

富山湾東部における広域海底湧水湧出量の測定

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

(2004年10月23日受付, 2005年7月8日受理)

Flow measurement of submarine groundwater discharge at wide area in the Eastern Toyama Bay

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

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

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

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

Recently, the flow rate of submarine groundwater discharge (SGD) has been measured around the world, in order to evaluate the effect of SGD on the marine environment. However, because the flux of SGD is spatially very inhomogeneous, it is difficult to extrapolate point measurements to estimate the spatial averages necessary to infer values relevant for large scale budgets. In this study, we developed a method for calculating the SGD flow rate by using sediment temperature. The method provides an estimate of the total flow rate, and also elucidates the flow mechanism of SGD.

It has been recognized that sediment temperature is highly correlated with SGD flow rate ($R^2 = 0.94$; correlation coefficient). We measured the sediment temperature (256 points, 1,024 km²) in the Katakai alluvial fan (Toyama Bay, western central Japan) in November 2003 and used the relation to infer a SGD distribution map. High flow areas are distributed as bands, with the total flow of SGD estimated 2.67×10^5 ml/min in the study area. The flow measured in August 2004 was smaller by 30 percent, with much of this reduction in the lower flow areas. It is shown that a permeable high aquifer reaches high flow locations directly, while the low flow locations are fed via higher resistance paths seeping out from the aquifer.

Key words: Submarine groundwater discharge (SGD), flow measurement, wide area, temperature of sediment, the eastern Toyama Bay

1. はじめに

世界各地の沿岸海域において、海底から地下水の湧出する現象（海底地下水湧出）が報告されている

(Kohout *et al.*, 1966; Lee *et al.*, 1977; Johannes, 1980)。この海底地下水湧出は、a) 淡水のみ、b) 淡水と海水の混合性海底湧出水及びc) 潮汐に応答する海水堆積物間の再循環水、の三つに分類され、海域と陸域での水循環を構成する重要な要素の一つであると認識されている (Burnett, 1999)。また、この海底地下水湧出（以下、海底湧水）は日本各地の沿岸域で報告されている (Fukuo, 1986; Taniguchi and Fukuo, 1993; Marui, 1997)。特に、富山県東部に位置する黒

^{*} 富山大学理学部
〒930 8555 富山市五福3190

^{**} 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)

部川及び片貝川扇状地の沿岸域には、a)の淡水性海底湧水の存在が多く報告されている(徳永ら, 2001; 張・佐竹, 2001)。また、徳永ら(2001)はその直接採取に成功しており、採取した海底湧水の水質分析も行われ、その物理的・化学的特性も明らかになってきている(徳永, 2001; 張・佐竹, 2002)。

一方、海底湧水の沿岸域への影響を評価するために、海底湧水湧出量測定法の開発も盛んに行われている。代表的なものとして、Lee-type 湧出量測定法(Lee, 1977; Cable *et al.*, 1997)、連続型熱供給式湧出量測定法(谷口・岩川, 2001)及び富大式SGDフラックスチャンパー法(萩原ほか, 2003)があり、これらの手法を用いた湧出量の測定も進められている。特に上に述べた淡水性海底湧水測定法は、主にダイバーの目視により、湧出域内において湧出地点を選定して行っている。しかし、湧出地点は湧出域内においても二次元的に散在し、局所性を持つことが多いと指摘されている(Burnett, 1999; 徳永・井上, 2004)。このように、1測点の測定により得られた湧出量を湧水域全域の代表値とすることは妥当ではないため、富山湾沿岸域において、海底湧水による淡水フラックスの推定までは至っていないのが現状である。

そこで本研究は片貝川扇状地沖において、海底堆積物表層(海底面下2cm)の温度と海底湧水湧出量の測定を行い、両者間の数値的關係を見だし、堆積物表層の温度から海底湧水湧出量を求めること、海底湧水域において、256測点の堆積物中の温度測定を行い(温度マッピング法)、広域に亘る湧出量の二次元的分布とその変動を明らかにすることを目的とした。

2. 研究地域概要

富山県の年間平均降水量は平野部で2,300mm、山間部では4,000mmにも達し、降水量が非常に多い。県東部に位置する片貝川扇状地は臨海扇状地であり(Fig. 1)、黒部・入善沖には完新成に形成された深海林、また魚津には埋没林が存在している(Fujii *et al.*, 1986)。この富山湾東部域において、豊富な地下水の存在が陸域での多数の自噴水をもたらすほか、黒部及び入善沖の深海林や魚津の埋没林を今日まで保存してきたと考えられている(藤井, 1997; 張・佐竹, 2001)。片貝川扇状地を形成した片貝川は、富山県の7大川の一つであり、全国でも有数の急流河川(勾配3°)である。猫又山(2,378m)、毛勝山(2,414

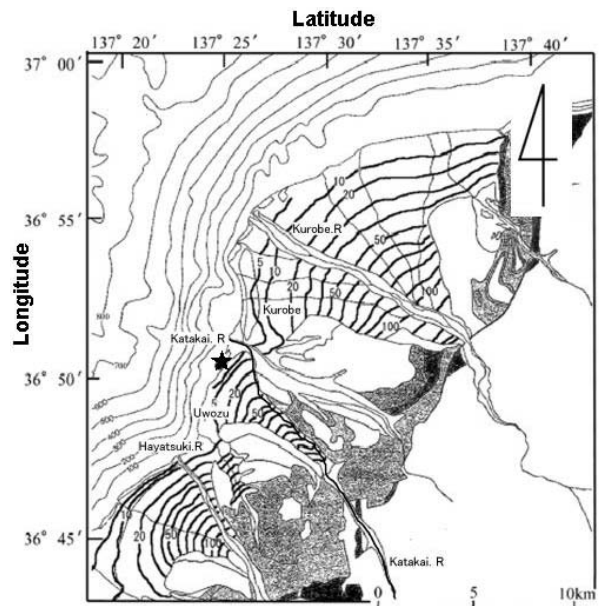


Fig. 1 Sampling location and study area.
: submarine groundwater flow area

m)及び駒ヶ岳(2,003m)などを水源とし、流程約25km、流域面積約169km²で富山湾に流入している。一方、近年、片貝川扇状地沿岸域において海底湧水湧出の観測が行われ、湧出のメカニズム・湧水の化学成分等地球化学的研究が進められている(徳永ほか, 2001; 張・佐竹, 2001・2002)。それらの結果によると、片貝川扇状地沖における海底湧水は陸域の地下水系と連動する淡水性海底湧水であり、粘土層に挟まれた透水性の高い砂礫層(旧河道)を通り湧出していることが分かった(張・佐竹, 2002)。さらに、海底湧水の栄養塩濃度は片貝川河川水の約2~3倍もあり(Suzuki and Zhang, 2003)、海底湧水によって富山湾へ流入する栄養塩量も大きいと推測される。実際、富山県の水収支結果(伊藤・藤井, 1993)から海底湧水湧出量は $3.3 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{yr}$ と計算され、それによる窒素・ケイ酸・リンの流出量は河川水によるものの倍以上にも達し、沿岸環境への影響は大きいと考えられている(Zhang and Satake, 2003)。

3. 測定方法及び原理

3.1 温度マッピング法の原理

温度の異なる物質間において、熱は温度の高い方から低い方へ伝達する。本研究ではこの物質を、海底表層堆積物、海底湧水及び海水として捉え、それらにおける熱輸送に着目した。海底堆積物表層(海底面下2

cm)の温度は、底層海水及び海底湧水から影響を受ける。つまり、海底湧水が全く湧出していない地点では堆積物表層の温度が底層海水温と一致するが、湧出量の多い地点では海底湧水の温度に近づいていく。そこで、海底堆積物表層の温度と海底湧水湧出量間に数値的な関係を見出すことができれば、堆積物温度から間接的に湧出量を算出することができると考えた。なお、この測定法が適用できる前提として、幾つかの条件が必要であり、a) 調査海域での底層海水温が均一であること、及びb) 海水温と海底湧水温間に十分な温度差があること等が挙げられる。

Suzuki and Zhang (2003) は、片貝川扇状地沖における表層海水温が、年間を通して9~27℃と大きく変動していることに対し、片貝川扇状地の地下水は12~16℃と海水に比べ変動が小さいと指摘している。また、前述のように、片貝川扇状地沖合の海底湧水は陸域の地下水と連動していることから、海底湧水温は地下水温とほぼ同程度と考えられる。すると、海水温が最大となる夏季においては、底層海水と海底湧水の温度差も最大となり、その差は11~15℃にも達するため、この温度マッピング法の検討・実施には適していると考えた。

3.2 実地観測 海底堆積物の温度と海底湧水湧出量の測定

上節に述べたとおり、堆積物表層の温度から海底湧水湧出量を算出するためには、両者の相関式を得ることが必要である。調査は、2003年11月及び2004年8月に片貝川扇状地沖合約160~200m、水深約6~8mの海域において行った。まず、海底湧水湧出域を中心に32m×32mの範囲内で側線を16本張ってマッピングを行い、各測線上2m間隔において計256測点の温度測定を行った(Fig. 2)。次に、測定結果から温度の異なる地点を選定し、海底湧水湧出量の測定を行った。測定手順は、始めにデジタル温度計のセンサー部を海底堆積物中に2cm程度刺し込み温度測定を行った後、湧出量を測定した。温度測定には防水・耐压ケースで密閉したデジタル温度計(HIOKI社製センサーロガー)を用い、海底湧水湧出量測定には富大式SGDフラックスチャンバー(萩原ほか, 2003)を用いた。

4. 結果及び考察

4.1 広域における海底湧水湧出量の分布

4.1.1 温度マッピング法の確立 2003年11月にお

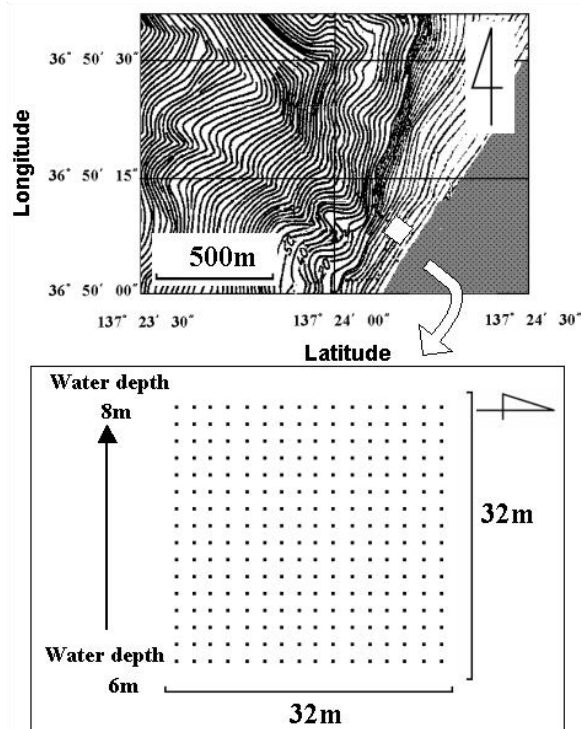


Fig. 2 Measurement of sediment temperature.
 ● : sediment temperature measuring area
 ○ : Measuring stations of sediment temperature

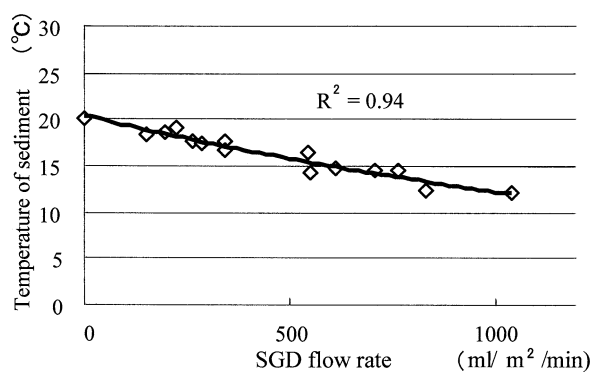


Fig. 3 Temperature of sediment (°C) vs. SGD flow rate (ml/m²/min) in November, 2003.

ける海底堆積物表層の温度と海底湧水湧出量の関係をFig. 3に示した。調査海域における海水温は20.4℃であった。海底湧水の湧出が見られない地点では、堆積物の温度が海水温に近い20.2℃を示し、最も湧出量が多い地点(1,040 ml/m²/min)では地下水温に近い12.4℃と最も低い値を示した。温度の異なる15測点における堆積物の温度測定と湧水湧出量の測定結果から(Fig. 3),両者間において高い相関($R^2 = 0.94$)

が認められた。

一般に、堆積物の温度鉛直分布が定常状態として仮定すれば、下記の一次元拡散移流モデルの式で表されることができる。

$$T = c_1 + c_2 \exp(W/D/Z) \quad \text{式 1}$$

ここで、 T は堆積物中の温度、 D は鉛直渦拡散係数（深さによらず一定と仮定してある）、 W は鉛直移流速度（下向きが正の方向）、 Z は堆積物表面からの深さ、 c_1, c_2 は積分定数とし、水平方向の拡散・移流等は無視できると仮定している。本研究の場合、堆積物中 ($Z = 2 \text{ cm}$) の温度 ($T_{2\text{cm}}$, $^{\circ}\text{C}$) は海底湧水と底層海水間における熱輸送によるものであり c_1 は深度十分に増大した際の海底湧水温度、 c_2 は海水と湧水の温度差となる。また $T_{2\text{cm}}$ は、堆積物の構造 (W/D) によってのみ決まる。つまり式1 は、

$$T_{2\text{cm}} = T_{\text{SGD}} + c(T_{\text{BW}} - T_{\text{SGD}}) \exp(-kx) \quad \text{式 2}$$

に書き換えることができ、 T_{SGD} は海底湧水（地下水）温度、 T_{BW} は底層海水温度、 c と k は堆積物構造など湧出状況に影響する定数、また、 x は海底湧水の湧出量 ($\text{SGD}_{\text{flow rate}}$, $\text{ml/m}^2/\text{min}$) を表す。この式2を用いて、堆積物の温度 ($T_{2\text{cm}}$) から湧出量 x を求めることができる。

本測定法の利点として、作業は海底堆積物表層の温度測定が主であり、1測点に要する計測時間がわずかに10~20秒と短い。つまり、調査海域における温度環境（海水温・湧水温）が一定であれば、迅速・簡便に多数の堆積物表層温度の測定ができる。その結果、季節ごとに堆積物温度 湧出量間のキャリブレーションが必要とするが、短時間で広範囲に亘る海底湧水の湧出量を求めることを可能にした。

4.1.2 広域における湧出量分布及び総湧出量測定

2003年11月における256測点の海底堆積物表層温度の測定結果から、上述した式2を用いて湧水湧出量を算出し、その二次元分布図を Fig.4 (Schlitzer, R., 2002) に示した。算出された湧出量は0~1,200 $\text{ml/m}^2/\text{min}$ であり、湧出量は極めて大きな局所性を示すことがわかった。ここでは、海底湧水湧出量の多少によって調査海域をそれぞれA域、B域、C域及びD域と分けた。A域及びB域は湧出量が多く、北から南西へ帯状に配列している。C域には上限600 $\text{ml/m}^2/\text{min}$ までの湧出量を示す地点が点在しているが、D域では、ほとんど湧出が認められなかった。さらに、

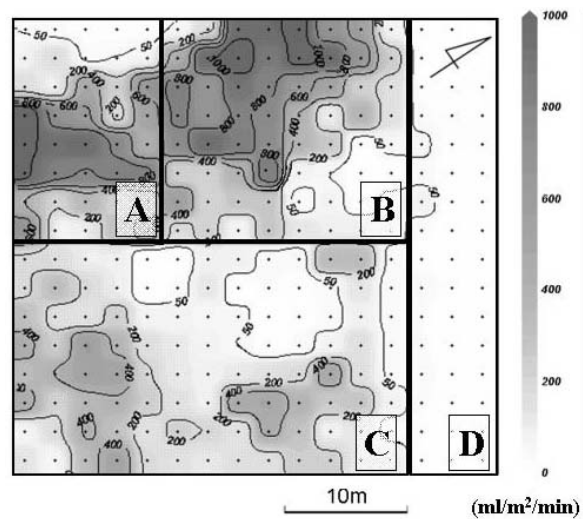


Fig. 4 Distribution of SGD flow rate ($\text{ml/m}^2/\text{min}$) in November, 2003.

Table 1 Flow area (m^2), average SGD flow rate ($\text{ml/m}^2/\text{min}$), SGD flux (ml/min), and total SGD flux.

Division of SGD flow rate ($\text{ml/m}^2/\text{min}$)	Flow area (m^2)	Average SGD flow rate ($\text{ml/m}^2/\text{min}$)	SGD flux (ml/min)	Total SGD flux (ml/min)
0-50	299	22	0.66×10^4	2.67×10^5
50-200	311	116	3.60×10^4	
200-400	185	290	5.35×10^4	
400-600	85	488	4.16×10^4	
600-800	57	711	4.06×10^4	
800- on A area	30	959	2.88×10^4	
800- on B area	57	936	5.34×10^4	

この湧出域を湧出量別に0~50, 50~200, 200~400, 400~600, 600~800 $\text{ml/m}^2/\text{min}$ と、A域における800 $\text{ml/m}^2/\text{min}$ 以上及びB域における800 $\text{ml/m}^2/\text{min}$ 以上の7区分に分け、それぞれの面積・平均湧出量及びそれらを積算した総湧出量を Table 1 に示した。今回の調査範囲における総湧出量は $2.67 \times 10^5 \text{ ml}/\text{min}$ (平均湧出速度 $2.61 \times 10^{-2} \text{ cm}/\text{s}$) と見積もられ、一日に約 $3.7 \times 10^5 \text{ L}$ の地下水が海底湧出していると推測された。

4.1.3 湧出量分布と総湧出量の季節変化 湧出量分布及び総湧出量の季節変化を解明するため、2004年8月に4.1.1と同様の測定を行った。海水温は2003年11月の20.4 $^{\circ}\text{C}$ よりも高く25.5 $^{\circ}\text{C}$ であった。

2004年8月における海底堆積物表層の温度と海底湧水湧出量の関係を Fig.5 に示した。湧出が見られない測点では、2003年11月の結果同様、海水温に近い

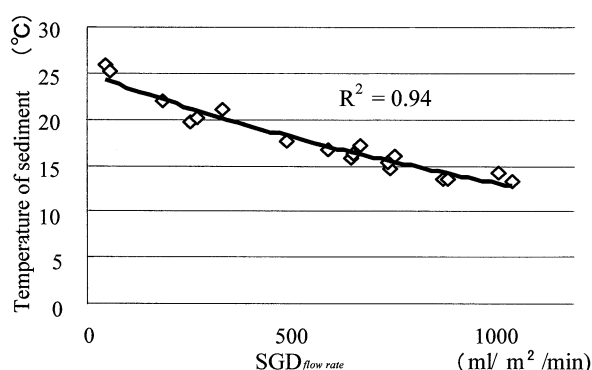


Fig. 5 Temperature of sediment T_{2cm} (°C) vs. $SGD_{flow\ rate}$ ($ml/m^2/min$) in August, 2004.

Table 2 Average SGD flow rate ($ml/m^2/min$), in November, 2003, and August, 2004, and their changes (%) in each division.

Division of SGD flow rate ($ml/m^2/min$)	Average SGD flow rate ($ml/m^2/min$)		Aug/Nov (%)
	Nov-03	Aug-04	
0-50	22	11	51
50-200	116	84	72
200-400	290	196	68
400-600	488	239	49
600-800	711	489	69
800- in area B	959	912	95
800- in area B	936	717	77

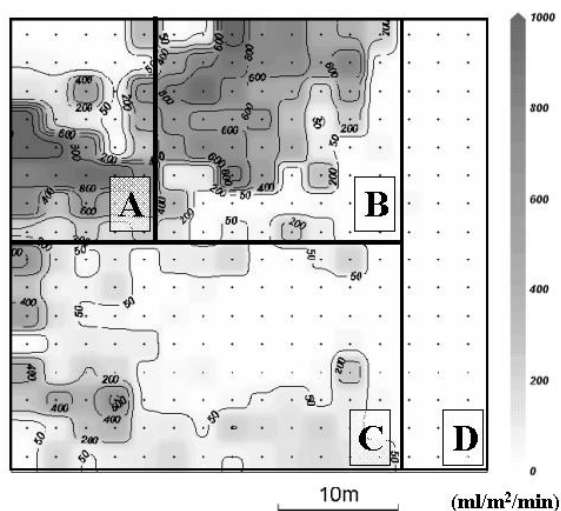


Fig. 6 Distribution of $SGD_{flow\ rate}$ ($ml/m^2/min$) in August, 2004.

25.4°Cを示した。また、最も湧出量の多い地点の湧出量は2003年11月と同程度(1,047 $ml/m^2/min$)であったが、堆積物の温度は2003年11月の12.4°Cよりも高い13.3°Cを示した。これらの温度変化は、夏季の気温や日照などにより、海水温及び地下水温が上昇したためと考えられる。相関係数は2003年11月の結果同様高い値($R^2=0.94$)であったが、堆積物温度と湧出量の指数曲線の変化はやや急になっており、周囲の温度環境の変化に左右されたと考えられる。

2004年8月に行った温度測定の結果(Fig. 5)を湧出量に換算し、その分布をFig. 6に示した。湧出量は2003年11月と同程度の0~1,200 $ml/m^2/min$ であった。また、湧出量の多い地域は2003年11月とほぼ同じ場所に位置しており、湧出量分布に大きな変化は見受けられなかった。しかし、2003年11月及び2004年8月

の総湧出量はそれぞれ $2.67 \times 10^5 ml/m^2/min$ (平均湧出速度 $2.61 \times 10^{-2} cm/s$)、 $1.84 \times 10^5 ml/m^2/min$ (平均湧出速度 $1.80 \times 10^{-2} cm/s$)となり、2004年8月では2003年11月に比べ3割程度の減少が見られた。ここで、2003年11月において湧出量別に区分された地点と比較するために、2004年8月における平均湧出量とその変化率をTable 2に示した。湧出量の多い地点(800 $ml/m^2/min$ 以上)においては、2003年11月より2割程度減少しているのに対し、湧出量の少ない地点では3~5割程度減少しており、湧出量が少ない地点ほどより顕著に減少している傾向が見られた。また、湧出量の多い地点においても、B域では2割程度減少しているのに対し、A域では、ほとんど減少が見受けられなかった。これらの要因として、1)湧出量の多いA・B域においては透水性の高い帯水層が直接海域に達していることに対し、C域においては湧出量が少なく湧出点が点在しており、さらに季節的な変化も大きいことから帯水層からの染み出し湧出と考えられる。また、2)A,B域では比較的湧出量の高い海域が帯状になっており、A域の方がより沿岸に近く、B域に比べ湧水量が安定していることから、季節変化が少ない。この湧出メカニズムは、Suzuki and Zhang (2003)による海底湧水が透水性の高い砂礫層(旧河道)を通り湧出しているとの結論と一致する。

5.まとめ

本研究は、海底堆積物表層の温度測定と、富大式SGDフラックスチャンバーによる海底湧水湧出量の測定を行って両者間の関係を見だし、堆積物温度から湧出量を換算する方法を検討した。また、片貝川扇状地沖において32m×32m四方の温度マッピング調

査を行い、広域における海底湧水の湧出量及びその湧出量分布を把握した。さらに、湧出量の変化から湧出メカニズムの考察も行った。その詳細を以下に示す。

1) 海底湧水湧出量測定法の検討において、海底堆積物の温度と海底湧水湧出量の高い相関 ($R^2 = 0.94$) を得ることができ、堆積物温度から湧出量を換算することが可能となった。

2) 温度マッピング法により、迅速・簡便に多数の堆積物表層温度の測定ができた。その結果、季節ごとに堆積物温度 湧出量間のキャリブレーションを必要とするが、短時間で広範囲に亘る海底湧水の湧出量を求めることを可能にした。

3) 片貝川扇状地沖合180 m、水深8~6 mの湧水域において、湧出量の多い部分が帯状に配列し、二次元的に局所性を示した。2003年11月における湧出量は0~1,200 ml/m²/minであり、観測域での総湧出量は 2.67×10^5 ml/m²/min (平均湧出速度 2.61×10^{-2} cm/s) と見積もられた。

4) 総湧出量は、2003年11月に比べ2004年8月は3割程度減少しており、湧出量に大きな季節変化があることがわかった。また、観測範囲内における水温の二次元分布は、二つの季節で同様の傾向にあり、湧出量の二次元分布は堆積物の構造が大きく関与していることがわかった。

5) 季節的・二次元的湧出量変動の理由として、以下のことが考えられる。

a) 湧出量の多いA・B域においては透水性の高い帯水層が直接海域に達していることに対し、C域には帯水層からの染み出し湧出している。

b) A, B域では比較的湧出量の高い海域が帯状になっており、A域の方がより沿岸に近く、B域に比べ湧水量が安定している。

今後の研究課題として、調査範囲の拡大や海底湧水湧出量の季節変化の解明をすると共に、質的な季節変化の解明が挙げられる。また、より長期間に亘り複数の測点において同時・連続温度測定を行うため、現在、連続型温度測定器を試作している。これらによって、湧出メカニズムの詳細や、湧出量の経時変化が明らかにされ、海底湧水による沿岸海洋への影響評価等の解明も期待できる。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、東京大学徳永朋祥助教授、東京大学茂木勝郎助手、東海大学成田尚史助教授

には貴重なアドバイスを頂きました。さらに、東海大学成田尚史助教授には、本稿4.1.1節に関して大変有意なコメント、および1名の匿名査読者から改善のコメントを頂きました。心より感謝いたします。また、試料分析には近畿大学三橋康伸氏に多大なご尽力を頂きました。海洋観測の際には富山県水産試験場観測船「はやつき」の船長ならびに船員の皆様方にご協力頂き、現地実験等では、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ました。研究に協力して下さった技術者・関係者の皆様に深く感謝いたします。本研究の一部は、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及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」を用いて行っており、ここに記して感謝の意を申し上げます。

引用文献

- Burnett, W. C. (1999) Offshore springs and seeps are focus of working group. *EOS* **80**, 13-15.
- Cable, J. E., Burnett, W. C. and Chanton, J. P. (1997) Magnitude and variations of groundwater seepage along a Florida marine shoreline. *Biogeochemistry* **38**, 189-205.
- 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.
- 藤井昭二 (1997) 「富山湾：神秘性とロマンの“宝庫”」, pp 213
- 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, Kurobe-gawa alluvial fan, Toyama Bay, central Japan. *Boreas* **15** (4), 265-277.
- 萩原崇史, 張勁, 小山裕樹, 中村哲也 (2003) フラックスチャンバーによる海底湧水流量測定を試み. 2003年度日本海洋学会秋季大会シンポジウム

- C「沿岸海底地下水湧水系と海洋環境への影響評価」講演要旨集, 13.
- 伊藤俊昭, 藤井昭二 (1993) 富山堆積盆の地下水の収支. 富山県地学地理学研究論集, **10**, 3-14.
- Johannes, R. E. (1980) The ecological significance of the submarine discharge of groundwater. *Marine Ecology* **26**, 391-413.
- Kohout, F. A. (1966) Submarine spring: A neglected phenomenon of coastal hydrology. *Hydrology* **26**, 140-147.
- Lee, D. R. (1977) A device for measuring seepage flux in deepwater sediment. *Water Resour. Res.* **32**, 1113-1117.
- Marui, A. (1997) Submarine groundwater discharge-possibility of opening up new resources. *J. Japan. Ass. Hydrol. Sc.* **27**, 85-94.
- Suzuki, M. and Zhang, J. (2003) Submarine groundwater spring and its impact on the marine environment in Toyama Bay, Japan. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **67**, supplement, A 459.
- 谷口真人, 岩川浩照 (2001) 連続熱供給型湧出量計を用いた大阪湾における海底地下水湧出量の測定. 地下水学会誌, **43**, 271-277.
- 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, 中田智浩, 谷口真人, 嶋田純, 三枝博光 (2001) 沿岸海底下での地下水採取技術の開発とその適用 黒部川扇状地沖合での例. 地下水学会誌, **43**, 279-287.
- 徳永朋祥, 井上誠 (2004) 海底電気探査法. 平成16年黒部市地下水流量等調査業務報告書, 23-51.
- 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. 月間海洋総特集海底地下水湧出, **270**, 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.
- 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.