

### 3-6 三次元帯水層概念モデルによるティラワ SEZ 短期地下水開発の環境影響評価

#### 3-6-1 概要

##### 3-6-1-1 目的

環境影響評価の観点からティラワ SEZ の短期地下水可能量の検討を行うため、帯水層の三次元概念モデルを用いて取水シミュレーションを実施した。取水候補地は、図 3-8-1-1 に示す 2 か所である。これらの候補地は、既存井戸の分布が希薄であること、既存塩水からの距離、およびティラワ SEZ への導水の容易さを考慮し選定した。

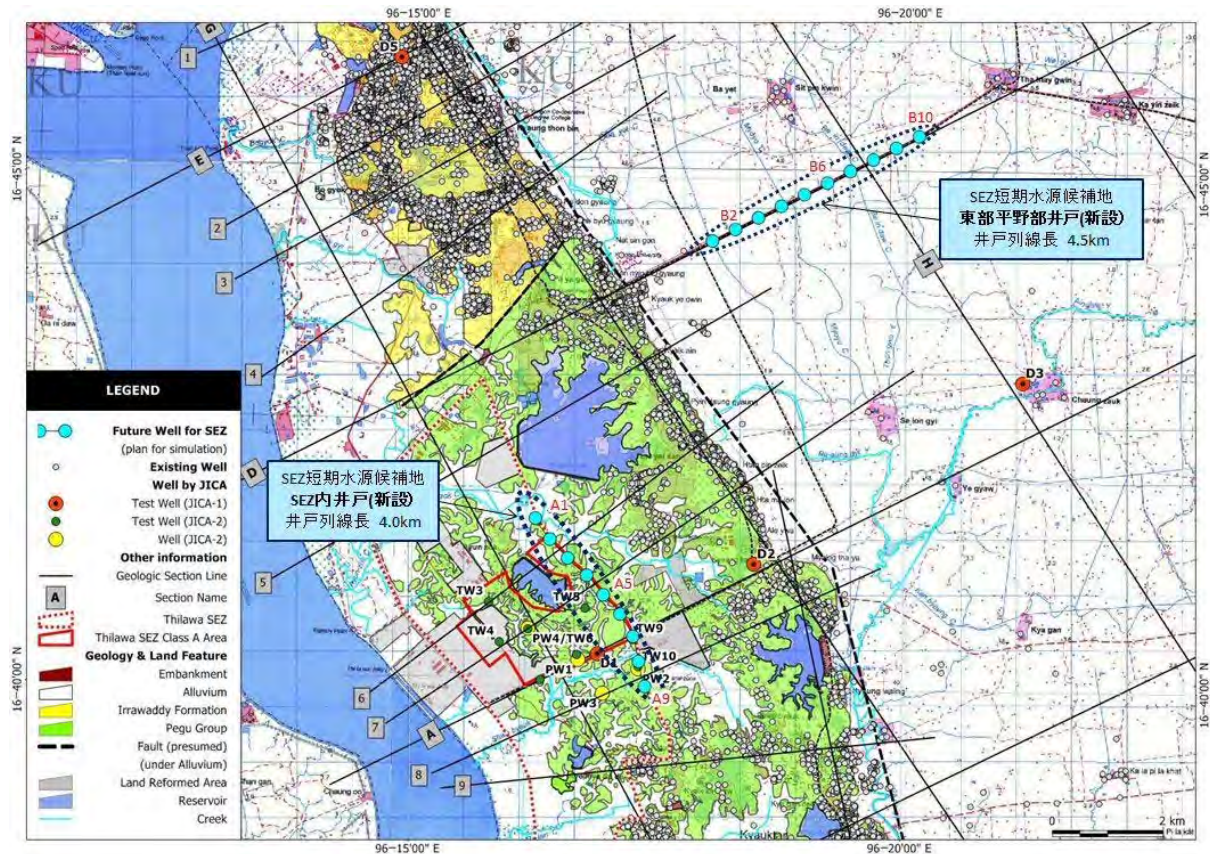


図 3-6-1-1 ティラワ SEZ の短期需要に対する地下水開発候補地

##### 3-6-1-2 使用プログラム

米国地質調査所が三次元地下水流動解析のために開発した“MODFLOW 2000”および“MODPATH”を使用した。プレ・ポスト処理には、米国の Aquaveo 社が販売する GMS (Groundwater Modeling System)を使用した。

#### 3-6-2 三次元モデルの構築

##### 3-6-2-1 モデルの対象

モデルの対象地域を図 3-6-2-1 に示す。周囲の境界の大部分は、河川沿いに設定された。モデルの対象とする帯水層は、図 3-6-2-2 に示すように、表層不圧帯水層と 4 つの被圧帯水層である。

### 3-6-2-2 モデル仕様

#### (1) 帯水層境界面

上述のように、調査結果から 23 箇所の帯水層断面図を作成し、その帯水層境界線をデジタル化して図 3-6-2-3 および図 3-6-2-4 に示す帯水層境界面等高線図を生成した。3 次元の計算メッシュはこれを基に作成された。

#### (2) 計算メッシュ

図 3-6-2-5 から図 3-6-2-7 に作成した 3 次元モデル計算メッシュの平面図、鳥瞰図および断面図を示す。計算セル数は、366,988 である。

#### (3) 水理パラメーター

帯水層の透水係数の初期値は、試験井の揚水試験で得られた比湧出量から計算し与えた。帯水層間の難透水層の透水係数は  $k = 1 \times 10^{-6}$  cm/sec 初期値とした。これらは、モデルの検証のための試算において、水頭出力が観測値に近づくように調整された。最終的にモデルに与えた水理定数を、図 3-6-2-8 よび表 3-6-2-1 に示す。

#### (4) 境界条件

境界条件は、図 3-6-2-10 に示すとおりである。周囲の河川は固定水頭境界とした。調査地域内の主なクリークは、境界への流出のみを許す、いわゆる“ドレーン”境界とした。

#### (5) 既存井戸の揚水量

既存井戸の揚水量は、図 3-6-2-9 に示すように対応するセルに入力した。雨期の揚水量は図 3-4-1-5（前掲）を考慮し、30%小さくした。..

#### (6) 地下水涵養量

上述したタンクモデルにより計算した日地下水涵養高をモデルに与えた。各計算地点の支配域は、図 3-4-2-1 に示す。



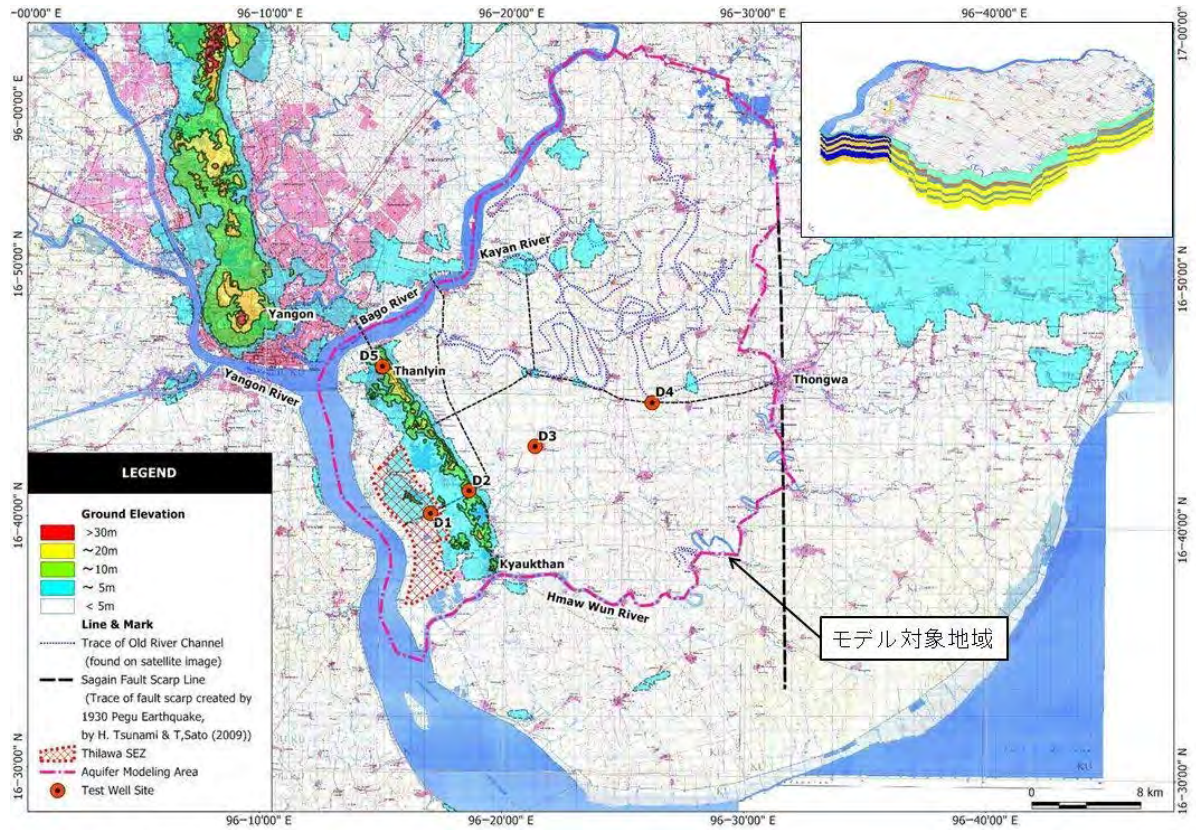


図 3-6-2-1 三次元概念モデルの対象範囲

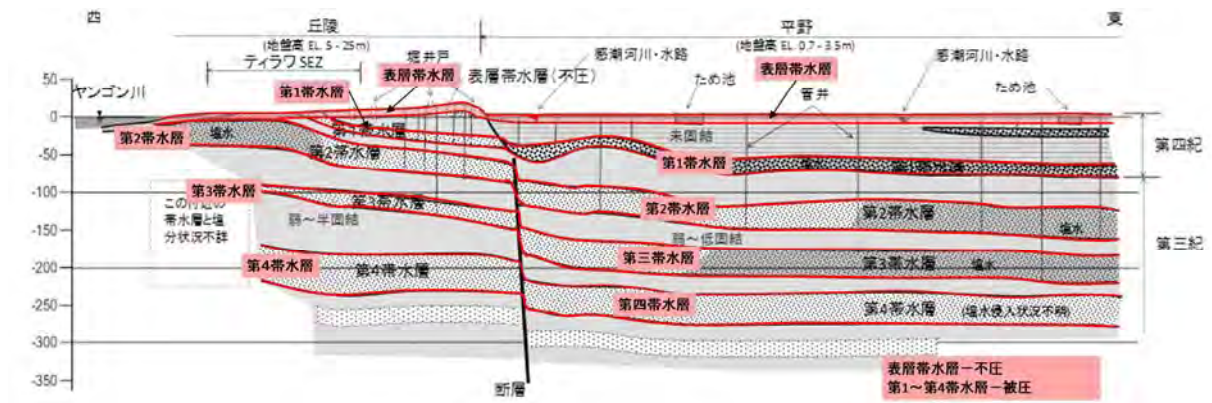


図 3-6-2-2 三次元モデルの対象層



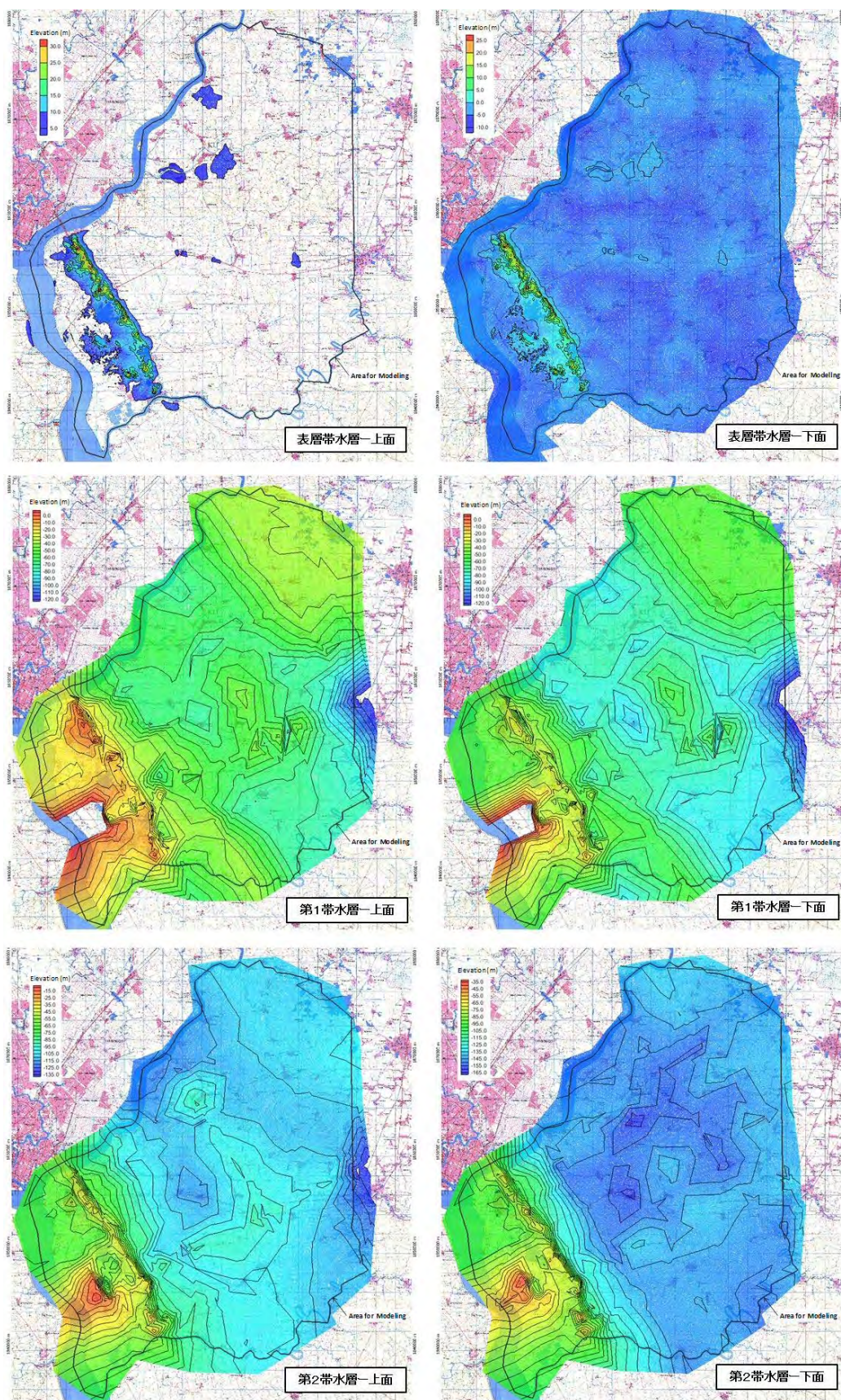


図 3-6-2-3 帯水層境界面等高線図 (1)



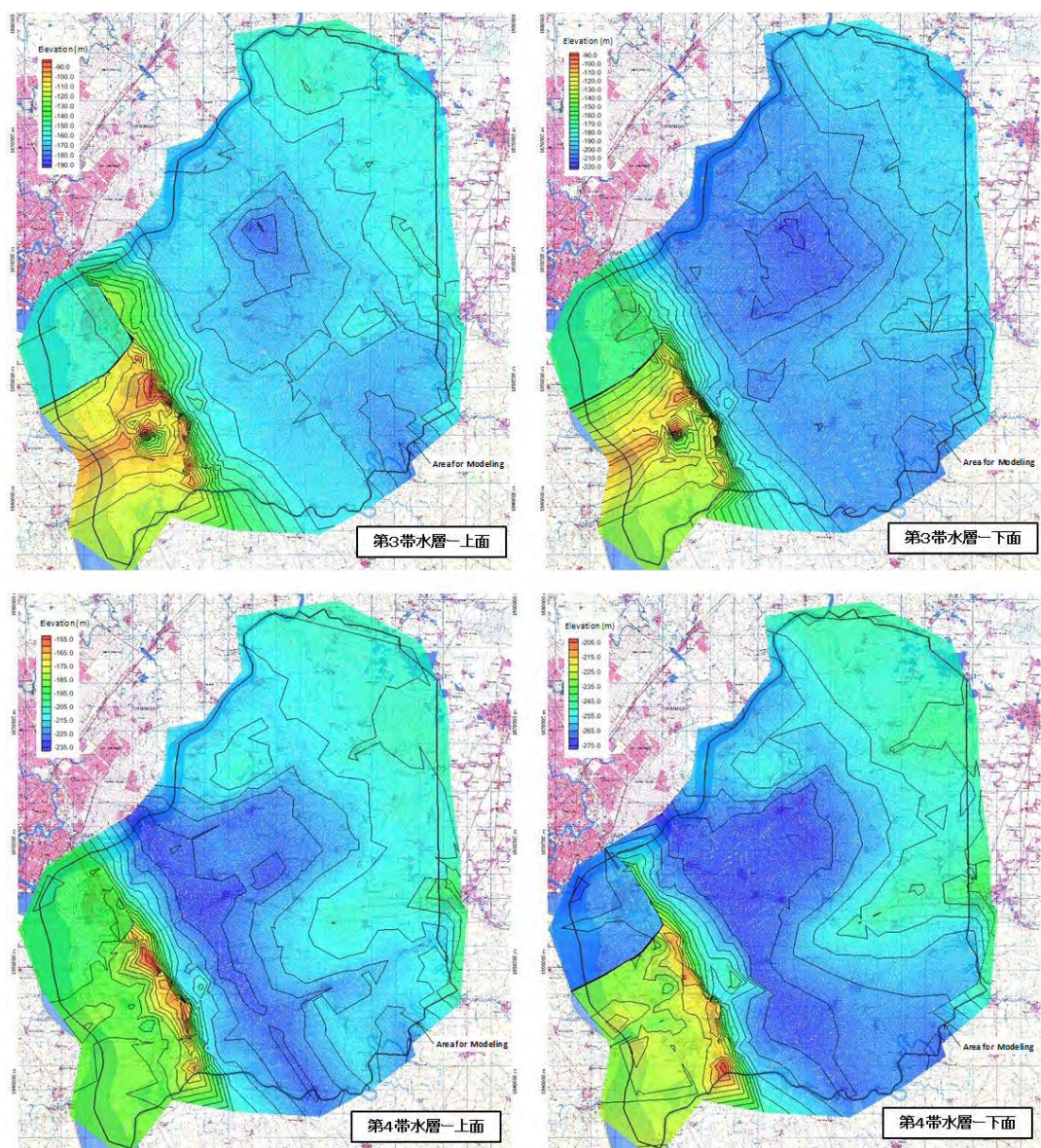


図 3-6-2-4 帯水層境界面等高線図 (2)



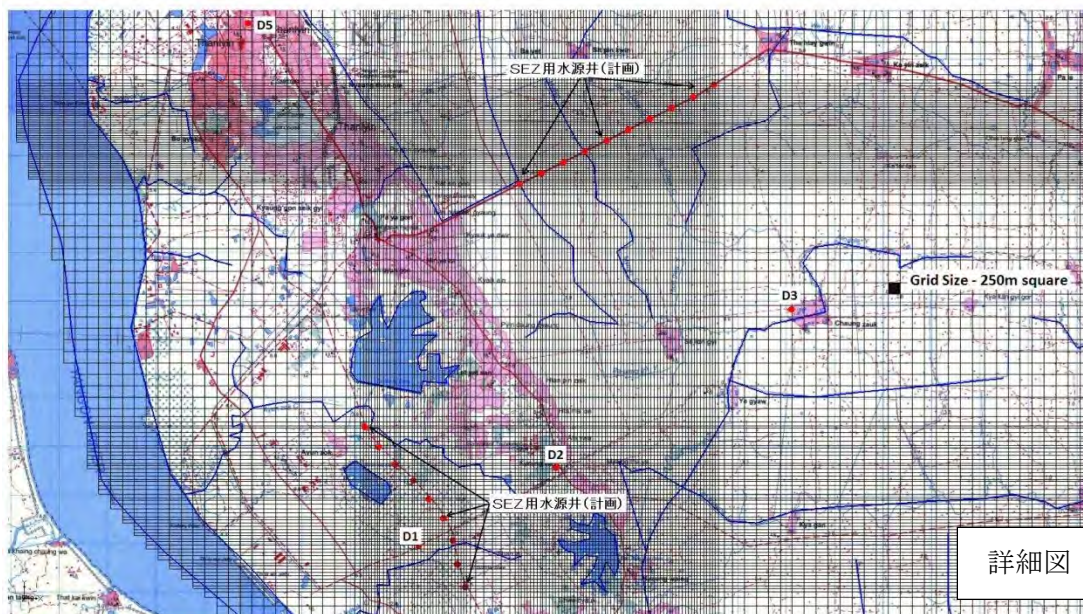
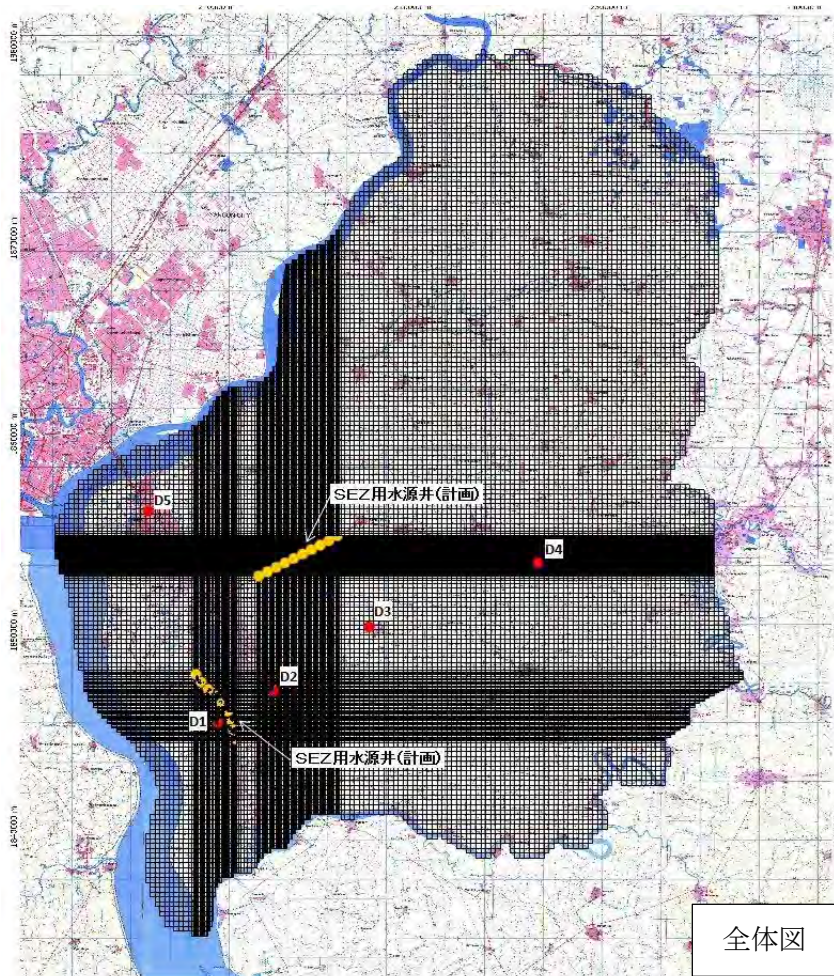
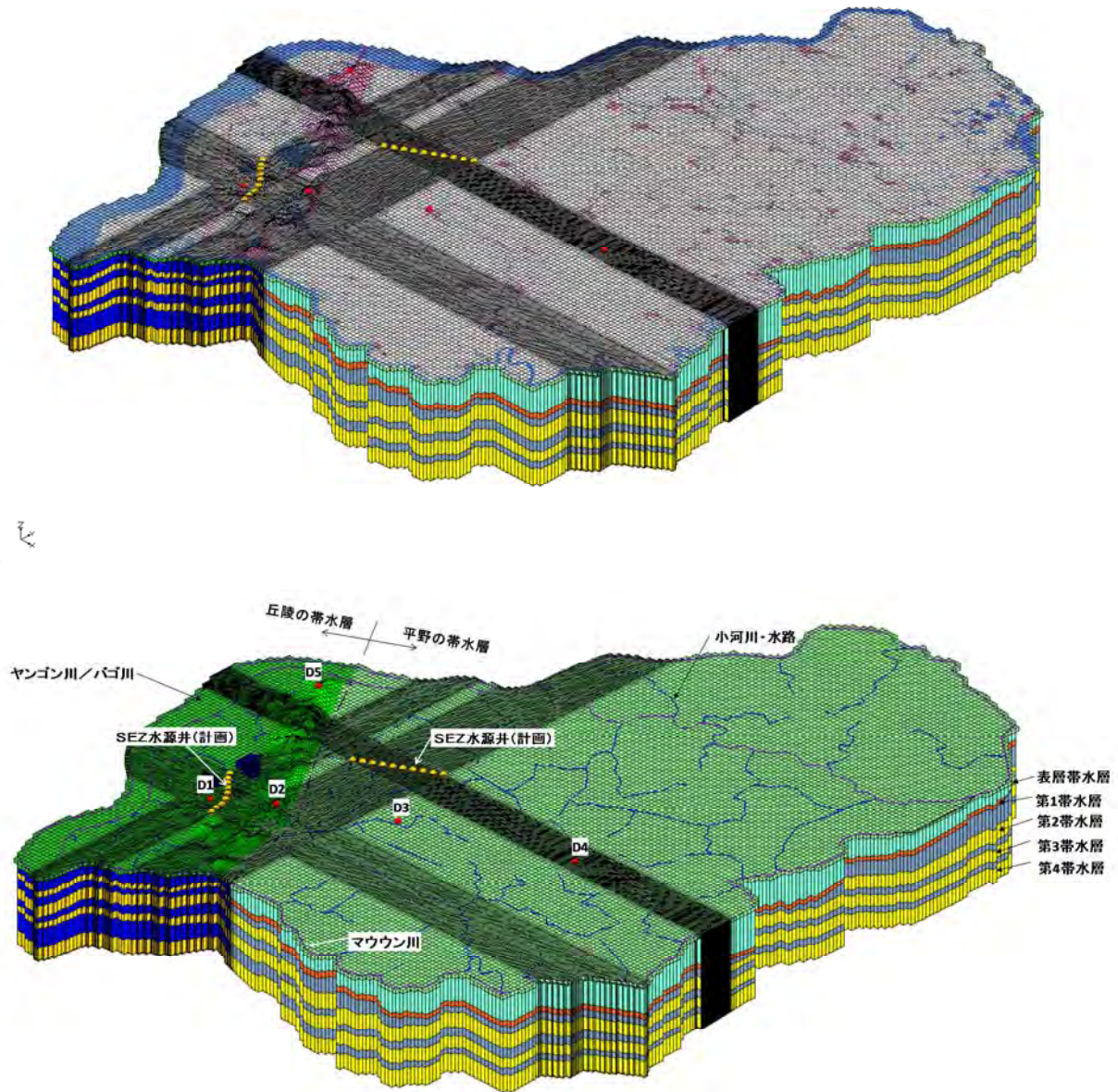


図 3-6-2-5 三次元モデル計算メッシュ平面図

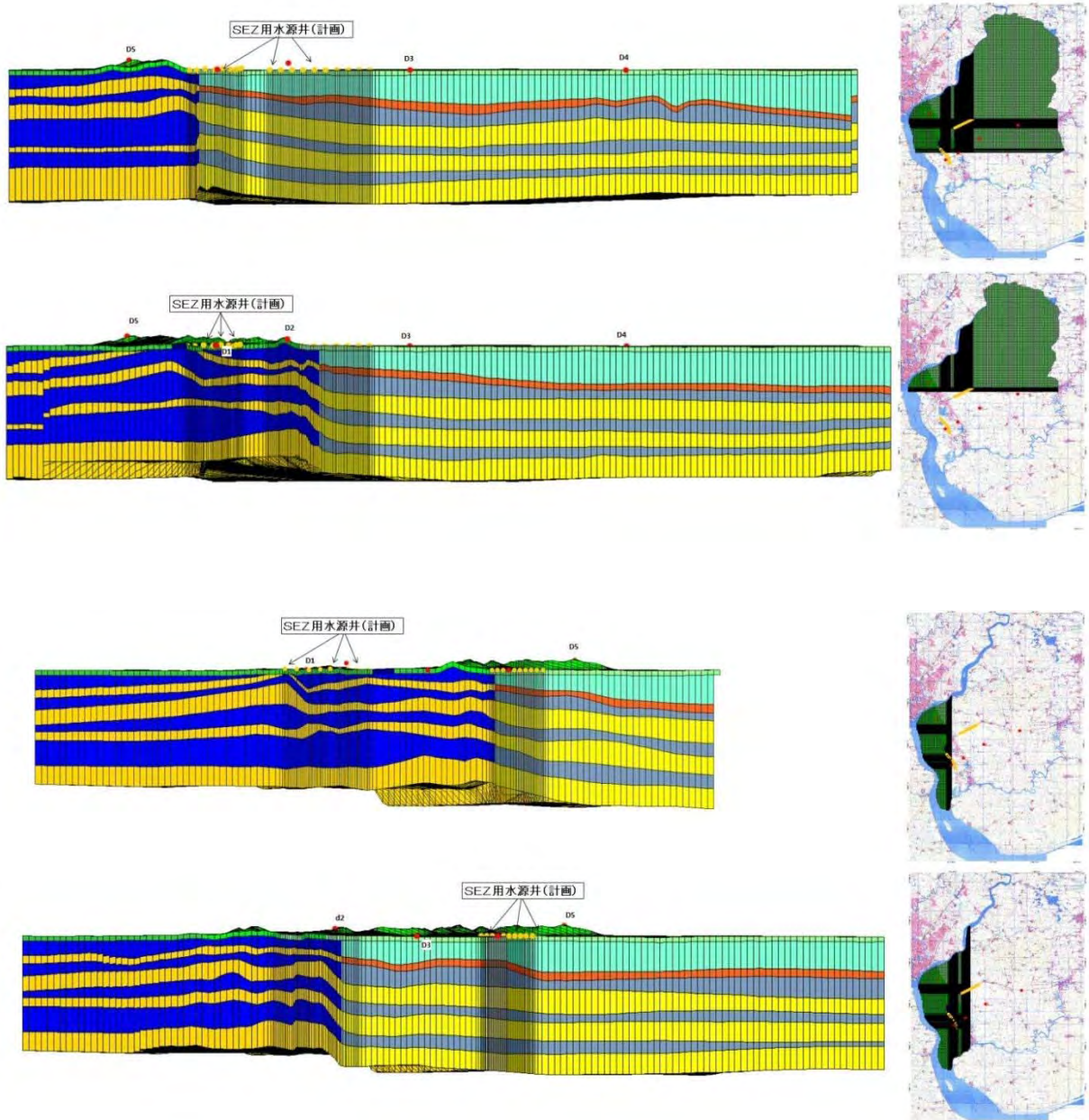




注) 鉛直方向を 20 倍に強調。

図 3-6-2-6 三次元モデル計算メッシュ鳥瞰図





注) 鉛直方向を 20 倍に強調。

図 3-6-2-7 三次元モデル計算メッシュ断面図



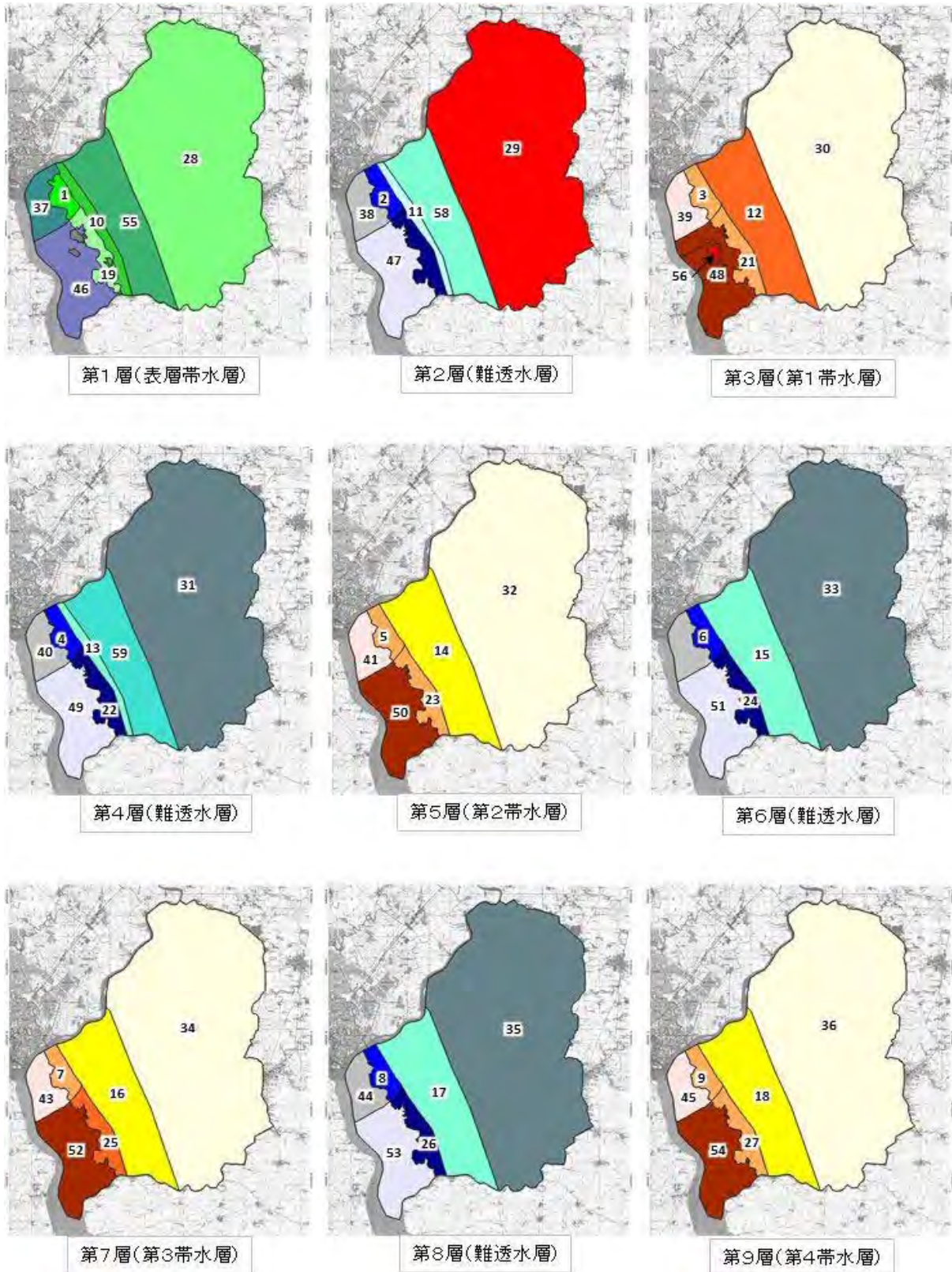


図 3-6-2-8 水理定数設定域区分図

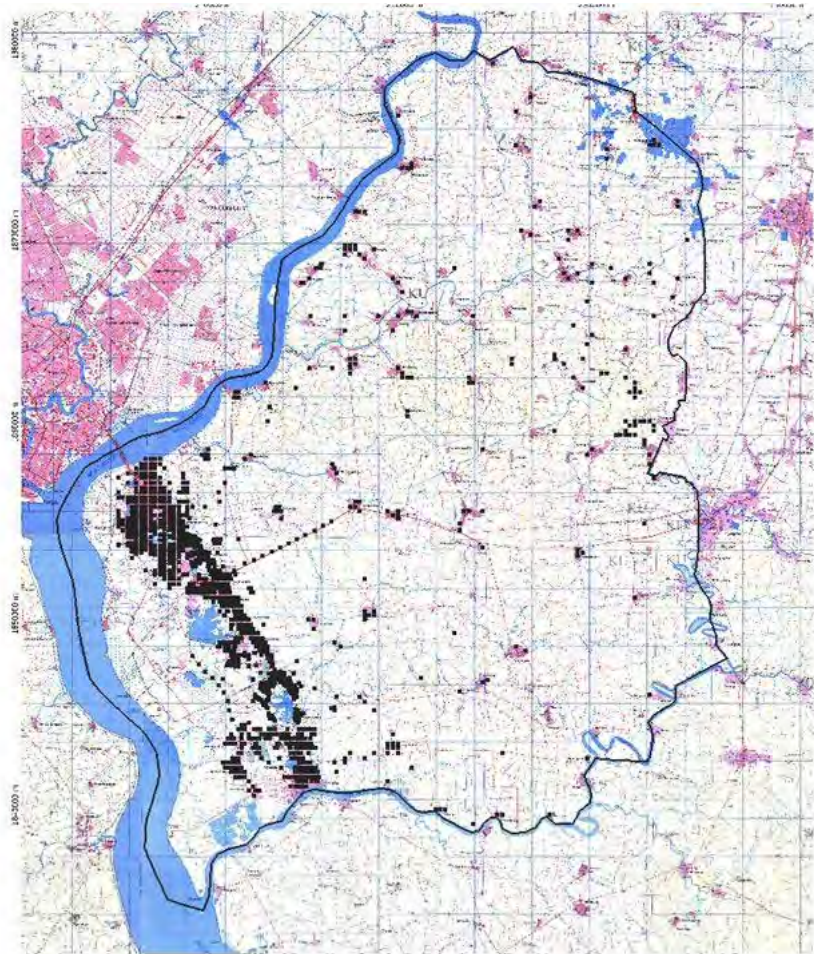


表 3-6-2-1 最終的にモデルに入力した水理定数

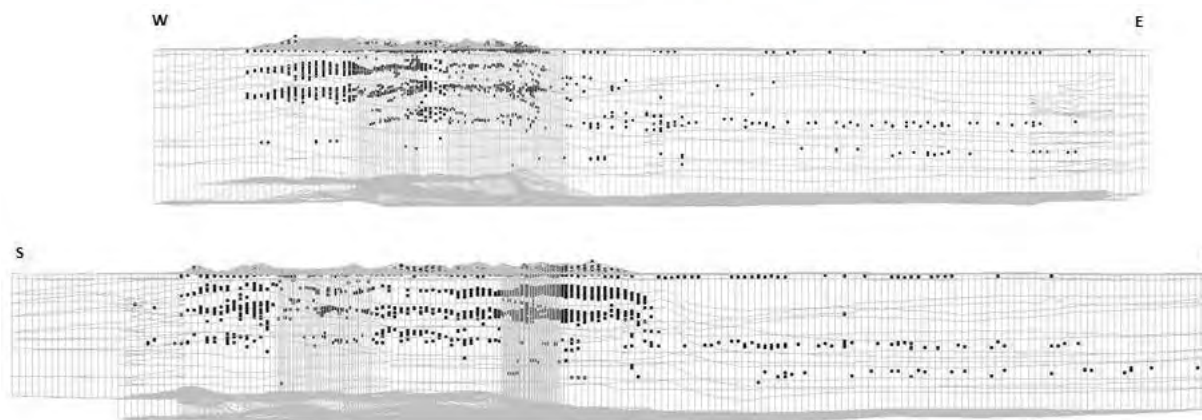
地域	入力データ					参考				地域の帯水層定数のデータ
	材質番号	材質名	透水係数 (m/day)	比貯留率	比産水率	標準的な厚さの帯水層				
						透水係数 (cm/sec)	層厚 (m)	等水量係数 (m <sup>2</sup> /day)	貯留係数	
丘陵北部	1	hill 1n	2.1	-	0.04	2.4E-03	10	21.0	0.04	D5地点揚水試験 Win Nain et al.(1991) による井戸データ
	2	hill 2n	0.012	0.00001	0	1.4E-05	25	-	-	
	3	hill 3n	0.67	0.00001	0	7.8E-04	30	20.1	3.0E-04	
	4	hill 4n	0.0008	3.00E-06	0	9.3E-07	-	-	-	
	5	hill 5n	0.5	3.00E-06	0	5.8E-04	40	20.0	1.2E-04	
	6	hill 6n	0.0006	3.00E-06	0	6.9E-07	-	-	-	
	7	hill 7n	0.05	3.00E-06	0	5.8E-05	10	0.5	3.0E-05	
	8	hill 8n	0.0006	3.00E-06	0	6.9E-07	-	-	-	
	9	hill 9n	0.16	3.00E-06	0	1.9E-04	70	11.2	2.1E-04	
平野西部	10	plain1w	5.2	-	0.03	6.0E-03	10	52.0	0.03	D3地点揚水試験
	55	plain1w2	10.4	-	0.03	1.2E-02	10	104.0	0.03	
	11	plain2w	0.0015	3.00E-06	0	1.7E-06	45	-	-	
	58	plain2w2	0.012	3.00E-06	0	1.4E-05	45	-	-	
	12	plain3w	3.8	3.00E-06	0	4.4E-03	20	76.0	6.0E-05	
	13	plain4w	0.0015	3.00E-06	0	1.7E-06	35	-	-	
	59	plain4w2	0.0005	1.00E-06	0	5.8E-07	35	-	-	
	14	plain5w	0.5	1.00E-06	0	5.8E-04	50	25.0	5.0E-05	
	15	plain6w	0.0015	1.00E-06	0	1.7E-06	15	-	-	
丘陵南部	16	plain7w	2	1.00E-06	0	2.3E-03	40	80.0	4.0E-05	D2地点揚水試験
	17	plain8w	0.0015	1.00E-06	0	1.7E-06	20	-	-	
	18	plain9w	2	1.00E-06	0	2.3E-03	40	80.0	4.0E-05	
	19	hill1s	3	-	0.03	3.5E-03	10	30.0	0.03	
	20	hill 2s	0.005	3.00E-06	0	5.8E-06	30	-	-	
	21	hill 3s	0.1	3.00E-06	0	1.2E-04	10	1.0	3.0E-05	
	22	hill 4s	0.0044	3.00E-06	0	5.1E-06	15	-	-	
	23	hill 5s	0.03	3.00E-06	0	3.5E-05	30	0.9	9.0E-05	
	24	hill 6s	0.0012	3.00E-06	0	1.4E-06	30	-	-	
平野西部	25	hill 7s	0.03	3.00E-06	0	3.5E-05	30	0.9	9.0E-05	D4地点揚水試験
	26	hill 8s	0.00075	3.00E-06	0	8.7E-07	35	-	-	
	27	hill 9s	0.12	3.00E-06	0	1.4E-04	60	7.2	1.8E-04	
	28	plain1e	20.4	-	0.03	2.4E-02	10	204.0	0.03	
	29	plain2e	0.0015	3.00E-06	0	1.7E-06	45	-	-	
	30	plain3e	12	3.00E-06	0	1.4E-02	12.5	150.0	3.8E-05	
	31	plain4e	0.0015	3.00E-06	0	1.7E-06	25	-	-	
	32	plain5e	5.2	3.00E-06	0	6.0E-03	40	208.0	1.2E-04	
	33	plain6e	0.0015	3.00E-06	0	1.7E-06	30	-	-	
丘陵西方低地の北部	34	plain7e	2	3.00E-06	0	2.3E-03	30	60.0	9.0E-05	-
	35	plain8e	0.0015	3.00E-06	0	1.7E-06	10	-	-	
	36	plain9e	2	3.00E-06	0	2.3E-03	40	80.0	1.2E-04	
	37	whill1n	2.6	-	0.03	3.0E-03	10	26.0	0.03	
	38	whill2n	0.0015	0.00001	0	1.7E-06	25	-	-	
	39	whill3n	0.67	0.00001	0	7.8E-04	30	20.1	3.0E-04	
	40	whill4n	0.0006	3.00E-06	0	6.9E-07	-	-	-	
	41	whill5n	0.5	3.00E-06	0	5.8E-04	40	20.0	1.2E-04	
	42	whill6n	0.0006	3.00E-06	0	6.9E-07	-	-	-	
丘陵西方低地の南部	43	whill7n	0.05	3.00E-06	0	5.8E-05	10	0.5	3.0E-05	D1地点揚水試験 他のJICA調査による 4箇所の揚水試験
	44	whill8n	0.0006	3.00E-06	0	6.9E-07	-	-	-	
	45	whill9n	0.16	3.00E-06	0	1.9E-04	70	11.2	2.1E-04	
	46	whill1s	5.2	-	0.03	6.0E-03	10	52.0	0.03	
	47	whill2s	0.0015	0.00001	0	1.7E-06	25	-	-	
	48	whill3s	18	0.00001	0	2.1E-02	8	144.0	8.0E-05	
	56	whill3s2	0.0015	0.00001	0	1.7E-06	8	0.0	8.0E-05	
	49	whill4s	0.0008	3.00E-06	0	9.3E-07	20	-	-	
	50	whill5s	0.63	3.00E-06	0	7.3E-04	30	18.9	9.0E-05	
丘陵西方低地の南部	51	whill6s	0.0015	3.00E-06	0	1.7E-06	15	-	-	
	52	whill7s	0.53	3.00E-06	0	6.1E-04	30	15.9	9.0E-05	
	53	whill8s	0.0015	3.00E-06	0	1.7E-06	60	-	-	
	54	whill9s	1.1	3.00E-06	0	1.3E-03	40	44.0	1.2E-04	

注: 粒子追跡に用いた有効空隙率は、0.03。  
明白行 - 帯水層、陰影行 - 難透水層。





平面図



側面図

- 注) 1.黒点は、それを含む計算セルに既存井戸の揚水量を入力することを示す。  
2.側面図は鉛直方向を20倍に強調。

図 3-6-2-9 地下水利用量の入力セルの分布



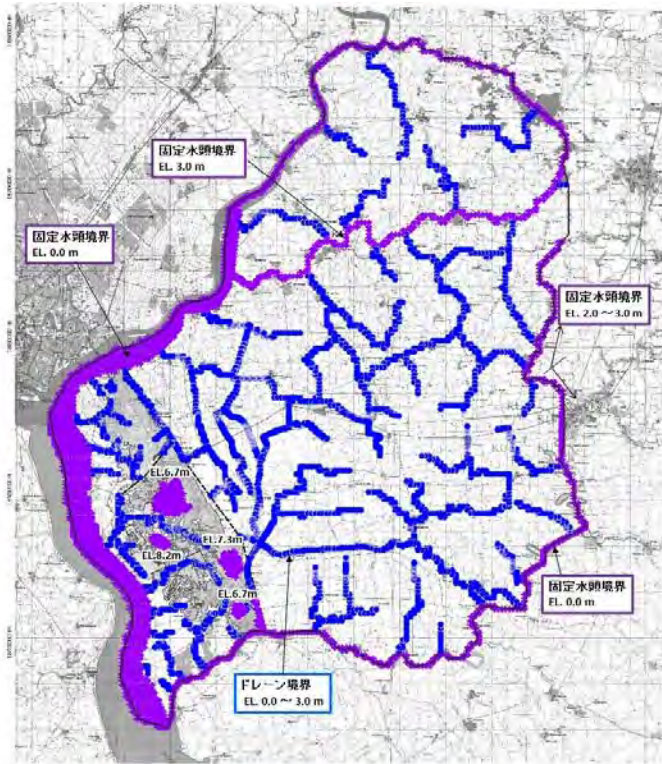


図 3-6-2-10 境界条件

### 3-6-2-3 モデルの検証

モデルの検証は、地下水頭の分布（図 3-2-9-10）と変動（図 3-2-9-10）を対象として実施した。使用したデータは、2014年4月までのものである。

#### (1) 定常および非定常計算による水頭分布の近似再現

モデルの検証においては、まず年間の平均地下水涵養量と取水量を入力して、定常計算を実施し、観測井の平均的な観測水頭をほぼ再現するようにモデルの透水係数を調整した。図 3-6-2-12 および図 3-6-2-13 の水頭グラフの初期値がこの定常計算の結果である。

図 3-6-2-11 は、計算された表層帯水層の水頭等高線を観測結果とともに示したものである。水頭分布は大略再現された。

図 3-6-2-14 は、各帯水層の水頭コンター図である。深い帯水層ほど差の小さい水頭分布となっている。

#### (2) 非定常解析計算による観測地下水等変動の再現

次に、観測井の観測水頭の変動を再現するため、タンクモデルで計算された日地下水涵養量を入力して非定常計算を実施した。図 3-6-2-12 および図 3-6-2-13 に計算および観測水頭を比較して示す。

D1 地点では、観測井間の水頭差や変動状況は大略再現できたが、水頭の絶対値は計算値の方



が約 1m 高い。この評価については以下の点を考慮すべきである。

- 観測水頭は、揚水試験の後約 3 か月間十分に回復していない。
- 観測水頭は潮汐変動の影響を受けている。

D2 地点では、観測井間の水頭差や変動状況はよく再現できた。ただし、おそらく現地の降水パターンがヤンゴンと異なるため水頭のピークの位置が少々異なっている。

D5 地点では、水頭の再現状況は D2 地点とほぼ同様である。ただし、最も深い帯水層の水頭を示す D-5-3 井では、計算水頭が観測値より高い。これは、入力した地下水取水量が実際より小さいためであろう。11 月 20 日における急激な水頭低下はよく再現できた。

D3 および D4 地点では、観測井間の水頭差はよく再現できたが、変動状況は再現できていない。ここでは、すべての観測井の水頭変動状況が同様に見える。深度の帯水層の降雨に対する応答を早めるためには、通常の地下水水理においては小さい貯留係数を与える必要がある。しかし、貯留係数を  $S=0.00005$  のような通常設定し得る最小値としても変動は再現できなかった。このような複数の帯水層のほぼ同時の変動は、おそらく帯水層の弾性変形によるもので、今回のような純粋な地下水水理に基づくモデルでは再現は困難である。

平野や低地では、地下水位が非常に高く、また、小河川、運河、排水溝が縦横に走っているため、浸透した降水は速やかに排水されるはずである。しかしながら、モデル上、このような水路すべてを表現することができず、図 3-6-2-10 に示すように限られた主要な水路のみ組み込まれている。このため、図 3-6-2-15 に示すように、水路間の距離が実際よりもかなり大きくなっており、モデルの表層帯水層の透水係数は、浸透した雨水を早く排水できるように実際よりはかなり大きな透水係数が与えられていると考えられる。

#### モデルの適合度について

モデル出力は、観測水頭のおおよその分布や値および変動を再現できたが、細かなところまでは再現できていない。全体として、モデルの適合度は、“良くも悪くもない”、程度である。今回のモデル構築には多大な労力を要したが、限られた、また、偏った量と質のデータから作成されたものであり、出来上がったモデルは、当地帯水層の第一近似のものと考えられるべきである。したがって、その予測出力については、現実と多少とも差異があることを覚悟しなければならない。



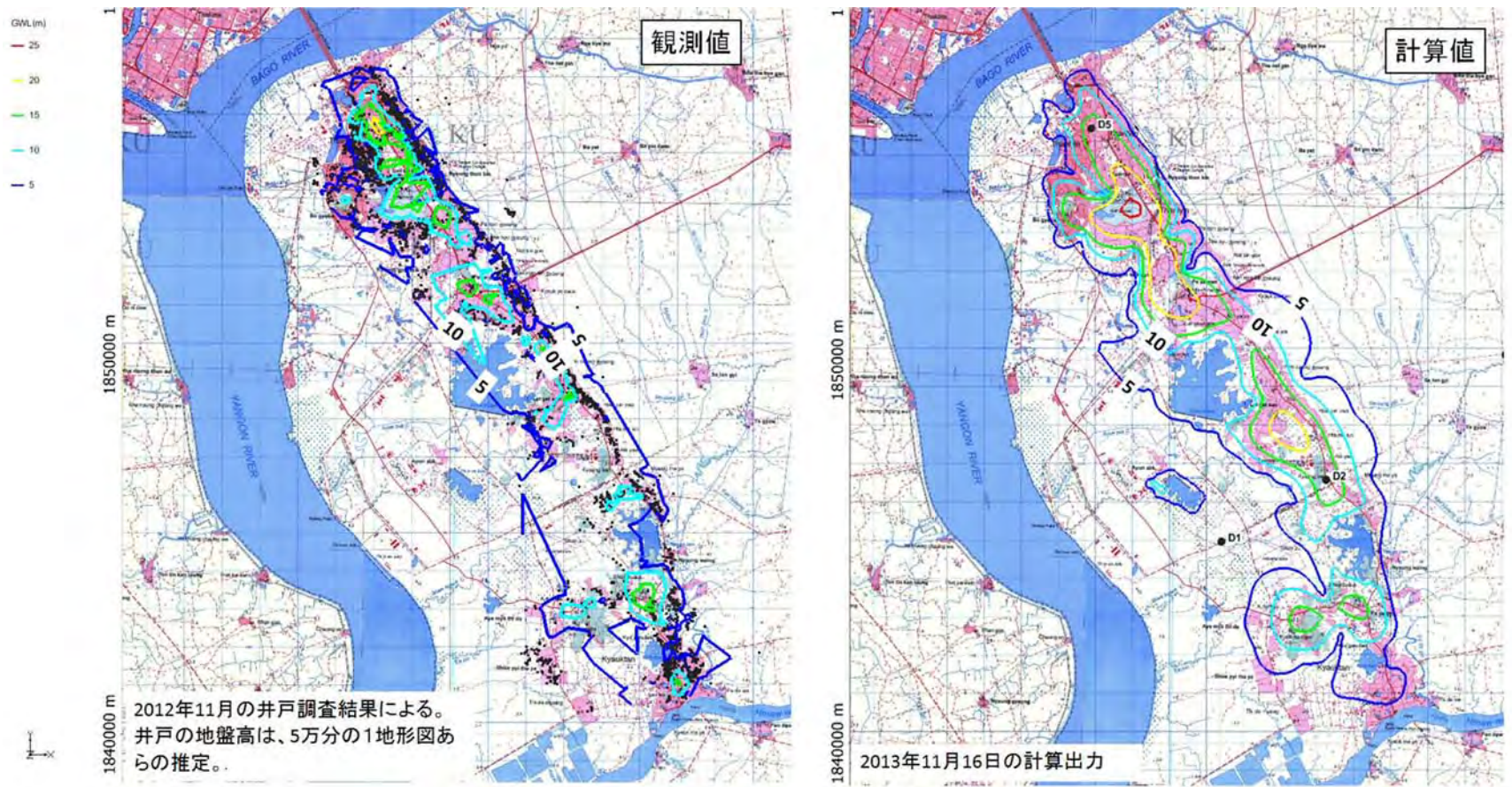


図 3-6-2-11 表層不圧帯水層地下水位分布の計算出力と観測値の比較



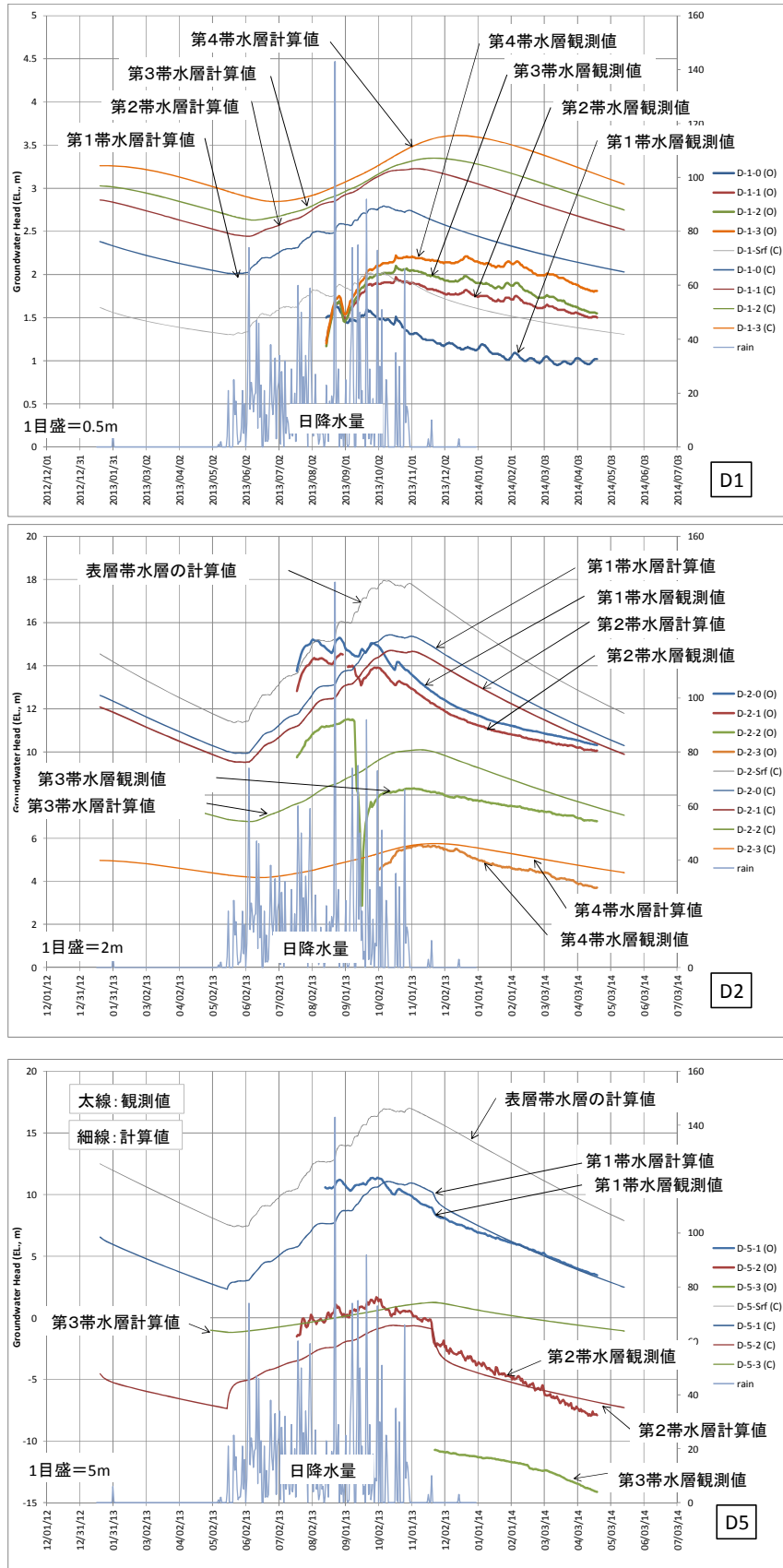


図 3-6-2-12 観測地点における地下水頭変動の計算出力と観測値の比較 (D1、D2 及び D5 地点)

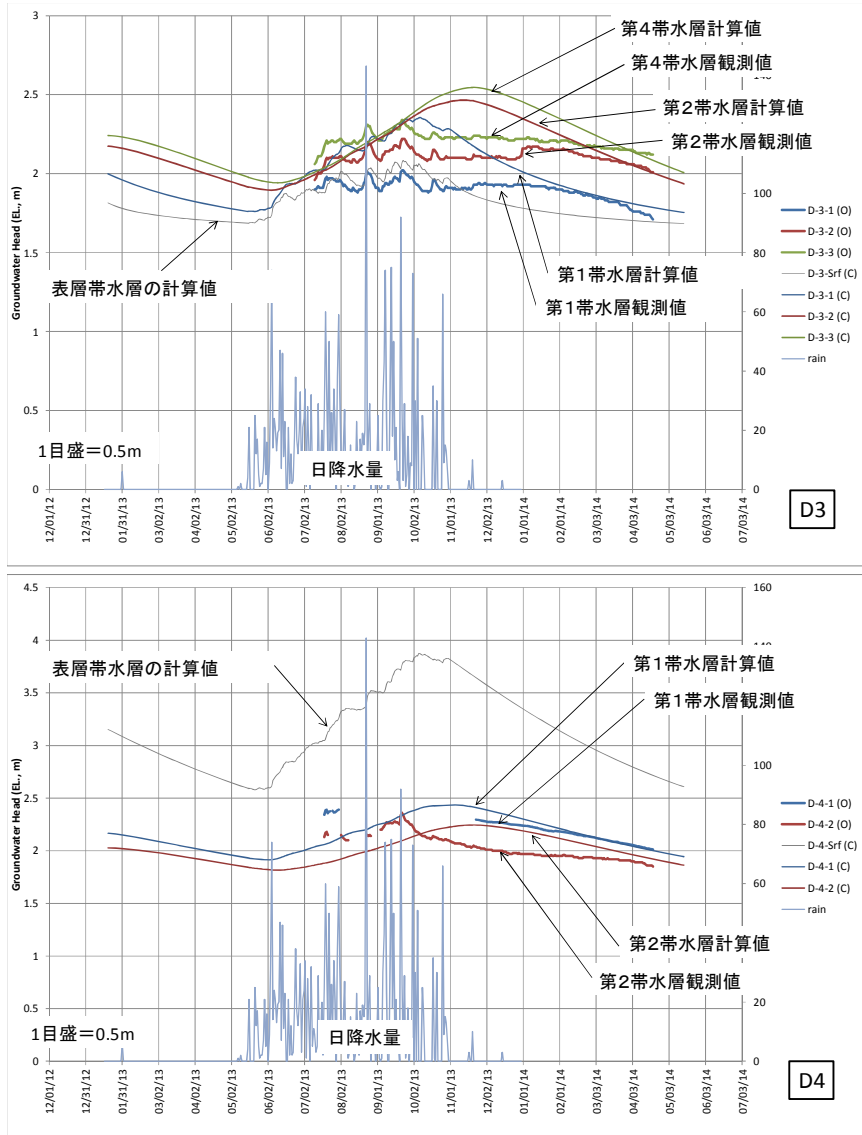


図 3-6-2-13 観測地点における地下水頭変動の計算出力と観測値の比較 (D3 及び D4 地点)



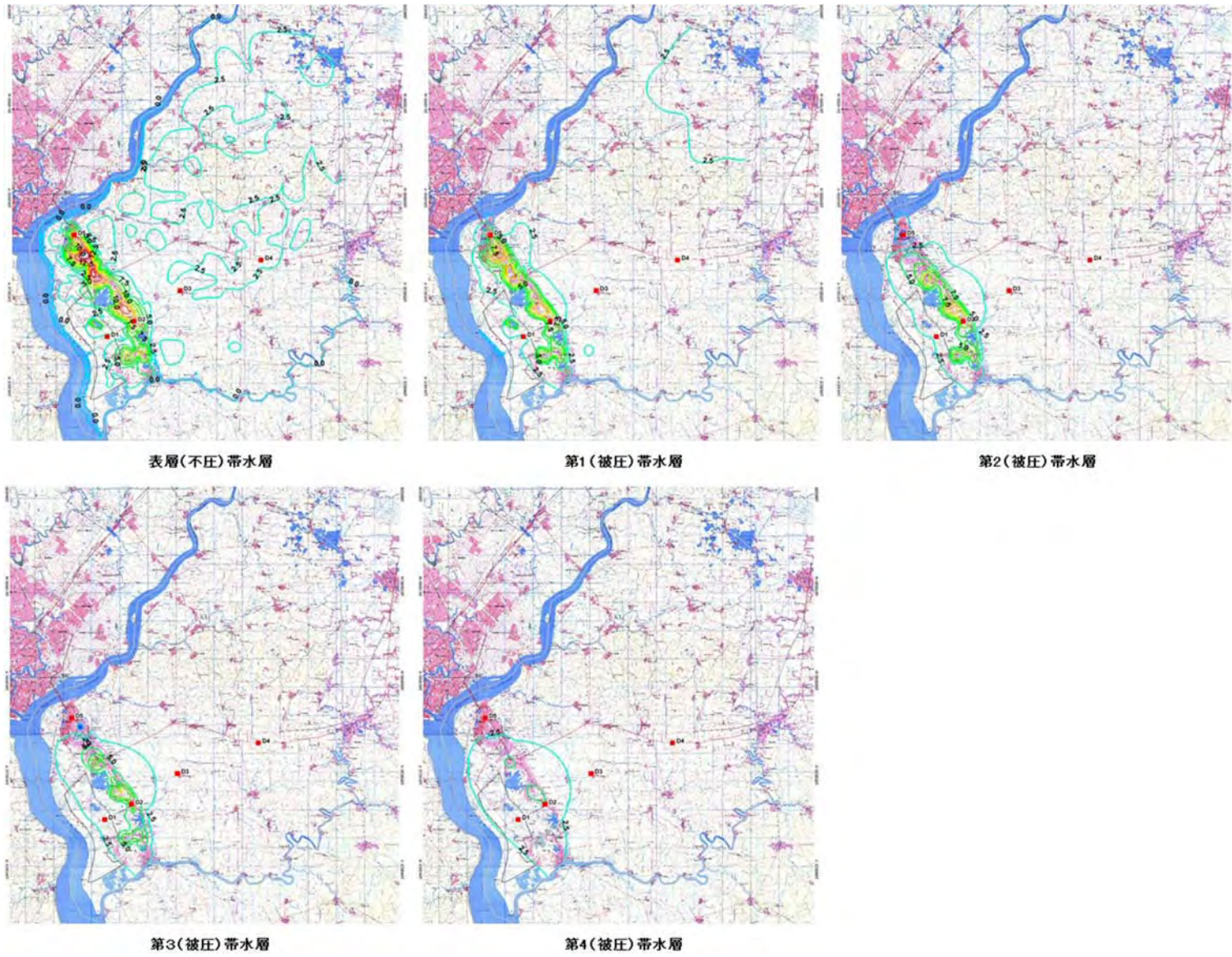


図 3-6-2-14 帯水層毎の地下水等等高線 (定常計算結果)



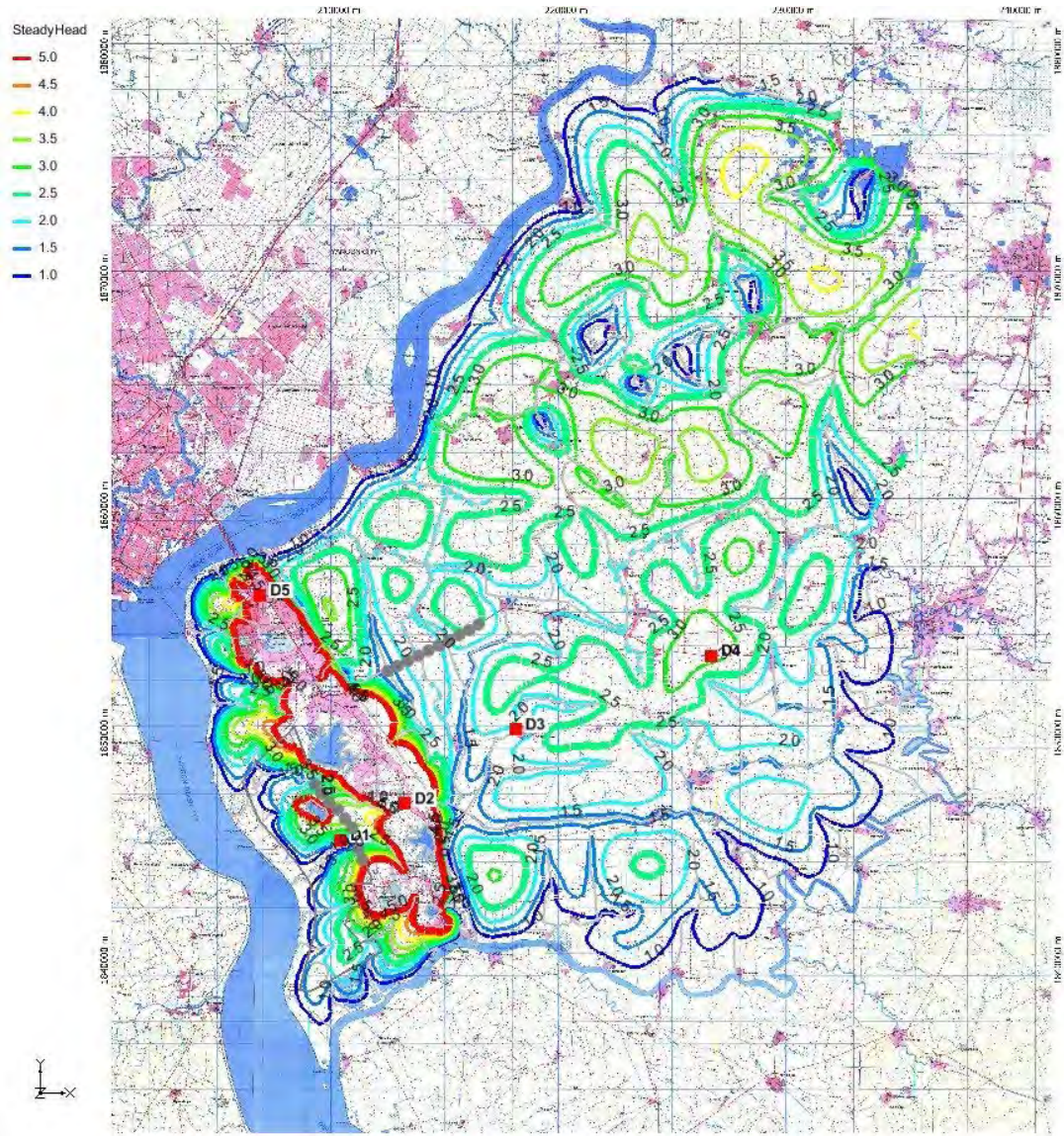


図 3-6-2-15 代表的な平野部表層帯水層の水頭分布

### 3-6-3 地下水開発の予測検討

#### 3-6-3-1 地下水開発案

##### (1) SEZ 内における開発

###### 1) 基本検討ケース

図 3-6-3-1 に SEZ 内で地下水取水を仮定した井戸の位置を示す。500m 間隔の 9 本の井戸からなる井戸列を、SEZ の東側境界沿いに設定した。この位置は、塩水フロントと井戸分布域の西限とのほぼ中間に位置する。取水は、4 つの被圧帯水層を対象とした。



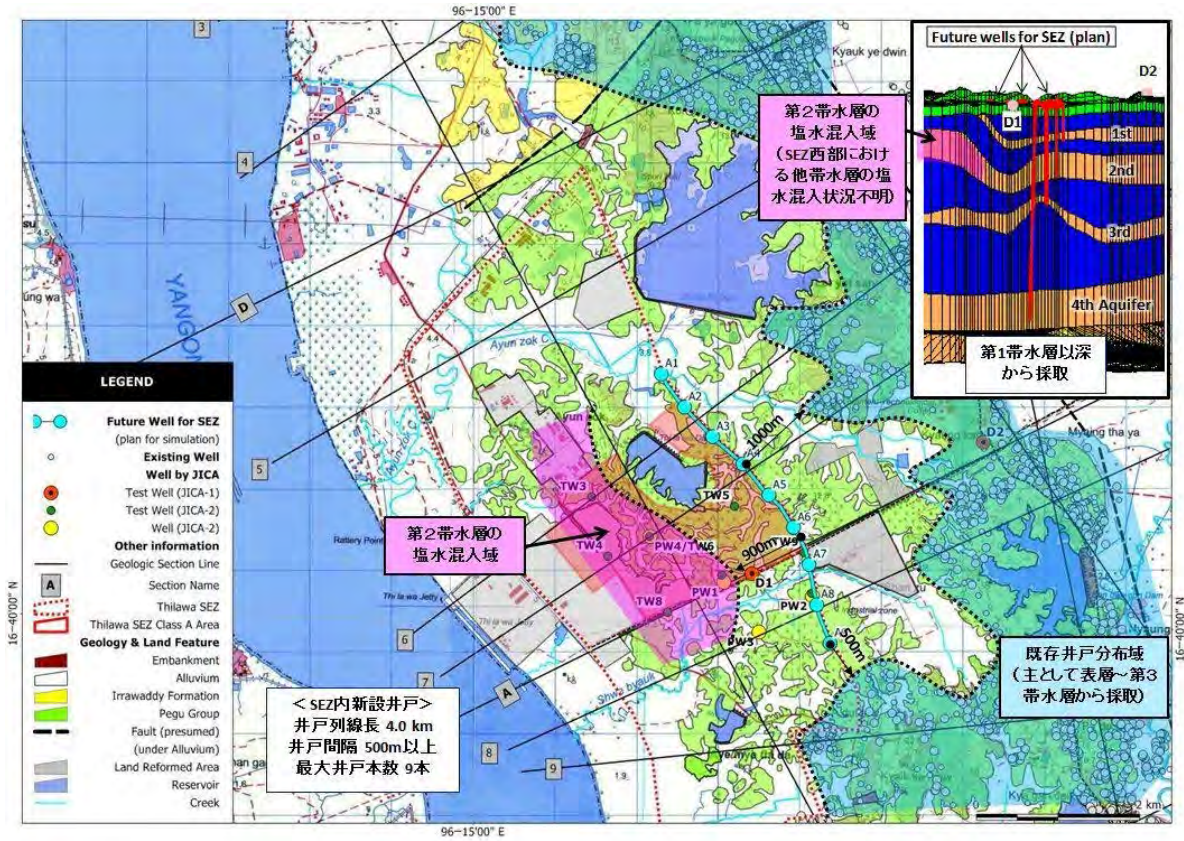


図 3-6-3-1 SEZ 内における地下水取水計画平面図 (基本検討)

2) 詳細検討ケース

基本検討ケースの予測計算の後、図 3-6-3-2 に示す優先開発地域内の 2 または 3 か所で、二つの帯水層から合計 1,200 m<sup>3</sup>/日 を取水する詳細検討ケースについて、計算を実施した。

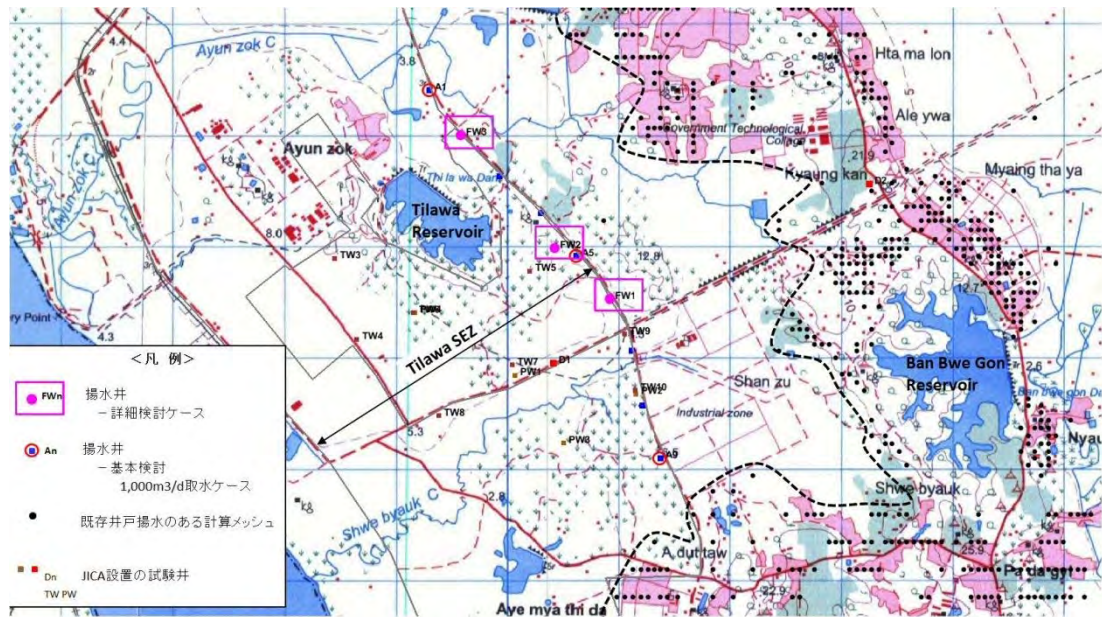


図 3-6-3-2 SEZ 内における地下水取水計画平面図 (詳細検討)



(2) 東方平野における地下水開発

図 3-6-3-3 に東方平野で地下水取水を仮定した井戸の位置を示す。500m 間隔の 10 本の井戸からなる井戸列を主要道路沿いに設定した。この道路は SEZ への導水路設置が容易であり、また井戸列付近には既存井戸が分布しない。帯水層の中で最も淡水域が広いと推定される第 2 帯水層を取水対象とした。

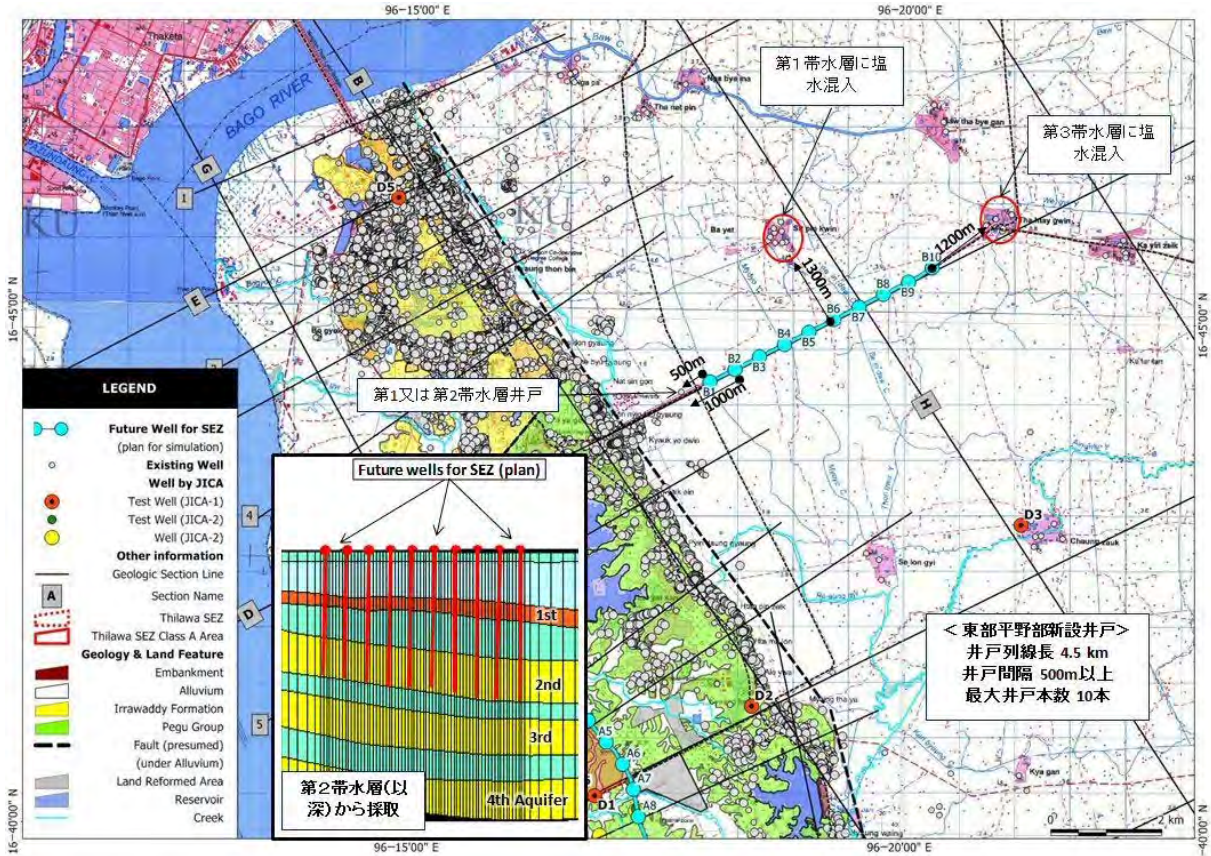


図 3-6-3-3 東方平野における地下水取水計画平面図

3-6-3-2 検討ケース

表 3-6-3-1 に基本検討ケースを示す。対象帯水層から、1,000、1,666 及び 3,000<sup>3</sup>/日を 1 年間ないしは半年（乾期）取水するケースを主とする。

表 3-6-3-2 に SEZ の優先開発区域内の 2 箇所ないしは 3 箇所です 2 つの帯水層から総量 1,200<sup>3</sup>/日を揚水する詳細検討のケースを示す。

注) 計算は、1 ケース (485 日、293 時間ステップ) 当り約 9 分を要した。P C は、CPU インテル・コア i7 2.7GHz,, メインメモリー 8.0GB、SSD 外部記憶搭載のものを使用した。1 ケース当りの生成出力ファイルの大きさは 7.3GB であった。



表 3-6-3-1 検討ケース（基本検討）

取水地区	取水対象層	総取水量 (m <sup>3</sup> /日)	期間	稼動井戸 本数	取水点	1井戸当り取水量 (m <sup>3</sup> /日)	塩水フロント の移動予測	ケース 名
SEZ内	第1被圧帯水層	1,000	通年	3	A1, A5, A9	333	*1	BS1
		1,666	乾期(半年)	5	A1,A3,A5,A7,A9		*1	BS2
		1,666	通年				*1	BS3
		3,000	乾期(半年)	9	A1~A9		*1	BS4
		3,000	通年				○	BS5
	1,000	通年	3	A1, A5, A9	○		BS6	
	第2被圧帯水層	1,666	乾期(半年)	5	A1,A3,A5,A7,A9		*2	BS7
		1,666	通年				*2	BS8
		3,000	乾期(半年)	9	A1~A9		*2	BS9
		3,000	通年				*2	BS10
	第3被圧帯水層	1,000	通年	3	A1, A5, A9		*3	BS11
		1,666	通年	5	A1,A3,A5,A7,A9		*3	BS12
		3,000	通年	9	A1~A9		*3	BS13
	第4被圧帯水層	1,000	通年	3	A1, A5, A9		*3	BS14
		1,666	通年	5	A1,A3,A5,A7,A9		*3	BS15
		3,000	通年	9	A1~A9		*3	BS16
	第2、第3、第4 帯水層	3000 (各層1,000)	通年	9 (各層3)	A1~A9		*4	BS17
東方平野 第2被圧帯水層		1,000	通年	3	B2, B6, B10	*5	BE1	
	1,666	通年	5	B2,B4,B8,B10	*5	BE2		
	3,000	通年	9	B2~B10	○	BE3		

注) \*1 移動速度は、3,000m<sup>3</sup>/日の移動予測結果から類推可能。

\*2 移動送速度は、1,000m<sup>3</sup>/日の移動予測結果から類推可能。

\*3 塩水侵入は確認されていない。

\*4 他の環境影響が大きく、明らかに許容できないケースなため予測の必要なし。

\*5 移送速度は、3,000m<sup>3</sup>/日の移動予測結果から類推可能。

表 3-6-3-2 検討ケース（詳細検討）

取水地点	取水対象層		稼動井戸 本数	1井戸当り取水量 (m <sup>3</sup> /日)	総取水量 (m <sup>3</sup> /日)	塩水フロント の移動予測	ケース名
	上層	下層					
FW1, FW2	第1被圧帯水層	第2被圧帯水層	4 (各帯水層 2)	300	1,200	○	DA1
		第3被圧帯水層				*1	DA2
		第4被圧帯水層				*1	DA3
		第2被圧帯水層				○	DA4
	第3被圧帯水層	*1				DA5	
	第4被圧帯水層	*2				DA6	
FW1, FW2, FW3	第1被圧帯水層	第2被圧帯水層	6 (各帯水層 3)	200	1,200	*3	DB1
		第3被圧帯水層				*3	DB2
		第4被圧帯水層				*3	DB3
	第2被圧帯水層	第3被圧帯水層				*3	DB4
		第4被圧帯水層				*3	DB5
		第3被圧帯水層				第4被圧帯水層	*3

注) \*1 移動速度は、上のケースの移動予測結果から類推可能。

\*2 両層に塩水侵入は確認されていない。

\*3 移動送速度は、2地点取水の場合より小さく、その結果から類推可能。

### 3-6-3-3 環境影響の評価基準

地下水環境影響を評価するため、モデル出力を図 3-6-3-4 に示す基準を用いて評価した。

一般的に開発によって塩水侵入を助長すべきでない。しかし、ティラワ SEZ 開発の重要性および SEZ での地下水利用の期間および水量が限定的であることを考慮し、帯水層や既存井戸の地下水利用に有意な被害を与えない範囲において、塩水侵入の誘引を許容するものとした。

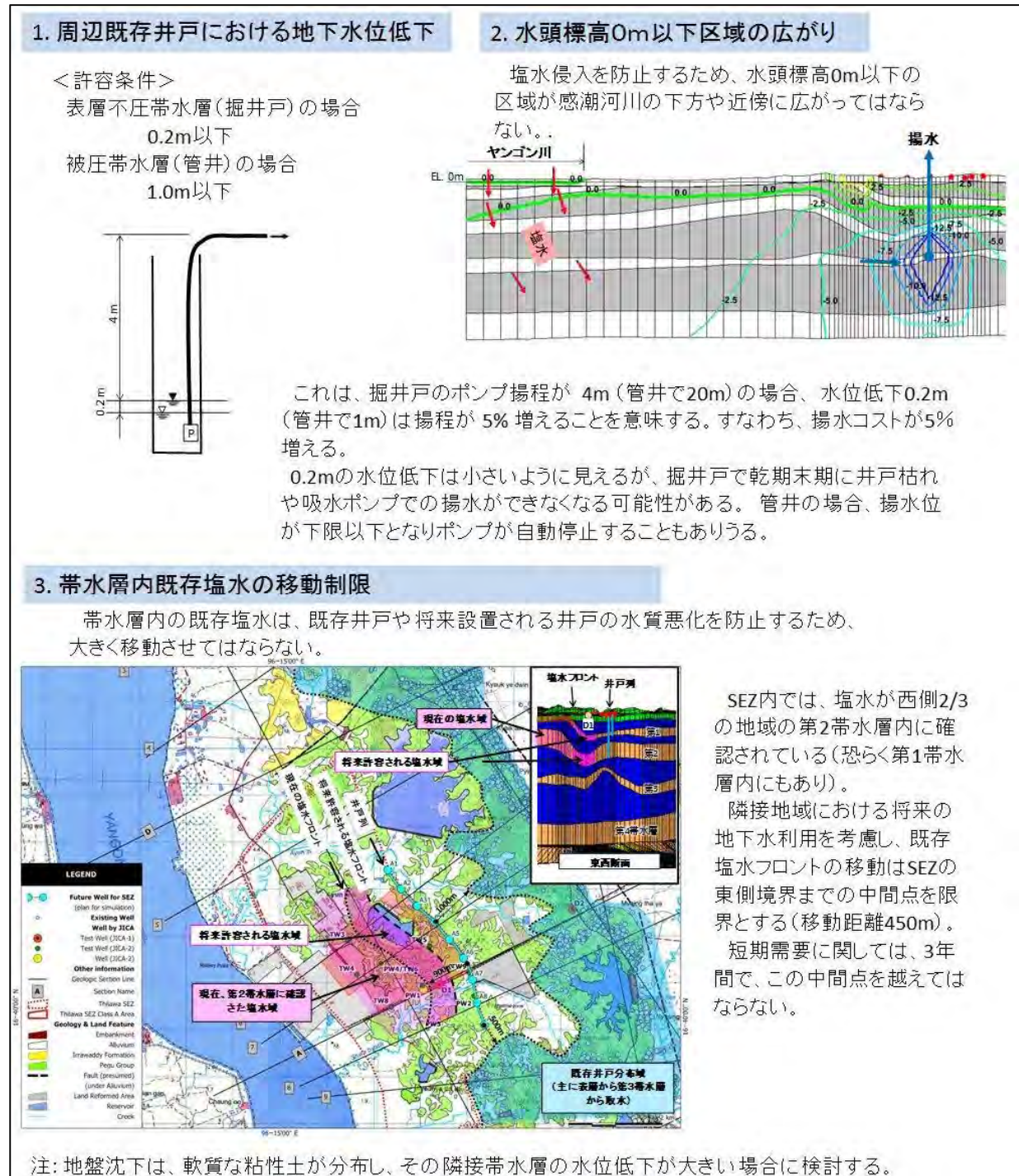


図 3-6-3-4 地下水環境影響の評価基準



なお、図 3-6-3-5 に 2014 年の乾季末期（4 月末）に丘陵全域で実施した掘井戸の地下水位調査結果を示す。井戸内の水深は、49 井中、55%の 27 井で 1m 以下、29%の 14 井で 0.5m 以下であり、乾期末期には水深に余裕のない井戸が多い。今回許容基準として設定した 0.2m の水位低下は、多くの井戸に井戸枯れや吸水ポンプの揚水障害を与えない妥当な値と考えられる。

また、図 3-2-9-2（前掲）に示したように揚水強度の高いタンリン地区の観測井（D-5-2）には、周辺の多数の井戸の影響を受けて、雨期で約 1m、乾期で約 1.3m の日変動が生じている。このように、既存井戸の揚水に伴い 1m 程度の恒常的影響が現実に現れている状況で地下水利用がなされていることから、管井に設定した 1m の許容基準も無理のない値と考えられる。

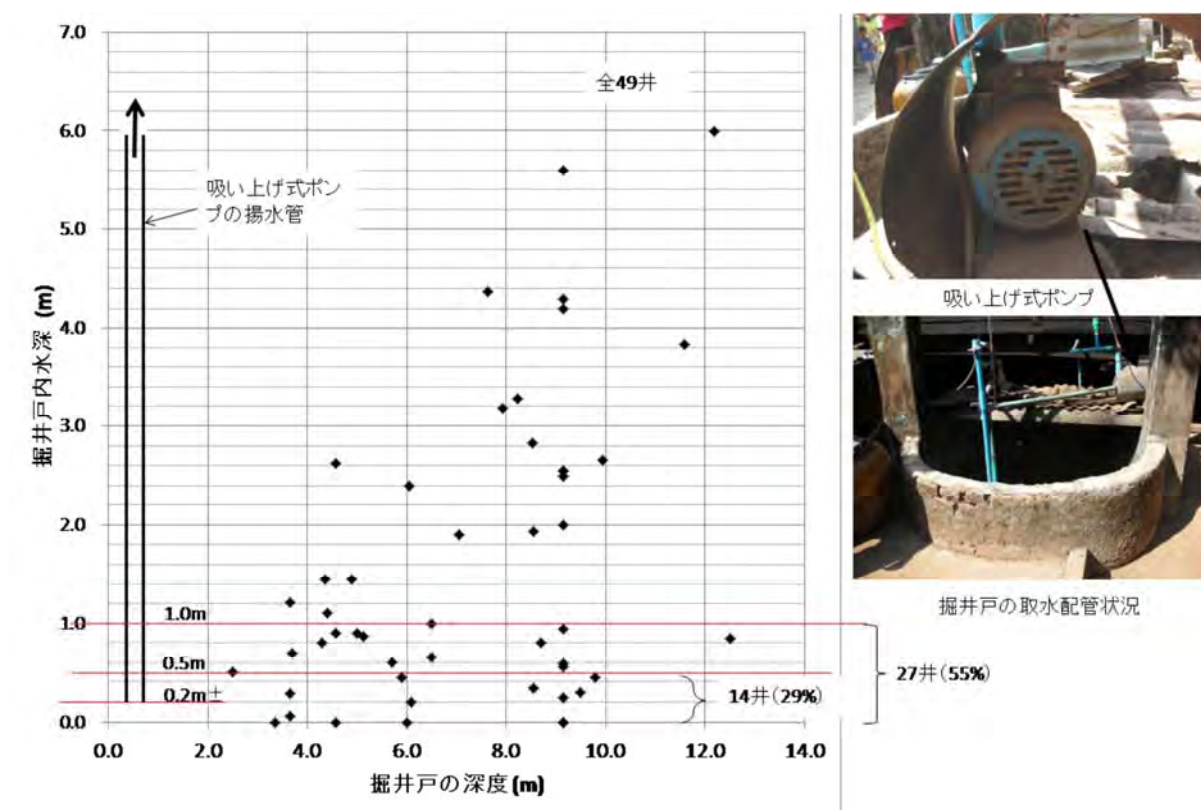


図 3-6-3-5 2014 年乾期末期の掘井戸の井内水深

### 3-6-3-4 予測された環境影響と地下水開発可能性

#### (1) 基本検討ケースのモデル出力例

##### 1) 通年取水ケース

図 3-6-3-6 は、取水地点にける水頭と水頭低下のモデル出力例である。水頭低下は、降水とは無関係に時とともに大きくなる。図 3-6-3-7 および図 3-6-3-8 は、異なる取水量的場合の水頭低下と水頭のモデル出力例である。図 3-6-3-9 ～図 3-6-3-11 は、塩水に移動速度を推定するための粒子追跡計算結果の例である。図 3-6-3-12 および図 3-6-3-13 は、最も良好と考えられるケース（BS6; 1,000 m<sup>3</sup>/日 を第 2 帯水層から取水；“6-3-5 予測された環境影響と開発可能性”を参照）の水頭低下と水頭標高のモデル出力である。南方の既存井戸では東方よりも少々大きい水位低下が生じるが、これは最も南の取水井の位置を 500m 程度北側に移動すれば、東方の水位低下をさほど大きくすることはないので問題ない。

##### 2) 通年取水と半年取水による水位低下の比較

図 3-6-3-14 および図 3-6-3-15 に示すように、取水を 1 年間および半年間行ったときの水位低下量の差異は小さい。半年間取水の場合は水位低下の影響を与える期間が 1 年間取水の場合より短い、水位低下の大きさは大差ない。このため、1,000 m<sup>3</sup>/日で 1 年間取水した場合の水位低下のほうが、1,666 m<sup>3</sup>/日で半年間取水した場合より周辺の水位低下量が小さい。もし半年間取水したのち半年間休止した場合、水頭はほぼ回復するが若干の水位低下が残留し（図 3-6-3-14 上図）、複数年にわたり半年取水すると水頭が累積する。

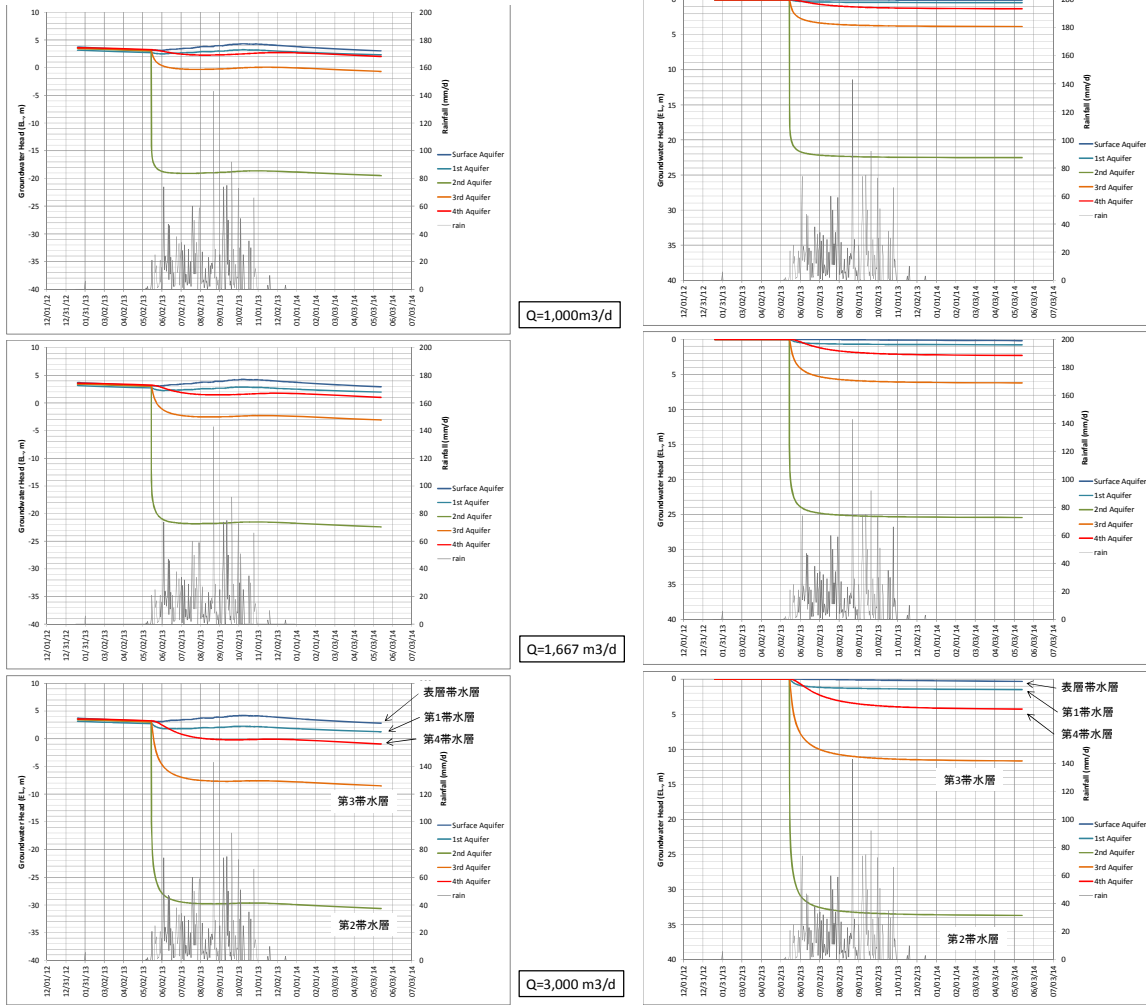
#### (2) 詳細検討ケースのモデル出力例

図 3-6-3-16 は、詳細検討ケース DA1 および DB1 の水頭低下と水頭の分布を示す。3 箇所取水する DB1 のケースは、2 箇所取水する DA1 のケースよりも、既存井戸の分布する東方や南方の地域における水頭低下が小さい。

#### (3) 取水後の水頭回復

1 年間取水後に取水をやめた場合は、図 3-6-3-17 に示すように水頭は 3 ヶ月～6 ヶ月でほぼ回復する。





水頭

水頭低下

注) 第2帯水層から取水した場合 (Case BS6、BS8 および BS10) の A5 地点 (中央の取水井) の出力。

図 3-6-3-6 取水地点における水頭と水頭低下の変化のモデル出力例

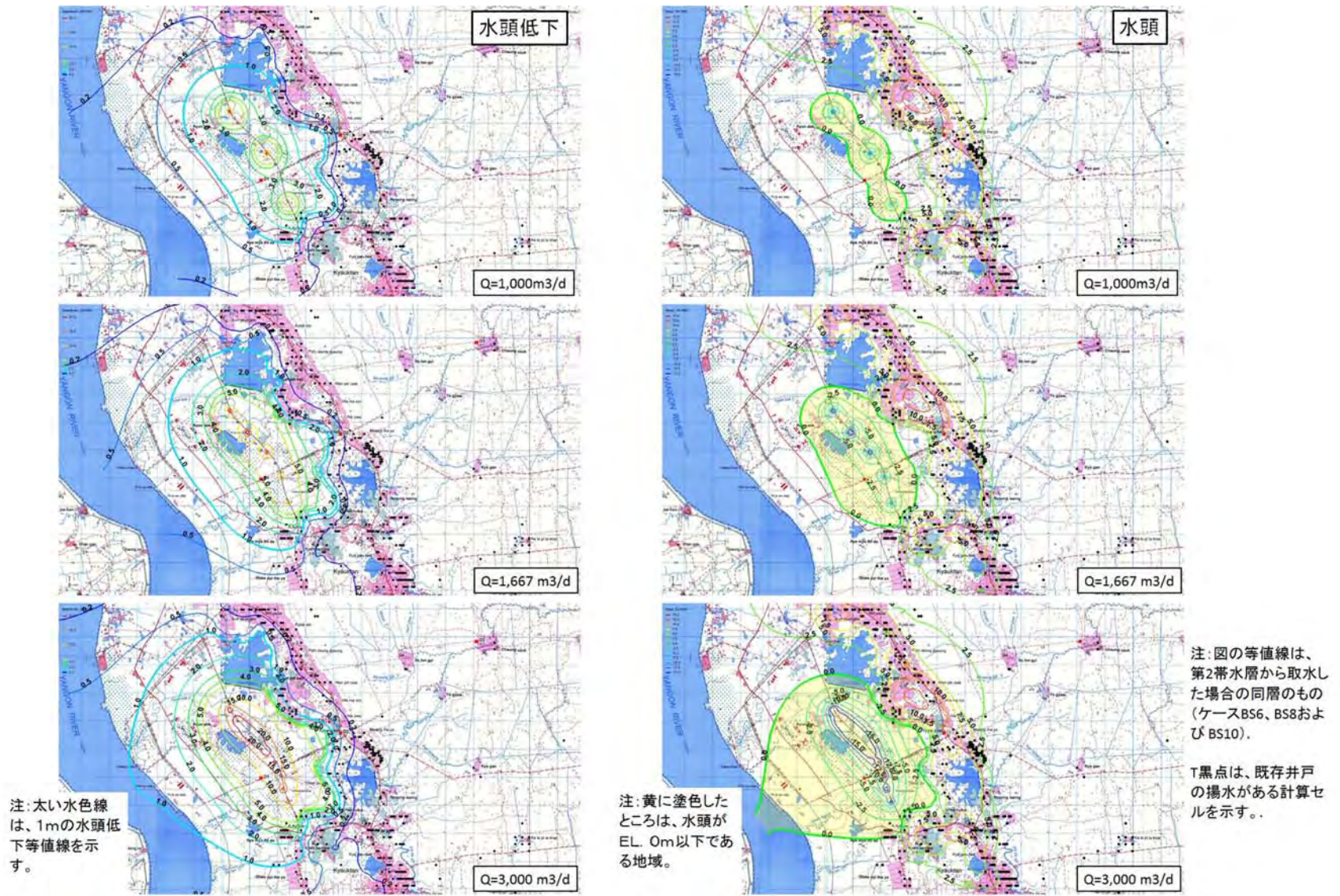


図 3-6-3-7 SEZ 内取水のモデル出力例—水頭低下および水頭の等高線 (第 2 帯水層から取水 ; 第 2 帯水層の状況)



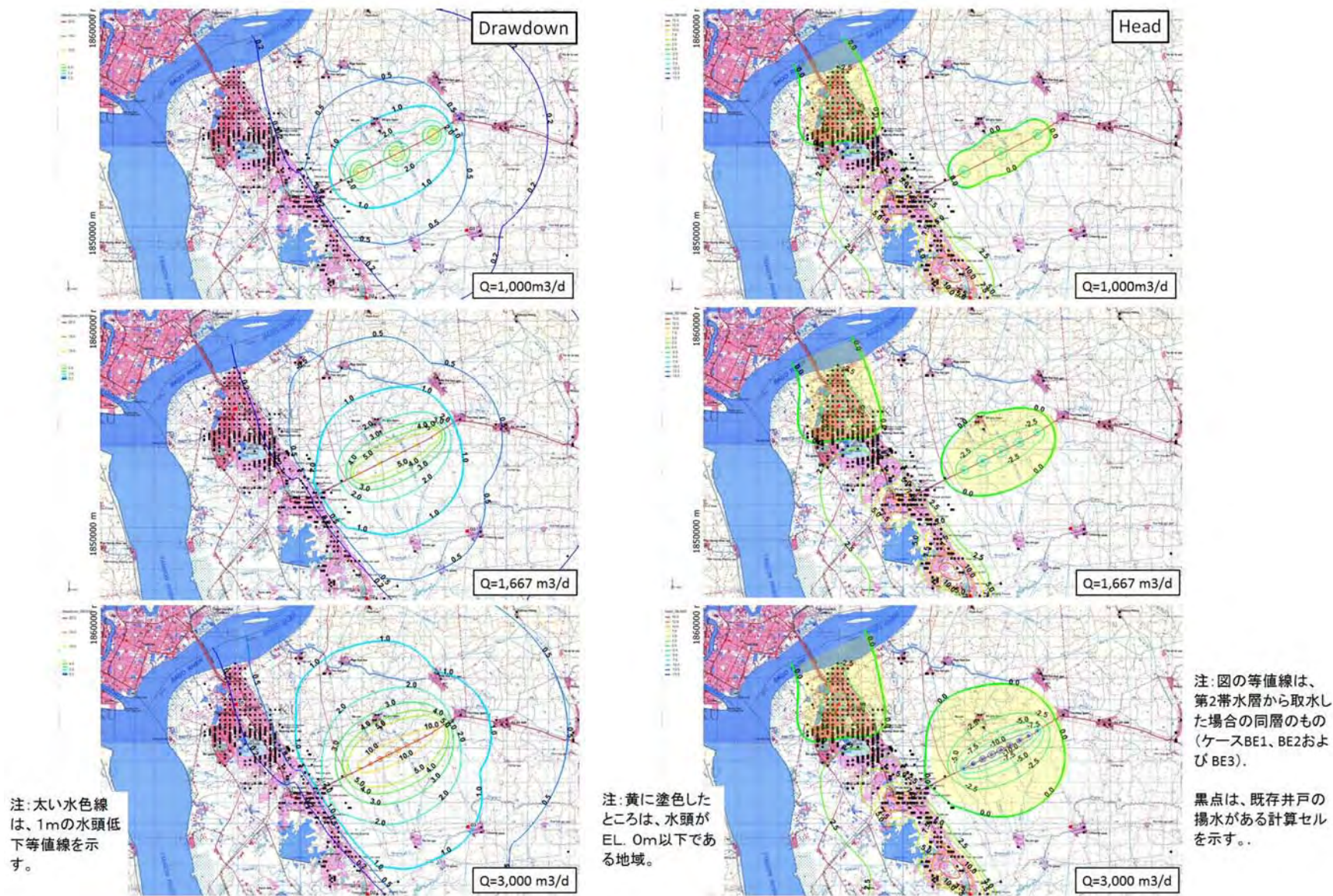
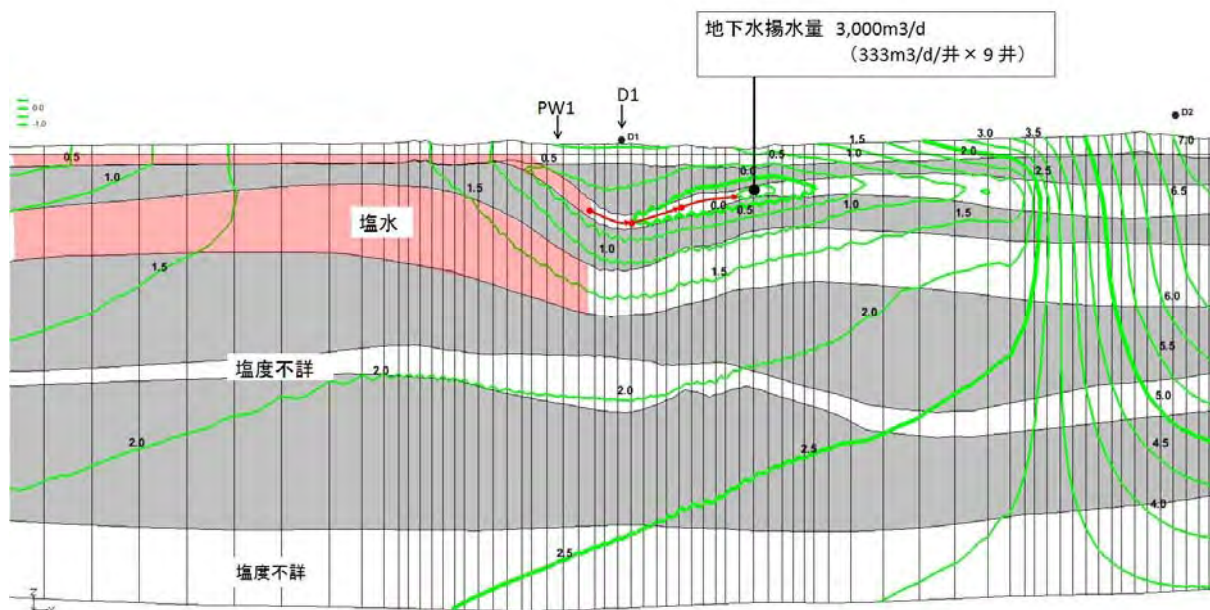


図 3-6-3-8 東方平野取水のモデル出力例—水頭低下および水頭の等高線 (第2帯水層から取水; 第2帯水層の状況)





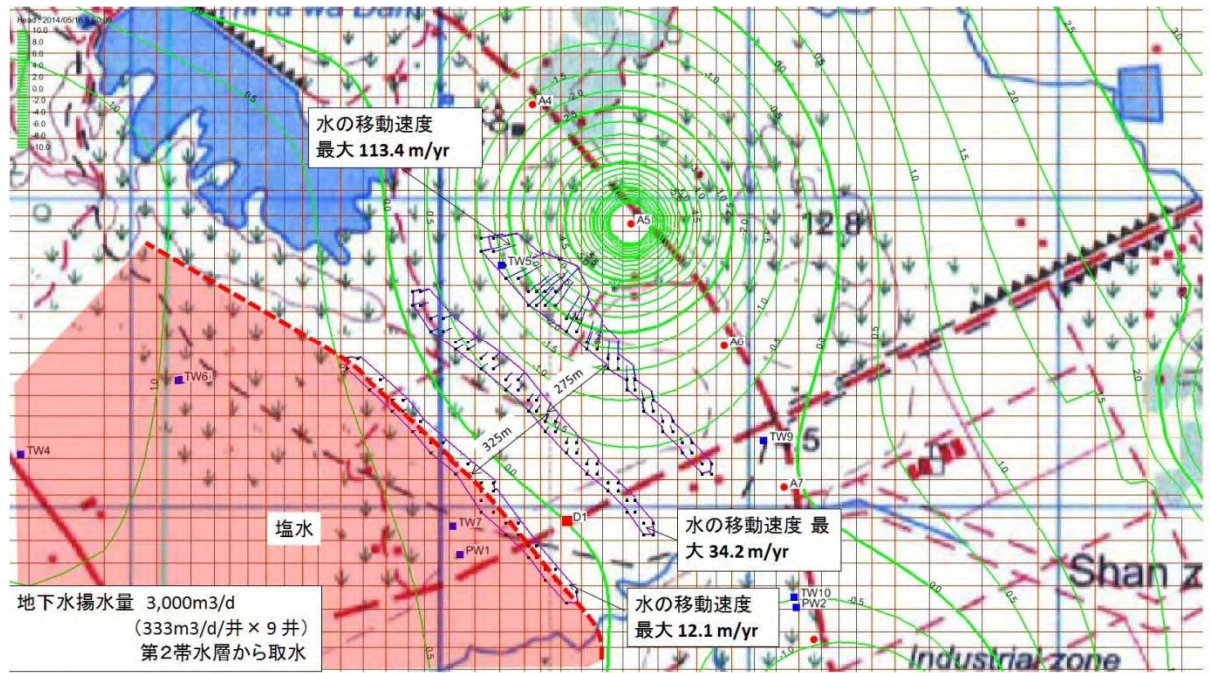
平面図



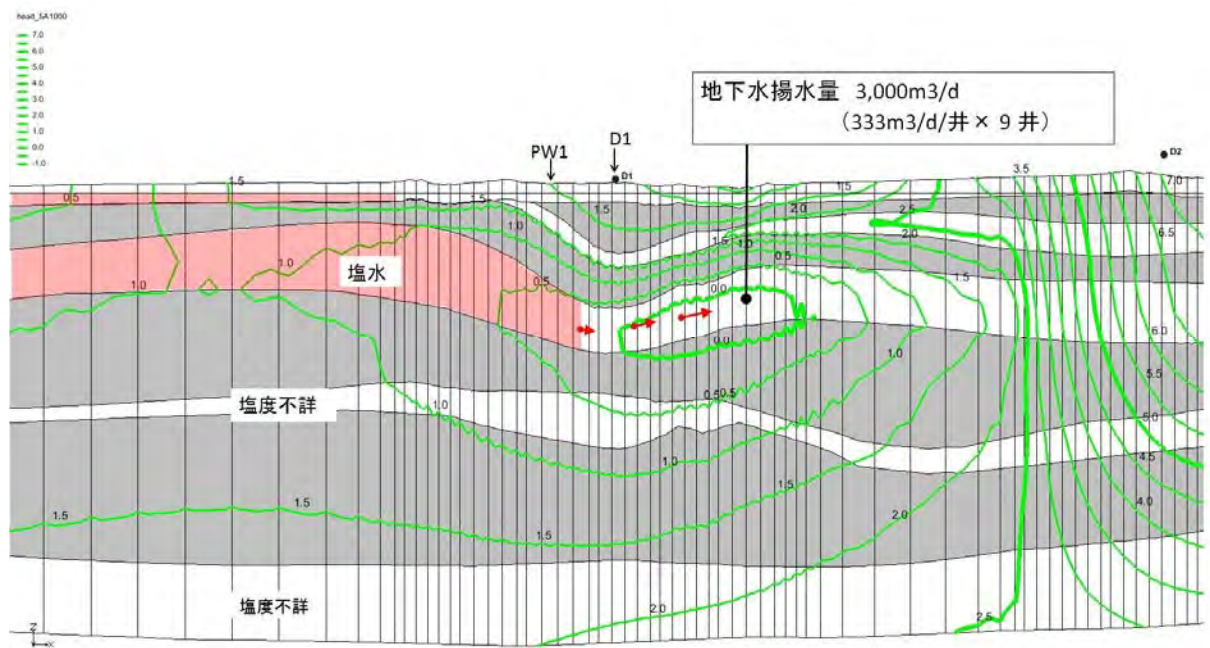
断面図

図 3-6-3-9 塩水フロント移動に係る地下水流動場での粒子追跡計算例 - ケース BS5





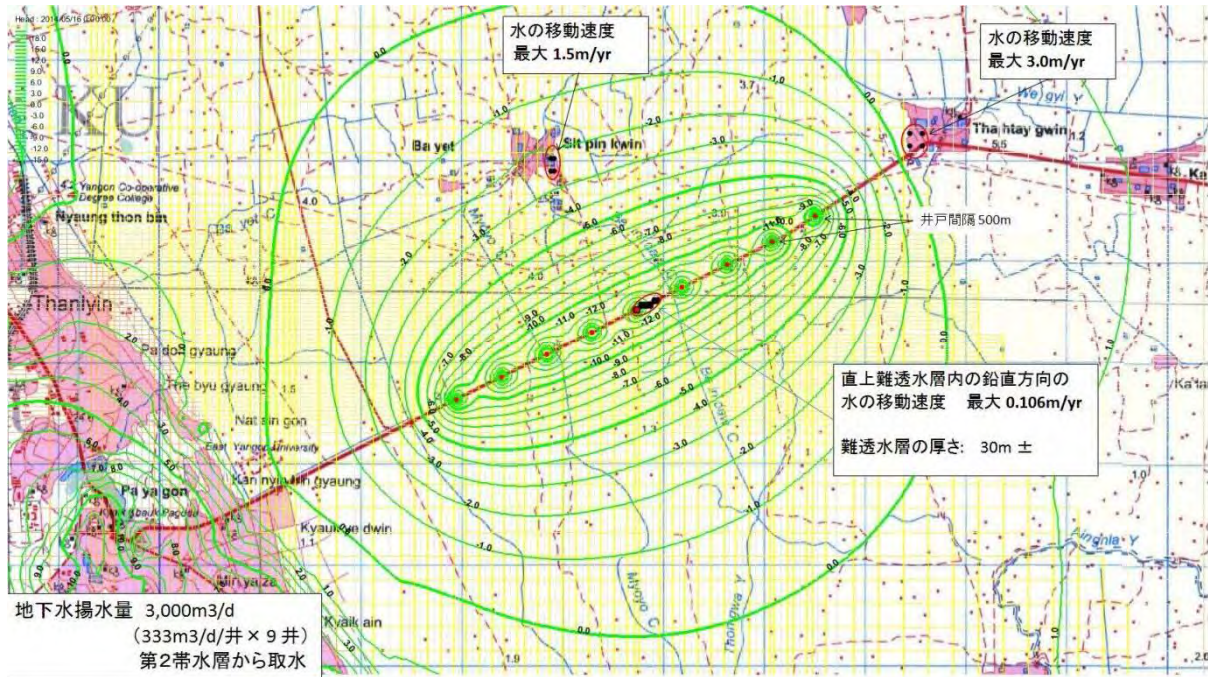
平面図



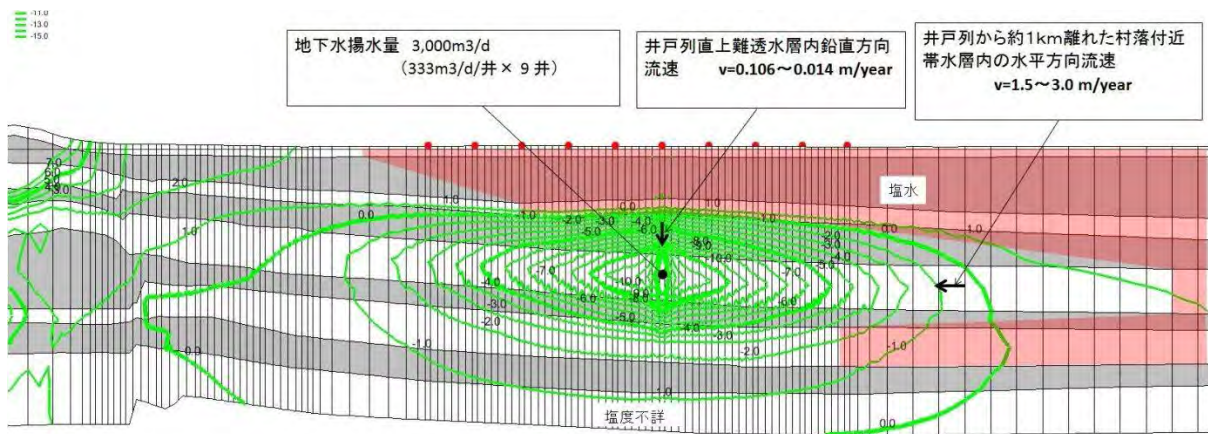
断面図

図 3-6-3-10 塩水フロント移動に係る地下水流動場での粒子追跡計算例- ケース BS6





平面図



断面図

図 3-6-3-11 塩水フロント移動に係る地下水流動場での粒子追跡計算例 -ケース BE3



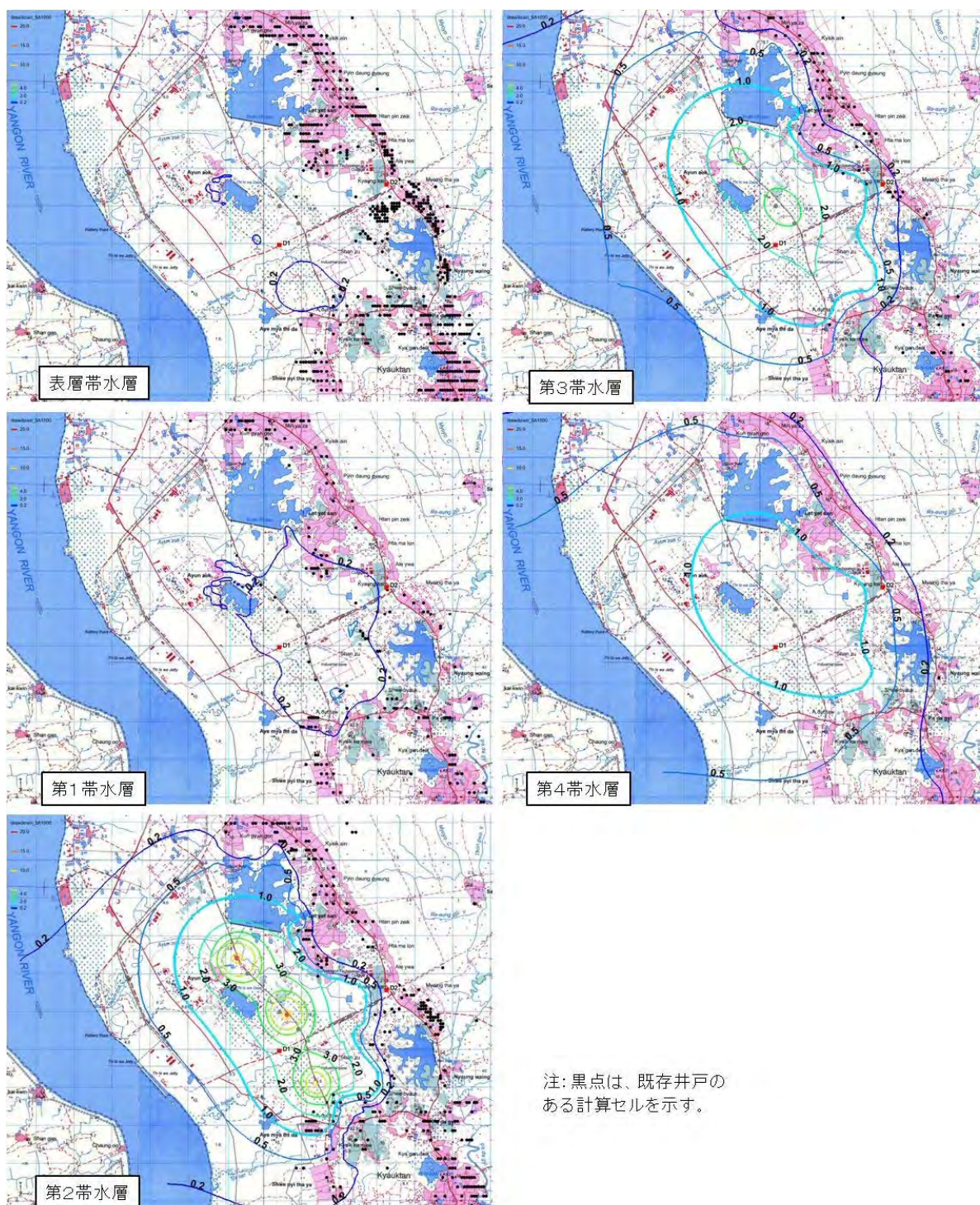


図 3-6-3-12 帯水層毎の水位低下分布 - ケース BS6; 第2帯水層から 1,000 m<sup>3</sup>/日 取水



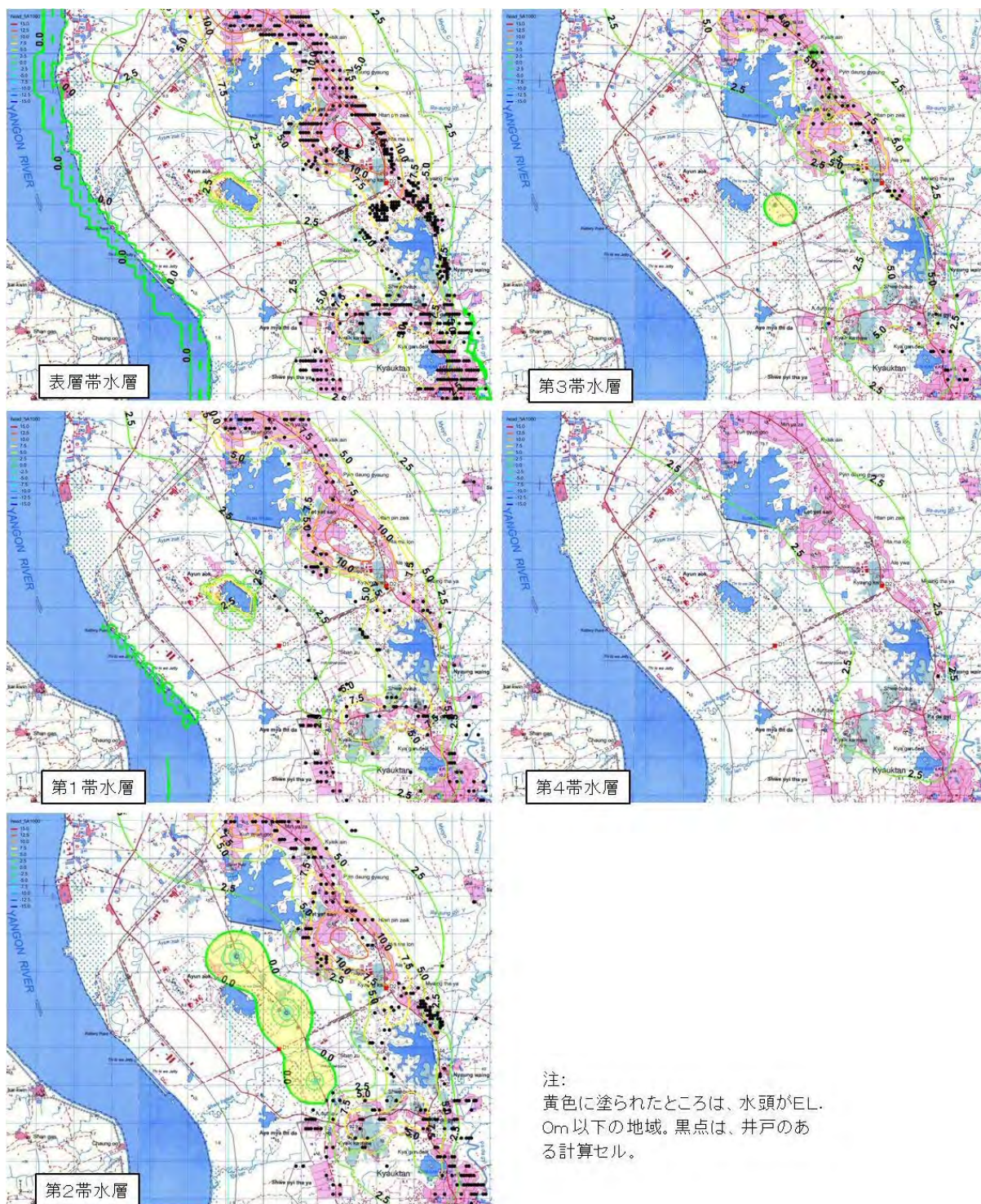
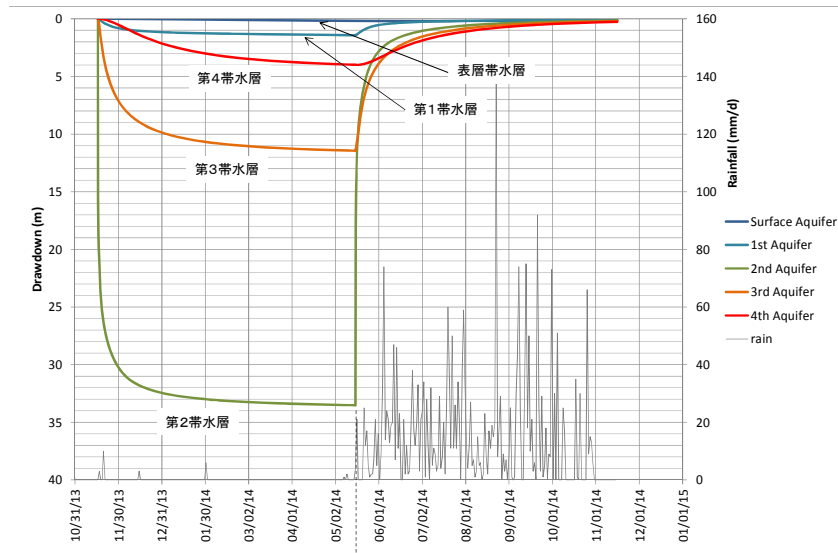
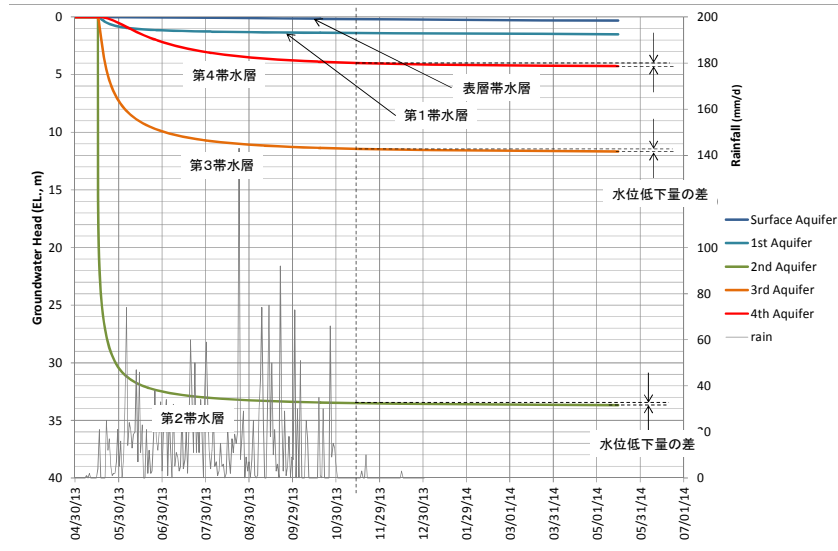


図 3-6-3-13 帯水層毎の水頭分布 - ケース BS6; 第2帯水層から 1,000 m<sup>3</sup>/日 取水





乾期半年取水



1年間取水

注) 第2帯水層から  
Q=3,000 m<sup>3</sup>/日 取水  
した場合の A5 地点  
の水位低下を示す。  
(ケース BS9 および  
BS10)

図 3-6-3-14 通年および半年間取水の場合の取水点における水位低下の比較

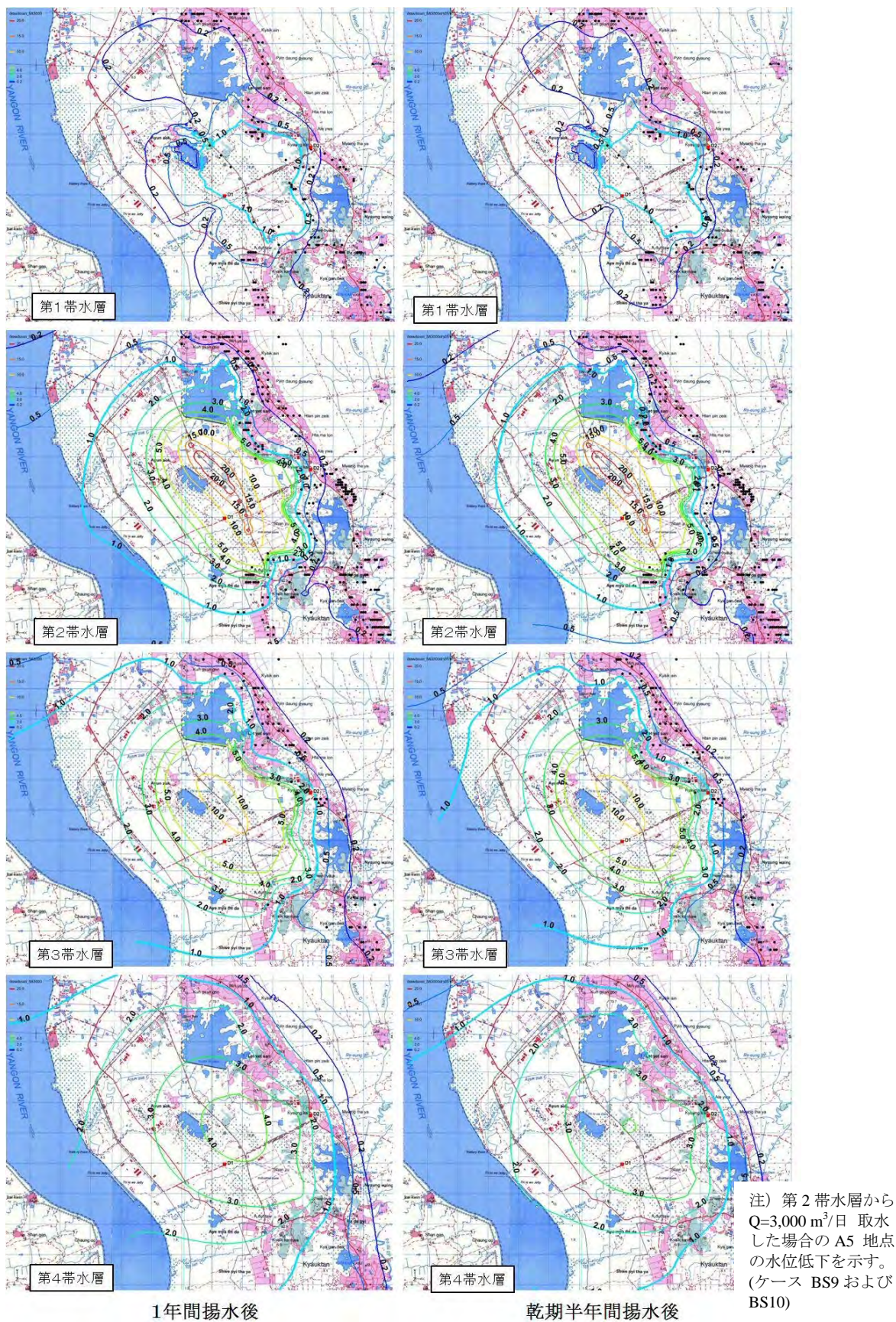


図 3-6-3-15 通年および半年間取水の場合の取水点における水位低下等高線の比較



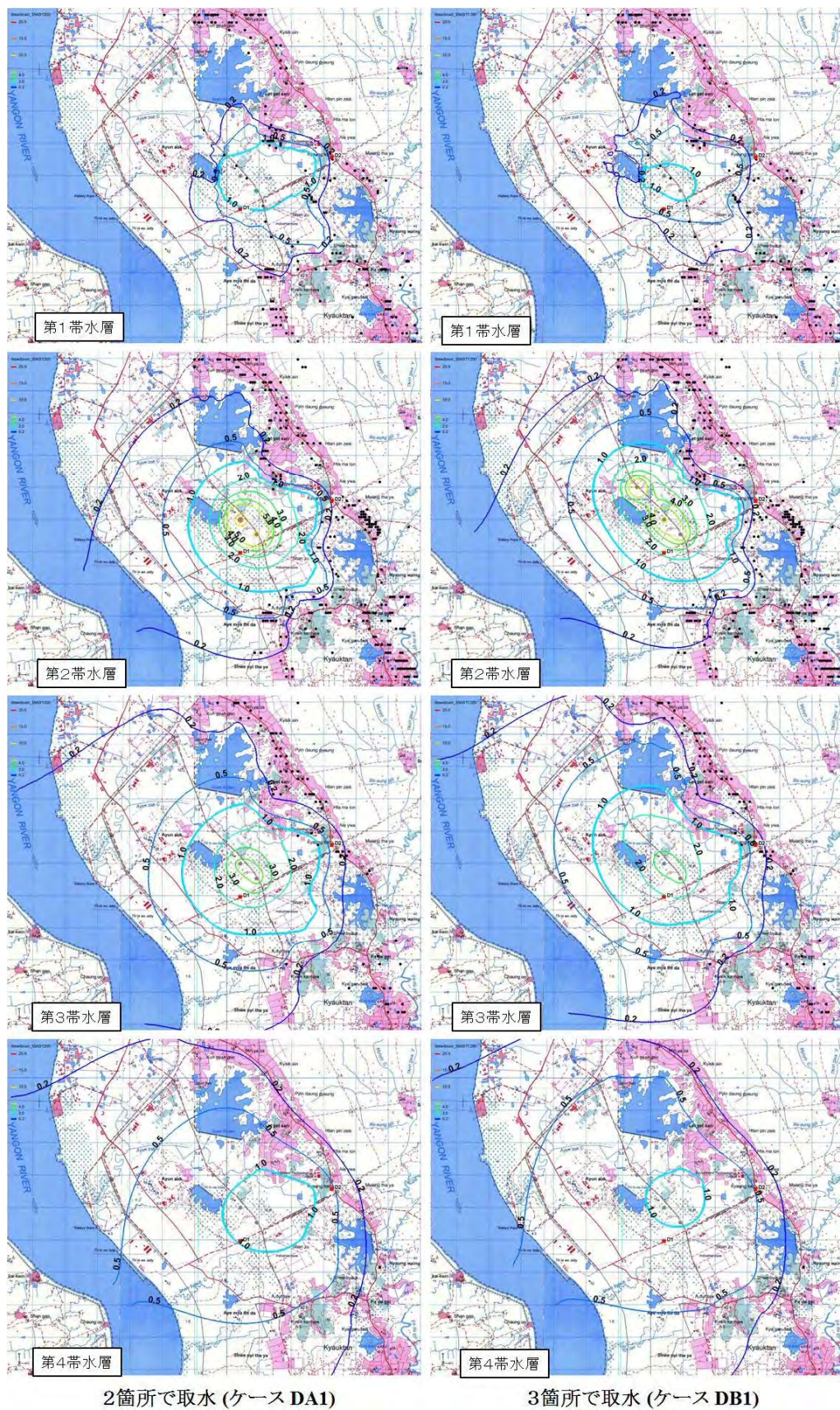


図 3-6-3-16 詳細検討ケースの水位低下出力例 - ケース DA1 および DB1



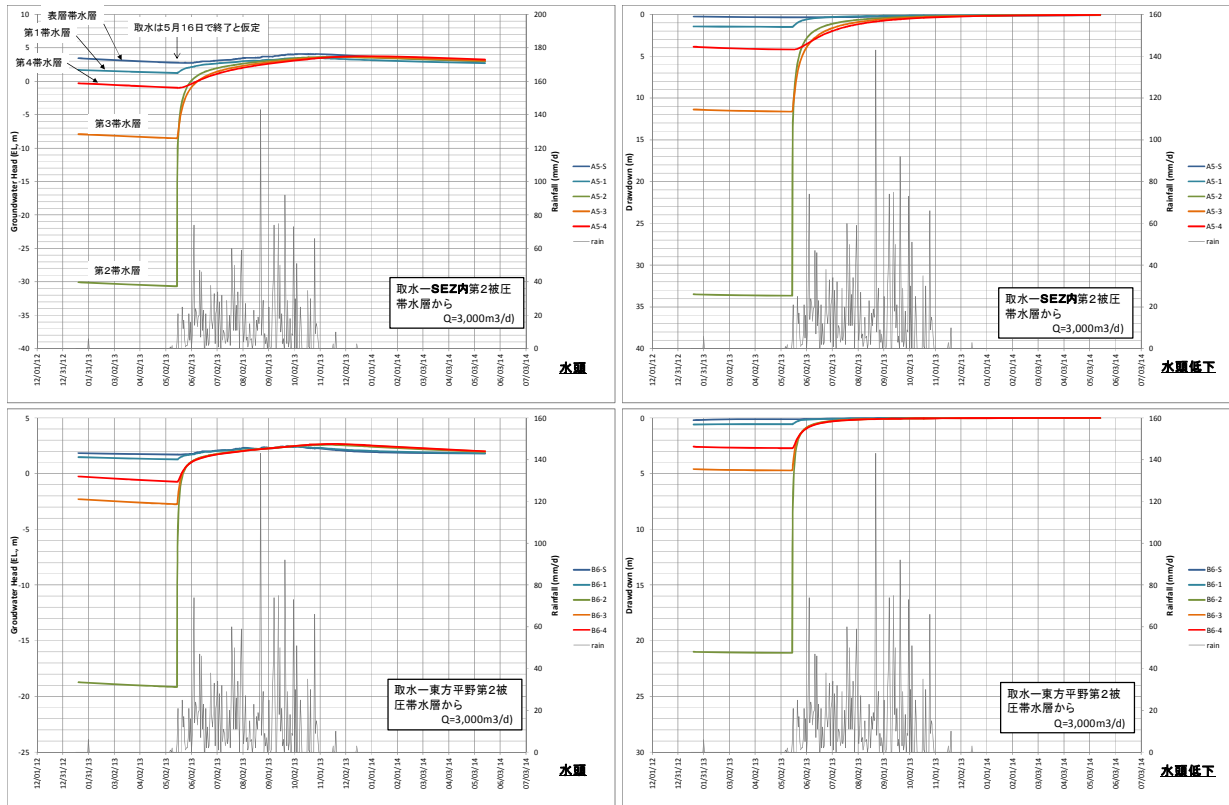


図 3-6-3-17 1年間取水後の水頭回復状況

### 3-6-3-5 予測された環境影響の評価と開発可能性

すべての検討ケースのモデル出力は、上掲の基準に基づいて評価された。表 3-6-3-5 に基本検討ケースの評価結果を、表 3-6-3-3 にその総括表を示す。また、表 3-6-3-6 に詳細検討ケースの評価結果を、表 3-6-3-4 にその総括表を示す。

#### (1) SEZ 内取水の場合

基本検討ケースのうち、第1または第2被圧帯水層から  $1,000\text{m}^3/\text{日}$  を取水するケース(ケース BS1 および BS6)のみ、すべての基準に適合した。しかしながら、第1帯水層から取水するケースは、取水によりティラワ貯水池からの漏水を増大させる可能性があること、および、連結が懸念される表層帯水層から不良水質の水が流入する可能性があることから、好ましくない。

詳細検討ケース(クラス A ゾーン内の2ないし3箇所で二つの帯水層から  $1,200\text{m}^3/\text{日}$  を取水)は、すべて評価基準に満たない。ただし、取水対象に第1帯水層を含む3ケース(ケース DB1、DB2 および DB3)は、環境影響は比較的小さく、基準に近いものであった。

基本、詳細の両検討ケースの結果とあわせて考えると、SEZ 内での開発可能性の目安は、取水対象層が単独か複数かを問わず、 $1,000\text{m}^3/\text{日}$  が目安と言える。これは水理的にはポテンシャルの重ね合せ理論により理解できる。





表 3-6-3-5 ティラワ SEZのための取水についての環境予測と評価結果（基本検討）

取水地区	取水対象層	取水量 (m <sup>3</sup> /日)	取水地点最大水位低下 (m)	周辺既存井戸の水位低下					水頭EL.0m以下地域の広がり					近傍塩水の移動	その他	評価	
				表層不圧帯水層	第1被圧帯水層	第2被圧帯水層	第3被圧帯水層	第4被圧帯水層	表層不圧帯水層	第1被圧帯水層	第2被圧帯水層	第3被圧帯水層	第4被圧帯水層			△	×
SEZ内	第1被圧帯水層	1,000	1.2~2.3	概ね0.2m以下;南方で一部最大0.3m	丘陵の西側縁辺で0.2~0.6m	丘陵の西側縁辺で0.2~0.3m	丘陵の西側縁辺で0.2~0.3m	(丘陵の西端で0.2m以下)	なし	なし	なし	なし	(SEZ内塩水フロントが約4.5年で井戸列までの中間地に到達)	- ティラワ貯水池からの漏水を促進する可能性あり ・表層帯水層と連結の可能性大(地表部汚染の影響を受けやすい) ・鉄イオンの含有量大あり。	△	△	
		1,666 (乾期のみ)	1.3~2.5	概ね0.2m以下;南方で一部最大0.3m	丘陵の西側縁辺で0.2~1.1m	丘陵の西側縁辺で0.2~0.6m	丘陵の西側縁辺で0.2~0.5m	(丘陵の西端で0.3m)	なし	なし	なし	なし	(SEZ内塩水フロントが約4年で井戸列までの中間地に到達)		×		
		1,666	1.4~2.6	概ね0.2m以下;南方で一部最大0.4m	丘陵の西側縁辺で0.2~1.2m	丘陵の西側縁辺で0.2~0.7m	丘陵の西側縁辺で0.2~0.5m	(丘陵の西端で0.3m)	なし	なし	なし	なし	(SEZ内塩水フロントが約2.5年で井戸列までの中間地に到達)		×		
		3,000 (乾期のみ)	2.0~4.0	概ね0.2m以下;南方で一部最大0.5m	丘陵の西側縁辺で0.2~2m	丘陵の西側縁辺で0.2~1m	丘陵の西側縁辺で0.2~1m	(丘陵の西端で0.5m)	なし	SEZ東端付近のみ	なし	なし	(SEZ内塩水フロントが約2.5年で井戸列までの中間地に到達)		×		
		3,000	2.0~4.1	概ね0.2m以下;南方で一部最大0.7m	丘陵の西側縁辺で0.2~2m	丘陵の西側縁辺で0.2~1m	丘陵の西側縁辺で0.2~1m	(丘陵の西端で0.5m)	なし	SEZ東端付近のみ	なし	なし	(SEZ内塩水フロントが約1.5年で井戸列までの中間地に到達)		×		
	第2被圧帯水層	1,000	15~23	概ね0.2m以下;南方で一部最大0.3m	丘陵の西側縁辺で0.2~0.5m	概ね0.5m以下;南方で一部最大2m	丘陵の西側縁辺で0.5~1m	(丘陵の西端で1m)	なし	なし	SEZ東端付近のみ	なし	(SEZ内塩水フロントが約16年で井戸列までの中間地に到達)	○			
		1,666 (乾期のみ)	16~25	概ね0.2m以下;南方で最大0.3m	丘陵の西側縁辺で0.2~0.7m	概ね1m以下;南方で一部最大3m	丘陵の西側縁辺で0.5~2m	(丘陵の西端で2m)	なし	なし	SEZ東端とヤンゴン川の中間付近まで	なし	-	×			
		1,666	17~25	概ね0.2m以下;南方で最大0.3m	丘陵の西側縁辺で0.2~0.7m	概ね1m以下;南方で最大3m	丘陵の西側縁辺で0.5~2m	(丘陵の西端で2m)	なし	なし	SEZ東端とヤンゴン川の中間付近まで	なし	取水量にほぼ反比例して到達時間が早くなると考えられる。	×			
		3,000 (乾期のみ)	20~33	丘陵の西側縁辺で0.2~0.4m	丘陵の西側縁辺で0.2~1.2m	丘陵の西側縁辺で1~6m	丘陵の西側縁辺で1~4m	(丘陵の西端で3.5m)	なし	なし	ヤンゴン川近くまで到達	SEZ東端とヤンゴン川の中間付近まで	-	×			
		3,000	21~34	丘陵の西側縁辺で0.2~0.6m	丘陵の西側縁辺で0.2~1.3m	丘陵の西側縁辺で1~6m	丘陵の西側縁辺で1~4m	(丘陵の西端で4m)	なし	なし	ヤンゴン川まで到達	ヤンゴン川まで到達	-	×			
	第3被圧帯水層	1,000	30~48	0.2m以下	丘陵の西側縁辺で0.2~0.3m	丘陵の西側縁辺で0.5~1.2m	丘陵の西側縁辺で1~1.5m	(丘陵の西端で2m)	なし	なし	SEZ東端付近のみ	なし	-	△			
		1,666	32~52	概ね0.2m以下;南方で一部最大0.3m	丘陵の西側縁辺で0.2~0.6m	丘陵の西側縁辺で0.5~3m	丘陵の西側縁辺で1~2m	(丘陵の西端で3m)	なし	なし	SEZ東端とヤンゴン川の中間付近まで	ヤンゴン川近くまで到達	-	×			
		3,000	39~63	丘陵の西側縁辺で0.2~0.3m	丘陵の西側縁辺で0.5~1.2m	丘陵の西側縁辺で1~4m	丘陵の西側縁辺で2~5m	(丘陵の西端で5m)	なし	なし	ヤンゴン川まで到達	ヤンゴン川まで到達	-	×			
	第4被圧帯水層	1,000	10~11	0.2m以下	東方丘陵内で0.2~0.3m	東方丘陵内で0.2~1.0m	東方丘陵内で0.2~2m	(東方丘陵内で0.2~2m)	なし	なし	なし	なし	-	△			
		1,666	13~15	0.2m以下	東方丘陵内で0.2~0.5m	東方丘陵内で0.2~1.2m	東方丘陵内で0.5~3m	(東方丘陵内で0.5~3m)	なし	なし	ヤンゴン川の一部	ヤンゴン川まで広い地域	-	×			
		3,000	19~25	概ね0.2m以下;南方で一部最大0.3m	東方丘陵内で0.2~1.0m	東方丘陵内で0.5~2m	東方丘陵内で1~5m	(東方丘陵内で1~5m)	なし	なし	ヤンゴン川まで広い地域	ヤンゴン川まで広い地域	-	×			
	第2, 3, 4帯水層	3000 (各1,000)	15~34 36~52 11~12	丘陵の西側縁辺で0.2~0.3m	丘陵の西側縁辺で0.5~1.2m	丘陵の西側縁辺で1~5m	丘陵の西側縁辺で2~5m	(丘陵の西端で5~7m)	なし	なし	ヤンゴン川まで広い地域	ヤンゴン川まで広い地域	-	×			
	東方平野	第2被圧帯水層	1,000	12.5~13	0.2m以下	西方丘陵近くで0.2~0.3m	周辺井戸で0.5~1.7m	周辺井戸で0.7~0.9m	(近傍集落で0.5~0.7m)	なし	なし	井戸列から約1kmの範囲	なし	-	△		
			1,666	14~15	0.2m以下	取水井戸列周辺で0.2~0.3m	周辺井戸で0.9~2.8m	周辺井戸で1~1.5m	(近傍集落で0.9~1.3m)	なし	なし	井戸列から約2kmの範囲	井戸列から約1kmの範囲	-	×		
			3,000	17~21	0.2m以下	取水井戸列周辺で0.2~0.7m	周辺井戸で1.5~5m	周辺井戸で2~2.5m	(近傍集落で1.8~2.3m)	なし	なし	井戸列から約3kmの範囲;タンリン北部のEL.0m以下地域まで1.5km	井戸列から約2.5~4.5kmの範囲	同一帯水層内塩水フロントの移動速度1.5~3.0/year以下;上方帯水層からの移動最大0.1m/year	×		

注: 灰色の欄は、環境影響に問題があると考えられることを示す。薄い灰色は、その程度がやや軽いことを示す。



表 3-6-3-6 ティラワ SEZ のための取水についての環境予測と評価結果の概要（詳細検討）

取水地点	取水量 (m <sup>3</sup> /日)		取水対象層		取水点 最大水位低下 (m)		周辺既存井戸の水位低下					水頭EL.0m以下の地域の広がり					近傍塩水の移動	評価	ケース 名
	1井当り	総量	上層	下層	上層	下層	表層 不圧帯水層	第1 被圧帯水層	第2 被圧帯水層	第3 被圧帯水層	第4 被圧帯水層	表層不圧 帯水層	第1被圧帯 水層	第2 被圧帯水層	第3 被圧帯水層	第4 被圧帯水層			
2箇所 (FW1, FW2) 4井	300	1,200	第1被圧 帯水層	第2被圧 帯水層	2.4	17, 23	概ね0.2m以下	丘陵の西側縁 辺で0.2~1.2m	丘陵の西側縁 辺で0.2~2.1m	丘陵の西側縁 辺で0.2~1.2m	(丘陵の西端 で0.5~1.2m)	なし	なし	SEZ東端付近 のみ	SEZ東端付近 のみ	なし	第1被圧帯水層内SEZ内 塩水フロントが約7.5年 で井戸列までの中間地 に到達	×	A1
				第3被圧 帯水層	2.4	38, 48	0.2m以下	丘陵の西側縁 辺で0.2~1.0m	丘陵の西側縁 辺で0.2~2.0m	丘陵の西側縁 辺で0.5~1.8m	(丘陵の西端 で0.5~1.5m)	なし	なし	SEZ東端付近 のみ	SEZ東端とヤン ゴン川の中間 付近まで	なし		×	A2
				第4被圧 帯水層	2	10	0.2m以下	丘陵の西側縁 辺で0.2~0.7m	丘陵の西側縁 辺で0.2~1.1m	丘陵の西側縁 辺で0.5~1.9m	(丘陵の西端 で2.0~4.0m)	なし	なし	なし	SEZ東端とヤン ゴン川の中間 付近まで	なし		×	A3
			第2被圧 帯水層	第3被圧 帯水層	20.27	42, 52	0.2m以下	丘陵の西側縁 辺で0.2~0.7m	丘陵の西側縁 辺で0.5~3.0m	丘陵の西側縁 辺で0.5~2.5m	(丘陵の西端 で2.0~2.5m)	なし	なし	SEZ東端とヤン ゴン川の中間 付近まで	SEZ東端とヤン ゴン川の中間 付近まで	なし	(2被圧帯水層内SEZ 内塩水フロントが約 7.5年で井戸列まで の中間地に到達	×	A4
				第4被圧 帯水層	17.24	10	0.2m以下	丘陵の西側縁 辺で0.2~0.7m	丘陵の西側縁 辺で0.5~2.3m	丘陵の西側縁 辺で0.5~2.7m	(丘陵の西端 で2.0~4.5m)	なし	なし	SEZ東端付近 のみ	SEZ東端とヤン ゴン川の中間 付近まで	ヤンゴン川近く まで到達		×	A5
				第3被圧 帯水層	40.50	12	0.2m以下	丘陵の西側縁 辺で0.2~0.5m	丘陵の西側縁 辺で0.5~1.0m; 一部2.1m	丘陵の西側縁 辺で0.5~3.0m	(丘陵の西端 で3.0~5.5m)	なし	なし	SEZ東端付近 のみ	SEZ東端とヤン ゴン川の中間 付近まで	ヤンゴン川近く まで到達	不詳 (恐らく短期での塩水 化はない)	×	A6
3箇所 (FW1, FW2, FW3) 6井	200	1,200	第1被圧 帯水層	第2被圧 帯水層	2~4	11~16	0.2m以下	丘陵の西側縁 辺で0.2~0.7m	丘陵の西側縁 辺で0.5~0.6m; 一部2.0m	丘陵の西側縁 辺で0.5~1.1m	(丘陵の西端 で0.5~1.0m)	なし	なし	SEZ東端付近 のみ	SEZ東端付近 のみ	なし	(第1被圧帯水層内SEZ 内塩水フロントが約11 年で井戸列までの中間 地に到達)	△	B1
				第3被圧 帯水層	3~4	20~32	0.2m以下	丘陵の西側縁 辺で0.2~0.6m	丘陵の西側縁 辺で0.5~0.7m; 一部1.3m	丘陵の西側縁 辺で0.5~1.3m	(丘陵の西端 で0.5~1.5m)	なし	なし	SEZ東端付近 のみ	SEZ東端付近 のみ	なし		△	B2
				第4被圧 帯水層	2	7	0.2m以下	丘陵の西側縁 辺で0.2~0.6m	丘陵の西側縁 辺で0.2~1.0m	丘陵の西側縁 辺で0.5~1.2m	(丘陵の西端 で2.0~3.5m)	なし	なし	なし	SEZ東端とヤン ゴン川の中間 付近まで	△		B3	
			第2被圧 帯水層	第3被圧 帯水層	14~19	23~35	0.2m以下	丘陵の西側縁 辺で0.2~0.7m	丘陵の西側縁 辺で0.5~2.0m; 一部3.0m	丘陵の西側縁 辺で0.5~2.0m	(丘陵の西端 で1.0~2.5m)	なし	なし	SEZ東端とヤン ゴン川の中間 付近まで	SEZ東端とヤン ゴン川の中間 付近まで	なし	(第2被圧帯水層内 SEZ内塩水フロントが 約11年で井戸列ま での中間地に到達)	×	B4
				第4被圧 帯水層	17	8~10	0.2m以下	丘陵の西側縁 辺で0.2~0.6m	丘陵の西側縁 辺で0.5~1.0m; 一部2.1m	丘陵の西側縁 辺で0.5~2.1m	(丘陵の西端 で2.0~4.5m)	なし	なし	SEZ東端付近 のみ	SEZ東端とヤン ゴン川の中間 付近まで	SEZ東端とヤン ゴン川の中間 付近まで	×	B5	
				第3被圧 帯水層	22~34	8~9	0.2m以下	丘陵の西側縁 辺で0.2~0.6m	丘陵の西側縁 辺で0.5~1.0m; 一部2.0m	丘陵の西側縁 辺で0.5~2.5m	(丘陵の西端 で3.0~5.0m)	なし	なし	SEZ東端付近 のみ	SEZ東端とヤン ゴン川の中間 付近まで	ヤンゴン川近く まで到達	不詳 (恐らく短期での塩水 化はない)	×	B6

注: 1) 灰色の欄は、環境影響に問題があると考えられることを示す。薄い灰色は、その程度がやや軽いことを示す。  
 2) 既存井戸の許容水位低下は、不圧帯水層(堀井戸)で0.2m、被圧帯水層(管井)で1.0mまでと仮定。  
 3) 水頭EL.0m以下の地域が河川下方まで広がることは、塩水を恒常的に誘引することを意味し好ましくない。  
 4) 近傍塩水の移動については、確認されているSEZ内塩水フロントが井戸列までのおよそ中間点まで移動することを許容すると仮定。2015年~2018年の3年間の取水を仮定すると、中間点までの到達時間が3年以上であれば取水を可とする。  
 5) 第4被圧帯水層から取水する井戸はモデル上1箇所のみで、ほとんど利用されていない。ただし、D-2-3観測井の水位記録には、取水によると推定され日変動が見られる。  
 6) 予測モデルは、限られたデータに基づき構築された概念的な第一近似のものである。したがって、実際の取水に当たっては、モニタリングへによる周辺地下水環境への影響の程度を継続的に把握することが必須である。

### 3-7 ティラワ SEZ の短期地下水開発についての結論

#### (1) 結論の前提

結論は、以下の前提に立っている。

- 1) ここに示すティラワ SEZ の短期地下水開発についての結論は、本調査で収集したデータに基づいて構築された地下水モデルによるシミュレーション結果に基づいて導かれた。
- 2) 収集したデータは量的には大きいものの、質については帯水層を精度良く把握するには十分ではない。構築されたモデルは第一近似のものと考えべきである。
- 3) 地下水取水に対する帯水層の実際の応答は、モデルによる予測と多少とも異なると考えられる。また、応答は気象変動にも左右される。
- 4) したがって、ここで得られた結論は、地下水開発を行う際のガイドラインと考えるべきである。実際の許容揚水量は、地下水環境のモニタリングを行いながら調整・決定すべきである。

#### (2) ティラワ SEZ 内での地下水開発

ティラワ SEZ 内での地下水開発については以下のように結論される。

- 1) 上記予測検討結果によれば、 $1,000\text{m}^3/\text{日}$  を少なくとも数年間取水可能と推定される
- 2) 上述の予測検討で1年取水と半年取水で大差がないことから、揚水期間を限定（たとえば半年）した場合でも、最大の取水量は  $1,000\text{m}^3/\text{日}$  が上限と考えられる。
- 3) 上記予測の詳細検討における複数帯水層取水の結果を考慮すると、複数の帯水層から取水する場合でも、基本的に総取水量は  $1,000\text{m}^3/\text{日}$  が上限と考えられる。
- 4) 上記予測検討では、第1及び第2被圧帯水層から  $1,000\text{m}^3/\text{日}$  を取水するケースのみ、すべての基準に適合した。しかしながら、第1帯水層は、表 3-3-2-4 に示したように水理能力は高いが、取水によりティラワ貯水池からの漏水を増大させる可能性がある。加えて、図 3-2-9-3（前掲）の地下水位観測結果や図 3-3-4-8（前掲）に示した SEZ 内の推定地質断面から表層帯水層との連結が懸念され、同層から不良水質の水が流入する可能性がある。したがって、第1帯水層は取水対象として好ましくなく、第2帯水層が望ましい。
- 5) 予測モデルの精度や周辺の地下水利用の増大を考慮すると、取水時のモニタリングは必須である。
- 6) もしモニタリング結果がよくなければ、許容揚水量は 2018 年以前でも減少する可能性がある。一方、モニタリング結果に問題がなければ、2018 年以降も揚水を継続できる可能性がある。

#### (3) 東方平野での地下水開発

東方平野での地下水開発については以下のように結論される。

- 1) 図 3-3-4-6 および図 3-3-4-7 に示した帯水層内塩水分布の推定状況から、第2帯水層が取水対象として望ましい。しかし、上記予測検討結果から、許容揚水量は最大  $1,000\text{m}^3/\text{日}$  程度



である。

- 2) 第6章の施設整備計画に示されるように、1,000m<sup>3</sup>/日の水量でのティラワ SEZ への長距離導水は経済的でない。
- 3) 井戸調査結果によれば、平野地域の住民は、良好な水質の地下水を求めて日々苦勞しており、また、同地域の全取水量が約 1,800m<sup>3</sup>/日であることを考えると、たとえ取水量が 1,000m<sup>3</sup>/日程度であっても、地域にとっては大きな値であり、社会的な影響は大きい。
- 4) このような経済的および社会的状況を考慮すると、東方平野でのティラワ SEZ 向け取水は意義に乏しい。

### 3-8 地下水のモニタリングと帯水層管理についての提言

#### 3-8-1 ティラワ SEZ における地下水取水に係るモニタリング

##### (1) モニタリング井戸（最小限の案）

取水井周辺の地下水低下と塩水移動の程度を監視するためには、モニタリング井戸が必要である。その配置と数量については、図 3-8-1-2 に示すように必要に応じて適切な規模のものを選択しなければならない。表 3-8-1-1 および図 3-8-1-1 に、既存井も活かしたモニタリング井戸の最小案を示す。

##### (2) 組織

適切なモニタリングのための組織を、ミャンマー側が用意すべきである。地下水環境への影響については、行政権限と公平さを有する適切な独立した機関が判断すべきである。

##### (3) 取水に係る報告

取水井の取水量、地下水位および電気伝導度の測定結果は、毎月、モニタリング機関に報告されるべきである。

表 3-8-1-1 ティラワ SEZ での取水のために必要な地下水モニタリング井（最小案）

区分	目的	観測孔名	監視対象帯水層	スクリーン深度 (m)	口径 (inch)	水頭測定		EC Measurement		設置状況	
						方法	頻度	方法	頻度		
主監視孔	周辺既存井戸への水位低下波及監視	ME	ME-1	表層帯水層	10	4	手測り 又は 自記	毎日 (手測り) 又は 毎時 (自記)	手測り	毎月	新設
			ME-2	第1被圧帯水層	(30 - 50)						
			ME-3	第2被圧帯水層	(65 - 85)						
	西方塩水の移動監視	MS	Aquifer targeted by nearby			手測り	週1回	手測り	週1回		
補助監視孔 (必須)	SEZ付近の各帯水層の水頭及び塩分濃度監視	D1	D1-0	第1被圧帯水層	37 - 48	6	自記	毎時 (月1回 データ回収)	手測り	毎月	既設
			D1-1	第2被圧帯水層	66 - 83						
			D1-2	第3被圧帯水層	110 - 138						
			D1-3	第4被圧帯水層	187 - 283(p)						
補助監視孔 (参考)	東方丘陵内の各帯水層の水頭監視	D2	D2-0	第1被圧帯水層	31 - 54(p)	6	自記	毎時 (月1回 データ回収)	手測り	毎月	既設
			D2-1	第2被圧帯水層	67 - 95						
			D2-2	第3被圧帯水層	125 - 148						
			D2-3	第4被圧帯水層	196 - 301(p)						
補助監視孔 (任意)	To monitor head and salinity in the adjacent area to Class "A" zone to the south	PW2		第2被圧帯水層	36 - 70(p)	10	手測り	毎月	手測り	毎月	既設
		PW3		第2被圧帯水層	27 - 66						

注:: (p) - 複数のスクリーン区間を含む。

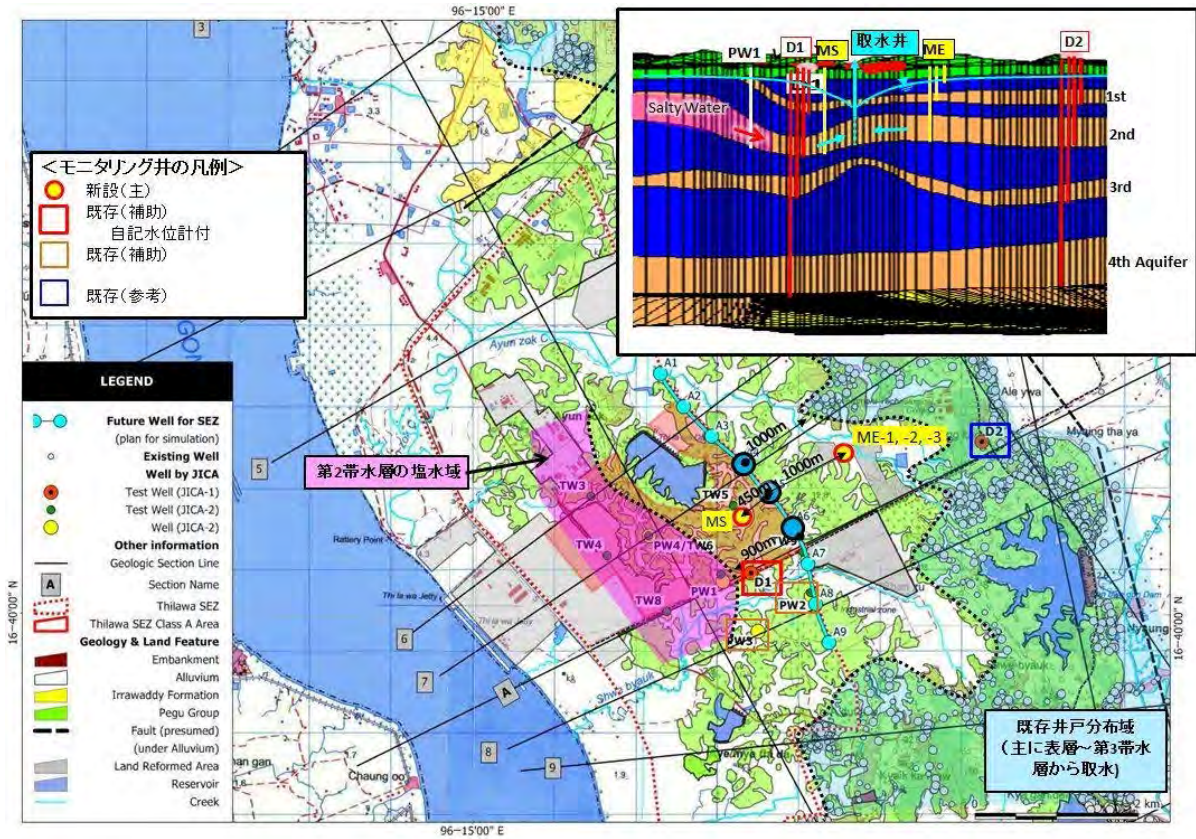


図 3-8-1-1 ティラワ SEZ での取水のために必要な地下水モニタリング井の配置（最小案）



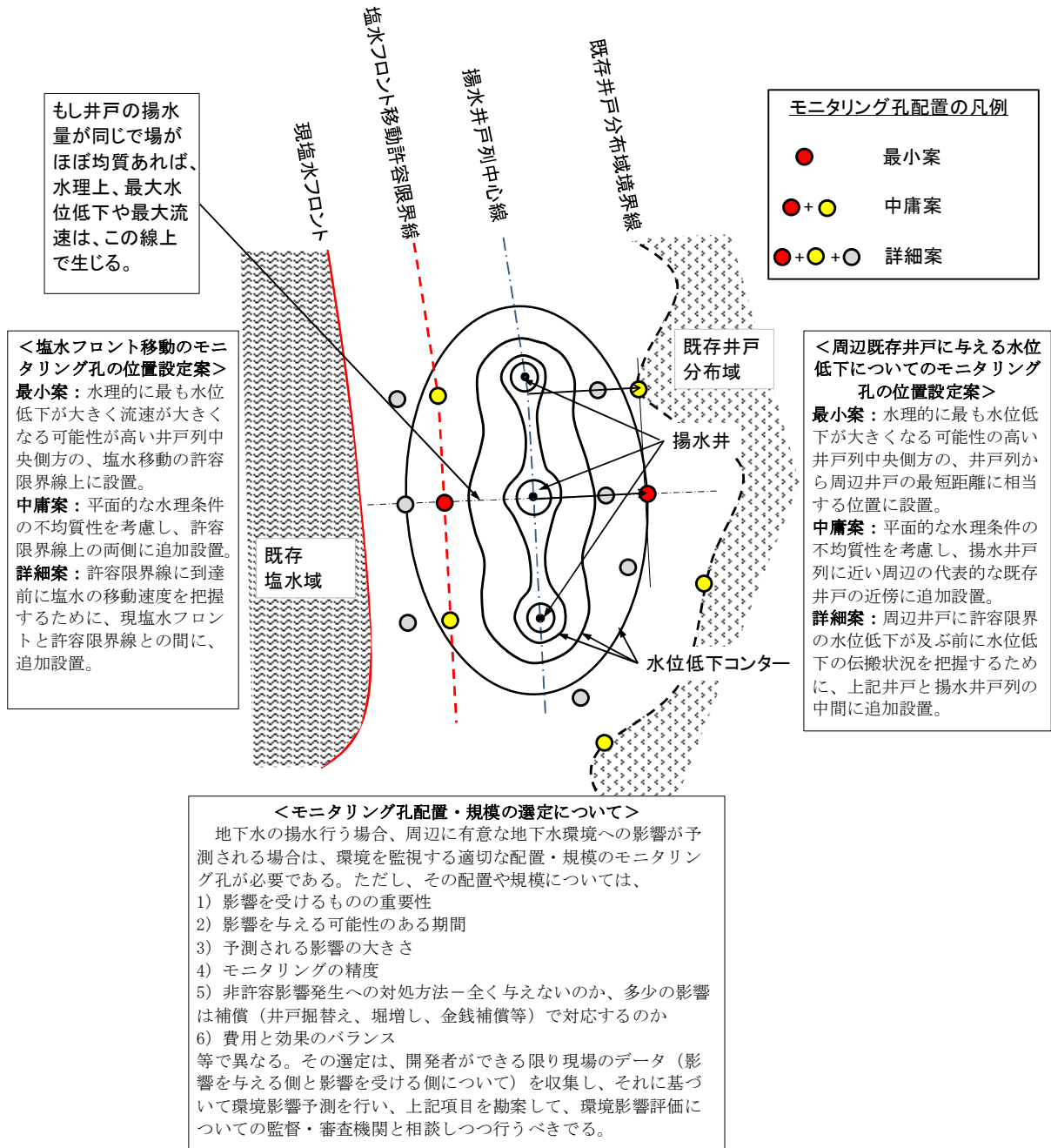


図 3-8-1-2 ティラワSEZ内で取水する場合のモニタリング井配置の基本的考え方

### 3-8-2 タンリン市街地におけるモニタリングと帯水層管理

タンリン市街地においては、図 3-8-2-1 に示すように第 2 および第 3 帯水層の年間平均水頭が標高 0m を下回っている。モデル解析結果によれば、図 3-8-2-2 に示すように標高 0m 以下の水頭域がバゴ川下方に広がり、塩水が帯水層に流入しつつあることが推定される。乾季の末期には、図 3-8-2-3 に示すようにタンリン北端の第 1 帯水層の水頭も標高 0m 以下である可能性が高い。このような状況は、帯水層が過剰揚水状態にあることを示している。加えて、井戸が年々増加している。

このような状況が続けば、早晩、塩水が帯水層に浸入し、帯水層と地下水利用に大きな被害を与えることとなる。これを防ぐためには、以下のような方策が必要である。

- 1) 地下水の取水量を減らすために、代替水源を見つける必要がある。
- 2) 地下水の長期変動を把握して過剰揚水の状況を確認するために、D-5 地点観測井のモニタリングを継続すべきである。
- 3) 過剰揚水の状況を地域的かつ帯水層別に把握するために、観測井を追加設置すべきである。
- 4) 井戸の新設状況を、タウンシップの井戸台帳で定期的に確認するとともに、必要に応じて、新設の規制や揚水の抑制策について検討すべきである。
- 5) 代表的な既存井戸の地下水位と水質を定期的に把握すべきである。
- 6) モニタリングと帯水層管理のために、権限を持った強力な機関を設置すべきである。

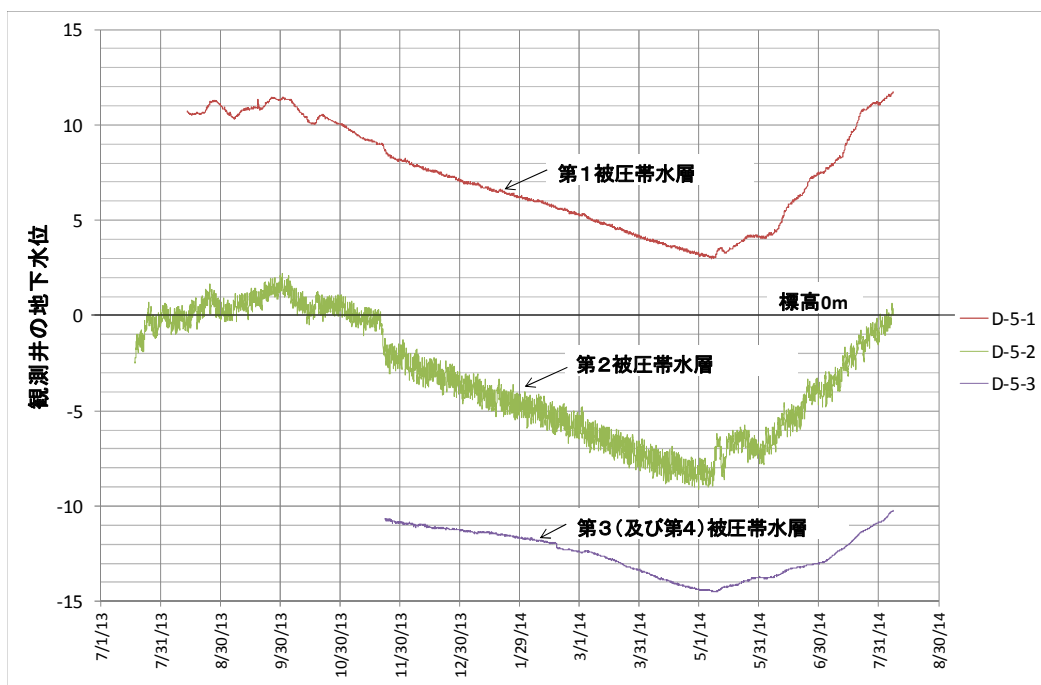
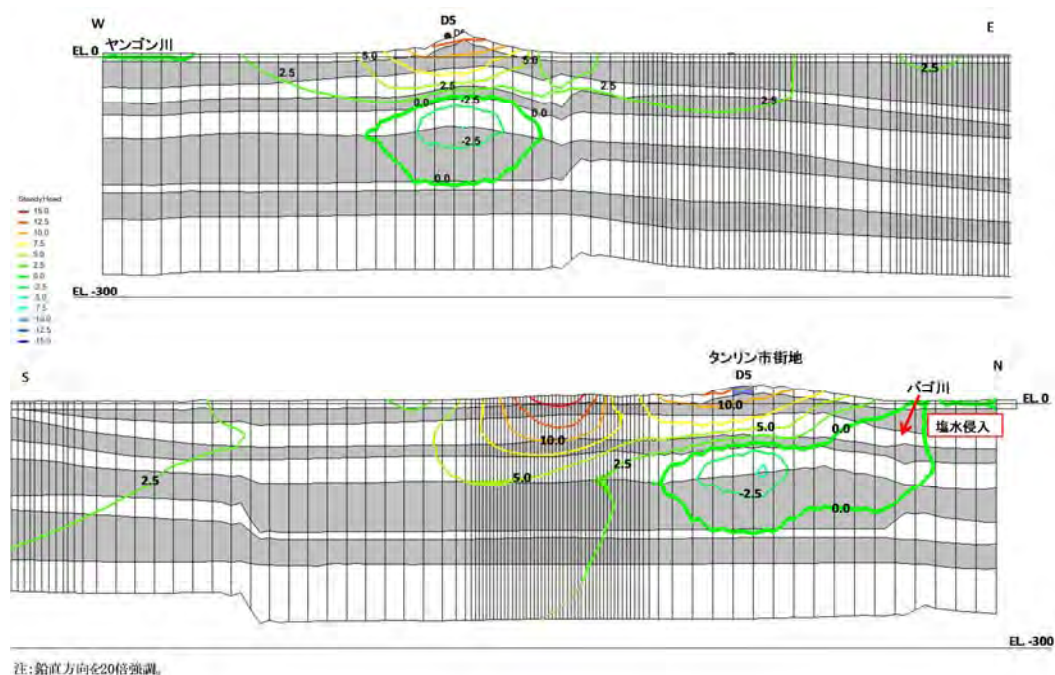


図 3-8-2-1 タンリン市街地 D5 サイトにおける観測地下水頭





注:鉛直方向を20倍強調。  
図 3-8-2-2 タンリン市街地 D5 地点を通る計算地下水等断面図



図 3-8-2-3 タンリン市街地北部における乾期末期の第1帯水層計算水頭分布

### 3-8-3 設置観測井の有効利用とモニタリング及び帯水層管理の担い手について

#### (1) 設置観測井の今後の利用

調査においては、調査地内 5 箇所に 16 本の観測井を複数の帯水層に設置し、自記水位計により約 1 年間観測を行ってきた。上述のように、当地は近年地下水の利用度が非常に高まってきており、特に北部は過剰揚水の状態にあると推定される。したがって、帯水層の監視・管理は必須と考えらる。一方、地元では、表 3-8-3-1 に示すように、設置観測井の一部を生産井に転用したい意向がある。しかし、当地において、地下水位の観測施設はこの 16 本以外にはなく、帯水層の監視・管理のためには、今後も観測井としてできる限り継続使用すべきである。水需要のある中、井戸の設置には大きな費用を要することから、生産井に転用したいという地元の意向は理解できるが、このような観測井を設置できる機会は今後も乏しく、生産井に転用した場合、監視の目を失うことの損失は大きい。特に、当地の主たる地下水利用地域の丘陵部に位置する D1、D2 および D5 の 3 地点の井戸は重要であり、特段の配慮が望まれる。

表 3-8-3-1 本調査により設置した観測井の位置・重要度と今後の利用についての地元の意向

観測地点名	観測井数	地形的位置	地理的位置	井戸掘削の許可を得たところ	現在の土地所有者／管理者	土地所有者／管理者の今後の利用についての意向	観測井としての重要度
D1	4	丘陵西麓	ティラワSEZ内	ティラワSEZ支援委員会議長	ミャンマー・日本・ティラワ開発会社 (MJTD)	比較的水質のよい1井は生産井として利用の可能性あり。	SEZ内で取水する場合はモニタリング井として有用；また、ヤンゴン川方面からの塩水侵入の監視孔として有用。
D2	4	丘陵中央の尾根部	ティラワSEZ支援委員会敷地内	ティラワSEZ支援委員会議長	ティラワSEZ支援委員会	利用需要がある場合は、利用したい。	周辺に地下水利用がある丘陵中央部の帯水層監視に有用
D3	3	東方平野	チャウング・ザウク集落縁辺	チャウング・ザウク集落リーダー(タンリントウシップ内)	チャウング・ザウク集落	乾期に水不足を補うため、できれば利用したい。(1井は塩水化し、水利用はできない。)	平野部では地下水の利用度は低い。地下水挙動の監視地点として帯水層管理に有用
D4	2	東方平野	公道路側	ティラワSEZ支援委員会議長(掘削中は、トングワタウンシップと相談)	トングワタウンシップ	(2井ともは塩水化し、水利用は困難だが、比較的分濃度の小さい1井は使用したい。)	同上
D5	3	丘陵北部尾根部	タンリン市街地中央のパゴダ境内脇の公有地	タンリントウシップ	タンリントウシップ	1井は、近隣への給水に利用したい。	既に過剰揚水にある丘陵北部の唯一の観測施設であり、帯水層管理に必須

注) 意向は、調査団の聞き取りによる。

#### (2) ミャンマーにおける地下水専門家と関連組織

地下水のモニタリングや帯水層管理のためには、地下水に関する知識・技術を有する地下水専門家・技術者の参加が必要である。現在、地下水技術者については、ミャンマーの公的機関では、農業かんがい省の水資源利用局 (WRUD; Water Resources Utilization Department) が圧倒的に多く保有する。WRUDには、部長職を有する独立した地下水部門があり、JICA 供与のものを含めた保有掘削リグを用いて、主に非都市部での井戸掘削による地下水利用に携わってきた。



他の機関では、都市部で住宅用に地下水開発を必要とする建設省住宅局等に若干の人材のいる可能性があるが、常時専門的に地下水に係る技術者がいる可能性はほとんどなく、WRUD が圧倒している。なお、諸般の事情により、本調査団は WRUD と十分な接触ができなかった。

タウンシップでは、井戸を含む給水施設を管理する技術部門があるが、地下水を専門とする技術者はいない。また、人事異動が頻繁に行われるため、技術の継続が困難である。

### (3) モニタリングと帯水層管理の担い手

帯水層管理には、地下水利用施設のインベントリー管理や地下水利用の制限・調整が必要であり、行政機関の参加が必須である。現在、井戸を設置した場合、タウンシップに報告義務があり、タウンシップがインベントリーを管理している。タウンシップは、ヤンゴン地方政府の下にあることから、今後の観測井の利用方法も含め、様々な意思決定のためにはヤンゴン地方政府の関わりが欠かせないと考えられる。

SEZ 内については、SEZ 法に基づいて対処されるものと考えられるが、SEZ 内の地下水開発は地域全体の帯水層管理とも関連するものであり、地域の管理者との調整も必要と考えられる。

調査団は、観測井のミャンマー側の引継ぎ先の決定とこれを有効活用して帯水層の監視、管理を行う組織の立ち上げについて、本件の実質的カウンターパートである SEZ 運営委員会書記や農業かんがい省かんがい局に、口頭ながら依頼を行った。しかし、ミャンマー側に経験のない分野のため、ドラフトファイナル報告書作成時点までには決定に至らなかった。

調査工期が迫り、結果として、観測井と自記水位計は、D1 および D2 地点についてはティラワ SEZ 管理委員会へ、また、D3、D4 および D5 についてはヤンゴン地方政府（南地区）に寄贈された。後者は、タンリンおよびトングワ・タウンシップにより管理されるが、地元の水に係ることだけにタウンシップ関係者および技術者の地下水についての関心は高く、引継ぎ時には、寄贈された井戸や水位計を有効に利用する意向が表明された。

なお、帯水層の監視・管理の作業は、当然ながら、ミャンマーの専門家・技術者・行政者が主体的に行うべきものである。しかし、ミャンマーにおいては、井戸を設置して地下水を利用する技術の蓄積・経験はあるが、帯水層を監視し管理する経験に乏しい。従って、必要に応じて、我が国もこの作業に協力することが望まれる。

### 3-9 地域における将来の地下水開発に関する結論と提言

すべての調査と解析結果を考慮して、地域の将来の地下水開発につき、以下のように、結論し提言する。

- 1) 地下水利用のもととなる主要な地下水涵養は丘陵地域における降雨浸透であり、その量は平均約 47,000m<sup>3</sup>/日と推定される。この涵養量の約 20~40 %<sup>注)</sup>が利用可能と考えられるが、現在の地下水利用率はすでに約 30%と高率であり、北部（タンリン市街地）では 50%で過剰揚水状態に達していることから、今後の多量の新規開発は困難である。
- 2) 地下水は地域住民の貴重な生活用水である。工業用等への使用は、一般家庭用の使用を考慮して計画されなければならない。
- 3) タンリン市街地では過剰揚水による環境影響が懸念されている。タンリン市街地における過剰揚水は解消されなければならない。揚水量を減らすためには代替水源を確保する必要がある。
- 4) 平野地域（ティラワ SEZ 周辺及び東部平野地域含む）では、季節的な貯留幅が小さいこと、地下水の循環速度が小さいこと、及び塩水を含む地層に被覆されていることから、開発可能量は 1,000m<sup>3</sup>/日程度が上限であり、多量の地下水開発は期待できない。また 1,000m<sup>3</sup>/日程度であっても長期にわたる取水が塩水化の進行を招くリスクがあることから、短期的開発水源として位置づけることが望ましい。

注) 利用可能率は、帯水層の水理能力（取水施設への取水の容易さ）、帯水層の広がりや境界条件、水質、環境影響等により変化し、地域によって異なる。当地の場合、南部丘陵は約 14%でも地下水障害は生じていないようであり、一方、北部丘陵では約 50%で過剰揚水にあることから、当地では 20~40 %が限界であろう。なお、南部丘陵は、北部（イラワジ層）より水理能力が劣ると推定されるペグ層が分布しており、利用可能率は北部より小さい可能性がある。





## 第4章

### 地表水の調査及び分析





## 第4章 地表水の調査及び分析

### 4-1 バゴー流域

本調査の目的は、経済特別区として整備が予定されているティラワ及びその周辺において、将来的な開発計画策定に必要な水資源に関する基礎情報を収集することである。基礎情報収集の対象は、利用可能な表流水、地下水を含む水資源であり、これらの水資源賦存量を科学的手法に基づいて推論し、その水資源を開発するに要するコストを利用目的に沿って比較検討することにある。地表水においては、その水源はバゴー流域およびバゴー流域に隣接するティラワ経済特区周辺域にもとめることとなる。

#### 4-1-1 地表水の調査範囲

表流水の調査はバゴー流域とティラワ経済特区周辺域が対象となった。現地調査の内容は、バゴー本川および支川における河川水位計の設置及び流量観測であり、2012年8月に調査を開始し2013年12月に終了した。河川水位計の設置を2013年3月末までに終了し、その後1年以上にわたり観測を継続し、得られた観測データをもとに流域の水文収支モデルを構築した。

流域収支モデルにより対象地区での水源ポテンシャルを求め、また、モデル出力となる流出量から必要となる施設規模を定め概算事業費を求めた。表流水の調査範囲はバゴー川流域の全域とティラワ経済特区周辺域を含む。

#### 4-1-2 地形

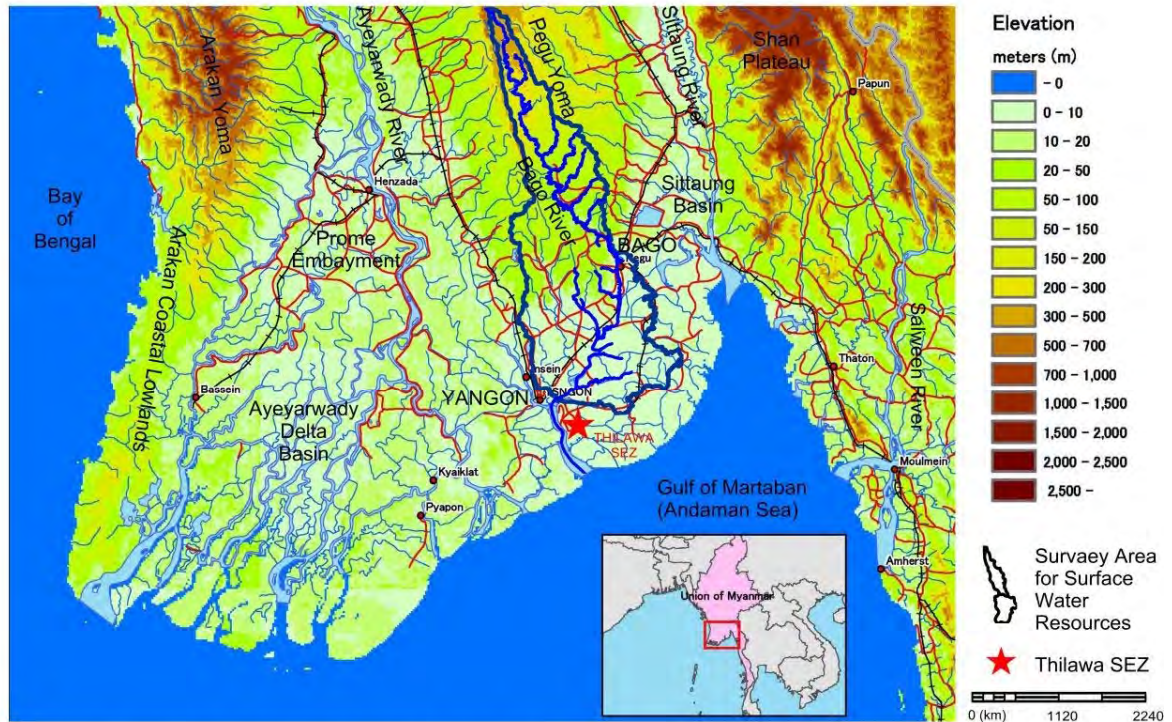
ミャンマーの国土は、東西および北縁に山地があり、中央に低地が広がっている。図 4-1-2-1 に示すように、中央低地の南部にはイラワジ川とシッタン川が南方に流下し、最終的にアンダマン海にそそぐ。両河川の間には南北にペゲー丘陵（ペゲーヨマ）が伸び、平野を分離している。ペゲー丘陵の南端は、ヤンゴンの位置するヤンゴン丘陵と、バゴー川を隔ててその南東方に伸びるタンリンーチャウタン丘陵に連続する。本業務における地表水の調査地域は、バゴー川上流のペゲー丘陵からティラワ経済特区周辺域のタンリンーチャウタン丘陵～低平地に及ぶ。

##### 4-1-2-1 標高および地形勾配

ペゲー丘陵南部は、一部稜線で400m～600mの標高を示すものの、大部分は10m～200mの小起伏の丘陵である。調査地内のタンリンーチャウタン丘陵は、北北東-南南東方向に延びる標高5m～25mの低丘陵であり、その西部で浅い谷が発達している。丘陵外の平野は、非常に低平であり、



東側の地下水調査対象地域で標高 0.7m から 3.5m、バゴー市街地で標高約 10m である。このため河川勾配は非常に小さく、バゴー川はヤンゴンから約 60 km 上流のバゴー市内でも感潮する。調査対象地域内の低地部の支川の多くは感潮するが、灌漑省により防潮水門が多数設置されたため、支川における潮汐の影響はかなり緩和されている。



Source: Global map of the central district of Union of Myanmar  
(Survey Department of Myanmar/ISCGN), <http://www.iscgm.org/>

図 4-1-2-1 調査地域周辺の地形

#### 4-1-3 河川及び流域の標高

バゴー流域の支川の多くは、上流域および西側流域において南方に流下するが、水系網は下流と比較し密となる（図 4-1-3-1 参照）。一方で、下流において支川は網状に広がり、河川と河川との間は比較的低平な平地となり一部で互いに接合する。分流と合流を繰り返すデルタ状の水系網が特徴的であるが、特に、東側のシッタウン流域支川と西のヤンゴン流域支川と連結し、洪水時には流水がバゴー川に流入する。

流域における面積-標高関係図をみると、低い標高地区が卓越し、55m以下の地区が 50%、100 m以下の地区が 70%以上を占める。





#### 4-1-4 土壌

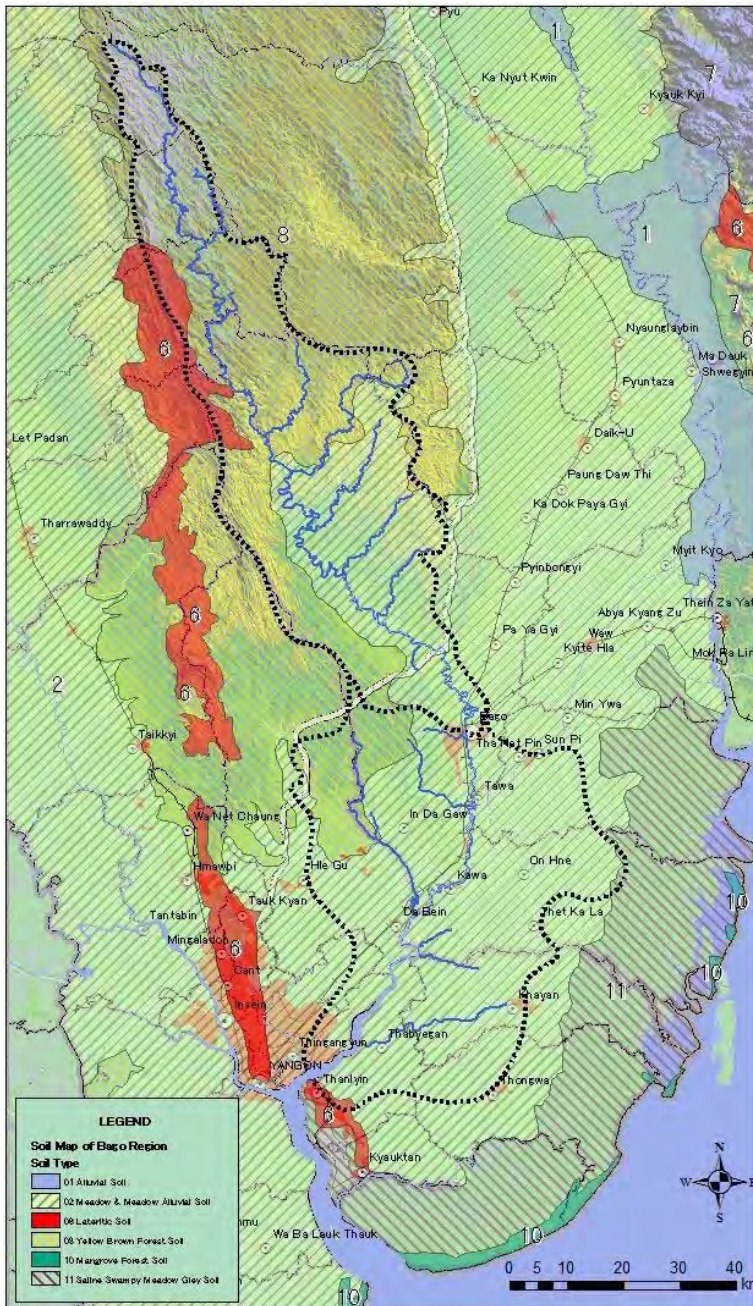


図 4-1-4-1 バゴー流域の土壌図

～135m の下部斜面に分布し、一部排水の良好な Red Brown Forest Soils またはラテライトに置き変わっている。粘土質ローム層が主体となる。

調査地区のバゴー流域および周辺における土壌調査は、ミャンマー農業局 (MAS : Myanmar Agriculture Service) によって行われ各地区別に土壌図が作成されている (図 4-1-4-1 参照<sup>1)</sup>)。

ミャンマーで採用されている土壌区分は、汎用的な 5 要素 : 母岩の構成、地形、気候、生物 (植生など)、時間の要素に基づく分類法にされている<sup>2)</sup>。これら 5 原則に基づき、バゴー流域においては、以下の 4 種が主要な土壌タイプとなる。下流域から、

02 Meadow Soils (Glesol) /Meadow Alluvial Soil (Gleysol Fluvic) /Meadow Swampy (Humic Gleysol) : ミャンマー国に広域に分布し、一般に土層は厚く粘性土を含み、テクスチャはシルト質ロームである。

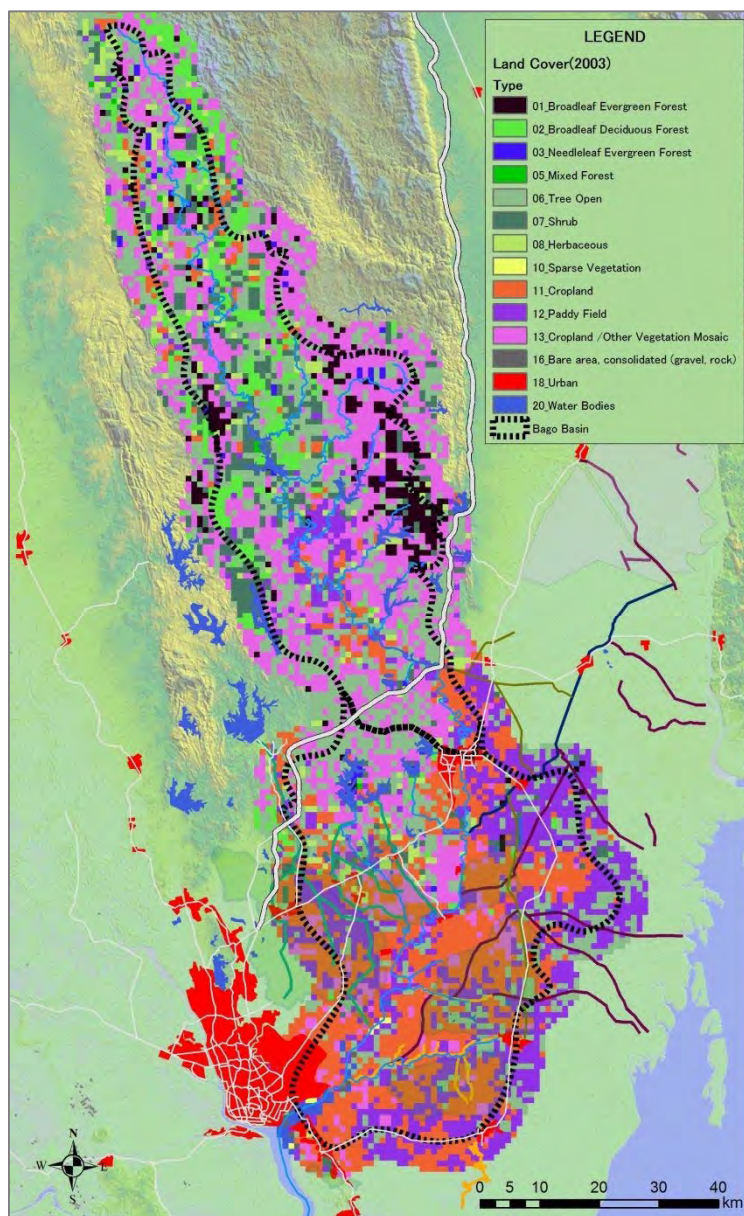
06 Lateritic Soils (Plinthic Ferrasol) : ペグー丘陵の標高 100m 以上の地区、または鮮新統 (ペグー層) 分布域に認められる。時に、深度 45～50 cm で豆石状の膠(こう)結層をもつ。

08 Yellow Brown Forest Soils(Xanthic Ferrasol) : ペグーヨマ丘陵の標高 30

<sup>1</sup> 全国 93 地区の内 20 地区で土壌図が作成されている。ヤンゴン地区とバゴー地区の土壌図を統合し「バゴー流域の土壌図」とした。

<sup>2</sup> 土壌調査は農業灌漑省農業局によって行われ、FAG/UNESCO 分類体系に従い、岩石 (母材の鉱物組成、物理化学特性)、地形、気候、植生といった土壌生成因子を基に土壌タイプを定めている。





source : GLCNMO : <http://www.iscgm.org/gmd/download/glcnm2.html>

図 4-1-5-1 バゴー流域の地表被覆区分(2008 年)

(バゴー橋上流) であっても、自然林の分布は 16% であり、多くは、竹林、灌木、草地の混合地 (40%)、または林間の耕作地 (44%) である。一方で、下流流域は広大な農業地帯が広がり自然

11 Saline Swampy Meadow Gley (Gley-Gleysol) : バゴー流域での分布は少ないが、海水の影響のある低湿地に分布し、テクスチャは粘土質シルトが主体となる。

これら土壌タイプ及び土壌組織から、流域の浸透能は、上流部は排水性の良好なローム層、またラテライト層が分布することから排水も良好と判断されるものの、下流部においては、土壌に粘土が混じり透水性も小さくなる。同時に、地下水水位も浅くなることから雨季に浸透量≒涵養量は少ない。

#### 4-1-5 地表被覆

流域における地表被覆は、MODIS 画像<sup>3</sup>より解析されている。GLCNMO(Global Land Cover by National Mapping Organizations)<sup>4</sup>において解析され公表されているもので、20 の地表被覆タイプに区分されているが、調査域周辺では 14 タイプが識別される。

流域内の植生分布を俯瞰すると、自然林は少なく流域面積の 1 割程度に留まる (図 4-1-5-1-参照)。上流域

<sup>3</sup> 衛星画像は、Terra 及び Aqua 衛星に搭載される MODIS センサー (Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer) より撮影されたもので、撮影幅は約 2,330 km に及び、地球全体を 1~2 日でカバーする。36 バンドのデータ取得を 3 種の精度 : 250m、500m 及び 1000m で行っている。

<sup>4</sup> 土地被覆情報は、GLCNMO ver2 (The Global Land Cover by National Mapping Organizations ver 2) より入手した。GLCNMO ver2 は、Terra 衛星画像 (2008 年、NMO 処理データ) から約 20 区分 (GLCNMO 区分) を設定し、解析を行ったものである。GLCNMO 区分は LCCS 植生区分 (FAO) に準じた区分であり、両者 (LCCS および GLCNMO) の対比は可能となっている。



林はごく少ない（1%）。畑地（38%）、水田（26%）およびこれらの混合地（13%）で全体の8割に達する（表4-1-5-1参照）。

流域全体の耕作地は、畑地が1,185km<sup>2</sup>（119x10<sup>3</sup>ha）、水田868km<sup>2</sup>（87x10<sup>3</sup>ha）および耕作混合地が1,208km<sup>2</sup>（121x10<sup>3</sup>ha）であり、総計は3,261km<sup>2</sup>（326x10<sup>3</sup>ha）に及ぶ。流域の6割が耕作地として利用される。

古い画像により時系列の比較も可能である。1993年の画像では、ランドサット画像から上流域の8割ほどが森林として区分されていた<sup>5</sup>。新旧の画像は分類・解析手法は異なるが、上流域の開発が過去20年ほどの間に急激に進んだことが想定される。

表 4-1-5-1 地表被覆区分別面積(2008年)

Type	Upper Bago Basin (U/S of Bago Bridge)		Lower Bago Basin (D/S of Bago Bridge)		Total	
	(km <sup>2</sup> )	(%)	(km <sup>2</sup> )	(%)	(km <sup>2</sup> )	(%)
01_Broadleaf Evergreen Forest	194	7.2	6	0.2	198	3.7
02_Broadleaf Deciduous Forest	206	7.6	17	0.6	221	4.1
03_Needleleaf Evergreen Forest	28	1.0	11	0.4	39	0.7
05_Mixed Forest	5	0.2	1	0.0	6	0.1
Sub-total(Forest)	433	16.0	35	1.31	464	8.6
06_Tree Open	738	27.2	436	16.3	1,171	21.8
07_Shrub	261	9.6	44	1.6	303	5.6
08_Herbaceous	89	3.3	51	1.9	140	2.6
10_Sparse Vegetation	0	0.0	6	0.2	6	0.1
Sub-total(Shrub land-Glass land)	1,088	40.1	537	20.1	1,620	30.1
11_Cropland	156	5.8	1,020	38.2	1,185	22.0
12_Paddy field	160	5.9	703	26.3	868	16.1
13_Cropland /Other Vegetation Mosaic	872	32.2	341	12.8	1,208	22.5
Sub-total(Cropland-Paddy field)	1,188	43.8	2,064	77.3	3,261	60.6
16_Bare area, consolidated (gravel, rock)	0	0.0	3	0.1	3	0.1
20_Water Bodies	1	0.0	31	1.2	32	0.6
Total	2,710	100.0	2,670	100.0	5,380	100.0

<sup>5</sup> GLOBAL LAND COVER CHARACTERIZATION : <http://edc2.usgs.gov/glcc/glcc.php>

## 4-2 気象

調査域の気候は、典型的な熱帯モンスーン気候<sup>6</sup>に属し、赤道から北回帰線の間、モンスーンの影響を受ける海岸部に位置する。年間の降雨は 2,500 mm～3,500 mm/年であり、熱帯雨林気候と変わらないが、モンスーンの影響による少雨期があり乾燥する。植生はおもに落葉広葉樹からなり、降水および気温特性（図 4-2-1 参照）から、雨季、涼季（乾季前半）及び暑季（乾季后半）に区分される。

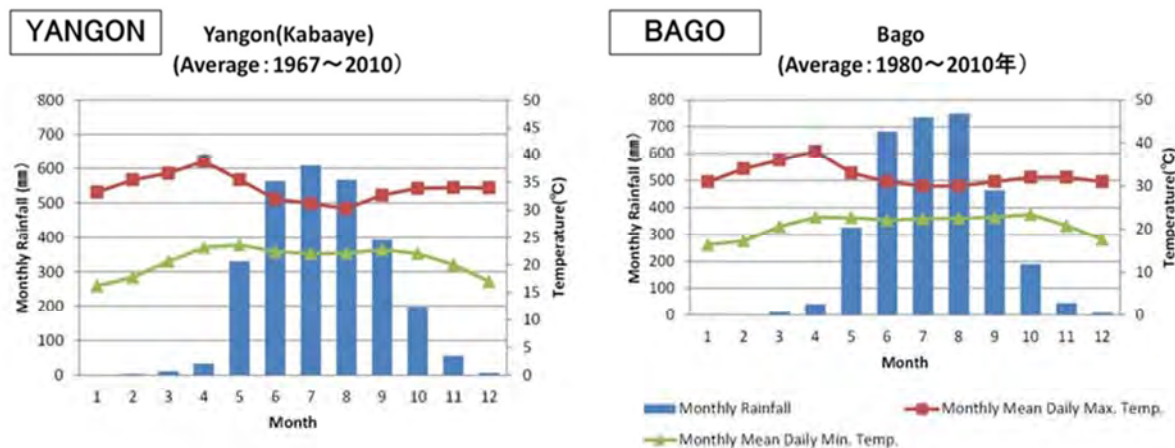


図 4-2-1 調査地域の気候特性

通常年における3季節の月区分は以下のおとりである。

- ・ 雨季（温暖多雨）：5月中旬から10月中旬
- ・ 涼季（冷涼少雨）：10月中旬から2月中旬
- ・ 暑季（高温少雨）：2月中旬から5月中旬

雨季の始まりがミャンマーの新年（5月）に一致し、次第にモンスーンが強くなるにつれ降雨頻度も増し7～8月で最大となり、10月中旬までの5ヵ月間で年降雨の9割以上がもたらされる。涼季の始まる10月中旬以降においても多少の降雨は残り1月までの涼冷な気候が続く。涼季后半の12月から暑季の始まり3月まで無降雨である。3月に入ると乾燥が進み気温も急激に上昇し4月末のモンスーン到来まで高温が続く。

### 4-2-1 気候値概要

調査域の気候値をヤンゴンおよびバゴ観測所の記録より示す(表4-2-1-1及び表4-2-1-2参照)。対象地域の年平均気温は摂氏27～28度であり、最低月は涼季中旬の1月で摂氏10度、最高月は乾季末の4月の摂氏40度である。年降水量は2,500～3,300mmであり、降雨日は年間120～150日

<sup>6</sup> 熱帯モンスーン気候（ねったいモンスーンきこう）とはケッペンの気候区分における気候区のひとつで、条件は①最寒月平均気温が18℃以上（ヤシが生育できること）、②年平均降水量が乾燥限界以上、③最少月降水量が60mm未滿かつ100-0.04×年平均降水量)mm以上（≒年降水量1000mm以上）の地域にあたる。



であるが、その 90 % 以上が 5 月～10 月の雨季に集中する。特に 7 月～8 月が多雨であり月降雨量は 550～700 mm となる。同様に、相対湿度も雨季に 65～90 % であるのに対し、乾季では乾燥し 35～60 % となる。これに応じて、露点温度も雨季で摂氏 24～25 度、また乾季で摂氏 16～22 度となる。風速は年間を通じ月平均風速で 9～16 km/時と観測されるが、特に高温となる乾季末の 4 月末で強風となる。

表 4-2-1-1 気候値概要表(ヤンゴン)

Climate Summary (Years on Records)	Unit	Month												Year Total
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Average Temperature(18)	C	25	27	29	31	29	27	27	27	27	28	27	25	27
Average High Temperature(18)	C	31	34	36	37	33	30	29	29	30	31	31	31	32
Average Low Temperature(18)	C	18	19	21	24	25	25	24	24	24	25	22	19	22
Average Number of Days With Precipitation(17)	Days	1	1	2	2	17	26	28	28	22	13	6	1	147
Highest Recorded Temperature(18)	C	38	38	40	41	41	37	37	34	38	37	38	34	41
Lowest Recorded Temperature(18)	C	12	13	17	20	20	20	22	22	20	20	15	15	12
Average Number of Rainy Days(17)	Days	1	1	2	2	17	26	28	28	22	13	6	1	147
Average Morning Relative Humidity(15)	%	86	88	91	90	92	96	96	97	96	95	92	88	92
Average Evening Relative Humidity(15)	%	40	33	35	40	65	84	85	86	80	72	60	48	61
Average Dew Point(14)	C	16	17	20	22	24	25	25	25	25	24	22	18	22
Average Wind Speed(14)	km/h	9	12	14	16	12	12	9	12	8	9	9	9	12
Data source: <a href="http://www.weatherbase.com/weather/">http://www.weatherbase.com/weather/</a>														

表 4-2-1-2 気候値概要表(バゴ)

Climate Summary (Years on Records)	Unit	Month												Year Total
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Average Temperature(17)	C	24	25	28	29	29	27	26	26	26	26	26	24	27
Average High Temperature(17)	C	31	33	36	36	33	30	29	29	30	30	31	30	32
Average Low Temperature(17)	C	17	18	20	23	25	24	23	23	23	23	22	18	22
Average Precipitation(8) <sup>7</sup>	mm	10	-	-	20	200	490	630	440	470	110	10	10	-
Highest Recorded Temperature(17)	C	37	37	38	42	41	35	37	35	32	33	37	36	42
Lowest Recorded Temperature(17)	C	10	12	14	17	18	21	20	20	21	20	16	11	10
Average Number of Days Above 90F/32C(17)	Days	16	25	30	29	21	5	2	3	3	10	16	10	176
Average Number of Rainy Days(8)	Days	2	-	-	1	12	22	24	24	22	9	-	-	121
Average Relative Humidity(12)	%	67	61	64	66	78	88	90	90	90	85	77	71	77
Average Dew Point(12)	C	16	16	18	21	23	24	24	24	24	23	21	17	21
Data source: <a href="http://www.weatherbase.com/weather/">http://www.weatherbase.com/weather/</a>														

<sup>7</sup> 参照した WEATHERBASE (U.S. Census Bureau) のバゴ地点雨量は 8 年間と短く、別途入手の Bago 観測所記録と異なる。雨量詳細については、2-3 節を参照。

#### 4-2-2 気象観測所

現時点において、バゴー流域内および周辺地区の雨量観測所、気象観測所は図 4-2-2-1 の気象観測所位置図のとおり 23 箇所が確認されている。このうち、3 箇所（バゴー観測所、カバアエ観測所、ザンツ観測所）は、運輸省気象水文局（DMH）の所管であり、地上雨量計の設置とともに、気温、湿度、風向・風速、日照、計器蒸発量などの一般気象項目の観測を行っている。また、同観測所では過去の記録も蓄積されていて、カバアエ観測所では 1901 年から 112 年間、バゴー観測所では 1965 年から 48 年間、ザンツ観測所では、1987 年から 26 年間の記録が利用可能である。

また、20 箇所は灌漑局（農業灌漑省）所管の水利施設において、観測を行っているもので、施設により 20 年程度の記録が蓄積されているが、多くの施設は 2000 年以降に建設されていることから、観測期間も 10 年以内の観測所が多い。また、灌漑局所管の雨量計は自動雨量計ではなく、これまでの計器の標準が貯水型指示雨量計（受水口径 4" : 100mm, 79mm<sup>2</sup>）であり、このため、人為ミスによる欠測、測定誤差、または施設位置に制約から測定誤差も含まれる。既存データの照査からは 2、3 カ所の観測点の記録で、周辺の観測値と相反する小さな値が認められた。現在灌漑局において、これらの観測誤差の是正、観測頻度の向上を目指し、転倒柵式自記雨量計（受水口径 8" : 200mm, 314mm<sup>2</sup>）への変更が行われている。

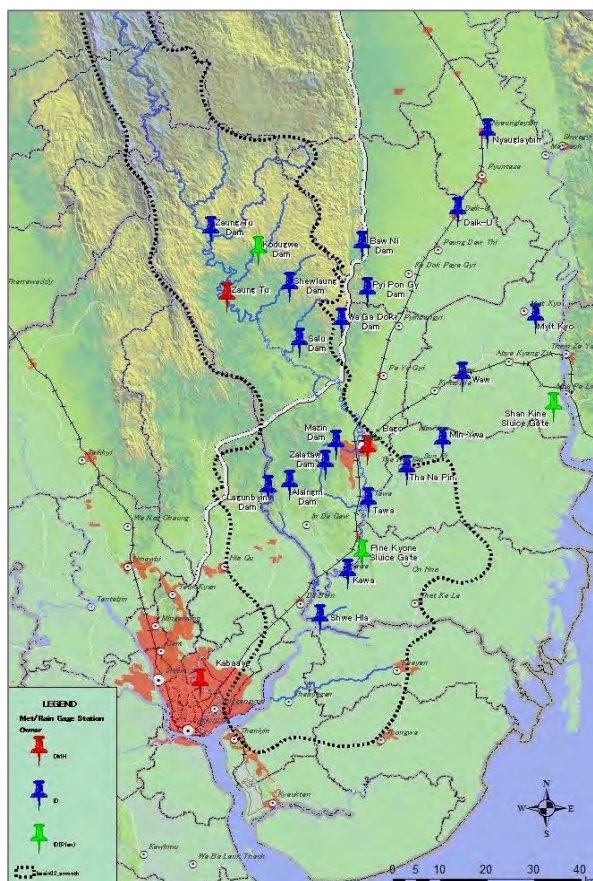


図 4-2-2-1 気象観測位置図

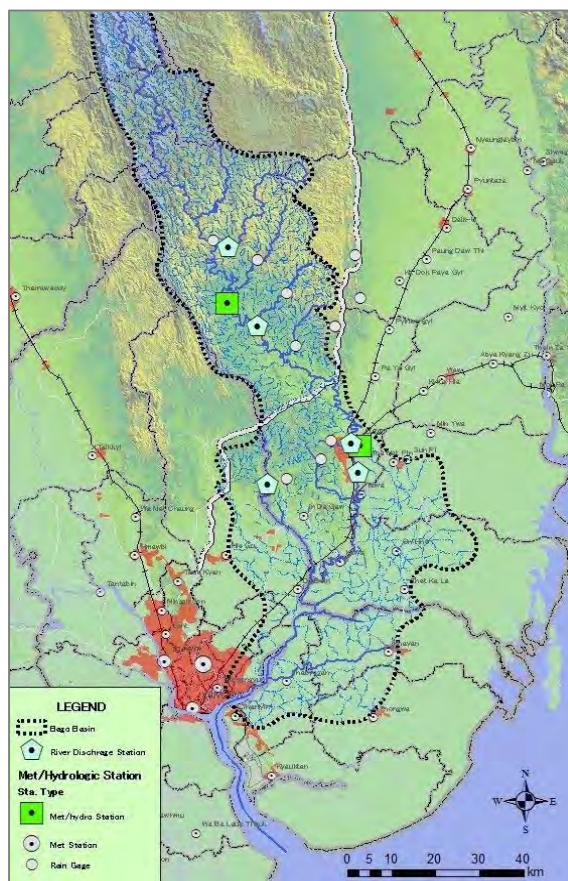


図 4-2-2-2 水文観測所位置図



表 4-2-2-1 気象・水文観測所一覧

No	Station Name	Type	Status	Record Available since	Lat (DD)	Lon (DD)	Owner
1	Bago	Met/Hydro_M	Ext	1965/1972	17.33	96.50	DMH
2	Zaungtu	Met/Hydro_M	Ext	1987/1987	17.63	96.23	DMH
3	Kabaaye	Met	Ext	1901	16.87	96.18	DMH
4	Zaungtu Dam	RG_M	Ext	1993	17.76	96.20	DHPI
5	La Gun Byin Dam	RG_M/RG_A/WL_A	Ext/Const	2001	17.25	96.31	ID
6	Alaingni Dam	RG_M	Ext	2003	17.26	96.35	ID
7	Mazin Dam	RG_M	Ext	2000	17.34	96.44	ID
8	Zalataw Dam	RG_M	Ext	1999	17.30	96.42	ID
9	Pyi Pon Gyi Dam	RG_M	Ext	1988	17.64	96.50	ID
10	Baw Ni Dam	RG_M	Ext	1999	17.73	96.49	ID
11	Wa Ga Dok Dam	RG_M	Ext	2008	17.58	96.45	ID
12	Kodugwe Dam	RG_M/RG_A	Ext/Plan	2012	17.72	96.29	ID
13	Salu Dam	RG_M	Ext	2012	17.54	96.37	ID
14	Shewlaung Dam	RG_M	Ext	2012	17.65	96.35	ID
15	Daik-U	RG_M	Ext	-	17.80	96.67	ID
16	Waw	RG_M	Ext	-	17.47	96.68	ID
17	Tha Na Pin	RG_M	Ext	-	17.29	96.58	ID
18	Tawa	RG_M	Ext	-	17.23	96.50	ID
19	Kawa	RG_M	Ext	-	17.85	96.46	ID
20	Nyauglaybin	RG_M	Ext	-	17.95	96.73	ID
21	Myit Kyo	RG_M	Ext	-	17.59	96.82	ID
22	Min Ywa	RG_M	Ext	-	17.35	96.64	ID
23	Shwe Hla	RG_M	Ext	-	17.00	96.41	ID
24	Bago Old Bridge	Hydro(_M/_A)	Const	2013	17.34	96.48	JICA/ID
25	Tama Bin	Hydro	Const	2013	17.58	96.29	JICA/ID
26	Dawei Dam	Hydro	Const	2013	17.75	96.23	JICA/ID
27	Shan Kine Sluice Gate	RG_A	Plan	2013	17.41	96.86	ID
28	Pine Kyone Sluice Gate	RG_A	Plan	2013	17.12	96.49	ID
29	Lower Se-Tee	Hydro (_M)	Const	2012	17.28	96.50	ID

Met: Meteorological Station for the measurement of climatic items including Rain, Temperature, Wind, Humidity, and Pan-Evaporation.  
Hydro: Hydrological Station for the measurement of both River Stage and Discharge Rate.  
WL\_A: Water Level Station for the (automatic) measurement of River Stage or Reservoir WL.  
RG\_M: Rain Gauge Station (Manual Measurement), RG\_A: Rain Gauge Station (Automatic Measurement)  
Ext: Existing Station, Const: Constructed by May 2013, Plan: Plan to Construct by May 2014  
DMH: Department of Meteorology and Hydrology, ID: Irrigation Department, JICA: Japan International Cooperation Agency,  
DHPI: Department of Hydropower Implementation, the Ministry of Electric Power No.(1),  
DD: Decimal Degree

#### 4-2-3 雨量

調査域（バゴー流域）内には、ミャンマー国運輸省気象水文局（DMH）の観測所が3箇所がある。バゴー流域の下流から、其々、ヤンゴン市（カバアエ観測所）、バゴー市（バゴー観測所）ザウンツ村（ザンツ観測所）が設けられ、長期観測データが蓄積されている。

年平均雨量は、カバアエ観測所で2,780 mm（1980～2010年：31年間）、バゴー観測所で3,260 mm（1980年～2010年：43年間）、およびザンツ観測所で2,860 mm（1989～2012年：24年間）であ

り、バゴー流域の中流域のバゴー観測所で最も多雨となる（図 4-2-3-1～図 4-2-3-3 参照）。

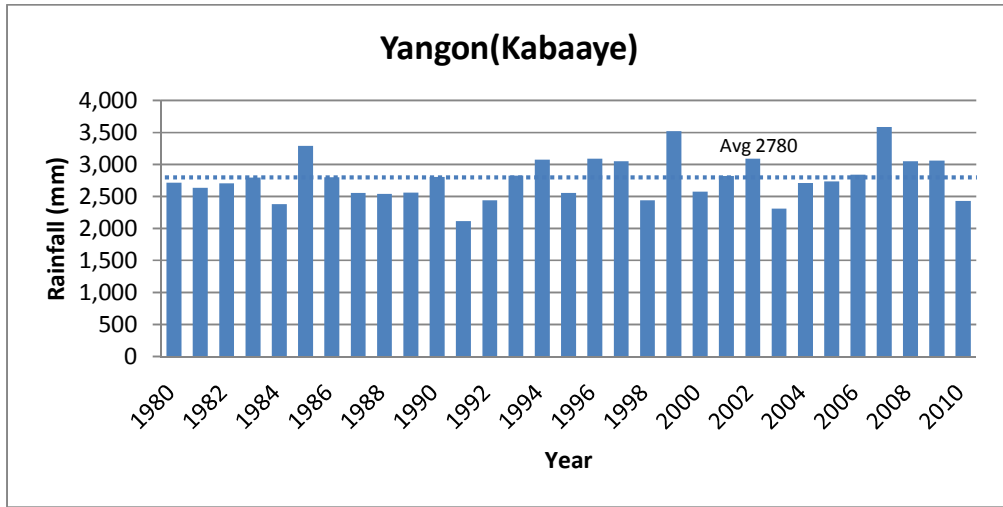


図 4-2-3-1 年降水量(ヤンゴン市:カバアエ観測所)

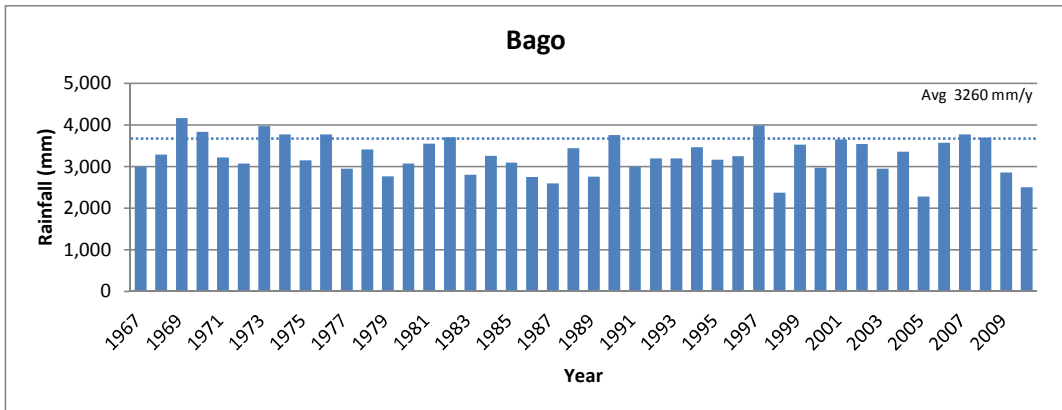


図 4-2-3-2 年降水量(バゴー市:バゴー観測所)

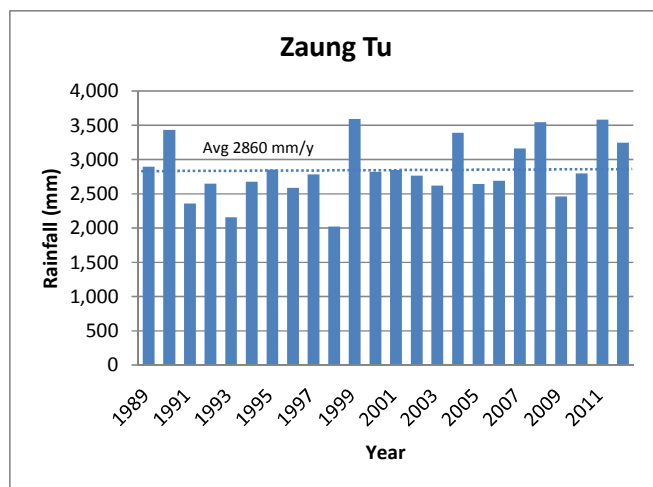


図 4-2-3-3 年降水量(ザンツ観測所)



また、年値の比較において各年毎の差は、バゴー観測所の43年間で、最低2,300 mm/年から最高4,200 mm/年と、その差は1.8倍程度となる<sup>8</sup>。同観測所の記録を基に、確率雨量を計算すると1/10年の超過確率年で3,860 mm/年、非調査確率で2,700 mm/年となり、その差は平均値から0.8～1.2倍となる(表4-2-3-1参照)。つまり、10年確率で、雨量は±20%程度の変動が認められる。

表 4-2-3-1 確率年の計算(バゴー観測所の年雨量)

NO	1/ Return Period	Exceedance Probability (Annual Rainfall)	Non-Exceedance Probability (Annual Rainfall)	NO	1/ Return Period	Exceedance Probability (Annual Rainfall)	Non-Exceedance Probability (Annual Rainfall)
1	1/2	3,229	3,229	12	1/50	4,304	2,423
2	1/3	3,430	3,040	13	1/60	4,349	2,398
3	1/4	3,549	2,939	14	1/80	4,419	2,360
4	1/5	3,633	2,871	15	1/100	4,471	2,332
5	1/8	3,793	2,749	16	1/150	4,565	2,284
6	1/10	3,863	2,699	17	1/200	4,630	2,252
7	1/15	3,984	2,618	18	1/250	4,680	2,228
8	1/20	4,065	2,566	19	1/300	4,720	2,209
9	1/25	4,126	2,528	20	1/400	4,783	2,180
10	1/30	4,174	2,499	21	1/500	4,830	2,159
11	1/40	4,248	2,455				

#### 4-2-3-1 流域の降雨特性

ミャンマー国運輸省気象水文局(DMH)及び灌漑局所管の雨量観測所を合わせると、23箇所が設置されるが、月別雨量を概観すると、何れの地点でも、12月～3月までは無降雨が続き4月から降雨が始まる。本格的な降雨は前述のとおり6月～8月にもたらされるが、9月以降で急速に雨量は減少する(図4-2-3-4参照)。

雨の月雨量の地域的な分布については、バゴー川の西岸と東岸部で多少異なり、ヤンゴン市を含むバゴー流域の西岸部(～下流)の最大月は7月であるに対し、バゴー市を含む流域の東岸(～シットン川)では、最大月は8月に連れ込む。バゴー流域の東岸部では7月より、8月に強い降雨が多く、これらの結果として、年降雨量もバゴー流域東岸部で200 mm～400 mm程度が多く観測されている。

<sup>8</sup> カバアエ観測所およびザンツ観測所では、1980年からの30年間の観測値で、最低2,000 mm/年から最高3,500 mm/年、またバゴー観測所では、1967年から42年間の観測値で、2,300 mm/年～4,000 mm/年の年較差がある。

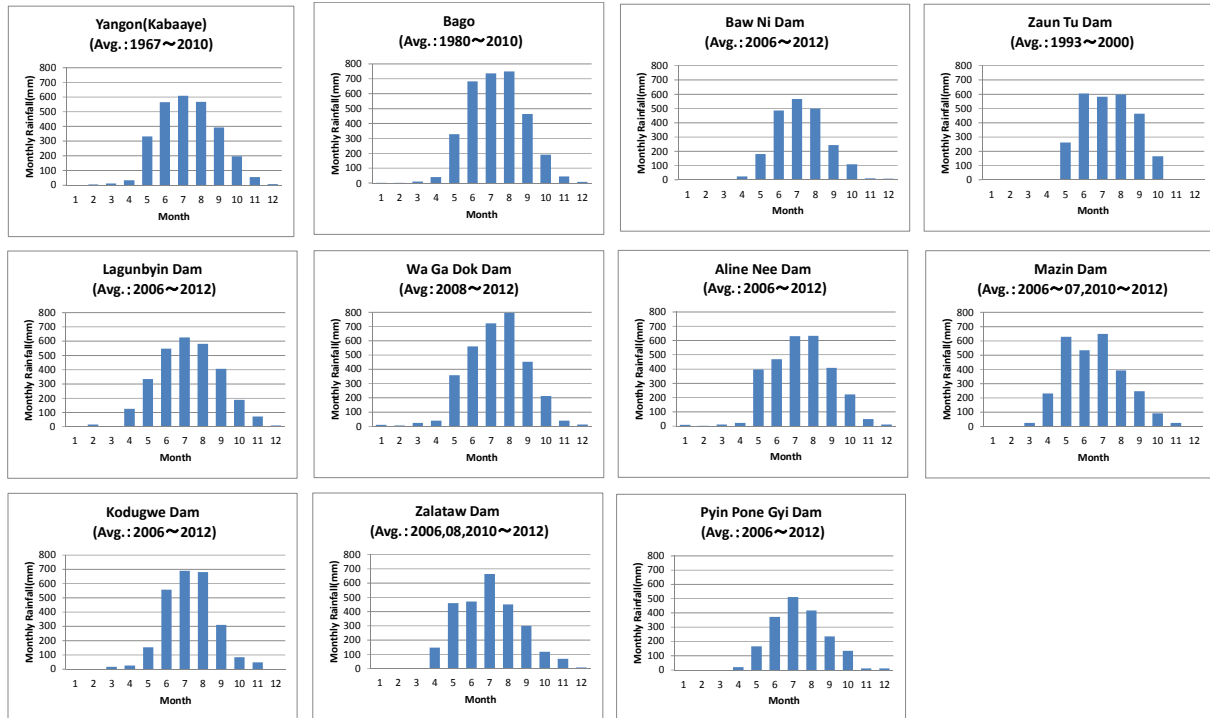


図 4-2-3-4 主要観測所月雨量

#### 4-2-4 気温

バゴー流域の気候値については、その地域的な概要を National Centers for Environmental Prediction (NCEP)<sup>9</sup>の再解析データによって把握が可能である。データは1972年より2010年の32年間の気候値を6時間毎(1日4回0000, 0600, 1200, and 1800 UTC)で再現したものであり、緯度・経度0.3度、0.5度、1.0度、1.9度及び2.5度の格子データでNCEP(Climate Forecast System Reanalysis: CFSR)<sup>10</sup>結果として)より提供されている。これらのデータを使い、調査域の平均日最低温度、平均日最高平均温度の等値線図を作成した(図4-2-6-1参照)。

日最高気温は14.0℃から49.1℃の範囲にあり、平均は31.5℃である。また最も高温となる地区はバゴー市の北に認められる。ここより北方と南方に向かい最高気温は低くなるが、森林で被覆されるバゴー流域の上流にあつては気温の上昇は抑制される。一方で、日最低温度は3.5℃から31.3℃の範囲、および平均は21.5℃であるが、海岸にそつての気温低下は少なく、逆に、ペグー丘陵での最低気温の低下は大きい。

<sup>9</sup> NCEP(The United States National Centers for Environmental Prediction : 米国国立環境予測センター (NCEP) は米国、地球規模の気象、水、気候、空間気象のガイドライン、予測、警報、解析などを行い外部に提供している (<http://www.ncep.noaa.gov/>)。

<sup>10</sup> CFSR(Climate Forecast System Reanalysis) : NCEPの気候再解析データであり、1979年から2010年までの32年間の再解析を地上観測所の記録、衛星データなどを気圏-海洋-地表-海氷など地球気候システムより行ったものであり公表されている (<http://cfs.ncep.noaa.gov/cfsr/>)。



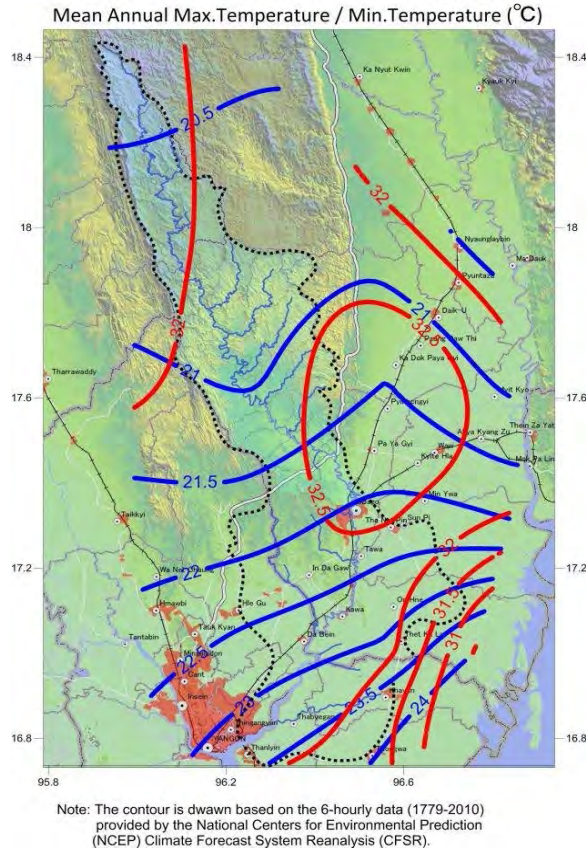


図 4-2-6-1 等値線図(日最高・日最低気温 °C)

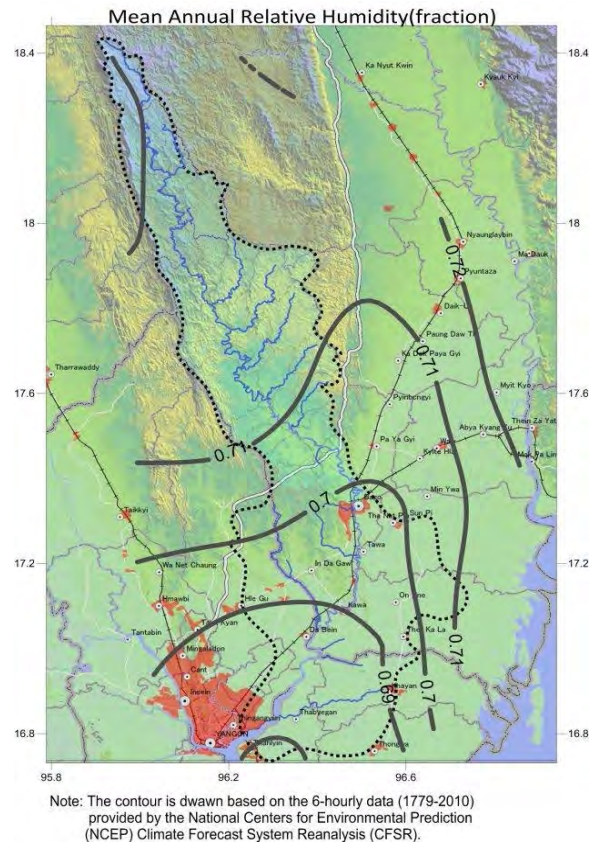


図 4-2-7-1 等値線図(日平均湿度 %)

#### 4-2-5 湿度

年間の平均湿度は 71% である (図 4-2-7-1 参照)。しかし、季節変化は大きく、日平均湿度で、乾季の最低が 14% から雨季の最高が 99% とその差は 85% に及ぶ。平原部で低く (乾燥)、丘陵部で高い (湿潤)。また、タンリントンシップおよびチャウタントンシップを含むヤンゴン南部地区は、調査域のなかでは乾燥域に属する。

#### 4-2-6 風速

日平均風速は図 4-2-8-1 に示すとおり、平均で 2.2m/sec、地区の最高で 4m/sec 程度である。風速の分布は単調であるが、概ね内陸部で小さく海岸部で大きい。日単位では、最少で 0.3 m/sec、最大で 11.4 m/sec である。

#### 4-2-7 日射

日平均日射の年平均は図 4-2-9-1 示したように 19.2 MJ/m<sup>2</sup> である。また対象地区内で最低 18 MJ/m<sup>2</sup> から最高 21 MJ/m<sup>2</sup> の範囲にある。日単位の日射量では最高 29.5 MJ/m<sup>2</sup> である。流域内で最も大きな日射はヤンゴンの南にあり、ここから北または北西に小さくなり、バゴー流域の西縁で低くなる。

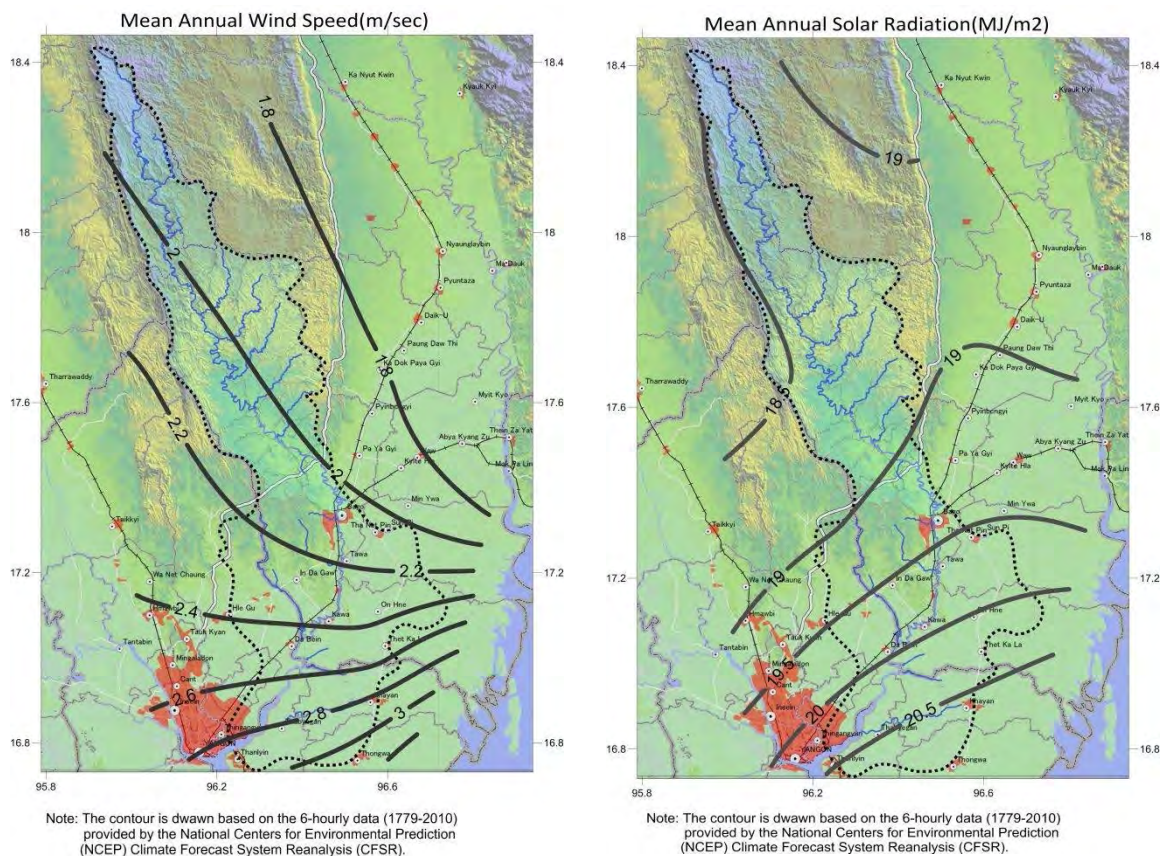


図 4-2-8-1 等値線図(日平均風速 m/sec)

図 4-2-9-1 等値線図(日平均日射 MJ/m<sup>2</sup>)

#### 4-2-8 蒸発散量

調査域の蒸発散量は、図 4-2-10-1 のとおり FAO と MODIS 衛星画像解析によって想定可能である。FAO データベースに掲載される値は、基準となる作物よりペンマン・モンティース式で計算した基準蒸発散量(reference evaporation)であり、バゴー流域内で複数の観測点で利用可能である。FAO データベースより、バゴー地点で 1,240mm/年、ヤンゴン地点で 1,333mm/年が得られる。

一方で、MODIS 衛星画像解析に結果となる実蒸発散量は、衛星データから地表アルベド、葉面積指数、日射をより抽出し計算したものであり、対象地区の実蒸発量を概ね 500 mm/日～1,000mm/日、平均 700mm/日と試算される。



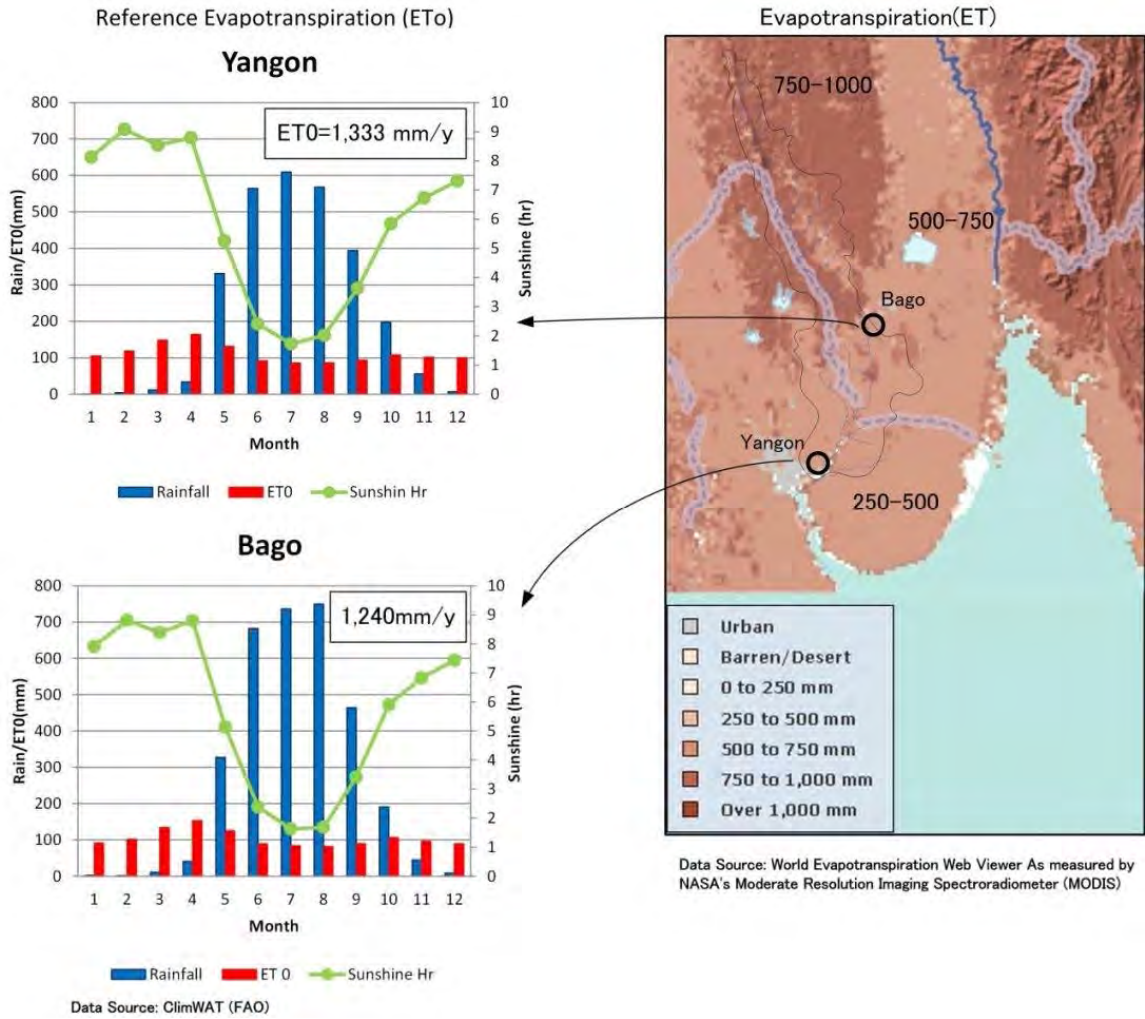


図 4-2-10-1 基準蒸発散量(FAO) 及び実蒸発散量(MODIS)

4-3 潮汐

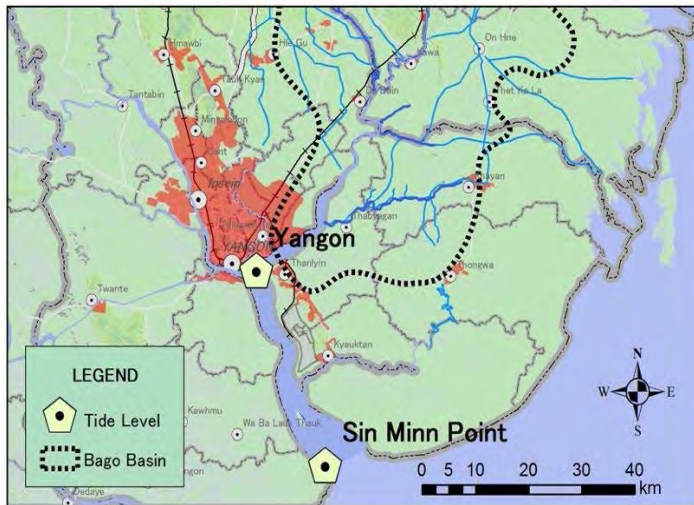


図 4-3-1 ヤンゴン港潮位観測所 (MNHC)

ミャンマー沿岸部の潮汐表は、Myanmar National Hydrographic Centre (MNHC)より全土 17 地点において予報値が公表されている<sup>1</sup>。このなかで調査地に最も近い地点はヤンゴン港である。

2013 年のヤンゴン港（バゴー川河口部）の年間最低満水面は 2 月 11 日の 0.28m、最高満水面は 10 月 8 日の 7.23m である。また、朔望平均最低潮位 (LWL) は 0.69m、また朔望平均最高潮位 (HWL) は、6.89m となる。年間平均潮位は 3.58m であることから、

其々、朔望水位までは+3.31 及び-2.89 の潮位差が認められる（表 4-3-1、図 4-3-1 及び図 4-3-2 参照）。

表 4-3-1 ヤンゴン港(バゴー川河口部)の潮位概要(2013 年)

Month	High Water Level (HWL, m)	Mean Water Level (MWL, m)	Low Water Level
1	6.23	3.21	0.30
2	6.41	3.27	0.28
3	6.79	3.3	0.37
4	6.87	3.34	0.59
5	6.97	3.52	0.74
6	6.99	3.70	0.79
7	7.01	3.83	0.80
8	7.01	3.98	1.00
9	7.04	3.92	1.08
10	7.23	3.81	0.97
11	7.18	3.61	0.78
12	6.9	3.42	0.61

<sup>1</sup>過去の潮位観測から 17 地点の調和定数（観測地点毎に固有な定数）を求め、Myanmar National Hydrographic Centre (MNHC)によって毎年推算され、毎年潮汐表 (Myanmar Naval Hydrographic Centre Myanmar Navy, Myanmar Coastal Port Tide Table) として提供されている。



Mean	6.89	3.58	0.69
------	------	------	------

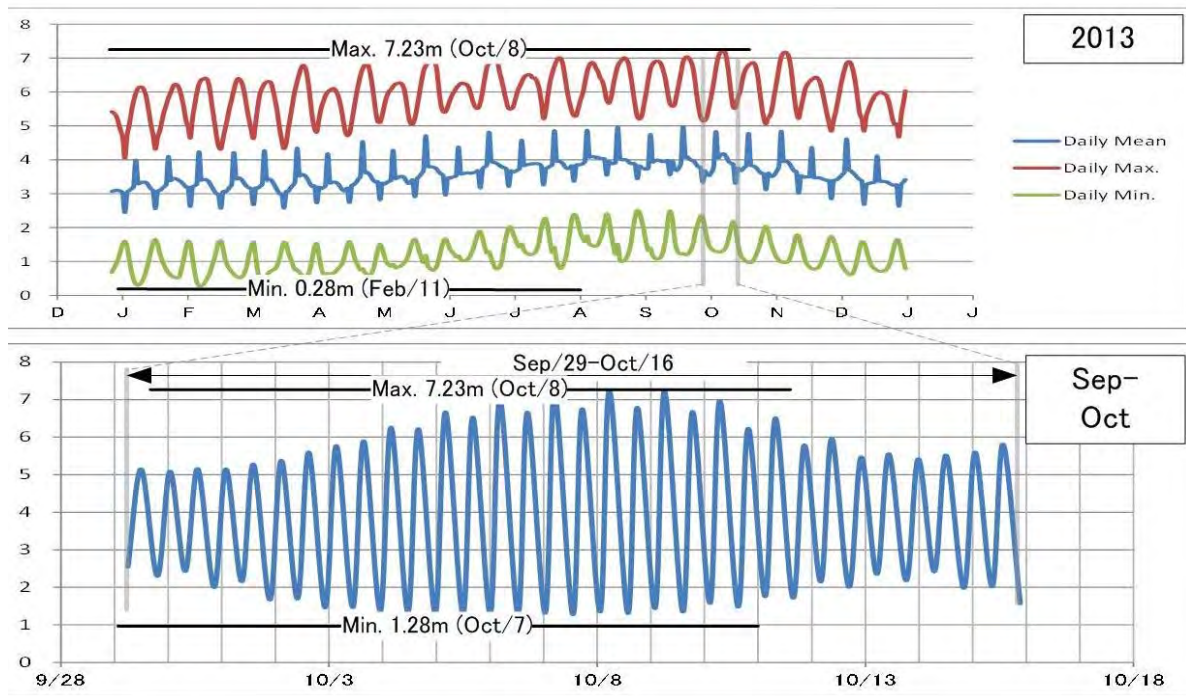


図 4-3-2 ヤンゴン港の潮位予測(単位:m)