

東北地方太平洋沖地震による 地盤沈降からの回復過程の表現

三神 厚¹・神山 眞²

¹ 正会員 東海大学教授 工学部土木工学科 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 4-1-1)

E-mail: atsushi.mikami@tokai.ac.jp

² フェロー 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では東北地方から関東地方にかけての太平洋岸の広い範囲で地盤が沈降した。本震で沈降の後、すぐに隆起に転じた地域については、その回復過程が概ね、指数関数で表現できることを前報で示した。一方、岩手県北中部の太平洋岸など、本震後も数年にわたり沈降が続き、その後、隆起に転じた地域があった。本研究では、このケースについて本震以降の地盤の回復挙動のモデル化を試みた。その結果、本震以降さらに沈降した後、隆起に転じ、徐々に回復していく様子を 1 自由度過減衰系の解を用いて良好に近似できることがわかった。得られた結果を用いて、本震による沈降の半分が回復する年月を算定したところ、長いところで 35 年以上を要することがわかった。

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

1. はじめに

平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震による地殻変動に伴い、東北地方から関東地方にかけて太平洋岸の広い範囲で地盤が沈降した。これにより、街は長期にわたり浸水被害に見舞われたばかりか、高潮や洪水災害に対して脆弱となった。また港湾施設や漁港施設は使いづらくなり、嵩上げ工事をするなどの対策が講じられたものの、本震後、すぐに隆起 (回復) に転じた地域では、数年後、逆に高くなりすぎて使いづらくなった漁港も現れた¹⁾。

著者ら²⁾は、岩手県、宮城県、福島県の太平洋岸の GEONET 観測点で得られたデータを用い、検討を行ってきた。その結果、宮城県や福島県、岩手県南部の観測点ではその後すぐに隆起に転じたことがわかった。本震の沈降からすぐに隆起に転じた地域については回復挙動を指数関数を用いてモデル化し、時定数で整理した。

一方で、岩手県北中部では本震で沈降した後、さらに数ヶ月から数年にわたり沈降が続き、その後、隆起に転じたが、どのように推移するかは不明なままで、モデル化にまで至っていなかった。

地震後、5 年が経過し、本震後も沈降が続いた観測点の挙動が徐々に明らかになってきた。地殻変動のメカニ

ズムを解明しようとする長期的なアプローチは重要で、国土地理院や大学の理学分野の研究者によって行われている^{例えば 3)4)}。一方で、メカニズムの解明に主眼を置くのではなく、現状から答えを出すことを優先する工学的なアプローチも必要と考える。本論文では、GEONET データを用い、本震後の地盤沈降からの回復過程挙動のモデル化を試みる。

2. 地震時と最近までの地殻変動

まず、東北地方太平洋沖地震による地震時の地殻変動と、地震後から最近までの変位分布を概観する。

(1) 地震時の地殻変動

図-1 に東北地方太平洋沖地震による地殻変動に伴う地震時地盤変動を示す。ここでは、2011 年 3 月 10 日 21:00 と 2011 年 3 月 12 日 21:00 (ともに日本時間) の F3 データの差分量から東西、南北、上下方向の変位を算出している (日々の座標値である F3 解は、24 時間平均座標値を 12:00 (UTC) の値として公開されている)。左の図が水平変位を表し、星マークは震源を表すが、震源に向かって水平変位が生じていることがわかる。一方、右の図は鉛直変位を表す。東北地方から関東地方にかけ

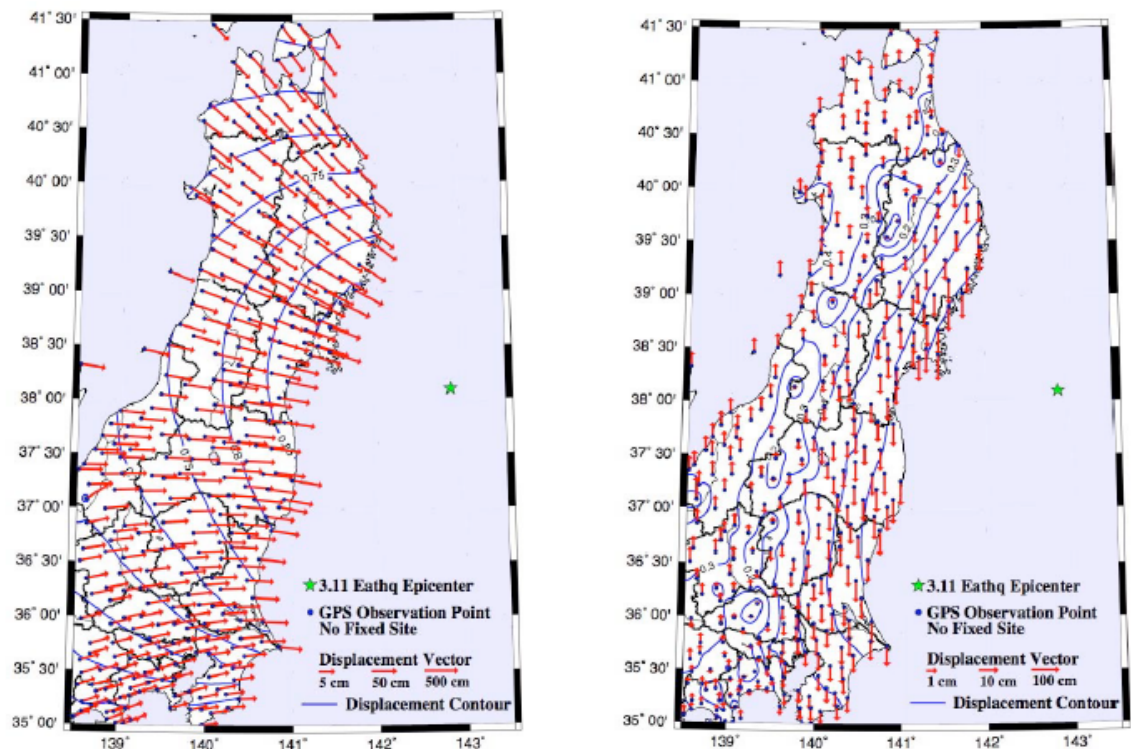


図-1 東北地方太平洋沖地震時の地殻変動（出典：Kamiyama et al.⁵⁾）

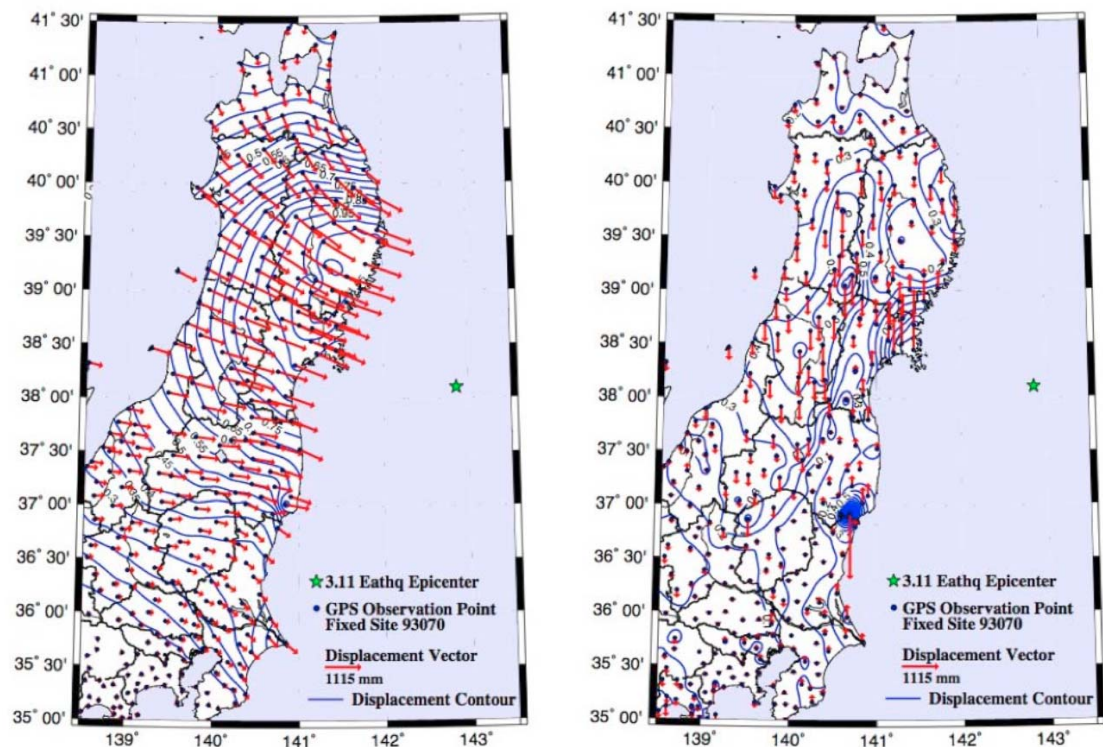


図-2 東北地方太平洋沖地震以降、数年間（2011.3.12から2015.9.12まで）の変位分布（出典：神山⁶⁾）

ての太平洋岸では概ね沈降しているのに対し、日本海側では隆起している。

(2) 地震後から最近までの地殻変動

一方、図-2 は 2011 年 3 月の本震以降の数年間の水平、

鉛直方向の変位分布である。水平成分については本震以降も引き続き、震源方向への変位が続いている。鉛直変位については、東北地方太平洋岸の多くの地域で隆起、すなわち、回復の傾向が見られ、宮城県沿岸で大きく隆起（回復）している。岩手県北中部地域では、2015 年 9

月時点で、本震前の水準に戻っていないことがわかる。

3. 沈降後の挙動の整理

図-3 に示す東北地方太平洋岸の 35 観測点に着目し、本震後の挙動を整理する。

(1) 観測点と用いたデータ

表-1 に観測点情報をまとめるとともに、本震時の変動量、本震後の定性的挙動を記述する。ここでは、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）を用いる。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（3/10 と 3/12 の観測値の差分）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。なお、観測記録が得られていない（十分な期間にわたって得られていない場合を含む）観測点についてはここでは記述していない。

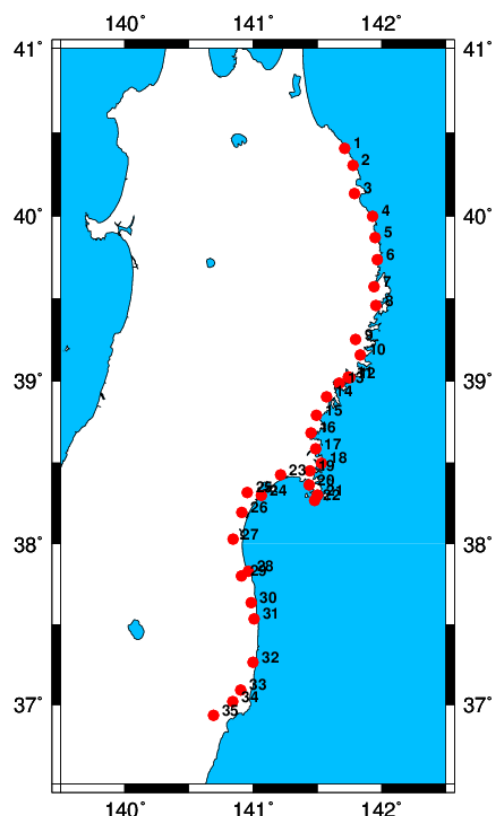


図-3 東北地方太平洋岸の GEONET 観測点

(2) 沈降→隆起の整理

本震で沈降した後、すぐに隆起に転じたサイト（表-1 の観測点 11～35）については、すでに前報²⁾で検討しているように、指数関数で良好に表現できた。すなわち、

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

ここで、 t は 2011 年 3 月 12 日からの通算日である。 a_1

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	回復過程	時定数	本震沈下量(cm)
1	種市	950158	40.40520102	141.71313555	沈降→沈降→隆起	-	2.0
3	久慈	940027	40.13344961	141.78909688	沈降→沈降→隆起	-	5.9
5	岩泉 1	950162	39.86937144	141.95054316	沈降→沈降→隆起	-	17.3
7	宮古	940028	39.57238638	141.93996322	沈降→沈降→隆起	-	34.1
8	山田	950167	39.45816171	141.9552579	沈降→沈降→隆起	-	47.5
9	釜石	950170	39.25351949	141.79804331	沈降→沈降→隆起	-	52.8
11	大船渡	950171	39.02378273	141.73984737	沈降→隆起	4306	74.0
14	気仙沼	950172	38.9028603	141.57259007	沈降→隆起	3214	64.2
16	志津川	950175	38.6826995	141.44937147	沈降→隆起	2384	67.2
19	女川	940036	38.44919588	141.44116491	沈降→隆起	2912	87.5
21	牡鹿	960550	38.30118716	141.50068654	沈降→隆起	4088	109.5*
23	矢本	960549	38.42505902	141.21290907	沈降→隆起	1392	48.5
25	利府	940037	38.31748761	140.95418509	沈降→隆起	1454	28.2
27	亘理	950179	38.02965947	140.84398903	沈降→隆起	651	21.0
29	相馬 1	940038	37.8006713	140.90808301	沈降→隆起	1858	29.3
33	いわき	940041	37.09071452	140.90251546	沈降→隆起	3698	47.3
34	いわき 2	970800	37.01844949	140.84164758	沈降→隆起	4570	47.8
35	いわき 4	20946	36.93261998	140.69014981	沈降→隆起	49276	34.2

* 牡鹿の沈下量の計算では、本震後、4/8 までのデータがないため、4/9 の値で代用している

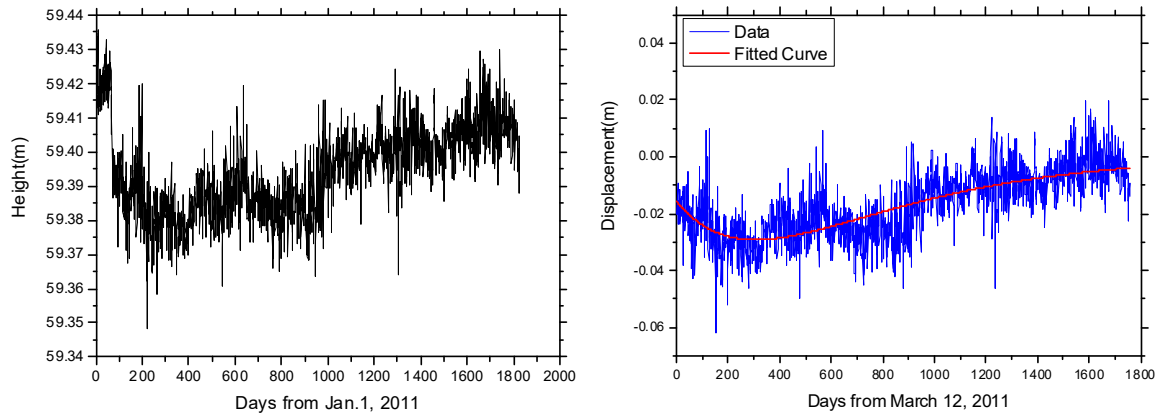


図4 種市の高さ変化（左）と回復過程のフィッティング結果（右）

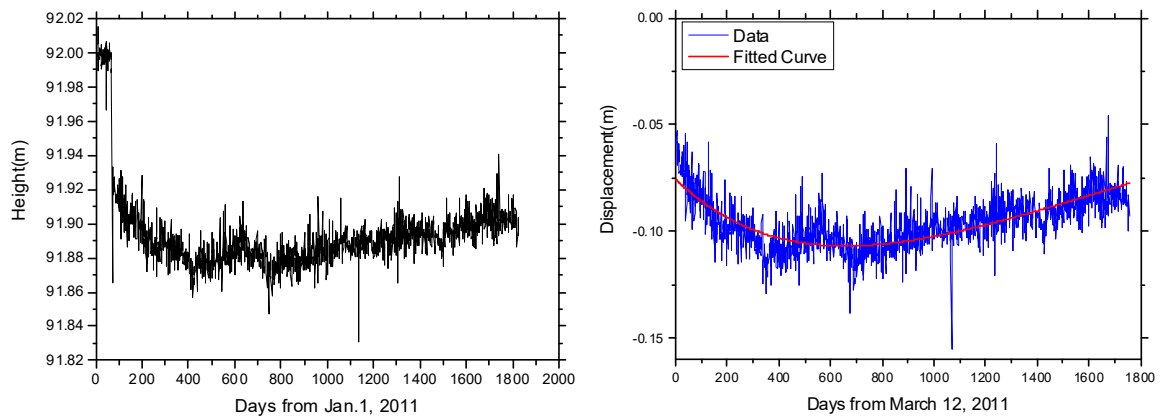


図5 久慈の高さ変化（左）と回復過程のフィッティング結果（右）

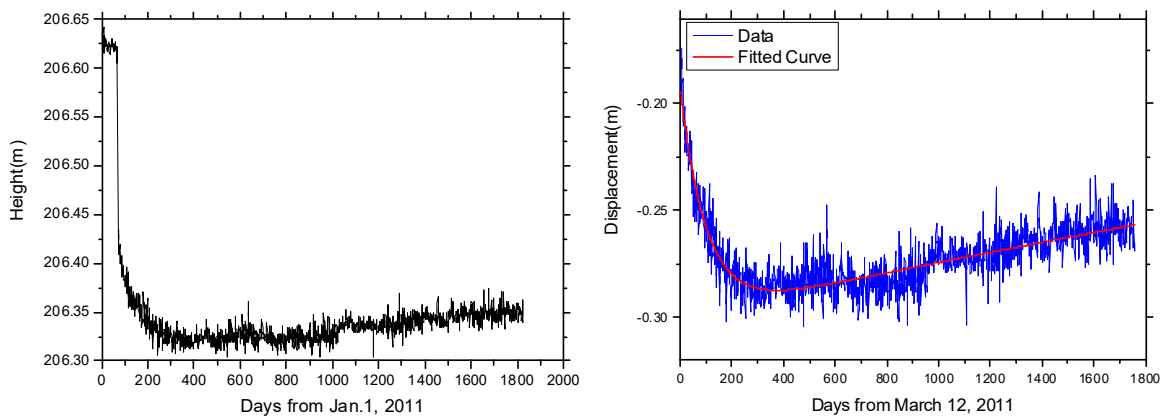


図6 岩泉1の高さ変化（左）と回復過程のフィッティング結果（右）

は本震による沈降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。本震後、4 年分のデータを用いて算出した時定数を表-1 に示している。詳細は前報で検討、記述済なので、ここでは、それ以上の検討は行わない。

(3) 沈降→沈降→隆起の整理

岩手県にある観測点 1（種市）から観測点 9（釜石）

では、本震で沈降した後、場所により数ヶ月から数年にわたり沈降が続き、その後、隆起に転じている。本論文では、特にこの地域の地盤挙動に着目し、本震による沈降以後の地盤挙動のモデル化を試みる。

4. 地殻変動のモデル化

ここでは、本震時後も沈降が続き、その後、隆起に転

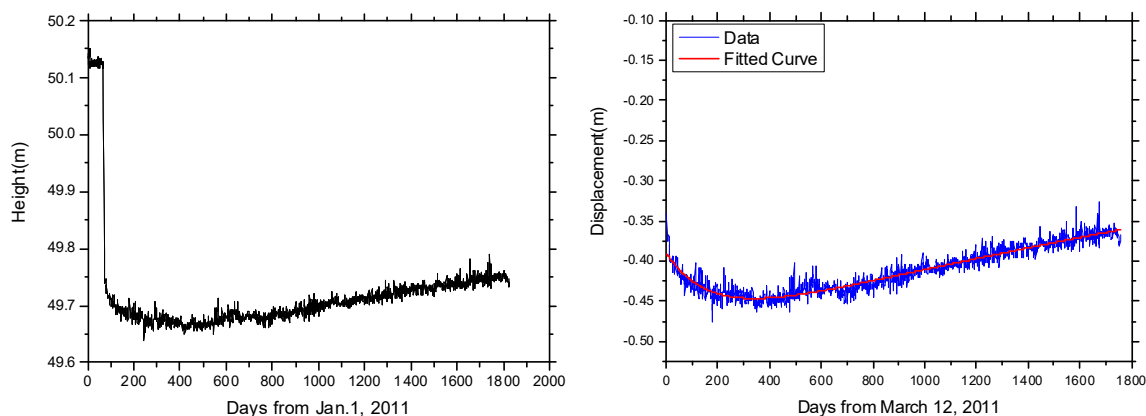


図-7 宮古の高さ変化（左）と回復過程のフィッティング結果（右）

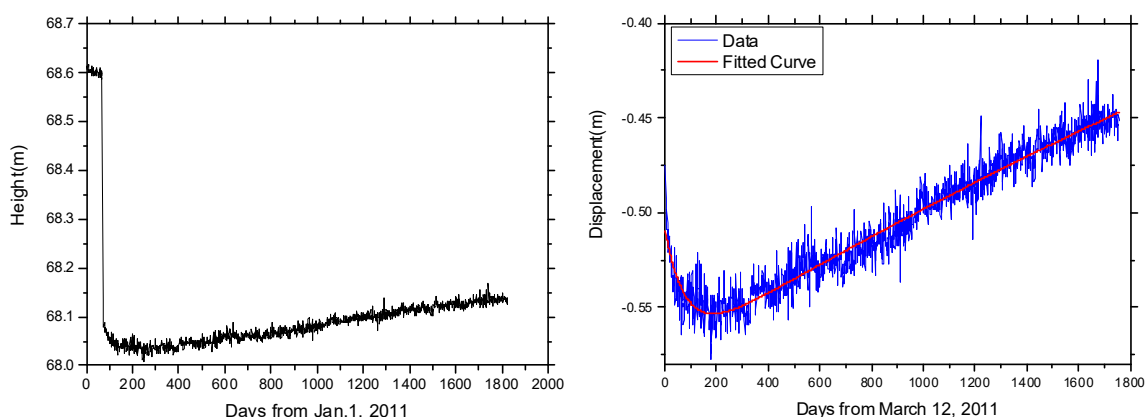


図-8 山田の高さ変化（左）と回復過程のフィッティング結果（右）

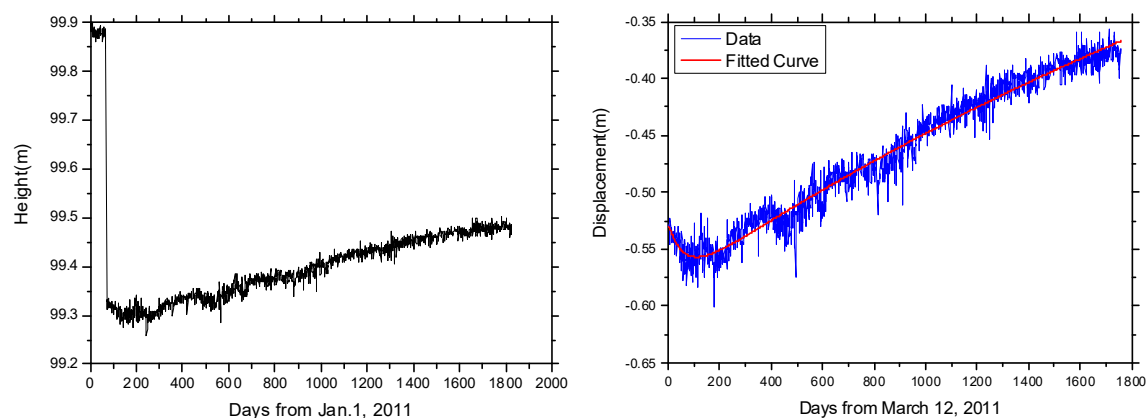


図-9 釜石の高さ変化（左）と回復過程のフィッティング結果（右）

じた岩手県地域の地殻変動についてモデル化を試みる。

(1) 曲線によるフィッティング

本震での沈降後、すぐに隆起に転じるケースについては、式(1)のような指数関数で表現した。本震後も沈降が続き、その後、隆起に転じるケースについては、試みに、以下のような指数関数の1次結合の形を与えてみる。

$$u = A_1 \exp(-p_1 t) + A_2 \exp(-p_2 t) \quad (2)$$

この曲線と観測データとの誤差の二乗和が最小になるよう Nelder-Mead のシンプレックス探索法⁷⁾を用いて、 A_1, A_2, p_1, p_2 を決定した。

(2) フィッティング結果

図-4 から図-9 に表-1 に示す観測点 1,3,5,7,8,9 について、2011年1月1日から5年間の地盤変動の様子を示すとともに、本震後の回復過程について、(2)式を観測データに適合させた結果を示す。いずれのケースも良好な近似

表-2 東北地方太平洋岸の GEONET 観測点

	局名称	$A_1(m)$	$A_2(m)$	p_1	p_2	50%回復日数	本震沈降量(cm)
1	種市	-3.0262e-01	2.8697e-01	2.1924e-03	2.7003e-03	1378	2.0
3	久慈	-1.9935	1.9177	8.9124e-04	9.8633e-04	3010	5.9
5	岩泉 1	-2.9956e-01	1.0695e-01	8.7692e-05	1.0016e-02	12943	17.3
7	宮古	-4.8762e-01	9.7731e-02	1.7140e-04	5.7984e-03	5350	34.1
8	山田	-5.7470e-01	6.6159e-02	1.4298e-04	1.2575e-02	5705	47.5
9	釜石	-5.8304e-01	5.5062e-02	2.6304e-04	1.5859e-02	3014	52.8

結果が得られていることがわかる。また、その際に同定されたパラメータを一覧表にして表-2 に示す。

(3) 50%回復日数の試算

フィッティング関数が正しいことを前提とした上で（すなわち、 A_1+A_2 を本震での沈降量としている）、本震による沈降量の半分が回復するのに必要な日数を試算した。その結果を表-2 の「50%回復日数」の欄に追記する。岩泉 1 観測点での回復は遅く、35 年以上を要する試算結果となった。なお、種市や久慈では本震による沈降量が小さく日々のデータ変動の影響を受けやすいため、試算結果には誤差が多く含まれるものと考えられる。これら 2 地点を除くと、本震の際の沈降量が大きい地点ほど、沈降から 50%回復する期間は短い結果となっている。

5. まとめ

2011 年東北地方太平洋沖地震では、地殻変動に伴う顕著な地盤変動が見られた。東北地方から関東地方に至る太平洋岸の広い範囲で地盤の沈降が生じた。岩手県南部から宮城県、福島県に至る範囲では本震による沈降後、すぐに隆起に転じているが、岩手県の北中部では、本震による沈降の後、さらに数ヶ月から数年にわたり沈降が続き、その後、隆起に転じるというパターンが見られる。本論文では、特にこの地盤変動のパターンに着目し、簡単な関数によるモデル化を試みた。

その結果、1 自由度過減衰系の解を用いて回復過程の様子を良好にモデル化することができた。今後、さらなる検証が必要ではあるが、この関数によるモデルが確かめられれば、地盤変動の将来予測が可能になる。今後は、モデルパラメータと震源との関係等を検討し、一般的な

地震に対する地盤変動モデルの構築を行っていく予定である。

謝辞：本研究を実施するにあたり、国土地理院の GEONET データを使用させて頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本経済新聞社：“三陸沿岸で地盤が隆起、漁業者困惑「岸壁高すぎる」”，日本経済新聞（電子版）記事，2015 年 3 月 8 日。
- 2) 三神厚，神山眞：2011 年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，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.72, No.4（地震工学論文集第 35 巻），pp.I 413-I 423, 2016。
- 3) 飛田幹男：対数・指数関数混合モデルによる東北沖地震余効変動の予測実験，日本地震学会講演予稿集，S03-04, 2015。
- 4) Sun T., Wang K., Iinuma T., Hino R., He J., Fujimoto H., Kido M., Osada Y., Miura S., Ohta Y. and Hu Y.: Prevalence of viscoelastic relaxation after the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Nature*, Vol.514, pp.84-87, 2014.
- 5) Kamiyama M., Sugino M. and Kuse M.: Precursor of Crustal Movements Before the 2011 Great East Japan Earthquake, *Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learnt from the 2011 Great East Japan Earthquake*, pp.226-237, 2012.
- 6) 神山眞：地殻変動の回復の仮説モデル，個人通信，2015。
- 7) Lagarias, J.C., Reads, J.A., Wright, M.H. and Wright, P.E.: Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions, *SIAM Journal of Optimization*, Vol.9, No.1, pp.112-147, 1998.

(2016.9.2 受付)

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

Atsushi MIKAMI and Makoto KAMIYAMA

The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake caused noticeable subsidence of ground in a wide area of the Tohoku district. The authors have been observing recovery process from the crustal move-

ment caused by the Tohoku Earthquake using GEONET data provided by the Geospatial Information Authority of Japan. It showed that immediate ground elevation occurred after the subsidence during the main shock at some areas while subsidence continued for a time even after the main shock for several months to several years until level rising began at some other areas. As we have already successfully described the former case with the fitting function of exponential decay type, this study attempts to model the recovery process for areas where subsidence continued even after the main shock. It was found that the recovery process was well described with a fitting function which was provided as the solution of over-damped single degree of freedom system. Using the function, periods that will be needed to recover 50% of subsidence during the main shock were estimated.