

航空レーザー測量による東京湾岸西部の 液状化沈下マップの作成と精度の検証

梶原 和博¹・小長井 一男²・清田 隆³

¹学生会員 横浜国立大学 都市イノベーション学府 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

E-mail:kajihara-kazuhiro-hc@ynu.jp

²正会員 横浜国立大学 都市イノベーション研究院 教授 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

E-mail:konagai@ynu.ac.jp

³正会員 東京大学生産技術研究所 准教授 (〒240-8501 東京都目黒区駒場 4-6-1)

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

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震(Mw=9.0)は、東京湾臨海部の埋立地や利根川流域に深刻な液状化被害をもたらした。将来の地震における再液状化の可能性も考慮して、本地震で生じた液状化被害を定量的な情報として記録し、防災へ役立てていくことは極めて重要である。この地震を受けて、Konagai ら¹⁾は、千葉県沿岸部を対象に航空レーザー測量から得られた地震前後の数値表層モデル(DSM)の標高変化から地殻変動成分などを除去し、液状化に起因する地盤沈下量を示した液状化沈下マップを整備した。本研究では、同様の手法を用いて京浜工業地帯を含む東京湾岸西部の液状化沈下マップを作成した。また、地震後に現地で実測された地盤沈下量と比較を行うことで、沈下マップの精度検証を行った。

Key Words: The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, liquefaction, ground subsidence

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(Mw=9.0)は、東京湾臨海部の埋立地を中心に深刻な液状化被害をもたらした。その面積は 42km²にも及ぶとされている²⁾。液状化がもたらした被害として、戸建て住宅の沈下傾斜、地盤沈下とそれに伴う杭の抜け上がり、道路の路面変状、下水道の管路・マンホールの被害などが挙げられる³⁾。中でも地盤沈下は、ライフラインの寸断や水害の長期化⁴⁾など、長期に渡る問題を引き起こすことが知られている。将来の地震における再液状化の可能性も考慮して、過去に生じた被害を定量的な情報として記録し、将来の地震防災へ役立てることは極めて重要であると考えられる。

この地震を受けて、Konagai ら¹⁾は千葉県沿岸部を対象として航空レーザー測量を実施し、地震前後のDSM(Digital Surface Model)を比較して得られた標高変化から地殻変動成分や計測機器由来の系統的な誤差を除去し、浦安市から千葉市に至る液状化沈下マップを整備した。

一方、東京湾岸西部にも戦後に造成された埋立地が多



図-1 本研究の対象とする地域

数存在しており、千葉県沿岸部と同様に液状化の発生が確認されているが、地盤沈下の実態は明らかになっていない。

そこで、本論文では Konagai ら¹⁾と同様の手法を用いて、図-1 に示す神奈川県川崎市沿岸部および東京都江東区沿岸部を対象に、航空レーザー測量を実施し液状化沈下マップを整備した。また、地震後に現地で実測された地盤沈下量を用いて沈下マップの精度検証を行った。

2. 航空レーザー測量の概要

航空レーザー測量(Air-borne LiDAR)は、航空機に搭載したレーザー計測装置からレーザーを照射し、対象地域の地形・地物を空中から計測する手法である。本システムは、空中 GPS 受信装置と走査式光線測距儀（レーザーキャナ）、慣性航空装置、動揺計測装置(IMU)と加速度計、地上 GPS 基準局で構成されており、航空機から照射されたレーザーが反射して戻ってくるまでの時間と、機体の位置・姿勢情報から DSM(Digital Surface Model)と呼ばれる地形モデルが得られる。表-1 に本研究で実施した航空レーザー測量の概要を示す。なお、航空レーザー測量は朝日航洋株式会社により実施された。

3. 液状化に起因する地盤沈下量の抽出

液状化沈下マップは、液状化に起因する地表面の標高変化を広域に渡り定量的に表現したものである。地震前後の標高変化量は、地震前後の DSM(Digital Surface Model)を比較することで求められるが、得られた標高変化量には液状化に起因するものだけでなく、地殻変動成分等が含まれるため、単純な比較を行うことはできない。実際に、東北地方太平洋沖地震によって宮城県・女川町江島の二等三角点「江ノ島」で最大水平変動量 5.85m、石巻市鮎川浜の電子基準点附属標「牡鹿」で-1.14m の最大鉛直変動量が記録されている⁹⁾。本論文が対象とする対象にはほど近い神奈川県川崎市に設置された電子基準点「神奈川川崎」においても、東方へ約 25.5cm の水平変動量が観測されている⁹⁾。

また、航空レーザー測量の計測精度は、GPS 衛星の配置や電離層の状態などによって異なる。一般に、各要素を複合させたシステム全体の標高誤差は±15cm と言われている⁷⁾。また、水平精度は航空機の対地高度に依存し、一般に対地高度の 1/3000 と言われている⁸⁾。その他にも、DSM には様々な系統的な誤差が複雑に介在しており、それらを個別で排除することは困難である。

そこで、Konagai ら⁹⁾は、液状化による地盤変形が主として軟弱な表層地盤内で生じることに着目し、液状化による地盤沈下の影響を受けないと考えられる先端支持杭を基礎とする建物を基準として、液状化に起因する標高

変化を抽出するテンプレートマッチング手法を提案している。また、水平方向の較差を検出する手法として、傾斜した屋根の鉛直変位から水平変位量を算出する手法を提案している。

本研究では、Konagai ら⁹⁾が提案したこれらの手法を用いて、地震前後の DSM のテンプレートマッチングを試みた。以下に詳細を記す。

(1) 鉛直較差の補正

液状化の影響を受けない先端支持杭を基礎とする建物の屋上を不動点としてテンプレートマッチングを行うことで、液状化に起因する地盤沈下量を抽出できる。そこで、対象地域内にある平坦な屋上面を有する杭基礎構造物や首都高速道路高架部の路面を用いてテンプレートマッチングを行った。

図-2 に得られた鉛直較差と計測箇所を示す。川崎地区においては、5cm を超えるような大きな鉛直較差は見られないが、川崎航路を境に扇島・東扇島地区と浮島地区では鉛直較差に不連続な差異が認められる。そこで、川崎航路を境に、東西で異なる鉛直較差の補正を行った。扇島・東扇島においては、地域内のテンプレート点群で観測された標高変化の平均値-0.008(m)を補正值とした。

一方、浮島においては、地域内の一箇所のみで観測された標高変化量-0.102(m)を補正值とした。以上の手順によって得られた補正值を、地震後の DSM から差し引くことで鉛直較差の補正を行った。

なお、図-2 に示した杭支持構造物の標高変化は一様で



図-2a 川崎市沿岸部における鉛直較差分布

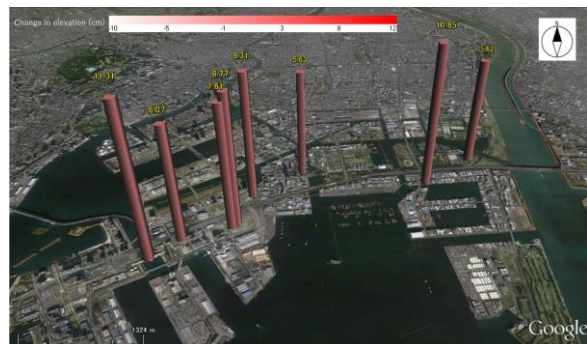


図-2b 江東区沿岸部

図-2 各対象地域において観測された鉛直較差

表-1 航空レーザー測量の概要((株) 朝日航洋実施)

地区	計測日	分解能 (points/m ²)	飛行高度 (m)
川崎市 沿岸部	2014年9月23日	5.2	600
江東区 沿岸部	2014年10月24日	5.2	1600

なく偏りが見られるため、回帰平面などを用いて地域内の鉛直較差を表現することが望ましいと考えられる。しかし、テンプレート点群は、首都高速道路湾岸線と並行するように線状に分布しており、回帰平面を構成するための十分なテンプレートポイントを得ることが困難であったため、暫定的な措置として上記の補正を行っている。

江東区沿岸部においては、地震後の屋上標高は地震前と比べて一様に上昇している。そこで、得られた標高変化の平均値+0.080(m)を補正值とし、地震後の DSM から差し引くことで鉛直較差補正を行った。

(2) 水平較差の補正

図-3 に示した場所において、三角形の屋根を有する先端支持杭を基礎とする建物を用いて水平較差の算出を試みた。

図-4 に得られた水平較差を示す。川崎地区においては、得られた水平較差はばらついているが、特に水平較差の大きい建物が位置する場所は、噴砂が確認された場所⁹⁾や護岸付近であり、液状化や側方流動が発生した可能性も否定できない。

同様に、江東区沿岸部においても、水平較差は偏りな

くばらついているが、液状化被害報告書¹⁰⁾に基づいて液状化が推定される地域の建物と護岸付近の建物を除外し、非液状化地盤上に存在すると考えられる I・J・L の 3 点に着目すると、平均水平較差の値は東西方向に-4.4cm（東向きを正とする）、南北方向に-1.5cm（北向きを正とする）と小さい。

以上から、得られた水平較差の値は小さく、また明瞭な傾向が得られなかったことから、本研究では水平較差の補正を行っていない。なお、既往の研究¹⁾と比べて水平較差の値が小さいのは、東北地方太平洋沖による地殻変動を考慮した新たな測地基準系（JGD2011）の適用によるものと考えられる。

4. 液状化沈下マップの作成

以上に述べた較差補正によって得られた液状化沈下マップを、図-5 と図-6 に示す。なお、新規建造物や車両による標高変化を避けるため、1.0m より大きな標高変化は除外してある。



図-3a 川崎市沿岸部



図-3b 江東区沿岸部

図-3 各対象地域において水平較差補正算出に用いた建物

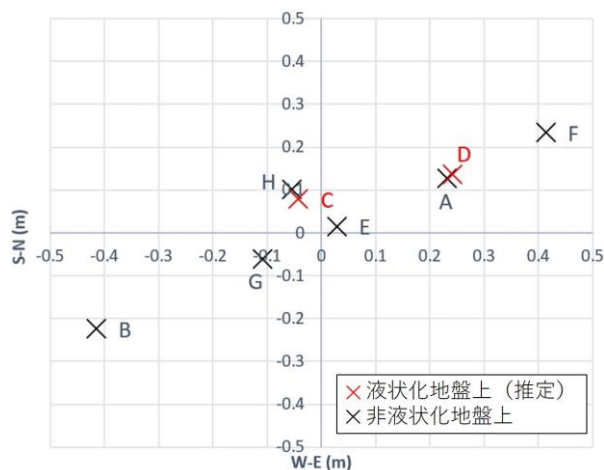


図-4a 川崎市沿岸部

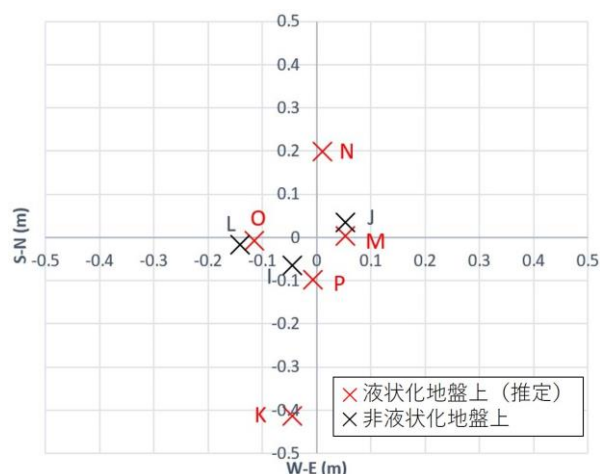


図-4b 江東区沿岸部

図-4 各対象地域における水平較差

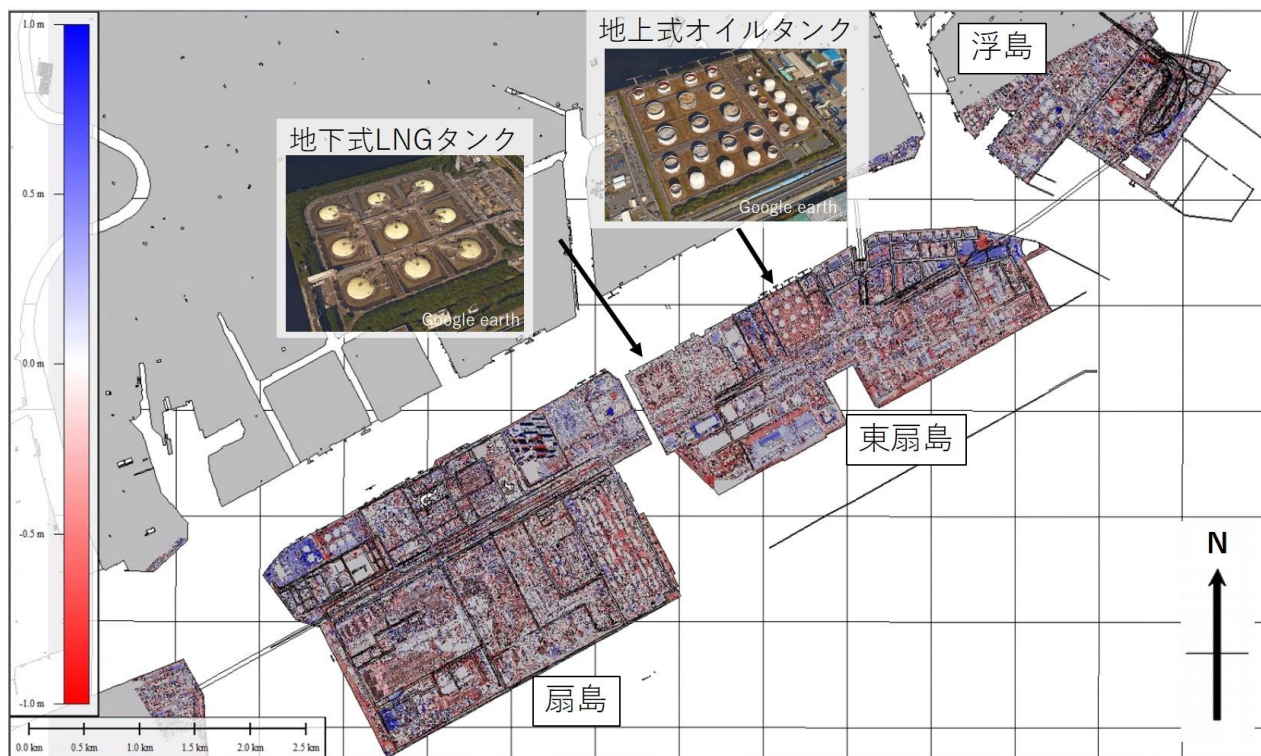


図-5 川崎市沿岸部(扇島・東扇島・浮島)の液状化沈下マップ



図-6 江東区沿岸部の液状化沈下マップ



図-7 江東区沿岸部の埋立地の変遷¹⁾

図-5 は、川崎市沿岸部の埋立地（東扇島・扇島・浮島）の液状化沈下マップである。地域内全域で液状化による沈下が見られるが、一部のコンビナート施設においてオイルタンク周辺では沈下量が比較的小さい。このような地盤沈下量の差異は、液状化対策の有無に起因するものと考えられる。

図-6 は、東京都江東区沿岸部の液状化沈下マップである。得られた沈下マップは、江東区沿岸部の東側の地域で大きな地盤沈下が生じたことを示している。また、新木場地区では、狭い範囲の中で地盤沈下が生じている箇所とそうでない箇所が混在しているが、図-7¹⁰⁾に示されるように大きな地盤沈下が生じた箇所は造成時期が新しく、埋立年代によって液状化被害が大きくことなるようである。

5. 液状化沈下マップの精度検証

筆者らは、2016 年 2 月 19 日に江東区沿岸部を対象に、メジャーやレーザーレベラーを用いて地盤沈下量を実測した。そこで、沈下マップから得られた沈下量と、現地で実測した沈下量の比較を行うことでマップの精度検証を行った。なお、液状化による沈下量は、図-8 に示す箇所で筆者らが計測した杭基礎構造物等の不動点と周辺地盤の較差としている。図-9 に示すように、沈下マップから得られた沈下量と、現地において計測された沈下

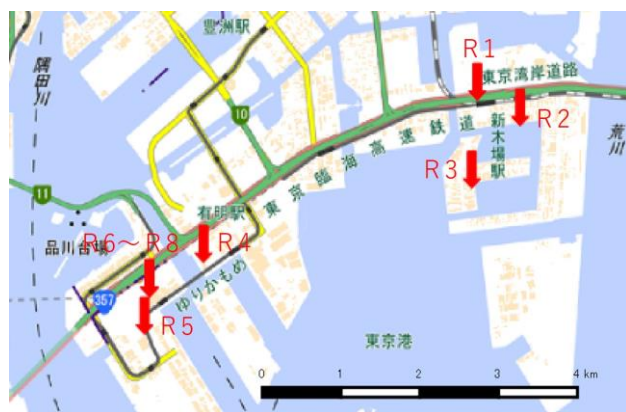


図-8 現地調査における地盤沈下量計測箇所

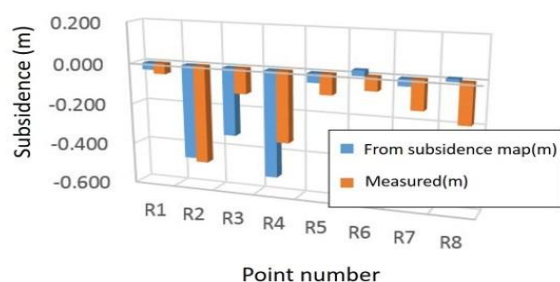


図-9 沈下マップと実測沈下量の比較

量の差の平均値は 1.3cm であり、標準誤差は 4.9cm であった。

また、福武ら¹²⁾は地震発生から数日後に図-10 に示す新木場・辰巳地域の 38 箇所において地盤沈下量を実測している。そこで、植生や人工的な地形改変の影響を受けていない 32 箇所を選定し、精度検証に利用した。図-11 に示すように、新木場・辰巳地区における沈下マップから得られた沈下量と、実測値の差の平均値はそれぞれ、15cm、11.9cm であり、標準誤差は 2.1cm、2.0cm であった。新木場地区においては沈下マップと実測値の傾向は概ね一致するが、辰巳地区においては沈下マップと実測値のばらつきが大きく、また最大で 20cm 程度の標高上昇も見られる。沈下マップ上で標高が上昇した地点では、液状化の発生が確認されている¹⁰⁾ことに加えて、人工的な地形改変が行われた可能性も低い。辰巳地区には鉛直較差補正に用いたテンプレート点が存在しておらず、このような地域では鉛直較差補正が適切でないことが考えられる。沈下マップの精度向上に向けて、地震前後で標高が変化しないと考えられる首都高速道路の路面をテンプレート点群に追加するなど、鉛直較差補正の見直しが必要と思われる。

6. まとめと今後の展望

航空レーザー測量から得られた地震前後の DSM を比較し、得られた標高変化から地殻変動成分や計測機器由来の系統的誤差を除去することで、京浜工業地帯を含む東京湾岸西部の液状化沈下マップを作成した。さらに、

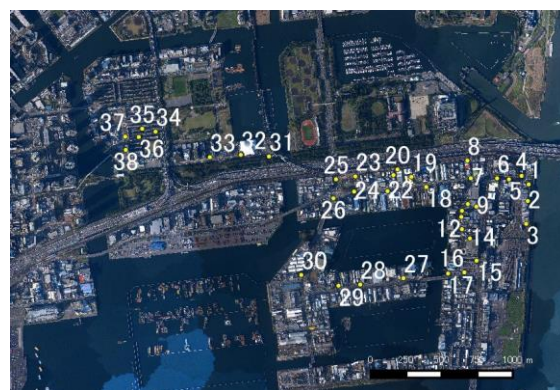


図-10 既往の調査¹²⁾における地盤沈下量計測箇所

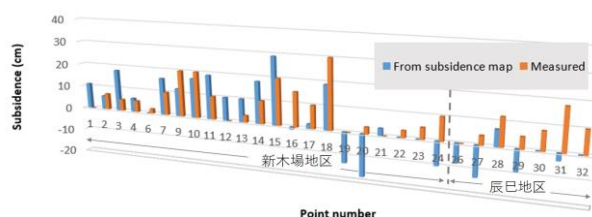


図-11 沈下マップと実測沈下量の比較

地震後に現地で実測された地盤沈下量と比較を行うことで、沈下マップの精度検証を試みた。その結果、作成した沈下マップは、液状化被害報告書や現地で計測された地盤沈下の実態と概ね整合するが、その精度は地域によって大きく異なることが示唆された。特に、鉛直較差補正に用いた不動点のない地域において、実測沈下量とマップから抽出した地盤沈下量の差が大きく、鉛直較差補正に用いるテンプレート点の追加や、地域ごとに異なる鉛直較差補正を行うなど、マップ精度の向上に向けた取り組みが必要である。

謝辞：本研究は一部日本学術振興会科学研究費基盤研究（A）一般（課題番号：2624069）の支援を受けて行われた。杭基礎を有する構造物のデータは、首都高速道路株式会社ならびに鹿島建設株式会社に提供して頂いた。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Konagai, K., Kiyota, T., Suyama, S., Asakura, T., Shibuya, K., Eto, C.: Maps of soil subsidence for Tokyo bay shore areas liquefied in the March 11th, 2011 off the pacific Coast of Tohoku Earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.53, pp.240-253, 2013.
- 2) Yasuda, S., Harada, K., Ishikawa, K., Kanemaru, Y.: Characteristics of liquefaction in Tokyo Bay area by the 2011 Great East Japan Earthquake. *Soils and Foundations*, Vol. 52(5): 793-810, 2012.
- 3) 浦安市液状化対策技術検討調査委員会：平成 23 年度浦安市液状化対策技術検討調査報告書，第 I 編共通，pp. 6, 2011.
- 4) 新潟県：たずねてみよう山の下 閘門排水機場，http://www.pref.niigata.lg.jp/niigata_seibi/1201107670226.html (2016 年 8 月 30 日閲覧).
- 5) 国土地理院：<http://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/sokuchikijun60011.html>.
- 6) （社）神奈川県測量設計業協会川崎支部会：東北地方太平洋沖地震に伴う川崎市公共基準点成果改定に関する調査研究報告書，2011，<http://kawasakisibukai.com/pdf/kawasakikoukyoukijyunntennkaiteisikennkenkyuuhoukokusho.pdf> (2016 年 8 月 30 日閲覧).
- 7) 小林浩：わかって使うレーザー計測 3 地表標高をいかに精度良く取得するか(フィルタリング手法)，地盤工学会誌，Vol.59/11，pp. 90-97, 2011.
- 8) 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，pp.310-314，pp.327, 2009.
- 9) 濱田政則：臨海部コンビナートの液状化に対する危険性と対策，消防防災博物館，<http://www.bousaihaku-smart.com/dptopics/295/> (2016 年 8 月 30 日閲覧).
- 10) 国土交通省関東地方整備局・地盤工学会：東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明(報告書)別冊資料，No.003，No.017，No.021, 2011.
- 11) 東京都港湾振興協会：東京湾埋立のあゆみ，https://www.tokyoport.or.jp/43pdf_01.pdf (2016 年 8 月 30 日閲覧).
- 12) 福武毅芳，眞野英之，堀田洋之，田地陽一，石川明，坂本忠：東北地方太平洋沖地震における東京湾北部埋立地の有効応力解析による検討，清水建設研究報告，2012.

(?)

Soil subsidence map for the west part of Tokyo Bay area liquefied in the March 11th, off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

Kazuhiro KAJIHARA, Kazuo KONAGAI and Takashi KIYOTA

On March 11th, 2011, a gigantic earthquake of moment magnitude Mw 9.0, which is officially named “The 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake”, caused severe liquefaction damage over the long stretch of reclaimed lands along the coast of the Tokyo Bay. In response to this earthquake, liquefaction-induced soil subsidence map for the eastern part of Tokyo Bay area was immediately prepared by comparing a set of Digital Surface Models before and after the earthquake, and subtracting tectonic displacement. In this study, soil subsidence map is further extended to cover the west part of Tokyo Bay area and compared with ground subsidence measured just after the earthquake.