

6.3.3. 広域地下水汚染シミュレーションモデルの構築

(1) 三次元地盤モデル

三次元モデルは水文データ、周辺地形条件、各種水文的境界（河川、港湾等）を考慮して、ABトラックを中心に、境界条件がABトラック内の解析結果に大きな影響を与えないよう、広域の範囲を対象に構築した。その領域境界には、水位変動が少ない河川・鹿島港や、地下水位が既知である既存観測孔位置をモデル領域として設定した（図6.3.7）。

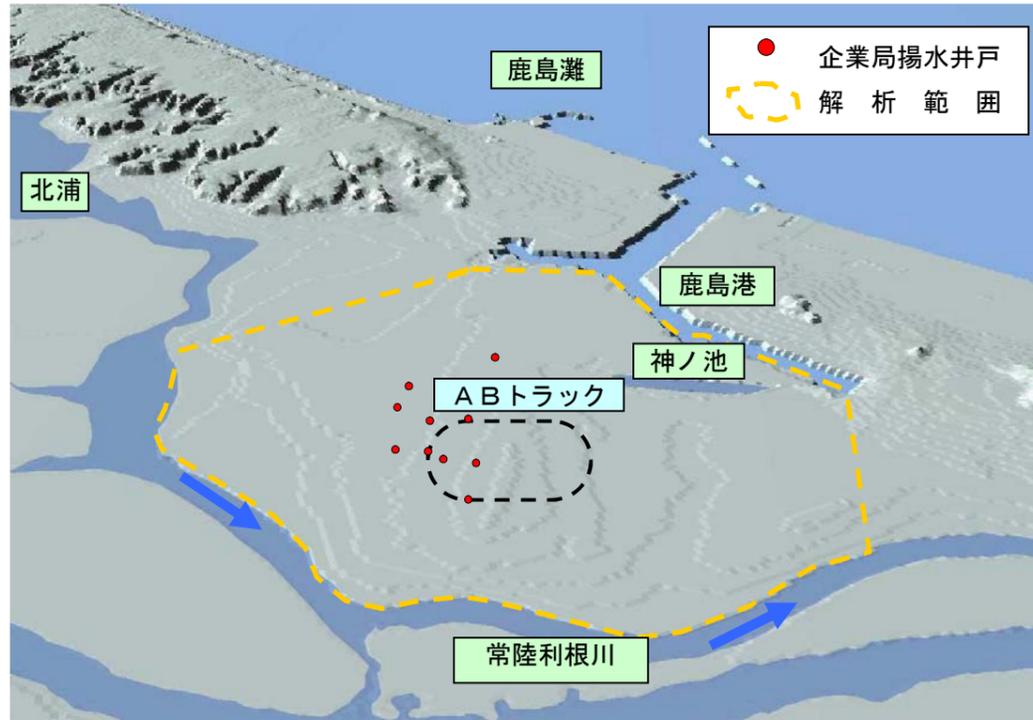


図 6.3.7 広域地下水汚染シミュレーション範囲（標高 5 倍表示）

図 6.3.8 は三次元解析メッシュ分割図である。

平面メッシュは「シミュレーション等報告書」の解析結果を参考に、A 井戸、B 地区、及びその下流側の汚染が移動する領域で密とした。A 井戸周辺部では概ね 5m 間隔、A 井戸から B 地区にかけては 5~30m 間隔、B 地区より下流部では概ね 30m 間隔とした。また、企業局揚水井戸等の地下水同定箇所、モニタリング井戸のうち濃度同定箇所ではメッシュの交点（節点）を一致させた。解析領域の境界は、以下のとおりとした。

表 6.3.2 は広域地下水汚染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。

- 北 : 下幡木井戸・深芝井戸観測所
- 北東 : 鹿島港
- 東 : 常陸利根川、鹿島港を結ぶ線
- 南から西 : 常陸利根川

表 6.3.2 広域地下水汚染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	228,260
要素数	217,361
平面メッシュ	9,512
鉛直節点数	24 (神ノ池のみ 22)

地盤条件、地層分布も「シミュレーション等報告書」における広域地下水流動シミュレーションを基本とし、以降に追加されたボーリング結果を用いて修正した。また、ABトラック南西地域に特徴的に分布する高透水の砂礫層（Dg3層）は「シミュレーション等報告書」のABトラック広域地下水汚染シミュレーションと同範囲としてモデル化した。図6.3.9は三次元地盤モデル、図6.3.10及び図6.3.11は三次元地盤モデル断面図、図6.3.12はDg2・Dg3層下面コンター図である。

図 6.3.8 広域地下水汚染シミュレーション平面メッシュ分割図

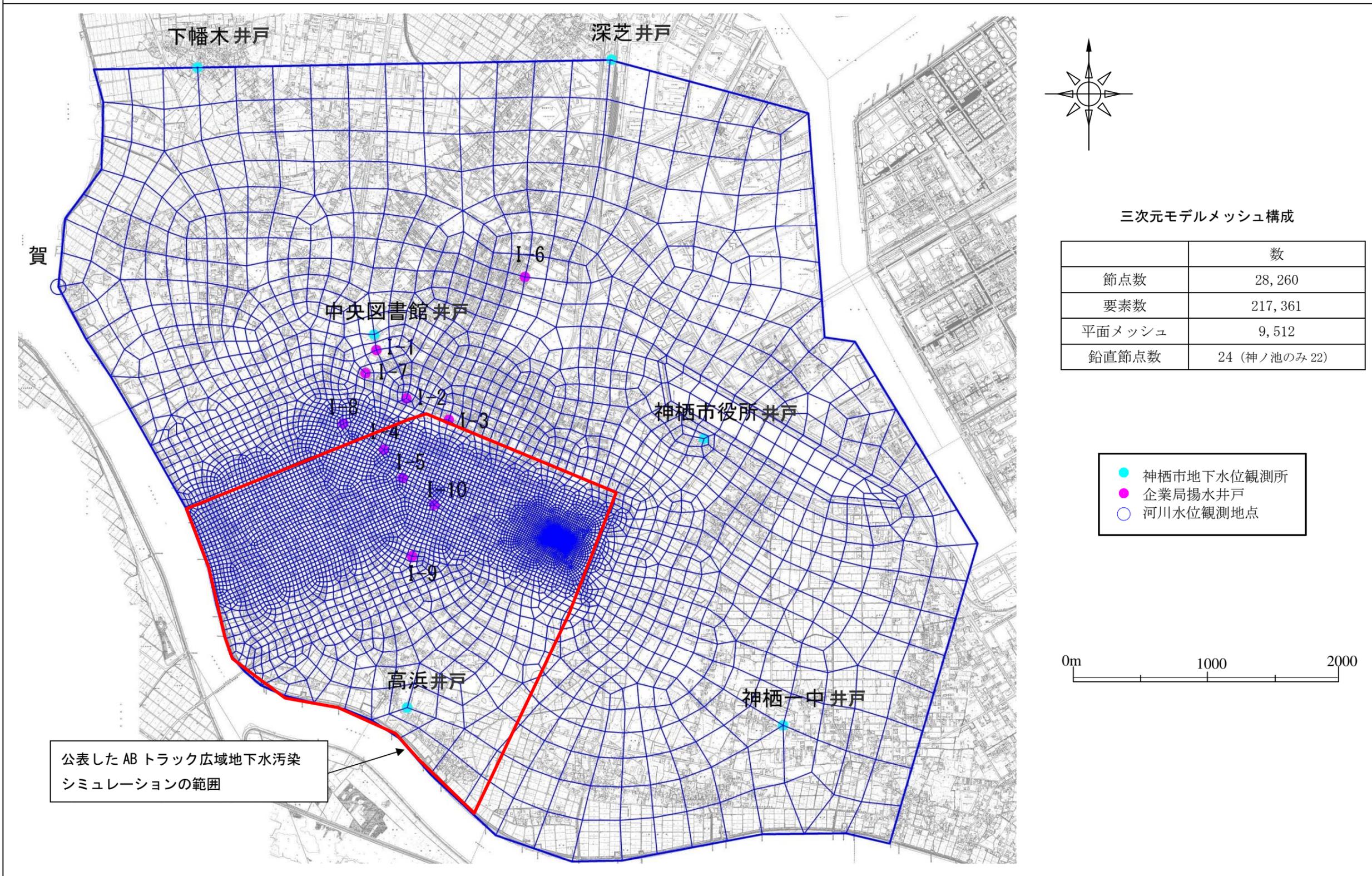


図 6.3.9 広域地下水汚染シミュレーション三次元地盤モデル

※深度方向 20 倍表示

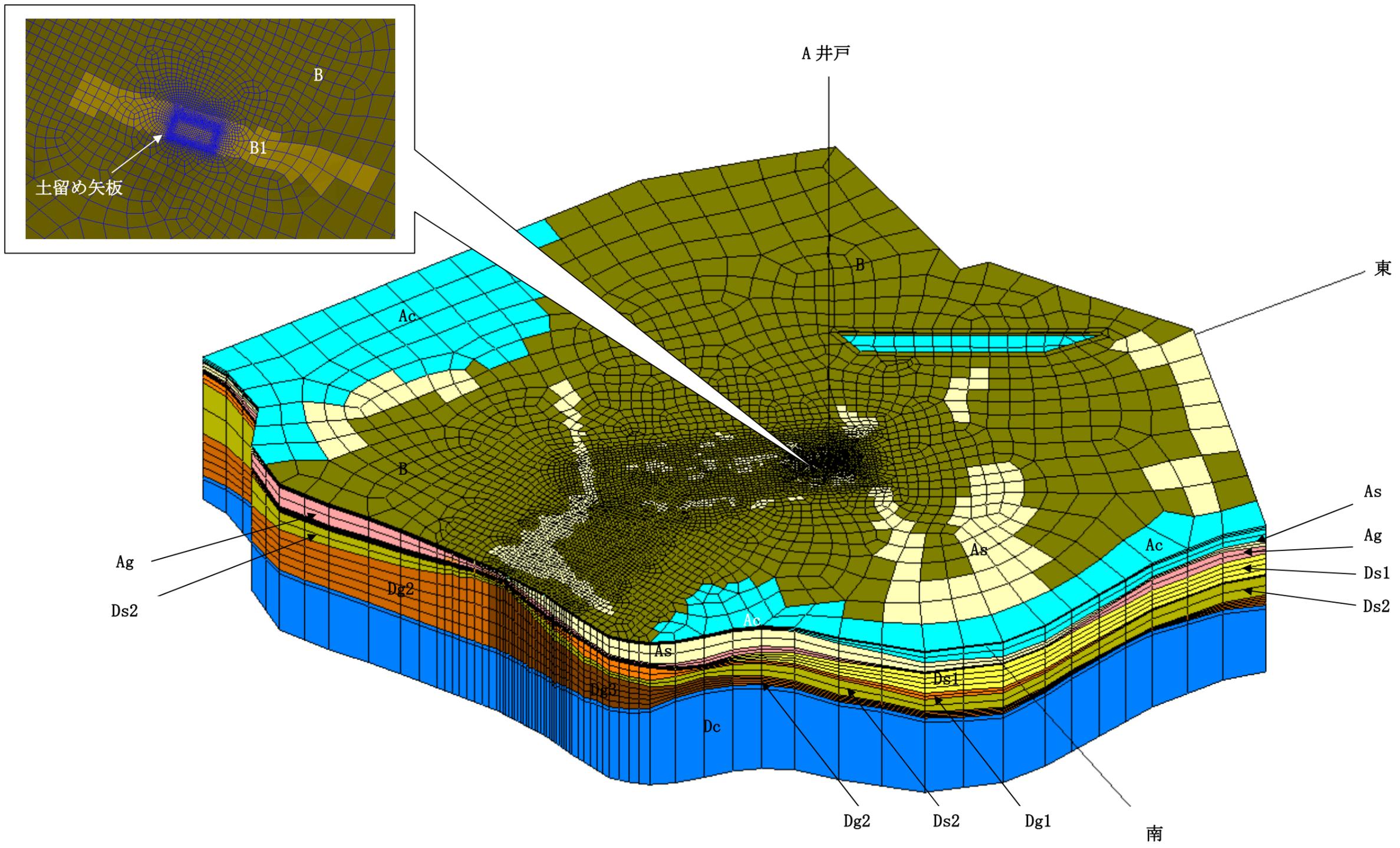
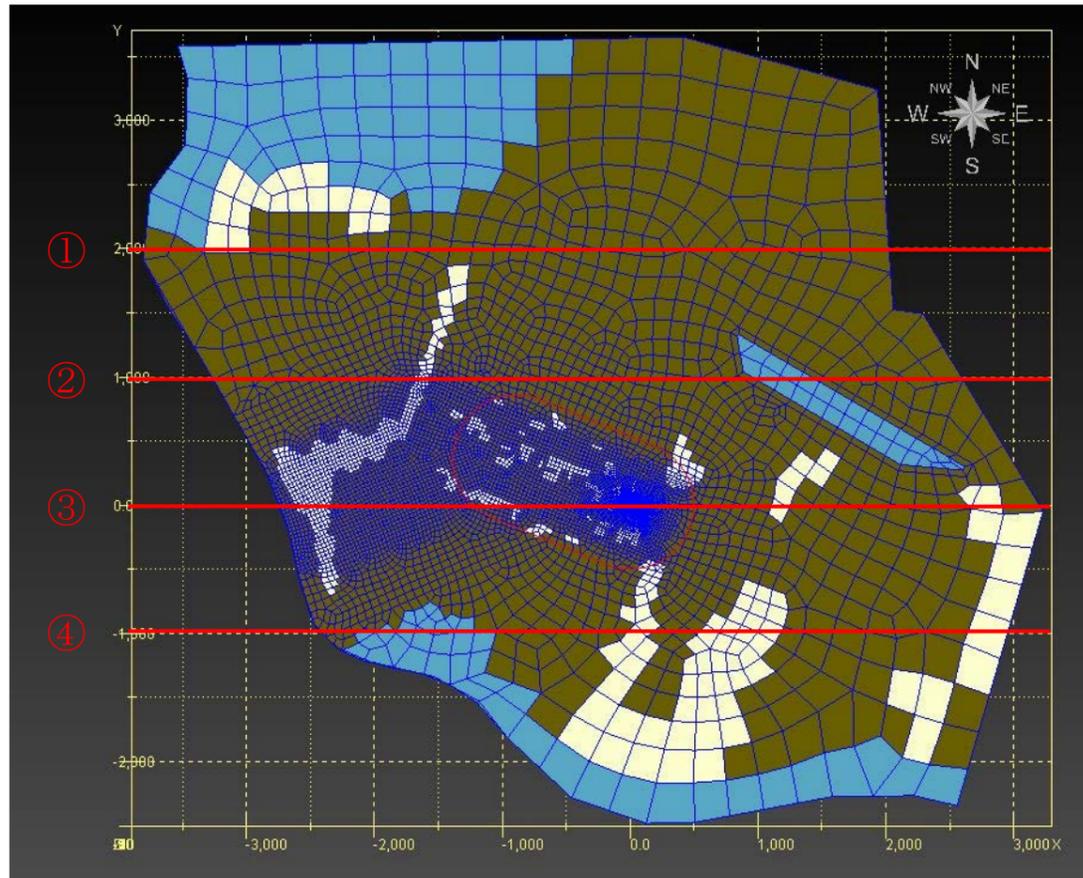
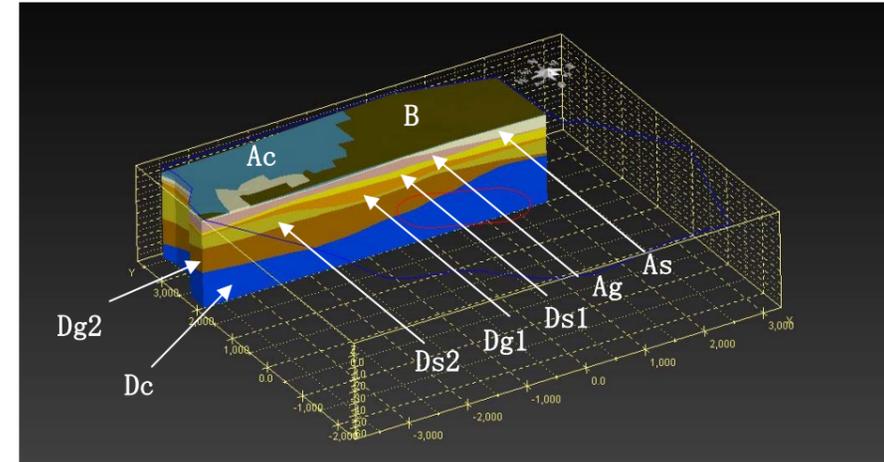


図 6.3.10 広域地下水汚染シミュレーション三次元地盤モデル断面図 1/2

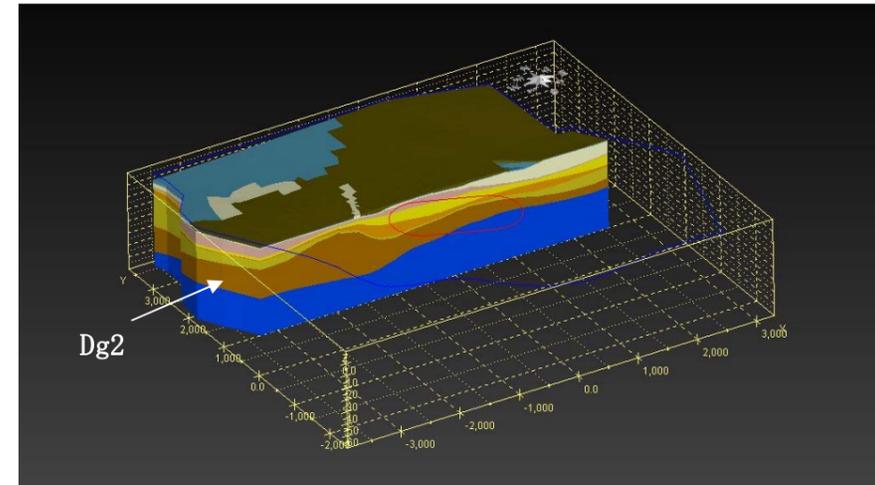
※深度方向 20 倍表示



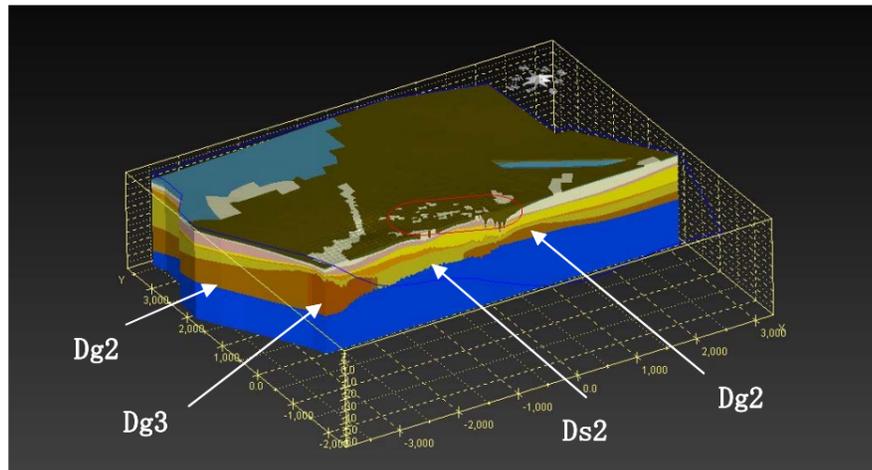
①
断
面



②
断
面



③
断
面



④
断
面

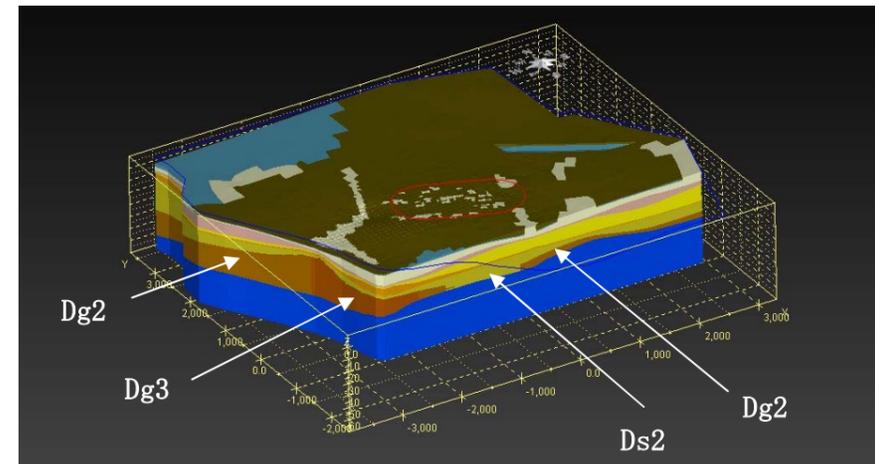
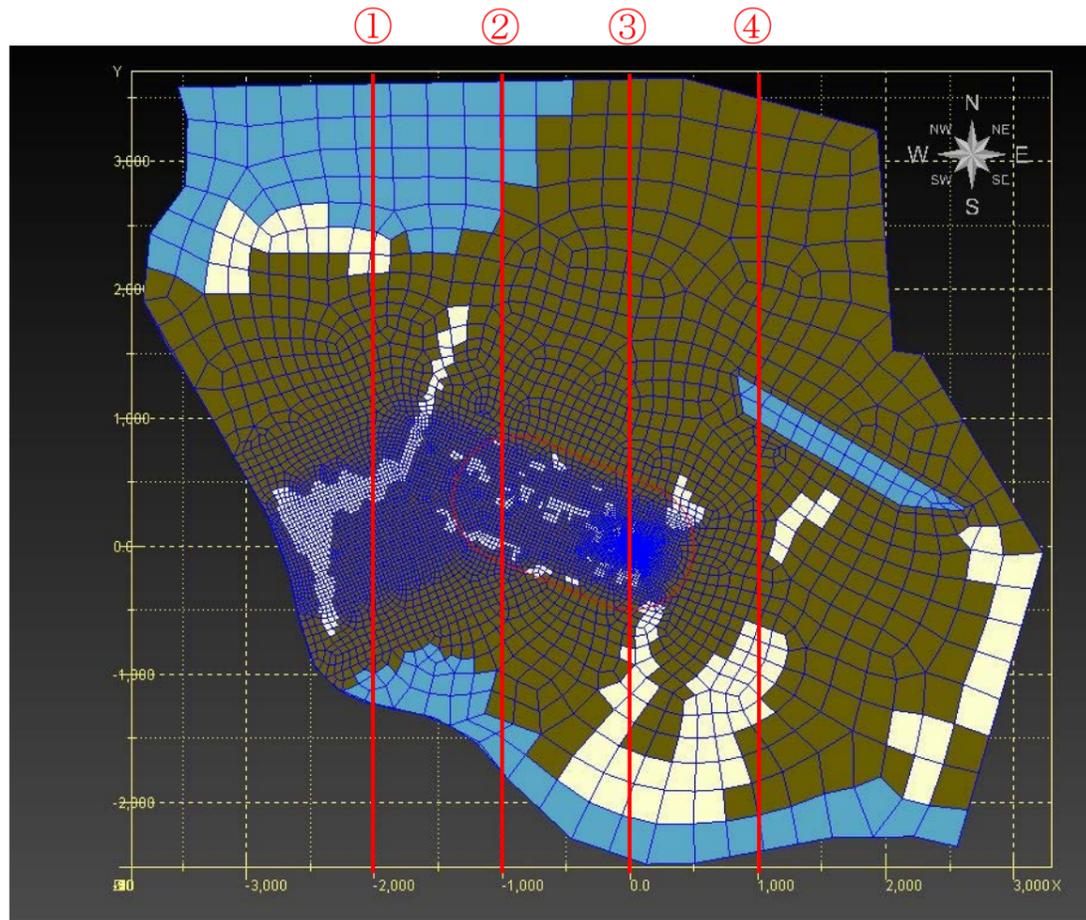
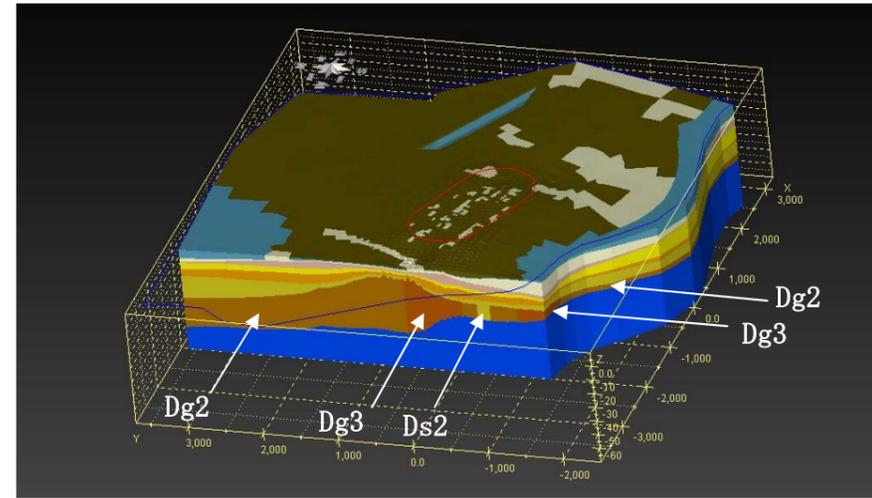


図 6.3.11 広域地下水汚染シミュレーション三次元地盤モデル断面図 2/2

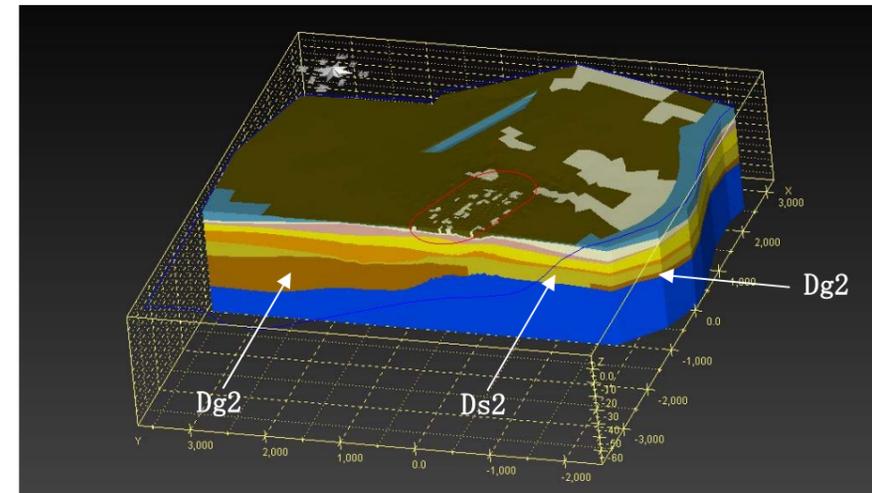
※深度方向 20 倍表示



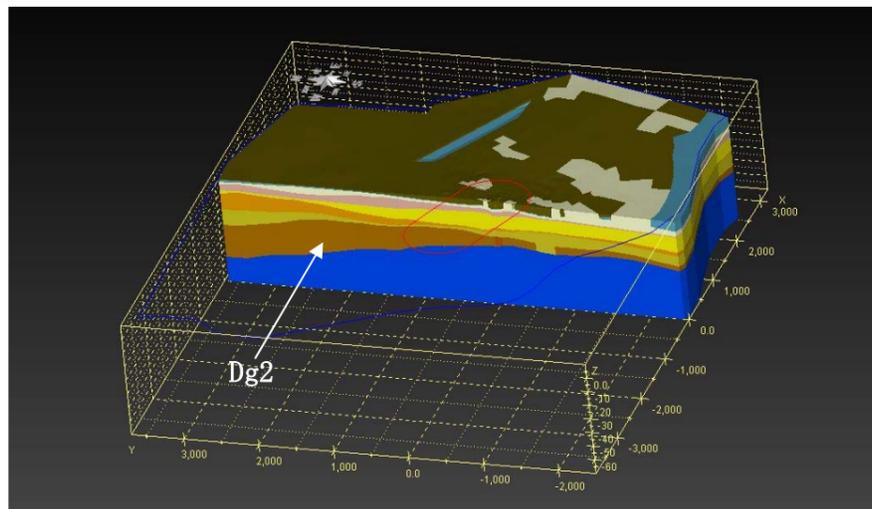
①
断面



②
断面



③
断面



④
断面

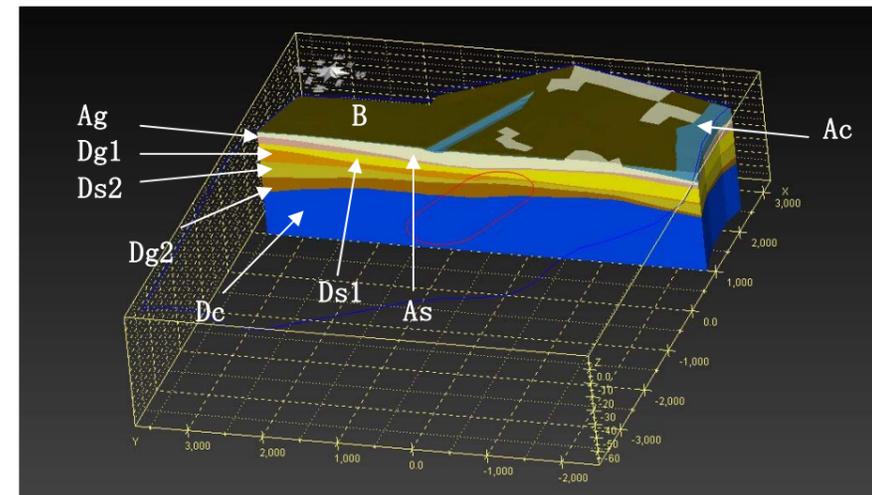
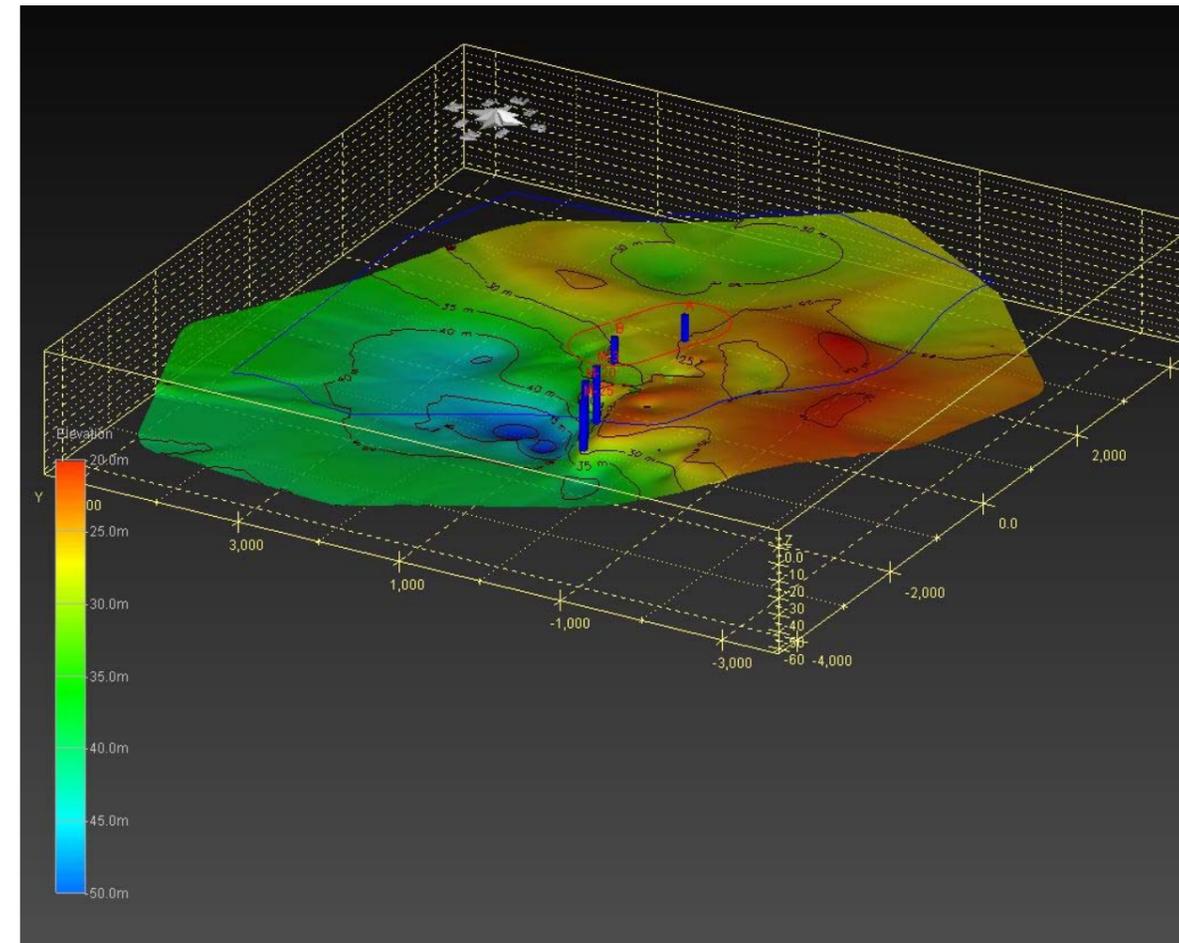
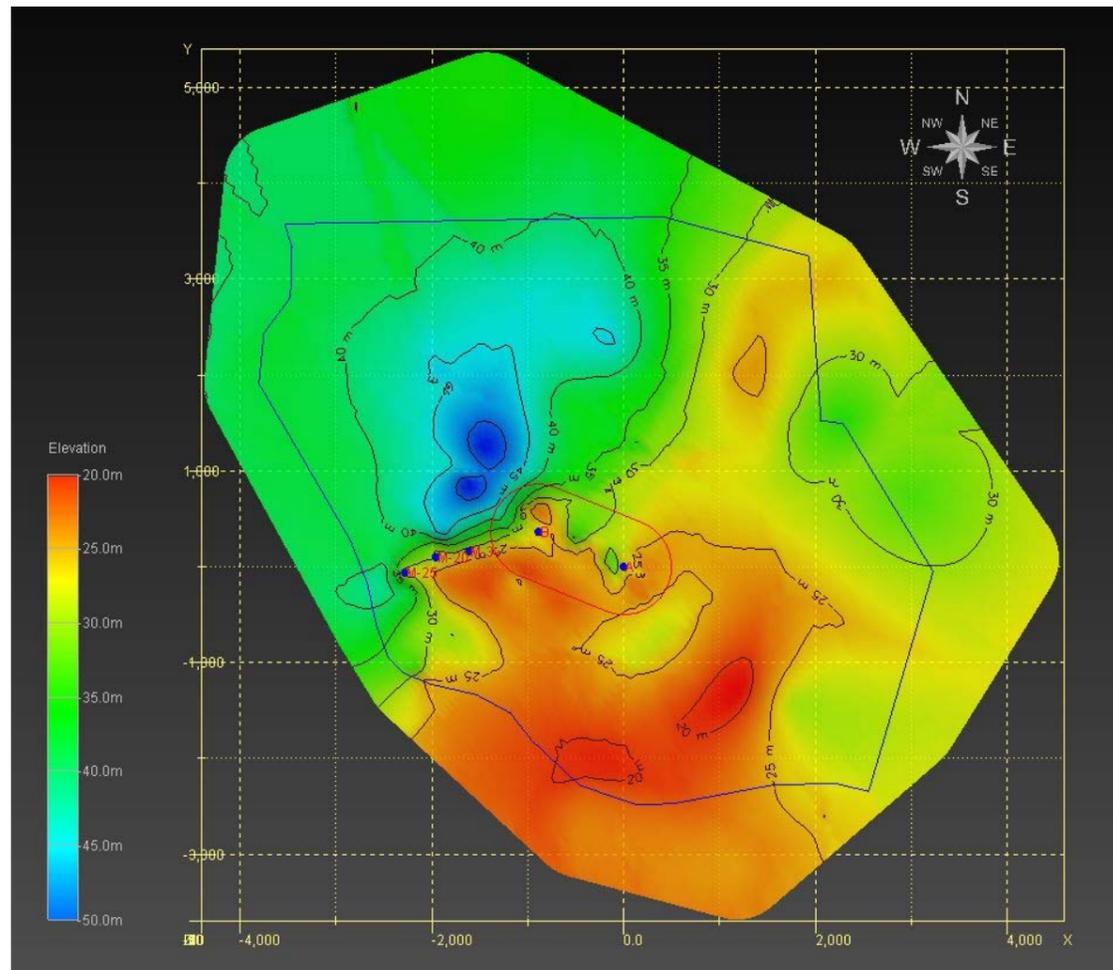


図 6.3.12 Dg2・Dg3 層下面コンター図



※深度方向 20 倍表示

(2) 水理定数

1) 飽和透水係数・比貯留係数・有効間隙率

表 6.3.3 は水理定数一覧である。水理地質区分は、既往文献及びボーリング結果を基に表内に示す区分とした。

透水係数は、現場透水試験結果を基本に、シミュレーションのケーススタディの中で地下水位が再現できた値であり、「シミュレーション等報告書」の AB トラック広域地下水汚染シミュレーション入力物性値と同値である。

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 $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ とした。また、比貯留係数については、文献を参考に設定した。

表 6.3.3 広域地下水汚染シミュレーション入力水理物性値一覧表

記号	地層名	現場透水 試験結果	透水係数 (cm/s)			比貯留 係数 (1/cm)	有効 間隙率 (%)
			解析使用値				
			X	Y	Z		
	土留め矢板		1.00×10^{-5}	1.00×10^{-5}	1.00×10^{-5}	2.00×10^{-5}	20
B1	第一埋土層 (いけす)		5.00×10^{-4}	5.00×10^{-4}	5.00×10^{-4}	2.00×10^{-5}	40
B	埋土層	1.79×10^{-6} ~ 1.4×10^{-3}	1.00×10^{-3}	1.00×10^{-3}	1.00×10^{-3}	2.00×10^{-5}	40
Ac	沖積粘土層		2.00×10^{-4}	2.00×10^{-4}	2.00×10^{-4}	1.00×10^{-5}	20
As	沖積砂層	1.73×10^{-3} ~ 4.74×10^{-2}	3.00×10^{-2}	3.00×10^{-2}	3.00×10^{-2}	5.00×10^{-5}	30
Ag	沖積砂礫層		5.00×10^{-2}	5.00×10^{-2}	5.00×10^{-2}	1.00×10^{-6}	20
Ds1・2	第一・第二洪積 砂層	1.85×10^{-3} ~ 1.45×10^{-2}	1.00×10^{-2}	1.00×10^{-2}	1.00×10^{-2}	4.00×10^{-5}	20
Dg1	第一洪積 砂礫層	1.4×10^{-2}	2.00×10^{-2}	2.00×10^{-2}	2.00×10^{-2}	1.00×10^{-6}	20
Dg2	第二洪積 砂礫層	3.96×10^{-2} ~ 9.54×10^{-2}	1.00×10^{-1}	1.00×10^{-1}	1.00×10^{-1}	5.00×10^{-7}	20
Dg3	第三洪積 砂礫層		2.50×10^{-1}	2.50×10^{-1}	2.50×10^{-1}	5.00×10^{-7}	20
Dc	洪積粘土層		1.00×10^{-5}	1.00×10^{-5}	1.00×10^{-5}	2.00×10^{-5}	20

※ 埋土層 (B) の透水係数は、粒度試験結果より推定 (クレーガー式)

※ 無試験層の透水係数については、一般値及び上下の地層より推定

2) 不飽和浸透特性

不飽和浸透特性は、現地測定データも参考に、図 6.3.13 の様に設定した。

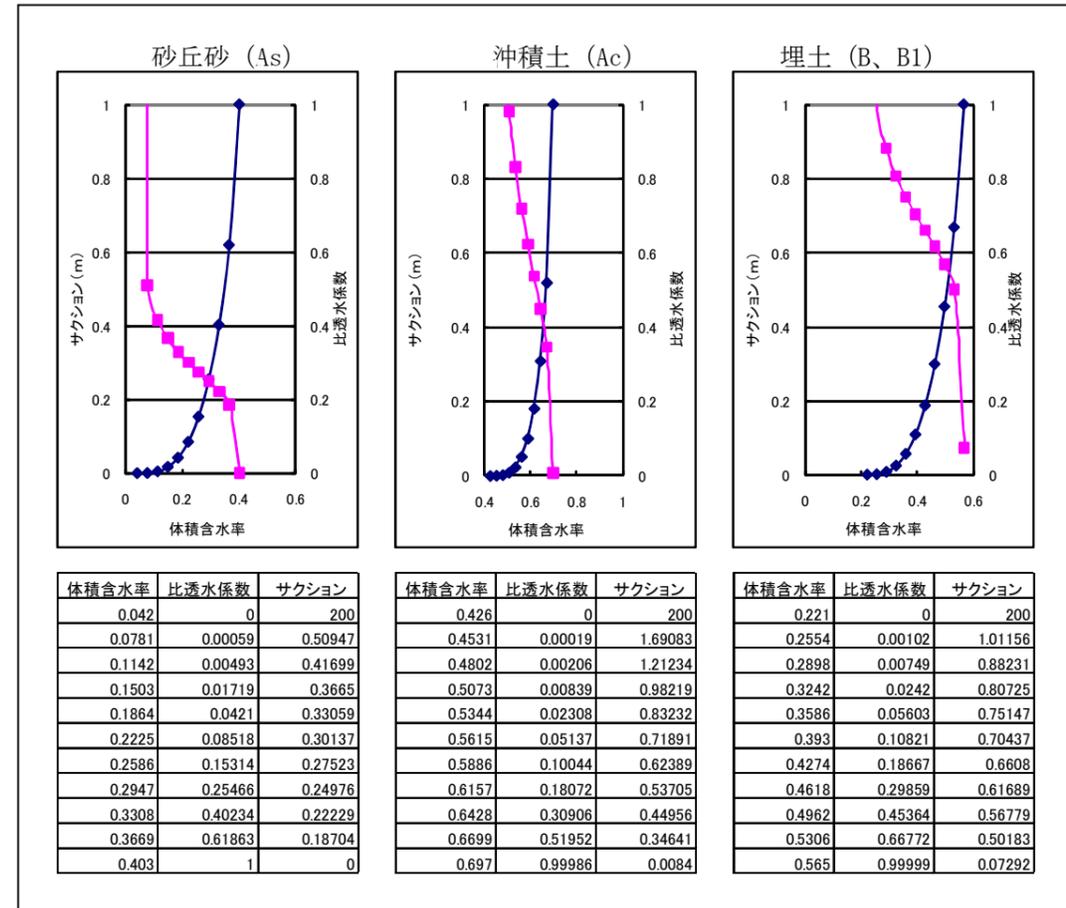


図 6.3.13 不飽和特性曲線

(出典：『室内及び原位置における飽和浸透特性の試験及び調査法に関する研究』、西垣他 1993) より推定

以下、水理定数を入力するにあたって参考とした資料を示す。

●透水性係数

透水性係数一般値（出典：『地盤調査法』地盤工学会、2004）

透水性	透水性係数 k(cm/s)										
	10 ⁻⁹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	10 ⁰	10 ¹
透水性	実質上不透水	非常に低い	低い	中位	高い						
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)			
透水性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				
透水性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 × 10 ⁻² ~ 2.6 × 10 ⁻³
硬質粘土	1.3 × 10 ⁻³ ~ 2.6 × 10 ⁻³
中程度の硬質粘土	1.3 × 10 ⁻³ ~ 9.2 × 10 ⁻⁴
密詰め砂礫	1.0 × 10 ⁻⁴ ~ 4.9 × 10 ⁻⁵
接合亀裂性岩	6.9 × 10 ⁻⁵ ~ 3.3 × 10 ⁻⁶
緩詰め砂	1.0 × 10 ⁻² ~ 4.9 × 10 ⁻³
密詰め砂	1.3 × 10 ⁻⁴ ~ 2.0 × 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

3) 移流分散特性

表 6.3.4 は移流分散定数一覧である。

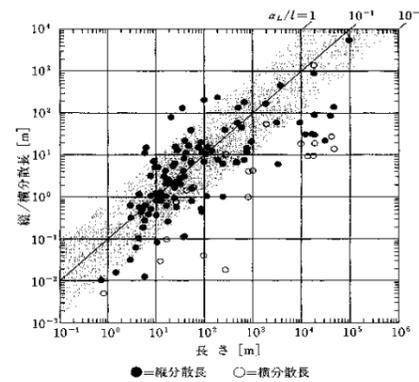
分散長は、一般にモデルスケール（モデルの大きさ、汚染物質の移動距離）に依存することがわかっており、モデルスケールが大きいほど分散長も大きくなる。

広域地下水汚染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 AB トラック広域地下水汚染シミュレーションと同値とした。なお、土留め矢板、第一埋土層及び埋土層の分散長は、入力上は必要となるが、解析には影響を与えないので、その他と同じ値とした。

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 6.3.4 移流分散物性値一覧

記号	地層名	分散長 (m)		分子拡散係数 (m ² /s)	屈曲率	遅延係数	減衰係数
		縦	横				
	土留め矢板	100	5	1 × 10 ⁻⁹	1.0	1.0	0.0
B1	第一埋土層 (いけす)	100	5	1 × 10 ⁻⁹	1.0	1.0	0.0
B	埋土層	100	5	1 × 10 ⁻⁹	1.0	1.0	0.0
Ac	沖積粘土層	100	5	1 × 10 ⁻⁹	1.0	1.0	0.0
As	沖積砂層	100	5	1 × 10 ⁻⁹	1.0	1.0	0.0
Ag	沖積砂礫層	100	5	1 × 10 ⁻⁹	1.0	1.0	0.0
Ds1・2	第一・第二洪積砂層	100	5	1 × 10 ⁻⁹	1.0	1.0	0.0
Dg1	第一洪積砂礫層	100	5	1 × 10 ⁻⁹	1.0	1.0	0.0
Dg2	第二洪積砂礫層	200	10	1 × 10 ⁻⁹	1.0	1.0	0.0
Dg3	第三洪積砂礫層	400	20	1 × 10 ⁻⁹	1.0	1.0	0.0
Dc	洪積粘土層	100	5	1 × 10 ⁻⁹	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 6.3.14 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 6.3.14 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）

6.3.4. 解析条件

(1) 解析プログラム

解析コードは、三次元飽和不飽和移流分散解析プログラム (Dtransu-3D・EL) としたが、降雨や流量条件を変動境界として扱えることに加え、計算速度を高めるため並列化に対応するよう改良して利用した。

(2) 解析範囲・モデル

企業局揚水井戸、神ノ池を含む東西約 7km、南北約 6km の範囲 (図 6.3.15 参照)

(3) 解析領域界の境界条件

- 南から西 : 常陸利根川 (賀・日川) 観測所平均水位 (実測) で水位固定
- 北 : 下幡木井戸・深芝井戸観測所平均水位 (実測) で水位固定
- 北東 : 鹿島港で水位固定 (推定)
 - ※ 鹿島港は、開削水路
 - ※ 鹿島港は、深さ 10m 程度のケーソン基礎
 - ※ 護岸設計背面水位は TP0.5m
- 東 : 常陸利根川、鹿島港、神栖三中井戸水位及び地盤標高を参考に水位固定 (推定)
- 神ノ池 : 既存水面観測結果及び神栖市役所井戸観測孔より変動水位境界

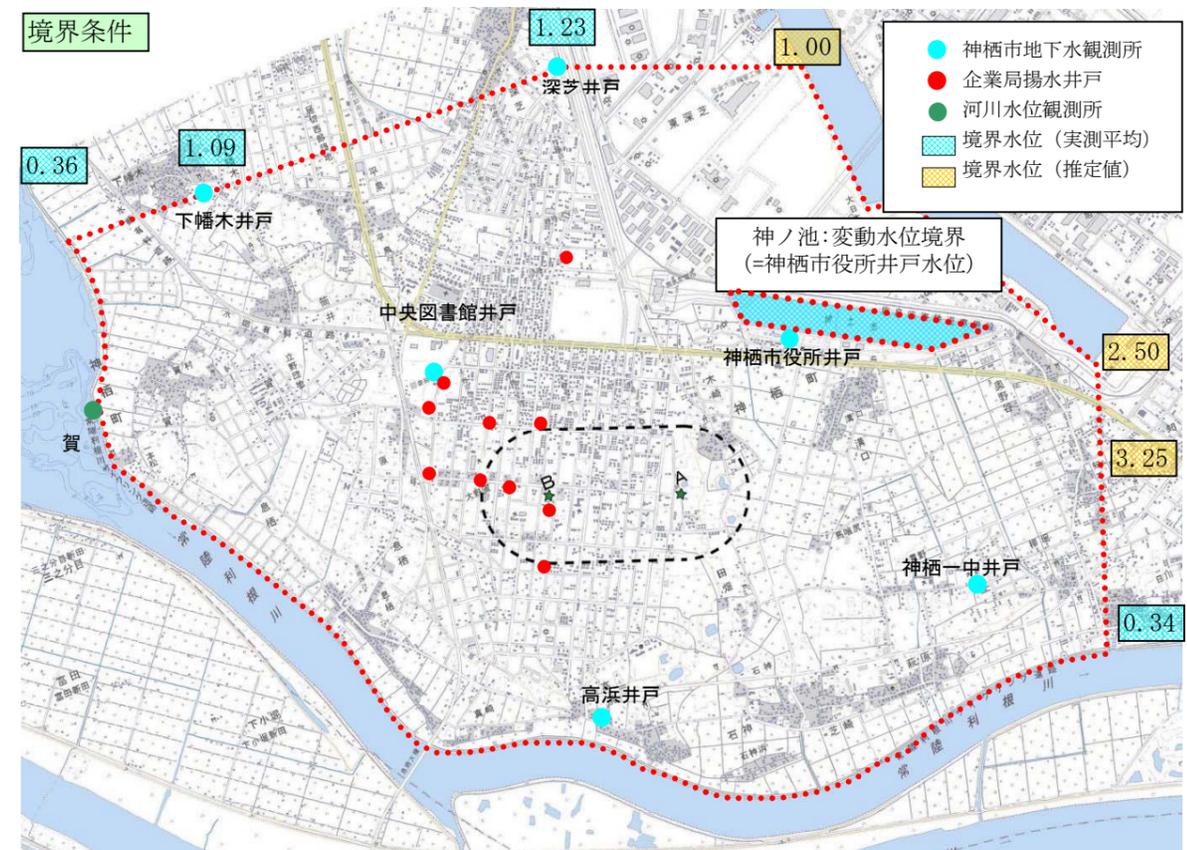


図 6.3.15 広域地下水汚染シミュレーションにおける境界条件設定値

神ノ池は、灌漑期に付近の農業用水として利用するため、南の常陸利根川から給水されており、また非灌漑期においても常時水位を保つようになっている。これが解析範囲内の地下水の流れに影響すると考えられたため、周辺観測孔 (神栖市役所井戸観測所) を参考変動水位境界 (10 日平均) とした。その他の箇所については、実測値 (各観測孔間は線形補完)、及び推定値とした。なお、これらの設定値は「シミュレーション等報告書」と同値である。

(4) 揚水条件

1) 企業局揚水井戸

解析範囲内に位置する企業局の揚水井戸については、揚水実績値 (図 6.3.6 参照) に基づき、「シミュレーション等報告書」と同様に 10 日毎平均として設定した。

このうち企業局揚水井戸 5 号及び 10 号は、2003 年 9 月に井戸水からジフェニルアルシン酸 (DPAA) が確認されたため、以後運転を休止している。また、その他の井戸においても図 6.3.6、表 6.3.1 に示すように運転休止期間が認められる。モデル上はこれらの運転状況も忠実に反映した。

予測解析においては、2009 年 3 月～2010 年 2 月の平均を設定した。(図 6.3.6 参照)

2) 民家井戸

解析範囲における住宅地（住宅地・住宅密集地）に、非給水人口×一般的1人1日水道使用量（0.2m³）（=2,213m³/day）とし、2003年3月までAg層より揚水する設定とした。なお、この値はシミュレーション等報告書における広域地下水シミュレーションと同値である。

(5) 灌漑期における水田からの浸透条件

水田からの浸透量は、灌漑期（4月～8月）において、神ノ池・常陸利根川受益水田面積（6,668m²）に1.6mm/dayとした。なお、この値はシミュレーション等報告書におけるB地区での現地浸透結果に基づく1次元浸透解析結果である。

(6) 降雨条件

有効雨量は神栖市役所井戸内に設置してある降雨観測所データから、可能蒸発散量（アメダスの鹿島の気温データを用いたソーンスウェイト式から計算）を差し引いた。1995年7月～2009年4月における有効雨量（図6.3.3参照）に基づき、シミュレーション等報告書と同様に10日毎平均を設定した。

(7) 降雨浸透率

空中写真判読により表層の土地利用区分を行い、流出係数を基に浸透率を設定した（表6.3.5、図6.3.16）。この値はシミュレーション等報告書と同値である。

ただし、水田においては有効雨量に浸透率を乗じた値に対し、漏水条件と同様に1.6mm/dayを最大値として設定し、地下水位の再現性を高めた。

表 6.3.5 降雨浸透率

区 分	浸 透 率
住宅密集地・アスファルト	0.20
住宅地	0.60
工場地	0.50
林・公園	0.75
裸地	0.70
畑	0.70
水田	0.40

●流出係数

流出係数一般値（出典：『実用河川計画』理工図書、1982）

急峻なる山地	0.75～0.90
第3紀層山丘	0.7～0.8
起伏ある土地および樹林	0.5～0.75
平坦な耕地	0.45～0.60
かんがい中の水田	0.7～0.8
山地河川	0.75～0.85
平地小河川	0.45～0.75
流域のなかば以上が平地である大河川	0.50～0.75

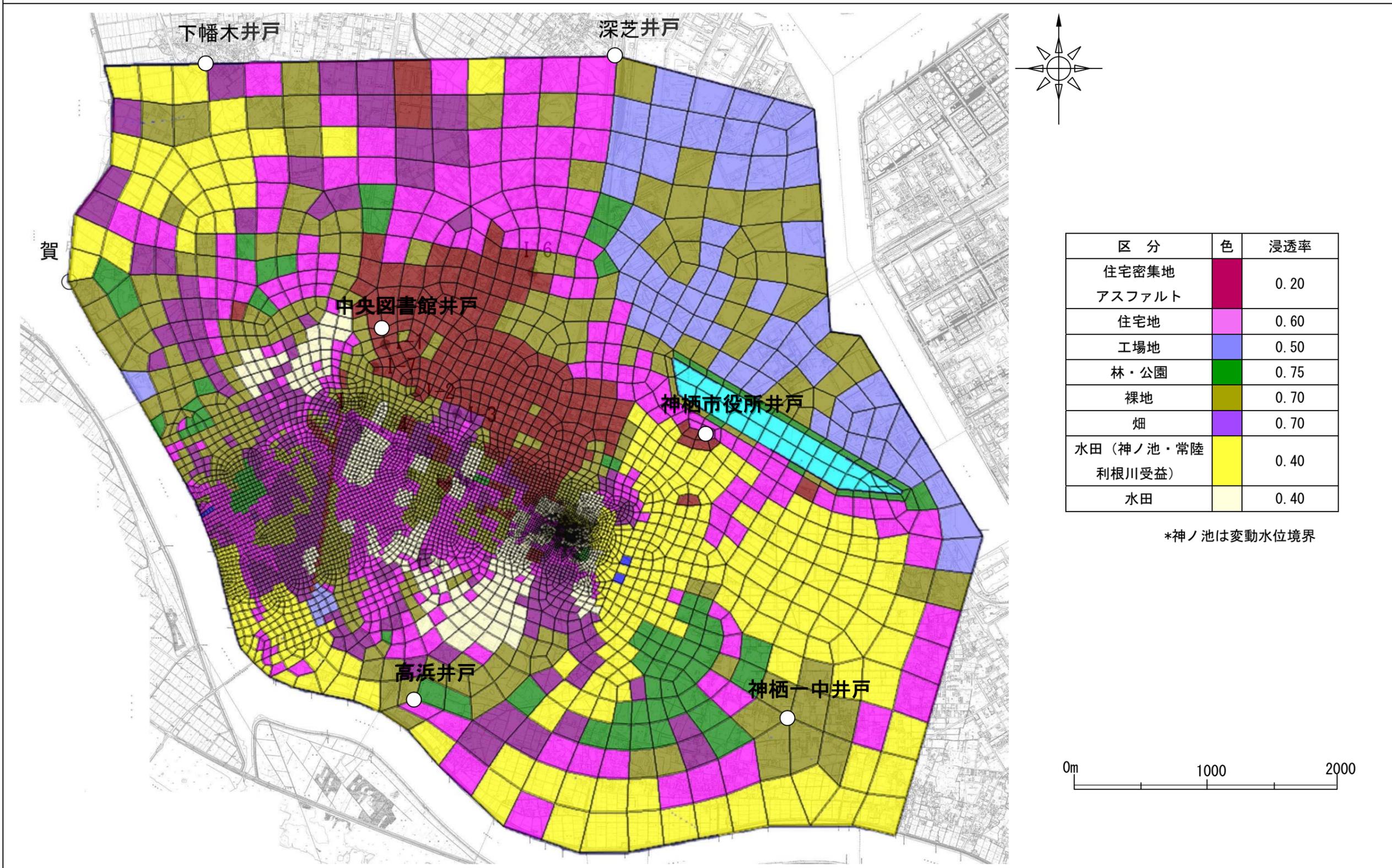
表 2・5 下水道施設基準の流出係数

地 区	流 出 係 数
商 業 地 区	0.70～0.90
工 業 地 区	0.40～0.60
住 宅 地 区	0.30～0.50
公 園 地 区	0.10～0.20

表 2・6 木村の流出係数

流 域	流 出 係 数
非第4紀火山岩流域	0.673～0.825 平均 0.75
第4紀火山岩流域	0.338～0.490 平均 0.41

図 6.3.16 降雨浸透区分図



(8) DPAA 溶出量の設定

コンクリート様の塊の直下砂礫層における DPAA 濃度及び DPAA が存在する位置については、「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及びその後実施した A 地区高濃度汚染対策シミュレーションから得られた結果をもとに、図 6.3.17、図 6.3.18 のように設定した。

A 井戸詳細地下水汚染シミュレーションでは、1996 年頃、DPAA が砂礫層 (Dg2) に到達し、1997 年 4 月には DPAA 濃度が 186mg-As/L とピークになり、その後徐々に濃度が減少していく結果が得られている。また、公表したシミュレーション以後の濃度条件については、新たに実施した A 地区高濃度汚染対策シミュレーションで得られた当該深度の濃度データを入力条件とした。なお、A 地区高濃度汚染対策シミュレーションでは、高濃度汚染対策を実施しなかった場合と高濃度汚染対策を 3 年行った場合の計算を行っているため、広域地下水汚染シミュレーションでも後述の予測解析においてはこの 2 ケースを対象とした (図 6.3.17)。

図 6.3.17 の 3 年対策ケースにおいて、対策期間中である 2009 年～2011 年にかけて急激に濃度が低下した後の 2020 年頃から、再び 0.002mg-As/L 程度の汚染が見られるようになることについては、高濃度汚染対策期間中は揚水により地下水濃度が大きく低下するが、揚水停止後、周辺に残存する低濃度の地下水汚染が遅れて当該深度に拡散することによるものである。

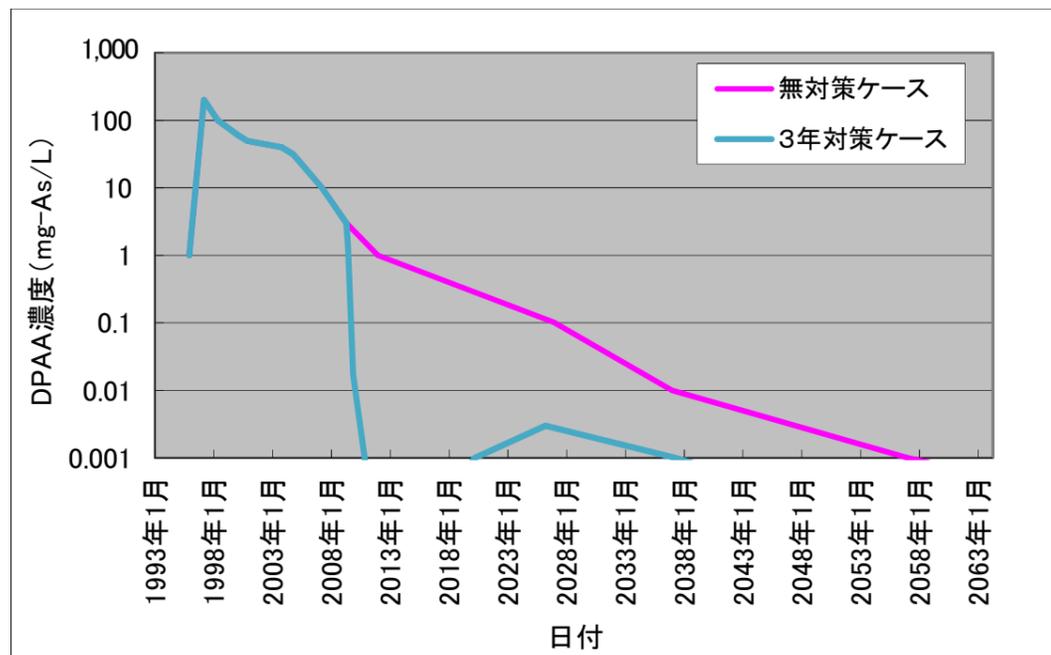


図 6.3.17 コンクリート様の塊の直下砂礫層の DPAA 濃度設定

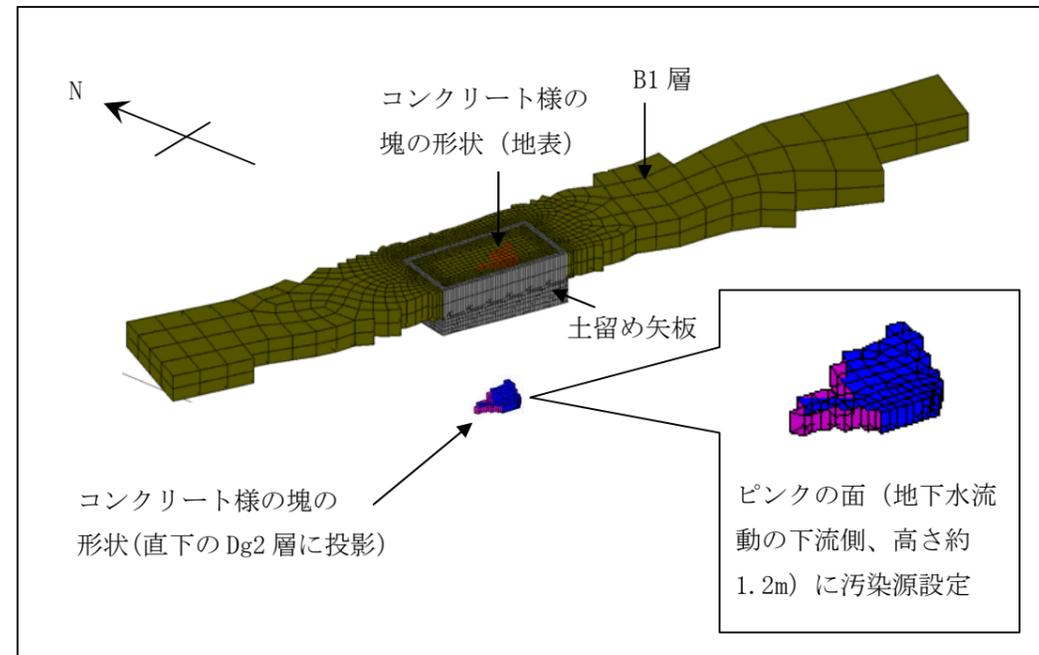


図 6.3.18 広域地下水汚染シミュレーションモデルにおける汚染源設定域

(9) 計算条件

現況再現期間は、コンクリート様の塊から溶出した DPAA が、その直下の Dg2 層に到達した時点の 1996 年 1 月 1 日から、高濃度汚染対策開始時点の 2009 年 4 月 29 日までを対象とした。また、予測解析は、それ以降高濃度汚染対策期間を含めた 100 年間を対象とした。表 6.3.6 は、予備解析 (1996 年 1 月 1 日時点での水頭値把握)、後述の予測解析も含めた計算条件である。

表 6.3.6 計算条件