

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23404016

研究課題名(和文) ハノイ市及びフエ市における水アクセスと関連づけた健康関連微生物汚染の浸水時調査

研究課題名(英文) Investigation on health-related microbial pollution during inundation in Hanoi and Hue linking to water accessibility

研究代表者

古米 弘明 (Furumai, Hiroaki)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40173546

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円

研究成果の概要(和文)：フエ旧市街地を対象として、水位および電気伝導度のセンサによる雨季のモニタリングと採水・水質調査を実施して、浸水状況や微生物汚染状況の実態把握を行った。また、現地踏査による標高データの取得、排水路の接続状況の精査、衛星画像を活用した不透水面の設定を通じて、都市浸水解析モデルを高度化した。そのモデルを利用して、過去の浸水実績図を再現できること、浸水しやすい地区の特定が可能であると判断される結果を得た。また、水利用、水アクセスに関するアンケート・インタビュー調査に関しては、看護婦からの聞き取りを行った後、対面方式での母親へのアンケートを通じて、水利用状況と曝露量推定のためのデータを取得した。

研究成果の概要(英文)：Situations on inundation and microbial pollution were investigated in Hue Citadel area during wet season by continuous monitoring of water level and electric conductivity as well as water sampling and its analysis. Advanced urban inundation model was developed through elaboration on ground elevation, connection of channels and ponds, and setting-up of imperviousness using satellite image data. The model was successfully utilized to reproduce a past inundation situation and to evaluate vulnerable districts for inundation. Questionnaire and interview survey was also conducted to obtain status of water accessibility and exposure to pathogens by face-to-face interviewing to local nurses and mothers.

研究分野：都市環境工学

キーワード：環境室定量化・予測 水質汚濁・土壌汚染防止・浄化 土木環境システム モニタリング リモートセンシング

1. 研究開始当初の背景

(1) 学術的背景

ベトナムの首都ハノイは、多雨地域に位置しており、インフラとしての排水施設の整備が不十分であるため、台風が上陸するたびに、低平地に位置する中心市街地の各所で浸水が頻繁に発生している(図 1-1)。



図 1-1 ハノイの浸水被害の様子

ハノイ市内を流れる To lich 川などの BOD、COD、重金属濃度は環境基準値の 3~4 倍に達しているという報告もあることから、一旦浸水が発生すると、下水由来の汚濁物質が密集市街地に拡散し、衛生学的にも大きな問題を引き起こすことが想定される。

申請者は、下水管路内及び受水域における病原微生物や重金属などの汚濁物質の動態の実測及びモデル解析を行ってきた。その集積した知見は、ハノイとフエの浸水問題を公衆衛生面や下水道システムを考慮した浸水解析を行うという環境インフラ対策面から総合的に評価する上で有用である。

そこで、ハノイでの研究実績を基にして、ベトナム中部のフエ市を主たる研究対象として、雨季における汚濁実態を調査するとともに、浸水時における水利用や水アクセスと健康リスクの関係を、浸水の深刻度との因果関係から評価することを試みる。

(2) 本研究の着眼点と学術的な特色

ベトナムの都市における雨天時の水質汚濁調査の事例は限られており、豪雨時における浸水状況での水質汚濁調査はほとんど行われていない。特に、フエでは浸水問題と健康リスクとの関係を考える上で、市街地内の各所に点在する大小の湖沼群とフエ王宮内水路網の存在を考慮する必要がある(図 1-2)。



図 1-2 フエ王宮内市街地と水路網 (QuickBird, 2002)

これらの湖沼や水路は下水の排除先にもなっていること、下水処理場が完備していないことから、浸水時に汚濁物質が市街地に流出した実態にある。しかし、湖沼や水路の機

能・役割と汚染源としての寄与については定量的に明らかにされていない。

本研究の特色は、浸水現象を水質汚濁調査および浸水シミュレーションの両面から評価する点である。これまで、浸水時の汚濁物質の動態を経時的に調査した研究はなく、本研究で得られる情報は新規性が高い。また、密集市街地の周辺に存在する湖沼や調整池群を考慮し、浸水時におけるこれらの役割を評価対象に加えたことは独創的である。

2. 研究の目的

ハノイとフエを対象とし、頻発する密集市街地での浸水状態における健康リスクに関わる病原微生物による汚染実態評価を行う。

これらの市街地内の各所には湖沼や雨水調整池が点在しており、浸水時には流出抑制効果が期待される一方、これら調整池は生活污水の排除先でもあるために大規模な浸水時には汚濁物質の負荷源として作用する可能性が高い。特に、フエ市街地において、浸水時の水質汚濁調査を実施するだけでなく、衛星画像を活用して地表面特性を詳細に把握することで、運河や水路、さらには調整池の機能を考慮した浸水シミュレーションも実施する。

そして、浸水常襲地域における衛生状態、水利用など健康に関連する視点から水アクセスに関するアンケート・ヒアリングによる実態調査結果も踏まえて、浸水と健康リスクとの関係、さらには浸水制御のあり方の検討に必要な知見を提供する。

3. 研究の方法

(1) 晴天時/雨天時時の連続水質観測と現地サンプリング・水質分析

フエ王宮内市街地内の運河水路や湖沼を対象として、晴天時と雨天時や浸水時における水質調査を行う。運河、湖沼の主要な箇所には水位計と EC(電気伝導度)計による連続観測を行う。また、晴天時と雨天時に採水による水質調査を実施する。

水質分析項目は、ベトナムの表流水基準で定められている一般水質項目に加え、病原微生物指標として大腸菌および腸管系ウイルスを測定する。測定及び前処理は、ベトナム側の研究協力者の実験室を利用して行う。

(2) 病原微生物調査

ベトナム・ハノイ市郊外において、小規模な豚飼育小屋の廃水、ブタ飼育小屋からの廃水流入があるアヒルの飼育池の水、ブタ飼育小屋からの廃水流入口、河川水の流入があるアヒル飼育池の水を、雨季 1 回、乾季 2 回の計 3 回採取した。

採取試料を滅菌済みフィルター(Analysis Monitor, Millipore)で濾過し、フィルター上に細菌を捕捉した。続いて、培地をろ過した後、37℃、24 時間培養して、大腸菌と大腸菌群数を計数した。

ウイルス濃縮を、試料を陰電荷膜法により行い、その誘出液を一次濃縮液とし、冷蔵保存し、東京大学まで輸送した。そして、二次濃縮液、核酸抽出を行ったのち、real-time PCR で、Aiv、エンテロウイルス (EV)、ノロウイルス GI (NV GI)、GII (NV G) およびアデノウイルス (AdV) を既報に従い定量した。

(3) 水利用、水アクセスに関するアンケート・インタビュー調査

水道が十分には普及していないフエ省の農村部とフエ市街地における水利用実態、水へのアクセスに関する基礎的なアンケートおよび疾病と水利用に関するヒアリングを行う。なお、フエ市街地については土地高低データ及び下水管渠から、浸水常襲地域の想定を行い、当該地域での浸水の有無やその状況も調査する。

(4) 衛星画像による地表面解析と浸水シミュレーション

複雑な密集市街地において土地利用形態の調査を行うことは困難である。既存研究を参考に、赤、青、緑、近赤外の4つの波長域のデータを有し、IKONOS 画像を用いた地表面特性解析を行う。その結果を反映して、浸水シミュレーションを実施する。また、標高データの精度を向上するために、土地高低差測定も実施する。

4. 研究成果

(1) 浸水状態調査と洪水時の水質調査

晴天時と雨天時水質調査結果

2012年の2月と8月の晴天時、そして9月の雨天時に池 (P1~P5, P7) と運河 (B1~B3, C1~C3) において *E. coli*、大腸菌群数、EC、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 等を測定項目とした水質調査を実施した。さらに11月の浸水発生時において路上 (INW1~INW4) で氾濫水を対象とした水質調査を行った。また9月から12月の雨季において池と運河の計13か所において水深とECの連続観測を行った。これらの水質調査・センサ設置地点を図4-1に示す。

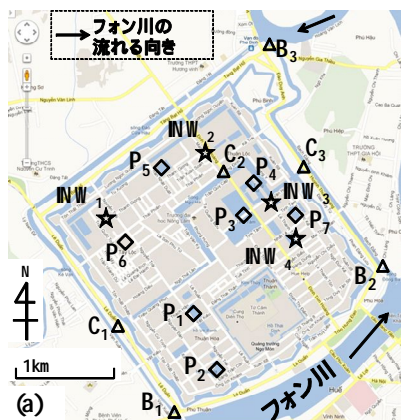


図 4-1 水質調査・センサ設置地点

図 4-2 に水質調査結果における *E. coli* 濃度範囲を示す。雨天時と浸水時の水質調査を実施した結果、雨天時には運河と池の全ての測定地点で 10,000CFU/100mL 以上の大腸菌数濃度が検出された。また路上氾濫水において、全ての地点で 1,000CFU/100mL 以上の大腸菌数濃度が検出され、糞便汚染のある污水が雨天時流出している可能性が示唆された。

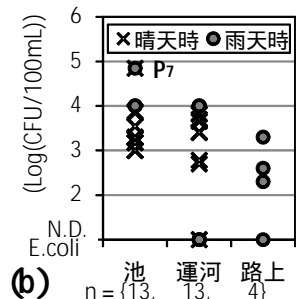


図 4-2 晴天時及び雨天時の *E. coli* 濃度範囲

水質データの類型化

糞便汚染指標に加えて EC や $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を変数としたクラスター分析で得られたデンドログラムを図 4-3 に示す。その結果、水質調査データは5つのグループに分けられた。グループ1は路上の氾濫水採水地点全てを、グループ2は運河と池の多くの地点を、グループ3はP7を、グループ4、5はそれぞれ晴天時のP3、雨天時のC2のみの水質データを含んでいる。大腸菌群数について、グループ1は「低」、グループ2は「中」、グループ3は「高」濃度のグループと特徴づけられた。この理由として、氾濫水は雨水により希釈されていること、またグループ3のP7においては、糞便を含む污水の継続的な流入により大腸菌群数濃度が高く保たれていること等が考えられる。

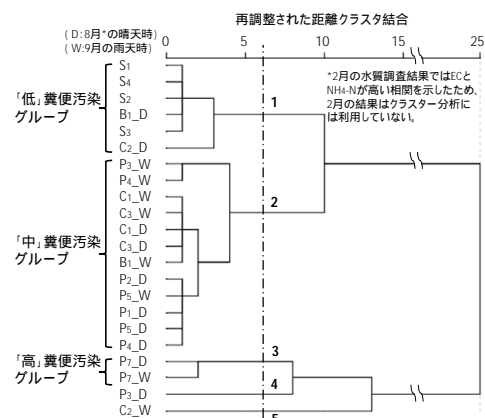


図 4-3 EC、大腸菌群数**、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を変数としたデンドログラム*** (**大腸菌群数は *E. coli* と高い相関があり、全地点で検出出来たため *E. coli* の代わりに分析に使用。***Ward 法による。個体間の距離は平方ユークリッド距離で算出。)

連続観測データを活用した水路網における水理・水質特性の評価

フエ旧市街地の中央運河の中間地点 C2 と外周運河との接合点 C3 における、連続観測結果を、図 4-4(a)と(b)にそれぞれ示した。

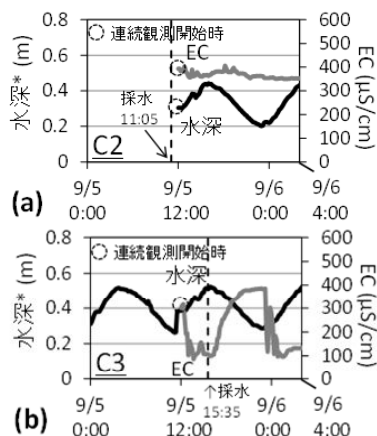


図 4-4 (a)C2、(b)C3 の雨天時調査日における水深・EC 変動 (*「水深」は「水位センサから水面までの深さ」を表す。)

9 月の雨天調査日において、中央運河の中央にある C2 では、EC は高い値が保たれていたが、外周運河との接合点では C3 では図 4-4(b)のような潮汐によるフォン川の水位上昇に応じた EC の低下が見られた。この現象は、上流側接合点の C1 でも観測された。

分布型下水道モデルによる水理解析

図 4-5 に晴天時の C1 ~ C3 における EC の連続観測結果を示す。C1、C3 では近接する河川の満潮時の水位上昇に伴い EC が下がるが、C2 では河川水の影響を受けにくく汚染水塊が滞留しているため高い EC 値を保たれていると考えられる。

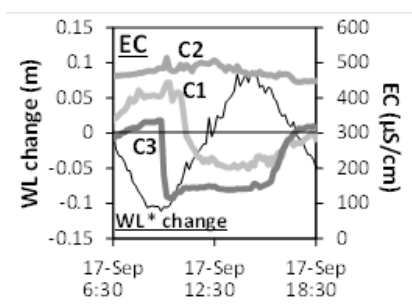


図 4-5 晴天時の C1 ~ C3 における EC の連続観測結果 (10 分毎)

図 4-6 に雨天時の C1 と C3 における流量の計算値と EC の連続観測結果を示す。C1 から C3 への方向を流量の正の向きとする。C1 では流量が大きくなるほど EC が低くなり、C3 では流量が大きくなるほど EC が高くなる傾向が見られた、C1 と C3 で流量と EC のピアソンの相関係数はそれぞれ -0.706、0.520 (n = 144) となった。

これは正の流量は、C1 では河川水が流量するが、一方 C3 では晴天時に形成された汚染水塊が流出することを意味し、逆に負の流量

は C1 向かって汚染水塊が流れ、一方 C3 では河川水が流入することを意味するが、EC の変動は計算された水の流れと一致している。

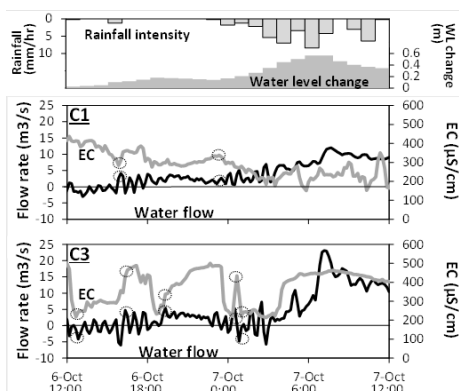


図 4-6 雨天時の C1 と C3 における流量計算結果と EC の連続観測結果 (流出解析は 1 時間ごとの降雨データを基に XPSWMM の地表面ヒュ解析モジュールを利用して行った。)

(2) 病原微生物調査

採取した試料における TC、EC、SMP、F ファージの測定結果、および AiV、EV、NV GI、NV GII、AdV の定量結果を表 4-1 に示す。

ハノイ市周辺の 4 ヶ所の畜産関連廃水における TC および EC は、 $2.5 \times 10^6 - 5.8 \times 10^8$ CFU/L と、 $3.5 \times 10^5 - 4.0 \times 10^7$ CFU/L の幅でそれぞれ検出され、全ての試料において比較的高いレベルでの糞便汚染が確認された(表 4-1)。特に、直接的な畜産廃水試料である地点 1 における TC と EC の濃度は、他の試料に比べ高かった。また、地点 2 および地点 3 において、ブタは飼育されていたがアヒルは飼育されていない試料では、他 2 回の採取試料に比べ、TC、EC の濃度が下がっていた。

表 4-1 採取試料における微生物の測定結果およびウイルスの定量結果

測定項目	採取地点			
	地点 1	地点 2	地点 3	地点 4
AiV	UD	UD	UD	UD
EV	UD	UD	UD	UD
NV GI	UD	UD	UD	UD
NV GII	6.7×10^3	UD	UD	$3.1 \times 10^3 - 3.7 \times 10^4$
AdV	UD	UD	UD	UD
TC	5.8×10^8	$3.7 \times 10^6 - 1.9 \times 10^7$	$2.5 \times 10^6 - 1.2 \times 10^8$	$3.2 \times 10^6 - 5.1 \times 10^6$
EC	2.9×10^7	$1.0 \times 10^6 - 2.0 \times 10^6$	$5.5 \times 10^5 - 4.0 \times 10^7$	$3.0 \times 10^5 - 1.8 \times 10^6$

豚飼育小屋の廃水 (地点 1)
豚飼育小屋からの廃水流入があるアヒルの飼育池の水 (地点 2) 豚飼育小屋からの廃水流入口 (地点 3)
河川水の流入があるアヒル飼育池の水 (地点 4)

ハノイ市周辺の地点 1 において NV GII が検出された。NV GII はブタの糞便から検出されるという報告があり、検出された NV GII は、ブタ由来であると考えられる。地点 1 - 3 において、高濃度に EC が検出されているものの、ヒトの腸管系ウイルス、特に、ヒトの糞便汚染指標として有力と考えられている AiV が検出されていないことは、地点 1 - 3 においてヒト糞便による汚染はなく、ブタ糞便

による汚染と考えられる。

一方で、河川水の流入がある地点4からも、NV GII が検出された。このウイルスは、アヒルから放出されたものではなく、利用した河川水に存在したウイルスであると考えられ、ハノイ市周辺の河川水に汚染が存在していることを示していると考えられる。

(3) 水アクセスに関する実態調査

水利用、水アクセスに関するアンケート・インタビュー調査に関しては、まず、母親、看護婦、JICA や NGO で活動している方々からの聞き取りを行い、それを踏まえて、ヒアリング項目や様式を決定する。そして、対面方式での母親ヒアリングを通じて、水利用状況と曝露量推定のためのデータを取得した。

図 4-7 に、雨季、乾季、および断水時における飲料水としての水アクセス実態調査結果を示した。フエ省の農村地域の 4 コミュニティでは、雨季や乾季に限らず、70 - 75% 程度の家庭で、飲料水としてボトル水や水道水を利用しているが、地下水を利用している家庭も相当数あることがわかる。また、水道水利用の家庭において、断水時での対応に関する調査では、ボトル水より地下水利用が主要な代替水となり、雨水利用もあることがわかった。

フエ農村部に関しては、水道水を含めて消毒処理が不十分で大腸菌の検出事例が認められたことから、簡易水道と地下水、さらには一部季節的利用されている雨水の水質検査を行うことが、健康リスク管理上重要であることがわかる。

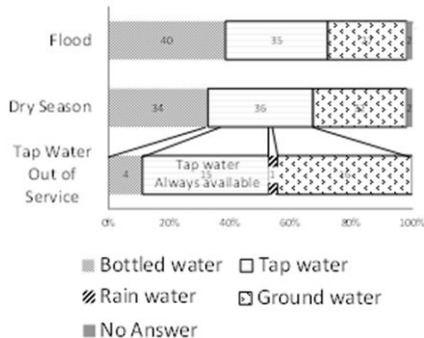


図 4-7 雨季、乾季、および断水時における飲料水としての水アクセス実態調査結果

水源については、乾季と雨季の季節による変化はないものの、水利用量には乾季と雨季の季節による変動が認められた。そこで、洪水時、雨季および乾季における病気発生に関する調査を実施した。

その結果を、図 4-8 に示す。フォーカスグループインタビューでは、下痢症に加え、皮膚病、眼科疾患、泌尿器系疾患、女児の婦人科系疾患が水系感染症と認識されていることが明らかになった。下痢症は、洪水時、雨季、乾季とも最も発生していることがわかる。特に、洪水時に疾患の発生が大きく、雨季と乾季には大きな違いが見られないこと

が分かった。

一方、フエ旧市街地では、洪水や浸水発生時には家屋の 2 階や 3 階に避難し、平常時に蓄えた水を利用していることなどが明らかとなった。

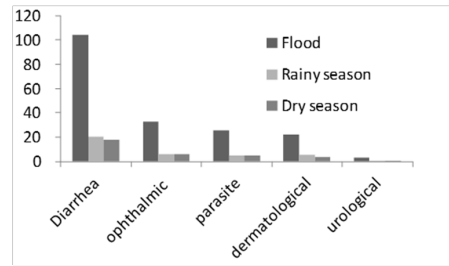


図 4-8 洪水、雨季、乾季における疾患発生に関する調査結果

飲料水とともに、健康に影響する水利用として、台所、洗面時の歯磨き、風呂の水源としての利用実態を調査した結果を、図 4-9 に示した。

これらの水アクセスについては、ほぼ比率は同等であり、水道水と地下水利用であり、ボトル水は利用されていない。この調査結果を活用して、飲料水だけでなく、水を介した病原微生物の曝露経路として、台所における食材や皿の洗浄水、歯磨き水、風呂水の影響も考慮することが重要であることが分かる。

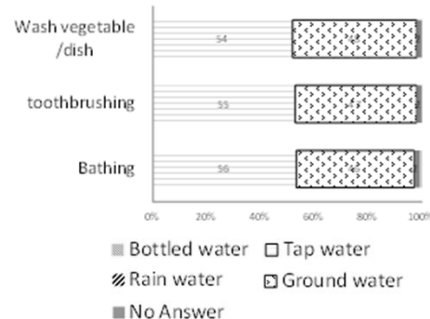


図 4-9 台所、洗面、風呂に用いる水利用実態調査結果

(4) 衛星画像による地表面解析と浸水シミュレーション

衛星画像を用いた地表面特性解析手順を精査して、Quickbird 衛星によるマルチスペクトル画像について、建物や道路、植生地や間地の抽出による浸透面、不浸透面の識別方法を検討した。しかし、舗装面と非舗装の道路の識別は困難であった。

一方、現地踏査により判明した排水路や下水管路と湖沼や調整池との接続状況を分布型流出モデルに反映してきた。また、標高データについても、水準測量を実施したことからモデルの高度化を進めることに成功した。

過去に 2 年に一度に発生する頻度豪雨レベルでの浸水実績図を、フエ市から入手できたことから、2 年確率の計画降雨条件を与えて、浸水シミュレーションを実施して、実績図との比較を行った。その結果を、図 4-10 に示

す。詳細な比較検討はできないものの、浸水しやすい地区の特定は可能であると判断される結果を得た。そして、過去の浸水実績図を再現できることを確認した。

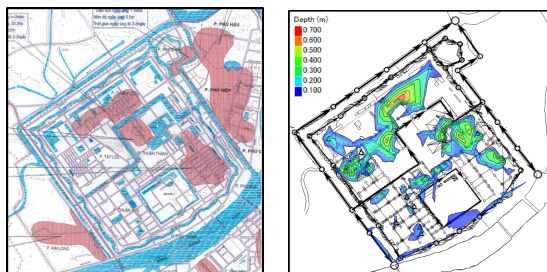


図 4-10 過去の浸水実績図と浸水シミュレーション結果（2年確率降雨）の比較

そこで、高度化を進めた分布型下水道モデルを用いて、フォン川の水位、すなわち、運河の水位の影響を考慮した浸水シナリオ解析を実施した。ここでは、先ほどと同じ2年確率の計画降雨を条件として、異なる運河水位を与えて、浸水範囲や浸水深さの違いを調べた。図 4-11 に示した。

その結果から、運河水位が浸水深さに影響を与えることを定量的に評価可能であることが分かった。

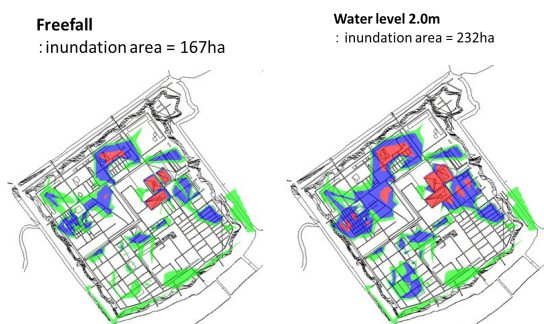


図 4-11 異なる運河水位条件における浸水範囲や浸水深さの比較（2年確率の計画降雨）

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) Yuichi. Nagano, T. Teraguchi, P. K. Lieu and H. Furumai: Characterization of water pollution in drainage networks using continuous monitoring data in the Citadel area of Hue City, Vietnam, Water Science & Technology (査読有), Vol 70, No 4, pp 612-619, 2014 doi:10.2166/wst.2014.243

〔学会発表〕(計 11 件)

- 1) Mnami INABA, H. Katayama and H. Furumai et al.: Detection of genus Kobuvirus for evaluation as virus indicator for fecal contamination source tracking from Nhue River in Hanoi, Vietnam, The

10th International Symposium on Southeast Asian Water Environment, 8-10, November, 2012, Hanoi, Vietnam

- 2) Mika Sata, H. Katayama and H. Furumai: Risk factors and water usage among children in Hue Province, Vietnam, Water and Environment Technology Conference 2013 (WET2013), 16-3B-13, p.50. (15-16 June, 2013, 早稲田大学, Tokyo)
- 3) Hiroaki Furumai: Advanced model and analysis of urban flooding in Hue Citadel area, International Symposium on Green Network of Excellence for Environmental Information, 15-16, December, 2013, Hue, Vietnam
- 4) Yuichi NAGANO, H. Furumai et al.: Characterization of water pollution during dry and wet weathers in canals and ponds in Hue Citadel area, International Symposium on Green Network of Excellence for Environmental Information, 15-16, December, 2013, Hue, Vietnam
- 5) Yuichi NAGANO and H. Furumai et al.: Hydraulic Model Validation by EC Continuous Monitoring Data In Hue Citadel Drainage System, 13th International Conference on Urban Drainage, Sarawak, Malaysia, 7-12 September, 2014
- 6) Pham Khac Lieu and H. Furumai et al.: Characterization of water pollution in pond and canal system in the Citadel of Hue, Vietnam, The 9th Inter-University Workshop on Education and Research Collaboration in the Indochina Region', Can Tho, Vietnam, September 27, 2014

〔図書〕(計 0 件) なし

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件) なし

取得状況 (計 0 件) なし

〔その他〕

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古米 弘明 (FURUMAI, Hiroaki)
 東京大学大学院・工学系研究科・教授
 研究者番号: 40173546

(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

(3) 連携研究者

春日 郁朗 (KASUGA, Ikuro)
 東京大学大学院・工学系研究科・講師
 研究者番号: 20431794