

衛星写真の画像処理とGISを用いた津波被害の推計手法に関する研究 ー被災家屋数と被災者数の推計の迅速化ー

○窪園 翔治^{*1} 山田 悟史^{*2}

キーワード：津波浸水域、被害把握、画像処理、GIS、フラクタル次元

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震における津波は広範な地域に甚大な被害をもたらした。このような広範な被害に対しては国策として復興計画が策定され、その立案には予算規模の根拠となる被害状況に関わる数字を迅速かつ正確に把握することが重要である。図1の流れに従って、災害対策本部の方針に拠り3日後に被害総額の第一報が発表されるが、この段階で被害全体の把握に必要な被災者数と被害家屋数は公開されていない。¹⁾ 発生後一週間以内において、死傷者数が順次集約・公開されているが被害全体の規模を把握するための被災者数は公開されていない。また、建物被害については、インフラや建物の全壊数は順次集約・公開されているが、被災家屋数は公開されていない。これは復興計画の根幹となる重要情報を正確に把握するため当然の手順であるが、復興計画全体としては被害全体の規模を迅速に把握することも重要である。しかし、被災時に人的調査に拠り広範な範囲を調査する事は不可能に近い。そこで、復興計画の立案の為に、人的調査以外の手法で両数字を3日以内に把握することが望ましい。

2. 既往研究

上記を目的とした研究として、萱場ら²⁾は高解像度衛星であるQuick Bird衛星画像を入手し、建物被害状況を目視判読によって評価し、地理情報システム:Geographic Information System(GIS)上で被害の空間分布を把握しているが、対象地毎の判別には多くの時間を要する。三浦ら³⁾は可視域から近赤外域における地表の反射放射特性を観測する光学センサによる高分解能衛星画像であるIkonos画像から分光反射特性を生かし建物の自動検出を行っているが、浸水範囲と想定した色が元からあると誤検出する、また撮影時期による色の变化への対応が困難であると考えられる。鈴木ら⁴⁾は、デジタル航空画像の教師付き分類をピクセルベースとオブジェクトベースで行い、建物の屋根の形状から被災状況を自動抽出しているが、全壊以外の判別が困難であると考えられる。石黒ら⁵⁾はIkonos画像とQuickBird画像の両者を利用したステレオマッチングによりNDVIとよばれる植生分布を検出している。津波によって植物が流された、または枯れた場所をその色の

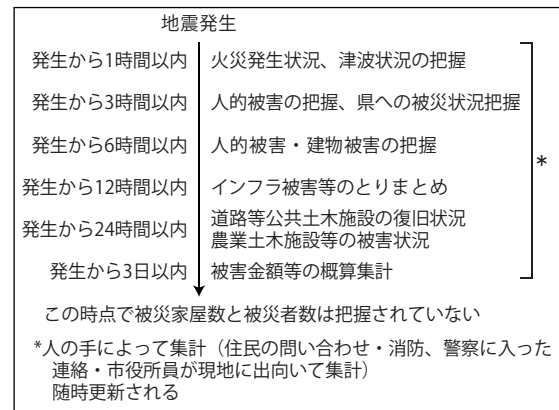


図1 宮城県災害対策本部の津波発生時初動マニュアル

違いによって相違を示しているが、植生が少ない都市部においての適用が困難である。また、落葉を誤検出する可能性があると考えられる。

3. 研究概要

本研究は上記の課題に対して、被災前後の衛星写真を用いてRGB、HSI表色系の値とXYZ表色系の座標上の値の原点からの距離を用いた画像相関や、フラクタル次元の変化量を用いた画像処理によって浸水域を自動検出する手法の検討を行い、GIS上で浸水域内の家屋数と人口数を推計する手法の構築を目的とする。

4. 津波被害判別手法

図2に示すように、対象地の衛星写真を被災前後で検討比較しやすいように縦横比1ピクセル10m×10m、全体15km×15kmの全1500ピクセルの画像に統一する。メッシュサイズは120m×120m、250m×250m、500m×500mで行った。画像相関、フラクタル次元の算出には特定の式を用いた。^{注)} これらを用いて変化の大きいメッシュを検出し、被災した範囲を判別する。

本研究では判別した浸水域に関する用語を次のように定義している。目視判別浸水域：日本地理学会災害対応本部津波被災マップ作成チーム⁶⁾が現地調査や空中写真の実体視判読によって被災状況を詳細に視認し、2.5万分の1地形図にマッピングした浸水範囲。目視判別浸水域外：目視判別浸水域と判別されなかった津波が浸水していない範囲。判別浸水域：本研究での手法で

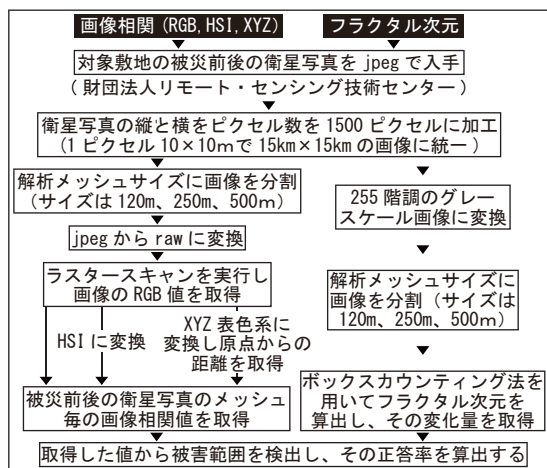


図2 判別浸水域検出フロー

判別した津波が浸水した範囲。判別浸水域外：本研究での手法で判別した津波が浸水していない範囲。正答判別浸水域：目視判別浸水域を実際に津波が浸水した範囲の基準とし、判別浸水域が実際の被害範囲としての的中させた範囲。正答判別浸水域外：目視判別浸水域外を実際に津波が浸水していない範囲の基準とし、判別浸水域外が実際の被害のない範囲としての的中させた範囲。

5. 検証実験

画像相関とフラクタル次元の変化量を用いた画像処理による津波浸水域把握の検証実験を行った。検証実験では RGB 値、HSI 値、XYZ 表色系の座標上の値の原点からの距離を用いた画像相関とフラクタル次元の変化量によって、任意に設定した浸水域の検出程度を検証した。図3はその検出結果である。RGB 値、HSI 値、XYZ 表色系の座標上の値の原点からの距離を用いた画像相関での検出結果は海洋部・浸水域・浸水域外の陸地を判別できており、十分な結果を得られると考えられる。また、フラクタル次元の変化量を用いた検出結果でも海洋部・浸水域・浸水域外の陸地を判別できている。これらの結果から、4種の手法は有効であると仮定し、本研究における浸水域把握に用いることとする。

6. 研究対象地

研究対象地は、財団法人リモート・センシング技術センター⁷⁾が公開している衛星写真から津波被害の大きかった「気仙沼」、「荒浜」、「志津川」、「石巻」、「仙台東南部」、「津谷」の6地域とする。

7. 画像処理による浸水域判別結果

図4は、画像処理の解析結果の例としてフラクタル次元の変化量を用いた手法での解析結果を示したものである。図5は、画像処理により検出した判別浸水域の検出率、図6は、判別浸水域外の検出率を示したグラフである。ここでは、判別浸水域の検出率と判別浸水域外の

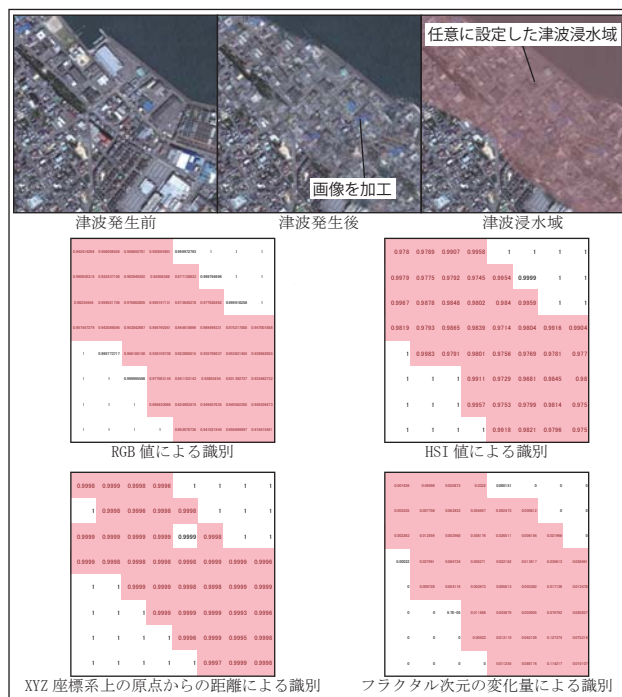


図3 検証実験結果

検出率の両者の検出率が共に高いことが、より判別浸水域が目視判別浸水域に近いことを示しており、両者を合わせて見るのが重要である。これらの結果から 250 m、500m のフラクタル次元を用いた手法が目視判別浸水域に対する正答判別浸水域の検出率が高いことがわかる。その中から正答率が高い 500m のフラクタル次元の変化量での検出結果を用いて判別浸水域内の建物数、および人口数を GIS 上で計量した。

8. 解析結果

図7のEが示す値は、GIS 上での判別浸水域内の建物数に対する正答判別浸水域内の建物数から導き出した被災家屋数の正答率を示している。例えば気仙沼での画像処理による浸水域検出率は 89.51%となっているが、被災家屋数の正答率は 41.89%となっている。これは解析により判別浸水域と判別されなかった範囲に全建物の 58.11%が分布されていたことを示している。石巻の被災家屋数の正答率が 76.21%と最も高い値を示し、仙台東南部の被災家屋数の正答率が 14.37%と最も低い値を示した。また、図8のE'が示す値は GIS 上での判別浸水域内の建物面積と人口密度から算出した推計被災者数に対する正答判別浸水域内の建物面積と人口密度から算出した推計被災者数の正答率を示している。これも同様に、石巻の推計被災者数の正答率が 79.24%と最も高い値を示し、仙台東南部の推計被災者数の正答率が 7.67%と最も低い値を示した。表1は地震と津波の両者による被害の第一報の正答率を示している。この正答率は地震と津波両者の被害によるものであり直接的に

気仙沼 メッシュ：500m					
	被災前の衛星写真	被災後の衛星写真	目視判別浸水域 目視判別浸水域外	判別浸水域 判別浸水域外 判別浸水域の検出率：89.51%	正答判別浸水域 正答判別浸水域外 判別浸水域外の検出率：68.81%
志津川 メッシュ：250m					
	被災前の衛星写真	被災後の衛星写真	目視判別浸水域 目視判別浸水域外	判別浸水域 判別浸水域外 判別浸水域の検出率：86.18%	正答判別浸水域 正答判別浸水域外 判別浸水域外の検出率：67.93%
石巻 メッシュ：120m					
	被災前の衛星写真	被災後の衛星写真	目視判別浸水域 目視判別浸水域外	判別浸水域 判別浸水域外 判別浸水域の検出率：73.36%	正答判別浸水域 正答判別浸水域外 判別浸水域外の検出率：70.74%
仙台東南部 メッシュ：500m					
	被災前の衛星写真	被災後の衛星写真	目視判別浸水域 目視判別浸水域外	判別浸水域 判別浸水域外 判別浸水域の検出率：51.67%	正答判別浸水域 正答判別浸水域外 判別浸水域外の検出率：56.42%
津谷 メッシュ：120m					
	被災前の衛星写真	被災後の衛星写真	目視判別浸水域 目視判別浸水域外	判別浸水域 判別浸水域外 判別浸水域の検出率：73.11%	正答判別浸水域 正答判別浸水域外 判別浸水域外の検出率：64.71%
荒浜 メッシュ：500m					
	被災前の衛星写真	被災後の衛星写真	目視判別浸水域 573136 pixel 目視判別浸水域外 1676864 pixel	判別浸水域 判別浸水域外 判別浸水域の検出率：72.91%	正答判別浸水域 417855 pixel 正答判別浸水域外 1531850 pixel 判別浸水域外の検出率：91.35%
判別浸水域検出率計算方法 例：荒浜 500m メッシュ 検出率 72.91% = $\frac{\text{正答判別浸水域 } 417855 \text{ pixel}}{\text{目視判別浸水域 } 573136 \text{ pixel}} \times 100$					
判別浸水域外検出率計算方法 例：荒浜 500m メッシュ 検出率 91.35% = $\frac{\text{正答判別浸水域外 } 1531850 \text{ pixel}}{\text{目視判別浸水域外 } 1676864 \text{ pixel}} \times 100$					

図 4. フラクタル次元での解析結果の例

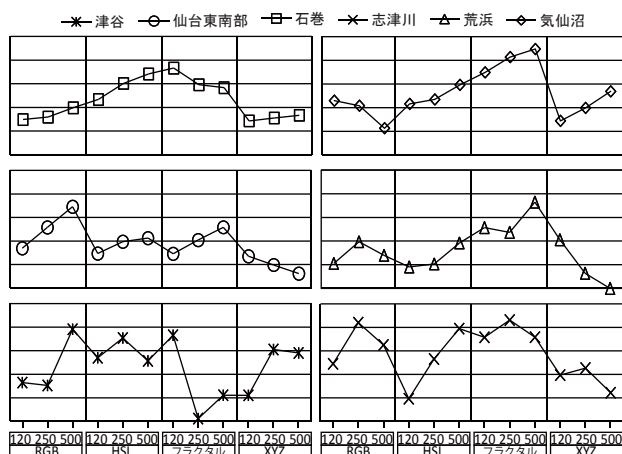


図5 画像処理による浸水域検出率
(正答判別浸水域 / 目視判別浸水域)

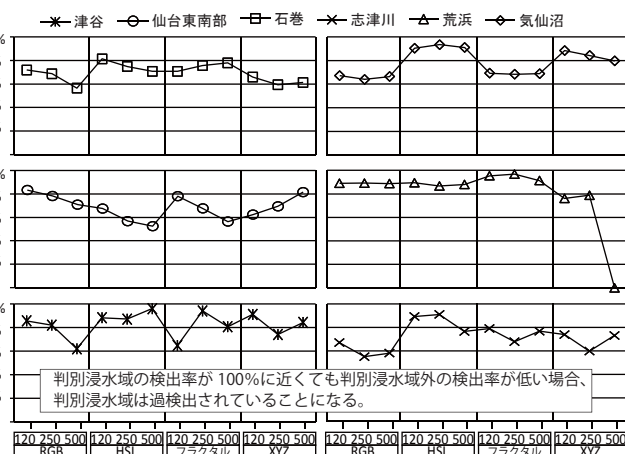


図6 画像処理による浸水域外検出率
(正答判別浸水域外 / 目視判別浸水域外)

	A	B	C	D	E
気仙沼	27378	62584	25590	43.75%	41.89%
荒浜	12557	17480	10296	71.84%	59.90%
志津川	3983	6284	3452	63.38%	55.93%
石巻	61977	55890	42594	110.89%	76.21%
仙台東南部	22434	110395	15867	20.32%	14.37%
津谷	9010	6341	3319	142.09%	52.34%

A: 目視判別浸水域内の建物の数(棟)
 B: 判別浸水域内の建物の数(棟)
 C: 正答判別浸水域内の建物の数(棟)
 D: 建物被害正答率① $D=A/B$
 E: 建物被害正答率② $E=C/B$

目視判別浸水域内で判別浸水域と判別されなかった部分の範囲に全建物の58.11%が分布されている
 正答判別浸水域(浸水域検出率89.51%)の範囲に目視判別浸水域内の全建物の41.89%が分布されている

図7 500mメッシュのフラクタル次元の変化量によるGISでの被災家屋数正答率

	A'	B'	C'	D'	E'
気仙沼	19073.7	45828.0	17992.7	41.62%	39.26%
荒浜	17370.5	25711.4	14523.5	67.56%	56.49%
志津川	5239.4	8841.5	4653.5	59.26%	52.63%
石巻	102689.0	94093.7	74560.7	109.13%	79.24%
仙台東南部	33216.5	311442.2	23878.2	10.67%	7.67%
津谷	7519.7	4270.4	2166.3	176.09%	50.73%

A': 目視判別浸水域内の人口(人)
 B': 判別浸水域内の人口(人)
 C': 正答判別浸水域内の人口(人)
 D': 被災者数正答率① $D'=A'/B'$
 E': 被災者数正答率② $E'=C'/B'$

図8 500mメッシュのフラクタル次元の変化量によるGISでの推計被災者数正答率

表1 地震・津波による東日本大震災の被害

参考:朝日新聞記事	第1報	最終報告	正答率
1日後被災者数	855人	15836人	5.40%
1ヶ月後被災家屋数	29615棟	516242棟	5.74%

は比較できないが、本研究で算出した被災家屋数、推計被災者数の正答率はその数字を上回っている。しかし、浸水域と判別する際の閾値は検出率が最大となる任意の値を用いており、その値は対象画像によって異なった。実際に津波が発生した際には、本研究での手法の利用者には閾値操作を行なってもらう必要がある。そこで、閾値の操作による判別浸水域の違いを検証するために運用実験を行った。

9. 運用実験

運用実験は20～25歳の男女17名で行った。被験者には、目視判別浸水域を見せない状態で各対象地の被災前後の衛星写真を比較してもらい、視認できる限りで津波が浸水したと考えられる範囲を確認してもらう。次に、500mメッシュにおけるフラクタル次元の変化量を用いた画像処理で検出した判別浸水域画像を衛星写真の上に重ね、被験者自身が衛星写真を比較して津波が浸水したと判断した範囲に近づくように判別浸水域画像の閾値を操作し、浸水範囲を決定してもらう。図9は被験者が決定した判別浸水域の対象地毎、被験者毎の正答率とその平均値を示したものである。同様に、図10は

判別浸水域外の対象地毎、被験者毎の正答率と平均値である。これらを見ると、荒浜における判別浸水域の正答率の平均は87.77%、判別浸水域外の正答率の平均は77.66%となっており、両者共に高い値を示した。また、仙台東南部における判別浸水域の正答率の平均は63.02%、判別浸水域外の正答率の平均は44.24%となっており、両者共に低い値を示した。被災後の衛星写真は荒浜、仙台東南部共に2011年3月14日に撮影されている。しかし、被災前の荒浜の衛星写真は2008年5月、12月に撮影された写真の中で雲が少ない範囲を合わせて作成されている。仙台東南部は2007年3月・2008年10月に撮影された写真の中で雲が少ない範囲を合わせて作成されている。対象地毎の判別浸水域の正答率の違いは、こういった撮影日時や季節の違いにより生じたものと考えられる。図11は、図7、8において正答率が最高値を示した石巻と最低値を示した仙台東南部における、被験者毎の判別浸水域、正答判別浸水域を用いて算出した被災家屋数と推計被災者数の正答率である。平均値はどれも γ の値または γ' の値が約150%前後の過検出となっており、閾値操作で被験者のほとんどが浸水域を実際より広く認識していることがわかる。本手法を運用し把握する津波被害は、閾値操作実行者の判別した結果のおよそ65%の被害と認識することが賢明であると考えられる。

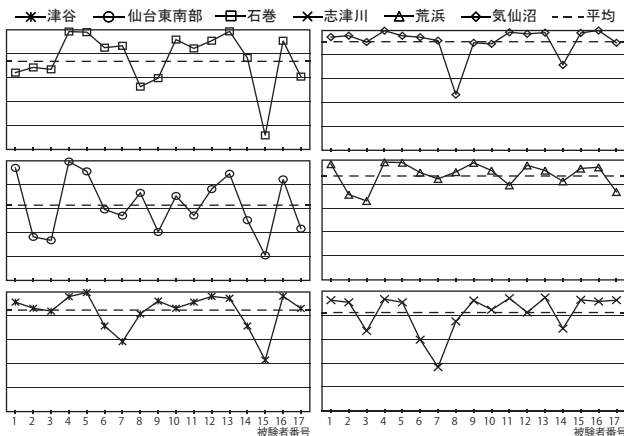


図9 運用実験での判別浸水域の正答率

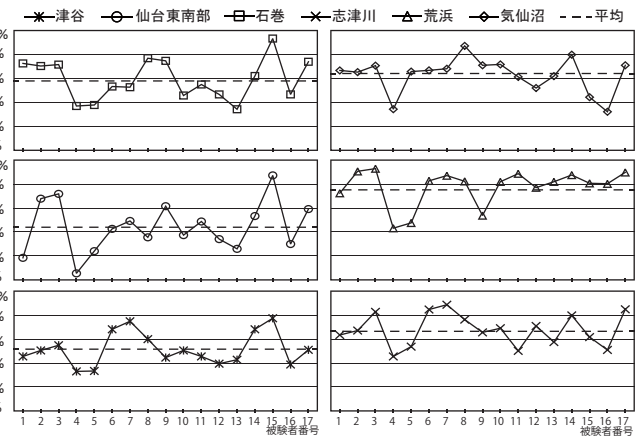
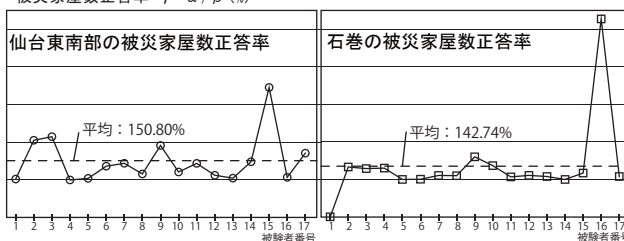


図10 運用実験での判別浸水域外の正答率

α : 目視判別浸水域内の建物の数(棟) β : 判別浸水域内の建物の数(棟)
被災家屋数正答率 $\gamma = \alpha / \beta$ (%)



α' : 目視判別浸水域内の推計人口(人) β' : 判別浸水域内の推計人口(人)
推計被災者数正答率 $\gamma' = \alpha' / \beta'$ (%)

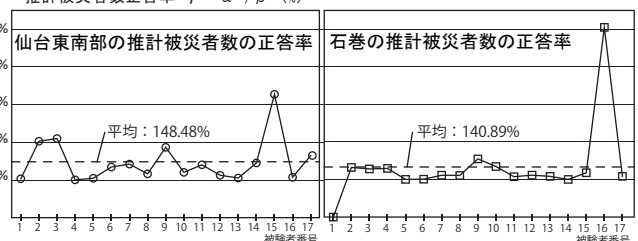


図11 被験者毎の判別浸水域、正答判別浸水域を用いて算出した被災家屋数と推計被災者数の正答率

10. まとめ

本研究では、4種の手法を用いた画像処理により津波の浸水域を検出し、その検出率を検討した。検出率を比較した結果、4種の中でフラクタル次元の変化量を用いた判別浸水域の検出率が高い値を示し、表1と比べると総じて高い値を示した。また、運用実験を行い、閾値操作による判別浸水域の正答率を検証した。しかし、各種の画像処理の検出精度や運用実験における閾値の操作は、衛星写真の撮影日時、季節などの影響を受けていると考えられる。また、解析での各段階のデータの受け渡しは手作業で行ったため時間を要し、各段階の解析も煩雑となった。今後の課題として以下の4点が挙げられる。1. 衛星写真に求められる条件の検討、2. テクスチャー特徴量などのより検出率の高い画像解析手法の検討、3. クラスター解析によるメッシュの分類などの閾値を用いない手法の検討、4. 一連の解析行程のソフトウェア化。以上の検討項目をクリアし、より精度の高い津波浸水域把握手法を構築する必要がある。

謝辞

本研究のデータの一部は東京大学空間情報科学研究センターとの共同研究「衛星写真の画像処理とGISを用いた津波被害の分析手法に関する研究－被災者数と被災家屋数の把握の迅速化－」として借用したものである。

注釈

画像相関では、8)を参考に以下の式を用いて相関値を算出する。

$$R = \frac{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} I(i, j) T(i, j)}{\left(\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} I(i, j)^2 \times \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} T(i, j)^2 \right)^{1/2}}$$

比較する2枚の画像の画素値の値をそれぞれ $T(i, j)$ 、 $I(i, j)$ とする。座標の (i, j) は画像の幅を m 画素、高さを n 画素としたとき、左上を $(0, 0)$ 、右下を $(m-1, n-1)$ とする。2枚の画像の類似性が低いところは相関値 R が低くなる。これを用いて、被災前後の画像の類似性が低い、すなわち被災前後で様子が変化したメッシュ

を検出し、被災した範囲であると判断する。

フラクタル次元の算出にはボックスカウンティング法を用いた。画素間隔が r の立方体の個数 $N(r)$ とし、フラクタル次元 D を9)を参考に以下の式を用いて算出する。

$$\log N(r) = -D \log r + \log C$$

ただし、 C は定数

2枚の画像の形態的特徴が被災前後で変化していれば、フラクタル次元の変化量が大きくなる。

参考文献

- 宮城県災害対策本部災害時書道活動マニュアルの作成例 (<http://www.pref.miyagi.jp/soshiki/kikitaaisaku/kb-shodoutop.html>)
- 萱場真太郎、越村俊一、村嶋陽一：高解像度衛星画像を利用した津波被害の把握手法に関する研究、海岸工学論文集、第55巻、1456-1460(2008)
- 三浦弘之、翠川三郎：建物GISデータの更新を目的とした高分解能衛星画像からの建物の自動検出手法、地域安全学会論文集、No.5、(2003-11)
- 鈴木大輔、丸山喜久、山崎雄雄：デジタル航空画像を用いた新潟県中越沖地震の建物被害抽出、日本地震工学論文集、第10巻、第3号、(2010)
- 石黒聡士、杉村俊郎：大規模津波災害直後における迅速な微地形把握のためのIKONOSとQuickBirdの単画像の組み合わせによる細密DSM作成、日本リモートセンシング学会誌、Vol.28、No.3、265-273、(2008)
- 日本地理学会災害対策本部津波被災マップ作成チーム (<http://danso.env.nagoya-u.ac.jp/20110311/>)
- 財団法人リモート・センシング技術センター (<http://www.restec.or.jp/eastjapan2011.html>)
- 画像処理ソリューション (<http://imaging-solution.blog107.fc2.com/blog-entry-186.html>)
- 高安秀樹：フラクタル、株式会社朝倉書店(1986)
- 窪田翔治、中庭崇晶、山田悟史：衛星写真の画像処理とGISを用いた津波被害の分析手法に関する研究－被災者数と被災家屋数の把握の迅速化－、東日本大震災2周年シンポジウム、357-358、(2013-3)

*1 立命館大学大学院 環境都市専攻 博士前期課程

*2 立命館大学 助教 博士(工学)

Studies on the estimation method of tsunami damage using GIS and image processing of satellite images

- Faster estimate of victims and the number of affected house number -

○Shoji KUBOZONO*¹ Satoshi YAMADA*²

Keywords: Tsunami inundation zone, Damage grasp, Image processing, GIS

1. Introduction

The Tohoku-Pacific Ocean earthquake resulted in a tsunami, which, in turn, caused extensive damage to a large area of Japan's coast. A national policy recovery plan has been formulated, but this national policy must be further developed and it would be important to quickly and accurately obtain budget figures for this.

2. Research outline

Previous researchers assessed tsunami damage by 1) visiting the damaged sites, 2) viewing the color of photographs and changes in the photograph's color, 3) viewing changes in the distribution of roofs in cities and towns, and 4) observing a change in the distribution of water and flora.

However, some of these studies were flawed in the following ways: 1) their protocols were time consuming; 2) incorrect colors result in people occasionally mistaking the tsunami's damage range; 3) only buildings that were completely destroyed were recognized; and 4) there is less plant life in urban areas and, therefore, they cannot fully grasp the damage, particularly in areas with frequent fallen leaves.

We propose the following methods to solve these problems. First, we identified tsunami flood areas using image processing. The image processing means the amount of change in the fractal dimension and image correlation using RGB values, HSI value and the distance from the origin of the XYZ color system. Second, we calculated the number of houses in these flood areas using GIS analysis. Third, we calculate the population of the region of the tsunami's inundation using the GIS.

3. Result

We used four methods of image processing to assess the extent of the tsunami's flooded area, and examined which method best captured the full extent of the damage. The image processing method that relied on a variation of the fractal dimension gave us the best results among the four. Using this method, the highest percentage of correct answers regarding building damage using GIS was 76.21%. The percentage of correct answers regarding the first report of tsunami and earthquake damage was 5.5%. Therefore, directly comparing these would not be appropriate. However, the correct answer rate of building damage and the inundation of the tsunami's area was appropriate. This was calculated by the method proposed above. However, when determining the tsunami's flooded area, we arbitrarily set the threshold value as different for each image. Additionally, when the image analysis was completed, we manually delivered the data, which was time consuming and complicated. In the future, we will expand our analysis of the tsunami area over a maximum altitude. Additionally, we must find a way to increase accuracy and develop tsunami inundation zone discrimination software that can manipulate the threshold, thus shortening the analysis time.

*1 Graduate Student, University of Ritsumeikan

*2 Assistant Prof., University of Ritsumeikan, Dr.Eng.