

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05218

研究課題名(和文) 熱帯モンスーン大河川の氾濫原干拓が周辺環境に及ぼす影響評価

研究課題名(英文) Evaluation of impact by land fill in flood plains in the Mekong River

研究代表者

風間 聡 (So, Kazama)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：50272018

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：Landsat 画像から埋立地を95%を抽出することが出来た。対象地域の各コミューン内の干拓地の有無を目的変数とし、年最大水深、首都プノンペン中心部からの直線距離の各コミューン毎の平均値を説明変数とした重回帰分析結果、相関係数は0.34であった。廃棄物の埋め立てが行われる氾濫原では、干拓無しとの氾濫原と比較して約25倍の全リン値、下水汚水基準値の約4倍のCOD値を記録した。埋立て後の工場地周辺の氾濫原では、他と比較して鉄の値が非常に大きく、一部WHO水質基準値の約21倍となった。土地被覆は年氾濫期間により分類され、現在自然植生が水田・畑に開拓された場合、134gC/m<sup>2</sup>の純一次生産量が失われる。

研究成果の概要(英文)：Landsat images can detect landfill areas in flood plains of the Mekong River. Multiple regression analysis shows correlation coefficient 0.34 using existence or nonexistence as an objective variable and annual maximum water depth, straight distance from central Phnom Penh to landfill area as explanatory variables. Landfill areas by wasted solids have 25 times more total phosphorus and 4 times more COD than those of floodplains. Landfill areas having factories have more iron than that of floodplains. One area has 21 times more than WHO standard of iron. Land use of agriculture can be classified by annual flood duration. NPP with 134kgC/m<sup>2</sup> in flood plain will be lost in the case of change from present natural vegetation to agricultural area.

研究分野：水文学

キーワード：氾濫原 灌漑 埋め立て 肥沃化 都市化

## 1. 研究開始当初の背景

2014年の世界大河川会議において新たな学問分野として、氾濫原科学 (flood plain science) が提唱され盛り上がりを見せた。その中で多くの内容は物質循環や植物生産量を取り扱っていたが、開発発展が氾濫原に及ぼす影響を論じたものはなかった。カンボジアでは急激な経済発展に伴ってプノンペンや各都市近郊に工業地や住宅地が拡大している。こうした新しい地域の大部分はかつての氾濫原であり、干拓されている。メコン河の氾濫原は、農業地、水産資源、地下水の涵養、水質浄化、舟運などの機能を備えており、周期的な洪水氾濫に調和した生活が行われてきた。しかし、急激な干拓地の増加 (氾濫原の減少) が、下流域の氾濫リスクを上昇させることが懸念されている。遊水機能を失うだけでなく、氾濫原は重要な地下水涵養地でもあり、地下水量の減少による乾季の基底流量の減少も問題と考えられる (Kazama et al., J. of Hydrol., 2007)。環境においても、カニ・エビの産卵場の減少や水質浄化機能の損失など、多くの問題が懸念されている。2000年の洪水ではプノンペンの洪水氾濫を防ぐため、下流の自然堤防を破堤させ遊水機能を利用したが、干拓によってこうした機能は低下する。このような状況が問題視されているが定性的な議論にとどまっている。一方、メコン河の河川流量に対して干拓の効果は些細であるとの意見もあり、多くのカンボジア政府関係者は干拓化を問題視していない。Myat, et al. (Water International, 2012) はバンコク、メコンデルタ、イラワジデルタを比較し、土地利用の変化によって洪水被害の潜在的リスクの上昇を統計的に示したが、急激に発展する現在のカンボジアにおいて干拓の影響をモデルにより定量的に評価することは、氾濫原科学分野の先駆けになると同時に、同じ東南アジアのイラワジやガンジスにおいて有用な情報を提供することができる。応募者は、過去、氾濫原の便益とリスクの定量化に取り組んできた。2000年の既往最大洪水時の農業便益と被害、水産資源便益の推算 (J. Hydrosoci. Hydraulic Eng., 2013)、地下水資源量の推定、感染症リスクの推定 (Sustai. Scie., 2012)、肥沃効果の検証などを数値計算によって実施してきた。しかし、近年の氾濫原の減少から氾濫原の多くの便益が失われると同時に、その影響が下流や氾濫原以外の地にまで及ぶと予想される。こうした影響を開発進行と同時に調べ、世界に発信することが他の氾濫原科学研究に先じることになる。

## 2. 研究の目的

氾濫原の持つ機能を明らかにする近年活発な研究の一つであり、新しい学問分野である氾濫原科学の一端を成す。多くの氾濫原研究では栄養塩と植生の関係が活発に論じられているが、開発圧力による周辺環境への影響については世界大河川会議において言

及されておらず、先進的な研究であるといえる。特に洪水濁水流量のみにとどまらず、水産資源と水文変化、開発圧力を結びつけた生態水文学の展開も考慮しており、将来の研究領域の広がりが期待できる。本研究は、途上国の開発は不可避として最も環境に負荷を与えない干拓について提案することを目標にしており、社会的意義のある研究である。例えば、ワンドの形状を取り入れた干拓や後背湿地を保全した干拓を提案する。

氾濫原に都市が拡大していく過程を一般化できれば、他の氾濫原都市にとって極めて有用なツールとなる。氾濫原は水質浄化機能を持っていると考えられるが、干拓によって汚染物質のソースに転じ、乾季に水質悪化をもたらすことが考えられる。干拓が周辺環境に与える影響を定量化することは、氾濫原科学の中でも開発の多角的な関係性を定量的に知ることができる。

氾濫原の干拓化の影響を総合的に評価の過程で以下のことを明らかにすることを目指す。(1) リモートセンシングによる氾濫原減少過程推定：干拓が行われる地域を抽出し、都市がどのように氾濫原に拡大するかを明らかにし、交通時間、距離、水深などとの関係を調べ、氾濫原開発地域の推定の一般化を目指す。(2) 干拓による流況変化評価：干拓が洪水と濁水に与える影響を把握する。遊水効果と地下浸透量の推算から下流流量を推定する。干拓のみならず近年ではベトナムで輪中による湛水農業や半湛水農業域が拡大しており、同様の農地整備がカンボジアで行われた際の下流の影響も評価する。また、タイ国チャオプラヤ川流域の過去のデータから流況の変化と氾濫原の関係を明らかにする。(3) 氾濫原の水産資源量の推定：氾濫原の水産量の聞き込みから、氾濫原全域の水産量を推定する。複数地点の聞き込みを行い、代表的な氾濫原の形態 (水田、浸水林、ため池等) 毎の水産量を推定し、干拓と水産資源量の関係を明らかにする。(4) 氾濫原の水質浄化機能評価：氾濫原の水質観測から水質浄化機能を明らかにする。一方、干拓によって都市化または農地化した地域の負荷量を求め、乾季の水質悪化 (栄養塩量や有機物量等の増加) を明らかにする。(5) もっとも影響の少ない干拓計画の提示：干拓面積が同一の場合に、干拓地の利便性を損なわない上で下流流況と水産資源への影響が少ない干拓計画を示す。

以上によって、人間活動と自然環境の相互作用を明らかにし、干拓の影響を定量的に明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

対象地域は、メコン河下流域に位置するカンボジア国首都プノンペンを中心とした 140km × 110km の領域である。メコン河は、カンボジアの首都プノンペンにおいてトンレサップ川と合流し、バサック川に分流している。本対象領域では農業用導水路コルマタ

ージュによって導水された水が下流一帯に拡がり、毎年雨季に大規模な洪水氾濫が発生する。この洪水氾濫によりカンボジアおよびベトナムの土地の3~4万km<sup>2</sup>が冠水する。氾濫原では稲作が主に行われており、一部氾濫林が形成されている。熱帯モンスーン気候であり、5月~11月が雨季、12月~4月が乾季である。また平均年間降水量は約1400mmである。純一次生産力のデータは、NEO(NASA EARTH OBSERVATIONS)のNet Primary Productivity(1Month-Terra / MODIS)を用いた。陸域炭素循環モデルBiome-BGCを用いて推定が行われ、MODIS(地球観測衛星搭載の中分解能撮像分光放射計)のプロダクトであるMOD-17として提供されているものである。空間解像度は0.1度メッシュで、純一次生産力はgC/m<sup>2</sup>/dayの単位で表される。2000年~2013年において8日毎と1ヶ月毎のデータがあり、2008年1月~12月の1ヶ月毎のデータを主に用いている。対象領域の土地被覆データは、ISCGM(地球地図国際運営委員会)のGlobal Land Cover Data(Terra & Aqua / MODIS 2008)を用いた。空間解像度は1kmメッシュであり、分類はFAO(国際連合食糧農業機関)により整備された土地被覆分類体系による20種類となっている。このうち、計算対象領域内の分類は水田・畑や森林を主とした16種類であり、水田は約38%、畑は約28%、森林は約27%を占める。全リン輸送モデルから、対象領域における洪水氾濫による全リン堆積量を得た。このモデルは洪水氾濫計算とリン輸送計算からなり、リン輸送計算では移流と沈降、風の影響による沈降の阻害を考えている。栄養塩の発生源として、人間および家畜を考えており、それぞれの個体数に原単位を乗じることにより負荷発生量を算出している。2000年~2013年のメコン河・バサック川の各年最大水位を用いた。水位観測地点はKampong cham, Phnompenh, Neak Loengの3地点である。

洪水氾濫計算はKazamaら(2009)の計算方法を基にした。河道に対し次元 Dynamic Wave モデル、氾濫原に対し二次元不定流モデルの移流項を省略したモデルを用いる。メコン河のように流れの変化が緩い場合、移流項の影響は少なく、計算が煩雑になり演算労力が大きくなることを防ぐため移流項を省略した。なお、本研究対象領域における氾濫は、農業用導水路コルマタージュを通じて発生する。堤防の一部が開かれており、洪水流の一部が氾濫原に導水される仕組みである。越流公式によって河道と氾濫原を接続することでコルマタージュをモデル化した。以上による洪水氾濫計算の精度について、2000年の洪水氾濫を対象とした計算では氾濫域を概ね再現できている。本研究では平均的な洪水氾濫を再現するため、氾濫計算の期間は1995年の1年間とした。計算の空間解像度は1km、時間間隔は30秒である。洪水氾濫モデルにより計算を行い、各セルでの年氾濫

期間を得る。標高にはアメリカ地質調査所のHydroSHEDSを用い、河道位置・川幅もこのデータから得た。水位および日降水量はメコン河委員会が収集・編集したデータを用いた。水面からの蒸発量は、熱帯地方におけるおおよその値150mm/monthとし、浸透能は10mm/hourとした。

#### 4. 研究成果

年氾濫期間と純一次生産力の関係を図-1に示す。ここで、年氾濫期間は図-1に示した値を各0.1度メッシュで平均したものをを用いた。平均を行う際、1kmメッシュでの河道のセルは無視して計算を行っている。純一次生産力はポテンシャル評価のため、各0.1度メッシュにおける年間最大値を用い、氾濫期間毎に平均して求めた。年氾濫期間9ヶ月に対応する純一次生産力の値は一つであるため誤差を示していない。図-1から、純一次生産力は年氾濫期間が7~8ヶ月となる地点でピークを示し、地点平均2.0gC/m<sup>2</sup>/dayとなっている。カンボジアの原生林地帯では純一次生産力の年最大値が5.0gC/m<sup>2</sup>/dayを超える地点もあるため、対象領域では開発の影響を受けて全体として純一次生産力が減少していると考えられる。これについて各氾濫期間を示す地点の水田・畑の割合を図-2に示す。図-2から年氾濫期間が大きくなる地点ほど水田・畑としての利用は制限される傾向にあり、年氾濫期間が2ヶ月大きくなると、水田・畑の割合は約1割減少する。すなわち、年氾濫期間が大きくなるような地点では土地への人為的な影響が制限されるといえる。更に、年氾濫期間が9ヶ月以上の地点で純一次生産力が減少傾向を示しているのは、氾濫期間が植生の成長を阻害していることによると考えられる。これらから年氾濫期間が7.5ヶ月の地点で純一次生産力が最大値を示すのは、氾濫期間が植生の成長にある程度適しており、かつ土地への人為的な影響が制限されるためだといえる。

また、対象領域における土地被覆は、年氾濫期間に従って分類されることが示された(図-1)。各0.1度メッシュのセルにおいて、1kmメッシュの土地被覆のうち過半数を占める土地被覆をそのセルの代表とし、全0.1度メッシュセルを主に自然植生、水田、畑の3つに分類した。それらを年氾濫期間毎に分類し、図-1に示されるような結果を得た。各範囲内に、各土地被覆を持つそれぞれのセル8割以上が属している。氾濫期間が長い地点では人の手が入らず自然植生が保たれ、ほぼ氾濫が生じない地点では畑作が行われるという、氾濫に対応した土地被覆分類が確認できる。更に自然植生と水田・畑、それぞれの年氾濫期間と純一次生産力の関係を図-3に示す。図-3から年氾濫期間が約9ヶ月地点までは自然植生が示す純一次生産力の方が大きく、特に7ヶ月地点でピークを示すことが分かる。現在カンボジアでは急激な経済発展、

食料需要増加に対応するため、自然植生地を水田・畑とする土地開拓が著しく進行している。現在自然植生に分類される土地が開拓された場合、図-3において自然植生から水田・畑を差し引いた分が失われることとなり、その年積算値は  $134\text{gC}/\text{m}^2$  となる。既に開拓された土地の割合が大きく(図-2)、開拓される可能性が高いと考えられる年氾濫期間3ヶ月以下の地点のみの開拓を仮定すると約  $32\text{gC}/\text{m}^2$  の損失となる。

対象領域において純一次生産力は、各氾濫期間に対応した変動、大きさを示すことが分かる。純一次生産力は氾濫が始まる時期の6月~7月に増加し、氾濫が拡大する時期の7

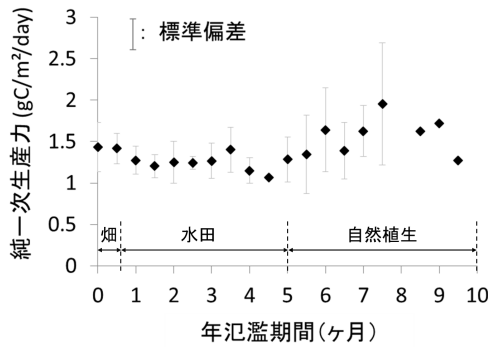


図-1 年氾濫期間と純一次生産力

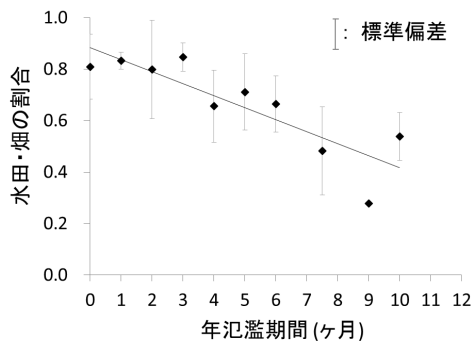


図-2 年氾濫期間と水田・畑の割合

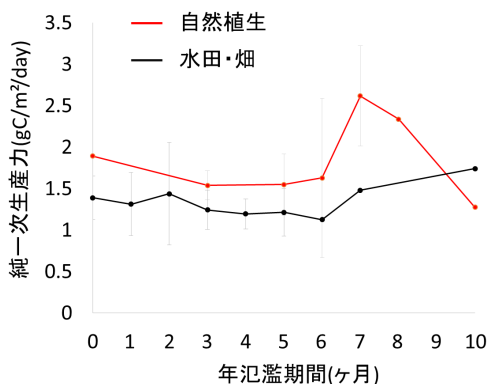


図-3 年氾濫期間と純一次生産力  
(自然植生と水田・畑)

月~8月にかけて減少する傾向にあり、年氾濫期間が大きい地点では、その後氾濫の拡大に伴って10月まで減少する。加えて、氾濫が引いていく時期に当たる10月~11月にかけて全ての地点で純一次生産量は増加する傾向にあり、年氾濫期間が6~8ヶ月、8~10ヶ月となる地点ではその後1月まで増加する。更に、年氾濫期間が0~2ヶ月となる地点においては純一次生産力の年最小値が乾季である2月の値となり、純一次生産力の最小値は  $0.61\text{gC}/\text{m}^2/\text{day}$  である。これに対して年氾濫期間が8~10ヶ月となる地点では、純一次生産力の年最小値は最も氾濫が拡大する9、10月の値となり、純一次生産力の最小値は  $0.38\text{gC}/\text{m}^2/\text{day}$  である。これらから純一次生産力は、洪水氾濫の年変動に対応した年変動を示すことが分かる。特に年氾濫期間が大きい地点では、洪水氾濫が拡大する時期に純一次生産力は減少傾向を示し、洪水氾濫が引いていく時期に増加傾向を示すという洪水氾濫に対応した変動が見られた。また、洪水氾濫による影響の度合いを考察するため、同気候条件のカンボジア国内かつメコン河洪水氾濫が及ばないと考えられる北西部ウドンメンチェイ州において純一次生産力の年変動を得た。純一次生産力の州平均値を各月で求め、年変動を確認した。結果として純一次生産力の年変動が確認されたが、 $\pm 0.5\text{gC}/\text{m}^2/\text{day}$  のみの変動かつ、対象領域における変動は確認出来なかった。このことから、対象領域における純一次生産力の年変動は、洪水氾濫の影響を受けていると考えられる。すなわち年氾濫期間と純一次生産力の大小が関係していることに加え、年間を通した季節的な変化についても洪水氾濫と関係していると言える。

洪水氾濫規模の変化と純一次生産力の関係について、特に氾濫原端部での関係に着目する。氾濫原端部では農作物の生育期に氾濫水を水資源として利用可能かつ、氾濫水深が農作物の生育に適度な程度となることから、水田を代表とする農地の占める割合が大きくなっており、増加する食糧需要を賄う上で特に重要な土地であるためである。2000年~2013年のメコン河・バサック川年最大水位と氾濫原端部の純一次生産力年間最大値との関係を求めた。対象領域内で場所による偏りが生じないように、メコン河左岸部、バサック川右岸部、トンレサップ川右岸部からセルを選択した。場所の条件に加えて、0.1度メッシュの各セルのうち年間でセルの10%~20%が浸水するものを氾濫原端部として定義した。各セルの土地被覆は、水田・畑が平均で78%を占めている。メコン河年最大水位と氾濫原端部の純一次生産力は正の相関を示す。年最大水位が1m変化すると純一次生産力は約  $0.26\text{gC}/\text{m}^2/\text{day}$  変化する。他の地域ではメコン河年最大水位と純一次生産力は正の相関を示す。氾濫原端部において年最大水位が1m変化すると、純一次生産力の変化量は平均

で約 0.28gC/m<sup>2</sup>/day となる。

## 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 9 件)

【以下全て全文査読有】

1. Yusuke Hiraga, So Kazama, Impact of reclamation on the environment of the lower Mekong River Basin, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2018.(受理)
2. 池園京佳, 久保成隆, 飯田俊彰, 木村匡, 自然環境適応型灌漑の実態分析～カンボジアのメコン川氾濫原を対象として～, 農業農村工学会講演要旨, 5-34, 2017.
3. 平賀優介, 風間聡, 峠嘉哉, メコン河氾濫原の干拓が流域環境に及ぼす影響評価, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.73, No.4, pp. I\_283-I\_288, 2017.  
doi.org/10.2208/jscejhe.73.I\_283
4. 佐藤郁, 小森大輔, メコン河氾濫原における地表水ヒ素濃度推定モデルの構築, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.73, No.4, pp. I\_289-I\_294, 2017.  
doi.org/10.2208/jscejhe.73.I\_289
5. 平賀優介, 風間聡, 峠嘉哉, メコン河下流域における洪水氾濫と純一次生産力の関係, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.73, No.4, pp. I\_307-I\_312, 2017.  
doi.org/10.2208/jscejhe.73.I\_307
6. Jutithep Vongphet, Takao Masumoto, Hiroki Minakawa, Ryoji Kudo, Modification of DWCM-AgWU model applied to a paddy-dominant basin with large dams, *Irrigation and Drainage*, 66, pp.60-70, 2017.  
doi.org/10.1002/ird.2013
7. 天野文子, 風間聡, メコン河の洪水氾濫規模と農業生産性の関係, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.72, No.4, pp. I\_1207-I\_1212, 2016.  
doi.org/10.2208/jscejhe.72.I\_1207
8. 天野文子, 風間聡, メコン河氾濫原におけるリン輸送モデルの構築および肥沃効果と農業への影響評価, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.71, No.4, pp. I\_1189-I\_1194, 2015.  
doi.org/10.2208/jscejhe.71.I\_1189
9. Takao Masumoto, Takeo Yoshida, Ryoji Kudo, Basin-scale irrigation planning on areas with scarce data, *Irrigation and Drainage*, 65, pp. 22-30, 2016.  
doi.org/10.1002/ird.2032

[学会発表](計 9 件)

1. 山田慶太郎・風間聡, メコン河氾濫原における衛星画像を用いた栄養塩分布の推定, 土木学会東北支部技術研究発表会, VII-35, 郡山, 2018.3.
2. Kyoko Ikezono, Analysis of irrigation systems adapting to natural environment:

The flood plain of Mekong River, Cambodia, PAWEES 2017, Taichung, Taiwan. 2017.11.

3. 平賀優介・風間聡, Chaiwat Ekkawatpanit, 峠嘉哉, メコン河下流域における湿地の干拓が流域環境に与える影響評価, 土木学会東北支部技術研究発表会, II-44. 仙台, 2017.3.
4. 佐藤郁, 小森大輔, 天野文子, カンボジア kandal 州における地表水ヒ素汚染の実態調査, 水文・水資源学会, pp.190-191, 福島, 2016.9.
5. Yusuke Hiraga, Ayako Amano, So Kazama, Impacts of flooding on Net Primary Productivity in the floodplain being affected by anthropic pressures, 2A021, pp.1-6, APD-IAHR, Colombo, 2016.8.30.
6. 天野文子, 風間聡, メコン河洪水氾濫の肥沃効果と農業の持続可能性の評価, 東北支部技術研究発表会, II-23. 盛岡, 2016.3.
7. 平賀優介, 天野文子, 風間聡, メコン河下流域における洪水氾濫と純一次生産量, 水文・水資源学会, pp.174-175, 東京, 2015.9.
8. 天野文子, 風間聡, メコン河の洪水氾濫規模と農業生産ポテンシャルの関係, 水文・水資源学会, pp.171-172, 東京, 2015.9.
9. Y. Hiraga, A. Amano, S. Kazama, Relationship between flooding and Net Primary Productivity in the downstream basin of the Mekong River, HW06p-120, IUGG, Prague, 2015.6.25.

[その他]

<http://kaigan.civil.tohok.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

風間 聡 (KAZAMA SO)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 50272018

### (2) 研究分担者

小森 大輔 (KOMORI DAISUKE)

東北大学・大学院環境科学研究科・准教授

研究者番号: 50622627

久保 成隆 (KUBO NARITAKA)

東京大学・大学院農学生命科学研究科・教授

研究者番号: 40134506

飯田 俊彰 (IIDA TOSHIAKI)

東京大学・大学院農学生命科学研究科・准教授

研究者番号: 30193139

増本 隆夫 (MASUMOTO TAKAO)

農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究部門・領域長

研究者番号: 80165729

吉田 武郎 (YOSHIDA TAKEO)

農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究部門・主任研究員

研究者番号: 80414449