

自己組織化マップを用いた東北地方太平洋沖 地震発生前後での東京の年間地下水位変動特性

CHARACTERISTICS OF ANNUAL GROUNDWATER LEVEL FLUCTUATION IN TOKYO BEFORE AND AFTER THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE USING SELF-ORGANIZING MAP

石原成幸¹・河村明²・天口英雄³・高崎忠勝⁴・高橋泰之⁵・川合将文⁶
Shigeyuki ISHIHARA, Akira KAWAMURA, Hideo AMAGUCHI,
Tadakatsu TAKASAKI, Yasuyuki TAKAHASHI 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 (〒136-0075 東京都江東区新砂1-9-15)

²正会員 工博 首都大学東京大学院 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) 首都大学東京大学院 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) 東京都建設局 河川部 (〒163-8001 東京都新宿区西新宿2-8-1)

⁵学生会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

⁶東京都土木技術支援・人材育成センター (〒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. Large fluctuations of groundwater levels were observed after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake at 102 observation wells in Tokyo. In this study, the fluctuation patterns of monthly groundwater levels caused by the earthquake were investigated using Self-Organizing Map (SOM). The SOM application classified the groundwater level fluctuation pattern into four clusters showing exclusively distinguishable patterns. Consequently, the results show that the monthly fluctuation pattern of more than half observation wells changed after the earthquake. Additionally, an increase can be seen in the confined groundwater level in Musashino Plateau following a lower amount of groundwater being pumped due to the earthquake. Furthermore, all unconfined observation wells, and most of the observation wells at depths above 70m and those south of Tama River showed no significant changes following the earthquake.

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

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)では、首都圏においても震度5強の揺れを観測した。また本震のほか、同15時15分頃に発生した震度5弱(Mw7.4)の余震を初めとする数多くの余効変動等では、東京都内において液状化を含む様々な現象が生じたほか、地下水位にも特異な変動が観測された。

地下水と東日本大地震との関連性については、産業技術総合研究所活断層・地震研究センターによる東海・近畿などを対象地域とした地震後1日間の地下水位・地下水圧・自噴量の変化や温泉水の湯量・温度の上昇等に関

する報告がある¹⁾²⁾が、地震前後の長期的な変動に関する解析は行われていない。また、東京における東日本大地震に伴う地下水位変動に関する調査・研究としては、唯一、著者らが土木技術支援・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観測データを用い、2011年3月の1箇月間の短期的な地下水位変動パターンを抽出し、そのパターン分類特性を明らかにした³⁾⁴⁾。

現在、東京都内では法令に基づく揚水規制等の効果により、地下水位が上昇または横ばい傾向にあり、地盤沈下が沈静化していることから地下構造物の浮力・漏水対策や水資源として、地下水活用が注目を集めている。特に、多摩地域を中心とする都内全域では、上水道や工場等の水源として日量約50万m³の地下水が揚水されるな

ど、重要な水資源となっている⁹⁾。

また近年は、災害対策としての防災井戸や病院における非常用水源としての活用など、地下水利用の社会的要
望が強くなっている¹⁰⁾が、これらの背景には防災を名
目とした日常的な地下水利用による経費節減等の目的が
あり、恒常的かつ多量の地下水揚水に伴う地下水位の低
下や地盤沈下の再燃等も懸念されている⁹⁾。このため、
地下水の水位低下を生じさせずに水資源としての活用を
図るには、長期的な地下水位の変動を正確に捉えること
が非常に重要となってくる。加えて、東日本大地震に伴
う特徴的な地下水位変動とその要因の相関関係を把握す
ることは、水循環体系に与える影響や長期的な水位変動
傾向を予測するうえからも有効であり、将来にわたり貴
重な知見になると考える。

そこで本論文では、センターの地下水位観測システム
による東日本大地震前の2010年と地震が発生した2011
年の2箇年における各月の地下水位データを用い、地震
発生に伴う地下水位の年間変動パターンの変化を検出し、
その変化と要因を評価した。具体的には、観測システム
における102井の2箇年の年間変動パターンについて、自
己組織化マップ (Self-Organizing Map, 以下「SOM」)
と記す)を用いて客観的に分類し、地下水位の年変動パ
ターン特性や地域的な変動特性を明らかにした。また、
その解析結果を地下水揚水量調査報告等に基づき検討す
ることにより、地下水位とその変動要因の相関関係につ
いて明らかにした。なお、SOM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
への適用例が数多く見受けられる⁸⁾⁹⁾が、地下水位変動
特性への適用に関しては、管見で承知していない。

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と表-1には、東京都内(島嶼・山地を除く)に設
置されているセンターの地下水位観測局の位置・局名と
観測局番号等を示した。また表-1には、今回解析に使用
する2010年と2011年における各観測井の水位データのう

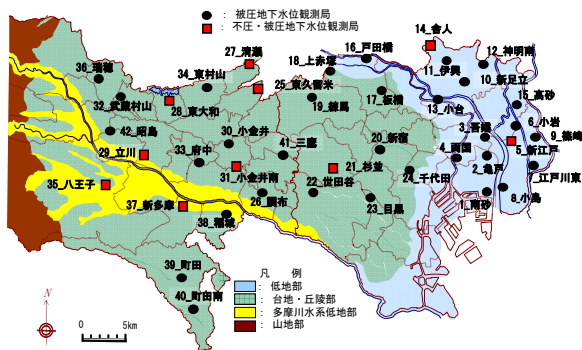


図-1 地下水位観測局の配置状況

表-1 観測井の詳細及び使用データ (抜粋)

局 番	井 戸 No.	2010 (上段)・2011年 (下段) の各月平均水位 - 2010年の年平均水位 (単位: m)												局 名
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
1	1	-0.11	-0.10	-0.07	-0.01	0.07	0.11	0.13	0.06	0.02	-0.03	-0.03	0.02	南砂町
	2	-0.11	-0.11	-0.07	-0.02	0.07	0.11	0.13	0.06	0.02	-0.03	-0.03	0.02	
2	1	-0.12	-0.10	-0.05	-0.17	-0.06	0.09	0.15	0.18	0.22	0.22	0.25	0.30	亀戸
	2	0.00	0.00	-0.21	-0.24	-0.10	0.00	0.09	0.11	0.20	0.20	0.22	0.26	
3	1	-0.14	-0.11	-0.07	0.00	0.08	0.12	0.13	0.06	0.01	0.00	-0.04	-0.06	吉 堀
	2	-0.08	-0.11	-0.05	0.02	0.11	0.12	0.11	0.02	-0.03	-0.06	-0.07	-0.01	
4	1	-0.10	-0.09	-0.04	0.02	0.13	0.14	0.13	0.03	-0.05	-0.09	-0.07	0.02	両 国
	2	-0.10	-0.18	-0.10	-0.03	0.06	0.14	0.17	0.05	-0.06	-0.05	-0.01	0.04	
5	①	-0.25	-0.13	0.09	0.10	0.11	0.04	-0.03	-0.19	0.02	0.13	0.04	0.05	新江戸川
	2	-0.20	-0.14	-0.08	-0.27	-0.03	0.06	0.27	-0.14	-0.02	-0.04	-0.10	-0.15	
	3	-0.03	0.01	0.08	0.14	0.24	0.22	0.15	-0.02	-0.19	-0.27	-0.20	-0.11	
40	1	0.72	0.84	0.95	1.12	1.10	0.34	-0.37	-1.36	-2.18	-1.32	-0.28	0.37	町田南
	2	0.03	0.06	0.06	0.04	0.02	-0.02	-0.03	-0.10	-0.08	-0.01	-0.02	0.00	
41	1	-0.08	-0.27	-0.29	0.12	0.01	-0.05	0.02	-0.14	-0.20	-0.03	0.32	0.65	三 鷹
	2	-0.25	-0.28	-0.19	-0.04	-0.11	-0.15	0.05	-0.26	-0.32	0.00	0.54	1.02	
	③	-0.20	-0.36	-0.40	-0.06	0.17	0.48	0.57	0.74	0.85	0.79	0.83	0.85	
42	1	-0.63	-0.69	-0.75	-0.70	-0.52	-0.19	0.05	0.18	0.28	0.71	1.07	1.23	昭 島
	2	1.30	1.05	1.27	1.78	1.90	2.21	2.28	2.55	2.90	3.11	3.41	3.81	
	③	-0.78	-0.65	-0.70	-0.69	-0.47	-0.11	0.02	0.15	0.28	0.67	1.02	1.25	
		1.40	1.38	1.65	2.58	2.90	3.09	3.08	3.26	3.50	3.87	4.59	5.46	
		-0.94	-1.25	-0.41	0.26	0.56	-0.08	0.64	-0.40	-1.19	1.05	0.76	0.00	
		-0.36	-0.07	-0.79	-0.72	-0.72	0.89	0.15	0.87	1.07	0.59	-0.29	-0.26	

注) 井戸No. O: 不在地下水 No. 14, 1: No. 37, 1: 長期欠測

ち、最初と末尾の観測局8局を例示した。なお、入力
データは長期欠測を除く42観測局102井(被圧: 89、不
圧: 13)において、以下の方法により求めた2箇年分の
月平均地下水位である。

ここで、東日本大地震直後には短時間での地下水位変
動が生じたことから、1時間間隔の水位データを用いた
変動解析結果を既に発表している³⁾⁴⁾。よって、本研究
では地震前後の長期的な水位変動パターンの解析を目的
とし、4月以降の地震に伴う時間間隔の水位変動の沈静
化が確認できたことから、月平均水位データを使用した。

- ① 2010年・2011年に観測された1時間毎の地下水位デ
ータから、月単位で24箇月分の月平均地下水位値($x_{i,m}$)
を算出する。ここに、各年における*i* 観測井の*m*月にお
ける地下水位の平均値 $x_{i,m}(i=1\sim 102; m=1\sim 12)$ である。
- ② 地震前2010年の12箇月分の月平均地下水位値($x_{i,m}$)か
ら、同年における年平均地下水位値(\bar{x}_i)を求める。
- ③ 2010年及び2011年の月平均地下水位値($x_{i,m}$)から、
2010年の年平均地下水位値(\bar{x}_i)を差し引いた値を入力
データ ($x_{i,m}-\bar{x}_i$) とした。入力データは204個である。

(2) SOMの適用

SOMは、入力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のノードマップを示す。
入力ベクトル $X(j)(j=1\sim 204)$ は、各観測井の各年1~12月
の12データ (12次元) より構成される。またSOMノ
ードマップの各ノードには、入力ベクトルと同じ次元を持
つ参照ベクトル $R(k)$ (k : ノード番号) が配置されており、
入力ベクトルの特徴 (パターン) はこの $R(k)$ によって表

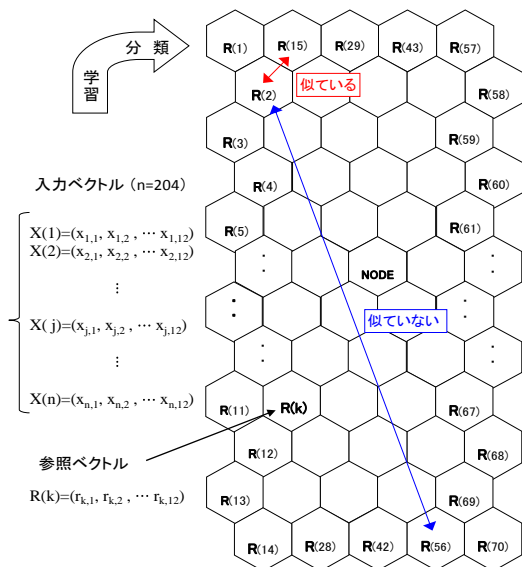


図-2 SOMノードマップ (14×5ノードの配列)

現される。入力ベクトルは全ノードに割り当てられた参照ベクトルと比較され、両者のユークリッド距離が最小となるノード（勝者ノード）が探索される。各ノードの参照ベクトルは勝者ノードとの距離で表される近傍関数に従い修正される。従って、勝者ノードに近い参照ベクトルほど修正量が大きくなるように競合学習が行われ、その修正の程度は学習回数とともに小さくなる。最終的に、複雑な入力ベクトルの特徴（パターン）はノードマップ上の参照ベクトルで表現され、ノードマップ上で距離が互いに近いノードほど類似した特徴を持ち、遠いノードほど互いに異なる性質を持つよう参照ベクトルの値が組織化される⁸⁾⁹⁾。

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DBI（Davies-Bouldin Index）値により決定し、クラスター分類にはウォード法を用いた¹⁰⁾。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。ここでは、 $n=204$ であることから全ノード数 M を70とし、データの共分散行列における固有値ベクトルの第1・2成分の比率から、SOMノードマップを図-2に示す縦14×横5のノード構成とした¹¹⁾。

3. SOMによる年間地下水変動パターンの抽出

図-3は入力データにSOMを適用し、月別の参照ベクトルを規準化して得られた出力結果を示している。次いで、図-3に示された特徴をより容易に把握するため、前述の手法により70のノードを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、最小DBI値より4クラスターと決定した。図-5は、4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。表-2には、各クラスターに配置された観測井数と主な観測井番号を示した。図-6では、マップ上のクラスターの配置状況とともに、各ノードに配置された全ての観測井の観測井番号を記した。さらに図-7は、4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第1四分位、中央値、第3四分位を-1~3の範囲でプロットしたものである。

4. 地震発生に伴う年間地下水位の変動パターン特性

(1) 各クラスターにおける地下水位の変動パターン特性

図-3より、月別の水位変動パターンの特徴を以下に示す。全般的な特徴としては、図-6のクラスター1に相

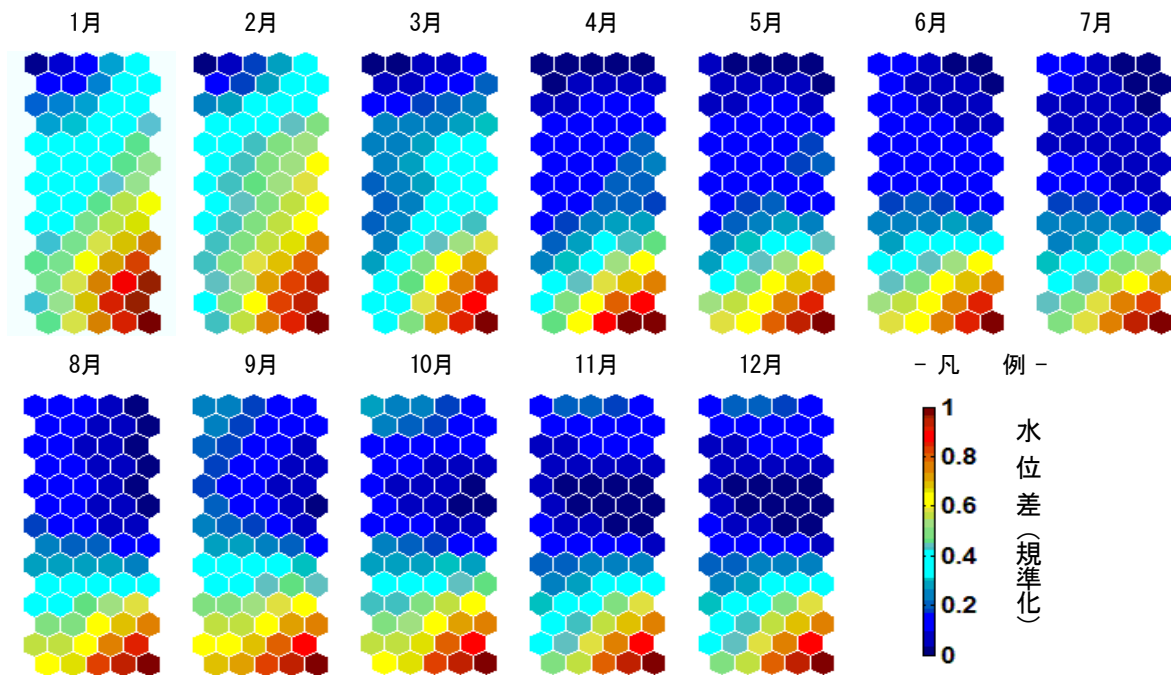


図-3 2010年の年平均水位に対する各月の月平均水位の変動パターン特性

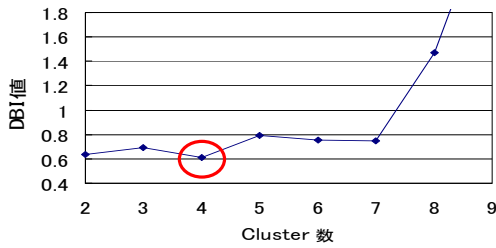


図-4 DBI値とクラスターの関係

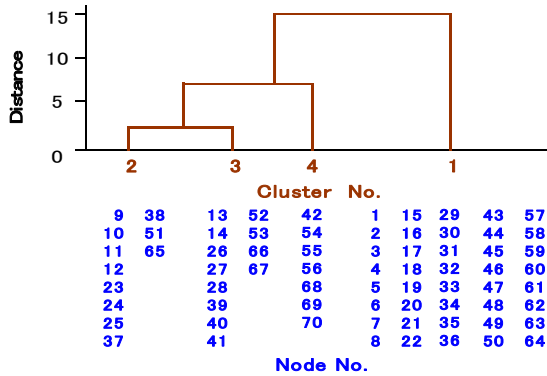


図-5 各クラスターの階層と属するノード (樹形図)

表-2 各クラスターに配置された観測井数

Cluster-No.	観測井数	配置された主な観測井
Cluster-1	89 + (13)	2010年: 全観測井(被圧+不圧)
	32 + (13)	2011年: 1-1, 7-1, 9-1, 16-1, 全不圧観測井
Cluster-2	24	3-2, 4-1・2, 6-1, 10-1, 14-3, 18-1・2・3, 20-1
Cluster-3	13	11-1, 19-2, 25-1・2・3, 28-2・3, 29-1, 36-2
Cluster-4	20	26-2・3・4, 30-1・2・3, 33-2・3, 41-1・2, 42-1・2

※C-1 (13): 不圧観測井, Cluster-2~4 : 全て2011年の観測井である

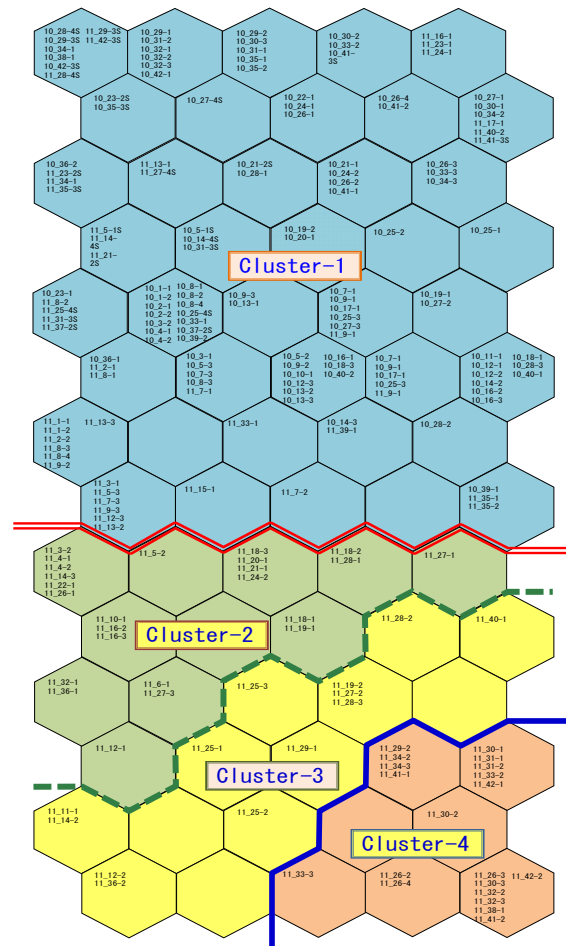


図-6 クラスターの配置とノード毎の観測井(番号)

凡例: 11_12-2; 2011年_No.12局-2井

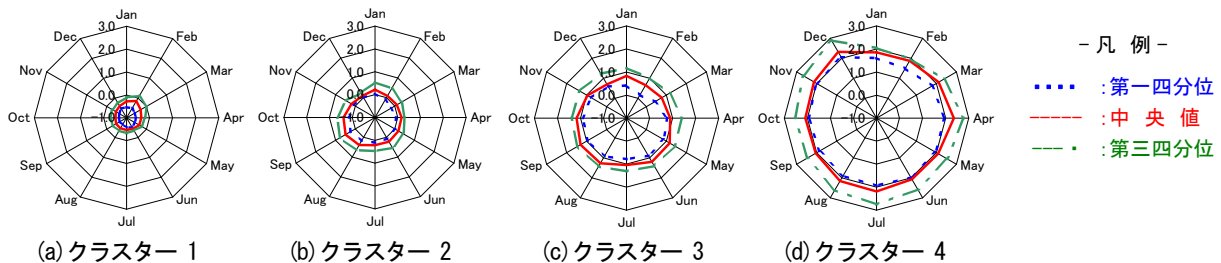


図-7 各クラスターにおける月別の水位変動の分布特性

当するノードに年間を通じて、各観測井の平均水位よりも水位が低いものが分類され、逆にクラスター4に相当するノードには水位が最も高い傾向のものが分類された。また、クラスター3に相当するノードにはクラスター2に相当するノードに比べ、若干高い水位傾向にある。

次に、図-1、図-6、図-7と表-2に基づき、クラスター毎の地下水位の年変動パターン特性の概要を記す。SOM解析の結果、地震発生前の2010年の年変動パターンは、被圧・不圧地下水、低地・台地部、区部・多摩部の観測井に拘わらず、102井全てがクラスター1に分類された。これは、地震前の年変動パターンと比較して、2011年の地震後の年変動パターンが大きく変化したことを示している。ただし、2011年の全ての不圧地下水観

測井及び2011年の区部低地並びに多摩川以南に位置する45観測井は地震前と同じクラスター1に分類された。これより、不圧観測井や沖積層を帯水層とする深度約70m以浅の観測井は、観測地域に拘わらず地下水位の年変動パターンに大きな変化を生じない傾向が明らかとなった。

一方、地震前に比べて2011年の地下水位の年変動パターンに変化のあった観測井は、次の3つのクラスターに分類された。地震後に最も大きな年変動パターンが生じたのは、主に多摩部の20観測井が分類されたクラスター4である。特徴的な変動パターンとしては4月と12月に著しい水位上昇を示し、その多くが区市境から多摩川沿いの市部に位置している。クラスター2は、2011年の年変動パターンとして、年間を通じて水位が緩い上昇傾

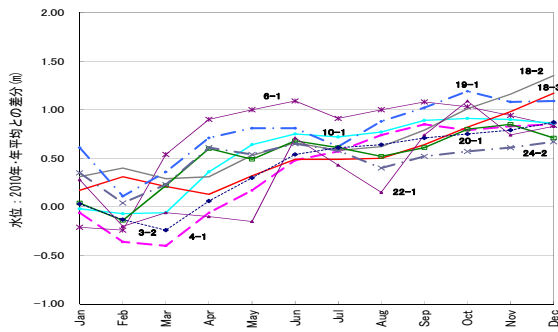


図-8 2011年・クラスター 2の主な観測井の水位変動

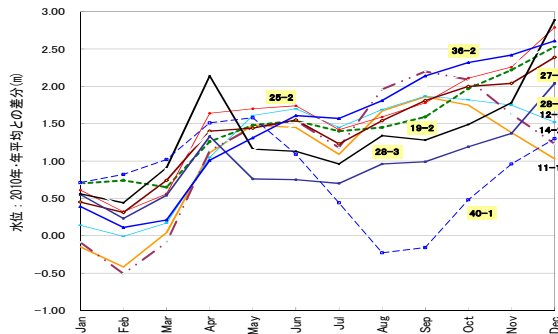


図-9 2011年・クラスター 3の主な観測井の水位変動

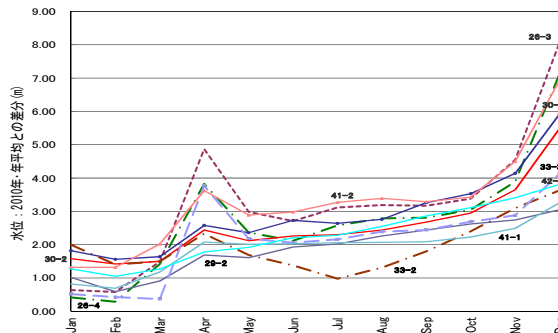


図-10 2011年・クラスター 4の主な観測井の水位変動

向にある24観測井が分類されている。クラスター3はクラスター2の約2倍の水位上昇傾向を示すとともに、4月に顕著な水位上昇パターンを示す13観測井が分類された。クラスター3の地域的な分布傾向としては、主に埼玉県寄り位置する多摩部の観測井などである。

そこで図-8から図-10には、クラスター2~4に配置された各観測井の2011年における地下水位の変動状況の詳細を示す。図-8より、クラスター2は徐々に水位が上昇する変動パターンを有するが、4月と12月の水位上昇は明確でない。一方、図-9のクラスター3では徐々に水位が上昇するなか、4月にピークを有している。また、12月に地下水位の上昇パターンが見られる多摩部の観測井に対し、区部の観測井は水位維持のパターン傾向を有していることが判る。図-10のクラスター4は、4月と12月に著しく水位上昇するパターンを有していることが明らかである。以上のことから、地震発生年である2011年4

月及び12月における水位上昇の変動パターンは、多摩部に特有の発生要因があると推定される。

(2) 地震発生後の地下水位の年間変動パターンと要因

東京における地下水位の変動パターンに顕著な影響を及ぼす要因としては、第一に都内における地下水揚水量の約9割を占める事業系の揚水施設に起因することが考えられる⁵⁾。このため著者らは、平成23年における地下水揚水量調査報告¹²⁾等のデータに基づき、水位変動パターンに関する考察を試みた。

初めに、図-11は当該報告書のデータから、月別の日当り揚水量について工場・指定作業場（病院・ガソリンスタンド等）と、上水道の水源施設を多摩部と区部に区分して作成したものである。当該図からは、東日本大地震発生年の年間揚水量が減少していることが明らかとなる。また地震後の3・4月と12月を中心に、多摩部の水道水源の揚水量が大きく減少していることが判る。

センターの地下水位観測システムでは3月11日の地震直後から、一部観測局において地震に伴う停電等で観測データの欠測が生じた。このため、著者らは3・4月の揚水量の減少理由として、地震に伴う停電の影響の可能性が高いと考え、水道事業者に事実関係を確認した。その結果、当該時期には地震に伴う停電・保守等により、一部の水道水源井の地下水揚水を停止したことが確認できた。また、当該報告書のデータから水道水源の揚水量が日当り1万m³を超える地域、計画停電等の影響を受けた

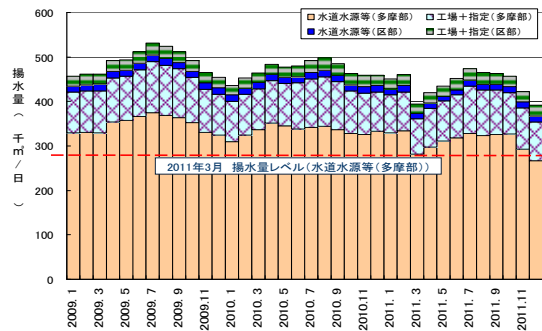


図-11 近年における月別・用途別の日揚水量

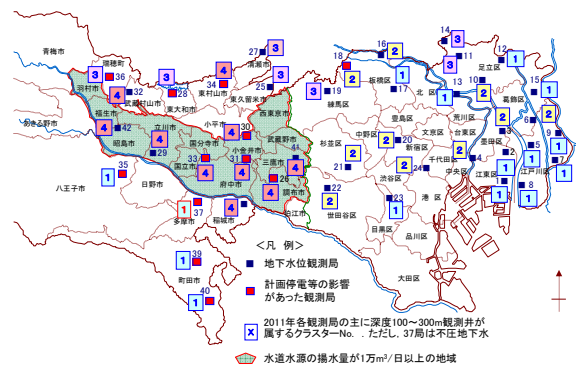


図-12 水道水源の揚水量が1万m³/日以上地域等並びに各観測局の主な観測井が属するクラスター分布

地下水位観測局、並びに各観測局の主に深さ100m～300mの井戸の属するクラスターを図化したのが図-12である。当該図と図-6及び図-7からは、3・4月に地下水位の上昇傾向が強い観測井と、揚水量の多い地域並びに停電等の影響を受けた観測局の所在とがほぼ一致することが確認できる。よって、3・4月に地下水位が上昇した主因は、地震に伴う水道水源井の揚水停止による影響と判断できる。また図-12によれば、SOM解析による主な観測井の属するクラスターの分布は、主に区部低地部と多摩川以南の地域にクラスター1、区部台地部にクラスター2、多摩部で停電等の影響を受けた観測局や都県境部にクラスター3、多摩部の水道水源の揚水量が日当り1万m³を超える地域にクラスター4が位置しており、分布傾向に地域的な特徴を有している。

次に、12月に生じた水位上昇については計画停電が実施されていないため、他の要因について調査を試みたところ、同時期にも水道水源井の揚水を停止していた¹³⁾。停止理由は、保守点検で水道水源井の送水を停止したところ、一般家庭の給水も同時に止まったことから誤接続が発覚し、他の誤接続の有無を確認する必要から、耐震補修等を兼ねて多摩部の水道水源井の揚水を停止したものである。よって、多摩部における12月の地下水位の上昇理由としては、地震に伴う水道水源井の保守・点検等に起因した揚水停止であると判断できる。

5. まとめ

本論文は、東京都内に存する地下水位観測42局のうち、長期欠測中の2観測井を除く102観測井（被圧：89、不圧：13）における2箇年の月別平均値を用い、SOM手法を適用して東日本大地震発生前後における東京での地下水位の年間変動パターン特性の分類とその要因の考察を試みたものである。SOMによる解析の結果、東日本大地震前の地下水位の年変動パターンと比較して、地震発生前における年変動パターンは以下の4つのクラスターに分類でき、地域的な分布傾向を有することが明らかとなった。地震発生前である2010年の年変動パターンは、被圧・不圧地下水、低地・台地部、区部・多摩部の別に拘わらず、全てクラスター1に分類された。これは、地震後の2011年の年変動パターンに対し、2010年の年変動パターンが無視できるほど小さいことを示している。一方、地震発生前である2011年の年変動パターンは、4分類できることがSOMにより示された。さらに、2011年における地下水位の変動パターンの特徴としては、全般に水位上昇傾向にあり、4月と12月に多摩地域で顕著な水位上昇が生じていた。その要因を精査したところ、地震による停電・保守等に伴う水道水源井の停止であることを明らかにした。

本研究では以上のとおり、SOM解析手法に基づき地

震発生前後における地下水位の年変動パターンを抽出し、その変動特性と地域的な分布特性を明らかにした。さらに、SOM解析結果と各種資料を関連付けて考察することにより、地下水位の変動パターンの主な要因を明らかにした。これは、地下水の水位変動量と揚水量の相関関係の一端が明確になったことを意味し、今後の地下水利用に際しての定量的な評価並びに長期的な変動パターン傾向の把握に資する重要なデータになると考える。

参考文献

- 1) 北川有一, 小泉尚嗣: 東北地方太平洋沖地震(M9.0)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, pp.309-318, 2011.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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不圧・被圧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.
- 5) 中嶋博, 金子紘士, 土田稔: 東京都における地盤沈下対策と地下水保全対策, 地下水学会誌, Vol.52, No.1, pp.35-47, 2010.
- 6) 植村哲士, 宇都正哲, 中川隆之, 向井肇: 総合的な水資源管理の必要性和鍵となる未使用淡水資源の活用, 知的資産創造, 2010年9月号, pp.6-19, 2010.
- 7) 守田優: 地下水は語る一見えない資源の危機, 岩波新書, pp.160-193, 2012.
- 8) 井芹慶彦, 水本真輝, 神野健二, 西山浩司: 自己組織化マップを用いた日本全国月降水量分布の変動特性解析, 水文・水資源学会誌, Vol.22, No.6, pp.466-478, 2009.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) Hilario, L. G. and Ivan, M. G.: Self-organizing map and clustering for wastewater treatment monitoring, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol.17, pp.215-225, 2004.
- 12) 東京都環境局: 平成23年 都内の地下水揚水の実態(地下水揚水量調査報告書) 平成25年3月, 2013.
- 13) 多摩水道改革推進本部: 平成23年10月21日 給水管の井戸導水管への誤接続について, 東京都水道局HP, 2011.

(2013. 9. 30受付)