# 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

Research on Estimation of Water Balance and Runoff Amount for the Kahayan River Basin in Indonesia

室蘭工業大学	○学生員	辻 弘平	(Kohei Tsuji)
室蘭工業大学	正 員	中津川 誠	(Makoto Nakatsugawa)
室蘭工業大学	学生員	工藤 俊	(Shun Kudo)

## 1. はじめに

カリマンタンの低平地には泥炭湿地林が広く分布して いる.これら熱帯泥炭地は多量の炭素の貯蔵庫としての 役割を果たしているが,近年の農地開発の影響で地下水 位が低下すること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.これにより 中部カリマンタンだけでも毎年,大量の二酸化炭素が放 出されており国際的な課題となっている<sup>1)</sup>.

このような泥炭火災を防ぐために、地下水位を正常な 状態にコントロールし乾燥化を抑制することが求められ ており、水文環境を理解した上で対策を講じる必要があ る.これまで、中部カリマンタンの Kahayan 川流域と隣 接する Sebangau 川流域を対象に地下水位変動と泥炭火 災の関係を分析した佐藤ら<sup>2)</sup>や早坂ら<sup>3)</sup>の研究,泥炭地 における蒸発散量と流出量の推定を行った三宅ら<sup>4)</sup>の研 究,河川水位の変動要因を検証し,Nearest-Neighbor 法を 用いて水位変動予測を行った工藤ら<sup>5)</sup>の研究事例がある. しかしながら流域全体での降雨量や流出高から水収支を 求め,流域の水循環を定量化したものはない.

そこで本研究は, Kahayan 川流域を対象に中央カリマ ンタン州政府(Dinas PU Propinsi Kalimantan Tengah)の 水位データなどの気象・水文データを用いて,そこから 蒸発散量を算定し水収支についての分析を行った.また, 下流への水供給量の定量化と Kahayan 川流域における水 循環モデルの構築の足がかりとして,集中型タンクモデ ルを用いて流域の上流部にある KualaKurun 観測所での 流出計算を試みた.

# 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、流域面積については中央カリマンタン州政府の資料

によると 19,917km<sup>2</sup>とされている.また、下流では平坦 な土地が広がり内陸部まで潮汐の影響を受けることが知 られており、上流になるにつれて河川の勾配が大きくな るという特徴を有する.本研究では豊かな泥炭地が広が る中流部に位置する PalangkaRaya 観測所(河口から約 130km)と、その上流部に位置する KualaKurun 観測所(河 口から約 250km)の水文データと、PalangkaRaya 飛行場 の気温データを用いた(図-1 参照).なお、流域面積に ついては経済産業省および米国航空宇宙局によって公開 されている標高データ(ASTER-GDEM(全球標高モデ ル))と GIS(地理情報システム)を用いて、尾根に沿っ て目視で分水嶺を推定し流域界を決定した(図-1参照). それを基に KualaKurun 観測所での流域面積は 4,405km<sup>2</sup>, PalangkaRaya 観測所での流域面積は 12,570km<sup>2</sup>とした.

## 3. 流域の水収支の検証

#### (1) 使用データ

流域水収支の検討を行うためには降雨量,流量,蒸発 散量のデータが必要であり,以下に本研究で使用したデ ータについてまとめる.

降雨量に関しては二つのデータを使用し①KualaKurun 観測所とPalangkaRaya観測所で観測された日雨量データ ②世界気象機関(WMO)らのプロジェクトである全球 降水気候計画(Global Precipitation Climatology Project)(以 下,GPCP)によって公開されている0.5°グリッドデータ<sup>6)</sup> (Full Data Reanalysis Version5(1901.1~2009.12の全球降 水量))のうち,2001年~2009年の月雨量データを用い た.なお,図-2に使用したグリッドを示す.

流量に関しては定期的に観測されておらず,連続して 観測されたデータは存在しない.そこで,図-3に示す手 順を用いて流量を推定した.その際,作成した H-Q 関係



図-1 インドネシア Kahayan 川流域の 位置と形状







# 図-5 水位観測所の水位と流量観測地点の水位の相関図 ((a) KualaKurun (b) PalangkaRaya)

水位(観測所) (m)

水位(観測所) (m)

表-1 KualaKurun 観測所流域の水収支

		2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	平均
1	降雨量(KualaKurun観測所のみ)	3,783	4,245	3,566	4,187	3,541	3,629	5,960	4,130
Û'	降雨量(GPCCデータ)	3,784	3,954	3,293	4,232	3,956	3,234		3,742
2	流出高	2,112	2,509	×1,880	2,901	X2,355	2,176	3,477	2,635
3(1)-2)	蒸発散量(水収支法)	1,671	1,736	欠測	1,285	欠測	1,452	2,483	1,726
3'(1)'-2)	蒸発散量(水収支法)	1,672	1,446	欠測	1,331	欠測	1,057		1,376
(4)	可能蒸発散量(Hamon法)	1,319	1,332	1,318	1,362	1,356	1,390	1,378	1,351
(5)	可能蒸発散量(Thornthwaite法)	1,702	1,748	1,696	1,842	1,837	1,941	1,890	1,808

単位:(mm/年) ※それぞれの流出高の合計は欠測日をひとして合計した値 ※2006年 5日間欠測(12月27日~12月31日) ※平均は欠測年を除いたもの ※2008年 31日間欠測(3月1日~3月31日)

表-2 PalangkaRaya 観測所流域の水収支

		2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	平均
1	降雨量(KualaKurun観測所のみ)	3,786	3,722	3,856	3,783	4,245	3,878
Û	降雨量(KualaKurun,PalangkaRaya観測所の平均)	3,181	2,915	3,357	2,982	3,309	3,149
0"	降雨量(GPCPデータ)	3,040	2,829	3,202	3,662	3,689	3,285
2	流出高	2,636	2,196	2,331	2,214	2,814	2,438
3(1-2)	蒸発散量(水収支法)	1,149	1,525	1,524	1,569	1,431	1,440
3'(1'-2)	蒸発散量(水収支法)	545	719	1,025	768	495	710
3"(1)"-2)	蒸発散量(水収支法)	404	633	871	1,448	875	846
4	可能蒸発散量(Hamon法)	1,317	1,327	1,330	1,319	1,332	1,325
5	可能蒸発散量(Thornthwaite法)	1,702	1,730	1,740	1,702	1,748	1,724

単位:(mm/年)

を定期的に観測されている水位データに適用するため, 流量観測地点の水位データとの相関関係を検証し,45° 線上に分布していることを確認した(図-4 H-Q 関係式, 図-5 水位相関図 参照).なお,流量観測と各観測所の水 位データはどちらも中央カリマンタン州政府の資料であ る.

蒸発散量に関しては、観測された気温データが PalangkaRaya 飛行場地点で観測された1地点のみである ため、その気温データを用いて Hamon 法と Thornthwaite 法<sup>7)</sup>により、それぞれ可能蒸発散量を算出し流域全体の 可能蒸発散量とした.

以上の降雨量,流量,蒸発散量をそれぞれ年単位でま とめ比較し検証を行う.その他,検証期間は各観測所に おいて数年続けて欠測が少ない期間とし,KualaKurun 観 測所については 2004 年~2010 年,PalangkaRaya 観測所 については 2001 年~2005 年とした.なお,この流域に



おける降水量の目安として, KualaKurun, PalangkaRaya 両観測所における 1996 年~2010 年(15 年間)の年平均 降水量は, それぞれ 3,697mm/年, 2,101mm/年である.

## (2) 水収支法による蒸発散量の検証

流域における水収支を定量化するために,各降雨量か ら流出高を差し引き水収支法により算出した蒸発散量と, Hamon 法, Thornthwaite 法によって求められた可能蒸発 散量との比較を行い,その妥当性を検討した.

表-1に2004年~2010年における KualaKurun 観測所, 表-2に2001年~2005年における PalangkaRaya 観測所の 水収支について示す.また年単位での水収支の変動を図 -6に示した.まず可能蒸発散量自体の妥当性について検 討しなければならないが,理科年表<sup>8)</sup>によればカリマン タン島の年間可能蒸発散量は約1,500mm/年である.これ は Hamon 法, Thornthwaite 法で得られた値のおおよそ中 間程度であることから,算出した可能蒸発散量は妥当で あると考えられる.

KualaKurun 観測所における水収支に関しては, KualaKurun 観測所の降雨量を用いた蒸発散量(表-1,③), GPCP の降雨量を用いた蒸発散量(表-1,③')ともに, Hamon 法, Thornthwaite 法により算出した可能蒸発散量 1,300mm/年~1,700mm/年をおおむね再現しており、妥当 な結果が得られたといえる. PalangkaRaya 観測所に関し ては表-2に示す通り, KualaKurun 観測所のみの降雨量を 用いた蒸発散量(表-2,③)が最も妥当な値を示してい る.この点について詳しく検証するために表-1,表-2に 示される各観測所の流出高(②)を比較してみると両者 にはあまり差がないことが読み取れる.このことから, KualaKurun 観測所流域と PalangkaRaya 観測所流域の降 雨量は量的には同様の傾向を示しているとみなされる. しかしながら, PalangkaRaya 観測所の降雨量, GPCP の 降雨量を用いた蒸発散量(表-2,③',③'')をみると, KualaKurun 観測所のみの降雨量を用いた蒸発散量(表-2, ③)とは異なる傾向を示している。そのため、流域平均 雨量については現在,本プロジェクト<sup>1)</sup>で計測されてい るデータも用いて検証していく必要があると考える.

以上をまとめると,KualaKurun 観測所に関しては,表 -1,③,③'に示す蒸発散量の双方とも妥当な結果が得ら れており,KualaKurun 観測所の降雨量のみを用いた結果 は,GPCPの降雨量を用いた結果からも裏付けがなされ ている.PalangkaRaya 観測所に関しても,その周辺の降 雨量と上流域での降雨量との関係については更なる検証 が必要であるものの,表-2,③に示すKualaKurun 観測所 のみの降雨量を用いた蒸発散量は妥当な値を示している と判断できる.したがって,両観測所の流域において降



雨量,流出高,蒸発散量といった水収支の定量化ができ たといえる.

#### 4. 流出再現計算について

前章までで水収支の検証を行ったが、本章ではそれを 踏まえてタンクモデルによる流出再現を試みる.流域全 体の水循環や水供給量を定量化することによって、地下 水の管理に役立てるなどといった泥炭地の乾燥化の対策 を講じる上での基礎の一つとして役立てたいと考え、タ ンクモデルを用いて流出再現計算を試みた.なお、 Kahayan川の中流部に位置する PalangkaRaya 観測所に関 しては、図-7 に示すように KualaKurun 観測所のハイド ログラフに比べて PalangkaRaya 観測所は変化が緩やかで あり、潮位の影響により平滑化されたような挙動をして いる.そのため本研究においては、まずは自流区間と考 えられる KualaKurun 観測所流域での流出再現計算を試 み、水循環モデル構築の足がかりとすることを目指した.

#### (1) タンクモデルの概要

タンクモデルとは図-8に示すように表面流出,中間流 出,地下水流出に対応したタンクを仮想的に設定し,それ らに対応した複数のパラメータを同定することによって 流出を再現する手法である.流出モデルには集中型と分 布型があるが,本研究においては比較的少ない条件で流 出量を算定できる集中型を使用し,タンクの段数を3段 と設定した.各タンクの連続式と流出量,浸透量を表す 式は以下のように示される.

$$\frac{dS_1}{dt} = r - q_1 - q_2 - p_1$$

$$\frac{dS_2}{dt} = p_1 - q_3 - p_2$$
(1)
$$\frac{dS_3}{dt} = p_2 - q_4$$

$$q_{1} = a_{1}(S_{1} - z_{1}) \qquad q_{2} = a_{2}(S_{1} - z_{2})$$

$$q_{3} = a_{3}(S_{2} - z_{3}) \qquad q_{4} = a_{4}S_{3} \qquad (2)$$

$$p_{1} = b_{1}S_{1} \qquad p_{2} = b_{2}S_{2}$$

ここで、 $S_1 \sim S_3$ :貯留高 (mm),  $q_1 \sim q_2$ :流出量 (mm/day),  $p_1 \sim p_2$ :浸透量 (mm/day), r:有効雨量 (mm/day), パラメ ータは $a_1 \sim a_4$ ,  $b_1 \sim b_2$ ,  $z_1 \sim z_3$ の計9つである.

本研究では各パラメータは泥炭地の乾燥化を抑制し泥 炭火災の対策に役立てることを考えていることから,乾 期にあたる7月~9月の低水時における流出を再現する ことを主眼に試行錯誤によって決定した(図-8参照).

なお、使用したデータについては、前章で水収支について定量化を行った KualaKurun 観測所のデータを使用する.入力データは日単位の計算を行うために表-1に示した①降雨量(KualaKurun 観測所のみ)から④Hamon法で推定した蒸発散量を差し引いた値を日単位の有効雨量とした.また、KualaKurun 観測所における流域面積を4,405km<sup>2</sup>とし、計算期間は2004年1月1日~2010年12月31日までとして日単位での計算を試みた.

## (2) 流出再現結果と考察

タンクモデルを用いて, KualaKurun 観測所における 2004 年~2010 年までの流出再現を行った結果を月単位 の流出高にまとめたものを図-9, 表-3 に示す.また日単 位の流量についてまとめたものの一部(2009, 2010 年) を図-10 に示す. なお, 表-3 において, 次式に示す平均 二乗誤差平方根(以下 RMSE)を用いて誤差評価を行っ た結果を示している.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (q_{cal} - q_{obs})^2}{N}}$$
(3)

ここで、 $q_{cal}$  はタンクモデルによる計算流出高 (mm)、 $q_{obs}$  は実測水位からの流出高 (mm)、N はデータ数 (月)



図-10 KualaKurun 観測所における流量再現結果((a) 2009 年(b) 2010 年)

である.

図-9 をみると月単位での流出高についての再現性は 良い結果が得られたことが分かる.しかしながら,表-3 に示す通り 2005年,2010年は RMSE の値が大きく,図 -9 からも 2005年,2010年の高水時に誤差が大きいこと が読み取れる.この原因について考えられる理由を以下 に示す.

- ① KualaKurun 観測所1地点のみの雨量データのみを使 用しているため流域全体の雨量が反映されていない.
- ② 低水時における再現を重視しているため、日雨量が 大きい場合には対応できていない。

以上の2点が原因として考えられ、②について詳しく 検証するために、表-4に日雨量 100mm 以上の日数をま とめ、その関係性に着目してみると 2005 年と 2010 年は 他の年に比べて、日雨量 100mm 以上の日数が多いこと が読み取れる.また、図-10、(b)からも日雨量が 100mm 以上の場合には実測水位からの流量よりも、タンクモデ ルを用いた計算値の方が過大であるということが確認で きる.また、流出計算を行った期間の中で最も誤差の小 さい 2009 年は日雨量 100mm 以上の日数が最も少なく、 日雨量が小さい場合には誤差が小さいことが読み取れる. そのため、本研究で設定したパラメータにおけるタンク モデルは日雨量が大きい場合には誤差が大きくなる傾向 はあるものの、日雨量が小さい期間、すなわち乾期など の低水時の期間は精度が良く、今回の結果は本研究の目 的を考えると十分に評価できるものといえる.

# 5. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる.

- Kahayan 川流域の KualaKurun, PalangkaRaya 各観測 所流域において Hamon 法, Thornthwaite 法によって 算出された値と水収支法によって推定された蒸発散 量の値との比較を行い,妥当性を検証した上で,降 雨量,流出高,蒸発散量といった水収支の定量化を 行うことができた.
- 2) KualaKurun 観測所における流出再現計算を行い,水 文データが乏しい中で KualaKurun 観測所のみの雨 量データを流域の雨量として用いた場合でも低水時 における流出について再現性の良い結果が得られた.

今後,本研究を足がかりとして,潮位の影響を考慮で きるモデルを用いて中流,下流域における流出再現計算 を行っていきたい.

謝辞:本研究を遂行するにあたり Kahayan 川関連データ を提供して頂いた JST/JICA プロジェクト:インドネシア の泥炭・森林における火災と炭素管理,地域管理グルー プの NPO 法人北海道水文気候研究所の高橋英紀先生,株 式会社リブテックの板倉忠興先生,北見工業大学の渡邊 康玄先生,日本工営株式会社の杉本光様,PalangkaRaya 大学の AswinUsup 先生に対し,ここに記して深謝辞致し ます.

#### 参考文献:

- 1) JST/JICA プロジェクト HOME http://www.census.hokudai.ac.jp/html/JSTJICA/jp/index. html
- 佐藤空,井上京,石倉究,波多野隆介,平野高司, 高橋英紀, Untung DARUNG, Adi JAYA, Suwido LIMIN:インドネシア中部カリマンタン州の熱帯泥 炭地における地下水位変動と泥炭火災,日本湿地学 会第2回学術報告会,2010.
- 3) 早坂洋史,エリアント インドラ プートラ,アス ウィン ウッスプ,ユリアンティ ニナ:インドネ シア,カリマンタン島での最近の泥炭火災傾向, Japan Geoscience Union Meeting 2010.
- 4) 三宅龍平,井上京,アディ・ジャヤ,ウントゥン・ ダルン:カリマンタン熱帯泥炭地における蒸発散量 と流出量の推定,農業土木学会全国大会講演要旨集, pp.698-699,2005.
- 5) 工藤俊,中津川誠:インドネシア Kahayan 川の水位 変動要因を踏まえた水位予測に関する研究,土木学 会水工学論文集,2012.(投稿中)
- 6) ドイツ気象局 HP: http://www.dwd.de/
- 7) 口澤寿,中津川誠:熱水収支を考慮した流域スケールの積雪と蒸発散量の推定,北海道開発土木研究所 月報,No.588,2002.
- 自然科学研究機構・国立天文台,理科年表・机上版, 平成23年度, pp.948.