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

PHOSPHORUS TRANSPORT MODELING AND EVALUATIONS OF FERTILIZATION EFFECT AND EFFECT ON AGRICULTURE AT THE MEKONG RIVER FLOOD PLAIN

天野文子¹・風間聡²

Ayako AMANO and So KAZAMA

¹学生会員 東北大学大学院土木工学専攻 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

²正会員 工博 東北大学教授 土木工学専攻 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

To evaluate fertilization effect of the Mekong River flood and inundation, we modeled phosphorus transport. Using this model, fertilization effect and effect of inundation on agriculture were evaluated. We obtained the following conclusions; 1) Settling velocity of phosphorus was calibrated to 0.25m/day. 2) Considering wind effect for settling velocity of phosphorus improve the model especially at the edge of flood plain. 3) Fertilization effect was evaluated spatially and quantitatively. Except for some edge areas of flood plain there are fertilization effect. 4) Effect of inundation on agriculture was evaluated spatially and quantitatively. Some areas need application of fertilizer for current production.

Key Words : Cambodia, Colmatage, nutrient, wind wave, sustainable agriculture

1. はじめに

メコン河下流域では、毎年大規模な洪水氾濫が発生する。この洪水氾濫は、コルマタージュと呼ばれる農業用の導水路により、人為的に発生させられる。コルマタージュにより導水された氾濫水は、主に稲作に利用される他、氾濫原では魚やカニが捕獲される。このように、洪水氾濫は農業のみならず、漁業や生活用水など様々な利用され、地元住民は高い水位に対応した高床式住居に住まい、洪水氾濫に順応した生活をしている。一方で洪水氾濫は、水系感染症を拡大させ¹⁾、市街地での浸水被害、道路や橋の被災などの問題も引き起こす²⁾。メコン河の洪水氾濫は正の側面と負の側面を併せ持つものであるが、これらの便益と被害を適切に評価することは、今後の治水・利水・開発を考える上で重要である。

その中で、メコン河の洪水氾濫による農地の肥沃効果については、カンボジア国の主要産業が農業で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。例えば、大河川の洪水氾濫について川口は、窒素やリン酸の「供給を河川の堆積物や河川水に求めることは一般にできない」として

いる³⁾。一方、角道・後藤は「メコン河および支流の洪水が運搬してきた泥土は低平地の土壌を肥沃化している」とし、カンボジアにおけるコルマタージュ農業の重要性を述べている⁴⁾。藤井らによって行われたメコンデルタにおける聞き取り調査においても、堤防により氾濫水の流入を防いだ地域において土壌肥沃度が低下したという意見が示されている⁵⁾。しかしながら、これらの先行研究では、肥沃効果についての科学的な証明はされていない。

また、メコン河下流域では今後も人口の増加が予測されており、人口増加に伴い食料需要の増加が見込まれる。この需要に安定的かつ持続的に応えるためには、農業の環境負荷を低減させる必要がある⁶⁾。メコン河氾濫原において、環境負荷の小さい持続可能な農業を実現するためには、洪水氾濫と農業の関係の理解が不可欠である。特に肥沃効果の評価は、メコンデルタにおいては既に問題化している施肥による水質悪化⁵⁾⁷⁾を予防・防止するためにも重要であると言える。

筆者らはこのような背景をうけ、氾濫原における現地観測に基づき水田の栄養塩収支を推定し、氾濫による肥沃効果を定量的に評価した⁸⁾。しかしながら、現地観測に基づく方法では、広域にわたる洪水氾濫の肥沃効果を時空間的に評価することが出来ない。そこで本研究では、

メコン河下流域の氾濫原におけるリンの輸送をモデル化し、肥沃効果の評価と農業への影響評価を空間的に行うことを目的とする。

2. 対象領域

対象地域は、図-1中赤枠で示された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、バサック川と分流している。本対象領域では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km²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⁹⁾。

3. 計算方法

リンの輸送を計算するため、洪水氾濫計算とリン輸送計算からなるリン輸送モデルを構築した。空間解像度は1km×1km、計算時間間隔は30秒とした。ここで、先行研究によりリンは窒素よりも肥沃効果が小さいことが示されており、本対象領域においてはリンが制限要因になっていると考えられる⁸⁾。また、窒素輸送はリン輸送よりも現象が複雑であるため、モデルが複雑になり広域のモデル化による精度が保証出来ない。したがって、本研究ではリンの輸送のみをモデル化し、肥沃効果の評価と農業への影響評価に繋げる。なお、本研究ではリンの形態を区別せず、SSに吸着した形態を仮定して計算を行い、全リンの輸送をモデル化した。図-2に示すように、現地観測により全リン濃度とSS濃度の相関係数が0.86と高いことが示されていることから、この仮定は妥当であると考えられる。以下、リンと記述するものは全リンを示すものとする。

(1) データセット

標高はUSGS(アメリカ地質調査所)が公開しているHydroSHEDSから得た。水位および日降水量、河道のリン濃度はメコン河委員会が編集したデータを用いた。人口分布はカンボジア保健省ホームページのGISデータから得た。州毎の家畜頭数から人間一人あたり家畜頭数を州毎に求め、人口分布と組み合わせることにより家畜の個体数分布を求めた。人間および家畜の排出負荷の原単位は吉村・竹内¹⁰⁾を参照した。個体数と原単位を乗じて求められた発生負荷量の分布は図-3の通りである。

図-1 計算対象領域

図-2 全リン濃度とSS濃度の比較

図-3 発生負荷量

(図中黒線は河道、星印は現地観測地点を表す)

(2) 洪水氾濫計算

洪水氾濫計算はKazamaら¹¹⁾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¹²⁾、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。

(3) リン輸送計算

リンの輸送は式(1)によって計算される。

$$L_i^t = L_a + L_{in} - L_{out} - L_s \quad (1)$$

ここで、 L_i^t ：時間 t 、セル i におけるリン量(g)、 L_a ：人・家畜からの発生負荷量(g)、 L_{in} ：隣合うセルからの流入リン量(g)、 L_{out} ：隣合うセルへの流出リン量(g)、 L_s ：沈降リン量(g)である。これらはそれぞれ式(2)～(5)により求められる。

$$L_a = (P_h \times U_h + P_a \times U_a) \times dt \quad (2)$$

$$L_{in} = Q_{in} \times C_{i-1}^{t-1} \times dt \quad (3)$$

$$L_{out} = Q_{out} \times C_i^{t-1} \times dt \quad (4)$$

$$L_s = V_s \times C_i^{t-1} \times dx^2 \times dt \quad (5)$$

ここで、 P_h 、 P_a ：人および家畜の個体数(個)、 U_a 、 U_h ：人および家畜の発生原単位(g/個/s)、 Q_{in} ：流入水量(m^3/s)、 Q_{out} ：流出水量(m^3/s)、 C_i^t ：時間 t 、セル i におけるリン濃度(g/ m^3)、 V_s ：沈降速度(m/s)である。先行研究^{13,14)}において示されている沈降速度を参考に、沈降速度を0.03m/dayから0.5m/dayの範囲で変化させ、計算結果と現地観測結果⁸⁾との比較から沈降速度を決定した。

境界条件として、河道のリン濃度を用いた。メコン河委員会によって河道のリン濃度が毎月一回測定されている。メコン河の観測地点のうち、計算対象領域とその上下流の6地点について2005年から2008年の4年間のデータを比較すると、地点間の濃度差が小さく、全ての地点において同様の季節変化を示した。よって計算対象領域内においてメコン河のリン濃度は一定だと考えられる。月ごとに6地点の平均値を求め、境界条件として河道全体に与えた。支流のトンレサップ川、バサック川についても同様のことが言え、それぞれ2地点、3地点のデータを用いて境界条件を算出した。図-4に境界条件として用いたリン濃度を示す。

4. 沈降速度の決定

リン輸送モデルによって計算されたリン濃度と、現地観測により測定されたリン濃度⁸⁾の比較から、沈降速度を決定する。現地観測地点は図-1に星印で示した4地点であり、雨季乾季双方を含む全9回の測定結果を比較に用いた。図-5は、沈降速度を0.05m/dayから0.30m/dayの範囲で変化させた場合の計算値と、実測値の比較である。なお、沈降速度0.03m/dayから0.5m/dayの範囲の計算結果のうち沈降速度が0.05m/dayよりも小さい場合と0.30m/dayより大きい場合は実測値との差が大きいため、図-5から省略した。図-5中、破線で囲まれたプロットは、どの沈降速度をもちいた場合も、実測値よりも計算値の濃度が低いことが分かる。これらのプロットは図-1の赤色の星で示されている氾濫原の端部を示す。氾濫原の端部は他の地域に比べ、計算の精度が劣ることが分かった。

それぞれの沈降速度の時のRMSE (root mean square error) は表-1に示す通りである。沈降速度が0.25m/dayの時、RMSEが0.069と最も小さくなることから、沈降速度を0.25m/dayと決定した。先行研究において示されている沈降速度は、0.3-0.5m/day¹³⁾、0.028-0.062 m/day¹⁴⁾と文献により異なり広範囲にわたるが、ここで決定された沈降速度はこれらの範囲に収まっており妥当な値であると考えられる。

5. 風の影響

上記のリン輸送計算において、氾濫原の端部の計算精度が劣る理由として、氾濫原全域において沈降速度を一定と仮定したことが考えられる。氾濫原の端部など水深の浅い地点においては、風の影響により底質の巻き上げや氾濫水中のリン沈降に変化が生じると考えられるためである。これらの風の影響を考慮し、モデルの改善を試みた。

天野らによると、巻き上げられた再懸濁物の沈降速度は17.5m/dayと速く、水中懸濁物の沈降速度の約30倍である¹⁵⁾。本研究対象領域において氾濫水深は大きい所でも10m程度であり、氾濫水の流れも遅いことから、本モデルのタイムスケールでは巻き上げが結果にあたえる影響は十分に小さいと考えられる、よって底質の巻き上げを考慮しないこととした。

風により氾濫水の流動に変化が生じると、リン沈降にも変化が生じると考えられる。本研究対象領域において、これらを詳細にモデル化することは、観測データの制約やスケールの問題などから困難である。また、様々な仮定を含む本モデルに期待される精度の点からも詳細なモデル化は適切でないと言える。そこで本モデルでは、風の影響により底質が移動する場合、氾濫水の乱れにより

図-4 境界条件として用いた河道のリン濃度

表-1 沈降速度毎のRMSE

Vs (m/day)	RMSE (mgP/L)
0.05	0.122
0.10	0.086
0.15	0.073
0.20	0.070
0.25	0.069
0.30	0.070

図-5 モデルの計算結果と実測値の比較

図-6 風速の季節変化

氾濫水内のリンの沈降が阻害されると仮定し、以下の通り、氾濫水深が底質の移動限界水深以下の時の沈降の阻害をモデル化した。

移動限界水深と風速の関係は次式(6)より求められる¹⁶⁾。

$$\sqrt{d/25} = \pi H / \{2T \sinh(2\pi h_i / L)\} \quad (6)$$

ここで、 d ：底質の粒径(mm)、 H ：波高(m)、 T ：周期(s)、 h_i ：移動限界水深(m)、 L ：波長(m)である。底質の粒径はRubeyの式¹⁷⁾を用い、決定された沈降速度から算出した。波高および波長、周期はWilsonの一般式をもとに井島が浅海風波に拡張した式¹⁸⁾を用いて求めた。なお、氾濫原における標高の変化が少ないことと、現地の様子から住居や樹木の間隔を考え、吹送距離を1000mとした。

風速は、本研究対象領域の上流に位置するトンレサップ湖チョンクニアス地点において測定された毎時データのうち2004年から2006年の3年間のデータを用いた¹⁹⁾²⁰⁾。本データは農林工学研究所により観測されたものであり、増本隆夫氏より提供いただいた。なお、本対象領域内の観測地点とチョンクニアス地点の風向が同様の季節変化を示すように¹⁹⁾、本対象領域とその周辺は標高の変化が少なく、風向や風速も空間的に類似していると考えられる。毎時のデータを毎日に1位から24位に昇順に順位づ

けし、各順位の風速の平均値を月ごとに求めたものを、図-6に示した。図-6において、7月と8月は他の月に比べ風速が大きい傾向にある。そこで、7月8月を強風期、それ以外を弱風期として、それぞれの平均値を算出した。昇順順位を割合に変換すると、強風期、弱風期それぞれについて、ある速度の風が一日のうち何%の時間発生するかを求めることが出来る。

ここで、ある地点の水深を h とすると、移動限界水深が h となる速度 U 以上の風が発生している間、沈降が阻害されると言える。よって、本モデルでは、時間 t 、セルにおける氾濫水深が h であり、速度 U 以上の風が一日のうち X の割合で発生するとき、時間 t 、セルにおける沈降量を X 割小さくし、沈降の阻害を表現した。

図-7に風の影響を考慮した場合としない場合の結果の比較を示す。風の影響を考慮した場合、RMSEが0.069から0.061、相関係数が0.16から0.25と改善した。破線で示したプロットは、氾濫原の端部を示す。風の影響を考慮しない場合は、実測値よりも計算値の濃度が低く精度が悪いが、風の影響を考慮すると計算値が実測値に近付くことがわかる。氾濫原の端部における計算結果の変化により、RMSEと相関係数が改善したと言える。

図-7 風の影響考慮の有無による計算結果の比較

6. 肥沃効果の評価と農業への影響評価

モデルによって計算された年間リン沈降量から、肥沃効果を評価する。浸水期間中にその地点において人・家畜が発生させるリン量に対する年間リン沈降量を肥沃化指標と定義し、図-8に示した。肥沃化指標が1よりも小さい地点は、その地点で発生するリン負荷が洪水氾濫により他の地点へ流出する地域である。肥沃化指標が1よりも大きい地点は、洪水氾濫により他の地点からリンが流入する地域であり、洪水氾濫による肥沃効果がある地域と言える。図-8より、氾濫原の端部などの一部を除き、肥沃効果があることが分かる。特に、メコン河とトンレサップ川、バサック川に挟まれた地域は肥沃化指標が大きい。これらの地域は浸水期間が長く、流入する氾濫水量が多いため、肥沃効果が高いと考えられる。氾濫原の端部に点在する肥沃効果のない地点は、周囲に比べて標高の高い地点である。氾濫水と共にリンが周囲に流出することや、水深が浅いため風の影響により沈降量が少なくなることが原因と考えられる。

農業への影響を評価するため、計算された年間リン沈降量を稲作に必要なリン量と比較する。稲作に必要なリン量は、対象領域内で栽培された稲のリン含有量を測定し収量当りに換算し求めた⁸⁾。図-9は、本対象領域の平均収量300t/km²の稲作に必要なリン量0.6t/km²を1とした時のリン沈降量を示す。この値が1よりも小さい地域では、収量300t/km²の稲作を持続的に行うためには、施肥などによりリンを投入する必要があると言える。なお、実際には他の動植物による吸収があるため、値が1や1に近い地域においても施肥が必要であると考えられる。リンの沈降量は図-3に示した発生負荷量とは異なる分布を示している。発生負荷量の分布よりも、河道からの距離や標高など浸水期間や氾濫水深の方が、リンの沈降量分

図-8 肥沃化指標

(図中黒線は河道、星印は現地観測地点を表す)

図-9 収量300t/km²の稲作に必要なリン量を1としたときのリン沈降量

(図中黒線は河道、星印は現地観測地点を表す)

布に強く影響していると考えられる。

河岸部など浸水期間の長い地点は沈降量が多く、栄養塩獲得の点において有利な土地であると言える。ただし、本研究対象領域において、氾濫水量および氾濫水深がその土地の農業に大きく影響を及ぼすと考えられ、本研究で評価されたのは洪水氾濫の農業への影響の一部である。今後、栄養塩獲得のみならず氾濫水量や氾濫水深を含めた総合的な影響評価を行う必要がある。

7. 結論

本研究によって得られた結論は以下の通りである。

- ・リン輸送モデルにおいて、沈降速度が0.25m/dayと決定された。風の影響を考慮しない場合、氾濫原の端部において濃度が低く計算されることが示された。
- ・風の影響を考慮した場合、RMSEが0.069から0.061、相関係数が0.16から0.25となり、結果が改善した。特に氾濫原の端部において改善が顕著である。
- ・肥沃効果の定量評価を空間的に示した。氾濫原の端部など一部を除き、肥沃効果があることが示された。周辺から水が流れ込む地点において肥沃効果が高い。
- ・リン沈降量と稲作に必要なリン量から農業への影響を空間的に評価した。持続可能な農業を行うためには施肥が必要な地域があることが示された。浸水期間の長い地域は多くのリンを獲得出来ることが示された。

謝辞：農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所の増本隆夫氏には観測データを提供いただいた。ここに謝意を表する。本研究は日本学術振興会特別研究員奨励費およびJSPS科研費13J02676の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 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, 第55巻, pp.643-648, 2011.
- 2) 久保純子: メコン川下流平野(カンボジア)における微地形と洪水特性, 土地利用・水利用の特色, 早稲田大学教育学部 学術研究(地理学・歴史学・社会科学編)第54号, pp.1-9, 2006.
- 3) 川口桂三郎: 東南アジアの水田土壌の概要と重要研究課題, 東南アジア研究, 第5巻, pp.661-672, 1968.
- 4) 角道弘文, 後藤章: カンボジアの農業農村開発とメコン下流域の水文環境, 農業土木学会誌, 第65巻, 第4号, pp.43-49, 1997.
- 5) Jonathan A. Foley, Navin Ramankutty, Kate A. Brauman, Emily S. Cassidy, James S. Gerber, Matt Johnston, Nathaniel D. Mueller, Christine O'Connell, Deepak K. Ray, Paul C. West, Christian Balzer, Elena M. Bennett, Stephen R. Carpenter, Jason Hill, Chad Monfreda, Stephen Polasky, Johan Rockström, John Sheehan, Stefan Siebert, David Tilman & David P. M. Zaks: Solutions for a cultivated plant, Nature, 478, pp.337-342, 2011.
- 6) 藤井秀人, 藤原洋一, 星川圭介: メコンデルタ洪水常襲稲作地域におけるフルダイク化の進展とその影響, 農業農村工学論文集, 第81巻, 第3号, pp.271-278, 2013.
- 7) 小島千穂, 川島博之, 新藤純子, 岡本勝男, 戸田任重, 茅原一之: ベトナムにおける食料生産と窒素フロー, 環境科学会誌, 第17巻, pp.15-24, 2004.
- 8) 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, 水工学論文集, 第69巻, 第4号, pp.I_499-I_504, 2013.
- 9) FAO: AQUASTAT, (<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm>) (2014/11/25)
- 10) 吉村千洋, 竹内邦良: 分布型流出モデルによるメコン川流域の栄養塩流出過程の推定, 水文・水資源学会誌, 第20巻, 第6号, pp.493-504, 2007.
- 11) So Kazama, Terumichi Hagiwara, Priyantha Ranjan and Masaki Sawamoto: Evaluation of groundwater resources in wide inundation areas of the Mekong River basin, Journal of Hydrology, 340, pp.233-243, 2007.
- 12) 土木学会 水理委員会 水理公式集改訂小委員会 編: 水理公式集 平成11年度版, 土木学会, 1999.
- 13) W. S. Lung, R.P. Canale and P.L. Freedman: Phosphorus models for eutrophic lakes, Water Research, 10, pp.1101-1114, 1976.
- 14) G. B. Sahoo, S. G. Schladow and J. E. Reuter: Effect of sediment and nutrient loading on Lake Tahoe optical conditions and restoration opportunities using a newly developed lake clarity model, Water Resources Research, 46, W10505, 2010.
- 15) 天野邦彦, 李建華, 鈴木宏幸, 安田佳哉: 浅い貯水池における懸濁物組成とその水質への影響, 水工学論文集, 第45巻, pp.1189-1194, 2001.
- 16) 堀川清司: 海岸工学へ海岸工学への序説, 東京大学出版会, 1973.
- 17) Rubey, W. W: Settling velocities of gravels, sand and silt particles, Amer I Sci., Vol.25, pp.325-338, 1993.
- 18) 井島武士: 波浪の数値予測, 土木学会 1968 年度水工夏期研修会講義集 A, 第5巻, PP.A2.1-A2.30, 1968.
- 19) MASUMUTO Takao, TSUJIMOTO Kumiko and SOMURA Hiroaki: Hydro-meteorological observation and analysis of observed data at Tonle Sap Lake and its environs, Urban Paddy Areas, Technical Report of the National Institute for Rural Engineering, 206, pp.219-236, 2007.
- 20) MASUMOTO Takao, TANJI Hajime, OGAWA Shigeo, HORIKAWA Naoki, RIKIMARU Atsushi, KUBO Sumiko, SOMURA Hiroaki, PHAM Thanh Hai and KAMAL Rowshon: Development of Prediction Models of the Change of Agricultural Water Use in the Asia Monsoon Region, Bulletin of the National Institute for Rural Engineering, 46, pp.67-90, 2007.

(2014.9.30受付)