

全国一級河川の海底地下水湧出量 評価における問題点

伊藤 成輝¹⁾・丸井 敦尚²⁾

1. はじめに

海底地下水湧出とは、「陸海の境界を横切って海域に直接流出する地下水」という水文学上の定義がある(Church, 1996). 地下水としての湧出量は、海洋への河川流出量の数%~10%と推定され(谷口, 2001; Burnett *et al.*, 2003; Slomp and Van Cappellen, 2004), 淡水資源として十分な量であるにもかかわらず、ほとんど利用されていないのが現状である。

近年問題視されている地球温暖化は世界的な渇水を引き起こす可能性が高く(IPCC, 1988), 安定した水資源を長期的に確保するためには、水源の多様化が必要であると提言されている(国土交通省, 2006). 海洋へ流れ出ている海底地下水湧出は湧出量の季節的な変動も少なく、地下水の採取法さえ確立すれば有望な水源になるといえよう(丸井・安原, 1999).

一方、海底地下水湧出は、海域に物質を輸送する主要経路の一つであり(Bokuniewicz, 1980), 沿岸域が汚染されている場合、海洋汚染の大きな原因になる。また、現在の日本では、二酸化炭素の地中貯留や高レベル放射性廃棄物の地層処分について、沿岸域立地の可能性が議論されている(原子力発電環境整備機構, 2002)ことから、環境を保護する上でも、海底地下水湧出研究は重要な役割を果たすと考えられる。特に沿岸域では、上向きの地下水流動による物質移動が、貯留または処分性能に影響を与えるとされ(核燃料サイクル開発機構, 2005), 地下深部から海底に向かって上昇してくる海底地下水湧出の定量評価が地点選定には重要である。

このような背景から、海底地下水湧出量の把握は、沿岸域の水資源開発と環境保護にとって、社会的意義が大きい。しかし、海底地下水湧出の特性は地点毎に異なり、湧出量も地域によって異なっている。そ

こで本研究では、日本列島を対象とした海底地下水湧出量の地域別把握を実施し、列島の水環境を概観する一つの因子となりうるか検討することにした。

2. 評価法および使用データ

2.1 評価の方法

海底地下水湧出量の評価法には、数値解析と現地調査がある。現地調査では、シーページメーターやトレーサーを用いて湧出量を直接計測するが(Zektser and Dzhamalov, 2006), 石飛ほか(2007)によれば、現地調査は「点」としての測定であり、未だ陸上の流域規模に匹敵する広域での測定は行えないのが現状である。したがって、日本列島全体を対象とするような広域研究では、数値解析による評価しか実施できない。数値解析には、水収支法と地下水流動量計算法(シミュレーション)がある。水収支計算は、全国一律の条件下で計測された気象および水文データを入力値とするが、得られる海底地下水湧出量は間接的な評価値である。すなわち計算精度は利用するデータ群の最も下位のものに従わざるを得ないことになる。他方、地下水流動量計算は、帯水層からの流出を直接計算できるが、透水係数等の水理定数を全国にわたって設定しなくてはならず、高精度化はあまり期待できない(Landon *et al.*, 2001)。

本研究では、全国での比較には一律条件でのデータ入手が重要であると考え、水収支計算によって一級河川流域毎の評価を行うことにした。このような海底地下水湧出量の全国評価はこれまでに類を見ないが、高精度に全国を把握できれば、将来の二酸化炭素貯留や放射性廃棄物地層処分における地点評価ツールとして利用できる。そこで、全国の一級河川103流域を対象に、1993~2002年の海底地下水湧出

1) 株式会社ニュージェック
2) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード: 沿岸域, 水資源, 環境, 地球温暖化, 渇水, GIS, SGD, 海底湧出地下水, 海底湧水, 回帰分析

量を水収支で試算し、日本列島の海底地下水湧出量の概況を把握するとともに評価の問題点を考察した。

2.2 年間水収支法の基本式

海底地下水湧出量は、下式に示す年間水収支法 (mean perennial water-balance method; Zektser and Dzhamalov, 2006) で流域毎に評価した。

$$SGD = P - E - R \quad (1)$$

ここでは、 SGD ：海底地下水湧出量 (Submarine Groundwater Discharge), P ：降水量 (Precipitation), E ：蒸発散量 (Evapotranspiration), R ：河川流出 (Runoff) である。

$P - E$ は有効雨量といい、土木学会 (1999) によると、地表に達する降雨のうち流出成分になる降雨分を指すとされている。すなわち、年間水収支法での有効雨量とは、深部浸透と年間貯留雨量変化を無視した成分 (降水量から蒸発を減じた地下浸透量) と考える。また、 R は河川水としての海洋への流出量であるが、便宜的に最下流観測所の流出高とした。

2.3 使用データ

流域界、河川流量、降水量、蒸発散量に関する以下のデータを使用した。

流域界データは、全国の一級河川^(注1)に対し、財団法人日本地図センターのJMCマップ (河川流路データ) と国土交通省の国土数値情報 (流域界 (面) データ) から、GISでデータ化した。国土数値情報 (流域界 (面) データ) は、都道府県別の小流域ポリゴンの集合体であったため、GISソフト (株式会社インフォマティクス製「SIS」) で流域界に沿った線要素に変換した。ただし、相模川 (関東) は流量年表に観測結果が掲載されていなかったため、評価の対象外とした。同様に、網走川 (北海道)、鳴瀬川 (東北)、物部川 (四国)、矢部川 (九州)、大分川 (九州) は、流量観測所近傍の分水や河川合流が煩雑であったため、今回は評価の対象外とした。

河川流量データは、国土交通省の流量年表に記載された全国約380ヶ所の観測データのうち103流域における最下流観測所での年平均流量を用いた。流量年表には、各観測所の365日分の日流量が記載されており、1日でも欠測があれば、その年の平均流量は

計算せず、(その年を) 評価の対象外とした。

降水量データは、気象庁のアメダス再統計値から、全国1,139地点の降水量データを用いた。アメダス (AMeDAS: Automated Meteorological Data Acquisition System; 地域気象観測システム) は、全国約1,300地点で1時間毎に気象データを観測するシステムである。1つの観測点が代表する範囲は、ティーセン法 (Thiessen, 1911) で区分した。観測点の年降水量は、月降水量を12ヶ月分積算した。月降水量は、日統計値に20%以下の欠測を許容する準完全値までを用いた。月降水量の欠測点を除くと、1993～2002年でデータ入手可能な観測点は、全国で1,139地点であった。

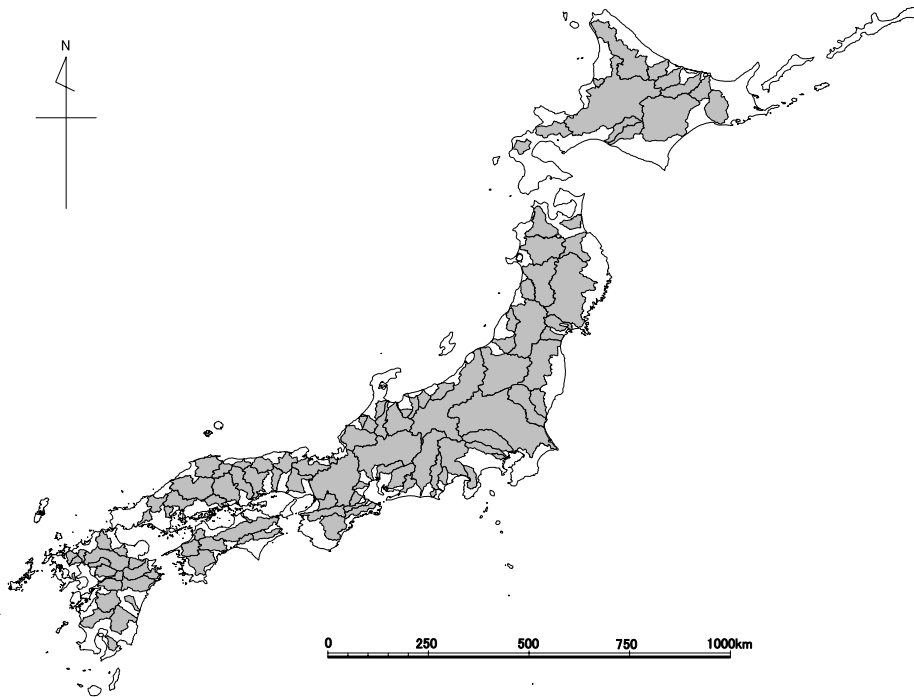
蒸発散量データは、気象庁のアメダス再統計値による全国700地点の月平均気温データから、ソーンスウェイト法 (Thornthwaite, 1948) で可能蒸発散量を計算し、蒸発散比0.7を乗じて各ティーセンエリアの蒸発散量データとした。可能蒸発散量の推定法にはペンマン法 (Penman, 1948) 等もあるが、より多くの入力データが必要であり、月平均気温から算出可能なソーンスウェイト法は、広域評価に適している。また、日本列島の蒸発散比は0.6～0.8程度の範囲で季節変化し、通年平均は0.7程度であるとされる (山内ほか, 2000)。岐阜県東濃地域で0.7 (宮原ほか, 2002)、多摩川流域で0.6 (齋藤・三宅, 2003) とした事例がある。

3. 結果

3.1 一級河川103流域での評価

全国の一級河川103流域 (第1図) に対し、1993～2002年の海底地下水湧出量 (単純平均) を計算した。(1) 式を使った103流域の海底地下水湧出量は $-1,716 \sim 546 \text{ mm/yr}$ の範囲に分布し、単純平均は -283 mm/yr 、面積加重平均は -310 mm/yr 、中央値は -232 mm/yr となった。ヒストグラムは、 $-300 \sim -200 \text{ mm/yr}$ を峰として、正の方向に対して漸減し、負の方向に歪んだ分布となった (第2図A)。

海底地下水湧出量の全国分布 (第2図B) は、北海道と東北で全流域が負値と評価され、関東より南西で比較的大きな値を示した。使用したデータの精度を吟味していないため誤差を含む可能性があるものの、同図は日本列島の海底地下水湧出量分布を相対的に表現しているといえる。しかし、負の海底地下水



第1図 年間水収支法で海底地下水湧出量を評価した全国の一級河川103流域の分布。

湧出量は、一般的には地下水が海洋に流出せず塩水化が起こったり、地盤沈下が発生していることを示す。今回の評価では、東北日本全域に地下水障害が起こっていることになる。

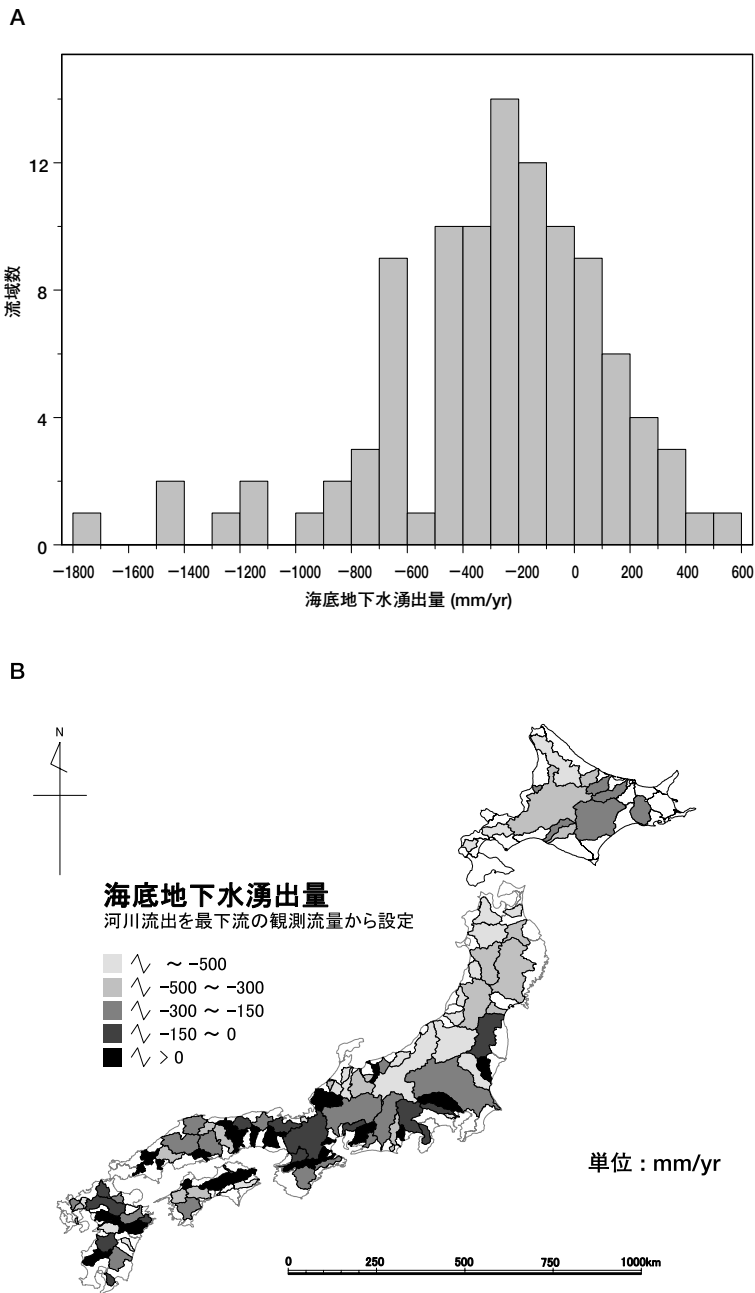
3.2 調査実績のある流域での評価結果(実データとの比較)

Taniguchi *et al.* (2005) は、中部地方の一級河川である安倍川流域で2002年の1年間における海底地下水湧出量を年間水収支法で175mm/yrと評価した。本研究による安倍川流域での評価結果では、1993～2002年の10年間で、流量データの欠測年を除く4年分の評価結果が得られ、その内訳は174mm/yr (1993年)、401mm/yr (1994年)、35mm/yr (1995年)、601mm/yr (2001年)であった。これらの単純平均は303mm/yrであった。

また、現地調査の実績がある黒部川流域(徳永ほか, 2003)に対しては、同様に1993～2002年の10年間で、2000年を除く9年分の評価結果が得られ、評価値の範囲は-344mm/yr (1995年)～576mm/yr (2002

年)であり、単純平均は200mm/yrであった。

この結果を見る限り、海底地下水湧出の既往調査実績がある流域では、本研究でも正の海底地下水湧出量を示した^(注2)。よって、日本列島のほぼ全域(特に東北日本全域)で地下水障害が起こっているとした前節の結果を否定できないが、国土交通省(2006)によれば、日本列島の地下水使用量は平均で約49mm/yrに過ぎず、有効雨量(全国平均1,250mm/yr)に大きく及ばない。また、環境省による平成17年度の全国の地盤沈下状況(平成18年12月21日発表)によれば、測定地域34地域中4cm以上の地盤沈下は0地域、2cm以上が7地域であった。工業用水法(昭和31年施行)やビル用水法(同37年施行)による地下水利用規制以降、全国の地盤沈下状況は、概ね収束状態に向かっていると報告されており、全国の地下水位観測にも大きな低減が見られないことなどから、現在の日本では、地下水障害が起きるような大規模な地下水利用はなされていない。よって、本研究は海底地下水湧出量を過小評価した可能性が高く、得られた単純な計算結果には疑問が残ると考えざるをえない。



第2図 全国の一級河川103流域で評価された海底地下水湧出量。
A:ヒストグラム, B:色分け図.

4. 考察

4.1 海底地下水湧出量が見かけ上負値となる原因

多くの流域で負の海底地下水湧出量を示し、河川

流出が有効雨量を見かけ上超える結果となった理由として、有効雨量の過小評価と、河川流出の過大評価の両面が考えられる。しかし、有効雨量の計算に用いたアメダスは全国を網羅しており、測点数も流量観

測所より多い。個々の観測精度も品質と均質性が確保されており高精度であると考えられる。これに対し、河川流出の評価精度は、最下流の流量観測所の観測精度に依存しているため、特に流量の大きな期間での精度に問題がある(水位-流量(H-Q)変換曲線の外挿に伴う誤差拡大)。さらに、データ空白域の流出も不明であることなどから、河川流出の評価精度が相対的に低いと考えるのが妥当である。

河川流出が過大評価となる理由として、もうひとつは最下流の流量観測所が河口より内陸部に位置することが挙げられる。この場合、沿岸域の流量増減が考慮されない点が問題となる(Taniguchi *et al.*, 2003)。本研究は、河川流出を最下流部の流量観測所における流出高に等しいと仮定した。このため、河川の地下水涵養が大きい場合、データ空白域となる沿岸域の流量補正が必要となる(現状ではなされていない)。

4.2 年間水収支法の精度向上策

河川流出の評価精度を向上させる最も単純な方法は、河口近くの河川流量を実際に測定することである。しかし、全国の一級河川103流域での再測定は、時間とコストの面から不可能である。また、河口近くは河川断面が大きく、塩水遡上などを考慮する必要もあり、内陸部に比べて河川水位から流量への変換が困難である。

一方、データ空白域となる沿岸域の流量は、統計処理で補正可能であり、河川流出の評価精度向上につながる可能性がある。統計処理の方法として、河川流量と各種流域特性との関連付けが考えられる。そこで、103流域で得られた海底地下水湧出量は流域毎の大小を相対的に表しているとして、流量特性の一つである有効雨量と単回帰分析で比較した。その結果、回帰直線は負の勾配を示し、有効雨量が大きな流域で海底地下水湧出量が小さくなる傾向を示した(決定係数 $R^2=0.4866$)。

さらに、各流域の有効雨量を、新第三紀(N2)以降、新第三紀(N1)~中生代、古生代の各地質の面積比で配分し、地質別有効雨量と称して、海底地下水湧出量との単回帰分析を再度行った(注3)。新第三紀(N2)以降への地質別有効雨量との回帰は、 R^2 が0.5774に上昇し(第3図A)、海底地下水湧出量と地質特性との相関が示唆された。このことは河川流出と地質特性に相関があることと同意である。

また、沿岸域のデータ空白域が流域面積の5%以下となる14流域を抽出し(注4)、同様の単回帰分析を行うと、 R^2 は0.802に上昇した(第3図B)。前述したように、データ空白域の面積が小さければ、海底地下水湧出量の評価精度が改善されることを示している。よって、年間水収支法の精度は、データ空白域の河川流量を地質特性から予測・補正することで高度化の可能性があると判明した。

すなわち、本研究で示した海底地下水湧出量の全国分布図は、未補正の河川流量に基づいて評価されているため、湧出量を地域間で相対的に表したものである。

5. おわりに

日本列島の海底地下水湧出量を地域別に把握するために、全国一律の条件でデータ入手可能な水収支計算で、一級河川103流域で評価を行い、全国の海底地下水湧出量分布を相対的に比較することができた。この結果、関東地方より南西部では海底湧出地下水が認められるものの、北海道・東北地方では海底湧出地下水が認められない結果となった。既往の調査実績がある安倍川と黒部川では、正の海底地下水湧出量を示したが、多くの流域では見かけ上負値を示した。これは地下水障害とも考えられるが、現実的な現象を適切に表現しているとは言いがたい。

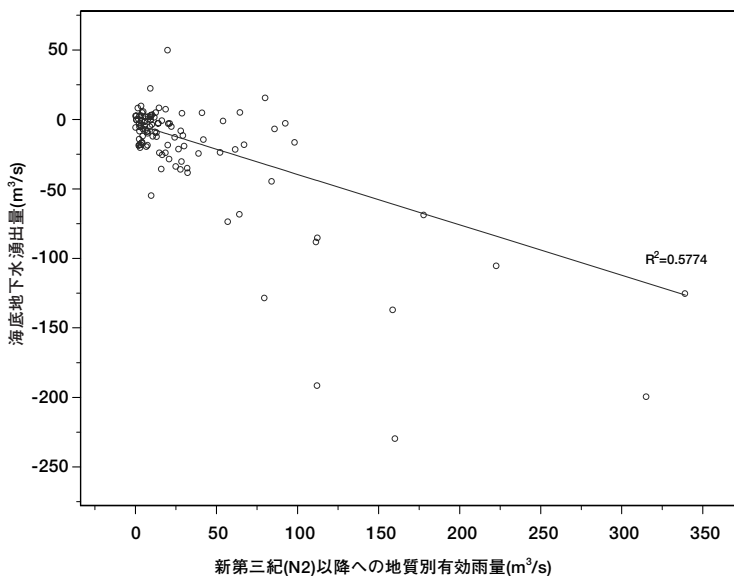
海底地下水湧出量が見かけ上負値となる原因として、河川流出の過大評価が考えられた。河川流出は最下流部の流量観測所の流出高に等しいとしたが、データ空白域となる沿岸域の流量補正によって河川流出の見直しが必要とした。

一方、103流域で得られた見かけの海底地下水湧出量は、地質別有効雨量と相関があり、データ空白域の面積が小さければ相関はより強くなった。本研究の計算結果は、現状でも列島の地下水流出環境を相対的に表現していると言えるが、河川流出を地質特性で補正することで高度化の可能性がある。今後は、地質データと河川流量データを詳細に検討することで年間水収支法を高度化し、海底地下水湧出量の全国分布を再評価したい。

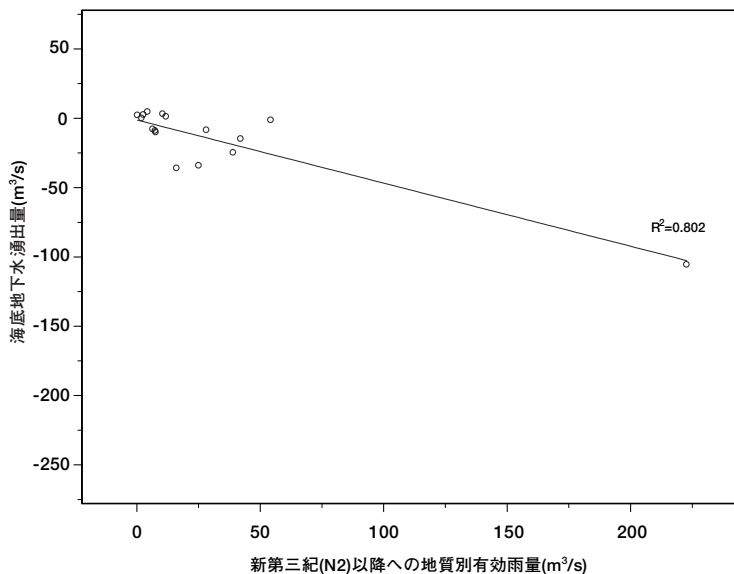
(注1)

一級河川とは、河川法(1964年制定)によって、国土

A



B



第3図 海底地下水湧出量と新第三紀(N2)以降への地質別有効雨量との単回帰分析。
 A：103流域を対象，B：データ空白域が5%以下となる14流域を対象。

交通大臣が指定した国土保全上又は国民経済上特に重要な水系である。

(注2)

これまでの流域規模の調査で負の海底地下水湧出

量が示された事例はない。国外では、Pluhowski and Kantrowitz (1964)は、ニューヨーク州ロングアイランドのSuffolk郡Babylon-Islip地区に年間水収支法を適用し、SGDを44mm/yrと評価した。国内の一級河川以

外でも、熊本県不知火の小流域では430-624mm/yrとした事例がある(Taniguchi *et al.*, 2006). 大きな湧出量が見込まれる地点を対象とした流域規模の研究からは、水収支計算での評価が見かけ上、負値を示す問題点を見出せなかった。

(注3)

各流域の地質別有効雨量を求めるために、地質データは、産総研(2003)の200万分の1数値地質図を用いた。地層・岩体は、時代と岩相(岩石の種類)で43区分されている。全国一級河川103流域の43地質区分の分布比をGISで計算して主成分分析を行うと、新第三紀(N2)以降、新第三紀(N1)~中生代、古生代の3グループに分類できた。主成分分析は、多変量の変動を少数の指標を用いて表す手法である。第1主成分は、古生代の地質の分布比に対して正の相関、新第三紀(N2)以降に対して負の相関を示した。

(注4)

全国の一級河川103流域におけるデータ空白域の大きさは、流域面積との比で表すと0.01~0.65であった。なお、103流域の単純平均は0.14であった。

参 考 文 献

- Bokuniewicz, H. (1980) : Groundwater Seepage into Great South Bay, New-York. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 10, 4, 437-444.
- Burnett, W. C., H. Bokuniewicz, M. Huettel, W. S. Moore and M. Taniguchi (2003) : Groundwater and pore water inputs to the coastal zone. *Biogeochemistry*, 66, 1-2, 3-33.
- Church, T. M. (1996) : An underground route for the water cycle. *Nature*, 380, 579-580.
- 土木学会(1999) : 水理公式集 平成11年版.
- 原子力発電環境整備機構(2002) : 処分場の概要, 高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域の公募関係資料-2.
- IPCC (1988) : The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability. IPCC Special Report.
- 石飛智穂・谷口真人・嶋田 純(2007) : 沿岸海底湧出量測定による塩淡水境界変動と地下水流出の評価. *地下水学会誌*, 49, 3, 191-204.
- 核燃料サイクル開発機構(2005) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築-平成17年取りまとめ-.
- 国土交通省土地・水資源局水資源部(2006) : 日本の水資源 平成18年版.
- Landon, M. K., D. L. Rus and F. E. Harvey (2001) : Comparison of instream methods for measuring hydraulic conductivity in sandy streambeds. *Ground Water*, 39, 6, 870-885.
- 丸井敦尚・安原正也(1999) : 塩水-淡水境界に関わる地下水流動研究. *日本水文学会誌*, 29, 1, 1-12.
- 宮原智哉・稲葉 薫・三枝博光・竹内真司(2002) : 広域地下水流動研究実施領域における水収支観測結果と地下水流動スケールの検討. *サイクル機構技報*, 16, 137-148.
- Penman, H. L. (1948) : National evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London, Ser. A, Mathematical and Physical Sciences*, 193, 120-145.
- Pluhowski, E. J. and I. H. Kantrowitz (1964) : Hydrology of the Babylon-Islip Area Suffolk County Long Island, New York. USGS Water-Supply Paper, 1768.
- 齋藤 庸・三宅紀治(2003) : 関東平野南西域の地下水収支に関する検討. *日本水文学会誌*, 33, 3, 197-214.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター(2003) : 200万分の1日本地質図第5版CD-ROM版. 数値地質図G-10.
- Slomp, C. P. and P. Van Cappellen (2004) : Nutrient inputs to the coastal ocean through submarine groundwater discharge: controls and potential impact. *Journal of Hydrology*, 295, 1-4, 64-86.
- Taniguchi, M., W. C. Burnett, J. E. Cable and J. V. Turner (2003) : Assessment methodologies for submarine groundwater discharge. *Land and Marine Hydrology*.
- Taniguchi, M., T. Ishitobi and K. Saeki (2005) : Evaluation of time-space distributions of submarine ground water discharge. *Ground Water*, 43, 3, 336-342.
- Taniguchi, M., T. Ishitobi, J. Shimada and N. Takamoto (2006) : Evaluations of spatial distribution of submarine groundwater discharge. *Geophysical Research Letters*, 33, 6, -.
- 谷口真人(2001) : 地下水と地表水・海水との相互作用-4. 海水と地下水との相互作用. *地下水学会誌*, 43, 3, 189-199.
- Thiessen, A. H. (1911) : Precipitation averages for large areas. *Monthly Weather Review*, 39, 1082-1084.
- Thornthwaite, C. W. (1948) : An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38, 55-94.
- 徳永朋祥・中田智浩・茂木勝郎・渡辺正晴・嶋田 純・張 勁・蒲生俊敬・谷口真人・浅井和見・三枝博光(2003) : 沿岸海底から湧出する淡水性地下水の探査および陸域地下水との関連に関する検討-黒部川扇状地沖合での例-. *地下水学会誌*, 45, 2, 133-144.
- 山内大祐・宮原智哉・竹内真司・小田川信哉(2000) : 超深地層研究所計画用地周辺の水収支観測結果. *サイクル機構技報*, 9, 12, 103-114.
- Zektser, I. S. and R. G. Dzhamalov (2006) : *Submarine Groundwater*. Taylor & Francis, London.
- Ito Narimitsu and Marui Atsunao (2007) : Problems of submarine groundwater discharge by perennial water-balance in class A river basins of Japan.

<受付:2007年4月16日>