

琵琶湖におけるケイ素画分の特徴とそれに影響を及ぼす要因

安積 寿幸

環境動態学専攻

はじめに

近年、人間活動の増大が、陸水や海洋において栄養塩（窒素、リン、ケイ素）の循環に影響を与えている。この人間活動の増大は、河川や湖沼、海洋の富栄養化を引き起こすだけでなく、ケイ素循環にも影響をおよぼす。特に陸水域における富栄養化やダム建造は、珪藻生産、珪藻の沈降・堆積を増加させ、陸域から海洋へのケイ素の輸送を減少させる（ケイ素欠損仮説）要因として注目されている。このように、人間活動による栄養塩負荷の増大や陸域でのダム建設による停滞水域の増加に伴う地球規模のケイ素循環の変化により、陸水や海洋におけるケイ素循環に関する研究の必要性が高まっている。

そこで本研究では、ケイ素シンクの場合として作用している琵琶湖において、湖水中でのケイ素画分の分布変動や湖底堆積物からのケイ素の回帰に注目し、湖のケイ素循環におけるケイ素画分の特徴とそれに影響を及ぼす要因を明らかにすることを目的とした。

琵琶湖およびその集水域河川における各ケイ素画分の分布

湖沼におけるケイ素循環を解明するための研究方法の1つとして、琵琶湖およびその流入河川水中の4つのケイ素画分（溶存態反応性ケイ素、コロイド態ケイ素、生物態ケイ素および鉱物態ケイ素）の濃度の空間的な分布や時間的な変動を調査した。さらに、河川や湖沼におけるケイ素循環に対して、各ケイ素画分の分布変動がどのように寄与しているかを

表1 琵琶湖流域の成層期における4つの水塊での各態ケイ素画分の水柱あたりの平均値。nは試料数を示す。特に表水層は深度0-15m、深水層は深度30m以深の値より算出した。

		n	Depth (m)	DRSi	CSi	BSi	LSi
		(μM)					
Inflowing river		4	0	160	15	2.4	8.5
Littoral region	Epilimnion	5	0-13	28	1.8	1.7	4.1
Offshore region	Epilimnion	12	0-15	27	1.2	1.8	2.0
	Hypolimnion	13	30-86	50	0.6	1.0	1.1

評価した。

各ケイ素画分の分布変動に関して、琵琶湖北湖最深部付近（水深87m）から、琵琶湖流入河川の1つである犬上川河口部を結ぶ直線上の6地点において、鉛直的および水平的に調査を行った。さらに琵琶湖流入河川の一つである犬上川において上流から河口部の間の4地点で調査を行った。

犬上川河川水中における溶存態反応性ケイ素（以下DRSiとする）の濃度は、琵琶湖表層（本研究では深度0-15m層）水のDRSi濃度と比較して約5倍高かった（表1）。河川水中の生物態ケイ素（以下BSiとする）、鉱物態ケイ素（以下LSiとする）およびコロイド態ケイ素（以下CSiとする）の濃度は、集水域地質由来のケイ素の流出や河川付着藻類の剥離の影響により、琵琶湖水と比較して高かった（表1）。また、琵琶湖において、沿岸域の表層水は深層（本研究では深度30m以深）水と比較してCSiやLSi濃度が高かった（表1）。これらは、LSi

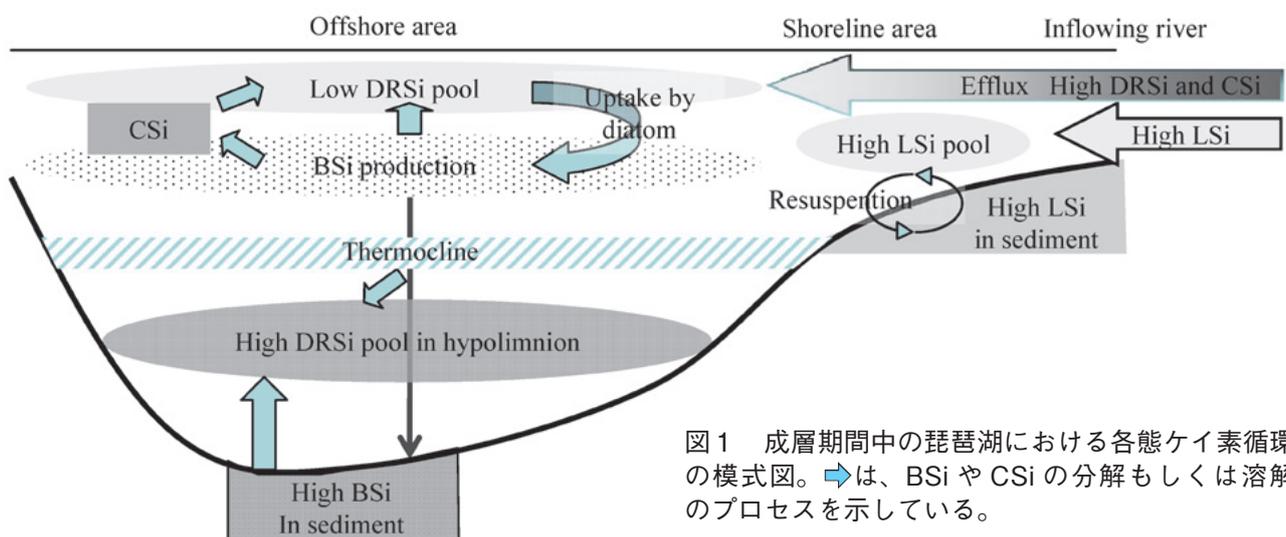


図1 成層期間中の琵琶湖における各態ケイ素循環の模式図。→は、BSiやCSiの分解もしくは溶解のプロセスを示している。

含有量に富んだ沿岸域堆積物の湖水への再懸濁や、CSi および LSi 濃度が高い河川水の流入による寄与を受けている結果であると示唆された。さらに、琵琶湖深層水における高い DRSi 濃度は、懸濁粒子の分解に伴うケイ素の回帰や湖底堆積物からのケイ素の溶出による影響が考えられた。このように、琵琶湖とその集水域河川におけるケイ素画分の分布変動は、琵琶湖流域の流入河川、沿岸域、沖域（表水層と深水層）によって異なり、それぞれの場の生物地球化学的な特徴の影響を強く受けられている（図1）。

琵琶湖湖底堆積物からのケイ素の回帰速度とそれに影響を及ぼす要因

琵琶湖において、水温成層が生じる期間に見られる湖底直上付近の DRSi の増加は、湖底堆積物からのケイ素の回帰による影響が考えられる。そこで、湖底堆積物からの DRSi の溶出速度やその溶出に影響を与える因子を調査した。そして、琵琶湖のケイ素循環に対する湖底堆積物からの DRSi の回帰の影響を評価した。

琵琶湖北湖最深部付近(Sta. 1:水深86m地点、図2)における2005年4月から2006年3月にかけて、月に一度の頻度で堆積物コアを採取した。それを用いて現場の水温と同じ温度である8℃および暗条件で DRSi の溶出実験を行ったところ、湖底堆積物からの DRSi の溶出速度は $60 \pm 4.1 \text{ mg Si m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ で、調査期間を通してほぼ一定の値を示した（図3）。

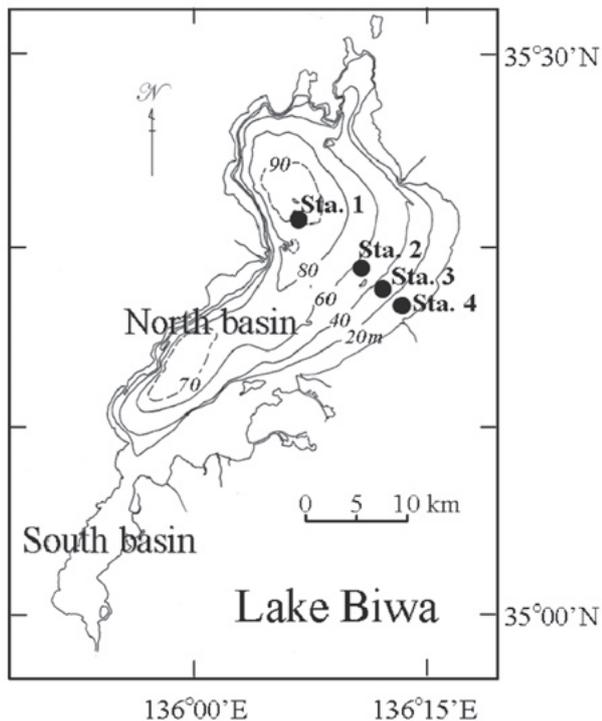


図2 湖底堆積物試料の採取地点。

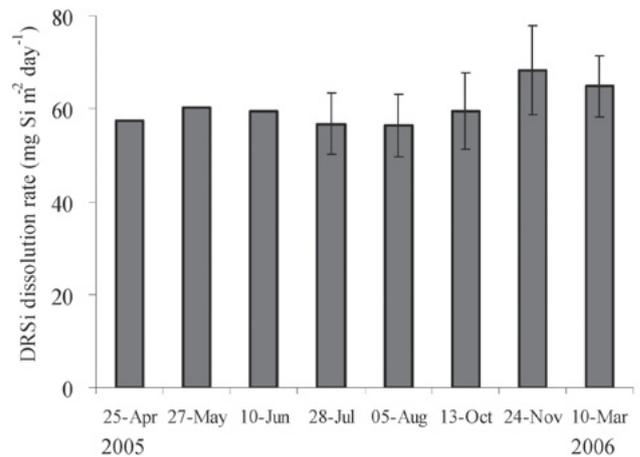


図3 Sta. 1の湖底堆積物を用いた DRSi の溶出実験より得られた湖底堆積物からの DRSi 溶出速度。実験条件は、8℃、暗条件で行った。エラーバーは標準偏差を示す。

一方、沿岸域 (Sta. 4:水深9m地点、図2) で採取した堆積物コアにおいて、Sta. 1と同じ条件 (温度8℃、暗条件) で実験を行ったところ、湖底堆積物からの DRSi の溶出速度は $27-29 \text{ mg Si m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ と、Sta. 1の場合と比較して小さかったが、夏期に沿岸域の湖水で見られるような水温である20℃で実験を行ったところ、DRSiの溶出速度は $46-48 \text{ mg Si m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ と、温度条件が8℃の場合と比較して大きくなった（表2）。つまり、水温が高くなると、湖底堆積物からの DRSi の溶出速度は促進されることが示唆された。このように、沿岸域のように季節的に水温が変化する場に存在する湖底堆積物からの DRSi 溶出速度は、水温が高い時期に高くなると推察される。さらに、堆積物表層 (0-2cm) において、堆積物中の BSi や DRSi の含有量は、沖域の堆積物 (Stas. 1-3) で、それぞれ $0.34-0.38 \text{ kg m}^{-2}$ 、 $0.12-0.22 \text{ g m}^{-2}$ である一方、沿岸域

表2 各地点 (各地点の水深は、Sta. 1が86m、Sta. 2が59m、Sta. 3が32m、Sta. 4が9mである) における異なった温度条件 (8℃と20℃) による湖底堆積物からの DRSi の溶出速度。WTは溶出実験時の温度を、N.D.は未測定を示す。表に示した () の中の値は、現場ではありえない温度で実験していることを意味し、参考値として表に記載している。

Sampling day	WT	Sta. 1	Sta. 2	Sta. 3	Sta. 4
	(°C)	(mg Si m ⁻² day ⁻¹)			
10-Jun	8	60	70	62	27
	20	(122)	N.D.	(121)	46
24-Nov	8	68	64	67	29
	20	(126)	N.D.	(121)	48

琵琶湖におけるケイ素画分の特徴とそれに影響を及ぼす要因

安積 寿幸

環境動態学専攻

はじめに

近年、人間活動の増大が、陸水や海洋において栄養塩（窒素、リン、ケイ素）の循環に影響を与えている。この人間活動の増大は、河川や湖沼、海洋の富栄養化を引き起こすだけでなく、ケイ素循環にも影響をおよぼす。特に陸水域における富栄養化やダム建造は、珪藻生産、珪藻の沈降・堆積を増加させ、陸域から海洋へのケイ素の輸送を減少させる（ケイ素欠損仮説）要因として注目されている。このように、人間活動による栄養塩負荷の増大や陸域でのダム建設による停滞水域の増加に伴う地球規模のケイ素循環の変化により、陸水や海洋におけるケイ素循環に関する研究の必要性が高まっている。

そこで本研究では、ケイ素シンクの場合として作用している琵琶湖において、湖水中でのケイ素画分の分布変動や湖底堆積物からのケイ素の回帰に注目し、湖のケイ素循環におけるケイ素画分の特徴とそれに影響を及ぼす要因を明らかにすることを目的とした。

琵琶湖およびその集水域河川における各ケイ素画分の分布

湖沼におけるケイ素循環を解明するための研究方法の1つとして、琵琶湖およびその流入河川水中の4つのケイ素画分（溶存態反応性ケイ素、コロイド態ケイ素、生物態ケイ素および鉱物態ケイ素）の濃度の空間的な分布や時間的な変動を調査した。さらに、河川や湖沼におけるケイ素循環に対して、各ケイ素画分の分布変動がどのように寄与しているかを

表1 琵琶湖流域の成層期における4つの水塊での各態ケイ素画分の水柱あたりの平均値。nは試料数を示す。特に表水層は深度0-15m、深水層は深度30m以深の値より算出した。

		n	Depth (m)	DRSi	CSi	BSi	LSi
		(μM)					
Inflowing river		4	0	160	15	2.4	8.5
Littoral region	Epilimnion	5	0-13	28	1.8	1.7	4.1
	Offshore region	12	0-15	27	1.2	1.8	2.0
Offshore region	Hypolimnion	13	30-86	50	0.6	1.0	1.1

評価した。

各ケイ素画分の分布変動に関して、琵琶湖北湖最深部付近（水深87m）から、琵琶湖流入河川の1つである犬上川河口部を結ぶ直線上の6地点において、鉛直的および水平的に調査を行った。さらに琵琶湖流入河川の一つである犬上川において上流から河口部の間の4地点で調査を行った。

犬上川河川水中における溶存態反応性ケイ素（以下DRSiとする）の濃度は、琵琶湖表層（本研究では深度0-15m層）水のDRSi濃度と比較して約5倍高かった（表1）。河川水中の生物態ケイ素（以下BSiとする）、鉱物態ケイ素（以下LSiとする）およびコロイド態ケイ素（以下CSiとする）の濃度は、集水域地質由来のケイ素の流出や河川付着藻類の剥離の影響により、琵琶湖水と比較して高かった（表1）。また、琵琶湖において、沿岸域の表層水は深層（本研究では深度30m以深）水と比較してCSiやLSi濃度が高かった（表1）。これらは、LSi

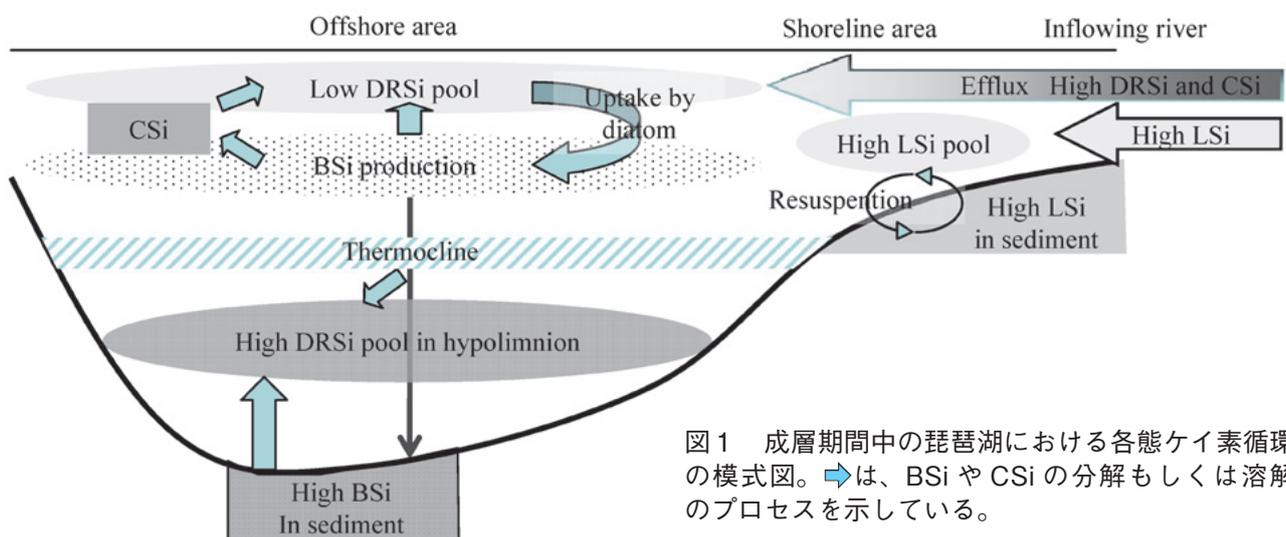


図1 成層期間中の琵琶湖における各態ケイ素循環の模式図。→は、BSiやCSiの分解もしくは溶解のプロセスを示している。

含有量に富んだ沿岸域堆積物の湖水への再懸濁や、CSi および LSi 濃度が高い河川水の流入による寄与を受けている結果であると示唆された。さらに、琵琶湖深層水における高い DRSi 濃度は、懸濁粒子の分解に伴うケイ素の回帰や湖底堆積物からのケイ素の溶出による影響が考えられた。このように、琵琶湖とその集水域河川におけるケイ素画分の分布変動は、琵琶湖流域の流入河川、沿岸域、沖域（表水層と深水層）によって異なり、それぞれの場の生物地球化学的な特徴の影響を強く受けられている（図1）。

琵琶湖湖底堆積物からのケイ素の回帰速度とそれに影響を及ぼす要因

琵琶湖において、水温成層が生じる期間に見られる湖底直上付近の DRSi の増加は、湖底堆積物からのケイ素の回帰による影響が考えられる。そこで、湖底堆積物からの DRSi の溶出速度やその溶出に影響を与える因子を調査した。そして、琵琶湖のケイ素循環に対する湖底堆積物からの DRSi の回帰の影響を評価した。

琵琶湖北湖最深部付近(Sta. 1:水深86m地点、図2)における2005年4月から2006年3月にかけて、月に一度の頻度で堆積物コアを採取した。それを用いて現場の水温と同じ温度である8°Cおよび暗条件で DRSi の溶出実験を行ったところ、湖底堆積物からの DRSi の溶出速度は $60 \pm 4.1 \text{ mg Si m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ で、調査期間を通してほぼ一定の値を示した(図3)。

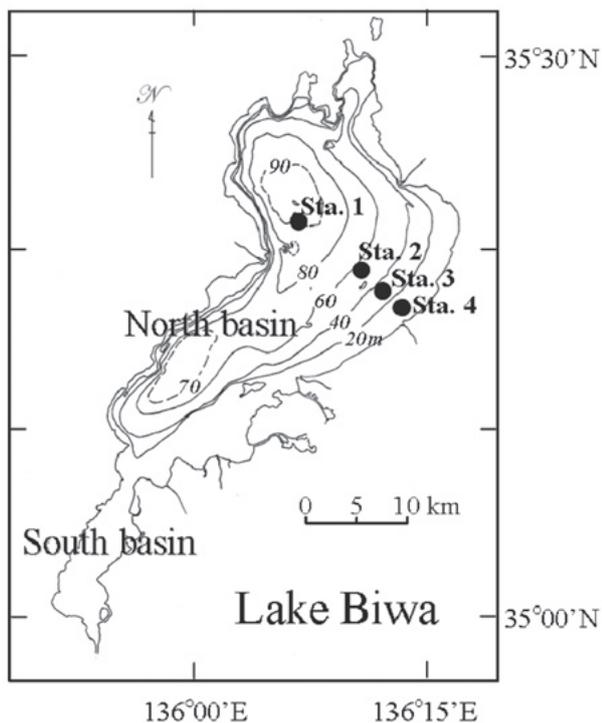


図2 湖底堆積物試料の採取地点。

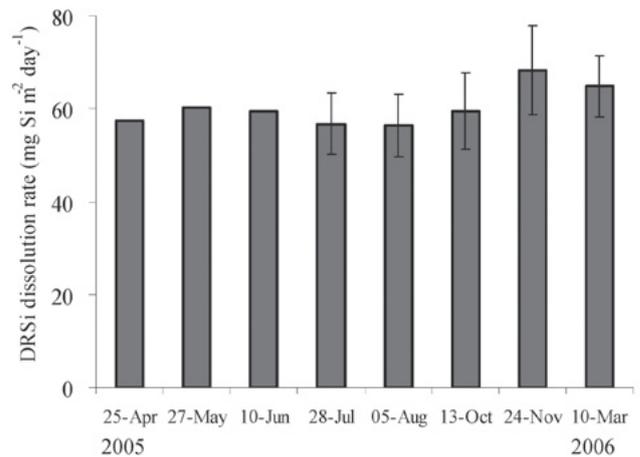


図3 Sta. 1の湖底堆積物を用いた DRSi の溶出実験より得られた湖底堆積物からの DRSi 溶出速度。実験条件は、8°C、暗条件で行った。エラーバーは標準偏差を示す。

一方、沿岸域 (Sta. 4:水深9m地点、図2) で採取した堆積物コアにおいて、Sta. 1と同じ条件(温度8°C、暗条件)で実験を行ったところ、湖底堆積物からの DRSi の溶出速度は $27-29 \text{ mg Si m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ と、Sta. 1の場合と比較して小さかったが、夏期に沿岸域の湖水で見られるような水温である20°Cで実験を行ったところ、DRSi の溶出速度は $46-48 \text{ mg Si m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ と、温度条件が8°Cの場合と比較して大きくなった(表2)。つまり、水温が高くなると、湖底堆積物からの DRSi の溶出速度は促進されることが示唆された。このように、沿岸域のように季節的に水温が変化する場に存在する湖底堆積物からの DRSi 溶出速度は、水温が高い時期に高くなると推察される。さらに、堆積物表層(0-2cm)において、堆積物中の BSi や DRSi の含有量は、沖域の堆積物 (Stas. 1-3) で、それぞれ $0.34-0.38 \text{ kg m}^{-2}$ 、 $0.12-0.22 \text{ g m}^{-2}$ である一方、沿岸域

表2 各地点(各地点の水深は、Sta. 1が86m、Sta. 2が59m、Sta. 3が32m、Sta. 4が9mである)における異なった温度条件(8°Cと20°C)による湖底堆積物からの DRSi の溶出速度。WTは溶出実験時の温度を、N.D.は未測定を示す。表に示した()の中の値は、現場ではありえない温度で実験していることを意味し、参考値として表に記載している。

Sampling day	WT	Sta. 1	Sta. 2	Sta. 3	Sta. 4
	(°C)	(mg Si m ⁻² day ⁻¹)			
10-Jun	8	60	70	62	27
	20	(122)	N.D.	(121)	46
24-Nov	8	68	64	67	29
	20	(126)	N.D.	(121)	48

表3 各地点における湖底直上水および堆積物表層（0-2cm）の物理化学的要素。WTは水温を、TSiは全ケイ素を示す。なお、WTとpHは湖底直上水の値を示す。各ケイ素画分の値は、単位面積当たりの堆積物表層（0-2cm）に含まれるケイ素含有量を示している。

Station (Water depth)	WT		pH		TSi	BSi	DRSi
	min	max	min	max			
	°C				kg m ⁻²	kg m ⁻²	g m ⁻²
Sta. 1 (86 m)	6.6	8.1	6.8	7.2	0.64	0.34	0.22
Sta. 2 (57m)	6.6	8.4	6.9	7.2	0.59	0.38	0.22
Sta. 3 (32m)	6.6	13.8	6.9	7.3	1.1	0.37	0.12
Sta. 4 (9 m)	6.6	27.9	7.0	8.8	1.9	0.14	0.05

(Sta. 4) では、それぞれ 0.14kg m⁻²、0.05g m⁻² と沖域と比較して低かった (表3)。つまり、湖底堆積物からの DRSi の溶出速度は、堆積物中の DRSi や BSi の含有量によっても影響されることが示唆された。沿岸域の湖底堆積物からの DRSi 溶出速度は、同じ培養温度で比較した場合、沖域の湖底堆積物からの DRSi 溶出速度より小さかった (表2)。しかしながら、沿岸域で見られる水温や pH の季節的な変化や波浪による湖底堆積物の攪乱は、むしろ沿岸域の湖底堆積物からの DRSi 溶出速度のほうが沖域の湖底堆積物からの DRSi 溶出速度よりも大きい可能性を暗示している。さらに、沿岸域のケイ素循環を評価するうえで、珪藻の高い生産が生じる沿岸域では、湖底堆積物からの DRSi 溶出速度だけでなく湖水中のケイ素粒子の分解に伴う DRSi の回帰の影響もまた考慮する必要があると考えられる。

琵琶湖深層水中の DRSi 濃度の増加に対する湖底堆積物からのケイ素の回帰の寄与

水温成層時では、成層期初期の4月頃から末期の12月頃にかけて、琵琶湖深層水中では DRSi 濃度が増加する (図4)。特に、その増加は湖底付近で顕著に見られ、成層期末期において DRSi 濃度は 70 μM 以上になり、成層期初期と比較して約 50 μM 増加する (図4)。水温成層の期間に深層で増加した DRSi の現存量を見積もるために、DRSi の鉛直分布のデータの特に深層 (ここでは深度 30m から湖底直上までと仮定した) のデータを用いた (図4)。そして成層期の初期から末期にかけての2つの期間 (2004年4月から2004年11月と2005年4月から2005年11月の、それぞれ約6ヶ月間。図4を参照) のデータから深層水中に蓄積した DRSi 現存量を見積もった。なお、成層期間の琵琶湖深層水中におい

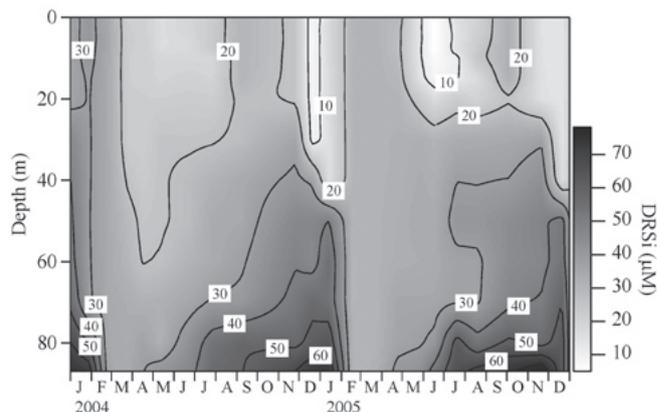


図4 Sta. 1における2004年1月から2005年12月までの DRSi 濃度の鉛直分布の季節変化。

て、各深度の DRSi 濃度は、水平的にはほぼ等しいものと考えた。その結果、2004年と2005年の2つの期間で琵琶湖深層水中に蓄積した DRSi 現存量は、それぞれ、約 5.8×10^6 kg Si と約 4.8×10^6 kg Si と見積もられた。

一方、水温成層期に、琵琶湖深層中に存在する湖底堆積物 (ここでは水深 30m 以深の湖底堆積物を示す) からの DRSi の回帰量も見積もった。計算方法には、本研究結果から得られた堆積物からの DRSi の回帰速度を用いた。Stas. 1-3 において年間を通してほとんど DRSi の回帰速度に変化がなかったことから、Stas. 1-3 から得られた湖底堆積物からの DRSi 溶出速度データの平均値 ($64 \text{ mg Si m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) を用いた。また、琵琶湖における水深 30m から水深 90m における湖底面積は、373km² である。さらに、深層水中の DRSi の蓄積量の算出方法と照らし合わせて4月から11月 (約6ヶ月) の期間で算出した。その結果、水温成層期に、琵琶湖深層中に位置する湖底堆積物からの DRSi の回帰量は、6ヶ月間で約 5.0×10^6 kg Si と見積もられた。以上のように、見積もった成層期間中における琵琶湖深層水中に蓄積した DRSi 現存量と琵琶湖深層中に位置する堆積物からの DRSi の回帰量は、ほぼ似たような値であることが示された。つまり、湖底堆積物からの DRSi の回帰は、水温成層期に見られる琵琶湖深層水中の DRSi 濃度の増加に寄与していることを示唆している。しかしながら、琵琶湖深層水中に蓄積した DRSi 現存量の値は、見かけの濃度変化から算出したものであるため、湖底堆積物からの DRSi の溶出量だけでなく、粒子の沈降時に分解することによって湖水中へ回帰する DRSi の量についても考慮する必要がある。今後これらの琵琶湖深層水中の DRSi 濃度変動に対する影響を解明することは、琵琶湖深層水に蓄積した DRSi 現存量を明らかにするだけでなく、深層水中のケイ素循環を理解す

ることにも役立つと考えられる。

まとめ

本研究は、湖のケイ素循環におけるケイ素画分の特徴とそれに影響を及ぼす要因を明らかにすることを目的とした。琵琶湖におけるケイ素画分の分布変動は、琵琶湖の流入河川、沿岸域、沖域（表水層と深水層）によってかなり異なっており、それぞれの場の生物地球化学的な特徴の影響を強く受けていると考えられた。また、湖底堆積物からの比較的高いDRSiの溶出速度は、琵琶湖のDRSi濃度変動に影響を与えることが示唆された。さらに、沿岸域の水深の浅い水域に存在する堆積物と沖域の水深の深い水域に存在する堆積物との間のDRSi溶出速度の違いは、水温、pH、堆積物中のBSi濃度の違いによって影響されることが考えられた。

近年、人間活動の増大が、陸水や海洋において栄養塩の循環に影響を与えている。琵琶湖もまた富栄養化を経験しており、琵琶湖北湖において、近年DRSi濃度が増加傾向にあることから、ケイ素の循環系もなんらかの変化を受けていると考えられる。海洋や湖沼において、主要な一次生産者である珪藻にとっての必須栄養素であるケイ素の循環過程の変化は、植物プランクトン群集を変動させ、さらには植物プランクトンが関わる食物網への影響も考えられるため、湖のケイ素循環を解明することは、環境科学的な視点からも重要な研究課題である。