

### 3-3 水理地質総合解析

#### 3-3-1 概要

すべての地下水調査結果を考慮すると、調査地における帯水層の分布、性状及び地下水利用は、模式的に図 3-3-1-2 のように、総括される。また、地下水の水頭分布および流動状況は、模式的に図 3-3-1-1 のように推定される。以下、それらの状況について項目ごとに記述する。

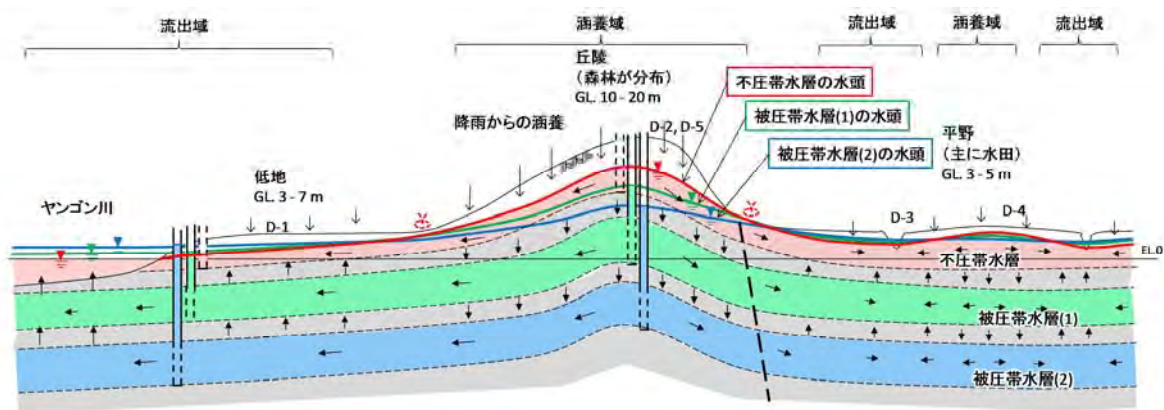


図 3-3-1-1 調査地における地下水の水頭分布及び流動の模式断面図

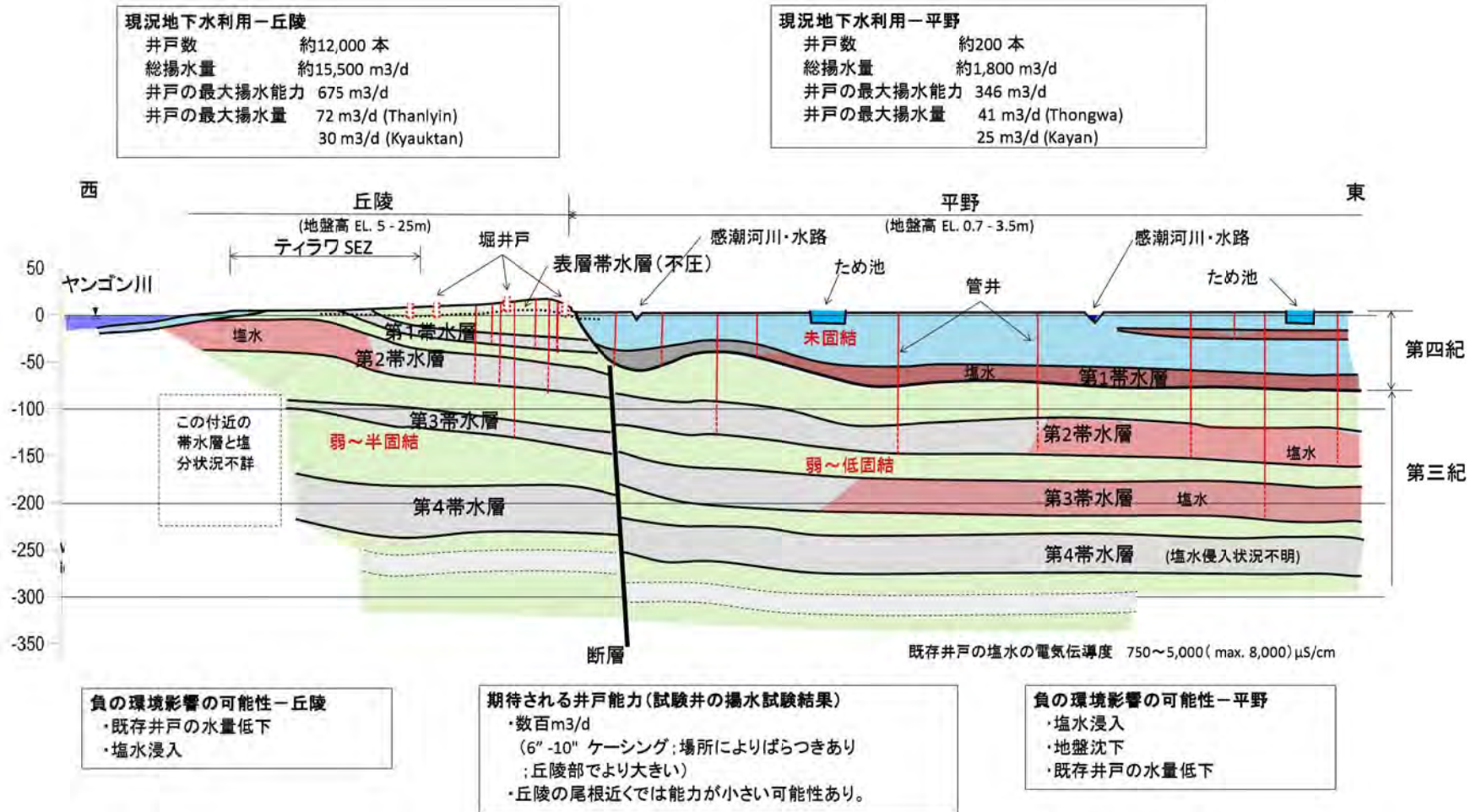


図 3-3-1-2 調査地における帯水層分布、性状及び地下水利用の模式断面図

### 3-3-2 帯水層の分布と性状

#### 3-3-2-1 帯水層の同定および対比

図 3-3-2-1 および図 3-3-2-2 にコア・ボーリング、試験井掘削および物理探査の位置を示す。コア・ボーリングと試験井掘削の結果から、第三紀丘陵と第四紀平野における帯水層の分布と性状は、それぞれ図 3-3-2-3 および図 3-3-2-4 に示すように推定される。図 3-3-2-5 および図 3-3-2-6 は、物理探査結果から作成した東西および南北方向の比抵抗断面図の水理地質的な解釈を示す。図 3-3-2-7 および図 3-3-2-8 はティラワ S E Z 中央付近の帯水層断面を示す。同定された帯水層とその性状を表 3-3-2-1～表 3-3-2-3 .に示す。

図 3-3-1-2（前掲）に示すように、調査地域は、水理地質的にも地形と同様に、丘陵地域と平野地域に二分される。両者の境界は、丘陵東縁の推定断層である。コア・ボーリング及び試験井掘削の結果から、丘陵地域には、表層不圧帯水層と 4 つの半固結状態の被圧帯水層の分布が推定される。これらは若干褶曲しているか、東方に傾いている。平野地域では、4 つの未固結ないし弱固結の被圧帯水層の分布が推定される。一番上の被圧帯水層は、第四紀堆積物の基底粗粒層に当たる。表層の不圧帯水層は、あまり発達していない。地層は、ほぼ水平に分布する。

平野部の不圧帯水層と第 1 被圧帯水層間（図 3-3-1-2 の水色の部分）には、厚さ 30m～50m の未固結粘性土が分布する。微細砂、シルト、粘土の微細互層を主体とし、有機質土や非常に柔らかい粘土層の分布に乏しいため、地下水頭変化にともなう単位厚さ当りの圧密沈下量は大きくないと推定される。しかし、全体の層厚が大きいため地下水開発に伴う地盤沈下には注意が必要である。

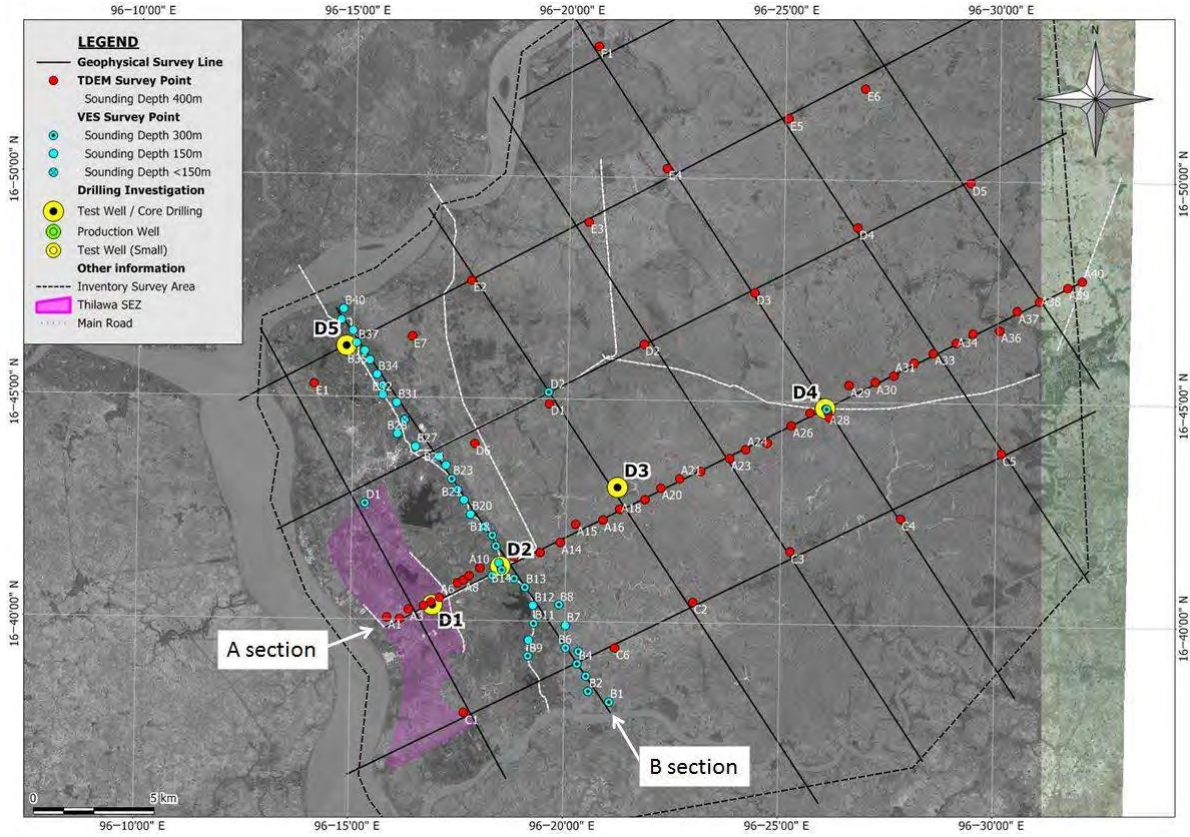


図 3-3-2-1 帯水層調査位置図（全域）

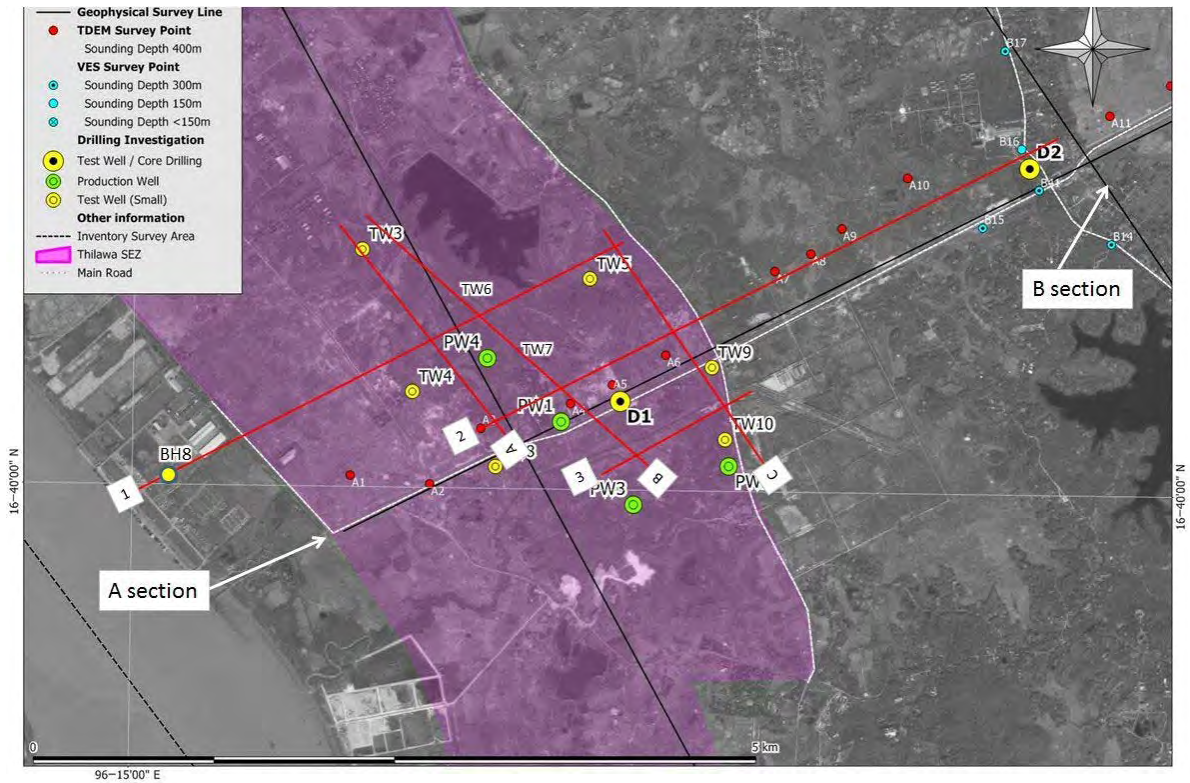


図 3-3-2-2 帯水層調査位置図（ティラワSEZ中央付近）

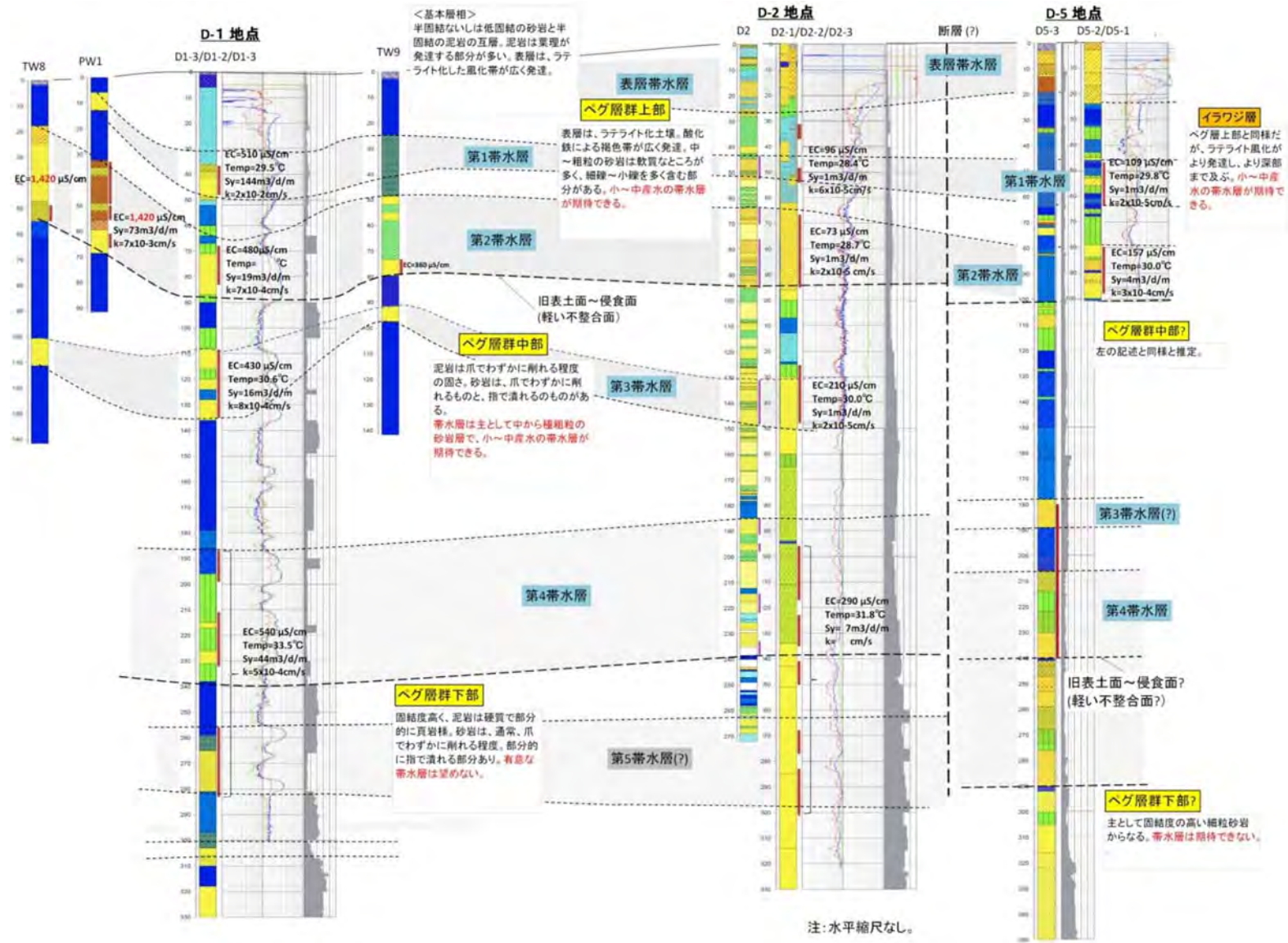


図 3-3-2-3 第三紀丘陵の帯水層調査結果と推定帯水層断面

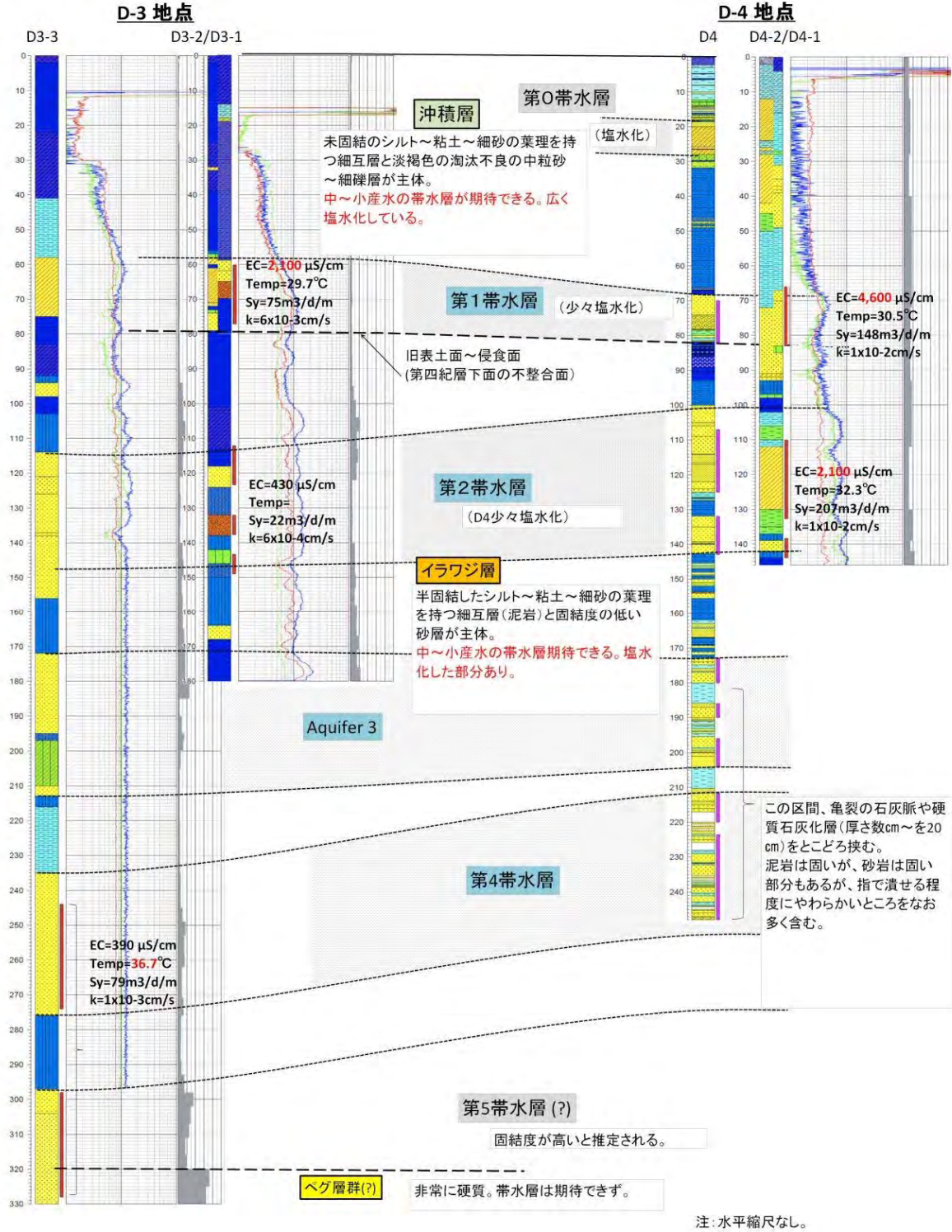


図 3-3-2-4 第四紀平野部の帯水層調査結果と推定帯水層断面

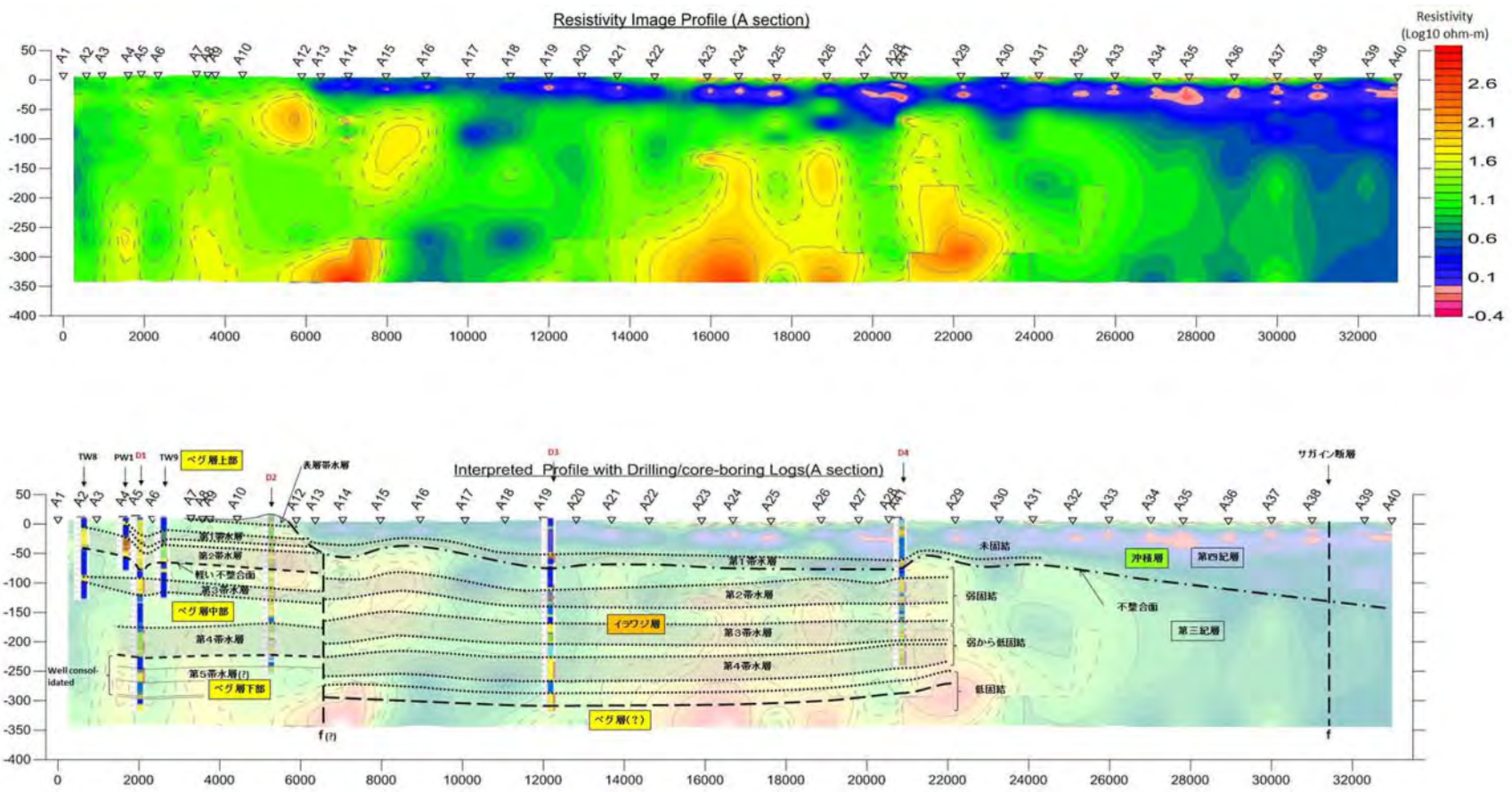


図 3-3-2-5 調査地東西方向 (A断面) の比抵抗断面と推定帯水層分布

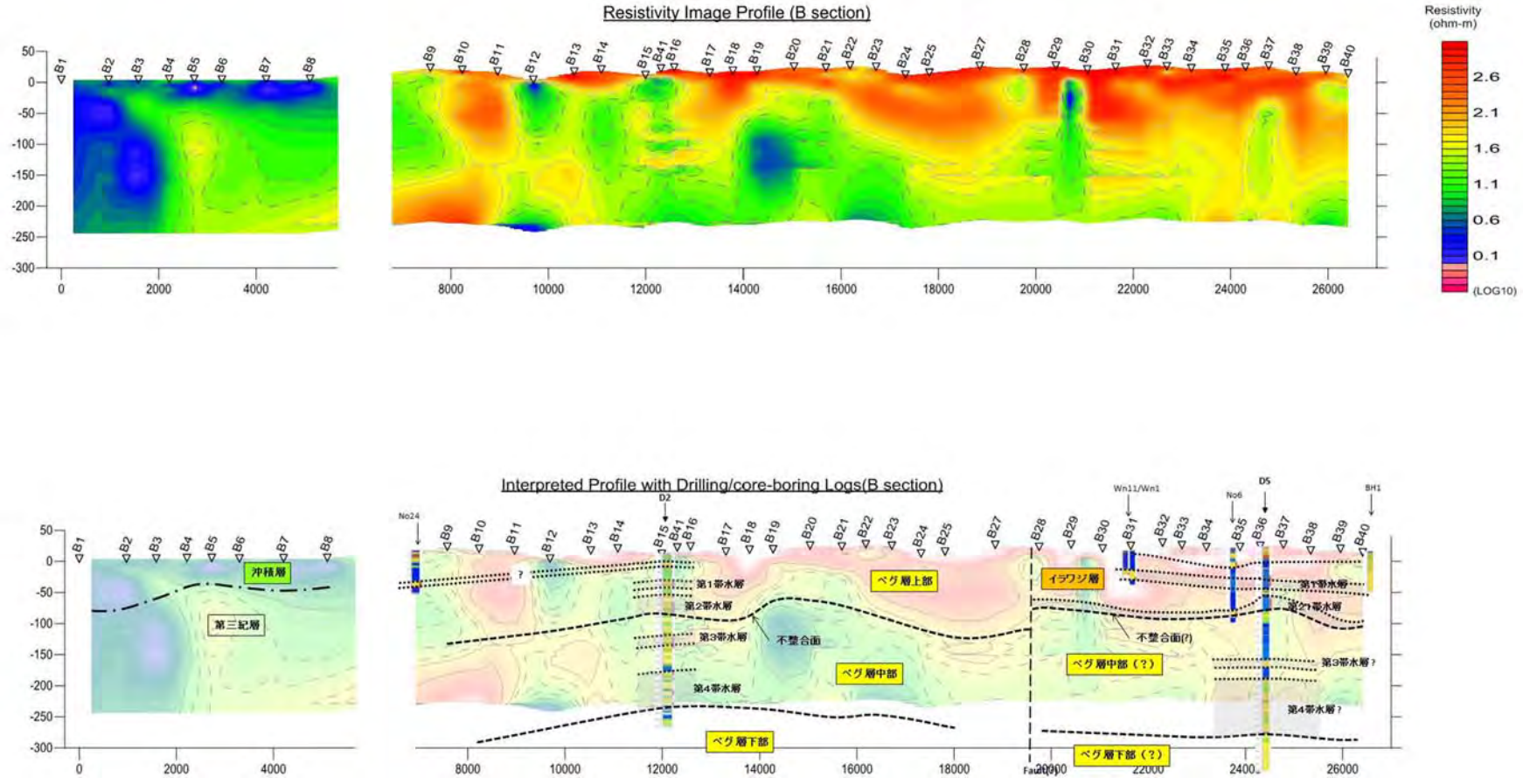
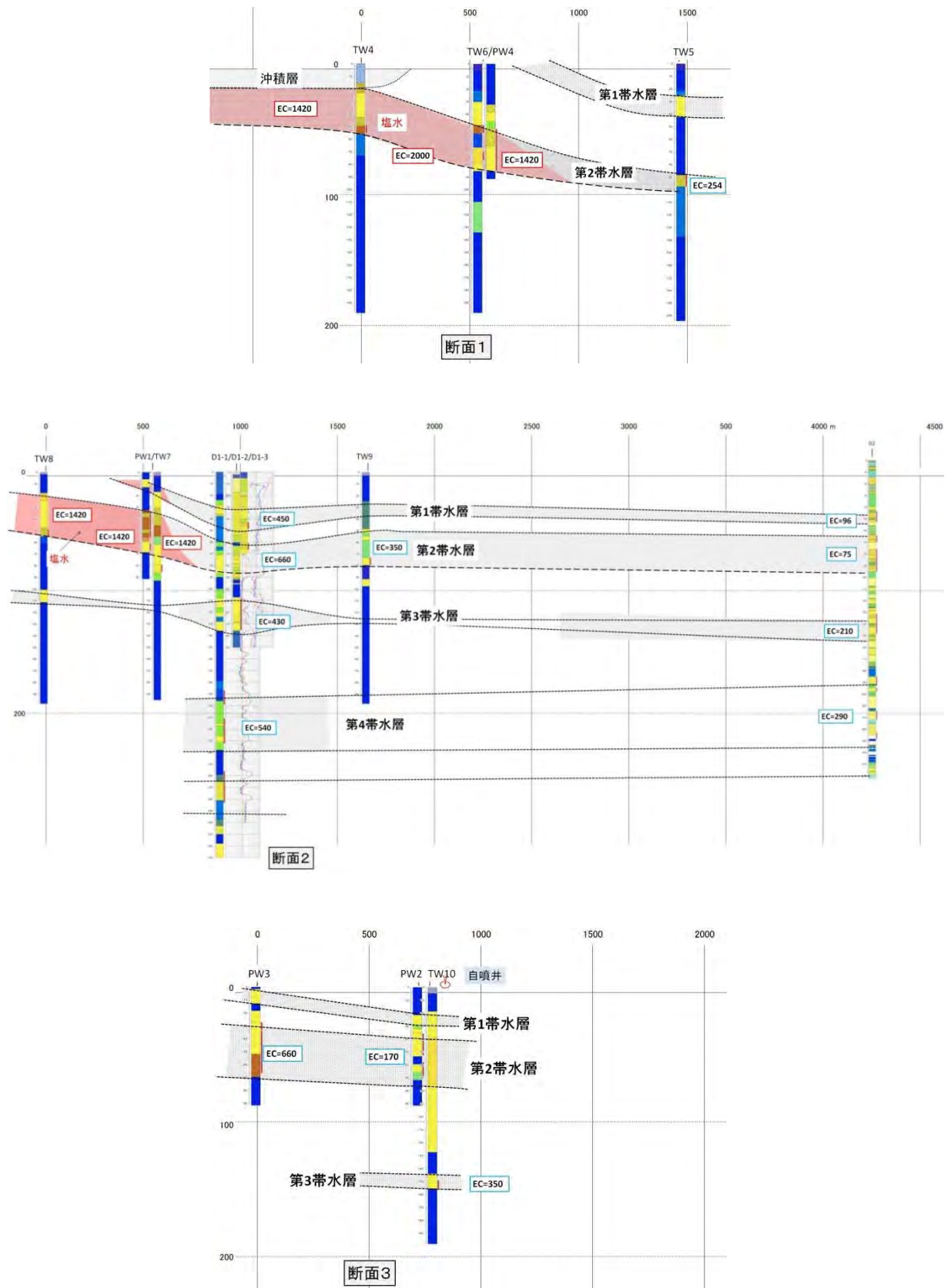


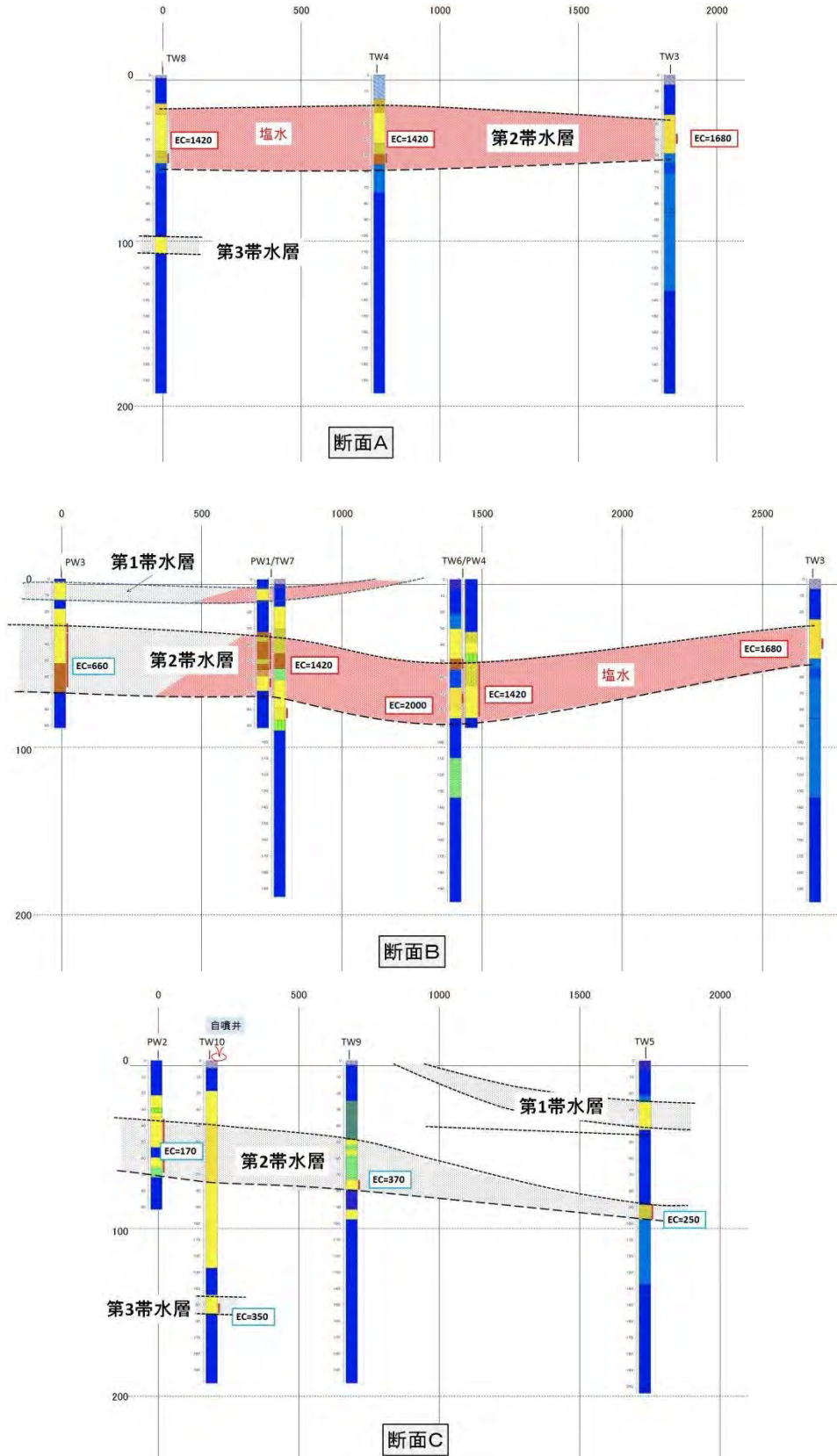
図 3-3-2-6 調査地南北方向 (B 断面) の比抵抗断面と推定帯水層分布





注) ECの単位は $\mu S/cm$ 。距離の単位はm。

図 3-3-2-7 ティラワ SEZ 中央付近の推定帯水層断面 (1)



Note: Unit of EC –  $\mu S/cm$ ; Unit of distance – meter.

図 3-3-2-8 ティラワ SEZ 中央付近の推定帯水層断面 (2)

表 3-3-2-1 地域毎の帯水層とその性状—SEZ 中央付近の丘陵

帯水層	主な分布深度 (m)	層厚	地質区分	層相	比湧出量 (m <sup>3</sup> /d/m)	透水係数 (cm/s)	揚水試験揚水量 (m <sup>3</sup> /d)	水質他 (EC: μ S/cm)	地下水利用	試験井
表層帯水層	0 ~ 20-30	20 ~ 30	ベグ層 (漸新世? ~ 中新世)	低固結の砂、全体的に風化					堀井戸の主採取対象	
第1帯水層	30 ~ 50	8 ~ 15		低固結の砂 ~ 細礫、部分的に風化	144 1	3×10 <sup>-2</sup> 1×10 <sup>-4</sup>	858 19	EC=96, 510 pH<6.5	管井による採取対象	D-1-0 D-2-0
第2帯水層	65 ~ 95	30		低固結の砂 ~ 細礫、一部風化	19 1 73 20 63 15	1×10 <sup>-3</sup> 8×10 <sup>-5</sup> 7×10 <sup>-3</sup> 1×10 <sup>-3</sup> 4×10 <sup>-3</sup> 8×10 <sup>-4</sup>	544 39 653 653 653 653	EC=73, 480, 170, 660 EC=1420, 1420 (SEZ西部は塩水化) pH<6.5	管井による採取対象	D-1-1 D-2-1 PW1 PW2 PW3 PW4
第3帯水層	100 ~ 150	10 ~ 25		低固結の砂、中国結砂岩中の節理	16 1	2×10 <sup>-3</sup> 3×10 <sup>-5</sup>	383 29	EC=210, 430, 510	一部、管井による採取対象	D-1-2 D-2-2
第4帯水層	185 ~ 240	30			447	9×10 <sup>-4</sup> 1×10 <sup>-4</sup>	670 220	EC=540, 290 pH>8.5 亜鉛-高濃度	未利用	D-1-3 D-2-3

注：地下水は一般に鉄イオンを多く含む。

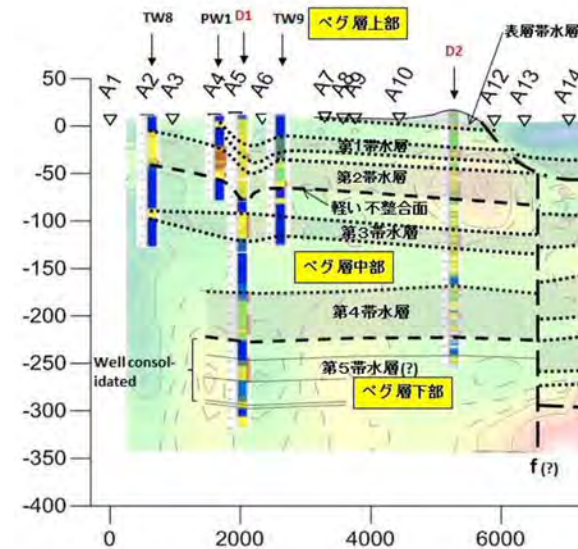
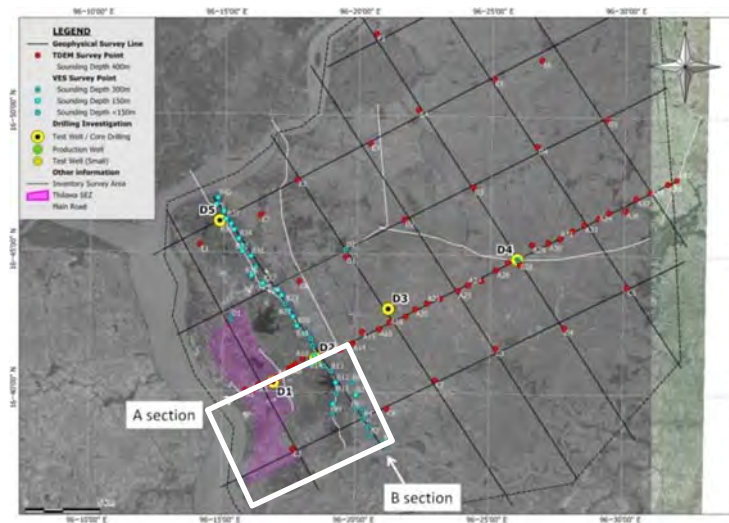


表 3-3-2-2 地域毎の帯水層とその性状－東側平野部－

東側平野部

帯水層	主な分布深度 (m)	層厚	地質区分	層相	比湧出量 (m <sup>3</sup> /d/m)	透水係数 (cm/s)	揚水試験揚水量 (m <sup>3</sup> /d)	水質他 (EC: μ S/cm)	地下水利用	試験井
表層帯水層		(5)	沖積層 (第四紀)	未固結のシルト質砂				ほとんど塩水化	不利用(掘井戸なし)	
(第0帯水層)	15~40	0~10~25		未固結の砂					一部の地域のみ管井で利用	
第1帯水層	55~85	15~20		未固結の中粒砂~細礫	75 148 34	6x10 <sup>-3</sup> 2x10 <sup>-2</sup> 7x10 <sup>-2</sup>	812 812 206	EC=2100, 4600 西側の丘陵近傍を除き、塩水化。	トングワおよびカヤンでは塩水化のため不利用。丘陵に近い西部では管井の主採取対象(東ヤンゴン大学等)	D-3-1 D-4-1 THA-8-5116
第2帯水層	100~150	25	イラワジ層 (鮮新世?)	弱固結の中~粗砂	22 207	1x10 <sup>-3</sup> 2x10 <sup>-2</sup>	383 890	EC=430, 2100	広く管井で利用。	D-3-2 D-4-2
第3帯水層	170~210	20							わずかに管井で利用	
第4帯水層	210~275	30				79	2x10 <sup>-3</sup>	812	EC=390 ph>8.5 水温37度 亜鉛-高濃度	未利用

注: 地下水は一般に鉄イオンを多く含む。

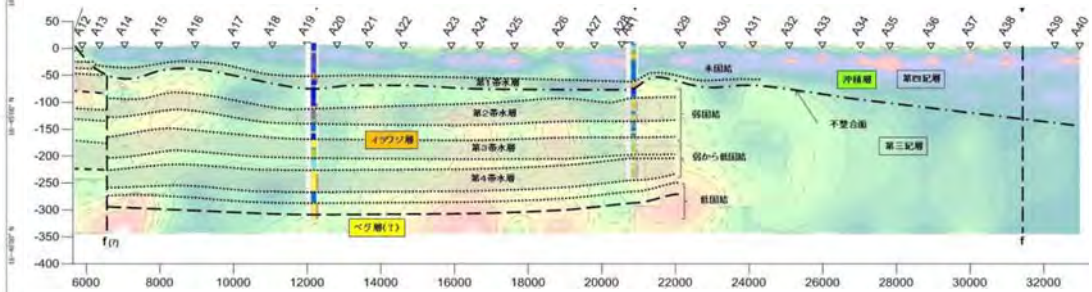
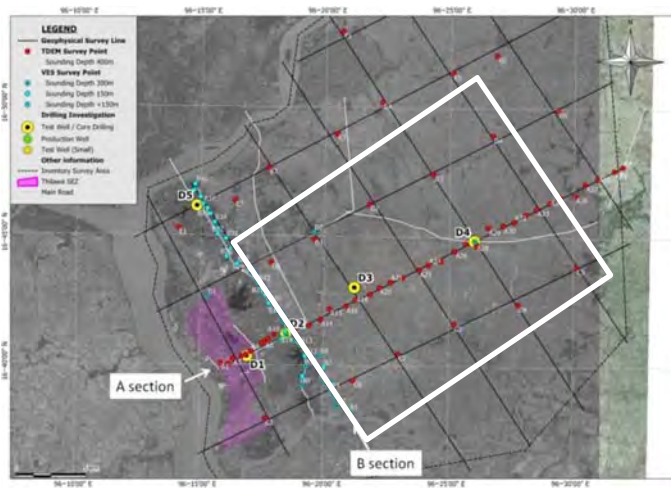
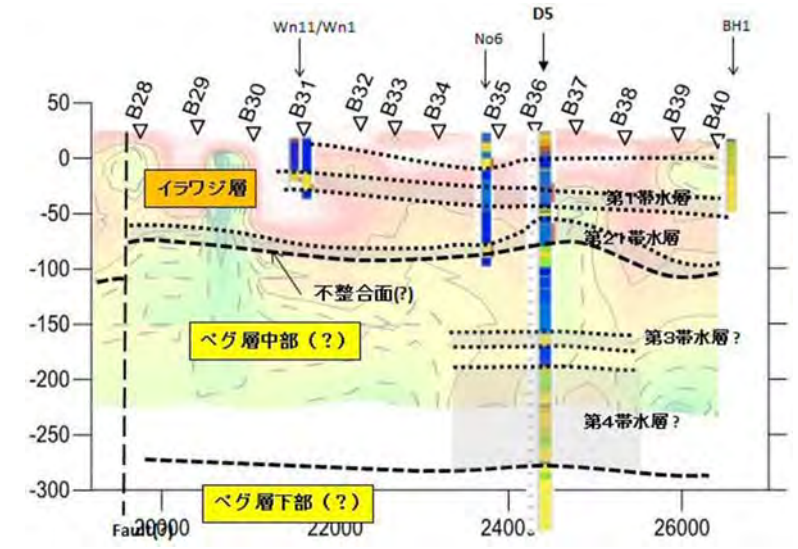
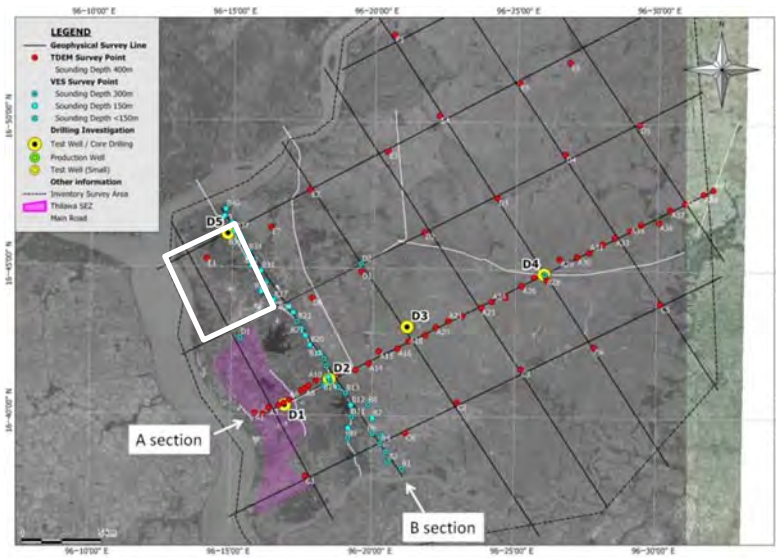


表 3-3-2-3 地域毎の帯水層とその性状－丘陵北部－

丘陵北部

帯水層	主な分布深度 (m)	層厚	地質区分	層相	比湧出量 (m <sup>3</sup> /d/m)	透水係数 (cm/s)	揚水試験揚水量 (m <sup>3</sup> /d)	水質 他 (EC: μ S/cm)	地下水利用	試験井
表層帯水層	0 ~ 20-25	20 ~ 25	イラワジ層 (鮮新世?)	低固結の砂、全体的に風化		0.5 ~ 1.4x10 <sup>-3</sup>			堀井戸の主採取対象	THA-27-8653
第1帯水層	45 ~ 65	20		低固結の砂～細礫、部分的に風化	1	4x10 <sup>-5</sup>	19	EC=110 pH<6.5	管井による採取対象	D-5-1
第2帯水層	80 ~ 100	20		低固結の砂～細礫 (漏水処理のため多量のペントナイト投入)	4 10 ~ 160	5x10 <sup>-4</sup> nx10 <sup>-3</sup>	68 (200 ~ 1090)	EC=160 pH<6.5	管井による採取対象 タンリン中央部で過剰揚水 (D-5-2 静水位EL.0mより低い)	D-5-2 Win Naing et al.(1991)
第3帯水層	180 ~ 190	10	ペグ層? (漸新世? ~ 中新世)	低固結の砂、中固結砂岩中の節理	13	1x10 <sup>-4</sup>	157	EC=420 pH>8.5 亜鉛-高濃度	部分的に管井による採取対象 タンリン中央部で過剰揚水 (D-5-3 静水位EL.0mより低い)	D-5-3
第4帯水層	205 ~ 270	30								

注: 地下水は一般に鉄イオンを多く含む。



### 3-3-2-2 面的な帯水層分布の推定

図 3-3-2-9 および図 3-3-2-10 に、すべての地質柱状、物理探査柱状および既存井戸深度を考慮して作成した帯水層断面図の断面線の位置を示す。図 3-3-2-11～図 3-3-2-15 に、主断面線沿いに作成した帯水層断面図を示す。また、図 3-3-2-16～図 3-3-2-20 に、丘陵部の帯水層断面を示す。これらの帯水層断面図の帯水層境界線をデジタル化し、各境界面等高線図を作成した。これを基に後述の帯水層の三次元概念モデルを構築した。（断面図の詳細については、添付CD中の拡大版を参照）

上記作業において、利用できる地質柱状は限定的であった。帯水層の位置の推定に使用した主なデータは、既存井戸のデータである。その数が多いが地質柱状のデータは含まれず深度のみがわかっている。そこで、井戸のスクリーンが先端の 10～20 フィートに設置されており、帯水層はその付近に存在していると仮定した。断面上には、断面からある指定した距離以内にある井戸を投影した。その距離は、井戸の分布密度により、丘陵部で小さく、平野部で大きくした。これは、丘陵部では地層が多少とも褶曲しており、平野部ではほとんど水平に堆積していることにも対応している。

物理探査（TDEM および VES）による比抵抗区分は、平野部の未固結第四紀層の分布状況の推定に役に立った。これは、同層が主にシルト質の細粒堆積物からなり、また、塩水を含むため低い比抵抗を示す。

深部の帯水層についてはデータが乏しかった。また、丘陵東縁の推定断層を挟んでの両側の帯水層の連続性については不詳である。

この帯水層断面作成作業は、地域の帯水層の第 1 近似モデル作成のため行ったものであるが、このようなデータの量と質を考慮すると、少々大胆な作業であったと言える。断面図は、将来、必要に応じて改訂されなければならない。

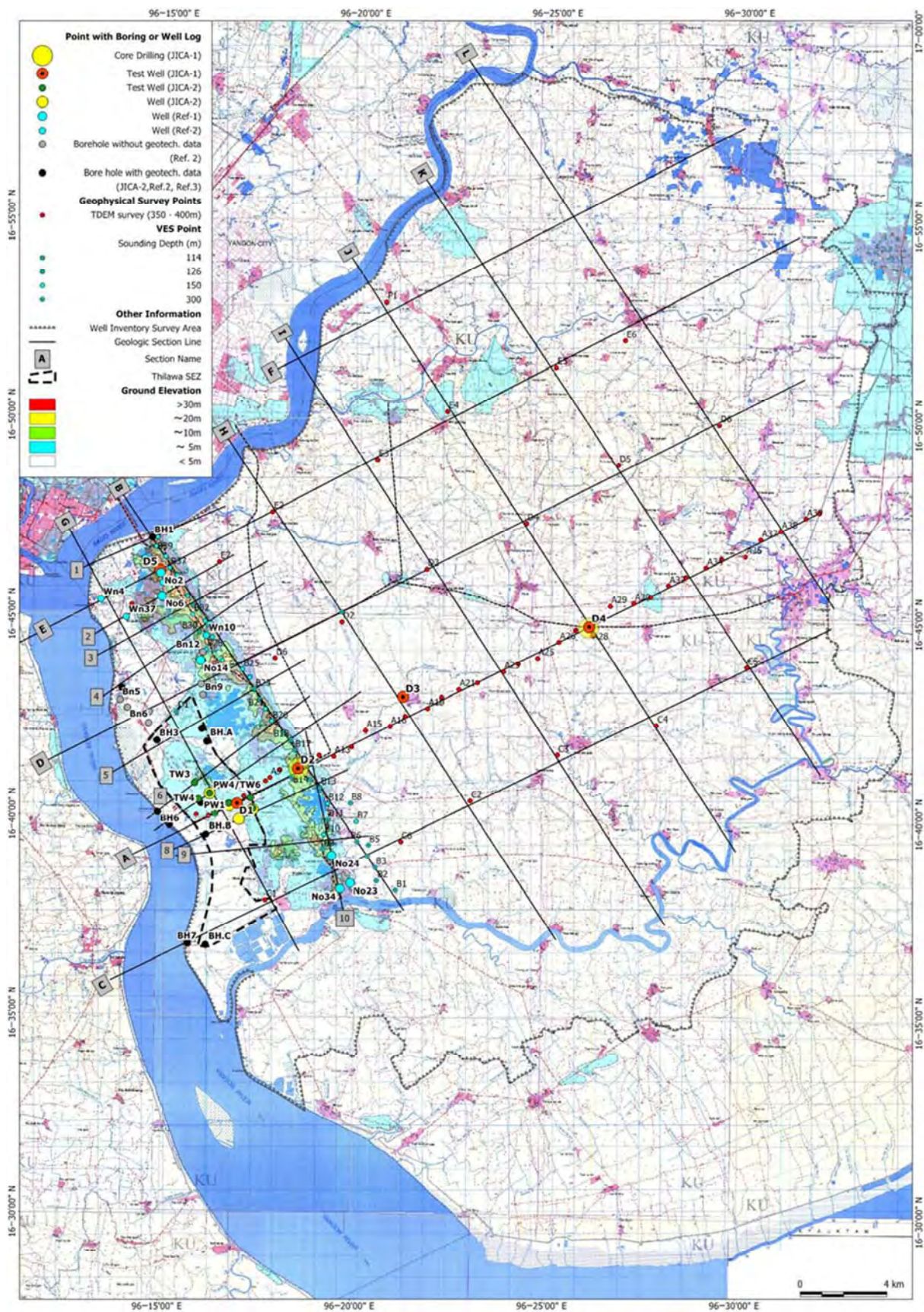


図 3-3-2-9 帯水層断面図の断面線位置図 (1)

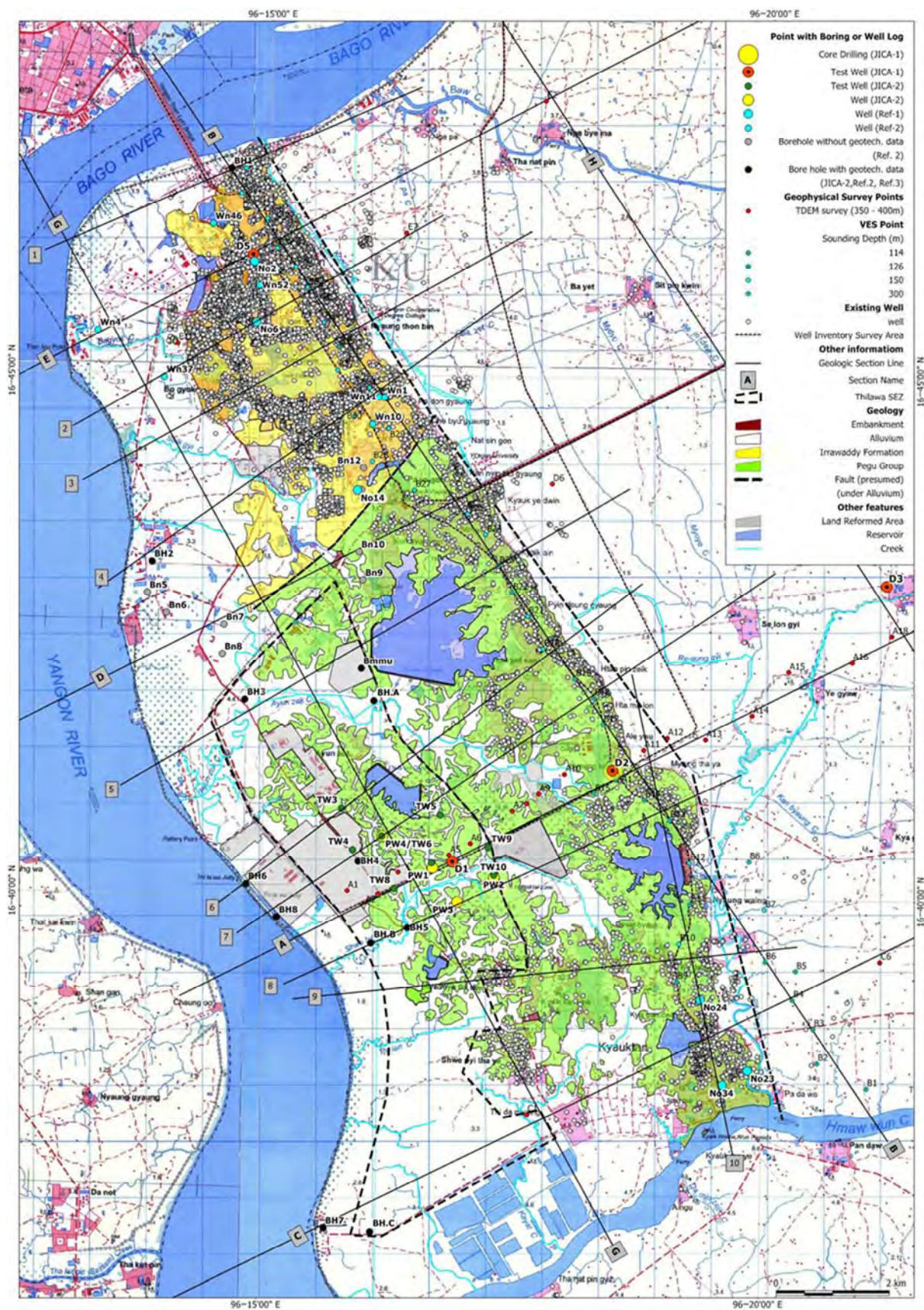
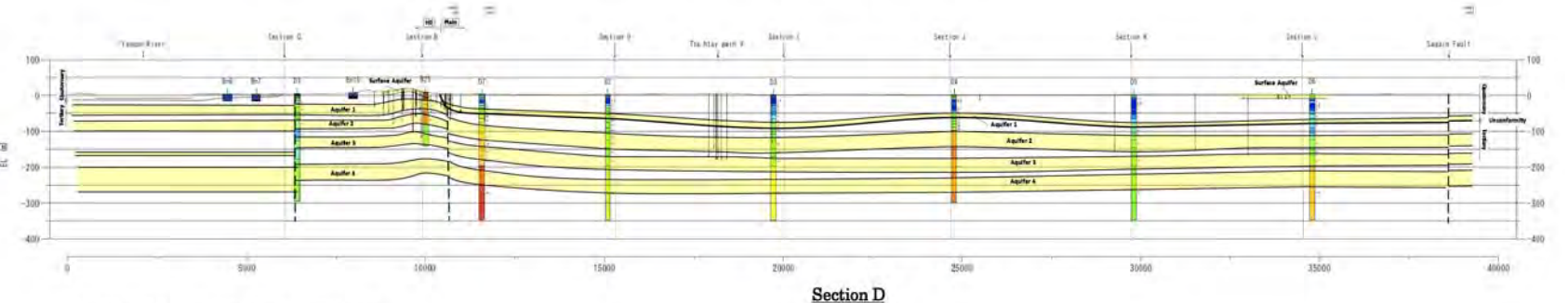
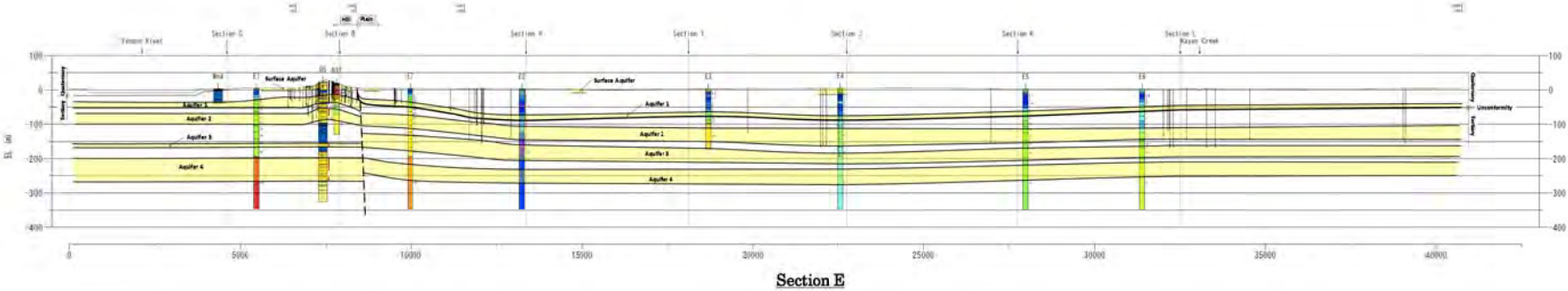
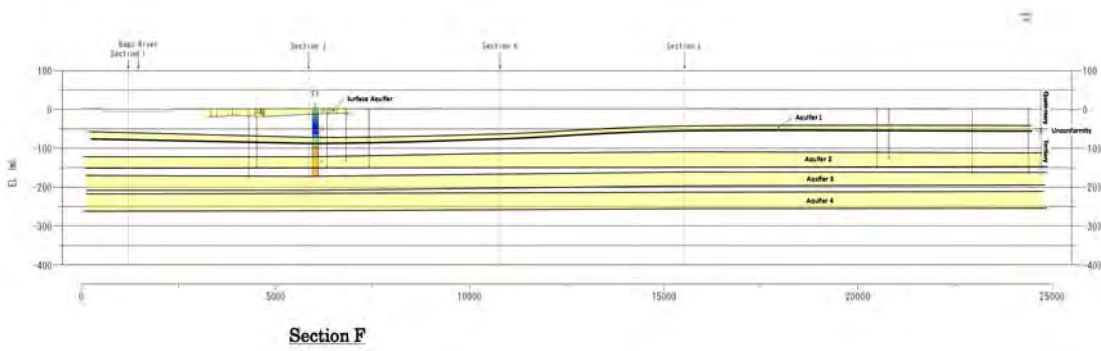
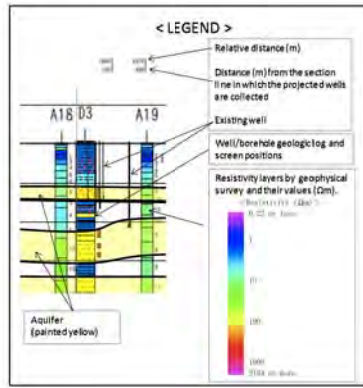


図 3-3-2-10 帯水層断面図の断面線位置図 (2)





Note: Unit of distance and elevation - meter (m)

图 3-3-2-11 帯水層断面図 - WSW-ENE 方向 (1)

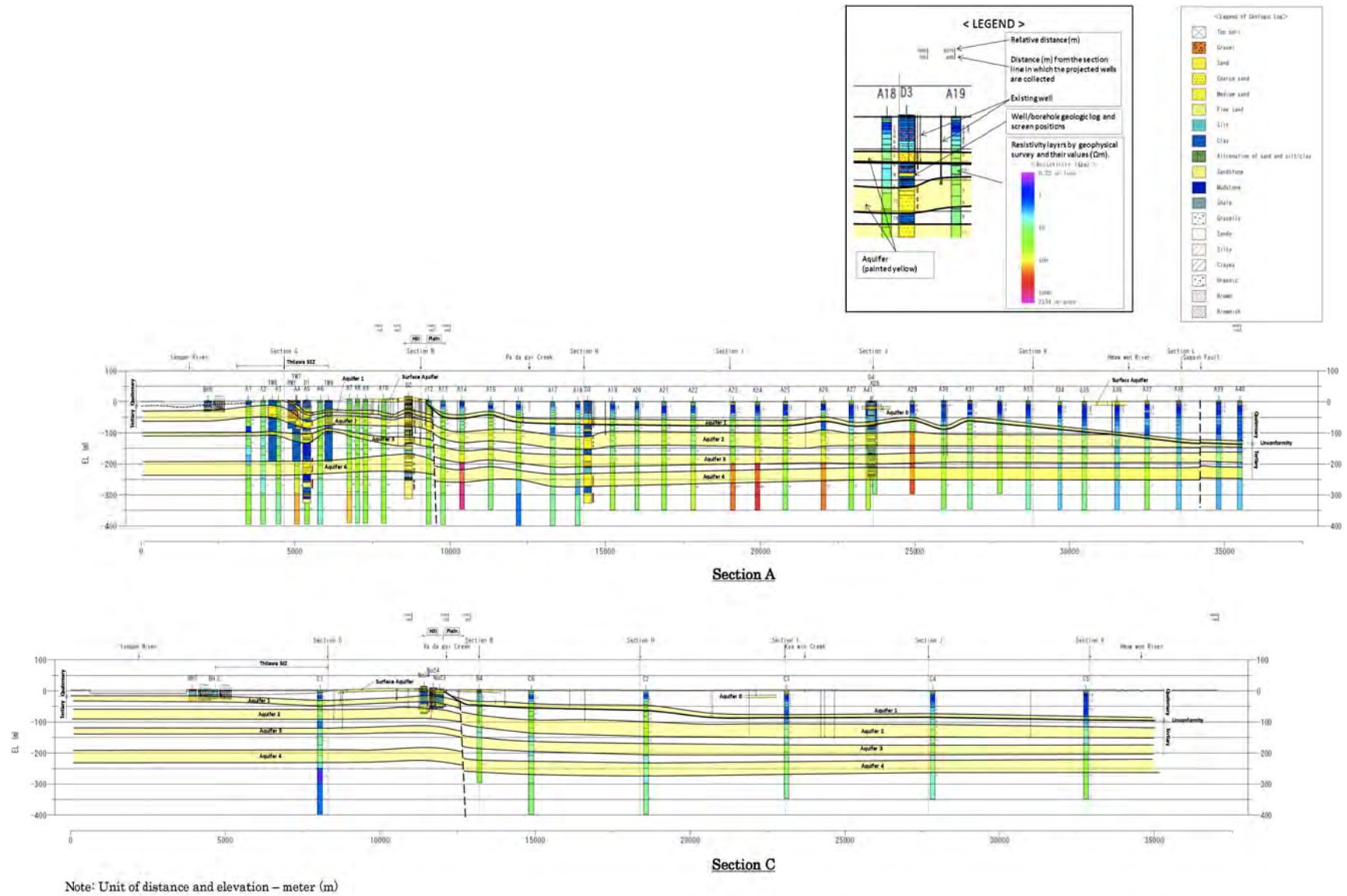


図 3-3-2-12 帯水層断面図 – WSW-ENE 方向 (2)

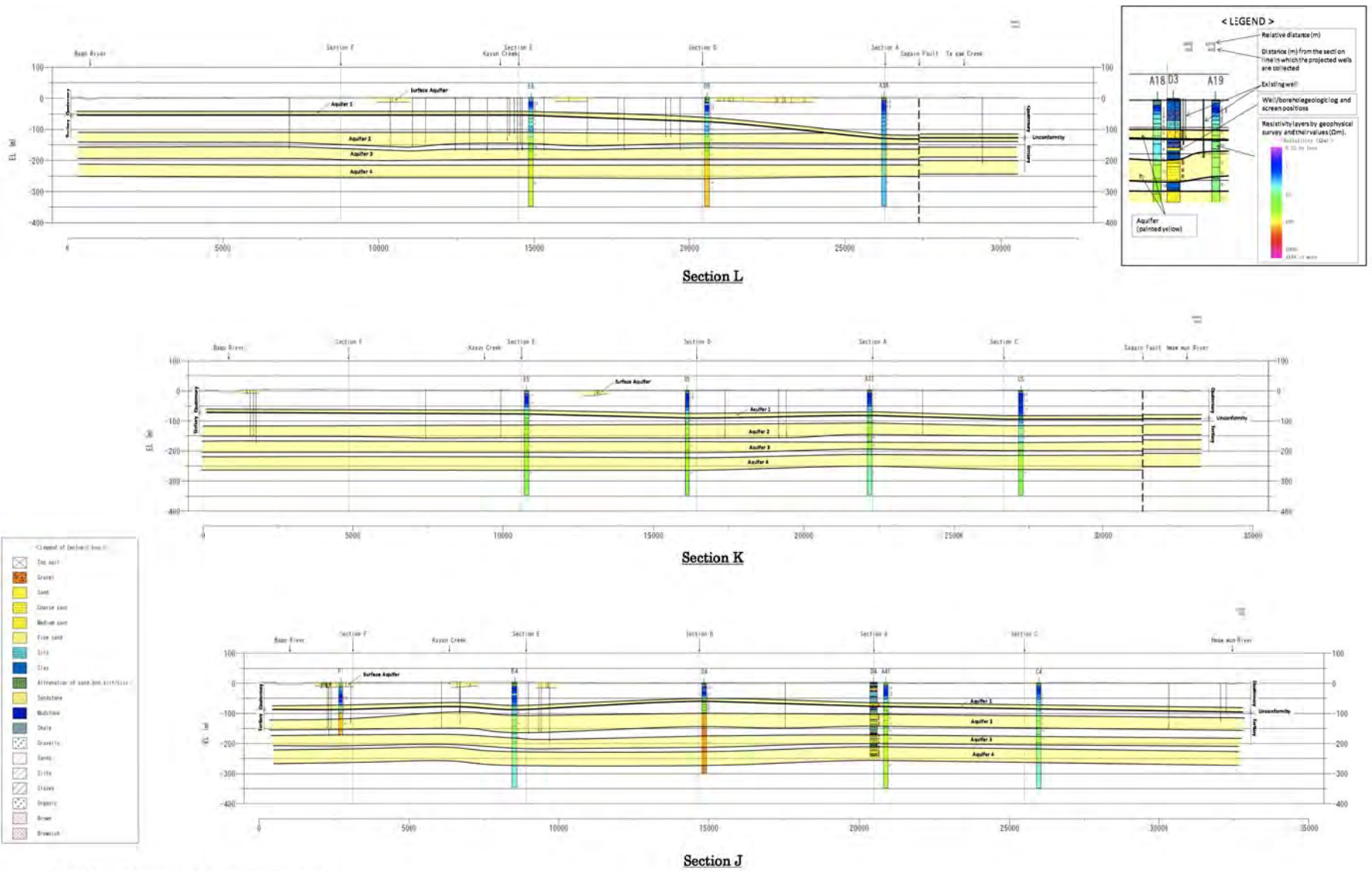
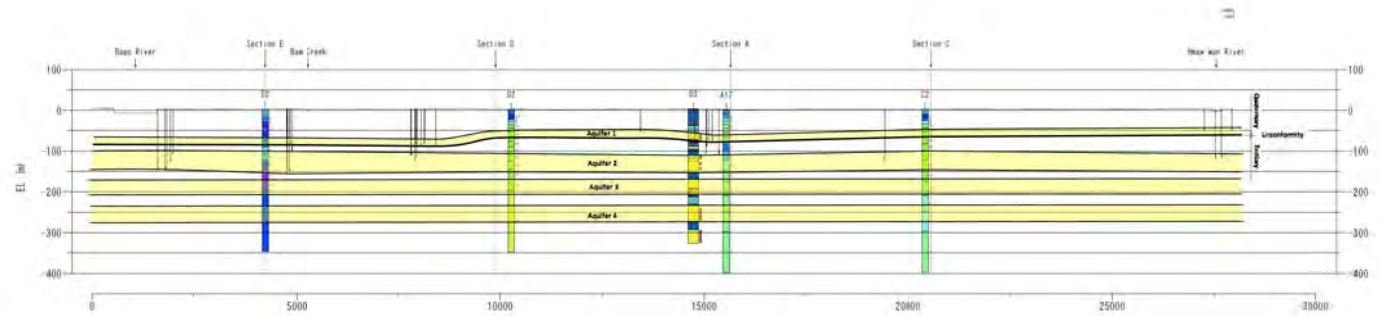
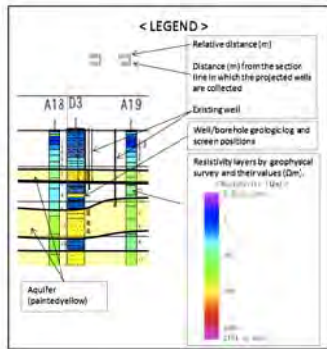
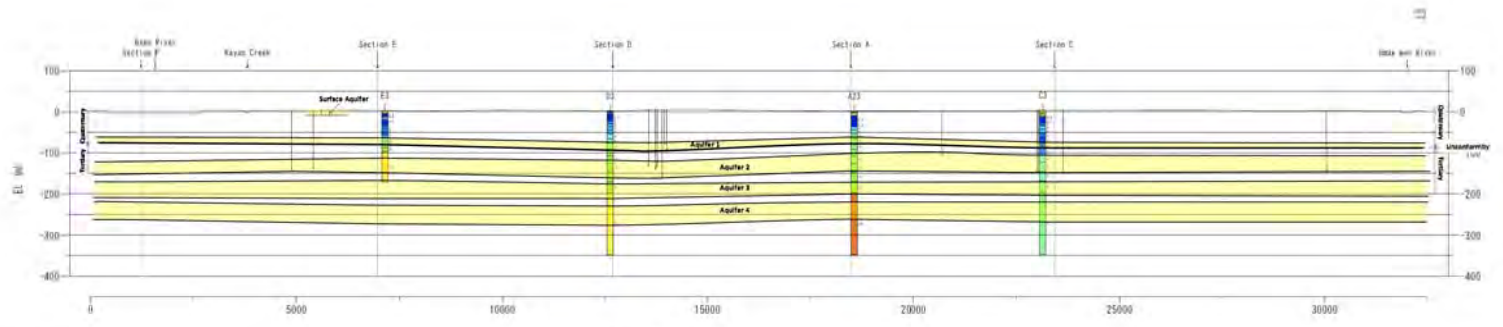
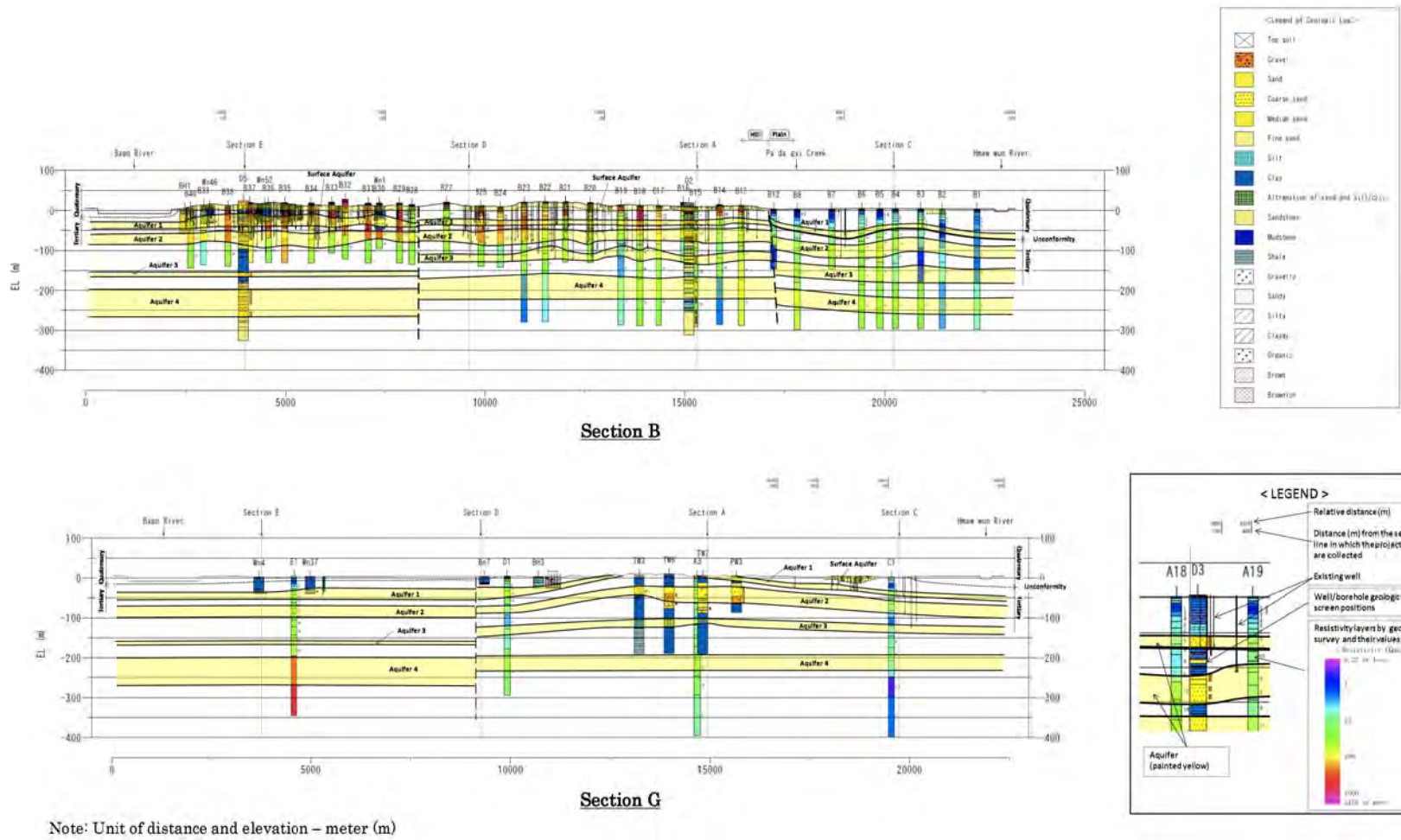


図 3-3-2-13 帯水層断面 - NNW-SSE 方向 (1)



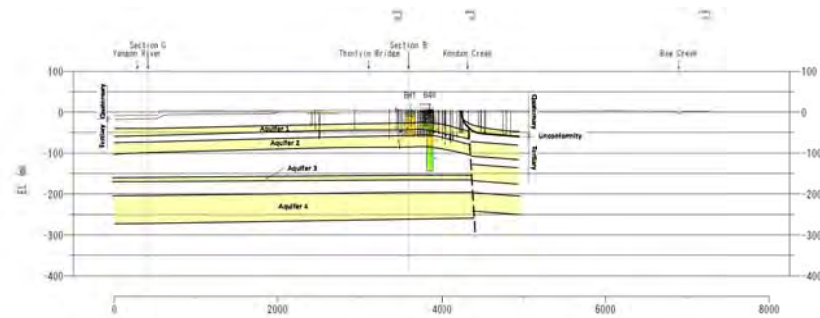
Note: Unit of distance and elevation – meter (m)

図 3-3-2-14 帯水層断面 – NNW-SSE 方向 (2)

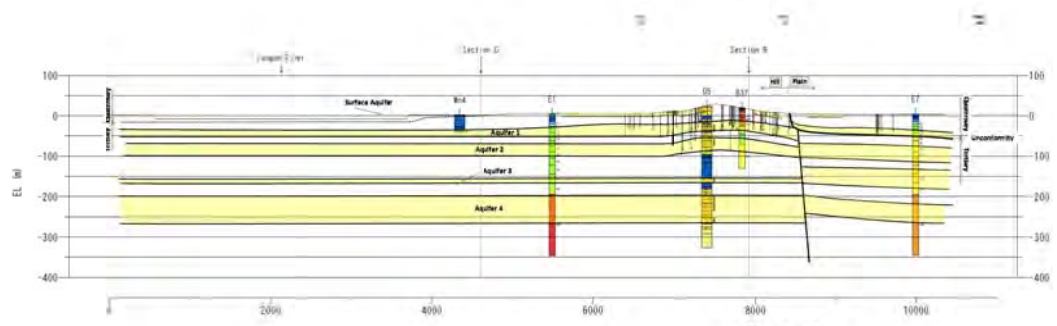


Note: Unit of distance and elevation – meter (m)

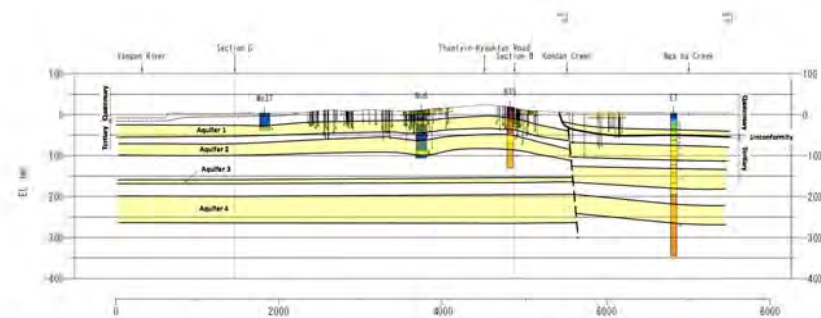
图 3-3-2-15 帯水層断面 – NNW-SSE 方向 (3)



Section 1



Section E



Section 2

Note: Unit of distance and elevation - meter (m)

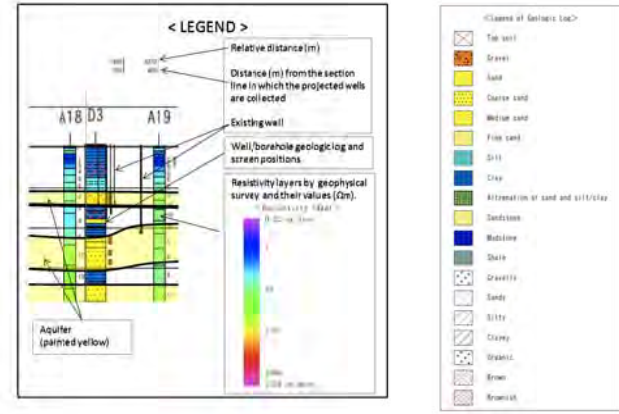
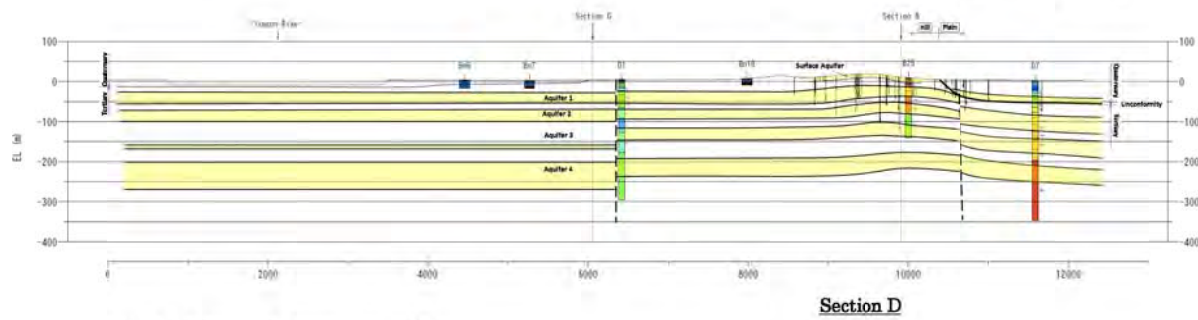
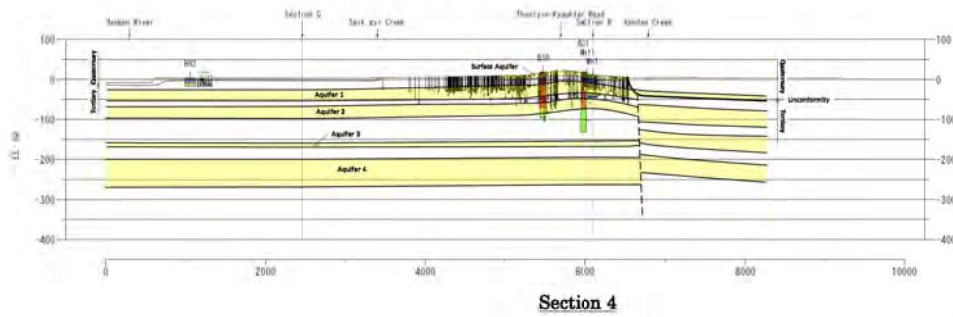
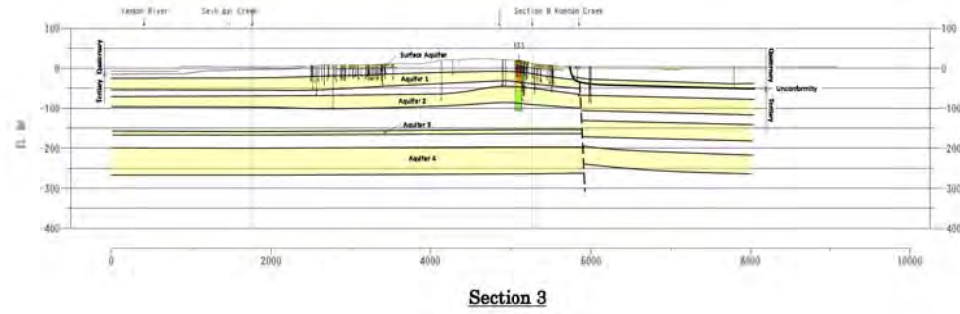


図 3-3-2-16 丘陵部の帯水層断面 (1)



Note: Unit of distance and elevation - meter (m)

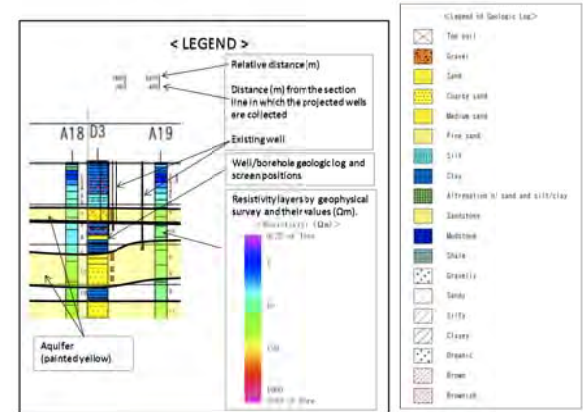
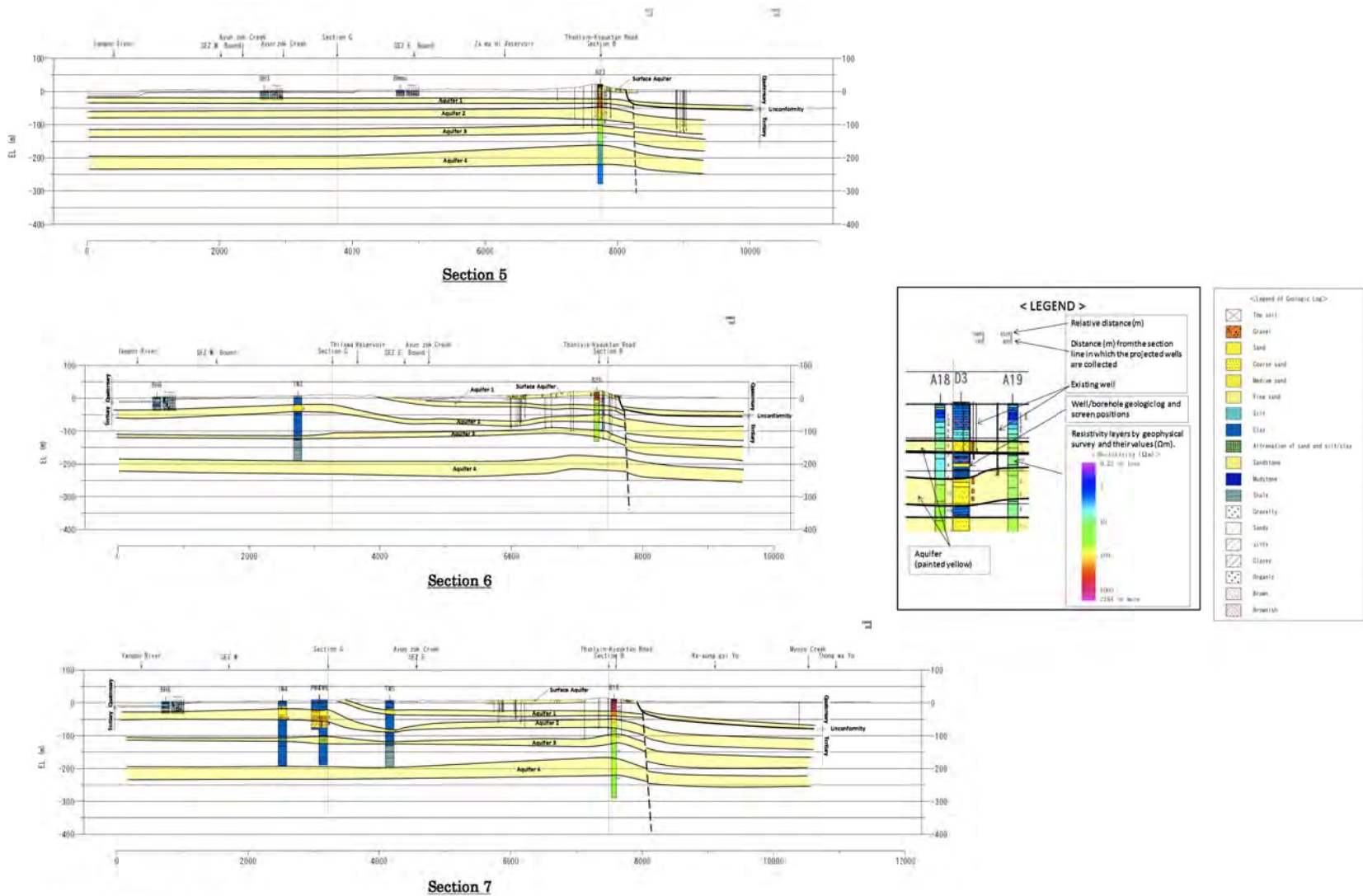


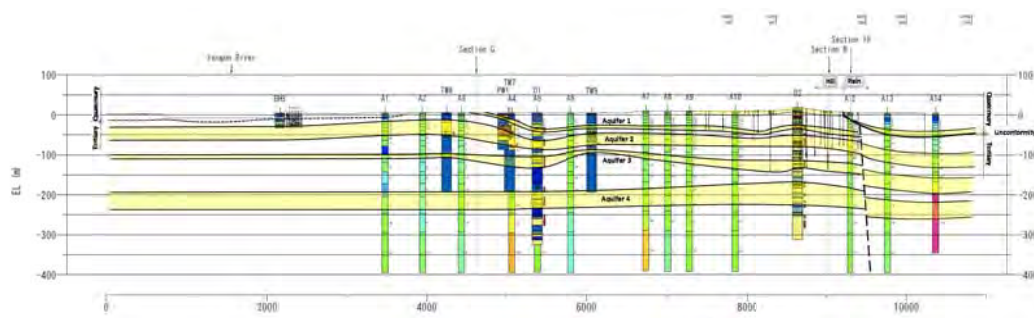
図 3-3-2-17 丘陵部の帯水層断面(2)



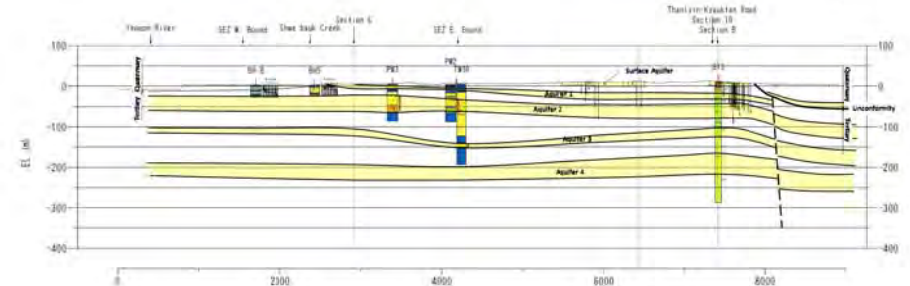
Note: Unit of distance and elevation – meter (m)

図 3-3-2-18 丘陵部の帯水層断面(3)

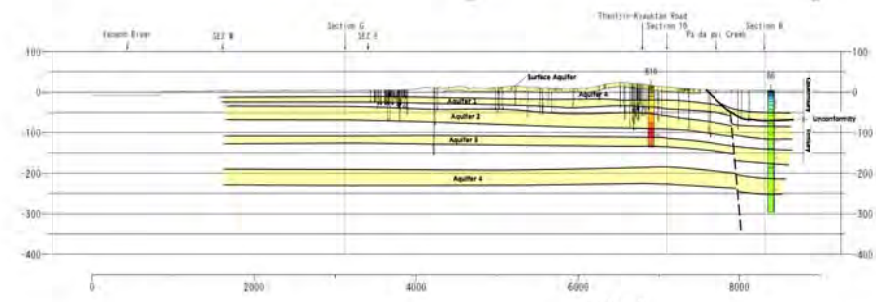




Section A



Section 8



Section 9

Note: Unit of distance and elevation – meter (m)

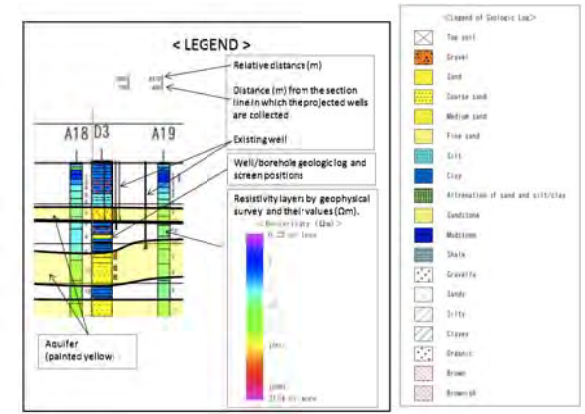
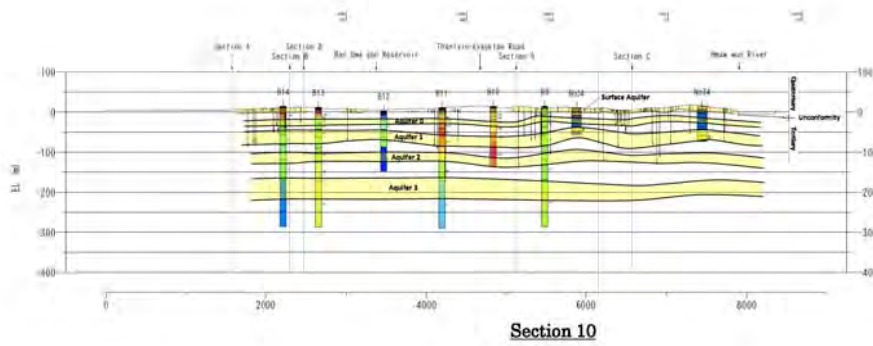
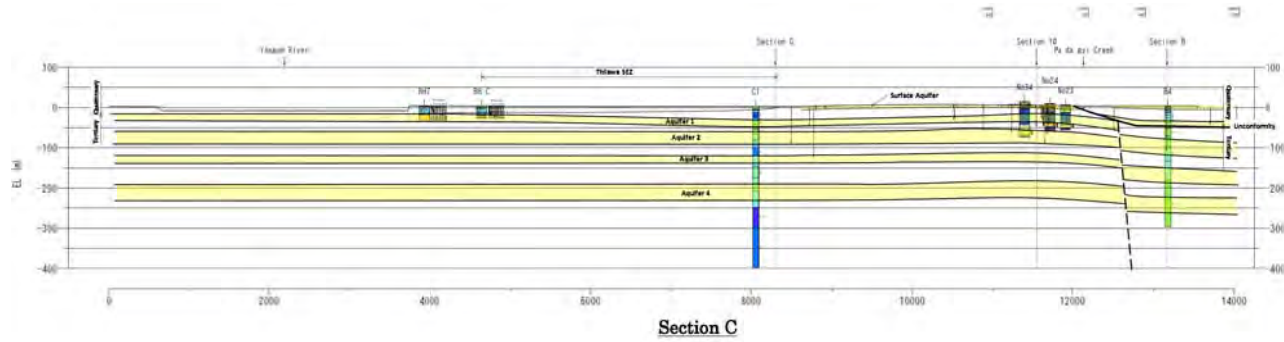


図 3-3-2-19 丘陵部の帯水層断面(4)



Note: Unit of distance and elevation – meter (m)

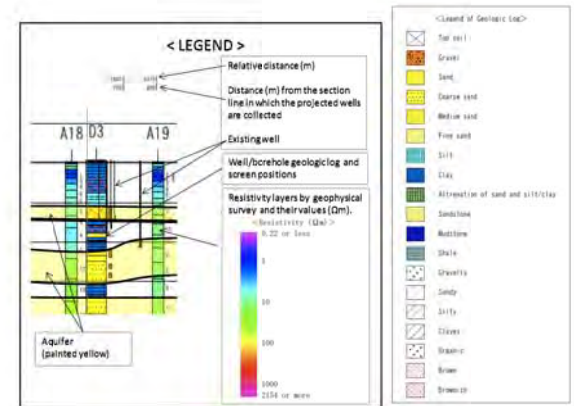


図 3-3-2-20 丘陵部の帯水層断面 (5)

### 3-3-2-3 水理能力

調査地の水理能力を把握するためには、以下の調査結果が参考となる。

- 本調査による試験井の揚水試験 (表 3-2-6-3)
- 他の JICA 調査 による 4 本の試験井の揚水試験(表 3-2-6-5)
- 本調査による 3 箇所の既存井戸の揚水試験(表 3-2-13-2)
- 既存報告書所収の井戸データ (表 3-2-2-5).

表 3-3-2-4 は、これらのデータから得られた井戸の比湧出量を示す。比湧出量は、ほぼ透水量係数と同様に、帯水層の水理能力の大きさを示している。比湧出量は、平野地域や丘陵西側の低地で比較的大きく、丘陵の尾根部で小さい。揚水試験で得られた透水係数は、 $n \times 10^{-5} \text{cm/s} \sim 2 \times 10^{-2} \text{cm/s}$  の間にある。試験井の揚水能力は、 $20 \text{m}^3/\text{日} \sim 890 \text{m}^3/\text{日}$  である。既存井戸の最大揚水能力は、丘陵地域で  $675 \text{m}^3/\text{日}$ 、平野地域で  $346 \text{m}^3/\text{日}$  である。これらの数値は、良好な帯水層では比湧出量は数百  $\text{m}^3/\text{日}/\text{m}$  であり、また、井戸の揚水能力は数千  $\text{m}^3/\text{日}$  に達することを考慮すると、当地の帯水層の水理能力がかなり劣るものであることを示している。

表 3-3-2-4 調査地域の比湧出量 ( $\text{m}^3/\text{日}/\text{m}$ )

地形上の位置	丘陵								平野		
	裾部		尾根部								
場所	SEZ		SEZの東 方	タンリン		チャウタン					
井戸 帯水層	D-1 地点 井戸	PW井	D-2地点 井戸	D-5 地点 井戸	Wing Naing et. al (1991)	既存井戸	Wing Naing et. al (1991)	既存井戸	東ヤンゴン 大学	D-3 地点 井戸	D-4 地点 井戸
表層帯水層	-	-	-	-	-	( $k=1 \times 10^{-3}$ cm/sec)	-	( $k=3 \times 10^{-3}$ cm/sec)	-	-	-
第1帯水層	146		1	1		-		-	179	75	148
第2帯水層	19	15, 20, 63, 70	1	4	11 ~ 150	-	2 ~ 31	-	-	22	207
第3帯水層	16	-	1	13	-	-	-	-	-	-	-
第4帯水層	44	-	7		-	-	-	-	-	-	79

出典: JICA調査団

### 3-3-3 地下水利用

既存井戸調査結果によると、図 3-3-3-1 に示すように、調査地域には約 12,000 本の井戸があり、 $17,000 \text{m}^3/\text{日}$  の地下水を取水していると推定される。井戸には、図 3-3-3-2 に示すように、堀井戸と管井の 2 種類がある。図 3-3-3-4 図 3-3-3-5 は、その分布状況を示す。図 3-3-3-6 および図 3-3-3-7 は、井戸の数と取水量の平面的な分布密度を示す。大部分の井戸は丘陵地域にあり、また、大部分の取水も丘陵地域で行われている。平野地域には、ほぼ管井のみが分布する。表 3-3-3-1、図 3-3-3-6 および 図 3-3-3-8 ~ 図 3-3-3-12 に帯水層毎の地下水利用状況を示す。取水は主として、表層の不圧帯水層と上部 2 層の被圧帯水層で行われているものと推定される。

図 3-3-3-3 に示すように、過去 20 年間、井戸が増え続けており、ここ数年間では、毎年約 700 本 (推定取水量約  $1,000 \text{m}^3/\text{日}$ ) の井戸が新設されている。

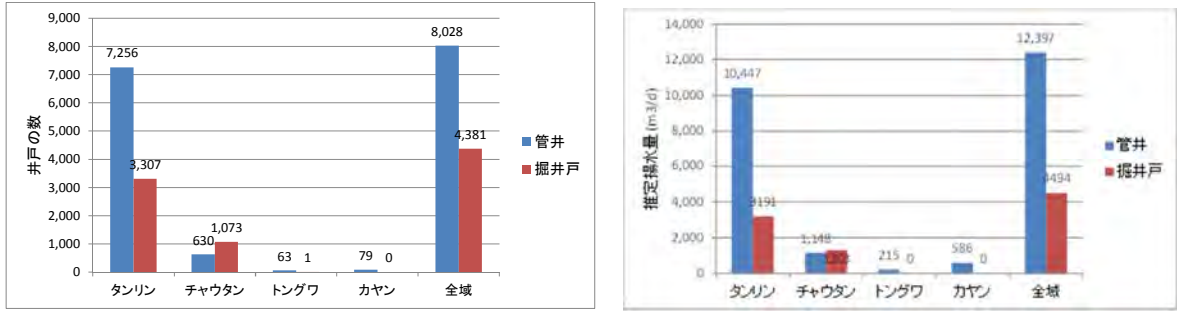


図 3-3-3-1 井戸の数と取水量



図 3-3-3-2 掘井戸（左）と管井（右）

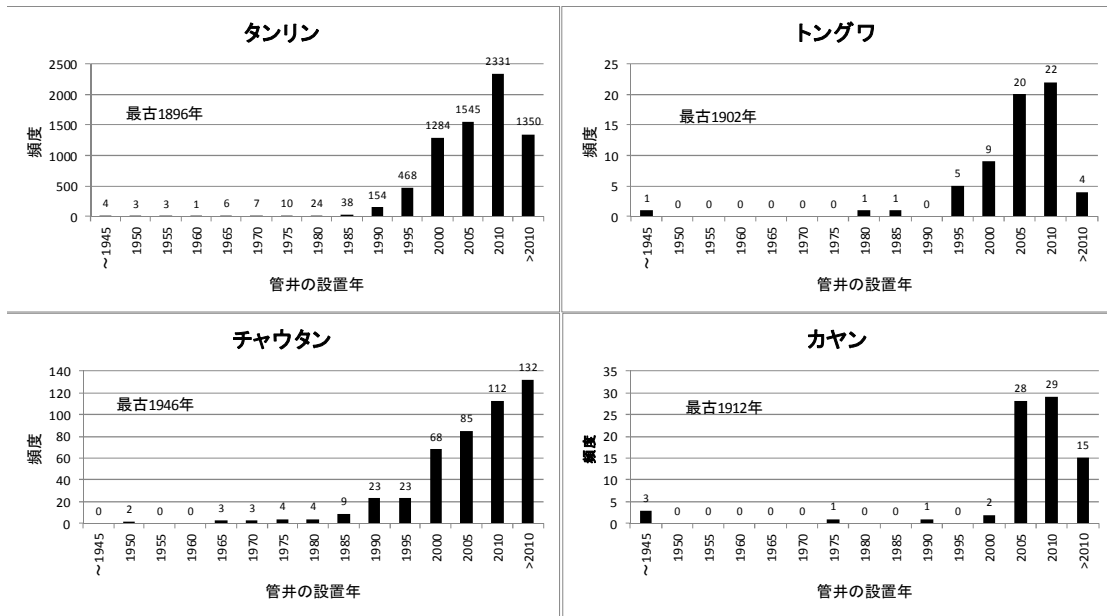


図 3-3-3-3 管井の設置年（2012年12月現在）

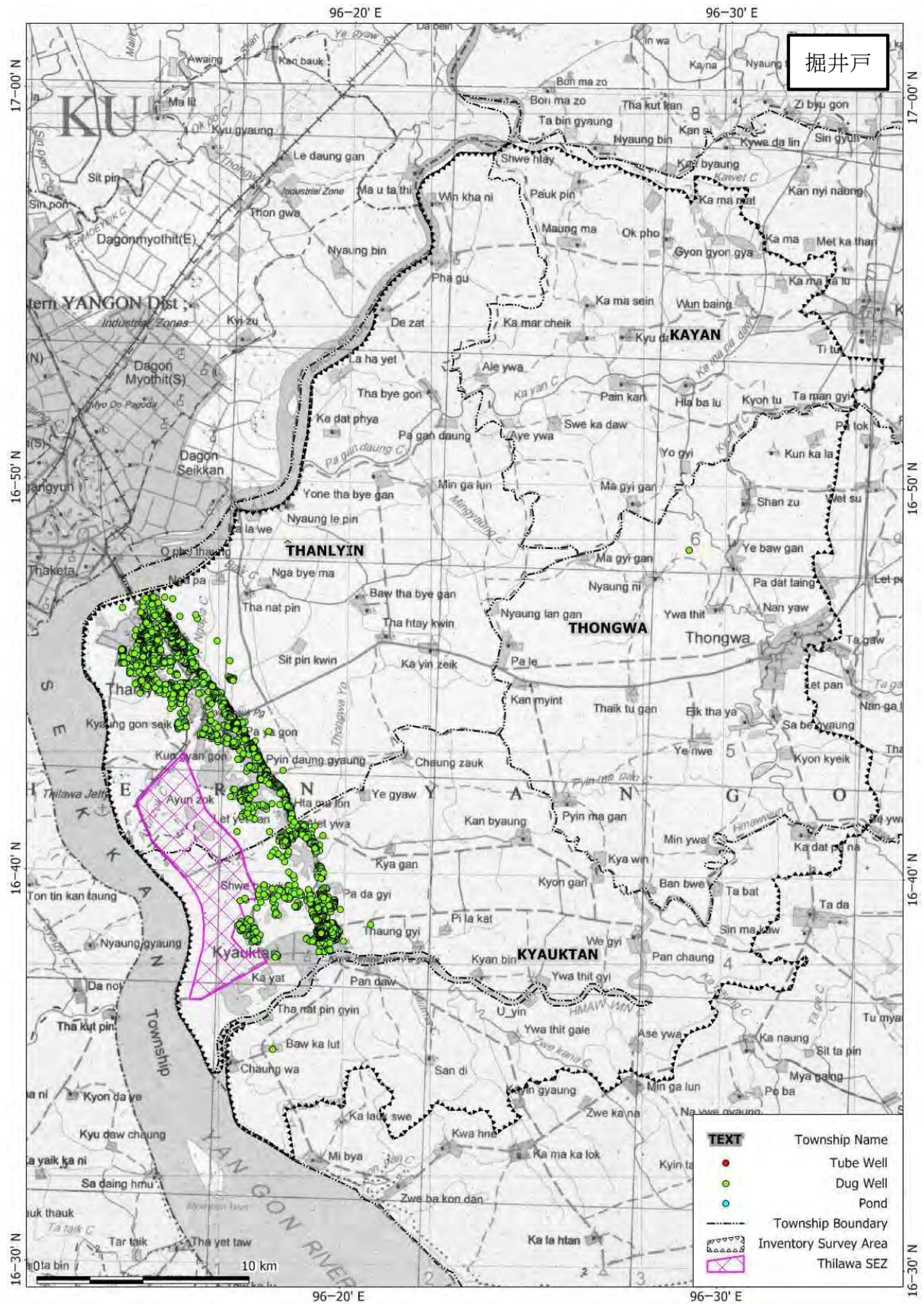


図 3-3-3-4 掘井戸の分布

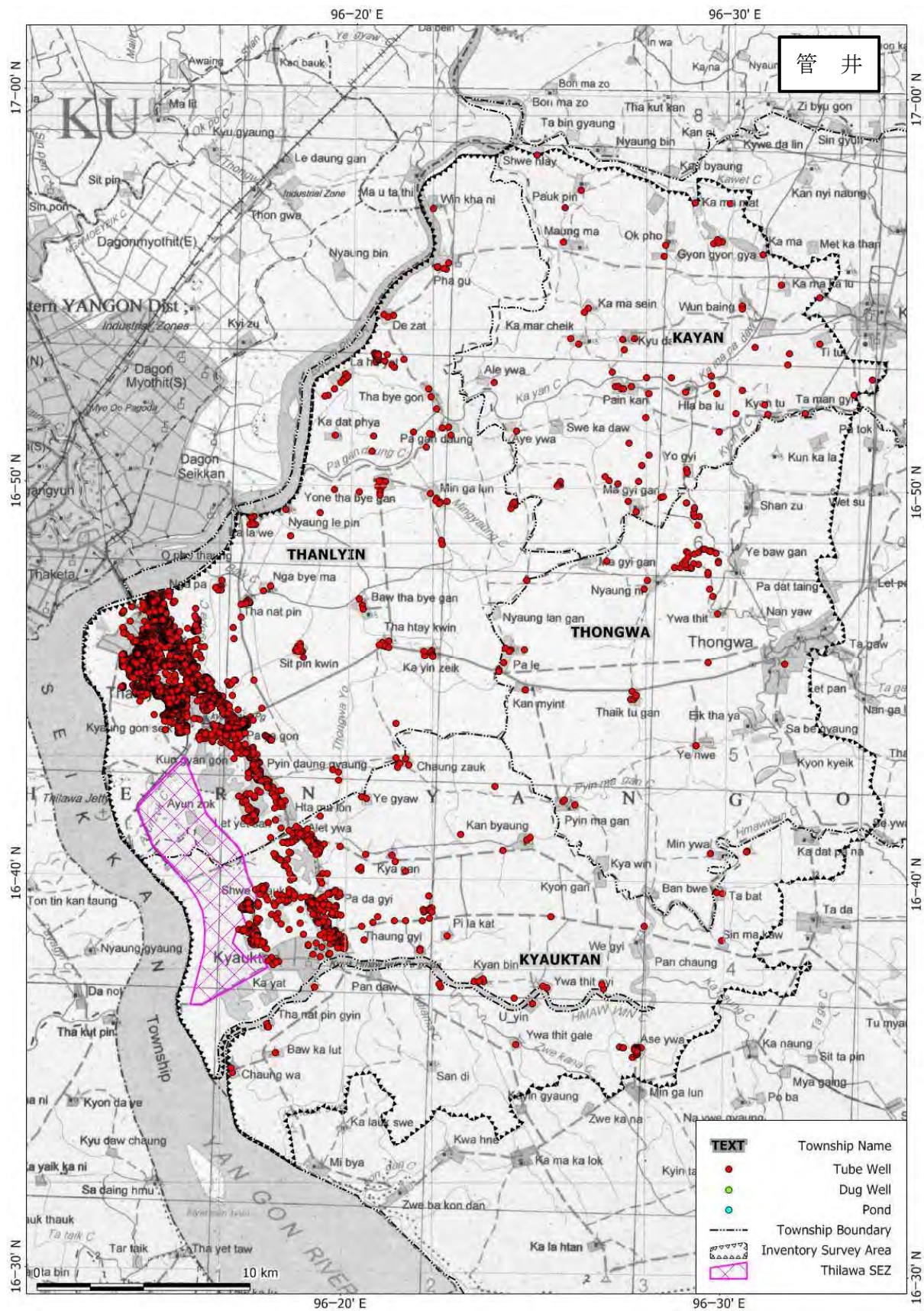


図 3-3-3-5 管井の分布

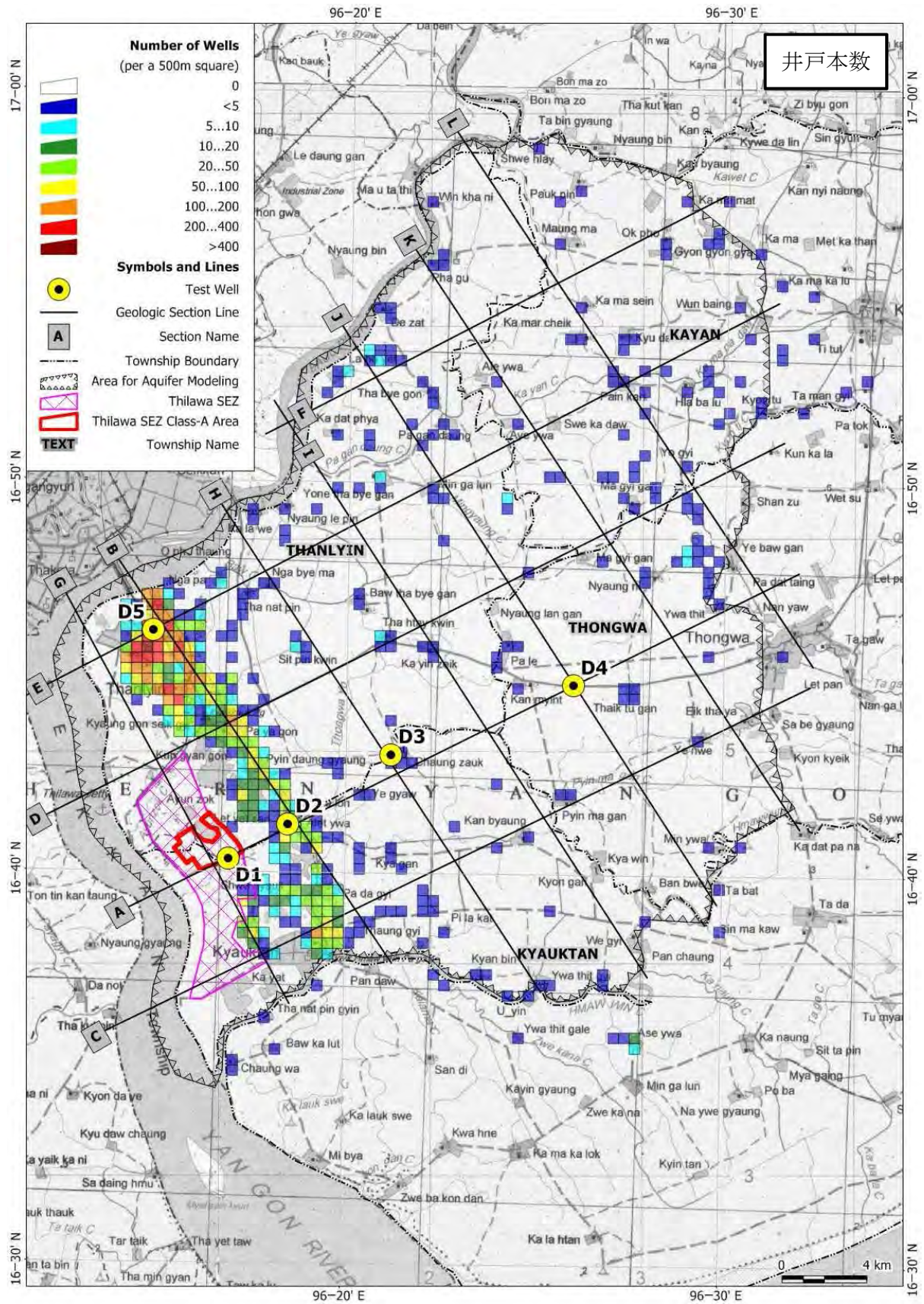


図 3-3-3-6 井戸の面密度 (500m 平方当りの本数)

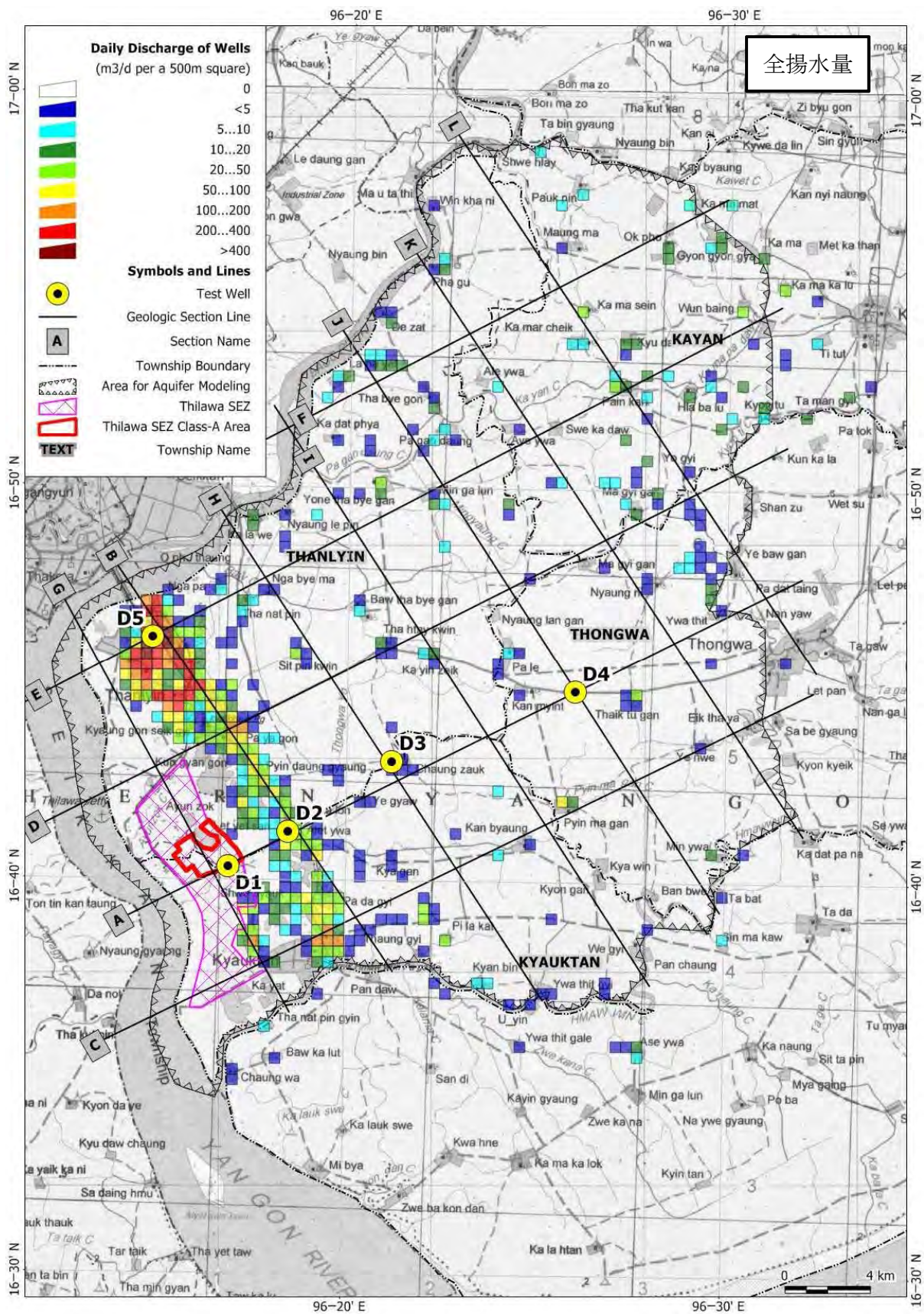


図 3-3-3-7 井戸揚水量の面密度 (500m 平方当りの日揚水量) - 全帯水層



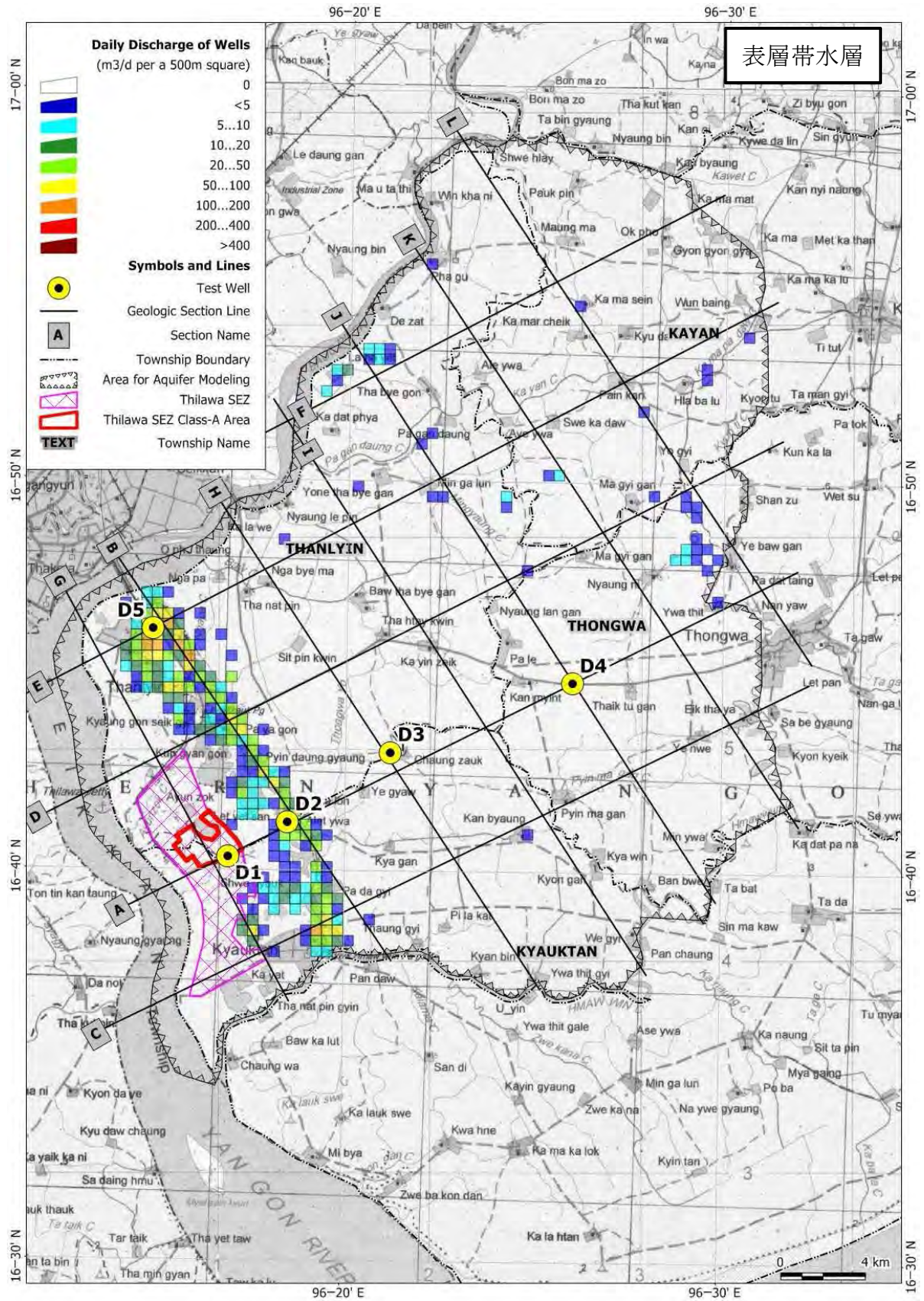


図 3-3-3-8 井戸揚水量の面密度 (500m 平方当りの日揚水量) - 表層帯水層 (深度 15m 以浅)

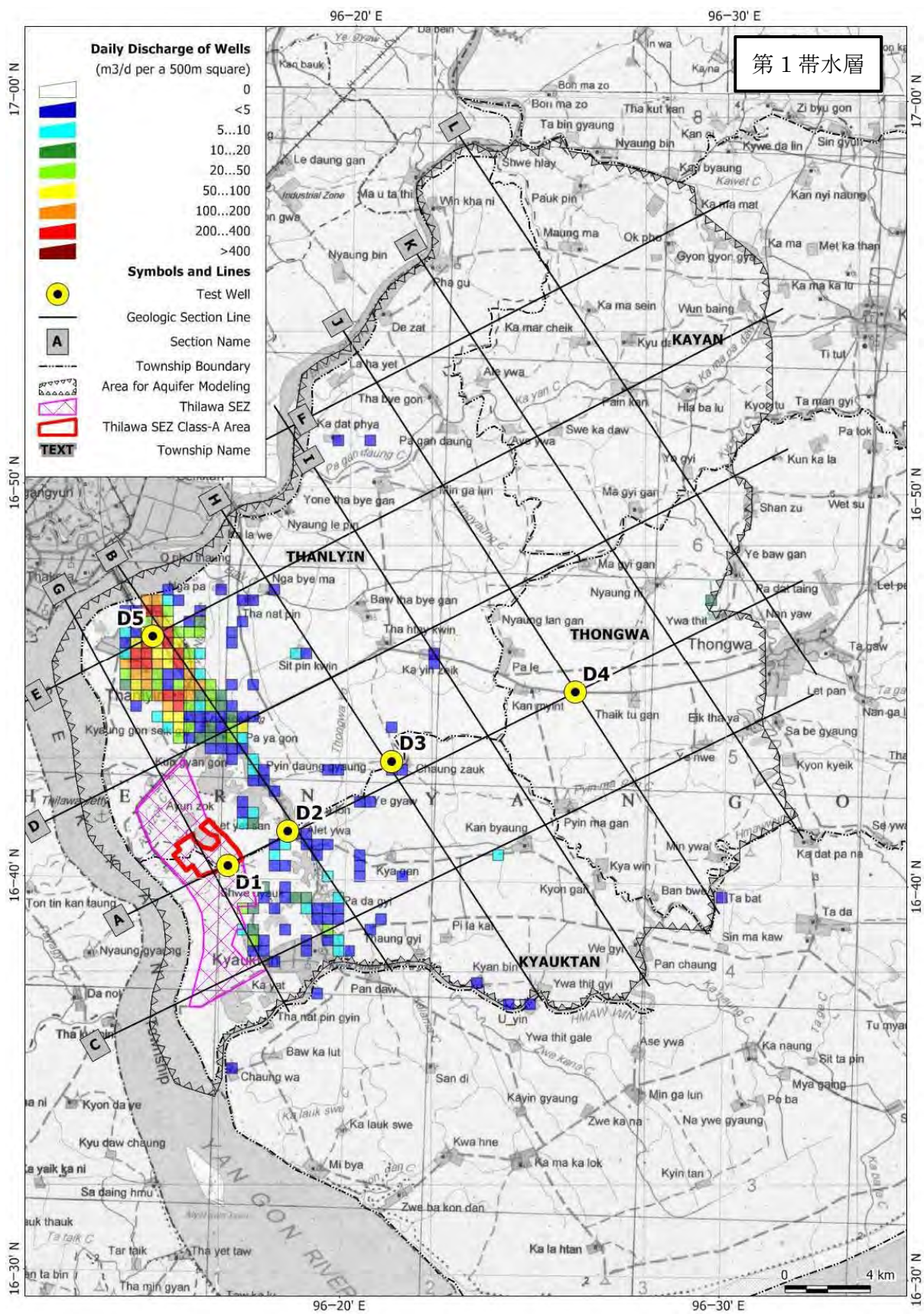


図 3-3-3-9 井戸揚水量の面密度 (500m 平方当りの日揚水量) - 第1帯水層

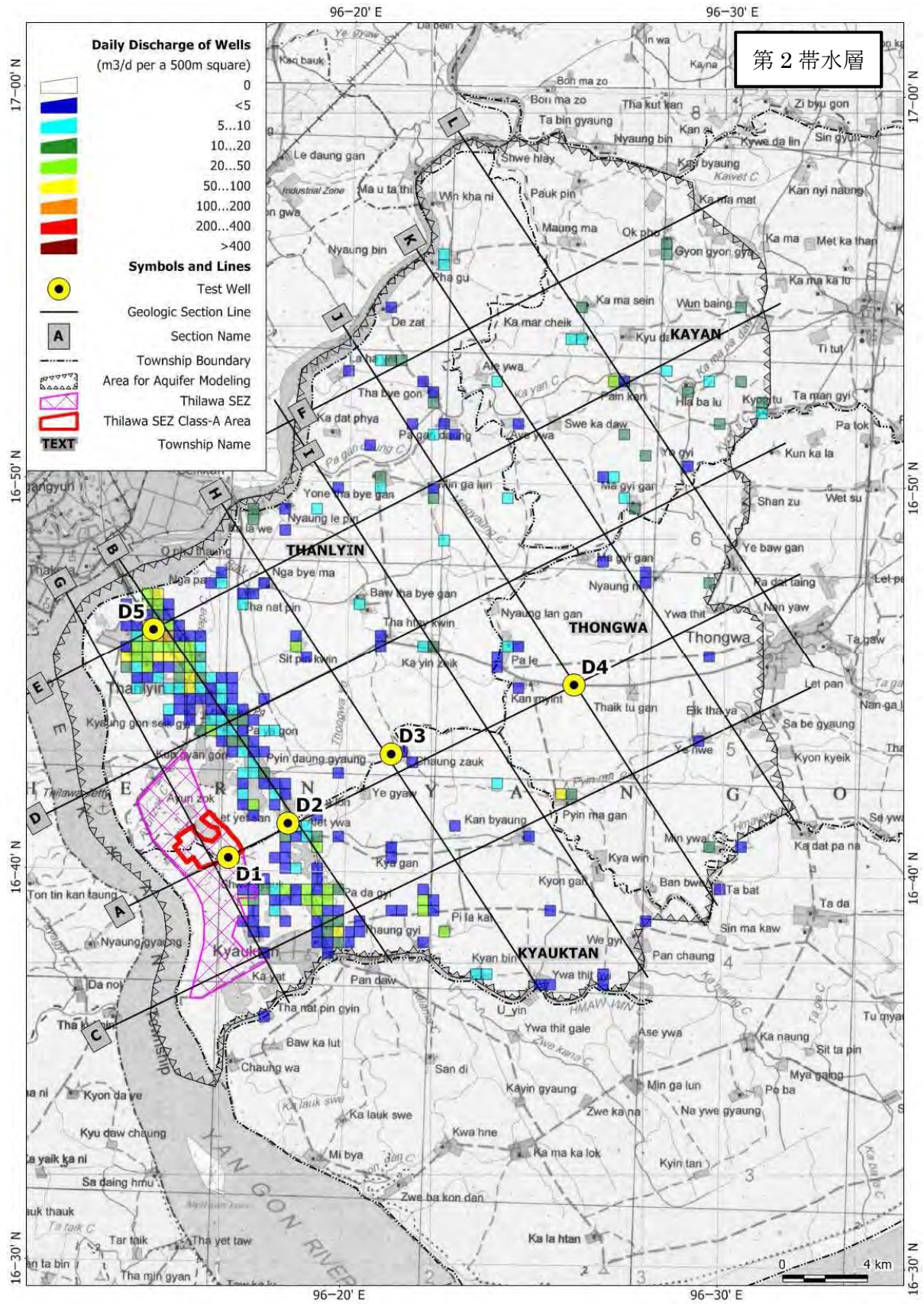


図 3-3-3-10 井戸揚水量の面密度（500m 平方当りの日揚水量） - 第2帯水層

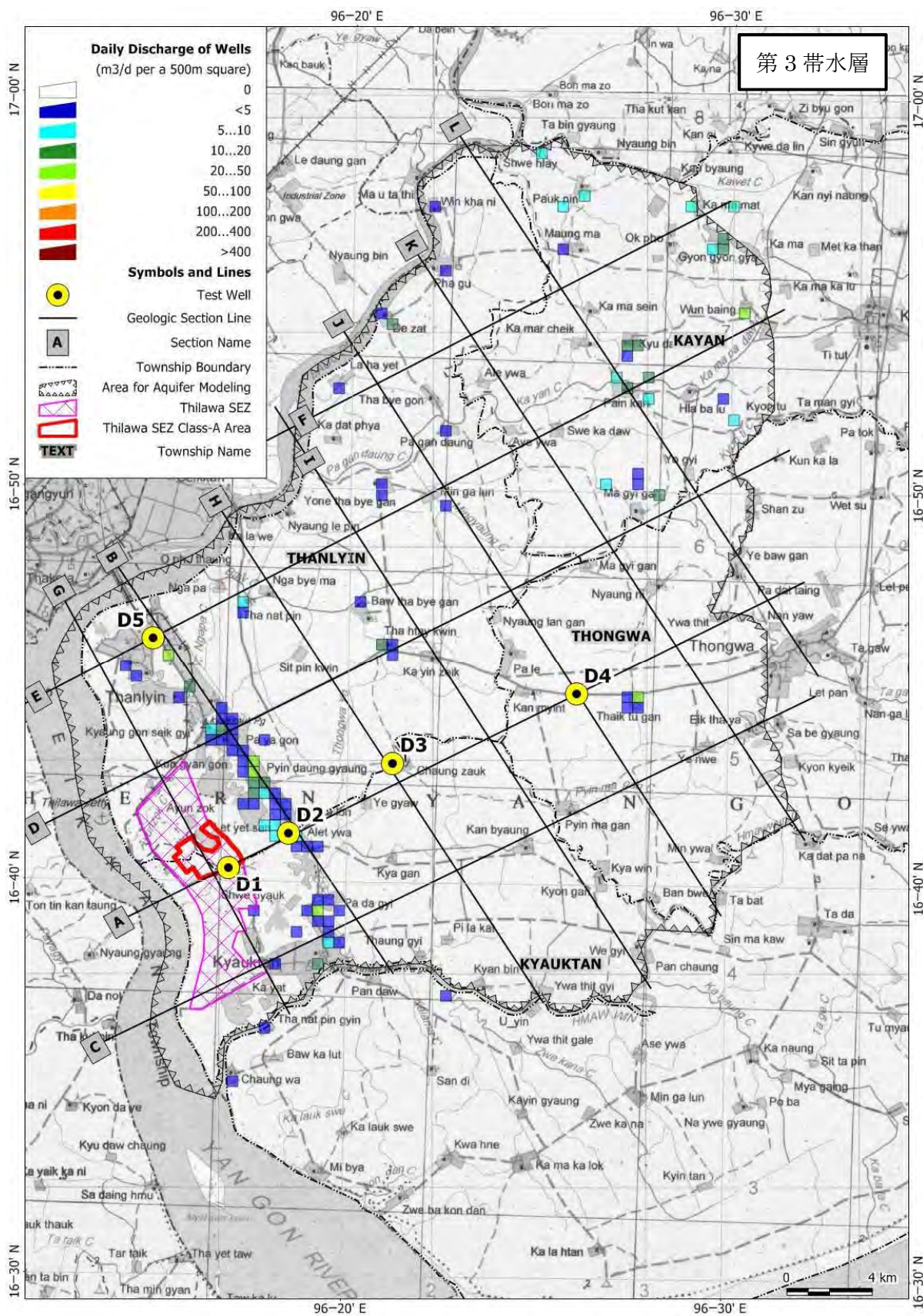


図 3-3-11 井戸揚水量の面密度（500m 平方当りの日揚水量） - 第3帯水層

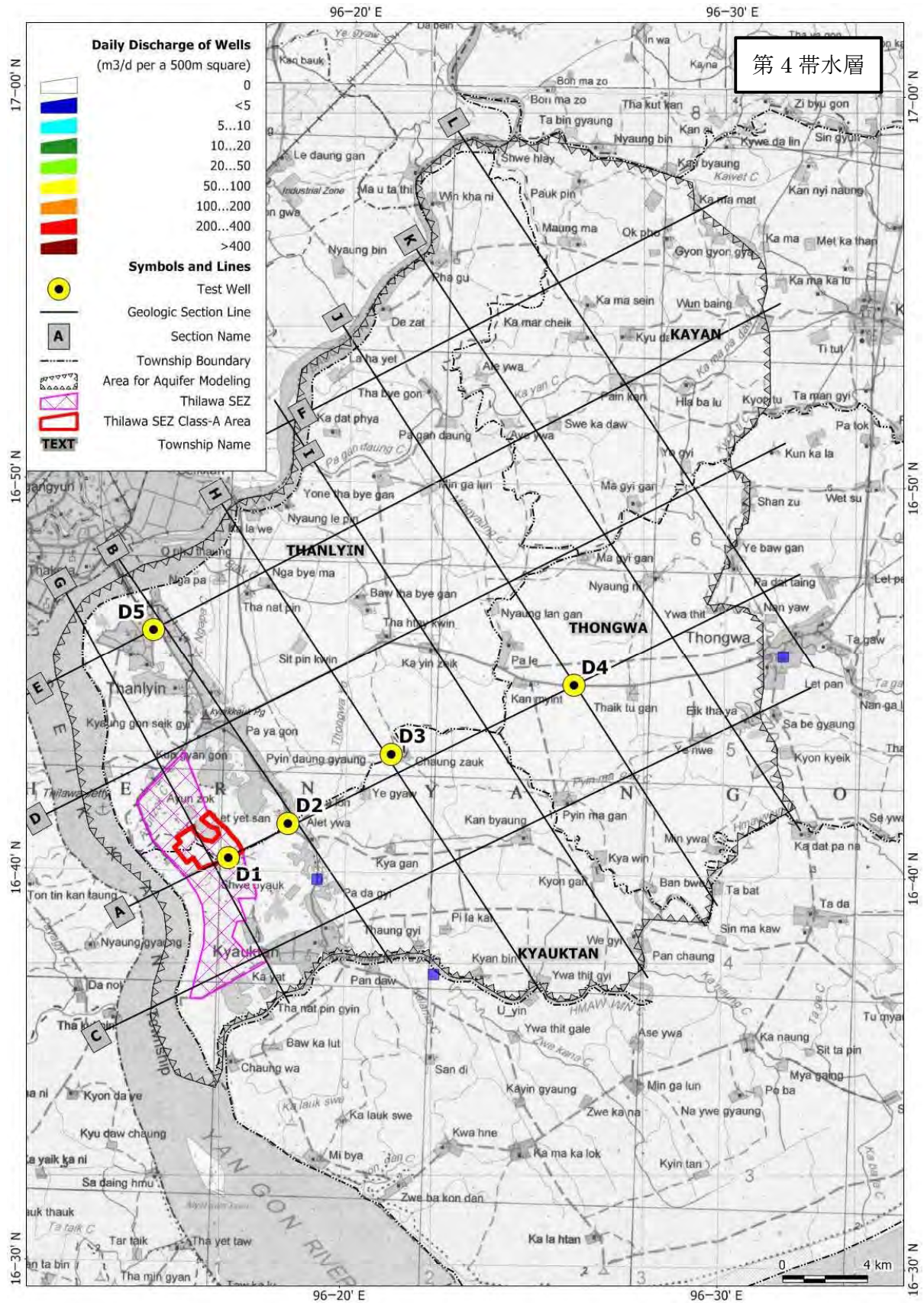


図 3-3-12 井戸揚水量の面密度 (500m 平方当りの日揚水量) - 第4帯水層

表 3-3-3-1 帯水層毎の地下水利用

帯水層名	管井		掘井戸		全井戸			
	本数	揚水量 (m <sup>3</sup> /日)	本数	揚水量 (m <sup>3</sup> /日)	本数	本数 (%)	揚水量 (m <sup>3</sup> /日)	揚水量 (%)
表層帯水層	176	242.7	4349	4442.8	4525	36.6	4685.5	27.1
第1帯水層	6001	8568.0	21	23.3	6022	48.7	8591.3	49.6
第2帯水層	1630	3405.4	0	0.0	1630	13.2	3405.4	19.7
第3帯水層	181	619.6	0	0.0	181	1.5	619.6	3.6
第4帯水層	3	3.6	0	0.0	3	0.0	3.6	0.02
合計	7991	12839.3	4370	4466.1	12361	100.0	17305.5	100.0

注) 揚水量は、(時間揚水能力) × (日揚水時間) により集計。

データの無い井戸については、平均揚水量：管井-1.59m<sup>3</sup>/d、掘井戸-1.01m<sup>3</sup>/d と仮定して集計。

調査地域周縁部の一部の井戸は対象外。

出典：JICA調査団

### 3-3-4 水質

#### 3-3-4-1 帯水層の水質の概要

表 3-3-4-1 に、試験井における水質試験の結果を総括して示す。次のような特徴が見られる。

- 1) 丘陵尾根部では、上方の帯水層（第1、第2）の地下水は、低いpH、電気伝導度及び鉄イオン濃度を示す。これは降雨が浸透して地下水となつてから、あまり長い時間が経過していないことを暗示している。
- 2) 平野地域の上方の帯水層には塩水が分布する。
- 3) 鉄イオン濃度は一般に大きく、味は良くない。
- 4) 深部帯水層（第4）は、pHと亜鉛濃度が高い。
- 5) 毎月の調査で、鉛が、丘陵尾根部の上方帯水層において3回以上WHOの飲料水水質基準を上回った。

表 3-3-4-1 試験井における水質試験結果総括表

地形上の位置	丘陵												平野				備考
	裾部				尾根部												
試験井名	D-1-0	D-1-1	D-1-2	D-1-3	D-2-0	D-2-1	D-2-2	D-2-3	D-5-1	D-5-2	D-5-3	D-3-1	D-3-2	D-3-3	D-4-1	D-4-2	
スクリーン深度 (m)	37-48	66-83	110-138	187-283	31-54	67-95	125-148	196-301	46-63	81-98	180-240	60-77	112-149	244-328	66-83	110-144	
対象帯水層番号	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3,4	1	2	4	1	2	
pH < 6.5	-	-	-	-	×	×	-	-	×	×	-	-	-	-	-	-	
pH > 8.5	-	-	-	×	-	-	-	×	-	-	×	-	-	×	-	-	
EC < 150 μ S/cm	-	-	-	-	○	○	-	-	○	○	-	-	-	-	-	-	
EC > 750 μ S/cm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	×	-	-	×	×	
Fe ion > 0.3 mg/l	×	×	×	×	-	×	×	×	×	×	×	×	-	×	×	×	
Taste	鉄味	鉄味	わずかに鉄味	少々鉄味	○	○	○	鉄味	鉄味	鉄味	鉄味	塩味	硫黄味	鉄味	塩味、硫黄味	塩味	
Zinc > 3 mg/l	-	-	-	×	-	-	-	×	-	-	×	-	-	×	-	-	
Lead > 0.01 mg/l	-	-	-	-	×	×	-	-	×	×	-	-	-	-	-	-	

注) ○ 良水質の指標 × 不良水質の指標 - 値は指定範囲外

出典：JICA調査団

### 3-3-4-2 塩水の分布

ここで塩水は、 $EC > 750 \mu S/cm$  (Cl-イオン 250 mg/l 以上に相当) としている (図 3-2-2-9 参照)。

#### (1) 断面分布

水質調査で得られた電気伝導度と物理探査で得られた低い比抵抗値から、主断面における帯水層の電気伝導度分布は、図 3-3-4-1～図 3-3-4-5 のように推定される。(断面図の詳細については、データ集の拡大版を参照)

断面図上で黄、橙および赤色で塗られた電気伝導度は  $750 \mu S/cm$  を越えるものである。赤色で塗られている比抵抗値が  $1.0 \Omega m$  以下の値の部分は、高い塩分濃度の塩水であると推定される。このような値は、主に平野部表層の第四紀層中に見られる。

#### (2) 帯水層毎の面的分布

図 3-3-4-6 及び図 3-3-4-7 は、既存井戸と試験井の電気伝導度測定結果から推定された帯水層毎の塩水分布状況を示す。塩水は、平野地域とティラワ SEZ 沿い西方低地の広い地域に分布する。淡水は、丘陵とその近辺に分布する。平野地域では、第 2 被圧帯水層で最も淡水域が広いと推定される。ティラワ SEZ の中央部では、図 3-3-4-8 に示すように西側 3 分の 2 の地域に塩水が分布することが確認された。

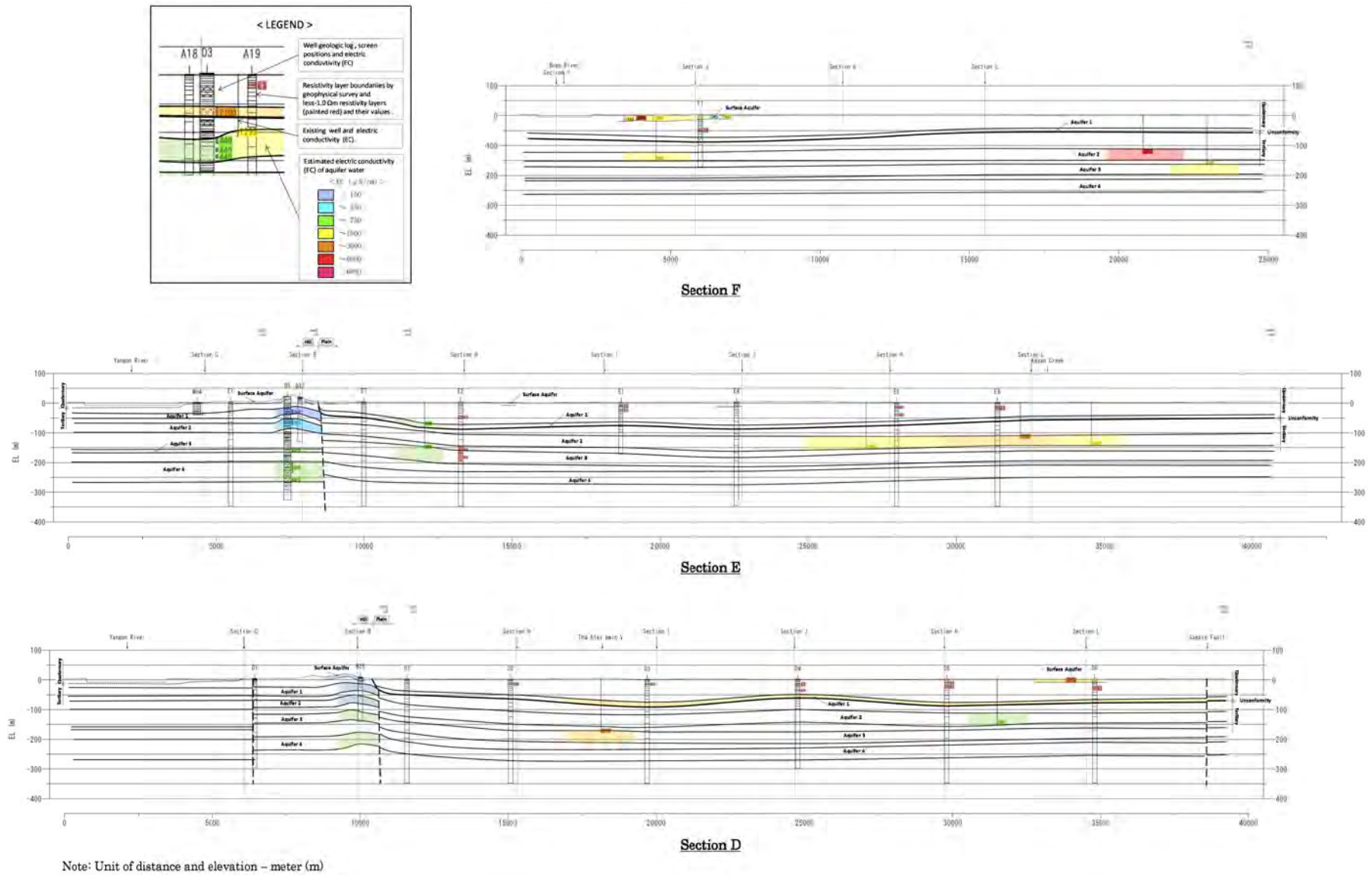


図 3-3-4-1 帯水層断面上の電気伝導度分布- WSW- ENE 断面 (1)



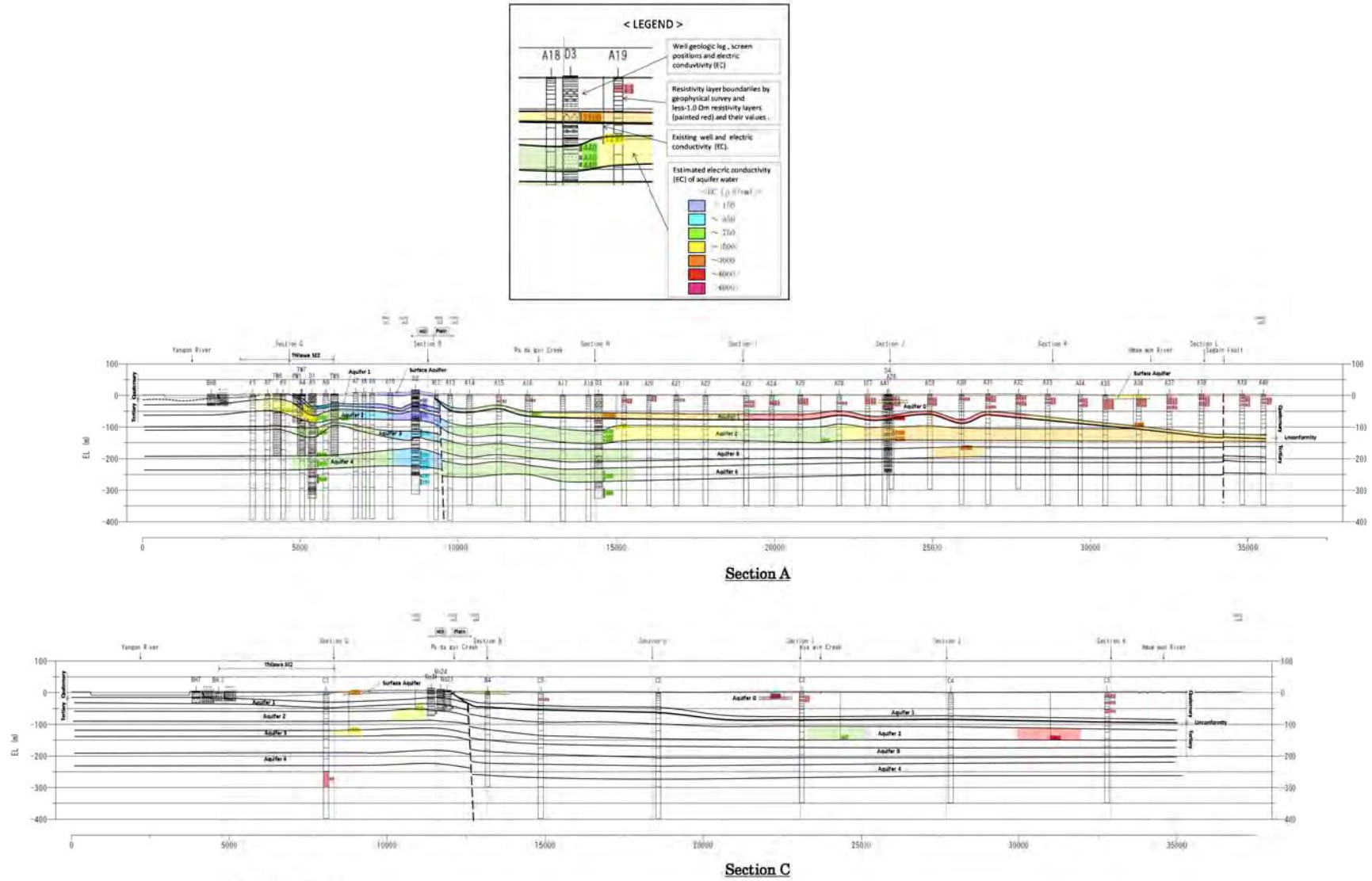
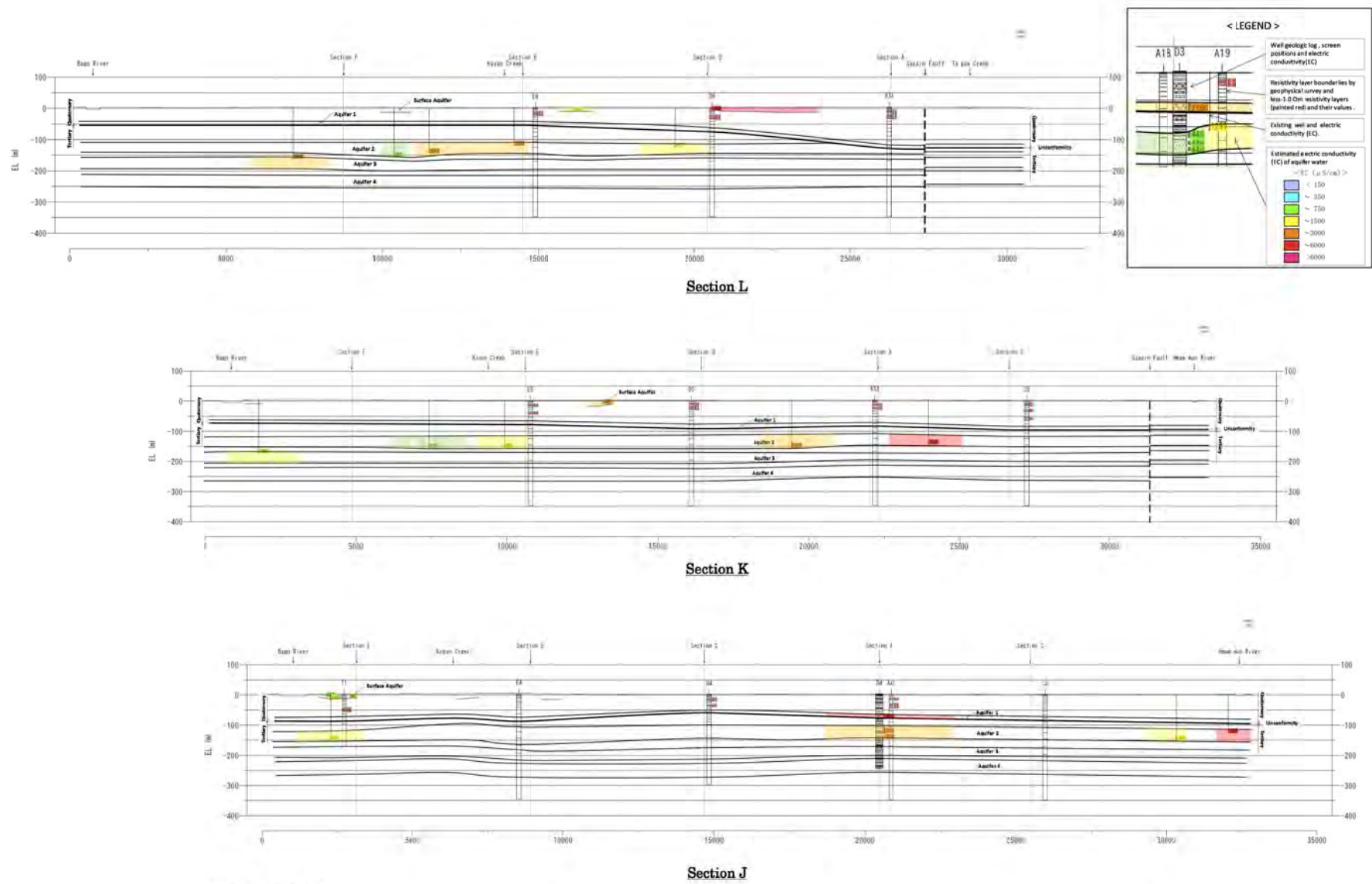
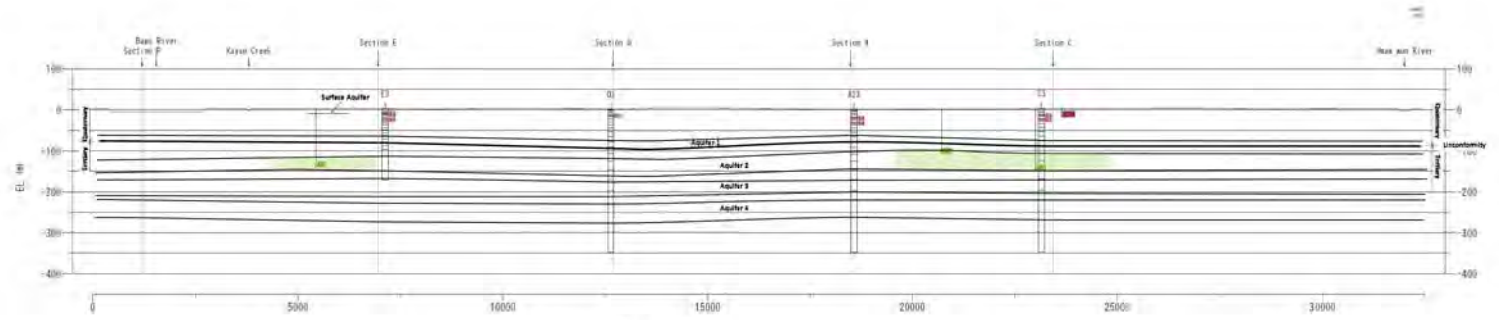


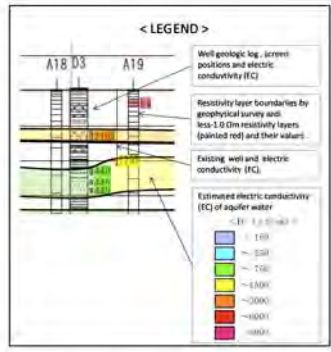
図 3-3-4-2 帯水層断面上の電気伝導度分布- WSW- ENE 断面 (2)



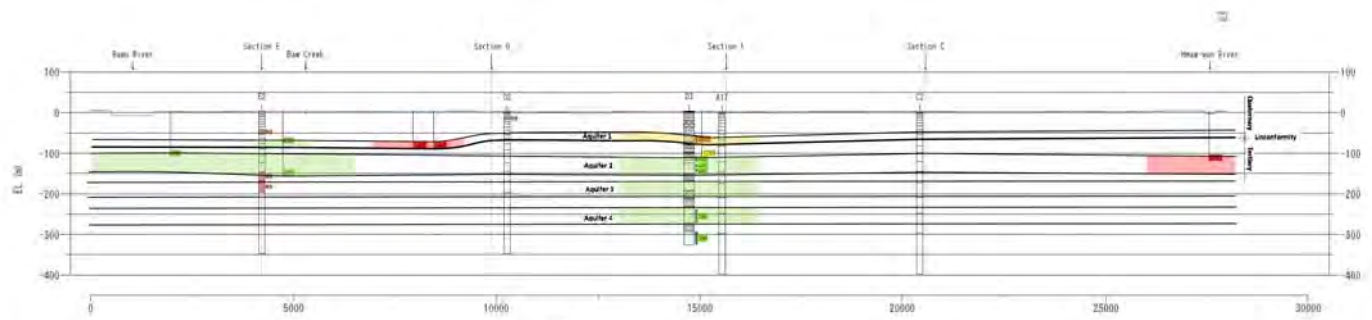
Note: Unit of distance and elevation - meter (m) 図 3-3-4-3 帯水層断面上の電気伝導度分布 - NNW - SSE 断面 (1)



Section I

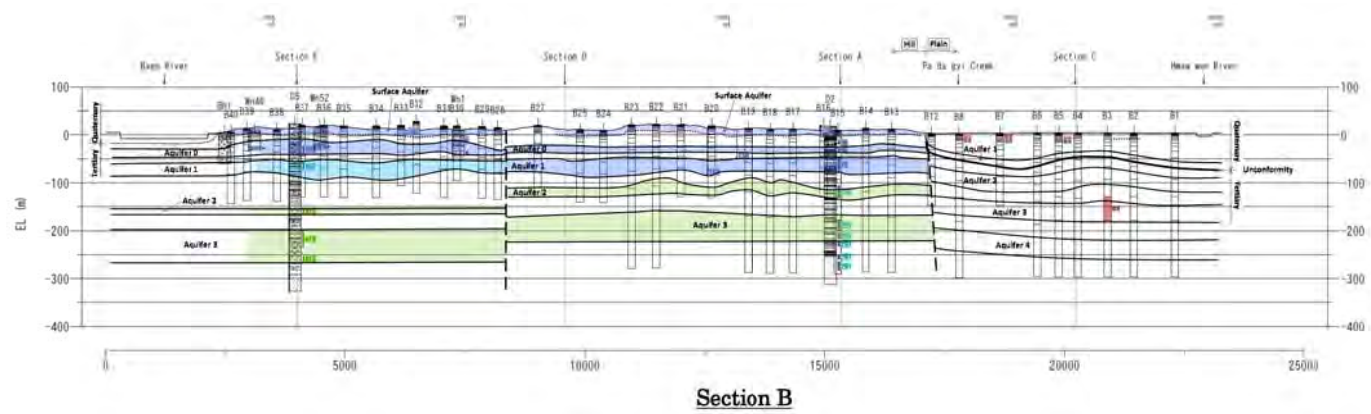


Note: Unit of distance and elevation - meter (m)

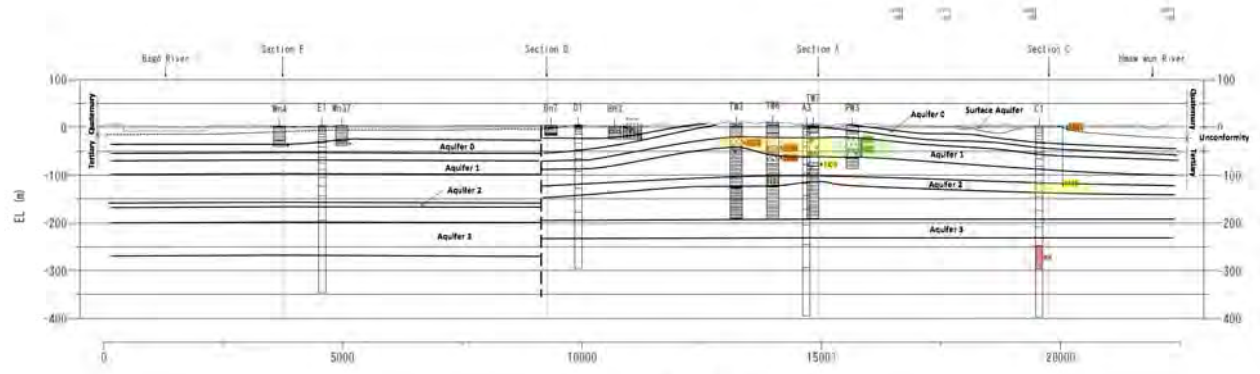


Section H

図 3-3-4-4 帯水層断面上の電気伝導度分布 - NNW - SSE 断面 (2)



Section B



Section G

Note: Unit of distance and elevation – meter (m)

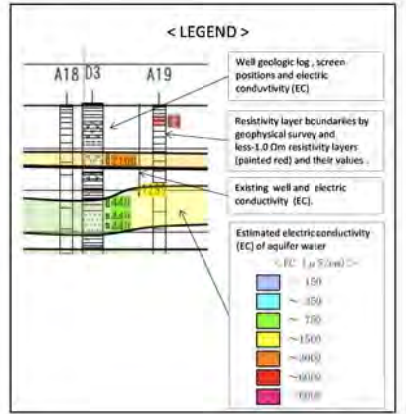


図 3-3-4-5 帯水層断面上の電気伝導度分布 - NNW - SSE 断面 (3)

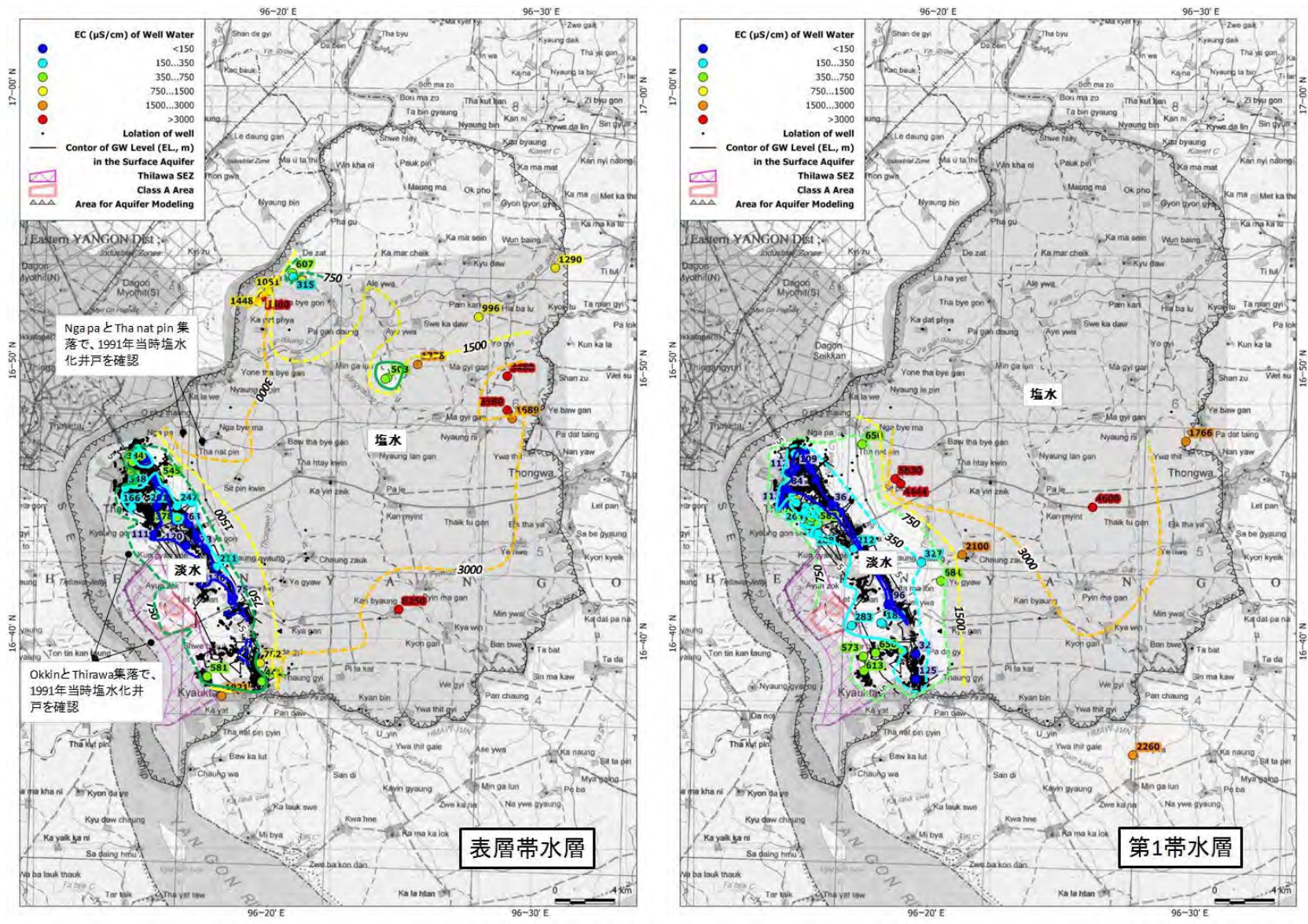


図 3-3-4-6 帯水層毎の推定塩水分布 (1)

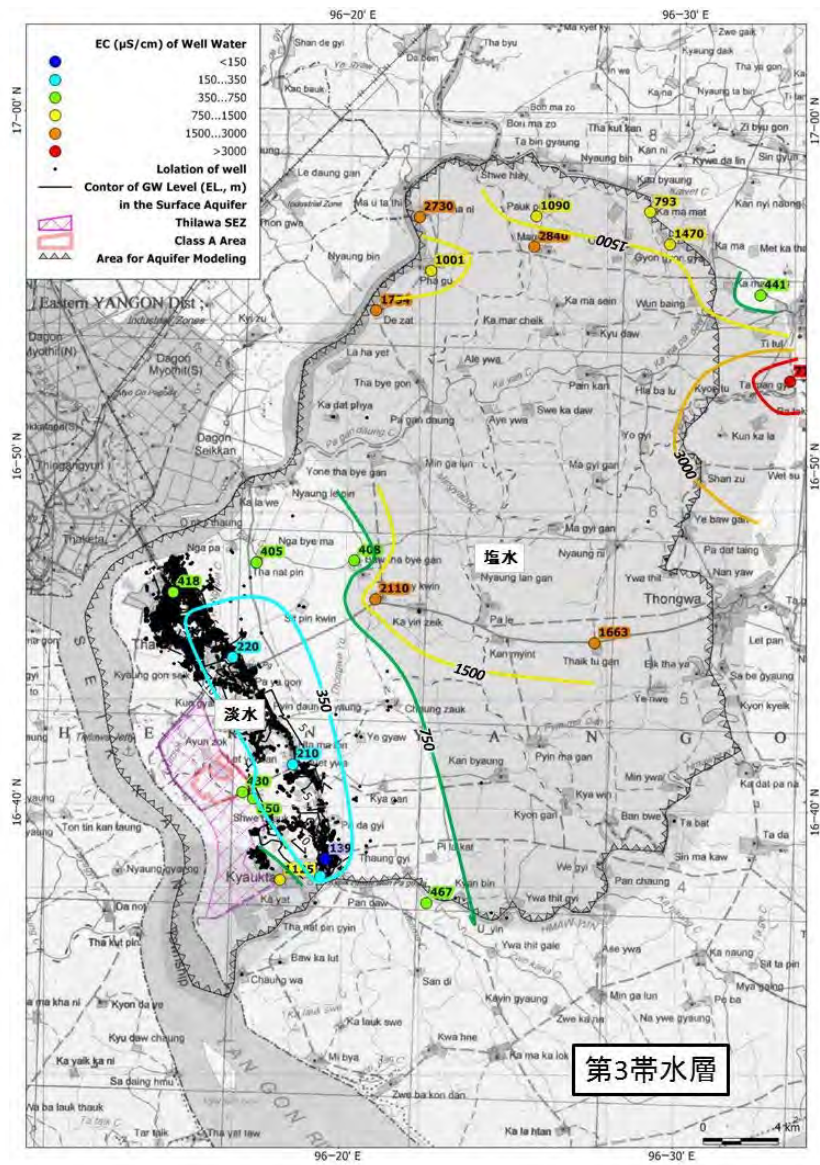
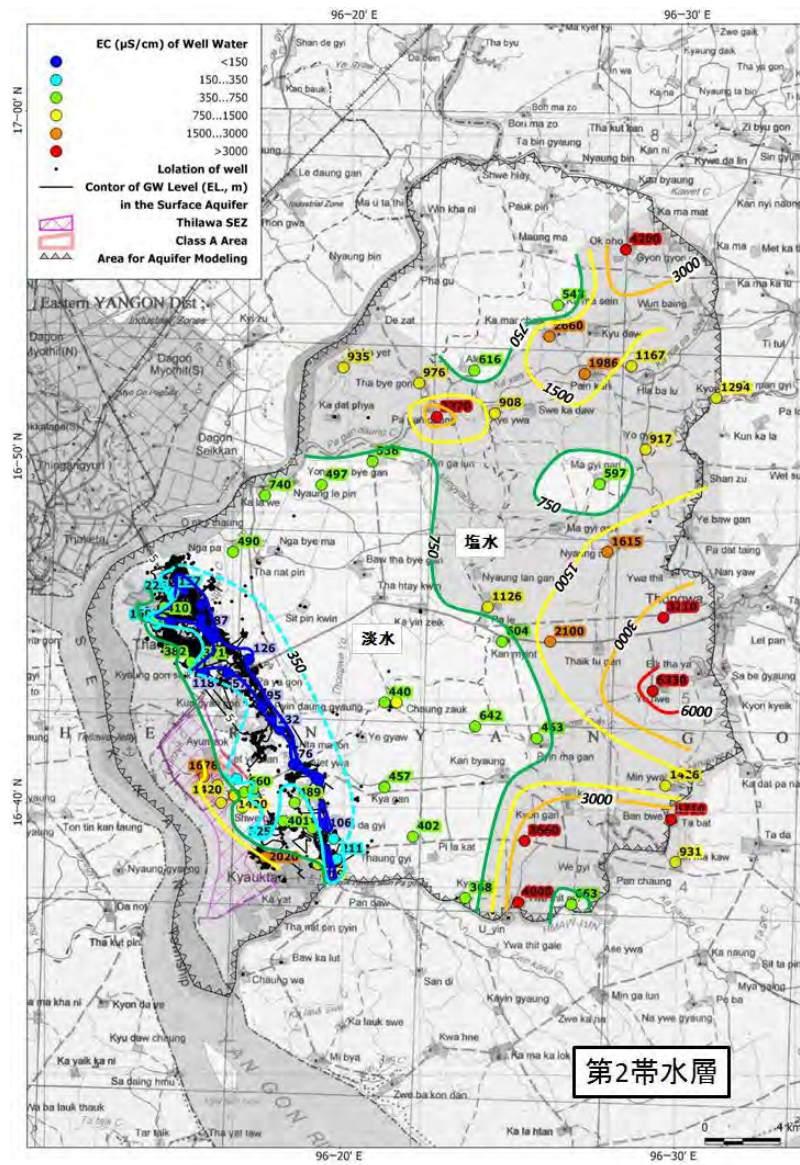


図 3-3-4-7 帯水層毎の推定塩水分布 (2)

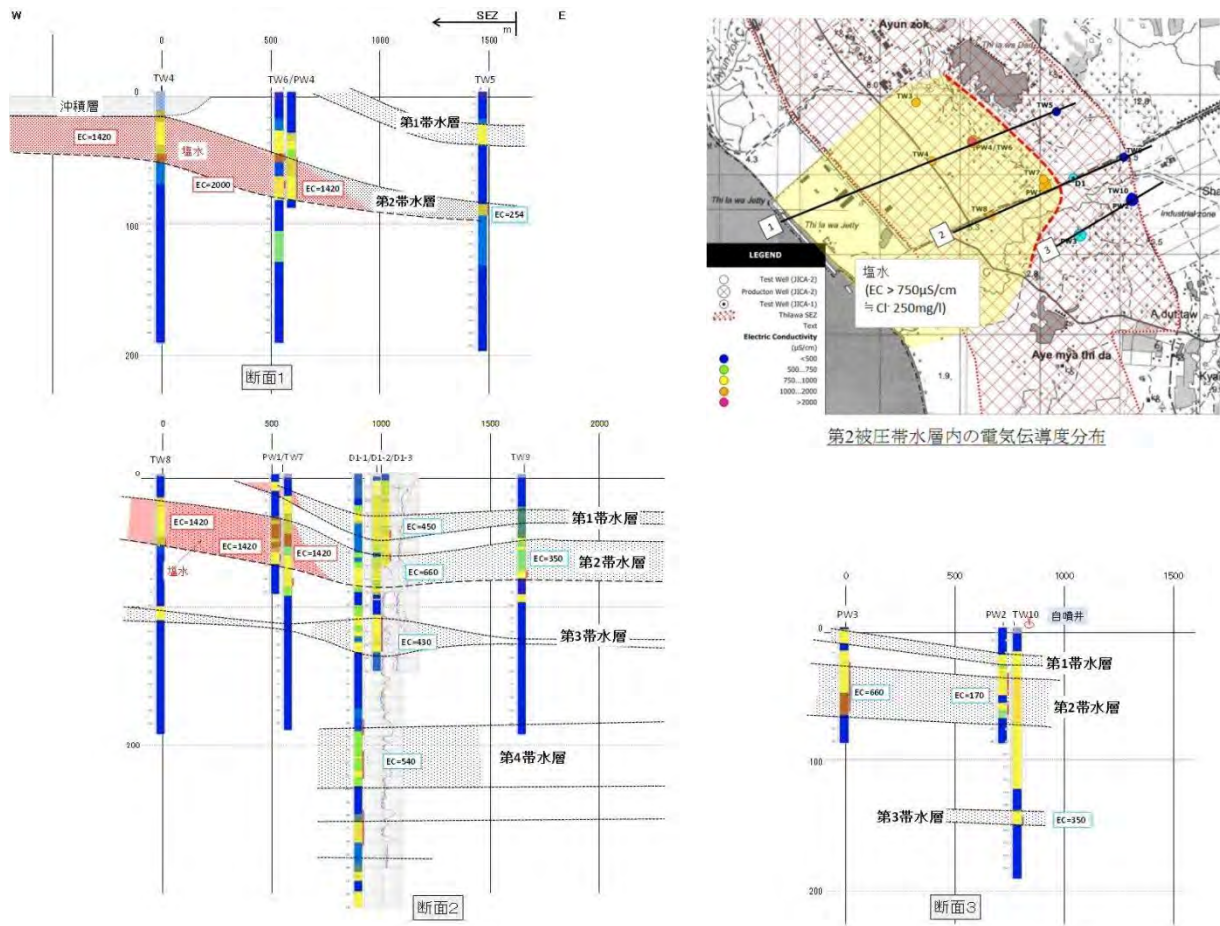


図 3-3-4-8 ティラワ SEZ 中央域の帯水層断面と塩水分布

### 3-3-5 地下水頭と地下水流動

#### (1) 全体的な流動方向

掘井戸内の水面深度及びこれに地盤高を考慮して作成した地下水位等高線図(図 3-2-10-1 参照)から、表層不圧帯水層の地下水が丘陵中央部から両側に流下していることが推定される。

#### (2) 涵養域と流出域

図 3-2-9-2 (前掲) 及び図 3-2-9-3 (前掲) に、16 箇所の試験井の地下水位及び水頭の変動状況を示す。D-2、D-5 及び D-4 地点では、深い位置にある帯水層ほど低い水頭を示している。これらの地点は、丘陵尾根部または平野内の高まった地域に位置している。対照的に、D-1 および D-3 地点では、深い位置にある帯水層ほど高い水頭を示している。これらの位置は丘陵の裾部または平野のクリークの近くに位置している。この状況は、図 3-3-1-1 (前掲) に模式的に示すように、前者が地下水の涵養域、後者が地下水の流出域にあることを暗示している。

### (3) タンリン地区の過剰揚水

D-5 地点では、D-5-2 観測井（第 2 被圧帯水層）と D-5-3（第 3 被圧帯水層）の水頭が、1 年を通じてほとんど標高 0m 以下にある。D-5 のあるタンリン地区は、塩水が遡上するバゴ川とヤンゴン川に近接する。一般にこのような水理状況においては、図 3-3 13 に示すように、帯水層への塩水侵入が懸念される。水頭が EL. 0 m を下回っていても、マイナス値が小さい場合は、河川との間に EL. 0m 以上の区域が残り、塩水侵入が生じない可能性があるが（同図の中図）、当地では大きなマイナス値であり、塩水侵入が生じる可能性が非常に高い（同下図）。したがって、第 2 及び第 3 帯水層は塩水侵入に関して「過剰揚水」の状況にあると考えられる。

なお、第 1 帯水層が EL. 0 m を通年で上回っていることから、全体としては降水からの涵養量を越えるほどの揚水はしてないと推定される。ただし、図 3-2-9-2 からわかるように、第 1 帯水層と第 2 帯水層とともに、降水からの涵養のない乾期において直線的な水位低下曲線を示している。帯水層の水位（水頭）は、自然状態では一般に、D-2-0 や D-2-1 のように指数関数的に低減する。このような直線的な低減は地下水流出による自然に近いものではなく、貯留された地下水を強度の高い揚水で消費していることを暗示している。D-5-2 の水頭には、11 月 20 日を境にして雨期に約 1m、乾期に約 1.4m の、周辺の多数の井戸によると推定される日変動が明瞭に表れている。

### (4) D-1 地点付近の帯水層状況

D-1 地点では、D-1-1（第 1 被圧帯水層）の水頭変動は、より深い位置にある他の 3 つの被圧帯水層の変動と明らかに異なる（図 3-2-9-3 参照）。第 1 被圧帯水層は、付近で表層不圧帯水層とつながっている可能性がある。



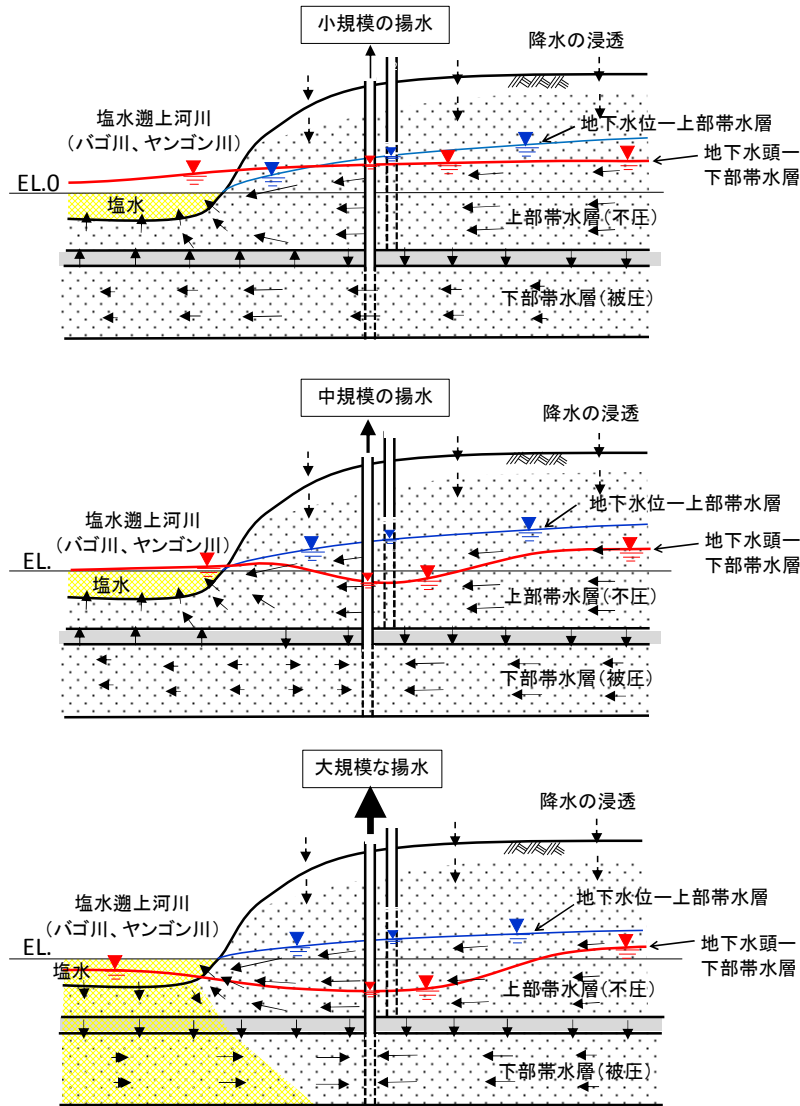


図 3-3-5-1 塩水遡上河川近傍における揚水規模と水位低下の関係の概念図

### 3-4 地下水涵養と利用率

#### 3-4-1 タンクモデルによる地下水涵養量の推定

##### 3-4-1-1 推定方法

以下の理由から、地下水涵養の主体は、ティラワ SEZ 周辺丘陵における降水であると考えられる。

- ・地形、表層地質及び土地被覆

丘陵地は、約 2800mm の年間降水量の下で、半ラテライト化した土壤が発達する（図 3-2-12-1～図 3-2-12-3；前掲—以下、括弧内同様）とともに林地が広く存在しており（図

3-2-11-1)、盛んな雨水浸透を暗示している。特に、北部は固結度の低い砂岩を主体とする地層に覆われており(図 3-1-4-2)、浸透能が高いと推定される。地盤高は尾根部で標高 20m 前後あり、浸透した雨水は周辺の流出河川や水路と最大 20m 前後の水頭差を有して丘陵内で貯留ないしは側方流動できる。

一方、平野・低地は、厚い粘性土層に被覆されており(図 3-2-5-2)、浸透能は小さいと推定される。また、地盤面は標高数mで、多数発達する周辺流出水路との水頭差はわずかである。このため、浸透した雨水は、ほとんど貯留できずに近傍の水路へ流出するか地表に湛水すると推定される。

#### ・地下水位変動

地下水位観測結果(図 3-2-9-2 および図 3-2-9-3)からわかるように、地下水頭は降雨に感応して変化しており、その年間変動量は、丘陵地域(D-2 及び D-5 地点)で 5m~10m、平野地域(D-3, D-4 地点)や西側低地(D-1 地点)で数十cmと、大差がある。この水頭変動量は、降雨浸透に由来する季節的な地下水の貯留量が、丘陵地域で大きく、平野ないし低地部で小さいことを意味している。

#### ・地下水利用

地下水利用(揚水)の大部分が丘陵地とその近傍でなされており(図 3-3-3-6)、地下水位は雨期に回復することから、丘陵地で相応の降雨からの涵養があることが推定される。平野・低地では、地下水利用はわずかであり強制的な涵養はほとんど生じていないと推定される。

#### ・同位体分析による推定年代

ヘリウム4による地下水の年代推定では、丘陵地の浅部帯水層で数十年と若く(トリチウム年代も同様)、低地では数百年~数万年の古い値を示した(図 3-2-8-7)。これは、丘陵地で浸透した雨水の流動速度が大きく、平野・低地で非常に小さいことを示している。

降水からの年間の地下水涵養の主要部分は、上述の地下水変動に示される季節的な貯留である。全体の年間地下水涵養量は、これに加え、年間の地下水利用量と地下水流出量を含む。

地域の地下水涵養量を推定するため、観測時系列水頭を検証値としてタンクモデル解析を実施した。図 3-4-1-1 に当地の帯水層状況をタンクモデルで概念的に示す。今回の解析では、同図に示すように、地表系タンクと表層不圧帯水層のタンクを使用する。表層不圧帯水層タンクでは、下方帯水層への浸透量と側方の流出を区別しない。

降水は地下に浸透した後、まず表層の不圧帯水層に達する。タンクモデル解析で地下水涵養量を推定のためには、検証値として不圧帯水層の水位観測データが必要である。しかしながら、図 3-4-1-2 に示すように、不圧帯水層についての観測がされていない。そこで、図 3-4-1-3 に示すように近似的に、最上位の被圧帯水層の水位変動を不圧帯水層のものであるとみなすこととした。実際には、不圧帯水層の水位変動は最上位の被圧帯水層よりは多少とも大きく、降雨に対する感応もいくらか早いものと考えられる。すなわち、上記仮定により得られた地下水涵養量は、実際より多少小さくなる可能性がある。

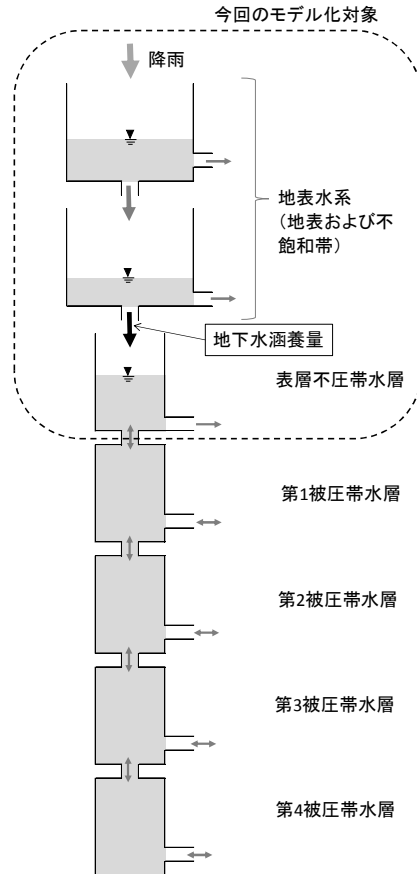


図 3-4-1-1 当地帯水層のタンクモデル概念図と今回の解析対象

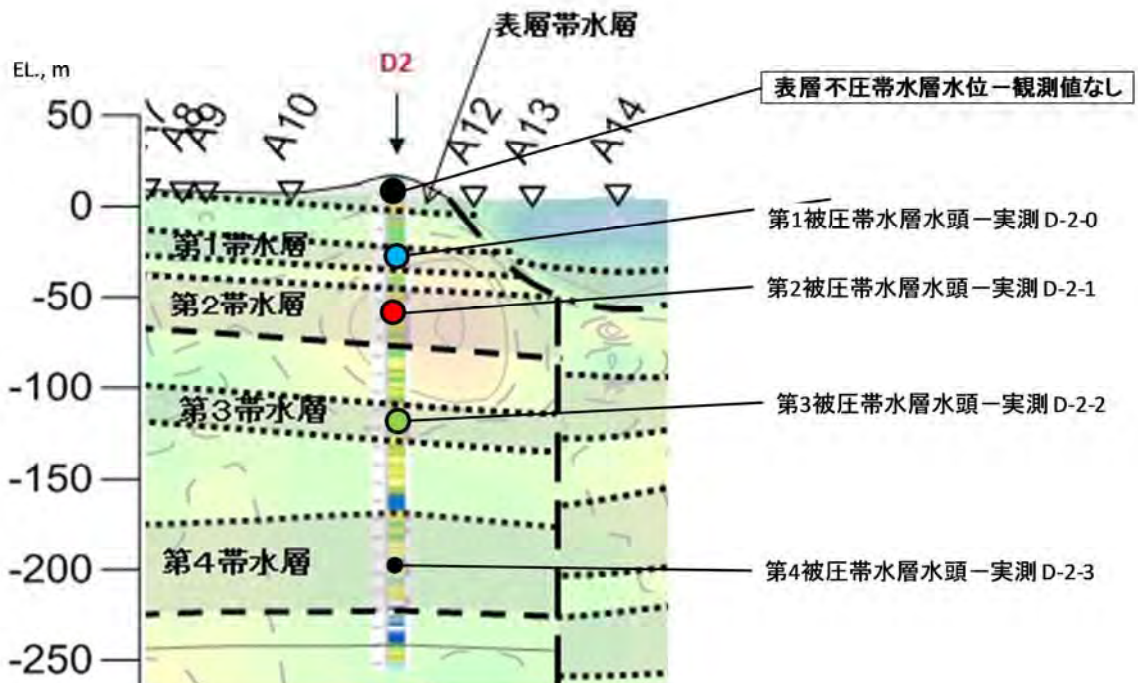


図 3-4-1-2 当地の帯水層と観測対象層 (D2 地点を例として示す)

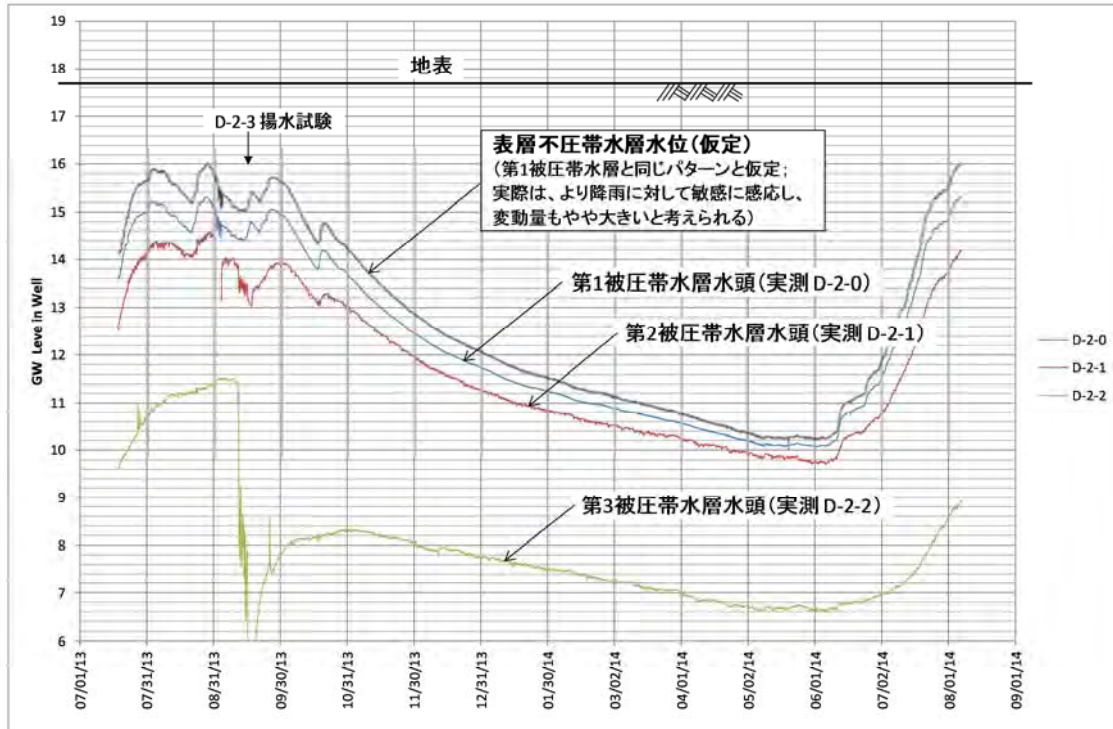


図 3-4-1-3 表層不圧帯水層の水位変動の仮定

### 3-4-1-2 パラメーター

#### (1) 降水量および可能蒸発散量

降水量は、ヤンゴン气象台における 2013 年の日値を解析に使用した。可能蒸発散量は、農業灌漑省灌漑局がヤンゴン地区において灌漑計画に使用している下記の月値を用いた。

#### 月可能蒸発散量 (mm/日)

Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
5.82	6.11	7.65	8.01	5.88	4.43	4.45	4.38	4.89	4.92	5.27	5.43

#### (2) 地下水利用強度

タンリン市街地に位置する D5 サイト付近では地下水利用が非常に盛んであり、これを解析上無視することはできない。既存井戸調査結果によれば、図 3-4-1-4 に示すように付近の揚水強度は 1.3 mm/日 と推定される。一方、D-5-2 井の地下水位観測結果によれば、図 3-4-1-5 に示すように、雨期に約 1.0m、乾期に約 1.3m の揚水によると考えられる日変動が認められる。これらを考慮し、D5 地点の解析においては、雨期に 1.0mm/日、乾期に 1.3mm/日の取水があると仮定した。

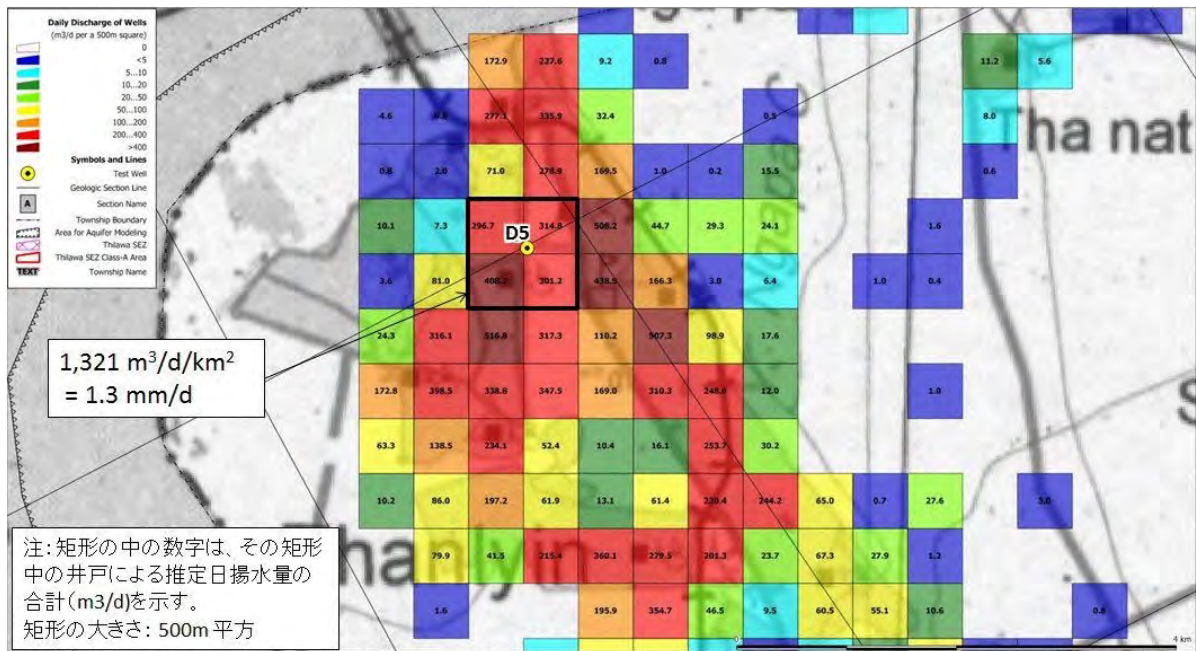


図 3-4-1-4 D5 地点周辺の揚水強度

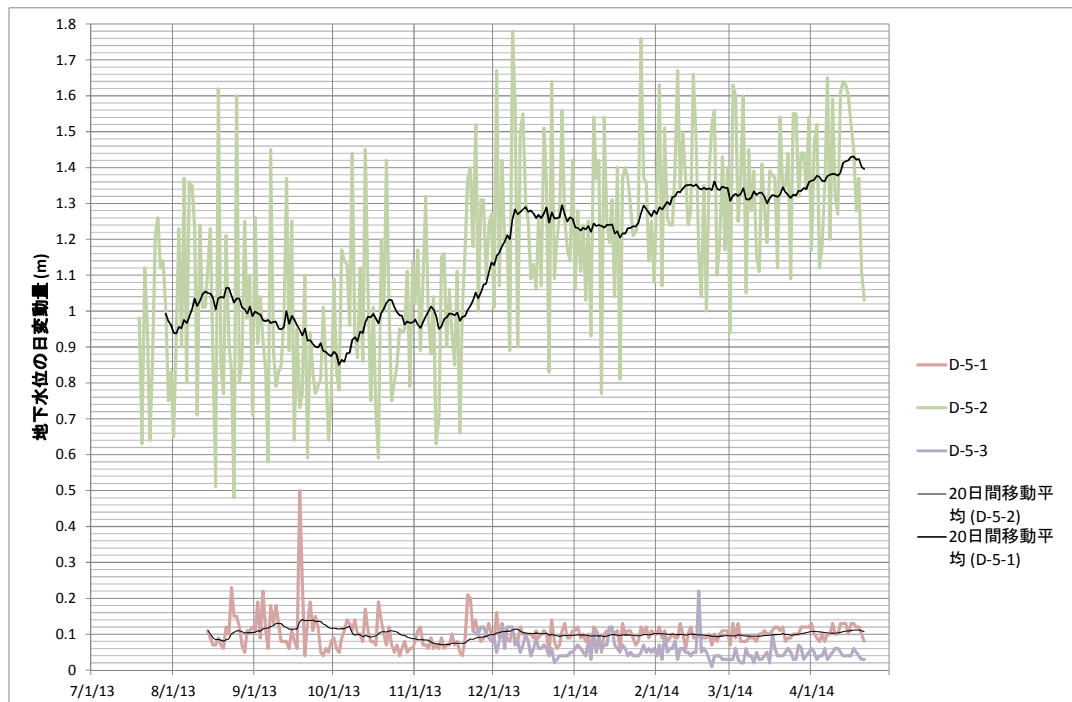


図 3-4-1-5 D5 サイト観測井地下水位の日変動量

### (3) 有効空隙率

不圧帯水層の有効空隙率はイラワジ層が主として分布する D5 地点では 0.04、また、ペグ層が市として分布する D2 地点では 0.03 と仮定した。他の地点では、同じく 0.03 と仮定した。D5

地点の 0.04 は、タンクモデル解析において地下水涵養のない乾期の水位変化をよく再現したことから値の信頼性は高いと考えられる。

### 3-4-1-3 解析結果

図 3-4-1-6～図 3-4-1-10 に 5 箇所を観測点におけるタンクモデル解析結果を示す。図からわかるように、計算水位は観測水位をほぼ再現している。

ただし、詳細にみれば、D-2 及び D-5 地点のグラフからわかるように、雨期（6 月から 8 月）における計算値と実測値の離れが大きい。10 月の実測グラフと降水のパターンを比較すると明らかに、大きな降雨にたいして地下水が反応していない。これは降雨データがヤンゴンの観測値で、現地の降雨とは異なるためと考えられる。地下水涵養量推定の精度を上げるためには、現地での降雨量観測と表層不圧帯水層の地下水位観測が必要である。

2013 年の水収支と地下水涵養高を表 3-4-1-1 に示す。

表 3-4-1-1 地下水涵養量と利用率

項目	単位	D1	D2	D3	D4	D5
降水量	mm/年	2774.0	2774.0	2774.0	2774.0	2774.0
蒸発散量	mm/年	477.6	472.9	477.6	477.6	463.5
地表流出	mm/年	2235.7	1964.9	2232.7	2232.7	1686.3
地下水流出	mm/年	61.2	325.5	65.3	64.1	187.4
揚水量	mm/年	0.0	0.0	0.0	0.0	413.3
貯留変化	mm/年	-0.5	10.8	-1.5	-0.3	23.5
地下水涵養	mm/年	<b>60.7</b>	<b>326.2</b>	<b>63.8</b>	<b>63.8</b>	<b>624.2</b>
年平均日地下水涵養量	mm/日	<b>0.17</b>	<b>0.89</b>	<b>0.17</b>	<b>0.17</b>	<b>1.71</b>
雨期の平均日地下水涵養量 (5月～10月;184日)	mm/日	0.3	1.8	0.3	0.3	3.4

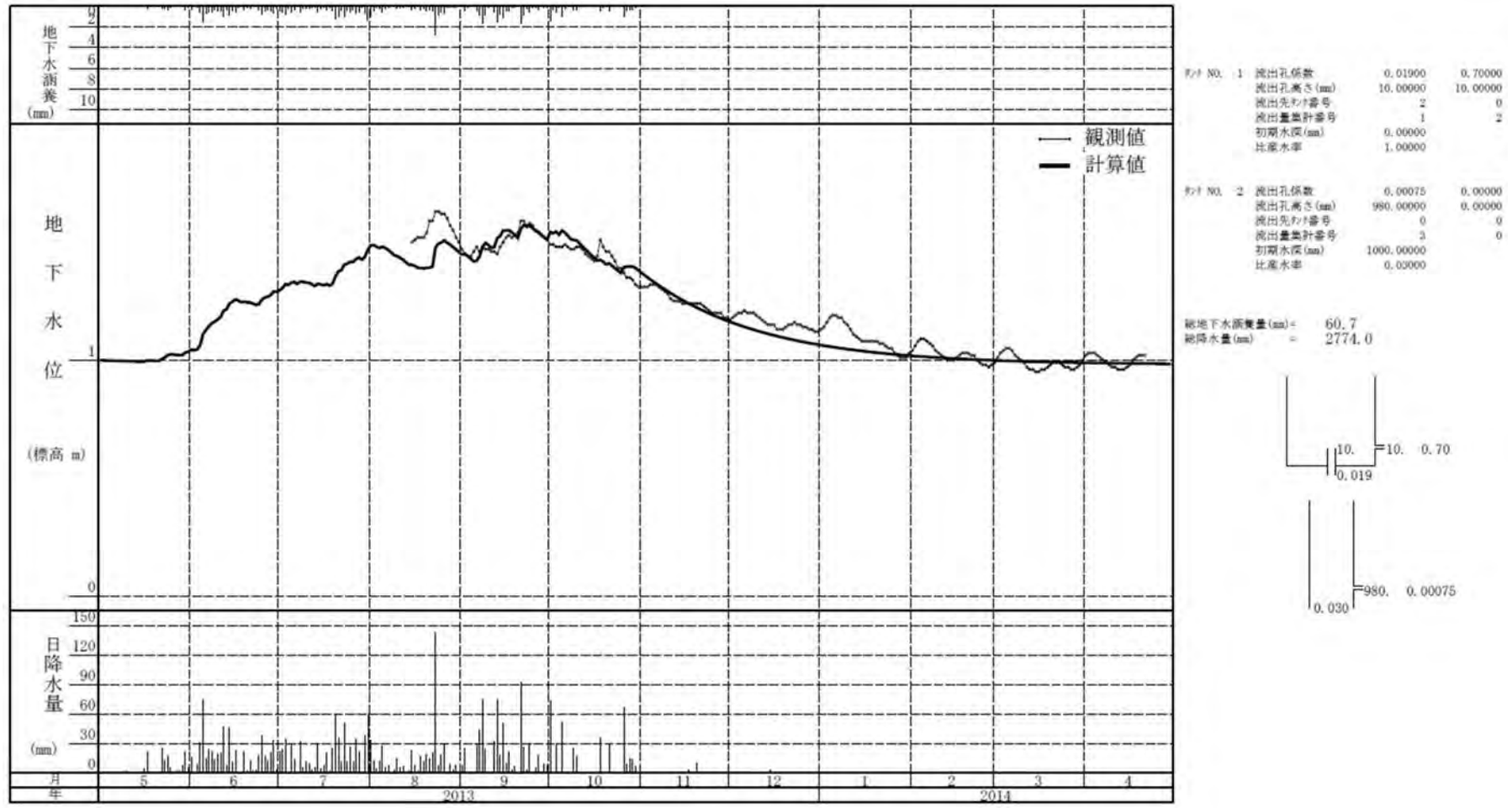


図 3-4-1-6 タンクモデル計算結果-D-1 地点

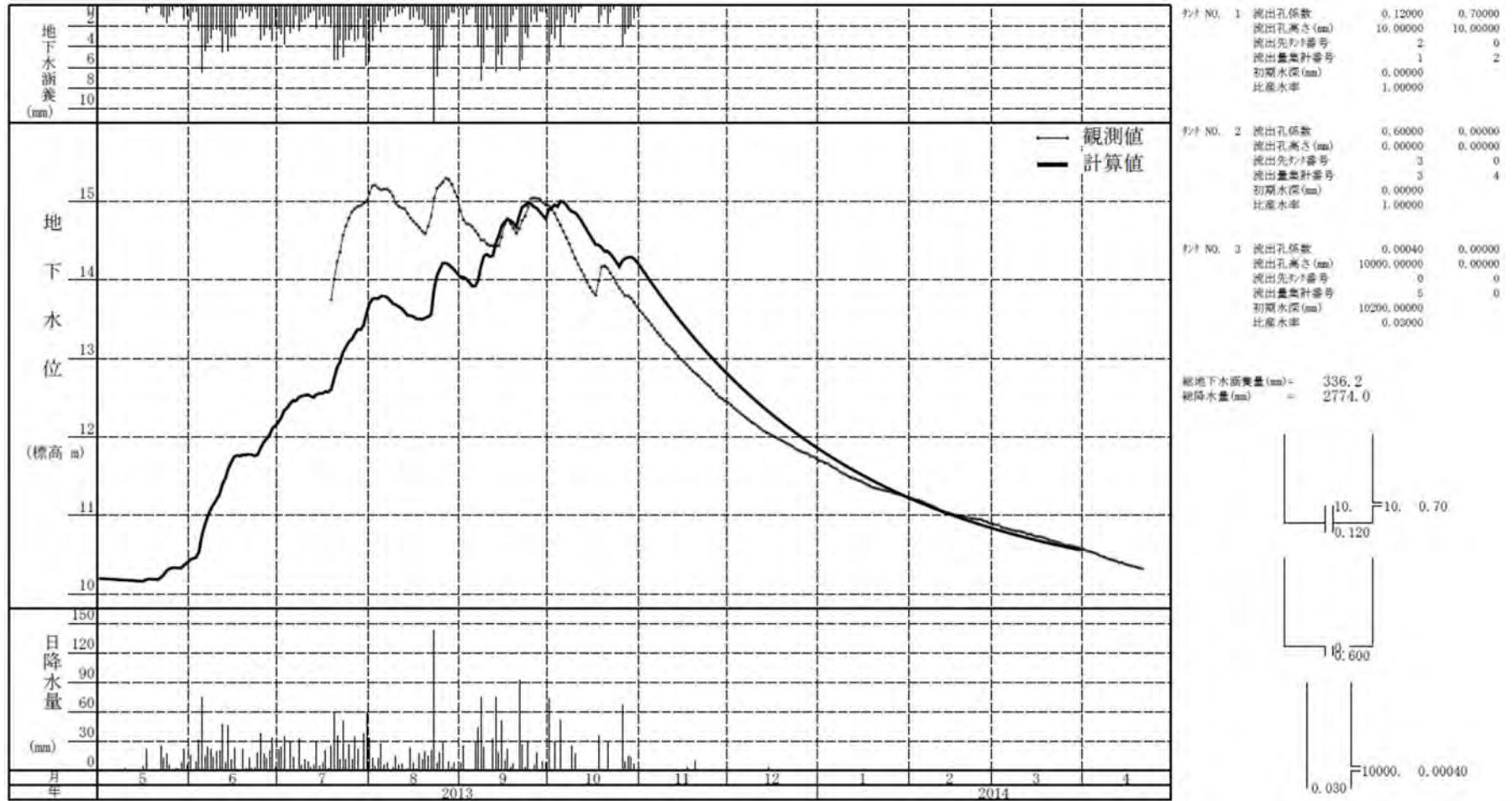


図 3-4-1-7 タンクモデル計算結果-D-2 地点



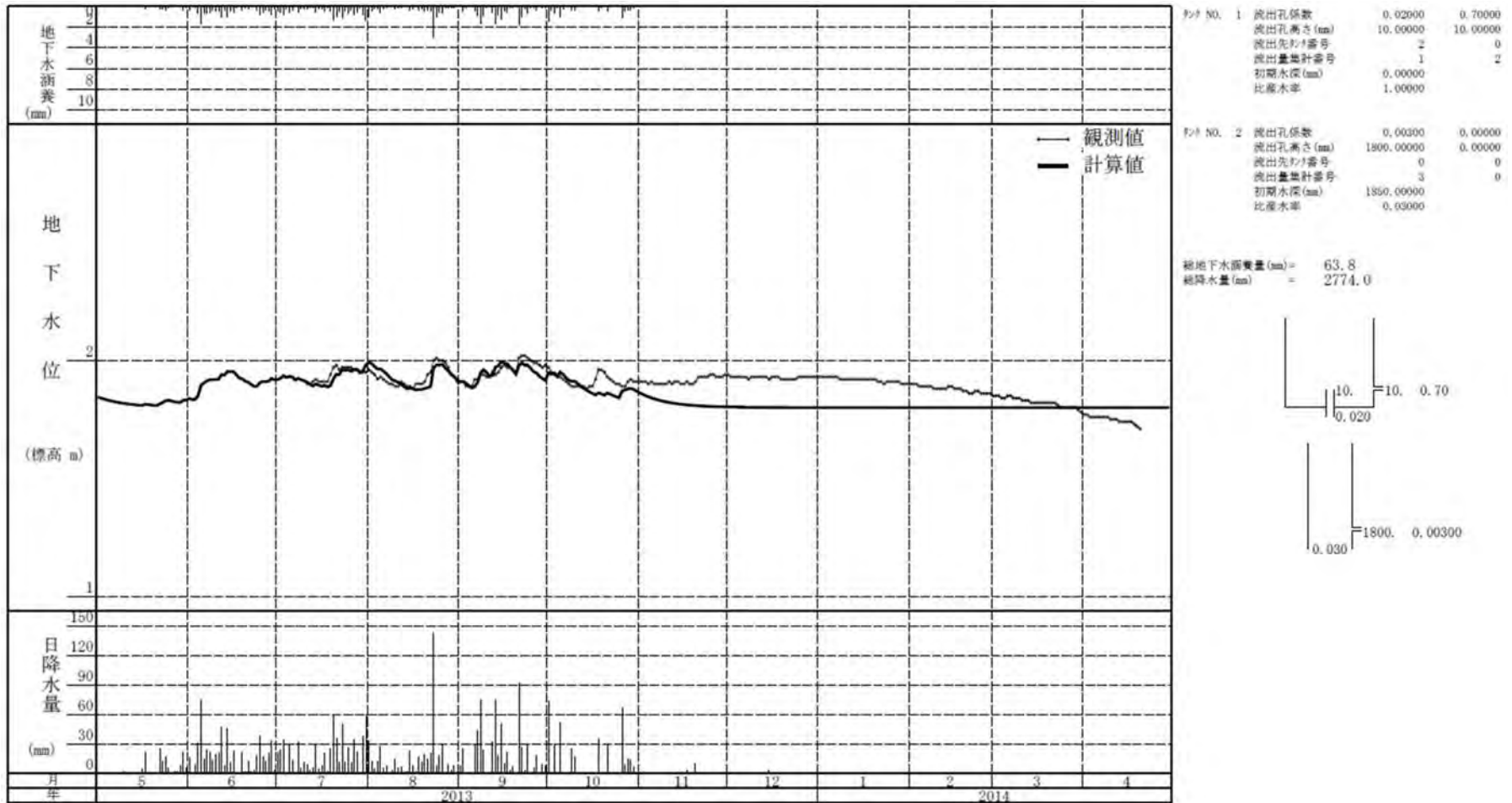


図 3-4-1-8 タンクモデル計算結果-D-3 地点

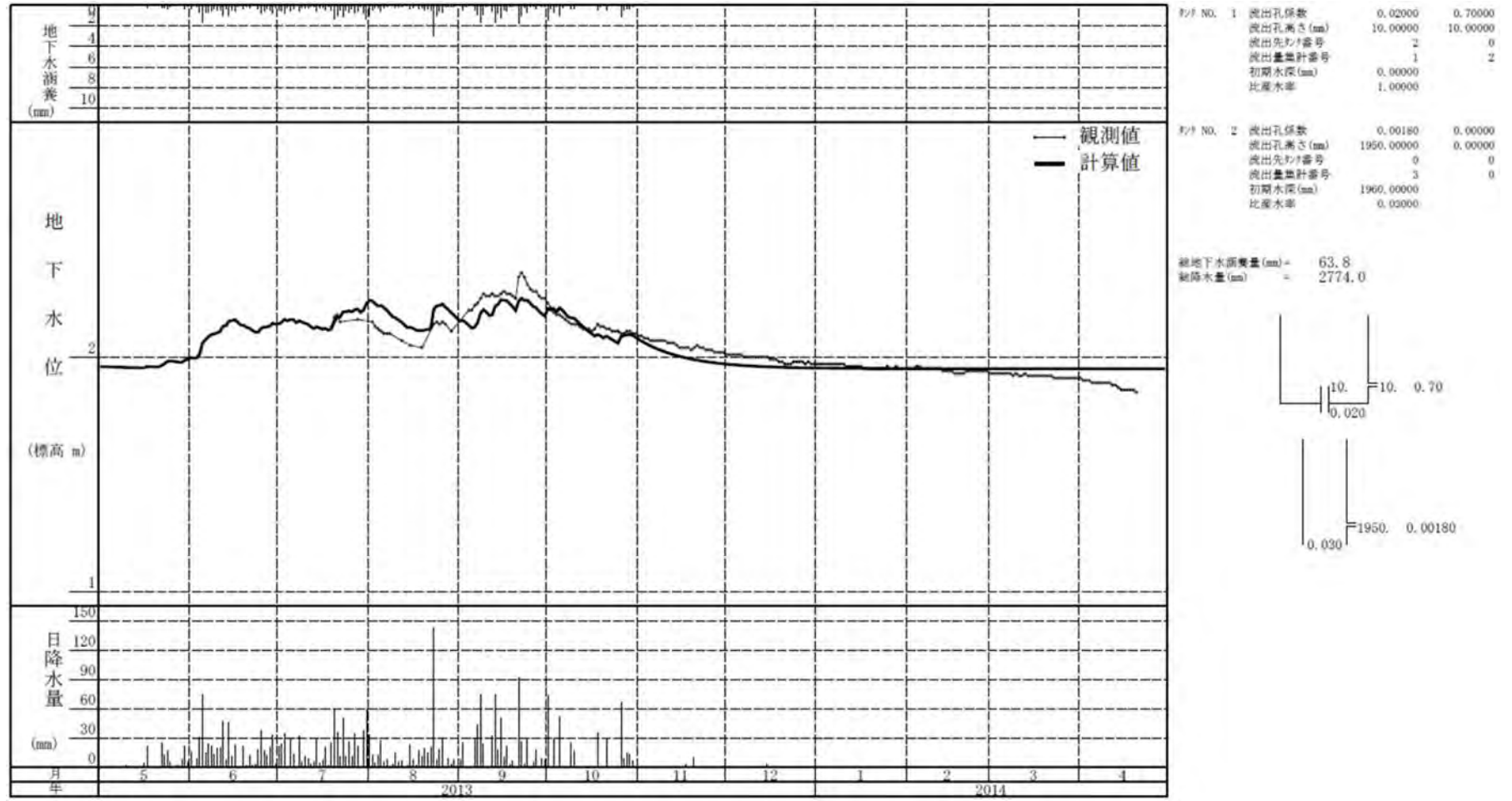


図 3-4-1-9 タンクモデル計算結果-D-4 地点

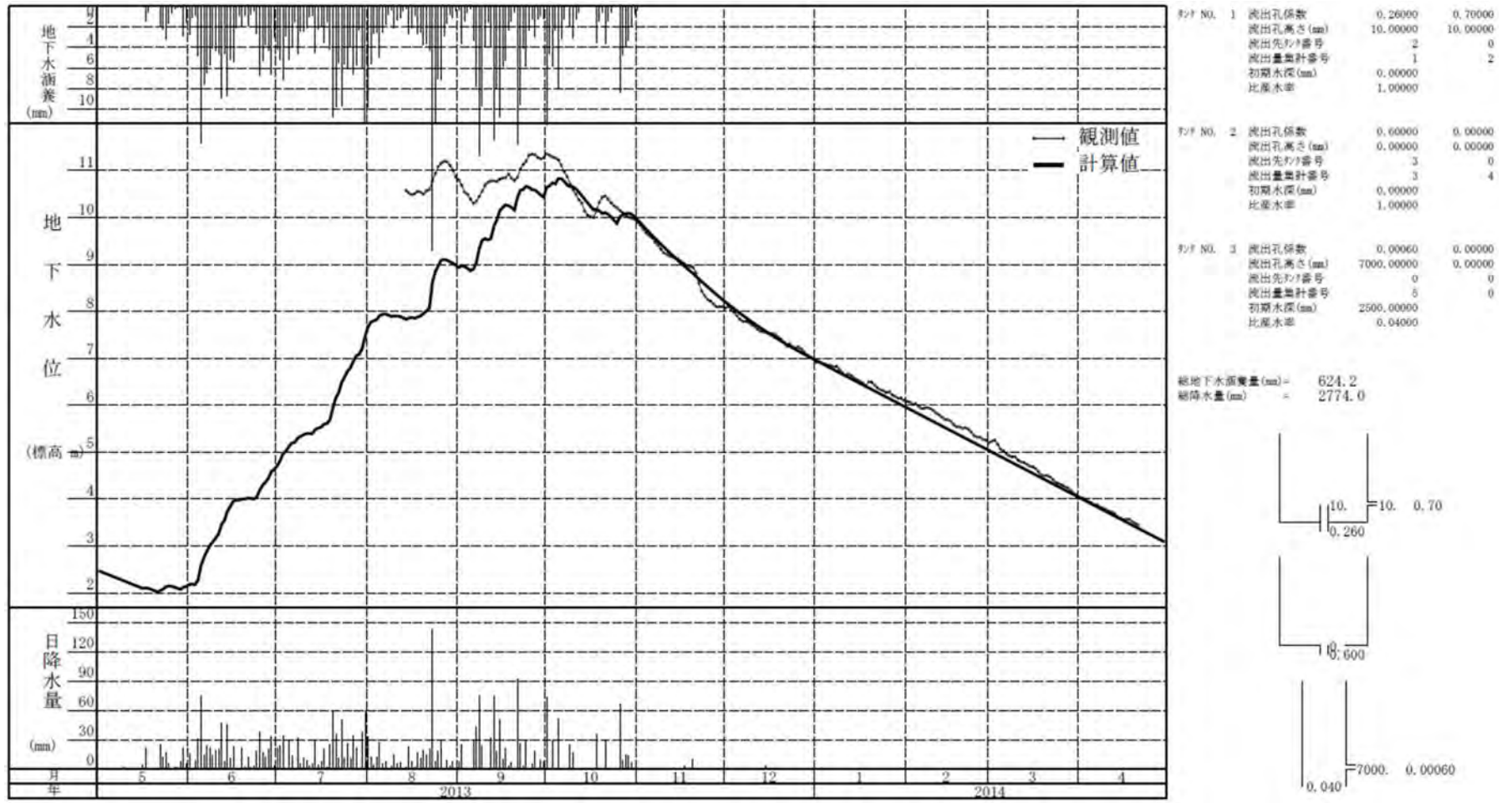


図 3-4-1-10 タンクモデル計算結果-D-5 地点

### 3-4-2 地下水涵養量と利用率の推定

地被を考慮して観測地点の支配域を図 3-4-2-1 に示すように仮定すると、降水からの地下水涵養量は大略図 3-4-2-1 および表 3-4-2-1 に示すように推算される。地下水涵養量は、丘陵地域で大きく、平野ないし低地部で小さい。平野部全体の涵養量は大きく算出されるが、実際には、地下浸透した雨水は、ほとんどが密に発達した水路網（小河川、水路、排水溝）に流出してしまうと推定される。加えて、平野地域は塩水を含む厚い第四紀層に覆われるため、たとえ下方の被圧帯水層の揚水により強制的な地下水流動が生じていても雨水からの浸透水を利用することができない。このため、丘陵域における地下水涵養のみが、地下水利用の対象になるものと言える。その量は、平均約 47,000m<sup>3</sup>/日 であり、その約 30% が既に利用されている。過剰揚水が認められる北部丘陵地域では、利用率は約 50% に達する。

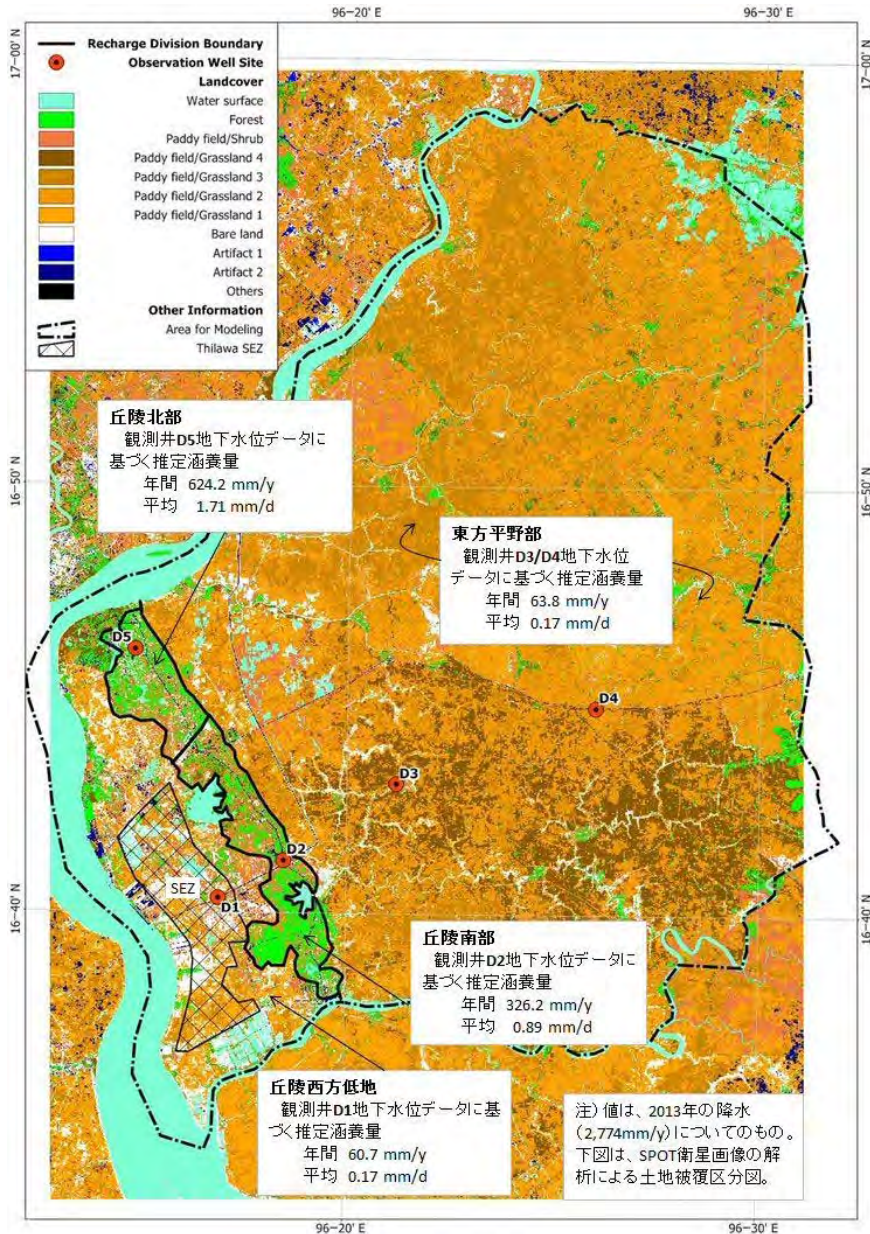


図 3-4-2-1 推定地下水涵養高と涵養域区分

表 3-4-2-1 地下水涵養量と利用率

地域	面積 (km <sup>2</sup> )	年間降水量 (mm)	年間涵養量 (タンクモデル 解析による) (mm)	平均日涵養量		利用対象の涵養 量 (m <sup>3</sup> /日)	現況地下水 利用量 (m <sup>3</sup> /日)	利用率	
				(mm)	(m <sup>3</sup> /日)				
丘陵北部	14.4	2,780	624.2	1.71	24,625	24,625	11,489	47%	31%
丘陵南部	24.7		326.2	0.89	22,077	22,077	3,005	14%	
西方低地	92.0		60.7	0.17	15,292	大部分は短時間で近 傍の水路へ流出する ため地下水として利 用できない。	942	-	-
東方平野	796.8		63.8	0.17	139,281		1,851	-	-
全域	927.9					46,702	17,287		

### 3-5 地下水開発可能量の推定

#### 3-5-1 地下水開発可能量に関する主要項目の評価

上述の調査結果から、地下水開発可能量に関する主要項目は、以下のように評価される。

##### (1) 水収支

有効な地下水涵養は、丘陵域において降雨からもたらされる。その量は、平均約 47,000m<sup>3</sup>/日と推定され、その約 30%が現在利用されている。北部丘陵（ほぼタンリン市街地）では、約 50%が利用されており、過剰揚水の状態にある。南部丘陵では、利用率は約 14%と推定され、付近で若干の新規開発が可能と考えられる。

##### (2) 水質

淡水は、主として丘陵地域とその近傍に賦存する。当地の地下水は、一般に鉄イオンを多く含む。また、深部帯水層（第 4 帯水層）は亜鉛を多く含む。飲用その他特定の用途には、これらイオンの除去処理が必要である。

##### (3) 水理能力

当地の帯水層の水理能力は大きくない。期待される新規井戸の揚水能力は、1 本あたり数百 m<sup>3</sup>/日（平均的には約 300m<sup>3</sup>/日）である。

##### (4) 環境影響

開発においては、次の 3 点に留意しなければならない。

- 1) 既存井戸における地下水利用への影響（地域内には多数の井戸が分布するため）
- 2) 塩水侵入の助長（塩水がすでに平野地域や河川近傍に分布しているため）
- 3) 平野地域における地盤沈下（厚い未固結の粘性土層が平野を覆うため）

### 3-5-2 調査地域における地下水開発可能量の基本像

推定される開発に有効な地下水涵養量は、平均約 47,000 m<sup>3</sup>/日と推定され、そのうちのある割合の量が利用可能である。現在すでに 17,000m<sup>3</sup>/日が利用されていること、および、丘陵北部では約 50%の利用で過剰揚水となっていることを考慮すると、新規に開発できる水量は、数千 m<sup>3</sup>/日程度であろう。この水量は明らかにティラワ SEZ の中期計画需要量 42,000m<sup>3</sup>/日を下回る。従って、ティラワ SEZ 向けには、地下水は、短期需要ないしは緊急時のためにのみ利用可能である。

また、地下水は地域の欠くべからざる主要水源であり、かつ、井戸が年々増加していることを考慮すると、SEZ での地下水利用はできるかぎり控えるべきであろう。