

地球環境変化の健康への影響

— 地球科学より —

輿水達司*¹、酒井陽一*²、戸村健児*³、大下一政*²

(*¹山梨県環境科学研究所 *²大同工業大学 *³立教大学原子力研究所)

摘 要

岩石を風化・浸食し、ガス成分や可溶性物質を溶解し、低地へ集積したものが海洋である。陸水も同様に現在の分布域に至る過程で岩石を風化・浸食しており、その現象が水の化学組成に反映されているはずである。岩石（特に火成岩類）中のバナジウム含有量（ppmのオーダー）は岩石の種類に対応して大きく変動することが知られている。一方、水道水や天然水のバナジウムの濃度も一般にppb（10億分の1）あるいはppb以下という低濃度であるが、地域による変動が極めて大きく、これらの水を摂取している動・植物、人間に対するバナジウムの影響が考えられる。最近、研究用原子炉を使った中性子放射化分析法によりバナジウムを高感度で簡便に分析する方法が確立された。この方法で日本各地の多数の水試料中のバナジウム濃度を分析した結果、地域による濃度変動が周辺の岩石種と深く関連していることが解明された。河川・湖沼水中のバナジウム濃度の相違が、分布する動・植物、人間まで影響を及ぼすか否かを検討するために、極端にバナジウム濃度が異なる河川系に生息する動・植物試料を採取して分析した。その結果、分布する岩石の化学的な相違が、水を媒体にしてそこに生育する生物にまで反映していることが明らかになった。また、従来よりバナジウムを高濃度に含むホヤなどにつき、バナジウムの濃縮機構や生理学的役割に関する興味ある研究も進められている。さらに、五価のバナジウムが血糖正常化作用を示すことも確認され、バナジウムを用いた糖尿病治療薬の開発も世界的に注目されている。このように生物とも深い係わり合いを持っているバナジウムが、地球環境により広範囲な濃度変化をすることは人間活動にも様々な影響を及ぼすものと考えられる。今後、バナジウムと人間を含めた環境との関係を詳細に追求することは重要な課題のように思われる。

キーワード：バナジウム，放射化分析，前濃縮操作，天然水，水道水，岩石化学，糖尿病

1. はじめに

太陽系の惑星の中で地球のみが、その表面に液体の水を大量にたたえている。地球上における水の存在が、動植物や人類などが生存可能な地球環境を長時間かけて作りあげてきた。地球表層部における水はその98%が海洋に存在し、大陸氷は1.8%、淡水は0.1%にすぎない。この水は地球内部から揮発性ガスとして大気圏に放出されたものが冷却され降水となって地表にもたらされたものであり、岩石を風化・浸食し、ガス成分や可溶性物質を溶解し、低地へ集積したものが海洋であるといわれている。そのため海水の溶存成分の起源は、大部分が岩石からの溶出物であると考えられている。陸水についても現在の分布域に至る過程で当然岩石を風化・浸食しており、その現象が水の化学組成に反映されているはずであ

る。

陸水は河川水、湖沼水、地下水、雪氷などに区分される。筆者等は本州中央部一帯の水道水を始め、河川水、湖沼水、地下水などの天然水に含まれるバナジウムにつき研究用原子炉を利用した中性子放射化分析により検討してきた¹⁾²⁾。バナジウムは必須微量元素の一つであり生体中・環境中での挙動が注目されている。ところが、水道水あるいは天然水のバナジウムの濃度は一般にppb（10億分の1）あるいはppb以下のレベルであり、放射化分析の前に何らかの濃縮操作が必要とされる。筆者等はオキシソルと活性炭による前濃縮法を採用し³⁾、水道水・天然水中のバナジウムの濃度を放射化分析により高感度で簡便に定量する方法を確立し、水試料中のバナジウム濃度が採取地域により変動の大きいことを明らかにした¹⁾²⁾。天然水中のバナジウム濃度の測定は既に抽出

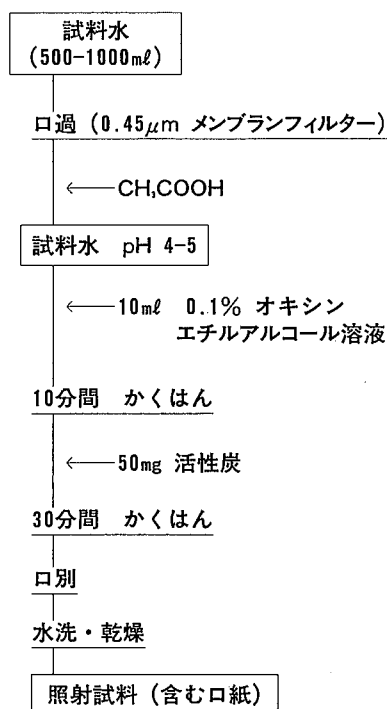


図1 水試料中のバナジウムを濃縮分離するための化学操作¹⁾

法や接触法などにより、富士山麓周辺の湧水等につきみられている⁴⁾⁵⁾。

本稿では、まず我々が中性子放射化分析により行った天然水、水道水についての研究結果を紹介する。なお、筆者等の試みた化学操作のスキームを図1に示した。

ついで、これまでに蓄積された種々の水試料中のバナジウム濃度の分析値を基にして周辺の岩石種との関連を中心に、地球科学的・公衆衛生的見地からなされたバナジウムに関する最近の研究動向を概観してみた。

2. 天然水・水道水での測定結果

前濃縮操作と中性子放射化分析による方法を種々の天然水、水道水に適用した結果を表1に示す¹⁾。水道水の採取地は主として高速道路沿いのサービスエリアとした。市販の飲料水（ミネラルウォーター）の採取地、採取日は容器に記載されたものである。

図2は、表1のうち関東・中部地方の各地の水道水の

表1 水試料のバナジウム濃度¹⁾

採取地	採取日	分析値(ppb)	採取地	採取日	分析値(ppb)
水道水			八ヶ岳SA (長野県)	4. 2.1994	3.85 ±0.03
白水町 (名古屋市)	1.21.1994	0.17 ±0.01	双葉SA (山梨県)	4. 2.1994	7.56 ±0.05
	5. 8.1994	0.22 ±0.01	釈迦堂SA (山梨県)	4. 2.1994	2.92 ±0.03
有松 (名古屋市)	8.10.1993	0.26 ±0.01	初狩SA (山梨県)	4. 2.1994	5.22 ±0.04
上郷SA (愛知県)	8.28.1993	0.21 ±0.01	藤野SA (神奈川県)	4. 2.1994	0.42 ±0.01
三方原SA (静岡県)	8.28.1993	0.47 ±0.01	熊取 (大阪府)	2.27.1994	0.031±0.003
牧の原SA (静岡県)	8.28.1993	0.18 ±0.01	湧水		
日本坂SA (静岡県)	8.28.1993	0.17 ±0.01	有松 (名古屋市)	6.20.1993	0.05 ±0.01
富士川SA (静岡県)	8.28.1993	11.0 ±0.2	谷川岳SA (群馬県)	8. 5.1993	0.63 ±0.02
	8.29.1994	8.98 ±0.07	幸清水 (新潟県)	8. 7.1993	0.18 ±0.02
足柄SA (神奈川県)	8.28.1993	15.0 ±0.2	桜清水 (新潟県)	8. 7.1993	0.69 ±0.02
海老名SA (神奈川県)	8.28.1993	10.2 ±0.2	泉端 (山梨県)	4.26.1994	56.0 ±0.4
横須賀 (神奈川県)	1.27.1994	4.21 ±0.08	忍野八海 (山梨県)	4.26.1994	48.0 ±0.3
高井戸 (杉並区)	8.31.1993	1.04 ±0.02	ミネラルウォーター (市販品)		
本郷 (文京区)	3.29.1994	0.83 ±0.01	屋久島 (鹿児島県)	11.12.1993	0.25 ±0.01
東海村 (茨城県)	8.29.1993	0.64 ±0.02	阿蘇野 (大分県)	10.25.1993	7.32 ±0.10
三芳SA (埼玉県)	8. 5.1993	1.36 ±0.03	六甲 (兵庫県)	12. 9.1993	0.16 ±0.01
上里SA (埼玉県)	8. 5.1993	1.94 ±0.04	飛騨 (岐阜県)	8. 6.1993	1.73 ±0.04
赤城高原SA (群馬県)	8. 5.1993	5.89 ±0.09	城端 (富山県)	1.20.1994	2.60 ±0.04
土樽SA (新潟県)	8. 5.1993	1.75 ±0.03	立山 (富山県)	1.10.1994	0.26 ±0.01
大和SA (新潟県)	8. 5.1993	0.54 ±0.02	婦負 (富山県)	12.28.1993	0.98 ±0.03
栄SA (新潟県)	8. 5.1993	0.48 ±0.02	安曇 (長野県)	9. 8.1993	0.11 ±0.01
新津 (新潟県)	8. 6.1993	0.24 ±0.01	甲斐駒 (山梨県)	12.14.1993	0.73 ±0.02
赤塚 (新潟県)	8. 6.1993	0.42 ±0.02	富士三ツ峠 (山梨県)	7.23.1993	15.1 ±0.2
米山SA (新潟県)	8. 9.1993	5.26 ±0.09	富士吉田 (山梨県)	11.15.1993	65.6 ±0.8
名立谷浜SA (新潟県)	8. 9.1993	0.11 ±0.01	下部 (山梨県)	10.22.1993	1.82 ±0.04
連台寺SA (新潟県)	8. 9.1993	0.57 ±0.02	標茶 (北海道)	10.14.1993	10.9 ±0.1
入善SA (富山県)	8. 9.1993	0.18 ±0.02	井戸水		
有磯海SA (富山県)	8. 9.1993	0.24 ±0.01	新津 (新潟県)	8. 7.1993	0.91 ±0.02
小矢部SA (富山県)	8. 9.1993	4.03 ±0.06	河川水		
安宅SA (石川県)	8. 9.1993	0.39 ±0.02	吉野川 (徳島県)	5. 1.1994	0.46 ±0.01
南条SA (福井県)	8. 9.1993	0.11 ±0.01	祖谷川 (徳島県)	5. 1.1994	0.37 ±0.01
神田SA (滋賀県)	8. 9.1993	0.19 ±0.01	勝浦川 (徳島県)	5. 3.1994	0.49 ±0.01
養老SA (岐阜県)	8. 9.1993	0.15 ±0.01	財田町 (香川県)	5. 2.1994	0.64 ±0.01
守山SA (愛知県)	8. 9.1993	0.26 ±0.01	天白川 (名古屋市)	1.18.1994	0.74 ±0.02
	4. 2.1994	0.18 ±0.01	愛知用水 (名古屋市)	2.13.1994	0.22 ±0.01
内津峠SA (愛知県)	4. 2.1994	0.27 ±0.01	海水		
恵那峡SA (岐阜県)	4. 2.1994	0.091±0.004	若松海岸 (伊勢湾)	1.22.1994	1.02 ±0.02
阿智SA (長野県)	4. 2.1994	0.32 ±0.01	雪水		
伊那 (長野県)	4. 2.1994	0.32 ±0.01	白水町 (名古屋市)	2. 3.1994	0.78 ±0.02
駒ヶ岳SA (長野県)	4. 2.1994	0.41 ±0.01	新津 (新潟県)	2. 4.1994	0.49 ±0.02
諏訪湖SA (長野県)	4. 2.1994	1.04 ±0.02			

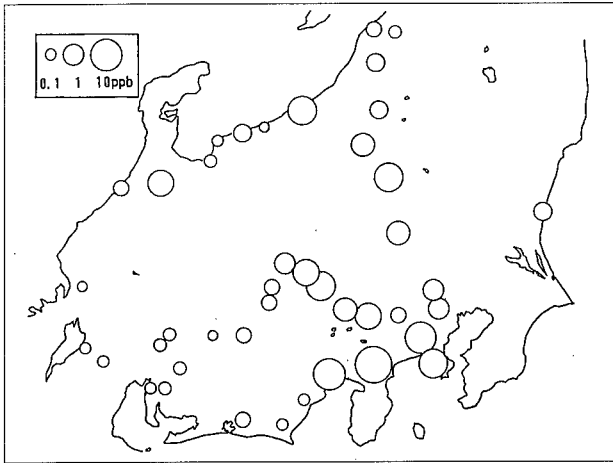


図2 中部日本の水道水のバナジウム濃度
バナジウム濃度は丸印の直径(対数目盛)として示される。直径と濃度の関係は図中にある。¹⁾

バナジウム濃度をまとめた結果である。定量値を丸印の径の大きさ(対数目盛)として示してある。

表1、図2から明らかなように、天然水、水道水中のバナジウム濃度は採取場所による変動が大きい。地球表層部の水は岩石を風化・浸食し、ガス成分や可溶性物質を溶解し移動集積しており、本研究で扱った水試料中のバナジウムを始めとする溶存成分の起源も、ほとんどが岩石からの溶出物質である。水試料中のバナジウム濃度の場所による変動は採取地点近傍の地質や火山噴出物の組成などの地球化学環境を反映しているためと考えられる。

一般に、風化作用は大気圏と岩石圏の境界面における酸化等の化学作用と考えられ、大気圏側から供給された水物質に岩石および土壌中の成分が溶出する現象である。風化作用の進行が岩石の鉱物的および物理的条件により制約されていることも指摘されている。また、岩石類の化学組成に着目し、元素ごとの移動しやすさを議論した研究も知られている。ところが、水物質中の特定の元素に注目し広域に溶存濃度を追跡し、その流域に分布する岩石類の化学組成と比較検討した研究は少ない。

3. 岩石中のバナジウム含有量の相異

地球表層部を構成する岩石のうち、火成岩はマグマの固結により形成されたもので、変成岩や堆積岩類よりも同一岩石種内の化学組成変動が小さい。火成岩の基本的な区分は二酸化ケイ素の含有量でなされており、火山岩の場合その割合の多い順に流紋岩、安山岩、玄武岩、また深成岩の場合は同様に花崗岩、閃緑岩、斑レイ岩などと呼称される。これら火成岩類につき標準岩石として日本地質調査所より配布されているものには、詳しい化学分析値が示されている⁶⁾。表2より二酸化ケイ素の値

表2 主要岩石中の二酸化ケイ素とバナジウム含有量⁶⁾

	SiO ₂ (%)	V (ppm)
花崗岩 (JG-2)	76.95	3.0
流紋岩 (JR-2)	75.65	< 8
流紋岩 (JR-1)	75.41	< 8
花崗岩 (JG-1)	72.30	25
花崗岩 (JG-3)	67.10	73
安山岩 (JA-1)	64.06	105
安山岩 (JA-3)	62.26	172
安山岩 (JA-2)	56.18	130
玄武岩 (JB-2)	53.20	578
玄武岩 (JB-1)	52.17	512
玄武岩 (JB-3)	51.04	383
斑縞岩 (JGb-1)	43.44	640

が高い花崗岩や流紋岩にはバナジウムが乏しく、玄武岩や斑レイ岩など二酸化ケイ素の値が低い岩石にはバナジウムが豊富に含まれており、二酸化ケイ素とバナジウムの火成岩中の含有率には負の相関が認められる。しかも、花崗岩・流紋岩類のバナジウム含有量(3-73ppm)に対し、玄武岩・斑レイ岩類のそれは383-640ppmと高い値を示し、前者の10-200倍となっている。

標準岩石中の微量元素としてはバナジウム以外にも多数の元素について分析値が報告されているが、岩石中の二酸化ケイ素の含有量に対応してバナジウム以上に著しく変動する元素は今のところ知られていない。このことから、天然水中のバナジウム含有量はその周囲に分布する岩石種を知ることで、優れた指標元素の役割を果たすといえる。

4. 富士山周辺の水試料の特徴

表1の中で高速道路サービスエリアの水道水でバナジウム含有量が明瞭に高い富士(静岡県)、足柄(神奈川県)、海老名(神奈川県)などは富士山の南麓に位置し、玄武岩質の岩石や火山灰と地下水との相互作用の可能性が考えられる。また、富士山周辺の湧き水の泉瑞、忍野八海(何れも山梨県)、その湧き水を使用していると思われる市販の飲料水でも高いバナジウム濃度が測定された。筆者等の研究に先立ち富士山麓周辺の湧き水・湖水など天然水中のバナジウム濃度測定の研究⁴⁾⁵⁾が試みられているが、筆者等の方法も含め得られた結果は分析法の違いによらず、互いに矛盾するものではない。富士山周辺は概ね玄武岩質の火山噴出物が厚く発達する地域である。玄武岩質の岩石はバナジウムの含有量が高いことが知られているが、上の結果はこのことを反映している。

5. 日本各地の水試料の特徴

表1における赤城高原（群馬県）のサービスエリアの水道水のバナジウム濃度も高い。これは近くに分布する赤城山に関連する。赤城山の火山噴出物は玄武岩質、安山岩質さらにはデイサイト質まで広範にわたる。しかし、その主体は玄武岩質ないし安山岩質で、これらが厚く分布している。また、米山（新潟県）、小矢部（富山県）の水道水におけるバナジウム濃度も高いが、この付近も火山噴出物が多い地域である。市販飲料水では、富士山以外では阿蘇野（大分県）、標茶（北海道）がバナジウムの含有量が高い。両採水地とも、近くに阿蘇山、阿寒岳という活火山が分布している。

一方、静岡県西部から愛知県、岐阜県にかけての水道水のバナジウム濃度は概して低い値を示している。この地域の地質は東側には新生代の堆積岩類が、西側には白亜期から古第三紀のいわゆる領家花崗岩類および流紋岩類が卓越している。とりわけ、愛知・岐阜両県の内陸域の山地側はバナジウム含有量の低い花崗岩類・流紋岩類が発達しているため、水道水中のバナジウムの濃度が低

いことが推測できる。また、近畿地方、四国地方も新生代の火山噴出物は分布しておらず、熊取（大阪府）の水道水および吉野川（徳島県）などの河川水のバナジウム濃度の低さも上述の観点からよく理解される。

6. 相模川水系と富士川水系の相異

最近筆者等は、山梨県の二つの主要河川である相模川および富士川水系の各地でバナジウム濃度を測定した⁷⁾⁸⁾。相模川水系は富士山の湧水を主な起源とし、山中湖、富士吉田市付近に端を発し、最初ほぼ北に向かい流れ大月市付近で向きを東に変え、相模湖付近で南に流れを変え、最終的には神奈川県平塚市付近で太平洋に流れ込む。一方、富士川水系は山梨県の北部の八ヶ岳あるいは甲府市北部-東部の大規模な花崗岩体に端を発し、甲府市南部で一つに収束し南に流れ静岡県富士市西方で太平洋に流入している。相模川・富士川両水系の各地のバナジウム濃度の分析値は、両水系沿いの岩石の化学的組成に対応して、相模川水系の分析値は富士川水系に比べ高いバナジウム濃度が認められた（図3）。その上で筆者等は、これら両河川沿いに分布する二、三の動・植

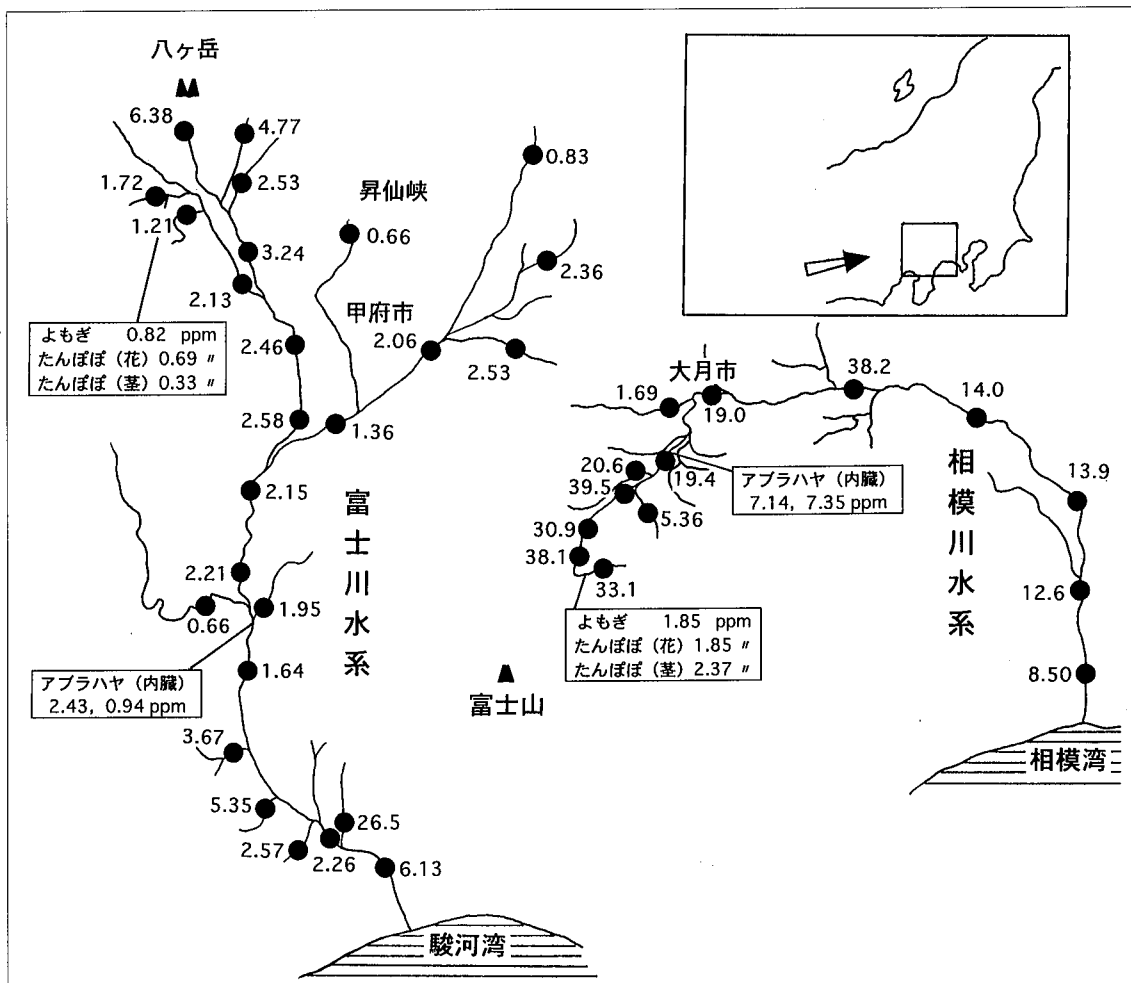


図3 富士川水系および相模川水系におけるバナジウム濃度（水試料はppb）

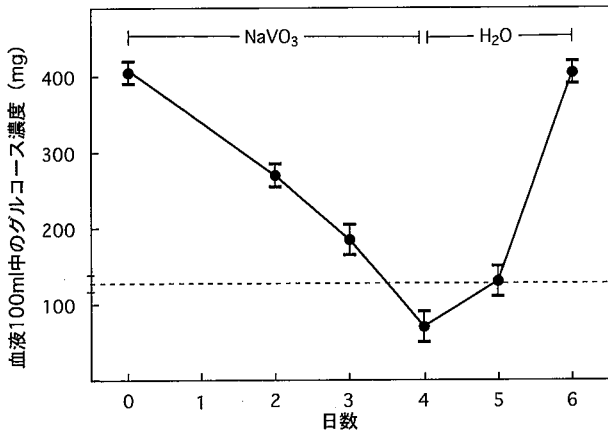


図4 ラットに飲料水と共に与えたNaVO₃の血糖正常化作用¹⁰⁾

物中のバナジウム濃度についても検討した。その結果、相模川水系側から採取された動・植物中のバナジウム濃度は、富士川水系のそれに対し、数倍の高い値が得られた(図3)。このようにバナジウム濃度を分析することにより、分布する岩石の化学的な性質の違いが河川水および動植物に反映されていることが確認できた。

7. 動物におけるバナジウムの濃縮

バナジウムが原索動物のホヤ血球細胞に高濃度に含まれていることが知られている。種々のホヤを分析した研究例によれば、ある種の血球細胞には海水に溶解しているバナジウム濃度の約400万倍にも当たるバナジウムが含まれていることもわかってきた⁹⁾。分類学的に脊椎動物と無脊椎動物の中間に位置する動物が、他の生物には

例を見ない高濃度の遷移金属元素を濃縮していることから、その濃縮機構や生理学的役割に関する研究が進められている。

ホヤに限らず、ベニテングダケにもバナジウムが濃集することは古くから知られており、また海藻からバナジウムを含むタンパク質や、微生物からニトロゲナーゼなどが発見されている。これらのことから、生物界にとってバナジウムは極めて重要な元素であると思われる。

8. 血圧・糖尿病への作用

近年ラットなどの動物により実験的にバナジウムが血糖降下作用に重要な役割を果たすことが明らかになってきている¹⁰⁾。それによると、高血糖鼠動物に、食塩水に溶かしたバナジウム溶液を与えると、血糖値は徐々に低下し、四日後には正常値を示した(図4)。五価のバナジウムが血糖正常化作用を示すことが確認されたのをきっかけにして、バナジウムを用いた糖尿病治療薬の開発が最近世界的に注目されている¹¹⁾。

上に紹介したバナジウムを含む糖尿病治療薬の開発研究の例と、筆者等が行った水道水中のバナジウムの分析結果を関連づけて疫学的に議論するには、筆者等のデータの量がまだ不十分な段階かもしれないが、仮に毎日飲料水から摂取されるバナジウム量が多い程、糖尿病の予防に効果をもたらすとすれば、本州中央部の愛知県、岐阜県のような水道水中に含まれるバナジウムが比較的乏しい地域に住む者には糖尿病による死亡率が高く現れるはずである。ところが、愛知・岐阜両県における実際

表3 糖尿病死の全死亡数に対する百分率¹²⁾

平成3年(%)	
1.41~1.50	北海道
1.31~1.40	青森、茨城、福井、三重、徳島
1.21~1.30	宮城、栃木、千葉、東京、神奈川、富山、静岡、大阪、広島
全国平均1.16→	1.11~1.20 岩手、福島、埼玉、新潟、石川、山梨、岐阜、京都、兵庫、鳥取、香川、高知、福岡、鹿児島
	1.01~1.10 山形、群馬、長野、愛知、奈良、島根、愛媛、長崎、沖縄
	0.91~1.00 秋田、滋賀、和歌山、岡山、山口、佐賀、熊本、大分、宮崎
昭和58年(%)	
1.61~1.70	石川
1.51~1.60	北海道
1.41~1.50	青森、徳島
1.31~1.40	静岡、滋賀、兵庫
1.21~1.30	岩手、宮城、群馬、千葉、東京、神奈川、新潟、富山、福井、三重、大阪、広島、愛媛、鹿児島
全国平均1.20→	1.11~1.20 茨城、埼玉、愛知、京都、奈良、香川、高知、福岡、佐賀、熊本
	1.01~1.10 福島、山梨、長野、岐阜、大分、沖縄
	0.91~1.00 秋田、山形、和歌山、鳥取、岡山、山口、長崎、宮崎
	0.81~0.90 栃木

の糖尿病死の割合は高くなっていない(表3)¹²⁾。むしろ、全国平均よりも低い傾向が認められる。水道水の分析をおこなった地点が少ない現時点でこのような議論をすること自体に無理があるのかもしれない。また、日常の飲料水のバナジウム濃度と糖尿病との関連を調べるには、県単位よりもさらに細かく市町村レベルの比較の方が望ましいのかもしれない。そのためには、我々の分析をより詳細に地域別実施する必要がある。我々は糖尿病はもちろん、糖尿病治療薬についての専門家ではないが、糖尿病にはバナジウムよりももっと本質的に影響を及ぼす別の因子があるものと考えている。

現時点では、日常的に摂取される飲料水中のバナジウムが糖尿病の治療にどのような役割を果たすか、また逆に、バナジウムが他のどのような疾患の要因になるのか明らかな結論を出すには至っていない。しかし、本研究でバナジウムに関する限り、分布する岩石類の化学的な違いが河川水や地下水などの天然水に反映され、その水を摂取して生きている動物・植物中にもバナジウムは濃度の違いとして系統的に現れていることが明白になった。言い換えれば、分布する岩石化学的な相違が、そこに生育する動・植物にまで反映しているといえる。この現象が人間にまで及ぶか否かについては今後の問題である。

我々の水試料中のバナジウムに関する研究は開始されたばかりである。我々が用いた放射化分析法は高感度で信頼性が高い簡便な分析法である。多くの分析値を議論の展開に必要とする環境科学、地球科学の研究に本法を生かすよう努めていきたい。

文 献

- 1) 酒井陽一, 大下一政, 戸村健児, 輿水達司 (1994) 前分離濃縮/中性子放射化分析による水試料中のバナジウムの定量. 分析化学, 43, 919-924.
- 2) Sakai, Y., K. Ohshita, S. Koshimizu, and K. Tomura, (1997) Geochemical study of trace vanadium in water by preconcentrational neutron activation analysis. J. Radioanal. Nucl. Chem. 216, 203-212.
- 3) 木村 優, 吉見有美子 (1991) 活性炭を用いる水中のバナジウム (V) の分離濃縮法—水道水および河川水中の微量バナジウム (V)—. 日本化学会誌, 361-366.
- 4) 岡部史郎, 森永豊子 (1968) 駿河湾に流入する河川とその河口海域におけるバナジウムおよびモリブデン. 日本化学雑誌, 89, 284-287.
- 5) 岡部史郎, 紫崎道広, 及川智文, 川口賀弘, 二本木均 (1981) 富士山周辺の湧水および湖沼水の地球化学的研究(1). 東海大学紀要海洋学部, 14, 81-105.
- 6) Ando, A., H. Kamioka, S. Terashima, and S. Itoh, (1989) 1988 values for GSJ rock reference samples, "Igneous rock series". Geochem. J. 23, 143-148.
- 7) 輿水達司, 酒井陽一, 大下一政, 戸村健児 (1996) 中性子放射化分析による富士川水系におけるバナジウムの起源と挙動. 第40回放射化学討論会講演予稿集, 266-267.
- 8) 輿水達司, 酒井陽一, 戸村健児, 大下一政, 三井潔 (1997) 富士川水系および相模川水系におけるバナジウムの循環. 第34回理工学における同位元素研究発表会要旨集, 132.
- 9) Michibata, H., T. Terada, N. Anada, K. Yamakawa, and T. Numakunai, (1986) The accumulation and distribution of vanadium, iron, and manganese in some solitary ascidians. Biol. Bull., 171, 672-681.
- 10) Meyerovitch, J., Z. Farfel, J. Sack, and Y. Shechter, (1987) Oral administration of vanadate normalizes blood glucose levels in streptozotocin-treated rats. J. Biol. Chem., 262, 6658-6662.
- 11) 桜井 弘 (1986) バナジウムと糖尿病. ファルマシア, 31, 593-597.
- 12) 厚生省大臣官房統計情報部人工動態統計課 (1984, 1993) 都道府県, 主要死因別死亡者数 (1983年), (1991年). 人口動態統計 (厚生省).