

■特集／“令和”時代の地下水の課題とその解決に向けた取り組み（その2）

東日本大地震に伴う地下水の変化 —東京の地下水位変動を事例として—

Fluctuation Characteristics of Groundwater Levels in Tokyo Caused by Tohoku-Pacific Ocean Earthquake

キーワード：東日本大地震（東北地方太平洋沖地震）、地下水位、自己組織化マップ（SOM）、東京

石原 成幸

Shigeyuki ISHIHARA

首都大学東京 大学院都市環境科学研究科
客員准教授



河村 明

Akira KAWAMURA

首都大学東京 大学院都市環境科学研究科
教授



1. はじめに

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9.0の地震となった東北地方太平洋沖地震（以下「東日本大地震」と記す）が発生し、関東地方でも震度5強の本震や余震等に伴う液状化現象のほか、地下水位にも特異な変動が観測された。このような地下水位の変動を正確に捉えることは地盤沈下対策等に加え、地下水マネジメントの観点からも非常に重要となっている。

一方、(独)産業技術総合研究所では、地震予知研究を目的とした地下水総合観測ネットワークによる観測記録を公表しているが、東京地方は観測対象地域となっていない¹⁾。

本論では、東京都の地下水位観測システムが捉えた非常に稀有な東日本大地震時を含む地下水位データを用い、被圧・不圧地下水位変動のパターン特性を抽出し、時系列変動特性に基づき分類した事例とともに、管見の限り世界で初めて地下水位解析に自己組織化マップ(SOM)を適用して分析した事例について紹介する^{2), 3)}。なお近年、首都圏では首都直下型地震などの予測確率が高まる中、地下水位観測システムの活用や地震時の地下水位挙動を把握することは、震災復旧等に資する貴重な知見になると考える。

2. 使用データ

使用したデータは、東京都が地盤沈下の監視目的で都内42箇所に設置した地下水位観測局の2011年3月の一箇月・1時間単位（毎正時）

の観測値である。観測概要は図-1に位置図を、表-1に観測施設諸元（井戸番号・深度、地盤高）の抜粋を示す。42観測局の区分としては、被圧地下水位観測井が91井、不圧地下水位観測井が13井の計104観測井である⁴⁾。

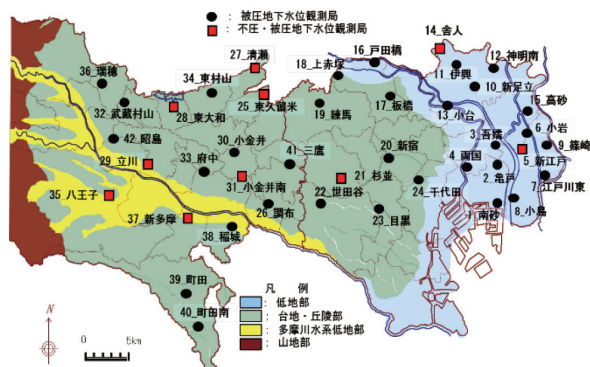


図-1 東京都内の地下水位観測局の配置

表-1 観測局並びに施設諸元（抜粋）

局No.	局名	所在地	観測井No.	井戸深度(m)	ストレータ深度(m)	地盤高(m)
1	南砂町	江東区南砂町	1, 2	7.0	125-130	T.P.-2
				13.0		
2	亀戸	江東区亀戸	1, 2	6.1	56-61	T.P.-2
				14.4		
41	三鷹	三鷹市牟礼	1, 2, ③	11.8	97-113	10-15
				26.0		
42	昭島	昭島市美堀町	1, 2, ③	11.0	92-103	8-13
				23.6		

※) ○付観測井No.: 不圧井を示す

3. 東日本大地震時の地下水位変動パターン

図-2には、東日本大地震に伴い各局で観測された地下水位の主な変動傾向を示す²⁾。ここでは東京での余震等の状況を考慮し、11日14時と16時の地下水位を比較した（停電で欠測した局は14時と15時の水位差）。その際の閾値として5cm以上の水位上昇を[▲]、同じく低下

を[▼]、5 cm 未満を「大きな変動なし」として[-]で表した。さらに表-2 に、これら水位差の最大値と最小値を、被圧・不圧地下水位の別に示した。図-2並びに表-2より、被圧地下水の多くは、全般的に低下傾向を示している。また、不圧地下水の水位低下は被圧地下水に比べて小さく、反対に水位上昇は大きい傾向が読み取れる。

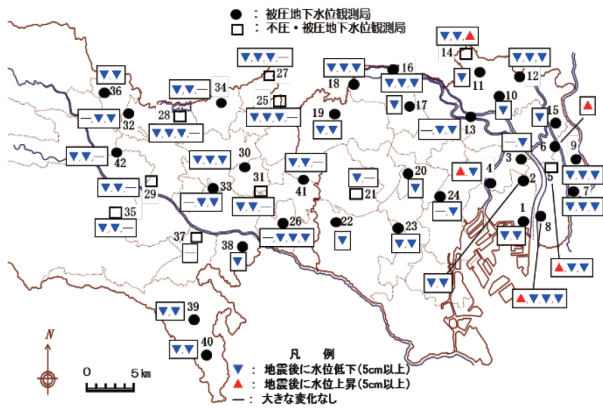


図-2 地震時の地下水位変動状況

表-2 地震時の地下水位変動量

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

表-3 では、これら明示的な時系列変動特性に基づき、計画停電等による欠測の少ない40観測局の98観測井（被圧85井、不圧13井）を被圧・不圧地下水の変動別に、被圧7パターンと不圧3パターンに分類した。

図-3には、不圧・被圧地下水の観測記録から特徴的な水位変動が生じた各2井について、3月一箇月間の時系列データを、気象庁による東京大手町の降水量ととともに示す。地下水位は東京湾平均海面を基準（T.P.+）とし、図中のグラフ線が欠けている箇所は、地震後に生じ

表-3 被圧・不圧地下水位の変動パターン特性

被圧	水位変動傾向			不圧	水位変動傾向		井数
	パターン	説明	井数		パターン	説明	
C-D	C-D-I	水位低下後に反転上昇	42	U-D	水位低下	1	
	C-D-C	水位低下し、そのまま継続	20	U-I	水位上昇	2	
	C-D-R	水位低下後、元の水位に復元	13	U-N	大きな変動なし	10	
C-I	C-I-I	水位上昇・低下後に反転上昇	1				
	C-I-C	水位上昇し、そのまま継続	1				
	C-I-D	水位上昇後、元の水位に低下	1				
C-N	C-N	大きな変動なし	7				

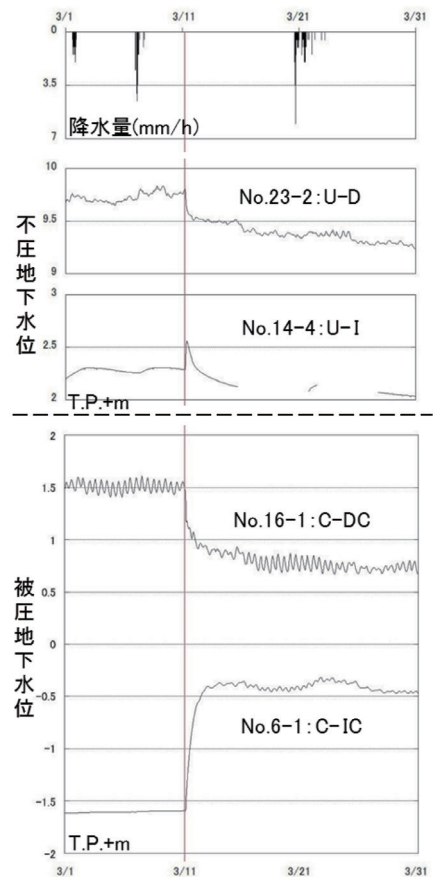


図-3 被圧・不圧地下水位の変動状況

た停電又は計画停電による欠測である。なお、地震前後の観測システムには、故障・異常がないことを確認している²⁾。

4. SOM を用いた地下水位の変動特性評価

この東日本大地震の観測データは非常に稀な記録であり、比較・検証が難しい状況にある。このような地下水の複雑な挙動を有する変動特性の分類には、より客観的なパターン分類手法の適用が望まれる。そこで筆者らは、地震時の地下水位変動特性を自己組織化マップ（Self-Organizing Maps : SOM）を用いて客観的に評価し、前述の時系列変動に基づく主観的な変動パターン特性との比較検討を通じて、より詳細な変動・分類特性等を明らかにした。

SOMは、入力データの関連性を類似度としてマップ上で描画できるニューラルネットワーク手法の一種である^{5), 6)}。この機能により、複雑な相互関連性を二次元マップ上に視覚化・分類することで、データ特性の分類等を客観的に表現することが可能となる。紙面の関係から、SOM

の詳細については既往研究を参照頂きたい^{2),3)}。

解析に使用した水位データとしては、前述した欠測の少ない40局98井（被圧85井、不圧13井）における次の(a)～(e)の5項目について、データを指標化して入力した。

- (a) 地震前後の水位差：3月11日16:00-14:00
- (b) 地震直後と22時間後（12日）の水位差
- (c) 地震1日後と同2日後（14日）の水位差
- (d) 地震2日後と3月31日の水位差
- (e) 各観測井のストレーナ深度の標高値（T.P.）

指標化に際しては東京での地殻変動量（4 cm 程度）を考慮し、(a)～(d)に閾値5 cmを設定した。

SOMのマップ配列を決める全ノード数は、データ数に基づく経験式から、縦10×横5=50ノードの構成とした^{5),6)}。また、クラスター数はk-means法を適用した最小DBI（Davies-Bouldin Index）値から8とし、クラスター分類はWard法を用いて4階層と決定した³⁾。

図-4には、SOMノードマップにクラスター配置と観測井の分類結果を示した。また、図-5は各クラスターにおける水位差(a)～(d)と深度(e)の分布特性をレーダーチャートで示した。

この図-4・図-5に基づく各クラスターの変動特性は、表-4に示すとおりである³⁾。

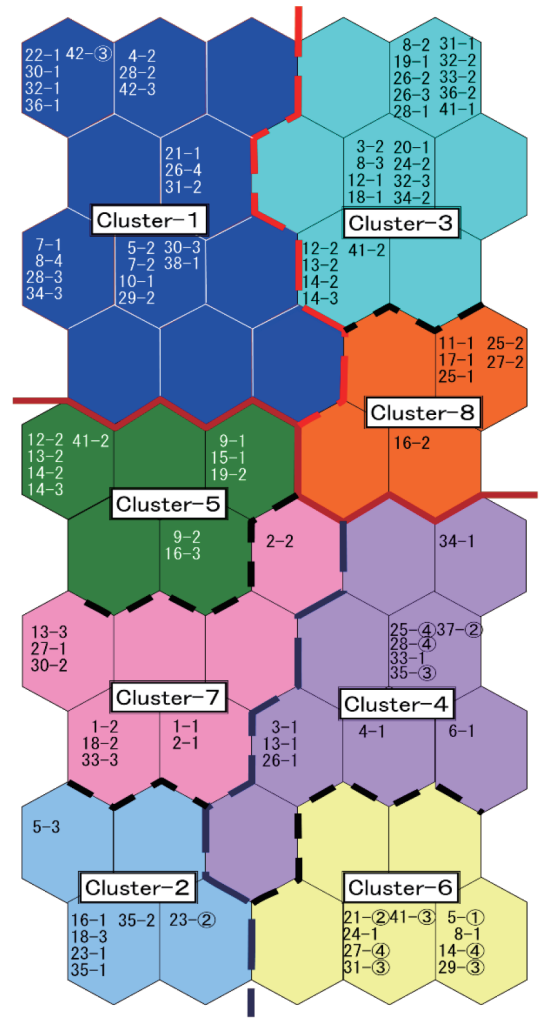


図-4 ノードマップとクラスター配列・観測井の分類結果
凡例：観測所-観測井No. 但し○No.：不圧井

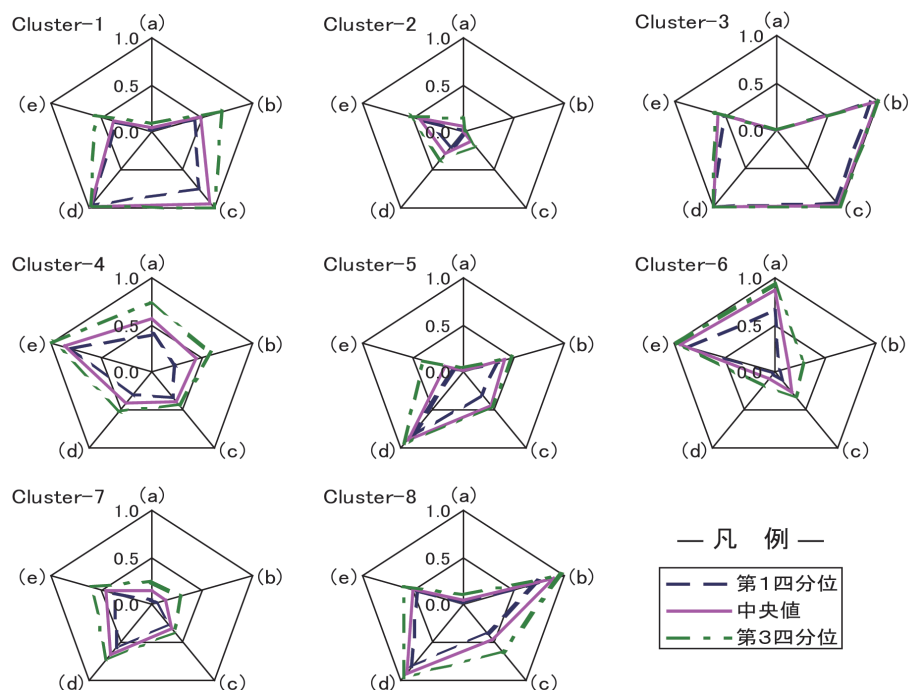


図-5 各クラスターの水位差(a)～(d)並びに井戸深度(e)の分布特性

次に、上記の時系列変動に基づく分類（表-3）と SOM による比較分類結果を表-5 に示した³⁾。

表-4 クラスタ毎の地震後の水位変動特性

Cluster No.	水位変動傾向			ストレート深度
	11日・地震直後	3月14日	3月末	
Cluster-1	大きく低下	回復・上昇	高水位	若干深い
Cluster-2	大きく低下	低下・回復	継続	中間
Cluster-3	最大の低下	地震前を上回る	継続	やや浅い
Cluster-4	若干の変動	大きな変動なし	継続	非常に浅い
Cluster-5	大きく低下	ほぼ回復	上昇	最も深い
Cluster-6	若干上昇	低下・回復	回復後低下	非常に浅い
Cluster-7	大きく低下	上昇	継続	中間
Cluster-8	低下後に上昇	地震前に戻る	再び上昇	やや浅い

表-5 SOM 解析結果と時系列に基づく変動特性の関係

SOMによる分類	目視による時系列変動に基づく主観的な分類(表-3)										
分類/井戸数	SOMに対応する被圧・不圧地下水の変動パターンと観測井数										
Cluster-1	21	C-DI	12	C-DR	5	C-DC	1	C-N	2	U-N	1
Cluster-3	24	C-DI	21	C-DR	2	C-DC	1				
Cluster-8	7	C-DI	5	C-DC	1	C-DR	1				
Cluster-5	10	C-DC	5	C-DR	3	C-DI	2				
Cluster-7	9	C-DC	6	C-DI	2	C-DR	1				
Cluster-2	7	C-DC	6	U-D	1						
Cluster-4	11	U-N	4	C-N	4	C-I	1	C-IC	1	C-DR	1
Cluster-6	9	U-N	5	U-I	2	C-N	1	C-ID	1		

5. 地震直後の被圧・不圧地下水位の変動要因

地震直後の地下水位に生じた特異的な水位上昇・低下の要因について、各資料に照らして調査した。その結果、被圧地下水の水位低下の原因は、地震時の断層変位に伴う静的な体積歪変化量の膨張傾向（歪み感度による水位換算：1～10cm 程度の低下）や電子基準点の変動状況（30cm 程度）等から、主に地震による洪積層の地殻膨張に起因する圧力低下により水位低下したものと判断できる^{7), 8)}。

一方、不圧地下水位の上昇については、水位上昇した観測井が N 値 0～10 以下の軟弱層に設置され、地震前後における降水がなく、帯水層上部にも難透水層が存在しないこと、また砂層に帯水した地下水位が上昇したこと等が明らかになった。このため、地震動により一時的に砂層中の過剰間隙水圧が高まり、有効応力の減少を招き地盤の不安定化とともに、液状化に似た状態となり、地下水位が短期的に上昇したものと考察できる^{2), 9)}。これらの水位変動要因の詳細については、既往研究を参照願いたい^{2), 3)}。

なお、本考察については、現時点で他の地震時における観測データがほぼ得られていないこ

とから、新たなデータが得られた段階で、より詳細な検証を行う必要があると考える。

6. おわりに

本論では、比較検証等の難しい特異な事象への SOM 適用によるパターン解析の有用性を示すとともに、地下水位の常時広域観測の重要性も再認識できる一例として紹介させて頂いた。

<参考文献>

- 1) 北川有一、小泉尚嗣：東北地方太平洋沖地震（9.0）後1日間での地下水位・地下水圧・自噴量変化、活断層・古地震研究報告、No.11 pp309-318、2011 ほか
- 2) 石原成幸、河村明、天口英雄、高崎忠勝、川合将文：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、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.68 No.4 pp.I_595-I_600、2012
- 3) 石原成幸、河村明、天口英雄、高崎忠勝、川合将文：自己組織化マップを用いた東北地方太平洋沖地震に伴う東京における地下水位の変動特性評価、土木学会論文集 B1 (水工学)、Vol.69 No.4 pp.I_541-I_546、2013
- 4) 東京都土木技術支援・人材育成センター：平成 23 年の地下水位変動の特徴、平成 24 年度センター年報、pp131-150、2012 ほか
- 5) Kohonen T: Self-Organizing Maps, Proceedings of The IEEE, 78 (9), pp1646-1480, 1990
- 6) Juha V, Johan H, Esa A, and Juha P: SOM Toolbox for Matlab 5, Helsinki University of Technology, 2000
- 7) 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・温泉の変化、地質調査研究センターHP、2011 ほか <https://unit.aist.go.jp/iev/reports/jishin/tohoku/chikasui.html>（令和元年 10 月 19 日確認）
- 8) 国土地理院：GPS 連続観測から得られた電子基準点の地殻変動、国土地理院 HP、2011 <https://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi40005.html>（令和元年 10 月 19 日確認）
- 9) 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