

「東日本大震災における航空レーザ測量を使用した地殻変動調査 ～宮城県沿岸を事例として～」

空中計測・マッピング部会 レーザ WG

1. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日、日本における観測史上最大の規模の地震が発生した。マグニチュードは 9.0 (Mw) を記録し、東北地方および関東地方の太平洋沿岸部では、地震に伴う津波で多くの犠牲者を出すとともに、沿岸の自治体には大量の瓦礫が散在する等、甚大な被害をもたらした。また、地震に伴う地盤沈下を確認され、宮城県石巻市では最大約 1.2m の地盤沈下が記録された。海岸部や河口部では満潮時や高潮による冠水被害が発生するなど、地盤沈下は周辺自治体に影響を及ぼした。そこで、宮城県、国土交通省、国土地理院は、航空レーザシステムを保有する各社と協力し、瓦礫量や地盤沈下状況を調査するとともに、復興に資する基礎資料の作成を目的に航空レーザ測量を実施した。

1.1 作業フロー

本作業は、図 1.1 のフローに従い作業を行った。

作業フローの最後の破線ボックスは、航空レーザ計測の利活用例を示す。

2. 宮城県沿岸部の航空レーザ計測

2.1 作業目的

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災の被災地のうち、宮城県沿岸部の瓦礫の所在と容量、地盤沈下状況を迅速に確認するため、航空レーザ計測を実施した。

2.2 作業内容

本業務は計測点間隔 1.0m²に 1 点以上とは

するものの、作業規程の準則による標準的レーザ点群取得間隔等は採用せずに、計測作業が迅速、かつ効率的に実施できるよう計画した。作業は航空レーザ計測から地表面画像取得を含む三次元計測データ作成、オリジナルデータ作成までを第一段階として行った。第二段階のメッシュデータ作成作業は計測終了後に全域実施した。また、航空レーザデータとの検証を目的に最低限の調整用基準点測量を実施した。

2.3 計画準備

本業務の計測作業範囲は、総面積 1,240km²

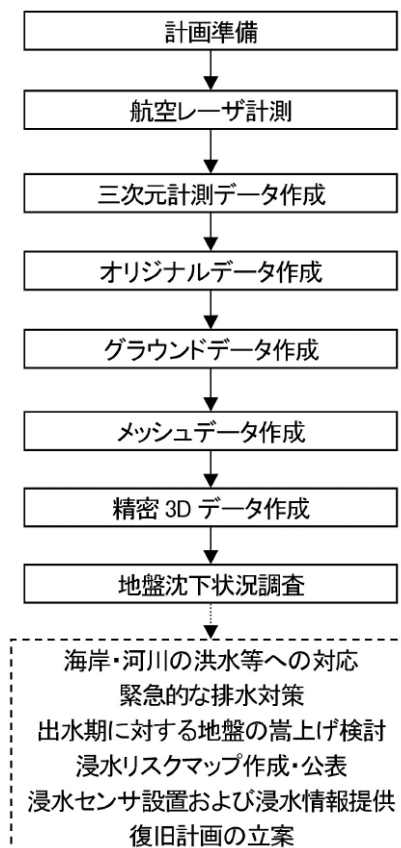


図 1.1 作業フロー

以上の宮城県沿岸部一帯である。災害対応ということもあり短期間で作業を完了させる必要があった。大震災発生後1週間以内に鳴瀬川を境に北部をアジア航測、南部を朝日航洋が計測計画の立案を行った。地形や複数機による安全な飛行を考慮し、作業範囲を5分割とした。各作業エリアの計測計画は、作業エリア毎の地形標高及びエリア形状、並びに航空レーザ機材・機体の仕様性能を鑑みて、計測計画を立案した。

2.4 作業結果

本作業の実施内容を以下に記す。

2.4.1 計測

3月19日から計測データの取得が始まり、19日後の4月6日には全1,240km²の265コースの航空レーザ計測が完了した。図2.1に範囲図及びコース図を示す。

計測飛行期間中は、飛行機毎の計測飛行諸元（計測コース及び飛行高度、計測基地、機体及び機材、運航機長及び計測オペレータの氏名連絡先など）の詳細を日々更新しながら情報共有した。また、計測飛行時には航空無線等を活用してお互い密に連絡を取り合うなど、隣接する作業エリアでの飛行安全を最大限確保しながら、迅速に航空レーザ計測作業を行った。

2.4.2 三次元計測データ作成

計測取得した後の三次元計測データ作成においては、GNSS/IMU解析時の地上GNSS固定局として使用する電子基準点の成果利用に注意が必要であった。その理由として電子基準点の座標値は、地震発生時の地殻変動の影響だけではなく、その後の余震変動の影響もあって日々変動しているためである。そこで、計測実施日における電子基準点の正確な

位置座標及び標高値の把握が重要となる。

本作業では、標高変動量が比較的小さい山形県の電子基準点「朝日」を使用することを基準とした。一方で、各社が地上GNSS固定局として、使用した電子基準点の暫定成果を国土地理院から入手することで、分担計測した各社作業エリア間のデータ接合に不具合が生じないように努めた。

2.4.3 オリジナルデータ作成

作業エリア間を含めた計測コース間の標高較差の平均値は、作業規程の準則に従い±30cm以内となるように点検・調整を行った上で、調整用基準点による標高点検を1点のみ実施した。調整用基準点は仙台市内に設置され、標高点検の結果、航空レーザ計測データが現地実測値より19cm低いことが分かった。これは作業規程の準則にある規定値（±25cm以内）を満たしていたために、計測点群データの標高調整（標高オフセット）は実施しないこととした。

2.4.4 その他

本業務の成果は、オリジナルデータとして宮城県沿岸の被災状況の迅速な調査に利用されただけではなく、引き続き災害対応緊急事業として実施された5mDEM作成の基盤データとしても活用されている。

Area5の南側に隣接する仙台平野南部（Area6）について、当初、福島第一原子力発電所が事故による飛行制限を設けていた理由から、安全面に関して配慮する必要があった。その後、宮城県と福島県の県境は福島第一原発より55km程度ある事もふまえ、関係機関と調整を行い県境まで追加実施することとなった。

最終的に、北端は福島第一原発から半径80kmの宮城県域、南端は福島県との県境（福島第一原発より約55km）までを業務対象範囲とした総面積323km²とした。Area5とデータ接合

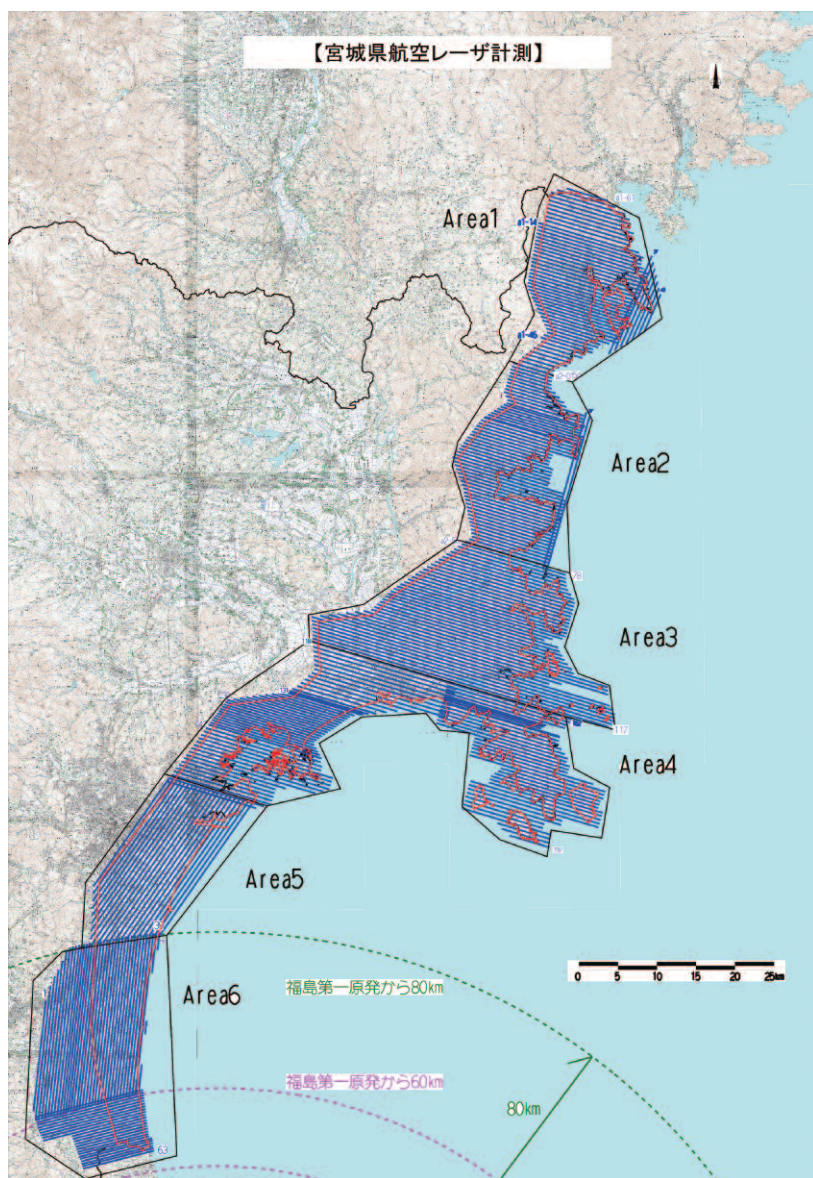


図 2.1 計測範囲図

が可能なようにパスコが計測取得している。

3. メッシュデータ作成

3.1 作業目的

宮城県沿岸は、東北地方太平洋沖地震により甚大な被害を受けた。当初は瓦礫の所在や瓦礫の量的把握を目的に航空レーザ計測を緊急実施した。しかし、この計測データは、仮設住宅の建設候補地選定等の有効なデータ活用を図るため、迅速な数値地形データの整備が求められた。そこで、計測した航空レーザデータからフィルタリング作業を行い、5mDEM データを整備した。

3.2 従来とは異なる DEM 作成作業

今回の作業対象地域は、東北地方太平洋沖地震なら



図 3.1 航空写真（左：震災前、右：震災後）

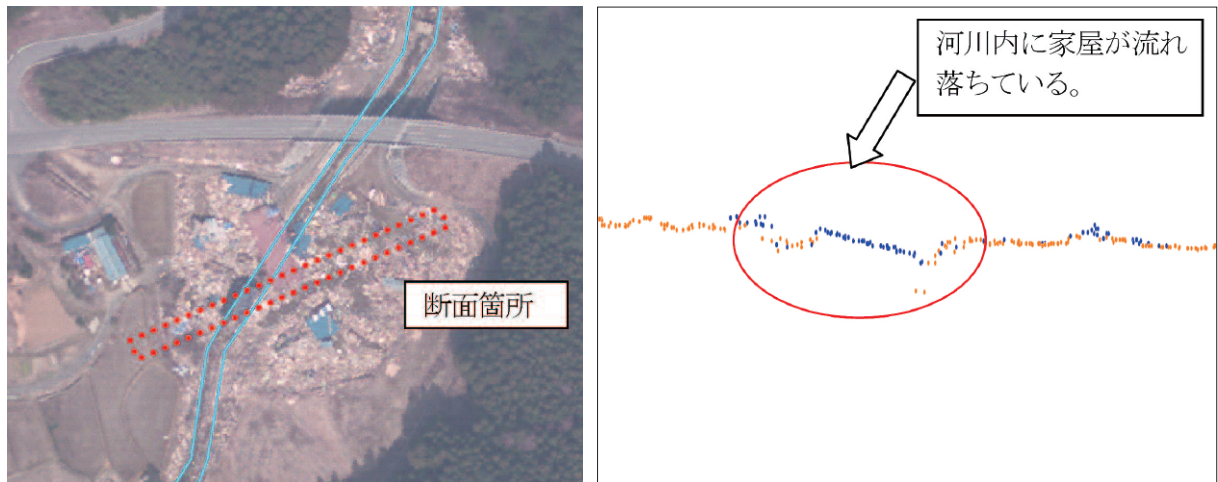


図 3.2 瓦礫（左：瓦礫箇所、右：断面図）

びにそれに伴い発生した津波による被害により、家屋・構造物等が瓦礫として堆積し、津波による湛水箇所が存在していた。

グラウンドデータ作成作業や水部ポリゴン取得作業では、瓦礫のフィルタリングや湛水域の水部ポリゴン取得方法において、以下の課題が発生した。

3.2.1 瓦礫のフィルタリング

航空レーザ測量で取得した航空写真と点群データから瓦礫判読を行えるが、地盤面を表現することが困難であるため、協議の結果、以下の判断基準でフィルタリング作業を行った。

- ・1m 程度の高さを持つ瓦礫は除去する。
- ・10～20m 以上水平的に分布する瓦礫はフィルタリングし、地表面の分からないその他の他はフィルタリング対象外とした。

水色ライン：震災前の河川形状ライン

青色点：地表面としていない点（瓦礫・家屋等）

オレンジ点：地表面としているもの

図 3.2 に一例を示す。

3.2.2 湛水域ポリゴンの取得

浸水域での湛水箇所の取得判断として、航空レーザ測量で取得した航空写真と震災前の航空写真、既存の数値地図等を比較し、湛水



図 3.3 震災後の湛水域と水部

域ポリゴンを取得した。また航空レーザの特性である、水部には反射しにくく欠測データとなる箇所も判断材料の一つとした。

緑色ライン：湛水域（津波によって一時的に出来た水溜り）

水色ライン：水部（海水及び河川等）

図 3.3 に一例を示す。

3.3 メッシュデータならびに精密 3D 地図作成

メッシュデータについては、国土地理院所定フォーマットである LEM 形式で作成を行った。また精密 3D 地図については津波の影響があった海岸部の低標高部について細分化表示した。

3.3.1 メッシュデータ作成

グラウンドデータと水部ポリゴン、湛水域ポリゴンからメッシュデータ (5m メッシュ) を作成し、国土地理院が提供するフリーソフト (LemView) にて標高値や水部ポリゴン、湛水ポリゴンの確認を行った。(図 3.4)

3.3.2 精密 3D 地図作成

基盤地図情報 25000 およびメッシュデータから作成したカラー標高段彩陰影図をオーバーレイ表示することにより精密 3D 地図を作成した。精密 3D 地図 (図 3.5) は、印刷様式、色調の統一を行い、計測対象地域の地形状況を緊急的に把握するため暫定的に作成した。

【精密 3D 地図の主な特徴】

- ・ 2 次メッシュ (縮尺 25,000 レベル) で作成
- ・ 基盤地図情報 25,000 を背景レイヤとした。
- ・ 低標高値を判別しやすくする為、標高値 12m 未満を細分類して表示した。

3.4 作業を終えて

メッシュデータ作成作業は、二次災害対策および被害状況把握のため迅速な作業が求められた。東日本大震災という未曾有の災害により、特例の作業に対応せざるを得なかったが、計画機関および作業期間の不断的努力により、航空レーザ計測後の 4 月上旬から 4 月末までの約 1 ヶ月で Area1~Area6 の約 1600 km² のメッシュデータを作成した。

事例のない大震災を経て、その対応として前述したように従来とは異なる処置への対応

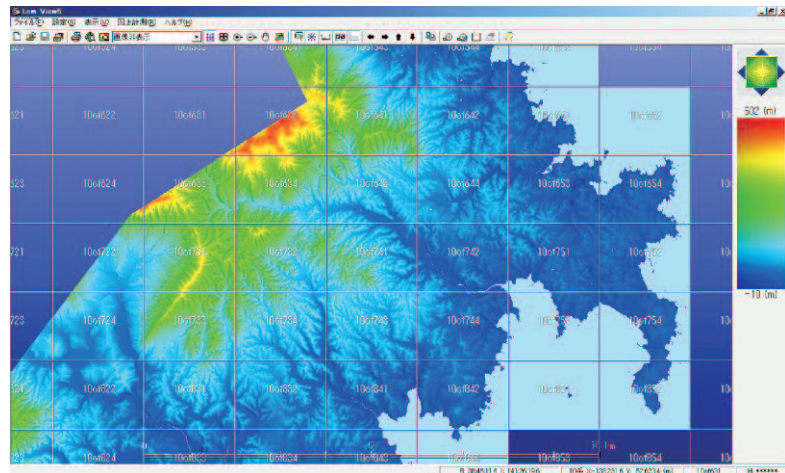


図 3.4 LemView (数値地図 5m ビューワ)

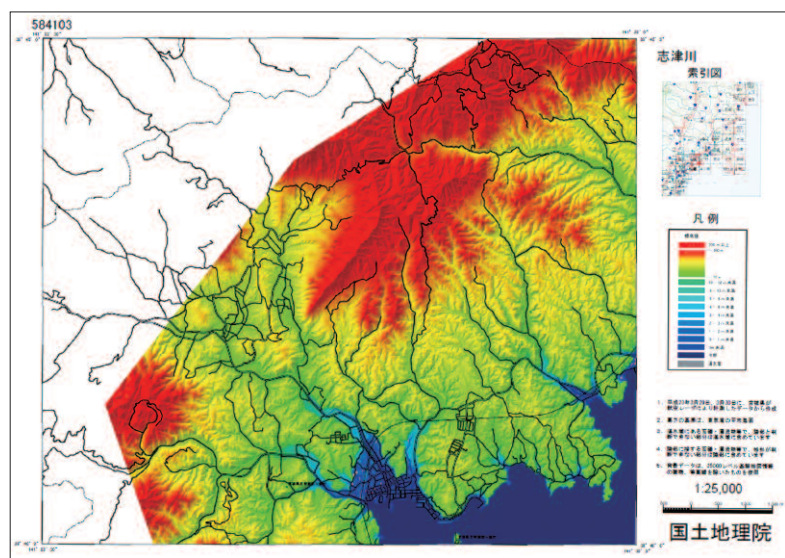


図 3.5 精密 3D 地図

について明文化が進められた。また、国土地理院 HP「平成 23 年 (2011 年) 東日本大震災に関する情報提供」http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h23_tohoku.html にて本作業にて作成したメッシュデータを加工したデジタル標高地形図 (<http://www1.gsi.go.jp/geowww/dhmap2/>) が公表されている。

4. 地盤沈下状況調査

4.1 標高段彩図作成

4.1.1 作業目的

震災の影響により、特に仙台平野では地盤沈下や防潮堤の破壊が発生し、高潮等に対する脆弱性が危惧されている。そこで、過去のデータ

と比較し、地形の変化がある箇所を抽出することを目的として、標高段彩図を作成した。

4.1.2 仙台平野での使用データ

標高段彩図の諸元を決めるために、仙台平野で試験的に標高段彩図を作成した。使用したデータを表 4.1 に示す。

震災後のデータは、いずれも 5mDEM で作成されており、高さの調整を行った後に合成した。

震災前のデータは、H20 及び国際航業アーカイブは 5mDEM で作成されており、H17 データは 2mDEM であった。そこで、H17 データはグラウンドデータから再度 5mDEM を作成した。また、データの範囲が重複している箇所については、海浜等で可能な限り陸域のデータを得られるように低い値を採用した。

表 4.1 使用データ

	震災後データ	震災前データ
宮城県沿岸部	平成 23 年 3 月～4 月計測データ	
仙台平野		H20 計測データ※1
海岸部		H17 計測データ※2
仙台平野南端		国際航業アーカイブデータ

※1 仙台河川国道事務所管内航空レーザ計測等業務（仙台河川国道事務所発注）グリッドデータ

※2 航空レーザ測量による高精度数値データ作成作業（宮城・福島地区）（国土地理院発注）グリッドデータ

4.1.3 標高段彩図の作成

上記のデータに対し、標高毎に色を付けた標高段彩図を作成した。今回の目的が低地の地形変化（地盤沈下）の把握であるため、5.5m 以上の高標高地は 1 色（灰色、背景を透過）に塗りつぶした。また、5 万分の 1 地形図を範囲外及び 5.5m 以上の地域について背景地図として表示した。さらに、5 万分の 1 地形図で水部となっている箇所は白色で塗潰した。

地震後データについては、既存の 5 万分の 1 地形図とは合わない場合があるが、新規の地形図データがないため、既存（震災前）の地形図データを背景図及び水部の塗潰しデー

タとして採用した。

標高値は T.P.-1.0m を基準として、0.5m 間隔に彩色し、5.5m 以上を灰色（背景図を透過）とする全 15 色に色分けした。また、過去最高潮位である 1.6m ラインをオーバーレイした図面も作成した。

付録に作成したサンプルをまとめた。

4.1.4 標高段彩図の出力

より詳細に地形変化を見るために、1 万分の 1 スケールでの印刷を行った。なお、この際に段彩の間隔を 0.25m に狭くした。出力図は仙台平野を北部、中部、南部に 3 分割しており、それぞれ地震後、地震前の 2 種類を A0 版で印刷した。

付録に出力図の PDF ファイルをまとめた。

4.1.5 震災後データの検証測量

震災前と後の標高段彩図を比較したところ、仙台空港の北部で震災後の方が標高値の高い場所があった。これらは津波の影響で田圃が湛水していたため、震災後の計測データでは見かけ上標高値が高くなっている場所であった。そこで、上記の場所 8 箇所を VRS による基準点測量を実施してレーザデータとの高さの較差を検証し、震災後データの補正を行った。

4.1.6 宮城県北部

仙台平野で作成した標高段彩図の諸元を元に石巻市、北上川河口部、気仙沼市等の標高

表 4.2 使用データ

	震災後データ	震災前データ
石巻市・北上川河口部	平成 23 年 3 月～4 月計測データ	H18 計測データ※3
海岸部		H17 計測データ※4
南三陸町・気仙沼市		H21 計測データ※5

※3 鳴瀬川及び北上川流域地盤高データ作成業務（北上川下流河川事務所事務所発注）グリッドデータ

※4 航空レーザ測量による高精度数値データ作成作業（宮城・福島地区）（国土地理院発注）グリッドデータ

※5 航空レーザ測量による精密基盤標高データ整備業務（東北地区）（国土地理院発注）グリッドデータ

段彩図を作成した。(使用データ表 4.2)

仙台平野では、防潮堤が大きく破壊され高潮等による内陸部への浸水が懸念されているため、0.5m 単位の詳細な標高段彩図を作成した。一方、宮城県北部は震災による地盤沈下が仙台平野に比べ大きく、また平地部が狭いため、既に浸水しているか、あるいは高潮等でも浸水範囲が限られてくる。そこで、今後の災害対応よりは現状の把握が重要であるため、1.0m 単位の標高段彩図を作成し、主として T.P.1.0m 未満の範囲がどの程度広がったかを確認できるように色の設定を行った。

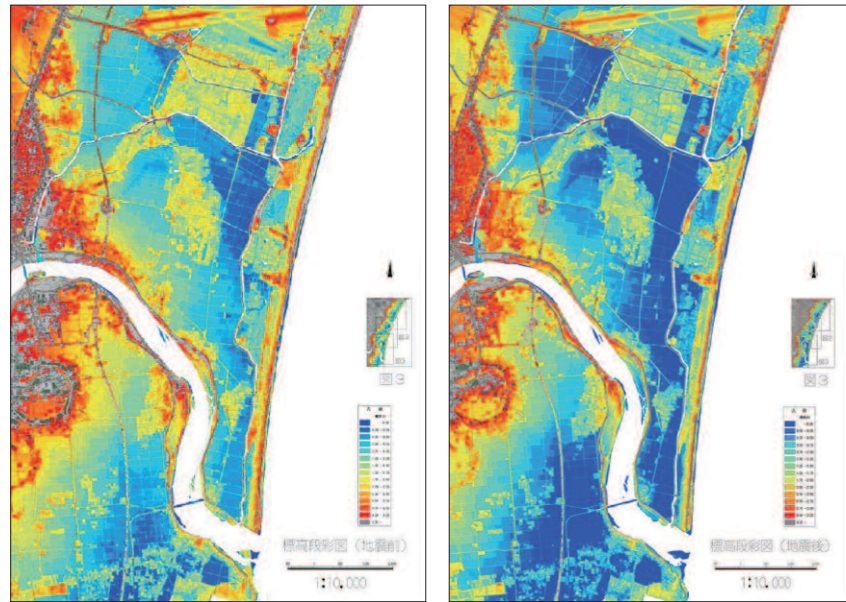


図 4.1 標高段彩図（阿武隈川河口部）左：震災前、右：震災後

表 4.3 低標高位置図作業仕様

項 目	内 容
使用したデータ	・【震災前】平成 17 年～平成 19 年に計測した航空レーザデータ※6 ・【震災後】平成 23 年 3 月～4 月に計測した航空レーザデータ。
作業メッシュ単位	5m メッシュ
作業仕様	海拔 0 メートル以下の標高値を水色に着色 海拔 0.7 メートル（大潮の満潮時）以下の標高値を黄緑色に着色 海拔 1.6 メートル（過去 30 年間の最高潮位）以下の標高値を黄色に着色
使用した地形図	数値地図 25,000、数値地図 50,000
浸水範囲線	国土地理院の作成資料を参考に紫色線で表示する
データ範囲線	航空レーザ測量データ範囲を橙色線で表示する

※6 仙台海川国道事務所管内航空レーザ計測等業務（仙台海川国道事務所発注）グリッドデータ
航空レーザ測量による高精度数値データ作成作業（宮城・福島地区）（国土地理院発注）グリッドデータ
鳴瀬川及び北上川流域地盤高データ作成業務（北上川下流河川事務所事務所発注）グリッドデータ
航空レーザ測量による高精度数値データ作成作業（宮城・福島地区）（国土地理院発注）グリッドデータ
航空レーザ測量による精密基盤標高データ整備業務（東北地区）（国土地理院発注）グリッドデータ

4.2 低標高位置図作成

4.2.1 作業目的

東日本大震災の巨大地震に伴う地盤沈下を調査

するため、航空レーザ測量データを利用した低標高位置図（図 4.1）を作成した。作業手順を以下に列記する。また、作業仕様を表 4.3 に整理する。

4.2.2 作業手順

- ①震災前後の航空レーザ測量データを準備し、それぞれの 5mDEM を作成する
- ②GIS 上にメッシュデータをインポートし、標高値に応じてメッシュデータを着色する
- ③背景に数値地形図を展開し、着色したメッ

シュデータを透過表示し出力する

- ④湛水域では、現地調査結果などから地盤高を想定した。

4.2.3 作業結果

本作業では、図 4.2 に示す低標高位置図を作成した。

4.3 低標高箇所面積集計

4.3.1 作業目的

東日本大震災の巨大地震に伴う地盤沈下した

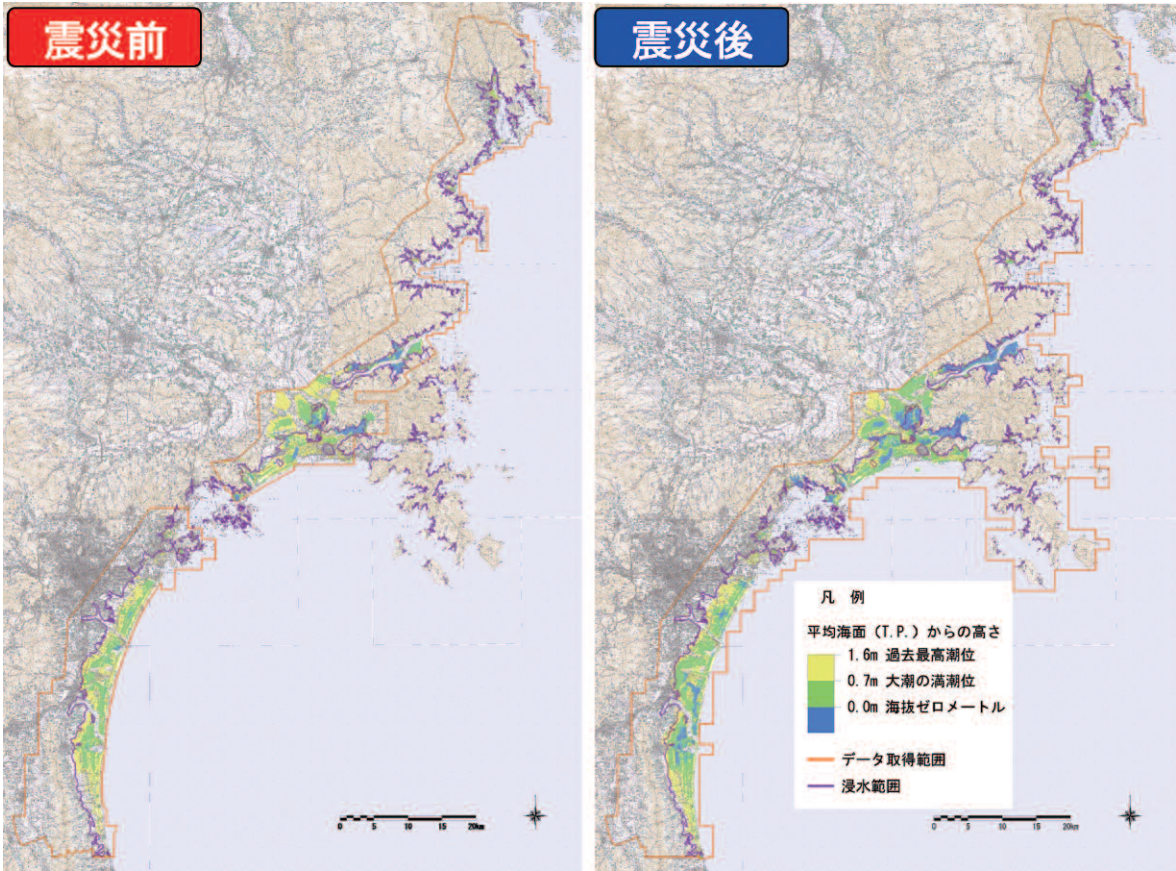


図 4.2 宮城県全域の低標高位置図

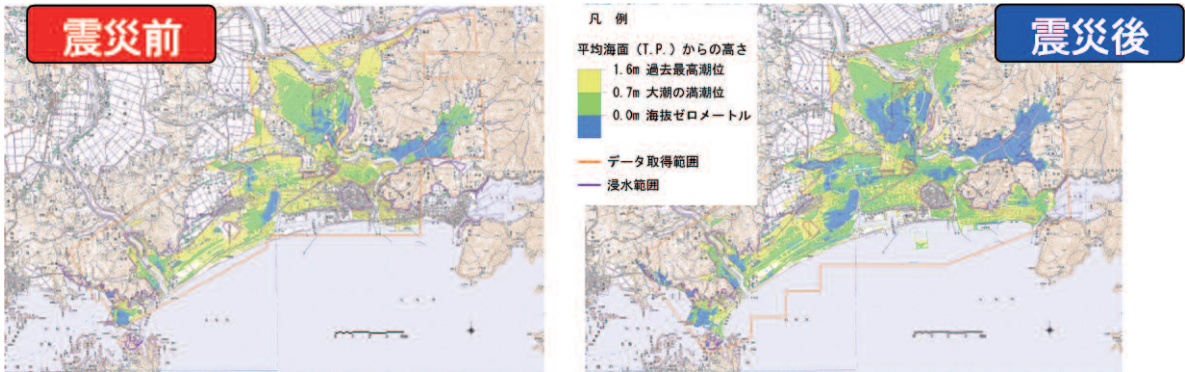


図 4.3 東松島市・石巻市周辺の低標高位置図

面積を調査する目的に航空レーザ測量データを利用した低標高箇所面積を集計した。作業手順は以下に列記する。また、作業仕様を表 4.4 に整理する。

表 4.4 低標高箇所面積集計作業仕様

項 目	内 容
使用したデータ	・【震災前】平成 17 年～平成 19 年に計測した航空レーザデータ ・【震災後】平成 23 年 3 月～4 月に計測した航空レーザデータ。
作業メッシュ単位	5m メッシュ
作業仕様	海抜 0 メートル以下の面積 海抜 0.7 メートル（大潮の満潮時）以下の面積 海抜 1.6 メートル（過去 30 年間の最高潮位）以下の面積

4.3.2 作業手順

①震災前後の航空レーザ測量データを準備

し、それぞれの 5 メートルメッシュデータ（DEM）を作成する

表 4.5 宮城県全域における地盤沈下の状況

	地震後	地震後増加した割合 (推定値)
海拔 0m 以下の面積 (T.P.±0m)	56km ²	3.4 倍
大潮の満潮位以下の面積 (T.P.+0.7m)	129km ²	1.9 倍
過去最高潮位以下の面積 (T.P.+1.6m)	216km ²	1.4 倍

- ②GIS 上にメッシュデータをインポートし、前項図 4.2 に記載する 0m 以下、0.7m 以下、1.6m 以下の標高値のメッシュデータを抽出し、メッシュ数をカウントした
- ③カウントしたメッシュ数に対して、メッシュの単位面積である 25m² (5×5m) を乗じて、低標高箇所面積集計とした

4.3.3 作業結果

低標高箇所面積集計結果を表 4.5 に示す。海拔 0m 以下の面積、大潮の満潮位以下の面積 (T.P.+0.7m)、過去最高潮位以下の面積 (T.P.+1.6m) 以下の面積が増加し、それぞれ、56km²、129km²、216km² となった。最も海拔 0m 地帯が多かったのは図 4.3 に示す東松島市・石巻市周辺の旧北上川河口域であった。

5. おわりに

本作業では、地震発生後、直ちに航空レーザ計測の準備を行ったため、被災地の地盤沈下状況を迅速に把握することができた。航空レーザ測量身の特徴は、広範囲を高精度、かつ高密度の点群データを取得することで、本作業ではその特徴を十分に活かし、災害状況把握に有効であったと思われる。また、本作業で作成した成果は、県や市町村など各自治体や大学などの研究機関において、津波シミュレーションや浸水リスクマップ等に使用されている。近い将来に予想される大規模地震への予防対策や地震発生後の被害状況把握のために、本作業で得た経験を技術的知見へと昇華しなければならない。レーザ WG では、災害におけ

る技術的知見を「減災」に資する技術的資料として取りまとめることを企画している。

■参考資料

- 1) 中村圭吾 (2011)、「航空レーザ計測による東日本大震災後の広域的な地形変化・地盤沈下の把握」、雑誌『河川』、平成 23 年 9 月号 (平成 23 年 9 月発行)、p75- p78、日本河川協会
- 2) 齊藤和也監修 (2008) 図解 航空レーザ計測、(財) 日本測量調査技術協会
- 3) 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動について
http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi_tohoku.html
(平成 23 年 11 月 7 日アクセス)
- 4) 仙台平野における地震に伴う地盤沈下について
http://www.mlit.go.jp/report/press/river03_hh_000327.html
(平成 23 年 11 月 7 日アクセス)
- 5) 宮城県沿岸部における地震に伴う地盤沈下について
http://www.mlit.go.jp/report/press/river03_hh_000335.html
(平成 23 年 11 月 7 日アクセス)
- 6) 浸水リスクマップ
<http://www.thr.mlit.go.jp/>
(平成 23 年 11 月 7 日アクセス)
- 7) 日経 BP 社 IT を活用した監視システムで変わる防災体制 (2)
<http://kenplatz.nikkeibp.co.jp/article/const/news/20111025/553616/?ST=rebuild>
(平成 23 年 11 月 7 日アクセス)
- 8) 平成 23 年東北地方太平洋沖地震による津波の対策のための津波浸水シミュレーションの手引きについて
http://www6.river.go.jp/riverhp_view

er/entry/y2011e13e44ae01e83d7d77d015

ac33fb529f2b9719f78.html

(平成 23 年 11 月 7 日アクセス)

■執筆者紹介

朝日航洋株式会社 横溝 和則

アジア航測株式会社 畠 周平

アジア航測株式会社 山野 芳樹

株式会社 エイテック 木村 明裕

国際航業株式会社 横尾 泰広

中日本航空株式会社 近藤 雅信

株式会社 パスコ 大坪 和幸

北海航測株式会社 滝澤 昭博