

自己組織化マップによる東北地方太平洋沖地震に伴う東京の地下水位変動特性に関する考察

首都大学東京 都市環境科学研究科 学生員 ○高橋 泰之
首都大学東京 都市環境科学研究科 正会員 河村 明
東京都土木技術支援・人材育成センター 正会員 石原 成幸
首都大学東京 都市環境科学研究科 正会員 天口 英雄
首都大学東京 都市環境科学研究科 正会員 中川 直子

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分頃に三陸沖を震源とするモーメントマグニチュード(Mw) 9. 0 の地震である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、首都圏では最大震度 5 強が観測された。加えて、同 15 時 15 分頃に発生した震度 5 弱の地震(Mw7. 4) など、数多くの余震により地下水位においても特異な変動が観測された。

筆者らは既に東京都土木技術支援・人材育成センター(以下「センター」と記す)が観測し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て、目視による時系列変動に基づいた地下水位変動パターン特性を主観的に抽出した。その結果、被圧地下水位を 7 パターン、不圧地下水位を 3 パターンに分類できることを示した¹⁾²⁾。

しかし、東日本大地震に伴う地下水位変動の記録は極めて稀な観測データであり、検証が難しい状況にある。また、今回観測されたような複雑な挙動を生じる地下水位の変動特性の分析には、客観的な解析手法を適用し、変動パターンを集約することが重要である。

そこで本研究では、パターン分類手法一つである自己組織化マップ(Self-Organizing-Map, 以下「SOM」と記す)をセンターが観測した東日本大地震を含む 2011 年 3 月間における 1 時間単位の地下水位変動データに適用し、客観的に地震時の被圧・不圧地下水位の変動特性を評価した。さらに、前述した目視による時系列変動に基づく地下水位変動パターン特性との比較・検証を行うことで、より詳細な地下水位変動の特徴を明らかにした。

2. 使用データの概要

図-1 に東京都内における地下水位観測局の分布図を地形概要とともに示す。また、表-1 には使用データとして設定した(a)から(e)までの 5 項目の詳細を示す。さらに表-2 には図-1 に対応する観測井の詳細と使用データを示す。地震後の計画停電の関係より、使用データは欠測が少ない 40 観測局 98 井(被圧：85 井、不圧：13 井)を対象とした。また、ストレーナ深度を加味した理由は、被圧・不圧地下水位が SOM 適用の際に精度よく分類されることを考慮したためである。

3. SOM の概要と適用

SOM は、多次元入力データの関連性を類似度として二次元平面上(マップ)に描画できるニューラルネットワークの一種であり、フィンランドの情報処理研究者の Kohonen(1982)により提案された分類手法³⁾である。図-2 には今回適用した SOM マップのノード配列を示す。SOM は一般的に入力層と出力層の 2 層構造となっており、入力層は入力ベクトル、出力層は参照ベクトルと呼ばれる多次元ベクトルで構成されている。SOM のアルゴリズムでは、入力ベクトルを基に参照ベクトルが入力ベクトルのパターンを学習する。学習により得られた参照ベクトルは、互いの距離に近いほど似た性質を持ち、距離が遠いものほど異なる性質を持つ。

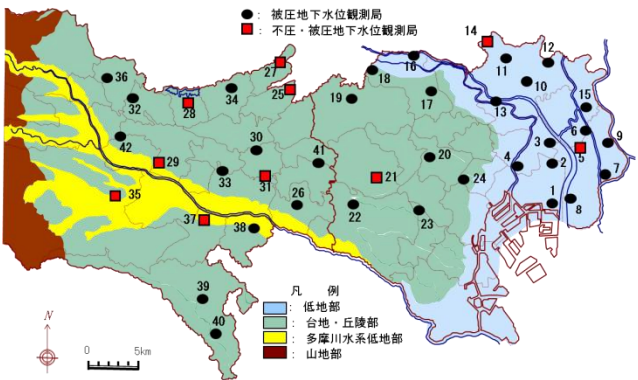


図-1 観測局分布図

表-1 使用データの各項目

記号	使用データ項目詳細	
(a)	地震前後の水位差(cm)	H23/3/11 16:00 - H23/3/11 14:00
(b)	地震直後と22時間後(12日)の水位差(cm)	H23/3/12 14:00 - H23/3/11 16:00
(c)	地震1日後と同2日後(14日)の水位差(cm)	H23/3/14の日平均値 - H23/3/12 14:00
(d)	地震2日後(14日)と3月31日の水位差(cm)	H23/3/14の日平均値 - H23/3/31の日平均
(e)	各観測井ストレーナ下端深度での標高値(T.P.+m)	

キーワード 東北地方太平洋沖地震, 地下水位変動, 東京, 自己組織化マップ

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 首都大学東京 E-mail : takahashi-yasuyuki@ed.tmu.ac.jp

次に、マップ上の参照ベクトルのクラスター化を行う。クラスターの最適数は、k-means 法を用いた際に得られた最小 DBI⁴⁾(Davies-Bouldin Index) 値により決定した。さらに、クラスター分類にはウォード法⁵⁾を用いた。また、SOM の全ノード数 M はデータ数 n に基づく経験式 $M=5\sqrt{n}$ により求められる⁶⁾。ここでは $n=98$ より M は 50 とし、縦 $10 \times$ 横 5 のノード構成とした。

4. 地下水位変動パターン抽出結果

図-3 にクラスター数と DBI 値の関係図を示す。また、最適クラスター数は最小 DBI 値を示した 9 クラスターとする。図-4 にウォード法により得られた 9 クラスターの階層とこれに対応するノード番号を示す。次いで図-5 に、分類された 9 クラスターの配置状況と各ノードに分類された表-1 の観測井番号を示す。さらに、図-6 は、分類された 9 クラスターの特徴を把握するため、各クラスターに属する参照ベクトルの値を $[0, 1]$ に基準化し、その第 1 四分位、中央値、第 3 四分位をプロットしたものであり、(a)から(e)は表-1 の各項目に対応している。

5. SOM による地下水位変動パターン分類

図-5 及び図-6 に示した各クラスターの変動特性を記す。クラスター1 は地震後に比較的大きな水位低下を生じ、31 日まで同水準の水位を継続し、ストレーナ深度は非常に深い。クラスター2 は、地震後に比較的大きな水位低下を生じるが、翌日には元の水位程度まで回復した後、14 日まで同程度の水位を維持し、31 日まで若干の水位上昇を生じる。ストレーナ深度は比較的深い。クラスター3 は、地震後に比較的大きな水位低下を生じるが、翌日までに元の水位まで回復、14 日までに若干の水位低下し、31 日まで同程度の水位を継続する。ストレーナ深度は中間的である。クラスター4 は地震後に水位上昇、または大きく変動せず、翌日までに大きく水位低下し、31 日まで同程度の水位を継続する。ストレーナ深度は非常に浅い。クラスター5 は地震後に水位上昇または大きく変動せず、翌日までに元の水位程度まで回復し 14 日まで同程度の水位を維持し、31 日までに若干の水位低下を生じる。ストレーナ深度は非常に浅い。クラスター6 は、クラスター1 と同様の水位変動傾向であるが、ストレーナ深度が中間的である。クラスター7 は、地震後に全クラスター中最大の水位低下し、翌日までに元の水位まで回復、そして 14 日はさらに水位上昇するが、31 日までに若干の水位低下を生じる。ストレー

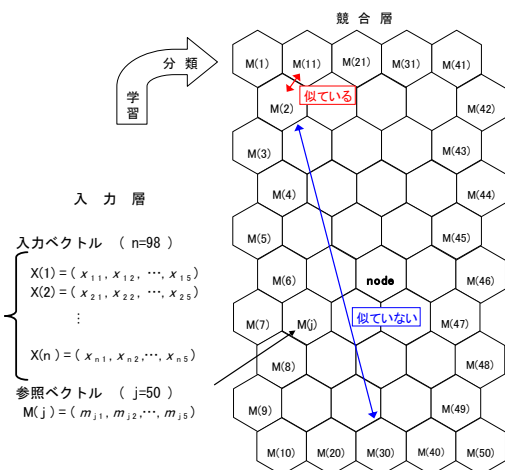


図-2 SOM マップ (10×5)

表-2 各観測局の使用データ

局番	観測井No	水位差				ストレーナ深度 標高 (e)	局 名
		(a)	(b)	(c)	(d)		
1	1	-12.5	-11.2	4.8	0.1	-72	南砂町
	2	-14.8	-7.8	3.9	-0.8	-132	
2	1	-14.0	-15.0	-0.1	2.2	-63	亀 戸
	2	-27.3	-0.1	-0.4	1.4	-146	
3	1	-4.0	-13.1	6.9	2.9	-48	吾 婦
	2	-40.4	21.1	7.5	23.3	-116	
4	1	6.1	-10.9	1.1	29.4	-35	両 国
	2	-27.1	4.2	35.7	34.0	-85	
5	①	5.3	-9.7	-5.2	-14.9	-12	新江戸川
	2	-32.8	2.3	11.3	20.1	-152	
	3	-22.7	-5.3	3.9	3.2	-348	
6	1	10.4	91.1	19.2	-7.3	-52	小 岩
	2	-18.3	-14.4	11.1	8.9	-66	
7	2	-25.8	-2.4	8.4	16.1	-159	江戸川 東 部
	3	-20.0	-1.4	1.6	8.5	-305	
	④	-20.0	-1.4	1.6	8.5	-305	
8	1	14.8	-13.5	-5.4	-7.0	-40	小 島
	2	-83.3	7.5	30.1	7.1	-77	
	3	-38.2	5.4	27.0	10.2	-134	
	4	-35.3	-6.0	19.6	11.7	-229	
9	1	-28.1	4.0	3.5	16.5	-58	篠 崎
	2	-39.1	-1.8	-1.0	4.4	-258	
	3	-24.4	-3.2	0.4	6.9	-313	
10	1	-30.4	0.2	11.8	35.4	-234	新 足 立
	2	-19.6	40.3	0.0	102.1	-112	
11	1	-32.4	7.3	7.6	43.4	-103	伊 興
	2	-36.6	17.5	11.8	69.2	-176	
	3	-35.8	0.8	4.4	8.6	-329	
12	1	-2.1	-7.1	2.4	-1.3	-43	小 台
	2	-35.7	8.0	7.3	28.3	-158	
	3	-8.4	-20.5	-1.0	8.9	-232	
	④	-8.4	-20.5	-1.0	8.9	-232	
13	1	-32.7	15.9	5.3	144.7	-181	舎 人
	2	-24.1	10.8	5.2	12.2	-299	
	④	23.4	-22.0	-12.3	-14.2	-3	
14	1	-32.3	-0.6	-2.9	5.2	-122	高 砂
	2	-27.9	-24.5	-5.4	-14.2	-265	
15	1	-24.0	12.2	-13.7	64.4	-110	戸田橋
	2	-23.0	4.7	-6.5	55.4	-56	
	④	-23.0	4.7	-6.5	55.4	-56	
16	1	-68.3	24.7	0.8	7.2	-170	板 橋
	2	-23.5	43.3	10.7	20.0	-95	
17	1	-17.2	-11.1	-0.5	0.3	-184	上赤塚
	2	-13.4	-10.1	-1.2	-8.4	-328	
	④	-13.4	-10.1	-1.2	-8.4	-328	
18	1	-39.5	28.7	12.9	78.1	-55	緑 馬
	2	-19.2	-3.6	1.9	51.2	-153	
19	1	-26.4	14.2	21.0	51.0	-92	新 宿
	2	-28.4	-0.6	24.4	39.2	-106	
	④	-0.6	-2.7	-4.7	-21.7	-29	
20	1	-17.6	2.1	5.0	4.1	-68	世 田 谷
	2	-17.6	2.1	5.0	4.1	-68	
21	1	-33.6	-10.0	-5.4	-38.0	-130	目 黒
	②	-14.4	-12.5	-4.4	-23.0	4	
	④	-14.4	-12.5	-4.4	-23.0	4	
22	1	-1.6	-0.8	3.2	-5.8	-13	千代田
	2	-25.6	11.4	24.5	49.4	-94	
23	1	-24.9	37.2	-4.6	179.1	-50	東久留米
	2	-24.6	18.0	1.4	130.8	-129	
	3	-25.1	-1.8	3.0	16.4	-377	
	④	-0.1	0.0	-0.4	-1.4	35	
24	1	-0.8	-6.7	9.5	-4.3	9	調 布
	2	-28.2	14.7	25.5	309.6	-19	
	3	-15.1	26.2	45.5	411.0	-61	
	④	-19.8	3.2	22.3	285.3	-128	
25	1	-25.3	-5.4	-10.0	32.8	-29	清 瀬
	2	-42.3	17.6	0.9	81.6	-142	
	3	-18.1	-1.5	4.1	16.4	-373	
	④	-0.2	-1.1	-2.7	-8.6	35	
26	1	-20.0	8.4	7.6	14.5	16	東大和
	2	-54.8	3.7	9.2	177.0	-68	
	3	-21.1	-5.2	5.5	248.9	-151	
	④	0.4	-2.2	1.2	-1.2	86	
27	1	-34.6	31.8	19.5	99.3	-27	立 川
	2	-19.0	0.8	17.0	98.6	-180	
	③	-0.2	-1.3	-5.0	-11.8	68	
28	1	-2.7	-1.7	15.1	42.1	-12	小金井
	2	-19.6	-6.7	1.7	111.2	-80	
	3	-21.1	-3.6	8.5	115.4	-188	
29	1	-27.9	5.4	22.4	135.7	-78	小金井南
	2	-25.3	3.2	16.9	136.9	-142	
	③	-4.2	-4.6	-2.9	-9.4	39	
30	1	-18.3	-0.8	8.8	6.9	25	武蔵村山
	2	-23.7	21.0	21.8	65.9	-50	
	④	-30.3	11.9	30.9	—	-140	
31	1	0.9	-4.5	1.5	-2.6	36	府 中
	2	-20.1	30.7	20.4	124.7	-84	
	④	-17.9	-6.6	3.0	—	-172	
32	1	-5.2	5.3	-2.5	-30.9	21	東村山
	2	-26.8	5.6	5.6	68.1	-118	
	④	-0.8	-24.1	7.7	71.7	-210	
33	1	-26.3	-28.3	-7.4	3.2	9	八王子
	2	-18.3	-12.3	-9.3	-0.3	-66	
	③	0.2	0.3	0.9	4.1	99	
34	1	-22.5	4.5	18.0	38.4	49	瑞 穂
	2	-24.8	30.0	11.2	52.1	-27	
	④	-1.9	-1.2	-0.5	-1.8	40	
35	1	-17.9	-1.6	14.5	101.9	-174	稲 城
	2	-22.2	34.8	43.0	72.7	-57	
	④	-23.2	8.4	26.4	223.9	-177	
36	1	-0.4	-1.5	-1.7	-14.1	41	三 鷹
	2	-11.0	16.7	13.7	35.6	16	
	④	-11.0	16.7	13.7	35.6	16	
37	1	-16.0	-2.4	15.3	87.4	-91	昭 島
	2	-16.0	-2.4	15.3	87.4	-91	
	④	0.5	4.3	6.8	20.9	106	

注) 観測井No. ○: 不圧地下水、水位差—: 欠測、(a)~(d): cm、(e): m

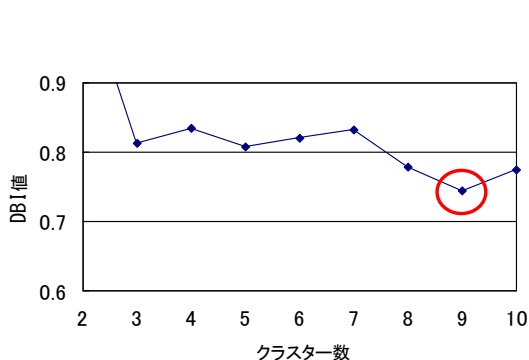


図-3 クラスター数と DBI 値の関係

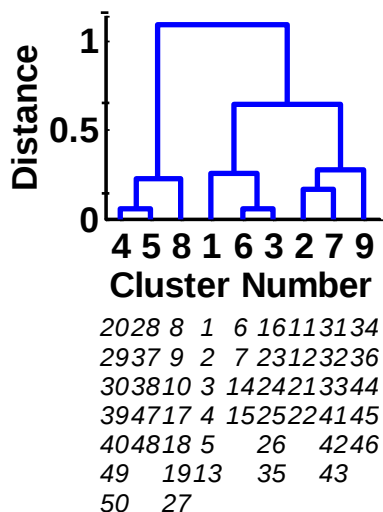


図-4 各クラスターの階層と属するノード

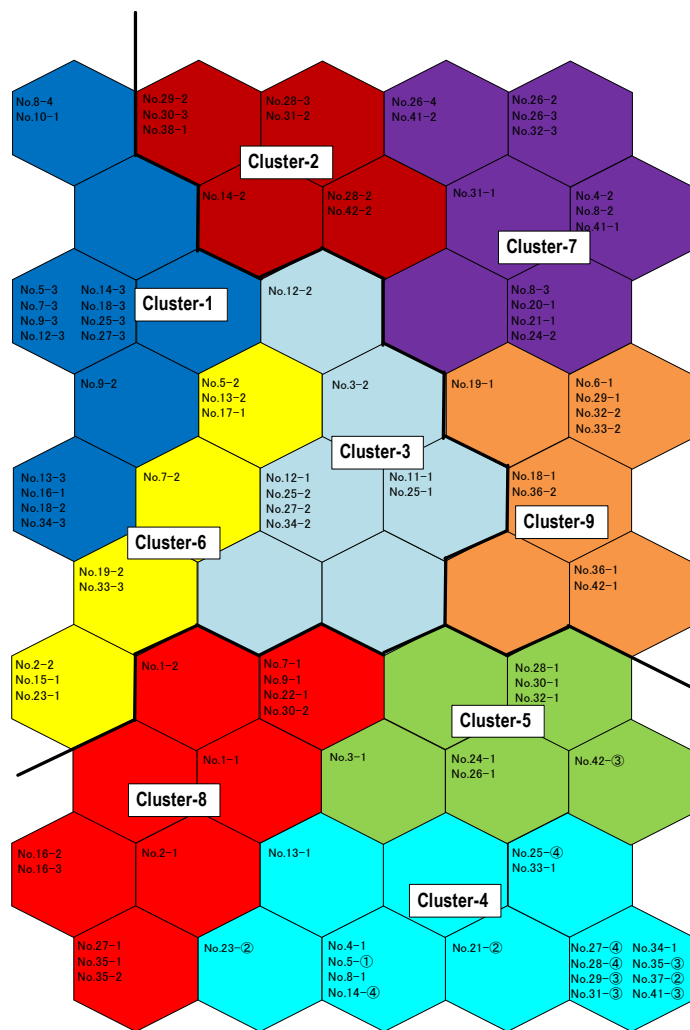


図-5 各クラスターの分類結果図

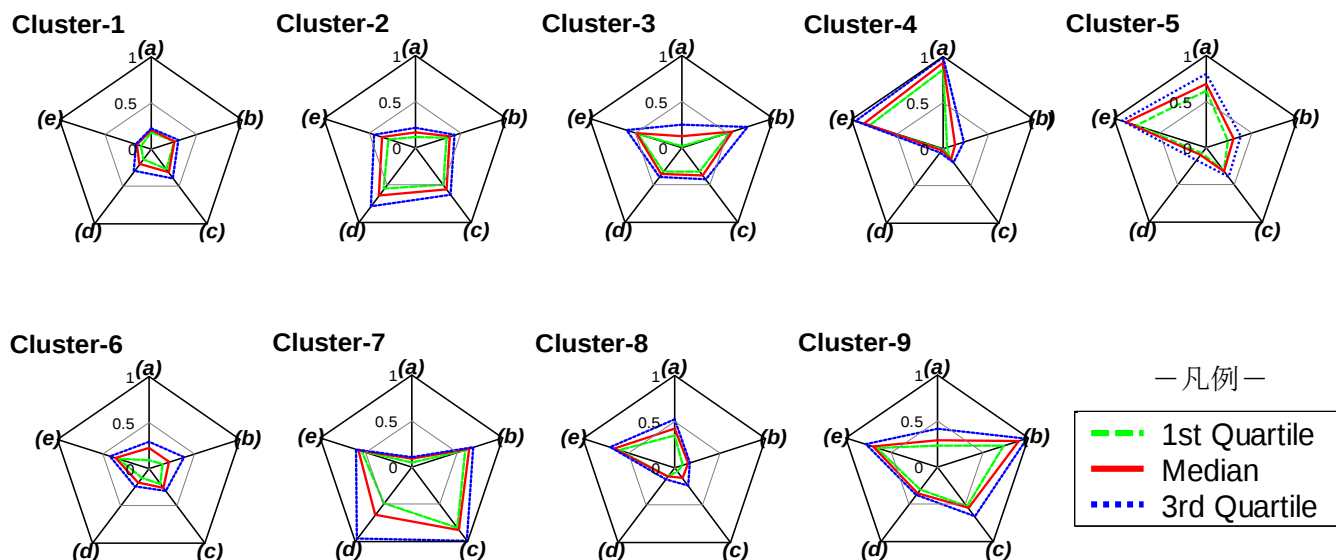


図-6 各クラスター水位差と井戸深度の特性

ナ深度は中間的である。クラスター8は、地震後に若干の水位低下が見られるが、翌日さらに水位低下し、31日まで同程度の水位を維持する。ストレナ深度は中間的である。クラスター9は、地震後に比較的大きな水位低下を生じ、翌日までに大きく水位上昇、14日までに元の水位まで低下し、そして31日までにさらに若干の水位低下を生じた。ストレナ深度比較的小さい。

表-3 目視による被圧・不圧地下水の変動パターン

被圧		水位変動傾向	井数	不圧	水位変動傾向	井数
C-D	C-D I	水位低下後に反転上昇	42	U-D	水位低下	1
	C-DC	水位低下し、そのまま継続	20	U-I	水位上昇	2
	C-DR	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			

表-4 SOM による被圧・不圧地下水の変動パターン

[illegible]

本研究では、東京都内 40 観測局の被圧観測 85 井、不圧観測 13 井における 5 項目の観測記録を用い、パターン分類手法の一種である SOM を適用して東日本大地震に伴う東京の地下水位変動パターン特性の分類・抽出を行った。その結果、地下水位の変動特性は 9 パターンに分類された。また、SOM の結果と目視による分類結果との比較より、被圧地下水においては目視による分類とほぼ同様の傾向が確認でき、目視より地下水位の変動特性を客観的に表現できることを示した。さらに、ストレートナ深度を入力データに加えることにより、詳細な地下水位変動傾向を把握できることを明らかにした。一方で、不圧地下水の約 90% が 1 つのクラスターに分類された。これは、SOM での学習過程において水位変動量の小さい不圧地下水が、水位変動量の大きい被圧地下水の影響を受けたと考えられる。今回の結果より、SOM を用いたパターン分析は、地下水位の解析においても適用できることを明らかにした。

参考文献

- 1) 高橋泰之, 河村明, 石原成幸, 天口英雄, 中川直子: 東北地方太平洋沖地震直後の東京における不圧・被圧地下水位の変化, 第39回土木学会関東支部, 2012
- 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) Kohonen T.: "The Self-organizing Map", Proc. of the IEEE, pp. 1464-1480, 1990.
- 4) Scott, K. E. and Oyana, T. J., : An improved algorithm for segregating large geospatial data, *9th AGILE Conference on Geographic Information Science*, pp.177-185, 2006.
- 5) Leloup, J. A., Lachkar, Z., Boulanger, J. P. and Thiria, S., : Detecting decadal changes in ENSO using neural networks, *Climate Dynamics*, Vol.28, pp.147-162, 2007
- 6) Jin, Y. H., Kawamura, A., Park, S. C., Nakagawa, N., Amaguchi, H. and Olsson, J., : Spatiotemporal classification of environmental monitoring data in the Yeongsan River basin, Korea, using self-organizing maps, *Journal of Environmental Monitoring*, No.13, pp.2886-2894, 2011.