

人工衛星と数値地図情報を用いたパナマ運河流域の水収支解析

日本大学工学部土木工学科 神戸 智志

日本大学工学部土木工学科 朝岡 良浩

Technological University of Panama Lucas Calvo

1. はじめに

パナマ運河（図1）は1914年に建設された太平洋と大西洋を結ぶインフラである。パナマ共和国の経済収益の大部分を占めるだけでなく、世界の貿易においても重要な役割を担う。運河の航路は80km、最高点は海拔26mという地形条件より、水路の水位を段階的に変化させる閘門式運河が適用された。運河の用水はガトゥン湖から供給され、またガトゥン湖はパナマ市への生活用水、灌漑用水、水力発電にも利用されている。近年、ガトゥン湖において渴水・洪水が発生した。通常、乾季は1月から4月の4ヶ月にわたるが、2019年は5ヶ月にわたって降雨がほぼ観測されず、1914年の運河開通以来、乾期の降雨が最小を記録した。運河の利用制限に伴い通行料による収入が数百万ドル減少した。一方で、2010年12月には1972年以降に記録された24時間雨量の最大値の2倍に相当する雨量が記録され、極値解析による再現期間（リターンピリオド）は2000年以上と報告されている^{1,2)}。

パナマ運河流域では1990年以降の焼畑農業の拡大に伴い森林面積が減少したが、2000年以降に政府による森林保護政策がとられ、植林地が増加傾向にある。そのため、土地利用の変化に伴う水文過程の遷移に着目した研究が実施してきた。Justin et al. (2012) は流域内の熱帯雨林帶において水文観測を実施し、小流域の降雨、林内雨、樹幹流、蒸発散、河川流、水収支を評価した。Ogden et al. (2013) は、二次林、牧草地、農業地帯といった土地利用が異なる3種類の集水域の流出特性を比較して、二次林の集水域は他の土地利用が支配的な集水域よりも洪水時のピーク流量を減少し、乾季の基底流量が豊富になることを示した。Park and Cameron (2008) は運河流域内の植林地に植栽された4種類の在来樹種と1種類の外来樹種の樹幹遮断、林内雨、樹幹流について比較し、雨滴による土壤浸食を緩和する可能性を指摘した。

気候変動に関する政府間パネルの報告書³⁾は、気候変動の顕在化に伴い渴水・洪水頻度が高くなる地域がことを指摘している。パナマ運河においても気候変動の適応策を検討するために、今後の気候変動を考慮した渴水・洪水頻度の推計が必要とされている。この点に加えて、運河の流域では上述の土地利用変化に関する水文過程の遷移、流域からの土砂生産による貯水池内の堆砂に伴う有効貯水量の低下といった問題を抱えている。これらの問題に対して包括的に対応するためにも、流域内の河川流量を推定する流出モデルの開発が必要とされている。本

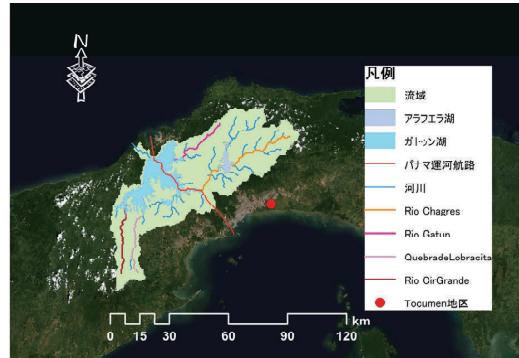


図1 パナマ運河流域

*Water balance analysis in the Panama Canal catchment with satellite remote sensing and geographic information date by Satoshi Godo, Yoshihiro Asaoka, and Lucas Calvo.

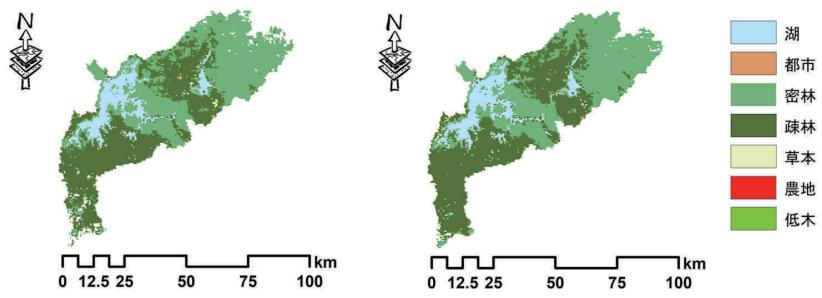


図2 土地利用図（左:2001年、右2010年）

研究はパナマ運河流域における流出モデル構築の基礎的研究として、パナマ運河流域の水収支解析による流出特性の評価を目的とする。

2. 対象地域

パナマ運河流域(図1)の流域面積は3319km²である。流域内のガトゥン湖は複数の河川を堰き止めて建設された人造ダム湖である。貯水池の面積は425km²、Rio Chagres, Rio Gatun, Rio Cir Grande, Quebrada Lobracitaがガトゥン湖に流入する。ガトゥン湖の上流にはアラフエラ湖があり、貯水池の面積は50.2km²である。アララフエラ湖も人造ダム湖であり、パナマ運河の用水に利用されている。MODIS衛星の土地利用プロダクトMCD12Q1（空間分解の500m）によると、2001年から2010年の10年間の土地利用（図2）の変化は限定的で、密林と疎林が流域面積の約88%を占める。

3. 研究手法及びデータセット

(1) 研究手法

パナマ運河流域の流出率を(1)式を用いて算出した。

$$\text{流出率} (\%) = \frac{\text{流出量}}{\text{降雨量} \times \text{流域面積}} \times 100 \quad (1)$$

(2) データセット

対象地域の流域界と河川データをHydroSHEDSから抽出した。HydroSHEDSは世界自然保護基金(World Wide Fund for Nature, WWF)が公開する全球規模の水文地形データである。流域界プロダクト(ca_bas_15s_beta_ud)と河川プロダクト(ca_riv_15s)はラスター形式で整備され、空間分解能は15秒である。降雨量はJST-CRESTやJAXA降水観測サイエンスチームによって開発され、JAXA/EORCによって提供された衛星全球降水マップ(Global Satellite Mapping of Precipitation, GSMAp)⁸⁾の標準版プロダクト(GsMAP MVK)を使用した。GSMApは時間分解能1時間、空間分解能0.1度である。また、GSMApのデータを補正するためパナマ共和国の電力会社ETESA (Empresa de Transmisión Eléctrica) が公開するTocumen観測点（図1）の地上観測雨量を収集した。2011年におけるTocumen観測点の年間雨量2166mmとGSMApのTocumen観測点を含むグリッド

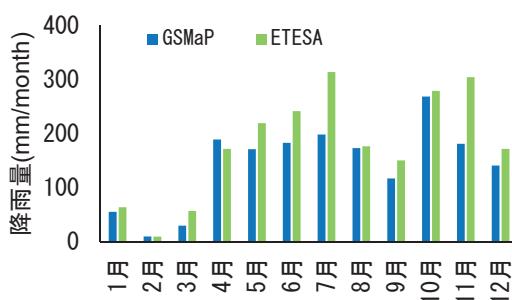


図3 降雨量データの比較
(Tocumen 地点, 2011年)

ドの年間雨量1726mmの比較(図3)から補正值1.26を得た。またTocumen観測点を含むグリッドの補正值をGsMAPの全グリッドに適用した。流出量データはLucas (2018)の解析データを使用した。

4. 結果及び考察

パナマ運河流域における2001年から2010年の年単位の降雨量と流出量を図4、雨量分布図を図5に示す。流域平均の年間雨量は2116 mm/year (標準偏差: 435 mm/year), 最小は2003年の1388mm/year, 最大は2010年の3092mm/yearであった。2010年は11月と12月の降水量が多く, 11月564mm/month, 12月442mm/month で年降雨量の約32%を占めた。また年降雨量の分布に関しては、流域中央部のガトゥン湖付近の降雨量が多い傾向にある。年流出量の平均は $5.56 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{year}$ (標準偏差: $1.08 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{year}$), 最小が2001年の $4.2 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{year}$, 最大は2010年の $8.20 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{year}$ であった。11月と12月の多雨により、この2か月の流出量は11月 $1.26 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{month}$, 12月 $3.29 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{month}$ で、年間流出量の約55%を占めた。

2001年から2010年までの10年間の月単位の降雨量と流出量を図6に示す。1月から3月は降水量が20mm/month以下となり、乾季に該当する。4月以降に雨季が始まり、12月まで続く。最大は11月の月降雨量318mm/monthであった。各月の標準偏差も乾季は小さく20mm/month未満、雨季は11月に標準偏差152mm/monthとなる。以上より、雨季は年ごとの降水量の変動が大きいと考えられる。流出量も1月から4月は低水状態が続き、概ね $2.00 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{month}$ 以下である。5月以降は流出量が徐々に増加する。月流出量の最大は11月の $1.14 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{month}$ であった。また、12月の流出量の標準偏差が最も高く、 $8.57 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{s}$ であった。以上より、月降雨量と月流出量の傾向は概ね一致することを確認した。

年単位の流出率を図7、月単位の平均流出率を図8に示す。年間の流出率は平均77%, 標準偏差は18%であった。最大は2003年の124%, 最小は2008年の62%であった。上述のとおり2003年の年間降水量は対象期間の10年間で最も少ない。このことから、地下水流出のような遅い流出成分の寄与率が高くなり、逆に降雨に対する応答が早い表面流のような流出成分の寄与が低く、これらの要因によって流出率が高くなつたと考えられる。月単位の流出率に関しては12月から3月の月単位の流出率は100%を越え、12月, 1月, 2月, 3月の流出率はそれぞれ183%, 425%, 136%, 105%であった。一方で4月の流出率は37%と最も低い。乾季に該当する1月から3月の低水期間は地下水流出の寄与率が高く、流出率が100%を超える要因と考えられる。

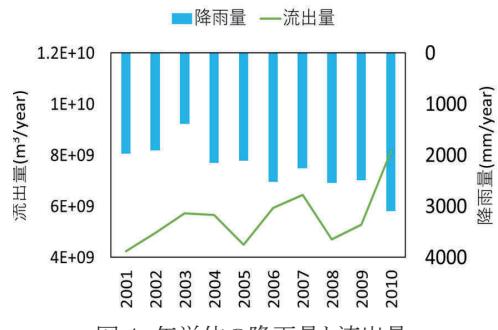


図4 年単位の降雨量と流出量

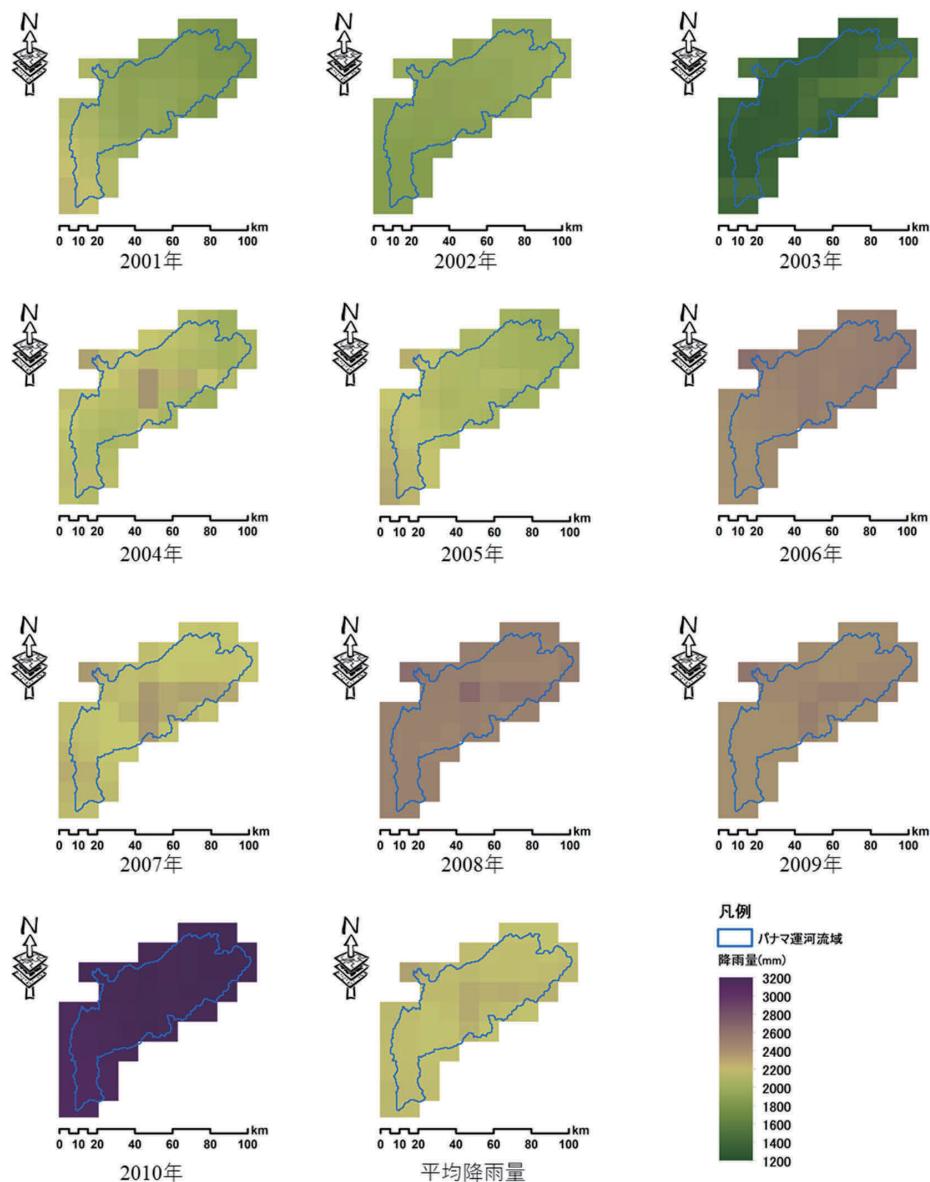


図 5 パナマ運河流域の年降水量分布

5. まとめ

本研究は水文地形に関する数値地図情報HydroSHEDSおよび衛星雨量データGsMAPを用いて、パナマ運河流域における流出率を算出して、流出特性を考察した。月単位の流出率は乾季に100%を超えるが、年単位の流出率は77%になる。乾季の流出率が高い要因として、地下水流出のような降雨に対して反応が遅い流出成分の寄与が高いことが示唆された。これらの点を踏まえて、今後はパナマ運河の流出特性に即した流出モデルを構築して、モデルの検証を進める。

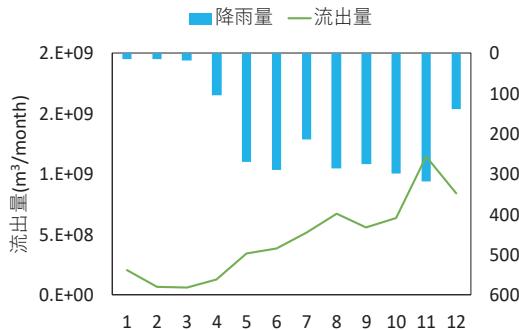


図 6 月単位の降雨量および流出量
(2000 年から 2010 年の平均値)

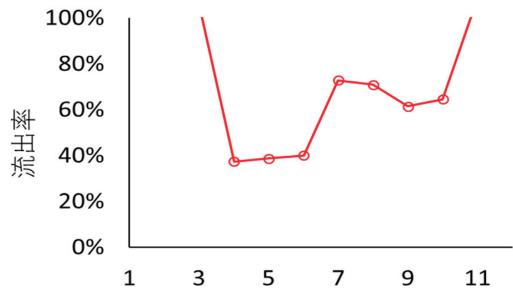


図 7 月単位の流出率
(2000 年から 2010 年の平均値)

謝辞

本研究の一部は日本大学工学部 平成31年度工学長指定研究(特別研究)の助成を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Murphy Jr. M.J., Georgakakos K.P. and Shamir E. (2014): Climatological analysis of December rainfall in the Panama Canal Watershed, International Journal of Climatology, 34, 403-415.
- 2) Shamir, E., Georgakakos, K. P. and Murphy, M.J. (2013): Frequency analysis of the 7-8 December 2010 extreme precipitation in the Panama Canal Watershed, Journal of Hydrology, 480, 136-148.
- 3) Justin M.N. and Ogden F.L. (2012): First-order catchment mass balance during the wet season in the Panama Canal Watershed, Journal of Hydrology, 462-463, 77-86.
- 4) Ogden F.L., Crouch T.D., Stallard R.F., Hall J.S. (2013): Effect of land cover and use on dry season river runoff, runoff efficiency, and peak storm runoff in the seasonal tropics of Central Panama. Water Resources Research, 49, 8443-8462.
- 5) Park A. and Cameron J. L. (2008): The influence of canopy traits on throughfall and streamflow in five tropical trees growing in a Panamanian Plantation, Forest Ecology and Management, 255, 1915-1925.
- 6) IPCC (2014) : Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability: Part A: Global and Sectoral Aspects, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- 7) Lehner, B., Verdin, K., and Jarvis, A. (2006): HydroSHEDS technical documentation, version 1.0. World Wildlife Fund US, Washington, DC, 1-27.
- 8) Okamoto, K., Iguchi, T., Takahashi, N., Iwatani, K. and Ushio, T. (2005): The Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMap) project, 25th IGRASS Proceedings, pp. 3414-3416.

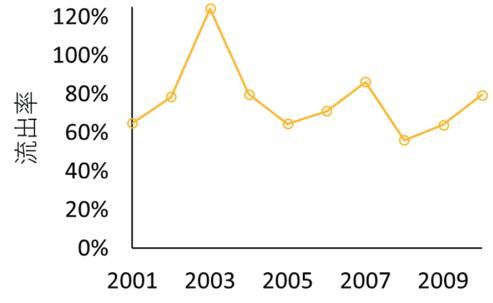


図 8 流出率

9) Lucas Calvo (2018): Application of HEC-ResSim® in the study of new water sources in the Panama Canal, Journal of Applied Water Engineering and Research, Vol.6, pp.236-250.