

# 東北地方太平洋沖地震に伴う東京における 不圧・被圧地下水位の変動特性

CHARACTERISTICS OF UNCONFINED AND CONFINED GROUNDWATER  
LEVEL FLUCTUATION IN TOKYO BY THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF  
TOHOKU EARTHQUAKE

石原成幸<sup>1</sup>・河村明<sup>2</sup>・天口英雄<sup>3</sup>・高崎忠勝<sup>4</sup>・川合将文<sup>5</sup>  
Shigeyuki ISHIHARA, Akira KAWAMURA, Hideo AMAGUCHI,  
Tadakatsu TAKASAKI and Masafumi KAWAI

<sup>1</sup>正会員 修(学) 東京都土木技術支援・人材育成センター 技術支援課 (〒136-0075 東京都江東区新砂1-9-15)

<sup>2</sup>正会員 工博 首都大学東京大学院教授 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

<sup>3</sup>正会員 博(工) 首都大学東京大学院助教 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

<sup>4</sup>正会員 博(工) 東京都土木技術支援・人材育成センター 技術支援課 (〒136-0075 東京都江東区新砂1-9-15)

<sup>5</sup>東京都土木技術支援・人材育成センター 技術支援課 (〒136-0075 東京都江東区新砂1-9-15)

Groundwater observation wells have been bored in 42 sites in Tokyo Metropolis by the Civil Engineering Support and Training Center of Tokyo Metropolitan Government. Large fluctuations of unconfined and confined groundwater levels in Tokyo were observed following the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. In this study, the characteristics of unconfined and confined groundwater level fluctuation caused by the earthquake were investigated. As for the results, three and seven fluctuation patterns were identified for the unconfined and confined groundwater levels, respectively. The increase after short drawdown was a major pattern for the confined groundwater levels, whereas no change in pattern was observed for about 70% of the unconfined groundwater levels. The causes of those patterns were additionally outlined in this study.

**Key Words :** *the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, groundwater level fluctuation, Tokyo, unconfined and confined groundwater,*

## 1. はじめに

東京地域を対象とした地下水に関する調査・研究としては、古くから様々な研究が行われているが、大別すると地下水そのものの調査<sup>1)</sup>、地盤沈下等との関係を対象にした調査<sup>2)</sup>、地震前兆予知などを前提とした地下水変動を対象<sup>3)</sup>としたものが多い。これまで、地震と地下水との関連性を調査したものとしては、地震に伴う地下水位の主な変動要因を論じたもの<sup>4)</sup>や変動傾向を分類したもの<sup>5)</sup>などがあるが、東京地域を対象とした地下水変動の分類等は行われていない。

一方、(独)産業技術総合研究所においては地震予知研究を目的として、地殻変動と地下水変動の関連を把握するための地下水観測を工業技術院地質調査所時代の1978年から継続して実施している。これは、地下水総合

観測ネットワーク<sup>6)</sup>として、東海地域、近畿地域及び紀伊半島から四国周辺に観測網を整備し、地下水位のほか、自噴量、水質等の観測が行われている。2011年3月11日14時46分頃に発生した東北地方太平洋沖地震(以下「東日本大地震」という)に伴う地下水位等の変動報告についてはホームページ上で公表されており、地震に伴う地下水位の変化と地震の断層変位による体積歪変化との関係が示されている<sup>7)</sup>。しかしながら、地下水位変動の分類等はなされていない。また、東日本大地震後には、日本の各地で地下水位が上昇または低下する現象、温泉水の湯量が増加または温度上昇等の変化が見られたと公表されているが<sup>8)9)</sup>、詳細な地震前後の変動に関する解析は、ほとんどなされていない。特に、東京地域における東日本大地震に伴う不圧・被圧地下水の水位変動に関する調査・研究は、管見では承知していない。

土木技術支援・人材育成センター(以下「セン

ター」という)においては、東京都内(島嶼・山地を除く)の地下水の汲み上げに起因する地盤沈下の観測と監視を目的として、1952年から地下水位観測を実施している。現在は都内42地点の観測局に104観測井(不圧地下水:13井,被圧地下水:91井)を設置し、この地下水位観測システムによる観測成果を毎年の「地盤沈下調査報告書」として公表している<sup>10)</sup>。

そこで本論文では、センターの地下水位観測システムが捉えた東日本大地震を含む1箇月間(2011年3月)の1時間単位の観測データを用い、不圧・被圧地下水位変動のパターン特性を抽出し、これらを分類した。さらに、複雑な時系列解析手法やパターン分析手法を用いるのではなく、明白な時系列変動特性に基づき、分類された各変動パターンの特性要因に関して、地殻変動ベクトル図や観測井の柱状図などを参考として検討を行ったものである。

## 2. 東京都における地下水位観測の概要

### (1) 概要・諸元等

図-1に、都内42地点に設置した地下水位観測局の空間分布を地形概要とともに示す。センターが地下水位観測を最初に開始したのは、1952年6月に江東区亀戸に設置した観測井であり、1990年からは遠隔監視のためのシステム化を進め、現在は2002年を始期とする観測機器の更新を実施中である。現況では、42観測局に不圧地下水位観測13井、被圧地下水位観測91井の合計104観測井で地下水位の変動監視を行っている。

表-1には、図-1に示す42観測局の局番、局名、所在地、並びに設置されている観測井の諸元(井戸番号・深度、ストレナ深度、地盤高)を示す。観測局の配置上の地形区分としては、不圧地下水位観測井が区部低地部に2井、区部及び多摩部の台地部に11井あり、被圧地下水観測井は区部低地部に35井、多摩川水系低地部を含む台地・丘陵部に54井が位置している。なお、No.14-1とNo.37-1については現在、観測を停止中のため表中から除外している。

### (2) 観測井及び水位計の構造

図-2に、観測井及び水位計の構造を示す。観測井の深度は、不圧地下水位の観測井で5m~15mの範囲に、被圧地下水位の観測井では26m~450mとなっている。

観測井の構造は、鉄管を使用した単管式と二重管式に大別される。多くは単管式が採用されているが、概ね100mを超える大深度の観測井においては、地盤沈下量を正確に測定するため二重管構造としている。また、管径は20cmを基本とし、一部の管径が5cm~15cmとなっている。

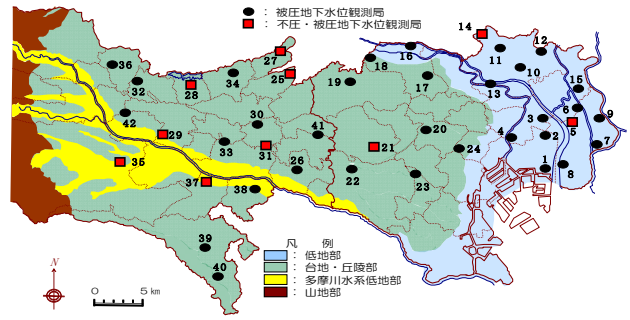


図-1 地下水位観測局

表-1 観測局一覧

局番	局名	所在地	観測井No.	井戸深度(m)	ストレナ深度(m)	地盤高T.P.(m)
1	南砂町	江東区南砂町	1.2	7.0	65-70	-2
2	亀戸	江東区亀戸	1.2	6.1	125-130	-2
3	吾妻	墨田区立花	1.2	1.4	139-144	-1
4	両国	墨田区両国	1 <sup>※</sup> , 2	4.7	42-47	2
5	新江戸川	江戸川区松島	①, 2, 3 <sup>※</sup>	3.8	35-37	-2
6	小岩	江戸川区上一色	1	12.6	76-87	3
7	江戸川東部	江戸川区江戸川	①, 2, 3 <sup>※</sup>	1.0	2-10	313-346
8	小島	江戸川区西葛西	1, 2, 3, 4 <sup>※</sup>	1.5	47-55	1
9	篠崎	江戸川区上篠崎	1, 2, 3 <sup>※</sup>	7.0	62-67	291-306
10	新足立	足立区中央本町	1	1.6	150-160	0
11	伊興	足立区伊興	1	4.0	37-40	123-134
12	神明南	足立区神明南	1, 2, 3 <sup>※</sup>	2.0	27-29	212-229
13	小台	足立区小台	1	2.7	224-234	2
14	舎人	足立区舎人	2 <sup>※</sup> , 3 <sup>※</sup> , ④	1.2	87-115	0
15	高砂	葛飾区高砂	1	2.0	224-234	2
16	戸田橋	板橋区戸田	1 <sup>※</sup> , 2 <sup>※</sup> , 3	1.2	87-115	0
17	板橋	足立区富士見	1	2.7	224-234	2
18	上赤塚	足立区赤塚	1, 2, 3 <sup>※</sup>	1.0	87-97	42
19	練馬	練馬区谷原	1, 2	1.0	87-97	42
20	新宿	新宿区百人町	1	1.3	114-125	33
21	杉並	杉並区大宮	1 <sup>※</sup> , ②	1.8	115-143	37
22	世田谷	世田谷区粕谷	1	1.3	87-109	41
23	目黒	目黒区青葉台	1, ②	1.5	125-147	17
24	千代田	千代田区紀尾井町	1, 2	3.3	19-28	15
25	東久留米	東久留米市神室町	1, 2, 3 <sup>※</sup> , ④	1.3	92-109	44
26	調布	調布市調布ヶ丘	1, 2, 3, 4 <sup>※</sup>	9.2	85-90	393-417
27	清瀬	清瀬市中清戸	1, 2 <sup>※</sup> , 3 <sup>※</sup> , ④	2.5	158-169	4-5
28	東大和	東大和市奈良橋	1, 2, 3 <sup>※</sup> , ④	5.6	43-53	146-162
29	立川	立川市富士見町	1, 2 <sup>※</sup> , ③	9.4	77-83	385-407
30	小金井	小金井市桜町	1, 2 <sup>※</sup> , 3 <sup>※</sup>	1.7	158-193	7-9
31	小金井南	小金井市東町	1, 2 <sup>※</sup> , ③	2.0	75-81	226-248
32	武蔵村山	武蔵村山市三ツ薮	1, 2 <sup>※</sup> , 3 <sup>※</sup>	1.0	154-165	9-11
33	府中	府中市武蔵台	1, 2 <sup>※</sup> , 3 <sup>※</sup>	1.0	90-102	5-7
34	東村山	東村山市久米川町	1, 2 <sup>※</sup> , 3 <sup>※</sup>	2.0	71-83	243-259
35	八王子	八王子市大和田町	1, 2 <sup>※</sup> , ③	1.0	140-151	47
36	瑞穂	瑞穂町箱根ヶ崎	1, 2 <sup>※</sup>	2.0	114-125	3-8
37	新多摩	多摩市関戸	②	1.0	167-189	62
38	稲城	稲城市東長沼	1 <sup>※</sup>	2.2	194-199	125-125
39	町田	町田市野津田町	1, 2 <sup>※</sup>	1.0	164-175	213-241
40	町田南	町田市高ヶ坂	1, 2 <sup>※</sup>	1.0	142-153	257-273
41	三鷹	三鷹市牟礼	1, 2 <sup>※</sup> , ③	1.8	138-150	109
42	昭島	昭島市美福町	1, 2 <sup>※</sup> , ③	1.1	76-93	142
				2.3	142-169	142
				1.0	5-10	50
				2.2	189-211	37
				1.0	72-84	62
				1.9	147-169	62
				2.5	42-53	53
				1.8	97-113	56
				2.0	178-203	8-13
				1.1	92-103	119
				2.3	187-210	

注) 観測井No. ○付: 浅井戸 ※: 二重管式を示す

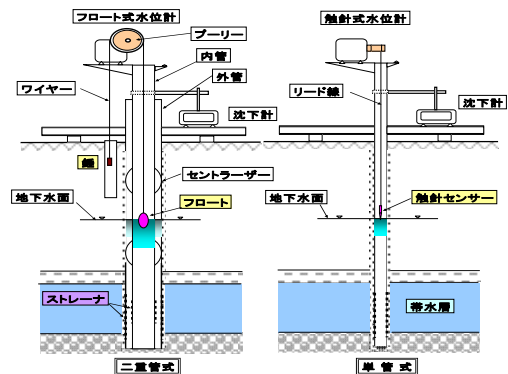


図-2 観測井及び水位計の構造

水位計の大部分については、構造が単純で故障が少なく精度の高いフロート式水位計（横河電子機器（株）W-132-04）を採用している。フロートの形状は口径10cm、長さ20cmの紡錘型であり、観測精度は3mm以内となっている。また、フロート式が採用できない管径10cm以下の一部の観測井では、触針式水位計（横河電子機器（株）W-151）を使用しており、その作動幅は5mm程度、巻き上げ時間の間隔は30秒程度で、観測精度は5mmである。

### (3) 観測記録

地下水位観測システムによる水位記録の形式は、1990年のシステム化までが紙媒体により、1990年以降はテキストデータとして、また2002年以降の新システムはCSVデータとして保存されており、記録間隔はそれぞれ毎正時における瞬間値である。

## 3. 東日本大地震前後の地下水位変動状況

東日本大地震は2011年3月11日14時46分頃、東北地方三陸沖を震源とするモーメントマグニチュード（以下「マグニチュード」という）9.0の地震であり、東京地方では最大で震度5強の揺れが観測されたほか、同15時6分頃にマグニチュード7.0（東京における最大震度3）の余震が、同15時15分頃には茨城県沖を震源とするマグニチュード7.4（東京での最大震度5弱）をはじめとする多くの地震が観測されている。

ここで、図-3に東日本大地震に伴い各観測局で観測された地下水位の変動傾向を示す。この図では地下水位の変動傾向として、東京での揺れを考慮して3月11日14時と16時の地下水位を比較し（ただし、局番No. 39とNo. 40については、16時以降の地下水位が停電により欠測のため、14時と15時の水位差とした。）、閾値として5cm以上の水位上昇したものを記号「赤▲」で、同じく水位低下したものを記号「青▼」で示し、5cm未満を「大きな変動なし」として記号「—」で表している。また、この図の各観測局に複数の記号があるのは、表-1の観測井No.に対応したものである。さらに表-2に、これらの水位差の最大値と最小値を、不圧・被圧地下水の別に示している。

図-3並びに表-2より、不圧地下水の水位低下は被圧地下水に比べて小さく、反対に水位上昇は被圧地下水に比べて大きい傾向にある。また、被圧地下水の多くは、都内全域において全般的に水位低下の傾向を示している。

図-4には、不圧地下水観測13井の観測記録のうち特徴的な水位変動が生じた5井について、2011年3月における一箇月間の時間単位での水位変動の時系列を、同様に図-5には被圧地下水観測89井のうちの9井に関する水位変動の時系列を、それぞれ東京大手町にある気象庁

東京管区気象台の降水量とともに示す。地下水位は、東京湾平均海面を基準(T.P.+ )としており、図中のグラフ線が欠けている箇所は、東日本大地震後に生じた停電又は計画停電による欠測である。使用した観測記録の時系列については、東日本大地震後に地下水位観測システムの機器に故障はなく、またデータ転送にも異常なく正常に

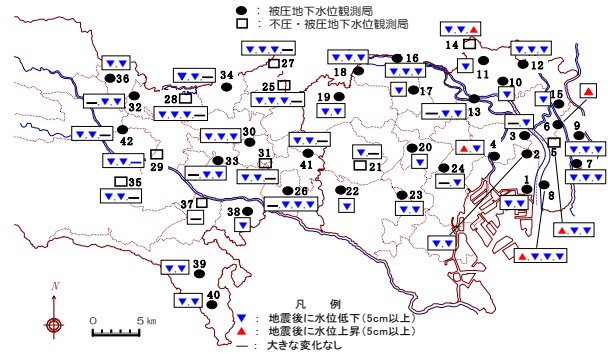


図-3 地震後の地下水位変動

表-2 地震後の水位変動量

変動量 種別	水位低下		水位上昇					
	最大値	井No.	最小値	井No.	最大値	井No.	最小値	井No.
不圧地下水	14.4cm	23-2	0.1cm	25-4	23.4cm	14-4	0.2cm	35-3
被圧地下水	83.3cm	8-2	0.4cm	3-1	14.8cm	8-1	0.9cm	33-1

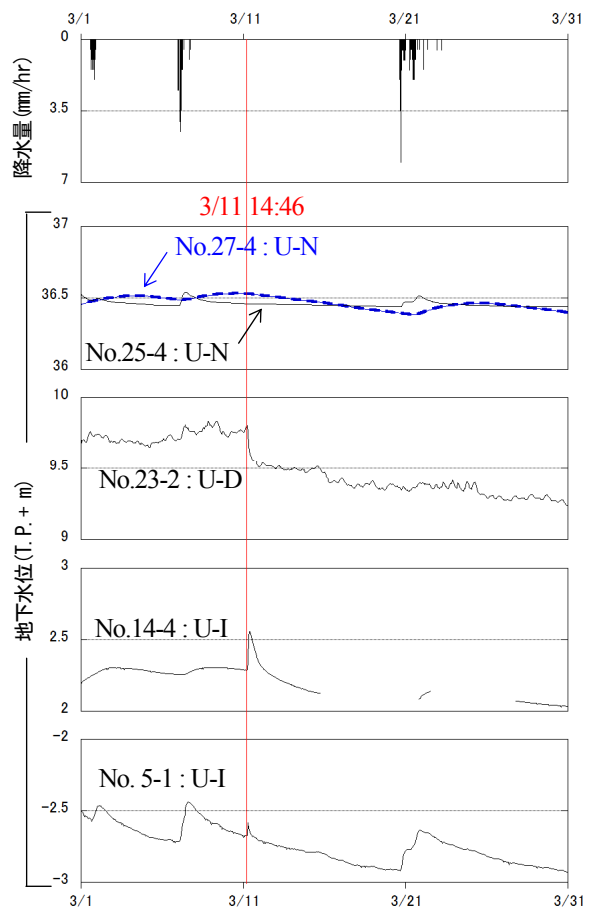


図-4 不圧地下水水位の変動状況図

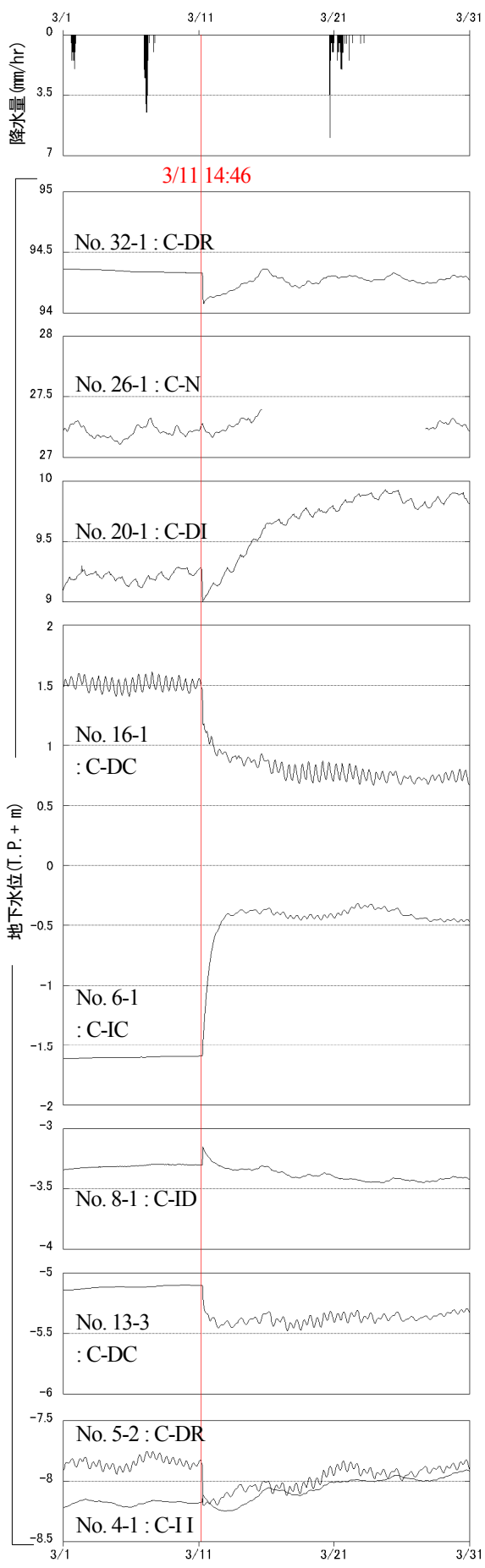


図5 被圧地下水水位の変動状況図

作動していることを点検確認している。

#### 4. 考察

初めに、水位計の特性が及ぼす観測値への影響について検討する。フロート式水位計の場合は、錘の地震動との共振が想定されるが、図-2に示した水面に浮かぶフロートとプーリーとは、数メートル以上のワイヤーで結ばれ、錘とプーリー間も約3m程度の長さを有していることから、短周期の振動には影響が少ないと判断した。

次に、観測井の管径が小さいことによる水面の共振等に伴う観測値の変動であるが、これについても1時間データを使用していること、観測形式の異なる水圧式水位計においても同様の水位変動の観測記録が確認できたため、共振による水面変動は観測値に対し支障ないものと判断した。なお、当該水位計（応用地質（株）S&DL mini MODEL-4800）による記録は、練馬観測局近傍の大深度トンネルの立坑建設現場内において、センターが観測を実施したものである。

##### (1) 不圧地下水の変動要因

図-4より、No.25-4とN27-4のように、大きな変動が見られないものをパターンU-Nとし、No.23-2のように地震に伴い水位が低下し、その後も低下傾向が続くものをパターンU-Dとする。また、No.14-4とNo.5-1のように、地震に伴う水位上昇の後、地震前の水位まで低下したものをパターンU-Iとしている。不圧地下水は、この3つの分類に大別され、それらの特徴と分類された観測井数を表-3に示す。その内訳は、パターンU-Dが全体の15%、パターンU-Iは23%、パターンU-Nが62%を占めている。

ここで、図-6にパターンU-Iに属す2井の柱状図を示す。

表-3 不圧地下水水位の変動パターン

パターン	特徴	代表井No.	井数
1 U-D	水位低下し そのまま継続	23-2	2
2 U-I	水位上昇後 元の水位に低下	5-1, 14-4	3
3 U-N	大きな変動なし	25-4, 27-4	8

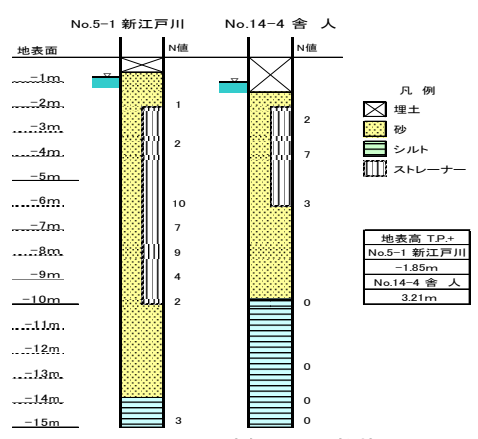


図-6 不圧地下水観測井の柱状図



これより、N値はいずれも0~10以下の軟弱層であり、地震時前後に降水がないこと、帯水層より上部には難透水層が存在しないこと、砂層に帯水した地下水位が上昇したこと等が明らかことから、地震動の揺れによって砂層中における過剰間隙水圧が高まったため、有効応力の減少を招き地盤の不安定化とともに、水位が短期的に上昇したもの<sup>11)</sup>と考えられる。

また、パターンU-Dの2井は台地部にあり、低下の原因は後述の被圧地下水で説明するように、地殻の膨張に伴う圧力低下が考えられる。ここで、パターンU-Nに属する8井は、同じく台地部に位置していることから、台地部の多くの不圧地下水は、その影響をほとんど受けなかったものと考えられる。

## (2) 被圧地下水の変動要因

図-5より、被圧地下水で地震に伴う水位低下が見られたものをパターンC-Dと大別する。このうち、No.32-1やNo.5-2のように、地震に伴う水位低下後に水位が復元するものをパターンC-DRとし、No.20-1のように水位低下後に反転上昇するものをパターンC-DI、水位低下が続くNo.16-1やNo.13-3をパターンC-DCに細分する。また、地震に伴い水位上昇したものをパターンC-Iと大別し、No.8-1のように水位上昇後に地震前の水位まで戻ったものをパターンC-ID、上昇から低下に転じた後、再び上昇したNo.4-1などをC-IIと細分したほか、No.26-1のように大きな変動がなかったものがパターンC-Nである。なお、一例だけ特異なものとしてNo.6-1があり、これをパターンC-ICとする。

被圧地下水はこれら7つに分類でき、それらの特徴と分類された観測井数を表-4にまとめた。その内訳は、パターンC-DIからC-DRまでが全体の91%を占め、パターンC-IIからC-IDが6%、パターンC-Nが3%となっている。

次に、表-4の変動パターンの変動要因について考察する。

東日本大地震に伴う東日本地方における地盤変動の状況として、前述の(独)産業技術総合研究所 活断層・地震研究センターが公表した地殻変動等値線図を図-7に示す。この図は、東日本大地震の地層の断層変位に伴う静的な体積歪変化量を表している。東京地域では、ほぼ $10^{-6}$ ~ $10^{-7}$ 桁の範囲で膨張しており、これを水位の歪感度を用いて水位換算すると、地下水位が1m~10cm程度低下すると示されている<sup>12)</sup>。

図-8に、国土交通省国土地理院が東日本大地震後の5月31日に発表した電子基準点の座標値<sup>13)</sup>に基づき、著者らが計算した東日本大地震後の東京周辺における電子基準点の変動状況を示す。これより、ほぼ東方向に区部で20~30cm程度、多摩部で15cm以上の地殻変動が生じたこと、計算によれば千葉市川と世田谷に設置されている電子基準点(93023・950228)の点間距離が地震後に拡大したことが判明している。これらの現象は、筆者らの調査による被圧地下水位の低下傾向と一致することから、パ

ターンC-DCの水位低下の原因は、主に東日本大地震により生じた地殻の膨張に起因する圧力低下によって水位が低下したものと判断できる。

さらに、筆者らの調査では日本水準原点(千代田区永田町)を不動点とした観測において、都内の一部地域で数十mm程度の地盤沈下が生じたことが判っている<sup>14)</sup>。このことが前述の水位低下後に、水みちの変化や地盤沈下に伴う水位上昇としてパターンC-DIやC-DRのような現象となった可能性が考えられるが、より詳細なデータを入手し検討する必要があると考える。

一方、水位上昇のパターンに相当するC-II、C-IC、C-IDに分類できたのは、井戸深度が凡そ50mより浅い観測井であった。そこで、当該観測井のうち、No.4-1とNo.8-1の柱状図を図-9に示す。これより当該観測井は、20m以深の沖積層の地下水位を観測の対象としている。また、細砂層のほかシルト質粘土または粘土質シルトが存在するが、シルト・粘土層には砂層を挟むほか腐植物を混入し、そのほとんどがN値10以下の比較的軟弱な地層構成であることが明らかである。このため、地下水位が上昇した要因は地層中の過剰間隙水圧の上昇により、地中で水位上昇が生じたこと<sup>11)</sup>が推測できる。

表-4 被圧地下水位の変動パターン

パターン	特徴	代表井No.	井数	
1	C-DI	水位低下後に反転上昇	20-1	46
2	C-DC	水位低下し そのまま継続	16-1,13-3	21
3	C-DR	水位低下後 元の水位に復元	5-2, 32-1	14
4	C-II	水位上昇・低下後に反転上昇	4-1	2
5	C-IC	水位上昇し そのまま継続	6-1	1
6	C-ID	水位上昇後 元の水位に低下	8-1	2
7	C-N	大きな変動なし	26-1	3

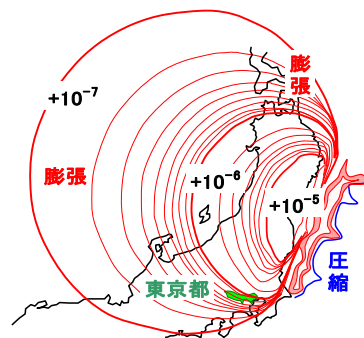


図-7 地殻変動等値線図 (産総研図面より作成)

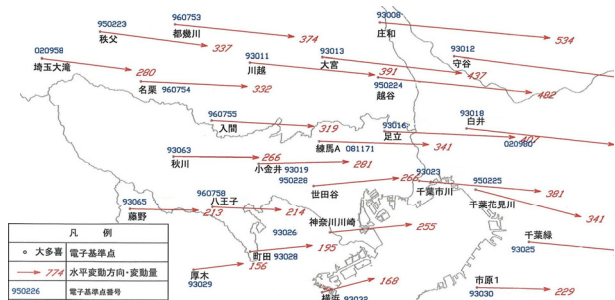


図-8 電子基準点 変動ベクトル図

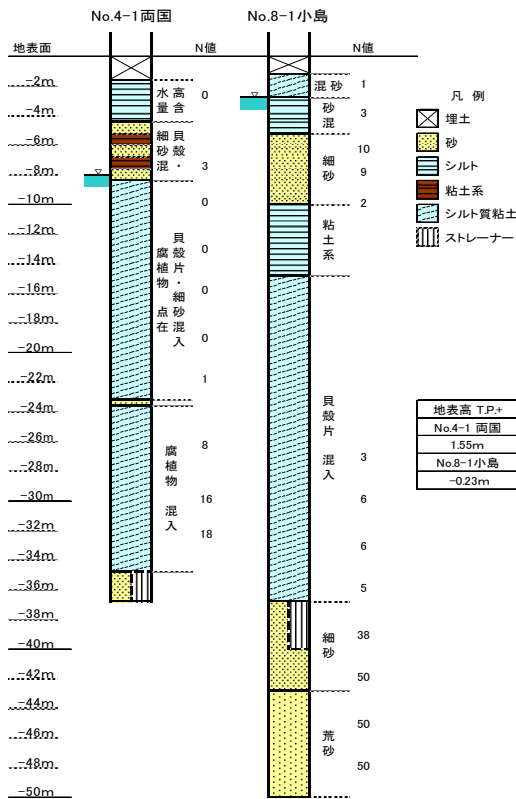


図-9 被圧地下水観測井の柱状図

以上のように、不圧・被圧地下水とを問わず、東日本大地震に伴う地下水位変動が東京地域で明瞭かつ広範囲に観測された。これは、これまでの比較的規模の大きな地震に比べて、今回の地震では本震に続く余震に伴って地震動の揺れが長時間続き、繰り返し振動が多かったことにより水位変動が顕在化し、従来観測されたことのない多くの水位変動が捕捉できたものと考えられる。

## 5. 結び

本論文では、東京都内42観測局の不圧観測13井、被圧観測89井の2011年3月1箇月間における1時間地下水位データを用い、その明白な時系列変動特性を基に、3月11日に発生した東日本大地震に伴う東京における不圧・被圧地下水位の変動パターン特性を抽出・分類するとともに、その変動パターンの特性要因について考察した。その結果、不圧地下水位の変動パターンとして3パターン、被圧地下水のそれは7パターンに大きく分類でき、不圧地下水位の変動パターンとしては大きな変動なしのパターンが多く、被圧地下水位では水位低下後に反転上昇するパターンが卓越していることを示した。また、観測井のストレーナの目詰まりが解消したことにより、変動波形が変化する場合があることが判った。

次に、東日本大地震に伴う地下水位変動の大きな要因として、①不圧地下水位の上昇は、地層中において過剰間隙水圧が高まったためと考えられること、②被圧地

下水位の水位低下に関しては、主に地殻が膨張し圧力が低下したことに起因していると考えられることを示した。また、より細かな変動パターンの要因についても一応考察を行ったが、今回使用したデータは極めて稀な観測記録であったことから比較検討等が難しいこともあり、これらに関しては今後関連するデータを収集・解析に努めるとともに、さらにその要因の精査を進めて参りたい。

## 参考文献

- 1) 国分邦紀，土屋十園：東京の地下水と水循環について，水文・水資源学会誌，第16巻3号，pp.289-300，2003.
- 2) 東京都環境局：東京都の地盤沈下と地下水の再検証について—平成22年度地下水対策検討委員会のまとめ—，2011.
- 3) 東京都：地震時における地下水変動に関する研究，東京都防災会議地震部会調査研究報告書，1979.
- 4) 小泉尚嗣，北川有一，高橋誠，佐藤努，松本則夫，伊藤久男，桑原保人，長秋雄，佐藤隆司：2001年芸予地震前後の近畿地方およびその周辺における地下水・地殻歪，地震2，第55巻2号，pp.119-127，2002.
- 5) 佐藤努，松本則夫，北川有一，小泉尚嗣，高橋誠，桑原保人，伊藤久男，長秋雄，佐藤隆司，小澤邦雄，田坂茂樹：2003年十勝沖地震に伴う地下水位変動（速報），地質ニュース596号，pp.35-41，2004.
- 6) 高橋誠：地震予知のための地下水テレメータ観測システム，地学雑誌，Vol.102，No.3，pp.241-251，1993.
- 7) 産業技術総合研究所 地質調査総合センター：2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)に伴う東海～四国周辺における地下水・地殻歪変化，第300回 地震防災対策強化地域判定会資料，2011.
- 8) 神奈川県温泉地学研究所：東北地方太平洋沖地震（2011年3月11日 M9.0）の箱根温泉への影響について，神奈川県温泉地学研究所HP，2011.
- 9) 産業技術総合研究所：2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)に伴う東海～四国周辺における地下水・地殻歪変化，地質調査総合センター 活断層・地震研究センターHP，2011.
- 10) 東京都土木技術支援・人材育成センター：平成22年地盤沈下調査報告書，pp.10-23，2011.
- 11) 佐田頼光，林宏親：地震時の地盤における過剰間隙水圧，開発土木研究所月報No.554，pp.22-26. 1999.
- 12) 産業技術総合研究所：平成23年東北地方太平洋沖地震速報地震後の地下水・温泉水の変化，地質調査総合センター 活断層・地震研究センターHP，2011.
- 13) 国土交通省国土地理院：平成23年（2011年）東日本大震災に関する情報提供—GPS連続観測から得られた電子基準点の地殻変動，国土交通省国土地理院HP，2011.
- 14) 東京都土木技術支援・人材育成センター：平成23年度 水準基標測量（区部），一級水準測量成果表，2011.

(2011. 9. 30受付)