

気候変動に伴う渇水時地下水管理方法の検討：千葉市を事例として

2012年3月 環境システム学専攻修士 47076892 天野昌樹

指導教員：徳永朋祥教授

キーワード：地下水管理, 気候変動, 渇水, 可能揚水量

1. 研究の目的と背景

日本の水需給は、将来の人口減少や経済成長の鈍化に伴い、概ねバランスする方向にあり、一方で、安全で良質な水供給に対する要請はますます強まる動向にある¹⁾。また、少雨傾向など気候変動に伴う渇水が従来以上に頻発かつ大規模化する傾向があり²⁾、水資源管理がこれまで以上に重要となってきた。大規模地震災害時には、水の確保が優先課題となるが、身近にある地下水は、重要な水源となりうるといわれている³⁾。しかしながら、これまで、渇水期には地下水が過剰に汲み上げられ、地盤沈下・水位低下などが引き起こされている¹⁾。また、高度経済成長時には、工業用地下水・天然ガスかん水等の揚水量が増加し、一方で、都市域の流入人口拡大に伴う表流水の水源開発・水道施設の整備等が十分に進まず、地下水を補完的に利用したために、年間数十センチに及ぶ地盤地下が発生し、社会的に問題となった¹⁾。

そこで本研究では、千葉市における従前の地下水の水位・地盤沈下・揚水量などの推移を捉え、地盤の特性から地下水低下に関する閾値を設定する。その上で、水資源の1つとして適切且つ持続可能な状態で地下水を管理する方法を検討していくことを目的とする。

2. 研究方法

本研究では、まず、対象地域である千葉市の降雨の経年変化を気象庁の降雨データから捉え、既往の渇水状況と比較する。また、地下水を中心とした水資源の動態を見直していく。あわせて、千葉市の20ほどの観測井の35年のデータから、水位変動・地盤沈下の経年変化の状況を捉え、渇水の影響を明らかにしていく。その上で、今後起こりうる渇水に備え、地下水管理の方法を検討することを目標とし、地盤沈下に関する検討を行う。テルツァギの有効応力の原理に基づき、地盤沈下が応力(間隙水圧)の変化から生じるものとし、経年の地盤変動量・水位変動から、体積圧縮係数を算出し、その妥当性を検討していく。また、地盤沈下を弾性変形と

非弾性変形に分け、弾性変形時に地盤の変動が千葉市の目標とする年変動2cm以内に収まる領域を許容値として設定し、可能低下水位を推計していく。非弾性変形時には、圧密降伏応力から圧密降伏時の水位を推定する。上記で算定した水位を閾値として、これまでの揚水量のデータから可能揚水量を推計する。最終的には可能揚水量が渇水・震災などの水危機にどの程度有効な量になるかを検討する。

3. 研究対象地域の概要

千葉市は、千葉県の北西部に位置する県庁所在地である。人口は約96万人、市域面積は272.08km²⁴⁾で、西部の臨海部は埋立とともに製鉄所・火力発電所・化学などの工場が進出し、京葉工業地帯を構成している。臨海部に隣接する沖積低地部は、都市部として商業地域・官公庁・住宅地が立地する市街地となっている。都市域の東～南側周辺部は台地となり農業を中心とする地域になっている。

沖積低地は、粘土・砂・礫などから構成される沖積層であり、洪積台地及び沖積層下部は、東京湾方向に傾斜し、粘土・砂・礫層などから構成される下総層群が分布している⁵⁾。台地は、下総層上位面と下総層下位面に分けられる。下総層上位面は、千葉市を広く覆い、土気付近で高度80～90mと最も高く、下総層下位面と接する市街地付近で高度20m前後となっている。表層は関東ローム層が覆っている。下総層下位面は、東京湾に並行する形で分布しており、高度20m前後で、上位面との境界は不明瞭とされている⁵⁾。

4. 結果

4.1. 気候変動に伴う降雨の変化

日本では、気候変動に伴い降雨量にバラツキを生じ、年総雨量としては減少傾向にあるといわれている²⁾。また、降雨量の変動幅の増大とともに豪雨などの極値降雨の増大と無降雨期間の延長が顕在化してきている²⁾。

国土交通省(2011)の試算によれば、千葉市は

年降水量が 150~200 mm 減少してきたトレンドの地域に含まれているが、降雨の総量と経年変化の傾向をみると、図-1 のように、むしろ降雨量は増加傾向となった。この原因は、国土交通省の試算が 1900 年からの 100 年で捉えているのに対して、入手したデータが 30 年しかなかったためであると推察される。一方、降雨の変動は、図-2 の様にバラツキが大きい。

降雨強度に関しては、無降雨の日数・100 mm 以上強い雨の日数では、明瞭な傾向を捉えられていない。

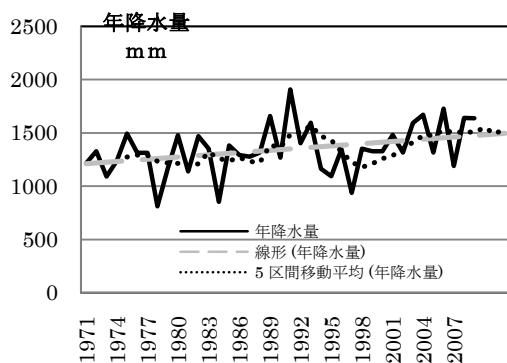


図-1. 千葉市の年間降水量の経年変化 1971~2009 年 (気象庁, (2011) より作成)

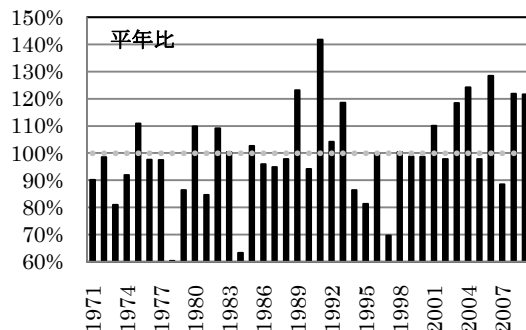


図-2. 千葉市の年間降水量平年比の変化 1971~2009 年 (気象庁, (2011) より作成)

4.2. 千葉市の水資源

千葉市の生活用水は、千葉県水道局・千葉市水道局・四街道市建設水道部が供給を行っている⁷⁾。そのうち、千葉県水道局が約 70% 程度を占めている⁷⁾。各水道事業体の水源別取水量を整理し、(給水人口/総人口)の割合×水源別の取水量として取り纏めたものが、表-2 となる。水源を地下水に依存する率は、隣接する習志野市に比べかなり低い。また、経年での地下水の依存率は低く、平成 21 年現在で、1%程度

となっている。工業用水も、同様に当初地下水源を利用して事業体が、地盤沈下の対策として、表流水に転換したため、現在では補給用として地下水が使用される程度で、地下水の依存率は 0.5% 程度となっている。また、回収水・海水の利用が進んでおり⁸⁾、工業用水中の地下水の割合はさらに少なくなっていると想定される。このように、生活用水・工業用水とも、地下水への依存率は低いといえる。また、千葉市に許可を得て設置している井戸に関しても、年々揚水量が減少してきている (図-3)。

表 2. 千葉市・習志野市の水源別取水量 (千葉県, (2009) より作成)

水源別	千葉市取水量(m ³)	千葉市割合	習志野市取水量(m ³)	習志野市割合
地下水	1,172,073	1.13%	8,375,940	65.1%
表流水	78,547,824	75.40%	0	0.0%
受水	24,448,725	23.47%	4,494,558	34.9%
総取水量	104,168,623		12,870,498	

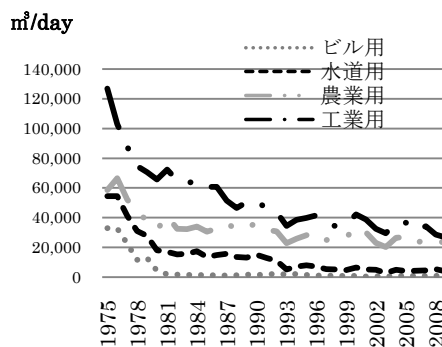


図-3. 千葉市許可井戸の日揚水量 (千葉県, (2010) より作成)

4.3. 渇水時の地下水と地盤沈下

渇水時に、地下水の依存率が高まり、その結果として、地盤沈下が起こるといわれている¹⁾。実際、既往の渇水時に、埼玉県北部・濃尾平野などでこの様な現象が起きている¹⁾。1990 年以降の渇水時に、千葉市では揚水量の大幅な上昇もなく、観測井から計測された地盤の変動量では明確な変化が伺えない。また、沈下面積 2cm 以上の地域も見られない (図-4) (千葉県, (2010))。これは、水源の転換がいち早く進み、地下水への依存度が低下していった為だと考えられる。

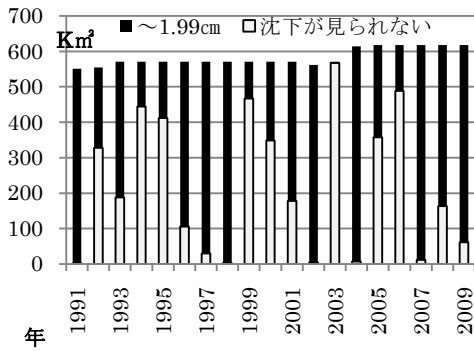


図 - 4. 千葉・市原地域の沈下面積推移
(千葉県, (2010))

4.4. 天然ガスと地盤沈下

前述の下総層群の下位に上総層群が広がっている。この上総層群に天然ガスかん水が含まれ、昭和 30 年代頃から、大規模な開発が行われはじめた。その結果、昭和 40 年代に地盤沈下が顕在化し、社会問題となった(図 - 5・図 - 6)。その後、行政の地盤沈下対策として、法的な規制が行われ、天然ガスかん水の揚水が規制され、次第に地盤沈下が沈静化していった。

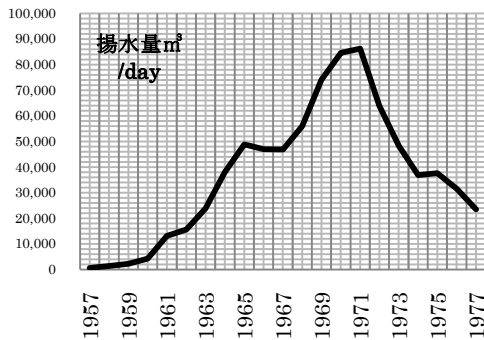


図 - 5 千葉市天然ガスの年間生産量・揚排水量の推移(千葉県, (2010) より作成)

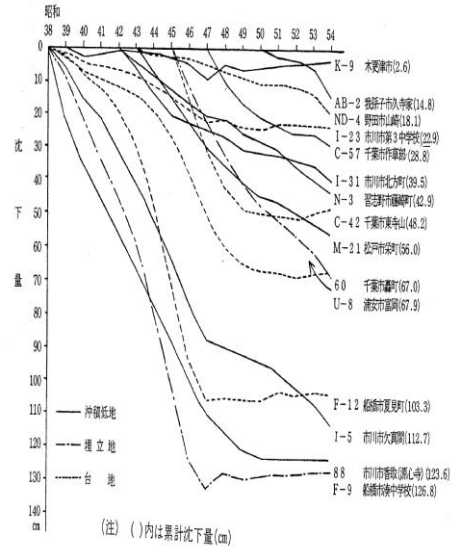


図 - 6 東葛飾・京葉臨海地区の地盤沈下の経年変動(千葉県, 1977)

4.5 地盤の変形特性

テルツァギの有効応力の原理は、

$$\sigma_t = \sigma_{\text{eff}} + \sigma_p \quad (1)$$

とかける。ここで、 σ_t は全応力(上載圧)、 σ_{eff} は有効応力(地盤が土の部分を支えている応力)、 σ_p は間隙水圧となる。ここで、上載荷重は変化せず、水位変動(間隙水圧変動)によって有効応力が変化すると考えると¹²⁾、(1)より

$$\Delta\sigma_p = -\Delta p \quad (2)$$

となる。従って、

$$\frac{\Delta V}{V} \approx m_v \Delta\sigma_p = m_v \rho_w g \Delta h = \frac{\Delta L}{L} \quad (3)$$

となる¹²⁾。ここで、 m_v は体積圧縮係数(MPa⁻¹)、 ΔL は地盤変動(cm)、 Δh は水位変動(m)、 L は層厚(m)である。南生実・生実・東寺山の3観測井で、水位変動・地盤沈下の30年の観測データを用いて、 m_v を推計した。弾性変形下で、間隙水圧の変化が完了している状況では、水位変動と地盤変動が(3)式の関係にあり、 ΔL と Δh をプロットすると、ほぼ原点を通る直線が期待できる。最小二乗法からその直線の傾きを求め、傾きを L で割り平均的な体積圧縮係数を求めた結果が表3である。

4.6 低下可能水位の推計

弾性変形領域で、低下可能な水位を推計する。地盤沈下の目標値を千葉市が年間 2cm としていることから、(3)式に基づき推計し、求めた推

計値を現在水位からの差としてまとめたものが、表3となる。

表3. 体積圧縮係数・低下可能水位

観測井	深度L (m)	傾き	m_v (GP a^{-1})	水位低下可能量 (m) Δh
東寺山	480	1.36	0.29	10.47
南生実	150	0.85	0.58	11.73
生実	298	1.89	0.65	23.46

4.7. 圧密降伏応力時の水位の推計

非弾性変形をしない為の閾値として、圧密降伏応力に相当する水位を周辺の土質試験の結果から推計した。(1)式より、

$$\sigma_t - \sigma_p = \sigma_{eff} \cong P_y \quad (4)$$

である。ここで P_y は圧密降伏応力である。(4)より求めた圧密降伏応力時の水位と現在水位との差を推計したものが、表-4 となり、現在水位から考えるとかなりの揚水ができることになる。

表-4. 圧密降伏応力と現在水位の差

観測井名	圧密降伏応力からの推定水位 (T.P.m)	現在水位との差 (m)	湧水・過去最低などとの水位との差 (m)
生実	-224	230	211
南生実	-25.7	25	20
東寺山	-378.8	378	374

4.8 可能揚水量の推計

低下可能水位・圧密降伏応力から算出した水位を用いて、揚水量-水位の関係から(図-7)、地盤沈下が許容される範囲内での可能揚水量は、51,480 千 m^3 となった。これは、千葉県水道局の1人あたりの水道使用量 300L/日とすると、約180日に相当する。

また、国土交通省(2009)は、湧水時(給水制限10%時)及び災害発生時の1人あたりの目標給水量を算出している¹⁴⁾。湧水時の目標給水量1人あたり250L/日で換算すると、可能揚水量は0.6日に相当することになり、1日あたりのおよそ半分の水量が地下水で担保できることになる。

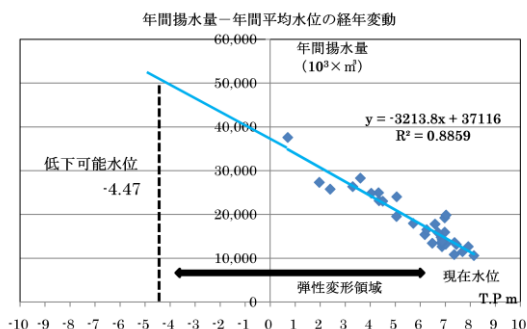


図7 揚水量-水位経年変動

5. まとめ

地盤の変化特性から、持続可能な地下水の管理の方法の1つとして、地盤沈下許容量に関する閾値を算定することができた。また、可能揚水量も同様に、推定することができた。今後は、地層毎の更なる詳細な解析などを行ない、より詳細な評価を行っていくことが必要であろう。

参考文献

- 1) 国土交通省土地・水資源局水資源部(2011):日本の水資源
- 2) 気象庁(2005):異常気象レポート
- 3) 杉田文(2010):地球温暖化対策としての地下水利用について.千葉商科大学情報機関誌 View&Vision No.30 環境問題と地球温暖化対策特集,pp15-20
- 4) 千葉市総合政策局総合政策部統計課(2010):千葉市統計書2010
- 5) 千葉県環境局環境規制課(2006):千葉市地下水保全計画書
- 6) 気象庁(2011)千葉市の日降水量データ:<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/>
- 7) 千葉県総合企画部水政課(2009):千葉県の水道平成5年~平成21年版
- 8) 経済産業省経済産業政策局調査部(2011):工業統計調査 用地・用水編
- 9) 千葉県環境生活部(2010):千葉県の地盤沈下現況平成3年~平成21年版
- 10) 千葉県環境部(1977):千葉県の地盤沈下と対策
- 11) 千葉県商工労働部保安課(2010):千葉県天然ガス開発・利用図 昭和56~平成22年版
- 12) 愛知正温(2005):首都圏における地下水位・地盤変動データを用いた地盤圧縮性評価の試み
- 13) 千葉県環境局環境規制課(2010):千葉市地下水位地盤沈下調査報告書 昭和51年版~平成22年版
- 14) 国土交通省土地・水資源局水資源部(2009):湧水・震災・事故等の水危機時の水確保方策のあり方に関する検討調査報告書(要約版)