

カンボジア国  
鉦工業エネルギー省  
シェムリアップ水道公社

カンボジア国  
シェムリアップ上水道拡張整備事業  
準備調査  
最終報告書 2

和文要約

平成 23 年 8 月  
(2011 年)

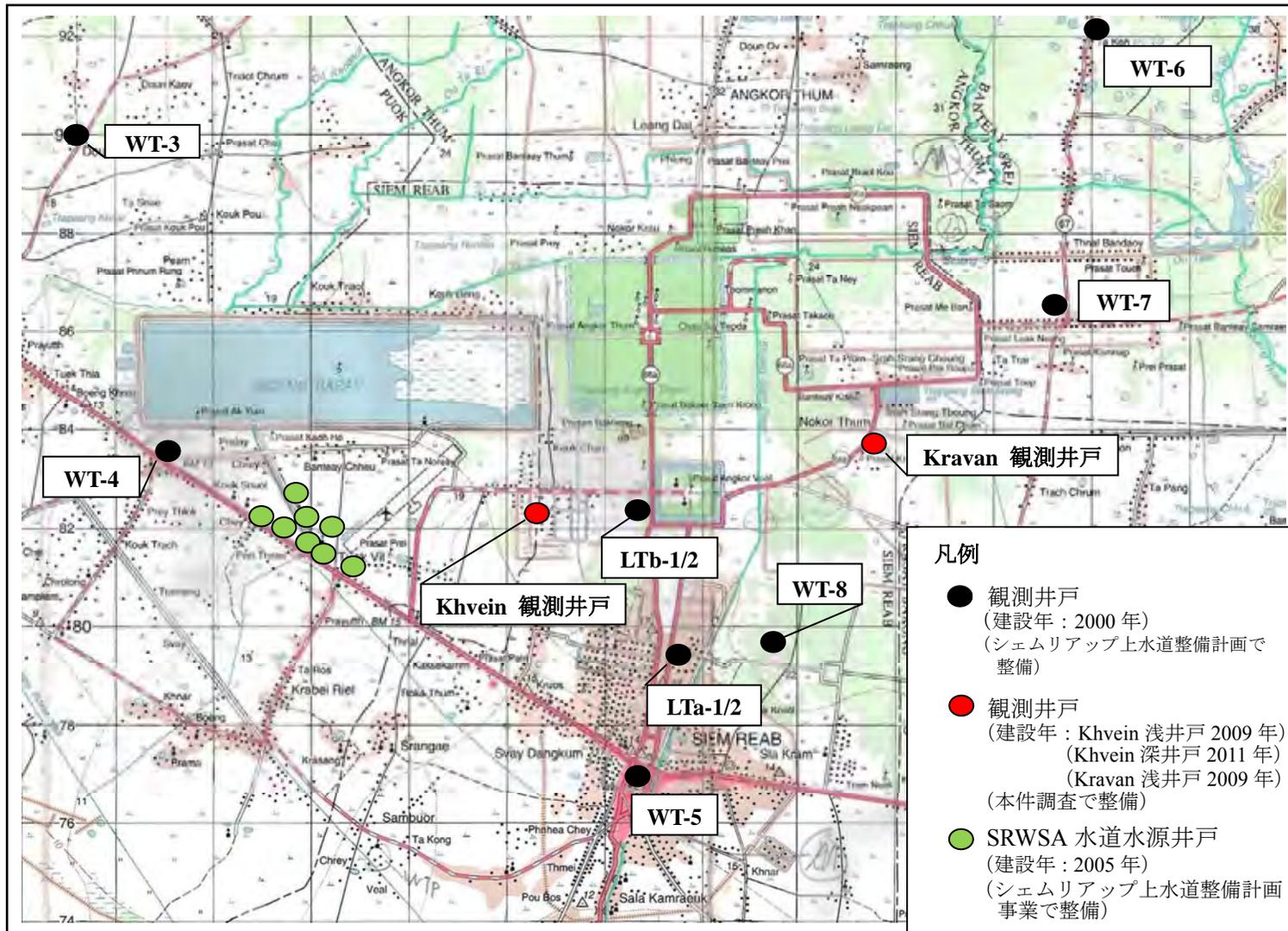
独立行政法人  
国際協力機構(JICA)

株式会社 エヌジェーエス・コンサルタンツ  
国際航業株式会社

環境
JR
11-139

適用通貨換算率は以下の通り。

1.00 米国ドル = 4,165 クメール・リエル(KHR) = 90.5 円 (2010年5月時点)



調査対象地域

調査対象地域写真 (1/2)



写真 1: 西バライ湖付近シェムリアップ市  
風景



写真 2: 西バライ湖



写真 3: 西バライ湖流出水路



写真 4: シェムリアップ川



写真 5: SRWSA 浄水場  
(日本国無償援助協力案件)



写真 6: コントロール室  
(SRWSA 井戸運転状況管理)



写真 7: SRWSA 生産井戸 (PW-4)



写真 8: SRWSA 生産井戸 (PW-4)  
およびコントロール・ボックス

調査対象地域写真 (2/2)



写真 9 : LTb-1 観測井戸  
(位置 : アンコール・ワット前)



写真 10 : 地盤沈下・地下水水位  
観測装置



写真 11 : WT-4 観測井戸



写真 12 : WT-4 観測井戸  
観測機器および井戸



写真 13 : Khvein 観測井戸  
(2011 年 5 月完成)



写真 14 : Kravan 観測井戸  
(2009 年 10 月完成)



写真 15 : 観測機器と井戸  
(Kravan 観測井戸)



写真 16 : ホテルの給水施設  
(水源 : 地下水)

## 要 約

### 1. 計画概要

#### 1.1 計画フレームワーク

シェムリアップ上水道拡張整備事業準備調査は、鉱工業エネルギー省 (MIME)、シェムリアップ水道公社(SRWSA)と独立行政法人国際協力機構 (JICA)の間で、2009年1月29日に調印された業務範囲に従って実施された。

本調査は、2009年5月に開始され、2011年8月に完了した。約28カ月間の調査期間中、調査チームは、鉱工業エネルギー省とシェムリアップ水道公社職員の協力のもと本調査を実施してきた。本最終報告書2は、地下水分野の調査結果を記載する。

#### 1.2 調査目的

本調査の目的は、以下の通りである。

- ◆ シェムリアップ市のための有効な、持続可能な給水システムのために、新しい水源を選定すること。
- ◆ 既存井戸の調査を実施し、地下水の開発可能性を評価すること。
- ◆ プロジェクトの目標年までの水需要を満たすために、緊急給水拡張整備計画を策定すること。
- ◆ 本プロジェクトが我が国の有償資金協力によって実施されるという過程の下、提案された給水拡張整備計画のためのフィージビリティ調査を実施すること。
- ◆ 2030年までの長期給水計画を策定すること。
- ◆ 調査の期間中、カンボジア側に技術移転を行うこと。

#### 1.3 調査対象地域

調査地域は、新しく市制を施行したシェムリアップ市の全コミューンと市外の隣接する1コミューンを含む14コミューンにより構成される。

#### 1.4 計画目標年次

2009年1月の独立行政法人国際協力機構とカンボジア側の間での合意に基づき、給水計画のための目標年として、2030年を設定された。

#### 1.5 調査方法と最終報告書2の内容

インセプション・レポートで調査チームによって提案された方法により実施された。本調査では、3フェーズに分けて実施され、最終報告書1(水道分野)と最終報告書2(地下水分

野) が作成された。

地下水調査の分野で、フェーズ1は、井戸台帳調査、電気探査、水利用意識調査、コンピュータシミュレーションによる地下水開発の可能性に関する基本的検討を含む。フェーズ2は、主に、水道分野における施設整備計画とフィージビリティ調査の準備によって構成されている。フェーズ3は、フェーズ1からの基本情報に基づいて実施された。

- ◆ フェーズ1 地下水盆の構造に関する基礎調査、井戸台帳及びコンピュータシミュレーションによる地下水開発の可能性に関わる基礎調査
- ◆ フェーズ2 施設整備計画とフィージビリティ調査の準備
- ◆ フェーズ3 地下水利用の評価に関する調査

## 1.6 最終報告書の内容

本最終報告書2は、フェーズ1と3の調査結果を取り扱う。

## 2. 地下水源の調査結果

### 2.1 物理探査

垂直電気探査 (VES) は、トンレサップ湖岸に沿った、Phnon Kraom 丘の東西 30 km の幅をもった地域で実施された。

探査データは、「カンボジア国シェムリアップ市上水道整備計画調査 (2000 年)」では、解析の結果として4層の地層構造が確認された。この解析結果を参考にして、今回調査で実施した物理探査データを解析した結果、以下のような地質構造となった。

#### 調査地域の地質層序及び水理地質特性

地層記号	地質年代	地層層厚 (m)	堆積物	水理地質的特性
1.Qal	第四紀 (完新世)	10-20	沖積堆積物 シルト質粗粒砂 中央部に非常に粗い砂	静水位:0.855m (1997年5月) 透水性: $1.87\sim 1.67 \times 10^{-2}$ (cm/sec)、 揚水量:444 L/min 水位降下量 0.73 m
2.Qsd	第四紀 (更新世)	10-30	洪積堆積物 シルト (岩)、粗粒石基を伴った粘土質砂 (岩)、礫質砂	
3.Tcy	第三紀 (鮮新世)	20-50	鮮新世堆積物 砂質粘土岩	難透水層一帯水層 (一部難透水層中)
4.Mbr	中生代		基盤岩、中生代堆積岩の風化凝灰岩	不明

(注) 本表は 2000 年に実施された「カンボジア国シェムリアップ市上水道整備計画調査 (2000 年)」のデータを編集したものである。「カンボジア国シェムリアップ市上水道整備計画調査 (2000 年)」により、当地域の地質構造は4構造からなり、最上部層の層1・層2が主要帯水層であることが判明した。この解析結果を参考にして、今回調査で実施した物理探査データが解析された。

## 2.2 井戸台帳調査

井戸台帳調査は、地下水利用の状況と水需要量に関する基礎データを入手するために実施された。調査対象は、地下水の大口利用者（280施設）である。

調査施設の井戸深度は、全て深度 20 m 以上である。ホテルやゲストハウスの 15%は、2本以上の井戸を保有している。他方、ホテル、ゲストハウスやレストランの 35%は、公共給水施設を利用している。

### 井戸台帳調査の概要

調査期間	2009年7月22日～8月29日
調査方法	質問票を基にインタビュー調査 オン・サイト測定
主要調査項目	調査場所に関する基礎情報 給水施設に関する基礎情報 井戸構造と水利用 水利用意識調査 水質
調査対象数	280施設

### 井戸の平均本数と井戸深度

カテゴリ	ホテル	ゲストハウス	レストラン	工場	その他
井戸数	1.37	1.06	1.40	1.60	1.03
深度*(GL-m)	45.5	30.9	31.0	43.6	32.1

\*それぞれの調査施設で、井戸2本以上存在する場合は、使用頻度の高い井戸の深度を採用した。それらの井戸の平均深度を示す。

測定記録の欠如のため、水使用量は、ポンプ能力、貯留タンク容量、及びポンプの運転時間に基づく推定による。その結果は、次表に纏められる。

### カテゴリ別、推定日平均水使用量 (m<sup>3</sup>/日/施設)

カテゴリ	ホテル	ゲストハウス	レストラン	工場	その他
雨季平均	30.35	4.62	8.89	39.00	8.89
乾季平均	47.27	5.65	9.91	85.4	8.51

増大する観光客数によって、その他以外のカテゴリの乾季の水使用量は、雨季のそれに比べて非常に多くなっている。ここで、その他の施設の大多数は洗車場である。

観光業に関係したカテゴリ（ホテル、ゲストハウス、レストラン）の回答者の大多数は、下表に示したように、周辺環境への地下水揚水の負の影響（地下水位の低下とそれによる地盤沈下）に気づいている。

### 地下水問題発生の可能性に対する意識割合

カテゴリ	ホテル	ゲストハウス	レストラン	工場	その他
意識割合 (%)	64	53	65	10	17.5

調査対象の施設保有者の多数は、利用可能であれば、公共水道へ接続する意思を持っている。その主要な理由は、地下水揚水施設に関わるコスト削減である。

井戸台帳調査の 280 施設の情報は、MS-Acess データベースとして SRWSA に引き渡された。

### 2.3 井戸台帳データからの重要な調査結果

2009年現在でのシェムリアップでの地下水利用の総量は、井戸台帳調査で入手されたデータを利用して推定された。乾季と雨季での地下水利用量を推定するために、次のようなデータと条件を採用した。

#### シェムリアップでの現在地下水推定利用量

カテゴリ	利用量 (m <sup>3</sup> /日)		推定上の条件
	雨季	乾季	
私有地下水揚水施設を保有している大規模施設	3,908	5,786	・井戸台帳に基づく 280 施設の地下水揚水量
上記以外の SRWSA 公共水道に接続している大規模施設	3,739	5,009	・ホテル数: 61, ゲストハウス数: 43, レストラン数: 190 (情報源: SRWSA 登録顧客数) ・上記カテゴリのための平均の地下水揚水量は、井戸台帳データを利用して推定した。 ・給水の一部は、私有地下水揚水施設により給水されている。
小規模施設と一般住宅	21,569	24,418	・2009年でのシェムリアップ人口は、203,483人 (情報源: シェムリアップ州計画局) ・給水のごく一部は、SRWSA 水道施設により給水。 ・水利用量原単位 = 0.106m <sup>3</sup> /日/人 (雨季)、0.120m <sup>3</sup> /日/人 (乾季)
合計	29,216	35,213	

カテゴリ別の水生産費 (US\$/m<sup>3</sup>) を見積もるために、井戸台帳調査による給水施設の月平均維持管理費と設置費のデータを利用した。その結果、地下水による浄水生産費用は、以下の通りである。この数字は、現在の公共水道の水道料金よりも大きい。

#### 地下水による浄水生産費用

カテゴリ	ホテル	ゲストハウス	レストラン	工場	その他
平均原単位水生産費* (US\$/m <sup>3</sup> )	0.781 - 0.815	0.802 - 0.835	0.734 - 0.745	0.446 - 0.460	1,028 - 1.048

(注) 生産費\*: 生産費の幅は、主要施設修理費を建設費の30~35%と設定して算出

### 2.4 現場水質試験

給水のための地下水資源開発可能地域での地下水質を野外で調べた。サンプル水は、主に、ハンドポンプ井戸から採水し、以下の水質分析項目をチェックした。下表に、シェムリアップの東部、西部、Phnon Kraom 地域の3つの地域別の分析結果を示す。

地域別の水質の平均値 (単位、mg/L)

分析項目	pH	EC ( $\mu$ S/cm)	Fe	Mn	NH <sub>3</sub> -N
飲料水水質基準*	6.5-8.5	1600 以下	0.3 以下	0.1 以下	1.5 以下
東部地域	5.43	48	1.21	0	0.18
西部地域	5.60	83	2.08	0	0.15
Phnon Kraom 地域	4.90	518	0.45	0.17	0.15

(注)\*: 鉱工業エネルギー省、2004年1月の飲料水水質基準

井戸台帳調査の水質試験結果と同様に、これらの水質は、低い pH と高い鉄濃度によって特徴づけられる。どの地区でも pH, 鉄が飲料水基準を超えており、そのままでは飲用に利用できない。

## 2.5 コアサンプル調査

本調査において、地下水モニタリング体制強化のために、1本の観測井戸（浅井戸）が2009年10月に Kravan 小学校の敷地内に、2本の観測井戸（浅井戸と深井戸）が2009年10月と2011年6月に Khvein 小学校の敷地内にそれぞれ建設された。その折、観測井戸が建設された同じ敷地内で、深度80mのコアボーリング調査が2009年10月に実施され、そのコアサンプル観察調査が2011年1月に実施された。なお、今回のコア・サンプル観察結果では、JSA（日本政府アンコールワット遺跡救済チーム）が1995年にアンコール遺跡内（アンコールワット及びバイヨン）で採取したコアサンプルも比較参考のために観察した。

その調査結果は、従来、「カンボジア国シェムリアップ市上水道整備計画調査(2000年)」が実施されて以来、その調査結果に基づき、当地域において定説とされてきた地質構造、即ち、「沖積層・洪積層の第四紀層の下部に、第三紀層相当層とされる粘土岩が分布する。」とする内容とは異なり、地表から80m深度まで未固結層が連続しており、一連の地層と見なせることが判明した。

上記調査（2000年）では、当地域では、一般的に、沖積層・洪積層の分布する深度約30m～50mより下部は、40m～50mの層厚を有する第三紀層が分布し、その下部の深度約70m～80mより以深に基盤岩である上部ジュラ紀の砂岩・シルト岩・頁岩等の堆積岩や凝灰各礫岩、及び後期中生代～第三紀の安山岩・玄武岩質貫入岩・閃緑岩の火山岩や風化火山岩等が分布するとしている。

しかしながら、コアサンプル調査結果では、khvein 及び Kravan 両サイトともに、(1)地表から深度80mまで未固結の地層が連続しており、一連の地層と見なしうること、(2)第三紀層と見なしうる地層は、これらのコアサンプルを観察する限り存在しないことが明らかとなった。さらに、アンコール遺跡コアサンプル調査においても、同様なことが確認された。

### 3. 地下水利用の現況

#### 3.1 地下水モニタリングの現況

「カンボジア国シェムリアップ市上水道整備計画調査（2000年）」によって、調査地域に10本の観測井戸が建設された。SRWSAは、毎月、観測データを回収している。モニタリング施設の信頼性を確認するために、地下水位の手動測定が2007年7月から毎月1回実施されてきた。

しかしながら、「カンボジア国シェムリアップ上水道整備計画基本設計報告書（2003年）」でなされた提言どおりに、SRWSAにより観測が実施されてきたわけではない。「第3章、表3.2 既存観測井戸の一覧と観測データの信頼性、及びキャリブレーションの必要性」に示したように、多くのモニタリング井戸の観測機器が正常に作動していず、観測機器の調整を必要としている。SRWSAは、「第6章結論と提言」に記載したように、この状況を改善するために、故障した観測施設を復旧する等の適切な手段をとるべきである。

地下水モニタリング体制強化のために、本調査により1本の観測井戸（浅井戸）が2009年10月に Kravan 小学校の敷地内に、2本の観測井戸（浅井戸と深井戸）が2009年10月と2011年6月に Khvein 小学校の敷地内にそれぞれ建設された。

#### 3.2 私有井戸

シェムリアップ地域に分布する私有井戸による地下水利用の現況が、井戸台帳情報と観測井戸データを利用して検討された。

- 揚水帯水層と地下水の揚水量

10m<sup>3</sup>/日以上を揚水する大型観光施設の保有する私有井戸は市中心部に集中して分布している。これらの私有井戸の合計揚水量は、井戸台帳調査の全揚水量（5,786 m<sup>3</sup>/日）の96%を占める、5,554 m<sup>3</sup>/日を乾季に揚水している。これらの私有井戸は、主に、20 m～50 m 深度に分布する洪積層、及び一部は、60 m～70 m の深度に分布する第三紀層から地下水を揚水している。

- 地下水揚水の影響

私有井戸による揚水の影響は、2008年1月7日～9日の WT-5, LTb-1, LTb-2 の井戸データを利用して検討された。観測データには、観測機器の不具合によりデータの信頼性が低い期間も多く含まれる。データの信頼性は、自動記録及び手動測定データの比較により確認され、信頼性の高い期間のデータのみを利用している。

市中心部に立地し、第三紀層中の地下水位を観測する WT-5 の観測データは3 cm～6 cm の日変動地下水位低下を示す。これは、シェムリアップ地域の第三紀層中の私有井戸による地下水の揚水の影響であると考えられる。この揚水による地下水変動が、WT-5 観測井戸から5 km離れたところに立地する同じ第三紀層中の LTb-1 観測井戸の地下水位では

観測されないために、影響をしていないことを示す。

LTb-2 のスクリーンは、洪積層中に設置されている。同日の LTb-2 の地下水位の日変動は、WT-5 よりも大きい。WT-5 のスクリーンは第三紀層中に設置されている。これは、私有井戸による洪積層からの地下水の揚水量が第三紀層からの揚水量よりも大きいために、WT-5 よりも大きい値を示すと考えられる。

### 3.3 SRWSA 生産井戸

- 揚水帯水層と地下水の揚水量

SRWSA 水源井戸は8本あり、沖積層の下部と洪積層の帯水層から地下水を揚水している。その井戸群から 9,000 m<sup>3</sup>/日以上が現在揚水されている。

- 揚水の影響

SRWSA 生産井による揚水の影響は、WT-4 と Khvein 観測井戸データを利用して検討された。

2008年1月8日と9日に回収された観測データが利用された。SRWSA 生産井戸は、1月9日にはフル稼働であり、1月8日の深夜には、4時間休止していた。この異なる稼働状況下における WT-4 の観測井戸水位の状況が比較された。もし、揚水の影響があれば、揚水に伴う同心円状の地下水低下は、揚水井戸から遠方にある観測井戸の水位に影響を及ぼし、地下水位の低下を引き起こすことが想定される。結果として、SRWSA 生産井から北西に 2.6 km 離れた WT-4 観測井戸において、SRWSA 生産井の揚水の影響は、観測されなかった。同様な傾向は、2007年12月14日から16日の観測データでも確認された。

SRWSA 生産井の揚水の影響をチェックするために WT-4 井戸に適用した方法と同様な方法により、Khvein 浅井戸の 2010年5月7日～10日の観測データにおいて検討された。SRWSA 生産井と Khvein 浅井戸は、同じ帯水層にスクリーンを設置している。その結果、SRWSA 生産井の揚水は、その井戸から北東に、4.1 km 離れた khvein 観測浅井戸の地下水位に対して影響を与えていないことが確認された。

## 4. シェムリアップ地域の水文条件

### 4.1 利用可能な気象の収集及び地下水モニタリングデータの信頼性検討

5か所の気象観測所と8か所の地下水観測井戸のデータを地下水涵養分析のために収集した。解析上、不適切なデータの利用を避けるために、観測データの信頼性について厳密な検討を実施した。

### 4.2 地下水涵養解析

多数の地下水涵養解析法の中で、降水量、蒸発量や地下水位の変動に直接リンクさせるこ

とにより、相対的に高い精度結果が得られるという理由から、タンクモデル法を選択した。

年間の地下水涵養量は、341 mm/年と計算された。これは、全涵養地域に換算すると、地下水涵養量 435,517,000 m<sup>3</sup>/年に相当する。

地下水盆構造を考慮すると、Kulen 山脈付近の上流域の涵養量は、シェムリアップ地域の給水区域にはほとんど影響を与えない。そのため、シェムリアップ地域の地下水涵養量は、188,320,000 m<sup>3</sup>/年と計算される。この量は、516,000 m<sup>3</sup>/日に相当する。

この量は、86,300 m<sup>3</sup>/日の水需要量よりもはるかに多い量である。しかしながら、給水地域は、多数の世界遺産遺跡の存在のために、地下水位の低下による地盤沈下の影響を受けやすい地域である。地下水位の低下は、地下水が揚水される時に必ず生じる。そのため、異なる地下水利用計画についての地下水位低下量の程度が、地下水評価のための主要な問題として取り上げられるべきである。

### 4.3 一斉地下水観測

シェムリアップ地域の異なる季節での地下水位分布と変動を明確にするために、一斉地下水観測が、雨季と乾季に2度実施された。雨季の観測は、2009年9月末に、乾季の観測は、2010年4月末に実施された。

その結果、乾季の地下水位低下量が、都市化地域で、雨季の水位と比べて相対的に大きいことを見出した。シェムリアップの都市化地域でのこの大きな地下水位低下は、多数の私有井戸による多量の地下水利用により生じていると考えられる。

### 4.4 地下水位の観測結果の比較

「カンボジア国シェムリアップ市上水道整備計画調査（2000年）」において、79本の井戸が1998年2月から1999年11月まで、月別地下水位観測のために利用された。今回の調査との比較のために、25本の井戸が2回の調査から抽出された。

次の2つの表は異なる年月における雨季と乾季の水位を示す。表中の数値は、地表面下の水位 (m)を示す。

都市化地域の雨季の地下水位の比較

観測年月	2009/9	1998/9	1998/10	1998/11	1999/9	1999/10	1999/11
平均 (m)	1.63	1.41	1.2	1.32	1.24	0.85	0.6
最大 (m)	5.12	3.51	3.1	3	3.26	2.9	2.32
最小 (m)	0.2	0.1	0	0.3	0.23	-0.28	-0.41

## 都市化地域の乾季の地下水位の比較

観測年月	2010/4	1998/4	1998/5	1999/4	1999/5
平均 (m)	4.19	3.5	3.5	2.5	2
最大 (m)	7.4	5	5.1	4.6	4.81
最小 (m)	2.6	2.35	2.25	1.46	0.82

1998年及び1999年の観測結果と2009年の地下水位との平均値を比較すると、2009年のそれは、雨季に、0.22 m\*から1.03 m\*低下し、乾季に、0.69 m\*から2.19 m\*低下している。明らかに、地下水低下がシェムリアップの都市化地域で生じている。

(注、 0.22 m\* = {1.63 m (2009/9) - 1.41 m (1998/9)}, 1.03 m\* = {1.63 m (2009/9) - 0.6 m (1999/11)}, 0.69 m\* = {4.19 m (2010/4) - 3.5 m (1998/4)}, 2.19 m\* = {4.19 m (2010/4) - 2 m (1999/5)})

## 5. 地下水位シミュレーション

シェムリアップ地域の水需要量は、2030年で最大86,300 m<sup>3</sup>/日と見積もられた。これは、地下水涵養量516,000 m<sup>3</sup>/日の約1/6に相当する。地下水シミュレーションには、地下水涵養量と揚水量の収支のみならず、地下水開発も考慮して行わなければならない。シェムリアップ地域での地下水開発の最も重要な影響は、地盤沈下を引き起こす可能性がある地下水位低下である。

本件調査では、将来水需要を賄うため、水道水源として、表流水と地下水を組み合わせた複数のシナリオをシミュレーション用に想定した。これらのシナリオによる地下水位低下への影響を水理地質調査結果に基づいて作成された地下水シミュレーション・モデルによって評価した。

## 5.1 地下水シミュレーション・モデル構造

地下水シミュレーション・モデルは、東西方向39 km 南北方向46.5 kmの広がりを持ち、給水地域全域とその周辺地域を含む。

## 5.2 層構造

5層構造がモデルに組み込まれた。層1と層2は浅層帯水層、層3は難透水層、層4は深層帯水層、層5は基盤岩である。(注：地下水モデルでは、第三紀層の一部が帯水層となっているために、第3層の難透水層と第4層深層帯水層に区分しており、そのため、基盤岩も含めて地質構造を5層と設定している。)

## 5.3 境界条件

シェムリアップ川/アンコール・ワット環濠/西バライ（人工貯水池）、及び導水用水路/トンレサップ湖等の定水頭境界条件がモデルに組み込まれた。

## 5.4 パラメーター仕様

「カンボジア国シェムリアップ市上水道整備計画調査（2000年）」の揚水試験結果に基づき、それぞれの地層構造について、その水理定数が組み込まれた。他のパラメーターとして、経験値に基づき、貯留係数、有効間隙率、比産水率が組み込まれた。

## 5.5 モデルキャリブレーション

- 1) 定常流シミュレーション：定常流シミュレーションにより、モデル収束の確認と一般的パラメーターの設定を行った。
- 2) 非定常流シミュレーション：非定常流シミュレーションは、降水量、蒸発量、地下水揚水量の過去3年間（2006年～2008年）のデータを利用して、パラメーター・キャリブレーションを行った。

## 5.6 地下水予測のためのモデル仕様

### 1) 外部要素の組み込み

降水量と蒸発量：シェムリアップ市気象観測所の1989年～2008年の過去20年間の観測結果が降水量として利用された。

定水頭境界の水頭：水文観測結果とトンレサップ湖の過去10年間の水位観測結果が定水頭境界値として利用された。

### 2) シナリオ仕様

- シナリオ1 : 地下水利用がない状態での自然状態
- シナリオ2 : 現在地下水利用量の継続的利用、(SRWSA 井戸 9,000 m<sup>3</sup>/日と市街化地域で私有井戸による揚水を合わせて、平均 22,176 m<sup>3</sup>/日を揚水)
- シナリオ3 : 77,000 m<sup>3</sup>/日までの地下水量開発、(SRWSA 井戸 9,000 m<sup>3</sup>/日と新設井戸による地下水開発量を合せて、合計 86,000 m<sup>3</sup>/日を揚水)
- シナリオ4 : KTC プロジェクトを考慮し、43,000 m<sup>3</sup>/日までの地下水量開発とする。  
(SRWSA 井戸 9,000 m<sup>3</sup>/日と新設井戸による地下水開発量を合せて、合計 52,000 m<sup>3</sup>/日を揚水)
- シナリオ5 : KTC プロジェクトを考慮するが、地下水開発水量を 60,000 m<sup>3</sup>/日までとする。  
(SRWSA 井戸 9,000 m<sup>3</sup>/日と新設井戸による地下水開発量を合せて、合計 69,000 m<sup>3</sup>/日を揚水)
- シナリオ6 : シェムリアップ川の東岸側地域に井戸を新設しないことを条件とする。  
地下水開発水量を 30,000 m<sup>3</sup>/日とする。(SRWSA 井戸 9,000 m<sup>3</sup>/日と新設井戸による地下水開発量を合せて、合計 39,000 m<sup>3</sup>/日を揚水)

シナリオ7 :水道水源としてトンレサップ湖の表流水を利用し、SRWSA 生産井戸を除き、井戸建設を休止する。(SRWSA 井戸 9,000 m<sup>3</sup>/日を揚水)

## 5.7 シミュレーション結果

### 1) 水位

5か所の仮想観測井戸が主要世界遺産の下部及び近傍の深層帯水層中に設定された。これらの井戸の最大地下水位低下量の計算結果が下表に示される。

地下水位低下量のまとめ (単位 m)

シナリオ	Near ANW*	ANW*	ANT*	Near WB*	WB*
シナリオ2	0.73	0.59	0.57	1.34	1.17
シナリオ3	0.7	0.65	0.74	3.31	2.12
シナリオ4	0.41	0.38	0.49	2.31	1.62
シナリオ5	0.51	0.47	0.6	2.83	1.9
シナリオ6	0.45	0.38	0.49	1.71	1.34
シナリオ7	0.13	0.12	0.23	1.16	0.96

(注) (列見出し\*) は5箇所の仮想観測深井戸の番号を示す。それぞれの番号の代表する場所は次の通りである。Near ANW (アンコール・ワット付近) ANW (アンコール・ワットの直下)、ANT (アンコール・トムの直下)、Near WB (西バライ貯水池付近) WB (西バライ貯水池)。仮想観測深井戸の位置は図 5.18 を参照。

### 2) 地盤沈下

計算された地下水位の変動量に基づき、予想地盤沈下量が計算された。その結果は下表に示される。

予想地盤沈下量 (単位 mm)

場所	NearANW*	ANW*	ANT*	NearWB*	WB*
シナリオ2	7.02	5.67	5.48	5.84	5.1
シナリオ3	6.73	6.25	7.12	14.43	9.24
シナリオ4	3.94	3.65	4.71	10.07	7.06
シナリオ5	4.9	4.52	5.77	12.34	8.28
シナリオ6	4.33	3.65	4.71	7.46	5.84
シナリオ7	1.25	1.15	2.21	5.06	4.19

(注) (列見出し\*) は5箇所の仮想観測深井戸の番号を示す。それぞれの番号の代表する場所は次の通りである。Near ANW (アンコール・ワット付近) ANW (アンコール・ワットの直下)、ANT (アンコール・トムの直下)、Near WB (西バライ貯水池付近) WB (西バライ貯水池)。仮想観測深井戸の位置は図 5.18 を参照。

バコン世界遺産での予想地盤沈下量 (単位 mm)

シナリオ	シナリオ2	シナリオ3	シナリオ4	シナリオ5	シナリオ6	シナリオ7
浅層 A	1.59	48.73	20.45	29.93	1.9	0.34
深層 A	0.71	24.23	11.19	16.51	0.92	0.11
合計	2.3	72.96	31.64	46.44	2.82	0.45

(注) 浅層 A: 浅層帯水層における予想地盤沈下量、深層 A: 深層帯水層における予想地盤沈下量  
合計: 浅層及び深層帯水層の予想地盤沈下量合計

## 3) 全シナリオの評価

シミュレーション結果は、地盤沈下が水道拡張計画のどのシナリオでも生じることを明らかにした。下表は、地下水揚水量と主要な世界遺産立地場所での予測地盤沈下量を要約する。

## 全シナリオの影響評価

シナリオ	PA (m <sup>3</sup> /日)	LD ANW	LD WB	Bakong	リスクレベル
シナリオ 3	77,250	6.25	9.24	72.96	1
シナリオ 2	0	5.67	5.1	2.3	2
シナリオ 5	60,250	4.52	8.28	46.44	3
シナリオ 4	43,060	3.65	7.06	31.64	4
シナリオ 6	30,000	3.65	5.84	2.82	5
シナリオ 7	0	1.15	4.19	0.45	6

(注) PA: 新設井戸 (井戸位置は図 5.16 参照) の揚水量。SRWSA の現在揚水量は数字には含まない。

LD ANW: アンコール・ワット世界遺産サイトでの予想地盤沈下量 (mm)

LD WB: 西バライ世界遺産サイトでの予想地盤沈下量 (mm)

Bakong: バコン世界遺産サイトでの予想地盤沈下量 (mm)

リスクレベル: リスクレベル判断の主要な基準は、最も重要な世界遺産 (アンコール・ワット) への影響の大きさである。2 番目の判断基準は、2 番目に重要な世界遺産 (西バライ) への影響である。(注リスクレベルの数字の小さい方が最もリスクレベルが高いことを示す。)

シナリオ 7 は、世界遺産に対して最も影響が小さい。しかし、影響はゼロではない。それゆえ、シナリオ 7 は、現実に適合性のある計画であれ、そうでないものであれ、検討する価値がある。以下に考察する。

アンコール・ワット遺跡への地盤沈下量は、1.15 mm である。この地盤沈下量によって、検査可能な凸凹した沈下を生じないと想定される。そのため、既存の SRWSA 井戸サイトからアンコール・ワットよりも更に遠方に立地するアンコール・トムのような他の世界遺産は安全であると考えられる。

西バライへの影響は 4.19 mm に達するかもしれない。世界遺産である西バライの構造を考慮すると、建築材料として、高い塑性を有する主に粘土を利用して建設されている。一方、地下水位の低下は、突然生じる出来事ではなくて、漸次変化するプロセスである。西バライのような数 km<sup>2</sup> のスケールでの粘土による建築物では、その塑性は、数か月間で徐々に発生すると想定される、4.19 mm 程度の地盤沈下を十分緩衝できると考えられる。西バライの大きさの構造物では、4.19 mm は、人間によって感知されるにはあまりにも微小であるため、変形は検知されないだけでなく、経験上及び地質工學観点から破壊やクラックは予測されない。そのため、シナリオ 7 からの西バライ遺産への影響は無視されるほど十分小さいと考えられる。

バコン遺跡への浅層及び深層帯水層を含めた予測沈下量は、アンコール・ワットや西バライへの影響より小さく、0.45 mm と同じぐらい小さい。そのため、バコン遺産へのシナリオ 7 の影響は安全圏内と考慮される。

## 6. 結論と提言

### 6.1 結論

本調査の目的は、世界遺産であるアンコール・ワット遺跡群を有するシェムリアップ市において、近年の観光客の急激な増加とホテル・レストラン等の観光施設の急増により、大量に揚水されるようになった地下水の遺跡に対する影響を調べ、地下水利用の評価をする、及びモニタリング体制の強化について検討することである。

#### (1) 地下水利用の評価

シェムリアップ市域において、井戸台帳調査として大規模揚水施設を調べた結果、ホテル等の観光施設、学校等の公共施設や工場が現在 280 施設あり、乾季には約 5,786 m<sup>3</sup>/日を揚水していることが判明した。これ以外、SRWSA は公共水道のために約 9,000 m<sup>3</sup>/日を揚水し、その他一般住宅による揚水が約 24,000 m<sup>3</sup>/日あると見込まれる。従って、現在、同地域から少なくとも 38,000 m<sup>3</sup>/日は揚水されている。

一方、アンコール・ワット周辺部の遺跡は市域に隣接し、また、大規模に揚水しているホテル等の観光施設は市中心部に集中している。将来、さらに観光施設が建設され、地下水の揚水が増加した場合、地下水位（圧）が低下して地盤の圧密沈下が生じ、世界遺産である遺跡に影響を与えることが危惧される。

これを確認するために、既存のモニタリング井戸の地下水位観測データを用いて解析を行った。その結果、地下水位観測データでは、観測井戸周辺の揚水井戸による僅かな水位変動が観測されたが、恒常的な地下水位低下は観測されなかった。また、SRWSA 井戸の揚水による地下水位低下も約 2.6 km 離れた国道 6 号線沿いの WT-4 観測井戸で観測されなかった。この結果、現状では、地下水利用に対する影響は認められなかった。

将来的な水需要増大に対する遺跡への影響を調べるために、地下水シミュレーションにより検証した。この検証に当たって、水道計画年である 2030 年時点での水需要 86,000 m<sup>3</sup>/日を賄うために、以下の 6 つのシナリオを考慮して検証した。

シナリオ	シナリオ条件
シナリオ 2	現在の地下水利用の継続的利用
シナリオ 3	地下水を水源とする公共水道で全ての水需要を賄う。
シナリオ 4	西バライ貯水池の灌漑用放流水を利用し、地下水の開発を一部少なくする (SRWSA 水源井を含めた揚水量：52,000 m <sup>3</sup> /日～69,000 m <sup>3</sup> /日)
シナリオ 5	
シナリオ 6	Bakong 遺跡への影響を少なくするために、シェムリアップ川東岸地域には新規井戸を建設しない。
シナリオ 7	水道水源として、SRWSA 井戸を除いて、既存井戸による揚水を休止し、トンレサップ湖の湖水を利用する。

(注) シナリオ 1 は、地下水利用がない自然状態のものであり、計算上の比較のためのケースであり省略。

前記シナリオにおける将来水源としての地下水開発は、国道6号線の南方約4~5 km、東-北西方向約30 km幅、標高10 m以上の地区に新規井戸を建設する計画である（井戸位置は図5.16参照）。

シナリオの検討結果、50年に1回の異常渇水年には、どのシナリオでも世界遺産遺跡で地下水位低下と地盤沈下が生じることが明らかになった。特に、これらのシナリオの中で、将来水需要について、全て地下水を水源とする公共水道により賄うとしたシナリオ3が最も遺跡への地盤沈下量が大きく、リスクが高い。それに次いで、リスクが高いのが、現状での市域での地下水利用を継続するシナリオ2である。その他のシナリオ4~6についても地下水揚水の遺跡への影響がみられるために推奨されない。これらのシナリオの中で、最もリスクが小さいのがトンレサップ湖水を将来水源として利用するシナリオ7である。

以上の結果から、将来の水需要を賄うためにはシェムリアップ地域では新たな地下水開発を行わず、また、現在の私有井戸も廃止してトンレサップ湖の湖水を代替水源として利用するのが妥当であるとの結論となる。

## (2) モニタリング体制の強化

重要な世界遺産であるアンコール遺跡は、石を積み上げただけの建築物より構成されているために、地盤沈下等の地盤の変動には極めて脆弱である。そのため、将来発生するかもしれない市域での地下水の過剰揚水による地下水位低下及び地盤沈下から遺跡を保護することは極めて重要である。現在、シェムリアップ地域には、8箇所に9本の地下水観測井戸、及び2箇所に4本の地盤沈下井戸が建設され、地下水位と地盤沈下を監視している。しかしながら、本調査により、これらの観測施設の一部の機材は正常に機能せず、その観測データの信頼性が低いことが明らかになった。各観測井戸の機器の稼働状況は、本報告書の第3章に記載している。これらの施設を管理するSRWSAは、現在、データを定期的に収集・保存し、その信頼性を確認するために、手動測定をデータ収集時に合わせて行っているが、それに加えて、正常に機能していない観測施設を復旧して信頼性の高い観測データを取得できるようにすべきである。

当地域では、SRWSAによる観測体制に加えて、APSARAにより地下水観測も行われている。DOWRAMは、現在は地下水観測体制を保有していないが、将来的には、地域の水資源利用に関して調査研究を行う立場にある。現在、これらの機関による連携は殆ど行われていない。将来的には、連携を強化して、シェムリアップ地域の重要遺跡保存のために、地下水のモニタリング体制を強化していく必要がある。

## 6.2 提言

- 1) 地下水シミュレーションの結果、将来、50年に1度の渇水年になった場合、水需要を全量地下水で賄った場合のみならず、現状の地下水利用を続けたとしても世界遺産遺跡に対して地盤沈下が発生するリスクがあることが明らかになった。この状況を改善するために、新規の地下水開発を停止し、出来るだけ早くトンレサップ湖の湖水を水

源とする水道施設に切り替えることが望ましい。

- 2) 将来、トンレサップ湖の湖水を水源とする水道施設に切り替わった場合、速やかに、既存の大型民間井戸施設による揚水を禁止する方策がとられるべきである。このためには、APSARA/県による条例制定と同時に住民啓蒙キャンペーンを実施すべきである。
- 3) SRWSA は、観測施設から地下水位及び地盤沈下の観測データを概ね月 1 回収集し、データの信頼性チェックのために手動観測も同時に行っている。しかしながら、収集時期がずれて手動観測が欠測となっている月もあり、定められた手法によるデータ収集を徹底させるべきである。
- 4) SRWSA は、手動と自動観測データとを比較して、自動観測データの信頼性をチェックすべきである。同じ観測日の手動と自動観測データを表に並べて比較を行い、その観測データの違いをチェックしたり、グラフに描いて相関関係をチェックすることが必要である。
- 5) SRWSA は、故障している観測機器を直ちに復旧すべきである。各観測井戸の観測機器の現況は、「第 3 章、3-1 地下水モニタリングの現況」に示した。
- 6) SRWSA は、APSARA や DOWRAM とそれぞれの観測データを共有して、活用する仕組みを構築すべきである。

和文要約  
カンボジア国  
シェムリアップ上水道拡張整備事業  
準備調査 最終報告書 2

調査対象地域  
写真  
要約  
目次  
表目次  
図目次  
略語

目次

<b>第1章</b>	<b>計画概要</b>	<b>1-1</b>
1-1	計画フレームワーク	1-1
1-2	調査の目的	1-1
1-3	調査対象地域	1-1
1-4	計画目標年次	1-1
1-5	調査方法と最終報告書 2 の内容	1-1
1-6	最終報告書の内容	1-2
<b>第2章</b>	<b>地下水資源の調査結果</b>	<b>2-1</b>
2-1	物理探査	2-1
2-1-1	探査の背景と概要	2-1
2-1-2	探査結果	2-1
2-2	井戸台帳調査	2-7
2-2-1	調査の背景および概要	2-7
2-2-2	調査結果	2-10
2-3	現場水質試験	2-14
2-4	コアサンプル調査結果	2-15
<b>第3章</b>	<b>地下水利用の現況</b>	<b>3-1</b>
3-1	地下水モニタリングの現況	3-1
3-2	モニタリング井戸の新設	3-3
3-3	私有井戸	3-3
3-3-1	私有井戸の分布	3-3
3-3-2	揚水帯水層と揚水量の解析	3-5
3-3-3	私有井戸による揚水の影響の解析	3-6
3-4	SRWSA 生産井戸	3-8
3-4-1	井戸構造と取水帯水層	3-8
3-4-2	SRWSA 生産井戸の稼働状況	3-9

3-4-3	SRWSA 生産井による揚水の影響の解析	3-9
<b>第4章</b>	<b>シェムリアップ地域の水文条件</b>	<b>4-1</b>
4-1	給水対象地区の河川流域	4-1
4-2	気候条件	4-2
4-3	既存気象データ	4-2
4-4	既存地下水観測データ	4-2
4-4-1	既存観測井戸	4-2
4-4-2	地下水観測結果の検討	4-3
4-4-3	地盤沈下のモニタリング結果	4-12
4-5	地下水涵養解析	4-16
4-5-1	データの利用可能性の検討	4-16
4-5-2	各観測サイトの地下水涵養計算結果	4-19
4-5-3	地下水涵養計算のまとめ	4-21
4-6	一斉地下水観測	4-22
4-6-1	地下水位分布および変化	4-22
4-6-2	以前の JICA 調査（2000 年）による地下水位観測	4-25
4-7	地下水位観測結果の比較	4-25
4-7-1	地下水位の高い季節	4-25
4-7-2	地下水位の低い季節	4-26
4-7-3	市中心部での比較結果	4-26
<b>第5章</b>	<b>地下水シミュレーション</b>	<b>5-1</b>
5-1	シェムリアップ地域の世界遺産の分布	5-1
5-2	地下水シミュレーションモデル	5-1
5-2-1	モデル領域	5-2
5-2-2	境界条件の設定	5-4
5-2-3	標高の設定	5-4
5-3	パラメーター仕様	5-6
5-3-1	透水係数	5-6
5-3-2	貯留係数 (無次元)	5-6
5-3-3	有効間隙率 (無次元)	5-6
5-3-4	比湧出量 (無次元)	5-6
5-4	モデル・キャリブレーション - 定常流シミュレーション	5-7
5-5	モデル・キャリブレーション - 非定常流シミュレーション	5-7
5-5-1	地下水使用量	5-8
5-5-2	降雨量、蒸発量、地下水涵養量及び消費量	5-8
5-5-3	非定常流シミュレーション結果	5-9
5-6	地下水予測のためのモデル設定	5-10
5-6-1	地下水シミュレーションの目的及び基礎的考慮	5-10
5-6-2	降雨確率計算のための観測所選定	5-10
5-6-3	確率解析方法と結果	5-11

5-6-4	外部ファクターの設定.....	5-11
5-6-5	内部ファクター – シナリオの設定.....	5-13
5-6-6	仮想観測井戸の設定.....	5-16
5-7	シミュレーション結果.....	5-17
5-7-1	仮想観測井戸（計算ポイント）の地下水位変動.....	5-17
5-7-2	地盤沈下の検討.....	5-24
5-7-3	地下水位低下量の予測結果.....	5-25
5-7-4	全シナリオの総合的影響評価.....	5-25
<b>第6章</b>	<b>結論と提言</b> .....	<b>6-1</b>
6-1	結論.....	6-1
6-2	提言.....	6-2

## 目 次

表 2.1	物理探査の概要 .....	2-1
表 2.2	調査地域の地質層序及び水理地質特性.....	2-1
表 2.3	井戸台帳調査の概要 .....	2-7
表 2.4	カテゴリー別調査施設数 .....	2-7
表 2.5	平均井戸本数・井戸深度 .....	2-10
表 2.6	カテゴリー別日平均水使用量.....	2-10
表 2.7	地下水問題の発生の可能性に対する意識調査結果.....	2-10
表 2.8	データベース概要 .....	2-11
表 2.9	シェムリアップ市における現在の地下水使用量推計.....	2-11
表 2.10	地下水による浄水生産費用 (ケース A) .....	2-12
表 2.11	地下水による浄水生産費用 (ケース B) .....	2-12
表 2.12	井戸台帳調査結果.....	2-14
表 2.13	水質分析項目及び試験方法.....	2-15
表 2.14	地区ごとの水質試験平均値.....	2-15
表 3.1	SRWSA によるモニタリング活動.....	3-2
表 3.2	既存の観測井戸の一覧と観測データの信頼性及びキャリブレーションの必要性 .....	3-2
表 3.3	新設モニタリング井戸の概要.....	3-3
表 4.1	観測サイト LTa での深い帯水層の月別地盤変位計測値の集計表 (mm).....	4-13
表 4.2	観測サイト LTa での浅い帯水層の月別地盤変位計測値の集計表(mm).....	4-14
表 4.3	観測サイト LTb での深い帯水層の月別地盤変位計測値の集計表 (mm).....	4-15
表 4.4	観測サイト LTb での浅い帯水層の月別地盤変位計測値の集計表 (mm).....	4-16
表 4.5	タンクモデル構築のために利用可能なデータの検討結果.....	4-18
表 4.6	各観測所、月・年平均地下水涵養量 (mm).....	4-21
表 4.7	タンクモデル計算結果のまとめ (mm).....	4-21
表 4.8	主要道路沿い井戸での雨季の地下水位の比較.....	4-25
表 4.9	主要道路沿い井戸での乾季の地下水位の比較.....	4-26
表 4.10	市中心部での雨季の地下水位の比較.....	4-26
表 4.11	市中心部での乾季の地下水位の比較.....	4-27
表 5.1	世界遺産サイト地下、又は付近に設定された 5 本の仮想観測井戸 (深井戸) の地下水位変動の集計表.....	5-23
表 5.2	シナリオ 1 と比較した、各シナリオにおけるバコン遺跡の地下水位低下量.....	5-23
表 5.3	地盤沈下量予測 .....	5-24
表 5.4	バコン遺跡群の地盤沈下量予測.....	5-25
表 5.5	全シナリオによる影響評価 .....	5-26

## 目 次

図 2.1	物理探査地点及び地質縦断面位置図 .....	2-4
図 2.2	探査地区の地層縦断面図 (1/3) .....	2-5
図 2.3	探査地区の地層縦断面図 (2/3) .....	2-6
図 2.4	探査地区の地層縦断面図 (3/3) .....	2-6
図 2.5	調査対象施設位置図 .....	2-9
図 2.6	現場水質調査の対象井戸位置図 .....	2-18
図 3.1	既存及び新設モニタリング井戸位置図 .....	3-1
図 3.2	揚水量 10m <sup>3</sup> /日以上私有井戸の分布 .....	3-4
図 3.3	揚水量 10m <sup>3</sup> /日以上私有井戸の揚水量分布 .....	3-4
図 3.4	私有井戸の井戸深度別の地下水揚水量 .....	3-5
図 3.5	WT-5, LTa, LTb の井戸構造と地質状況 .....	3-6
図 3.6	2004 年 1 月の WT-5 観測井戸での地下水位 .....	3-7
図 3.7	2008 年 1 月 7 日～9 日の WT-5 観測井戸での地下水位 .....	3-7
図 3.8	2008 年 1 月 7 日～9 日の LTb-2 観測井戸の地下水位の日変動 .....	3-8
図 3.9	2008 年 1 月 7 日～9 日の LTb-1 観測深井戸の地下水位 .....	3-8
図 3.10	SRWSA 生産井戸の取水帯水層 .....	3-9
図 3.11	WT-4 観測井戸の地質状況とスクリーンの設置深度 .....	3-10
図 3.12	2008 年 1 月 8 日と 9 日の WT-4 観測井戸の地下水位の日変動 .....	3-11
図 3.13	2008 年 1 月 8 日と 9 日の WT-4 観測井戸の地下水位の日変動比較 .....	3-12
図 3.14	2010 年 1 月 7 日と 10 日の Khvein 観測浅井戸の地下水位の日変動比較 .....	3-13
図 4.1	給水対象地域(紫/桃色の地域)及び関連河川流域 .....	4-1
図 4.2	給水対象地区への涵養地域 .....	4-1
図 4.3	調査対象区域の月間降雨量及び蒸発量の分布 .....	4-2
図 4.4	地下水位変動観測結果 (WT-3) .....	4-3
図 4.5	地下水位自動観測データの精度検討結果 (WT-3) .....	4-3
図 4.6	地下水位変動観測結果 (WT-4) .....	4-4
図 4.7	地下水位自動観測データの精度検討結果 (WT-4) .....	4-4
図 4.8	地下水位変動観測結果 (WT-5) .....	4-5
図 4.9	地下水位自動観測データの精度検討結果 (WT-5) .....	4-5
図 4.10	地下水位変動観測結果 (WT-6) .....	4-6
図 4.11	地下水位自動観測データの精度検査結果 (WT-6) .....	4-6
図 4.12	地下水位変動観測結果 (WT-7) .....	4-7
図 4.13	観測井戸 WT-7 の観測室内写真 .....	4-7
図 4.14	地下水位自動観測データの精度検討結果 (WT-7) .....	4-8
図 4.15	地下水位変動観測結果 (WT-8) .....	4-8
図 4.16	地下水位変動観測結果 (LTa) .....	4-9
図 4.17	観測サイト LTa での地下水位変動手動観測結果 .....	4-9
図 4.18	地下水位自動観測データの精度検討結果 (LTa : 深い帯水層) .....	4-10

図 4.19	地下水位自動観測データの精度検討結果 (LTa; 浅い帯水層)	4-10
図 4.20	地下水位変動観測結果 (LTb)	4-11
図 4.21	地下水位自動観測データの精度検討結果 (LTb : 深い帯水層)	4-12
図 4.22	地下水位自動観測データの精度検討結果 (LTb; 浅い帯水層)	4-12
図 4.23	LTa 観測井戸での地盤変動の観測結果	4-13
図 4.24	LTa 観測井戸での年間平均地盤沈下量	4-14
図 4.25	LTb 観測井戸での地盤変動の観測結果	4-15
図 4.26	観測サイト LTb での年間平均地盤沈下量	4-16
図 4.27	タンクモデル概念	4-17
図 4.28	調査対象地域の地下水位観測井戸サイト及び気象観測所の位置	4-18
図 4.29	タンクモデルによる地下水位シミュレーション結果 (WT-3)	4-19
図 4.30	タンクモデルによる地下水位シミュレーション結果 (WT-4)	4-19
図 4.31	タンクモデルによる地下水位シミュレーション結果 (WT-5)	4-20
図 4.32	タンクモデルによる地下水位シミュレーション結果 (WT-6)	4-20
図 4.33	タンクモデルによる地下水位シミュレーション結果 (WT-7)	4-20
図 4.34	タンクモデルによる地下水位シミュレーション結果 (LTb)	4-21
図 4.35	雨季一斉地下水観測結果 (2009年9月)	4-23
図 4.36	雨季観測 (2009年9月) と乾季観測 (2010年4月) との地下水位変動量	4-24
図 4.37	主要道路沿い井戸での雨季の平均地下水位の比較	4-25
図 4.38	主要道路沿い井戸での乾季の平均地下水位の比較	4-26
図 4.39	市中心部での雨季の平均地下水位の比較	4-27
図 4.40	市中心部での乾季の平均地下水位の比較	4-27
図 5.1	シェムリアップ地域の主要世界遺産分布図	5-1
図 5.2	地下水シミュレーション・モデル領域	5-2
図 5.3	定水頭境界条件の設定	5-4
図 5.4	南北方向の垂直断面図の実例	5-5
図 5.5	東西方向の水平断面図の実例	5-5
図 5.6	定常流シミュレーションの結果	5-7
図 5.7	SRWSA 既存井戸及び市街化地域での私有井戸の地下水揚水量 (2006年～2008年)	5-8
図 5.8	観測された降雨量と蒸発量、モデルにより規定した地下水涵養量及び消費量	5-8
図 5.9	仮想観測井戸 (浅井戸) 及び井戸セル位置図	5-9
図 5.10	仮想観測井戸 (浅井戸) の過去3年 (2006年～2008年) の地下水位変動	5-10
図 5.11	シェムリアップ市気象観測所のデータによる降雨確率曲線	5-11
図 5.12	観測データ (1989年～2008年) に基づくシミュレーション期間 (2009年～2030年) の地下水涵養量と消失量、及び回帰年50年での確率解析結果	5-12
図 5.13	河川水位変動の設定	5-12
図 5.14	トンレサップ湖の水位変動の設定	5-13
図 5.15	シナリオ3による地下水利用の新規水道施設計画 (2016年完成)	5-14
図 5.16	シナリオ3のための新規生産井戸の設置位置	5-14
図 5.17	水道施設整備計画	5-15

図 5.18	新規生産井戸及び各シミュレーション・シナリオによる世界遺跡サイトへの影響検討用仮想観測井戸（深井戸）位置図 .....	5-16
図 5.19	仮想観測井戸 No.1 の地下水位変動（シェムリアップ市、都市化地域中心部、浅い帯水層） .....	5-17
図 5.20	仮想観測井戸 No.2 の地下水位変動（既存 SRWSA 井戸の中央部、浅い帯水層） .....	5-18
図 5.21	仮想観測井戸 No.3 の水位変動（アンコール・ワット近辺、深い帯水層） .....	5-19
図 5.22	仮想観測井戸 No.4 の水位変動（西バライ貯水池近辺、深い帯水層） .....	5-19
図 5.23	仮想観測井戸 No.5 の水位変動（西バライ貯水池湖地下、深い帯水層） .....	5-20
図 5.24	仮想観測井戸 No.6 の水位変動（アンコール・トム遺跡地下、深い帯水層） .....	5-20
図 5.25	仮想観測井戸 No.7 の水位変動（アンコール・ワット遺跡地下、深い帯水層） .....	5-21
図 5.26	仮想観測井戸 No.8 の水位変動（西バライ貯水池南西、浅い帯水層） .....	5-21
図 5.27	仮想観測井戸 No.9 の水位変動（シェムリアップ市南東、浅い帯水層） .....	5-22
図 5.28	仮想観測井戸 No.10 の水位変動（シェムリアップ市南側、浅い帯水層） .....	5-22

## 略 語

AMSL	平均海面上
ANT	アンコール・トム
ANW	アンコール・ワット
BOT	BOT 方式
CA	利権契約
D/D	詳細設計
DOWRAM	水資源気象局
DWL	動水位
EC	電流
EIA	環境影響評価
EIRR	経済的内部収益率
E/N	交換公文
FIRR	財政的内部収益率
GDP	国内総生産
GPS	全地球測位システム
GW	地下水
I/P	実施プログラム
JICA	日本国際協力機構
JPY	日本円
L/A	借款協定
L/s	リッター/秒
MIME	鉱工業エネルギー省
MOWRAM	水資源気象省
M/P	マスタープラン
NPV	純現在価値
ODA	政府開発援助
O&M	維持管理
PS	揚水機場
PVC	ポリ塩化ビニル
SAPROF	プロジェクト形成特別支援調査
SRWSA	シェムリアップ水道公社
STEP	経済協力特別条項
SWL	静水位
TOR	委任事項
UTM	ユニバーサル横メルカトル
VES	垂直電気探査
WB	西バライ（人工貯水池）
WMO	世界気象機関

# 第1章 計画概要

## 第1章 計画概要

### 1-1 計画フレームワーク

シェムリアップ上水道拡張整備事業準備調査は、鉱工業エネルギー省 (MIME)、シェムリアップ水道公社(SRWSA)と独立行政法人国際協力機構 (JICA)の間で、2009年1月29日に調印された業務範囲に従って実施された。

本調査は、2009年5月に開始され、2011年8月に完了した。約28カ月間の調査期間中、調査チームは、鉱工業エネルギー省とシェムリアップ水道公社職員の協力のもと本調査を実施してきた。本最終報告書は地下水分野での調査結果を記載する。

### 1-2 調査の目的

本調査の目的は以下の通り。

- 1) シェムリアップ市のための有効な、持続可能な給水システムのために、新しい水源を選定すること。
- 2) 既存井戸の調査を実施し、地下水の開発可能性を評価すること。
- 3) プロジェクトの目標年までの水需要を満たすために、緊急給水拡張整備計画を策定すること。
- 4) 本プロジェクトが我が国の有償資金協力によって実施されるという仮定の下、提案された給水拡張整備計画のためのフィージビリティ調査を実施すること。
- 5) 2030年までの長期給水計画を策定すること。
- 6) 調査の期間中、カンボジア側に技術移転を行うこと。

### 1-3 調査対象地域

調査対象地域はシェムリアップ市の13コミューン及び隣接する1コミューン、合計14コミューンとする。

### 1-4 計画目標年次

2009年1月に、独立行政法人国際協力機構とカンボジア側の間での合意に基づき、長期給水計画のための目標年として、2030年を設定された。

### 1-5 調査方法と最終報告書2の内容

インセプション・レポートにおいて調査チームによって提案された方法により実施された。本調査では、3フェーズに分けて実施され、最終報告書1(水道分野)と最終報告書2(地下水分野)の報告書が作成された。

地下水調査の分野で、フェーズ1は、井戸台帳調査、電気探査、水利用意識調査、コンピュータシミュレーションによる地下水開発の可能性に関する基本的検討を含む。フェーズ2は、主に、水道分野における施設整備計画とフィージビリティ調査の準備によって構成さ

れている。フェーズ3は、フェーズ1からの基本情報に基づいて実施された。

- ◆ フェーズ1 地下水盆の構造に関する基礎調査、井戸台帳及びコンピュータシミュレーションによる地下水開発の可能性に関わる基礎調査
- ◆ フェーズ2 給水施設計画とF/S調査の準備
- ◆ フェーズ3 地下水利用と評価査定に関する調査

#### 1-6 最終報告書の内容

本最終報告書2はフェーズ1とフェーズ3の内容を記載する。

## 第2章 地下水資源の調査結果

## 第2章 地下水資源の調査結果

### 2-1 物理探査

#### 2-1-1 探査の背景と概要

2009年に実施された本調査の準備調査により本調査におけるシェムリアップ市給水代替水源として、トンレサップ湖岸沿いの平野での地下水の利用が計画された。「カンボジア国シェムリアップ市上水道整備計画調査(2000年)」により、シェムリアップ市の市街地および周辺地域の地質状況を確認していたが、トンレサップ湖岸沿い地域の地質情報は殆ど無い状況であった。そのため、本探査区域は、トンレサップ湖岸沿いの Phnon Kraom 丘の東西 30 km にわたる範囲とした。探査地点を図 2.1 に、探査概要を下表に示す。

表 2.1 物理探査の概要

探査期間	2009年7月13日～30日
探査方法	垂直比抵抗探査
探査箇所数	53
電極配置法	Schlumberger
探査深度	150 m

#### 2-1-2 探査結果

「カンボジア国シェムリアップ市上水道整備計画調査(2000年)」では、解析の結果として4層の地層構造が確認された。この解析結果を参考にして、今回調査で実施した物理探査データを解析した結果、以下のような地質構造となった。

表 2.2 調査地域の地質層序及び水理地質特性

地層記号	地層年代	地層層厚(m)	堆積物	水理地質学的特性
1. Qal	第四紀 (完新世)	10 - 20	沖積堆積層 シルト質粗粒砂 中間部に非常に粗い砂層	静水位：0.855 m (1997年5月) 透水係数：1.87-1.67x 10 <sup>-2</sup> (cm/sec)
2. Qsd	第四紀 (更新世)	10 - 30	洪積堆積層 シルト(岩)、粗粒石基を伴った粘土質砂(岩)、礫質砂	揚水量：444 liters/分 水位降下量 0.73m
3. Tcy	第三紀 (鮮新世)	20 - 50	鮮新世堆積物 砂質粘土岩	難透水層
4. Mbr	中生代	-	基盤岩：中生代堆積岩の風化凝灰岩	不明

(注) 本表は、「カンボジア国シェムリアップ市上水道整備計画調査(2000年)」のデータを編集したものである。「カンボジア国シェムリアップ市上水道整備計画調査(2000年)」により、当地域の地質構造は4構造からなり、最上部層の層1・層2が主要帯水層であることが判明した。この解析結果を参考にして、今回調査で実施した物理探査データが解析された。

解析結果に基づき、探査地域の地層縦断面図（比抵抗値分布を含む）の 1 例（B-B'断面、E-E'断面、G-G'断面、）を図 2.2、2.3、及び 2.4 に示す。

#### (1) 基盤岩

解析により、本基盤岩が地表に露出し、残丘を形成している Phnon Kraom 丘を除いて、基盤岩は地表下 50 m から 80 m に分布していることが明らかになった。ボーリング記録によれば、Phnon Kraom 丘から数百メートル離れた地点では、基盤岩の深度は 30 m 以上であった。この基盤岩の隆起はこの地点に限定されることを示している。これらの基盤岩は 1000 ohm-m 以上の比抵抗値をもち、珪質酸性凝灰岩や結晶質閃緑岩のような不透水性の岩石であると解釈される。

#### (2) 被覆層

基盤岩の上部に 3 層の被覆層がある。最上部の地層は沖積堆積層で、砂・シルト・粘土からなる薄層の互層構造となっている。層厚は 10 m～25 m の範囲で変化しており、比抵抗値も 5 Ohm-m から 1000 Ohm-m の範囲にある。

2 番目の層はさらに下の 3 番目の層より比較的大きな比抵抗値を持つ、砂質堆積層である。層厚は 5m から 35 m の範囲で変化しており、比抵抗値は 30 Ohm-m～500 Ohm-m の範囲にある。

3 番目の層は通常 100 Ohm-m 以下の低い比抵抗値により特徴づけられる。層厚は上部 2 層よりかなり厚く、10 m～55 m の範囲である。

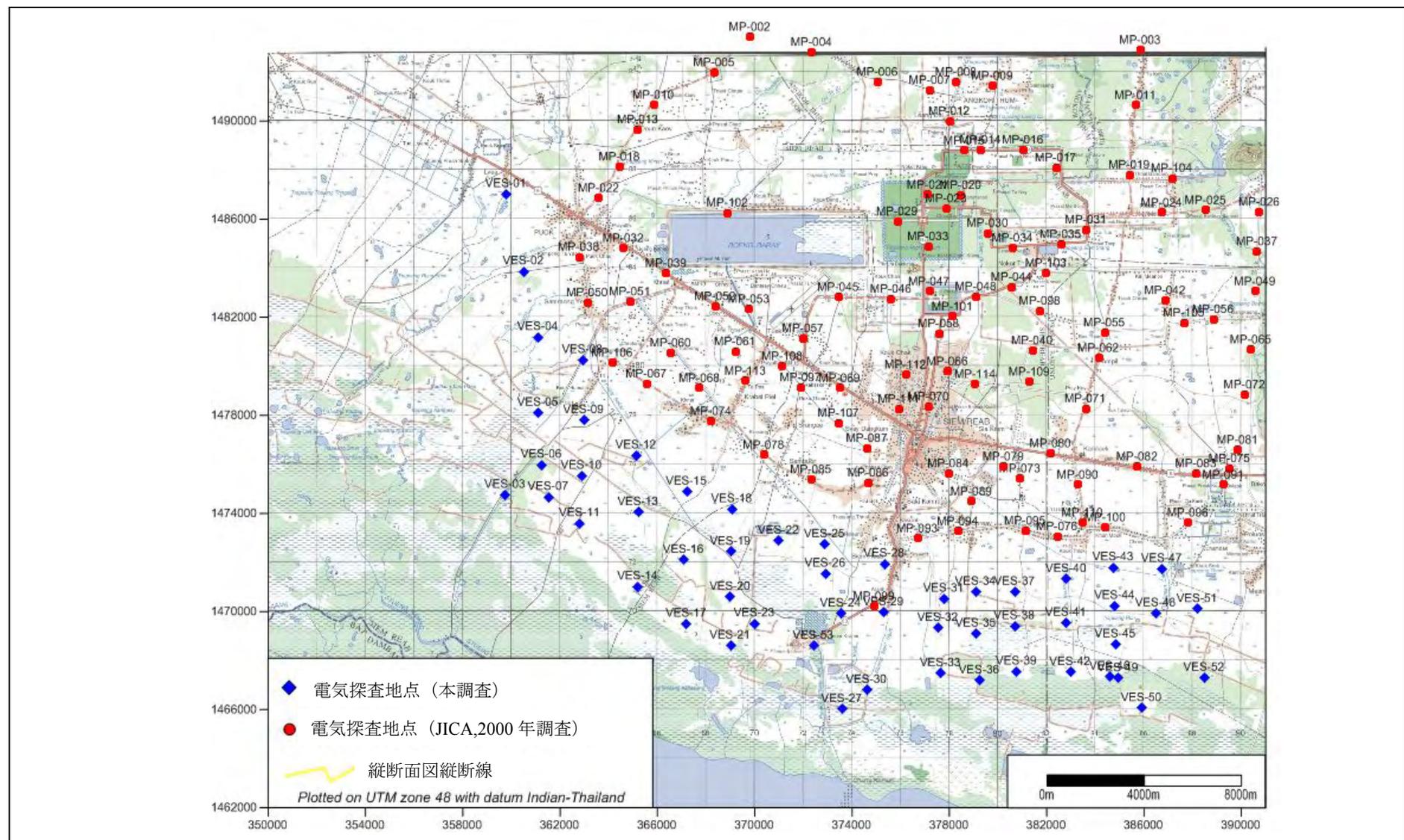


図 2.1 物理探査地点及び地質縦断面位置図

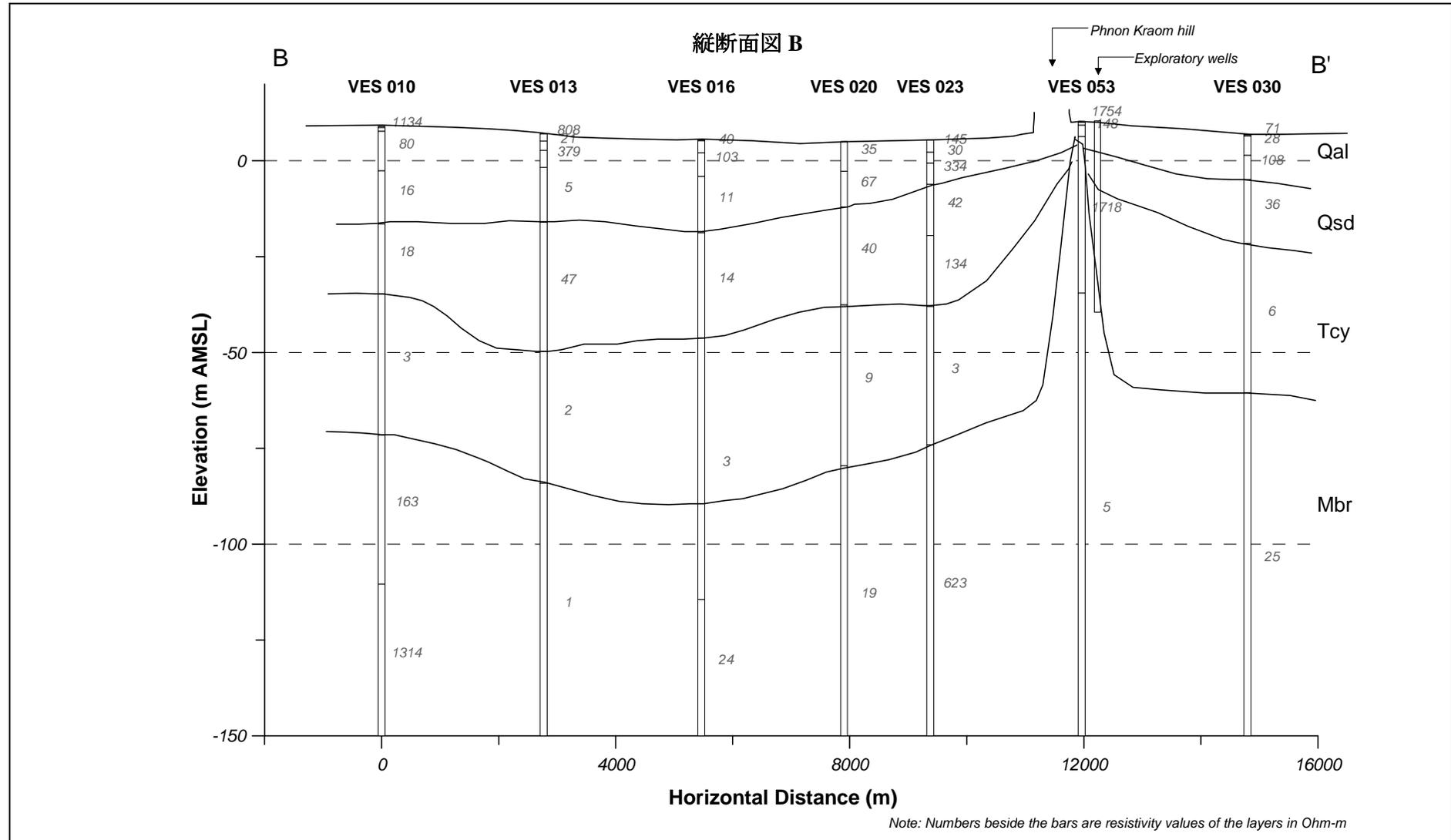


図 2.2 探査地区の地層縦断面図 (1/3)

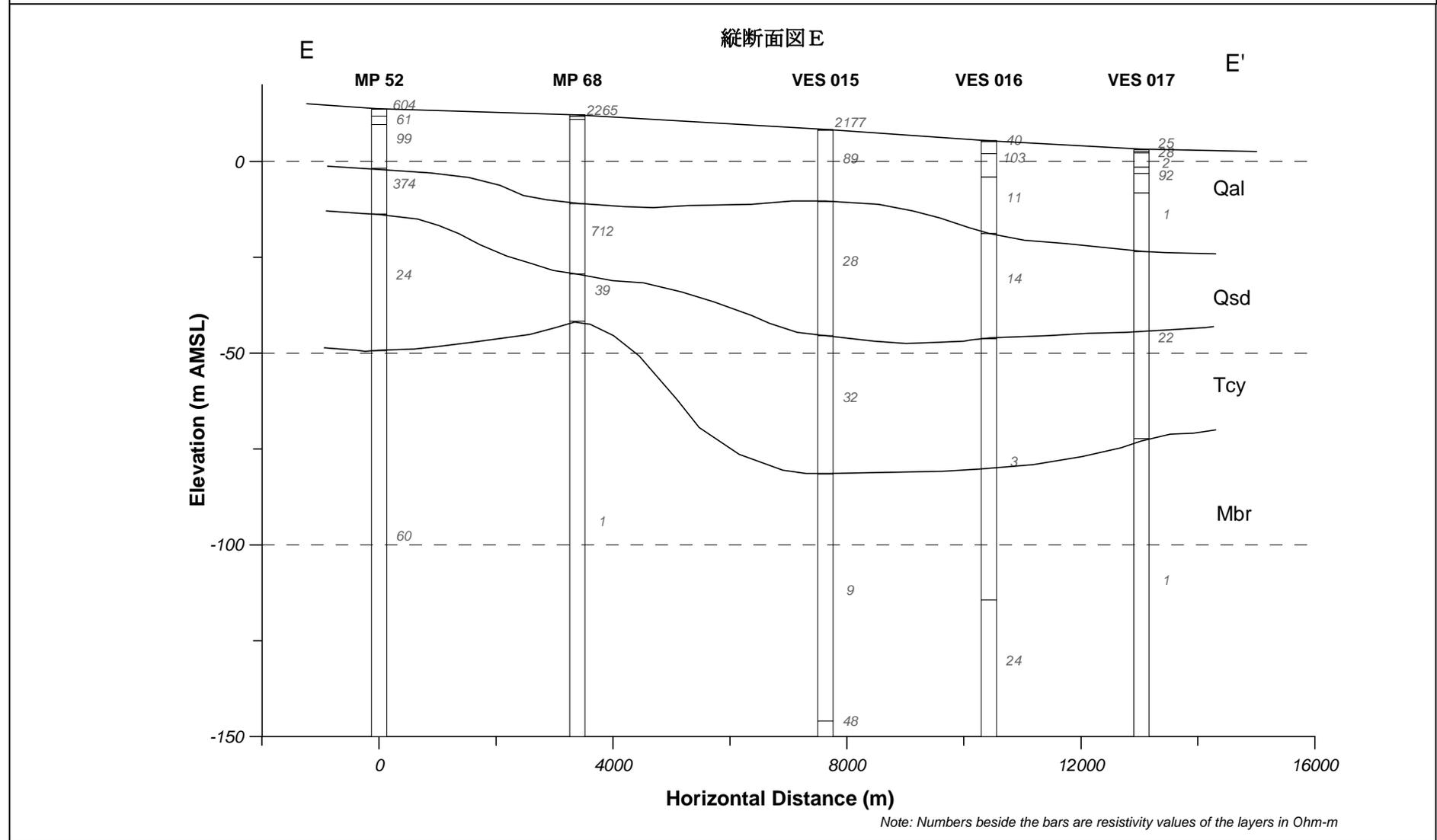


図 2.3 探査地区の地層縦断面図 (2/3)

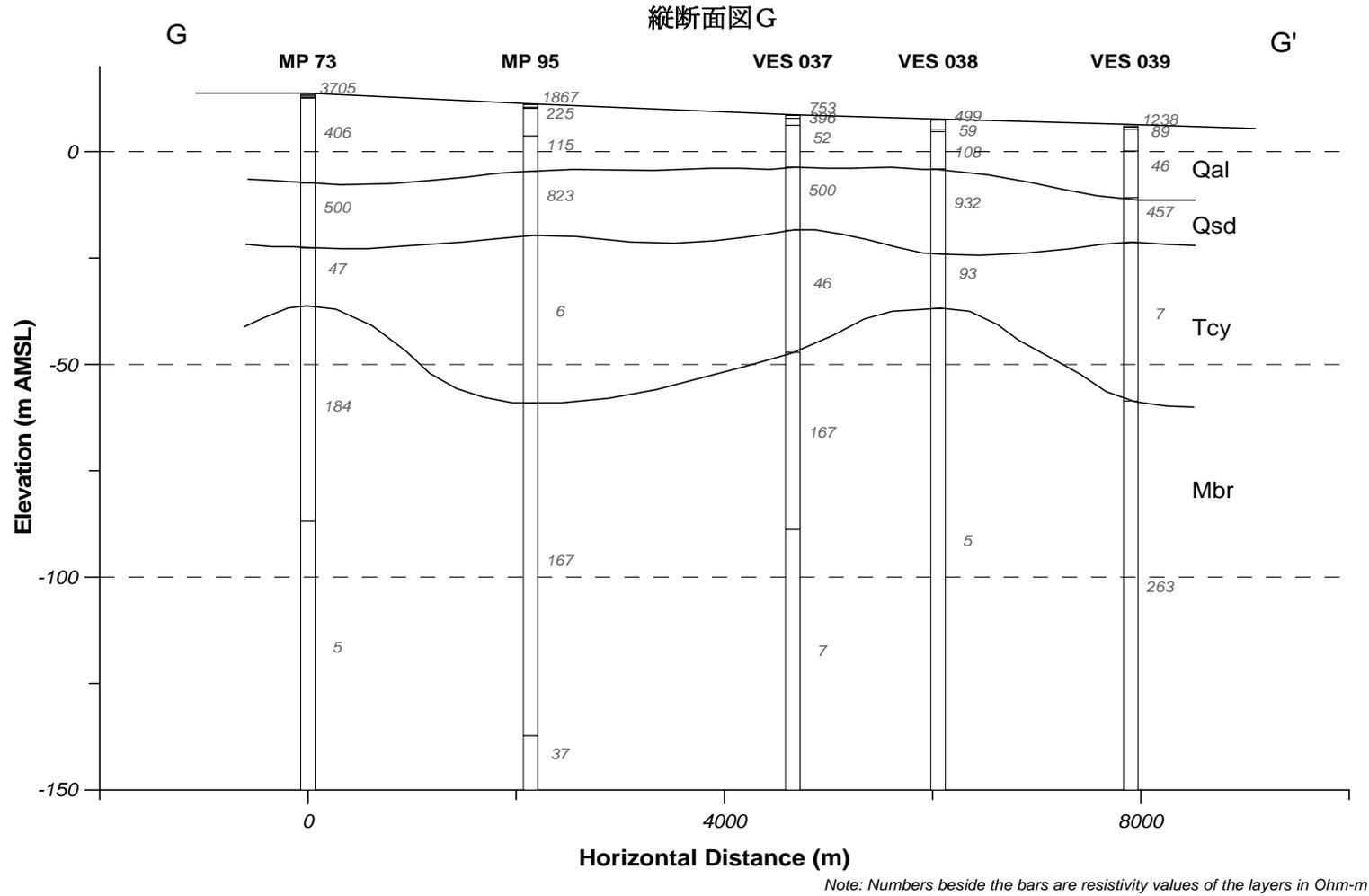


図 2.4 探査地区の地層縦断面図 (3/3)

## 2-2 井戸台帳調査

### 2-2-1 調査の背景および概要

#### (1) 調査の背景

本調査は地下水利用および需要量推計の基礎データを得るために実施された。調査対象はホテル、レストラン、学校といった地下水の大口需要者で、定型の質問票によるインタビュー調査を行った。調査対象施設の位置図を図 2.5 に示す。

表 2.3 井戸台帳調査の概要

調査期間	2009年8月22日から29日
調査方法	●質問票による聞き取り調査 ●現場測定
主な調査項目	1.サイトの基礎情報 2.給水設備の基礎情報 3.井戸構造と水利用用途 4.水利用に対する意識 5.水質
調査施設数	280箇所

表 2.4 カテゴリ別調査施設数

#### (2) 調査対象

調査対象は主に地下水揚水装置（モーターポンプ付井戸）を保有する商業・公共施設で、表 2.4 に示す 280 施設で調査を行った。

施設	詳細	件数	小計
ホテル		75	190
ゲストハウス		115	
レストラン		40	40
工場/製作所		10	10
その他	洗車場	31	40
	学校	4	
	娯楽施設	4	
	病院	1	
合計			280

#### (3) 調査方法

調査は2人で構成されるチームを2チーム投入して行なった。チームは各施設の責任者（主にマネージャーおよび所有者）に対し、質問票を用いてインタビュー調査を実施した。チームは井戸内の地下水水位を計測し、水質も現場試験キットや携帯式 pH・EC メータで計測した。

#### (4) 調査内容

質問票は5つのセクションにグループ化される。以下が各セクションの内容である。

セクション1（サイトの基礎情報）：施設名、GPS データ、標高等

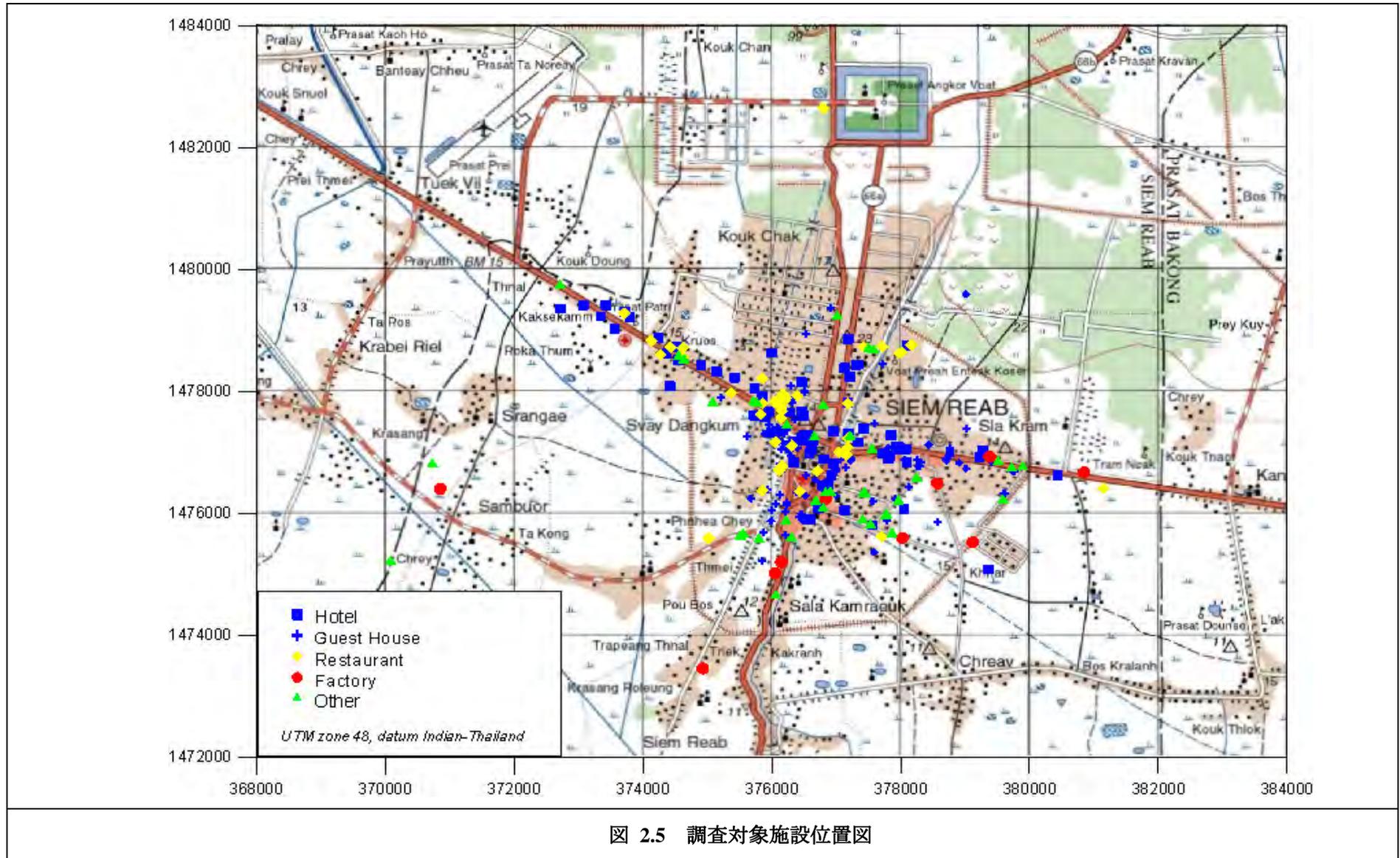
セクション2（給水設備の基礎情報）：水源タイプ、用途、井戸本数、ポンプ形式、処理の有無

セクション3（井戸台帳）：井戸深度、ケーシング径、スクリーン設置深度、揚水量、静水位、動水位、揚水時間、運転維持管理費

セクション4（水利用に対する意識調査）：満足度（水量・水質）、運転維持管理要員数、技術的問題等

セクション5（水質試験）：EC、pH、鉄、マンガン

質問票をサポーティング・レポートの表 2.2.1, 2.2.2, 2.2.4 及び図 2.2 に示す。



## 2-2-2 調査結果

調査データの分析から得られた結果を以下に記述する。これを整理して、表 2.12 に示す。

### (1) 給水設備および水利用

調査した施設の水源は総て、20 m 以上の深度がある管井戸であった。ホテル・ゲストハウスの約 15 % が複数の井戸を有しており、レストラン・工場の複数井戸の所有率はそれぞれ約 23 % および 50 % であった。約 35 % のホテル・ゲストハウス・レストランは、公共水道施設に接続しており、これを井戸のバックアップ水源として利用している。

表 2.5 平均井戸本数・井戸深度

カテゴリ	ホテル	ゲストハウス	レストラン	工場	その他
井戸数	1.37	1.06	1.40	1.60	1.03
井戸深度 *(GL-m)	45.5	30.9	31.0	43.6	32.1

\* 複数の井戸がある場合、メイン井戸の深度（質問票の“well A”）

井戸深度は 20 m～80 m の範囲にあり、ホテル・工場井戸の平均深度はそれぞれ 45 m、30 m であった。水処理はホテル・工場では一般に行われ、最も一般的な処理方式は「砂ろ過」である。

ポンプ能力、貯水槽容量、ポンプ運転時間のインタビュー結果を基に日使用量を推計した。下表に結果を示す。

表 2.6 カテゴリ別日平均水使用量 (m<sup>3</sup>/日/施設)

カテゴリ	ホテル	ゲストハウス	レストラン	工場	その他
雨季平均	30.35	4.62	8.89	39.00	8.89
乾季平均	47.27	5.65	9.91	85.4	8.51

「その他」以外の施設では水使用量は乾季に大きく、雨季には小さい。「その他」に該当する施設の殆どが「洗車場」であり、乾季は雨季に比べ車が汚れにくいので、上記の結果になったと思われる。

### (2) 水利用に対する意識

本調査により、多くのホテル・ゲストハウス・レストランは地下水揚水が環境に与える危険性がある負の影響（地下水位低下とそれによる地盤沈下発生危険性）につき意識していることが分かった。残りの 2 カテゴリは意識が低い。これは前記の 3 カテゴリが観光ビジネス関連施設で、環境に対し関心が高いためと思われる。

表 2.7 地下水問題の発生の可能性に対する意識調査結果

カテゴリ	ホテル	ゲストハウス	レストラン	工場	その他
意識率 (%)	64	53	65	10	17.5

現在、公共用水道に未接続の多くの施設は、安全で安定して供給できる公共水道施設が利

用可能になったら接続したいと考えている。その主な理由は、地下水揚水設備の運転費用を削減するためである。

### (3) 水質

各施設につき、以下の水質分析項目を現場試験キットおよび携帯測定器により計測した。

浅井戸の地下水は1) 高い鉄・マンガン濃度、2) 高い EC 値、及び3) 低い pH 値の特徴がある。深井戸の地下水の数値は比較的良好い。

浅井戸の利用者の多くは小規模業者で、高価な処理施設を設置する余裕がなく、高い鉄濃度に悩まされている。小規模業者は公共水道施設に切り替える強い動機があると考えられる。

### (4) データベース構築

280 件の調査情報を MS-Access データベースとして、SRWSA に提出した。

表 2.8 データベース概要

タイトル	Well Inventory of Large Groundwater Consumers
ソフトウェア	MS-Access
件数	280 施設
内容	セクション 4 (水利用に対する意識調査) を除く全て
使用言語・単位	英語・メートル法
位置情報	各データには GPS 座標が表示され、GIS と連動可能

### (5) 井戸台帳データの重要調査結果

#### 1) 現在の地下水使用量

井戸台帳調査で収集したデータを利用して、シェムリアップ市の現在（2009 年）の乾季・雨季別の地下水使用量を推計した。

表 2.9 シェムリアップ市における現在の地下水使用量推計

項目	使用水量 (m <sup>3</sup> /日)		推計条件
	雨季	乾季	
地下水揚水施設を有する大規模施設	3,908	5,786	- 井戸台帳内 280 箇所の施設から抽出し、雨季・乾季別に推計
上記以外の SRWSA 公共水道施設に接続した大規模施設	3,739	5,009	- 施設数：ホテル=61、ゲストハウス=43、レストラン=190 (出典：SRWSA 登録需要者リスト) - 上記施設の平均揚水量は井戸台帳データから推計した (表 2.6 参照) - 使用水量の一部は地下水揚水施設から賄われている
小規模施設および一般住宅	21,569	24,418	- 2009 年シェムリアップ市人口 = 203,483 (出典：Department of Planning Siem Reap Province) - 使用水量のごく一部は SRWSA 公共水道施設から賄われている - 水使用量原単位 = 雨季：0.106 m <sup>3</sup> /日/人、乾季：0.120 m <sup>3</sup> /日/人
合計	29,216	35,213	

(注) ここでの合計使用量は給水設備形式に係らず、家庭・商業・観光用水の合計値である。そのため、SRWSA 生産井戸による地下水揚水量も含まれている。

## 2) 地下水給水施設の運転・維持管理費

本調査において、各施設の地下水給水施設の運転・維持管理費は、調査員が現場で収集したデータに基づき、概略計算した。

ケース A：主要施設修理費を建設費の 30%と仮定、15 年に 3 回行う。

ケース B：主要施設修理費を建設費の 35%と仮定、15 年に 3 回行う。

表 2.10 地下水による浄水生産費用（ケース A）

項目	ホテル	ゲストハウス	レストラン	工場	その他
A) 雨季平均水使用量 (m <sup>3</sup> /日)	30.35	4.62	8.89	39.00	8.89
B) 乾季平均水使用量 (m <sup>3</sup> /日)	47.27	5.65	9.91	85.4	8.51
C) 平均運転・維持管理費 (US\$/月)	413	59	169	491	203
D) 平均給水施設建設費 (US\$)	45,686	6,261	1,923	32,778	6,267
E) 主要施設修理費 (US\$)	41,117	5,635	1,731	29,500	5,640
F) 平均浄水生産費用 (US\$/m <sup>3</sup> )	0.781	0.802	0.734	0.446	1.028

表 2.11 地下水による浄水生産費用（ケース B）

項目	ホテル	ゲストハウス	レストラン	工場	その他
A) 雨季平均水使用量 (m <sup>3</sup> /日)	30.35	4.62	8.89	39.00	8.89
B) 乾季平均水使用量 (m <sup>3</sup> /日)	47.27	5.65	9.91	85.4	8.51
C) 平均運転・維持管理費 (US\$/月)	413	59	169	491	203
D) 平均給水施設建設費 (US\$)	45,686	6,261	1,923	32,778	6,267
E) 主要施設修理費 (US\$)	47,970	6,574	2,019	34,417	6,580
F) 平均浄水生産費用 (US\$/m <sup>3</sup> )	0.815	0.835	0.745	0.460	1.048

以下の仮定・方程式を用いた：

- 雨季は5月から10月の6ヶ月、1月は30日、1年は365日。
- Dの金額は、回答された複数の建設費用の中の最高金額を採用した。
- 施設の償却期間は15年、主要維持管理作業は5年毎に行われ費用はケースA・Bそれぞれ建設費の30%・35%とする。
- 運転・維持管理費用 = 消毒用塩素費用 + 修理費 + 労務費 + 動力費

$$\text{単位浄水生産費計算式} : F = [C/30 + (D + E)/(15 \times 365)] / [(A + B)/2]$$

計算結果は、施設カテゴリにより  $1\text{m}^3$  毎の浄水生産費用が異なることを示している。工場は一般的に大規模施設であるため、最も効率的生産を行っており、主に洗車場が該当する  
その他施設では、逆に最も効率が悪い生産を行っている。上表の生産費用はいずれも公共  
水道料金を上回っている。

表 2.12 井戸台帳調査結果

主要項目	内 容
調査数	・ 280 箇所の大口需要者
給水施設	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水源は総て深度 20 m 以上の管井戸で、地上・水中ポンプで揚水している</li> <li>・ 調査施設の多く(77%)は井戸1本で給水している</li> <li>・ ホテルおよびゲストハウス所有の平均井戸本数は1.37本で、15%は2本以上所有している</li> <li>・ 量水メータもしくは水位観測パイプが井戸に設置してある施設は全体の4%以下であった</li> <li>・ ホテル、ゲストハウスおよびレストランの約30%は地下水・公共水道両方を使用している</li> <li>・ ホテル・工場井戸の平均深度は約44 mで、それ以外の施設井戸の平均深度は約30 mであった</li> <li>・ 一般的な井戸ケーシング口径は、ホテル・工場で100 mm、その他施設では49 mmであった</li> <li>・ 総ての施設で地上ポンプは使用されているが、36%のホテル・工場では水中ポンプも併用されている。</li> <li>・ 大規模ホテル・工場では水処理施設は一般的に設置されており、砂ろ過処理が大半である</li> <li>・ 水処理施設の殆どが施設建設と同時に、2000年以降に建設されている</li> <li>・ スクリーン深度は井戸深度により異なり、平均長は9.6 mであった</li> <li>・ 地下水の静水位は地下1.5 mから2.9 mの範囲であった</li> <li>・ 動水位は地下6 mから7 mの範囲であった</li> <li>・ 工場を除く多くの施設で、公共水道システムへの接続が、建設工事の観点から容易で適切であるとの意見が聞かれた</li> <li>・ ホテルの75%が商業電力と自家発電装置を併用しているのに対し、ゲストハウスの86%は商業電力のみを用いている</li> </ul>
用途および使用水量	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 量水メーターや信頼できるデータがないので、ポンプ容量、運転時間により使用水量の推計を行った</li> <li>・ ホテルや工場は1日30から40 m<sup>3</sup>もの水量を使用する</li> <li>・ 洗車場を除く殆どの施設で、乾季使用水量は雨季の1.1から1.5倍である</li> <li>・ 施設数は少ないが、工場は大口需要者である</li> <li>・ 大規模レストランは水利用量が多い</li> <li>・ 地下水・公共水道水ともに多用途に用いられている</li> </ul>
環境問題に対する意識	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 大規模施設は現在の水道供給に量・質ともに満足しているが、小規模施設は満足度が低い</li> <li>・ ホテル、ゲストハウスおよびレストランは地下水利用に係る環境問題(地下水位低下と地盤沈下)に高い関心がある</li> </ul>
SRWSA 公共水道への転換意思	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 70 から 90%のホテル、ゲストハウス、レストランは公共水道への切り替え意思があるが、工場は地下水使用を続行する意向であった</li> <li>・ 条件次第と回答した施設は、条件として、給水料金と使い勝手の良さをあげていた。</li> <li>・ 切り替えの理由は環境に対する義務および使いやすさであった</li> </ul>
水 質	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 市全域の地下水質は、低pH値と地区的に散在する高鉄分濃度という特徴がある</li> </ul>

\* イタリック表示項目については、本稿でさらに詳細に記述されている。

### 2-3 現場水質試験

計画水道施設の水源になる可能性がある地域で、簡易分析機器により現場で、地下水の水質試験を行った。採水は主に管井戸からハンドポンプで行い、以下の水質項目につき計測した。採水箇所を図 2.6 に示す。

表 2.13 水質分析項目及び試験方法

水質項目	pH	EC	Fe	Mn	NH <sub>3</sub> -N
試験方法	携帯 pH メータ	携帯 EC メータ	パック・テスト	パック・テスト	パック・テスト

一部の素掘り井戸を除き、一般的に EC 値は非常に小さい。一部の井戸の鉄分濃度は 8 mg/L と非常に大きかったが、これは狭い範囲に限定される。アンモニア性窒素 (NH<sub>3</sub>-N) は動物/人間の排泄物・肥料による間接的汚染の指標の 1 つであるが、今回試験では 0.2 mg/L 以下であり、飲料水基準未満であった。下表に水質試験結果を示す。

表 2.14 地区ごとの水質試験平均値 (単位: mg/L)

項目	pH	EC (μS/cm)	Fe	Mn	NH <sub>3</sub> -N
飲料水基準*	6.5 - 8.5	1600 以下	0.3 以下	0.1 以下	1.5 以下
シェムリアップ 川東部	5.43	48	1.21	0	0.18
シェムリアップ 川西部	5.60	83	2.08	0	0.15
Phnon Kraom 丘	4.90	518	0.45	0.17	0.15

注: \* 飲料水基準: January 2004, Ministry of Industry, Mines, and Energy

これら 3 地区の地下水水質は市内の他地域および周辺地域のものと同等であり、低 pH 値と所々高鉄分濃度が散在するという特徴がある。

## 2-4 コアサンプル調査結果

本調査において、地下水モニタリング体制強化のために、1本の観測井戸（浅井戸）が 2009 年 10 月に Kravan 小学校の敷地内に、2本の観測井戸（浅井戸と深井戸）が 2009 年 10 月と 2011 年 6 月に Khvein 小学校の敷地内にそれぞれ建設された。その折、観測井戸が建設された同じ敷地内で、深度 80 m のコアボーリング調査が 2009 年 10 月に実施され、そのコアサンプル観察調査が 2011 年 1 月に実施された。なお、今回のコアサンプル観察結果では、JSA（日本政府アンコール・ワット遺跡救済チーム）が 1995 年にアンコール遺跡内（アンコール・ワット及びバイヨン）で採取したコアサンプルも比較参考のために観察した。

その調査結果は、従来、「カンボジア国シェムリアップ市上水道整備計画調査(2000 年)」が実施されて以来、その調査結果に基づき、当地域において定説とされてきた地質構造、即ち、「沖積層・洪積層の第四紀層の下部に、第三紀層相当層とされる粘土岩が分布する。」とする内容とは異なり、地表から 80 m 深度まで未固結層が連続しており、一連の地層と見なせることが判明した。

上記調査 (2000 年) では、当地域では、一般的に、沖積層・洪積層の分布する深度約 30 m ~ 50 m より下部は、40 m ~ 50 m の層厚を有する第三紀層が分布し、その下部の深度約 70 m ~ 80 m より以深に基盤岩である上部ジュラ紀の砂岩・シルト岩・頁岩等の堆積岩や凝灰各

礫岩、及び後期中生代～第三紀の安山岩・玄武岩質貫入岩・閃緑岩の火山岩や風化火山岩等が分布するとしている。

しかしながら、コアサンプル調査結果では、khvein 及び Kravan 両サイトともに、(1)地表から深度 80 m まで未個結の地層が連続しており、一連の地層と見なし得ること、(2)第三紀層相当層と見なしうる地層は、これらのコアサンプルを観察する限り存在しないことが明らかとなった。

コアサンプル調査結果の概略は以下の通りである。コアサンプルの観察結果（地質柱状図）は、Supporting Report、Chapter 3、SR 3-2 (1) Survey Results of Core Samples に記載している。

### (1) Khvein サイト

地表から深度 5 m まで粘土層が分布する。その下部、深度 5 m～深度 50 m までは、層厚 1 m～4 m の砂層・砂質粘土層・粘土質砂層等の互層である。その下部深度 50 m～63 m までは、深度 58 m と深度 61m～63 m に薄い粘土質砂層（砂質粘土層）を挟在させる以外は、層厚約 12 m の厚い粘土層が分布する。その下部深度 63 m から深度 80 m までは、細砂層が分布する。

本調査の結果によれば、コアサンプルの地質は、一連の連続したものと見なされ、また深度 50 m～63 m に分布する粘土層は、第三紀層相当層と見なせるような固結した地層ではないことが明らかになった。

### (2) Kravan サイト

地表から深度 7 m までは、シルト・砂質粘土・砂・粘土の互層である。その下部から深度 80 m まで、細砂層・中粒砂層が分布する。

本調査の結果、Khvein サイトと同様に、コアサンプルの地質は、一連の連続したものと見なされ、また、第三紀層当層は存在しないことが明らかになった。

### (3) アンコール遺跡コアサンプル

JSA「日本国政府アンコール遺跡救済チーム(Japanese Government Team for Safeguarding Angkor)」は、アンコール遺跡の地盤調査のために、1995年3月に、Angkor Wat（サンプル番号、AV-1B）、及び Bayon（サンプル番号、BY-1B）寺院の敷地内で、100 m、87 m に達するコアボーリング調査を行った。そのコアサンプルがシェムリアップ市内の JSA 事務所に保管してあり、本調査において、2011年1月に当地域の地下地質状況確認のための参考資料としてコアサンプル観察調査を行った。

コアサンプルは、コアボーリング実施から既に約 16 年経過しており、乾燥して相当程度固くなっており、また、砂層部分はコアが採取できなかったため、コアが欠除している部分が相当程度見られた。

コアサンプル観察の結果は、Angkor Wat サイトでは、深度 74.20 m、Bayon サイトでは、

深度 83.50 m より下部において基盤岩が観察された。また、JSA の「アンコール遺跡調査報告書 1996 (1996 年 7 月)」によれば、深度 40 m 付近を境にその上下で明らかに層相が変わっていたとのことであったが、2011 年 1 月の時点で既に約 16 年を経過しているコアサンプルを観察した限りでは、明瞭な層相の変化は、認識できなかった。また、このコアサンプルにおいても、Khvein と Kravan サイトと同様に、第三紀層相当層と見なし得る地層は観察されなかった。

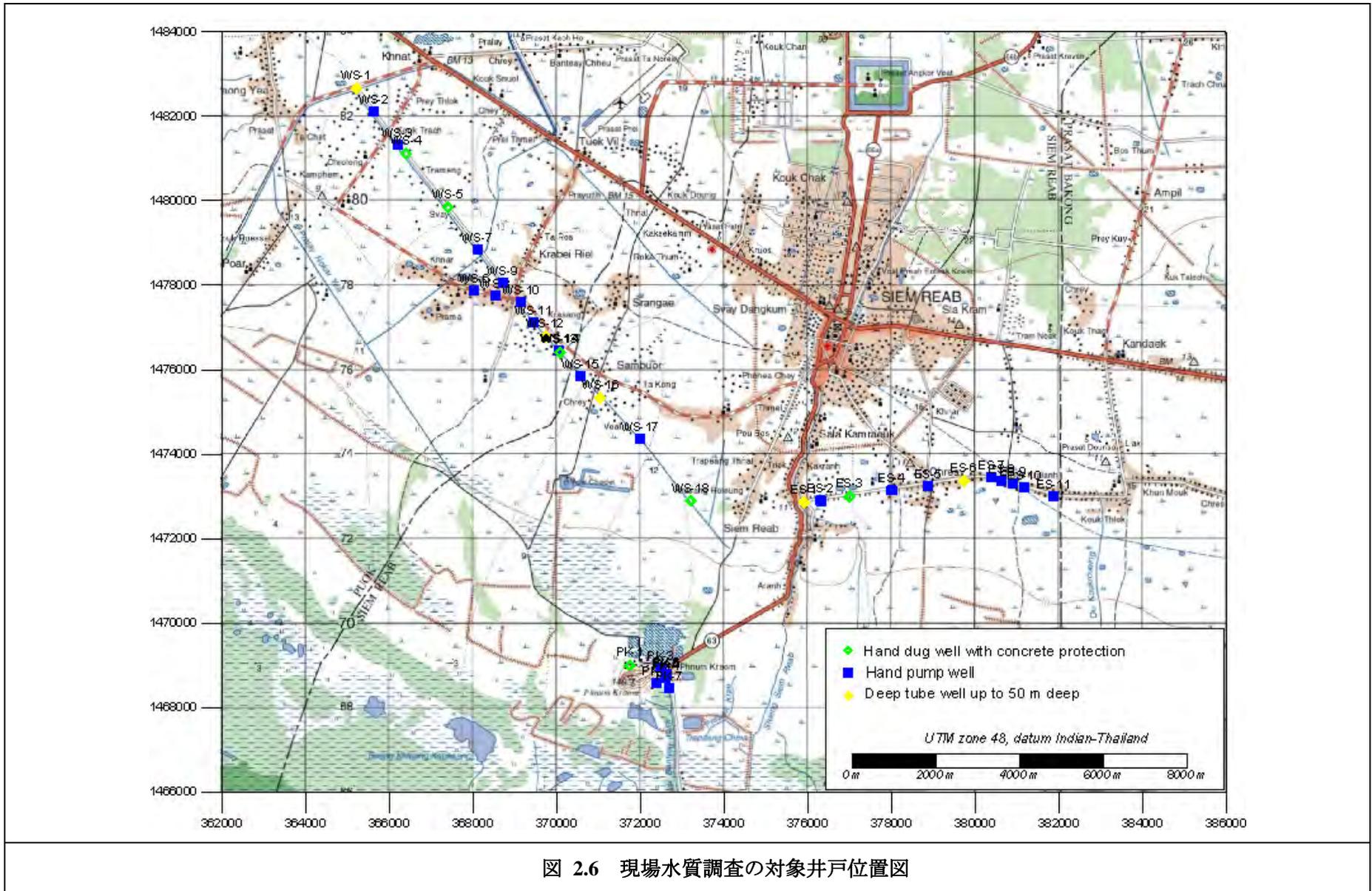


図 2.6 現場水質調査の対象井戸位置図

## 第3章

### 地下水利用の現況

### 第3章 地下水利用の現況

#### 3-1 地下水モニタリングの現況

##### (1) SRWSA のモニタリング活動

「カンボジア国シェムリアップ市上水道整備計画調査（2000年）」によって、調査地域に10本の観測井戸が建設された。SRWSAは、毎月、観測データを回収している。地下水位の手動測定が2007年7月からモニタリング施設の信頼性を確認するために、毎月1回実施されてきた。

しかしながら、いままで、SRWSAによって実施された活動は、「カンボジア国シェムリアップ市上水道整備計画基本設計調査（2003年）」でなされた提言どおりに実行されているわけではない。上記調査で提言された内容とSRWSAによるモニタリング活動の実情を表3.1に、既存の観測井戸の一覧と観測データの信頼性及びキャリブレーションの必要性を表3.2に示す。SRWSAは、「第6章 結論と提言」に記載されたように、この状況を改善するために、維持管理費の適正な利用により故障した観測機器の復旧等の適切な手段をとるべきである。



図 3.1 既存及び新設モニタリング井戸位置図

表 3.1 SRWSA によるモニタリング活動

No.	2003 年 B/D 報告書*の提言内容	SRWSA により実施された活動
1	既存モニタリング施設に適切な維持管理	数か所で故障機材が修理されないままに放置されており、観測データの欠損の結果となっている。
2	モニタリングデータの有効利用	データ収集が行われてきたが、その解析は行われていない。
3	異常なモニタリングデータが見つかった時には、適切な対応をとること。	地下水位の手動測定は、2007 年 7 月から実施されている。しなしながら、手動測定データと自動モニタリングデータとの比較による詳細な分析は、実施されてこなかった。
4	収集情報の開示	データ信頼性の確認困難のために、SRWSA は、今まで、データを開示してこなかった。

(注) 2003 年 B/D 報告書：「カンボジア国シェムリアップ上水道整備計画基本設計調査（2003 年）」

表 3.2 既存の観測井戸の一覧と観測データの信頼性及びキャリブレーションの必要性

番号	井戸番号	井戸深度 (m)	入手できる観測データ期間	観測井戸の現状及びデータの信頼性	観測機器のキャリブレーションの必要性
1	WT-3	36 m	2003/8～2008/4	<ul style="list-style-type: none"> <li>観測機材なし（ソーラパネル/避雷針）除いて撤去、）機材撤去時期(2008/5/21)</li> <li><u>撤去理由</u></li> <li>SRWSA によれば、郊外に立地する WT-3 よりも測定機材が機能停止し、市中心域に近く、重要遺跡の多い地域に立地している WT-6, LTa の方が観測井戸として重要との考え方から観測機材を移設した。</li> <li>●WT-6 ヘケーブルセンサー移設</li> <li>●LTa ヘデータロガーを移設</li> <li>●機材撤去までのデータ精度良好</li> </ul>	2008/5 以降観測機器なし。
2	WT-4	29 m	2007/3～現在	<ul style="list-style-type: none"> <li>●観測機材あり（観測中）</li> <li>●2007/3～2008/3 の観測データ精度良好</li> <li>●2008/3 以降の観測データの精度低い。</li> </ul>	キャリブレーション必要。
3	WT-5	58 m	2007/3～現在	<ul style="list-style-type: none"> <li>●観測機材あり（観測中）</li> <li>●観測データの精度高い</li> </ul>	キャリブレーション必要なし。
4	WT-6	29 m	2008/7～現在	<ul style="list-style-type: none"> <li>●観測機材あり（観測中）</li> <li>●観測データの精度低い。</li> </ul>	キャリブレーション必要。
5	WT-7	60 m	2003/8～現在	<ul style="list-style-type: none"> <li>●観測機材あり（観測中）</li> <li>●観測データの精度高い。</li> </ul>	キャリブレーション必要なし。
6	WT-8	83 m	2008/4～2010/9-	<ul style="list-style-type: none"> <li>●観測機材あり（観測中）</li> <li>建設中の APSARA 博物館ビルの地下に保存予定。ビル建設中、土砂による埋設/冠水あり。</li> <li>●観測データの精度低い。</li> </ul>	キャリブレーション必要。
7	LTa-1	72 m	2008/8～現在	<ul style="list-style-type: none"> <li>●観測機材あり（観測中）</li> <li>●観測データの精度低い。WT-3 の観測機材移設時に浅井戸と深井戸の接続ミス発生。浅井戸と深井戸とで測定水位が逆転。</li> </ul>	キャリブレーション必要。
	LTa-2	35 m	2008/8～現在	<ul style="list-style-type: none"> <li>●観測機材あり（観測中）</li> <li>●観測データの精度低い。WT-3 の観測機材移設時に浅井戸と深井戸の接続ミス発生。浅井戸と深井戸とで測定水位が逆転。</li> </ul>	キャリブレーション必要。

8	LTb-1	73 m	2003/9～現在	<ul style="list-style-type: none"> <li>●観測機材あり（観測中）</li> <li>●観測データの精度が高い。</li> </ul>	キャリブレーション必要なし。
	LTb-2	40 m	2003/9～現在	<ul style="list-style-type: none"> <li>●観測機材あり（観測中）</li> <li>●観測データの精度が高い。</li> </ul>	

(注) 上記に示す観測井戸の現状とは、2010/9/13 時点での状況を示す。なお、Khvein/Kravan 観測井戸は、2009/9 以降建設され、観測精度を保っているために省略。

## (2) DOWRAM（水資源気象局）によるモニタリング活動

カンボジア政府は、2007年6月に「水資源管理法」を制定し、水資源に関するモニタリング作業は、鉱工業エネルギー省(MIME)から水資源気象省(MOWRAM)に移管された。現在、水資源気象省は、地下水に関わるモニタリング作業をまだ実施していない。

### 3-2 モニタリング井戸の新設

本調査の下で、1本の観測井戸（浅井戸）が2009年10月に Kravan 小学校の敷地内に、2本の観測井戸のうち、浅井戸が2009年10月に、深井戸が2011年5月に Khvein 小学校の敷地内にそれぞれに建設された。

表 3.3 新設モニタリング井戸の概要

No.	井戸番号	井戸深度 (m)	ケーシング径と材質	井戸設置場所	井戸建設年
1	Khvein No.1	40	PVC 6"	Khvein 小学校	2009年10月
2	Khvein No.2	80	PVC 6"		2011年5月
3	Kravan No.1	40	PVC 6"	Kravan 小学校	2009年10月

Khvein 及び Kravan サイトでの浅層及び深層観測井戸の本数は、コアサンプリング調査に基づく水理地質状況による。Khvein サイトでは、深度 50 m～63.5 m に粘土層が分布しており、その上層と下層に砂層が分布しているために、浅層帯水層と深層帯水層の2つに区分され、浅井戸及び深井戸の観測井戸が建設された。一方、Kravan サイトは、コアサンプル調査から砂層が地表部を除いて深度 80 m まで分布しており、1つの帯水層より構成されている。そのため、浅層観測井戸のみが建設された。

## 3-3 私有井戸

### 3-3-1 私有井戸の分布

井戸台帳調査の結果によれば、揚水量 10m<sup>3</sup>/日以上私有井戸は調査地域で 128 本である。ホテルと工場による揚水量は、特に多く、調査された私有井戸の全揚水量の 70 %以上を占めている。

揚水量 10m<sup>3</sup>/日以上私有井戸の位置は、調査時の GPS データを利用して確認し、その位置を図 3.2 の 1 km × 1 km グリッド図に示した。図 3.3 は、揚水量 10m<sup>3</sup>/日以上私有井戸による揚水量分布を示す。揚水量 10m<sup>3</sup>/日以上私有井戸は、ほぼ市中心部に分布する。最も地下水の揚水量が多いのは、市中心部と国道 6 号線に沿った地域である。

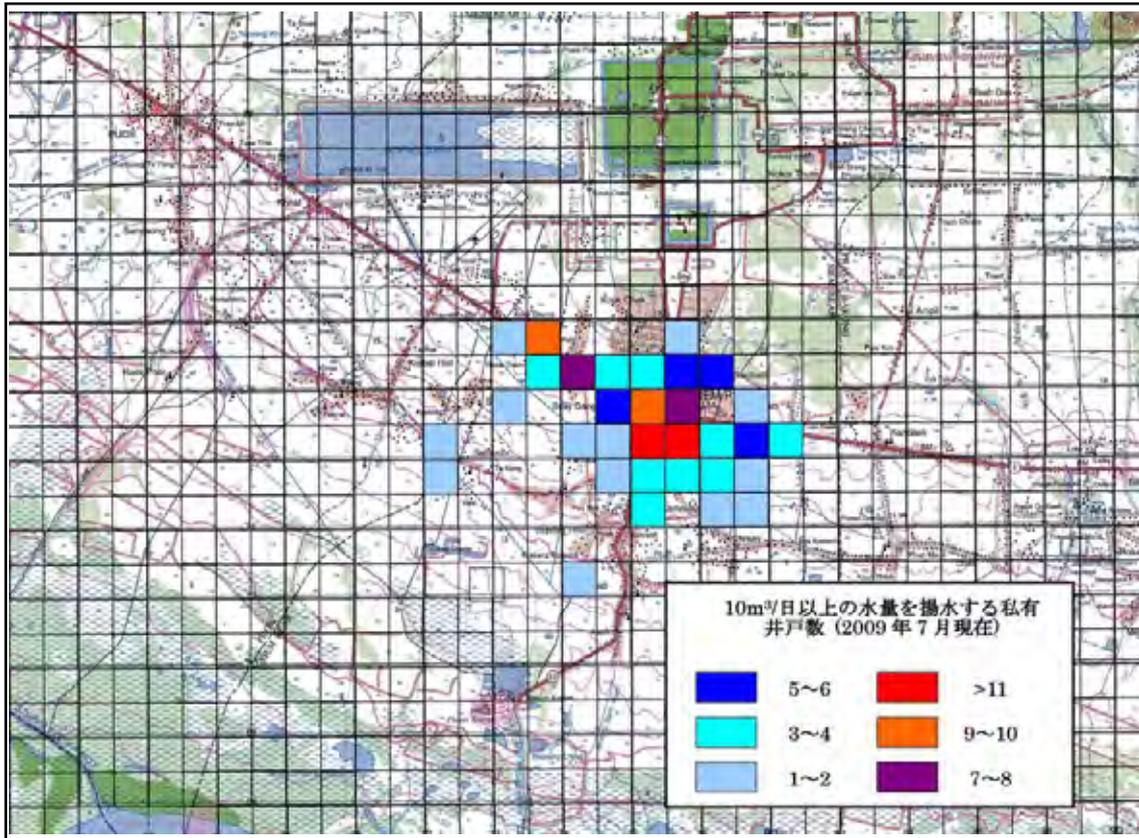


図 3.2 揚水量 10m<sup>3</sup>/日以上 of 私有井戸の分布

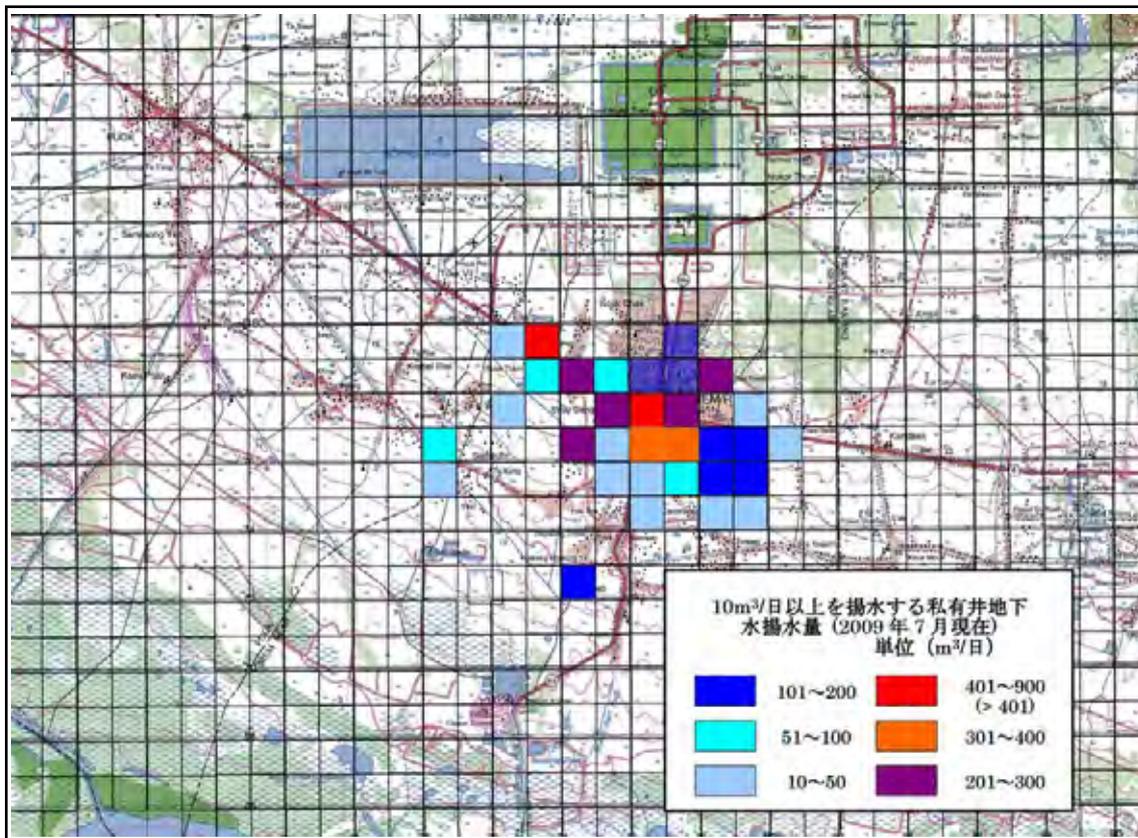


図 3.3 揚水量 10m<sup>3</sup>/日以上 of 私有井戸の揚水量分布

### 3-3-2 揚水帯水層と揚水量の解析

井戸台帳調査により収集された情報に基づいて、私有井戸による、揚水帯水層と地下水揚水量が検討された。

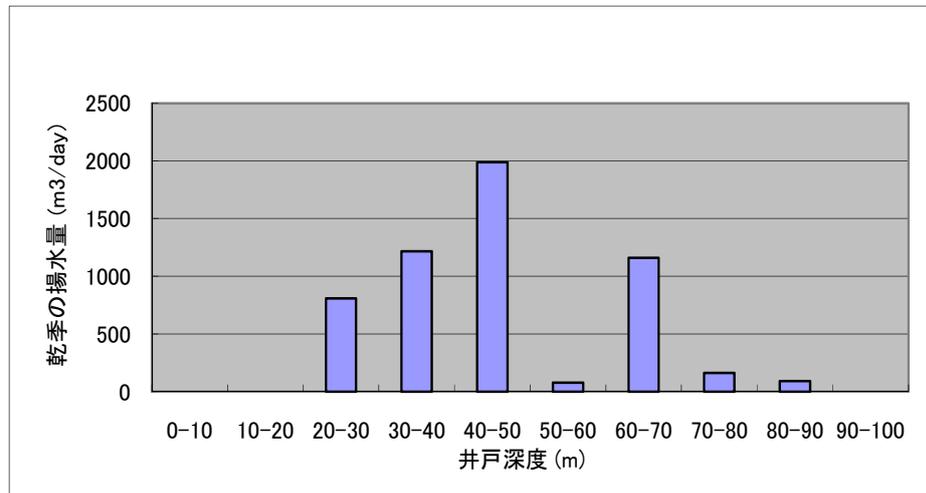


図 3.4 私有井戸の井戸深度別の地下水揚水量

図 3.4 は、私有井戸の井戸深度と地下水揚水量との関係を示す。地下水は、主に、20 m～50 m の深度及び 60 m～70 m の深度で揚水されている。

私有井戸は、ほとんど、市中心部に分布している。そのため、市中心部に立地している WT-5 観測井戸が解析のために利用された。図 3.5 に図示されているように、WT-5 の揚水帯水層は、「カンボジア国シェムリアップ市上水道整備計画調査（2000 年）」の結果により確認された。

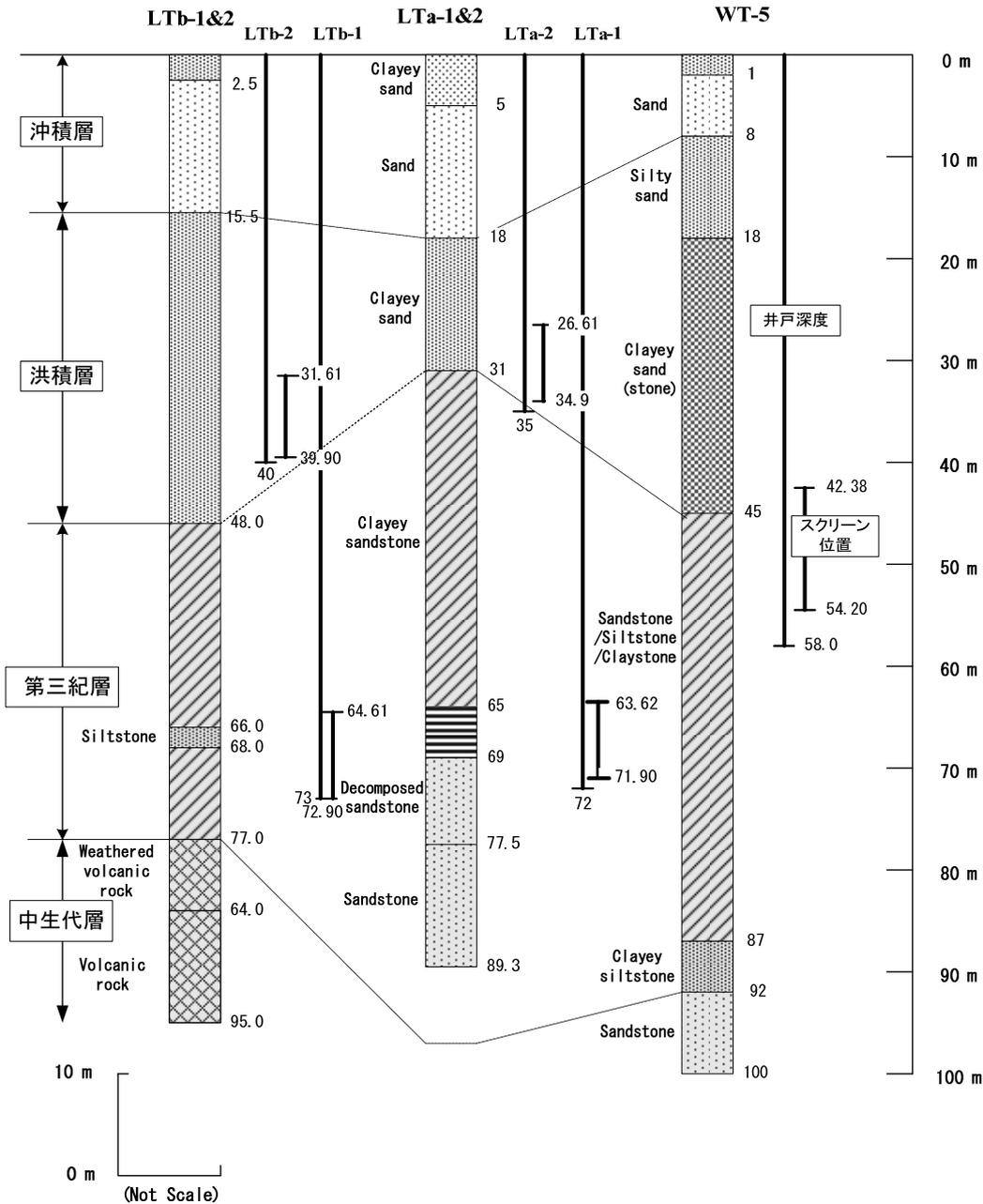


図 3.5 WT-5, LTa, Ltb の井戸構造と地質状況

「カンボジア国シェムリアップ市上水道整備計画調査（2000年）」によれば、沖積層は、0 m～20 m の深度に分布している。洪積層は、10 m～40 m の深度に分布している。40 m～50 m の層厚をもつ第三紀層がその下部に存在している。第三紀層の下部に、中生代層の火山岩や砂岩が分布している。

図 3.5 に示した地質状況と図 3.4 に示した私有井戸の揚水帯水層とを比較すると、私有井戸は、洪積層と第三紀層の一部から地下水を揚水している。

### 3-3-3 私有井戸による揚水の影響の解析

私有井戸による揚水の影響は、WT-5 と LTb 観測井戸のデータを利用することによって検

討された。WT-5 観測井戸は、SRWSA 事務所の中に立地している。その敷地の中の旧浄水施設は、2005 年 11 月～12 月以前まで、給水のために、約 60 m 深度の 3 本の井戸を利用した。そのため、2005 年 11 月～12 月以前に記録された WT-5 の地下水位は、図 3.6 に示したように、140 cm～157 cm の水位低下を示す大きな日変動パターンを示した。

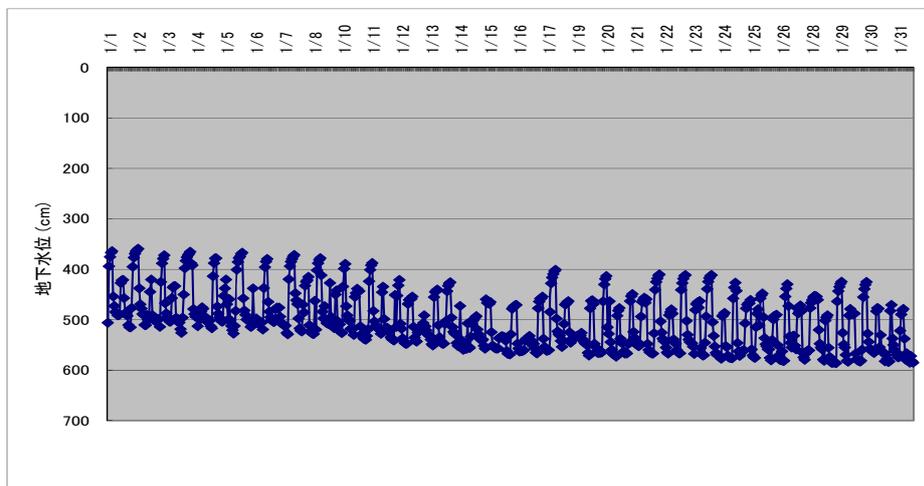


図 3.6 2004 年 1 月の WT-5 観測井戸での地下水位

浄水場が廃棄された後、2008 年 1 月 7 日～9 日に記録された地下水位は、朝晩に、約 1 cm～6 cm の小さな日変動パターンを示した。この水位変動は、市内での地下水揚水の影響と考えられる。2008 年 1 月 7 日～9 日の WT-5 観測井戸の地下水位の日変動の例が、図 3.7 に示される。

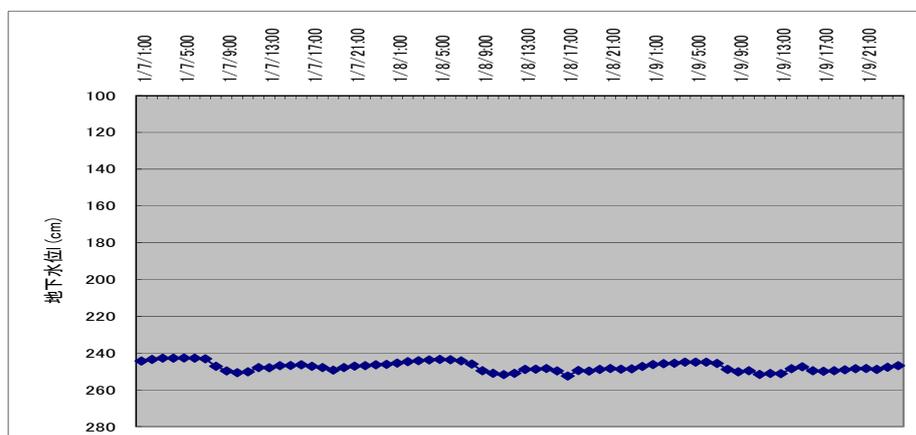


図 3.7 2008 年 1 月 7 日～9 日の WT-5 観測井戸での地下水位

同日の、LTb-2 浅層観測井戸は、WT-5 よりも大きい 15 cm～17cm の水位変動を記録した。WT-5 井戸のスクリーンは、第三紀層の帯水層に設置されている。LTb-2 井戸スクリーンは、洪積層中に設置されており、その地下水位の低下は、WT-5 よりも大きい。私有井戸による洪積層からの地下水の揚水量は、第三紀層の約 4 倍である。LTb-2 の日地下水変動パターンを、図 3.8 に示す。

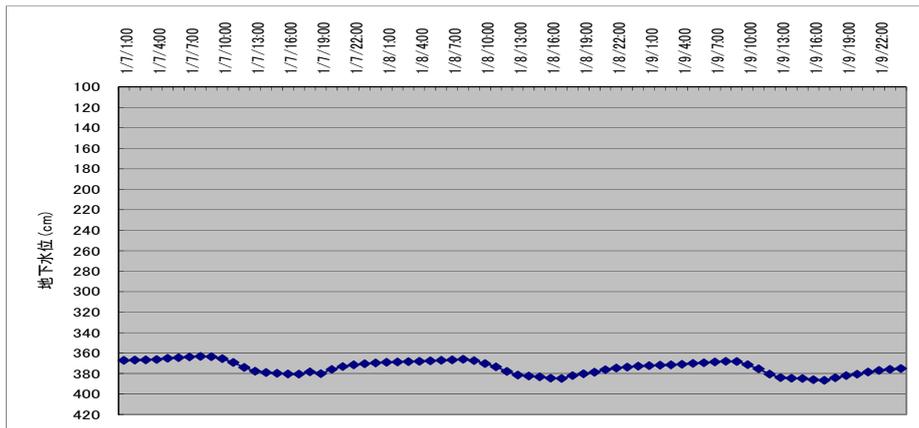


図 3.8 2008 年 1 月 7 日～9 日の LTb-2 観測井戸の地下水位の日変動

LTb-1 深井戸の地下水位は、明瞭な日変動パターンを示さない。そのため、3 cm～5 cm の地下水位低下を示す、私有井戸の多い市中心部に立地する WT-5 井戸の地下水位の変動は、私有井戸による第三紀層中の地下水揚水の影響であり、私有井戸による揚水は、WT-5 観測井戸から約 5 km 離れて立地する LTb-1 観測井戸サイトまで影響しなかったと解釈される。2008 年 1 月 7 日～9 日の LTb-1 深井戸の地下水位は、図 3.9 に示される。

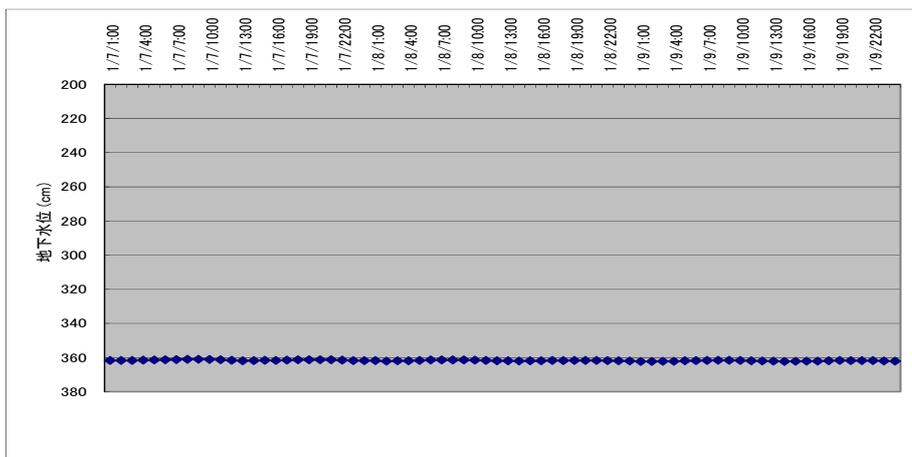


図 3.9 2008 年 1 月 7 日～9 日の LTb-1 観測深井戸の地下水位

### 3-4 SRWSA 生産井戸

#### 3-4-1 井戸構造と取水帯水層

SRWSA 生産井の取水帯水層が、地質柱状図と井戸構造によって検討された。SRWSA 井戸は、60 m の井戸深度をもち、そのケーシング径は、250 mm である。その井戸スクリーンは、14 m～45 m の深度に設置されている。

その地質柱状図は、沖積層、洪積層、第三紀層に分類されている。地質とスクリーンの設

置深度の関係は、これらの井戸が沖積層の下部及び洪積層から地下水を取水していることを示している。地質とスクリーン位置との関係が、図 3.10 に示される。

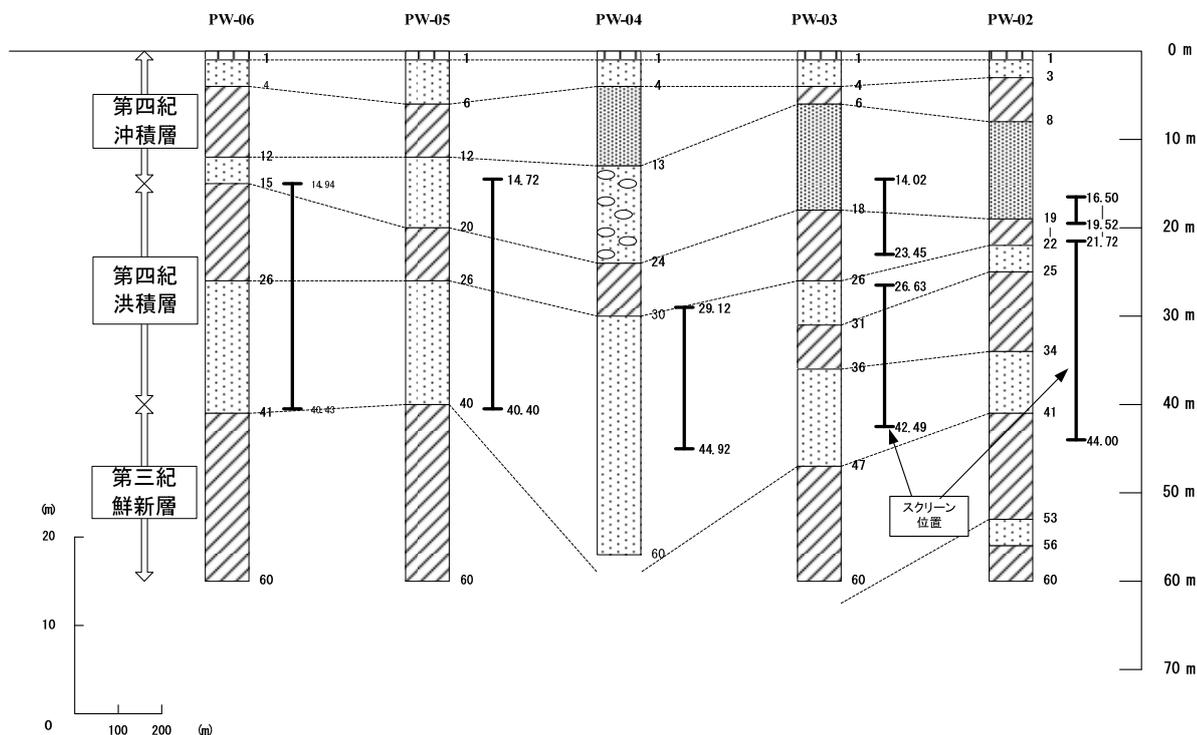


図 3.10 SRWSA 生産井戸の取水帯水層

### 3-4-2 SRWSA 生産井戸の稼働状況

SRWSA 生産井は、2005 年 11 月に揚水を開始した。2007 年 12 月には、その生産量は、8,000 m<sup>3</sup>/日まで達し、そして、2009 年 8 月には、9,000 m<sup>3</sup>/日を超えた。

### 3-4-3 SRWSA 生産井による揚水の影響の解析

WT-4 と Khvein 観測浅井戸が、SRWSA 生産井による揚水の影響を調査するために利用された。

#### (1) WT-4 の井戸構造と帯水層

WT-4 観測井戸のスクリーンは、沖積層の下部と洪積層の主要部分に設置された。これは、WT-4 観測井戸のスクリーンは、SRWSA 生産井と同じ揚水帯水層に設置されていることを意味する。図 3.11 は、WT-4 観測井戸の地質状況とスクリーンの設置深度を示す。

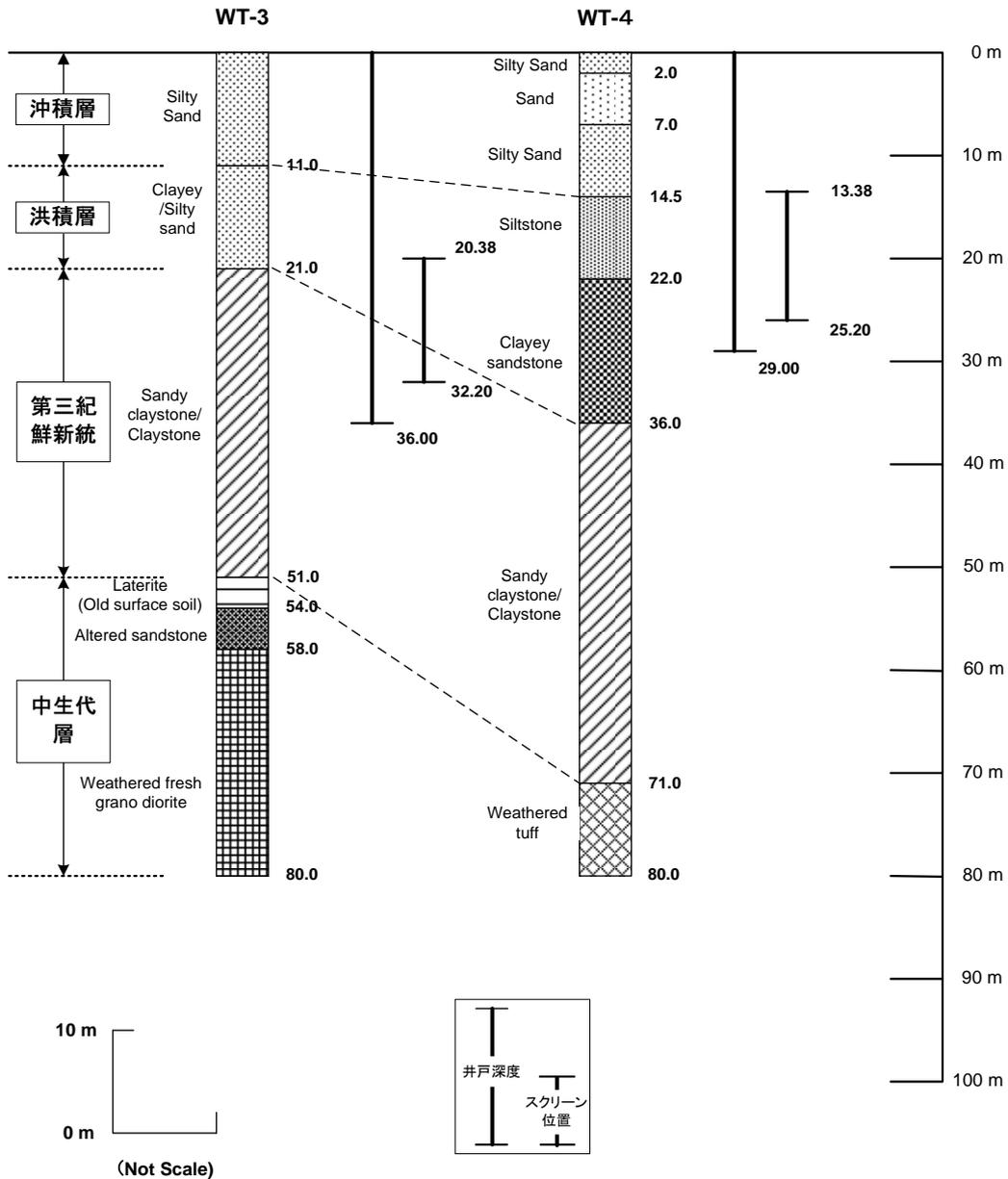


図 3.11 WT-4 観測井戸の地質状況とスクリーンの設置深度

(2) WT-4 データの分析

この分析は、SRWSA 生産井が地下水の揚水を休止した時に、WT-4 観測井戸のモニタリング地下水位とその翌日の同じ時間の揚水稼働中の地下水位を比較することによって実施された。

WT-4 井戸の水位データは、手動測定データと自動記録データを比較した結果、2007年3月～2008年2月までの観測データのみが信頼性があると確認されており、この期間のデータを検証に利用した。

「カンボジア国シェムリアップ市上水道整備計画調査（2000年）」によれば、地下水位の年間変動パターンは、降雨の季節変動により影響されている。地下水位変動に対する降雨の

影響を除くために、乾季の観測水位データのみを利用して解析を行った。

さらに、近隣の私有井戸の揚水の影響を最小化するために、この分析は、私有井戸が稼働を休止した深夜のデータを利用して実施された。

2008年1月8日と9日の2日間の観測データが、1月9日の揚水フル稼働日と1月8日の約4時間の地下水の揚水の休止のものとして利用された。2008年1月8日と9日のSRWSA生産井の稼働状況が下表に、図3.12と図3.13に観測データの日変動パターンが示される。

SRWSA生産井の稼働状況は、以下のとおりである。

日時	稼働/非稼働時間	揚水量
2008年1月8日	フル稼働 (0:00, 7:00-23:00) 揚水休止 (2:00-5:00) 揚水量減少 (1:00, 6:00)	369 - 373 m <sup>3</sup> /時間 (合計量: 7,062 m <sup>3</sup> /日)
2008年1月9日	24時間: フル稼働	369 - 373 m <sup>3</sup> /時間 (合計量: 8,901 m <sup>3</sup> /日)

(注): フル稼働は、全ての生産井戸の稼働を、休止は、全ての生産井戸の休止を意味する。

以下の図に示すように、2日間の地下水水位の変動は、5 cm～8 cmの大きさで、朝(5:00-10:00)と夕方(17:00-19:00)に地下水水位の低下がある。地下水水位の変動は近隣の私有井戸によって生じていると考えられる。

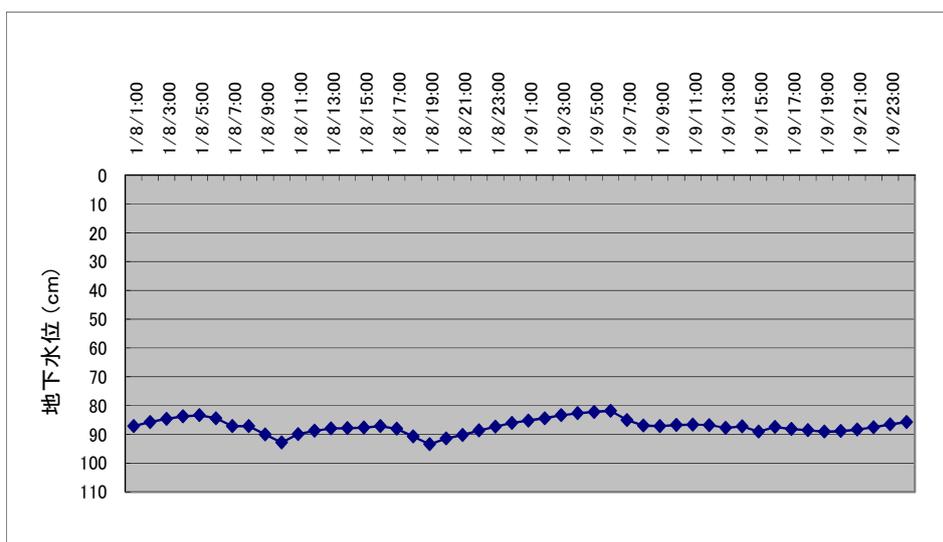


図 3.12 2008年1月8日と9日のWT-4観測井戸の地下水水位の日変動

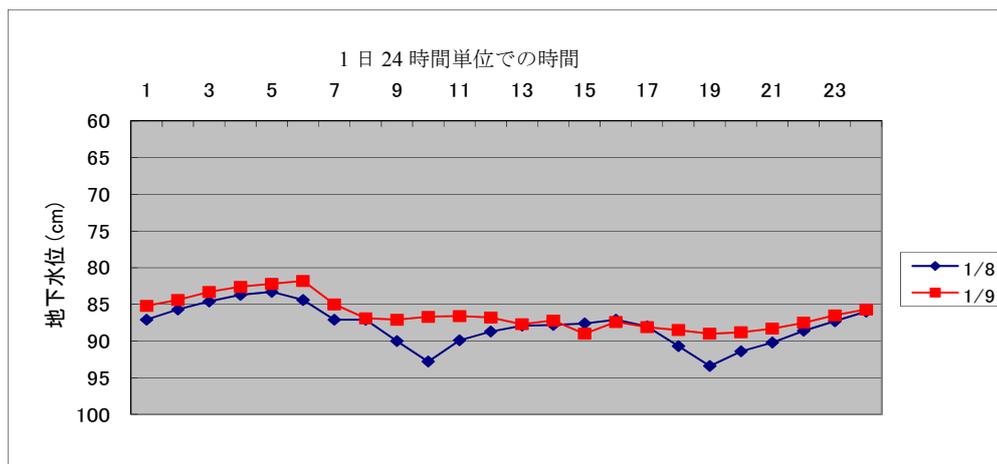


図 3.13 2008年1月8日と9日のWT-4観測井戸の地下水位の日変動比較

図 3.13 は、2008年1月8日と9日の2日間の24時間以内の地下水位の日変動の比較を示す。それらの日変動パターンは、以下の事柄を示している。

- 2008年1月8日のデータは、SRWSA 井戸が1:00から揚水を休止させたことを示す。2:00～5:00には、揚水は完全に休止した。5:00から揚水が再び開始された。しかしながら、地下水位の変動傾向は、SRWSAが24時間ポンプを稼働させた1月9日の地下水位の変動と同じである。この現象は、SRWSA 井戸がWT-4 井戸に影響を与えないことを示している。というのは、もしSRWSA 生産井が、WT-4 井戸に影響を与えているならば、1月9日の2:00～5:00までの時間に、その水位は1月8日の水位よりも低下するであろう。そのため、SRWSA 生産井の揚水の影響半径は、WT-4のモニターされた地下水位に負の影響を及ぼしていないと考えられる。
- 同様な傾向は、2007年12月14日～16日までのモニターデータで確認された。
- その結果、SRWSA 生産井から約2.6 km 離れて立地するWT-4 観測井戸で、SRWSA 井戸の揚水の影響は確認されなかった。

### (3) Khvein 浅井戸データの解析

SRWSA 生産井のポンプは、2010年5月7日と9日の深夜に約2時間一時的に休止された。SRWSA 井戸の休止期間中記録されたデータに基づいて、Khvein 浅井戸でのモニターされた水位に対する影響が分析された。

SRWSA 生産井の稼働状況は、以下の通りである。

日 時	稼働/非稼働時間	揚水量
2010年5月7日	フル稼働 (0:00, 5:00-23:00) 揚水休止 (2:00-3:00) 揚水量減少 (1:00, 4:00)	387-389 m <sup>3</sup> /時間 (合計量: 8,154 m <sup>3</sup> /日)
2010年5月8日	24時間: フル稼働	384-389 m <sup>3</sup> /時間 (合計量: 9,306 m <sup>3</sup> /日)
2010年5月9日	フル稼働 (0:00, 5:00-23:00) 揚水休止 (2:00-3:00) 揚水量減少 (1:00, 4:00)	386-389 m <sup>3</sup> /時間 (合計量: 8,106 m <sup>3</sup> /日)
2010年5月10日	24時間: フル稼働	386-389 m <sup>3</sup> /時間 (合計量: 9,285 m <sup>3</sup> /日)

(注): フル稼働は、全ての生産井戸の稼働を、休止は、全ての生産井戸の休止を意味する。

2010年5月8日と10日の24時間フル稼働と2010年5月7日と9日の2時間のSRWSA生産井の揚水の休止により、地下水位の変動パターンは、図3.14に示したように比較された。

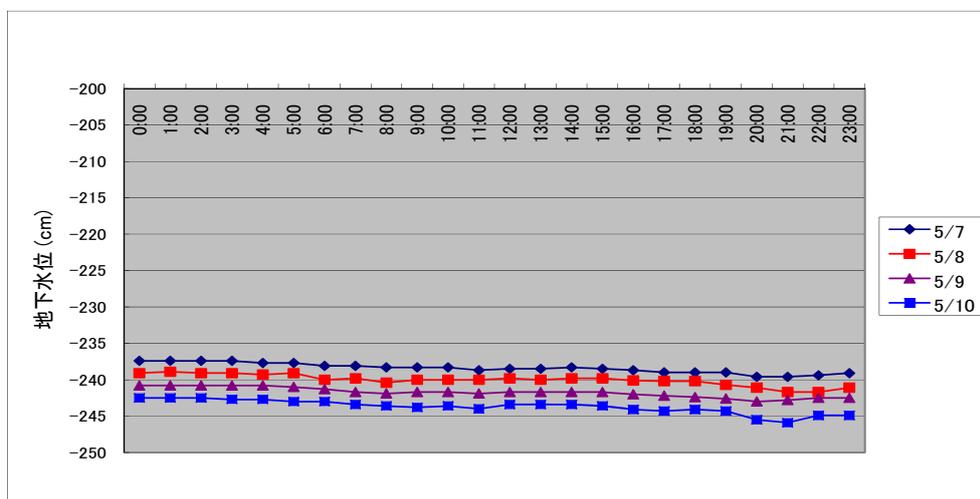


図 3.14 2010年1月7日と10日のKhvein観測浅井戸の地下水位の日変動比較

図3.14は、以下のことを示す。

- この期間中、記録されたデータは、乾季のために毎日1.7 cmずつ低下している。全てのSRWSA生産井は、2010年5月7日と9日の2:00~3:00までに2時間休止したが、地下水位は、上昇しなかった。これらの4日間の全地下水位は、同様な変動パターンを示している。
- SRWSA生産井がKhvein観測浅井戸に影響を与えたならば、2010年5月7日と9日の2:00~3:00までに記録されたデータに比べて低下するするだろう。実際のデータは、記録された水位がほとんど異なっていないことを示している。そのため、SRWSA生産井がKhvein観測浅井戸に影響を与えていないと考えられる。

## 第4章

### シェムリアップ地域の水文条件

## 第4章 シェムリアップ地域の水文条件

### 4-1 給水対象地区の河川流域

河川流域を明確にするため、SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, USNASA)による 90 m メッシュのデジタル標高モデルデータを基礎データとして利用した。GIS 水文ソフトが河川流域を描くために用られた。

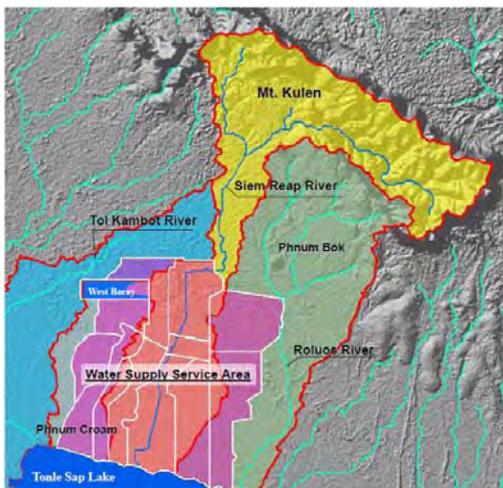


図 4.1 給水対象地域(紫/桃色の地域)及び関連河川流域

上図に示すように、給水対象地区の殆どは、西側に Tol Kambot 川流域の一部を、東側に Roluos 川流域の一部を含み、大部分は、シェムリアップ川流域から構成されている。



図 4.2 給水対象地区への涵養地域

上図に給水対象地区への地下水涵養地域を示す。給水地域への全地下水涵養域は、1,277 km<sup>2</sup>であり、そのうちの 552 km<sup>2</sup>は、給水区域に相当する。

## 4-2 気候条件

給水対象地区の水資源は、降水からの涵養、河川による流失、蒸発と蒸発散による消費、地下浸透及び地下水流出に区分される。水収支が河川流域の単位で解析される時、調査対象地域に他の流域からの流入はないために、降雨が唯一の地下水涵養成分となる。

シェムリアップ地域のような平坦な地域では、一般的に河川水と地下水間の交換水量は少ない。トンレサップ湖への流出する地下水量も少ない。従って、降雨量と蒸発量が、調査対象地域の水収支にとって最も重要な2つの成分である。

他の東南アジア諸国同様、シェムリアップ地域の降雨量は季節変動により特徴づけられる。以下の図でも分かるように、1年は明確に雨期・乾期に区分される。

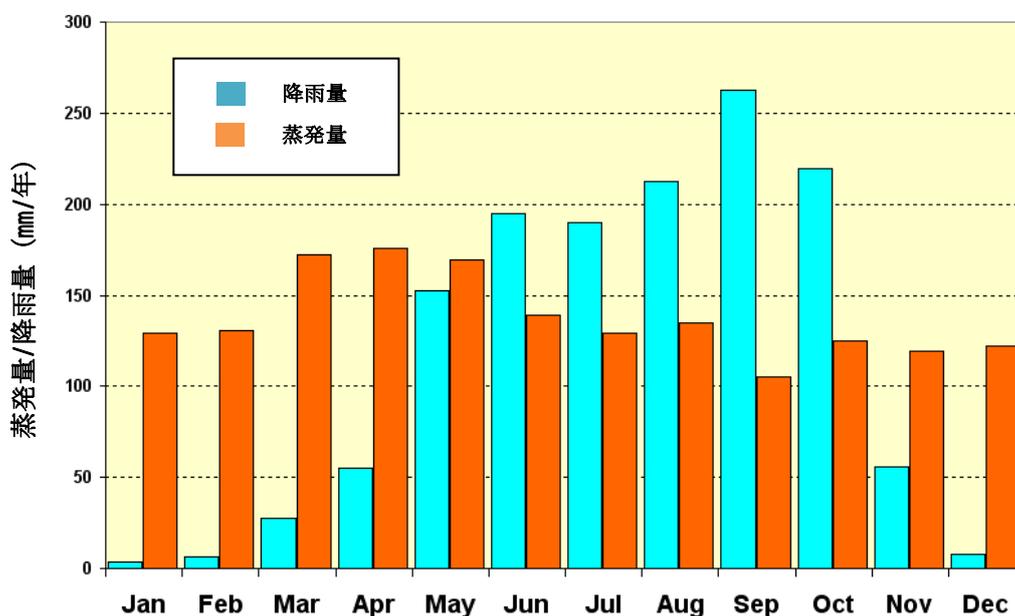


図 4.3 調査対象区域の月間降雨量及び蒸発量の分布

(注) 上図はシェムリアップ市気象観測所の観測結果（1988年～2008年）をまとめたものである

## 4-3 既存気象データ

降雨分析のため、5カ所の気象観測所の観測結果を、シェムリアップ市気象水文局（水資源省）から収集した。

## 4-4 既存地下水観測データ

### 4-4-1 既存観測井戸

「カンボジア国シェムリアップ市上水道整備計画調査（2000年）」により、調査区域内に8本の観測井戸が建設された。しかしながら、観測機器の故障、バッテリー電力不足その他の問題により、殆ど総ての井戸で比較的大きなデータ・エラーが発生した。そのため手動での水位測定が、自動観測結果の検定のために、SRWSAにより開始された。

#### 4-4-2 地下水観測結果の検討

##### (1) 観測井戸 WT-3

以下の図に WT-3 観測井戸から得られた生データを示す。欠落データと明らかな観測エラーを除き、定期的地下水水位変動が明確に示されている。

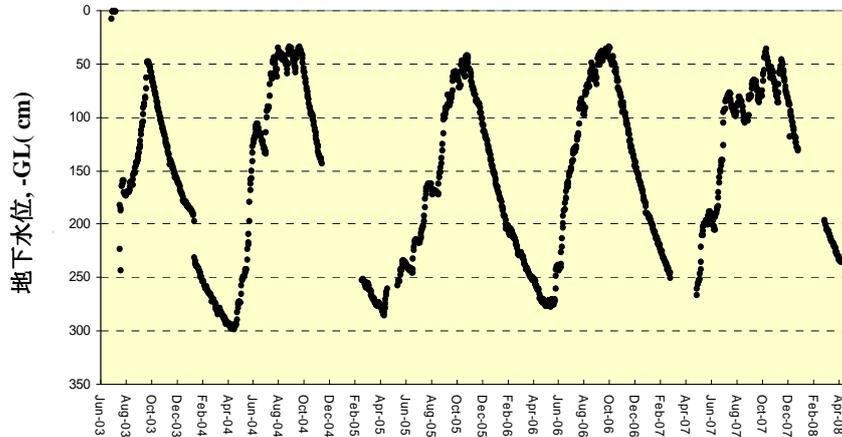


図 4.4 地下水水位変動観測結果 (WT-3)

(注) 上記グラフは観測井戸 WT-3 の生データを表したものである。生データに観測エラーが発見されたため、利用前にデータをチェックすることが必要である。チェック結果を表 4.5 に示す。

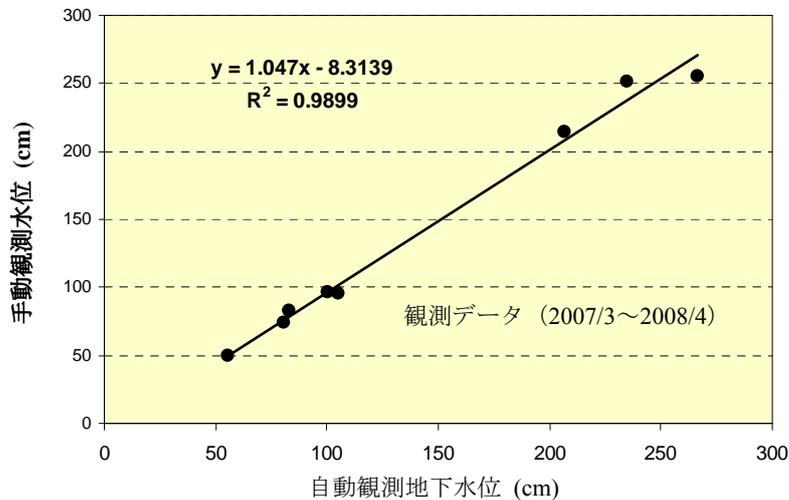


図 4.5 地下水水位自動観測データの精度検討結果 (WT-3)

上図の検討結果によれば、WT-3 水位観測機材は、モニター期間（2003 年から 2008 年）内の地下水変動を正確に記録していたと判断される。

##### (2) 観測井戸 WT-4

以下の図に WT-4 観測井戸から得られた生データを示す。WT-3 観測井戸データと比較すると、本井戸データは異常な地下水水位変動を示している。

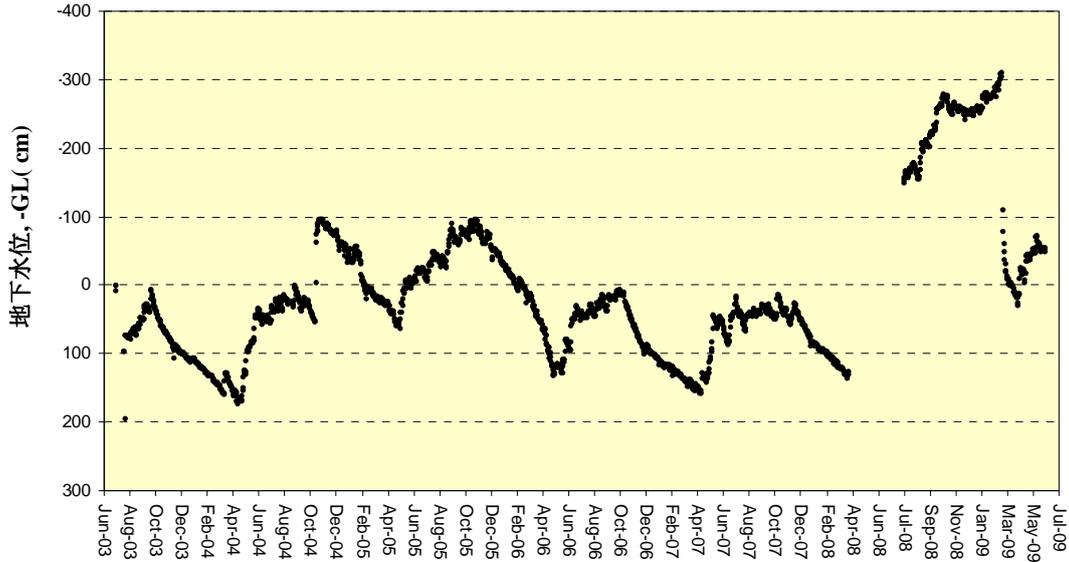


図 4.6 地下水位変動観測結果 (WT-4)

(注) 上記グラフは観測井戸 WT-4 の生データを表したものである。生データに観測エラーが発見されたため、利用前にデータをチェックすることが必要である。検査結果を表 4.5 に示す。

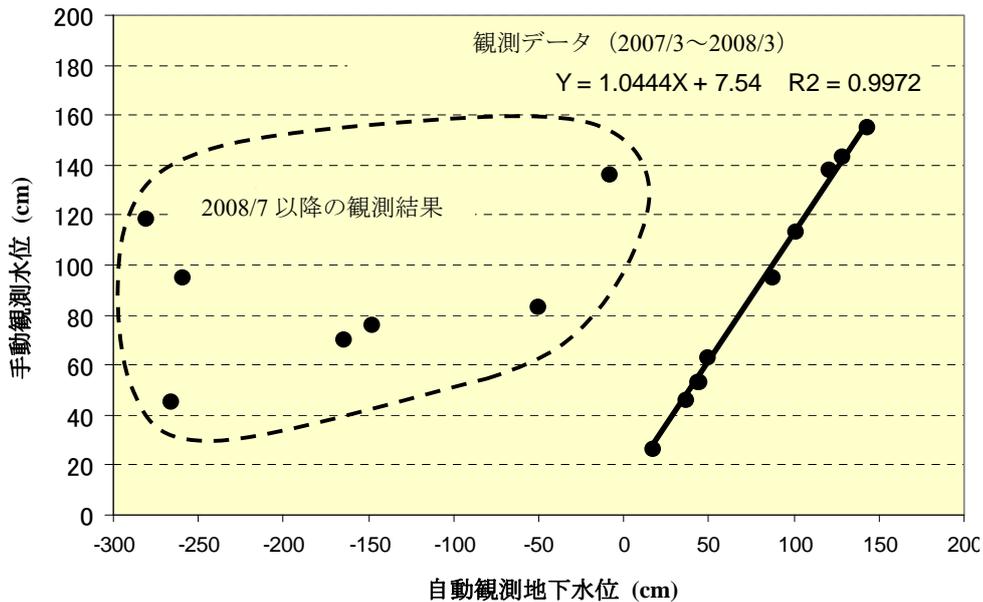


図 4.7 地下水位自動観測データの精度検討結果 (WT-4)

上図に示すように、検討結果は、WT-4 の信頼性の高い観測期間が 2007 年 3 月から 2008 年 3 月に限定されることを示している。

(3) 観測井戸 WT-5

以下の図に WT-5 観測井戸から得られた生データを示す。本データは 2 種類の水位変動パターンを表している。2005 年 11 月以前の変動は地表以下 2 m～7 m であったが、2006 年 3

月以降は 1 m～4 m になっている。

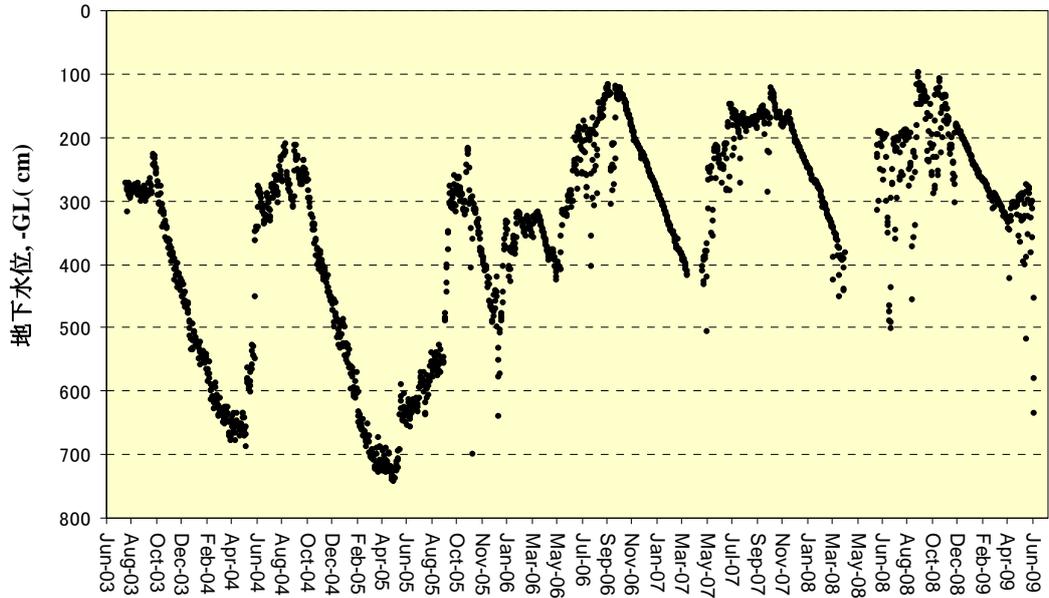


図 4.8 地下水位変動観測結果 (WT-5)

(注) 上記グラフは観測井戸 WT-5 の生データを表したものである。生データに観測エラーが発見されたため、利用前にデータをチェックすることが必要である。チェック結果を表 4.5 に示す。

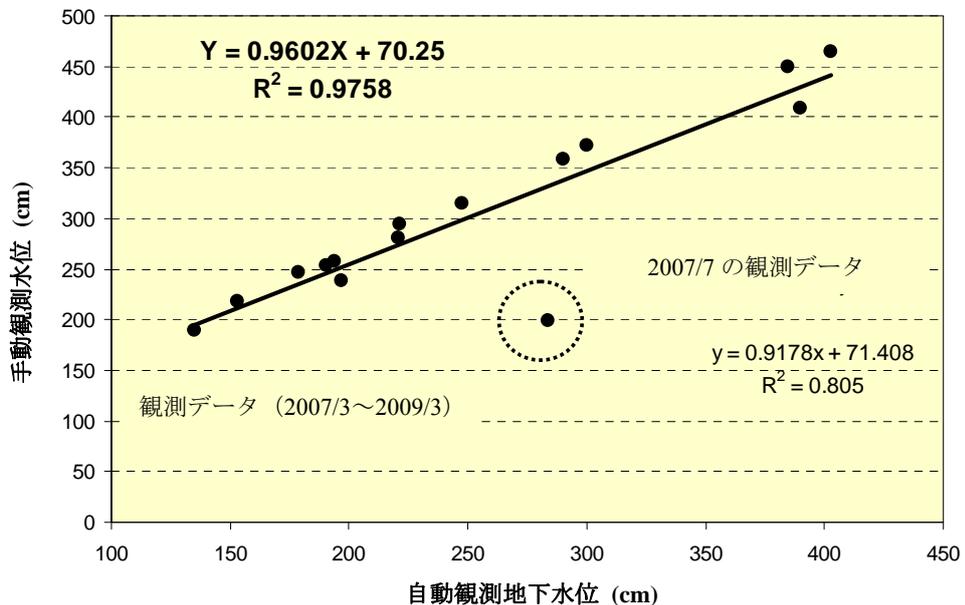


図 4.9 地下水位自動観測データの精度検討結果 (WT-5)

上図に示すように、検討結果は、WT-5 の信頼性の高い観測期間が 2007 年 3 月から 2009 年 3 月と考えられることを示している。しかしながら、この期間内の信頼度の高いデータが利用される場合であっても、間違っただータが含まれている可能性があるため、分析に際しては注意が必要である。

(4) 観測井戸 WT-6

以下の図に WT-6 観測井戸から得られた生データを示す。水位変動は地表上 9 m～地表下 3 m であったが、地表以上 9 m のデータは明らかに間違いである。

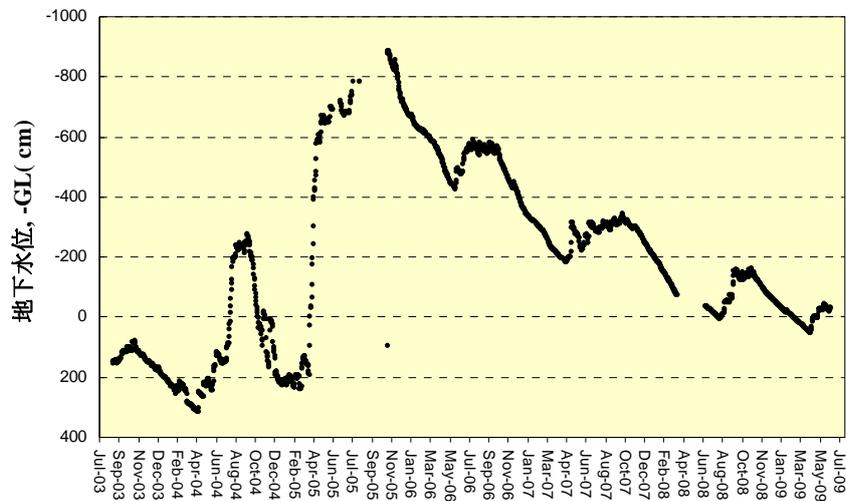


図 4.10 地下水位変動観測結果 (WT-6)

(注) 上記グラフは観測井戸 WT-6 の生データを表したものである。生データに観測エラーが発見されたため、利用前にデータをチェックすることが必要である。検査結果を表 4.5 に示す。

下図に示すように、検査結果は、WT-6 の信頼性の高い観測期間が 2008 年 7 月から 2009 年 6 月に限定されることを示している。

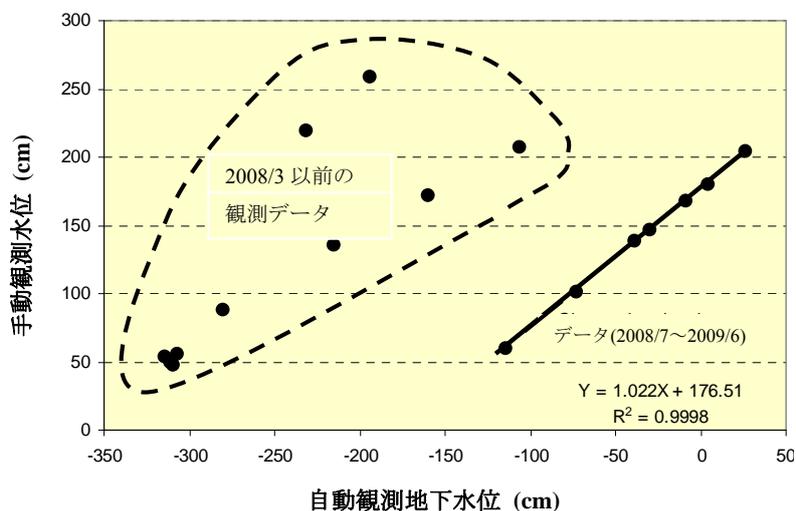


図 4.11 地下水位自動観測データの精度検査結果 (WT-6)

(5) 観測井戸 WT-7

以下の図に WT-7 観測井戸から得られた生データを示す。本井戸の地下水位は、時折、地表以上に上昇することがある。しかしながら、図 4.13 の現場写真は 2009 年 9 月 11 日に撮影されたものであるが、この時点の地下水位は地表以上 10 cm であった。さらに、井戸ケー

シング下部に残っている泥の跡から、過去地下水位が地表 20 cm 程度まで上昇したことが分かる。従って、観測データは正確に地下水位を記録したと判断できる。以下の図は、明らかなエラー・データを除けば比較的規則正しい水位変動パターンを示している。

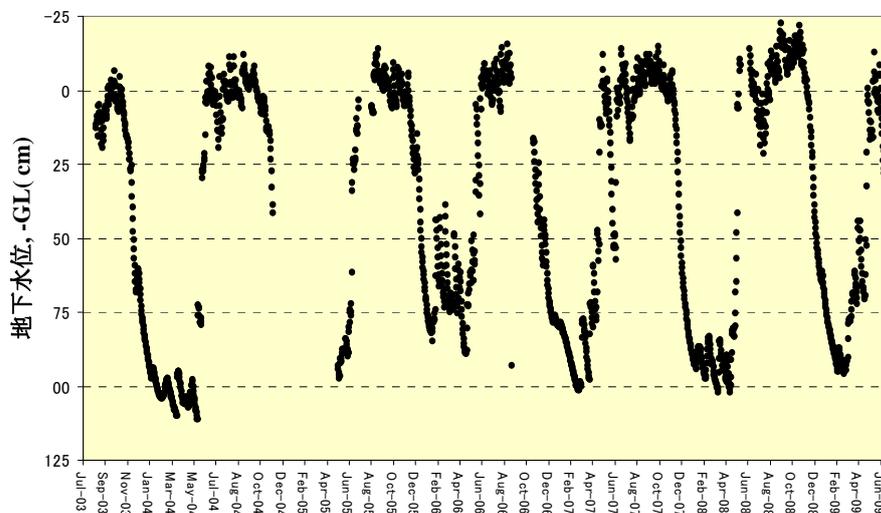


図 4.12 地下水位変動観測結果 (WT-7)

注) 上記グラフは観測井戸 WT-7 の生データを表したものである。生データに観測エラーが発見されたため、利用前にデータをチェックすることが必要である。検査結果を表 4.5 に示す。



図 4.13 観測井戸 WT-7 の観測室内写真

以下の図で分かるように、同時期に観測された自動観測と手衝動観測の 2 種類のデータ間には高い相関性がある。図 4.12 に示すとおり、本井戸の水位変動は規則的であるため、観測データの殆どは利用可能と考えられる。

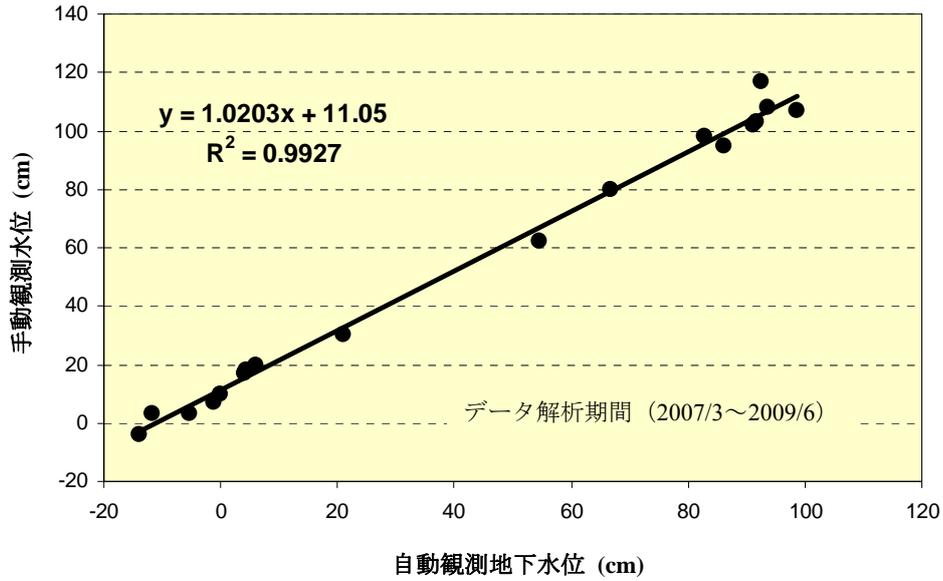


図 4.14 地下水位自動観測データの精度検討結果 (WT-7)

(6) 観測井戸 WT-8

以下の図に WT-8 観測井戸から得られた生データを示す。本サイトに自動水位観測装置が設置されたのは 2003 年であった。しかしながら、設置 1 年以内に装置が消失したため、利用できるデータは、2003 年 8 月から 2004 年 1 月までの 5 ヶ月間分のみである。

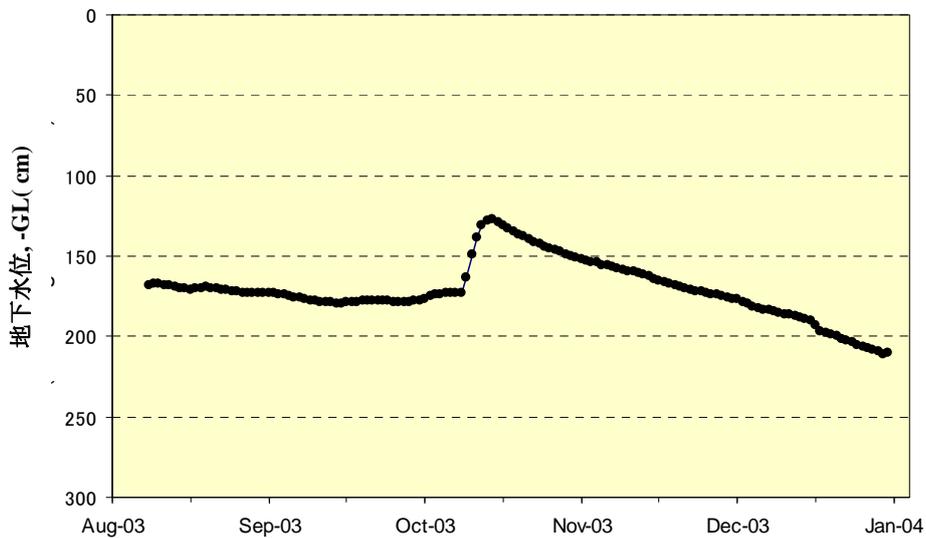


図 4.15 地下水位変動観測結果 (WT-8)

(注) 上記グラフは観測井戸 WT-8 の生データを表したものである。生データに観測エラーが発見されたため、利用前にデータを検査することが必要である。検査結果を表 4.5 に示す。

(7) 地下水・地盤沈下観測井戸 LTa

観測サイト LTa では、地下水位と地盤沈下の観測を行う。同サイトの 2 本の井戸は、それぞれ浅い帯水層と深い帯水層における地下水位および地盤沈下の観測を行う。以下の図は

観測サイト LTa における浅い帯水層と深い帯水層における地下水位観測生データである。

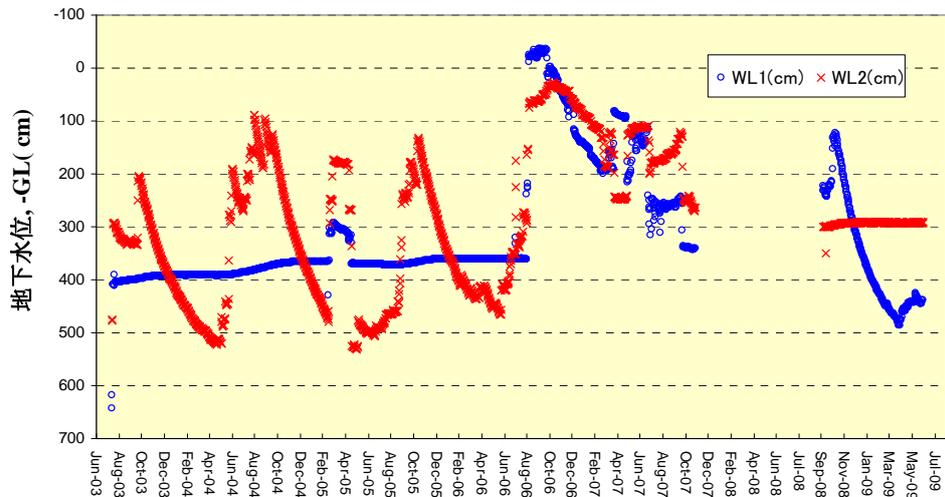


図 4.16 地下水位変動観測結果 (LTa)

(注) 上記グラフは観測サイト LTa の井戸 (2 本) の観測生データを表したものである。生データに観測エラーが発見されたため、利用前にデータを検査することが必要である。検査結果を表 4.5 に示す。

2003 年 8 月から 2006 年 8 月までの観測結果は、浅い帯水層と深い帯水層における地下水位変動の違いを明確かつ適切に示している。しかしながら、2006 年 8 月から 2008 年 9 月の期間は、約 1 年分のデータが記録されておらず、解析が困難である。データがない期間の後、浅い帯水層と深い帯水層の地下水位データは、それ以前に比べ全く対称的になっている。これはセンサーと観測機器が逆に接続されたからであろうと推測できる。

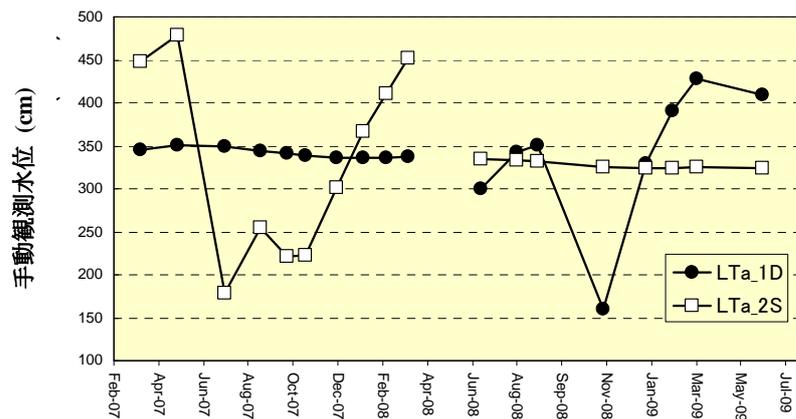


図 4.17 観測サイト LTa での地下水位変動手動観測結果

上図から分かるように、手動計測結果は、自動計測結果と同じ結果である。即ち、2008 年から水位変動パターンが全く異なっている。この結果に対する唯一考えられる理由は、データなしの期間 (2008 年 3 月から 8 月) の後、手動観測記録シートに異なる井戸番号が書き込まれたためであろうということである。

データを再度整理したとしても、以下の図に示すように、2セットの水位変動データには全く相関関係が見られない。従って、観測サイト LTa の地下水位モニタリング・データは、地下水解析には利用できないと判断される。

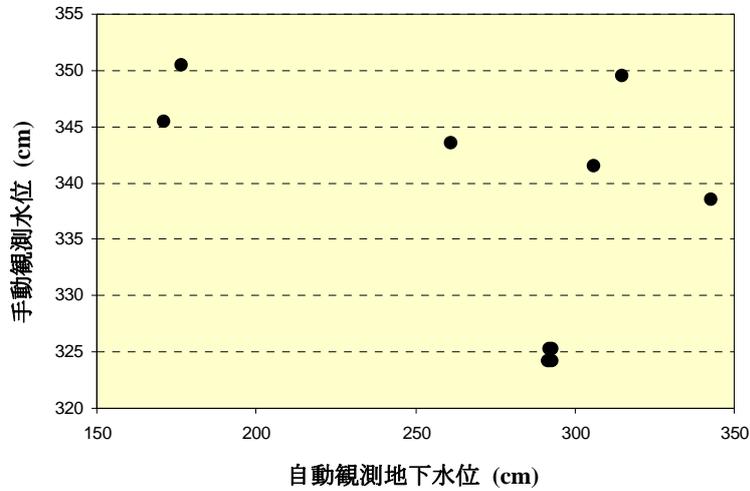


図 4.18 地下水位自動観測データの精度検討結果 (LTa; 深い帯水層)

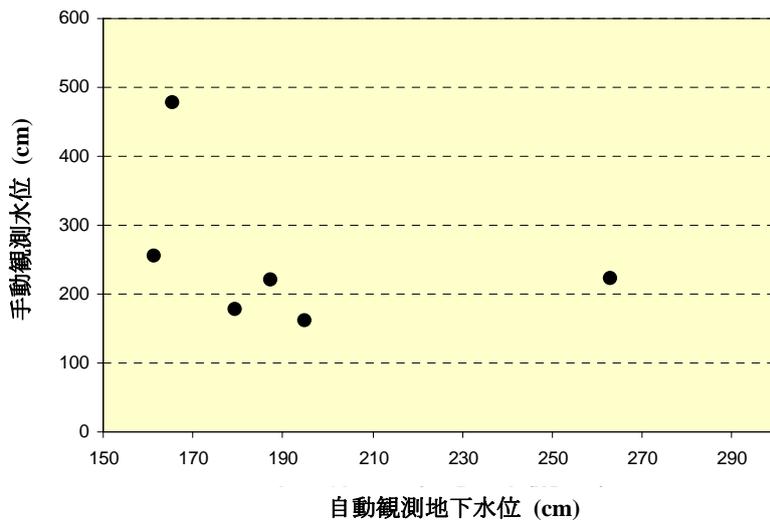


図 4.19 地下水位自動観測データの精度検討結果 (LTa; 浅い帯水層)

(8) 地下水変動・地盤沈下観測井戸 LTb

LTb のサイトに、2本の井戸が、浅い帯水層と深い帯水層の地下水位と地盤沈下観測をするために建設された。以下の図は、同サイトでの浅い帯水層と深い帯水層の地下水位観測データである。

2つの帯水層での地下水位の観測結果の信頼性を確認するための図 4.21、4.22 において、ともに比較的高い相関が見られる。LTb サイトの全データは、地下水解析のために利用できる信頼度を持っていると考えられる。

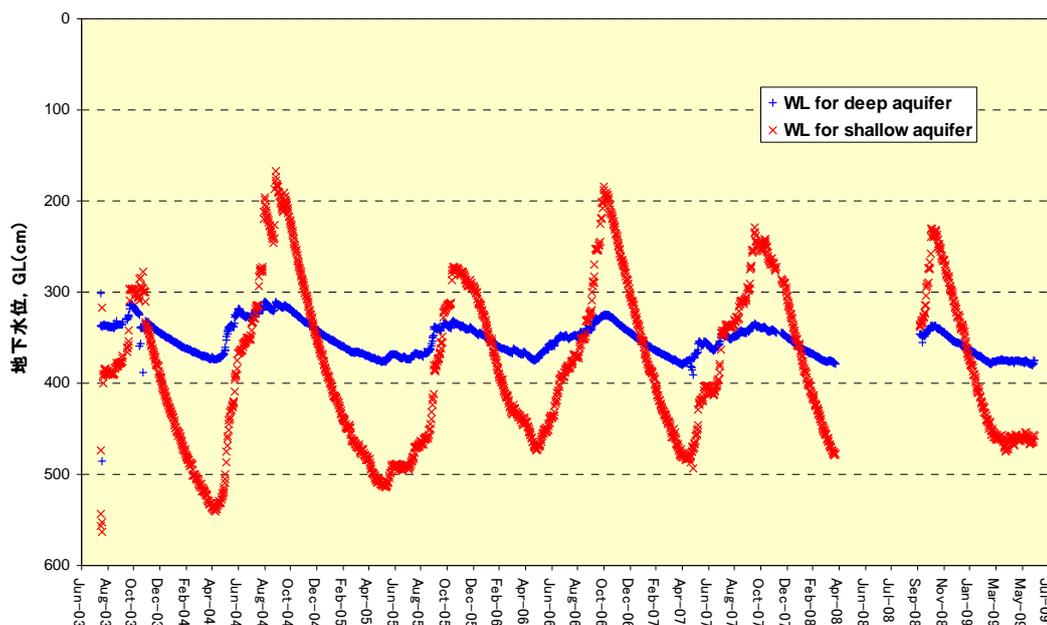


図 4.20 地下水位変動観測結果 (LTb)

(注) 上記グラフは観測サイト LTb の井戸 (2 本) の観測生データを表したものである。生データに観測エラーが発見されたため、利用前にデータを検査することが必要である。検査結果を表 4.5 に示す。

上図に示した地下水変動観測結果を検討し、以下の結論に至った。

### 1) 地下水位変動パターン

浅い帯水層と深い帯水層の地下水が、雨季に上昇し、乾季に下降するという類似の水位変動パターンをもっている。

### 2) 2つの帯水層の水位の違い

2つの帯水層の地下水位は、全観測期間を通じて殆ど異なっている。明らかなのは、深い帯水層に比べ浅い帯水層の水位が雨季には高く、乾季には低いことである。

水は、水頭の高い場所から低い場所に流動する。従って、地下水が、もし浅い帯水層と深い帯水層の間で流動するならば、地下水流の方向は、次のように変化するはずである：1) 雨季には浅い帯水層から深い帯水層へ下方向に流動し、2) 乾季には深い帯水層から浅い帯水層へ上方向に流動する。

### 3) 水位変動範囲

図 4.20 に示したように、全観測期間にわたり、深い帯水層の水位は、浅い帯水層のものと異なる。深い帯水層の水位は、決して、浅い帯水層の最高・最低水位に到達することはない。このことは、浅い帯水層と深い帯水層が、異なる帯水層システムに属していることを示している。

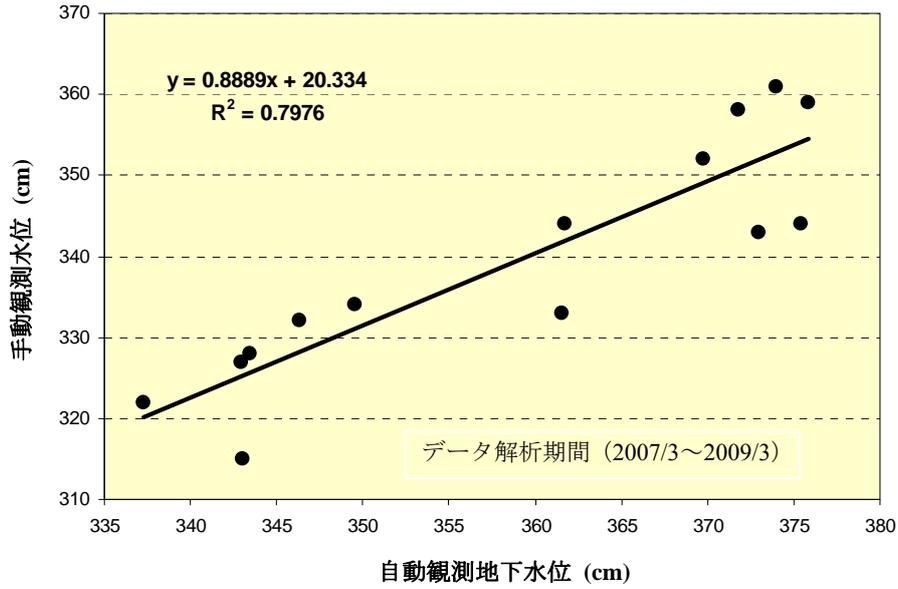


図 4.21 地下水位自動観測データの精度検討結果 (LTb: 深い帯水層)

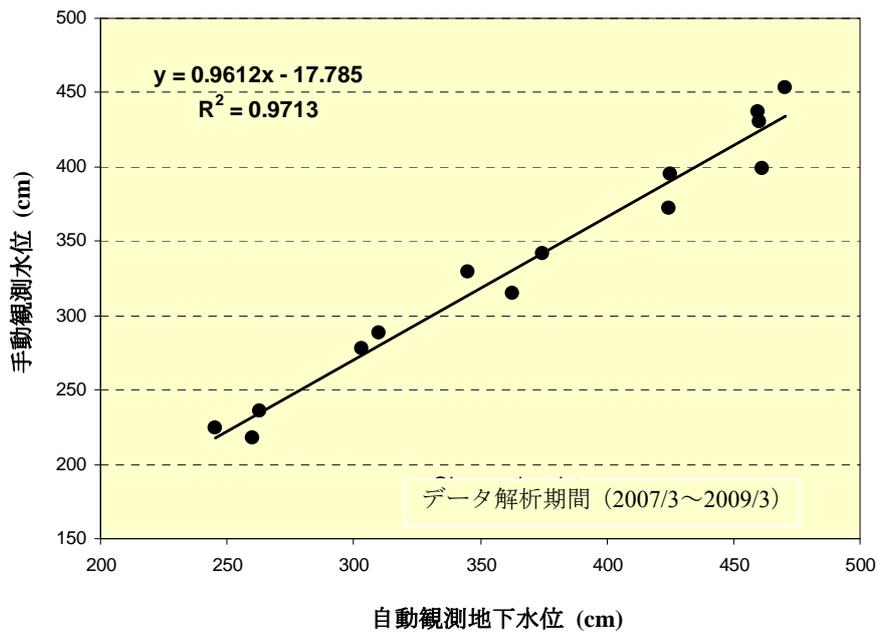


図 4.22 地下水位自動観測データの精度検討結果 (LTb; 浅い帯水層)

#### 4-4-3 地盤沈下のモニタリング結果

##### (1) 観測サイト LTa での地盤沈下の観測結果

以下の図は観測サイト LTa の、浅い帯水層・深い帯水層における地盤沈下観測結果を示す。

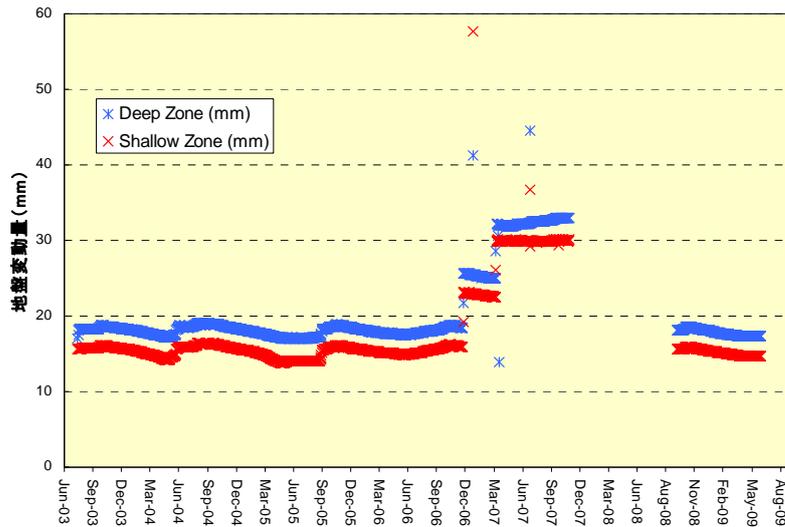


図 4.23 LTa 観測井戸での地盤変動の観測結果

明らかにエラーとわかる 2006 年 11 月～2008 年 7 月を除く観測結果から、以下の事実が判明する。

地盤沈下は浅い帯水層・深い帯水層双方で確認された。

双方の帯水層での地盤沈下変動パターンは、ほぼ同じである。

地盤沈下変動パターンは地下水位変動パターンと一致し、季節変化に従って変化する。

季節的な変動の繰り返しでの地盤沈下傾向を確認するために、月平均沈下量を計算した。下表に示すように、利用できるデータによる検討は、深い帯水層の最大地盤沈下量が、 $18.96 - 17.06 = 1.9$  (mm) という結果となった。

表 4.1 観測サイト LTa での深い帯水層の月別地盤変位計測値の集計表 (mm)

月	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	最大	最小	平均
1月	-	18.21	18.12	18.20	-	-	18.03	18.21	18.03	18.15
2月	-	17.99	17.88	17.98	-	-	17.76	17.99	17.76	17.92
3月	-	17.76	17.64	17.80	-	-	17.57	17.80	17.57	17.71
4月	-	17.50	17.30	17.72	-	-	-	17.72	17.30	17.56
5月	-	17.24	17.06	17.61	-	-	17.33	17.61	17.06	17.37
6月	-	18.07	17.09	17.59	-	-	17.37	18.07	17.09	17.64
7月	-	18.55	17.06	17.77	-	-	-	18.55	17.06	17.98
8月	18.14	18.87	17.11	18.01	-	-	-	18.87	17.11	18.20
9月	18.26	18.96	17.82	18.21	-	-	-	18.96	17.82	18.44
10月	18.49	18.91	18.59	18.67	-	18.21	-	18.91	18.21	18.63
11月	18.60	18.64	18.71	18.60	-	18.52	-	18.71	18.52	18.63
12月	18.42	18.38	18.47	-	-	18.27	-	18.47	18.27	18.40
最大	18.60	18.96	18.71	18.67	-	18.52	18.03	18.96		
最小	18.14	17.24	17.06	17.59	-	18.21	17.33		17.06	
平均	18.38	18.26	17.74	18.01	-	18.33	17.61			18.02

一方、下表に示すように、浅い帯水層の最大地盤沈下量は、 $16.31 - 13.86 = 2.45$  (mm) である。

表 4.2 観測サイト LTa での浅い帯水層の月別地盤変位計測値の集計表(mm)

月	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	最大	最小	平均
1月	-	15.59	15.47	15.56	-	-	15.37	15.59	15.37	15.52
2月	-	15.31	15.24	15.36	-	-	15.20	15.36	15.20	15.29
3月	-	15.00	14.85	15.22	-	-	15.00	15.22	14.85	15.06
4月	-	14.63	14.24	15.11	-	-	-	15.11	14.24	14.77
5月	-	14.30	13.86	14.96	-	-	14.69	14.96	13.86	14.55
6月	-	15.37	14.07	14.93	-	-	14.72	15.37	14.07	14.89
7月	-	15.89	14.04	15.16	-	-	-	15.89	14.04	15.25
8月	15.69	16.20	14.01	15.43	-	-	-	16.20	14.01	15.51
9月	15.76	16.31	14.96	15.65	-	-	-	16.31	14.96	15.80
10月	15.96	16.26	15.89	16.09	-	15.64	-	16.26	15.64	16.02
11月	15.99	16.00	16.03	16.02	-	15.88	-	16.03	15.88	15.99
12月	15.78	15.72	15.78	-	-	15.60	-	15.78	15.60	15.73
最大	15.99	16.31	16.03	16.09	-	15.88	15.37	16.31		
最小	15.69	14.30	13.86	14.93	-	15.60	14.69		13.86	
平均	15.84	15.53	14.79	15.41	-	15.76	15.00			15.33

上記 2 表を比較すると、観測結果が異常である。同じ場所で、地盤沈下が浅い帯水層と深い帯水層の両方で観測される時、一般的に、深い帯水層の地盤沈下量が浅い帯水層のそれより大きいか、少なくとも浅い帯水層と同じになるはずであるからである。

この現象については、観測機器精度がこのように小さな地盤沈下を正確に観測できるほど高くなかったことによる可能性がある。

下図に LTa サイトでの年間平均地盤沈下量を示す。僅か 6 年間の観測期間では、地盤沈下の兆しは確認できて、実際に地盤沈下が生じたのかを結論づけるのは困難である

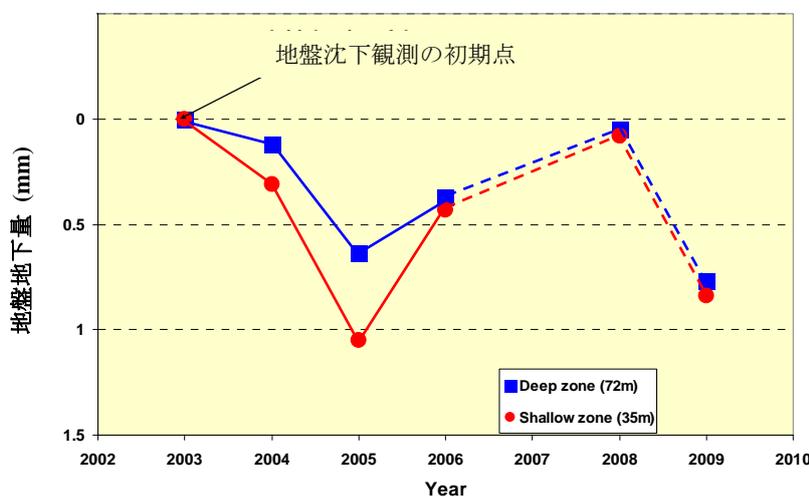


図 4.24 LTa 観測井戸での年間平均地盤沈下量

(2) LTb 観測井戸での地盤沈下の観測結果

以下の図は、観測サイト LTb における地盤沈下観測結果である。LTb での観測は 2003 年 7 月に開始され、2009 年 7 月までの 6 年間、観測データが収集された。図に示すように、観測エラーおよび 2008 年 3 月から 9 月までの 6 ヶ月のデータ欠損を除けば、地盤沈下は適切に観測されたと判断される。

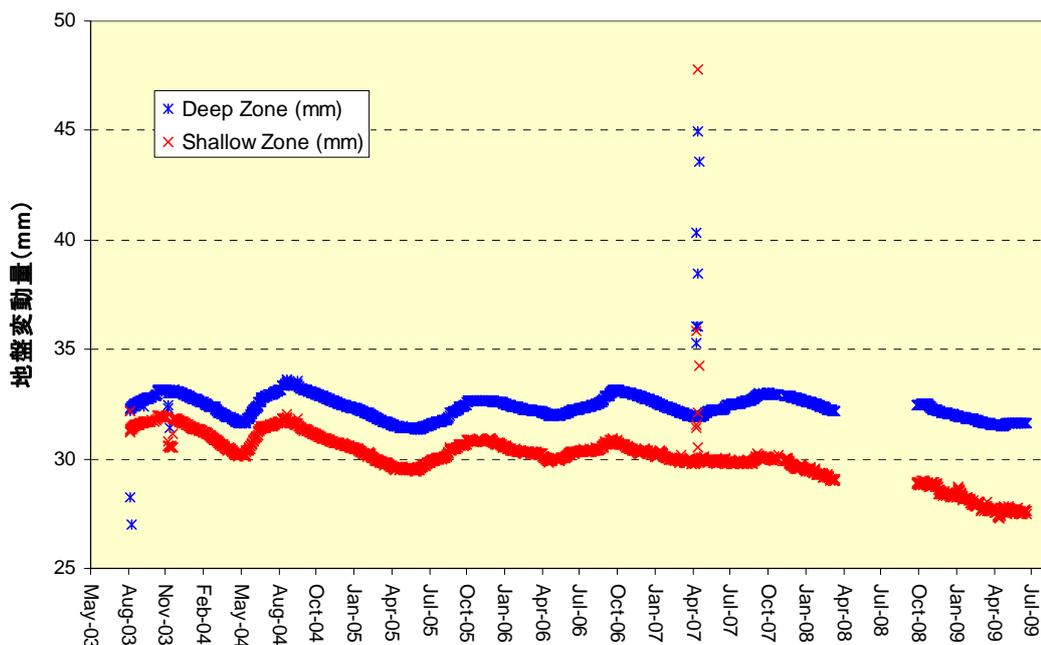


図 4.25 LTb 観測井戸での地盤変動の観測結果

深い帯水層・浅い帯水層での月平均地盤計測値をそれぞれ表 4.3 と表 4.4 に示す。

表 4.3 観測サイト LTb での深い帯水層の月別地盤変位計測値の集計表 (mm)

月	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	最大	最小	平均
1月	-	32.71	32.39	32.56	32.62	32.62	31.93	32.71	31.93	32.51
2月	-	32.45	32.20	32.40	32.37	32.43	31.80	32.45	31.80	32.30
3月	-	32.09	31.94	32.26	32.16	32.23	31.65	32.26	31.65	32.08
4月	-	31.79	31.66	32.16	31.97	-	31.55	32.16	31.55	31.88
5月	-	31.81	31.47	32.01	32.07	-	31.62	32.07	31.47	31.84
6月	-	32.56	31.40	32.08	32.24	-	31.62	32.56	31.40	32.08
7月	-	32.99	31.47	32.27	32.45	-	-	32.99	31.47	32.43
8月	32.44	33.36	31.69	32.41	32.59	-	-	33.36	31.69	32.64
9月	32.70	33.31	32.01	32.71	32.84	-	-	33.31	32.01	32.81
10月	33.07	33.06	32.44	33.11	32.97	32.49	-	33.11	32.44	32.89
11月	32.99	32.84	32.68	33.00	32.91	32.28	-	33.00	32.28	32.81
12月	32.97	32.59	32.66	32.83	32.80	32.09	-	32.97	32.09	32.70
最大	33.07	33.36	32.68	33.11	32.97	32.62	31.93	33.36		
最小	32.44	31.79	31.40	32.01	31.97	32.09	31.55		31.40	
平均	32.83	32.62	32.01	32.49	22.49	32.36	31.71			32.37

表 4.4 観測サイト LTb での浅い帯水層の月別地盤変位計測値の集計表 (mm)

月	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	最大	最小	平均
1月	-	31.37	30.57	30.62	30.23	29.53	28.35	31.37	38.35	30.29
2月	-	31.10	30.32	30.39	30.09	29.31	28.02	31.10	28.02	30.05
3月	-	30.67	30.04	30.30	29.94	29.11	27.76	30.67	27.76	29.78
4月	-	30.30	29.77	30.20	30.01	-	27.59	30.30	27.59	29.70
5月	-	30.37	29.57	29.98	29.96	-	27.64	30.37	27.64	29.65
6月	-	31.22	29.52	30.10	29.89	-	27.58	31.22	27.58	29.92
7月	-	31.56	29.71	30.32	29.85	-	-	31.56	29.71	30.60
8月	31.47	31.75	30.00	30.39	29.86	-	-	31.75	29.86	30.87
9月	31.67	31.52	30.33	30.59	29.99	-	-	31.67	29.99	30.96
10月	31.89	31.22	30.67	30.77	30.01	28.88	-	31.89	28.88	30.76
11月	31.29	30.95	30.84	30.51	29.98	28.75	-	31.29	28.75	30.52
12月	31.66	30.74	30.82	30.34	29.67	28.39	-	31.66	28.39	30.47
最大	31.89	31.75	30.84	30.77	30.23	29.53	28.35	31.89		
最小	31.29	30.30	29.52	29.98	29.67	28.39	27.58		27.58	
平均	31.60	31.06	30.18	30.38	29.96	29.00	27.82			30.12

図 4.26 に LTb での 6 年間における地盤沈下量の経年的変化を示した。地盤沈下観測値について、深い帯水層の地盤沈下量が浅い帯水層よりも小さいために、正しい測定値とは考えにくく、その原因として、LTa サイトの説明でも記述したように、測定機械の精度が低いことを可能性として挙げた。機械の精度と現場の状況から判断すると明らかに地盤地下が発生しているとは認められないが、今後も継続して調査をしていくことが必要である。

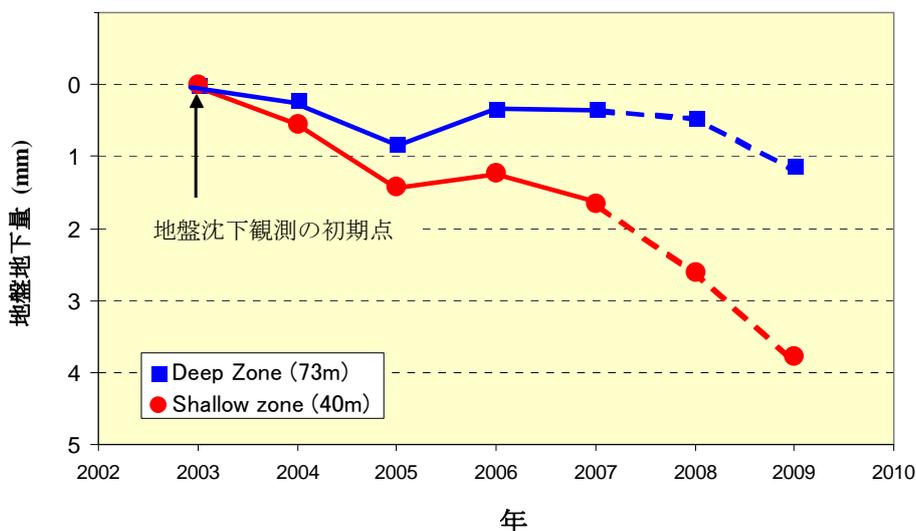


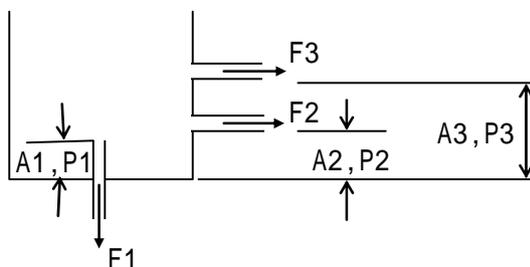
図 4.26 観測サイト LTb での年間平均地盤沈下量

#### 4-5 地下水涵養解析

##### 4-5-1 データの利用可能性の検討

降雨量と地下水涵養量との関係は、地形、降雨発生場所から河川までの距離、地質、土壌の種類、気候（蒸発・湿度）、土地利用、地下水位の深さ等の自然条件によりコントロールされている。しかしながら、日別単位での全てのこれらのパラメーターについて、十分な値を得ることは、現実的に不可能である。

多くの地下水涵養解析方法のうち、降水量、蒸発量や地下水位の変動に直接リンクさせることにより、相対的に高い精度が得られるという理由から、タンクモデルが実用的な手法と考えられる。降雨量・蒸発量が、タンクモデルの地下水変動に直接連動している場合、地下水涵養量・消費量は、全ての関連ファクターを包括的に関連させ、算出できる。タンクモデルの基礎的概念図を以下に示す。



- A1: 地下水涵養量が発生する最小降雨量
- A2: 地表流出が発生する最小降雨量
- A3: 地表流ピークが発生する最小降雨量
- F1: タンクから地下水涵養への出口
- F2: タンクから地表流出への出口
- F3: タンクから地表流ピークへの出口
- P1: タンクによる地下水涵養の流出係数
- P2: タンクによる地表流出の流出係数
- P3: タンクによる地表流ピークの流出係数

図 4.27 タンクモデル概念

気象観測所と地下水観測サイトの位置関係を下図に示す。

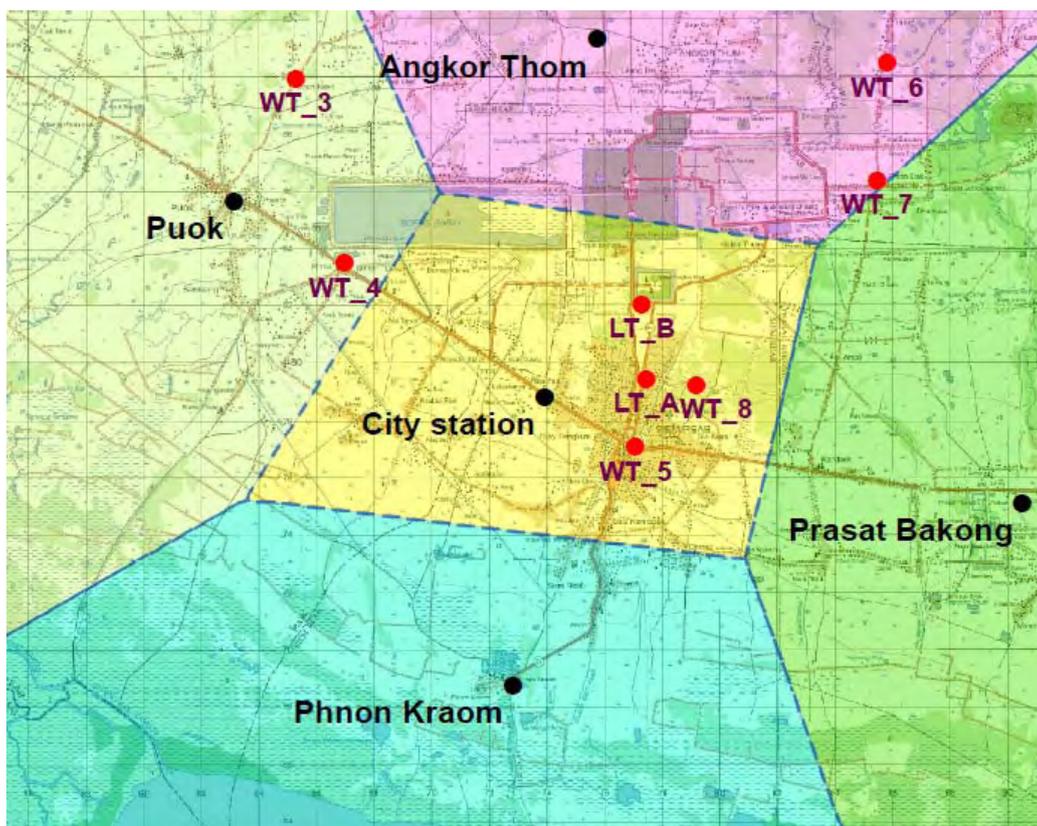


図 4.28 調査対象地域の地下水位観測井戸サイト及び気象観測所の位置

以下の表にデータ利用可能性の検討結果が示される。

表 4.5 タンクモデル構築のために利用可能なデータの検討結果

WL_station	W_Duration	Rain_station	R_Duration	Cal_Duration
WT-3	2003年8月-2008年4月	Puok	2003年3月-2008年12月	2004年1月-2008年4月
WT-4	2007年3月-2008年3月	Puok		2007年3月-2008年3月
WT-5	2007年3月-2009年3月	City	1988年1月-2008年12月	2007年5月-2008年12月
WT-6	2008年7月-2009年6月	Angkor Thom	2000年7月-2008年12月	2008年7月-2008年12月
WT-7	2003年8月-2009年1月	Angkor Thom Prasat Bakong		2003年9月-2008年12月
WT-8	-	City	1988年1月-2008年12月	-
LTa	-	City		-
LTb	2003年9月-2009年6月	City		2003年9月-2008年12月

WL\_Station : 地下水位観測井戸コード

W\_Duration : 手動観測結果から検討された信頼性の高い井戸水位データ観測期間

Rain\_Station : 気象観測所名称

R\_Duration : 気象観測所の観測期間

Cal\_Duration : 地下水位・気候データともにタンクモデルに利用可能な期間

4-5-2 各観測サイトの地下水涵養計算結果

図 4.29 から図 4.34 は、表 4.5 に記載された全地下水位観測場所で得られた水位データに対し、タンクモデルによりシミュレーションを行った結果である。

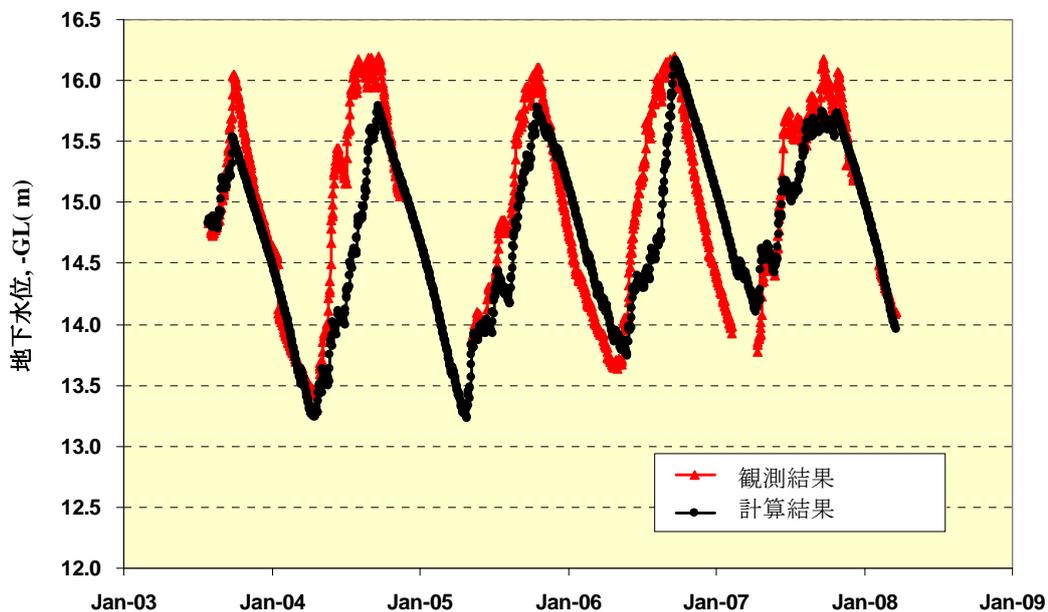


図 4.29 タンクモデルによる地下水位シミュレーション結果 (WT-3)

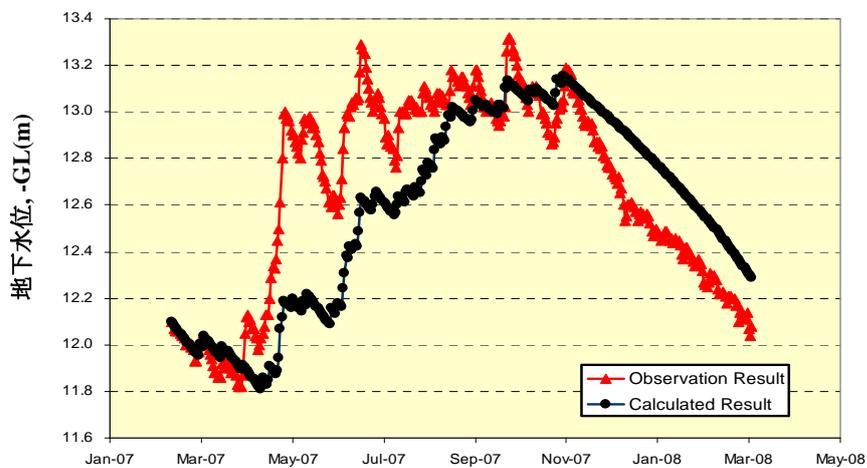


図 4.30 タンクモデルによる地下水位シミュレーション結果 (WT-4)

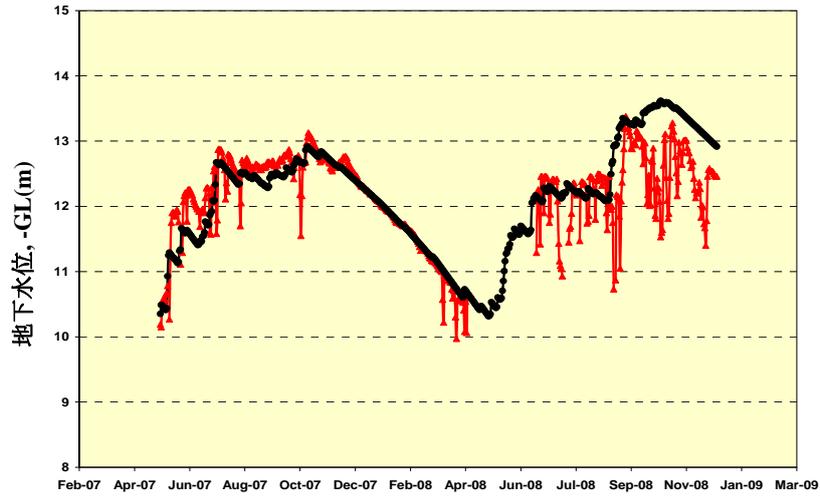


図 4.31 タンクモデルによる地下水位シミュレーション結果 (WT-5)

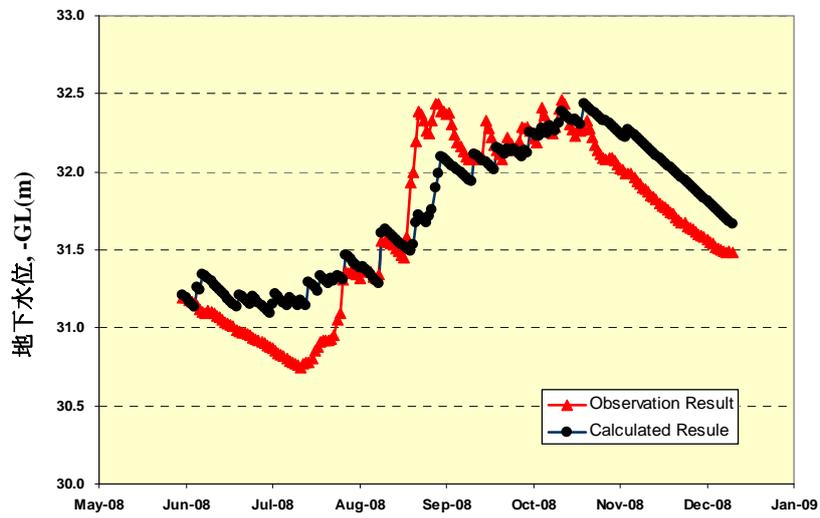


図 4.32 タンクモデルによる地下水位シミュレーション結果 (WT-6)

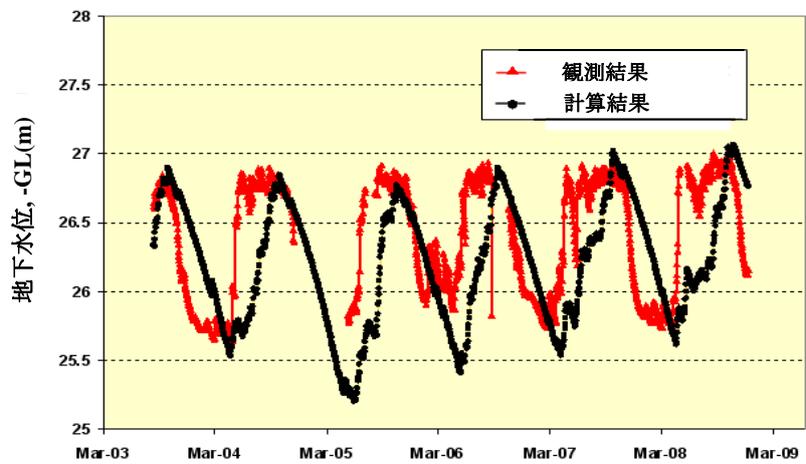


図 4.33 タンクモデルによる地下水位シミュレーション結果 (WT-7)

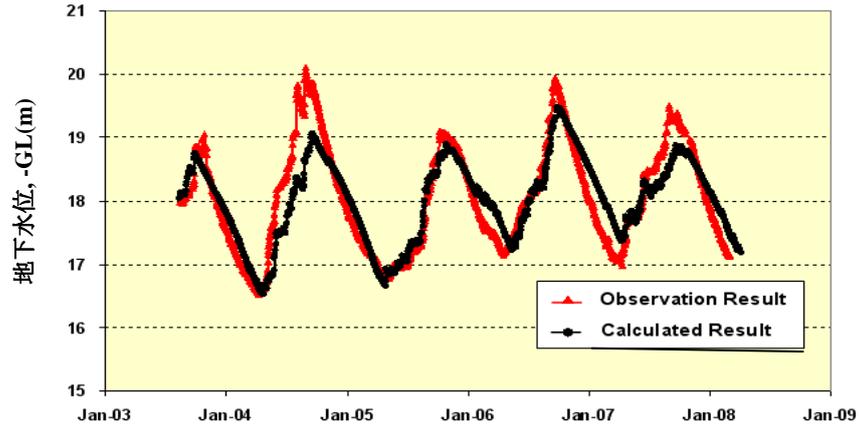


図 4.34 タンクモデルによる地下水位シミュレーション結果 (LTb)

4-5-3 地下水涵養計算のまとめ

地下水涵養計算結果を以下の2つの表にまとめた。

表 4.6 各観測所、月・年平均地下水涵養量 (mm)

月	WT-3	WT-4	WT-5	WT-6	WT-7(1)	WT-7(2)	LTb
1月	0.0	0.0	1.0	-	0.0	0.0	0.3
2月	0.0	0.0	2.1	-	0.0	0.0	4.3
3月	6.4	13.9	2.5	-	1.0	6.5	8.5
4月	20.0	12.1	7.1	-	4.0	6.4	13.6
5月	74.4	82.4	17.1	-	28.0	31.8	56.8
6月	70.8	54.2	18.5	38.2	38.0	39.8	60.7
7月	71.1	57.8	13.6	55.0	24.0	51.0	56.6
8月	59.7	56.3	13.8	120.1	55.0	35.1	40.6
9月	93.6	36.6	31.4	115.8	55.0	60.5	86.8
10月	59.2	33.8	25.8	91.8	47.0	37.0	61.1
11月	12.4	20.1	6.1	33.0	6.0	9.8	10.7
12月	5.4	0.0	0.0	0.0	10.0	2.2	2.4
年間	473	367	139	>454	268	280	402

表 4.7 タンクモデル計算結果のまとめ (mm)

月	降雨量			地下水涵養量			蒸発散量		
	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小
1月	10.0	6.0	1.4	1.4	0.1	0.0	38.9	29.3	20.2
2月	46.7	11.2	0.0	17.1	1.1	0.0	39.8	30.0	21.0
3月	121.9	29.5	0.2	28.7	5.8	0.0	51.6	38.8	26.3
4月	124.0	53.5	2.7	29.6	10.4	0.0	53.4	39.3	27.4
5月	372.0	232.4	42.0	113.1	45.4	0.0	54.3	37.4	22.2
6月	397.7	217.5	102.4	93.9	48.5	17.8	49.1	31.8	20.0
7月	340.0	199.3	117.9	82.3	47.0	11.3	66.7	31.0	17.2
8月	306.8	206.1	43.0	120.1	47.7	11.2	68.0	32.0	19.2
9月	502.9	254.1	130.0	134.8	70.4	26.0	54.2	24.7	15.6
10月	375.7	196.6	103.0	119.1	49.7	14.8	58.9	29.2	19.2
11月	98.2	50.8	3.9	33.0	10.7	0.0	58.5	28.0	18.6
12月	71.1	31.2	0.2	23.4	4.2	0.0	60.3	28.6	18.2

年平均地下水涵養量は 341 mm であった。涵養地域全体・3本の河川流域（図 4.2 の黄色ハッチング部参照）の年間涵養量は、435,517,000 m<sup>3</sup>であり、それは、日量 1,193,000 m<sup>3</sup>に相当する。

シェムリアップ地域には、透水性が高く、深い帯水層は存在しない。給水対象地域の地下水涵養量は、341 mm に地域面積 552 km<sup>2</sup> を乗じ、188,320,000 m<sup>3</sup>/年もしくは、516,000 m<sup>3</sup>/日と算出される。

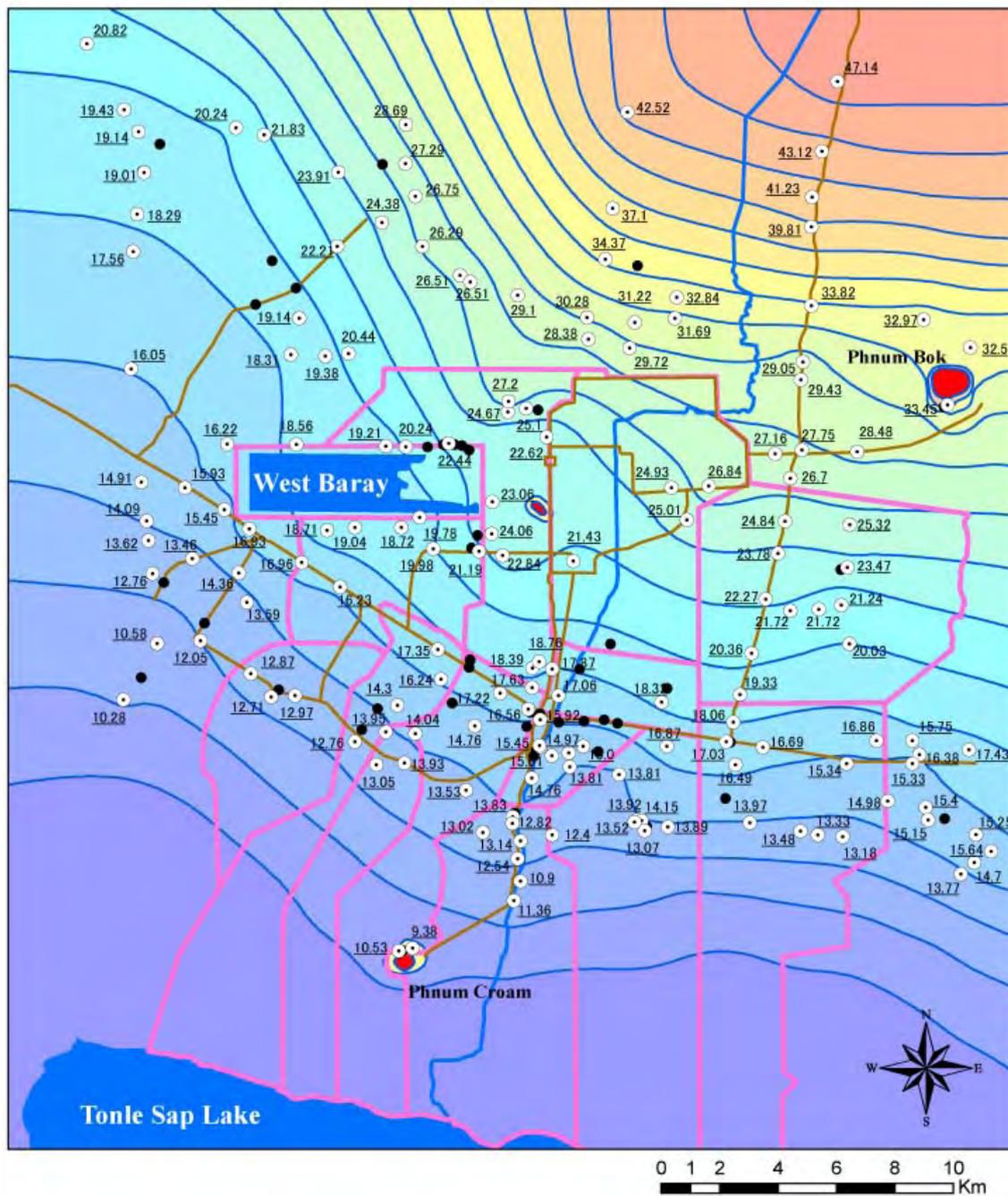
降雨による地下水涵養量（516,000 m<sup>3</sup>/日）と長期水道施設整備計画による計画給水量（86,300m<sup>3</sup>/日）を比較すれば、前者が後者の約 6 倍であることがわかる。しかし、水文のサイクルで考えれば、かなりの大規模の降雨が発生して、地下水が涵養されたとしても、地下水位は全く変動しないと想定される。自然条件下においては、主要な地下水消費源は、明らかに蒸発、或いは蒸発散である。

地下水からの蒸発は、地表からの蒸発量・地下水深度・土壌種類、又は帯水層の種類等の多くの要素と関連している。しかし、一般的解析では、地下水からの蒸発有効深度を 5 m と設定している。従って、シェムリアップ市全域において、地下水取水量が地下水涵養量にかなり等しい場合には、地下水深度が地表からほぼ 5 m になる。

## 4-6 一斉地下水観測

### 4-6-1 地下水位分布および変化

シェムリアップ市の地下水位分布を把握するため、一斉地下水観測を雨季の 2009 年 9 月と乾季の 2010 年 4 月の 2 度行った。2 回の地下水位の観測調査において、地下水位分布がほぼ同じであったことが確認された。図 4.35 に雨季に行われた一斉観測結果を、図 4.36 に雨季・乾季の地下水位の変動量を示す。



凡例		地下水 地下水位 (msl)			
○	地下水位観測を実施した井戸	< 8	18 - 20	30 - 32	42 - 44
●	位置を確認した井戸	8 - 10	20 - 22	32 - 34	44 - 46
—	主要道路	10 - 12	22 - 24	34 - 36	46 - 50
□	給水地域	12 - 14	24 - 26	36 - 38	> 50
—	シェムリアップ川	14 - 16	26 - 28	38 - 40	
		16 - 18	28 - 30	40 - 42	

図 4.35 雨季一斉地下水観測結果 (2009年9月)

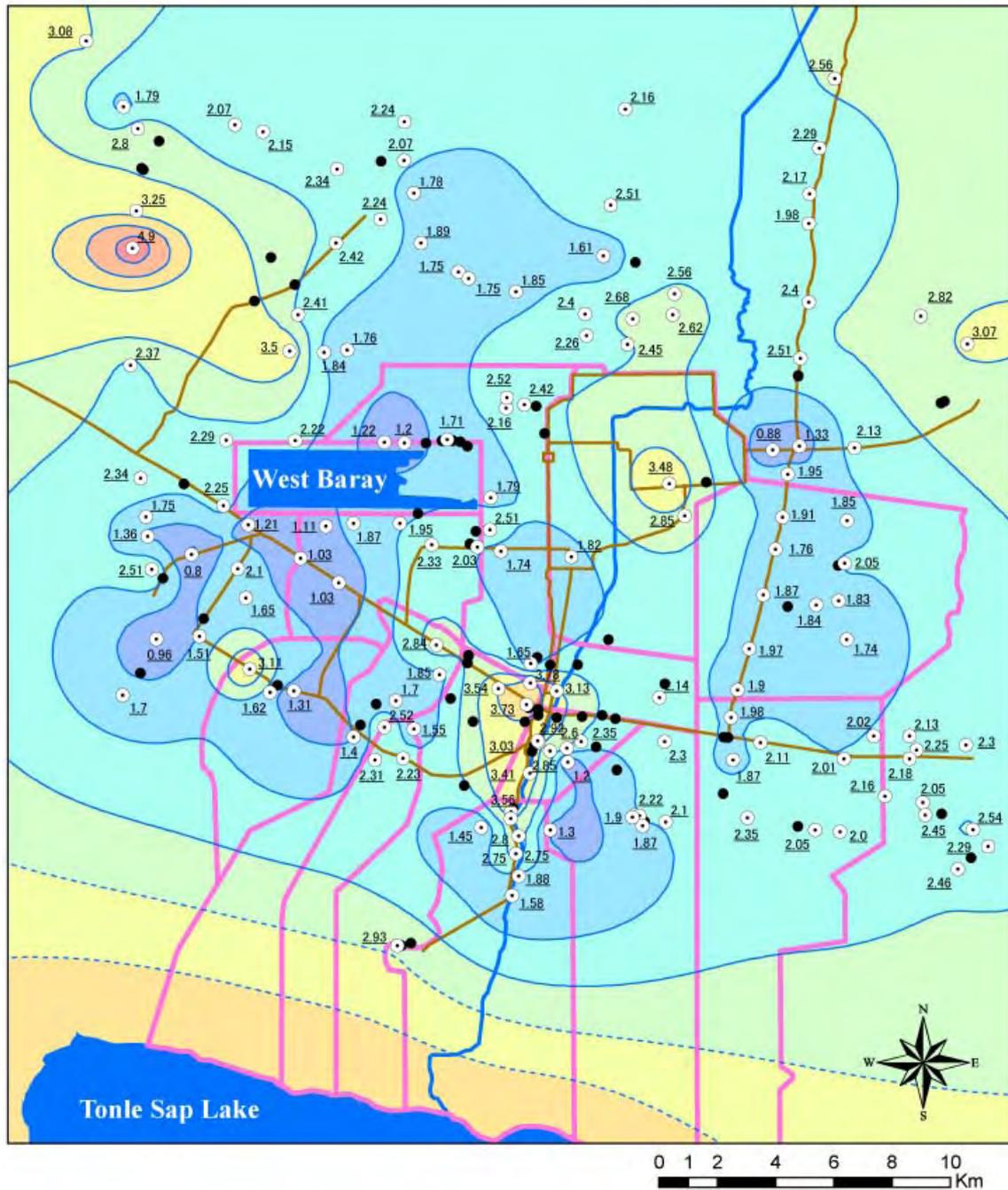


図 4.36 雨季観測（2009年9月）と乾季観測（2010年4月）との地下水位変動量

図 4.36 では、乾季に大きな水位降下が生じていることが分かる。これは、市中心部にあるホテルやゲストハウスといった多くの大口需要者が、私有井戸から大量の地下水を揚水

しているためである。

#### 4-6-2 以前の JICA 調査（2000 年）による地下水位観測

「カンボジア国シェムリアップ市上水道整備計画調査（2000 年）」では、79 本の井戸で月別地下水位観測が、1998 年 2 月～1999 年 11 月の期間中に実施された。

#### 4-7 地下水位観測結果の比較

「カンボジア国シェムリアップ市上水道整備計画調査（2000 年）」と本調査ともに、地下水位観測に、国道 6 号線及びアンコール・ワット遺跡からトンレサップ湖に至る道路沿いの井戸を利用している。上記 2 本の主要道路から 1 km 以内に分布する、総ての井戸水位の変動比較を行った。

##### 4-7-1 地下水位の高い季節

以下の図表に、「カンボジア国シェムリアップ市上水道整備計画調査（2000 年）」本調査での雨季水位観測結果をまとめた。2009 年の水位は 1999 年の水位より低いが、1998 年の水位とほぼ同じである。

表 4.8 主要道路沿い井戸での雨季の地下水位の比較

測定年月	2009 年 9 月	1998 年 9 月	1998 年 10 月	1998 年 11 月	1999 年 9 月	1999 年 10 月	1999 年 11 月
平均 (m)	1.58	1.57	1.32	1.39	1.2	0.84	0.61
最高 (m)	5.12	6.83	5.88	5.79	5.21	4.21	3.13
最低 (m)	0.2	0.1	0	0.08	-0.06	-0.44	-0.49

(注) 表中の数値は地表面以下の地下水深度である。

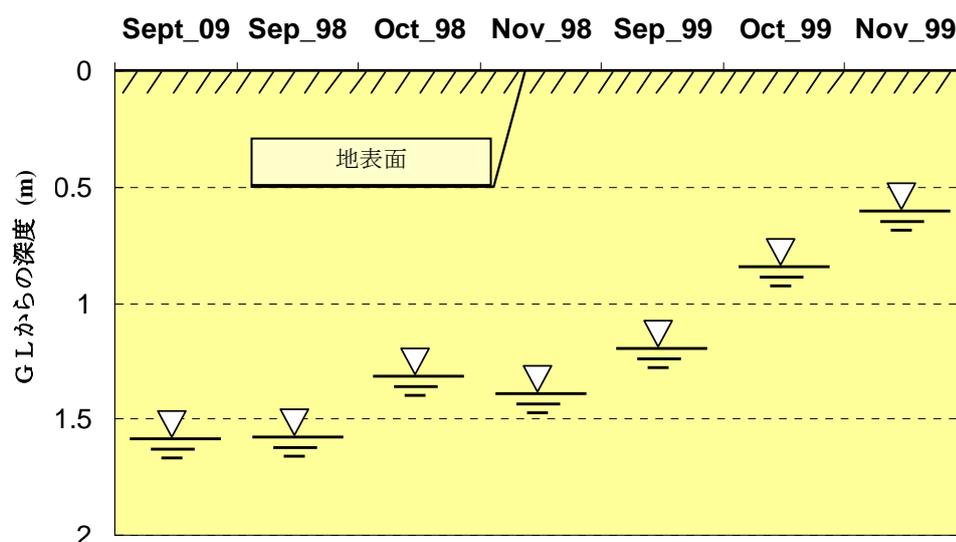


図 4.37 主要道路沿い井戸での雨季の平均地下水位の比較

4-7-2 地下水位の低い季節

本調査での乾季の観測水位（2009年4月）は、他のどの同じ月の水位よりも低い。

表 4.9 主要道路沿い井戸での乾季の地下水位の比較

測定年月	2009年4月	1998年4月	1998年5月	1999年4月	1999年5月
平均 (m)	3.97	3.48	3.48	2.7	2.28
最高 (m)	9.12	8.52	8.52	9.22	7.4
最低 (m)	1.73	0.99	0.99	0.65	-0.05

注) 表中の数値は地表面以下の地下水深度である。

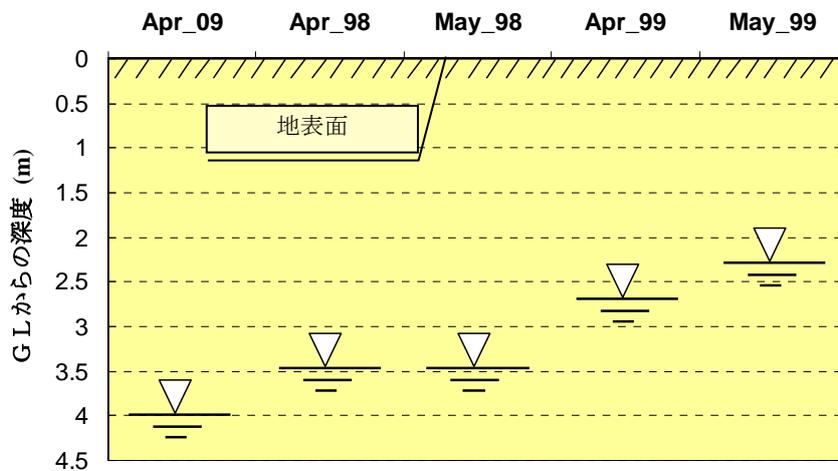


図 4.38 主要道路沿い井戸での乾季の平均地下水位の比較

4-7-3 市中心部での比較結果

市中心部の水位変化をチェックするため、市中心部での異なる調査の全調査井戸が検討された。本調査で現場踏査した 33 本の井戸のうち、23 本が雨季観測、25 本が乾季観測に利用された。以前の JICA 調査から抽出された 28 本の井戸のうち、同じ観測井戸と特定でき、比較検討に利用できるのは 13 本であった。以下の図表に比較結果を示す。

表 4.10 市中心部での雨季の地下水位の比較

測定年月	2009年9月	1998年9月	1998年10月	1998年11月	1999年9月	1999年10月	1999年11月
平均 (m)	1.63	1.41	1.2	1.32	1.24	0.85	0.6
最高 (m)	5.12	3.51	3.1	3	3.26	2.9	2.32
最低 (m)	0.2	0.1	0	0.3	0.23	-0.28	-0.41

注) 表中の数値は地表面以下の地下水深度である。

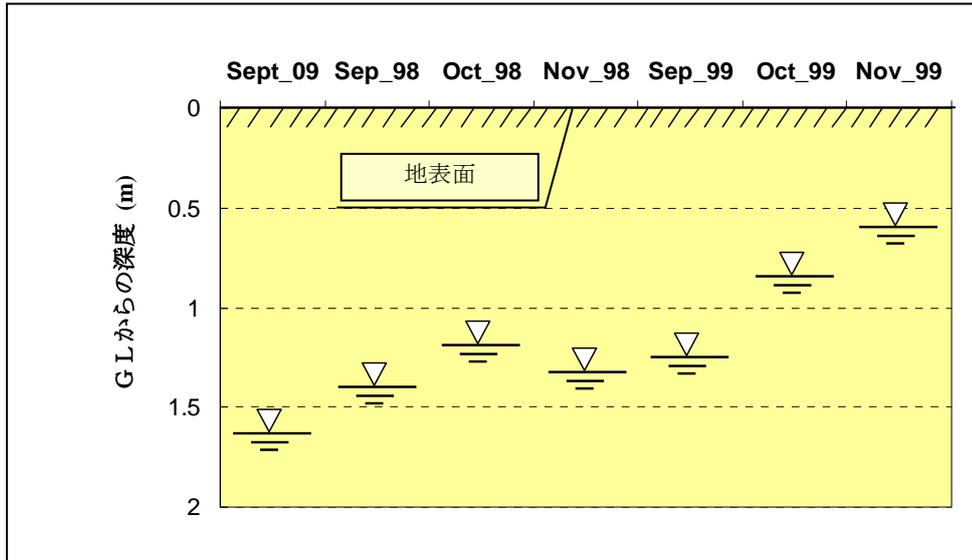


図 4.39 市中心部での雨季の平均地下水位の比較

表 4.10 に示したように、本調査観測結果 とその他の調査観測結果では、雨季水位に明らかな違いがある。1998 年・1999 年・2009 年水位を比べると、それぞれ 0.22 m\* から 1.03 m \* 下降している。{注、0.22 m\* = 1.63 m (2009/9) – 1.41 m (1998/9)、1.03 m \* = 1.63m (2009/9) – 0.6 m (1999/11)}

表 4.11 市中心部での乾季の地下水位の比較

測定年月	2010 年 4 月	1998 年 4 月	1998 年 5 月	1999 年 4 月	1999 年 5 月
平均 (m)	4.19	3.5	3.5	2.5	2
最高 (m)	7.4	5	5.1	4.6	4.81
最低 (m)	2.6	2.35	2.25	1.46	0.82

注) 表中の数値は地表面以下の地下水深度である。

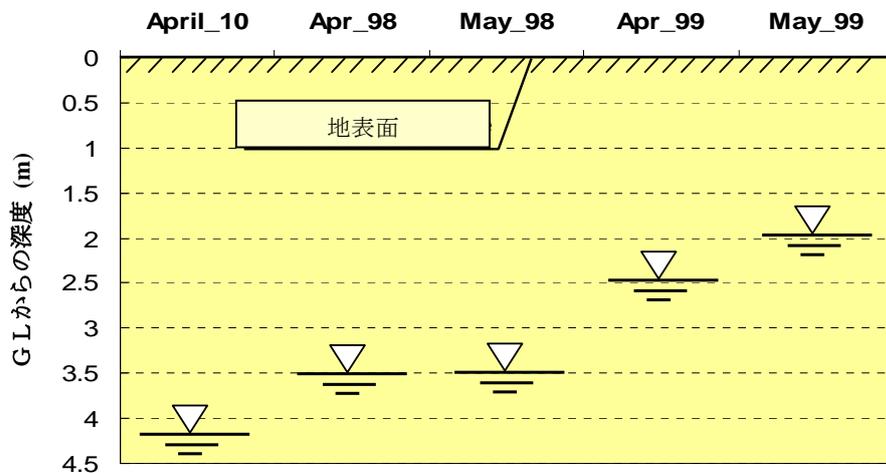


図 4.40 市中心部での乾季の平均地下水位の比較

表 4.10・表 4.11 とともに、2009 年 9 月及び 2010 年 4 月の井戸水位と 1998 年・1999 年の同  
なじ月の水位には大きな隔たりがある。この大きな差は主要道路付近に位置する井戸で特  
に大きい。主要道路周辺は市中心域を形成しており、大口需要者の井戸利用が集中し、大  
量に地下水を揚水しているため、地下水降下量が特に大きいと考えられる。

## 第5章

# 地下水シミュレーション

## 第5章 地下水シミュレーション

地下水涵養量  $516,000\text{m}^3/\text{日}$  は、2030 年の水需要量  $86,300\text{m}^3/\text{日}$  の約 6 倍である。地下水揚水・涵養のバランスの観点からの可能地下水開発量は、 $516,000\text{m}^3/\text{日}$  と見なすことができる。

しかし、地下水涵養量と揚水量とのバランスだけではなく、将来における揚水量の増加や開発地域の選定等の地下水開発の影響も考慮しなければならない。シェムリアップ市における地下水開発による最も重大な影響は、地下水位の低下により引き起こされる地盤沈下の発生である。

「前章、4-5-3 地下水涵養計算のまとめ」に記述したように、シェムリアップ地域には、深く、透水係数の大きい帯水層がないため、もし地下水涵養量 ( $516,000\text{m}^3/\text{日}$ ) が全量水道水供給に利用される場合、市全域の地下水位は、地表下 5 m まで下降すると予想される。しかし、水需要量は地下水涵養量の約 1/6 であるため、平均的な地下水位の降下量は 5 m より小さくなる。地下水が揚水される時、地下水の低下は避けられず、地下水位の低下量は、井戸やその周辺では 5 m 以上になるかもしれない。

### 5-1 シェムリアップ地域の世界遺産の分布

シェムリアップ地域は、多くの世界遺産で世界的に有名な場所である。有名な世界遺産としては、アンコール・ワット(Angkor Wat)、アンコール・トム(Angkor Thom)、西バライ(West Baray)、バコン(Bakong) 等の重要な世界遺産がある。これらを図 5.1 に示す。

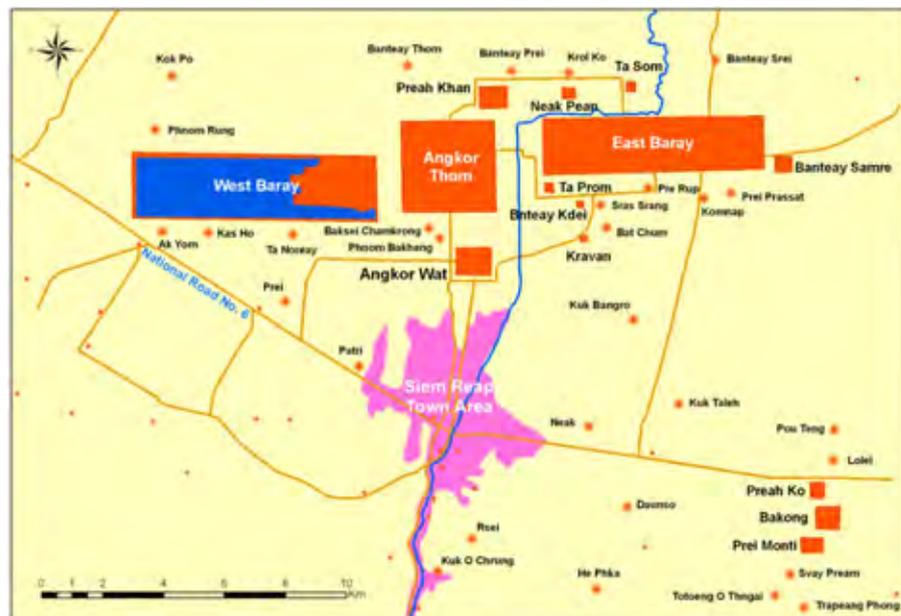


図 5.1 シェムリアップ地域の主要世界遺産分布図

### 5-2 地下水シミュレーションモデル

シェムリアップ地域には、深く、厚い、透水係数が大きい良好な帯水層がない。そのため、

水道水源として地下水が利用される場合、大きな局地的水位降下を避けるために、日揚水量は、 $1,000 \text{ m}^3/\text{日}/\text{井戸}$ 程度とすることが望ましい。また、水源地域全体の地下水位の低下も真剣に評価されなければならない。

本調査において、将来水需要を賄うため、水道水源として表流水と地下水を組み合わせた複数のシナリオをシミュレーション用に想定した。これらのシナリオによる影響は、地質・水理地質関連調査に基づき構築された地下水シミュレーション・モデルによって評価された。

モデル領域は、図 5.2 に示すような、シェムリアップ地域の地下水特性、利用可能なデータ及びシミュレーション目的に基づいて、決定された。

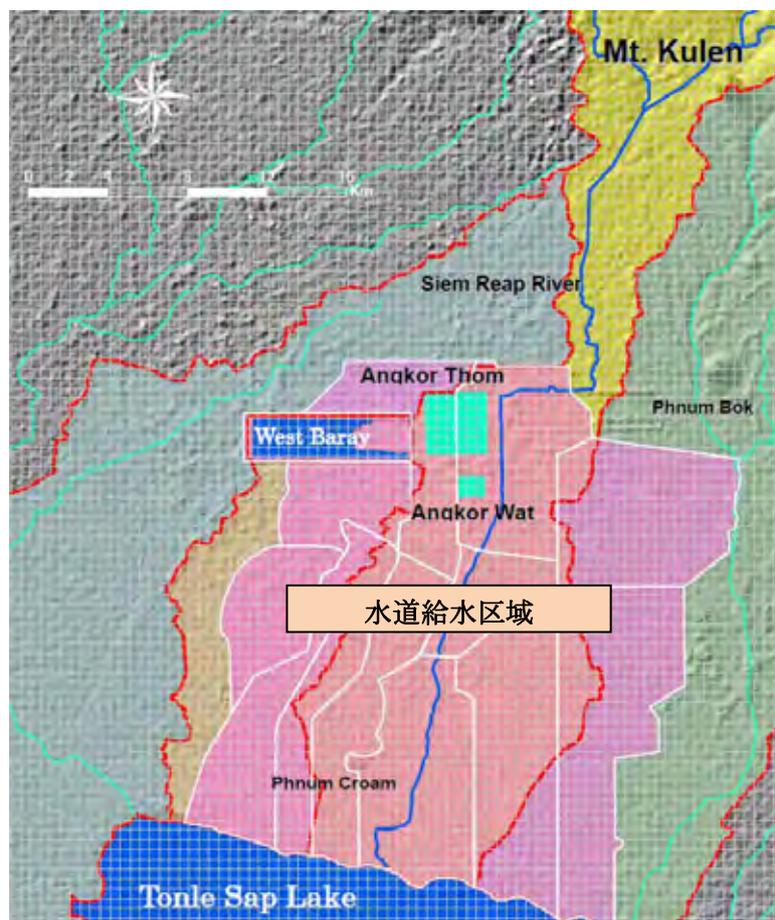


図 5.2 地下水シミュレーション・モデル領域

### 5-2-1 モデル領域

図 5.2 に示すように、モデル領域は、座標システム WGS84, UTM zone 48 north により、以下の範囲を含む。

- 経度：354000 – 393000 (39 km)
- 緯度：1460500 – 1507000 (46.5 km)
- 全対象範囲面積： =  $39 \times 46.5 = 1,813 \text{ km}^2$

モデルは、世界的に有名な地下水シミュレーション・プログラム Modflow を用いて構築した。Modflow は、USGS（米国地質調査所）により開発され、ソース・コードは、USGS のウェブ・ページからダウンロードできる。Modflow は、有限差分法により地下水シミュレーションを行う。本法は、モデル領域を矩形として規定し、そのモデル領域を小さな矩形グリッドに分ける。グリッド分割は、モデル精度、パラメーターのために利用可能なデータ、インプットデータ作成及びアウトプットデータ獲得の効率等に基づいている。

- グリッド寸法：500 m×500 m
- 行数：93
- 列数：78
- セル数：7,254

### レイヤー仕様

過去の JICA 調査 (the Study on Water Supply System for Siem Reap region in Cambodia, 2000 年) の揚水試験結果及び地盤沈下観測サイト LTa・LTb での地下水位観測結果 (第 4 章、4-4 節参照) により、シェムリアップ地域の帯水層は、浅い帯水層と深い帯水層の 2 つに分けられる。これら 2 つの帯水層の間には難透水層がある。

一方、浅い帯水層では、多くのセルが表流水の特性のために、定水頭境界として規定される。これらの表流水の特性の存在は、その付近の地下水位に影響を与えるだけでなく、世界遺産の保護において掛け替えのない役割を果たしている。そのため、これらの表流水特性は、モデルをシェムリアップ地域の状況に可能な限り合わせるように、モデル領域の中に組み込んだ。

モデル収束を確実にし、パラメーターをシェムリアップ地域の実際の地下水利用状況に合致させるために、浅い帯水層を、モデル中で 2 層に分けた。それから、モデル領域は、以下のように、上記の浅い帯水層を含めて、全体として 5 層のモデル・レイヤーに分けられた。

層 1：トンレサップ湖の定水頭境界用に 10 m の厚さ、他の定水頭境界用に 6 m の厚さ、及び全水頭計算セル用に層 2 の底部上 5 m

層 2：層 1 底部から第四紀帯水層底部まで

層 3：難透水層

層 4：深い帯水層

層 5：基盤岩

## 5-2-2 境界条件の設定

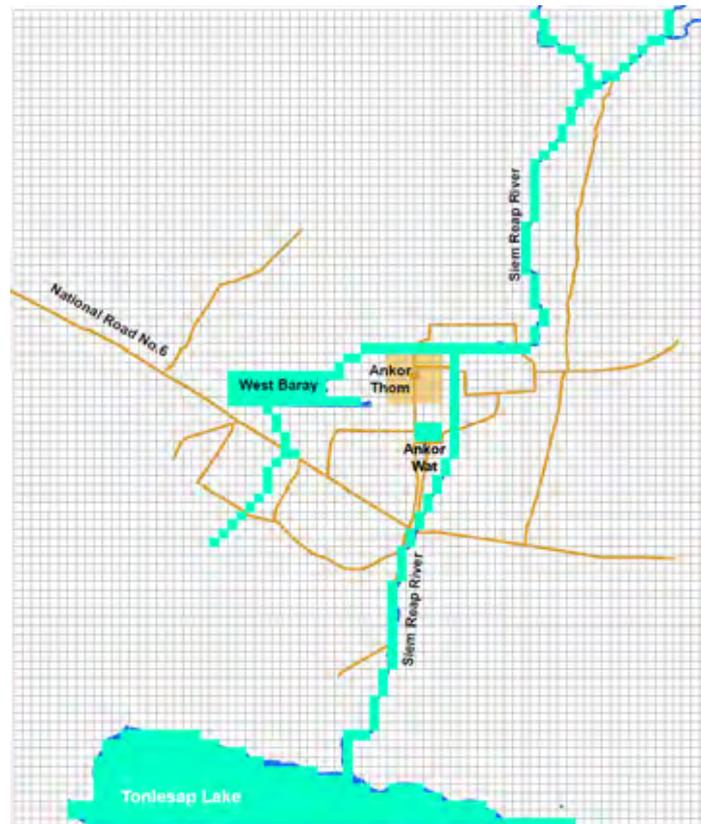


図 5.3 定水頭境界条件の設定

図 5.3 に示す定水頭境界条件は、以下を含む。

- シェムリアップ川
- アンコール・ワットの環濠
- 西バライ（人工貯水池）及び上流側・下流側で導水のための用水路
- トンレサップ湖

## 5-2-3 標高の設定

先の JICA 調査 (Integrated Master Plan for Sustainable Development of Siem Reap/Angkor Town in Kingdom of Cambodia; 2005) で作成された 1:5,000 地形図が、都市化地域及び周辺部の標高設定に用いられた。それ以外の地区の標高は、90 m メッシュの USNASA DEM data SRTM による。

モデル中の各レイヤーの底部標高は、「カンボジア国シェムリアップ市上水道整備計画調査 (2000 年)」の試験ボーリング・データ及び物理探査結果による。

図 5.4 および図 5.5 に、地下水シミュレーション・モデル領域における南北・東西方向の

垂直断面図の実例を示す。

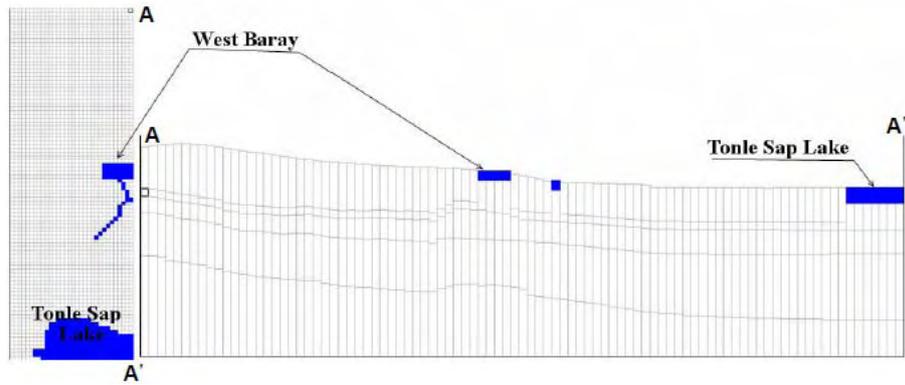


図 5.4 南北方向の垂直断面図の実例

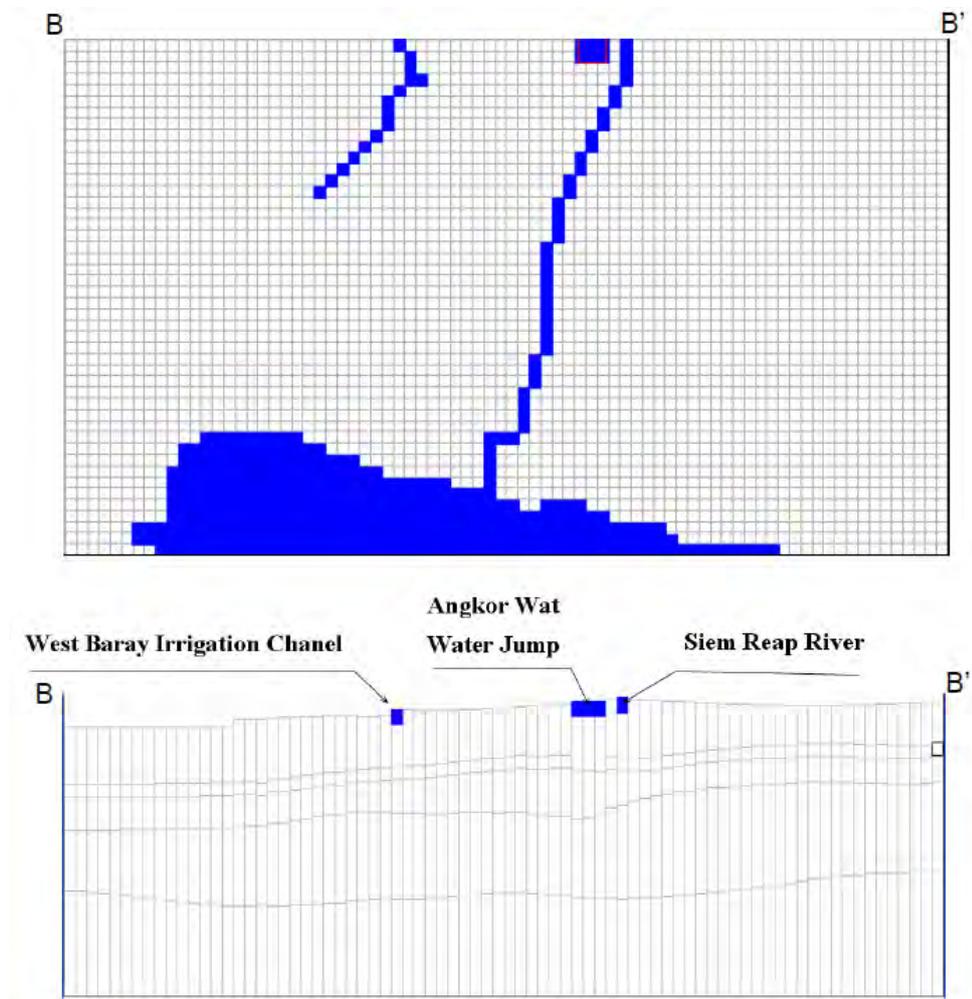


図 5.5 東西方向の水平断面図の実例

## 5-3 パラメーター仕様

### 5-3-1 透水係数

各レイヤーの透水係数は、「カンボジア国シェムリアップ市上水道整備計画調査(2000年)」の揚水試験結果に基づいて設定される。

- レイヤー1 およびレイヤー2 : 浅い帯水層  
岩相 : 粘土混じり砂、砂、シルト質砂、主にシルト質砂  
0.05 ~ 35.5 m/日、平均 11.95 m/日
- レイヤー3 : 難透水層  
岩相 : 粘土混じり砂、砂混じり粘土岩、粘土混じり砂岩、シルト岩、砂岩  
0.002 ~ 0.1 m/day、平均 0.0077 m/日
- レイヤー4 : 深い帯水層  
岩相 : 粘土混じり砂岩、砂混じり粘土岩、シルト岩、粘土岩  
0.012 ~ 4.03 m/日、平均 1.21 m/日
- レイヤー5 : 基盤岩  
岩相 : 砂岩、頁岩、凝灰岩、主に砂岩  
0.00005 m/日

### 5-3-2 貯留係数 (無次元)

- レイヤー1~3 : 0.000005
- レイヤー4 : 0.00005
- レイヤー5 : 0.0005

### 5-3-3 有効間隙率 (無次元)

- 全レイヤー : 0.15

### 5-3-4 比湧出量 (無次元)

- レイヤー1: 0.05 ~ 0.17、平均 0.095
- レイヤー2~レイヤー5 : 0.15

#### 5-4 モデル・キャリブレーション - 定常流シミュレーション

モデルの安定化、或いは収束のための基礎的方法は、定常流計算を実施することである。これは、あるケースでは、そのモデルが実際的に収束しなかったとしても、シミュレーション結果が得られるためである。図 5.6 に、シェムリアップ地域の地下水シミュレーション・モデルの定常流計算結果を示す。

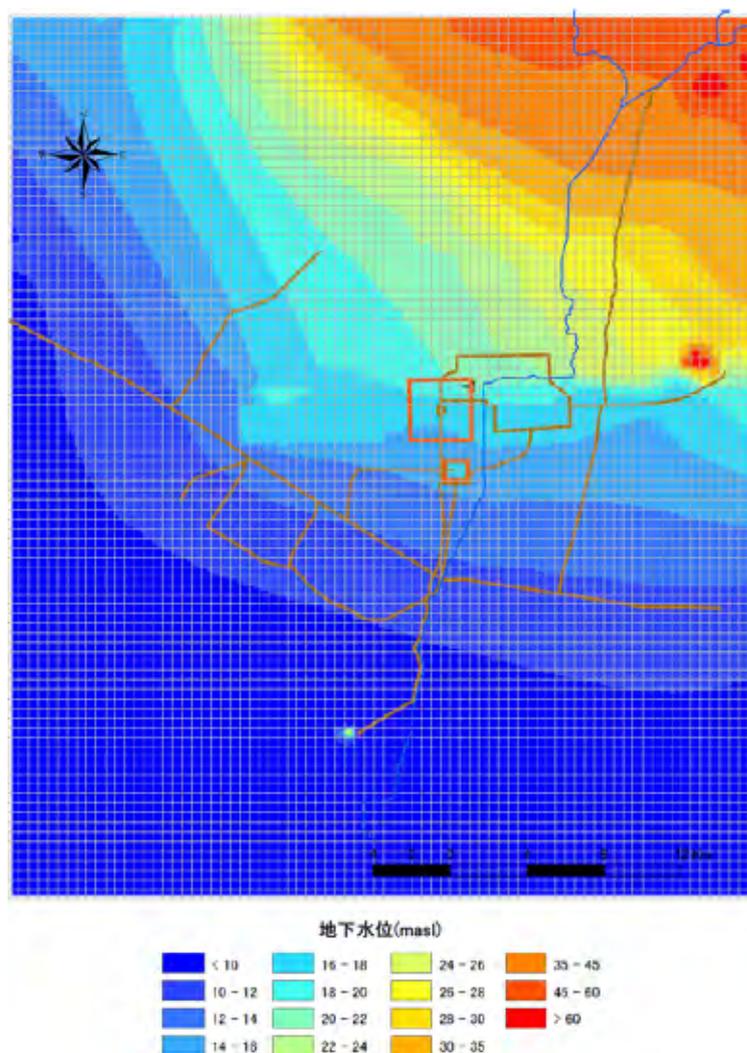


図 5.6 定常流シミュレーションの結果

上図に示されるように、定常流シミュレーション結果は、一斉地下水水位観測結果と一致する。本地下水シミュレーション・モデルの収束と適合性が確認された。

#### 5-5 モデル・キャリブレーション - 非定常流シミュレーション

SRWSA 揚水記録と関連パラメーターを利用することによって、モデル・キャリブレーションのために、定常流計算が実施された後、非定常流シミュレーションが行なわれた。SRWSA 井戸が揚水を開始した、2006 年から 2008 年末までの 3 年間の計算期間が設定された。

5-5-1 地下水使用量

SRWSA 生産井の記録と井戸台帳による地下水揚水量推計値が、市街化地域の地下水揚水量を予測するために用いられた。

SRWSA 既存生産井戸サイト及び私有井戸地域でのシミュレーション期間の月間揚水量が図 5.7 に示される。シミュレーション・モデルでの井戸セルの位置は、図 5.9 に示される。

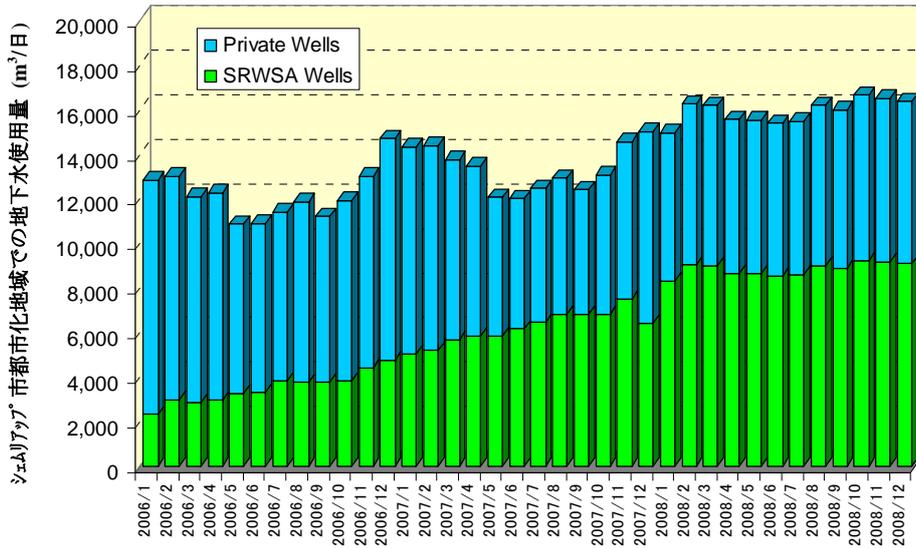


図 5.7 SRWSA 既存井戸及び市街化地域での私有井戸の地下水揚水量 (2006 年～2008 年)

5-5-2 降雨量、蒸発量、地下水涵養量及び消費量

図 5.8 に、月別降雨量、蒸発量、地下水涵養量及び消費量をまとめた。

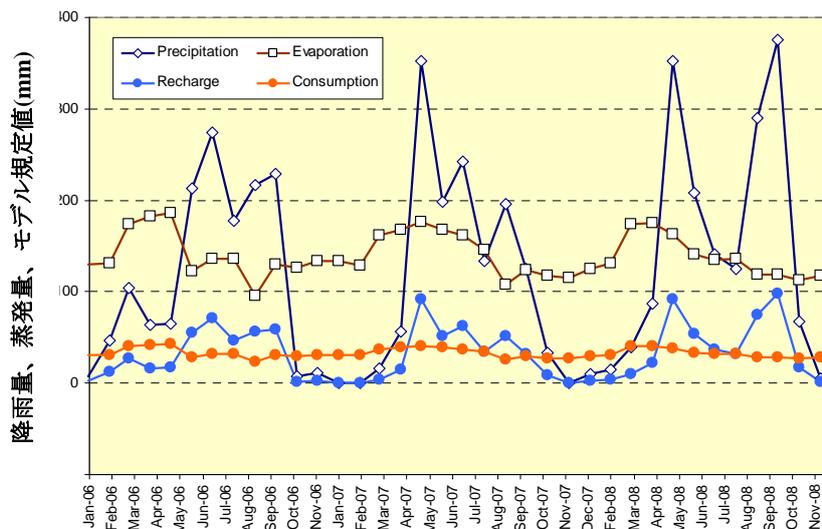


図 5.8 観測された降雨量と蒸発量、モデルにより規定した地下水涵養量及び消費量

### 5-5-3 非定常流シミュレーション結果

非定常流結果のチェックのために、図 5.9 に示すように、市街化地域中央部 (OBW\_1) のセル、及び SRWSA 既存井戸サイト (OBW\_2)と新規計画生産井戸サイト (OBW\_8～OBW\_10) のセルに、5 箇所の仮想観測井戸 (浅井戸、計算ポイント) が設定された。

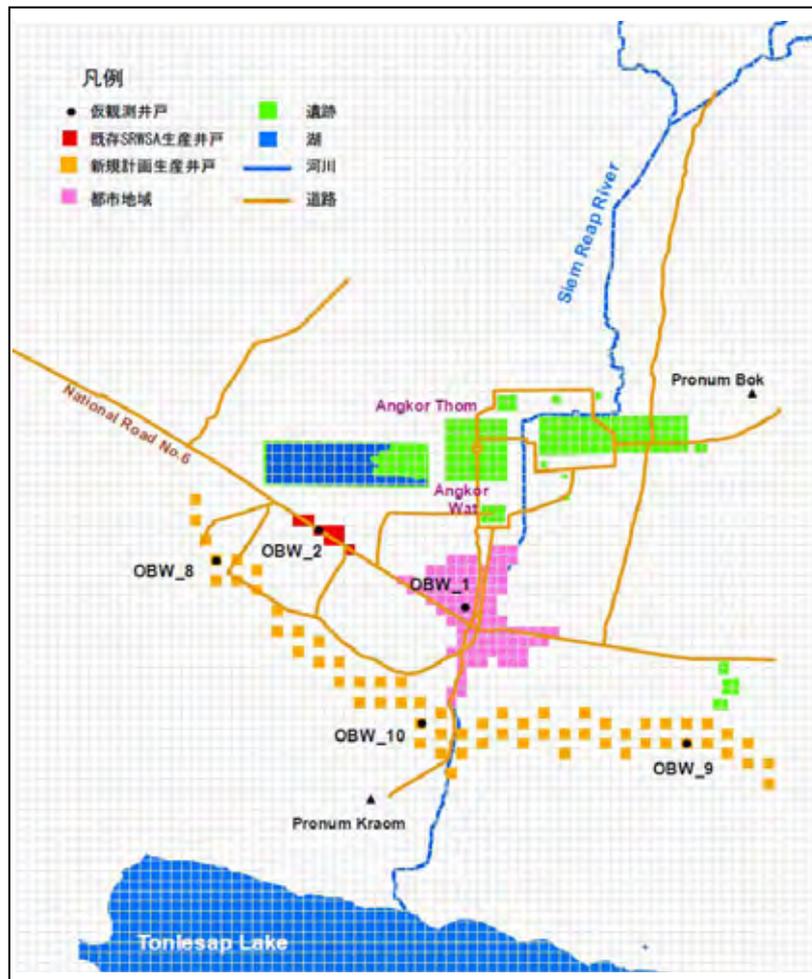


図 5.9 仮想観測井戸 (浅井戸) 及び井戸セル位置図

シミュレーション期間 (2006 年～2008 年) の非定常流計算による月別地下水位変動の結果を図 5.10 に示す。

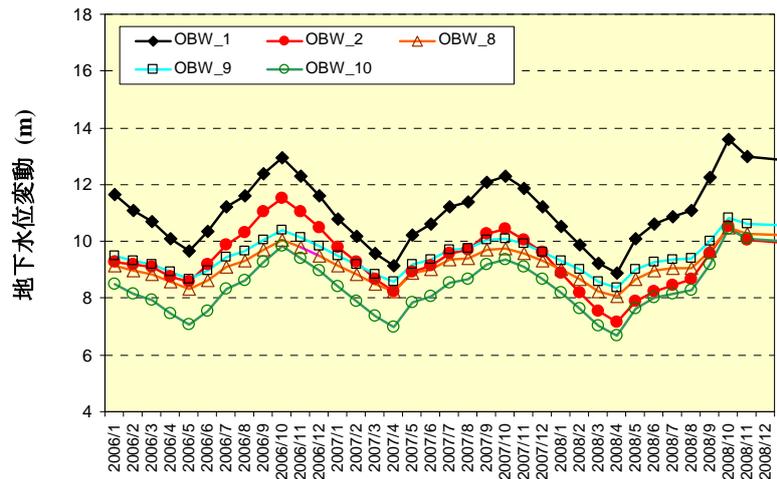


図 5.10 仮想観測井戸（浅井戸）の過去3年（2006年～2008年）の地下水位変動

非定常流シミュレーションの以下の結果から再現性のあるモデルであると判断した。

地下水位の季節変動パターンは、地下水モニタリング結果と一致する。

地下水涵養量と地下水消費量の影響が再現された。2006年は、地下水涵養量が少なく、地下水位がやや低下した。続く2007年2008年は降雨量が多く、地下水位は、回復傾向に変わった。

## 5-6 地下水予測のためのモデル設定

### 5-6-1 地下水シミュレーションの目的及び基礎的考慮

本調査の目的は、2030年までの家庭用水供給を確保できる水道計画の策定である。そのため、地下水位予測のためのシミュレーション期間は、2009年から2030年までの22年間とした。

地下水開発の影響評価は、関連要素を単純に平均化して行うべきではない。自然条件下では、地下水位は季節により変動する。シェムリアップ地域の降雨量は、年々変化する。極端な渇水年が、最大水需要の年に出現した場合には、大きな地下水位の低下が起これ、世界遺産サイトに大きな影響が及ぶことになると想定される。

### 5-6-2 降雨確率計算のための観測所選定

データを収集した5箇所の観測所のうち、シェムリアップ市観測所は市中心部に立地していて、調査地域を代表する降雨量を観測していると判断されるため、本観測所の観測資料を降水量解析に利用した。そのデータは、シェムリアップ市観測所からとWMO (世界気象機関、観測所番号: 48966000)のデータベースから収集された。収集された降雨観測データ期間は、1951年～1960年の10年間、1962年～1970年の9年間、及び1982年～2010年の29年間であり、合計48年間の降雨観測データが解析に利用された。

### 5-6-3 確率解析方法と結果

確率分析は、最も多く利用された次の4種類の方法を選んで行った。

- 正規分布法 (Normal distribution)
- 対数正規分布法 (Log-normal distribution)
- 対数ピアソン法 (Log-Pearson Type III distribution)
- 図解法 (Plotting position)

図 5.11 に対数ピアソン法に Hazen による点プロット法を組み合わせた降雨確率曲線を示す。

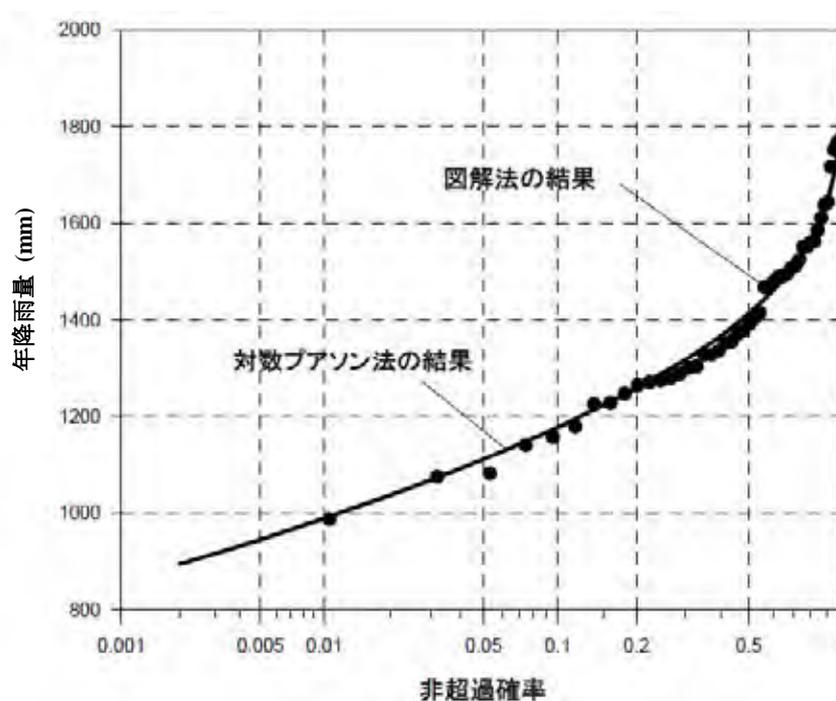


図 5.11 シェムリアップ市気象観測所のデータによる降雨確率曲線

### 5-6-4 外部ファクターの設定

シェムリアップ地域の地下水シミュレーション・モデルのための外部ファクターとしては、降雨量、蒸発量、河川・湖の水位変動（定水頭境界）がある。

#### (1) 降雨量、蒸発量、地下水涵養量及び地下水消失量の設定

図 5.12 に降雨量、蒸発量、地下水涵養量及び蒸発による地下水消失量を示す。

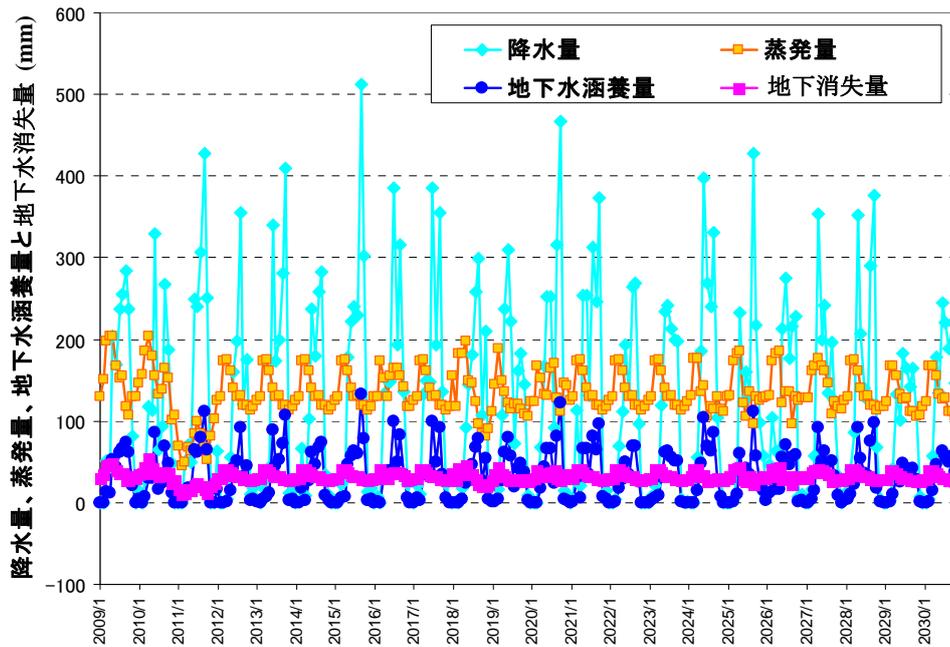


図 5.12 観測データ（1989年～2008年）に基づくシミュレーション期間（2009年～2030年）の地下水涵養量と消失量、及び回帰年50年での確率解析結果

(2) 定水頭境界条件のための水頭の設定

図 5.13 に、水文観測結果に基づく、22年間のシミュレーション期間内の月別河川水位変動を示す。

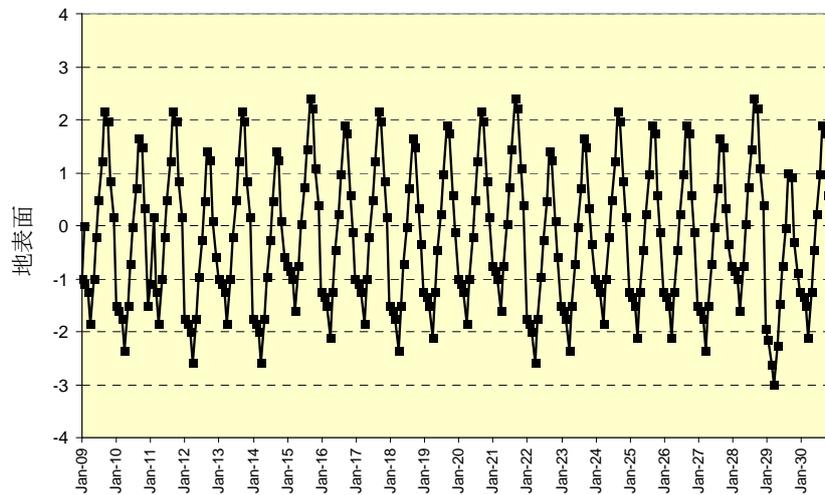


図 5.13 河川水位変動の設定

トンレサップ湖水位の設定は、図 5.14 に示すトンレサップ湖の水位観測結果による。

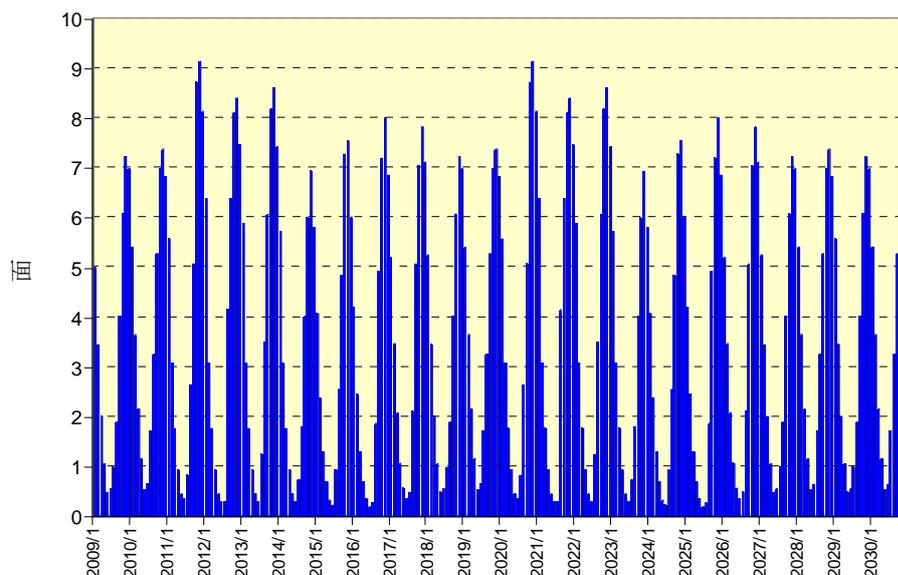


図 5.14 トンレサップ湖の水位変動の設定

#### 5-6-5 内部ファクター - シナリオの設定

##### シナリオ 1: 比較対象ケース

比較検討には、自然条件による水位降下と、地下水開発による水位降下の、2種類の地下水位降下データが必要である。従って、シナリオ1は、地下水利用を行わず、上記の外部ファクター総てを組みこんで設定される。(地下水利用がない状態での自然状態)

##### シナリオ 2: 現在の地下水利用量を持続する。

現在、地下水がシェムリアップ地域の主要水道水源である。シナリオ2は、現在の地下水利用（平均 22,176 m<sup>3</sup>/日）を計画年次の2030年まで持続するものである。

(SRWSA 井戸 9,000 m<sup>3</sup>/日や私有井戸による揚水を合わせて、平均 22,176 m<sup>3</sup>/日を揚水)

##### シナリオ 3: 唯一の水道用水源として、地下水を利用する

水需要量は年々増加し、2030年には 86,300 m<sup>3</sup>/日になると推定されている。水道施設整備拡張計画において、水道用の唯一の水源として、地下水を利用し続けることも1つの選択肢である。従って、本シナリオにおいては、2030年までの需要量を賄えるように地下水のみを利用し、新規水道施設は2016年に完成することを想定する。

(77,000 m<sup>3</sup>/日までの地下水開発、SRWSA 井戸 9,000 m<sup>3</sup>/日と新設井戸による地下水開発量を合わせて、合計約 86,000 m<sup>3</sup>/日を揚水)

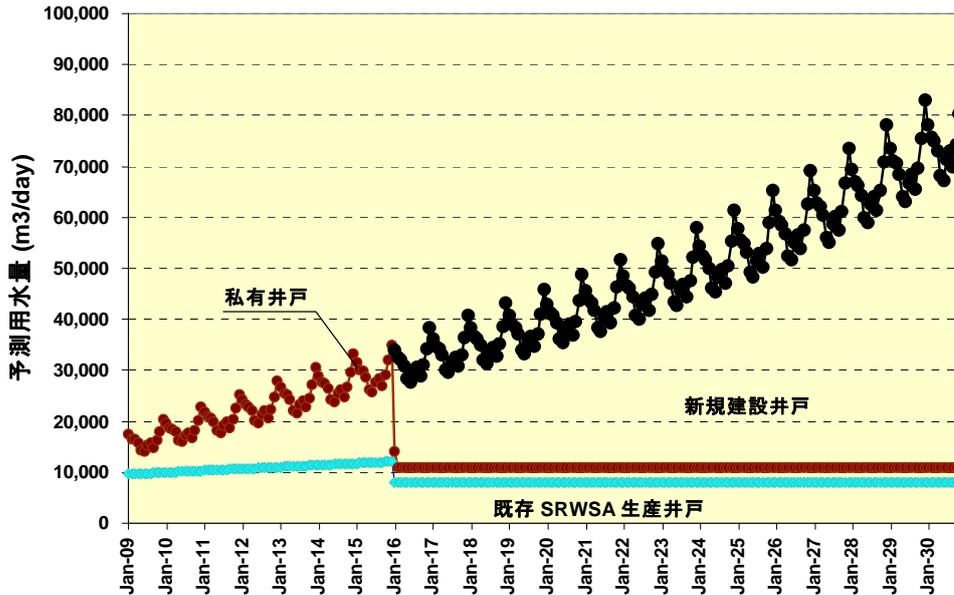


図 5.15 シナリオ 3 による地下水利用の新規水道施設計画（2016 年完成）  
 （新規水道施設が 2016 年に完成し、それ以降、私有井戸は新規水道施設に切り替わる。）

図 5.16 に示すように、シナリオ 3 においては、64 本の新規井戸が標高 10m 以上（区内ピシクのコンター）に計画されている。

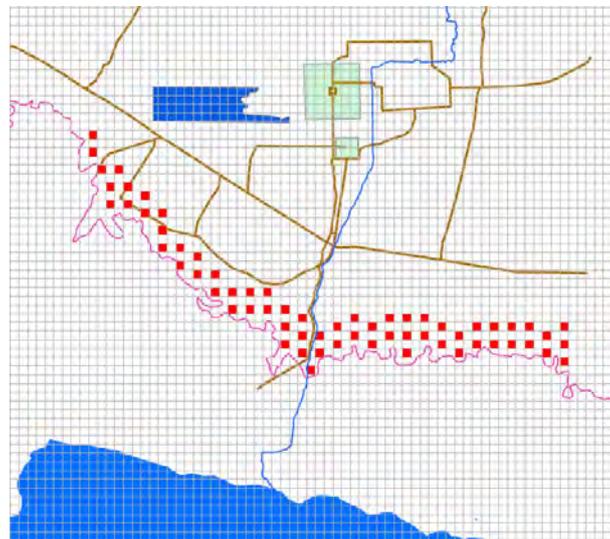


図 5.16 シナリオ 3 のための新規生産井戸の設置位置

シナリオ 3 では、地下水水源は、既存 SRWSA 井戸、市街化地域の私有井戸、新規建設井戸の 3 つに分けられる。

#### シナリオ 4 及び 5: 水道施設整備計画

KTC プロジェクトが市の水道施設整備の一環として考慮されてきた。KTC プロジェクトの主要内容は、西バライ湖の灌漑水路の表流水を原水とし、17,000 m<sup>3</sup>/日の給水能力を増強

する計画である。本プロジェクトを念頭に置き、図 5.17 のように水道施設整備計画が策定された。

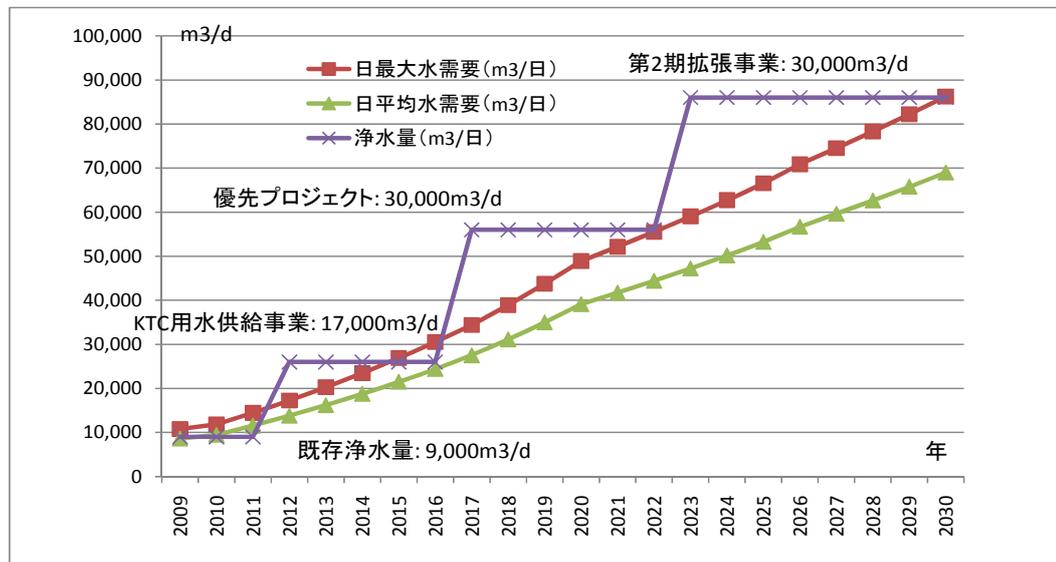


図 5.17 水道施設整備計画

図 5.17 に示した水道施設整備計画には 2030 年までの日平均需要量と日最大需要量が予測されている。それぞれの予測値に従って、水道拡張計画が地下水利用する場合の揚水量設定をした。シナリオ 4 は日平均需要量に対応しているシナリオであり、シナリオ 5 は日最大水需要量に対応しているシナリオである。シナリオ 4・5 では、シナリオ 3 に、さらに KTC プロジェクトを加える。

シナリオ 4 (KTC プロジェクトを考慮し、43,000 m<sup>3</sup>/日までの地下水開発とする。SRWSA 井戸 9,000 m<sup>3</sup>/日と新設井戸による地下水開発量を合わせて、合計 52,000 m<sup>3</sup>/日を揚水)

シナリオ 5 (KTC プロジェクトを考慮するが、地下水開発水量を 60,000 m<sup>3</sup>/日までとする。SRWSA 井戸 9,000 m<sup>3</sup>/日と新設井戸による地下水開発量を合わせて、合計 69,000 m<sup>3</sup>/日を揚水)

需要量増加に対応するため、各フェーズで 30 本の新規井戸を計画し、各井戸の計画揚水量は 1,000 m<sup>3</sup>/日と設定した。各フェーズでの新設井戸及びシミュレーション結果の確認のための仮想観測井戸の位置図を図 5.18 に示す。

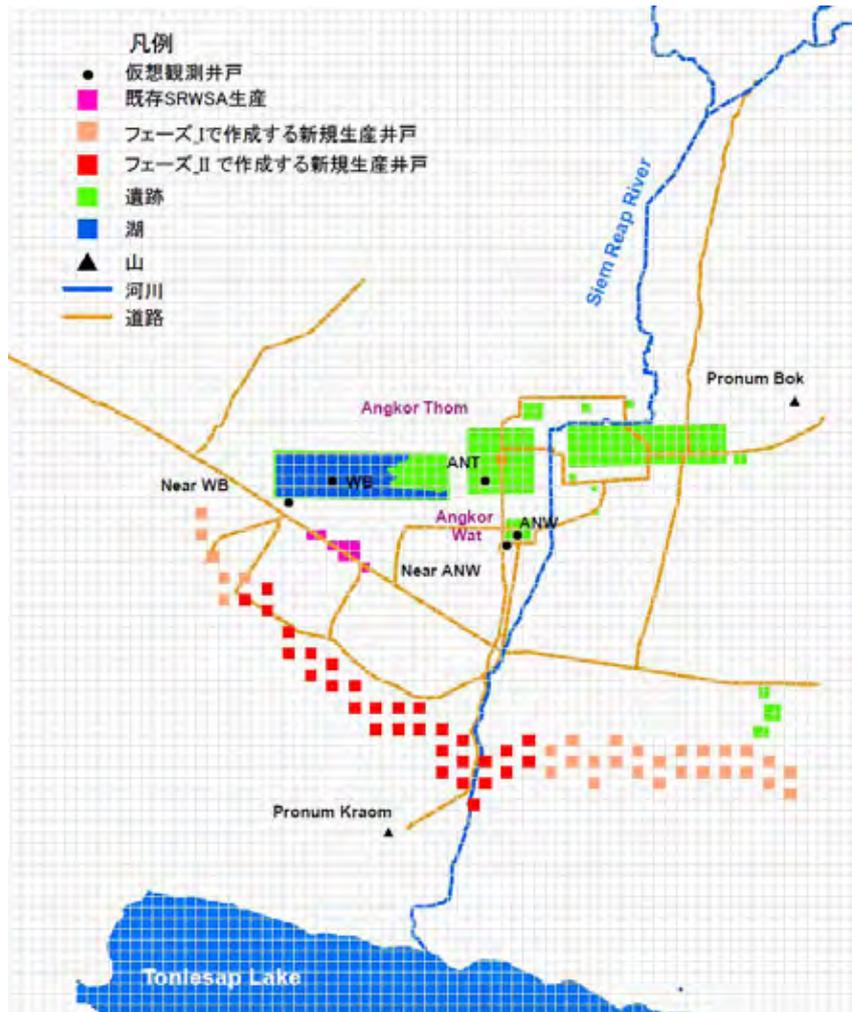


図 5.18 新規生産井戸及び各シミュレーション・シナリオによる世界遺跡サイトへの影響検討用仮想観測井戸（深井戸）位置図

シナリオ 6: シェムリアップ川東部に新規井戸を建設しない

シナリオ 6 は、フェーズ I 以降、地下水開発を中止した場合の地下水位の低下の影響を検討するため、バコン遺跡群付近に新規井戸を計画しない設定である。

（地下水開発水量を 30,000 m<sup>3</sup>/日とする。SRWSA 井戸 9,000 m<sup>3</sup>/日と新設井戸による地下水開発量を合わせて、合計 39,000 m<sup>3</sup>/日を揚水）

シナリオ 7: 地下水の揚水を削減するため、水道水源として表流水を利用する

本シナリオは、表流水を水源とする新規水道施設の 2016 年完成を計画する。新規施設の完成後、市街化地域での地下水利用は、SRWSA 既設井戸を除き禁止される。（SRWSA 井戸 9,000 m<sup>3</sup>/日を揚水）

5-6-6 仮想観測井戸の設定

モデル・キャリブレーションの過程で、5 本の仮想観測井戸（計算ポイント）が、シミュ

レーション結果の抽出用に浅い帯水層で設定された。アンコール・ワット、アンコール・トム、西バライ貯水池等の世界遺産サイトの敷地内、或いはその近辺で、深い帯水層でのシミュレーション結果の抽出用に、図 5.9 に示した仮想井戸（計算ポイント）とは異なる別の 5 本の仮想観測井戸（計算ポイント）が設定された。その位置を図 5.18 に示す。合計、10 本の仮想観測井戸が設定されたことになる。（注、浅井戸、井戸番号 no.1, no.2, no.8, no.9, no.10, 深井戸、井戸番号 ANW {アンコール・ワットの直下}、ANT {アンコール・トムの直下}、Near ANW {アンコール・ワットの近辺}、Near WB {西バライ貯水池の近辺}、WB {西バライ貯水池の直下}）

## 5-7 シミュレーション結果

### 5-7-1 仮想観測井戸（計算ポイント）の地下水位変動

モデル内に 10 本の仮想観測井戸が設定された。10 本の仮想井戸における地下水位変動が、以下の 10 枚の図面に表示される。

#### 1) 仮想観測井戸 No.1（シェムリアップ地域都市化地域の中心部、浅い帯水層）

最大の水位降下はシナリオ 3 の 2 m であった。

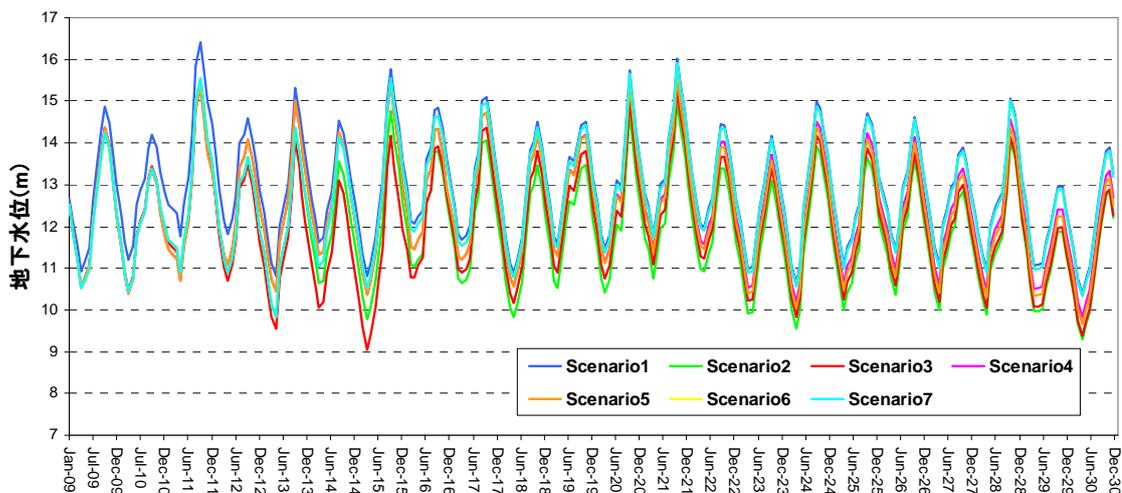


図 5.19 仮想観測井戸 No.1 の地下水位変動（シェムリアップ市、都市化地域中心部、浅い帯水層）

#### 2) 仮想観測井戸 No.2 (既存 SRWSA 井戸中央部、浅い帯水層)

最大の水位降下はシナリオ 3 の 4 m であった。

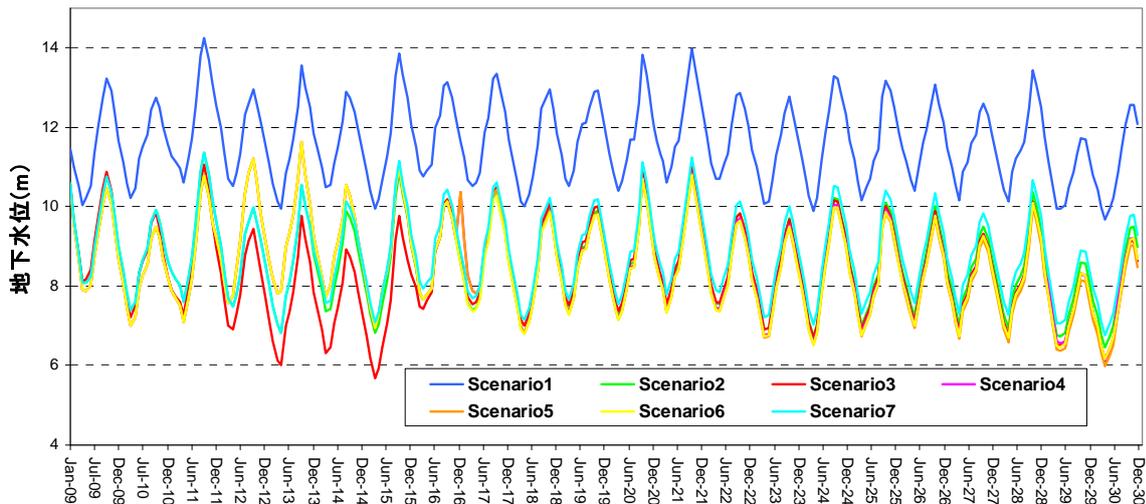


図 5.20 仮想観測井戸 No.2 の地下水位変動（既存 SRWSA 井戸の中央部、浅い帯水層）

### 3) 仮想観測井戸 No.3（アンコール・ワット近辺、深い帯水層）

本仮想観測井戸に最も近い地下水揚水サイトはシェムリアップの都市化地域である。シナリオ 3 では、2015 年に、最大揚水量が市街化地域の私有井戸から揚水されるように設定されており、水位低下傾向が季節変動とともに、仮想観測井戸で見出される。

シナリオ 3 では新規水道施設の完成が 2016 年に計画され、市街化地域の私有井戸による揚水のほとんどは、トンレサップ湖付近に計画される公共水道用の新規井戸からの揚水に切り替えられるため、大幅に減少する。市街化地域での地下水揚水が減少することにより、2016 年から地下水位が回復する。

しかし、公共水道用の新規井戸からの揚水量増加により、新規井戸付近を中心とする水位低下の影響範囲は拡大し、ついには仮想観測井戸サイトに至る。図 5.21 のように、観測井戸の水位への新規井戸からの地下水揚水の影響が 2027 年には確認される。新しい水位降下の傾向は、図に示したように、2027 年から 2030 年まで生じる。最低地下水位は、シナリオ 2 および 3 において 2030 年 5 月に現れる。この月は、50 年回帰年の確率で渇水年として設定される、2029 年の乾季の最後の時期に相当する。自然条件下の水位に比べ、シナリオ 2 および 3 の水位は、約 0.7 m 低下する。

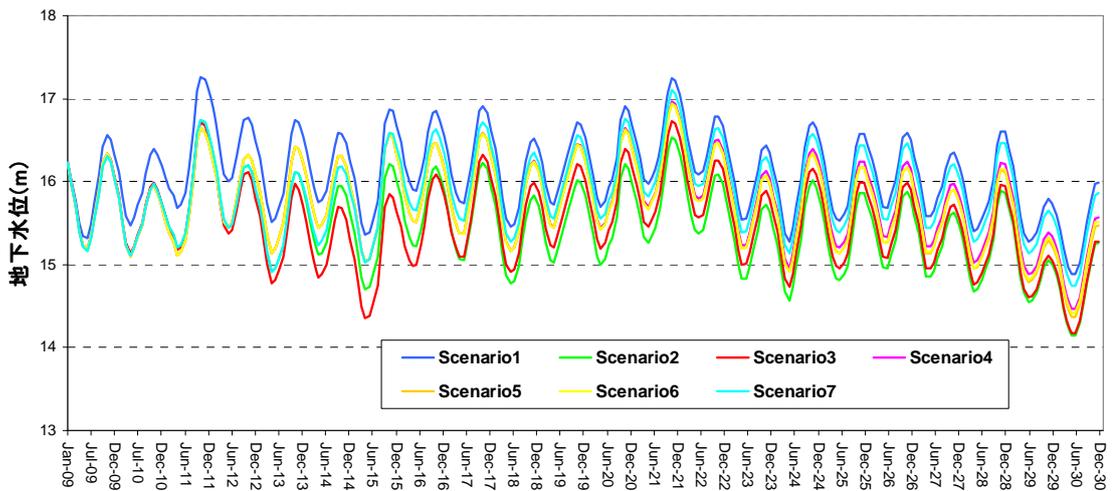


図 5.21 仮想観測井戸 No.3 の水位変動（アンコール・ワット近辺、深い帯水層）

4) 仮想観測井戸 No.4（西バライ貯水池近辺、深い帯水層）

最大の水位低下は、シェムリアップ地域の全給水用に、地下水を利用すると設定された、シナリオ3で、2030年5月に出現する。自然条件下と比べて、シナリオ3の水位低下は、3m以上である。シナリオ4及び5で、最大地下水水位の低下は、シナリオ3と同じ期間に出現する。しかし、その水位低下の程度は、給水開発計画に従って、生産水量の差のために、約2.3mと2.8mである。

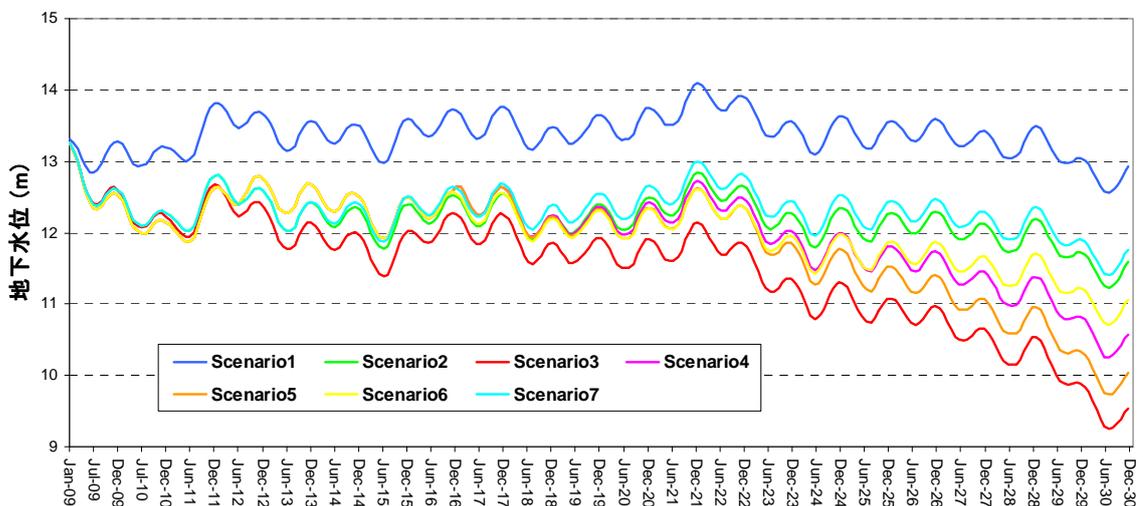


図 5.22 仮想観測井戸 No.4 の水位変動（西バライ貯水池近辺、深い帯水層）

5) 仮想観測井戸 No.5（西バライ貯水池地下、深い帯水層）

仮想観測井戸 No.4 における最大地下水水位低下は、自然条件下の地下水レベルに比べ 3 m 以上低い、仮想観測井戸 No.5 では 2 m 程度であった。

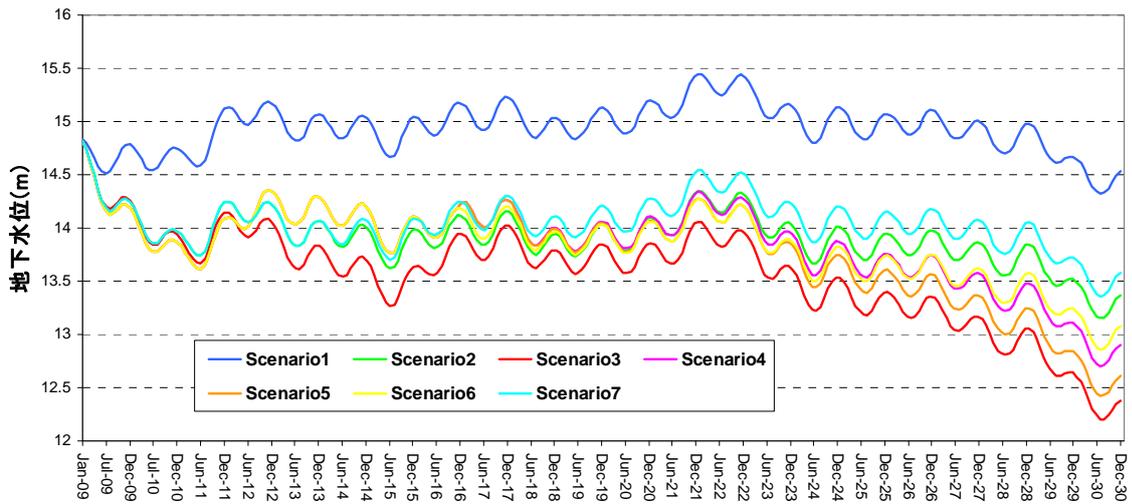


図 5.23 仮想観測井戸 No.5 の水位変動（西バライ貯水池地下、深い帯水層）

6) 仮想観測井戸 No.6（アンコール・トム遺跡地下、深い帯水層）

自然条件に比べて、異なるシナリオでの水位低下は、0.2 m から 0.7 m まで変化する。

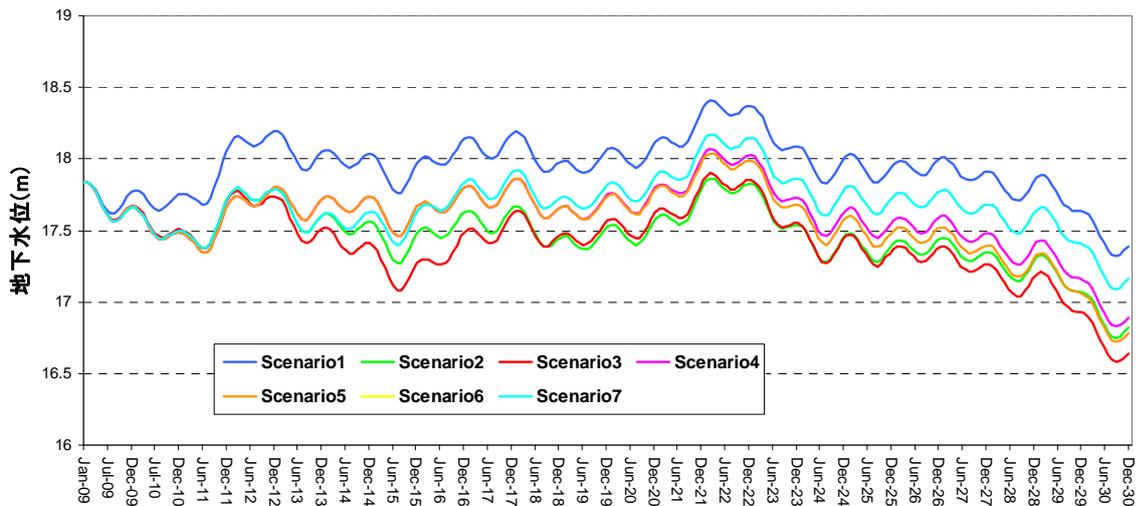


図 5.24 仮想観測井戸 No.6 の水位変動（アンコール・トム遺跡地下、深い帯水層）

7) 仮想観測井戸 No.7（アンコール・ワット世界遺産地下、深い帯水層）

自然条件に比べて、異なるシナリオの地下水位の低下は、0.1 m から 0.7 m まで変化する。

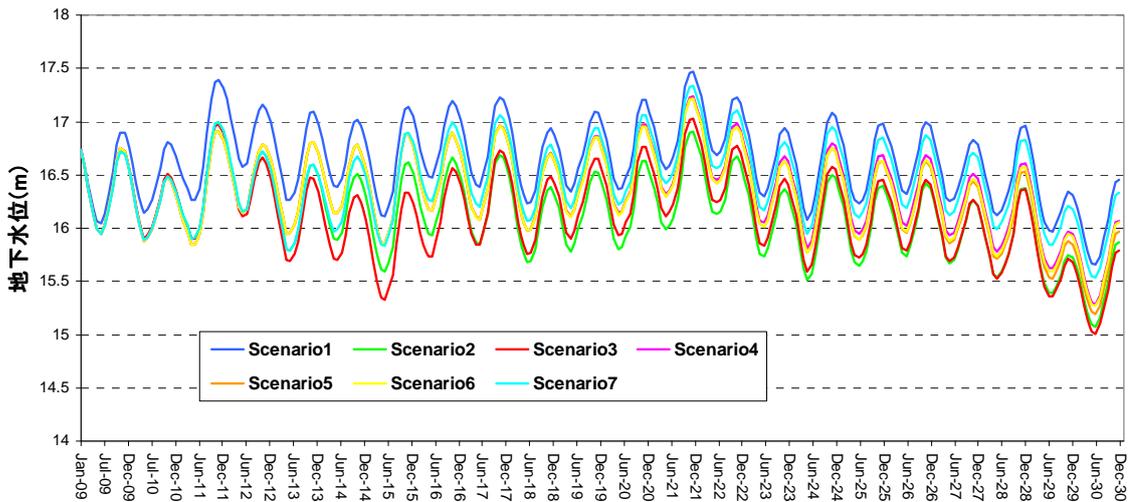


図 5.25 仮想観測井戸 No.7 の水位変動 (アンコール・ワット遺跡地下、深い帯水層)

8) 仮想観測井戸 No.8 (西バライ貯水池南西、新設井戸サイトの中央部、浅い帯水層)

自然条件に比べ、最大地下水位の低下は、各シナリオの地下水揚水量の設定に従って、4.5 m から 6.5 m まで変化する。

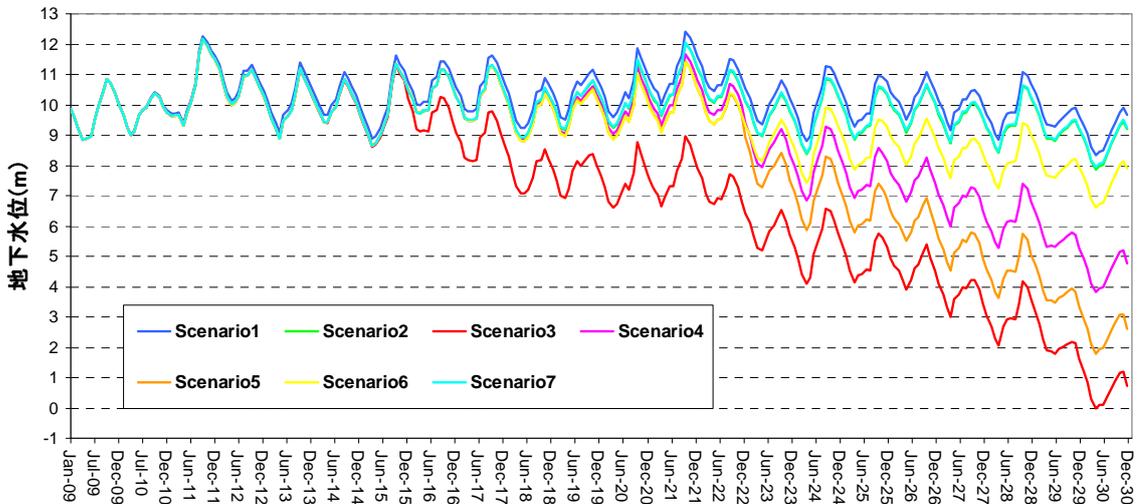


図 5.26 仮想観測井戸 No.8 の水位変動 (西バライ貯水池南西、浅い帯水層)

9) 仮想観測井戸 No.9 (シェムリアップ市南東、新設井戸サイト、浅い帯水層)

図 5.27 は、この新設井戸に、SRWSA 既存生産井戸、市街化地域の私有井戸の影響はないことを示している。地下水位の低下は、シナリオ3から5で設定された新規井戸の揚水により発生している。

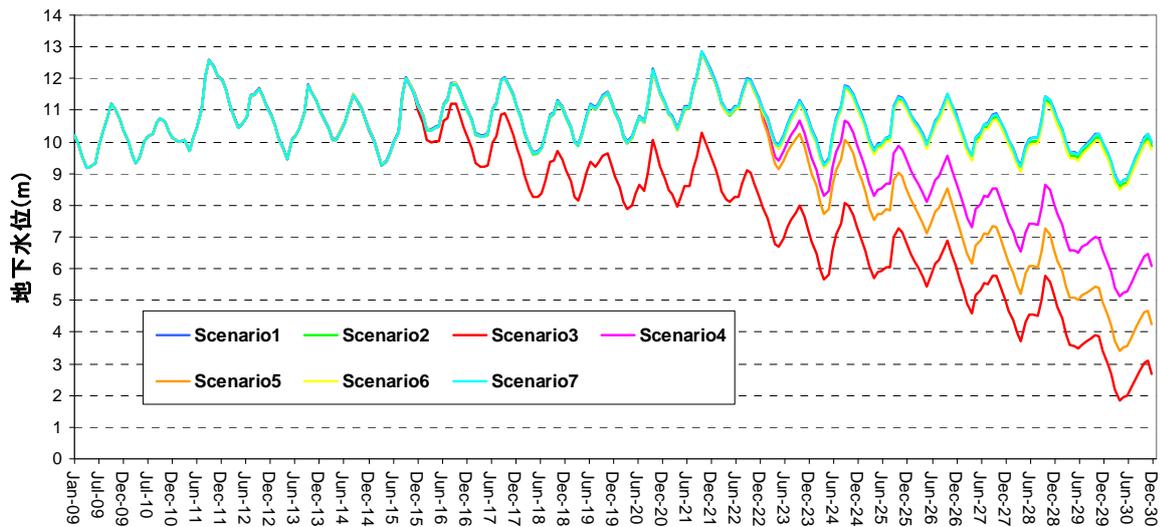


図 5.27 仮想観測井戸 No.9 の水位変動 (シェムリアップ市南東、浅い帯水層)

10) 仮想観測井戸 No.10 (シェムリアップ市南、新設井戸サイトの中央部、浅い帯水層)

最大地下水位の低下は、各シナリオの地下水揚水量の設定により、約 2.6 m から 4.4 m まで変化する。

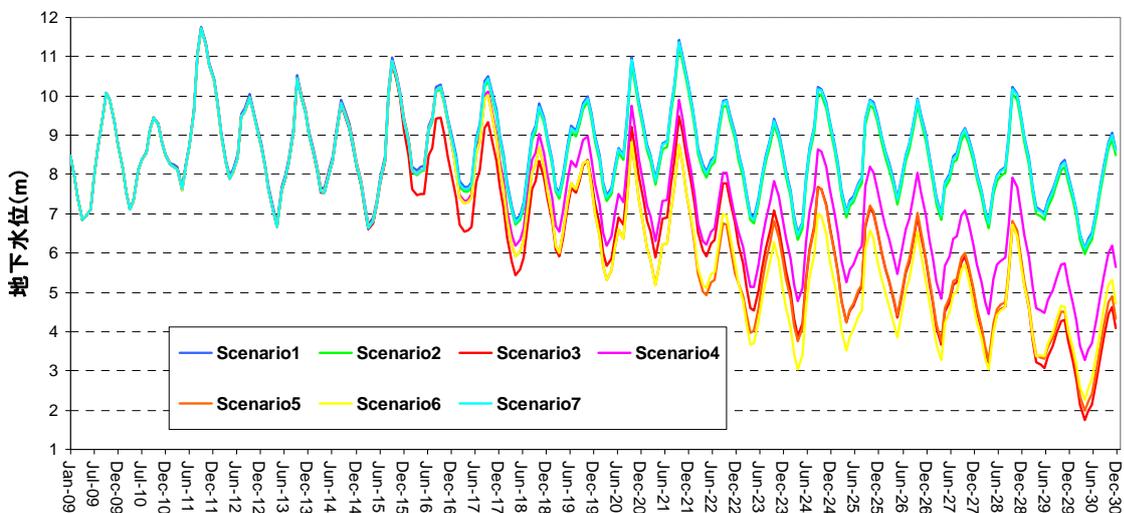


図 5.28 仮想観測井戸 No.10 の水位変動 (シェムリアップ市南側、浅い帯水層)

シェムリアップ地域の地下水開発計画評価に当たっては、地下水位低下による世界遺産サイトへの影響が最重要課題として考慮すべきである。そのため、5本の仮想観測井戸（深井戸）が、最も有名な世界遺産サイト、アンコール・ワット、アンコール・トム、西バライ貯水池の地下や近隣に設定された。2009年から2030年にわたる22年間のシミュレーション期間で、各仮想観測井戸の最大・最小水位が表 5.1 にまとめられた。

図 5.21 から図 5.25 に示したように、5本の仮想観測井戸（深井戸）での最大地下水位降

下は、50年回帰年の確率で、渇水年の最後の月、2030年5月に出現する。自然条件下での最大地下水位低下もまた、この月に出現する。自然条件下での地下水位の低下は、世界遺産保全の観点からは安全な範囲と判断される。検討すべきは、シナリオ1（自然条件下）と各シナリオでの地下水位の差である。これらの差が計算され、下表に集計された。

表 5.1 世界遺産サイト地下、又は付近に設定された5本の仮想観測井戸  
(深井戸)の地下水位変動の集計表

(単位: m)

	シナリオ	Near ANW*	ANW*	ANT*	Near WB*	WB*
最高水位	シナリオ 1	17.26	17.47	18.41	14.09	15.45
	シナリオ 2	16.74	16.99	17.86	13.27	14.81
	シナリオ 3	16.73	17.03	17.9	13.27	14.81
	シナリオ 4	16.97	17.24	18.07	13.27	14.81
	シナリオ 5	16.94	17.22	18.04	13.27	14.81
	シナリオ 6	16.94	17.22	18.04	13.27	14.81
	シナリオ 7	17.1	17.34	18.17	13.27	14.81
最低水位	シナリオ 1	14.88	15.66	17.32	12.56	14.32
	シナリオ 2	14.15	15.07	16.75	11.22	13.15
	シナリオ 3	14.18	15.01	16.58	9.25	12.2
	シナリオ 4	14.47	15.28	16.83	10.25	12.7
	シナリオ 5	14.37	15.19	16.72	9.73	12.42
	シナリオ 6	14.43	15.28	16.83	10.85	12.98
	シナリオ 7	14.75	15.54	17.09	11.4	13.36
水位差	最低1-最低2	0.73	0.59	0.57	1.34	1.17
	最低1-最低3	0.7	0.65	0.74	3.31	2.12
	最低1-最低4	0.41	0.38	0.49	2.31	1.62
	最低1-最低5	0.51	0.47	0.6	2.83	1.9
	最低1-最低6	0.45	0.38	0.49	1.71	1.34
	最低1-最低7	0.13	0.12	0.23	1.16	0.96

(注) (列見出し\*)は5本の仮想観測深井戸の番号を示す。各仮想観測井戸位置は図 5.18 参照、仮想観測深井戸の番号は次の通りである。(ANW: アンコール・ワットの直下、Near ANW: アンコール・ワット付近、ANT: アンコール・トム直下、WB: 西バライ貯水池の直下、Near WB: 西バライ貯水池付近)  
水位差=最低水位(シナリオ1) - 最低水位(シナリオX)、  
シナリオ1は自然条件下での水位計算値

シェムリアップ地域の東部、国道6号線の南側に、バコン遺跡群がある。Prasat Bakongの位置に該当するセルのデータにおいて、地下水低下量の計算を行った。下表にシナリオ1の地下水レベルと比較した各シナリオでの水位降下を示す。

表 5.2 シナリオ1と比較した、各シナリオにおけるバコン遺跡の地下水水位低下量

(単位: m)

シナリオ		シナリオ 2	シナリオ 3	シナリオ 4	シナリオ 5	シナリオ 6	シナリオ 7
水位低下量	浅い帯水層	0.102	3.134	1.315	1.925	0.122	0.022
	深い帯水層	0.106	3.597	1.661	2.452	0.136	0.016

## 5-7-2 地盤沈下の検討

地下水位の低下は地盤沈下を生じかねない。世界遺産敷地内及び周辺には、環濠、人工貯水池、水路といった人工的水路施設がある。これらの水路施設は、世界遺産敷地内や周辺での地下水位をコントロールしている。これは、渇水年や浅い帯水層での地下水開発の場合には、安全サイドに保つ役割を果たしている。

先の JICA 調査 (the Study on Water Supply System for Siem Reap Region in Cambodia, 2000) では、圧縮試験のために、土質サンプルが複数サイトから採取された。7本の観測井戸サイトで採取されたサンプルの圧縮係数(Mv)の値は、井戸位置のみならずサンプル採取深度によっても異なる (詳細はサポーティング・レポート参照)。

最重要世界遺産サイトであるアンコール・ワットに最も近い観測井戸は WT-8 であり、深い帯水層深度に該当する深度での平均圧縮係数は  $1.16E^{-6} \text{ m}^2/\text{kg}$  であった。

観測井戸 WT-4 は、西バライ湖の別の重要な世界遺産から数百メートル離れて立地している。深い帯水層深度に該当する深度での平均圧縮係数は  $4.1E^{-7} \text{ m}^2/\text{kg}$  であった。

Prasat Bakong 遺跡群付近には観測井戸はない。それに最も近い観測井戸 WT-5 は、遺跡群から約 7 km の位置に立地している。他の観測井戸 WT-8 は、二番目に近い井戸であるが、WT-5 と殆ど同様の距離に立地している。WT-7 も遺跡群から約 7 km の距離にある。これら 3 井の採取サンプルで計測された圧縮係数を本遺跡群の地盤沈下解析に用いる。平均圧縮係数は、浅い帯水層・深い帯水層で、それぞれ  $6.22E^{-7} \text{ m}^2/\text{kg}$  及び  $6.33E^{-7} \text{ m}^2/\text{kg}$  であった。

揚水試験結果によれば、深い帯水層の層厚は、8.3 m から 12 m の範囲であった。これら圧縮係数を含む関連パラメーターを用いて、仮想観測井戸・シナリオ毎の地盤沈下量を、下表にまとめた。

表 5.3 地盤沈下量予測

(単位、mm)

場所	Near ANW*	ANW*	ANT*	Near WB*	WB*
シナリオ 2	7.02	5.67	5.48	5.84	5.1
シナリオ 3	6.73	6.25	7.12	14.43	9.24
シナリオ 4	3.94	3.65	4.71	10.07	7.06
シナリオ 5	4.9	4.52	5.77	12.34	8.28
シナリオ 6	4.33	3.65	4.71	7.46	5.84
シナリオ 7	1.25	1.15	2.21	5.06	4.19

(注) (列見出し\*) は 5 本の仮想観測深井戸の番号を示す。各仮想観測深井戸の位置は図 5.18 を参照。仮想観測深井戸の番号は次の通りである。(ANW : アンコール・ワットの直下、Near ANW : アンコール・ワット付近、ANT : アンコール・トム直下の直下、WB : 西バライ貯水池の直下、Near WB : 西バライ貯水池付近)

Prasat Bakong 遺跡群は堀で周囲を囲まれていないため、地盤沈下は深い帯水層だけでなく浅い帯水層でも計算する必要がある。当サイトでの沈下量は両帯水層沈下量の合計とする。計算結果を表 5.4 に示す。

表 5.4 バコン遺跡群の地盤沈下量予測

(単位、mm)

シナリオ	シナリオ 2	シナリオ 3	シナリオ 4	シナリオ 5	シナリオ 6	シナリオ 7
浅い帯水層	1.59	48.73	20.45	29.93	1.9	0.34
深い帯水層	0.71	24.23	11.19	16.51	0.92	0.11
合計	2.3	72.96	31.64	46.44	2.82	0.45

### 5-7-3 地下水位低下量の予測結果

以下に、各シナリオ毎の地下水シミュレーションによる地下水低下量の予測結果を示す。

#### シナリオ 2

シナリオ 2 は現在の地下水揚水量を 2030 年まで継続する設定である。最大の地下水位降下は、浅い帯水層で 3.69 m、深い帯水層で 3.26 m と予測された。深い帯水層での最大水位低下量は、浅い帯水層よりも小さかったが、地下水位低下の影響範囲は、浅い帯水層の定水頭境界条件のために深い帯水層の方が大きい。

#### シナリオ 3

最大水位降下量は、浅い帯水層で 8.3 m、深い帯水層で 7.4 m と予測された。

#### シナリオ 4

最大水位降下量は、浅い帯水層で 4.5 m、深い帯水層で 4.0 m と予測された。

#### シナリオ 5

最大水位降下量は、浅い帯水層で 6.5 m、深い帯水層で 5.96 m と予測された。

#### シナリオ 6

最大水位降下量は、新規井戸地点に集中しており、浅い帯水層で 5.84 m、深い帯水層で 5.77 m と予測された。

#### シナリオ 7

最大水位降下量は、浅い帯水層で 3.3 m、深い帯水層で 2.9 m と予測された。

### 5-7-4 全シナリオの総合的影響評価

シミュレーション結果は、シナリオ毎の水道計画の違いにより、地盤沈下の大きさや世界遺産サイトへの影響は変化するが、地下水位の低下や地盤沈下が全水道拡張計画で発生することを明らかにしている。次表に各水道計画で開発される地下水量と主要世界遺産サイトのアンコール・ワット、アンコール・トム、西バラライ貯水池、及びバコンでの予想地盤沈下量を示す。

全ての水道拡張整備計画が地下水の低下及び地盤沈下を発生させるため、これらの異なる計画の評価は、表 5.5 に示したようなリスクレベルを比較することによってのみ可能となる。

表 5.5 全シナリオによる影響評価

シナリオ	PA (m <sup>3</sup> /d)	LD_ANW	LD_WB	Bakong	リスクレベル
シナリオ 3	77,250	6.25	9.24	72.96	1
シナリオ 2	0	5.67	5.1	2.3	2
シナリオ 5	60,250	4.52	8.28	46.44	3
シナリオ 4	43,060	3.65	7.06	31.64	4
シナリオ 6	30,000	3.65	5.84	2.82	5
シナリオ 7	0	1.15	4.19	0.45	6

(注) PA : 新規建設（井戸位置は図 5.16 参照）の井戸揚水量。既存 SRWSA 井戸揚水量は数字に含まれない。

LD\_ANW : アンコール・ワット遺跡サイト下での地盤沈下量 (mm)

LD\_WB : 西バライ貯水池遺跡サイト下での地盤沈下量 (mm)

Bakong : バコン遺跡サイト下での地盤沈下量 (mm)

リスクレベル : アンコール・ワット遺跡への影響を一位の、西バライ湖への影響を二位の危険因子と考え、危険レベルを決定した。(注、リスクレベルは、数値が小さい方が高いことを示す。)

シナリオ 2 では新規井戸は計画されないが、アンコール・ワット遺跡への影響で危険レベル 2 位とした。これは同遺跡に近い市街地の私有井戸で 7,000 m<sup>3</sup>/日以上揚水を持続するシナリオによる。

地盤沈下の危険性は、沈下量の大きさや絶対量ではなく不等沈下にあることは一般的に知られている。しかし、不等沈下の予測には、さらに詳細な土質調査が必要になり、予測自体が困難である。世界遺産サイトでのこの種の調査費用は非常に巨大なものとなるだけでなく、世界遺産サイトの基礎下の最も重要な場所の下でこのような調査を実施することは不可能である。従って、最良の方法は、上表に示したように、最小の影響をもつシナリオであるシナリオ 7 を選定することである。

シナリオ 7 のみが、給水源の大部分として、地下水利用の代わりに、トンレサップ湖水を利用し、SRWSA 既存井戸はシェムリアップ市の給水の一部として利用する計画である。極端に異常な渇水状況が発生した時、これらの井戸からの揚水は、上表に示したように、アンコール・ワット、西バライ貯水池、バコンの 3 か所の世界遺産に影響を及ぼすが、シナリオ 7 が現実的に、採用可能な計画であるかどうかの検討が必要である。

アンコール・ワット遺跡の地盤沈下量は、シナリオ 7 で 1.15 mm と予測される。この地盤沈下量では、不等沈下が生じても計測することは、困難であり、既存の SRWSA 井戸サイトからさらに遠い場所に立地する、アンコール・トムのような他の世界遺産も含めて、安全なレベルと判断できる。

シナリオ 7 での西バライ貯水池の地盤沈下量は、4.19 mm に達する。この値は、許容沈下量を超過している。しかし、世界遺産の西バライ貯水池のスケールとそれを構築するために利用された材料の量を考えると、他の世界遺産とは異なっている。アンコール・ワットや他の遺跡の殆どは、可塑性の小さい石材でできている。しかしながら、西バライ貯水池

は、可塑性が高い粘土で構築されている。一方、地下水位は、突然低下するのではなく、地下水位変動曲線（図 5.18 から図 5.27 参照）に示したように、季節変動を繰り返しながらゆるやかに変化するプロセスである。西バライ貯水池のように数平方 km もの面積を持つ粘土構造物の可塑性は、数ヶ月にわたり発生する 4.19 mm の大きさの地盤沈下量を補償するのに十分である。4.19 mm は、西バライ貯水池の大きさの構造物において、人間によって感知されるにはあまりにも小さな値であるために、その変形は検知されないだけでなく、破壊やクラックは、経験上及び地質工学の観点から予測されない。そのため、このシナリオによる西バライ湖の世界遺産への影響は、無視できるほど小さい。

バコン遺跡の地盤沈下量は、アンコール・ワットや西バライ貯水池のそれより小さい 0.45 mm と予測され、安全範囲内と判断される。

## 第6章 結論と提言

## 第6章 結論と提言

### 6-1 結論

本調査の目的は、世界遺産であるアンコール・ワット遺跡群を有するシェムリアップ市において、近年の観光客の急激な増加とホテル・レストラン等の観光施設の急増により、大量に揚水されるようになった地下水の遺跡に対する影響を調べ、地下水利用の評価をする、及びモニタリング体制の強化について検討することである。

#### (1) 地下水利用の評価

シェムリアップ市域において、井戸台帳調査として大規模揚水施設を調べた結果、ホテル等の観光施設、学校等の公共施設や工場が現在 280 施設あり、乾季には約 5,786 m<sup>3</sup>/日を揚水していることが判明した。これ以外、SRWSA は公共水道のために約 9,000 m<sup>3</sup>/日を揚水し、その他一般住宅による揚水が約 24,000 m<sup>3</sup>/日あると見込まれる。従って、現在、同地域から少なくとも 38,000 m<sup>3</sup>/日は揚水されている。

一方、アンコール・ワット周辺部の遺跡は市域に隣接し、また、大規模に揚水しているホテル等の観光施設は市中心部に集中している。将来、さらに観光施設が建設され、地下水の揚水が増加した場合、地下水位（圧）が低下して地盤の圧密沈下が生じ、世界遺産である遺跡に影響を与えることが危惧される。

これを確認するために、既存のモニタリング井戸の地下水位観測データを用いて解析を行った。その結果、地下水位観測データでは、観測井戸周辺の揚水井戸による僅かな水位変動が観測されたが、恒常的な地下水位低下は観測されなかった。また、SRWSA 井戸の揚水による地下水位低下も約 2.6 km 離れた国道 6 号線沿いの WT-4 観測井戸で観測されなかった。この結果、現状では、地下水利用に対する影響は認められなかった。

将来的な水需要増大に対する遺跡への影響を調べるために、地下水シミュレーションにより検証した。この検証に当たって、水道計画年である 2030 年時点での水需要 86,000 m<sup>3</sup>/日を賄うために、以下の 6 つのシナリオを考慮して検証した。

シナリオ	シナリオ条件
シナリオ 2	現在の地下水利用の継続的利用
シナリオ 3	地下水を水源とする公共水道で全ての水需要を賄う。
シナリオ 4	西バライ貯水池の灌漑用放流水を利用し、地下水の開発を一部少なくする (SRWSA 水源井を含めた揚水量：52,000 m <sup>3</sup> /日～69,000 m <sup>3</sup> /日)
シナリオ 5	
シナリオ 6	Bakong 遺跡への影響を少なくするために、シェムリアップ川東岸地域には新規井戸を建設しない。
シナリオ 7	水道水源として、SRWSA 井戸を除いて、既存井戸による揚水を休止し、トンレサップ湖の湖水を利用する。

(注) シナリオ 1 は、地下水利用がない自然状態のものであり、計算上の比較のためのケースであり省略。

上記シナリオにおける将来水源としての地下水開発は、国道 6 号線の南方約 4～5 km、東—北西方向約 30 km 幅、標高 10 m 以上の地区に新規井戸を建設する計画である（井戸位置は図 5.16 参照）。

シナリオの検討結果、50 年に 1 回の異常渇水年には、どのシナリオでも世界遺産遺跡で地下水位低下と地盤沈下が生じることが明らかになった。特に、これらのシナリオの中で、将来水需要について、全て地下水を水源とする公共水道により賄うとしたシナリオ 3 が最も遺跡への地盤沈下量が大きく、リスクが高い。それに次いで、リスクが高いのが、現状での市域での地下水利用を継続するシナリオ 2 である。その他のシナリオ 4～6 についても地下水揚水の遺跡への影響がみられるために推奨されない。これらのシナリオの中で、最もリスクが小さいのがトンレサップ湖水を将来水源として利用するシナリオ 7 である。

以上の結果から、将来の水需要を賄うためにはシェムリアップ地域では新たな地下水開発を行わず、また、現在の私有井戸も廃止してトンレサップ湖の湖水を代替水源として利用するのが妥当であるとの結論となる。

## (2) モニタリング体制の強化

重要な世界遺産であるアンコール遺跡は、石を積み上げただけの建築物より構成されているために、地盤沈下等の地盤の変動には極めて脆弱である。そのため、将来発生するかもしれない市域での地下水の過剰揚水による地下水位低下及び地盤沈下から遺跡を保護することは極めて重要である。現在、シェムリアップ地域には、8 箇所に 9 本の地下水観測井戸、及び 2 箇所に 4 本の地盤沈下井戸が建設され、地下水位と地盤沈下を監視している。しかしながら、本調査により、これらの観測施設の一部の機材は正常に機能せず、その観測データの信頼性が低いことが明らかになった。各観測井戸の機器の稼働状況は、本報告書の第 3 章に記載している。これらの施設を管理する SRWSA は、現在、データを定期的に収集・保存し、その信頼性を確認するために、手動測定をデータ収集時に合わせて行っているが、それに加えて、正常に機能していない観測施設を復旧して信頼性の高い観測データを取得できるようにすべきである。

当地域では、SRWSA による観測体制に加えて、APSARA により地下水観測も行われている。DOWRAM は、現在は地下水観測体制を保有していないが、将来的には、地域の水資源利用に関して調査研究を行う立場にある。現在、これらの機関による連携は殆ど行われていない。将来的には、連携を強化して、シェムリアップ地域の重要遺跡保存のために、地下水のモニタリング体制を強化していく必要がある。

## 6-2 提言

- 1) 地下水シミュレーションの結果、将来、50 年に 1 度の渇水年になった場合、水需要を全量地下水で賄った場合のみならず、現状の地下水利用を続けたとしても世界遺産遺跡に対して地盤沈下が発生するリスクがあることが明らかになった。この状況を改善するために、新規の地下水開発を停止し、出来るだけ早くトンレサップ湖の湖水を水

源とする水道施設に切り替えることが望ましい。

- 2) 将来、トンレサップ湖の湖水を水源とする水道施設に切り替わった場合、速やかに、既存の大型民間井戸施設による揚水を禁止する方策がとられるべきである。このためには、APSARA/県による条例制定と同時に住民啓蒙キャンペーンを実施すべきである。
- 3) SRWSA は、観測施設から地下水位及び地盤沈下の観測データを概ね月 1 回収集し、データの信頼性チェックのために手動観測も同時に行っている。しかしながら、収集時期がずれて手動観測が欠測となっている月もあり、定められた手法によるデータ収集を徹底させるべきである。
- 4) SRWSA は、手動と自動観測データとを比較して、自動観測データの信頼性をチェックすべきである。同じ観測日の手動と自動観測データを表に並べて比較を行い、その観測データの違いをチェックしたり、グラフに描いて相関関係をチェックすることが必要である。
- 5) SRWSA は、故障している観測機器を直ちに復旧すべきである。各観測井戸の観測機器の現況は、「第 3 章、3-1 地下水モニタリングの現況」に示した。
- 6) SRWSA は、APSARA や DOWRAM とそれぞれの観測データを共有して、活用する仕組みを構築すべきである。