

# シムリアップ市上水道整備計画への地下水管理モデルの適用

PERENNIAL GROUNDWATER YIELD PLANNING FOR THE SIEM REAP REGION,  
CAMBODIA

高橋 秀\*・鈴木忠男\*\*・高橋昌弘\*\*\*

Shu TAKAHASHI, Tadao SUZUMURA and Masahiro TAKAHASHI

A groundwater pumping planning model, maximizing the optimal pumping rates subject to the physical aquifer, was constructed for the Siem Reap Region bordering the Tonle Sap Lake, Cambodia. There, groundwater can be expected to meet the increasing water demand for municipal use due to urbanization and tourism. However, there are great concerns about land subsidence around the Angkor heritage area due to pumping. An optimal spatial distribution of pumping was computed near the Siem Reap airport bounded to allowable drawdowns around the heritage area. The pumping strategy results are then verified using a transient simulation.

*Key Words*: sustainable groundwater pumping, optimization, Angkor Wat, land subsidence, groundwater modeling

## 1. はじめに

地下水開発量をもとめる際の問題は、「地下水障害をひき起こすことなしに、長い期間(持続的に)どこでどのぐらい揚水できるのか?」ということである。このような問題は、定常地下水流動シミュレーションと最適化手法を組み合わせた地下水管理モデルにより効率よく解くことができる。

本稿では、国際協力事業団「カンボジア国シムリアップ市上水道整備計画調査」において実施した地下水揚水計画策定について報告する。シムリアップ市においては地下水が有望な上水道水源と考えられるが、当地域にはアンコールワットなどの遺跡があり、過度な揚水による地盤沈下の発生が懸念されている。

これまで、地下水管理モデルはマスタープランレベルの揚水開発計画策定に有効に利用されている。しかし、従来のモデルは非線形項を含む地下水流動式に最適化手法を組み込むことが困難なため、より高い地下水シミュレーション能力を必要とされるF/Sレベルの解析には十分対応できなかった。そこで、準3次元定常地下水流動シミュレーションと最適化手法を用い持続可能な揚水量計画を策定した。

## 2. 調査対象地域

調査対象地域は、カンボジア国の中央に位置するトンレサップ湖に面する東西35km、南北40km、面積1,400km<sup>2</sup>で、アンコールワット遺跡、シムリアップ市、西バライ貯水池を中心とするシムリアップ川流域にある(図-1)。



図-1 調査対象地域

\* 中央研究所 開発研究部

\*\* コンサルタント国際事業本部 地質・防災部

\*\*\* 首都圏事業部 環境部

シムリアップ地域は熱帯モンスーン地帯に属し、雨期と乾期が明瞭に分かれており、雨期は5月～10月、乾期は11月～4月である。過去19年の平均年降雨量は1,418mmであり、その90%近くが雨期に集中する。

シムリアップ市はトンレサップ湖の北15km、標高15m～20mに位置し、人口約10万人のシムリアップ州都で、アンコール遺跡観光で年間50万人の観光客が訪れる。最近5年間の人口増加率は4%、観光客増加率は100%に近く、年々増加する人口と観光客に伴うシムリアップ市に必要な水供給量は、2010年に12,000m<sup>3</sup>/日に達すると予測された。一方、シムリアップ市周辺にあるトンレサップ湖、西バライ貯水池、シムリアップ川、地下水の4つの代替水源を、水質、水道システムの建設および維持管理費について比較すると、地下水が上水道水源として最も有利と考えられた<sup>1)</sup>。

同地域の帯水層は扇状地下に広く分布し、地下水の流れの方向は扇状地に沿ったもので、最終的にトンレサップ湖に流れ込むと考えられる。図-2に8ヶ所の自動モニタリング井戸(WT-1～WT-8)を含む観測井戸の位置と予想される地下水の流れを示す。

本地域の帯水層は厚さ20m～40mの沖積および洪積の砂層にある。現在、多くの住民は不圧地下水を浅井戸からくみ上げているが、浅井戸のため水質は鉄分濃度が高く生活用水として良好ではない。しかし、適切な場所と深さに新規の揚水井戸を設置すれば、水質的にも良好な地下水を利

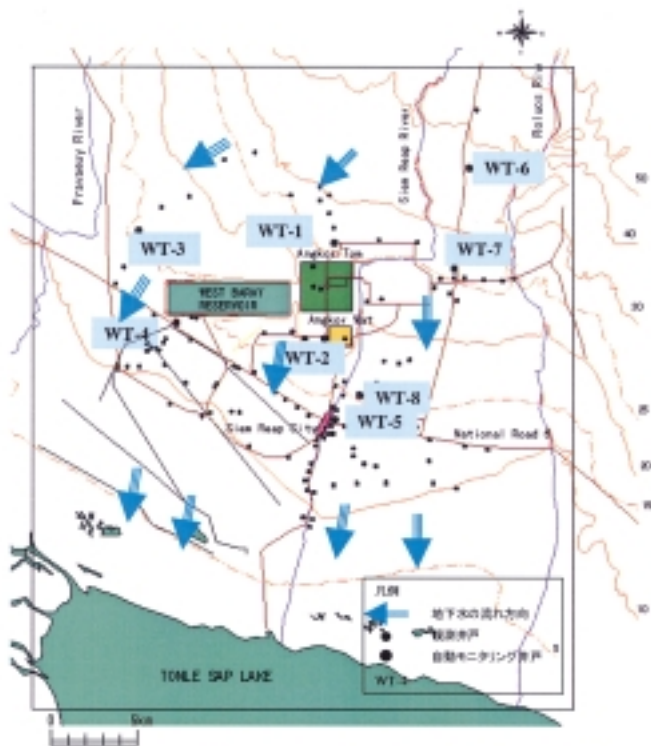


図-2 地下水観測井戸の位置

用できると考えられた。

一方、新規井戸を設置し継続的に揚水することにより、アンコールワット遺跡とその周辺において地盤沈下の問題が生じることが懸念されたので、シムリアップ市の新規地下水開発においては、以下の問題を解き持続可能な揚水計画を策定する必要があった。

揚水によるアンコールワット遺跡周辺域の地盤の収縮(沈下)が許容範囲内にあるかどうか？

揚水による地下水の低下が浅い井戸、ハンドポンプ井戸の井戸枯れや揚水量の低下を引き起こさないか？

### 3. 持続可能な地下水揚水計画の策定

#### (1) 計画策定の流れ

シムリアップ地域の持続可能な地下水開発計画の策定手順を図-3に示す。まず、水理地質調査結果を基に対象地域の帯水層を3次元地下水流動シミュレーションモデル(MODFLOW96)に合わせモデル化した。さらに、西バライ貯水池の南に地下水開発候補地区を選定し、アンコールワット遺跡周辺に地盤沈下の問題を引き起こさない制約のもとで、地下水開発可能量(最適生産井戸の位置と揚水量)を地下水管理モデルより求めた。次に、新規の井戸の生産量と水質を確認するため、2本のパイロット生産井戸を建設した。最後に、計画した揚水に伴って生じる周辺地域への影響を詳しく評価するために非定常地下水シミュレーションを実施した。

#### (2) 持続的なくみ上げ

地下水を「持続的」にくみ上げるためには、「1年(1水文年)を通じての水収支が平衡を保ち、地下水の恒常的低下を生じない」状態を確保する必要がある<sup>2)</sup>。たとえば、地下水開発が実施される前の自然状態(あるいは一定規模の地下水開発が実施され、同等量の地下水利用が継続されている状態)ならば、一定の気象水文環境の下では水収支が平衡に保たれる。すなわち、1年(1水文期間)内では、地

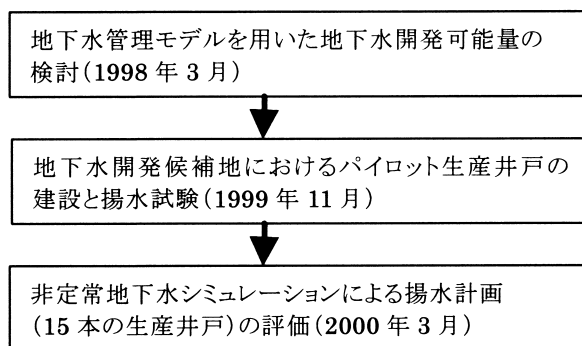


図-3 持続可能な揚水計画の策定手順

下水位の変化(季節的な変動)はあるが、開始時と終了時の水位は同一になるので、水収支は一定とみなすことができる(初期平衡状態)。新たな地下水開発が始まり、一定の揚水(井戸の配置、揚水量が一定)をある期間続けると、その揚水量に対応して新しい平衡状態に達する(2次平衡状態)。この2次平衡に達した状態で、地下水障害が発生しないかあるいは許容範囲内にあれば、この揚水は持続可能なくみ上げといえる。

#### 4. 地下水管理モデル

##### (1) モデルの特徴

持続可能な揚水計画は、定常地下水流動シミュレーション(平衡状態の計算)と最適化手法を組み合わせたモデルにより効率よく解くことができる。今回の検討で採用するモデルは、複数の帯水層システム下の地下水流動をシミュレートする準3次元地下水流動式と線形/非線形計画法をカップリングしたモデル<sup>3)</sup>であり、MODFLOW<sup>4)</sup>と同等のシミュレーションの下に揚水計画の最適化問題を解くことができる。

##### (2) 帯水層システムおよび水理定数の平面分布

地下水の流れは有限差分法を用いてシミュレートするので、解析対象区域を500m×500mサイズの正方形の格子(以降メッシュとする)で分割した(図-4)。

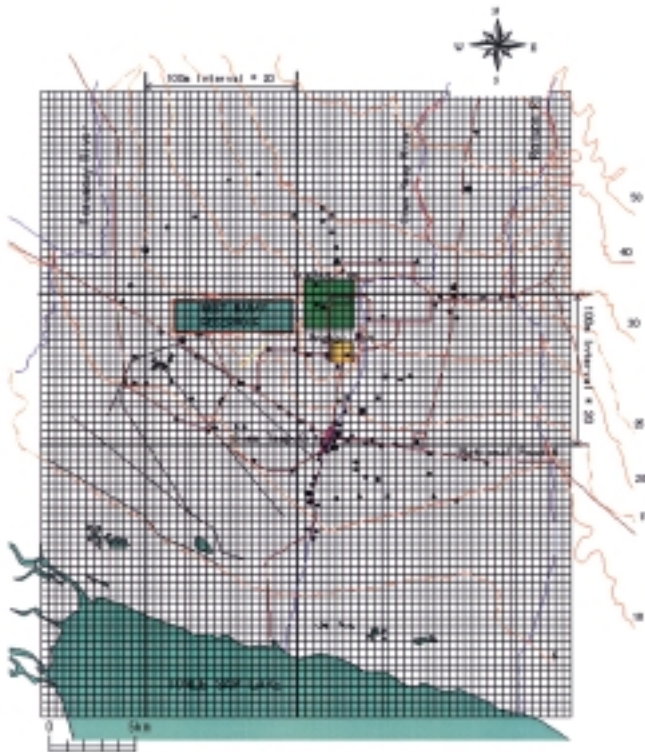


図-4 解析対象地域とメッシュ図

雨水の地下浸透量、境界外部、シェムリアップ川、トンレサップ湖と帯水層間の流出入を考慮し、現状の地下水分布(1997年9月~1998年2月まで地下水平面分布の時系列)と計算結果が一致するまで非定常計算を繰り返し、帯水層厚、帯水層の透水係数などの水理定数の平面分布を同定した。以下にモデルの概要を示す。

##### 1) 境界条件

北側は、アンコールワットから北10km付近を非流動境界とした。南側はトンレサップ湖縁辺標高6m付近を既知水頭境界とした。西側はSok川、東側はRolus川とし、ともに既知水頭境界とした。

##### 2) 帯水層構造

サウンディングおよびボーリングコア等の水理地質調査結果より、帯水層構造は上層に不圧地下水、下層に被圧地下水の2層構造とした(図-5)。

##### 3) 地下浸透量

地形図(1:50,000)より得られた土地利用情報を500m四方メッシュ単位で整理し、土地利用に応じて帯水層への浸透量時系列を、地表面付近の水収支より算定した。たとえば、灌漑水田からの浸透量は、降水量、灌漑用水量、稲の蒸発散量の水収支から求めた(図-6)。

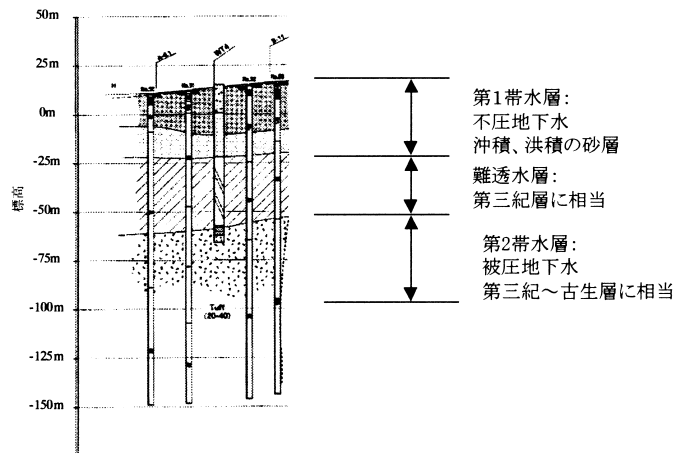


図-5 水理地質断面図

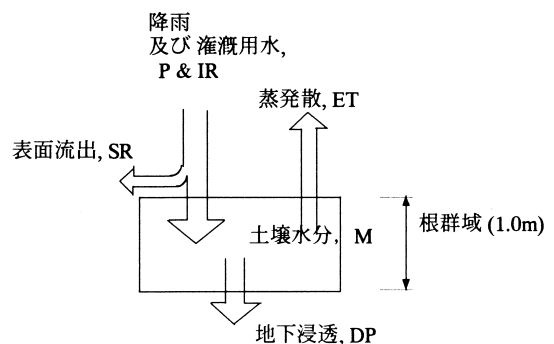


図-6 地表面付近の水収支と地下浸透量



#### 4) 浅井戸からの揚水量

浅井戸の揚水量の記録はないので、村落単位で住民数と一人当たりの水の消費量(100liter/day)を乗じて推定し、メッシュ単位のデータとして入力した。

#### (3) モデルの構成

今回構築した地下水管理モデルは表-1に示す通りの目的関数と制約条件からなり、帯水層システム、平面差分セルシステム、境界条件、水理定数の水平分布は、MODFLOW96で同定した値をそのまま利用した。なお、モデルは最適化言語(GAMS)で書かれ、線形計画問題用ソルバー(MINOS-LP)で解いた。

#### (4) 非線形モデルの最適解を求める方法

帯水層システムでは上層に不圧帯水層があるため、地下水流動式は非線形となる。また、自然排水路への流出量、シエムリアップ川の流出入量を求める近似式も非線形である。したがって、線形計画法を用いて直接解くことはできないので、非線形項を解くためにサイクリング手法を適用した。すなわち、1サイクル毎に、非線形項を線形近似し、MINOS-LPソルバーで最適解(1サイクルにおける最適解)を求め、これを真の最適解に収束するまで繰り返した。

#### (5) 地下水管理モデルを用いた開発可能量の検討

アンコールワット遺跡付近の地盤変位の許容量、水質、生産井戸の揚水能力を考慮して、以下の制約条件を設定した。

##### 1) 新規揚水地点

調査地域内10カ所で実施した揚水試験の結果、西バライ貯水池西端付近のWT-4の水量は444liter/minで十分な揚水量が期待できた。そこで、新規の生産井戸の建設候補地点については、地下水中の鉄の含有量が少なく、送水施設の建設費を低く抑えることを条件とし、揚水適地を西バライ貯水池の南、国道沿いとした。

##### 2) 揚水による地下水位低下量

アンコールワット付近の地盤変位のモニタリング結果から、0.3mの地下水位低下が原因で生じる地盤沈下は1.0mm

表-1 地下水管理モデルの構成

|      |   |
|------|---|
| 目的関数 | 地下水開発候補地からの揚水量の最大化  |
| 制約条件 | 1) 準3次元定常地下水流動式<br>2) Siem Reap 川から帯水層への涵養および帯水層から Siem Reap 川への流出<br>3) ポンプ施設の揚水能力<br>4) 許容地下水位低下量 |

以下であると判定された。そこで、アンコールワットおよびアンコールトム周辺における地下水位低下許容量を0.3mとした。

#### 3) 1セル当たりの揚水量の上限

1セル当たりの揚水量の上限は、井戸内の地下水位の低下量の制限値から、逆算して求めた。

モデルで計算される地下水位は、500m×500mメッシュの平均地下水位を表しており、実際の井戸における地下水位とは異なる。そこで、以下のチームの式から、井戸内の地下水位を算出し、これが10m以上(帯水層の2/5)低下しないことを制約とした。

$$h_{wt} = h_{ij} - \frac{Q_{wt}}{2\pi T} \times \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) \quad (1)$$

ここで、開発候補地の条件、 $h_{wt}$ :井戸内水頭(=5m)、 $h_{ij}$ :平面メッシュ平均計算水位(=15m)、 $r_e$ :等価井戸半径(0.208a)、 $a$ :セルのサイズ(=x=y=500m)、 $r_w$ :井戸半径(=0.05m)、 $T$ :透水量係数(=透水係数×帯水層の厚さ=1×10<sup>-4</sup>m/s×25m)を(1)式に代入すると、揚水量 $Q_{wt}$ =0.02m<sup>3</sup>/sが求められる。これを1セル当たりの揚水量の上限とした。

この0.02m<sup>3</sup>/s(1メッシュ内に600liter/min×2本相当)は、WT-4(約500liter/min)にほぼ匹敵する揚水量を見込めると仮定した場合であり、安全側をとって、 $Q_{wt}$ =0.01m<sup>3</sup>/s(1メッシュ内に300liter/min×2本相当)のケースも想定した。

#### 4) 地下水管理モデルによる予測結果

各セルにおける揚水量の上限と揚水地点の許容地下水位低下量を変えた7ケースについて最大可能揚水量を求めた。表-2に計算結果である各ケースの最大可能揚水量と揚水地点数および生産井戸の本数を示す。また、図-7と図-8にCase5における井戸の最適配置、地下水位低下量の平面分布をそれぞれ示す。

図-7において、69の生産井戸設置候補セルのうち、国

表-2 解析ケースの設定と揚水計画量

| ケース   | 揚水地点の平均地下水位低下量(m) | 揚水量の上限(m <sup>3</sup> /s) | 開発候補地区からの最大可能揚水量(m <sup>3</sup> /day) | 揚水地点数(生産井戸の本数) |
|-------|-------------------|---------------------------|---------------------------------------|----------------|
| Case0 | 3.00m             | 0.20                      | 16,330                                | 6(12)          |
| Case1 | 1.00m             | 0.01                      | 9,850                                 | 31(62)         |
| Case2 | 2.00m             | 0.01                      | 14,170                                | 18(36)         |
| Case3 | 3.00m             | 0.01                      | 14,320                                | 17(34)         |
| Case4 | 1.00m             | 0.02                      | 9,850                                 | 31(62)         |
| Case5 | 2.00m             | 0.02                      | 14,947                                | 10(20)         |
| Case6 | 3.00m             | 0.02                      | 15,638                                | 10(20)         |

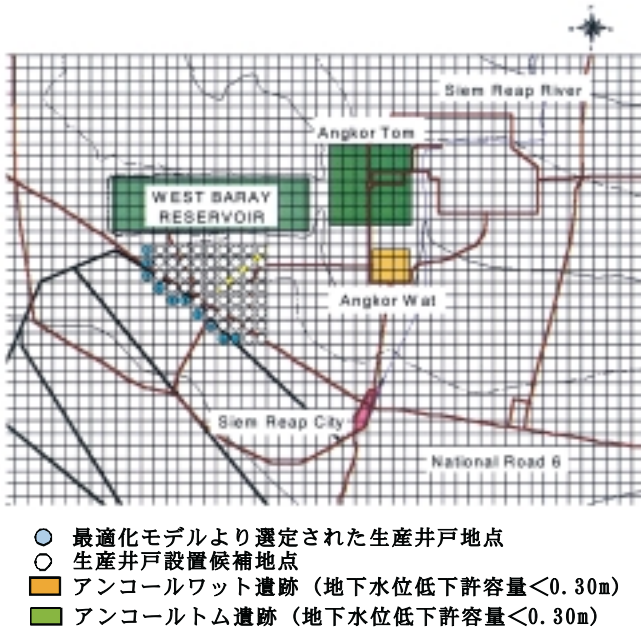


図 - 7 生産井戸の最適配置 (Case 5)

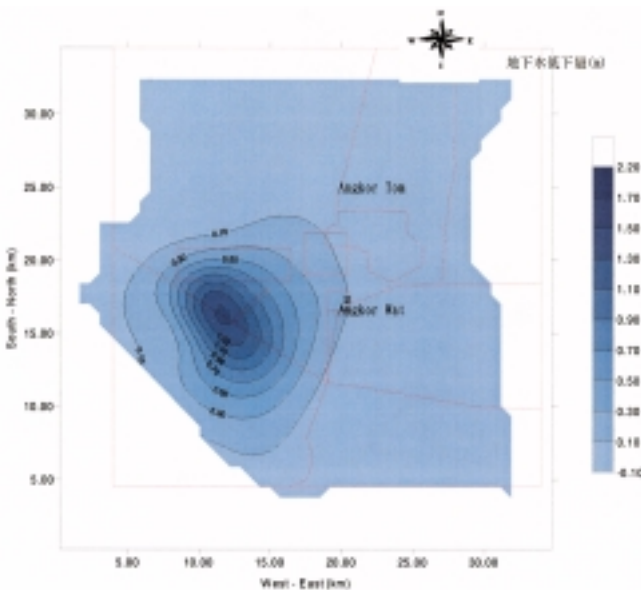


図 - 8 地下水位低下の水平分布

道沿いの10セルが最適な生産井戸の位置として選ばれている。また、図 - 8において、アンコールワット周辺域の地下水位低下量は0.3m以下となることがわかる。

計算上では制約条件をゆるめれば(大きな低下量を許容する、あるいは揚水量の上限を大きく設定する)、より多くの揚水が可能である。しかし、Case 1、Case 4のように新規の生産井戸を62本も建設することは事実上難しい。したがって、10地点に新規の生産井戸を設置するCase 5が最適な揚水計画であると判断する。さらに、最大揚水量については、安全側のみで12,000m<sup>3</sup>/day(シミュレーション結果の80%)に設定する計画とした。

## (6) パイロット生産井戸と水質分析

2本のパイロット生産井戸(pp-99-1とpp-99-2)を、地下水管理モデルより求められた最適位置、すなわち国道6号線に沿った選定地点の両端に建設した(図 - 9)。揚水試験において、パイロット生産井戸の揚水量は5mの水位低下で約800m<sup>3</sup>/dayであった。また透水係数は7.0×10<sup>-5</sup>m/sであった。水質については、砒素含有量は0.01mg/l以下、鉄分含有量も0.3mg/l以下で、ともにWHOの水質基準を満たしていた。

## (7) 非定常シミュレーションによる予測計算

### 1) 計画揚水による周囲の影響の予測

地下水管理モデルで得られた開発可能揚水量と生産井戸の最適配置、さらにパイロット生産井戸の揚水試験結果から、揚水量800m<sup>3</sup>/day規模の生産井戸を15本、400m間隔で配置する計画を立案した(図 - 10)。ここでは、この揚水に伴って生じる周辺地域への影響を予測するために、非定常シミュレーションを実施した。

非定常地下水流動シミュレーションモデル(詳細モデル)は、地下水管理モデル作成時のシミュレーションモデル(基本モデル)に改良を加え、新たに検定計算を実施し構築したものである。基本モデルと詳細モデルの相違点を表 - 3に示す。

### 2) 予測計算結果

2006年から2011年の期間、15本の計画井戸で定期的に12,000m<sup>3</sup>/dayの揚水をした場合、周辺にどのような影響が生じるかをシミュレートした。

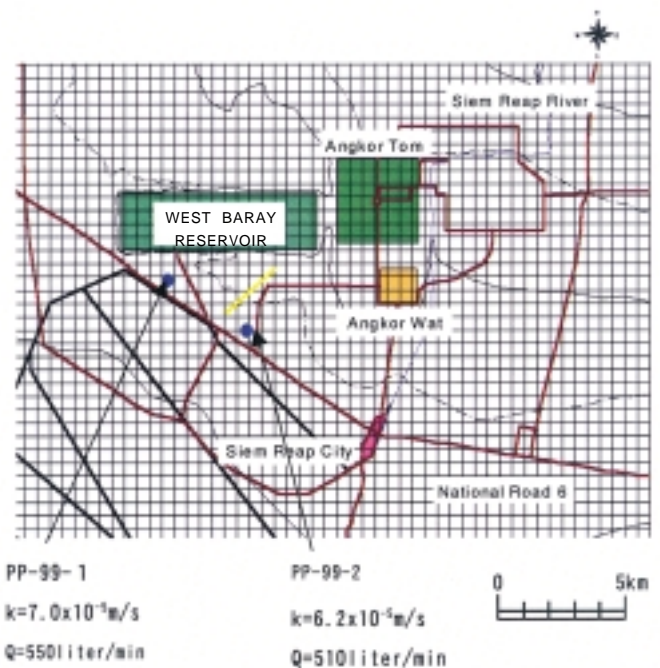


図 - 9 パイロット生産井戸の配置と揚水試験結果

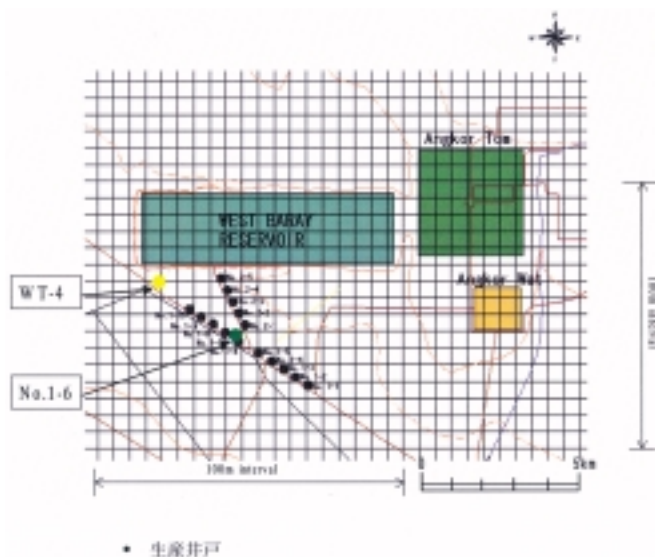


図 - 10 生産井戸の計画位置図

表 - 3 基本モデルと詳細モデルの相違点

|                        | 基本モデル   | 詳細モデル   |
|------------------------|---|---|
| 境界条件<br>南側: トンレサップ湖    | 一定水位(6m)  | 湖水位変動による変化(1m~9m)に対応  |
| 帯水層の透水系数<br>井戸群および中央部: | $2.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ から<br>$8.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ | $7.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$   |
| その他の地域:                | $5.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$                                       | $3.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 以下  |
| 平面分割セルの大きさ             | 500m x 500m   | 500m x 500m<br>+<br>100m x 100m<br>(井戸群部分)  |
| 排水路からの流出               | 旧シムリアップ河川沿いおよびトンレサップ湖岸の湿地帯の自然排水路からの流出                                 | 解析対象地域中央および南部に広がる水田からの排水を考慮した。  |
| モデルの検定に用いた地下水観測データ     | 1998年2月~1999年2月の13ヶ月間   | 1998年2月~1999年11月の22ヶ月間  |
| 平面分割セルの大きさ             | 500m x 500m   | 500m x 500m<br>+<br>100m x 100m<br>(井戸群部分)  |
| 井戸の数、間隔、揚水量            | 20本、500m間隔、総揚水量= $14,947 \text{m}^3/\text{day}$                       | 15本、400m間隔、1本当たり $800 \text{m}^3/\text{day}$ 総揚水量= $12,000 \text{m}^3/\text{day}$ |

図 - 11に、WT- 4 付近および生産井戸No.1-6 付近における計画揚水開始後5年間の地下水位の変化を示す。

生産井戸No.1-6 は15本の生産井戸設置地区のほぼ中心、WT- 4 はその中心から約 3 km西に位置する。No.1-6 付近の地下水位変化を見ると、揚水を開始した時点( day0 )での地下水位は標高で13.1mで、1年経過時( day365 )、2年経過時、3年経過時、4年経過時、5年経過時の地下水位はそれぞれ9.7m、9.1m、8.9m、8.8m、8.8mである。したがって、一定な揚水を開始後、地下水位は雨期には上昇し乾期には低下する年周期を示しながら低下し続けるが、5年経過した時点で地下水位は平衡状態に達していることがわかる。

揚水の周囲への影響は、この2次平衡に達した状態で、地下水障害が発生しないあるいは許容範囲内にあるかどうかを評価した。図 - 12に計画揚水開始後、5年経過した時点の地下水位低下量の平面分布を示す。

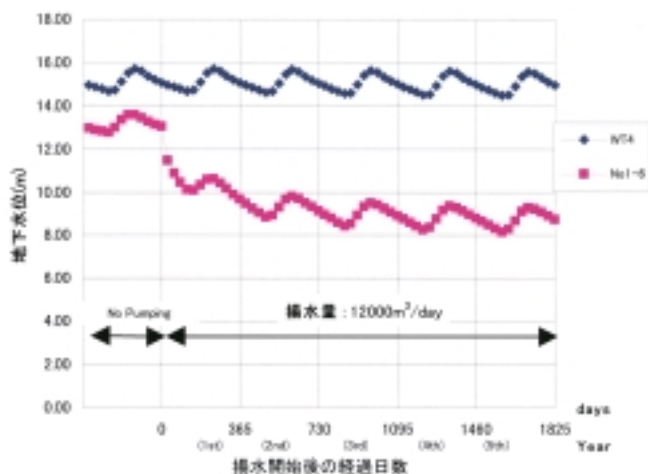


図 - 11 WT-4及び生産井戸No. 1 - 6 の地下水位の変化

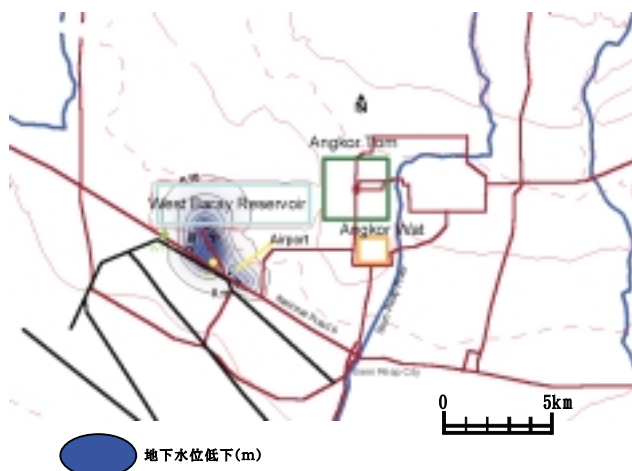


図 - 12 定常揚水による地下水位低下の水平分布

アンコールワット周辺および井戸群周辺の地下水位低下は、それぞれ0.1m、4.5m以下であり、揚水による影響は生産井戸の1帯だけに限られ、遺跡には影響が及んでいない。したがって、この揚水計画は遺跡周辺の地盤沈下を引き起こさないと考える。一方、揚水による2m以上の地下水位低下は、井戸枯れや揚水量の低下を引き起こすことが予想される。しかし、生産井戸周辺に既存の浅井戸は数多く存在しないので、揚水計画実施による影響は少ないと考えられる。

## 5.まとめ

地下水管理モデルを用い、アンコールワット周辺の地盤変位量の許容限界を考慮して、シェムリアップ市上水道水源の持続可能な揚水量計画を策定した。その際、F/Sレベルの揚水計画とするために以下の方法を用いた。

地下水流動式に含まれる非線形項と大スケールの最適化問題を扱える地下水管理モデルを解析対象地区の帯水層に構築した。

計算値である平面メッシュ(500m×500m)の平均地下水位から井戸内の地下水位をチームの式から求めた。生産井戸の計画揚水による周囲への影響を予測するた

めに、15本の計画井戸周辺域においては100m×100mのセルで平面分割し、揚水による地下水位の低下の詳細を算定した。

**謝辞：**本解析は、国際協力事業団「カンボジア国シェムリアップ市上水道整備計画調査」の成果の一部である。解析を進めるにあたり、高橋団長をはじめとする同調査団員各位よりご協力をいただいた。また、地下水流動のモデリングについては、岡山大学 環境理工学部 西垣教授、首都圏事業部 地質部 斎藤参事より多くのご助言をいただいた。ここに記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 国際協力事業団：カンボジア国 シェムリアップ市上水道整備計画調査 最終報告書、2000
- 2) 柴崎達雄：地下水許容量、Urban Kubota, No.27, pp.26-30, 1988
- 3) McDonald, M.G. and A.W. Harbaugh : A modular three-dimensional finite-difference groundwater model, U.S. Geological Survey, Open-File Report, 83-875, 1988
- 4) Anderson, P.A. and W.W. Woessner 著、藤縄克之監訳：地下水モデル、共立出版、1994
- 5) Takahashi, S. and R.C. Peralta : Optimal perennial yield planning for complex nonlinear aquifers: Methods and examples, *Advanced in Water Resources*, Vol.18, pp.49-62, 1995