東日本大震災における津波浸水域の地理的特徴
Geographic Characteristics of Tsunami Flooded Area by the Great East Japan Earthquake

地理地殻活動研究センター　小荒井　衛・岡谷隆基・中埜貴元・神谷　泉
Geography and Crustal Dynamics Research Center
Mamoru KOARAI, Takaki OKATANI, Takayuki NAKANO and Izumi KAMIYA

要　旨

東日本大震災の津波浸水域について，海岸線から１km 毎にバッファを発生させて，国土数値情報の100mメッシュ土地利用データ，土地条件図の地形分類情報，地震後の航空レーザ測量による詳細地形データ（DEM），空中写真判読による津波被害状況，MMS（Mobile Mapping System）で計測した津波浸水深等をGIS上でオーバレイ解析し，津波被害の状況と地形や土地利用との関連性を解析した．その結果，建物がほぼ流出するような壊滅的な被害域については，浸水深がおおよそ４m以上，かつ海岸線から約１kmの範囲に限定され，標高よりは浸水深や海岸線からの距離との関連性が高かった．一方，建物等の破壊が一部で認められ，周囲をがれきで覆われるような地域は，海岸線から２～３kmの範囲までで標高１m以下，また，浸水のみが認められる地域は，海岸線から４～５km の範囲までで標高２m以下という結果で，概ね標高で決まっていた．ただし，海岸平野・三角州では高標高でも浸水したエリアがあり，地形分類の違いも影響している可能性がある．また，浸水域と非浸水域の境界部は，海岸線と平行方向に延びる水路や，田と住宅地の境界にあたる盛土の擁壁部など，人工構造物が影響していた．

１．はじめに

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(M9.0)では，北海道から関東地方にいたる広い範囲で津波による被害が発生した．

今回の津波被害に関しては，津波浸水域の地形や土地利用など，被災域の地理的特質を明らかにし，地域ごとの災害状況の違いを明確にすることが重要である．このような情報は，今後の災害復興計画や地域計画を考える上で参考資料になるものであり，被災地のみならず今後の津波被害が想定される地域にも役立つ情報となることが期待されている．

そのため筆者らは，東日本大震災の津波浸水域について，国土数値情報の 100mメッシュ土地利用データ，土地条件図の地形分類情報，地震後の航空レーザ測量による詳細地形データ(DEM)等をGIS上でオーバレイ解析し，津波被害の状況と地形や土地利用との関連性を解析した（小荒井ほか，2011a；小荒井ほか，2011bなど）．本稿では，それらの地理空間情報の解析結果と，それらを基に津波浸水域の地理的な特徴について整理した結果を紹介する．

２．青森県から千葉県にかけての津波浸水域の土地利用

国土地理院（2011a）は，青森県から千葉県にかけて，空中写真及び衛星画像（衛星画像は福島県南相馬市南部からいわき市北部にかけての範囲で使用）を用いて津波浸水範囲の判読を行い，この判読結果による浸水範囲概況図を公表した．

国土地理院（2011b）は，この津波浸水域のポリゴンデータと，国土交通省国土計画局が公表している国土数値情報「土地利用細分メッシュデータ」（http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/jpgis/datalist/KsjTmplt-L03-b.html）とを組み合わせ，津波浸水域の土地利用図と，市区町村別の土地利用別面積を集計した結果を公表した．

県別津波浸水範囲の土地利用構成率を表－１に示す．津波浸水域全体では田が37%と最も多く，次いで建物用地（20%），その他の用地（10%），河川地及び湖沼（９%），森林（７%）となっている．県別にみると，宮城県と福島県では田の割合がそれぞれ41%，53%，岩手県では建物用地の割合が34%と大きくなっている．この違いは，岩手県ではリアス式海岸のため沿岸の狭い平野部に市街地が集中しているのに対し，宮城県や福島県では沿岸に平野が広がり，田が広く分布するためと考えられる．一方，青森県と茨城県では海浜の割合がそれぞれ 33%，29%，その他の用地の割合がそれぞれ21%，23%と大きく，千葉県では海浜の割合が23%，田の割合が21%と大きい．これらの３県で海浜の割合が高いのは，岩手県，宮城県，福島県と比べて，津波の浸水がそれほど内陸までは達しなかったためと考えられる．

市区町村別（本稿では，政令指定都市の区も一行政区画として取り扱う）の土地利用別浸水面積を図－１に示す．ここでの土地利用区分は，国土数値情報土地利用細分メッシュデータの原データ（11 区分）を，５つの項目にまとめて再区分したものである．石巻市の浸水面積が最も大きく 70km^{2}を越えており，建物用地の浸水面積も 20km^{2}を越えている．浸水面積の大きな順では，石巻市に次いで，南相馬市，東松島市，亘理町（いずれも 30km^{2}を越える），

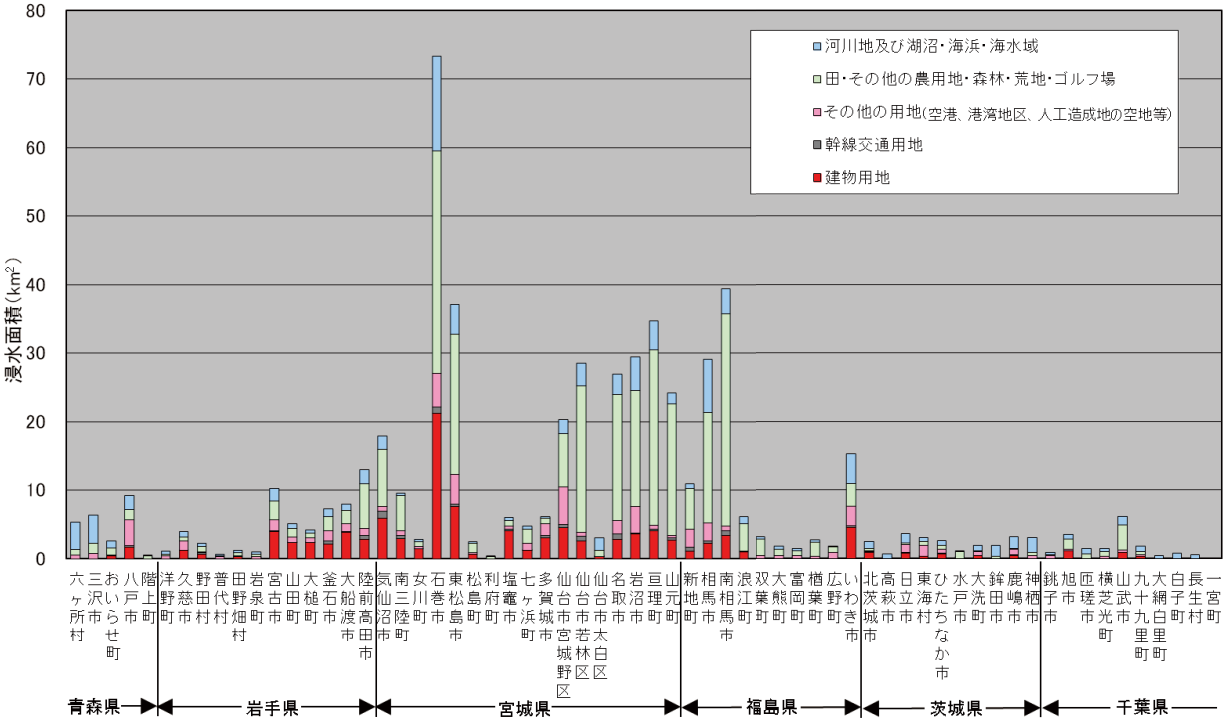
岩沼市，相馬市，仙台市若林区，名取市，山元町，仙台市宮城野区（いずれも 20km^2 を越える）となっており，石巻平野と仙台平野の市区町村が上位を占めている．

市区町村別の建物用地の浸水面積をみると，岩手県中部から宮城県，福島県北部にかけて建物用地の浸水が多く見られた．建物用地の浸水面積の大きな順では，石巻市に次いで，東松島市，気仙沼市，いわき市（いずれも５km^2 を越える）となっている．

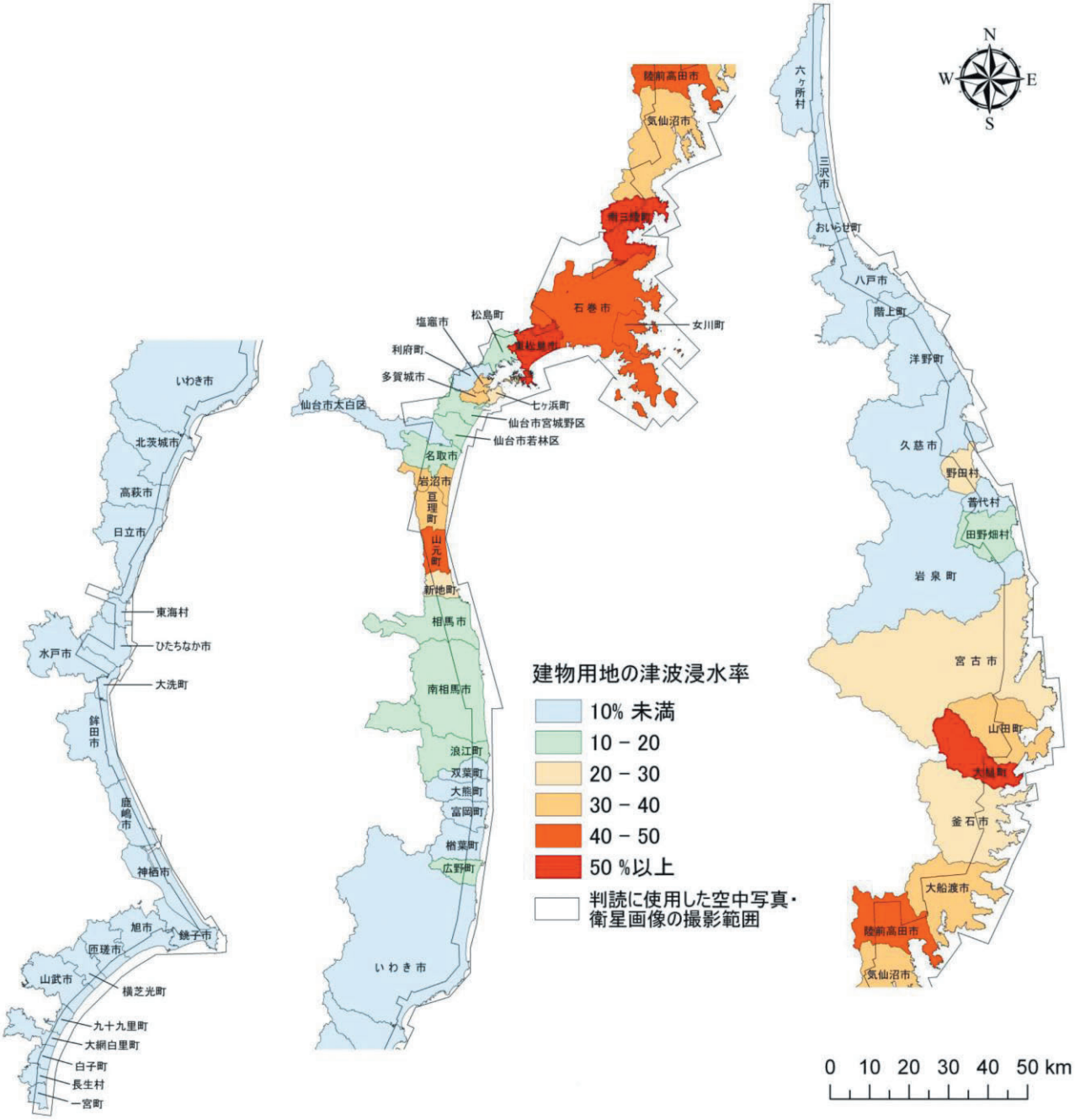
また，各市区町村の建物用地のうち津波の浸水を受けたものの面積比率を色分けで表示したものを図－２に示す．大槌町，南三陸町，東松島市では建物用地の 50％以上が，陸前高田市，石巻市，女川町，山元町では建物用地の 40％以上が浸水した．

表－１　県別津波浸水範囲の土地利用構成率（％）

	田	その他の農用地	森林	荒地	建物用地	幹線交通用地	その他の用地	河川地及び湖沼	海浜	海水域	ゴルフ場
青森県	3%	2%	10%	6%	10%	1%	21%	9%	33%	6%	0%
岩手県	17%	4%	9%	1%	34%	3%	15%	10%	3%	4%	0%
宮城県	41%	7%	7%	1%	21%	2%	8%	10%	2%	1%	0%
福島県	53%	3%	4%	1%	12%	2%	9%	7%	3%	7%	0%
茨城県	6%	2%	4%	1%	15%	1%	23%	6%	29%	12%	0%
千葉県	21%	6%	12%	2%	15%	0%	8%	2%	23%	12%	0%
6 県計	37%	5%	7%	1%	20%	2%	10%	9%	6%	4%	0%

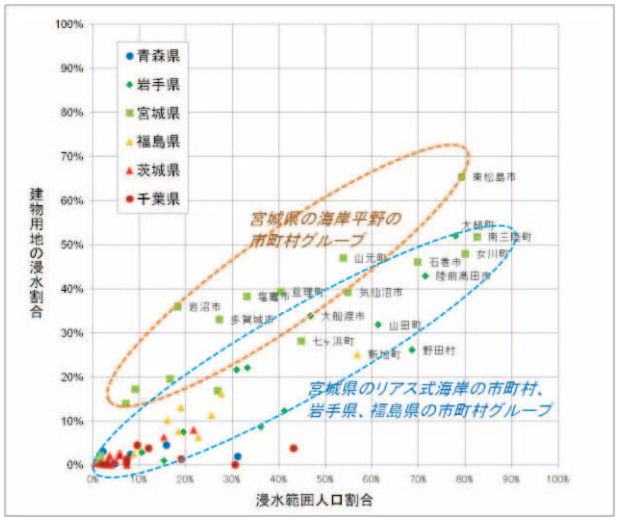


図－１　市区町村別津波浸水範囲の土地利用別面積

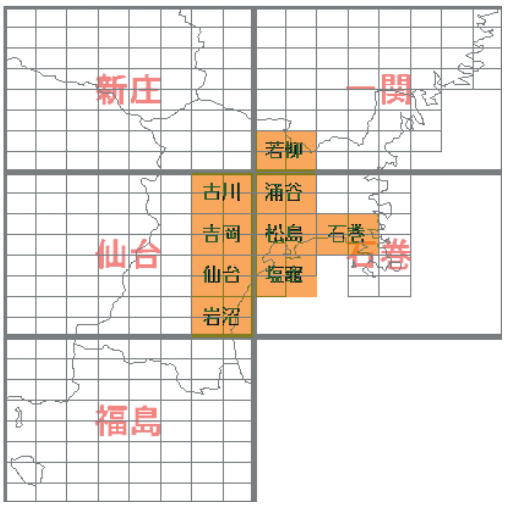


図－２　市区町村別の建物用地の津波浸水率

総務省統計局（2011）は，国土地理院が公表した津波浸水範囲データと 2010 年国勢調査速報値の基本単位区データとを重ね合わせて，浸水範囲の人口・世帯の目安を推定している．この結果による市区町村別の浸水域人口率と図－２の結果（市区町村別建物用地の津波浸水率）との関係をグラフにしたものが図－３である．図－３では，基本的に人は建物用地に居住していると考えられるので，建物用地の浸水率が大きくなると人口の浸水率も大きくなると推測される．図－３にもそのような傾向が認められるが，大きく２つのグループに分かれる．１つは宮城県の海岸平野が広がる市町村グループであり，もう１つは宮城県のリアス式海岸の市町村と岩手県，福島県の市町村のグループである．前者はグラフの左上側に，後者は右下側に位置するが，これは沿岸部の人口密度の違いを反映しているものと考えられる．リアス式海岸では海岸平野と比べて沿岸部に人口密度の高い集落が集中しているため，人口浸水率が建物用地の浸水率に対して高くなる傾向があると解釈できる．



図－３　建物浸水率と人口浸水率の関係



図－４　宮城県における土地条件図の整備範囲

３．地域を絞った解析の範囲

地形分類情報を活用した地理情報解析を，土地条件図の整備が進んでいる宮城県を対象に行った．解析は，震災後すぐに入手可能であったデータのみによる予備的な解析と，それらに詳細な DEM や判読により新たに作成した情報を加えた詳細な解析の２種類行った．

宮城県で土地条件図が刊行されている図面の範囲（図－４）で，国土地理院が作成した「地球地図日本」（国土地理院技術資料 D・1-No.576）の海岸線データからバッファを発生させて海岸線から内陸へ７km までの範囲を解析の対象とした（島しょ部を除く）．海岸線から７km としたのは，津波の浸水範囲が河川部の遡上を除くと概ね海岸線から７km より内陸には及んでいなかったからである．ただし，この解析は浸水・非浸水の区分，土地利用，地形分類のみの予備的な解析である（以下，「解析Ａ」という．）．一方，リアス式海岸などを除いた一般的な海岸平野における津波被害の地形的特徴を見るため，仙台平野（仙台港から磯浜漁港付近まで）を対象により詳細な地理情報解析を行った．対象となる行政範囲は，仙台市宮城野区，同若林区，名取市，岩沼市，亘理町，山元町である．この範囲については，航空レーザにより地震後に計測された詳細地形データ（LiDAR DEM），空中写真判読により津波被害状況を３段階に区分したポリゴンデータ，MMS により計測した浸水深データ，及び「解析Ａ」の土地条件図に含まれなかった，「岩沼」図面の南側の範囲の地形分類データも既存地理空間情報や空中写真の判読により追加して，より詳細な解析を行った（以下，「解析Ｂ」という．）．

４．土地条件図の作成範囲を対象にした地形と土地利用の予備的な関連性解析（解析Ａ）

４．１　使用したデータ

「解析Ａ」は，既存の地理空間情報のみを使用した解析である．使用した地理空間情報は，以下の通りである．

４．１．１　土地条件図の地形分類ポリゴンデータ

今回の解析に使用した土地条件図は，「石巻」「松島」「吉岡」「塩竈」「仙台」「岩沼」の６図葉である．1971～72 年度に国土地理院により作成された．現在図面はベクトル化されており，地形分類のポリゴンデータそのものを使用した．地形分類は，土地条件図の中分類に従い，斜面，変形地，台地・丘陵，山麓堆積地形，低地の微高地，凹地・浅い谷，低地の一般面，頻水地形，水部，人工地形の 10 区分としている．

４．１．２　国土数値情報の土地利用細分メッシュデータ

このデータは国土交通省国土計画局により 2006 年度に作成されたデータである．その内容は２章で説明済みである．土地利用種別は，田，その他の農用地，森林，荒地，建物用地，幹線交通用地，その他の用地，河川地及び湖沼，海浜，海水域，ゴルフ場の 11 区分である．

４．１．３　津波浸水域ポリゴンデータ

このデータは国土地理院が 2011 年度に作成した．この内容は２章で説明済みである．

４．２　解析方法

地球地図の海岸線データ（島しょを除く）から陸側に７km のバッファを発生させ，１km 帯毎に津波浸水域と津波非浸水域とに分け，ArcGIS で土地条件図の地形分類ポリゴン，国土数値情報の土地利用細分

メッシュデータとオーバレイし，ポリゴンデータとして面積集計した．

４．３　浸水域の土地利用と地形分類の解析結果

浸水域の土地利用別面積を地形分類別に細分したグラフを図－５に，地形分類別面積を土地利用別に細分したグラフを図－６に，非浸水域の土地利用別面積を地形分類別に細分したグラフを図－７に，地形分類別面積を土地利用別に細分したグラフを図－８に示す．

浸水域の土地利用は面積順で，田，建物用地，その他用地，河川地及び湖沼である．浸水した田の地形分類は，大半が低地の一般面で，次いで低地の微高地である．浸水した建物用地の地形分類は，低地の微高地が約半分で，次いで人工地形，低地の一般面である．

浸水域の地形分類は面積順で，低地の一般面，低地の微高地，人工地形である．浸水した低地の一般面の土地利用は，3/4 が田で，次いで建物用地，その他の用地である．浸水した低地の微高地の土地利用は，約半分弱が建物用地で，次いで森林，田，その他の農用地がほぼ同面積で続いている．

非浸水域の土地利用は面積順で，森林，田，建物用地である．非浸水の森林の地形分類は大半が斜面である．非浸水の田の地形分類は８割が低地の一般面である．非浸水の建物用地の地形分類は面積順で，低地の微高地，低地の一般面，人工地形と続く．

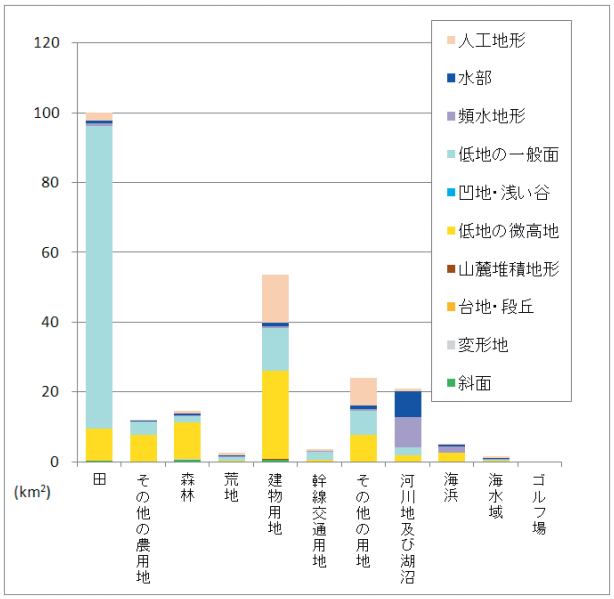
非浸水域の地形分類は面積順で，斜面，低地の一般面，低地の微高地，人工地形である．非浸水の斜面の土地利用は，85％が森林である．非浸水の低地の一般面の土地利用は，６割弱が田で，次いで建物用地，森林と続く．非浸水の低地の微高地の土地利用は，６割強が建物用地である．

以上の結果を浸水面積の大きな土地利用である田と建物用地に着目して見ると，浸水した低地の一般面に占める田の割合に対し，浸水しなかった低地の一般面における田の占める割合が小さくなっている．一方，浸水した低地の微高地については，田以外の農用地，森林，建物用地など様々な土地利用が混在するのに対し，浸水しなかった低地の微高地は建物用地の割合が明らかに高い．これは，津波浸水しやすい海岸線に近い微高地（砂州・砂堆等）と津波浸水しにくい海岸線から遠い微高地（自然堤防等）との，土地利用の違いを示していると考えられる．市街地の発達は内陸側から延びてきており，自然堤防などの内陸側の低地の微高地は宅地化が進んでいるのに対し，海岸線に近い低地の微高地である砂州・砂堆はそれほど開発が進んでおらず，様々な土地利用が残されている．

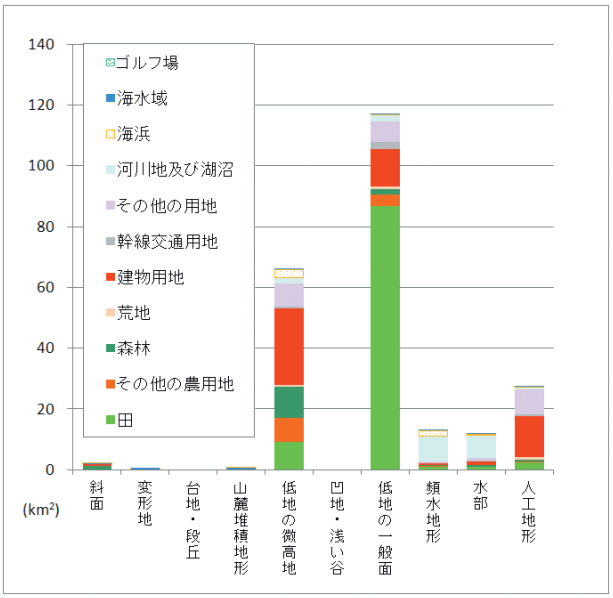
５．仙台平野の浸水域の地理的特徴の解析（解析Ｂ）

５．１　使用したデータ

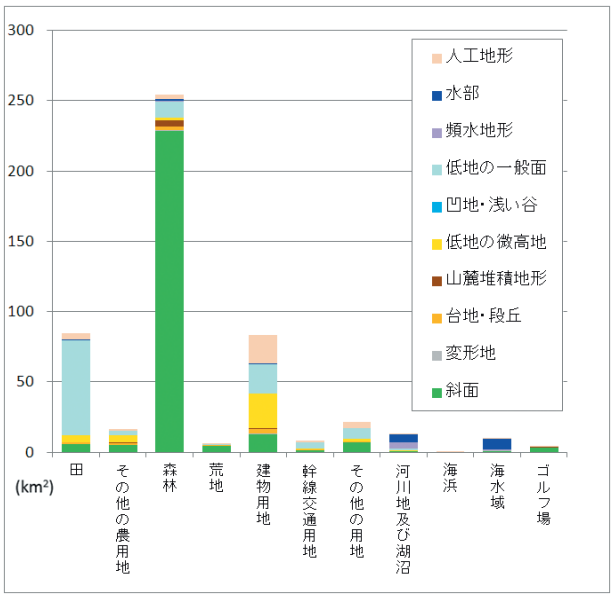
仙台平野全域を対象にした「解析Ｂ」では，いくつかの地理空間情報について新規に作成した．その概要を以下に示す．



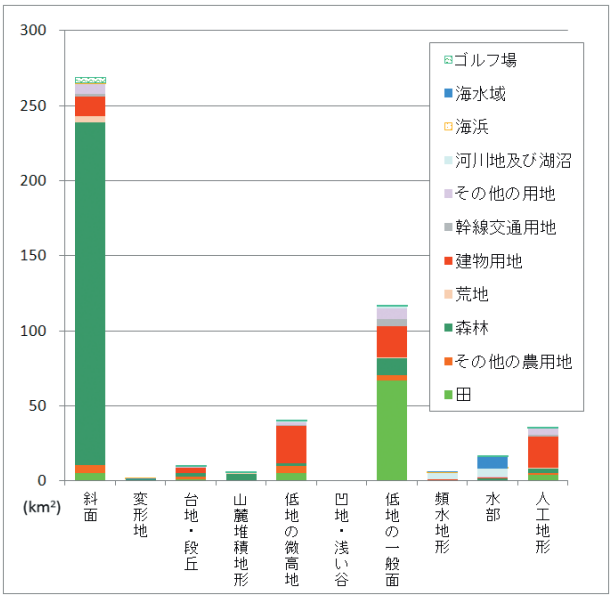
図－５　海岸線から７km までの浸水域の土地利用別（地形分類別細分）面積



図－６　海岸線から７km までの浸水域の地形分類別（土地利用別細分）面積



図－７　海岸線から７km までの非浸水域の土地利用別（地形分類別細分）面積



図－８　海岸線から７km までの非浸水域の地形分類別（土地利用別細分）面積

５．１．１　津波被害状況別ポリゴンデータ

国土地理院が災害後に撮影した空中写真（オルソ画像）を判読して，津波の被害を３段階に区分して GIS ポリゴンデータを作成した．判読に用いた空中写真は，2011 年３月 12 日から４月５日にかけて撮影され，国土地理院のホームページで電子国土 Web システムを利用して公開されている表示縮尺 1/2,500 のオルソ画像である．被害の大きい方から Rank１～３に区分している．空中写真判読に際しては，同じく空中写真判読により被害状況を区分した日本地理学会災害対応本部津波被災マップ作成チーム（2011）（以下，日本地理学会（2011）という.）や国土交通省都市・地域整備局（2011）を参考にしたが，基本的には独自に判読基準を決めて判読した．日本地理学会（2011）と国土交通省都市・地域整備局（2011）は，建物のある地域のみを区分しており，農地や森林等を区分していないが，筆者らは建物のある地域以外も含めて全域を被害状況に応じて３段階に区分した．

Rank１は建物の大半が流出するなど壊滅的な被害を受けた箇所である．建物のある地域の判読は容易であり，災害前の空中写真と比較しながら，概ね７割程度以上の建物が流出した場合と概略的に定義した．しかしながら，厳密に建物の数を数えたわけではなく，日本地理学会（2011）の津波被災マップを参考にして，総合的に判断して決めている．森林部や農地は壊滅的な被害の認定が難しいが，元々の土地利用が回復しがたいほどの被害を受けている地域と定義した．例えば，森林等では半分程度以上の樹木が流出したり倒れたりしているような状況である．ただし，土地利用に応じて Rank１の境界が大きく変化することは好ましくないので，建物のあった地域の判読結果による Rank１の分布と調和的になるように境界線を引いている．

Rank２は建物の流出は少ないものの破損が酷く，周囲にがれきが堆積しているような範囲である．建物のある地域では，流出が５割以下の地域から，建物は流出していないががれき等に覆われて破損しているような地域までが含まれる．がれきの堆積状況等から農地も含めて区分した．従って，Rank２と Rank３との境界は，がれき前線に相当する．がれき前線の判読という視点で見ると，Rank２の農地の判読はそれほど困難ではなかった．

Rank３は上記以外の津波浸水範囲である．基本的には浸水のみの被害で，建物の破壊等の被害は無かった地域である．空中写真判読では，浸水しているものの，がれき等の堆積は認められなかった範囲である．Rank３の最も外側は，国土地理院が公表した浸水範囲を原則的に採用しているが，2011 年 11 月に行った現地確認調査並びに聞き取り調査の結果，大きなズレが認められた箇所については，地形解析の結果に大きな影響を与えることが懸念されたため，解析Ｂにおいてのみ修正を行っている．具体的には，仙台市若林区南田中地区周辺のみ，修正を加えている．

結果の一部として，閖上地区や仙台空港周辺の津波被害状況を区分した結果を図－９に示す．

５．１．２　MMS により求めた浸水深

国土地理院では新技術を利用して詳細な被災現況

図－９　写真判読で求めた津波被害分類（３ランク）閖上地区・仙台空港周辺

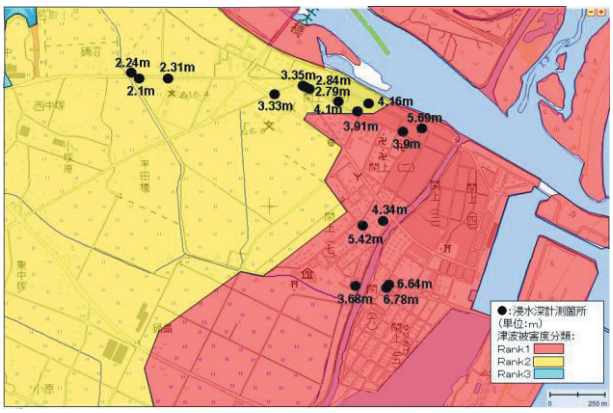
を記録することを目的に，車載型画像計測システム（Mobile Mapping System; 以下「MMS」という）による画像計測を行った．調査の実施にあたっては，（社）日本測量機器工業会の機器提供等の協力を受けている．仙台平野に関しては，名取市閖上地区周辺と岩沼市仙台空港周辺で計測を行っている．MMS のシステム外観を図－10 に示す．

MMS とは，360° 全方位カメラ（地上５方向と上空を撮影する計６台のデジタルカメラ）を車上に搭載連続撮影画像データと GPS 及び IMU による位置情報を同時に記録するシステムである．それにより，３次元位置情報を持つ映像データが取得でき，空間情報の計測が可能となっている．津波痕跡上と地表の２箇所を選択すると，画像データの演算処理に基づき２点間の標高差が得られる（図－11）．

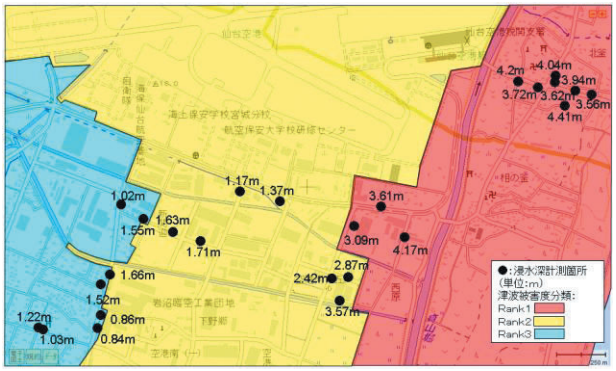
筆者らは MMS の画像から建物等に残された津波の痕跡を読み取り，その地表からの高さを計測し，津波の浸水深とした．今回は閖上地区と仙台空港周辺について計測を実施した（岡谷・小荒井，2011a, b）．閖上地区について津波浸水深を計測した結果を，津波被害状況３区分と重ね合わせたものを図－12 に，仙台空港周辺の同様の図を図－13 に示す．

図－10　MMS の装置の外観

図－11　津波の浸水深の計測の状況



図－12　MMS データの計測による閖上地区の浸水深分布



図－13　MMS データの計測による仙台空港周辺の浸水深分布

５．１．３ 地形分類ポリゴンデータ

地形分類のポリゴンデータは，解析Ａと同様に土地条件図の地形分類ポリゴンデータを使用したが，仙台平野に関しては「仙台」と「岩沼」の図面しかないため，仙台市宮城野区から亘理町の一部までしか地形分類のデータがない．そのため，亘理町から山元町にかけては，1961 年撮影の縮尺 1/10,000 の空中写真を判読して地形分類を行った.その範囲は，土地分類基本調査の地形分類図「角田」（宮城県，1986）の範囲に該当するため，同地形分類図を参考にした．土地条件図の地形分類と土地分類基本調査の地形分類とは,分類の項目と基準とが異なるため，基本的に土地条件図の分類項目と基準に準拠して地形分類を行ったが，地形境界線については極力，土地分類基本調査の地形分類の境界線を使用するようにした．

土地条件図の地形分類については，解析Ａでは中分類に集約して解析を行ったが，津波浸水域の地形解析では低地の微地形がどれだけ影響しているのかを検討したいため，低地の微高地，低地の一般面の２つの中分類項目については小分類項目まで区分し，その他の地形は中分類のまま集約した．すなわち，低地の微高地は扇状地と自然堤防・砂州・砂堆の２つに，低地の一般面は谷底平野・氾濫平野，海岸平野・三角州，後背低地，旧河道の４つに細分した．

地形分類図「角田」においては，低地は「一般低地」と「後背低地」の２つにしか区分されていない．地形分類図「角田」の「一般低地」は小河川の山地からの出口周辺にしか分布しておらず，山地を刻む谷部には広く「最低位段丘」が分布していた．今回の地形分類では，これら２つの地形分類を「谷底平野・氾濫平野」とした．一方，地形分類図「角田」の「後背低地」については，基本的には土地条件図「岩沼」との連続性から「海岸平野・三角州」とし，砂州間低地の部分のみ「後背低地」とした.「谷底平野・氾濫平野」と「海岸平野・三角州」の境界を写真判読のみで決めることはかなり難しいため，地形分類図「角田」の「一般低地」と「後背低地」の境界が該当すると一義的に決めた．

なお，土地条件図「岩沼」では,「後背低地」は鳥の海周辺の湿地的環境の箇所に限られており，鳥の海の南に何本かある砂州の砂州間低地は必ずしも「後背低地」に分類している訳ではない．従って，「角田」の範囲の地形分類の結果は，土地条件図と比べて「後背低地」を広めに分類している可能性がある．

また，地形分類図「角田」の範囲では小河川しか無く，旧河道については認定しなかった．写真判読の結果では旧河道の可能性のある地形が皆無という訳では無かったが，土地条件図「仙台」「岩沼」の旧河道は，名取川と阿武隈川周辺のかなり明瞭な旧河道しか認定しておらず，それと同じ基準で旧河道と言えるものは無かった．

上述のような基準で作成した地形分類の結果を，津波被害状況の３分類，海岸線から１km 刻みのバッファと重ね合わせて表示した図を，図－14 に示す．図からわかる地形的特徴を記述する．

海岸線から１km の範囲では，砂州・砂堆が発達している．阿武隈川より北側では幅の広い砂州・砂堆が発達するが，阿武隈川より南側では砂州・砂堆の幅は狭くなるが，３～６本の砂州・砂堆が南北方向に連続するといった感じで，北側と南側で発達状況に大きな違いが認められる．

海岸線から１km より内側には，海岸平野・三角州が発達する．名取川より北では海岸線から５～６km くらいまで，名取川と阿武隈川の間では海岸線から７km 以上内陸でも海岸平野・三角州が分布する．阿武隈川より南側は，南に行くほど山地・丘陵が海に近づいており，海岸線から６km まで分布した海岸平野・三角州が山元町の南では海岸線から１km までと狭くなってきている．

谷底平野・氾濫平野は，七北田川，名取川，阿武隈川の大きな河川沿いに発達する．この３つの河川沿いについては，海岸線から１km の距離くらいまで分布している．それ以外の箇所については，山地・丘陵を刻む小さな谷の内部と出口周辺部に限定されている．自然堤防と旧河道は，３つの大きな河川沿いでのみで発達して分布している．

５．１．４ LiDAR DEM データ

航空レーザ測量により計測された詳細標高データは，震災前のデータもあるが，地震時の地殻変動が生じた後に津波が到達しているので，震災後に計測された LiDAR の DEM を使用することにした．平成 23 年３月 19 日～４月６日に宮城県が航空レーザ測量で計測した DEM データと,平成 23 年５月～６月に国土地理院が航空レーザ測量により計測した DEM データとがある．３月～４月に計測した DEM については，内陸部まで広範囲に取得されているが，湛水していた範囲が大きく，欠測となっているグリッドの数が多い．５～６月に計測した DEM は，沿岸域のみであるが湛水域が縮小していたため，両データを統合して使用した．

この DEM を，津波被害状況の３分類，海岸線から１km 刻みのバッファと重ね合わせて表示した図を，図－15 に示す．図を見ると，特に阿武隈川より北側は，標高２m津波浸水域の境界と良く対応していることがわかる．

５．１．５　国土数値情報の土地利用細分メッシュデータ

このデータは，解析Ａで使用したデータや全国の浸水域の土地利用の解析に使用したデータと全く同じである．仙台平野の土地利用について，津波被害状況の３分類，海岸線から１km刻みのバッファと重ね合わせて表示した図を，図－16に示す．図からわかる土地利用的特徴を記述する．

海岸線から１km以内の範囲には，森林が連続的に存在する．名取川より北側では，建物用地が集中するところが１箇所ある以外は大半が森林であるが，名取川と阿武隈川の間では，森林の内陸側にその他農用地や建物用地が点在する．阿武隈川より南側では，森林の幅が狭く，その内陸側にはその他農用地が広く存在し，建物用地が点在する．

海岸線から１kmよりも内陸側は，基本的に田が広く分布し，その範囲は海岸線から４～５kmまで続く．その間に，建物用地やその他農用地が点在する．それらは，海岸線と平行な方向に延びているように見え，図－14と比べると砂州・砂堆上に分布していることがわかる．阿武隈川より南側は，その他農用地と建物用地が密集するエリアが帯状に南北に延びているのが明瞭である．これらも図－13と比べると，砂州・砂堆上に分布していることが明瞭である．

仙台平野の北半分は，海岸線から４～５kmより内陸側に建物用地が密集するエリアが広く認められる．南半分は，山地・丘陵部と平野部の縁に沿って，建物用地が点在している．

その他用地が密集している場所が２箇所あるが，北から仙台港と仙台空港である．

５．２　解析方法

地球地図の海岸線データ（島しょを除く）から陸側に７kmのバッファを発生させ，１km帯毎に津波浸水域を被害程度で３分類と津波非浸水域の４区分に分け，ArcGISで地形分類ポリゴン，国土数値情報の土地利用細分メッシュデータ，LiDARのDEMとオーバレイし，メッシュデータとして集計した．LiDARのDEMは５ｍ間隔の格子状のポイントデータとなっているが，このままでは大容量で扱いづらいため，ラスターデータに変換した。この際，ArcGIS上では画素サイズを５ｍのままにするとデータ変換時に隙間ができてしまうため，画素サイズを６ｍ四方としてリサンプリングを行った。そして，LiDAR DEMの各画素に対応する 10ｍメッシュの土地利用と地形分類情報を抽出した．

この結果，６ｍグリッド単位で，ＸＹ座標，LiDARのDEMの標高，土地利用11区分，地形分類14区分，浸水被害の程度４区分（浸水なしも含む）を一覧にした集計表が作成された．この集計表に基づき，標高，地形分類，土地利用と津波浸水被害程度との関連性を解析した．MMSによる浸水高の計測結果については，離散的な分布のデータであるため，津波浸水域の被害程度３分類との関連性について，定性的に検討した．

５．３　津波の浸水深と被害の関係

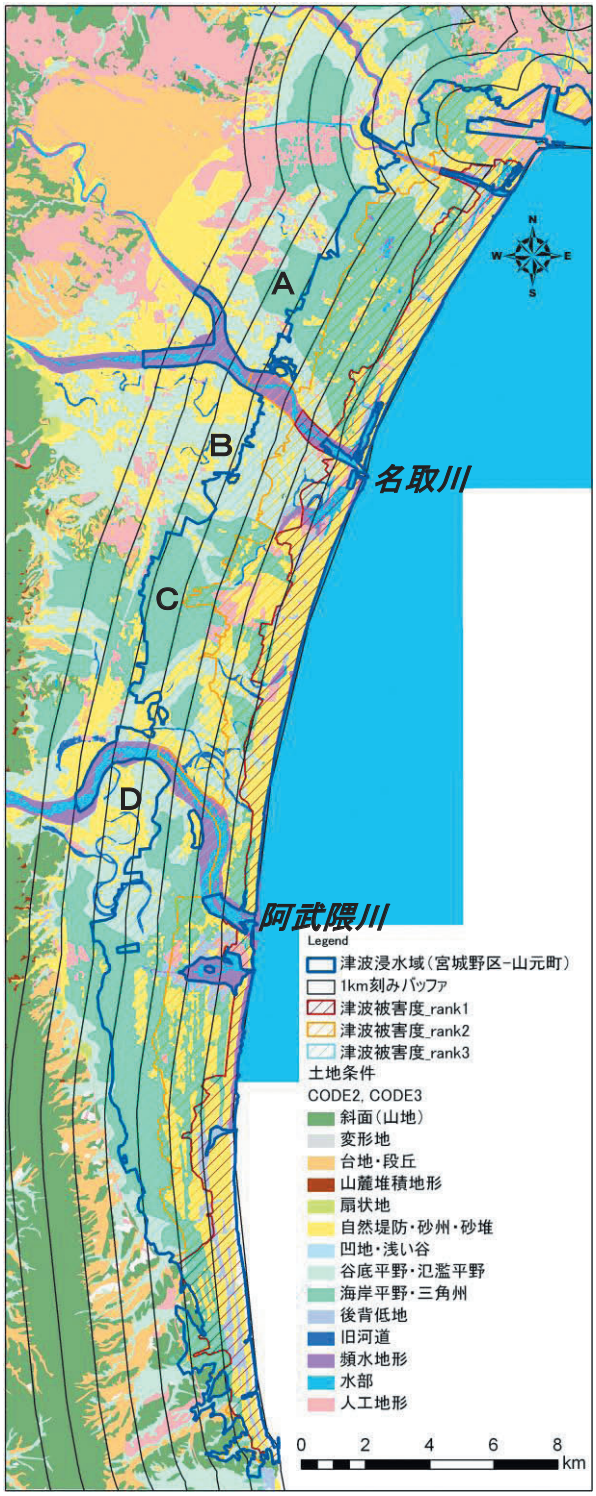
５．３．１　MMSで計測した浸水深と被害との関係

MMSで求めた浸水深を津波の建物被害状況と重ね合わせた図を，閖上地区について図－12に，仙台空港周辺について図－13に示す．赤色がRank１に黄色がRank２に該当する．

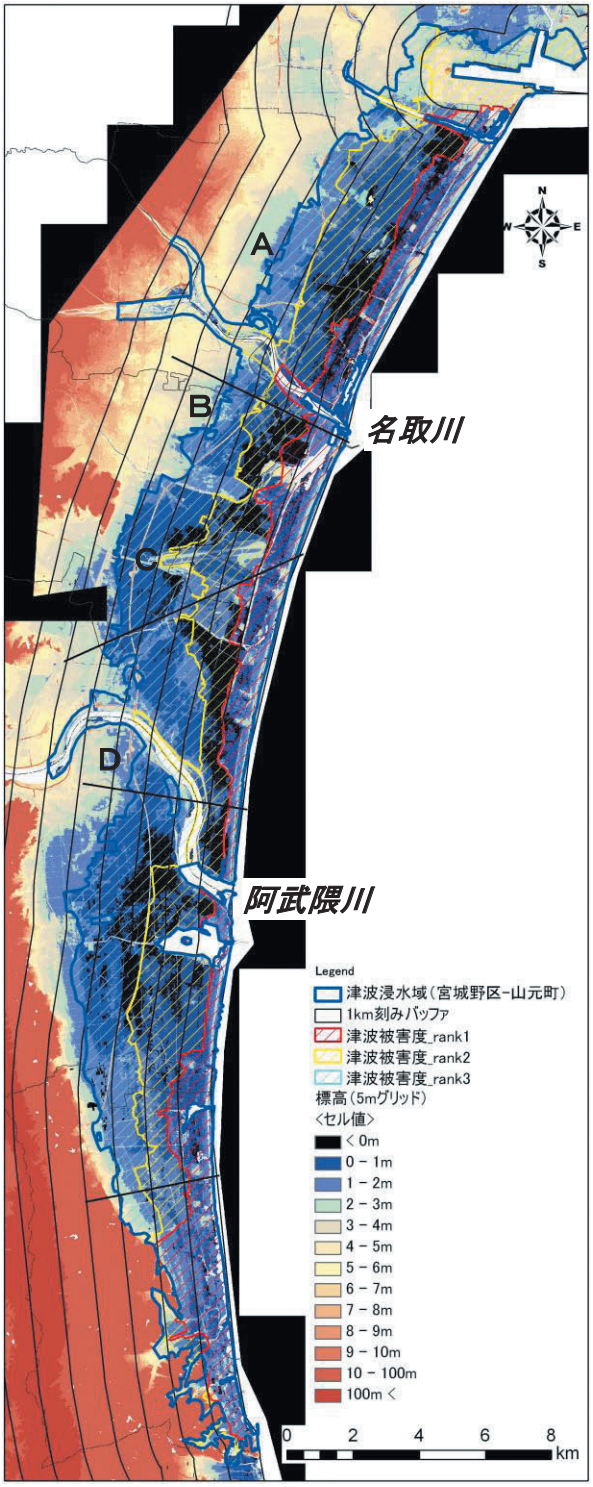
図－12をみると，閖上地区では海岸に近いところでは６ｍを超えるような浸水深であり，西側（内陸側）に向かうと徐々に浸水深は下がるものの，４ｍ程度の値が広く分布している．このような場所は，建物の流出が激しいRank１に相当する．さらに西側に向かうと浸水深は２ｍ程度に低下するが，そのような場所は，建物の流出が一部見られるRank２のエリアとなる．

図－13をみると，仙台空港周辺では海岸に近いところでは４ｍ近い浸水深であり，建物の流出が激しいRank１のエリアに相当する．工業団地付近では，東側は浸水深が４ｍだが，西側に向けて急激に低下し，建物の流出が一部見られるRank２のエリアへと移行する．更に西側の住宅街では１ｍ程度の浸水深であり，瓦礫の到達はあるが建物自体の損傷はあまり激しくない状況である．

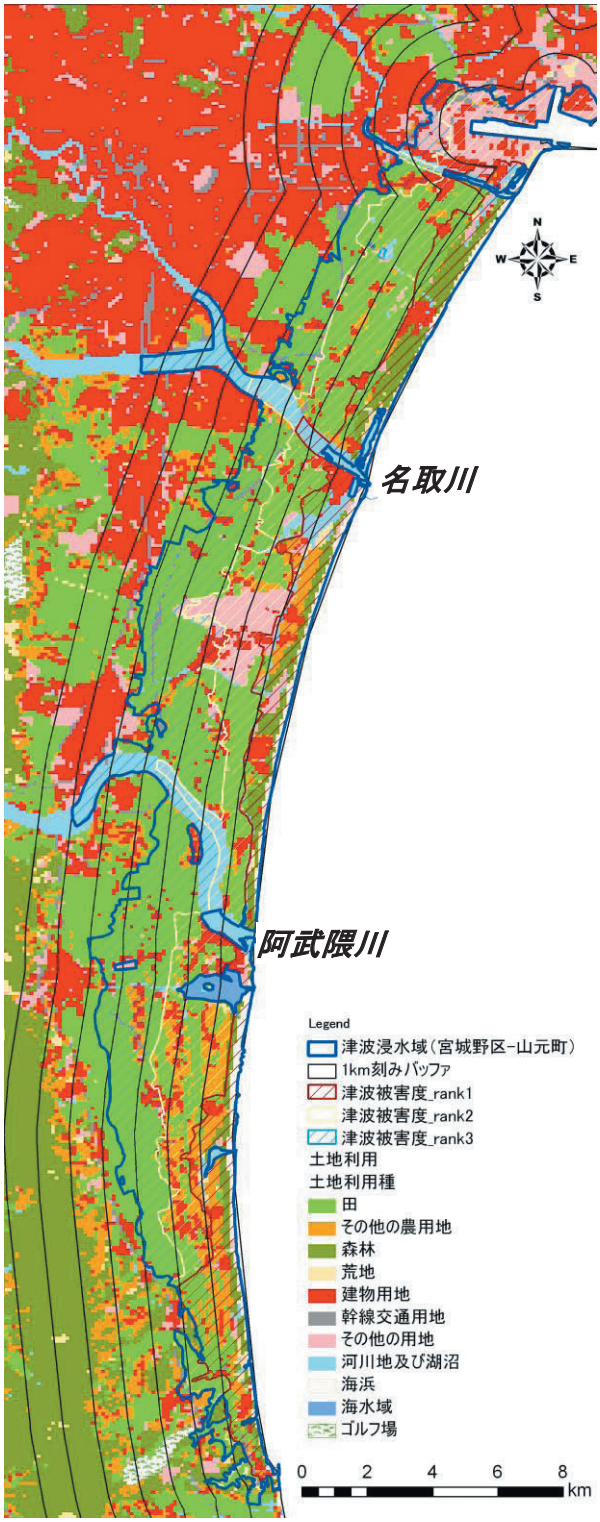
以上の状況から，概ね浸水深が４ｍを越えるとRank１に，概ね浸水深が1.5ｍを越えるとRank２になっていること分かる．図－14，15，16を見ると海岸線から１km以内は概ねRank１に分類されている．ここまでは標高に関係なく，浸水深が４ｍ以上あったことが推測される．津波の浸水高については，東北地方太平洋沖地震合同調査グループ（2011）が現地調査により計測した結果をWeb等で公開している．筆者らのMMSによる津波浸水深の計測結果と11月の現地調査における津波浸水深の現地計測結果をLiDARのDEMを加算することで浸水高に置き換えて，合同調査グループの浸水高データと合わせたものを図－17に示す．この図を見ると，MMSの計測結果も合同調査グループによる計測結果と１ｍ程度の誤差で良く対応しているように見える．



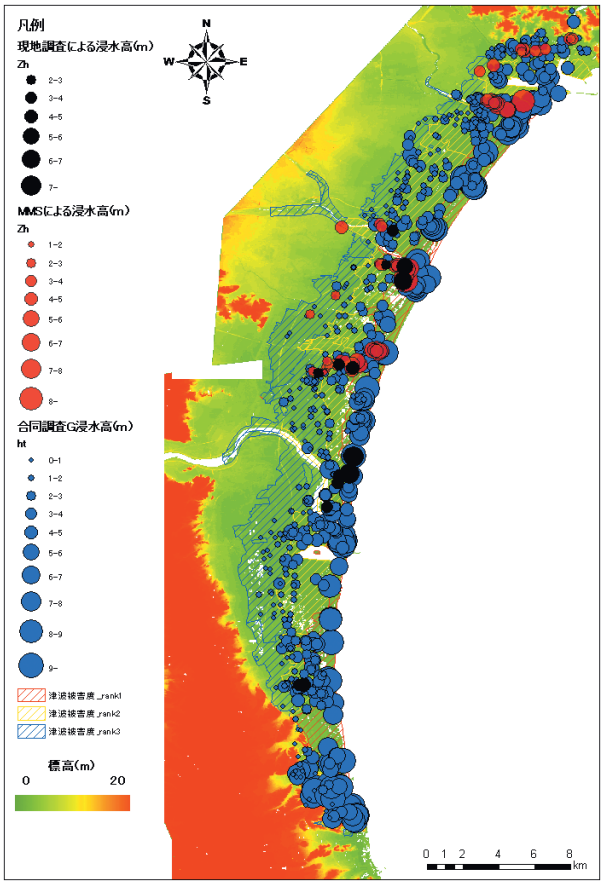
図－14　海岸線からの１km ごとのバッファと地形分類，津波被害状況との重ね合わせ



図－15　海岸線からの１km ごとのバッファと LiDAR による DEM，津波被害状況との重ね合わせ



図－16　海岸線からの１km ごとのバッファと土地利用，津波被害状況との重ね合わせ



図－17　合同調査グループによる津波浸水高のデータと MMS 計測並びに現地調査で計測した浸水高

５．３．２　具体的な断面における標高と浸水高

津波の被害状況と浸水深，地形との関連性をみるために，代表的な４箇所で標高と浸水高の断面図を作成した．断面図を作成した位置は図－15 の黒直線の位置である．MMS による浸水深の計測を行った閖上地区の断面図を図－18 に，同じく仙台空港周辺の断面図を図－19 に示す．また，MMS による浸水深の計測は行っていないが，筆者らが現地調査で浸水深の計測を行った箇所を取り上げて，阿武隈川河口部の断面図を図－20 に，山元町の JR 山下駅周辺の断面図を図－21 に示す．標高データは LiDAR の DEM による．浸水高のデータは基本的に筆者らが計測した MMS のデータか，現地調査の結果のみを使用しているが，大半の建物が流出した Rank１のエリアでは筆者らの計測した津波浸水高のデータが少ないため，合同調査グループのデータも使用して断面図を作成した．

津波被害度 Rank１の範囲は，海岸線から約１km の範囲に該当しているところが多い．同範囲は砂州・砂堆等の低地の微高地となっており，浸水高と標高との差にあたる浸水深を見ると，４m以上の深さになっている箇所が多いように見受けられる．浸水深を見てみると，津波が標高１～３m程度ある微高地を通過した後，標高０m程度の低地の一般面に該当する箇所になると，浸水深が急激に減少して２m程度に変化している．このような傾向は，今回断面図を作成した４箇所ともに見られる傾向である．

阿武隈川河口部周辺は，Rank１の被害の範囲が狭

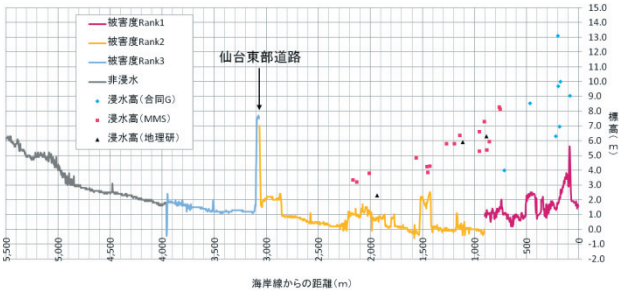
く，海岸線から 500m程度しか離れていない集落でも建物は流出されずに残されており，海岸線から１km 以内でも被害度の Rank が２となっている．そのような箇所の浸水深を現地調査で測ると 2.5m程度であり，明らかに Rank１のエリアの浸水深よりは浅くなっており，被害の程度としては妥当な結果となっている．図－18，19 を見ると標高が低くなる海岸線から１km くらいの位置で，図－20，21 を見ると標高が低くなる海岸線から 500mくらいの位置で，浸水高が下がっている．その理由については現時点では不明であるが，津波が砂州・砂堆等の微高地を通過する際に，エネルギーを失って急激に浸水深が低下している可能性がある．

そのような視点で見ると，JR 山下駅周辺の山元町では，標高自体は海岸線から 500mの位置で低くなって浸水高も下がっているが，Rank１の範囲は海岸線から 900mの位置まで来ている（図－21）．その違いの理由は良くわからないが，阿武隈川河口の北と南で地形や土地利用の状況が違うことが，影響しているのかも知れない．仙台市若林区，名取市，岩沼市などの北部の沿岸の砂州・砂堆は，１本の幅の広いものが存在し，沿岸林も幅の広いものが存在する．一方，南部の山元町では，幅の狭い砂州・砂堆が数本存在するという地形をしており，砂州の土地利用も森林部が狭く，畑地が広いという状況である．森林と農地とでは，津波の抵抗となる粗度が明らかに違うので，山元町で被害が大きくなったことの説明が可能である．

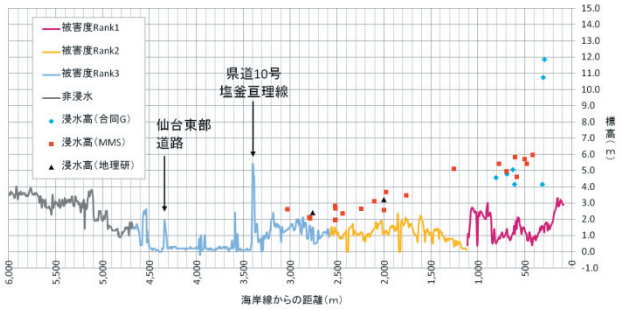
また，山元町南部は海岸線から２km 以上離れていても，Rank１の被害があった．この周辺の海岸平野自体は，標高が亘理町の海岸平野より低い（図－15）．そのため，津波の浸水深が他の地域より深くなっていることが考えられ，合同調査グループの計測結果も浸水高が高くなっている（図－17）．

一方，阿武隈川河口周辺で津波被害が相対的に低かった理由に，阿武隈川自体の河口の形状が影響していた可能性がある．阿武隈川は河口部で大きく蛇行し，海岸線と平行に流れている箇所がある．河口部の集落に住んでいる方からのヒアリングでは，津波自体が海岸線側からと阿武隈川からの２方向から来たそうである．２方向からの水流の到達が，建物の流出という点について，被害を増大する方向に働くのか，軽減する方向に働くのかは未検討である．しかし，海岸線と平行な方向に延びる自然堤防上の集落が，海岸線から２km しかない場所に位置していても浸水しなかった事実がある．これらのことから，阿武隈川やその堤防が何らかの影響を及ぼした可能性は高いと考える．

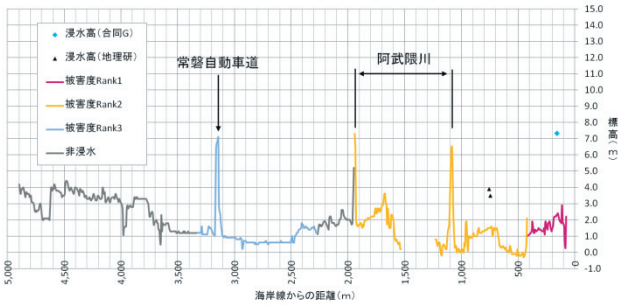
がれき前線の範囲でもある津波被害状況 Rank２の範囲は，海岸線から約２～３km までの範囲に該当



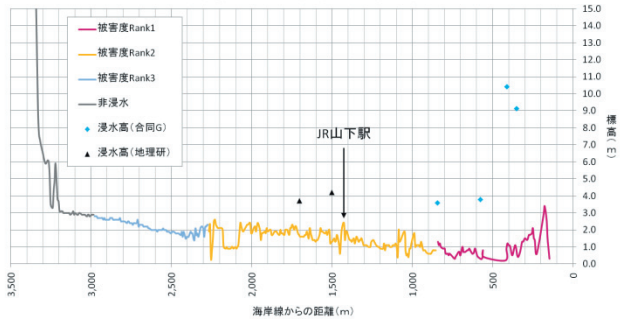
図－18　名取市閖上地区を含むエリアの標高と津波浸水高の断面図



図－19　岩沼市仙台空港周辺地区を含むエリアの標高と津波浸水高の断面図



図－20　岩沼市・亘理町の阿武隈川河口部周辺の標高と津波浸水高の断面図



図－21　山元町のＪＲ山下駅周辺を含むエリアの標高と津波浸水高の断面図

しているところが多い．図－14，15，16を見る限りは，余り地形分類に大きく左右されている傾向は見られない．海岸線から約２～３km範囲の出入りに最も大

きな影響を与えているのは，標高と考えられる．図－15のRank２と３の境界線である黄色い線を見ると，標高１ｍ未満と１ｍ以上の境界あたりに該当している．特にその傾向が明瞭なのは，名取川と阿武隈川の間のエリアである．また，仙台空港ではRank２と３の境界線が内陸に張り出しているが，これは空港の滑走路という粗度の低い土地被覆であることが影響した結果と考えられる．

図－18～19の地形断面を見ると，標高は人工構造物による起伏はあるものの，概ね平らであり，標高０～１ｍの範囲に収まっているものが多い．浸水高と標高との差にあたる浸水深を見ると，２～３ｍ程度の深さになっている箇所が多い．図－18の閖上地区の断面図を見てみると，Rank２と３の境界部で大きな起伏が認められるが，これは仙台東部道路である．このような人工的な大起伏が，津波被害の程度を大きく変える境界部となっている．

５．４　浸水・非浸水と地形分類・標高の関係

５．４．１　地形分類毎の標高のヒストグラムと浸水との関係

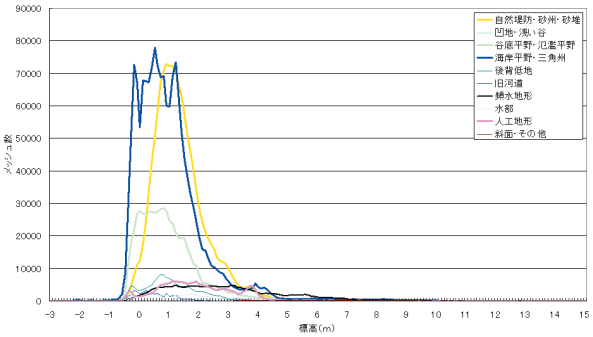
津波被害度Rank３の外縁は，浸水域と非浸水域の境界になる．浸水域の地形分類と標高の特徴を見るため，海岸線から７kmまでの浸水域の標高毎のヒストグラムを地形分類毎に集計した結果を図－22に，同じく非浸水域の標高毎のヒストグラムを地形分類毎に集計した結果を図－23に示す．

浸水域を占める地形は，低地の微高地，谷底平野・氾濫平野，海岸平野・三角州の３つが主なものである．それぞれの地形でヒストグラムのピークを示す標高値に差はあるものの，浸水域の標高値は－１ｍ～３ｍの間に入るものが大半である．一方，図－23に示す非浸水域であるが，それぞれの地形でヒストグラムのピークを示す標高値に差はあるものの，非浸水域の標高値はほとんどが１ｍより大きいものである．従って，地形分類に関係なく，標高１ｍ以下はほとんどが浸水で，３ｍ以上はほとんどが非浸水で，標高１～３ｍは状況によって浸水したりしなかったりするので，そこに地形分類の結果が反映される可能性がある．

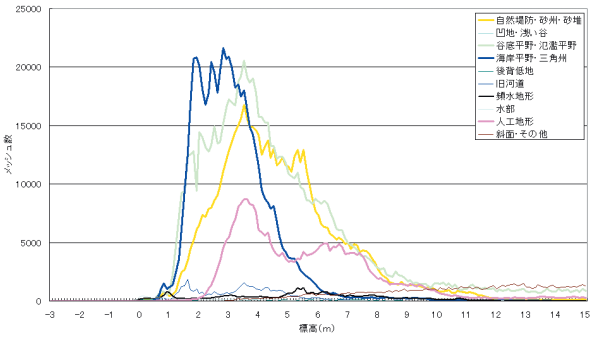
地形分類毎に特徴を見てみると，浸水した海岸平野・三角州と谷底平野・氾濫平野のピークは，０～２ｍの範囲になるのに対し，浸水した自然堤防・砂州・砂堆のピークは１～２ｍの範囲になる．標高が高くても浸水しているのは，海岸線に近い砂州・砂堆が浸水したのを示していると考えられる．

一方，非浸水のピークは，海岸平野・三角州が標高２～３ｍなのに対し，自然堤防・砂州・砂堆と谷底平野・氾濫平野は標高３～４ｍとなる．

この結果が意味するところは，谷底平野・氾濫平野は，浸水と非浸水の境界が標高２ｍ程度で明瞭に分かれるのに対し，海岸平野・三角州は標高１～２ｍの間で，低地の微高地は標高２～３ｍの間で，少しずつ浸水から非浸水に変わっていっていることを示している．



図－22　仙台平野の浸水域の地形分類と標高の関係

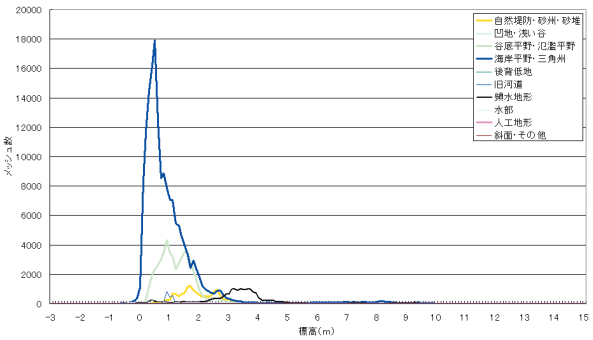


図－23 仙台平野の非浸水域の地形分類と標高の関係

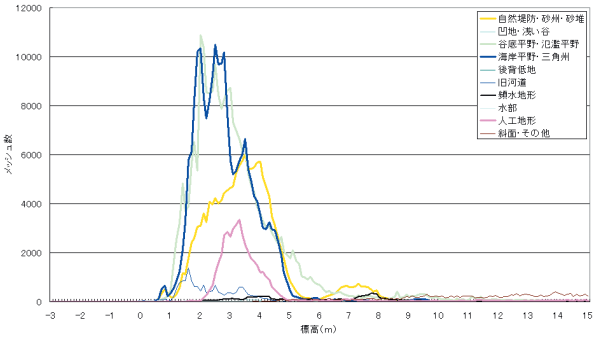
海岸線から３kmまではほとんどが浸水していたが，それより内陸側では非浸水域が少しずつ出現してくる．Rank３の範囲である浸水と非浸水の境界であるが，図－14，15，16を見ると海岸線から４～５kmの範囲に該当することが多い．そこで，海岸線から４～５kmの範囲で浸水した地形分類の標高毎のヒストグラムを図－24に，同じく海岸線から４～５kmの範囲で非浸水域の地形分類での標高毎のヒストグラムを図－25に示す．

この距離帯では，自然堤防・砂州・砂堆などの微高地は大半が非浸水，谷底平野・氾濫平野は９割近くが非浸水で残りが浸水であるのに対し，海岸平野・三角州は浸水と非浸水の比率は約２：１である．

図－14を見ると，名取川沿岸や阿武隈川沿岸などは谷底平野・氾濫平野が発達するが，そのような場所は周囲と比べて標高が高く（図－15），浸水域の範囲の外縁が海岸線側に引っ込んでいる（図－14，15のＢ，Ｄ）．一方，海岸平野・三角州については，図－14のＣのように浸水域の範囲の外縁が内陸側に張り出している箇所もあるが，図－14のＡのように周囲の谷底平野・氾濫平野と変わらない箇所もある．



図－24　海岸線から４～5km の浸水域の土地条件と標高との関係



図－25　海岸線から４～5km の非浸水域の土地条件と標高との関係

この違いを図－15を使って標高について見てみると，Ａでは標高が２m以上あるのに対し，Ｃでは標高は１m以下となっている．このように，地形分類による浸水・非浸水の違いは有り，海岸平野・三角州の方が，谷底平野・氾濫平野よりも浸水しやすい傾向はあるものの，最終的にはその理由は標高に依存しているとみなすことが出来る．

図－24，25を見ると，谷底平野・氾濫平野の浸水域の標高は０～２m，非浸水域は１m以上となっており，海岸平野・三角州では浸水域の標高は０～３m，非浸水域は１m以上となっている．これは若干ではあるが海岸平野・三角州では標高が高くても浸水したことを示しており，標高以外の地形発達に起因した要因が浸水したか否かに影響した可能性を示唆するとも考えられる．

５．４．２　平野部における津波遡上地点の特徴

具体的個別の状況として，津波遡上の末端がどうなっていたかを報告する．

図－14 のＡに代表される若林区の内陸部であるが，現地調査のヒアリングにより，正確に浸水範囲を押さえることが出来た．津波の浸水方向に直交する水路があり，そこで津波の浸水が止まったとのことである．水路の様子を写真－１に示す．深さが２m以上あり，ここに到達した津波は水路に沿って横に広がり，水路の壁を越えてより内陸側を浸水するだけのエネルギーは持っていなかったものと推察される．

写真－１　仙台市若林区内陸部の水路

写真－２　岩沼市内陸部の津波遡上末端部

図－14 のＣに代表される岩沼市の内陸部であるが，その様子を写真－２に示す．田と建物用地の境界が浸水範囲の境界になっている．田と住宅地の境界にあたる盛土の擁壁部など，人工構造物が影響していると考えられる．

このように，津波の遡上末端部の浸水・非浸水を決める最終的な決定要因は，このような人工構造物が影響しているものと考えられる．

６．おわりに

津波被害の状況と地形や土地利用との関連性の解析を行った．その結果，建物がほぼ流出するような壊滅的な被害域については，浸水深がおおよそ４m以上と浸水深が大きく影響しており，海岸線から約１km の範囲に限定され，標高よりは海岸線からの距離との関連性が高いと予想される結果であった．一方，がれきで覆われるような建物等の破壊が認められる地域は，海岸線から２～３km の範囲で標高１m

以下，浸水が認められる地域は，海岸線から４～５kmの範囲で標高２m以下という結果で，概ね標高で決まる結果であった．ただし，海岸平野・三角州では高標高でも浸水したエリアがあり，地形分類の違いも影響している可能性があるという結果であった．また，浸水域と非浸水域の境界部は，海岸線と平行方向に延びる水路の存在や，田と住宅地の境界にあたる盛土の擁壁部など，人工構造物が影響しているという結果であった．

現時点で十分なGIS解析を行っている訳ではないが，壊滅的な被害域については浸水深が影響しており，標高よりは海岸線からの距離との関連性が高いと予想される．また，内陸部の低地の一般面の浸水・非浸水に関しては概ね標高で決まるが，海岸平野・三角州では高標高でも浸水したエリアがあり，地形分類の違いも影響している可能性がある．今後より解析を深化させて，個別案件の検証を進めていきたい．最後に，今回の大震災で被災した皆様に，心よりお見舞い申し上げると共に，早急の復旧・復興を祈念しております．

謝　辞

本研究を進めるにあたって，奈良大学文学部地理学教室の海津正倫教授と国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室の加藤史訓主任研究官には，色々と意見交換，情報交換をさせていただき，有益であった．心より感謝申し上げます．

参 考 文 献

経済企画庁（1967）：土地分類基本調査　地形・表層地質・土じょう　仙台　５万分１　国土調査.

小荒井衛，中埜貴元，岡谷隆基，神谷泉（2011a）：東北地方太平洋沖地震の宮城県津波浸水域の土地利用と地形の特徴，2011年日本地理学会秋季学術大会発表要旨集，164.

小荒井衛，岡谷隆基，中埜貴元，神谷泉（2011b）：東日本大震災の津波浸水域の土地利用と地形のGIS解析，地理情報システム学会第20回研究発表大会講演論文集（CD-ROM）.

国土地理院（2011a）：２万５千分１浸水範囲概況図，http://www.gsi.go.jp/kikaku/kikaku60003.html（accessed 26 Dec.2011）.

国土地理院(2011b)：津波浸水範囲の土地利用別面積について，http://www.gsi.go.jp/common/000060371.pdf（accessed 26 Dec.2011）.

国土交通省都市，地域整備局(2011)：東北地方太平洋沖地震による市街地の津波被災状況について（航空写真に基づく暫定値），http://www.mlit.go.jp/report/press/city07_hh_000047.html（accessed 28 Oct.2011）.

宮城県（1982）：土地分類基本調査　塩竈，岩沼　５万分１　国土調査.

宮城県（1986）：土地分類基本調査　角田　５万分１　国土調査.

日本地理学会災害対応本部津波被災マップ作成チーム（2011）：2011年３月11日東北地方太平洋沖地震に伴う津波被災マップ，http://www.ajg.or.jp/disaster/201103_Tohoku-eq.html（accessed 28 Oct.2011）.

岡谷隆基，小荒井衛（2011a）：Mobile Mapping Systemによる津波浸水高の計測，平成23年度国土交通省国土技術研究会，http://www.mlit.go.jp/chosahokoku/giken/program/kadai/pdf/innovation/inno2-11.pdf（accessed 28 Dec.2011）.

岡谷隆基，小荒井衛（2011b）：Mobile Mapping System による平成23年東北地方太平洋沖地震に伴う津波浸水高の計測，日本写真測量学会平成23年度秋季学術講演会発表論文集，1-2.

総務省統計局（2011）：東日本太平洋岸地域のデータ及び被災関係データ～「社会，人口統計体系（統計でみる都道府県，市区町村）」より，http://www.stat.go.jp/info/shinsai/zuhyou/data1226.xls（accessed 28 Oct.2011）.

東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ(2011)：東北地方太平洋沖地震津波情報，http://www.coastal.jp/ttjt/（accessed 28 Dec.2011）.