

メコン河下流域における土砂・栄養塩動態の推定について

ESTIMATING OF TRANSPORT OF SEDIMENT AND NUTRIENTS IN THE LOWER MEKONG BASIN

柿澤一弘¹・宮沢直季²・砂田憲吾³

Kazuhiro KAKIZAWA, Naoki MIYAZAWA and Kengo SUNADA

¹学生会員 山梨大学大学院修士課程学生 医学工学総合教育部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

²正会員 工修 山梨大学大学院助手 医学工学総合研究部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

³フェロー会員 工博 山梨大学大学院教授 医学工学総合研究部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

The transportation of sediment and nutrients in the lower Mekong basin was studied. The influence of a dam in the mainstream on the downstream area was analyzed by comparing data from before and after construction. No change of discharge was seen in the downstream area. However, the suspended sediment flux decreased significantly, and its ratio of decrease was higher near the dam. The daily data of suspended flux and nutrient flux was estimated from the relationship among the discharge and the suspended and nutrient fluxes. The balance of sediment and nutrients was calculated, and maps of their transportation were created. The tendency of deposition and erosion could be understood. Most suspended sediment of the mainstream was supplied from the upstream area of Chiang Saen. In contrast, all phosphorus was supplied from the tributaries and the river channel.

Key Words : lower Mekong basin, observation data, dam, suspended load, nutrients, sediment transportation map

1. はじめに

メコン河は標高5,200m以上のチベット高原に源を發し、中国、ミャンマー、ラオス、タイ、カンボジア、ベトナムを経て、南シナ海に注ぐ、総延長4,900km、流域面積795,500km²の国際河川である。流域では、本支川の水利用と開発に関わる、局所的または地域的または流域全体に及ぶさまざまな規模の水問題が生じている。このうち、メコン河委員会¹⁾は、地域・流域全体に関わる水問題として、1)洪水や下流デルタ地帯での塩水侵入などに関する流量変動、2)生態系条件や漁業生産性、3)水質環境、4)河岸侵食や河床変動、5)航行障害、6)森林破壊、7)政策協調などの水関連問題があるとしている。本・支川に直接関わる総合流域管理の視点からは、特に水量、土砂、水質が適正に管理されることが望まれている。これらは、前述の項目1), 2), 3), 4), 5)にかかわる流域全体にわたる基本的かつ重要な課題である。

本研究は、メコン河下流域における土砂動態および栄

養塩動態について、その包括的な見通しを得るために、不十分ながら現存する観測資料を用いて推定を試みたものである。

筆者らは、同下流域区間約2,500kmの本川河道特性の現地調査を実施している²⁾。その結果からは、区間の河床粒径は約0.25~0.90mmであり、流送土砂は浮遊砂が卓越すると考えられた。このため、土砂としては浮遊砂を対象とした。栄養塩については総リンを中心に検討した。流量-浮遊砂量および流量-栄養塩負荷量の関係からそれらの輸送量と収支の推定を行い、土砂・栄養塩に対する地理的条件や人間活動の影響を考察した。

2. メコン河流域の状況と使用データ

メコン河流域では現在約7,180万人が生活し、今後人口急増が予想されている地域である。人々の多くは農業や漁業によって生計を立てているが、第3次産業が急速に伸びている。地形としては、上流部では山岳地帯、下

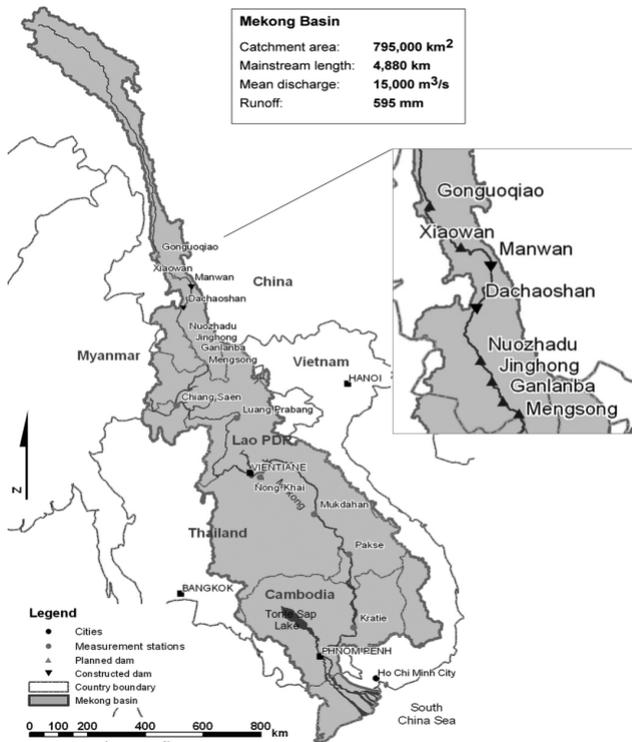


図-1 メコン河流域と漫湾ダム及び建設・計画中のダムの位置⁶⁾

流域では平地に農地が広がっている。雨季の下流域デルタ地帯は氾濫原として洪水被害が起きている。

解析に使用したデータは以下の3つである。

- Mekong River Commission
Lower Mekong Hydrologic Year Book³⁾
流量，浮遊砂濃度
- Mekong River Commission
Water Quality Monitoring Network (WQMN) database⁴⁾
浮遊砂濃度，総リン濃度 (Total-P)，リン酸態リン濃度 (PO₄-P)，アンモニア態窒素濃度 (NH₄-N)
- Mekong River Commission
Hydrological database (HYMOS)⁵⁾
流量

3. 漫湾ダムがメコン河下流の流況へ及ぼす影響

(1) 漫湾ダムの概要

メコン河本川の最初のダムが，1993年中国雲南省に完成した⁶⁾。集水面積は114,500km²，総貯水量は0.92km³，年間発電量は7,805GWhである。この他に中国では，7つのダムがメコン河本川で建設・計画されている。第2のダム大朝山ダムは2003年に供用され，第3のダムである小湾ダムも建設が開始されている。図-1⁶⁾に漫湾ダムおよび建設・計画中のダムの位置を示す。上流域から中国国境までの年間総流量は73.6km³に対し，これらの8つの

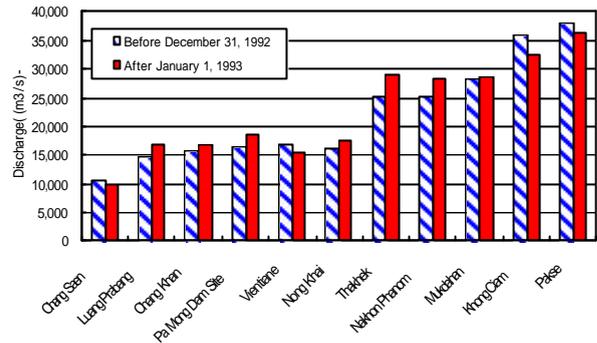


図-2 ダム完成前後の下流観測所での平均年最大流量の比較

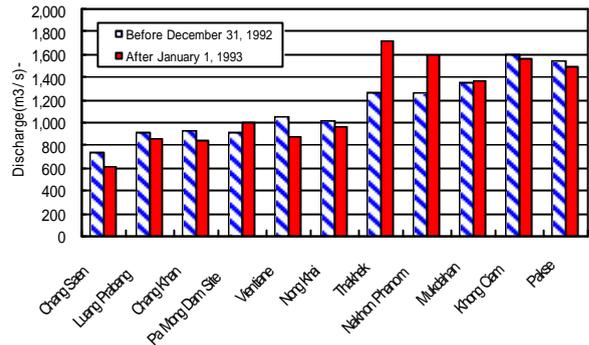


図-3 ダム完成前後の下流観測所での平均年最小流量の比較

ダムの総貯水量は40km³を超える。これらのダムは発電用であるために，基本的に雨季の洪水期では貯水し，乾季にはその水を発電に使用するために放流を行っている。このことでこれまでの流況が変化すると思われる。またダムによる堆砂で下流への土砂供給量が減少する。漫湾ダムの下流へ及ぼす影響を検討するために，観測資料によって漫湾ダムが建設された1993年前後の流況（年最大流量，年最小流量，浮遊砂フラックス）の変化を見た。

(2) 流量への影響

図-2と図-3は各地点本川観測所の年最大流量と年最小流量のダム建設前後の変化を見るため，1992年以前と1993年以降の平均値の比較を行った。年最大流量の変化を見ると増加地点が多く，年最小流量の変化では減少地点が見られる。これからダムによって上流からの流量は減少していることも考えられるが，雨季では流域から集まる大きな流入量によって打ち消されてしまっている。各地点で流量の増減は見られるが，下流全体へのダムの影響ははっきりと示す結果は得られなかった。

Quangら⁷⁾は，漫湾ダムから最も近い下流の観測所であるChiang Saenで影響の解析を行った。最大水位のグラフからは，ダムの貯水が開始されている1992年には観測期間内では最低の水位を示した。これは，漫湾ダムが貯水量を満水にするために操作を行ったためとしている。しかしそれ以降はこれまでより水位が上昇しているとしている。さらにQuangら⁷⁾は，乾季・雨季ともにChiang Saenでは流量が増加していることを示している。

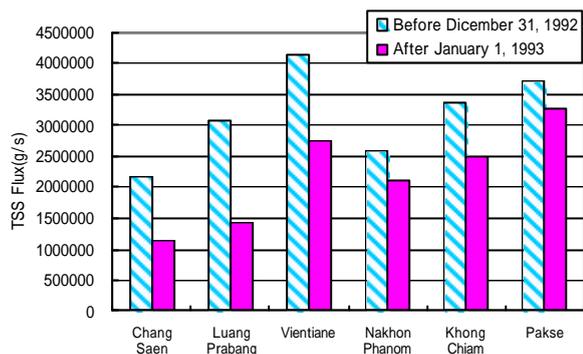


図-4 ダム完成前後の下流観測所での平均浮遊砂フラックスの比較

(3) 浮遊砂への影響

Kummu ら⁶⁾はダムが河川を封鎖した年から3年たった1996年の漫湾ダム貯水池での水深測量調査の分析を行っている。建設時よりも底面の標高が30m上昇していたことから年間平均で土砂堆積は 60×10^9 kgと推定した。中国から生じる年間の浮遊砂量は 71×10^9 kg (メコン河流域の約50%)が漫湾ダム建設前に流れていた。建設後には、Chiang Saenで 31×10^9 kgと浮遊砂量はダムの建設された1993年以降56%の減少があったとしている。

Kummu ら⁶⁾は、さらにBrune⁸⁾の式を用いてメコン河ダム群の理論的な捕捉率を算出している。漫湾ダムで68%、大朝山ダムで66%、小湾ダムで92%の捕捉率となった。ダム群すべてでは、中国から流れる浮遊砂の94%がダムに堆砂する結果を得ている。

ダムによる土砂流送への影響を見るために、Kummu らとは別な方法で浮遊砂濃度データから求めたフラックスの推定を試みた。図-4は観測所における1985年から1992年と1993年から2000年の浮遊砂フラックスの平均値を比較した。ダム建設の1993年前後で浮遊砂フラックスの大きな減少がはっきりと見られる。Chiang Saenでは218万g/sから113万g/sと約48%の減少になるなど、直下流域 (Chiang Saen ~ Vientiane) では約35~50%の減少が見られた。さらに下流域 (Nakhon Phanom ~ Pakse) では約10~25%の減少が見られた。ダムによって浮遊砂が捕捉されたためと考えられる。またダムに近いほど浮遊砂フラックスの減少量、減少割合が大きいが分かる。観測所の下流側では減少が見られるが、上流側ほどではない。このことよりダムからの距離が浮遊砂フラックス減少に影響することが分かる。

4. 土砂・栄養塩動態

(1) 浮遊砂量・栄養塩負荷量の推定

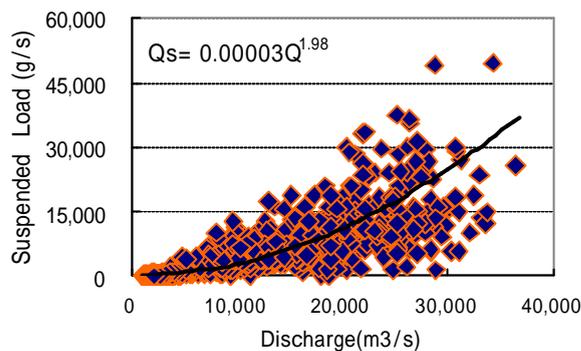


図-5 Mukdahanにおける流量と浮遊砂量の観測値及び流量 - 浮遊砂量曲線式

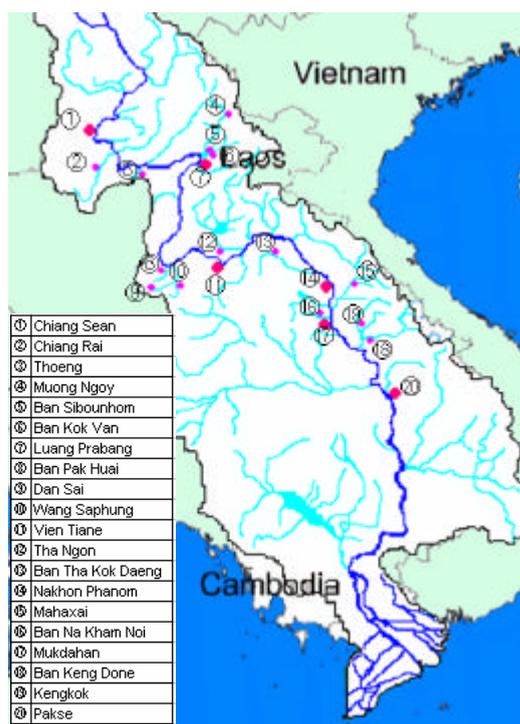


図-6 観測所の名前と位置

メコン河流域では本川・支川ともに観測データが十分とはいえず、動態の把握は困難となっている。浮遊砂濃度データ、栄養塩 (TotalP, PO_4 -P, NH_4 -N) 濃度データは時系列で異なり不足している。しかしながら流量は日データとして豊富にあることから、以下の式を用いた。

既知の観測データから式(1)の浮遊砂量 Q_s と流量 Q の関係式の係数 K_s と p_s を決定し、浮遊砂量を推定した。

$$Q_s = K_s Q^{p_s} \quad (1)$$

図-5にMukdahanの流量 - 浮遊砂量曲線を示す。

同様に、得られている観測データから式(2)の栄養塩負荷量 Q_n と流量 Q の関係式の係数 K_n と p_n を決定し、栄養塩負荷量を推定した。

$$Q_n = K_n Q^{p_n} \quad (2)$$

図-6に考慮した観測所の位置を示す。支川を含めた土

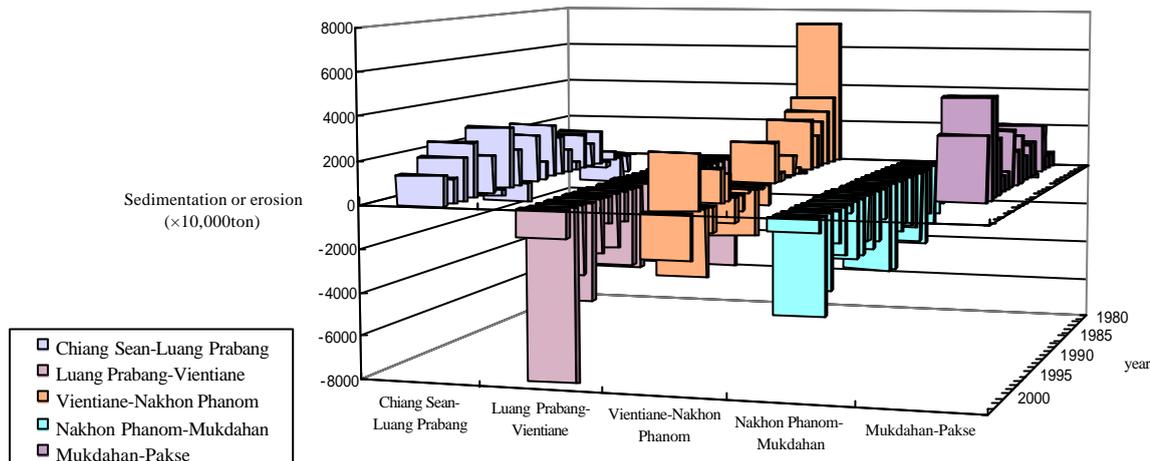


図-7 Chiang Saen - Pakse間の年間浮遊砂量収支

砂収支を把握するために、本川をChiang Saen - Luang Prabang区間(CS-LP区間)、Luang Prabang - Vientiane区間(LP-VT区間)、Vientiane - Nakhon Phanom区間(VT-NP区間)、Nakhon Phanom - Mukdahan区間(NP-MD区間)とMukdahan - Pakse区間(MD-PK区間)に分けた。このほかにも多数の支川が存在するが、得られた観測所の観測データのみで議論する。また支川観測所の位置を本川合流地点として扱い、その支川からの流入量として考える。栄養塩は、CS-LP区間、LP-VT区間、VT-NP区間、Nakhon Phanom - Khong Chiam区間(NP-KC区間)とKhong Chiam - Pakse区間(KC-PK区間)で分けた。栄養塩については支川のデータが得られなかったため、本川のみで考える。

(2) 解析結果

推定された浮遊砂量を用いて、年間土砂収支を算出した。図-7はメコン河本川のChiang SaenからPakseまでの5区間の年間土砂収支である。図より、CS-LP区間では堆積した年が多いことが分かる。堆積侵食を毎年繰り返しているために河床は安定している区間だと言える。LP-VT区間では1992年以外は侵食され、土砂流出が大きい区間ということが知れる。小さな支川が多く流入する区間ではあるが、計算されていない支川からの流入土砂量を考慮しても侵食量は非常に大きいと言える。図-7からは、VT-NP区間は土砂が堆積している年代から侵食される年代へ変化している。NP-MD区間はすべて侵食となった。支川からの流入量を考慮しても、侵食はこの区間の傾向と考えられる。MD-PK区間では堆積した年が多かった。本川では、堆積傾向区間と侵食傾向区間がはっきりと分かれる結果となった。河床が上昇する区間と低下する区間ができることにより、それに伴った影響が今後本川河道に出てくるだろう。このような傾向が続くことになれば河道管理が一層必要となると考えられる。作成した土砂動態マップを図-8に示す。メコン河本川で流れる土砂量の多くはChiang Saenよりも上流である中

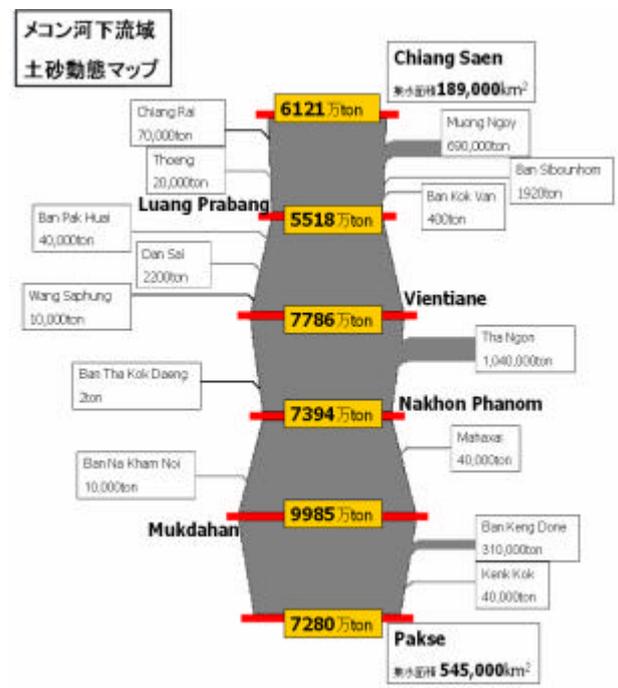


図-8 メコン河下流域の年間土砂動態マップ

国で生産・流送されていることが分かる。集水面積はChiang Saenで約189,000km²、Pakseでは約545,000km²と2.9倍となるのに対し、年間土砂量はChiang Saenでは5990万tonと推定され、Pakseでは7280万tonと1.2倍の増加にとどまっている。また限られたデータではあるが、求めた支川の土砂量は本川と比べると十分小さいことが分かる。本川には堆積・侵食区間があり、メコン河における土砂量は上流（中国）からのものが支配的と言える。図-9はメコン河本川のChiang SaenからPakseまでの5区間の年間総リン負荷量収支である。総リンは、NP-KC区間では、溶解傾向から蓄積傾向へ変化している。KC-PK区間では、1993年までは溶解傾向と蓄積傾向が繰り返されているが、溶解傾向へ変化した。CS-LP区間、LP-VT区間、VT-NP区間では溶解傾向であった。CS-LP区間では、すべての年が溶解ではなく、蓄積の年も見られた。

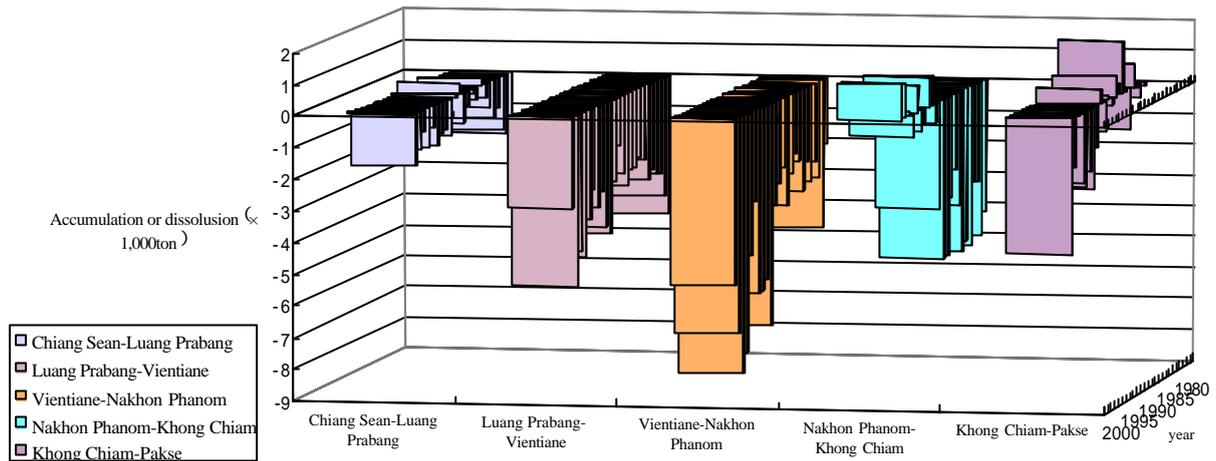


図-9 Chiang Saen - Pakse間の年間総リン (Total-P) 負荷量収支

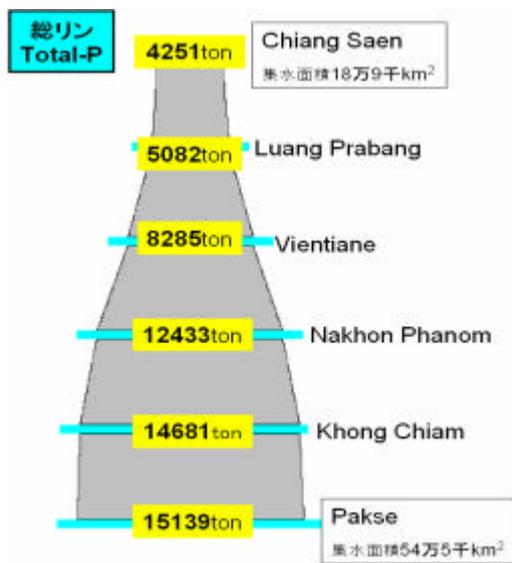


図-10 メコン河下流域の年間総リン (Total - P) 動態マップ

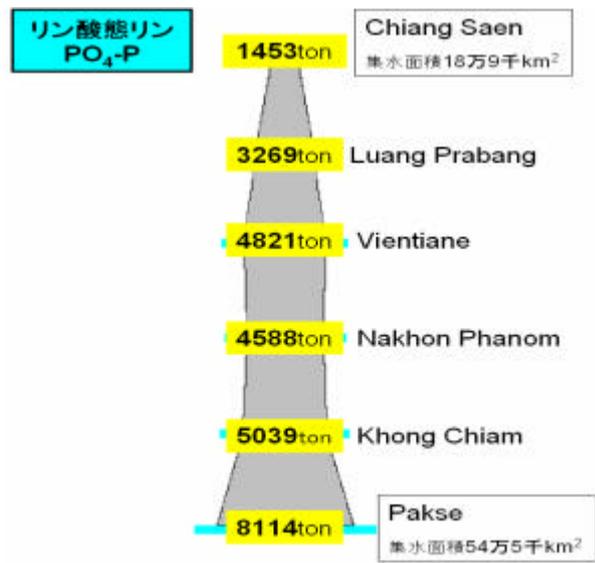


図-11 メコン河下流域の年間リン酸態リン (PO₄-P) の動態マップ

また溶解・蓄積量は他の区間に比べ小さい。VT-NP区間では溶解量が多く、近年増加していることも分かった。周辺での農薬の使用や人口が集まっていることが原因と考えられる。

総リン負荷量動態マップを図-10に示す。浮遊砂とは対照的に、総リンは支川または河道から流入していることが分かる。すべての区間で溶解傾向であるが、VT-NP区間での増加が大きいことが分かる。同区間では、後述するようにリン酸態リンは減少する傾向も見られる。このことから他のリン化合物がより多量にこの区間で、流入、溶解、その結果として総リンが増加しているものと考えられる。

年間リン酸態リン動態マップ、年間アンモニア態窒素動態マップを示すと図-11、図-12のようになる。リン酸態リンはCS-LP区間とKC-PK区間では大きな増加が見られた。逆に、VT-NP区間で通過量が減少している。総リン、アンモニア態窒素が増加区間であって、栄養塩が流



図-12 メコン河下流域の年間アンモニア態窒素 (NH₄-N) の動態マップ

入していることは間違いなく、リン酸態リンがこの区間の河道に蓄積していることが考えられる。そのため富栄養化が進行し水質が悪化している区間とも言える。また金属と結合しているものは沈殿することから、この区間の工業排水が発生源であると推測される。無機態のリン酸態リンから他のリン物質に変化することはあまり無いことより、メコン河本川では下流へ行くにしたがって有機態のリン化合物が多く流入していることが分かる。

アンモニア態窒素は総リンと同様にVT-NP区間で大きな増加となっている。その理由として、Vientianeでは人口増加や生活水準上昇の地域でもあり、それらの汚水が垂れ流されているために、この区間の支川からアンモニア態窒素が高濃度でメコン河へ流入していることも考えられる。アンモニア態窒素は、本研究の区間では距離が長いために反応を起こし、亜硝酸・硝酸態窒素に酸化されることが予想される。図-12を流入してすぐのアンモニア態窒素量と考えると、各区間で2000トンから8000トン流入している。よって総窒素も総リンと同様に支川から流入しているものと考えられる。

3つの栄養塩を見ると、山地（Chiang Saen ~ Vientiane）はともに増加する区間であり、平地（Vientiane ~ Pakse）では、流入量が多くなる要因を抱えているが蓄積してしまう栄養塩があることが分かった。栄養塩は、下流に行くにしたがって増加することが考えられた。

5. 結論

本研究では、メコン河下流域を対象として観測資料を解析し、土砂動態および栄養塩動態の把握を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 漫湾ダムの下流への影響として、浮遊砂濃度及び浮遊砂量が大きく変化した。流量への影響は明確に現れなかった。浮遊砂は減少し、ダムからの距離が近いほど減少割合が大きかった。
- 2) 観測資料から推定式を用いて浮遊砂量及び栄養塩負荷量を算出した。その結果から年間土砂・栄養塩収支を計算し、メコン河下流域における土砂動態と栄養塩動態の傾向が分かった。またその結果から土砂動態マップと栄養塩動態マップを作成した。同図から、Chiang Sean - Luang Prabang 区間と Mukdahan - Pakse 区間は堆積傾向にあり、逆に Luang Prabang - Vientiane 区間と Nakhon Phanom - Mukdahan 区間では侵食傾向であることが知れた。さらに、Vientiane - Nakhon Phanom区間では土砂が堆積している年代から侵食される年代へ変化していること、Chiang

Sean 上流からの浮遊砂供給量が大きく、支川からの流入量は小さいことなどが分かった。

- 3) 総リンは Nakhon Phanom - Khong Chiam 区間では、溶解傾向から蓄積傾向へ変化している。アンモニア態窒素、総リンでは Vientiane - Nakhon Phanom 区間の増加量大きい。しかし、リン酸態リンではこの区間は減少している。総リンでは、浮遊砂とは対照的に支川または河道から流入していることが分かった。

ここでは、既存の資料のみからメコン河下流域の土砂・栄養塩動態の推定を試みた。今後は全域における物質輸送モデルの構築による検討も進めていきたい。一方で開発計画の優先順位を決めるためにも、さらに多地点、より高精度なデータの集積が望まれる。詳しくは、支川およびその本川合流部での観測、一日毎の土砂・栄養塩データの収集、水質項目（栄養塩に關すれば、総窒素、硝酸態・亜硝酸態窒素、炭素など）の観測およびデータ収集が求められる。

謝辞：本研究は山梨大学COEおよびRR2002（竹内邦良リーダー）、CREST（代表：砂田憲吾）のプロジェクト研究費の支援を受けて行われた。有益な助言を与えられた科学技術振興機構（JST）の Sokhem Pech氏、岐阜大学の吉村千洋氏、および資料を提供されたメコン河委員会に謝意を表します。

参考文献

- 1) Mekong River Commission : State of the Basin Report 2003
- 2) 宮沢直季・砂田憲吾・ペチ ソクヘム：メコン河下流域の河川管理のための広域水文・河道特性の抽出、人口急増地域の持続的な流域水政策シナリオ - モンスーンアジア地域における地球規模水循環変動への対応戦略 - 2005 年研究成果概要集, pp.9-10, 2005.
- 3) Mekong River Commission Secretariat : Lower Mekong Hydrologic Year Book, CD-ROM .
- 4) Mekong River Commission Secretariat : Water Quality Monitoring Network (WQMN) database, 1985-2000, CD-ROM.
- 5) Mekong River Commission Secretariat : Hydrological database (HYMOS), CD-ROM .
- 6) Kumm, M., Sakkula, J. and Varis, O.: Sediment-related impacts due to upstream reservoir trapping, the lower Mekong River , Geomorphology, accepted, 2006.
- 7) Nguyen, Q. M.: Hydrologic Impacts of China's Upper Mekong Dams on the Lower Mekong River , Published in www.mekongriver.org/publications.html on June, 2003.
- 8) Brune, G. M.: Trap Efficiency of Reservoirs. Trans. American Geophysical Union, 34(3), pp407-418, 1953.

(2006.9.30 受付)