

# ラオス国ナムグム川流域における水・窒素動態モデルの適用 Application of Water and Nitrogen Dynamics Model to Nam Ngum River Basin in Laos

吉田貢士\*・安瀬地一作\*\*・飯田俊彰\*\*\*

\*東京大学大学院新領域創成科学研究科 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

\*\*三重大学大学院生物資源学研究所 (〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577)

\*\*\*岩手大学農学部 (〒020-8550 岩手県盛岡市上田 3 丁目 18-8)

YOSHIDA Koshi\*, AZECHI Issaku\*\*, IIDA Toshiaki\*\*\*

\*Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo (5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba, 277-8563)

\*\*Mie University Graduate School of Bioresources (1577 Kurimamachiya-cho Tsu city, Mie, 514-8507)

\*\*\*Faculty of Agriculture, Iwate University (3-18-8 Ueda, Morioka, Iwate, 020-8550)

## Abstract

Enhanced availability of nitrogen is a worldwide cause for eutrophication of rivers, lakes and estuaries, however, quantitative evaluation of such impact on nitrogen load was insufficient in developing countries because of data availability. In this study, Nam Ngum River basin having 415km length and 17,000km<sup>2</sup> catchment, Laos was selected as a target area, supplying good quality water for domestic use to Vientiane Metropolis. In UN estimation, population in Laos expected to increase 2.1 times from 2000 to 2050, and fertilizer use also will increase to produce the sufficient food. Therefore, future water quality change is main concern in this river basin. Meteorological and hydrological data from 1995 to 2004, and spatial data such as topography, land use, soil properties were collected for model simulation. Conceptual nitrogen balance model, which has three nitrogen pools, was developed and combined with rainfall runoff model. Simulated river discharge and nitrogen load were satisfactory agreement with observed data.

**Key words:** water quality, nitrogen runoff, point sources, diffuse pollution

## 要 旨

農業の近代化に伴う窒素肥料使用量の増加により、河川や湖沼等における富栄養化および水質汚濁が世界的に懸念されているが、観測データの乏しい途上国では人間活動が窒素負荷量に及ぼす影響の評価は十分ではない。本研究では、河川長 415km、流域面積約 17,000km<sup>2</sup> のラオス国ナムグム川流域を対象に人口分布・土地利用・営農の違いが考慮可能な水・窒素動態モデルを構築し、その適用性を評価した。国連予測によればラオス国では 2000 年から 2050 年までに人口が 2.1 倍となり、測量増産のための肥料使用量も増加することが予測されている。降雨流出解析には完全分布型 TOPMODEL を用いた。また、降雨流出解析から得られる各土地利用メッシュにおける水収支と窒素動態モデルを用いて、全窒素濃度を推定した。Pakkanhoung 観測所における河川流量の推定誤差は Nash 係数 0.50, RMSE1.54(mm・day<sup>-1</sup>), 全窒素濃度の実測値と計算値の相関係数は R=0.75 となり、季節変動を概ね再現できた。今後は人口や施肥量増加に伴う窒素負荷への影響を評価していく予定である。

**キーワード:** 水質, 窒素流出, 点源, 面源

## 1. はじめに

開発途上国を中心とした人口増加に伴い食料増産が必要になるが、それには大きく分けて農地の拡大と単位面積あたりの収量増加の 2 つの方法が考えられる。前者については、既に世界の農地面積は土壌劣化等の理由により減少し始めており、大幅な農地面積の拡大を期待することは難しい。つまり、単位面積あたりの収量増加 (高収穫品種への転換や灌漑設備の導入による年間作付け回数増加) が現実的

な方法となる。緑の革命と呼ばれる高収量品種の導入により農業生産性が向上したが、その栽培には化学肥料の投入と農業用水の高度管理（灌漑と排水）が必須の条件となった。それに伴いアジアの閉鎖性水域では人口の急激な増加と化学肥料の大量投入により過剰な栄養塩が流出し水質汚濁が問題となっている。特に、発展の著しい熱帯アジアモンスーン地域で水質問題が深刻となっており、世界の化学肥料のうち3割以上がこの地域で消費されている。また、人口はいまだ増加し続けており、安定した食糧生産と水環境保全を達成するための基盤整備が必要となっている(吉村ら, 2007)。これまで河川や湖沼の汚染状況に関するモニタリングが多く行われてきたが、実測でのモニタリングでは河川に線的に観測所を設けて水質濃度を観測しており、そのみでは河川の汚濁状況は把握できても、その汚濁の要因について空間的に特定するまでには至らなかった。つまり、モニタリング調査のみから、点源と面源の両者における水利用実体の反映や栄養塩の流出形態の違いによる流出負荷量の空間的な把握を行うには限界があると言える。さらに、開発途上国においては観測密度が低く支流レベルでの観測データが不足しており、水資源量および栄養塩の時・空間的な分布を把握するのは難しい。そこで、本研究では日本と同じく水田稲作文化を有する熱帯アジアモンスーン流域において、現地の栽培体系および水処理形態を反映させた水循環・窒素動態モデルを構築・適用した。

## 2. 対象地域

ラオス国ナムグム川流域はラオス国首都ビエンチャン近郊を流下する河川であり、国際河川メコン川の支流でもある。河川長は約415km、流域面積は約17,000km<sup>2</sup>であり、流域の中流部に有効貯水量47億m<sup>3</sup>のナムグム1ダムを有している (Fig.1)。ナムグム1ダムは発電専用のダムであり、首都ビエンチャンへの電力供給とともに隣国タイへの売電は外貨獲得の重要な手段となっており、ラオス国における最重要河川と言える。流域人口は42万人と推計され、流域平均の人口密度は約25人/km<sup>2</sup>と現状では極めて低いものの、流域面積は国土全体の7%、流域人口は2000年時ラオス全人口の9%を占めている。ラオス国の下水道普及率は19.2%とされるが主に都市部のみである。農業部門における近代化も遅れており灌漑農地も僅かに11%にすぎない。施肥量もわずかでビエンチャン近郊農村における聞き取りでは平均して25kgN/ha/season、雨季の天水田では無施肥で栽培する農家もあった。流域の土地利用は、水田を

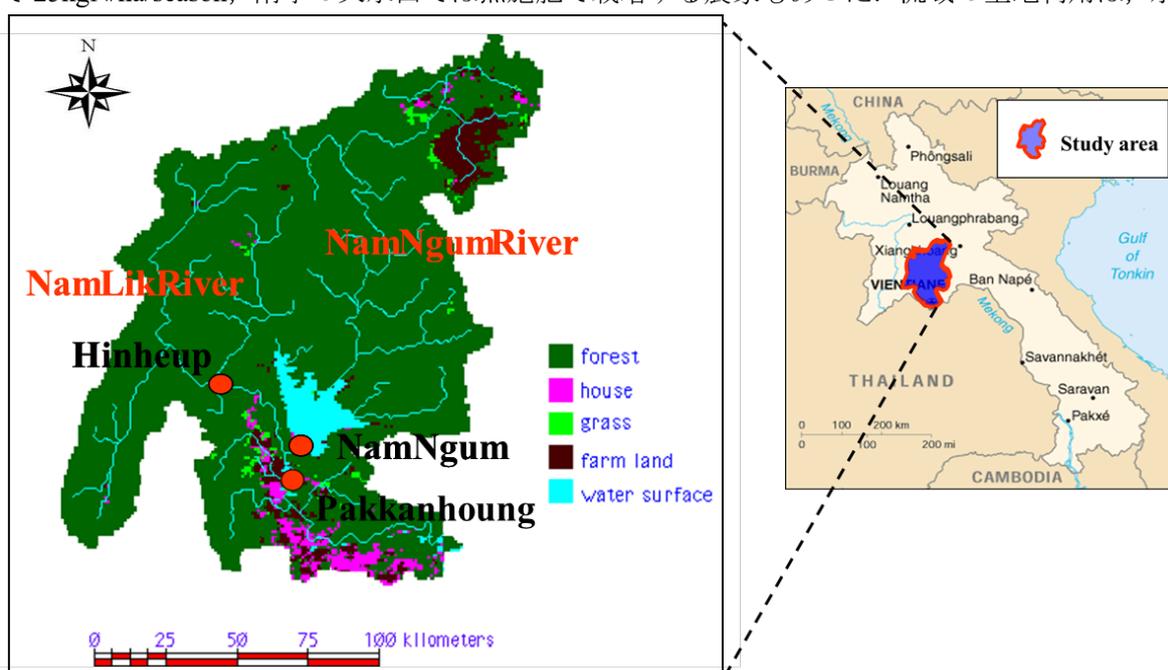


Fig.1 ラオス国ナムグム川流域

主とする農地が 16%，森林およびブッシュが 72%，宅地は僅かに 0.2%となっており，未だに自然が豊かな流域となっている．なお，流域内ではナムグム 2 ダム(有効貯水量 26 億トン：2011 年完成)とナムグム 5 ダム(有効貯水量 2.5 億トン：2012 年完成)が既に運用を開始しているが(工藤ら，2011)，本研究では解析対象期間の 2004 年までに完成しているナムグム 1 ダムのみを考慮することとした．モデル構築に必要な気象データ，河川流量や雨量などの水文・気象データについてはメコン河委員会が発行している流量年鑑よりデータ収集を行った．水質データについては過去の観測データが乏しいため，2003-2004 年に Pakkanhoung 観測所において毎月採水を行いラオス国立大学において全窒素濃度の測定を行った．

また，ナムグム流域の KM6 灌漑地区において水利用・水処理・灌漑・栽培方法・水質状況等に関する現地調査を行った．水環境に影響を及ぼす要因は人や家畜などの点源負荷と農地等からの肥料成分の流出による面源負荷に大別される．そのうち前者の人や家畜からの発生負荷量は体重が大きく異ならない限り日本における窒素排出原単位と大きく異なることはない(國松ら，1989)．そこで，人口や家畜頭数などの統計データを統計局において収集し，発生源単位については日本で推定された値を FAO の国別カロリー摂取量データに基づいて修正を行った(田中ら，2013)．一般家庭では下水処理における最もシンプルな施設であるセプティックタンクが設置されている．生活系における排水をこのタンクで受け，汚水中の物質は沈殿・嫌気性分解により処理され，この上澄み液が排水河川へと放流される．ラオスでは，一年中気温が高いため微生物の活発な分解作用で排泄物は速やかに分解されると考えられるが，適切なメンテナンスが行われておらず，その処理効率は極めて低い状況にある(桜井，1992；堀，1996)．家畜等の排泄物は，そのまま農地や草地に廃棄され，面源における分解・吸収過程を経て水系へと流出する．

### 3. モデルの概要

#### 3.1 降雨流出モデル

水資源量推定には降雨一流出過程を時系列的・空間的に把握でき，GIS データとリンクが容易で，パラメータ数が少ない TOPMODEL を採用した (Beven et al., 1979)．TOPMODEL は物理的基礎と実用上の簡便性をともに持ち，流出寄与域の時・空間分布を把握できることから，様々な地域で広く用いられている (熬ら，1999)．本研究では流域の任意の地点で流量，汚濁負荷量などを推定でき，流域内の人間活動や土地利用変化，自然条件の変化を計算に反映できるよう完全分布型とした (Yoshida et al., 2017；寺家谷ら，2019)．TOPMODEL では，上層から根層，不飽和層，飽和層と三段の貯留部において水収支計算が行われる (Fig. 2)．根層の水収支計算を式 (1) に，不飽和層の水収支計算を式 (2)，飽和層の水収支計算を式 (3) に示す．

$$Sr_z(i,t) = Sr_z(i,t-1) + P(i,t) - ET(i,t) \quad (1)$$

$$Su_z(i,t) = Su_z(i,t-1) + Sr_z(i,t) - Sr_{zmax}(i) \quad (2)$$

$$S(i,t) = S(i,t-1) + qb(i,t) - qv(i,t) \quad (3)$$

$$qv(i,t) = To(i) \cdot \exp\left(-\frac{S(i,t)}{m(i)}\right) \quad (4)$$

ここで，添え字の  $i$  はグリッドセル， $t$  は時間を表している．また， $Sr_z(i,t)$  は根層貯留量 (m)， $P(i,t)$  は降水量 ( $m \cdot h^{-1}$ )， $ET(i,t)$  は蒸発散量 ( $m \cdot h^{-1}$ )， $Su_z(i,t)$  は不飽和層貯留量 (m)， $qv(i,t)$  は飽和層への供給量 ( $m \cdot h^{-1}$ )， $Sr_{zmax}(i)$  は圃場容水量， $S(i,t)$  は飽和層の水分不足量 (m)， $qb(i,t)$  は基底流出量 ( $m \cdot h^{-1}$ )， $To(i)$  は飽和透水量係数 ( $m^2 \cdot day^{-1}$ )， $m(i)$  は減水係数である．

各グリッドからの流出量  $q(i,t)$  は式 (5) で表され，表面流出量  $qof(i,t)$  ( $m \cdot h^{-1}$ ) と基底流出量  $qb(i,t)$  ( $m \cdot h^{-1}$ )

1)の和である.

$$q_{(i,t)} = qof_{(i,t)} + qb_{(i,t)} \quad (5)$$

$$qof_{(i,t)} = Suz_{(i,t)} - Srzmax(i) \quad (6)$$

$$qb_{(i,t)} = To(i) \cdot \exp\left(-\frac{S_{(i,t)}}{m(i)}\right) \cdot \tan\beta(i) \quad (7)$$

ここで,  $\tan\beta(i)$ は地形指標を表している. TOPMODELの未知のパラメータは  $Srmax$ ,  $To$ ,  $m$  の3つである. また,  $\tan\beta(i)$ は Quinn et. al.(1991)を参考に, 数値標高から計算される地形勾配に基づいて計算される. 各グリッドからの流出量  $q_{(i,t)}$ から, 流向に基づき積算された値が河川流量となる.

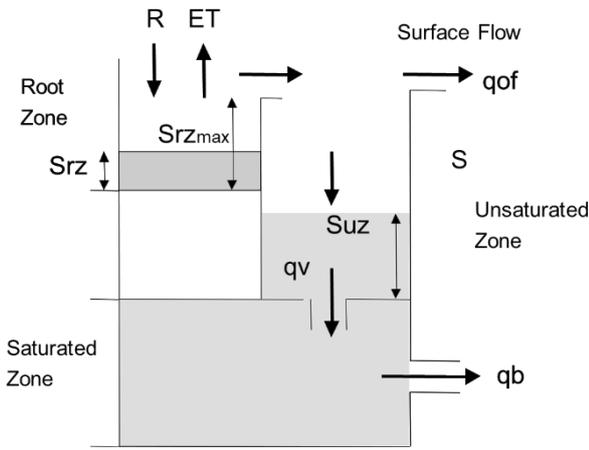


Fig. 2 TOPMODELの概要

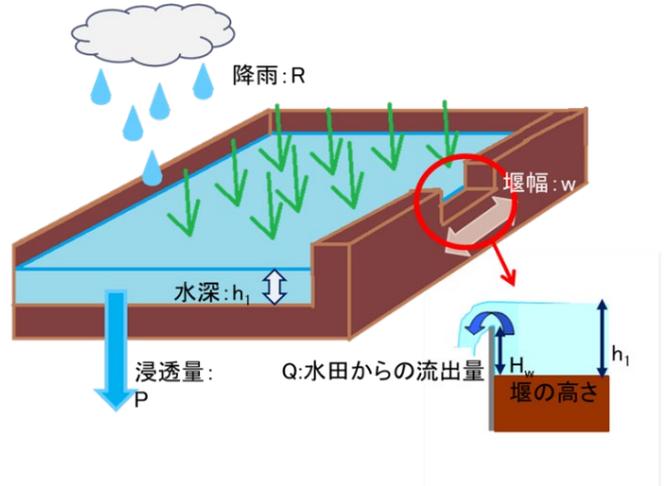


Fig. 3 水田貯留の模式図

### 3.2 田面貯留および大規模ダムモデル化

水田はアジアモンスーン地域を代表する土地利用であり, 他の土地利用と異なり, 水貯留機能を有している. 本研究では水田の貯留を表現するモデルとして, 式 (8) ~ 式 (10) に示す水田貯留モデルを用いた.

$$\Delta h_1 = R - P - Q_1 \quad (8)$$

$$Q_1 = w(h_1 - H_w)\sqrt{2g(h_1 - H_w)}/A_p \quad (9)$$

$$P = T \times h_1 \quad (10)$$

ここで,  $R$ は降雨 ( $m \cdot day^{-1}$ ),  $P$ は浸透量 ( $m \cdot day^{-1}$ ),  $Q_1$ は水田からの流出量 ( $m \cdot day^{-1}$ ),  $w$ は堰幅 ( $=0.11m$ ),  $h_1$ は水田水深 ( $m$ ),  $H_w$ は排水口の堰高さ ( $=0.1m$ ),  $A_p$ は水田面積 ( $m^2$ ),  $T$ は浸透パラメータ ( $=0.05$ )である (Fig. 3).

本研究において対象地域内の大規模ダムの影響は大きいと考えられ, ナムグム1ダム (有効貯水量: 47億トン)を対象としてモデル化を行った. モデル化にあたり, ダムの操作ルールを考慮しなければならないが, 操作ルールはダムに固有であり, 貯水量や流入量, 水利権所有者の水需要などから決められる. さらにダムの操作は絶対的なものではなく, 洪水時などではその時々状況に応じて変化する. そこで本研究では, 流量の平準化はダム操作の上で共通のものとし, ダム貯留量と放流量を式 (11) ~ (12)により計算した (Hanasaki et. al, 2003 ; 花崎ら, 2004).

$$\Delta V_{res} = (Q_{in} - Q_{out}) \times \Delta t \quad (11)$$

$$Q_{out} = Q_{min} + C_{Release} \times V_{res} \quad (12)$$

ここで,  $V_{res}$ はダム貯水量 ( $m^3$ ),  $Q_{in}$ はダム流入量 ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ),  $Q_{out}$ はダム放流量 ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ),  $Q_{min}$ は最低放流

量,  $C_{release}$  は放流係数 ( $1 \cdot s^{-1}$ ) である.

### 3.3 窒素動態モデル

土中の窒素動態を計算する上で, 有機態窒素, アンモニア態窒素, 硝酸態窒素の3つの形態変化を考慮する必要がある (Lin *et. al*, 2000; Suga *et. al*, 2005). そこで本研究では, 土中の有機態窒素, アンモニア態窒素, 硝酸態窒素の3つのプールにおける窒素成分の収支を考慮し (Fig. 4), 窒素収支式を式 (13) ~ 式 (15) により表現した.

$$\frac{dN_{org}}{dt} = PSNL - MinerN - RunoffN_{org} \quad (13)$$

$$\frac{dN_{amm}}{dt} = RainN + FertiN - NitriN - RunoffN_{amm} \quad (14)$$

$$\frac{dN_{nitra}}{dt} = NitriN - PupN - DenitN - LeachN_{nitra} \quad (15)$$

ここで,  $N_{org}$  は土中の有機態窒素量 ( $kg \cdot ha^{-1}$ ),  $PSNL$  は点源からの窒素負荷量 ( $kg \cdot ha^{-1} \cdot day^{-1}$ ),  $MinerN$  は有機態窒素の無機化量 ( $kg \cdot ha^{-1} \cdot day^{-1}$ ),  $RunoffN$  は表面流出による窒素流出量 ( $kg \cdot ha^{-1} \cdot day^{-1}$ ),  $N_{amm}$  は土中のアンモニア態窒素量 ( $kg \cdot ha^{-1}$ ),  $RainN$  は降水中の窒素量 ( $kg \cdot ha^{-1} \cdot day^{-1}$ ),  $FertiN$  は化学肥料含有アンモニア態窒素量 ( $kg \cdot ha^{-1} \cdot day^{-1}$ ),  $NitriN$  はアンモニア態窒素の硝化量 ( $kg \cdot ha^{-1} \cdot day^{-1}$ ),  $N_{nitra}$  は土中の硝酸態窒素量 ( $kg \cdot ha^{-1}$ ),  $PupN$  は植生吸収窒素量 ( $kg \cdot ha^{-1} \cdot day^{-1}$ ),  $DenitN$  は脱窒による窒素損失量 ( $kg \cdot ha^{-1} \cdot day^{-1}$ ),  $LeachN$  は溶脱量 ( $kg \cdot ha^{-1} \cdot day^{-1}$ ) である.

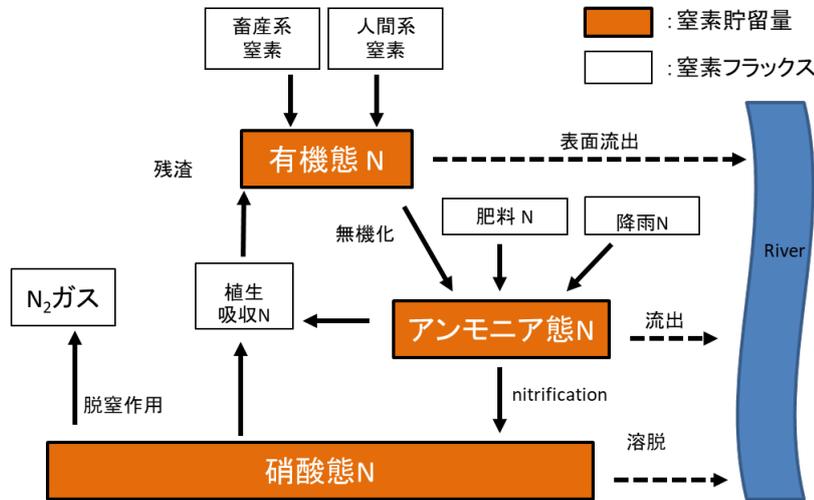


Fig. 4 窒素動態モデルの概要

また, 式 (13) ~ 式 (15) 中の各項は以下の式により計算される.

$$PSNL = (1 - Rmrate) \cdot POP_H \cdot UNL_H + \sum POP_j \cdot UNL_j \quad (16)$$

$$MinerN = e_T \cdot (1 - e_m) \cdot k_{miner} \cdot N_{org} \quad (17)$$

$$RunoffN_{org} = r_{f_{org}} \cdot qof^c \cdot N_{org} \quad (18)$$

$$RainN = C_{rain} \cdot P \cdot \frac{100 \times 100}{1000} \quad (19)$$

$$NitriN = e_T \cdot e_m \cdot k_{nitri} \cdot N_{ammo} \quad (20)$$

$$RunoffN_{ammo} = r_{f_{ammo}} \cdot qof^c \cdot N_{ammo} \quad (21)$$

$$DenitN = e_m \cdot k_{denit} \cdot C_{nitra} \quad (22)$$

$$LeachN_{nitra} = lf \cdot qb^c \cdot N_{nitra} \quad (23)$$

ここで、 $Rmrate$  は浄化処理率、 $POP_H$  は人口密度、 $UNL_H$  は人間の排出原単位、 $POP_j$  は家畜種  $j$  の頭数密度、 $UNL_j$  は家畜種  $j$  の排出原単位、 $e_T$  は温度補正係数、 $e_m$  は土壌水分補正係数、 $k_{miner}$  は無機化係数 ( $1 \cdot \text{day}^{-1}$ )、 $r_{forg}$  は有機態窒素の流出係数 ( $1 \cdot \text{m}^{-1}$ )、 $qof$  は表面流出量 ( $\text{m} \cdot \text{day}^{-1}$ )、 $c$  は窒素成分の掃流係数、 $C_{rain}$  は降水中窒素濃度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )、 $P$  は降水量 ( $\text{m} \cdot \text{day}^{-1}$ )、 $k_{nitri}$  は硝化係数 ( $1 \cdot \text{day}^{-1}$ )、 $r_{fammo}$  はアンモニア態窒素の流出係数 ( $1 \cdot \text{m}^{-1}$ )、 $k_{denit}$  は脱窒係数 ( $1 \cdot \text{day}^{-1}$ )、 $C_{nitra}$  は土壌水の硝酸態窒素濃度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )、 $lf$  は溶脱係数 ( $1 \cdot \text{m}^{-1}$ )、 $qb$  は基底流出量 ( $\text{m} \cdot \text{day}^{-1}$ ) である。

温度補正係数  $e_T$ 、土壌水分補正係数  $e_m$  と脱窒係数  $k_{denit}$  は式 (24) ~ (26) によって計算される (Suga et al, 2005 ; Johnsson et al, 1987). 式 (26) における、係数 0.00002 は明条件下の値である (平野ら, 2006).

$$e_T = 2^{(T-10)/10} \quad (24)$$

$$e_m = \frac{Sr_z(i,t)}{Sr_{zmax}(i)} \quad (25)$$

$$K_{denit} = 0.00002 \cdot T^2 + 0.05 \quad (26)$$

ここで、 $T$  は気温、 $Sr_z(i,t)$  は根圏層の水分量、 $Sr_{zmax}(i)$  は根圏層の圃場容水量である。

#### 4. 結果および考察

Fig.5 に HinHeup 観測所 (集水面積 5,300km<sup>2</sup>) と Pakkanhoung 観測所 (集水面積 14,300km<sup>2</sup>) における河川流量の実測値と計算値を示す。計算期間はデータが入手できた 1995 年~2004 年である。推定誤差は HinHeup 観測所で Nash 係数 0.39, RMSE2.11mm/day となり精度が低かった。また、Pakkanhoung 観測所における推定精度は Nash 係数 0.50, RMSE1.54mm/day となり、精度は高くないものの Satisfactory の結果が得られた。この理由として、今回の解析では降雨量の入力値は Pakkanhoung 観測所における 1 点のみであること、HinHeup 観測所の高水時における誤差が大きいたことが挙げられる。HinHeup 観測所の上流には大規模な貯水施設は存在しないが、Pakkanhoung 観測所の上流には有効貯水量 47 億 m<sup>3</sup> のナムグム 1 ダムが存在し、平滑化の効果により Pakkanhoung 観測所の高水時の誤差が小さくなった。Fig.6 にダム管理モデルによるナムグム 1 ダム貯水量の実測値と計算値を示す。ナムグム 1 ダムにおける貯水量の実測値が得られた期間は 1995~2002 年の月データではあるが、ダムの貯水量変化について計算値は概ね実測値の再現ができています。Fig.7 に Pakkanhoung 観測所における全窒素濃度の計算値と実測値の比較を示す。計算値と実測値の相関係数は  $R=0.75$  であり、まずまずの結果が得られたものの、計算値は実測値と比較して若干過大評価を示している。Fig.8 に年間総窒素負荷量の年変化を示す。ナムグム川流域では水質項目の全窒素に関して定期的な観測は行われていない。今回検証に使用したデータは著者らが 2003-2004 年に計測した全窒素濃度であるが、精度の高い LQ 式を得るためのデータ数が不足しているため、ここでは全窒素濃度で実測値と計算値の比較を行い、年間総窒素負荷量の年変動については計算値のみを示した。ナムグム川流域では人口密度が低く、農地での施肥量も依然として少ないため全窒素濃度はほぼ 1 mg/L 以下であった。Pakkanhoung 観測所における年間窒素負荷量の平均値は 11,676(t/year)、単位面積当たりでは 8.1(kg/ha/year)であった。また、2003 年は渇水年であり年間窒素負荷量も 5,867(t/year)と小さかった。Fig.9 にナムグム川流域における人口分布と年平均全窒素濃度(1995-2004 年)の空間分布を示す。分析の結果、現状では全窒素濃度は人口分布つまり市街地の影響はあまり受けておらず、農地において比較的高く計算されることが分かった。

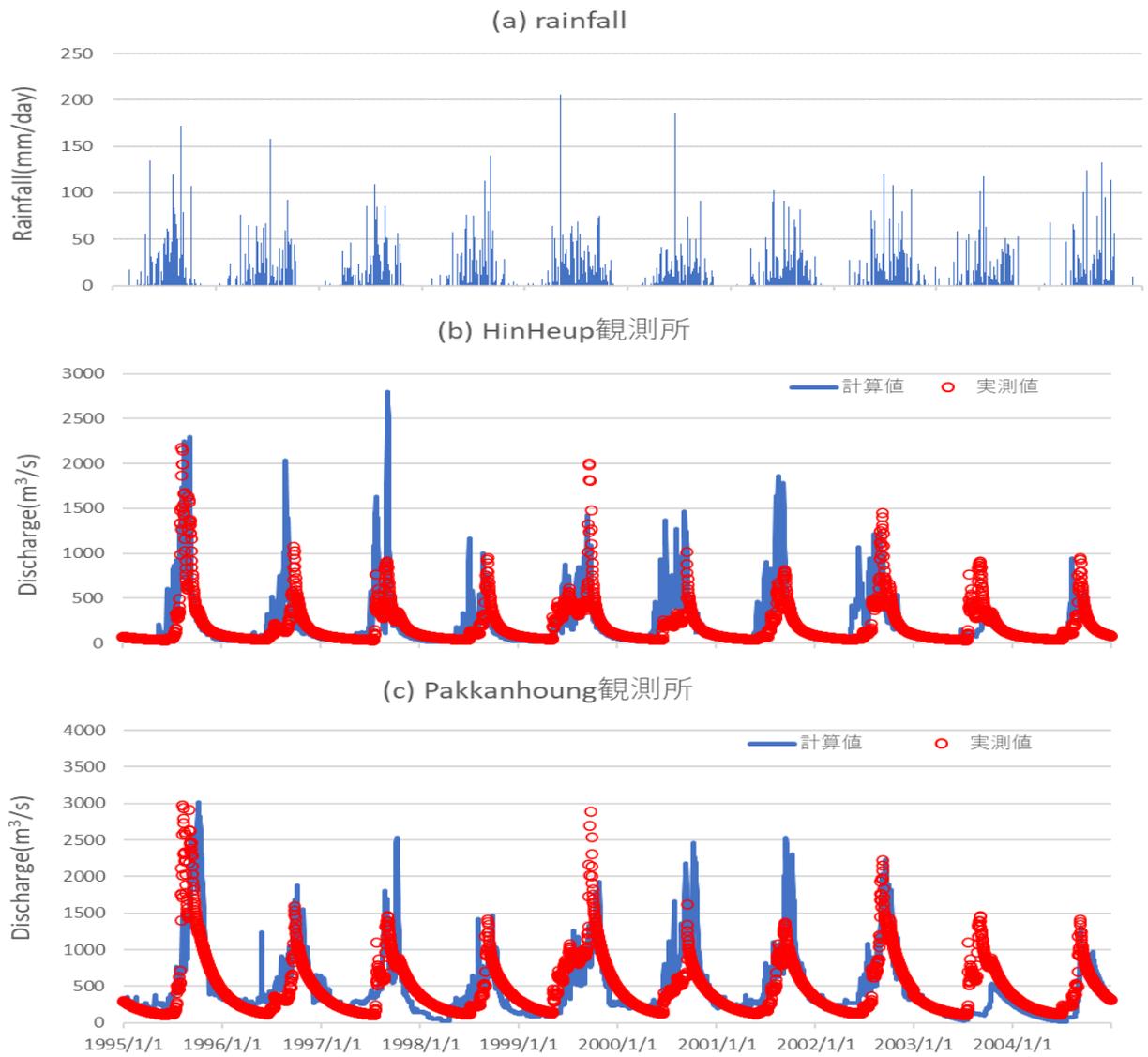


Fig.5 観測流量および計算流量の比較

(a)降水量, (b) : HinHeup 観測所, (c):Pakkanhoung 観測所

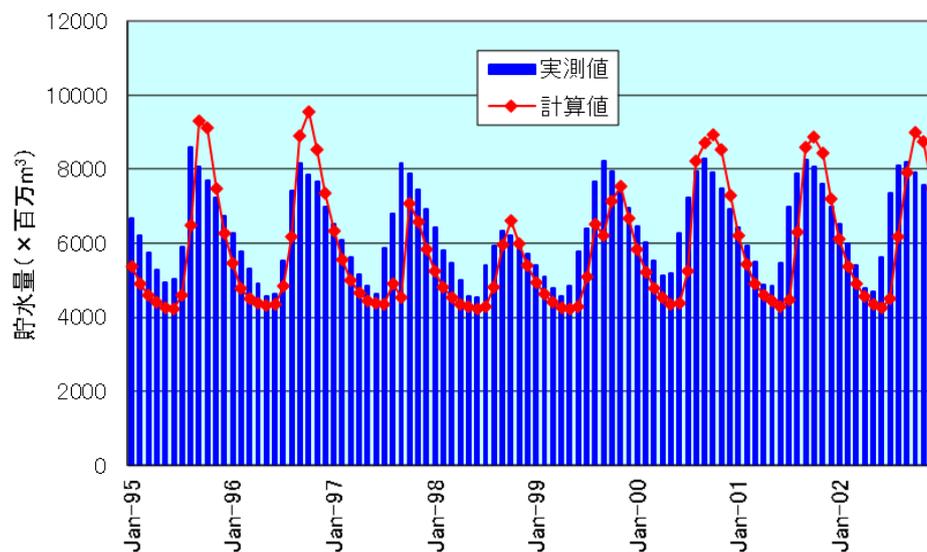


Fig.6 ナムグム 1 ダムにおける貯水量変化

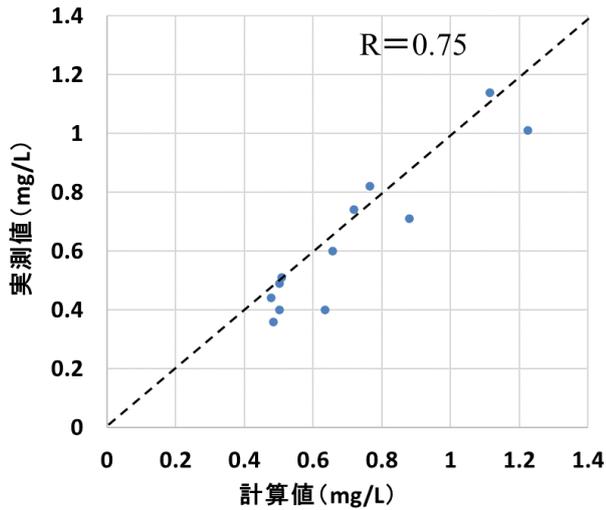


Fig.7 全窒素濃度の計算値と実測値の比較

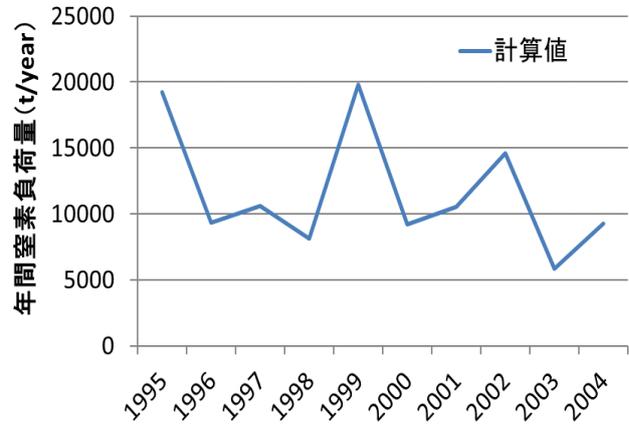


Fig.8 年間窒素負荷量 (計算値)

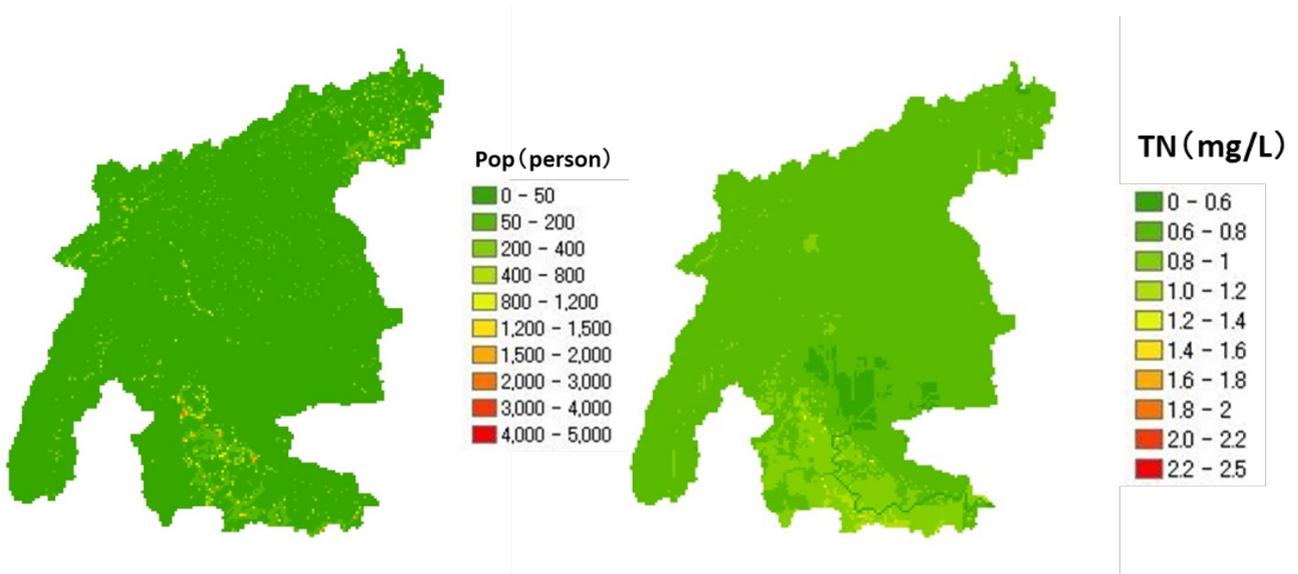


Fig.9 ナムグム川流域における人口分布 (左) と全窒素濃度 (右) の空間分布

## 5. 結論

本研究では観測データの乏しいラオス国ナムグム川流域において水・窒素動態モデルの適用を試みた。現状におけるモデルの推定精度は十分ではないものの、分布型の流出モデルを適用することにより、流域内の水資源量の分布について時間的・空間的に推定可能となった。また、これまで流域の本流において線的に観測が行われてきた水質データをもとに土地利用や人・家畜分布データを組み合わせることにより、窒素排出負荷量や全窒素濃度の時間的・空間的な分布が把握可能となった。今後の課題としては、入力となる降雨観測点数を増やすことや水質濃度のより長期的な計測により、モデルの推定精度を向上させる必要がある。また、構築したモデルを用いて、将来の気候変動予測や人口増加・施肥量増加シナリオなどを想定した数値実験を実施し、首都ビエンチャンへの水源となる本流域における水質濃度がどの程度影響を受けるか解析を行っていききたい。

謝辞：本研究を遂行するにあたり JST SICORP (JPMJSC20E3)「ダム貯水池の動的運用による統合水資源管理 (代表：沖大幹)」および科研費 (基盤 B：19H03069, 国際共同研究 A：20KK0346) の支援を受けた。ここに記して謝意を表す。

#### 引用文献

- Beven, K.J. and Kirkby, M.J. (1979) : A physically based, variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), pp.43-69.
- 熬天其, 石平博, 竹内邦良(1999) : ブロック型 TOPMODEL 及び M-C 追跡法による分布型流出解析モデルの検討, *水工学論文集*, 43, pp.7-12.
- Hanasaki, N., Utsumi, N., Yamada, T., Shen, Y., Bengtsson, M., Kanae, S., Otaki, M., Oki, T. (2003) : Development of globally applicable reservoir operation model, *JSCE*, 47, pp.181-186.
- 花崎直太, 鼎信次郎, 沖大幹 (2004) : 貯水池操作が全球の河川流量に与える影響の評価, *水工学論文集*, 48, pp.463-468
- 平野真弓, 黒田久雄, 加藤亮, 中曽根英雄 (2006) : 光条件が湛水土壌の窒素除去能力に与える影響, *農業農村工学会論文集*, 248, pp.31-38.
- 堀博(1996) : メコン河 - 開発と環境, 古今書院.
- 寺家谷 勇希, 吉田 貢士, Sritumboon SUPRANEE, Srisutham MALLIKA, 前田 滋哉, 黒田 久雄 (2019) : タイ 東北部農業主体地域を対象とした水資源・窒素負荷量推定モデルの構築, *農業農村工学会論文集*, 28(2), pp.261-269.
- Johnsson, H., Bergstrom, L., Jansson, P. E., Paustian, K. (1987): Simulated nitrogen dynamics and losses in a layered agricultural soil, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 18, pp.333-356.
- 工藤亮治, 増本隆夫, 堀川直紀, 吉田武郎(2011) : 気候変動とダム開発がナムグム川流域の水資源に与える複合的影響の予測, *応用水文*, 24, pp.57-66.
- 國松孝男, 村岡浩爾(1989) : 河川汚濁のモデル解析, 技報堂, 11-86 p.
- Lin, B. L., Sakoda, A., Shibasaki, R., Goto, N., Suzuki, N. (2000) : Modelling a global biogeochemical nitrogen cycle in terrestrial ecosystems, *Ecological Modelling*, 35(1), pp.89-110.
- Mekong River Commission (1995-2004) : Hydro Year Book, Mekong River Basin.
- Quinn, P.F., Beven, K.J., Chevallier, P., and Planchon, O.(1991): The Prediction of hillslope flowpaths for distributed modelling using digital terrain models, *Hydrol. Process*, 5, pp.59-80.
- 桜井敏郎(1992) : 東南アジア 3ヶ国(マレーシア, インドネシア, タイ)における生活排水処理の現状, *用水と廃水*, 34(8), pp.645-651.
- Suga, Y., Hirabayashi, Y., Kanae, S., Oki, T. (2005) : Changes in river nitrate transport of the world resulting from increase in fertilizer use, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, 49 (1), 495-500.
- 田中健二, 吉田貢士, 乃田啓吾, 安瀬地一作, 黒田久雄 (2013) : メコン川流域における窒素・リン排出原単位の推定, *農業農村工学会論文集*, 284, pp.79-85.
- Yoshida, K., Tanaka, K., Noda, K., Homma, K., Maki, M., Hongo, C., Shirakawa, H. and K., Oki (2017) : Quantitative Evaluation of Spatial Distribution of Nitrogen Loading in the Citarum River Basin, Indonesia, *Journal of Agricultural meteorology*, 73(1), pp.31-44.
- 吉村千洋, 竹内邦良(2007) : 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*, 20(6), pp.493-504.