

はじめに

河川水中の重要な栄養塩類として窒素やリンの管理が想定されてきていますが、珪藻が主要な植物プランクトン構成種であることにより、珪藻の外殻のもととなるケイ酸も湖沼や沿岸海域における一次生産の制限因子となりうると考えられます。したがって、岩石の風化や地下水経由という元来のケイ酸の起源だけでなく、雨天時の土砂輸送、農業活動や都市活動からの供給など、ケイ酸の起源や河川における動態を考慮して、栄養塩類としてのケイ酸を他の無機塩類とともにモニタリングする意義は大きいはずです。

しかし、河川におけるその動態や収支には、いまだに解明されていない部分が多く存在しています。また、全国的なモニタリングによるデータの蓄積もほとんどなされていないのが現状です。しかし、近年の研究においては森・川・海のつながりにおいてケイ酸の重要性が取り上げられるなど、河川におけるケイ酸の重要性が指摘されています。今後は、水質測定データを蓄積し、河川におけるケイ酸の動態や収支などを明らかにしていくこと、重要な生産者である珪藻の生育と関連付けて整理さ

れることが求められています。

そこで、平成17年度から2ヶ年にわたり「河川におけるケイ酸など無機溶存物質の流出機構に関する研究会」が財団法人河川環境管理財団において設置されました。この研究活動は、全国的・総合的視点で実施される財団事業の一つです。

本研究会では、河川流域の様々な箇所においてケイ酸がどのような濃度で存在し、どのような動きをするのかという観点から、ケイ酸の河川における特性を把握することにより、この研究課題に取り組むこととしたものです。このため、地球科学、水環境工学、海洋環境学、河川工学などの学識者からなる研究会が組織されました。そして、本書はその研究会の成果である報告書のエッセンスを、わかりやすい読み物風にしながらも、専門的な知見もバランスよく整理することを目指したものです。

まさに、第三の栄養塩類としてケイ酸を位置付けて、ケイ酸に関する基礎知識やモニタリングデータ、さらには関連の最新研究成果を取りまとめました。これは、今後、ケイ酸を含めた体系だった水質測定が継続的に実施され、下流域や滞留水域に影響の少ない水質の確保の観点から河川水質管理が展開されることを期待したいためです。

このことは、河川上流から沿岸域までの流域全体の水収支、流域土砂管理、森林管理、ダム管理、土地利用状態などを考慮して、河川管理者が関係機関と連携しながらケイ酸や無機塩類の物質収支を把握できるように、効率的で継続的な水質モニタリング体制を整える必要性を整理したとも言い換えられます。

さらには、河川におけるケイ酸や無機塩類に関して、その存在形態や生物利用性、河川流下過程への挙動解明、流域内の収支や人為起源に関する研究を進めることの意義もまとめさせていただきました。そして、ケイ酸を軸に様々な視点から研究の議論したこと、その起源、流出や動態をわかりやすく解説することを目指した研究会のメンバーの気持ちを込めて、本書のタイトルを『ケイ酸—その由来と行方』とさせていただきました。

本書が、沿岸域とのつながりを意識して、河川流域の水質や水環境に興味を持っておられる全国の多くの方に読んでいただくだけでなく、ケイ酸とその動態に関わる無機物質の適正な管理を目指す河川管理の現場で活躍されている方々に役立てられることを祈念してやみません。

2011年12月

古米 弘明

名 簿

編 者 古 米 弘 明 [東京大学大学院工学系研究科 教授]
山 本 晃 一 [(財)河川環境管理財団河川環境総合研究所 所長]
佐 藤 和 明 [日本上下水道設計(株)技術本部 技術顧問]

執筆者 (50 音順 太字担当箇所)

赤 木 右 [九州大学大学院理学研究院 教授 2-2/2-4(分担)
/4-3/5-1]
神 尾 重 雄 [(株)ニュージェック 理事 2-1/5-2]
佐 藤 和 明 [前出 3-2/4-1]
駒 井 幸 雄 [大阪工業大学工学部 教授 2-4(分担)/5-3]
高 崎 みつる [石巻専修大学理工学部 教授 5-5]
高橋(田中)美穂 [東京海洋大学海洋科学部 准教授 4-4/5-4]
長 井 正 博 [人間環境大学人間環境学部 准教授 1-2/4-2]
西 村 修 [東北大学大学院工学研究科 教授 2-3/5-6]
古 米 弘 明 [前出 1-1/1-3/6 章]
本 橋 健 [(株)日水コン大阪支所河川事業部(元財団法人河
川環境管理財団) 3-1]

目 次

第 1 章 栄養塩類としてのケイ酸 1

- 1-1 ケイ酸の重要性と本書の読み方 1
- 1-2 天然水中のケイ酸の形態と分析法 6
- 1-3 陸水と沿岸域のケイ酸 14

第 2 章 ケイ酸の起源 27

- 2-1 岩石の風化作用 27
- 2.2 ケイ酸と陸上植物 37
- 2-3 人為(生活・工業・農業)起源 44
- 2-4 降水と降水物 50

第 3 章 河川と地下水のケイ酸濃度, 無機塩類濃度 61

- 3-1 ケイ酸と他の無機塩類の濃度分布 61
- 3-2 ケイ酸濃度の経年変化 69

第 4 章 ケイ酸の流出と動態 81

- 4-1 河川流下過程におけるケイ酸濃度変化 81

- 4-2 湖沼, ダム湖におけるケイ酸の動態 89
- 4-3 水田におけるケイ酸の挙動 95
- 4-4 河口部におけるケイ酸の動態 101

第5章 ケイ酸に関わる研究事例 109

- 5-1 樹種とケイ酸：森林生態系が異なると、
川に流れるケイ素の量はどう変わるか 109
- 5-2 ケイ酸溶出ポテンシャル 115
- 5-3 河川渓流水の水質特性, 主要溶存成分の相互関係 126
- 5-4 ケイ酸の存在形態と藻類利用性 139
- 5-5 河川中でのケイ酸の動態 145
- 5-6 付着珪藻類と栄養塩バランス 152

第6章 ケイ酸モニタリングと研究の意義 165

- 6-1 河川におけるケイ酸モニタリングの実態 165
- 6-2 ケイ酸モニタリングの必要性和意義 167
- 6-3 ケイ酸のモニタリング研究の意義 172

索引 177

第1章

栄養塩類としてのケイ酸

1-1 ケイ酸の重要性と本書の読み方

a. 第三の栄養塩としてのケイ酸

窒素やリンだけでなく、ケイ酸は、不足する栄養塩類としての再認識が求められている。それは、海域生態系における一次生産において重要な役割を果たしているケイ酸が、人為影響によって陸域からの供給が減少している可能性を指摘されてきていることに関係している。

富栄養化現象の制限因子となりやすい窒素、リンについては、その発生源別負荷量、制御方法について多くのデータをもとに種々の取り組みが行われている。しかし、これら窒素、リンに加え、沿岸域の珪藻の生産という観点から、第三の栄養塩としてのケイ酸に注目すべきである。

ケイ酸は、風化反応を通じて浸透水、湧水、地下水に溶解する自然由来の物質であるが、近年、種々の要因から海まで到達する比率が下がってきているといわれている(原島,2003)。こ

のような状況の中で、水道水質基準や水質環境基準に設定される水質項目だけでなく、元来、河川水質を規定してきたケイ酸、カルシウム、マグネシウムなど主要溶存化学成分の挙動に関して、河川を通じた流出、河口・沿岸域での動態という観点から改めて注目する必要がある。

b. 地殻のケイ酸とその供給

ケイ素と酸素とが結び付いたケイ酸(SiO_2)は、地殻全体の60%を占めている。表-1.1に示すように地殻成分の元素として最も多いのは酸素であるが、酸素は単独では存在せず、ケイ素、アルミニウム、鉄などと結合している。したがって、地球の表層を構成する地殻の主要成分であり、存在量の多いケイ酸が水中での生物生産の制限因子になりうることは、とても不思議なことである。

表-1.1 地殻に1%(重量)以上含まれている元素(Clarke *et al.*,1924)

元素	含有量(%)
酸素	46.6
ケイ素	27.7
アルミニウム	8.1
鉄	5.0
カルシウム	3.6
ナトリウム	2.8
カリウム	2.6
マグネシウム	2.1
8元素合計	98.5

河川を通じたケイ酸の供給は、地殻での風化作用と水循環に深く関連している。アジアモンスーン地域に位置する日本には豊かな水の流れが存在する。河川を通じて流れる表流水、また、一部は地下水となって山から平野そして海へと運ばれていく。そして、海の水は太陽のエネルギーによっ

て常に蒸発し、雲をつくり、雨となり、また地上の水源となっていく。この水循環とともに栄養塩類を含む無機成分が陸域から海に供給される。したがって、窒素、リンとともにケイ酸が適正な濃度バランスで供給されることで、豊かな沿岸生態系が構築され、沿海漁業の生産力の基礎となっていることを再認識する必要がある。

c. 本書の構成と読み方

そこで1章では、まずケイ酸の形態と分析方法についてまとめ、ケイ酸の存在形態が栄養塩としての機能にどのように影響するかの議論を整理した。次に、湖沼をはじめとする陸水の富栄養化現象の中で、窒素、リンと並んでケイ酸が栄養塩類としてどのような位置を占めるのかについての知見を整理した。また、陸域から供給されるケイ酸資源が沿岸域の生産性にとっていかに重要であるかの論点を再確認し、珪藻の栄養源となるケイ酸の欠乏状態の可能性についての議論を紹介した。

2章では、ケイ酸の起源について言及した。ケイ酸の起源は、主に地殻の岩石の成分が溶け出してくるものである。温泉や地下水では一般にかなり高い濃度を示し、その起源が岩石由来であることを示している。ただし、その濃度は地域によってかなり異なっており、それぞれの地域の地質における岩石の風化作用の多寡と密接に関連している。風化の速い地質、あるいは風化の結果として醸成される土壌の種類との関係について考察を深めた。

ケイ酸の供給量が風化現象と関連してくるならば、地表を覆う植生との関係もかなり強いということが予想される。植物は、主に根圏の作用により岩石成分を吸収しているが、ケイ酸も植物体にかなり蓄積する。この蓄積された植物体のケイ酸が森林全体としてどのような収支となって水系に出てくるのかは、非常に興味ある課題であり、切り込んで考察を加えた。ケイ酸の起源については、その他に生活、工業、農業起源の人為的なものが考えられる。関連データをできるだけまとめて提示した。また、黄砂など大気起源のもの大きさも紹介する。

3章では、日本における河川水および地下水のケイ酸濃度について、実際の計測データがどのようになっているかの調査結果を示した。データ数に限りはあるが、その濃度範囲を整理した。また、1940、50年代に測定された日本の河川水の濃度との比較を行った。このデータ整理および過去との比較にあたっては、ケイ酸成分のみでなく、カルシウムやマグネシウムなど他の無機溶存成分についても主要なものを取り上げて同様な整理を行った。

ケイ酸やカルシウムなど無機溶存成分は、一般には大きく濃度を変えることなく河川を流下していくと思われるが、出水時、あるいは流下途中の湖沼やダム湖などの停滞水域で濃度が変わることがあり得る。こうした河川流下過程での濃度変化の機構について切り込んだ議論を4章において紹介している。ケイ酸成分の発生源と蓄積場の関係を視野に、河川の源流部分、ならびにイネにケイ酸成分が多く吸収されるという水田を対象に整

理した。同様に、湖沼やダム湖の停滞水域および河口部におけるケイ酸など溶存物質の挙動について現在の知見を総覧した。以上、本書の構成を簡略化して図に示すと、図-1.1 のようになる。

雨水や大気降水物に始まり、風化作用による溶出、森林地域でのケイ素の動態、出水時を含む河川流下過程におけるケイ酸

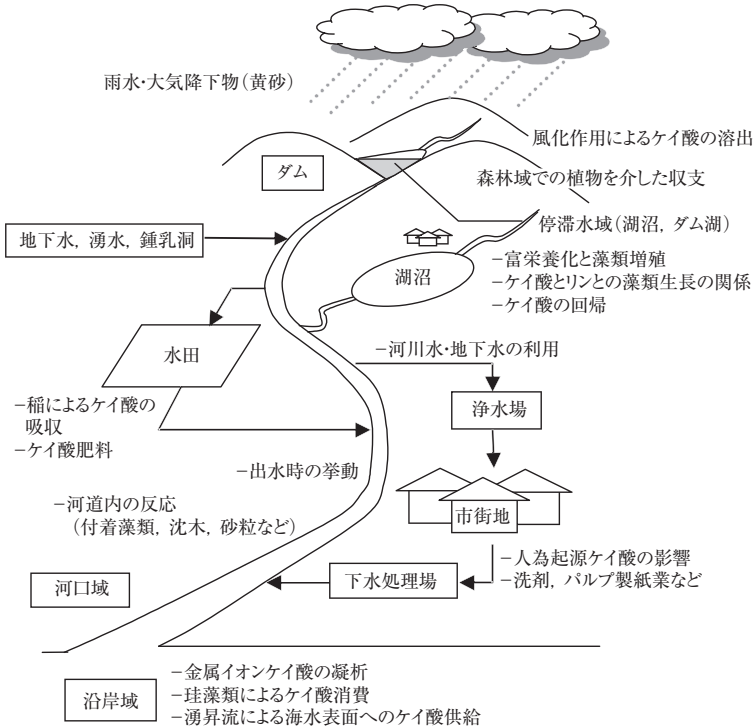


図-1.1 ケイ酸成分の河川流下の挙動

の流出や動態，湖沼やダム湖における藻類増殖との関係，水田におけるケイ酸の供給と消費，河川水や地下水利用に伴うケイ酸の収支などの影響を受けて，最終的に河口部や沿岸域に到達するケイ酸は存在形態やケイ藻類の増殖や漁業生産力の保持に関連していることになる。

最後の6章では，ケイ酸など無機溶存物質の河川におけるモニタリングの意義について総合的な見地から考察を加えた結果を示した。ケイ酸などの成分が河川を通して河口域や沿岸域へと流下していく，そして海で珪藻の増殖と沈降に伴い堆積するという過程を，河川管理においていかに認識するのか。まさに，地球規模の地質学的なゆっくりとした物質循環と，太陽エネルギーで駆動されるサイクルの速い水循環との関係が河川水中の成分濃度として現れているかを捉えられるかである。すなわち，水質という指標で何か重要な現象や過程を読み解くべく，河川のモニタリングとデータ蓄積が必要であろう。

なお，5章においては，ケイ酸に関わる研究事例紹介である。2章と4章に記載されているケイ酸の起源や流出・動態に関連する，興味ある事象を取り上げ，わかりやすく研究成果を紹介している。オムニバスの読み物である。

1-2 天然水中のケイ酸の形態と分析法

a. 単量態ケイ酸と縮合態ケイ酸

水中のケイ酸の形態は大きく単量態ケイ酸と縮合態ケイ酸に