

# トンレサップ湖畔と周辺都市・水田域における 総合水文気象観測とデータ解析

増本隆夫\*・辻本久美子\*\*・宗村広昭\*\*\*

目 次	
緒 言 .....	219
メコン河流域における地上観測網の現状と課題 .....	220
1 観測網の変遷 .....	220
2 水文気象観測網の現状 .....	221
対象地域の概要 .....	222
1 メコン河の概要 .....	222
2 トンレサップ湖の水文と水資源 .....	222
3 メコン河の氾濫とトンレサップ湖の関係 .....	223
4 トンレサップ湖の水収支 .....	224
新たな総合水文気象観測の開始と現地観測 ...	225
1 新規観測施設の概要 .....	225
2 トンレサップ湖畔総合水文気象観測 .....	226
3 水田地帯の総合水文気象観測 .....	226
4 観測施設の管理と管理上の問題点 .....	227
観測データを用いた降雨量と日射量の解析 ...	228
1 水文気象環境の季節変化 .....	228
2 観測データと解析方法 .....	229
3 解析結果と考察 .....	230
結 言 .....	234
参考文献 .....	234
Summary .....	236

## 緒 言

アジアの面積は世界の陸地の24%にすぎないが、世界人口65億人の中の38億人が暮らしている。このことは多湿な環境と古くから米を主要な穀物としてきたことに起因しているといえるが、中国で発見された7,000年前の稲作の痕跡からも、アジアにおいて持続してきた水田稲作は地域の気候、風土に適合し、多くの地域資源を有効利用した持続的で環境に優しい経済活動であったといえる。しかし、モンスーンアジアの水利用や、畑地とは異なる水田の水循環機能については、欧米諸国では十分には理解されていない。これは、水利用量の現地計測等が不十分かつデータ不足であること、地上観測データと衛星画像データとの統合利用についての研究が行われていないことなどが影響している。

食料と農業用水利用との関係については、これまで、国際水管理研究所 (IWMI: International Water Management Institute) や国際食料政策研究所 (IFPRI:

International Food Policy Research Institute) などがモデル開発を行い、様々な政策シナリオのもとで、世界各地の将来の食料・水需要量を予測し、望ましい水利用について議論している。しかし、そこで利用されたモデルでは、畑作物に対する収量モデルを水田に対しても適用しており、水田稲作主体のモンスーンアジア地域では、実際の水需給量と計算値との間に大きな誤差が生じている。中でも、水文・気象・農業データがこれまで収集されずデータ空白域となっていたメコン河流域では、天水田が約8割を占めていることもあり、米生産量と水需要量との関係は明らかにされていない。

特に、メコン河流域に位置するトンレサップ湖は、乾季(2,500km<sup>2</sup>)から雨季の湖水面積が5倍程度に大きく変化し、洪水貯留と農業用水供給の両機能を同時に発揮するという大きな特徴を有しているといわれるが、この巨大湖沼が有する水文環境変化や水利用特性は十分には明らかになっていない。その上、近年まで内戦の続いたカンボディアでは、水文気象観測網および観測の人材・資金の手当が遅れており、水利用に関する基礎データすら十分に得られていない。また、トンレサップ湖周辺域の地域研究として既往研究が少なく、実態解明が不十分である。

一方、メコン河流域の農業生産は、主に天水田での水稲栽培に依存している。農地全体の90%が非灌漑地であり、そのうち90%が水田となっている(Masamoto et al., 2004; Shimizu et al., 2004)。水稲稲作による生産量にと

\* 農地・水資源部水文水資源研究室

\*\* 東京大学大学院工学系研究科

\*\*\* 島根大学生物資源科学部

平成19年3月15日受理

キーワード: メコン河, トンレサップ湖, 水文気象観測網, 湖面, 水田地帯, 都市域, 現地観測, 日射量, 降雨量, 観測データ

っての2つの制限要因の水(降雨)と日射の量を知ること、この地域の天水水稻の生産ポテンシャルを評価する上で、重要である。

一般的には、降雨日あるいは雨季には、雲の存在により日射量が少なくなると言われている。たとえば、Akpanbio and Etuk (2003) は、ナイジェリア南部の熱帯雨林地域(4° 26'N, 7° 10'E)における観測結果として、乾季の4月には平均して14.99MJ m<sup>-2</sup>の日射が得られる一方、雨季の8月には、平均日照時間が2時間未満となり、日射量は10.36MJ m<sup>-2</sup>で4月の約69%にとどまると報告している。しかし、日日射量と日降雨量の関係は、降雨の日変化の影響を受け、日単位データのみで議論することはできない。Oki and Musiak (1994) が指摘しているように、このような降雨日変化の特性は、日射量や日照時間への影響を介して、日蒸発量にも大きな影響を与える。たとえば、菅原(1979)は、タンクモデルにおける蒸発量の取り扱いとして、簡単のため、「雨の日(日雨量1mm以上)は湿度が高く、蒸発はないとする」という計算規則を用いることを提案している。菅原(1979)自身は、「この方法は便宜的であり、問題は多かるが、...(中略)...、わが国では、蒸発散が流出解析で演ずる役割はあまり大きくない。」と述べ、これが日本における経験に基づくものであることを付記している。水収支に占める蒸発散の役割が大きく、メコン河下流域において、日射量や蒸発散量について日本と同じ扱いでいいのか、また降雨は日内でどのような変化特性を持つか等について、降雨時刻と日射量との関係から検討する必要がある。

そこで、ここではメコン河における水文気象観測施設の変遷と現状を明らかにした上で、観測データの少ないカンボディアのトンレサップ湖および水田域において新たに設置した水文気象観測施設の概略を紹介するとともに、そこで得られた観測データに基づき、現地の特徴的な水文気象環境について検討した結果を報告する。特に、日射量の季節変化特性を明らかにし、降雨の特徴と日射量への影響について検討する。

なお、本研究は文部科学省「新世紀重点研究創生プラン(Research Revolution 2002 (RR2002))人・自然・地球共生プロジェクト」の支援を受けた研究プロジェクト「アジアモンスーン地域における人口・自然変化に伴う水資源変化予測モデルの開発(平成14~18年度)」(研究代表者:山梨大学竹内邦良教授)のもとで行われたものである。研究遂行にあたっては、全体のプロジェクト課題の共同研究機関として、山梨大学、土木研究所、森林総合研究所、国際建設技術協会等ならびに関連研究者の絶大な協力を受けた。さらに、各種基本データの提供や現地観測の実施に関しては、メコン河委員会(MRC:農工研と土木研究所の3機関の間で共同研究協定有り)、カンボディア国水資源気象省水文河川局および同省気象局の支援を受けた。また、成果の一部は、京都大学地球

Table 1 水文気象観測地点数の変遷  
Transition of hydro-meteorological observation network

(a) 水位計

	タイ	ラオス	カンボディア	ベトナム	計
1960	3	14	8	12	37
1970	25	18	18	14	72
1980	145	62	22	39	268
1990	44*(188**)	44	5	41	134(278)
2000	44*(180**)	138	63	51	296(432)

(b) 雨量計

	タイ	ラオス	カンボディア	ベトナム	計
1960	8	4	11	5	28
1970	94	34	21	11	160
1980	152	68	41	18	279
1990	154	70	41	21	286
2000	153	143	170	103	569

\* メコン河委員会に報告される観測地点数

\*\* タイ国政府による独自観測地点を含んだ地点数(エネルギー開発促進局(DEDP: 現在の水資源局)と気象局管理のもの、ただし王立灌漑局(RID)管轄の地点は含まれていない)

環境学舎インターン制度を活用して得られたものである。ここに記して、心からの謝意を表す。

### メコン河流域における地上観測網の現状と課題

#### 1 観測網の変遷

##### a 過去の検討例

まず、水文気象観測網開発の歴史を探った。すなわち、

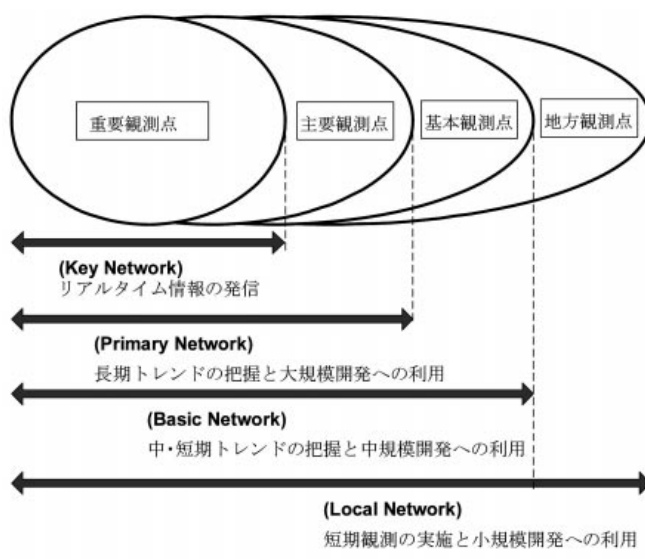


Fig.1 水文観測網のネットワーク図  
Classification of hydro-meteorological networks

1957年のメコン委員会 (Mekong committee) の設立以来、水文気象網の増強は委員会の中心的活動の一つとして位置付けられ、21世紀の初めには、メコン河委員会が把握する流域内の雨量計ならびに水位計の数は、430, 560箇所に達した。その過程で、1988年には水文観測を担当する各国代表者が集まり、56の重要水文観測所地点が決定された (Interina Committer, 1988)。その後、重要観測点に多くの施設が追加され (1990年に86箇所 Delft Hydraulics, 1990), 1995年に125箇所 (Thaipuck, 1999), 1995年には最重要の水文観測点 (水位, 流量) を14箇所に絞った上で、さらにそれらを検討して、重要観測点 (Key Network), 主要観測点 (Primary Network), 基本観測点 (Basic Network) を提案し、それぞれの箇所数を14, 44, 125とした (田中, 1997)。しかしながら、上記委員会ならびに1995年に発足したメコン河委員会の中では、水利用計画 (WUP), 流域開発計画 (BDP) さらには環境計画 (EP) 等の活発な推進の陰で、基礎的データを提供する観測網の将来計画についての検討がなされていないことも分かった。

b 観測施設数の変化

これまでの水文気象観測網としての観測数の変遷は、Table 1にみる事ができる。1960年以来、観測地点数は著しく増加しており、1960年に比較して2000年には水位計と雨量計観測点数がそれぞれで10倍、20倍になっている。これらの施設の増強はUNDPやメコン河委員会を通じたものであったが、近年のタイやベトナムの観測施設に関しては、独自予算での施設改善が進んでいる。ここで、カンボディアでは内乱の影響で1990年には水位計の観測地点が極端に減少していること、1970~80年代には、戦乱の影響からカンボディアやベトナムでの雨量観測網の増強は行われなかったことなどが分かる。さらに、2000年のカンボディアの雨量施設数は、他国に比べて見劣りしないが、後述するように雨量観測点が低平部に集中している、総合気象観測施設の地点数が不足している等の問題が存在している (Fig.2参照)。

2 水文気象観測網の現状

a 重要観測点の選択

前述したように、現状での水文観測施設は重要・主要・基本観測点ならびに地方観測点 (Local Network) に分類できる (Fig.1)。重要観測点は、メコン河本川および重要支川の観測点であり、リアルタイムの監視ができ、さらにメコン河委員会が業務として行う洪水予測に必要な情報を提供する基礎地点である。その分類毎の地点数については、重要観測点は1996年段階で14地点、新規提案では25地点となっている。一方、主要地点は本川や支川での追加分を含み長期のトレンドを見るためのもので、流域内で44地点が指定されている。基本観測点はさらに支川レベルの観測点を追加し、中・短期のトレン

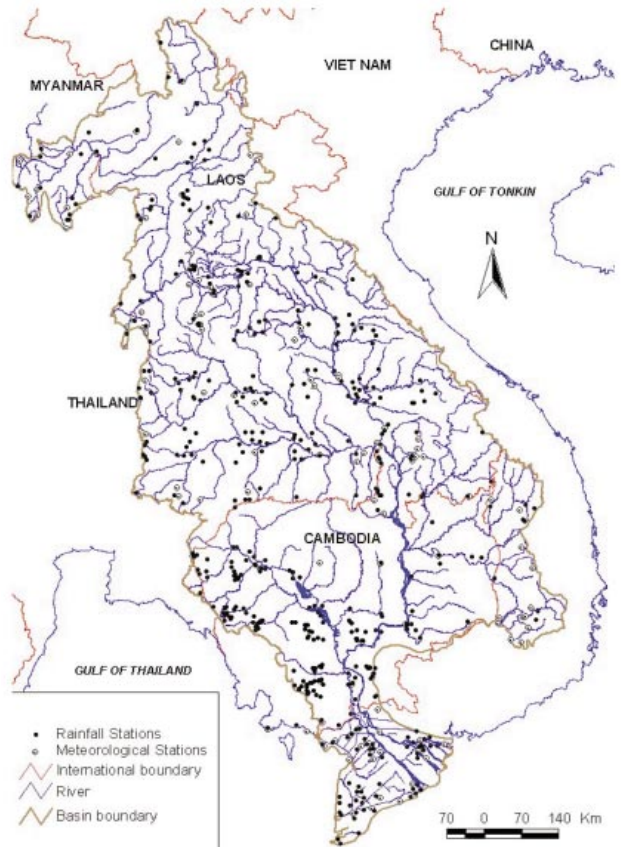


Fig.2 気象観測網の現状  
Status quo of rain-gauge and meteorological observation networks



Fig.3 現有の気象レーダー位置と新設計画 (2003年時点)  
(注) 図中の円はレーダーのカバー範囲 (実線: 既設レーダー, 点線: 計画中) を示すが、ラオスピエンチャンのレーダー (点線で表示) は2005年にJICAにより新設されている。

Location of present and under-planning meteorological radars

ド観測と中規模の開発計画に役立つ目的で、流域内で100箇所を越える地点を選定している。また、この基本観測点がメコン河委員会の整備対象としている観測網である (Mekong River Commission, 2001a; Masumoto, 2002)。

#### b 気象観測施設とレーダー雨量計

気象観測に関しては、Table 1 に示した現況の雨量観測点 (2000年分参照) のうち、総合気象観測が行われているのは、地点数でタイ43箇所 (雨量観測地点数に占める割合: 28%)、ラオス34 (24%)、カンボディア13 (8%)、ベトナム30 (29%) となっているが、カンボディアやラオスでは全気象要素が測られているわけではない。また、故障率からみるとベトナムの施設は良く管理されている一方で、ラオスやカンボディアの雨量観測施設の中には10~20%程度稼働してない施設も存在する。雨量計の自記観測の割合は各国共に低く (データロガー: 4%、自記紙: 15%程度 (共に流域平均))、多くは人手による計測が行われている。

雨量計の観測密度は、WMOの基準 (WMO, 1994) を援用すると、1地点あたり600~900km<sup>2</sup> (自記記録なし)、6,000~9,000km<sup>2</sup> (自記記録あり) であり、ラオス全域、カンボディアの北部域、ベトナム中部 (カンボディアに流入する地域) の密度向上が望まれる (Fig. 2)。

気象レーダーもタイ全域やベトナム北・中部で有効に利用されているが (Fig. 3)、ラオス、カンボディア、ベトナム南部メコン域等にも建設計画 (日本に対する要請、ラオスはJICAプロジェクトにて2005年に設置済) がある。

#### c 水位観測

水文観測に関しては、河川・地下水の水位や流量、水質等が測られているが、ここでは水文観測の中心となっている水位に焦点を絞って紹介する。

水位観測地点については、地方観測点も含んだ観測密度を検討すると、タイとベトナムはWMOの基準 (面積2,000 km<sup>2</sup>に1観測所) (WMO, 1994) を満足するものの、ラオスとカンボディアは基準値をクリアするには更なる増強が必要である。水位観測にデータロガー等の使用が6%程度、自記紙の利用が11%程度の割合に止まっており (いずれも流域平均、ベトナムでは80%が自記記録)、一般的には量水標を人が日々1~2回読み取る方式が多い。

#### d 関連機関の構成と陣容

次に、水文気象観測に関わる機関の構造や職員の陣容を、各国の予算の推移とともに検討した。詳細は省略するが、関係機関のうち、ラオスとカンボディアでは施設だけでなく維持管理費にも十分な予算措置はなされておらず、メコン河委員会や援助国からの支援に頼っている

のが実状である。

データ回収は各機関が行っているが、気象および水文の観測値は、1ヶ月毎に郵送あるいは電話回線を利用したEメールで各国の本部機関に集められる (カンボディアは1~3ヶ月、ラオスは3~6ヶ月毎)。ただし、洪水予測の時期には、重要観測点情報は、毎日、本部機関に集められた後、電子メールでメコン河委員会に伝えられる。

なお、中国領内メコン河上流部分は瀾滄江 (Lancang Jiang) と呼ばれ、水文観測は雲南省水資源局で1952年から本川の3箇所で行われている。しかし、中国国内の国際河川流域の水文気象データは国外へは無論、中国国内の大学研究者にさえも公表を行っていない。一方で、メコン河委員会と中国政府の度重なる対話交流 (1996~2001年計6回) を受けて、2002年からは本川景江地点とシーサバンナー (西双版纳) 州の支川の流量データが1日2回 (午前・午後8時: 大洪水時には3回) 同委員会を通じて下流諸国に対して定期的に通知されている。

### 対象地域の概要

#### 1 メコン河の概要

本研究の対象地であるカンボディアのトンレサップ湖は、メコン河の下流域に位置する (Fig. 4)。

メコン河は、チベット高原に源を発して中国西部を南東に流下し、ミャンマー、ラオス、タイ、カンボディアを経て、ベトナムにて南シナ海に注ぐ。流域面積は約795,000km<sup>2</sup>で世界第21位、年間総流出量は4,750億m<sup>3</sup>で世界第8位の規模である。流路長は約4,880kmで、東南アジアの河川で最も長く、世界第12位である。

メコン河の大きな特徴のひとつとして、流量の季節変化が大きいことが挙げられる。たとえば、河口から332km地点に位置するカンボディアのプノンペンでは、年平均流量が12,740 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>であるのに対し、年最小流量は1,780m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>、年最大流量は43,110 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>と見積もられている (MRC and JICA, 2004)。メコン河の乾季流量 (年最小流量) には、最上流国である中国からの流入量の寄与が大きく、一方、雨季流量 (年平均流量および年最大流量) の形成には、中流部ラオスのアンナン山脈やボロヴェン高原に降ったモンスーン降雨が大きく寄与している。なお、トンレサップ湖一帯を含むカンボディア氾濫原では、毎年のように広大な氾濫区域が生じており、結果として15%程度の年最大流量がプノンペンまでに氾濫を通して調節されている (MRC and JICA, 2004)。

#### 2 トンレサップ湖の水文と水資源

メコン河流域からの流出のパターンとしては、5~6月に流出量が増大し、上流部は8~9月、下流部は9~10月にピークになり、4月に最低水位を記録する。メコン河の流量はほとんど未調整であり、河状係数 (流量の

最小と最大の比率)は40~50と大きく、雨季と乾季の水位差でみると、カンボディアの首都プノンペン (Fig.4の地点参照)で7mにもなる。この水文特性を利用して、洪水期の氾濫水は乾季の灌漑水として利用される。7月以降、トンレサップ湖の水位よりメコン河の水位が高くなり、逆流が生じ、洪水貯留が行われる。湖では、年間で7~8m程度の水位変動がある。トンレサップ湖の水収支は、低平な地形のため流量把握が難しいことと観測値が極端に少ないことから詳細には明らかにされていないが、推定で本川の全流量の2割程度が湖に入るとされている(後述のコルマージュは同1割程度)。そのため、トンレサップ湖は年間平均で8,200km<sup>2</sup>の水面積を持ち、最大時には10,000km<sup>2</sup>を越える。そこでは、洪水と農業は密接な関係にある。すなわち、カンボディアの水田200万haのうち60万ha、畑50万haのうち25万haが洪水による氾濫域に存在している。カンボディアの稲作には3種類あり、雨季栽培、乾季栽培、後退栽培(recession cropping)である。後退栽培は、雨季には氾濫により作物栽培ができないが、氾濫減衰期に作付けし、乾季に稲を栽培するものである。ここでは水田が洪水を貯める役目を果たすとともに堆積土壌が養分を多量に含んでいるため、乾季作よりも収量が多い。さらに、コルマージュによる流水客土の利用である。コルマージュは、フ

ランスの技術を基本として自然堤防の一部を掘削し、洪水期にメコン河とバサック川の水位上昇に応じて、河川流水を背後湿地へ導入する施設である。洪水期にコルマージュにより背後湿地に蓄えられた洪水は、両河川水位が低下した後も一部貯留され、乾季においては、コルマージュ水路内に貯留された水をポンプで揚水し、背後湿地に残った水を利用している (Fig.5参照)。このように、沼地を含む背後湿地は水文環境を形成する重要な要素である。洪水期に河川から溢れた水は、いったん背後湿地に蓄えられ河川水位の低下とともにゆっくりと排水されるため、流域管理としては農地が遊水地としての洪水調節の機能を持っているといえる。

### 3 メコン河の氾濫とトンレサップ湖の関係

メコン河は、プノンペンのチャトムック (Chak Tomuk) 地点でトンレサップ (Tonle Sap) 川と合流し、同時にバサック (Bassac) 川を分岐している。雨季に入って周辺河川に加え、メコン河の水位が上昇すると、メコン河の水がトンレサップ川を逆流して、トンレサップ湖に流入する。そのため、トンレサップ湖の面積は、乾季には1,500~2,500km<sup>2</sup>程度であるが、雨季にはその5倍程度にまで増大する。

MRC and JICA (2004)によると、各区間の流況は以下のようなものである。

#### (i) メコン本川のコンボンチャム上流

コンボンチャム付近およびその上流部では、左岸で溢水氾濫が毎年のように生じている。結果として、クラティエの洪水ピーク流量の約2~5%がカットされている。

#### (i) メコン本川のコンボンチャム下流からプノンペン合流分岐点



Fig.4 メコン河下流域の概要とトンレサップ湖の位置 (斜線部はメコン河下流域を示す)

Outline of the Lower Mekong River Basin and the location of Tonle Sap Lake

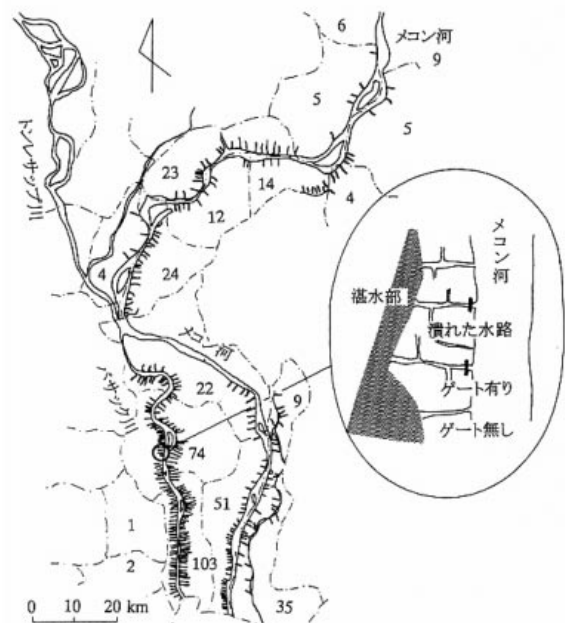


Fig.5 コルマージュの概要

Outline of Colmatage systems

コンボンチャムからブノンペンに至るまでに、大規模な洪水は、氾濫原への溢水氾濫や氾濫原内の洪水流量への流入によって調整されながら流下し、約25%の流量が調整されて減少する。合流点における流況の状態は、湖の空き容量によって大きく変化する。

(五) 合流分岐点からトンレサップ川

洪水初期の7月中旬から8月中旬にかけては、溢水氾濫の規模は小さく、トンレサップ川の逆流の一部は、プレックと呼ばれる水路に流入し、後背湿地に湛水する。8月中旬から9月の終わりにかけて、メコン河本川では激しい溢水氾濫が至るところで発生する。合流分岐点から発した逆流(トンレサップ湖への流入)は、メコン河からの氾濫流を合流させながらプレックダム(Prek Kdam)に到達する。湖が洪水流で満杯になると、トンレサップ川の流向が順流(トンレサップ湖からの流出)に変わる。10月時点ではプレックダムを発した順流は、氾濫原からの

流入量を加えながら下流に流れる

(六) 合流分岐点からバサック川

バサック川の両岸には無数のコルマタージュ水路が存在し、洪水流を堤内の後背湿地に導入する。

以上のようなメカニズムで、コンボンチャム下流、特に首都ブノンペンは、トンレサップ湖ー帯を含む氾濫原の洪水緩和機能によって防護されている。藤井(2004)も同様の検討を氾濫域での実測値やモデル推定により行っている。

4 トンレサップ湖の水収支

a 水収支

トンレサップ湖の水収支については、これまで、日本の国際協力機構(JICA)がMRCと協力して行ったWUP-JICAプロジェクトや、フィンランド政府支援によるWUP-FINプロジェクト等で検討されてきている。

Table 2 ブノンペン(都市域)の観測機器  
Observation equipment at Phnom Penh (Urban area)

観測項目	観測機器	備考
風向・風速	034A (Campbell)	高度:10m
日射量	LI200X (Campbell)	
日照時間	No.43-T (太田計器製作所)	
気温・相対湿度	CS500 (Campbell)	
大気圧	CS105 (Campbell)	
降雨量	TE525MM (Campbell)	
土壌水分	CS615 (Campbell)	
大型蒸発パン蒸発量	(池田計器製作所)	大型パンの直径:60cm, 高さ:25cm 高度基準面:観測タワー設置地表面

Table 3 チョンクニアス(トンレサップ湖面)の観測機器  
Observation equipment at Chong Kneas (Lake area)

観測項目	観測機器	備考
風向・風速	034A-L30 (Campbell)	高度:7m
風速	014A-L30 (Campbell)	高度:0.8m
放射収支	CNR1 (Kipp&Zonen)	放射4成分を測定
気温・相対湿度	CS500-L30 (Campbell)	高度:7m, 0.8m
大気圧	CS105 (Campbell)	
降雨量	TE525MM-L25 (Campbell)	
熱流板	HFT3 (Campbell)	2004/11/22に設置 高度基準面:観測タワー設置地表面

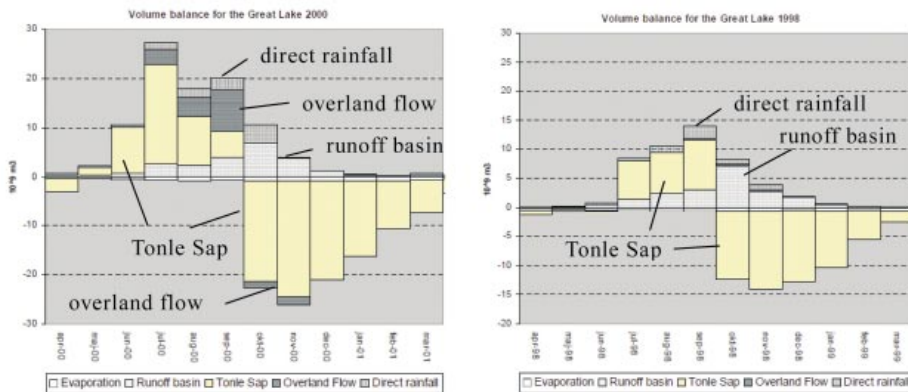


Fig.6 トンレサップ湖の水収支。洪水年2000年(左図)と渇水年1998年(右図)

(MRC and JICA (2004) に加筆)

Water balance of Tonle Sap Lake (Flood year of 2000 and drought year of 1998)

WUP-JICAプロジェクトでは、1998～2002年を対象としたモデルのシミュレーションに基づいて、湖の水収支を月単位で検討している。渇水年の1998年と洪水年の2000年について求められた月単位水収支をFig.6に示す。その結果をまとめると、以下のようなものである。

湖の貯留機能への寄与の大きさは、順に、トンレサップ川の逆流 (Tonle Sap), トンレサップ湖の自己流域からの流入 (runoff basin), メコン河からの氾濫流 (overland flow), 湖水面への直接降雨 (direct rainfall) である (括弧内の記述はFig.6参照)。10月に最も寄与の大きいのは、自流域からの流入量である。この時期にはトンレサップの流向は変化しており、貯留した水を流出させる順流状態となっている。自流域からの流出量はそれほど大きな年別の変動は認められない。渇水年の1998年には、氾濫源を流下して湖へ向かう流入形態はほとんど発生しなかった。

b トンレサップ湖の水位 - 水面積 - 貯水量関係

WUP-JICAプロジェクト (MRC and JICA, 2004) では、カンボディア水路部によるメコン河、トンレサップ湖およびバッサック川の調査結果 (1998年), 同部による湖の調査結果 (水域, 1999年), フィリピン作成の地形図 (氾濫源, 1963年), SOGREAH作成のその他の氾濫源地図 (1963年) をもとに、コンポンチュナンを南限として、水位 H - 面積 A - 容量 V 関係を整理している。この結果から、水位 - 水面積および水位 - 貯留量は次式のように表される。

水位 - 水面積曲線 (H-A)  
 $A = -36.13 H^2 + 1734.6 H - 453.05 \quad (R^2=0.997) \quad (1)$   
 水位 - 貯水量曲線 (H-V)  
 $V = -7.4421 H^3 + 766.34 H^2 + 152.31 H - 533.63 \quad (R^2=1) \quad (2)$

ここに、H：水位 [m], A：水面積 [km<sup>2</sup>], V：貯水量 [10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>] である。水位は、ベトナムのハーティエン地点における海面を基準としている。

c トンレサップ湖の持つその他の機能

トンレサップ湖の貯水量は500～600億m<sup>3</sup>と推定されており、洪水の調整、水資源涵養、農業用水供給、漁業資源確保などの多面的機能を有していると考えられている。また、トンレサップ湖の周辺氾濫域は、水田主体地域となっており、氾濫水を利用した水田稲作が営まれるなど、湖の消長が農業生産と密接に関わっている。

新たな総合水文気象観測の開始と現地観測

1 新規観測施設の概要

メコン河下流域では、現在、水文気象観測網の整備および水文観測の充実化が図られてきている。とりわけ流

量観測は、メコン河下流域 4 カ国の合意による水利用計画策定の上で極めて重要であり、メコン委員会の創設 (1957年) 以来、流域 4 カ国の関係機関と同委員会の協力のもとに継続的に進められてきた。

しかし、前述したように長期化した内戦と 4 カ国の経済格差のため、現在の観測網の観測密度と観測値の信頼性は、4 カ国の間に大きな差が生じている。カンボディアでは、政治的混乱の中で水文観測網は完全に破壊され、1990年代からメコン河委員会および日本を始めとする援助国の技術・財政上の支援の下で整備を進めているが、十分な観測施設網にはなっていない。さらに、カンボディア政府内の財源逼迫と人材育成の不足により、水文河川関連部局のみでは水文観測活動を継続できない状態にある。

一方で、1990年代後半から、日本の支援によるカンボディア国内における観測施設の設置や観測活動も精力的に行われている。また、メコン河流域を対象とした複数の研究プロジェクト (RR2002「水資源モデル」プロジェクト (2002～2006年度), 農水省農林水産技術会議事務局「水循環 - 食料」プロジェクト (2003～2007年度) 等) も実施されている。

研究対象とする観測施設は、首都プノンペン、水田地帯のカンダルストン、トンレサップ湖面上のチョンクニアスの 3 地点である。観測地点の位置をFig.7に示す。

カンダルストンおよびチョンクニアスの両観測施設は、「人・自然・地球共生プロジェクト (RR2000)」の一環として、2003年 6 月に設置した。また、プノンペン観測施設は、日本の援助でメコン河委員会の管理のもと、2000年 3 月に同本部敷地内に設置された (増本, 2007)。なお、同事務局は2004年 7 月にラオス国ビエンチャンに移動している。3 観測施設とも、現在観測中である。なお、プノンペンおよびカンダルストンではデータ回収状



Fig.7 トンレサップ湖流域の概要 ( : 水文気象観測所)  
 Outline of Tonle Sap Lake Area ( : Hydro-meteorological station)

況が良好であるが、チョンクニアスではしばしば機器の故障・欠測が発生している(増本, 2007)。

まず、プノンペン観測所(Phnom Penh; 緯度 $11^{\circ}35'N$ , 経度 $104^{\circ}55'E$ , 標高 $10m$ )は、カンボディアの首都プノンペンの都市域内にある。メコン河委員会の事務局の旧敷地内、 $16.1m \times 16.1m$ の草地区画内に気象観測タワーが設置してある。同事務局がラオスのビエンチャンに移ってからは、施設はカンボディアの水資源気象省気象局に移譲され、データ管理は同局が行っている。最近では、観測区画周囲の木が大きく成長、大型蒸発パン蒸発計の管理が不十分、草刈り等の管理記録が不明など、観測精度にやや問題が生じている。観測項目および観測機器をTable 2に示す。

2 トンレサップ湖畔総合水文気象観測

湖畔総合観測施設は地方都市シムリアップ(Siem Reap)近郊のトンレサップ湖上に位置する。観測地点(Chong Khneas; 緯度 $13^{\circ}13'N$ , 経度 $103^{\circ}50'E$ )における水深は、一年の中で大きく変化し、最低水位時期(5~6月)には約 $0.8m$ 、最高水位時期(10月)には約 $9m$ 以上となる。観測項目をTable 3に、観測機器高度と量水標および水位・水深の関係をFig.8に示す。観測機器の高度表記のための基準面は、Fig.8中の水平板(観測足場)である。

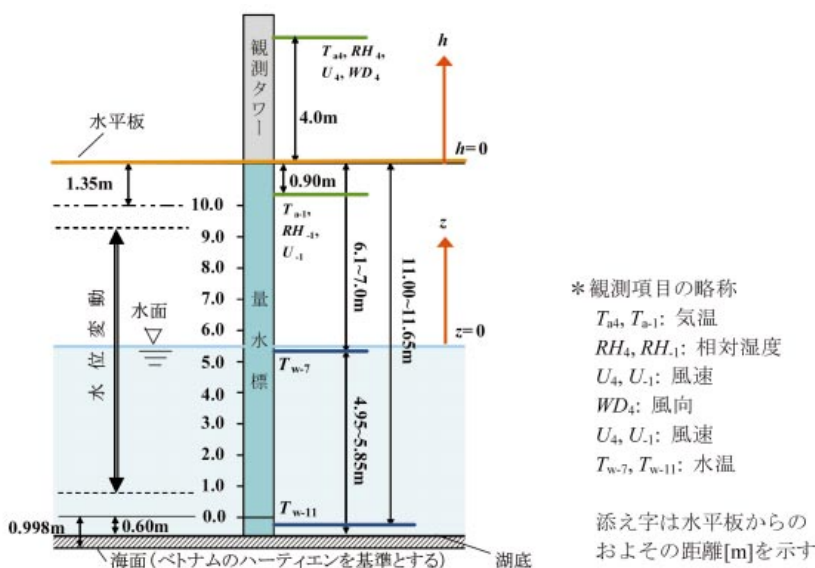
水温計は、2003年6月の設置当初には水平板下 $7.0m$ と $11.0m$ に設置した。その後、2003年12月に盗難に遭ったため、盗難防止のために鉄パイプを水中に立て、その中に水温計を入れた(2004年5月、水平板下 $7.0m$ と $11.0m$ )。しかし、その状態では周辺湖水とパイプ内湖水の交換が十分になされないことと日射による鉄パイプの温度上昇が生じたため、多数の穴(直径 $7mm$ )を開けたPCパイプ内に水温計を入れ直した(2005年6月、水平板下 $6.1m$ と $11.65m$ )。

また、本地点では水位変化に伴って水面から各観測機器までの高さに変化する。観測タワーの水平板から鉛直上向きに $h$ 軸[m]、水面から鉛直上向きに $z$ 軸[m]をとる。 $h$ 軸と $z$ 軸の関係は、WLを量水標読み値[m]として次式で表される。

$$z = 11.35 - WL + h \quad (3)$$

3 水田地帯の総合水文気象観測

水田総合観測施設は、首都プノンペン近



\* 観測項目の略称  
 $T_{air}, T_{w-1}$ : 気温  
 $RH_{air}, RH_{-1}$ : 相対湿度  
 $U_{air}, U_{-1}$ : 風速  
 $WD_{air}$ : 風向  
 $U_{air}, U_{-1}$ : 風速  
 $T_{w-7}, T_{w-11}$ : 水温  
 添え字は水平板からの  
 およその距離[m]を示す

Fig.8 観測機器と量水標の位置関係  
 Hydro-meteorological equipment and its height

郊のカンダル県カンダルストーン郡に広がる広大な水田の一角に位置する(Kandal Stung; 緯度 $11^{\circ}33'N$ , 経度 $104^{\circ}50'E$ , 標高 $10m$ )。カンダルストーン郡は、13村72集落から成る、面積 $11,300ha$ 、人口 $26,100$ 人の郡である。Fig.9に示すように、観測施設の周辺一帯に水田が広がっている。気象観測は、水田地帯の一角にある、約 $40m \times 40m$ の草地内でおこなっている。観測項目および観測機器をTable 4に示す。

なお、本地区では、2001年1月から2006年1月にかけて、日本の農林水産省の協力のもと、JICAがカンボディアの水資源気象省内で、「カンボディア灌漑技術センター計画フェーズ1(TSC: Technical Service Center for Irrigation System Project in Cambodia)、その後フェーズ2(2006年6月~)」を実施している。その結果、本地区は、灌漑のための用水路が整備されている。稲作は雨季から乾季の始めにかけて行われ、乾季の中頃~雨季の初めに

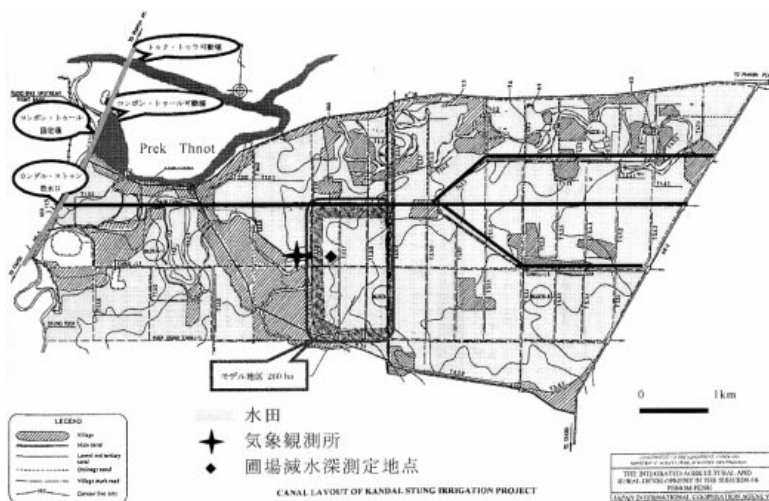


Fig.9 カンダルストーン観測所の周辺図(気象観測所および圃場減水深測定地点, JICA・カンボディア水資源気象省(2005)に加筆)  
 Hydro-meteorological observation station at Kandal Stung



Table 4 カンダルストーン（水田域）の観測機器  
Observation equipment at Kandal Stung (Paddy area)

観測項目	観測機器	備考
風向・風速	034A-L30 (Campbell)	高度:7m
風速	014A-L30 (Campbell)	高度:0.8m
放射収支	CNR1 (Kipp&Zonen)	放射4成分を測定
気温・相対湿度	CS500-L30 (Campbell)	高度:7m, 0.8m
大気圧	CS105 (Campbell)	
降雨量	TE525MM-L25 (Campbell)	
熱流板	HFT3 (Campbell)	2004/11/22に設置

高度基準面:観測タワー設置地表面

は、地表面のほとんどが裸地・乾燥状態である。なお、同TSCプロジェクトによって、気象観測所に隣接する地区内の圃場で減水深ならびに実蒸発散量推定のためのライシメータ試験も行われている。

4 観測施設の管理と管理上の問題点

(1) 自動観測雨量計の観測精度（全地点）

上記 3 観測所で設置されている雨量計は、いずれも Campbell 社 TE525 型自動観測雨量計であるが、特に熱帯モンスーン地域においては、この雨量計の観測精度が低下する傾向にあることが指摘されている。特に、チョンクニアスにおいては、湖面上の風の影響により、さらに捕捉率が低下していると考えられる。そのため、観測雨量の扱いには特に注意が必要である。

チョンクニアス近辺のシェムリアップにおいて、水資源気象省シェムリアップ地方事務所の若林勝専門家（JICAシニアボランティア）が、Campbell 社 TE525 型自動観測雨量計と検定付き標準口径の手動雨量計との間で比較観測を行っていた。入手した 2004 年 9 月および 10 月の日雨量データおよび 2004 年 1 月から 11 月の月雨量データを用いて、以下の検討を行った。

Campbell 社 TE525 型自動観測雨量計による雨量データ ( $P_{auto}$ ) と手動雨量計による雨量データ ( $P_{manual}$ ) とを比較し、切片が 0 になるとの条件の下で両観測値に対する回帰直線を求めた。その結果を Fig.10 (a),(b) に示す。なお、月雨量に関しては、自動観測による雨量が極めて少ない 4 月、5 月、11 月のデータを除外して回帰計算を行った。回帰計算の結果、2004 年 1 ~ 3 月および 6 ~ 10 月の月雨量については、次の関係があることが分かった。

$$P_{manual} = 1.23 \cdot P_{auto} \quad (r^2 = 0.9685) \quad (4)$$

また、2004 年 9-10 月の日雨量については、次の関係があることが分かった。

$$P_{manual} = 1.19 \cdot P_{auto} \quad (r^2 = 0.9975) \quad (5)$$

手動観測雨量と自動観測雨量の関係は、特に日雨量単位では、非常に明瞭で決定係数も大きい。よって、解析では、日雨量については観測値を 1.19 倍した値を用いた。

(2) 風による雨量計の降雨捕捉率の低下（チョンクニアス）

上述のように観測データを 1.19 倍した上で、各地点の年降雨量を求めた結果、特に 2004 年については、チョン

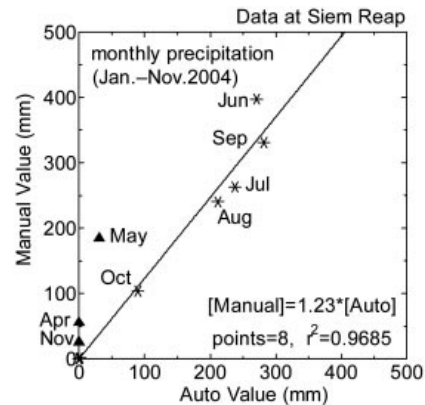
クニアスの降雨量が他の 2 地点に比べて極めて少なくなっている。チョンクニアスでは、湖面上の観測タワーにて雨量が計測されているため、雨量計自体の精度に加え、風による補足率低下によって、さらに観測雨量が過小評価されている可能性がある。

(3) 観測日射量の精度（プノンペン）

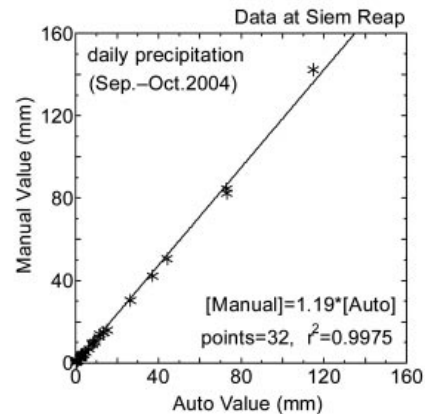
プノンペン観測施設では、日射計のメンテナンスが不十分であったこと、観測所横の交通量の多い道路が未舗装で、赤土が巻き上がりやすい状態にあったことから、日射計への土埃の堆積により日射量が過小評価されていた可能性がある。

(4) 水温計の観測精度（チョンクニアス）

湖面上のチョンクニアス地点では、当初 2003 年 6 月に



(a) 2004 年 1 ~ 11 月の月雨量



(b) 2004 年 9 ~ 10 月の月雨量

Fig.10 シェムリアップにおける手動観測雨量と自動観測雨量の比較結果

Comparison of rainfalls by manual and automatic gauges

設置した水温計 (Fig.8中の $T_{w \rightarrow}$ および $T_{w \leftarrow}$ ) が、前述のように盗難に遭ったため、一時期、鉄パイプ内に水温計センサーを入れておいた。そのため、その期間の2004年5月から2005年6月の水温観測値は、鉄パイプの存在による水温が高めに出るという測定誤差が考えられる。ただし、設置前後の観測結果から明瞭な関係を見出すことはできず、ここでは観測値をそのまま用いている。

なお、ここでの観測結果によれば、表面水温と湖底付近の水温 ( $T_{w \rightarrow}$ ) では、1~8程度の差が見られた。一方で、トンレサップ湖では水温成層はないとする既往研究成果もある。本観測データは、パイプ内という風による混合の影響を受けにくいいため、このように深さによる差が明瞭に出た可能性もある。

(5) 観測タワーの鉄板足場プレートによる影響 (チョンクニマス)

Fig.8に示したチョンクニマス地点の観測タワーでは、ロガー等の観測機器を置くため、観測タワー途中に鉄板足場プレート (Fig.8中の「水平板」) を設置している。しかし、日中には鉄板が熱せられ、上下の温湿度センサーに影響を与えている可能性がある。なお、湖面と温湿度観測点との距離を一定に保つためにも、フロート式の観測機器を設置するのが望ましいが、観測機器等の管理問題や盗難等の発生により、その実現は大変困難である。

観測データを用いた降雨量と日射量の解析

1 水文気象環境の季節変化

a 水位変化と湖水面積

Fig.11に観測水位 (ベトナムのハーティエン基準) と、H-A曲線 (式(1)) から求めた湖水面積の季節変化を示した。ここに、水位の欠測日については、直線補間した。なお、Fig.8からも明らかなように、チョンクニマス地点における湖水深は、次式で求められる。

$$(\text{チョンクニマス地点の湖水深 [m]}) = (\text{絶対水位 [m]}) - 0.398\text{m} \quad (6)$$

Fig.11に示されるように、水位・湖水面積とも季節変化が大きく、低水位期を除いて、水位は $5 \sim 6\text{cm d}^{-1}$ の速度で上昇・低下している。水位は毎年10月始めに最大となり、チョンクニマス地点の最大湖水深は、2003年は7.81m (湖水面積:  $11,345\text{km}^2$ )、2004年は8.70m (湖水面積:  $12,338\text{km}^2$ )、2005年は8.81m (湖水面積:  $12,453\text{km}^2$ )であった。一方、5~6月頃には水位が最低となり、この時期の水深は2004年には0.84m (湖水面積:  $1,507\text{km}^2$ )、2005

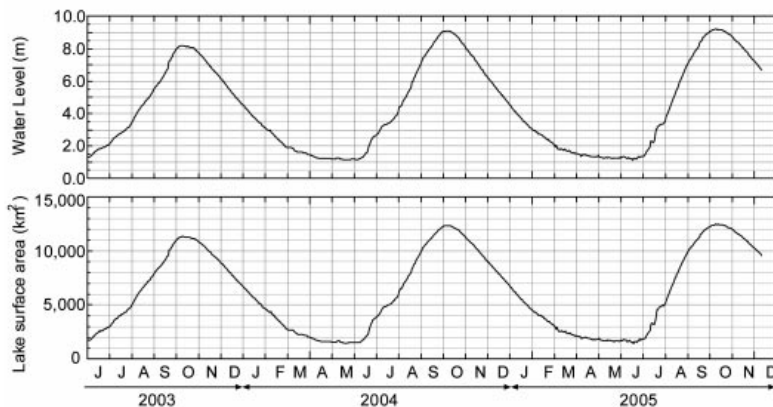


Fig.11 湖面水位および湖面積の季節変化

Seasonal change of water level of the Lake and its surface area

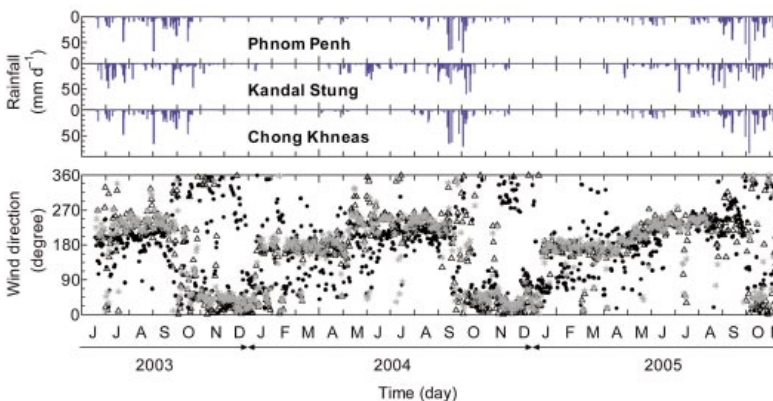


Fig.12 3地点における日降雨量と日平均風向の季節変化

(風向は、\* : プノンペン, : カンダルストン, : チョンクニマスを示す)

Seasonal change of daily rainfall and daily average wind direction

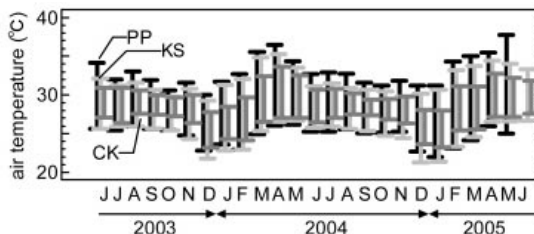


Fig.13 3地点における気温の日較差と日変化域

(上端:日最高気温, 下端:日最低気温)

(PP: プノンペン, KS: カンダルストン, CK: チョンクニマス)

Seasonal change of temperature

年には0.76m (湖水面積:  $1,641\text{km}^2$ )であった。

b モンスーンによる気象環境の季節変化特性

カンボディアは、熱帯モンスーン気候帯に属しているが、周囲の山岳によってその影響は多少緩和されている。乾季には、大陸の乾燥した冷気団が南方及び東方に移動し、冬季モンスーンとなる。カンボディアでは、一般に11月下旬から、東風あるいは北東風の冬季モンスーンが吹く。12~1月は寒気団による直接的な影響が大きい。4月には、シベリア高気圧帯の影響を受けて東よりの風になる。5月末からは、夏季モンスーンが発達し、この

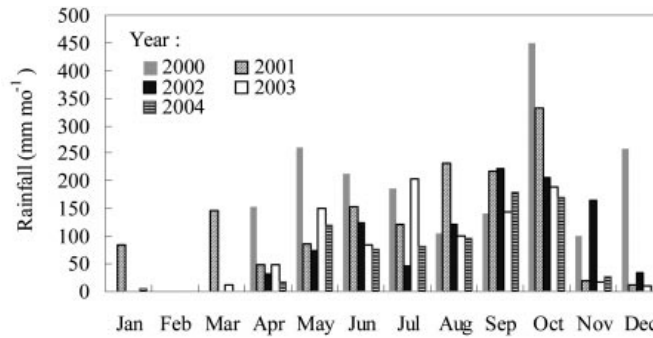


Fig.14 プノンペンにおける2001～2004年の月別降雨量

(2000/1/1～2000/3/29はデータなし。2002年4月は欠測日4日間，2002年6月は欠測日1日間を含む)

Monthly rainfall from 2001 through 2004 at Phnom Penh

時期，インド洋からの南西風が卓越するようになる。夏季モンスーンは，ヒマラヤ山脈の麓で低気圧帯として発生し，湿潤で不安定な暖気団としてカンボディアに到来する。夏季には，湿潤暖気団が熱された地表面と接触するとき不安定になるため，突風を伴う嵐が多い。これらの嵐は，雨季前半には午後，後半には夜間に多い。さらに，熱帯収束帯に沿って，赤道性気団と熱帯海洋からの北東風（貿易風）との境界部で，2つの気団が収束するため，暴風雨が発生しやすい。これらの暴風雨は，熱帯収束帯が発達・低下する季節の変わり目に多い。5月から9月の間の暴風は，しばしば15～20回に及ぶ。10月からは，再び寒気団に覆われるが，特にカンボディア南西部では，この時期にはインド北部からの偏西風の影響も受ける（MRC and WUP-FIN, 2002）。

実際に現地観測を行った3地点における日降雨量および風向（1日の風速・風向ベクトル平均）の季節変化をFig.12に示す。日平均風向からは大きく3季節に分類することができ，(I) 2～4月頃の南～南南東風，(II) 5～9月頃の南南西～西風，(III) 10～1月頃の北～東北東風，となっている。また，(I) および (III) が乾季に，(II) が雨季にほぼ相当している。

さらに，3観測所における気温の季節変化をFig.13に示す。同図には，3観測所の気温日変化域（日最高気温と日最低気温）を月平均値として示している。気温は年間を通して高く，4月に最も暑く（日平均気温29～30），11～12月に最も涼しく（日平均気温27～28）なる。なお，湖面上および雨季の水田では，気温日較差が小さくなる傾向が見られる。

## 2 観測データと解析方法

### a 対象期間

プノンペンにおける2000/3/30～2005/2/28の1,797日間のデータ，および，カンダグストンとチョンクニアスにおける2003/6/20～2005/2/28の620日間のデータを用いた。

### b 雨季・乾季の区分

カンボディアでは，一般に，5～10月頃が雨季，11～

12月および1～4月頃が乾季とされているが，Fig.14に示すプノンペンの各年の月別降雨量分布からも明らかのように，雨が集中して降る時期は年によって異なっている。また，「雨季」「乾季」の定義については，これまで様々に検討がなされてきているものの，絶対的な定義はない。

そこでここでは，次式で表される5日間合計降雨量  $R_{5days}$  を指標として雨季と乾季とを区分した。なお，時期区分に際しては，プノンペンにおけるデータを用いて行い，カンダグストン，チョンクニアスの雨季・乾季の時期も，プノンペンにおける時期に等しいとした。

$$R_{5days}(i) = \sum_{j=-2}^2 R(i+j) \quad (7)$$

ここに， $i$ は対象日， $j$ は整数， $R(i+j)$ は $(i+j)$ 日における日降雨量を表す。さらに，データが収集された1,797日間に降った雨の総量（6,068mm）から期間内平均5日間雨量を求めたところ，16.9mm/5daysであった。そこで， $R_{5days}(i)$ が連続して16mmを下回る時期を乾季，それ以外の時期を雨季と定義した。

この定義のもとでは，観測期間1,797日のうち，1,170日が雨季（うち，日雨量が0.1mm以上の降雨日は666日），627日が乾季（うち，降雨日は53日）と分類された（Table 5参照）。

Table 5 プノンペンの降雨量による雨季・乾季の区分（日雨量0.1mm以上の日を降雨日と定義）

Definition of rainy and dry seasons in precipitation data at Phnom Penh

Season	Period	
	Starting	Ending
Rainy season (I)	30 Mar 2000	31 Jan 2001
Dry season (I)	01 Feb 2001	05 Mar 2001
Rainy season (II)	06 Mar 2001	28 Oct 2001
Dry season (II)	29 Oct 2001	27 Apr 2002
Rainy season (III)	28 Apr 2002	03 Dec 2002
Dry season (III)	04 Dec 2002	06 Apr 2003
Rainy season (IV)	07 Apr 2003	16 Oct 2003
Dry season (IV)	17 Oct 2003	30 Apr 2004
Rainy season (V)	01 May 2004	28 Nov 2004
Dry season (V)	29 Nov 2004	28 Feb 2005

c 日射量データ

プノンペンでは、“Dry season (I)” および “Dry season (III)” の両乾季期間中に、観測日射量が徐々に減少し、雨季の到来とともに急速に増加する傾向が見られた。しかし、日射計のメンテナンスが不十分であったこと、観測所横の道路の交通量が多いこと、かつ、その道路が2003年の半ばあるいは末頃まで未舗装で、赤土が巻き上がりやすい状態にあったことから、日射計への土埃の堆積により、乾季の日射量が過小評価されていた可能性が大きいと考えた。これらの堆積物は、雨季の始まりとともに、降雨により洗い流されて、日射量の観測精度が回復していた。

さらに、道路舗装後の乾季、“Dry season (V)” には、観測日射量が最小となる時期が雨季の到来よりやや早く、大気圏外日射量が最小となる時期に対応しており、これは、同時期のカンダルストーンおよびチョンクニアスにおける傾向とも一致していた。

以上の検討より、日射量の観測値については、“Rainy season (IV)” 以降が信頼のおけるものと判断し、それ以前の期間については、以下に示す手順で日照時間から日射量を算定した (Tsujiimoto et al., 2007; Akpabio and Etuk (2003))。

全期間に対して、日照時間から日射量  $S_a'$  [ $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ] を計算した結果を Fig.15 (d) に示す。雨季の全期間、および、乾季の “Dry season (IV)”、“Dry season (V)” には、計算日射量  $S_a'$  は Fig.15 (b) に示す観測日射量  $S_a$  と同等の値を示している一方、乾季の “Dry season (I)” および “Dry season (III)” には、過小評価されていたと考えられる日射量の値が大きく改善されている。

なお、プノンペン以外の2観測所については、観測状態が良好であったため、観測日射量をそのまま用いた。

3 解析結果と考察

a 全天日射量の季節変化

日照時間から計算した全天日射量  $S_a$  について、各季の平均値および標準偏差を計算し、比較した。その結果を Fig.16 に示す。雨季・乾季の日射量には大きな差はなく、平均値では乾季の方が  $0.12 \sim 1.45 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$  多いものの、雨季には変動が大きく、しばしば乾季と同等の日射量を得られていることがわかる。

この原因としては、以下の3つの要因が考えられる。

(1) 大気圏外日射量の影響

大気圏外日射量が大气中のエアロゾルや水蒸気、雲などによって地表面に到達するまでに遮断される割合を「曇り度数 (CI: Cloudiness Index)」とし、 $CI = 1 - S_a/Q_a$  と定義してその季節変化を調べた。その結果を Fig.17 に示す。雨季のCIは0.53~0.56、乾季のCIは0.45~0.48となっており、雨季には雲や大气中の水蒸気量の増加によってCIが上昇するものの、日射遮断率は5割強にとどまっており、日射がほぼ完全に遮断されるような曇天日は少

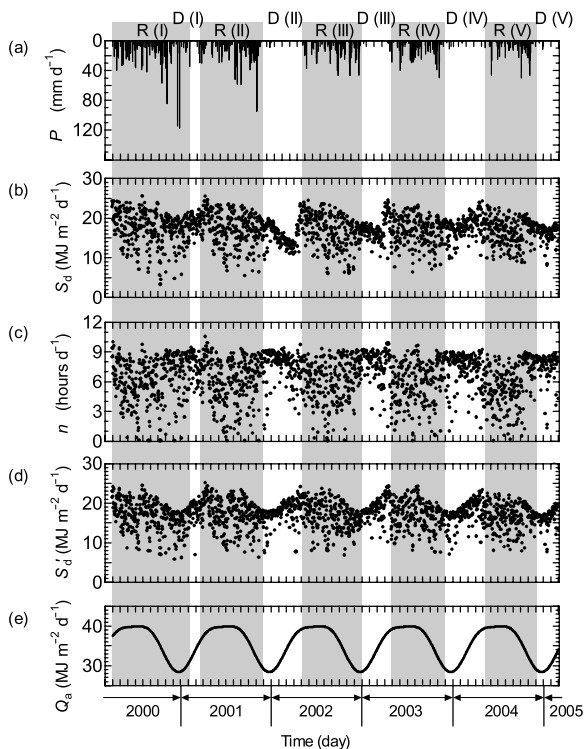


Fig.15 プノンペンにおける降雨と日射の季節変化

(a) 日降雨量P, (b) 観測日射量  $S_a$ , (c) 日照時間n, (d) 計算日射量  $S_a'$ , (e) 大気圏外日射量  $Q_a$ . 横軸は、2000/3/1~2005/2/28までの日付を示し、1目盛りは1ヶ月を示す。また、図上の“R”は雨季を、“D”は乾季をそれぞれ示しており、括弧内の数字はTable 5に対応している。)

Seasonal change of rainfall and insolation

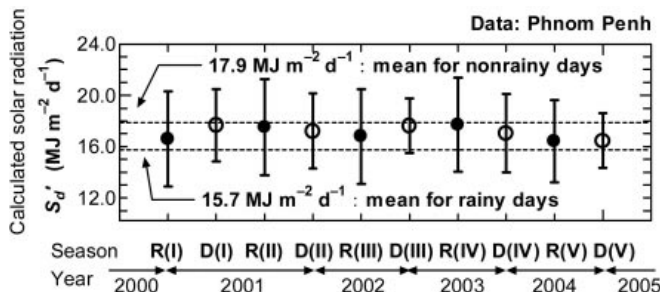


Fig.16 プノンペンにおける各季節の全天日射量の比較

Comparison of seasonal insolation at Phnom Penh

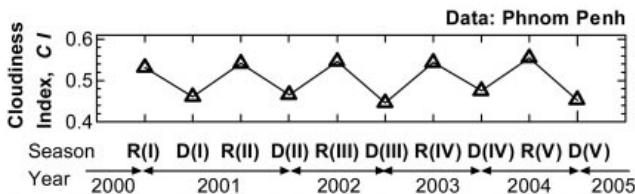


Fig.17 プノンペンにおける各季節の曇り度指数CIの比較

(横軸の表示については、Fig.16に同じである)

Comparison of Cloud Index at Phnom Penh

ないと考えられる。

(2) 雨季の総日数に対する降雨日の割合

雨季における降雨日 (日降雨量が0.1mm以上の日) の

割合は、全日数の5~6割程度にとどまっており、4~5割程度は無降雨日となっている。無降雨日が晴天日とは限らないものの、雨が降らず、十分に日射を得ることのできる日が、雨季期間中にも多く存在していると考えられる。

(3) 降雨日・無降雨日の日射量

さらに、観測全期間を通して「降雨日」「無降雨日」という区分で日射量を比較してみると、降雨日の平均日射量は $15.7\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 、無降雨日の平均日射量は $17.9\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ であり (Fig.16)、降雨日であっても平均して無降雨日の約88%に及び日射が得られていることがわかる。

b 降雨日変化の特徴

前節では、降雨日であっても無降雨日の約88%の日射があることを示したが、その原因について、降雨時刻に着目して検討した。検討に際し、次の3指標を導入した。

(a) 時刻  $t$  における降雨イベント総数,  $N(t)$  :

各時刻  $t$  において、対象期間内に $0.1\text{mm}$ 以上の降雨を記録した総回数。

(b) 降雨継続時間,  $R_d(t)$  [hrs] :

各時刻  $t$  から降り始めた降雨イベントの回数と、それぞれの降雨継続時間  $R_d(t)$  について調べた。ここでの「降雨継続時間  $R_d(t)$ 」は、1時間単位の降雨量観測値が連続して $0.1\text{mm}$ 以上を記録した時間と定義し、1時間以内の降雨イベントの小休止は無視している。

(c) 平均降雨強度  $I(t)$  [ $\text{mm h}^{-1}$ ] :

各時刻  $t$  に記録された降雨量を全期間に渡って合計し、 $N(t)$ で割った値。

これら3指標について、プノンペンのデータを調べた結果をFig.18に示す。まず降雨イベント総数 $N(t)$ について見ると (Fig.18上段)、降雨イベントの大半が15:00~24:00に集中しており、08:00~13:00頃のイベントが非常に少なくなっていることがわかる。また、一日の中で直達日射が最も大きくなる12:00~13:00を中心として、その前後5時間 (07:00~18:00、日の出から日の入りにほぼ相当)、前後3時間 (09:00~16:00)、前後2時間 (10:00~15:00) の降雨回数を調べると、それぞれ、1,088回 (全イベントの41.2%)、583回 (同22.1%)、388回 (14.7%) となっており、全降雨イベントの半分以上が夜間であり、太陽高度の高い時間に降る回数 (頻度) が非常に少なくなっている。

また、各時刻に降り始めた降雨イベント数を調べると (Fig.18中段)、降雨の開始時刻は15:00~17:00頃、次いで18:00~22:00頃がピークであり、この時間帯の雨は、およそ3分の1

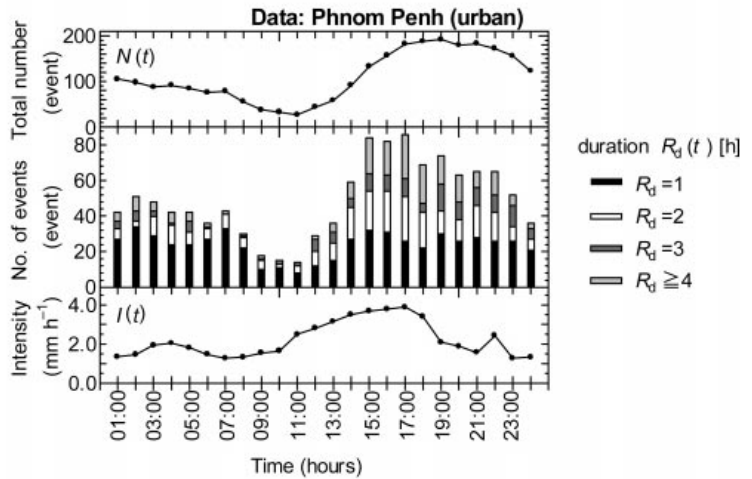


Fig.18 プノンペンにおける $0.1\text{mm h}^{-1}$ 以上の降雨イベントの時刻別頻度分布 ((上段) 時刻  $t$  における降雨イベント総数  $N(t)$ , (中段) 時刻  $t$  に始まった降雨イベント数とその降雨継続時間  $R_d(t)$  [h], (下段) 時刻  $t$  における平均降雨強度  $I(t)$  [ $\text{mm h}^{-1}$ ])

Temporal distribution of rainfall events of  $0.1\text{mm h}^{-1}$  or more at Phnom Penh

程度が3時間以上にわたって比較的長時間降っていることがわかる。一方で、早朝から正午ごろにかけての降雨は、半数以上が1時間程度の短時間で止んでいる。

さらに、降雨強度  $I(t)$  に着目すると (Fig.18下段)、午後 (13:00~18:00頃) に $3\sim 4\text{mm h}^{-1}$ 程度で強く、17:00にピークとなっている。一方で、深夜から午前中にかけての降雨は $1\sim 2\text{mm h}^{-1}$ 程度の弱い雨となっている。定義より明らかなように、 $N(t)$ と $I(t)$ の積は、各時刻  $t$  に降った雨の総量を表しており、降雨量としてみると、16:00~17:00頃に多く、朝方から昼間にかけては少なくなっていることがわかる。

次に、Fig.19には、それぞれ、チョンクニアス (湖面上) における結果を示した。また、同様にカンダルトンにおいても検討した。これらの観測所では、観測日数

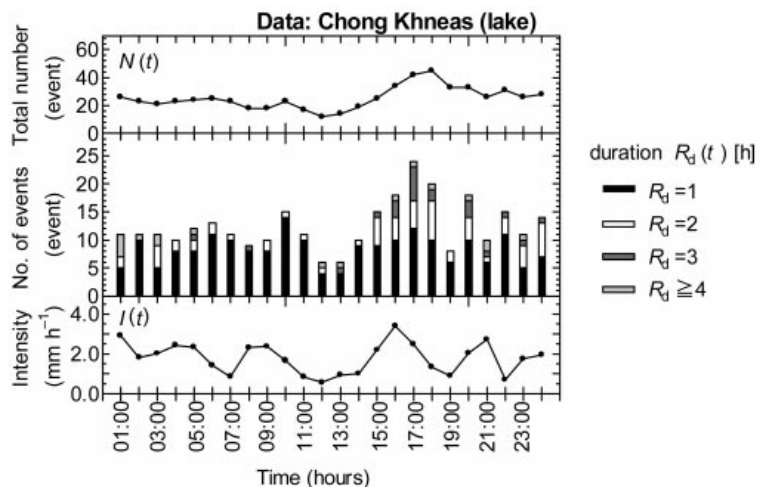


Fig.19 チョンクニアスにおける $0.1\text{mm h}^{-1}$ 以上の降雨イベントの時刻別頻度分布 (図の注釈はFig.18に同じ)

Temporal distribution of rainfall events of  $0.1\text{mm h}^{-1}$  or more at Chong Khneas

Table 6 ある3日間 (Fig.20)における日射量および降雨量の日積算値  
Daily amount of insolation and rainfall of specific 3 days in Fig.20

	Date	Season	$S_d'$ (MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	$P$ (mm d <sup>-1</sup> )
(a)	13 Feb 2004	Dry season (IV)	20.25	0.0
(b)	14 Jun 2002	Rainy season (III)	20.46	30.8
(c)	29 Sep 2004	Rainy season (V)	12.44	23.2

が2年弱(620日)とプノンペン(1,797日)の3分の1程度であったため、降雨日変化の傾向はプノンペンほど明瞭ではないものの、ほぼ同様と認められる。

プノンペンと異なる点としては、i) カンダルストーン、チョンクニラスともに、降雨イベント総回数  $N(t)$  のピークがより短時間に集中していること(カンダルストーンでは19:00、チョンクニラスでは18:00)、ii) 降雨継続時間  $R_d(t)$  が1時間程度の短い降雨事象が一日を通して卓越していることである。

また、陸域の水田地帯であるカンダルストーンと、湖面上のチョンクニラスとを比較して考察すると、カンダルストーンでは降雨事象が午後一番から夕方にかけて集中している一方、トンレサップ湖面上では、日の出前後に短時間雨量の割合が増えているものの、夜間にもある程度の降雨事象があることがわかる。

以上から、この地域においては、夕方早めの時間帯(15:00~17:00頃)に比較的まとまった雨が降り始め、徐々に強度を弱めながら深夜まで降り続けていると考えられる。その後、早朝から午前中にかけては、雨が降ることはほとんどなく、降っても少量である。なお、海岸域では、海陸風と一般風の衝突により朝方に降雨ピークが発生する傾向があることが知られているが(Oki and Musiaka, 1994)、チョンクニラスではそのような傾向は確かめられず、夕方にピークが卓越していた。なお、朝方ピーク発生の有無は、局所的な風向の日変化と密接に関わっているといえる。

c 日射量の日変化と降雨時刻との関係

次に、日射量の日変化と降雨時刻との関係を調べた。Fig.20には、特徴的なある3日の日射量および降雨量の日変化の様子を示している。また、各々の日の日射量および降雨量の日積算値をTable 6に示した。ここで取り上げた3日間は、(a) 乾季の無降雨日で、かつ、日射量が乾季内で最大であったことから、一日中快晴であったと考えられる日、(b) 雨季の降雨日で、夕方にのみ雨が降った日、(c) 雨季の降雨日で、日中に雨が降った日、である。

(b)と(c)は、ともに日降雨量が20mmを超える降雨日の様子を示しているが、(b)では快晴日と思われる(a)と同等の日射量が得られている一方、(c)では、日降雨量としては(b)より少ないにもかかわらず、太陽高度の高い12:00に雨が降った結果、日射量は(a)

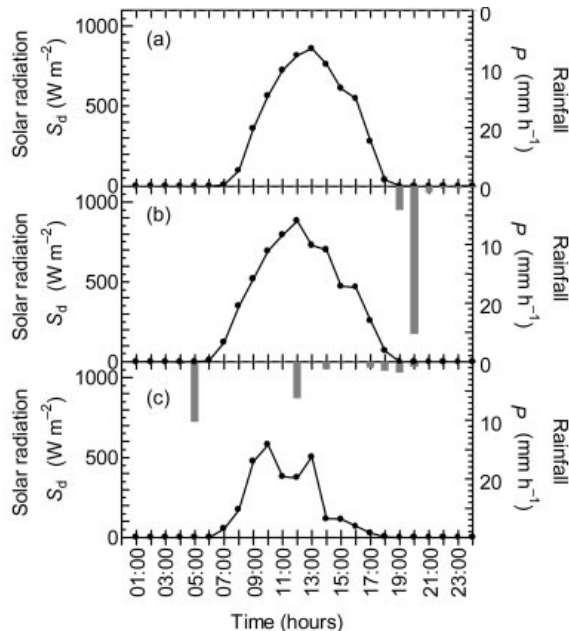


Fig.20 プノンペンにおける、特徴的なある3日間の日射量  $S_d$  と降雨量  $P$  の日変化  
(a) 乾季の無降雨日(2004/2/13); (b) 雨季の降雨日(2002/6/14); (c) 雨季の降雨日(2004/9/29)  
Diurnal change of insolation and rainfall on specific 3 days

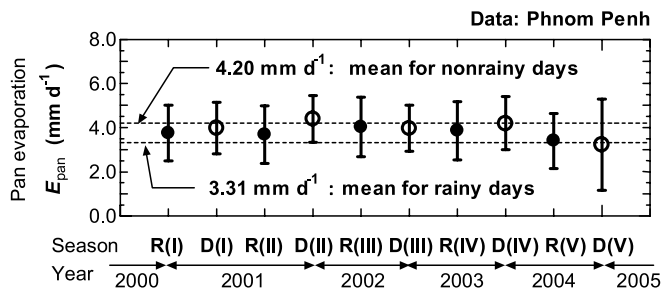


Fig.21 プノンペンにおけるパン蒸発量  $E_{pan}$  の季節変化 (Rは雨季、Dは乾季の平均値を示し、エラーバーはそれぞれの標準誤差範囲を示す。点線は「降雨日」、「無降雨日」それぞれの平均値を示す。「R」は雨季を、「D」は乾季をそれぞれ示している。)  
Seasonal change of pan evaporation at Phnom Penh

の6割程度と少なくなっている。このように、日射量の多少は降雨時刻の影響を大きく受けている。前述のように、本地域では降雨イベントの半分強が夜間に発生していることから、雨季の降雨日の多くは、(b)と類似の降雨・日射の日変化を示している。このことが、降雨日であっても無降雨日の9割近い日射が得られている理由

Table 7 カンダルストーン (KS) およびチョンクニアス (CK) における各季節の全天日射量, 大気放射量および純放射量

Insolation, atmospheric radiation and solar radiation at Kradal Stung (KS) and Chong Kneas (CK)

Station	Season	Mean for each season			Difference [(rainy s.) - (dry s.)]		
		$S_d$	$L_d$	$R_n$	$S_d$	$L_d$	$R_n$
		(MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )			(MJm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )		
KS (paddy)	Rainy season (IV)	18.56	36.53	10.45	0.22	1.90	2.07
	Dry season (IV)	18.34	34.63	8.38			
	Rainy season (V)	18.69	35.92	10.55	-0.26	3.07	2.20
	Dry season (V)	18.95	32.85	8.35			
CK (lake)	Rainy season (IV)	19.62	36.65	13.08	0.81	2.29	1.76
	Dry season (IV)	18.81	34.36	11.32			
	Rainy season (V)	19.73	36.10	12.94	1.12	2.81	2.19
	Dry season (V)	18.61	33.29	10.75			

と考えられる。

d 考察

以上の結果より, 対象地域では, 日降雨量と日日射量との間の相殺関係は弱く, 雨季であっても乾季と同等の日射量が得られていることが示された。また, その原因として, 夕方に降雨が集中していることを述べた。

このような降雨 - 日射特性は, 蒸発量やそれを直接的に規定する純放射量の季節変化に影響を及ぼしているといえる。ここでは, これらの降雨 - 日射特性が与える影響として, 純放射量および蒸発量の季節変化について考察する。

(1) 蒸発能の季節変化への影響

プノンベンにおけるパン蒸発計蒸発量の観測結果を Fig. 21 に示した。この図から, 雨季・乾季ともに, また, 降雨日・無降雨日ともに, 蒸発計蒸発量は平均して 2.5 ~ 5mm d<sup>-1</sup> 程度であり, 雨季・乾季に伴う明瞭な季節変化は見られないことがわかる。なお, 乾季には移流効果によりパン蒸発が促進されていると考えられる。

このことから, 雨季には, 十分な日射が得られることにより, 蒸発能 (パン蒸発計蒸発量) も乾季と同等に大きいと考えられる。さらに, 雨季の午前中には, 前日の夕方から夜間にかけての降雨により地表面が湿潤状態にあると考えられることから, 十分な日射量のもとで多くの実蒸発散が生じていると考えられる。

(2) 純放射量への影響

蒸発量 (蒸発能) への影響は, 全天日射量 (下向き短波放射量)  $S_d$  のみならず, 放射収支を構成する他の 3 要素, すなわち, 大気放射量 (下向き長波放射量)  $L_d$ , 反射量 (上向き短波放射量)  $S_u$ , 地面放射量 (上向き長波放射量)  $L_u$  の影響を受ける。蒸発能はこれらの収支としての純放射量  $R_n$  によって規定される。ここで,  $R_n$  は次式で表される。

$$R_n = (S_d - S_u) + (L_d - L_u) \quad (8)$$

この放射 4 要素の中で,  $S_d$  と  $L_d$  は太陽高度や雲などの

気象条件によって決定されるが,  $S_u$  と  $L_u$  は地表面状態によって決まる。Table 7 に, 放射 4 成分を観測しているカンダルストーン (水田地帯) およびチョンクニアス (湖面上) について, 各季の  $S_d$ ,  $L_d$ ,  $R_n$  を示した。

Table 7 を見ると, 全天日射量 (下向き短波放射量)  $S_d$  は, プノンベンにおける結果と同様に, 雨季・乾季でほとんど差がなく, むしろ雨季のほうがやや多いくらいである。雨季・乾季による平均全天日射量の差は, 0.2 ~ 1.1 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> となっている。一方, 大気放射量 (下向き長波放射量)  $L_d$  について見ると, 平均して, 雨季には乾季よりも 1.9 ~ 3.1 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> 程度多い傾向にある。これは, 雲の存在や大気中の水蒸気量の増加によって, 雨季には大気放射量が増加するためである。このように雨季の大気放射量が増す傾向は, Vardavas and Fountoulakis (1996) によっても示されている。これらの結果, 蒸発能を直接的に規定する純放射量  $R_n$  は, 平均して, 雨季には乾季よりも 1.8 ~ 2.2 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> 程度多くなっている。

さらに,  $S_d$  および  $L_d$  の日変化の特徴について, 各時刻の無降雨日の量に対する降雨日の量の比率を調べ, 各時刻の  $S_d$  の割合から, 降雨イベント数が夕方~夜間にかけて増加する傾向と合致した状況を示していること, また,  $L_d$  は一日を通して降雨日の方が大きく, 夜間から早朝にかけてその割合が微増していることが分かった。なお, これらの傾向は水田地帯のカンダルストーンの方が顕著であった。

以上から, 前述した降雨 - 日射特性は, 降雨日において, 日中の全天日射量を大きく減少させないのみならず, 主に夕方から夜間にかけて大気放射量を増加させることにより, 日単位の雨季の純放射量を乾季よりも 1.8 ~ 2.2 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> 程度増加させる役割を果たしていると言える。

さらに, 以上の検討に加えて, 蒸発能の季節変化特性や熱帯湿潤地域の湿潤面蒸発散量に関する検討, さらに日変化特性にみるトンレサップ湖及び周辺水田地帯の水文気象環境についての検討も行っているが, 詳細は辻本 (2006) を参照されたい。

## 結 言

メコン河流域における水文気象観測網の現状をレビューするとともに観測上は重要でありながら整備の遅れていたカンボディアに「人・自然・地球共生プロジェクト (RR2000)」(2002.8~2007.3)等で新設した水文気象観測施設の概要を述べた。さらに、これまでに観測された観測データを解析して得られた結果にも言及した。得られた分析結果ならびに提言を要約すると以下ようになる。

1) メコン河のトンレサップ湖は、既往研究の少ない熱帯湿潤地域(熱帯モンスーンアジア)に立地している、明瞭な雨季と乾季を有している、水文気象の観測が遅れているカンボディアに立地している、周辺河川からの流入に伴い、湖の水深および表面積が大きく季節変化する、湖水濁度が大きい、湖の周辺氾濫域において水田稲作が営まれているなどの特徴を有している。

2) 2000年から継続しているプノンペン市街域の気象観測施設に加えて、新たにトンレサップ湖畔の湖面域(チョンクニマス)に設置した総合水文気象観測施設と水田域(カンダルストーン)の気象観測施設と水収支観測施設を設置した。観測は2003年6月から継続しており、観測データの一部の解析も行なった。これらの観測データは、今後の新規データも含めて公開を原則としており、共有化と要望に応じた提供が可能である。

3) 全天日射量の季節変化について調べ、日単位では、雨季であっても乾季とほぼ同等の全天日射量が得られていることが分かった。そしてその理由として、i) 対象地における雨季がもともとの大気圏外日射量の大きい時期に相当している、ii) 雨季期間中のうち約半数は無降雨日である、さらに、iii) 降雨日であっても、日単位の日射量は無降雨日の約88%に及ぶことが考えられた。また、この3つめの理由として、降雨イベントの半数以上が夜間(日没から日の出までの間)に集中していることを示した。

## 参考文献

- 1) Akpabio IE and Etuk SE (2003) : Relationship between global solar radiation and sunshine duration for Orne, Nigeria. *Turkish Journal of Physics*, 27, 161-167
- 2) Allen RG, Pereira LS, Raes D and Smith M (1998) : Crop evapotranspiration -Guidelines for computing crop water requirements-, FAO Irrigation and Drainage Paper, 56, FAO, Rome, 301
- 3) Delft Hydraulics (1990) : Network Optimization, Part I: Network Density, 1-41
- 4) French Mission (1962-3) : The Great Lake of Cambodia, Sedimentology and Hydrology 1962-63, Ministry of Foreign Affairs, France
- 5) Fukumoto M (2000) : Explanation on meteorological observation system at MRCS, Technical Report, Mekong River Commission Secretariat, A1-17, B1-13, C1-13, D1-8, E1-12, F1-2
- 6) HARZA Engineering Company (1960-61) : Hydrologic Data Mekong River Basin, Cambodia, Three volumes of Prior to 1960, 1960 and 1961, The Committee for Coordination of Investigation of the Lower Mekong River Basin, USAID
- 7) Hirose, M and Nakanura K (2005) : Spatial and diurnal variation of precipitation systems over Asia observed by TRMM precipitation radar, *Journal of Geophysical Research*, 110, D05106, DOI: 10.1029/2004JD004815
- 8) 堀 博 (1996) : メコン河-開発と環境-, 古今書院, 296-299
- 9) 藤井秀人 (2004) : メコン河カンボジア氾濫域の水文観測と水収支, *農業工学研究所技報*, 202, 127-140
- 10) Fujii, Hideto, Henrik Garsdal, Peter Ward, Masaki Ishii and Kanehiro Morishita (2003) : Hydrological roles of the Cambodian floodplain of the Mekong River, *Intl. J. River Basin Management*, Vol.1, No.3, 1-14
- 11) Interim Committee for Co-ordination of Investigations of the Lower Mekong Basin (1988) : Report of the First Meeting of Chief Hydrologists, Bangkok, 1-8
- 12) Japan International Cooperation Agency (2003) : The Study on Hydro-Meteorological Monitoring for Water Quantity Rules in Mekong River Basin, Interim Report, Vol.1, II-1-4
- 13) JICA・カンボディア水資源気象省 (2005) : 灌漑技術センター計画概要書
- 14) Lindsey SD and Farnsworth RK (1997) : Sources of solar radiation estimates and their effect on daily potential evaporation for use in streamflow modeling, *Journal of Hydrology*, 201, 348-366
- 15) Masumoto, Takao (2002) : Strategic Master Scheme for a Hydro-Meteorological Network in the Mekong River Basin, *Rural and Environmental Engineering*, 42, 26-35
- 16) 増本隆夫 (2007) : トンレサップ湖での現地観測と国際研究, 竹内邦良・福嶋義宏編『メコンと黄河』, 学報社
- 17) Masumoto T, Pham TH, Shimizu K (2004) : Impact of paddy irrigation levels on floods and water use in the Mekong River Basin, *Proceedings of Advances in Integrated Mekong River Management*, 158-165
- 18) Mekong River Commission (1986, 1990, 1994, 1998) : Lower Mekong Hydrologic Yearbook 1986, 1990, 1994, 1998
- 19) Mekong River Commission (1995) : Agreement on the Cooperation for the Sustainable Development of the Mekong River Basin, 5 April 1995



- 20) Mekong River Commission (2000) : Water Utilization Program-Project Implementation Program, Annex A
- 21) Mekong River Commission (2001a) : Strategic Master Scheme for Hydro-Meteorological Network in the Mekong River Basin, 1-104
- 22) Mekong River Commission (2001b) : Strategic Master Scheme for Hydro-Meteorological Network in the Mekong River Basin, AIV-5-13
- 23) Mekong River Commission (2002) : Chaktomuk Area - Environment, Hydraulics and Morphology (Phase 1)-, Final Report, 2-1 -22-52
- 24) Mekong River Commission (2003a) : Progress Report 2002 and Workplan 2003, Water Utilization Program Start-up Project, 7-8
- 25) Mekong River Commission (2003b) : Consolidation of Hydro-Meteorological Data and Multi-functional Hydrologic Roles of Tonle Sap Lake and its Vicinities (Basinwide), Draft Final Report
- 26) Mekong River Commission (2004) : Annual Report
- 27) Mekong River Commission and Japan International Cooperation Agency (2002) : The Study on Hydro-Meteorological Monitoring for Water Quantity Rules in Mekong River Basin, Working Paper II-II, 1-25
- 28) Mekong River Commission and Japan International Cooperation Agency (2004) : The study on hydro-meteorological monitoring for water quantity rules in Mekong River basin, Final Report 3, Summary, CITI Engineering International Co. and Ltd, Nippon Koei Co., Ltd.
- 29) Mekong River Commission and WUP-FIN (2002) : Water Utilization Program - Modelling of the flow regime and water quality of the Tonle Sap, Data Collection Report, Finnish Environment Institute <http://www.eia.fi/wup-fin/>, 2006/1/9
- 30) MRCS/ WUP-FINホームページ, <http://www.eia.fi/wup-fin/wup-fin1/index.html>, 2006/01/15
- 31) Oki T and Mushiaki K (1994) : Seasonal change of the diurnal cycle of precipitation over Japan and Malaysia, *Journal of Applied Meteorology*, 33, 1445-1463
- 32) Rosset M, Riedo M, Grub A, Geissmann M and Führer J (1997) : Seasonal variation in radiation and energy balances of permanent pastures at different altitudes, *Agricultural and Forest Meteorology*, 86, 245-258
- 33) Shimizu K, Masumoto T and Pham TH (2004) : Categorization and mapping of water use for rain-fed and irrigated agriculture in the Mekong river basin, *Proceedings of Advances in Integrated Mekong River Management*, 206-212
- 34) SOGREAH (1963-65) : Mathematical Model of Mekong River Delta, The Committee for Coordination of Investigation of the Lower Mekong River Basin, UNESCO
- 35) Sonura H (2003) : Meteorological station and water level measurements at Kandal Stueng, Meteorological station at Tonle Sap Lake, In-house Report, National Institute for Rural Engineering
- 36) 菅原正巳 (1979) : 続・流出解析法, 共立出版, 132p.
- 37) 田中秀明 (1997) : メコン河下流域の水文観測網の現状と課題, *農業土木学会誌*, 65(4), 27-30
- 38) Technical Support Division of MRCS (1996) : Improvement of the Basic Hydrologic Stations, 1-6
- 39) Thaipuck Thamongkol (1995) : Review of the Current Status of the Lower Mekong Hydrologic Network, 1-51
- 40) 辻本久美子 (2006) : 熱帯湿潤地域における巨大湖沼流域の水文気象環境 カンボジアのトンレサップ湖を事例として, 京都大学大学院地球環境学舎「修士論文」, 2006年1月13日, 70p.
- 41) Tsujimoto, Kumiko, Takao Masumoto and Toru Mitsuno (2007) : Seasonal Changes in Radiation and Evaporation Implied from the Diurnal Distribution of Rainfall in the Lower Mekong, *Hydrological Processes* (Accepted).
- 42) Vardavas IM and Fountoulakis A (1996) : Estimation of lake evaporation from standard meteorological measurements: application to four Australian lakes in different climatic regions, *Ecological Modelling*, 84, 139-150
- 43) WMO (1994) : Guide to Hydrological Practices, 1-730

# Hydro-meteorological Observation and Analysis of Observed Data at Tonle Sap Lake and its Environs, Urban and Paddy Areas

MASUMOTO Takao, TSUJIMOTO Kumiko and SOMURA Hiroaki

## Summary

Tonle Sap Lake has unique characteristics in that its surface area of 2,500 km<sup>2</sup> in the dry season expands by about 5 times during the wet season and in that the lake and its environs provide a flood regulation function and a rational supply of water resources at the same time by utilizing the natural hydrological conditions. However, the change of hydro-environmental and water use mechanism, which this huge lake has, have not been understood well. In addition, the civil war in Cambodia has prevented people from obtaining even fundamental data due to the delay of financial and human resources development on hydro-meteorological facilities and observation. Then, few proper meteorological data exist for this area and the region's meteorological conditions, including seasonal variation in radiation and evaporation, have not been clarified.

This paper, therefore, firstly explains three hydro-meteorological stations newly installed by authors in urban, paddy Tonle Sap Lake areas, respectively, based on the history and status quo of the hydro-meteorological observation facilities in the Mekong River Basin. Then, the characteristics of hydro-meteorological condition and new findings by the analysis of the data observed in those stations are shown. Especially, the ground-based hourly hydro-meteorological data collected at three observation stations mentioned above, which are located in different land-use types (urban district, paddy area, and lake) were analyzed to investigate the seasonal variation in radiation and evaporation related to the diurnal distribution of rainfall. Our results showed that rainy and dry seasons had nearly the same amount of solar radiation in the Lower Mekong River Basin because: 1) rainy seasons had a relatively larger amount of extraterrestrial radiation; 2) no rain fell on nearly half of the days during rainy seasons; and 3) the amount of solar radiation on rainy days reached 88% of that on nonrainy days. The third factor was attributed to the high frequency of evening rainfall. Furthermore, this rainfall-radiation relationship meant that rainy seasons had a large amount of net radiation due to the low reduction ratio of solar radiation and an increase in long-wave incoming radiation. Accordingly, rainy seasons had a high evaporation potential.

**Keywords :** Mekong River, Tonle Sap Lake, hydro-meteorological observation network, lake surface, paddy area, urban area, field observation, solar radiation, rainfall, observed data