

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

張 勁^{*†}・萩原 崇史^{*}・小山 裕樹^{*}・佐竹 洋^{*}
中村 哲也^{**}・浅井 和見^{***}

(2004年9月3日受付, 2005年6月22日受理)

A new flow rate measuring method - SGD (submarine groundwater discharge) flux chamber and its approach off Katakai Alluvial Fan, Toyama Bay, Central Japan

Jing ZHANG^{*†}, Takashi HAGIWARA^{*}, Yuki KOYAMA^{*}, Hiroshi SATAKE^{*},
Tetsuya NAKAMURA^{**} and Kazumi ASAI^{***}

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

** Nichiyu Giken Kogyo Co., Ltd.
21-2 Matoba-shinmachi, Kawagoe, Saitama 350-1107, Japan

*** Chikyu Kagaku Kenkyusho Inc.
1-608 Uedahonmachi, Tenpaku-ku, Nagoya 468-0007, Japan

† Corresponding author (jzhang@sci.toyama-u.ac.jp)

Submarine groundwater discharge (SGD) is becoming recognized as a significant source of fresh water and chemical fluxes into the coastal oceans around the world. On the coast of eastern Toyama Bay (central Japan), land-based estimates of the water budget indicated the possible existence of SGD. The two-fold purpose of this study was to development a SGD flow measuring method with wide dynamic range and to demonstrate it by obtaining preliminary estimates of the SGD flux in Katakai River alluvial fan. A new flow rate meter was developed, named the Toyama University SGD-Flux Chamber (in collaboration with Nichiyu Giken Kogyo Co., Ltd.). Electrical conductivity and temperature sensors were mounted in a plastic chamber, conventionally used for gas flux measurements. The flow rate was calculated though the conductivity dilution velocity measured of the bottom seawater, diluted by spring groundwater from sea floor inside of the chamber (diameter: 40 cm; height: 15 cm). The initial field experiment was conducted to investigate the measurement sensitivity and accuracy of the SGD-Flux Chamber. Trial SGD water (tap water) was utilized, and two ranges of flow rate were measured: 10-50 mL/min with estimated uncertainty of ± 1 mL (relative standard deviation: RSD = 5%), and 50-400 mL/min ± 2 ml (RSD = 2%). Therefore, the Flux Chamber is capable of measuring SGD flux within a large flow range, 10-400 mL/min (corresponding flow velocity values are: 5.7-458 cm/day). Flux measurements were then carried out from April to December, 2003 in the SGD area of Katakai River alluvial fan, 150-200 m seaward of the coastline in water depths of 8 m and 22 m. The average fluxes from April to December were 0.8-1.3 L/min/m² at 8 m and 0.5-

* 富山大学理学部
〒930 8555 富山市五福3190
** 日油技研工業株式会社
〒350 1107 埼玉県川越市の場新町21 2

*** 地球科学研究所
〒468 0007 名古屋市天白区植田本町1 608
† 連絡先 (jzhang@sci.toyama-u.ac.jp)

0.8 L/min/m² at 22 m. On tidatime scales, the SGD flux increases with the dropping of the tide level with a time lag of 2 hours. There are indications the flux is controlled by changes in landward groundwater potential pressure, sea level at the SGD area, and the geotechnical condition of submarine sediment. Longer time series at multiple sites will be required to discern the relations between the SGD flux and river flow rate, precipitation, and long-term (seasonal) changes of the landward unconfined aquifers.

Key words: Flow rate, Submarine groundwater discharge, SGD-Flux chamber, Dilution rate, Katakai Alluvial Fan, Toyama Bay

1. はじめに

沿岸海域において海底から地下水の湧出する現象（海底地下水湧出）が世界各地から報告されている（Kohout *et al.*, 1966; Lee *et al.*, 1977a; Falkowska and Piekarek-Jankowska, 1999; Charette *et al.*, 2003）。日本においても各地で湧水の観測例が報告されている（Fukuo, 1986; Taniguchi *et al.*, 1993; Marui, 1997）。これらの海底地下水湧出（以下、海底湧水）は、潮汐に応答する海水堆積物間の再循環水、淡水と海水の混合性海底湧水及び淡水のみの3つの海底湧水に分類され、海水と陸域で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

（Burnett, 1999）。最近、海底湧水の化学的性質の把握、湧出量の見積もり、海洋環境への影響の研究が世界各地で盛んに行なわれている（Johannes, 1980; Moore, 1996）。富山県においても県東部に位置する黒部川扇状地沖水深30 m付近において、塩分が5%低下していたことが報告され（Fujii *et al.*, 1986）、片貝川扇状地沖水深20 mと8 mの観測からの海底湧水の存在が明らかになった（張・佐竹, 2001; 張, 2003）。さらに、片貝川扇状地沖海底湧水に関しては海底湧水採水装置（徳永ほか, 2001）を用いて採取され（Fig. 1）、電気伝導度が極めて低い淡水性湧水（120 μS/cm）であること（Suzuki and Zhang, 2003）、広域にわたって湧出しており、扇状地沖の河

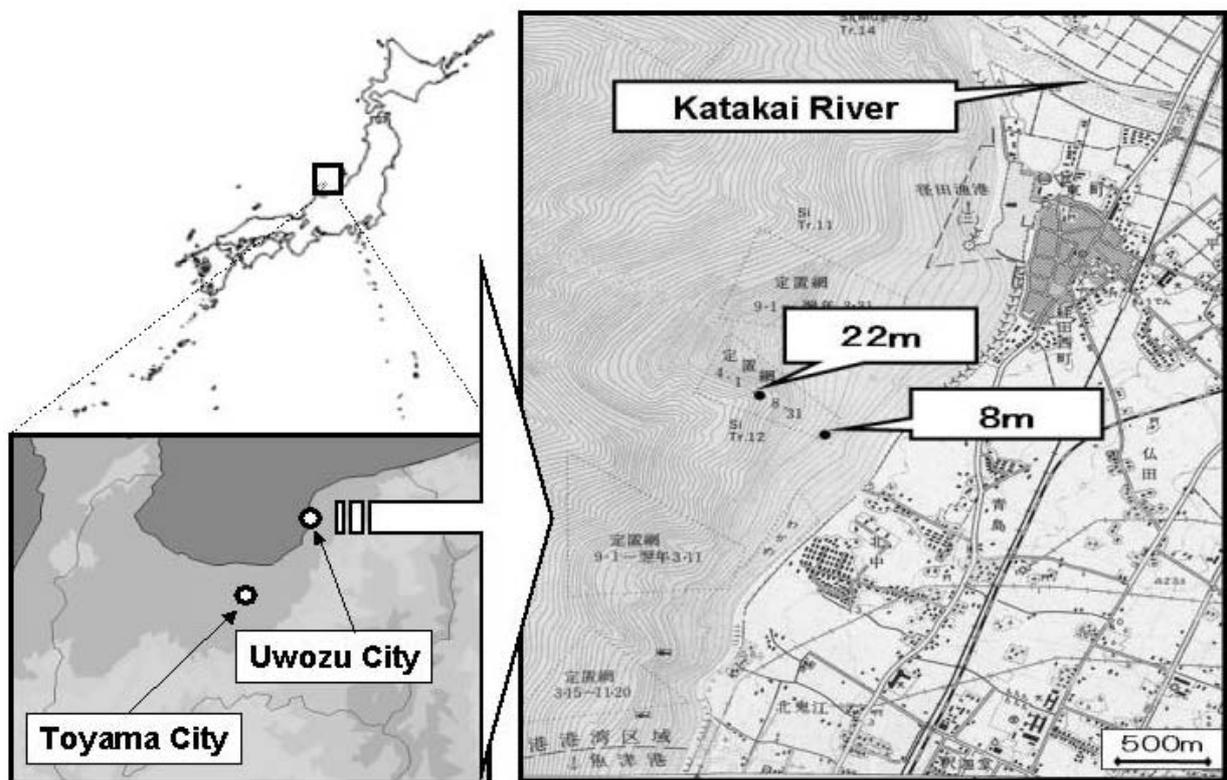


Fig. 1 Locations of the study area.

川水よりも豊富な栄養塩を含んでいて、富山湾の沿岸海洋環境に大きな影響を及ぼしている可能性が高いことが指摘されている(張・佐竹, 2002; Zhang and Satake, 2003)。一方、富山湾の海底湧水の湧出量は、河川によって海洋へ流出する量の1/4に相当することが陸上の水収支に基づき見積もられているが(伊藤・藤井, 1993)、未だに実測されていない。それは海底湧水が広範囲にわたって湧出していること、湧出箇所によって湧出状況が大きく異なること、また、個々の湧水口において時系列によって湧出速度が変化することなどにより、実測が困難である。そのため、まず特定の湧出域における湧出速度を計測し、季節変化や最大湧出速度の数値化と、その湧出域における全湧出量に占める特定湧出量の比率算出が先決である。現在、海底湧水の湧出速度計として“Lee-type”手動式(Lee, 1977b)や連続熱供給式流速計(岩川・谷口, 2001)、染色希釈式流速計(Sholkovitz, 2003)が開発されているが、これらの測定装置は微小な湧出速度変化には対応しているものの、流速測定範囲が狭く、海流や水温の影響によって変化しやすい。また、装置が大掛かりであり、安価でないため、容易に設置することができないなどの難点がある。さらに片貝川扇状地沖においては、湧出箇所による湧出速度の変化が大きく、これらの測定装置を用いることは適当ではない。本研究では広い測定範囲の湧出速度を測定可能な方法(装置を含む)を開発し、片貝川扇状地沖で実際の海底湧水湧出速度の計測を行うことを目的とする。

2. 測定装置

2.1 測定原理

片貝川扇状地沖の海底湧水は淡水性海底湧水である(Suzuki and Zhang, 2003)。この淡水性海底湧水の電気伝導度がほぼ120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ であり、富山湾の沿岸海水の平均値が約40,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ であることから、湧水場所における両者の電気伝導度差の変化を利用すれば、海底湧水の湧出速度を測定することが可能である。本研究では湧出速度の測定に、ガスの流量計測や採取として一般的に使用されているチャンバー法を応用した。海底湧水湧出域の海底に一定容積のチャンバーを設置すると、チャンバー内に満たされていた底層海水が、海底面から湧出してくる淡水性海底湧水によって希釈される。この希釈される速度を電気伝導度の減少する速度から計算し、湧出速度に換算すること

ができる。すなわち、チャンバー内の水の電気伝導度は、湧水によって希釈されるため時間の経過につれて指数関数的に減少し、次式によって表すことができる。

$$(A) = (A_0)e^{-KT} \quad (1)$$

ここで、 (A) は電気伝導度を表し、 (A_0) は初期の海水の電気伝導度、 K は電気伝導度変化速度、 T は時間を表している。

次に、本測定法においては電気伝導度を測定するため、(1)を用いて一定時間における電気伝導度変化速度を求める。一定時間後の電気伝導度を (a) 、一定時間後における時間を t とすると、一定時間における両者の電気伝導度を対数化し、 $(A) = (a)$ から電気伝導度変化速度を求める。

$$(A) = (A_0)e^{-KT}, (a) = (A_0)e^{-K(T-t)} \quad (2)$$

$$K = (\ln(a) - \ln(A)) / (T - t) \quad (3)$$

さらに、一定時間の電気伝導度変化速度から一定容積のチャンバーにおける淡水性海底湧水流入量を次式より算出し、海底湧水湧出速度を換算する。

$$Q = (1 - K) \cdot V \quad (4)$$

ここで、 K は電気伝導度変化速度、 V はチャンバー容積を表している。

2.2 海底湧水湧出速度測定装置の概要

本研究ではまず、海底湧水湧出速度測定装置(富大式SGD-Flux Chamber, 以下フラックスチャンバー)を作成して考察に用いた(Fig. 2)。Suzuki and Zhang (2003)と徳永ら(2001)は数箇所においてダイバーによる海底湧水の直接採水に成功したが、フラックスチャンバーも水深1.5 m ~ 33 mまでダイバーにより簡単に設置することができた。

フラックスチャンバーは、電気伝導度計、攪拌装置(スターラー)、チャンバー容器から構成されている。電気伝導度計として測定精度が $\pm 20 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、秒単位の測定可能なCTセンサー(Compact-CT, アレック電子株式会社製)を使用した。CTセンサーは、チャンバー容器の上部から挿入し、センサー部のみをチャンバー内部に設置した。チャンバー内の電気伝導度を均一に保つために使用する攪拌装置(スターラー)は、その回転数を海水中で1分間に60 rpmとし、チャンバー容器の中心に設置した。また、湧水がチャンバー内に湧出した量だけチャンバー外に排出す

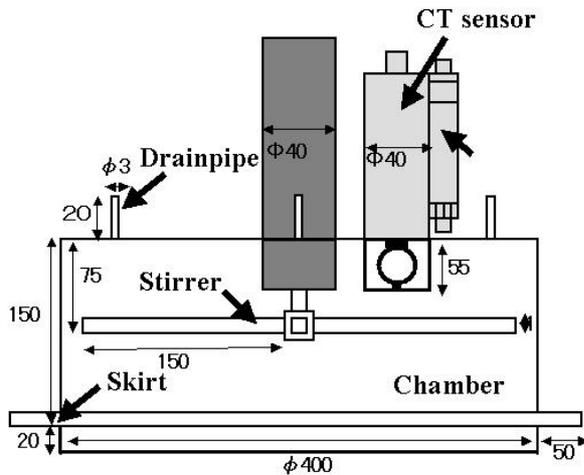


Fig. 2 Detailed outline and structure of the Tomidai-SGD Flux Chamber.

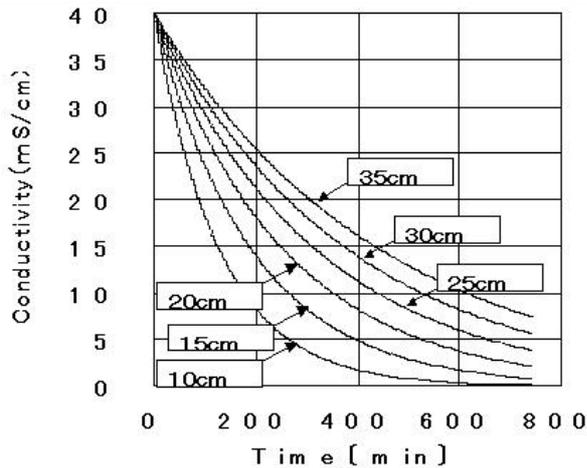


Fig. 3 Varied conductivity dilution curves of the different height of chamber.

の必要があり、排水部を海底面から最も離れているチャンバーの上部に設置した。さらに、排出効率と海水の逆流を防ぐために、小口径（3 mm）の排水口を4箇所設置し、加えて海底設置部からチャンバー外への漏えい及び海水の浸透を遮断するため、チャンバーの底にスカートを取り付けた。海底での作業性と携帯性を考慮して、チャンバーは直径40 cmの円柱型とした。また、チャンバーの底面積を一定とし、海底湧水の湧出速度を100 ml/minと仮定した場合、チャンバーの高さが低いほど電気伝導度が変化（減少）する速度は大きく、測定感度が高くなる（Fig. 3）。センサーの寸法、設置位置を考慮して、チャンバーの高さは15 cmとした。Table 1のチャンバーとセンサー寸

Table 1 Available sampling volumes by different size of chamber.

Diameter (cm)	Height (cm)	Chamber volume (cm ³)	Dead volume (cm ³)	Available sampling volume (%)
10	15	1178	160	13.60
20	15	4710	160	3.40
30	15	10598	160	1.51
40	15	18840	160	0.85
50	15	29438	160	0.54
60	15	42390	160	0.38

法から、センサー等によるデッドボリュームはチャンバー内容積の1%以下であるとわかった。フラックスチャンバーは現在水深33 mまで使用可能であり、スターラーのバッテリー性能によるが、最長1ヶ月連続測定が可能である。

3. フラックスチャンバーの検証

3.1 模擬海底湧水湧出システムと装置

富大式 SGD-Flux Chamberの実効性を検証するため、フラックスチャンバーに流量計を取り付けて実験した。海底湧水の電気伝導度はほぼ120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ である（Suzuki and Zhang, 2003）ことから、淡水性湧水の代用として電気伝導度が150 $\mu\text{S}/\text{cm}$ である水道水を使用した。水道水を海底から湧出させるように、海底下の砂中に口径6 mmのチューブの先端部を埋め、そのチューブを陸上まで延長し、湧出速度を調整するための流量計（コフロク社製：RK 400 V, RK 50 V）に接続して、水道水を湧出させた。水道水を湧出させる方法として、湧出速度の多い場合（流量50～400 ml/min）は水源を直接水道蛇口から、湧出速度の少ない場合（流量10～45 ml/min）は20 Lタンクからの2段階の湧出速度で模擬実験を行った（Fig. 4）。

3.2 検証場所及び項目

模擬海底湧水湧出装置の現場実験は片貝川河口に近い富山県黒部市石田漁港において行なった。装置は波浪の影響を受けにくい漁港内で、本研究の海底湧水湧出領域と同様の砂地である水深1.5 mの海底に設置した。測定範囲と再現性について検証するため、湧出速度を50～400 ml/min, 10～50 ml/minの2種類の範囲で測定した。1回当たりの測定時間を15分間と短くし、潮汐による水位の変化による影響を防いだ。また、フラックスチャンバーの精度は、10, 20, 30, 40, 45, 50 ml/min及び50, 100, 200, 300, 400 ml/minの

流量で各々15分測定した。測定は10~50 ml/min の場合は50, 45, 40, 30, 20, 10 ml/min へと, 50~400 ml/min の場合は400, 300, 200, 100, 50 ml/min へと連続的に減少させ, そのときの標準偏差を用いて検証した。

3.3 検証結果

10, 20, 30, 40, 45, 50 ml/min の湧出速度を各15分間で測定した結果, それぞれにおける標準偏差は±1 mlであったため, フラックスチャンバーの精度は±1 mlであると検証できた。また, 流速範囲10~50 ml/min における湧出速度及び再現性の検証結果は, 流量計で測定した“湧出速度”(Y)とフラックスチャンバーによって求められた“湧出速度”(X)の間では, $Y = 0.95X - 1.02$ で表すことができ, $R^2 = 0.97$ であった (Fig. 5 a)。この10~50 ml/min の範囲におけるSD (相対標準偏差)は5% (n = 12)であり, 10~50 ml/min における範囲での測定も可能かつ再現性の

良いことも検証できた。次に, 大きい流速範囲50~400 ml/min における湧出速度及び再現性を検証した結果, $Y = 1.04X - 1.28$ で表すことができ, $R^2 = 0.99$ であった (Fig. 5 b)。また, この50~400 ml/min の範囲におけるSD (相対標準偏差)は2% (n = 10)であり, 50~400 ml/min における範囲では測定精度・再現性ともに高いことがわかった。以上の結果をまとめると, フラックスチャンバーは10~400 ml/min 範囲における海底湧水湧出速度を測定することが可能とわかった。また, 海底湧水の湧出速度が変化した場合でも, 本研究のフラックスチャンバーはその変化量を測定することが可能であることを示した。この範囲をcm/dayに変換すると, 5.7~458 cm/dayの湧出速度であった。さらに, 測定装置に用いたセンサーの検出範囲を考慮すると, 富大式SGD-Flux Chamberの湧出速度は0.05~1,260 cm/dayの範囲で測定可能とわかった (Table 2)。

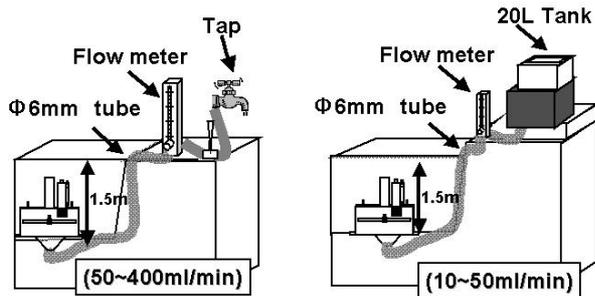


Fig. 4 Image illustration of the field experiments of SGD-Flux Chamber.

4. 片貝川扇状地における海底湧水湧出速度の測定結果

海底湧水湧出速度の測定は2003年4~12月の間に片貝川扇状地沖合150~200 mで, ダイバーの目視によって湧水がもっとも多く湧出していることを確認できた水深8 m及び22 mの海底湧水域の同じ地点で実施した (Fig. 1)。海底に置いたフラックスチャンバーの位置がずれないように4つの固定杭上に設置し, 測定は1日1回2時間として, 水深8 mと22 mの湧水域において各々15回測定をした。それとは別に,

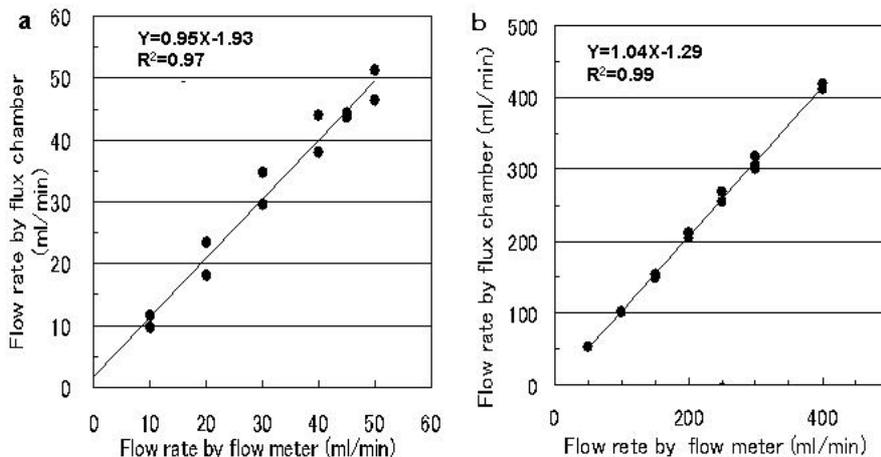


Fig. 5 Precision and accuracy of the Tomidai-SGD Flux Chamber. Flow rate by SGD Flux Chamber verse flow rate by general flow meter with different measurement range (a: 10-50 ml/min; b: 50-400 ml/min).

Table 2 Comparison of different seepage meters.

Seepage meter types	Acoustic	Heat pulse	Dye dilution	Flux chamber
Area of seepage housing (m ²)	0.21	0.20	0.29	0.13
Range of measurable flow rates (cm/d ⁻¹)	0.9~300	2~40	0.5~150	Confirmed 5.7~450 Theoretical 0.05~1260
Reference	Paulsen et al. (2001)	Taniguchi et al. (1993)	Sholkovitz et al. (2003)	This work

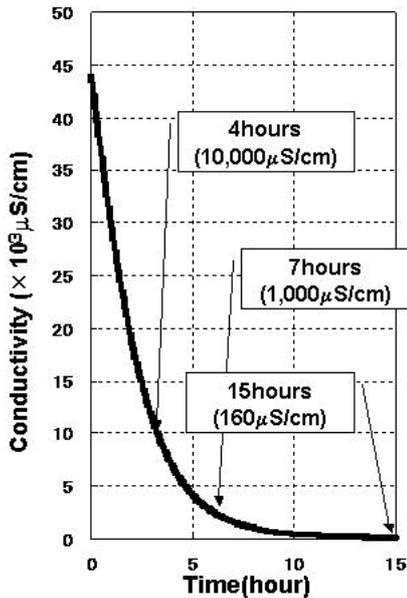


Fig. 6 SGD flow rate (conductivity) result from water depth of 8 m, in 30 Oct. 2003.

2003年10月30日には水深8mにおいてフラックスチャンバーを24時間設置して測定した。

4.1 2003年10月30日の海底湧水量

チャンバー内の電気伝導度は指数関数的に減少した (Fig. 6)。フラックスチャンバー設置前の電気伝導度は44,000 μS/cmであったが、設置開始から4時間後に電気伝導度は10,000 μS/cmまで減少し、7時間後に電気伝導度は1,000 μS/cmとなった。最終的に、チャンバー内の電気伝導度は18時間後に160 μS/cmの値で平衡に近い状態に達した。片貝川における海底湧水の電気伝導度は120 μS/cmであり (Suzuki and Zhang, 2003), 富大式 SGD-Flux Chamber は淡水性海底湧水の性質を特定することが可能とわかる。つまり、本フラックスチャンバーを用いて、チャンバー内水の電気伝導度の平衡値が分かれば、海底湧水の特徴

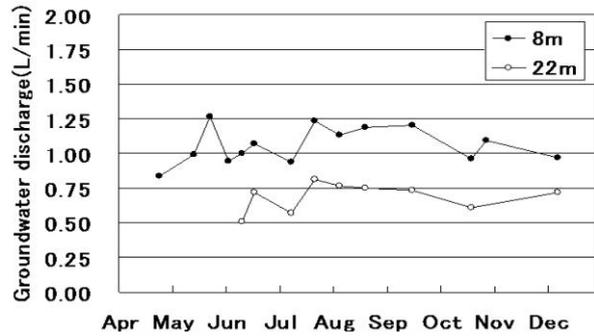


Fig. 7 Temporal variation of SGD flow rate off Katakai alluvial fan, Toyama Bay. Open circles show the data from water depth of 22 m and solid dots are from 8 m.

(再循環水・淡水と海水の混合性海底湧水・淡水のいずれか)を特定することが可能であると示唆された。

4.2 2003年4~12月の8m及び22mの海底湧水量

水深8mにおいて0.8~1.3 L/m²/min, 水深22mでは0.5~0.8 L/m²/minの海底湧水が年間を通じて湧出しており、観測した水深8mにある湧出口からの湧水量は、22mにある湧出口からの湧水量より多いことを示している (Fig. 7)。また、水深8mと22mの海底湧水湧出速度の変化は同調している傾向がみられた。それは、海底湧水湧出速度の変化が河川水量、降水量及び地下水位など長期的 (季節) に影響されると考えられる。

一方、岩川・谷口 (2001) は大阪湾の淡輪沖合5m, 水深2.5mの海底湧水域の湧出速度を測定し、湧出速度は1日における降水量の上昇には明瞭に回答せず、4~5時間の遅れはあるものの、潮位の変化に連動していることを観測している。つまり、潮位が上がると海底湧水の湧出速度は遅くなり、潮位が下がったときには湧出速度は速くなる。片貝川扇状地沖海底湧水の湧出速度の変動と潮位変化とのずれは2時間であり、岩川・谷口 (2001) の結果とは異なる。この両者の湧出速度変動の違いは、陸側の地下水ポテンシャル、海底湧水湧出域における海水位及び海底堆積物地質条件の違いや季節変化など、その地域における湧出環境の違いによるものと推測される。

5. おわりに

本研究では、富大式 SGD-Flux Chamber を作成し、2003年4~12月に観測を行った。その成果をまとめて次に示した。

- (1) 海底湧水の湧出速度は、富大式 SGD-Flux Chamber を用いてチャンバー内の海水の電気伝導度減少速度から測定できる。
- (2) 水道水を用いた模擬実験から、富大式 SGD-Flux Chamber は、海底湧水の湧出速度範囲が10~400 ml/min で精度よく(±1 ml)測定することに適している。
- (3) 観測した水深8 m の湧水口において0.8~1.3 L/m²/min、水深22 m 湧水口では0.5~0.8 L/m²/min の海底湧水が4月から12月まで湧出している。
- (4) 海底湧水の特徴(再循環水・淡水と海水の混合性 海底湧水・淡水のいずれか)を特定することが可能であると示唆された。
- (5) 水深8 m と22 m の海底湧水湧出速度の変化は同調している傾向がみられた。

本研究は、2時間における湧出速度変化を測定した結果であったが、現在、長期間における海底湧水の時系列湧出速度測定法の開発と改良型 SGD-Flux Chamber の試作も進行している。また、日本のみならず、台湾・韓国など海底湧水湧出環境の異なる地域においても、富大式 SGD-Flux Chamber による海底湧水湧出速度の測定を行っている。今後、海底湧水湧出環境の違いと湧出速度の関連性について検討する予定である。

謝 辞

本研究の進行に当たり、日油技研工業株式会社、地球科学研究所、魚津漁業協同組合、黒部漁業協同組合から様々な援助を受けた。研究に協力していただいた研究者、技術員各位に深く感謝する。また北海道大学角皆潤助教授、富山大学田中晋名誉教授、近畿大学中口讓助教授から大変有意なコメントを頂き、心より感謝いたします。さらに本研究は、科学研究費補助金「富山湾海底の地下水湧出の実態とその海洋環境における役割の解明」(課題番号14740313)、「沿岸海底湧水機構の海洋環境への影響評価および評価システムの構築」(課題番号16681004)、稲盛財団「富山湾海底からの淡水湧出とその海洋に対する影響評価」、富山県受託研究費「富山湾の海洋科学基礎研究」により行うことができました。深く感謝を申し上げます。

引用文献

Burnett, W. C. (1999) Offshore springs and seeps

are focus of working group. *EOS* **80**, 13-15.

Falkowska, L. and Piekarek-Jankowska, H. (1999) Submarine seepage of fresh groundwater: disturbance in hydrological and chemical structure of the water column in the Gdask Basin. *ICES Journal of Marine Science* **56**, Supplement 1, 153-160.

Fuji, S., Nasu, N., Smith, Alec, J., Fuji, N., Mizutani, Y., Shimakura, M., Konishi, K., Igarashi, C., Muramoto, J., Takemura, T., Shimoda, T., Boggs, Jr, Sam., Fujioka, K., Mappa, H., Kawahata, H., Kong, Y. S. and Tanaka, T. (1986) Submerged forest off Nyuzen, Kurobegawa alluvial fan, Toyama Bay, central Japan. *Borea* **15** (4), 265-277.

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.

伊藤敏照、藤井昭二(1993) 富山堆積盆地の地下水の水収支. 富山県地学地理学研究論集, **10**, 3-4.

岩川浩照、谷口真人(2001) Measurement of submarine groundwater discharge rates by a continuous heat-type automated seepage meter in Osaka Bay, Japan. 地下水学会誌, **4**, 271-277.

Johannes, R. E. (1980) The ecological significance of the submarine discharge of groundwater. *Marine Ecology* **26**, 391-413.

Kohout, F. A. (1966) Submarine spring: Aneglected phenomenon of coastal hydrology. *Hydrology* **26**, 140-147.

Lee, D. R. (1977a) A device for measuring seepage flux in deepwater sediment. *Water Resour. Res.* **32**, 1113-1117.

Lee, D. R. (1977b) A device for measuring seepage flux in lakes and estuaries. *Limnology and Oceanography* **Vol. 22, n. 1**, 140-147.

Marui, A. (1997) Submarine groundwater discharge-possibility of opening up new resources. *J. Japan. Ass. Hydrol. Sc.* **27**, 85-94.

Matthew, A. Charette., Richard, Splivallo., Craig, Herbold., Marsha, S. Bollinger and Willard, S. Moorec (2003) Salt marsh submarine ground-

- water discharge astraced by radium isotopes. *Marine chemistry* **84**, 113 121.
- Moore, W. S. (1996) Large groundwater inputs to coastal waters revealed by ^{226}Ra enrichments. *Nature* **380**, 612 614.
- Sholkovitz, E., Herbold, C. and Charette, M. (2003) An automated dye-dilution based seepage meter for the time-series measurement of submarine groundwater discharge. *Limnology and Oceanography Methods* **1**, 16 28.
- Suzuki, M. and Zhang, J. (2003) Submarine groundwater spring and its impact on the marine environment in Toyama Bay, Japan. *Geochim. Cosmochim. Acta, Supplement* **67**, A 459.
- 谷口真人 (2001) 海底地下水研究の現状と課題 海洋学と水文学との接点 . 月刊地球 , **12** , 827 831 .
- Taniguchi, M. and Fukuo, Y. (1993) Continuous measurements of ground-water seepage using an automatic seepage meter. *Groundwater* **31**, 675 679.
- 徳永朋祥, 浅井和見, 中田浩治, 谷口真人, 島田純, 三枝博光 (2001) 沿岸海底下からの地下水採水技術の開発とその適用 黒部川扇状地沖での例 . 月刊地球 , **12** .
- 張勁, 佐竹洋 (2001) 富山湾における浅瀬および深海の海底湧水 . 月刊地球 , **12** , 852 856 .
- 張勁, 佐竹洋 (2002) 富山湾における海底湧水 . 海洋と生物 , **141** , 294 301 .
- 張勁 (2003) 木一本鱒千本 . 森の響 , **28** , 18 19 .
- 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.