

衛星雨量を利用したインドネシア・チリウン川の水位推定手法の提案

Research on Water Level Estimation Method for the Ciliwung River in Indonesia Using Satellite Data

室蘭工業大学 ○学生員 星野 佳太 (Keita Hoshino)
室蘭工業大学 正 員 中津川 誠 (Makoto Nakatsugawa)

1. はじめに

近年、世界規模で大雨に伴う洪水が頻発し、大きな被害が発生している。IPCC 第 5 次評価報告書¹⁾では、今後さらに地球温暖化が進行し、地球規模で降水量が増加すると提言されており、さらにアジア・アフリカの湿潤地域での洪水リスクが増大する可能性があるとの平林ら²⁾は指摘している。また、Hrachowitz ら³⁾は国際水文学科学協会 (IAHS) として Predictions in Ungauged Basins (PUB) という概念を提唱し、水文情報のない地域での水文理解を深める取り組みが重要であることを主張している。

そのような中、インドネシアは毎年集中豪雨に見舞われており、特にジャワ島西部の Ciliwung 川では、河川流域内にある Jakarta 市で近年洪水被害が頻発している。それを背景に洪水解析を行った事例として、過去の最大日降水量事例と 2014 年 1 月の洪水の動向を検証した Siswanto ら⁴⁾の研究、レーダー雨量を使用して Ciliwung 川の洪水解析を行った Hapsari ら⁵⁾の研究がある。ここで問題となるのは Ciliwung 川などジャワ島西部に位置する河川では地理情報、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ことである。そこで、本研究では水文データの観測が乏しい流域への適用を想定して開発された IFAS⁶⁾を用い、近年の洪水事例を対象に流出計算を行った。この際、衛星雨量を用いた計算流量から H-Q 式を用いて水位推定が可能であるかの検証を行なった。

2. 研究方法

2.1 流出計算モデル (IFAS)

IFAS とは国立研究開発法人土木研究所 ICHARM で開発された総合洪水解析システム (Integrated Flood Analysis System) の略称であり、数値標高モデル、土地利用情報、衛星雨量を駆使することで、観測データがない条件下でも流出計算が行えるメリットがある。IFAS による流出計算の流れを図-1 に示す。

2.2 使用データ

(1) 地理データ

今回使用する標高データは、IFAS に実装された標準 IFAS の流出計算の流れ

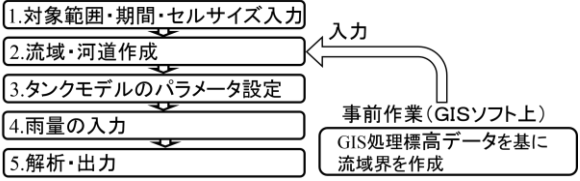


図-1 IFAS による流出計算の流れ

機能でダウンロード可能な入力標高データ (以下、IFAS 標準標高データ)、それとは別の方法で ArcGIS といった GIS ソフトで処理する標高データ (以下、GIS 処理標高データ) の 2 種類がある。それぞれのデータの概要を表-1、表-2 に示す。また、IFAS でダウンロード可能な土地利用データを表-3 に示す。

(2) 雨量データ

IFAS でダウンロード可能な衛星雨量を表-4 に示す。本研究では解析対象事例の期間のデータが存在した GSMaP_NRT と 3B42RT を使用した。また、IFAS には離散的な観測地点の雨量と座標をセットで入力することで、ティーセン分割した範囲のメッシュに各観測地点の雨量を与える機能が搭載されている。

(a) 3B42RT

3B42RT は、日本の宇宙航空研究開発機構 JAXA と米国の航空宇宙局 NASA の共同ミッションで打ち上げられた衛星である熱帯降雨観測衛星 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) のプロダクトのひとつである。TRMM は熱帯地域を対象とした降雨観測に特化し

表-1 標高データ (IFAS 標準入力標高データ)

名前	提供	空間解像度	座標系	範囲
Global Map	ISCGM	30秒(1km)	WGS84	全球
GTPO30	USGS	30秒(1km)	WGS84	全球
Hydro1k	USGS	1km	ランベルト正積方位図法	全球

表-2 標高データ (GIS 処理標高データ)

名前	提供	空間解像度	座標系	範囲
ASTERGDEM	METI NASA	30m	WGS84	全球
基盤地図情報 数値標高モデル	国土地理院	10m	WGS84	日本国内

表-3 土地利用データ

名前	提供	空間解像度	座標系	範囲
Global Map (Land Cover)	ISCGM	30秒(1km)	WGS84	全球
Global Map (Land use)	ISCGM	30秒(1km)	WGS84	全球
GLCC	USGS EDC	1km	ITRF94 GRS80	全球

表-4 衛星雨量データ

名前	提供	対象範囲	空間解像度	時間解像度	配信遅れ
3B42RT	NASA	50N~50S	0.25°	3時間	10時間
CMORPH	NOAA	60N~60S	0.25°	3時間	15時間
QMORPH	NOAA	60N~60S	0.25°	30分	2.5時間
GSMaP_NRT	JAXA	60N~60S	0.1°	1時間	4時間

表-5 河道網データ

名前	提供	座標系	範囲
国土数値情報 河川データ	国土交通省	JGD2000	日本国内
ユーザー作成 河道網データ	GoogleMapより得た 河川の座標を使用	WGS84	全球

た衛星である。そのため、インドネシアを対象とした本研究では有用なデータアーカイブであると考えられる。

(b) GSMaP_NRT

GSMaP_NRT は、TRMM の後継ミッションである JAXA や NASA 等の共同ミッションの全球降水観測計画 GPM (Global Precipitation Measurement) の一環で、JAXA が処理、提供している GSMaP プロダクトのひとつである。GSMaP_NRT は、TRMM のデータの他に、より高精度になった GPM 主衛星のセンサーのデータを使用しているため、対象範囲が広くなり微弱な降雨も捉えられるようになっている。

(3) 河道データ

IFAS では IFAS 標準標高データから自動で河道網を作成することができる。さらに別途用意したシェープファイル形式の河道網データを入力することにより、作成される河道網の形状を補正する機能がある。河道網データを表-5 に示す。河道網データは、国土数値情報の河川データ等だけでなく、ユーザーが GIS ソフトを用いて河川の座標から作成したデータを入力することもできる。

2.3 対象事例

Ciliwung 川はインドネシア・ジャワ島西部の Jakarta 市の中央を流れており、Hapsari ら⁵⁾ は流域面積 476km²、主要部の流路長が 97km と報告しているが、公称値であるかは未確定である。流域では Jakarta 市の地形が低平であることや、水源である南部の Bogor 市や Depok 市の都市化による人口増加と森林伐採によって近年洪水の被害が拡大している⁷⁾。計算地点は図-2 に示す Jakarta 市 Manggarai とする。Manggarai では水位が 10m を超えると氾濫が発生するため、水位が 10m 付近になる期間が防災面で非常に重要となる。流出計算は近年の大きな洪水である 2007 年 1 月 27 日~2 月 9 日、2013 年 1 月 14 日~19 日、2014 年 1 月 8 日~15 日の 3 事例について行う。

IFAS の計算条件をセルサイズ 1km とし、標高データ



図-2 計算地点

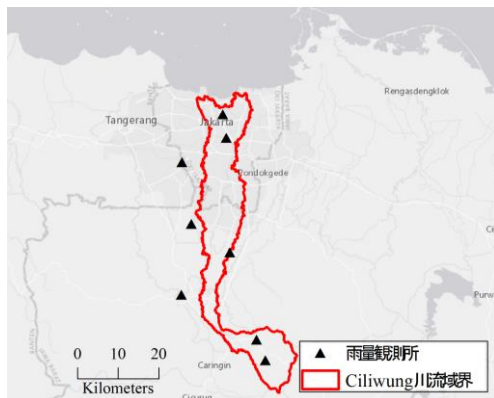


図-3 雨量観測所と作成した流域界

に GTOPO30, 土地利用データに GlobalMap (Land Cover), 雨量データに GSMaP_NRT, 3B42RT と地上観測雨量, 河道網データにフリーでダウンロードできる GIS ソフト, QGIS で作成した河道網データを使用した。また事前作業として ArcGIS に GIS 処理標高データとして ASTREGDEM を入力し流域界のシェープファイル (図形情報と属性情報をもった地図データファイルの集合ファイル) を作成した。作成した流域界の形状を図-3 に示す。

2.4 観測水位と計算流量による H-Q 式の作成

実際の洪水予警報には最終的に水位が必要となり、水位を的確に算出することが必要である。水位を算出する手法としては、計算により求めた流量に H-Q 式を当てはめ水位を求めるのが一般的であるが、H-Q 式の作成には観測流量と観測水位のデータが必要となる。しかし、インドネシアのような発展途上国では流量の観測自体が行われていないか、行われていても入手が難しい。

そのため本研究では、観測流量データを得られない河川を対象に、地上観測雨量と IFAS を用いた流量計算を行い、求められた計算流量と観測水位を用いて H-Q 式を作成した。また、作成した H-Q 式に衛星雨量を入力し計算した流量を与え水位を推定し、観測水位と比較することで衛星雨量の有用性の検証も行った。なお、観測水位データは現地の Manggarai 観測所に紙ベースで保管されていた台帳を現地渡航時にデジタルカメラで撮影させていただき、デジタル化したものを使用した。

3. 結果と考察

3.1 2007 年 1 月の洪水事例における地上観測雨量と観測水位を用いた H-Q 式の作成

はじめに、入手した雨量の中で最も信頼性のある 2007 年 1 月のインドネシアの地上観測雨量を用いて IFAS により流量計算を行った。使用した地上雨量の観測所の位置を図-3 に示す。これらの雨量は IFAS の標準機能として搭載されているティーセン法を用いて与えた。

計算結果を図-4 に示す。また、観測水位も図中に示す。この結果を見ると計算流量の立ち上がりなどと観測水位の立ち上がりなどが一致していない。これは計算地点とした Manggarai 地点で洪水時に水門を開閉し流量の調整を行っていることが原因であると考えられる。水位の観測地点と水門などの位置関係を図-5、水位計の敷設状況を写真-1 に示す。今回の研究では流量観測地点よりも上流にある水門 A の操作に関してのみ考慮した。水門 A の開度は水位が記録されている台帳に記載されていた。

つづいて、この計算流量と観測水位を用いて H-Q 式を作成する。この際に水門 A で流量の調整を行っているため、作成する H-Q 式でも水門 A の開度を考慮する必要がある。そのため本研究では以下の 3 つの H-Q 式の検証を行った。

$$Q_{cal} = aH_{obs}^2 + bH_{obs} + c\{H_{cal}^{3/2} - (H_{cal} - K)^{3/2}\} + d \quad (1)$$

$$Q_{cal} = aH_{obs}^2 + bH_{obs} + c \quad (2)$$

$$\sqrt{Q_{cal}} = aH_{obs} + b \quad (3)$$

ここで、 a, b, c, d : 回帰係数, Q_{cal} : 計算流量(m³/s), H_{obs} : 観測水位(m), K : ゲート開度(m)である。また(1)式, (2)

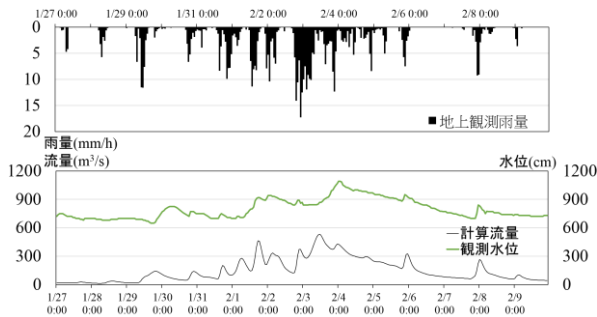


図-4 地上観測雨量を用いた流量計算結果と観測水位

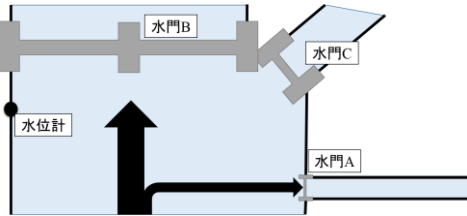


図-5 Manggarai 地点外略図



写真-1 Manggarai 地点水位計

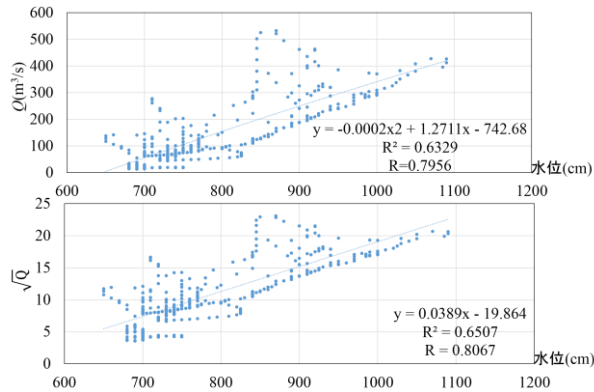


図-6 H-Q 図(左)と H-√Q 図(右)

表-6 H-Q 式の係数

	a	b	c	d	相関係数 R	決定係数 R²
(1)式	-6.1749	126.3715	-18.9695	-771.172	0.83	0.68
(2)式	-0.0002	1.2711	-742.68		0.80	0.63
(3)式	0.0389	-19.864			0.81	0.65

式, (3)式, を用いた方法をそれぞれ H-Q ケース①, H-Q ケース②, H-Q ケース③とする。

H-Q 図, H-√Q 図を図-6 に, 回帰分析により求めた各式の回帰係数と相関係数を表-6 に示す。この結果から(1)式が最も相関があることが確認できる。

つづいて, 求めた H-Q 式に計算流量とゲート開度を与え水位を推定し, 観測水位との比較を行った。この際, (1)式, (2)式, (3)式を以下のように変形した。

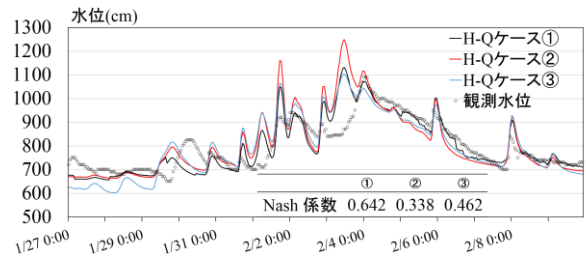


図-7 H-Q 式による推定水位の違い

表-7 流量計算の条件

事例	使用する雨量		
	地上観測雨量	GSMaP_NRT	3B42RT
2007年	ケース①	データ無し	ケース②
2013年	データ無し	ケース③	ケース④
2014年	データ無し	ケース⑤	ケース⑥

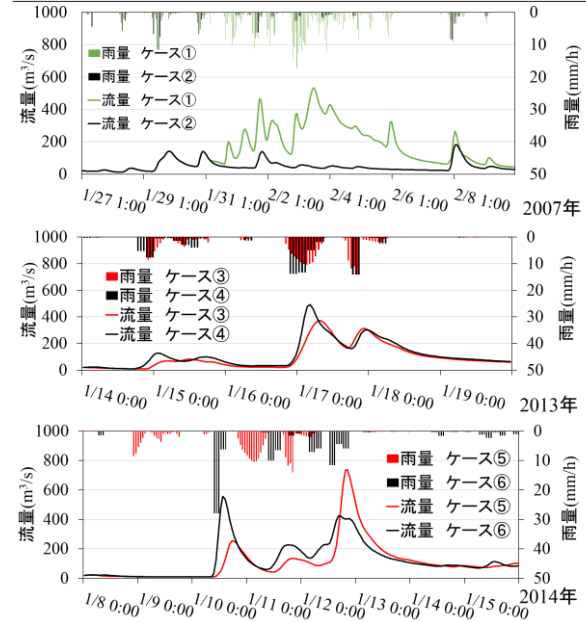


図-8 衛星雨量を用いた流量計算結果

$$f(H_{cal}) = aH_{cal}^2 + bH_{cal} + c\{H_{cal}^{3/2} - (H_{cal} - K)^{3/2}\} + d - Q_{cal} \quad (4)$$

$$H_{cal} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4a(c - Q_{cal})}}{2a} \quad (5)$$

$$H_{cal} = \frac{\sqrt{Q_{cal}} - b}{a} \quad (6)$$

ここで, H_{cal} : 推定水位(m)である。(5)式, (6)式では計算流量を入力するだけで水位を求めることができるが, (4)式では式が複雑であるため SCE-UA 法⁸⁾を用いて解を求めた。SCE-UA 法とは大域的探索の一種であり, 極小解が複数存在する場合でも大域的な最小点を探索することができる。この際, Newton 法による解の導出も行ったが, Q_{cal} と K の組み合わせにより発散または異常値に収束する場合はみられたため, 解の探索には SCE-UA 法を採用した。求めた推定水位及び観測水位と各推定水位の Nash 係数を図-7 に示す。この結果よりゲート開度 K を考慮した H-Q ケース①で推定した水位が他のケースよりも観測水位に近いことがわかる。これらの結果より本研究で用いる H-Q 式は H-Q ケース①のものとした。

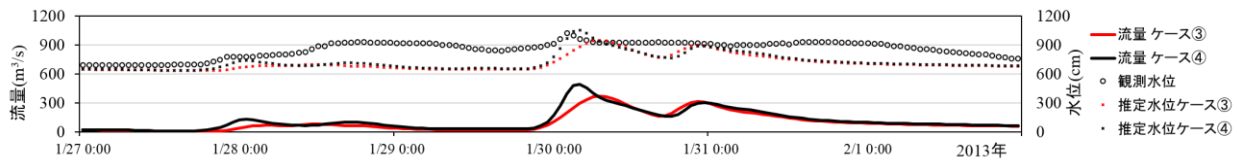


図-9 2013年1月の水位推定結果

表-8 各ケースでの水位推定結果

ケース	対象年 使用雨量	観測ピーク水位 cm	推定ピーク水位 cm	ピーク時雨量 mm/day	地上観測雨量 mm/day
ケース①	2007 地上観測雨量	1,090	1,131	49	-
ケース②	2007 3B42RT	1,090	836	5	-
ケース③	2013 GSMaP	1,020	949	122	193
ケース④	2013 3B42RT	1,020	1,053	103	193
ケース⑤	2014 GSMaP	925	892	26	17
ケース⑥	2014 3B42RT	925	993	3	17

3.2 衛星雨量を用いた流量計算の結果

表-7に示す条件により、IFASを用いて流量計算を行い、計算結果を図-8に示した。この結果より雨量のデータソースにより計算流量のピークの大きさやタイミングに差異が現れることが確認できる。また、2013年1月の事例については、洪水最終報告書⁹⁾の記述との整合性を確認する。報告によると、インドネシア技術評価応用庁(BPPT)の降雨レーダーを用いた分析では、1月17日の午前中にManggarai付近で300m³/sから400m³/s程度の流量を確認したとの記述がある。この記述と2013年の流量計算の結果を比較するとIFASでの計算結果が概ね妥当であることがわかる。

3.3 計算流量による水位推定

つづいて、3.1節で求めたH-Q式を用いて、衛星雨量を与えて計算した流量と水位の検証を行った。結果を図-9、表-8に示す。2013年2014年では、水位がピークとなった日の衛星雨量とManngarai地点より3km程度北に位置する観測所の地上観測の日雨量と比較した。

(1) 2007年の事例の結果

ケース②の結果に注目すると、ケース①よりも大幅に過小評価していることがわかる。これは地上観測雨量に比べこの期間の3B42RTの値が非常に小さいことが原因であると考えられ、水位の推定に雨量の精度が重要であることを表している。

(2) 2013年、2014年の事例の結果

2013年の事例ではケース③、ケース④を比較すると、観測水位のピーク時付近で推定水位も観測水位に近い値を取っていることがわかる。

2014年の事例でもピークのタイミングは多少ずれていたが、ケース⑤、ケース⑥共に表-8より水位の大きさは概ね再現できていることがわかる。

これらの結果より、推定水位は計算流量に依存してしまうため、過度に衛星雨量が過小評価されている場合や降雨のタイミングがずれていると正確に推定できないことがあるが、災害時に問題となる水位10m付近では概ね近い値を推定できていることが確認できた。このことは水文情報の乏しい地域において、概ね十分な精度で水

位の推定が可能であることを示唆した結果といえる。

4. おわりに

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 衛星雨量を用いることで妥当な流量計算が可能であることがわかった。
- 2) 水門のオペレーションを考慮することにより、計算流量から水位の推定をすることができた。
- 3) GIS、衛星雨量データといったグローバルなデータアーカイブ、流出計算ソフトの活用により水文データの十分ではない流域を対象とした水位・流量計算の可能性を示した。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、八千代エンジニアリング(株)の関係各位から資料を提供頂いた。また、土木研究所 ICHARM の津田守正氏には有益な助言を頂いた。なお、本研究は JICA プロジェクトの「多目的ダム管理の効率化等」にむけたリアルタイム監視システム (SESAME)普及・実証事業(2015～2017, 代表：繁永幸久)の一部である。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 気象庁：IPCC 第5次評価報告書 第1作業部会報告書 政策決定者向け要約 気象庁訳，2015。
- 2) Hirabayashi, Y., et al.: Global flood risk under climate change, *Nature Climate Change*, Vol. 3, pp.816-821, 2013.
- 3) Hrachowitz, M., et al.: A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB)—a review, *Hydrological Sciences Journal*, vol.58, pp.1198-1255, 2013.
- 4) Siswanto, S., et al.: Trends in High-Daily Precipitation Events in Jakarta and The Flooding of January 2014, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol.96, No.12, pp.131-136, December 2015.
- 5) Hapsari, R., et al.: The Adjustment of C-BAND Radar-Rainfall Estimates and Its Impact on Stream Flow Simulation Uncertainty: A Case Study for Jakarta Urban River Basin, Indonesia, *36th IAHR World Congress*, 2015.
- 6) 杉浦友宣ら：衛星雨量情報を利用した洪水予測システム(IFAS)の開発，土木学会第63回年次学術講演会，pp.61-62, 2008.
- 7) Jakarta Post: <http://www.thejakartapost.com/> (閲覧: 2015/12/5)
- 8) Qingyun, D., et al.: Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models, *Water Resources Research*, Vol.28, No.4, pp1015-1031, 1992.
- 9) Royal Embassy of the Netherlands, Ministry of Public Works, and Indonesia (PU): Jakarta Floods January 2013, 2013.