

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22404008

研究課題名(和文)大陸河川が氾濫原の肥沃化ならびに植生環境に与える影響について

研究課題名(英文)IMPACT OF CONTINENTAL RIVER INUNDATION TO FERTILIZATION AND VEGETATION

研究代表者

風間 聡 (KAZAMA, SO)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50272018

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円、(間接経費) 3,870,000円

研究成果の概要(和文)：結論は以下の通りである。氾濫ため池内において氾濫水中の栄養塩が沈降するため、ラバーゲートよりもスルースゲートの方が効率的に栄養塩を利用できる。本流からの距離に伴い懸濁態栄養塩が沈降するため、本流付近の方が洪水氾濫による栄養塩獲得量が多い。日本の水田土壌の管理目標値と比較すると、カンボジアの水田土壌の約半数が目標値を満たした。土壌および氾濫水のもつ栄養塩量はカンボジアにおける米生産を賄うのに十分である。土壌は表層15cmに刈取り量の50倍以上の栄養塩を保有している。洪水氾濫の米生産に対する寄与率はカンダルにおいて窒素98%、リン50%、タケオにおいて窒素88%、リン17%である。

研究成果の概要(英文)：To evaluate fertilization of the Mekong River flood and inundation, we observed nutrient concentrations of flood water and nutrient amounts of soil at paddy fields located in the Mekong River flood plain and calculated nutrient balance. We obtained the following conclusions; 1) Sluice gate is more effective system than rubber gate at the point of nutrients utilization because water at the level of a lower layer has much nutrient due to the deposition. 2) Nutrient balance calculation expresses that the amounts of nutrients contained in soil and inundation water are sufficient to provide for rice production. 3) The contribution ratio of flood to rice production that is presented in "the nutrients amount brought by inundation/the nutrients amount included in the harvested rice" are 98%, 50%, 88% and 17% about nitrate at Kandal, phosphorus at Kandal, nitrate at Takeo and phosphorus at Takeo respectively.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：水工学

キーワード：洪水 点源負荷 水理モデル メコン河 栄養塩

1. 研究開始当初の背景

氾濫は当地の重要な資源であるが、調査の過程で大陸河川の洪水がもたらす氾濫原の肥沃化について多くの不明な点が明らかになった。それは、(1)河川水の栄養塩量は非常に少ない、(2)ウオッシュロードの堆積地域は限定的で多くの地域はそれほど堆積しない、(3)浮遊砂の影響も地域が限定される、(4)カンボジアの農民は氾濫水に栄養塩を期待していない、(5)わずかな栄養塩は素早く分解される等、である。「エジプトはナイルの賜物」の言葉に見られるように多くの文献に大陸河川洪水の肥沃効果が言及されているが(アマゾン、メコン、イラワディ)、それらを科学的に証明した文献は見当たらず、むしろ肥沃化を否定するものが多い。メコン河の場合、氾濫原の植生は繁茂しており、施肥がなくとも米作が成立している地域や、デルタの国立公園は十分な森林を形成しており、これらの栄養塩の由来が不明である。そこで本研究では、洪水氾濫による洪水氾濫と氾濫原栄養塩の関係を明らかにし、大陸河川の洪水氾濫が氾濫原の環境に与える影響を様々な観点から明らかにすることを目的とする。

2. 研究の目的

メコン河下流域は100種類以上の固有種を有する生物多様性のホットスポットである。生物多様性条約第十回取締役会議 COP10において、氾濫原や低平地の生物多様性の保全や過剰栄養による汚染の防止が戦略目標として挙げられていることからわかるように、メコン河氾濫原の環境および生物多様性の保全が求められている。同時にメコン河下流域は農地としても大きな役割を担い、開発圧力を常に受けている。人口増加に伴い食料生産への需要は増加するが、この需要に安定的かつ持続可能に応えるためには、農業の環境負荷を低減させる必要がある。このように、生物多様性や環境の保全と持続的農業の両立が強く求められており、洪水氾濫がもつ肥沃効果を評価することの重要性が増していると言える。メコン河の洪水氾濫による農地の肥沃化の効果については、カンボジア国の主要産業でもあるにもかかわらず不明なことが多く、肥沃効果や富栄養化の発生などに関わる栄養塩とメコン河の洪水氾濫との関係については、未だ不明なことが多い。

本研究では、氾濫原における現地観測により氾濫水・土壌・水稻の栄養塩に関するデータを得て、栄養塩収支を推定することにより氾濫による肥沃効果を定量的に評価することを目的とする。

3. 研究の方法

研究対象領域は、メコン河下流域に位置する氾濫原である。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、バサック川と分流している。現地観測はカンダルおよびタケオにおいて行った。メコン河本流付近に位置するカンダルにおいてはコルマタージュと呼ばれる灌漑用導水路を用いた米作が行われている。一方、バサック川本流から30km程離れたタケオのルンチャンコミュニティムネイ地区においては、雨季に氾濫した水を堰き止めて乾季に利用する減水ため池農法が行われている。なお、本対象領域では毎年雨季に河道から水が溢れて下流一帯に拡がり、大規模な洪水氾濫が発生する。

カンダルおよびタケオにおいて現地観測を行った。観測は季節変化を考察するため、異なる季節を選択し全6回行った。観測地点はカンダル4地点タケオ3地点であるが、氾濫規模の影響等により観測日によって観測していない地点がある。サンプリングによるバラツキの影響を抑えるため、原則として各地点3サンプル採水した。カンダルの観測地点は、コルマタージュの本流側、コルマタージュの先の氾濫原であり、タケオの観測地点はため池の中部、ため池の水門付近、水田側の水門付近である。観測対象は氾濫水および土壌中の栄養塩である。氾濫水はろ過したサンプルとろ過しないサンプルの双方について、全窒素・アンモニア態窒素・硝酸態窒素・全リン・リン酸態リン・カリウム等の濃度を測定した。土壌については、全窒素・可給態窒素・全リン・可給態リン酸・カリウム等の含有量を測定した。また、刈取られた稲に含まれる窒素・リン量を測定した。

4. 研究成果

図-1,2に氾濫水の全窒素および全リン濃度および河川水深を示す。栄養塩濃度は観測月毎にコルマタージュ手前と奥それぞれ2地点の平均値およびタケオのため池2地点の平均値を示す。11月については2010年11月・2011年11月のデータの平均値である。原則1地点3回の測定が行われており、エラーバーは、各項目2地点6回の不偏標準偏差、11月については2年分2地点12回の不偏標準偏差を示している。ただし、3月のため池は1サンプルのみの採取(1回のみの測定)であるため、エラーバーを示していない。河川水深はプノンペンにおけるメコン河本流の観測データを用い、1998年から2002年の5年間の平均値を示す。図-1,2において3月、

7月の測定値は他と比較して濃度が高い傾向がみられる。これらの時期は乾季および雨季初期であり、河川水深は低く、コルマタージュ内の流れもなく、観測地点の水深も浅い。そのため、栄養塩濃度が濃縮されたと考えられる。大腸菌群濃度にも同様の傾向がみられることが Kazama et al. によって示されている。なお、3月、7月は変動幅が大きい、同一地点のサンプル間の変動、地点間の変動共に大きく、水深が浅いことにより底質の影響を受けやすく水質が安定しないと言える。

2010年11月や2011年11月のような雨季から乾季への移行期はため池に比べて水田側の濃度の高いことが分かる。同様の傾向がカリウムとシリカにも見られる。この時期、タケオの水田側の氾濫は後退しているが、ため池には氾濫水が貯留されている。貯留された氾濫水はスルースゲート（水門）によって水田側へ給水され、農業に利用される。ため池に比べ水田側の氾濫水の栄養塩濃度が高い理由は、ため池内において氾濫水中の栄養塩が沈降し、栄養塩濃度が増加した下層の水が沈降物と共にスルースゲートを通過して供給されたためと考えられる。ため池の表層水を採水したが、水深の深い地点においては栄養塩が沈降した上澄みである上層水のみが採水されたのに対し、水深の浅い地点においては底面付近の水が混合されて採水されたと考えられ、下層水の栄養塩濃度が高いことが裏付けられた。下流のベトナムにおいてもため池を用いた農業が行われているが、ベトナムにおいてはため池の上層の水を給水するラバーゲートを用いる方法が一般的で

ある。本観測結果から、ラバーゲートよりもスルースゲートの方が効率的に氾濫水中の栄養塩を利用できるシステムであると言える。

全リン濃度に対する溶存リン酸態リン濃度（溶存 P/TP）および全窒素濃度に対する溶存無機態窒素濃度（溶存 N/TN）を考える。本来この値は1を超えないが、1を超える測定結果がいくつか生じた。これらのサンプルは測定値のバラつきが大きく、サンプルの不均一性が原因と考えられる。1を超えるものについては最大値の1に置き換え、カンダルとタケオの平均値を求める。溶存 P/TP についてはメコン河岸（カンダル）0.3、遠隔地のため池（タケオ）0.5であり、溶存 N/TN についてはメコン河岸 0.4、遠隔地のため池 0.7であり、遠隔地の方が溶存態の割合が高く、メコン河岸の方が懸濁態の割合が高いことがわかる。メコン河委員会が測定したメコン河本流の栄養塩濃度のうちメコン河岸のカンダルの観測地点に最も近い Neak Loung における全リン濃度測定値の季節変化では、年毎にバラつきはあるものの、乾季よりも雨季の方が高濃度となる傾向がある。SS 濃度にも同様の傾向があり、Neak Loung における全リン濃度と SS 濃度は相関係数 0.63 と正の相関を示す。この相関からメコン河本流において、全リン濃度に対して SS に吸着している懸濁態リンの占める割合が高いことがわかる。これは、メコン河岸において懸濁態栄養塩の割合が高いという測定結果と一致する。

バサック川の観測地点 Khos Thom における全リンおよび SS 濃度にも同様の傾向がある。垣内らが示すように SS は氾濫距離に伴い沈降するため、タケオのような本流から距離のある地点においては SS に吸着した懸濁態栄養塩も沈降し懸濁態栄養塩濃度が低下すると考えられる。これは、遠隔地のため池における懸濁態栄養塩量の割合がメコン河岸と比較して低下しているという測定結果と一致する。

ここでカンダルとタケオの測定結果を例に、氾濫期における河川本流付近と本流から離れた土地の栄養塩濃度を比較する。氾濫期の溶存態栄養塩濃度と懸濁態栄養塩濃度をメコン河岸と遠隔地で比較した。溶存態塩濃度濃度および懸濁態栄養塩濃度は、氾濫期にあたる10月11月について、全リン濃度に対する溶存リン酸態リン濃度および全窒素濃度に対する溶存無機態窒素濃度を計算し、その平均値と、全リン濃度・全窒素濃度の平均値から算出された。窒素・リン共に、懸濁態濃度はメコン河岸よりも遠隔地の方が小さく、氾濫により濃度が低下することがわかる。氾濫距離に伴い懸濁態栄養塩が沈降し、本流から距離のある地点においては本流付近よりも懸濁態栄養塩濃度が低下するためであ

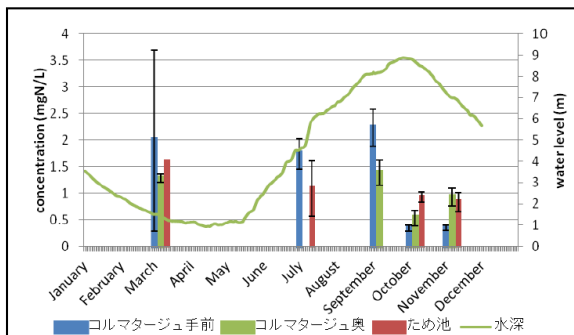


図1 氾濫水の全窒素濃度および河川水深

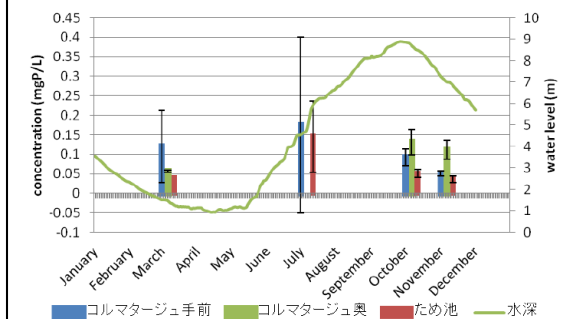


図2 氾濫水の全リン濃度および河川水深

ると考えられる。一方、溶存態濃度は、メコン河岸よりも遠隔地の方が大きい。氾濫水が確保でき、河岸に比べて浸水深が浅いことから、一般に、氾濫原の縁すなわち遠隔地には村落が存在する。村落における人間生活による負荷量を2012年9月のタケオ州家畜等数統計データと國松・村岡の原単位から推定した。約2km²のため池に対し約85tN/year/km²および25tP/year/km²であり、一年間ため池に流入すると考えられる水量から濃度に換算すると約28mgN/Lおよび8mgP/Lとなる。このような人間生活の負荷があるため、遠隔地の溶存態濃度がメコン河岸よりも増加すると考えられる。また、リンに比べ窒素の増加率が大きい。人間生活の負荷も窒素の方が大きく、以上の考察が妥当であると考えられる。

氾濫に伴いSSおよび懸濁態栄養塩が沈降するため、河川本流からの距離が遠い程栄養塩獲得量が少ないと考えられる。しかしながら、氾濫過程において人間生活の負荷が流入する場合、本流からの距離が遠くても、本流付近と同等あるいはそれ以上の栄養塩を獲得できると考えられる。

土壌の可給態窒素含有量および可給態リン酸含有量を表-1に示す。一般に、土壌中の可給態リンはリン酸(P2O5)の量で表されるため、ここではリン酸量で表記する。表-1に農林水産省の地力増進計画指針に示される水田の土壌管理目標値を示す。管理目標値は、施肥を行う際の基準となる値である。基準値を満たしていれば施肥の必要のない土壌であると言える。測定されたサンプルのうちに基準を満たすものは約半分である。遠隔地であるタケオの観測地点よりも、河岸付近であるカンダルの観測地点のほうが基準を満たすサンプルの割合が多い傾向がある。ただし、この値は日本の基準値であり、収量の異なるカンボジアにおいては、土壌中の栄養塩量が十分でないとの評価には至らない。

現地観測の結果を踏まえ、カンダルとタケオの水田における栄養塩収支を考える。氾濫による肥沃化の効果を考察するため、施肥による流入は考えず、氾濫水によって水田系内に流入するもの、刈取りによって系内から流出するもの、系内の土壌に含有されているもののみを考える。なお、氾濫水は人間生活の負荷の影響を受けていると考えられるが、氾濫水中の栄養塩のうち氾濫によるものと人間生活によるものを分離することは困難であり、今後研究を進める必要がある。よってここでは氾濫水がもつ人間生活の負荷の影響を含め、氾濫による流入とする。氾濫水によって系内に流入する可給態栄養塩および系内に存在する土壌中の可給態栄養塩がその年に植物に吸収されて系外に流出するポテンシャルを持つ。

表1 可吸態窒素および可吸態リン酸含有量と基準値の比較

実測日	st	N mg/100g乾土	P ₂ O ₅ mg/100mg乾土
2011年10月	2	14	10
	4	11	18
	10		15
2011年11月	2		9
	4		4
	12		11
2012年3月	2	3	18
	4	3	6
	11	2	3
	12	1	4
2012年7月	2		10
	4		4
	10		3
	11		3
	12		2
地力増進基本指針		8~20	10以上

表2 栄養塩収支と寄与率

		N (t/km ²)		P (t/km ²)	
		カンダル	タケオ	カンダル	タケオ
土壌	可給態	11	2.5	3.2	1.9
	Total	180	88	38	12
氾濫水	可給態	+0.50	+0.79	+0.062	+0.036
	Total	+1.3	+1.1	+0.12	+0.040
刈取り			-1.3		-0.24
寄与率		98%	88%	50%	17%

氾濫水による流入は、先行研究に準じて水田に流入する水量に現地観測から得た栄養塩類濃度を乗じることにより求めた。用いる栄養塩濃度は平均値とする。湛水期間はメコン河岸のカンダルを7ヶ月、遠隔地のタケオを6ヶ月とした。土壌中に存在する栄養塩は、作土厚を15cm、比重は一般に用いられる値1.0として土壌重量を計算し、土壌中の栄養塩含有量および可給態栄養塩量を乗じることにより求めた。刈取りによる流出量は現地観測結果および単位面積あたりの収量(120t/km²)を乗じることにより求めた。収量は年変動や、タケオ・カンダル間の差があると考えられるが、ここでは同じ基準で評価するため、一律にカンボジアの平均的な収量120t/km²を与える。なお、先行研究において、初刈取りによる窒素・リンの流出は、収量に比例することが示されており、観測結果から算出された値はカンボジアの収量と近い値を示す日本における無施肥の水田(収量110t/km²)の値と概ね一致した。表-2に計算された栄養塩収支を示す。系内への流入を+、流出を-と表記している。なお、氾濫水中の可給態窒素・可給態リンは、溶存無機態窒素・溶存リン酸とする。

窒素・リン共に氾濫水および土壌中の可給態栄養塩量の合計値、すなわち植物に吸収されるポテンシャルをもつ全ての栄養塩の量

が刈取りによる流出を上回ることがわかる。よって、農法などの工夫により収量を上げることが可能である考えられる。また、前述の土壤中の可給態窒素・可給態リン酸に関して、日本の施肥基準と比較して十分とはいえないが、カンボジアにおける収量に対する栄養塩は十分に供給できると言える。さらに非可給態も含めると、土壌は僅か表層 15cm 中に刈取り量の 50 倍以上の栄養塩を保有していることが理解された

氾濫水によりもたらされる可給態栄養塩量は、刈取りによる流出量を下回るが、非可給態の栄養塩は、その年の収穫には寄与しないが、時間を経て無機態に分解されるため、長期的に考えると氾濫水中に含まれる非可給態栄養塩は土壌の肥沃化に寄与・貢献していると言える。氾濫により流入する全栄養塩量が刈取りによる栄養塩流出量に対して占める割合を、洪水氾濫の刈取りに対する寄与率とする。表-2 に示すように、メコン河岸のカンダルにおける窒素の寄与率が 98%、リンの寄与率が 50%、遠隔地のタケオにおける窒素の寄与率が 88%、リンの寄与率が 17%となり、氾濫による肥沃化の効果が定量的に示された。遠隔地よりもメコン河岸が、リンよりも窒素が高い寄与率をもつ。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

【以下全て全文査読】

1. Ayako Amano, So Kazama, Evaluation of nutrient condition and agricultural production in the inundation areas of the Mekong River, *Environmental Hydraulics*, pp.375-378, 2014.
2. Ayako Amano, Taisuke Sakuma, So Kazama and Luminda Niroshana Gunawardhana, Spatial temporal distribution of waterborne infectious diseases risk, *River Systems*, 20(3-4), pp.185-196, 2013. DOI: 10.1127/1868-5749/2012/0064
3. Chaiwat Ekkawatpanit, So Kazama, Masaki Sawamoto and Sarukkalige Priyantha Ranjan, Evaluation of the inequality of water resources, *Water Management, Proceedings of the institution of Civil Engineers*, 165(WM1), pp.1-12, 2013. DOI: 10.1680/wama.11.00050
4. 天野文子, 風間聡, メコン河氾濫原における栄養塩の季節変化と肥沃効果の評価, *土木学会論文集 B1(水工学)* 69, No.4, pp. I_499-I_504, 2013.3.7.
5. Ayako AMANO, So KAZAMA, Relationship between Discharge and Nutrient Concentration in Inundation Areas in Cambodia, *Journal of Water and Environment Technology*, 10(2), pp.165-175, 2012.
6. Myat Myat Thi, Luminda Niroshana Gunawardhana, So Kazama, A comparison of historical land-use change patterns and recommendations for flood plain developments in three delta regions in Southeast Asia, *Water International*, 37(3), pp.218-235, 2012. DOI: 10.1080/02508060.2012.687511
7. 天野文子, 風間聡, メコン河洪水氾濫の肥沃化について, *水工学論文集*, 56, pp.I_1459-I_1464, 2012.3.
8. So Kazama, Toshiki Aizawa, Toru Watanabe, Priyantha Ranjan, Luminda Gunawardhana and Ayako Amano, A quantitative risk assessment of waterborne infectious disease in the inundation area of a tropical monsoon region, *Sustainability Science*, 7(1), pp.45-54, 2012. DOI: 10.1007/s11625-011-0141-5
9. Amano, A., Kazama, S., Nagai, K. and Chanon, T., Effective use of flood water for agriculture by inundation ponds in the lower Mekong River basin, *Oral Presentation Proceedings of the 9th International Symposium on Southeast Asian Water Environment*, pp.81-88, 2011.
10. 天野文子, 佐久間太佑, 風間聡, 水理氾濫モデルと現地患者数を用いた水系感染症リスクの時空間分布, *水工学論文集*, 55, pp.S643-S648, 2011.

〔その他〕

<http://kaigan.civil.tohoku.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・准教授
研究者番号：50272018

(2) 研究分担者

大村 達夫 (OMURA, TATSUO)

東北大学・大学院工学研究科・教授
(平成 23 年度まで)

研究者番号：30111248

梅田 信 (UMEDA, MAKOTO)

東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：10447138

真砂 佳史 (MASAGO, YOSHIFUMI)

東北大学・大学院工学研究科・助教
(平成 24 年度まで)

研究者番号：50507895

中野 和典 (NAKANO, KAZUNORI)

日本大学・工学部・准教授

研究者番号：30292519