

海陸一体のデジタル地形データ作成に関するケース・スタディ Case Study on Development of Sea-land Combined Digital Terrain Data

地理地殻活動研究センター 岩橋純子

Geography and Crustal Dynamics Research Center Junko IWAHASHI

海上保安庁海洋情報部 松本良浩

Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard
Yoshihiro MATSUMOTO

要 旨

国土地理院は主に陸域、海上保安庁は海域について広範囲な地形データを保有している。火山活動や津波、活断層等の調査を行うためには、陸域から海底まで一体となった地形データが求められる事象が近年増えている。陸域と海域の地形データは、地形図及び海図での高さの基準や、プロダクトのDEMメッシュの投影法・座標系が一般に異なっており、中～高解像度のデータの接合に当たっては、ノウハウの蓄積が必要と考えられる。そこで中縮尺の等深線ベクトルデータ(コンター)が主体のデータから 50m メッシュ DEM を作成した場合(薩南地域)と、高密度点群データが主体のデータから 5m メッシュ DEM を作成した場合(石巻～相馬地域)についてケース・スタディを行った。海陸の地形データの高さ補正については、東京湾平均海面とその地域における平均水面の差が得られる地域ではその値を使って補正し、得られない地域ではその地域における平均水面を標高ゼロとして海域データを高さ補正することが適当であることが確認された。海陸一体のデジタル地形データを試作した石巻～相馬地域では、震災時の津波の影響を受けた沿岸地形の様子が 5m メッシュ DEM の陰影図から明瞭に観察された。また、GIS を用いて海陸をまたぐ集水域や断面図、面積高度曲線等を作成することも可能であり、土砂の流入の見積もりや地理研究など、様々な目的に活用できると考えられる。今後も、海陸一体の地形データ作成を行うことは有意義である。

1. はじめに

陸域の地形は、古くは平板測量、近年は主として写真測量や航空レーザ測量によって計測されている。一方、海域の地形計測は、古くはシングルビーム、近年はマルチビーム音響測深が主である(図-1)。沿岸域の地形計測は難しかったが、近年、一部地域でグリーンレーザによる航空レーザ測深が行われている。国土地理院は主に陸域、海上保安庁は海域について広範囲な地形データを保有している。海陸の地形データの接合手法の検討や、作成したデータを用いた地形の解析・解釈を行うため、国土地理院と海

上保安庁海洋情報部(以下「海洋情報部」という。)は平成 27 年 4 月 27 日から共同研究「海陸一体のデジタル地形データの作成に関する研究」(平成 29 年 5 月現在は第二期)を行っている。

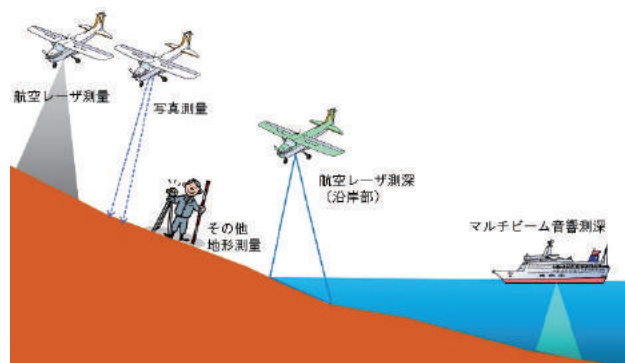


図-1 陸域・海域の地形計測方法の概要。

地形・地質研究者の研究対象は、現在のところ圧倒的に陸域が多い。しかし、陸域から海域まで一連の事象として、地震、津波、活断層、火山活動、岩屑なだれ・地すべり、赤土・土砂等の流入など様々なものがある。平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震以降の様々な地震・火山活動によって改めて認識されたように、津波や火山活動、活断層等の調査を行うためには、陸域から海底まで一連の地形データ(図-2)が必要である。活断層・火山・地形等を対象に、既に一部分野で海陸一体の地形観察・研究が行われている(後藤, 2013; 泉ほか, 2013; 小林・佐々木, 2014; Iwahashi et al., 2015)。また、津波等各種シミュレーション、地球物理学での分析等にも有用と考えられる。

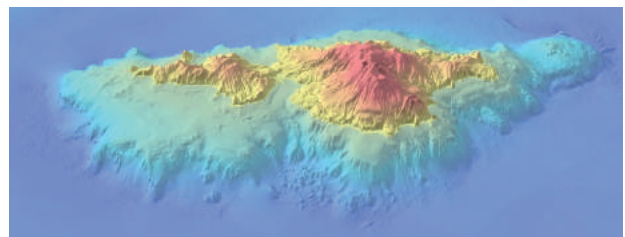


図-2 ロ永良部島周辺の 10m メッシュ DEM 鳥瞰図
(国土地理院・海上保安庁, 2015)。

一方、陸域と海域の地形データは、地形図での高さの基準や、プロダクトの DEM メッシュの投影法・座標系が一般に異なっている（表-1）。特に海域の地形データは、様々なデータ取得手法・時期のデータを1つのプロダクトの中に混在して含むことが多く、マルチビーム音響測深の原データなど、より高解像

度なデータとの接合を行って海陸接合データを作成するに当たってはノウハウの蓄積が必要と考えられる。本論では、中縮尺の等深線ベクトルデータ（コンター）が主体の場合（薩南地域）と、高密度点群データが主体の場合（石巻～相馬地域）のケース・スタディを、結果の地形観察と共に紹介する。

表-1 陸域及び海域の広範囲で入手可能な地形データ（使用承認が必要なものや有償のものを含む）。

J-EGG500（浅田，2000）と津波シミュレーション用海底地形データは陸域との接合を考え高さ調整されたものである。海底地形データは通常、最低水面が深さの基準となっている。

	データ種別	データソース	測位基準	高さの基準	測地系・メッシュの投影法	メッシュ間隔 (DEMの場合)	発行・管理者
基盤地図情報数値標高モデル(10mメッシュ)	ポイント	1/2.5万地形図の等高線、基準点、標高点	基準点	東京湾平均海面	JGD2011, 経緯度	0.4"	国土地理院
基盤地図情報数値標高モデル(5mメッシュ; 写真測量)	ポイント	空中写真	基準点, GNSS	東京湾平均海面	JGD2011, 経緯度	0.2"	国土地理院
基盤地図情報数値標高モデル(5mメッシュ; 航空レーザ)・その他の国土地理院がアーカイブする航空レーザ測量データ	ポイント	航空レーザ測量データ	基準点, GNSS	東京湾平均海面	基盤地図: JGD2011, 経緯度 その他: JGD2000またはJGD2011, 平面直角座標系	基盤地図: 0.2" その他: 0.5~5m	国土地理院 (元のデータは国土地理院, 国交省の河川・砂防公共測量, 一部自治体・林野庁)
海底地形デジタルデータ M7000シリーズ	コンター	沿岸の海の基本図(1/5万)の等深線・測量原図等	NNSSとロランCの複合測位等	最低水面	WGS84, 経緯度	—	日本水路協会 (元の地図は海上保安庁)
J-EGG 500	ポイント	音響測深データ, 100万分1海底地形図の等深線	GNSS等	東京湾平均海面	WGS84, ランベルト正角円錐図法	500m	海上保安庁・JAMSTEC
津波シミュレーション用海底地形データ(1~5次メッシュ)	ポイント	J-EGG500, J-BIRD, 音響測深データ	GNSS等	東京湾平均海面	WGS84, ランベルト正角円錐図法	1次: 4050m 2次: 1350m 3次: 450m 4次: 150m 5次: 50m	海上保安庁

2. 陸域・海域の地形データ接合について

通常、陸域は東京湾平均海面（TP）、海域は各地の最低水面が、それぞれ標高ゼロ・水深ゼロとなっており、地形データの接合に際しては平均海面と最低水面の較差が問題となる（図-3）。各地の平均海面と最低水面の差（Z0）は、全国の多くの験潮所・験潮場毎の値が、海洋情報部から「平均水面、最高水面及び最低水面一覧表」としてウェブ公開されている。一方、補正に当たって厳密には東京湾平均海面と各地の最低水面の差が必要になるが、これは一部の地点でしか値が提示されていない。

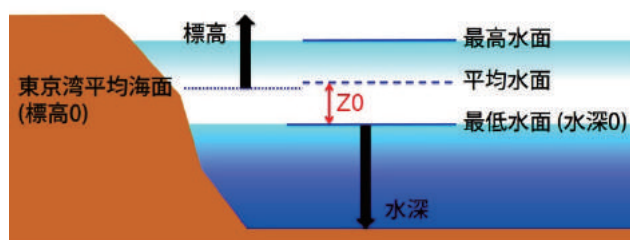


図-3 陸域と海域の標高・水深の基準。

海陸の地形データの接合に当たって、東京湾平均

海面と各地の最低水面の差が得られない地域では、各地の平均水面を標高ゼロとして便宜的に高さを補正することが適当と考える。その理由を以下に述べる。標高データの高さ精度は、基盤地図情報数値標高モデル（10m メッシュ）ではソースである 2 万 5 千分 1 地形図の等高線間隔の半分（±2.5~5m）、航空レーザ測量データでは公共測量作業規程の準則において調整用基準点との平均較差±25cm 以内が基準と定められている。図-4 は、約 50 年前と、2000 年の成果改定に伴って国土地理院から公表された、東京湾平均海面を基準とした各地の平均海面高の分布図である。図-4 から、較差は最大でも 30cm 程度であること、年変化はおそらく少なく地域的な固定した較差がありそうなのが分かる。このように、東京湾平均海面と各地の平均海面高の差は、現状の陸域の標高データの高さ精度と比較して無視できる大きさである。したがって、最寄りの験潮所等での Z0 を使って補正することが可能と考えられる。なお、渡海水準測量（林，1968）が行われていない離島は、その場所の平均海面が標高ゼロとなっているため、Z0 のみ考慮すれば良いことになる。

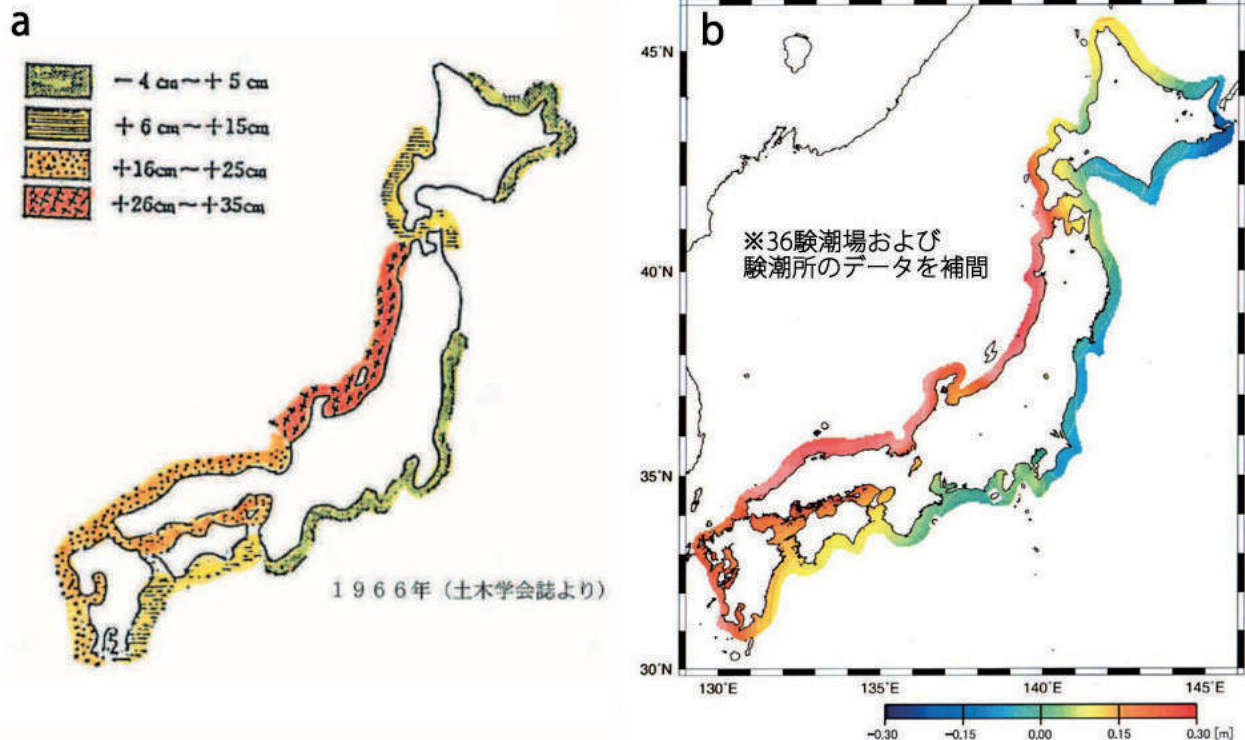


図-4 東京湾平均海面を基準とした各地の平均海面高。(a)1966 年土木学会での公表値（箱岩，2002 から転載）。
(b)2000 年水準点成果改定に伴う調査公表値（国土地理院 HP から転載・加筆；元図は国土地理院（2002））。

陸域と海域の地形データの接合に当たっては、高さの基準の統一に注意するほかに、投影変換等の作業が必要である。また、対象が広域になるほど、地形データの取得密度や年代が、特に海域のデータでは大きく異なることが多い。標高点間隔によって傾斜など地形量が異なってくることは以前から良く知られており（例えば Zhan and Montgomery, 1994; Deng et al., 2007），またデータソースの精度によって、同じ標高点間隔の DEM でも地形量が異なってくる事が知られている（Erskine et al., 2007）。目的に応じて、詳細なデータと粗いデータを元のスケールのまま接合するのか、間引き等行い粗さを揃えた上で接合するのか、判断が必要である。一般的には、ある程度、ソースデータの粗い方に空間密度を揃えてから接合し補間することが望ましいと考えられる。

3. データ接合事例

3.1 等高線データを中心とする事例：薩南地域

3.1.1 データ接合手法

薩摩半島～種子島・鬼界カルデラに至る薩南地域（約 74km×152km）について、図-5 の工程で DEM 作成を行った。海域は広くデータが整備されている M7000 シリーズのコンターデータ（M7008 薩南 ver.2.3, 日本水路協会）をベースとし、開聞岳南方沖・鬼界カルデラについて、スポット的に、近年のマルチビーム音響測深の点群データ（海上保安庁, 2007；

小野寺ほか, 2009）を加えた（図-6）。陸域は、海底地形デジタルデータ M7000 シリーズ（表-1）の縮尺を考慮し、基盤地図情報数値標高モデル（10m メッシュ；以下「基盤地図 10mDEM」という。）（国土地理院）を用いた。基盤地図 10mDEM は、M7000 と同程度の間隔の等高線（2 万 5 千分 1 地形図）が主なソースである。広域であることや、ソースの縮尺を考え、最終的な DEM のメッシュサイズは 50m、投影は WGS84 のランベルト正角円錐図法とした。

開聞岳南方沖・鬼界カルデラの音響測深データの点間隔は平均 10m 程度であるが、海水温が不均一な黒潮を通過することから、船の航跡に沿うビームの幅の外端近くで水深が浅く計測されるエラーが見られる。そのようなエラー部分のデータは、コンターに変換したのち削除した。図-5 のとおり、基本的に、海域はコンターでデータを揃え、ビーム計測の結果が浅くなっているエラー部分や、M7000 においてマルチビーム測深データと大幅に形状が異なる部分を削って間は補間計算で埋めることとし、陸域に少し食い込ませる形で基盤地図 10mDEM から沿岸部のデータを足し、コンターの補間に強い ANUDEM の補間法を用いて DEM を作成した（Hutchinson, 1988；ArcGIS ver.10 (ESRI) に実装されたコマンドを使用）。

この地域では東京湾平均海面と平均水面の較差が知られていないが、図-4 とソースデータの高さ精度から、その値は考慮しなくて良いと考えられる。水

深はデータ作成時点での鹿児島港の最低水面（平均水面下 1.55m）を考慮することによって標高値に換算した。陸域の基盤地図 10mDEM は平均値を用いて

50m メッシュに集約し、標高値に換算した海域のデータとモザイクした。

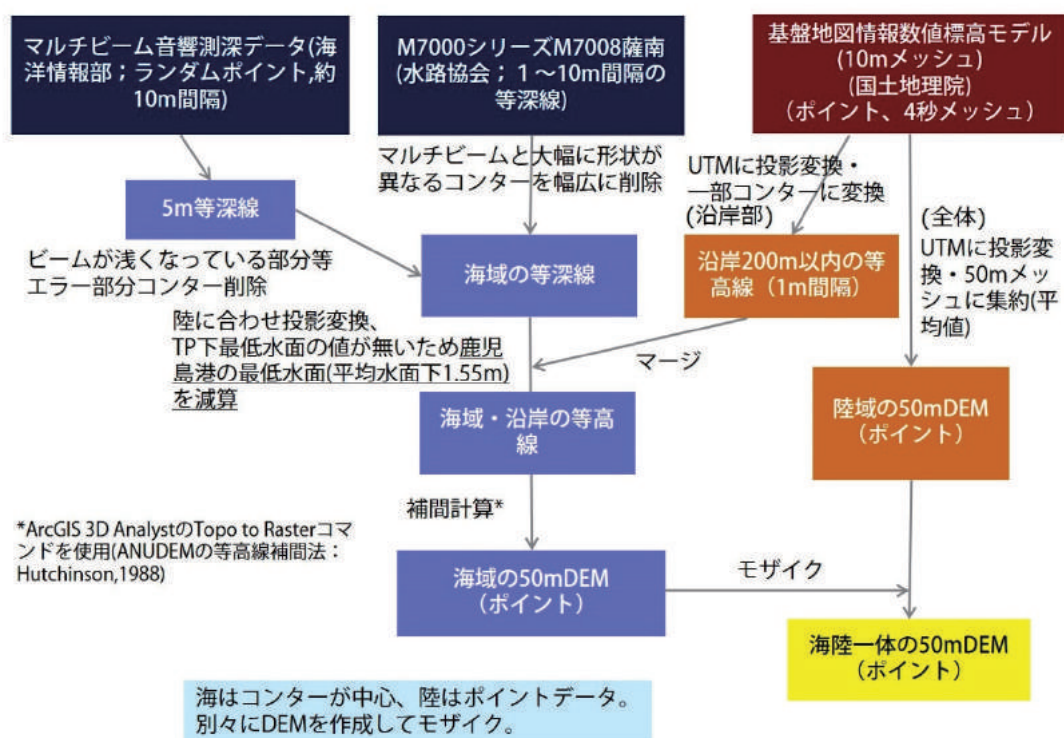


図-5 薩南地域の 50mDEM 作成におけるデータソース及び作成法。



図-6 薩南地域の 50m メッシュ DEM 作成におけるデータソースの位置図。

3.1.2 地形の観察

鹿児島湾は鹿児島地溝（露木，1969）に伴う内湾であり，周辺の地形を特徴付けるのは，活火山である．北から順に，加久藤カルデラ（霧島山付近）～始良カルデラ（桜島付近）～阿多カルデラ（開聞岳付近）～鬼界カルデラ（薩摩硫黄島付近）と大型のカルデラが連なり，桜島の溶岩流は海底にも流入している（小林・佐々木，2014）．作成した 50m メッシュ DEM による地形陰影図・鳥瞰図（図-7）からは，地形を明瞭に観察することができる．開聞岳南方沖に，開聞岳形成以前に生じた，海底崖を滑落崖とする大型の海底地すべりがあり（海上保安庁，2007），GIS 上の計測では長さ約 23km・幅約 7km にも及ぶ．鬼界カルデラの中央火口丘は水面下にあり，複雑な地形となっている（小野寺ほか，2009）．

陸域と海域の接合部分については，馬毛島や種子島周辺のように，大変スムーズにつながっている所が大部分である．薩摩硫黄島の周辺は，M7000 と他のデータの乖離が大きく，若干の不自然な段差が残っている．また，鬼界カルデラ周辺では全体にマルチビームの端が浅くなる現象が大きかったため，海底に格子状の航跡に沿うエラーが若干残っている．

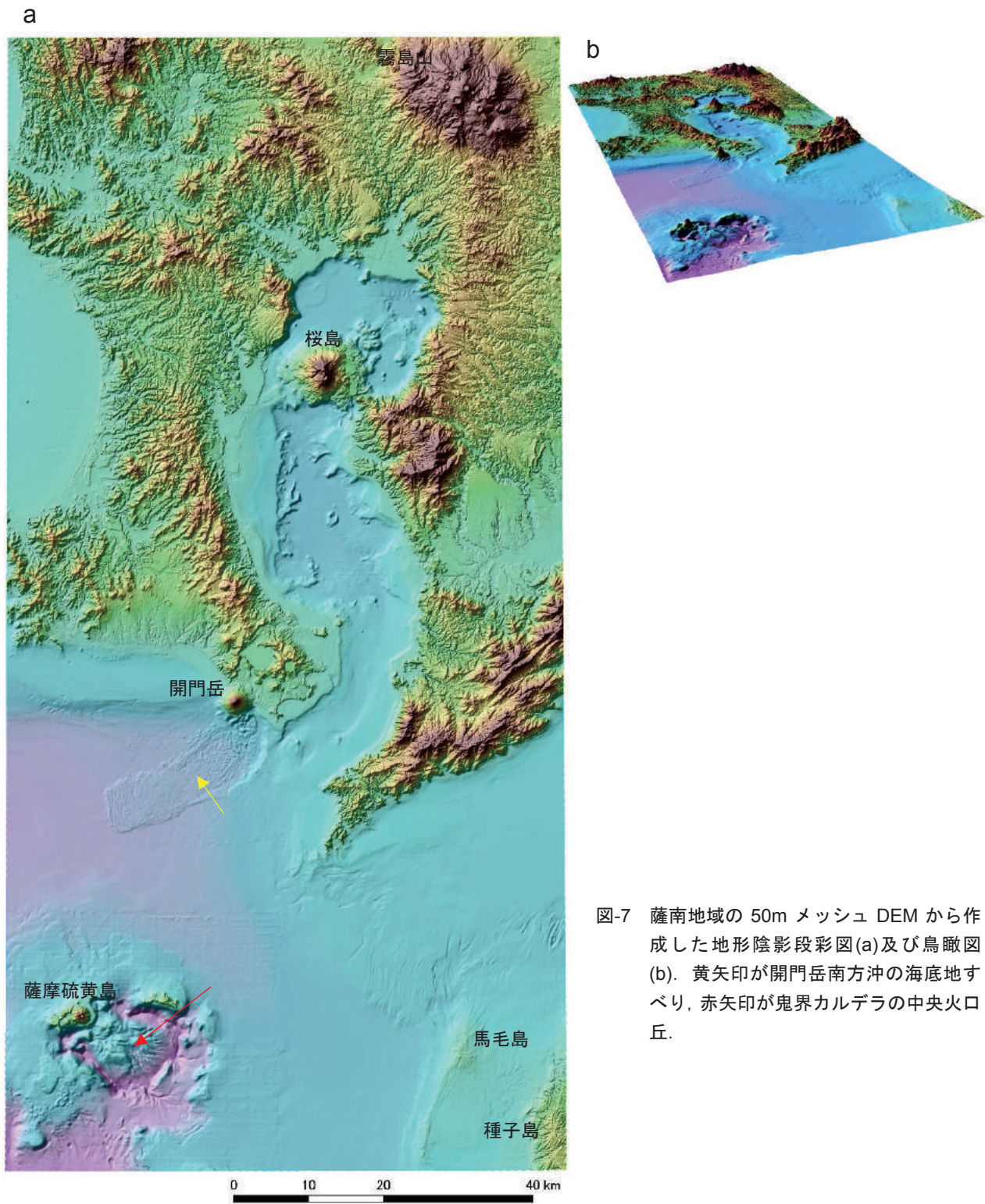


図-7 薩南地域の 50m メッシュ DEM から作成した地形陰影段彩図(a)及び鳥瞰図(b)。黄矢印が開門岳南方沖の海底地すべり，赤矢印が鬼界カルデラの中央火口丘。

3.2 高密度点群データを中心とする事例：石巻～相馬地域

3.2.1 データ接手法

石巻～相馬地域は，平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震の津波によって大きな被害を受けた地域である。この地区では，震災後数年のうちに，国土交通省及び自治体の関連部局によって，陸域の

航空レーザ測量（2011 年 4 月～8 月），海域のマルチビーム音響測深（2011 年 6 月～2013 年 5 月）及び航空レーザ測量（グリーンレーザ；2011 年 6 月及び 2012 年 9 月）が行われている。陸域の航空レーザ測量データは国土地理院，海域のデータは海洋情報部でアーカイブされている。データ範囲の概要は図-8 のとおりである。

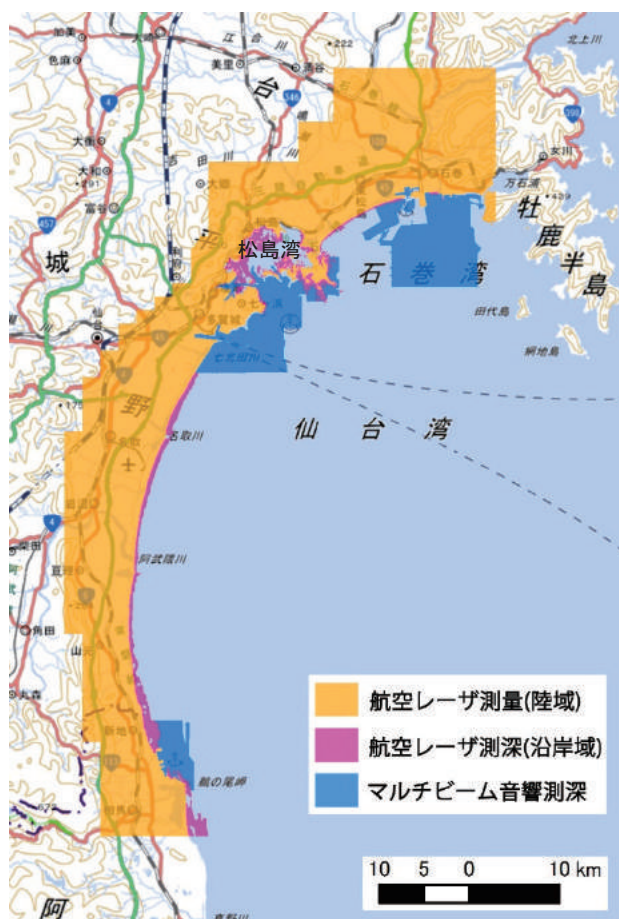


図-8 石巻～相馬地域の 5m メッシュ DEM 作成におけるデータソース位置図.

海域のデータはマルチビーム音響測深が中心であるが、陸域との接合部にあたる浅海部分は、船が入れないため航空レーザ（グリーンレーザ）で計測されている。グリーンレーザは、海底が見通せない部分や、牡蠣の養殖施設等がある部分はデータ欠損部となっている。なお、旧陸部で浸水した部分は陸域の航空レーザで計測されている。

石巻～相馬地域の海陸接合データの作成方法は図-9 のとおりである。グリーンレーザの測定点間隔がおおむね 5m 程度であること、陸域航空レーザ測量の成果物として 5m メッシュ DEM があることから、作成する DEM の標高点間隔は 5m、投影法等は使用した陸域のデータに合わせて JGD2000 の平面直角座標系第 10 系とした。このケースでは全てが点データだが、点間隔がデータソースにより約 10cm～30m 程度まで大きく異なっていた。データを間引くことはできるが細かくできないため、本論では、マルチビーム音響測深データのうち、点群が数十 cm 間隔の超高密度のデータについて、作成する DEM の標高点間隔と点密度が大きく乖離しない程度（平均で 2m 四方に 1 点程度）に間引いた点群を用意し、高さ調整後データをマージし補間計算するという方法を取った。具体的には、マルチビーム音響測深データの一部を、スキンの航跡に沿って付けられたポイント番号をキーに無作為抽出してから調製を行った。また、陸域の航空レーザデータについては、超高密度のオリジナルデータではなく、グリーンレーザに合わせ 5m メッシュの点群を使用した。

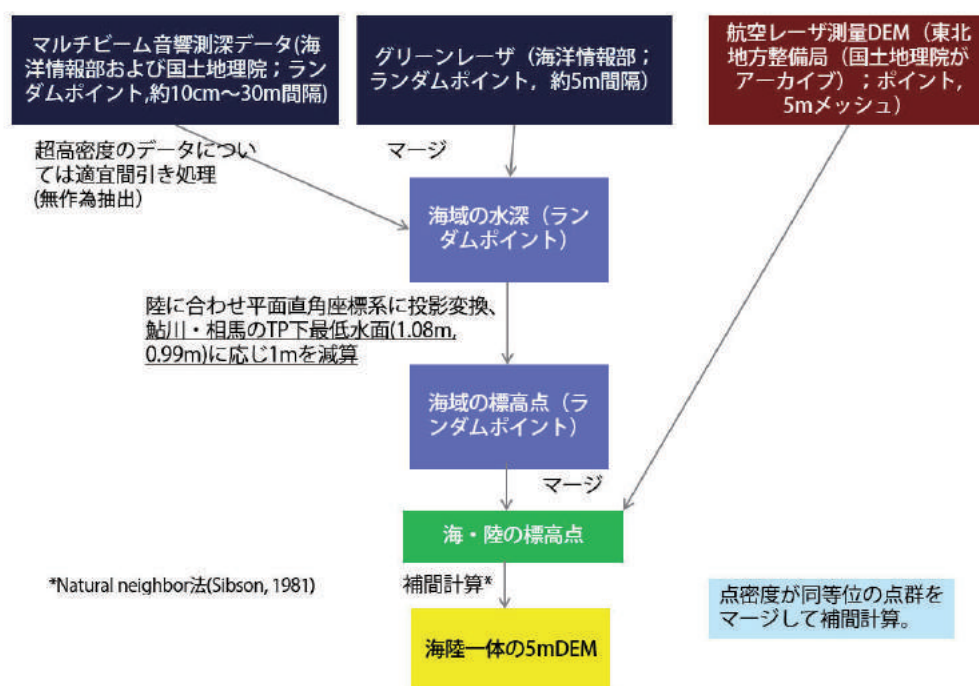


図-9 石巻～相馬地域の 5m メッシュ DEM 作成におけるデータソース及び作成法.

水深値は、この地域をまたぐ鮎川・相馬駿潮場の、本データ作成時の東京湾平均海面と最低水面の較差が 1.08m 及び 0.99m とされていたため（その後、震災後の余効変動に伴い 2017 年 3 月 30 日付けで 0.78m と 0.87m に変更）、1m を減算して標高値に変換した。補間計算は Natural neighbor 法を用いた（Sibson, 1981; ArcGIS (ESRI) に実装されたコマンドを使用）。Natural neighbor 法はボロノイ分割を利用した補間法であり、作成サーフェスは入力サンプルを通過しつつ、滑らかな面を作成する。

なお、作成した 5m メッシュ DEM は、更に沖合まで広範囲に整備されている津波シミュレーション用地形データ 4 次メッシュ（表-1, 150m メッシュ；以下「津波 150mDEM」という。）との接合を検討したが、解像度の問題に加えて不均一な高さの差異があり不可能であった。津波 150mDEM は震災前に作成されたデータであり、1970 年代など古い時期の情報を含んでいる。5m メッシュ DEM との高さ方向の差分について、測深機の違いの影響や水平方向の変動の影響が比較的小さいと考えられる沖合の広い平面で観察したところ、石巻沖で概ね 1~2m 程度、仙台塩竈港沖では概ね 30~70cm 程度、震災後のデータの方が低いという結果が出た。2011 年の震災による石巻湾周辺の沈下量は概ね 50cm~1m 程度、仙台塩竈港に最も近い水準点の沈下量は 15cm である（国土地理院, 2011）。トレンドやオーダーとして大きな矛盾がないが、この差分量が地殻変動を反映している可能性は、津波 150mDEM の古さもあり不明である。いずれにせよ、所により m 単位での不均一な差異が見られるため、津波 150mDEM との接合は不可能であった。

3.2.2 地形の観察

作成した 5m メッシュ DEM から陰影段彩図を作成し、沿岸部の地形を観察した。なお、これら沿岸部の地形は震災後の主として 2011 年~2012 年前半に計測されたものであり、その後の沿岸流による砂の堆積や人工改変により、現在ではその多くが変化している。

沿岸部には、津波の痕跡を示す地形が多数見られた。陸域の洗掘は砂州・砂嘴の前面、そのほか防潮堤が破堤した部分を中心に分布しており、他の多くの研究・報告で既に示されたように津波により削られた地形である。図-10 は山元町新浜付近の沿岸部である。沿岸部に見える直線状の段差が震災前の海岸線の位置である。この地域では、かつての陸域に食い込んだ津波による馬蹄形の洗掘が、突堤を避ける形で見られる（赤矢印）。海岸沿いの洗掘された箇所的大部分はグリーンレーザで撮影されていないため、本 DEM では陸域のデータを充てているが、磯

波が写りこんでいることから分かるように実際は水面高に近く、本来はデータの空白部分である。図-10 の範囲でグリーンレーザと陸域の航空レーザデータが重畳する狭い領域について調べたところ、陸水部のデータ（水面高）と高さ調整後のグリーンレーザ（海底）の較差は概ね 2m 程度であり、図-10 付近の山元海岸での洗掘深度が 2~3m 程度との現地調査結果（加藤ほか, 2012）と合っていた。5m メッシュ DEM で旧陸部との境界に見られる崖状の段差は高さ 5m 程度あるので、陸域の洗掘後も残っている可能性が高いが、実際は洗掘部ではずっと低くなっただけになっていると考えられる。



図-10 山元町新浜付近の陰影段彩図。

赤矢印は津波による馬蹄形の洗掘部。白部はデータ欠損部。波紋状のものは磯波が陸域の航空レーザに写りこんだエラーである。それらを含め、旧陸地の水部のデータは水面高のため本来空白部であるが、参考に残した。沿岸部の直線状の段差の位置がかつての海岸線。この段差は、洗掘部については、その高さが水面高であることから、実際はずっと低い可能性が高い。以下、図-15 まで同じ縮尺。

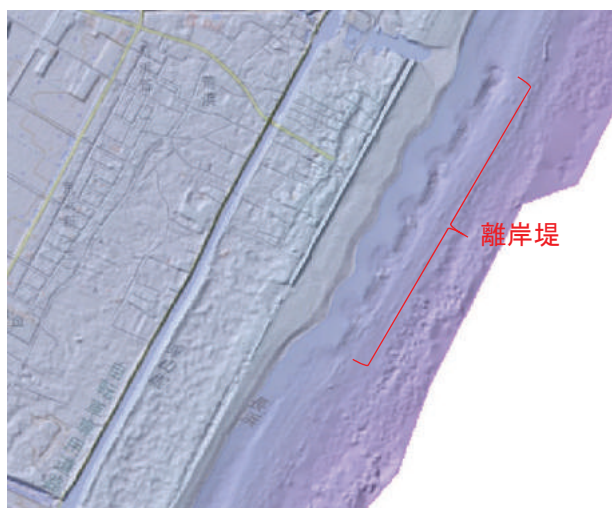


図-11 仙台市荒浜付近の段彩陰影図。
離岸堤の陸側に少し津波による洗掘が見られる。

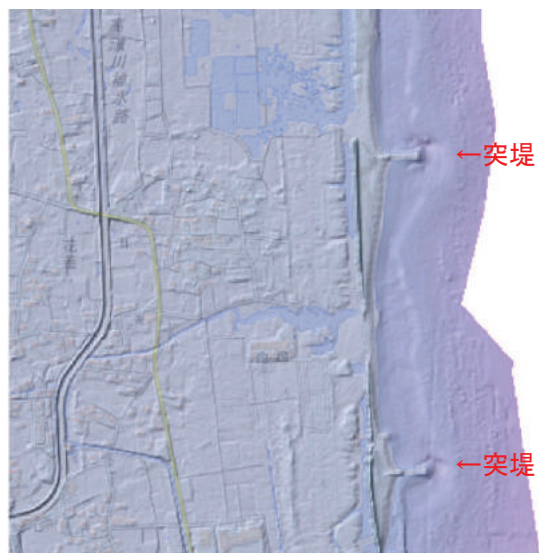


図-12 山元町山寺付近の段彩陰影図。
沿岸海底に津波による大きな洗掘が見られる。

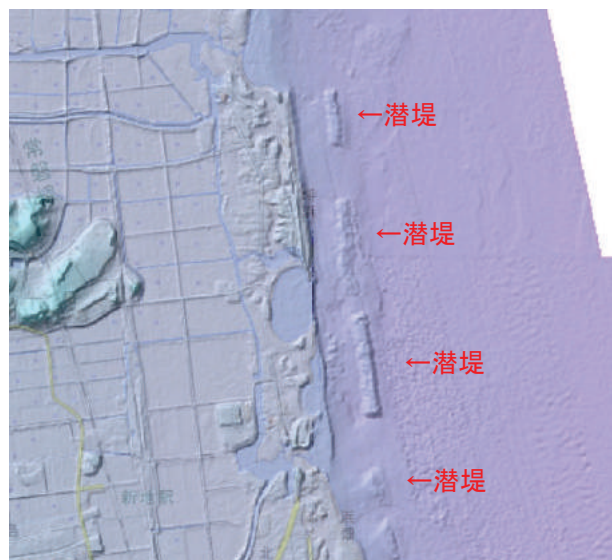


図-13 新地町谷地小屋付近の段彩陰影図。
潜堤の切れ目の旧陸地に馬蹄形の洗掘が見られる。

仙台湾南部で発災前後の航空レーザと海底地形データを接合して砂浜海岸の津波による侵食・回復過程を調べた有働ほか（2013）や、海岸堤防の被災・洗掘を調べた加藤ほか（2012）で、堤防が残存したところでは比較的侵食が抑制され、また破堤箇所では押し波と引き波の繰り返しにより侵食が進んだと報告されている。津波が洗掘に与える影響と海岸保全施設の関係は、本論の 5m メッシュ DEM においても沿岸部の海底地形から観察できる（図 11-13）。

石巻湾・松島湾・仙台湾の沖合には、海図で「陰悪物」として表示されている突起物が点々と見える（図-14）。これらは 5m メッシュ DEM で明瞭に見えるためかなり大きな物体であるが、津波による震災瓦礫と考えられる。



図-14 石巻市西浜町沖の段彩陰影図。
震災瓦礫と思われる影が沖合に点々と見える。（斜め方向の薄い縞はマルチビーム音響測深のノイズによるもの）

本論の 5m メッシュ DEM では、仙台湾沿岸部の浅海底に、海岸線と平行に長く伸びる幅 150m 程度のカマボコ状の地形が、海岸線との間に幅 150m 程度の浅い窪みを挟み、沖合に連続して見られる（図-15）。1980 年測量の 1:25,000 沿岸海域土地条件図「仙台」「岩沼東部」にも同様の地形が「堆積台」や「堆

積性平坦面」として示されており、音波探査機（ソノプロブ）の記録では最大層厚 12m 程度の細砂からなり陸域沿岸部の均質な砂層に連続する（国土地理院, 1983）。したがってこれらの地形は沿岸トラフと沿岸底洲に相当し、波浪による堆積地形と考えられる。沿岸海域土地条件図に記載されたこれらの地形の連続性や、陸域との関係（なめらかにつながるか急斜面を挟むか）は、本論の 5m メッシュ DEM とは場所により異なっており、全体として 5m メッシュ DEM の方が、沿岸トラフ・沿岸底洲の地形が明瞭であるように見える。図-15 に相当する地域は、有働ほか（2013）の発災前後の海底地形データを用いた分析において、本論の DEM と同時期に沿岸トラフ部分で $-0.5 \sim -2.5\text{m}$ 、沿岸底洲部分で $+0.5 \sim +2.5\text{m}$ 程度、標高変化があったことが示されている。沿岸海域土地条件図の地形計測から 30 年以上が経過しており、現在の測量結果と単純に比較できないものの、沿岸トラフ・沿岸底洲の津波による明瞭化は実際に起きた可能性が高いと考えられる。

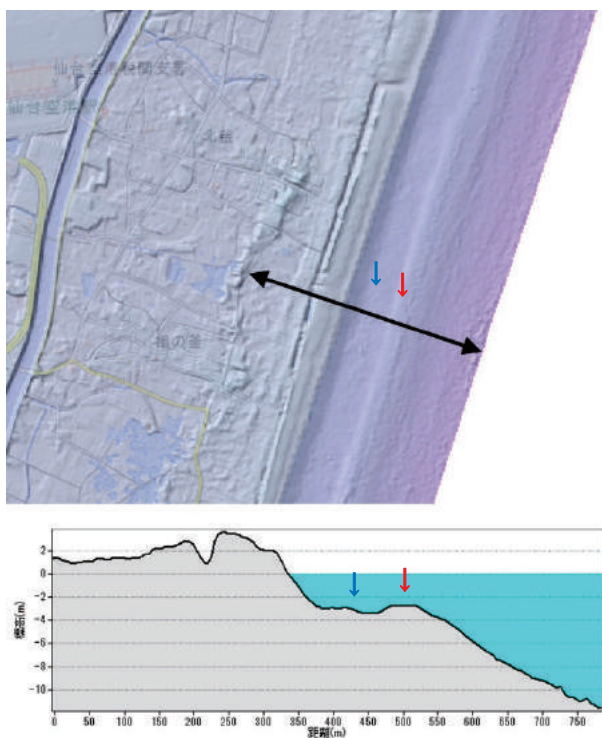


図-15 仙台空港沖の陰影段彩図及び断面図。

沿岸トラフ（青矢印）と沿岸底洲（赤矢印）が明瞭に見られる。断面図は黒矢印の区間について作成。

リアス式海岸で有名な松島湾周辺では、仙台湾沿岸のような洗掘は湾内で見られない。しかし外洋に面した地域では、東松島市の野蒜海岸（州崎海岸）が津波により大きく侵食されたことが知られており、その様子は 5m メッシュ DEM でも、発災前の航空

レーザ測量データとの比較（図-16）から定量的に観察できる。なお、野蒜海岸の侵食の南北差は、護岸の種類の違いによるものとされており（田中ほか, 2011）、また、海岸北部からの砂の供給等により、その後 2014 年時点で 8 割程度回復したと推定されている（小岩ほか, 2015）。2016 年 2 月に現地を訪れた際、嵯峨溪遊覧船の船長から、野蒜海岸の南では震災後、砂の流入が激しく従来の航路が通りにくくなったとの話をお聞きした。また第二管区海上保安本部の森弘和課長（当時）からは、震災後、砂や栄養のある海水の流れが変わって漁業関係者内で問題になっている旨お聞きした。この地域は元々明治～昭和初期の急速な砂嘴の発達により宮戸島と陸繋島化したとされており（八島, 1998）、漂砂が発生しやすいと推測される地域である。

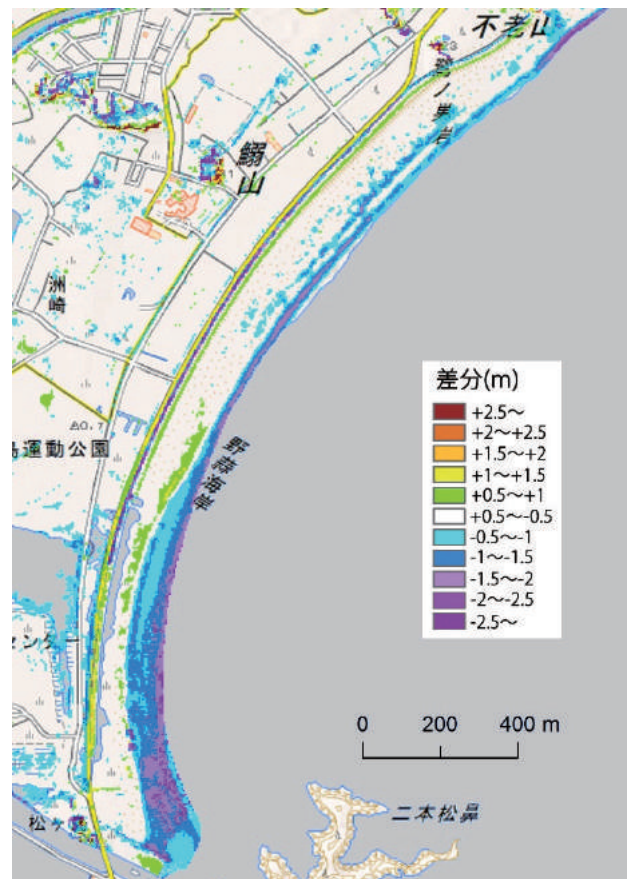


図-16 野蒜海岸付近の陸域の 5m メッシュ DEM(2011 年 4 月～8 月)と 2006 年 2 月の航空レーザ DEM の差分図。

差分に当たっては野蒜海岸に最も近い水準点の震災時の上下変動（ -45cm ; 国土地理院, 2011）を補正值とした。細い構造物の大きな値は位置ズレ誤差と考えられる。

松島湾周辺の 5m メッシュ DEM では、海底に広がる沈水地形が非常に明瞭に見える（図-17）。図-17

の陸域では、地質図（石井ほか，1983）と比較すると、嵯峨峡などに分布する松島層（主に軽石凝灰岩）が細い尖った山稜の地形を形成し、波津々浦周辺などに分布する大塚層（シルト岩・細粒砂岩）が丸みを帯びた山稜を形成している。地質図は陸域のみ作成されているが、地質の違いによる地形の違いが図-17では海底にも連続しているように見える。なお、1:25,000 沿岸海域土地条件図「松島」（1980 年測量）では、花洲浜沖等の海底山稜の間の地形は海底谷と

してシャープに描かれているが、本論の 5m メッシュ DEM ではいずれも平らな箱型の谷である。一方、グリーンレーザで計測された松島湾内の海底地形には、陸域の小河川からつながっている水路状の凹地谷が見える（図-18）。最終氷期には、松島湾は陸地だったことが知られている（松本，1984）。これらの凹地には人工的な掘削も見られるが、元々氷河期の河川であったものやそれを掘削したものも含まれると考えられる。

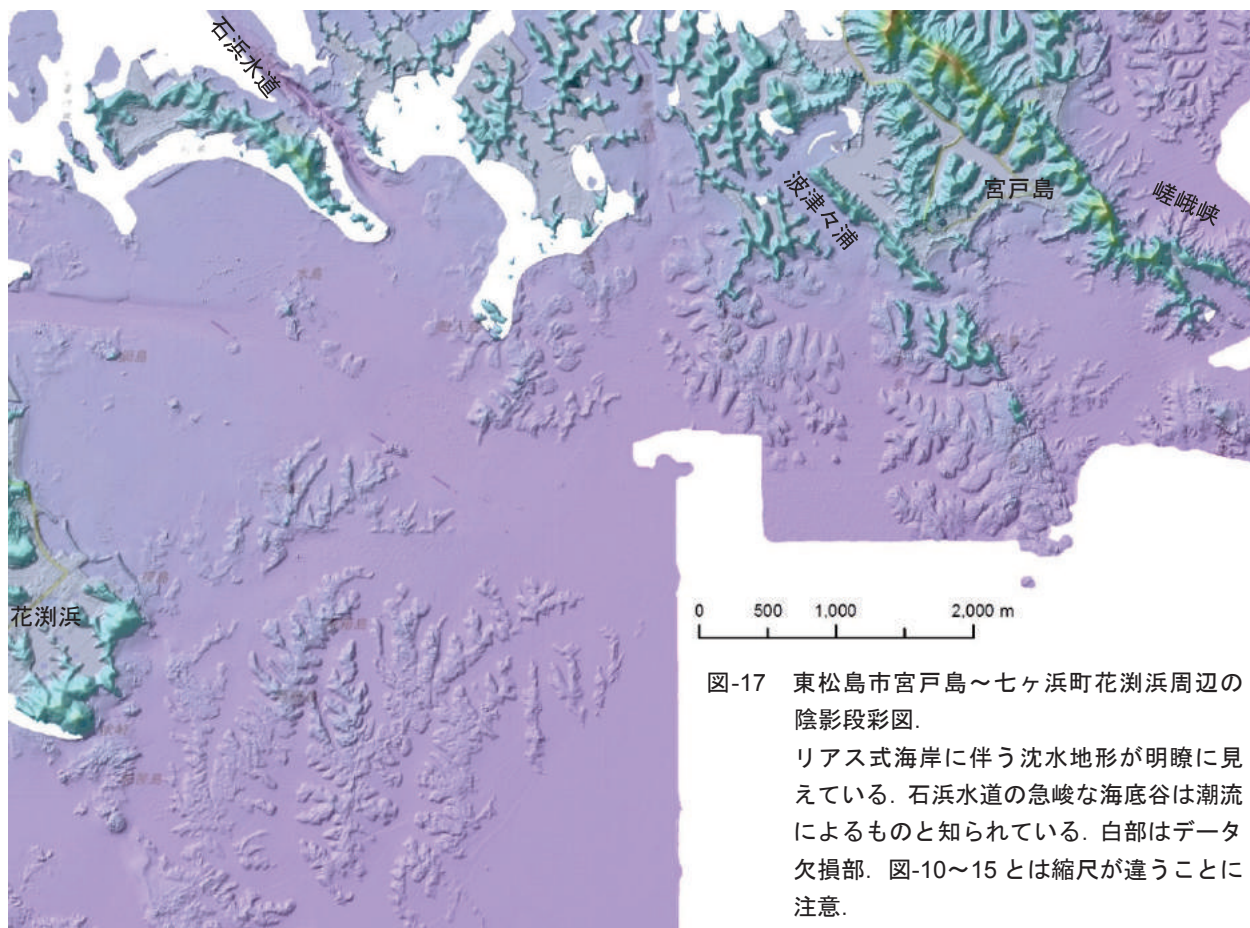


図-17 東松島市宮戸島～七ヶ浜町花洲浜周辺の陰影段彩図。

リアス式海岸に伴う沈水地形が明瞭に見えている。石浜水道の急峻な海底谷は潮流によるものと知られている。白部はデータ欠損部。図-10～15 とは縮尺が違うことに注意。

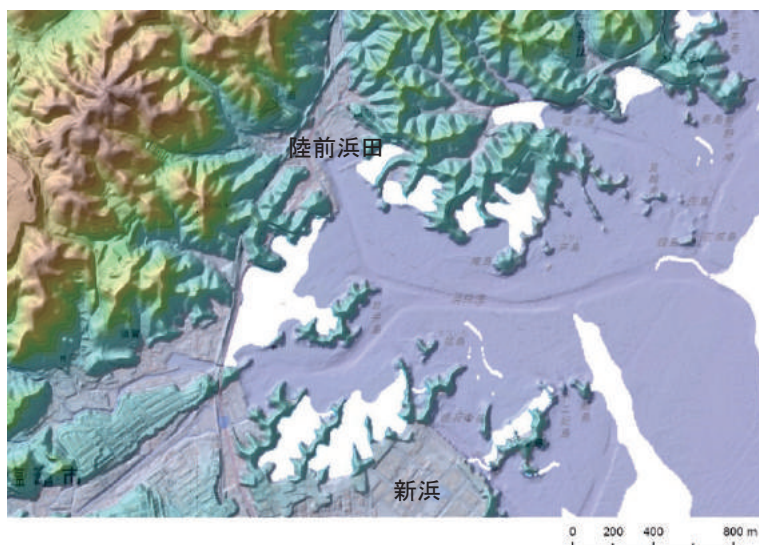


図-18 塩竈市新浜・陸前浜田付近の陰影段彩図。

松島湾内に河川網のような地形が見られる。1980 年の沿岸海域土地条件図「松島」では谷の部分あるいはそれを掘削した部分である。白部はデータ欠損部。

3.1.3 地形解析

ArcGIS (ESRI) のツールを用いて 5m メッシュ DEM の地形解析を試行した。図-19 は、海底の黒点の位置に流れ込んでくる集水域と、落水線をテスト的に示したものである。土砂の流入が問題になるようなケースでは、このような分析が有効と考えられる。また GIS を用いて任意の地形断面を作成できるほか、統計値から面積高度曲線等の作成も比較的容易にできる。図-20 は松島湾周辺の面積高度曲線である。この地域では、標高±3m 程度の所に平坦面が広がっている。

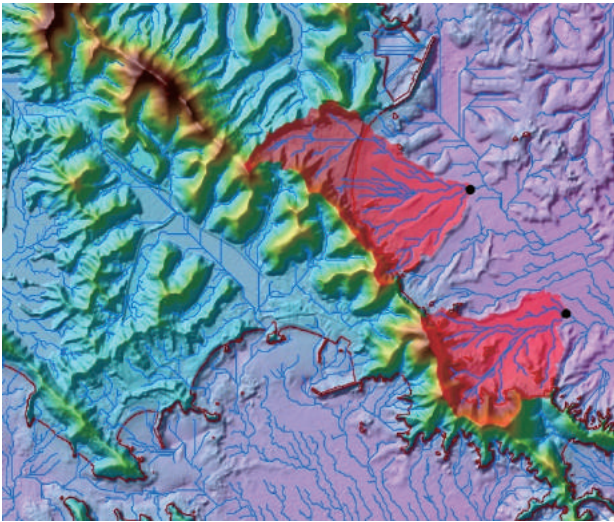


図-19 GIS (ArcGIS, ESRI) を用いた落水線・集水域の作成の様子。

落水線(青線)と、海底のある地点(ここでは黒点)に流れ込んでくる集水域(赤マスク)を示したもの。

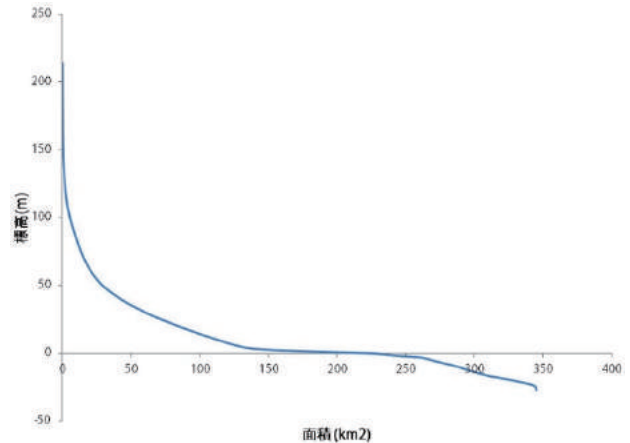


図-20 松島湾周辺の面積高度曲線。

面積高度曲線とは、縦軸に示される標高以上の土地の面積を横軸にプロットしたもの。

4. まとめ

陸域・海域の地形データの高さ基準の較差を海底地形データから減じて標高に変換し、陸域の地形データと接合した。ソースデータの選択、補間計算や編集で工夫することにより、50m・5m どちらのメッシュレベルでも、概ねスムーズな接合 DEM を作成することができた。接合 DEM から、陰影図等を用いて海陸を俯瞰した地形の観察を行った。5m メッシュ DEM では沿岸部の微地形の観察が陸水部を除き可能であった。集水域・断面図作成等を GIS のツールを用いて容易に行うことができた。またデータが欠損していない部分については、シミュレーション等への利用も可能と考えられる。

陸域と海域で起きた現象が相互に影響する地域について、防災上必要な箇所については、海陸一体の DEM があれば応用範囲は広いと考えられる。

(公開日：平成 29 年 8 月 21 日)

参考文献

- 浅田昭 (2000) : 日本周辺の 500m メッシュ海底地形データとビジュアル編集プログラム, 海洋調査技術, 12 (1), 21-33.
- Deng, Y., Wilson, J. P., Bauer, B. O. (2007) : DEM resolution dependencies of terrain attributes across a landscape, International Journal of Geographical Information Science, 21(2), 187-213.
- Erskine, R. H., Green, T. R., Ramirez, J. A., MacDonald, L. H. (2007) : Digital elevation accuracy and grid cell size: effects on estimated terrain attributes, Soil Society of America Journal, 71(4), 1371-1380.
- 後藤秀昭 (2013) : 等深線データから作成した日本列島周辺の海底地形アナグリフ解説と地図-, 広島大学大学院文学研究科論集, Vol.73 特輯号.
- 箱岩英一 (2002) : 河川・水路・港湾の基準面について, 国土地理院時報, 99, 9-19.
- 林哲郎 (1968) : 潮位観測による渡海水準測量について, 測地学会誌, 13(3), 87-92.
- Hutchinson, M.F. (1988) : Calculation of hydrologically sound digital elevation models. Proceedings of the Third International Symposium on Spatial Data Handling, August 17-19, Sydney. International Geographical Union, Columbus, Ohio, 117-133.

- 石井武政, 柳沢幸夫, 山口昇一 (1983) : 塩竈地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅「塩竈」), 112p.
- Iwahashi, J., Matsushi, Y., Fukuoka, H. (2015) : Digital terrain analysis of sea-land combined data on the Outer Zone of Southwest Japan including the Nankai Trough, *Annals of DPRI, Kyoto Univ.*, 58(B), 102-115.
- 泉紀明, 西澤あずさ, 堀内大嗣, 木戸ゆかり, 中田高, 後藤秀昭, 渡辺満久, 鈴木康弘 (2013) : 3 秒グリッド DEM から作成した日本海東縁部の 3D 海底地形, 海洋情報部研究報告, 51, 127-143.
- 海上保安庁 : 平均水面, 最高水面 及び 最低水面一覧表, http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/TIDE/enkan/Suijun_hyo/Pub.No741/Top.htm (accessed 12 Jul. 2017).
- 海上保安庁 (2007) : 開聞岳沖の海底地すべりについて, 火山噴火予知連絡会会報, 97, 98-102.
- 加藤史訓, 野口賢二, 諏訪義雄, 木村晃, 河合雅史, 高木利光, 小俣雅志 (2012) : 東北地方太平洋沖地震津波による仙台平野南部での海岸堤防被災・洗掘に関する調査, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 68(2), I_1396-I_1400.
- 小林哲夫, 佐々木寿 (2014) : 桜島火山, 地質学雑誌, 120, 補遺 63-78.
- 小岩直人, 武田開, 葛西未央, 伊藤晶文, 松本英明 (2015) : 宮城県野蒜海岸における 2011 年東北地方太平洋沖地震津波後の地形変化の定量的把握の試み, 2015 年日本チリ学会春季学術大会, セッション ID407 (発表要旨).
- 国土地理院 (1983) : 沿岸海域基礎調査報告書 (仙台湾地区), 国土地理院技術資料, D3-51.
- 国土地理院 (2002) : 測地成果 2000 構築概要, 国土地理院技術資料, B5-20.
- 国土地理院 (2011) : 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動量 (上下方向), http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h23_tohoku.html#namelink3 (accessed 12 Jul. 2017).
- 国土地理院, 海上保安庁 (2015) : ロ永良部島周辺の海陸一体の標高データ, 第 133 回火山噴火予知連絡会資料 (その 1) ロ永良部島, 平成 27 年 10 月 21 日, 45-46, http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/133/133_01.pdf (accessed 12 Jul. 2017).
- 松本英明 (1984) : 宮城県松島湾の沈水過程, 東北地理, 36-1, 46-53.
- 小野寺健英, 伊藤弘志, 熊川浩一, 小山薫, 加藤正治 (2009) : 海域火山基礎情報図「鬼界カルデラ」調査, 海洋情報部技報, 27, 92-97.
- Sibson, R. (1981) : "A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation," chapter 2 in *Interpolating Multivariate Data*, New York: John Wiley & Sons, 21-36.
- 田中仁, 真野明, 有働恵子 (2011) : 2011 年東北地方太平洋沖地震津波による海浜地形変化, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 67(2), I_571-I_575.
- 露木利貞 (1969) : 九州地方における温泉の地質学的研究 (第 5 報), 鹿児島大学理学部紀要 地学・生物学, 2, 85-101.
- 有働恵子, 田中仁, 真野明, 武田百合子 (2013) : 東北地方太平洋沖地震津波による宮城県仙台湾南部海岸の海浜変形特性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 69(2), I_1391-I_1395.
- 八島邦夫 (1998) : 野蒜洲崎浜の急速な地形発達とその要因についての一考察, 季刊地理学, 50, 329-337.
- Zhang, W., Montgomery, D. R. (1994) : Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations, *Water Resources Research*, 30(4), 1019-1028.