

## ダム貯水池における物質移動に関する研究②

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 16～平 18

担当チーム：河川生態チーム

研究担当者：天野 邦彦、中西 哲

### 【要旨】

河川及び海洋部の生態系においては、各種栄養塩や重金属類の流下が重要な意味をもつことが明らかにされつつある。このため、流水を一時的に貯留するダム貯水池では、栄養塩類や重金属の流入・捕捉状況の解明及び予測技術の開発を行なうとともに、必要に応じて適切な処置を講じることが求められている。河川生態チームにおいては、貯水池における珪素の生物現象に基づく捕捉状況の解明を行った。このため、ダム貯水池底泥の生物体シリカ濃度の測定、珪藻類による珪酸捕捉沈降量の現地計測、シミュレーションモデルによる珪酸捕捉沈降量の推定を行った。その結果、日本のダム貯水池では、生物現象による珪素の捕捉は大きいものではないことが示された。

キーワード：ダム、珪酸、捕捉、シミュレーション

### 1. はじめに

ダム貯水池による水質問題は、ダムが存在することにより河川上下流で水質の不連続性が生じると言うことにより特徴づけられる。従来、ダム貯水池における水質変化としては水温変化、濁水長期化、富栄養化といった現象が強く意識されてきたが、物質移動を伴う水質変化としては、濁水問題において懸濁物がダムに捕捉されるということではなく、下流河川が濁った期間が増加することを問題視する点や、富栄養化現象において下流河川への有機物供給量の増加が問題視されてきており、河川を流下する物質の過剰が問題とされることが多かった。水質問題は、一般的にこれまで汚濁負荷の過剰という文脈で意識されてきており、ダム貯水池における水質問題についても、水温変化を除けば、同様の捉え方をされてきた。

しかし近年、上記のような問題の捉え方とは異なり、ダム貯水池が持つ物質の捕捉機能自体が問題ではないかという問題提起があり、特に沿岸域の環境保全を考える上で、珪酸（シリカ）やある形態の鉄が貯水池により捕捉されることで欠損し、沿岸環境の保全上、問題であるという指摘がなされた<sup>1)</sup>。

このような問題提起に対応するため、本研究においては、珪酸と鉄のうち、分画手法が困難な鉄を除き、貯水池における珪酸の生物現象に基づく捕捉状況の解明を目指した。このため、ダム貯水池底泥の生物由来シリカ濃度の測定、珪藻類による珪酸捕捉沈降量の現

地計測、シミュレーションモデルによる珪酸捕捉沈降量の推定を行った。以下に、それぞれの項目について、手法、結果等を示す。

### 2. 研究方法

#### 2. 1 貯水池底泥の生物由来シリカ濃度の測定

ダム貯水池に水が滞留することでシリカが捕捉されるという場合、溶存態のシリカが珪藻に取り込まれて、これが貯水池に捕捉されることが問題であると考えられる。このため、まず平成 16 年度は、現場ダムにおける底泥中の生物由来シリカ濃度の測定を行った。

##### 2. 1. 1 試料採取

栃木県川治ダム湖に調査地点を設定し採泥および採水を行い、採取されたサンプルについて各態ケイ素等の分析を行った。採水および採泥は平成 16 年 12 月 9 日～平成 17 年 3 月 15 日にかけて行った。底質はエクマンバージ採泥器で表層から 10cm 程度の深さまで採取し、水質はバンドーン採水器により採取を行った。調査地点は、底質については 9 地点、水質については 5 地点で採取を行った。

##### 2. 1. 2 分析方法

採取した底泥サンプル（9 検体）及び表層水（5 検体）の分析項目、分析方法を表-1 に示した。

生物由来シリカの分析にはアルカリ抽出法<sup>2)</sup>を用い、補正のためにアルミニウムの分析も行った。アルミニウムとシリカについては 6 濃度測定し、結果を直線近

似する方法及びシリカの溶出量の時間変化から初期値を外挿する方法により生物由来シリカを算出した。

また、鉍物態シリカは全シリカから生物由来シリカを引いたものとし、コロイド態シリカは全シリカから溶存態シリカを引いたものとした。

表-1 分析項目及び分析方法

媒体	分析項目	分析方法
底泥	全シリカ	アルカリ融解法
	生物由来シリカ	アルカリ抽出法
	鉍物態シリカ	全シリカ-生物由来シリカ
	含水率	JIS A 1203
	強熱減量	底質調査方法II.4
	クロロフィル a	アセトン抽出-吸光光度法
	TOC	沿岸環境調査マニュアル(底質・生物編) 5.5.1
	T-N	沿岸環境調査マニュアル(底質・生物編) 5.5.1
	T-P	底質調査方法II.19
	粒度組成	JIS A 1204
表層水	全シリカ	JIS K 0101 44.3.1
	鉍物態シリカ	全シリカ-生物由来シリカ
	コロイド態シリカ	全シリカ-溶存態シリカ
	生物由来シリカ	アルカリ抽出法
	溶存態シリカ	JIS K 0101 44.2
	アルミニウム	JIS K 0102 58
	TOC	JIS K 0102 22.1
	T-N	JIS K 0102 45.4
T-P	JIS K 0102 46.3	



写真-1 現地に設置したメソコズム

日目、10日目、20日目の3回、無添加区では0日目の1回とし、それぞれ10日間設置して沈降物を捕集した。

メソコズム(添加区)にはセディメントトラップを設置した後に栄養塩類の添加を行った。添加液の組成は表-2のとおりであった。添加液を添加した後はメソコズム内を良く攪拌し、メソコズム内の栄養塩濃度が均一になるようにした。

表-2 栄養塩類添加量

組成	0日目	10日目	20日目	
	硝酸アンモニウム (NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> )	766g	766g	2300g
リン酸水素二ナトリウム (Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> )	693g	693g	4160g	
塩酸または水酸化ナトリウム	適量 (pH7に)			
水	10L	10L	10L	
目標濃度	T-N	3.9mg/L	3.9mg/L	11.7mg/L
	T-P	2.2mg/L	2.2mg/L	13.2mg/L

## 2.2 珪藻類による珪酸捕捉沈降量の現地計測

栃木県川治ダム湖において、平成17年10月6日～平成18年1月30日にかけて、閉鎖水域実験装置(メソコズム)を作成し、セディメントトラップを利用して、珪酸沈降量の測定を試みた。また、メソコズム内に栄養塩類を添加して、沈降量の変化について調査した。

### 2.2.1 現地実験装置

写真-1に現地に作成したメソコズムの写真を示す。この装置を2基作成し、実験を行った。設置した2箇所のメソコズム(栄養塩添加区、無添加区)にセディメントトラップを設置した。作業は潜水士により行った。

セディメントトラップはロープで固定した浮きに吊るす形とし、設置位置は水面から5mとした。セディメントトラップは1リットルのポリビン6個をひとまとめとし、純水で満たしたポリビンの蓋を閉め、水面から5mの位置に設置した後に、蓋を開けた。

### 2.2.2 実験概要

セディメントトラップの設置は栄養塩添加区では、0

セディメントトラップは設置後10日目に回収した。回収は水面から5mに設置されているポリビンの蓋を水中で閉め、そのまま水面まで引き上げる形で行った。

セディメントトラップによる沈降物量測定に合わせて、採水を行うことで、メソコズム内の水質調査を行った。採水はメソコズム設置前(事前調査)、実験開始時、10日目、20日目及び実験終了時に行い、バンドン採水器により水面から2m、4mの2箇所から採水し、両者を混ぜて1つのサンプルとした。採水したサンプルは実験室に持ち帰り、冷蔵保管した。

さらに、メソコズム設置箇所付近においてダム湖に堆積する堆積土を採取した。採取は潜水士により行い、直径10cmのアクリルコアにより深さ15cmのコアを2本採取した。

採取した水質サンプル(9検体)、沈降物(4検体)及び表層泥(1検体)の分析項目、分析方法については、表-1の通りである。

## 2.3 シミュレーションモデルによる珪酸捕捉沈降量の推定

現在、数多く実施されている貯水池水質シミュレー



表一 3 分析結果一覧

底質	分析項目	地点								
		St.1	St.2-1	St.2-2	St.2-3	St.3-1	St.3-2	St.3-3	St.4	St.5
	全シリカ(SiO <sub>2</sub> ) (%)	55.7	56.4	55.8	57.8	53.3	60.6	50.0	58.1	57.8
	生物由来シリカ(SiO <sub>2</sub> ) (%)	0.5	0.5	0.6	0.3	0.2	0.5	0.3	0.2	0.2
	鉱物シリカ(SiO <sub>2</sub> ) (%)	55.2	55.9	55.2	57.5	53.1	60.1	49.7	57.9	57.6
	含水率 (%)	62.4	54.4	62.3	60.1	60.9	54.3	58.4	53.2	36.0
	有機物量 (%)	5.0	4.2	6.1	5.7	6.3	4.9	4.9	6.5	3.6
	クロロフィル-a (mg/g乾重)	0.16	0.25	3.55	0.15	0.51	2.28	0.57	1.19	8.87
	TOC (mg/g乾重)	7.76	3.65	10.3	8.91	11.0	8.68	9.04	13.4	3.50
	T-N (mg/g乾重)	0.98	0.75	1.36	1.16	1.24	1.05	0.98	1.44	0.35
	T-P (mg/g乾重)	0.60	0.56	0.68	0.62	0.64	0.59	0.58	0.57	0.36
粒度組成	粒径<2mm (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	粒径0.075-2mm (%)	5	2	1	3	4	5	2	0	0
	シルト分(0.005-0.075mm) (%)	26	52	27	22	35	48	38	0	0
	粘土分(<0.005mm) (%)	69	46	72	75	61	47	60	0	0

水質	分析項目	地点								
		St.1	St.2-1	St.2-2	St.2-3	St.3-1	St.3-2	St.3-3	St.4	St.5
	全シリカ(T-SiO <sub>2</sub> ) (mg/L)	14.4	—	13.1	—	—	12.5	—	12.8	12.1
	溶解シリカ(D-SiO <sub>2</sub> ) (mg/L)	12.4	—	12.9	—	—	12.2	—	12.4	11.8
	コロイド態シリカ(SiO <sub>2</sub> ) (mg/L)	2.0	—	0.2	—	—	0.3	—	0.4	0.3
	生物由来シリカ(SiO <sub>2</sub> ) (mg/L)	<0.1	—	<0.1	—	—	<0.1	—	<0.1	0.1
	鉱物シリカ(SiO <sub>2</sub> ) (mg/L)	2.0	—	0.2	—	—	0.3	—	0.4	0.2
	アルミニウム (mg/L)	0.073	—	0.060	—	—	0.064	—	0.062	0.059
	TOC (mg/L)	0.4	—	0.4	—	—	0.4	—	0.7	0.7
	T-N (mg/L)	0.41	—	0.43	—	—	0.43	—	0.52	0.40
	T-P (mg/L)	0.008	—	0.007	—	—	0.006	—	0.007	0.007

コロイド態シリカ=全シリカ-溶解シリカ 鉱物シリカ=コロイド態シリカ-生物由来シリカ

来シリカの値は低いですが、これは生物由来シリカが主に珪藻によることから、上記の2箇所に比べ貧栄養な川治ダムにおける珪藻の堆積量を反映している可能性があると考えられる。また、シルト分の流入が多く、このために割合として小さなものになった可能性がある。表-3に示したとおり、今回の水質中にはコロイド態シリカ自体の濃度が0.2~2.0mg/Lと低く、その中の生物由来シリカはほとんど検出されない濃度であった。このことから、川治ダムの様な貧栄養なダム貯水池では、大量のシリカが珪藻による摂取、沈降により捕捉されていないと考えられた。

### 3. 3 珪藻類による珪酸捕捉沈降量の現地計測

測定結果を表一4に示す。結果の概要は、以下のようのものであった。

- 1) メソゾムに添加した栄養塩(窒素、りん)は速やかに水中濃度が減少した。特に窒素は硝酸アンモニウムとして硝酸態窒素、アンモニウム態窒素を等量添加しているにも拘らず、水中濃度は常にアンモニウム態窒素の方が硝酸態窒素よりも低い傾向が顕著に認められた。この原因としては、植物プランクトンによる同化の際、窒素源としてアンモニアの方が硝酸よりも吸収されやすいためである可能性が考えられる。
- 2) 水質中のシリカについては顕著な変化はみられなかった。
- 3) 沈降物中の各成分の濃度は、窒素、リンが第1期回収時に比べて第3期回収時の方が高い値を示した。また、全シリカは第1期から第3期まで変化はみられなかったが、生物態シリカについては第1期に比べて第2期、第3期の方がわずかながら高めの値を示した。
- 4) 表層泥については全シリカが48.0%、生物態シリカが6.2%という結果であった。平成16年度の川治ダム

沈降物調査で、エクマンパーシブ採泥器により表層から10cm程度の泥を採取・分析した際の底泥中の生物態シリカ0.2~0.6%であった。平成17年度調査では表層から約5mmに堆積した浮泥を分析しており、上記の結果は、生物由来シリカが表層部分に比較的多く存在している可能性を示していると考えられる。

表一 4 珪藻類による珪酸捕捉沈降量の現地計測結果

分析項目	事前調査	本調査								
		調査日	第1期				第2期		第3期	
			設置	回収	設置	回収	設置	回収	設置	回収
全窒素	mg/L	0.39	2.88	0.49	0.38	0.38	3.23	0.45	9.26	0.51
硝酸態窒素	mg/L	0.24	1.40	0.33	0.34	0.31	1.69	0.35	4.70	0.33
アンモニア態窒素	mg/L	0.05	0.98	0.01	0.01	<0.01	1.41	0.038	0.034	0.027
無機態窒素	mg/L	0.004	0.001	<0.001	0.001	0.002	0.003	0.005	0.005	0.005
全リン	mg/L	0.013	1.21	0.007	0.003	0.005	1.65	0.011	9.70	0.016
リン	mg/L	0.001	1.18	0.002	0.001	<0.001	1.50	0.006	9.36	0.007
クロロフィル-a	μg/L	9.0	2.8	1.1	2.9	—	1.8	—	2.2	—
フコフィチン	μg/L	2.1	0.6	0.6	0.6	—	1.1	—	0.8	—
TOC	mg/L	1.3	1.3	2.0	1.5	—	1.7	—	1.8	—
DOC	mg/L	1.3	0.7	1.4	1.3	—	1.1	—	1.4	—
VSS	mg/L	<1	<1	<1	<1	—	<1	—	<1	—
鉄	mg/L	<0.01	0.03	0.03	0.01	—	0.03	—	0.02	—
マンガン	mg/L	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	—	<0.01	—	<0.01	—
T-SiO <sub>2</sub>	mg/L	21.6	18.7	14.6	13.9	—	14.9	—	16.0	—
D-SiO <sub>2</sub>	mg/L	9.1	13.7	12.8	12.8	—	13.9	—	14.7	—
アルカリ溶性シリカ(SiO <sub>2</sub> )	mg/L	—	12.4	13.0	12.7	—	11.0	—	12.6	—
生物態シリカ(SiO <sub>2</sub> )	mg/L	—	<0.1	—	0.5	0.8	<0.1	—	<0.1	—
植物プランクトン	—	別紙	別紙	別紙	別紙	別紙	別紙	別紙	別紙	別紙
植物プランクトン	—	別紙	別紙	別紙	別紙	別紙	別紙	別紙	別紙	別紙
全窒素	mg/g乾重	—	11.8	7.90	—	—	11.8	—	44.8	—
全リン	mg/g乾重	—	1.84	2.47	—	—	2.93	—	4.17	—
クロロフィル-a	mg/g乾重	—	1.14	0.72	—	—	0.38	—	0.63	—
フコフィチン	mg/g乾重	—	1.07	0.81	—	—	0.87	—	0.89	—
TOC	mg/g乾重	—	88.4	71.1	—	—	77.8	—	78.1	—
T-SiO <sub>2</sub>	%	—	33.6	23.6	—	—	32.2	—	29.9	—
D-SiO <sub>2</sub>	%	—	0.3	0.2	—	—	0.3	—	0.3	—
アルカリ溶性シリカ(SiO <sub>2</sub> )	%	—	1.3	2.1	—	—	2.8	—	3.1	—
生物態シリカ(SiO <sub>2</sub> )	%	—	1.0	1.9	—	—	2.5	—	2.8	—
植物プランクトン	—	別紙	別紙	別紙	別紙	別紙	別紙	別紙	別紙	別紙
固形物量(SS)	mg	—	450	675	—	—	441	—	465	—
固形物濃縮量(VSS)	mg	—	76.8	95.4	—	—	68.7	—	84.2	—
セディメントトラップ開口部面積	m <sup>2</sup>	—	0.0253	0.0256	—	—	0.0251	—	0.0262	—
T-SiO <sub>2</sub>	%	—	—	48.0	—	—	—	—	—	—
生物態シリカ	%	—	—	6.2	—	—	—	—	—	—
植物プランクトン	—	別紙	別紙	別紙	別紙	別紙	別紙	別紙	別紙	別紙
含水率	%	—	—	95.9	—	—	—	—	—	—
塩分	%	—	—	22.2	—	—	—	—	—	—

\* 水質、沈降物の生物態シリカは、(アルカリ溶性シリカ)-(D-SiO<sub>2</sub>)により算出。アルカリ溶性シリカは、SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>プロット法により、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=0となる点を外挿して求めた。

表一4の測定結果から、生物態シリカの沈降速度を推定する。まず、セディメントトラップ回収時に得られた固形物量中の生物態シリカの質量を求める。これをセディメントトラップ開口部面積で除することで、設置した10日間における単位面積あたりの生物態シリカの沈降フラックスが求まる。さらにこれを10日の期間および測定期間中の水柱における平均生物態シリカ濃度で除することで、沈降速度を求めることができる。

今回の調査では、栄養塩添加ケースでのセディメントトラップ回収時の水柱における平均生物態シリカ濃度が非常に低いレベルとなっている。セディメントトラップ設置時に濃度を計測していなかったため、濃度が測定できた2回の結果を参考に、いくつかの推定濃度を設定して、沈降速度を推定した結果、0.05~0.2m/d程度の値となった。これは、以下に述べるシミュレーションにおいて、現実の水質変化に合わせるように同定したパラメータ値(珪藻類の沈降速度)とほぼ同様の値であった。

### 3. 3 シミュレーションモデルによる珪酸捕捉沈降量の推定

表-5 珪酸捕捉沈降量の推定

	ダムサイト表層水質(10カ年平均(実測値))			平均流入SiO2 (mg/L)	平均流入Si (mg/L) 10 <sup>6</sup> (g/年)		平均補足Si 10 <sup>6</sup> (g/年)	Si補足率 (%)	平均年流入量 (m3)	常満容量 (m3)	湛水面積 (ha)	平均年回転率 (回/年)	平均水深 (m)	集計期間
	T-P(mg/L)	T-N(mg/L)	Chl. a(μg/L)											
鹿ノ子	0.016	0.26	6.4	34.4	16.1	1136	2.45	0.22	70,784,418	24,200,000	210	3.1	11.5	H6-15
下久保	0.022	1.37	9.2	20.8	9.7	2118	1.44	0.07	218,193,091	130,000,000	327	1.8	39.8	H2-11
鶴田	0.046	0.87	20.3	38.1	17.8	30858	2.86	0.01	1,735,528,118	123,000,000	361	17.0	34.1	H4-13
土師	0.022	0.54	13.5	14.5	6.8	3118	5.47	0.18	460,721,347	41,800,000	280	13.9	14.9	H5-14
桂沢	0.025	0.23	4.1	12.4	5.8	2095	5.07	0.24	361,973,578	92,700,000	499	4.1	18.6	H7-16

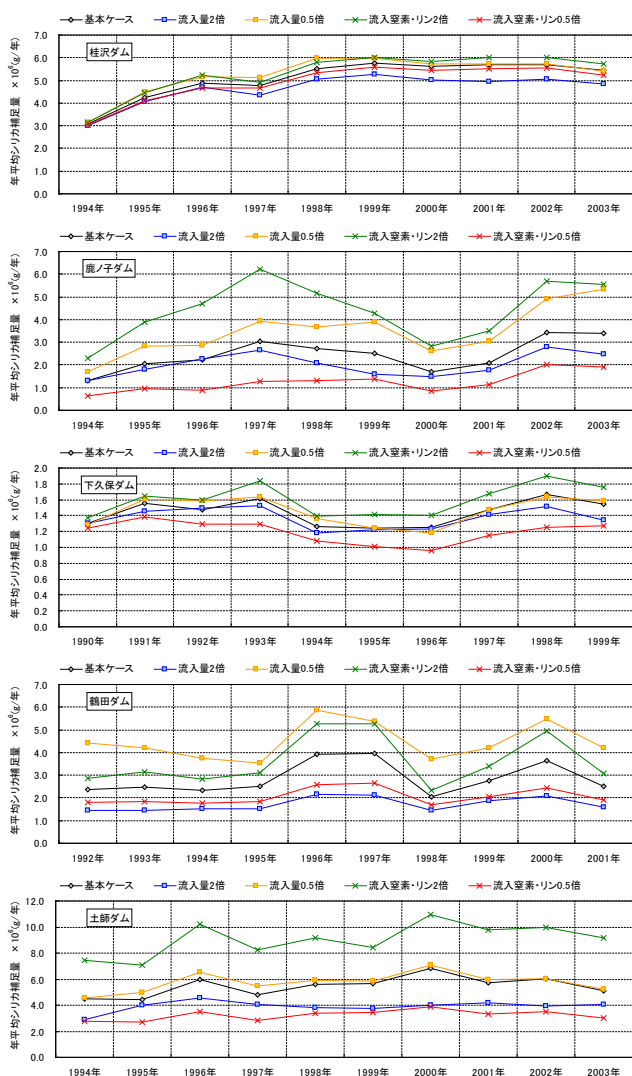


図-2 感度解析結果

水質シミュレーションにより、求めた珪藻類が摂取した後に沈降することで貯水池に捕捉されるシリカの質量、流入量に対する捕捉率を表-5に示す。割合としては、それぞれのダムで1%を超えることなく、極めて小さなものであると推定された(ただし、流入量を文献値から推定しているため、割合については、この推定値により変化する)。また、図-2に流入栄養塩濃度や流入水量を変化させた場合の、シリカ捕捉量の推定値の変化を示す。貯水池ごとに変化の度合いは異なるが、栄養塩濃度を上昇させた場合に珪藻類の増加が多くなる貯水池で捕捉量の増加が大きいと考えら

れる。また、流入水量が減ったほうが捕捉量が増加する結果となったが、これは流入水量が減ることで、滞留時間が増加し、珪藻類の沈降量が増加することによって考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、貯水池における珪素の生物現象に基づく捕捉状況の解明を行った。このため、ダム貯水池底泥の生物体シリカ濃度の測定、珪藻類による珪酸捕捉沈降量の現地計測、シミュレーションモデルによる珪酸捕捉沈降量の推定を行った。その結果、以下のことがわかった。

- 1) シミュレーション計算による推算からは、流入する珪素のうち、珪藻類に摂取されて沈降する割合は1%以下であり、この結果から、日本のダム貯水池では、生物現象による珪素の捕捉は大きいものではないことが示された。
- 2) 現地実験結果から、珪藻類の沈降速度を推定した結果、0.05~0.2m/d程度の値となった。この値からも、日本のダム貯水池では、生物現象による珪素の捕捉は大きいものではないことが示された。
- 3) 栄養塩濃度の上昇、回転率の低下が生物現象による珪素の捕捉を増加させることが示された。

#### 参考文献

- 1) Vorosmarty et al. : The storage and aging of continental runoff in large reservoir systems of the world, *Ambio*, 26, pp. 210-219, 1995.
- 2) Kamitani, A. and M. Takano : The behavior of dissolved silica during the mixing of river and sea waters in Tokyo Bay, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 19, pp. 505-512, 1984.
- 3) Jorgensen et al., *Handbook of Ecological Parameters and Ecotoxicology*, Elsevier, 1991.
- 4) 小林純, 水の健康診断, 岩波新書, 1971.
- 5) 鎌谷明善 : 生物ケイ酸の測定法 一現状と問題点一, 海の研究, Vol.9, No.3, pp.143-159, 2000.
- 6) 岩田 拓朗, 後藤 直成, 三田村 緒佐武 : 琵琶湖における湖底堆積物および湖水中の生物態シリカの分布, 日本陸水学会講演要旨集, Vol. R68, p. 166, 2003.

## **STUDY ON THE MATERIAL DYNAMICS THROUGH DAM RESERVOIR**

**Key words;** dam, silica, trap, simulation

Trap of materials such as silica by dam reservoirs became a concern in estuary. We have measured the concentration of biogenic silica in bottom sediments and the settling flux of biogenic silica in a dam reservoir. We have also simulated the trapped mass of silica through the uptake of diatom in five dam reservoirs. The percentage of silica trapped by diatoms in dam reservoirs in Japan seemed quite low (ca.  $\sim 1\%$ ).