有明海北東部流入河川の溶存態ケイ素濃度の予測

熊谷 博史* 田中 義人* 白川 ゆかり**
松尾 宏* 金 並 和 重***

Estimation of Dissolved Silicate Concentration in Influent Rivers of Northeastern Ariake Bay

Hiroshi KUMAGAI*, Yoshito TANAKA*, Yukari SHIRAKAWA**,
Hiroshi MATSUO* and Kazushige KINNAMI***

* Fukuoka Institute of Health and Environmental Sciences, Mukaizano 39, Dazaifu, Fukuoka 811-0135, Japan

** Tagawa Health, Welfare and Environment Office, Matsubaradohri 3292-2, Ida, Tagawa, Fukuoka 825-8277, Japan

*** Oita Prefectural Tobu Health Center, Shimotai 14-1, Tsurumi, Beppu, Oita 874-0840, Japan

Abstract

Dissolved silicate ($\text{Si}(\text{OH})_4\text{-Si}$; DSi) concentration was examined at 38 sampling sites in influent rivers of the northeastern Ariake Bay, and estimated on the basins of a numerical geological map of the sites' watershed. The multiple regression model was used for predicting DSi concentration at the sampling sites using the geological area ratio in their watersheds. The coefficient of determination (R^2) obtained was 0.931, indicating that DSi concentration was strongly associated with its geological condition. The geological categories which contribute to DSi concentration in rivers are quaternary volcanic rocks (non-alkali, felsic), volcanic rocks (debris) and quaternary volcanic rocks (non-alkali, pyroclastic flows). This result suggests that the DSi concentration of an arbitrary station in an influent river of the northeastern Ariake Bay can be predicted on the basins of a geological map of the station.

Key words: dissolved silicate, geological map, watershed, Ariake Bay

1. はじめに

近年、有明海で生じている環境異変は、同海域の海洋資源を壊滅させかねず、その原因解明と再生へ向けた対策は緊急の課題である。有明海・八代海総合調査評価委員会は、赤潮発生の一要因として、有明海における植物プランクトンの遷移を挙げるとともに、今後解決すべき重要な課題として、赤潮発生の増加に関するメカニズムの更なる解明が必要であるとしている¹⁾。実際、有明海流域では、N・Pに関する情報は多くの機関により調査が実施されているものの、それらに比較すると、珪藻の必須栄養塩である溶存珪酸態珪素 ($\text{Si}(\text{OH})_4\text{-Si}$; 以下溶存態ケイ素 DSi) についての情報²⁾は依然として少ない。

小林³⁾は全国各地の河川水を分析し、 SiO_2 を含む各項目の平均水質を算出している。その中で有明海流域を含む九州北部地方では全国に比して SiO_2 濃度が高いことを報告している。この理由として、 SiO_2 溶出量の多い阿蘇火山系の火山噴出物が筑後川流域に存在していることを理由に挙げている。一方で著者ら⁴⁾が実施した調査では、筑後川本流のDSi濃度は高かったものの、そ

の他の支川については低濃度のものから、高濃度のものまで流域毎に異なっていた。

一般的に河川水中のDSiについては、自然由来とされており、DSiは河川流域において岩石と水（土壌水、地下水）が反応し、岩石から元素を溶解する化学的風化作用により、河川水中に供給されている。筑後川流域において支流毎にDSi濃度に変動が見られたのも、地質状況が流域毎に異なっていることが原因と考えられる。すなわちDSi濃度を予測する際には流域地質の考慮が必要である。

鹿園⁵⁾は、化学的風化作用を考慮し、流出量（runoff：集水域の単位面積、単位時間当たりの総河川流量）からDSi濃度を算定する、水-岩石反応カイネティックス-流動モデルを提案している。ただしこの方法を用いてDSi濃度の予測を実施するには、流出量に加え、反応比表面積、空隙率、リザーバー厚等の多くのパラメータを必要とする。その為、本方法を用いて、有明海流入河川のように流域毎に地質が異なる状況でDSi濃度を計算するのは困難である。

一方、Meybeck⁶⁾は、単一岩石からなる流域を持つ

* 福岡県保健環境研究所 〒811-0135 福岡県太宰府市大字向佐野 39

** 福岡県田川保健福祉環境事務所 〒825-8277 福岡県田川市大字伊田松原通り 3292-2

*** 大分県東部保健所 〒874-0840 大分県別府市大字鶴見字下田井 14-1

河川水を調査した上で、地球上の大陸表面の岩石の種類とその露出面積により、河川水中の SiO_2 と各イオン成分を見積もっている。その際、考慮された岩石は花崗岩等を含む主要 16 種類であるが、それらについての地質時代は考慮されていない。本研究で対象としている有明海流域の地質には、第三紀以前に生成された地質と第四紀地質とが混在する。地質時代は、岩石の物理的風化作用にも関わることが考えられる為、予測の際には地質時代についても考慮する必要がある。すなわち有明海流域における DSi 濃度を予測し、その負荷量を算出する為には、空間的に異なる地質及び年代を考慮した、簡便かつ精度の高いモデルが必要となる。

近年では、流域地質を考慮して「 SiO_2 」を求める手法⁷⁾も提案されているが、流域地質に応じた詳細な河川調査の実施を必要とする。その為、本研究の対象領域である有明海流域のような広域において上記方法を実施するには多大な労力と経費を要することが予測される。

そこで本研究では、DSi 濃度がその流域地質によって規定されると仮定した上で、既存地質情報を利用して、有明海北東部流入河川水中の DSi 濃度の予測を試みた。先ず流域内の河川水中の DSi 濃度と、それらに対する流域地質の関連を把握するために、河川水中の DSi 濃

度実態調査と、数値地質図を用いた地質調査を実施した。この結果を用い、算出した流域地質面積から重回帰分析を用いて DSi 濃度の再現を試みた。さらに DSi 濃度に対する影響の高い地質について考察したので報告する。

2. 方法

2.1 DSi 調査

毎月一回、有明海北東部流域に位置する環境基準点・補助監視点等で採取された検体を測定した。測定点は **Fig. 1** 及び **Table 1(a)** に示す 38 地点である。内訳は、筑後川流域 19 地点、矢部川流域 10 地点、大牟田市内河川 9 地点である。

DSi の分析は、試料をメンブレンフィルター (ADVANTEC 社 DISMIC25CS 孔径 $0.45\ \mu\text{m}$) で濾過した後、モリブデン黄法⁸⁾ またはモリブデン青吸光度法⁹⁾ を用いた。

なお以降の平均 DSi 濃度の算定に際しては、地質影響をみるため、降雨による希釈と考えられる DSi 濃度の低下が見られるデータを除外して、平均値を算出した。

2.2 地質調査

前述のように河川水中の DSi 濃度は、降雨時には表面流出が卓越し、浸透水からなる基底流が希釈されるこ

Fig. 1 Map of the study area and locations of the sampling sites. Numbers represent the site numbers in Table 1.

Table 1 Sampling sites and DSi concentration

(a) Sampling site for calculation

Site No.	Sampling site	River system	River	Location (WGS84)		Sampling period	Mean (mg・ℓ ⁻¹)	S.D. (mg・ℓ ⁻¹)	n
				Latitude	Longitude				
1	Sakemi Bridge	Chikugo R.	Hanamune R.	33° 12' 45"	130° 23' 22"	Jun. 2006-Mar. 2009	6.4	2.3	35
2	Senoshita		Chikugo R.	33° 18' 54"	130° 29' 18"	Jun. 2006-Mar. 2009	15.0	2.4	33
3	Onigawara Bridge		Houman R.	33° 25' 13"	130° 34' 25"	Jun. 2006-Mar. 2009	9.5	1.7	36
4	Nagaoka Bridge		Houman R.	33° 28' 47"	130° 32' 38"	Jun. 2006-Mar. 2009	9.8	2.3	34
5	Iwamoto Bridge		Houman R.	33° 30' 26"	130° 33' 14"	Jun. 2006-Mar. 2009	9.3	1.0	34
6	Takanari Bridge		Koishihara R.	33° 21' 38"	130° 37' 59"	Jun. 2006-Mar. 2009	8.7	2.1	34
7	Sadagawa Bridge		Sada R.	33° 22' 3"	130° 39' 7"	Jun. 2006-Mar. 2009	6.2	1.2	36
8	Yakatabaru Bridge		Yakatabaru R.	33° 25' 10"	130° 42' 21"	Jun. 2006-Mar. 2009	5.2	1.0	36
9	Hinashiro Bridge		Katsura R.	33° 22' 3"	130° 40' 41"	Jun. 2006-Mar. 2009	13.3	2.5	36
10	Nagino Bridge		Kumanoue R.	33° 19' 59"	130° 48' 10"	Jun. 2006-Mar. 2009	12.3	2.3	34
11	Yoake Dam		Chikugo R.	33° 20' 15"	130° 29' 39"	Jun. 2007-Mar. 2009	18.1	2.2	22
12	Chayanose Bridge		Ohi R.	33° 19' 28"	130° 52' 11"	Apr. 2008-Mar. 2009	13.5	1.6	12
13	Saburoumaru Bridge		Kagetsu R.	33° 19' 34"	130° 54' 23"	Apr. 2008-Mar. 2009	13.8	1.8	12
14	Nagafuchi Bridge		Shote R.	33° 19' 15"	130° 54' 29"	Apr. 2008-Mar. 2009	19.2	1.5	12
15	Kobuchi Bridge		Kusu R.	33° 18' 10"	130° 56' 56"	Apr. 2008-Mar. 2009	20.5	1.5	12
16	Ichinomura Bridge		Kusu R.	33° 15' 48"	131° 3' 27"	Apr. 2008-Mar. 2009	22.1	2.3	12
17	Kyoushin Bridge		Kusu R.	33° 16' 46"	131° 9' 8"	Apr. 2008-Mar. 2009	22.3	2.3	12
18	Higashikochi Bridge		Naruko R.	33° 10' 56"	131° 12' 51"	Apr. 2008-Mar. 2009	25.8	2.2	12
19	Kuguriishi Bridge		Machida R.	33° 12' 43"	131° 10' 20"	Apr. 2008-Mar. 2009	27.0	3.5	12
20	Miake Bridge	Yabe R.	Okinohata R.	33° 9' 32"	130° 23' 25"	May 2006-Mar. 2009	7.4	1.2	35
21	Isodori Weir		Okinohata R.	33° 10' 35"	130° 25' 53"	May 2006-Mar. 2009	6.3	1.7	35
22	Seiten Bridge		Shiotsuka R.	33° 9' 26"	130° 25' 7"	May 2006-Mar. 2009	7.3	1.6	35
23	Sankaizeki Bridge		Kusuda R.	33° 12' 39"	130° 35' 22"	May 2006-Mar. 2009	7.9	2.0	35
24	Yamashita Bridge		Shiraki R.	33° 10' 53"	130° 32' 54"	May 2006-Mar. 2009	5.9	0.7	35
25	Nakadouri Bridge		Hebaru R.	33° 12' 3"	130° 34' 47"	May 2006-Mar. 2009	6.4	0.7	35
26	Kamiyabegawa Bridge		Hoshino R.	33° 12' 42"	130° 35' 19"	May 2006-Mar. 2009	8.1	0.9	35
27	Hoshinogawa Bridge		Hoshino R.	33° 12' 42"	130° 35' 19"	May 2006-Mar. 2009	7.7	0.7	35
28	Matsuze Dam		Yabe R.	33° 10' 32"	130° 46' 6"	Apr. 2006-Mar. 2009	7.9	1.0	36
29	Manotsuru Bridge		Yabe R.	33° 9' 18"	130° 48' 39"	May 2006-Mar. 2009	8.1	1.1	36
30	Miikekantakunai Bridge	Kuma R.	Kuma R.	33° 4' 31"	130° 25' 45"	Sep. 2006-Mar. 2009	7.7	1.8	36
31	Tsukazaki Bridge		Kuma R.	33° 4' 54"	130° 28' 0"	Sep. 2006-Mar. 2009	10.5	2.1	36
32	Shinkawa Bridge	Shiragane R.	Shiragane R.	33° 3' 5"	130° 50' 50"	Sep. 2006-Mar. 2009	8.2	2.4	36
33	Miikedenryokusuyokoi Weir		Shiragane R.	33° 3' 40"	130° 12' 12"	Sep. 2006-Mar. 2009	9.5	1.6	36
34	Shindoumen Bridge	Doumen R.	Doumen R.	33° 2' 55"	130° 26' 38"	Sep. 2006-Mar. 2009	9.4	1.5	36
35	Okogaeri Bridge		Doumen R.	33° 2' 37"	130° 28' 21"	Sep. 2006-Mar. 2009	11.2	1.8	36
36	Satsuki Bridge	Omuta R.	Omuta R.	33° 2' 6"	130° 26' 53"	Sep. 2006-Mar. 2009	10.9	2.7	36
37	Miiketetsudoukako Bridge	Suwa R.	Suwa R.	33° 1' 20"	130° 25' 39"	Sep. 2006-Mar. 2009	12.9	3.2	36
38	Babamachishusui Weir		Suwa R.	33° 0' 40"	130° 26' 31"	Sep. 2006-Mar. 2009	15.9	2.7	36

(b) Sampling site for validation

Site No.	Sampling site	River system	River	Location (WGS84)		Sampling period	Mean (mg・ℓ ⁻¹)	S.D. (mg・ℓ ⁻¹)	n
				Latitude	Longitude				
V1	Zendouzi Bridge	Chikugo R.	Kose R.	33° 20' 13"	130° 36' 12"	Dec. 2008-Mar. 2009	13.0	3.0	4
V2	Omiya Bridge		Oyama R.	33° 17' 59"	130° 56' 58"	Dec. 2008-Mar. 2009	15.5	1.3	4
V3	Sugikawachi Bridge		Yamaura R.	33° 15' 43"	130° 4' 7"	Dec. 2008-Mar. 2009	20.6	1.0	4

とにより減少する¹⁰⁾。しかし非降雨時においては、浸透水中のDSi濃度の変動や、その他の流入負荷、水中での増減が無ければ、河川水中のDSi濃度はほぼ一定であり、この基底流に含まれるDSiの多寡が非降雨時の河川水中のDSi濃度を規定すると考えられる。本研究では、この河川の基底流に影響を与える表層地質情報が必要である。

日本における表層地質情報としては、産業技術総合研究所地質調査総合センターにより数値地質図が整備されている。ここでは研究対象流域を全て網羅している100万分の1の数値地質図¹¹⁾を利用した。同地質図においては、地質単位には地層(群)名や岩帯名が付されていないものの、区分内容が直感的に理解可能なようにマトリクス方式で記載されており、岩相・地質時代によって165のカテゴリーに区分されている。本研究では、火山

岩類(非アルカリ)については岩相と地質時代(第三紀以前及び第四紀)で区分した。それ以外については、地質時代が確定している岩相を除き、地質時代を考慮せず岩相のみで分類した。これにより全地質を22分類に区分した(Table 2)。なお、ここに記載してある火山岩類(岩屑)[Cat.6]とは、第四紀に生成した岩屑ながれ、火山麓扇状地、火山泥流、小規模火砕流などの堆積物が含まれている。

各流域については、国土数値情報の流路¹²⁾・流域¹³⁾に従い分割した。観測地点付近の流域の修正については、2万5千分の1数値地図を利用した。

以上の情報を用いて各地点の流域界を決定した後に、ESRI社ArcGIS9.0を用いて、流域界によって数値地質図をクリップし、流域界に含まれる各地質面積を集計した。

Table 3 Ratio of divided areas by geological categories in catchment basin of sampling sites

(a) Sampling site for calculation		Tota area (km ²)	Ratio of divided areas by geological categories (-)														Unit (mg·ℓ ⁻¹)	
Site No.	Sampling site		1	4	6	8	9	10	12	13	16	17	18	20	21	22	Observed DSi value	Predicted DSi value
1	Sakemi Bridge	407.8	0.141	-	-	-	-	0.010	-	0.446	-	-	-	-	0.398	0.005	6.4	8.7
2	Senoshita	2270.1	0.187	-	0.004	0.064	0.002	0.201	0.136	0.241	0.078	-	<0.001	<0.001	0.084	0.002	15.0	15.3
3	Onigawara Bridge	139.9	0.405	-	-	-	-	-	-	-	0.542	-	-	-	0.054	-	9.5	10.2
4	Nagaoka Bridge	22.7	0.149	-	-	-	-	-	-	-	0.851	-	-	-	-	-	9.8	10.5
5	Iwamoto Bridge	16.5	0.084	-	-	-	-	-	-	-	0.855	-	-	-	0.061	-	9.3	10.2
6	Takanari Bridge	90.5	0.282	-	-	-	-	-	-	0.012	0.150	-	0.012	-	0.533	0.010	8.7	7.9
7	Sadagawa Bridge	72.3	0.262	-	-	-	-	-	-	0.019	0.023	-	-	-	0.696	-	6.2	7.1
8	Yakatabaru Bridge	55.7	0.067	-	-	-	-	-	-	0.025	0.030	-	-	-	0.878	-	5.2	6.2
9	Hinashiro Bridge	35.0	0.544	-	-	-	-	-	-	0.029	-	-	-	-	0.428	-	13.3	8.4
10	Nagino Bridge	66.5	0.015	-	-	-	-	0.008	-	0.927	-	-	-	-	0.050	-	12.3	10.3
11	Yoake Dam	1435.8	0.022	-	0.006	0.101	0.003	0.316	0.215	0.322	0.005	-	-	<0.001	0.006	0.003	18.1	18.6
12	Chayanose Bridge	73.6	0.030	-	-	-	-	-	-	0.843	0.033	-	-	-	0.094	-	13.5	10.0
13	Saburoumaru Bridge	128.7	-	-	-	-	-	0.441	0.001	0.558	-	-	-	-	-	-	13.8	15.1
14	Nagafuchi Bridge	1166.5	0.024	-	0.008	0.125	0.004	0.324	0.264	0.243	0.004	-	-	<0.001	-	0.004	19.2	20.0
15	Kobuchi Bridge	1116.8	0.025	-	0.008	0.129	0.004	0.332	0.276	0.216	0.004	-	-	<0.001	-	0.004	20.5	20.2
16	Ichinomura Bridge	442.8	0.057	-	0.021	0.133	-	0.231	0.558	-	-	-	-	-	-	-	22.1	21.7
17	Kyoushin Bridge	315.7	0.056	-	0.029	0.118	-	0.214	0.583	-	-	-	-	-	-	-	22.3	22.8
18	Higashikochi Bridge	113.7	-	-	0.060	-	-	0.243	0.697	-	-	-	-	-	-	-	25.8	25.6
19	Kuguriishi Bridge	45.2	0.002	-	-	0.455	-	-	0.543	-	-	-	-	-	-	-	27.0	26.8
20	Miake Bridge	480.7	0.098	0.002	-	-	-	0.009	-	0.378	-	0.010	-	-	0.499	0.004	7.4	8.1
21	Isodori Weir	468.9	0.076	0.002	-	-	-	0.009	-	0.388	-	0.011	-	-	0.511	0.004	6.3	8.1
22	Seiten Bridge	473.0	0.084	0.002	-	-	-	0.009	-	0.384	-	0.010	-	-	0.507	0.004	7.3	8.1
23	Sankaizeki Bridge	12.0	0.544	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.456	-	7.9	8.3
24	Yamashita Bridge	25.0	-	0.031	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.969	-	5.9	5.7
25	Nakadouri Bridge	49.8	0.046	-	-	-	-	-	-	-	-	0.098	-	-	0.856	-	6.4	6.3
26	Kamiyabegawa Bridge	143.4	0.044	-	-	-	-	0.004	-	0.438	-	-	-	-	0.514	-	8.1	8.0
27	Hoshinogawa Bridge	215.5	0.010	-	-	-	-	0.016	-	0.552	-	-	-	-	0.412	0.009	7.7	8.6
28	Matsuze Dam	83.7	-	-	-	-	-	-	-	0.733	-	-	-	-	0.244	0.022	7.9	9.3
29	Manotsuru Bridge	49.6	-	-	-	-	-	-	-	0.810	-	-	-	-	0.190	-	8.1	9.6
30	Miiekantakunai Bridge	9.2	0.591	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.680	-	7.7	8.5
31	Tsukazaki Bridge	4.8	0.320	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.649	-	10.5	7.2
32	Shinkawa Bridge	18.5	0.569	-	-	-	-	-	-	-	0.147	-	-	-	0.285	-	8.2	9.1
33	Miikedenryokusyoyokoi Weir	13.2	0.576	-	-	-	-	-	-	-	0.205	-	-	-	0.219	-	9.5	9.4
34	Shindoumen Bridge	11.8	0.771	-	-	-	-	-	-	-	0.218	-	-	-	0.011	-	9.4	10.4
35	Okogaeri Bridge	7.6	0.661	-	-	-	-	-	-	-	0.339	-	-	-	-	-	11.2	10.5
36	Satsuki Bridge	7.5	0.999	-	-	-	-	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	10.9	10.5
37	Miiketetsudoukako Bridge	64.5	0.264	-	-	-	-	0.298	-	-	0.293	-	-	-	0.144	-	12.9	12.9
38	Babamachishusui Weir	60.5	0.212	-	-	-	-	0.320	-	-	0.314	-	-	-	0.155	-	15.9	13.1

(b) Sampling site for validation		Tota area (km ²)	Ratio of divided areas by geological categories (-)														Unit (mg·ℓ ⁻¹)	
Site No.	Sampling site		1	4	6	8	9	10	12	13	16	17	18	20	21	22	Observed DSi value	Predicted DSi value
V1	Zendouzi Bridge	99.9	0.499	-	-	-	-	0.157	-	0.131	-	-	0.213	-	-	-	13.0	12.1
V2	Omiya Bridge	580.2	0.005	-	-	0.110	0.365	0.502	-	0.008	-	<0.001	-	0.008	-	-	15.5	19.8
V3	Sugikawachi Bridge	25.7	0.018	-	-	0.731	-	0.251	-	-	-	-	-	-	-	-	20.6	41.1

Table 2 Geological categories classified by rock type and geologic age

Category	Rock type	Geologic age
1	Sedimentary rocks	All
2	Accretionary complexes, Mainly sedimentary rocks	Pre-Quaternary
3	Accretionary complexes, Volcanic rocks	Pre-Quaternary
4	Accretionary complexes	Pre-Quaternary
5	Accretionary complexes, Plutonic rocks	Pre-Quaternary
6	Volcanic rocks, Debris	Quaternary
7	Volcanic rocks, Non-alkali, Felsic, Intrusive	Pre-Quaternary
8	Volcanic rocks, Non-alkali, Felsic	Quaternary
9		Pre-Quaternary
10	Volcanic rocks, Non-alkali, Pyroclastic flows	Quaternary
11		Pre-Quaternary
12	Volcanic rocks, Non-alkali, Mafic	Quaternary
13		Pre-Quaternary
14	Volcanic rocks, Alkali, Felsic	Pre-Quaternary
15	Volcanic rocks, Alkali, Mafic	All
16	Plutonic rocks, Felsic	Pre-Quaternary
17	Plutonic rocks, Felsic and Mafic	Pre-Quaternary
18	Plutonic rocks, Mafic	Pre-Quaternary
19	Plutonic rocks, Migmatitic	Pre-Quaternary
20	Metamorphic rocks, Low to medium pressure type	Pre-Quaternary
21	Metamorphic rocks, High pressure type	Pre-Quaternary
22	Water area	Pre-Quaternary

3. 結果と考察

3.1 DSi 調査結果

DSi 調査の結果を **Table 1(a)** に示す。

各地点の平均値についてみると、最小値は、屋形原橋 (No.8) で、5.2mg·ℓ⁻¹、最大値は、潜石橋 (No.19)

で、27.0mg·ℓ⁻¹であり、その差は5.2倍であった。

流域別にみると、筑後川流域 (No.1～19) については、筑後川の本流及び、その上流に位置する玖珠川 (No.2, 11, 14～19) において DSi 濃度が 15mg·ℓ⁻¹ 以上と高くなっていた。

矢部川流域 (No.20～29) においては、10mg·ℓ⁻¹ 未満で他の地点と比較して DSi の値が低い傾向を示した。

大牟田市内河川 (No.30～38) については、およそ 10mg·ℓ⁻¹ 程度の値であったが、三池鉄道河口鉄橋 (No.37) 及び馬場町取水堰 (No.38) の2カ所については、同地点群と比較して値が高かった。

3.2 地質調査結果

地質調査の結果を **Table 3** に示す。ここでは各地点の流域内地質の各カテゴリー面積割合を算定したものを記載する。**Table 2** では地質を 22 のカテゴリーに区分したが、今回対象とした有明海北東部流域では、そのうちの 14 カテゴリーが含まれていた。

結果をみると、流域内の地質区分は、流域毎に異なる地質特性を有していることが分かる。

筑後川水系 (No.1-19) においては、その本川及び上流部 (No.2, 11-19) と他の支川とで、流域地質が明確に異なっている。本川及び上流部に属する地点の流域では火山岩の割合が高いのに対し、支川に属する地点の流域では火山岩の割合が低い。

矢部川水系 (No.20-29) においては、第三紀以前火山岩類 (非アルカリ珪長質苦鉄質) [Cat.13] や変成岩類 (高

圧型) [Cat.21] の占める割合が高い。

大牟田市内河川 (No.30-38) においては、堆積岩類 [Cat.1], 深成岩類 (珪長質) [Cat.16], 変成岩類 (高压型) [Cat.21] の占める割合が高い。特に、諏訪川の観測地点である三池鉄道河口鉄橋 (No.37) 及び、馬場町取水堰 (No.38) では、周辺の流域とは異なり、その流域内に第四紀火山岩類 (非アルカリ火砕流) [Cat.10] の地質が3割程度含まれている。

3.3 DSi 濃度の予測式

DSi 調査及び地質調査の結果から、各地点の DSi 濃度は、その地点の流域内の地質区分を反映したものとなっていることが想定される。そこで Table 1(a) の各地点の平均 DSi 濃度を目的変数とし、Table 3 中の各流域の各地質区分面積割合を説明変数とする、以下の重回帰式が成り立つと仮定する。

$$y_j = b_0 + \sum_{k=1}^{13} b_k x_{jk} \quad (1)$$

ここで、 y_j : 流域 j における平均 DSi 濃度の予測値 ($\text{mg} \cdot \ell^{-1}$), b_0 : 定数, b_k : 地質カテゴリー k の偏回帰係数, x_{jk} : 流域 j に含まれる地質カテゴリー k の面積割合である。その際、水域 [Cat.22] については説明変数から除外して、13のカテゴリーに対して解析を実施した。なお、予測式の有効な変数選択を目的として、ステップワイズ回帰法により自由度調整済み寄与率が高くなるように変数を選択した。

同法によって選択されたカテゴリー毎の標準偏回帰係数 β_k , 偏回帰係数 b_k , t -値, 及び p -値の算定結果を Table 4 に示す。有意な説明変数として選択されたのは5つのカテゴリーで、火山岩類 (岩屑) [Cat.6], 第四紀非アルカリ珪長質 [Cat.8], 第四紀火山岩類 (非アルカリ火砕流) [Cat.10], 第四紀火山岩類 (非アルカリ珪長質・苦鉄質) [Cat.12], 変成岩類 (高压型) [Cat.21] であった。

この際、得られた標準偏回帰係数から、目的変数に対する各説明変数の寄与を相対的に評価可能である。これによると DSi 濃度に対する寄与が大きい地質分類は、順に第四紀非アルカリ珪長質 [Cat.8], 火山岩類 (岩屑) [Cat.6], 第四紀火山岩類 (非アルカリ火砕流) [Cat.10] であった。

地質的にみると、[Cat.8] が [Cat.12] よりも寄与が大きい、すなわちマフィック火成岩類よりもフェルシク火成岩類の寄与が大きい傾向がある。この理由として、岩石の化学組成からみて、フェルシクな岩石には SiO_2 が多く含まれている¹⁴⁾ ことが原因であると考えられる。

Table 4 The results of multiple regression analysis where β_k = standard partial regression coefficient and b_k = partial regression coefficient

Category	β_k	b_k	t-value	p-value
-		10.500	20.488	0.000
6	0.458	237.579	1.751	0.090
8	0.552	38.607	2.740	0.010
10	0.241	10.384	4.279	0.000
12	-0.080	-2.404	-0.226	0.822
21	-0.245	-4.906	-4.465	0.000

年代的にみると、第四紀の火山岩地質を有する割合の高い流域において、DSi 濃度が高くなること傾向にある。この理由として、第四紀火山岩地質が、その他の流域に比べ保水力が高いことが影響していると考えられる。第四紀火山岩地質の高保水力については、過去の研究によれば、流域内において同地層の分布面積が大きいほど地下水比流量が大きくなる¹⁵⁾ ことや、同地層を含む流域ではその低減定数が小さい^{16, 17)} ことから明らかにされている。すなわち、第四紀火山岩地質では、その高保水力により、水-岩石間の接触時間が長くなり、その結果 DSi 濃度が高くなると考えられる。

三池鉄道河口鉄橋 (No.37) 及び、馬場町取水堰 (No.38) の流域においても第四紀火山岩類 (非アルカリ火砕流) [Cat.10] が分布しており、これらの地点で DSi 濃度が高い現象を裏付ける結果となった。

Fig. 2 Comparison of the observed values of DSi at sampling sites for calculation with the calculated results using eq.(1). Error bars represent one standard deviation of the observed DSi. The dashed line represents a slope of 1.0.

Fig. 3 Comparison of the observed values of DSi at sampling sites for validation with the results calculated using eq.(1). Error bars represent one standard deviation of the observed DSi. The dashed line represents a slope of 1.0.

一方で筑後川下流付近の流域に多く含まれている堆積岩類 [Cat.1] については、DSi 濃度に対する寄与が小さい結果となった。さらに柳野橋 (No.10)、茶屋の瀬橋 (No.12) のように、火山岩地質であっても第三紀以前の地質が多く占める場合 (この場合、非第四紀火山岩類 (非アルカリ珪長質・苦鉄質) [Cat.13]) には、その地質の DSi 濃度への寄与が小さい為に、DSi 濃度も低かった。

重回帰式から得られた予測値を Table 3 中に示す。また予測値と観測値を比較したものを Fig. 2 に示す。寄与率は 0.931 と高く、予測値と実測値は、ほぼ一致していた。このことから、地点間の DSi 濃度変動は、地質由来であることが再確認された。

一方で DSi の寄与としては、地質由来のような自然系の寄与以外にも、生活系・事業場系¹⁸⁾・農業系¹⁹⁾等の人為的な寄与や停滞水域における珪藻類の吸収^{20~23)}の影響も考えられる。今回の結果によれば、流域地質で DSi 濃度がある程度説明出来たことにより、これらの人為的影響は小さいものと推察される。ただし、Fig. 2 によると幾つかの地点においては、実測値と計算値との間に不整合がみられる。この不整合の原因として上述の人為的影響も考えられる。今後は、このような人為的影響に対する更なる知見の蓄積が必要である。

3.4 モデルの検証

モデルを他の流域に応用することで、その有効性についての検証を実施した。対象とした流域は、モデル作成に用いた流域内の 3 地点 (Site No.V1-V3) である。3 地点の位置については Fig. 1 に、それらの諸元と調査期間を Table 1 (b) に示す。

これらの 3 地点の実測 DSi 濃度と流域地質調査結果を合わせて Table 3 (b) に示す。また検証地点の DSi 濃度測定結果と、今回作成した重回帰モデルにより予測した DSi 濃度とを比較したものを Fig. 3 に示す。

V1 (巨瀬川、善導寺橋) については、ほぼ予測通りであるが、V2 (大山川、大宮橋) については実測値よりも高めの予測値となっている。また V3 (山浦川、杉河内橋) については実測値よりも 2 倍近く高い予測値となった。

この予測値との解離する原因については、それらの地点が有する、DSi 濃度に寄与の大きい [Cat.8]、[Cat.10] の面積比率に由来していると考えられる。すなわち、V3 では [Cat.8] の面積比率が 0.731 であるが、式を作成した際の [Cat.8] の面積比率の範囲は 0.064-0.455 であり、これを大幅に超過していた。また V2 では [Cat.10] の面積比率が 0.502 であるが、[Cat.10] の面積比率の範囲は 0.001-0.441 であり、これもその範囲を超過していた。このように DSi 濃度に対し寄与率の高い地質カテゴリーが、式作成時の地質割合を超過している場合には予測値と実際との値が解離する傾向にある。

今回の結果により、有明海北東部の任意の地点の DSi 濃度は、流域の地質面積比率が一定の条件下において、重回帰式により予測可能であることが明らかとなった。また、他の流域についても、同様の手法で重回帰式を作成すれば、DSi 濃度の予測は可能であると考えられる。将来的には本研究の結果を用いることで、有明海における定常時の DSi 流入負荷量を想定することが可能になると考えられる。

4. ま と め

本研究では、環境基準点を含む有明海流入河川 38 地点において DSi 濃度を測定しその実態を調査するとともに、数値地質図を用いて各地点における DSi 濃度の予測を試みた。この研究から得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 重回帰分析により予測された DSi 濃度は、実際の値と近いもので寄与率も 0.931 と高かった。このことから有明海北東部流域内の DSi 濃度の空間的変動は、流域地質由来であることが再確認された。
- 2) DSi 濃度に寄与の大きい地質は、寄与の大きい順に第四紀非アルカリ珪長質、火山岩類の岩屑、第四紀火山岩類 (非アルカリ火砕流) であった。
- 3) 有明海北東部における、任意の地点の河川水中の DSi 濃度は、その流域内における地質分布によりおおよその予測が可能である。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、福岡県環境部環境保全課、各保健福祉環境事務所の皆様に数々の便宜を図って頂いた。また本研究の一部は、H21 年度環境省環境技術開発推進費により行われたものであり、ここに謝意を表す。

(原稿受付 2009年 8 月 28 日)

(原稿受理 2010年 2 月 10 日)

参 考 文 献

- 1) 環境省有明海・八代海総合調査評価委員会 (2007) 有明海・八代海総合調査委員会報告書。
- 2) 川口修, 山本民次, 松田治, 橋本俊也 (2004) 水質の長期変動に基づく有明海におけるノリおよび珪藻プランクトンの増殖制限元素の解明. 海の研究 **13** (2), pp.173-183.
- 3) 小林純 (1961) 日本の河川の平均水質とその特徴に関する研究. 農学研究 **48**, pp.63-106.
- 4) 熊谷博史, 田中義人, 松尾宏, 白川ゆかり (2008) 有明海北東部流域からの溶存態ケイ素の流出と有明海への影響. 第 23 回全国環境研究所交流シンポジウム予稿集, pp.12-15.
- 5) 鹿園直建 (2002) 化学的風化作用の河川水水質特に溶存シリカ濃度に与える影響. 地学雑誌 **111** (1), pp.55-65.
- 6) Meybeck, M. (1987) Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *American journal of science* **287**, pp.401-428.
- 7) 柴田未来, 長井正博, 片山幸士 (2008) 豊川流域におけるケイ酸及び主要溶存成分の濃度変化. 第 42 回日本水環境学会年会公演集, p.226.
- 8) 社団法人日本水道協会 (2001) 上水試験方法.
- 9) 日本規格協会 (2008) JIS ハンドブック 53 環境測定 II (水質).
- 10) Kennedy, V. (1971) Silica variation in stream water with time and discharge. *Nonequilibrium Systems in Natural Water Chemistry. Nonequilibrium Systems in Natural Water Chemistry. American Chemical Society, Advances in Chemistry Series No. 106. ACS*, pp.94-130.
- 11) 産業技術総合研究所地質調査総合センター (2003) 100 万分の 1 日本地質図第 3 版, CD-ROM 第 2 版, 数値地質図 G-1.
- 12) 国土交通省 国土数値情報 (流路データ).
- 13) 国土交通省 国土数値情報 (流域・非集水域 (面) データ).
- 14) 杉村新, 中村保夫, 井田喜明 (1988) 図説地球科学, 岩波書店, 東京.
- 15) 高橋裕, 安藤義久, 井上誠一 (1981) 表日本の山地河川の流況特性に関する統計的研究. 第 25 回水理講演会論文集, pp.209-214.
- 16) 安藤義久, 高橋裕, 伊藤孝 (1981) 山地河川の地下水流出の

- 通減特性それに対する流域地質の効果. 第 23 回水理講演会論文集, pp.175-181.
- 17) 高橋裕, 安藤義久, 伊藤孝, 伊藤和央 (1983) 山地河川の低水流出の減水特性に関する研究. 土木学会論文報告集 **337**, pp.75-82.
- 18) 熊谷博史, 田中義人, 松尾宏, 白川ゆかり (2008) 特定事業場排水中に含まれる溶存態ケイ素の実態調査. 平成 19 年度社団法人日本水環境学会九州支部研究発表会講演概要集, pp.5-6.
- 19) 高橋英一 (1987) ケイ酸植物と石灰植物－作物の個性を探る－. 農山漁村文化協会, 東京.
- 20) Humborg, C., Ittekkot, V., Cociasu, A., Bodungen, B.v. (1997) Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure. *Nature* **386**, pp.385-388.
- 21) 原島省 (2003) 陸水域におけるシリカ欠損と海域生態系の変質. 水環境学会誌 **26** (10), pp.621-625.
- 22) 田庚昊, 林到映, 千葉信男, 野村宋弘, 中野和典, 西村修 (2008) 河川における Si の挙動とその要因. 第 42 回日本水環境学会年会公演集, p.225.
- 23) 井上直也, 赤木右 (2006) 多摩川におけるケイ素収支にあたるダムおよび下水処理場の影響. 地球化学 **40**, pp.137-145.