アンコール地域の地下水問題

岩 崎 好 規

要 旨

本紀要創刊号においては，アンコール地域の揚水問題を取り上げて，JICA の取り扱いの問題点を指摘したが，この第 2 号においては，このような間違った扱いが再び起こらないように，アンコール平野の地下水流動の基本的な特徴を述べた。

クーレン山とトンレサップ湖の間の 50 km の間に広がるアンコール平野の地下水位は，2–6 m 程度の年間の季節変動が観測される。現地に立てば，クーレン山からトンレサップ湖へ流れているような錯覚に陥るが，非常な緩斜面であるので水平流動速度は小さく，この季節変動は，雨季の降雨の地盤浸透による地下水位上昇，乾季の蒸発による水位低下である。JICA によるアンコール平野域における年間月別水位変動記録から，水位変動幅，シエムリアップ市内の過剰揚水状況，および 2006 年の揚水開始以降の地下水位変動の予測と観測結果の比較を示した。

キーワード：アンコール（Angkor），地下水揚水（Pumping underground water），遺跡保存（Preservation of heritage），国際協力（International cooperation）

1. まえがき

著者は 1994 年から開始した JSA（Japanese Government Team for Safeguarding Angkor：日本国政府アンコール救済チーム）の地盤系の調査活動[(1)] を担当した。紀要創刊号においては，JICA による揚水施設の建設のための地下水流動問題を扱ったが，第 2 号においては，基礎的な地下水位の季節変動メカニズムを示しておきたい。

アンコール地下水問題を論文として残しておきたいと思い，サイバー大学紀要創刊号に掲載した論文[(2)] は，発刊から数ケ月が経った 2009 年秋に著者がアンコールに調査入りした際，現地で活動を開始した JICA の調査技術者にも読まれていることが判明した。こうも，スピーデイにその関係筋に達してサイバー大学紀要論文が流通しているかと思うと，本紀要も，すでに世の中で，その任を果たしつつある。

サイバー大学世界遺産学部・客員教授

原稿受付日：2009 年 10 月 19 日
原稿受理日：2010 年 1 月 13 日

2. アンコール地域の自然条件

2.1 気　象

東南アジアに位置するカンボディアは，典型的なモンスーン（アラビア語 mausin（季節）に由来する）気候帯にある。北半球に位置する本地域では，夏季は西風が卓越し，東西に並ぶエヴェレスト山脈によって整流化され，インド洋からの暑い蒸発水を運んでいくが次第に冷たくなるにつれて，雨を放出することになる。冬には中国東北部からの高気圧が優勢となり，カンボディアにおいては，東北風によって乾冷気がもたらされる。

Fig. 1 に雨量，蒸散量，温度変化，日照時間，および湿度の月別変化（1998 年度）を示した。この地域は年間の降雨量の季節変化が大きく，雨季の 5 月から 10 月までは 200 mm/月，乾季の 11 月から 4 月までは 50 mm/月以下で，年間雨量としては 1,300–1,500 mm/年で東京・大阪と同程度である。蒸散量の季節変化は小さく，地表面が裸地となっているシエムリアップ飛行場における月蒸散量は，100–150 mm/month 程度の値で一定している。雨量から蒸散量を差し引いた水が，涵養水として地盤に浸透するが，この図に示した蒸散量は，裸地におけるもので，一般的には，森林などにおいては，蒸散量は小さい。雨季においては，降雨量が蒸散量を上回るが，乾季という降雨のない季節（11 月から 4 月）においても，蒸散量は 130 mm/月である。

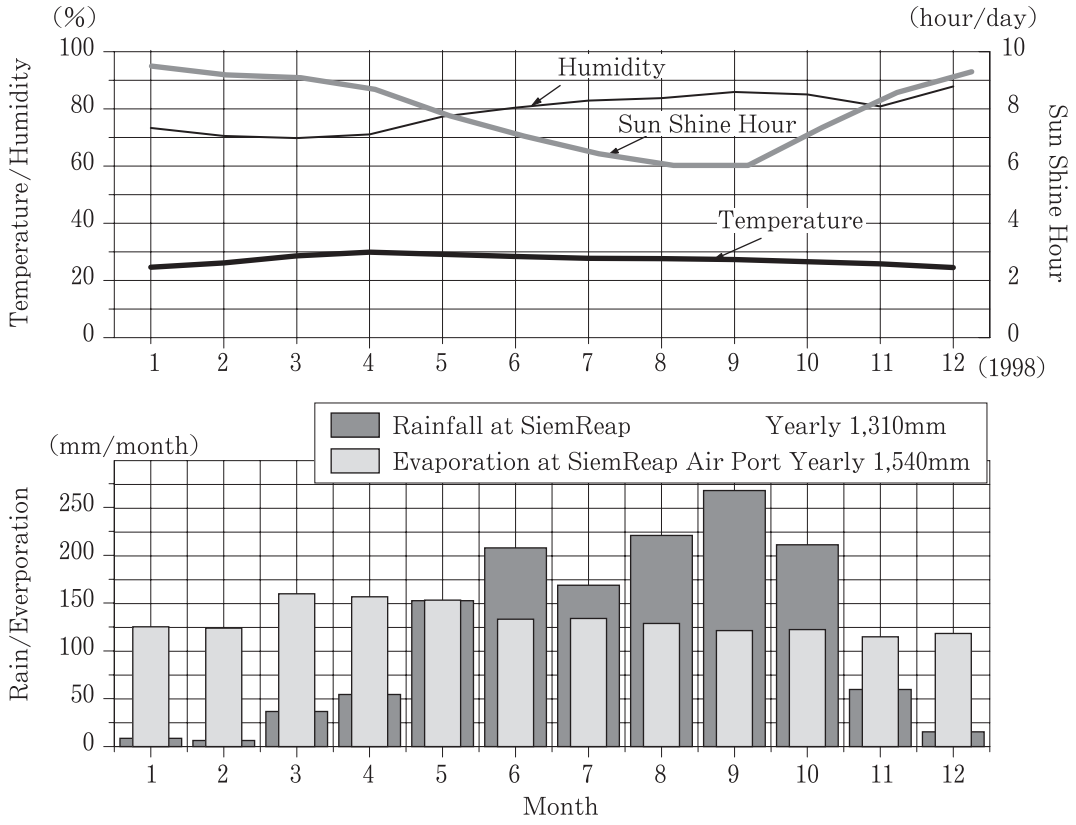

Fig. 1　Monthly change of Metrological condition at Siem Reap in 1998

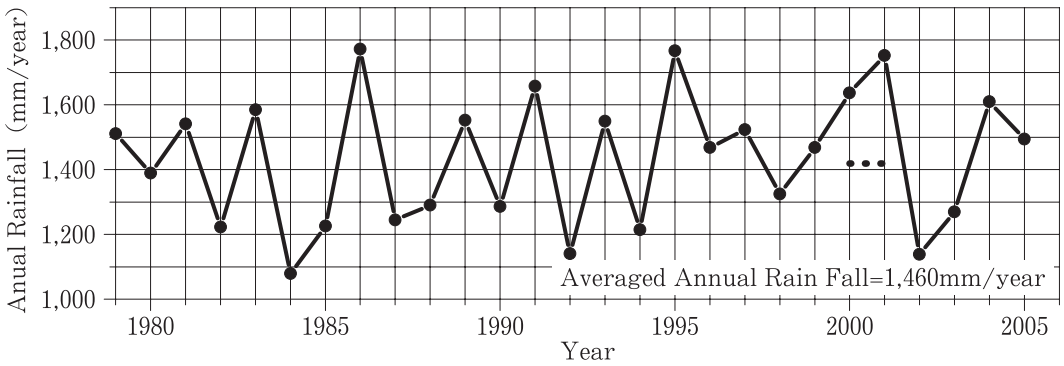

Fig. 2　Change of Annual Rainfall in Siem Reap

乾季の 11 月から 2 月までの気候は日本の 3 月程度で快適である。東北風が弱まる 3〜4 月ころには，最高気温は 35℃から 40℃にもなって草木も枯れるくらいになる。

Fig. 2 に，1979 年から 2005 年までの年間総降雨量の変化を示した。この図から見ると，1,100–1,800 mm/year という範囲で年間降雨量は変動している。もし，シエムリアップの水利用を考えるならば，降雨量と蒸発散量であるが，その安全側の降雨量としては，年間 1,000 mm 程度であろう。

2.2　地形および表層地質

カンボディアは，東南アジアインドシナ半島の南に位置し，この半島を流下するメコン河は，中国青海省南部およびチベット高原東部に源を発し，中国雲南省からラオス・タイの国境を流れ，カンボディアを貫流，ヴェトナム南部から南シナ海に注ぐ長さ 4,020 km の東南アジア最長の大河である。

Fig. 3 にアンコール等高線地形図を示した。カンボディア王国のアンコール遺跡といえば，アンコールワットが優れて有名であるが，数十を超える遺跡群が，王国の西部に広がるトンレサップ湖（Tonle Sap）からクーレン山脈（Kulen Mountains）の間約 50 km のアンコール平野に広く点在している。

Fig. 3 に示されているようにアンコール平野は北から南へ約 60 m の比高で，ほぼ 1/1000 という緩傾斜を有する。クーレン山に源流を持つシエムリアップ川が遺跡の間を流れ，バライと呼ばれる農業用灌漑人造湖の水源ともなり，遺跡周囲の環濠と連携して往時の水郷都市アンコールを支えた。

この川の流路を Fig. 3 に示したが，クーレン山を源流として，同山の南西部から平野に入り，本来は西南方向に流下し，西バライの西北端部に流れていたと思われる。

現在のシエムリアップ川はクーレン山麓から西南に流れたのち，プム・クラート（Phum Khlat）分流堰（ラジェンドラバルマン王（Rajendravarman, 944–968）の造営による）地点で，人工河川によって南下して東バライ（East Barai）と呼ばれる人造湖に至り，東バライの北側を西に流れ，同バライの北西部からアンコールトム（Angkor Thom）の東側を南下し，シエムリアップ（Siem Reap）市街の中を通ってトンレサップ湖に流下する。

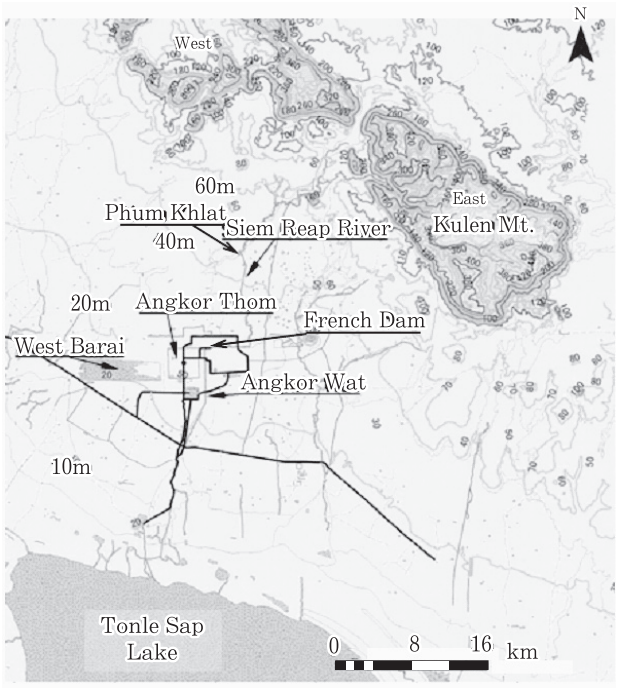

Fig. 3　Topological Map of Angkor

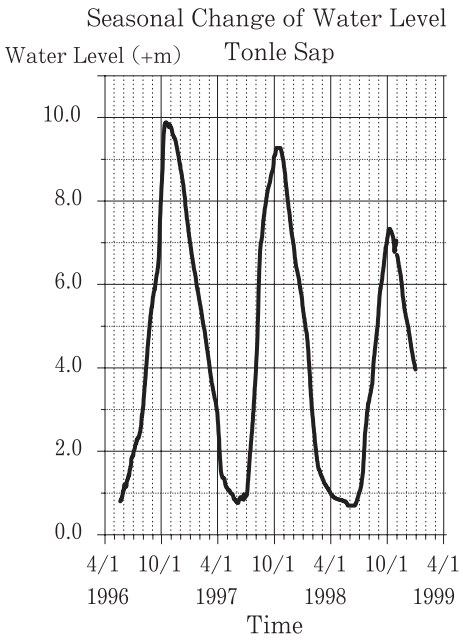

Fig. 4　Seasonal Change of Water level, Tonle Sap

トンレサップ湖は長さ 150 km 幅 30 km の瓢箪型で，乾季にはこの広大な水域がわずか 2〜3 m という浅い水深となる。瓢箪の出入り口はトンレサップ川を通じてプノンペンでメコン河と繋がっている。

トンレサップ湖の湖面の水面の年間変化（1996–1999）を Fig. 4 に示した。乾季から雨季に入った 7 月から，逆流が発生して次第に湖水面が上昇し，10 月に最大に達し 7〜10 m が計測されている。この湖水面の水位変動が，アンコール地域の南端における境界条件を与えている。

Fig. 5 に JICA による航空写真測量[3] とともに示されている地表地形地質図[4] を示した。トンレサップ湖周辺には，雨季には水没する湿地帯がひろがり，水位が高かったころの湖底層や沖積扇状面が緩やかな平野を形成している。アンコール平野の北限は，東および西クーレン山が両翼を南に拡げトンレサップ湖に対峙している。主として第三紀中生代（Tertiary Mesozoic）の砂岩が分布しており，アンコール遺跡の石材を取り出した場所であるとされるが，どこの遺跡がどこの石切場であったかという特定はなされていない。

2.3　クーレン山の涵養とシエムリップ川

クーレン山は東西両翼に分かれて，トンレサップ湖に対峙している。東南翼は長さ 25 km，幅 15 km で 420 m の高さで，山の中心部は標高約 350 m の台地状で山の周囲の方が高いため（すり鉢状を示し）涵養能力が高い。この東南翼の面積のほぼ半分の集水域約 250 km^2 の雨水の流出口は西北に位置する谷川で，シエムリアップ川の主源流である。西北翼は標高 380 m の最高点が山の中央部にあり，南東，南西と西に谷が形成されており，

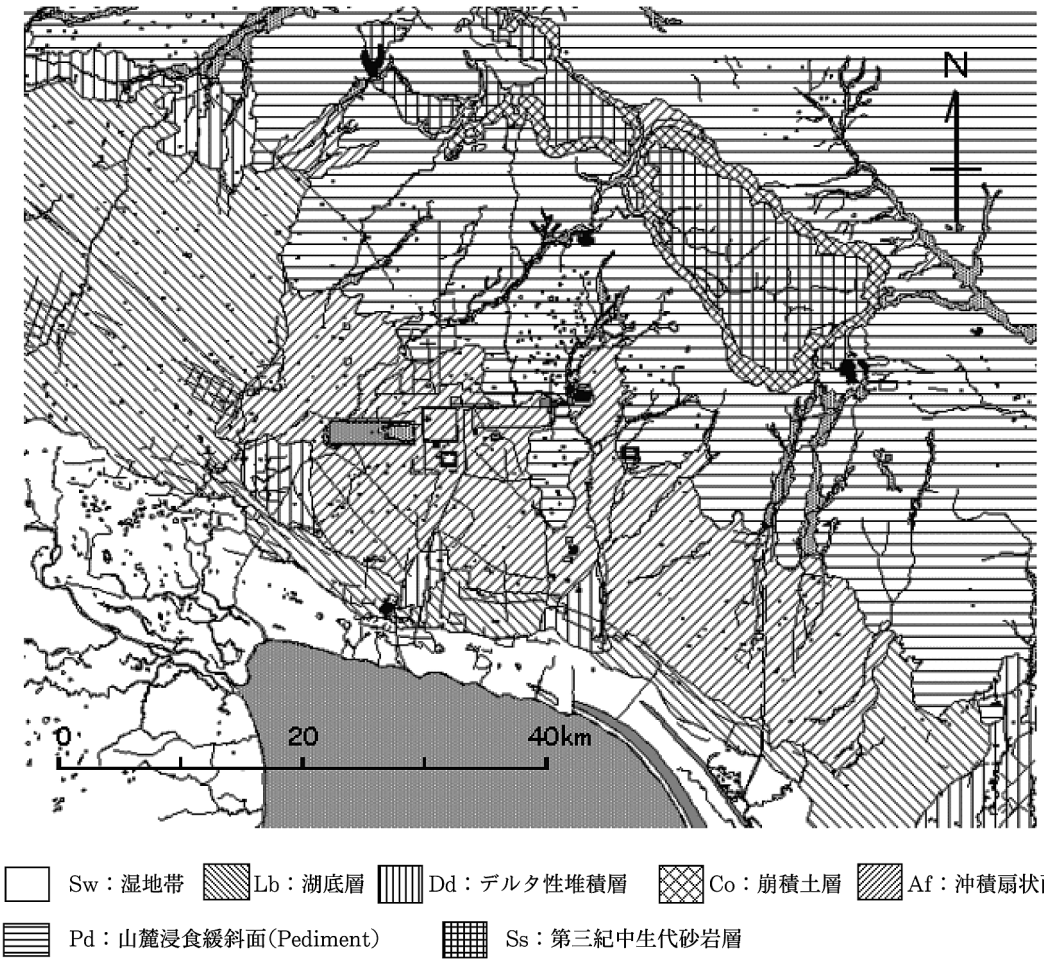

Fig. 5　Surface Geomophological Map of Angkor[(2)]

このうち南西方向の谷（集水域約 50 km^2）がシエムリアップ川の支流を形成している。

シエムリアップ川は，東バライの北を通り，フランス堰と呼ばれるダム地点で一部は分流されて西バライに貯留される。西バライは，東西約 7 km, 南北約 2 km, 堤防の高さ約 15 m の人造湖である。

西バライは，周辺の水田の灌漑用水として利用されていて，現在でも重要な役割を果たしている。

Fig. 6 に，シエムリアップ川のフレンチダム地点における河川流量推定値および同ダム地点から分流して西バライへの供給水量を JICA 報告書[(5)] からの数値に基づいて示した。

1998 年度におけるシエムリアップ川の年間流量を求めると 6 千万 m^3/年で，フランスダム地点から，分流されて西バライに流れるのはほぼ 2 千 3 百万 m^3/年であり，これは，全水量の 39%に相当する水量である。

Fig. 6 の上部には，シエムリップ気象観測所における雨量データを示した。シエムリアップ川の流量とシエムリアップ市における日降雨量の変化を見てみよう。シエムリアップ川は，乾季に入って次第にその流量を減じ，1 月には約 $v=2.2$（m^3/sec）からさらに減じ 5 月中旬には，$v=0.6$（m^3/sec）の最低値に達したあと，反転増加する時期は，雨季の始ま

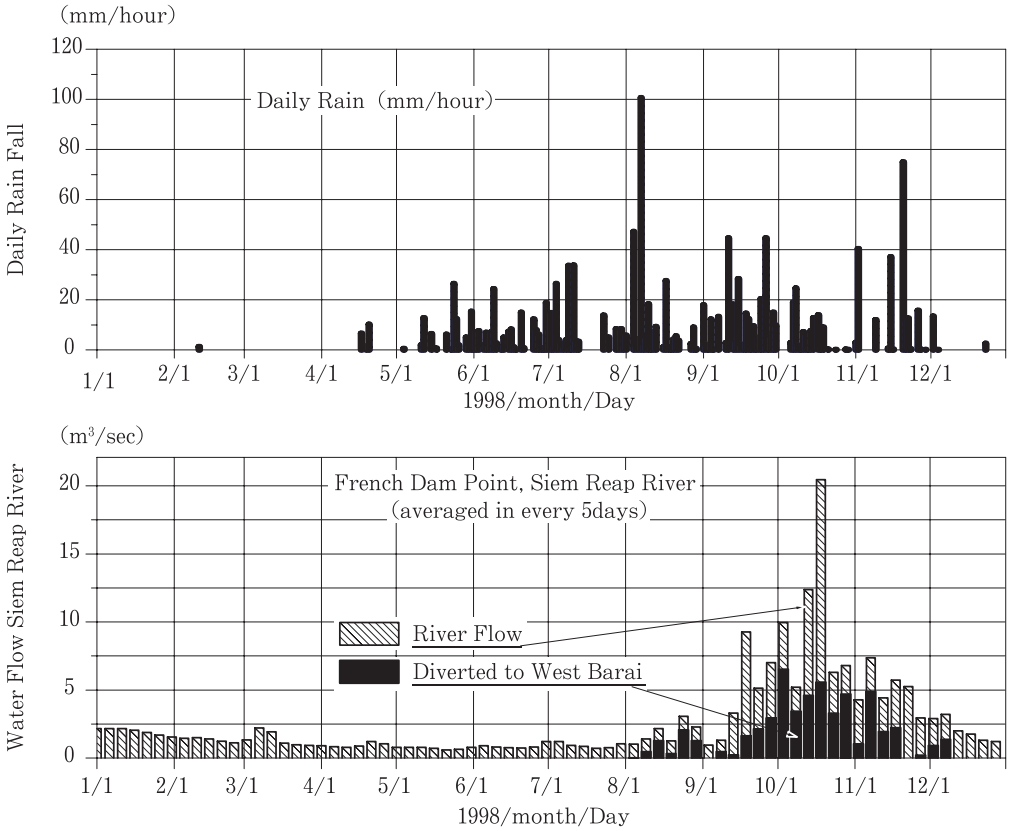

Fig. 6　Water Flow of Siem Reap River at French Dam, Diverted Flow, and Rainfall in 1998

りと一致する。しかしながら，その後，河川流量は，降雨につれて比例増加するわけではなく，ほぼ一定値を継続し，明確な増量が見えるのは，8 月後半の雨季開始後 3 月目である。9 月以降，9 月半ばと 10 月初旬に約 10（m^3/sec）に達する 2 つのピークがある。これに対応する雨量の 40（mm/day）のピークが 2 つ確認できる。雨量と流量ピークは，それぞれ，雨量ピーク（9/11 および 9/26）　流量ピーク（9/21 および 10/2）で，ピークの時間差は 10 日と 6 日である。10 月半ばに流量の最大値 20（m^3/sec）がみられるが，これに対応する降雨はシエムリアップの降雨観測には見られない。

Fig. 6 に見られるように，シエムリアップ川は乾季においても枯れることはないが，これは，クーレン山の高い涵養能力によるものである。クーレン山における雨量は，シエムリアップ市内に比べて，数十%多いとされているが，クーレン山における雨量観測，蒸発散量，シエムリアップ河川流量などの同時観測によってさらなる検討が出来よう。

さて，クーレン山の流域の降雨量をシエムリアップ市内の約 1.3 倍として，シエムリアップ河川の年間流量と比べてみると，1998 年では，河川流量は降雨量の約 17%程度となった。

即ち，クーレン山に降った約 3 億 5,000 万 m^3 の水は，約 2 割の 6,000 万 m^3 が河川で流下するが，他の水は蒸発や地下水となっているのであると推察される。

3. ボーリング調査による地下地質

アンコール域における地質調査のための 100 m 級のボーリングを JSA が 1994 年に実施した。

その後，奈良国立文化財研究所，JICA によるシエムリアップ市水源調査などにおいても地質ボーリングが行われた。これらの地点は，Fig 4 に示したが，地表付近の標準貫入試験による N 値の深度分布を南北断面として Fig. 7 に示した。

地表から 40 m 程度までの深度は第四紀の地層で，N 値 50 以下の細粒分を含む細砂層が分布している。この表層地層は，さらに層相から二層に分けることができる。上層はシルト粘土質細砂で N 値＜20 以下であるが，下層は巨礫を含むシルト質細砂を主とするもので，N 値は 20〜50 である。

第四紀層の下位には，第三紀と思われる風化凝灰岩が約 GL−80 m まで続き，さらに火成岩を中心とする基盤岩が存在する。

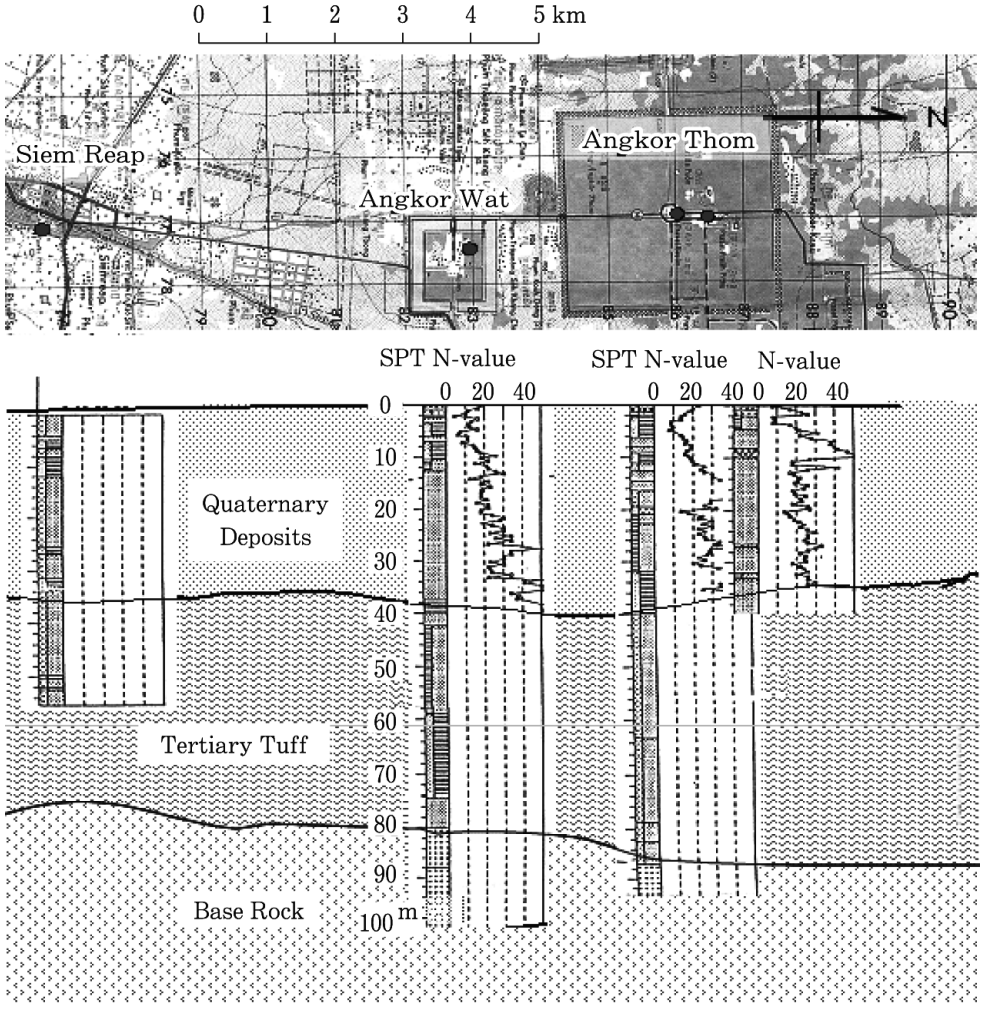

Fig. 7　Geotechnical N-S Profile in Angkor

地下水は，主として地表最上部の堆積層を北から南に流下すると考えられるが，風化岩盤中の亀裂などを通って流れている伏流水の存在も考えられる。

表層部の土質の大部分の土質には，細粒分（粒径 0.06 mm 以下）が 10–30%程度含まれ，粒度特性からはシルト質細砂で，深くなるとやや細粒分が減少する。

4. バイヨン北広場における水圧計の設置と表層地下水位の変動

JSA によるアンコールトムバイヨン寺院（Bayon, Angkor Thom）におけるボーリング調査では，深層 100 m と，標準貫入試験を伴う表層 40 m までの 2 本のボーリングを実施した。

この地点のボーリング結果および間隙水圧計の設置位置を Fig. 8 に示した。

地層の層相をみると，砂質系がシルト系より卓越している層が何枚か存在している。それらの地層の中から，2 つの砂分卓越層を選び出し，地表面から 7.1 m および 15.1 m の深度に水圧計を各ボーリング孔に設置した。設置にあたっては，当該砂層までは，ベントナイトセメントで埋め戻し，砂層では砂で埋め戻して間隙水圧計を設置して，さらに砂，その後，ベントナイトセメントで表層孔を埋め戻した。このような設置をしておくと，地下水が，上下方向の流動を解明する手口を与えるからである。上下流動のない状態は，静水圧状態と呼ばれ，地下水面下 10 m で，水圧は 10 ton/m^2 である。もし，この静水圧より異なる水圧だと，高い水圧から低い水圧へ水の流動が発生する。すなわち，地下水面下 10 m 深度で 10 ton/m^2 より水圧が高ければ，下層から上層へ，低ければ上層から下層へと水の流れが発生する。

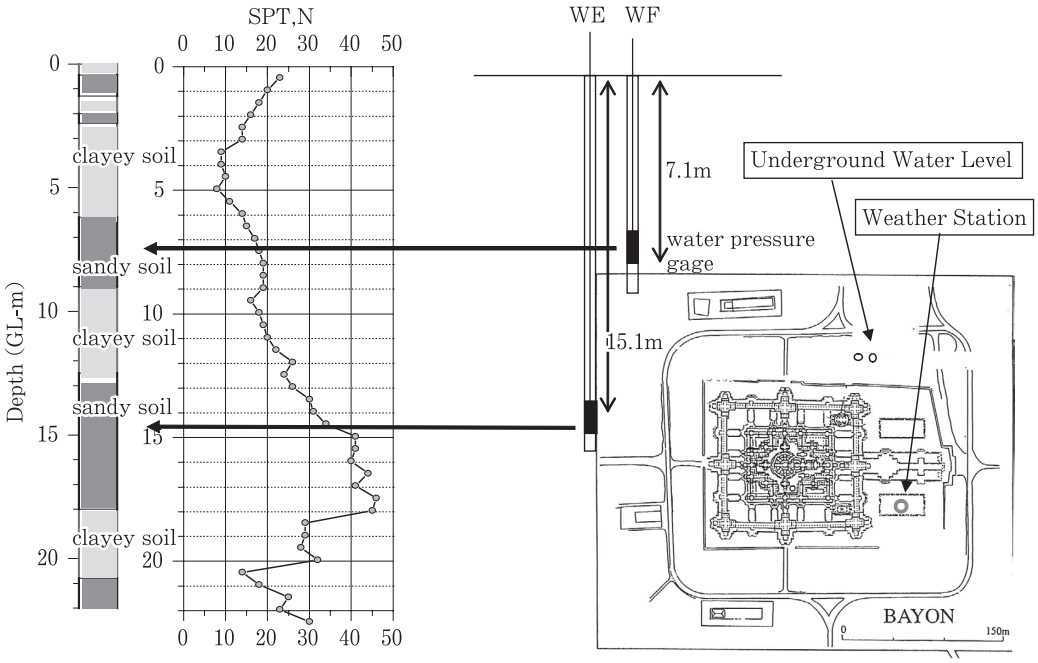

Fig. 8　Installation of Pore Pressure Sensors at Bayon Site

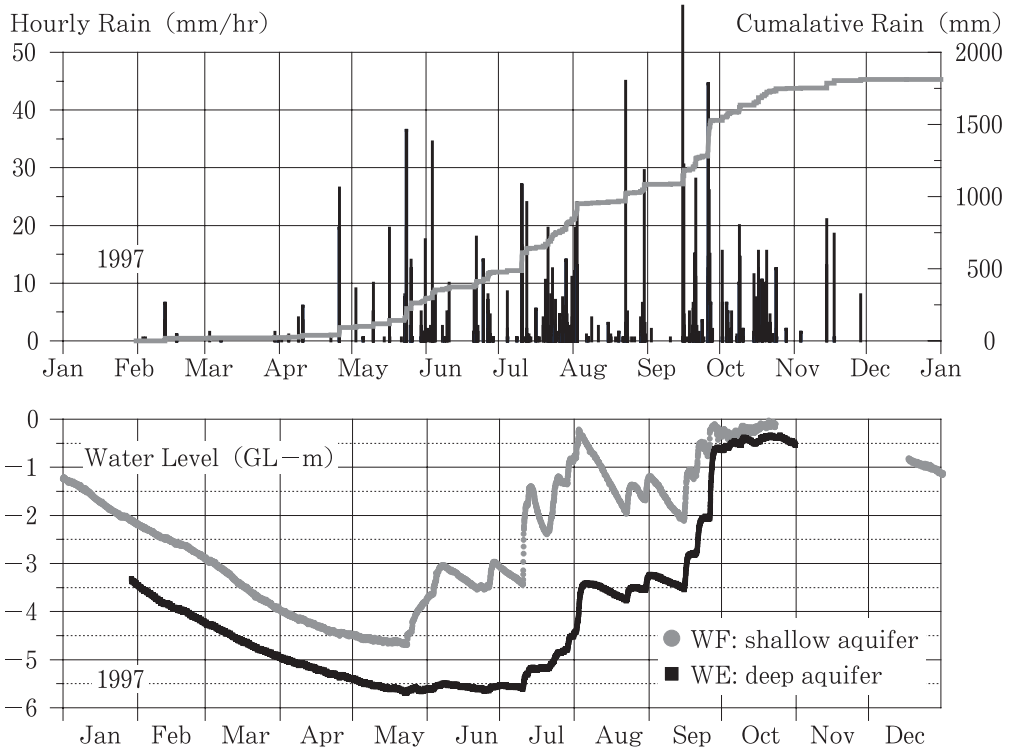

Fig. 9　Monitored Results of Pore Water Pressure at Bayon

以上のようにバイヨン寺院における地下水位の観測においては，2 つの砂層（6.0〜9.2 m および 11.5〜18.0 m）を選んで，それぞれの深度に独立して間隙水圧計を設置し，観測結果を Fig. 9 に示した。

乾季の 1 月から 5 月ころまでは，これらの水位には約 1.5 m から 1 m 程度の差が見られる。アンコール域においては，10 m 程度の深さの井戸を多く掘って地下水を利用している。乾季には上層から蒸発による水位低下が発生するが，下層の水位の方が低いのは，この人為的な水利用の影響であろう。

乾季の時の地下水位低下速度は，0.5〜1.0 m/月程度である。土の平均的な含水比は 10〜20%程度であるから，土の体積の 2〜3 割が水分である。

もし，1 m の土柱の水分が蒸発したとすると，ほぼ 200〜300 mm/月の蒸発ということになる。ここで見られるような地下水の季節変動は主として乾燥と降水，および井戸による取水によるものであると思われる。

5. アンコール平野における表層地下水

JICA は，現地の地下水調査の一つとして，アンコール平野の地下水位流動を把握するために，井戸の地下水位の年間変化の計測を実施した[(5)]。

これらの計測地点の分布を Fig. 10 に示したが，そのうち，クーレン山からトンレサップ湖にかけての南北線を選んで，これらの地点の標高と地下水位変化を Fig. 11 と Fig. 12

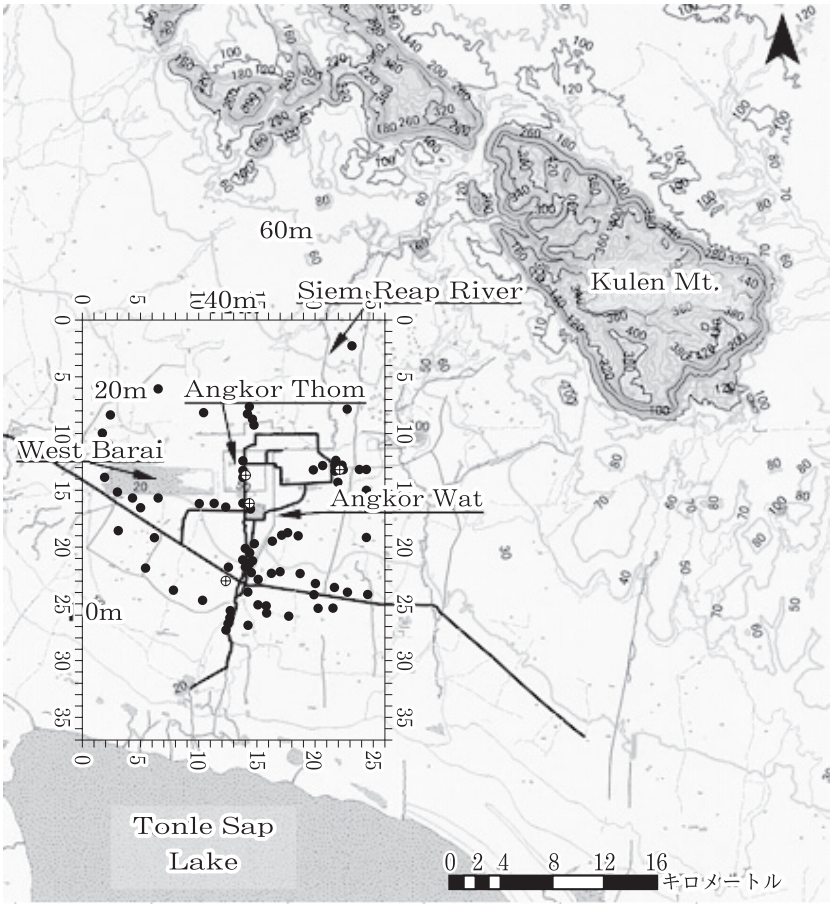

Fig. 10　Monitoring Points of Shallow Wells by JICA Study

に示した。

クーレン山からトンレサップ湖までの約 50 km 間であるが，観測井戸群は水平距離約 25 km 間に位置し，比高 25 m の間にある。

各観測地点の地下水位の季節変化を Fig. 12 の右図に示し，左図に各観測井戸における最高水位および最低水位を示した。さらに右図の下には，1998 年におけるシエムリアップ市の月別降雨量を示した。各井戸における地下水位の季節変動をみると，最低水位および最高水位となっている時期をみると，どの観測井戸においても 4 月から 5 月が最低水位，11 月から 12 月が最高水位となっている。

地下水位の最大水位時や最低地下水位時の勾配は，ほぼ，地表面勾配に平行しているが，観測井戸群最北部と最南部のシエムリップ市域では大きく水位低下が発生していることが分かる。

さて，各井戸における地下水位の季節変動をみると，最低水位は，どの観測井戸においても 4 月から 5 月あたりで，最高水位は 11 月から 12 月にかけてである。

もし，クーレン山からトンレサップ湖にむけて地下水の勾配に従って地下水が流動しているとすると，最高水位や最低水位などは時間差が現れて当然であると思われるが，確認することが出来ない。ほぼ，同時に出現している。1 月に 1 回の観測であるから，同時に

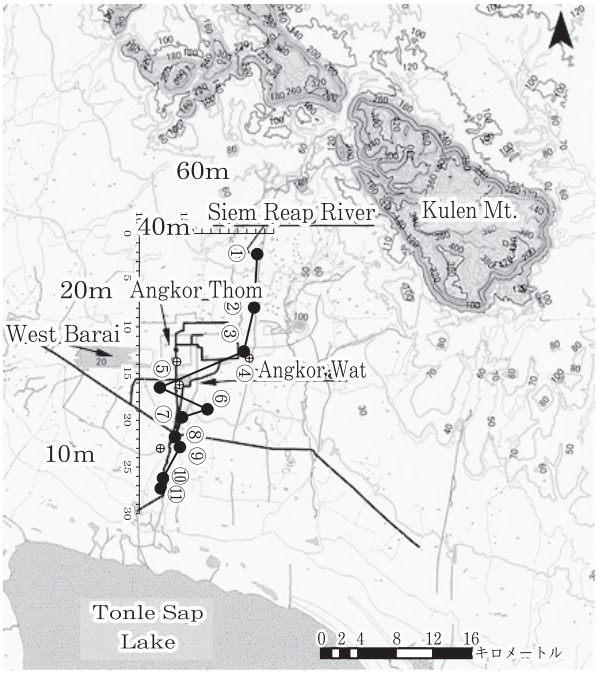

Fig. 11　Well points in N-S direction

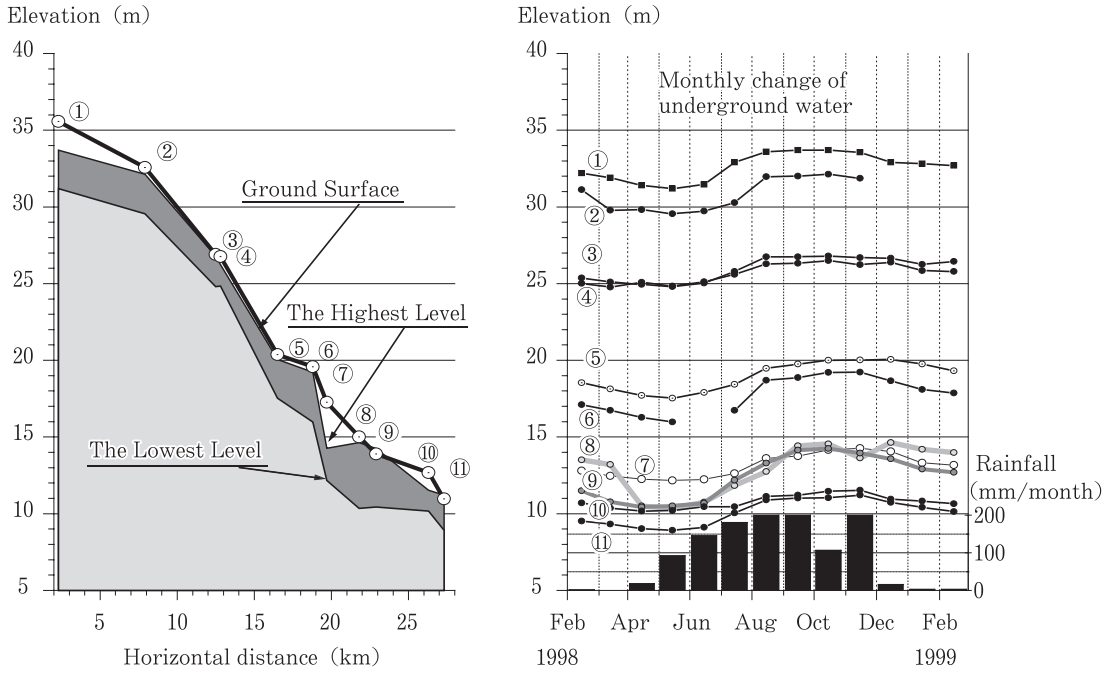

Fig. 12　Max-Min and seasonal Ground water level

出現しているということは，数日ないし 10 日程度で，流動しているか，あるいは，地下水位は，その場で地下水の降雨浸透による地下水位上昇，蒸発による水位降下が主流となっているのであろうか？

地下水の流速（v），動水勾配（i），および透水係数（k）の間には，$v = k*i$ という関係がある。i＝0.001 として，透水性のよい砂礫とか砂の透水係数は，10^{-1}（cm/sec）程度

であるから，v＝0.00001（cm/sec）＝30（cm/年）となり，水平流動は無視出来る。

地下水位の季節変動が，水平流動ではないとすれば，鉛直流動で発生している現象ということになる。Fig. 9 をみると，雨季における場合，2 つの観測深度でそれぞれ地下水挙動は異なっている。降雨があれば，浅い観測深度ではただちに水圧上昇が見られ，深い深度においては，その応答はやや鈍いが，降雨に応じて上昇していることが見える。すなわち，水位上昇は降雨時に発生し，鉛直流動と考えられる。

乾季における状況はどうであろうか？　Fig. 9 の乾季である期間から 1997 年 1 月 30 日から 2 月 2 日の間の 4 日間の水圧変化を，Fig. 13 に示した。1 時間に 1 回の頻度で計測されているが，水圧は，小さな振幅の増減を繰り返しながら，次第に低下していることが示されている。振幅の変化の周期は，24 時間で，最大値はほぼ午前 9 時頃，最低値は午後 6 時ころに出現し，振幅は 5〜7 cm 水頭程度である。繰返し変化の中でも，水圧降下が発生する区間を枠線で囲って示した。

これらの区間は，1 日の中でも午前 8 時ころから夕方午後 6 時ころに相当している。水圧変化を見ると，昼間の水圧降下が発生した後，やや，上昇するが，前日の水圧まで復帰することはなく，日ごとに，水圧は低下していく。低下量は，3 日間で 10 cm から 15 cm 程度であるから 1 日あたり 3〜5 cm の低下となっている。

この地下水位低下の現象は，地表面からの蒸散に関係しているものと考えられる。1998 年の 1 月から 6 月までの期間の，シエムリアップ飛行場における蒸散量とアンコールワットにおける地下水位の観測点における変化を Fig. 14 に示した。アンコールワットにおける観測点は，西参道から外回廊に入ったところにある南経蔵地点付近に設置したものである。基本的な地下水位の変動の様子は，前述したバイヨンにおける場合（Fig. 9）と変わらない。地下水圧の乾季における低下をみると，1 月から 4 月の間に約 2.5 m の水位降下が見られている。これは，1 日あたりの低下とすると，20 mm となり，Fig. 12 と同等のレベルにある。

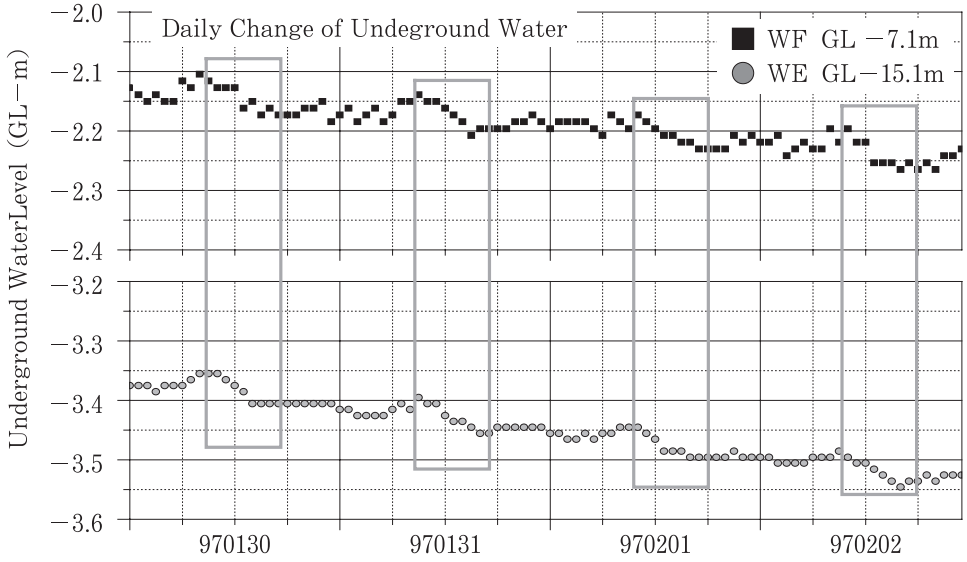

Fig. 13　Observed Pore water Pressure at Bayon during Dry Season

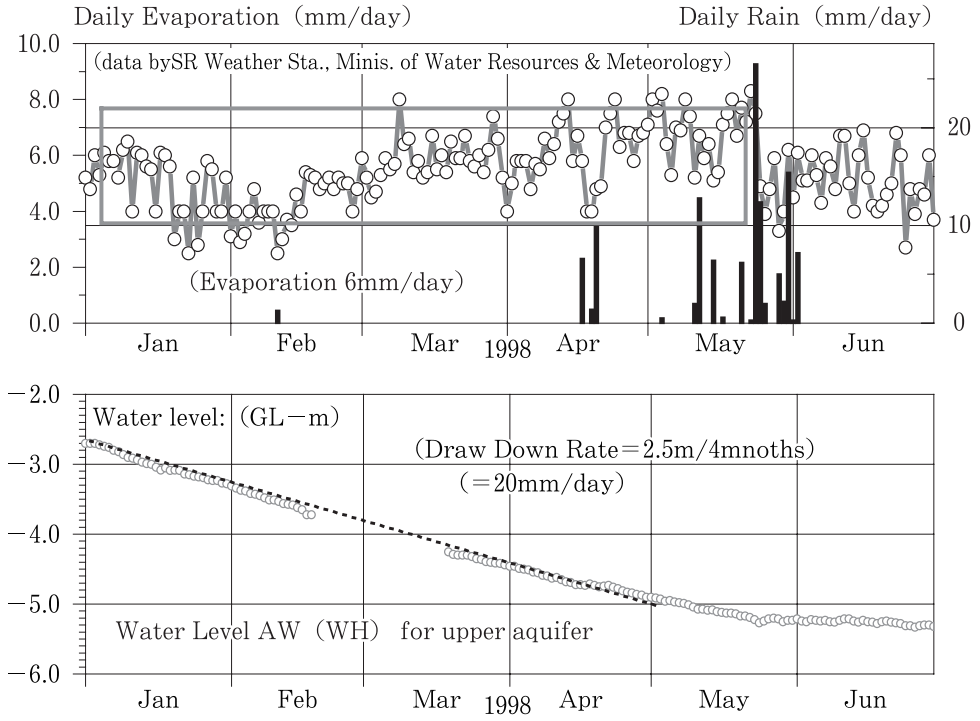

Fig. 14　Evaporation at Siem Reap Air Port and Water Level at Angkor Wat site

この時期の飛行場における蒸散量は，平均すれば，6 mm/日という値となっている。先述したように，土の体積の 2〜3 割が水なので，水位低下が 20 mm であるということは，実質の水は単位面積あたり，4〜6 mm/日の水が消失したことになる。この値は飛行場における日蒸散量とオーダーとしても合致しており，その水位低下挙動からも，蒸散によるものであると考えられる。

水収支解析において，蒸発散による影響は，総雨量から蒸発散量を差し引くということで与えているのが，一般的である。JICA における水収支解析においても同様である。これは，降雨があり，蒸発散量が降雨量より小さい場合には成立する。しかし，アンコールにおける乾季のような場合，降雨は殆どなく，蒸発散量だけが存在する場合，その影響を評価するためには，実測でその影響を確定する以外に評価手法はない。すなわち，アンコール域のバイヨンやアンコールワット観測地点においては，ほぼ，裸地における蒸発量に相当する地下水位の低下が観測された。しかし，地層構造によっては，たとえば，粘土層が存在して容易に地下水の上下移動が出来ない場合などは，蒸散に対応した地下水位の低下は発生しないと考えられるからである。

6. 蒸発による地下水位の低下

乾季における蒸散量は，地下水位にどのような影響を与えるのか？　紀要第 1 号に掲載した前論文を執筆中，JICA と意見交換を行った。「JICA におけるアンコール平野における水収支解析において，蒸発散量は考慮されている」という見解であったが，著者は「十

分には考慮されていない」という見解である。JICA による蒸発散は，表層近くの地下水を想定しており，降雨量と蒸発散量の差を浸透量として与えるだけである。乾季になると，蒸発による影響は深部にまで及んでいる。この蒸発による地下水位低下の影響は，前述したように，実測する以外に確定させる方法はない。

7. 年間水位変動幅の分布

これらの観測井戸の特徴の一つに，井戸水位の変動幅がある。年間変動幅を，2 m 以内，2〜3 m，3〜4 m，および，4 m 以上の 4 種類に分類し，これを Fig. 15 に示した。

バイヨンでの井戸の年間変動は，乾季の最後の 5 月で地下水は最大深度の GL−5 m，また雨季の最後が最浅深度の GL−0 m であった。

観測井戸の多くは，バイヨンと同じく，3 m 以上の変動を示しているが，地域によっては，2 m 以内という変動幅の非常に小さい地域もあることが分かる。アンコール域における地下水位の変動幅は，基本的に 2 つの要素，①年間降雨量と②年間蒸発散量とによって規制されているが，アンコール域に限ると年間降雨量がほぼ一定であるから，年間蒸発散量の違いということが考えられる。3 m 以上の井戸が見られるのは，市街地としてのシエムリアップや，アンコールワットやバイヨンなどの観光開発域である。変動幅が，2 m 以

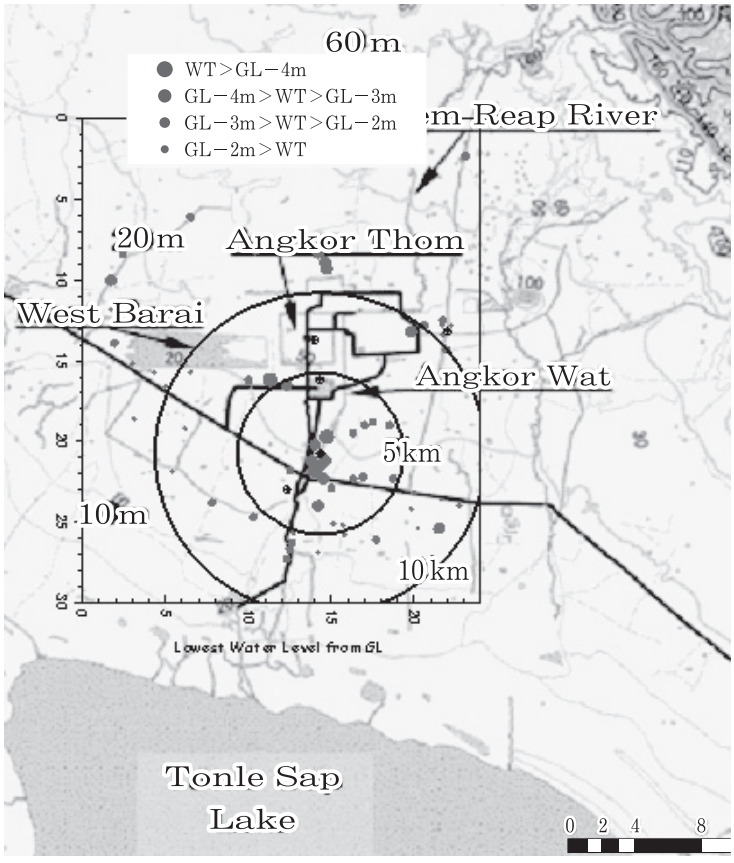

Fig. 15　Distribution of Observed Well and the Max. Change of Water Level

下と小さいのは，西バライの南側およびシエムリアップの南側に点在している。

西バライは，その湖水をバライの南側の水田に灌漑用水を供給しているために，乾季の水位低下が減少し地下水位の変動が小さく抑えられている。

8. シエムリアップ市街周辺の地下水

シエムリアップ市周辺においては，最低水位レベルの地表面からの低下が大きくなっていたが，シエムリアップ中心で井戸水位最大低下を示す井戸群の中心からの距離と，井戸の水位の関係を求め，Fig. 16-17 に示した。

最高水位と最低水位の地表面からの深さの分布を示しているが，最低水位の中心は，国道 6 号線より，やや北側に位置している。この地下水位の低下というものは，地下水の市

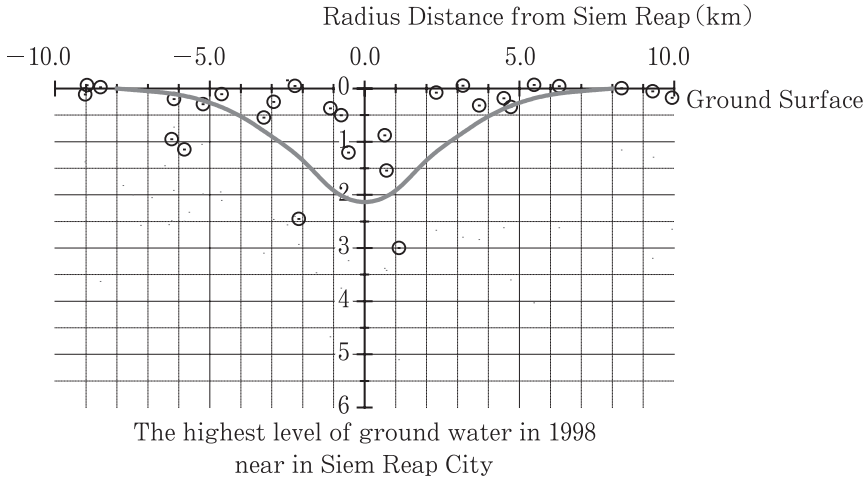

Fig. 16　The Distribution of The Highest level of Underground Water vs. Distance from the Lowest Center

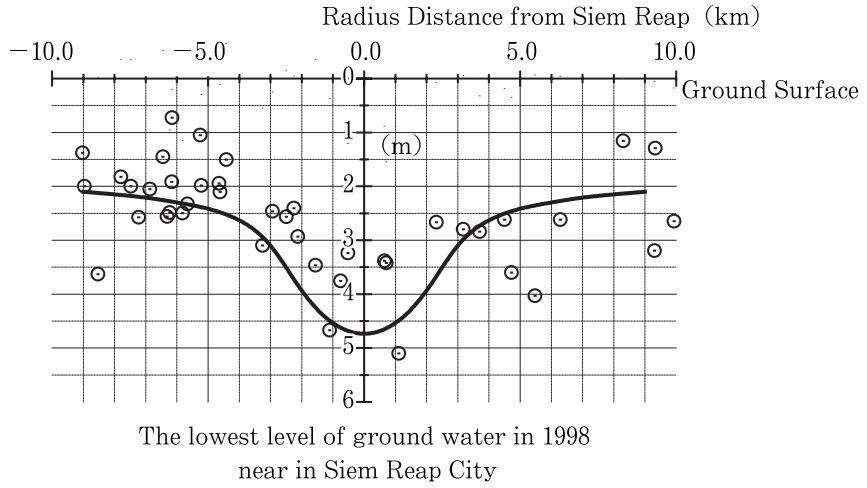

Fig. 17　The Distribution of The Lowest level of Underground Water vs. Distance from the Lowest Center

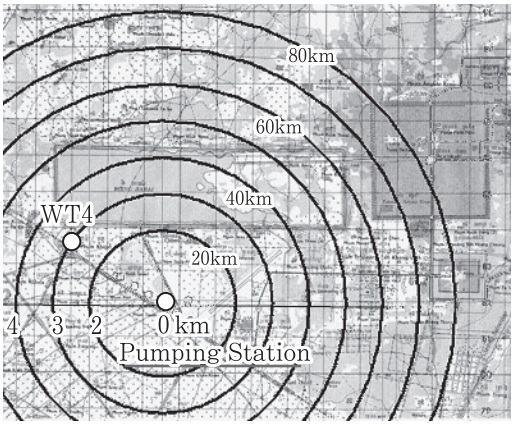

Fig. 18　観測井戸位置

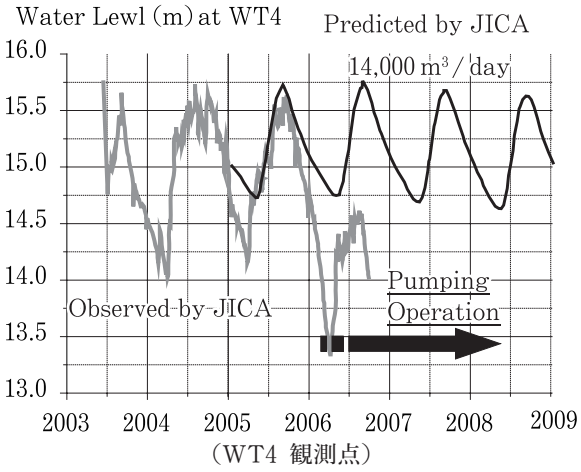

Fig. 19　JICA による水位低下の予測および観測結果

民やホテルの地下水揚水によって発生していることは明らかであろう。

これらの井戸位置を南北 2 つに分けて，左右に振り分けた。

中心から 10 km 付近においては，最高水位は，地表面付近にあるが，半径 5 km の範囲においては，ばらつきはあるものの，明らかに地下水位は地表面から数 m 以下，低下中心部では平均約 2 m 地表面下にある。これは，すでに，シエムリアップ市中心域においては，過剰揚水状態となっていて，地下水が回復する雨季の終わる頃においても地表面までは地下水面は復帰しなかったことを示している。

平面図でみてみると，5 km という範囲は，アンコールワットをその中に含んでおり，今後のさらなる検討を要する問題である。

9. 揚水による周辺域の水位変化

2007 年のアンコールの水に関するコロキュアムで，日本国の無償援助によって完成した揚水施設は，2006 年に稼動が開始されている。JICA によって設置された地下水位の観測施設による結果は，必ずしも正常な記録がなされていなかったようであるが，JICA によって示された[6]。揚水施設から西方に約 3 km 離れた WT4 観測地点の結果を Fig. 17 に示した。この結果を見ると，WT4 地点の水位は，揚水開始の 2006 年度に，かなりの大きさの水位低下が報告されている。同図には，F/S 調査後に予測されていた WT4 観測地点の地下水位変化[7] も示してある。予測計算の井戸配置は，実際の配置とは若干異なり，揚水量も 14,000 m^3/day で，実際の揚水量 8,000 m^3/day の 1.7 倍程度大きい仮定の条件となっている。それにも拘らず，1 m 程度の地下水位の低下が報告されている。もし，この記録が正しいということになれば，いずれ，なんらかの対策が必要となろう。

10. 結　論

本稿においては，主として 1994〜2000 年間において得られたアンコール域における地下水に関連した JSA で実施した地下水計測および JICA が実施した各種の地下水や流量計測の観測結果をもとに，アンコール域における地下水位変動の特性を求め，次の結論を得た。

① アンコール域においては，表層 40 m は第四紀層のシルト質細砂層で帯水層を形成している。

② アンコール域の降雨量は，雨季の 5 月から 10 月で 200 mm/月，乾季の 11 月から 4 月で 50 mm/月以下であるが，蒸散量は，雨季，乾季に関係なく，年間通じて 100 mm/月以上が観測される。

③ アンコール平野の北にある東西クーレン山はシエムリアップ川の源流で，特に東クーレン山の山容はすり鉢状となっているために，降雨水の涵養能力が高く，シエムリアップ川は乾季においても枯れることはない。年間 6 千万トンの水量があるが，そのうち，ほぼ 4 割が西バライに供給されている。

④ アンコール平野の帯水層は，単一ではなく，何枚かの粘土質を挟んでいる。このため，揚水されている地域においては，間隙水圧は静水圧的ではなく，揚水されている深部帯水層では上部に比べて低水圧状態となっている。

⑤ アンコール平野における地下水は，季節的に 2〜5 m の変化が観測されている。これらの変化は平野に広く分布している浅井戸の水位変化に，時間的な差はなく同月時に観測されている。アンコール平野の地表面勾配が 0.001 と小さいために，水平流動によるものではなく，雨季の降雨時に水位上昇，乾季には蒸発散によって水位は低下している。乾季の最後に最低水位を記録するが，雨季の最後には，ほぼ，地表面付近までに回復する。

⑥ 年間地下水位変動が 2 m 以下の地域の典型は，西バライの南側の地域で，これは，西バライからの灌漑用水の供給を受けているため，地表面の灌漑水が，蒸散の影響が地下水の低下を防いでいると思われる。

⑦ 年間地下水位変動が 4 m に達する地域のうち，シエムリアップ市域を注目してみると，雨季の最後になっても地下水位が地表まで回復しない地域がみられ，年間地下水の最高レベルの平均的形状をみると，中心で地表面から深度 2 m のラッパ形状を示しており，このような地域はシエムリアップ市の半径 5 km を中心とした地域で観察されている。この現象は，地下水の過剰揚水地域であることで発生していると思われる。この観測は，1998 年であったから，2010 年の現在時点では，影響は深化している可能性がある。

⑧ JICA によって建設された揚水施設は 2006 年に開始され，約 3 km 西側地点における地下水観測結果は，約 1 m の地下水位の低下を示している。揚水施設周辺の状況

をチェックする必要があろう。

あとがき

紀要第１号においては，日本国政府の援助無償による揚水問題を取上げたが，紀要第２号において問題としたアンコール平野における地下水の特性は，第１号の論文を補完するものであるが，読者の理解の利便からいえば，最初に出稿すべきものであった。しかしながら，揚水問題は，緊喫の問題であったから，止むを得なかった。

まえがきで触れたJICAによるシエムリアップ地域での水源探索は，さらに続くらしい。在りし日のアンコールは，環濠に囲まれた多くの寺院や巨大な人造湖バライで象徴される水都であった。今後の観光産業の進展にはホテルの増加に伴なう増大する水需要がある。適切な地下水の利用は望まれるところだが，地下水の取水は必ず地下水低下を招き，地盤沈下を引き起こす。アンコール遺跡は石積構造物で，不等沈下は必ず構造物の変状を引き起こすと思われる。

幸い近くにあるトンレサップ湖から湖水を湖岸近くのプノンクロム丘に揚げてタンクに貯留し，サイフォン式導管で北バライに導き，シエムリアップ川を自然流下させて還流させ，その途中のシエムリアップ市付近で取水して利用する湖水パイプラインということが，遺跡保存を視野に入れた中長期的な水利用計画として有望であると思っている。

このトンレサップ湖水パイプラインは，恒久的なインフラ整備でカンボディア国の技術で十分に実施できると思われ，トータルとして同国の経済発展に資するものと思われる。現在の日本農業再生が，ただ単に農業の生産性のみからでなく，地域環境の観点から見直されていると同様に，カンボディア国アンコールにおいては，水問題は，観光立地という観点からも，総合的な見直しを行って水事業を考えるべき時にあると思われる。現在においてはただ単に上水事業のみの観点からの経済合理性を追求しており，総合的な観点が見捨てられているのは残念である。

注および引用文献

（１） JSA Report, アンコール遺跡調査報告書（1995–2001）

（２） 岩崎好規,「カンボディア王国アンコールにおける地下水揚水問題」, サイバー大学紀要第１号, サイバー大学,（2009）, pp. 129–148

（３） JICA Report. Infrastructure Development Institute, PASCO International Inc. “The Reconnaissance Survey Project for the Establishment of an Emergency Rehabilitation and Reconstruction of the Kingdom of Cambodia”, March 1999, SSF JR 99–119

（４） JICA Report. ㈳国際建設技術協会，国際航業㈱, “The Topographic Mapping of the Angkor Archaeological Area in the Siem Reap Region of the Kingdom of Cambodia”, May 1998, 社調１JR 98–087

（５） JICA Report. Nippon Koei Co., Ltd. and Nihon Suido Consultants Co., Ltd., “The Study on Water Supply System for Siem Reap Region in Cambodia,” JICA Report to Min. of Industry, Mines, and Energy, The Royal Government of Cambodia, June 2000

（6） JICA, JICA study report on the observation facility and land subsidence in Siem Reap areas, handout, Water Colloquium on Siem Reap, UNESCO Phnom Penh Office, Nov. 27, 2007
（7） 高橋　秀・鈴村忠男・高橋昌弘,「シエ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」, こうえいフォーラム第 10 号（2002）, 日本工営㈱

Problems of Underground Water in Angkor

Yoshinori Iwasaki

The author had already written a paper under a title “The Problems of Underground Water Caused by Pumping Water in Angkor” in Vol. 1, Bulletin, Cyber University, 2009. The present paper is to describe much more fundamental characteristics of underground water in the Angkor plain as well as specific problems based upon the monitored results by JSA (Japanese Government Team for Safeguarding Angkor) and JICA.

Conclusions obtained are as follows,

1. Major water bearing layer in Angkor is surface silty fine sand layer with 40 m in thickness of quaternary deposits.
2. Rainfall in Angkor shows about 200 mm/month during rainy season from May to October and less than 50 mm/month in dry season from November to April. Evaporation is very high as more than 100 mm/month all year around.
3. Kulen mountain ranges in the north of Angkor plain provide the water origin of the Siem Reap river. Especially top of the East Kulen Mt. shows bowl type and works as an efficient reservoir to provide water to Siem Reap river in dry season. Annual quantity of the reservoir is about 60,000,000 ton/year, 40% of which is diverted into the West Barai.
4. The water bearing formation is divided into several layers interbedded with impervious clay rich layers. The pore water pressure in the area where underground water is being pumped does not show hydrostatic distribution but lower value than the hydrostatic value.
5. The levels of the underground water are observed to change about 2–5 m within a year. These changes at various points in Angkor plain take place at the almost same time. This is due to rainfall and evaporation that cause raising and lowering of the water table. Water level shows the lowest value at the end of the dry season and the highest at the end of the rainy season.
6. A typical area where the change of the water level is less than 2 m is at the south on the West Barai. It is estimated that the irrigated water infiltrates into the ground and keeps water level under small change throughout the year.
7. Among several regions where the change exceeds more than 4 m, Siem Reap downtown area shows the water level does not reach to the surface. The line of the averaged highest level shows bowel shape with the depth of 2 m at the center. The bell shape was identified as a radius of 5 km in the city. This

drawdown shows the over pumping phenomena in the city in 1998. At present of 2010, the tendency is expected to have been increased.

8. The pumping station that was completed by JICA project started to work in 2006. The water level by a monitoring well by JICA at a distance of 3 km from the station was reported as to have been lowered 1 m in 2006 and needs further check around the pumping station for the safety operations.

Keywords: Angkor, Pumping underground water, Preservation of heritage, International cooperation