

カンボディア王国アンコールにおける 地下水揚水問題

岩崎好規

サイバー大学世界遺産学部・客員教授

要旨

2006年3月、日本国政府からの無償資金協力によって1日8,000トンの揚水施設がシエムリアップ市に完成し、寄贈された。JICAによって実施された本揚水施設建設計画は、この地方の水供給を改良するものではあるが、同時に、長期的には地下水位の低下をもたらし、アンコールの遺跡に悪影響を与えるかもしれないものである。

1. 本報告においては、アンコール平野の一般的な水収支を概説し、長期的な揚水によってどのように地下水位が影響されるかについて、論述した。
2. 水源フィージビリティと地下水に関する調査において、これらの特性に関して2つの点で問題が残されている。一つは、蒸散の影響による地下水位の低下を考えていないことであり、他の一つは、地盤沈下のメカニズムの考察が不十分であることである。アンコールにおいては、地盤の沈下・浮き上りは、蒸散による乾燥・降雨による湿潤によっているのである。
3. 揚水施設が完成した現況においては、ホテル等の揚水の影響も含めて水収支の確認と遺跡への影響を予防するための観測システムを展開する必要がある。
4. 西バライの底面からの漏水とか、西バライから灌漑用水の供給を受けている南側の水田表面から地下への浸透、井戸周辺も含めた地盤沈下も計測する必要がある。
5. このような地下水と地盤沈下の観測結果は、揚水のみならず、ホテルによる揚水の影響の評価に使用され、アンコール遺跡に対して悪い影響がでないように、必要ならば、地下水揚水規制のためにも活用されるべきである。

キーワード：アンコール、地下水揚水、遺跡保存、国際協力機構

第1章 序

著者は、1994年から日本国政府アンコール遺跡救済チーム（JSA: Japanese Government team for Safeguarding Angkor）で地盤系の調査研究修復活動に参加してきた。

シエムリアップ市は、アンコール遺跡群に隣接する人口約17.3万（2008年）の中核都

原稿受付日：2008年12月2日

原稿受理日：2009年2月13日

市であるが、国際協力事業団（JICA：現在は、（独法）国際協力機構）は、シエムリアップ市域への水道水源についての実施可能性調査（Feasibility Study: F.S.）（以後 F.S.と記述）を 1996 年から 2000 年にかけて実施している。著者は JICA の F.S. に対する作業監査委員会に参加する機会を得た。アンコール地域の地下水と地盤の調査や、水源水質、水道システムの信頼性、建設および維持管理費等を総合的に比較検討した結果、水源としては地下水の揚水を最適として 2000 年に報告された。この調査結果の後、2003 年 3 月から同年 10 月にかけて、実施のための基本設計が実施された^①。

2000 年報告の基礎となるアンコール平野の水収支に関する基本的仮定の検討が不十分であることを、JICA にも、担当コンサルタントにも伝えたが、軌道修正は行われることなく、基本設計は完成した。この結果 2006 年春には、西バライの南に、揚水井戸群が完成し、シエムリアップに供給するための水タンクが完成した。

本稿においては、アンコール地域における水収支の基本をなす地下水位の季節変動とその要因について述べ、さらに、この揚水が引き起こすかも知れないアンコール域の水問題を述べたい。

第 2 章 アンコール平野の地形的特性

アンコール平野の地形図を Fig. 1 に示したが、北をクーレン山丘陵、南をトンレサップ湖北岸の南北約 50 km の間に広がる広大な平野である。クーレン山は東南東－西北西にかけて約 50 km の長さで二つの山で形成され、トンレサップ湖に両翼を張った形で対峙している。クーレン山は標高約 400 m を有するが、山の周囲がそそり立ち、山の中心部がお盆のようにすり鉢となる特異な形状を示している。

クーレン山の麓の標高は+60 m 内外で、トンレサップ北岸から山麓までの距離が 50 km なので平均勾配は 1/1000 という緩勾配である。クーレン山に降る降雨は年間約 1800-2000 mm で雨季に集中するが、クーレン山の盆地で涵養され、山地の西端から流れ出るが、ここは、シエムリアップ川の源流を形成し、年間を通じて川は枯れることはない。

第 3 章 JICA による水源調査

国際協力事業団（JICA）は、シエムリアップ市に対する水源に関する F.S. を 1996 年から 2000 年にかけて実施した。著者は関連活動の専門家として JICA による調査結果の作業監理委員会に出席してその実態を知る機会を得た。

この業務を遂行したコンサルタント会社は、考えられる水源として、①地下水、②西バライ、③シエムリアップ川、および④トンレサップ湖を取り上げて比較していた。これらの 4 つの案の比較検討の結果、地下水の揚水が最適であるということであった。他の水源は水量が足りないとか、トンレサップ湖からの取水案（取水した水をシエムリアップ市の浄水場まで導水し、浄水後配水する案）は、湖水の汚染の処理と建設予算が地下揚水の 2

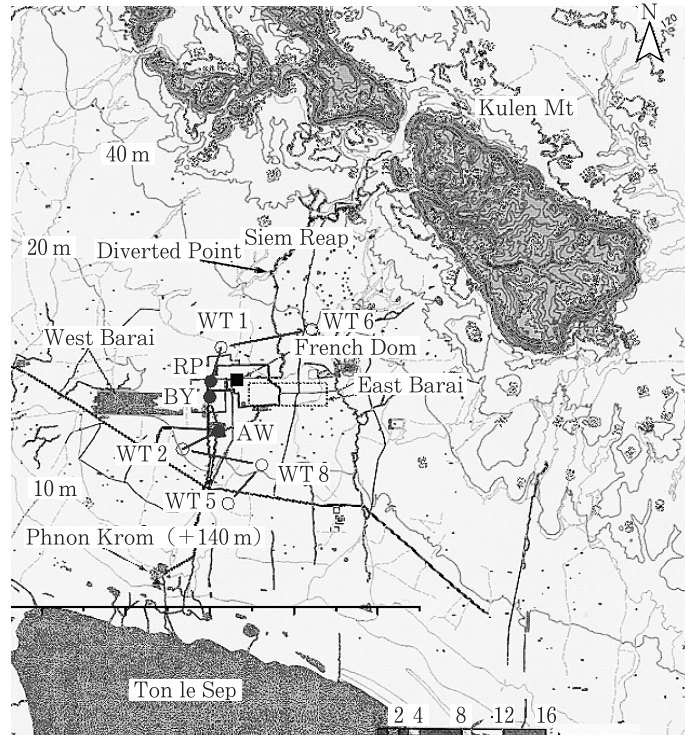


Fig. 1 Topography of Angkor plain

boring points

● RP (royal plaza), BY (Bayon), AW (Angkor Wat) by JSA, 1995,

○ WT 1, WT 2, WT 6 WT 8 by JICA, 2000

倍かかるからというものであった。著者は、④トンレサップ湖案に対して、さらに、トンレサップ湖から湖岸にあるクロム丘の標高+50 m 地点に水タンクを設けて、このタンクからサイフォン式に約標高 30 m の北バライに向けて導水する案が最適であると思っている。北バライからシエムリアップ川に放流し、シエムリアップ市付近で浄化して、水道源とすれば、河川の水量増加になって清流化も達成されるというものである。

地下水揚水による検討を行うために、まず、現地において、最初の1年間はアンコール平野の地下水変動観測を行った。その地下水位の季節変動のシミュレーションに基づく地下帯水層の水理定数を検討した。

地下水位の年間季節変動を、有限差分法による浸透流解析 (MODFLOW 96) で再現し、クーレン山麓の南側、アンコールワットより 10 km 北側の境界を非流動境界条件、南はトンレサップ湖岸縁辺標高+6 m を既知水頭境界として与え、地下水流動事象として解析し、地盤の透水性を検討した。しかし、蒸発散を考慮した雨水の地表面からの流入の減少はモデル化されていたが、地表面からの蒸散による地下水位の低下は考慮されていない。

実際には、後述するように、アンコール平野の地下水位は、乾季の終わりには地表面から GL-5 m 程度に存在しているが、毎年5月の雨季に入って次第に上昇して、雨季の終わりの10月の終わりには地表面近くまでとなり、乾季に入ると地下水位は低下していき、乾季の終わりの4月末には、GL-5 m 程度まで低下するのである。

JICA 報告（2000）においては、年間降雨および蒸発散による浸透と地下水の水平流動だけで、アンコール平野にある 50 以上の井戸水位の季節変化をシミュレートすることで、水理定数の同定を試みている。アンコール域の地下水変動は、降雨による水位上昇と蒸散による水位低下であるから、本報告によるアンコール平野の水理特性の同定は不十分である。乾季の蒸散による地下水の低下が十分に考慮されていないシミュレーションのために、乾季における地下水位変動が再現できていない結果となっている。

さらに、地盤沈下機構に対する考えが、不十分である。地下水位が低下することにより、浮力の作用が減少して、鉛直圧力の増加による収縮であると仮定されている。しかし、JSA の観測データによれば、地盤が乾燥することによる収縮こそが主要の原因であった。

JICA の活動が F.S. から、基本設計に移った 2003 年、著者は、F.S. の基礎的な考え方が充分でないことを JICA の担当とともに、コンサルタントに説明し、再検討するよう求めたが、その後なんの連絡もなく、結局は、基本設計として 1 日 9,000 トンの揚水量とする地下揚水施設の図面が出来上がり、ほどなく、日本の建設会社が落札して、2006 年 3 月には完成したのである。

第 4 章 アンコール平野の地盤構造

JSA は 1994 年に、基礎岩盤まで達する 100 m の長尺ボーリングをこの地域で最初に実施した（JSA（1995））が、さらに、これに続いて、JICA も数本の地質ボーリングを実施した（JICA Report（2000））。この結果、アンコール平野においては、地表地盤約 40 m が第四紀層のシルト質砂で、その下には第 3 紀層の砂岩層や凝灰岩層、約 80 m に安山岩などの基岩の存在が明らかとなってきた。これらのボーリング位置は、Fig. 2 に示した。

表層地盤の南北断面を標準貫入試験の N 値（N 値とは、土質ボーリング調査時に、標準化した鋼製試料採取管を打撃貫入し、30 cm 貫入に必要な打撃数である、通常 N 値 10 以下は、軟弱地盤と呼ばれる）地盤の貫入抵抗結果で Fig. 2 に示した。N 値は地表面付近では $N < 5$ で、深度とともに漸増する。この第四紀層の地層は、2 つの地層に分けることができ、上層はシルト粘土質細砂層で N 値は 20 以下で、下層は礫交じりシルト質砂層で N 値は漸増して $N = 30 - 40$ となることが多い。

上層は、完新世、下層は更積世の時代の堆積ではないかと思われるが、未詳である。N 値からみると、完新層の上層は、“緩い”から“中位に締まった”砂層で、下位の洪積層は“中位に締まった”から“よく締まった”状態の砂層である。

アンコール平野における地下水は、地表近くの第四紀と第三紀の堆積層に賦存していると考えられる。第四紀層や第三紀層は比較的に空隙が多いために貯留能が一般的に大きい。その中でも、第四紀層のシルト質細砂層内での貯留および流動特性が、地下水状態を特徴づけていると思われる。その下位にある第三紀層は、第四紀層に比べれば、空隙は小さいが、断裂や亀裂系があれば、地下水が賦存し、流動に寄与していると考えられる。

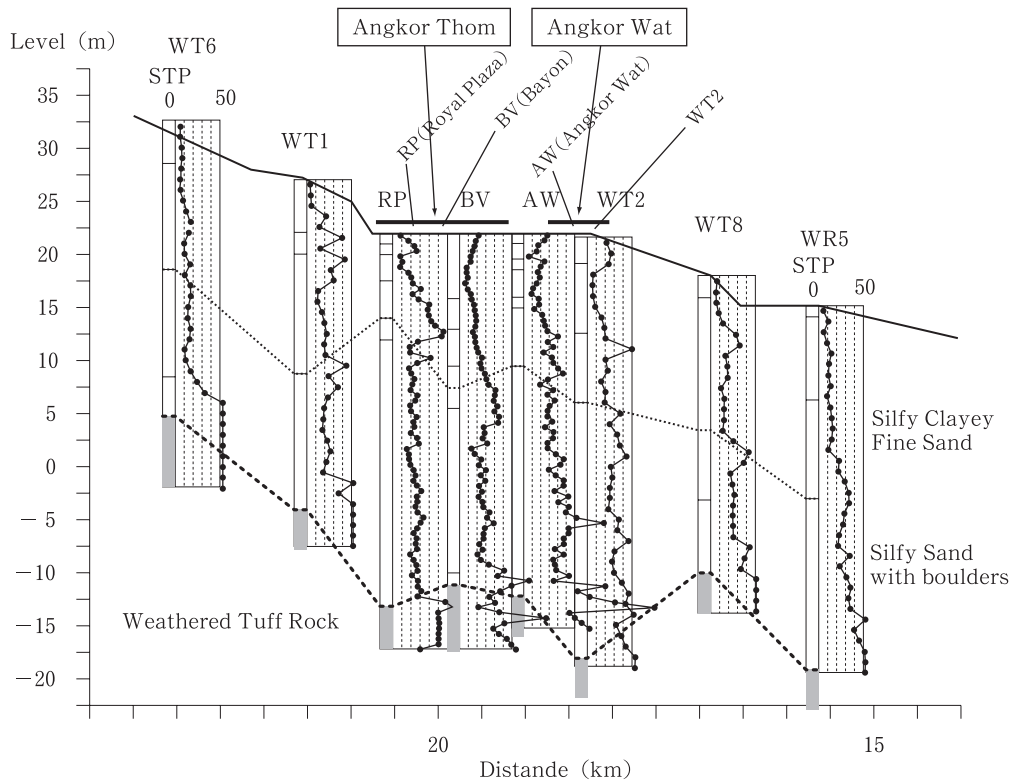


Fig. 2 Geotechnical section of Angkor in NS direction (see Fig. 1 for boring point)

第5章 アンコール平野における水収支と地下水位の季節変動

Fig. 3 の上部に 1999 年度のシエムリアップ気象観測所における日降雨量と日蒸散量、およびそれらの積算量を示した。同図の下部には JSA によって計測されたバイヨン寺院北広場の地下水位の日変化を示した。まず、雨量と蒸散量をみると、モンスーン地帯にあるカンボディアにおいては、5月から雨季が始まり10月までの約半年間に降雨が集中し、年間降雨量はほぼ1,500 mmである。蒸散は、乾季と雨季で倍程度の違いがあるものの、年間を通じて定常的に観測され、年間蒸散量は1,500 mmで、年間降雨量と等しい。

降雨量と地下水位変化を見よう。降雨のない乾季の1月から4月までは地下水位は下がり続け、5月の雨季に入ってから上昇に転ずる。降雨がなければ蒸散によって降下し、降雨があれば上昇しているが、雨季の末期には、地下水位はほぼ地表面近くGL-0.5 m程度まで上昇する。

後章において、詳述するが、乾季においては単調に減少している地下水位は、雨季においては地下水位の変動は激しい。当初、なぜ、季節によってこのような特徴が現れるのかと不思議に思い、水平流動によるものか、あるいは垂直流動によるものか、と思いつつ調査を続けた。結局、この地における地下水位変動は、降雨による上昇と蒸散による地下水低下の二要素で完結していることが判明した。雨季においては、常に蒸散による水位低下とともに、降雨時には上昇が見られるために、複雑な様子となっている。

カンボディア王国アンコールにおける地下水揚水問題

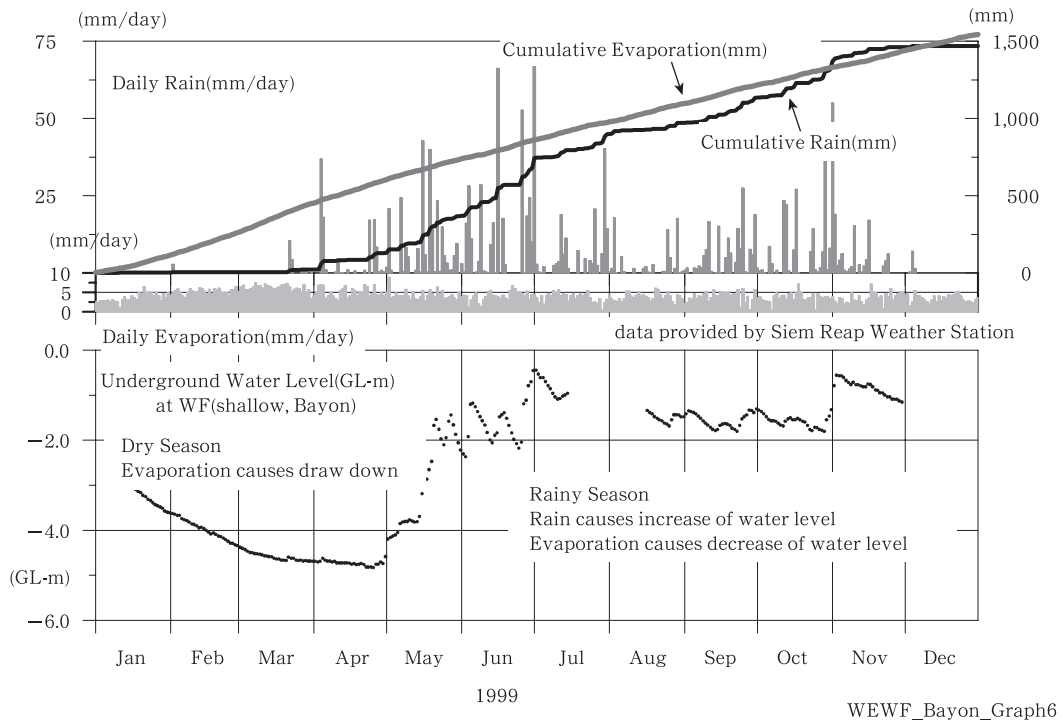


Fig. 3 Rain fall/Evaporation/Water Level in Angkor Plain

降雨のない2月の地下水位の変化はほぼ20 mm/dayの一定速度で下降している。これに対応する平均蒸散量は5-7 mm/dayである。蒸散量の測定は日照下の値であり、森林などでは蒸散量はこの値よりは低い値となる。森林伐採が進んだ裸地の地域においては、年間雨量と同じ量の蒸散があり、このような場所で地下水を採取すれば、必ず水位は次第に降下する。

蒸散量が5-7 mmで、地下水位が20 mm低下するというのは、土柱20 mmの高さに約6 mmの高さ相当の水が含まれているということであるから、空隙率が約30%程度であるということになる。自然の水系を擾乱せずに採取できるのは、森林などで降雨量が蒸散量を上回って涵養されている水量であるということになる。

それゆえ、アンコール域のような蒸散が激しい地域においては、森林などで貯留される水量の年間涵養量が、利用できる地下水量の基本数値である。

後述するように、アンコール平野の平坦性によって地下水の水平流動はきわめて遅い。

JSAによる地下水位の観測結果をFig.5に示した。地盤の構成は、シルト質細砂で所々に若干のシルト粘土質細砂層が狭在していて、地下の2つの異なった深度（GL-7.1 mおよびGL-15.1 m）における地下水位は、同じではない。年間を通じてほぼ浅い位置の水位が高い。

このことは、常に水が上から下へ向けて垂直に流動していることを示している。なぜ、深い位置の水圧が低いのであろうか？ これは、次のように考えられよう。

地下水で飽和されている地層の場合、雨水などが地下に浸透して水位が上昇すると、水圧の伝播により直ちに、地下深部においても、水圧が上昇する。しかしながら、不飽和状

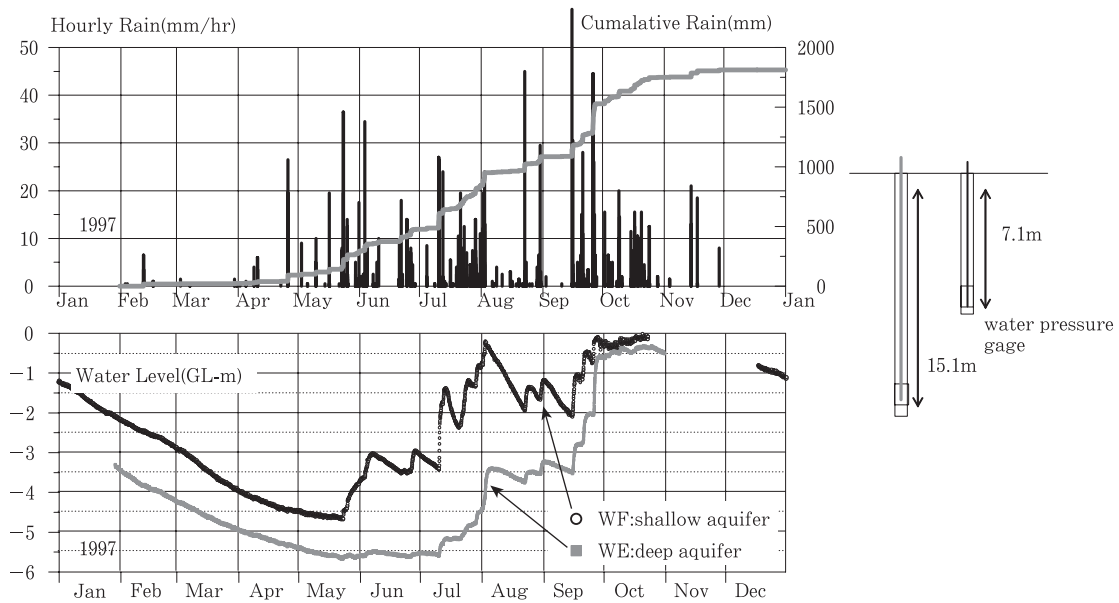


Fig. 4 Seasonal Change of water level at two depths in Bayon Temples (WF: GL-7.1 m, WE: GL-15.1 m)

態にあると、水圧として伝播することはなく、地下水が鉛直に浸透流下して初めて水圧上昇となる。アンコール地域においては、一般市民は、地下水を井戸によって利用している。井戸は約 10～30 m 程度の深さまで、水ジェットを用いて井戸孔を掘削し、塩ビ管にスリットを入れた井戸揚水管を挿入して完成させている。このような井戸で地下水を汲み上げると、揚水管に開けられたスリット部分から地下水が汲み上げられるために、スリット近くの地下深度部分の水圧がまず低下し、その水圧低下が地表に伝播していくために、地表付近の地下水は深部に向けて吸い込まれるようにして水位低下が発生するのである。

冬から春に掛けては、常に約 1 m 程度の水圧差が見られているが、これは地下水の汲み上げによる影響であると思われる。雨季になると、次第に地下水の鉛直浸透が優勢となり、雨季の終期には、ほぼ、地表面付近と地下深部との水圧が静水圧的分布に近づいていることが認められる。

このように、降雨があれば、まず浅い層の水位が上昇する。地層の中の水が完全に飽和して、上下の水が連続していれば、浅い層における水位の上昇は、ただちに、下位の水位の上昇となって現れるはずであるが、この Fig.5 のように、時間遅れがあるということは、不飽和層であるか、これらの間に難透水性の薄い層があるためである。

第 6 章 基本設計と揚水井戸群の設置

JICA は、シエムリアップ地域における上水用の水源として利用可能性を探るために、シエムリアップ域における水利特性、地盤調査、揚水試験など多くの現地調査、および、室内土質試験を実施した。その結果、担当コンサルタントは、地下水揚水案 (JICA Report, 2000) を最適案として提案した。

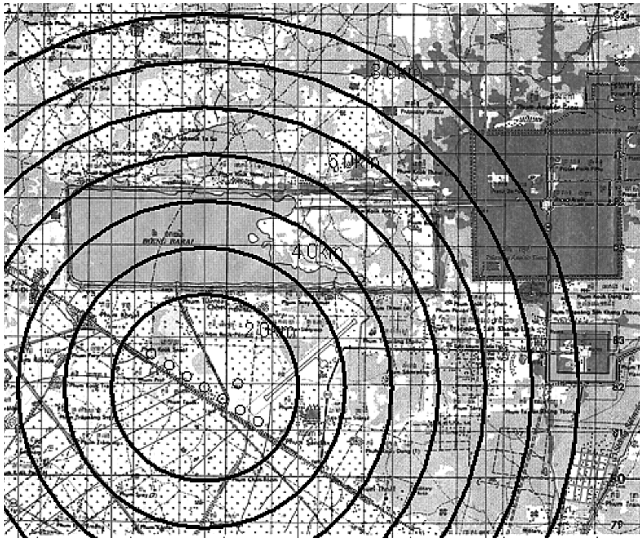


Fig. 5 Position of pumping wells by JICA plan 2003



Photo-1 Constructed Water Tank

これは、Fig.5 に示したように、西バライの南方、アンコール飛行場の南を東南東～西北西に走る国道6号線に沿って約10本程度の揚水井を設置して日量8,000トンの揚水施設を建設するものである。

このF.S.を受けて、基本設計を実施しているという情報が入ってきた（JICA Report, 2003）。当該コンサルに質問したところ、「基本設計と共に、F.S.の結果のレビューも行いたい」というJICAの意向であるという回答であった。

著者は、「これで、F.S.調査における基本的な問題点を訂正することができ、地下揚水案から別の案になる可能性もあるか」と思い、基本設計を受注したコンサルタントやJICAの担当課にも積極的に働きかけてみたが、一度敷かれた路線の変更はなかった。後日JICAから得られたコメントでは、F.S.の結果のレビューとは、「F.S.実施時点からの状況の変化の確認とそれに伴う修正を行うことを意図したもので、F.S.の結果の妥当性を見直すものではない」ということであった。そうならば、当然の帰結である。

揚水井戸基本設計の井戸の位置や許容揚水量を決定するために、国道6号線沿いに、揚水井戸を掘削し、長期揚水能の調査としては短い、24時間の連続揚水試験が実施された。その結果（JICA Report, 2003）、Fig.4に示されているように、8つの揚水井戸が計画され、各井戸から上水用に1,000 t/dayと維持管理用に100 t/day、総計1井戸あたり1,100 t/dayが1日1本当たり揚水可能量とされていた。この揚水井戸および送水幹線建設事業は、掘削後の揚水試験の結果によって揚水可能量が計画に満たない井戸があったが、新たに井戸を掘削して、ほぼ基本設計通りに建設された。2006年春に完成してシエムリアップ市域への給水用の水源として利用が開始された。

第7章 アンコール遺産地域への影響予測

Fig. 4 に示されているように、揚水井戸群の位置は、世界遺産であるアンコールワットやアンコールトムまでの水平距離は6-7 km である。現在も利活用されている西バライ人工池までは約 2 km の距離にある。

JICA フィージビリティ報告（2000）によれば、文化遺産に対する悪影響を避けるために、揚水による地下水位の低下はアンコールワット西端位置で 30 cm 以下とするような許容揚水量の設定が述べられている。

また、JICA 基本設計報告（2003）では、8 本（揚水量 1 本当たり 1,100 t/day）の井戸群による地下水位低下量の推定を“理論解”によって行った結果として、井戸群から 7.5 km 離れているアンコールワット周辺で 0.16 mm であると結論付けている。この“理論計算”は、被圧帯水層を想定し、地表の表層水がその下にある難透水層を浸透して被圧帯水層に流入するという定常流モデルによっている。この水理モデルにおいては、表層部には常に一定水位の水が存在し、被圧帯水層の水圧を地下水位としている。実際の地盤では、そのような系統的な難透水層は存在しないが、揚水井のストレーナー部が地表面下 10 m 以深にあって、10 m 以浅の地下水は下方に吸引されるから、このような“漏水モデル”で第 1 次近似できるかもしれないが、この地下水理モデルの地表水は、常に供給されていなければならない、今後実測による検証を要する問題であろう。

これは、後述するように、西バライ人造湖からの灌漑用水の水田表面から地下への鉛直浸透による地下水供給が想定されているように思われるが、いかなる方法で、水理定数を設定したものかという具体的記述はない。

第8章 地下水揚水による長期的影響

この章では、シエムリアップにおける重要な恒久的施設として位置付けられているが、揚水による地下水低下の長期的影響について考えてみよう。

まず、アンコール平野における地下水流動、さらに、地下水揚水による長期的な地下水低下について考える。

Table 1 Estimated velocity of underground water in Angkor Plain

透水係数	k (cm/sec)		0.01	0.001	0.0001
地表面勾配	i (gradient)		0.001		
見かけ速度	Apparent velocity	(cm/sec)	0.00001	0.000001	0.0000001
		(cm/day)	0.864	0.0864	0.00864
		(cm/year)	315.4	31.5	3.2
速度	Velocity	(m/year)	10.5	1.05	0.105

8.1 節 地下水の水平流動

アンコール平野における地下水の流動を考えてみよう。アンコール平野は北にクーレン山の麓で標高+60 m 南はトンレサップ湖の北岸でその間の距離は約 50 km であるから、平野の傾斜は $60/(50 \times 1000) \approx 1/1000$ という緩斜面である。平野の地下水の流動速度は、地下水位の流動傾度を i 、透水係数を k として

$$v = i * k$$

と示される。アンコール平野の地層の透水係数はシルト質細砂という粒度から大きめに見積もっても $k = 10^{-4} \sim 10^{-2}$ cm/sec 程度である。

そこで、 $i = 10^{-3}$ 、 $k = 10^{-4} \sim 10^{-2}$ cm/sec として流動速度を求め、Table 1 にその結果を見かけ速度、速度として示した。

ここで見かけ速度というのは、地下水の流動する地質断面で一様に流動していると考えから、実際には、空隙部分だけを流動しているから、空隙部分の占める面積比で補正する必要がある。この表では空隙比率を $r = 30\%$ (5章で議論した空隙率を採用) として速度を求めたているが、結果としては大きな違いはない。1年間でわずか 10 m 程度の流動しかしないことが分かる。以上のように、井戸の無い自然状態でのアンコール平野における水の水平移動は、事実上考えられない。

8.2 節 長期揚水による地下水低下

前節で議論したように、クーレン山からトンレサップ湖に向けてアンコール平野の地下水の水平流動は小さい。

このように地表面が、ほぼ水平であるアンコール平野で長期にわたって地下水揚水を行えば、揚水地付近から地下水位の低下が発生することは避けられない。地下水の低下は、時間とともに、外方に拡大する。ここでは、第1近似として1井あたり 1,100 t/day で合計 8井の群井の揚水効果の概略をみるために、8,800 t/day の単井として地下水位の低下を計算してみた。

地下水低下は主として次の4つのパラメータによっている。すなわち、帯水層厚さ (H)、帯水層の透水係数 (k)、帯水層の有効空隙率 (β)、8,800 t/day の単井として地下水位の低下を計算してみた。

地下水低下は主として次の4つのパラメータによっている。すなわち、帯水層厚さ (H)、帯水層の透水係数 (k)、帯水層の有効空隙率 (β)、および時間当り揚水量 (Q/t) である。

ここでは、アンコール地盤の水理定数として次のような値を仮定した。

帯水層厚さ	$H = 45$ m
透水係数	$k = 10^{-2}$ cm/sec
有効空隙率	$\beta = 0.10$
日当り揚水量	8,800 t/day

カンボディア王国アンコールにおける地下水揚水問題

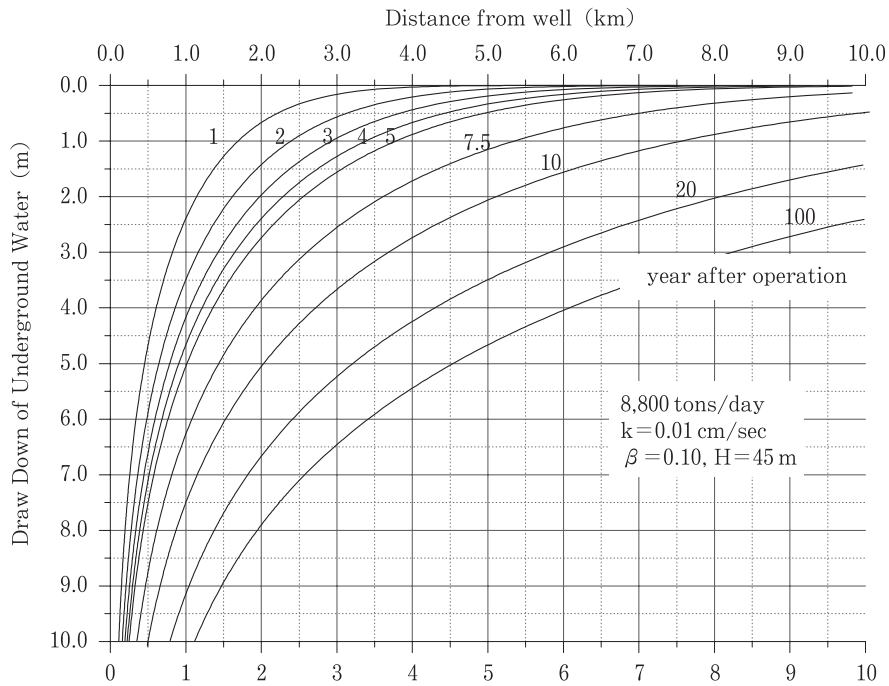


Fig. 6 Drawdown of the underground water with time

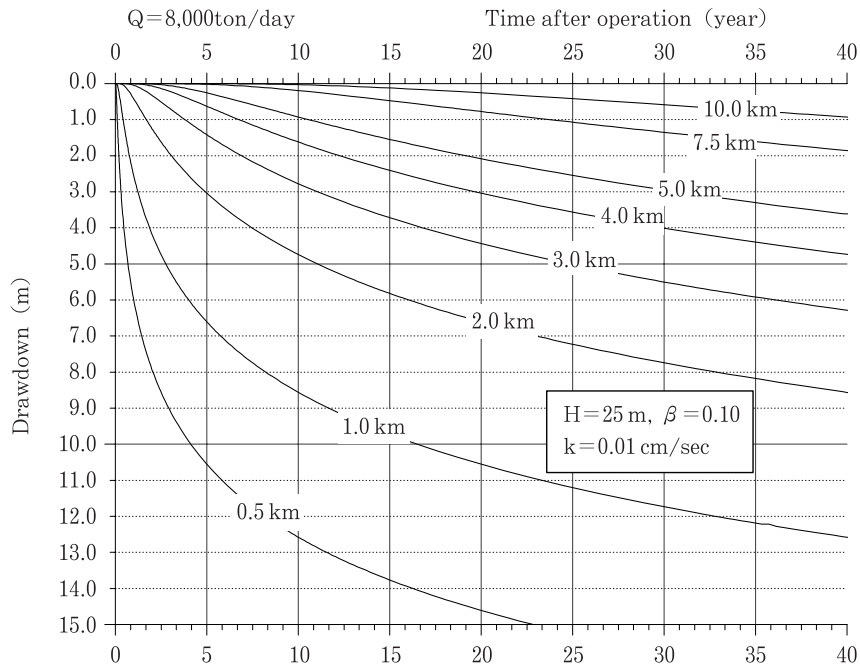


Fig. 7 Change of underground water table with time

地下水位低下の計算は、井戸関数（赤井浩一（1969））を用いて、揚水井から 2.0 km, 3.0 km, 4.0 km, 5.0 km, 7.0 km, および 10.0 km の距離にある地点での地下水低下の時間経過を Fig. 6 と Fig. 7 に示した。Fig. 6 では、揚水開始後 5 年までの地下水低下を示した。

時間経過とともに、地下水位の低下が増大するが、距離 $R=2$ km 地点においては、3 年で 2 m 程度の低下である。アンコールワット地点は、 $R=7-8$ km に相当し、5 年程度

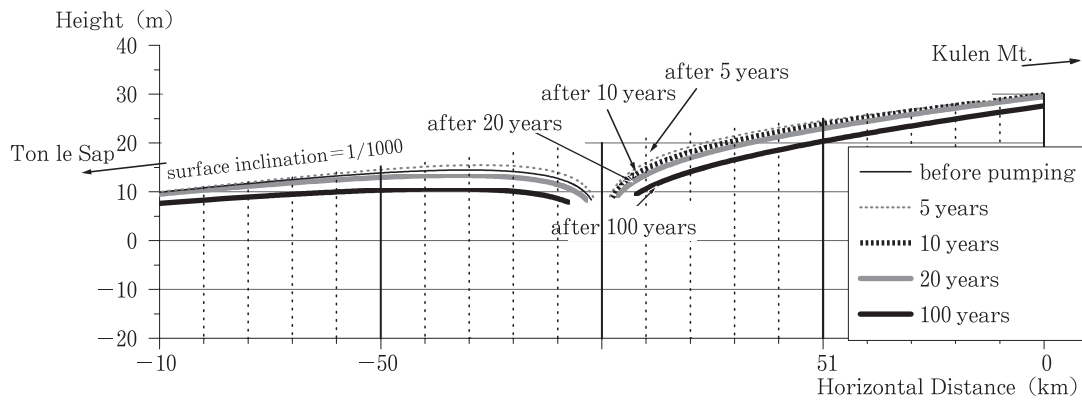


Fig. 8 Drawdown of underground table in north-south direction

では 0.2 m だが、10 年から 20 年経過すると、2.3 m の地下水位低下となる。

Fig. 7 においては、水平軸を揚水井中心からの距離として、地下水位面の形状変化を示した。地下水位低下は、揚水井中心に集中するが、時間とともに影響範囲が拡大し、10 年もすれば 10 km 程度までに影響が現れる。この計算では、群井を単独井としてモデル化しているから、井戸中心から対称性を有する円形であるが、実際の井戸は直線配置なので井戸周辺では楕円の形状となろう。

Fig. 8 においては、南北断面における形状の概略を示した。すでに述べたように、地下水変動における水平流動の影響は少ないと思われるが、井戸地点よりの南の下流域においては、長期間にわたる揚水は、地下水の流動阻害の影響が現れる可能性がある。

8.3 節 アンコール平野における長期揚水による地下水への影響と実際の水位

以上の議論では、揚水による地下水位の与える影響は、降雨とか、蒸散の影響を除外している。実際に地下水位の計測を行うと、降雨による地下水位の上昇、また、地表面からの蒸散による地下水位の低下が加わる。

アンコール域における地下水位は、一般的に次のように考えられる。

地下水位 = (降雨による水位上昇) - (地表からの蒸散量) - (揚水による水位低下)

なお蒸散の影響は、降雨量から蒸散量を差し引くことによる実効の降雨量の減少のみならず、地下水位が蒸散によって低下することに留意する必要がある。

第 9 章 地下水位低下による地盤沈下

JICA 報告書 (2003) においては、地下水位低下による浮力の減少に伴う鉛直応力の増大として弾性圧縮によるものと仮定して求めている。そのような圧縮膨張も存在するが、アンコールにおける地盤挙動は、それとは全く異なる原理に基づいて発生する乾燥収縮による現象である。

このことは、ユネスコを事務局として日本国政府によって東京において開催された“アンコール救済のための政府間会議 (UNESCO (1993))” のトピックスの一つである“The

カンボディア王国アンコールにおける地下水揚水問題

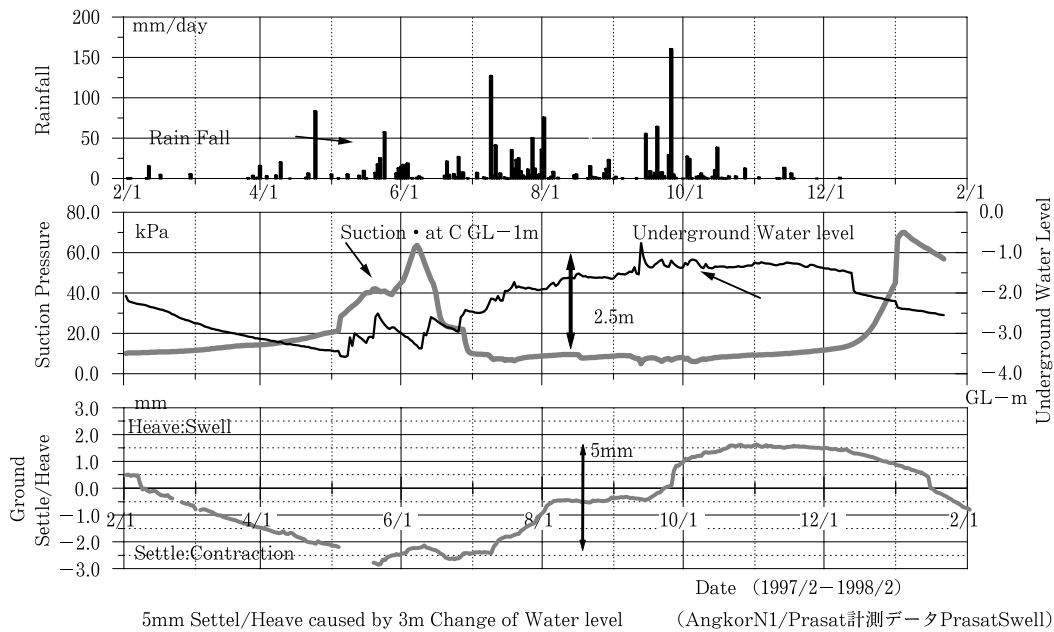


Fig. 9 Seasonal settlement and heave of ground with underground water level

Future Challenges”の章にも記述されている。日本国政府アンコール遺跡調査チームにおいては、地盤沈下の発生メカニズムに関して、1997年から1998年にかけてアンコールトム遺構内のプラサートスープラ付近において計測実験を実施した（JSA, 1999）。地盤観測を実施した場所は、アンコール平野の典型的なシルト質細砂の地盤であり、Fig. 2にRP地点と示されている地盤構成となっている。

地盤沈下の計測は、地表からボーリングを実施し、ボーリング孔に鉄管を挿入し、先端部を孔底に打ち込み固定する。地表部に出ている鉄管端部と地表面との間の距離変化を計測すれば、鉄管の固定深度と地表面との間の地盤の収縮が計測できる原理である。

このようにして計測して得られた結果の一つをFig. 9に示した。この事例では、鉄管の固定点深度は3.5 mで、地下水が関与する影響は、サクシオン計を地下GL-1.0 mに設置して観測した。サクシオンとは、地下水位が低下し、センサー設置深度より低くなると、地盤は水で飽和状態であったものが不飽和状態となり、水圧が負圧となる。これは、土粒子表面の水が水膜となり、粒子間がメニスカスによる表面張力によって結合される状態で、粒子表面に形成される水膜の水圧は負圧となるのである。

地下水位は、1997年2月の計測開始時には、約GL-2.0 mであったものが、乾季の終わりの4月ころにはGL-3.5 mとなり、雨季に入って回復上昇してGL-1.0 m程度となって雨季後半は一定値で推移し、次の乾季を迎えて、再度低下している。サクシオン計の設置位置は、GL-1.0 mなので、常に地下水位より上位にあるため、不飽和状態である。サクシオンは、計測当初は、10 kPa (=0.1気圧程度)であったものが、地下水位の低下とともに、不飽和の程度が増大するために上昇し、6月初めには最大値の60 kPaを示しているが、やがて降雨とともに、負圧は解消して低下し、乾季に入った1月に再度上昇している。

Table 2 Drawdown of the underground water and ground settlement

Drawdown of underground water	Expected ground settlement
2.5 m	5 mm
10.0 m	10 mm
10.0 m	20 mm
15.0 m	20 mm
20.0 m	40 mm

Fig. 9 に示されているように、乾季には地表面は沈下し、雨季には隆起することが観測されている。このような地盤挙動は、乾季における乾燥収縮と雨季における湿潤膨張として知られている。この観測においては、ほぼ、2.5 m の地下水位変動によって 5 mm の沈下/隆起が観測されていることが分かる。

このような地盤の沈下/隆起の発生する原因は、サクションに起因しているけれども、サクション変動よりは、見かけ上、降雨に連動しているように見える。計測されたサクションはある 1 深度だけの様子であるが、沈下・隆起量は全深度の積重ね、積分値であるからである。

もし、地下水位の変動量と沈下/隆起量が比例して発生すると考えると、地下水位変動と地盤沈下/隆起量は、Table-2 のようになる。

このような地盤沈下量のアンコール地域における許容量はどの程度か？ という設問は重要な問題である。対象とする構造物にとっては、沈下量の絶対量ではなく、相対沈下量であるが、石積み構造物であるということから、積み石間の目地変化を発生させる沈下曲率が問題となると思われるが、現在のところ、一般的なアンコール域における許容地盤沈下に関する提案はない。

第 10 章 揚水による地下水位変動の観測の必要性

日本からの無償援助によって揚水施設がシエムリアップに建設された。アンコール地域の地下水は、本揚水井戸だけでなく、多くのホテルに設置されている地下揚水井戸によって利用されている。このことは、シエムリアップ地域の地下に賦存している自然の水資源を枯渇さすばかりではなく、いずれは、観光資源である世界遺産にも決定的な損害を与える可能性を有している。

前章において示された地下水位の低下は、簡単に単一帯水層とモデル化されたものであり、また、JICA 報告書（2003）の予測値も含めて、シミュレーション結果は、現地観測による検証により実態の解明がなされなければならない。このような現地における検証に基づいて、今後の地下水位の変動がより明確に示され、もし、問題となれば、取り返しのつかない時点に至るまえに、軌道修正が可能であるからである。Fig. 10 に、JICA 報告書（2003）に示されている揚水井の構造を示す。揚水井は、44.54 cm（17-1/2 インチ）のボー

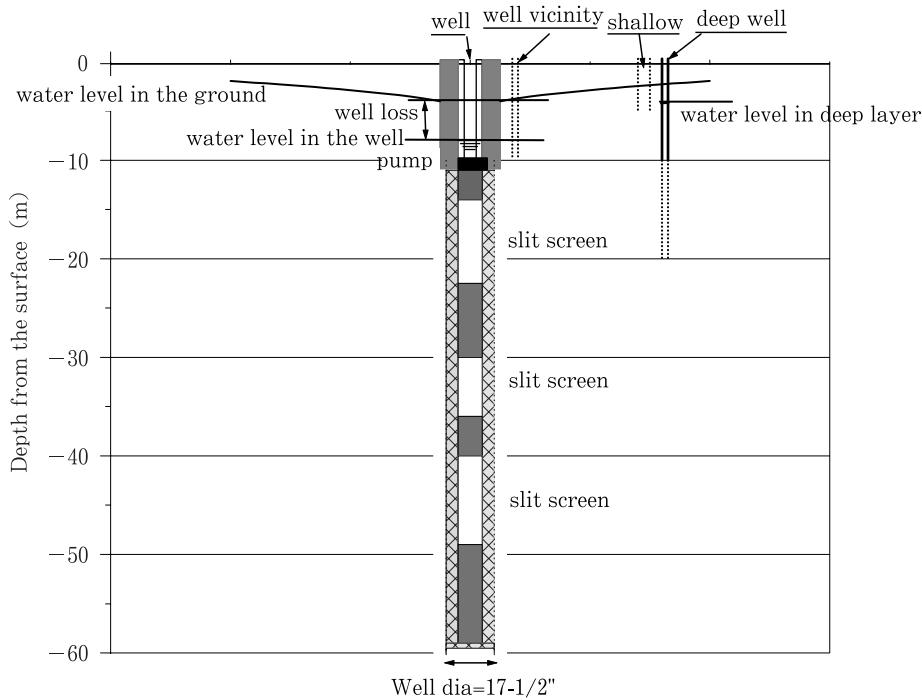


Fig. 10 The structure of well by JICA report 2003 with proposed monitoring well

リング孔に 400 mm の口径の鋼管を入れ、鋼管には 3 ケ所に水を吸い込むためのスリット・スクリーンが設けられている。ボーリング孔と鋼管との隙間には、透水性のよい礫が充填されている。地表面から 10 m の間は、スリット・スクリーンは無く、揚水ポンプは地表面から 10 m の深度に設置されている。

このような井戸構造においては、表層地下水は地下深部のスクリーンに向かって流れるので、地表面付近の水位は、スクリーンの深度付近の水位に比べて浅くなっている。このために、地盤内水位の計測は、地表面近くのみならず、スリット・スクリーン深度も含めた 10 m 以深の位置の水位が計測できるような設置計画とするべきであろう。

設置が望ましい位置としては、

揚水井戸内水位

揚水井戸隣接外部

地表面浅部地下水

10 m よりも深い深度での地下水位

が望ましい。

第 11 章 現場における地下水計測配置の 1 例

井戸揚水による地下水変動の様子は、井戸周辺および広域の地下水変化をモニターすることで達成できる。たとえば、Fig. 11 にその 1 例を示した。群井を中心として、地下水の観測井戸を設置する計画案であるが、地下水位の低下は、まず、井戸中心から始まり、次

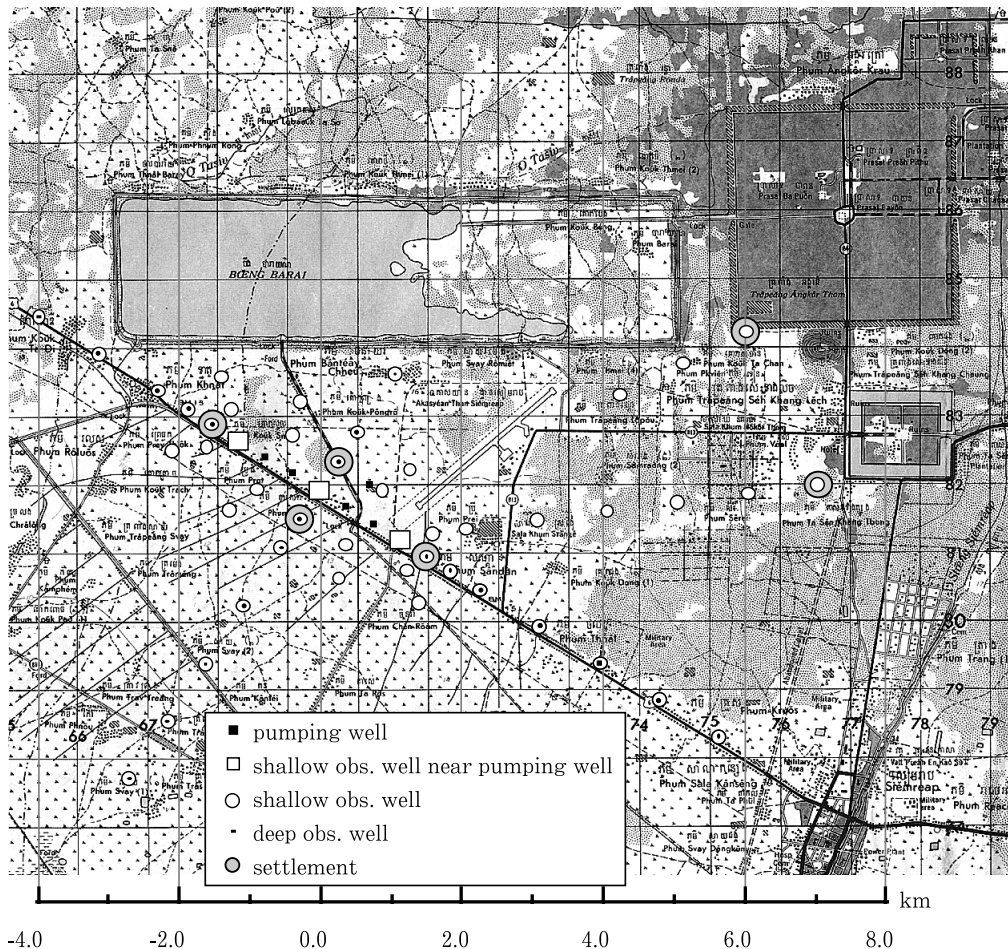


Fig. 11 An example of monitoring plan in Angkor

第に遠方に伝播するから、観測を継続していれば、アンコール遺跡への影響は把握できる。

このような観測井戸は4つのグループに分類できよう。

1. 揚水井周辺の極近接浅層地下水

一般に揚水井の鋼管内の水位と鋼管外水位とは異なり、専門的には井戸損失 (well loss) と呼ばれる。井戸内の水位の方が外より低い。井戸の孔外直近の孔外水位を計測し、孔内水位との差を求めるものである。

2. 群井中心より楕円形状を有する浅い観測井戸

群井が、ほぼ有限の直線配置となっているために、均一地盤であると、その等地下水位低下線は円形ではなく、楕円形状を示すものと期待される。このような、有限直線の井戸配置の影響を確認するための観測配置である。

3. 揚水井戸線上およびそれに直交する線上の観測点

このような揚水井戸線とそれに直交する線上に配置される観測点における地下水位情報は、井戸群による揚水による影響を見るのは、最適配置である。

4. 遺跡方向への影響線上での観測

アンコールワットや、アンコールトムに向けての直線的配置は、もし、地下水位低下が

観測される場合には、どの程度の影響がいつ伝播するかを的確に予想できるための地下水位情報を提供する。沈下観測も重要である。沈下の計測点は、遺跡近傍点だけでなく、揚水井戸周辺においても計測することがよい。揚水井戸周辺は、最初に沈下が発生することが予想され、このような観測データによって遺跡周辺の地盤沈下の推定も可能となるからである。アンコールにおいては、多くのホテルが建設されてきている。このようなホテルによる揚水効果も、国道6号線に沿う東西に観測井戸を設置すれば、ホテルは井戸中心より東側に多く設置されていることから、JICAによる地下水位に与える影響とホテルの井戸からの影響とが比較できる可能性がある。

第12章 西バライによる揚水環境への影響

西バライは、東西8km、南北約2kmの巨大な人造湖であり、水源と共に観光地でもある。シエムリアップ川から分水導入されたのち、西バライより南の地域の農地の灌漑用水として放水されている。

この西バライの南側に立地する本件揚水井戸は、西バライによる主として2つの影響を受けることが考えられる。Fig. 12に示したように、一つは、バライの湖底部からの漏水と、バライからの灌漑放水による水の水田地表面からの浸透である。どちらも、西バライからの水を、そのままでは、流下流出してしまうところを、揚水井で受けていることになるから、どの程度の供給があるのか、不明なまでも、揚水による地下水低下を緩和する効果があることは間違いない。

このような効果は、西バライと揚水井間の水田、揚水井から南部の水田に地下水観測井を設置することで評価が可能となろう。

この西バライおよび灌漑用水の影響を考えると、水位上昇の影響として、降雨、西バライの底部漏水、および灌漑水の鉛直浸透があり、水位低下の要因としては蒸散および揚水がある。

地下水位＝

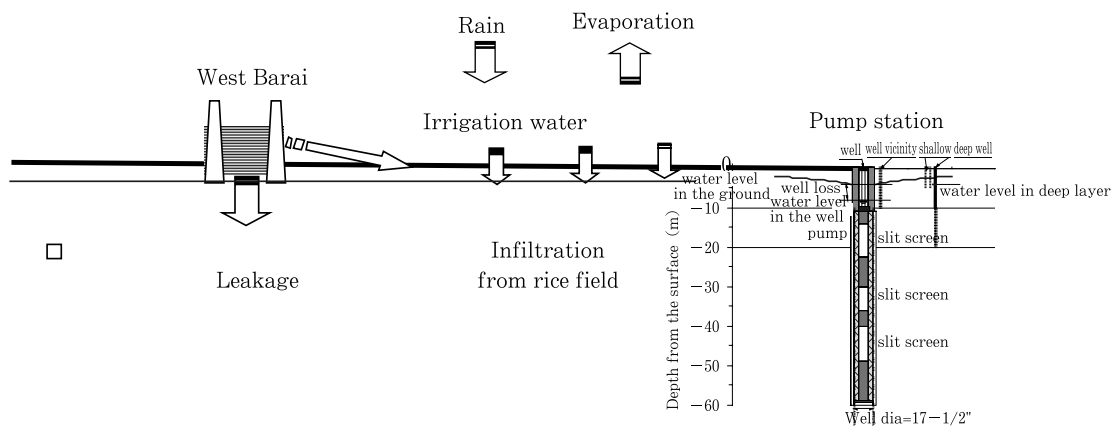


Fig. 12 Special factors affecting pumping area

水位上昇（降雨、西バライの底部漏水、灌漑水の鉛直浸透）－水位低下（蒸散、揚水）
すでに、揚水施設は完成した現在、アンコール平野における西バライ南方域の地下水問題には、現地における地下水位の計測と、それに基づき検討し、明らかにすべき多くの課題がある。

第13章 アンコール域における地下水の継続的監視体制の確立の必要性

JICA は、2000年に開発調査「シエムリアップ市上水道整備計画調査」を実施し、同調査中に8箇所の観測井戸を設置した。さらに、2007年2月には地下水位・地盤沈下計測設備の観測体制の現状を確認し、今後の対策に係る提言を行うことを目的として「シエムリアップ地域の地下水管理に係る調査」（2007年2月）を実施した。同調査では、シエムリアップ水道公社（SWSA：Siem Reap Water Supply Authority）による、地下水位のモニタリング作業の継続が確認されたものの、8箇所中1箇所の計測機材が盗難により紛失し、また、その他の観測井戸から回収されたデータの精度も低く、データ解析も十分になされていないことが確認された。このため「シエムリアップ地下水位フォローアップ調査」（2008）を実施して、これらの維持管理技術等の伝達に努力している状況にある。

シエムリアップ域における地下水位観測は、JICA が設置して現地機関にその観測管理を移管した地下水観測井戸、現地のアプサラ機構（APSARA：Authority for the Protection and Management of Angkor and the Region of Siem Reap）、シエムリアップ州や市など行政による観測井戸がある。著者は、これらの地下水位データの収集ネットワークを立ち上げようと、ユネスコ・プノンペン事務所に協力を求めたところ、快く協力が得られ、2007年11月27日シエムリアップ市で“Water Colloquium on Siem Reap”が開催された。しかし、目的とする“アンコール域地下水観測データネットワーク”の結成は未完のままとなっている⁽²⁾。

第14章 結 論

アンコール平野における水収支は、アンコール遺跡および観光立地環境の重要な要素である。本稿においては、アンコールにおける実観測データに基づいて、議論を行い、次のような結論を得た。

①アンコール平野における地下水位の変動は、降雨による地下水への地盤内の垂直浸透による水位上昇と、地表からの蒸散による地下水の降下である。

②アンコール平野の地盤沈下は、軟弱粘土地盤によるものではなく、乾燥収縮と湿潤による膨潤であり、地下水位が2.5 m 低下すると、地盤が約5 mm 沈下し、降雨とともに隆起している。

③JICA による F.S.（JICA 報告（2000））においては、地下水の水平流動という仮定の

もとに、季節変動解析を実施して、地盤の透水特性を求めている。また、この解析においては、考慮すべき地表からの蒸散による地下水位の低下を考慮していない。その後、実施された基本設計調査（JICA 報告（2003））においても、これらの修正すべき仮定が見直された形跡はない。

アンコール平野が持つ特徴の一つは、非常に緩い斜面であって、地表面や河川では流下しているが、地中内での流動は殆どないことを示した。

④設置された揚水施設の北側には、西バライ人造湖があり、人造湖からの湖底漏水や、西バライからの灌漑用水の地表面からの垂直浸透などの問題の解明が残されており、アンコール遺跡への影響の評価も含めて、現位置計測に基づく今後の対応が必要である。

⑤今回著者が経験した本問題は、JICA およびコンサルタントのプロジェクト遂行の手法や、プロジェクトの管理者や技術者の技術理解能力、プロジェクト遂行能力、長期にわたるプロジェクトの担当者が数年で変更となる際の引継ぎ手法などにあると思われる。これらは、本稿の主旨ではないが、関係機関における充分なる検証が必要である⁽³⁾。

注

- (1) 本稿の技術的データは、JSA による調査研究、F.S. (JICA Report 2000), および基本設計調査 (JICA Report 2003) の報告書に基づいている。揚水施設建設報告書は、JICA にはないということで参照できなかった。情報によれば、基本設計の段階と揚水井戸の仕様に若干の変更があったということであるが、本稿の結論に影響を与えるものではない。
- (2) JICA によれば、アンコール地域の地下水の問題に対しては、データの収集・公開・共有、モニタリング、地下水規制の働きかけなど、総合的な対応を行ってきており、今後もこのような対応を継続していく所存であるということだから、今後の対応に期待したい。
- (3) JICA 担当部署からの見解によれば、本件に関しては、技術的結論にも引継ぎにも問題はなく、現状の組織で充分機能しているという認識であるという回答を得ているが、筆者の見解とは異なる (2009 年 1 月)。

参考文献

1. UNESCO, "Safeguarding and Development of Angkor," Report to the Inter-Governmental Conference on the Safeguarding and Development of the Historical Area of Angkor, 1993, Tokyo, Cultural Division, UNESCO, pp. 36-43
2. JSA, "Geotechnology, Geology, and Environment," Annual Report on the Technical Survey of Angkor Monument 1995, July, 1995, JSA, pp. 237-267
3. Y. Iwasaki et al., "Geotechnology, Geology, and Environment," Annual Report on the Technical Survey of Angkor Monument 1999, July, 2000, JSA, 231-245
JICA Report 2000
4. Nippon Koei Co., Ltd and Nihon Suido Consultants Co. Ltd., "The Study on Water Supply System for Siem Reap Region in Cambodia-Final Report," June 2000, JICA Vol. I, II, III, and IV
JICA Report 2003
5. NJS Consultants Co. Ltd., "Basic Design Report on the Project for Improvement of Water Supply System in Siem Reap Town in the Kingdom of Cambodia," November, 2003, JICA
6. 赤井浩一「浸透に関する事象」, 最上武雄編『土質力学』技法堂, 1969 年, pp. 204-218

The Problems of Underground Water Caused by Pumping Water in Angkor

Yoshinori IWASAKI

A huge capacity pumping station was completed at the south of the West Barai in March 2006 providing 8,000 tons per day in Siem Reap as a gift from Japanese Government to Cambodia. The constructed pumping facility by JICA is to improve the water supply system in the region, however at the same time, it is anticipated to cause serious problems of lowering of the underground water in the plain in long range and may cause adverse effects on the cultural heritages in Angkor.

1. In this paper, the author shows general aspects of water balance in Angkor plain and how underground water becomes affected by the pumping water from the ground in the long range.
2. In the feasibility study for the project by JICA, two basic problems are required further study. They are the effect of evaporation to underground water and the mechanism of ground settlement. The evaporation effect was only considered to decrease total rain fall to obtain water supply. In the reality, evaporation causes lowering of underground water. JICA considers the settlement by only compression of soil layers by the increase of vertical load by dewatering. In Angkor, the ground settlement and heaving are considered as caused by drying and wetting process of unsaturated soils by evaporation and raining.
3. It is needed to operate monitoring system to confirm water balance and to prevent any adverse effects upon heritages by the pumping of underground water.
4. Effects of leakage from base of West Barai as well as surface leakage from the rice field into the underground should be monitored and included in the analysis.
5. The monitoring results shall be fed back to the evaluation of effects of pumping not only by the pumping constructed by JICA but also Hotels nearby and used to control the pumping to avoid any adverse results to the Heritages in Angkor.

Keywords: Angkor, pumping underground water, conservation of heritage, JICA