

有明海沿岸域の佐賀県太良町大浦沖における 海底地下水湧出と栄養塩の輸送

ESTIMATION OF NUTRIENT INPUTS THROUGH SUBMARINE
GROUNDWATER DISCHARGE TO THE ARIAKE BAY AREA
— OFF THE OURA COAST, TARA-TOWN IN SAGA —

安元純¹・広城吉成²・高岡秀朋³・古市久士⁴・松原英隆⁵・神野健二²

Jun YASUMOTO¹, Yoshinari HIROSHIRO², Hidetomo TAKAOKA³

Hisashi FURUICHI⁴, Hidetaka MATSUBARA⁵ and Kenji JINNO²

¹正会員 農博 九州大学大学院 工学研究院 環境都市部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

²正会員 工博 九州大学大学院 工学研究院 環境都市部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

³非会員 いであ(株) (〒812-0055 福岡市東区東浜1-5-12)

⁴非会員 八千代エンジニアリング(株) (〒810-0062 福岡市中央区荒戸2-1-5)

⁵非会員 工博 (株)新日本環境コンサルタント (〒815-0075 福岡市南区長丘1-2-30)

Submarine Groundwater Discharge (SGD) is now recognized as an important pathway between land and sea. This paper takes a first step for estimating nutrient inputs through SGD to Ariake Bay. SGD rates and its quality along the coast of the Ariake Bay off Oura region were investigated. As a result, it was shown that on-site SGD rate ranged from 0.01 to 20.52 $\mu\text{m/s}$, and SGD flowed through shallow confined aquifers which consist of basalt and superposition pyroclastic fall with shorter residence time. Then, it was estimated that reduction reaction for SGD proceeded just up to denitrification, and SGD associated nutrient loads (N, P, SiO₂) are estimated at 1.40g/day, 0.07g/day, and 52.78g/day respectively. The results of this study demonstrate that SGD must be considered as a significant source of nutrient to the coastal sea area in Ariake Bay.

Key Words : submarine groundwater discharge, nutrient inputs, reduction reaction, Ariake bay

1. はじめに

有明海を始めとする閉鎖性水域や沿岸域における生態系環境は悪化の一途をたどっている。その原因はさまざまであるが、主な原因の一つとして、近年、沿岸域における宅地および農耕地が開発されたことで、陸域から海域への栄養塩類等の負荷量が増加したことが考えられる。

これまで、海域の生態系保全のために欠かせない要因である陸域から海域への物質負荷量の算定や管理には、河川水などの表流水に溶解する物質のみ考慮されてきた。しかし最近の研究で、海域へ地下水経由でもたらされる栄養塩類等の溶存濃度が河川に比べ大きい場合が存在することが示唆され、海底地下水湧出 (SGD : Submarine Groundwater Discharge) とよばれ注目を集めている。例えば、Valiela¹⁾ は沿岸域への地下水経由の窒素およびリンの輸送速度は河川よりも地下水の方が相対的に小さいが、その溶存濃度は、河川中に比べ大きい場合も存在することを示している。このように、海域への地下水経由

の栄養塩の供給は、河川経由と並び、栄養塩の循環や一次生産量に重要な役割を果たしていると考えられる。

一方、水循環に関する研究においても、海洋へ流出する地下水に関する定量的評価はこれまでほとんど行われてこなかった。しかし最近の研究により、海洋への全流出量のうち直接地下水流出成分が占める割合は10%~31%²⁾にも及ぶことが示され、上述のほか地球化学的物質収支あるいは生態系への影響観点を加えた、海底地下水湧出の定量的評価の重要性が高まってきている。

有明海沿岸域においても、海底地下水湧出とそれに伴う栄養塩類等の物質輸送はいまだ未解明であり、有明海における生態系環境を回復させるためにも、十分な環境把握が必要である。

そこで本研究では、有明海沿岸域の佐賀県太良町大浦沖において、海底地下水湧出の現地調査を行った結果を基に、本地域における海底地下水湧出とそれに伴う栄養塩類等の物質輸送の考察およびその定量的評価を行う。

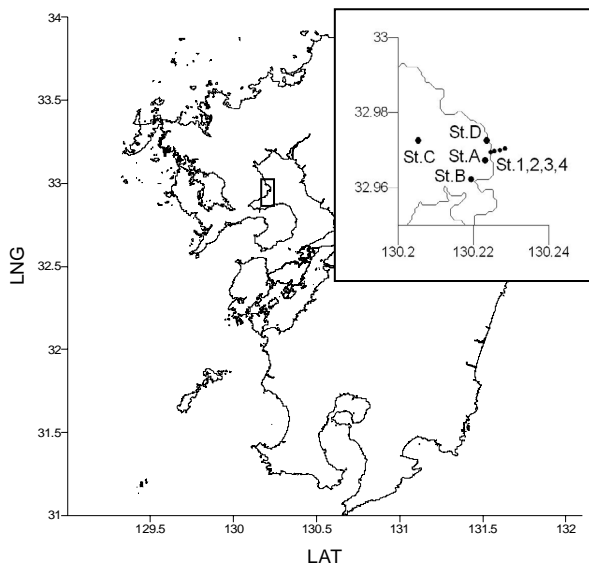


図-1 調査対象地域の位置および観測地点

2. 調査地域概要

本研究では、有明海沿岸域の佐賀県藤津郡太良町大浦沖を調査対象とした。図-1に調査対象地域の位置と海底湧水観測地点 (St.1, St.2, St.3, St.4) および陸域地下水観測地点 (St.A, St.B, St.C, St.D) を示した。以下では、小形³⁾の報告を基に、本観測地点の後背地である多良岳地域の地形・地質について述べ、栄養塩の供給にかかわりの大きい土地利用状況について述べる。

(1) 地形・地質

本地域は、鮮新世から第四紀前半に噴出したと考えられる火山岩類が分布しており、本地域の最高峰は経ヶ岳 (1075m) である。概観すると、本地域の地形は約25kmの直径に対し、比高1100m足らずの傾斜の緩い円錐形をしており、西側に開いた凹地形をなし、東西方向に深い谷が刻まれている (図-2)。本地域には、一級河川のような大きな河川はないが、北東部と南部の山麓には3°~4°の緩傾斜をなす火山麓扇状地が発達し⁴⁾、そこに多数の小河川が中央部から放射状に発達している。

本地域の火山岩は、玄武岩から角閃石安山岩まで多様であり、多くの岩体に区分される。本地域の基底部に広く分布する古期玄武岩類は、南部を除く本地域の山麓に広く露出しており、数十枚以上の溶岩流と少量の降下火砕物よりなる。溶岩流は層厚が数mから30mで、亀裂が発達しており透水性が高く、降下火砕物を挟んでほぼ水平に累重している。降下火砕物はスコリア層や火山灰層よりなるが、風化のため赤褐色の粘土になっている場合が多く、難透水層性を示す。

以上の知見を基に、本地域における海底地下水湧出の概念図を作成し図-3に示した。今回観測された海底湧水は、背後地の斜面に形成された河川や沢からの浸透や、山腹斜面部からの浸透を集めた地下水が、沿岸部の海底下の古期玄武岩類中に形成された透水性の高い溶岩流と

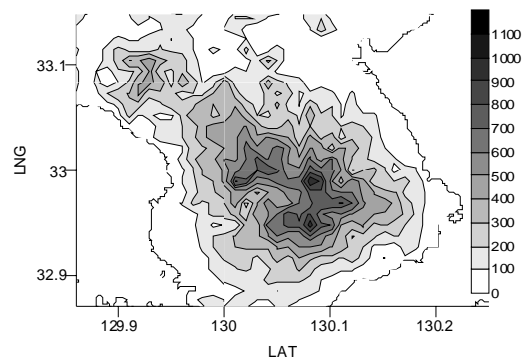


図-2 多良岳地域の地形(標高:m表示)

透水性の低い降下火砕岩の間の被圧帯水層を、比較的短い経路で流下し湧出したものではないかと推測された。

(2) 土地利用状況

多良岳地域の土地利用状況は、上述したように、火山山麓地で斜面傾斜も緩やかであるため、農業地帯が沿岸部から標高300m以下の山麓部に広く分布しており、古くからみかん栽培が盛んである。山頂付近一帯の国有林は自然公園地域となっている。

3. 海底地下水湧出の調査および分析項目

現地観測は、2006年8月20日から21日にかけて行った。調査日における潮汐条件を表-1に示す。本地点は、潮汐の大きな有明海でも比較的潮差の大きな場所であり、調査日は中潮にもかかわらず、潮差が約3.0mであった。そこで、海底地下水湧出の観測は潮汐の影響を考慮し、20日の上げ潮時 (FT: Food Tide)、21日の満潮時 (HW: High Water)、下げ潮時 (ET: Ebb Tide)、干潮時 (LW: Low Water) に計4回行った。

海底地下水湧出の観測方法は、図-1に示すように、汀線に直交する測線上において、陸側から順にSt.1, St.2, St.3, St.4の計4点の海底面に直径32cmのLee-type⁵⁾の手动式湧出量計 (Seepage meter) をそれぞれ2個設置し、ポリエチレン製の採水袋を用いた採水を一定時間 (15分~20分) 行うことで、海底地下水湧出の流速測定および海底湧水の採水を行った。また、沿岸域の4点 (St.A, St.B, St.C, St.D) で地下水の採水を行った。St.AおよびSt.Dは海底湧水の観測地点近くの斜面からの湧出地下水で、St.Bは地表面から約-55mの深井戸から揚水した被圧地下水、St.Cは民家奥の竹林の中にある現在未使用の掘りぬき井戸 (地表面から約-5m) の地下水である。

海底湧水、地下水および海水の現地測定項目には、水温、電気伝導度 (EC)、pH、溶存酸素 (DO)、酸化還元電位 (ORP)、水質分析項目に、溶存性有機態炭素 (DOC)、全有機態炭素 (TOC)、主要陽イオン (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺, Mn²⁺)、主要陰イオン (Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻)、栄養塩 (アンモニア性窒素 (NH₄-N)、硝酸性

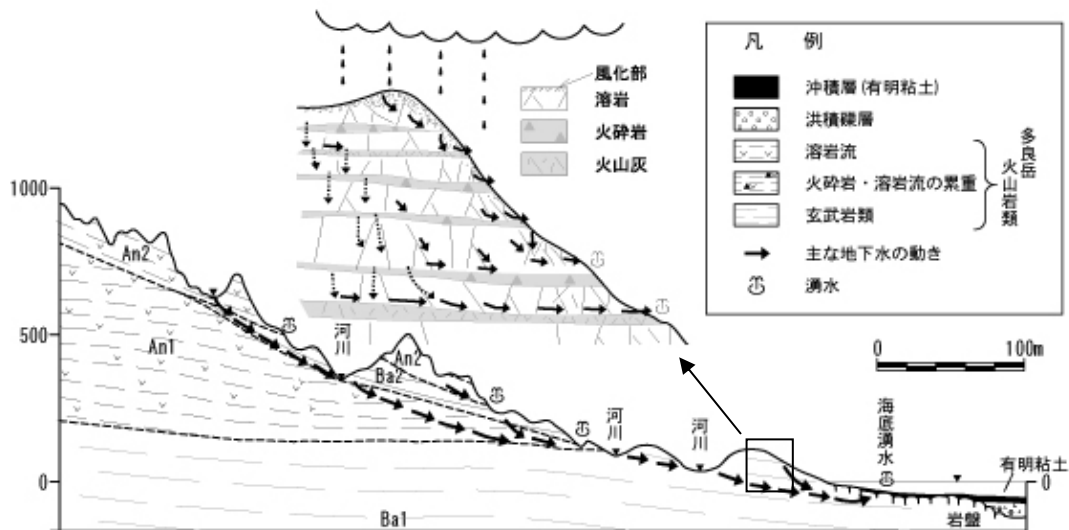


図-3 本地域における海底地下水湧出の概念

表-1 調査日の潮汐条件

(HW: High Water, LW: Low Water)

調査日	干満潮位(T.P.+m) (時刻)	潮差m
2006.8.20	LW-1.22 (13:05) ~HW 1.41 (19:49)	2.63
2006.8.21	HW 1.76 (7:31) ~LW-1.48 (13:57)	3.24

窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$), 亜硝酸性窒素 ($\text{NO}_2\text{-N}$), 全窒素 (T-N), リン酸態リン ($\text{PO}_4\text{-P}$), 全リン (T-P), 珪酸 (SiO_2), 水素・酸素安定同位体比 ($\delta\text{D} \cdot \delta^{18}\text{O}$) を選出した。なお、各水質項目の分析法および測定機器に関しては以下に列挙する。EC: 電極法 (HORIBA CONDMETER DS-52), pH, ORP: 電極法 (HORIBA pH METER F-22), DO: 電極法 (IJIMA DO METER B-103Z), 主要陽イオン (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+}): 原子吸光度法 (HITACHIA 原子吸光度計 Z-8100), 陰イオン (Cl^- , SO_4^{2-}): イオンクロマトグラフ法 (HITACHI Conductivity Detector L-3730), DOC, TOC: 燃焼酸化-赤外線式 TOC 自動計測法 (SHIMADZU TOC-V), HCO_3^- : 赤外線分析法 (SHIMADZU TOC-V), $\text{NH}_4\text{-N}$, SiO_2 : 吸光光度法 (HITACHIA 原子吸光度計 U-1100), $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$: 吸光光度法 (FIA サヌキ工業株式会社製), T-N: 銅・カドミウムカラム還元法 (FIA サヌキ工業株式会社製), T-P: ペルオキシニ硫酸カリウム分解法 (FIA サヌキ工業株式会社製), δD , $\delta^{18}\text{O}$: 質量分析法 (安定同位体比分析用質量分析装置 VG-アイソテック SIRA-10)。

4. 結果および考察

(1) 海底地下水湧出の流速

沿岸域への海底地下水湧出に伴う窒素およびリン等の栄養塩の流出機構を把握する上で必要な要素の一つとして、地下水の流路と速度が挙げられる。地下水の流路と速度には、沿岸帯水層の水文特性が大きく関与している。沿岸部帯水層は浅い(不圧)帯水層と深い(被圧)帯水層に分類でき、海底地下水湧出の発生には、上下帯水層間の動的な関連性および下層からの正の圧力が必要であり、それによって、沿岸域での漏出や沖合での湧出が引き起こされる。

今回行った現地観測で計測された各観測地点、および各潮汐条件 (FT: Food Tide, HW: High Water, ET: Ebb Tide, LW: Low Water) における海底地下水湧出の流速 ($\mu\text{m/s}$) および電気伝導度 (mS/m) を示す (表-2)。

観測の結果、St.1およびSt.2で比較的大きな海底地下水湧出量が観測された。特に汀線から約30mの距離に位置するSt.2において、海底地下水湧出の断面平均流速は $20.52\mu\text{m/s}$ を示し、電気伝導度もほぼ淡水に近い 32 mS/m であった。干潮時には海面に波紋が確認できた。

St.1においても海底地下水湧出の流速が平均 $0.76\mu\text{m/s}$ と観測されたが、電気伝導度は淡水と海水との半分近い値で、平均 2823mS/m を示した。St.3およびSt.4においても若干の海底地下水湧出が計測されたが、電気伝導度はより海水に近い値であった。つまり、今回計測された海底地下水湧出には、Burnett⁶⁾ が述べているように、陸域の地下水系と連動する海底地下水湧出に加え、潮汐に応答し海水と海底堆積物の間で流入出を繰り返している海水成分を含んでいることが考えられる。

そこで、観測された電気伝導度を塩分濃度の指標として、谷口らの手法²⁾ を参考に、海底湧水に含まれる海水の混合比により、陸域由来の淡水湧出と海水の分離を行った。解析に用いた式を (1) に、得られた結果を図-4に示す。

表-2 各観測地点・各潮汐条件における海底地下水湧出の流速 (μm/s) および電気伝導度 (mS/m) (FT: Food Tide, HW: High Water, ET: Ebb Tide, LW: Low Water)

Point	計測項目	潮汐条件			
		FT	HW	ET	LW
St.1	流速	1.14	0.36	0.73	0.83
	EC	3155	2815	2695	2625
St.2	流速	15.78	20.03	22.04	24.23
	EC	27	36	43	21
St.3	流速	0.18	0.34	0.23	0.31
	EC	3920	3965	4120	4020
St.4	流速	0.26	0.49	0.13	0.26
	EC	4215	4070	4390	4015

$$q_{SFGD} = \frac{EC_{SGD} - EC_{GW}}{EC_{SW} - EC_{GW}} \cdot q_{SGD} \quad (1)$$

ここで、 q_{SFGD} は陸域からの淡水湧出の流速 (μm/s) , q_{SGD} は海底地下水湧出の流速 (μm/s) , EC_{SGD} は海底湧水の電気伝導度 (mS/m) , EC_{GW} は陸域地下水の電気伝導度 (mS/m) , EC_{SW} は観測地点付近の海水の電気伝導度 (mS/m) である。

図-4をみると、St.2で観測された海底地下水湧出と淡水湧出の流速がほぼ一致しており、淡水湧出の流速は海水面の低い干潮時に大きくなる傾向を示した(表-2)。一方、それ以外のSt.1, St.3, St.4では、海底地下水湧出と淡水湧出の間に差がみられ、淡水湧出だけではなく、海水の混合が確認できた。しかしながらその混合比は、潮位に対して明確な関係性はみられなかった。観測された海底地下水湧出中の淡水湧出の混合比の平均値は、St.2では淡水湧出が99.6%となっており、海水の混合はほとんどみられなかった。一方、St.1における淡水湧出は39.4%、St.3, St.4ではそれぞれ、8.6%、5.9%であった。

以上、海底地下水湧出の流速は、基本的に、海岸からの距離にしたがって減少する傾向にあるが、局所的(St.2)に非常に大きな値を示すこともある。本地点付近における海底地下水湧出は、沿岸部の帯水層を形成する玄武岩中に火砕岩と火山灰の累重により形成された被圧帯水層を流下してきた地下水が、玄武岩中に局所的に発達した亀裂などの透水性の高い部分からの湧出したものと推測される。

(2) 海底地下水湧出に伴う栄養塩の輸送

海底地下水湧出に伴う栄養塩の流出機構を把握する上で、上述した地下水の流路と速度に加えて、地下環境の酸化還元状況を把握することが重要である。

滞留時間が小さく土壌水分中の溶存有機炭素 (DOC) 濃度が小さいような自然状態の浅部帯水層は多くの酸素

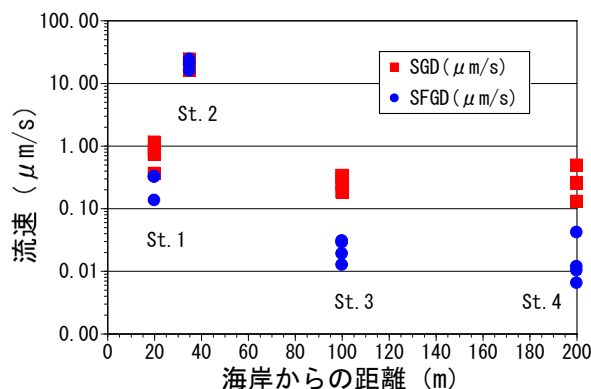


図-4 海底地下水湧出および淡水湧出の流速分布

を含んでおり、滞留時間が長いから、あるいはDOCを多く含んだ浅部や深部の帯水層では、溶存酸素 (DO) は通常すべて消費され、DOCは脱窒、マンガンや鉄の酸化物の還元、硫酸還元などの反応過程で分解され、最終的にメタンが生成する。つまり、帯水層は地下水の流れに沿って還元状態が進んでいく。

以上を踏まえ、今回の現地観測で採水した海底湧水、陸域地下水、および海水の水質分析結果(表-3)について考察する。

今回観測された海底湧水は、酸化還元電位 (ORP) が平均193mVで、陸域地下水の209mVに比べて若干低く、還元状態である。また、硝酸イオン (NO₃⁻) の平均濃度が、陸域地下水では2.44mg/L、海底湧水では0.75 mg/Lとなっており、海底湧水の値は小さくなっている。これは海底湧水中の重炭酸イオン (HCO₃⁻) 濃度が陸域地下水のそれより高いこと、また海底湧水中の全有機物 (TOC) 濃度が陸域地下水と比べ減少していることから、陸域地下水が海底から湧出する過程で、脱窒反応が起こったものと考えられる。一方、マンガンイオン (Mn²⁺) 濃度や2価鉄イオン (Fe²⁺) 濃度には海底湧水と陸域地下水とで差異はみられなかった。硫酸イオン (SO₄²⁻) 濃度は、満潮時 (HW) の海底湧水中で大きな値がみられたが、塩化物イオン (Cl⁻) 濃度も同時に大きくなっていることから、これは海水の混入によるものと考えられる。海底湧水中の還元反応は脱窒反応までであり、Mn²⁺や Fe²⁺の生成する還元反応や硫化水素 (H₂S) の生成する硫酸還元まではいたっていない。

次に、図-5は陸域地下水および海底湧水の水質をヘキサダイアグラムに表したものである。その結果、陸域地下水はSt.Bのような深部帯水層に多くみられる重炭酸カルシウム型に分類され、St.AやSt.Dのような浅部帯水層では非重炭酸ナトリウム型に分類された。海底湧水は海水を含む場合もあるため、平均的にCl濃度は大きくなっているが、海水の混入が少なかった上げ潮時 (FT) の結果をみると、非重炭酸ナトリウム型を示していることから、浅部帯水層 (St.A, St.D) の地下水と水質タイプは同じであることがわかった。

表-3 海底湧水，陸域地下水，海水の水質分析結果（ND：定量下限値以下，SGD：海底湧水，GW：地下水，SW，海水，FT：上げ潮，HW：満潮，ET：下げ潮，LW：干潮）

水質項目	単位	SGD:FT (St.2)	SGD:HW (St.2)	SGD:ET (St.2)	SGD:LW (St.2)	GW (St.A)	GW (St.B)	GW (St.C)	GW (St.D)	SW (St.4)	SW (St.4)
水温	°C	26.9	26.7	26.6	26.8	26.4	26.3	26.4	26.4	26.3	26.4
pH	—	8.2	8.1	8.2	8.1	7.2	8.0	7.4	7.5	7.6	7.7
EC	mS/m	16.9	42.1	22.0	24.7	9.3	11.8	19.4	15.5	3820	3650
DO	mg/L	9.8	9.6	8.7	9.9	9.2	8.8	9.4	9.5	5.9	7.1
ORP	mV	196	192	193	191	213	206	210	208	186	185
DOC	mg/L	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.3	0.1	1.1	1.3
TOC	mg/L	0.2	0.2	0.2	0.2	0.9	0.5	0.9	0.1	1.1	1.3
Na ⁺	mg/L	17.4	58.3	25.4	30.0	6.4	5.6	13.3	11.7	9310	8240
K ⁺	mg/L	6.4	5.4	4.0	4.1	1.2	1.6	1.7	1.8	382	358
Ca ²⁺	mg/L	7.6	9.1	8.4	8.8	5.5	11.0	14.8	9.4	466	418
Mg ²⁺	mg/L	4.9	8.5	4.6	5.1	2.4	3.5	4.7	4.7	1040	940
Fe ²⁺	mg/L	0.05	ND	ND	ND	0.09	ND	ND	ND	1.27	1.22
Mn ²⁺	mg/L	0.006	ND	ND	ND	0.027	ND	ND	ND	0.514	0.542
Cl ⁻	mg/L	18.0	94.2	34.1	42.6	11.6	6.2	21.4	11.2	16700	15800
HCO ₃ ⁻	mg/L	52.8	50.5	49.2	49.1	19.1	44.6	31.9	44.1	79.7	80.3
SO ₄ ²⁻	mg/L	4	16	6	7	2	2	7	6	2500	2300
NH ₄ ⁺	mg/L	ND	ND	ND	ND	0.06	ND	ND	0.06	ND	ND
NO ₃ ⁻	mg/L	0.75	0.75	0.75	0.75	0.32	1.27	5.31	2.88	0.13	0.10
NO ₂ ⁻	mg/L	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002	0.001	0.002	0.026	0.019
TN	mg/L	0.79	0.79	0.79	0.80	0.43	1.31	6.15	3.14	0.69	0.63
PO ₄ ²⁻	mg/L	0.037	0.041	0.040	0.040	0.016	0.046	0.030	0.036	0.043	0.042
TP	mg/L	0.040	0.043	0.042	0.042	0.062	0.048	0.048	0.038	0.116	0.092
SiO ₂	mg/L	31	31	27	29	15	24	46	25	4	4

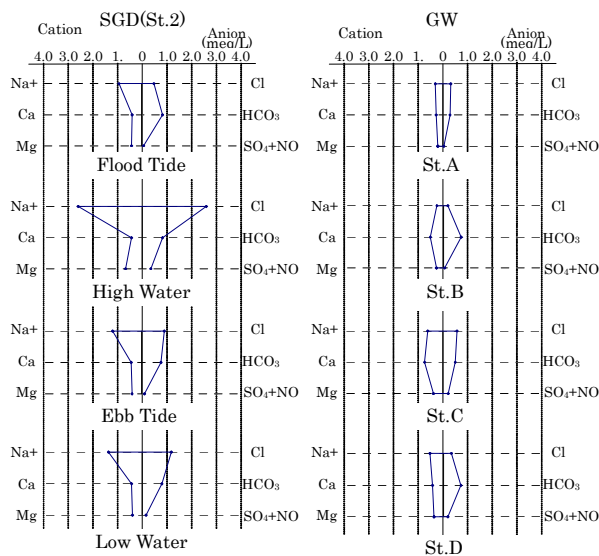


図-5 ヘキサダイアグラムによる水質分類

以上より，本地域における海底湧水は，比較的滞留時間の短い浅部帯水層や，透水性の高い層を流下してきたもので，地下水輸送に伴う還元の程度は，脱窒反応までであると推測された。

次に，海底湧水中の栄養塩について，海域の生態系環境に与える影響について定量的に考察する。表-4に海底地下水湧出量の多かったSt.2において，1m²当りに流入する一日の栄養塩（全窒素（TN），全リン（TP），珪酸

（SiO₂）の負荷量を示した。その結果，St.2における一日の栄養塩負荷量は，TNが1.40g/(m²・day)，TPが0.07g/(m²・day)，SiO₂が52.78g/(m²・day)という結果になった。2章で述べたように，多良岳沿岸地域の地質は火山岩質であることから，水収支の中で地下水流出成分の占める割合は大きいことが予測され，本沿岸域への栄養塩の供給に関して海底地下水湧出が寄与する割合は大きくなると思われる。

一方，リンに対する窒素の割合（N/P）に着目すると，植物プランクトンの一般的なN/PとされているRedfield比＝16に比べ，海底湧水中のTN/TPは19.2と大きい。珪藻の増殖に必要な珪酸塩（DSi）については，一般的な珪藻の窒素と珪素との比（TN/DSi）は約1.0であり，海底湧水中のTN/DSiは約0.03であることから，珪酸が比較的多いといえる。つまり，本地域の海底湧水は珪藻等の植物プランクトンの生育に好条件といえる。

有明海沿岸において多良岳沿いの沿岸部が占める沿岸距離の割合は小さくはない。したがって，有明海の湾奥部，あるいは本調査対象の沿岸海域において，海底湧水由来の栄養塩等の供給が周辺の生態系環境に重要な影響を及ぼしていると考えられ，今後も検討していく必要がある。

(3) 水素・酸素同位体比

今回の現地調査により採水した海底湧水，陸域地下水，

表-4 St.2における各栄養塩の負荷量

項目	溶存濃度 (mg/L)	SGD流速 ($\mu\text{m/s}$)	負荷量 ($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$)
TN	0.79	20.5	1.40
TP	0.04	20.5	0.07
SiO ₂	29.8	205	52.78

および海水それぞれの水素・酸素同位体比 ($\delta\text{D} \cdot \delta^{18}\text{O}$) の関係を示す (図-6)。今回観測された海底湧水および陸域地下水の $\delta\text{D} \cdot \delta^{18}\text{O}$ は、Craig⁷⁾によって示された天水線上にプロットされ、天水 (降水) 由来であることが確認された。また、中部日本における地表水の $\delta^{18}\text{O}$ の高度効果⁸⁾を参照すると、観測された $\delta^{18}\text{O}$ から、約300m以下の低地で降った降雨が浸透して形成された地下水であると推測された。また、本地域の海水の $\delta\text{D} \cdot \delta^{18}\text{O}$ は、SMOW (標準平均海水の組成) に比べ小さく、淡水成分の混合が認められた。以上の結果は、今回観測された海底湧水が、本地域の地形・地質や各水質分析結果により推測された浅部帯水層起源であるという推測と一致しており、上述の考察の妥当性を示すものである。

5. まとめ

有明海沿岸域の佐賀県太良町大浦沖において、海底地下水湧出が観測された。海底湧水の流速は、基本的に、海岸からの距離に従い減少する傾向にあるが、局所的 (St. 2) に非常に大きな値 (20.52 $\mu\text{m/s}$) を示すこともある。St. 2における海底湧水は、沿岸部の帯水層を形成する玄武岩中に火砕岩や火山灰の累重により形成された被圧帯水層を流下してきた地下水が、局所的に発達した亀裂などの透水性の高い部分からの湧出したものと推測された。一方、海底湧水の水質分析の結果、本地域における海底湧水は、比較的滞留時間の短くなる浅部帯水層、あるいは透水性の高い層を流下してきたものであると推測された。このことは、水素・酸素同位体比の関係からも妥当性が確認された。大きな河川の流入の無い大浦沿岸海域において、この海底湧水が、海域の植物プランクトン等の生息環境に大きな影響を及ぼしていると推測される。

今後は、有明海沿岸で海底地下水湧出が見られる地点を出来るだけ多く確認し、その現地調査を行う。また、現段階では、周辺河川の資料不足から水収支解析は行っていないが、今後、資料収集を行い、数値解析により、海洋への地下水流出量を算出する予定である。加えて、生物地球化学的な反応過程を考慮した物質輸送解析により、全集水域から有明海に流入する地下水流出成分の

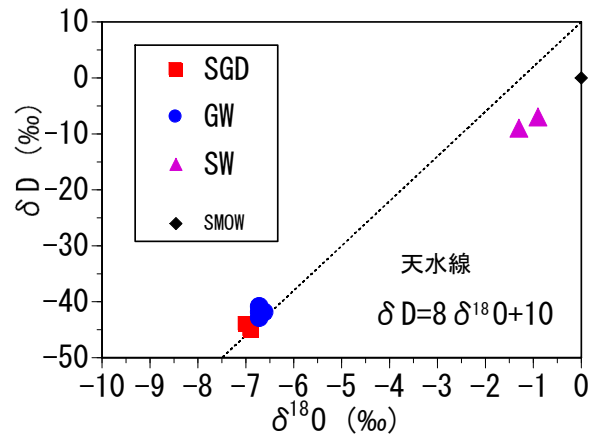


図-6 水素・酸素同位体比 ($\delta\text{D} \cdot \delta^{18}\text{O}$) の関係 (SMOW:標準平均海水の組成)

「量」と「質」の推定を行う予定である。これにより、海域と陸域との接合部分で欠落していた海域への地下水流出成分が明らかとなり、陸域から海域を一元的に捉えた水循環のマネジメントモデルの構築が可能となり、有明海の生態系環境の再生に貢献できるものと考えられる。

謝辞：本研究は、平成17年度の文部科学省重要課題解決型研究 (代表：楠田哲也) 「有明海生物環境の俯瞰的再生と実証試験」の課題の一部として行ったものである。また、八千代エンジニアリング(株)の飯島康夫氏には、研究対象地域の地質構造について有益なご助言を頂いた。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Valiela, I., et al.: Transport of groundwater-borne nutrients from watersheds and their effects on coastal waters, *Biogeochemistry*, Vol10, No3, pp177-197, 1990.
- 2) Taniguchi, M. et al.: Investigation of submarine groundwater discharge, *Hydro. Process.* Vol16, pp2115-2129, 2002.
- 3) 小形昌徳：九州北西部、多良岳地域の火山地質、*地質学雑誌*, Vol95, No10, pp755-768, 1989.
- 4) 守屋以知雄：火山麓扇状地と成層凝灰亜礫層、*北海道駒沢大紀要*, No.9,10, pp107-126, 1975.
- 5) Lee, D.R.: A device for measuring seepage flux in lake and estuaries, *Limnol. Oceanogr.* Vol22, pp140-147, 1977.
- 6) Burnett, W.C.: Offshore springs and Seeps are focus of working group, *EOS*, Vol80, pp13-15, 1999.
- 7) Craig, H.: Isotopic variations in meteoric waters, *Science*, Vol133, pp1702-1703, 1961.
- 8) 早稲田周ほか：中部日本・東北日本における天然水の同位体組成、*地球化学*, Vol17, pp83-91, 1983.

(2006. 9. 30受付)