

インドネシア Kahayan 川を対象とした流出予測に関する研究

Research on Runoff Prediction for the Kahayan River in Indonesia

室蘭工業大学 ○学生員 吉田 ちあき (Chiaki Yoshida)
 室蘭工業大学 正員 中津川 誠 (Makoto Nakatsugawa)
 (独) 土木研究所 正員 工藤 俊 (Shun Kudo)

1. はじめに

インドネシアの熱帯泥炭には多量の炭素が蓄積されているが、近年の農地開発による地下水位低下などが原因とみられる泥炭地の乾燥化が起き、大規模な火災を引き起こしている¹⁾。それにより中部カリマンタンだけでも毎年、日本の年間排出量に相当するほどの膨大な量の二酸化炭素が放出されており²⁾、国際的な問題となっている。

このため、泥炭火災を防ぐため地下水位を正常な状態にコントロールし、泥炭地の乾燥を抑制することが求められている。これまで、Kahayan 川流域での近年の水収支を検討した上で上流域において流出再現計算を試みた辻ら³⁾の研究、El Niño event を左右する Sea Surface Temperature (以下、SST) に着目し Kahayan 川の水位予測を試みた工藤ら⁴⁾の研究など、Kahayan 川流域を対象にした研究がある。

Kahayan 川流域は地理情報、水文情報が日本のように充実していないため、解析を行うにあたってはデータが乏しいことを勘案しなければならない。そこで、流域水収支の定量化と上流域からの水供給量の連続データを把握し流域の基礎情報を得ることが必要である。また、データが乏しい中での水位予測手法の確立は泥炭火災の抑制に向けた流域管理を実施する上では非常に重要であると考えられる。そこで本研究では、以下の手順により水位予測を試みた。

- 1) 予測雨量と流出モデルから将来の流量を予測計算し、H-Q 式を用いて水位に換算することで水位予測を試みる。雨量予測には、Nearest-Neighbor Method (以下、NNM) を採用した。NNM の構成因子に SST を組み込み、予測精度の向上を試みる。
- 2) 流域水収支を検証した上で流出モデルを確立するとともに、NNM の構成因子として SST を組み込んだ予測雨量と流出モデルにより水位予測を行い、精度の検証を行う。

2. Kahayan 川の概要

Kahayan 川はインドネシア・中部カリマンタンに位置し、流域面積は中央カリマンタン州政府 (Dinas PU Propinsi Kalimantan Tengah) によると、19,917km²とされている。本研究では周囲に豊かな泥炭地が広がる PalangkaRaya 観測所 (図-1 参照) を対象として水位予測を行った。なお、PalangkaRaya 観測所流域の流域面積に関しては、全球標高データである ASTER-GDEM と GIS を用いて 12,570km²と推定した。PalangkaRaya 観測

所周辺は、Kahayan 川と隣接する Sebangau 川を接続する Kalampangan 運河 (図-1 参照) が存在し、泥炭地の乾燥化に大きく関係しており、泥炭火災の抑制に向けた対策を考える上で重要な領域となる。

3. NNM の概要

NNM とは一種のパターンマッチングのような手法であり、現在の水位パターンと類似した過去の水位パターンから、将来の水位を予測するものである。具体的には図-2 のように考え、X 地点の A 時の将来の水位を予測すると考えると、まず、A 時から遡った連続する水位パターン (黒丸で示す) と類似な水位パターンを過去の水位パターンから探す。B 時から遡った連続水位 (白丸で示す) が最も類似なパターンで、C 時から遡った連続水位 (同様に白で示す) が 2 番目に類似なパターンだとすると、B 時の将来水位と C 時の将来水位の平均を A 時の予測水位とする。

ここで、連続する水位の個数 (以下、M) と過去からの事例の抽出数 (以下、K) は様々な組み合わせが考えられ、図-2 は M=4, K=2 の例である。また、他の水文データの現在と過去のパターンの比較も合わせて利用することもでき、これを構成因子という。

なお、類似した過去の水位パターンの抽出には、次式

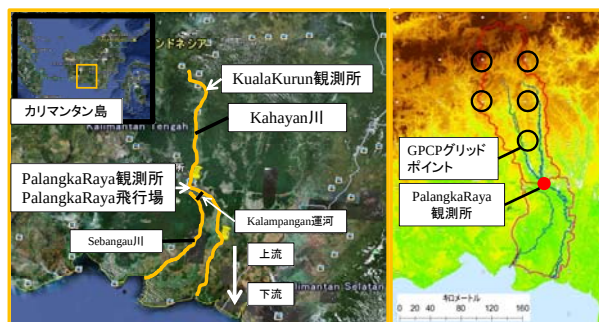


図-1 Kahayan 川の位置、流域内観測点
流域界、GPCP グリッドポイント

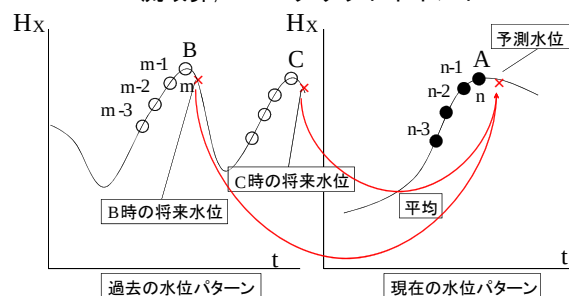


図-2 NNM のイメージ図

表-1 予測パターンと結果の一覧

予測パターン	予測対象	リードタイム	構成因子	連続データ数(M)	抽出水位数(K)	RMSE	Dry-RMSE	
①	雨量	1ヶ月	実測雨量	MR=3	3	130(mm/mon)	172(mm/mon)	
②	雨量	1ヶ月	実測雨量、SST	MR=3,MS=4		88(mm/mon)	68(mm/mon)	
③	雨量	1ヶ月	GPCP雨量	MR(G)=3		111(mm/mon)	104(mm/mon)	
④	雨量	1ヶ月	GPCP雨量、SST	MR(G)=3,MS=2	4	106(mm/mon)	81(mm/mon)	
⑤	水位	1ヶ月	PalangkaRaya水位、実測雨量	MWp=3,MR=2		0.876(m)	0.839(m)	
⑥	水位	3ヶ月				1.368(m)	1.708(m)	
⑦	水位	1ヶ月	PalangkaRaya水位、実測雨量、SST	MWp=3,MR=2,MS=2		0.706(m)	0.575(m)	
⑧	水位	3ヶ月			0.820(m)	0.841(m)		
⑨	水位	1ヶ月	PalangkaRaya水位、GPCP雨量	MWp=2,MR(G)=4	3	0.955(m)	0.973(m)	
⑩	水位	3ヶ月				1.318(m)	1.631(m)	
⑪	水位	1ヶ月	PalangkaRaya水位、GPCP雨量、SST	MWp=2,MR(G)=4,MS=3		0.872(m)	0.823(m)	
⑫	水位	3ヶ月				0.905(m)	0.942(m)	
⑬	水位	1ヶ月	予測パターン②の予測雨量をタンクモデルに入力			0.890(m)	0.734(m)	
⑭	水位	1ヶ月	予測パターン④の予測雨量をタンクモデルに入力			1.137(m)	1.186(m)	

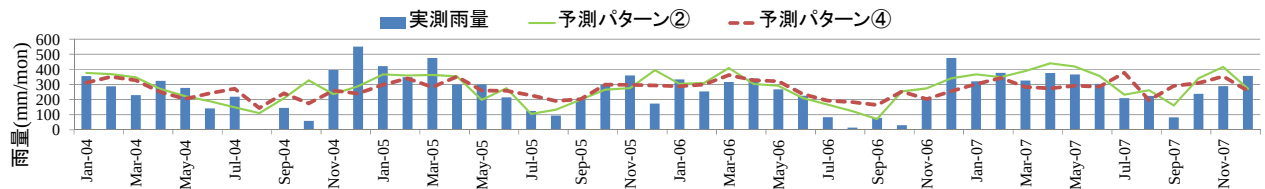


図-3 実測雨量と予測パターン②と予測パターン④の比較（リードタイム1ヶ月）

に示すユークリッド距離が小さくなるものを抽出する。
ユークリッド距離=

$$\sqrt{\{H_x(n)-H_x(m)\}^2 + \{H_x(n-1)-H_x(m-1)\}^2 + \dots} \quad (1)$$

ここで、 $H_x(n)$ は X 地点の現在水位、 $H_x(m)$ は X 地点の過去水位、 $n-1$ 、 $m-1$ はそれぞれ 1 時点前のデータである。

NNM を用いた水文資料の予測については、Karlsson and Yakowits⁹⁾が実時間洪水予測に初めて応用した。また、藤原ら⁹⁾の融雪のある河川の日流量予測に適用した研究事例、Kahayan 川の日単位水位予測を試みた三野ら⁷⁾の研究事例があるが、低水位時の予測に主眼を置いた研究は稀であるといえる。

4. NNM を用いた雨量予測の検証

本章では流域内水文情報として、PalangkaRaya 観測所と KualaKurun 観測所の 2 地点で観測された雨量の算術平均値を流域平均雨量（以下、実測雨量）とした。さらに全球降水気候計画（Global Precipitation Climatology Project）（以下、GPCP）のプロダクトである 0.5° グリッドデータ⁸⁾（Full Data Reanalysis Version6）を使用することとし、流域内に存在するグリッドを 5 点抽出（図-1 参照）した後、それらのデータを算術平均した流域平均雨量（以下、GPCP 雨量）も用いた。また、工藤ら⁴⁾は Kahayan 川の水位変動と SST は相関関係を有していることを示しており、SST を NNM に組み込むことを考えた。SST データは、気象庁⁹⁾が El Niño event 発生の判断基準としているエルニーニョ監視海域「NINO.3」（5N-5S, 150W-90W）の月毎の海面水温値を使用した。

これらを NNM の構成因子として組み込んだ雨量予測を行い、それぞれを比較、検証した。

4.1 構成因子 M, K, の選定

実測雨量の M（以下、MR）、GPCP 雨量の M（以下、MR(G)）、SST の M（以下、MS）、K はさまざまな組み合わせが考えられることから、組み合わせを変化させそ

れぞれ予測を行い、誤差が少なくなるような組み合わせを選定する。今回は、各 M は 2～5、K は 1～20 の範囲で選定を行う。

また、PalangkaRaya 水位と雨量の数値の標準偏差には約 100 倍の差が存在する。ユークリッド距離の算出時に、水位によるものと雨量によるものを等価にするため、雨量データを 100 で除し、水位データと雨量データの標準偏差をおおよそ揃え、ユークリッド距離に寄与する重みを等価にするという処理を行った。

誤差評価には、次式に示す平均二乗誤差平方根（以下、RMSE）を用い、RMSE が小さいものを誤差が小さいとみなす。また、全期間の RMSE とは別に、本研究では乾季に着目した誤差として、7～9 月の 3 ヶ月間を抽出した RMSE（以下、Dry-RMSE）も合わせて用いる。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (R_{cal} - R_{obs})^2}{N}} \quad (2)$$

ここでは、 R_{cal} は予測雨量(mm/mon)、 R_{obs} は実測雨量（GPCP 雨量）(mm/mon)、 N はデータ数である。

4.2 実測雨量、GPCP 雨量を用いた雨量予測

構成因子を実測雨量または GPCP 雨量のみとした場合と、実測雨量または GPCP 雨量と SST を用いる 4 パターンを考え、それぞれについて予測計算（表-1、予測パターン①～予測パターン④参照）を行った。なお、予測対象期間は、近年において比較的連続して観測が行われている 2004 年～2007 年とし、NNM を適用する上でのデータベース期間は 1981 年～2003 年とした。表の各 M、K については、RMSE が最も小さいものを選定している。

予測パターン①から予測パターン④の RMSE、Dry-RMSE のそれぞれの値を比較すると、SST を構成因子に入れることで予測精度が格段に向上することがわかり、Kahayan 川流域における水文量の解析について SST を考慮することの必要性が示されている。また、実測雨量と 2 つの予測雨量（予測パターン②、④）の比較を図-3 に示すが、2 つの予測雨量は実測雨量を良好に再現でき

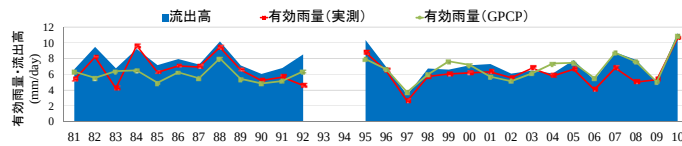


図-4 水収支の検証

(93 年は流出高の観測日が 0 日、94 年は 2 日のため欠測とした)

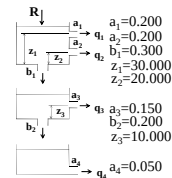


図-5 使用したパラメータ

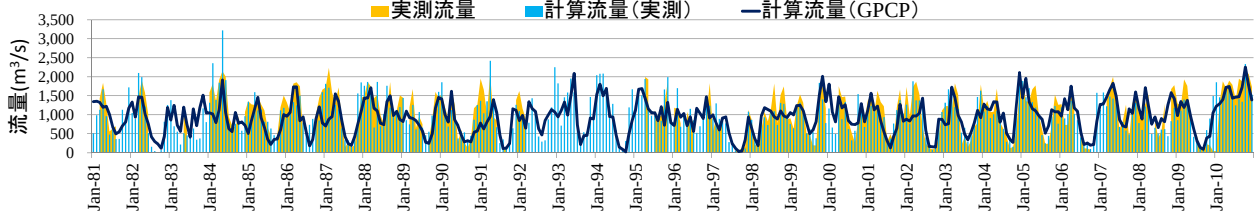


図-6 流出再現計算結果

ていることがわかる。以上より、水位予測を行う際は、SST を考慮した予測パターン②、④の予測雨量を用いる。

5. 流出モデルと雨量予測を用いた水位予測

5.1 流出再現計算

(1) 流域水収支の検証

本項では有効雨量を用いた流出再現計算を行う。そのためにまず、有効雨量と流出高を比較してそのバランスを確認した上で水収支の定量化を行い妥当性を検証する。

有効雨量は、実測雨量または GPCP 雨量から実蒸発散量を引いたものを指す。実蒸発散量の算出手順は、近藤¹⁰⁾によるとインドネシア付近での実蒸発散量と可能蒸発散量の比は約 2/3 であることから Hamon 法により可能蒸発散量を算出した後、2/3 を乗じて実蒸発散量とした。流出高は、辻ら³⁾の手法と同様に、不定期に観測された流量データより H-Q 式を作成した後 PalangkaRaya 観測所における連続水位データに適用し、連続した流量データを推定し実測流量とした。なお、使用した H-Q 式は、 $H=0.13Q^{0.5}-0.15+15.15$ (m,ASL) であり、15.15 は PalangkaRaya 観測所の基準面からの水位を ASL に変換するための数値である。また、ASL は平均海水面からの高さ (Above Sea Level) を表す。

検証期間は、長期的な検証を行うために 1981 年～2010 年とし、有効雨量と流出量を年毎にまとめてその変動状況を示したものを図-4 に示す。この際、観測データの欠測のために水収支の年単位量を算出することが不可能であったため、日平均値としてまとめた。図-4 に着目すると、実測雨量をもとにした有効雨量は流出高と概ねバランスしており、有効雨量の妥当性が確認できた。また、GPCP 雨量をもとにした有効雨量について 92 年以前は流出高に対し比較的過小であるが、95 年以降は改善されていることが見受けられる。このことは、過去データから近年データにかけての GPCP 雨量データの精度向上を表していると考えられ、今後は年間の水収支などであれば全球降水量データであっても十分な精度を保証した検証が行える可能性を示している。

(2) 流出再現計算の結果

PalangkaRaya 観測所を対象地点とした流出再現計算を行う。本研究では集中型 3 段タンクモデルを用い、計算期間は 1981 年～2010 年として日単位での計算を行った。

なお、各パラメータは辻ら³⁾の検討をもとに若干の修正を加えた値 (mm-d 単位) を選定した (図-5 参照)。計算結果を月単位にまとめ、実測流量と計算流量を比較したものを図-6 に示す。なお、実測流量には欠測があるため、月平均流量データを算出した。

図-6 に着目すると、2 つの計算流量は実測流量を概ね再現できていることがわかる。さらに、次節において水位予測を行う期間である 2004 年～2007 年についての計算流量 (実測) の Nash 効率係数は 0.75 であり、計算結果の妥当性が確認できる。しかし、計算流量 (GPCP) の Nash 効率係数は 0.61 であり、その値は比較的高くない。この理由として前項の水収支の検証の図-4 に示されている 2004 年での有効雨量 (GPCP) が過大であることが要因となり、計算流量 (GPCP) の Nash 効率係数が小さくなったと考えられる。

以上を踏まえ、実測雨量を用いた流出再現計算においては、各パラメータの選定が適切になされていると判断でき、流出モデルの検証に加えて PalangkaRaya 観測所における上流からの水供給量の連続データの推定ができたといえる。GPCP 雨量を用いた流出再現計算については、流出モデルの各パラメータの検証、実測雨量に基づく GPCP 雨量の定量的な補正等を行い、流出再現計算値を実測値に近づける必要がある。

5.2 NNM を用いた水位予測

本節では、NNM に PalangkaRaya 水位 (MW_P) と SST (MS)、実測雨量 (MR) または GPCP 雨量 (MR(G)) を構成因子として組み込んだ水位予測を試みる。構成因子の組み合わせは表-1 に示す予測パターン⑦、⑨、⑪でのリードタイム 1 ヶ月の水位予測、予測パターン⑧、⑩、⑫でのリードタイム 3 ヶ月の水位予測を行った。その結果を図-7、図-8 に示す。図によると、リードタイム 1 ヶ月の予測水位に関しては実測水位を再現できると言える。特に予測パターン⑦、⑪に関しては、ほぼ実測水位に近い結果が得られた。リードタイム 3 ヶ月の予測水位に関しても、構成因子に SST を組み込むことによって (予測パターン⑫)、SST を組み込まない場合 (予測パターン⑩) より RMSE が改善されていることがわかる。

NNM を用いた水位予測には、実測水位データが必要となる。そのため、水位が欠測となった場合には予測を

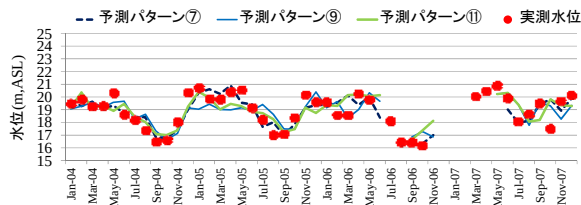


図-7 実測水位と予測パターン⑦, ⑨, ⑪の比較
(リードタイム1ヶ月)

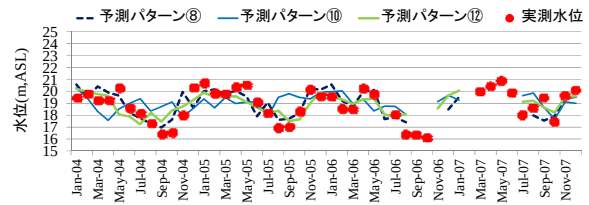


図-8 実測水位と予測パターン⑧, ⑩, ⑫の比較
(リードタイム3ヶ月)

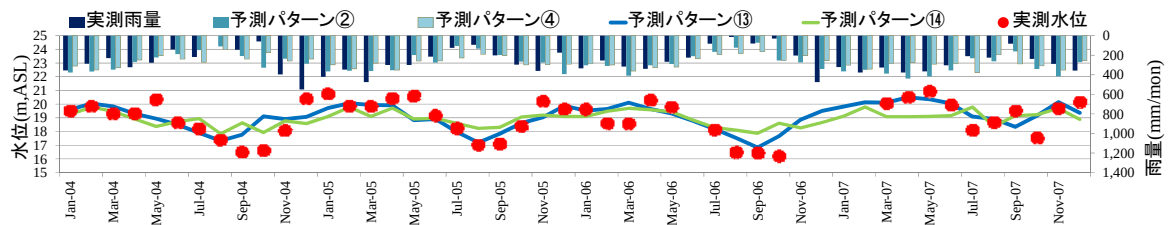


図-9 雨量予測結果と雨量予測を介した水位予測 (リードタイム1ヶ月)

行うことができない。以降では、前述の予測雨量(予測パターン②, ④)と流出モデルを用いて水位予測を行い、水位が欠測となった場合でも予測可能な手法を提案する。

5.3 雨量予測を介した水位予測

NNM による予測雨量と流出モデルを用いた水位予測を試みる。この際、流出モデルによる計算を行うために月単位の値として与えられる予測雨量を月の日数で除し、日雨量データを作成して日単位での計算を行う。次に出力された日流量を前述で使用した H-Q 式を用いて日水位に換算し、月平均水位を算出し水位予測とした。

予測結果を表-1(予測パターン⑬, ⑭), 実測水位との比較を図-9 に示す。予測パターン⑬に関しては概ね実測水位を再現できていると言える。しかし、予測パターン⑭に関しては、乾季における水位予測がうまく行えていないことが分かる。今後、乾季における予測精度の向上を図るため、乾季の降雨量に作用するような構成因子を NNM に組み込む必要があると考える。

また、以上より実測水位が欠測の場合でも、本節の手法を用いることで水位予測は可能であることを示すことができた。

6. まとめ

- 1) SST を NNM の構成因子に組み込むことで雨量、水位ともに予測精度の向上が見られ、リードタイムを伸ばした予測が行えることを示した。
- 2) 実測雨量データと GPCP 雨量データを用いて有効雨量と流出高のバランスを確認した上で、水収支の定量化を行うことができた。
- 3) PalangkaRaya 観測所での流出モデルによる流出計算について再現性の良い結果が得られ、連続データの推定ができた。
- 4) NNM による予測雨量と流出モデルを用いた水位予測を行い妥当な結果を得たことで水位が欠測であるときにも水位予測を行う手法を示した。

本研究では主に、実測雨量と GPCP 雨量の2つを用いた雨量・水位及び流出予測について比較、検討してきた。El Niño event を左右する SST を NNM に導入することで、それぞれの予測精度を向上させることができた。しかし

GPCP 雨量を用いた際の予測精度は、実測雨量を用いた場合よりも低いことがわかった。以上を踏まえて今後は、GPCP 雨量の定量的な補正、流出モデルの各パラメータの検証を行い、GPCP 雨量を用いた水位予測の精度を向上させていきたい。

謝辞：本研究は地球規模課題対応国際科学技術協力 (SATREPS) プロジェクトの「インドネシアの泥炭・森林における火災と炭素管理」(代表：大崎満)の一部である。本研究を遂行するにあたり、室蘭工業大学大学院の林下直樹氏には貴重な助言を頂いた。ここに記して深謝いたします。

参考文献

- 1) JST/JICA Project, パンフレット：Wild Fire and Carbon Management in Peat-Forest in Indonesia.
- 2) JST/JICA Project, HP : <http://www.census.hokudai.ac.jp/html/JST/JICA/jp/index.html>
- 3) 辻弘平, 中津川誠, 工藤俊：インドネシア Kahayan 川流域の水収支と流出量の推定について, 土木学会北海道支部論文報告集, 68号, B-29, 2012.
- 4) 工藤俊, 中津川誠：インドネシア Kahayan 川のエルニーニョ現象に着目した水位予測に関する研究, 水工学論文集, 第57巻, 2013.
- 5) Karlsson, M and Yakowits, S. "Nearest-Neighbor Methods for Nonparametric Rainfall-Runoff Forecasting", Water Resources Research Vol.23, No.7, pp.1300-1308, 1987.
- 6) 藤原洋一, 田中丸治哉, 畑武志, 多田明夫：Nearest-Neighbor 法による多雪流域の実時間流量予測, 農業土木学会論文集, No.210, pp.75-82, 2000.
- 7) 三野基之, 中津川誠, 板倉忠興, 杉本光：Nearest-Neighbor 法を用いたインドネシア Kahayan 川の水位予測, 土木学会北海道支部論文報告集, 67号, B-34, 2011.
- 8) ドイツ気象局：<http://www.dwd.de/>
- 9) 気象庁 HP：<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 10) 近藤純正：水環境の気象学, 朝倉書店, 1994.