地下水利用が行われる状況下での 地下水収支に関する一つの考え方*

徳永朋祥**

A consideration on the groundwater budget under the condition of groundwater utilization

Tomochika TOKUNAGA**

1. はじめに

地下水は、地下浅部までを含んだ地球表層の水循環の重要な構成要素の一つであり、その利用を念頭に置いた検討を行う場合には、地下水利用が水収支に与える影響を考慮した議論を丁寧に行うことが不可欠となる。その議論を進めていくうえでは、人間活動の結果として発生する場の擾乱と、それに伴う地下水挙動の特徴の把握を適切に行うことが必要となる。ここでは、そのような観点から、すでに多くの研究者・技術者には自明のことかもしれないが、注意しておいたほうが良いと考えられる点について論じてみたい。

2. いわゆる「水収支神話」について

そもそも、地下水収支は、地下水流動系における水の質量保存を考えるということに他ならない。定常的な地下水流動系においては、地下水への流入量（すなわち地下水涵養量）は、地下水からの流出量と等しくなる。一方、地下水を揚水す

る場合には、水の質量保存が成り立っている系において、揚水という行為によって、どのように地下水収支が変化するのかを時空間的に明らかにすることが必要になってくる。別の言い方をすれば、揚水量に相当する水をどこから得ているのか、また、その結果、地下水への流入量や地下水からの流出量、地下水として貯留されていた量等がどのように時空間的に変化するのかを理解することが必要ということになる。結論から言うと、揚水量に相当する水は、「地下水貯留量の減少」「地下水への涵養量の増加」「地下水からの流出量の減少」という三つの「変化」によってもたらされる。このような理解に基づき、Bredehoeft et al. (1982; 2002) は、「持続可能な地下水利用量が、地下水開発前の地下水収支に基づいて考えられるとする場合があるが、これは『水収支神話』(water budget myth) とも呼ばれるべきものであり、適切でない場合がままある（（ ）内は筆者追記）。」という指摘をしている。

その具体的な例として、Alley et al. (1999) は、北米大陸オガララ帯水層の事例を挙げている（図

* 本資料に関連する内容は、平成26年7月4日に開催された公益社団法人日本地下水学会主催のシンポジウム「地下水の保全、涵養および利用に関する法制度化に向けた現状と課題」において発表している。

** 東京大学大学院新領域創成科学研究科（〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5）
Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

1)。図1の左側は、地下水開発前の地下水収支であり、定常状態に至っていると考えられるため、帯水層への涵養量(24百万立方フィート/日)が地下水流出量と等しくなっている。一方、右側の地下水開発が始まった後の地下水収支では、揚水量(830百万立方フィート/日)は、①地下水への涵養量の増加と灌漑水の地下への浸透、②地下水貯留量の減少、③地下水流出量の減少によって賄われていることがわかる。これはまさに、Bredehoeft et al. (1982, 2002) が指摘しているような『水収支神話』的な考え方が、地下水利用可能量の議論をする上で適切でない場合があることを示していると理解することができる。すなわち、『水収支神話』の考え方に基づくと、この帯水層で利用することが可能な水量は24百万立方フィート/日しかないことになるが、実際には、より多くの地下水を利用することが「可能」になるということがわかる。なお、この議論を実問題に適用するに当たっては、地下水収支のみではなく、地下水利用に伴い発生する可能性がある他の諸問題(例えば顕著な地盤沈下、被圧帯水層の不圧化やそれに伴う酸欠空気の発生など)が生じない範囲内に地下水変動がとどまっていることが前提となることは言うまでもない。

実際には、上述のような定常的な理解では不十分であり、揚水される水の起源は時間と共に変化していくことを考慮する必要がある(図2)。この図に示されているように、地下水開発の初期は、帯水層中の地下水貯留量の減少分が井戸からくみ上げられる水の大部分を占めるが、その後、地下水の揚水によって引き起こされる涵養量の増

大(誘発涵養)による表流水の地下への浸透が、井戸からの揚水の多くの割合を占めるようになる。また、この図の場合では、さらに時間が経過すると、一定量の揚水をしている場合には新たな定常状態に到達することになり、その時には地下水貯留量の変化はなく、井戸からの揚水量は、誘発涵養によるものと河川の基底流量の減少によってもたらされるということになる。さらには、植物の根系が地下水面まで到達している場合には、揚水による地下水面低下が蒸発散量の減少にもつながる場合がありうることも示されている。このように、実際の現象は非定常な状態を含むことから、地下水収支に関わる議論を丁寧に行う場合には、この非定常な変化に着目することが必要となる。また、この変化は複雑な相互作用を伴ういわゆる「システム」として挙動する地下水流動系を対象とすることになり、その把握にあたっては、数値解析を用いたモデリングが極めて有効なツールになりうるということが理解される。

3. 涵養域の時空間的な変化

ところで、このような問題を検討するにあたっては、その影響範囲がどこまで及ぶのか、また、影響範囲が時間とともにどのように変化するのかを考えることも重要である。比較的簡単な事例として、不完全な被圧帯水層の場合を考えてみる(図3)。この場合、問題を単純化すると、井戸からの揚水は「被圧帯水層の地下水貯留量の減少」「被圧帯水層の水圧が減少した領域における上の加圧層から被圧帯水層への水移動量の増加」「被

図1 オガララ帯水層における地下水開発前の地下水収支(左)と地下水利用時の地下水収支(右)(Alley et al., 1999 に基づき作成)。単位は百万立方フィート/日。

「圧帯水層に沿った側方流動量の増加」によって賄われていると考えることができる。また、これらの事象が発生するのは、図3に書かれている揚水影響範囲内であり、十分に遠いところでの現象

は、井戸から揚水される水には直接的には関係しないということになる。

これに関連した検討として、Aichi and Tokunaga (2008) は、関東平野を対象とした地

図2 井戸から揚水される水が地下水流動系のどの要素から供給されるかに関する時間変化の模式図 (Korus and Burbach, 2009 に基づき作成)。図中のハッチがかかっている領域は、揚水量のうち地下水貯留量の減少によって賄われる部分を示し、ハッチのかかっていない領域は、揚水量のうち地表水からの寄与によって賄われる部分を示す。横軸の時間は任意になっている。

図3 不完全な被圧帯水層における揚水井戸への水の供給に関する模式図。この図には、不圧帯水層の地下水面は示していない。

図4 関東平野における不圧帯水層から被圧帯水層への地下水鉛直移動量の時空間変化 (Aichi and Tokunaga, 2008 に基づき作成)。

下水流動解析を実施し、不圧帯水層から被圧帯水層への地下水の鉛直移動量（不完全な被圧帯水層への誘発涵養量と考えてもよい）の時空間変動について検討を行った（図4）。この図からわかるように、誘発涵養が行われる地点は時間的に変化するものであり、その変化は、地下水利用の空間分布に強く依存することになる。すなわち、1970

年代ごろは東京都区部（東部）において大規模な地下水揚水が行われており、その結果として、主要な揚水地域の近傍の台地（武蔵野台地ならびに下総台地）からの誘発涵養量が大きかったことがわかる。一方、1980年以降は、東京都区部では地下水利用規制のために揚水量が減少し、その結果、周辺の誘発涵養量も減少している。東京都の

市部（武蔵野台地西部）では地下水揚水が継続しているために、その周辺での誘発涵養量は依然として大きい。それに加えて、北関東における誘発涵養量が増加していることがわかる。このような結果も、地下水資源管理という観点から、地下水流動系の変化が起きている地域の把握が重要であることを示しているといえる。

4. まとめ

以上述べてきたことのポイントをまとめると以下のようなだろう。

- ・地下水利用（揚水）は、地下水流動系の状態を変化させる。
- ・地下水の揚水量は、「地下水貯留量の変化」「帯水層への（誘発）涵養量の変化」「地下水流出量の変化」によって賄われる。
- ・地下水利用によって引き起こされる地下水流動系の変化は非定常であり、その把握が重要な課題になる。その手法として、数値解析を用いたモデリングが有効なツールとなりうる。

すなわち、地下水の保全・管理・利用には、流域全体を対象とし、地表水・地下水をあわせた水挙動の時空間的な変化を定量的に把握するための努力が必要となる。また、その結果として発生する可能性のある自然・社会へのインパクトの大きさを検討・把握し、適切な対応に向けた準備とその実践が必要となる（例えば、徳永、2015）。そのためには、地下水利用を進めたいと考える立場、地下水の保全・管理を行う立場、および、自

然・人為現象の評価・予測に向けた活動を行う立場にあるそれぞれの関係者の有機的な協力が重要かつ有意義であり、各者にそのための努力が求められるであろう。

参考文献

- 徳永朋祥 (2015) : 地盤沈下が沈静化した後の地下水管理のあり方. 地下水学会誌, 57 (1), 37-43.
- 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, XXXVI IAH Congress S31-215-1, Toyama, Japan.
- Alley, W.M., T.E. Reilly and O.L. Franke (1999): Sustainability of Ground-Water Resources. U.S. Geological Survey Circular, 1186, 79p.
- Bredehoeft, J.D. (2002): The water budget myth revisited: why hydrogeologists model. Ground Water, 40(4), 340-345.
- Bredehoeft, J.D., S.S. Papadopoulos and H.H. Cooper Jr. (1982): The water budget myth. In: Scientific Basis of Water Resource Management, Studies in Geophysics, 51-57, Washington, D. C., National Academy Press.
- Korus, J.T. and M.E. Burbach (2009): Analysis of aquifer depletion criteria with implications for groundwater management. Great Plains Research, 19(2), 187-200.

(受付：2016年4月2日，受理：2016年5月27日)