地盤沈下が沈静化した後の地下水管理のあり方*

徳永朋祥**

Groundwater management after the cessation of land subsidence: Lessons learnt from the Tokyo Metropolitan Area

Tomochika TOKUNAGA**

1. はじめに

日本国内では、七大公害の一つである地盤沈下が広範に発生し、その対策に多くの努力が払われてきたことはよく知られた事実である。例えば、首都圏では、第二次世界大戦終戦後、高度経済成長期にかけて、大規模な地下水揚水や東京ガス田からの水溶性天然ガス採取による地盤沈下の問題が発生しており、その対策として地下水揚水規制や水溶性天然ガス鉱業権の行政による買い取り等が行われ、地盤沈下の抑制と被圧帯水層中の急速な水理ポテンシャルの回復が達成された（例えば、遠藤ほか，2001）。現在では、水理ポテンシャルの回復に伴う地下構造物等への負荷の増大に代表される新しい問題を抱えつつあり（例えば、清水・鈴木，2005）、その対策や適切な地下水管理に向けた検討が必要となってきた。地下水は、地面の下に広く分布しており、比較的容易に揚水し利用することが可能であることが多い。ため、平常時利用のみならず大震災等の緊急時水源としての意味を持つ重要な水資源となり得るが、現実には、地下水利用に関する合意形成や適

切なマネジメント方法の構築といった課題が残されている。最近では、社会の将来的なあり方について様々な立場からの議論を通じ、社会的な合意を得ながら計画を立案し、実践することが望まれていること（例えば、小林，2007）を考えると、地下水の持続可能性の保障や、地盤沈下に代表される問題を回避しつつ適切に地下水を利用することの可能性、地域社会との協働としての地下水管理のあり方について議論をし、方向性を示していくことが必要になっていると思われる。本稿では、これらの観点も念頭に置きつつ、ありうる地下環境管理の方策に向けて私見を述べてみたい。

2. 地盤沈下とその鎮静化の経緯－東京を例にして－

図1は、東京都市圏の被圧帯水層中に設置した井戸内の水位変化を示した図である（遠藤ほか，2001）。ちなみに、この間における不圧帯水層の水位変化はそれほど大きくないとされている（川島，2001）。ただし、武蔵野台地の一部では、不圧帯水層と被圧帯水層の水理的な連続性が認めら

* シンポジウム「地盤沈下の現状から見る今後の地下水管理」（主催：公益社団法人 日本地下水学会）にて講演

** 東京大学大学院新領域創成科学研究科環境システム学専攻

Department of Environment Systems, the University of Tokyo

図1 東京都市域における地下水・天然ガスかん水の揚水量と被圧帯水層に設置した観測井の井戸内水位, 地盤沈下量の推移 (遠藤ほか, 2012)。なお, 明治24年の下の年号は1891年の誤植である。

れる地域があること (梶根, 1994) には注意を払う必要がある。これに関連した事象として, 武蔵野台地上にある井の頭池等いくつかの池の枯渇は, 揚水に伴う被圧帯水層中の水理ポテンシャル低下によって引き起こされた不圧帯水層から被圧帯水層への地下水供給の増加による不圧帯水層の水位低下により, 湧水が消滅していったためであるとされている (守田, 2012)。

図1に示されている被圧帯水層中の水理ポテンシャルの低下の結果, 大規模な地盤沈下が発生する事態になった。その実態は図2に示される地盤高分布に顕著に表れている (東京都建設局, 2004)。一度発生した地盤沈下は, 地下水の回復に伴うわずかな地盤高の上昇が見られる場合はあるものの, 全体としては地盤高がほとんど回復しないため, 東京の下町低地ではいわゆる「ゼロメートル地帯」が広く分布することとなった。例えば, 図1に示されているように, 江東区亀戸で

は, 明治時代と比較すると4メートルを超える地盤沈下が起こったことがわかる。

これらの問題への対策として, 図1に見られるように, 東京都などでは, 地下水使用の規制を行っている。その結果, 被圧帯水層中の井戸内水位は急激に回復し, 地盤沈下も抑制された。最近ではわずかではあるが, 地表面の上昇が認められる場合も出てきている (図1)。このように, 地下水利用の規制によって, 地盤沈下等の問題が解決されてきたことがわかる。なお, このような地下水利用制限の実現のためには, 利根川上流域における水源開発等の事業の実施による水源転換が行われたことを忘れてはいけない。

最近では, 地下水揚水が行われていた時代に構築された地下構造物への漏水や構造物の変形, 浮き上がりといった新たな問題が発生してきていることも知られており (例えば, 清水・鈴木, 2005), この問題に対処するための投資も多額に

図2 東京下町低地の地盤高分布 (東京都建設局, 2004)。

及ぶことが少なくなく、軽視できない問題となっていることも事実である。

3. 地盤沈下が起こった時期の加圧ユニット (難透水性層) の水理ポテンシャル変化

よく知られているように、被圧帯水層から揚水を行うと、その上下に位置する難透水性層からの水の絞りだしが発生する。特に、東京の下町低地のように、まだ十分に固結していない地層中では、粘土を主体とする難透水性層は、帯水層を構成する砂や礫を主体とする地層よりも軟らかく、

水が絞りだされることによって大きく変形し、大規模な地盤沈下が発生することとなる。従って、地盤沈下の検討を詳細に行うためには、帯水層内の水理ポテンシャルだけではなく、難透水性層中の水理ポテンシャル (もしくは間隙水圧) の経時変化を知ることが重要になってくる。

遠藤・小笠原 (1976) や廣瀬ほか (2004) の検討に始まり、データは限られているものの、東京における難透水性層中の水理ポテンシャルの経時変化の評価がなされている事例が存在する (Aichi and Tokunaga, 2007; 愛知, 2008)。ここでは、被圧帯水層からの揚水過程において、難透水性層で

ある泥質層内の間隙水圧変化が帯水層のそれに比べて遅れていることが指摘されている (図3)。

図3に見られる状況は、我々が今後の地下水利用や保全、地盤沈下防止を検討するうえで多くの示唆を与えている。一般に、難透水性層である泥質層の圧密は、圧密降伏応力よりも有効応力が大きくなることによって発生すると考えられることが多く、圧密降伏応力は、その地層が今までに経験した最大有効応力によって決まるとされることが多い。図3の事例にみられる状況は、泥質層の圧密降伏応力が、層内で鉛直方向に均一になるとは限らないことを意味している。また、この図に示されている経緯を経た難透水性の泥層は、さらなる排水と地盤沈下に寄与するだけの変形をすることが可能である。すなわち、一度帯水層中の水理ポテンシャルを下げたことによって地盤沈下が発生したということに基づき、今一度帯水層中の水理ポテンシャルを同じ状態にまで低下させても、すでに泥質層からの排水が行われたために永久変位を伴う地盤沈下は起きないと主張することは適切ではない場合があることを意味している。技術的な観点からは、仮に今後の地下水利用を想

定し、発生するであろう地盤沈下量を精度良く評価するためには、検討する領域における泥質層内の間隙水圧プロファイルの経時変化を高い空間解像度で解析することが重要になるということができる。一方で、帯水層システムは広域的に連続していることが一般的であるため、帯水層内の水理ポテンシャルの変化を検討するためには、広域地下水流動を取り扱うことも必要となってくる。

4. 適切な地下水管理に必要な技術開発——一つの取り組み——

ここまでに取りまとめたような経緯に基づくと、これからの地下水の管理はどのようにあるべきであろうか。実は、この問題は、極めて難しい側面を持っている。というのは、地下水や地下環境と人間社会との関係を考える上では様々な立場を取ることが可能であり、それぞれの立場によってあり得べき将来像が違ってくるからである。

様々な立場が取られる問題を考える上で技術的な観点から重要なことは、実際にどのようなことが起こってきているのかを知ること、今後地下水利用に対して何らかのアクションをしたときにどのようなことが発生し得るかをできる限り正確に予測すること、さらには、実際に起こる現象を精度良く監視すること、であると考えている。最初の観点である歴史的な経緯やそこで注目すべき点のいくつかについては今までに述べてきているので、ここでは、予測と監視という2つの点について、現在我々が行っている研究の一端を紹介してみたい。

まず、一つめは、地下水挙動とそれに伴う地盤変動の再現・予測を可能にする数値解析技術の開発である。地下水挙動と地盤変形との関係については今までに多くの研究がなされており、要素過程をかなり正確に表現することが可能なレベルに達しているといえる。図3のデータを用いた議論もこのような考え方に基づいている。しかし、実問題に適用するためには、前節にも述べたように、広域的に連続した地下水流動と、地盤沈下にかかわる変形が主に発生するスケールである難透水性層内の変形現象を同時に解析する必要がある。そのために、我々は、広域の地下水流動と局

図3 東京の神明観測井データを用いた難透水性層中の間隙水圧変化の評価例 (愛知, 2009)。

所で発生する地下水流動・地盤変動を連結して解析する手法の開発を行っている(愛知, 2009)。図4はその結果の一例であるが、観測結果を計算結果が良く再現していると考えられている。なお、図4では、北川辺観測井の観測井水位が周期的な変動をしつつ、年平均ではほとんど変化していない中で、周辺の地盤沈下が進行していることが示されている。この結果は、帯水層の水理ポテンシャルが1年間程度の時間で平均すれば大きな変化がなく、季節的な利用のみをするような場合であっても地盤沈下が発生しうることを示しており、これは、前節で議論した難透水性層中の間隙水圧変化の評価が重要であることを示している結果でもある。

もう一つは、衛星情報の一つである合成開口レーダを用いて地表面変動を広域的に精度良く知るという方法である。図5の左図は関東地域を対

象とした観測結果の例、図5の右図は、九十九里平野周辺での例であるが、現地での水準測量結果と合成開口レーダに基づく地盤変動監視結果は整合性が高いことがわかる(出口ほか, 2009)。ところで、図5の左図では、東京の下町低地の南部では、少し地盤が上昇していることが観測されている。図1に示されている地盤変動からも最近の地盤の上昇は認められており、この結果も、水準測量と合成開口レーダの監視結果が良く合っていることを支持している。

我々は、予測のためのモデリング技術と観測・監視技術とを組み合わせ、さらにGISによるデータ統合をすることにより、今後の適切な地下水管理に必要な技術的な観点からの貢献が可能になると考えている(Obanawa et al., 2010)。このようなアプローチを取り込んだうえで、社会の要請に対応する技術情報を丁寧に提供していくことがより合理性の高い地下水管理に向かう方向性の一つであろう(図6)。

5. 今後考えるべきこと

地下水は人類にとって主要な淡水資源の一つであるが、その利用に伴い地表及び地下の環境はさまざまに変化する。地下水は、平常時の安定した水資源でありうるとともに、緊急時の重要な水資源となり得る。したがって、どのような目的で地下水利用を行うにあたって、そのことによって発生する変化と環境への影響については、十分に認識したうえで行動を起こす必要がある。また、地下水を含め、水は人類並びに生態系に共有の資源であり、地域社会がどのような将来像を「あるべきもの」と考えるかによっても、目指す方向は変わってくるはずである。このことは、いわゆる科学・技術的な観点のみから地下水管理のありうる姿を議論することには限界があることを示している。一方で、科学・技術的な観点からできるだけ正確な情報を適切に提示することは、地域社会が積極的に課題を検討し、起こりうる結果について理解をしながら一つ一つ納得していくことに対して重要な貢献をするはずである。さらには、多くの人が現状を理解し、今後の活動に伴う変化について知ることが可能になる状況を構築すること

図4 広域地下水流動と局所地下水流動・地盤変動の連結解析による解析結果の例。北川辺観測井(埼玉県加須市)の井戸水位観測結果と計算結果(左図)と、3つの水準点(行田(埼玉県行田市)、北川辺(埼玉県加須市)、野木潤島(栃木県下都賀郡野木町))の水準測量結果と地盤変動量計算結果(右図)(愛知, 2009)。

図5 合成開口レーダを用いた地盤変動観測の例。左図は関東地域における観測結果を示す。カラーバーは、衛星から地表面への視線方向の距離の変化量を示しており 8π は約 11.2cm の変動を表す。0 から 8π に向かって色が変わる場合は、地表面が衛星から遠ざかっており、 8π から 0 に向かって色が変わる場合には地表面が衛星に近づいていることを意味する。九十九里平野での地盤沈下や東京の江東地域でのわずかな地盤の膨張が認められる。右図は九十九里地域の2点（千葉県山武郡大網白里町（P01）、千葉県長生郡一宮町（P03））での水準測量と合成開口レーダ観測結果の比較を示す。縦軸は2003年1月13日以降の地盤変動量、横軸は時間経過を表す。赤の三角が水準測量、黒点が衛星からの観測結果。出口ほか（2009）に基づき作成。

図6 数値モデリングと観測技術，GISを統合した地下水管理のあり方の一例（Obanawa et al., 2010）。

も重要である。具体的には、前節で述べたような地盤変動観測結果の提供や、今までも行われてきている地盤沈下観測井による帯水層中の水理ポテンシャル変化の計測、水準測量や地盤沈下計測結果の地域社会への公表といった活動を継続していくことが不可欠であろう。これらの情報の適切な提供と、地域社会における議論、科学・技術的な観点からの助言が双方向的になされ、地域社会が納得したうえで地下水の保全・利用とそのための管理を行うという方向性が、これからあるべき姿の一つではないだろうか。

参考文献

- 愛知正温 (2009)：広域地下水流動を考慮した地盤変動モデリング：関東平野を対象として、一般社団法人日本応用地質学会平成21年シンポジウム予稿集, 60-63.
- 遠藤 毅・小笠原弘信 (1976)：沖積低地における間ゲキ水圧変化と地盤沈下の関係について、昭和50年度東京都土木技術研究所年報, 165-181.
- 遠藤 毅・川島真一・川合将文 (2001)：東京下町低地における“ゼロメートル地帯”展開と沈静化の歴史、応用地質, 42, 74-87.
- 樫根 勇 (1994)：多摩川水系の地表水と地下水の交流に関する研究、とうきゅう環境浄化財団研究助成成果報告書, 310p.
- 川島真一 (2001)：東京都における地下水位の経年変化、基礎工, 29 (11), 77-79.
- 小林傳司 (2007)：トランス・サイエンスの時代－科学技術と社会をつなぐ－、NTT 出版, 288p.
- 清水 満・鈴木 尊 (2005)：地下水の上昇に対する地下駅の対策工事、土と基礎, 53 (10), 29-31.
- 出口知敬・六川修一・松島 潤 (2009)：干渉 SAR の時系列解析による長期地盤変動計測、日本リモートセンシング学会誌, 29, 418-428.
- 東京都建設局 (2004)：東部低地帯の地盤高図、http://www.kensetsu.metro.tokyo.jp/kasen/gaiyo/pdf/_/14-3.pdf、(2014年5月4日閲覧)
- 廣瀬 誠・川越 健・木谷日出男 (2004)：建設工事・地下構造物と地下水、平成16年度日本応用地質学会研究発表会予稿集, P46.
- 守田 優 (2012)：地下水は語る－見えない資源の危機、岩波書店, 240p.
- Aichi, M., and T. Tokunaga (2008): Land subsidence simulation by a nested modeling scheme to integrate regional groundwater flow and local groundwater flow/land deformation models: a case study from Tokyo and its surrounding. Proceedings of XXXVI IAH Congress, 26 Oct-1 Nov, Toyama, Japan. S31, p215-1.
- Obanawa, H., T. Tokunaga, S. Rokugawa, T. Deguchi and T. Nakamura (2010): Land subsidence at the Kujukuri Plain in Chiba Prefecture, Japan: Evaluation and monitoring environmental impacts. IAHS Publications., 339, 293-298.

(受付：2014年5月5日，受理：2014年12月22日)