

3.4 地下水盆の特性

ランガット水系の下流域に分布する地下水盆の特性を述べる。この地下水盆が管理計画立案の対象となる。

3.4.1 地下水盆の地形境界

ランガット水系の地形は山地、丘陵地、低平地の三つに分類できる。対象とする地下水盆はランガット水系の南西部にある低平地部に分布している。

地下水盆の北および東の境界は丘陵で囲まれる。低平地と丘陵地の境界線を図3.4.1に示した。これは標高20mの等高線を基準としているが、航空写真の判読結果をもとに修正を加えている。

地下水盆の北の境界部には三つの小さい丘が分布している。これらの丘に挟まれる三つの埋没谷によって地下水盆はクラン川流域と結び付いている。東の境界ではランガット川、ラブ川、およびデンキル近くを流れていたと想定できるランガット川の旧川道等によって形成された谷部を通して丘陵部と地下水盆が接している。

西部にはブキットジュグラを除き目立った地形的特徴がないために、地下水盆の境界は地質条件によって定める必要がある。地下水盆の南の境界は海、マラッカ海峡によって規定される。

3.4.2 基底岩盤面

地下水盆では侵食されて不規則な古い岩盤面上に第四紀の厚い地層が堆積している。最も古くて厚い地層が対象としている帯水層であるが、基盤岩に直接接し堆積している。基盤岩面標高のコンターラインを図3.4.1に示した。

これによると北（クラン川流域）から南へ向かう二つの大きい埋没谷が認められる。ボーリングデータ等の地質情報は十分ではないが、ランガット川、ラブ川、および小河川によって形成された東側からの埋没谷の存在も予想される。これらの三つの谷は地下水盆の中央部で合流し一つの大きい谷を形成して、海岸方向へ向かう。

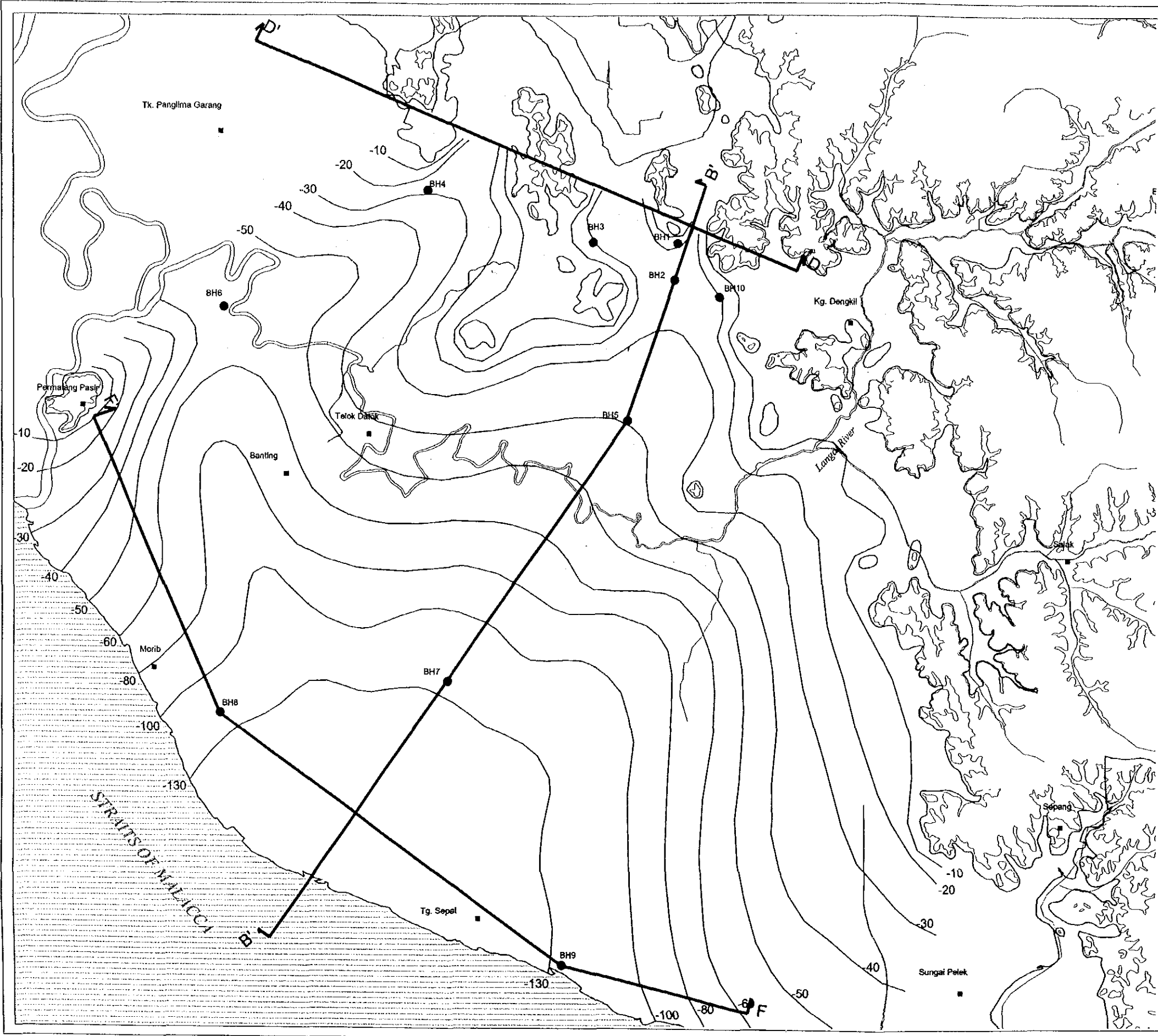
基盤岩上面の深さは海に向かうに従い深くなる。地下水盆北端では埋没谷中央部の標高は-20mから-30mであるが、南端の海岸部では、No.7, 8および9地点の弾性波探査の結果によれば、基盤岩の標高は少なくとも-130mより深い深度にある。海岸部に近いところのコンターラインは上記3地点の情報をもとに想定して作成したものである。

3.4.3 地下水盆の地質

北から流れる埋没谷に沿う地質断面図（断面B-B'）を図3.4.2に示した。地下水盆の北端（断面D-D'）と中央部（断面E-E'）を横断する地質断面をそれぞれ図3.4.3と図3.4.4に示した。

図 3.4.1

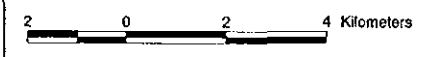
基盤岩面標高のコンターライン



LEGEND

- Location of Geological Profile
- Boring Point (Present Study)
- Topographic Contourline of 20m Height
- Boundary between Lowlands and Hills obtained by Aerial Photograph Interpretation
- Contourline of Bedrock Surface
- Rivers
- Towns
- Study Area

Scale 1 : 200,000



Japan International Cooperation Agency



Minerals and Geoscience Department Malaysia

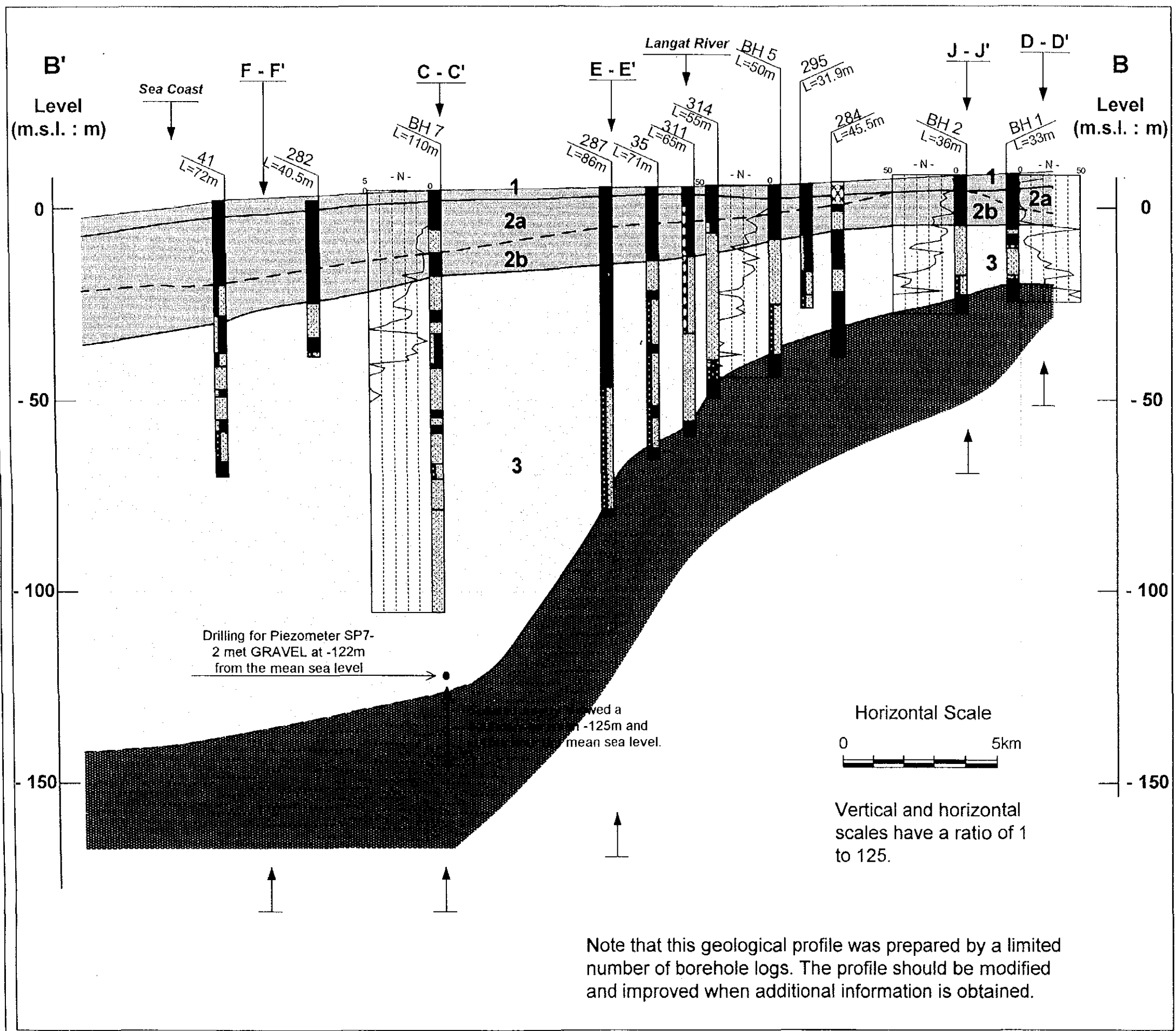
THE STUDY ON THE SUSTAINABLE
GROUNDWATER RESOURCES AND
ENVIRONMENTAL MANAGEMENT
FOR THE LANGAT BASIN
IN MALAYSIA

CTI Engineering International Co., Ltd.

OYO CORPORATION

図 3.4.2

地質縦断面図 (B - B')



LEGEND

- PEAT
- CLAY
- SILT
- SAND
- GRAVEL
- LIMESTONE
- SHALE, SLATE, PHYLLITE
- SANDSTONE, QUARTZITE, SCHIST
- GRANITIC ROCK

1 - 3 Layer Number

— Boundary of Geology

JICA Japan International Cooperation Agency

Minerals and Geoscience Department Malaysia

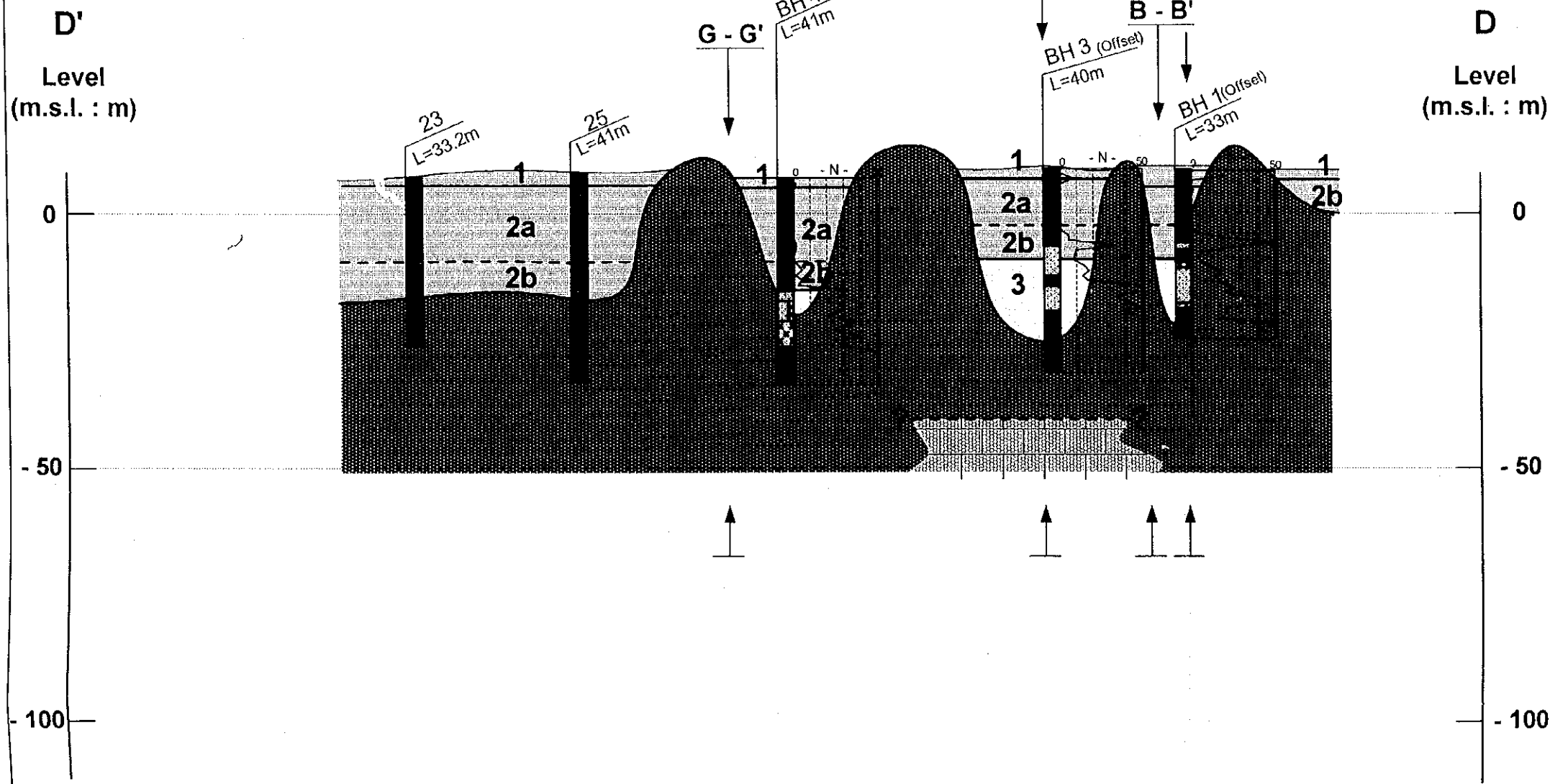
THE STUDY ON THE SUSTAINABLE GROUNDWATER RESOURCES AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT FOR THE LANGAT BASIN IN MALAYSIA

CTI Engineering International Co., Ltd.

OYO CORPORATION

図 3.4.3

地質縦断図 (D - D')



LEGEND

- PEAT
- CLAY
- SILT
- SAND
- GRAVEL
- LIMESTONE
- SHALE, SLATE, PHYLLITE
- SANDSTONE, QUARTZITE, SCHIST
- GRANITIC ROCK

1 - 3 Layer Number
 — Boundary of Geology

Note that this geological profile was prepared by a limited number of borehole logs. The profile should be modified and improved when additional information is obtained.

Vertical and horizontal scales have a ratio of 1 to 125.

Japan International Cooperation Agency

Minerals and Geoscience Department Malaysia

THE STUDY ON THE SUSTAINABLE GROUNDWATER RESOURCES AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT FOR THE LANGAT BASIN IN MALAYSIA

CTI Engineering International Co., Ltd.

OYO CORPORATION

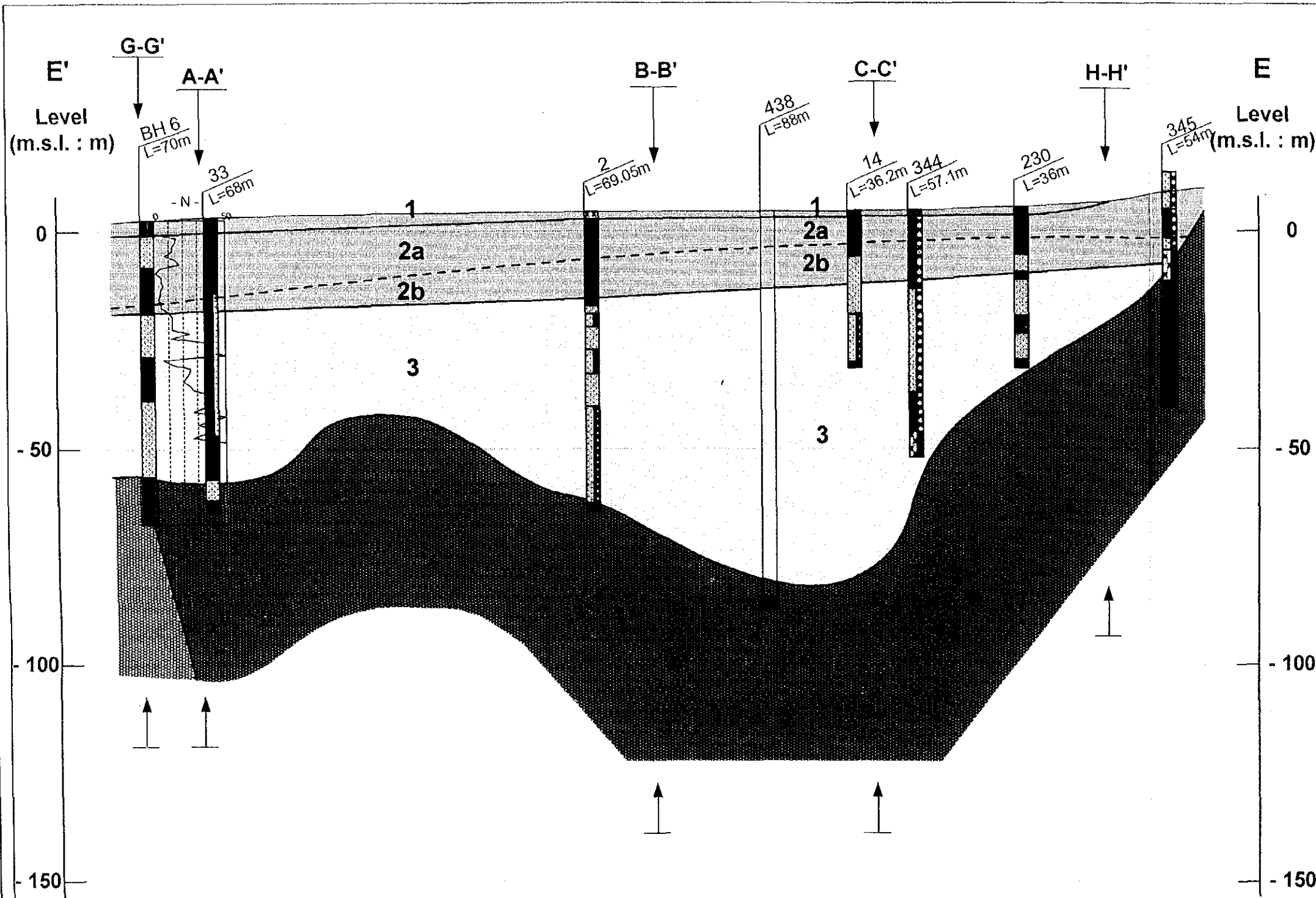






図 3.4.4

地質縦断面図 (E - E')

- LEGEND
- PEAT
 - CLAY
 - SILT
 - SAND
 - GRAVEL
 - LIMESTONE
 - SHALE, SLATE, PHYLLITE
 - SANDSTONE, QUARTZITE, SCHIST
 - GRANITIC ROCK
- 1 - 3 Layer Number
- Boundary of Geology

Note that this geological profile was prepared by a limited number of borehole logs. The profile should be modified and improved when additional information is obtained.

Horizontal Scale
 0 5km
 Vertical and horizontal scales have a ratio of 1 to 125.

 Japan International Cooperation Agency
 Minerals and Geoscience Department Malaysia
 THE STUDY ON THE SUSTAINABLE GROUNDWATER RESOURCES AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT FOR THE LANGAT BASIN IN MALAYSIA
 CTI Engineering International Co., Ltd.
 OYO CORPORATION

地下水盆の典型的な地質を断面B-B'に見ることができる。断面図では地層を、有機質土/有機質粘土層（層1）、粘性土層（層2）、砂質土および礫質土層（層3）、そして基盤岩（層4）の4層に分類している。このうち粘性土層は硬さにより、軟弱粘性土層（層2a）と中位～硬い粘性土層（層2b）に細分した。

有機質土層（層1）はブルアス層に属する地層で、地下水盆に広く分布する。非常に軟弱で、有機質土層の上部の有機成分は高く、下部では粘土化した有機質粘土層となるのが一般的である。層厚は地下水盆の北部（ボーリング1, 2, 3, 10地点）では3.5m～5.5m、中央部（ボーリング5, 7地点）では1.5m～1.7m、西部（ボーリング5, 7地点）では0.6m～1.0mとなる。南部（ボーリング8, 9地点）では有機質土/有機質粘土は確認されていない。

地下水盆に広く分布する軟弱粘性土層（層2a）は海成の明緑灰色から灰色のシルト質粘土より主に構成され、グラ層に相当する。層厚は地下水盆の北部（No. 5地点）では数mであるが海岸部では20m以上となる。また、西部に向かって層厚は増加する。軟弱粘性土層には砂質土層が挟まれるのが一般的であり、No. 6および7地点では厚さが6m～7mほどの中位な密度の砂層を挟む。

中位～硬い粘性土層（層2b）も地下水盆に広く分布する。主に明灰色～灰色の粘性土より構成されているが、一般的に砂質土層を挟んでいる。層厚は数mから10m以上に変化する。層2bも概ねグラ層に相当するものと考えられる。ただし、No. 5の粘性土は他の地点と比較して異なる性質（より硬い）を示すため、より古い地層に属する可能性もある。

主に砂質土と礫質土よりなる層3も広く地下水盆に分布する。この層はシンパン層の下位メンバーであり、地下水盆の主帯水層を構成している。層厚は、地下水盆の北部の数mから海岸部の100m以上と大きく変化する。ここでは砂質土/礫質土と一つに分類しているが、層3の特徴は砂質土/礫質土層と粘性土層が交互に堆積し互層状態になっている。確認されている粘性土層の厚さは1mから8m以上もある。

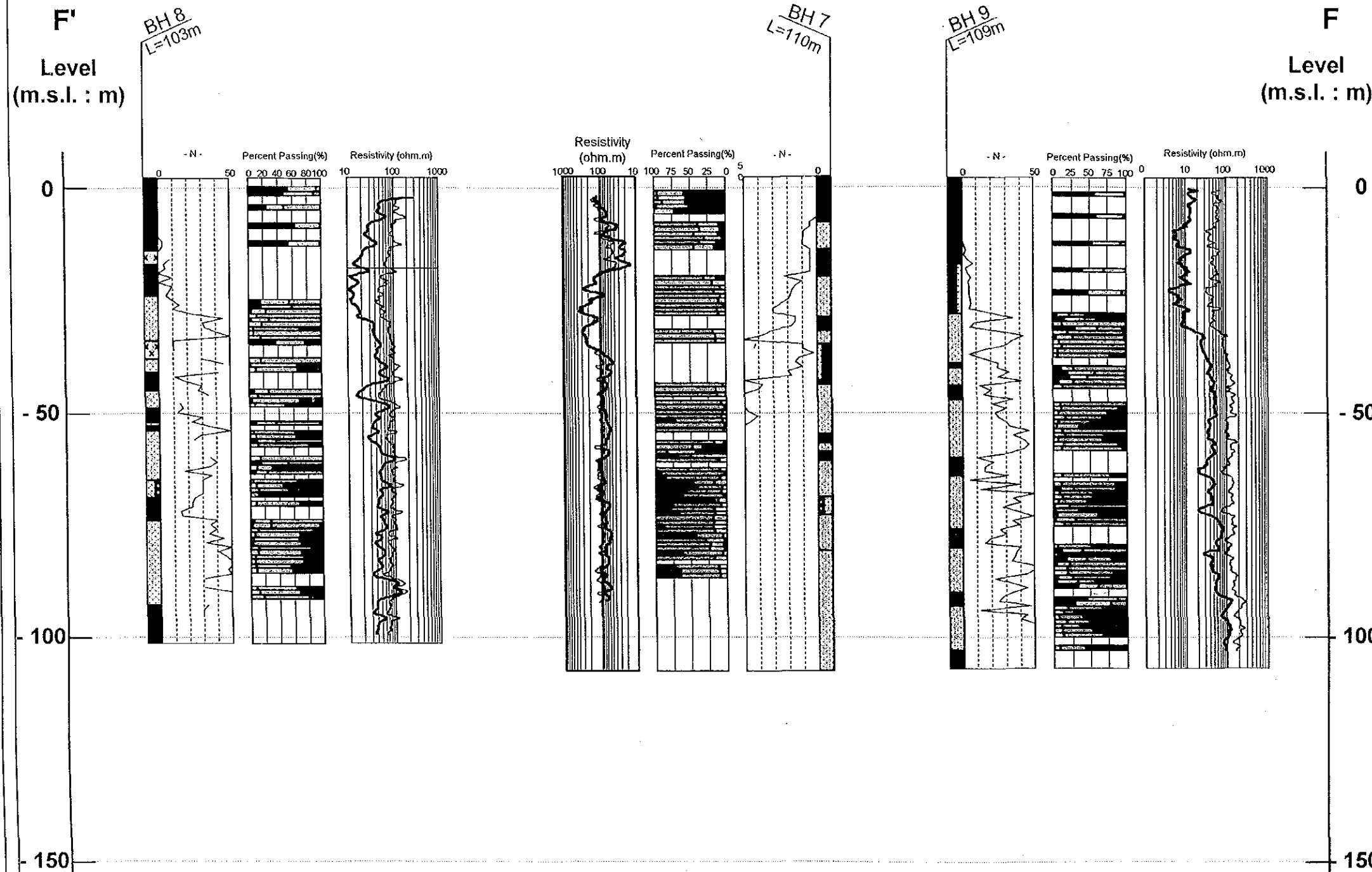
3.4.4 地層の特性

塑性指数や液性限界などの物理特性や圧密特性の違いにより、地下水盆に分布する軟弱粘性土層（層2a）は3つのゾーンに、中位～硬い粘性土層（層2b）は2つのゾーンに区分できる。軟弱粘性土層について言えば、地下水盆の西部（ゾーンI）が最も高い圧縮性を、北東部（ゾーンII）が最も低い圧縮性を、そして中央部と南部（ゾーンIII）が中間の圧縮性をそれぞれ示す。

図3.4.5は地下水盆中央部と南部の滞水層（層3）の特性を、No. 7, 8, 9地点で得られたボーリング柱状図、標準貫入試験で求まるN値、粒度特性そして見掛け比抵抗値で表したものである。これによると滞水層は粘性土層と砂質土層/礫質土層が交互に分布する互層状態になっている。ただし、粘性土層の地下水盆全般にわたる連続性は現在得られる情報からは確認できない。砂質土層/礫質土層の粒度特性は地点によって異なるが、一般的に言えば同一層では下位ほど礫分の含有率が高い。

図 3.4.5

滞水層の特性 (地下水盆中央部と南部)

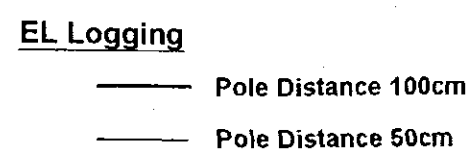
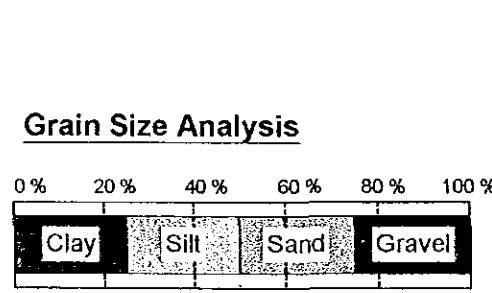


LEGEND

- PEAT
- CLAY
- SILT
- SAND
- GRAVEL
- LIMESTONE
- SHALE, SLATE, PHYLLITE
- SANDSTONE, QUARTZITE, SCHIST
- GRANITIC ROCK

1 - 4 Layer Number

— Boundary of Geology



JICA
Japan International Cooperation Agency

Minerals and Geoscience Department Malaysia

THE STUDY ON THE SUSTAINABLE GROUNDWATER RESOURCES AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT FOR THE LANGAT BASIN IN MALAYSIA

CTI CTI Engineering International Co., Ltd.
OYO CORPORATION

3.5 地下水シミュレーションモデル

地下水シミュレーションの目的は地下水資源ポテンシャルの推定と地下水揚水による環境へのインパクトを予測することにある。三次元地下水流と汚染移流のシミュレーションには数値モデルパッケージ Visual MODFLOW を用いた。パッケージにはプログラム MODFLOW, MODPATH, ZoneBudget, MT3D/RT3D, PEST そして強力な図化インターフェースが含まれる。

3.5.1 境界条件

地下水盆の上面境界すなわち地表面は地下水シミュレーションモデルでは最も重要な境界である。ここでは降雨の影響、蒸発散、地表水の地下への浸透が生じ、また地表水もここを流下する。モデル下部境界は基盤岩の上面となる。地表面の平面境界と基盤岩上面境界は前節に示した情報をもとに決定した。

3.5.2 地下水シミュレーションモデルの地層区分

地下水シミュレーションモデルでは地下水盆の地層を前節で説明したように大きく4層に分類し、そのうち帯水層(層3)をさらに4層に細分した。このためモデルの地層は次の7層になる。

- (1) 有機質土層(層1)。最上部の地層であり、降雨と地表水からリチャージを受ける地表部に分布する帯水層でもある。シミュレーションではこの帯水層から地下水の排水路、運河、河川への流出を考慮する。
- (2) 透水性の低いまたは不透水な粘性土層(層2)で、砂礫層より構成される帯水層の上位に分布する。
- (3) 帯水層の最上部に分布するシルト質または粘土質砂質土層(層3a)。一般的に礫分含有率は低く透水性は小さい。層厚は場所により大きく変化し、また分布していない地域もある。粘性土層を挟む箇所も多く見られる。
- (4) 帯水層に挟まれる透水性の低いまたは不透水な粘性土層(層3b)。地下水盆内で部分的に分布する。
- (5) シルト質砂礫層(層3c)。帯水層のなかで透水性が高い主要部(主帯水層)の上部層。異方性が高く、砂質粘土層を挟む箇所もある。
- (6) シルト質砂礫層(層3d)。帯水層のなかで透水性が高い主要部(主帯水層)の下部層。
- (7) 基盤岩(層4)。上部は風化しており、透水性は低いまたは難透水性である。

3.5.3 揚水試験結果の解釈

地下水盆の3地点(パヤインダ、カジブミ第2井戸場、およびカンチョンダラット)で揚水試験を実施した。試験の目的は帯水層の特性を知ると同時に3次元地下水シミュレーションモデルに用いる信頼できる入力パラメーターを求めることである。

(1) 揚水試験結果(パヤインダ)

パヤインダでの長期揚水試験より得られた知見は次のようにまとめられる。

- 地表部から滞水層へのリチャージは無視できる。
- 滞水層での揚水によって地表部にある滞水層（有機質土層、層1）の地下水は影響を受けない。
- リチャージ域は揚水試験地点より1,200mから1,800mの距離にあるものと推定できる。
- パヤインダの人工池（スズの採掘跡）は地下水流の不透水バリアーとなっている。
- 人工池からの滞水層へのリチャージは無視できる。
- 揚水試験から推定した滞水層下部にある砂礫層の基本的な滞水層係数は次のとおりである：透水量係数 $T = 4.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ 、貯留係数 $S = 6.2 \times 10^{-4}$ （パヤインダのメインレイクを不透水境界としたとき）。
- 不透水層の鉛直方向の透水係数は小さく、約 $1.2 \times 10^{-8} \sim 7 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ の値が得られた。

パヤインダでの揚水試験中に揚水井PW-2から地下水を採取した。この地下水の電気伝導度は23-38 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲にあり、塩化物濃度は常に2 mg/l以下であった。またpH値は4.7 から 5.2の値が得られた。地下水に含まれる固形物含有率が低く、この理由として滞水層を構成する物質の反応性が低いか、またはリチャージ域が近い（浸透した雨水と滞水層物質との反応時間が短い）ことが推察できる。

ここでの地下水は利用可能であるが、適正に配置したとしても揚水井の数は限られ、揚水量も5~10 l/sと少ないものになる。リチャージ域を保護した上で、リチャージ量を確保するとともに水質を保つ必要がある。

(2) 揚水試験結果（カジブミ第2井戸場）

カジブミ第2井戸場での長期揚水試験より得られた知見は次のようにまとめられる。

- 揚水試験を実施した地点での地表部から滞水層へのリチャージは無視できる。
- 滞水層での揚水によって地表部にある滞水層（有機質土層、層1）の地下水は影響を受けない。
- リチャージ域は揚水試験地点より3,000mまたはそれ以上の距離にあるものと推定できる。
- パヤインダの人工池（スズの採掘跡）は北からの地下水流に対して不透水バリアーとして働いている可能性がある。
- 揚水試験地点の近傍にある砂採掘サイト(イムダ鉱山)において、地下水位低下を目的として揚水される地下水は地域の水供給に用いることができる。

- 海岸部は地下水盆の一つの境界であり、ここからは滞水層への海水進入が懸念される。
- 揚水試験から推定した滞水層下部にある砂礫層の基本的な滞水層係数は次のとおりである：透水量係数 $T = 1.7 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ 、貯留係数 $S = 6.0 \times 10^{-4}$ （パヤインダの人工池を不透水境界としたとき）。
- 不透水層の鉛直方向の透水係数は小さく、約 $6.0 \times 10^{-8} \sim 9.2 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ の値が得られた。

揚水試験個所の地下水は水供給に用いることができる。許容揚水量の推定には3次元地下水シミュレーションが必要である。揚水井を適正に配置したとしても、揚水可能な量は現在既存井戸と砂採掘サイト(イムダ鉱山)で揚水している量を加えた合計量とあまり変わらないものと予想できる。滞水層の許容揚水量を設定する時の重要なファクターとして過剰揚水と塩水進入への配慮がある。

カジブミ第2井戸場の揚水井TU/Bから採取した地下水の電気伝導度は261-332 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、塩化物濃度は28-30 mg/l 、またpH値は6.6-6.8の範囲の値を示した。リチャージ量を確保し水質を保つためには主なりチャージ域の保護が重要となる。さらに塩水化の進行を防止するためのモニタリング計画の立案が必要となる。

(3) 揚水試験結果（カンチョンダラット）

カンチョンダラットでの長期揚水試験より得られた知見は次のようにまとめられる。

- 揚水試験を実施した地点での地表部から滞水層へのリチャージは無視できる。
- 滞水層での揚水によって地表部にある滞水層（有機質土層、層1）の地下水は影響を受けない。
- リチャージ域は揚水試験地点より4,000mまたはそれ以上の距離にあるものと推定できる。
- 海岸部は地下水盆の一つの境界であり、ここからは滞水層への海水進入が懸念される。
- 揚水試験から推定した滞水層下部にある砂礫層の基本的な滞水層係数は次のとおりである：透水量係数 $T = 5.1 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ 、貯留係数 $S = 2.5 \times 10^{-3}$ 。
- 不透水層の鉛直方向の透水係数は小さく、 $5.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 程度と考えられる。

他の2地点と比較してカンチョンダラットの揚水井PW7から採取した地下水の電気伝導度は2050-2230 $\mu\text{S}/\text{cm}$ と高い値を示した。またpH値は6.6-6.8の範囲を示した。高い塩化物濃度407-445 mg/l は、この地点で塩水化がすでに進行していることを示している。

(4) 揚水試験結果のまとめ

揚水試験で得られた滞水層下部層（層3cおよび3d）の滞水層係数を表3.5.1にまとめた。これらの係数は揚水試験地点近傍を対象とした3次元地下水シミュレーションをもとに想定したものである。

表3.5.1 砂および礫層の水理定数（3cおよび3d層）

Locality	Depth (m)	Thick. b (m)	Conduct. K_H ($m.s^{-1}$)	Conduct. K_V ($m.s^{-1}$)	Transm. T ($m^2.s^{-1}$)	Spec. St. S_s (m^{-1})	Stor. S (-)
Paya Indah	16 - 29.8	13.8	2.97e-4	7.27e-6	4.10e-3	4.50e-5	6.21e-4
Kajibumi WF 2	23 - 43	20	8.41e-4	2.04e-5	1.68e-2	3.00e-5	6.00e-4
Kanchong Darat	63 - 120	57	8.98e-4	1.63e-6	5.12e-2	4.36e-5	2.48e-3

3.5.4 地下水シミュレーション

地下水盆の地下水シミュレーションにはVisual MODFLOWを用いた。地下水シミュレーションを予測に用いる準備作業として、地下水盆モデルのセットアップ、モデルのキャリブレーション、そしてモデルの有効性を確認するためのシミュレーションを実施した。

(1) モデルセットアップ

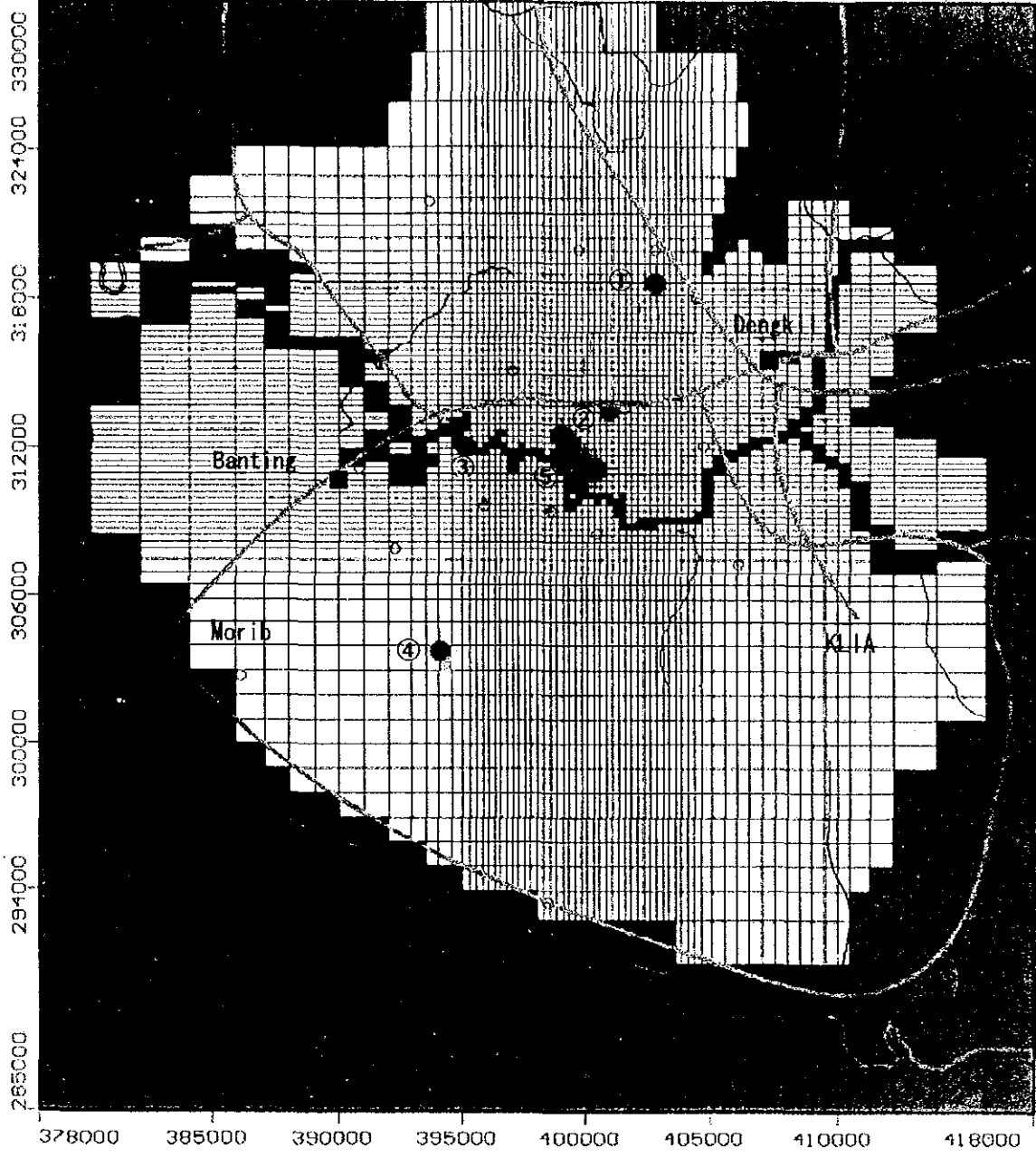
モデルグリッド

モデル化した領域は実際の地下水理境界をもとに決定した。モデル領域はマレーシア標準座標系のx座標378,000-418,000 m、y座標285,000-330,000 mの範囲にあり、面積は40×45 kmである。モデル化領域を大きさの異なるグリッドで分割した（70×76 セル）。最も小さいセルの大きさは250×250 mであり、一方、最も大きいサイズは2,000×2,000 mである。地下水盆の地層は3.5.2節で説明したように7層に分割した。以上よりモデルを構成するセルの総数は37,240となる。

モデル境界とグリッドを図3.5.1、地表面の標高コンター図を図3.5.2に示した。

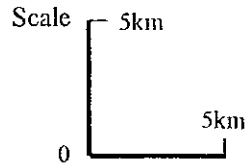
帯水層係数

3次元地下水モデルで使用した地層毎の帯水層係数を表3.5.2にまとめた。



LEGEND

- | | | |
|---------------|--------------------------|-----------------------|
| Inactiv Cells | Active Pumping Well | Inactive Pumping Well |
| General Head | ①: Paya Indah | Monitoring Well |
| River | ②: Kajibumi Well Field 2 | |
| Road | ③: Kajibumi Well Field 1 | |
| Town | ④: Kanchong Darat | |
| | ⑤: Megasteel | |



Japan International Cooperation Agency

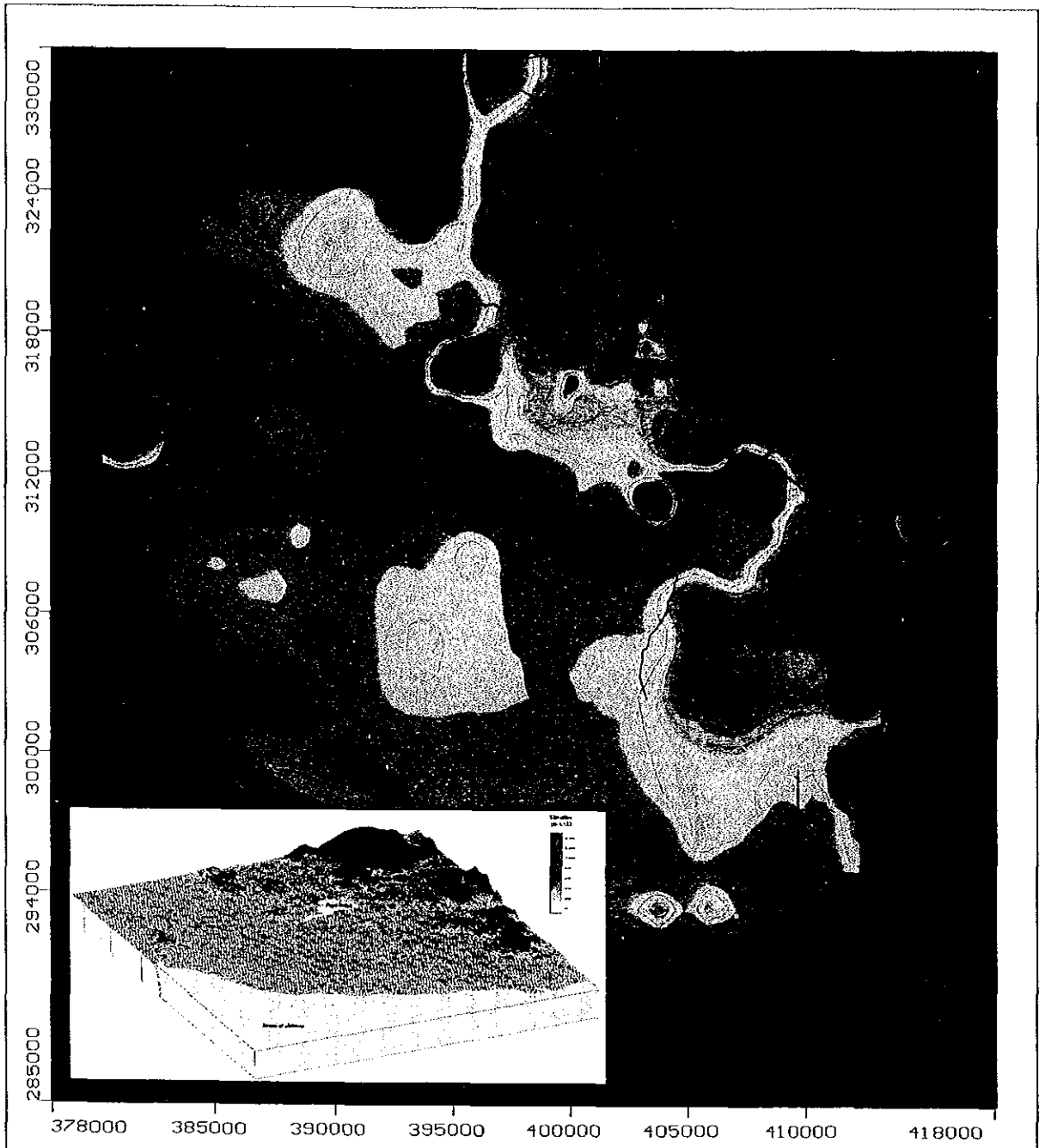
Minerals and Geoscience Department Malaysia

THE STUDY ON THE SUSTAINABLE GROUNDWATER RESOURCES AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT FOR THE LANGAT BASIN IN MALAYSIA

CTI Engineering International Co., Ltd. OYO CORPORATION

図 3.5.1

モデル境界とグリッド



LEGEND

- Inactive cells
- Contour lines of ground surface

Elevation (m a. s. l.)

- 0
- 5
- 20

JICA Japan International
Cooperation Agency



Minerals and Geoscience
Department Malaysia

図 3.5.2

THE STUDY ON THE SUSTAINABLE GROUNDWATER RESOURCES
AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT FOR THE LANGAT BASIN
IN MALAYSIA

地表面 標高コンター

CTI CTI Engineering International Co., Ltd.

OYO CORPORATION

表3.5.2 3次元地下水シミュレーションモデルに用いた帯水層係数

Layer No.	Zone	Prop. ID	Conduct. K_H ($m \cdot s^{-1}$)	Conduct. K_V ($m \cdot s^{-1}$)	Anisotr. K_H / K_V	S_S (m^{-1})	S_Y (-)	Soil Description
1		18	1.00e-4	1.00e-5	10	1.00e-3	0.3	Peat, laterite soil
2		8	1.20e-8	9.20e-9	1.3	6.00e-6	0.01	Silty clay
3a	A	21	6.00e-5	6.00e-6	10	3.70e-5	0.15	Clayey sand with gravel
	B	1	1.00e-4	1.00e-5	10	6.00e-6	0.15	
	C	28	1.6e-4	4.00e-6	40	6.00e-6	0.15	
3b		9	1.00e-8	7.00e-9	1.4	6.00e-6	0.01	Clayey silt
3c	A	23	4.00e-4	9.60e-6	42	4.50e-5	0.2	Silty sand and gravel, sandy clay
	B	12	1.20e-3	4.80e-5	25	3.00e-5	0.2	
	C	25	1.20e-3	2.40e-5	50	4.10e-5	0.18	
3d	A	38	1.00e-4	5.00e-6	20	4.50e-5	0.2	Silty sand and gravel
	B	15	2.00e-4	1.00e-5	20	3.00e-5	0.2	
	C	40	8.00e-4	3.20e-5	25	4.50e-5	0.2	
4	A	20	3.20e-6	3.20e-6	1	6.00e-6	0.02	Bedrock
	B	24	1.00e-8	1.00e-8	1	6.00e-6	0.02	
Dredge Ponds		2	5.80e-7	5.80e-7	1	4.50e-5	1	Mining areas

初期条件および境界条件

地下水の流入/流出がない境界（流動がない（zero-flux）、バリアー等）を地下水モデルに設定した。モデル領域の境界、モデルの下部境界、不活性セル、そして地表に露出している基盤岩部に相当するセルは流入/流出がない境界とした。人工池に相当するセルは池と滞水層の連続性が悪いために、同様に流入/流出がない境界とした。

降雨からのリチャージは最上部層を通して生じる。不活性セルでも降雨からのリチャージを許すものとした。有効降雨量またはリチャージ量954 mm/年をシミュレーションに用いた（バリエーション0, 1, 2, 3, 5）。バリエーション4のシミュレーションではリチャージ量を0 mm/年と仮定した。

ランガット川（そしてラプ川）は地表水部としてモデル化した。ここでの境界条件は河床材料の透水性となる。この透水性は各セルの中での河川の長さ、河床材料の透水係数と厚さに関する($k/b=3e^{-8}s^{-1}$)。

海との境界は自由水面境界とした。シミュレーションでは海水と淡水の密度に同じ値を用いる必要があるために、両者の密度差を補正するために海水位は平均海水面より1m高く設定した。海との境界部の透水性は海水の流入/流出に影響するが、セルの大きさと地層の透水性と厚さをもとに算定した ($k/b=5.8e^{-7}s^{-1}$)。

最上層の有機質土層(層1)は地表部にある滞水層であり、ここでは地下水の水平方向の流入/流出がある。この現象をシミュレーションするために最上層のうち7334個のセルをドレインセルとし、ここでの地下水位を地表面下1mに固定するとともにドレインの位置も地表面下1mに設定した。ドレインの透水性はセルの大きさ、

ドレイン隣接部の透水係数、ドレインと地下水システム間の水頭差に関係する ($k/b=1.0e^{-7}s^{-1}$)。

イムダ鉱山は60個のドレインセルでモデル化した。透水性は $250 m^2/d$ ($k/b=4.63e^{-8}s^{-1}$) とし、ドレインの位置は平均海面下-35 mに設定した。

(2) モデルのキャリブレーションと実証

地下水盆の3次元地下水シミュレーションモデルに用いる滞水層係数は、パヤインダ、カジブミ第2井戸場、カンチョンダラットの揚水試験結果をもとにして設定した。まず、揚水試験を実施した3地点の地下水モデルを作成し、これらのモデルによるシミュレーション結果と揚水試験・回復試験で実測した水位とを同定することによりモデルをキャリブレーションして、その有効性を実証した。次に、地下水盆全体モデルのキャリブレーションと実証は、2001年3月9日から13日にかけて実測した地下水盆の水位とシミュレーション結果を同定することにより実施した。

キャリブレーション時に判明したことであるが、地下水モデルは既存井戸の揚水量とイムダ鉱山からの揚水量に非常に敏感に反応する。一方、メガスチールの揚水井とイムダ鉱山の揚水量に関するデータは量と質ともに限られている。モデルのキャリブレーションと実証にはあくまで既存レポートに記載されている揚水量を使用したことに注意する必要がある。

(3) シミュレーションバリエーション (条件)

次の9つのシナリオに基づいて地下水シミュレーションを実施した。シナリオに従い、シミュレーションでは既設井戸からの揚水量、イムダ鉱山での揚水量、降雨によるリチャージ量を変化させた。表3.5.3に各シナリオで用いた揚水量とリチャージ量をまとめている。

シナリオの概要は次のとおりである。

- バリエーション0 (SV0) : 既存の揚水井が設置される前の条件である。ただし、イムダ鉱山からの揚水はある。
- バリエーション1 (SV1) : 現状 (本調査実施時) のシミュレーション。既設井戸とイムダ鉱山からの揚水がある。
- バリエーション2 (SV2) : 近い将来のシミュレーション。カジブミ第1井戸場の揚水量が増え、カジブミ第2井戸場の井戸からの揚水が始まる。イムダ鉱山での揚水は継続。
- バリエーション3 (SV3) および5 (SV5) : 将来のシミュレーション。メガスチール/アムスチールII地区での揚水量が増える。カジブミ第1井戸場と第2井戸場およびイムダ鉱山でも揚水は継続。
- バリエーション4 (SV4) : 現状 (本調査実施時) のシミュレーション。バリエーション1と同様に既設井戸とイムダ鉱山からの揚水がある。ただし、降雨からのリチャージがないものと仮定した。渇水時のシミュレーション。

- バリエント 6 (SV6) : 自然条件。井戸およびイムダ鉱山からの揚水はない。
- バリエント 7 (SV7) : 近い将来のシミュレーション。バリエント 2 の条件と同じようにカジブミ第1井戸場の揚水量が増え、カジブミ第2井戸場の井戸からの揚水が始まる。しかしながら、イムダ鉱山からの揚水は中止される。
- バリエント 8 (SV8) : 現状（本調査実施時）のシミュレーションであるバリエント 1 と同様な揚水条件であるが、巨大開発地域マルチメディアスーパースコーン地区からのリチャージ量が減少する。

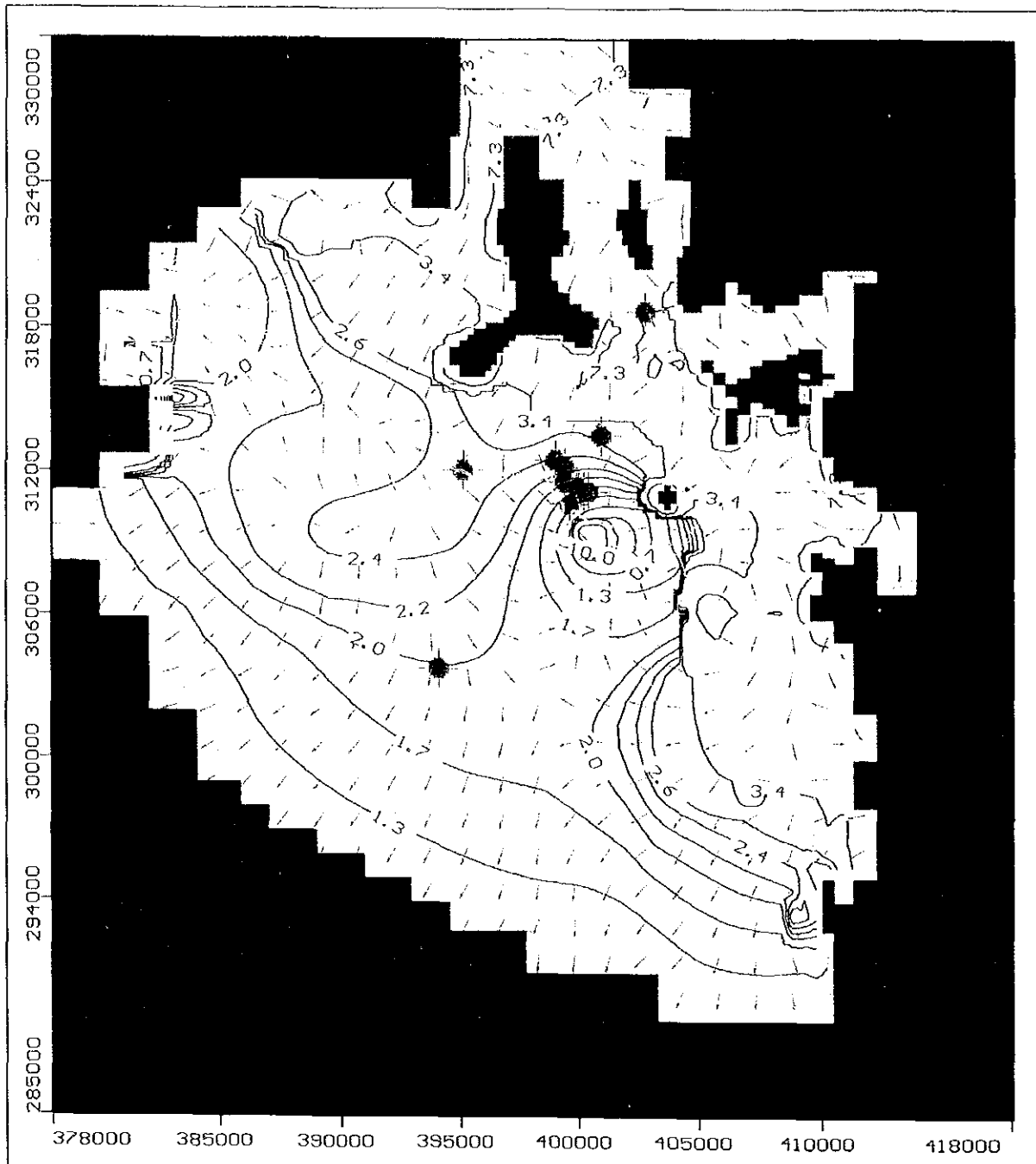
表3.5.3 シミュレーションに用いた揚水井とイムダ鉱山での揚水量

Well Field	Simulation Variant (SV)								
	SV 0 (m ³ /d)	SV 1 (m ³ /d)	SV 2 (m ³ /d)	SV 3 (m ³ /d)	SV 4 (m ³ /d)	SV 5 (m ³ /d)	SV 6 (m ³ /d)	SV 7 (m ³ /d)	SV 8 (m ³ /d)
PWM-1	0	6450	6450	13440	6450	13440	0	6450	6450
Well A (new)	0	0	0	13730	0	13730	0	0	0
Well B (new)	0	0	0	13730	0	13730	0	0	0
PWM-2 (JBA-1)	0	2640	2640	2640	2640	2640	0	2640	2640
PWM-3	0	4440	4440	4440	4440	4440	0	4440	4440
PWM-4	0	4440	4440	4440	4440	4440	0	4440	4440
PWS-1	0	1200	1200	1200	1200	1200	0	1200	1200
TW-4	0	1600	1600	1600	1600	1600	0	1600	1600
Kajibumi WF 1	0	0	9200	9200	0	9200	0	9200	0
Kajibumi WF 2	0	0	6900	6900	0	6900	0	6900	0
Imuda Tin Mine	27028	24884	23756	18933	20619	20931	0	0	24432
Total	27028	45654	60626	90253	41389	92251	0	36870	45202

(4) 自然条件での地下水流、バリエント 1 (SV1) および 0 (SV0)

SV1は現状のシミュレーションであり、またモデルのキャリブレーションにも用いられた。シミュレーション結果を図3.5.4（平面図）と図3.5.5（断面図）に示した。両図に示した等水圧線コンターと地下水流の流線方向によれば、現在さかんに揚水が行われているメガスチール/アムスチールII地区とイムダ鉱山を中心として地下水位が大きく低下していることが分かる。周辺部の地下水流の方向は揚水地区に向かっていて、地下水は北西と東方向より供給されている。

SV0の条件はSV1に類似しているが、イムダ鉱山のみで揚水する（図3.5.3）。既存井戸からの揚水がなくなることによって、地下水位が低下する領域は狭くなり、また地下水流向が分岐する位置がより陸側に移動する。



LEGEND

- Contour Lines of Piezometric Head
- Direction of Groundwater Flow
- Inactive cells
- ⊗ Inactive Pumping Well
- Active Pumping Well
- Dry cells



Japan International
Cooperation Agency



Minerals and Geoscience
Department Malaysia

THE STUDY ON THE SUSTAINABLE GROUNDWATER RESOURCES
AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT FOR THE LANGAT BASIN
IN MALAYSIA

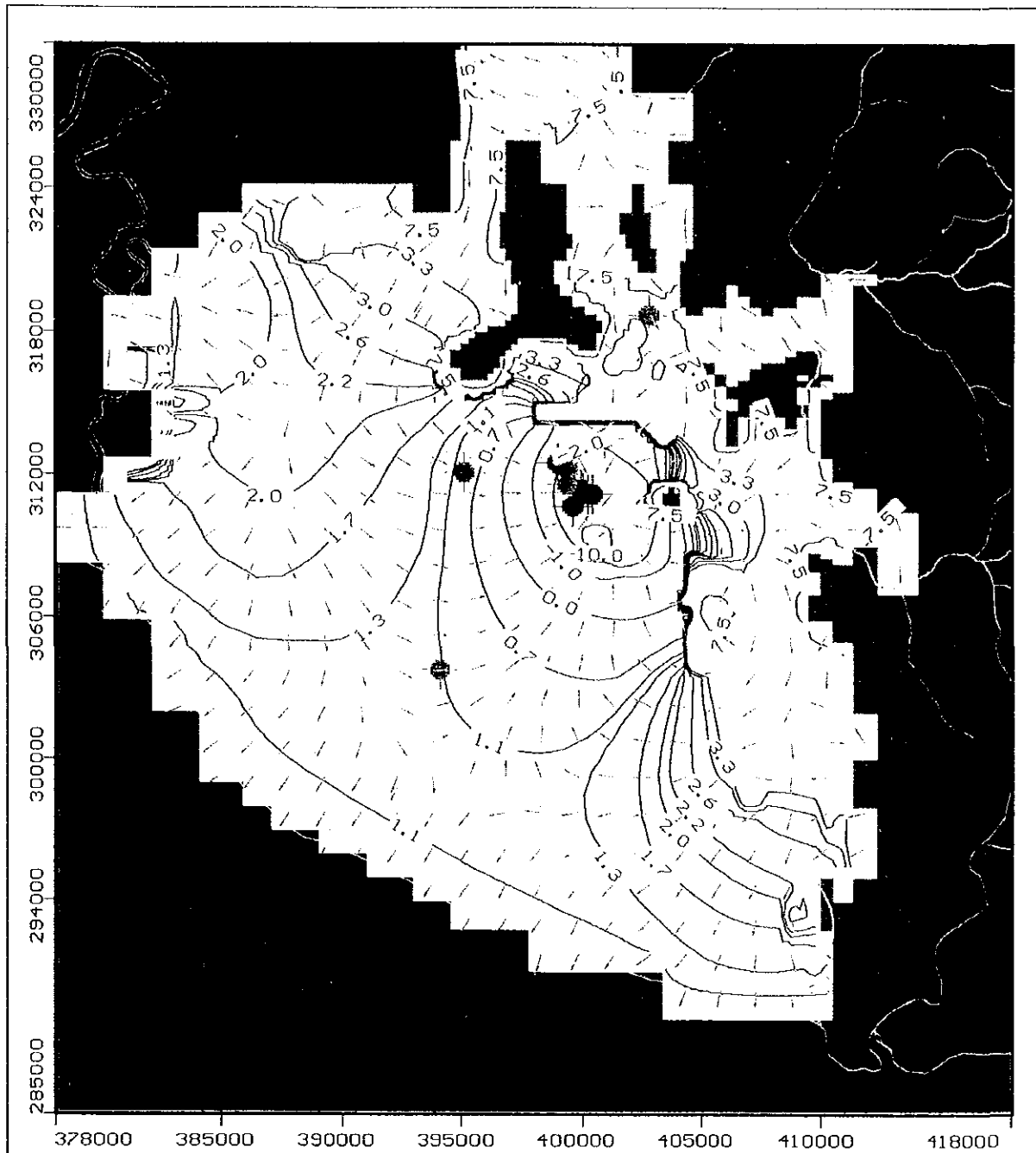


CTI Engineering International Co., Ltd.



図 3.5.3

シミュレーション結果
(バリエント0, 3c層
等水圧線コンター)



LEGEND

- Contour Lines of Piezometric Head
- - - Direction of Groundwater Flow
- Inactive cells
- ⊗ Inactive Pumping Well
- Active Pumping Well
- Dry cells

JICA Japan International
Cooperation Agency



Minerals and Geoscience
Department Malaysia

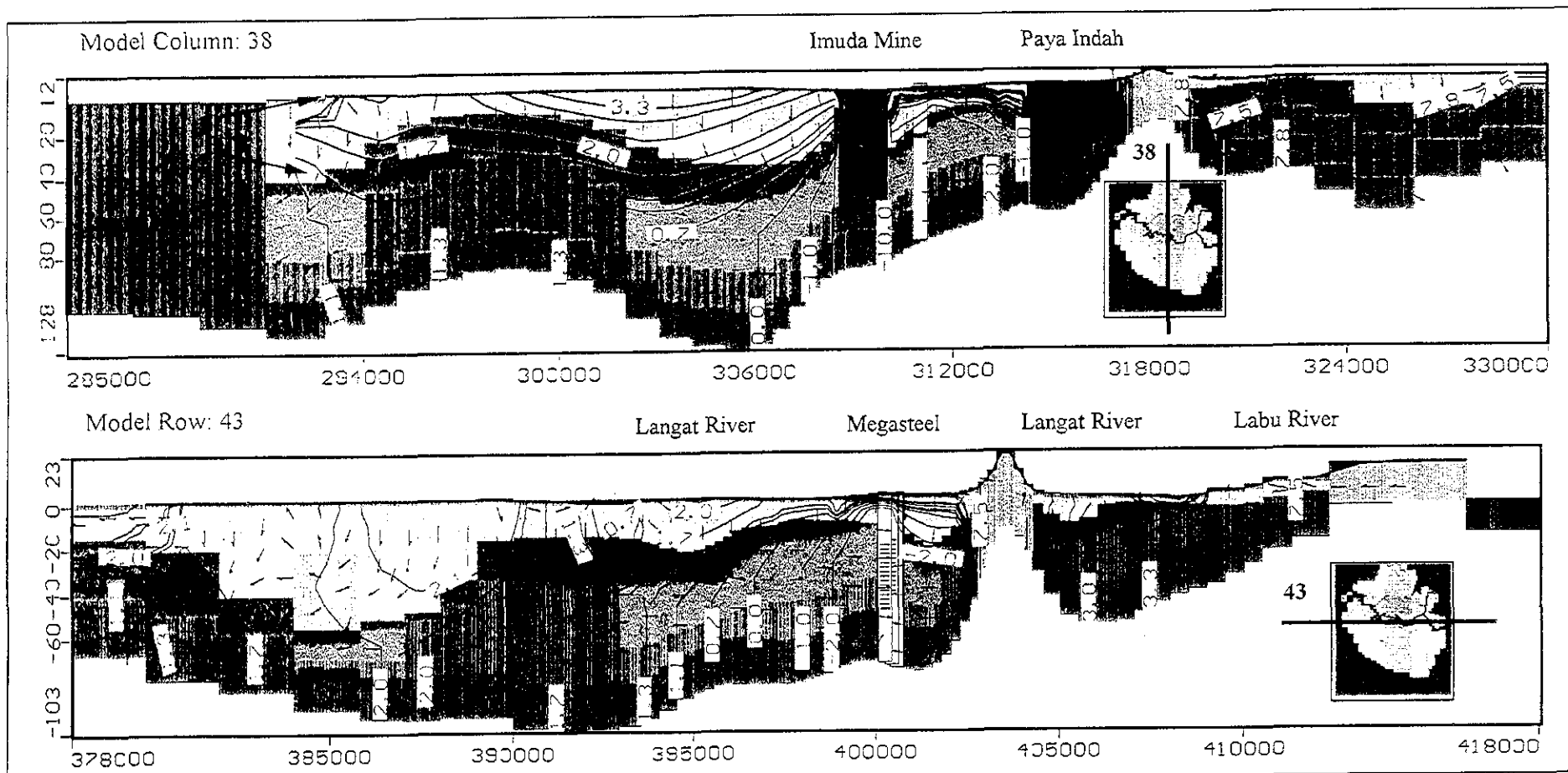
THE STUDY ON THE SUSTAINABLE GROUNDWATER RESOURCES
AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT FOR THE LANGAT BASIN
IN MALAYSIA

CTI CTI Engineering International Co., Ltd.

OYO CORPORATION

図 3.5.4

シミュレーション結果
(バリエーション1, 3c層
等水圧線コンター)



JICA Japan International Cooperation Agency

Minerals and Geoscience Department Malaysia

THE STUDY ON THE SUSTAINABLE GROUNDWATER RESOURCES AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT FOR THE LANGAT BASIN IN MALAYSIA

CTI CTI Engineering International Co., Ltd. **OYO CORPORATION**

LEGEND

- Contour Lines of Piezometric Head
- Direction of Groundwater Flow
- Inactive Cells

図 3.5.5

シミュレーション結果
(バリエーション1, 等水圧線コンター
モデル縦断面図 38 列 43 行)

シミュレーションで得られたモデルの地下水需給バランスを表3.5.4にまとめた。

表3.5.4 シミュレーションから求まるモデルの地下水需給バランス

Model (+ Input / - Output)	Simulation Variant (SV)								
	SV0 (m ³ /d)	SV1 (m ³ /d)	SV2 (m ³ /d)	SV3 (m ³ /d)	SV4 (m ³ /d)	SV5 (m ³ /d)	SV6 (m ³ /d)	SV7 (m ³ /d)	SV8 (m ³ /d)
1. Recharge (rain.- evap.)	2586074	2586074	2586074	2586074	0	2586074	2586074	2586074	1873358
2. Drains, Canals	-2385000	-2374800	-2367300	-2351800	-10631	-2354300	-2394285	-2380796	-1660440
3. Imuda Tin GW Mine SW	-22454	-20310	-19182	-14359	-20619	-16357	0	0	-19836
	-4574	-4574	-4574	-4574	0	-4574	0	0	-4574
4. Leakage from River	2410	3186	3927	7299	4260	6438	1586	2475	3680
5. Leakage into River	-3576	-3149	-2623	-2040	-2267	-2200	-647	-2945	-2557
6. Pumping Wells	0	-20770	-36870	-71320	-20770	-71320	0	-36870	-20770
7. Leakage from HB (sea)	0	0	807	15021	348	11538	0	0	0
8. Storage	0	0	0	0	37771	46	0	0	752
GW Recharge from rain (1.-2.-3. SW)	196500	206700	214200	229700	0	227200	191789	205278	208344

Simulation parameters:

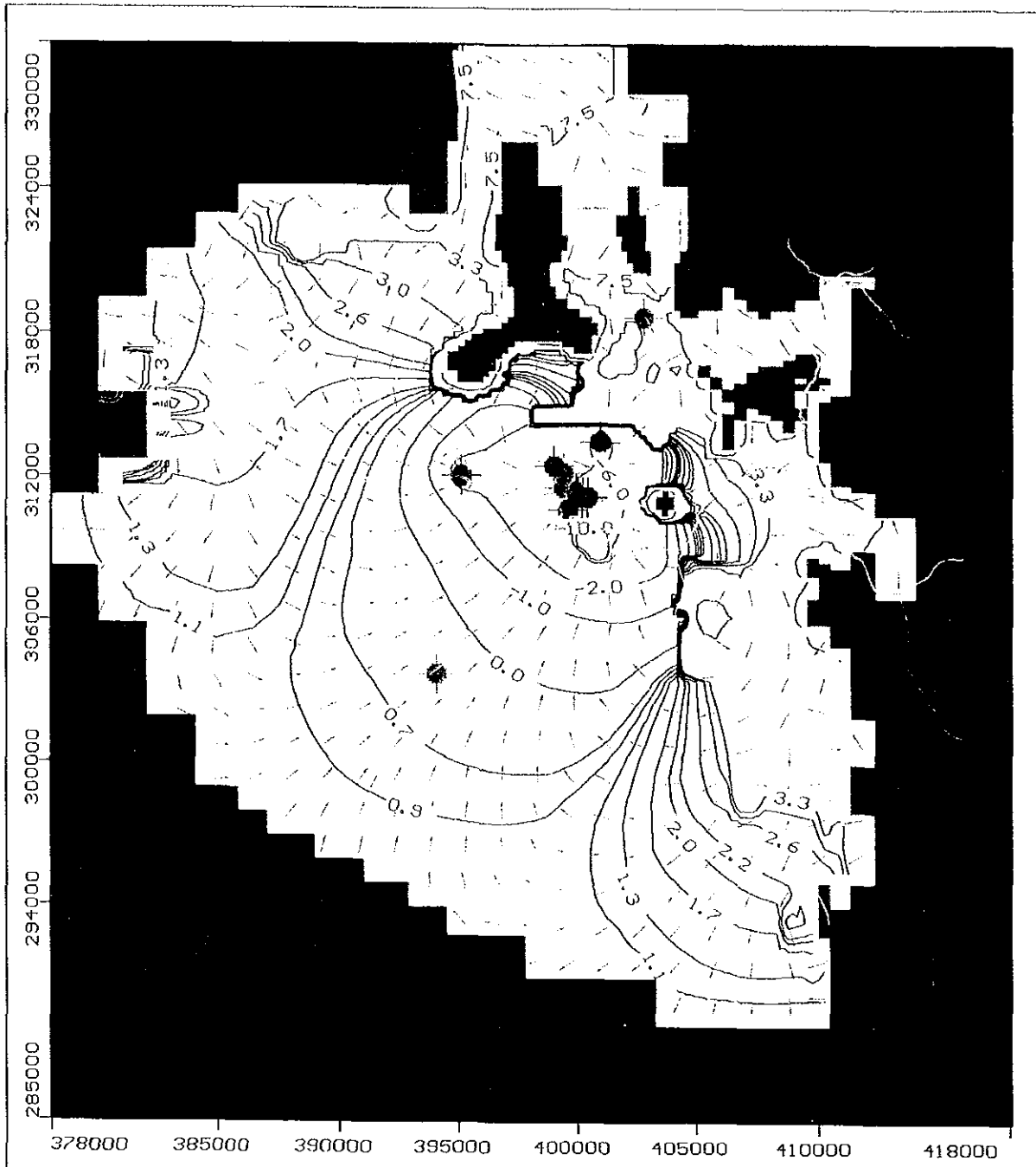
Variant 0, 1, 2, 3, 6, 7: SOR Solver, InitHead Terrain - 1m, Head CC for Convergence 0.01 m

Variant 4, 5, 8: SOR Solver, InitHead Variant 1, Head CC for Convergence 0.01 m

- (5) 地下水揚水量を増加させたときの影響、バリエーション2 (SV2)、3 (SV3)、およびバリエーション5 (SV5)

SV2のシミュレーションではSV1の揚水条件に加えて、カジブミ第1井戸場、カジブミ第2井戸場の井戸からの揚水が始まる。揚水量はSV1の45,000 m³/日よりSV2の60,000 m³/日へわずかに増加する。SV3とSV5では、SV2の揚水量増加に加えてメガスチール/アムスチールII地区で新しい2本の揚水井（1井当たりの増加量は既設井戸PWM-1と同程度を仮定）が追加されることによる増加分で、全体の揚水量が約90,000 m³/日となる。

SV2のわずかな揚水量の増加によっても、等水圧線コンターと地下水の流向は大きく変化する（図3.5.6）。揚水量の増加が大きい場合は（SV5）、シミュレーションによればメガスチールとイムダ鉱山周辺での水位低下量は10mにも及ぶものと予想できる（図3.5.7）。滞水層の上位に分布する粘性土層（層2）での水圧低下量も8mに達し、影響域はパインダーの南部にも及ぶ（図3.5.8）。



LEGEND

- Contour Lines of Piezometric Head
- - - Direction of Groundwater Flow
- Inactive cells
- Inactive Pumping Well
- Active Pumping Well
- Dry cells



Japan International
Cooperation Agency



Minerals and Geoscience
Department Malaysia

THE STUDY ON THE SUSTAINABLE GROUNDWATER RESOURCES
AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT FOR THE LANGAT BASIN
IN MALAYSIA

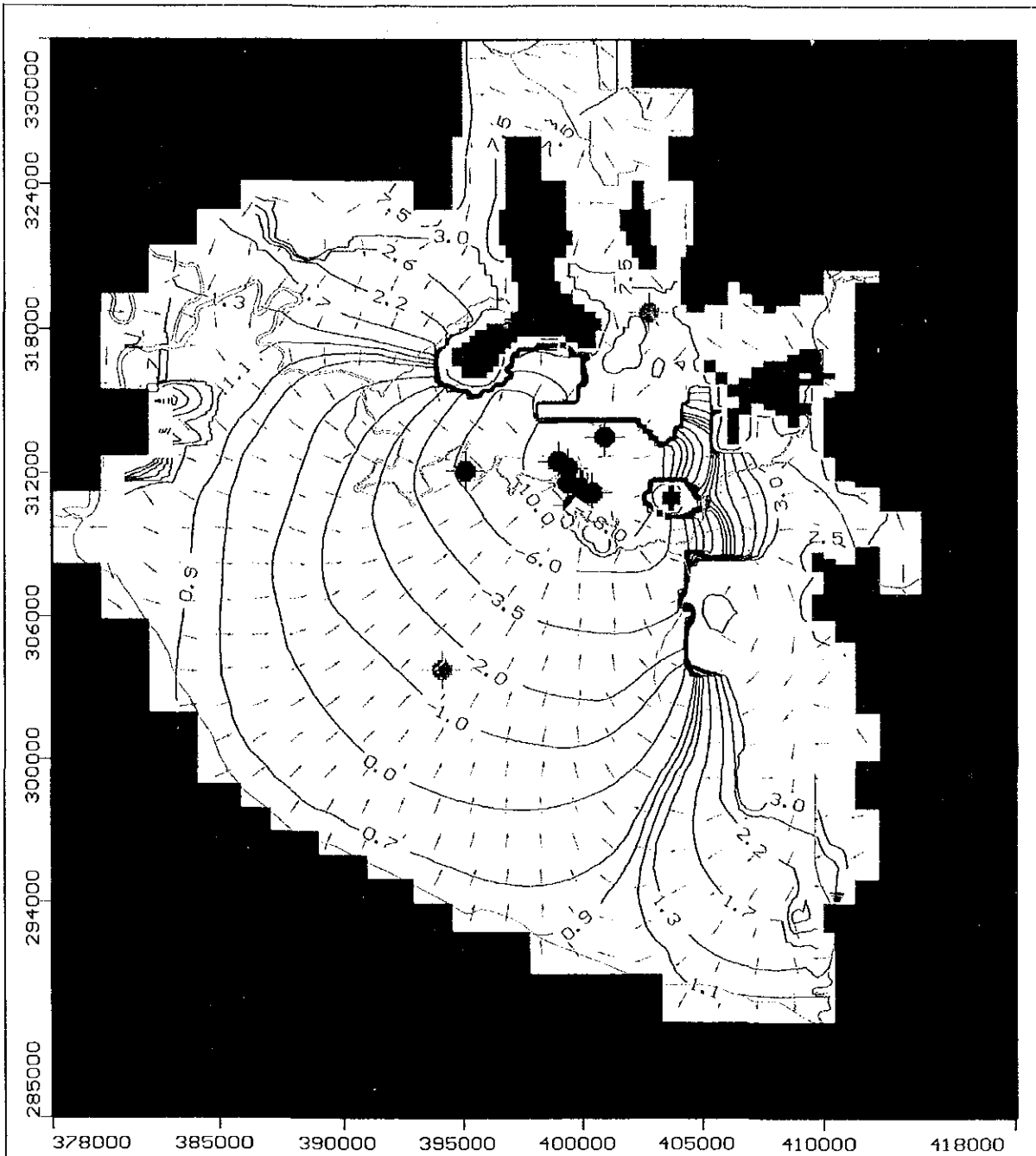


CTI Engineering International Co., Ltd.



図 3.5.6

シミュレーション結果
(バリエント2, 3c層
等水圧線コンター)



LEGEND

- Contour Lines of Piezometric Head
- Direction of Groundwater Flow
- Inactive cells
- ⊗ Inactive Pumping Well
- Active Pumping Well
- Dry cells



Japan International
Cooperation Agency



Minerals and Geoscience
Department Malaysia

THE STUDY ON THE SUSTAINABLE GROUNDWATER RESOURCES
AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT FOR THE LANGAT BASIN
IN MALAYSIA

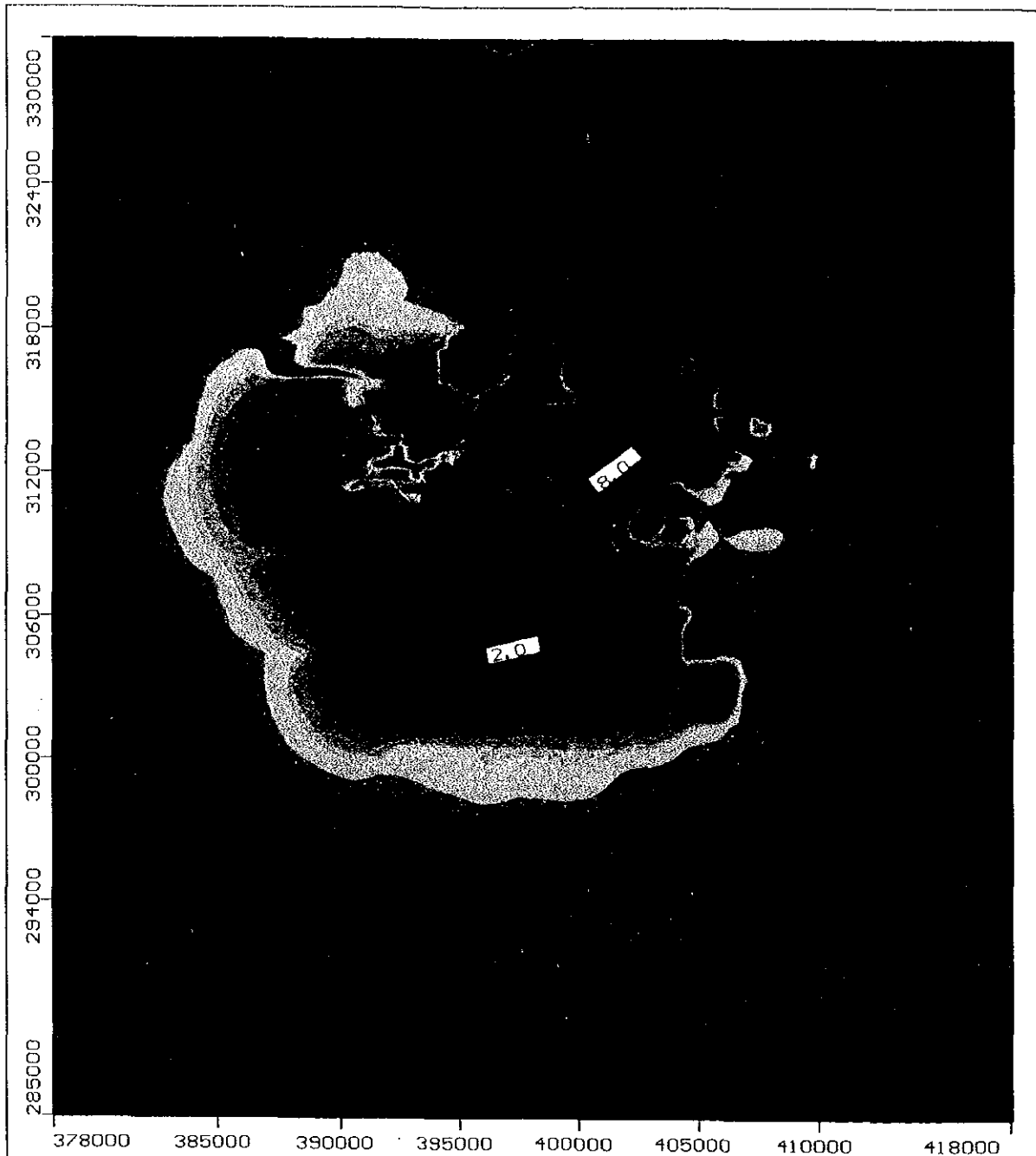


CTI Engineering International Co., Ltd.






図 3.5.7





シミュレーション結果
(バリエント5, 3c層
等水圧線コンター)



LEGEND

-  Inactive cells
-  Dry cells
-  General head boundary

Drawdown (m)

- | | |
|---|---|
|  0 |  0.8 |
|  0.2 |  1.4 |

 Japan International Cooperation Agency



Minerals and Geoscience Department Malaysia

THE STUDY ON THE SUSTAINABLE GROUNDWATER RESOURCES AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT FOR THE LANGAT BASIN IN MALAYSIA

 CTI Engineering International Co., Ltd.

 OYO CORPORATION

図 3.5.8

シミュレーション結果
(バリエント 5, 2 層の
水位低下量)

(6) 乾燥期の影響、バリエーション4 (SV4)

3年間有効降雨量が無いものと仮定したシミュレーションでは、主滞水層の等水位線コンターと地下水の流向に明らかな影響が見られた。水位低下の領域が広がるために、地下水流の流向分岐線が海岸方向に押しやられ、広範囲な塩水進入が生じる条件が生まれる。地下水のリチャージが無くなることによるメガスチールとイムダ鉱山周辺地域の水圧低下量は約1.4mとなる。

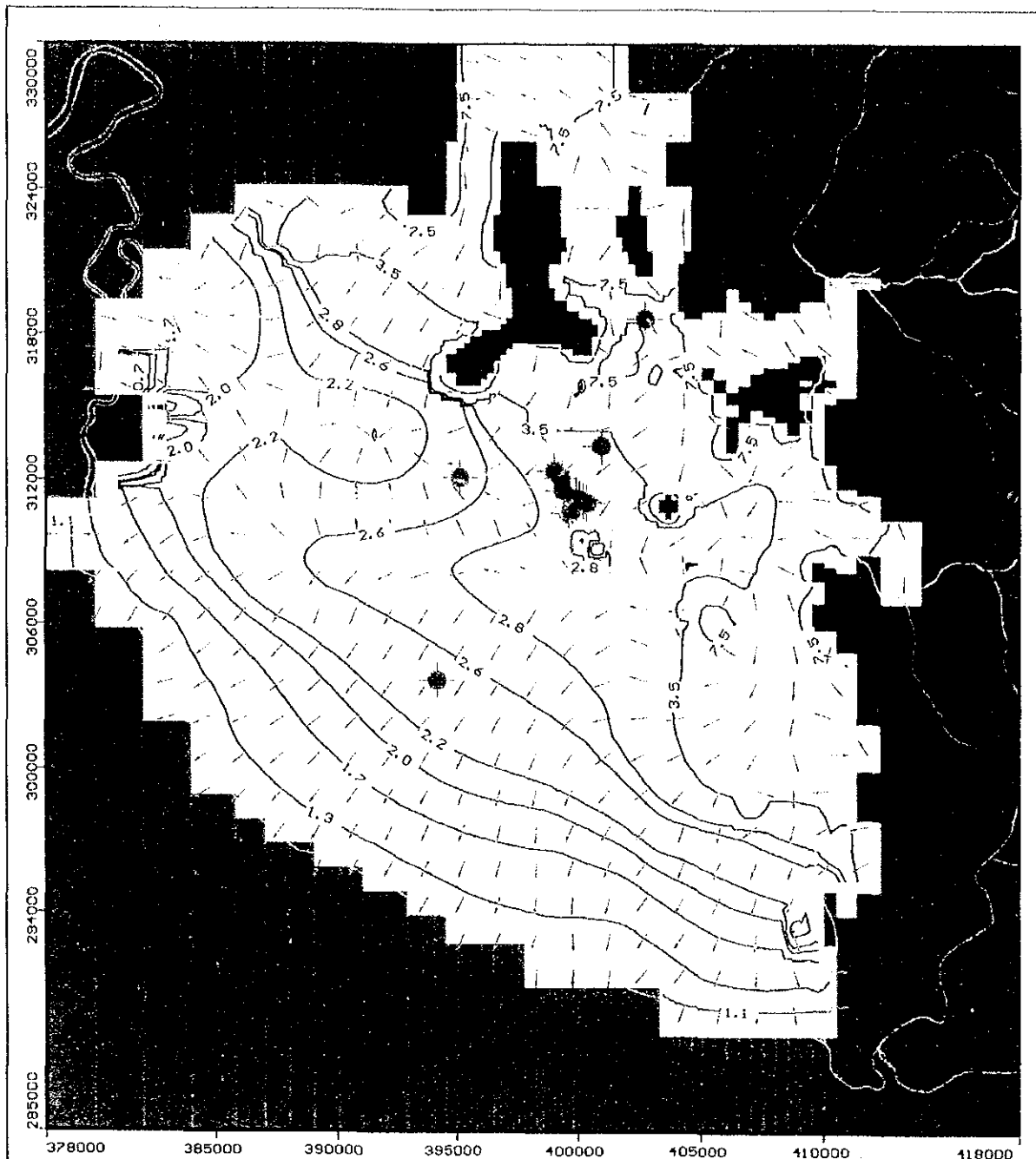
(7) イムダ鉱山の揚水を中止したときの影響、バリエーション6 (SV6) およびバリエーション7 (SV7)

SV6は自然条件のシミュレーションで、井戸およびイムダ鉱山からの揚水はない。SV7は近い将来のシミュレーションであり、バリエーション2 (SV2) の条件と同じようにカジブミ第1井戸場の揚水量が増え、カジブミ第2井戸場の井戸からの揚水が始まる。しかしながら、イムダ鉱山からの揚水は中止される。

図3.5.9 (SV6) に示したように、地下水盆地での揚水が全く無い条件では滞水層への十分な地下水供給が認められ、メガスチールとイムダ鉱山地域での地下水位の回復量は10m以上となる。地下水の流向は海岸方向へ向かう。

(8) 都市化の影響、バリエーション8 (SV8)

マルチメディアスーパーコリドー地区での有効降雨を20年間低減させてシミュレーションした。主滞水層の等水圧線コンターと地下水の流向変化はわずかである(図3.5.10)。水圧低下領域は拡大し、地下水流の流向分岐線は海岸方向に移動するが、海水進入が促進される状態にはならない。リチャージ量を低減させることによる、メガスチールとイムダ鉱山地域での水圧低下量は0.5m～1.4m程度である。有機質土層(層1)と粘性土層(層2)の水圧低下量は小さく、0.2m～0.5m以下である。



LEGEND

- Contour Lines of Piezometric Head
- ↑ Direction of Groundwater Flow
- Inactive cells
- ⊗ Inactive Pumping Well
- Active Pumping Well
- Dry cells

JICA Japan International Cooperation Agency



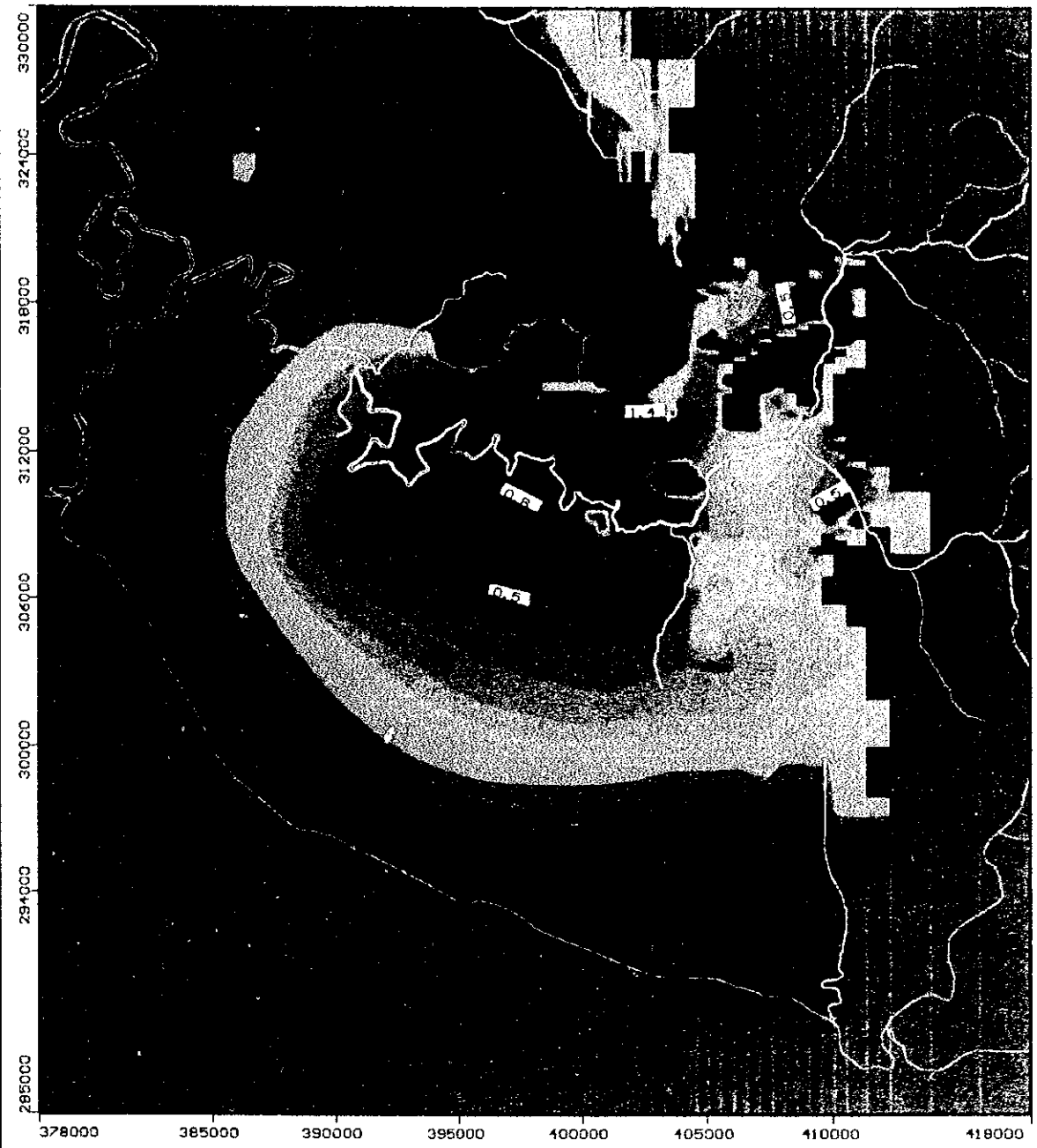
Minerals and Geoscience Department Malaysia

図 3.5.9

THE STUDY ON THE SUSTAINABLE GROUNDWATER RESOURCES AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT FOR THE LANGAT BASIN IN MALAYSIA

シミュレーション結果
(バリエント6, 3c層
等水圧線コンター)

CTI CTI Engineering International Co., Ltd. **OYO** CORPORATION



LEGEND

- Inactive cells
- Dry cells
- General head boundary

Drawdown (m)

- | | |
|-------|-------|
| ■ 0 | ■ 0.8 |
| ■ 0.2 | ■ 1.4 |

JICA Japan International Cooperation Agency



Minerals and Geoscience Department Malaysia

THE STUDY ON THE SUSTAINABLE GROUNDWATER RESOURCES AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT FOR THE LANGAT BASIN IN MALAYSIA

CTI CTI Engineering International Co., Ltd. **OYO** CORPORATION

図 3.5.10


シミュレーション結果
(バリエント 8, 3c 層
水位低下量)



LEGEND

- | | | | |
|---|---------------------|---|---|
|  Inactive cells | Drawdown (m) |  0 |  0.8 |
|  Dry cells | |  0.2 |  1.4 |
|  General head boundary | | | |

 Japan International Cooperation Agency

 Minerals and Geoscience Department Malaysia

THE STUDY ON THE SUSTAINABLE GROUNDWATER RESOURCES AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT FOR THE LANGKAT BASIN IN MALAYSIA



 CTI Engineering International Co., Ltd.  OYO CORPORATION

図 3.5.10

シミュレーション結果
(バリエーション8, 3c層
水位低下量)

(9) 汚染物質の移動、バリエーション2 (SV2(b))

3次元の粒子移動計算の結果はパスライン図として表示した(図3.5.11)。流向はパスラインの矢印の方向で示した。矢印は時刻のマーカでもあり、20年間で粒子が移動する間の移動速度を矢印の間隔で推定することができる。地下水盆の境界での動水勾配が小さいために、ここでの汚染物質の移動速度は非常に遅い。

単純な物質移動モデルで移流と分散による汚染物質の濃度変化を見ることができ。汚染物質(防腐剤トレーサー)は地表部からの4層(有機質土層(層1)、粘性土層(層2)、シルト質または粘土質砂質土層(層3a)、粘性土層(層3b))に浸透する。2つのセルグループ(第9列x第39、40行)の各層に濃度が一定(10 g/l)の汚染物質を与える条件で計算した。図3.5.12は有限差分法で求めた汚染物質の濃度カウンター図である。20年間汚染物質が流出を続けると汚染は滞水層に広がり、カジブミ第1井戸場の井戸に達することを示している。

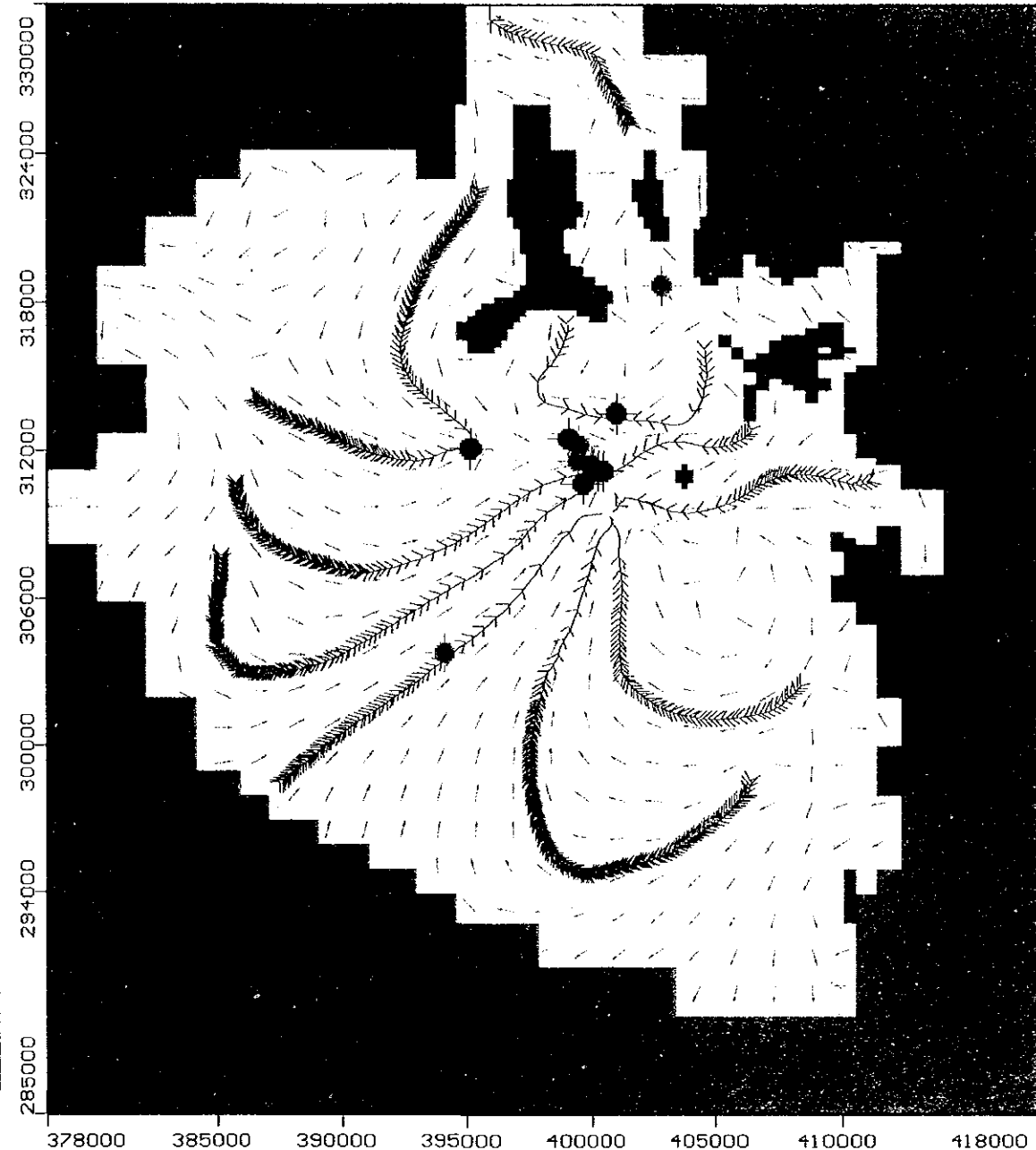
(10) 地盤沈下

滞水層からの揚水によって発生する地盤沈下は、主に粘性土層(層2)の圧密沈下が寄与している。現状(SV1)から近い将来揚水量を増やすことによって(SV2)、地盤沈下量の最大値は約0.2mに増えるとともに、0.05m程度の沈下が発生する区域は現状(SV1)の5倍に広がることを予測できた。揚水地区から離れたカンジョンダラットでも地盤沈下が始まる。

(11) 塩水の浸入

図3.5.13は地下水盆に広がる観測井より採取した地下水の塩化物濃度の分布を示したものである。図では測定値を次の3つに区分して表示している: 1,000 mg/l以上、250~1,000 mg/l、250 mg/l以下。地下水盆奥深くでも塩化物濃度が高い地下水が観測されている。図中の境界線は基準値、250 mg/l、で地下水盆を区分したものであるが、境界はランガット川南岸にまで進行している。No.3 および4地点で求めた高い塩化物濃度の原因は不明である。

地下水盆の中央に沿った断面における塩化物濃度分布を図3.5.14に示した。図中には想定した濃度のカウンターラインを引いてある。海岸部では2,300~5,800 mg/lの濃度が得られており、内陸に向かうに従い濃度は低下する。地下水盆と丘陵部の境界では塩化物濃度は10 mg/l程度に低下する。



LEGEND

- Pathlines (20-years time markers)
 - Direction of Groundwater Flow
 - Inactive cells
- Inactive Pumping Well
 - Active Pumping Well
 - Dry cells

Japan International Cooperation Agency

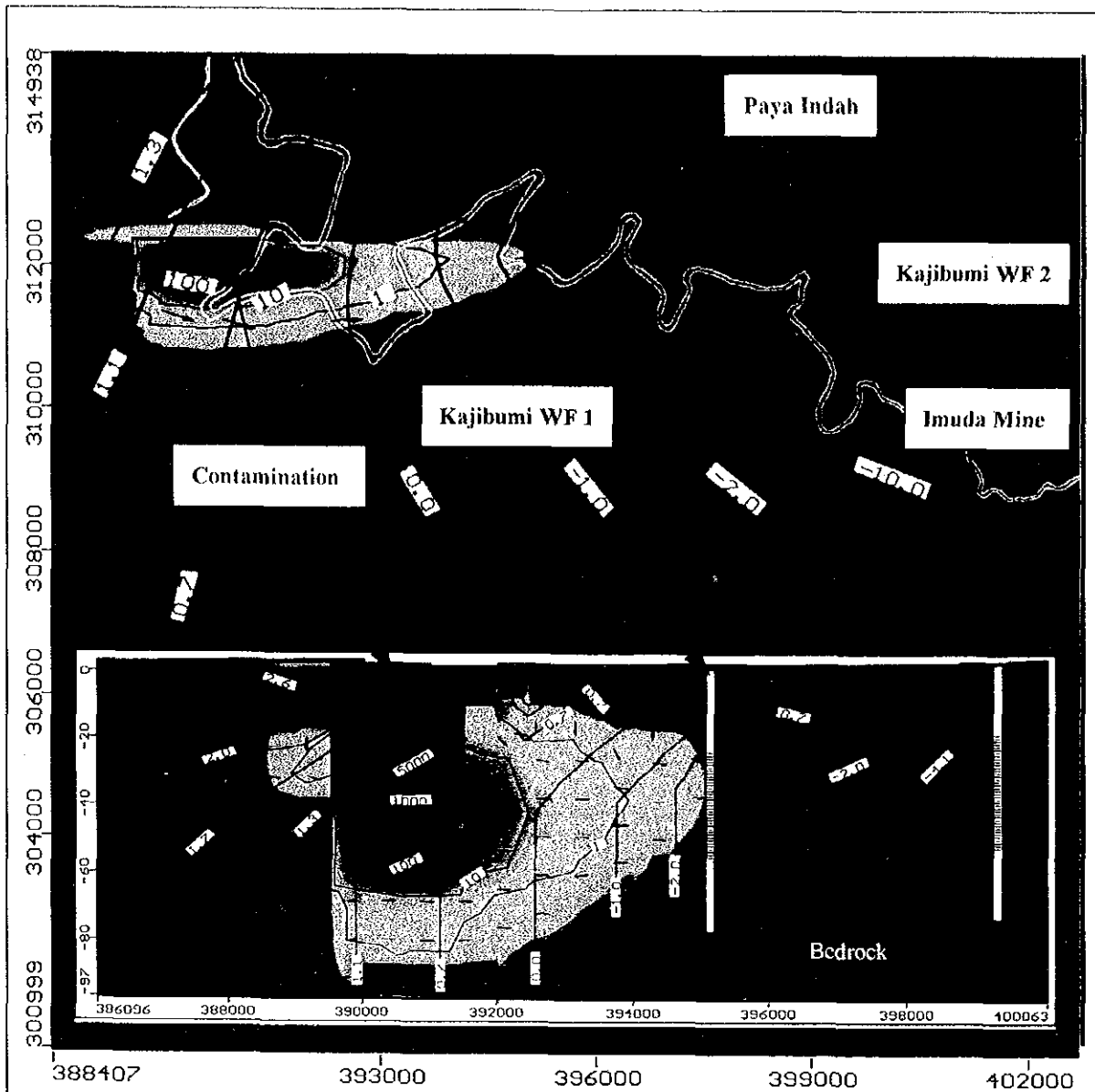
Minerals and Geoscience Department Malaysia

図 3.5.11

THE STUDY ON THE SUSTAINABLE GROUNDWATER RESOURCES AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT FOR THE LANGAT BASIN IN MALAYSIA

シミュレーション結果
(バリエント 2 (b), 3d 層
パスライン図)

CTI Engineering International Co., Ltd. OYO CORPORATION



LEGEND

- Contour Lines of Piezometric Head
- Direction of Groundwater Flow
- ⊙ Inactive Pumping Well
- Active Pumping Well

Concentration (mg/l)

- 0
- 100
- 1
- 10000

Contamination Period: 7300 days

JICA Japan International Cooperation Agency



Minerals and Geoscience Department Malaysia

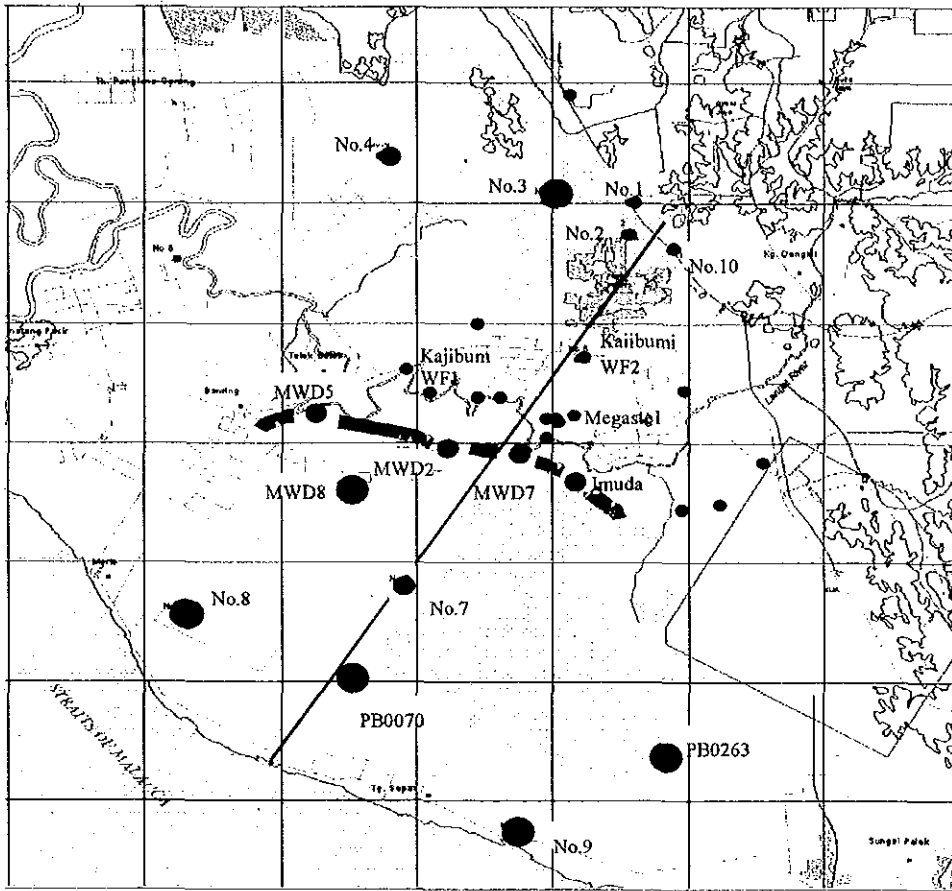
THE STUDY ON THE SUSTAINABLE GROUNDWATER RESOURCES AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT FOR THE LANGAT BASIN IN MALAYSIA

CTI CTI Engineering International Co., Ltd.

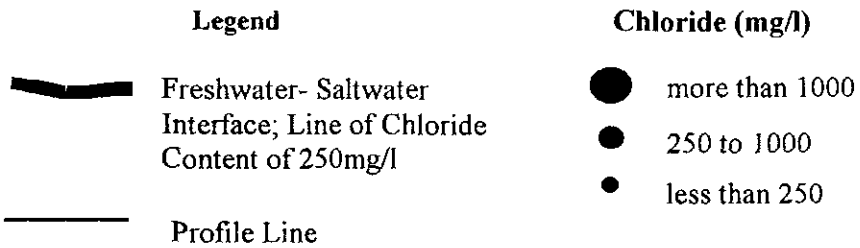
OYO CORPORATION

図 3.5.12

シミュレーション結果
(バリエント2(c), 汚染物質濃度コンター図)



0 5km



Japan International Cooperation Agency



Minerals and Geoscience Department Malaysia

図 3.5.13

THE STUDY ON THE SUSTAINABLE GROUNDWATER RESOURCES AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT FOR THE LANGKAT BASIN IN MALAYSIA

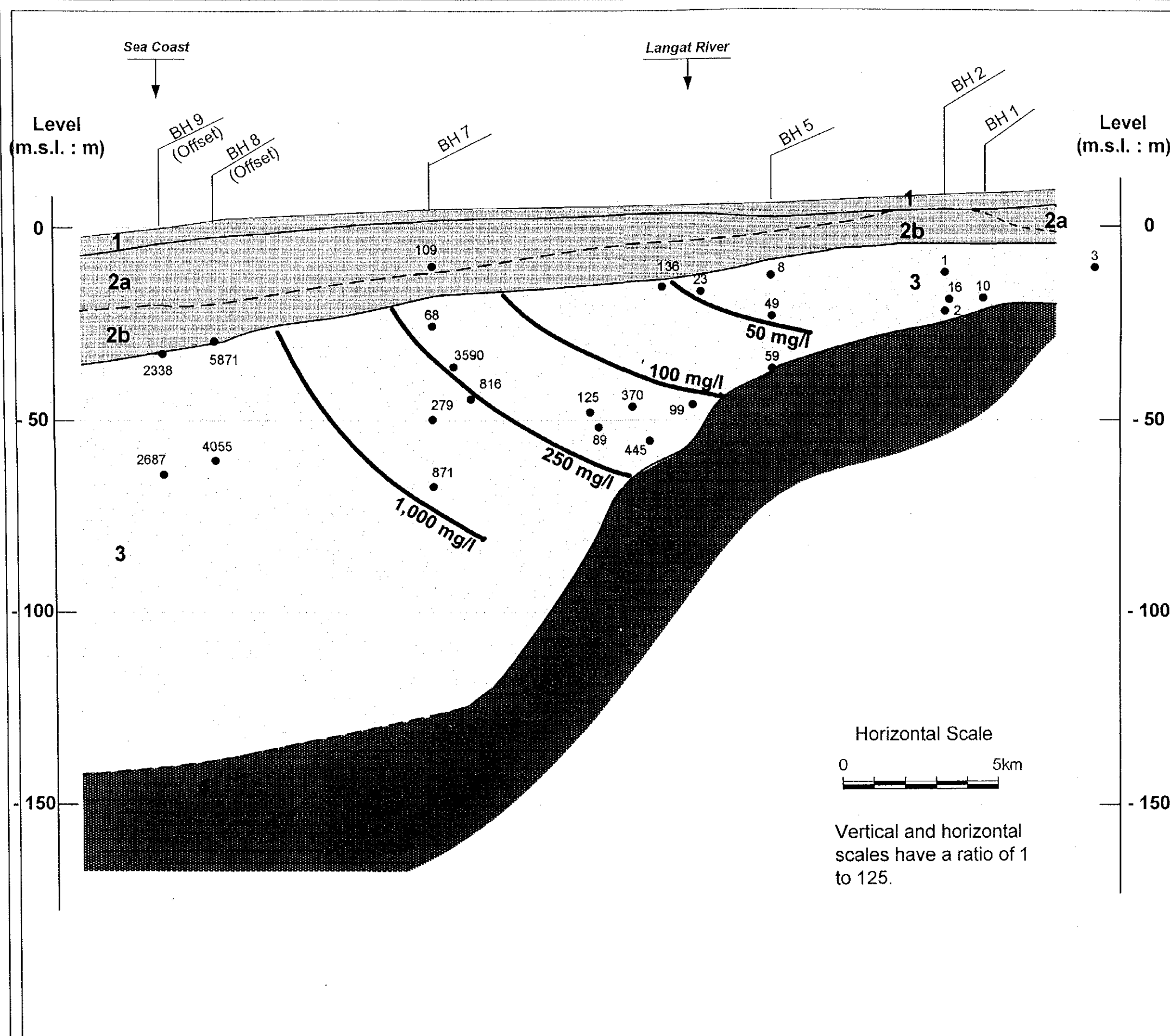
塩水侵入の現況

CTI Engineering International Co., Ltd.

OYO CORPORATION

図 3.5.14

滞水層内の塩化物濃度分布



LEGEND

Piezometer

- 59 ← Chloride Content (mg/l)
- ← Location of Piezometer

Key of Borehole Log

- PEAT
- CLAY
- ▨ SILT
- ▨ SAND
- ▨ GRAVEL
- ▨ LIMESTONE
- SHALE, SLATE, PHYLLITE
- SANDSTONE, QUARTZITE, SCHIST
- Granitic rock
- 1 - 4 Layer Number
- Boundary of Geology

JICA
Japan International
Cooperation Agency

Minerals and Geoscience
Department Malaysia

THE STUDY ON THE SUSTAINABLE
GROUNDWATER RESOURCES AND
ENVIRONMENTAL MANAGEMENT
FOR THE LANGAT BASIN
IN MALAYSIA

CTI Engineering International Co., Ltd.
OYO CORPORATION

第4章

地下水に対する圧力および影響

4.1 顕著な圧力

ランガット川流域の持続的な地下水資源・環境保全に対する圧力は下記のとおりである。

(1) 確認された圧力

非点源負荷

- 過去の異常渇水年における地表水源の不安定な水供給
- 対象地下水盆の地下水質の特徴としての含有鉄分が高いこと（通常1.0から4.0 mg/l、高い場所で10 mg/l。飲料用水基準は0.3 mg/l）
- 地下水の電気伝導度も全般に高い

点源負荷

- 対象地下水盆上、ランガット川沿いの工業開発回廊の存在
- テロック・ダトゥク・オラック・ルンピット地区における工業目的の大規模な地下水取水
- イムダ錫鉱山における大規模な地下水汲み上げ

(2) 確認されていないが潜在的圧力と考えられる事項

非点源負荷

- 流域内の大規模プランテーションにおける農薬の使用
- 流域内丘陵地部におけるプトラジャヤ、サイバージャヤ、工業団地等の大規模開発の影響

4.2 顕著な影響

持続的な地下水資源・環境保全にかかる顕著な影響は下記のとおりと確認された。

(1) 地下水汚染

データが不十分なため影響およびその原因を特定することが現時点では難しいが、下記が確認された。

- 重金属：全35試料のうち1試料（カジブミ第1井戸場地区のMWD10観測井）で水道基準の0.05 mg/lに比較し高い0.08 mg/lの鉛が検出された。砒素は数箇所
の観測井（パヤインダ地区J2-1-2&3観測井、カジブミ第2井戸場地区J5-2-2
観測井、カンチョンダラット地区J7-1-2&3&4観測井、パヤインダ東地区J10-

1-1観測井)で水道基準を上回る数値が検出された。砒素は、当該地下水盆で広く検出され、特に浅い位置の井戸に多く見られた。

- 有機化合物：5種類の有機化合物（m & p キシレン、o キシレン、1,2,4-トリメチルベンゼン、ナフタリン、2-メチルナフタリン）がJ7-1-2、J7-1-3、J8-2、J9-1観測井で検出されたが、1例を除き、3回の観測のうち1回のみで検出されたことから、今後のモニタリングで注意すべきである。

(2) 塩水浸入

海岸沿いのJ8およびJ9観測井で、10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以上の電気伝導度（海水は45,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ）が観測された。海岸沿い地区の地下水は飲料水としての利用に適していない。地下水盆への塩水浸入は明確ではなく、将来のモニタリングが重要である。

(3) 地盤沈下

2000年6月から2001年8月の約1年間における顕著な地盤沈下は、BM7地点で16.46 mm、BM15地点で11.10 mm、BM16地点で13.24 mmであった。これらの地点はすべてランガット川沿いで、地下水の大規模消費先であるメガスチール、砂採取用の孔内をドライにするため取水を行なっているイムダ錫鉱山の近傍地区である。

(4) 湿地帯での水位低下

地下水シミュレーションの結果、パヤインダ湿地における地下水取水の影響は認められなかった。パヤインダ湿地の池は不透水層により覆われていると考えられる。

第5章 環境目標

5.1 序

前章で述べたランガット川流域における持続的な地下水資源・環境保全に対する圧力および顕著な影響を踏まえ、持続的地下水資源・環境管理計画の環境目標を下記のとおり設定した。ただし、この環境目標はモニタリングの結果により適宜修正する必要がある。

5.2 環境目標

環境目標は下記のとおりである。

(1) 持続的地下水許容揚水量

持続的地下水許容揚水量は取水の状況（深い位置での数箇所の大規模取水、あるいは、浅い位置での分散した小規模取水）にもよるが、現時点での、大規模需要家による日量45,000 m³の取水は、持続的取水可能量に近い。

(2) 水質

- 対象地下水からは有機化合物は検出されてはならない。
- 重金属の含有量はマレーシア国飲料水基準を下回るべきである。

(3) 塩水浸入

- カンチョン・ダラット地区J7-1-4観測井における地下水の電気伝導度は、現時点のレベル2,000-2,500 μS/cmを維持すべきである。

(4) 地盤沈下

- 当地域の年間地盤沈下量は現在のレベル最大約15mmを維持すべきである。特に、BM7、BM15およびBM16における沈下量に注意を払う必要がある。

(5) パヤインダの水位低下

- パヤインダ地区における異常な水位低下は避ける必要がある。