地下環境指標による水文・気候変動および人間活動の復原

谷口 真人^{*1}

Reconstructions of hydrometeorological changes and human impacts using subsurface environmental data

Makoto TANIGUCHI^{*1}

Abstract

Reconstructions of hydrometeorological changes and human impacts using subsurface environmental data have been reviewed. Surface temperature changes estimated from subsurface temperature have been used globally and locally for climate reconstructions. Human impacts of contaminations can be revealed from the data preserved in the subsurface environments. International research framework on reconstructions of hydrometeorological changes may help us to understand the global hydrometeorological problems and human impacts on the earth.

Key words: Subsurface environment, Inverse methods, Reconstructions of hydrological and meteorological environments

キーワード: 地下環境, 逆解析, 気候・水文環境復原

1. はじめに

地球環境問題を解く方法には, 過去あるいは現在から出発して, 現在あるいは未来の状態を解く(つまり時間軸に正の方向の)順問題と, 現在から過去に遡って問題を解き, その変化をもたらした原因を明らかにする(つまり時間軸に負の方向の)逆問題とがある。順問題は, スーパーコンピュータ等の数値計算技術を駆使して演繹的に問題を解くことによって行う将来予測や, モデルの検証のために過去から出発して現在の状態を再現することなどにより行われる。一方逆問題は, その多くは, 変化の原因をもたらす境界条件やパラメータを推定するために, 現在の環境に保存されている様々な資料を時間情報と組み合わせて明らかにしていくものである。

本論文では, 上記のうち逆問題としての地球環境問題を解く方法として, 特に地下に保存されている環境指標を用いた, 水文・気候変動と人間活動の復原を行う手法とその例について概観する。

2. 地下熱データを用いた気候変動復原

地球温暖化や都市化などによる気温上昇による地表面温度の上昇は, 地下の温度環境をも大きく変える。気温上昇に伴う地表面温度上昇は, 定常状態の地下温度分布からのずれとして地下熱環境に保存されることが広く理解されており, 世界各地でその影響が現れている(Lanchenbruch and Marshall, 1986; Pollack, *et al.*, 1998)。つまり, 過去における地球上の気候変動の記録が, 大気よりもより長い時間情報を保存することができる地下

* 1 総合地球環境学研究所 Research Institute for Humanity and Nature

熱環境に保存されていることになる。したがって地下温度環境を詳細に調べることで、地下温度データから地表面温度変化（気候変動）を逆問題として解くことができるわけである。

Taniguchi *et al.* (1999a) は、東京都の地盤沈下観測井において測定された地下水温鉛直分布を用いて、温暖化および都市化による地表面温度上昇と、地下水流動の影響を評価した。過去 100 年で 2.5°C 上昇した地表面温度上昇の影響を受けて、浅層帯水層において地下水温の逆転現象が見られた。さらにこの地表面温度上昇の影響は、地下水涵養域では地下深く（深度 80-100m）まで及ぶのに対し、地下水流出域では浅層（深度 20-40m）に留まっていることが明らかになった。原爆実験により 1950・60 年代に大量に放出されたトリチウムがその後の地下水研究に大きな役割を果たしたように、最近の温暖化・都市化による地表面温度上昇は、地下水流動を明らかにするトレーサーとして広く利用可能であり（谷口, 1998, 2000）、今後の地下水研究にとって重要であると考えられる。また大阪平野では、過去 100 年で約 2.0°C、また濃尾平野では過去 100 年で約 1.5°C の地表面温度上昇の影響を受けて、地温の逆転現象が見られた（谷口, 2001）。一方、山形・米沢盆地や、石狩平野など都市化が進行していない地域では、この地温逆転現象は観測されなかった。このことは、温暖化の影響よりも都市化の影響がより強いことを表していると考えられる（佐倉, 2000）。

日本国内の孔内水温計測による気候変動の影響抽出に関しては、佐倉 (2000)、谷口 (2001) などが取りまとめを行っているほか、世界的には Pollack *et al.* (1998) や Lewis (1992) 等によりまとめられている。また Huang *et al.* (2000) は、グローバルな観点から大陸ごと・過去 5 世紀の 100 年ごとの古気候復元を地下水温度を用いて試みている。また、IGPC (International Geological Correlation Programme) Project No.428 “Climate and Boreholes” などにおいて、データベースの構築と解析が進められている。

Huang *et al.* (2000) は、地下温度を用いた過去

500 年間の全球レベルの気候変動推定に成功した (Fig.1)。その結果、北半球では 1.1°C/500y、南半球では 0.8°C/500y、全球では 1.0°C/500y の温度上昇が、また過去 100 年では全球で 0.5°C/100y の温度上昇が、現在の地下温度環境を逆解析で調べることでより明らかになり、その値は他の気候変動復元結果と整合性のある結果となっている。さらに、Huang (2004) は地下温度を用いた気候復元と年輪などによる気候復元を組み合わせることで、より精度の良い気候変動復元が可能であることを示している。また最近、Taniguchi *et al.* (2004) は、アジアにおける地下熱データを用いた詳細な地域別気候変動復元を試みている (Fig.2)。

地下水温は、熱伝導による熱輸送のみではなく地下水流動に伴う熱移流によっても影響を受けるため、現在の地下熱環境は、過去の地下水流動の非定常情報をも保存している可能性がある。このことを利用して、地下熱データを気候復元のみならず降水量（地下水涵養量）変動復元にも用いる可能性が指摘されている。Taniguchi (2002) は、東京都の地盤沈下観測井において測定された地下水温鉛直分布を用いて地下水涵養量の変動の推定

Fig. 1 Climate reconstructions on global, Northern and Southern Hemisphere from borehole temperatures (Huang *et al.* 2000).

Fig. 2 Climate reconstructions in Asia from borehole temperatures (Taniguchi *et al.*, 2000) Each bar shows the increased temperature during the 16 century (left) to 20 century (right).

を行った結果、1890年から1940年の間はほぼ増加傾向を示し、1940年から1990年にかけてはほぼ減少傾向を示した。この推定された地下水涵養量変動は降水量変動の傾向とほぼ一致し、地下温度分布から推定された古涵養量が、降水量変動とある程度対応している可能性が示された。また土地利用・植生改変による地下水涵養量の変化を、地下熱環境から推定した例がTaniguchi (1997), Taniguchi *et al* (1999b) により報告されている。

3. 地下に蓄積された物質による環境復原

環境復原のための地下環境指標の例として、土壌水中・地下水中の硝酸性窒素濃度から人間活動の影響を評価したのものがある。金子 (1995) は、集落の形成年代と集落地下水の硝酸態窒素濃度との関係から、形成年代が古い集落ほど人為起源の窒素負荷が大きく、地下に蓄積されている濃度の差として現れていることを示した (Fig. 3)。これはグローバルにはGreen *et al* (2003) によって、産業革命前と現在の窒素負荷総量の違いとして示されており (Fig. 4), 多くの前提を含むものの、環境復原のための地下環境指標としての利用価値はあると考えられる。

Fig. 3 Relationship between age of town and nitrate concentration of groundwater (Kaneko, 1995).

一方、土壌水の濃度鉛直分布から、農業活動に伴う施肥量との関係を論じたものもある。Fig. 5は、イギリスの台地におけるトリチウム、硝酸性窒素濃度、施肥量の分布を示している (Parker *et al.*, 1991)。これは、地下水面までの深度40mのボーリングによって採取した土壌から土壌水を抽出し、それぞれの成分を分析した結果である。トリチウムは、1964年の降水が濃度のピークを持つことから、ほぼ1964年の降水が深度9m付近に存在するが同定できる。さらに、土壌水は一般にピストン流的に降下浸透することから、施肥量の

Fig. 5 Tritium, N, and fertilizer application of nitrate nitrogen at upland of England (Parker *et al.*, 1991).

増減が土壌水中の硝酸性窒素濃度と対応すると仮定でき、結果として濃度のピークと施肥量との対応からおおよその年代が推定できる。以上から、深度 33m 程度の濃度ピークは 1949 年に施肥された窒素が到達したものであることが推定された。図中、施肥のピークと土壌水中の硝酸性窒素濃度のピークが 1–2 年ずれている部分もあるが、全体としておおよその対応が可能である。この結果から、汚染物質が現在 40m 付近にある地下水面に到達する直前であることを示しており、この不飽和帯には、測定が行われた 1975 年までの約 25 年間の汚染情報が蓄積されていることを意味している。

一方、Fig. 6 は北米西海岸ニューヨーク州における池の堆積物中の各種成分の深度分布をあらわしている (Graney and Eriksen, 2004)。Pb 濃度は表層で高く、大気起源の汚染物質を含んだ堆積物が比較的表層に堆積していることを示している。これに対して、Sr は比較的深層で高濃度を示す。これは、最近の堆積物が Pb などの重金属を多く含

Fig. 6 Sr, Pb, ^{210}Pb and ^{137}Cs in the sediment at western coast of the North America (Graney and Eriksen, 2004).

むため、Ca と同期するといわれる Sr が酸性雨や大気汚染物質によってイオン交換して溶脱したことを示している。これに対して、 ^{210}Pb 及び ^{137}Cs 含量は堆積年代を示す指標として利用される放射性同位体である。これらの情報をもとに、堆積年代とその堆積物中の重金属濃度をあらわしたのが Fig. 7 である。この結果、As (ヒ素) は 1970 年代にピークを、Pb は 1980 年代にピークを示し、現在にかけては低下傾向を示すのに対して、Mn や Zn は現在も上昇中であることがわかる。これらのレビューは、小野寺・中野 (2004) によってまとめられている。

4. まとめ

地下環境指標を用いたグローバルな古環境復原は、UNESCO の GRAPHIC (Groundwater Resources Assessment under the Pressures of Humanity an Climate Changes) プロジェクトや IAH (International Association of Hydrogeology) の Groundwater and Climate Changes ワーキンググループなどでも始まっている。ただ、それらのデータは時空間的に

Fig. 7 Change of trace metals loads evaluated from the sediment at western coast of the North America (Graney and Eriksen, 2004).

限られており、また異なる手法によるクロスチェックが必要とされている。地下水は地表水に比較すればその速度は遅いが、しかし水は流動しており、時間軸を決定することが難しい。不飽和帯における土壌水や流動のほとんどない粘土層中の地下水の濃度などの地下環境指標を用いた古環境復原、あるいは地下水流動を前提とした地下熱環境を用いた古水文・古気候復原などが今後も期待される。

参考文献

- 小野寺真一・中野孝教 (2004): アジア巨大都市における物質負荷問題の現状と課題, 67-77, 地球研プロジェクト FS2-4 「都市の地下環境に残る人間活動の影響」, 総合地球環境学研究所・谷口真人編, 平成 16 年度報告書, p97.
- 金子文宣 (1995): 千葉県における地下水の特性とその農業利用に関する研究, 千葉県農業試験場特別報告, 29, 1-69.
- 佐倉保夫 (2000): 気候変化に伴う地下の熱環境変化, 陸水学雑誌, 61, pp.35-49.
- 谷口真人 (1998): 地下水流動と物質輸送・熱輸送, 日本水文学会誌, 28(1), 1-12.
- 谷口真人 (2000): グローバルな観点からの地下水研究の現状と課題—地下水研究の時空間方向へのスケールアップ—, 水文・水資源学会誌, 13, 476-485.
- 谷口真人 (2001): 地下環境データを用いた地球温暖化・都市化および降水量変動の推定, 文部省科学研究費 (基盤研究 B) 研究報告書.
- Graney JR and Eriksen TM (2004): Metals in pond sediments as archives of anthropogenic activities: a study in response to health concerns, *Applied Geochemistry*, 19, 1177-1188.
- Green et al. (2003): IGBP report
- Huang, S., H.N. Pollack and Po-Yu, Shen, (2000): Temperature trends over the past five centuries reconstructed from borehole temperatures, *Nature*, 403, 756-758.

- Huang S. (2004): Merging information from different resources for new insights into climate change in the past and future, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L13205, doi: 10.1029/2004GL019781.
- Lachenbruch, A.H. and Marshall, B.V. (1986): Changing climate: Geothermal evidence from permafrost in the Alaskan Arctic, *Science*, **234**, pp.689-696.
- Lewis, T. (Ed.) (1992): Climate change inferred from underground temperatures, *Paleogeogr. Paleoclimatol. Paleoecol.*, **98**, pp.71-281.
- Parker JM, Young CP and Chilton PJ (1991): Rural and agricultural pollution of groundwater. In Downig RA and Wilkinson WB (eds) *Applied Groundwater Hydrology*, Clarendon Press, Oxford, 149-163.
- Pollack, H.N., Huang, S., and Shen, P.Y., (1998): Climate Change Record in Subsurface Temperatures: A Global Perspective. *Science*, **282**, pp.279-281.
- Taniguchi, M., Huang S., Uemura, T., Miyakoshi, A. and Sakura, Y. (2004): Climate reconstruction from borehole temperatures in Japan. WPGM, Hawaii, August 16-20, 2004.
- Taniguchi, M. (1997), Subsurface water responses to land cover and land use changes: An overview, in *Subsurface Hydrological responses to land cover and land use changes*, edited by M. Taniguchi, Kluwer Acad. Publ., Norwell, Mass., pp.1-20.
- Taniguchi, M., Shimada, J., Tanaka, T., Kayane, I., Sakura, Y., Shimano, Y., Dapaah-Siakwan, S. and Kawashima, S. (1999a): Disturbances of temperature-depth profiles due to surface climate change and subsurface water flow: 1. An effect of linear increase in surface temperature caused by global warming and urbanization in the Tokyo metropolitan area, Japan, *Water Resour. Res.*, **35**(5), pp.1507-1517.
- Taniguchi, M., Williamson, D. R. and Peck, A. J. (1999b): Disturbances of temperature-depth profiles due to surface climate change and subsurface water flow: 2. An effect of step increase in surface temperature caused by forest clearing in southwest Western Australia, *Water Resour. Res.*, **35**(5), pp.1519-1529.
- Taniguchi, M., (2002), Estimates of the past groundwater recharge rate from deep borehole temperature data. *CATENA*, **48**, 39-51.
- Taniguchi, M., Huang, S., Uemura, T., Miyakoshi, A., and Sakura Y. (2004): Climate reconstruction from borehole temperatures in Asia, WPGM, Hawaii, USA.

(受付 2005年 4 月20日)

(受理 2005年 6 月 8 日)

この論文に対する「討論」を2006年 2 月28日まで受付けます。