

jh220018

日本全土の洪水氾濫被害と適応策の検討

峠 嘉哉（東北大学）

概要

気候変動による洪水被害に対する緩和策と複数の適応策の効果を評価した。二次元不定流モデルと治水経済調査マニュアルを用いて、洪水時の浸水深と被害額を算出した。近未来期と 21 世紀末における洪水被害を推定するため 5 つの GCM を入力値として将来の浸水深と被害額を求めた。また、適応策として土地利用規制とピロティ建築、治水水準の向上に着目し、その被害額軽減効果を検証した。21 世紀末において RCP8.5 シナリオの場合現在気候の 1.5 倍程度まで増加する被害額を、RCP2.6 基準まで緩和することにより洪水被害額を 1.2 倍程度の増加に抑えることができると推定された。また、組み合わせを実施することにより、将来気候においても被害額を現在気候以下に抑えられる可能性があると推定された。更に緩和策と適応策の両方を実施することにより、21 世紀末において洪水被害額を現在気候の 69%まで抑えられる可能性が示された。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

東北大学 サイバーサイエンスセンター

(2) 共同研究分野

■ 超大規模数値計算系応用分野

(3) 参加研究者の役割分担

峠嘉哉、東北大学、総括

風間聡、東北大学、洪水氾濫モデル開発

柳原駿太、東北大学、洪水氾濫モデル開発

滝沢寛之、東北大学、数値計算高速化

山本道、東北大学、入力データ作成

池本敦哉、東北大学、洪水氾濫モデル開発

岡本彩果、東北大学、入力データ作成

2. 研究の目的と意義

近年、平成 27 年関東東北豪雨、平成 29 年 7 月九州北部豪雨、令和元年東日本台風など日本各地で豪雨災害が発生している。Kawase et al. (BAMS, 2020) は平成 30 年西日本豪雨への気候変動影響を指摘するなど、気候変動による豪雨災害の強化・増加が喫緊の問題となっている。適応策の策定が急務であり流域治水等が提言されているが、適応策の選択肢は多様であり包括的で定量的な効果の算定は行われておらず、将来予測値に対して適切な適応策を検討する

という「気候適応の科学」が工学に必要である。豪雨被害が深刻となっている日本でこそ、世界に先駆けて検討する価値がある。

気候変動研究では、多種の全球気候モデル (GCM) と社会経済シナリオ (SSP シナリオ) ごとの影響評価が主流となっており、その適応策は流域治水のように多様な対策の組み合わせが検討されるようになった。そのため将来の洪水被害を求めるには、将来気候予測・将来社会経済・適応策の組み合わせ毎にシナリオ数を乗じることになり、計算が大規模化する。高性能な計算環境や計算の高度化が不可欠である。

洪水氾濫モデルでは高精度計算の実現に水理パラメータ調整が必須である。パラメータ調整は手作業で行う場合も多いが、日本全国では不可能なため自動化・最適手法が有効である。

東北大学サイバーサイエンスセンターは、計算負荷分散の最適化やパラメータ最適化の実績がある。計算負荷分散の最適化によって、大規模なシナリオ分析が実現でき、ベイズ理論によるパラメータ最適化の手法を氾濫モデルに応用することで、粗度等の主要なパラメータを最適化する技術などによってシミュレーションの高速化を図ってきた。水理学・計算科学の双方の技術の融合により本研究は実現できる。

3. 当拠点公募型研究として実施した意義

研究目的を達成するためには、洪水予測・評価の数値シミュレーションの高速化が不可欠であり、その開発のための計算機資源が必要である。これまでの研究により、特に日本全域の計算には、地方または流域に分ける並列化による高速化の効果が高いことがわかっている。しかし、本研究では日本全土を空間分解能 250m かつ時間刻み 30 秒程度で数日間のシミュレーションによって浸水域と浸水期間を求めるには、単純な並列化だけでは十分な高速化を実現できない。さらに、経済モデルの付加による被害金額推定や将来気候モデルの活用、様々なシナリオ、多様な洪水対策など、本研究では総計算数が 360 通りであり、より高性能計算システムの有効利用が不可欠である。加えて並列化の最適配置やモデルパラメータの同定などは一部経験的な手法に頼っているケースも多く、最適な領域区分やパラメータ値を自動的に求めるに至っていない。水理学・流体力学的な計算技術は土木工学において用意されるが、高速計算や数値計算モデルの最適化についてはサイバーサイエンスセンターにおいてノウハウがあり、これらを併せることによって、高精度な洪水リスク計算が可能となった。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要 該当しない

5. 今年度の研究成果の詳細

5.1 データセット

気候予測情報として、農研機構地域気候シナリオ 2017-v2.7r によって 1km 分解能までダウンスケリングされた日降水量を用いた。これには 5 つの気候モデルと 2 つの放射強制力シナリオ (RCP) を利用した。使用されている GCM は GFDL-CM23, HadGEM2-ES, MIROC5, MRI-CGCM3, CSIRO-Mk3-6-0 の 5 つであり、RCP8.5 と RCP2.6 の 2 つのシナリオが対象とされている。対象期間は 1981 年から 2000 年 (現在気候) と 2031 年

から 2050 年 (近未来), 2081 年から 2100 年 (世紀末) の三期間とした。

洪水氾濫計算および浸水深から被害額を算出する過程で利用する土地利用データとして、5 次メッシュの土地利用データを使用した。このデータは、国土数値情報ダウンロードを利用した。地盤勾配データは国土数値情報ダウンロードの標高・傾斜度 5 次メッシュ内に格納されている平均傾斜角度を使用した。

人口データは、国土数値情報ダウンロードの 1km メッシュ別将来推計人口 (H30 国政局推計) における 2015 年の推計人口値を用いた。

5.2 解析方法

氾濫被害の計算方法は昨年 (2021) の風間の手法 (jh210001) と同一である。

洪水氾濫計算において、浸水深算出のために二次元不定流モデルを用いた。空間解像度は 5 次メッシュ (約 250m 四方) 解像度を用いた。日本全域を同時に氾濫解析するとともに、河川と氾濫原は区別せずにデカルト座標系の二次元不定流モデル (Tezuka et al., IJDRR, 2014) を適用して解析を行った。日極値降雨データを 24 時間で一定強度に与えて解析を行った。二次元不定流モデルにおいて、家屋は流体が浸入しない領域と仮定し、家屋の抵抗を考慮することとした。氾濫解析に用いたパラメータは Tezuka らの手法と同様である。

国土数値情報データの土地利用分類に従い、治水経済調査マニュアル (案) を参考に、土地利用区分ごとの計算手順を作成した。年期待被害額 (EAD) の算出には再現期間 30 年, 50 年, 100 年, 200 年の各洪水被害額に生起確率を乗じて求めた規模別年平均被害額を累計し、年期待被害額とした。

頻度分析により AMeDAS 地点における各再現期間の日降水量を現在気候と将来気候のそれぞれに対し求める。以上により得られる日降水量の比を降水量の増加率とした。これを逆距離荷重法により日本全土に分布させて降水量の

増加率分布とした。これに現在気候の確率洪水寄与降雨分布を掛け合わせて得られる降雨分布を将来気候における極値降雨分布とした。

緩和策の効果は RCP8.5 シナリオの被害額と RCP2.6 シナリオの被害額の差額とする。

5.3 適応策

日本においては行政の取組みとして、総合治水対策が進められてきた。総合治水対策を構成する三つの対策として、地域特性に応じた流域である。以下に本研究における各適応策の適用手法を示す。

a) 土地利用規制

現在気候における再現期間 200 年の洪水時に 3m 以上浸水した建物用地の土地利用のうち、人口密度が 10,000 人/km²以下のメッシュを撤退させたとして、被害額を計上しない。人口密度の制限を設けたのは、東京のような人口密集地において土地利用規制は非現実的であるからである。図-1 に人口密度分布を示した。人口密度が 10,000 人/km²を超える箇所を赤色で示した。主に東京と大阪を中心に高人口密度エリアが分布していることが分かる。これらの地区は経済活動拠点が集積しており、撤退を進めること

は容易ではない。したがってこうした高人口密度に対してはピロティ建築による洪水対策を検討する。

図-2 に規制後の土地利用の変化の一例として比較的規制面積の大きい荒川下流域の土地利用の変化を示す。

b) ピロティ建築

撤退が難しい地域に対してピロティ化を試みた。人口密度が 10,000 人/km²を超え、再現期間 30 年の洪水解析において 0.5m 以上浸水（床上浸水）するメッシュの建物用地メッシュをピロティ建築に置換した。ピロティのメッシュにおける被害額計算においては、ピロティ化により 3m 嵩上げすることを仮定し、浸水深を 3m 下げて被害額を計上した。

c) 治水水準の向上

水系の計画規模と河川区間種別の治水安全度の目標を反映させるように河道掘削を行い、整備目標を 100%達成した状態を再現した。水系の計画規模と河川の区間種の対応は、1 級直轄河川は水系の計画規模の半分の規模、1 級指定河川は 1 級直轄河川の半分の計画規模、1 級指定外河川は 1 級指定河川の半分の計画規模、2 級河川は 10 年確率規模、2 級指定外河川は 5

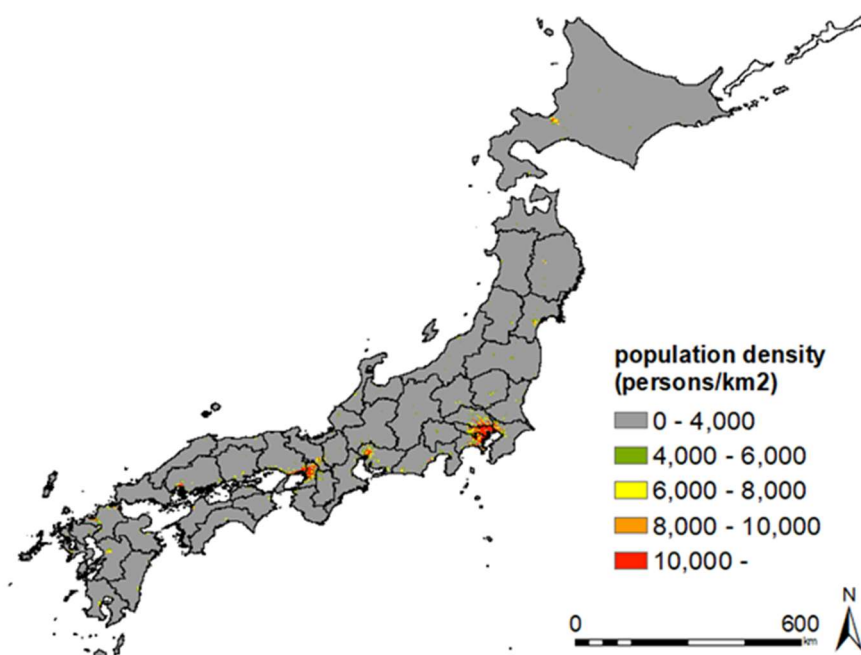


図-1 人口密度分布

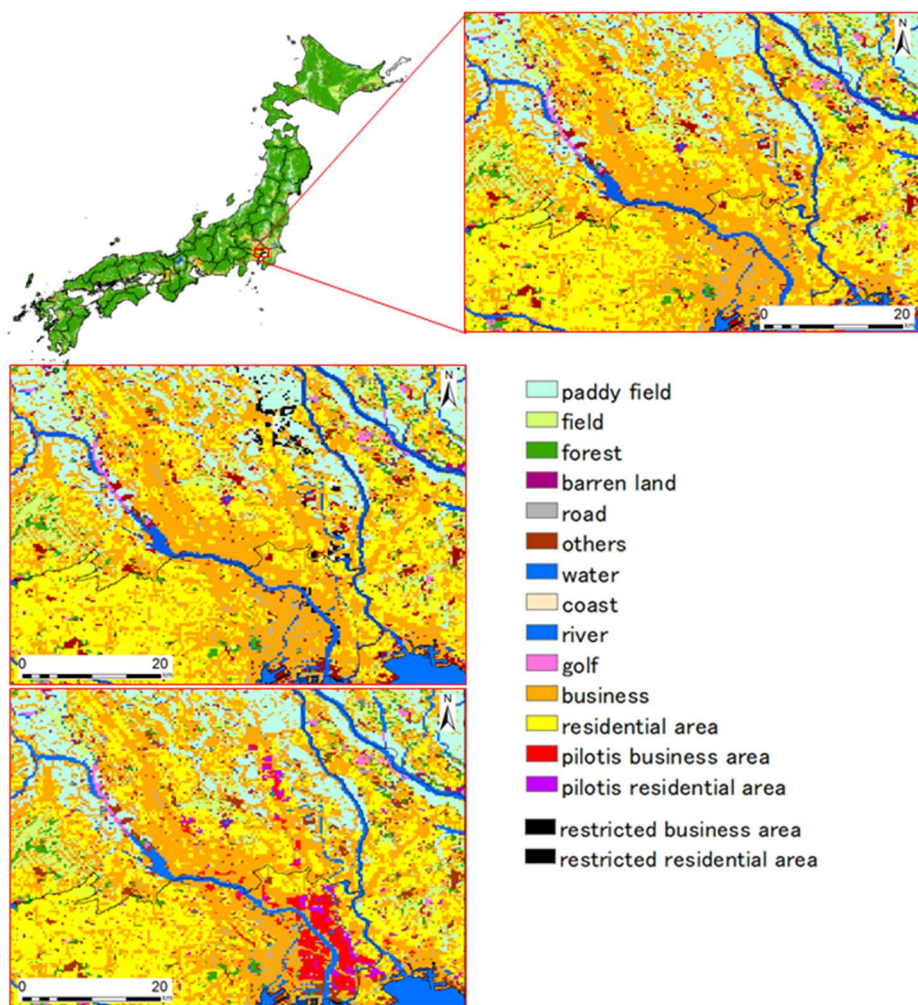


図-2 土地利用規制とピロティ建築適用前後の土地利用分布（東京近郊）

右上：元の土地利用。左上：土地利用規制後。左下：ピロティ化後

年確率規模と設定している。

5.4 解析結果

図-3 に各種対策を実施した場合の洪水の年期待被害額（5 モデル平均値）を示す。年期待被害額は 3 兆 5532 億円/年と推定された。年期待被害額が大きい都道府県は順に大阪府、東京都、愛知県、埼玉県、北海道 である。

a) 土地利用規制による洪水被害額の軽減

土地利用規制の対象セル数は 9256 であり、面積は 578.5 km²である。年期待被害額は 2 兆 7559 億円/年と推定された。土地利用規制を行わなかった場合の現在気候の年期待被害額から 22%減少した。年期待被害額軽減割合が 50%

を超えた都道府県は、長崎県、鹿児島県、奈良県、秋田県、長野県の 5 県である。これらの県は地形的に氾濫が広がりにくい傾向があり、土地利用規制の対象エリアが元来洪水リスクが高いエリアの多くと一致したため、対策の効果が如実に表れたと考えられる。

近未来期において土地利用規制を行った場合の年期待被害額は、土地利用規制を実施しない現在気候条件と比べ、RCP2.6、RCP8.5 両シナリオにおいて 11%増加すると推定された

世紀末において土地利用規制を行った場合の年期待被害額は、土地利用規制を実施しない現在気候条件と比べ、RCP2.6 シナリオにおいて 1.2%減少、RCP8.5 シナリオにおいて 23%増加す

ると推定された。

b) ピロティ化による洪水被害額の軽減

ピロティ化を行った場合、現在気候の降水条件において年期待被害額は2兆9336億円/年となり、ピロティ化を行わない場合に対し17%減少した。ピロティ化を施したセル数は3714であり、面積は232km²である。

一方、近未来期においてはピロティ化を施した現在気候の条件と比べ、約1.5倍に増加した。適応策を行わない近未来期と比べると13~14%の被害額が減少する。しかしながら現在気候から近未来期への被害額増加率は適応なしの場合よりピロティ化を施した場合の方が、わずかに大きくなる。ピロティ化の基準が現在気候の

降水条件に依存するためだと考えられる。将来の洪水被害を減少させるには、土地利用や建築制限には将来予測を踏まえて行うべきである。

21世紀末においては被害額がピロティ化を行わない現在気候よりもRCP2.6において8%、RCP8.5において34%増加すると推定された。

c) 治水水準の向上による洪水被害額の軽減

治水水準を現況の50%から整備目標の計画規模の洪水流量を流せる水準まで引き上げた場合、現在気候の降水条件において年期待被害額は2兆9581億円/年となり、50%の整備状況に対し、17%減少した。一方、近未来期においては土地利用規制を施した現在気候の条件と比べ、約1.5倍に増加した。適応策を行わない近

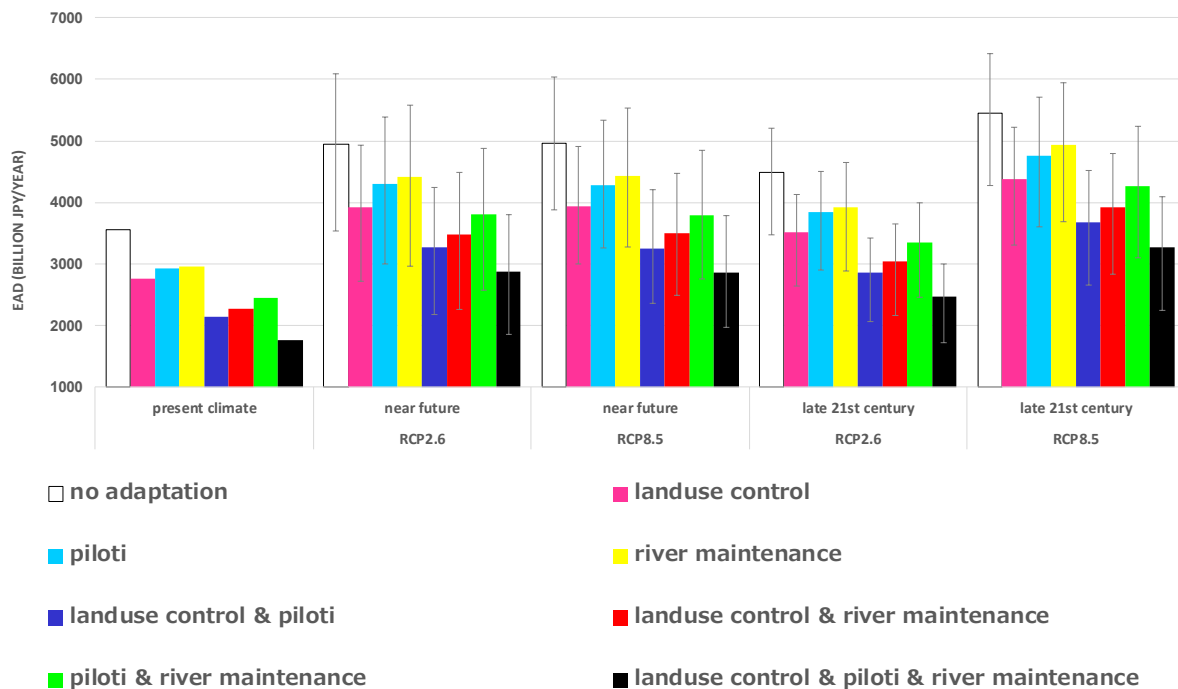


図-3 洪水の年期待被害額。エラーバーは5モデルの最大値と最小値を示す

表-1 現在気候・適応策なしの場合の年期待被害額に対する各シナリオの年期待被害額の割合 (%)

(%)	no adaptation	landuse control	piloti	river maintenance	landuse control & piloti	landuse control & river maintenance	piloti & river maintenance	landuse control & piloti & river maintenance	
present climate	100	78	83	83	60	64	69	50	
near future	RCP2.6	139	111	121	124	92	98	107	81
	RCP8.5	140	111	120	125	92	98	107	80
late 21st century	RCP2.6	126	99	108	110	80	85	94	69
	RCP8.5	154	123	134	139	104	110	120	92

未来期と比べると11%被害額が減少する。21世紀末においては、現況整備状況かつ現在気候降水の条件と比べ、RCP2.6で10%増、RCP8.5で39%増となった。現況整備状況かつ世紀末降水条件と比較すると、RCP2.6で13%減、RCP8.5で10%減であった。いずれのシナリオにおいても、他の適応策より効果が小さい。

d) 洪水被害額推定モデルの精度

本手法による洪水氾濫解析の精度について検証する。1980年から2000年の水害統計における一般資産等被害額を都道府県ごとに集計すると、被害額が大きい順に愛知県、東京都、北海道、大阪府、埼玉県となる。これはモデルによる推定結果において被害額が大きい都道府県と一致する。したがって被害額分布は概ね再現出来ていると考えられる。一方、被害額の絶対値は一致しない。モデルの推定結果は全国で3兆5531億円であるが、水害統計は2427億円である。これは洪水を発生させる降水の空間発生確率を考慮していないためだと考えられる。

将来気候推定の際のモデル選択による不確実性について考察する。適応策を行わない条件においては年期待被害額の標準偏差は5666億円/年から9532億円/年とモデル間のばらつきは非常に大きい。特に近未来期においては、RCP2.6とRCP8.5の5モデル平均被害額の差額が132億円/年であるので、被害額の逆転が生じる可能性がある。したがってGCMモデルの不確実性については十分留意が必要である。

e) 気候変動による洪水被害の推移と緩和策の効果

緩和策を行わないRCP8.5シナリオの5モデル平均洪水被害額は世紀末ほど大きくなると推定された。一方緩和策を行うRCP2.6シナリオの5モデル平均洪水被害額は近未来期をピークに世紀末にかけて減少すると推定された。RCP8.5シナリオにおいてGFDL-CM23を除く4モデルの洪水被害額が現在気候、近未来期、世紀末期の順に増加した。GFDL-CM23の世紀末被害

額は近未来期被害額から7%余り減少したが、しかし、同モデルのRCP2.6シナリオにおける近未来期被害額から世紀末被害額への減少幅は約24%であることと比べるとRCP8.5シナリオの被害額の減少幅は小さいといえる。したがって5モデル全体の傾向として時間が経つごとに洪水被害額が増加すると考えられる。

(3) 複数の適応策を組み合わせる場合の洪水被害軽減

三つの適応策は個別に実施した場合、現在気候の被害額以下に抑えることが難しい。表-1に現在気候において適応策を実施していない場合に対する各種適応策と緩和策を実施した際の洪水被害額の割合を示す。赤色、橙色、黄色で示したパターンは現在気候において適応策を実施していない場合よりも被害額が増加する。個別に適応策を実施する場合、将来気候においては被害額が増加するパターンがほとんどである。RCP2.6シナリオの値は緩和策と適応策を同時に実施した場合の洪水被害額の変化と捉えることができる。近未来期においては緩和策の有無に関わらず洪水被害が同程度増加する。ため、緩和策と適応策の両方を行うことによる特段の効果は見られない。しかしながら、世紀末においては両対策を行うことにより被害額を大きく減少させることができる。例えば、RCP8.5シナリオにおいては、土地利用規制、ピロティ化、治水水準の向上の全てを実施するシナリオ以外は被害額が適応策なしの現在気候条件よりも増加するが、RCP2.6シナリオにおいては複数の適応策を組み合わせると、土地利用規制を行う場合において適応策なしの現在気候よりも被害額を小さく抑えることができるとみられる。三つの適応策全てを実施した場合においては、適応策なしの現在気候条件に比べ69%にまで被害額を抑えられるという結果を得た。これらの結果は、緩和と適応両方の成功が気候変動対策において重要であることを裏付けるものと言える。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

サイバーサイエンスセンターの高速化技術によって 360 通りの適応策の組み合わせを計算することができ、計画以上に実施することができた。今後は適応策のコベネフィット（他の便益）と併せて効果を評価し、地域に応じた効果的な適応策の提案をする予定である。

7. 研究業績一覧（発表予定も含む）

(1) 学術論文（査読あり）

[1] Hayata Yanagihara, So Kazama, Tsuyoshi Touge, Yoshiya Touge, Estimation of the effect of future changes in precipitation in Japan on pluvial flood damage and the damage reduction effect of mitigation/adaptation measures, PLOS Climate, 1(7): e0000039, 2022. 7. 11.

[2] 柳原駿太, 風間聡, 多田毅, 山本道, 峠嘉哉, 共有社会経済経路 (SSP) を用いた気候変動と土地利用変化による日本全国の洪水被害の変化, 土木学会論文集 G (環境), Vol. 78. No. 5, pp. I_387-I_396, 2022.

[3] 池本敦哉, 風間聡, 吉田武郎, 柳原駿太, 峠嘉哉, ため池の治水活用の潜在的効果と県別の洪水被害軽減の評価, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 78. No. 2, I_265-I_270, 2022.

(2) 国際会議プロシーディングス（査読あり）

[1] Hayata Yanagihara, Tao Yamamoto, So Kazama, Estimation of Inland Flood Damage Based on Extreme Precipitation in Japan, Proceedings of the 39th IAHR World Congress, 08-03-006-214, 2022.

(3) 国際会議発表（査読なし）

[1] Hayata Yanagihara, So Kazama Yoshiya Touge, Nationwide Evaluation of the Damage-mitigation Effect of Adaptation Measures to Pluvial Flooding in Japan, HS07-A003, AOGS, 2022. 8. 3. Online.

[2] So Kazama, Hajime, Yanagisawa, Spatial Frequency Analysis of Extreme Precipitation Using d4PDF in Whole Japan, HS07-A007, AOGS, Online, 2022.

(4) 国内会議発表（査読なし）

[1] 風間聡, 近年の河川災害にみる問題点と適応策・対策, 地域防災シンポジウム, 茨城大学, 水戸, 2023.

[2] 柳原駿太, 風間聡, 多田毅, 山本道, 峠嘉哉, 人口変動に伴う土地利用変化を考慮した将来の洪水被害の全国評価, 水文・水資源学会, 宇治, 2022.

[3] 風間聡, 水害受容社会の可能性 (水文・水資源学会), 日本学術会議公開シンポジウム / 防災学術連携シンポジウム, 東京, 2022.

(5) 公開したライブラリなど

<http://kaigan.civil.tohoku.ac.jp/kaigan/papers/opendataj.html>

(6) その他（特許, プレスリリース, 著書等）