

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2013

課題番号：21254005

研究課題名(和文) 国際観光都市アンコール地域の持続可能な流域水管理

研究課題名(英文) Sustainable water resource management in the Angkor and its surroundings

研究代表者

徳永 朋祥 (Tokunaga, Tomochika)

東京大学・新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：70237072

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,600,000円、(間接経費) 10,680,000円

研究成果の概要(和文)：カンボジア王国のシエムリアップ市、バタンバン市周辺を対象とし、地下水環境並びに地表水環境、地表水と地下水の関連について検討を行った。シエムリアップ市では、地下水と表流水との交流が比較的活発であり、また、地下水の利用も相対的に容易である一方、バタンバン市周辺においては、表流水と地下水との交流は活発ではなく、地下水利用も一部の地域を除いてそれほど容易でない状況が見られた。このような違いは、両都市の地質学・地理学的位置づけに依存していることが考えられた。また、トンレサップ湖の堆積物を用いた古環境解析や水中に存在するウイルスの定量化に関する検討も実施し、成果を得た。

研究成果の概要(英文)：Surface water and groundwater investigation was conducted at both Siem Reap and Battambang, Cambodia. Interaction between surface water and groundwater was considered to be relatively active at Siem Reap while it was not at Battambang. This reflects the difference of water usage in these cities, i.e., groundwater is used as water resource in Siem Reap while surface water is the primary resource in Battambang. The difference is considered to be different geological and geomorphologic settings of the cities. This study also conducted paleo-environmental analysis using the sediment core samples from the Lake Tonle Sap, and the development of new methodology to quantitative analysis of viruses in water environments.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：地球・資源システム工学

キーワード：水資源 流域圏 水循環 流域管理 環境質定量化・予測

1. 研究開始当初の背景

安全かつ安定した水供給の実現は、世界中のどのような地域であれ、その地域に生活する人たちの生命や健康を維持する上で本質的に重要な問題である。近年の地球規模の環境変化の結果、安定した水供給のための資源確保が今後さらに困難になっていく可能性が高い。特に、アジアモンスーン気候においては、乾期・雨期が明瞭に分けられるため、安全な水資源を年間を通じて安定に確保するためには、地下水を含めた流域水管理を実践することが危急の課題である。

今回研究対象とするカンボジア王国・シエムリアップ周辺地域は、アンコール遺跡が位置するという利点を生かした観光開発が急激かつ大規模に進んでいる地域である。もはや止めようがない経済的・情動的なグローバルイノベーションにより地球規模で人々が集まってくるため、当地域に新規な病原微生物が持ち込まれることも想定しておく必要がある。上水道、下水道、あるいは病院などの公衆衛生関連の社会基盤が十分に整備・管理されなければ、水系を通じた感染流行が発生し、ひいては当地域から病原微生物が世界に広がる可能性がある。すなわち、世界遺産周辺地域の観光都市において水を量・質・安全性の観点から確保することは、地球規模の人間社会の安心・安全、そして楽しみを担保することに直接的につながると捉える必要がある。

一方、このような拡大する国際観光都市を対象とした水資源の確保は、その地域の自然環境や農業活動に対して過剰な負荷をかける可能性があり、その開発には地域社会の持続可能性を保証することが求められる。最近の急速な地域開発により、すでに市街地中心部での急激な水需要の増加が起きていることから、無秩序な地下水開発が今後も進行するならば、周辺農村の浅層地下水の枯渇や、河川水等表流水量の低減を招く可能性がある。そのため、地域の特性を把握した総合的な水資源管理の達成が急務となっている。さらに、本地域では、遺跡の保全も重要な視点であり、観光都市としての発展、農業活動の継続、遺跡の保全という課題を達成するための環境調和型水資源管理手法を構築し、実践していくことが必要とされる。

2. 研究の目的

本研究では、上述の背景に基づき、観光開発に伴う急激な発展を遂げているカンボジア王国の都市域および周辺農村地域の持続可能な水利用と水管理方策を提示するために必要な技術開発・調査を実施することを目的とする。具体的には、水の地表並びに地下における動態解明、水中の病原微生物などのリスク因子の挙動把握、人間活動・自然相互作用の解明が主要な課題である。

3. 研究の方法

本研究では、水環境に関する調査として、1.現状の水循環過程の把握、2.過去の人間活動に伴う水循環系の変遷の解明、3.病原微生物などの挙動把握、を実施する。その成果に基づいた総合的な流域水循環を明らかにする。

4. 研究成果

本研究の成果として得られた主要な内容は以下のとおりである。

(1) シエムリアップ周辺とパットンバン周辺における地下水環境に関する検討

地下水に関連する調査として、CFCs および SF₆ を用いた地下水流動系の概要把握、乾期及び雨期における地下水面形状の把握、シエムリアップ市内の2か所の井戸における乾期から雨期にかけての井戸水位変動観測、を実施した。その結果、乾期・雨期ともに、不圧帯水層中の地下水は河川に向かって流出する傾向があること、乾期と雨期において井戸水位が数m程度変動すること、が明らかとなった。一方、地下水中の SF₆ 濃度はシエムリアップ周辺においては、東部で高く、西部・南部に向かって低くなる傾向が示された。また、微動アレー探査による地盤構造探査を行い、地下のS波速度構造を明らかにすることを試みた。この結果からは、帯水層が地表から20~30m程度までに分布していることが想定された。

さらに、河川水の上流から下流へ向かう流量の増減を利用し、当該地域における地下水から河川への水流出量の定量的評価を実施した。その結果は、(2)に示すとおりである。

(2) カンボジアの河川(シエムリアップ川とサンカー川)に関する比較検討

シエムリアップ川とサンカー川を対象に、河川の横断面形状、河岸材料、河床材料、河川流量の調査を縦断的に行い、その流下方向の変化を読み取った。

シエムリアップ川は直線的に掘削された人工河川であるが、上流では直線的な線形が維持されているのに対し、途中の勾配変化点で河道は大きく左右に蛇行する。これと対応するように、上流の直線化された区間の流量は流下方向にほぼ一定で変化はなかったが、勾配が変化する地点で流量が急に増加し、その後は漸増する傾向にあった。すなわち、勾配が変化するあたりで地下水が河川に流出していることが示唆されているといえる。

一方、サンカー川は緩やかに蛇行しながら谷底を削りこんでいる自然河川であるが、全体的に流量は上流から下流までほぼ一定であり、地下水の流出は所々目視で確認できるものの、その量は限定的であった。しかし、市街地の一箇所、いったん流量が増加した後再び減少するという傾向が確認された。年を変えて二度計測を実施したが、その傾向は

変わらず、また流量の増加している範囲は極めて狭いことがわかった。

シェムリアップ川では河岸材料の代表粒径(60%通過粒径)は0.2~0.6mmであるのに対し、河床材料の代表粒径は0.4~1.1mm(最上流部のみ5mm程度)であり、全体的に河岸材料よりも大きかった。人工的に掘削された河川であることから、直線的な場所では川幅と河道深さの比は小さく4~5と安定していたが、勾配が変化する地点でのみこの比は20~30と大きく広がり、ここでは、河床材料と河岸材料は同じサイズであった。すなわち、土砂もまたこの勾配変化点付近に堆積し、河岸浸食をおこし、その結果河道を蛇行させている。

一方、サンカー川では河岸材料の代表粒径(60%通過粒径)は0.02~0.03mmであり、ほぼ一定であった。その一方で、河床材料の代表粒径は0.002~0.009mmと一桁小さく、場所によってばらつきがあった。このようなシルト、粘土質の河床は堅く、流量に応じて河岸が削られるものと考えられるが、川幅と河道深さの比は12-14と安定しており、ほぼ安定した形状を有していた。ただし、市街地付近では河岸侵食が問題となっており、河道がやや不安定である。流量の動態ともあわせて考えると、このあたりで勾配が変化している可能性も考えられる。

シェムリアップ川では集落が川から離れた道路沿いに並んでおりすべての家が井戸水を利用していた。一方、サンカー川では集落が川沿いに集中しており、井戸のある家もあるものの、河川水を直接取水している家が目立った。また、農地の土壌も上記河床、河岸材料と同じく、シェムリアップでは砂質の乾燥した土壌であるのに対し、バタンバンでは粘土質の保水力のある土壌であった。

このように、砂質のシェムリアップ川は透水性が高く地下水は勾配変化点で一気に河川水へ流入し、ここで川幅水深比が大きくなり河道も不安定になっている。そして、これより下流の緩勾配区間では徐々に地下水が流出していることも見て取れた。一方、河岸がシルト、河床が粘土からなるサンカー川は透水性が低く地下水と河川水の交換は限定的である。ただし市街地では局所的に流量が増加し、河岸浸食も問題となっている。この原因ははっきりと解明できなかったが、シェムリアップ川との比較からすると、ここで勾配が変化し局所的に地下水が流入していることが示唆されるが、再び流量が減少する理由については解明できなかった。なお、この地点では乾季でも雨季の高い地下水位が維持されているのも特徴であり、両者に何らかの関係があることも考えられる。

(3) トンレサップ湖の水質に関する検討

シェムリアップ付近におけるトンレサップ湖の水質を把握するために乾季と雨季の調査を行った。乾季の湖岸付近で局所的な富

養化がみられたが、その起源は主に水上集落であり、シェムリアップ起源の人為的負荷による湖水の水質への影響は見られなかった。これは雨季にメコン河の水が大量に流入し、乾季になるとメコン河に戻っていくというトンレサップ湖特有の物質輸送形態が水質を決める支配的な要因になっているためであると考えられる。

また、バタンバンからトンレサップ湖に至る河川の乾季における水質を調査したところ、都市や集落近傍では一部局所的な富栄養化が見られるものの、その影響は下流には及んでおらず、都市起源の負荷が湖の水質に直接的な影響をほとんど及ぼしていないことが示唆された。乾季には河川流量が非常に小さいため、富栄養化物質をほとんど輸送していないためであると考えられる。

(4) トンレサップ湖堆積物に関する検討

トンレサップ湖において、スパーカーを用いた地下地質構造探査を行い、その結果に基づいて、コア試料採取を実施した。また、採取したコア試料を用いた長期的な環境変遷について、詳細な検討を行った。

(5) その他

本研究ならびに既存研究で得られたデータに基づき、手法の確立という観点から、表流水水位の変動に伴う地下水位応答の評価をするための方法論の確立を行った。また、水中に存在するウイルスの定量化に関する新しい方法の開発を実施した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計10件)

Onishi, K., Tokunaga, T., Sugimoto, Y., Yamada, N., Metwaly M., Mogi, K., Shimoda, I. and Iwasaki, Y., 2014, Identifying damaged areas inside a masonry monument using a combined interpretation of resistivity and ground-penetrating radar data. *Exploration Geophysics*, in press. doi: 10.1071/EG14011(査読有)

徳永朋祥・佐野修・星一良・本田博巳・稲崎富士・徂徠正夫・松岡俊文・安原正也・小出仁, 2012, 地下の遅い流体挙動 (Part II)-フィールドと室内実験から見る - : イントロダクション. *地学雑誌*, 122, 8-15, doi: 10.5026/jgeography.122.8 (査読なし)

Tokunaga, T., Sano, O., Hoshi, K., Honda, H., Inazaki, T., Sorai, M., Matsuoka, T., Yasuhara, M. and Koide, H., 2012, An overview: special issue on "The Slow Subsurface Fluid Flow Processes (part II): Field Examples and

Laboratory Experiments". J. Geograph., 122, 1-7, doi: 10.5026/jgeography.122.1 (査読なし)

浅井和見・徳永朋祥・茂木勝郎・後藤宏樹, 2012, 名水を訪ねて(97) アンコール遺跡周辺の水. 地下水学会誌, 54, 117-129, doi: 10.5917/jagh.54.117, (査読なし)

徳永朋祥・本田博巳・佐野修・徂徠正夫・松岡俊文・星一良・安原正也・稲崎富士・三ヶ田均・小出仁, 2011, 地下の遅い流体挙動(Part1)理論・モデル・物性評価: イントロダクション. 地学雑誌, 121, 7-12, doi: 10.5026/jgeography.121.7 (査読なし)

Tokunaga, T., Honda, H., Sano, O., Sorai, M., Matsuoka, T., Hoshi, K., Yasuhara, M., Inazaki, T., Mikada, H. and Koide, H., 2011, An Overview: Special Issue on "The Slow Subsurface Fluid Flow Processes (Part I): Theory, Model, and Physical Properties Estimation". J. Geograph., 121, 1-6, doi: 10.5026/jgeography.121.1 (査読なし)

Hata, A., Katayama, H., Kitajima, M., Visvanathan, C., Nol, C. and Furumai, H., 2011, Validation of internal controls for extraction and amplification of nucleic acids from enteric viruses in water samples. Applied and Environmental Microbiology, 77, 4336-4343, doi: 10.1128/AEM.00077-11 (査読有)

愛知正温・塩苅恵・徳永朋祥, 2011, 地下水面の潮汐応答に関する解析解の導出と伊豆諸島新島における原位置水理特性評価. 地下水学会誌, 53, 249-265, doi: 10.5917/jagh.53.249 (査読有)

Tokunaga, T., Shimada, J., Kimura, Y., Inoue, D., Mogi, K. and Asai, K., 2011, A multiple-isotope ($\delta^{37}\text{Cl}$, ^{14}C , ^3H) approach to reveal the coastal hydrogeological system and its temporal changes in western Kyushu, Japan. Hydrogeology Journal, 19, 249-258, doi:10.1007/s10040-010-0638-5 (査読有)

徳永朋祥, 2010, 日本地下水学会 50 周年記念特集「地下水の開発と保全・管理 - 日本の経験とこれからの挑戦」: はじめに. 地下水学会誌, 52, 5-7, doi: 10.5917/jagh.52.5 (査読なし)

[学会発表](計17件)

Haraguchi, T., Yonenobu, H., Tokunaga, T. and Shimoda, I., 2013, Reconstruction of the past flow channels in the early Holocene at Lake Tonle Sap, Cambodia. 2013 AGU

Meeting of the Americas, Cancun, Mexico, May 15, 2013..

Lun, S. and Tokunaga, T., 2012, Physical understanding of interaction between groundwater and surface water in Battambang by numerical simulation. 日本地下水学会 2012 年春季講演会, 東京大学柏キャンパス, 2012 年 5 月 26 日.

浅井和見・Lun Sambo・徳永朋祥・茂木勝郎, 2012, カンボジア王国バタンバン周辺の地下水の起源と滞留時間. 日本地球惑星科学連合 2012 年度連合大会, 幕張メッセ, 2012 年 5 月 24 日.

徳永朋祥・茂木勝郎・浅井和由, 2011, トリチウム・ SF_6 (六フッ化硫黄) によるアンコール遺跡周辺の地下水の滞留時間推定. 日本地球惑星科学連合 2011 年度連合大会, 幕張メッセ, 2011 年 5 月 25 日. 後藤宏樹・徳永朋祥・茂木勝郎・浅井和見, 2010, カンボジア・シェムリアップ市とその周辺地域の地下水位と水質に基づく地下水流れの検討. 2010 年日本地下水学会春季講演会, 慶応義塾大学矢上キャンパス, 2010 年 5 月 29 日.

徳永朋祥・片山浩之・福士謙介・知花武佳・原口強・多部田茂・茂木勝郎・浅井和見・秋山知宏・端昭彦・松岡達郎・甲斐荘秀生, 2009, 国際観光都市アンコール地域の持続可能な流域水管理のための地下水調査 - 計画と概査結果の報告 -. 2009 年日本地下水学会秋季講演会, 札幌市かでの 2・7, 2009 年 10 月 16 日.

[図書](計1件)

沖大幹・大熊孝・蔵治光一郎・溝口勝・徳永朋祥・清野聡子・小倉紀雄・滝沢智・浅見真理・加藤篤・中山幹康・西村弘・樋口直樹・吉村和就, 2010, 水の知—自然と人と社会をめぐる 14 の視点. 化学同人, 286p.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

徳永 朋祥 (TOKUNAGA TOMOCHIKA)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授
研究者番号: 70237072

(2) 研究分担者

片山 浩之 (KATAYAMA HIROYUKI)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号: 00302779

知花 武佳 (CHIBANA TAKEYOSHI)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号: 10372400

福士 謙介 (FUKUSHI KENSUKE)

東京大学・サステナビリティ学連携研究機構・教授
研究者番号：30282114

多部田 茂 (TABETA SHIGERU)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授
研究者番号：40262406

原口 強 (HARAGUCHI TSUYOSHI)
大阪市立大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：70372852

(3)研究協力者

浅井 和見 (ASAI KAZUMI)
株式会社 地球科学研究所

松岡 達郎 (MATSUOKA TATSURO)
ジオックスコンサルタント株式会社

井上 誠 (INOUE MAKOTO)
有限会社 地球情報・技術研究所

秋山 知宏 (AKIYAMA TOMOHIRO)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教
研究者番号：90452523

茂木 勝郎 (MOGI KATSURO)
東京大学・大学院工学系研究科・技術専門職員

端 昭彦 (HATA AKIHIKO)
東京大学・大学院工学系研究科・博士課程学生

甲斐荘 秀生 (KAINOSHO HIDEO)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・博士課程学生

LUN SAMBO (LUN SAMBO)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・博士課程学生

後藤 宏樹 (GOTO HIROKI)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・博士課程学生

本宮佑規 (MOTOMIYA YUKI)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・修士課程学生