

## 6.2. A地区における高濃度汚染対策の効果検証と対策後の濃度低下予測

### 6.2.1. 目的

高濃度汚染対策の効果検証及び高濃度汚染対策終了後の濃度低下推移を予測するため、A地区高濃度汚染対策シミュレーションを実施した。

2007年6月に公表した「シミュレーション等報告書」では、A井戸南東90mで発見されたコンクリート様の塊から溶出したジフェニルアルシン酸（DPAA）を含む汚染地下水がA井戸周辺の汚染源になりうるかを検証するために、当時得られていた知見に基づいてモデルを構築して「A井戸詳細地下水汚染シミュレーション」を実施した。そのため、解析モデルはA井戸及び掘削調査地点周辺に限定していた。

このため、高濃度汚染対策で実施している揚水井戸からの揚水状況や汚染将来予測を精度良く行うために、より大きな解析モデルを再構築して実施することとした。

### 6.2.2. 解析の流れ

本シミュレーションは図6.2.1のフローに示す手順で行った。

高濃度汚染対策開始時点の汚染分布は、「シミュレーション等報告書」のA井戸詳細汚染シミュレーションにおける2009年4月29日時点の3次元汚染分布を抽出し、A地区高濃度汚染シミュレーションの初期値とした。2009年4月30日以降については、新たに構築したモデルを用いて、2年間の高濃度汚染対策の効果検証、その後1年追加した対策の効果検証、対策終了後の予測及び対策を実施しなかった場合の予測の各シミュレーションを行った。

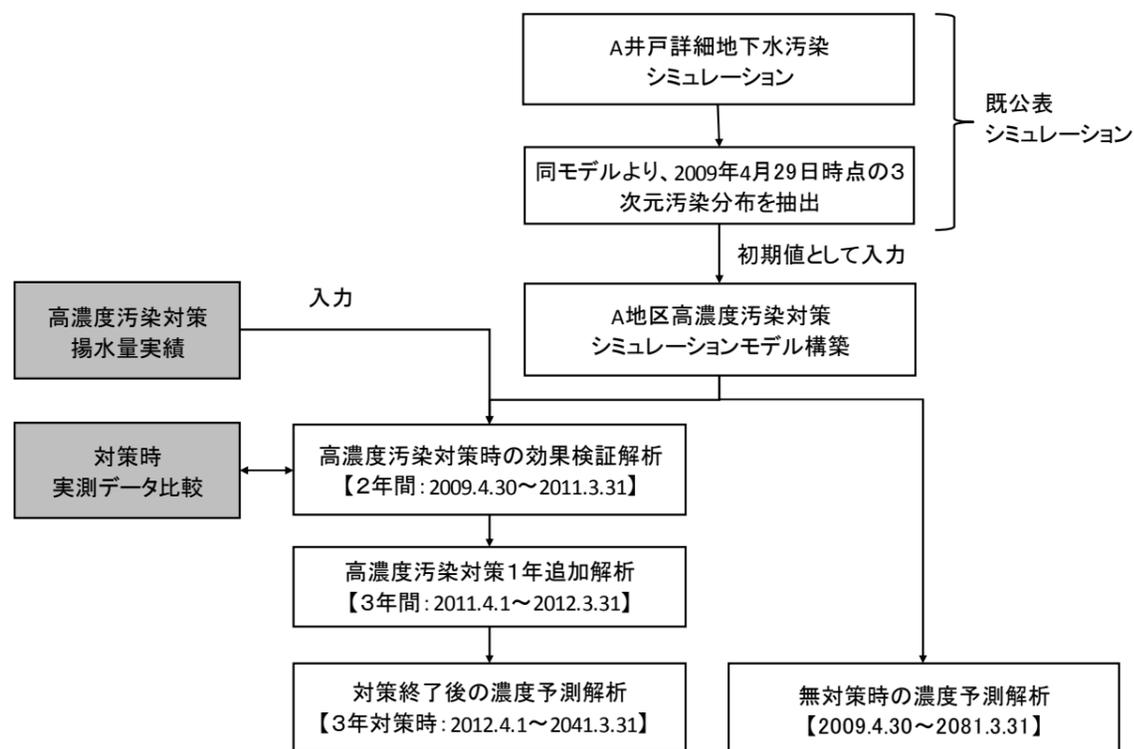


図 6.2.1 A井戸詳細地下水汚染シミュレーション以後の解析の流れ

### 6.2.3. A地区高濃度汚染対策シミュレーションモデルの構築

#### (1) A地区高濃度汚染対策シミュレーションモデルの範囲

図6.2.2は、A地区高濃度汚染対策シミュレーションモデル解析範囲図である。A地区高濃度汚染対策シミュレーションでは、モデル範囲が揚水に与える影響を避けるため、A井戸を基準に南北方向にそれぞれ150m（計300m）、東西方向に200m（計400m）とした。なおメッシュについて、掘削調査地点については、概ね2m間隔、対策を実施したA井戸周辺部については概ね2.5m間隔とした。

また、表6.2.1はA地区高濃度汚染対策シミュレーションにおける三次元モデルメッシュ構成である。

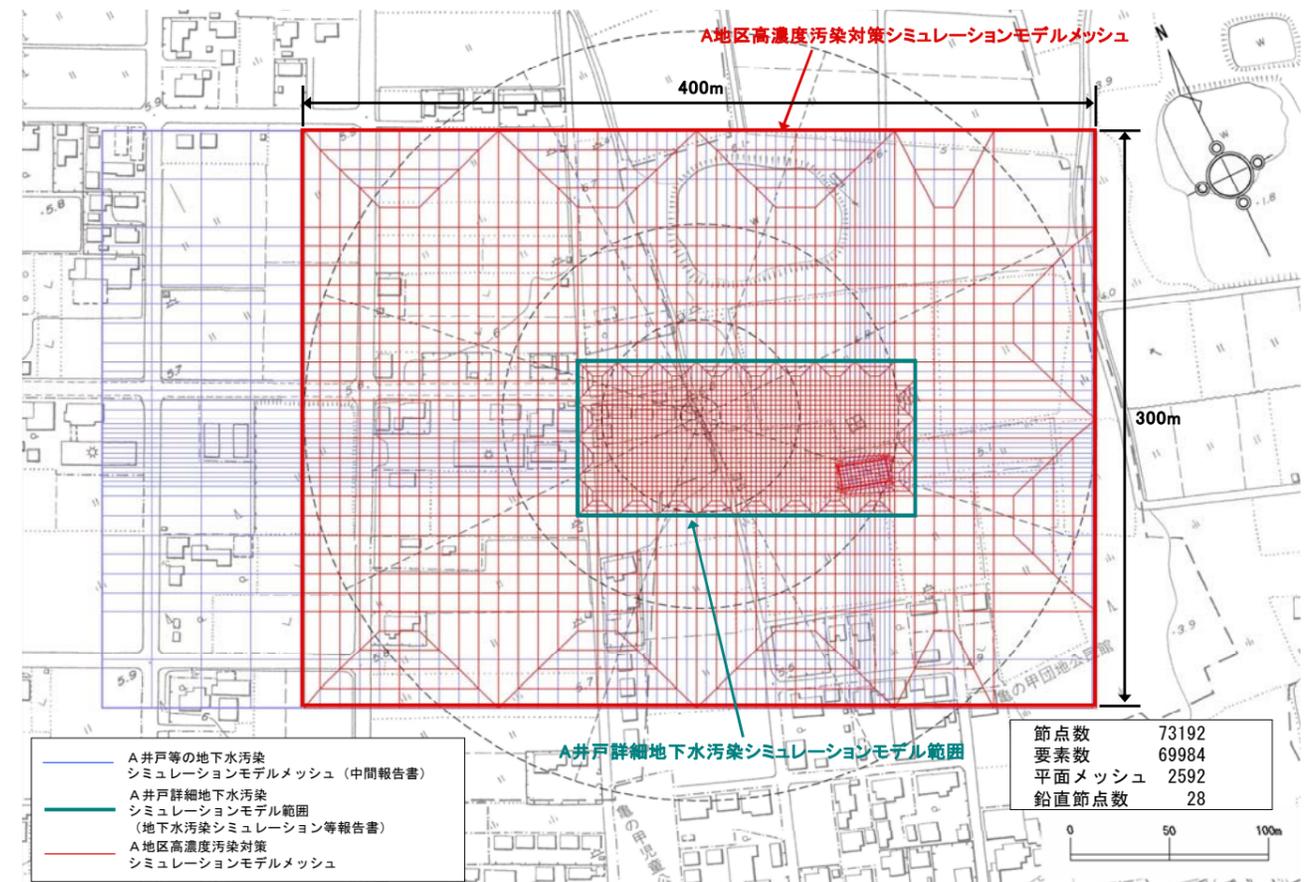


図 6.2.2 A地区高濃度汚染対策シミュレーションモデル解析範囲図

表 6.2.1 A地区高濃度汚染対策シミュレーションにおける三次元モデルメッシュ構成

	数
節点数	73,192
要素数	69,984
平面メッシュ	2,592
鉛直節点数	28

## (2) 三次元地質モデルの構築

図 6.2.3 は A 地区周辺の地質断面位置図、図 6.2.4～図 6.2.7 はこれまで得られたボーリングデータを基に作成した A 地区周辺の地質断面図である。

A 井戸付近の地質は、概ね深度 30m までに沖積～洪積の砂・砂礫の互層 (As、Ag、Ds、Dg1、Dg2) が、その下位に連続性のよい洪積粘土層 (Dc) が分布する構成となる。この内、洪積粘土層直上にある第二洪積砂礫層 (Dg2) は、非常に高透水であることが確認され、透水係数は  $1 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$  程度である。この上位にも、砂・砂礫が互層状になっており、A 井戸直近では深度 5m 付近にも、砂礫層が分布している。ボーリングデータから A 地区の粘土層上面の標高は、掘削調査地点からやや西方が高く、A 井戸を越えて西側では (No. 27 付近) 急激に低くなっている (図 6.2.4、図 6.2.7)。主な汚染帯水層と考えられる第二洪積砂礫層 (Dg2) の層厚は、概ね 5m 程度で、不透水層である洪積粘土層 (Dc) が深くなる No. 27 付近では 10m 程度と厚くなっている。

図 6.2.8、図 6.2.9 は、これらの現地地質状況をもとに作成した三次元地質モデル図である。コンクリート様の塊が発見された掘削調査地点においては、深度 11m まで土留め矢板が打設されているため、土留め矢板もモデル化した。シミュレーションにおいて、土留め矢板は高濃度汚染対策が終了する 2012 年 4 月以降は撤去されたものとした。なお、「シミュレーション等報告書」においては、当該地に分布する洪積砂層を Ds1 と Ds2 に区分していたが、水理定数が同じであり、当該モデルでは Ds1 と Ds2 の中間に分布する第一洪積砂礫層が欠如する区間があるため、Ds と一括した。

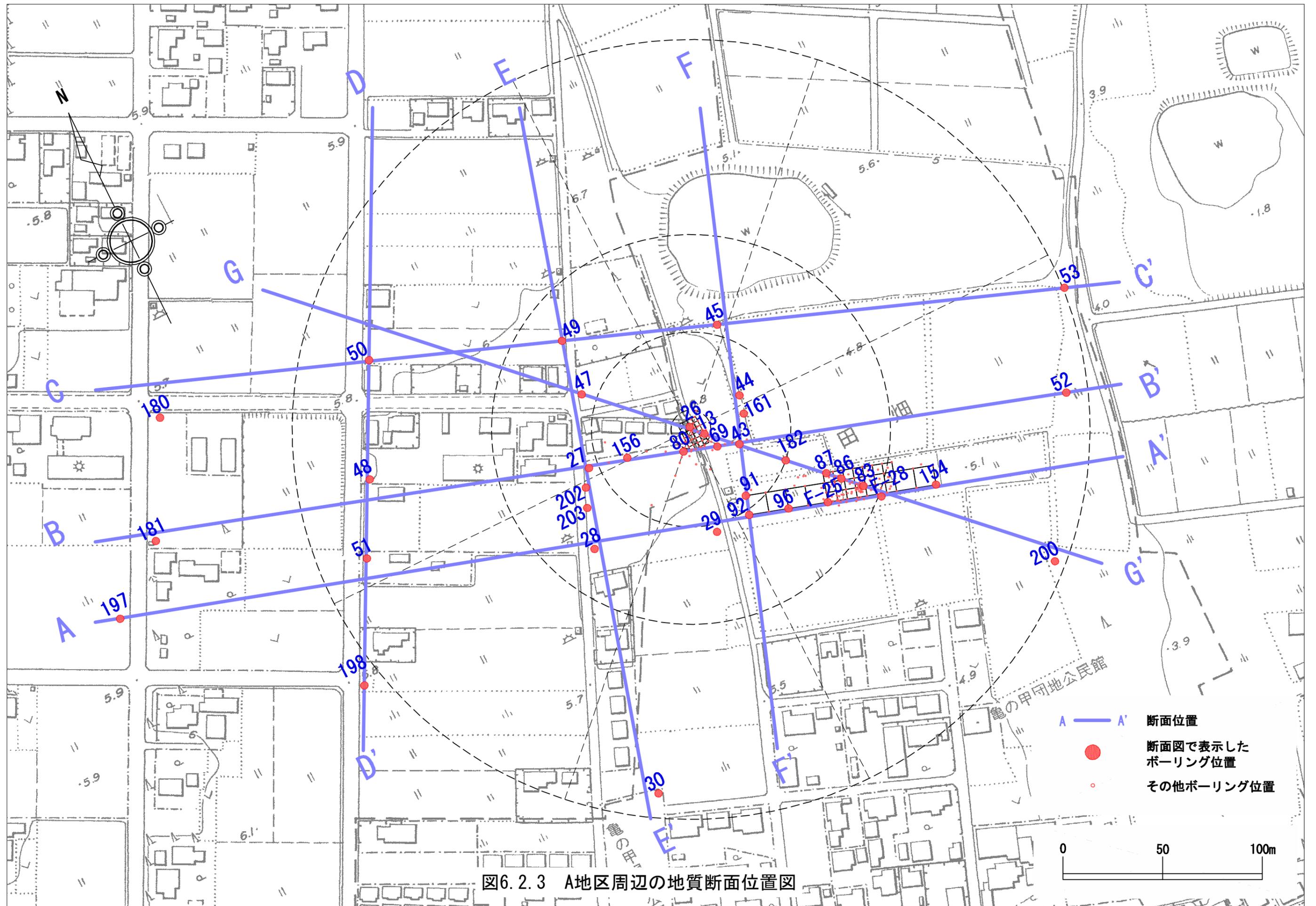


図6.2.3 A地区周辺の地質断面位置図

記号・色	地質
B	埋土層
As	沖積砂層
Ag	沖積砂礫層
Ds	洪積砂層
Dg1	第一洪積砂礫層
Dg2	第二洪積砂礫層
Dc	洪積粘土層

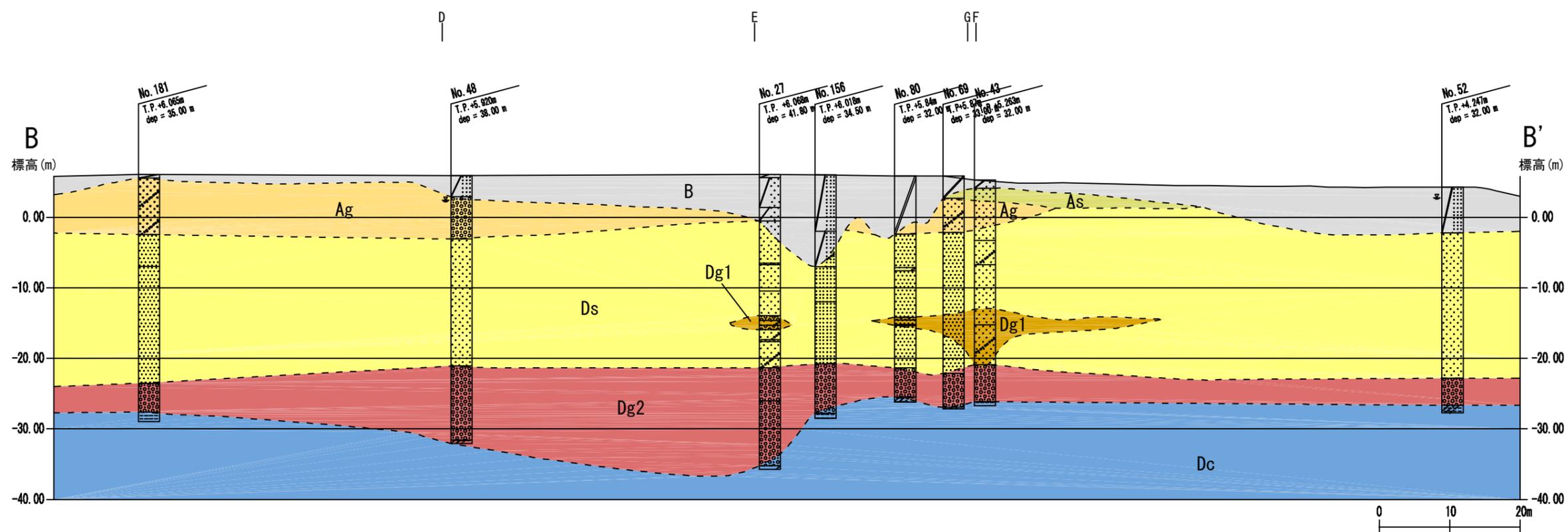
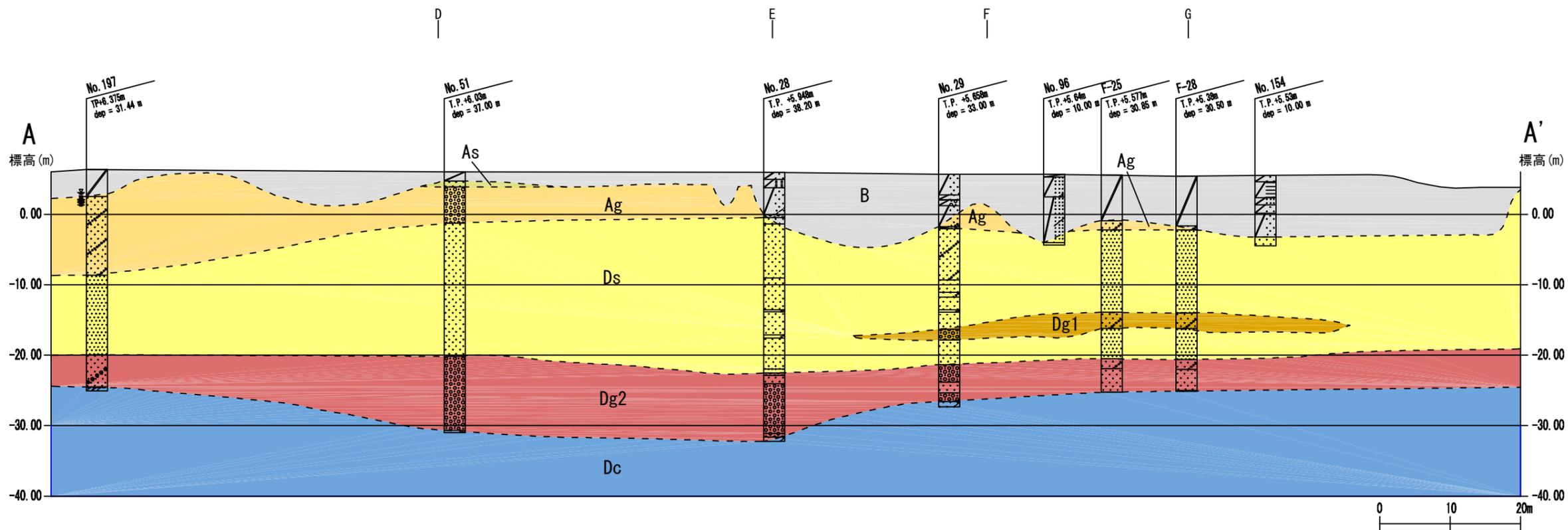


図6.2.4 A地区周辺の地質断面図 (A-A'、B-B'断面)

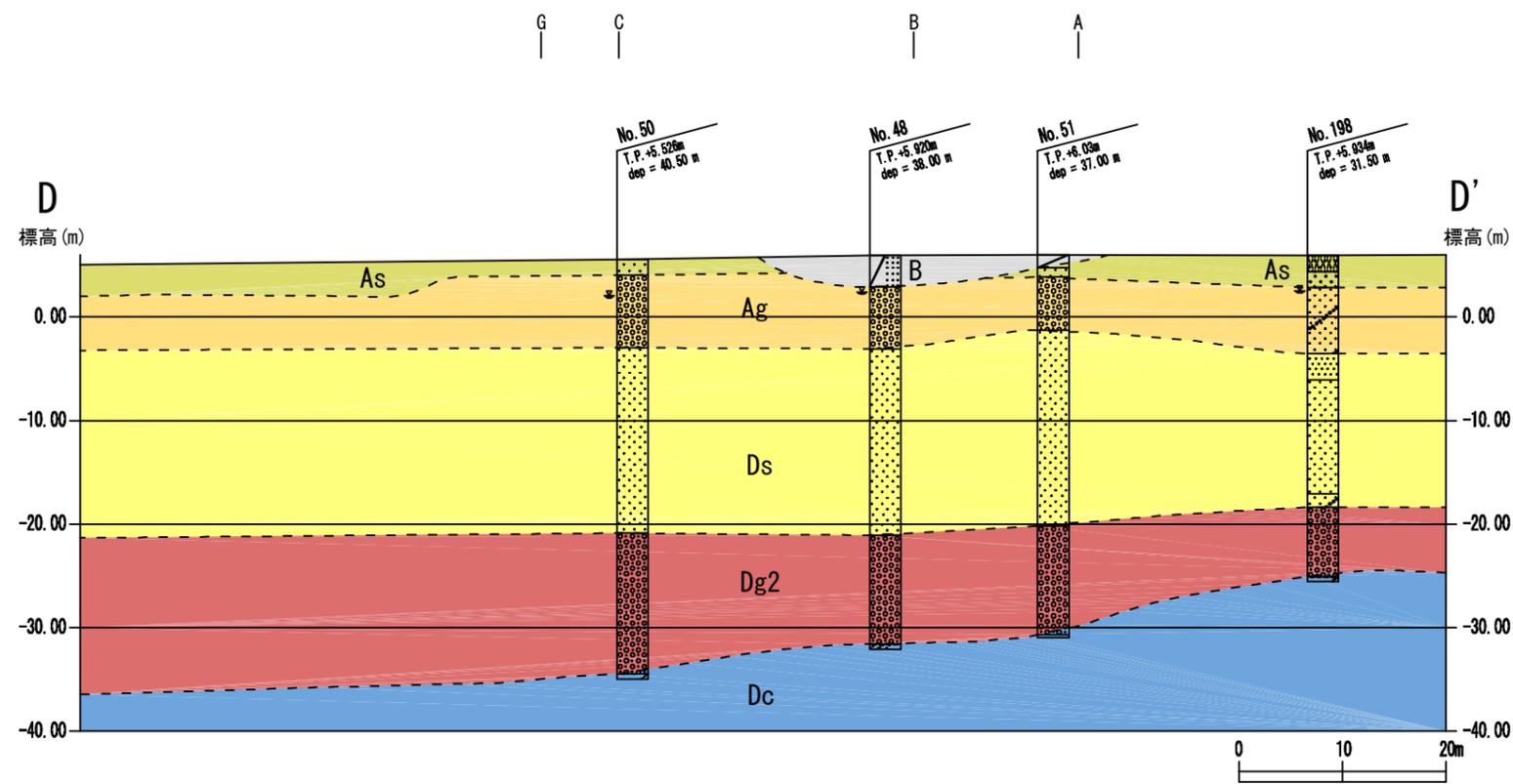
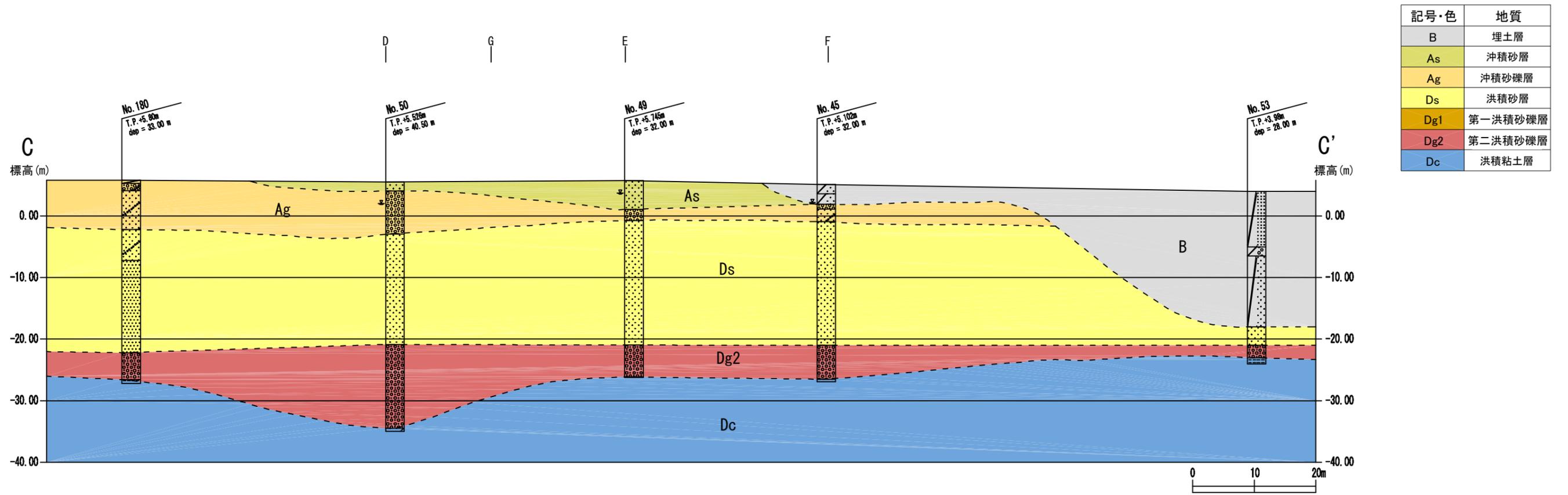


図6.2.5 A地区周辺の地質断面図 (C-C'、D-D' 断面)

記号・色	地質
B	埋土層
As	沖積砂層
Ag	沖積砂礫層
Ds	洪積砂層
Dg1	第一洪積砂礫層
Dg2	第二洪積砂礫層
Dc	洪積粘土層

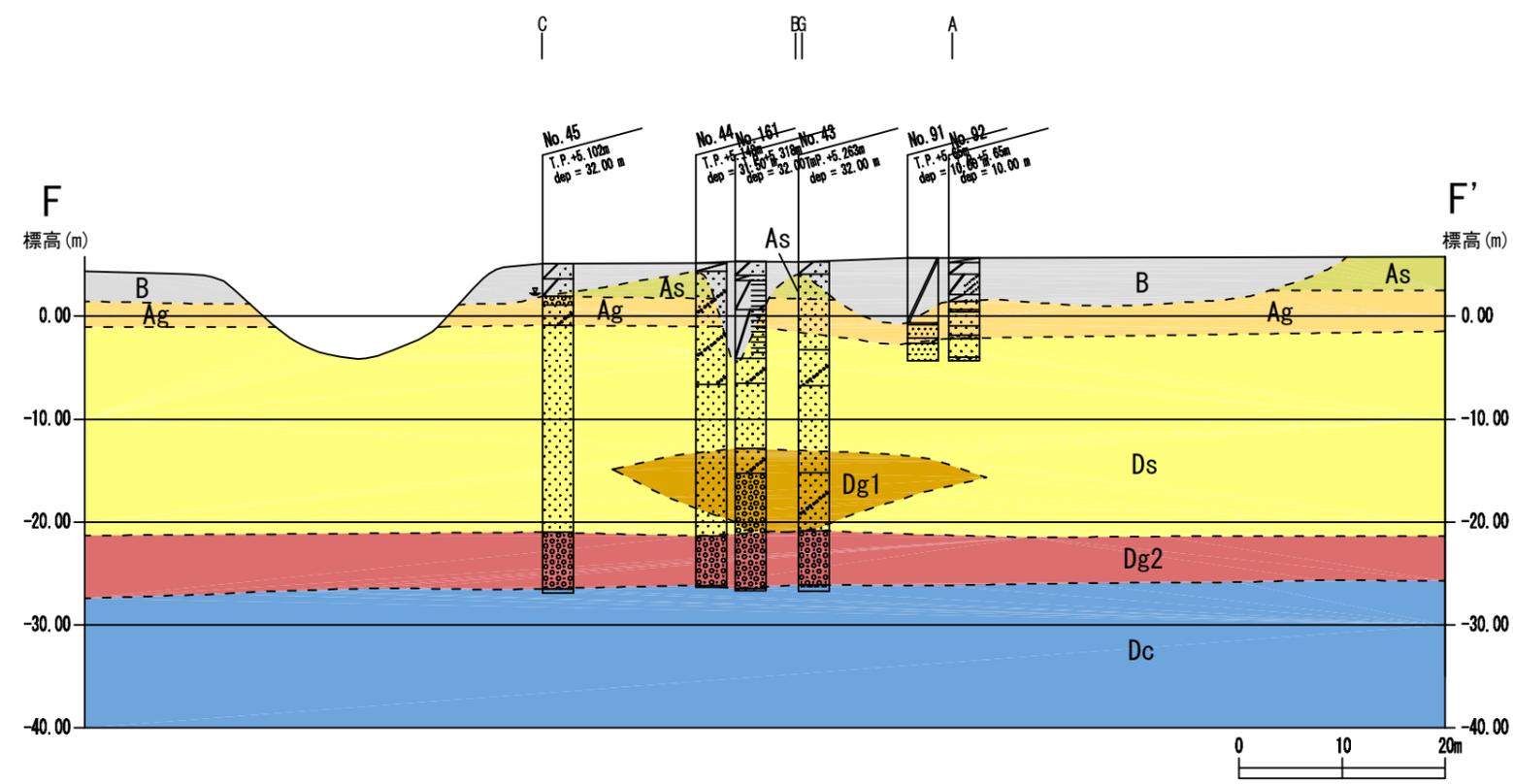
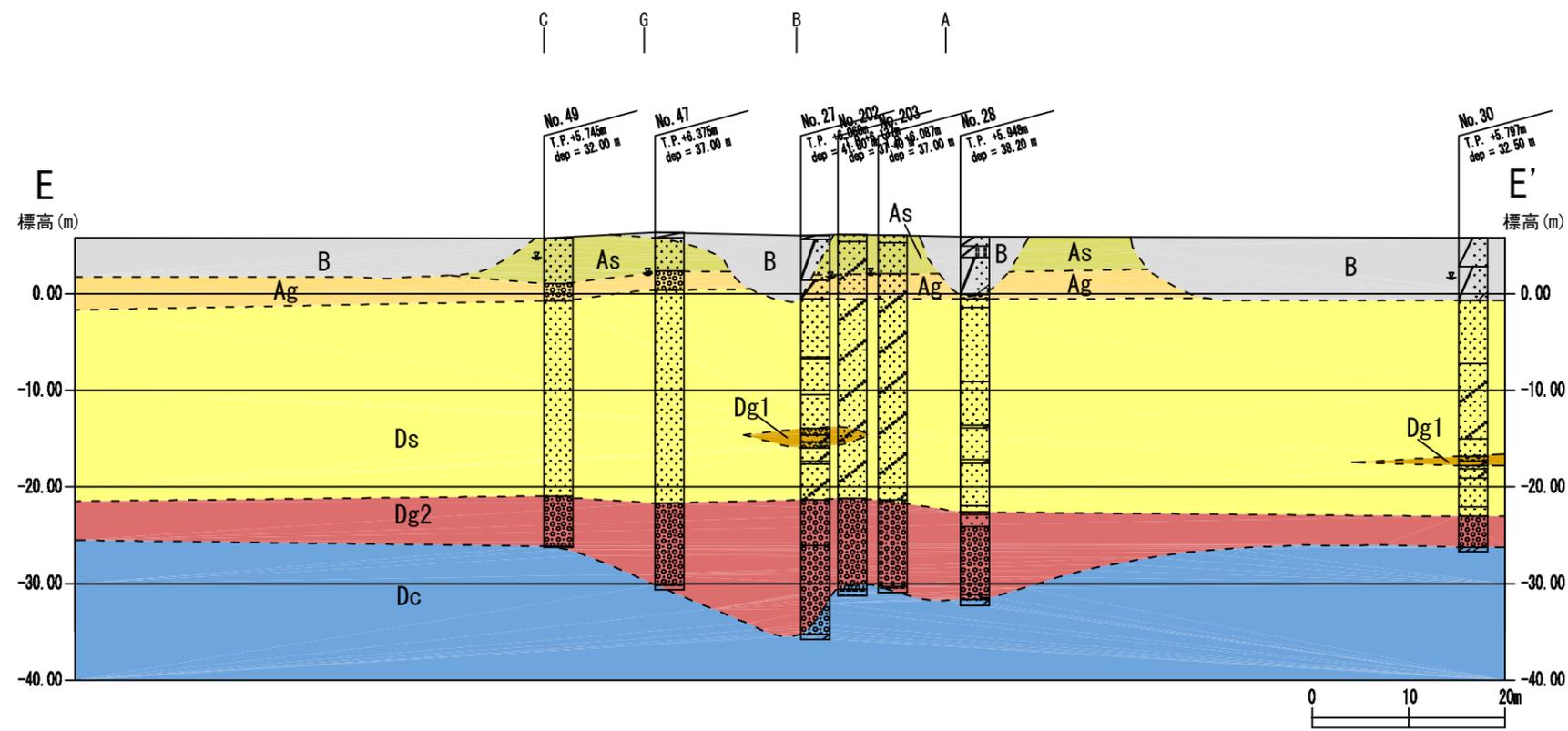


図6.2.6 A地区周辺の地質断面図 (E-E'、F-F' 断面)

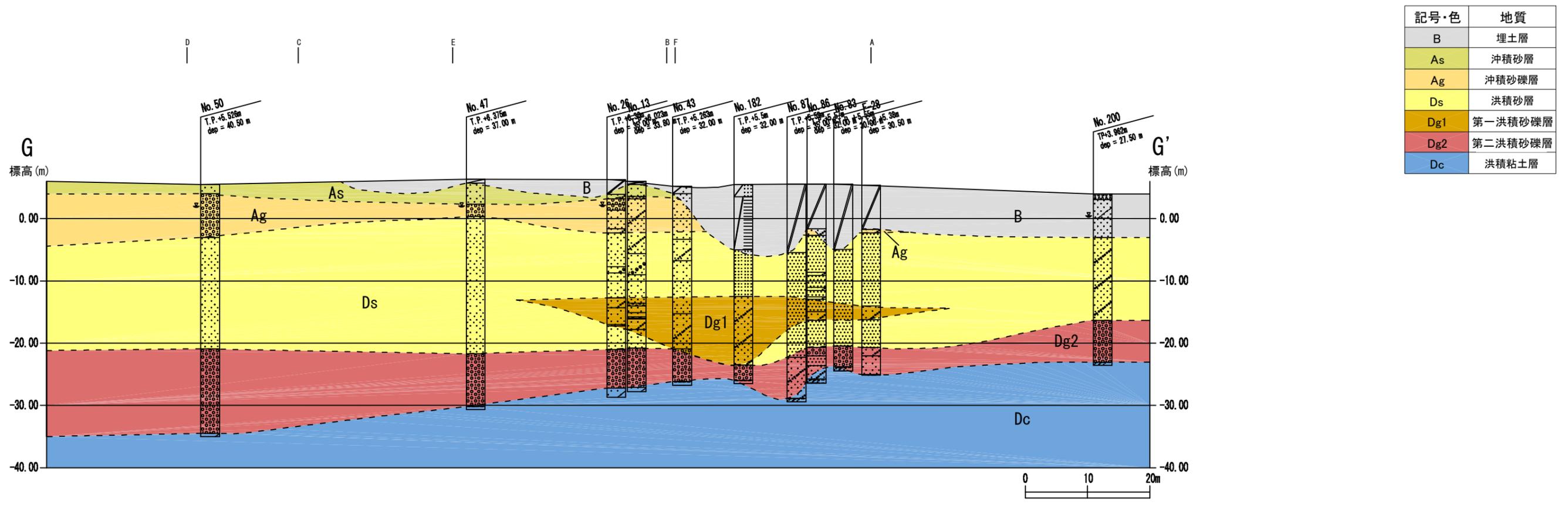
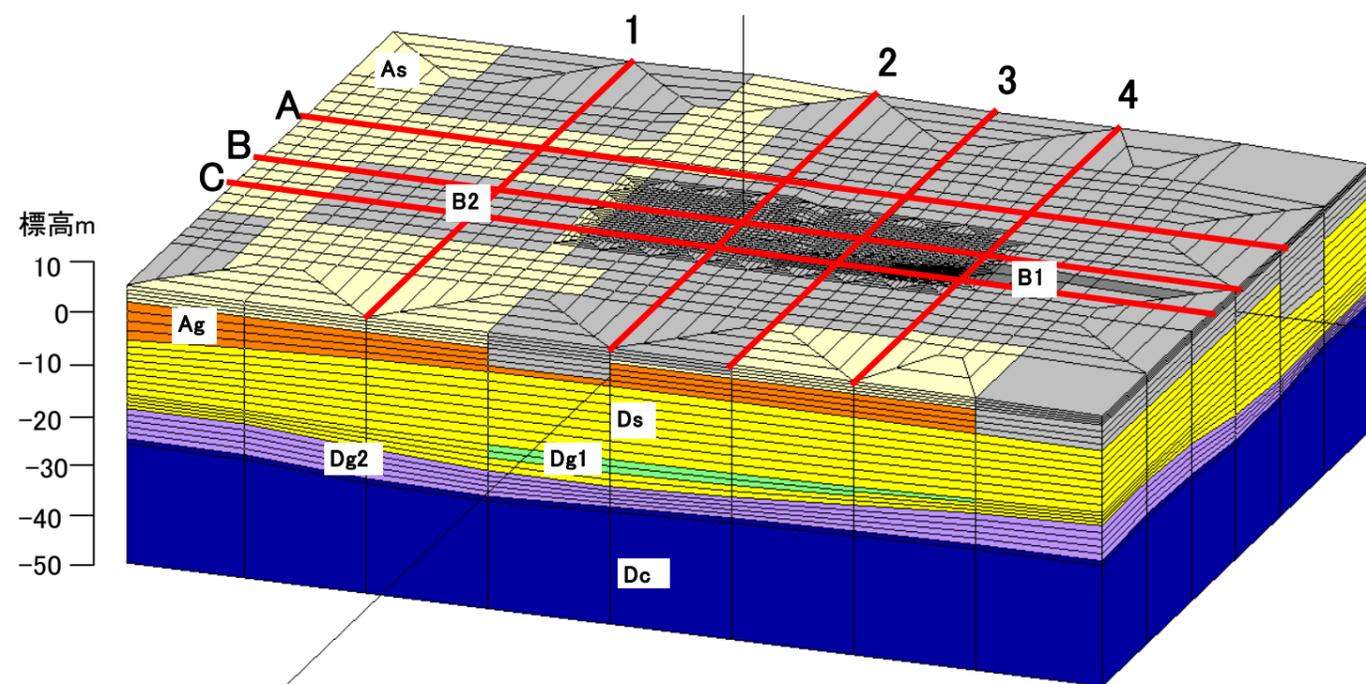


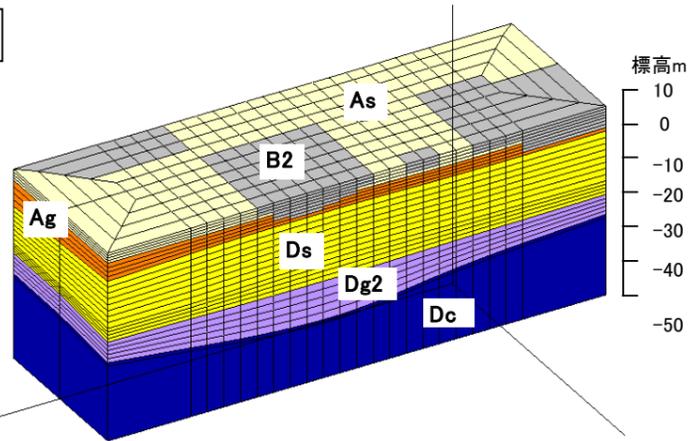
図6.2.7 A地区周辺の地質断面図 (G-G' 断面)

図6.2.8 A地区高濃度汚染対策シミュレーション三次元地質モデル図(1)

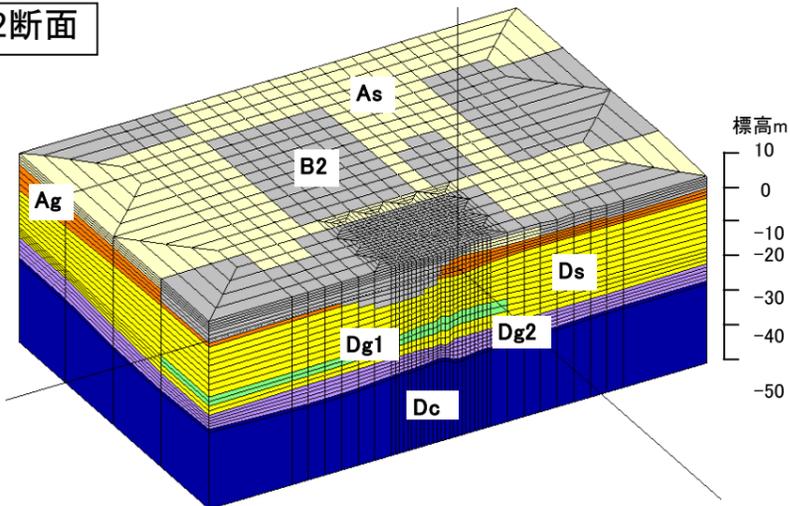


記号	色	地質
B1	■	第一埋土層
B2	■	第二埋土層
As	■	沖積砂層
Ag	■	沖積砂礫層
Ds	■	洪積砂層
Dg1	■	第一洪積砂礫層
Dg2	■	第二洪積砂礫層
Dc	■	洪積粘土層

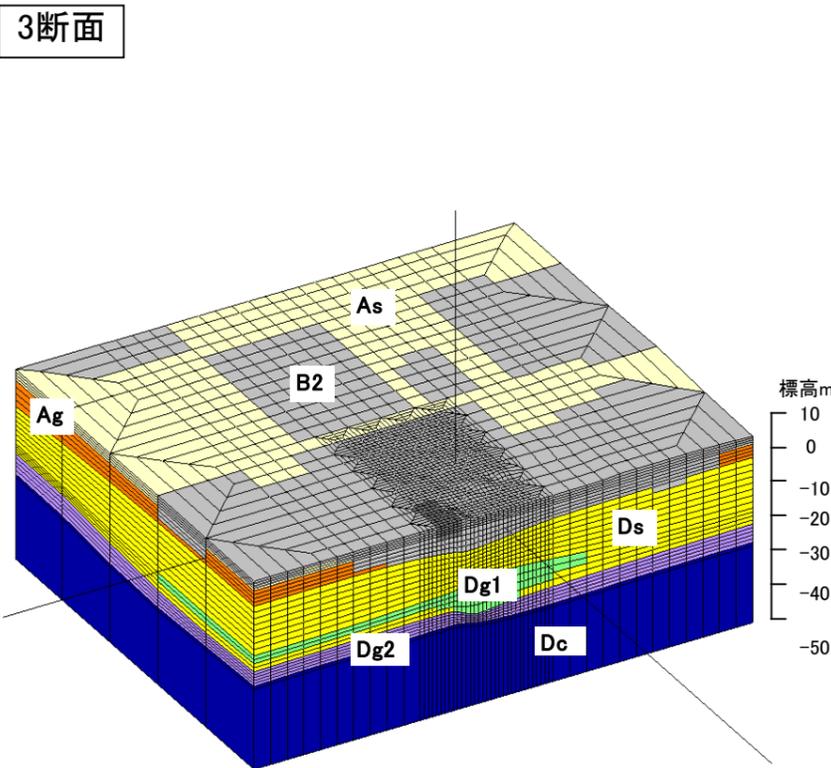
1断面



2断面



3断面



4断面

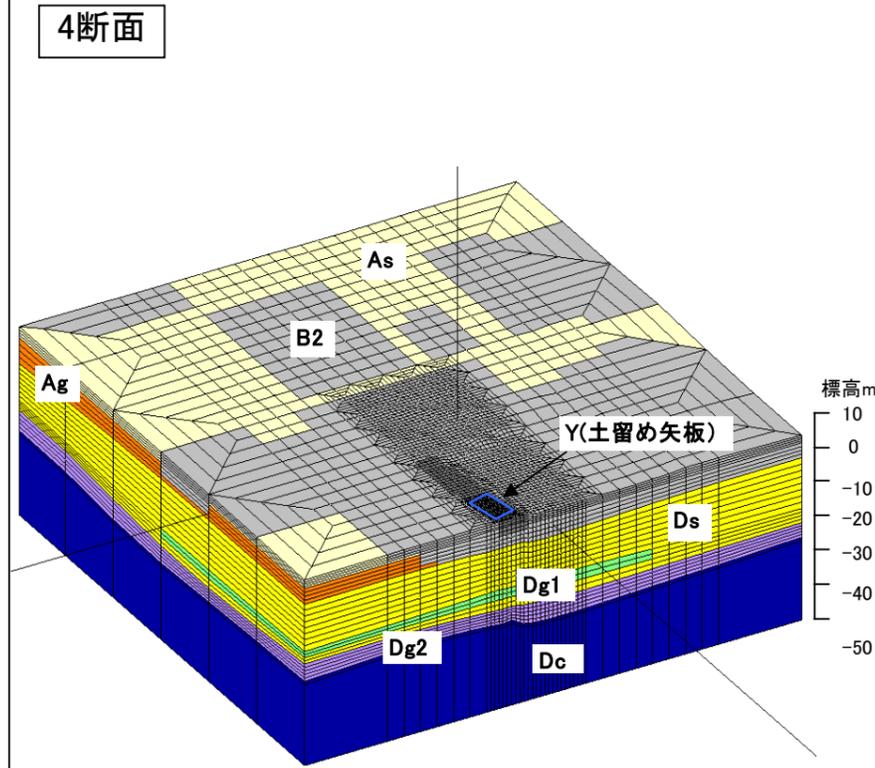
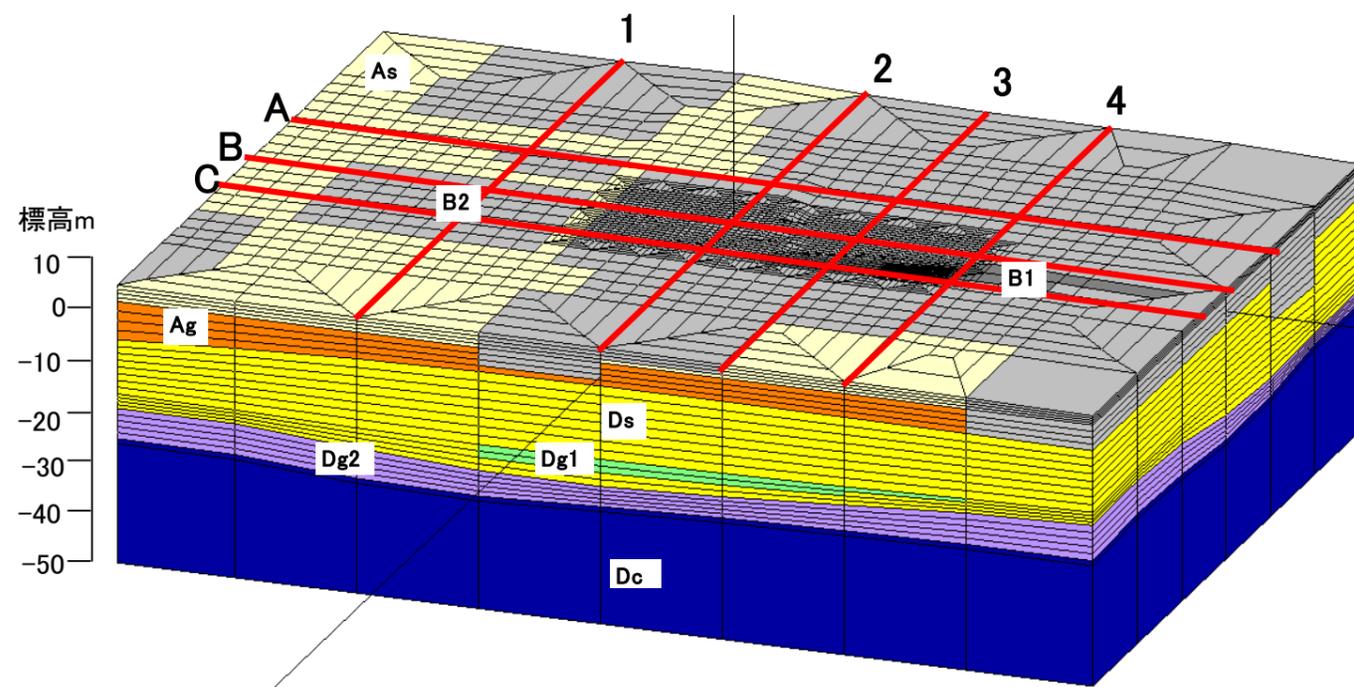
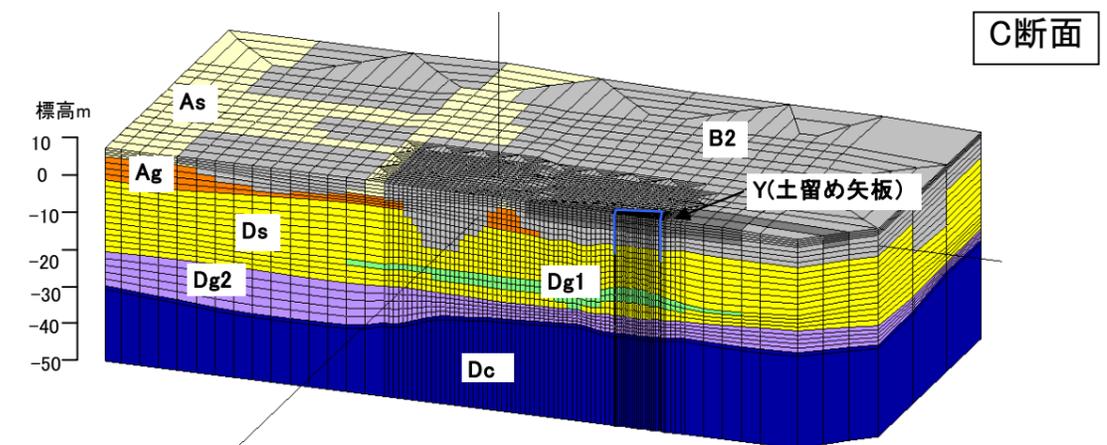
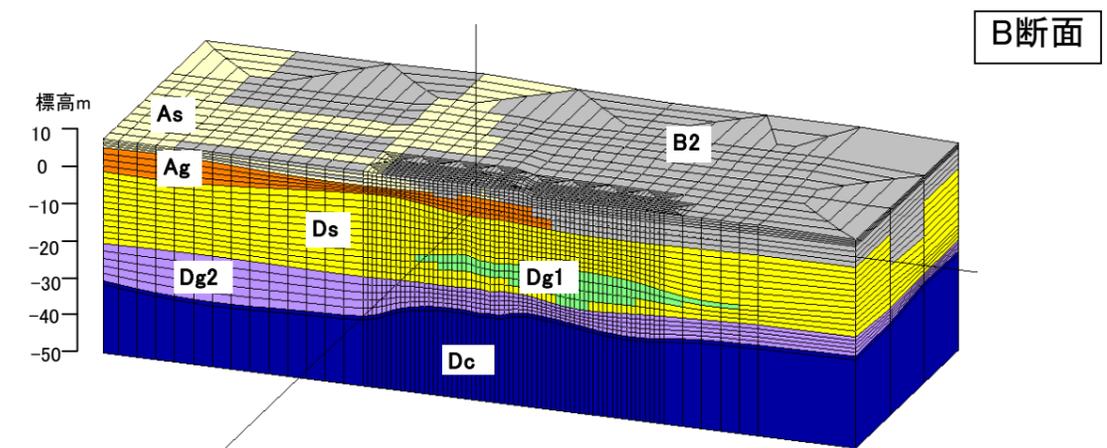
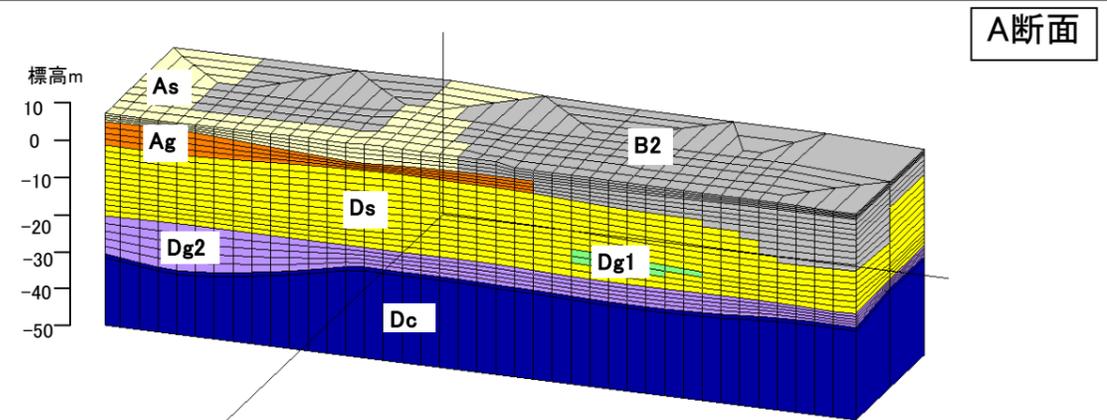


図6.2.9 A地区高濃度汚染対策シミュレーション三次元地質モデル図(2)



記号	色	地質
B1	■	第一埋土層
B2	■	第二埋土層
As	■	沖積砂層
Ag	■	沖積砂礫層
Ds	■	洪積砂層
Dg1	■	第一洪積砂礫層
Dg2	■	第二洪積砂礫層
Dc	■	洪積粘土層



(3) 水理及び移流分散定数

1) 透水係数・比貯留係数、有効間隙率

表 6.2.2 は水理定数一覧、表 6.2.3 は移流分散定数一覧である。これらの値は、「シミュレーション等報告書」における A 井戸詳細汚染シミュレーションと同値である。

埋土層については、過去、「いけす」として利用されていた範囲の深度 4m 付近までは粘性土を主体としているため、2層に区分した。この粘土層を主体とする B1 層の透水係数は  $5 \times 10^{-4}$  cm/sec とした。

土留め矢板の透水係数は、総理府・厚生省「一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める命令の一部改正について」(平成 10 年総理府・厚生省令第二号) より、遮水の効力を有する地層と同程度 (層厚 50cm) の  $1 \times 10^{-5}$  cm/s とした。

有効間隙率は、沖積砂礫層 (Ag) より下位の地層については 20% とした。埋土層 (B1、B2) については、粘性土層ではあるものの、人口地層であり十分に締まってないと判断したため、有効間隙率は 40% とした。

表 6.2.2 水理定数一覧

記号	地層名	透水係数 (cm/sec)			比貯留係数 (1/cm)	有効間隙率 (%)
		X	Y	Z		
Y	土留め矢板	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	20
B1	第一埋土層	$5 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-5}$	40
B2	第二埋土層	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-5}$	40
As	沖積砂層	$5 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-5}$	30
Ag	沖積砂礫層	$7 \times 10^{-3}$	$7 \times 10^{-3}$	$7 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-6}$	20
Ds	洪積砂層	$3 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-5}$	20
Dg1	第一洪積砂礫層	$5 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-6}$	20
Dg2	第二洪積砂礫層	$1 \times 10^{-1}$	$1 \times 10^{-1}$	$1 \times 10^{-1}$	$5 \times 10^{-7}$	20
Dc	洪積粘土層	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-5}$	20

以下、水理定数を入力するに当たって参考とした資料を示す。

● 透水係数

透水係数一般値 (出典:『地盤調査法』地盤工学会、2004)

透水性	透水係数 k(cm/s)					
	$10^{-9}$	$10^{-8}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	
実質上不透水						
非常に低い						
低い						
中位						
高い						
10 <sup>1</sup>						
10 <sup>2</sup>						
10 <sup>3</sup>						
10 <sup>4</sup>						
10 <sup>5</sup>						
10 <sup>6</sup>						
10 <sup>7</sup>						
10 <sup>8</sup>						
10 <sup>9</sup>						
10 <sup>10</sup>						
10 <sup>11</sup>						
10 <sup>12</sup>						
対応する土の種類	粘性土{C}	微細砂、シルト、砂-シルト-粘土混合土 {SF} [S-F] {M}			砂および礫 (GW) (GP) (SW) (SP) (G-M)	清浄な礫 (GW) (GP)
透水係数を直接測定する方法	特殊な変水位透水試験	変水位透水試験			定水位透水試験	特殊な変水位透水試験
透水係数を間接的に推定する方法	圧密試験結果から計算	なし			清浄な砂と礫は粒度と間隙比から計算	

● 比貯留係数

比貯留係数一般値 (出典:『実務者のための地下水環境モデリング』岡山地下水研究会、2003)

物質	比貯留係数 (1/m)
塑性粘土	$2.0 \times 10^{-2} \sim 2.6 \times 10^{-3}$
硬質粘土	$1.3 \times 10^{-3} \sim 2.6 \times 10^{-3}$
中程度の硬質粘土	$1.3 \times 10^{-3} \sim 9.2 \times 10^{-4}$
密詰め砂礫	$1.0 \times 10^{-4} \sim 4.9 \times 10^{-5}$
接合亀裂性岩	$6.9 \times 10^{-5} \sim 3.3 \times 10^{-6}$
緩詰め砂	$1.0 \times 10^{-2} \sim 4.9 \times 10^{-3}$
密詰め砂	$1.3 \times 10^{-4} \sim 2.0 \times 10^{-4}$

● 有効間隙率

有効間隙率参考値 (未固結地盤) (出典:『水理公式集』土木学会、1974)

地層	間隙率	有効間隙率	地盤	間隙率	有効間隙率
沖積礫層	35	15	洪積砂礫層	30	15~20
細砂	35	15	砂層	30~40	30
砂丘砂層	30~35	20	ローム層	50~70	20
泥粘土質層	45~50	15~20	泥層粘土層	50~70	5~10

## 2) 移流分散特性

表 6.2.3 は移流分散定数一覧である。

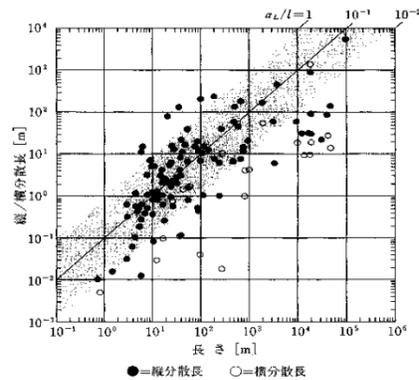
分散長は、一般にモデルスケール（モデルの大きさ、汚染物質の移動距離）に依存することがわかっており、モデルスケールが大きいほど分散長も大きくなる。

A 地区高濃度汚染対策シミュレーションにおける分散長は、「シミュレーション等報告書」の A 井戸詳細地下水汚染シミュレーションと同値とし設定した。

その他、分子拡散係数は水と同等とし、遅延や減衰はシミュレーション等報告書同様、考慮していない。

表 6.2.3 移流分散定数一覧

記号	地層名	分散長 (m)		分子拡散係数 (m <sup>2</sup> /s)	屈曲率	遅延係数	減衰係数
		縦	横				
Y	土留め矢板	1	0.01	1×10 <sup>-9</sup>	1.0	1.0	0.0
B1	第一埋土層	1	0.01	1×10 <sup>-9</sup>	1.0	1.0	0.0
B2	第二埋土層	1	0.01	1×10 <sup>-9</sup>	1.0	1.0	0.0
As	沖積砂層	1	0.01	1×10 <sup>-9</sup>	1.0	1.0	0.0
Ag	沖積砂礫層	1	0.01	1×10 <sup>-9</sup>	1.0	1.0	0.0
Ds	洪積砂層	1	0.01	1×10 <sup>-9</sup>	1.0	1.0	0.0
Dg1	第一洪積砂礫層	1	0.01	1×10 <sup>-9</sup>	1.0	1.0	0.0
Dg2	第二洪積砂礫層	1	0.01	1×10 <sup>-9</sup>	1.0	1.0	0.0
Dc	洪積粘土層	1	0.01	1×10 <sup>-9</sup>	1.0	1.0	0.0



引用元  
Gelhar et al., 1992. A critical review of data on field-scale dispersion in  
Water Resources Research, Vol.28 (7), pp.1955-1974.

図 6.2.10 分散長設定の例

分散長は、縦分散長と横分散長に分けられ、縦分散長は、流れ方向に地下水の流速に先行して濃度がぶれる度合いを表し、横分散長は流れに直交する方向への濃度のぶれの度合いを表す。

一般に分散長は、巨視的な地盤の不均質性による流速のばらつきにより、移行距離に依存することが言われており、図 6.2.10 を参考にすると、横分散長は縦分散長の 1/10~1/100 程度となる。

(出典：『実務者のための地下水環境モデリング』技報堂出版、2003)

## 6.2.4. 高濃度汚染対策 2 年（2009 年 4 月～2011 年 3 月）の効果検証解析

### (1) 解析条件

#### 1) 解析プログラム

三次元飽和不飽和移流分散解析プログラム (Dtransu-3D・EL)

#### 2) 解析領域界の境界条件

水位固定境界：2004 年 8 月～2009 年 3 月の期間中の平均的な水位として、2005 年 6 月の地下水位を参考に設定した (図 6.2.11)。

※A 井戸北側の砂利採取場の水位条件について

地下水流動の再現の中で、A 井戸北側の砂利採取場の影響を考慮するため、水位固定条件として、解析に反映させた。解析では周辺よりも 9cm 低く設定した。これを揚水量として簡易に計算すると、

流量 = 透水係数 × 動水勾配 × 面積

で与えられ、0.864m/day × 0.09m × 3,000m<sup>2</sup> = 233m<sup>3</sup> となる。

これを、毎分流量に換算すると、162L/min 程度となる。実際の砂利採取場（現在は砂利洗浄場）に設置されている機械等から判断すると妥当な値と考えられる。

### 3) 揚水量・注水量の境界条件

#### i) 掘削調査地点外

表 6.2.4 は掘削調査地点外に設けた B-1 井戸、F-15 井戸、C-1 井戸の各揚水量設定である。表中の値は各揚水井戸の実績値である。

表 6.2.4 B-1 井戸、F-15 井戸、C-1 井戸の揚水量設定 (単位：m<sup>3</sup>/日)

		B-1	F-15	C-1
2009	4/30~5/1	25	15	0
	5/7~8	50	30	0
	5/11~5/15	50	30	0
	5/18~22	50	30	0
	5/25~27	50	30	0
	5/28~7/12	150	90	0
	7/13~11/15	160	90	0
2010	11/16~2010/1/25	160	100	0
	1/26~3/14	160	105	0
	3/15~4/11	160	100	0
	4/12~5/31	160	105	0
	6/1~8/1	75	105	75
	8/2~10/10	0	105	150
	10/11~2011/3/31	0	105	110

## ii) 掘削調査地点内

表 6.2.5 は掘削調査地点内の揚水井戸の揚水量、注水量の境界条件値である。実際の高濃度汚染対策においては、東日本大震災（2011年3月11日）以後、一時的に揚水を停止したが、本シミュレーションでは引き続き揚水を行った条件とした。注水については、表 6.2.4 の数値を土留め矢板範囲内の GL-約 2.1m の全面に境界条件として入力した。

表 6.2.5 掘削調査地点内の揚水量・注水量の境界条件値（単位：m<sup>3</sup>/日）

		F-6	F-22	F-1	F-5	F-19	F-10	注水
2009	4/30	2.2	0.8	0.8	2.2	0	0	2
	5/1	2.6	0.8	0.8	2.6	0	0	4
	5/7~8	5	1.6	1.6	5	0	0	10
	5/11~5/15	5	1.6	1.6	5	0	0	10
	5/18	5	1.6	1.6	5	0	0	10
	5/19~20	5	1.6	1.6	5	0	0	7
	5/26	0.6	0.2	0.3	0.6	0	0	0
	6/1~14	15	5	5	15	0	0	30
	6/15~30	15	5	15	15	0	0	30
	7/1~5	15	5	15	15	0	0	45
	7/6~8/2	16	11	16	16	0	0	45
	8/3~9/1	16	11	16	16	0	0	50
	9/2~6	16	11	16	16	0	0	45
	9/7~11/15	16	11	10	16	0	0	45
11/16~29	16	11	5	16	0	0	45	
12/1~12/29	16	11	5	16	0	0	40	
12/30~2010/1/31	16	11	3	16	0	0	35	
2010	2/1~2/28	16	0	2	16	0	0	30
	3/1~14	16	0	1	16	0	0	30
	3/15~21	16	0	1	16	15	0	30
	3/22~30	16	0	1	16	15	0	35
	3/31~4/11	16	0	1	16	15	0	0
	4/12~8/1	16	0	0	16	15	0	0
	8/2~10/10	16	0	0	16	15	10	0
10/11~2011/3/31	30	0	0	16	30	20	0	

※1 予備運転期間（2009年4月30日～2009年5月31日）は、上記記載日のみ揚水井戸稼働。

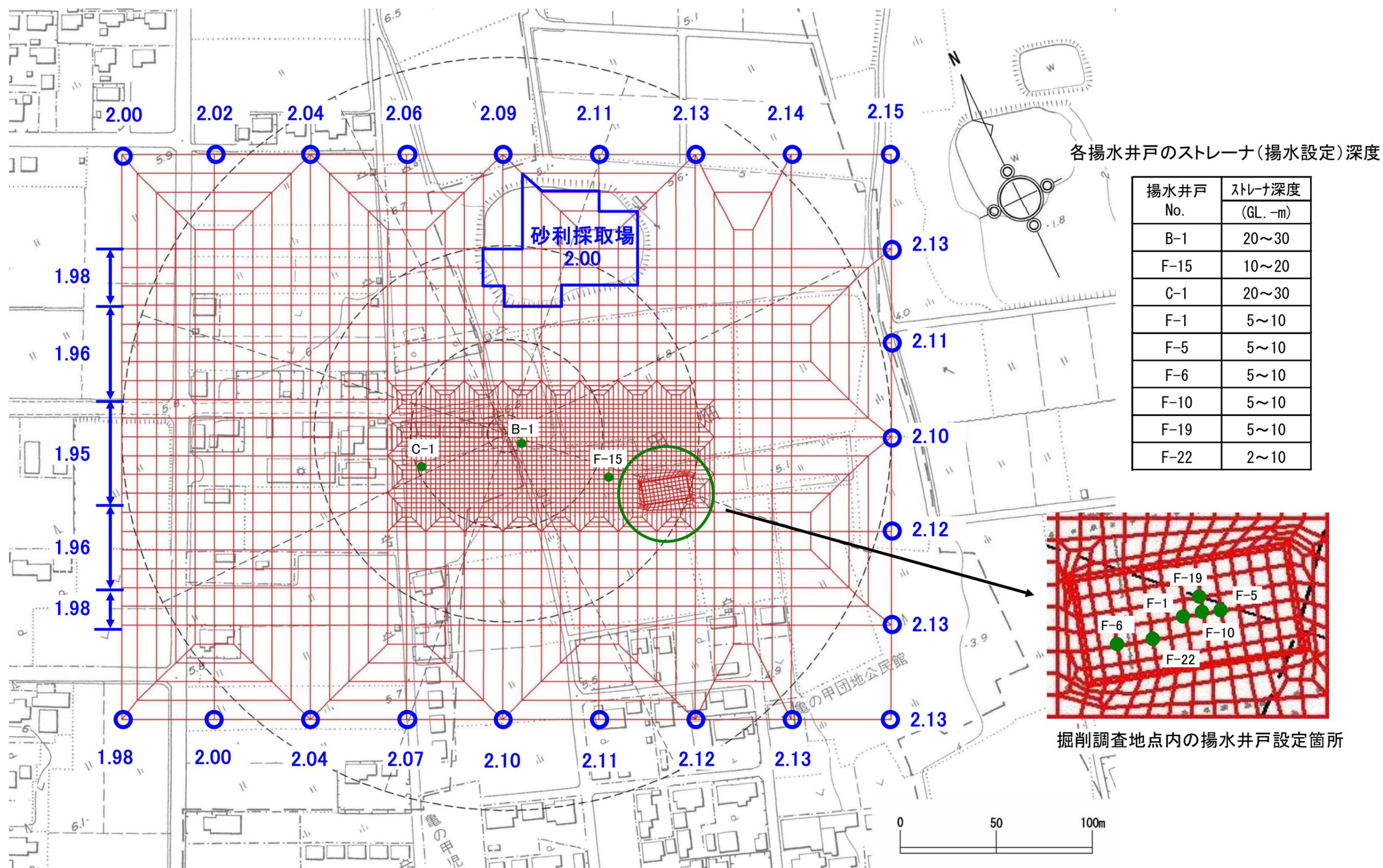
※2 2009年6月1日～2010年4月1日は週5日稼働とした。

※3 2010年4月2日～2011年3月31日は週6日稼働とした。

## 4) 降雨浸透量

降雨浸透量は、神栖市役所での降雨観測データ（1993年10月～2009年3月）を基に、ソーンズウェイト式による可能蒸発散量を差し引き有効雨量とし、その有効雨量平均値（1.85mm/日）に対し50%が浸透するとした場合の値として0.92mm/日を用いた。

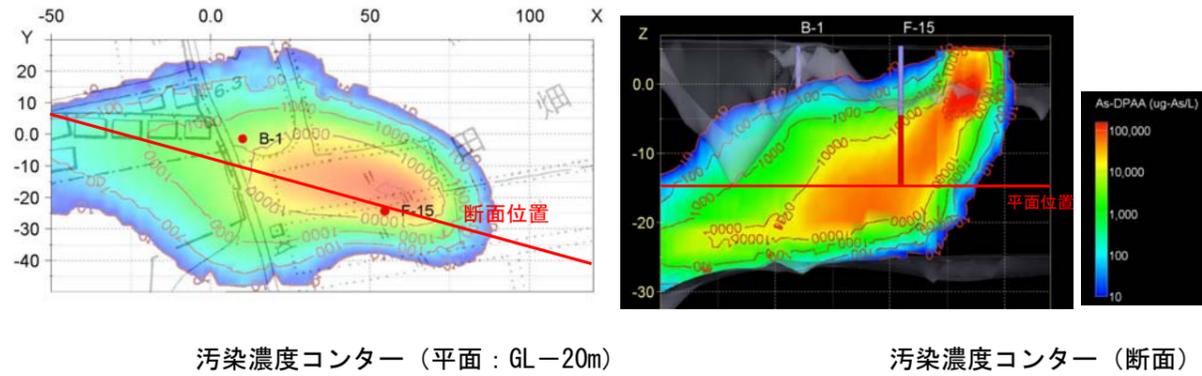
図6.2.11 A地区高濃度汚染対策シミュレーション 境界水位 (m) と揚水井戸配置位置



## 5) 高濃度汚染対策開始時点の地下水汚染状況の設定（初期濃度境界）

高濃度汚染対策開始時点の地下水汚染分布は、「シミュレーション等報告書」におけるA井戸詳細地下水シミュレーションの予測解析結果より算出した、2009年4月29日時点の地下水汚染分布を入力した（図6.2.12）。

なお、上記の初期条件からは、シミュレーション開始時点でA地区に残存するDPAA量は161.26kgと計算される。



汚染濃度コンター（平面：GL-20m）

汚染濃度コンター（断面）

図 6.2.12 設定したシミュレーション開始時点の汚染分布（2009年4月29日時点）

## 6) 解析期間

解析期間：2009年4月30日～2011年3月31日

## (2) 解析結果

### 1) 実測値との比較

図6.2.13は、各揚水井戸におけるシミュレーション結果と実測値の比較図である。

F-15井戸では、高濃度汚染対策後半においてシミュレーション値が実測値よりもやや早く濃度低下するものの、B-1井戸はシミュレーション値と実測値との整合性がよいことが示された。

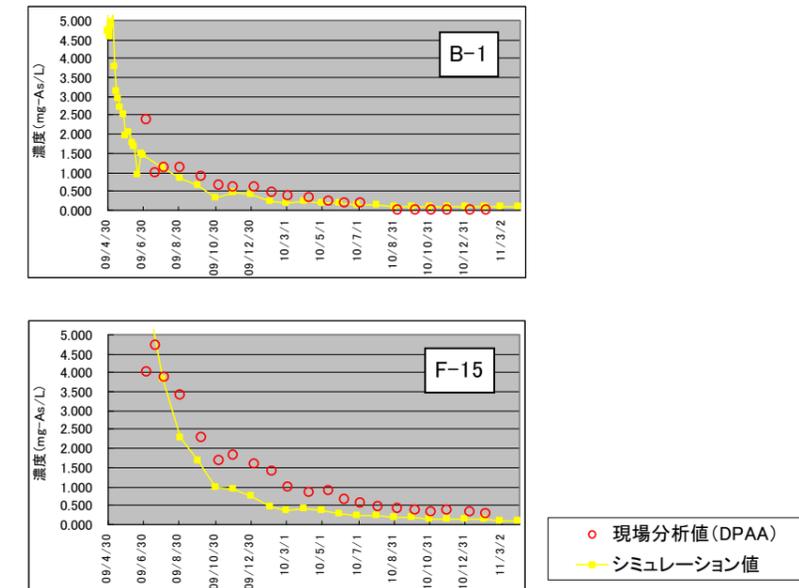


図 6.2.13 シミュレーション結果と実測値の比較図（B-1井戸、F-15井戸の濃度推移）

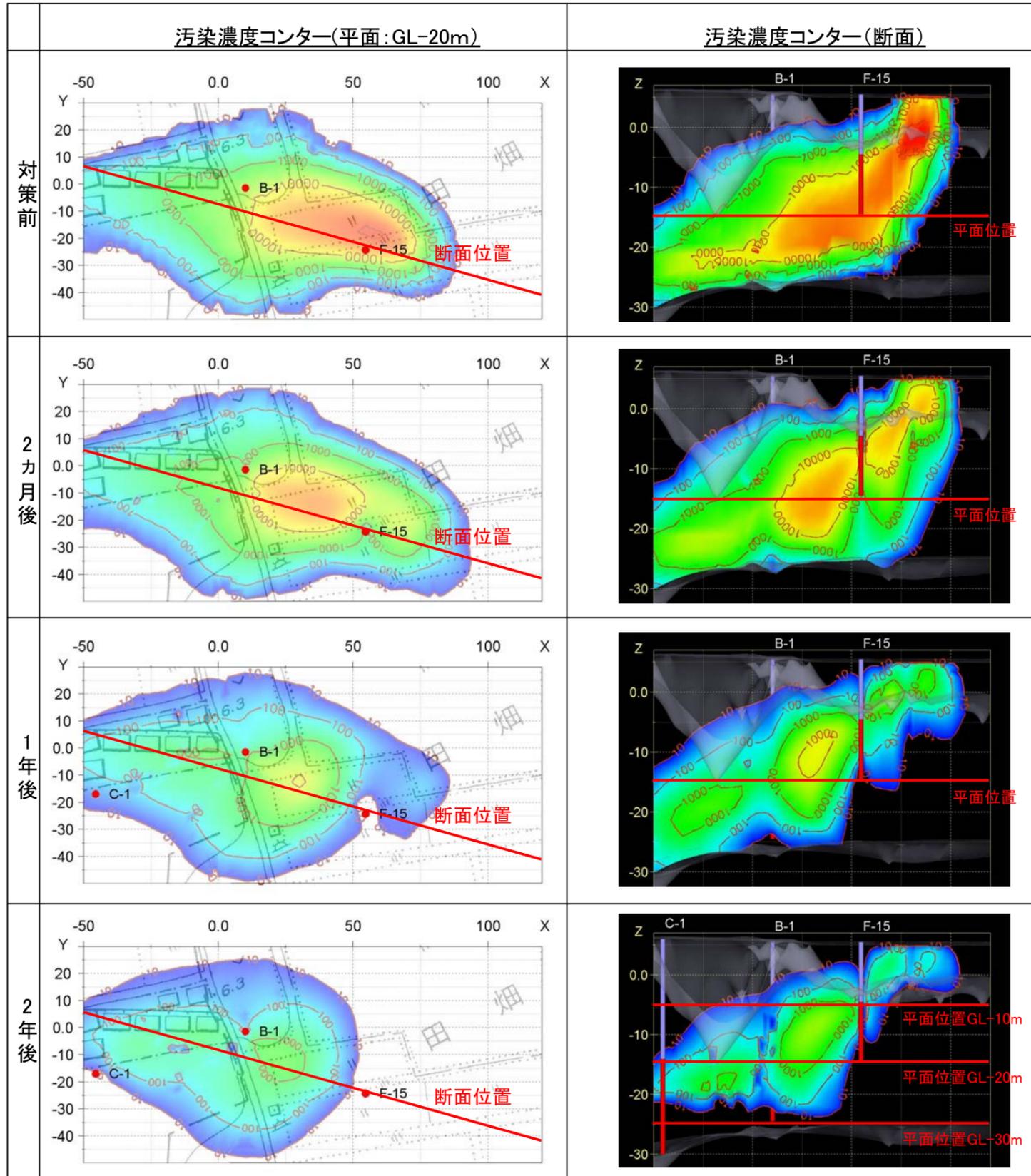
### 2) 解析結果

図6.2.14は2年間の高濃度汚染対策の再現結果を示す。高濃度汚染対策前、掘削調査地点からB-1井戸下流にかけては、広く10mg-As/Lを超える汚染が分布しているが、対策開始2ヵ月後に10mg-As/Lを超える汚染範囲は半分になり、1年後にはさらに小さくなり、2年後にはその範囲は消滅する。しかし、対策によって、汚染が完全に除去されるわけではなく、2年後においても1mg-As/Lを超える汚染は、F-15井戸とB-1井戸の間、深度15m付近を中心に残存することが示された。

図6.2.14 現況再現シミュレーション結果（対策前DPAA量：161.26kg）

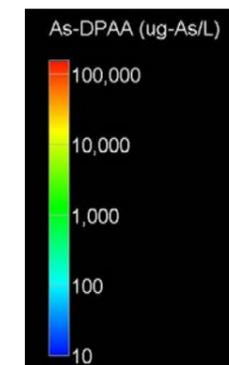
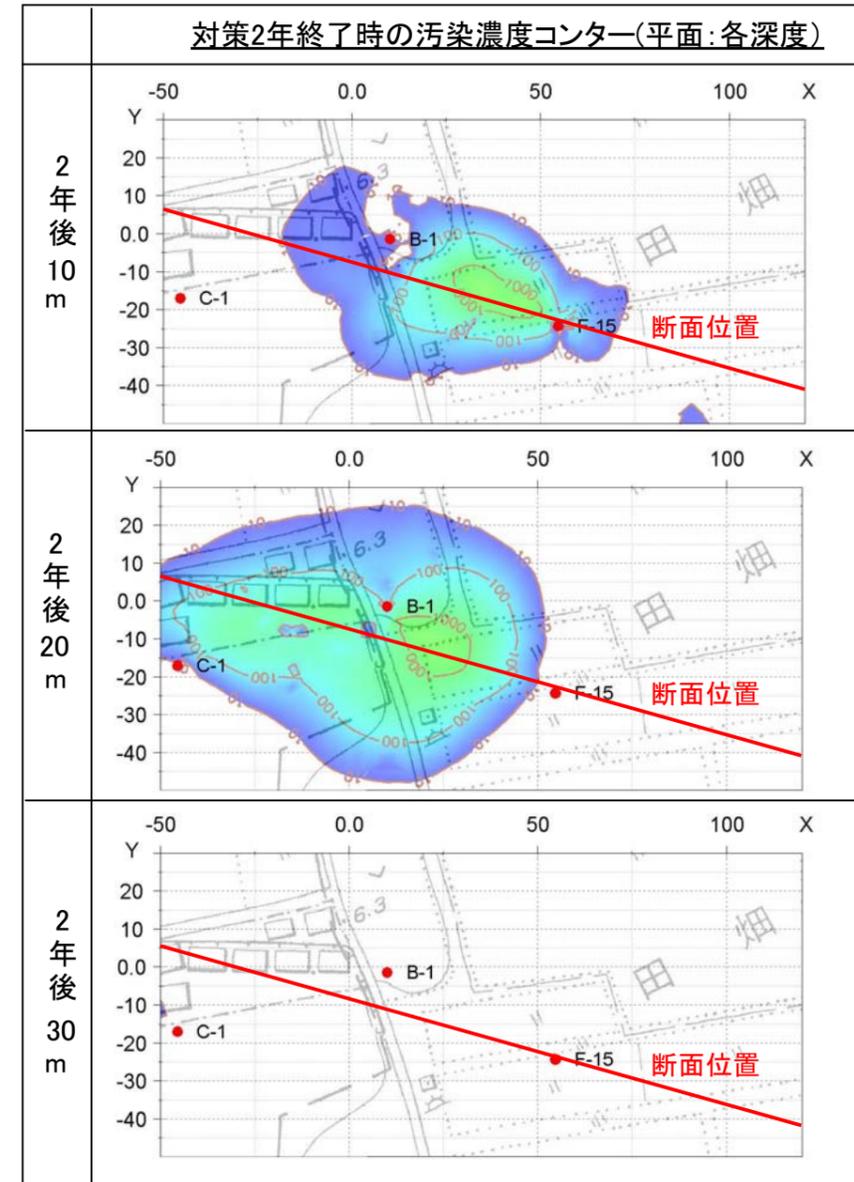
シミュレーション結果

○各時期における汚染濃度コンター（平面、断面）※揚水井戸の赤い区間はストレナーナ区間



シミュレーション結果

○対策2年終了時の深度毎のDPAA濃度分布



### 3) 2年間の高濃度汚染対策における有機ヒ素化合物の除去量の検証

高濃度汚染対策前（2009年4月29日時点）にA井戸周辺に残存していた有機ヒ素化合物量は、A井戸等詳細地下水汚染シミュレーションより、161.26kg-Asと推定されている。

同時期を初期値として、シミュレーションを用いて2年間の高濃度汚染対策の状況を再現すると、2011年3月31日時点で、高濃度汚染対策による有機ヒ素化合物の除去量は131.89kg（揚水井戸の濃度×揚水量より算出）となる。

他方、高濃度汚染対策における実際の有機ヒ素化合物の除去量は、2011年3月31日時点で144.68kg-Asと算出され、シミュレーションとの差は12.79kgとなった。

シミュレーションによる除去量は実対策における除去量よりも少ないが、シミュレーションの持つ不確実性を踏まえると、両者は一定の整合性を有していると判断され、シミュレーションが実現場の状況を精度良く再現していると考えられる。

ここで、対策前に残存していた有機ヒ素化合物量を約160kg-Asとすると、対策による有機ヒ素化合物の除去率はシミュレーションでは82.4%、実対策では90.4%となった（表6.2.6）。

表 6.2.6 シミュレーションと実測から算出される対策における有機ヒ素化合物の除去率

算出方法	区分	有機ヒ素化合物量 (kg-As)	割合（対、対策前有機ヒ素化合物量）（%）
シミュレーション	対策前有機ヒ素化合物量	160*	
	除去した有機ヒ素化合物量	131.89	82.4
実測	除去した有機ヒ素化合物量	144.68	90.4
シミュレーションと実測における除去した有機ヒ素化合物量の差		12.79	

※シミュレーションからの算出は6.2.4(1)5)に示したとおり161.26kg-Asであるが、シミュレーションは不確実性を有するため、対策前に残存していた量を概数として160kg-Asとした。