

令和元年5月28日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H05617

研究課題名(和文)カンボジアのトンレサップ湖における生物多様性維持機構の再評価

研究課題名(英文) Reevaluation of mechanisms sustaining the biodiversity in Lake Tonle Sap, Cambodia

研究代表者

塚脇 真二 (TSUKAWAKI, SHINJI)

金沢大学・環日本海域環境研究センター・教授

研究者番号：00222133

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：カンボジアのトンレサップ湖は、季節によって面積が変化する特異性と、淡水域としては世界でも最高レベルの生物多様性で知られるが、同国の社会経済の発展によって自然環境は激変しその豊かな生態系は壊滅の危機に瀕している。そこで、約12年前に実施した生物多様性総合調査の成果と比較しつつ、再度の総合調査を実施し、生物群集や環境条件の現状を明らかにするとともにその変化を解析した。その結果、湖の堆積物や水文環境、底生生物群集には大きな変化は認められないものの、植物プランクトン群集組成や一次生産の調査結果から湖の富栄養化の進行は明らかであることが判明した。また、外来植物の分布域の拡大や外来魚の定着が確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

伸縮する水域として知られ、また淡水域としては最高レベルの生物多様性で知られるカンボジアのトンレサップ湖について、同国の社会経済の発展にともなう自然環境の変化を約12年前の総合学術調査の結果と比較しつつ再調査した。その結果、同湖の生物多様性の現状を明らかにするとともに、約12年間の自然環境の変化を確認することに成功した。同湖はカンボジアの人々の生活や文化に密着した存在であり、アジア熱帯域の淡水生物の多様性の維持に重要な役割を果たしている。UNESCOの生物多様性保護区として世界的に貴重なものでもある。この調査結果は、同湖の広域的かつ長期的な保全へ向けての貴重な基礎資料となるものである。

研究成果の概要(英文)：Lake Tonle Sap in Cambodia is well known as its distinct seasonal changes and the world's highest level of freshwater biodiversity. However, its natural environment has drastically changed due to the recent socio-economic development of Cambodia, the ecosystem is facing danger of destruction. Referring to the results of the comprehensive biodiversity evaluation research of the lake carried out from 2000 to 2006, the current status of biological communities and environmental conditions were clarified in this research, and analysed their changes quantitatively over the 12 years.

As a result, although no significant change was detected in the sediments, hydrological conditions and benthic animal fauna of the lake, it was revealed that the progress of the lake eutrophication was clear on the basis of the results of the phytoplankton flora and primary production of the lake water. Further, the spread of alien plants and the settlement of alien fish were identified in and around the lake.

研究分野：地質学，環境動態解析学

キーワード：トンレサップ湖 生物多様性 生態系 環境動態 カンボジア メコン河 環境汚染

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

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湖沼としては世界最大のトンレサップ湖は、雨季と乾季との間でその面積が 5 倍以上にも変化し、それにもなつて水深も 1~9 m と大きく変わる湖として有名である。雨季末の高水位期になると低水位期の湖畔に繁茂していた植生は水没して一部が浸水林となり、世界でもまれな景観を呈するようになる。また、この湖は世界でも類をみないほどに多種多様で豊富な現存量を有する生物相を擁することで知られる。さらに、この湖は水産資源の重要な供給源としてカンボジアに住む人びとの生活に密着した存在であり、このような豊かな生物相と地域との密着性にもとづき、同湖の一部は UNESCO「人と生物圏計画」の「生物圏保護区 (Biosphere Reserves)」に指定されている。これに加え、アジア有数の大河メコンとトンレサップ川によって連絡する同湖は、長大なメコン水系の生物の保育地として、アジア熱帯域の淡水生物の多様性の維持にもきわめて重要な役割を果たしていると考えられる。

このようにトンレサップ湖は学術的にきわめて興味深い湖沼であり、メコン河流域のすべての生物とそれに依存する人間社会の基盤としてかけがえのない存在である。代表者らはこの湖での学術調査の結果にもとづき、この湖の誕生からその後の自然環境の変動をへて、現在の特異な環境が現出するまでの変化を明らかにするとともに、メコン河との接続によって同湖の埋積作用が事実上停止し、現在の水理的な環境条件が維持されれば、この湖が将来も安定して存在しつづけることを示した (Tsukawaki ed., 2002)。引き続き実施した学術調査では、同湖の生物相をその環境条件とともに調べ、地質学・水文学・植物学・動物学の各分野について、湖の全域における季節ごとの状況を 3 年間にわたって記録保存したうえで、各調査分野の成果をあわせ検討し、この湖の豊かな生態系が、季節によって拡大と縮小とをくり返す同湖固有の特性と、湖畔に繁茂する植生が雨季の増水期に浸水林となり、その浸水林から多量の有機物が湖にもたらされることによって維持されていることを明らかにした (Tsukawaki et al. ed., 2005)。

長年の戦乱に見舞われたカンボジアであったが、1993 年の国民総選挙によって平和が戻り、それとともに内戦中に破壊されつくしたインフラの再整備などの社会基盤整備事業が 90 年代後半から全国的に始まった。しかし、社会経済の基盤が未熟なままでの無計画な開発事業の展開によって、同国の豊かな自然は急激に失われ、さまざまな環境問題がおどろくほどの早さで顕在化してきた。とくにトンレサップ湖北岸にあるアンコール世界遺産を訪れる観光客が 2000 年代から激増し、同世界遺産の観光基地であるシェムリアプでは、観光産業が計画性のないまま発展し、環境汚染や環境破壊が著しく進行した。アンコール世界遺産での無秩序な開発がトンレサップ湖の生態系の破壊に直結することは必至である (Tsukawaki et al. eds., 2008)。

湖の生態系をおびやかすのはカンボジア国内の問題のみにとどまらない。この湖に特有の拡大と縮小の季節によるくり返しは、季節による流量変動が著しいメコン河に接続するという地理的要因による。そのメコン河でのダム建設事業が着々と進行している。ダムの落成によってメコン河の水量が大きく変化することになれば、その影響はトンレサップ湖にも確実におよび、生態系の破壊どころかトンレサップ湖そのものの消失さえ危惧される状況にすらある。

### 2. 研究の目的

カンボジアの社会経済やアンコール世界遺産の観光産業の無計画な発展とともに、同国や同世界遺産の自然環境の破壊が進行し、同国の自然環境の中核といえるトンレサップ湖の豊かな生態系や特有の自然環境はまさに壊滅の危機に瀕している。前回の同湖の生物多様性維持機構の総合調査を実施した 2000 年から 2006 年にかけての時期は、同国が内戦後の復興の時代から開発の時代へと移行する時期にちょうど重なる。同湖に特有の自然環境や豊かな生態系が、この時期に始まったさまざまな開発事業にもなつて近い将来のうちに劣化することが予想された。そこで、生態系の状況を正確に記録保存し、同湖の生物多様性の維持機構を正しく評価しておくことが当時の調査の目的であった。その予想が残念ながら的中し、同湖の変化は誰の目にも明らかなものとなっている。湖畔の森林は大規模に伐採され湖水にはアオコが広がるようになった。外来魚が市場でふつうに売られるようになり、湖畔には外来植物が繁茂するようになった。さらには、同湖と連絡するメコン河では本流へのダムの建設といった大規模な開発事業が現在進行しつつあり、生態系の破壊どころか湖そのものの存続さえ危機にさらされている。

そこで本研究では、約 12 年前となる 2000 年から 2006 年にかけて同湖で実施した生物多様性維持機構調査の成果をふまえ、現在の生態系とその維持機構についての総合調査を再度実施し、同湖の生物群集の現状をまず明らかにすることを目的とした。引き続き、今回の再調査で得られた成果を、前回のそれと比較することで、カンボジアの社会経済の発展にもなつての生態系の変化を定量的に把握することを試みた。さらには、この湖の保全は、カンボジアのみならずメコン河流域のすべての生物やそれに依存する人間社会にとってきわめて重要な課題であることを考え、この湖に特有なアジア熱帯淡水生物相を保全するための方策を検討した。

### 3. 研究の方法

本研究では、トンレサップ湖において、約 12 年前に実施した生物多様性調査と同じく地質学、水文学、植物学、そして動物学の各分野からなる総合調査を同様の手法で再度実施した。現地調査にあたっては、同湖北部のシェムリアプ沖、ならびに同湖南部のチュノック・トルーを重点調査地域に設定した (図 1)。

シェムリアブは、アンコール世界遺産の観光基地としてカンボジアでもっとも開発が進んでいる地域のひとつである。湖畔の森林を伐採してのインフラの整備が計画性のないままに進行している。また、同世界遺産地域では、森林の伐採による土壌の流出や人口の増加にともなう河川の水質汚濁が進んでおり、これらは河川をとおしてトンレサップ湖へ流入する。観光用の外来魚の飼育も盛んである。したがって、湖畔や周辺地域における開発などの影響が、湖の自然環境や生態系に与える影響を確認するにはもっとも適した地域である。一方のチュノック・トルーは、トンレサップ湖とメコン河を連絡するトンレサップ川が同湖と接続する位置にある。雨季の増水期になるとメコン河からの水が堆積物とともに湖へ流れ込み、乾季の減水期になると水が堆積物とともにトンレサップ川をとおってメコン河へ流出する。このように、チュノック・トルーは、湖水や堆積物の移動が同湖ではもっともダイナミックな地域であり、このような環境に適応した植生や生物群集が存在する。また、メコン河からの外来生物、とくに魚類の侵入経路と想定される場所でもある。なお、チュノック・トルーやコンボン・チュナンには同湖最大の漁場とともに水産物の水揚げ市場があり、魚類の採集や外来魚の発見と追跡にはもっとも適したところである。



図1. トンレサップ湖の重点調査地域

北部の調査では、シェムリアブ市に本拠地をおくカンボジア国立アンコール遺跡整備公団が、一方、南部の調査では、プノンベンにあるカンボジア工科大学がカウンターパートである。両機関ともにこれまでいくつもの共同研究や共同事業を実施してきた周知の間柄であり、総合調査は両機関の研究者と合同で実施した。また、試料の処理や研究などの作業にかかる場所の提供や、試料の保管なども両機関に依頼した。

トンレサップ湖の自然環境は、上記のとおり、メコン河からの水の大規模な流入と流出に支配され、増水期（5月～9月）、水深が8mをこえる高水位期（10月）、減水期（11月～2月）、水深が1m以下となる低水位期（3～4月）に大きく区分される。そのため、重点調査地域を中心とする現地調査はこの変化を考慮し、各研究分野合同での総合調査を2016年10月（高水位期、北部）、同年12月（減水期前期、南部）、2017年3月（低水位期、北部）、同年5～6月（増水期前期、北部）、同年8月（増水期後期、北部）、同年10～11月（高水位期、北部・南部）、2018年3月（低水位期、北部）の7回実施した。これに加えて、湖の状況に応じての各分野個別の調査を随時実施した。

総合調査における各調査項目と調査方法、今回の調査で留意した点は以下のとおりである。

- (1) 簡易測深機による湖底地形探査および表層採泥器による堆積物の採取と堆積物組成の解析、前回の調査結果との堆積物組成、とくに粒度組成・鉱物組成の変化の有無の確認。
- (2) 自記式水圧計・水温計ならびにCTDを用いての湖の物理学的データの収集およびCTDを用いての水質の調査、前回の調査結果との水位変動の変化および水質の変化の有無の確認。
- (3) 浸水林域から内陸部にかけての植生調査および地域住民の植物利用状況・生活様式調査、前回の調査時との植生面積や種構成の変化、外来種の侵入と拡散状況の確認、住民生活様式、とくに植物利用状況の変化の確認。
- (4) 乾季でも陸化しない湖沼部ならびに陸化する浸水林域での、湖水のクロロフィル濃度、光環境、一次生産の測定、前回の調査結果との変化の有無の確認。
- (5) プランクトンネットによる浮遊性生物の採集と種構成の調査、表層採泥器による底生無脊椎動物の採集と種構成の調査、および水生昆虫の調査、前回の調査結果との種構成や生息量の変化の有無の確認。とくに今回の調査では、カンボジアではほとんど未解明である水生甲虫の調査を実施した。水生甲虫は水域における環境指標生物として幅広く用いられており、環境変化をさらに長期的にわたって追跡するための基礎資料の作成を目指した。
- (6) 定置網ならびに市場での試料の採集にもとづく湖および周辺水系の魚類の調査、前回の調査結果との種構成の変化、とくに外来種の拡散・定着状況の確認。

これらに調査項目に加えて、広域的かつ長期的な生物相調査の手法として注目されている環境DNA分析が熱帯地域にある同湖での研究に適用できるかどうかの予察的な検討を行った。さらに、生態系の変化を誘引した要因ともいえる内戦後カンボジア社会経済の発展状況についての文献資料調査もあわせ実施している。

各調査項目と役割分担にもとづく研究代表者ならびに分担者、研究協力者相互の連携は図2

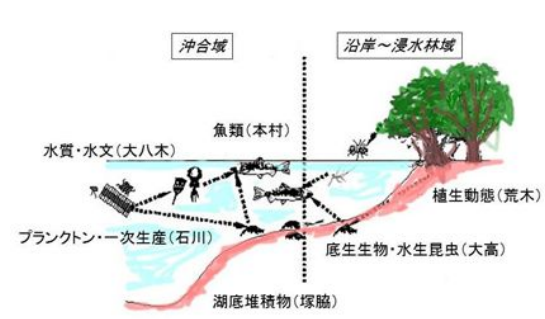


図2. 調査項目と役割分担

に示すとおりである．淡水生態系を維持するための無機的環境条件としての湖底地形や湖底堆積物，水質や水文条件，光環境といった項目をまず確認し湖畔の植生動態を把握する．そのうえで，水中あるいは水底に生息する無脊椎動物群の生息環境を理解し，これらの無機・有機的な環境条件をふまえた上で，魚類の生息状況とその動態を解釈する．そして，これらを総合し，各調査分野における変化，外来種の存在と拡散にとくに留意しつつ，約 12 年前の生態系調査の成果との比較をふまえ，現在の生態系の現状評価を試みた．

#### 4．研究成果

前述の各調査項目それぞれでの期間内の研究の成果を以下にまず記述する．

(1) 湖底堆積物の採集は湖北部と湖南部のそれぞれにおいて，底生生物群集の採集とあわせて 2 本の側線上ならびに同湖南端部の流路沿いで実施した．湖南部のトンレサップ川との接続部主流路沿いで砂質堆積物が 10% 前後となるのをのぞき，湖の主要部では 99% 以上が泥質堆積物から構成され，堆積物に含まれる砂粒子は，おもに極細粒砂大の石英からなり，メコン河からの砂質堆積物の流入は認められない．この結果は前回の調査結果と同じであり，堆積物組成については大きな変化は認められないと結論づけられる．

(2) 調査期間をとおしての水位の変化は湖北部シェムリアプ沖に設置した自記式水圧計によって水温の測定とあわせ実施した．また，CTD を用いての湖の物理的データの収集や水質の観測は，分析用水試料の採集とあわせて湖底堆積物・底生生物群集の採集側線で実施した．2017 年 4 月から 2019 年 4 月にかけての水位変動曲線を図 3 に示す．前回の調査となる 2004 年の最高水位は 8.7m (10 月 3~7 日)，2005 年は 8.8m (10 月 4~5 日) であるが，今回の調査では，2017 年に 7.37m (10 月 11~15 日)，2018 年に 8.62m (9 月 21~25 日) という結果であり，前回の調査時と比べて目立った変化はないといえる．しかしながら，2007 年には最高水位が 6m に満たなかったことや，2011 年には 9m を超える高水位であったことが知られており，水位変動についてはより長期間にわたる観測が望まれる．なお，CTD によって収集した湖水の物理化学的データなどは現在解析中である．

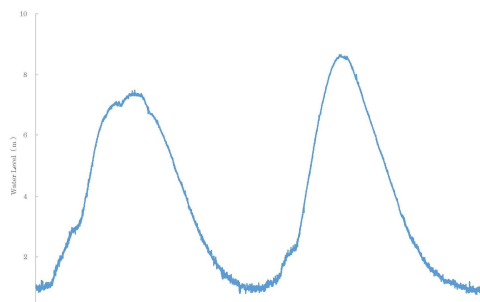


図 3．2017 年 4 月～2019 年 4 月の水位の変化

(3) 湖北部および湖南部の浸水林域から内陸部にかけての植生動態調査の結果から，前回の調査時と今回とで，植生については種構成ならびにゾーネーションの双方で大きな変化は認められなかった．しかし，地域住民の生活様式は大きく変化しており，かつては湖畔の森林を伐採して薪として利用していたが，これにかわって最近では炭の使用が主流となっていた．また，湖北部のチョンクニア地域では，トンレサップ湖の遊覧がアンコール世界遺産につづく第二の観光地となったため，植生を広範囲にわたって伐採しての港湾が 2008 年に建設されており，これによる裸地の拡大や，そこに侵入する外来種があらたな問題となっていた．とくにジャイアントミモザ (*Mimosa pigra*) の広範囲にわたる繁茂によって，北部・南部ともに在来種が駆逐されつつあることが確認された．

(4) 湖水のクロロフィル濃度，光環境，一次生産の測定は，低水位期でも水がある湖の本体と，低水位期には陸化する浸水林域の双方で高水位期に実施した．その結果，いずれでもクロロフィル濃度が前回と比べて明らかに高くなっていること，また，一次生産についても前回よりも今回の調査時のほうが高いことが示された (図 4)．この結果は，湖における光環境の変化や濁度の変化，富栄養化などに起因するものと推定されるが，これらにかかる解析は現在実施中である．

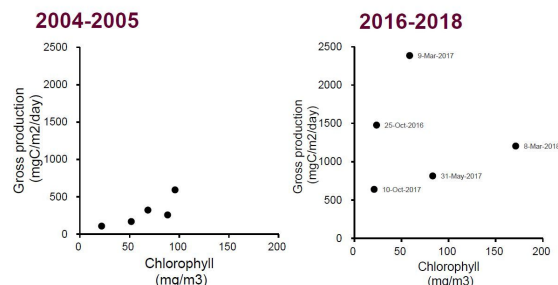


図 4．前回と今回の調査での一次生産の比較

(5) プランクトンネットによる浮遊性生物の調査ならびに表層採泥器による底生無脊椎動物の調査を，前回の調査と同じ側線に沿って湖北部と湖南部で実施した．今回の調査では，湖沖合の植物プランクトン群集が珪藻 (*Aulacoseira granulata*) の卓越で特徴付けられること，沖合と沿岸の両方で藍藻類が豊富であることなどが明らかになった．この結果を前回の調査結果と比較すると，高水位期における植物プランクトン密度の湖北部・湖南部の両方で今回のほうが有意に高く (図 5)，また湖水の透明度の低下も全域で明らかであることから，トンレサップ湖の富栄養化の進行は明らかであると結論づけられた．その一方で，底生動物群集については，

前回の調査と今回とで密度や種構成に有意といえる差異は認められなかった。同湖の環境変化の将来的な変化を追跡するために予察的に行った水生甲虫相の調査では、その一科である鞘翅目ガムシ科を対象に種レベルでの同定を行い、ガムシ科 17 種が種まで同定され、うち 7 種がカンボジアから初記録となる種だった。この種数は今後さらに増加するものと考えられ、水生甲虫の他の分類群とあわせての将来的な検討が望まれる。

(6) トンレサップ湖の魚類相調査では、同湖と関連水系などから合計 3660 個体を今回の調査で採集することができ、同湖に生息する魚類はおよそ 200 種であることが確認された。また、2005 年に同湖での生息が初めて確認された南米からの外来魚レッド・コロソマは、今回の調査においては、同湖や関連水系のあらゆる場所で確認され、同種がカンボジアに完全に定着したことが明らかになった。また、メコン川とトンレサップ川のみが生息すると考えられていた *Polynemus melanochir melanochir* が 1 個体、2016 年 8 月 29 日にトンレサップ湖北部で採集された。この標本 (KAUM-I. 92202) は本種の同湖からの初めての記録となる。

これまでに述べてきた各調査分野個々における実施期間中の成果については、2019 年 1 月に国内研究者による研究集会にて情報交換・意見交換を実施し、これをふまえてのカンボジア側カウンターパートや関連機関との情報交換ならびに調査結果を相互に参照しつつとりまとめるための国際ワークショップを 2019 年 3 月にカンボジアのシェムリアプで開催した。現時点では、トンレサップ湖の堆積物組成や水位変動・水温といった水文環境、湖北部・湖南部の底生生物群集には前回の調査時と今回とで大きな変化は認められないものの、プランクトン群集組成や一次生産の調査結果から湖の富栄養化の進行は明らかであるといえる。また、湖半部での開発事業にともなう裸地の拡大や地域住民の植物利用形態の変化による外来植物の広範囲にわたる拡散が確認され、外来魚の 1 種がカンボジアに完全に定着していることが明らかになった。また、湖の環境の変化を広域的かつ長期的に今後継続するための、水生甲虫相の調査や環境 DNA の試料の採集も予察的ながら実施することができた。これらの結果を定量的にとりまとめる作業は、個々の調査分野におけるさらなる解析とあわせて現在実施中あり、その結果をまわってトンレサップ湖の生物多様性を長期的に保全するための対策を検討する予定である。

#### < 引用文献 >

Tsukawaki, S., Araki, Y., Oyagi, H., eds. *Proceedings of the International Symposium on Evaluation of the Present Situation of Environmental Pollution and Destruction in the Angkor Monument Area in Cambodia*. UNESCO Hall, Siem Reap, Cambodia, 2008, 154p.

Tsukawaki, S. ed., *Proceedings of the First International Symposium on Evaluation of Mechanisms Sustaining the Biodiversity in Lake Tonle Sap, Cambodia*. Ministry of Industry, Mines and Energy, Cambodia, Phnom Penh, Cambodia, 2005, 104p.

Tsukawaki, S. ed., *Proceedings of the International Symposium on Environmental Changes of Lake Tonle Sap of Cambodia during the Last 20,000 Years*. Ministry of Industry, Mines and Energy, Kingdom of Cambodia, Phnom Penh, Cambodia, 2002, 59p.

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

Oyagi, H., Ishikawa, T., Tsukawaki, S. et al., Seasonal changes in water quality as affected by water level fluctuations in Lake Tonle Sap, Cambodia, *Geographical Review of Japan Series B*, 査読有, Vol. 90, 53-65, 2017.

[学会発表] (計 13 件)

Ohtaka, A., Composition and abundance of net plankton and zoobenthos in Lake Tonle Sap, with special reference to the recent changes, *Research Meeting on the Progress Results of "Tonle Sap EMSB Phase 2: Evaluation of Mechanisms Sustaining the Biodiversity in Lake Tonle Sap, Cambodia"*, 2019.3.16, Siem Reap (Cambodia)

#### 6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：大高 明史

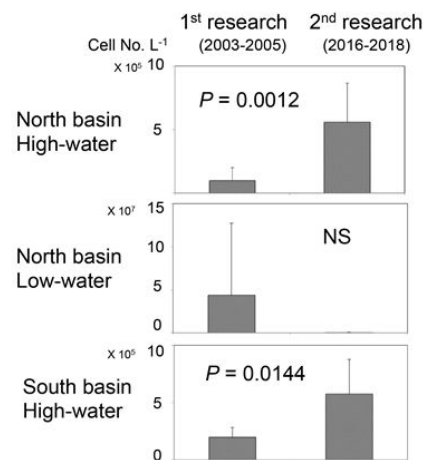


図 5. 今回と前回の調査での総植物プランクトンと動物プランクトン密度の比較

ローマ字氏名：OHTAKA, Akifumi

所属研究機関名：弘前大学

部局名：教育学部

職名：教授

研究者番号(8桁)：20223844

研究分担者氏名：本村 浩之

ローマ字氏名：MOTOMURA, Hiroyuki

所属研究機関名：鹿児島大学

部局名：総合研究博物館

職名：教授

研究者番号(8桁)：90433086

研究分担者氏名：石川 俊之

ローマ字氏名：ISHIKAWA, Toshiyuki

所属研究機関名：滋賀大学

部局名：教育学部

職名：准教授

研究者番号(8桁)：50396313

研究分担者氏名：荒木 祐二

ローマ字氏名：ARAKI, Yuji

所属研究機関名：埼玉大学

部局名：教育学部

職名：准教授

研究者番号(8桁)：00533986

研究分担者氏名：大八木 英夫

ローマ字氏名：OYAGI, Hideo

所属研究機関名：日本大学

部局名：文理学部

職名：助教

研究者番号(8桁)：50453866

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：蛭田 眞平

ローマ字氏名：HIRUTA, Shimpei

研究協力者氏名：山中 裕樹

ローマ字氏名：YAMANAKA, Hiroki

研究協力者氏名：蓑島 悠介

ローマ字氏名：MINOSHIMA, Yusuke

研究協力者氏名：青木 あい

ローマ字氏名：AOKI, Ai