

## カンボジアの大気環境 — トンレサップ湖生物多様性維持機構保全の視点から —

塚脇 真二<sup>1</sup>・荒木 祐二<sup>2</sup>・石川 俊之<sup>3</sup>・本村 浩之<sup>4</sup>

向井 貴彦<sup>5</sup>・大八木英夫<sup>6</sup>・坂井 健一<sup>7</sup>

### Evaluation of the Present Atmospheric Environment in Cambodia from a Standpoint of Conservation of the Biodiversity in Lake Tonle Sap

Shinji TSUKAWAKI<sup>1</sup>, Yuji ARAKI<sup>2</sup>, Toshiyuki ISHIKAWA<sup>3</sup>, Hiroyuki MOTOMURA<sup>4</sup>,  
Takahiko MUKAI<sup>5</sup>, Hideo OYAGI<sup>6</sup> and Kenichi SAKAI<sup>7</sup>

Received 21 March 2006

Accepted 4 April 2006

**Abstract** — Lake Tonle Sap, the largest lake in Southeast Asia, has been closely associated with the lives and culture of Cambodian people and society. A great amount of aquatic resources arising from its high biodiversity has supported them since the Khmer Dynastic Time to the present. However, because problems of environmental pollution, and atmospheric pollution in particular, have become worse within a short space of time in Cambodia due to rapid development of tourism of the Angkor Monument Complex for instance, its harmful effect to the natural environment has been of recent concern. Rapid deterioration of the natural environment will probably trigger a certain change of the lake ecosystem, and the change might lead to a fatal damage to the plentiful aquatic resources. The present article describes the preliminary results of the research missions “Evaluation of Mechanisms Sustaining the Biodiversity in Lake Tonle Sap” from 2003 to 2005. On the basis of these results loss and damage of the natural environment and biodiversity of the lake are estimated, along with the progress of atmospheric pollution.

**Key Words** : Lake Tonle Sap, Cambodia, Biodiversity, Atmospheric Pollution, Angkor Monument Complex.

<sup>1</sup> 金沢大学自然計測応用研究センター  
(〒 920-1192 金沢市角間町)

<sup>1</sup> Institute of Nature and Environmental Technology, Kanazawa University  
Kakuma-machi, Kanazawa 920-1192

<sup>2</sup> 横浜国立大学大学院環境情報学府  
(〒 240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7)

<sup>2</sup> Graduate School of Environment and Information Sciences,  
Yokohama National University  
79-7 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501

<sup>3</sup> 北海道大学大学院地球環境科学研究科  
(〒 060-0810 札幌市北区北十条西 5)

<sup>3</sup> Graduate School of Environmental Sciences, Hokkaido University  
N10W5, Kita-ku, Sapporo 060-0810

<sup>4</sup> 鹿児島大学総合研究博物館  
(〒 890-0065 鹿児島市郡元 1-21-30)

<sup>4</sup> Kagoshima University Museum  
1-21-30 Korimoto, Kagoshima 890-0065

<sup>5</sup> 岐阜大学地域科学部  
(〒 501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

<sup>5</sup> Faculty of Regional Studies, Gifu University  
1-1 Yanagido, Gifu 501-1193

<sup>6</sup> 日本大学大学院総合基礎科学研究科  
(〒 156-8550 世田谷区桜上水 3-25-40)

<sup>6</sup> Graduate School of Integrated Basic Sciences, Nihon University  
3-25-40 Sakurajosui, Setagaya-ku 156-8550

<sup>7</sup> 大阪大学大学院工学研究科  
(〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1)

<sup>7</sup> Graduate School of Engineering, Osaka University  
2-1 Yamadaoka, Suita 565-0871

## 1. はじめに

大気環境汚染に代表される環境汚染問題の発生は発展途上国には普遍的に存在する現象といえる。しかし、長期間にわたって内戦あるいは鎖国の状態にあったカンボジアでは、環境汚染が政府や一般市民の理解のないまま短期間のうちに深刻化していったという特殊性がうかがえる。環境汚染が住民の健康な生活に悪影響となって近々現れることは必至であろうし、生態系の保全という視点から見た場合、同国における水界生態系の中心ともいえるトンレサップ湖の生物相への影響がもっとも懸念される。

トンレサップ湖は東南アジア最大の湖であるとともに熱帯低地に位置する淡水湖としては世界最大の冠水面積を誇る。また、雨季と乾季とで面積が5倍にも変化し、それにとまって水深も大きく変わる湖としても有名である。さらにこの湖は世界でも類を見ないほどに多種多様で、豊富な生物相を擁することで知られ、栄華をきわめたアンコール帝国期以前から現在に至るまで、カンボジアに住む人々の社会・文化・生活のあらゆる面にわたって密接な存在であり続けてきた。同湖そのものの自然環境や湖が生み出す水産資源がカンボジアの人々を支え続けてきたともいえよう。このように同湖は学術的にきわめて興味深い湖沼であり、カンボジアのみならずメコン河流域に位置する諸国にとっても社会生活の基盤としてかけがえのない存在である。

しかし、カンボジアやその周辺諸国における長年の戦乱や政情不安などのため、これまでトンレサップ湖の調査が十分になされてきたとはいえず、かつての調査結果にも散逸してしまったものが多い。しかし、カンボジアにとっての同湖の重要性を考えると、同湖の生態系の変化＝破壊という事態は回避されなければならない。そのためには環境汚染や破壊の実態解明とともに、現在の自然環境にかかわる基盤情報を収集解析し提示することはまさに急務といえる。

筆者らの研究グループはトンレサップ湖の生物多様性維持機構の評価を目的に、湖底地質、水文、植生動態、そして水界動物の四分野からなる総合学術調査を2000年から予察的に始め<sup>1)</sup>、2003年からは科学研究費補助金ならびにUNESCO MAB-IHPによる海外学術調査として共同で展開してきた<sup>2)</sup>。生態系の記載やその維持機構の全容解明には時間がまだまだ必要であるが、これまでの研究成果にもとづき、大気環境の変化＝大気汚染が同湖の生態系にどのような影響を与えるかの考察をここに試みる。本稿をまとめるにあたり金沢大学大学院自然科学研究科古内正美助教授にはさまざまなお助言・ご意見をたまわった。ここに記して感謝の意を表する。

## 2. カンボジアにおける環境汚染の背景と対策の現状

1954年にフランスからの独立を達成したカンボジアであるが、1970年のロン・ノルのクーデターによって平和な時代が終わり、1975年、ポル・ポトのクーデター後の約4年間にわたって国民を殺戮の嵐が襲ったことはよく知られている。この暗黒時代は1979年のヴェトナム軍の侵入とヘン・サムリン政権の成立とによって終了したものの、事実上の鎖国体制のため国際社会からの孤立はその後なおも続き、1991年のパリ合意にもとづくUNTACの暫定統治、そして1993年の国民総選挙の成功で政権はようやく安定し同国は鎖国状態から開放された。それと同時に同国が有する鉱産物や木材などの天然資源の開発、そして内戦で破壊されつくしたインフラの再整備を目的とした外国資本の怒濤の流入が始まった。一方、アンコール遺跡観光に同国を訪れる外国人観光客の数は1994年以降年々増加しており、2005年には100万人を突破した。それにとまって同国の観光産業は計画性のないまま急激な成長を遂げている。このような長年にわたる内戦と国際社会からの孤立、その後の急激な社会の発展や人口の増加、そしてそれにとまらぬ乱開発によって環境汚染や自然破壊などの問題が同国各地で一気に噴出してきた。

アンコール遺跡観光の基地であるシェムリアプ市、なかでもアンコール遺跡区域内やその周辺でこのような環境汚染や自然破壊の進行が顕著である。大型ホテルが急増しつづける観光客数に対応して次々と建設され、それとともに道路の新設・拡張工事などのインフラ整備が進められている。その一方、無秩序で際限のない開発行為のため同州がかつて誇っていた豊かな森林は減少の一步をたどっている<sup>3)</sup>。また、林立するホテルやレストランなどからの汚水による河川水・地下水の汚染や遺跡を訪れる大型車輛などからの排気ガスによる大気汚染にも憂慮すべきものがある。

この深刻な事態に対処するためカンボジア政府は1994年に設立したアンコール遺跡整備機構(Authority for the Protection of the Site and the Management of Angkor Region)を2003年に改組した。遺跡の調査や修復などの諸事業にかかる調整・企画・提言機能的な性格であったものを大幅に改め、州や国との連携のもとに行政指導の一端を担えるようにするとともに、環境問題に対応し保全を図る水・森林部門(Department of Water and Forest)および遺跡区域内住民の生活改善を目指す住民発展部門(Department of Demography and Development)を設置した。そして遺跡区域や緩衝区域といった開発制限区画を再設定するとともに、水・森林部門は遺跡地域の森林再生計画や河川の水質調査計画などを打ち出し、一方の住民発展部門は生産性の高い農作物の導入やトンレサップ湖湖底堆積物を用いての農地土壌改良などの諸計画を立案している。

このようにアンコール遺跡区域における環境汚染や自然破壊の改善にカンボジア政府がのりだしたことは高く評価される。しかし発展途上の段階にある同国の社会経済基盤を考えると、財政的貧窮そして人材不足の両面から、上記両部門の諸計画が順調に進行しているとはいえない。観光客の今後の増加やそれともなう開発によって発生するさらなる自然破壊や環境汚染を考えると、大気汚染に代表される環境汚染問題は緊急に解決されるべきものといえる。

### 3. トンレサップ湖の概要

トンレサップ湖はカンボジア西部のトンレサップ盆地中央に位置する淡水湖である (Fig. 1)。この湖はトンレサップ川を通じて大河メコンと連絡する。そのため湖水は乾季 (11月～4月) にはトンレサップ川を通してメコン河へ流出するが、雨季 (5月～10月) になると激増したメコン河の水がトンレサップ川を逆流し湖へ流入するようになる (Fig. 2)。これに加えて雨季には湖周辺の河川からの流入も増大するため、乾季末に冠水面積約 3,000 km<sup>2</sup> の同湖は、雨季末期には同約 15,000 km<sup>2</sup> と約 5 倍に拡大し、水位も 1 m 以下から 8 m 以上に増大する。このように拡大と縮小とを毎年繰り返すことがこの湖の最大の特徴である。同湖の形成年代やその後の環境変遷史は湖底堆積物の解析結果からほぼ明らかになっている<sup>4-7)</sup>。以下、これらの資料にもとづき同湖の形成・発達史について概説する。

トンレサップ湖の原型が誕生したのは約 7,500 年前と推定されている。当時の湖はメコン河とは切り離された孤立湖群であった。詳細は不明ながらも径 20 km

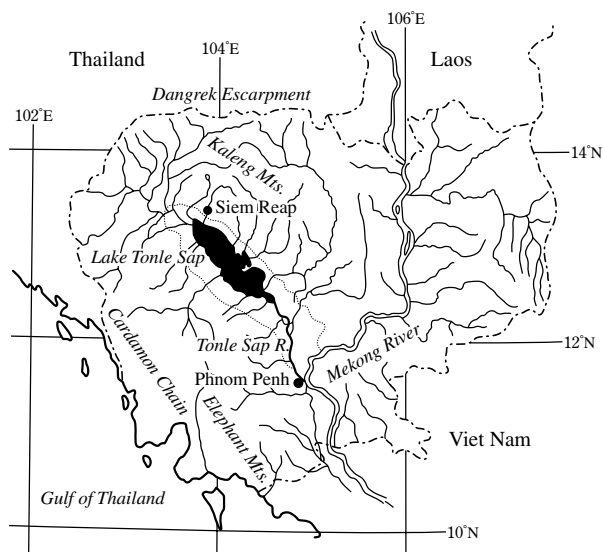


Fig. 1 Location of Lake Tonle Sap and topographic features of Cambodia (Dotted line around the lake indicates maximum flooding area during the rainy seasons) (partly modified from Tsukawaki *et al.*, 1994).

以下の湖が少なくとも 3カ所にあったことがわかっている。その当時の湖は周囲からの土砂により年間約 1 mm の速度で埋積されていた。しかし、完新世の世界的海面上昇によってメコン河の水が河道からあふれ出し湖沼群のあった低地に流入したことで、今から約 5,500 年前に現在とほぼ同じ巨大湖が形成された。同湖が拡大と縮小とを季節ごとに繰り返すようになったのはこのときからであり、増水時のメコン河からは多量の水とともに土砂が湖へ供給されるようになったが、その一方、減水時には湖からほぼ等量の土砂が排出されるようになった。そのため湖の埋積作用は事実上停止することになり、これによって同湖は安定した水域として現在の位置に存在することになった。すなわち、現在の同湖で見られる生態系の成立は約 5,500 年前にさかのぼることができるといえる。さらに、自然環境の大きな変化や自然環境の大きな人為的改変がなければ、将来的にもこの湖は安定した水域として存在しうるといえよう。

### 4. トンレサップ湖の生物多様性維持機構調査とその予察的成果

海外学術調査等によるトンレサップ湖の総合調査は 2003 年 11 月 (最高水位期: 湖北部), 2004 年 5 月 (最低水位期: 同), 2004 年 11～12 月 (最高水位期: 湖南部), 2004 年 5～6 月 (最低水位期: 同) の 4 回実施した。これに加えて UNESCO MAB-IHP の助成による総合調査を湖の南北両域で 2005 年 1 月 (減水期前半), 2005 年 3 月 (減水期後半), 2005 年 7～8 月 (増水期), 2005 年 12 月 (最高水位期), そして 2006 年 3 月 (減水期) の 5 回行った。これらの調査で得られた予察的成果を研究分野ごとに以下略述する。

#### 4.1 湖底地質分野

トンレサップ湖の形成・発達史は、同湖北部での 2002 年までの調査で明らかになったものである<sup>6)</sup>。そこで湖全体や周辺水系での表層堆積物の分布・組成の把握を目的に、湖南部およびトンレサップ川での表層・柱状採泥を実施した。その結果、湖南部表層には北部同様含泥率 99 % 以上の赤褐色泥が全域に分布するが、トンレサップ川表層には湖付近にこそ赤褐色泥が分布するものの、メコン河との合流点付近になると砂質堆積物が卓越するようになり、砂質堆積物は湖方向に向かうにつれてその粒径や含有量とともに減ずることがわかった<sup>8,9)</sup>。これに加えて湖南部の柱状採泥結果を同湖北部でのそれと比較し、約 5,500 年前以前、同湖南部にも長径約 10 km の小湖沼が存在したことが確認された<sup>8)</sup>。

#### 4.2 水文分野

水文学的基礎情報の取得を目的に、トンレサップ湖南北定点での水温・水圧の長期連続観測、同湖北部・南部における水温、pH、濁度、伝導度などの横断観測、

シェムリアップ市内における気温・風向・風速などの気象情報の記録，そして同湖や周辺水系の水質測定などを実施した。その結果，湖水温の日変化が雨季では1度程度であるものの水深が1 m以下と浅くなる乾季にはこれが3～5℃と大きくなること，水位の季節変動に北部と南部とで明瞭な違いは認められず2004年11月～2005年5月の平均低下速度は5.1 cm/日であること，伝導度は湖水が80～100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  であるのに対して湖に直接流入する周辺河川では10～80  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ときわめて低く，その一方メコン河では約200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  と高くなること，などが明らかになってきた<sup>10～12)</sup>。これに加えて同湖の高い表層水温のため，きわめて近距離で蜃気楼が発生することを報告した<sup>13)</sup>。

#### 4.3 植物生態分野

湖の北縁にあってシェムリアップ市南方に位置し，サガリバナ科の *Barringtonia acutangula* が主要樹種となっている氾濫原<sup>14)</sup>を主調査地域に設定して，氾濫原全体の植生概況および特定種の分布状況や更新特性を調べた。その結果，主として植生構造の違いにもとづき5タイプの森林植生を識別し，植生遷移におよぼす人為的な影響の評価に成功した<sup>15)</sup>。また，これに加えて世界各地の熱帯湿原で問題となっている外来植物 *Mimosa pigra*<sup>16)</sup>の侵入・繁殖状況を確認した<sup>15)</sup>。一方，同氾濫原域における水生草本類の高水位期調査結果から，草本類24種を識別するとともに常に冠水する湖沼域から氾濫原の内部に向かって群落が明瞭に分帯することを確認した<sup>17)</sup>。

#### 4.4 水界動物分野

動物群集構造の解明，湖および周辺地域における動物群集の分布，一次生産の測定，そして魚類の系統的採集と分類などがこの分野の調査項目である。その結果，多数の未記載種を含む10門の水界無脊椎動物が識別され，これらは高水位期の氾濫原域では卓越するものの常に冠水する湖水域ではきわめて少ないこと，低水位期の動物群集はきわめて貧弱となること，プラ

ンクトン群集にしても同じ傾向にあること，淡水域としては世界最高の漁獲高を誇るものの湖表層での一次生産は低いことなどが明らかとなった<sup>18～21)</sup>。また，新属新種ならびに外来魚5種を含む35科80属140種の魚類が記載された<sup>22, 23)</sup>ほか，雨季にはメコン河から大量の水が湖に流れ込むことで多くの魚類も同湖に入り込むが，トンレサップ湖とメコン河との双方に広く分布すると従来考えられていた複数の魚種において，両者で個体群が異なることが示唆された<sup>22)</sup>。

### 5. 考察：大気汚染がトンレサップ湖の水界生態系におよぼす影響

トンレサップ湖水界生態系の全容把握やその維持機構の解明には時間がまだまだ必要である。しかし，これまでの調査結果から明らかにされた<sup>24, 25)</sup>ように，カンボジアにおける大気汚染の危機的状況，そしてそのさらなる悪化には予断を許さないものがある。そこで，トンレサップ湖の特異な環境条件，ならびに同湖での生物多様性調査から得られた成果にもとづき，大気汚染の深化が水界生態系へ与える影響について推論を交えつつではあるが考察する。

大気汚染がトンレサップ湖の水界生態系に直接影響するとは考えがたい。大気汚染は雨水の汚染，たとえば大気中の硫黄酸化物などによる酸性雨としてまず現出したうえで水界生態系へ影響を及ぼすと考えてよからう。直接的には酸性雨による水域そのものの酸性化があげられる。一方，間接的には酸性雨や光化学オキシダントなどによる影響が森林面積の減少などとなって現れ，それが連鎖的に水界生態系へ影響を及ぼすという過程が考えられる。

#### 5.1 酸性雨による湖水の酸性化

酸性雨による湖水の酸性化は北欧の湖沼の魚類が死滅したことで著名となった<sup>26)</sup>。シェムリアップ市内の大気に含まれる硫黄酸化物量は現在のところわが国の基準値を下回っている<sup>25)</sup>。トンレサップ湖水のpHは

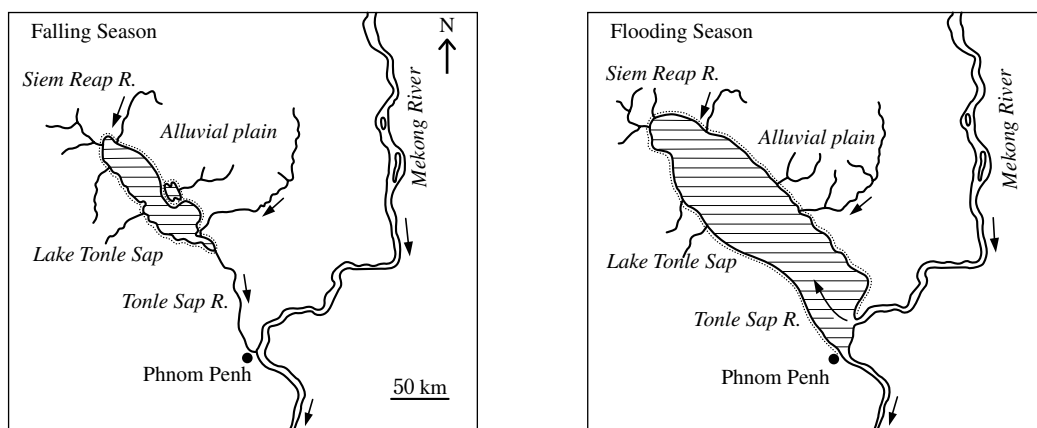


Fig. 2 Water areas of Lake Tonle Sap in falling and flooding seasons (simplified from Okawara and Tsukawaki, 2002).

場所や季節にかかわらずほぼ中性であり<sup>11)</sup>、1960年代もほぼ同じであったことが知られている<sup>27)</sup>。しかし、同湖に流入する河川水はやや酸性であり、アンコール遺跡区域における地下水のpHはしばしば4以下となる<sup>28, 29)</sup>。周辺河川から酸性の水が流入し地下水が酸性であるにもかかわらず同湖の水が中性を保っている理由は、拡大・縮小を繰り返すことによって、緩衝能力が高いメコン河の水<sup>11)</sup>が毎年新たに供給されるという水文学的特異性にもとめられよう。すなわち現在の湖の環境条件が湖水の酸性化を防いでいるといえる。また、強い水温躍層が形成されやすい同湖では湖水の垂直混合が発生しにくく、さらに多量の懸濁物質によるきわめて低い透明度によって湖底では光合成がおこらず、長期間にわたり還元的環境にあるといえる。これは指標生物である水生ミミズ類が貧弱なこと<sup>18)</sup>や湖底堆積物に自生黄鉄鉱があること<sup>30)</sup>からも裏付けられる。還元的な状態では窒素酸化物が除去されるため、還元的な湖底環境は酸性化を防ぐことに寄与している可能性もある。

しかし、メコン河上流諸国の工業化には近年著しいものがあり、トンレサップ湖へ流入するメコン河の水の酸性化が将来的に懸念される。また、同河本流でのダム建設が現実のものとなった場合、同湖の環境条件の激変、具体的には雨季にメコン河から流入する水の減少と乾季に流出する水の減少、すなわち湖水の停滞が予測され、湖水の大規模交換がなくなるとともに湖水の酸性化が加速的に進行する可能性が指摘される。

同湖集水域には石灰岩の分布がきわめて少なく<sup>31)</sup>、湖水の酸性化の進行が地質条件によって抑制されにくいことにも留意すべきといえよう。

湖水の酸性化によるトンレサップ湖水界生態系への影響は、世界各地の湖沼を対象にこれまで多くの論文などで議論されているとおりであろう<sup>32)</sup>。炭酸カルシウムの殻をもつ大型甲殻類や二枚貝などへの直接の影響がまず想定され、酸性化による魚類の生殖作用の低下や停止、ひいては絶滅も考えられる<sup>26)</sup>。これに加えて、酸性雨に含まれる硝酸や亜硝酸は同湖生態系ピラミッドの底辺となる植物プランクトンの生育に必要な栄養塩でもあるため、これをめぐる植物プランクトンの生態学的な競争、そして湖水の酸性化や酸化物質の毒性による植物プランクトンへの生理学的な影響も考慮せねばならない。いずれにしても、湖水の酸性化が同湖水界生態系の大きな変化を引き起こすことは確実である。

重金属など大気中の浮遊有害物質が自然落下あるいは雨水とともに落下し湖水に含まれたときの生態系への影響については不明な点が多い。しかし、これらの物質を濾過食性の無脊椎動物が選択なしに摂取し、それが食物連鎖、さらには生物濃縮によって生態系全体、ひいては地域住民へ深刻な影響をおよぼすことは想定されうることといえよう。

## 5.2 森林の減少・消滅

植物、とくに森林による大気の浄化作用はよく知られている。光合成や呼吸によって気孔から取り込まれ

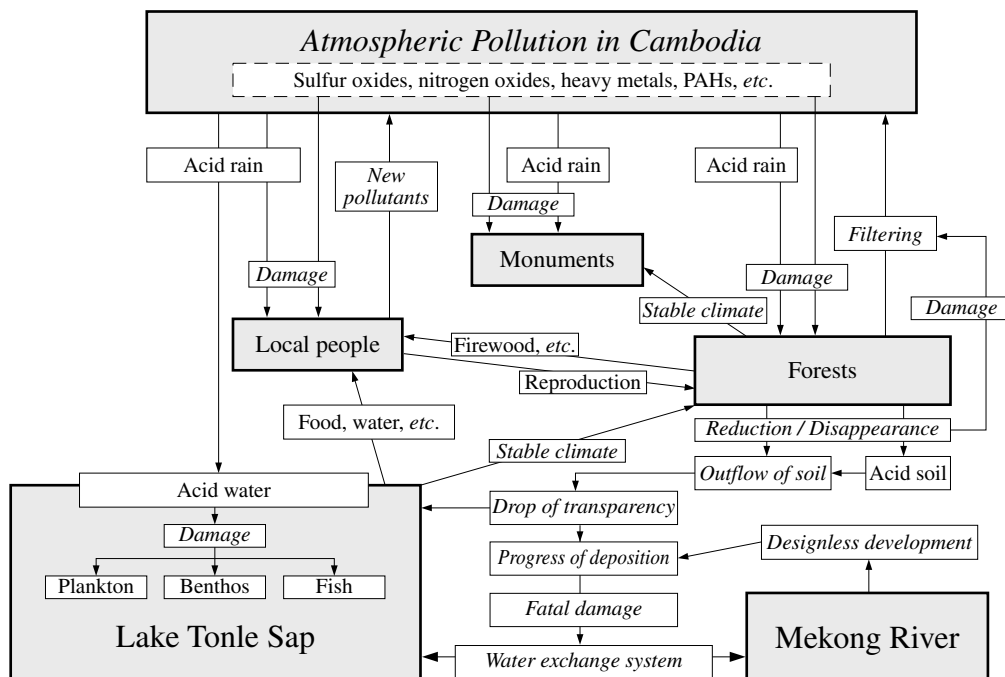


Fig. 3 Schematic diagram showing influence of atmospheric pollution in Cambodia to ecosystem in Lake Tonle Sap, forests, local people and Angkor monuments, and linkages among them.

た窒素酸化物などの汚染物質は植物の生理作用によって分解代謝される<sup>33)</sup>。浮遊汚染物質の一部は気孔から吸い込まれて植物体内に固定されたり葉に付着したりすることで大気から除去され、落葉や枯死によって大地に固定される<sup>33)</sup>。また、風の流れが停滞しやすい森林環境では大気中の粉塵などの汚染物質が林床に落下し土壤に固定される<sup>33)</sup>。その一方で、大気汚染物質による植物への直接の影響もあり、たとえば光化学オキシダントによる葉組織の破壊、落葉、さらには植物そのものの枯死が知られ、大気汚染物質に対する植物のこのような感受性は葉が成熟した段階でもっとも高く、強い照度、高い大気湿度、そして多量の土壌水分量によってこの感受性（＝被害の受けやすさ）はさらに高まるとされる<sup>34)</sup>。つまり、湖畔の氾濫原に分布する森林は大気汚染物質の直接的な影響をもっとも被りやすい環境条件にあるといえ、氾濫原域の水生動物相がもっとも豊かであること<sup>18, 21)</sup>を考えると、この地域での植生の減少は水界生態系への大きな打撃となるといえよう。

次に大気汚染が酸性雨として森林に与える影響について考えてみたい。酸性の雨滴は植物体、とくに葉の表面に付着し、そこで蒸散・濃縮されることでさらに酸性となる。これがクチクラ層を傷つけ表皮細胞を破壊し、最終的には落葉する<sup>34)</sup>。一方、土壤に染みこんだ酸性雨は土壤の酸化を引き起こし、それによって土壌中のCaやMgなどの土壌養分が硝酸塩となって流出することで土壌の酸性化が促進され植物の成長が阻害される<sup>26)</sup>。一方、トンレサップ湖に流入する周辺河川や貯水池の水のアルカリ度は湖水の20分の1以下ときわめて低く<sup>11)</sup>、緩衝作用に乏しいことから酸性雨による水の酸性化は容易に起こりうるといえる。アンコール遺跡区域の地下水が酸性であることは前述のとおりである。これらの水は農業用水などとして広く用いられているが、このような水を用いて農地あるいは森林を涵養することは森林土壤の酸性化を招く懸念があるばかりか、酸性雨の発生を想定すると土壤の酸性化のさらなる進行を招くことが予測される。

大気汚染そのもの、あるいは酸性雨によって森林面積が減少あるいは森林そのものが消失してしまった例は世界各地から報告されている<sup>26)</sup>。カンボジアでは大気汚染による被害こそ報告されていないが、木材の不法輸出を目的とする森林の伐採に加え、村落の拡大や観光開発などのために森林が伐採される例は数多く知られる<sup>14, 35~37)</sup>。これに加えて、地方の一般家庭では薪を森林から採取し燃料として用いている。そのため同国における森林面積の近年の減少には著しいものがあり、その一例としてシェムリアップ州ではこの数十年間に90%以上の森林が面積にして消失したとされる<sup>3)</sup>。このような森林の衰退による陸上生態系への影響は計り知れないものがあるろうし、トンレサップ湖水界生態

系への影響にも看過できないものがあり、もっとも端的な例として森林土壤の流出があげられよう。

森林面積の減少による森林土壤流出量の増大は、湖へ流入する土砂量の増大に直結する。さらに、森林土壤の消失により表流水量が増加すれば、森林土壤のさらなる流出を招くばかりか河川の流量増をも引き起こす。アンコール遺跡区域を流れてトンレサップ湖へ流入するシェムリアップ川などの河川群は、アンコール帝国時代の河道変更工事による河岸浸食が現在も著しい。河川流量の増加は河岸浸食の激化を引き起こすことになるろう。そうすると、湖への土砂流入量はさらに増加することになる。

土砂流入量の増大がトンレサップ湖の水界生態系に憂慮すべき事態を引き起こすことは確実である。多量の懸濁物によって湖水の透明度は現在以上に低下する。すると植物プランクトンの光合成に必要な光が得られる層がきわめて浅くなり、浅い層に定位できる種が優占するようになるろう。このような種の代表であるアオコの中には魚類にとって有毒な物質を生産するものがあり<sup>38)</sup>、アオコの大量発生による魚類への影響がまず懸念される。現在の同湖では低水位期にはアオコが大量発生するものが高水位は珪藻が優占するようになる<sup>21)</sup>。しかし、高水位期にもアオコが大量発生するような事態になれば、水界生態系全体の変化はもちろんのこと魚類の再生産への影響も必至といえる。これに加えて透明度の低下によって水温躍層の形成はより顕著になるろう。これは表層水の栄養塩が枯渇しやすくなるとともに下層水が無酸素状態になりやすくなることを意味し、生物相の変化を招く危険性がある。さらに、流出土壌に含まれる汚染物質が水生動物の体内に入り込むことも十分に想定され、この場合も既述のとおり生物連鎖や生物濃縮といった憂慮すべき事態の発生が考えられよう。

土砂の多量流入による魚類への直接的な影響については、生態学的資料が未詳であることから予想の域を出ない。しかし、日中は湖底の窪地に潜み夜間になると索餌のため浅い水域に出てくるナマズなどの大型捕食魚にとって、土砂の流入で湖底の窪地が埋積されることは致命的であり、これらの大型捕食魚が水界生態系ピラミッドの頂点に位置することを考えるとこれは生態系そのものの崩壊にもつながりうる問題となるろう。なお、前述のとおり同湖における埋積作用はほぼ停止状態である<sup>4)</sup>。しかし湖への土砂流入量の増大、とくに乾季の逆流によっても湖から排出されない粗粒堆積物の増加は、水界生態系どころかトンレサップ湖そのものの消失さえ引き起こすことにもなりかねない。

## 6. おわりに

これまで実施してきたトンレサップ湖の生物多様性維持機構調査の結果と合わせ、カンボジアにおける大

気汚染が同湖の生態系におよぼすであろう影響についての考察を進めてきた。生態系の全容がまだ明らかとなっていない時点での作業であったため推論にたよる点が多いことは否めないが、同国における大気汚染の進行が湖やメコン河の生態系の破壊につながりうることは確実といえる。トンレサップ湖には湖水の透明度の低さや湖水の毎年の大規模な交換といった同湖特有の環境条件が存在する。大気汚染が同湖水界生態系へ与える影響の定量的評価は、この特異性に十分に留意しながらも、首都プノンペンや観光都市シェムリアップでの大気汚染が危機的状況にある現在では緊急に進めるべき課題といえる。

その一方で、生態系とは直接には関係しないが、遺跡に使用されている石材へ酸性雨が与える影響にも憂慮すべきものがある。酸性雨の建築物への影響としては大理石の溶解や金属の腐食がよく知られているが、アンコール遺跡群に多用されている砂岩についても構成粒子の緑泥石化が酸によって加速し、遺跡の壁面を飾る著名な彫刻群が劣化するばかりか、遺跡そのものの崩壊の危険性も指摘される。そして、大気汚染の深刻化は当然のことながら地域住民の健康な生活に深刻な影響を与えるであろう。地域住民が燃料とする薪の主供給源は森林である。大気汚染の進行によって森林が減少し、それに人為圧による森林の減少が加わることで、森林がもつ大気汚染除去機能は確実に低下する。それが森林のさらなる減少を招くばかりか、薪の燃焼によって汚染物質が大気中に新たに放出されている可能性も指摘されている<sup>25)</sup>。さらに流出する森林土壌が土砂となってトンレサップ湖に流れ込み、同湖の生態系や水文学的特性に大きな影響を与える。このような負の連鎖の加速度的進行によってカンボジアの自然環境は壊滅的な打撃を被るであろうし、地域住民の動物タンパクの主供給源となる同湖の生態系の変化はもちろんのこと、最悪の事態ともなれば湖そのものの消失さえ引き起こすことも予期される。

地域住民の健康な生活の保障、人類共通の文化遺産としての遺跡の保全、そしてやはり人類共通の財産ともいえるトンレサップ湖の生物多様性保護のためには、同湖水界生態系の全容解明を急ぐとともに、同国における大気環境観測体制の広域的展開とその長期的運営、そしてその解析結果をふまえての発生源対策やその低減策を、同国における観光産業のますますの発達や、工業化が進みつつある近隣諸国からの汚染物質の大気輸送の問題とあわせて緊急に講じることが望まれる。

## References

- 1) Committee for Proposal the Overall Scientific Research on Lake Tonle Sap (Endoh, S., Katakura, H., Tsukawaki, S. and Mita, K.) : "Report on the Field Missions in Lake Tonle Sap, Cambodia-Toward an Overall Scientific Research in Lake Tonle Sap", p. 330, Infrastructure Development Institute, Tokyo (2001) (in Japanese)
- 2) Tsukawaki, S. and Members of EMSB & EMSB-u32 Teams : Introduction and Research Activities of the EMSB and EMSB-u32 Teams in Lake Tonle Sap, Cambodia in 2003-2005, *Proc. First Int. Symp. on Evaluation of Mechanisms Sustaining the Biodiversity in Lake Tonle Sap, Cambodia*, Phnom Penh, Cambodia, 9-13 (2005)
- 3) Department of Water and Forest : "Project Report for Reforestation Project in Siem Reap Angkor Region", p. 17, Authority for the Protection of the Site and the Management of Angkor Region, Cambodia (2004)
- 4) Tsukawaki, S., Okuno, M. and Nakamura, T.: Sedimentation Rates in the Northern Part of Lake Tonle Sap, Cambodia, during the Last 6,000 Years, *Summaries of Researches Using AMS at Nagoya University*, **8**, 125-133 (1997) (in Japanese with English abstract)
- 5) Okawara, M. and Tsukawaki, S.: Composition and Provenance of Clay Minerals in the Northern Part of Lake Tonle Sap, Cambodia, *Jour. Geography*, **111**, 341-359 (2002)
- 6) Mildenhall, D. C. and Tsukawaki, S.: Holocene History of Lake Tonle Sap, Cambodia, *Geological Society of New Zealand Newsletter*, **128**, 27-33 (2002)
- 7) Tsukawaki, S., Sotham, S. and Members of Tonle Sap 21 Programme : Formation of the Present Natural Environment on Lake Tonle Sap and the Lower Courses of the Mekong River System in Cambodia, Geological History of Cambodia during the Last 20,000 Years, *Proc. First Int. Symp. on Evaluation of Mechanisms Sustaining the Biodiversity in Lake Tonle Sap, Cambodia*, Phnom Penh, Cambodia, 21-23 (2005)
- 8) Tsukawaki, S., Sotham, S., Sim, I., Takebayashi, H., Ooji, A., Bunnarin, B. and Sambath, T.: Lithological Features of Cored Sediments from the Southern Part of Lake Tonle Sap and the Tonle Sap River, *ibid*, 24-26 (2005)
- 9) Takebayashi, H., Luu, X. L., Egashira, S., Tsukawaki, S., Sim, I., Sambath, T., Sotham, S. and Ide, S.: Flow Pattern and Size Distribution of Bed Material at Chaktomuk in Cambodia, *ibid*, 51-54 (2005)
- 10) Endoh, S., Fujita, K., Nakai, S., Okumura, Y., Oyagi, H., Fujii, T., Tsukawaki, S. and Monichoth, S. I.: Continuous Measurement of Water Temperature in Lake Tonle Sap, *ibid*, 29-30 (2005)
- 11) Oyagi, H., Endoh, S., Okumura, Y., Monichoth, S. I., Tsukawaki, S., Ishikawa, T., Fujii, T., Fujita, K. and Mori, K.: Seasonal Changes in Water Level and Water Quality in Lake Tonle Sap, Cambodia, *ibid*, 31-32 (2005)
- 12) Okumura, Y., Endoh, S., Oyagi, H. and Darith, E.: Meteorological Characteristics of Siem Reap City, Cambodia, *ibid*, 79-81 (2005)
- 13) Endoh, S., Tsukawaki, S. and Okumura, Y.: Inferior Mirage of Lake Tonle Sap, Cambodia, *Tenki*, **52**, 3-4 (2005) (in Japanese)
- 14) McDonald, J. A., Pech, B., Phauk, V. and Leeu, B.: "Plant Communities of the Tonle Sap Floodplain", p. 30, Final Report in Contribution to the Nomination of Tonle Sap as a Biosphere Reserve for UNESCO's Man in the Biosphere Program (1997)
- 15) Araki, Y., Powkhy, D., Hirabuki, Y., Rachna, C., Tsukawaki, S., Tomita, M. and Suzuki, K.: Floodplain Vegetation Under Severe Human Impact, Succession Pattern and Invasion of Exotic Mimosa in Lake Tonle Sap, Cambodia, *Proc. First Int. Symp. on Evaluation of Mechanisms Sustaining the Biodiversity in Lake Tonle Sap, Cambodia*, Phnom Penh, Cambodia, 43-45 (2005)
- 16) Tim, A. H., Quentin, P., Richard, C. and Areli, M.: *Malacorhinus Irregularis* for Biological Control of *Mimosa Pigra* : Host-specificity, Life Cycle, and Establishment in Australia. *Biological*

- Control*, **32**, 252-262 (2005)
- 17) Hirabuki, Y., Araki, Y., Powkhy, D., Takehara, A., Tsukawaki, S., Suzuki, K., Sokrithy, I. and Rachna, C.: Herbaceous Water-plant Vegetation in Flooding Lake Tonle Sap, Cambodia, Distributional Pattern and Ecological Implications, *Proc. First Int. Symp. on Evaluation of Mechanisms Sustaining the Biodiversity in Lake Tonle Sap, Cambodia*, Phnom Penh, Cambodia, 47-48 (2005)
  - 18) Ohtaka, A., Katakura, H., Kamiya, T., Narita, T., Motomura, H., Ishikawa, T., Mukai, T., Kuwahara, Y., Tsukawaki, S., Sophorn, V., Rachna, C. and Vuthy, T.: Diversity of Aquatic Invertebrates in Lake Tonle Sap, *ibid.*, 60-61 (2005)
  - 19) Ishikawa, T., Oyagi, H., Ohtaka, A., Narita, T., Sim, I. and Tsukawaki, S.: Primary Production in Lake Tonle Sap, *ibid.*, 57-59 (2005)
  - 20) Narita, T., Ohtaka, A., Motomura, H., Mukai, T., Ishikawa, T., Sophorn, V., Rachna, C. and Vuthy, T.: Food Web Structure Study by Natural Stable Isotope in Lake Tonle Sap, Cambodia - A Preliminary Report -, *ibid.*, 62-63 (2005)
  - 21) Watanabe, R., Ohtaka, A., Katakura, H., Kamiya, T., Narita, T., Motomura, H., Ishikawa, T., Mukai, T., Tsukawaki, S., Sophorn, V., Rachna, C. and Vuthy, T.: Seasonal Changes of Net-plankton Communities in Lake Tonle Sap, *ibid.*, 66-67 (2005)
  - 22) Motomura, H., Mukai, T., Ohtaka, A., Katakura, H., Kamiya, T., Narita, T., Ishikawa, T., Tsukawaki, S., Sotham, S., Sambath, T., Bunnarin, B., Sokhom, N., Rachna, C. and Powkhy, D.: Fishes of Lake Tonle Sap and Tonle Sap River, Cambodia, *ibid.*, 69 (2005)
  - 23) Mukai, T., Motomura, H., Ishikawa, T., Oyagi, H., Araki, Y., Ohtaka, A., Narita, T., Tsukawaki, S., Sotham, S., Sambath, T., Bunnarin, B., Sim, I., Rachna, C. and Powkhy, D.: DNA Analysis of Fishes in Lake Tonle Sap. *ibid.*, 68 (2005)
  - 24) Murase, T., Furuuchi, M., Tsukawaki, S., Sotham, S., Hata, M. and Yamashita, M.: Present Status and Characteristics of Ambient Air Pollution in Phnom Penh, Cambodia, *J. Aerosol Res. Japan* (2006) (in Japanese) (in press)
  - 25) Furuuchi, M., Murase, T., Tsukawaki, S., Sotham, S., Hang, P. and Hata, M.: Present Status of Air Pollution in Siem Reap Angkor Region in Cambodia, *Proc. First Int. Symp. on Evaluation of Mechanisms Sustaining the Biodiversity in Lake Tonle Sap, Cambodia*, Phnom Penh, Cambodia, 73-78 (2006)
  - 26) Kawachi, T. and Sakuraya, Y.: "Ecology and Environment of Animals - Aiming for Symbiosis with Animals", p.178, Kyoritsu Pub., Tokyo (1996) (in Japanese)
  - 27) Mitusio, H., Ohno, N. and Meas, S. -A.: Limnological Study of the Mekong Water System, Cambodia, *Res. Rep., Kochi Univ., Nat. Sci.*, **16**, 59-68 (1970)
  - 28) Tsukawaki, S. and Moriai, T.: The Ground and Ground Water in the Angkor Monuments Complex - In Respect of Angkor Thom in Particular, *Renaissance Culturelle du Cambodge*, **8**, 263-286 (1993)
  - 29) Lao, K. L.: Current Status of Water Environment in the Angkor Region - Preliminary Survey of Water Quality -, *ibid.*, **8**, 363-369 (1993)
  - 30) Tsukawaki, S., Okawara, M., Lao, K. -L. and Tada, M.: Preliminary Study of Sedimentation in Lake Tonle Sap, Cambodia, *Jour. Geography*, **103**, 623-636 (1994)
  - 31) United State Geological Survey : Geological Map of Cambodia Showing Location of Lithologic Sections, Scale 1 : 1,000,000, United State Department of the Interior, Geological Survey (1971)
  - 32) Takamura, N.: Biodiversity and Lake Conservation, *Aquabiology*, **140**, 197-202 (2002) (in Japanese with English abstract)
  - 33) Tohda, H.: Function of Air Purification, *Rep. Forestry and Forest Products Res. Inst., Japan*, **40**, 19-20 (2004) (in Japanese)
  - 34) Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council ed., "Bibliographical Introduction to Researches on Agriculture, Forestry and Fisheries, No. 10 : Agricultural Meteorology", p. 376, Soc. Agriculture, Forestry and Fisheries Japan (1984)
  - 35) CNMC / NEDECO : "Natural Resources-based Development Strategy for the Tonle Sap Area, Cambodia (CMB / 95 / 003), Final Report. vol. 1, Main Report", p.15+p.115, Cambodian National Mekong Committee, Phnom Penh (1998)
  - 36) CNMC / NEDECO : "Natural Resources-based Development Strategy for the Tonle Sap Area, Cambodia (CMB / 95 / 003). Final Report, vol. 2, Sectoral Studies, Environment in the Tonle Sap Area", p.9+p.122, Cambodian National Mekong Committee, Phnom Penh (1998)
  - 37) Sokhun, T.: "Review of the Forestry Sector in Cambodia. Prepared for the Project CMB / 95 / 003, Natural Resources-based Development Strategy for the Tonle Sap Area, Cambodia. UNDP", p.3+p.22, Mekong River Commission and Cambodian National Mekong Committee, Phnom Penh, (1997)
  - 38) National Institute for Environmental Studies : Eutrophication and Toxic Cyanobacteria, *Kankyogi (NIES Research Booklet)*, **7**, p. 5 (2002) (in Japanese)