

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560617

研究課題名(和文) 水文学的視点からの再生可能エネルギーの限界と脆弱性

研究課題名(英文) Hydrological limitation and vulnerability of renewable energy

研究代表者

鼎 信次郎 (KANAE, SHINJIRO)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：20313108

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：2050年の世界の一次エネルギー需要は2010年の約2倍から3倍にまで上るかもしれないと予想されるが、このような中、再生可能エネルギーのプラスとマイナスについて、グローバルな水資源研究の側面から貢献することが本研究の狙いであった。最終的には、将来のエネルギー利用形態に応じたグローバルな水利用量について検討することができた。複数の社会経済および気候シナリオに基づくエネルギー需要量の推計に対して、世界の複数地域に区分した場合のエネルギーに対する水利用量を算定した。その中で、再生可能エネルギーの選択の違いや導入レベルの違いが与える影響、CO2排出削減とのコベネフィットなどについて算定、検討した。

研究成果の概要(英文)：While it is anticipated that primary energy demand of the world will increase double or triple in 2050, advantage and disadvantage of renewable energy introduction were investigated particularly from the viewpoint of global water resources assessment. As a consequence, the following investigation was able to be carried out. Under several future socioeconomic and climate scenarios, also by dividing the world into several regions, for each future energy demand, water withdrawal demand was estimated. In it, the impact of choices of renewable energy options and the impact of differences in renewable energy introduction levels were investigated. In addition, co-benefit with CO2 emission reduction was also calculated and discussed.

研究分野：水文・水資源学

キーワード：世界水資源モデル 再生可能エネルギー 冷却水 世界水資源アセスメント

### 1. 研究開始当初の背景

エネルギー問題と温暖化対策への切り札は、再生可能エネルギーである。しかし、未来社会における再生可能エネルギーの限界と脆弱性は、ほとんど検討されてこなかった。温室効果ガス排出削減等の関心から、再生可能エネルギーの一つとしてバイオ燃料が注目され、近年は利用増加の一途をたどっている。バイオ燃料は主に植物を原料として作られ、これを化学反応させて得られたエネルギーはバイオエネルギーと呼ばれている。

一方で、バイオ燃料の生産増大は限りある土地・水資源をめぐる食糧との競合、農地拡大に伴う生態系の破壊、水資源の枯渇といった事態を引き起こす可能性があること懸念されており、事態を悪化させないためにも、「バイオ燃料はどの程度、世界のエネルギー需要を満たすことができ、導入に値するのかどうか」という問いに対する答えが早急に求められているが、その研究が十分に行われていないのが現状である。

バイオ燃料のみならず、エネルギー・水・食料は相互に依存している。この3分野の需要がともに増加する中で持続可能な社会を維持するためには、相互関係によってもたらされる影響について評価し、対策を講じていくことが必須である。近年この相互関係について多くの研究が行われているが、エネルギーが水に与える影響については比較的最近注目されるようになった。一口にエネルギーが水に与える影響と言っても、水力発電や燃料の採掘に使用する水などがあるが、本研究では、発電所で発電をする際に使用する水に焦点を当てる。

一般的に、発電所を建設する際に考慮される要因として、コストや土地利用、都市部からの距離など様々なものがあげられるが、現状では水はあまり重要な要因ではない。しかし、水逼迫の状況下にある地域では、水がないためにエネルギーに影響が出るケースもすでに起こっている。いくつかの発電所では水を使う冷却方法(Once-through cooling)を、水を何度も循環させた冷却方法(Recirculating Cooling)に換えることによって、使用する水量を抑えるという対策が講じられている。しかし、Recirculating CoolingはOnce-through coolingよりもコストが高く、発電効率も悪くなる。このように、燃料があっても水がないために発電ができないというケースは今後増加する可能性が大いに考えられる。水需要、エネルギー需要が共に増加する将来においては、このように発電方法の選択をする際に水が与える影響力が大きくなる可能性が高い。また、可動性という面で考えてみると、エネルギーは可動だが、水は可動ではない。これは文字通り、エネルギー(発電所)は移動できるが水資源は移動できないという意味もあるが、それだけではなく、エネルギーは減らすなり増やすなり量の調節ができる。しかし、水(淡水)は有限

であり、減らすことはできても容易に増やすことはできないという意味も含んでいる。更にエネルギーに関しては、燃料、発電方法、冷却方法それぞれについて様々な選択肢があり、その点においても可動であると言える。従って、融通の利くエネルギーサイドから、融通の利かない水サイドへとアプローチすることが大変重要であると言える。

### 2. 研究の目的

上記のような背景から、ここでは二つの側面を取り上げる。一つは、将来の90億人の食料確保の上でのバイオ燃料の増産は、水資源の限界によって不可能かもしれないという恐れ。二つ目は、洪水・干ばつ等の極端現象の激化が危惧されているが、自然環境に依存する再生可能エネルギーは、極端現象の変化に対してきわめて脆弱かもしれないこと。この二つについてのアセスメントを全球もしくは地域ごとに行うことを目的とした。H24年度は1つ目の側面、H25年度は2つ目の側面について研究を行った。

上記の経験から、エネルギー使用量が変化することによって、水がどのような影響を受けるかということの解明することが重要であると考えた。そこで、最終年度であるH26年度は、将来の複数の政策シナリオに基づいて発電用水需要量の算出方法を考え、発電による水需要への影響を評価することを目的とする。

### 3. 研究の方法

H24年度は、バイオ燃料ポテンシャルだけでなく、他の項目においても共通の基礎データとなる気候データ、土地利用データ、陸面水文モデルのための標高データ、それと整合した新たな河川網データの整備などの収集・整備を行った。また、過去の気候データについては、研究代表者らがこれまで構築してきたデータセットをベースとし、将来の気候データはIPCCの最新データセットであるCMIP5の出力を適切にバイアス補正・ダウンスケールすることによって作成した。

複数の食糧必要シナリオを設定し、それらを全球水資源モデルへ導入することによって、全球バイオ燃料ポテンシャルを計算した。

H25年度は、低水に関わる積雪や氷河などの水資源数値モデルについて改良を進め、遠隔導水スキームの導入も可能とした。次に、高水・低水およびメコン川流域を対象として最新のCaMa-Flood水文モデルの設定、運用を可能とし、低水と発電に関わるモデルモジュールを導入し、干ばつ時のシミュレーションをおこなった。高水に関わる氾濫およびデルタでの分岐分流、海面上昇および温暖化時の流量及び氾濫の変化を推定した。

H26年度は、全球を対象とし、2010年から2100年までの発電用水需要量の推定を行った。まずは、将来の発電量予測が必要である。この予測については、国立環境研究所よ

り提供を受けた IPCC 第 5 次報告書に向けて開発された最新の気候変動予測シナリオ (RCPs) と社会経済シナリオ (SSPs) に基づいた 13 種のエネルギー源別発電量 (図 1) を用いた。このデータは、気候変動緩和策として導入される低炭素エネルギーの選択の違い、またその導入レベルの違いを見ることができ、そこから各シナリオでの発電用水需要量を算定した。ここでの低炭素エネルギーとは、再生可能エネルギーや二酸化炭素貯留 (CCS) の導入のことであり、低炭素依存社会においては必須の技術である。水の側面から見ると、風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギーは水をほとんど必要としない。一方で、CCS 技術を導入した火力発電所では、従来の 1.3~3 倍の水を必要とすることが分かっている。

また、本研究では発電用水量を決定する大きな要因となる冷却方式について二通りのケース (現状維持ケース、高効率ケース) を想定した。ここで用いる冷却方式とは、Once-through cooling と Recirculating Cooling であり、その他の冷却方式については、未だ導入している割合は少ないので考慮しないこととした。また、本研究ではバイオエネルギー以外の再生可能エネルギーの水使用量はゼロとした。上記の現状維持ケースとは、現状のエネルギー源別の Once-through cooling と Recirculating Cooling の冷却方法の割合が変化しない場合を想定している。高効率ケースでは、Recirculating cooling が 1 年で 0.4% 増加し、Once-through cooling が 1 年で 0.4% 減少すると仮定した。

発電冷却用を使用する水には海水由来と淡水由来の二つが考えられるが、本研究では淡水由来の水使用量のみを見積もるため、「海岸から 1 グリッド以内にある発電所は冷却水に海水を用いている」と仮定した。ここでは、全世界 230 か国以上の発電所約 6000 プラントの位置データ (図 2) から、海岸からの距離を算定 (図 3) し、海水を用いて発電している発電量の割合を求めた。

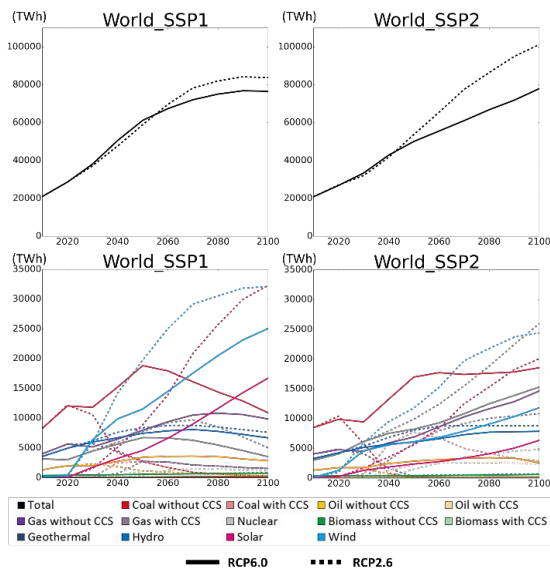


図1 13種のエネルギー源別全球発電量の将来予測

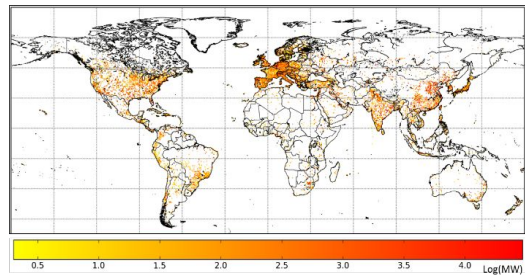


図2 発電容量の全球分布

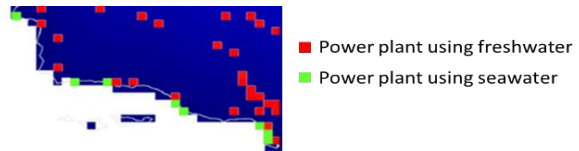


図3 カリフォルニア州における取水源別 (海水・淡水) 発電所の分布。

#### 4. 研究成果

H24 年度の成果としては、バイオ燃料の栽培地としてより現実的である放棄地および休耕地を対象としてバイオ燃料ポテンシャルの推定結果を示すことで代表する。バイオ燃料作物には 7 種の作物: アブラナ・コムギ・コメ・サトウキビ・ダイズ・テンサイ・トウモロコシを選択し、全球水資源モデル H08 によりこれら 7 種の作物の全球収量を 0.5° の空間解像度で再現した。現在の放棄地および休耕地においてバイオ燃料作物の作付けを想定し、放棄地および休耕地面積をそれぞれ 420Mha, 325Mha と算定した。

各大陸・国別のバイオ燃料ポテンシャルおよび現在の一次消費エネルギーを表 1 にまとめた。本研究が推定したバイオ燃料ポテンシャルは、放棄地と休耕地を合計して約 237EJ (うち残余 80EJ) となり、これは現在の世界の一次消費エネルギーの約 47% に相当する。今回推定したバイオ燃料ポテンシャルを大陸別みると、アメリカ大陸、アフリカ大陸、アジアの 3 地域で推定値の約 90% を占めている。アメリカ大陸とアジアにおいては、一次消費エネルギーが大きいいため、エネルギー比が 0.3~0.5 程度にとどまっている。

表 1 各大陸・国のバイオ燃料ポテンシャルと各大陸・国の一次消費エネルギー、およびそのエネルギー比。( )内の数字は残余のポテンシャルを表す。単位は EJ。

地域・国名	A: 一次消費エネルギー (EJ)	B: バイオ燃料ポテンシャル (EJ)	バイオ燃料ポテンシャルの内訳 (EJ)		エネルギー比 B/A
			休耕地	放棄地	
オセアニア	5.78	6.65	2.67	3.98	1.15
ヨーロッパ	124	16.1	6.75	9.38	0.13
アメリカ	91.4	31.9	13.4	18.5	0.35
ブラジル	9.45	10.7	3.28	7.44	1.13
アメリカ大陸	142	72.5	29.8	42.7	0.51
インド	21.9	6.35	3.71	2.64	0.29
中国	102	17.9	7.82	10.1	0.18
アジア	196	68.5	33.5	35.0	0.34
アフリカ大陸	15.6	72.7	36.0	36.7	4.66
世界合計	503	237	109 (31.2)	128 (48.5)	0.47 (0.16)

アフリカ大陸に関しては、一次消費エネルギーが小さいため、エネルギー比が 4.6 という大きな値となった。

一方でヨーロッパに関しては、バイオ燃料ポテンシャルが小さいことに加え、一次消費エネルギーも大きいため、エネルギーは 0.1 と小さい。先行研究の推定値が約 1120EJ であるので、本研究の推定値との差は約 880EJ であるが、この差のほとんどが、高地やサバンナなどの、これまで耕作が行われてこなかった土地をバイオ燃料作物の栽培地として利用をするかどうかの違いに由来している。

また、放棄地の劣化土壌による影響評価も試みた結果、放棄地のバイオ燃料ポテンシャルが約 24%低下するという結果が得られた。

H25 年度の成果は、全球河川モデルの一つである CaMa-Flood とリスクアセスメントの手法を組み合わせることによって、水文学的に計算された水の挙動から高水に関わる氾濫およびデルタでの分岐分流を考慮した洪水のポテンシャルダメージ（実際の被害額ではなく、起こりうる被害）の推定結果を示すことで代表する。図 4 は、2000 年 MODIS によって観測された氾濫域の分布と、CaMa-Flood によって計算した浸水深の分布を示す。CaMa-Flood の計算ではメコンデルタの南部における氾濫は過大評価であるが、トンレサップ湖周辺からメコンデルタ北部にかけての広い範囲での氾濫や、タイの支流は本流中流域での比較的小規模な氾濫がよく表現できることが分かった。また、CaMa-Flood で計算した 2000 年の最大浸水深を用いて推定したポテンシャルダメージを表 2 に示した。

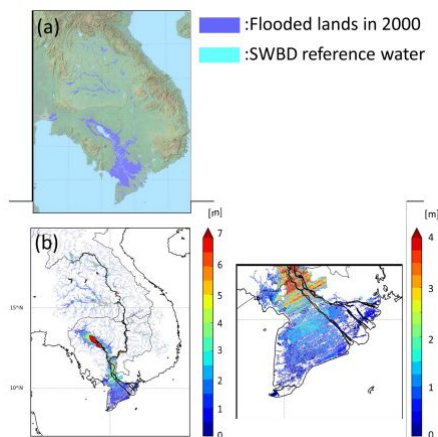


図 4 2000 年洪水における氾濫域および年最大浸水深の分布 (a)MODIS による観測された氾濫域 [DFO, 2014], (b) CaMa-Flood による浸水深[m] また、(b)においてはメコンデルタにおける拡大図も同様に示した。

表 2 2000 年洪水のポテンシャルダメージ合計[mil 1990USD]。赤字は楽観的、青字は悲観的な Depth-Damage 関数を用いた場合である。

	ベトナム	カンボジア	タイ	ラオス	ミャンマー	中国	流域全体	デルタ全体
DFO(2014)	344	100	193	ND	ND	ND	919	33€
推定値	521	321	1,840	110	3	12	2,810	53€
	1,070	614	3,640	197	8	34	5,560	1,10€

H26 年度は、13 種のエネルギー源別発電量の複数シナリオを用いて、世界を 6 地域に区分した場合の各発電の冷却方式毎の発電用水需要量を算出した。ここでは、全球総計の結果のみ示すこととする。

図 5 は、冷却方式現状維持ケース下におけるエネルギー源別全球発電用水需要量の推定結果である。

図 5 (右) の現状の続きに近い SSP2 の将来社会下では、RCP2.6 と RCP6.0 の推定結果に大きな差は見られなかった。RCP2.6 と RCP6.0 の推定結果はともに、2010 年で全体として 500km<sup>3</sup> 程度の需要量が、2100 年で 1500 km<sup>3</sup> 以上とおよそ 3~4 倍となる見込みとなった。図 1 から 2100 年までの RCP6.0 シナリオ下における主要エネルギーは、化石燃料であるが、原子力エネルギーも漸増する。しかし、RCP2.6 と比較すると原子力エネルギーの使用増加率は低くなっている。原子力エネルギーは他の燃料と比較し、通常 2~10 倍の冷却水を使用するため、RCP2.6 シナリオにおいても取水が多く必要となる推定結果となる。結果として、GHG 排出の程度に関わらず、水利用量は増加する結果となり、GHG 排出削減と発電用水需要量はトレードオフの関係となることが明らかとなった。

図 5 (左) の再生可能エネルギー主体の社会を目指す SSP1 シナリオ下では、2030 年以降 RCP2.6 と RCP6.0 の推定結果に大きな差が始める。RCP6.0 の推定結果では、2050 年ごろ 1000km<sup>3</sup> ほどの取水となり、ピークを迎える。一方、RCP2.6 の推定結果では、2020 年の 700 km<sup>3</sup> をピークに発電用水需要量が減少し始める。これは、図 1 の各シナリオの設定の違いから由来することが考えられる。RCP6.0 シナリオ下では、再生可能エネルギーの使用が増加するものの、依然主なエネルギー源は化石燃料である。一方、RCP2.6 シナリオ下では、化石燃料が劇的に減少し、主なエネルギー源は再生可能エネルギーへとシフトする。本研究では、再生可能エネルギーの発電用水需要量はゼロと仮定しているため、大きく減少する結果となった。以上から、GHG 排出削減と発電用水取水量はコベネフィットの関係にあることが明らかとなった。

図 6 は、冷却方式高効率ケース下におけるエネルギー源別全球発電用水需要量の推定結果である。このケースの場合は、水をさほど使用しない Recirculating cooling の割合が高くなるため、全体として取水量は減少する。このケースでは、GHG 排出及び社会経済想定の違いに関わらず、2100 年には 2010 年の取水量 500km<sup>3</sup> を下回る結果となることが分かった。

現状維持ケースと高効率ケースのエネルギー源別全球発電用水需要量 (図 5 と図 6) を比較すると、2100 年の現状維持ケースでの発電用水需要量が高効率ケースでのおよそ 5~7 倍になることが明らかとなった。以



上のことから，本研究では，採用される冷却方式の違いが社会経済シナリオや GHG 排出シナリオ以上に発電用水取水量に影響を与える可能性が示唆された。

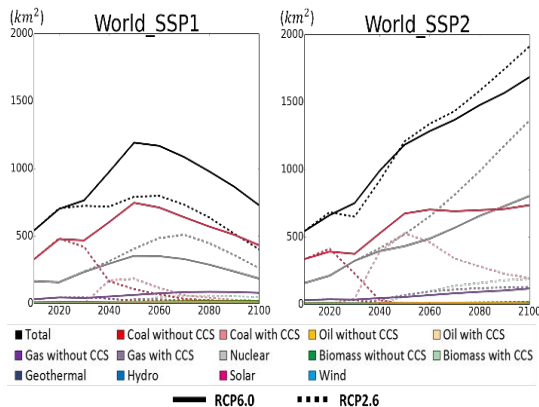


図5 冷却方式現状維持ケースにおける全球発電用水取水量（左図：SSP1・右図：SSP2）

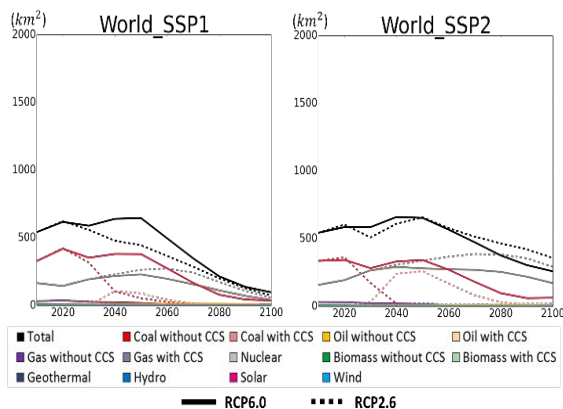


図5 冷却方式現状維持ケースにおける全球発電用水取水量（左図：SSP1・右図：SSP2）

## 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 10 件)

渡辺恵, Sujana Koirala, 平林由希子, 鼎信次郎 (2015) アジア高山域起源の大河流域における 21 世紀の氷河融解の進行と年流出量への影響, 土木学会論文集 B1 (水工学), 71, I\_445-I\_450.

柳川亜季, 吉川沙耶花, Jaeil CHO, Hyungjun KIM, 鼎信次郎 (2015) 乾燥地における土地利用期間が干ばつへの脆弱性に与える影響, 土木学会論文集 B1 (水工学), 71, I\_931-I\_936.

Yoshikawa, S., J. Cho, H. G. Yamada, N. Hanasaki and S. Kanae (2014) An assessment of global net irrigation water requirements from various water supply sources to sustain irrigation: rivers and reservoirs (1960–2050), *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 4289–4310, doi:10.5194/hess-18-4289-2014.

Yoshikawa, S., A. Yanagawa, Y. Iwasaki, P. Sui, S. Koirala, K. Hirano, A. Khajuria, R. Mahendran, Y. Hirabayashi, C. Yoshimura, and S. Kanae (2014) Illustrating a new global-scale approach to estimating potential reduction in fish species richness due to flow alteration, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 621–630, doi:10.5194/hess-18-621-2014.

石田裕之, 小林翔太, 鼎信次郎, 長谷川知子, 藤森真一郎, 申龍熙, 高橋潔, 増井利彦, 田中朱美 (2014) 最新のシナリオフレームワークに基づいた将来の低栄養起因健康被害の推定, 土木学会論文集 B1 (水工学), 70, I\_463-I\_478.

Sato, T., D. Yamazaki, W. H. Lim, S. Koirala and S. Kanae (2014) Modeling the impact of sea level rise to potential flood damage in the Mekong, *Journal of Japan Society of Civil Engineers (B1)*, 70, I\_103-I\_108.

岩崎明希人, 井芹慶彦, Lim Wee Ho, 鼎信次郎 (2014) 熱帯低気圧による全球経済的損失の将来推計, 土木学会論文集 B1 (水工学), 70, I\_469-I\_474.

Hirabayashi, Y., Y. Zhang, S. Watanabe, S. Koirala and S. Kanae (2013) Projection of glacier mass changes under a high-emission climate scenario using the global glacier model HYOGA2, *Hydrological Research Letters*, 7(1), 6–11.

萩原健介, 石田裕之, 花崎直太, 鼎信次郎 (2013) 農作物の栽培を想定した世界のバイオ燃料ポテンシャルの推定, *環境科学会誌*, 26, 287–296.

Watanabe, S., S. Kanae, S. Seto, P. J.-F. Yeh, Y. Hirabayashi, and T. Oki (2012), Intercomparison of bias-correction methods for monthly temperature and precipitation simulated by multiple climate models, *J. Geophys. Res.*, 117, D23114, doi:10.1029/2012JD018192.

〔学会発表〕(計 8 件)

Gao, L. S. Yoshikawa and S. Kanae (2014) Optimizing the integrated efficiency for water resource utilization: based on Economic perspective, AGU fall meeting, San Francisco, USA.

Yoshikawa, S., J. Cho, H. G. Yamada, N. Hanasaki and S. Kanae (2014) Global net irrigation water requirements from various water supply sources during past and future periods, AGU fall meeting, San Francisco, USA.

Kanae, S., D. Yamazaki, H. Hirabayashi, S. Koirala, M.

Roovabannan, T. Sato, H. Kim, H. Ikeuchi (2013) Flood risk projection for large river basins with delta in Southeast Asia, AGU fall meeting, San Francisco, USA.

Koirala, S., Y. Hirabayashi, M. Roovabannan and S. Kanae (2013) Changes in streamflow percentiles under climate change, AGU fall meeting, San Francisco, USA.

Khajuria, A. and S. Kanae (2013) Resource Management: Implication on scarcity and stress, The Fourth Asian Conference on Sustainability, Energy and environment, Osaka.

Kanae, S. (2013) Future flood and flood risk under climate change, JST-NSERC Workshop on 'Sustainable Water Use', Tokyo (招待講演).

Kanae, S. (2012) Impact and adaptation to climate change, The 5<sup>th</sup> AUN/SEED-net Regional Conference on Global Environment, Bandung, Indonesia (招待講演).

Kanae, S. (2012) Application of a global water resources model to the estimation of blue/green/virtual water flows and bioenergy potential, IISD-GWSP Conference on the Water-Energy-Food Security Nexus, Manitoba, Canada (招待講演).

〔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

鼎 信次郎 (KANAE, Shinjiro)

東京工業大学 大学院理工学研究科・教授

研究者番号：20313108

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし