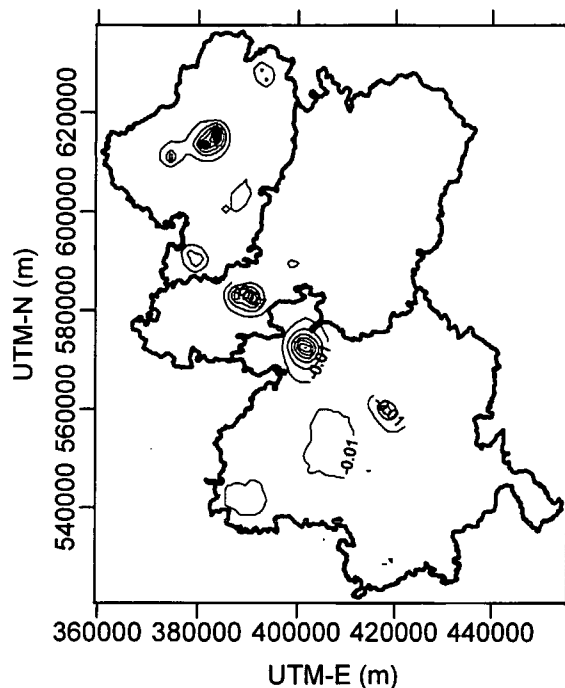
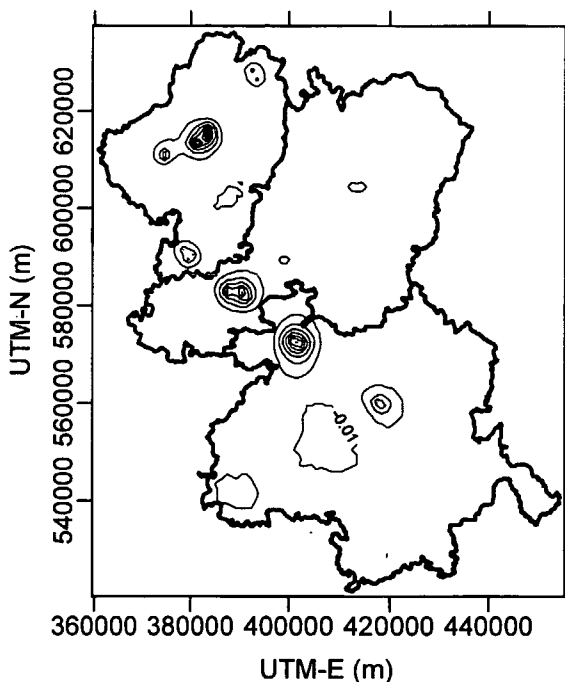


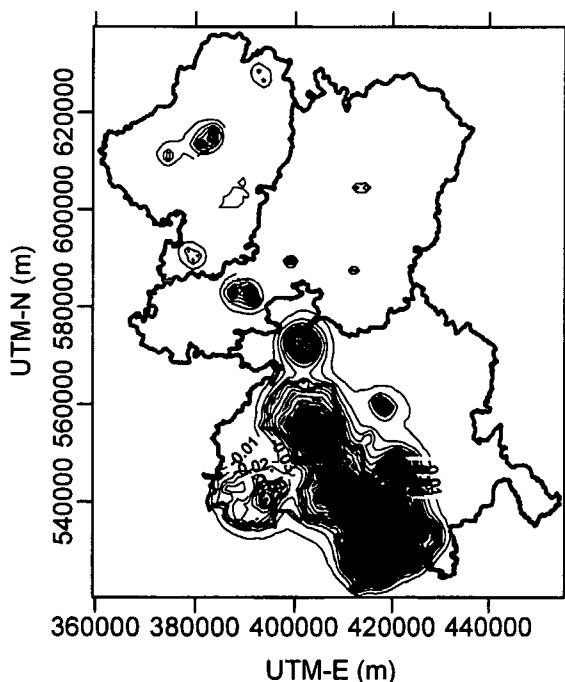
a) Layer-2, Apr 2020



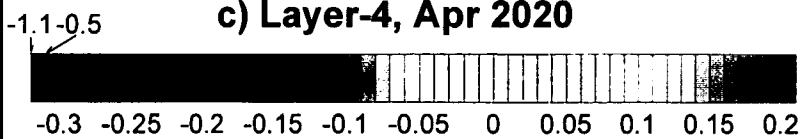
b) Layer-3, Apr 2020



c) Layer-4, Apr 2020



d) Layer-5, Apr 2020



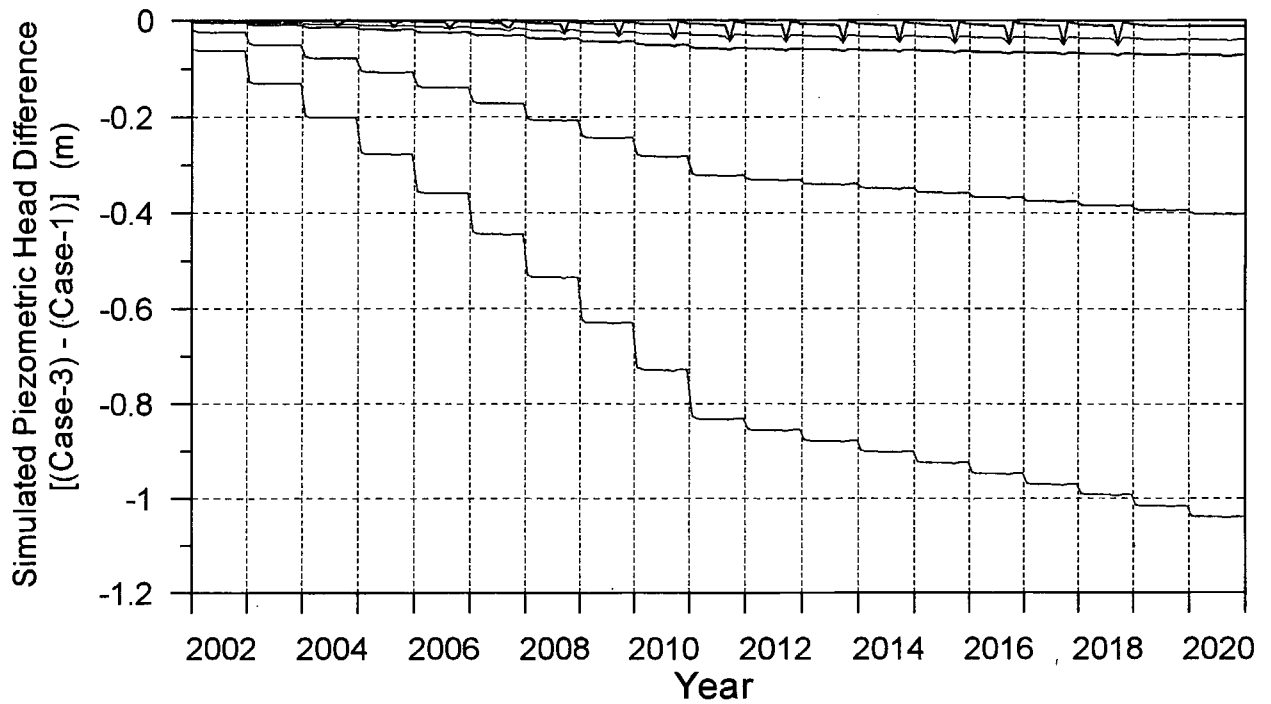
Simulated Piezometric Head Difference between Case-1 and Case-3, Scenario-2 (Unit: m)

図8.2.35

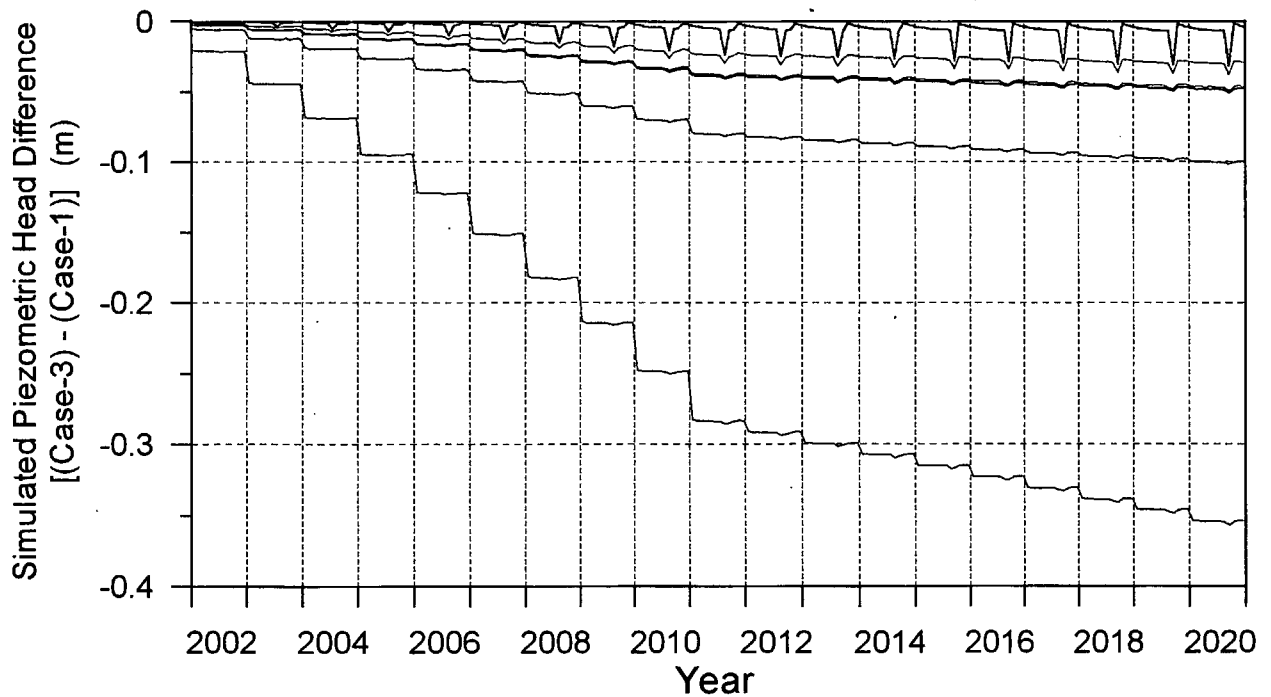
シナリオ-2におけるケース-1とケース-3の計算水頭差(2020年4月)

THE STUDY ON THE GROUNDWATER DEVELOPMENT OF DEEP AQUIFERS FOR SAFE DRINKING WATER SUPPLY TO ARSENIC AFFECTED AREAS IN WESTERN BANGLADESH

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA)



a) Chaugachha Future Well Site



b) Moheshpur Future Well Site

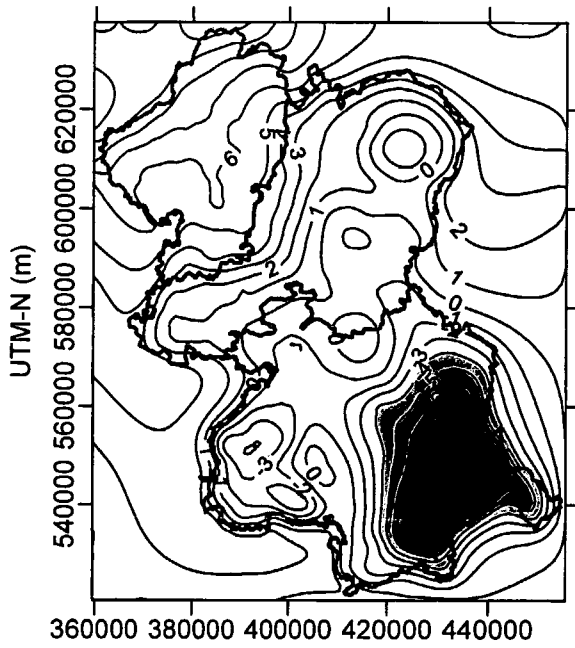
LEGEND	
—	Layer-1
—	Layer-2
—	Layer-3
—	Layer-4
—	Layer-5
—	Layer-6

図8.2.36

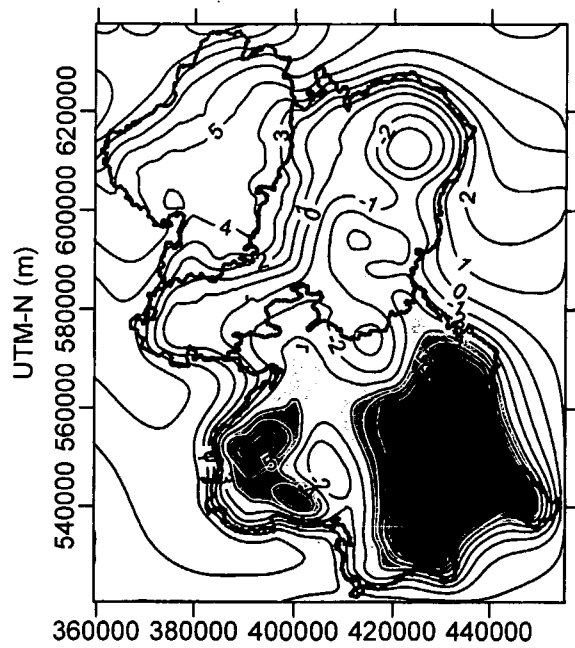
シナリオ-2におけるケース-1と
ケース-3の計算水頭差
(ChaugachhaおよびMoheshpur)

THE STUDY ON THE GROUNDWATER DEVELOPMENT OF
DEEP AQUIFERS FOR SAFE DRINKING WATER SUPPLY TO
ARSENIC AFFECTED AREAS IN WESTERN BANGLADESH

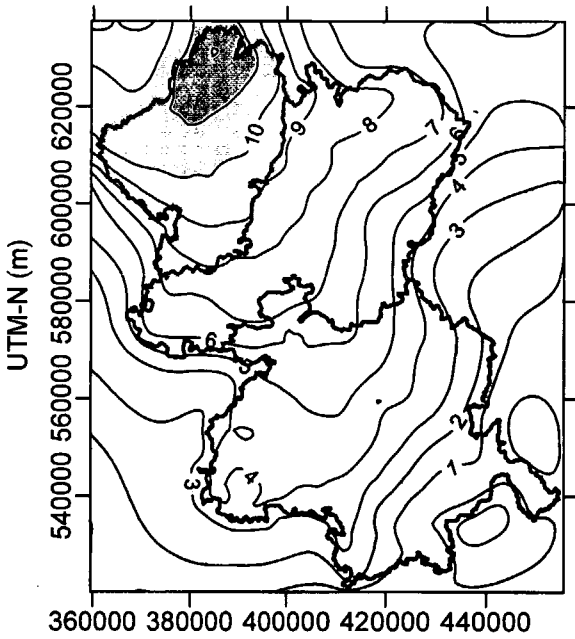
JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA)



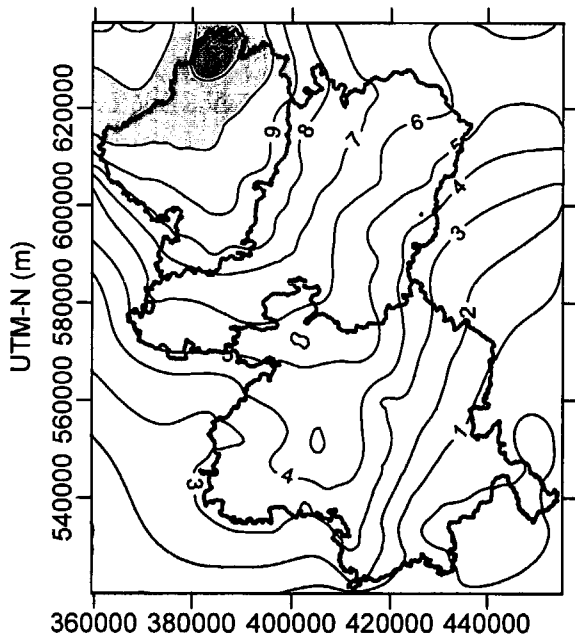
UTM-E (m)
a) Jan 2020



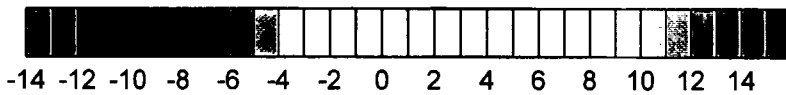
UTM-E (m)
b) Apr 2020



UTM-E (m)
c) Jul 2020



UTM-E (m)
d) Oct 2020



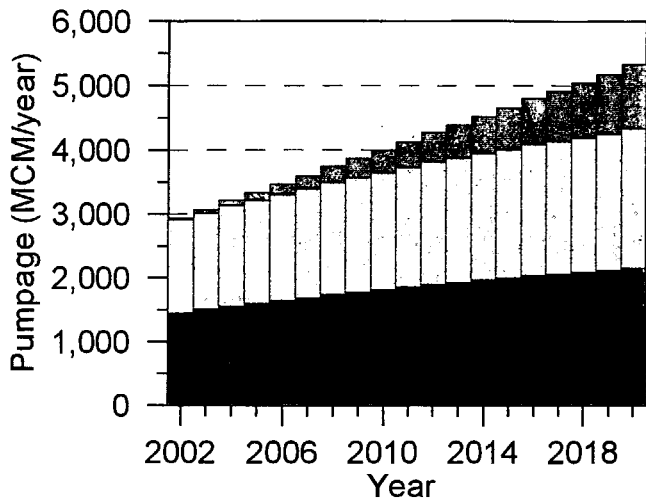
Simulated Piezometric Head
in Layer-5
(Unit: m above sea level)

図8.2.37

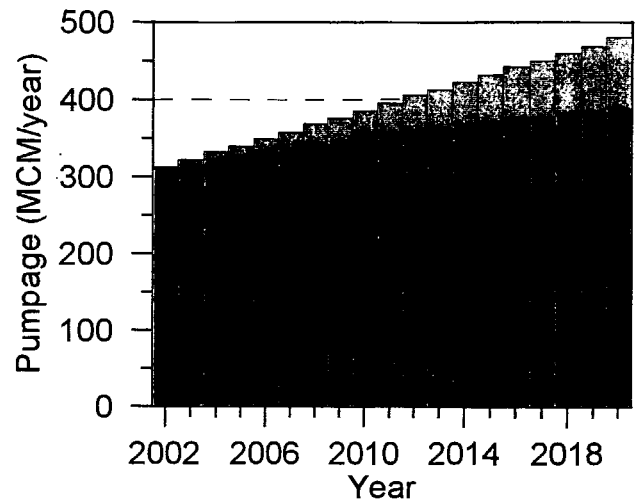
ケース-3、シナリオ-2による
計算被圧水頭分布(2020年、Layer-5)

THE STUDY ON THE GROUNDWATER DEVELOPMENT OF
DEEP AQUIFERS FOR SAFE DRINKING WATER SUPPLY TO
ARSENIC AFFECTED AREAS IN WESTERN BANGLADESH

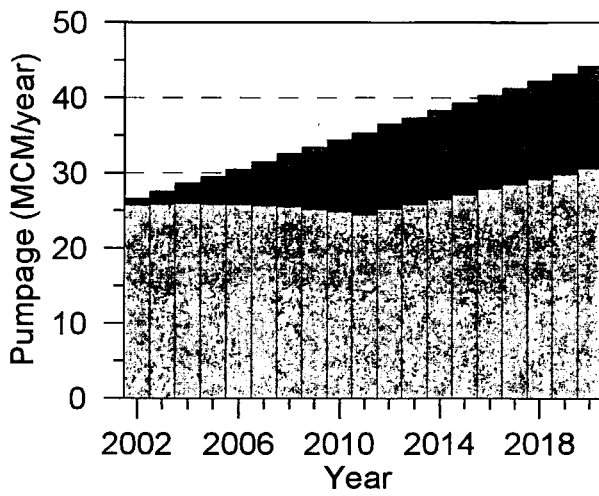
JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA)



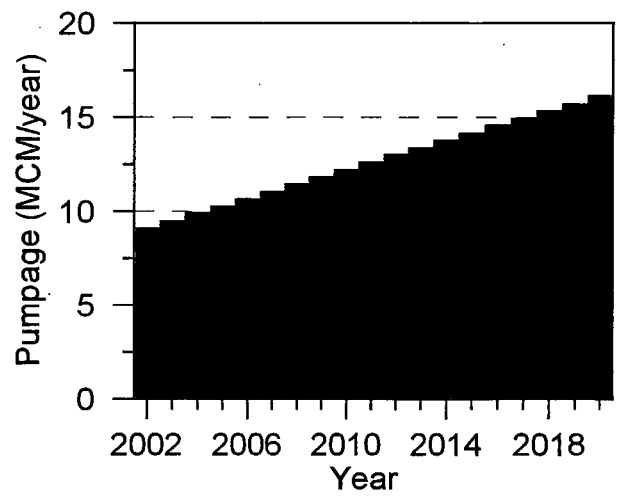
a) AG-STW



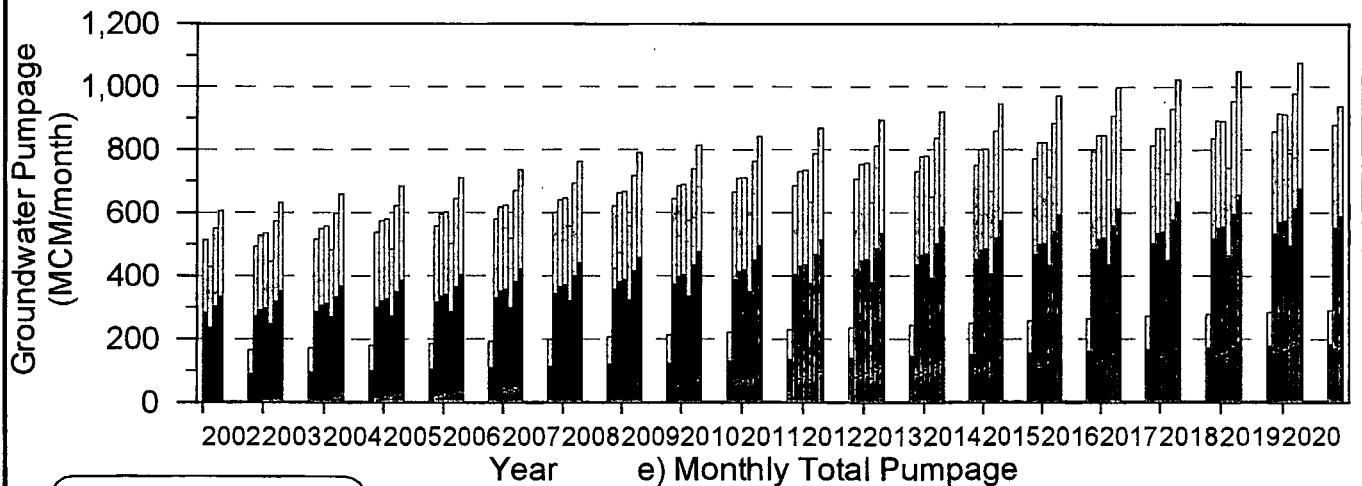
b) AG-DTW



c) DM-STW



d) DM-DTW



e) Monthly Total Pumpage

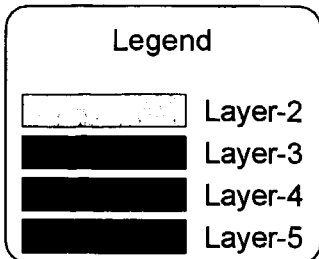
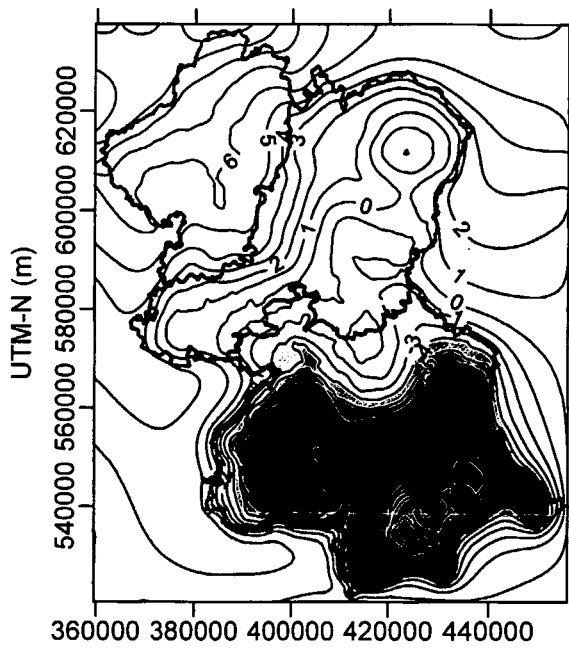


図8.2.38

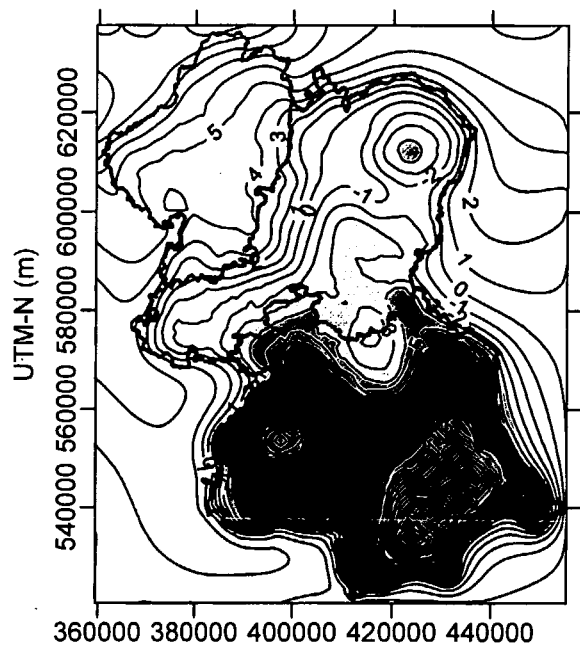
ケース-4、シナリオ-2による
将来地下水揚水量

THE STUDY ON THE GROUNDWATER DEVELOPMENT OF
DEEP AQUIFERS FOR SAFE DRINKING WATER SUPPLY TO
ARSENIC AFFECTED AREAS IN WESTERN BANGLADESH

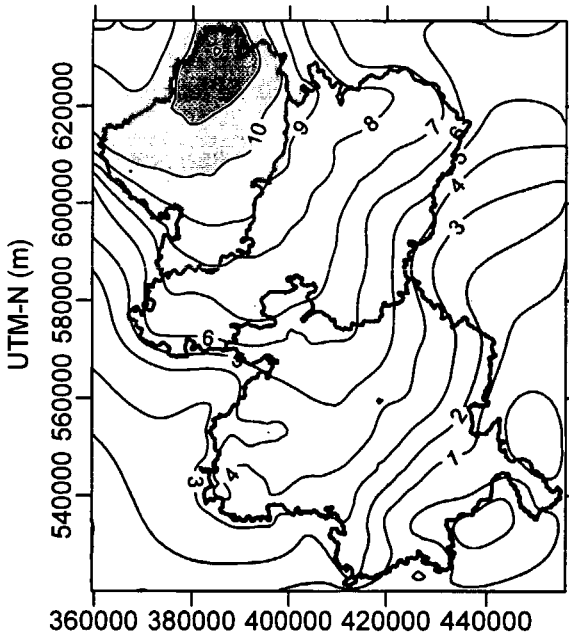
JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA)



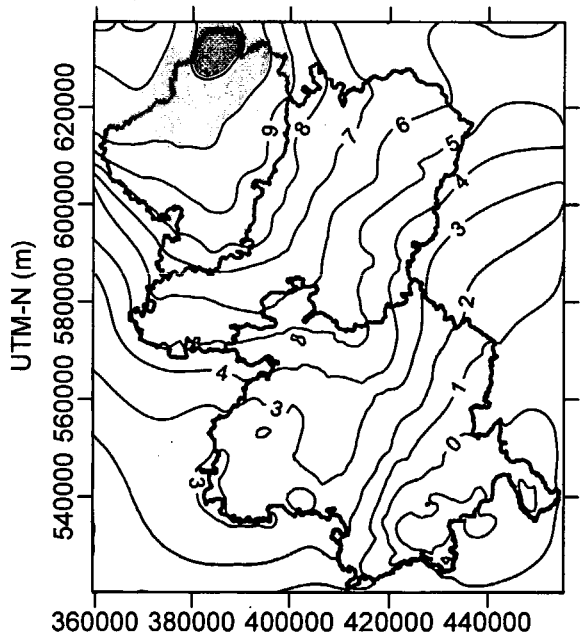
a) Jan 2020



b) Apr 2020



c) Jul 2020



d) Oct 2020



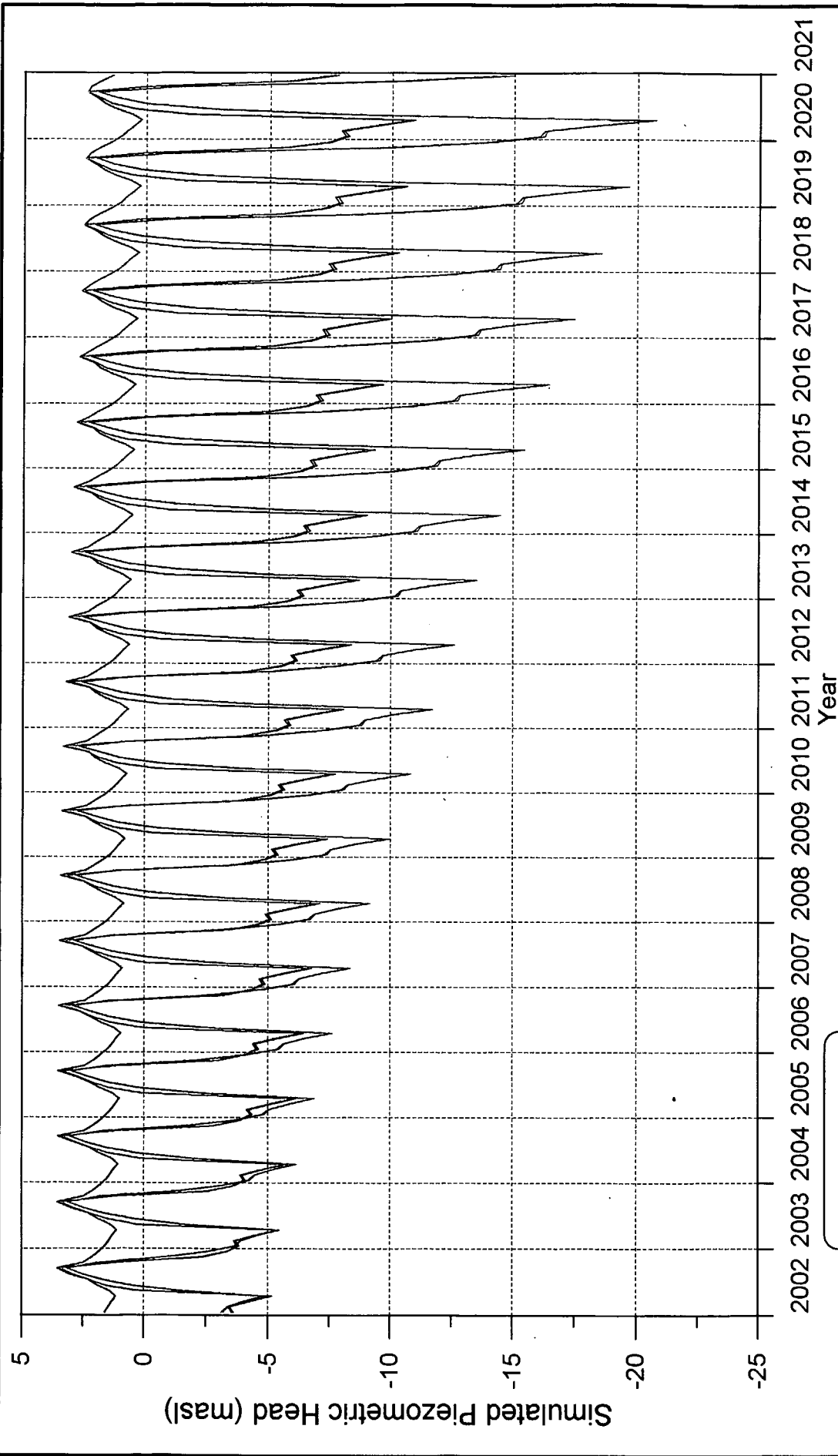
Simulated Piezometric Head in Layer-5
(Unit: m above sea level)

図8.2.39

ケース-4、シナリオ-2による
計算被圧水頭分布(2020年、Layer-5)

THE STUDY ON THE GROUNDWATER DEVELOPMENT OF DEEP AQUIFERS FOR SAFE DRINKING WATER SUPPLY TO ARSENIC AFFECTED AREAS IN WESTERN BANGLADESH

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA)



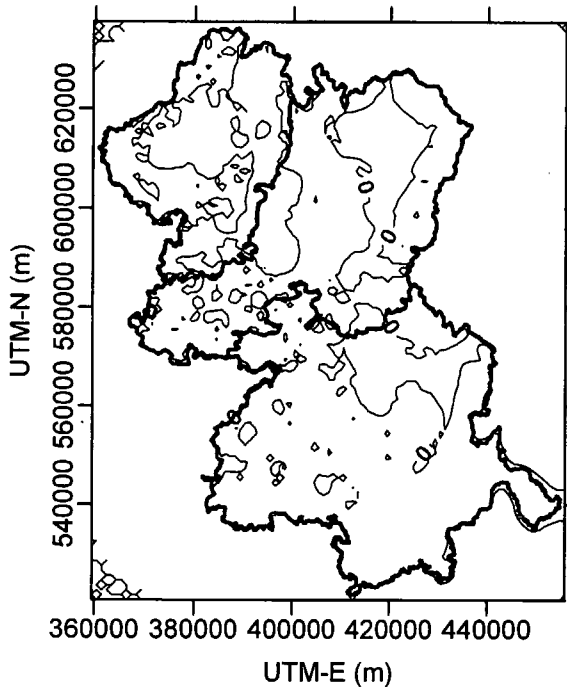
LEGEND

—	Layer-1
—	Layer-2
—	Layer-3
—	Layer-4
—	Layer-5
—	Layer-6

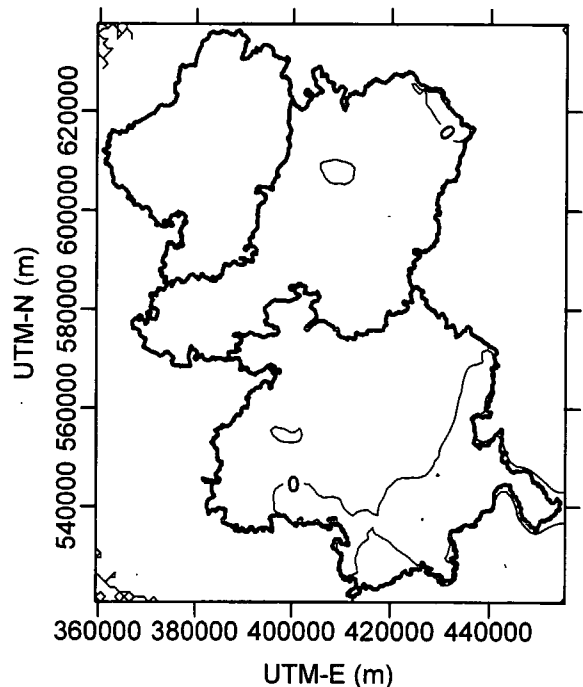
図8.2.40 ジェソール県Rajnagar Bankabarsi村における
2002年から2020年までの計算水頭
(ケース-4、シナリオ-2)

THE STUDY ON THE GROUNDWATER DEVELOPMENT OF
DEEP AQUIFERS FOR SAFE DRINKING WATER SUPPLY TO
ARSENIC AFFECTED AREAS IN WESTERN BANGLADESH

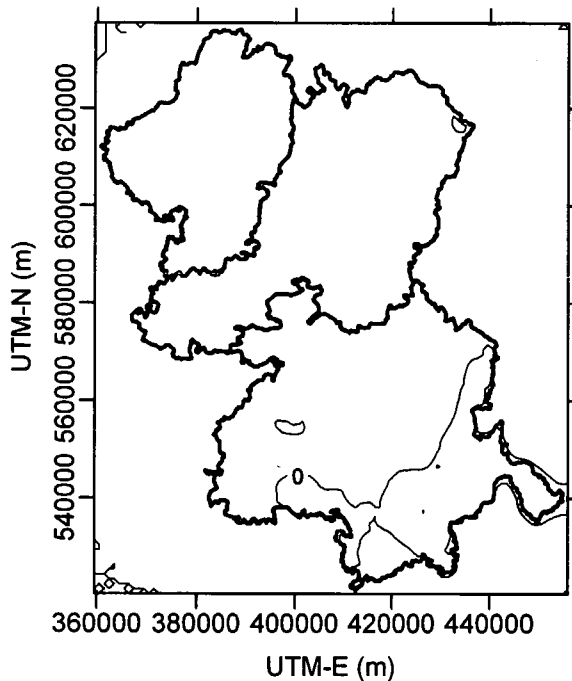
JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA)



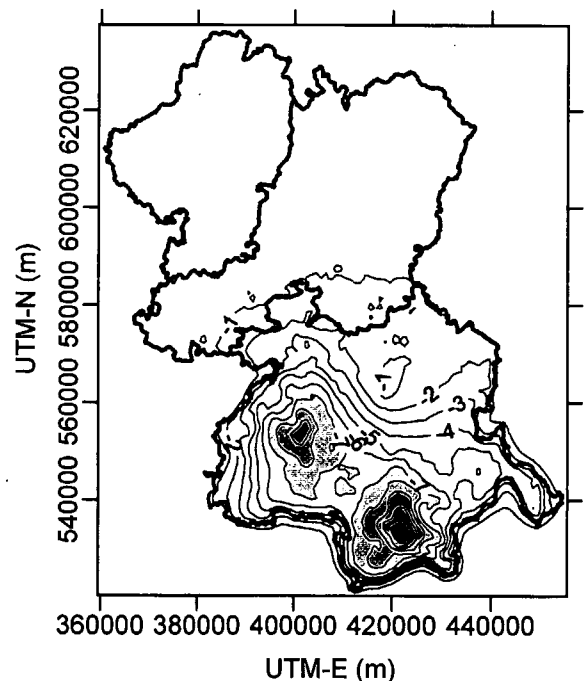
a) Layer-2, Apr 2020



b) Layer-3, Apr 2020



c) Layer-4, Apr 2020



d) Layer-5, Apr 2020

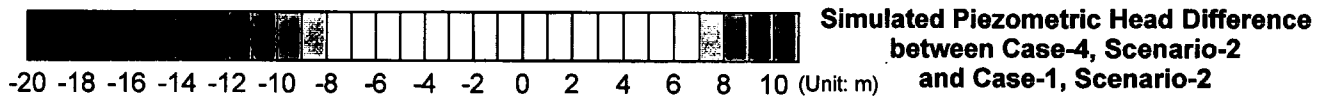


図8.2.41

**シナリオ2におけるケース1と
ケース4の計算水頭差(2020年4月)**

**THE STUDY ON THE GROUNDWATER DEVELOPMENT OF
DEEP AQUIFERS FOR SAFE DRINKING WATER SUPPLY TO
ARSENIC AFFECTED AREAS IN WESTERN BANGLADESH**

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA)

8.2.5 断面二次元広域モデル

1) 目的

断面二次元広域モデルは、調査地域を南北に縦断する垂直断面における地下水流動を検討するため作成した。このモデルは砒素汚染地下水の挙動もシミュレートすることができる。断面二次元モデルは、水文地質構造に規制された地下水流動を検討したり、地盤沈下や地下水塩水侵入を解析したりする目的で幅広く利用されている。計算された被圧水頭分布にもとづき、設定した条件のもとでの砒素汚染地下水の挙動を解析することができる。断面二次元広域モデルのシミュレーション結果により、砒素汚染地下水の移動と将来の深層地下水開発が与える影響を考察することができる。

2) 水文地質モデリング

すでに述べたように、本調査地域の深度 300m までの地下地質は 5 層に区分することができる。さらに、それぞれの地層は、地質断面図に示されるように層相により細分することができる。モデル化にあたっては、図 8.2.42 に位置図や帯水層区分とともに示した B-B' 線に沿った地質断面図を使用して、水文地質モデルを作成した。

図 8.2.43 に断面二次元広域モデルのモデルグリッドを示すが、モデルの断面線方向の長さは 100,000 m (= 100 km) とし、垂直方向には深度 400m までの水文地質状況を反映させた。各モデルセルは横方向 (= X 軸方向) に 1,000m の長さをもつ。セルの厚さは、深度 100m よりも浅い部分では 5 m、それより深い部分では 10m と設定し、浅層部の A1 および A2 部層からなる A 層と B 層の水文地質状況がよくモデルに反映できるようにした。モデルのセルの総数は、100 列 × 50 層 = 5,000 セルである。

図 8.2.44 には、モデルで設定した層相区分と地層境界区分を示す。これらの区分は、B-B' 線に沿う地質断面図をもとに設定した。層相は、「粘土～シルト」、「シルト優勢のシルト・砂互層」、「砂優勢のシルト・砂互層」、「極細粒～細粒砂」、「細粒～中粒砂」、「中粒～粗粒砂」、そして「礫」の 7 つに区分した。深度 300m より深い部分の層相は、本調査で実施した TEM 探査による比抵抗断面をもとに推定した。この部分は E 層に属すると思われるが、モデル上では E' 層として扱った。この断面モデルでは、調査地域の南部で浅層帯水層と深層帯水層とを区分する C 層中の粘性土層の分布が明瞭に表現されている。

3) モデルの検証

過去の地下水揚水量データやかん養量データを入力して行うモデルの検証は大変重要な作業である。本調査では、モデルの検証を 1983 年 1 月から 2001 年 12 月までの 19 年間について月別に 228 ステップの計算を行うことにより実施した。農業用や生

活用の地下水揚水量は、本調査で作成した GIS データベースシステムや衛星画像解析による土地利用状況、既存統計資料等をもとに算出した。三次元広域モデルで使用した揚水量データを断面二次元モデル用に整理した。図 8.2.45 には、断面二次元広域モデルの位置と、断面モデルで使用した三次元広域モデルの揚水量セルの位置関係を示す。

三次元広域モデルの揚水量データは、水文地質区分に基づいたモデル層ごとに集計されているが、断面二次元広域モデルでは、層別の揚水量をさらにその層に属するセルの透水係数を考慮して配分した。地層区分および層相別の透水係数は、揚水試験結果から見かけ上の透水係数を算出し、それをもとに設定した。三次元広域モデルのあるモデル層の揚水量データは、対応する断面二次元広域モデルの同じ層に属するセルに、透水係数に比例させて分配した。なお、「粘土～シルト」相に該当するセルからは、地下水は揚水されないものと仮定した。図 8.2.46 には、2001 年 12 月の地下水揚水量の断面分布を示す。断面モデルに揚水量を入力するにあたっては、ジェソールおよびジェナイダ・ポルシャバの既存生産井の揚水量も、その井戸深度を考慮して入力した。モデルの検証の結果、現地調査で実測値が得られないいくつかの不確かなパラメータについては、それが物理的に取り得る値の範囲を考慮して修正した。修正したパラメータは、垂直方向の透水係数と比貯留量である。表 8.2.6 には、同定された帯水層定数をまとめて示す。

モデルの境界条件としては、モデルの最上位層に固定水位境界を設定した。これは、地表面付近は粘土層からなり、そこでの地下水位はほとんど一定であると仮定したためである。固定水位境界における地下水位は、各列の地形面標高と不圧帯水層の地下水までの深度を考慮して設定した。一般水頭境界は、モデル領域外との帯水層の連続性を表すために、モデルの両側 ($J=1$ および $J=100$) に設定した。モデルの底面 ($K=50$) には閉鎖境界を設定した。

表 8.2.6 断面二次元広域モデルに入力した検証済みパラメータ

三次元モデル層区分	水文地質区分	水理定数	層相						
			1 粘土-シルト	2 シルト優越互層	3 砂優越互層	4 極細粒-細粒砂	5 細粒-中粒砂	6 中粒-粗粒砂	7 礫
Layer-1	A層 (A1部層)	kh (m/d) kv (m/d) Ss (m ⁻¹) kh/kv	ID: 101 0.01 to 0.03 0.002 to 0.006 1.00E-02 5	-	-	ID: 104 0.5 0.1 7.50E-04 5	-	-	-
Layer-2	A層 (A2部層)	kh(m/d) kv(m/d) Ss(m ⁻¹) kh/kv	ID: 201 0.009 0.0018 6.75E-03 5	-	-	ID: 204 1.5 0.15 6.00E-04 10	ID: 205 5 2.5 5.00E-04 2	-	-
Layer-3	B層	kh (m/d) kv (m/d) Ss (m ⁻¹) kh/kv	ID: 301 0.0075 0.0015 5.00E-03 5	-	-	ID: 304 2 0.2 5.00E-04 10	ID: 305 6 3 3.00E-04 2	ID: 306 25 12.5 1.00E-04 2	-
Layer-4	C層	kh (m/d) kv (m/d) Ss (m ⁻¹) kh/kv	ID: 401 0.005 0.001 3.00E-03 5	ID: 402 1 0.05 1.00E-03 20	-	ID: 404 2.4 0.24 4.00E-04 10	ID: 405 10 5 2.00E-04 2	ID: 406 100 50 1.00E-04 2	ID: 407 150 75 5.00E-05 2
Layer-5	D層	kh (m/d) kv (m/d) Ss (m ⁻¹) kh/kv	ID: 501 0.004 0.0008 1.00E-03 5	ID: 502 0.5 0.025 8.00E-04 20	ID: 503 0.6 0.04 6.00E-04 15	ID: 504 2.05 0.205 3.00E-04 10	ID: 505 8 4 1.50E-04 2	-	ID: 507 50 25 4.00E-05 2
Layer-6	E層 (深度300 m 以浅)	kh (m/d) kv (m/d) Ss (m ⁻¹) kh/kv	ID: 601 0.003 0.0006 2.00E-04 5	ID: 602 0.4 0.02 6.00E-04 20	ID: 603 0.45 0.03 6.75E-03 15	-	ID: 605 5 2.5 1.20E-04 2	ID: 606 10 5 8.00E-05 2	-
	E'層 (深度300 m 以深)	kh (m/d) kv (m/d) Ss (m ⁻¹) kh/kv	ID: 701 0.001 0.0002 1.00E-04 5	ID: 702 0.1 0.005 4.00E-04 20	ID: 703 0.25 0.016666667 2.00E-04 15	ID: 704 0.5 0.05 1.00E-04 10	ID: 705 2.5 1.25 7.00E-05 2	ID: 706 5 2.5 5.00E-05 2	-

ID: 層相ラベル番号, kh: 水平方向透水係数, kv: 垂直方向透水係数, Ss: 比貯留量

4) 検証期間のシミュレーション結果

検証されたモデルを使用して、1983年1月から2001年12月までの期間について、過去の地下水流動を再現するためのシミュレーションを行った。シミュレーションは月別に228ステップの非定常計算で行い、各ステップの時間はその月の日数に応じて28~31日とした。

図8.2.47には、断面二次元広域モデルによる2001年12月の計算被圧水頭を示す。標高-1m以下の被圧水頭の低下部は、ケシャブプール地区のB層とジェソール・ポルシャバ地区のB層およびC層に分布する。入力した地下水揚水量は主にA層およびB層に分布しているにもかかわらず、海拔0m以下の被圧水頭はジェソール・ポルシャバ地区からケシャブプール地区にかけてのD層にまで及んでいる。計算被圧水頭の分布から、図に示すように地下水流動方向を描くことができる。地下水は水頭ポテンシャルの高い地域から低い地域に向かって流動するので、深層地下水の流動方向は基本的に上向きで、水頭低下部の中心に向かって流動する。浅層部の地下水は、主に下方に流動し、水頭低下部の中心に向かって移動する。以上の地下水流動パターンから、現状ではA層およびB層中の浅層地下水は深度200m以深の深層部には到達しないと判断される。

図8.2.48には、断面モデルによる2001年12月の計算砒素濃度を示す。もともとB-B'断面線沿いでは実際の砒素汚染は軽微であるが、モデルではA層からD層までのい

くつかのセルに砒素原因層が分布すると仮定して計算を行った。モデル上での砒素原因層の条件は、断面二次元局所モデルと同じ条件とした。19年間のシミュレーションの結果、汚染地下水は主に上下方向に動き、水平方向にはほとんど移動しないことが明らかになった。これは、モデルでは垂直方向の地下水流動が卓越していることと、モデルでは水平方向の流動も計算されているがモデルのセルのサイズが水平方向に大きいので、地下水は19年間の計算期間には隣のセルまで移動しないことが原因である。さらに、浅層部には連続して揚水セルが分布するため、浅層部からの汚染地下水はこれら既存井戸の揚水セルで揚水されてしまい、深層部に到達しない。なお、ジェソール・ポルシャバ地区のポルシャバ生産井近くにあるC層中の砒素原因層から溶出する汚染水は、垂直方向に比較的大きく広がる。これは、帯水層の透水係数が比較的大きく、しかも被圧水頭の季節変動が大きいために移流および分散が大きくなるためであると説明できる。一方、D層中の砒素原因層から溶出した汚染地下水の分布範囲は狭いが、これは深層部の透水係数が小さいことと、現在の地下水利用状況では深層部の動水勾配が小さいことが原因と考えられる。

5) 将来予測シミュレーション結果

検証された断面二次元広域モデルを使用して、将来の地下水流動を予測した。三次元広域モデルで準備した将来の揚水シナリオとケースを利用して、表8.2.7に示す揚水案について予測シミュレーションを行った。

表 8.2.7 断面二次元広域モデルで使用した将来地下水揚水量のシナリオとケース

シナリオ	シナリオの内容	ケース	ケースの内容	揚水量データの名称
1	2001年の揚水量が2020年まで継続	1	現在と同じ帯水層から揚水	FQ-01
		2	DM-STW 揚水量を2002年から2011年にかけて深層帯水層(Layer-5)にシフト	FQ-02
2	過去のトレンドで将来の揚水量が増加(線形予測)	1	現在と同じ帯水層から揚水する	FQ-03
		2	DM-STW 揚水量を2002年から2011年にかけて深層帯水層(Layer-5)にシフト	FQ-05
		4	農業用揚水量を毎年1%ずつ深層帯水層(Layer-5)にシフト	FQ-09

a. シナリオ - 1 シミュレーション

シナリオ - 1 による将来の地下水揚水量は、2001 年の既存揚水量が 2020 年まで継続されると仮定した。断面二次元広域モデルに入力した 2002 年から 2020 年までの年間揚水量は 59.87 MCM/year である。なお、うるう年では年間揚水量が 60.14 MCM/year である。

(i) ケース - 1、シナリオ - 1 シミュレーション

ケース - 1、シナリオ - 1 シミュレーションの結果、2001 年と同じ量の揚水量が継続されるにもかかわらず、調査地域南部の深層部の被圧水頭が徐々に低下すると予測される。年間 12 ヶ月間の計算水頭をみると、最低水頭は毎年 4 月に現れ、最高水頭は毎年 9 月に出現する。

図 8.2.49 には、2005 年 1 月、4 月、9 月、12 月の地下水揚水量の断面分布と計算被圧水頭を示す。年間を通じて - 1 masl 以下の被圧水頭の低下部が、ジェソール・ポルシャバ地域とケシャブプール地域の 2 箇所にみられる。最低水頭は 2005 年 4 月にケシャブプール地区の B 層で - 6.29 masl と予測される。9 月には地下水揚水が A 層および C 層上部からの生活用だけになるために、モデル領域のほとんどでは計算水頭が回復する。しかし、調査地域南部では、- 1 ~ - 3 masl の水頭低下部が残る。12 月には、被圧水頭低下部の水頭は再び低下し、調査地域中央部～北部の B 層、C 層の被圧水頭も低下し始める。2010 年になると、地下水揚水量は 2005 年と同量であるにもかかわらず、水頭低下部は拡大し水頭も低下する。ジェソール・ポルシャバ地区では、- 1 masl 以下の被圧水頭は E 層の基底部まで及ぶ。また、その下位の E' 層でも被圧水頭が 0 masl 以下になる部分がある。2010 年 4 月の最低計算水頭は、ケシャブプール地区の B 層中の - 6.45m であった。2015 年には、計算被圧水頭はさらに徐々に低下し、水頭低下部の範囲が拡大した。2015 年 4 月の最低被圧水頭は - 6.53m と予測される。2020 年における計算被圧水頭の分布を図 8.2.50 に示すが、2020 年 4 月の最低被圧水頭は - 6.57m と計算され、E 層および E' 層の被圧水頭も 0 masl 以下になると予想される。しかし、被圧水頭低下部の中心は、ケシャブプール地区およびジェソール・ポルシャバ地区の B 層中に位置しており、B 層より下位の地層中の地下水流動方向は基本的に上向きのみである。

図 8.2.51 には、ケース - 1、シナリオ - 1 の 2002 年と 2020 年の計算被圧水頭の差を示す。この図からも明らかなように、水頭はモデル化した範囲のうち、南部～中央部にかけての深層部で低下する。4 月における最大水頭差は 3.29m である。この原因は、モデル中央部から南部の E 層および E' 層は主に粘性土層により構成され、それらの透水係数が小さいために予測シミュレーション開始時には比較的高い水頭がこれら

の粘性土層中に残存していたが、その後の上位層における地下水揚水により深層地下水が上方に移動していき、深層部粘性土層中の水頭が徐々に低下したためと説明できる。同様の粘性土層中の水頭のゆっくりとした低下は、ケシャブプール地区の C 層中の粘性土層においても認められる。

(ii) ケース - 2、シナリオ - 1シミュレーション

ケース - 2 は、DM-STW 揚水量が 2002 年から 2011 年にかけて A 層下部から D 層および E 層にシフトすると設定した。このケースによると、2005 年には年間 0.266 MCM/year が深層帯水層から揚水されることになり、2010 年には 0.599 MCM/year が深層帯水層にシフトする。2011 年以降は、DM-STW 需要量すべて(= 0.666 MCM/year) が深層帯水層から揚水されることになる。

図 8.2.52 と図 8.2.53 には、それぞれ 2005 年と 2020 年の地下水揚水量と計算被圧水頭の分布を示す。2005 年 4 月には、深層帯水層からの 1 セルあたりの最大揚水量は $19.7 \text{ m}^3/\text{day}$ となる。ケース - 1 のシミュレーション結果と比較すると、深層帯水層の被圧水頭はわずかに低くなり、D 層および E 層中の - 1 masl 以下の水頭低下部はやや拡大する。2010 年 4 月の深層帯水層における 1 セルあたりの最大揚水量は $44.2 \text{ m}^3/\text{day}$ となり、2011 年から 2020 年までの 4 月の最大揚水量は $49.2 \text{ m}^3/\text{day}$ となる。2020 年になると、ジェソール・ポルシャバ地区の D 層および E 層の計算被圧水頭は - 2 masl 以下となる。

図 8.2.54 には、2020 年におけるシナリオ - 1 の場合のケース - 1 とケース - 2 の計算水頭差を示す。2020 年 12 月の場合、最大水頭差はジェソール・ポルシャバ地区の E 層中の 0.88m と計算される。DM-STW 揚水量の深層帯水層へのシフトによる影響は、ジェナイダ県南部からジェソール県南部にかけての地域の D 層、E 層および E' 層で 0.3m 以上となり、ジェソール県南部の C 層中で 0.2 ~ 0.3m と予測される。

b. シナリオ - 2シミュレーション

シナリオ - 2 では、将来の地下水揚水量は過去の増加トレンドに従い直線状に増加する。断面二次元広域モデルでは、入力した揚水量は 2002 年の 62.76 MCM/year から 2020 年の 112.00 MCM/year に増加する。2005 年、2010 年、そして 2015 年の年間揚水量は、それぞれ 70.88 MCM/year、84.42 MCM/year、97.95 MCM/year をモデルに入力した。

(i) ケース - 1、シナリオ - 2シミュレーション

ケース - 1、シナリオ - 2シミュレーションの結果、モデル領域全域で計算水頭が低

下し、とくにジェソール地区では低下量が大きくなる。年間12ヶ月間の計算水頭をみると、最低水頭は毎年4月に現れ、最高水頭は毎年9月に出現する。

図8.2.55には2005年1月、4月、9月および12月の揚水量と計算被圧水頭の分布を示す。年間を通して-1 masl以下の2つの被圧水頭低下部がジェソール・ポルシャバ地区とケシャブプール地区に分布する。これらの水頭低下部の範囲はケース-1、シナリオ-1のときよりも大きくなる。2005年4月の最低水頭は、ケシャブプール地区のB層中の-7.51mである。2005年9月になると、被圧水頭はモデル領域のほとんどで回復するが、南部地域では-2~-4mの被圧水頭の低下部が残る。2005年12月には、水頭低下部の被圧水頭は再び低くなり、モデル中央部から北部のB層・C層中の被圧水頭も低下しはじめる。図8.2.56には2020年の計算水頭分布を示すが、それ以前の年と比べると計算水頭はさらに低下しており、水頭低下部の範囲も拡大する。ジェナイダ県においても計算被圧水頭は0 masl以下となり、ここでは2015年までにA層下部からC層にかけての被圧水頭が-3~-5mになると予測される。2020年にはモデル領域のほとんどで被圧水頭が0 masl以下となる。2020年4月の最低被圧水頭は-14.27 maslになると予想される。E層とE'層の被圧水頭も、ジェナイダ県で-4 masl以下、ジェソール県では-6 masl以下になると予想される。しかし、このケースおよびシナリオでも水頭低下部の中心はケシャブプール地区およびジェソール・ポルシャバ地区のB層およびC層に位置しており、B層より下位の地層中での地下水流動は基本的に上向きであると予測される。

図8.2.57には、ケース-1・シナリオ-2における2002年と2020年の計算被圧水頭の差を示す。この図からも明らかなように、被圧水頭は、とくにジェソール・ポルシャバ地区のB層とC層で低下する。水頭低下量は4月が最大であり、ジェソール・ポルシャバ地区では最大水頭差が9.45mとなる。ジェナイダ県では、南部と北部で水頭差が6~7 mとなる。9月はA層からC層にかけての浅層部では水頭差が小さくなるが、深層部ではとくにジェナイダ県で水頭差が5 m以上と大きくなる。

以上のシミュレーション結果から、2002年から2020年にかけて地下水揚水量がシナリオ-2、ケース-1に従って増加する場合、被圧水頭が3~9.5m低下すると予測される。ケース-1では将来揚水量は浅層帯水層から揚水されると設定しているが、2020年には深層部のD層およびE層でも水頭が4~6 m低下すると予測される。しかし、水頭低下部の中心はB層およびC層に位置するので、これよりも上位にある浅層地下水は深層帯水層に到達しないと予測される。なお、ジェナイダ県では2020年9月の計算水頭をみると深層帯水層の水頭は浅層帯水層のそれよりも低くなり、その時点では地下水流動は下向きとなる。しかし、そのときにC層からD層に流入する地下水の量は、D層の透水係数が小さいために極めて限られた量であると予測され

る。さらに、雨季の後半の一時期に深層帯水層に流入した地下水は、そのつぎの乾季から雨季の初めにかけて再び上方に移動すると予測される。したがって、ジェナイダ県におけるシナリオ - 2、ケース - 1 による浅層汚染地下水による深層地下水の汚染の可能性はきわめて小さいと判断される。

(ii) ケース - 2、シナリオ - 2シミュレーション

ケース - 2 では、DM-STW 揚水量は 2002 年から 2011 年にかけて A 層下部から D 層および E 層にシフトすると設定した。この設定により、断面二次元モデル領域では 2005 年に 0.312 MCM/year の DM-STW 揚水量が深層帯水層にシフトされ、2010 年には 0.818 MCM/year がシフトされる。2011 年以降は、DM-STW 揚水量すべてが深層帯水層から揚水される。深層帯水層からの DM-STW 揚水量は、2015 年に 1.037 MCM/year、2020 年に 1.169 MCM/year となる。

図 8.2.58 には、2005 年の地下水揚水量と計算被圧水頭の分布を示す。2005 年 4 月の深層帯水層からの 1 セルあたりの最大揚水量は $23.0 \text{ m}^3/\text{day}$ であり、最低計算水頭は -7.50 masl であった。シナリオ - 2、ケース - 1 の結果と比べると、深層帯水層の被圧水頭はやや低下し、D 層、E 層中の -1 masl 以下の水頭低下域がわずかに拡大している。図 8.2.59 には 2020 年の結果を示すが、同年 4 月の 1 セルあたりの最大揚水量は $86.3 \text{ m}^3/\text{day}$ である。2020 年 9 月を除き、モデル領域のほとんどが 0 masl 以下の被圧水頭を示す。2020 年 4 月には、ほとんどの地域で B 層と C 層の被圧水頭が -4 masl 以下となる。ジェソール・ポルシャバ地区とケシャブプール地区の水頭低下部では -12 masl 以下の水頭を示す。2020 年 4 月の最低水頭は -14.23 masl と予測される。

図 8.2.60 には、シナリオ - 2 の場合の 2020 年におけるケース - 1 とケース - 2 の計算水頭の差を示す。2020 年 12 月のジェソール・ポルシャバ地区における E 層の最大水頭差は 1.50 m である。DM-STW 揚水量の深層帯水層へのシフトによる影響は、ジェナイダ県南部から中部にかけての D 層、E 層および E' 層で 0.5 m 以上であり、ジェソール県南部の C 層で $0.3 \sim 0.4 \text{ m}$ である。

以上のシミュレーション結果から、DM-STW 揚水量が深層帯水層にシフトする影響はシナリオ - 1、ケース - 2 の場合よりも大きいと予測されるが、2020 年の被圧水頭分布をみるとその中心部はシナリオ - 2 においても B 層および C 層に位置している。したがって、深層帯水層における地下水流動の方向は、このケースでも浅層帯水層にむかって上向きであると予測される。

(iii) ケース - 4、シナリオ - 2シミュレーション

ケース - 4 では、ケース - 3、シナリオ - 2 の条件に追加して、農業用地下水揚水量

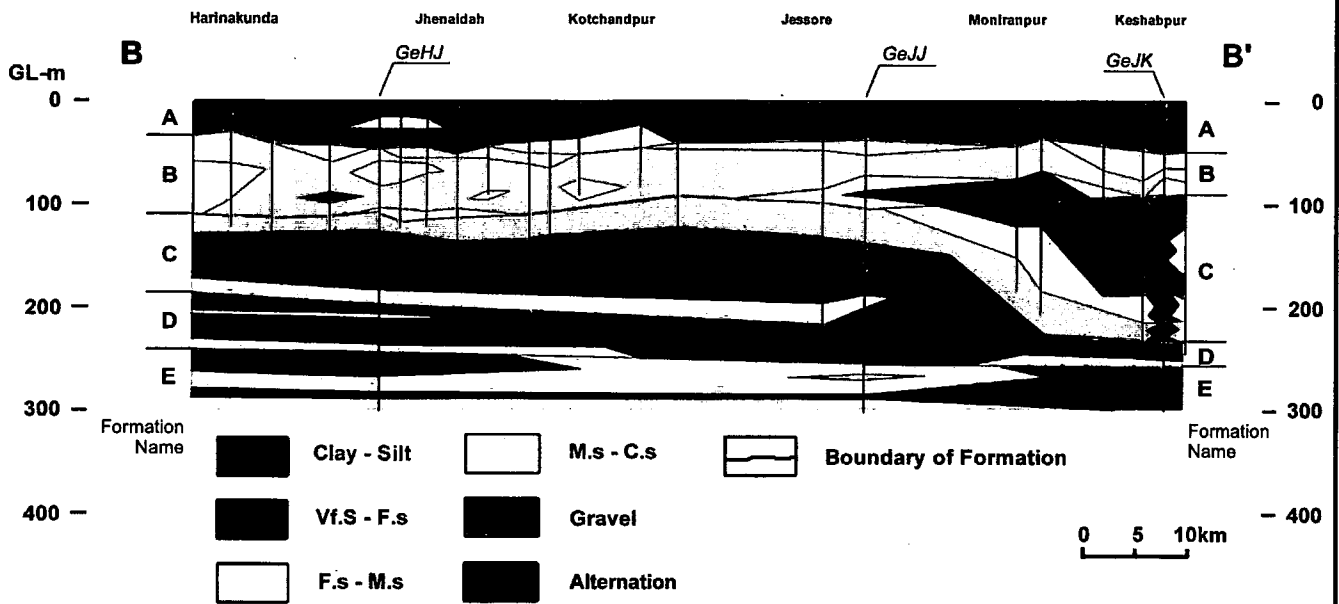
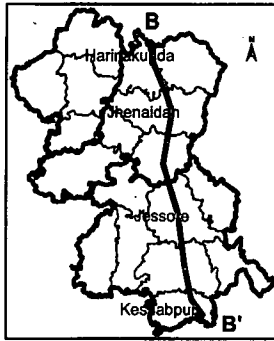
がD層およびE層に2002年から2020年まで毎年1%ずつシフトすると仮定した。このケースでは、D層およびE層からの地下水揚水量は2002年の0.616 MCM/yearから2020年の20.690 MCM/yearに増加することになる。2005年、2010年、2015年の断面モデルに入力した深層帯水層からの揚水量は、それぞれ2.783 MCM/year、7.456 MCM/year、13.382 MCM/yearとなる。

図8.2.61には、2005年の地下水揚水量と計算被圧水頭の分布を示すが、2005年4月の深層帯水層からの1セルあたりの最大揚水量は217.3 m³/dayであり、最低水頭は-7.19 maslである。この時点では水頭低下部の中心はまだB層およびC層中にあるが、低下域はD層およびE層に拡大しはじめている。2005年12月になると、ジェソール・ポルシャバ地域のD層およびE層中に、-3 masl以下の水頭を示す新たな水頭低下部が形成される。

図8.2.62には2020年の地下水揚水量と計算水頭の分布を示すが、2020年4月の深層帯水層からの1セルあたりの最大揚水量は1,602.8 m³/dayとなり、計算被圧水頭は雨季においても-17 maslよりも低くなる。2020年4月の最低水頭は-23.45 maslである。2020年12月には、-15 masl以下の被圧水頭はC層からE層にかけて分布している。この年までに既存の地下水流動系は完全に破壊され、浅層部の汚染地下水が深層部に直接侵入する危険性があると判断される。

図8.2.63には、2020年のシナリオ-2におけるケース-1とケース-4の計算被圧水頭差を示す。2020年12月では、ジェソール・ポルシャバ地区の北部と南部で水頭差が14 m以上となる。合計19%の農業用揚水量の深層帯水層へのシフトにより、乾季におけるジェナイダ県南部からジェソール県南部にかけての地域では水頭が10 m以上も低下する。雨季である2020年9月でも、深層帯水層の水頭はケース-1よりも10~11 m低くなる。その結果、深層地下水と浅層地下水の水頭差はさらに拡大する。

このシミュレーション結果が示すように、深層地下水からの過剰揚水は、深層帯水層中に大きな水頭低下部を形成の形成を引き起こすことになる。このような状況では、ほとんどの地下水は深層部の水頭低下部に向かって流動することになり、深層地下水への砒素汚染の拡大が懸念される。貴重な地下水資源を持続的に利用する観点からも、こうした事態を避けるようにすべきである。



Subsurface Geology and Aquifer Classification

Geologic Age	JICA Study Team (2002)		BGS/DPHE (2001)
	Subsurface Geology	Aquifer Classification	
Holocene	A formation	First Aquifer (Shallow Aquifer)	Upper shallow aquifer
	B formation		
Late Pleistocene	C formation	Second Aquifer (Middle Aquifer)	Lower shallow aquifer
Plio-Pleistocene	D formation	Third Aquifer (Deep Aquifer)	Deep aquifers
	E formation		

図8.2.42

地質断面図(B-B'線)と帯水層区分

THE STUDY ON THE GROUNDWATER DEVELOPMENT OF DEEP AQUIFERS FOR SAFE DRINKING WATER SUPPLY TO ARSENIC AFFECTED AREAS IN WESTERN BANGLADESH

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA)

B

Column (J)

B'

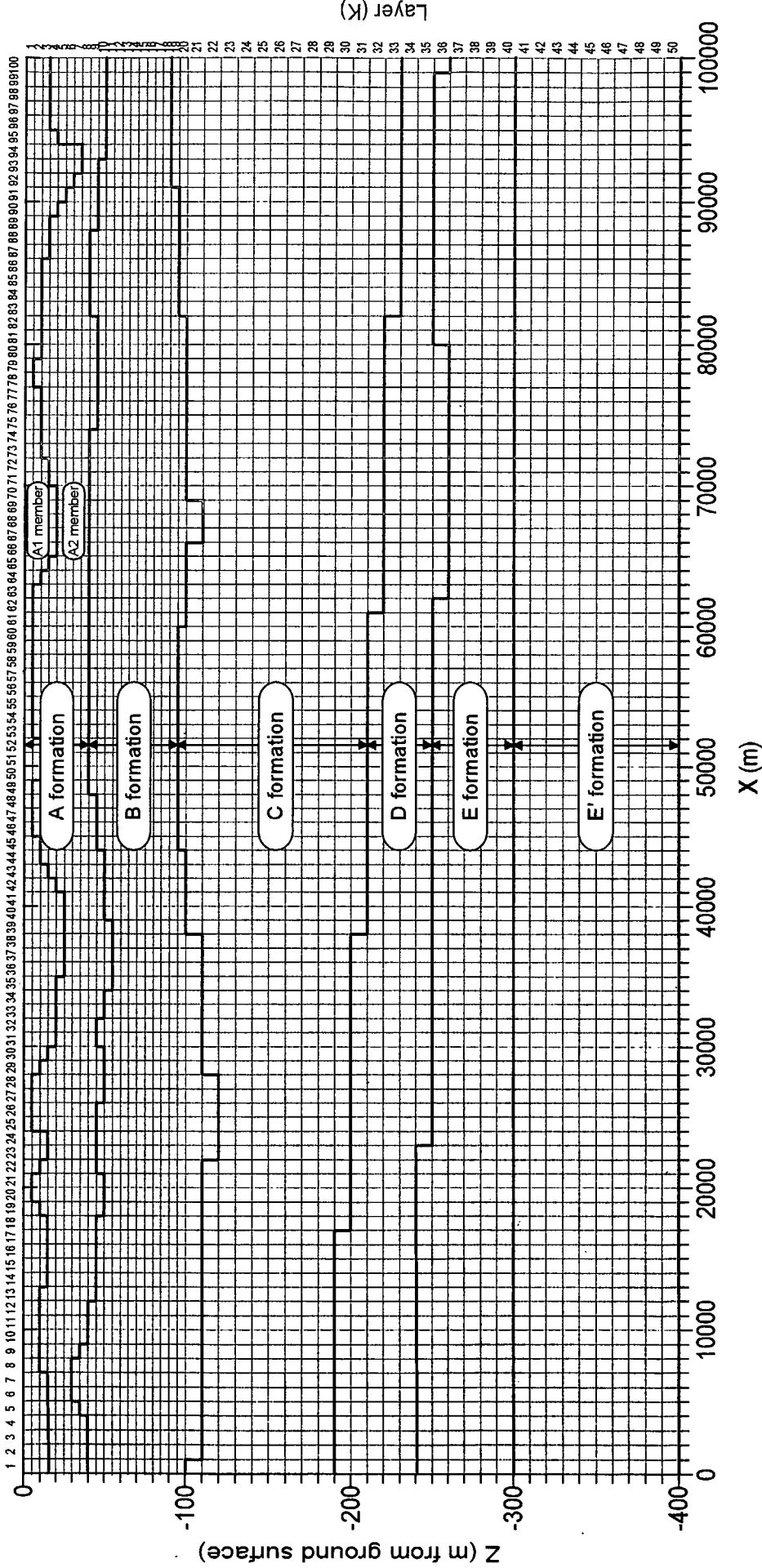


図8.2.43

断面二次元広域モデルの
モデルグリッド

— Stratigraphic Boundary

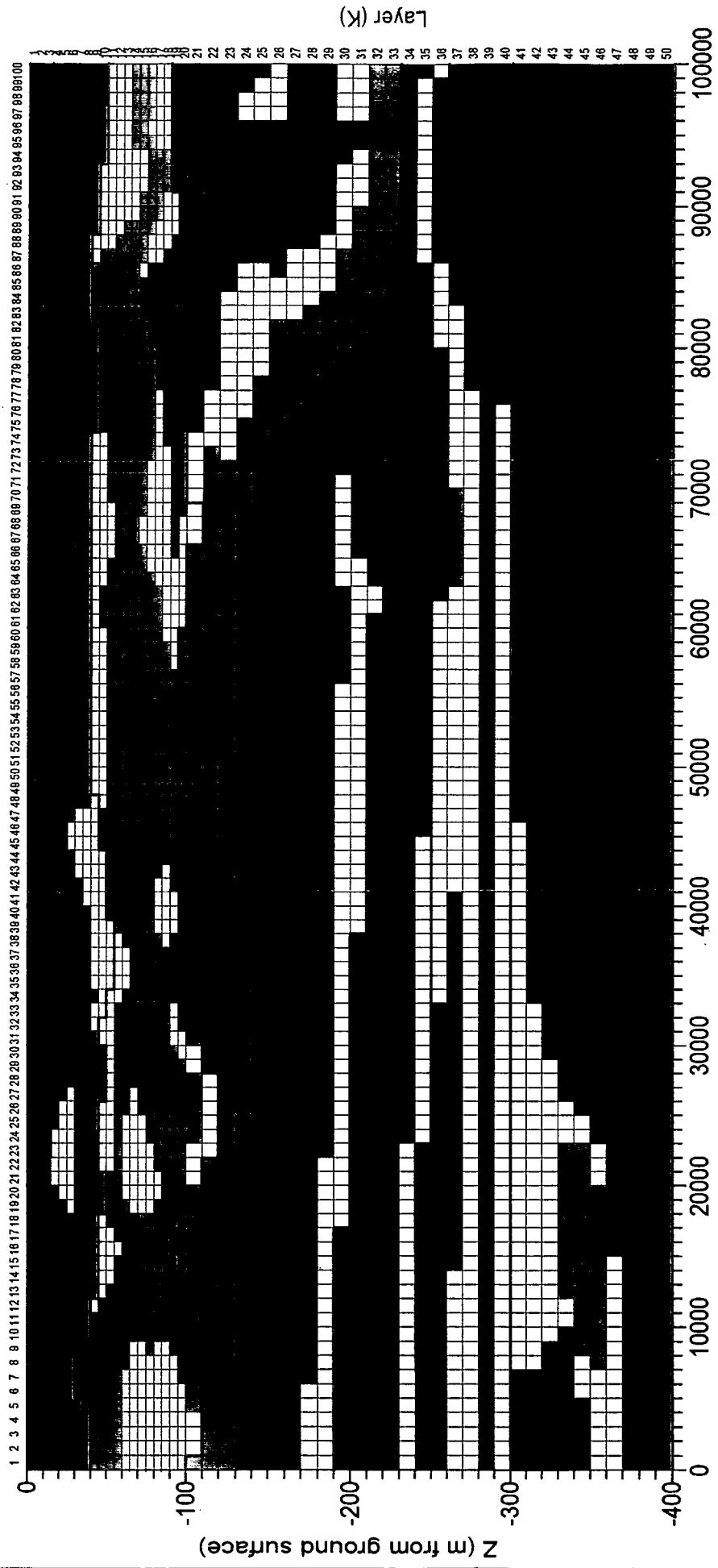
THE STUDY ON THE GROUNDWATER DEVELOPMENT OF
DEEP AQUIFERS FOR SAFE DRINKING WATER SUPPLY TO
ARSENIC AFFECTED AREAS IN WESTERN BANGLADESH

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA)

B'

Column (J)

B



- clay to silt
- silt rich alt.
- sand rich alt.
- vf to f sand
- f to m sand
- m to c sand
- gravel

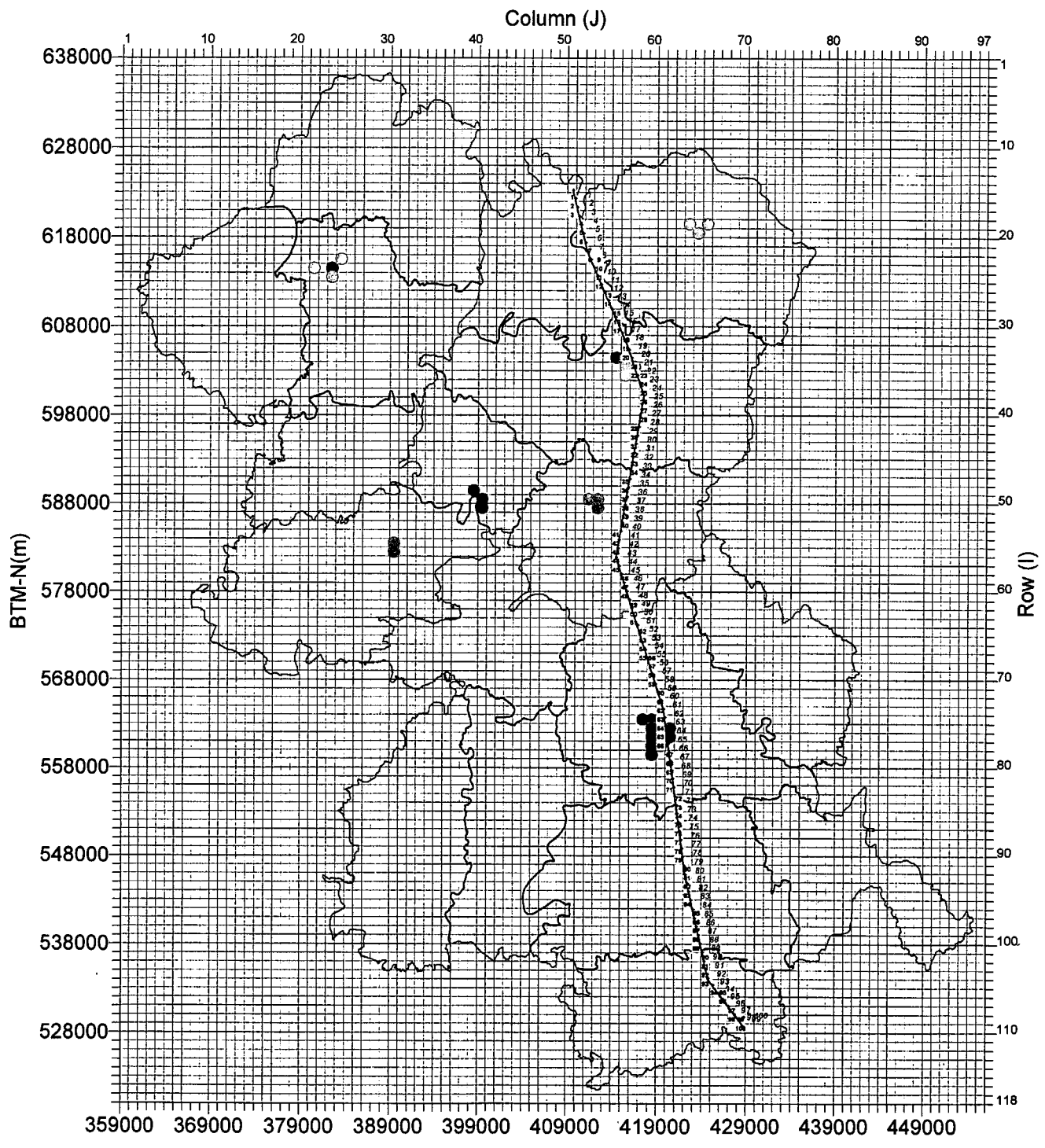
— Stratigraphic Boundary

図8.2.44

断面二次元モデルにおける
層相区分と地層境界

THE STUDY ON THE GROUNDWATER DEVELOPMENT OF
DEEP AQUIFERS FOR SAFE DRINKING WATER SUPPLY TO
ARSENIC AFFECTED AREAS IN WESTERN BANGLADESH

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA)



Pumpage of Pourashava Production Wells (m³/day/cell)

- 1 to 200
- 200 to 400
- 400 to 600
- 600 to 1000
- 1000 to 3000

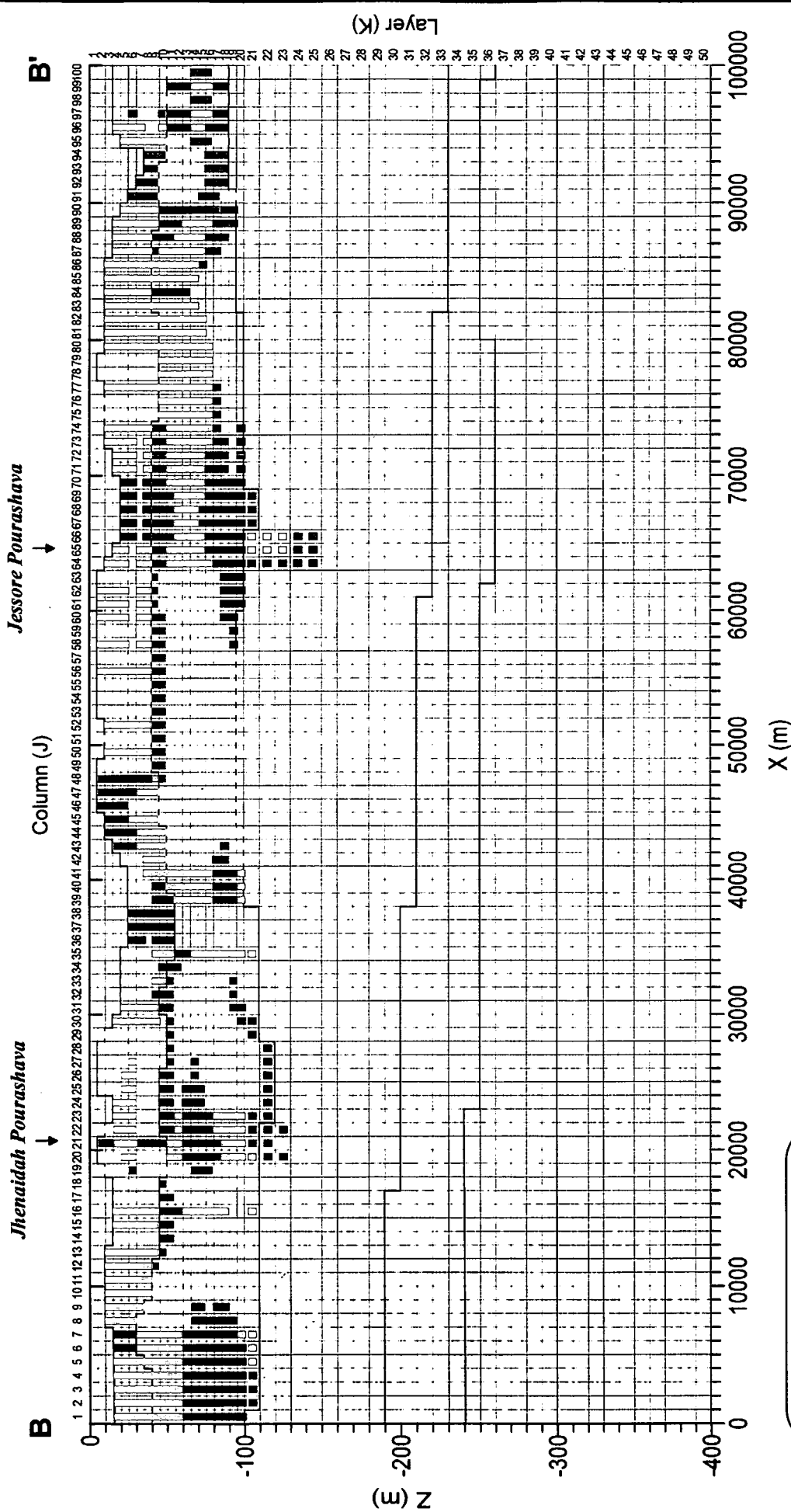
65 Pumped Cell of 3-D Regional Model Used for Vertical 2-D Regional Model with Corresponding Column (J) Number

28 Profile Line for V2D Regional Model with Column (J) Number

図8.2.45 断面二次元モデルの位置と使用した三次元モデルの揚水セル

THE STUDY ON THE GROUNDWATER DEVELOPMENT OF DEEP AQUIFERS FOR SAFE DRINKING WATER SUPPLY TO ARSENIC AFFECTED AREAS IN WESTERN BANGLADESH

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA)



Groundwater Pumpage per Cell
(December 2001)

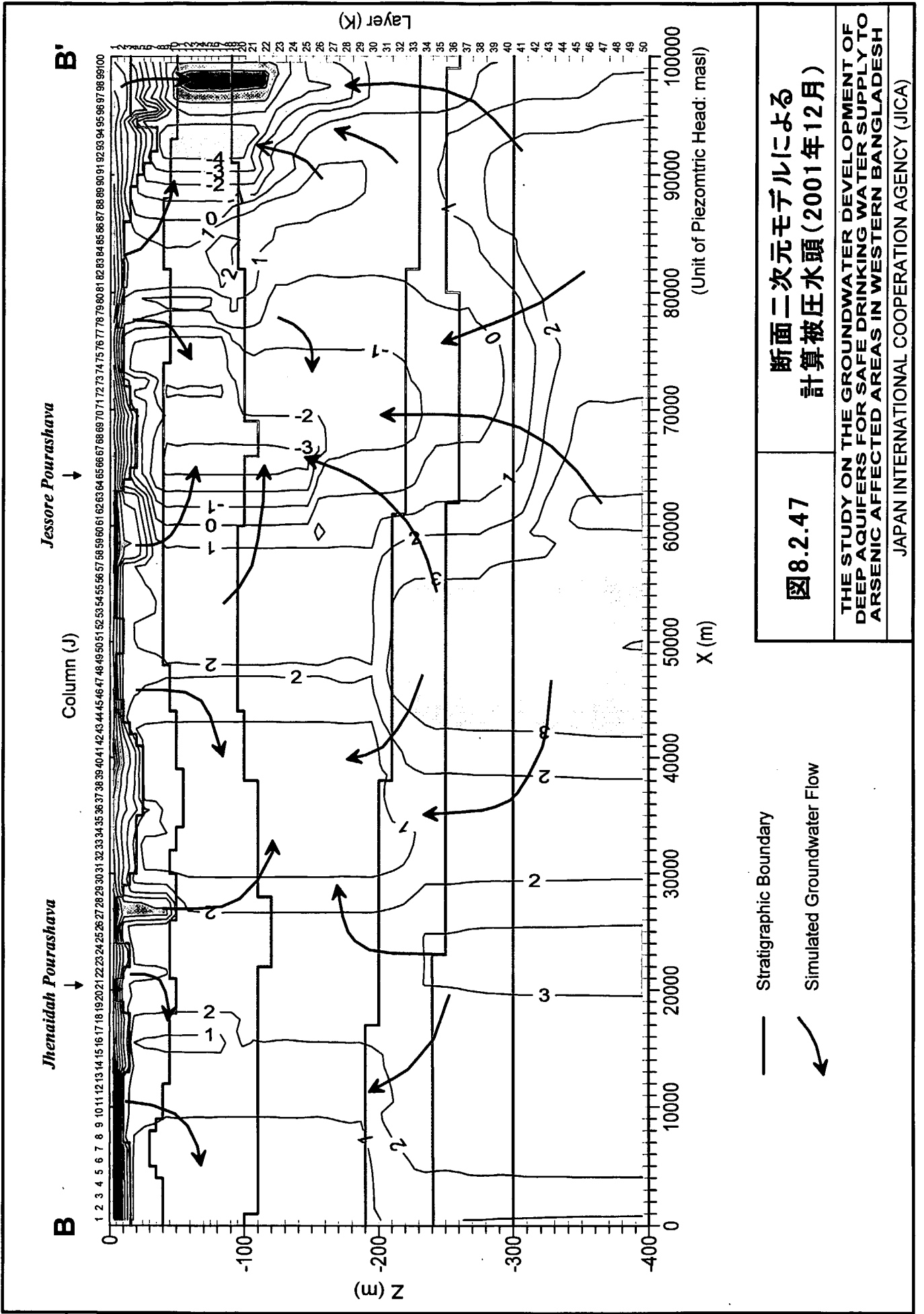
- 0.4 to 50 m³/day
- 50 to 100 m³/day
- 100 to 200 m³/day
- 200 to 400 m³/day
- 400 to 800 m³/day

— Stratigraphic Boundary

図8.2.46

断面二次元モデルに入力した
地下水揚水量(2001年12月)

THE STUDY ON THE GROUNDWATER DEVELOPMENT OF
DEEP AQUIFERS FOR SAFE DRINKING WATER SUPPLY TO
ARSENIC AFFECTED AREAS IN WESTERN BANGLADESH
JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA)



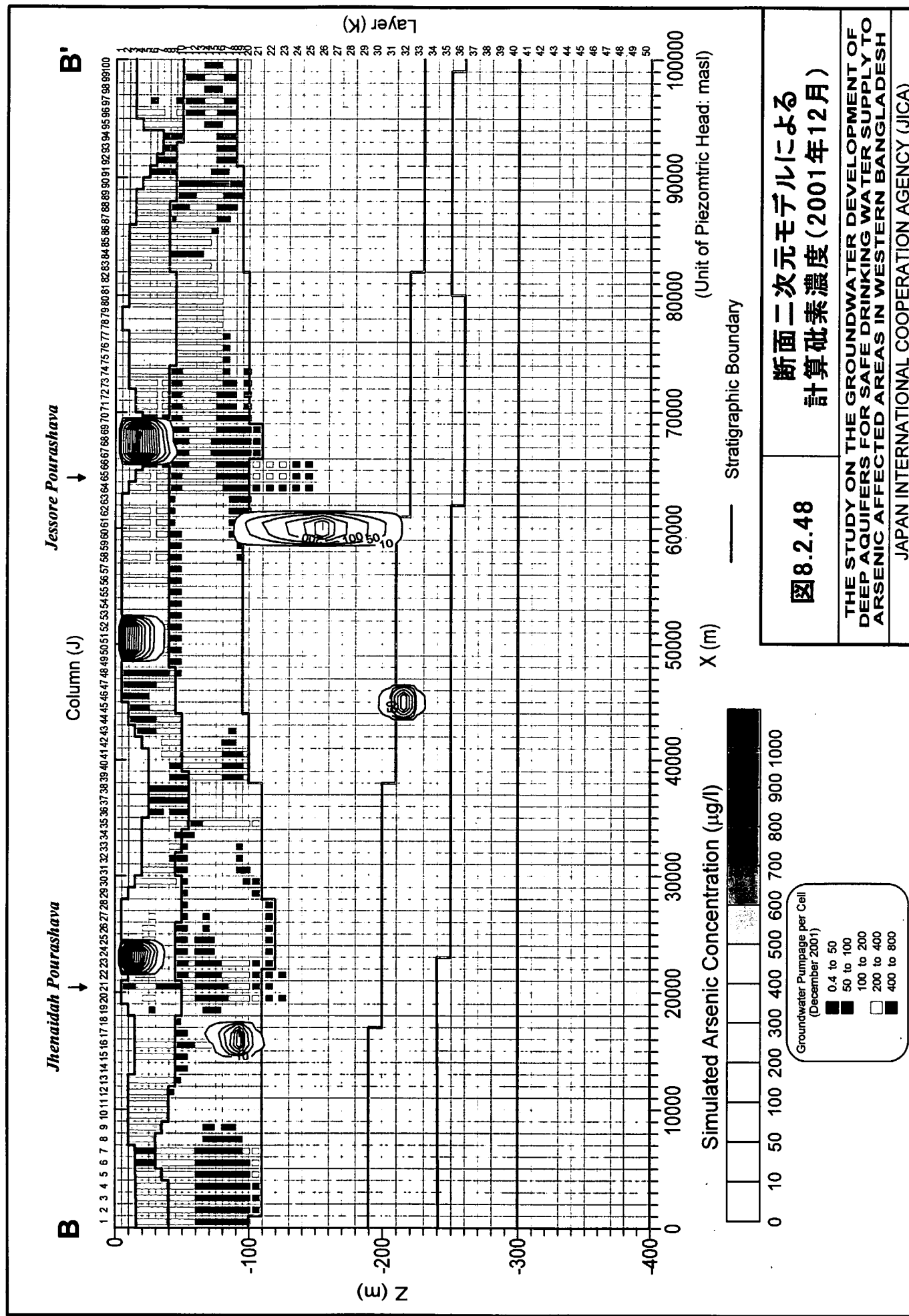
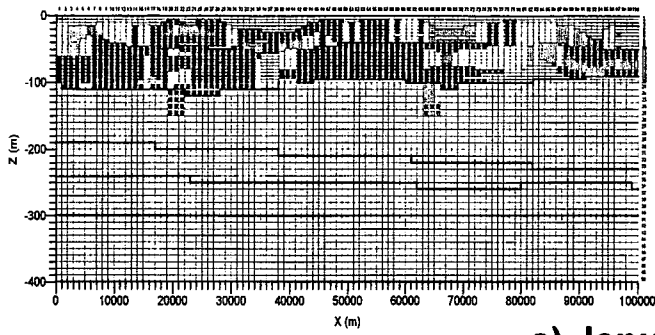


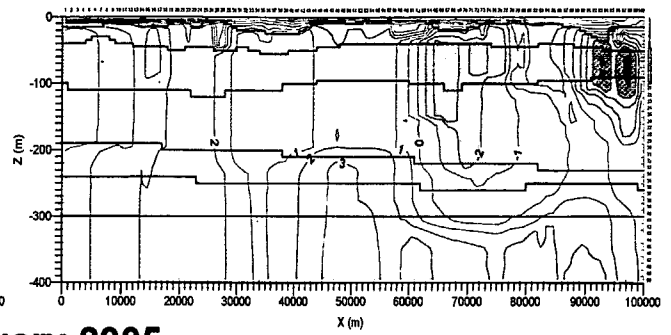
図8.2.48 **断面二次元モデルによる
計算砒素濃度(2001年12月)**

THE STUDY ON THE GROUNDWATER DEVELOPMENT OF DEEP AQUIFERS FOR SAFE DRINKING WATER SUPPLY TO ARSENIC AFFECTED AREAS IN WESTERN BANGLADESH
JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA)

Groundwater Pumpage

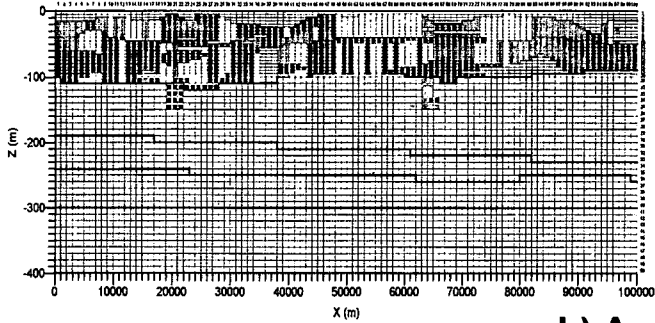


Simulated Piezometric Heads

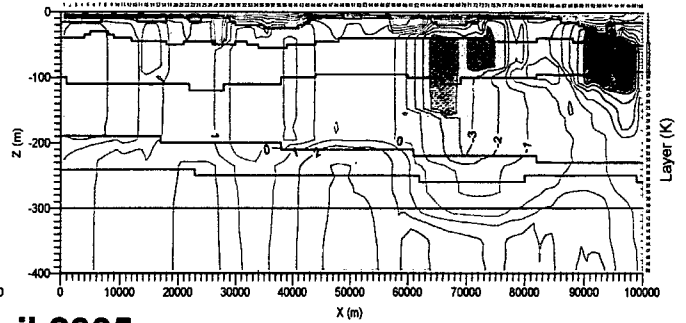


a) January 2005

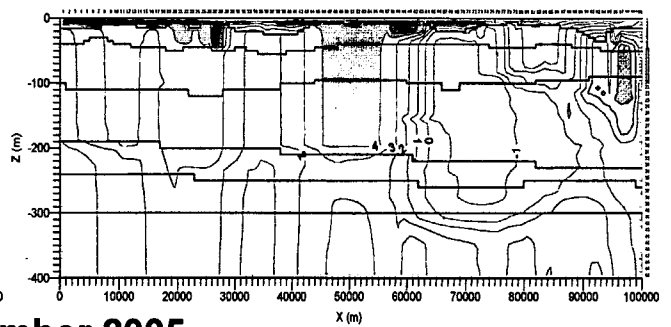
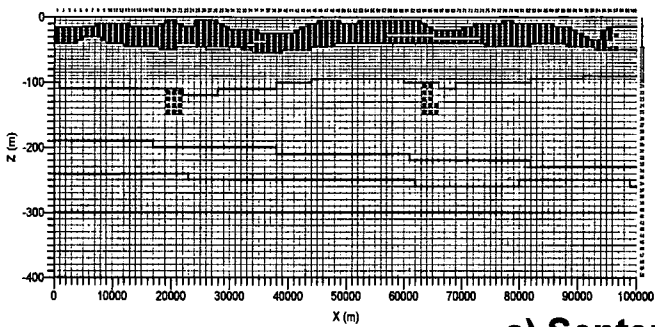
Column (J)



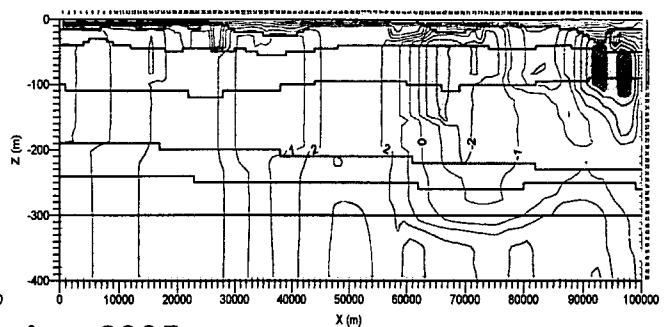
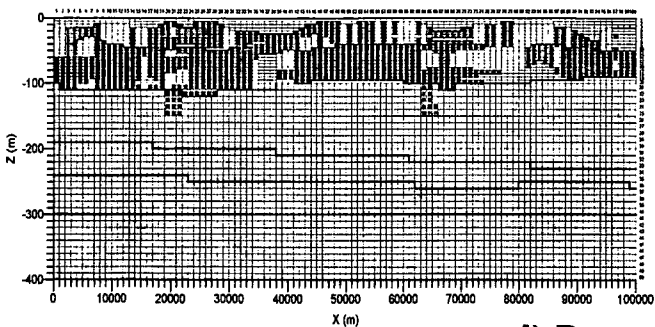
Column (J)



b) April 2005



c) September 2005



d) December 2005

Groundwater Pumpage per Cell
(Unit: m³/day)

- 0.1 to 50
- 50 to 100
- 100 to 200
- 200 to 300
- 300 to 500
- 500 to 1000
- 1000 to 2000

Simulated Piezometric Head (masl)



図8.2.49

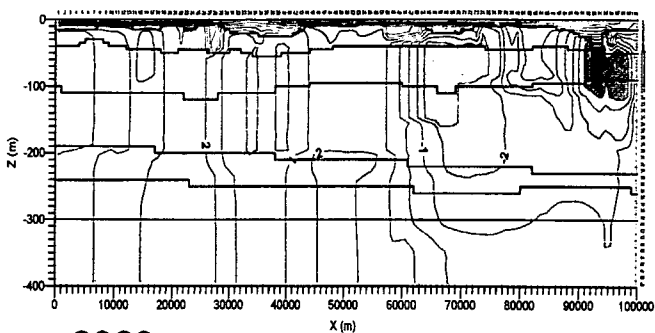
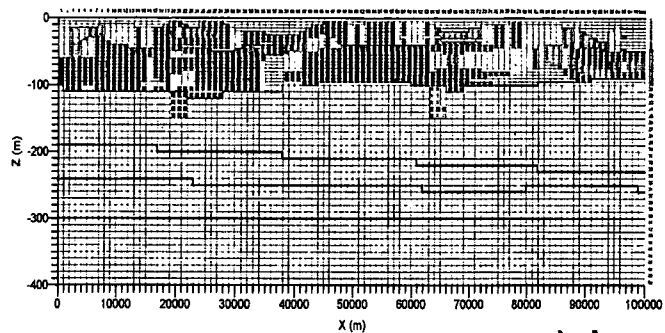
2005年の地下水揚水量と計算被圧水頭の断面分布(ケースー1、シナリオー1)

THE STUDY ON THE GROUNDWATER DEVELOPMENT OF DEEP AQUIFERS FOR SAFE DRINKING WATER SUPPLY TO ARSENIC AFFECTED AREAS IN WESTERN BANGLADESH

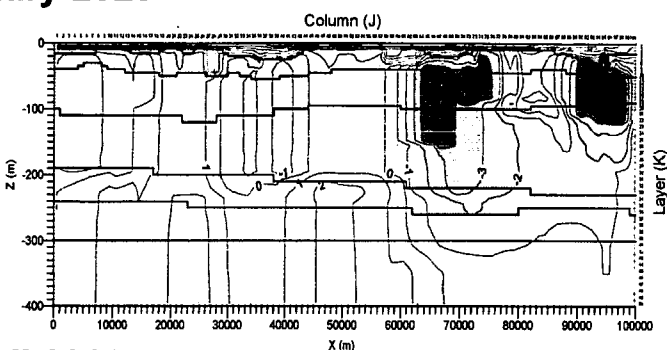
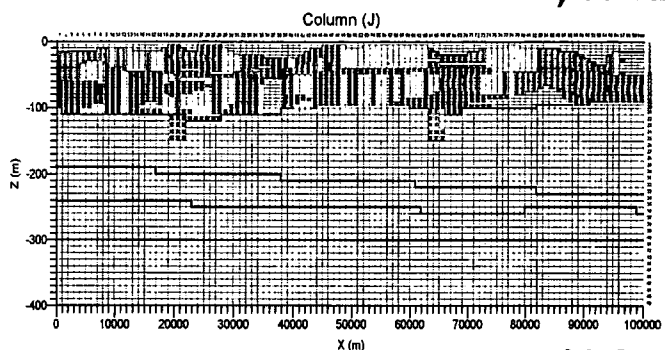
JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA)

Groundwater Pumpage

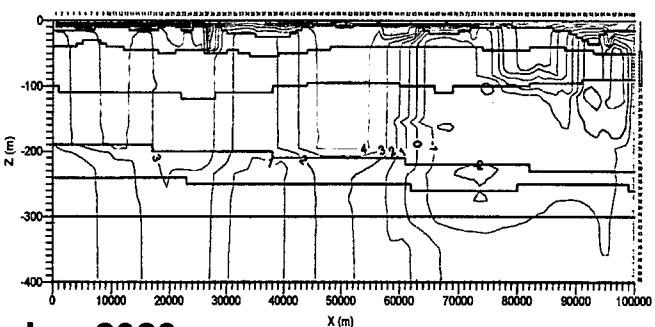
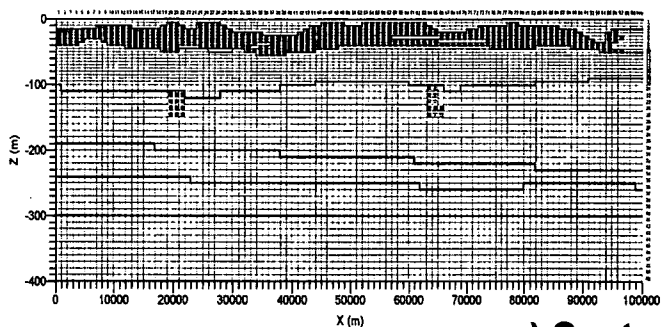
Simulated Piezometric Heads



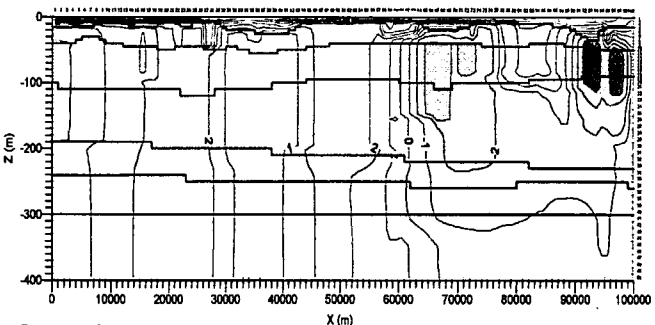
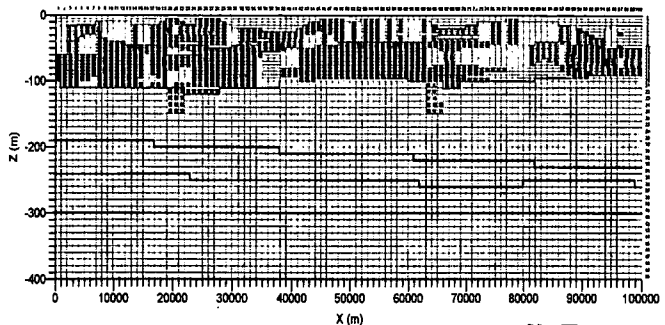
a) January 2020



b) April 2020



c) September 2020



d) December 2020

Groundwater Pumpage per Cell
(Unit: m³/day)

- 0.1 to 50
- 50 to 100
- 100 to 200
- 200 to 300
- 300 to 500
- 500 to 1000
- 1000 to 2000

Simulated Piezometric Head (masl)

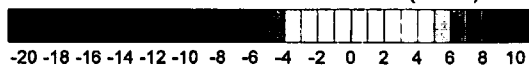


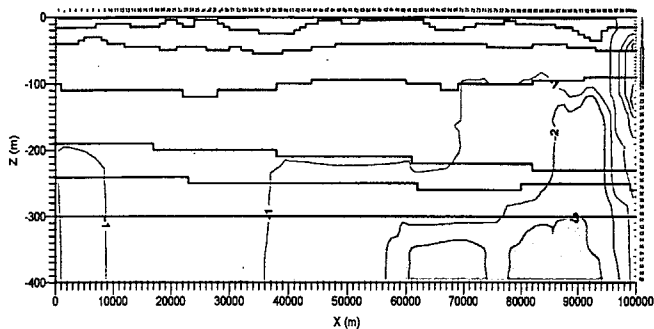
図8.2.50

2020年の地下水揚水量と計算被圧水頭の断面分布(ケースー1、シナリオー1)

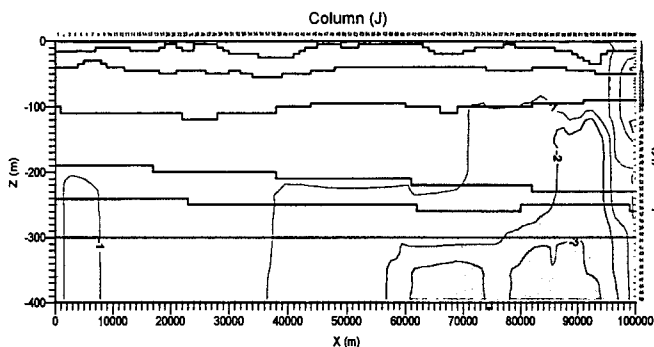
THE STUDY ON THE GROUNDWATER DEVELOPMENT OF DEEP AQUIFERS FOR SAFE DRINKING WATER SUPPLY TO ARSENIC AFFECTED AREAS IN WESTERN BANGLADESH

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA)

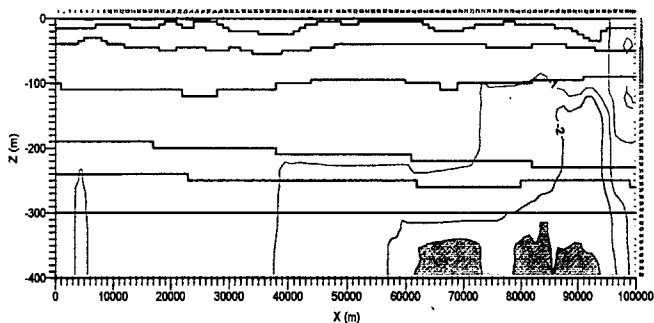
Difference of Simulated Piezometric Heads (2020-2002)



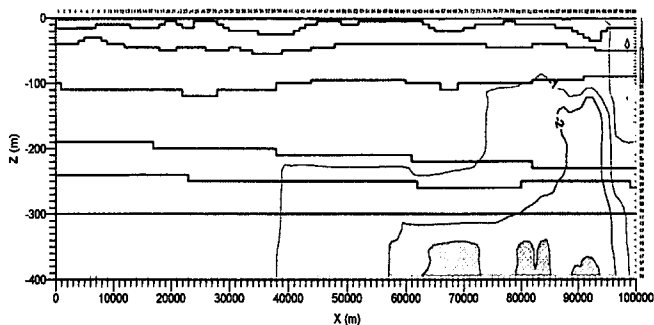
a) January



b) April



c) September



d) December

Difference of Simulated Piezometric Head (m)

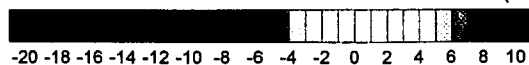


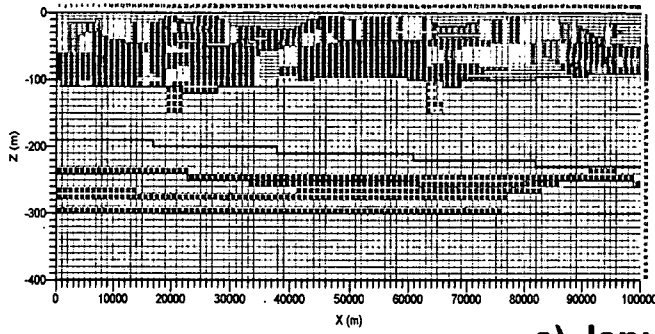
図8.2.51

**ケース1、シナリオ1における
2002年と2020年の計算被圧水頭差**

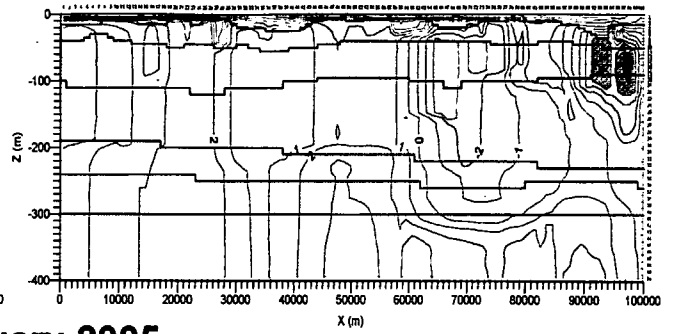
**THE STUDY ON THE GROUNDWATER DEVELOPMENT OF
DEEP AQUIFERS FOR SAFE DRINKING WATER SUPPLY TO
ARSENIC AFFECTED AREAS IN WESTERN BANGLADESH**

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA)

Groundwater Pumpage

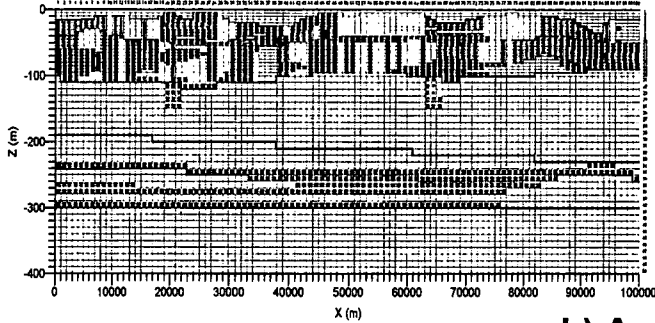


Simulated Piezometric Heads

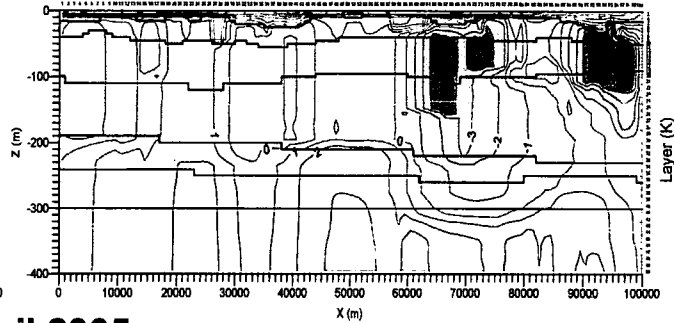


a) January 2005

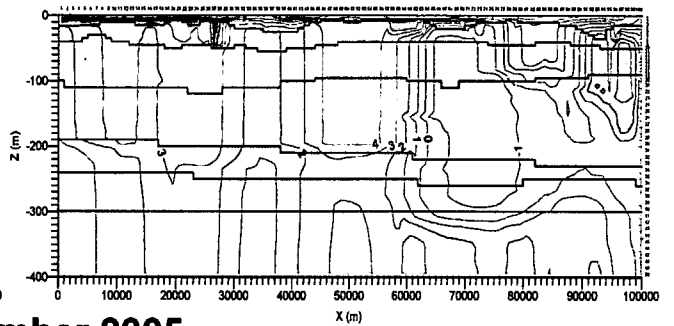
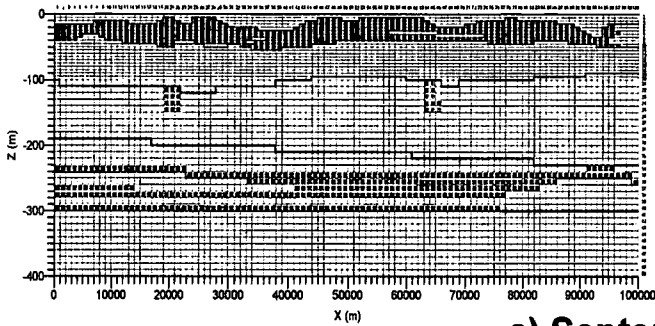
Column (J)



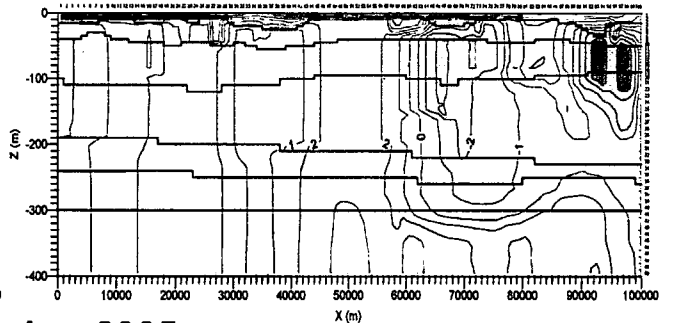
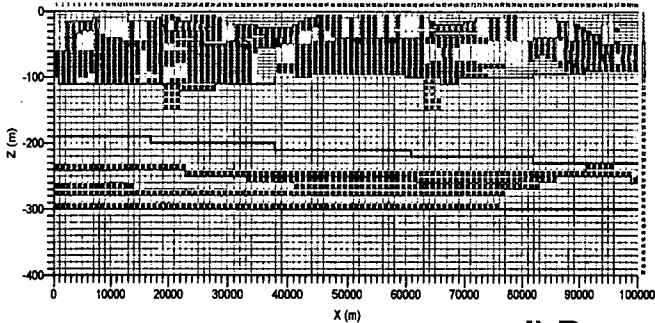
Column (J)



b) April 2005



c) September 2005



d) December 2005

Groundwater Pumpage per Cell
(Unit: m³/day)

- 0.1 to 50
- 50 to 100
- 100 to 200
- 200 to 300
- 300 to 500
- 500 to 1000
- 1000 to 2000

Simulated Piezometric Head (masl)



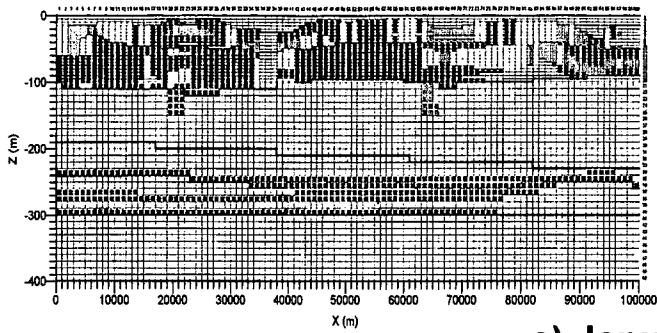
図8.2.52

2005年の地下水揚水量と計算被圧水頭の断面分布(ケース-2、シナリオ-1)

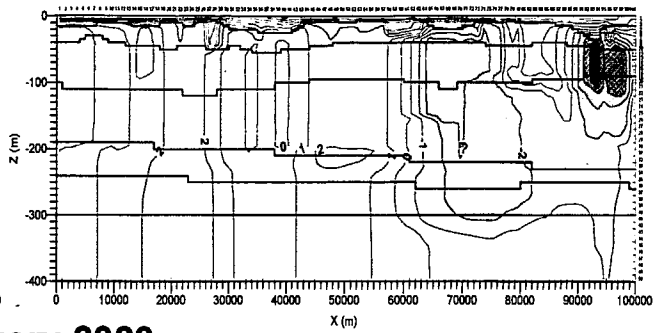
THE STUDY ON THE GROUNDWATER DEVELOPMENT OF DEEP AQUIFERS FOR SAFE DRINKING WATER SUPPLY TO ARSENIC AFFECTED AREAS IN WESTERN BANGLADESH

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA)

Groundwater Pumpage

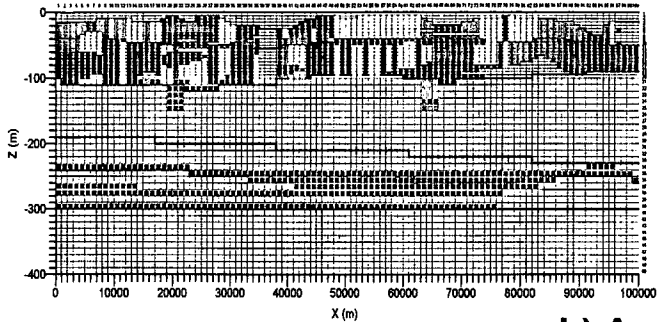


Simulated Piezometric Heads

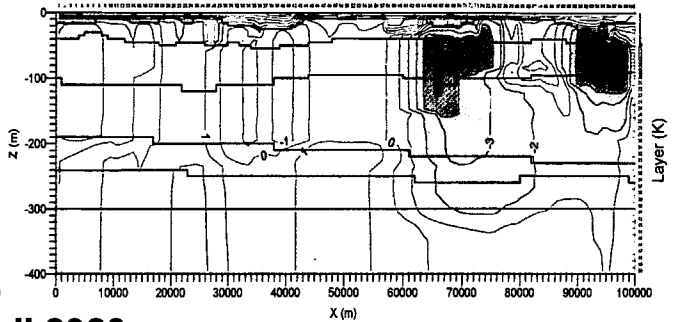


a) January 2020

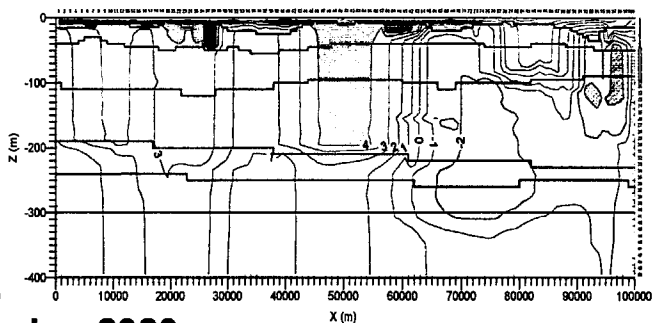
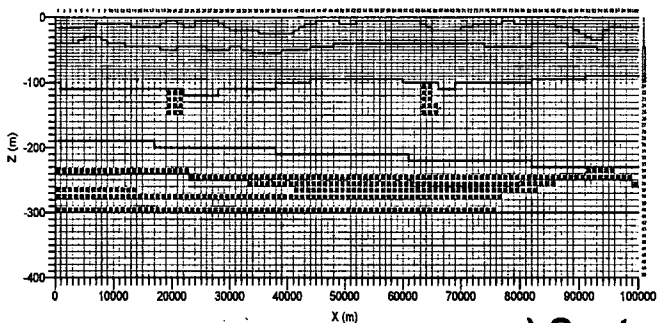
Column (J)



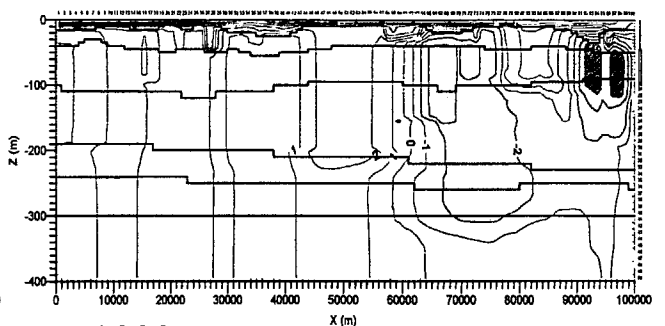
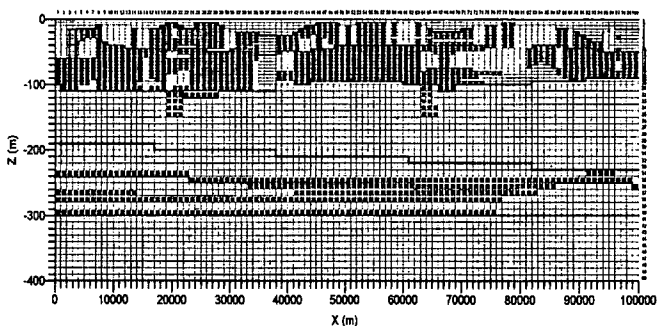
Column (J)



b) April 2020



c) September 2020



d) December 2020

Groundwater Pumpage per Cell
(Unit: m³/day)

- 0.1 to 50
- 50 to 100
- 100 to 200
- 200 to 300
- 300 to 500
- 500 to 1000
- 1000 to 2000

Simulated Piezometric Head (masl)



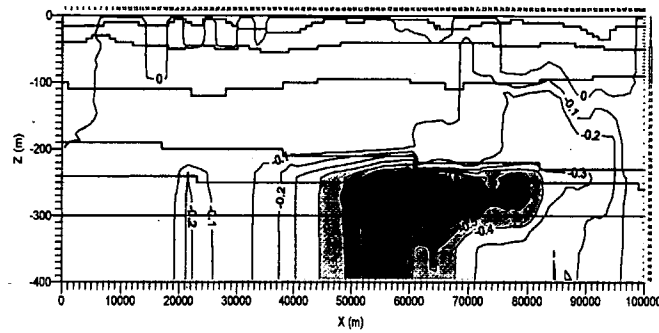
図8.2.53

2020年の地下水揚水量と計算被圧水頭の断面分布(ケース-2、シナリオ-1)

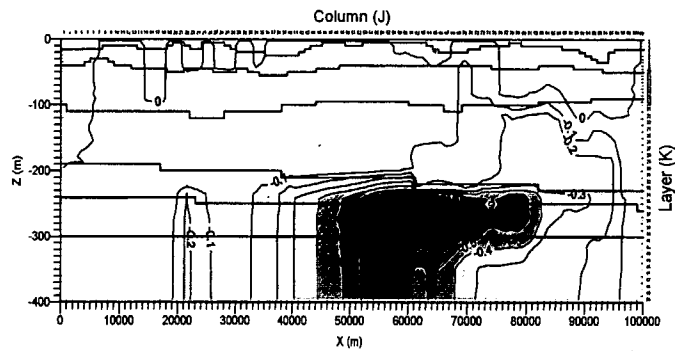
THE STUDY ON THE GROUNDWATER DEVELOPMENT OF DEEP AQUIFERS FOR SAFE DRINKING WATER SUPPLY TO ARSENIC AFFECTED AREAS IN WESTERN BANGLADESH

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA)

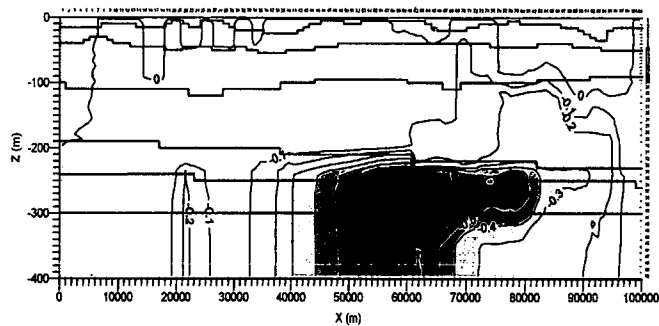
Difference of Simulated Piezometric Heads [(C2;S1) - (C1, S1)]



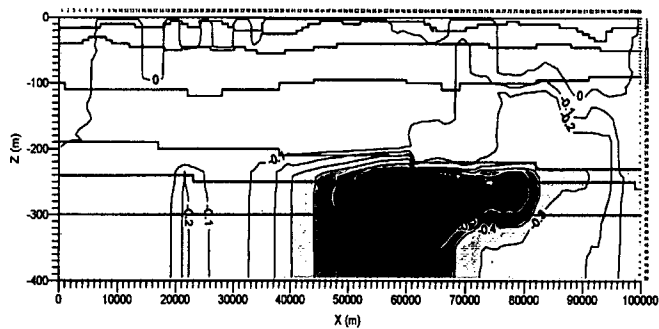
a) January



b) April



c) September



d) December

Difference of Simulated Piezometric Head (m)

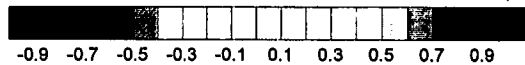


図8.2.54

**シナリオ-1におけるケース-1と
ケース-2の計算水頭差(2020年)**

**THE STUDY ON THE GROUNDWATER DEVELOPMENT OF
DEEP AQUIFERS FOR SAFE DRINKING WATER SUPPLY TO
ARSENIC AFFECTED AREAS IN WESTERN BANGLADESH**

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA)