

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26241025

研究課題名(和文) 気候・社会・生態系の変動に対応した感染症リスク評価モデルの構築

研究課題名(英文) Development of risk assessment models for infectious diseases considering changes in climate, society and ecosystem

研究代表者

福士 謙介 (Fukushi, Kensuke)

東京大学・サステナビリティ学連携研究機構・教授

研究者番号：30282114

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,200,000円

研究成果の概要(和文)：アジアの途上国都市を想定し、気候変動や社会変動の影響を考慮した洪水起因の感染症リスクの定量評価モデルを構築した。まず、洪水時の行動を考えたQMRAを基本とし、家庭内における二次感染を考慮したモデルにより、ノロウイルス感染リスクを算出した。次に、気候パラメータにもとづくデング熱のリスク評価モデルを、デング熱罹患率の季節変動と都市内での空間変動に着目しながら、機械学習アルゴリズムを用いて構築した。

最後に、現地でのインタビュー調査により、洪水時に頻発する感染症の種類とそれに対する住民の感情を明らかにした。その結果にもとづいてDALYの算出手法を改良し、洪水時の感染症による経済損失を評価した。

研究成果の概要(英文)：Models for quantitative risk assessment of infectious diseases induced by urban flood were developed, considering effects of climate and societal changes, in some cities in Asian developing countries. One of the developed model was a QMRA-based model which enabled us to estimate risk of norovirus infection taking human behaviors in flood setting and human-to-human transmission in households into account. Another model to estimate risk of dengue fever based on climatic parameters, focusing on seasonal and spatial changes of its prevalence in cities, was developed using an algorithm for machine learning. We also clarified infectious diseases which happen frequently in flood settings and inhabitants' feeling to the diseases by means of interview surveys in the target cities. According to the result, the method to calculate DALY lost by the infectious diseases was modified and finally the economic loss due to the diseases induced by urban flood was quantified.

研究分野：サステナビリティ学

キーワード：感染症 リスク評価 途上国都市 洪水 気候変動 下痢症 デング熱 DALY

1. 研究開始当初の背景

アジアの多くの都市では、熱帯モンスーンに起因する洪水・浸水による被害を頻繁にうけている。この原因は、気候・地形的な特徴、河川整備の遅れ、急激な都市化に伴う不十分な都市の雨水排水インフラ、気象・水文観測情報提供システムの未整備など多岐にわたっている。洪水・浸水による被害は、水による直接的な人的被害、建物や自動車等の個人・公共財産のダメージなどの経済的被害にくわえ、洪水による衛生状態の悪化にともなう健康被害などが考えられる。

この洪水が引き起こす健康被害を定量化するためには、降雨、都市洪水、生態系、健康リスクの4つの要素を考慮した統合型の健康リスク評価モデルの構築、そして、評価された健康リスクの保健経済学的な分析手法が必要とされる。

2. 研究の目的

(1) アジアの途上国都市を想定し、気候変動や社会変動の影響を考慮した洪水起因の感染症リスクに関する定量的なモデルを構築する。

(2) 従来の障害調整生存年 (DALY) のコンセプトは維持しつつ、保健経済的な解析に用いることができる、より現実を反映した指標を開発する。

(3) 洪水や気象に伴う媒介蚊個体数 (生息面積) の増加と人の Dengue 感染リスクの関係をモデル化し、感染リスクを予測する。

3. 研究の方法

(1) 幾つかの対象都市において、洪水時の行動を考えた QMRA を基本とし、家庭内における二次感染の影響を考慮したリスク評価モデルを構築し、ノロウイルス感染リスクを算出した。洪水時のノロウイルス濃度は、指標微生物である大腸菌から類推した。気候変動予測に関して、RCP シナリオは 4.5 と 8.5 の2種類を解析した。GCM は当該地域に最も適合するものを選んだ。

(2) 研究対象地域におけるインタビュー調査により、洪水時の衛生状態の悪さやその際に流行する疾病を明らかにするとともに、その経験を通じて住民がいかに疾病を受け入れてきたか、について評価した。その評価結果を保健経済的解析に反映させるために、DALY 算出手法の改良を行った。

(3) 気候変動後の感染症リスクを蚊などのウイルス媒介生物 (ベクター) の変化に基づいて予測する疫学生態モデルを開発した。「①気候変動→②都市内の環境変化 (洪水等) →③ベクターの生態変化→④感染症リスクの増大」の仮説的關係を定量化するモデルである。モデル構築に必要な生息密度等の生態学的データを、各都市をグリッドに分割し、野外調査で集めた。また、同じ調査地点で気候

変動に関する気温、降水量、洪水頻度などの環境変数も調査する。そして、環境項目を説明変数、Dengue 熱罹患率 (人口あたり感染者数) や蚊個体数を目的変数とする Dengue 熱予測モデルを開発した。

4. 研究成果

(1) 気候変動は、都市における洪水の頻度と強度を上げることが予想されている。気候変動下での洪水予測と、洪水時における水系感染症リスクの予測の二つのカップリングを行い、図1に示すような結果を得た。水系感染症リスクの予測では、気候予測モデルと洪水の表面流出モデルに加えて、人間行動を考慮した QMRA モデルの連結を実施した。なお、今回は表面流出モデルには地下構造物を考慮していない。

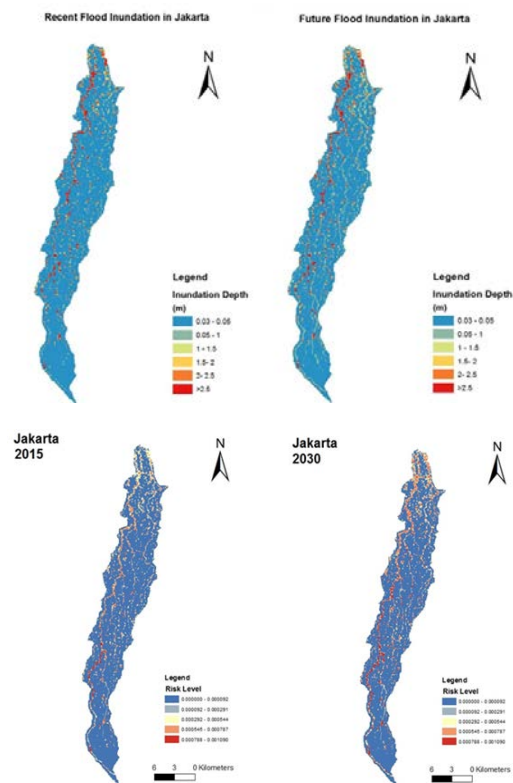


図1. ジャカルタにおける洪水 (上段) とそれに伴うノロウイルス感染リスク (下段) の予測結果。なお、上下段ともに、左図が 2015 年、右図が 2030 年の予測結果である。

同様の解析を他の都市においても行った。本解析により、将来的な下痢症のリスクが定量的に推定でき、水系感染症を未然に防ぐための排水処理システムなどを合理的に整備するための科学的根拠が得られた。不確実性に関しては気候予測モデル、リスク推定モデル共に多分の不確実性を含み、また、社会のインフラ整備状況にリスク推定モデルや表面流出解析モデルは大きく影響されるので、定期的な解析が今後必要となるであろう。

(2) 研究対象地域におけるインタビュー調

査により、洪水時に発生頻度が高まる感染症等の疾病の種類について明らかにした。図2には、ベトナム・フエ市における調査結果を示すが、約半数の住民が「下痢症」の発生頻度が高まると答えた。

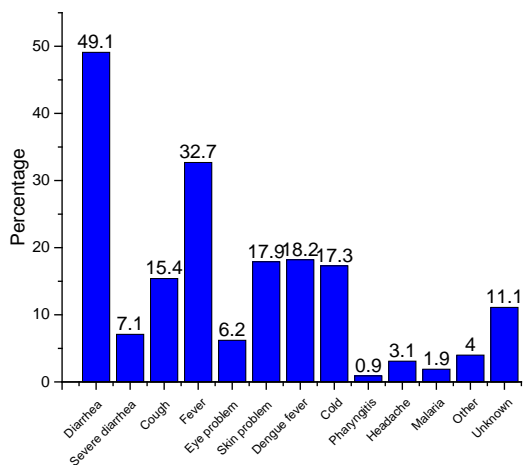


図2. 洪水時に発生頻度が高まると思われる疾病（ベトナム・フエ市の例）

その他の対象地域においても、洪水時の下痢症はありふれた疾病とみなされていた。このことから、洪水に見舞われる地域の住民は、洪水がない地域の住民に比べて、下痢症に対する負担意識が低下している（慣れている）という仮説を立てた。この仮説を検証するために、障害調整生命年（DALY）の重要なパラメータである障害の重みづけ係数（DW）を用いた。すなわち、下痢症の負担（症状の重さ、心理的な負担も含む）と他のよく知られた疾病（腰痛、心疾患、結核など）の負担を比較して、下痢症のDWを相対的に推定した。その結果、いずれの対象地域でも、洪水の経験の有無によって、下痢症のDWに有意差がなかった。

ここで得られたDWには、洪水の影響は見られなかったが、アジアの途上国都市の住民の疾病に対する意識が反映された指標として用いることができる。最終的に、このDWを使ってDALY（感染症による損失時間）を計算し、経済損失の評価につなげた。

(3) 2014年1~12月にフィリピンのメトロマニラでネッタイシマカのサンプリングを行った（図3）。モスキートトラップと呼ばれる捕獲口の赤外線蛍光灯により蚊を引きつけ、内部のファンにより採取する機器を使用して蚊の成虫を採取した。メトロマニラの75グリッドから計725個体のネッタイシマカが採取された。

インドネシア・バンドンにおいても同様の調査を行った。2017年にバンドン市内の16行政区に分布する440~498世帯/月（のべ1381世帯）に同トラップを設置し、 Dengue熱を媒介するネッタイシマカとヒトスジシマカの成虫を採取した。トラップを設置してから24時間後にトラップで捕獲された蚊標

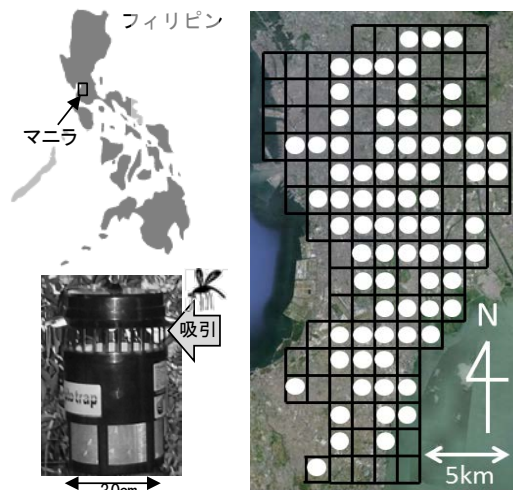


図3. フィリピンのメトロマニラ全域に分布する125グリッドの各3家庭で採取調査を行い、○で示した75グリッドかでネッタイシマカを採取した。電動採捕器(左下)で蚊成虫を採取した。

本を回収することで、採捕努力量（採取時間）あたり個体数を定量的に評価した。採取個体数は調査対象の16行政区の間で大きな空間変動が見られた。調査世帯（調査期間は各1日）あたりの採捕個体数は0.56個体/日/世帯であった。採捕された全775個体のうち433個体は吸血活動をするメス個体であった。

両都市ともにネッタイシマカとヒトスジシマカの2種が採取されたが、生息する Dengue熱媒介蚊のほとんどはネッタイシマカであることが確認された。これら2種のうち、ヒトスジシマカは比較的自然環境が残された生息環境を好み、ネッタイシマカは家屋などの人間の生活域に近いエリアを好んで住むことが知られている。都市化が進んだマニラとバンドンの環境を反映した種構成となっていると考えられる。

メトロマニラで全604バラングイ（行政区）における4段階の洪水強度と住宅地、産業地域、商業地域、農業地域、水源、森林など19カテゴリーの土地利用区分の面積率に関するGISデータを整備した。これら20変数を説明変数として、バラングイ間の2012年に観測された Dengue感染率（人口当たり感染者数）の空間変動を説明する機械学習モデルの一つである Random Forest Model を使って作成した。その結果、決定係数0.90という高い精度で2012年に実測された各バラングイの Dengueリスクを説明するモデルが構築された（図4）。洪水頻度もモデル変数の一つとして選択され、洪水強度が中程度のバラングイの Dengue罹患率が高くなる傾向を説明した。洪水による水域の拡大は Dengue熱媒介蚊の産卵や幼虫の生息場となるが、洪水強度が高すぎる地域では、卵や幼虫が流されるために、 Dengue熱罹患率が高まらないことが考えられた。

バンドン市の2009年から2015年（7年間）

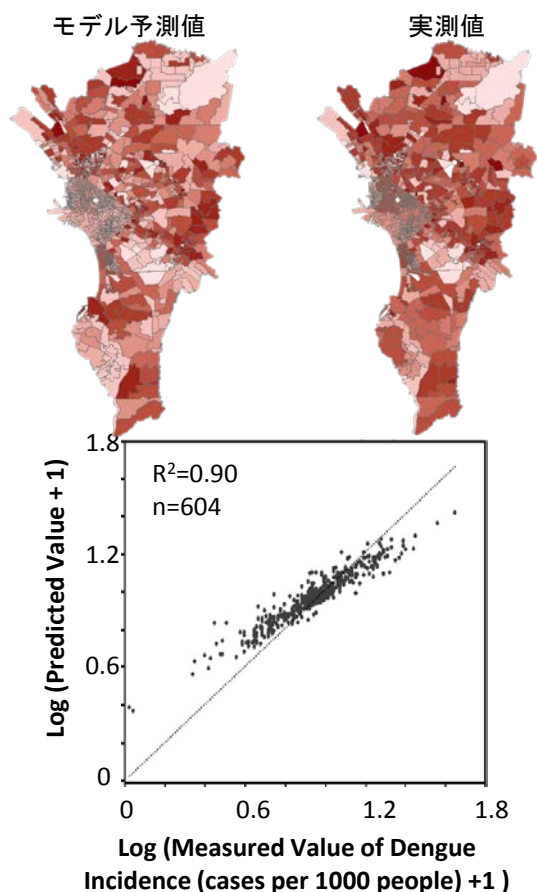


図4. メトロマニラの各バラングアのデングリスク（人口当たりのデング感染者数）. 左が本研究で開発した機械学習モデルによる予測値の相関図.

の降水量、気温、湿度、風速、気圧の5つの気象変数とデング熱患者数の経月変化の相関をラグタイム（遅れ時間）を考慮して解析した。ラグタイムを考慮した理由は、降水等の気象イベントが起きた直後にデング熱患者が発生するとは考えにくく、ある一定期間の遅れ時間をおいてからデング熱流行が始めると考えたためである。7年間の時系列データの単相関分析の結果、降水量、月最低気温、湿度が2ヵ月後、月最高気温が1ヵ月後のデング熱患者数と有意な相関を有することが明らかになった。特に降水量や湿度の相関は、降雨により水だまりが増えて、蚊が産卵・孵化をして、羽化した成虫の吸血活動により感染した患者にデング熱の症例が発症するまでに要する期間として合理的に説明できるラグタイムとなった。このことから、これら気象変数に基づいてデング熱患者数の中長期的動態を予測できる可能性が示された。

(4) 上記の研究成果を報告する場として、2016年7月7日に、デング熱シンポジウム「Dengue and Urban Climate」をマニラのデラサル大学で開催した。当日は200名以上の若手研究者・学生がフィリピン、日本、インドネシア、オーストラリア、イギリス、ア

メリカから集まり、有益な意見交換ができた。



また、2015年12月にインドネシア・バンドンにおいて、国際シンポジウム“Overview of Facts In The Field Against Mosquitoes, Dengue Virus, Human And Problems in Bandung City”を開催し、気候変動や社会変動に伴うデング感染リスクに関する研究発表や意見交換を行った。



(5) 定期的な研究会の設定、情報共有のためのプラットフォーム構築、アウトリーチ活動を行った。情報共有は当初 DIAS を活用する予定であったが、簡便な使用方法を模索した結果、クラウド型のデータシェアリングシステムにおいてデータ交換等を行った。アウトリーチとしては2017年1月にインドネシア・バリ州にて開催された第2回 NIES Forum（国立環境研究所・東京大学・アジア工科大学院の共催）において、当研究グループの成果を発表するセッションを設けた。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計9件）

1. Kei Nukazawa, So Kazama, and Kozo Watanabe, Catchment Scale Modeling of Riverine Species Diversity Using Hydrological Simulation: Application to Tests of Species-Genetic Diversity Correlation, *Ecohydrology*, 10, e1778, 2017, DOI: 10.1002/eco.1778, 査読有
2. Thaddeus M. Carvajal, Lara Fides T. Hernandez, Howell T. Ho, Menard G. Cuenca, Bianca Marie C. Orantia, Camille R. Estrada, Divina M. Amalin, and Kozo Watanabe, Spatial Analysis of Wing Geometry in Dengue Vector

- Mosquito, *Aedes aegypti* (L.) (Diptera: Culicidae) Populations in Metropolitan Manila, Philippines, *Journal of Vector Borne Diseases*, 53(2), 127 - 135, 2016, 査読有
3. Fuminari Miura, Toru Watanabe, Kozo Watanabe, Kazuhiko Takemoto, and Kensuke Fukushi, Comparative Assessment of Primary and Secondary Infection Risks in a Norovirus Outbreak Using a Household Model Simulation, *Journal of Environmental Sciences*, 50, 13-20, 2016, DOI: 10.3390/w8050188, 査読有
 4. Bin Li, Kozo Watanabe, Dong-Hwan Kim, Sang-Bin Lee, Muyoung Heo, Heui-Soo Kim and Tae-Soo Chon, Identification of Outlier Loci Responding to Anthropogenic and Natural Selection Pressure in Stream Insects Based on Self-Organizing Map, *Water*, 8(5), 188, 2016, DOI: 10.1016/j.jes.2016.05.041, 査読有
 5. Kei Nukazawa, So Kazama, and Kozo Watanabe, A Hydrothermal Simulation Approach to Modelling Spatial Patterns of Adaptive Genetic Variation in Four Stream Insects, *Journal of Biogeography*, 42, 103-113, 2015, DOI: 10.1111/jbi.12392, 査読有
 6. Thaddeus M. Carvajal and Kozo Watanabe, Environmental determinants in the control of dengue mosquito vector, *Aedes aegypti*, Proceedings of 7th ASEAN Environmental Engineering Conference featuring the 5th Seminar on Asian Water Environment, WW19, 2014, 査読有
 7. 三浦郁修, 渡部徹, 渡辺幸三, 福士謙介, 家庭内二次感染を考慮した下痢症の地域内伝播モデルの構築と検証, *土木学会論文集G (環境)*, 70(7), III_295-III_304, 2014, 査読有
 8. 高瀬陽彦, 糠澤桂, 風間聡, 渡辺幸三, 分布型水文モデルと確率密度関数を用いた底生動物の生息環境および種多様性評価, *土木学会論文集 B1(水工学)*, Vol.70, No.4, I_1297-I_1302, 2014, 査読有
 9. 糠澤桂, 風間聡, 高瀬陽彦, 渡辺幸三, 水生生物の生息場適性度と遺伝的多様性の関係, *土木学会論文集 B1(水工学)*, Vol.70, No.4, I_1405-I_1410, 2014, 査読有
- [学会発表] (計 19 件)
1. Kozo Watanabe, Thaddeus M. Carvajal, Lia Faridah, Dwi Agustian, Nurrachman, Fedri Rinawan, Howell T. Ho, Divina Amalin, Chiho Watanabe: The Correlation of Urban Climate and Dengue: Metro Manila and Bandung Cases, The Japan Geoscience Union and the American Geophysical Union joint meeting, Makuhari (Japan), 2017.5.21
 2. Fuminari Miura, Toru Watanabe, Kozo Watanabe, Kensuke Fukushi: Time series analysis of seasonal correlation between concentration of norovirus in sewage and clinical cases of acute gastroenteritis, 19th IWA-HRWM Symposium, North Carolina (USA), 2017.5.15
 3. Kozo Watanabe, Eco-epidemiology of Dengue Mosquitoes in the Philippines: Modeling and Genetic Approaches, Philippine Society of Parasitology, Inc. 9th Scientific Meeting, Manila (Philippines), 2017.3.10
 4. Kristin Joyce Go, Kazuki Hashimoto, Angel Judan Cruz, Thaddeus M. Carvajal, Monique Martinez, Jayson Capistrano, Vincent Stefano, Divina Amalin and Kozo Watanabe, Presence of *Wolbachia* sp in *Culex* sp. from Metro Manila, Philippines, 9th Scientific Meeting of the Philippine Society for Parasitology, Manila (Philippines), 2017.3.10
 5. Thaddeus M. Carvajal, Yoshiki Kubo, Katherine M. Viacrusis, Lara Fides T. Hernandez, Howell T. Ho, Divina Amalin, and Kozo Watanabe, Dengue risk modeling in Metro Manila, Philippines using land use and climate variables, 2nd International Forum on Sustainable Future in Asia, Bali (Indonesia), 2017.1.28
 6. Thaddeus M. Carvajal, Kristin Joyce D. Go, Monique Martinez, Jayson Capistrano, Vincent Stefano, Divina Amalin and Kozo Watanabe, Presence of *Wolbachia* sp. in mosquito species of Metro Manila, Philippines, International Congress of Entomology, Orlando (USA), 2016.9.28
 7. Gia Thanh Nguyen, Yuri Kanaya, Jian Pu, Toru Watanabe, Modified disability weights for diarrhea diseases based on feeling of flood-affected people in Asian developing countries, WET2016, Tokyo (Japan), 2016.9.27-28
 8. Thaddeus M. Carvajal, Kohei Ogishi, Sakiko Yaegashi, Lara Fides T. Hernandez, Katherine M. Viacrusis, Howell T. Ho, Divina Amalin, and Kozo Watanabe, Fine-spatial genetic

- analysis of dengue vector, *Aedes aegypti*, in Metropolitan Manila, Philippines, Dengue & Urban Climate Symposium, Manila (Philippines), 2016.7.7
9. Nukazawa, K., Kazama, S., Watanabe, K., Predicting Biodiversity of Aquatic Insects Under Changing Climates in Japan, and a Vision for Habitat Modeling of Dengue Vectors, Dengue & Urban Climate Symposium, Manila (Philippines), 2016.7.7
 10. Thaddeus M. Carvajal, Howell T. Ho, Yoshiki Kubo, Lara Fides Hernandez, Katherine Viacrusis, Divina Amalin, Kozo Watanabe, Impacts of Climate Change on Dengue in Metro Manila, Philippines, Symposium on Climate Change Adaptation in Indonesia, Balli (Indonesia), 2016.3.11
 11. D. Agustian, L. Faridah, A. Berbudi, F. Rinawan, K. Watanabe, The Ecology of Dengue in Bandung, West Java, 2016-2017, The 3rd JSPS-AASPP/GRENE-EcoHealth joint International Symposium on Development of International Network on Health Risk Assessment in Urban Area, Balli (Indonesia), 2016.3.11
 12. Thaddeus M. Carvajal, Kohei Ogishi, Sakiko Yaegeshi, Lara Fides T. Hernandez and Katherine M. Viacrusis, Kozo Watanabe, Genetic inference of spatial dispersal pattern of dengue vector mosquito *Aedes aegypti* in Metro Manila, Philippines, The 3rd JSPS-AASPP/GRENE-EcoHealth joint International Symposium on Development of International Network on Health Risk Assessment in Urban Area, Balli (Indonesia), 2016.3.11
 13. Kozo Watanabe, Eco-epidemiologic Study of Dengue Vector Mosquito, *Aedes aegypti*, In The Philippines., Seminar on the Overview of Facts In The Field Against Mosquitoes, Dengue Virus, Human And Problems in Bandung City, Bandung (Indonesia), 2015.12.8
 14. Fuminari Miura, Toru Watanabe, Kozo Watanabe, Kensuke Fukushi: Importance of secondary infection within households in epidemic of waterborne infectious diseases, 6th IWA-ASPIRE Conference & Exhibition, Beijing (China), 2015.9.20
 15. Thaddeus M. Carvajal, Howell T. Ho, Yoshiki Kubo, Lara Fides Hernandez, Katherine Viacrusis, Divina Amalin, Kozo Watanabe, Impacts of Climate Change on Dengue in Metro Manila, Philippines, Symposium on Climate Change Adaptation in Indonesia, Balli (Indonesia), 2016.3.11
 16. Thaddeus M. Carvajal, Kohei Ogishi, Sakiko Yaegeshi, Lara Fides T. Hernandez and Katherine M. Viacrusis, Kozo Watanabe, Genetic inference of spatial dispersal pattern of dengue vector mosquito *Aedes aegypti* in Metro Manila, Philippines, 3rd JSPS-AASPP/GRENE-EcoHealth joint International Symposium on Development of International Network on Health Risk Assessment in Urban Area, Balli (Indonesia), 2016.3.11
 17. Kozo Watanabe, Eco-epidemiologic Study of Dengue Vector Mosquito, *Aedes aegypti*, In The Philippines., Seminar on the Overview of Facts In The Field Against Mosquitoes, Dengue Virus, Human And Problems in Bandung City, Bandung (Indonesia), 2015.12.8
 18. 渡部 徹、福士 謙介、片山 浩之、渡辺 幸三、降雨、洪水、水環境と健康：世界と日本、第 74 回日本公衆衛生学会、長崎ブリックホール（長崎市）、2015.11.4-6
 19. 大岸航平, Thaddeus M. Carvajal, 八重樫咲子, 渡辺 幸三, マイクロサテライトマーカーを用いたマニラのデング熱媒介蚊の遺伝子流動の評価, 応用生態工学会第 19 回大会, 日本大学 (福島県・郡山市), 2015.9.10
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
 福士 謙介 (FUKUSHI, Kensuke)
 東京大学・サステイナビリティ学連携研究機構・教授
 研究者番号：30282114
 - (2) 研究分担者
渡部 徹 (WATANABE, Toru)
 山形大学・農学部・教授
 研究者番号：10302192
渡辺 幸三 (WATANABE, Kozo)
 愛媛大学・理工学研究科・教授
 研究者番号：80634435