

1.4 水災害リスク評価のための衛星地形データの活用手法の研究（1）

1.5 水災害リスク評価のための衛星地形データの活用手法の研究（2）

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 20～平 22

担当チーム：水災害研究グループ（水文）

研究担当者：田中茂信、深見和彦、猪股広典、
山下英夫

【要旨】

人工衛星由来の地形データをレーザープロファイラーデータ（LP データ）と比較することによる精度の検証および氾濫シミュレーションに適用するための衛星地形データ処理手法の開発を行った。衛星地形データは LP データと比較すると精度に劣り、100m 程度の単純平均では、氾濫シミュレーションによる氾濫域の再現にも利用できないことが分かった。そこで、SRTM 衛星地形データについては、フーリエ解析およびローパス平滑化フィルタを適用してノイズを除去することで LP データとの適合性を改善し、洪水氾濫シミュレーションの再現性を向上させた。ALOS-PRISM 等の光学系センサデータの精度改善手法については、今後の課題が残された。また、衛星地形データを活用して水災害リスクを評価する手法の開発を行った。

キーワード：衛星地形データ、レーザープロファイラー、誤差修正、水災害リスク評価

1. はじめに

近年、東南アジア等の発展途上国を中心として洪水被害件数、規模が拡大する傾向がある中で¹⁾、事前対応の重要性が指摘されている。しかし、構造物対策を進めることがむずかしい発展途上国においては、洪水のリスク評価を行い、その結果を土地利用等の非構造物対策に反映させることが有用な手段と考えられている。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、その結果に基づいた対象地域での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発展途上国を中心とした国々においては、洪水シミュレーションを行うために必要となる地形データが十分でない、または存在しないことが多い。そこで、地球観測衛星由来の地形データを活用することが望まれる。しかし、衛星地形データは水災害リスクを評価する視点からの精度評価と活用性の実証がなされていないため、すぐに現場で利用できる段階にはない。

そこで本研究では、発展途上国に広く見られる低平な氾濫原において、信頼性の高い氾濫解析を行うために必要となるデジタル標高データを確保し、衛星地形データを水災害評価に用いることを目的として以下の項目について検討を行った。

- 地形再現精度の検証
- 浸水計算のための最適な地形データ処理手法の開発
- 衛星地形データを活用した水災害リスクの評価手法の開発
- 衛星地形データ活用教材の作成

2. 地形再現精度の検証

2.1 対象地域および用いたデータ

新潟県刈谷田川流域を対象として検証を行った。刈谷田川流域では 2004 年 7 月に大規模な出水が発生し、堤防の破堤により、広い範囲で洪水氾濫被害が発生している²⁾³⁾。この地域では、航空機によるレーザープロファイラーデータ（以下、LP データ）により、詳細な地形データの取得が可能である。そのため、本研究の検討項目である地形の再現精度検証および洪水氾濫シミュレーションへの適用性検討において、必要な情報の取得が可能である。

本研究で検討を行う衛星地形データとして陸域観測技術衛星「だいち」による ALOS PRISM データ、NASA の人工衛星に搭載された経済産業省開発の高性能光学センサーによる ASTER データおよびスペースシャトルによる SRTM データをとりあげた。地形データおよび LP データの概要を表-1 に示す。

表-1 LP データおよび各人工衛星地形データの概要

DEM	解像度	概要
LP	2m	航空機レーザー測量により観測
ALOS PRISM	10m	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	15m	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	90m	スペースシャトル搭載の SAR センサーのデータから作成

2. 2 LP データと衛星地形データの比較

2.2.1 目視による比較

それぞれの標高分布図の違いを目視で確認するために、図-1 に LP データ、ALOS PRISM、ASTER、SRTM の標高分布図を示す。

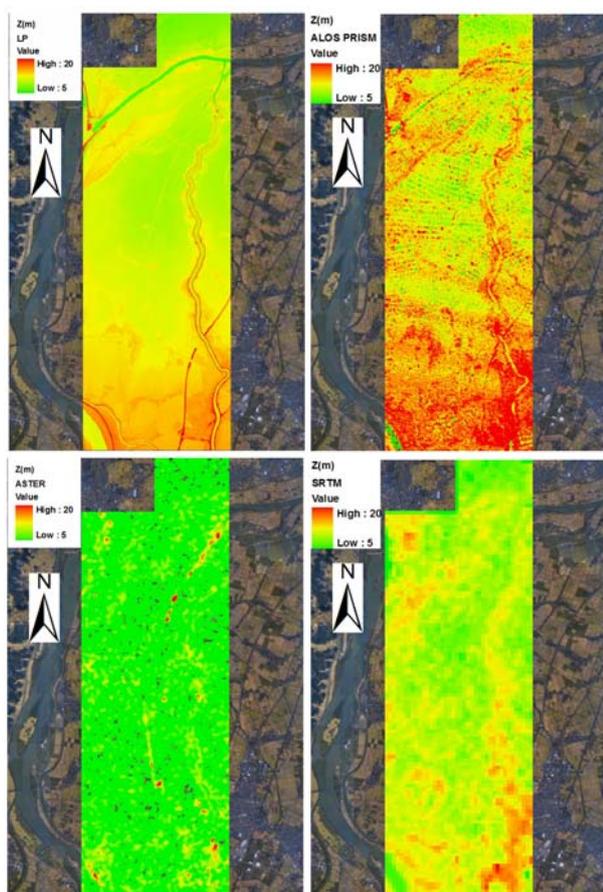


図-1 LP データ (左上)、ALOS PRISM (右上)、ASTER (左下)、SRTM (右下) データの標高分布図

図-1 より、ASTER は標高値のバラつきが大きいためこの図からは実際の地形に関して情報を得ることは難しい。SRTM についても、メッシュサイズが 90m と他と比較して粗いため実際の地形について情報を得ることは難しい。一方で ALOS PRISM の場合、標高分布図から

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 データには見られない明確な「うねり」が存在することが確認された。

2.2.2 メッシュ標高値の比較

オリジナルのメッシュサイズでの比較と、100m 移動平均によりメッシュサイズを 100m に変換した場合の比較を行った。精度評価にあたり、LP データを真値とした場合の鉛直方向の平均二乗誤差 (RMSE) および、経度方向断面の標高プロファイルと比較した。それらの結果を表-2 および図-2 に示す。

表-2 LP データを真値とした場合の誤差

	ALOS PRISM	ASTER	SRTM
RMSE (オリジナルデータ)	3.7m	9.4m	2.6m
RSME (100m 平均)	2.6m	9.1m	2.1m

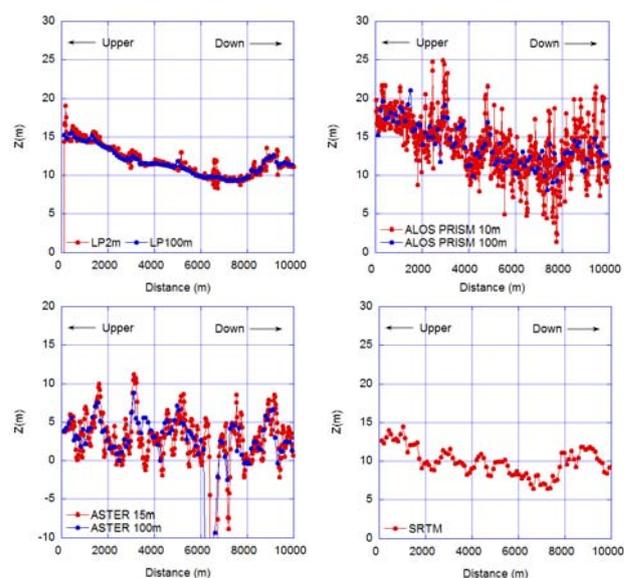


図-2 経度方向断面標高プロファイルの比較

(LP データ (左上)、ALOS PRISM (右上)、ASTER (左下)、SRTM (右下) データ)

表-2 より、100m 程度の平均化では地形データの乱れ成分を十分小さくできないことが分かる。ASTER は RMSE が他よりも大きく、ALOS PRISM および SRTM と比較して精度が劣ることが分かった。

図-2 から、ALOS PRISM、SRTM は 100m 移動平均することで、標高の乱れ成分は依然残るものの、平野部の全体的な地形特性の把握は可能であることが分かる。ASTER はオリジナルデータから標高の推移を読み取ることはできず、平均化しても誤差が減少しなかった。

2.2.3 衛星地形データを用いた洪水氾濫シミュレーションによる比較

ALOS PRISM、ASTER および SRTM を標高のデータとして洪水氾濫シミュレーションを行い、衛星地形データが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。

- 1) LP データを用いて洪水氾濫シミュレーションを行う。本研究の検討では、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⁴⁾を用いる。
- 2) LP データ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が示されない場合、粗度等の設定を行って再度シミュレーションを行う。ここでは、国土地理院の調査で調べられた同地域の2004年7月洪水による洪水浸水エリアを検証データとした³⁾。
- 3) シミュレーション結果の妥当性が示されたら、LP データをALOS PRISM、ASTER およびSRTM に変えて氾濫シミュレーションを行い、標高データの違いが結果に与える影響について検討を行う。

対象領域の土地利用は農地が主体的で、勾配も比較的に緩いこと、対象領域の大きさがおおむね20km²であることから、解像度は100mで行うこととした。参考文献2)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破堤地点の流量ハイドログラフの差が実際に氾濫した流量と想定し、図-3に示す破堤流量のハイドログラフを作成して氾濫シミュレーションに入力した。また、本研究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るため、水路等の施設の影響は考慮しないこととした。



図-3 破堤流量のハイドログラフ

LP データに基づく洪水氾濫再現シミュレーションの結果と2004年の氾濫実績は、図-4に示すとおり、おおむね良好な整合を示す。LP データをALOS PRISM、

ASTER およびSRTM に変えたシミュレーション結果を図-5に示す。図-5はLP データ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合流点に氾濫が到達した破堤9時間後の結果である。

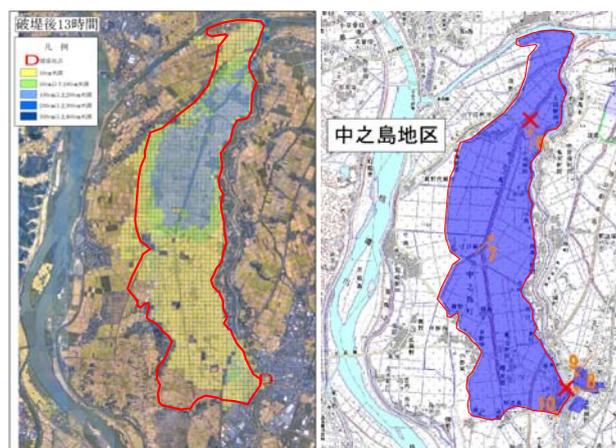


図-4 破堤13時間後の洪水氾濫再現シミュレーション結果図 (左:シミュレーション結果、右:洪水氾濫実績³⁾)

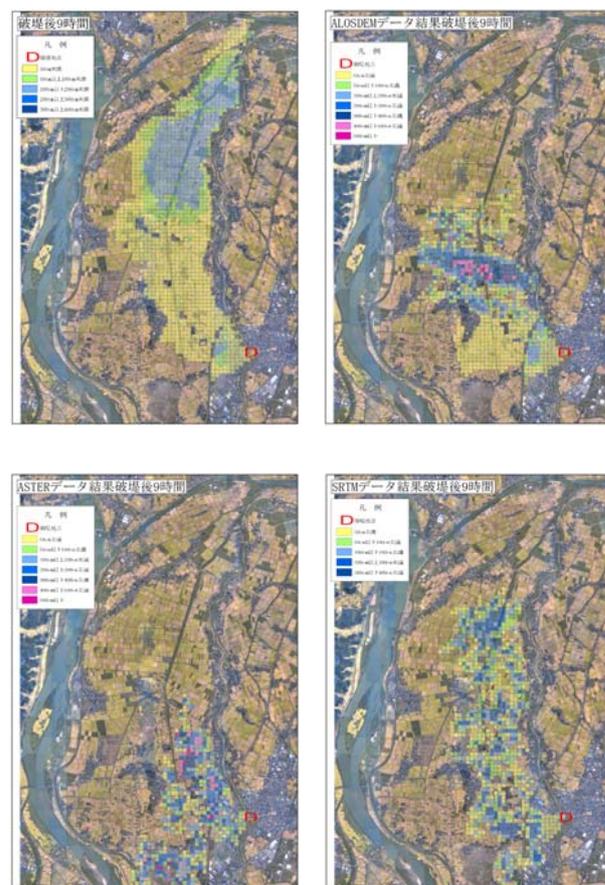


図-5 LPデータ (左上)、ALOS PRISM (右上)、ASTER (左下) およびSRTM (右下) による洪水氾濫シミュレーション結果 (破堤後9時間後)

ALOS PRISM の場合、LP データには見られない明確なうねりが存在するために氾濫水が溜まり、それ以降氾濫水が下流に進行しない結果となった。ASTER の場合、前述のとおり表面のバラつきが大きいために洪水が下流まで流れていかない結果となった。SRTM は ALOS PRISM および ASTER と比較すると氾濫エリアが LP データの結果に最も近いが、氾濫水の先端は信濃川と刈谷田川の合流点には到達しない結果となった。これらのことから、局地的スケールでの誤差が残る 100m 移動平均処理では、いずれの衛星地形データにおいても、低平地における洪水氾濫の詳細を解析することは難しいことが明らかとなった。

3. 浸水計算のための最適な地形データ処理手法の開発

3.1 SRTM の補正

3.1.1 補正手法の検討

前節において SRTM データを用いて洪水氾濫シミュレーションを行ったが、その結果得られた氾濫エリアは、他の衛星地形データを用いたシミュレーションと比較すると LP データの結果と最も近いものの、洪水氾濫を再現することはできていない。これは衛星軌道に関する波を SRTM が持っているためと考えられる。そこで、以下のような流れで刈谷田川流域を対象に SRTM 補正手法の開発を行った。

- 1) SRTM 画像を 2 次元フーリエ変換し、周期的なノイズ成分 (パワースペクトル) を抽出する。この成分を除去し、逆フーリエ変換することで同ノイズを除去する。
- 2) ローパス平滑化フィルタで高周波成分を除去する。

3.1.2 フーリエ解析によるノイズの除去

SRTM 画像の領域を切り出し、2 次元フーリエ解析を行うと、図-6 のようなパワースペクトルが抽出された。

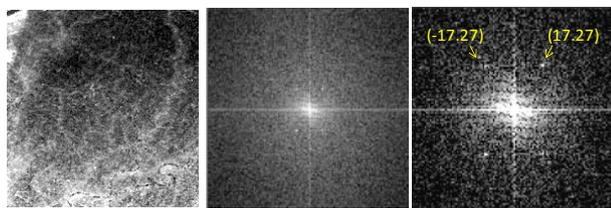


図-6 パワースペクトル

図-6 から(17,27)の周波数の領域にピークが確認できる。このことから、図-7 に示すような 32.1° 傾いた 722m 波長の卓越周期ノイズを抽出することができた。このノイズは実際に SRTM より確認できる周期ノイズと一致

している。また、(-17,27)にも比較的小さいが、ピークが存在し、 -32.1° 傾いた同様のノイズを表している。

周期ノイズと思われる 2 つの波のスペクトルを除去し、逆フーリエ変換をかけて周期ノイズを除去する。SRTM の周期ノイズ除去結果を図-8 に示す。

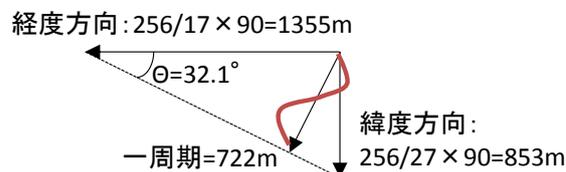


図-7 パワースペクトルから確認される周期ノイズの角度と長さ

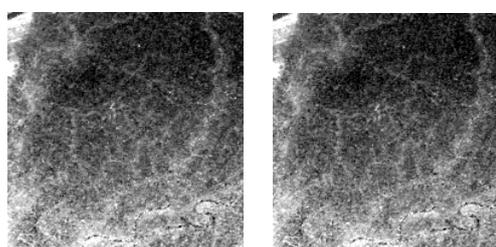


図-8 周期ノイズの除去結果

周期ノイズ除去前後の周波数成分の差分から、SRTM データには周期ノイズが存在し、逆フーリエ変換によって周期ノイズが除去できることが分かった。しかし、周期ノイズの振幅は実際には極めて小さく、これらの成分除去だけでは標高データの乱れ成分の除去には不十分であることも同時に判明した。

3.1.3 ローパス平滑化フィルタによる高周波成分除去

図-2 に見られるような高周波のノイズを除去するために、さらにローパスフィルタを適用し、一定以上の周波数を除去する手法を検討した。ローパスフィルタによって除去される周波数成分は窓の大きさに依存する。本研究では窓の大きさをフーリエ解析から得られた周期ノイズの波長 722m よりも大きくなるよう 9×9 とした。ローパスフィルタの係数は図-9 のように円形に定めた。これにより、810m 以下の周波数成分は低減できる。

ローパスフィルタ適用前後の比較を図-10 に示す。図-10 から、平地における周波ノイズが取り除かれ、全体になめらかになっていることが分かる。

図-11 に示すように、地物の少ないラインにおいて縦断面図を作成すると、図-12 のようになる。図-12 から、SRTM を平滑化することにより、地物の影響を軽減し、LP データとほぼ同等のなめらかさが得られた。

1.4 水災害リスク評価のための衛星地形データの活用手法の研究 (1)
 1.5 水災害リスク評価のための衛星地形データの活用手法の研究 (2)

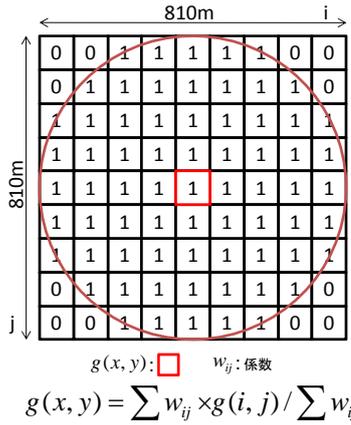


図-9 適用した9×9のローパスフィルタの係数

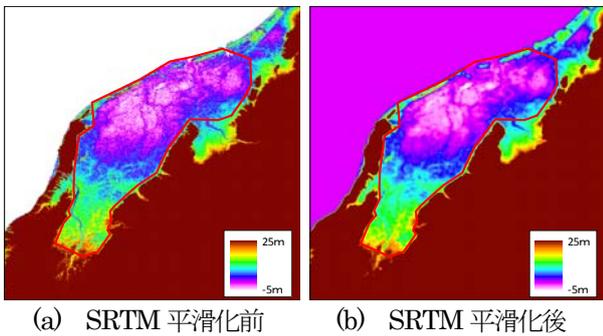


図-10 SRTMの平滑化処理結果

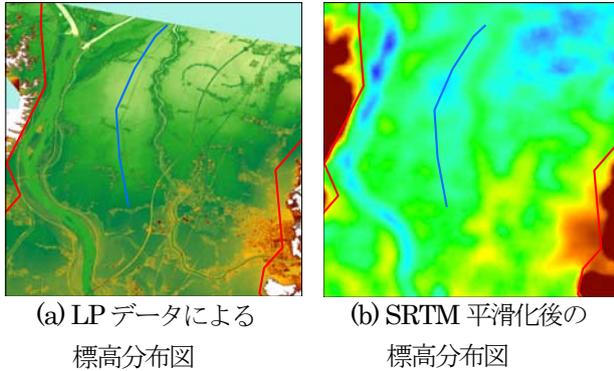


図-11 LPデータとSRTM平滑化後の標高分布と縦断図を作成したライン

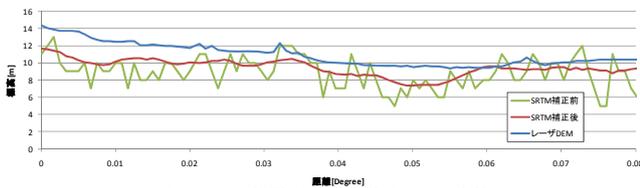


図-12 縦断線上の標高の推移

図-10で示した領域において、SRTM平滑化前後の結果の差分に注目すると、図-13に示すように傾斜地では平滑化のために差分が大きくなり、尾根や谷の本来の形状が失われている。このことから、平地にはローパス平滑化フィ

ルタを適用し、傾斜地には適用しないことが望ましい。

そこで、傾斜地では平地よりもフィルタ領域内の標準偏差が高いことに注目し、標準偏差によって平地と傾斜地を区別することとした。標準偏差によって平地と判断されたピクセルに平滑化フィルタを適用し、傾斜地とされたピクセルにはフィルタを適用しないことにより、傾斜地の地形を保存した。また、平地においても、標準偏差から堤防や微地形を抽出し、もとのSRTMデータと置き換えた。

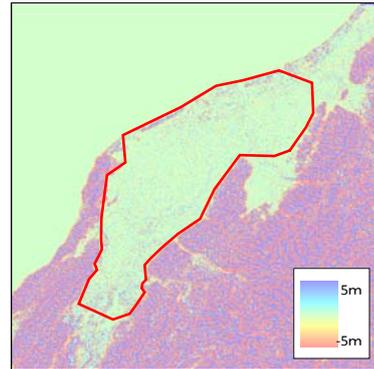


図-13 SRTMの平滑化前後の差分

3.2 補正された地形データを用いた洪水氾濫シミュレーションによる比較

3.1に示した手法により補正したSRTMベースの地形データの有効性を検証するため、刈谷田川流域における洪水氾濫シミュレーションを行った。

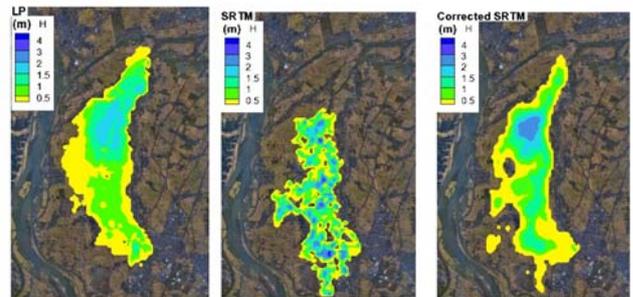


図-14 破堤9時間後の洪水氾濫シミュレーション結果 (LPデータ (左)、SRTM補正前 (中央)、SRTM補正後 (右))

図-14より、SRTM補正後のシミュレーション結果はLPデータによる結果とほぼ同等の氾濫区域を包括することができた。本研究で開発したSRTM地形データの補正手法は、数十km²スケールといったかなり狭領域での局地的な詳細解析を含めて、低平な氾濫原における洪水氾濫解析のニーズに応えられる精度を有していると評価できることを確認した。

4. 衛星地形データを活用した水災害リスクの評価手法の開発

4.1 大陸スケール大氾濫原の水害リスク評価

インダス川流域の洪水氾濫原(約100万km²)を対象として、地形等の情報に乏しい大陸スケール大氾濫原におけるマクロな洪水氾濫リスク評価手法を開発する。ここで取り扱うリスクとは、災害によって危険にさらされる領域であるハザード(*H*; Hazard)と危険にさらされる人口や資産(*E*; Exposure)、災害に対する社会の被害の受けやすさ(*SS*; Social Susceptibility)の関数として表すことを想定している。

$$R = H \times E \times SS \quad (\text{式1})$$

検討にあたっては、米国地質調査所(US Geological Survey)編纂のSRTM由来の地形メッシュ情報HydroSHEDSを活用した。洪水氾濫リスクの指標として浸水ポテンシャルを用い、以下の手法を提案した。

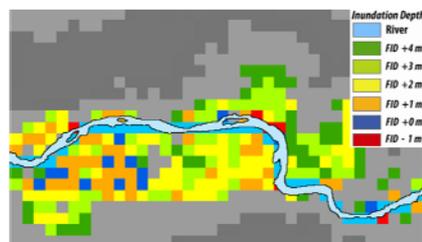
- 1) 氾濫原のあるメッシュの標高と、そのメッシュを通る落水線が流入する河道のピクセルの標高との差(比高)の大きさから、比高分布図を作成する。比高分布図は河川の満水位から比高分だけ浸水位が上昇した場合の浸水ポテンシャルと考えられる。
- 2) IFAS⁵⁾による降雨流出解析から得られる洪水流出量と、そのときの洪水氾濫実績(衛星画像に基づく)との関係から、氾濫開始流量、氾濫流速・水深を規定するパラメータを評価する。
- 3) 雨量確率規模毎に流出解析に基づく洪水氾濫解析シミュレーションを行い、生起確率規模毎の洪水氾濫リスク領域・面積を評価する。

インダス川支流のカブール川の、インダス川との合流点に近い最下流域に対して、河川との比高に基づく浸水ポテンシャルから洪水氾濫エリアを評価したものと衛星画像による2010年8月5日時点の洪水氾濫領域を図15に示す。ただし、この検討においては流出解析にBTOPモデルを用いた。

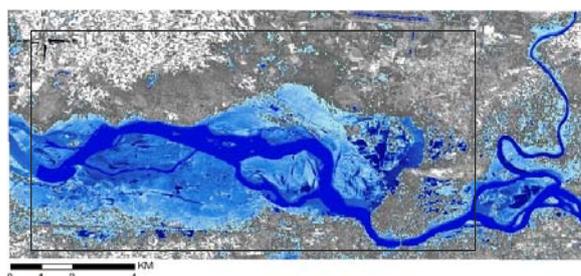
図15から、浸水位が河川からの比高にして+3mの高さまで水が達したと想定した場合の洪水ハザード領域が、観測された氾濫領域とほぼ一致していることが分かる。また、この領域で浸水位が比高+3mまで達するのに必要な流量は、河道勾配や粗度の推定値から3040 m³/s程度と試算された。一方、2010年8月5日にカブール川最下流地点で観測された洪水流量は3398 m³/sであり、浸水位が+3mまで達するのに要する流量推定値と比較的よく一致した。

また、インダス川全流域の広大な領域を対象として、

浸水位が比高+2mまで達したとき氾濫リスクエリアを洪水で被災する人口の分布を試算した結果とともに図-16に示す。人口の試算にあたり、オークリッジ国立研究所(Oak Ridge National Laboratory)編纂LandScan(Vijayaraj et al, 2007)の最新版であるLandScan 2009を用いた。



(a) 浸水ポテンシャルによる洪水氾濫エリアの評価



(b) 衛星画像による氾濫領域(黒枠内が(a)の表示箇所)

図15 洪水氾濫エリア評価と衛星画像による氾濫領域

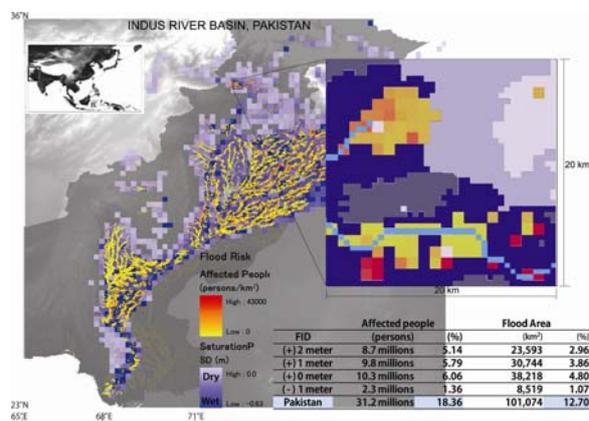


図16 洪水流出の規模に応じた氾濫リスクエリアの変化

4.2 中小スケール氾濫原の水害リスク評価

ネパールの西ラプティ川流域の下流部に位置する氾濫領域を対象として、水災害リスク評価手法の検討を行った。本研究では、SRTMベースの地形情報を活用し、雨量確率規模毎に流出解析に基づく2次元氾濫解析シミュレーションを行い、洪水災害評価に必要な洪水ハザード(浸水深、氾濫流速、湛水時間)を算出した。シミュレーションの対象とするメッシュと境界条件を与える地点

およびQuickBird衛星画像による対象エリアの100mメッシュ毎の土地利用、家屋数分布、農地面積を図-17に示す。図-17の南西側の黒線はインドとネパールの国境である。

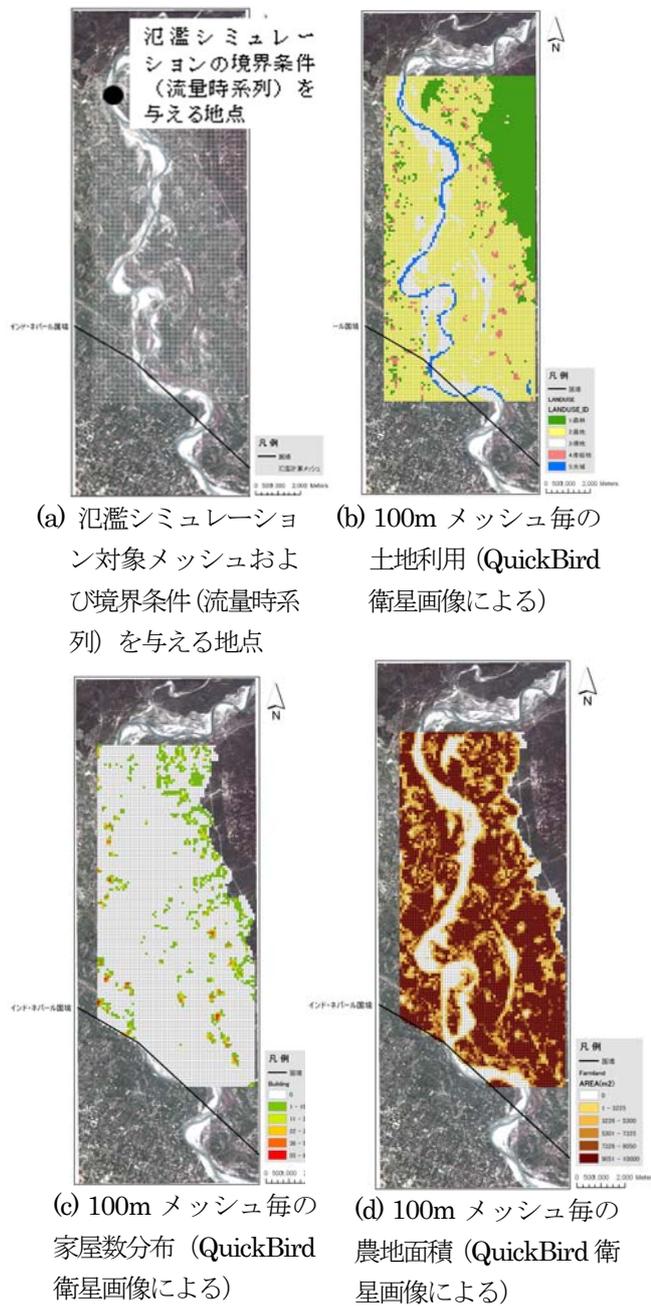


図-17 氾濫シミュレーション対象メッシュと100mメッシュ毎の土地利用、家屋数分布、農地面積

シミュレーションで得たハザードをもとに、洪水規模毎に我が国の治水経済調査手法を適用し、建物に関する被害、農業被害額の試算を行うことで、水災害リスクを評価した。結果を表-3、表-4に示す。

確率年が大きくなるにつれて、被害が大きくなる様子が

確認できる。特に、30年確率と100年確率でみた場合、家屋被害額についてはおよそ2.5倍になり農業被害額については1.4倍となることが分かった。

ここで開発した被害評価手法は、被害単価をGDP比で換算することにより、我が国の手法を基本として提案し試算したものである。しかし、発展途上国では、国毎に社会経済状況が大きくことなるため、例えば、今回の研究対象としたネパールの氾濫原における被害の実態を反映したものになっているかは未確認である。この点は、今後の課題である。

表-3 洪水規模毎の建物に関する被害 (単位:千\$)

	30年確率	50年確率	100年確率
家屋の倒壊	233	952	1,151
被害家屋撤去	4	16	19
家庭用品被害	2,337	4,366	4,673
家屋被害合計	2,574	5,333	5,843

表-4 洪水規模毎の農業被害に関する被害 (単位:千\$)

	30年確率	50年確率	100年確率
収穫物被害	2,478	3,200	3,305
農耕機械被害	268	501	537
農業被害合計	2,747	3,701	3,842

5. 衛星地形データ活用教材の作成

本研究で得られたSRTMベースの衛星地形データを氾濫解析に適した補正処理を行うための作業手順マニュアルを作成した。今後はこのマニュアルを英語化するとともに、既述の適用事例を追加して、活用教材とする予定である。

6. まとめ

本研究では、SRTM、ALOS-PRISM、ASTERの衛星地形データについてLPデータを真値として日本の平野地域で比較検証を行った。その結果、オリジナルデータではいずれも誤差が大きく、100mスケールまで平均化すればALOS PRISMやSRTMでは地形の概要は把握できるものの、その場合でもいずれのデータも氾濫解析に必要な精度を確保できていないことが判明した。

また、SRTMに対して、周期的なノイズが目立つことを明らかにし、フーリエ解析を応用した周期ノイズの除去およびローパスフィルタを用いた処理手法を開発した。処理後のSRTMデータを基盤として、新潟県刈谷田川の2004年7月洪水における2次元氾濫解析を行い、その有効性を確認できた。このことから、本研究で開発した処理手法は発展途上国のメガデルタから中小河川流域

の低平地における洪水氾濫リスク評価に応用できると考えられる。一方、ALOS-PRISM に関しては、誤差の原因として、農地などでは地物判別が困難となり、ステレオマッチング精度が低下することにあることがわかっている。PRISM は、本来は 3m という極めて高い空間分解能を有していることから、その高分解能を生かした補正手法を開発することが、今後に残された大きな課題と考えている。

衛星地形データを活用した水災害リスク評価にあたり、パキスタンのインダス川流域を対象に、衛星由来の地形データをベースとした洪水氾濫ハザードの評価を行う手法を開発し検証を行った。今後は、広大な氾濫原で実用的に用いることのできる社会経済データと組み合わせ、人的・経済的被害の算出方法を確立することが考えられる。中小スケールの流域に対しては、ネパールの西ラプティ川で洪水氾濫解析の結果と我が国の治水経済調査の手法を組み合わせることで、途上国における洪水被害を評価する手法を提案した。これは、グローバルに汎用的に利用可能なひとつの統一的かつ確実な試算・比較分析方法としては有効であるが、途上国現地の社会経済の実態に即した、ローカルな課題に対応するための手法の修正・検証は今後の課題として残された。

本研究により得られた低平地における衛星地形データの問題点と、それをより明確化したことによる氾濫解析のための適切な処理手法の開発、ならびに衛星地形データを用いた水災害リスクの評価手法の提案は、発展途上国における迅速かつ定量的な水災害リスクの評価に貢献する技術として、今後の大きな貢献が期待できると考えている。

参考文献

- 1) Adikari Y., J. Yoshitani, N. Takemoto, C. Ali: Technical Report on the Trends of Global Water-related Disasters – a revised and updated version of 2005 report, Technical Note of Public Works Research Institute No.4088, 2008
- 2) 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
- 3) http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/SAIGAI/16niigata/higai-zyoukyou-niigata_suigai.html
- 4) 白石芳樹、深見和彦、猪股広典：雨域移動情報を活用した衛星降雨データ補正方法の提案－吉野川流域の事例解析－、水工学論文集第 53 巻、pp.385-390、2009 年 2 月
- 5) ICHARM：総合洪水解析システム（IFAS Version1.2）ユーザーズマニュアル、土木研究所資料第 4149 号、2009 年 6 月

STUDY ON UTILIZATION OF SATELLITE-BASED TOPOGRAPHICAL DATA FOR FLOOD RISK ASSESSMENT (1) (2)

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2008-2010

Research Team :Water-related Hazard Research Group
(Hydrologic Engineering Research Team)

Author : TANAKA Shigenobu

FUKAMI Kazuhiko

INOMATA Hironori

YAMASHITA Hideo

Abstract : This research focuses on the verification of accuracy of satellite-based topographical data and development of a data correction method in order to apply such data to inundation simulation in very flat flood plains. Compared with laser profiler data, satellite-based topographical data were found to have lower accuracy and thus contribute to poorer reproducibility in inundation simulation. To correct satellite-based data and improve the accuracy of inundation simulation with them, a method for canceling noise was developed for SRTM, a type of satellite-based topographical data, by using the Fourier analysis and a low-pass filter. A method was also developed for water-related hazard risk assessment using satellite-based topographical data.

Key words : satellite-based topographical data, laser profiler, error correction, water-related risk assessment