

人工衛星地形データの精度評価および 洪水氾濫シミュレーションへの適用

A STUDY ON ACCURACY OF SATELLITE-BASED TOPOGRAPHICAL DATA AND ITS APPLICABILITY TO FLOOD INUNDATION SIMULATION

猪股広典¹・田中茂信¹・深見和彦¹・山下英夫¹

Hironori INOMATA, Shigenobu TANAKA, Kazuhiko FUKAMI and Hideo YAMASHITA

¹正会員 工修 独立行政法人土木研究所 水災害リスクマネジメント国際センター
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

Three satellite-based topography data (ALOS PRISM, ASTER and SRTM) were compared with laser profiler data to check their accuracy and inundation simulation was conducted by using those satellite-based topography data. The experimental area was Nakanoshima area in Kariyata River Basin in which there was the big flood disaster in 2004. As a result of the comparison with the laser profiler data, ALOS PRISM and SRTM showed similar error characteristics in the experimental area and ASTER showed inferior to them. However, ALOS PRISM showed gurge shape which SRTM does not have in that area. Result of inundation simulation showed that none of them could simulate the actual inundation process but SRTM showed better result than ALOS PRISM and ASTER.

Key Words : *Satellite-based topographical data, laser profiler, flood inundation simulation*

1. はじめに

洪水被害対策を立案するにあたっては、洪水流出計算による洪水流量の計算や、その結果に基づいて対象とする地域における洪水氾濫シミュレーションの実施による洪水氾濫特性の把握が行われる。しかし、洪水被害が多く発生する、または洪水対策が十分でない開発途上国を中心とした国々においては、洪水流出計算を行うための降雨量情報および流出計算モデル、洪水氾濫シミュレーションを行うために必要となる高精度な地形データが十分でない、または存在しないことが多い。前者の課題である開発途上国における洪水流出計算については、人工衛星雨量データの精度検証¹⁾および総合洪水解析システムの開発²⁾など現在までにいくつかの試みが行われてきている。しかし、後者の課題である洪水氾濫シミュレーションについては、詳細な地形データが入手可能な先進国を対象とした研究や、アルゴリズムの高度化に関する研究事例は多く見られるが^{3,4)}、開発途上国のような高精度な地形データの入手が困難な地域を対象とした検討事例は少ない。このような状況の中、ALOS PRISMやSRTMに代表される人工衛星により観測された高分解能

の全球地形データが廉価または無料で利用できる状況になってきている。特にALOSは2006年1月に打ち上げられた衛星で、搭載されているPRISMセンサーによる高分解能標高データが取得可能であり、開発途上国における洪水氾濫シミュレーションへの利用が強く期待される。人工衛星により観測された地形データの洪水氾濫シミュレーションへの適用としては、既に岩田ら⁵⁾がサモアの首都アピアを対象とした2次元氾濫シミュレーションを実施しているが、用いたデータの精度や仕様については述べられていないため、その知見を他の検討に適用することができない。そこで本研究では、詳細な地形データの入手が困難であることが想定される開発途上国を対象とした洪水氾濫シミュレーション実施に資する、人工衛星地形データの洪水氾濫シミュレーションへの適用性についての検討を行う。

開発途上国における洪水氾濫の空間的規模は、メコン河のように日本の洪水氾濫と比較して非常に広大なものもあれば、ネパール南部の低平地のように、数十km²という比較的狭い範囲で洪水が生じるものまで様々である⁶⁾。本研究では、比較的狭い領域で生じる洪水氾濫を念頭に、人工衛星地形データの洪水氾濫シミュレーションへの適用性を検討する。具体的には、人工衛星地形デー

タの精度検証用として高精度高分解能地形データであるレーザープロファイラーデータ（以下LP）が利用でき、かつ2004年7月に数十km²の範囲で発生した洪水氾濫域の情報⁷⁾が利用可能である刈谷田川流域の中之島地区を対象として、LPとの比較を通じた衛星地形データの精度検証および洪水氾濫シミュレーションへの適用性を検討する。本研究では、衛星地形データとしてALOS PRISMデータ、ASTERデータおよびSRTMデータの3つを扱う。

2. 対象地域および使用するデータについて

(1) 検討対象地域

1. の最後に述べた理由から、本検討対象地域は日本の刈谷田川流域の中之島地区とした。

(2) 用いた地形データ

ここでは3種類の人工衛星地形データおよび検証用のLP（国土地理院2mメッシュ標高データ（中越））を用いた。それぞれのデータの概略を表-1に示す。

3. LPと人工衛星地形データの比較

(1) 標高分布図での比較

それぞれの標高分布図の概観の違いについて確認することを目的として、表-1に示したオリジナルの解像度で各データの標高分布を表示したものが図-1の着色部分である。図-1の着色部分は、次節で述べる洪水氾濫シミュレーションの計算領域と同じ範囲（東西方向：約4km，南北方向：約12km）で設定した。図-1の左上に示すLPでは、南から北に向かって緩やかに標高が低くなることを確認できる。また、南から北に向かって刈谷田川が流れ、図の北東部分で北西から流れてくる信濃川と合流することが確認できる。図-1左下に示してあるASTERは、標高値の振動が大きいいためこの図からは上述したようなLPから得られる地形に関する情報を得ることは難しく、また平均的にLPと比較して標高が低いことが分かる。図-1右下に示すSRTMについても、メッシュサイズが90mと比較的粗いため、実際の細かい地形情報を得ることは難しいが、南から北に向かって標高が低くなることは確認できる。図-1右上のALOS PRISMの場合、南から北に向かって標高が低くなることを確認することは難しいが、標高図から河川の位置や堤防の存在を確認することができる。しかし同時に、図の中央付近にLPやその他の地形データでは確認されないうねりが存在することが確認された。

(2) メッシュ標高値の比較

次に、図-1に示す領域を対象として、各データの標高

表-1 LPおよび各人工衛星地形データの概略

DEM	解像度	概要
LP	2 m	航空機レーザー測量により観測
ALOS PRISM	10 m	ALOS PRISMセンサーのデータをステレオマッチング処理により作成
ASTER	15 m	ASTERセンサーのデータをステレオマッチング処理により作成
SRTM	90 m	スペースシャトル搭載SARセンサーのデータから作成

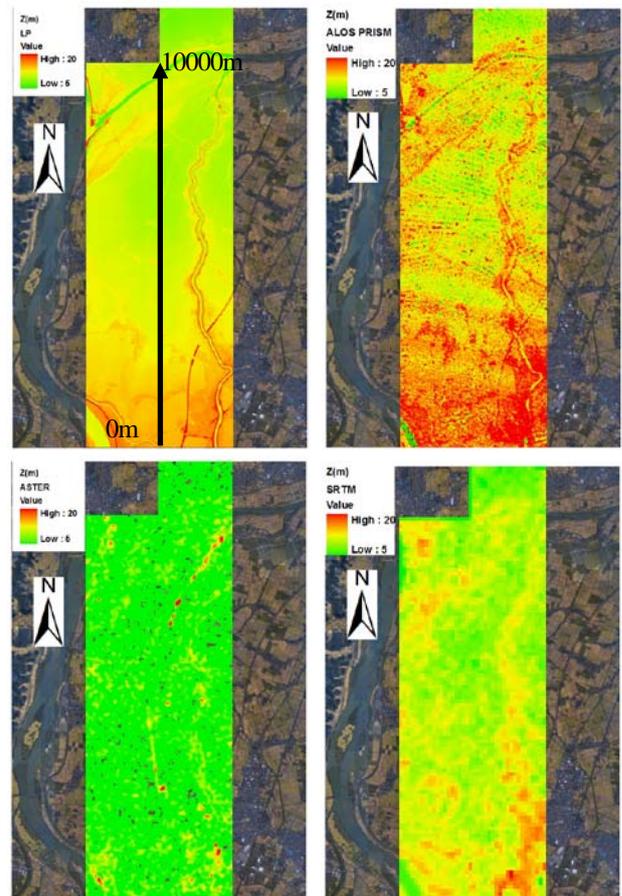


図-1 LP（左上）、ALOS PRISM（右上）、ASTER（左下）、SRTM（右下）の標高分布図（各図左上の矩形に切り込まれている箇所は、氾濫シミュレーションに関係しない範囲なので検討対象からは除外した。LPに示された黒直線は、3. (4)で行う標高縦断の検討箇所である。）

値の精度評価を行う。

a) 比較検討範囲

比較検討の範囲は、図-1において標高分布が示されている範囲（色が塗られている範囲）とした。

b) 比較方法

今回の検討では、LPを真値として各人工衛星地形データの精度検証を行う。各人工衛星地形データのオリジナル解像度での精度評価に加えて、メッシュサイズを統一させて3つの衛星地形データの精度を評価する。具体的には、以下の2通りについて精度の検証を行った。

- 1) 表-1 に示す各地形データのオリジナルのメッシュサイズでの比較
- 2) 3 種類の人工衛星地形データのメッシュサイズを 25m および 100m に平均化して比較

c) 空間平均化方法

1)の各地形データのオリジナル解像度での比較では、最初に検証対象グリッドとして、対象領域内にメッシュサイズ100mのグリッドを敷き詰め、次にLP, ALOS PRISM, ASTERおよびSRTMをそれぞれのオリジナル解像度で対象領域内に展開する。先に敷き詰めたメッシュサイズ100mの検証対象グリッドから最も近いLP, ALOS PRISM, ASTERおよびSRTMそれぞれのグリッドの標高値を抽出し、LPを真値としてALOS PRISM, ASTERおよびSRTMの精度を評価した。検証対象グリッドにおいてのみ比較を行うため、オリジナル解像度が異なる3種類の衛星地形データを同じサンプル数で比較することができる。2)の場合、メッシュサイズ25mおよび100mのグリッドを対象領域内に敷き詰め、次にLP, ALOS PRISM, ASTERおよびSRTMをそれぞれのオリジナル解像度で対象領域内に展開する。メッシュサイズ25mのグリッドおよび100mのグリッドの中には各地形データの複数の標高値が含まれるため、各25mグリッドおよび100mグリッドの中に含まれるそれぞれの標高値を平均することで各地形データの25mメッシュ値、100mメッシュ値とした。そして、先に述べた100mの検証対象グリッドに最も近い各地形データの25mおよび100mメッシュ値同士を比較した。なお、SRTMについてはオリジナル解像度が90mであるため25mメッシュでの平均化は行わず、100mメッシュでの平均化のみを行った。

d) 精度評価項目

ここではRMSE (式(1))、平均誤差 (式(2)) および標準偏差 (式(3)) を精度評価項目として用いた。それぞれの定義式を以下に示す。

1) 平均二乗誤差(RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_{Sat_i} - H_{LP_i})^2} \quad (1)$$

ここで、 N : 評価ポイント数、 H_{Sat_i} : ALOS PRISM、

ASTERまたはSRTMの標高値、 H_{LP_i} : LPの標高値

2) 平均誤差(M)

$$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_{Sat_i} - H_{LP_i}) \quad (2)$$

3) 標準偏差(SD)

標準偏差は衛星地形データの標高値からLPの標高値を差し引いた差分値の、平均誤差値からのばらつきを示す。

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{(H_{Sat_i} - H_{LP_i}) - M\}^2} \quad (3)$$

e) 比較結果

ALOS PRISM, ASTERおよびSRTMのオリジナルメッシュサイズ、25mメッシュ、100mメッシュに平均化し、比較した結果を表-2、表-3、表-4に示す (SRTMについては25mを省く)。なお、今回の検討では精度評価ポイント数は4,184個であった。

ALOS PRISMデータについて

- 平均誤差は 1.7m~1.9m 程度となり、LP と比較して ALOS PRISM は高い標高を示した。
- メッシュサイズが大きくなるにつれて RMSE および標準偏差は小さくなり、メッシュサイズの平均化を行うことで、各メッシュの誤差が平均化され、ばらつきが低減されることが確認された。

ASTERデータについて

- 平均誤差はメッシュサイズの影響をあまり受けず、その大きさは-8.5m であり、LP と比較して低い標高を示していることが分かる。
- RMSE および標準偏差もメッシュサイズを大きくしてもそれほど小さくならない。ALOS PRISM が示したような、平均化に伴う誤差、標準偏差の低減が確認できなかった。

SRTMデータについて

- 平均誤差はメッシュサイズに依らず概ね-1.4m 程度となり、LP と比較して SRTM はやや低い標高を示していることが分かる。
- RMSE および標準偏差もメッシュサイズを大きくしてもそれほど影響を受けない。

ALOS PRISM, ASTERおよびSRTMを100mメッシュサイズで比較してみると、ALOS PRISMおよびSRTMは平均誤差に違いがあるものの、RMSEと標準偏差ではほぼ同様の結果が得られた。平均誤差については、ALOS PRISMが1.7m過大に、SRTMが1.4m過少に評価している。一方で本検討においてASTERは、平均誤差の絶対値、RMSEおよび標準偏差についてALOS PRISMおよびSRTMと比較して精度が劣ることが分かった。

(3) 標高縦断面図での比較

空間平均を行うことにより、衛星地形データから得られる地表面の形状がLPにどれだけ近づくかを視覚的に確認するために、LP, ALOS PRISM, ASTERおよびSRTMのオリジナルの解像度と100mメッシュに平均化したデータの縦断面図を比較した (SRTMについてはオリジナル解像度が90mであり100mに近いことから、100mに平均化したものだけを調べた)。ここでは、図-1に示された上流から下流 (図-1の南から北) に向かう距離約10,000mの直線上の縦断標高を調べた。縦断検討箇所は、上流側から農地を抜け、約8,000mの地点に市街地が存在

表-2 ALOS PRISMデータ精度評価結果

	RMSE	平均誤差	標準偏差
オリジナル 10m	3.7	1.9	3.2
25m	3.3	1.8	2.8
100m	2.6	1.7	1.9

表-3 ASTERデータ精度評価結果

	RMSE	平均誤差	標準偏差
オリジナル 15m	9.4	-8.5	3.9
25m	9.3	-8.5	3.8
100m	9.1	-8.5	3.2

表-4 SRTMデータ精度評価結果

	RMSE	平均誤差	標準偏差
オリジナル 90m	2.6	-1.4	2.2
100m	2.3	-1.4	1.9

し約10,000m地点で信濃川に到達する。図-2にLPを含めた各標高データの標高縦断面図を示す。LPより、上流側から下流側に向かって農地を緩やかに下り、市街地が現れる約8,000m地点で標高が上がり、信濃川が現れる10,000m地点で標高が下がる傾向が確認できる。ALOS PRISMについても、8,000m地点まで標高が下がり続け、そこから市街地の部分で一度標高が高くなり、信濃川との合流部分で標高が下がる傾向は確認できるものの、LPと比較して標高値の振動が大きいが確認できる。オリジナル解像度10mのデータを100mに平均化することで、標高の振動がある程度除去できたがLPと比較すると依然として振動が大きい。また、図-1において確認されたうねりについては、約4,000m地点に窪みが確認され、うねりの波長が約1,000m程度あるので100mメッシュに平均化しても除去されなかった。ASTERに関しては、LPと比較して全体的に標高が低く、また上述したような農地を緩やかに下り、市街地で標高が上がる傾向を確認することは難しく、空間平均による誤差低減効果もあまり見られなかった。SRTMについては、全体的な傾向はLPと同じ傾向が確認できる。振動についてもALOS PRISMおよびASTERと比較して比較的抑えられているが、LPと比較すると依然大きいことが確認できる。

4. 人工衛星地形データを用いた洪水氾濫シミュレーション

(1) 検討の概要、流れ

前節で精度評価を行った領域を対象として、ALOS PRISM、ASTERおよびSRTMを標高のデータとして洪水

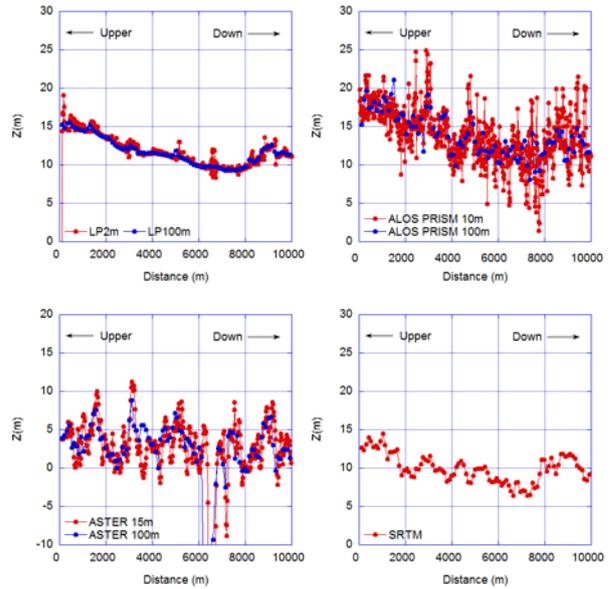


図-2 LP (左上) , ALOS PRISM (右上) , ASTER (左下) , SRTM (右下) の標高縦断面図

氾濫シミュレーションを行い、洪水氾濫シミュレーション結果に与える影響を検討する。検討の流れは以下のとおりである。

- LPを用いて洪水氾濫シミュレーションを行う。
- LPを用いたシミュレーション結果と検証データを比較してシミュレーション結果の妥当性を評価する。シミュレーション結果の妥当性が示されない場合、粗度等の設定を再度行ってシミュレーションを行う。ここでは、衛星地形データを用いた洪水氾濫シミュレーションでは数百メートル規模のエリア内の浸水深を再現することは難しいことが想定されるため、国土地理院の調査で調べられた、2004年7月洪水による刈谷田川破堤地点から信濃川の合流点までの広域の洪水浸水範囲を検証データとした⁷⁾。
- シミュレーション結果の妥当性が示されたら、LPをALOS PRISM、ASTERおよびSRTMに変えて氾濫シミュレーションを行い、地形データの違いが氾濫シミュレーション結果に与える影響について検討を行う。

(2) LPを用いた2004年7月洪水再現計算

a) 洪水氾濫モデル

今回の検討では、土木学会水理公式集平成13年版に掲載されている平面二次元の洪水氾濫シミュレーションモデル⁸⁾を用いる。

b) メッシュサイズ

今回の検討では、対象領域の土地利用について農地、水田が主体的で、勾配も比較的が緩いこと、対象領域の大きさがおおむね50km²であることから、100mで行うこととした。

c) 破堤流量の設定

参考文献9)では「破堤あり」および「破堤なし」の二つの条件について破堤地点の河川流量ハイドログラフを推定している。ここでは、その二つの条件で得られた河川流量ハイドログラフの差を、実際に破堤地点から氾濫域に流入した流入量と仮定して氾濫シミュレーションの入力とした。図-3に想定した破堤流量ハイドログラフを示す。



図-3 破堤流量のハイドログラフ

d) 施設等の取扱い

今回は衛星地形データの精度について初期検討することが目的であり、狭い範囲での浸水深ではなく、広域の浸水範囲を検証の対象とすることから、水路等の施設の影響は考慮しないこととした。

e) 洪水氾濫再現シミュレーションの結果

以上の条件を設定し、計算時間間隔1.0秒で洪水氾濫シミュレーションを実施した。図-4に氾濫域が定常となる破堤後13時間後のシミュレーション結果と国土地理院の調査による洪水氾濫エリアの実績図を示す。図-4より、シミュレーション結果と洪水氾濫域の実績はおおむね良好な整合を示したため、地形データ以外の設定をそのままにして、LPをALOS PRISM、ASTERおよびSRTMに置き換えて氾濫シミュレーションを実施し、それぞれの違いを検討することとした。

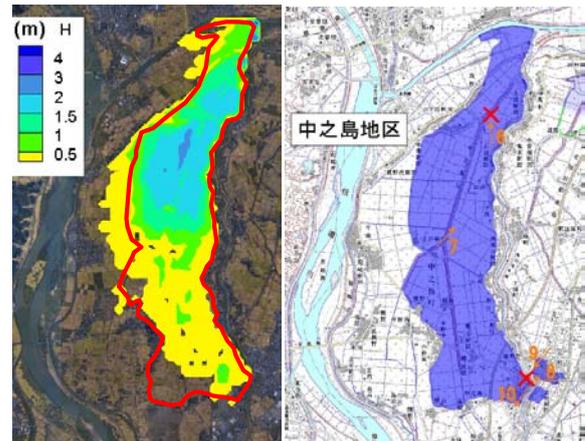


図-4 洪水氾濫域再現シミュレーション結果図（左：シミュレーション結果、右：洪水氾濫実績⁷⁾）

(3) ALOS PRISM、ASTERおよびSRTMを使った洪水氾濫再現シミュレーション

図-5に破堤後9時間後（LPによるシミュレーション結果において、信濃川と刈谷田川の合流点に氾濫がほぼ到達する時間であると同時に、氾濫範囲についても概ね定常状態に達する時間である。）のLP、ALOS PRISM、ASTERおよびSRTMを用いて計算された氾濫浸水図を示す。図-4よりALOS PRISMの場合、3(1)、3(3)で述べたように図-1の中央付近にLPには見られないうねりが存在するためにそのうねりに氾濫水が溜まり、そこより下流側に氾濫水が進行しない結果となった。ASTERの場合、標高データの振動自体が大きいため、洪水が下流まで流れない結果となった。SRTMはALOS PRISMおよびASTERと比較すると氾濫域の広さはLPによるシミュレーション結果に最も近い。しかし、LPによるシミュレーションでは9時間後に氾濫水の先端が信濃川と刈谷田川の合流点に概ね到達するのに対し、SRTMによるシミュレーション結果ではそこまで達しておらず、洪水の進行速度が実際よりも遅い結果となった。

6. 洪水氾濫シミュレーションについての考察

本研究では、数十km²の比較的狭い空間で発生する洪水氾濫を想定し、衛星地形データの適用性を検討した。その結果、図-4のシミュレーション結果から分かるように

どの衛星地形データも現実の結果を良好に再現することはできなかった。これは、衛星地形データの精度に依存するものである。オリジナルの解像度が10mであるALOS PRISMは、100mに平均化することで、その平均誤差やRMSE誤差といった統計量について誤差を低減できることは確認された。しかし、図-2の縦断面図から分かるように、ALOS PRISMやSRTMは全体的な標高の傾向は現実を再現しても、100m程度の平均化ではその標高値の振動を完全に除去することはできなかった。LPと比較して標高の振動が大きいため氾濫水の進行速度が遅くなり、現実の再現に至らなかったと考えられる。衛星地形データを用いた洪水氾濫シミュレーション結果が現実を再現するためには、標高値の振動を除去することが必要と考えられる。このことから、衛星地形データを洪水氾濫シミュレーションに対して適用するためには100mよりも大きいサイズに平均化することが求められ、その場合、本検討で取り扱った数十km²程度の洪水氾濫に対して適用することは、計算領域に対してメッシュサイズが大きくなってしまいうため困難と考えられる。よってALOS PRISMやSRTMを用いて現実の洪水氾濫を再現するためには、今回検討を行った比較的狭い範囲での洪水氾濫ではなく広域の洪水氾濫を対象としてメッシュサイズを大きく平均化して適用することが条件として考えられる。今回検討を行った比較的狭い範囲での適用性を向上させるためには単純な空間平均化だけでなく標高値

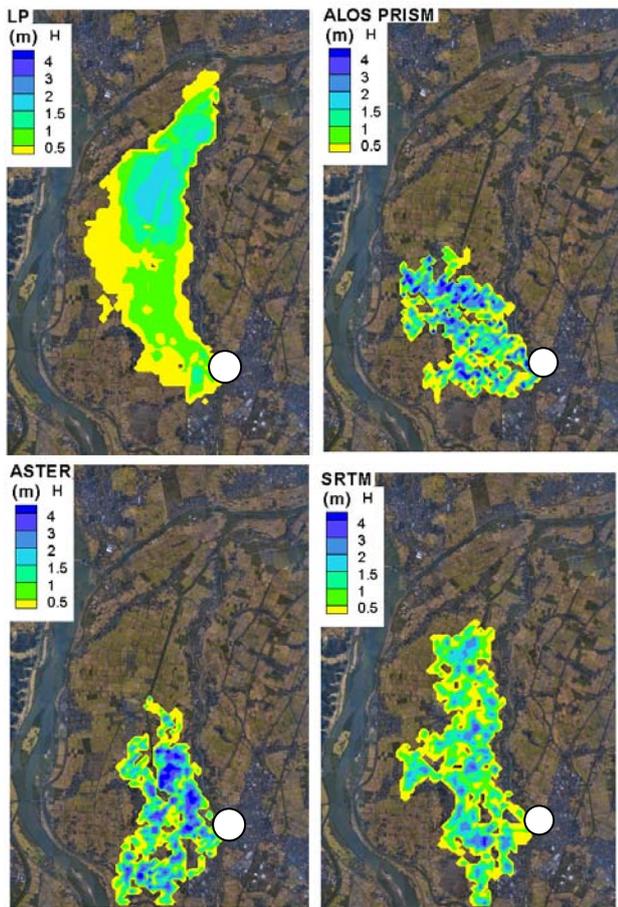


図-5 破堤後9時間後の洪水氾濫シミュレーション結果（水深分布図）（左上：LP，右上：ALOS PRISM，左下：ASTER，右下：SRTM，○印：破堤地点）

を統計的に補正する方法を別途考える必要がある。

7. まとめと今後の課題

本研究で得られた知見・課題は以下の通りである。

(1) 地形データとしての精度

- ASTERおよびSRTMはそれぞれ標高値が持つ振動およびメッシュサイズの粗さの影響で河川や堤防の位置をはじめとした地形の情報を得ることは難しかった。その一方でALOS PRISMはメッシュサイズが3者の中で最も分解能が細かいため河川の位置や堤防の位置が標高分布図からも確認することができた。
- ALOS PRISM, ASTERおよびSRTMを100mメッシュサイズに統一して比較した場合、平均誤差についてそれぞれ+1.4m, -8.5m, -1.4mという結果が得られた。またRMSEと標準偏差についてはALOS PRISMとSRTMでおおむね同じ値を示したのに対し、ASTERはその二つと比較して精度が劣った。
- 縦断面図で比較を行ったところ、ALOS PRISMおよびSRTMは全体的な標高の傾向は現実を表現していたが、100mメッシュに平均化を行っても標高値の振動がLP

と比較して大きかった。

(2) 洪水氾濫シミュレーションへの適用性

刈谷田川の中之島地区における2004年7月洪水の再現シミュレーションを3種類の衛星地形データを入力データとして氾濫シミュレーションを実施した結果、どの衛星地形データも良好な再現性を得ることができなかった。衛星地形データの標高値の振動が現実と比較して大きいことが主な原因と考えられる。

(3) 今後の課題

今回検討を行った範囲よりも広い範囲で発生した洪水氾濫を対象として、衛星地形データを大きく平均化することで適用性の検討を行う。今回対象としたような狭い範囲での洪水氾濫に対する適用性を向上させるための検討として、標高データの補正方法についての検討を行う。

謝辞：本研究で用いたASTERデータは、地球観測グリッド（GEO Grid）を通じて頂戴しました。

参考文献

- 1) Inomata H., K. Fukami: Application of a distributed hydrological model to the Pursat River Basin based on satellite-based rainfall data, Proceedings of “Mekong Research for the people of the Mekong”, pp.209-214, October 2006, Chiang Rai, Thailand
- 2) 土木研究所：総合洪水解析システム（IFAS Version 1.2）ユーザーズマニュアル，<http://www.icharm.pwri.go.jp/research/ifas/index.html>，2010年6月
- 3) 関根正人，中村淳，中村康朋：河川からの越水を伴う都市域の内水・外水氾濫課程に関する数値解析，水工学論文集，第52巻，pp.865-870，2008年2月
- 4) 椿涼太，藤田一郎，岡部健士：航空レーザー測量を用いた高解像度非構造格子の自動生成と氾濫解析，土木学会論文集B，Vol.62，No.1，pp.41-52，2006
- 5) 岩田圭佑，清水康行：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，水工学論文集，第52巻，pp.835-840，2008年2月
- 6) Osti R: A Feasibility Study on Integrated Community Based Flood Disaster Management of Banke District, Nepal, Technical Note of PWRI No.4122, 2008
- 7) 国土地理院：平成16年7月新潟・福島豪雨による冠水区域図（三条・見附・中之島地域），http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/SAIGAI/16niigata/higai-zyoukyou-niigata_suigai.html，
- 8) （財）土木学会：水理公式集例題プログラム平成13年版，pp.16，2002
- 9) 7.13 新潟豪雨洪水災害調査委員会：7.13 新潟豪雨洪水災害調査委員会，2005

(2009. 9. 30受付)