

航空レーザー計測による液状化地盤沈下マップの精度評価と浦安市の地盤と構造物変位の状況

朝倉 徹¹・須山 翔太¹・小長井 一男²・江藤 稚佳子³・渋谷 研一³

¹東京大学大学院工学系研究科 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail: toru-asa@iis.u-tokyo.ac.jp

²東京大学生産技術研究所教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail: konagai@iis.u-tokyo.ac.jp

³朝日航洋株式会社 計測コンサルタント部 (〒350-1165 埼玉県川越市南台3-1-1)

E-mail: kenichi-shibuya@aeroasahi.co.jp

2011年東北地方太平洋沖地震により、東京湾岸の広域で液状化現象及びそれに伴う地表面の沈下が観測された。東京大学生産技術研究所小長井研究室と朝日航洋（株）は最も液状化被害の激しかった地域のひとつである千葉県浦安市の上空から航空レーザー測量による地表面標高の計測を行い震災前の標高と比較し、地殻変動などの影響を除去した液状化のみによる標高変化マップを作成している。この作成にあたっては杭支持建物の屋上標高を基準点とした標高差分補正が行われているが、その精度をより多くの標点を用いて再検討するとともに、地盤のみならず戸建住宅、工場建屋、護岸擁壁などの構造物の変位検出を試みた。

Key Words : 浦安市, 液状化, 表層地盤沈下, 航空レーザー測量, The 2011 East-Japan Earthquake, Urayasu city, sand-liquefaction, soil subsidence, Air-borne LIDAR,

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により、東京湾岸の広域で液状化現象が観測された。

液状化による主な被害は、一般住宅や低層構造物の傾斜と変位、杭基礎構造物と周辺地盤で生じた大きな段差、路面舗装の損壊、上下水道・ガスなどライフライン地下構造物の寸断などである。これらの被害を受けた地域の多くでは、表層地盤の砂質土が填砂として大量に地上に噴出したため、地表面の沈下が見られた（写真-1）。

震災直後は液状化被害地域全体が大量の填砂に覆われている状態であったが、砂の除去が進むにつれ、沈下した地表面の様子が明らかになってきた。そこで小長井研究室は朝日航洋株式会社と共同で、震災後4月20日に、最も液状化被害の激しかった地域の一つである千葉県浦安市の上空から航空レーザー測量による地表面標高の計測を行い、得られたデジタル地表面モデル（以下DSM）と2006年12月から2007年1月にかけて計測したDSMとの差分を求めることで、液状化による地盤の沈下マップ（標高差分図）を作成した。¹⁾



写真-1 液状化による地盤沈下の様子(浦安南高校)

沈下マップ作成にあたり航空レーザー測量によるDSMから液状化による標高変化のみを抽出するためには、測量機器に由来する歪み、および地殻変動などの影響を除去しなければならなかった。液状化による地盤変形は主として軟弱な表層地盤内で発生するため、支持基盤に到達する杭基礎構造物は地震の前後で地殻変動分を除く標高変化が無かったものと考え、これを利用した標高差分の補正が行われている。本論文前半ではさらに標点を増やして定量的に本手法の精度を検証している。



写真-2 計測機器搭載機および各計測機材

得られた標高差分のデータは地表面の標高変化だけではなく、地上構造物の変位検出も十分可能な精度を持つと考えられる。そこで後半では浦安市内の液状化被害を受けた地区の戸建住宅、工場建屋、護岸擁壁等の構造物を対象に計測結果の検討を行った。

2. 標高変化計測の精度検証

(1) 測量の概要

本調査で用いられた航空機レーザー測量システムは、空中GPS受信装置とレーザースキャナ（走査式光線測距儀）、慣性航法装置（動揺計測装置（IMU）と加速度計を組み合わせたもので機体の三軸回転角を計算する）等の機材と地上GPS基準局で構成される。

地形データから微細な変化量を抽出するためには、空間的に高密度なDSMが必要とされるため、震災後の計測では全領域で2.182点/㎡（ラップ時4.089点/㎡）、震災前（2006年）のデータでは0.432点/㎡（ラップ時0.792点/㎡）の空間分解能を有するDSMが準備された。

(2) 鉛直方向の較差補正

浦安市内では、今回の地震による杭基礎建物の構造被害は少なく、地震前後で工学的基盤から屋上までの高さの変化は無視できると考えられる。このためKonagaiらは市内最高層のマンション棟の屋上を基準に震災前後のDSMを比較することで浦安市全域の液状化による沈下マップを作成した¹⁾。

これはマップの早急な復旧対応への活用を念頭に置いての暫定的な措置であったが、その標高変化の精度については今後のマップの活用のためにも定量的な評価を加えておく必要がある。そこで、埋立て年代の異なる²⁾地域から、公共施設、大学校舎、高層マンションなど6箇所の建物を選び出し、それら

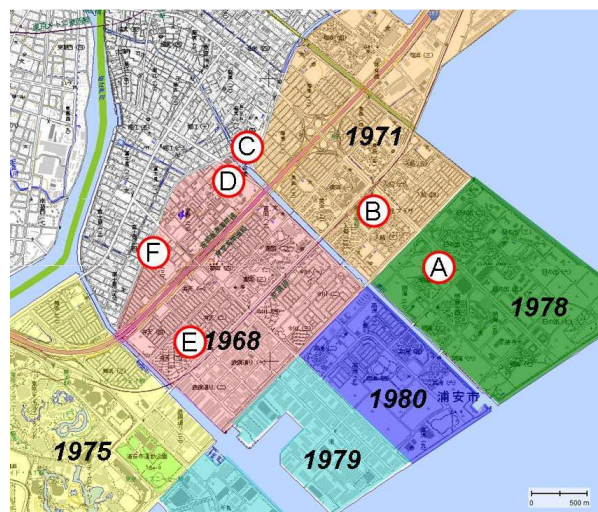


図-1 計測対象建物の位置および地区毎の埋立て年

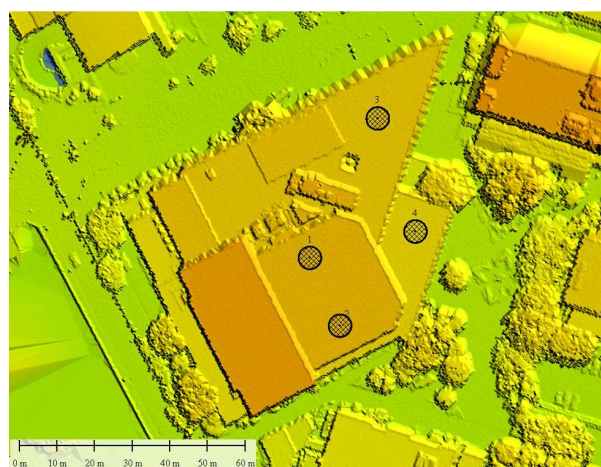


図-2 計測地点抽出の例（文化会館C）

表-1 2011年—2006年 基準建物の標高差分

計測建物 及び地点名	計測地点座標		2011	2006	2011-2006差分(m)	
	緯度	経度	標高(m)	標高(m)	地点毎(m)	建物毎(m)
大学A1	35.645125	139.920240	31.1023	31.3083	-0.2060	
大学A2	35.645125	139.920571	31.1292	31.3419	-0.2127	-0.2093
マンションB1	35.647987	139.913904	112.9577	113.1900	-0.2323	
マンションB2	35.647906	139.914026	112.9761	113.2367	-0.2606	
マンションB3	35.647951	139.914092	112.9663	113.1745	-0.2082	
マンションB4	35.647951	139.913949	112.9646	113.1917	-0.2271	-0.2321
文化会館C1	35.653619	139.901497	20.9227	21.1300	-0.2074	
文化会館C2	35.653457	139.901585	20.9132	21.1199	-0.2067	
文化会館C3	35.653952	139.901696	16.9115	17.1025	-0.1910	
文化会館C4	35.653682	139.901806	13.5811	13.7840	-0.2029	-0.2020
郵便局D1	35.651817	139.899839	14.3769	14.5829	-0.2061	
郵便局D2	35.651592	139.900280	14.3778	14.5738	-0.1959	-0.2010
学校E1	35.639417	139.895500	13.6783	13.8505	-0.1722	
学校E2	35.638109	139.897155	14.2482	14.4560	-0.2078	-0.1900
学校F1	35.644944	139.891650	13.6680	13.8642	-0.1962	
学校F2	35.644673	139.892025	13.6488	13.8733	-0.2245	
学校F3	35.645052	139.892445	13.4727	13.6934	-0.2207	-0.2123
標準偏差					0.0193	0.0142
平均(m)					-0.2078	

の屋上の突起や傾斜のない平坦な部分から各棟複数箇所の計測地点を抽出し、標高差（差分値）の平均値とその標準偏差を抽出した。なお各計測地点では半径3m（図-2の黒枠アミ掛け範囲）の標高平均値をもって計測地点を代表する標高とした。

杭支持建物の標高は地震後（2011年4月）の値が地震前（2006年）に比較し平均20.78cm低く、その標準偏差は1.93cmであった（表-1）。この標準偏差値は10cm～数十cm程度の地盤沈下量を議論するうえで十分小さく、実用上十分な精度が得られている。



図-3 沈下マップ

(3) 水平方向の較差補正

支持基盤に達する杭基礎で支えられた建物であっても、表層地盤の流動に伴い水平方向には変位が生じている可能性がある。そのため、現時点では電子基準点の位置情報のみを用いてDSMの水平方向の補正が行われている。すなわち震災前のDSMデータは電子基準点「千葉市川」の測地成果2000による座標値を、震災後のDSMデータは同基準点の2011年4月20日時点の座標値を基準として作成している。電子基準点の水平方向の精度はmmレベルであるため、地殻変動による影響はこの補正により除去できたものとみなせる。

一方、航空機レーザー測量システム自体にも位置情報に誤差を生じさせる要因が存在する³⁾（例えばレーザーの拡散により地上到達時のビーム径はある幅を持つ）。これら各構成要素の誤差を複合させたシステムの水平精度については、公共測量作業規定

において精度評価の対象となっていない⁴⁾ものの、参考値として震災後の計測にて使用した計測機器（ALTM3100AG4）のメーカー基準によると、水平精度は対地高度の1/3000とされており⁴⁾、本計測における航行高度が750mより水平精度±25cmという値が導かれる。この値の工学的意味については議論の余地があるが、いずれにしろ本調査で得られた水平面内の位置情報は、真値に対して一定の幅を持つことに留意する必要がある。

(4) 沈下マップの作成

上記（2）で再検証された鉛直方向の較差補正值（+21cm）を用いて、液状化地盤の沈下マップを再描画した（図-3）。本マップにおいては路肩や空地に積まれた填砂などを除外するため沈下量のみを表示している。なおこのマップは東京大学生産技術研究所小長井研究室のウェブサイトで閲覧可能である¹⁾。



図-4a 弁天2丁目の航空写真および測線位置

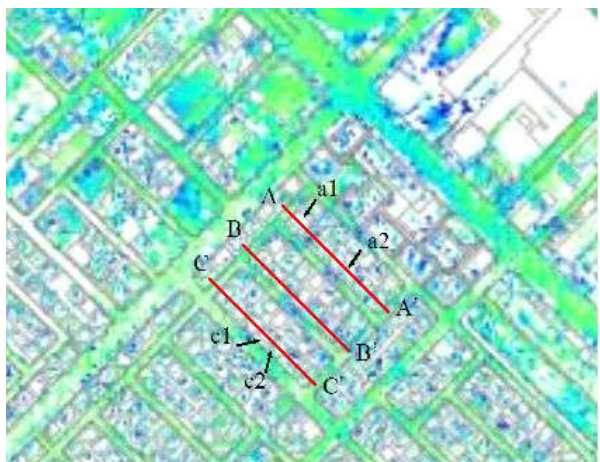


図-4b 弁天2丁目の沈下の様子および測線位置

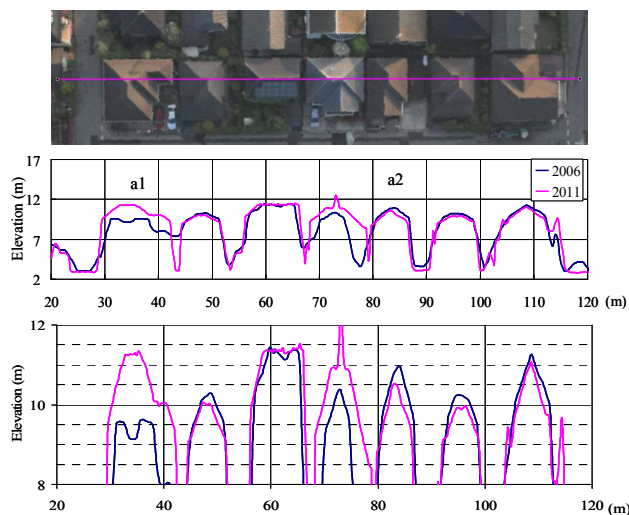
3. DSMデータを用いた構造物の変位計測例

精度の高いDSMデータを活用し、地盤の沈下のみならず個々の構造物の変位も検出できる可能性がある。そこで、沈下や傾斜による被害が報じられた地区の戸建住宅と工場建屋、および沈下マップより変位が発生していると推測できる護岸擁壁の計測結果を以下に示す。

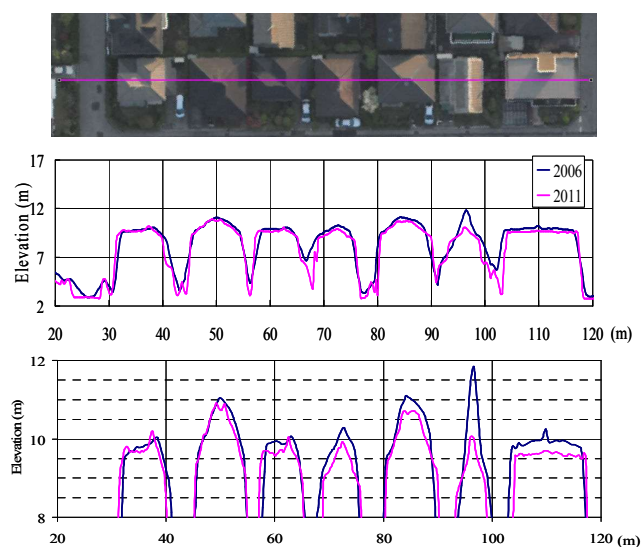
(1) 戸建住宅

浦安市内の液状化被害の中でも、埋立て造成地に立地する戸建住宅の沈下・傾斜被害が激甚であった。中でも弁天2丁目の一部地域では被害の激しい住宅群が帯状に観測されたことが報告されている⁵⁾。そこでこの帯を横切るように測線A-A'～C-C'を設定し（図-4）、DSMデータから断面を切り出して観察を行った。

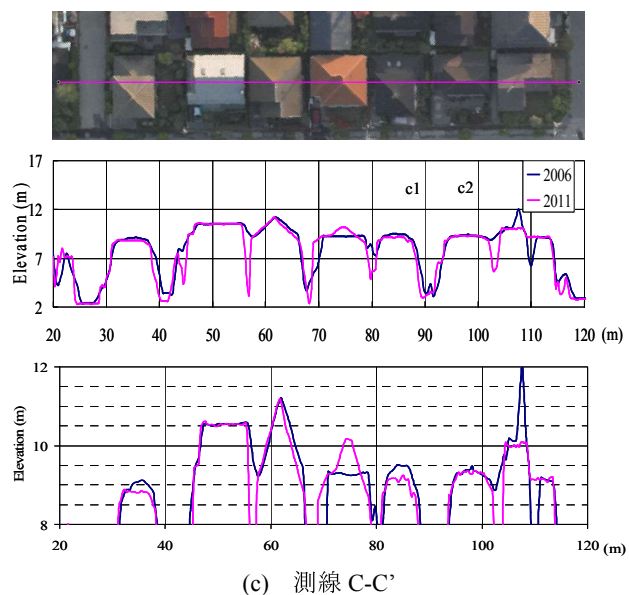
図-5に各測線を含む航空写真と切り出された断面を示す。なお各測線とも、下段のグラフは屋根付近の標高を拡大表示したものである。多くの屋根面で10cmから最大20cm程度の沈下が発生していることが確認できる（測線A-A'上の住宅a2など）。なお標高変化が極めて顕著であったり屋根型が変化しているもの（測線A-A'上の住宅a1、測線C-C'



(a) 測線 A-A'



(b) 測線 B-B'



(c) 測線 C-C'

図-5 弁天2丁目各測線の断面



図-6a 鉄鋼通り1丁目の航空写真および測線位置



図-6b 鉄鋼通り1丁目の沈下の様子および測線位置

上の住宅c1、c2など）については液状化による標高変化以外の要因であると推測され、震災前の計測時に撮影されたオルソ画像を用いて増改築の様子などを確認する作業を進めている。

(2) 工場建屋

JR京葉線を挟んだ弁天町の南東側には鉄鋼関連施設が集積する工場地帯となっている。この地区の工場でも沈下や傾斜の被害が報告されている⁶⁾。ここでは鉄鋼通り1丁目地区を例にとり図-6に示される測線A-A'～D-D'を設定し、断面の観察を行った結果を図-7に示す。

測線上の建物のうち、沈下マップ上で青色の濃いもの（測線A-A'上の工場a1）、逆に真白であるもの（測線A-A'上の工場a2）を抽出し、屋根断面を拡大したものを図-8に示す。屋根面の沈下あるいは隆起の様子を確認することができる。また工場a1においては鉛直方向の較差に加えて水平方向への較差も確認できるが、2章で述べた通り水平方向の位置情報についてはある程度の幅を見込む必要があり、水平方向に関する変位をより高い精度で論じるための検討は今後の課題である。

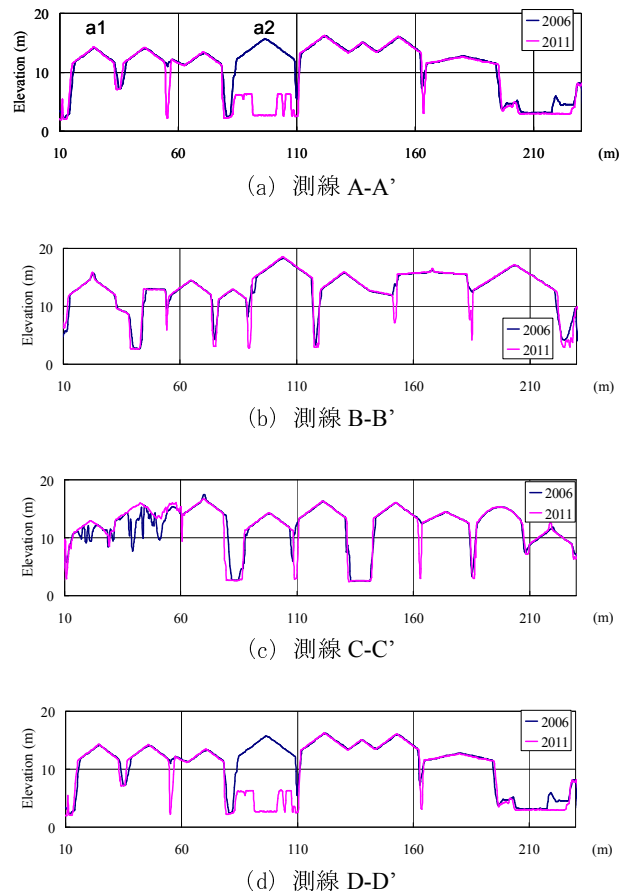


図-7 鉄鋼通り1丁目各測線の断面

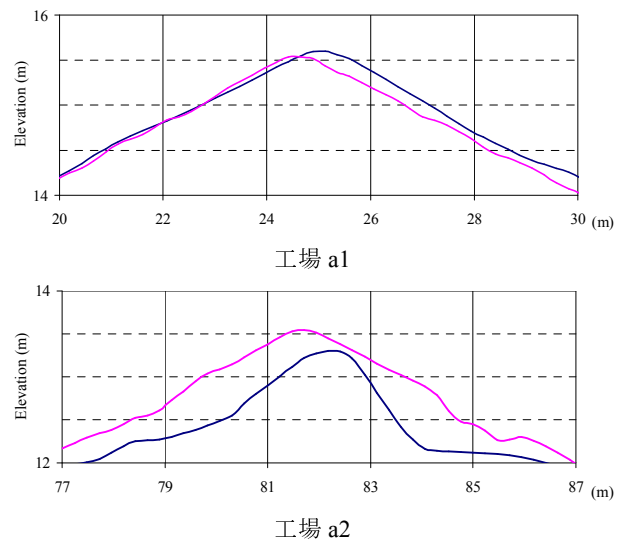


図-8 屋根面の沈下または隆起の様子

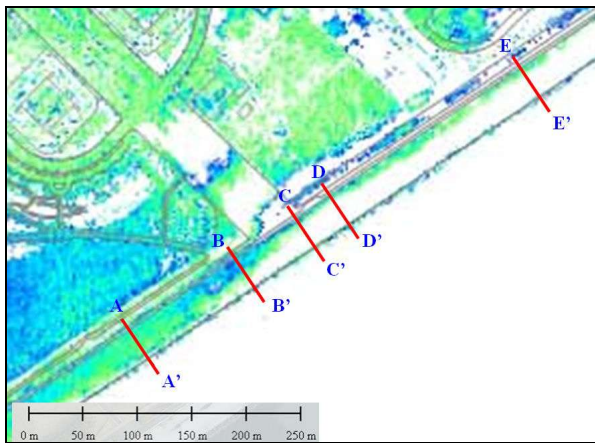


図-9a 明海地区海岸部の沈下の様子と側線位置

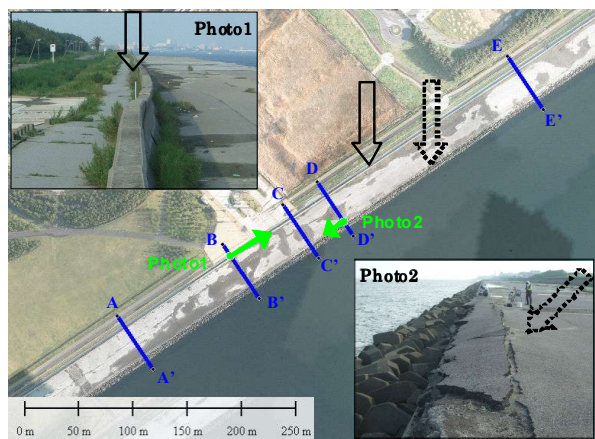


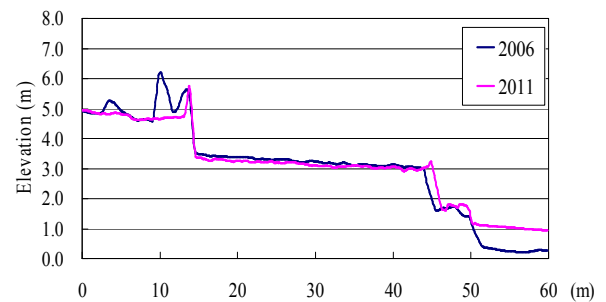
図-9b 航空写真及び現地写真による護岸変位の様子

(3) 護岸擁壁

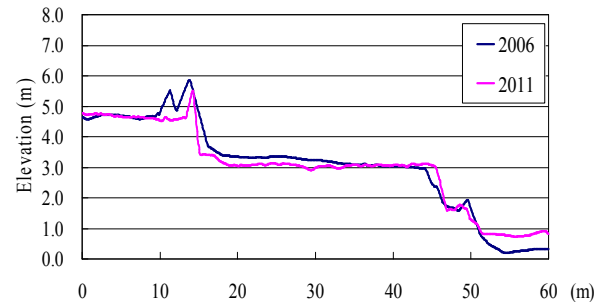
埋立て地の護岸表面の標高変化を観測した様子を示す。図-9aは沈下マップのうち、明海地区の海岸部を拡大したものである。波除工背面（図中の実線矢印）の地盤が沈降している様子がわかる。現地で撮影した写真（図-9b）からも、波除工と根固め工（破線矢印）を覆うアスファルト舗装が海側に押し出した様子が観察できる。

データから上図に示す測線 A-A'～E-E'の断面を切り出した結果を図-10に示す。測線 A-A'と測線 B-B'では、根固め工接水部付近の舗装の隆起は観察されず、波除工の押し出された様子もなかった。測線 C-C'と測線 D-D'は、波除工が海側に孕み出している箇所を切り取った測線である。切り出した断面にも、2m程の波除工の孕み出しと、根固め工付近の隆起は明確に現れている。差分図上で根固め工付近の赤色が特に濃い、つまり隆起の大きい箇所を切り取った測線 E-E'では最大 0.5m程度の隆起、また波除工については約 2～3mに及ぶ孕み出しが確認できる。

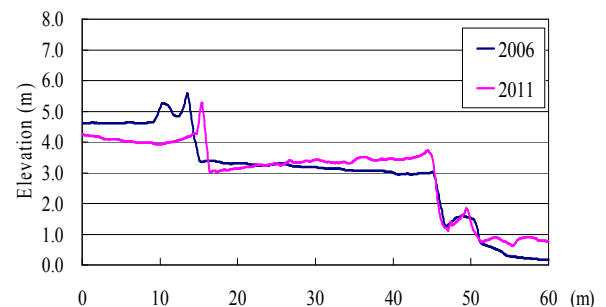
水平方向の精度についてはまだ検討の余地が大きいことに留意が必要であるものの、震災後に現地調査で観察された構造物の変化が、航空レーザーによる測量データに反映されている様子を確認することが出来た。



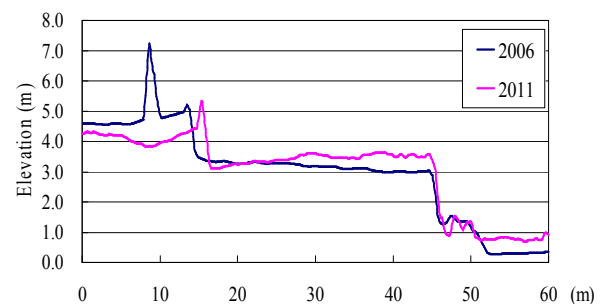
(a) 測線 A-A'断面



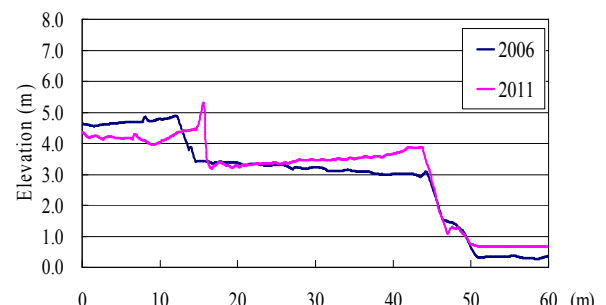
(b) 測線 B-B'断面



(c) 測線 C-C'断面



(d) 測線 D-D'断面



(e) 測線 E-E'断面

図-10 海岸部各測線の断面

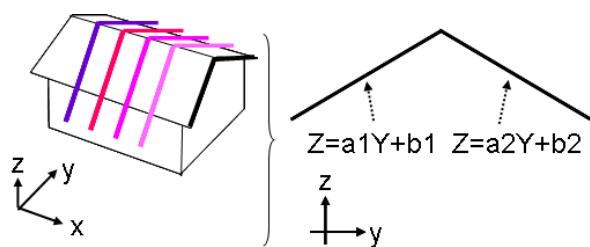


図-11a 屋根断面の勾配算出

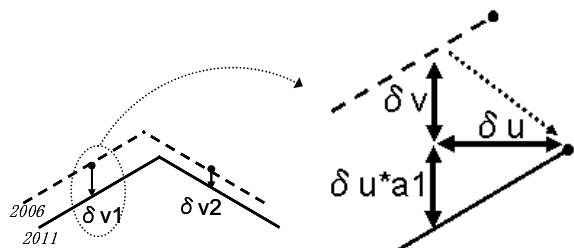


図-11b 断面方向の水平較差を算出

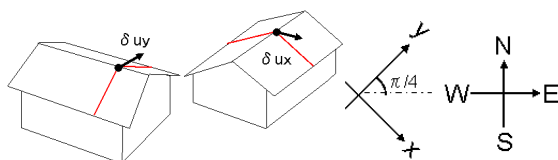


図-11c 平面上で直交する2方向において較差を算出

(4) 杭基礎構造物の側方流動

支持基盤に達する杭に支えられた建物は沈下や傾斜はほとんど発生しないと考えられるが、水平方向には表層地盤の流動により変位が生じている可能性がある。そこで、杭基礎構造物の水平変位を調べることで表層地盤の局所的な流動を捉える手法の検討を行った。

震災前のDSMが有する空間分解能は、建物のエッジを捉えるには不十分であるが、計測点密度の低い場合のキャリブレーション手法として、フラットで大きな三角屋根を利用する方法がある⁷⁾。これを参考として以下に述べる計算方法により杭基礎構造物の水平変位検出を試みた。

まず建物の屋根から棟と直交する断面の標高データを取り出したのち、断面図より目視にて突起や勾配変化の少ない区間を選択し、最小二乗法による回帰直線をもって屋根勾配とした。ひとつの屋根面につき4本の測線勾配の平均値をとり、三角屋根の両側についてそれぞれ一意の勾配 a_1 、 a_2 を得た (図-11a)。

一方、前節で述べた鉛直較差補正と同様の手法により、各屋根面について標高較差 δv_1 、 δv_2 を求める。 δv_1 、 δv_2 は、屋根面の水平方向の較差に起因する $a \cdot \delta u$ と、鉛直方向較差 δv に分離することが出来る (図-11b)。

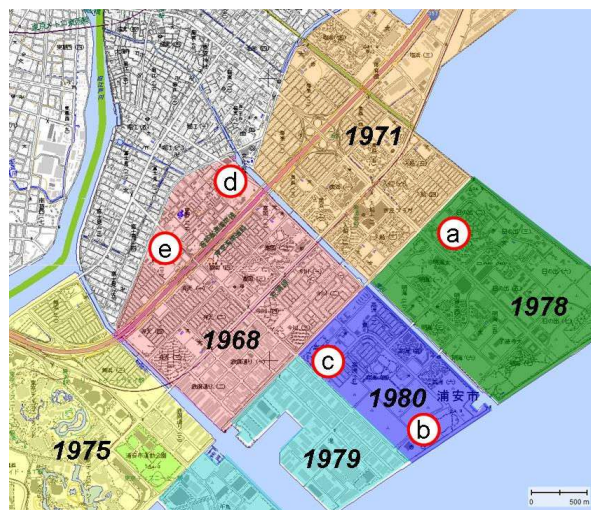


図-12 計測対象建物の位置および地区毎の埋立て年

表-2 計測対象建物の水平較差 (2011-2006年)

計測建物	北西-南東軸		南西-北東軸		δuN (m)	δuE (m)
	δv (m)	δux (m)	δv (m)	δuy (m)		
マンションa	-0.0583	-0.4049	-0.1289	-0.1009	0.2150	-0.3576
福祉施設b	-0.1607	-0.3465	-0.1878	-0.0588	0.2034	-0.2866
大学c	-0.2301	0.1232	-0.2353	-0.1031	-0.1600	0.0142
社宅d	-0.1428	0.1774	-0.0969	0.0907	-0.0613	0.1895
学校e	-0.1685	-0.1287	-0.2078	0.0471	0.1243	-0.0577
標準偏差	0.0619	0.2646	0.0571	0.0889	0.1671	0.2235
平均値	-0.1521	-0.1159	-0.1713	-0.0250	0.0643	-0.0997

断面方向の水平・鉛直較差 $\delta u \cdot \delta v$ は、既知量である a_1 、 a_2 、 δv_1 、 δv_2 を含む以下の連立方程式を解くことにより求めることが出来る。

$$\delta v_1 = \delta v - a_1 \cdot \delta u \quad (1)$$

$$\delta v_2 = \delta v - a_2 \cdot \delta u$$

この作業を直交する二つの三角屋根について行い、 δu_x 、 δu_y を各建物について求めた (図-11c)。

市内各所から三角屋根を持つ杭基礎建物5箇所を測定対象とし (図-12)、 δv 、 δux 、 δuy および座標変換により算出した南北方向較差 δuN (北への変位を正とする) および東西方向較差 δuE (東への変位を正とする) を表-2に示す。

前章で言及した通り、水平方向の位置情報については、数十cm程度の幅を持って見る必要がある。したがって表-2の数値は、あくまで震災前後のDSMを比較した較差であり、実際に動いた変位を保証するものではない。とはいえ、この水平較差を座標平面上にプロットしてみると一定の傾向を読み取ることが出来る。

図-13は表-2に示した各建物の水平較差を座標平面上にプロットしたものである (原点は震災前後のDSMを比較して較差がないことを示す)。特にマンションa及び福祉施設bにおいて北西方向に顕

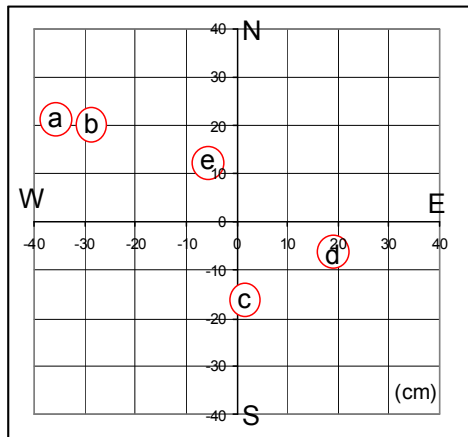


図-13 計測対象建物の水平較差
(2011-2006年)

著な較差が生じていることが読み取れる。

この2地点の周辺にて、DSMから地表断面を切り出してみると、計測対象建物の敷地が北西側道路・隣地に比べ高くなっていることが判る（図-14、マンションaについては埋立て時期の違いに、福祉施設bについては当該敷地の造成に起因すると思われる）。

この計測結果からは、2地点の付近一帯の表層地盤が液状化により強度を失って標高の低い側へ流動を起こし、実際に水平変位が発生した可能性が示唆される。もちろん、現段階では上述した計測機器による誤差範囲内であるとも言えるため、液状化が発生していない（＝側方流動の発生していない）地域における計測サンプル数を増やす等、水平較差発生要因についてはさらに検証を進めていく予定である。

4. まとめ

本稿では、東北地方太平洋沖地震により液状化の被害を受けた千葉県浦安市における航空レーザー測量を用いた標高変化の計測、解析精度を確保するためのキャリブレーション手法、及びこれらの手法を構造物の変位検出に適用した事例について紹介した。

今回の震災による液状化の被害地域は、観測史上最大⁸⁾とも言われる非常に広い範囲に及んだ。このような広域の液状化による影響を正確に記録として残すことは、被害の実態を科学的に分析し、復旧への的確な対応をとる上でも、また将来の地震での再液状化のリスクを評価するうえでも重要である。また、構造物への直接的な被害に加え、市街地の地盤が沈下したことにより、高潮や豪雨時の冠水を懸念する声もある。こうした市街地の内水氾濫シミュレーションを行う際にも、精度の高い地表面標高モデルは有用な情報を与えると考えられる⁷⁾。

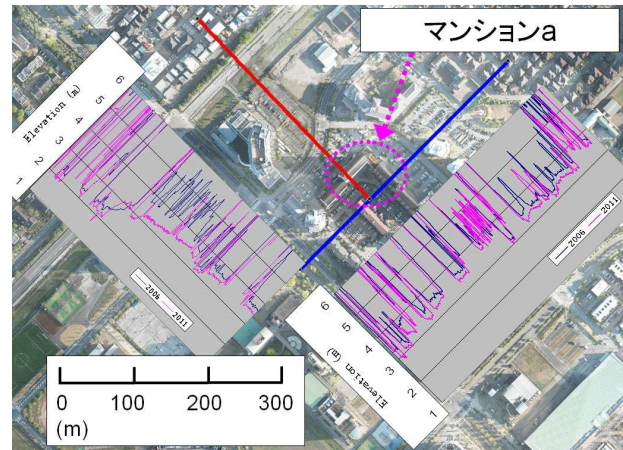


図-14a マンション a 周辺の DSM 断面

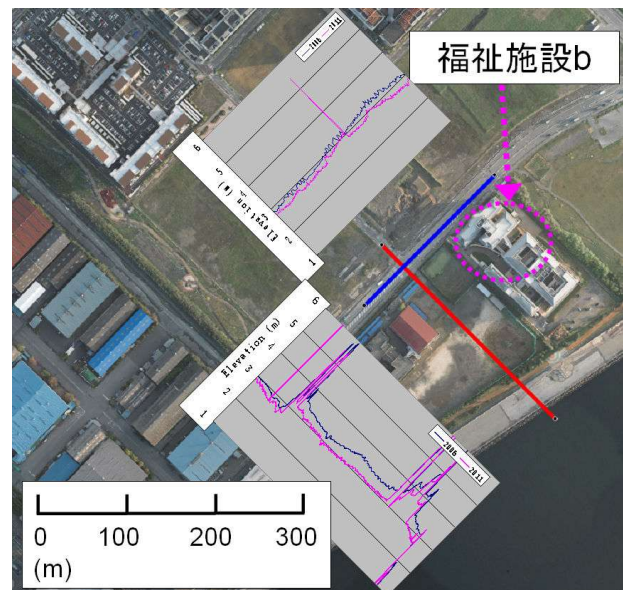


図-15b 福祉施設 b 周辺の DSM 断面

参考文献

- 1) Konagai k., Shibuya K., Eto C. and Kiyota T.: Map of soil subsidence in Urayasu, Chiba, caused by the March 11th 2011 East-Japan Earthquake, *Bull., Earthquake Resistant Structure Research Center, IIS, University of Tokyo*, 2011 (<http://konalab.main.jp/east-japan-eq/>).
- 2) 浦安市ウェブサイト「浦安市の海面埋め立て」(<http://www.city.urayasu.chiba.jp/menu2863.html>)
- 3) 横山心一郎, 弘松峰男, 金子純二, 秋山幸秀, 根元謙次: 三保海岸における航空レーザー測量の精度検証, 「海—自然と文化」東海大学紀要海洋学部, Vol. 2-1, pp. 31-39, 2004.
- 4) 社団法人日本測量協会「—公共測量—作業規定の準則 解説と運用」, 2009.
- 5) 東畑ら「東北地方太平洋沖地震南関東地区の被害調査速報」, 2011
- 6) オンライン「東京からもっとも近い被災地・浦安現地ルポ【上】産業編」, 2011 (<http://lib.toyokeizai.net/business/society/detail/AC/fe1a3d5eb9ecc1031b3a55deedcb8fb7/>)

7) 国土地理院「航空レーザ測定の利用技術に関する研究」(<http://www.gsi.go.jp/common/000022304.pdf>)

8) 安田進「関東の液状化被害」地盤工学会 東北地方太平洋沖地震災害調査報告会第1回資料, 2011

VERIFICATION OF ACCURACY OF LIQUEFIED SOIL SUBSIDENCE MAP OF URAYASU FROM AIR-BORNE LIDAR SURVEY AND DISPLACEMENT-INFLECTED DAMAGE TO STRUCTURES AND THEIR SUBSOILS

Toru ASAKURA, Shota SUYAMA, Chikako ETO, Kenichi SHIBUYA
and Kazuo KONAGAI

The 2011 East-Japan Earthquake has caused sand-liquefaction over the long stretch of Tokyo Bay area. Both Konagai laboratory and Aero Asahi Corporation jointly surveyed Urayasu city, one of the heavily liquefied areas, to measure soil/ structure subsidence caused by liquefaction. An airborne LIDAR imagery was obtained on April 20th and compared with that before the earthquake. To remove the effect of deep-seated tectonic deformations, end-bearing pile supported buildings were taken as a reference. The first half of this paper verifies the accuracy of the map, and the latter half describes displacements that houses, factories and coastal levees have suffered.