

地下水と地球環境

谷口 真人*

1. 水循環の要素としての地下水

石油などの化石燃料の消費による地球温暖化の例を見るまでもなく、20世紀は消費型の世紀であり、人口増加とグローバルイゼーションによる様々な地球環境問題が深刻化した。一方、世界銀行副総裁であったイスマイル・セラゲルディンのいう「21世紀は水の世紀」は、単に人口増加による水資源の枯渇や、国境を越えた水争いに代表される紛争などの社会問題のみをさすのではなく、「循環」の象徴としての「水」に焦点を当てた社会の合意形成の重要性を指摘したものであろう。水の問題は量だけでなく汚染などによる質も同様に重要であり、20世紀の枯渇資源利用型から、水に代表される循環型の資源を有効利用した社会を築いていく必要がある。

水循環の概念は、古くはアリストテレスの時代から存在する。アリストテレスは「雨は雲から降ってくる。雲は山の頂上付近でできる。それが動いてきて雨が降るように見える。」と観察し、雨は常に降り続けるので、常に山には雲ができなければならない、山には雲を作る源があり、そこから水が湧き出て雲を作り、雨が降ると考えた。そうすると、山の頂上には常に水源が必要となり、降った雨が地面を駆け上がり、山頂に水源を作ったと考えた。そうすれば、水が循環することを説明できると考えたわけである。現在の知識では水が移動する方向は間違っているが、循環するという考え方はすでに存在

していたことが伺える。

地球上の水循環の知識は、眼に見える雨・川・雪・氷河・海水にくらべ、眼に見えず評価しにくい地下水に関しては、その評価方法を含めてまだまだ十分とはいえない。しかし降雨・浸透・地下水涵養・地下水から河川／海への流出、あるいは地下水から土壌水・植生を介した蒸発散から降雨と、眼に見える水の水循環だけではなく眼に見えない地下水も含めて地球上の水はつながっており、地下水の有無が地球上の水循環に大きな役割を果たしていることが考えられる(谷口, 2005)。

地球規模での地下水資源量の評価を行ったユネスコと世界銀行の調査によると、2000年の段階で、年間2,000億トンの地下水存在量(貯留量)が減少している(Foster, 2000)。これは全世界の河川流量の約1/6であり、これを全球の水深にすると、全球陸上あたり約1.2ミリメートルとなる。アメリカ・オガララ帯水層(High Plain Aquifer)や中国・華北平原など大規模な地下水帯水層だけではなく、全球レベルで地下水貯留量が減少しているが(谷口, 2008)、この大量の地下水貯留量の減少はその後の移動先をふくめてまだ不明な点が多い。

地下水には大きく4つの側面がある。1つは利用可能なもっとも多い淡水資源であること、2つは人間生活も含めた地上の社会を支える環境地盤としての地下水、3つ目は物質運搬者としての地下水、そして4つ目は信仰も含めた文

*大学共同利用機関法人 人間文化研究機構 総合地球環境学研究所

61周年秋季講演会(平成19年11月11日)講演

化としての地下水である。ここでは、大気と陸を結ぶ地下水、陸と海を結ぶ地下水、人と自然を結ぶ地下水、の観点から、地下水と地球環境について概説する。

2. 大気と陸を結ぶ地下水

地下水涵養の源は雨であり、気候変動による降雨量の変動が地下水涵養量変動を引き起こす。Gurdak (2006) はエルニーニョ・ラニーニャなどによる降水量の周期的変動が地下水涵養量の変動を介して地下水位の周期的変動に現れていることを High Plain Aquifer で明らかにした (Gurdak, 2006)。過去100年程度の降水量の変化を見ると、アメリカ中南部では降水量減少のシグナルがわずかに見えるが、High Plain aquifer では農業活動に伴う地下水揚水による地下水貯留量の減少が著しい。

一方、人口増加と気候変動による水ストレス予測によると (Vörösmarty *et al.*, 2000)、気候変動による影響は全体の20%であるのに対し、人口増加による水資源不足によるストレスが80%と予想されている。地下水の場合はさらに人間活動による揚水の影響をより強く受けると考えられる。

降水の土壌浸透量、地下水涵養量を決める大きな要因の1つに、地表面での水と熱の分配比を決める土地被覆・植生の影響がある。一般に森林と草地・裸地を比較した場合、蒸散量の多い森林の方が、同じ降水量に対して、蒸散で大気に水を多く戻す分、地下水涵養量が少なくなる (谷口, 1989)。したがって「森林は地下水を増やす緑のダム」であるという表現は間違いであり、草地や裸地のほうが地下水涵養量は多い。しかし、森林は川への流出を遅らせたり、土砂の流出を防ぐという役割は持っており、「森林は水の流出を遅らせる緑のダム」という

点では正しい。実際、日本のような湿潤地域では降水は土壌浸透、地下水涵養、地下水から河川への流出をとおして海へ流出する経路が一般である。植生・土地利用は、オーストラリアでの森林伐採実験・植林実験の結果 (谷口, 1989) を見るまでもなく、地下水涵養と蒸発散量、表面流出へと、水の分配比を決める最も重要な要因となる。地下水資源管理と土地利用管理は一体として扱う必然性がここにある。

3. 陸と海を結ぶ地下水

陸から海への水の流出経路は、河川流出と直接地下水流出の2つに分けられる (図1)。グローバルスケールでの海洋への河川流出量に関してはその推定が行われているが、海洋への地下水直接流出に関しては不明な点が多い。全球スケールでの陸域から海洋への全流出量に占める地下水流出量の割合に関して、その推定値は0.01%~31%と非常に大きな幅を持っているが、全体として、海洋への全流出量の数%~10%が直接地下水流出成分で占められていると推定されている (Taniguchi *et al.*, 2002)。

上述のように水収支的には、海洋への直接地下水流出は全流出量の10%足らずであるとしても、地下水がもたらす物質輸送 (溶存物質負荷量) に関しては、通常地下水の溶存濃度が河川水のそれよりも大きいことから、地球化学的収支および生態系への影響の観点からは、海洋への直接地下水出は、量それ自身より重要であるといえる (Moore, 1996)。世界の大陸域での水循環解析を基にした地下水による海洋への物質輸送解析によると、海洋への直接地下水流出量は河川流出量の約6%であるが、地下水が海洋へもたらす塩類の量は、河川水がもたらす量の約50%であると推定している研究例もある (Zektser, 2000)。

沿岸域での地下水流出量は、降水や陸域での地下水ポテンシャル〔地下水位など〕変化等いろいろな要因で変動するが、潮汐の影響による海面変動に伴う地下水湧出量変化については、多くの観測結果がある（例えば Taniguchi *et al.*, 2006, Kim *et al.*, 2006）。これは、陸域の地下水位がほぼ一定条件下で、満潮時の海面上昇に伴い陸と海との動水勾配の減少に伴い地下水湧出量が減少し、逆に干潮時には動水勾配増加に伴い地下水湧出量が増加する現象である。

海水が地下水と接する沿岸域は地下水流動系の流出域に位置し、陸域から海域へ水が「流出」する場所であるが、同時に海側から見れば、陸から海へ水が「流入」する場所でもある。地下水と海水との境界（通常は海底堆積物境界）を通過するフラックスを直接測定するには、シーページメータ（地下水湧出量計）と呼ばれる装置がこれまでもちいられてきた。海底面を通過

する海底地下水湧出の成分（SGD: Submarine Groundwater Discharge）には、正味の地下水湧出（淡水成分 SFGD: Submarine Fresh Groundwater Discharge）に加えて、海水がいったん海底下に潜り再び湧出する「再循環水（RSGD: Recirculated Submarine Groundwater Discharge）」が含まれることが明らかになっている（図1, Taniguchi *et al.*, 2007 など）。この再循環水は、汀線における波や潮汐によって引き起こされ、物質循環を考察する上でも、その評価の必要性が指摘されている（Burnett *et al.*, 2001）。

一方、陸域からの淡水地下水流出成分を全地下水流出成分から分離するには、以下の水収支・物質収支式を用いる。

$$\text{SGD} = \text{SFGD} + \text{RSGD} \quad (1)$$

$$S_{\text{SGD}} \times \text{SGD} = S_{\text{SFGD}} \times \text{SFGD} + S_{\text{RSGD}} \times \text{RSGD} \quad (2)$$

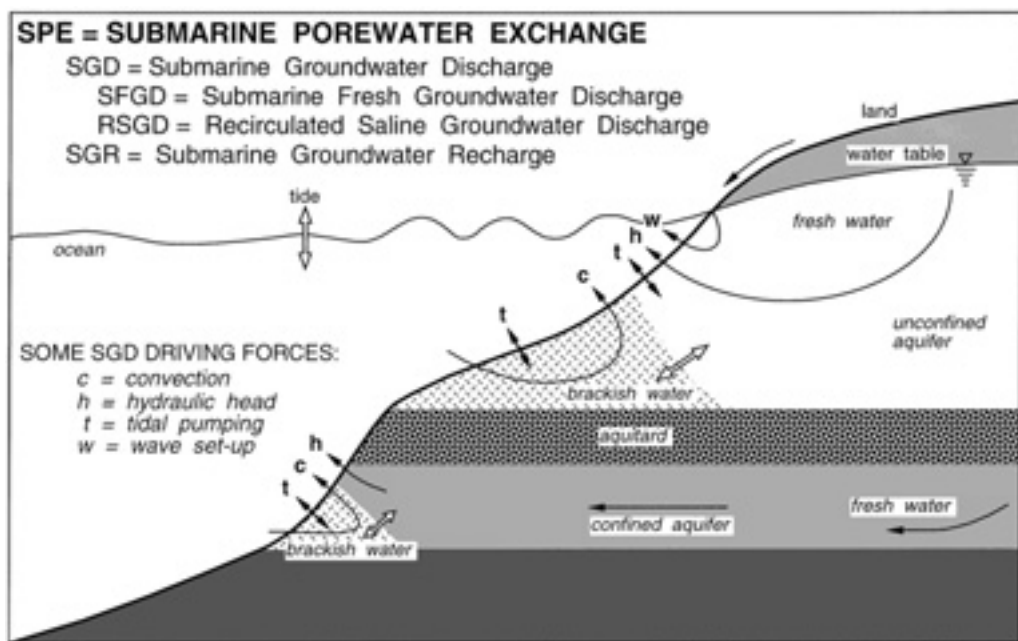


図1 Processes in submarine groundwater discharge near the coastal zone (Taniguchi *et al.*, 2002)

ここで S_{SGD} , S_{SFGD} , S_{RSGD} は流出地下水, 陸域淡水, 海水の各塩分濃度を示している. この陸域淡水と海水の2つのエンドメンバーを用いることで, 陸域起源の淡水地下水流出成分を分離することができる.

全球スケールでの海底地下水流出を評価するために, SCOR, LOICZ, IAEA, IHP/IOC, IAHS/IAPSO など様々な国際研究組織が共同で研究を行っている. 図2はその国際共同研究によって得られた成果のうち, 直接測定方法である地下水流出量計 (seepage meter) を用いて実測された海底地下水湧出量について, 淡水成分 (SFGD) と再循環水にわけて単位海岸線あたり・単位時間 [日] 当たりの流出量として表している (一部, 淡水成分と再循環成分に分離できなかった地域は全流出量 (SGD) として示している). グローバルな地下水流出の評

価にはまだ十分とはいえないが, 海底地下水流出量の測定が自動化されたことにより, そのプロセスも含めて徐々に明らかになってきている.

4. 地球環境問題としての地下水

これまで地球環境問題として大きく扱われてきたのは, 地球温暖化やオゾン層破壊, 大気汚染, 生物多様性の減少, 海洋汚染など, 眼に見える地面より上の現象が主であった. しかし, 地面の下には地球環境問題は存在しないのであろうか? 人口増加と都市化の進行で, 地下利用の拡大が進行し, 地下環境が人間社会の1つの環境空間になっているばかりでなく, 地下の生物環境としても人間活動の影響がどのように及んでいるのかを明らかにすることは重要である. 地下の環境は現在も将来も大切であると考えられるが, 現象として眼に見えない, 評価が

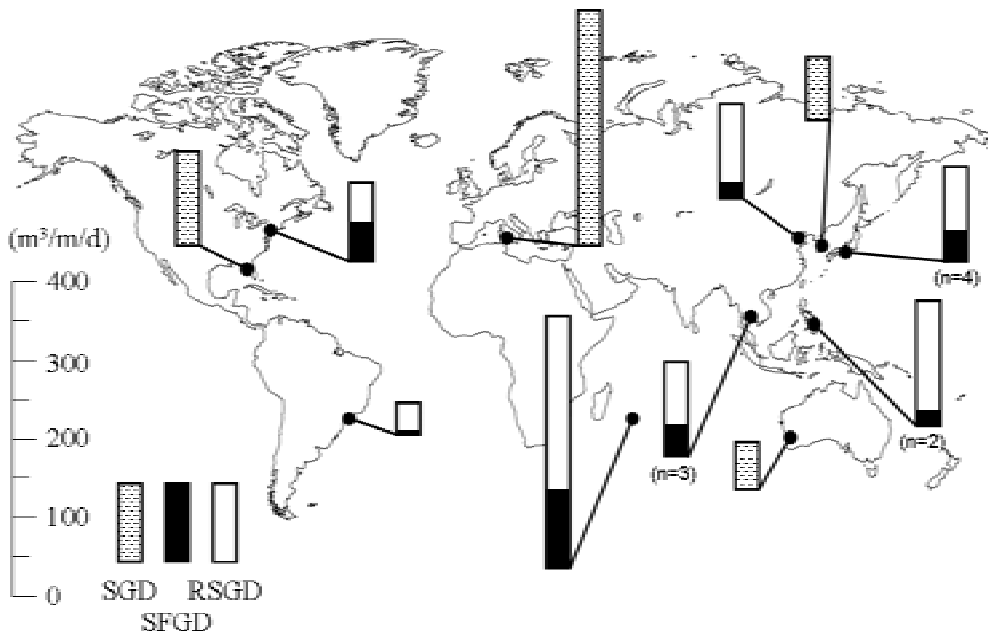


図2 Global assessment of Submarine Groundwater Discharge (SGD), Submarine Fresh Groundwater Discharge (SFGD), and Recirculated Submarine Groundwater Discharge (RSGD) (Taniguchi *et al.*, 2008)

難しいということで、これまでほとんど無視されてきた。

台湾では地球温暖化で気温が経年的に上昇し、雨の降り方が変わってきている (Wang, 2005)。総降水量にはほぼ変化はないが、降水日数の減少が明らかである。そのため、雨の降り方に依存する表流水 (ダム貯水) の水資源としての信頼性が低下している。台湾では1980年代まではダムによる表流水の水利用が多かったが、それ以降は表流水の水質低下もあいまって地下水の利用が急激に広がっている (Taniguchi, 2005)。その結果、台湾全土で地下水位の低下が著しい。表流水を水資源として利用していたものが、気候変動を主な理由として、地下水に水資源を転換させた例である。表流水は目に見えるので評価しやすいが、地下水は見えないので疎んじられがちである。目に見えない地下環境に影響を押しつけているのが現状である。

古くからの地下水環境問題は、塩水進入や地下水揚水による地盤沈下などである。これらに加えて、地下水の水質汚染は世界各地で大きな問題になってきている。ロンドンの例では河川水の硝酸汚染のピークはすでに1980年代に過ぎているが、地下水硝酸汚染のピークは数値モデ

ルによる予測では2010年と推定されている (Roberts and Marsh, 1987)。同じ汚染源であっても河川水と地下水の流速・滞留時間の差がこの違いをもたらしており、現在は顕在化していないが潜在化している地下水汚染を放置しておくことで、将来の水利用の未来可能性を食いつぶしているということもできる。

都市における人間活動と土地被覆改変によるヒートアイランド現象は、都市大気温度を周辺より著しく上昇するが、この影響は地下にも及んでいることが明らかになってきた (Taniguchi *et al.*, 2007)。アジアにおける都市の地下温度の鉛直分布を、東京・大阪・バンコク・ソウルで比較解析した結果によると、都市化の開始時期が地下温度に残存しており、都市化開始時期が古いほど地表面温度上昇の影響が深くまで及んでいることが明らかになっている。また市街地と郊外の地下温度を比較すると、市街地の地下温度上昇の著しいことが明らかであり、都市化の進展の状況が地下環境に残存していることが明らかになった。また地下温度の上昇により微生物活動が活発になり、土壌分解速度の促進により大気へのカーボンフラックスが増大し、温暖化を促進させる可能性も指摘さ

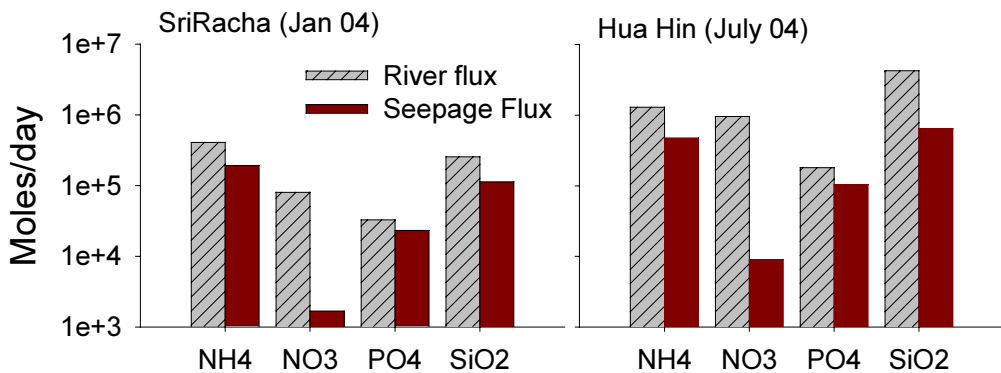


図3 Estimated fluxes in the flow of inorganic and organic nutrients into the Upper Gulf of Thailand via the rivers (slashed) and groundwater (dark color).

れている (Knorr *et al.*, 2005). さらに図3は、アジアの沿岸都市からの地下水流出による海への物質負荷量を評価した例で、バンコク湾における雨季と乾季の地下水流出と河川流出による各栄養塩類の流出量を示している。リンや珪酸などは、河川水と同様の付加が地下水によって海へもたらされていることが明らかである。

人口の増加、都市への人口の集中は、時間の遅れを伴ってアジアの諸都市で次々と起きている。産業の発達による地下水揚水量の増大は地下水位の低下をもたらし、他の地域においても同じように時間の遅れを伴って次々と発生している (Taniguchi, 2007). 揚水による地下水位の低下は、東京が1960~70年に最低水位を示し、1980年代に台北、1990年代にバンコクと続いた。地下水位の低下は、軟弱な地盤に都市が形成されているアジアの沿岸諸都市では地盤沈下の被

害をもたらし、東京では1970年代に、そして台北、バンコクと時間のずれを伴って発生した。地盤沈下や地下水汚染、地下熱汚染のような地下の環境汚染が都市の発達段階において、時間の遅れを伴って次々とアジアの都市で起こっている (Taniguchi, 2007, 図4).

5. 未来可能性と地下水

地下水研究のこれまでの歴史を見ると、物理学的な水量の評価から始まり、化学的な水質評価に移り、生物・生態系への影響評価となり、さらに経済・政治学的観点からの水管理になり、最後に文化としての地下水の評価にまで及んでいる。地下水を含めて水の管理を行ううえで、Too Much Water (to control, 水が多すぎて管理できない) や Too Little Water (to survive, 水資源が少なすぎて生存できない) とい

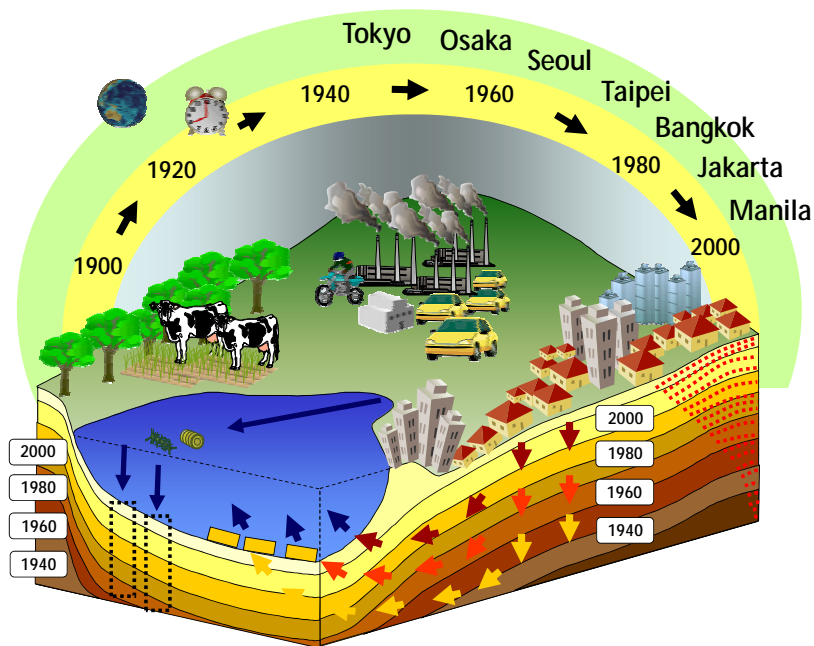


図4 Schematic diagram of the RIHN project “Human Impacts on urban subsurface environment”

う水量の問題はこれまでもいわれてきたが、地球上に存在する水のアンバランスは、現在の空間分布に見られるアンバランスのみの議論では収まらない。

アメリカ西部の半乾燥地域へのコロラド川からの水の導入や、中国の南水北調（長江から黄河をまたいで北京までの水運）などは、上記の too little water を克服するためにそれぞれの国の命運をかけて建設（予定含む）されたものである。つまり、水を動かすことによって人間生活を維持してきたことを意味する。しかしこの水を動かすことによって汚染の問題を含めて様々な地球環境問題がいたちごっこのように表れてきたことも事実である（RIHN, 2006）。

地球上を循環している地下水は、時間を限定せずに、循環している量だけに使用を限れば無限な水資源といえる。しかし、短時間に回復しない（滞留時間の長い）深層地下水を地下水涵養量以上に使えばなくなってしまうので、そういう意味では有限の水資源といえる。オガララ

帯水層や華北平原における深層地下水を用いた農業活動は、滞留時間の長い“遅い”地下水を涵養量以上に利用している点で、持続的な水利用とは言いがたい。一方、too much water に代表される湿潤地域では、逆に水を流動させないことによる問題が発生している。東京や大阪では地盤沈下による地下水揚水規制により、地下水位が著しく回復し、地下水位低下時に建設された地下鉄駅などの地下構造物が浮き上がる問題が発生している。地下水位上昇による浮力で持ち上がる地下鉄駅をくい止めるために、錘やアンカーなどで対処的な療法を施しているのが現状である。日本のような湿潤地域では、地下水涵養量を超えない範囲で地下水を有効利用することが重要であるといえる。

バーチャルウォーター（virtual water）やフードマイレージ（food mileage）は、グローバル化が進む現代における地球環境問題の捕らえ方のひとつとして注目されている。バーチャルウォーターとは、例えば牛を生育させるのに

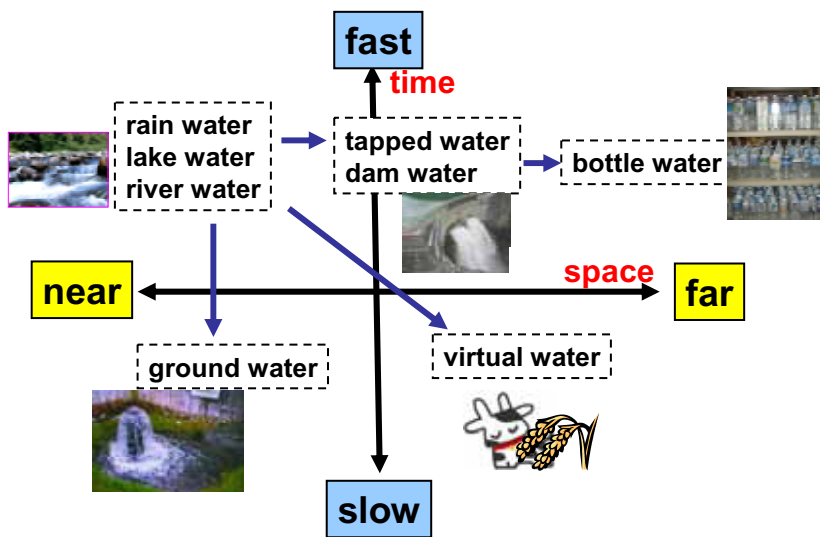


図5 Water Imbalance in space and time; “too far water” and “too slow water”

飼料としてトウモロコシが必要であり、そのトウモロコシを栽培するのに水が必要となる。つまり牛肉を輸入するという事は、それだけ水を輸入するのと同じことだという考えである。「水」という価値に置き換えることで、雨の少ない半乾燥地域のアメリカなどから雨の多い日本への「水の輸入」に対する是非を問うものである。日本へのバーチャルウォーターの輸入量は年間1,035億トン程度と推定されており、日本における年間水資源使用量890億トンより多い量となっている。フードマイレージに関しても日本は世界有数のマイレージ数になり、物〔水など〕を動かすことで付随施設の建設・輸送などでエネルギー消費を増大させている。水の豊富な日本でペットボトルなどのボトル水を輸入し、食糧をはじめ様々なものを移動・輸入する現在の日本の水利用の状況に未来可能性はあるのだろうか。

これまでの水利用の歴史を見ると、人口増大・都市への人口集中に伴って、それまで“近い水”である雨水・池水あるいは浅い井戸水などを使っていたものが、少し離れた場所にダムを建設し、川の水を大量にためて「遠い水」を tapped water として使うようになった。さらにボトル水の輸入に代表されるように、流域や国境を越えて“より遠くの水”を使うようになっている(図5)。一方で、近場の水としては、滞留時間の短い浅層地下水や雨水・池の水の利用から、アメリカ・オガララ帯水層や華北平原で見られるように、より深い地下水(より滞留時間の長い“遅い”水)を使い始めた。半乾燥地域のアメリカ中西部や中国北部での地下水資源の利用であるバーチャルウォーターは“遠くて遅い水”を輸入していることを意味する。このように現在の水の利用形態は“速くて近い水”から、“遠くて遅い水”への水資源利用変化と見るこ

とができる。これを滞留時間や地下水涵養量などの正確な理解なしに進めると、水利用の未来可能性を損ねる可能性があることに十分注意すべきであろう。

6. おわりに

水循環と物質循環の経路の一形態としての地下水は、その評価がまだ十分であるといえない。地下水は「大気と陸」や「陸と海」をつなぐばかりでなく、“近くて早い水”から“遠くて遅い水”への水資源利用変化に見られるように、人間社会と自然を未来可能性の観点からつなぐ重要な水資源といえる。地下水の持続的利用の基本である地下水涵養量や地下水滞留時間を明らかにした上で、未来可能性を損なわない地下水利用を行うべきであろう。

参考文献

- Burnett, W.C., Taniguchi M., and Oberdorfer, J.A., 2001. Assessment of submarine groundwater discharge into the coastal zone. *J. Sea Res.* **46**: 109-116.
- Foster, S.S.D. (2000): Groundwater at the world forum, IAH News, 2000.
- Gurdak, J. (2006): Human and climate stress on ground water: Life and water on high plain aquifer, United State, Proc. RIHN International Symposium, 89-96.
- Kim, G. and Hwang, D.W., 2002. Tidal pumping of groundwater into the coastal ocean revealed from submarine Rn-222 and CH₄ monitoring, *Geophys. Res. Lett.*, **29**: 1-4.
- Knorr, W., Prentice, I.C., House, J.I., and Holland, E.A., 2005. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming,

- Nature, **433**: 298-301.
- Moore, W.S., 1996. Large groundwater inputs to coastal waters revealed by ^{226}Ra enrichments. *Nature* **380**: 612-614.
- RIHN, 2006. Summary and open discussion, Proc. RIHN 1st International Symposium, Nov. 6-8, 2006, 72-73.
- Roberts, G. and Marsh, T., 1987. The effects of agricultural practices on the nitrate concentrations in the surface water domestic supply sources of Western Europe, in *Water for the Future: Hydrology in Perspective*. IAHS Publ., **164**: 365-380.
- Taniguchi, M. 2002. Tidal effects on submarine groundwater discharge into the ocean, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, (12): 1-3, 10.1029/2002GL014987.
- Taniguchi, M., W.C. Burnett, J.E. Cable, and J.V. Turner, 2002. Investigations of submarine groundwater discharge: *Hydrological Processes* **16**: 2115-2129.
- Taniguchi, M., 2005. Introduction of RIHN project 2-4 "Human impacts on urban subsurface environment", Proc. 1st International Symposium on "Human Impact on urban subsurface environment", Oct 18-20, 2005, Kyoto, Japan, 1-8.
- Taniguchi, M., T. Ishitobi and J. Shimada, 2006: Dynamics of submarine groundwater discharge and freshwater-seawater interface: *J. Geophys. Res.* **111**: C01008, doi: 10.1029/2005JC002924.
- Taniguchi, M., Uemura T., and Jago-on K., 2007. Combined effects of urbanization and global warming on subsurface temperature in four Asian cities, *Vadose Zone Jour.*, **6**: 591-596.
- Taniguchi, M., 2007. Human and climate impacts on subsurface environment in Asia, Proc. 2nd International Symposium on "Human Impact on urban subsurface environment", Dec. 4-8, 2007, Bali, Indonesia, 1-4.
- 谷口真人, 1989. オーストラリア・パースにおける異なる植生下での地下水涵養量の比較研究, 筑波大学水理実験センター報告, **13**: 71-76.
- 谷口真人, 2005. 気候変動と地下水, *地下水学会誌*, **47**: 5-17.
- 谷口真人, 2008. 人工衛星で見る地下水, *人と水*, **4**, 2-5.
- Vörösmarty, C.J, Green P., Salisbury J., Lammers R., 2000. Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth. *Science* **289**: 284-288.
- Wang, C.H., 2005. Subsurface environmental changes in Taipei, Taiwan: current status, Proc. 1st International Symposium on "Human Impact on urban subsurface environment", Oct 18-20, 2005, Kyoto, Japan, 55-59.
- Zektser, I.S., 2000. *Groundwater and the Environment*, Lewis Publishers, Boca Raton, 175.