

3 航空機 SAR による地表面の観測

3 Observation of Land Surface by Airborne Synthetic Aperture Radar

3-1 航空機搭載合成開口レーダー Pi-SAR X2 と GIS による浸水地域の検出法に関する研究

3-1 Research on Detection Method of Flooded Areas by NICT Airborne Synthetic Aperture Radar (Pi-SAR X2) and GIS

児島正一郎 有馬悠也

Shoichiro KOJIMA and Yuya ARIMA

本研究では、NICT で研究開発している航空機搭載合成開口レーダー Pi-SAR X2 で観測した画像データと GIS データを総合的に解析することで、高精度に浸水地域を抽出することができる新しい解析法を開発した。開発した解析法の妥当性を検証するために、Pi-SAR X2 によって観測された東日本大震災直後の仙台空港周辺の画像データと GIS データから浸水マップを作成し、国土交通省都市局の復興支援調査アーカイブデータの浸水深マップと比較・検証を実施した。検証の結果、新しい解析法によって、高精度に浸水マップを算定できることを確認した。さらに、本研究では、SAR 画像と GIS データを用いることで SAR 画像のみでは推定することができなかった浸水深マップを作成する新しい解析法も開発した。

NICT developed the second-generation X-band air-borne SAR system (Pi-SAR X2) and have been carrying out the observation for the application research such as disaster monitoring. In this study, a new analysis method was developed for detecting flooded areas with high accuracy by analyzing GIS data and image data observed by Pi-SAR X2. To verify the flooded area estimated by this method, the flooded area map around Sendai Airport was estimated from GIS data and SAR image observed immediately after the Great East Japan Earthquake, and was compared with the flooded depth map created by Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. As a result of verification, it was confirmed that the new analysis method can estimate flooded area maps with high accuracy. Furthermore, a new algorithm was developed for estimating the flood depth map by using SAR image and GIS data.

1 はじめに

Pi-SAR X2 による定性的な地表面把握は、これまでの研究によってほぼ実用レベルになっている。例えば、噴火後の火口の状況把握（新しい火口の発見や噴火に伴う地形の変化等）や河川の決壊等による浸水被災地の状況把握（水面として判読できる浸水地域の特定等）については実用レベルに達している。

一方、Pi-SAR X2 で観測された地表面データを定量的に解析し、人の行動決定に資する情報（以後、AI (Actionable Information) と呼ぶ）の抽出については、まだ研究途上段階である。特に、災害発生時における行政実務者、救助活動者及び被災者らが、その行動を

決定するために活用できる AI については、ほとんど抽出できていない。例えば、小林ら [1] は東日本大震災直後の被災地の Pi-SAR X2 の偏波解析を行っているが、避難や救助等で活用することができる AI は抽出されていない。このため、Pi-SAR X2 の観測データが避難、救助及び災害復旧等に活用されてこなかった。避難や救助で活用することができる AI の抽出技術の研究開発は、社会的に強く求められている。

この問題を解決するために、NICT では Pi-SAR X2 から得られる観測データ（画像データ）と DEM 等の GIS データを統合的に解析し、AI を抽出するための研究開発を進めている。本研究では、Pi-SAR X2 の観測データと GIS データを用いて東日本大震災の津

3 航空機 SAR による地表面の観測

波によって浸水した仙台空港周辺の浸水マップを高精度に算定し、さらに、SAR 画像のみでは推定することができなかった浸水深マップを推定することを目的に研究を進めた結果について報告する。

2 Pi-SAR X2 について

Pi-SAR X2 は、Pi-SAR の機能と性能を向上させることを目的に、2006 年から開発が進められ、2008 年に初期段階の開発が完了した [2]。2008 年以降、Pi-SAR X2 の研究開発は初期機能・性能確認試験を経て、応用研究と新たな機能を追加するための機器開発が行われてきた。図 1 に Pi-SAR X2 のシステムを搭載した航空機 (Gulfstream II) とアンテナポッドの中の格納されているアンテナの写真を示す。Pi-SAR X2 は、アンテナ部を除く送受信部、記録部、電源部及び制御部等の機器はすべて航空機内部に設置され、操作者 (1 名) が観測計画に基づいて制御 PC を通じてそれらの機器を操作している。アンテナ部 (アンテナとアンテナ駆動装置) は、機体の胴体下部に設置されている 2 つのポッドの中に格納されている。メインアンテナポッド (図 1 右下写真) の中には送受兼用の垂直偏波アンテナ (上部) と水平偏波アンテナ (下部) が格納され、サブアンテナポッド (図 1 左下写真) の中にはクロストラック干渉 (CTI) SAR 用の受信アンテナ (上部) とアロングトラック干渉 (ATI) SAR 用の受信アンテナ (下部) それぞれが格納されている。

CTI 機能は地表面の高度を計測すること目的に開発 (2008 年) され、ATI 機能は車両や船舶等の移動体の視線方向の速度を計測することを目的に開発 (2011 年) された。ただし、ATI 用に開発されたアンテナは

表 1 Pi-SAR X2 の諸元

	Mode 1	Mode 2	Mode3
観測法	ストリップマップ		
偏波	HH&HV&VH&VV		
中心周波数	9.55 GHz	9.65 GHz	9.65 GHz
帯域幅	500 MHz	300 MHz	150 MHz
スラントレンジ方向の分解能	0.3 m	0.5 m	1.0 m
アジマス方向の分解能	0.3 m (1look)	0.6 m (2looks)	0.6 m(2looks)
雑音等価後方散乱係数	-27 dB以下	-27 dB以下	-30 dB以下
信号対偽像比	25 dB以上		
観測幅	5 ~10 km	7 ~10 km	10 km以上
入射角の範囲	20~60°		
スラントレンジ方向のピクセルスペーシング	0.25 m	0.5 m	1.0 m
アジマス方向のピクセルスペーシング	0.25 m	0.5 m	1.0 m

垂直偏波専用で、帯域 300 MHz まで (中分解能モードと広域観測モード) しか対応していなかった。このため、2016 年に両偏波 (垂直偏波と水平偏波) に対応し、Pi-SAR X2 の高分解能モード (分解能 : 30 cm、帯域 : 500 MHz) で移動体を計測することができる新しいアンテナが開発された [3][4]。電波の照射方向は、機械的にアンテナの向き (可動範囲 : 40 ~ 60 度) をアンテナ駆動装置によって制御することで、任意の方向に向けることができる。また、アンテナ駆動装置は、機首方向と機体の進行方向が異なることに伴う電波の照射方向の誤差を修正するために、ヨー方向にアンテナを回転させることができる。ヨー方向の回転角の範囲は、± 7 度の範囲である。表 1 に Pi-SAR X2 の諸元を示す。

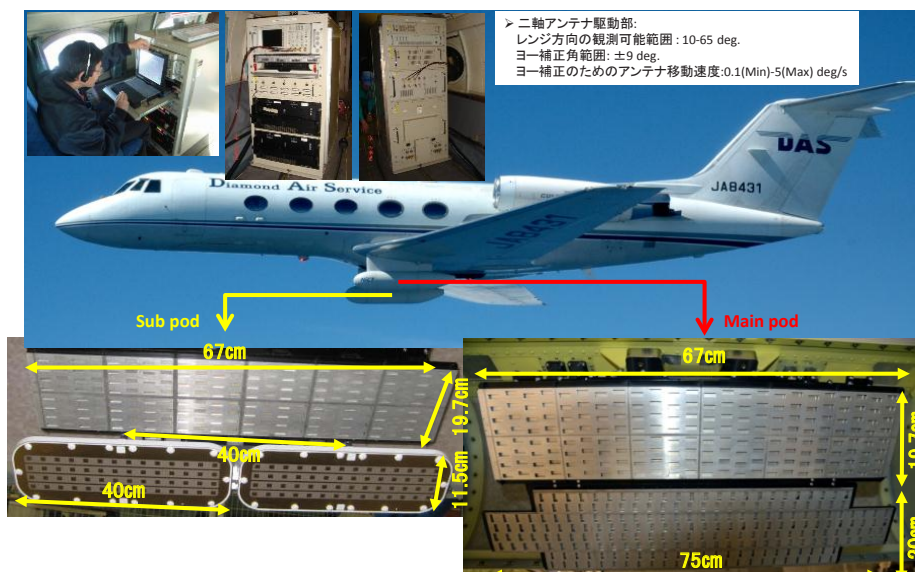


図 1 Pi-SAR2 のアンテナポッドと Gulfstream II

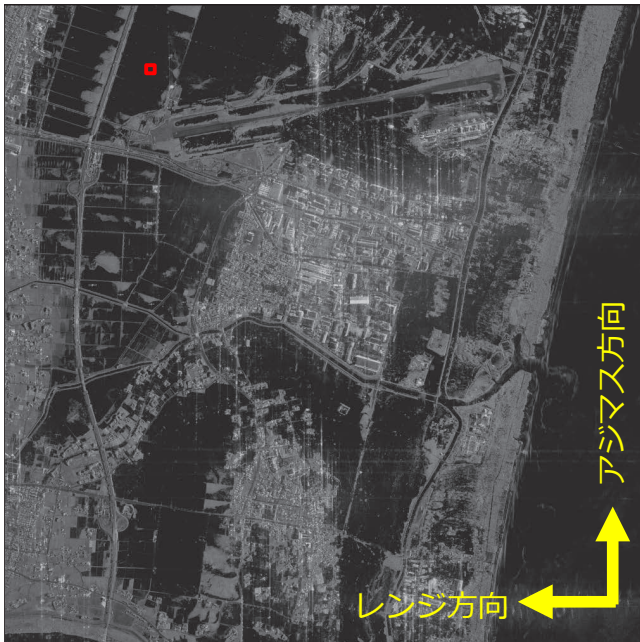


図2 東日本大震災直後(2011年3月12日)の仙台空港周辺のVV偏波画像(6 km × 6 km)

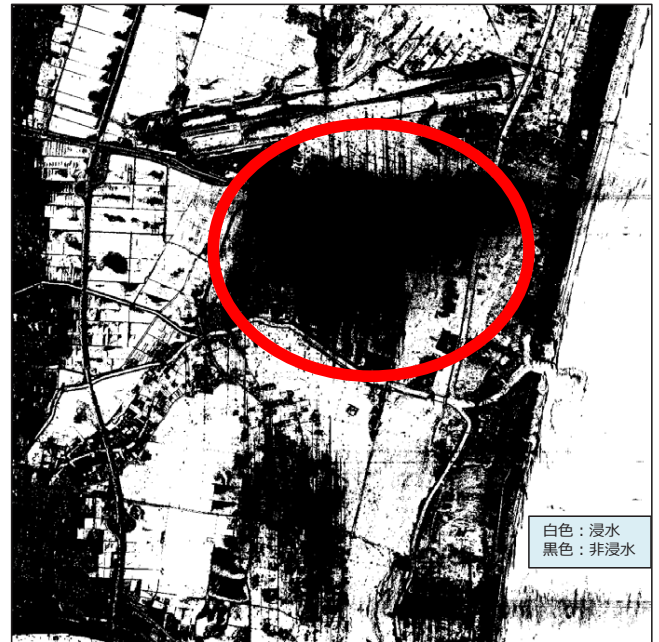


図3 浸水マップ(白:浸水、黒:非浸水)

3 Pi-SAR X2 による仙台空港周辺の観測

Pi-SAR X2による浸水地域の解析は、2011年3月11日に発生した東日本大震災の津波によって浸水した仙台空港周辺地域を対象とした。津波による浸水被害は、東北地方沿岸域から北関東沿岸域にかけての範囲で発生し、場所によっては海岸線から10 kmを超える範囲で浸水被害が発生した。図2にPi-SAR X2によって観測された仙台空港周辺のVV偏波の画像を示す。観測は、2011年3月12日8時頃(東日本大震災発生してから17時間30分後)に実施した。この図において、黒色は水面や道路等の滑らかな表面を示している。通常、陸上においては、河川等の水面や道路以外の地表面が黒色になることはないため、河川等の水面や道路を除く陸上の黒色は浸水している地域を示している。浸水地域と非浸水地域の大まかな分類は、画像の2値化によって分類することができる(2値化法)。浸水地域と非浸水地域を識別するための閾値は、図2の赤枠で示した部分(10 pixel × 10 pixel)の輝度値の平均値 Ave_water を浸水地域での輝度値の代表値とし、Ave_water の値よりも小さい輝度値を浸水している地点とした。図3に2値化によって識別した浸水地域と非浸水地域を示す。白色は浸水地域を示しているが、図3の赤丸で示した地域(人工構造物が密集する地域)は、海岸線に近接しているが非浸水地域として分類されている。人工構造物が密集する地域では、レイオーバーによって、水面の後方散乱と建物の側面からの後方散乱が重なり合い、浸水している水面を識別することができない。

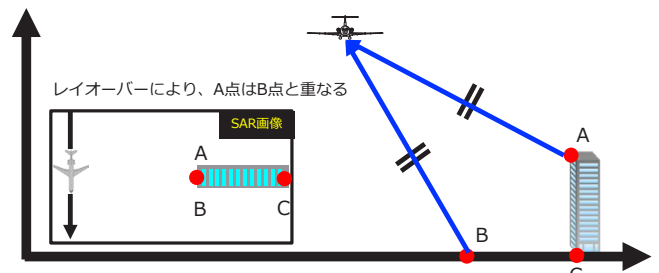


図4 浸水マップ作成の問題(レイオーバー)

図4にレイオーバーによる後方散乱の重畳のメカニズムを示す。SARは、進行方向に対して横斜め下方向に電波を照射して、地表面からの後方散乱波の信号を受信・画像化している。画像化される観測対象物の位置は、SARを搭載している飛行体と観測対象物との距離で決まっているため、図4のA地点とB地点は飛行体からの距離が同じであり、SAR画像中では両者の位置は同一になる。同様に、直線ACと直線BCは、SAR画像中では同じ位置となる。人工構造物が密集している地域では、レイオーバーによって浸水地域からの後方散乱波に建物からの後方散乱波の信号が重畳され、浸水地域を識別することが困難となる。このため、SAR画像のみを使用して、人工構造物が密集する地域で浸水地域を高精度かつ安定して抽出することはできない。

さらに、河川の水面や道路等の滑らかな表面を有する地表面は、2値化によって浸水地域として分類される可能性があり、大きな誤差要因となる。本研究では、これらの問題を解決するために、Pi-SAR X2の観測

3 航空機 SAR による地表面の観測

データと GIS データを総合的に解析する新しい解析手法を開発した [5]。

4 GIS データ

浸水地域の推定に使用する GIS データは以下のとおり。

① 土地利用データ

土地利用データは、SAR 画像と GIS データの位置合わせを行うために使用した。使用した土地利用データは、OpenStreetMap の土地利用データを用いた。

② 水域データと道路データ

浸水地域を高精度に推定するためには、誤差要因となる河川等の水面と道路を解析対象から除外する必要がある。このために、本研究では国土地理院が整備している基盤地図情報の水域データと OpenStreetMap の道路データを用いて、河川等の水面と道路を解析対象から除外した。

③ 数値標高データ (DEM データ)

数値標高データは、人工構造物が密集する地域で高精度に浸水地域を抽出するために使用した。使用した数値標高データは、国土地理院が整備している基盤地図情報の数値標高データ (5 m メッシュ) を用いた。さらに、基盤地図情報の数値標高データ (5 m メッシュ) は、浸水深を推定する解析でも使用した。

④ 復興支援調査アーカイブデータ

推定した浸水地域を検証するために、国土交通省都市局の「東日本大震災津波被災市街地復興支援調査」のアーカイブデータ (復興支援調査アーカイブデータ)

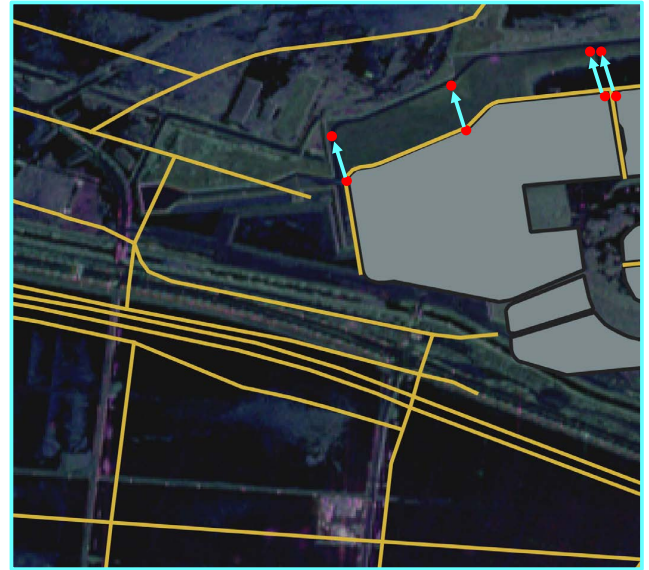


図6 SAR 画像 (疑似カラー合成画像) と土地利用図

を用いた。

5 浸水マップと浸水深マップの作成

浸水マップと浸水深マップの作成は、図5に示すフローチャートで実施した。本解析では、SAR 画像中のスペckルノイズを低減するために Pi-SAR X2 の高分解能モード (25 cm ピクセルスペーシング) で観測された 6 km 四方の画像データを 10 pixel × 10 pixel で平均化処理した。その上で、SAR 画像と GIS データ (土地利用データ) との位置合わせを実施した (図5の手順1)。なお、地上に設置されている GPS のリファレンスステーションは、東日本大震災の影響で Pi-SAR X2 の地表面観測時に停止していた。この

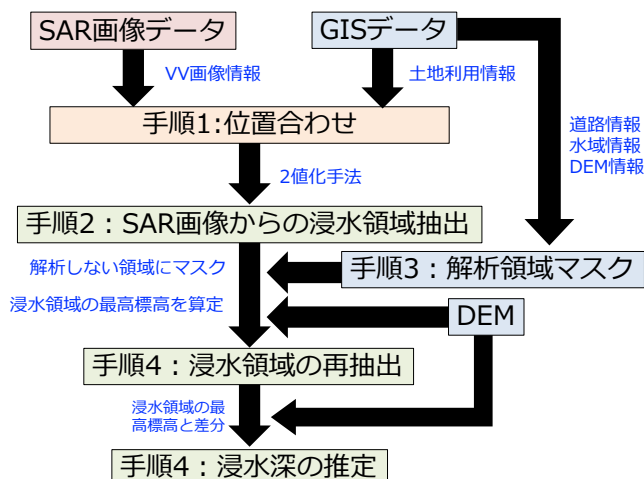


図5 浸水マップ・浸水深マップ作成のフローチャート



図7 OpenStreetMap の水域データ



図8 OpenStreetMap の道路データ

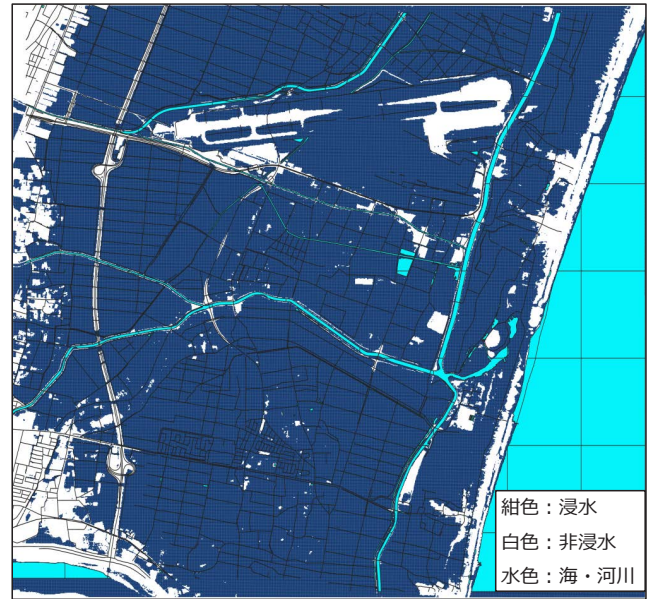


図10 再解析後の浸水マップ



図9 マスクフィルタ

ため、航空機の位置を計測している POS (Positioning and Orientation Systems) の後処理 (GPS のリファレンスステーションのデータを用いて位置誤差を補正する処理) は実施できなかった。POS の後処理ができないことに伴い、航空機の位置計測精度は通常時よりも低下していた。SAR 画像と GIS データの位置合わせは、SAR 画像と土地利用図中の地物の特徴点を GCP として設定して、両者の位置ずれ量を目視で計測した。図6に SAR 画像上に土地利用図を重ね合わせたものを示す。赤丸は、設定した GCP (Ground Control Point) の位置を示している。本研究では、滑走路の特徴点に GCP を設置 (4 か所) し、各 GCP の位置ずれ量を算定した。その上で、各 GCP の位置ずれ量の平均値を算定して、SAR 画像と GIS データの位置ずれ量とした。計測の結果、位置ずれ量は、緯度方向に

61.53 m、経度方向に 12.87 m であった。

手順2では、手順1で作成した位置合わせした SAR 画像から2値化法を用いて浸水マップを作成した。2値化法で設定する浸水地域と非浸水地域を識別する閾値は、**3**で算定した Ave_water を用いた。

手順3では、河川等の水面や道路等の浸水地域の推定において誤差要因となる地域をマスクするためのフィルタを GIS データによって作成した。水域のマスクフィルタは、OpenStreetMap の水域データを用いて作成した。図7に作成した水域のマスクフィルタを示す。図7において、青色が解析対象外のマスク領域を示している。道路のマスクフィルタは、OpenStreetMap の道路データを用いて作成した。ただし、OpenStreetMap の道路データは道路の中心線の情報しかないため、全ての道路幅を 10 m として道路のマスクフィルタを作成した。図8に作成した道路のマスクフィルタを示す。図8において、緑色が解析対象外のマスク領域を示している。本研究では、水域と道路のマスクフィルタを結合させて解析対象外をフィルタするマスクを作成した。図9に、解析対象外をマスクするフィルタを示す。図9において、白色は解析対象外を示している。

手順2で作成した浸水マップと DEM データを用いて浸水地域中で一番高い標高を算定し、その値を津波到達水面の標高とした。津波到達水面の標高の算定では、手順3で作成したマスクフィルタを使用することで、河川等の水面や道路の影響を除去した。手順4では、算定した津波到達水面の標高値と DEM を用いて浸水地域の再抽出を行った。浸水地域の再抽出は、浸水水面が津波到達水面の標高までであるという前提の下、

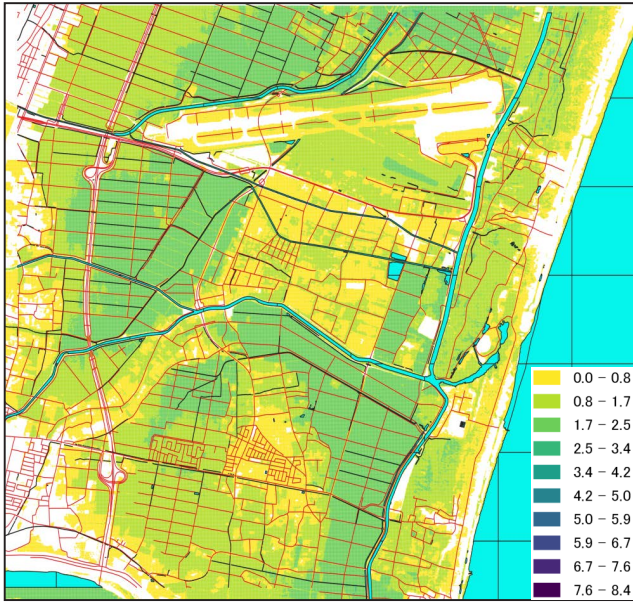


図 11 浸水深マップ

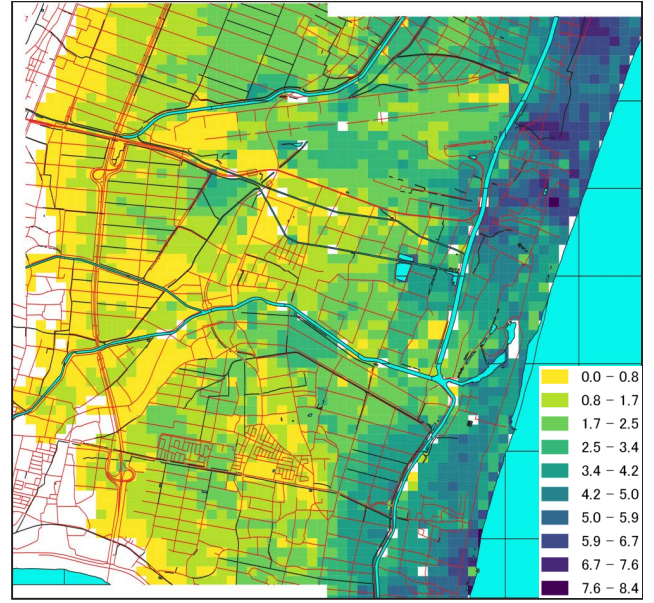


図 12 国土交通省都市局の浸水深マップ

津波到達水面の標高よりも低い標高地域は浸水しているとして DEM から浸水地域を算定した。さらに、津波到達水面の標高値と浸水している地域の DEM の標高値との差を算定することにより、浸水している地域の浸水深を算定した。図 10 と図 11 に算定した浸水マップと浸水深マップを示す。図 10 において、紺色は浸水地点を示している。

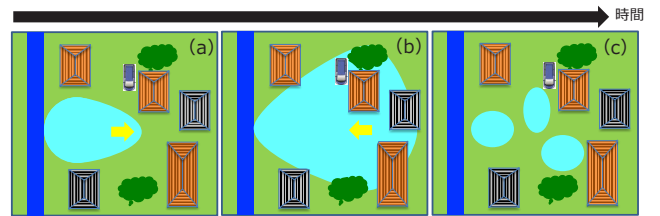


図 13 浸水の形態

6 推定した浸水地域の評価

推定した浸水マップ・浸水深マップの妥当性を評価するために、国土交通省都市局の「東日本大震災津波被災市街地復興支援調査」のアーカイブデータ（復興支援調査アーカイブデータ）の浸水深マップとの比較を行った。図 12 に国土交通省都市局の浸水深マップ（100 m メッシュ）を示す。国土交通省都市局の浸水深マップは、調査地点での津波の痕跡からその高さを計測して作成されている。このため、SAR 画像と GIS データから推定した浸水深マップと国土交通省都市局の浸水深マップとを単純には比較することはできないが、両者の浸水域のパターンはほぼ一致しており、本研究で提案した浸水地域の抽出法の有用性が示されている。

7 考察と今後の予定

本研究では、東日本大震災直後の仙台空港周辺を Pi-SAR X2 の画像データと GIS データを用いた解析を行うことで、SAR 画像のみでは抽出することが困難であった人工構造物が密集する地域における浸水地

域を抽出し、浸水マップ・浸水深マップを作成した。また、浸水地域の推定の誤差要因となる水面や道路に関しては GIS データを用いて解析領域から除去することで、浸水マップの推定精度を向上させた。

河川氾濫や津波による浸水は、発生からの時間や発生場所によって以下に示す 3 つの状態に分類することができる。

- 浸水形態 1：浸水が低地部分から高地部分に向かって広がる状態（図 13 (a)）
- 浸水形態 2：水の供給がなくなり、浸水地域が縮小している状態（図 13 (b)）
- 浸水状態 3：浸水地域が縮小し、浸水箇所が飛び石状態になっている状態（図 13 (c)）

本提案手法は浸水形態 1 の浸水地域の推定には適用可能であるが、それ以外の状態に対しては別のアルゴリズムを検討する必要がある、今後の研究課題のひとつである。また、浸水深マップの定量的な評価をどのように実現するかについても検討していかなければならない。

本研究により、SAR 画像と GIS データを総合的に

解析することで、個々のデータを個別に解析することでは得られなかった AI の抽出が可能であり、土砂災害等の災害把握へ応用することが可能である。今後、SAR 画像と GIS データを用いて土砂崩れ箇所の抽出や地震等による建物被害の抽出法について検討を進めていく予定である。また、迅速かつ効果的な AI の抽出のために機械学習による情報抽出技術 (SAR × GIS × 機械学習) についても研究を進めていく予定である。

謝辞

Pi-SAR X2 の観測実験は、株式会社ダイヤモンドエアサービス及び NICT の関係者の協力を得て実施した。ここに謝意を表します。

【参考文献】

- 1 小林達治, 梅原俊彦, 上本純平, 佐竹誠, 児島正一郎, 松岡建志, 灘井章嗣, 浦塚清峰, “航空機搭載 SAR (Pi-SAR2) による東日本大震災の津波被災地の偏波解析,” 日本リモートセンシング学会第 55 回学術講演会論文集, 2013, pp.43-44.
- 2 A. Nadai, S. Uratsuka, T. Umehara, T. Matsuoka, T. Kobayashi, and M. Satake, “Development of X-band airborne polarimetric and interferometric SAR with sub-meter spatial resolution,” IGARSS 2009, vol.2, pp.913-916, 2009.
- 3 S. Kojima, T. Umehara, J. Uemoto, T. Kobayashi, M. Satake, and S. Uratsuka, “Development of Pi-SAR2 Along-Track Interferometric SAR System,” IGARSS 2013, pp.3159-3162, 2013.
- 4 児島正一郎, “Pi-SAR2 の ATI_K による波浪計測,” 土木学会論文集 B2, vol.73, no.2, pp.1675-1680, 2017.
- 5 児島正一郎, 有馬悠馬, 山本和朋, 是津耕司, “Pi-SAR X2 と GIS データを用いた浸水領域の抽出,” 日本リモートセンシング学会第 58 回学術講演会論文集, 2018, pp.43-44.



児島正一郎 (こじま しょういちろう)

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
研究マネージャー
博士 (工学)
計測工学・海岸工学

有馬悠也 (ありま ゆうや)

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
研究員
博士 (工学)
電子情報工学・機械学習・マイクロ波