

令和 元年 9 月 2 日現在

機関番号：82114

研究種目：基盤研究(B)（海外学術調査）

研究期間：2015～2018

課題番号：15H05136

研究課題名（和文）気候変動及び社会経済シナリオを考慮した広域河川氾濫リスク予測モデル開発

研究課題名（英文）Development of large-scale river flood risk model considering climate change and socio-economic scenarios

研究代表者

郭 栄珠（KWAK, YOUNG-JOO）

国立研究開発法人土木研究所・土木研究所（水災害・リスクマネジメント国際センター）・研究員

研究者番号：60586642

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、不確実性を持つ将来気候変動に伴う洪水リスクの影響を明らかにするため、気候変動及び社会経済シナリオ（人口やGDPの想定）を考慮したアジア諸国の氾濫原、特に途上国の主要大
河川における洪水リスクの時空間変化を予測するモデルを開発し、洪水リスク評価と予測の高度化を図ることから水害適応策の立案を支援することを主な目的とする。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、大規模な国際河川における緊急及び長期的な洪水モニタリングの高度化のため、アジア諸国における河川氾濫リスクを出来る限り正確に推定できるモデルとアルゴリズムを開発する基礎研究である。本研究の水害リスク評価プロセスは、広域的な国土モニタリングおよび水災害リスク管理、国家政策のフレームワークの標準化など貴重な防災情報を氾濫危険区域に住んでいる地域住民へ信頼性の高い防災リスク情報を提供すし、洪水被害軽減及び緊急復興活動支援にも貢献できた。

研究成果の概要（英文）：The main objective of this research is support to a decision making for the advanced prediction of temporal and spatial changes using a new flood risk model based on climate and socio-economic synarios (population and GDP) in Asian floodplains particularly developing countries.

研究分野：防災管理

キーワード：洪水 水害リスク 気候変動 氾濫予測

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、世界では、気象変化の影響や気象の極端化が現れ、これまで経験のない集中豪雨に起因する土砂災害や大規模洪水が発生するようになった。特に、近年アジア諸国では著しい人口増加と経済成長の影の側面として、大規模な洪水や土砂災害などの自然災害が増えている。それに対して、グローバルな水循環研究は 1990 年代以降発展し、最近全大陸を対象とした水循環推計が可能となってきた。さらに、超高解像度全球大気循環モデル(MRI-Atmospheric General Circulation Model: AGCM)による将来気候変動予測や代表的濃度パスシナリオ(RCP: Representative Concentration Pathways)に基づいた地球システムモデル実験なども着実に進展している。また、グローバルスケールの 1 km 格子で地表面水循環が推計される「Grand Challenge」に対して水文研究が始まろうとしている。

研究代表者は、これまで全球及びアジア諸国における河川氾濫リスクを対象に、現在の最大リスクと将来変化予測に関する基礎研究・評価を行った。洪水事象が現在気候下で約 50 年に 1 回の頻度で起こる洪水リスクの分析結果(バングラデシュ人民共和国の危険度は 1 位)である。アジア諸国中、調査可能な 14 カ国の脆弱性指標を調べ、洪水と相関性が高い指標(高齢者人口率、栄養失調率、都市化率、腐敗認識指数、早期警報)を選定して新たなリスク評価を行った。特に水害に対して脆弱なアジア地域の氾濫源で人口増加が著しいことが原因と考えられ、気候変動及び社会経済シナリオを考慮した大規模洪水管理支援システムの構築を目指す。こうしたアジアの地域・流域の水害特性を考慮した河川氾濫域の抽出は、持続的に研究を進展させることで、最終的に将来気候及び社会経済シナリオを同時に考慮したリスク予測が可能となる。

2. 研究の目的

本研究では、アジア諸国、特に発展途上国における洪水リスク統合管理支援システム構築のための気候変動及び社会経済シナリオ(人口や GDP の想定)を考慮した洪水リスク評価と防災監視・予測の高度化が主な目的である。そのために、氾濫が広域に及ぶ河川について、地理情報システム(GIS)かつ衛星観測データを用いて洪水氾濫マッピングのアルゴリズム開発を行う。また、時系列衛星観測データによる広域的な洪水氾濫域の抽出および地上水文観測データが不十分な地域での洪水氾濫域の判読精度を向上しつつ、迅速に洪水氾濫域マップを作成することで気候変動及び社会経済シナリオを考慮した洪水予測の高度化にもつながる。具体的に、一連の水害リスク情報創生プロセスの取り組みは、1) 気候及び社会経済変化を考慮した洪水リスク評価のフレームワーク確立、2) 浸水算定範囲や時系列の大規模洪水変化リスクマップ試作、3) 準リアルタイム洪水氾濫域の抽出による洪水リスクモデルの検証、4) バングラデシュ全土を対象に洪水氾濫被害(人口、資産)予測アルゴリズム開発及びクラウド型オンライン GIS システムのプロトタイプを試作することで、現状のアジア域における洪水氾濫域を特定することだけではなく信頼性の高いシナリオベースの将来洪水リスク予測を行う。このような緊急及び長期的なリスク情報を共有することで、国家(政府)レベルの持続可能な防災危機管理・防災緊急対策等を支援することに役立つ。また、政府には防災レジリエンス能力向上など防災計画のプロセスの改善等の策定案を、利害関係者には水害リスクへの深い理解を、一般市民には信頼性の高い災害マップ情報を提供することを目指す。

3. 研究の方法

(1) 気候及び社会経済変化を考慮した洪水リスク評価のフレームワーク確立

不確実性を持つ将来気候変動に伴う洪水リスクの影響を明らかにするため、マルチモデルアンサンブル気候実験及び社会経済シナリオ(人口や GDP の想定)を考慮した極値分析による大規模洪水リスクに主眼を置き、一連の水害リスク情報創生フレームワークを確立させる。主に、アジアの 5,000km² 以上の主要な流域を対象に、氾濫が広域に及ぶ河川において、インターネットから入手可能なグローバルデータをもとに、洪水リスクが高い順に優先順位を決めて、現在気候の洪水リスクと将来洪水リスクの変化を推定する。図. 1 は全球スケールの一連の水害リスク情報創生プロセスの全体図を示す。現在気候から将来気候についての多様なシナリオに基づいて、現在気候や将来気候における洪水流出量の統計的特性を用いてハザード(氾濫域)を予測する。そのため研究代表者が開発してきた「複雑な水理学的計算を必要としない浸水深モデル(GFID2M: Global Flood Inundation Depth model)」を改善しつつ、地形データを基に浸水ポテンシャルをもつ領域(洪水ハザード)内で、洪水リスク指標を簡便に計算できる一連のプロセスを構築し、その精度を検証した。次に、将来気候の社会経済シナリオを考慮した脆弱性指標データを共通の格子(0.45km)毎の空間データに変換・詳細化することで、アジア域における現在及び将来気候極値洪水氾濫シミュレーション計算と再現性の検証を行った。最後に、GFID2M モデルの検証及び再現性検証においては、地理情報システム(GIS)とリモートセンシング技術を駆使して、洪水氾濫マッピングを行い、ハザードとしての氾濫域の抽出・比較を行った。大洪水発生時に、中解像度の光学衛星データとの比較し、同時に光学センサによる観測は雲の除去など氾濫抽出の精度問題等の制約があるため、複数時期の合成開口レーダ(Synthetic Aperture Radar: SAR) データも利用して事例検証データを蓄積し、複数時期の氾濫域を検証した。

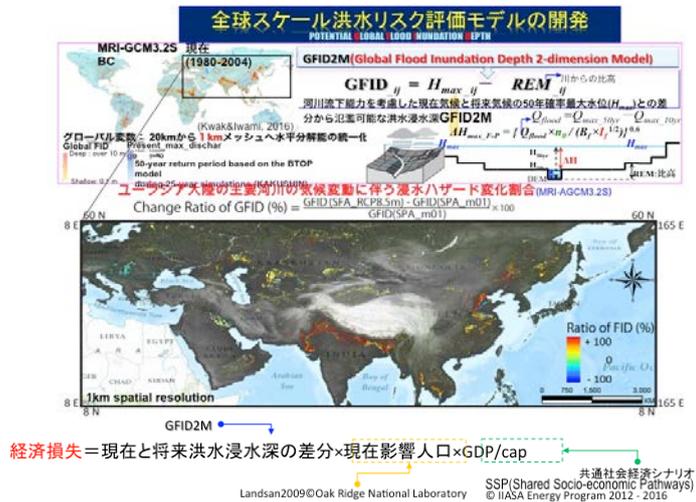


図. 1 一連の水害リスク情報創生プロセスの全体図

(2) 時系列浸水域変化マップ作成

数値計算の再現性の向上や実際に発生した極端な大規模洪水の場合、地球観測衛星データから抽出した浸水域と GFID2M モデルによる現在気候の洪水リスク予測域との妥当性を明らかにするため、衛星リモートセンシング技術による水災害発生前後の観測画像から広域氾濫面積を重ね合わせ、検証を行った。具体的には、洪水氾濫域がバングラデシュ全土（東西幅 500km を超える）にわたって同時多発的に分布していることから、本研究では、NASA が無償かつリアルタイムで提供している中分解能スペクトル放射計 (MODIS) の観測データ（観測幅約 2,000km）を選定し、中解像度（地上水平分解能 500m）の 8 日ごとのコンポジットのテラ (Terra: MOD09A1 surface spectral reflectance) 及びアクア (Aqua: MYD09A1) データを用いて長期間（年間）の正規化水指標による地表面変化の時系列氾濫分析を行い、最大氾濫域変化を比較した。

更に、準リアルタイム大洪水氾濫マッピング作成のため、中・高解像度の光学衛星センサの時系列データと複数時期の SAR データの時・空間的浸水域変化を比較し、氾濫マップを試作した。特に、SAR は全天候性、つまり、観測時の天候や時間帯（雲、昼夜観測など）に左右されないアクティブセンサを持ち、コヒーレント性（位相のそろい具合）も高いため、災害時等の緊急観測には非常に適している。特に自然災害が多い日本では、災害監視・防災のための JAXA だいち 2 号 (ALOS-2) L バンド地表可視化レーダ (PALSAR-2) の緊急観測・分析・活用事例が増え、詳細な地表面の状況把握可能な高分解能（地上解像度 3m）センサとして高く評価されている。図.2 に示すように、複数の時系列データによる広域洪水マッピングの長期的分析を行うため、まず雲の影響を除去した後、各画像処理プロセスを段階別に正規化水指数 (NDVI 植生指数, MLSWI: Modified Land Surface Water Index 地表洪水指数, fNDWI フーリエ変換の水指数等) と新たなシンクロナイズド洪水指数 (SfWI²: Synchronized Floodwater Index) と比較し、地上観測データ及び水文観測データ（流量、水位など）と連携させて、時空間分布の広域的な洪水氾濫域変化図の作成を試みた。

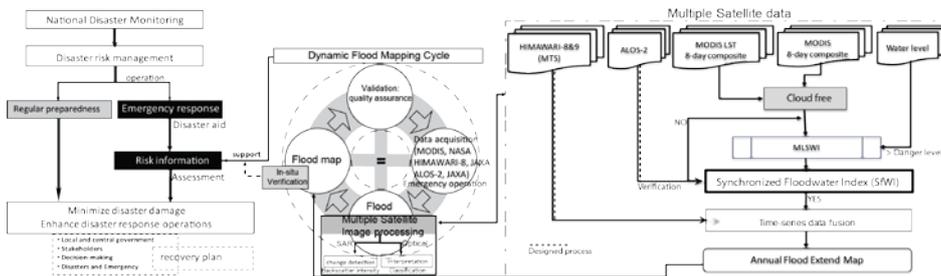


図. 2 シンクロナイズド洪水指数の融合プロセス

また、氾濫痕跡追跡及び米被害の聞き取り調査のため、省力化、効率化、迅速化、正確化などが期待できる最新の現地調査手法を投入し、新たなウェブ及びモバイルデータ収集・管理システム「米被害の現地調査用スマートアプリケーション (Online-GIS Survey123, ESRI)」を試作した。2016 年 7 月からインド北東部のアッサム州に流れるブラマプトラ川の洪水及びグラウンドトゥース情報収集に適用・活用し始め、バングラデシュの氾濫域現地調査にもドローン (MAVIC Pro, DJI) を活用したスマートなデータ収集方法も加えて現地の洪水状況の 3 次元モデリングを試みた。

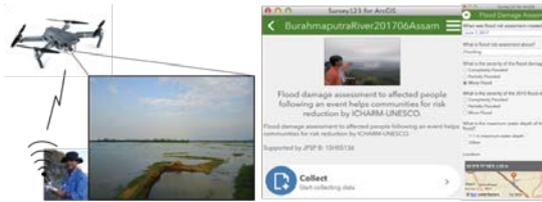


図. 3 ドローンで空撮した氾濫状況及び現地調査のモバイル用アプリケーションの例 (右)

図. 3 ドローンで空撮した氾濫状況及び現地調査のモバイル用アプリケーションの例 (右)

(3) クラウド型オンライン GIS 洪水氾濫予測システムのプロトタイプ開発

インド北東部のアッサム州とバングラデシュの氾濫原中心部を南北に縦断して流れる国際河川ブラマプトラ川を対象に、国境をまたぐ広域浸水域や検証結果をクラウド型オンライン GIS 上にわかりやすく可視化することを試みた。今後、GIS データをアップロードして簡単に情報を共有できる洪水リスク管理支援システムに発展させていく。洪水ハザード要素のデータと洪水リスク予測情報をオンラインで提供できる簡便なシステムを構築し、無償又は低コスト向けのクラウド型オンライン GIS 洪水氾濫予測システムのプロトタイプを試作した。

4. 研究成果

(1) 洪水リスクの変化予測図

マルチモデル気候実験データ (RCP シナリオ) を入力変数とし、改良した GFID2M モデルに対応するアジア域における洪水氾濫シミュレーションの再現性の検証を継続し、現在気候から将来気候による洪水ハザード域の変化をもとに、氾濫リスクに伴う影響人口と被害額 (一人当たり GDP : US \$) を 1 km 格子ごとに推定した。将来の人口増減率を考慮した洪水リスク影響人口は、アジア域の 15 カ国全体で 3.4% (約 3 千 5 百万人) 増加し、将来の影響人口全体に占める割合は中国が最も高く予測できた。総人口比率で見るとバングラデシュの洪水リスク増加率が 38.5% と最も高いことが判明した。その結果と重ね合わせ、図. 4 に示すように、将来気候のリスクは現在 50 年確率の最大リスクより増加傾向であり (赤色ピクセル)、浸水域によってばらつきはあるが、総 GDP の 3% 程度を損失する可能性が高いという洪水リスクシナリオ結果が明らかになった。

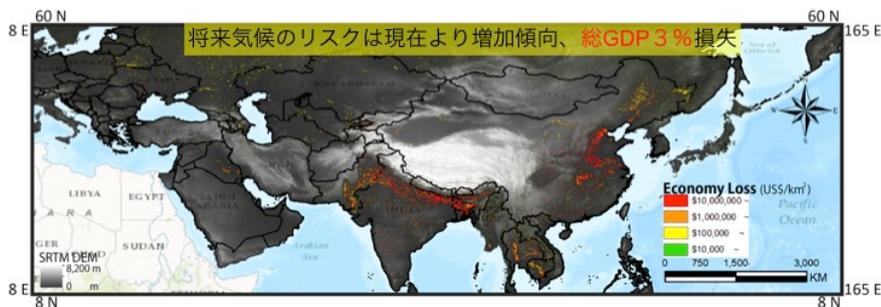


図. 4 現在気候 50 年確率日最大流量の場合の最大洪水リスクマップ

(2) 流域レベル (国際河川) の時系列洪水氾濫マップ

① 2015 年鬼怒川洪水 (日本)

だいち 2 号 ALOS-2 の PALSAR-2 L バンドの緊急観測データ画像 (2015 年 7 月 31 日と 9 月 11 日 13:56、HH 偏頗、入射角 35.0° 、2.5m 地上分解能) を主に使用し、4 編波よりデータ量が少ない単編波 SLC (Single Look Complex) 画像レベル 1.5 を用いて、後方散乱係数分析から最適な閾値の範囲を算定し、既存水域と新規浸水域のカテゴリの分類化・差分化により簡便かつ迅速に浸水域を自動推定することができた。ALOS-2 強度画像にはスペックルノイズ誤差が含まれているが、微地形と土地利用の区分で分類した後方散乱係数の平均値パターンを用いて洪水前後の最適な閾値の差分分析することから浸水域を推定し、図. 5 に示すように、ケーススタディとして、青色ピクセルの浸水域を抽出し緊急洪水速報マップを試作した。

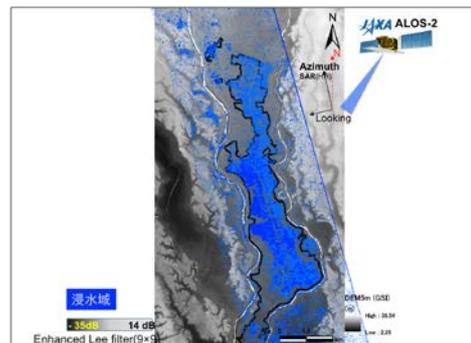


図. 5 ALOS-2 データを用いた 2015 年 9 月鬼怒川洪水速報マップ

② 2018 年ブラマプトラ川洪水

複数衛星観測データ (MODIS、ALOS-2、Sentinel-1 など) を用いてインド北東部のアッサム州を通して流れるブラマプトラ川の中下流における洪水発生時の洪水速報マップを作成した。また、インド国立水文研究所洪水管理センターとバングラデシュ水開発庁洪水予・警報センターの河川情報 (水位データ) と連携し、非線形水位予測シナリオに沿って正確かつ迅速な準リアルタイムの洪水氾濫変化マップを試作した。ケーススタディとして、図. 6 に示すように 2017 年 9 月洪水発生時、地上分解能が異なる MODIS (500m) と Sentinel-1 (25m) 観測データをもとに洪水域変化ピクセルを抽出・比較した。青色ピクセルは共通抽出域であり、赤色ピクセルは Sentinel-1

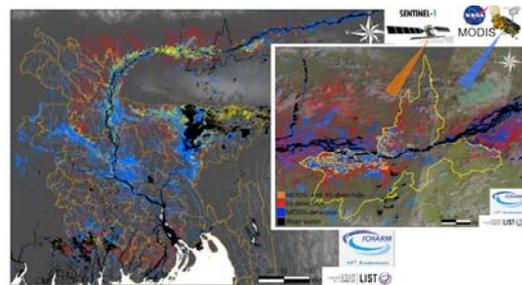


図. 6 MODIS Sentinel-1 データを融合した洪水マップ

のみ、黄色ピクセルは MODIS のみ検出された。複数衛星観測データのセンサーの特徴や能力がそれぞれ異なることから同じ時期に観測しても氾濫域の地表面特徴によって抽出結果が相違である試行的研究事例と新たな課題を生み出した。

③ メコン川洪水（ベトナム、カンボジア）

時系列 MODIS データ (MOD09A1) を用いてメコン川の下流域の洪水による氾濫様子をモニタリングした。既存の単画像解析ではなく、雲除去フィルター法 (WOI) のコンポジットデータを用いることで晴れた日の地表面様子を連続的に分析することができた。雲の影響を考慮して8日コンポジットより16日コンポジットの方が洪水氾濫域の時系列変化などが詳細に観測できることが明らかになった。このような時系列処理により、常に水域である領域 (永続水：川や海等) と一時的な水域 (洪水氾濫域) との区別が可能になった。図. 7 は時系列 WOI コンポジットを用いて水域を判断し、年間浸水域のピクセルを累積した結果である。青色ピクセルは永続水域を、赤青色ピクセルは洪水による氾濫域を示す。

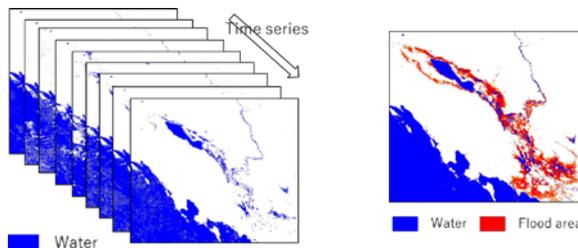


図. 7 MODIS 時系列データを用いたメコン川の下流域の氾濫マップ

図. 7 MODIS 時系列データを用いたメコン川の下流域の氾濫マップ

(3) ウェブ GIS システム試作 (課題)

アジア域主要河川の洪水浸水深モデル GFID2M や検証・分析結果の一部を図. 8 に示すように地図上に水害リスク変化わかりやすく、スケールブルなデータ可視化を試みた。選別したケーススタディとして、バングラデシュの影響人口および農業被害の変化予測のために、近年最大規模であった 2007 年大洪水 (10 年確率洪水) モデルを再現し、洪水シミュレーション氾濫域と MODIS 衛星画像から抽出した浸水域を比較・検証した。また、実証データを求めるため、深刻な農業被害があったブラマプトラ川沿いの代表地区で、現地水害調査 (ヒアリング等) を行い、稲作被害曲線を試作した。それを基に格子ごとの人口急増地域の氾濫リスク、氾濫域内の稲作被害分布、水施設 (堤防) を考慮した新たなリスクモデルを開発した。その結果、地形図に基づいて、全球データの土地利用図、標高データ、治水地形分類図、人口分布図、一人当たり GDP から氾濫域の特徴を持つ水害リスクの素因を選定し、バングラデシュの将来水害リスクは現在リスクより 6%増加する年最大洪水の局地的な水害リスクの変化を明らかにした。更に、図. 8 に示すように、バングラデシュの将来経済損失は総 GDP の約 2.8% (現在最大リスク) から約 29%程度 (将来最大リスク) を高くなる可能性がある。ケーススタディとして、シラジゴンジ県とタンガイル県における広域氾濫マッピングと時空間的な変化を表す水害リスク評価を行った (図. 8 の左)。しかし、堤防設置、都市河川整備等政府主導での持続的な洪水対策により、現在のリスクは軽減できることが期待される。使用データや速報マップ等の最終成果データは、標準形式の GIS データに変換し (Shape, KML 等)、クラウド型オンライン GIS にアップロードすることで洪水リスク管理支援システムのプロトタイプとして自由に情報共有できる。

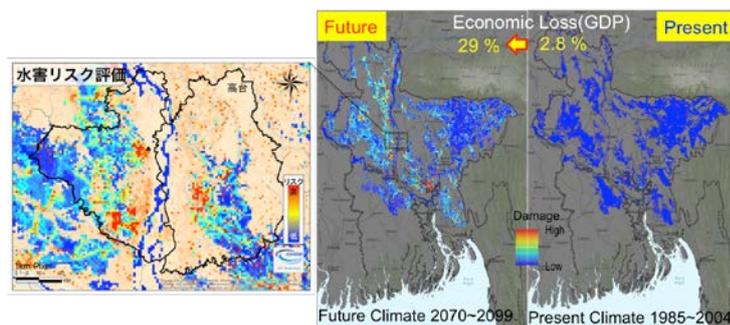


図. 8 洪水氾濫リスク想定マップのプロトタイプ (オンライン水害リスク情報共有)

(4) まとめ

本研究では、大規模な国際河川における緊急及び長期的な洪水モニタリングの高度化のため、アジア諸国における河川氾濫リスクを出来る限り正確に推定できるモデルとアルゴリズムを開発する基礎研究を行った。現在の最大洪水氾濫域の自動抽出アルゴリズムの手法開発 (ハザード)、局地的な水害素因分析 (リスク要因)、地域社会実装に向けた試行的事例研究 (リスク評価) という防災地域社会に向けた 3 段階の一連の水害リスク情報創生プロセスを確立した。洪水リスク管理・意思決定支援システムの構築に重要な役割を果たすと同時に、限られた情報しか持たない開発途上国において長期間の氾濫リスク予測が可能になる総合リスク評価の基礎研究を進めてきた。その間、平成 28 年度 7 月 1 日ダッカで発生したテロ事件後、危険地域レベル (入国禁止) から 1 年経過して入国許可になり、安全を確保しつつ相好研究協力を進展させることで JICA 専門家の支援を受け、バングラデシュ水開発局 (BWDB) の庁官をはじめ 4 ヶ国 (バ

国、米国、日本、インド)の中央・地方官庁の防災関係者・洪水担当者・NGO等と共に毎年国際ワークショップを共催した。4年間の研究成果をもとに広域的な国土モニタリングおよび水災害リスク管理、国家政策のフレームワークの標準化などについて意見交換し、貴重な防災情報を氾濫危険区域に住んでいる地域住民へ信頼性の高い防災リスク情報を提供することなど、洪水被害軽減及び緊急復興活動支援にも貢献できた。今後、バングラデシュ水資源開発庁洪水予報警報センターを中心に民官学の協力研究に連携しつつ防災地域社会づくりへの提供予定である。引き続き持続的に大洪水氾濫域の自動抽出融合アルゴリズム開発とそのリスク評価プロセスを改善し、3次元浸水リスクモデルへ展開する。例えば、低コスト・スマートな自動水位計測システム開発と連携したダイナミクス数値予測氾濫モデル開発など洪水予測技術の高度化に取り組むことで、洪水を活かしたスマート農業が可能な地域密着型支援策を提案したい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計15件) 査読有り

①Park, J.Y Kwak, A Determination of the Earthquake Disaster Area by Object-based Analysis Using a Single Satellite Image, リモートセンシング学会誌 38(1) pp.14-29, 2018

②Young-Joo Kwak (2017) Nationwide Flood Monitoring for Disaster Risk Reduction Using Multiple Satellite Data, ISPRS Int. J. Geo-Inf., vol.6, pp. 203-215, 2017

③Youngjoo Kwak and Y Iwami (2016) Rapid global flood exposure assessment for extreme river flood risk under climate change, Jour. Disaster Research, Vol.11No.6, pp. 1128-1136

④Youngjoo Kwak, B Arifuzzanman, Y Iwami (2015) Prompt Proxy Mapping of Flood Damaged Rice Fields using MODIS-derived Indices, Remote Sensing vol.7 (12), Special Issue Remote Sensing in Flood Monitoring and Management pp.15969-15988 DOI: 10.3390/rs71215805

(国際発表論文: Proceeding paper 査読有り: 計17件)

①Youngjoo Kwak and R. Pelich (2019), Fractional Floodwater-pixel Fusion for Emergency Response using ALOS-2 and Sentinel-1 data, 2018 IEEE Aerospace Conference, MT. USA

②Youngjoo Kwak (2018.3, Istanbul, Turkey), Flash Flood Mapping for Mountain Streams Using High-resolution ALOS-2 Data, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-3/W4, pp. 307-312 DOI:org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W4-307-2018

〔学会発表〕(計18件 以上) 招待・依頼講演/セッション座長

①Youngjoo Kwak, 招待セッション座長, 「Advanced Flood Monitoring and Prediction for Global Disaster Risk Reduction」, IEEE IGARSS 2018.7-2019.7

②Youngjoo Kwak (セッション座長&招待講演), 「Integrated Multiple Satellite Application for Flood Mapping」, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 15th Annual Meeting, 2018.6

〔図書〕(計2件)

①Youngjoo Kwak and J. Park (2018) Annual Flood Monitoring of 2010 Indus River Flood using Synchronized Floodwater Index, Indus River Basin: Water Security and Sustainability, Elsevier/Academic Press published book (Book chapter 17) Edited by Sadiq I. Khan

②Youngjoo Kwak (2017) Large-scale Flood Monitoring in Monsoon Asia for Global Disaster Risk Reduction Using EOS/MODIS Data, Remote sensing of hydro-meteorological hazards, CRC Taylor&Francis (Book chapter 17, pp. 367-379) Edited by Gorge Petropoulos and Tanvir Islam

〔その他〕国際研究集会共催 4回 「Integrated disaster risk management using advanced remote-sensing」, Youngjoo Kwak (co-host), 3rd International workshop on Community-based integrated flood risk management of water resource under climate change for disaster risk reduction, ICHARM-JICA-BWDB-UoT, Dhaka, 2018.9

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 近藤昭彦

研究分担者氏名: 朴 鍾杰

ローマ字氏名: Akihiko Kondoh

ローマ字氏名: JongGeol Park

所属研究機関名: 千葉大学

所属研究機関名: 東京情報大学

部局名: 環境リモートセンシング研究センター

部局名: 総合情報学部

職名: 教授

職名: 准教授

研究者番号 (8桁): 30201495

研究者番号 (8桁): 40337770

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: バングラデシュ水開発庁関係者、JICA 専門家

ローマ字氏名: Arifuzzaman Bhuyan (バングラデシュ)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。