

東北地方太平洋沖地震による 地殻変動からの回復過程の考察

三神 厚¹・神山 眞²

¹正会員 徳島大学大学院准教授 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2-1)

E-mail: amikami@ce.tokushima-u.ac.jp

²正会員 東北工業大学名誉教授 (〒982-8577 宮城県仙台市太白区八木山香澄町35-1)

E-mail: mk_kamiyama@jcom.home.ne.jp

東北地方太平洋沖地震によって東北地方の広域で地盤の沈降が生じ、港湾施設などは非常に使いづらい状態となった。これに対して岸壁を嵩上げするなどの方策がとられたが、地震後の隆起で逆に高くなりすぎて使いづらくなった港湾も現れた。同様なことは昭和南海地震の際の高知市でも起きており、長期にわたる浸水被害に悩まされた。

本研究は国土地理院のGEONETデータを用いて東北地方太平洋沖地震の際の地殻変動に伴う広域地盤の沈降からの回復過程を考察し、今後の大規模地震の対策に有益な知見を得ようとするものである。検討の結果、本震後すぐに隆起に転じた場所と、本震後もしばらく沈下が続く、その後、隆起に転じた場所があることや、本震後すぐに隆起に転じた場所ではその回復過程が指数関数を用いて良好に表現されることなどがわかった。

Key Words : GEONET, crustal movement, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, recovery process

1. はじめに

平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震によって東北地方の広い範囲で地盤の沈降が生じた。図-1は石巻市渡波地区内の港湾の様子を撮影したものであるが、満潮時には海面が岸壁すれすれまで到達するようになり港湾施設が非常に使いづらい状況となった。また市街地では浸水してしまうため、ポンプによる排水を余儀なくされた。使いづらくなった港湾施設に対し、沈降した分だけ岸壁を嵩上げするなどの方策が講じられたが、その後の地盤の隆起で、逆に高くなりすぎて使用が不便になった港湾も現れた¹⁾。

同様なことが1946年昭和南海地震の際にも起きていた。沢村²⁾によって高知市は約120cm沈下したと報告されている。高知市は、津波と広域地盤沈降と堤防の決壊によってもたらされた浸水被害に長期にわたり悩まされた（図-2）。

南海トラフを震源とする地震の来襲が危惧されているが、昭和南海地震と同様、広域的な地殻変動が起きるものと予想される。このような地殻変動に伴う問題としては、地震直後の地盤の沈降や隆起の問題に加えて、沈降

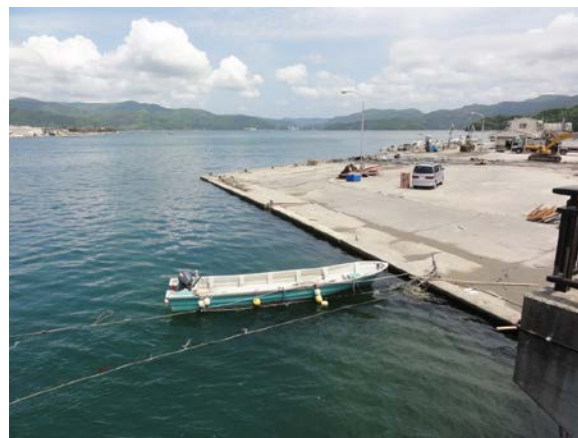


図-1 石巻市渡波地区の港湾施設の様子
(2011年5月27日 著者撮影)

や隆起がどのような回復過程を辿り、またどの程度回復するのか、などの問題があり、早期復興を実現するための事前対策を考える上でいずれも不可欠な情報である。

このように地殻変動に伴う地盤の沈降や隆起は、昭和南海地震、東北地方太平洋沖地震とも発生したが、昭和南海地震当時とは異なり、現在では、全国に1200を超える国土地理院の電子基準点があり、GPS観測により地殻変動をリアルタイムでモニタリングしている

(GEONET)．2011年3月11日の地震から4年が経過し、東北地方各地の地殻変動からの回復過程が徐々に明らかになってきた．本研究はGEONETデータを用いて、東北地方太平洋沖地震の際の地殻変動に伴う地盤の沈降からの回復過程を考察し、そこから今後の発生が危惧される南海トラフ地震など、大規模海溝型地震の対策に有益な知見を得ようとするものである．

2. GEONETによる観測点と観測データ

ここではGEONET観測の概要について述べるとともに、本研究において着目した観測点、用いたデータについてまとめる．

(1) 観測の概要

GEONETとは、GNSS Earth Observation Network Systemの略で、国土地理院が展開するGPS連続観測システムのことで、日本全国に1200点を超える電子基準点がある．GNSSとはGlobal Navigation Satellite System（全球測位衛星システム）で、GPS等の測位衛星システムの総称である．複数の衛星を利用して電子基準点の位置をcmの誤差で決定する．

提供されているデータの種類としては、リアルタイムデータ（RINEX形式30秒サンプリング値）の他に、補正され信頼性の高い測位プロダクトである日々の座標値（F3解）がある．ここでは日々の座標値（F3解）を用いる．

(2) 着目した観測点と検討に用いた観測データ

本研究では港湾施設等の早期復興に主眼を置いているので、東北地方の岩手県から福島県に至る太平洋沿岸沿いの地殻変動に着目する．図-3に着目したすべての観測点を示すとともに、表-1にまとめる．これらの観測点のうち、2011年3月11日前後で観測できていたものを用いる．表-1には、データの有無も示している．

提供されるデータのF3解の内容としては、各観測点の地心座標値、緯度、経度、楕円体高であるが、ここでは楕円体高を標高として近似的に用い、上下方向の変化を考察する．なお本研究では、3月11日の本震前の基準としてそこからの変位量を検討するため、本震前後の楕円体高の差分をとる．このため、楕円体高を標高の近似値として用いることにした．

3. 沈降からの回復過程

本研究では地震が発生した年の2011年の1月1日から本



図-2 昭和南海地震の際の高知市の浸水被害
(昭和 21 年 12 月 21 日撮影, 高知市提供)

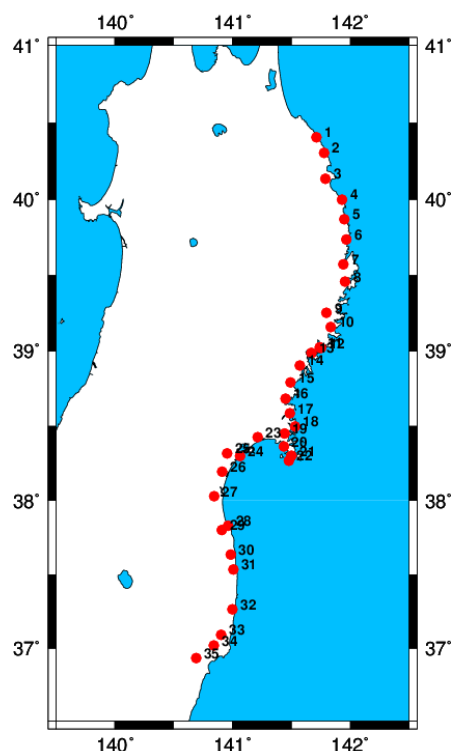


図-3 東北地方太平洋岸の GEONET 観測点

震の4年後の2015年3月11日までのデータを用いる．

(1) 本震前後の地殻変動

岩手から福島にかけての太平洋岸エリアでは3月11日の本震によって基本的に沈降するが、本震直後から隆起に転じるエリアと、本震後もしばらく沈降が続いた後、隆起に転じるエリアがある．これらの傾向の違いについては、表-1の回復過程の欄に示した．観測点番号1～9（岩手県北部）では、本震後もしばらく沈降が続いた後、

表-1 東北地方太平洋岸の GEONET 観測点

	局名称	局番号	緯度	経度	データ 有無	回復過程	時定数
1	種市	950158	40.40520102	141.71313555	○	沈降→沈降→隆起	-
2	S 洋野	07S063	40.30213192	141.77685635	×		
3	久慈	940027	40.13344961	141.78909688	○	沈降→沈降→隆起	-
4	S 普代	07S064	39.99683975	141.92976988	×		
5	岩泉 1	950162	39.86937144	141.95054316	○	沈降→沈降→隆起	-
6	田老 A	111184	39.73583343	141.96714593	×		
7	宮古	940028	39.57238638	141.93996322	○	沈降→沈降→隆起	-
8	山田	950167	39.45816171	141.9552579	○	沈降→沈降→隆起	-
9	釜石	950170	39.25351949	141.79804331	○	沈降→沈降→隆起	-
10	S 大船渡	07S065	39.15787999	141.83514645	×		
11	大船渡	950171	39.02378273	141.73984737	○	沈降→隆起	4306
12	P 大船渡	02P205	39.01977567	141.75325344	×		
13	S 陸前高田	07S066	38.98620172	141.6697923	×		
14	気仙沼	950172	38.9028603	141.57259007	○	沈降→隆起	3214
15	S 本吉	06S055	38.79149631	141.49351739	×		
16	志津川	950175	38.6826995	141.44937147	○	沈降→隆起	2384
17	S 石巻北上	06S056	38.58552184	141.48689338	×		
18	S 石巻雄勝	06S057	38.49544152	141.53101174	×		
19	女川	940036	38.44919588	141.44116491	○	沈降→隆起	2912
20	S 石巻牧浜	06S058	38.36419193	141.43466322	×		
21	牡鹿	960550	38.30118716	141.50068654	○	沈降→隆起	4088
22	S 石巻	05S054	38.26682646	141.47769205	×		
23	矢本	960549	38.42505902	141.21290907	○	沈降→隆起	1392
24	S 七ヶ浜	06S059	38.2998	141.0636382	×		
25	利府	940037	38.31748761	140.95418509	○	沈降→隆起	1454
26	仙台太白	111185	38.19429452	140.91092655	×		
27	亘理	950179	38.02965947	140.84398903	○	沈降→隆起	651
28	P 相馬 A	14P125	37.8304361	140.961698	×		
29	相馬 1	940038	37.8006713	140.90808301	○	沈降→隆起	1858
30	S 南相馬 A	11S070	37.636186	140.98359069	×		
31	小高	950203	37.53369315	141.00661087	×		
32	檜葉 A	101181	37.26395759	140.9985426	×		
33	いわき	940041	37.09071452	140.90251546	○	沈降→隆起	3698
34	いわき 2	970800	37.01844949	140.84164758	○	沈降→隆起	4570
35	いわき 4	20946	36.93261998	140.69014981	○	沈降→隆起	49276

隆起に転じる。隆起の速度は非常にゆっくりである。典型的な例として、観測点番号7の宮古の地震前後の様子を図-4に示す。横軸には2011年1月1日を起算日とした通算日を取り、縦軸には標高の近似値として楕円体高を示している。本震の発生した3月11日は通算で70日目に相当するが、図を見ると本震から400日以上（1年以上）にわたり沈下が続いていたことがわかる。その他、データからは北に行くほど回復の速度が遅いことも考察されたが、ここでは省略する。

一方、観測点9より南では、本震で沈下した後、隆起に転じる。代表例として矢本（観測点番号23）の回復過

程を図-5に示す。本震を境に隆起に転じており、宮古に比べて隆起の速度も速い。同様の傾向は福島県エリアでも見られるが、隆起（回復）の速度はやや緩慢になる。

図-6に福島県での典型的な例としていわき（観測点番号33）の回復過程を示す。

(2) 曲線によるフィッティング

2011年3月11日の本震の後、すぐに沈下から隆起に転じるケースについて、曲線によるフィッティング（モデル化）を試みる。ここでは、2011年3月12日～2015年3月11日の間の観測値に対して、指数関数を用いてフィッテ

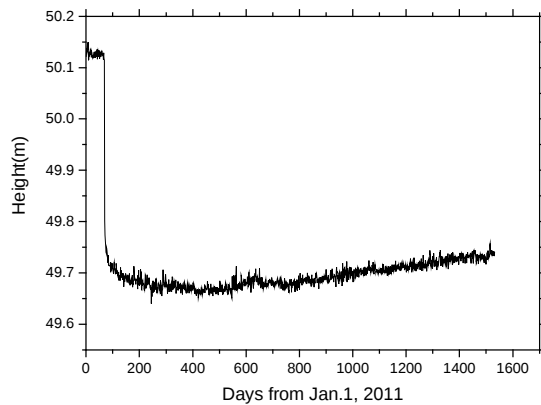


図-4 宮古の沈下回復過程

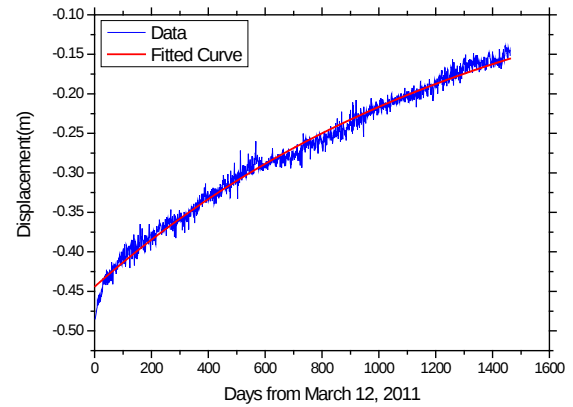


図-7 矢本の沈下回復過程の指数関数近似

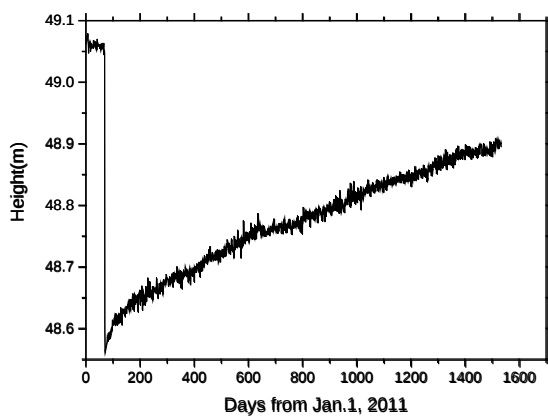


図-5 矢本の沈下回復過程

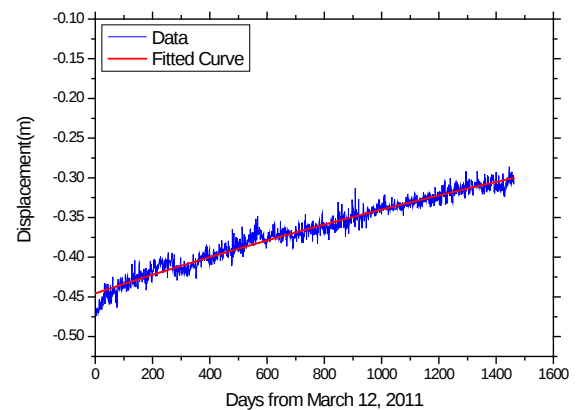


図-8 いわきの沈下回復過程の指数関数近似

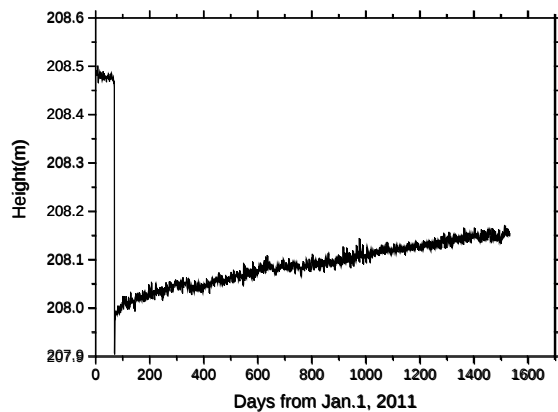


図-6 いわきの沈下回復過程

図-7, 8に指数関数によるフィッティングの結果の例を示す。指数関数によって矢本、いわきとも良好に近似できていることがわかる。

(3) 時定数の考察

式(1)のパラメーター a_2 の逆数として定義される時定数 $T=1/a_2$ の値を表-1に追記する。Tの値が小さい方が回復の速度が速いことを意味する。

時定数の値は、互理で最も小さく651となっており、概して、その他の値をみても宮城県で小さい値となっている。全体として、沈下量そのものが大きかった場所では回復（隆起）速度も大きく、沈下量が小さい場所では回復速度もゆっくりである傾向がある。

ィングを行うことにした。

$$y = a_1 \exp(-a_2 t) \quad (1)$$

ここで、 t は2011年3月12日からの通算日である。 a_1 は本震による沈下量に対応するパラメーターである。 a_2 は地殻変動からの回復の速度を制御するパラメーターで、時定数の逆数に相当するパラメーターである。

4. まとめ

2011年東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動からの回復過程について、GEONETデータを用いて考察した。2011年1月1日から本震の4年後である2015年3月11日までの期間について、東北地方（岩手、宮城、福島県）の沿

岸部に設置されたGEONET観測点の挙動に着目した。岩手県の北部地域では、本震による沈下後、さらにしばらく沈下が続く、その後、隆起に転じるのに対し、岩手県南部や宮城県、福島県沿岸の観測点では、本震による沈下の後、すぐに隆起に転じる。隆起の速度は宮城県で大きく、福島県では南部において隆起の速度が緩慢である。

回復過程について指数関数によるフィッティングを行ったところ、大変良くフィットすることがわかった。時定数の値を調べると宮城県の亘理で最も小さい値となっており、そこから離れると大きい値になる傾向があることがわかった。今後、指数関数等を使って沈降からの回復過程をモデル化できれば、地盤高の将来予測が可能になり、合理的な復興対策に役立つものと思われる。

謝辞：本研究の一部は、一般社団法人四国クリエイト協会による2015年度第19回「建設事業に関する技術開発・

調査研究」支援事業による助成を受けたものです。また国土地理院のGEONETデータを使用させて頂きました。一部の図の作成にあたりGeneric Mapping Toolsを用いました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本経済新聞社：日本経済新聞（電子版）2015 年 3 月 8 日。
- 2) 沢村武雄：南海大地震と地殻運動，高知大学学術研究報告，第 1 号，pp.1-14, 1951.
- 3) Wessel, P. and Smith W.H.F. : New improved version of the Generic Mapping Tools released EOS Trans. AGU, 79, 579, 1998.
- 4) Wessel, P. and Smith W.H.F. : Free software help map and display data, EOS Trans. AGU, 72, 441, 1991.

(2015.9.11 受付)

OBSERVATIONS OF RECOVERY PROCESS FROM CRUSTAL MOVEMENT CAUSED BY THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE

Atsushi MIKAMI and Makoto KAMIYAMA

Due to noticeable subsidence of ground seen in a wide area of the Tohoku district caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, port and harbor facilities became difficult to use as the sea level becomes too high during high tide. Necessary measures including level rising of quay walls were undertaken. However, subsequently, quay walls at some places became too high due to the increased ground elevation. A similar phenomenon was seen in Kochi city after the 1946 Showa Nankai Earthquake. People suffered from long lasting inundation there.

In order to obtain beneficial knowledge for the next predicted mega earthquake, this study observes recovery process from the crustal movement caused by the Tohoku Earthquake using GEONET data provided by the Geospatial Information Authority of Japan. Results showed that immediate ground elevation occurred after the subsidence at some areas while subsidence continued for a time after the main shock until level rising began at some other areas. Recovery process from subsidence was described well with the fitting function of exponential decay type.