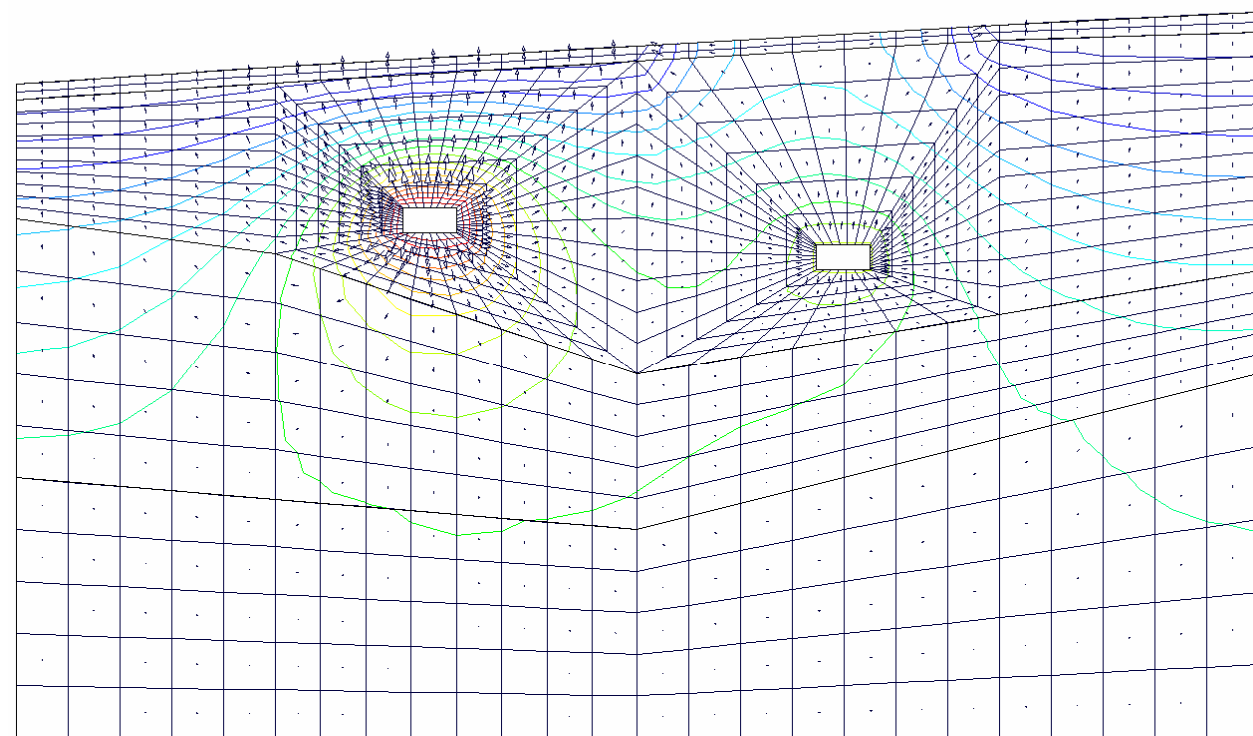


図 3-3-10 試行解析 ケース 2-3



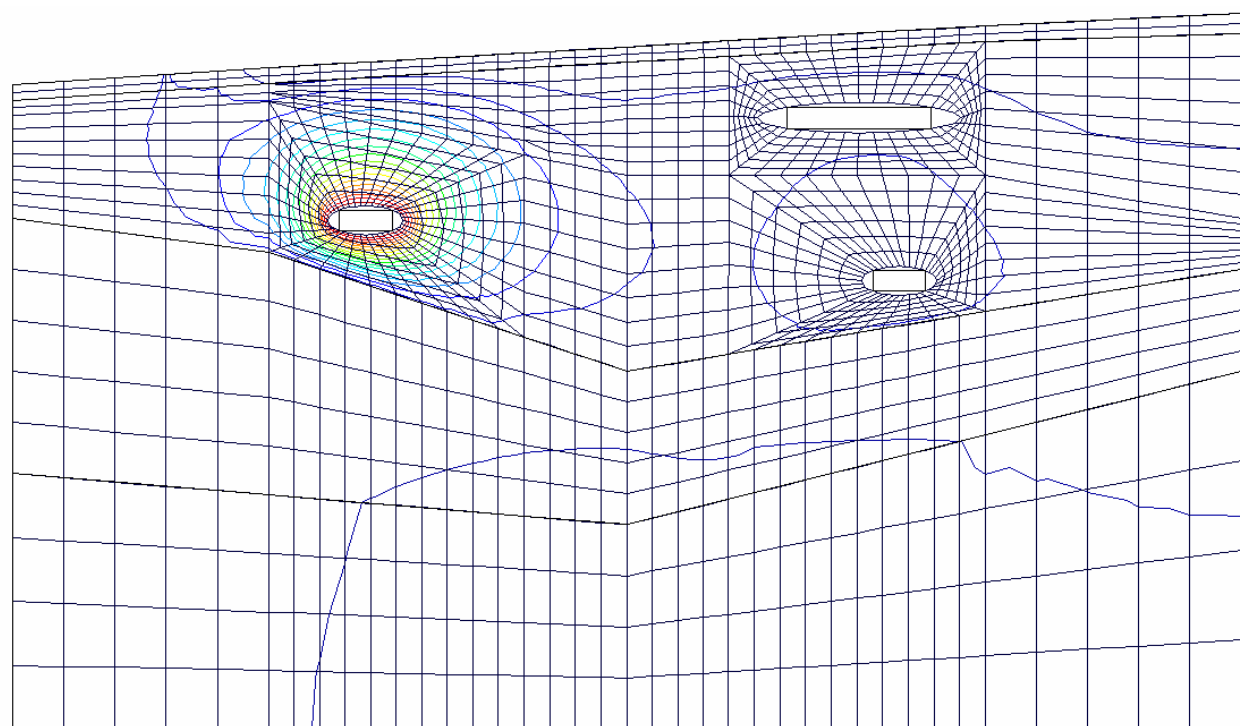
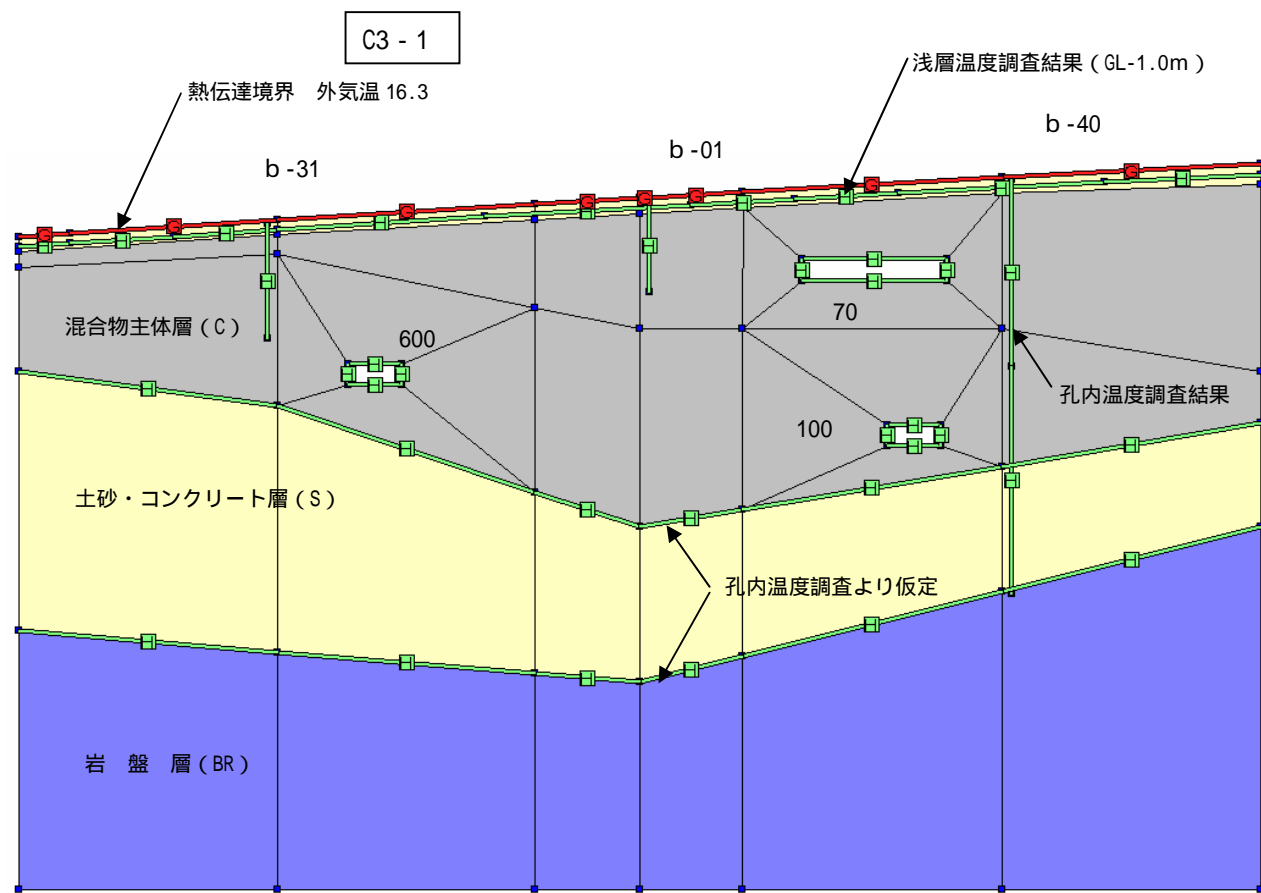


図 3-3-11 試行解析 ケース 3-1

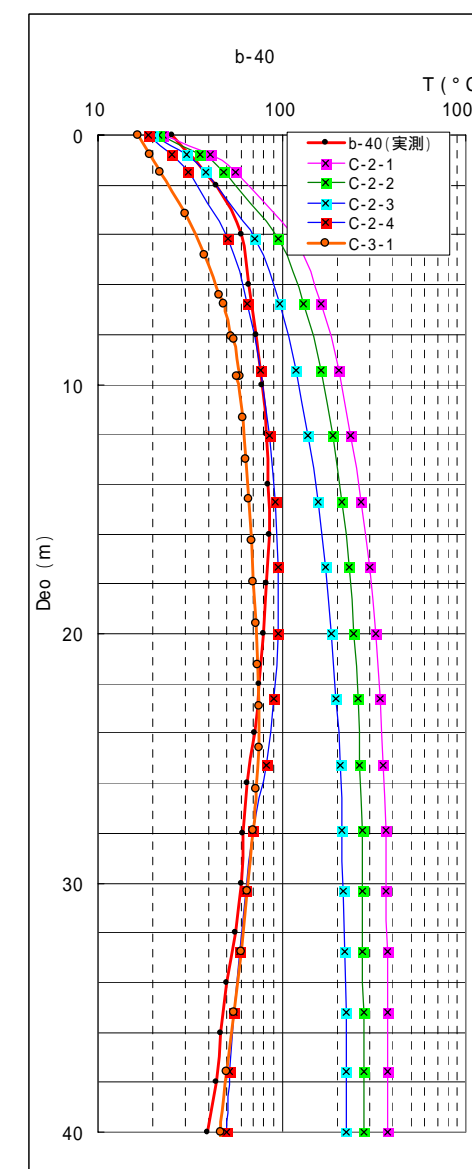
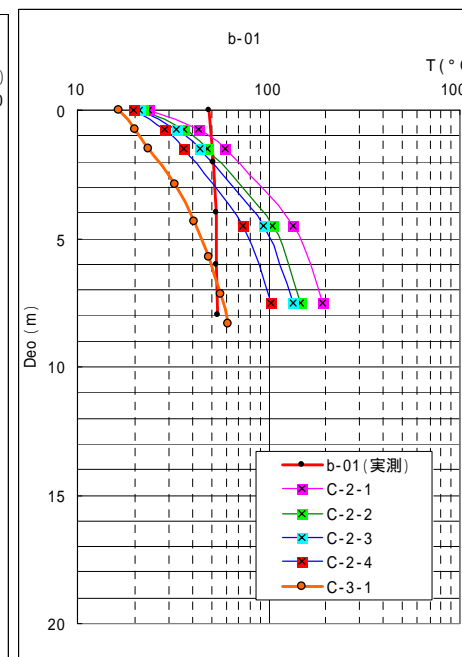
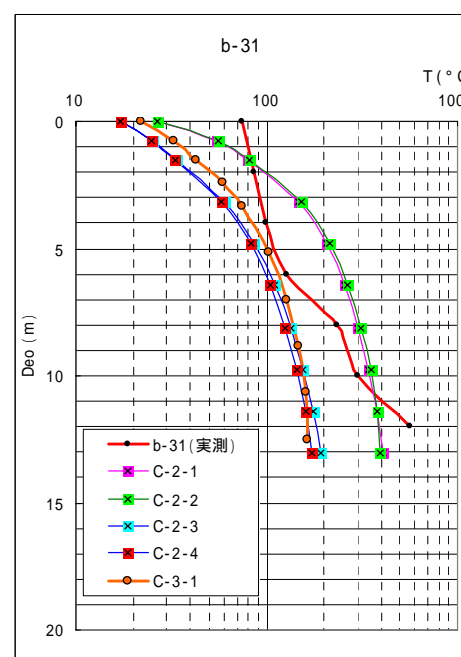
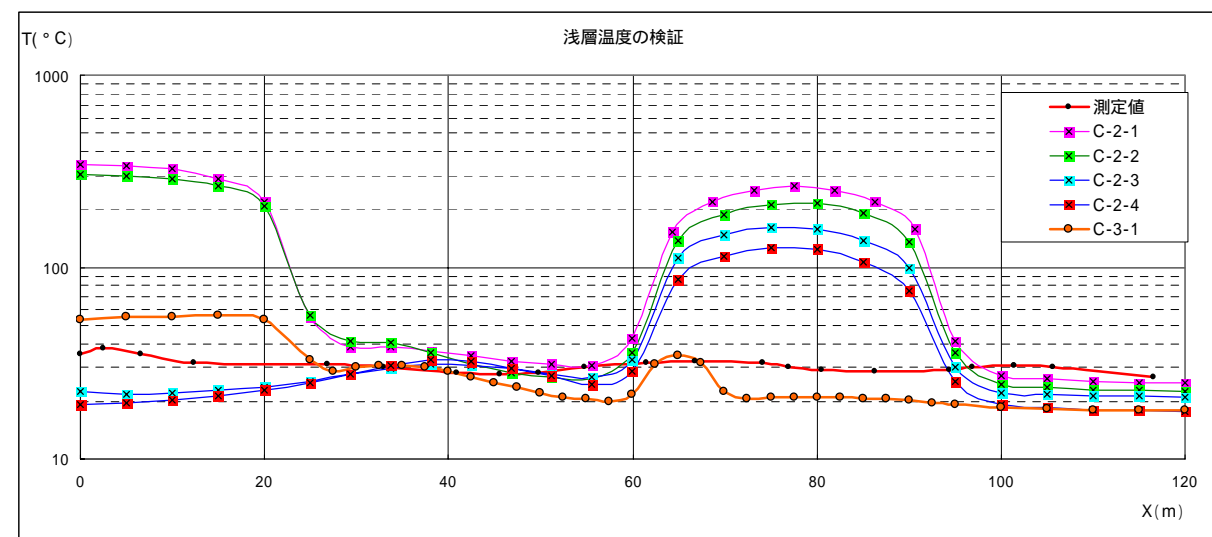


図 3-3-12 試行解析 熱源 2~3 の検証

解析結果とまとめ

試行解析モデルと同じ条件で、既往調査測線の従横断面について伝熱解析を実施した。

解析結果はおよび座標データを巻末に添付する。解析結果より温度分布断面図を図 3-3-13～24 に示す。

伝熱解析結果から得られた廃棄物内の温度分布の再現状況に関する特徴を以下に示す。

燃焼範囲： 燃焼の範囲を、水分が蒸発して乾燥状態となる 100 以上とした場合、平面的には e-04～e-05 と e-18～e-19 の間付近で、標高約 100～120m の範囲に 100 以上の位置が含まれる。

その他： 観測した温度は、伝熱現象の他にガス対流等による熱移動の影響も受けていると考慮すれば、高温が観測された範囲は本来の燃焼部分よりも大きく判定された可能性があると考ええる。

図 3-3-25 に 100 以上の範囲を投影した平面図を示す。

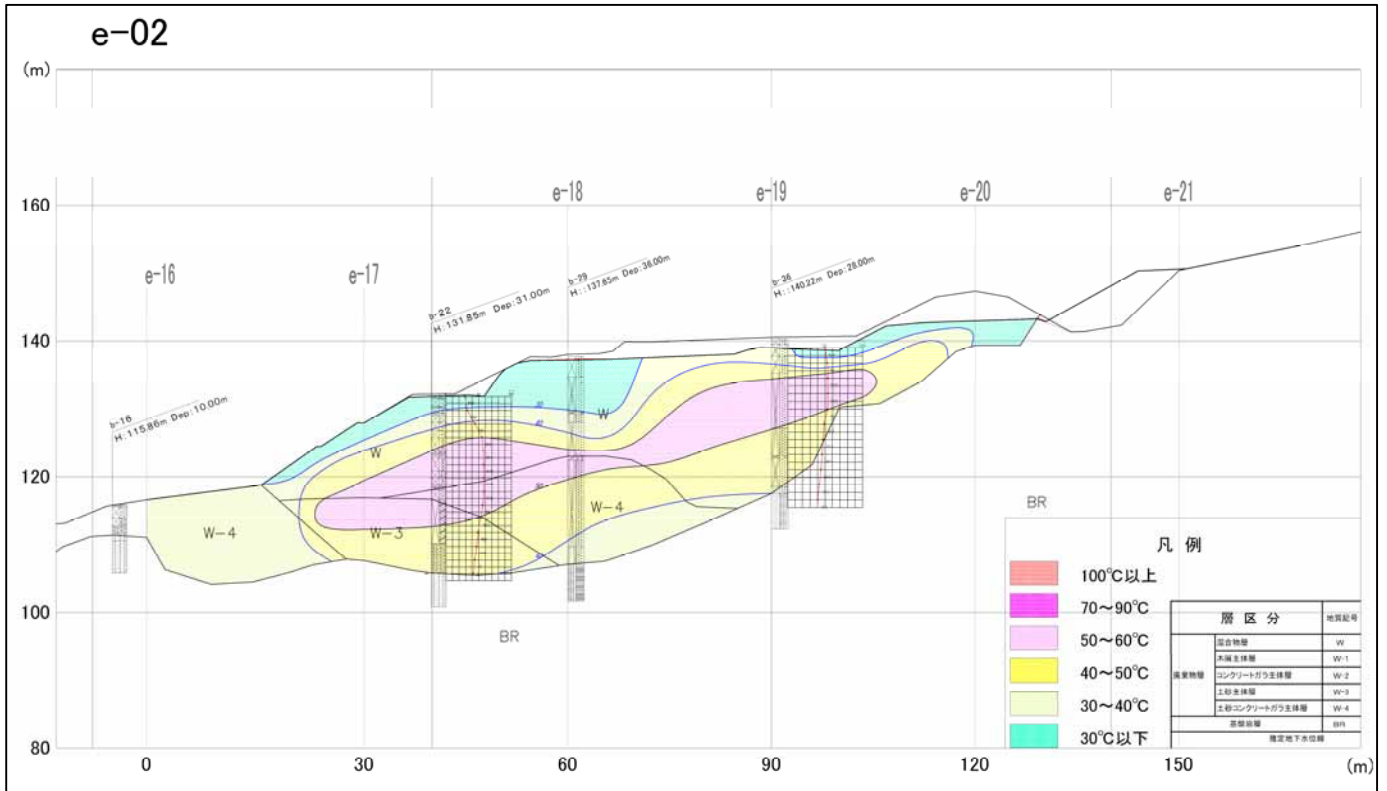


図 2.2.12 温度分

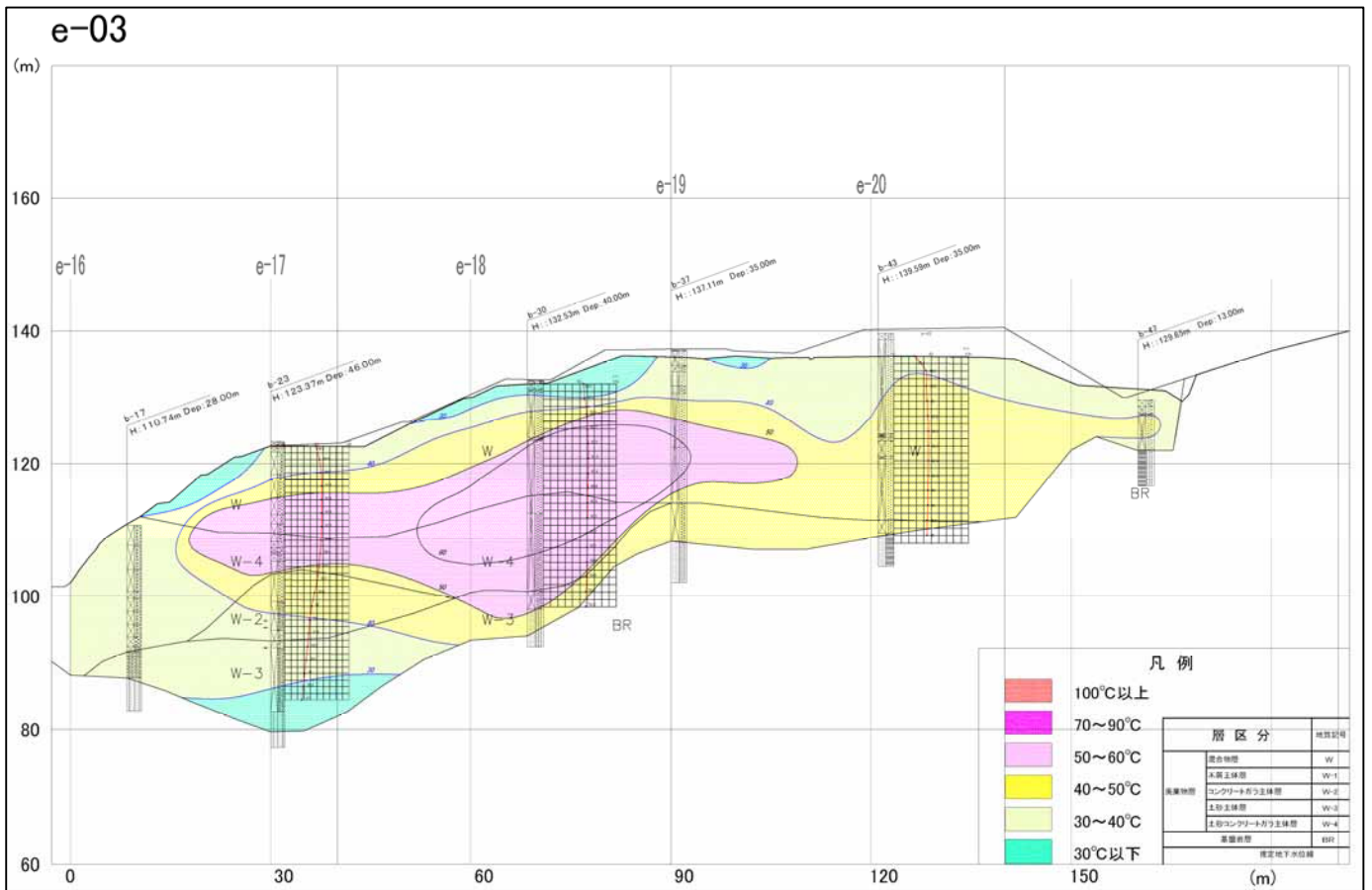


図 2.2.14 温度分

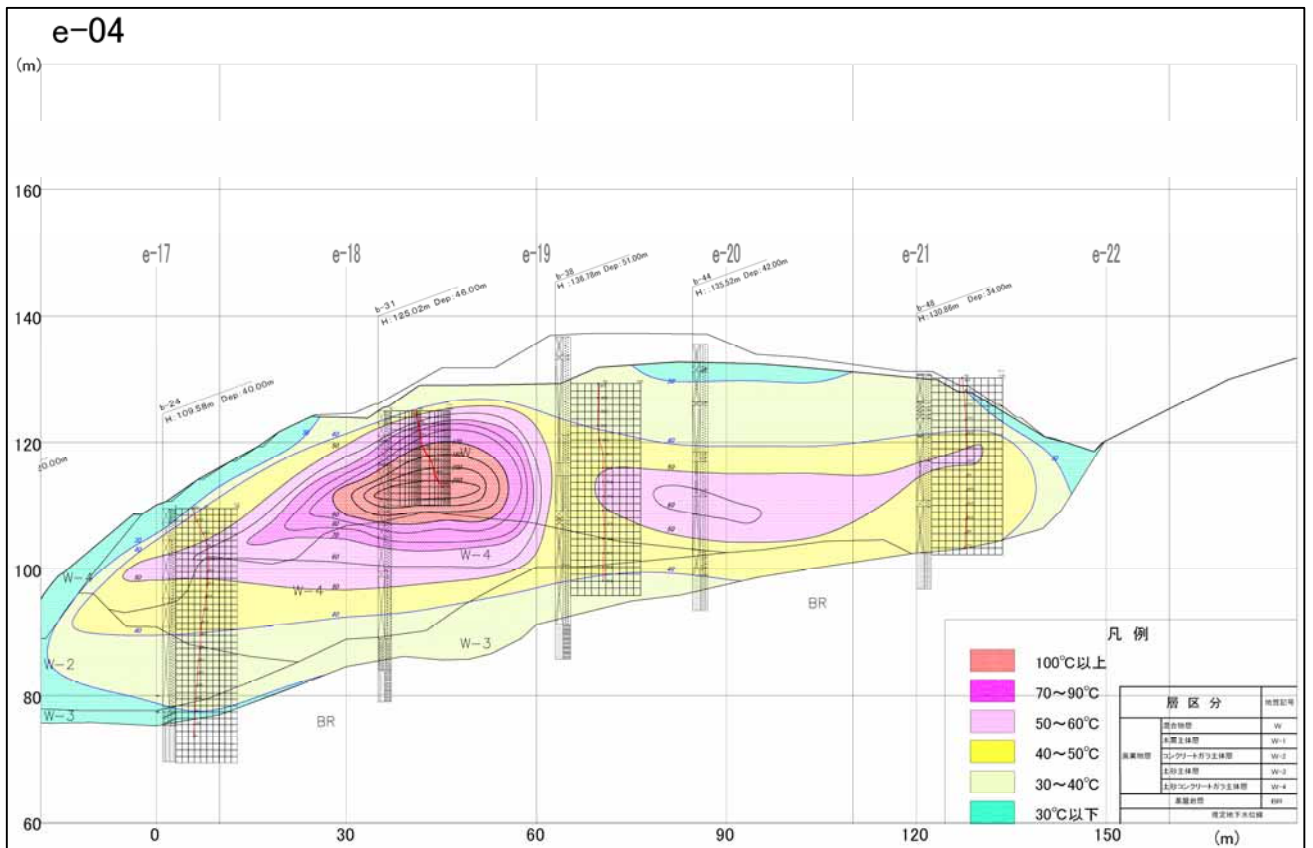


図 2-2-15 温度図

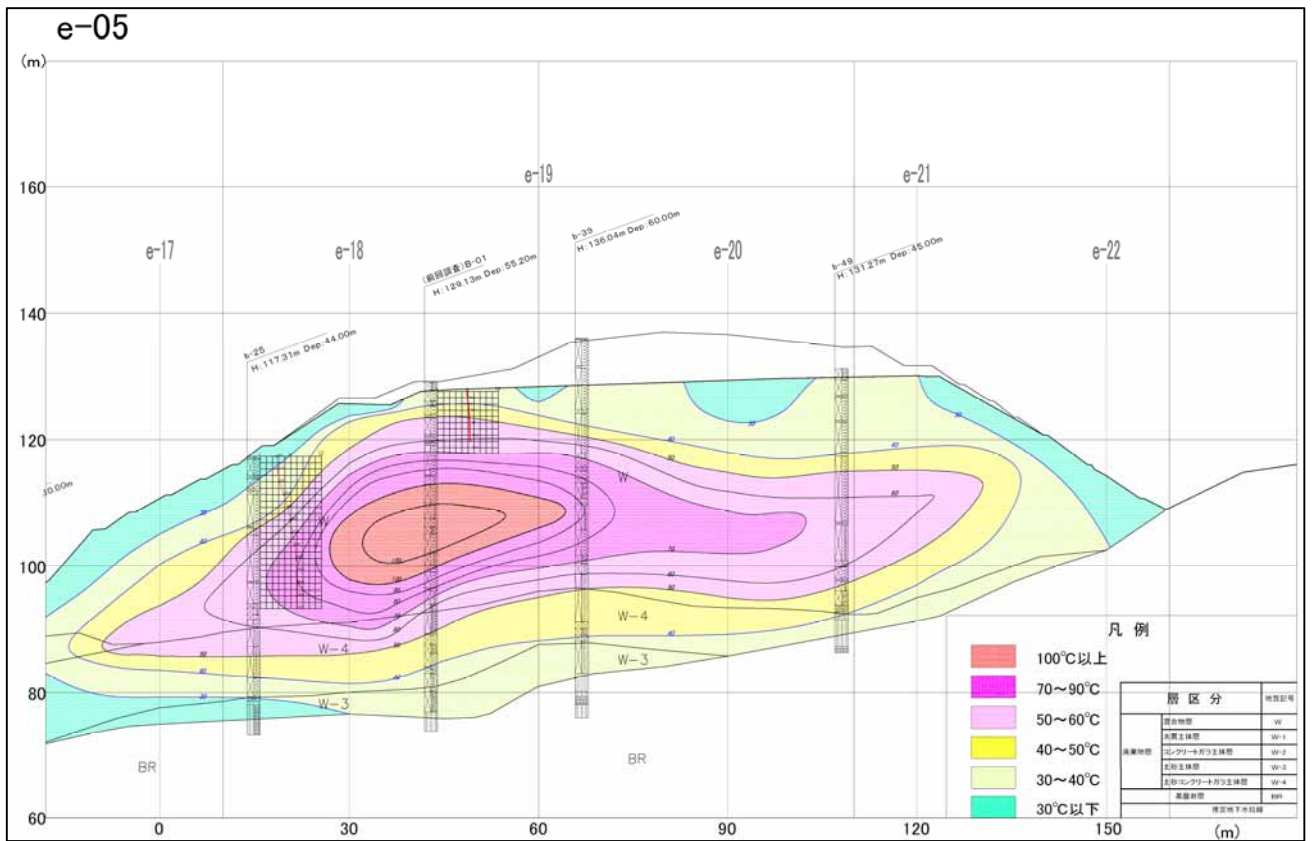


図 2-2-16 温度図

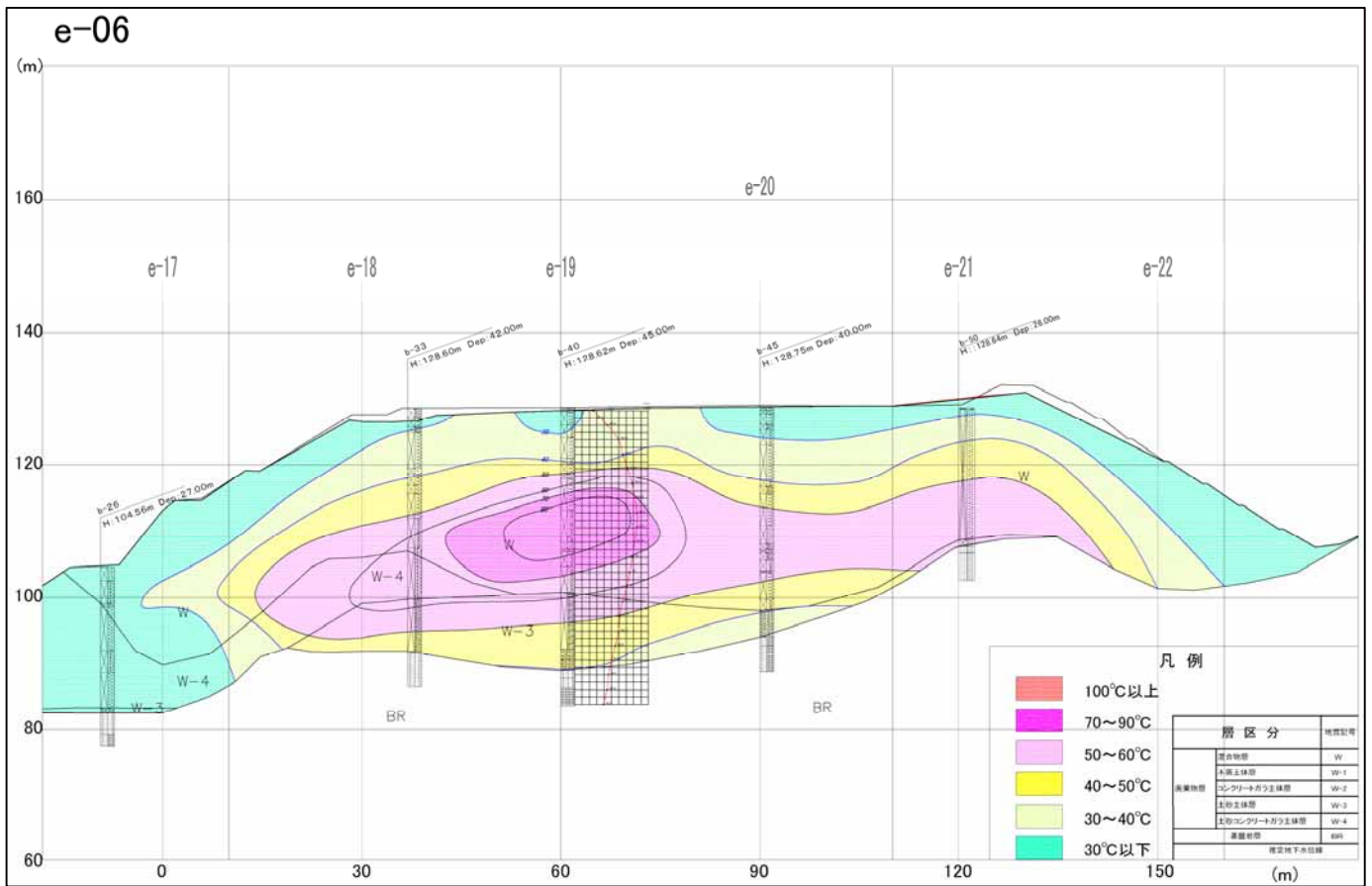


図 2.2.17 温度分布

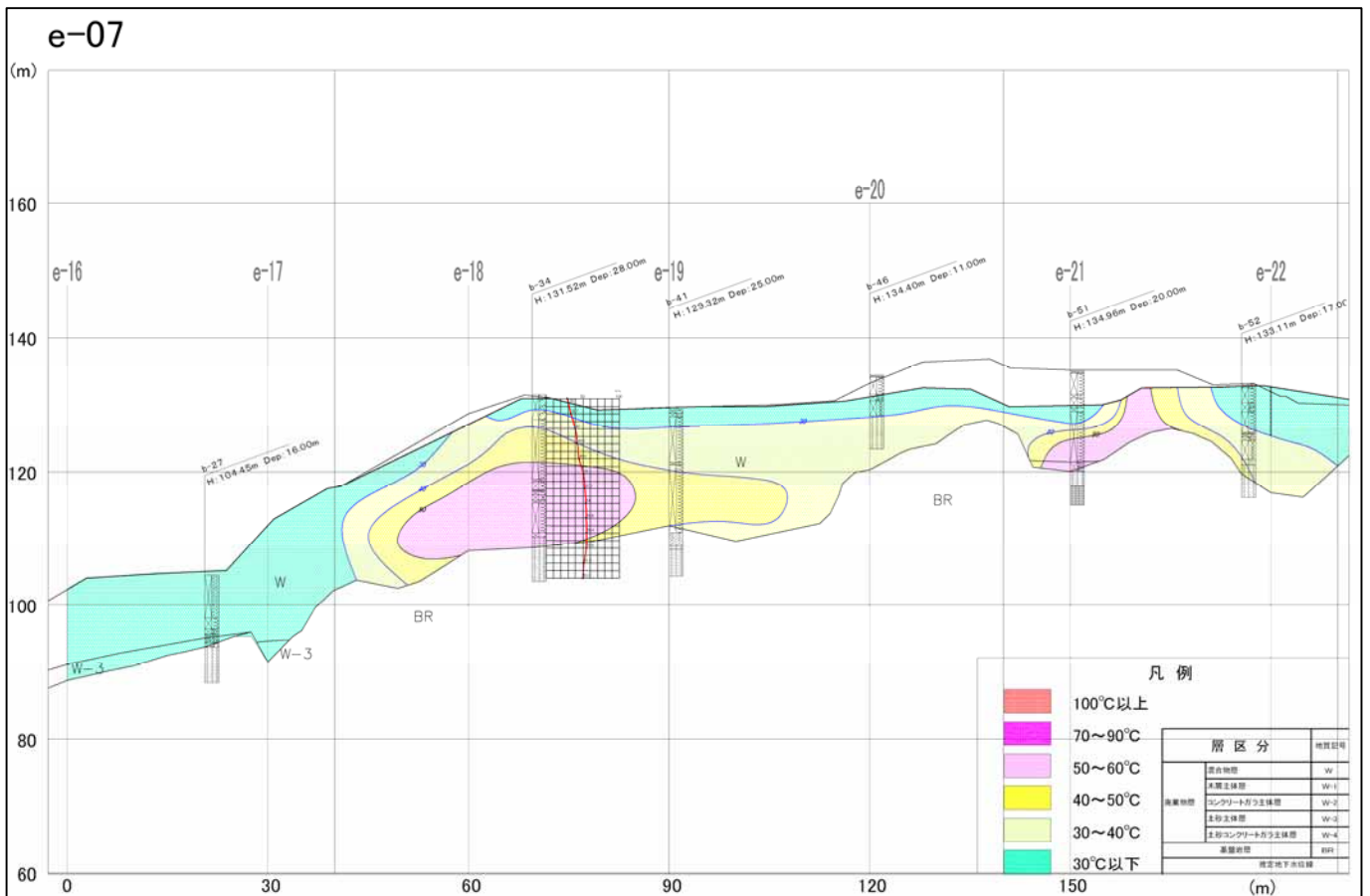


図 2.2.18 温度分布

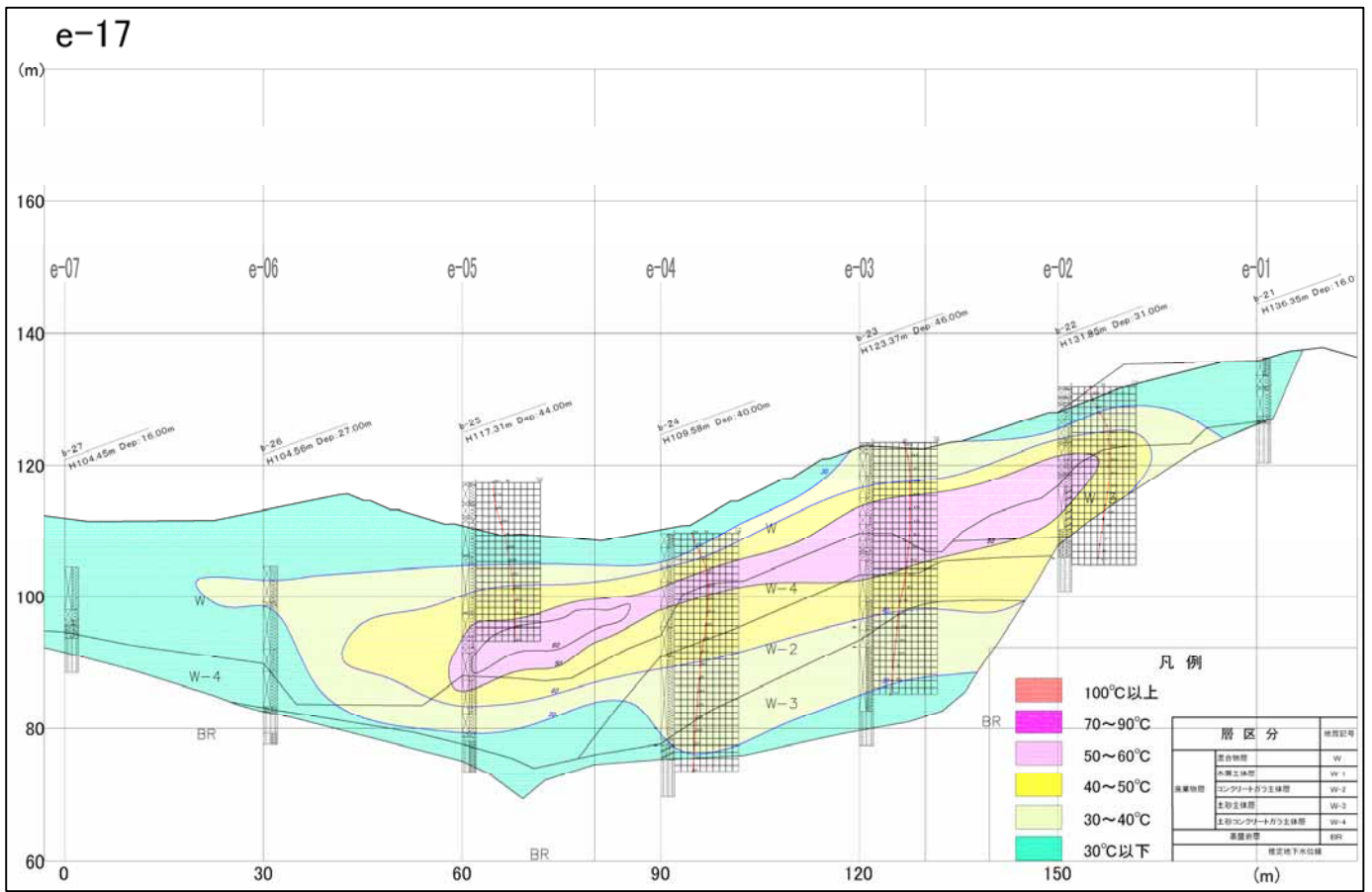


図 3.2.10 温度分

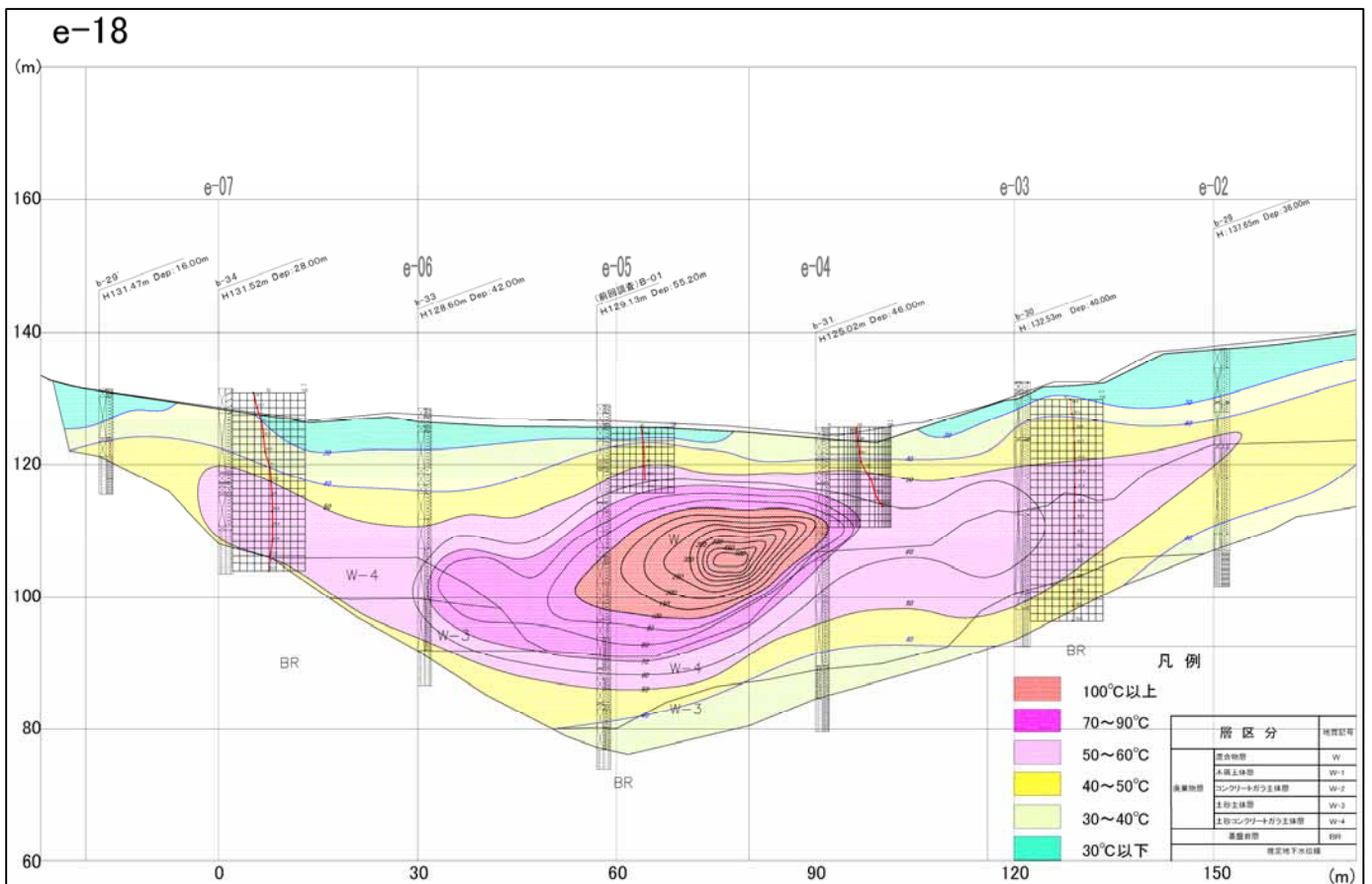


図 3.2.20 温度分

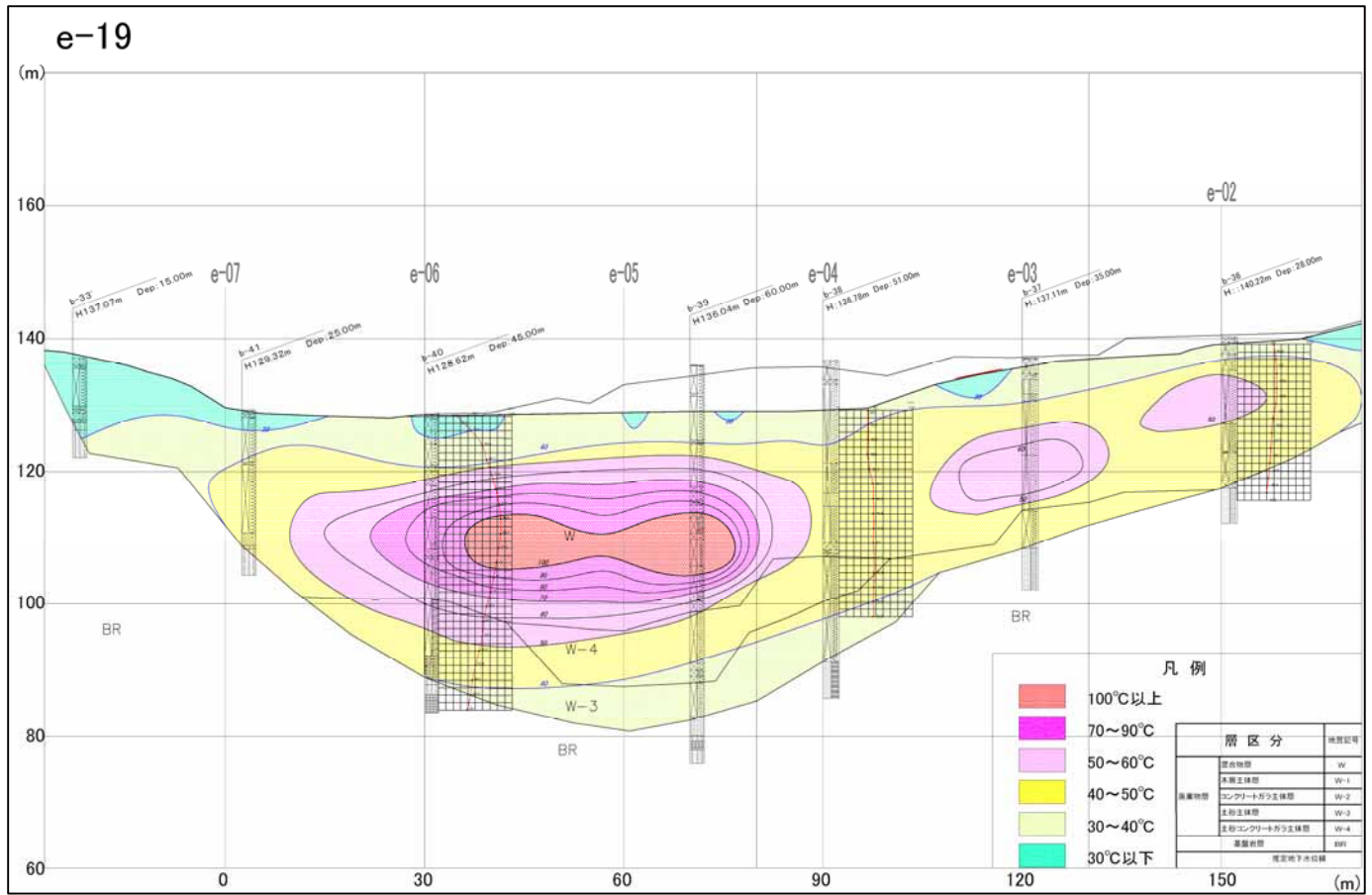


図 3.2.21 温度分布

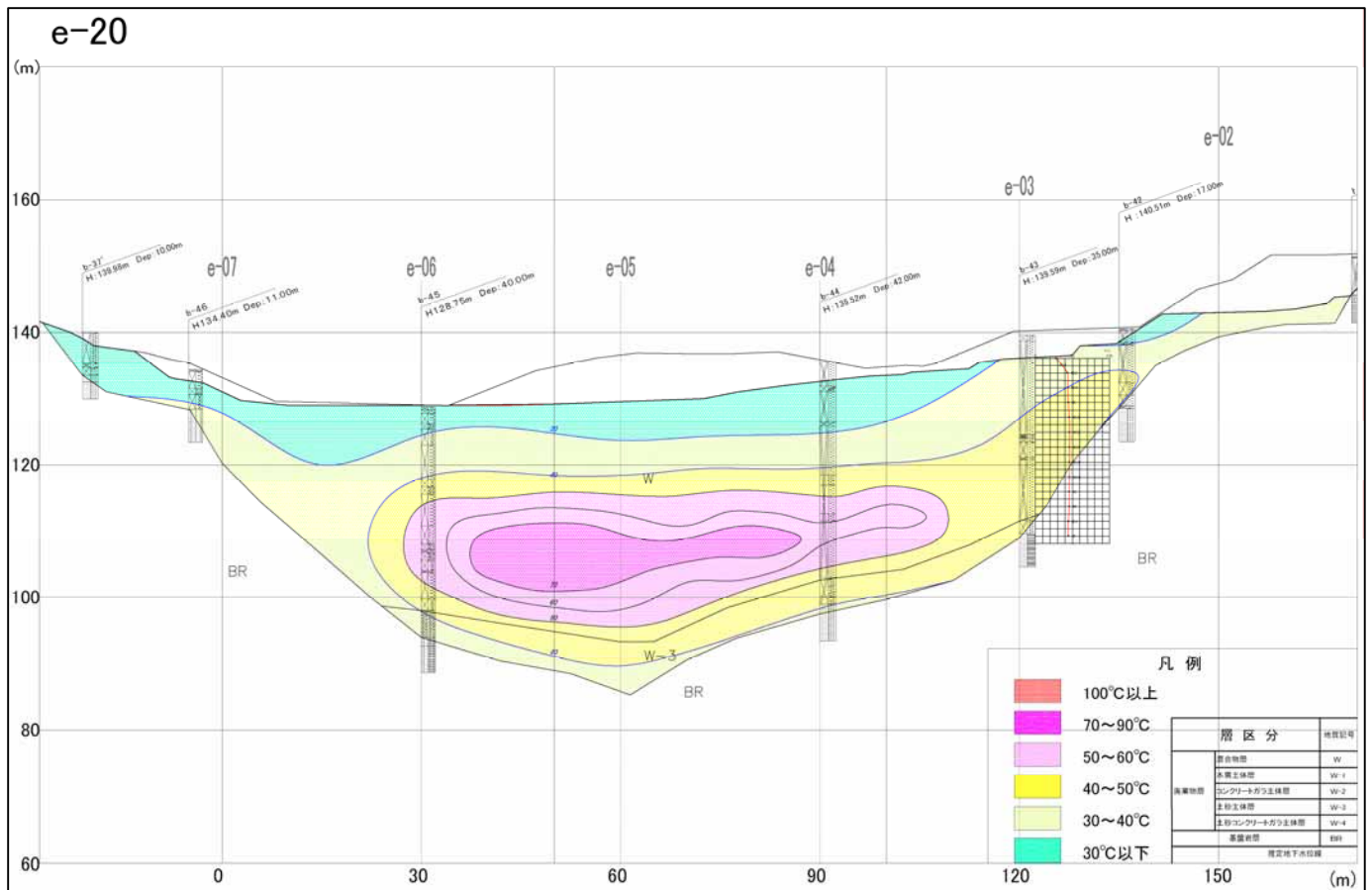


図 3.2.22 温度分布

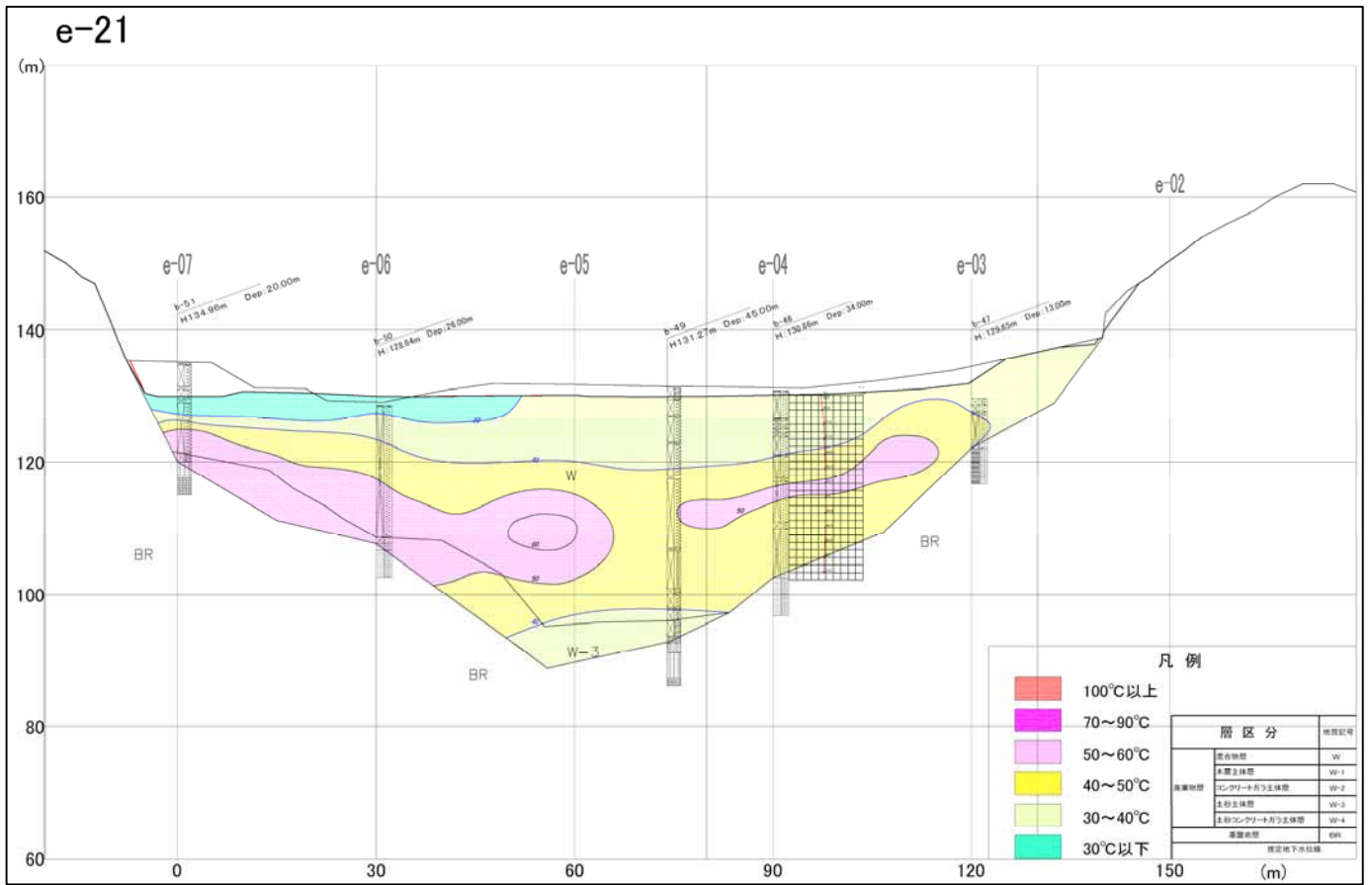


図 3-3-23 温度分布

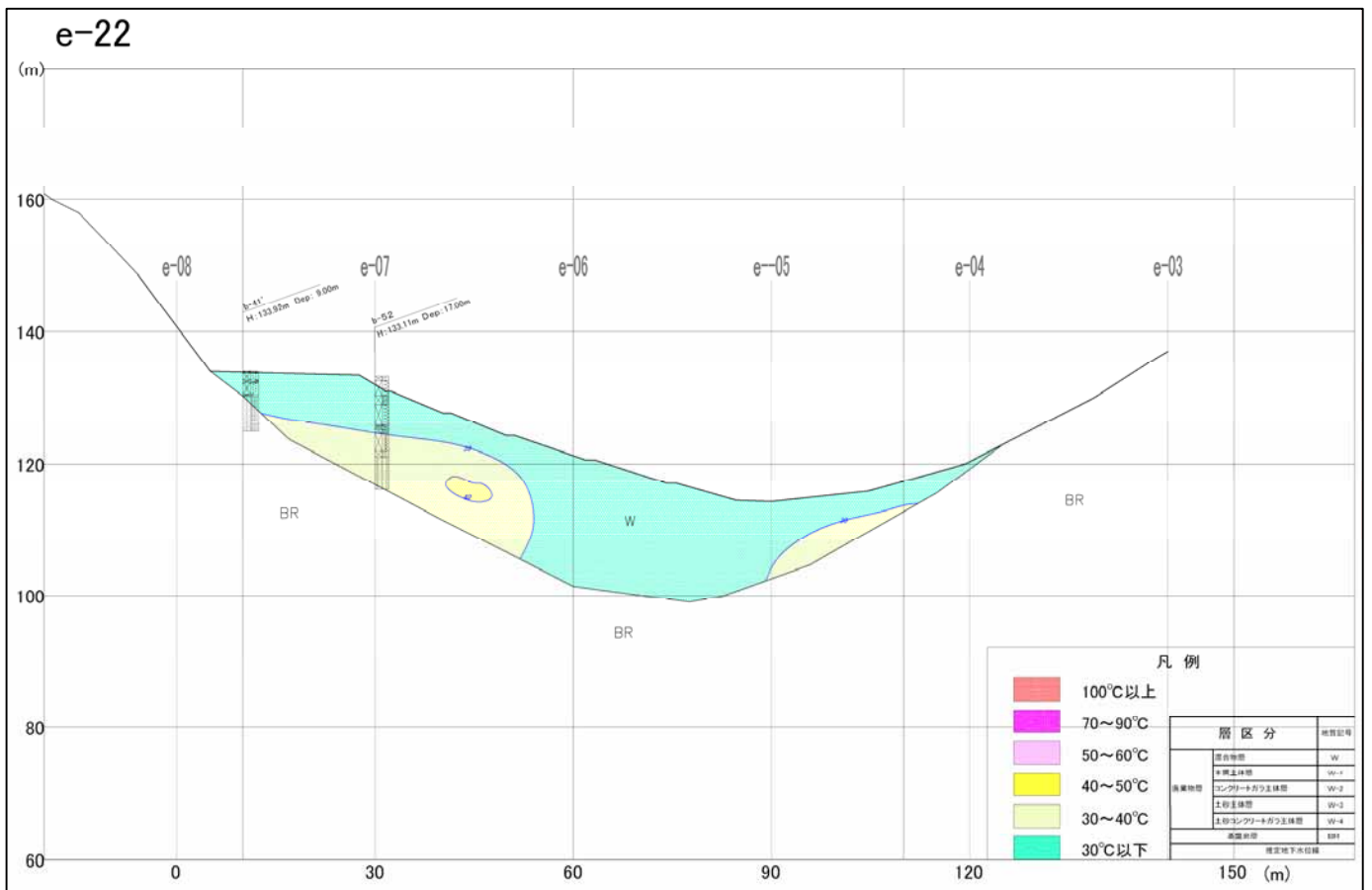


図 3-3-24 温度分布

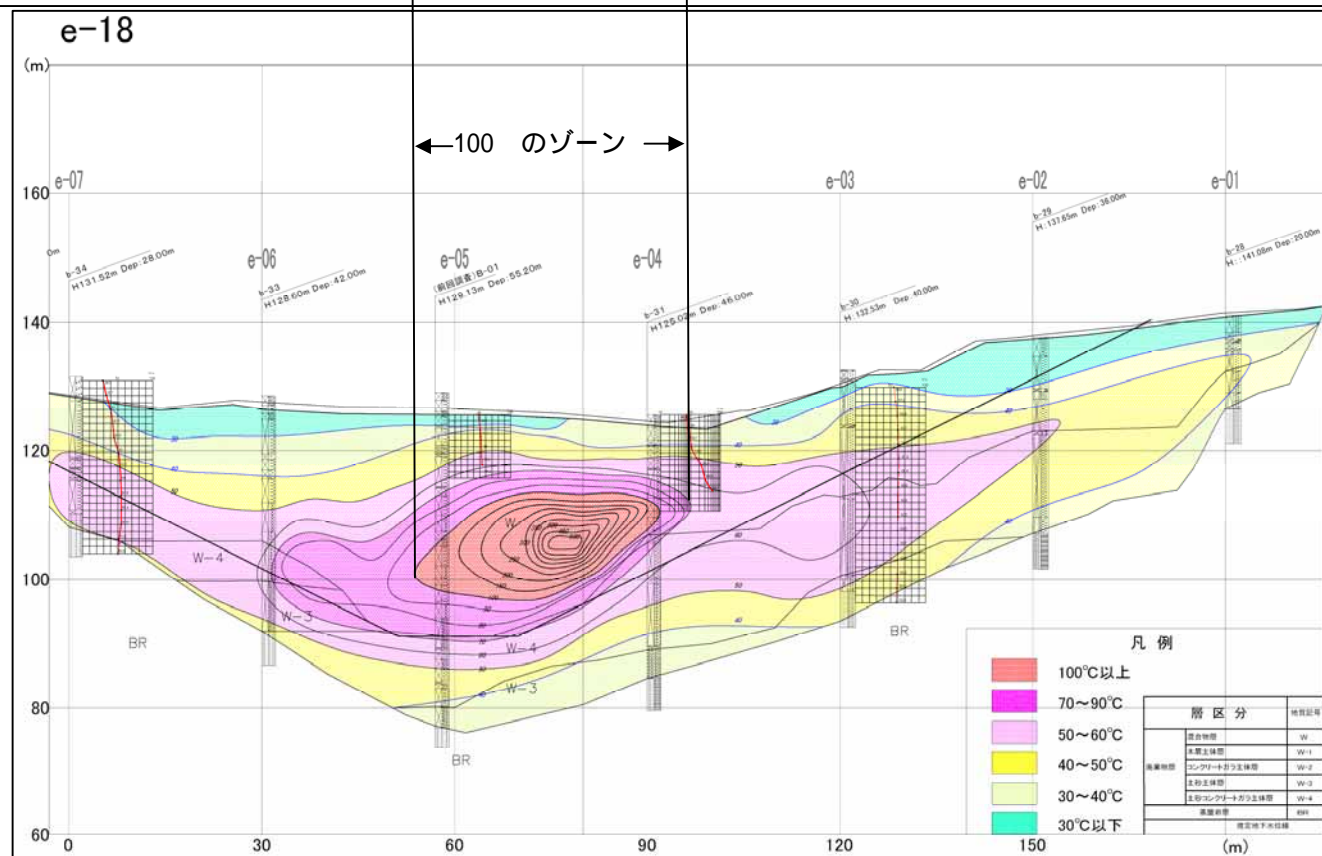
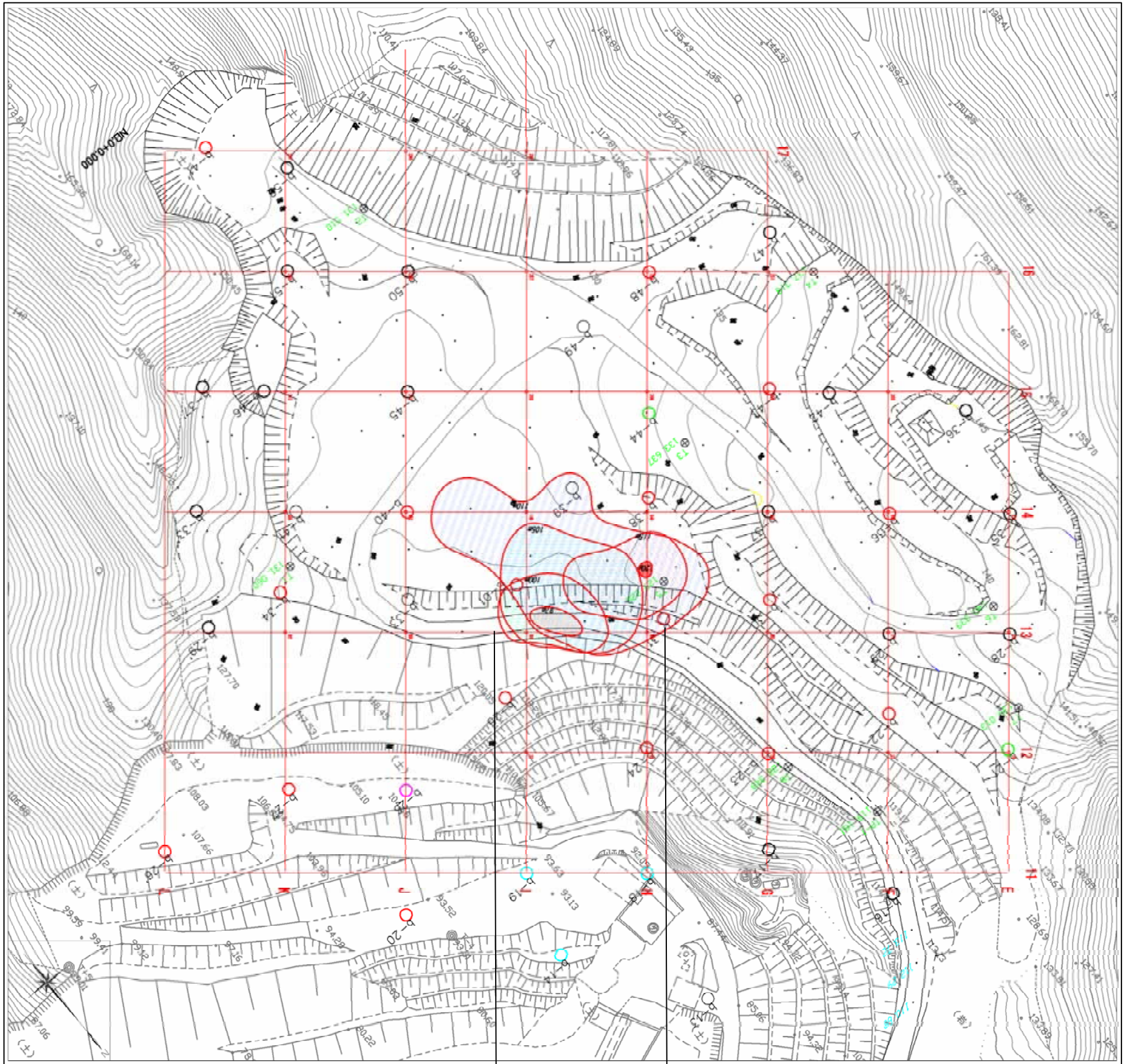


図 3-3-25 100 以上範囲の投影平面図

3-1-2 温度調査と伝熱解析結果のまとめ
 温度調査と伝熱解析の結果を表3-3-3に示す

表3-3-2 調査・解析結果まとめ

調査・解析種目	結果	備考
浅層温度測定	<ul style="list-style-type: none"> 浅層温度の平均は30以下であり、30以上の箇所は、廃棄物の直接露出・植生被覆による蓄熱、燃焼による影響を受けている可能性が高いものと考えられる。 高温部は、廃棄物露出箇所と土砂分布箇所を検出し、土砂分布箇所付近に熱源と想定。 浅層温度と表面温度の高温部検出箇所は殆ど同位置である。 	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄物層内の熱移動は廃棄物が熱の媒質として一様ではないため、均一に等方向に伝熱拡散していると断定できない。そのため、温度分布には偏在性があると考えられる。
赤外線カメラ 表面温度測定		<ul style="list-style-type: none"> 測定により識別した地表面温度の幅は1~3であり、地表付近の植生被覆や日照、風向風速のノイズを受けるおそれがあり、測定温度の評価について注意が必要である。
孔内温度測定	<ul style="list-style-type: none"> 孔内温度は50前後が廃棄物中の有機物の発酵による蓄熱温度の平均であり、それ以上の温度では発酵以外の現象が生じている可能性がある。 測定温度と一般的な知見からb-31深部では燃焼が生じていると判断する。 孔内温度の経時変化より、廃棄物内部の一部は温度上昇傾向にあり、b-31の燃焼領域の拡大と空洞化が懸念される。 	<ul style="list-style-type: none"> b-31の孔底付近では約600を測定している。 b-40では孔の中間深度で約85を測定している。 b-40の測定温度については、有機物発酵の温度領域を超えており今後検討が必要であると考えられる。
伝熱解析	<ul style="list-style-type: none"> 燃焼範囲 燃焼温度の定義100とした場合、平面的にはe-04~e-05とe-18~e-19の間付近、標高約100~120mの範囲に100以上の位置が含まれる。 	<ul style="list-style-type: none"> 燃焼領域の温度について検討する必要がある。 実際の燃焼部分では、伝熱現象の他にガス移動等の熱移動があると推定されるので、伝熱現象に依存し解析した燃焼範囲は、現実の範囲よりも拡張した結果を示していると考えられる。

伝熱解析により、100以上を示す高温部の平面的な広がり、赤色の太線で示す範囲である。ただし、伝熱解析の与条件とした廃棄物層内温度測定結果は、伝熱現象を含めたガス対流現象等も含む複合的な現象を反映しているものであり、伝熱解析の結果が、現場の状況と完全に一致するものではない。

本業務の伝熱解析は、廃棄物層内の温度分布の測定結果を再現できる伝熱モデルを作成し、廃棄物層中の温度分布の範囲を推定した。ガス対流等による熱移動は伝熱移動よりも早く、広範囲になると考えれば、伝熱解析による高温部の推定は、本来の高温部の広がりよりも大きく判定されていると考える。

伝熱解析結果を用いて熱源位置を予測しているが、他の調査による検討を併せて補完することにより、推定精度を高めることは有効である。

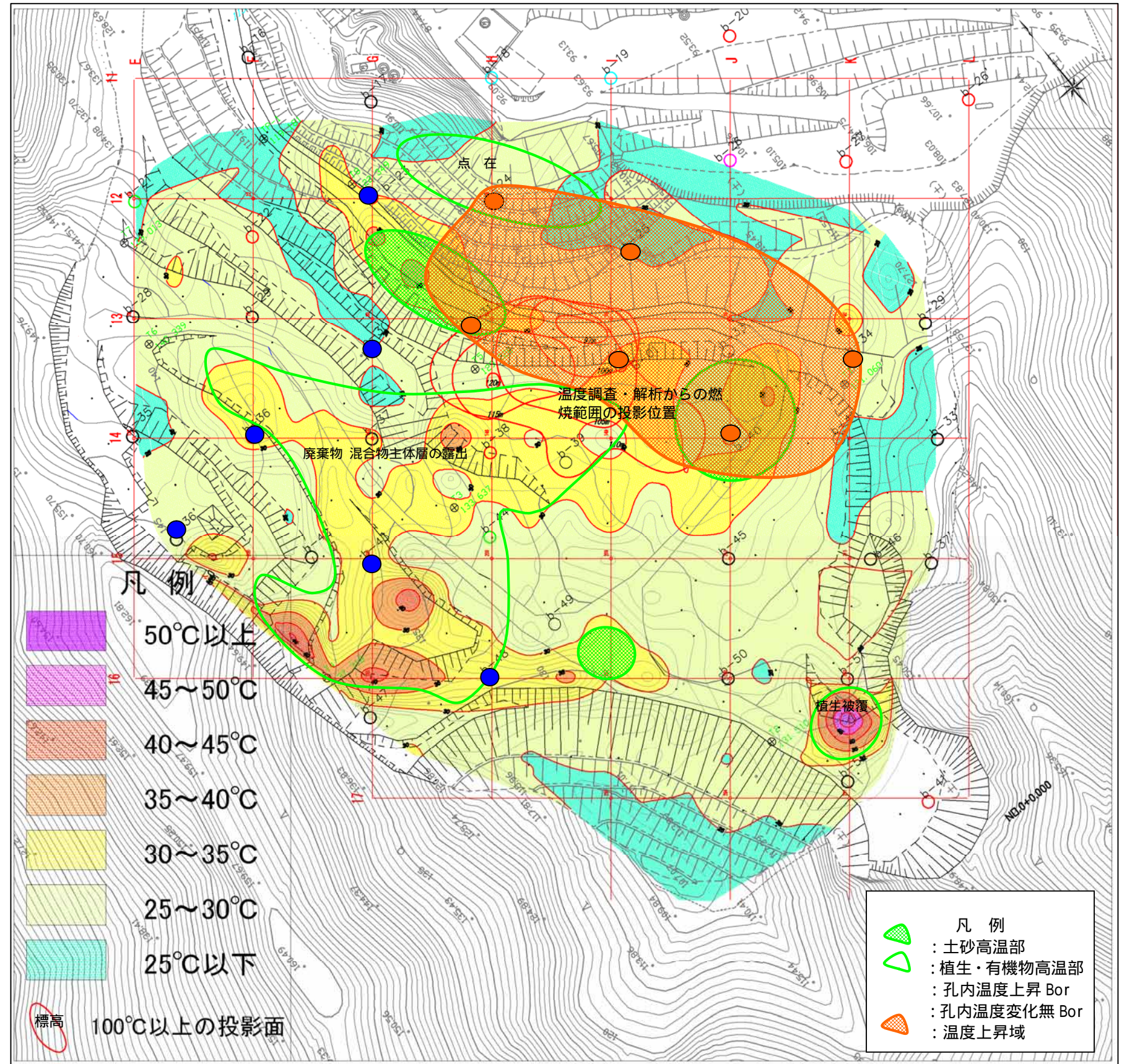


図3-3-26 温度調査・温度解析のまとめ

3-2 他の調査結果との対比

本業務の温度調査と伝熱解析の結果について、他の調査と比較して検討する。

3-2-1 既往電気探査結果との関係

既往電気探査と今回の伝熱解析の結果を比較し、関連性を評価した。

2つの調査を比較して、ボーリング孔b-31を含む測線e-04において、温度と比抵抗との間に有意な関係が認められた。図3-4-1に温度と比抵抗値の重合図を示す。

電気探査には、鉄管等の憂慮導体の存在や、土中の乾燥状態は、比抵抗の測定に影響がある。そのため、電気探査は、ボーリングに用いる孔壁保護管の影響を心配し、ボーリング施工前に実施していた。

また、現地作業員から「過去(2004以前)に焼却炉の背後で火災を生じており、消火できず土砂で埋めた。」との聞き取り情報については、地中における低水分(乾燥)領域の存在を予見させるものである。しかし既往の電気探査結果解析の際には、乾燥条件による比抵抗の高さを考慮していなかった。

既往電気探査で高比抵抗を示した要因は、「温度上昇による含水低下ならびに間隙変化によるもの」と推察される。一般に比抵抗値の変化要因は、直接的な温度上昇とともに二次的な物性変化にも依存している。電気探査の高比抵抗部と伝熱解析の熱源部分は同じ領域を示している。

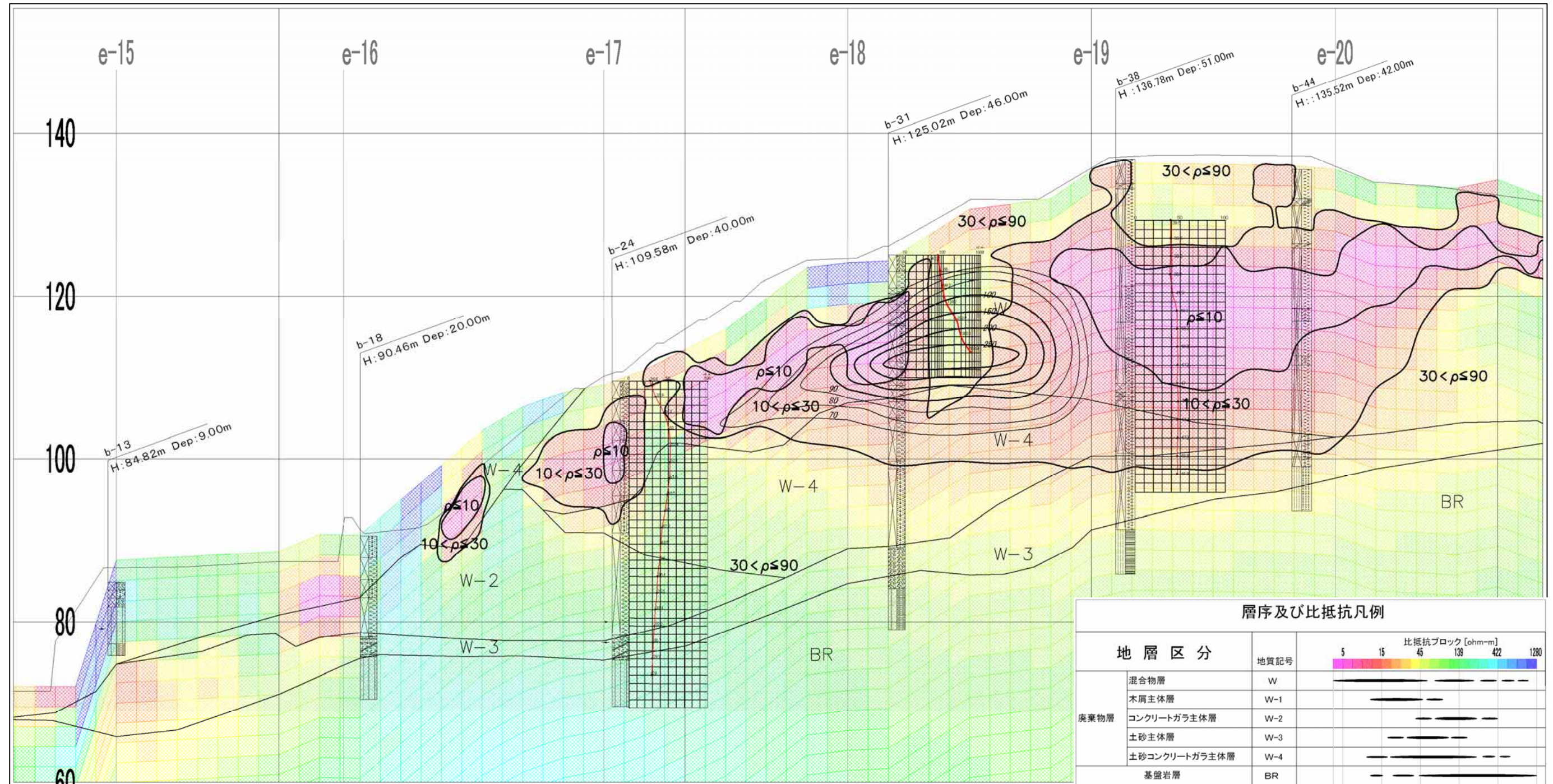


図 3-4-1 温度と比抵抗値の重合図

3-3 燃焼メカニズムの推定

3-3-1 廃棄物の温度分布、ガス成分、地中比抵抗概況

廃棄物の表面温度は、外気温の影響を受けて変動している。

土砂被覆された廃棄物が掘削により露出している箇所表面温度は周囲より高い。

地中部（地表下 1.0m 付近）の温度は、40 ~ 60 を示す。

メタンガスの発生が確認されており、嫌気性発酵の進行が推定される。

地中深部では、著しい高温（80 ~ 500 ）を示す領域がある。

二酸化炭素、一酸化炭素の発生が確認されており、燃焼の進行が推定される。

3-3-2 燃焼メカニズムの推定

既往の調査結果、資料の整理及び文献調査を実施し、現場の混合物主体層における発熱のメカニズムから燃焼にいたるメカニズムまでを推定した。

一般に燃焼は、気中で炎を上げて燃える現象を指す。本現場においては、堆積した廃棄物の内部で著しい高温を示す領域の存在が確認されており、堆積物の内部では、可燃物の燃焼が進行していると推定する。ただしこの燃焼は、廃棄物や土砂で被覆された内部深くで進行しており、空気(酸素)の供給が制約された不完全燃焼であると推定される。観測ボーリング孔で測定する発生ガス中には、一酸化炭素が検出されており、不完全燃焼を裏付けるものである。

不法投棄された廃棄物が燃焼に至る過程は一様ではないと推測される。本現場における燃焼は、廃棄物の中でも、既往の廃棄物分布調査で判明した、混合廃棄物層（木質系廃棄物の優先部）において進行している。そのため、燃焼は、廃棄物層中に木質系廃棄物が卓越する部分の燃焼であると推定する。

木質系素材の発火温度は、一般に次のようにされている。

燃焼に必要な最低温度である「発火点」(丸善 理科年表より)

木材 400 ~ 470

木炭 320 ~ 400

泥炭 225 ~ 280

これは開放系における発火温度である。本現場においては、堆積した廃棄物の層厚が 40 ~ 50m に達しており、圧密による加圧条件が加わり、更に内部発熱は外部と遮断されて蓄熱が容易に進行する条件になっていると考えられる。

木材チップ等の可燃物の集積場では、消防法に基づく条例等により、集積高さ（堆積厚さ）を 5m 以下とするように定められている。これは、内部で発生する熱の放熱が困難となる高さを示しており、5m を超えるような層厚では、発熱量が放熱量を上回り、内部蓄熱による温度上昇の継続が起ることになる。

堆積された木材チップ等は空気が遮断されるために嫌気発酵による発熱を生じる。堆積状況により発熱量が放熱量を上回ると、嫌気発酵の進行に伴い内部温度が上昇する。しかし、嫌気発酵は微生物活動によるものであり、嫌気性微生物の至適温度を超えると生物活性度が低下し発熱は徐々に低下し、一定の水準で発酵と温度上昇がバランスして定常状態となる。

一般に高温嫌気発酵の至適温度は 50～60 前後である。

嫌気発酵により 60 まで温度上昇した木材チップ等は、木材内部の脂肪酸活性が高まり、酸化反応に伴う発熱により更に温度が上昇する可能性がある。脂肪酸の酸化による温度上昇が 100 を超えると、木材内部および周辺の水分が水蒸気化して乾燥状態となるため、自然発火する現象が生じる。

本現場における不法投棄廃棄物の堆積状況は、混合廃棄物層に限ってみても層厚が最大部で 40mほどある。土砂層との互層になっており、また、廃棄物中に土砂が混じっている点では発火燃焼の妨害条件もあるが、自然発火が生じて燻焼状態となっていることが推定される。燃焼に至るプロセスを模式図として示す。

