

## 2次元氾濫計算を用いたサモア・アピア市街地の氾濫に関する考察

2D CALCULATION STUDY OF FLOOD DAMAGE IN URBAN AREA AT APIA, SAMOA ISLAND.

北海道大学大学院 工学研究科 ○学生員 岩田圭佑 (Keisuke Iwata)  
北海道大学大学院 工学研究科 正会員 清水康行 (Yasuyuki Shimizu)

### 1. はじめに

サモアの首都アピアでは、例年雨季に入ると都市部を流れる複数の河川が氾濫し、大きな被害が発生している。近年では、2001年の4月15-16日にかけての大雨の影響により、都市部が大きな被害を被っている。また2003年や2006年にも同様の氾濫が発生しており、このような氾濫に備えて水の流れや氾濫による危険性を知ることがとても重要な課題となっている。氾濫の特徴として、複数の河川がアピアの市街地や近郊を流れ太平洋に注いでおり、かつ市街地が太平洋に面して形成されていることから、氾濫は単一河川ではなく複数の河川の影響を受けると考えられ、さらには潮位による影響も考慮しなければならない。その一方で、それらの検討に必要な降雨量や流量といった水理・水文資料が乏しく、治水整備などが十分に行われているとは言いがたい。また、過去の洪水の歴史的な資料も乏しいため、氾濫の全体像をつかむことは非常に困難である。

そこで本研究では、第一に2001年4月氾濫を例に取り、流出解析で得られた流量を基に数値解析を行い氾濫を再現し、その特徴を考察することで、複数の河川が氾濫することによる、洪水時間全体の氾濫の様子を明らかにすることを目的とする。計算結果の検証は、現地での聞き込みや調査結果、参考資料を基に行った。

また、これによって確立された数値計算を用いることで、対象地域の地形特徴に基づく氾濫の様子についての考察や、氾濫と土地利用の関係性についての初期的な考察を行うこととする。これにより、将来の治水対策への活用だけでなく、歴史的な資料が不足している中で過去の氾濫を可視化し、過去の洪水に対してこの地域がどのような影響を受けてきたのかということや、土地利用の形態、都市形成と氾濫特性の関係性を見出すための重要な手がかりになり得ると考える。

流出解析については各種パラメータを確定する調査が不十分であったため、簡単な貯留関数法を用い流量を決定した。また、2次元の氾濫解析については、衛星による測量データを用い、著者らによる既往の研究など<sup>1),2)</sup>を参考に行った。

### 2. 現地の状況

#### (1) 解析対象地

解析対象地は、サモア・ウポル島の首都アピアを流れる複数の河川とその流域とする。図-1は解析対象地の位置を示し、図-2は解析対象地点の拡大図である。対象河川には、市街地を流れる中で最も流域面積の広い

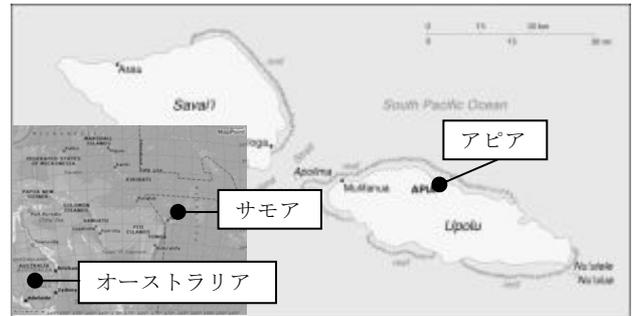


図-1 アピア位置図

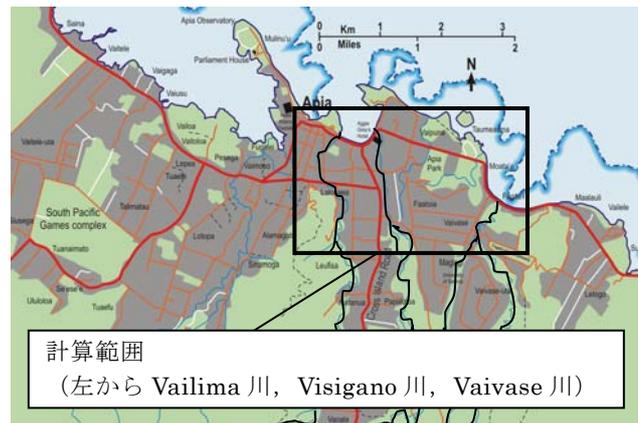


図-2 アピア市街地と解析対象地

Visigano 川と、その西隣にある、流域面積は狭いが都市部を流れ氾濫被害の出た Vailima 川、さらに、東隣にある Vaivase 川を選んだ。Vaivase 川を選んだ理由は、Visigano 川の治水対策として、本川から東に分岐して沼地に至る放水路を建設する計画があがっており、Vaivase 川が氾濫してこの沼地に影響を与えるようなことがあれば、それを考慮した計画にしなければならず、検討要素として加えておくべきと考えたためである。

#### (2) 氾濫の概要

2001年4月15日から16日にかけて、4時間ほどの間に約200mmの降雨が計測され、北部の海岸に沿った地域を中心に氾濫が広がったと推測されている。この氾濫により道路や水道管などインフラが大きな被害に遭い、5000人が住居の被害を受け、28000人が断水の影響を受けたとされる。この氾濫では Apia を含む東西約10kmの範囲にある5河川が氾濫したとされており、その特徴として、「外水氾濫と内水氾濫の複合的なものであったこ

と「流速が速かったこと」「鉄砲水のような現象があったこと」などが挙げられているが、それが具体的にどこでどのように発生したのかは述べられていない<sup>3)</sup>。地形から考えると、背後に急峻な山地が広がっており、市街地はその下流の扇状地のような地形上に形成されていることから、上流部の山地に降った雨が短時間のうちに河川流となり市街地に達し、広域で氾濫が広がったものと推測できる。Visigano 川を例にとると、流域最高部の標高は 1000m 以上に達しており、河口までの距離は 12.5km であるため、このようにそれぞれの河川が非常に急勾配な地形形状を流れて市街地に達することが、対象流域における氾濫の大きな特徴であるといえる。本研究では、以上の参考文献に述べられていた情報や、対象領域の特徴を踏まえ結果の考察を行う。

### 3. 解析方法

対象河川において、氾濫時に継続的な流量観測は行われていなかったため、降雨量のデータを基に流出解析を行いそれぞれの河川の流量を求め、それらを上流端へのインプットとして 2 次元の氾濫計算を行った。上流端の境界については、流量をインプットするそれぞれの断面を指定し、平均地盤高と勾配をもとに繰り返し計算でそれぞれの断面の初期水位、流量を求めた。また、下流端の境界条件としては同時刻に計測されていた潮位を与えた。

#### (1) 流出解析

先に述べたように、それぞれの河川の流量を現地の降雨データを基に貯留関数法から求めた。用いた連続式と貯留関数式をそれぞれ以下に示す。

$$\frac{ds}{dt} = fr - q \quad (1a)$$

$$s = Kq^p \quad (1b)$$

ここで、 $s$ ：みかけの貯留高、 $K$ 、 $p$ ：係数、 $q$ ：流出高、 $f$ ：流出率、 $r$ ：降雨量、 $t$ ：時間である。係数は  $K=5.0$ 、 $p=0.6$  を、流出率には  $f=1.0$ 、 $\Delta t=0.1$  として計算を行った。流出率については、表面の土地利用や地層構造を基に検討して与えるべきであったが、水文資料が少なく検討できないこと、地層構造を把握しておらず、降雨量以外の要素を含む  $f=1.0$  以上において検討材料がないこと、1.0 付近の値を用いることで今回の目的に対して十分な考察ができること、などを理由にこの流出率を用いた。また、同様の理由で、遅れ時間は考慮していない。流域面積は 3 秒メッシュの衛星地形測量データを用いて、落水線をたどり合計の面積を求めることによりその川の流域面積とし、Visigano 川で 34.2km<sup>2</sup>、Vailima 川で 4.3km<sup>2</sup>、Vaivase 川で 8.6km<sup>2</sup> として流量を求めた。求められた流量を図-3 に示す。参考文献<sup>4),5)</sup>では、Visigano 川の流量についてアピア近郊や上流部で流出解析が行われており、最大流量は約 530m<sup>3</sup>/s という結果が得られている。今回求められた流量もこれに近い値が得られているため、本研究ではこの結果を適用することとした。

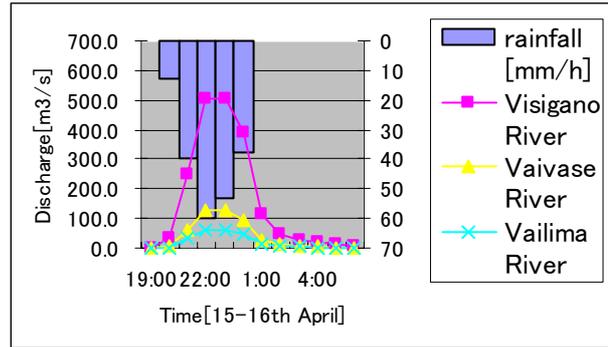


図-3 上流端流量

#### (2) 氾濫解析

計算は 2 次元非定常流、非圧縮流れの連続式および運動方程式をもとに行った。詳細は前出の参考文献<sup>1),2)</sup>に譲る。基礎式を以下に示す。

連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$x$  方向運動方程式

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2h)}{\partial x} + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \nu_t \frac{\partial(uh)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \nu_t \frac{\partial(uh)}{\partial y} \right] \quad (3a)$$

$y$  方向運動方程式

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2h)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \nu_t \frac{\partial(vh)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \nu_t \frac{\partial(vh)}{\partial y} \right] \quad (3b)$$

ここで、 $x, y$ ：格子座標、 $u, v$ ： $x, y$  方向の水深平均流、 $t$ ：時間、 $\rho$ ：水の密度、 $g$ ：重力加速度、 $h$ ：水深、 $H$ ：水位である。また、渦動粘性係数は

$$\nu_t = \frac{1}{6} \kappa u_* h \quad (4)$$

である。ここで  $\tau_x, \tau_y$  は  $x, y$  方向の河床せん断力で

$$\tau_x = \frac{\rho g n_m^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{1}{3}}}, \tau_y = \frac{\rho g n_m^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{1}{3}}} \quad (5a, b)$$

で表される。マンニングの粗度係数  $n_m$  は底面の土地利用状況に応じて変化させるべきであるが、詳細な建築物や植生の密度などといったデータが不足しているため、土地利用状況に応じた粗度係数を与えることは難しいと考えた。そこで、現地の河川周辺の状況と航空写真などから判断し、 $n_m$  は 0.05 で与えた。また、時間刻み  $\Delta t$  は 0.005 秒で与えた。

計算格子は 10m ごとの衛星地形測量データを 50m メッシュに加工したものを用いた。計算範囲は南北 2.1km、東西 3.1km である。計算範囲の鳥瞰図を図-4 に示す。

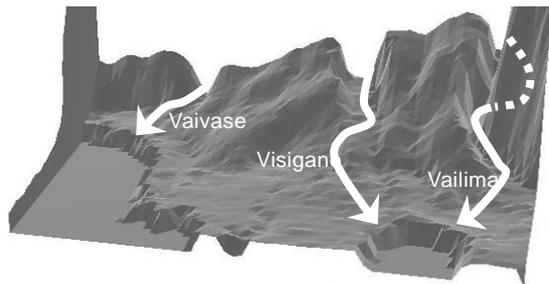


図-4 計算対象地鳥瞰図

#### 4. 計算結果

計算は午後9時から翌午前4時までの7時間にわたり行われた。午後9時から計算を開始し、上流端から求められた流量を与えて計算を進めた。水深コンターの時間変化を図-5, 6, 7, 8に示す。午後9時30分においてはすでに氾濫が広がり始めている様子がわかる。また、放水路が計画されている Visigano 川本流から沼地方面にかけても氾濫が同時に広がっていく様子が伺えた。これにより、このエリアに放水路を造れば、放水と流量カットが的確に行えることを計算結果でも示すことができたと言える。

午前0時30分頃には水深が最大となり、市街地と沼地が冠水している様子がわかる。また、放水路計画に影響を与えると考えられた Vaivase 川の氾濫に関しては、流速ベクトルを検討した結果、沼地へ若干の流入が見られるものの Visigano 川からの流入量が支配的であることがわかった。一方 Vailima 川と Visigano 川の氾濫については、今回の計算結果では流量の交換は見られず、氾濫域は独立していることがわかった。

午前3時になると、Visigano 川と Vaivase 川に沿った地域の氾濫は引いているのに対し、沼地や Vailima 川下流部においては水深の変化がほとんど見られなかった。Visigano 川については、'The flood rose at about 9:30 pm and was reported to have receded from most affected properties by 3am.'と述べられており<sup>6)</sup>、Visigano 川における氾濫の再現性は良好であると言える。

一方で、Vailima 川下流部と沼地については、7時間が経過した後も氾濫が引く様子は見られなかった。図-9に計算範囲における地盤高コンター図を示す。円印のある Vailima 川下流側や沼地は周囲より標高が低く水が溜まりやすい地形になっていることがわかる。Vailima 川はこの低地を右岸側に見て迂回するように流れており、1度水が溢れこの低地に氾濫が広がると、排水性に乏しく長時間の被害が予想される。この地は現在学校のグラウンドとして使用されているが、左岸側にはアピアの市街地が形成されており、都市のインフラ、特に下水などに悪影響を与えると考えられる。排水性の悪さは当初、湾内の海岸沿いに建設された堤防が原因の1つではないかと考えられていたが、これに加えて元々の地形的な特徴が排水性に支障をもたらしていることが計算結果からも再現できた。

次に、2-(2)で述べた氾濫の概要に基づいた考察を行う。「外水氾濫と内水氾濫の複合的なものであったこと」に

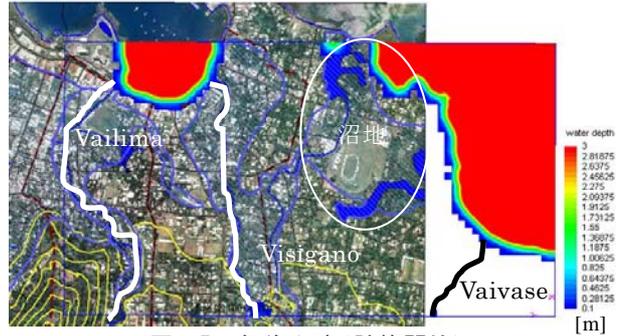


図-5 午後9時(計算開始)

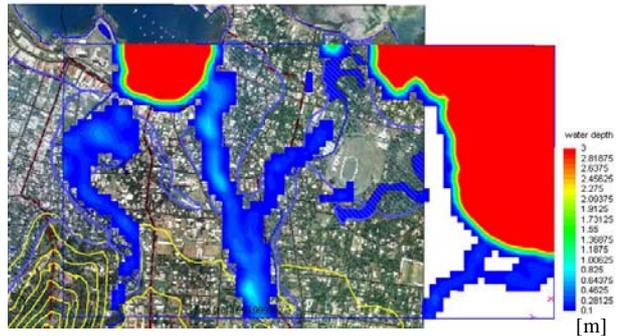


図-6 午後9時30分 水深コンター

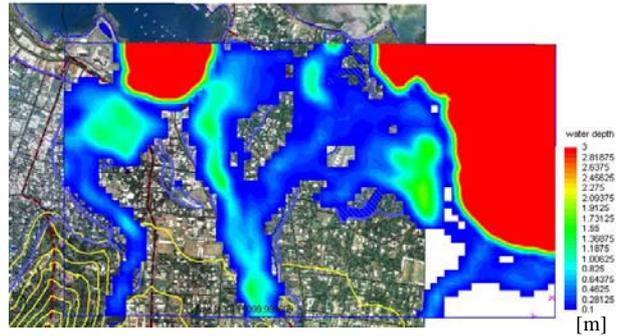


図-7 午前0時30分 水深コンター

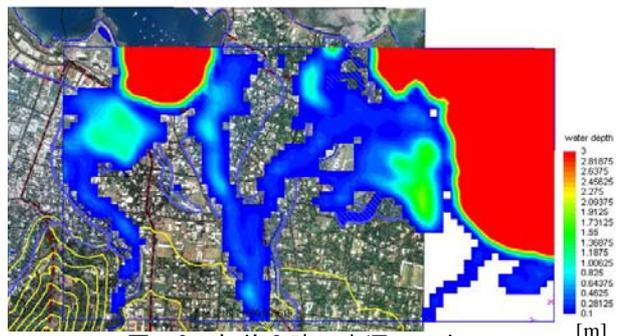


図-8 午前3時 水深コンター

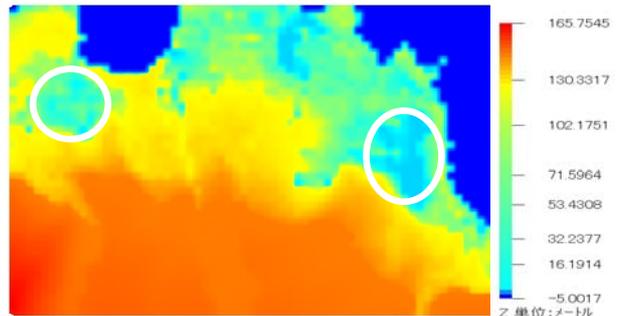


図-9 地盤高コンター図

については、まだ今回の計算方法では具体的な検討ができる段階ではなく、今後の検討課題である。「流速が速かったこと」「鉄砲水のような現象があったこと」については、**図-10**の流速コンター図にみられるように、Visigano川において流速が比較的大きい場所(白円)が見られた。航空写真から判別すると、この周辺には他の地域と比較して建築物が見られず、もともとこのような流速の速い氾濫に対して市街地が形成されづらい地域であったという関係性がうかがえる。

最後に、実績氾濫域と計算結果の比較を**図-11**に示す。黒い太線で囲んだ範囲が、現地の住民の情報を基に作成した実績氾濫域<sup>7)</sup>である。Vaivase川については情報が残っていなかった。これによると、Visigano川の氾濫域は計算によって概ね再現できていると言える。一方Vailima川については、氾濫の広がる様子は再現できたが、下流側で計算結果が実績氾濫域を超えているのが目立つ。これは、Visigano川より小さい河川であるため、同じスケールの格子で計算した結果再現性に影響が現れたためと考えられる。

## 5. まとめ

以上、サモアの首都アピアにおいて、2次元氾濫解析モデルを適用し、複数の河川による氾濫の様子を再現しその特徴を考察した。その結果、以下のことが確認できた。

- ・ 氾濫時の流路に放水路を造れば、放水と流量カットが的確に行えることを計算結果でも示すことができた。
- ・ Vailima川とVisigano川の氾濫については、今回の計算結果では流量の交換は見られず、氾濫域は独立している。
- ・ Vailima川周辺の市街地では、地形的な特徴が排水性に支障をもたらしていることが計算結果からも再現できた。

今後の研究の課題として、植生や建築物の影響を考慮したモデルの性能向上があげられる。さらに、今回の計算では上流端から同時に流量を与えたが、連続式または貯留関数式に遅れ時間を考慮するなどの改善すべき点がある。

氾濫特性と都市形成の関係性についてはまだ歴史的な議論はできていないが、なぜ地形的に排水性の良いVisigano川流域ではなく、排水性の悪いVailima川流域に市街地が発展してきたのかという疑問が挙げられる。これはあくまで推測に過ぎないが、**図-12**に見られるようにVisigano川の流速はVailima川に比べて速く、頻繁に発生する洪水から大きな被害を避けるためにVailima川周辺から市街地が形成された可能性もある。また、流速の速い氾濫に対して市街地が形成されづらい地域があることがうかがえ、都市形成と氾濫特性の関係性を見出すことが今後も期待できる。このように、氾濫と都市形成、防災の関係性を考える上で数値計算を用い、氾濫を可視化することの有用性が得られた。

放水路計画が考えられている湿地周辺には、マングローブが生息しており、サモアの伝統的高床式住居(ファ

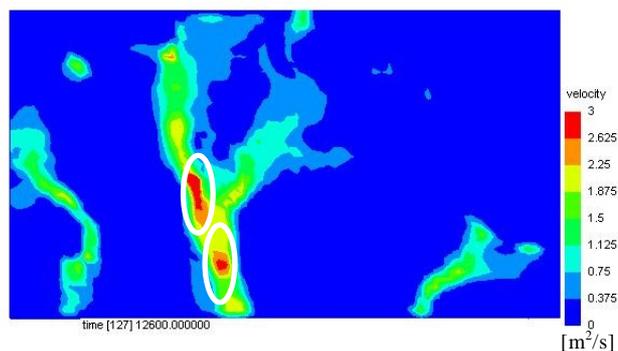


図-10 午前0時30分 流速コンター図

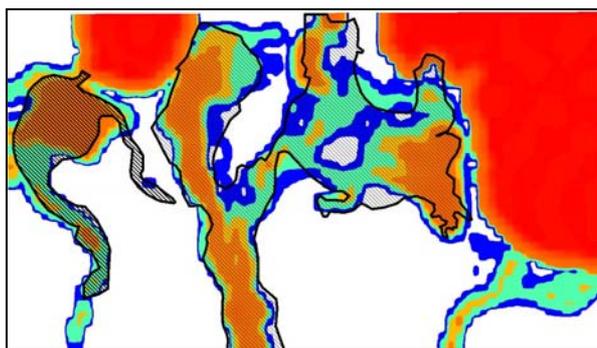


図-11 実績氾濫域と計算結果の氾濫域の比較

れ)も多く見られる。現地の河川は頻繁に発生する洪水によって土砂堆積が速い速度で進んでいる<sup>8)</sup>。今回の計算では土砂輸送は考慮されていないが、放水路計画を進める際には土砂輸送に関する検討も行い、湿地の環境に与える影響について認識する必要がある。これは環境問題のみならず、サモア独特の建築物であるファレの保存といったことにもつながる問題であるため、本研究を進展させて今後も検証していきたい。

## 参考文献

- 1) 長谷川善彦, 清水康行: 平成15年台風10号による北海道厚別川の洪水氾濫とその再現計算, 水工学論文集, 第49巻, 2005.
- 2) 岩田圭佑, 清水康行: 沙流川の氾濫シュミレーション, 土木学会北海道支部論文集, 2004.
- 3) Stephen Yeo: A Review of Flooding in Apia, Samoa, April 2001, P8, 2001年7月.
- 4) SOPAC Technical Report/ Capacity Building in Flood Risk Management, P23-P24, 2006.
- 5) Government of Samoa/Department of Public Works/Flood Study of the Occurrence 15-16th April 2001 Flooding areas of the APIA Township, P5, 2001.
- 6) 前出3) P8
- 7) 前出4) P41
- 8) Terry James P., Kostas Chuk Ray A., Garimella Sitaram: Sediment Deposition rate in the Falefa River basin, Upolu Island, Samoa, J Environ Radioact Vol.86, 2006.