

「沿岸海底湧水の地球科学」にあたって

張 勁*・蒲生俊敬**

(2005年7月27日受付, 2005年7月27日受理)

Preface to “Geosciences of submarine groundwater discharge”

Jing ZHANG* and Toshitaka GAMO**

* Faculty of Science, Toyama University,
3190 Gofuku, Toyama 930-8555, Japan

** Ocean Research Institute, the University of Tokyo,
1-15-1 Minamidai, Nakano, Tokyo 164-8639, Japan

The discharge of freshwater from the seafloor of the continental shelf is recognized as an important, direct transport pathway both for water and other materials between the land groundwater system and the marine environment. This submarine groundwater discharge (SGD) is possibly more important than its contribution to the water balance alone would suggest, because the concentration of dissolved material is greater than that of river water, and much of the riverine dissolved material is removed by colloids and/or uptaken by phytoplankton in the estuary region. In this special issue, 7 original papers and 1 short report are incorporated, focusing on recent SGD geochemistry research in Japan.

海洋における物質循環や地球化学的収支を考える上で、従来は河川の流入、大気経由の降下、中央海嶺や海底火山の噴火に伴う熱水の湧出などが主要な化学物質の供給源であると考えられてきた。しかし、最近の沿岸域における陸水循環の研究からは、地下水の海底面下からの直接湧出に伴う物質供給の重要性が指摘されるようになってきている。

このような沿岸海底湧水は、数十年前からその存在が報告 (Kohout *et al.*, 1966; Lee *et al.*, 1977) されてきて以来、特に現在、観測技術の飛躍的な進歩によって、陸棚域でごくありふれた現象として捉えられるようになってきた。これまでに報告された海底湧水の例としては、南米・北米の大陸棚では、カリフォルニア沖 (Muir, 1986; Oberdorfer *et al.*, 1990), フロリダ (Back and Hanshaw, 1970; Barraclough and Marsh, 1962; Belanger and Walker, 1990; Belanger *et al.*, 1997; Brooks *et al.*, 1993; Cable *et al.*, 1997;

Cao *et al.*, 1999; Chanton *et al.*, 1991; Cooper and Tindall, 1994; Corbett, 1999), ニューヨーク (Bokuniewicz, 1980; Flipse and Bonner, 1985), パハマ諸島 (Henderson *et al.*, 1999; Whitaker and Smart, 1990), ジャマイカ (D’Elia *et al.*, 1981), メキシコのユカタン半島 (Back and Lesser, 1981; Hanshaw and Back, 1980; Moore *et al.*, 1992; Stoessell *et al.*, 1989) などがあり、太平洋域では、ハワイ (Dollar and Arkinson, 1992; Kanehiro and Peterson, 1977; Sansone and Resing, 1995), グアム (Matson, 1993), オーストラリア (Dickson, 1985; Johannes and Hearn, 1985; Wright, 1999), フランス (Cathles, 1987; Mariotti *et al.*, 1988), ギリシア (Burden, 1964; Stringfield and LeGrand, 1969; Higgins, 1980), 韓国 (Kim *et al.*, 2002) などの報告がある。また日本においても、海底湧水の観測例 (Fukuo, 1986; Komae, 1990; Igarashi *et al.*, 1995; Taniguchi and Fukuko, 1993; Marui, 1997; Taniguchi *et al.*, 1999; Zhang and Satake, 2003) が数多く報告されている。

Burnett (1999) によって、これらの海底湧水は、

* 富山大学理学部
〒930 8555 富山県富山市五福3190

** 東京大学海洋研究所
〒164 8639 東京都中野区南台1 15 1

陸上の地下水系と連動する淡水性湧水系，淡水と海水の混合性海底湧水及び潮汐に应答する海水堆積物間の再循環水に分類され，地球規模の水循環を構成する重要な要素のひとつであると認識されている。特に，栄養塩など様々な物質を海洋に供給しているため，その存在は生物生産を含む海洋の物質循環を考える上で無視できない (Moore, 1996; Charette *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2003; Hwang *et al.*, 2005)。しかし，海底湧水研究の幕開けからまだ歴史は浅く，河川等地球規模でのデータ網にほど遠いのも現状である。当初は海洋学と陸水学の分野で別々に研究が行われてきたが，国際的な枠組みとして，IUGG傘下の IAPSO/IAHS のジョイントコミッティー “Groundwater-Seawater Interactions” や，SOCR/LOICZ のワーキンググループ「海底地下水湧出とそれに伴う物質負荷が沿岸環境に与える影響」，UNESCO/IHP，IAEA，LOICZ(IGBP) Phase II など，学際的な組織の中で国際共同研究が始まっている。また，GEOTRACES (蒲生, 2005) にも海底湧水研究が研究課題の一つとして取り上げられ，海洋に対する淡水や物質の重要な供給源としての海底湧水に注目した研究が，世界中で広範囲に展開されるようになりつつある。

本誌では，このような現状に鑑み，日本における海底湧水を中心に，陸棚での湧出量，地下水が陸上の土壌や海底堆積物中を流下する際における水質変化，また，海底湧水が沿岸域の化学・生態学的環境に与える影響評価等に視点を置き，最近2，3年に行われた海底湧水に関する研究を特集することとした。

本特集号は報文7編及び速報1編からなる。最初の2報は，水理地質学による駿河湾沿岸海底湧水の定量評価の研究，次の2報は，地球化学的手段による富山湾海底湧水の特徴解明・起源同定についての研究である。さらに湧出速度測定法の開発と広域海底湧水湧出量の測定のアプローチに関する2報と，ボックスモデルを用いた淡水・栄養塩フラックスの評価についての報告が続く。最後に，台湾における沿岸海底湧水の探索の速報が加わっている。各論文の概要は，下記の通りである。

【駿河湾沿岸における海底地下水湧出量の定量的評価】では，陸域から海洋への地下水流出過程を解明するため，自記地下水湧出量計による海底地下水湧出量の測定を行い，また，塩淡水境界の変動を把握するために沿岸域地下の比抵抗測定を行った。その結果，海

岸付近での湧出量の変化には陸域地下水位との相関が，沖合では潮位との相関が見いだされ，塩淡水境界についても潮位変化に対応した変動が確認された。また，全湧出量に占める陸域地下水成分は最大で9%程度と評価された。

【静岡平野における地下水流動系】では，地下水中の $D \cdot ^{18}O$ ，一般水質，トリチウムをトレーサーに用いた調査を行い，浅層地下水の水質は主にカルシウム重炭酸型，深層地下水はナトリウム重炭酸型と分かった。また，部分的に確認された硝酸イオンは，人為的汚染が原因と考えられ，地下水の起源は，主に安倍川河川水と降水であった。地下水の大半が1970年から現在までの降雨から構成され，その分布特性は深度よりもむしろ帯水層を構成している物質の透水性に支配されており，深度100 mを越える深層地下水であっても礫層主体の安倍川近傍では滞留時間は非常に短いという特性を示している。

【富山湾海底湧水の化学成分の特徴と起源】は，海底湧水および底層10~50 cm直上水中の亜硝酸+硝酸，リン酸，ケイ酸，溶存有機炭素を観測し，湧水中の亜硝酸+硝酸濃度は直上水に比べ約60倍，ケイ酸濃度は約30倍の高い値を示すことが分かった。片貝川・黒部川扇状地地下水についても亜硝酸+硝酸，リン酸，ケイ酸の定量を行ったところ，ケイ酸/(亜硝酸+硝酸)比は地下水起源の海底湧水の流路と起源を示すことが明らかにされた。3次元励起蛍光スペクトル法による海底湧水中の有機物のキャラクタリゼーションでは，直上水にはフルボ酸様物質やトリプトファン様物質に由来する蛍光強度ピークが認められたが，湧水中には典型的な蛍光強度ピークは見られなかった。湧水による富山湾への亜硝酸+硝酸，リン酸，およびケイ酸の負荷量はそれぞれ $2,290 \pm 700$ ， 6.9 ± 5.9 および $22,900 \pm 10,400$ ton/year と計算された。

【溶存メタンを指標に用いた富山湾海底湧出地下水の地球化学的研究】は，海底湧出水や一部の陸上地下水が，大気との気体交換を遮断された閉鎖系となっていることを明らかにした。この閉鎖系内ではメタン生成は起きず，地下水は大気起源メタンの酸化が続く程度に酸化された状態で帯水層を通り抜けていることが示唆された。海外の海底湧出水に比べてメタン濃度が低いことから，地下水の滞留時間は短いと推定された。また，メタンの濃度と炭素同位体比から，片貝川扇状地の陸上地下水は還元・酸化的環境に区分され，片貝川扇状地沖の海底湧出水は，河川に沿った地下を滞

留して海へ供給されたものと推測された。

【沿岸海底湧水湧出速度測定法の開発と富山県片貝川扇状地沖でのアプローチ】は、湧水直上の海底に設置したチャンパー（富大式 SGD フラックスチャンパー）内の海水が湧水によって希釈される速度を測定し、湧出速度を求める手法を考案したものである。装置の精度試験を行った結果、精度は $\pm 1 \sim 2$ mLで10~400 mL範囲での湧出速度が測定可能であった。2003年4~12月に片貝川扇状地沖合の海底2ヶ所で湧出速度測定を行い、その値は0.5~1.3 L/minと見積もられた。両地点での湧出速度変化は、陸側の地下水ポテンシャル、海水位及び海底堆積物の地質条件等の湧出環境に支配されるものと推測された。

【富山湾東部における広域海底湧水湧出量の測定】では、海底堆積物の温度から海底湧水の湧出量を算出する方法が開発され、片貝川扇状地における海底湧水の二次元分布が明らかにされた。デジタル温度計と富大式 SGD フラックスチャンパーを用いた観測の結果、堆積物温度と湧出量間には高い相関が認められ、堆積物温度から湧出量を算出することができた。2003年11月と2004年8月に片貝川扇状地沖において湧出量を求めた結果、湧出量の多い場所は帯状に分布し、総湧出量は約3割減少していた。湧出量の多い場所には透水性の高い帯水層が発達し、湧出量の少ない場所では帯水層からの染み出し湧出がおこっていることが示唆された。

【富山湾の水塊構造と河川水・沿岸海底湧水による淡水フラックス】は、富山湾の水塊が沿岸表層水、対馬暖流系水、深層水の3層構造であり、水深200 m以浅は、湾内へ流入した淡水の影響を受けた低塩分水で構成されていることを示した。ボックスモデル解析から、湾内に流入する海底湧水量のフラックスは河川水の約25%に匹敵、また、栄養塩フラックスは、河川水の55% (PO_4^{3-})、133% ($\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$)であることが明らかになった。さらに、窒素とリンの濃度比から、富山湾の海底湧水は水深100 m~180 mにおいても存在している可能性が示唆された。

速報の【台湾における海底湧水採取の試み】は、地下水の過剰揚水の著しい台湾において、SGDの探索及び採取の成功を報告したものである。SGDの可能性の高い場所で雨季に試料採取を行ったが、高屏溪河口近傍等地下水の塩水化が深刻である地域においても、おそらく再循環水が海底から湧出していると考えられる。今後、より詳細かつ本格的な調査の必要性が

指摘された。

本特集号は、駿河湾・富山湾を例に沿岸海洋環境において、海底地下水機構が極めて大きな位置を占めていることを明らかにした。今後、日本近辺・極東地域における沿岸海底地下水機構の解明やそれによる海洋環境への物質供給・影響評価を急ぐとともに、台湾・韓国・中国等の共同研究者との共同調査・データ交換を活発に行うことが望まれる。

参考文献

- Back, W. and Hanshaw, B. B. (1970) Comparison of Chemical Hydrogeology of the Carbonate Peninsulas of Florida and Yucatan. *J. Hydrol.* **10**, 330-368.
- Back, W. and Lesser, J. M. (1981) Chemical Constraints of Groundwater Management in the Yucatan Peninsula, Mexico. *J. Hydrol.* **51**, 119-130.
- Barraclough, J. T. and Marsh, O. T. (1962) Aquifers and quality of ground water along the Gulf Coast of Western Florida. 29, State of Florida, State Board of Conservation, 28 pp.
- Belanger, T. V. and Walker, R. B. (1990) Ground Water Seepage in the Indian River Lagoon, Florida. In: *J. H. Krishna, V. Quinones-Aponte, F. Gomez-Gomez and G. L. Morris* (Editors), International Symposium on Tropical Hydrology and Fourth Caribbean Islands Water Resources Congress. American Water Resources Association, San Juan, Puerto Rico, pp. 367-375.
- Belanger, T. V., Heck, H. H. and Andrews, M. S. (1997) Groundwater Flow Characteristics of the Mosquito Lagoon, Florida. Project Number: CANA-N-027.000, Florida Institute of Technology.
- Bokuniewicz, H. (1980) Groundwater seepage into Great South Bay, New York. *Estuarine and Coastal Marine Science* **10**, 437-444.
- Brooks, G. R., Dix, T. L. and Doyle, L. J. (1993) Groundwater/Surface water Interactions in Tampa Bay. Implications for Nutrient Fluxes, Tech. Pub. #06-93, Tampa Bay National Estuary Program, prepared by Center for Nearshore Marine Science, University of South Florida.

- Burden, D. J. (1964) Karst groundwater investigations, Food and Agric. Org. United Nations (FAO/SF), Greece, 99 pp.
- Burnett, W. C. (1999) Offshore springs and seeps are focus of working group. *EOS* **80**, 13 15.
- Cable, J. E., Burnett, W. C. and Chanton, J. P. (1997) Magnitude and Variations of Groundwater Seepage Along a Florida Marine Shoreline. *Biogeochemistry* **6**, 1 17.
- Cao, H., Cowart, J. B. and Osmond, J. K. (1999) Water Sources of Wakulla Springs, Wakulla County, Florida: Physical and Uranium Isotopic Evidences. *Southeastern Geology* **39** (1), 51 60.
- Cathles, L. M. (1987) Fluid circulation in the crust and the global geochemical budget. In: *G. B. Munsch* (Editor), Second Conference on Scientific Ocean Drilling (COSOD II). European Science Foundation, Strasborg, France.
- Chanton, J. P., Martens, C. S. and Paull, C. K. (1991) Control of pore-water chemistry at the base of the Florida escarpment by processes within the platform. *Nature* **349**, 229 231.
- Charette, M. A., Splivallo, R., Herbold, C., Bollinger, M. S. and Moore, W. S. (2003) Salt marsh submarine groundwater discharge as traced by radium isotopes, *Mar. Chem.* **84**, 113 121.
- Cooper, C. R. and Tindall, J. A. (1994) Model for dolomite formation in northwest Florida. *J. Hydrol.* **157**, 367 391.
- Corbett, D. R. (1999) Tracing Groundwater Flow into Surface Waters by Application of Natural and Artificial Tracers. Dissertation for the Ph. D. Degree Thesis, The Florida State University, 292 pp.
- D'Elia, C. F., Webb, K. L. and Porter, J. W. (1981) Nitrate-rich groundwater inputs to Discovery Bay, Jamaica: a significant source of N to local coral reefs? *Bull. Mar. Sci.* **31**, 903 910.
- Dickson, B. L. (1985) Radium isotopes in saline seepages, south-western Yilgarn, Western Australia. *Geochim. Cosmochim. Acta* **49**, 361 368.
- Dollar, S. J. and Atkinson, M. J. (1992) Effects of Nutrient Subsidies from Groundwater to Near-shore Marine Ecosystems off the Island of Hawaii. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **35**, 409 424.
- Flipse, W. J. Jr. and Bonner, F. T. (1985) Nitrogen-Isotope Ratios of Nitrate in Ground Water Under Fertilized Fields, Long Island, New York. *Ground Water* **23**, 59 67.
- Fukuo, Y. (1986) Studies on groundwater seepage in the bottom of Lake Biwa. Report for Environmental Science by the Ministry of Education, Science and Culture, Japan, **B 289-R-12-2**, 1-23.
- 蒲生俊敬 (2005) 総論 : GEOTRACES 海洋の微量元素・同位体研究の最新動向と将来展望 . 月刊海洋, 号外**39**, 5 18 .
- Hanshaw, B. B. and Back, W. (1980) Chemical mass-wasting of the northern Yucatan Peninsula by groundwater dissolution. *Geology* **8**, 222 224.
- Henderson, G. M., Slowey, N. C. and Haddad, G. A. (1999) Fluid flow through carbonate platforms: constraints from U-234/U 238 and Cl in Bahamas pore-waters. *Earth Planet. Sci. Lett.* **169**, 99 111.
- Higgins, C. G. (1980) Nips, Notches, and the Solution of Coastal Limestone: An overview of the problem with examples from Greece. *Estuarine and Coastal Marine Science* **10**, 15 30.
- Hwang, D. -W., Kim, G., Lee, Y. -W. and Yang, H. -S. (2005) Estimating submarine inputs of groundwater and nutrients to a coastal bay using radium isotopes, *Mar. Chem.* **96**, 61 71.
- Igarashi, G., Saeki, S., Takahata, N., Sumikawa, K., Tasaka, S., Sasaki, Y., Takahashi, M. and Sano, Y. (1995) Ground-Water Radon Anomaly Before the Kobe Earthquake in Japan. *Science* **269**, 60 61.
- Johannes, R. E. and Hearn, C. J. (1985) The effect of submarine groundwater discharge on nutrient and salinity regimes in a coastal lagoon off Perth, Western Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **21**, 789 800.
- Kanehiro, B. Y. and Peterson, F. L. (1977) Groundwater Recharge and Coastal Discharge for the Northwest Coast of the Island of Hawaii: a Computerized Water Budget Approach. TR 110,

- Water Resources Research Center, University of Hawaii, Honolulu, 83 pp.
- Kim, G. and Hwang, D. -W. (2002) Tidal pumping of groundwater into the coastal ocean revealed from submarine ^{222}Rn and CH_4 monitoring, *Geophys. Res. Lett.* **29**, 1678-1681.
- Kim, G., Lee, K. -K., Park, K. -S., Hwang, D. -W. and Yang, H. -S. (2003) Large submarine groundwater discharge (SGD) from volcanic island. *Geophys. Res. Lett.* **30**, 2098-2101.
- Kohout, F. A. (1966) Submarine spring: A neglected phenomenon of coastal hydrology. *Hydrology* **26**, 140-147.
- Komae, T. (1990) Groundwater Research Methods Using Radioactivity. *Farming Japan* **24**, 1-7.
- Lee, D. R. (1977) A device for measuring seepage flux in deepwater sediment. *Water Resour. Res.* **32**, 1113-1117.
- Mariotti, A., Landreau, A. and Simon, B. (1988) Nitrogen-15 isotope biogeochemistry and natural denitrification process in groundwater: Application to the chalk aquifer of northern France. *Geochim. Cosmochim. Acta* **52**, 1869-1878.
- Marui, A. (1997) Submarine groundwater discharge-possibility of opening up new resources. *J. Japan. Ass. Hydrol. Sc.* **27**, 85-94.
- Matson, E. A. (1993) Nutrient flux through soils and aquifers to the coastal zone of Guam (Mariana Islands). *Limnol. Oceanogr.* **38**, 361-371.
- Moore, W. S. (1996) Large groundwater inputs to coastal waters revealed by ^{226}Ra enrichments. *Nature* **380**, 612-614.
- Moore, Y. H., Stoessell, R. K. and Easley, D. H. (1992) Fresh-Water/Sea-Water Relationship Within a Ground-Water Flow System, Northeastern Coast of the Yucatan Peninsula. *Groundwater* **30**, 343-350.
- Muir, K. S. (1968) Groundwater reconnaissance of the Santa Barbara - Montecito Area, Santa Barbara County, California. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1859-A.
- Oberdorfer, J. A., Valentino, M. A. and Smith, S. V. (1990) Groundwater contribution to the nutrient budget of Tomales Bay, California. *Biogeochemistry* **10**, 199-216.
- Sansone, F. J. and Resing, J. A. (1995) Hydrology and geochemistry of sea surface hydrothermal plumes resulting from Hawaiian coastal volcanism. *J. Geophys. Res.* **100** (C7), 13555-13569.
- Stoessell, R. K., Ward, W. C., Ford, B. H. and Schuffert, J. D. (1989). Water chemistry and CaCO_3 dissolution in the saline part of an open-flow mixing zone, coastal Yucatan Peninsula, Mexico. *Geol. Soc. Amer. Bull.* **101**, 159-169.
- Stringfield, V. T. and LeGrand, H. E. (1969) Relation of Sea Water to Fresh Water in Carbonate Rocks in Coastal Areas, with Special Reference to Florida, U.S.A., and Cephalonia (Kephallinia), Greece. *J. Hydrol.* **9**, 387-404.
- Taniguchi, M. and Fukuo, Y. (1993) Continuous measurements of ground-water seepage using an automatic seepage meter. *Groundwater* **31**, 675-679.
- Taniguchi, M., Shimada, J., Tanaka, T., Kayane, I., Sakura, Y., Shimano, Y., Dapaah-Siakwan, S. and Kawashima, S. (1999) 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**, 1507-1517.
- Whitaker, F. F. and Smart, P. L. (1990) Active circulation of saline ground waters in carbonate platforms: Evidence from the Great Bahama Bank. *Geology* **18**, 200-203.
- Wright, D. T. (1999) The role of sulphate-reducing bacteria and cyanobacteria in dolomite formation in distal ephemeral lakes of the Coorong region, South Australia. *Sediment. Geol.* **126**, 147-157.
- Zhang, J. and Satake, H. (2003) The chemical characteristics of submarine groundwater seepage in Toyama Bay, Central Japan. In: *Land and Marine Hydrogeology* (eds. M. Taniguchi, K. Wang and T. Gamo), Elsevier, 45-60.