

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

EVALUATION OF CHARACTERISTICS OF GROUNDWATER LEVEL FLUCTUATION IN TOKYO BY THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE USING SELF-ORGANIZING MAPS

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

- ¹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)
²正会員 工博 首都大学東京 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
³正会員 博(工) 首都大学東京 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
⁴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)
⁵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 40 sites in Tokyo Metropolis. Large fluctuations of unconfined and confined groundwater levels were observed after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake at 98 observation wells in Tokyo. In this study, the characteristics of groundwater level fluctuation caused by the earthquake were evaluated using Self-Organizing Maps (SOM). The SOM has been suggested as a nonlinear classification method. As for the results, the SOM analysis succeeded in visualizing the characteristics of groundwater level fluctuation. Eight fluctuation patterns were identified for the characteristics of unconfined and confined groundwater level fluctuation. In addition, by comparing the results of the SOM with the visual inspection of fluctuation time series, it is shown that the SOM is successfully and objectively almost the same as the fluctuation patterns after the earthquake.

Key Words : *the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake, groundwater level fluctuation, Tokyo, SOM (Self-Organizing Maps)*

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(Mw)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)により首都圏では、震度5強の揺れが発生した。また、同15時15分頃に発生した震度5弱(Mw7.4)の余震のほか、数多くの余震・余効変動等に伴って液状化を含む様々な現象が発生し、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、地盤沈下や液状化対策、また広く水資源等の把握の観点から非常に重要である。さらに、地震に伴う急激な地下水位変動を評価することは、水循環に与える影響を予測するうえからも有効であり、将来にわたり貴重な知見となると考える。

北島らは、産業技術総合研究所活断層・地震研究セン

ターにより観測された地下水と東日本大地震との関連性について、東海・近畿・四国地方を対象地域とした地震後1日間の地下水位・地下水圧・自噴量の変化について報告している¹⁾。このほか、東日本大地震後には、日本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報告されているが²⁾³⁾、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。

一方、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、大別すると地下水そのものの調査⁴⁾、地盤沈下等との関係を対象にした調査⁵⁾、地震前兆予知などを前提とした地下水変動を対象⁶⁾としたものが多い。しかしながら、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。唯一、著者らは土木技術支援・人材育成センター(以下「センター」と記す)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、目視による時系列変動のみに基づいた地下水位の変動パターン特性を主観的に抽出し、その変動パターンを被圧地下水位7パターン、不圧地下水位3パターンに分類した⁷⁾。

しかし、東日本大地震に伴う地下水位の観測記録は、非常に希な観測データであり、比較・検証が難しい状況にある。このような過去にない複雑な挙動を生じる地下水位の変動特性の分析には、主観的なパターン分類によることなく、より客観的な解析手法を用いて地下水位の変動パターンの特徴を集約することが重要である。ここで、パターン分類手法の一つである自己組織化マップ (Self-Organizing Maps, 以下「SOM」と記す) は、他のパターン分類手法に比して複雑なデータの相互関連性を二次元平面に視覚化して表現できるなど、データ特性の発見等に優れた点を有している。このため、これまでに水文・気象分野への適用例^{8)~10)}が数多く見受けられる。しかしながら、地下水位変動特性への適用例は、管見では承知していない。

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2011年3月の1箇月間における1時間単位の観測データを用い、地震時の被圧・不圧地下水位の変動特性をSOMにより客観的に評価した。また、その結果を前述の目視による時系列変動に基づく主観的な変動パターン特性と比較検討を行うことで、より詳細な変動の特徴や分類特性等を明らかにした。

2. 使用したデータ及びSOMの適用

(1) 入力ベクトルに用いたデータ

図-1には、東京都内（島嶼・山地を除く）に設置されている地下水位観測局とその局番を示した。また表-1には、図-1に対応する各観測局の観測井の詳細を示した。2011年3月には東京電力による計画停電が行われており、一部の観測データに欠測が生じた。このため、入力データには、欠測の少ない40観測局98井（被圧：85，不圧：13）における次の(a)から(e)の5項目を設定した。

- (a) 地震前後の水位差(cm) (H23/3/11 16:00 – 同 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)

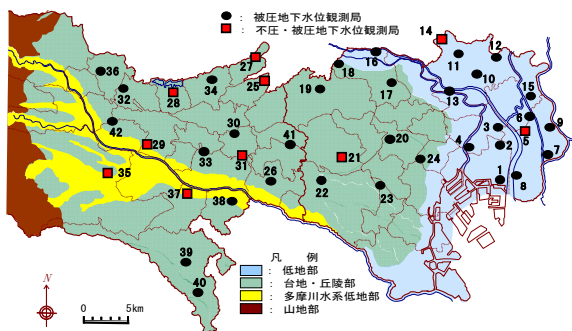


図-1 地下水位観測局の配置状況

表-1 観測井の配置並びに使用データ

局番	観測井No	水位差 (指標化して入力)				ストレーン深度標高 (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	香焼
	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
	1	-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	
	1	14.8	-13.5	-5.4	-7.0	-40	
8	2	-83.3	7.5	30.1	7.1	-77	小島
	3	-38.2	5.4	27.0	10.2	-134	
	4	-35.3	-6.0	19.6	11.7	-229	
	1	-28.1	4.0	3.5	16.5	-58	
9	2	-39.1	-1.8	-1.0	4.4	-258	篠崎
	3	-24.4	-3.2	0.4	6.9	-313	
	1	-30.4	0.2	11.8	35.4	-234	
10	1	-19.6	40.3	0.0	102.1	-112	新足立
12	1	-32.4	7.3	7.6	43.4	-103	神明南
	2	-36.6	17.5	11.8	69.2	-176	
	3	-35.8	0.8	4.4	8.6	-329	
13	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	
14	2	-32.7	15.9	5.3	144.7	-181	舎人
	3	-24.1	10.8	5.2	12.2	-299	
	④	23.4	-22.0	-12.3	-14.2	-3	
	1	-32.3	-0.6	-2.9	5.2	-122	
16	1	-27.9	-24.5	-5.4	-14.2	-265	戸田橋
	2	-24.0	12.2	-13.7	64.4	-110	
	3	-23.0	4.7	-6.5	55.4	-56	
17	1	-68.3	24.7	0.8	7.2	-170	板橋
18	1	-23.5	43.3	10.7	20.0	-95	上赤塚
	2	-17.2	-11.1	-0.5	0.3	-184	
	3	-13.4	-10.1	-1.2	-8.4	-328	
19	1	-39.5	28.7	12.9	78.1	-55	練馬
	2	-19.2	-3.6	1.9	51.2	-153	
20	1	-26.4	14.2	21.0	51.0	-92	新宿
21	1	-28.4	-0.6	24.4	39.2	-106	杉並
	②	-0.6	-2.7	-4.7	-21.7	29	
22	1	-17.6	2.1	5.0	4.1	-68	世田谷
23	1	-33.6	-10.0	-5.4	-38.0	-130	目黒
	②	-14.4	-12.5	-4.4	-23.0	4	
24	1	-1.6	-0.8	3.2	-5.8	-13	千代田
	2	-25.6	11.4	24.5	49.4	-94	
	1	-24.9	37.2	-4.6	179.1	-50	
	2	-24.6	18.0	1.4	130.8	-129	
25	3	-25.1	-1.8	3.0	16.4	-377	東久留米
	④	-0.1	0.0	-0.4	-1.4	35	
	1	-0.8	-6.7	9.5	-4.3	9	
	2	-28.2	14.7	25.5	309.6	-19	
26	3	-15.1	26.2	45.5	411.0	-61	調布
	4	-19.8	3.2	22.3	285.3	-128	
	1	-25.3	-5.4	-10.0	32.8	-29	
	2	-42.3	17.6	0.9	81.6	-142	
27	3	-18.1	-1.5	4.1	16.4	-373	清瀬
	④	-0.2	-1.1	-2.7	-8.6	35	
	1	-20.0	8.4	7.6	14.5	16	
	2	-54.8	3.7	9.2	177.0	-68	
28	3	-21.1	-5.2	5.5	248.9	-151	東大和
	④	0.4	-2.2	1.2	-1.2	86	
	1	-34.6	31.8	19.5	99.3	-27	
	2	-19.0	0.8	17.0	98.6	-180	
29	③	-0.2	-1.3	-5.0	-11.8	68	立川
	1	-2.7	-1.7	15.1	42.1	-12	
	3	-21.1	-3.6	8.5	115.4	-188	
31	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	
32	1	-18.3	-0.8	8.8	6.9	25	武蔵村山
	2	-23.7	21.0	21.8	65.9	-50	
	3	-30.3	11.9	30.9	---	-140	
33	1	0.9	-4.5	1.5	-2.6	36	府中
	2	-20.1	30.7	20.4	124.7	-84	
	3	-17.9	-6.6	3.0	---	-172	
34	1	-5.2	5.3	-2.5	-30.9	21	東村山
	2	-26.8	5.6	5.6	68.1	-118	
	3	-0.8	-24.1	7.7	71.7	-210	
35	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	
36	1	-22.5	4.5	18.0	38.4	49	瑞穂
	2	-24.8	30.0	11.2	52.1	-27	
37	②	-1.9	-1.2	-0.5	-1.8	40	新多摩
38	1	-17.9	-1.6	14.5	101.9	-174	稲城
41	1	-22.2	34.8	43.0	72.7	-57	三鷹
	2	-23.2	8.4	26.4	223.9	-177	
	③	-0.4	-1.5	-1.7	-14.1	41	
42	1	-11.0	16.7	13.7	35.6	16	昭島
	2	-16.0	-2.4	15.3	87.4	-91	
	③	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

- (c) 地震1日後と同2日後（14日）にかけての水位差(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日の長期的な水位差(cm)
(H23/3/31の日平均値 - H23/3/14の日平均値)
- (e) 各観測井のストレーナ下端深度での標高値(T.P.+m)
ストレーナ深度を加味しているのは、SOMにおいて被圧地下水位と不圧地下水位が精度良く分類されることを念頭に置いているためである。

SOMによる入力ベクトルの選定は、後述するように入力データ間のユークリッド距離により組織化される学習法のため、分類結果がデータの事前処理に非常に敏感であることを考慮する必要がある¹¹⁾。そこで、SOMの入力ベクトルとしては、表-1に示す生データから、少数かつ微少な水位上昇と長期的な変動傾向を抽出できるよう、入力データの指標化を行った。当該指標化に際しては、東日本大地震に伴う東京での地殻変動が最大でも4cm程度¹²⁾であることを考慮し、前記(a)から(d)に示す地下水位変動量が±5cm未満を0，±5cm以上をそれぞれ+1，-1とした。またストレーナ深度は、東京湾中等潮位による実数値（単位：m）で入力した。

(2) SOMの適用

SOMは、入力したデータの関連性を類似度としてマップ上に描画できるニューラルネットワーク手法の一種である。この機能により、一般的に捉えにくい多次元のデータを二次元マップ上に分類し、客観的かつ可視的に表現することができる。

図-2には、今回適用したSOMマップのノード配列を示す。SOMアルゴリズムでは、入力層から取り出した入力ベクトル（分類したいデータ）を基に学習することで、入力ベクトルのパターンを学習する。各ノード上に配列されたパターンは、参照ベクトルという多次元ベクトルで表現されており、各ノードには一つの参照ベクトルが対応している。参照ベクトルは、SOMマップ上で

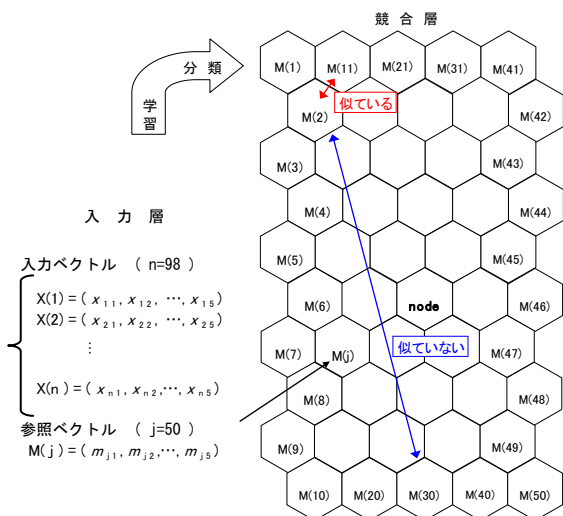


図-2 SOMマップ (10×5ノードの配列)

の距離が互いに近いものほど似ており、距離が遠いものほど互いに異なるという性質がある。

次に、マップ上の参照ベクトルのクラスター化を行う。本研究においては、クラスターの最適数はK-means法を適用した最小DBI¹³⁾ (Davies-Bouldin Index) 値により決定し、クラスター分類にはウォード法¹⁴⁾を用いた。SOMの全ノード数 m は、データ数 n に基づいて経験式 $m=5\sqrt{n}$ により求められる⁹⁾。ここでは、 $n=98$ であることから全ノード数を50とし、図-2に示すように縦10×横5のノード構成とした。

3. 地下水位変動パターンの抽出

図-3は、SOMを適用して得られた前述の(a)から(e)の5項目に対する参照ベクトルの結果を示している。項目(a)から(d)は、得られた参照ベクトルを[0,1]に基準化して表し、(e)は得られた参照ベクトルのストレーナ深度を表している。

次いで、図-3に示された特徴をより容易に把握するため、50のノードを前述の手法によりクラスター分類した。図-4は、クラスター数に対するDBI値の変化を示したものであり、クラスター分類の最小値は8クラスターと決定される。図-5は、8つのクラスターの階層とこれに対応するノード番号を樹形図として示した。また図-6では各ノードに分類された観測井数をノード中央に示すとともに、分類された8つのクラスターの配置状況を示した。図-7には、各クラスターの各観測井の特性が容易に把握できるよう、表-1に示す観測井番号を記した。さらに図-8には、8つの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1四分位値、中央値、第3四分位値をプロットしたものである。

4. 各クラスターにおける水位変動パターン特性

(1) SOMによる地下水位変動のパターン特性分類

図-3と図-6より、分布パターンの特徴を以下に示す。なお、今回の解析では基準化したデータを用いて分類していることから、分布パターンの詳細には着目せず、その大要から特徴を記すものとする。

初めに、図-3の各分布の全般的な特徴としては、上から左側4段目と右側5段目を境として上下に、また中央から左右で変動特性が大きく異なることが読みとれる。同図の上段は地震直後に地下水位の低下傾向を示し、時間の経過とともに上昇傾向が大きくなり、ストレーナ深度が深いものから比較的浅い観測井までを含んでいる。

左側の中・下段では、3月中旬以降に地下水位の変動量が大きくなる傾向を有し、ストレーナ深度が大きいものが分類されている。右側の中・下段には、不圧地下水観測井を中心とするストレーナ深度が浅く、地震直後に地下水位の上昇傾向を有するものが分類されている。

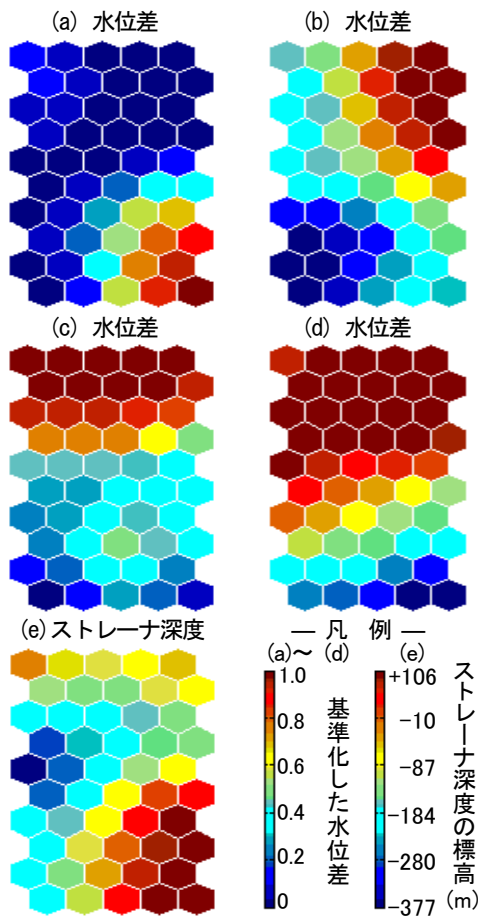


図-3 水位差(a)～(d)と深度(e)の分布パターン

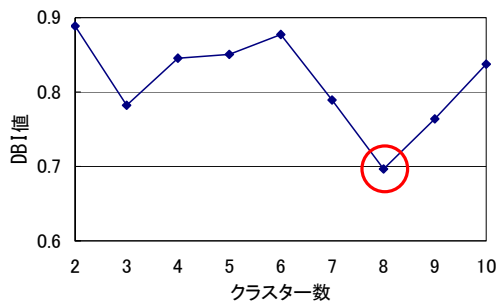


図-4 DBI値とクラスター数の関係

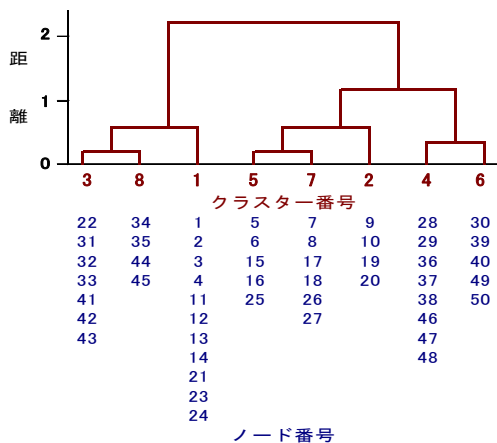


図-5 各クラスターの階層と属するノード (樹形図)

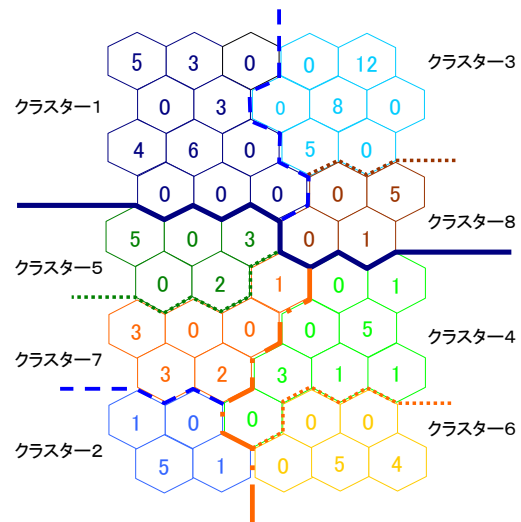


図-6 クラスター配置とノード分類結果 (数値: 観測井数)

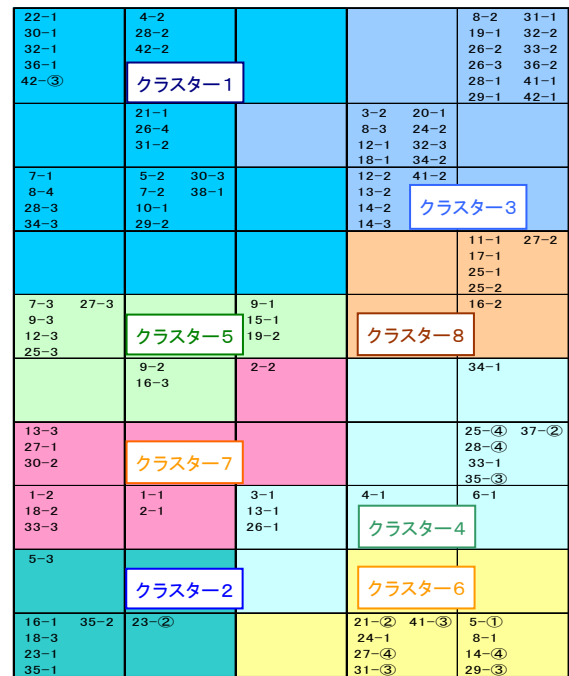


図-7 各クラスターのノードに分類された観測井(番号)

次いで、図-7及び図-8に示すクラスター毎の主な変動特性を記す。クラスター1は、地震直後に大きく水位低下を生じ、翌日までにほぼ地震前の水位まで回復、14日までに水位上昇して31日に至る高い水位を継続、ストレーナ深度が中間的なパターンである。クラスター2は地震直後に大きく水位低下、翌日まで低下傾向を継続、14日には地震前水位を若干下回る程度に回復して31日まで継続し、ストレーナ深度は中間的である。クラスター3は、11日16時に全クラスター中で最大の水位低下、翌日に地震前の水位を上回るまでに回復後、31日まで継続する。ストレーナ深度はやや浅い。クラスター4は、地震直後に若干の水位上昇もしくは大きく変動せず、その後も大きな変動がない状況を継続し、ストレーナ深度はかなり浅い。クラスター5は地震直後に大きく水位低下、

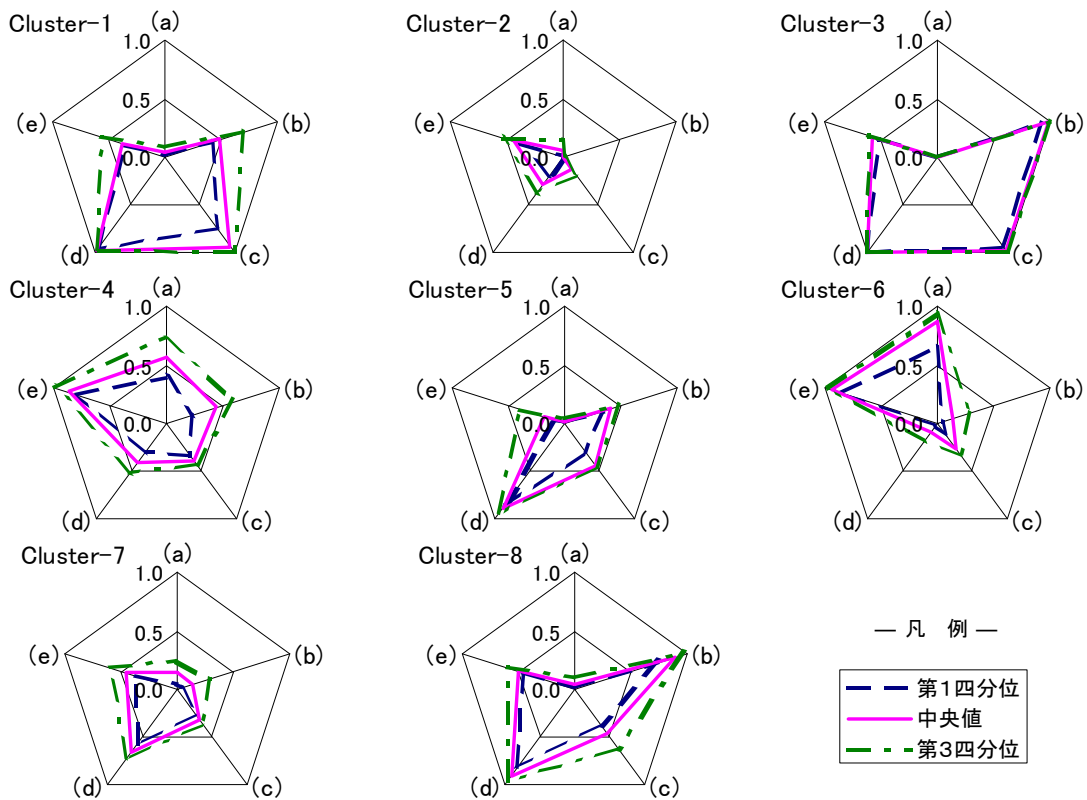


図-8 クラスタ毎の水位差(a)~(d)と井戸深度(e)の分布特性

翌日までにほぼ地震前の水位に回復し、14日まで継続した後31日まで上昇、ストレーナ深度は若干深い。クラスター6は、地震直後に水位上昇もしくは大きな変動がなく、翌日までに地震前より水位低下、14日までに地震前と同程度に水位回復し、31日までに再び低下する。ストレーナ深度は非常に浅い。クラスター7は地震直後に比較的大きな水位低下を生じ、翌日も同水位を維持、14日に地震前の水位まで上昇し31日まで水位上昇を継続し、ストレーナ深度は平均的である。クラスター8は、地震直後に大きく水位低下した後反転上昇、14日に地震前の水位レベルまで低下し、31日まで再び上昇する。ストレーナ深度は若干浅いパターンであることが判る。

(2) SOMと目視による時系列変動傾向との比較検討

当該地下水位の変動傾向に関して著者らは既に、目視による時系列変動のみに基づいて地下水位の変動特性を主観的に抽出・分類（以下「主観的な分類」と記す）した結果、大きく被圧地下水を7パターン、不圧地下水を3パターンに分類できることを明らかにした⁷⁾。以下では、先の主観的な分類結果と今回のSOMによる分類結果について比較検討を試みる。

表-2には、先の主観的な分類に基づく地下水位の変動パターンに関し、その記号と共に特徴・観測井数を示した。また表-3は、今回のSOMによる8つのクラスターに属する表-2の変動パターンを示したものである。先の主観的な分類では、被圧・不圧地下水を別々に分類した結果、合計10パターンとなっているが、SOMでは被圧・

不圧地下水を区別せず、8パターンに分類している。

SOMと先の主観的な分類の結果に相違が生じた主な要因は、先の分類結果が地震直後の水位変動傾向と31日の水位に着目してパターン分類したのに対し、SOMでは基準化した個々のデータを用い、ストレーナ深度を加味して解析した点にある。その結果、SOMでは主観的な分類で地震直後に水位低下した被圧地下水の3分類(C-D)が7クラスターに、不圧地下水の上昇傾向(U-I)を2クラスターに、大きな変動なし(U-N・C-N)が3クラスターに配置され、全体で8つのクラスターに分類されている。

ここで、表-3より各クラスターには、対応する表-2の変動パターンが2から5パターン含まれており、先の主観的な分類傾向と異なるようにも見受けられる。しかしながら、各クラスターにおける主要な2つの変動パターンが占める割合は、73%から100%と高い。例えばクラスター4・6には、大きな変動なしと水位上昇傾向を示す全不圧観測井の80%が属している。地震直後に水位上昇した変動パターン(C-I・U-I)は、その後に水位の低下傾向を有しており、当該変動パターンが大きな変動なし(U-N・C-N)と同一クラスターに配置されたことは、全般的な変動傾向やストレーナ深度を考慮すれば妥当と考えられる。さらに、クラスター1に分類されたC-DRは一時的な水位低下後の復元傾向を示すため、低下後に上昇傾向を示すC-DIとは、31日の水位が類似傾向にあると見なすことができる。このように、SOMによる結果と先の分類結果は、相対的に一致した傾向にあると判断できる。

以上のとおり、表-3及び図-8から判る全般的な特徴

表-2 目視による被圧・不圧地下水位の変動パターン⁷⁾

	被圧		水位変動傾向		井数	不圧	水位変動傾向		井数
	C-D	C-N	C-D	C-N			U-D	U-N	
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-3 SOM解析結果に属する目視による変動パターン

SOMによる分類 分類・観測井数	目視による時系列変動に基づく主観的な分類(表-2) 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									
	C-D-I	C-DC	C-DR	C-N	U-D	U-I	U-N	C-I-I	C-I-C	C-I-D
クラスター1	21									
クラスター3	25									
クラスター8	6									
クラスター5	10									
クラスター7	9									
クラスター2	7									
クラスター4	11									
クラスター6	9									

として、SOMによる結果は主観的な分類結果とほぼ一致していると判断できる。また、地下水位変動の特性把握において、SOMを用いた客観的かつ判り易いパターン分類が可能なことを明らかにした。

5. むすび

本論文は、東京都内(島嶼・山地を除く)に存する被圧・不圧地下水位観測42局のうち、計画停電等による欠測の少ない40局98観測井(被圧:85, 不圧:13)における5項目の観測記録を用い、パターン分類の一種であるSOMを適用して、東日本大地震に伴う東京における地下水位の変動パターン特性の抽出と分類を試みたものである。その結果、地下水位の変動特性として8パターンに分類できることを示した。SOMの結果と主観的な分類との比較からは、SOMの成果として地下水位の変動傾向の特徴をより客観的かつ判り易く明示できること、全般的な分類傾向としてもほぼ一致していること等が明らかとなった。また、SOMの適用に際しては、データ総数に占める割合は少ないが、地震時の特徴的な地下水位の上昇傾向を解析結果に適切に反映できるかが一つの課題であった。SOMの解析結果としては、大きな変動なしと同じクラスターにパターン分類されているが、他の主要な変動傾向である水位低下とは完全に隔離されたクラスターにパターン分類されたこと、地震直後に水位上昇した観測井についても、その後水位低下する傾向が強いことから、大きな変動なしの分類に含めることは妥当と考えられる。その際、入力データの指標化等による前処理を適切に行うことが、その特徴を明確に示すために重要な要素であることを明らかにできた。これらの結果からは、地下水分野においてもSOMを用いたパターン解析の有意性が認められたと考える。

今後は、より多次元かつ複雑な挙動を伴う長期間に亘る地下水位の変動特性のパターン分析において、SOMの活用を図ることにより、東京における地下水の

変動特性の解明を進めるとともに、その変動要因との関連性についても精査を進めて参りたい。

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, pp.309-318, 2011.
- 2) 産業技術総合研究所: 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果(2010年11月~2011年5月)(43), 地震予知連絡学会報, Vol.86, pp.458-464, 2011.
- 3) 板寺一洋, 菊川城司, 代田寧: 東北地方太平洋沖地震の影響による箱根温泉の変化, 神奈川県温泉地学研究所報告, Vol.43, pp.39-43, 2011.
- 4) 国分邦紀, 守田優: 地下水位変動とその影響要因との相関について, 東京都土木技術研究所年報, 昭和59年, pp.251-260, 1984.
- 5) 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
- 6) 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.
- 7) 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.595-600, 2012.
- 8) 横田いずみ, 井料隆太, 井芹慶彦, 広城吉成, 神野健二: 自己組織化マップを用いた福岡市民の水に関するアンケート調査結果分析, 土木学会水工学論文集, Vol.53, pp.553-558, 2009.
- 9) Hentati, A., Kawamura, A., Amaguchi, H. and Iseri, Y.: Evaluation of sedimentation vulnerability at small hillside reservoirs in the semi-arid region of Tunisia using the Self-Organizing Map, *Geomorphology*, No.122, pp.56-64, 2010.
- 10) 西山浩司, 遠藤伸一, 神野健二, 河村明: 自己組織化マップを利用した梅雨期特有の気象場の分類, 土木学会水工学論文集, Vol.49, pp.241-246, 2005.
- 11) 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.
- 12) 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(その1・2)(区部), 一級水準測量成果表, 2012.
- 13) 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.
- 14) 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