

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2007～2010

課題番号：19206056

研究課題名(和文) 活性汚泥法に取って代わる無曝気・超省エネ方式の次世代型下 wastewater 処理システムの創成

研究課題名(英文) Development of energy-saving novel wastewater treatment systems

研究代表者

原田 秀樹 (HARADA HIDEKI)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70134971

研究成果の概要(和文)：国内においてパイロットスケールの UASB-DHS システムを運転し、下水処理における UASB および DHS における余剰汚泥発生メカニズム、微生物群集構造解析などの基礎的研究を行い、そのメカニズムを明らかにした。また、DHS 単独あるいは DHS-USB システムを用いて、高濃度アンモニア性窒素含有廃水および埋立地浸出水処理への DHS リアクターの適用性拡大を行った。また、インドにおいては、現地のプラクティカルな条件下で、新型担体のスタートアップ特性および処理性能を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Sewage treatment mechanisms in terms of excess sludge production and microbial community structures of a UASB-DHS system was investigated. In addition, applicability of DHS reactor to a wastewater containing high strength of ammonium-nitrogen and a landfill leachate was also investigated. New media for DHS reactor was introduced in a reactor in India, and investigated its start-up characteristics under on-site practical conditions.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	11,600,000	3,480,000	15,080,000
2008年度	9,000,000	2,700,000	11,700,000
2009年度	8,200,000	2,460,000	10,660,000
2010年度	8,200,000	2,460,000	10,660,000
年度			
総計	37,000,000	11,100,000	48,100,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木環境システム

キーワード：上下水道

1. 研究開始当初の背景

汚染された水に起因する疾病は、開発途上国では最も深刻かつ緊急を要する環境問題である。アジアの開発途上国では生活排水、産業排水等の未処理放流により公共水域の汚濁が深刻化しており、安全な水資源と水環境を確保することが困難な状況にある。それゆえ途上国が適用可能な“self-sustainable”な下水処理システムを整備してゆくことが要求されている。我々研究グループは長年、

途上国に適用可能な下水処理技術の開発に携わってきた。UASB 法（上昇流嫌気性スラッジブランケット反応器：upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor）と DHS リアクター・（スポンジ担体懸垂好気性ろ床方式：Down-flow Hanging Sponge Reactor）を組み合わせた新規下水処理システムは、エアレーション不要・余剰汚泥生成抑制の省エネルギー・環境低負荷型の新規下水処理装置であり、気候の温暖な（嫌気性処理に有利）途上国で

は、コストの高い活性汚泥法の代替として大きな可能性を秘めている。UASB 法を下水のような低濃度廃水に適用しようとする研究はようやく途についたばかりであり、現在ブラジル、コロンビア、インド、中国、インドネシアの途上国において、オランダ、アメリカ等の技術先進国が技術援助する形で大規模なデモプラントによる実験研究が進行中である。しかし、嫌気性法である UASB 法単独では良好な水質が得られない等の問題があり、このため嫌気性処理水のポリッシュアップのためのポスト・トリートメントとして浮遊増殖型や付着増殖型のいくつかのプロセスが提案されている。増殖速度の遅い硝化菌などを保持するには高い SRT が可能な付着増殖型が有利であり、最近では閉塞防止用の空隙率の高い充填材も開発されている。しかしながら、浸漬型のリアクターでは好気性処理を行うにはエアレーションが不可欠である。ラグーン（オキシデーション・ディッチ）法は省エネルギー型の処理方式であるが、広大な土地取得が困難になっている途上国の大都市圏域では不適であり、省スペース型である本提案システム（UASB+DHS）リアクターの組み合わせが最も適している。本システムを下水処理に適用しようとしている研究は、もちろん国内外を通じて申請者のグループのみである。

2. 研究の目的

長年にわたって開発してきた、UASB 法（嫌気性）とスポンジ担体懸垂型リアクター（好気性）を組み合わせた新規下水処理システムは、エアレーション不要の省エネルギー・環境低負荷型の新規下水処理装置である。インド政府森林環境省（MOEF）河川環境保全局（NRCD）が、われわれの提案システム（UASB+DHS）を高く評価し、実証プラントを建設し、国際共同開発研究を呼びかけてきている。本提案システムは、実用化の一手前まで来ているが、何故卓越した処理性能を有しているのかと云った詳細な微生物反応学的メカニズムや、実用化のためのスケールアップの問題について詳細な検討をする必要がある。そこで、本研究プロジェクトでは国内（東北大学・長岡技術科学大学）と途上国（インド工科大学デリー校 IIT Delhi）のあいだで現地一体型の国際共同研究体制を構築して、途上国の実状に合致した適用可能な超低コストの新規下水処理システムの実用化に向けた技術体系を確立する。

(1) インド政府によって建造設置された実証

プラント（デリー郊外カルナル市）を第2世代型（スポンジカーテン型）から第3世代型（ハードスポンジ・ランダムパッキング型）に改造して、長期連続処理試験を実施し、途上国の気候や下水性状に合致したプラクティカルな条件下での実規模での問題点の把握と対応策を検討して、実用化技術を完成させる。

(2) 国内（実施場所：実下水処理場に設置）でのセミ・パイロットプラントによる長期連続実験を実施し、微小電極や分子生物学的手法などの基礎的研究ツールを用いて UASB、DHS の各リアクターの保持微生物叢の動態解析と機能評価を行い、硝化・脱窒機能の強化によって提案システムの先進国地域での適用可能性を拡大する。また、適用種の拡大を図る。

3. 研究の方法

海外実験サイトとの連携による途上国に適用可能な UASB-DHS システムの開発では、インド政府環境森林省（MOFE）河川環境保全局（NRCD）が建造設置したプロトタイプ型（G2型）の既存 DHS パイロットプラント（デリーから 150km の地方都市に既存）を新世代型（G3型）に改造して、気候、原廃水性状等の現地の実状に合致したプラクティカルな条件下で、長期連続実証試験を実施して、途上国が適用可能な“self-sustainable”な衛生リスク低減技術としての新規下水処理システムの実用化技術を確立する。

国内実験サイトでの UASB-DHS システムの基礎的研究では、下水処理場に設置するパイロットスケール UASB-DHS システムを用いて、連続処理特性の他、UASB および DHS リアクターにおける余剰汚泥発生メカニズムおよび微生物群集構造を解明する。また DHS 単独、あるいは DHS-USB リアクターを用いて特に硝化に着目した廃水処理プロセスを開発する。

4. 研究成果

下水を処理する UASB (Up-flow Anaerobic sludge blanket) (HRT=8 時間) の後段に、好気性生物処理法である DHS (Down-flow Hanging Sponge) (HRT=3.2 時間) を設置し、2年以上の連続運転を行い、DHS における余剰汚泥発生量の抑制要因を評価した。DHS における除去 BOD あたりの汚泥流出量は 0.25 g-VSS/g-BOD_{removed} であった。DHS 保持汚泥は、酸素消費速度が水温 25°C で最大 0.18 gO₂/g-VSS·day であった。一方 DHS は保持汚

泥濃度が平均 26.9 g-VSS/L-sponge と高いため COD_{Cr}汚泥負荷は約 0.2 g-COD_{Cr}/g-VSS-day と低く維持された。また DHS 保持汚泥には微小動物が生息しており、流下長 0.4 m における個体数は、線虫類で 50 個体/mg-SS、輪虫類で 40 個体/mg-SS、貧毛類で 20 個体/mg-SS、ミジンコで 10 個体/mg-SS であった。このため DHS では、保持汚泥の酸素消費速度および微小動物の生息数は活性汚泥と同程度であるが、保持汚泥量が多いために汚泥負荷が低く維持されることから、汚泥増殖量と同程度の汚泥分解量が得られる結果、余剰汚泥の発生が抑制されると考えられた。

温帯地域における実下水処理 UASB の処理性能と保持汚泥性状の評価を行った。UASB には中温消化汚泥を植種とし、HRT8 時間、水温 10-28°C で 700 日間の連続運転を行った。UASB の平均汚泥濃度は 683 日目においてカラム平均で 20.8 g-VSS/L となった。COD 汚泥負荷は 0.05 gCOD/g-VSS-day の低いレベルであった。平均全 COD 除去率は 63% であった。除去 COD に対する VSS 転換率は全運転期間で 0.020 g-VSS/g-COD_{removed} と低いレベルとなったが、これは汚泥が高濃度に保持されることより汚泥増殖が抑えられたためと考えられた。また、保持汚泥はグラニュール化したことから、SVI 約 50 ml/g-SS 以下の良好な沈降性を示した。SRT は約 250 日に達した。このため、UASB はセルロースなどの固形性有機物を汚泥に蓄積した後に分解させるメカニズムにより、安定した処理水質を獲得したと考えられた。

都市下水を処理している UASB-DHS システムの G3 型 DHS リアクターの微生物群集構造を rRNA アプローチを用いて解析した。クローン解析による結果はリアクター上・中・下部において微生物群集構造が異なっていることを示していた。微生物多様性はリアクター上部において最も低く、*Dechloromonas* 属に近縁なクローンが全体の約 40% を占めた。このクローンの優占化は、DHS リアクターにおける有機物分解が好氣的分解の他、嫌氣的酸発酵と *Dechloromonas* 属による低級脂肪酸分解の組み合わせにより行われている可能性を示唆していた。また UASB 処理水に含まれる溶存メタンを資化していると考えられるメタン酸化細菌に近縁なクローンも検出された。アンモニア・亜硝酸酸化に関わる微生物種に近縁なクローンは、リアクター下部において検出された。Real-time PCR 法による各種微生物の rRNA 遺伝子の定量結果は、アンモニアおよび亜硝酸酸化細菌の存在率がリアクター中・下部に行くにつれて増加す

ることを示していた。リアクター上部からのアンモニア除去は、活性汚泥と同程度以上のアンモニア酸化細菌群の存在率に加え、DHS リアクターの高い汚泥保持能力および酸素供給能力に由来する可能性が示唆された。またリアクター下部におけるアンモニア酸化細菌および亜硝酸酸化細菌の高い存在率は、DHS リアクターが一過的なショックロードを許容し得る能力を持っていることを示唆し、安定した処理水質が得られる一因であると考えられた。

DHS の適用性拡大のために、高濃度無機塩類を含む浸出水の硝化を試みた。アンモニア性窒素負荷速度 0.3 kg N/m³-sponge/d で処理したとき、DHS では人為的な曝気を行わなかったにも関わらず、アンモニア除去速度 0.27 kg N/m³-sponge/d を達成した。後段の脱窒処理 USB リアクターとのシステム全体でも、浸出水中の窒素の 90% を除去することができ、現行処理方式の接触酸化槽+脱窒槽に取って代わる省エネルギー型浸出水処理システムとしての適用可能性が示された。アンモニア負荷を人為的に上げ、0.66 kg N/m³-sponge/d で運転したところ、DHS のアンモニア性窒素の除去率が 58% に低下した。これは遊離アンモニアによる阻害およびカルシウムスケールによる供給水の短絡が原因として考えられる。今後は汚泥保持能や供給水と汚泥の接触効率を高めたスポンジ形状の適用とシステムにおける微生物群集解析を行うことで、スケールアップに向けた検討が課題である。

この他、常温・無曝気運転で高濃度アンモニア性窒素含有人工廃水を処理することにより DHS リアクターの硝化能力を把握することを目的とした実験を行った。約 1 年間の実験期間は 4 つの phase に分けられ、アンモニア負荷を段階的にあげた。無曝気・無加温で運転したにも関わらずアンモニア負荷速度 2.00 kg-N/m³/d で運転したとき、アンモニアの除去速度 1.78 kg-N/m³/d 及び除去率 90% を示した。これは既存の高負荷硝化プロセスとほぼ同様のアンモニア除去性能である。供給水の pH は 8 前後であり、硝化に適した pH であった。また供給水に有機物を含めなかったことによりリアクター最上部からアンモニアの除去が可能であった。処理水の亜硝酸濃度及び硝酸濃度からリアクター内の酸素利用速度を求めると、無曝気にも関わらず最も処理が良好に行なわれていた phase 3 において平均 66 g-O₂/kg-VSS/h であった。Phase 2a を除くすべての phase で各 stage の DO が 4 mg/L 以上維持されていたことと合わせると、DHS リアクターが高い K_{La} (総括酸素移動係

数) を有していることが示された。アンモニアはリアクター上部から除去されており、各 stage に保持された汚泥の硝化活性を調べると平均 0.67 kg-N/kg-VSS/d であった。硝化活性試験及び酸素利用速度試験の結果と連続実験の結果を比べると、スポンジ表面の汚泥によって溶存酸素が消費され、スポンジ深奥部で酸素供給が律速になった可能性があることが示唆された。スポンジを改良することで硝化性能の向上が期待出来る。

インドにおいて、都市下水を処理する UASB リアクターの後段に第三世代型 DHS リアクターを設置し、スタートアップ特性および処理性能を評価した。DHS リアクターは処理水量 500 m³/d (返送なし) で運転を開始し、その後運転条件を変えながら約一年にわたり現地の気候や下水性状などのプラクティカルな条件の下で連続モニタリングを行った。その結果、DHS リアクターは短い HRT (0.66 h) 条件下においても、有機物および窒素態の優れた除去性能を示した。また DHS 基軸方向から採取した保持汚泥の酸素利用速度試験を行い、基質別の酸素消費活性を明らかにした。また水質プロファイルから求めた全 BOD および糞便性大腸菌群の除去速度定数は、運転開始からおよそ 4 ヶ月で一定になった。硝化反応は、散水ろ床法で推奨されている運転条件よりも高い条件下で進行し、また、返送運転はアンモニア性窒素の除去に有効な手段であった。高負荷で運転したときには従属栄養細菌の酸素消費活性が増加したにも関わらず、BOD 除去率が減少し、それに伴った TN 除去率の低下が見られた。第三世代型 DHS 担体は、開発途上国でも作成可能な担体であり、処理性能および施工性が第二世代型 DHS 担体より優れていることを実証規模実験で明らかにすることができた。

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 13 件)

1. Uemura, S., Kimura, M., Yamaguchi, T., Ohashi, A., Takemura, Y. Harada, H. 2012. Long term evaluation of the effect of salinity on organic removal and ammonium oxidation in a down-flow hanging sponge reactor. *International Journal of Environmental Research*. 6: 361-366. 査読有.
2. Uemura, S., Suzuki, S., Maruyama, Y., Ohashi, A., Yamaguchi, T. Harada, H. 2012.

Direct treatment of settled sewage by DHS reactors with different size sponge support media. *International Journal of Environmental Research*. 6: 25-32. 査読有.

3. Takahashi, M., Ohya, A., Kawakami, S., Yoneyama, Y., Onodera, T., Syutsubo, K., Yamazaki, S., Araki, N., Harada, H., Yamaguchi, T. 2011. Evaluation of Treatment Characteristics and Sludge Properties in a UASB Reactor Treating Municipal Sewage at Ambient Temperature. *International Journal of Environmental Research*. 5: 821-826. 査読有.
4. Uemura, S., Suzuki, S., Abe, K., Kubota, K., Yamaguchi, T., Ohashi, A. Takemura, Y., Harada, H. 2010. Removal of organic substances and ammonium oxidation by a down-flow hanging sponge (DHS) reactor under high salinity conditions. *Bioresource Technology*. 101: 5180-5185. 査読有.
5. 大久保努, 山口隆司, 久保田健吾, 原田秀樹. 2010. 無曝気方式の新規下水処理技術の開発 -第三世代型担体を適用した実規模DHSリアクターの処理性能評価-. *土木学会論文集G*. 66: 149-158. 査読有.
6. 久保田健吾, 林幹大, 松永健吾, 大橋晶良, 李玉友, 山口隆司, 原田秀樹. 2010. 都市下水処理UASB-DHSシステムにおけるG3型DHSリアクターの微生物群集構造解析. *土木学会論文集G*. 66: 56-64. 査読有.
7. 大久保努, 渡辺悠介, 大浦一恵, 久保田健吾, 李玉友, 原田秀樹. 2010. DHS-USB方式による埋立地浸出水の省エネルギー型窒素除去システムの開発. *土木学会論文集G*. 66: 9-16. 査読有.
8. 松永健吾, 小野寺崇, 上村繁樹, 山田真義, 山内正仁, 高橋優信, 久保田健吾, 原田秀樹, 山口隆司. 2009. 下水処理UASB後段のDHSにおける余剰汚泥量の抑制要因の評価. *環境工学研究論文集*. 46: 623-628. 査読有.
9. 大矢明子, 小野寺崇, 山口隆司, 珠坪一晃, 荒木信夫, 多川正, 山崎慎一, 米山豊, 大橋晶良, 原田秀樹. 2009. 下水処理UASBリアクターの処理特性および保持汚泥性状評価. *環境工学研究論文集*. 46: 629-636. 査読有.
10. 小野寺崇, 原田秀樹, 大久保努, 上村繁樹, 山口隆司, 大橋晶良. 2010. 実規模DHSリアクターにおける硝化およびふん便性大腸菌群の除去性能評価. *下水道協会誌*. 4(561): 106-116.

- 査読有。
11. 大久保努, 原田秀樹, 小野寺崇, 上村繁樹, 山口隆司, 大橋晶良. 2008. 開発途上国のためのエネルギー最小消費型下水処理技術の開発-実規模 DHSリアクターの有機物処理特性評価-. 土木学会論文集 G. 64: 187-195. 査読有.
 12. 小野寺崇, Doni Sugiyana, Madan Tandukar, 上村繁樹, 長野晃弘, 山口隆司, 大橋晶良, 原田秀樹. 2008. 新型汚泥保持単体を適用した第6世代型 DHS 反応器における下水処理性能. 土木学会論文集 G. 64: 78-87. 査読有.
 13. Madan Tandukar, Akiyoshi Ohashi, and Hideki Harada. 2007. Performance comparison of a pilot-scale UASB and DHS system and activated sludge process for the treatment of municipal wastewater. Water Research. 41: 2697-2705. 査読有.

[学会発表] (計 35 件)

1. 井口晃徳, 立花真, 大久保努, 上村繁樹, 山口隆司, 松永健吾, 谷口涼子, 永井寛之, 久保田健吾, 原田秀樹. 実証規模 DHS 反応槽の微生物相解析と硝化細菌群の定量. 第 46 回日本水環境学会年会, pp. 484. 東洋大学, 2012.3.16.
2. 大久保努, 久保田健吾, 原田秀樹. 実規模 DHS リアクターにおける無機態窒素の処理性能と K_{La} の評価. 土木学会第 66 回年次学術講演会. VII-068. 愛媛大学. 2011.9.9.
3. 立花真, 井口晃徳, 永井寛之, 大久保努, Absar A. Kazmi, 久保田健吾, 原田秀樹. 実証規模下水処理 DHS リアクターの保持汚泥内微生物群集構造解析. 第 45 回日本水環境学会年会, pp. 153. 北海道大学, 2011.3.18.
4. 井口晃徳, 大久保努, 大矢明子, 高橋優信, 久保田健吾, 山口隆司, 荒木信夫, 関口勇地, 原田秀樹. 都市下水処理 UASB 汚泥の微生物群集構造解析と主要微生物の検出. 第 45 回日本水環境学会年会, pp. 152. 北海道大学, 2011.3.18.
5. 立花真, 井口晃徳, 大久保努, Absar A. Kazmi, 久保田健吾, 原田秀樹. インドで稼働中の実規模下水処理 DHS リアクターの微生物群集構造解析. 平成 22 年度土木学会東北支部技術研究発表会. VII-7. 東北工業大学. 2011.3.5.
6. Iguchi, A., A. Ohya, M. Takahashi, K. Kubota, N. Araki, Y. Sekiguchi, T. Yamaguchi, and H. Harada. Bacterial community analysis of anaerobic sludge in an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor treating municipal wastewater. 13th International Symposium on Microbial Ecology (ISME-13), Seattle, WA, USA. PS.02.021. 2010.8.26-27.
7. 井口晃徳, 大久保努, 久保田健吾, 大矢明子, 高橋優信, 山口隆司, 関口勇地, 荒木信夫, 原田秀樹. 下水処理 UASB 汚泥の微生物群集構造解析. 環境バイオテクノロジー学会 2010 年度大会, pp. 61 (P-43). 東北大学, 2010.6.21.
8. 服部賢, 久保田健吾, 李玉友, 原田秀樹. DHS リアクターによる無曝気方式の硝化プロセスの処理特性. 第 44 回日本水環境学会年会, pp. 85. 福岡大学, 2010.3.15.
9. 大浦一恵, 大久保努, 渡辺悠介, 竹村泰幸, 久保田健吾, 李玉友, 原田秀樹. DHS-USB 方式による埋立地浸出水の高負荷処理に関する研究. 第 44 回日本水環境学会年会, pp. 84. 福岡大学, 2010.3.15.
10. 松永健吾, 小野寺崇, 上村繁樹, 山田真義, 山内正仁, 高橋優信, 久保田健吾, 原田秀樹, 山口隆司. 下水処理 UASB 後段の DHS における余剰汚泥量の抑制要因の評価. 第 46 回環境工学研究フォーラム, pp. 623-628. 新島学園短期大学. 2009.11.29.
11. 服部賢, 久保田健吾, 李玉友, 原田秀樹. DHS リアクターによる省エネルギー型硝化プロセスの処理特性. 土木学会第 64 回年次学術講演会. VII-059. 福岡大学. 2009.9.4.
12. 大浦一恵, 渡辺悠介, 大久保努, タンドカール マダン, 久保田健吾, 李玉友, 原田秀樹. DHS-USB 方式による埋立地浸出水からの窒素除去システムの開発. 土木学会第 64 回年次学術講演会. VII-060. 福岡大学. 2009.9.4.
13. 服部賢, 久保田健吾, 李玉友, 原田秀樹. DHS リアクターによる省エネルギー方式硝化プロセスの処理特性, 第 43 回水環境学会年会. 1-F-09-4. 山口大学. 2009.3.16.
14. 渡辺悠介, 久保田健吾, 李玉友, 原田秀樹. DHS-USB 方式による埋立地浸出液の省エネルギー型処理システムの開発. 第 43 回水環境学会年会. 1-H-16-1. 山口大学. 2009.3.16.
15. 大浦一恵, 渡辺悠介, 久保田健吾, 李玉友, 原田秀樹. DHS リアクターに用いられるスポンジ担体の物理的キャラクター

- ゼーション. 平成 20 年度土木学会東北支部技術研究発表会. VII-23. 東北学院大学. 2009.3.7.
16. 久保田健吾, 林幹大, タンドカール マダン, 山口隆司, 原田秀樹. 都市下水処理 UASB+DHS システムにおける DHS リアクターの微生物叢解析. 土木学会第 63 回年次学術講演会. VII-007. 東北大学. 2008.9.10.
 17. 服部賢, 渡辺悠介, 小地沢俊宏, タンドカール マダン, 久保田健吾, 李玉友, 原田秀樹. DHS リアクターによる無曝気硝化プロセスの開発. 土木学会第 63 回年次学術講演会. VII-013. 東北大学. 2008.9.10.
 18. 松永健吾, 小野寺崇, 上村繁樹, 長野晃弘, 久保田健吾, 原田秀樹, 山口隆司. DHS (Down-flow Hanging Sponge) の保持汚泥特性とその減量化ポテンシャルの評価. 土木学会第 63 回年次学術講演会. VII-019. 東北大学. 2008.9.10.
 19. 渡辺悠介, 服部賢, タンドカール マダン, 久保田健吾, 李玉友, 原田秀樹. DHS-UASB を用いた省エネルギー型埋立地浸出水処理システムの開発. 土木学会第 63 回年次学術講演会. VII-051. 東北大学. 2008.9.12.
 20. Kubota, K., M. Hayashi, M. Tandular, T. Yamaguchi, and H. Harada. Microbial community structure in a down-flow hanging sponge reactor. 12th International Symposium on Microbial Ecology (ISME-12), Cairns, Australia. PO12-0351. 2008.8.19.

[図書] (計 1 件)

1. 山口隆司, 高橋優信, 幡本将史, 川上周司, 久保田健吾, 原田秀樹, 山田真義, 山内正仁, 荒木信夫, 山崎慎一. 2011. 水浄化技術の最新動向. 第 2 章 下水・廃水処理技術, 次世代水資源循環技術-都市下水を対象とした嫌気性下水処理-. CMC 出版. 121-131.

6. 研究組織

(1)研究代表者

原田 秀樹 (HARADA HIDEKI)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号 : 70134971

(2)研究分担者

(3)連携研究者

李 玉友 (LI YU-YOU)
東北大学・環境科学研究科・准教授
研究者番号 : 30361140

久保田 健吾 (KUBOTA KENGO)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号 : 80455807

大橋 晶良 (OHASHI AKIYOSHI)
広島大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号 : 70169035