

東京における長期地下水位変動解析

ANALYSIS OF LONG-TERM GROUNDWATER LEVEL FLUCTUATION IN TOKYO

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 (〒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)

In this study, the fluctuation patterns of the long-term groundwater levels at 87 confined and 13 unconfined water observation wells in 42 sites in Tokyo Metropolis were investigated using Self-Organizing Maps (SOM). The SOM application classified the yearly groundwater level fluctuation patterns into eight clusters showing clearly distinguishable patterns which were then divided into 3 large groups. Consequently, the results show that the fluctuation patterns of natural groundwater levels were classified into Group-1. Most of the wells in the Tama region which showed regular fluctuation patterns caused by pumping were classified into Group-3. However, the majority of the wells were moved to Group-2 due to the pumping of drinking water being suspended or decreased. These results show that the SOM analysis was successful in extracting the unique long-term fluctuations of groundwater levels.

Key Words : *groundwater level, long-term fluctuation, observation well, Tokyo, SOM (Self-Organizing Map)*

1. はじめに

1940(昭和15)年4月, 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)の前身である東京都土木技術研究所では, 防災並びに防潮対策を目的として, 都内における地盤沈下調査を東京帝国大学地震研究所から引き継いで実施することとなった。その後, センターでは今日に至るまで当該調査の一貫として, 東京における地盤沈下対策の基礎資料となる1級水準測量と地下水位観測を継続的に行っている。

これらの成果を用いた東京における地下水の調査・研究としては, 古くから様々な研究が行われているが, 大別すると水循環や地下水涵養の視点からの研究¹⁾, 地下水の水質²⁾や地形地質との関係³⁾についての研究, 地盤沈下等との関連に係る調査・研究⁴⁾などが多い。ここで, 地下水位そのものの変動に関する調査としては, 降水量との相関についての研究⁵⁾が多数を占める。またセンターでは地下水位観測成果を公表しているが, その変動特性の分析までは行っていない。著者らは既に, 東北地

方太平洋沖地震(以下「東日本大地震」と記す)に伴う2011年3月1箇月間の1時間単位の観測データなどを用い, 東京での特徴的な短期地下水位変動パターンの解析に成功した^{6)~8)}。しかし, 東京における長期的な地下水位の変動パターン解析について管見では承知していない。

現在, 東京都内の地下水位は, 法令に基づく揚水規制等の効果により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, 地下水の利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弱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⁾。さらに近年では, 地震時等の災害対策としての防災井戸や病院の非常用水源としての活用など, 地下水利用に対する社会的要望は強くなっている^{10), 11)}。その許可を受けた多くの防災井戸では, ストレーナの目詰まり防止等を理由に, 日常的に地下水利用がなされている。このため, 防災名目による地下水利用を広く認めた場合, 恒常的かつ多量の地下水揚水に伴う地下水位の低下とそれに起因する地盤沈下の

再燃等も懸念されている。

よって、地盤沈下を生じさせずに地下水活用を図るには、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、その特徴的な地下水位変動と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2003(平成13)年から2012(平成24)年の10箇年における各月の地下水位データを用い、42観測局(地点)100井における地下水位の年間変動パターンの長期的な変動を抽出し、その変動傾向について評価した。具体的には、観測システムにおいて得られた欠測等の少ない観測井の月平均地下水位10箇年データについて、複雑なデータの相互関連性を二次元平面に視覚化することでデータ特性の発見等に優れた自己組織化マップ(Self-Organizing Map, 以下「SOM」と記す)を用い、客観的にパターン分類のうえクラスタ化し、地下水位の年間変動パターンの長期的な変動特性や空間分布特性を明らかにした。また、その解析結果を関連資料により検討し、地下水位とその変動要因について言及した。

2. 使用したデータ及びSOMの適用

(1) 入力に用いたデータ

図-1には、東京都内(島嶼・山地を除く)に設置されているセンターの地下水位観測局の局名と局番号等を示した。また表-1には、今回解析に使用した2003年から2012年における各観測井の水位データのうち、9観測局20観測井の詳細を例示した。なお、入力データは長期欠測等を除く42観測局100井(被圧: 87, 不圧: 13)において、以下の方法により求めた10箇年分の月単位の地下水位である。

- ① 2003~2012年の10箇年に観測された1時間単位の観測データより、 i 観測井の n 年目 m 月における地下水位の月平均値 $x_{i,n,m}$ ($i=1\sim 100$; $n=1\sim 10$; $m=1\sim 12$)を求めた。
- ② 上記の120箇月分の月平均地下水位値($x_{i,n,m}$)から、各年における年平均の地下水位値($\bar{x}_{i,n}$)を求めた。
- ③ SOMへの入力データとしては、各観測井における各

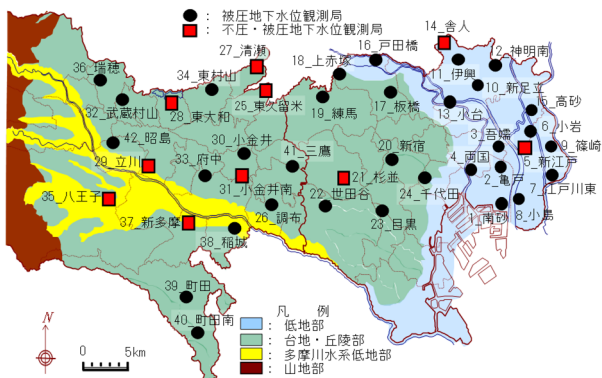


図-1 地下水位観測局の配置状況

表-1 観測井及び使用データ(抜粋)

局名	井戸No.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	年
南砂	3-1-1	-0.293	-0.282	-0.192	-0.132	-0.072	0.048	0.078	0.108	0.118	0.148	0.188	0.268	2003
	3-1-2	-0.290	-0.250	-0.190	-0.120	-0.070	0.040	0.070	0.110	0.110	0.140	0.180	0.270	
亀戸	3-2-1	-0.336	-0.276	-0.216	-0.126	-0.066	0.044	0.074	0.104	0.114	0.154	0.204	0.324	
	3-2-2	-0.356	-0.296	-0.226	-0.146	-0.066	0.044	0.094	0.114	0.124	0.174	0.234	0.304	
吾郷	3-3-1	-0.478	-0.467	-0.387	-0.258	-0.128	0.053	0.102	0.153	0.193	0.283	0.403	0.533	
	3-3-2	-0.527	-0.487	-0.407	-0.257	-0.127	0.033	0.093	0.163	0.213	0.313	0.433	0.533	
両国	3-4-1	-0.741	-0.681	-0.561	-0.361	-0.171	0.089	0.179	0.249	0.629	0.639	0.339	0.389	
	3-4-2	-0.728	-0.666	-0.516	-0.286	-0.056	0.204	0.264	0.304	0.324	0.334	0.364	0.454	
新江戸	3-5-1S	-0.134	-0.084	-0.044	0.006	-0.084	-0.014	0.016	0.146	0.006	0.016	0.126	0.046	
	3-5-2	-0.421	-0.361	-0.271	-0.091	0.079	0.149	0.099	0.079	0.049	0.089	0.239	0.359 (H15)	
町田	12-39-1	-0.488	-0.508	-0.438	-0.408	-0.228	0.182	0.762	0.752	0.192	-0.198	-0.288	0.672	2012
	12-39-2	-0.114	-0.084	-0.024	0.006	0.066	0.036	0.046	-0.024	-0.004	0.036	0.056	0.006	
町田南	12-40-1	0.977	1.087	1.187	1.187	1.217	0.407	-0.403	-1.383	-2.293	-1.503	-0.533	0.057	
	12-40-2	-0.339	-0.289	-0.189	-0.119	-0.019	0.011	0.091	0.061	0.111	0.191	0.231	0.261	
三鷹	12-41-1	0.296	0.186	0.126	-0.034	-0.044	-0.074	-0.064	-0.234	-0.284	-0.314	-0.034	0.476	
	12-41-2	2.766	1.816	0.606	0.066	-0.374	-0.554	-0.694	-0.994	-1.014	-1.074	-0.684	0.136	
昭島	12-42-1	0.198	-0.062	-0.102	-0.102	0.018	0.108	0.098	-0.052	-0.082	0.028	0.018	-0.072	
	12-42-2	0.532	0.202	0.182	0.022	0.012	0.022	0.052	-0.168	-0.318	-0.198	-0.108	-0.238	
新江戸	12-42-3S	-0.817	-0.657	0.693	0.063	0.953	0.333	0.333	-0.667	0.083	0.393	-0.277	-0.607 (H24)	
	3-5-2	-0.421	-0.361	-0.271	-0.091	0.079	0.149	0.099	0.079	0.049	0.089	0.239	0.359 (H15)	

※ 井戸No.: 観測年(西暦) 観測局No.-観測井No. 末尾の'S'は、不圧地下水観測井を示す。

年1~12月で構成する各月平均水位値から年平均水位値を差し引いた値 $\tilde{x}_{i,n,m}$ ($= x_{i,n,m} - \bar{x}_{i,n}$)で、100井・10箇年の合計1,000データである。

(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。このため、これまで水文・気象分野への適用が多く見受けられる^{12),13)}が、地下水位変動パターン特性への適用に関しては、著者らの成果^{7),8)}以外ほとんど見受けられない。

図-2には、今回適用したSOMのノードマップを示す。SOMの入力ベクトル $X(j)$ ($j=1\sim 1,000$)は、 $[\tilde{x}_{i,n,1}, \dots, \tilde{x}_{i,n,12}]$ とする12次元(各年1~12月)で構成され、そのデータ数は1,000(=100井×10年)である。SOMのノード数 M は、入力データ数 n に基づく経験式 $M=5\sqrt{n}$ から近似的に求められる。本研究において $n=1,000$ からノード数 M は158であり、これにデータの共分散行列における固有値ベクトルの第1・2成分の比率に基づき、ノードマップを縦14×横11の154ノードと決定した¹⁴⁾。

SOMノードマップの各ノードには、入力ベクトル $X(j)$ 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)はこの参照ベクトル $R(k)$ によって表現される。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^{12),13)}。

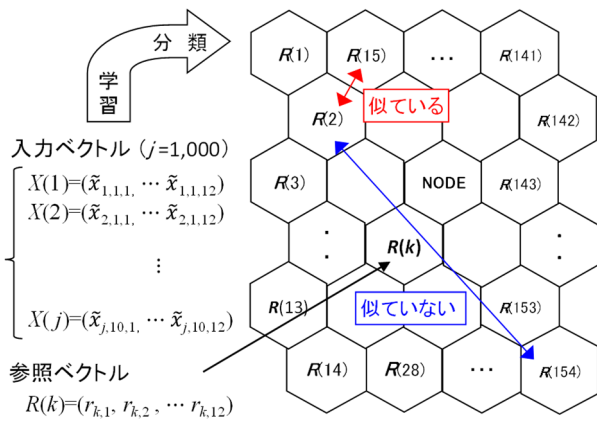


図-2 SOMノードマップ (14×11ノードの配列)

次に、SOMで得られた参照ベクトル（ノード）のクラスター化を行った。本研究ではクラスターの最適数をK-means法に基づく最小DBI (Davies-Bouldin Index) 値により決定し、クラスター分類はウォード法を用いた¹⁵⁾。

3. SOMによる地下水位変動パターンの結果

図-3ノードマップは、100井・10箇年の入力ベクトル $\tilde{x}_{i,n,m}$ にSOMを適用して得られた参照ベクトル $R(k)$ を0～1の値に規準化し、全体的な地下水の季節変動を捉えるために月別に示したものである。

図-3から、1～3月の水位変動傾向が類似しており、4～6月にかけて暫時変化する。その後、7～9月に類似傾向を示したのち、10月の変化を経て11・12月の分布傾向が類似していることが読み取れる。また、各月の分布傾向としては1～3月の特に右上端ノードの水位が顕著に高く、右下端ノードの水位が特に低い傾向を示している。4～6月にかけては、上側の特に右端のノードの水位が大きく低下し、左端のノード全体が高い水位傾向を示す。その後、7～9月には下半分のノードの水位が著しく上昇

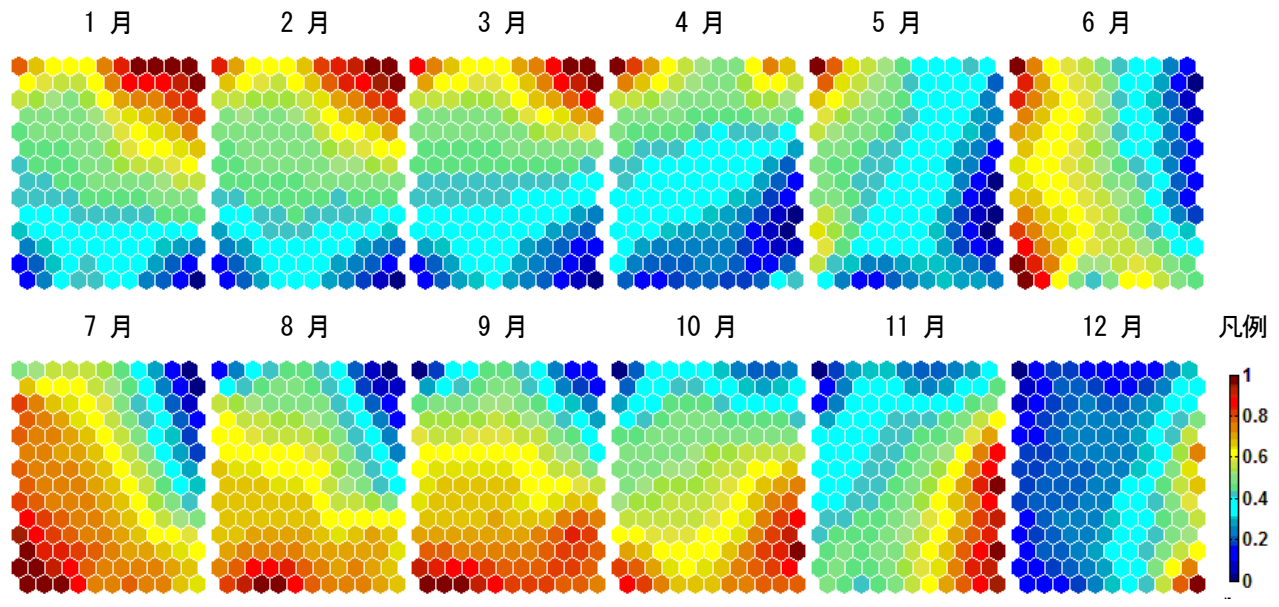


図-3 2003～2012年における100井の月別の水位変動分布パターン（規準化）

するのに対し、上半分のノードの水位が徐々に低下している。10月には中央部から下半分のノードの水位も低下し始め、11・12月には右下端ノードの水位が高くなる変移を示している。12月には、右下端ノードの水位だけが低いという特異性を示している。以上のとおり、変動パターンとしては前半で上側ノードの水位が高く、逆に後半において下側ノードの水位が上昇し、年末には限られた一部のノードを除き全体的に低下するという特徴を有する。

図-4には、前述の手法により最小DBI値が8となることから、154のノードを8つのクラスターに分類した結果とともに、各クラスターに分類されたノード番号を樹形図として示した。さらに図-5では図-4に示した各ノードに配置された観測井の詳細が判るように、SOMノードマップ上に各クラスターとノード並びに各ノードに配置された観測井の状況を示した。図中の表示は「観測年_観測局No._井戸No.」である。また表-2には、クラスター毎に分類されたデータ数の内訳を示した。

4. 10箇年における地下水位の変動パターン特性

(1) 各クラスターの地下水位の変動パターン特性

図-6には、8クラスター毎の特徴を明らかにするため、各クラスターに属する参照ベクトル $R(k)$ の第1四分位、中央値、第3四分位を -3～+3の範囲でプロットした。図-6に基づき、特徴のあるクラスターを以下に例示する。図(a)のクラスター1は1～6月に平均水位より若干高い傾向から、7～12月にかけて徐々に水位が低下する傾向にある。また図(c)・(e)のクラスター3・5についても、水位の変動パターンが類似している点が共通している。次に、図(f)のクラスター6は、8クラスター中で最も水位変動が少なく、年間を通じて平均水位を維持する傾向にある。図(b)・(d)のクラスター2・4についても、水位上昇幅は若干大きい類似した変動パターンを有している。

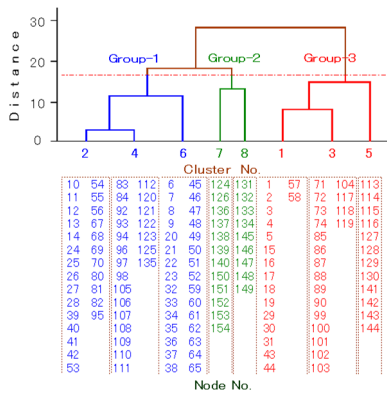
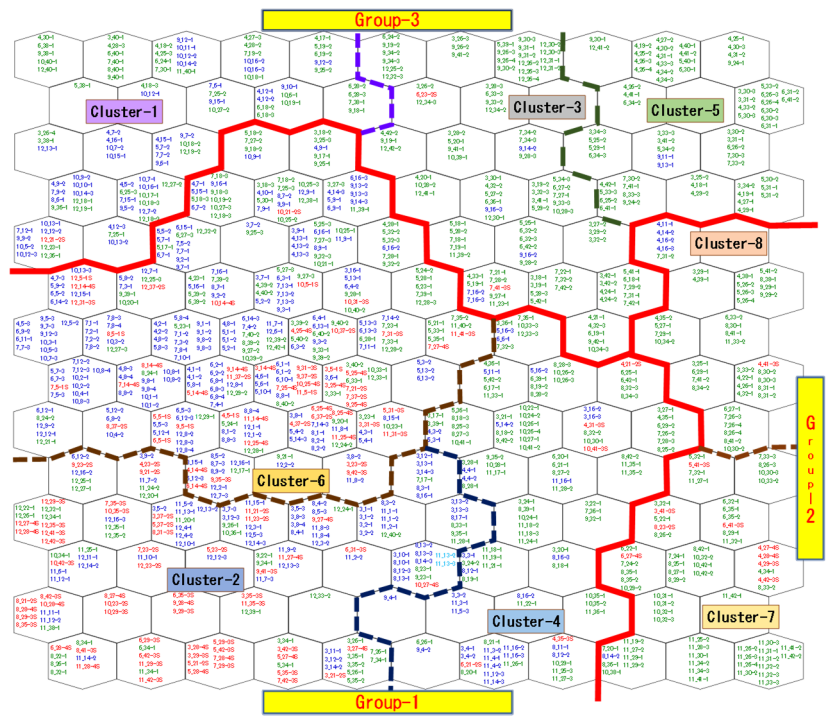


図-4 クラスタ階層とノード区分

表-2 クラスタ別のデータ数

クラスタNo.	データ数	小計	グループNo.
Cluster-1	106	258	Group-3
Cluster-3	93		
Cluster-5	59		
Cluster-2	162	624	Group-1
Cluster-4	116		
Cluster-6	346		
Cluster-7	81	118	Group-2
Cluster-8	37		
合計	1,000		



凡例 青：被圧地下水-低地部，緑：被圧地下水-台地部，赤：不圧地下水-低地部・台地部

図-5 クラスタ・ノード別の観測井の分布パターン

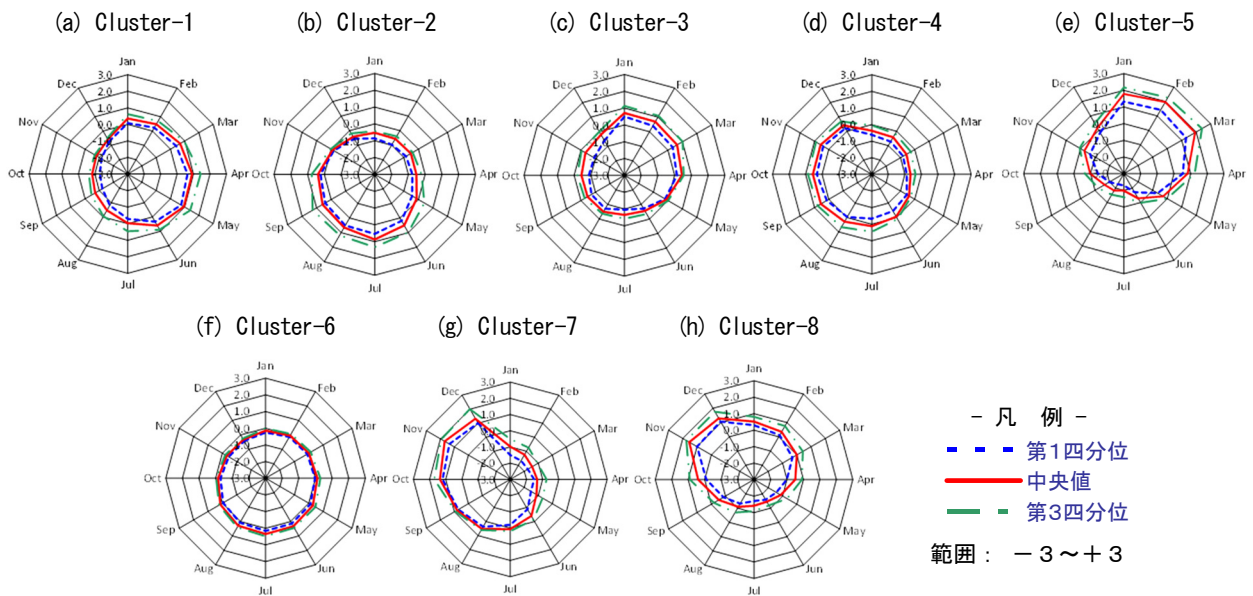


図-6 各クラスタにおける月別の水位変動の分布特性

図(g)のクラスタ7は、年前半に水位が平均より低下し、年後半にかけて水位が大きく上昇したのち、年末に若干低下する傾向にある。図(h)のクラスタ8についても比較的似た水位変動傾向にある。

上記の水位変動傾向に基づき、当該8クラスタを特徴別に3つのグループに区分することとし、クラスタ2・4・6をグループ1、同様にクラスタ7・8をグループ2、クラスタ1・3・5をグループ3と定めた。なお、図-4・5及び表-2にグループ毎の分類結果を併記する。

(2) 10箇年における水位変動のパターン分布とその要因

図-7には、大別した各グループに属する主な観測井の月平均の地下水位、東京管区気象台における月当たり降水量及び都内の水道水源と工場等の月当たり揚水量の変動状況を示す。同図と図-5より、以下にグループ毎の水位変動の特徴を記す。グループ1に都内全域の多くの観測井が分類され、水位変動が比較的少ないこと、グループ2に2010・2011年の多摩部を中心とする観測井が分類され、最も大きな水位変動を示すこと、グループ3が主に2003～2010年の台地部全域の観測井が分類され、グ

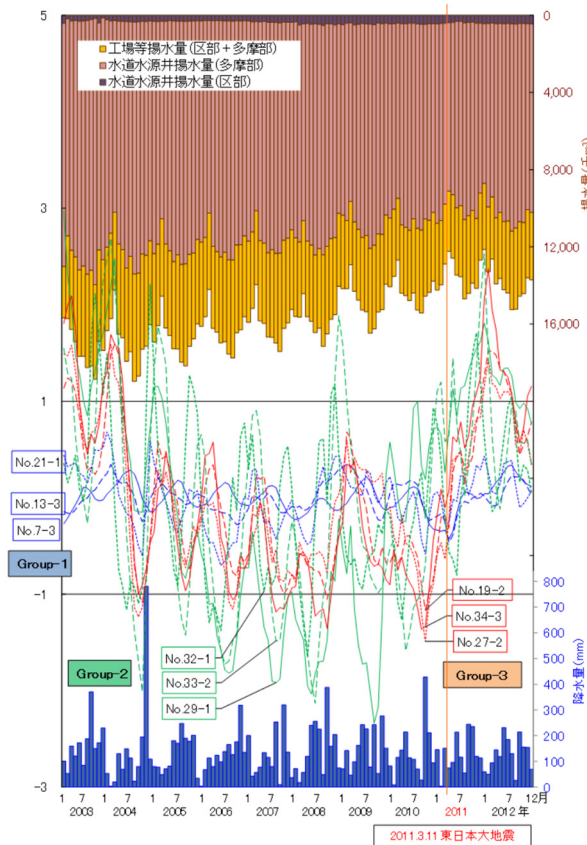


図-7 10箇年の月別の地下水位，降水量と揚水量の変動

グループ1・2の中間的な水位変動を示すという特徴が確認できる。

図-8には、10箇年間に於ける主な地下水位変動パターン時の時空間特性の変化を示した。同図(a)～(d)には、2003～2009年の標準的な変動傾向かつ調査初年である2003年並びに顕著な変化のあった2010～2012年の各観測局の被圧観測井(深度70～417m)について、地点毎に変動グループの分布状況を示した。また、水道水源井の揚水量が特に多い地域等を着色して示した¹⁶⁾。ここで、井戸深度を70mで区分したのは、70m未満の観測井が15井と少なく地域分布に偏りがあること、東京における主な帯水層の分布や地下水位に及ぼす体積歪変化の感度が鮮明となる深度等を考慮したことによる^{4),17)}。

図(a)には、2003年における地下水位変動パターンの分布傾向を示した。主な特徴としては区部低地部と台地部にグループ1、水道水源の日揚水量が1万m³を超える多摩部を中心にグループ3、その他の多摩部にグループ1が分布している。図(b)は2010年の分布傾向を示し、図(a)において変動パターンがグループ1であった地点のうち、千葉・埼玉県境付近のものがグループ3に変化した。また、この年は日揚水量1万m³超の地域から練馬区及び稲城市が外れ、東大和市が加わった。これらに伴い、当該地域の日揚水量が約47万m³から40万m³未満に大きく減少し¹⁶⁾、多摩川左岸を中心に揚水量の多い地域の変動パターンがグループ3からグループ2に変化している。図

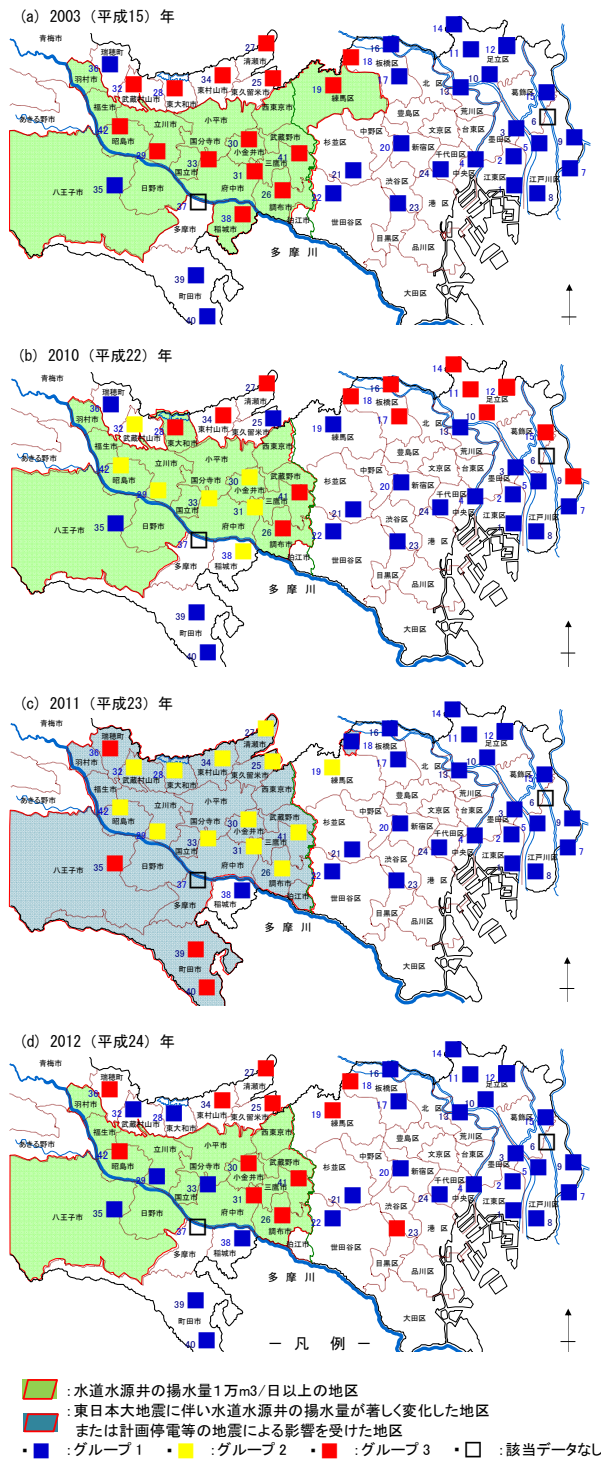


図-8 観測局別の地下水位変動グループの空間分布

(c)は東日本大地震が発生した2011年の変動パターンであり、ほぼ区部全域がグループ1となった。また多摩部では地震直後の計画停電や施設修繕等の影響により、水道水源などの揚水が一時停止し、前年までに比べて日揚水量が約3万m³減少した¹⁶⁾。このため、平常時に日揚水量の多い地域がグループ2となり、多摩川右岸などでグループ3に変化している。図(d)は地震後の2012年の水位変動パターンの傾向である。区部では一部を除き変化は見られないが、多摩部では揚水の再開に伴って日揚水量

が約2万m³増えた¹⁶⁾ことから、図(b)でグループ2に分類された地点を中心にグループ1に変化し、区市境と東京都・埼玉県境付近の地点がグループ3となった。

また、同図及び図-7からは従前に比べて2010年以降の揚水量が大きく減少しており、特に東日本大地震のあった2011年の多摩部が顕著であること、翌年には再び増加傾向にあることが読み取れる。図-8(d)のグループ2からグループ1に変化した地点付近では揚水量がほぼ2010年レベルであるのに対し、グループ3となった地点及び隣接地域では日揚水量約1万m³の増加¹⁶⁾に伴って変動したこと、同様に図-8(b)で都県境付近などの変動パターンがグループ1からグループ3に変化したのは、主に隣接県における揚水量の変動に起因していることを確認している⁴⁾。

以上のことから、区部での揚水規制に伴い自然状態に近い、または揚水量の変動の少ない地下水位の年間変動パターンがグループ1に相当し、平年の揚水量の多い地域において揚水量が大きく変動した場合の年間変動パターンをグループ2、また多量の揚水などの人為的な影響を受けている場合の年間変動パターンがグループ3に分類されたことが考察できる。なお、紙面の関係で詳細を記すことができなかつた不圧地下水観測井については、水道水源井による揚水の影響を直接受けておらず、降水量との相関が高いことから⁴⁾、地域に関わらずほぼグループ1の変動パターンを示すことを確認している。

5. むすび

本論文では、東京都内の地下水位観測42局100観測井における10箇年の月単位の水位値を用い、SOM解析により長期的な地下水位の年間変動パターンの特性分類とその要因の考察を試みた。SOM解析の結果、2003～2009年の地下水位の変動パターン特性と比較して、2010～2012年3箇年の変動パターン特性が大きく変化しており、かつ空間分布に明瞭な傾向のあることを明らかにした。さらに、都内における地下水位の年間変動パターンの長期的な変化の特徴は、人為的影響が少ない場合の地下水位の変動パターンをグループ1、水道水源による多量の揚水等の人為的影響を受けた場合がグループ3、人為的影響のある地域で揚水量が大きく変動した場合にグループ2として分類できた。これにより、地下水分野における12次元1,000データという多次元のデータ解析において、特徴的な変動パターンを二次元化して抽出可能なことが確認できた。

これは今後の地下水管理において、地盤沈下を生じさせない範囲で地下水活用を図る際に必要となる揚水量・水位関係の定量的な評価、地下水位の変動パターン予測などに資する有益な知見になると考える。

- 1) 国分邦紀, 土屋十囀: 東京の地下水と水循環について, 水文・水資源学会誌, Vol.16, No.3, pp.289-300, 2003.
- 2) 宮越昭暢, 林武司, 丸井敦尚, 佐倉保夫, 川島眞一, 川合将文: 地下温度からみた東京低地における地下水環境変化の評価, 応用地質, Vol.47, No.5, pp.269-279, 2006.
- 3) 細野義純: 東京付近における不圧地下水の環境地理学的研究, 奈良大学紀要, 第31号, pp.147-165, 2002.
- 4) 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.
- 5) 駒村正治, 増野途斗, 成岡市: 地下水位変動と地下水涵養機構, 水文・水資源学会誌, Vol.16, No.6, pp.631-639, 2003.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 石原成幸, 河村明, 天口英雄, 高崎忠勝, 高橋泰之, 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発生前後での東京の年間地下水位変動特性, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.70, No.4, pp.I_1129-I_1134, 2014.
- 9) 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.
- 10) 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と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.
- 11) 守田優: 地下水は語る—見えない資源の危機, 岩波新書, pp.160-193, 2012.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 東京都環境局: 平成15～平成24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17～26年3月, 2014.
- 17) 地質調査所: 1995年兵庫県南部地震直後の関西地区と徳島県における地下水位変化, 地震予知連絡会報, 58, pp.500-504, 1997.