

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25870377

研究課題名（和文）ベトナムにおけるマテリアルフローモデルと連携した水・物質循環モデルの構築

研究課題名（英文）Development of water and material cycle model in association with material flow analysis in Vietnam

研究代表者

原田 英典（Harada, Hidenori）

京都大学・地球環境学堂・助教

研究者番号：40512835

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：既往データが限定的な途上国の流域において、地域多様性や社会動態を一定程度把握し、水環境改善策の立案に資する定量・動的な情報を創出が求められている。本研究では、ベトナム国Nhue-Day川流域を例に、流域の分類化、タンクモデルを用いた水・物質循環解析、典型集落での詳細なマテリアルフロー解析を組み合わせることで、一定程度の実用性に資する定量データを創出できることを実証的に示した。

研究成果の概要（英文）：Watershed management requires information on the dynamics of water quantity and quality, reflecting the diversity of localities in the watershed and the time transition of the society, although many of watersheds in developing countries lack basic statistics and geographic data. As a case study in the Nhue-Day basin, Vietnam, this study demonstrated the methodology framework to generate quantitative information for the practical use of watershed management, composed of watershed sub-dividing and classification, water and material cycle analysis using a tank model, and material flow analysis in typical sub-watersheds.

研究分野：環境工学

キーワード：環境負荷解析 水・物質循環 流域水環境 ベトナム

1. 研究開始当初の背景

多くのアジア諸国と同様、ベトナム国3大重点流域の1つ、Nhue-Day 川流域(紅川の分流域)においても質・量の両面において水環境の悪化が著しい。同流域は上流部に首都ハノイの大部分を含み、中下流部の農村部では河川水を灌漑利用し、点在する都市では水道水に利用する。また、他の途上国流域と同様にNhue-Day 川流域では、流域の近代化が進みながらも、伝統的な地域資源利用および利・排水様式が残り、これらは水・物質循環に重要な影響を与えている。例えば、上下水道未整備地域の多様な利・排水、畜産廃棄物・人尿尿の農業利用などである。

一般に、こうした実態を把握する詳細なデータの入手は困難であり、例えばICEM(2008)では同流域内行政区毎のBOD 負荷量を推計したが、一律の負荷原単位を用いざるを得ない等、季節・空間的に多様な実態が把握されていない。さらには、利・排水により汚濁排出がどう変化するかモデルも構築されていないため、求める環境質を実現するために如何なる方策が有効なのかを検討することもできない。つまり、汚濁物質の排出や取水・排水状況を把握し、地域性および社会動態を反映した水・物質循環の解明が遅延しているため、地域における水利用を適正にデザイン・管理できない状況に陥っている。

申請者はこれまで、当該流域の物質循環を解明するため、リンのマテリアルフロー解析を行ってきた(原田ら, 2010)。近年はこれを窒素に拡張するとともに(Giang ら, 2012)、産業構造より流域を複数のクラスターに分類(クラスター解析)することで、代表地域のマテリアルフローモデルを流域全体へ拡張する手法を開発、Nhue-Day 川流域に適用してきた(駒井ら, 2012)。

これらモデルでは、対象地域における物質の流入・流出(収支関係)を地域特性および社会動態による変化を含めて評価できるが、地域内での物質の移流・分散等を評価することはできなかった。しかし、対象地域内での物質の物理・化学・生物学的変化や汚濁物質の排出を評価する水量・水質モデルを新たに構築し、マテリアルフローモデルと連携すれば、地域特性や社会動態を反映した水管理計画のデザインに資する定量データを創出することができる。

2. 研究の目的

既往の統計・土地利用などのデータが限定的な途上国の流域において、地域多様性や社会動態を一定程度把握し、水環境改善策の立案に資する定量データを創出するため、マテリアルフローモデルと水量・水質動態モデルとを連携させことで地域多様性や社会動態を一定程度反映可能な物質循環解析の方法論を検討する。具体的には、流域の水環境悪化が著しく、水利用の形態変化が社会変化に追随していないベトナム国Nhue-Day 川流域を

例にモデルを構築し、その実用性を検討する。

3. 研究の方法

既往データが地理的に詳細な物質循環解析を行うのは困難である。本研究では、地域多様性や社会動態を一定程度把握するため、入手可能な統計・地理情報を活用し、流域を分割、地域条件に応じていくつかに分類する。さらに、それぞれの分類に対して、一定程度の地域データで構築可能な水量・水質動態モデルを構築し、水循環の概要を把握する。合わせて、分類ごとの典型地域での現地調査に基づく詳細な物質循環解析をMFAモデルを構築することで実施する。上記の流域分類、水量・水質の概要把握、詳細なマテリアルフローの解析の手順を踏むことで、流域の水環境改善策に資する一定程度の有用性を持ったデータの創出を目指す。以下にその概要を示す。

(1) 流域の分割(小流域化)と分類

Nhue-Day 川流域の標高は0~3,047 mであるものの、大部分は50 m以下の平地が広がる。本研究では、低勾配地域で複雑な河川網を有すNhue-Day 川流域を以下の手順で小流域に分割した。解析にはArcGIS 9.3およびArcHydro 1.4(ESRI社)を用いた。

- ① 標高データ(ASTER GLOBAL DEM3, NASA)より落水線を作成し、仮の河道図を得る。
- ② GPSを用いた現地踏査、衛星画像の使用、水門調査に応じた実際の流路確認を行い、河道図を修正、小流域を構築する。
- ③ 入手可能な統計・地理情報を元に、クラスター分析を実施し、経済社会条件や水利用特性が均一と見なせるレベルのクラスターごとに小流域を分類する。

(2) タンクモデルによる分布型水量モデルの構築

本研究では、分布型水量モデルの構築のため、タンクモデルを構築した。本研究で用いたタンクモデルは3段構造であり、第1タンクには雨水、生活排水、農業用水および蒸発量を入力値として設定した。なお、蒸発散量の算定にはソーンスウエイトの可能蒸発散量の算定式を用いた。農地に取水される河川水は農地1 km²あたり167.3 mm/yearとの既往の調査結果より、取水時期を1月1日から1月31日および6月1日から6月30日と仮定し、農地1 km²へ取水される一日当たりの河川水を2.79 mm/dayとすることで各小流域の単位面積当たり農業取水量を算出した。生活排水量は、各小流域の流域人口密度を一人あたり水利用量で除することにより1 km²当たりの水位(mm/日)を計算した。なお、各クラスターにおける水利用量は既往研究を参考にし、都市クラスターは170 L/日、その他のクラスターは92 L/日と設定した。以上よりモデルを構築した。

クラスター毎に水循環特性が異なると考え

られたため、タンクモデルのパラメータ較正はクラスター毎に実施した。2012年1月～2012年12月までのHa Dong水門およびDong Quan水門の流量・降水量データを元に較正を行なった。較正方法は、菅原(1972)のパラメータ同定法を参考にした。

さらに、タンクモデルにより推計された流量を用いて、各種点源および面源汚濁負荷原単位を合わせ、各小流域から発生するTNおよびTP汚濁負荷量を求め、さらにHa Dong水門およびDong Quan水門での実測値との比較から流達率の推計を行い、リンの汚濁負荷流出特性を解析した。

(3) 地域特性に応じた小流域レベルのマテリアルフローの構築

し尿や畜産廃棄物の農業利用など、当該流域の特徴的な物質循環が見られる郊外の典型地域にて、現地調査に基づき地域特性を反映した詳細なマテリアルフローの構築を行なった。マテリアルフローの構築方法は、原田ら(2010)およびGiang et al. (2012)を基礎とし、マテリアルフローモデル内の動態をマトリックスとして表した。その概要は以下の通りである。

まず、既存のモデルでコンポーネントとして含まれていた家庭、畜産、農業、水環境・土壌(系外)、大気(系外)、市場(系外)に対して、当該流域の郊外・農村部で重要な養殖池、および都市部で重要な下水管巨をコンポーネントを追加し、計8種のコンポーネントを組み込んだ。

コンポーネントの正味の反応は種々の入力・出力プロセスによる。物質保存則に基づけば、あるコンポーネントの系内の正味の反応は以下のマスバランスを満たす。

$$r_j = \sum_i (\gamma_{i,j} \times \rho_i) = 0$$

ここで、 r_j : コンポーネント j の正味の反応速度(kg/year), $\gamma_{i,j}$: 反応プロセス i を経たコンポーネント j への移動係数(-), および ρ_i : 反応プロセス i の反応速度(kg/year)。さらに、各反応プロセスの移動係数の合計はマスバランスを満たす。

$$f_i = \sum_j (\gamma_{i,j}) = 0$$

以上を基本に、二次データ収集に加えて廃棄物・排水管理および農業・畜産形態に関する詳細な現地調査を実施し、マテリアルフローの構築を行なった。

(4) 都市の生活排水・汚泥に特化した水量・炭素汚濁負荷フローの解析

当該流域上流に位置するとともに、ベトナム国の首都であるハノイ市では下水処理普及率が未だ10%程度である。上流部の都市排水の対策立案に資する物質循環データ創出のため、都市の生活排水・汚泥に特化したマテリアルフロー解析を実施した。

行政的な施策の実施単位に基づき、当該流域内の主要な都市部であるハノイ市都市部を対象とした生活排水・し尿汚泥の水量・炭素

汚濁フローを構築した。

本研究では、以下の3段階の手順で水量・炭素汚濁フローを構築した。まず、Pealら(2014)によって提案された衛生サービスチェーン(封じ込め、引き抜き、運搬、処理、および処分)に基づくし尿ストリーム解析の枠組みを基礎とした。これに、アジア都市で広く使われる腐敗槽の利用実態を細分化する変更を加え、アジア都市の実態をより具体的に可視化できるし尿ストリーム(人口の%表記)を作成した。

次に、マテリアルフローモデルおよび水量モデルで利用した排水種別ごとの単位排水量と、し尿汚泥ストリームにおける各プロセスの排水人口を乗じることで、排水種別排水量フローを推定した。同時に、雑排水量もフローに組み込んだ。

最後に、炭素汚濁フローは、それぞれのプロセスに紐づけられた排水人口にCOD原単位を乗じることで算出、腐敗槽処理水および腐敗槽汚泥は、排水量に濃度を乗じることで算出、処理コンポーネントを経る場合は除去率を考慮することで算出した。

4. 研究成果

(1) 対象流域の小流域化

上述の方法により対象流域を分割した結果、105の小流域に分類された(図1)。これを、人口密度、浴室のある世帯割合、トイレのない世帯割合、腐敗槽のある世帯割合、世帯当たり家畜頭数(水牛、牛、豚)を変数として、クラスター分析を行なったところ、小流域は3種に分類された。それぞれ、「都市部(クラスターA)」、「郊外部(クラスターB)」、「農村部(クラスターC)」と位置付けた。

(2) タンクモデルによる物質循環

パラメータを較正したタンクモデルの精度検証として、Ha Dong水門およびDong Quan水門における流量の実測値とモデル値を比較し

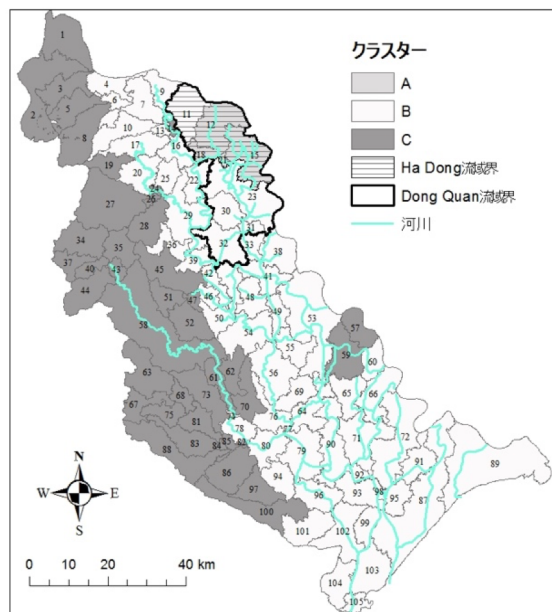


図1 Nhue-Day川流域の小流域への分割

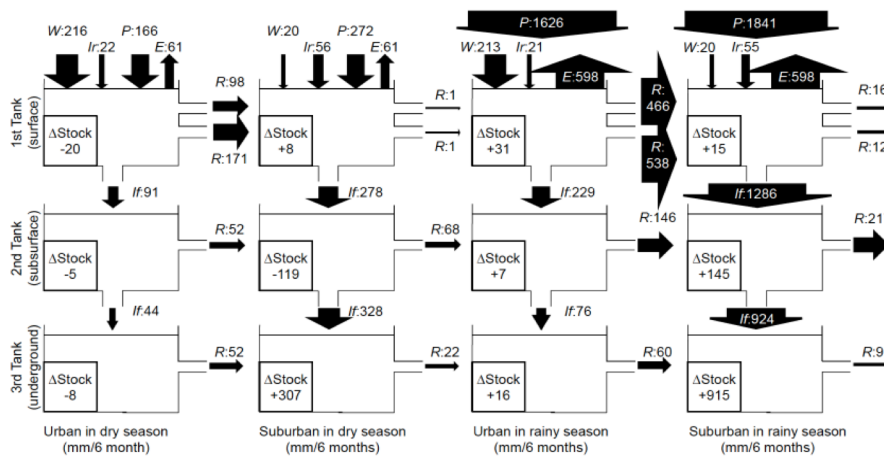


図2 都市・郊外の典型小流域における雨季(2012/5/1-10/30)および乾季(11/1-2013/4/30)の水収支

たところ、その相関は、それぞれ0.72および0.85であった。これより、当該モデルは限定的な地域情報より構築したものの、一定程度の精度を有することが示された。

都市・郊外の典型小流域における雨季・乾季別の水収支の概要を図2に示す。都市モデルでは、第2タンクへの浸透係数が0.015と小さく、降雨の多くが第1タンクで表面流出することが表された。一方郊外モデルでは、第2タンクへの浸透係数が0.7と高かった。これは郊外には農地が広がっており、都市部と比べ地下浸透率が高いことを表している。

郊外モデルでは、3層のタンクそれぞれから一定程度の流出があり、2層目および3層目の流出は、時間遅れも大きく分解などの変化も大きく受けていると考えられた。乾季の農業用水は、流域からの総流出量の1.4倍取水されており、河川流量が灌漑により有意に

はより複雑であることが示唆された。

水量データとマテリアルフローモデルより地域特性を反映した原単位データとを連携させて汚濁負荷解析を行なった。その結果、都市クラスターでのTNおよびTPの流達率はそれぞれ0.7および0.4、郊外クラスターでの流達率はそれぞれ0.01および0.01となった。また、リンについてクラスターごとの排出特性を解析したところ、都市クラスターの排出負荷強度は6.86 kg/ha/年である一方、郊外クラスターの排出負荷強度は0.12 kg/ha/年と推計された。

以上より、郊外部から河川への生活由来の汚濁負荷流入は都市部と比べ非常に少なく、都市部の生活排水の対策が流域の水環境改善に大きく寄与することがわかった。一方郊外部では、第2タンクに当たる浸透性の高い水田などからの負荷が主になるものの、汚濁負

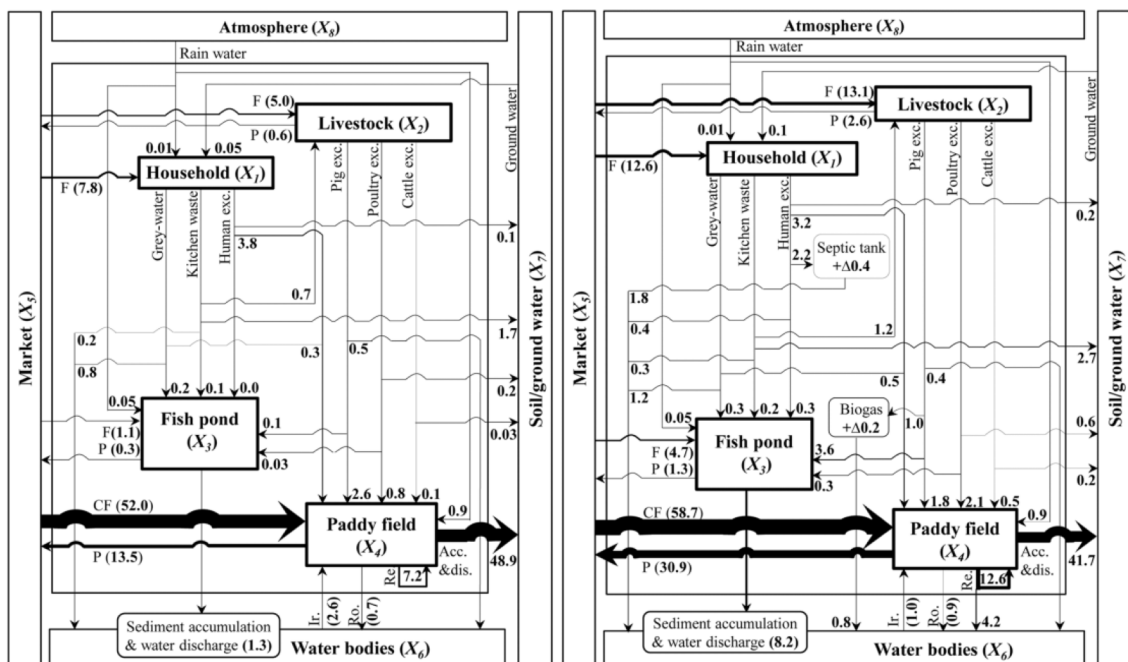


図3 ベトナム郊外の典型小流域を対象としたリンのフロー(kg/ha/year)。左図は1980年時点、右図は2010年時点。略称の意味は以下の通り。Exc. excreta, F food, P product, CF chemical fertilizer, Re. residue, Ir. irrigation, Acc. & Dis. accumulation and discharge, Ro. Runoff.

荷の大部分は流域内に蓄積・分解され、実際に水域へ排出される汚濁負荷量は発生量の1%と限定的であることがわかった。同時に、こうした物質循環の特徴に域内での蓄積・分解などが大きく寄与していることがわかった。

(3) 地域特性を考慮した小流域でのマテリアルフローの構築

上述の通り、郊外部では域内での蓄積・分解が物質循環に大きな寄与を与えていると示された。郊外部のより詳細な物質循環を解析するために典型小流域にて窒素およびリンのマテリアルフローを実施した。

結果の一例として、1980年時点および2010年時点のリンフロー図3に示す。1980年の時点ですでに化学肥料が系内への主要な入力であり、水田土壌への蓄積と水田から水域への排出が両時点ともに主要な系外への出力であった。土地面積の9割以上を占める水田が、当該地域の物質循環に主要な役割を担っていることがわかった。

さらには、面積としてはわずか6%しか占めない養殖池が、底泥・水域を合わせた系外への最大の出力であることがわかった。1980年時点から2010年時点の大きな違いとしては、腐敗槽（セプティックタンク）およびバイオガスシステムの利用がこの間に始まり、人し尿および畜産糞尿の農業利用に影響を与えていた。1980年には畜産堆肥および人し尿に由来するリンの80%および97%がそれぞれ農業利用されていたが、2010年にはそれぞれ49%および42%まで落ち込んでいた。これらにより、リンの水域への負荷量は上記の30年間の間に4倍に増加していることがわかった。

感度分析からは、化学肥料の使用量の増減がリンフローに与える影響がもっとも大きいことが示された。以上より、現在のリンの蓄積・排出源において主要な役割を担っている養殖池の底泥を農業利用し、化学肥料の使用を削減することが、有効なリンフローの是正方策と考えられた。

(4) 水量・炭素フローモデル

(2)で示したように、都市クラスターの生活系排水は、河川に対する大きな負荷源となっている。当該流域の都市クラスターを形成するハノイ都市区的生活排水・し尿汚泥由来の炭素フローの解析結果を図4に示す。ハノイ都市区では家庭から一日あたり148,000 kgのCOD負荷が排出されていると推計された。このうち、衛生処理が実現できず排出されている割合は90.5%であった。未処理下水には78.6%の炭素が含まれる一方、投棄汚泥には11.8%が含まれた。特にし尿汚泥は水量では生活系排出量のわずか0.2%に過ぎないものの、

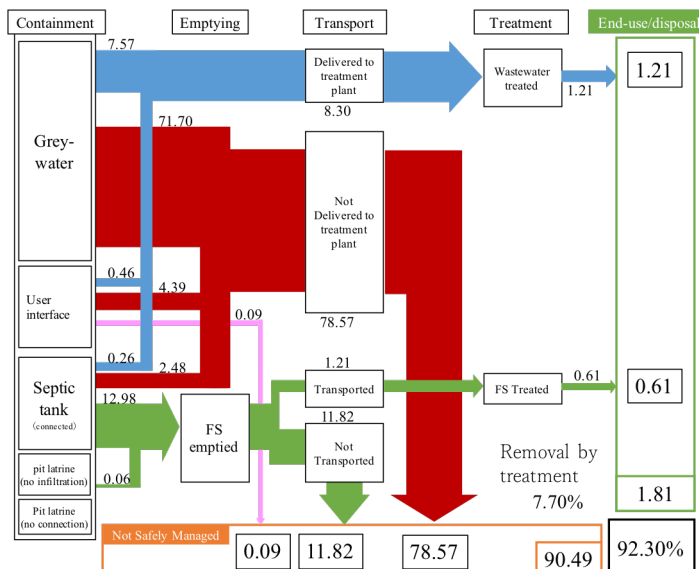


図4 ハノイ都市区的生活排水・し尿汚泥フロー (%)

一定の寄与を有することが示された。現在、下水処理場などの処理施設で安全に処理されている炭素割合は7.7%であった。流域内の汚濁負荷削減には、その最上流に位置するハノイ都市部の生活排水対策が不可欠であることが示された。一方、前節での解析から、郊外部の汚濁負荷は現状では限定的であることから、下水処理の普及により河川環境の改善が一定程度見込まれる可能性が示唆された。

(5) まとめ

本研究では、流域の水環境悪化が著しいベトナム国Nhue-Day川流域を例に、マテリアルフローモデルと水量・水質動態モデルとを連携させ、地域多様性や社会動態に応じた対策立案に資する定量データを創出する方法論を検討した。定量的な情報が限定的な中、流域の小流域化および統計情報を用いた分類に基づき、タンクモデルを用いた水・物質循環の大枠の理解、さらには地域調査をベースとした分類に応じた詳細なマテリアルフローの理解により、一定程度の実用性に資する一定程度の定量データを創出できることを実証的に示すことができた。今後は、この方法論を他地域においても援用できる形に一般化することが大きな課題としてあげられる。また、水質あるいは汚濁負荷データの精度向上のためには代替的なモニタリングデータの整備が欠かせないと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計16件)

- ① Giang, P.H., Harada, H., Fujii, S., Lien, N.H.P., Hai, H.T., Anh, P.N., Transition of human and livestock waste management in rural Hanoi: a material flow analysis of nitrogen and phosphorus during 1980-2010, *Journal of Material Cycle and Waste Management*, 査読有, 19(2), 827-839, 2017, DOI:10.1007/s10163-016-0484-1.

- ② Tran, N.Q.A, Harada, H., Fujii, S., Pham, N.A., Pham, K.L., Tanaka, S., Preliminary analysis of phosphorus flow in Hue Citadel, *Water Science and Technology*, 査読有, **73**(1), 69-77, 2016, DOI: 10.2166/wst.2015.463.
- ③ Tran Nguyen Quynh Anh, Hidenori Harada, Shigeo Fujii, Pham Khac Lieu, Duong Van Hieu, Shuhei Tanaka, Sewer discharge characteristics and water balance in dry season in Hue, Vietnam, *Journal of Science and Technology*, 査読有, **54**(2A), 265-272, 2016.
- ④ Giang, P.H., Harada, H., Fujii, S., Lien, N.H.P., Hai, H.T., Anh, P.N., Tanaka, S., Transition of fertilizer application and agricultural pollution loads: A case study in the Nhue-Day River basin, *Water Science and Technology*, 査読有, **72**(7), 1072-1081, 2015, DOI: 10.2166/wst.2015.312.
- ⑤ Hidenori Harada, Shigeo Fujii, Ayano Takagi, Nguyen Pham Hong Lien, Huynh Trung Hai, Water balance of Nhue River basin: preliminary results for urban and suburban areas, *Journal of Science and Technology*, 査読有, **52**(3A), 154-160, 2014.

他 1 1 件

〔学会発表〕（計 10 件）

- ① 原田英典, Gold Moritz, 藤井滋穂, 西田卓弘, Jean-David Therrien, Michael Cunningham, Swaib Semiyaga, Nguyen Viet Anh, Charles Niwagaba, Dorea Caetano, Linda Strande, し尿汚泥の性状特性・脱水性に関する越・ウ・日・瑞の国際比較, 第 53 回環境工学研究フォーラム, 2016/12/7, 北九州.
- ② Pham Huong Giang, Shigeo Fujii, Hidenori Harada, Resources recycle practice at a rural village in Hanoi, Vietnam - Historical change of human and livestock manure use to agriculture, Japan-China Symposium on resources recycle of wasted materials during urbanization, 2015/12/06, シンセン, 中国.

- ③ Tran Nguyen Quynh Anh, Hidenori Harada, Shigeo Fujii, Pham Nguyet Anh, Pham Khac Lieu, Shuhei Tanaka, Characterization of combined sewer discharge in Hue city, Vietnam, The 5th International Forum on Green Technology and Management, 2015/07/28, フエ, ベトナム.
- ④ P.H.Giang, H.Harada, S.Fujii, N.P.H.Lien, H.T.Hai, and S.Tanaka, Practices of fertilizer application to agriculture and its contribution to agricultural pollution, JSPS Core-to-Core Program The 2nd International Symposium on Formulation of the cooperation hub for global environmental studies in Indochina region & The 12th Inter-University Workshop on Education and Research Collaboration in Indochina Region, 2014/09/27, カントー, ベトナム.
- ⑤ 原田英典, 藤井滋穂, 松井三郎, NGUYEN Pham Hong Lien, HUYNH Trung Hai, NGUYEN The Dong, NGUYEN Viet Anh, 下水道整備の進捗を考慮した腐敗槽の役割と汚泥処理:ハノイの事例から, 京都大学環境衛生工学研究会第 36 回シンポジウム, 2014/08/01, 京都.

他 5 件

〔図書〕（計 0 件）

なし

〔産業財産権〕

- 出願状況（計 0 件）
- 取得状況（計 0 件）

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原田 英典 (HARADA, Hidenori)
 京都大学・大学院地球環境学堂・助教
 研究者番号： 4 0 5 1 2 8 3 5