

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2014～2016

課題番号：26304002

研究課題名(和文) マレーシア汚濁淡水源におけるエコゲノミクスを用いた浄水処理障害微生物の実態調査

研究課題名(英文) Investigation on the actual condition of microorganisms with disability to purification treatment using ecogenomics in polluted freshwater sources in Malaysia

研究代表者

杉浦 則夫 (SUGIURA, Norio)

筑波大学・国際室・特命教授

研究者番号：10302374

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：クアラルンプール市の水源となっているSemenyih damとBatu dam、およびその流出河川、レクリエーション水域であるTitiwangsa 湖の調査と社会科学的解析を実施展開した。水源であるダム湖では、窒素やリンおよびクロロフィルa濃度が低く水質が良好といえた。しかし顕微鏡観察結果とエコゲノミクス解析結果から、有毒物質を産生する藍藻類であるMicrocystis属も検出された。そのため良好な水源水質の維持が重要であり、汚染防止に資する流域管理のための、廃棄物の再資源化の社会システムを構築することで、日本発の先端技術が社会実装できることが社会科学的解析より明らかになった。

研究成果の概要(英文)：We conducted a survey and social scientific analysis of Batu dam river from Batu dam, titiwangusa lake which is recreation lake, and two drinking water reservoirs, semenyih dam and Batu dam for Kuala Lumpur city, Malaysia. The water reservoir dam lakes were good water quality focusing on nitrogen, phosphorus, and Chl.a concentration. However, microscope observation and eco-genomics analysis revealed microcystin-producing cyanobacteria, Microcystis sp. in lake water bodies. Therefore, it is important to maintain good water source quality, and social scientific analysis revealed that new Japanese technology can be implemented socially by constructing a social system of waste recycling for watershed management that contributes to maintain water source quality.

研究分野：生態工学、水道工学

キーワード：環境分析 モニタリング 微生物 水資源 人間生活環境

## 1. 研究開始当初の背景

経済発展と環境保全の同時進行が希求されているが、発展途上国では水質汚濁を代表として様々な環境問題が顕在化しているのが現状である。加えて温暖化により、有毒物質や臭気物質産生、ろ過閉塞、凝集沈殿障害といった水利用障害を引き起こす藍藻類が優占化する藍藻類ブルーム「アオコ」の発生頻度が高まることが予測されている（Science 2008、他）。杉浦らは、これまでに気温上昇に伴う水温上昇により植物プランクトン相の優占種が藻類から浄水処理障害を引き起こしやすい藍藻類に変遷することを室内研究やモニタリング研究から報告してきた（Fujimoto *et al.* *Limnol. Oceanogr.*, 1997, Fujimoto *et al.* *Env. Tech.*, 1994、他）。従って温暖化に起因する現象に賢く適応した浄水処理、環境浄化技術の構築は焦眉の課題である。しかしながら、熱帯雨林気候での浄水処理障害微生物、特に有毒物質産生藍藻類やカビ臭物質産生藍藻類・放線菌の環境モニタリング解析の報告例は極めて少ない。この為、浄水障害微生物の挙動が予測できないことから水源管理や上水や農業用水の利用に著しい障害をもたらしている。

マレーシアは国民1人当たりの水資源が年間約 21,500 m<sup>3</sup>（日本は約 3,200 m<sup>3</sup>）と恵まれているが、急速な経済発展からそれらの水源の適切な保全が急務となっている。最も需要があるのは農業用水分野であるため、水源の有毒藍藻類やカビ臭物質産生藍藻類・放線菌の優占化は、避けるべき事象であり、有効な流域管理、水源管理の方策が産官民から強く望まれている。そうした要望を受け、第10次マレーシアプランの中に「水の安全性を高めるため、水源管理に関する長期的戦略を策定する」ことが盛り込まれている。ここにおいて、これまでの日本のマレーシアにおける調査は、河川環境等の水源を保全するための下水調査協力が主で、上水や用水への調査協力はほとんど行われていない。近年、東京都な

ど自治体が協力関係を築き始めており、我が国の水(みず)産業の海外進出のために熱帯地域における流域管理、水源管理を含めた水利用障害対策に資する知見を得ることが渴望されている。そこで本計画は、熱帯地域で水源が豊富なマレーシアを対象として、水利用障害予測において重要な指標である植物プランクトン相、とくに有毒藍藻類とかび臭物質産生微生物およびそれら代謝産物の分解細菌群の挙動解析を行う。さらに浄水処理障害予測に基づく流域管理、水源管理の方策を提言する。本研究成果により熱帯地域での水事業の海外進出に資する知見を得られることが強く期待される。

## 2. 研究の目的

本研究は、水源および水域の水質と浄水処理障害微生物の実態、環境技術の社会実装の課題を明らかにすることを目的とした。この達成のために、発展著しいマレーシアの首都クアラルンプール周辺の水域と水源を調査し、浄水処理障害微生物の実態を解析した。加えて、マレーシアを含むアジア諸国において、環境汚染原因となりやすいバイオマス廃棄物を亜臨界水技術によって資源循環化させるシステムの成立条件に関して調査し、課題の抽出および解決策を分析した。

## 3. 研究の方法

### (1) 水域モニタリング調査研究

マレーシア現地の研究者の協力を得て、クアラルンプール市近郊の貯水池、湖沼、河川の予備調査を初年度に実施し、2年次以降の水域モニタリング対象水域を決定した。対象水域は、クアラルンプール市の水源となっている Semenyih ダムと Batu ダム、およびその流出河川、レクリエーション水域である Titiwangsa 湖とした。毎月1回、サンプリングを実施し、窒素、リン、クロロフィル a (Chl.a) 分析を実施した。加えて、水サンプルから総 DNA を抽出し、エコゲノミクス解析に供した。

加えて、プランクトンネットを用いて採水したサンプルを顕微鏡観察し、藻類および藍藻類を分析した。

#### (2) 環境保全技術導入への社会経済的解析

日本及び台湾・中国におけるバイオマス廃棄物の亜臨界水技術による資源循環システムの先行事例を対象とするケーススタディをベースとして、当システムの成立条件を技術側面及び社会経済側面から解析した。日本の先行事例は、未利用木材からの家畜用木質飼料の生産システム（北海道・北見市）とし、台湾・中国の先行事例は、家畜糞尿や食品残渣からの完熟・高機能堆肥生産システムとした。

### 4. 研究成果

#### (1) 水域モニタリング調査研究

研究開始当初に短期モニタリング調査を行い、長期モニタリング調査水域を決定した。その結果、クアラルンプール市の水源となっている Semenyih ダムと Batu ダム、およびその流出河川、レクリエーション水域である Titiwangsa 湖について現地協力研究者と共同して水源水域の調査を実施展開した。

水源であるダム湖では、窒素やリンおよびクロロフィル a 濃度が低く水質が良好といえた。しかし、流出河川は、下流にいくに従い、窒素およびリン、クロロフィル a 濃度が増大した。とくに、アンモニア態窒素濃度が、亜硝酸態窒素と硝酸態窒素濃度の合計値より高い場合もあった。微生物群集構造の変動を解析するために行った、16S rRNA 遺伝子を標的としたエコゲノミクス解析結果から、窒素濃度が高い水域からは、硝化細菌群がほとんど検出されなかった。一方、窒素濃度が低かった Titiwangsa 湖や Semenyih ダム、Batu ダムおよびその流出直後の河川からは、*Nitrospira* 属の検出が多かった。藍藻類は、Semenyih ダムと Batu ダムにおいて *Synechococcus* 属が最多検

出された。加えて、有毒物質を産生する *Microcystis* 属も検出され、Semenyih ダムよりも Batu ダムより多く検出された。従って、今後、水源の富栄養化が進行していくと異常増殖する恐れがある。マレーシアの人口と平均寿命は、増加傾向にあることや、発展著しい内水面養殖業による水質汚染問題、ダム流出河川の汚染問題から、良好な水源水質の維持のためには、継続的な水源水質のモニタリングと汚染を防ぐための流域管理が重要である。

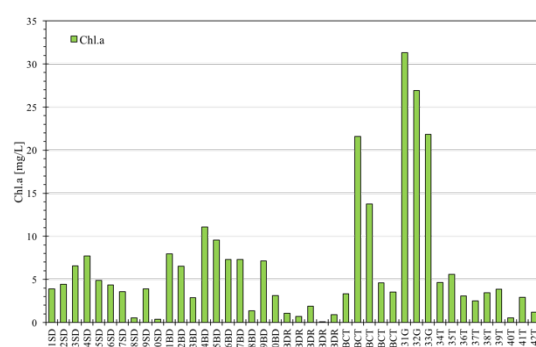


図1 各地点における Chl.a の変動

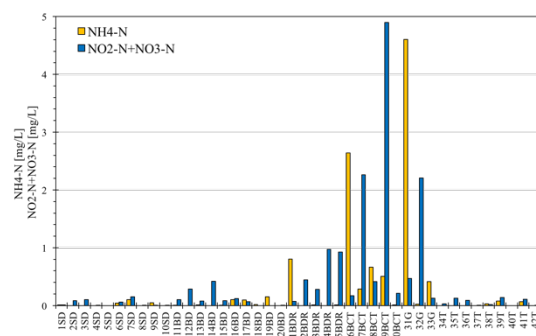


図2 各地点の NH4-N と NO<sub>x</sub>-N の変動

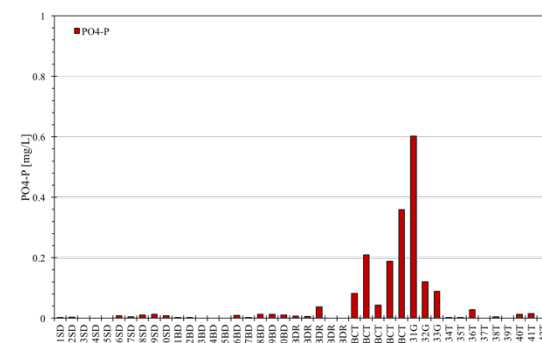


図3 各地点の PO<sub>4</sub>-P の変動

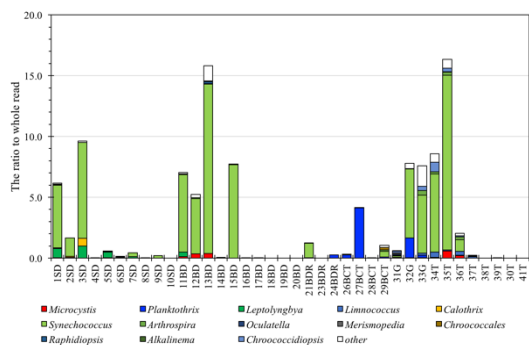


図4 各地点の全細菌に対する藍藻類の「属」毎の割合の変動

(2) 環境保全技術導入への社会経済的解析  
マレーシアを含むアジア諸国における急激な経済成長や都市化に付随して急増する都市廃棄物や下水汚泥などの水質汚濁負荷物を削減するため、バイオマスを高速加水分解・解繊して資源化する日本発の先端的な亜臨界水反応装置(バッチ式)の適用可能性について、技術側面と社会経済側面から分析評価した。

第一に、亜臨界水技術による高速加水分解処理・解繊物(以下、亜臨界水処理・解繊物と呼ぶ)の資源としての価値評価が極めて高いことがわかった。難分解性物質の木質材の場合、堅牢なりグニン層構造が壊れ、セルロースが糖類に転化されるため、牛の嗜好性が高く、良質な木質飼料が低コストで得られた。また、家畜糞尿や食品残渣の場合、従来の堆肥化技術では、発酵から熟成に到るまでに長時間を要することが課題であった。しかし、亜臨界水技術では、1時間程度の短時間で高分子化合物が低分子化され、放線菌等の有用土壌菌が繁殖しやすい高機能堆肥向けの素材に変わることが明らかになった。

第二に、亜臨界水技術による解繊物のメタン発酵原料としての価値評価も高いことを解明した。従来のメタン発酵技術では、難分解性の下水汚泥等の初期段階の加水分解に長時間を要するうえに、可溶化が十分でなく、バイオガスの発生量が少ないという点に難点があった。これに対して、亜臨界水処理・解繊物では、可溶化が進むとともに、相当部分が低

分子化合物や有機酸に転換される結果、有機酸を栄養塩類とするメタン菌にとっての優れた栄養物となる。このため、亜臨界水処理・解繊物からのバイオガス量が1.5~2.8倍に増加するほか、発酵時間が35日から10日程度に短縮されることが明らかになった。

第三に、亜臨界水反応装置(圧力容器2m<sup>3</sup>)の運転に要するエネルギーを見ると、ワンバッチ当たりA重油平均25Lと電力150kWh、MJ換算では1,100MJで、焼却に比べるとはるかにCO<sub>2</sub>発生量が少ないことがわかる。メタン発酵では、ワンバッチ当たりの亜臨界水処理・解繊物から60Nm<sup>3</sup>以上のバイオガス量の増加が見込めれば、エネルギー収支は釣り合うことが明らかになった。

第四に、亜臨界水処理・解繊物の生産原価と市場価値の差異に着眼すると、生産原価はトン当たり2万円前後のレベルであるのに対して、市場価格は国や地域により大幅に異なることが明らかになった。堆肥の市場化価格の場合、日本国内では、最大でもトン当たり1万円程度にすぎないが、台湾・中国では2万円を超えるため、民間単独での事業化が可能となる。その他のアジア諸国の場合も、堆肥の市場価値は比較的高いので、都市廃棄物からバイオマス成分を分別できれば、資源循環システムの成立条件が整えられる可能性が高いことが明らかになった。

当技術の適用に際しての最大の課題は、都市廃棄物からバイオマス成分を分別する社会システムをいかにつくるかという点にある。マレーシア政府との調整により、パゴウ学園都市において二基のプラント設置(反応槽容量2m<sup>3</sup>(2基))に対する予算付けを得て、平成29年6月に稼働開始見込みである。同国では、学園都市における分別システムモデルづくりから始まり、今後国内の諸都市全体に広めていく予定である。

以上をまとめると、本研究期間で対象とした水源の栄養塩濃度は低いものの、水源から

流下する河川の栄養塩濃度は高く、栄養塩流入は課題となっている状況が明らかになった。加えて水源では、世界中で問題となっている障害藍藻類が顕在化しており、ひとたび栄養塩の流入があれば、「アオコ」を呈する状態に変化すると考えるのは容易な状況であった。このために、従来下水道などの栄養塩類の水域・水源への流入削減・防止策のみならず、発生現場において地産地消も可能となる亜臨界水技術を用いた水質汚濁負荷物の資源循環化は、分散型処理システムとして有望であり、現地の無過失責任を負う可能性がある事業体に社会実装されることが期待された。

#### 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1件)

- ① Siti Norayuni Mohd Zulkeffle, Yus Amira Yusaimi, Norio Sugiura, Koji Iwamoto, Masafumi Goto, Motoo Utsumi, Zuriati Zakaria, Hirofumi Hara, Phenotypic and genetic characterization of multidrug-resistant *Staphylococcus aureus* in the tropics of Southeast Asia, *Microbiology* 162(12), pp. 2064-2074, doi: 10.1099/mic.0.000392 査読有.

[学会発表] (計10件)

- ① Jun Matsushita, Saburo Matsui, Tomonao Miyashiro, and Naoko Nakagawa, Technical Options to Improve Municipal Waste Management Mode based on Formulating Biowaste Recycling Links, 7-th Civil Engineering Conference in Asian Region (CECAR'7), 2016.8.30 – 2016.9.2, ハワイ (アメリカ合衆国)
- ② Aeyshah Abang Kassim, Nurul Syahirah Shamsol Anuar, Hirofumi Hara, Nor'azizi Othman, Zuriati Zakaria, Norio Sugiura, and Motoo Utsumi, Isolation and Molecular Detection of Geosmin Producing Bacteria from

Source of Drinking Water, Malaysia, International Conference on Sustainable Initiative (ICSI2015), 2015.8.25, クアラルンプール (マレーシア)

- ③ Yus Amira Yusaimi, Hirofumi Hara, Nor'Azizi Othman, Zuriati Zakaria, Norio Sugiura, and Motoo Utsumi, Identification of Multidrug-Resistant *Escherichia coli* Isolated from River in Kuala Lumpur, International Conference on Sustainable Initiative (ICSI2015), 2015.8.24, クアラルンプール (マレーシア)
- ④ Norio Sugiura, Hideaki Maseda, Maki Uwate, Kazuya Shimizu, Kunihiko Okano, Motoo Utsumi, Koji Iwamoto, Masafumi Goto, and Tomoaki Itayama, Microcystin Degradation in *Sphingopyxis* sp. C-1, International Conference on Sustainable Initiative (ICSI2015), 2015.8.24, クアラルンプール (マレーシア)
- ⑤ Ezza Atikah Marsid, Norio Sugiura, Zuriati Zakaria, Nor'azizi Othman, Motoo Utsumi, Koji Iwamoto, Masafumi Goto, and Hirofumi Hara, Microbial Diversity in Disturbed and Undisturbed Peat Swamp Forest and Isolation of Cyanobacteria, International Conference on Sustainable Initiative (ICSI2015), 2015.8.24, クアラルンプール (マレーシア)
- ⑥ Jun Matsushita, Saburo Matsui, Tomonao Miyashiro, Norio Sugiura, Naoko Kaida, and Naoko Nakagawa, Case Study on Biowaste Recycling System Models linked with Value-added Probiotic Agriculture, International Conference on Sustainable Initiative (ICSI2015), 2015.8.24, クアラルンプール (マレーシア)
- ⑦ Atiqqoh Apandi, Hirofumi Hara, Zuriati Zakaria, Norio Sugiura, Nor'azizi Othman, and Motoo Utsumi, Biodegradation of Prazosin from Effluent of Hospital Wastewater and Nearby Rivers in Klang Valley, International Conference on Sustainable Initiative (ICSI2015), 2015.8.24, クアラルンプール (マレーシア)

- ⑧ Nor Farhana Mohd Barnoh, Nurtasbiyah Yusuf, Analhuda Abdullah Tahir, Nuurul Nadrah Mohd Said, Zuriati Zakaria, Norio Sugiura, Nor'azizi Othman, Motoo Utsumi, and Hirofumi Hara, The Isolation of Lignin-degrading Bacteria from Decayed Empty Fruit Bunch Obtained from Oil Palm Plantations, International Conference on Sustainable Initiative (ICSI2015), 2015.8.24, クアラルンプール (マレーシア)
- ⑨ Nurul Syahirah Shamsol Anuar, Motoo Utsumi, Norio Sugiura, Zuriati Zakaria, Nor'azizi Othman, Koji Iwamoto, Masafumi Goto, Hirofumi Hara, Characterization of Musty Odor Producing Actinomycetes in Malaysia, International Conference on Sustainable Initiative (ICSI2015), 2015.8.24, クアラルンプール (マレーシア)
- ⑩ Jun Matsushita, Tomonao Miyashiro, Saburo Matsui, Naoko Nakagawa, Norio Sugiura, Masafumi Goto, Technical and Socioeconomic Aspects of Multiple Biowaste Recycling System linked with Value-added Organic Agriculture, 9th IWA International Symposium on Waste Management Problems in Agro-Industries, 2014.11.24 – 2014.11.26, ザ・クラウンパレス新阪急高知 (高知市)

[その他]

ホームページ等

筑波大学水環境生態工学研究室

<http://nc.bsys.tsukuba.ac.jp/Lab-Top/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

杉浦 則夫 (SUGIURA, Norio)

筑波大学・国際室・特命教授

研究者番号：10302374

### (2) 研究分担者

中村 幸治 (NAKAMURA, Kouji)

筑波大学・生命環境系・教授

研究者番号：40212097

内海 真生 (UTSUMI, Motoo)

筑波大学・生命環境系・准教授

研究者番号：60323250

甲斐田 直子 (KAIDA, Naoko)  
筑波大学・システム情報系・助教  
研究者番号：60456704

松下 潤 (MATSUSHITA, Jun)  
中央大学・研究開発機構・教授  
研究者番号：60327757

板山 朋聡 (ITAYAMA, Tomoaki)  
長崎大学・工学研究科・教授  
研究者番号：80353530

岩見 徳雄 (IWAMI, Norio)  
明星大学・理工学部・准教授  
研究者番号：00353532

間世田 英明 (MASEDA, Hideaki)  
徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス  
研究部・准教授  
研究者番号：10372343

原 啓文 (HARA, Hirofumi)  
長岡技術科学大学・アジア・グリーンテック  
開発センター・客員研究員  
研究者番号：80511071

岡野 邦宏 (OKANO, Kunihiro)  
秋田県立大学・生物資源科学部・助教  
研究者番号：30455927

清水 和哉 (SHIMIZU, Kazuya)  
筑波大学・生命環境系・准教授  
研究者番号：10581613

### (3) 研究協力者

Zuriati Zakaria (ZAKARIA, Zuriati)

岩本 浩二 (IWAMOTO, Kouji)