

R-02-2004

YIES Research Report

山梨県環境科学研究所研究報告書

第9号

プロジェクト研究

「山梨県の水環境（特に地下水）の化学的特性の把握」

平成15年度

山梨県環境科学研究所



R-02-2004

YIES Research Report

山梨県環境科学研究所研究報告書

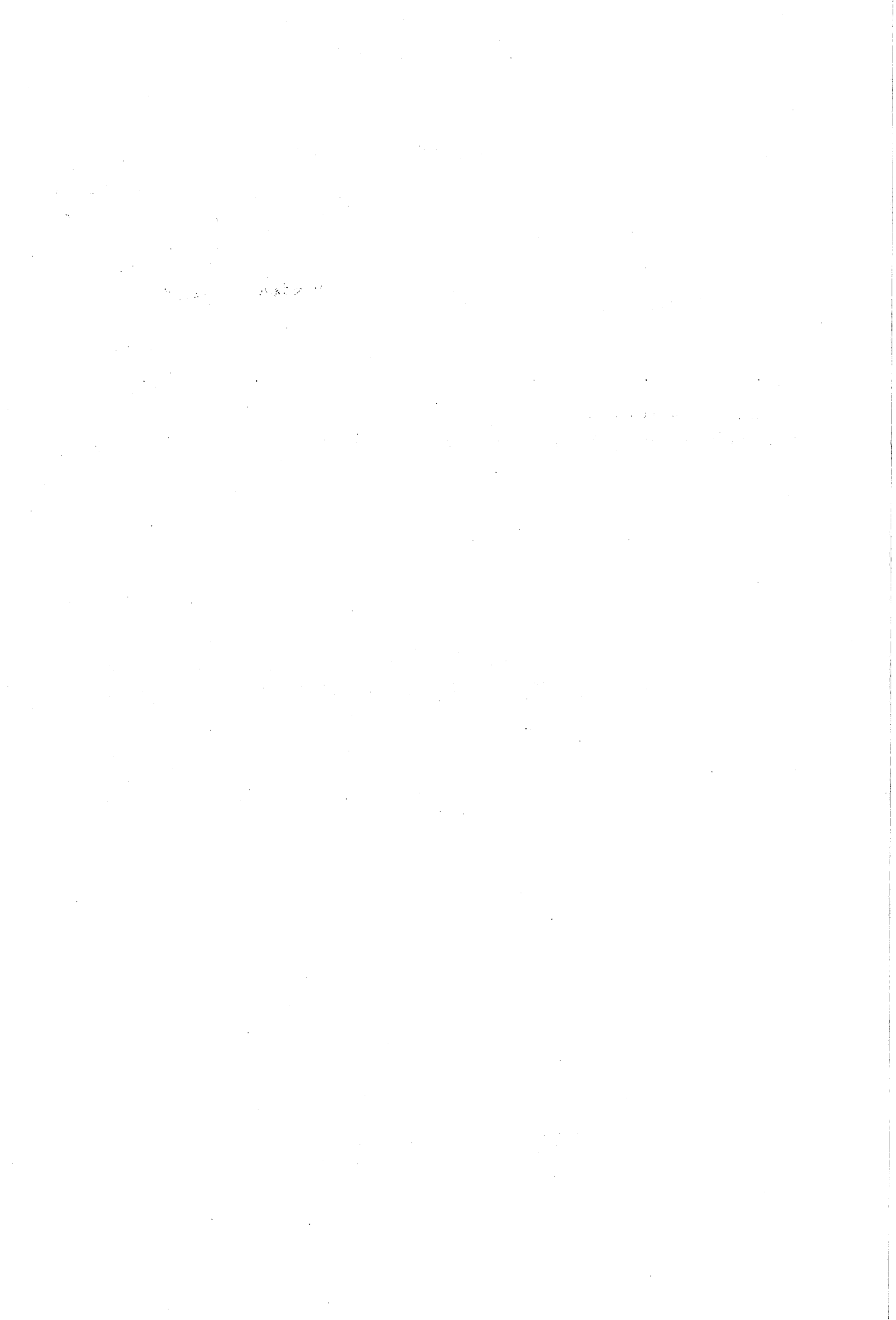
第9号

プロジェクト研究

「山梨県の水環境（特に地下水）の化学的特性の把握」

平成15年度

山梨県環境科学研究所



はじめに

水が生命活動の維持、人々の日常生活、そして産業活動にとって非常に重要であることは言うまでもない。地下水、河川水、湖沼水の水質の悪化や水量の減少は、健康・日常生活・産業活動等に重大な影響を及ぼすことは、過去の歴史をみれば明らかである。多くの場合人間活動の直接的な影響で水質の悪化や水量の減少が起きている。それに加え地球レベルの気候変動は地域の降水量を変化させ、水資源量が増える可能性も考えられている。水は重要な資源であり、その量と質を良好に保つために、これまでもそして現在も様々な研究や国と地方自治体の行政活動が行われている。

山梨県の水道水源の約70％は地下水（湧水を含む）に依存している。地下水を利用したミネラルウォーターの生産量は全国1位である。山梨県にとって地下水は特に重要な資源である。また、毎年大勢の観光客が訪れる富士北麓地域にとって富士五湖は重要な観光資源であり、その水質を良好に保つことも重要課題である。

山梨県にとって重要な水資源について、水に含まれる成分の分析を中心として新しい手法を用いて現状を把握するとともに、そこから得られた知見を元に、健康影響についても研究することが本研究の目的である。

研究の結果、山梨県の地下水の特性に関する新たな知見も得られた。また、従来から報告されている富士山地下水中に多く含まれる微量元素バナジウムについても富士北麓地域を中心として詳細な濃度分布地図も得られた。さらに、富士五湖の水質をリモートセンシングによって面的に把握する新しい手法も開発された。これらの研究成果は、山梨県の水資源を考える上で今後大いに役立つものと確信している。

平成15年12月

山梨県環境科学研究所

所 長 入 来 正 躬

目次

はじめに

概要編

研究体制	1
目的	1
サブテーマ1. 山梨県の地下水の化学的特性の把握	1
サブテーマ2. 富士山の地下水に多く含まれる微量元素バナジウムの健康影響	2
サブテーマ3. リモートセンシングによる富士五湖の水質測定	3

本編

サブテーマ1. 山梨県の地下水の化学的特性の把握

目的	5
調査方法	5
調査結果と考察	6
ICP-質量分析計による地下水中微量元素の測定	6
主要陰イオンおよびケイ酸	16
「公共用水域及び地下水の水質測定結果」の地理情報化	19
おわりに	22
謝辞	22
引用文献	22

サブテーマ2. 富士山地下水に多く含まれる微量元素バナジウムの健康影響

はじめに	25
実験方法	27
(1) バナジウムの健康影響（毒性）に関する検討	27
(2) バナジウムのインスリン様作用に関する検討	27
1) バナジウム水溶液（0.1～100 mg/L）で10週間飼育	27
2) バナジウム水溶液（0.1, 100 mg/L）で3世代飼育	27
3) 富士山地下水で28週間飼育	27
(3) 各種測定法	27
結果ならびに考察	28
(1) バナジウムの健康影響（毒性）に関する検討	28
動物の体重変化	28
解剖所見ならびに臓器重量	32
血液検査	33
生化学的検査	33
まとめ	34
(2) バナジウムのインスリン様作用に関する検討	34
1) バナジウム水溶液で10週間飼育	34
動物の体重変化	34
血糖値変化ならびに飲料水とエサの摂取量	34
経口ブドウ糖負荷試験ならびにヘモグロビンA1c量	35

総コレステロールならびに中性脂肪	36
臓器中バナジウム蓄積量	37
臓器重量ならびに毒性指標	37
まとめ	40
2) バナジウム水溶液 (0.1および100 mg/L) で三世代飼育	40
動物の体重変化	40
血糖値変化ならびに飲料水とエサの摂取量	40
経口ブドウ糖負荷試験ならびにヘモグロビンA1c量	41
総コレステロールならびに中性脂肪	43
臓器重量	43
まとめ	43
3) 富士山地下水で28週間飼育	44
動物の体重変化	45
血糖値変化ならびに飲料水とエサの摂取量	45
経口ブドウ糖負荷試験ならびにヘモグロビンA1c量	46
総コレステロールならびに中性脂肪	46
臓器重量	47
臓器中バナジウム蓄積量	47
まとめ	48
総括	48
引用文献	48

サブテーマ3. リモートセンシングによる富士五湖の水質測定

1. はじめに	51
富士五湖の水質計測の概要	51
富士五湖の形態と水理	51
富士五湖の水質の変遷	53
富士北麓流域下水道	55
本研究の目的	55
2. リモートセンシングによる水質測定の原理	56
リモートセンシングとは	56
電磁波の波長帯域	56
ランドサット衛星について	56
水質分布の観測原理	56
温度分布の観測原理	58
3. 定性的水質分布図	59
使用データ	60
定性的水質分布図作成手順	60
4. 相対的水温分布図	62
使用データ	62
相対的水温分布図作成手順	62
まとめ	63
データ提供	64

概 要 編

プロジェクト研究の概要

研究テーマ	
「山梨県の水環境（特に地下水）の化学的特性の把握」	
研究期間	
平成9～12年度（4年間）	
研究体制	
山梨県環境科学研究所	
環境生化学研究室	
主幹研究員	瀬子 義幸
研究員	長谷川達也
科学技術庁STAフェロー	
丁 文軍	
助手	小林 仁美
環境計画学研究室	
特別研究員	宮崎 忠国
研究員	杉田 幹夫
助手	佐藤 美紀
助手	内田 美香
緑地計画学研究室	
研究員	池口 仁
山梨大学工学部	
教授	竹内 邦良
助手	小林 拓

目的
山梨県内の地下水、富士五湖湖水を中心として新しい手法を用いて含有成分を分析し、山梨県にとって重要な

水資源の現状を把握すると共に、富士北麓地域の地下水に比較的多く含まれる微量元素バナジウムの健康影響を明らかにすることを研究目的としている。

山梨県では、水道水の約70％を地下水に依存している。また、地下水を利用したミネラルウォーターの生産量は全国一位を誇っている。山梨県にとって、地下水の質と量を良好に保つことは重要課題である。また、毎年大勢の観光客が訪れる富士北麓地域では、富士五湖は重要な観光資源でありその水質を良好に保つことも重要課題の一つである。

地下水、河川水、湖沼水については水質の環境基準が設けられており、行政的な監視が義務づけられているため、環境基準のある項目については県大気水質保全課を中心に継続的に水質調査が行われている。本研究では、行政的に行われてきた水質測定とは別に、近年測定技術の発達してきた微量元素を中心に分析を行い、山梨県の地下水の現状を把握した。また、富士五湖の水質については、衛星データを利用したリモートセンシング技術を活用し、湖全体を面的にとらえる手法を開発し分析を行った。

一方、従来から数多く報告されているように、本研究でも富士山の地下水には他の地域より高い濃度の微量元素バナジウムが含まれていることが確認できた。バナジウム化合物には糖尿病治療効果があるため、富士山地下水の飲用による糖尿病治療の可能性を糖尿病動物を用いて検討すると共に、健康動物を用いて長期飲用の毒性の有無についても検討した。

サブテーマ1：
山梨県の地下水の化学的特性の把握
環境生化学研究室
環境計画学研究室
緑地計画学研究室

- 1) 研究目的
地下水に含まれる微量元素を中心として含有成分を分析し、地下水水質の地域特性の概要を明らかにすることを目的とした。また、これまで県大気水質保全課が中心となって行ってきた地下水水質調査の結果をデジタル化し、これらも含めて得られた結果を地理情報化システムを用いて解析した。
- 2) 研究成果の概要
ICP-質量分析計を用いて県内各地から採取した地下水について71元素の濃度を半定量分析したところ、37の元素がそれぞれ全ての試料あるいは一部の試料で検出された。全県的にほぼ同程度の濃度だった元素、一部の地域で相対的に濃度の高い井戸が多い元素、一部の地域での

み検出された元素など、県内の濃度分布は元素ごとに異なっていた。

図1には、1997年8月に調査したバナジウム、タングステン、ルビジウム、ウランの例を示してある。バナジウムは従来から富士山の地下水に比較的多く含まれることが知られており、本調査研究でもそのことが確認できた。タングステン、ルビジウム、ウランについては過去の報告はなく、ICP-質量分析計を活用した我々の調査研究で、はじめてこれらの元素の地下水中濃度の地域差が明らかとなった。その他、ハロゲン元素の臭素やヨウ素は甲府盆地ならびにその周辺で相対的に高いことなども明らかとなった。おしなべて、甲府盆地とその周辺で濃度が相対的に高い元素が多く、富士山北側地域や県南部では濃度の低い元素が多かった。

イオンクロマトグラフィーを用いた主要陰イオンの測定結果では、甲府盆地を取り囲む地域で硝酸イオン濃度が高い傾向にあり、地下水の環境基準（硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素）を超えている地点も少なからずあった。

フッ素濃度は、甲府盆地ならびに富士山北側の地域で比較的高かった。

県大気水質保全課が公開している地下水水質測定結果を地理情報化し、汚染状況がより明確に把握できるようになった。また、データの蓄積量が多い水素イオン濃度(pH)を地図上にプロットしたところ、富士山北部地域と甲府盆地東側では弱アルカリ性の傾向があり、県北西部、北部、南部、東部地域では弱酸性の地下水が多いことが明らかとなった。

地下水水質基準項目や要監視項目の測定のみならず、微量元素やイオン類の測定を行い、得られたデータを地理情報化することにより、県内地下水の化学的特性がより明らかとなった。今後、水中酸素水素安定同位体比や溶解成分の安定同位体比なども測定し、土地利用状況、地質等の地理情報と組み合わせて解析をすれば、県内地下水の水質特性と環境要因との関連などもより明らかになり、地下水水質の保全に寄与するものと考えられる。

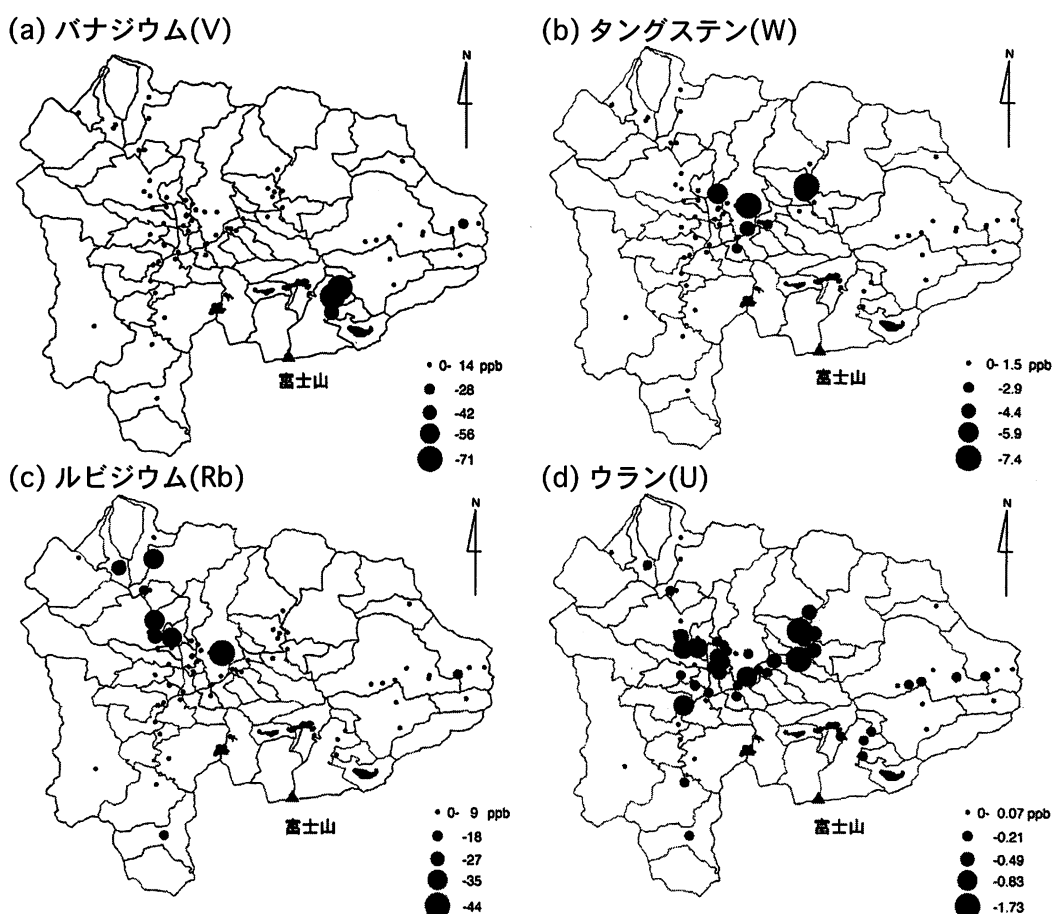


図1 山梨県内の地下水中微量元素の特徴(1997年8月採水)

[瀬子ほか 1999年発表: Biomed. Res. Trace Elements, 10(3), 271-272, 1999 (一部改変)]

サブテーマ2:

富士山の地下水に多く含まれる微量元素バナジウムの健康影響

環境生化学研究室

1) 研究目的

富士山の地下水には他の地域より高い濃度の微量元素バナジウムが含まれていることは古くから報告されており、本報告書の地下水調査研究でもこのことを確認した。富士山周辺では地下水が水道原水として使われており、地域住民はこの水を飲んでいる。一方、バ

ナジウム化合物にはインスリン様作用があり、糖尿病モデル動物の高血糖が顕著に改善されることが報告されている。また逆に、健康にとって有用な微量元素でも摂取量が多くなれば有害な作用が出てくる場合がある。そのため、本研究では、富士山の地下水に含まれるバナジウムレベルが健康に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、毒性学的側面と糖尿病改善効果の側面から実験動物を用いて研究した。

2) 研究成果の概要

毒性学的研究: 精製水、富士山地下水、0.1mg/Lのバナジウムを含むメタバナジン酸アンモニウム溶液を

それぞれ飲料水として雄及び雌のICRマウスに5週齢から60週齢まで最長で390日間飲ませ、体重及び臓器重量測定、赤血球数等の血液検査、血液生化学検査（GOT、GPT、BUN、総コレステロール）を行った。何れの測定項目も、精製水を飲ませた対照群と地下水投与群ならびにバナジウム溶液投与群の間に有意な差は認められなかった。富士山地下水そのものあるいはそれと同レベルのバナジウムを含むメタバナジン酸アンモニウム溶液を長期間飲用しても、悪影響はないものと考えられた。

糖尿病改善効果に関する研究：遺伝的糖尿病モデル動物KKマウス（雄）に0～100mg/Lのバナジウム（メタバナジン酸アンモニウム溶液）を含む飲料水を5週齢～15週齢まで与えた。バナジウムを含まない水を与えた対照群では、経時的な血糖値の上昇が認められたが、100mg/Lバナジウム溶液を与えた群では、血糖値の上昇が抑制され、糖尿病改善効果がみられた（図2）。しかしながら、0.1、1、10mg/L溶液を与えた群

の血糖値は対照群との間に有意差は認められず、糖尿病改善効果はなかった。この実験とは別に、富士山地下水をKKマウスに28週間与える実験も行ったが、血糖値や経口ブドウ糖負荷試験の結果に改善は認められなかった。

富士山地下水と同程度のバナジウム（0.1mg/L）（メタバナジン酸アンモニウムを使用）を含む水を雌雄のKKマウス（第1世代）に飲ませながら繁殖を行い、第2, 3世代のマウスを作成し、経世代的なバナジウム投与の影響をみる実験を行った。血糖値測定や経口ブドウ糖負荷試験を行ったが、何れの世代でも精製水を与えた対照群とバナジウム投与群の間に差は認められなかった。

以上の結果から、100mg/L程度の高濃度のバナジウムを含む飲料水には高血糖を改善する働きがあるものの、富士山地下水に含まれるレベル（0.1mg/L）のバナジウムには、糖尿病の高血糖を改善する働きはないものと考えられた。

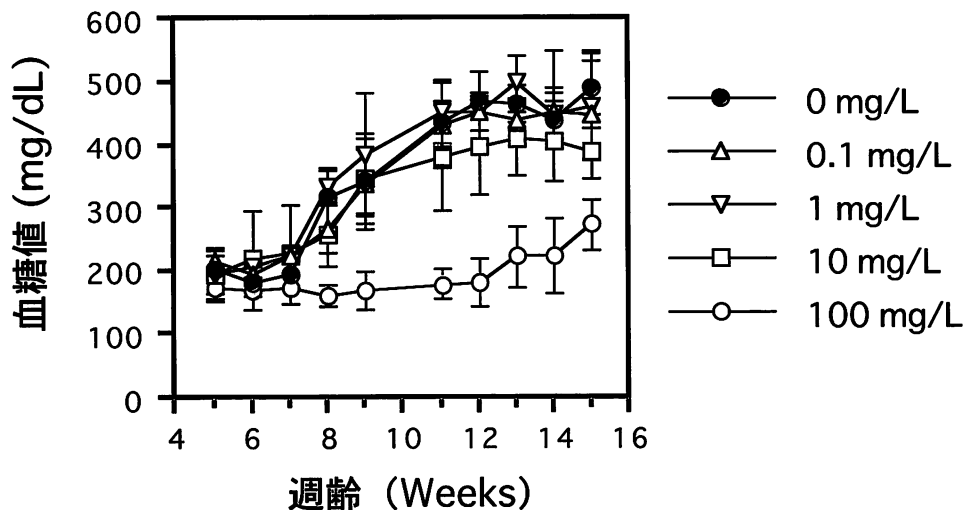


図2 バナジウム含有飲料水を与えて飼育した糖尿病モデル動物の血糖値変化

サブテーマ3.

リモートセンシングによる富士五湖の水質測定 環境計画学研究室

リモートセンシングでは、光領域(可視光域、近赤外域、中間赤外域)、熱赤外域、マイクロ波域など、可視光域以外にもいろいろな波長域の電磁波を利用している。現在、リモートセンシングで主に利用されている電磁波の波長域は、可視光線（波長0.4～0.7μm）、赤外線の一部（0.7～14μm）、およびマイクロ波（1mm～1m）である。ランドサット（LANDSAT）衛星は地球を観測する人工衛星の代表的なものである。この衛

星に搭載されたTMセンサは地球表面を可視域から熱赤外域までの7つのバンドで観測する。

本研究では、複数の観測時期のランドサット衛星画像を用いて、湖水面領域を切り出し、定性的水質分布図および相対的温度分布図の作成を行った。

定性的水質分布図

水質パラメータを、水面の分光反射データから直接的に観測することは出来ない。しかし、水質パラメータと分光反射特性との間の関係を導くことが出来れば、水面の分光反射データから間接的に水質を計測することが可能である。例えば、土砂侵食による多量の懸濁物質を含んだ水は、周囲の澄んだ水に比較して、反射率が際立って高くなる。このため、可視光域の反

射率の大小で水質の定性的把握が可能である。

本研究では、衛星画像から水域の範囲を切り出した後、可視バンドをカラーレベルスライス表示することにより、定性的水質分布図を作成した。ランドサット衛星TMセンサの観測バンドのうち、可視バンドに相当するのは、バンド1から3までである。水質の変化による水面反射率の変化を把握する目的で、水面における観測値の範囲が大きいバンド1の観測値を利用して、レベルスライス表示による定性的水質分布図作成を行った。本研究では、1995年5月18日および2000年4月29日観測のランドサットTMデータから河口湖・山中湖の定性的水質分布図を作成した（図3）。1995年の定性的水質分布図では、河口湖の東側が西側よりも相対的に汚濁し、山中湖の北側が南側よりも相対的に汚濁していたことがわかった。また、2000年の定性的水質分布図では、河口湖の南側が北側よりも相対的に汚濁し、山中湖の南側を中心に広い範囲に汚濁領域が広がっていたことがわかった。

相対的水温分布図

物体が放出する電磁波の強さや波長分布は物体の温度と物質によって決まり、熱放射と呼ばれる。衛星による熱放射エネルギーの測定には熱赤外バンドが利用される。ランドサット衛星TMセンサの観測バンドのうち、熱赤外バンドに相当するのは10.40～12.50μmの波長域を観測するバンド6である。本研究では、ランドサット衛星画像から河口湖・山中湖を含む水域を切り出し、ランドサットTMバンド6について、観測値の大小に応じて色を割り当てて相対的な水面温度分布画像を作成する。本研究では、1995年5月18日および2000年4月29日観測のランドサットTMデータから河口湖・山中湖の相対的水温分布図を作成した（図4）。作成した相対的水温分布図から1995年、2000年の両時期において、河口湖では東側が西側よりも相対的に表面水温が高い傾向であり、山中湖では湖岸部が中心部より相対的に表面水温が高い傾向であることがわかった。

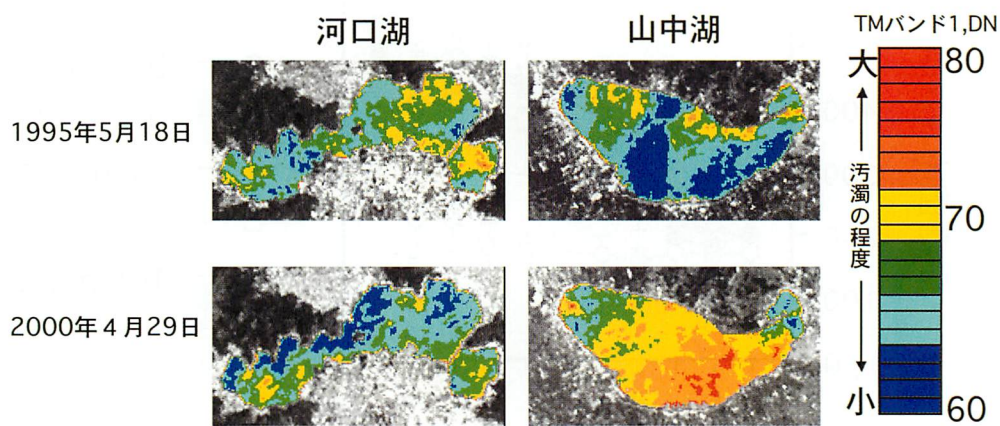


図3 ランドサットTMデータから作成した河口湖・山中湖の定性的水質分布図
（画像の範囲は何れも東西5.5km、南北3km）

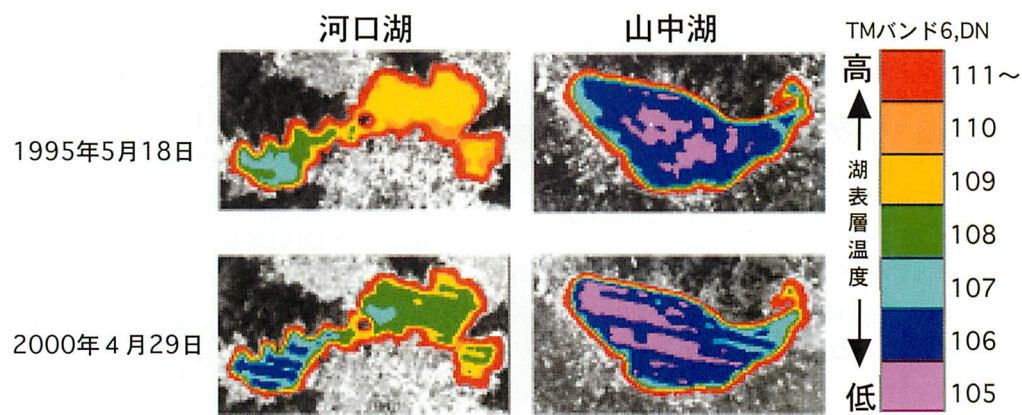


図4 ランドサットTMデータから作成した河口湖・山中湖の相対的水温分布図
（画像の範囲は何れも東西5.5km、南北3km）

本 編

山梨県の地下水の化学的特性の把握

瀬子義幸、長谷川達也、小林仁美（環境生化学研究室）

杉田幹夫、宮崎忠国（環境計画学研究室）

池口 仁（緑地計画学研究室）

目的

水資源は、産業活動や人々の日常生活に不可欠なものである。また、人の健康にも様々な形で深く関わっている。特に、飲料水として用いる水道水は、有害な化学物質や微生物を一定レベル以上に含まないように管理されているが、水源の水質の善し悪しは水道水の質に影響する。水道、あるいは簡易水道の水源は、全国平均では約30%が地下水に依存しているのに対し、山梨県では約70%が地下水（湧水を含む）に依存している。また、ミネラルウォーターの生産量は全国第一位で、国内産のミネラルウォーターの半分以上は山梨県で生産されている。このように、地下水は山梨県にとって非常に重要な資源である。

一方、人間活動は地下水の質や量に大きな影響を与えることがある。有機塩素系化合物による地下水汚染、地下水の過剰なくみ上げによる地盤沈下、肥料や家畜の尿による硝酸汚染等は日本各地で問題となっている。

山梨県では、大気水質保全課が中心となって県衛生監視指導センターや県衛生公害研究所と共に地下水のモニタリングや汚染が起きたときの対応等を行っている。本調査研究では、これらの部署の協力を得ながら、通常のモニタリングでは測定していない地下水の水質を調査することにより、山梨県の地下水の特徴や現状をより明らかにし、地下水の適切な保全と活用を目指すことを目的としている。また、これまで県が行ってきた地下水調査データをデジタル化し、地理情報システムを用いて解析することも試みた。

調査方法

採水：県が毎年行っている地下水モニタリングに同行し、本調査研究用の試料をポリプロピレン製容器に採取した。また、研究員が同行できない場合は、採水を担当している保健所の職員に採水を依頼した。採水は、1997年8月（18日～26日、9月12日の1検体を含む）、1998年1月（12日～29日）、8月（17日～25日、9月12日の1検体を含む）、1999年1月（11日～20日）、2000年8月（8月29日～30日、9月6日の1検体を含む）に行った。

試料の処理：試料は保冷して持ち帰り、その日の内に0.45ミクロンのニトロセルロース製フィルターで濾過した。ろ液について、各種微量元素、主要陰イオン、ケイ酸を測定した。

微量元素測定：試料100mlに高純度硝酸（電子工業用）を2ml添加したものを測定試料とした。ICP-質量分析計（ICP-MS、HP-4500、横河アナリティカルシステムズ社）を用いて71元素について半定量分析、あるいは一部の元素については定量分析を行った。ブランク試料は超純水（ミリQICP-MS、日本ミリポア（株））に同様に硝酸を加えたものを用いた。測定までの間は、室温保存とし採水日から1週間以内に測定した。

主要陰イオンの測定：イオンクロマトグラフィー（日本ダイオネクス社製）の装置を用いた。分離カラムはAS12Aを用いた。試料は4℃に保存し、採水から2日以内に測定を行った。

ケイ酸の測定：衛生試験法注解（日本薬学会1995）に準じて、モリブデン酸アンモニウムを用いた比色法で行った。測定は、4℃に保存した試料について採水の翌日に行った。

過去の地下水データのデジタル化：山梨県（大気水質保全課）が毎年報告している「公共用水域及び地下水の水質測定結果」のうち地下水調査がはじまった平成2年度から平成13年度（山梨県1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2002, 2003）について、地下水の測定結果部分をスキャナーで取り込み、OCR（optical character reader）ソフト

（e.Typist ver.7.0、メディアドライブ株式会社）を用いて測定値をデジタル化した。

地理情報システム（GIS、Geographical Information System）ソフト：フリーウェアソフトMANDARAを用いた。また、市町村境界線や標高データは国土交通省がインターネットで公開しているものを用いた。大気水質保全課の調査では、採水ポイントの地図上の厳密な位置は公開しないことを前提に、井戸所有者の同意を得て地下水採取を行っているため、緯度経度は「字」レベルの代表的な地点の緯度経度を用いた。緯度経度の読みとりには、インターネット経由で利用できるMapfan.net（インクリメントP（株））を利用した。採水地の

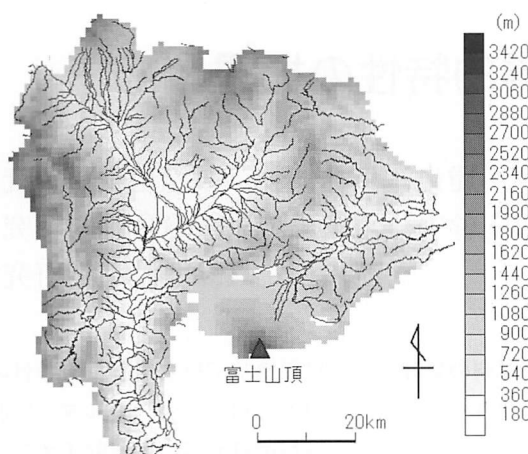


図1 山梨県の標高と1級河川

「字」レベルまで住所を入力して得られる代表点の緯度経度を用いた。

調査結果と考察

ICP-質量分析計による地下水中微量元素の測定

ICP-質量分析計は水に含まれる微量元素を高感度かつ多元素同時に短時間で測定できる装置である。この装置を用いて山梨県内の地下水の特徴を探るために、県内各地から採水された地下水について微量元素濃度を半定

量分析モードで測定した。この装置で分析できる元素は表1に示す通りで約71元素である。今回用いた半定量分析では検量線を用いていないため、装置の測定ソフトによって元素ごとに設定されている係数を用いて測定カウントから濃度を算出させた。同じ試料について検量線を用いてバナジウム濃度を測定してみたところ、半定量分析の約1/2の値であった。そのため、図に示した濃度は50%程度の誤差がある可能性があるが、微量元素濃度のオーダーと地域差を探るためには十分使うことが出来る。

測定の結果、表1に示す37元素が検出された。1998年8月に採水した71検体の井戸水についての測定結果の一部を図2に示す。検出された元素のうちナトリウム (Na)、マグネシウム (Mg)、カリウム (K)、カルシウム (Ca) は、地下水に含まれる濃度が高すぎてICP-質量分析計では測定できない場合が多かったため、図2にはこれらの元素のデータは示していない。

図中の円の中心が採水地点を示し、円の大きさが濃度を示す。濃度と円の面積が比例している。元素が検出されなかったり、他の地点より濃度が非常に低い場合は図中には円が示されていない。また、他と比較して異常に濃度の高い採水地点が1つでもあると、その他の地点の円の大きさは相対的に小さくなるため地域差が目立たなくなる場合があるため注意を要する。

リチウム (Li) : 井戸ごとの濃度差が大きいが、富士山

表1 ICP-質量分析計で分析した元素と県内地下水から検出された元素（周期律表）

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
	1																	2		
1	H																	He	1	
	3	4											5	6	7	8	9	10		
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	2	
	11	12											13	14	15	16	17	18		
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	3	
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	4	
	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54		
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	5	
	55	56	57~71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86		
6	Cs	Ba	L	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	6	
	87	88	89~103																	
7	Fr	Ra	A																	
				57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71		
				L	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Ru	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
				89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103		
				A	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

県内地下水から検出された元素の例

3	← 原子番号
Li	← 元素記号

ICP-質量分析計で測定した元素の例

4	← 原子番号
Be	← 元素記号

北側の地域では濃度が比較的低かった。

ホウ素 (B) : 甲府盆地で比較的高い傾向があった。また、リチウム同様富士山北側の地域では濃度が低い。県東部に濃度の高い地点があったが、その周辺の濃度は高くなかった。ホウ素は県大気水質保全課の地下水モニタリングでも平成10 (1998) 年度から測定しており、平成10 (1998) ~平成13 (2001) 年度結果を図9-(b)に示してある。1つだけ濃度が高い採水地点があったため、相対的に他の地点のデータは小さな円で示されているが、同様の地域差が認められている。

アルミニウム (Al) : 甲府盆地から県北西部にかけては検出された地点が少なく、県東部で濃度が高い傾向が見られた。また、富士山北部地域でも甲府盆地より濃度が高い傾向が認められた。

ケイ素 (Si) : 20,000 $\mu\text{g/L}$ (20 mg/L) 前後と他の元素と比べると、何れの地点でも高い濃度で含まれている。甲府盆地でやや濃度の高い地点が認められるが、地点間の濃度差が比較的小さい。ケイ素はケイ酸として地下水に含まれていると思われるが、比色法で測定したケイ酸の場合 (図6-(e)) と同様の傾向である。

スカンジウム (Sc) : 多くの地点で検出されていて、井戸ごとの差、地域差がほとんどない元素であった。

チタン (Ti) : 井戸間の差や地域差が少ない元素であった。

バナジウム (V) : 富士山北側の地域で高く、他の地域の濃度は低かった。この図 (図2-2-(a)) では、富士山北側地区の地下水中濃度が100 $\mu\text{g/L}$ 以上で表示されているが、半定量分析であったため生じた誤差であると思われる。我々は、富士山北側の約100本の井戸についてバナジウム濃度を測定しているが、最もバナジウム濃度が高い地下水で100 $\mu\text{g/L}$ 程度であった (Seko et al. 2003)。

クロム (Cr) : 大きな地域差は認められなかったが、県東部で濃度が低い傾向が認められた。

マンガン (Mn) : 甲府盆地内に100 $\mu\text{g/L}$ 濃度の高い4地点があるため、他の地点の濃度が小さく表示されているが、100 $\mu\text{g/L}$ の地点を除いて表示しても甲府盆地から笛吹川上流にかけて濃度の高い地点が認められた。富士山北側の地域では濃度が低かった。

鉄 (Fe) : 甲府盆地内で高い傾向が認められた。

コバルト (Co) : 甲府盆地内で高い傾向が認められた。富士山北側地域と県東部地域ではほとんど検出されていない。

ニッケル (Ni) : 地域差は顕著でないが、県東部でやや濃度の高い地点が認められた。

銅 (Cu) : 富士山北側地域では濃度が低い傾向が認められた。

亜鉛 (Zn) : 甲府盆地内と笛吹川上流方面で濃度の高い

地点が認められた。県東部と富士山北側地域では低かった。甲府盆地内での井戸間の差も大きい。

ガリウム (Ga) : 最も濃度の高かったのは、県南西部の地点であったが、比較的濃度が高い地点が甲府盆地の北東部ならびに北西部方面に認められた。井戸間の濃度差も大きい。

ゲルマニウム (Ge) : 井戸間の濃度は比較的少なかった。大きな地域差は認められなかったが、富士山北側地域では低い傾向であった。

ヒ素 (As) : 濃度の高い地点が1点だけ認められたが、その他の地点の濃度は低かった。県大気水質保全課の報告書では、平成2 (1990) 年度に地下水調査を開始した時点から継続的に調査しており、その結果 (図9-(a)) と同様であった。

臭素 (Br) : 甲府盆地から釜無川上流方面の県北西部にかけて濃度が高く、富士山北部地域、県東部地域、及び県南部地域ではほとんど検出されなかった。臭化物イオン (Br^-) はオゾンと反応すると、発ガン物質の可能性がある臭素酸を生成することがわかっており (宮田・寺島 1997)、水道水として水を浄化するときにオゾン処理法を用いる場合は注意を要する。但し、水のオゾン処理は原水のメチルボルネオール等の臭気物質などが含まれているときに使われる方法であるため、原水の水質が良好である場合は使うことはないといわれている。

ルビジウム (Rb) : 甲府盆地から県北東部にかけて濃度の高い傾向が認められた。

ジルコニウム (Zr) : 県東部地域で濃度の高い地点が2つ認められた。

モリブデン (Mo) : 富士山北部から県東部にかけての地域で1点だけ濃度の高い地点が認められた。甲府盆地側で濃度の比較的高い地点が多かった。

銀 (Ag) : 検出された地点は甲府盆地に集中していた。

アンチモン (Sb) : 県北西部の釜無川流域から富士川流域にかけた地域で検出される傾向が認められた。富士山北部地域では検出されなかった。

ヨウ素 (I) : ヨウ素は周期律表では、臭素と同族のハロゲン元素である。臭素と同様に、甲府盆地から北西部方面で比較的濃度の高い地点が多く認められた。

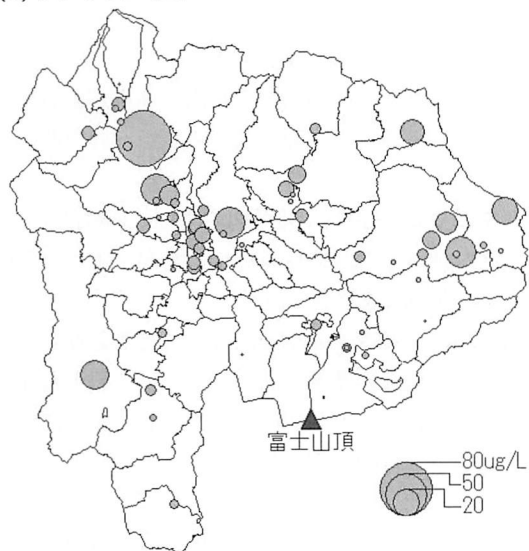
セシウム (Cs) : 県南西部で1点だけ濃度が比較的高い地点があったが、その他に検出された地点は県北部が多かった。

バリウム (Ba) : 井戸間の濃度差が比較的大きい元素であった。富士山北側地域を除いた他の地域で濃度が高い地点が認められた。

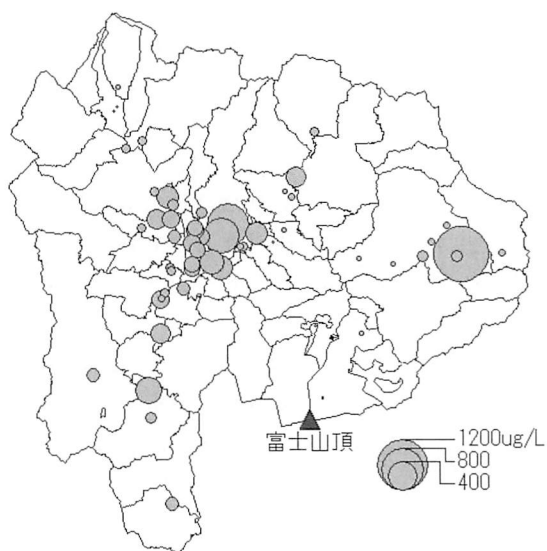
ランタン (La) : 県北東部の2地点でのみ検出された。

タングステン (W) : 甲府盆地から笛吹川方面にかけ

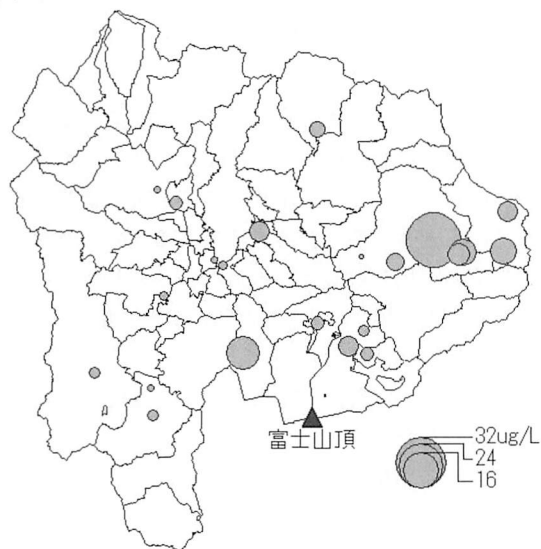
(a)リチウム (Li)



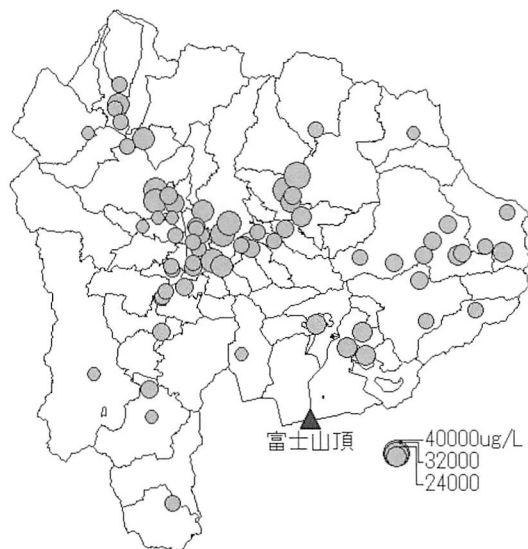
(b)ホウ素 (B)



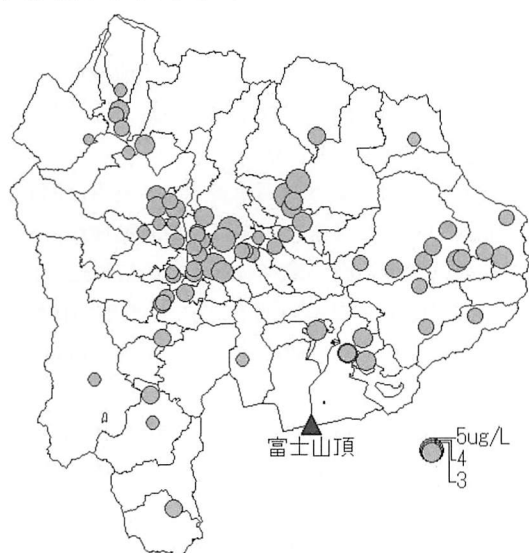
(c)アルミニウム (Al)



(d)ケイ素 (Si)



(e)スカンジウム (Sc)



(f)チタン (Ti)

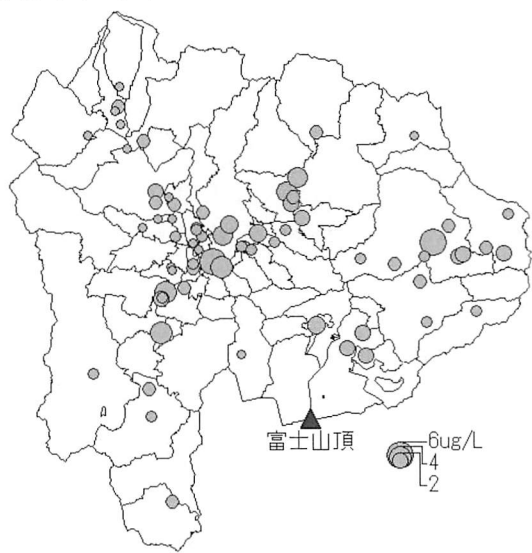
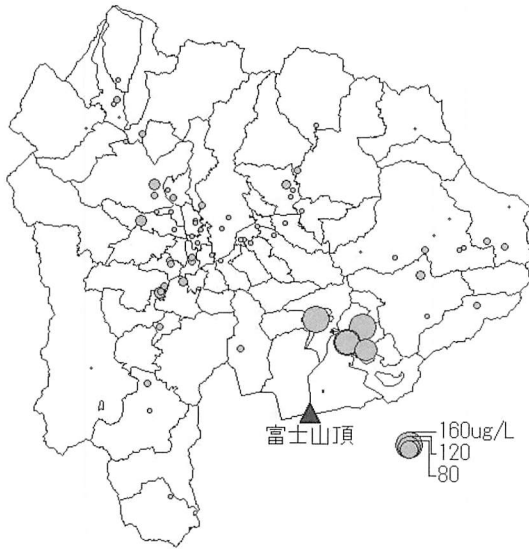
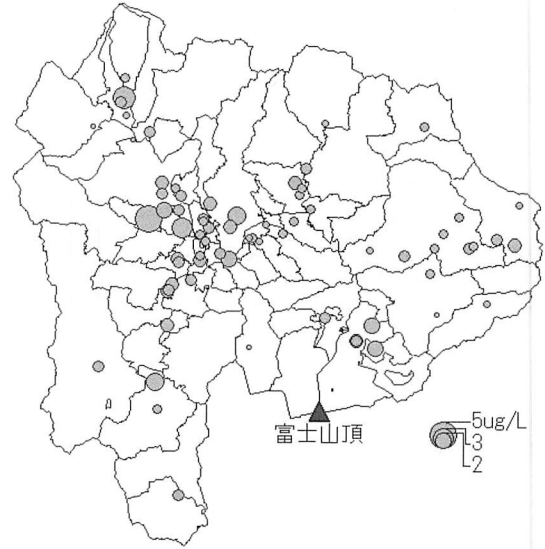


図2-1 山梨県内の地下水中微量元素濃度 (1998年8月採水、ICP-質量分析計による半定量分析)

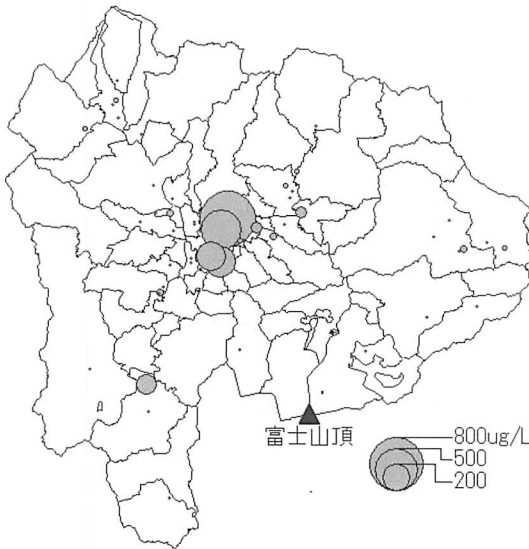
(a)バナジウム (V)



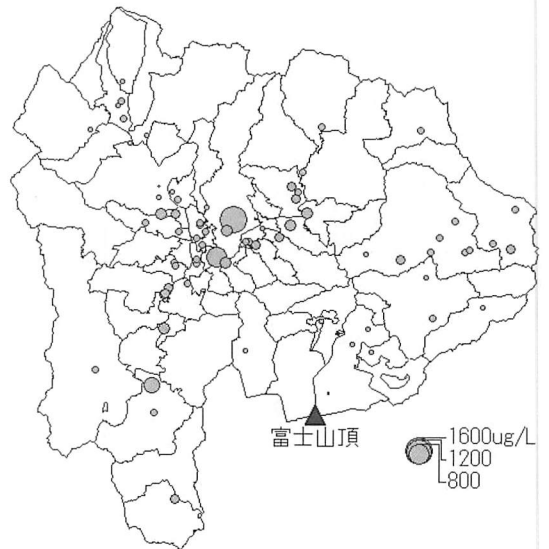
(b)クロム (Cr)



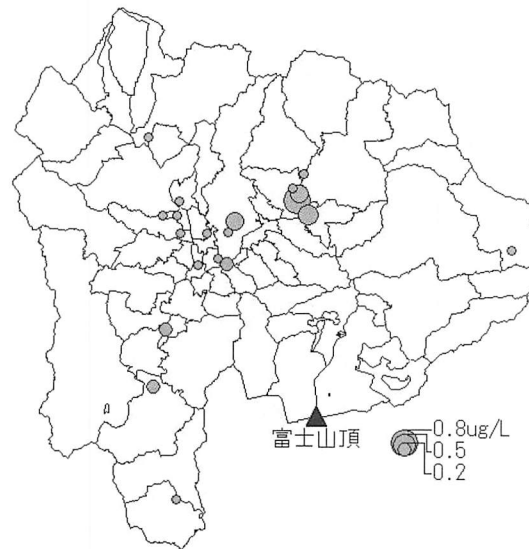
(c)マンガン (Mn)



(d)鉄 (Fe)



(e)コバルト (Co)



(f)ニッケル (Ni)

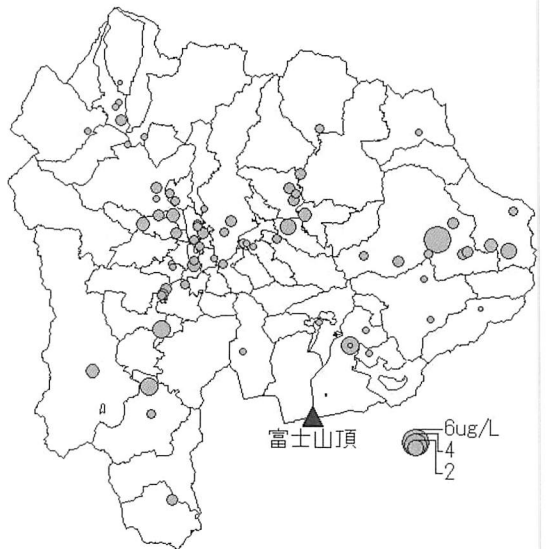
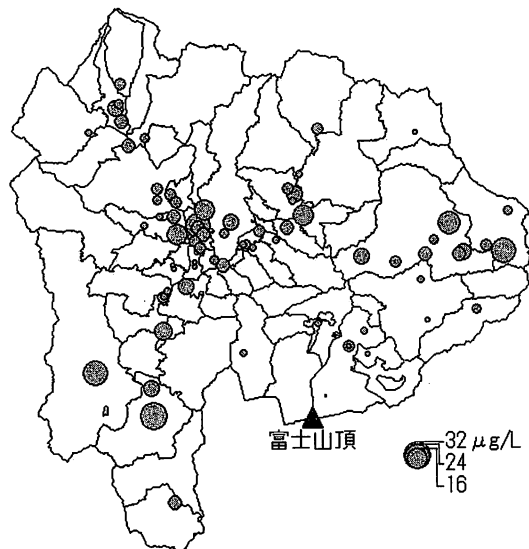
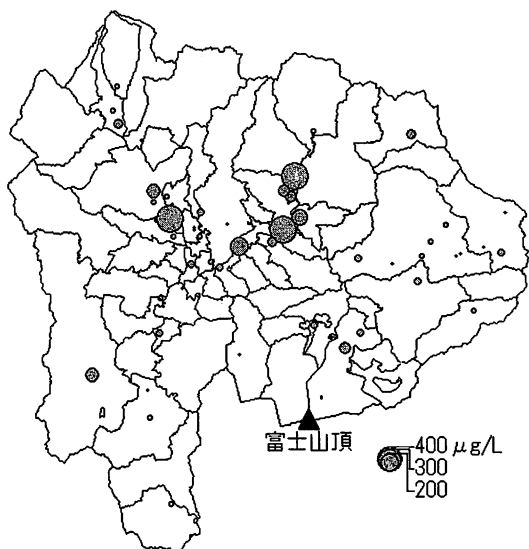


図2-2 山梨県内の地下水中微量元素濃度 (1998年8月採水、ICP-質量分析計による半定量分析)

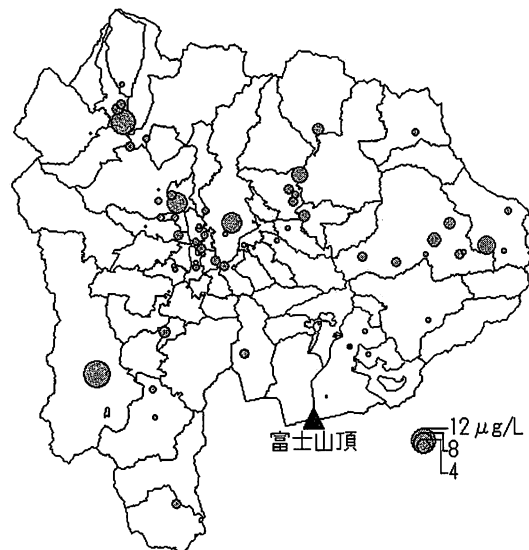
(a)銅 (Cu)



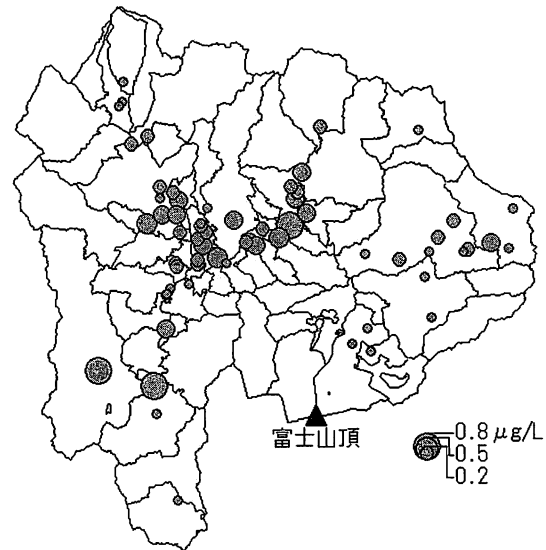
(b)亜鉛 (Zn)



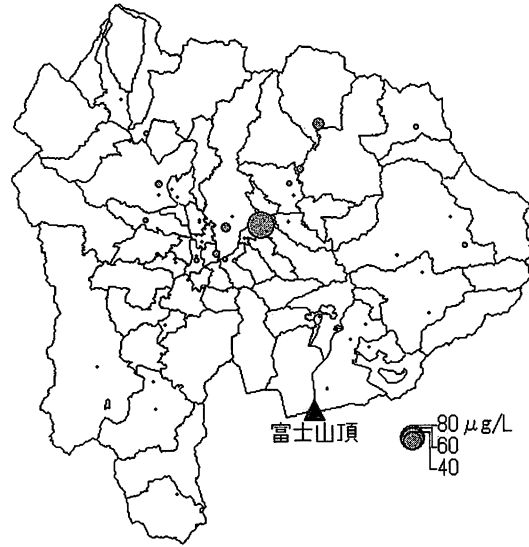
(c)ガリウム (Ga)



(d)ゲルマニウム (Ge)



(e)ヒ素 (As)



(f)臭素 (Br)

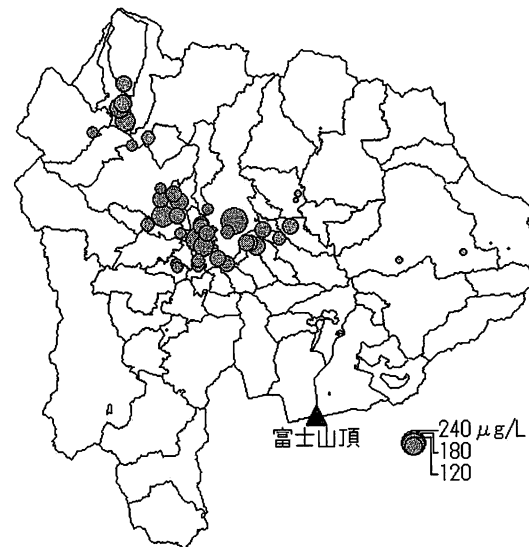
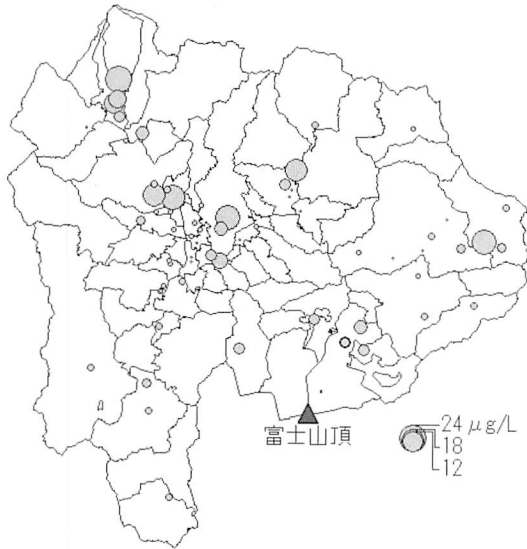
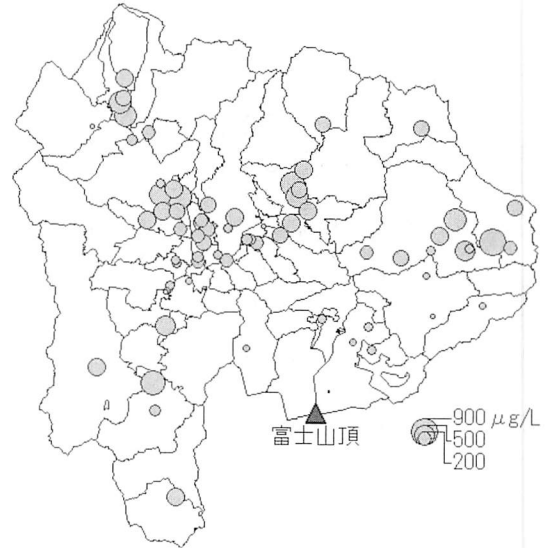


図2-3 山梨県内の地下水中微量元素濃度 (1998年8月採水、ICP-質量分析計による半定量分析)

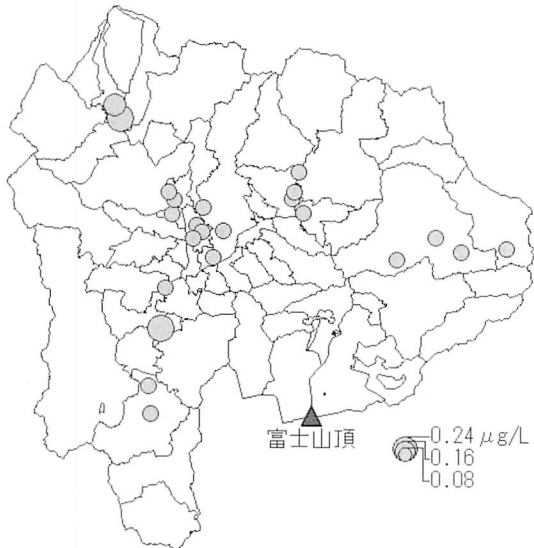
(a)ルビジウム (Rb)



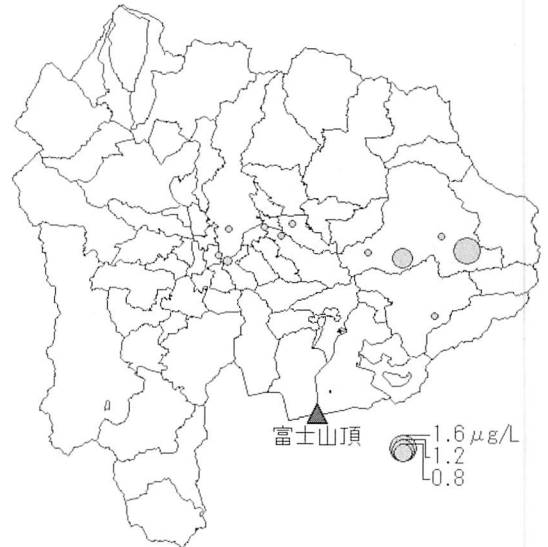
(b)ストロンチウム (Sr)



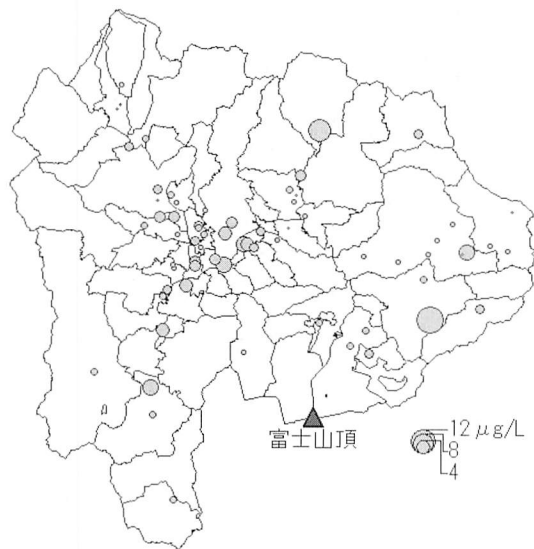
(c)イットリウム (Y)



(d)ジルコニウム (Zr)



(e)モリブデン (Mo)

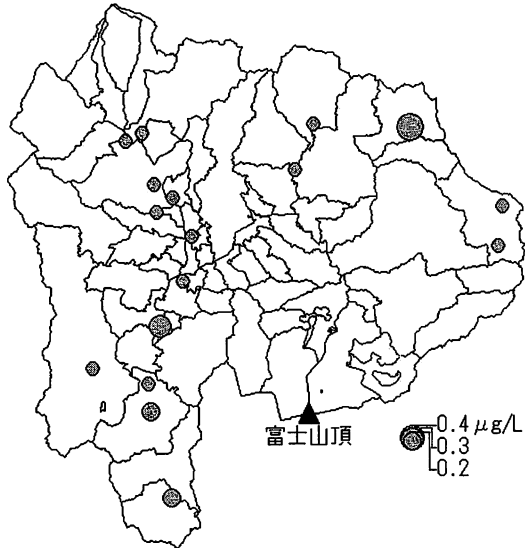


(f)銀 (Ag)

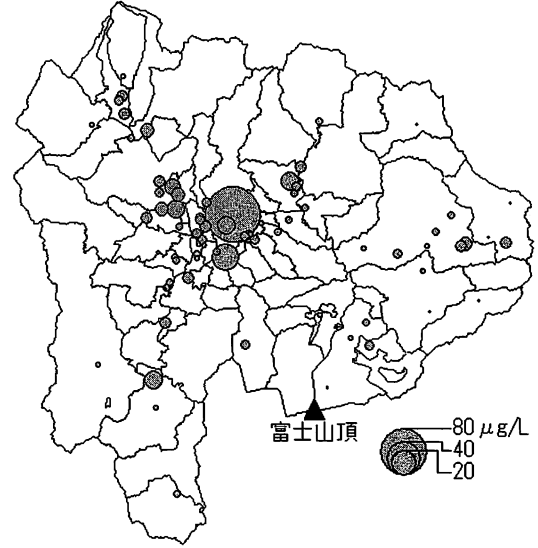


図2-4 山梨県内の地下水中微量元素濃度 (1998年8月採水、ICP-質量分析計による半定量分析)

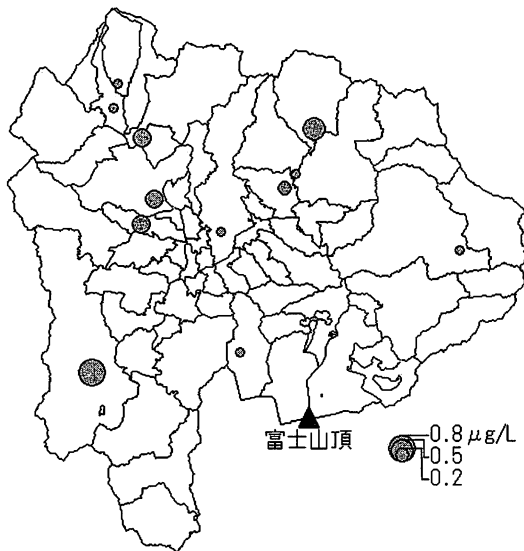
(a) アンチモン (Sb)



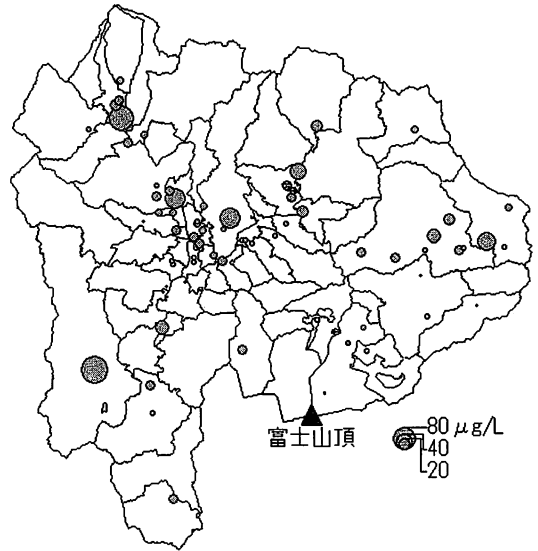
(b) ヨウ素 (I)



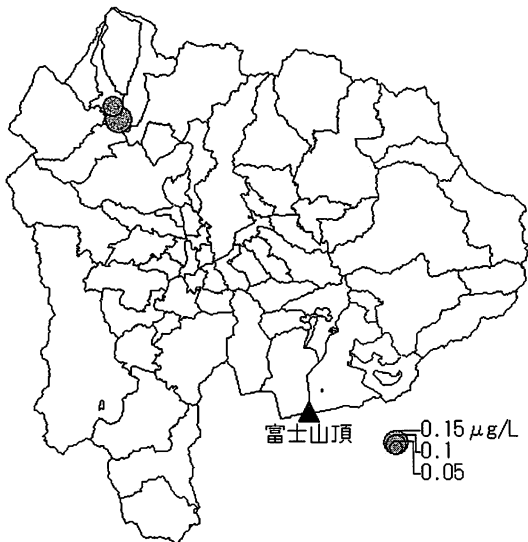
(c) セシウム (Cs)



(d) バリウム (Ba)



(e) ランタン (La)



(f) タングステン (W)

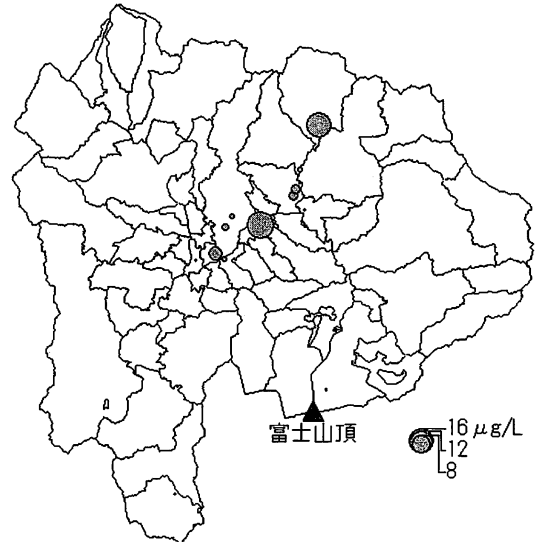
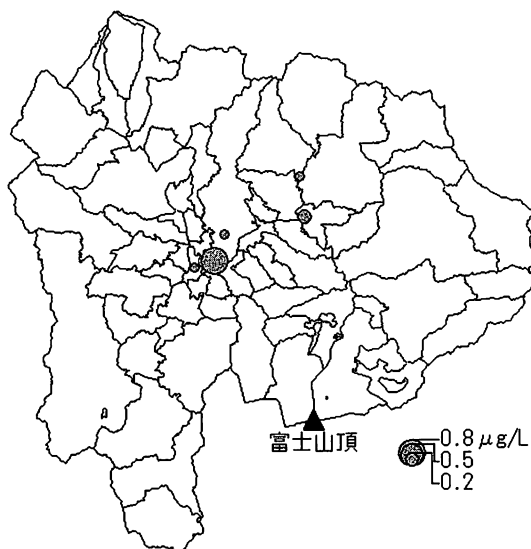
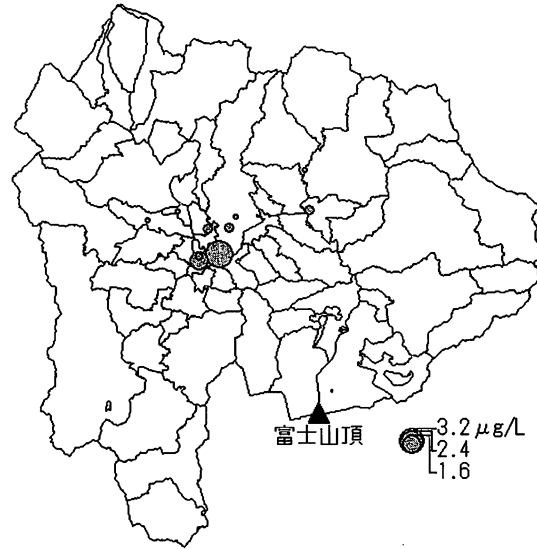


図2-5 山梨県内の地下水中微量元素濃度 (1998年8月採水、ICP-質量分析計による半定量分析)

(a)タリウム (Tl)



(b)ビスマス (Bi)



(c)ウラン (U)

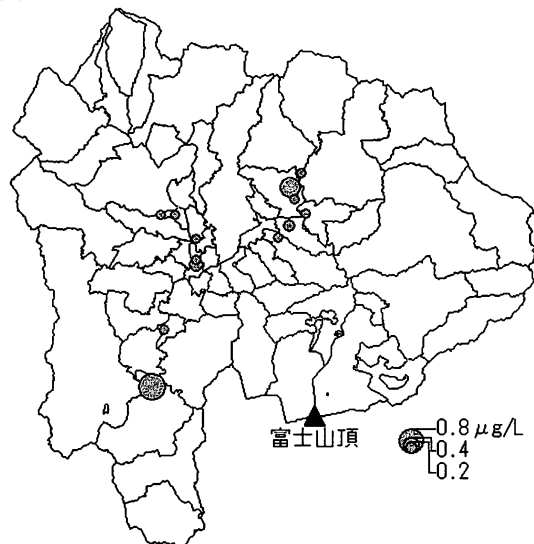


図2-6 山梨県内の地下水中微量元素濃度 (1998年8月採水、ICP-質量分析計による半定量分析)

て比較的濃度の高い地点が認められた。

タリウム (Tl) : 検出された地点は少なく、甲府盆地とその北東部で検出された。

ビスマス (Bi) : 検出された地点は少なかったが、甲府盆地とその周辺に集中していた。

ウラン (U) : 県南部の1地点を除くと、検出された地点は甲府盆地周辺に集中していた。

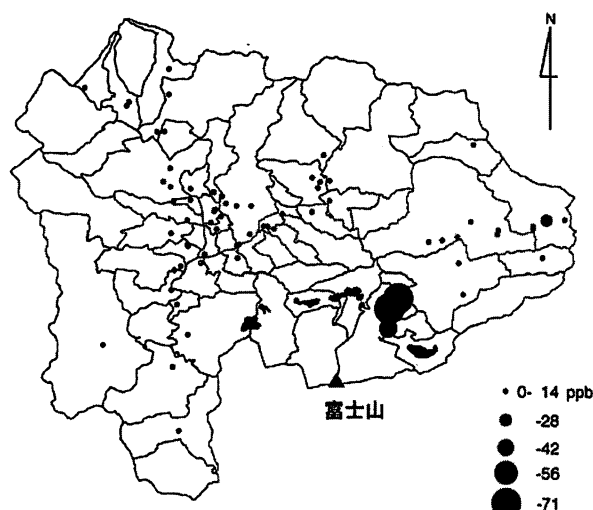
図2には平成10 (1998) 年夏に採水された地下水の結果を示したが、バナジウム、タングステン、ルビジウム、ウランの地域差は、平成9 (1997) 年度の調査結果 (図3) でも同様のものが得られている。

バナジウム濃度の地域差について

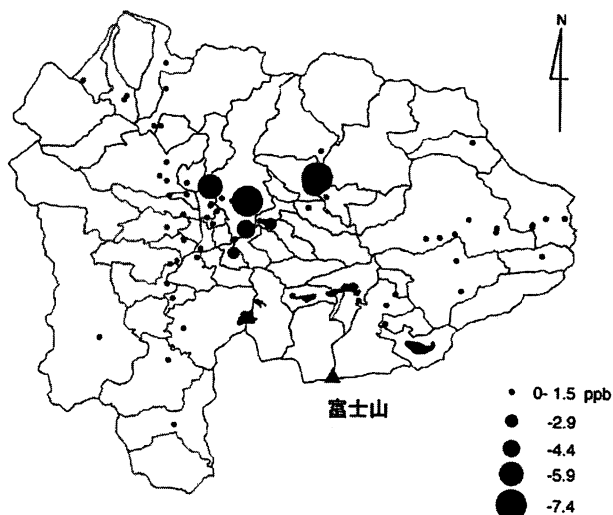
富士山由来の地下水には、他の地域より高い濃度のバナジウムが含まれていることは既に知られており、最も早くには岡部ら (岡部・森永 1968) が1968年にこのこ

とを報告している。その後、多くの研究者が富士山地下水にバナジウムが他の地域より高い濃度で含まれることをより詳細に確認し報告している (塚本 1994, 2002 ; 塚本ら 1990 ; 酒井ら1994 ; 岩下ら1994, Sakai et al. 1997 ; Hamada 1998 ; 瀬子・長谷川 1998 ; 瀬子ら 1999 ; Seko et al. 2003) 。富士山の溶岩 (玄武岩) には比較的高い濃度のバナジウムが含まれており、降水が富士山の地下を通過する過程で溶岩由来のバナジウムを多く含むようになると考えられている (岡部ら 1981 ; Sakai et al. 1997) 。図2-2-(a)、図3-(a)でバナジウム濃度が高かった井戸は、富士山由来の地下水を採水していると考えられる地域に位置している。我々は、富士北麓地域の地下水中バナジウム濃度についてより詳細に調査を行い、バナジウム濃度が高い地域は、富士山の溶岩が到達している場所とほぼ一致しており、周辺の御坂山地などに位置する井戸では高くないことなども明らかに

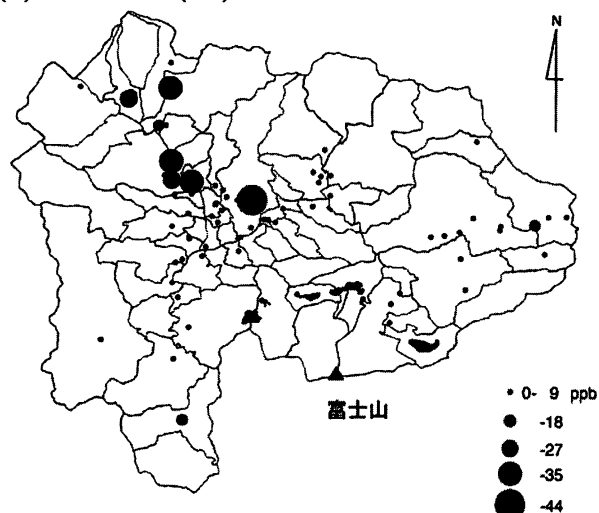
(a) バナジウム(V)



(b) タングステン(W)



(c) ルビジウム(Rb)



(d) ウラン(U)

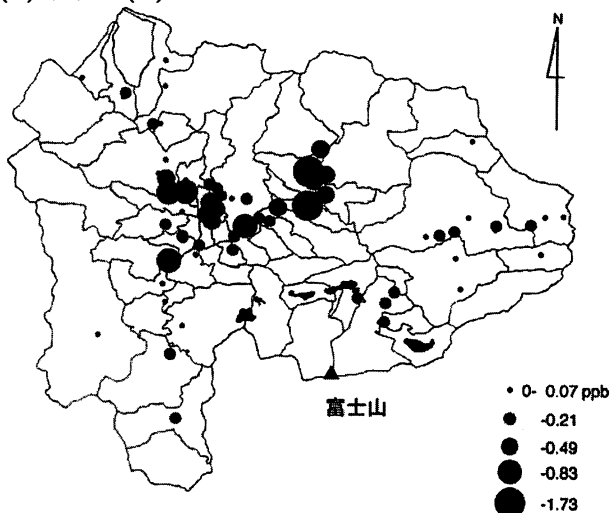


図3 山梨県内の地下水中微量元素の特徴 (1997年8月採水)

[瀬子ほか 1999年発表 : Biomed. Res. Trace Elements, 10(3), 271-272, 1999 (一部改変)]

している(図4)。詳細は、別報(Seko et al. 2003; 瀬子ら 2003)を参照されたい。また、我々は富士山地下水中のバナジウムの化学形についても検討し(長谷川ら 1999; 長谷川・瀬子2000; 瀬子ら2003)、5価のバナジウムイオンであると推定している。

富士山の地下水に由来するバナジウムは、周辺の河川水にも多く含まれており(岡部・森永 1968; 塚本 1990, 1994; 酒井ら1994; 岩下ら1994, Sakai et al. 1997; Hamada 1998; 奥水ら 1998)、それらの河川に生息する魚(奥水ら 1998)や、河川水を水道水源とする地域の腎臓透析患者(Tsukamoto et al. 1990)の体内バナジウムレベルを増加させることなども明らかになっている。

バナジウム化合物はインスリンと同様の作用を示すことから、経口的に与えられる糖尿病治療薬として利用する研究が行われており(Heyliger et al. 1985;

Meyerovitch et al. 1987)、他の地域より高い濃度のバナジウムを含む富士山の地下水に糖尿病治療効果があるか否かについて、多くの関心が集まっている(瀬子ら 2000; 瀬子 2003)。富士山地下水に含まれるバナジウム濃度に糖尿病治療効果があるか否かを明らかにするために、我々は実験動物を使った研究を行っているが(丁ら 2000; Ding et al. 2001a, b; 長谷川ら 2001; Hasegawa et al. 2001)、本報告書のサブテーマ2ではその成果を報告している。また、2002年11月に行った山梨県環境科学研究所国際シンポジウム2002では、世界の研究者を招きバナジウムと糖尿病に関する討論を行い(McNeill 2003, 桜井 2003a, 2003b, 瀬子2003)、我々の研究成果も発表した(長谷川2003)。バナジウムは必須微量元素の可能性も提唱されている(Schroeder 1970; Schwarz and Milne 1971)ほか、環境中のバナジウムと糖尿病以外の疾病等との関係なども研究されて

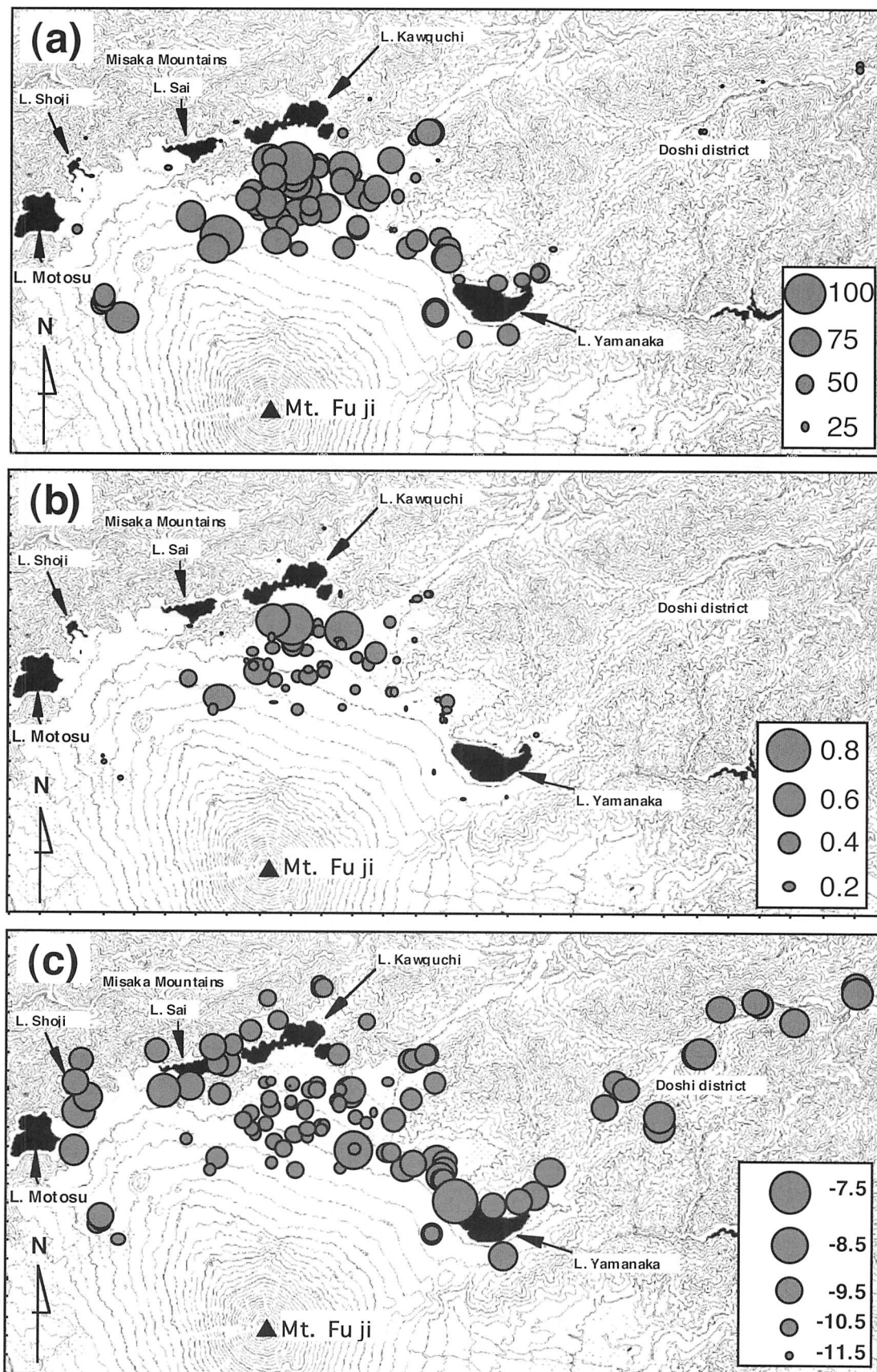


図4 富士山北側および周辺地域の地下水中バナジウム濃度 (a) ($\mu\text{g/L}$)、フッ化物イオン濃度 (b) (mg/L)、および水中酸素安定同位体比 (c) ($\delta^{18}\text{O}$) (Seko et al. 2003 を一部改変)

いる（WHO1988）が不明の点も多く、今後の研究の進展が望まれる。

主要陰イオンおよびケイ酸

ICP-質量分析計による微量元素の測定とは別に、イオンクロマトグラフィーと比色法を用いて、硝酸イオン（NO₃⁻）、亜硝酸イオン（NO₂⁻）、硫酸イオン（SO₄²⁻）、リン酸イオン（PO₄³⁻）、塩化物イオン（Cl⁻）、フッ化物イオン（F⁻）、ケイ酸（SiO₂）の測

定を行った。以下に、図5、6には1997年夏、1998年冬・夏、1999年冬、2000年夏に採水した地下水の測定結果を記す。

硝酸イオン：富士山北部地域ならびに県南部の地域では硝酸イオン濃度は高くないが、甲府盆地周辺、県北西部、県東部では高い地点が数多く認められた（図5-（a））。地下水の環境基準には「硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素」の項目が設定されており、基準値は窒素濃度の合計で10mg/L以下となっている。これは水道水の水質基

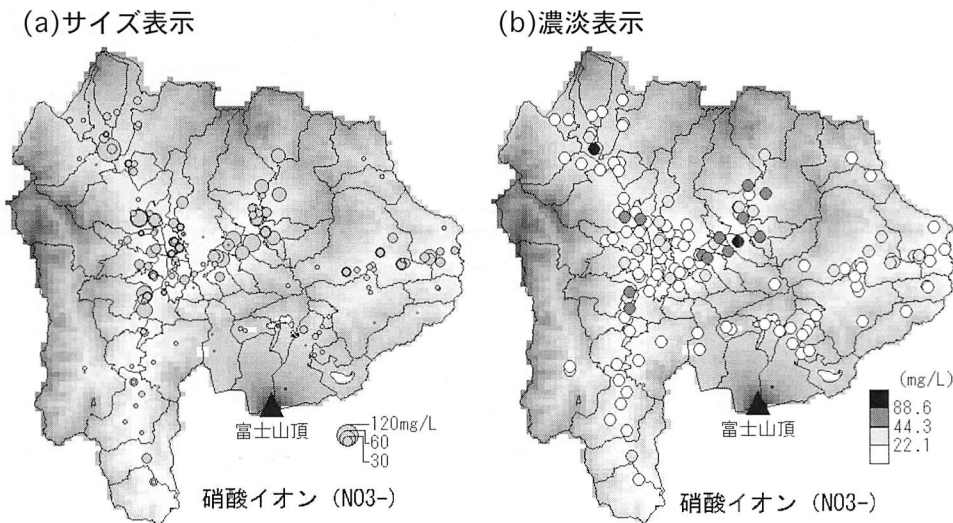


図5 山梨県内の地下水中硝酸イオン濃度（1997年度、1998年度および2000年度）

1997年度：同じ井戸について1997年8月と1998年1月の2回採水し、平均値を用いた。
1998年度：同じ井戸について1998年8月と1999年1月の2回採水し、平均値を用いた。
2000年度：2000年8月に1回採水し、そのデータを用いた。
硝酸イオン濃度44.3mg/Lは、硝酸性窒素濃度10mg/Lに相当する。

表2 地下水汚染事例（2,330件）の項目別内訳（平成13年度）
（単位：件）

項目名（揮発性有機化合物）	超過事例数	項目名（重金属等）	超過事例数
テトラクロロエチレン	629	砒素	317
トリクロロエチレン	469	ふっ素	80
シス-1,2-ジクロロエチレン	275	鉛	35
1,1-ジクロロエチレン	74	ほう素	33
四塩化炭素	35	総水銀	28
1,1,1-トリクロロエタン	23	六価クロム	23
1,2-ジクロロエタン	23	全シアン	10
ベンゼン	15	カドミウム	1
1,1,2-トリクロロエタン	6	セレン	1
ジクロロメタン	5	P C B	1
1,3-ジクロロプロペン	0	アルキル水銀	0
		チオベンカルブ	0
		チウラム	0
		シマジン	0
項目名	超過事例数		
硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素	865		
項目名	超過事例数		
ダイオキシン類	0		

※複数の項目による汚染事例があるため、内訳の合計は2,330件に一致しない。
* 地下汚染事例の2,330件とは、都道府県及び水質汚濁防止法政令市が平成13年度末までに把握した汚染判明事例のうち、平成13年度末時点において環境基準値を超える井戸が存在する事例の数である。
出典：環境省環境管理水環境部土壌環境課地下水・地盤環境室
「平成13年度 地下水汚染事例に関する調査について」

表3 環境基準項目別地下水質測定結果（抜粋）

分項目	調査区	概況調査			汚染井戸 周辺地区調査		定期モニタリング 調査	
		調査数 (本)	超過数 (本)	超過率 (%)	調査数 (本)	超過数 (本)	調査数 (本)	超過数 (本)
砒素	元	1,357	4	0.3	125	7	51	0
	2	3,219	5	0.2	316	7	303	3
	3	2,941	4	0.1	316	8	508	9
	4	2,747	5	0.2	133	4	708	16
	5	2,561	37	1.4	323	83	794	100
	6	2,914	91	3.1	689	211	913	130
	7	2,720	48	1.8	320	79	904	146
	8	2,648	43	1.6	548	66	975	166
	9	2,564	52	2.0	264	53	1,059	192
	10	3,424	45	1.3	275	32	688	234
	11	3,310	45	1.4	186	29	695	223
	12	3,386	65	1.9	380	83	613	238
	13	3,422	44	1.3	284	108	626	246
及び亜硝酸 性窒素	11	3,374	173	5.1	650	182	807	66
	12	4,167	253	6.1	1,682	479	988	165
	13	4,017	231	5.8	1,343	535	1,113	272

（注） 平成元年度から13年度まで測定が行われてきた項目についてまとめた。なお、1,1,1-トリクロロエタン及び四塩化炭素は、平成元年度から4年度までは暫定指導指針により指導が行われていた項目である。また、ジクロロメタン～セレン（11項目）は、平成5年の評価基準の改正に伴い平成5年度から測定が始められた項目であり、硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素～ほう素（3項目）は、平成11年の環境基準項目への追加により平成11年度から測定が始められた項目である。超過数とは、測定当時の評価基準または環境基準を超過した井戸の数である。

出典：環境省環境管理局水環境部土壌環境課地下水・地盤環境室
「平成13年度地下水質測定結果について」

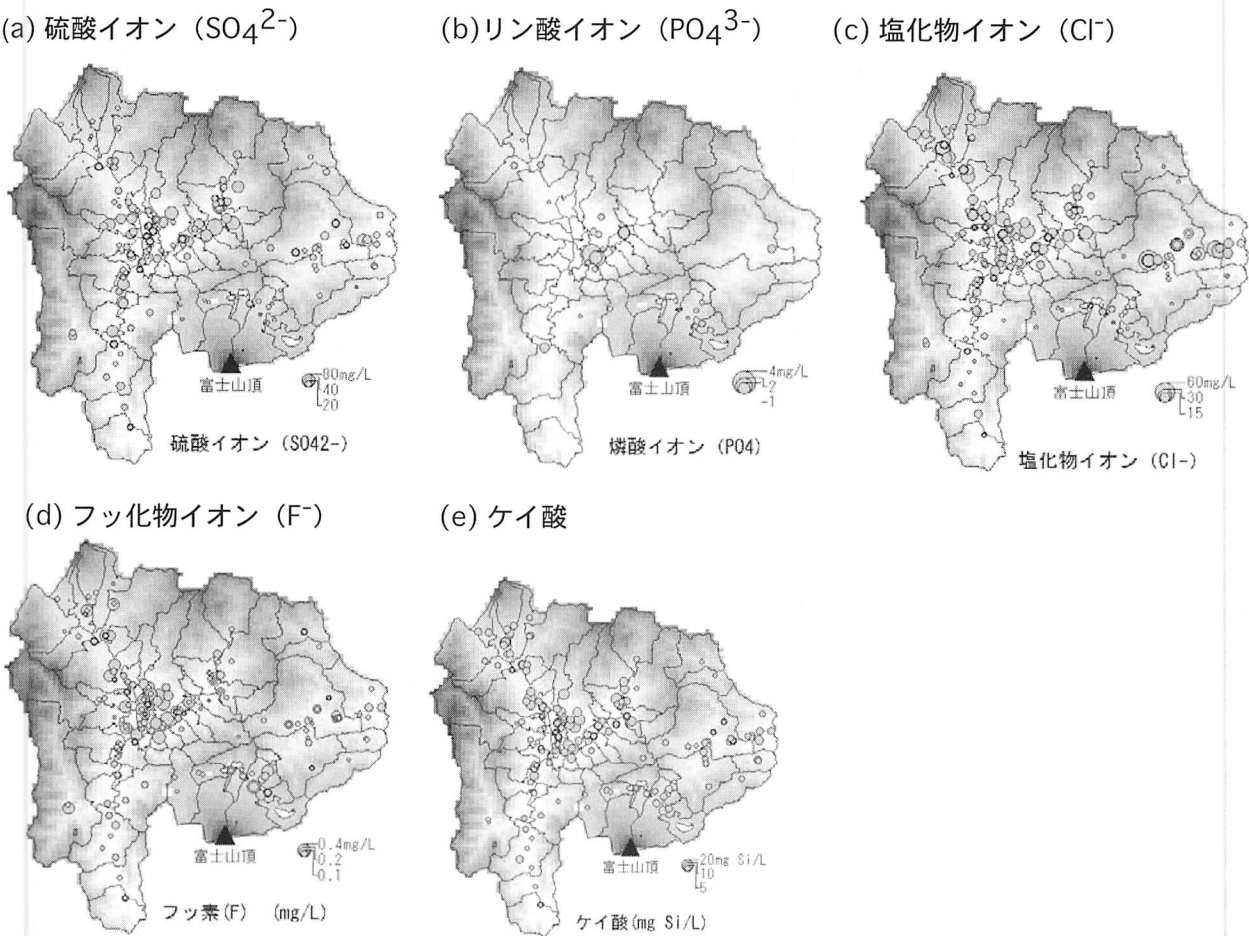


図6 山梨県内の地下水中の硫酸イオン、リン酸イオン、塩化物イオン、フッ素イオンおよびケイ酸濃度（1997年度、1998年度および2000年度、試料とデータ処理は図5と同じ）

準と同じ値である。硝酸イオン濃度に換算すると44.3mg/Lになる。我々の調査結果では、亜硝酸イオンはほとんど検出されなかったため、硝酸イオン濃度が44.3mg/Lを越えていれば、地下水の環境基準に適合していないことになる。図5-(b)では、硝酸イオン濃度をポイントの濃淡で表している。基準値を越える地下水は甲府盆地の周辺と県北西部で認められる。

地下水の硝酸汚染は日本のみならず世界的な問題となっているが、環境省がとりまとめた日本全国の地下水測定結果の中でも、地下水汚染事例の中で最も件数が多く（表2）、5%以上の井戸で基準値を越えている（表3）。地下水の硝酸汚染の主な原因としては、窒素肥料、畜産業から出る家畜の尿尿、地質起源などが考えられる。山梨県の地下水の一部で、硝酸性窒素汚染のあることは以前より知られている（堤 1979；吉澤ら 1989；坂本ら 1993；風間・米山2002）。また、地下水の環境基準に硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素の項目が加えられて以来、県が行う地下水モニタリングでも基準値を越える井戸のあることが報告されているが、原因の特定までには至っていない。今後、様々な角度から調査・解析を行い、原因の特定を行うことが必要である。

硫酸イオン：硝酸イオンと同様に甲府盆地周辺で高い傾向があるが、硝酸イオンの濃度分布と必ずしも一致しない（図6-(a)）。硝酸イオン汚染の原因が硫酸肥料（硫酸アンモニウム）であれば、硝酸イオンと共に硫酸イオンの濃度も高くなるものと予想されるため、硫酸イオンと硝酸イオンの相関図を作成した（図7-(a), (b)）。硝酸イオンと硫酸イオンが相関する傾向があるようにも見えるが、硝酸イオンが高くても硫酸イオンがほとんど検出されない地点や、逆に硝酸イオンが高くても硫酸イオンが低い地点などもあり、統計学的に有意な相関とはなっていない。硝酸性窒素汚染の特定のために、硫酸イオンの測定は有用な情報を提供するがそれのみで汚染源を特定することは出来ない。水に含まれる硫酸イオン以外の主要なイオン類の測定、窒素の安定同位体比測定、水の由来を推定するための水中酸素水素安定同位体比測定等を行い、地下水の流動と土地利用の関係等を地理情報システム（GIS）なども活用しながら総合的に解析することが今後必要であろう。その場合、今回の調査研究で測定した微量元素の測定も水の由来を推定するための有用な情報を提供するであろう。

リン酸イオン：検出されることが少ないイオンであったが、甲府盆地内の採水地点で検出されかつ濃度が高い傾向が認められた（図6-(b)）。

塩化物イオン：甲府盆地から県北西部にかけての地域

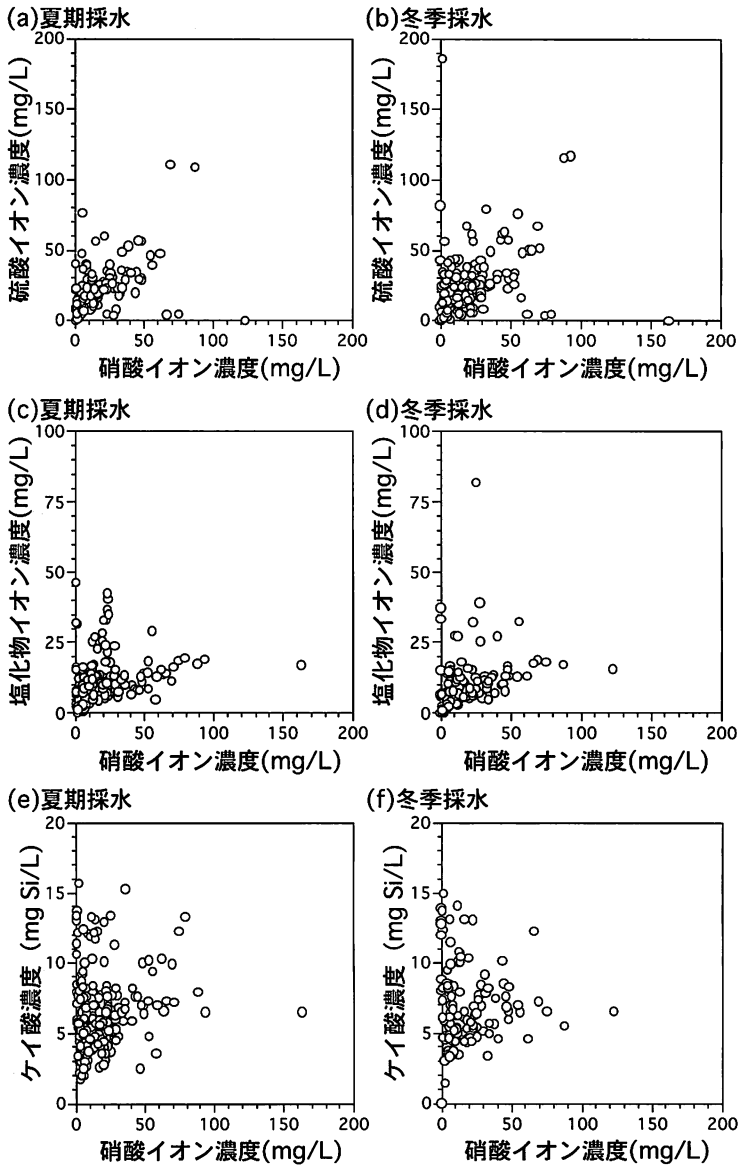


図7 地下水中の硝酸イオン濃度と他の成分との関係（1997年8月～1999年1月採水試料）

ならびに県東部地域で高い傾向があり、富士山北部地域ならびに県南部地域では低かった（図6-(c)）。塩化物イオンは人間活動の影響を受けて高くなることもあるため、自然由来のほか人為的な汚染も関連している可能性がある。

フッ化物イオン：甲府盆地ならびに富士山北部地域の一部で高い傾向が認められた（図6-(d)）。富士山北部地域の地下水をより詳細に調査した我々の結果では（図4-(b)）、富士山北部地域の中でも河口湖南部で濃度が高い傾向が認められている。

ケイ酸：井戸間の濃度差が比較的少ない成分であるが、甲府盆地及びその周辺でやや高い傾向が認められた（図6-(e)）。ICP-質量分析計で測定したケイ素の結果（図2-1-(d)）とほぼ同様であった。

「公共用水域及び地下水の水質測定結果」の地理情報化

山梨県森林環境部大気水質保全課が行う地下水モニタリングでは、現在、環境基準項目（表4）ならびに要監視項目（表5）について測定を行い、結果を報告書として公開している。平成2（1990）年度から始まった地下水モニタリングでは、水温、カドミウム、シアン、有機リン、鉛、クロム（六価）、ヒ素、総水銀、PCB、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレン、1,1,1-トリクロロエタン、四塩化炭素、pH、導電率の15項目であったが、現在では要監視項目も含めて51項目にものぼっている。これらのデータを平成2年度の報告書から

表4 人の健康の保護に関する環境基準

	項目	基準値
1	カドミウム	0.01mg/l以下
2	全シアン	検出されないこと。
3	鉛	0.01mg/l以下
4	六価クロム	0.05mg/l以下
5	砒素	0.01mg/l以下
6	総水銀	0.0005mg/l以下
7	アルキル水銀	検出されないこと。
8	P C B	検出されないこと。
9	ジクロロメタン	0.02mg/l以下
10	四塩化炭素	0.002mg/l以下
11	1,2-ジクロロエタン	0.004mg/l以下
12	1,1-ジクロロエチレン	0.02mg/l以下
13	シス-1,2-ジクロロエチレン	0.04mg/l以下
14	1,1,1-トリクロロエタン	1 mg/l以下
15	1,1,2-トリクロロエタン	0.006mg/l以下
16	トリクロロエチレン	0.03mg/l以下
17	テトラクロロエチレン	0.01mg/l以下
18	1,3-ジクロロプロペン	0.002mg/l以下
19	チウラム	0.006mg/l以下
20	シマジン	0.003mg/l以下
21	チオベンカルブ	0.02mg/l以下
22	ベンゼン	0.01mg/l以下
23	セレン	0.01mg/l以下
24	硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素	10mg/l以下
25	ふっ素	0.8mg/l以下
26	ほう素	1mg/l以下

備考

- 1 基準値は年間平均値とする。ただし、全シアンに係る基準値については、最高値とする。
- 2 「検出されないこと」とは、測定方法の欄に掲げる方法により測定した場合において、その結果が当該方法の定量限界を下回ることをいう。
- 3 硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素の濃度は、規格43.2.1、43.2.3又は43.2.5により測定された硝酸イオンの濃度に換算係数0.2259を乗じたものと規格43.1により測定された亜硝酸イオンの濃度に換算係数0.3045を乗じたものの和とする。

平成13年度の報告書まで、概況調査結果を中心にデジタル化した。有害化学物質のうち検出されることが比較的多い項目を中心として、以下の通りに地図上に採水地点と濃度を表示した。なお、調査方法で述べたようにここで示す井戸の位置は採水地点のある地域の代表点の緯度経度であり、正確な採水地点の位置は示していない。また、井戸は異なっても字名が同じであれば採水地点の緯度経度は同じになるため地図上では同じ位置に示される。

有機塩素系化合物：有機塩素系化合物のうちほとんど検出されることがない項目は省き、トリクロロエチレ

表5 要監視項目及び指針値

項 目	指 針 値
クロロホルム	0.06 mg/L以下
トランス-1,2-ジクロロエチレン	0.04 mg/L以下
1,2-ジクロロプロパン	0.06 mg/L以下
p-ジクロロベンゼン	0.3 mg/L以下
イソキサチオン	0.008 mg/L以下
ダイアジノン	0.005 mg/L以下
フェニトロチオン(MEP)	0.003 mg/L以下
イソプロチオラン	0.04 mg/L以下
オキシ銅（有機銅）	0.04 mg/L以下
クロロタロニル(TPN)	0.05 mg/L以下
プロピザミド	0.008 mg/L以下
E P N	0.006 mg/L以下
ジクロロボス(DDVP)	0.008 mg/L以下
フェノブカルブ（BPMC）	0.03 mg/L以下
イプロベンホス（I B P）	0.008 mg/L以下
クロルニトロフェン(CNP)	-
トルエン	0.6 mg/L以下
キシレン	0.4 mg/L以下
フタル酸ジエチルヘキシル	0.06 mg/L以下
ニッケル	-
モリブデン	0.07 mg/L以下
アンチモン	-

ン、テトラクロロエチレン、1,1-ジクロロエチレン、1,1,1-トリクロロエタンのデータを示す(図8)。1年間に夏冬2回の調査を行った場合は、値の大きい方のデータを示した。これらの化合物はもともと自然界には存在しないものであるため、人為的な地下水汚染の状況を示している。汚染が認められた場合は行政的な対応も行っており、改善された地域もあるのでこの図は、必ずしも現状を表していない。

ヒ素、ホウ素、ニッケル：これらの物質は、人為的な

汚染によって地下水中濃度が高くなる可能性もあるが、地質に由来し、地下水中濃度が高い場合もある。特にヒ素の場合は、全国的には地質由来のヒ素によって基準値を上回ることが環境基準測定項目の中では比較的多い(表2、3)。山梨県の報告書のデータで見ると、基準値を超えている井戸の数は少ないが、基準値(0.01mg/l)を超える地点が甲府盆地内にある(図9-(a))。この図では周辺にヒ素の高い井戸はそれほど多くない。この井戸は深さ110mの深井戸であるが、その

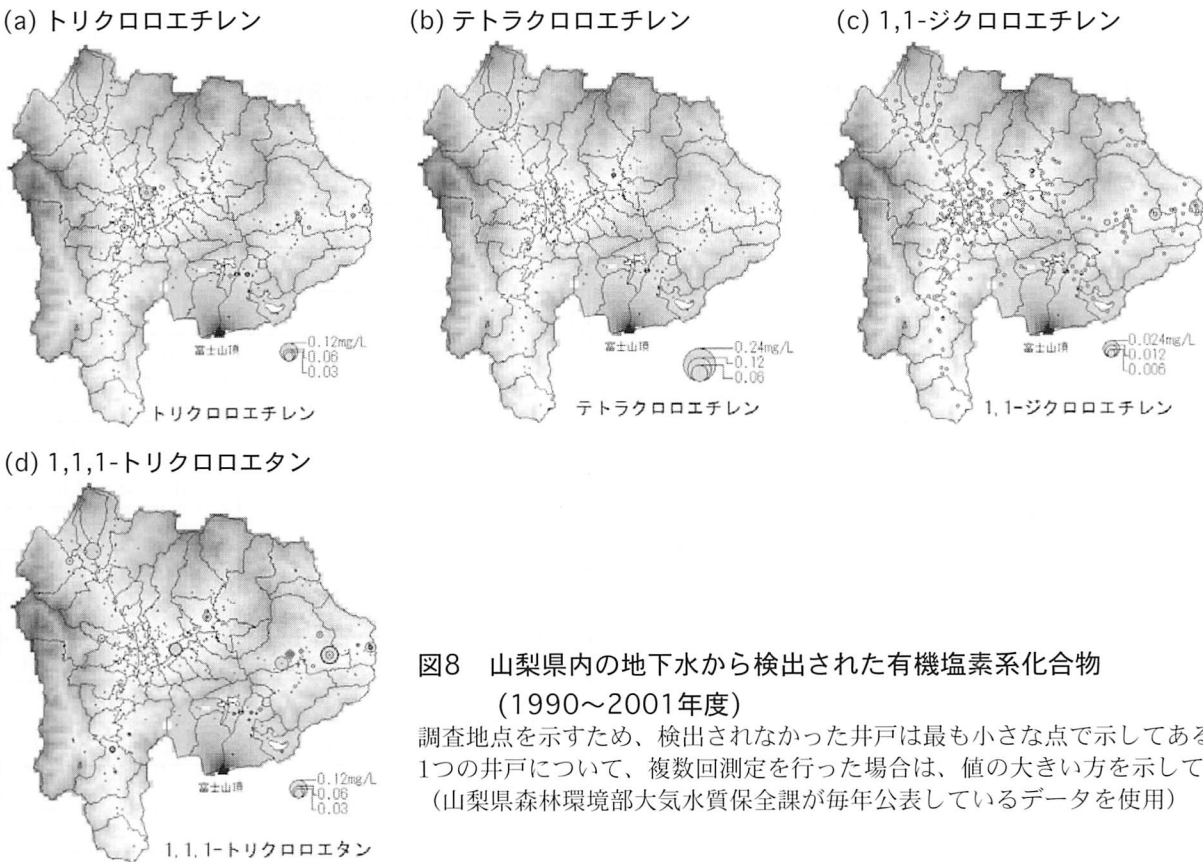


図8 山梨県内の地下水から検出された有機塩素系化合物 (1990～2001年度)
調査地点を示すため、検出されなかった井戸は最も小さな点で示してある。1つの井戸について、複数回測定を行った場合は、値の大きい方を示してある。(山梨県森林環境部大気水質保全課が毎年公表しているデータを使用)

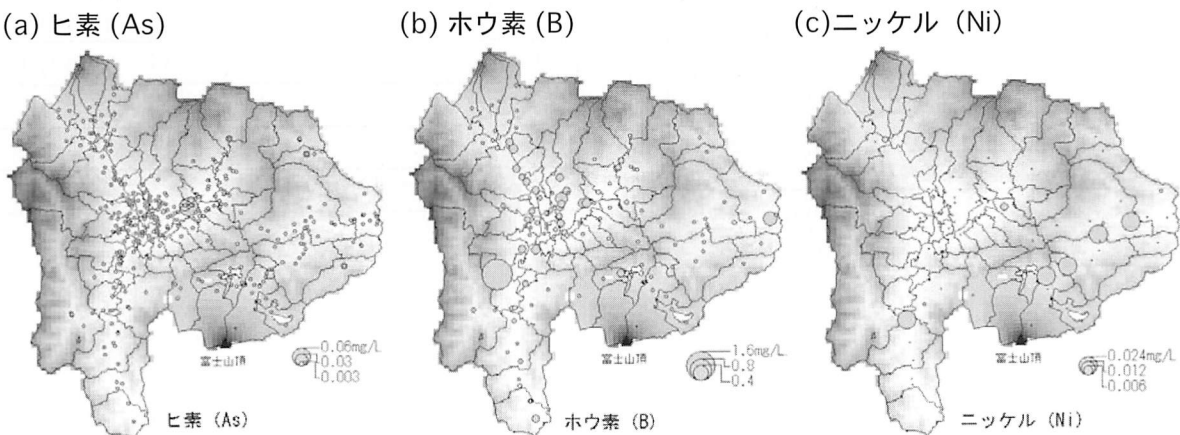


図9 山梨県内の地下水中ヒ素、ホウ素、ニッケル濃度
調査地点を示すため、検出されなかった井戸は最も小さな点で示してある。1つの井戸について、複数回測定を行った場合は、値の大きい方を示してある。(山梨県森林環境部大気水質保全課が毎年公表しているデータを使用)
データの年度：ヒ素、1990～2001年度；ホウ素、1998～2001年度；ニッケル、1999～2001年度

後、県大気水質保全課が行った汚染地区周辺地区調査結果（平成2年度）でも、100mを越える深井戸ではヒ素が検出され、周辺の浅井戸や深さが100mに満たない井戸ではヒ素は検出されていない。これらのことから、ヒ素は地質に由来するものと考えられる。

ホウ素は、平成10年度の報告書から測定値が報告されている項目であり、他の測定項目と比べるとデータの蓄積は少ない。甲府盆地から釜無川上流方面の山梨県北西部で比較的高い傾向があり、富士山北側地域や山梨県東部の地下水ではおおむね濃度が低い（図9-(b)）。県西部に基準値を越える地点が1つ認められたが、それ以外の採水地では基準を越えていない。

ニッケルは、平成11年度の概況調査から要監視項目として測定が開始されたもので、ホウ素と同様にデータの蓄積は少ない。図中の大きな円がニッケルの検出された地点で、桂川流域地方に4地点、県南西部に1地点が認められている（図9-(c)）。測定を行った井戸の数と分布を表示するため、図ではニッケルが検出されなかった調査地点を小さな点で示してある。

pH：図10では、中性のpHの値（7.0）を試料のpHから差し引いた値（ $[pH-7]$ ）を示してある。地下水のpHが酸性側にあり7より小さい場合はマイナス（-）の値となるが、そのような地点はグレーの点で示してある。逆にアルカリ側のpHの場合、 $[pH-7]$ はプラスの値となるが、その場合は白い点で示してある。何れの場合も、pH7.0からかけ離れるほど、点の大きさが大きくなる。

この図から、富士山北側の地域では、白いポイントが多く、点のサイズはそれほど大きくない。つまり、pH7.5前後の弱アルカリの地下水が多いことを示している。甲府盆地の中心部分は白い点が多く、やはり弱アルカリの地下水が多いが、周辺地域から釜無川及び笛吹川上流方面にかけてはグレーの点が多く、酸性側の地下水が多いことを示している。県東部では、黒い点が多く酸性側の地下水が多い。

導電率：導電率は、塩化物イオン、硫酸イオン等、水に溶解しているイオン類濃度の合計が高いほど値

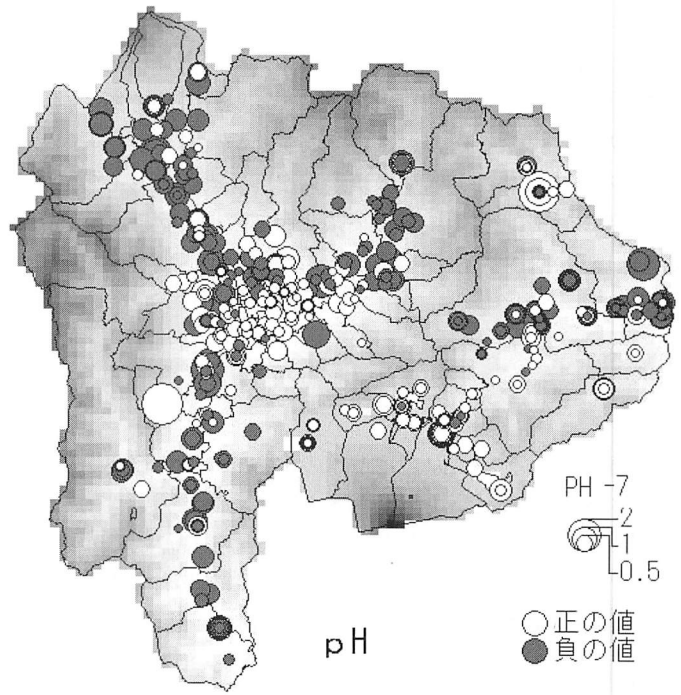


図10 山梨県内の地下水の水素イオン濃度（pH）（1990～2001年度夏季データ）

〔試料の $pH - 7$ 〕 を表示。アルカリ側の地下水は白い点で表示され、酸性側の地下水は黒い点で示される。

（山梨県森林環境部大気水質保全課が毎年公表しているデータを使用）

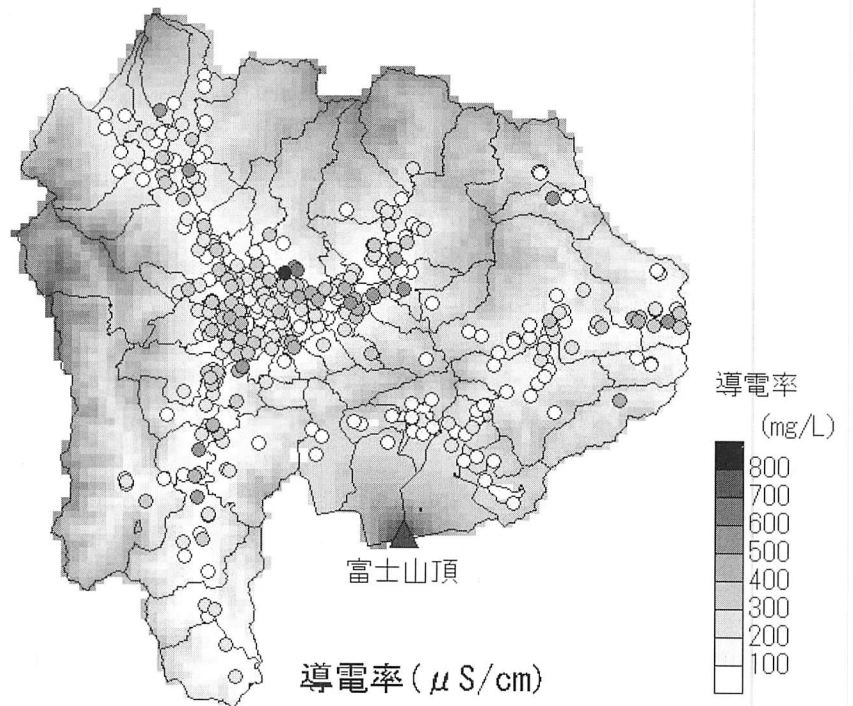


図11 山梨県内の地下水の導電率（1990～2001年度）

1つの井戸について複数回測定を行っている場合は、平均値を表示（山梨県森林環境部大気水質保全課が毎年公表しているデータを使用）

が大きくなる。つまり溶解イオン類の合計量の指標となる。地下水調査では必ずといっていいほど測定するものである。大気水質保全課の調査でも夏冬共に調査井戸全てで測定しているため、データの蓄積が多い項目である。そのため、濃度を円の大きさで表すと濃度分布が見にくくなるため、ここでは点の濃淡で濃度を表してある(図11)。富士山北側地域、山梨県北西部の地下水は、甲府盆地周辺と比べると電気伝導度の低い地下水が多い。

おわりに

本調査研究では、山梨県の地下水の化学的特徴の概要を明らかにするために、山梨県全域を対象として、これまでほとんど測定されていなかった微量元素を中心として調査を行った。また、環境基準項目について県大気水質保全課がこれまで行ってきた調査の結果は、印刷物で公表されているため、これらのデータをデジタル化し、我々のデータとあわせて地理情報化した。その結果、様々な測定項目で地下水水質の地域間の違いが明らかとなった。

従来から県大気水質保全課が公表してきたように、測定項目によっては地下水の環境基準値を越える地点もあるが、その状況が地理情報化することにより、より明確に状況が把握することができた。

本研究では山梨県の地下水水質の全体像の概要を明らかにすることが出来たと考えているが、同一地域内でも水質が大きく異なる場合もあり、地域内での水質の違いや水質に影響する要因については、一部の有機塩素系化合物の汚染の場合を除けば、ほとんど明らかになっていない。富士山地下水を中心とした我々の調査研究では、富士山麓の地下水に比較的多く含まれるバナジウムやフッ素の濃度が地域内でも場所ごとに異なり、また、他の水質測定項目や環境要因と関連することなどが明らかになっている。地域ごとに、より詳細な調査研究を行うことにより、地下水の水質に影響する要因が明らかになってくる。

日本全国で問題となっている地下水の硝酸汚染は山梨県も例外ではなく、基準値を越える地点が少なからず認められている。一般的には、地下水の硝酸汚染の原因として肥料や畜産尿が疑われるが、地質に由来する場合もあり、原因の特定にはさらなる詳細な調査研究が必要である。

バナジウムの例にみられるように、地下水に含まれる微量元素の濃度は地質と関連することがある。そのことを利用して水の由来を推定する試みも行われており、地下水中微量元素の測定は地下水調査の有力な手段の1つになり得ると考えている。また、微量元素測定も含めて

様々な測定結果と地理情報を組み合わせることにより、より明確に現状把握が出来る。本研究では、地図上の平面的な位置情報と標高の組み合わせしか行っていないが、地質、土地利用状況、人口密度、森林面積などその他の様々な地理情報と組み合わせで解析していくことが今後は重要である。

謝辞

本調査研究では、地下水の採取や情報収集に際して山梨県森林環境部大気水質保全課、山梨県環境衛生監視指導センター、山梨県内各保健所ならびに山梨県衛生公害研究所の方々にご協力頂きました。心から感謝いたします。

引用文献

- 丁 文軍、長谷川達也、保坂仁美、高橋幸治、瀬子義幸 (2000) 富士山の地下水に含まれるバナジウムの糖尿病動物の対する影響. Biomed. Res. Trace Elements 11, 419-420.
- Ding, W., Hasegawa, T., Hosaka, H., Peng, D., Takahashi, K. and Seko, Y (2001a) Long-term effect of vanadate administration in drinking water on glucose homeostasis in diabetic KK mouse. J. Trace Elements Med. Biol. 80, 159-174.
- Ding, W., Hasegawa, T., Hosaka, H., Peng, D., Enomoto, S. and Seko, Y (2001b) Effect of long-term administration of vanadium in drinking water on three generation of KK mice with non-insulin-dependent diabetes mellitus (NIDDM). The third international symposium on chemistry and biological chemistry of vanadium, Abstracts, 52.
- Hamada, T (1998) High vanadium content in Mt. Fuji groundwater and its relevance to the ancient biosphere. in "Vanadium in the Environment(Part 1)", J. O. Nriagu ed., John Wiley & Sons, Inc., 97-123.
- 長谷川達也、保坂仁美、高橋幸治、瀬子義幸 (1999) HPLC/ICP-MSシステムによる生体内バナジウムの測定法の検討. Biomed. Res. Trace Elements 10, 273-274.
- 長谷川達也、瀬子義幸 (2000) 生体および環境試料中のバナジウムの形態分析. Biomed. Res. Trace Elements 11, 441-442.
- 長谷川達也、丁 文軍、高橋幸治、保坂仁美、彭 端、

- 瀬子義幸（2001）富士山の地下水中バナジウム濃度の生体影響：マウスを用いた基礎検討．35回 日本水環境学会年会講演集，564．
- 長谷川達也（2003）バナジウムを多く含む富士山地下水に糖尿病治療効果はあるのか？．山梨県環境科学研究所国際シンポジウム2002報告書、30-38．
- Heyliger, E.C., Tahiliani, G.A. and McNeill, H.J. (1985) Effect of vanadate on elevated blood glucose and depressed cardiac performance of diabetic rats. *Science* 227, 1474-1477.
- 岩下正人、安藤 寛、影山英紀、島村 匡（1994）誘導結合プラズマ質量分析計による相模川水系の水質調査．分析化学 43, 925-932．
- 風間ふたば、米山実（2002）山梨県における窒素負荷量と地下水汚染．環境科学雑誌 15(4), 271-276．
- 奥水達司、酒井陽一、戸村健児、大下一政（1998）地球環境変化の健康への影響－地球化学より－．地球環境 2, 215-220．
- McNeill, J. H. (2003) バナジウムの生物学的影響：想定される作用機構．山梨県環境科学研究所国際シンポジウム2002報告書、12-14．
- Meyerovitch, J., Farfel, Z., Sack, J. and Shechter, Y. (1987) Oral administration of vanadate normalizes blood glucose levels in streptozotocin-treated rats. *J. Biol. Chem.* 262, 6658-6662.
- 宮田雅典、寺島勝彦（1997）高度浄水処理における臭素酸イオンの生成とその挙動．水道協会雑誌 66(3)、16-25．
- 日本薬学会編（1995）衛生試験法・注解1995．
- 岡部史朗、森永豊子（1968）駿河湾に流入する河川とその河口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．
- 岡部史朗、柴崎道広、及川智文、川口賀弘、日本木均（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．
- 酒井陽一、大下一政、戸村健児、奥水達司（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．
- Sakai, Y., Ohshima, K., Koshimizu, S. and Tomura, K (1997) Geochemical study of trace vanadium in water by preconcentrational neutral activation analysis. *J. Radioanal. Nucl. Chemistry* 216, 203-212.
- 坂本康、中村文雄、風間ふたば（1993）地下水を水源とする水道水の硝酸性窒素濃度の地理的分布と時間変動．水道協会雑誌 62(6)、17-28．
- 桜井弘（2003a）インスリン様作用を示すバナジウムおよび亜鉛錯体．山梨県環境科学研究所国際シンポジウム2002報告書、15-18．
- 桜井弘（2003b）バナジウムで糖尿病を治せるか？．山梨県環境科学研究所国際シンポジウム2002報告書、26-29．
- Schroeder, H.A. (1970) Vanadium. Washington DC, American Petroleum Institute (Air Quality Monograph No. 70-13).
- Schwarz, K. and Milne, D.B. (1971) Growth effects of vanadium in the rat. *Science* 174, 426-428.
- 瀬子義幸、長谷川達也（1998）山梨県の水環境（特に地下水）の化学的特性の把握．平成9年度山梨県環境科学研究所年報 1, 11-12．
- 瀬子義幸、長谷川達也、保坂仁美、宮崎忠国、杉田幹夫（1999）山梨県内の地下水中微量元素濃度の地域差．*Biomed. Res. Trace Elements* 10, 271-272.
- 瀬子義幸、丁 文軍、長谷川達也（2000）富士山の水と糖尿病．山梨県環境科学研究所ニューズレター 4．
- 瀬子義幸（2003）生体微量元素とはなにか？－健康維持から環境ホルモン作用まで．山梨県環境科学研究所国際シンポジウム2002報告書、19-25．
- Seko, Y., Hosaka-Kobayashi, H., Hasegawa, T. and Nohara, S. (2003) Vanadium, fluoride and stable isotope ratio of oxygen in ground water from Mt. Fuji. *Proceedings of the International Symposium on Bio-Trace Elements 2003*, 125-127.
- 瀬子義幸、長谷川達也、小林仁美、野原精一（2003）富士山地下水の特徴．山梨県環境科学研究所研究報告書プロジェクト研究「富士山周辺の自然特性に関する研究」（印刷中）．
- 塚本雄介、岩波茂、石田吏、長谷川潤平、丸茂文昭（1990）慢性腎臓透析患者における高V血漿と神奈川県における水道水中の高V濃度の原因．*Biomed. Res. Trace Elements* 1, 213-214.
- Tsukamoto, Y., Saka, S. Kumano, K., Iwanami, S., Ishida, O. and Marumo, F. (1990) Abnormal accumulation of vanadium in patients on chronic hemodialysis therapy. *Nephron* 56, 368-373.
- 塚本雄介（1994）腎臓病と微量元素異常．*Biomed. Res. Trace Elements* 5, 61-68.
- 塚本雄介（2002）内科医からみた富士山の地下水－微量元素と健康－（富士山の地下水と健康）．山梨県環境科学研究所カンファレンスレポート 1, 30-31．
- 堤充紀（1979）果樹地帯における硝酸態窒素による地下水の汚染．日本陸水学会甲信越支部大会（1979年12月9日、長岡）要旨集．
- WHO (1988) *Environmental Health Criteria* 81:

Vanadium.

山梨県（1991）平成2年度公共用水域・地下水水質測定結果.

山梨県（1992）平成3年度公共用水域・地下水水質測定結果.

山梨県（1993）平成4年度公共用水域・地下水水質測定結果.

山梨県（1994）平成5年度公共用水域・地下水水質測定結果.

山梨県（1995）平成6年度公共用水域・地下水水質測定結果.

山梨県（1996）平成7年度公共用水域・地下水水質測定結果.

山梨県（1997）平成8年度公共用水域・地下水水質測定

結果.

山梨県（1998）平成9年度公共用水域・地下水水質測定結果.

山梨県（1999）平成10年度公共用水域及び地下水水質測定結果.

山梨県（2000）平成11年度公共用水域及び地下水水質測定結果.

山梨県（2002）平成12年度公共用水域及び地下水の水質測定結果.

山梨県（2003）平成13年度公共用水域及び地下水の水質測定結果.

吉澤一家、清水源治、高橋照美、茅野陽子、堤充紀（1989）甲府盆地および周辺部の地下水の水質について. 山梨衛公研年報 33、59-62.

富士山の地下水に多く含まれる微量元素バナジウムの健康影響

長谷川達也、丁 文軍、小林仁美、瀬子義幸（環境生化学研究室）

はじめに

前章で明らかとなったように、富士北麓地域の地下水や湧水には、バナジウムが 0.1 mg/L前後（他の地域に比べ50～100倍高い濃度）含まれている。また、この富士北麓地域は、水道の原水として地下水を99パーセント使用している。そして、水道原水（地下水）中のバナジウムは浄水過程でほとんど除去されない。従って、この地域の住民は、毎日水道水から知らず知らずのうちにバナジウムを摂取し続けている（我が国の水道水の水質基準にバナジウムは存在しない）。

バナジウムは元素記号「V」、原子番号「23」の遷移元素で、元素周期表ではチタン（Ti）とクロム（Cr）の間に位置し（図1）、1970年代の始めにヒヨコとラットの成長因子の一つとして必須性が証明された（Schwarz and Milne, 1971）。しかし、その他の哺乳動物やヒトにおける証明は未だなされていない。

1980年代の半ばに二つの研究グループが、バナジウムに糖尿病の治療薬として用いられるインスリンと同様の薬理作用のあることを発見した。すなわち、1985年にカナダのMcNeillらは糖尿病モデル動物（ラット）にバナジウム溶液（NaVO₄）を6週間飲ませた後、血糖値を測定した。すると、バナジウムを飲ませた動物において、

血糖値上昇が抑制され糖尿病の改善が起こることを発表した（Heyliger et al., 1985）。この知見は、バナジウムにインスリン様作用のあることを世界で初めて示した報告である。その2年後、1987年にイスラエルのMeyerovitchらはバナジウムのインスリン様作用が短期間で劇的に起こることを報告した（Meyerovitch et al., 1987）。すなわち、図2に示すごとく、糖尿病モデル動物（血糖値が400 mg/dL）にバナジウム溶液（NaVO₃）を飲料水として飲ませ始めると、400 mg/dLあった血糖値が2日後には300 mg/dLに、4日後には正常血糖値の100mg/dLにまで下がった。そして、飲料水をバナジウムの入っていない水（H₂O）に交換すると、血糖値はもとの400 mg/dLにまで上昇した。

これらの結果から、バナジウムに糖尿病治療作用のあることが期待され、現在、医薬品としてバナジウム化合物の開発が行われている（桜井, 1996）。また、アメリカではバナジウムを含む錠剤やカプセルが健康食品として薬局やドラッグストアで売られており、世界中でバナジウムと健康との関連性が注目されている。

我が国においては、最近、富士山周辺の地下水が「高バナジウム水」として、ペットボトルに詰められ売られている。そして、科学的（医学的）な研究ではないが、この水を糖尿病患者が毎日飲み続けると、血糖値が下

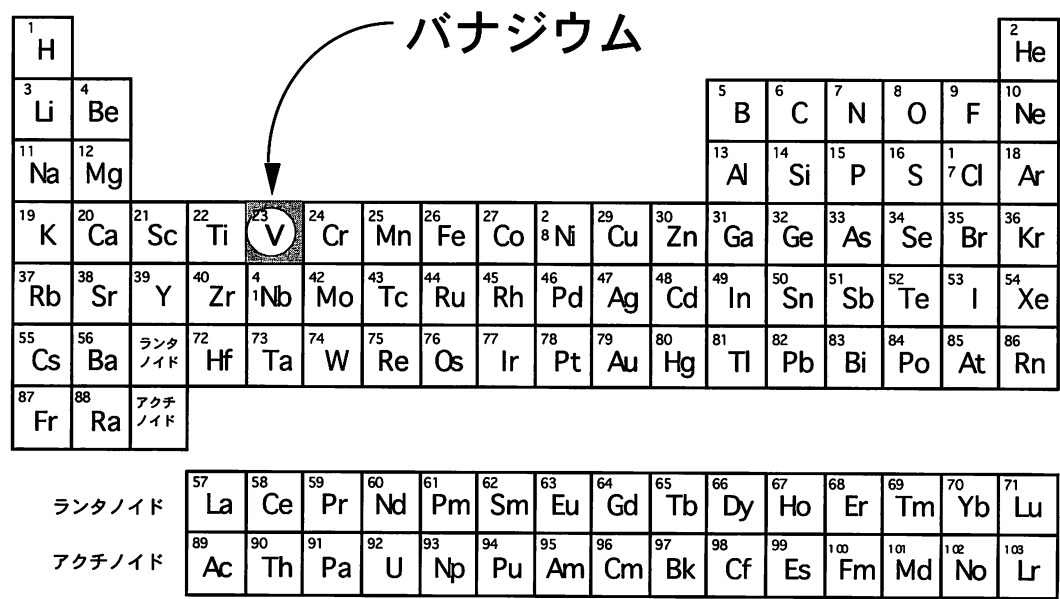


図 1 元素周期表でのバナジウムの位置

がったと言う体験談がいくつかの本に掲載されている(橋田 1999；奥田 2002；野村 2000；バナジウム・ミネラルウォーター研究会 2001)。しかし、バナジウムの濃度を考えた場合、動物においてインスリン様作用が認められたバナジウム濃度は、約80～300mg/Lであり、富士山地下水中のバナジウム濃度(0.1mg/L)に比べると1,000倍も高いことになる(図3)。従って、これまでの科学的な常識では、富士山地下水のバナジウムにインスリン様作用(血糖降下作用)を期待することは難しいと言える。しかし、前述のごとく、何人もの糖尿病患者が富士山地下水の飲用に起因すると考えられる血糖降下作用を体験しており、富士山地下水の抗糖尿病作用に関する科学的な研究が待たれている。

そこで我々は、バナジウム(富士山地下水と同程度の濃度)の健康影響(安全性・毒性)および抗糖尿病効果

(インスリン様作用)を明らかにすることを目的として、実験用動物(ハツカネズミ)を用いた基礎的検討を行うこととした。この研究の成果は、糖尿病で苦しむ患者への新しい治療法の開発、および、これまで知られていないバナジウムの生理作用(必須性)の解明に役立つと考えられる。一方、山梨県は全国一のミネラルウォーターの生産県であり、富士山周辺地域にもいくつかの工場がある。また、富士北麓地域の水道水は、前述のように富士山地下水を原水として作られている。従って、富士山地下水の生体影響を科学的に検討するこの研究は、医学・薬学分野にとどまらず、地域の産業界や水道業界などの方面からも意義深いものとなることが示唆される。

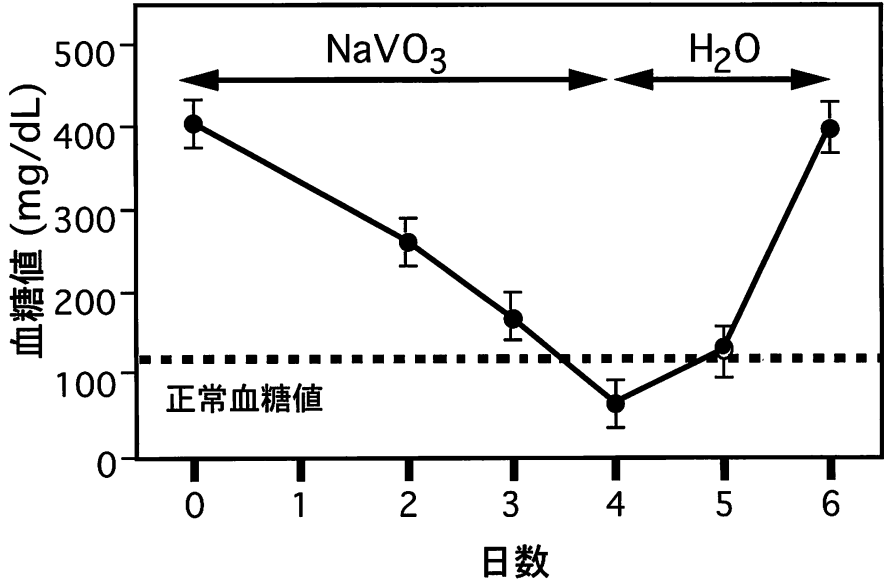


図2 バナジウムに血糖値を下げる作用(インスリン様作用)のあることを示した実験のデータ
高血糖状態のSTZ-ラットに80 mMの食塩水に溶かしたNaVO3溶液(0.8 mg/ml=334 mg V/L)を与えたときの血糖値の変化を示す。(Meyerovitch, J. et al., (1987) J. Biol. Chem., 262, 6658-6662.)

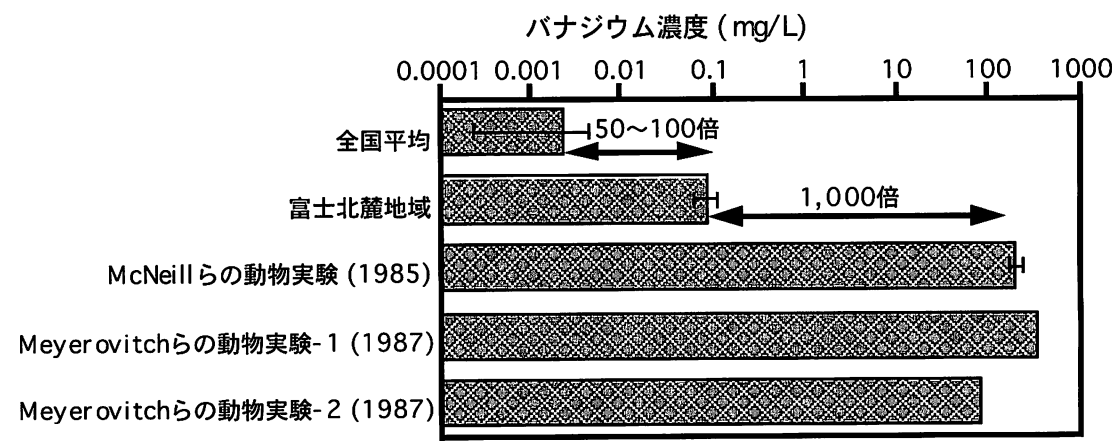


図3 バナジウム濃度の比較

実験方法

(1) バナジウムの健康影響（毒性）に関する検討

健常動物（ICR系マウス、5週齢、オスおよびメス）を日本エスエルシー株式会社より購入し、室温 $23\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度47～53%、明暗サイクル12時間のバリアシステムを施した動物飼育室に搬入した。これら動物は、富士山地下水、0.1 mg/Lバナジウム溶液および対照としてバナジウムを含まない精製水（0 mg/L）をそれぞれ飲料水として与え、 γ -線滅照射配合飼料（CE-2、日本クレア）で5週齢から60週齢まで390日間（55週）飼育した。飼育期間中定期的に動物の体重および摂水量の測定を行った。また、飼育130、260および390日後に動物を解剖し、臓器重量の測定、血液検査（RBC、WBC、PLT、Hb、Hct）ならびに生化学的検査（GOT、GPT、BUN、TCHO、グルコース）を行った。なお、動物に与えた地下水は、研究所敷地内（富士吉田市上吉田字剣丸尾5597-1）の井戸水（塩素消毒なし）をメンブランフィルター（ポアサイズ $0.45\mu\text{m}$ ）でろ過して用いた。また、バナジウム溶液は地下水中に存在する化学形である+5価のメタバナジン酸アンモニウム（関東化学）で調製した。

(2) バナジウムのインスリン様作用に関する検討

1) バナジウム水溶液（0.1～100 mg/L）で10週間飼育

インスリン非依存型糖尿病疾患モデル動物（KK系マウス、オス、5週齢）を日本クレア株式会社から購入し、室温 $23\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度47～53%、明暗サイクル12時間のバリアシステムを施した動物飼育室に搬入した。これら動物に0.1、1、10、100 mg/Lのバナジウム溶液をそれぞれ飲料水として与え、脂肪を添加した γ -線照射配合飼料（日本エスエルシー）で5週齢から15週齢まで10週間（70日）飼育した。飼育期間中定期的に動物の血糖値、体重、摂水量および摂餌量の測定を行った。また、10週齢の時点で経口ブドウ糖負荷試験（OGTT）を行い、15週齢で動物を解剖して臓器重量、生化学的検査（TCHO、TG）およびヘモグロビンA1cを測定した。対照として精製水（0 mg/L）を与えた動物についても同様の操作を行った。

2) バナジウム水溶液（0.1, 100 mg/L）で3世代飼育

インスリン非依存型糖尿病疾患モデル動物（KK系マウス、4週齢）のオスとメスに0.1あるいは100 mg/Lのバナジウム溶液をそれぞれ飲料水として与え脂肪を添加した γ -線照射配合飼料で飼育した。9週齢で交配させ、生まれた2世代目の動物を離乳後から親と同じ濃度のバナジウム溶液で飼育した。さらに2世代目の動物を交配させ、3世代目の動物を作成した。3世代目の動物も親と同じバナジウム濃度の飲料水を与え、3週齢から20週齢

まで17週間（120日）飼育した。この飼育期間中定期的に動物の血糖値、体重、摂水量および摂餌量の測定を行った。また、11および18週齢目に経口ブドウ糖負荷試験（OGTT）を行い、20週齢で動物を解剖して臓器重量の測定、生化学的検査（TCHO、TG）およびヘモグロビンA1cを測定した。対照として精製水（0mg/L）を与えた動物についても同様の操作を行った。

3) 富士山地下水で28週間飼育

インスリン非依存型糖尿病疾患モデル動物（KK系マウス、オス、8週齢）に富士山地下水をそれぞれ飲料水として与え γ -線滅照射配合飼料で8週齢から30週齢まで28週間（200日）飼育した。対照としてバナジウムを含まない精製水を飲料水として与えて同様に操作した。飼育期間中定期的に動物の血糖値、体重、摂水量および摂餌量の測定を行った。また、33週齢目に経口ブドウ糖負荷試験（OGTT）を行い、36週齢で動物を解剖して臓器重量、生化学的検査（TCHO、TG）およびヘモグロビンA1cの測定を行った。

(3) 各種測定法

血糖値（グルコース）の測定

動物の尾静脈から部分採血を行い、クルコカード（京都第一科学）を用いて血糖値を測定した。

経口ブドウ糖負荷試験（OGTT）

一晩絶食させた動物に3 mg/g体重の割合で30%ブドウ糖溶液を一回経口投与し30、60、120、180分後にそれぞれ血糖値を測定し、経口ブドウ糖負荷試験を行った。

ヘモグロビンA1c（HbA1c）

動物の腹部大動脈からヘパリン採血した血液を試料とし、陽イオン交換カラム（Shodex IEC SP-420N、昭和電工）を取り付けたHPLC（HP-1100、横河アナリティカルシステムズ）を用い、Ding et al. (2001) の方法に準じて測定を行った。

血液検査

動物の腹部大動脈からヘパリン採血した血液を試料とし、セルタックMEK（日本光電）を用いて、赤血球数（RBC）、白血球数（WBC）、血小板数（PLT）、ヘモグロビン量（Hb）およびヘマトクリット値（Hct）の測定を行った。また、これらの測定結果を基に平均赤血球容量（MCV）、平均赤血球色素量（MCH）ならびに平均赤血球ヘモグロビン濃度（MCHC）を算出した。それぞれの計算式は次に示すとおりである。

$$\begin{aligned}\text{MCV (10}^{-15}\text{L)} &= \text{ヘマトクリット値 (\%)} \\ &\quad \div \text{赤血球数 (10}^6\text{/}\mu\text{L)} \times 10 \\ \text{MCH (pg)} &= \text{ヘモグロビン量 (g/dL)} \\ &\quad \div \text{赤血球数 (10}^6\text{/}\mu\text{L)} \times 10 \\ \text{MCHC (\%)} &= \text{ヘモグロビン量 (g/dL)}\end{aligned}$$

÷ ヘマトクリット値 (%)

生化学的検査

動物の血液を腹部大動脈からヘパリン採血し、遠心操作により血液から分離した血漿を試料とし、ドライケム3500（富士フィルム）を用いて、グルタミン酸オキザロ酢酸トランスアミナーゼ（GOT）、グルタミン酸ピルビン酸トランスアミナーゼ（GPT）、血中尿素窒素（BUN）、総コレステロール（TCHO）、中性脂肪（TG）の測定を行った。

臓器中微量元素（バナジウム、亜鉛、銅）量の測定

微量元素量の定量は試料を酸で湿式灰化した後、ICP-MSで測定を行った。

湿式灰化

臓器約0.1gを試験管にとり、硝酸（電子工業用、関東化学）2 mLを加えホットプレート上のアルミブロック中で80℃ 1時間、120℃ 3時間、140℃ 2時間の条件で順次加熱し硝酸を乾固させた。つぎに、過酸化水素水（電子工業用、関東化学）2 mLと硝酸0.5 mLを加え同様にアルミブロック中で80℃ 1時間、120℃ 4時間の条件で順次加熱し過酸化水素水・硝酸を乾固させ、湿式灰化を行った。これにイオン交換水4mLを加え、ICP-MS測定用試料溶液とした。

②ICP-MSによる測定操作

ICP-MS測定用試料溶液中のバナジウム濃度測定は、フローインジェクション装置（ISIS、横河アナリティカルシステムズ）を取り付けたICP-MS（HP-4500、横河アナリティカルシステムズ）を用いて行った。ICP-MSの測定質量数として、バナジウムは51 m/z、亜鉛は66 m/z、銅は63m/zを用い、絶対検量線法により濃度を算出した。なお、バナジウムの51m/zによる測定に塩素の妨害のないことを確認している。

地下水のバナジウムの化学形態分析

バナジウムの化学形態分析はHPLC/ICP-MSシステムを用いて分析を行った（長谷川ら 1999； 長谷川・瀬子，2000）。すなわち、HPLC（HP-1100、横河アナリティカルシステムズ）の分析用カラムにCapcell Pak UG120（資生堂）、移動相には6%メタノールおよび2mMテトラブチルアンモニウムフォスフェイトを含む3 mM EDTA溶液を用い、0.5ml/minの流量でバナジウム化合物の分離を行い、オンラインでICP-MSに導入して51 m/zによるバナジウムの測定を行った。

結果ならびに考察

（1）バナジウムの健康影響（毒性）に関する検討

バナジウムは、水道水の水質基準や監視項目に収載されておらず、浄水場ではバナジウムの検査は行われていない。このことは、過去にバナジウムによる環境汚染のような社会的問題が発生していないこと、さらに、未来においてもその可能性が低いことを示している。しかし、富士北麓地域の住民は他の地域に比べ50～100倍多いバナジウムを、毎日水道水から知らず知らずのうちに摂取しており、このことに起因する健康影響が起きる可能性が100パーセントないとは断言できない。そこで我々は、これらの疑問をはっきりさせる目的で、富士山地下水と同程度のバナジウムを含む水で健康動物を長期間飼育し、バナジウムの健康影響（毒性）に関する検討を行った。

動物の体重変化

健康マウスのオスならびにメスを5週齢から60週齢まで390日間、富士山地下水、0.1mg/Lバナジウム溶液およびバナジウムを含まない精製水の3種類でそれぞれ飼

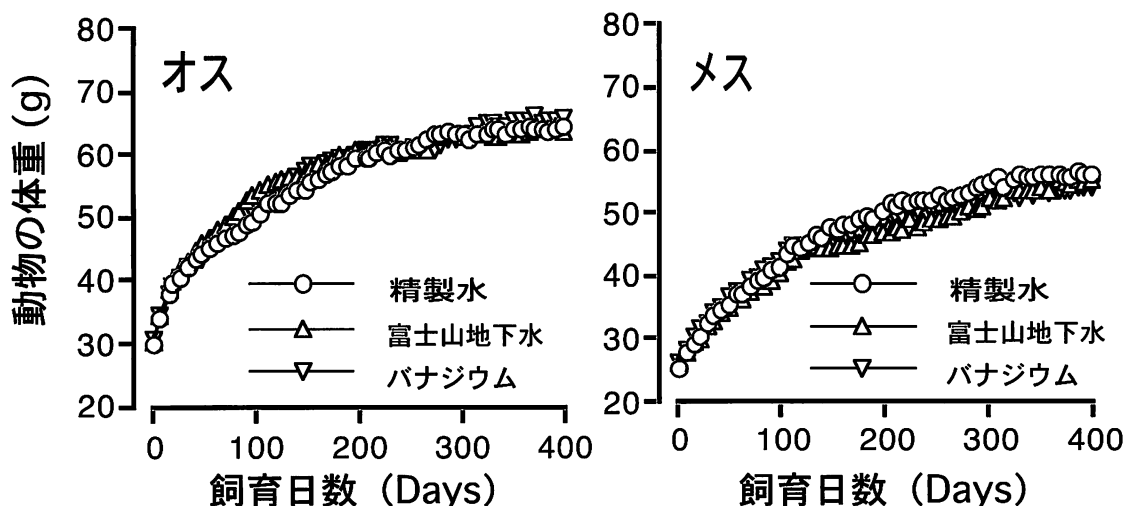


図4 富士山地下水およびバナジウムを与えた健康動物の体重変化

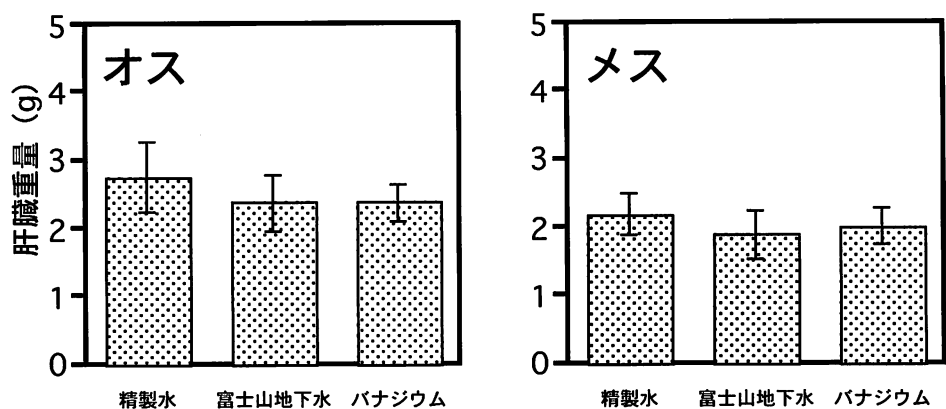


図5 富士山地下水およびバナジウムを与えた健常動物の肝臓重量 (60週齢)

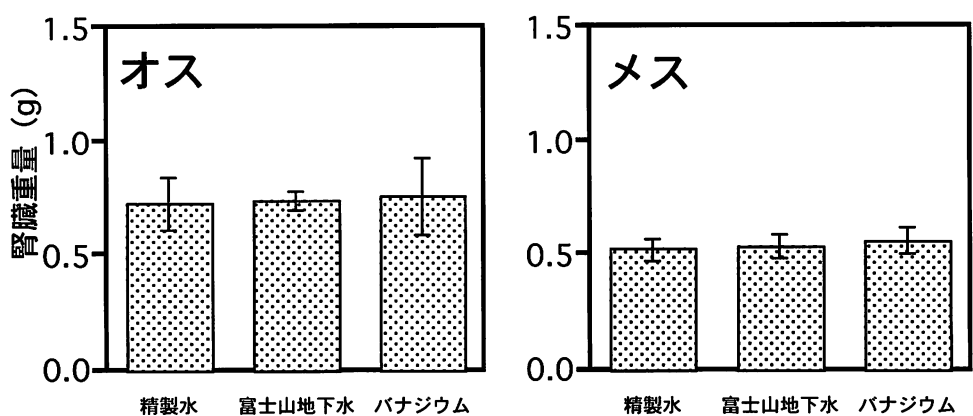


図6 富士山地下水およびバナジウムを与えた健常動物の腎臓重量 (60週齢)

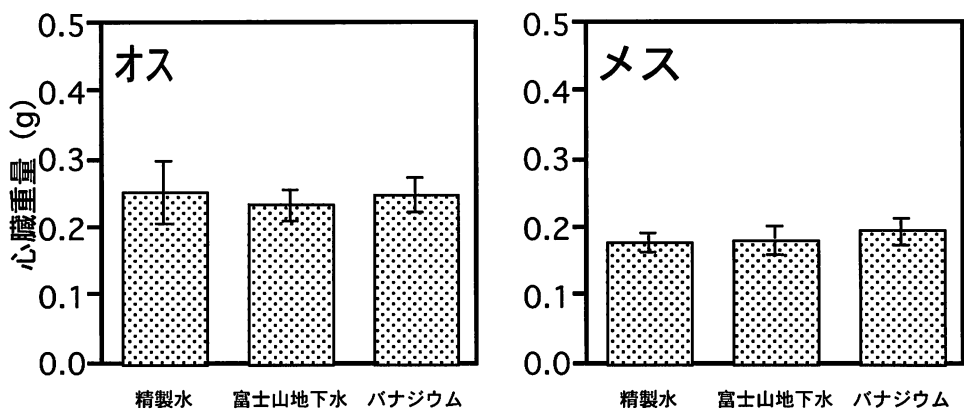


図7 富士山地下水およびバナジウムを与えた健常動物の心臓重量 (60週齢)

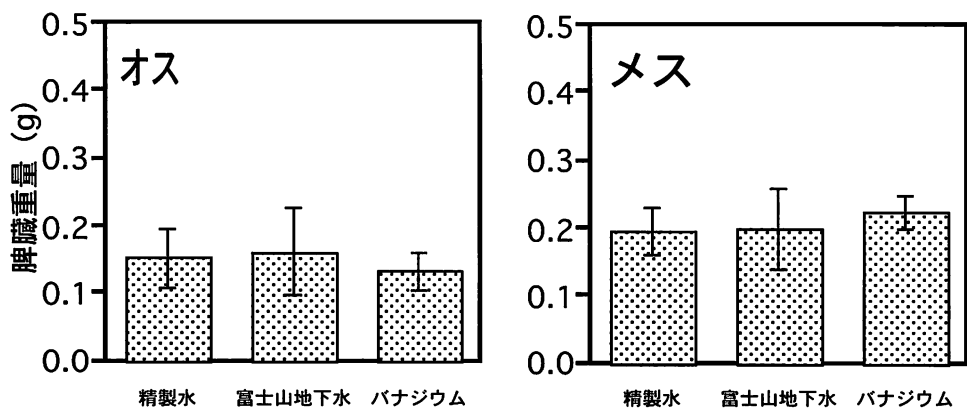


図8 富士山地下水およびバナジウムを与えた健常動物の脾臓重量 (60週齢)

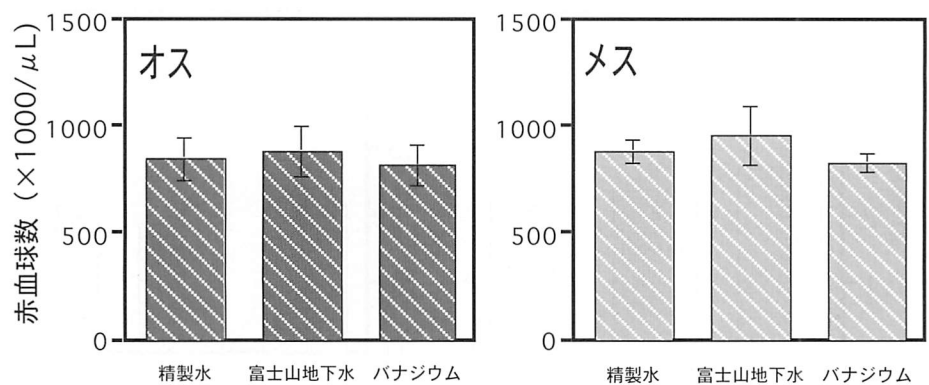


図9 富士山地下水およびバナジウムを与えた健常動物の赤血球数

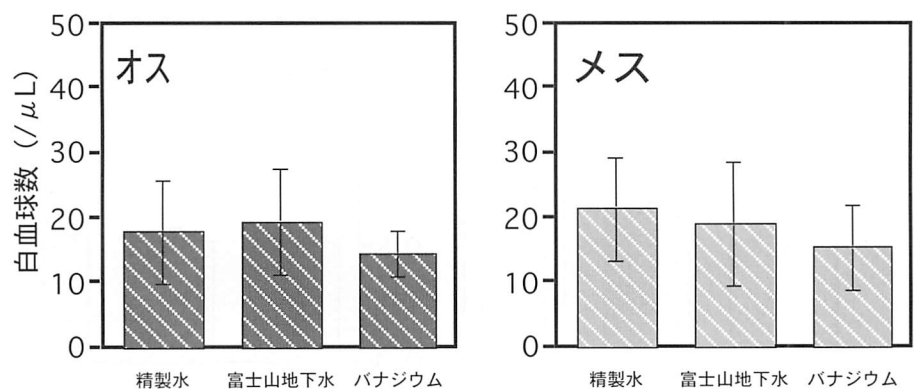


図10 富士山地下水およびバナジウムを与えた健常動物の白血球数

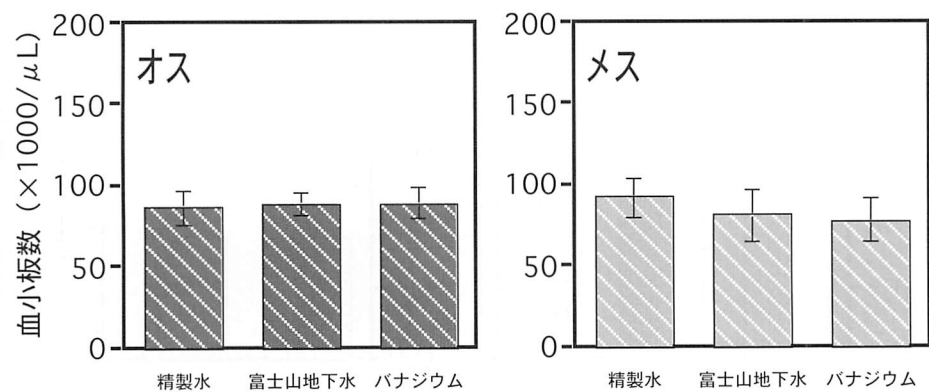


図11 富士山地下水およびバナジウムを与えた健常動物の血小板数

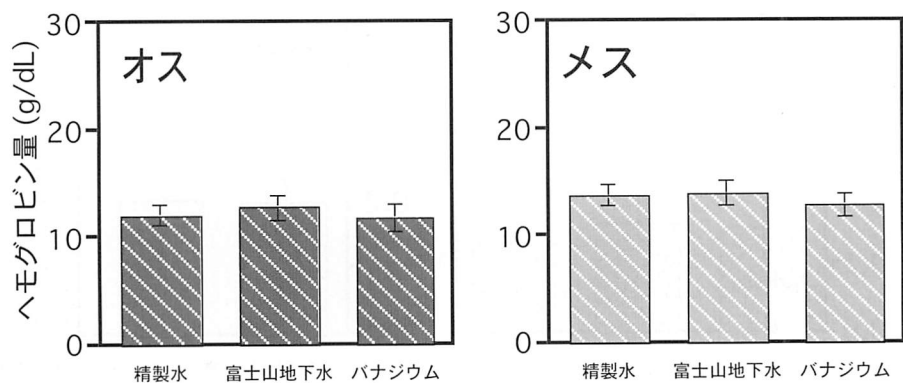


図12 富士山地下水およびバナジウムを与えた健常動物のヘモグロビン量

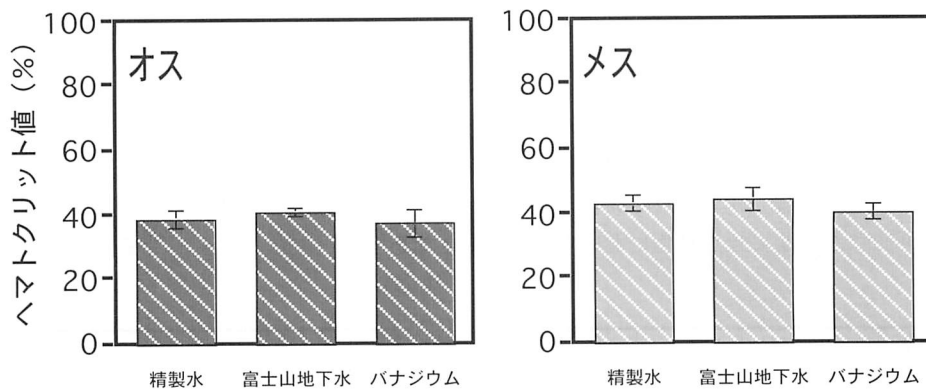


図13 富士山地下水およびバナジウムを与えた健常動物のヘマトクリット値

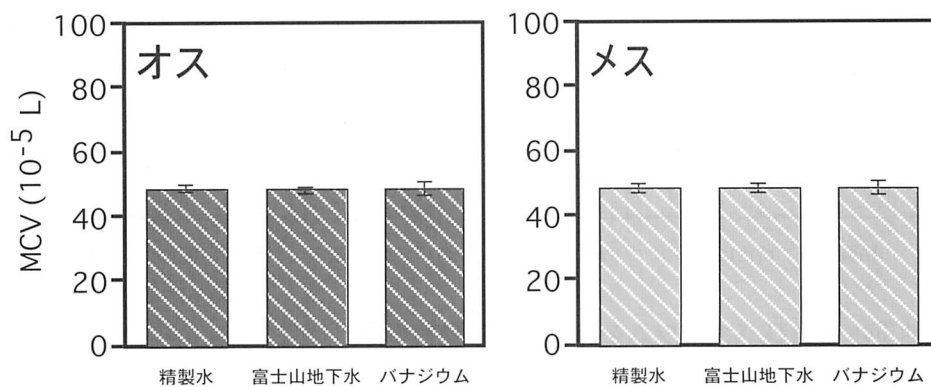


図14 富士山地下水およびバナジウムを与えた健常動物のMCV値

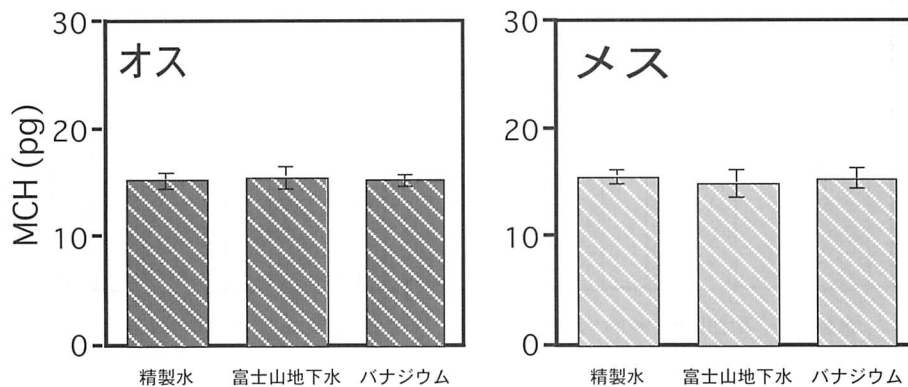


図15 富士山地下水およびバナジウムを与えた健常動物のMCH値

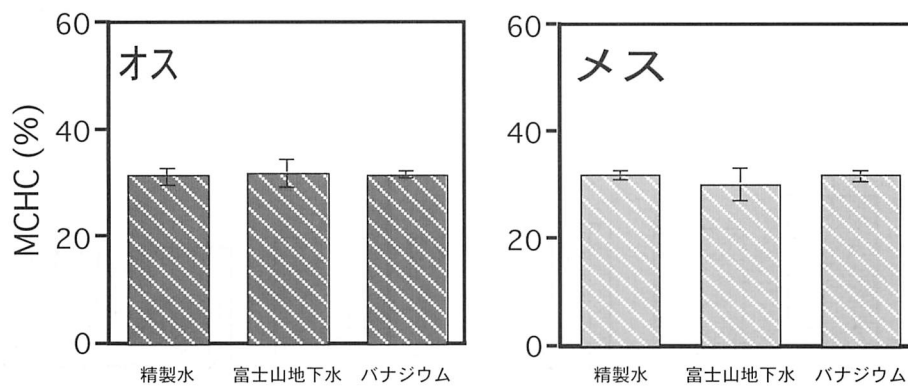


図16 富士山地下水およびバナジウムを与えた健常動物のMCHC値

育した。そして、一週間に一回の割合で動物の体重測を行った(図4)。その結果、精製水を与えたオス-マウスは、飼育開始直後から成長に伴う体重増加が認められ、200日後には約60グラム、390日後には約65グラムに達した。メス-マウスはオスより体重が軽いものの、200日後には約50グラム、390日後には約55グラムに成長した。富士山地下水やバナジウムを飲ませた動物において

も、精製水を与えた対照動物と同様に体重が増加し、オス、メス両方とも成長に伴う体重増加に、飲料水の違いによる有意な差は認められなかった。

解剖所見ならびに臓器重量

飼育開始130,260および390日後にオス、メスともに4匹づつ動物を解剖した結果、記載すべき解剖所見は発見できなかった。また、肝臓、腎臓、心臓、脾臓をそれぞれ

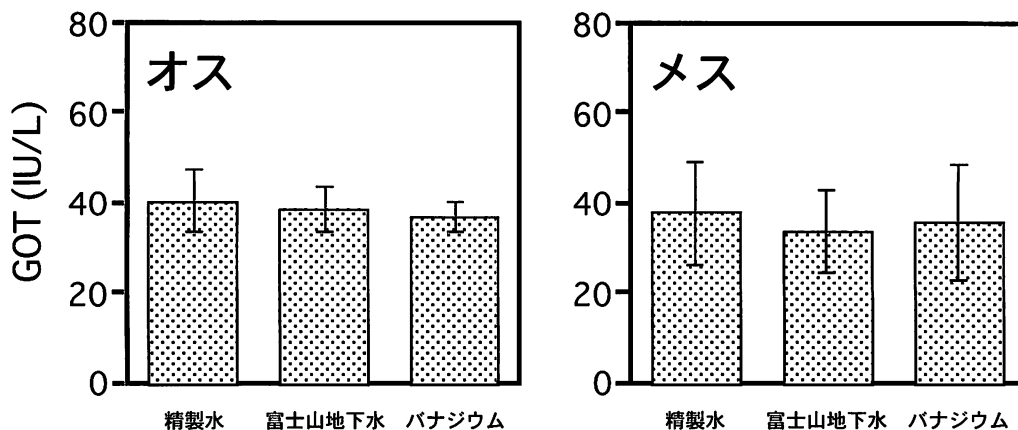


図17 富士山地下水およびバナジウムを与えた健常動物のGOT活性

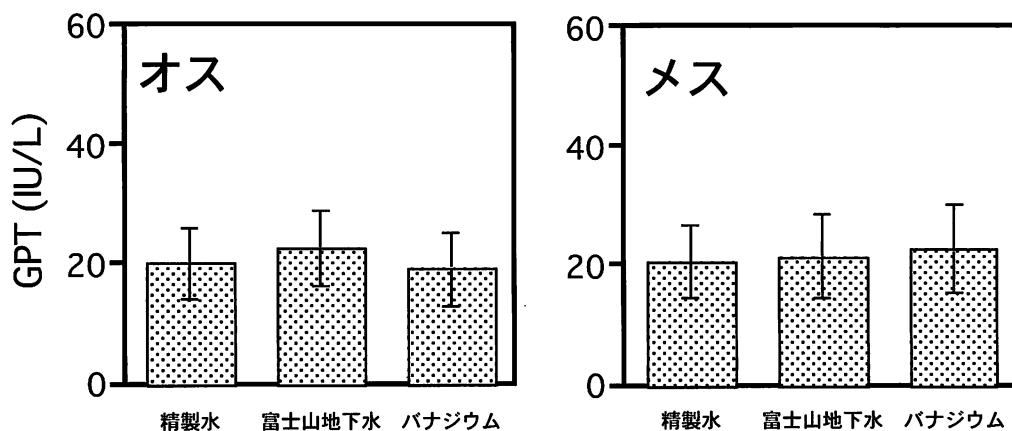


図18 富士山地下水およびバナジウムを与えた健常動物のGPT活性

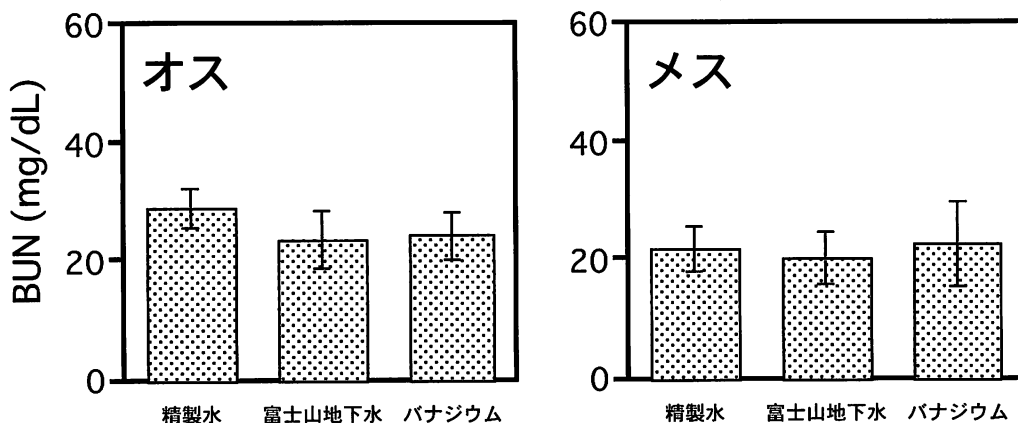


図19 富士山地下水およびバナジウムを与えた健常動物のBUN値

れ摘出し、臓器重量の測定を行った。図5に390日後（60週齢）に解剖したマウスの肝臓の重量を示す。精製水、富士山地下水、バナジウム（0.1mg/L）をそれぞれを与えて飼育した動物の肝重量に有意な差は、オス、メス共に認められなかった（120日後、260日後のデータも同様であったため省略した。なお、図には各群の平均および標準偏差を示した）。

腎臓、心臓、脾臓の臓器重量の測定結果を図6、図7、図8にそれぞれ示す。これら臓器においても、肝臓と同様に3種類の飲料水の違いによる有意な差は認められなかった。

血液検査

精製水、富士山地下水、バナジウム（0.1 mg/L）の3種類の飲料水で飼育した動物の血液検査（RBC、WBC、PLT、Hb、Hct）を130、260および390日後に行った。図9、図10、図11、図12、図13に390日後（60週齢）に測定したデータを示す。オス、メスともに赤血球数（RBC）、白血球数（WBC）、血小板数（PLT）、ヘモグロビン量（Hb）ならびにヘマトクリット値（Hct）を測定した結果、どの測定項目も飲料水の違いによる有意な差は認められなかった。また、平均赤血球容量

（MCV）、平均赤血球色素量（MCH）ならびに平均赤血球ヘモグロビン濃度（MCHC）を算出したが、これらの値にも違いは認められなかった（図14、図15、図16）

（120日後、260日後のデータも同様であったため省略した）。

生化学的検査

精製水、富士山地下水、バナジウム（0.1mg/L）の3種類の飲料水で飼育した動物について、肝障害の指標としてGOTとGPTを、腎障害の指標としてBUNの測定を行った。また、健康動物へのバナジウムの血糖降下作用を検討するため、血中のグルコースおよび総コレステロール（TCHO）の測定も行った。図17、図18、図19にGOT、GPT、BUNの測定結果を示す。富士山地下水およびバナジウムを飲んだ動物において、肝障害や腎障害が発生することはオス、メス共に認められなかった。

血中グルコース濃度ならびに総コレステロール量を測定した。その結果、図20と図21に示すごとく、富士山地下水およびバナジウムを飲んだ動物において、血中グルコース濃度や総コレステロール量が対照の精製水を飲んだ動物より低くなることは認められなかった。

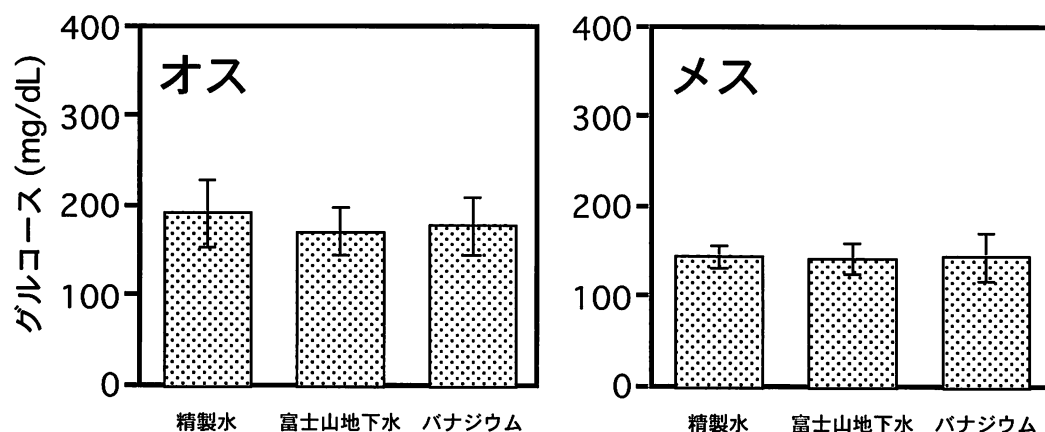


図20 富士山地下水およびバナジウムを与えた健康動物の血中グルコース濃度

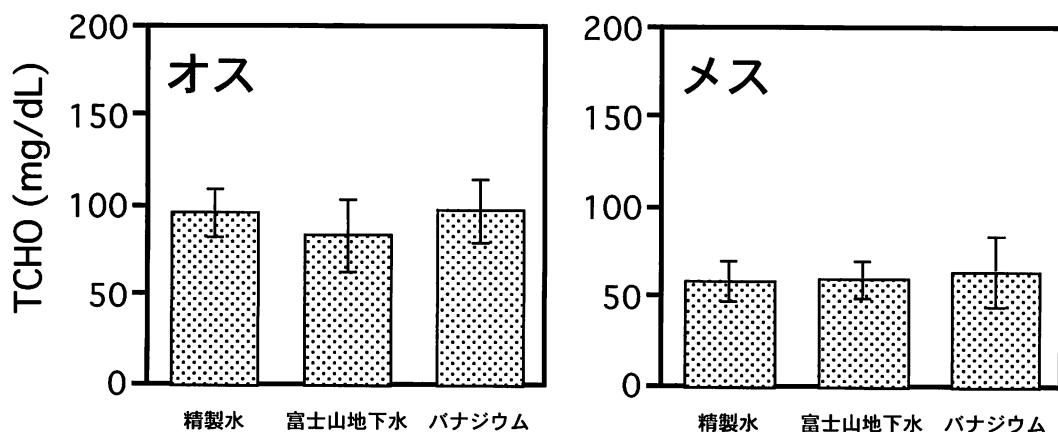


図21 富士山地下水およびバナジウムを与えた健康動物の総コレステロール量

まとめ

富士山地下水のバナジウム安全性を確かめる目的で、富士山地下水および0.1mg/Lのバナジウム溶液（富士山地下水と同程度のバナジウム濃度）で、健常動物を長期間飼育し、バナジウムの健康影響（毒性）に関する検討を行った。その結果、富士山地下水およびバナジウム溶液（0.1mg/L）で健常マウスを1年以上飼育しても、バナジウムに起因する一般毒性の発生しないことが明らかとなった。また、健常動物の正常な血糖値を下げる効果も認められなかった。

(2) バナジウムのインスリン様作用に関する検討

富士山地下水に含まれているバナジウム濃度（0.1 mg/L）にインスリン様作用（血糖降下作用）があるのか否かを検討する目的で、糖尿病疾患モデルマウスによる検討を行った。今回実験に使用した動物は先天的に高血糖を発症するマウスで、インスリン非依存型糖尿病疾

患モデル動物として知られている。この動物（オス）は図22に示すごとく、成長と共に血糖値が上昇する。なお、メスでは血糖値の上昇は少ないため、実験ではオスを用いた。

1) バナジウム水溶液で10週間飼育

インスリン非依存型糖尿病疾患モデルマウスを5週齢から15週齢まで10週間、バナジウム濃度を0.1、1、10、100 mg/Lに調製した水溶液で飼育した。また、これら動物の対照としてバナジウムを含まない精製水（0 mg/L）でも動物を飼育した。

動物の体重変化

図23に動物の体重変化を示す。精製水（0mg/L）を与えたマウスは、飼育開始直後から成長に伴う体重増加が認められた。富士山地下水と同レベルのバナジウム溶液（0.1mg/L）を与えた動物、ならびに1mg/L、10 mg/Lを与えた動物群においても、精製水を与えた対照と同様に体重は増加した。一方、最高投与量である100 mg/Lを与えた動物においては、体重増加が抑制されることが明らかとなった。

血糖値変化ならびに飲料水とエサの摂取量

図24に血糖値を測定した結果を示す。精製水（0 mg/L）を与えた動物は、始め200mg/dLであった血糖値が、8週齢以降上昇して12週齢で450mg/dLに達した。バナジウム0.1 mg/L、1 mg/L、10 mg/Lをそれぞれ与えた動物においても、同様に血糖値の上昇が認められた。しかし、100mg/Lバナジウム飲水群では明らかに血糖値の上昇は抑制された。この結果は、100mg/Lのバナジウムにインスリン様作用があることを示している。しかし、この100mg/Lという濃度は、これまでにバナジウムのインスリン様作用が報告されている既存の濃度と同じ濃度レベルである（Heyliger et al., 1985 ; Meyerovitch et al., 1987）。

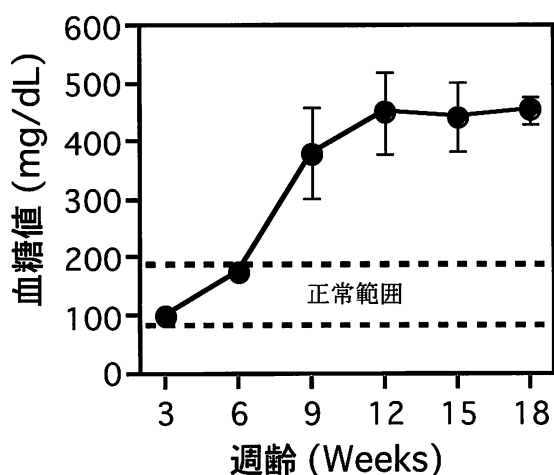


図22 糖尿病疾患モデル動物の成長に伴う血糖値変化

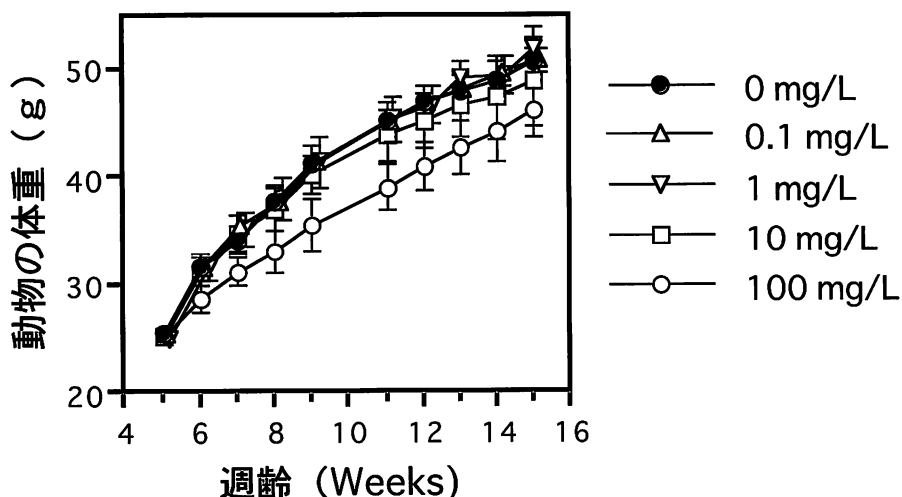


図23 バナジウム含有飲料水を与えて飼育した糖尿病モデル動物の体重変化

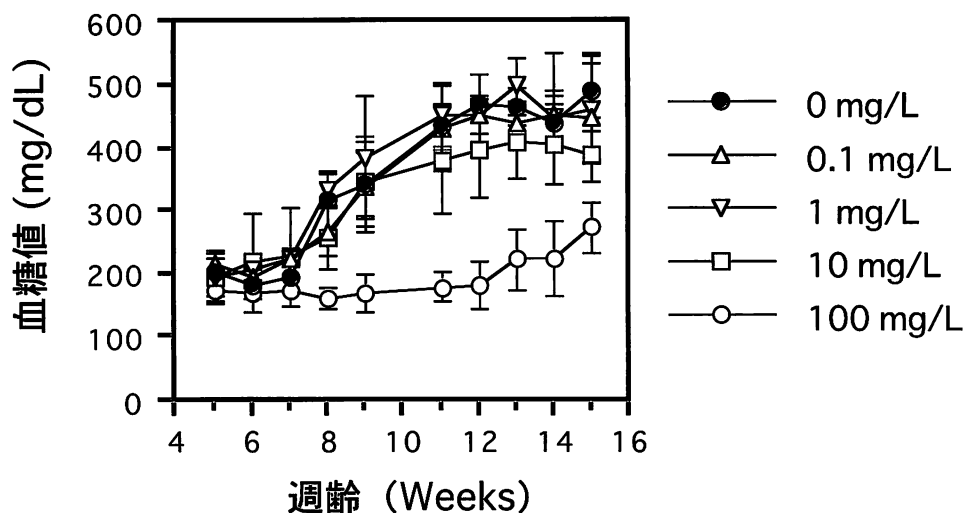


図24 パナジウム含有飲料水を与えて飼育した糖尿病モデル動物の血糖値変化

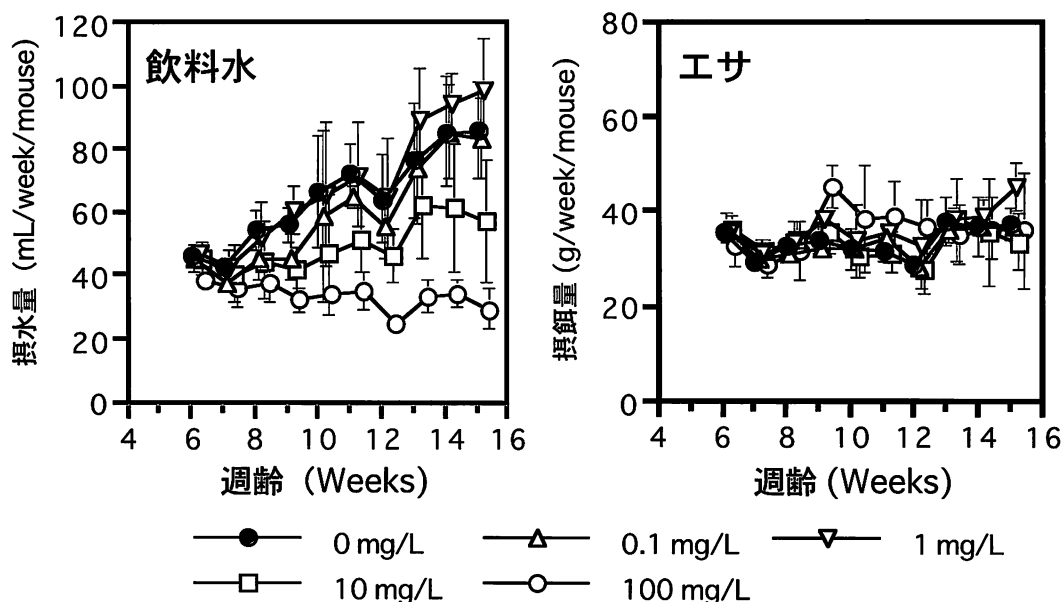


図25 パナジウム含有飲料水およびエサの摂取量

糖尿病が発症すると、著しい咽喝がおこり、飲料水の摂取量が増大することが知られている。図25にパナジウム含有飲料水およびエサの摂取量を測定した結果を示す。血糖値が上昇している動物群（0、0.1、1、10 mg/L）で、飲料水摂取量が増加していることが確かめられた。血糖値の上昇が抑制された100mg/L群では明らかに飲料水摂取量が他の動物群に比べ低いことが示された。一方、エサの摂取量は全ての動物において大きな違いは認められなかった。なお、この実験では、短期間に血糖値を上昇させる目的で、脂肪を添加した固形飼料を用いた。

経口ブドウ糖負荷試験ならびにヘモグロビンA1c量

血糖値測定以外の糖尿病の指標として、経口ブドウ糖負荷試験（OGTT）およびヘモグロビンA1c（HbA1c）の測定を行った。経口ブドウ糖負荷試験は一般に糖尿病

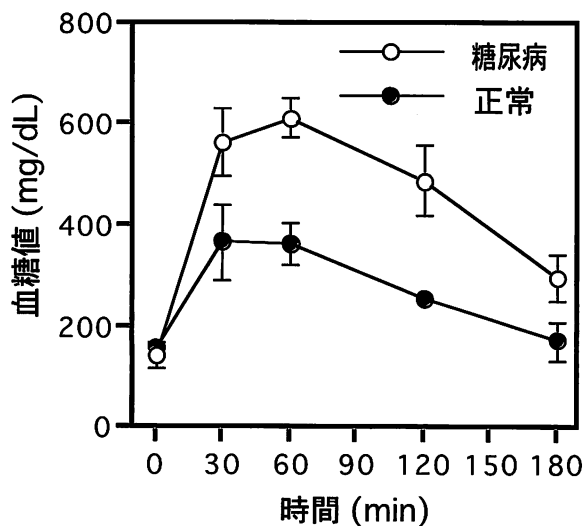


図26 ブドウ糖負荷試験の原理

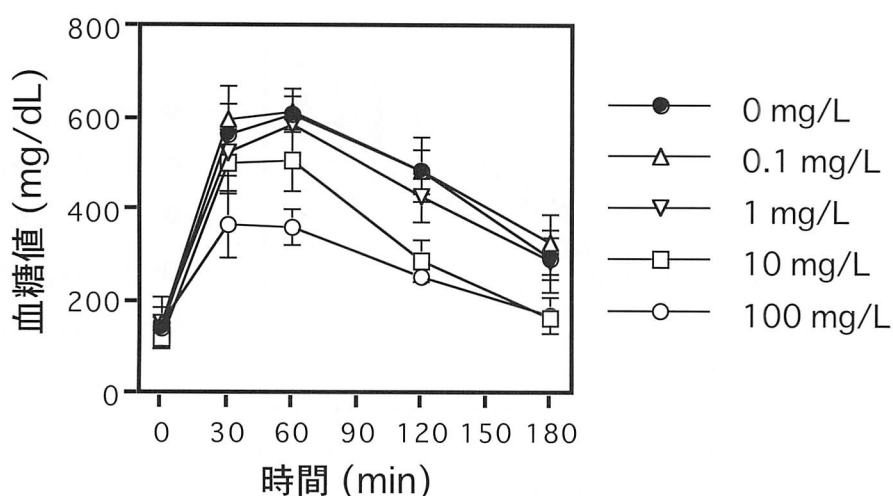


図27 バナジウム含有飲料水を与えて飼育した糖尿病モデル動物における経口ブドウ糖負荷試験（10週齢）

の診断に用いられている方法で、絶食させて血糖値が下がった動物に、一定量のブドウ糖を1回経口投与し、経時的に血糖値を測定して行われる。図26に代表的な症例を示す。

正常な動物ではブドウ糖が投与されると、ただちに膵臓からインスリンが分泌されるため、血糖値の上昇は抑制され、短時間に正常血糖値に回復する。しかし、糖尿病の場合、膵臓からのインスリン分泌が少なかったり、インスリンの作用が抑制されているため、血糖値は高く上昇して回復するのに時間を要することになる。この原理に基づいて、バナジウム含有飲料水を摂取させた動物において、10週齢目にブドウ糖負荷試験を行った。

ブドウ糖負荷試験の結果を図27に示す。糖尿病が発症している動物群（0, 0.1, 1, 10mg/L）において、ブドウ糖投与30分後に急激に血糖値が上昇することが観察された。一方、糖尿病の発症が抑制されている100mg/L群では、血糖値の上昇は緩やかであった。また、0 mg/L, 0.1 mg/L, 1 mg/L群ではブドウ糖投与180分後においても完全な血糖値の回復は認められなかった。しかし、10 mg/Lおよび100 mg/L群では、180分後で血糖値の回復が認めれた。この結果から10mg/Lには、血糖値を下げる作用は認められないが（図24）、経口ブドウ糖負荷試験のようなより鋭敏な指標を選ぶと、糖尿病治療効果が期待できる可能性が示された。100mg/Lには血糖値の上昇抑制に引き続き（図24）、経口ブドウ糖負荷試験でも糖尿病治療効果が示された。

ヘモグロビンA1c（HbA1c）の測定結果を図28に示す。HbA1cはヘモグロビンのβ鎖のN末端にグルコースが結合したもので、過去1～2ヶ月間（赤血球の寿命）の血糖値の平均を表現している。すなわち、この値の上昇は過去1～2ヶ月間血糖値が高かったことを意味している。従って、HbA1cは血糖値と異なり採血当日の食事の影響を受けない特徴を持つが、鋭敏さに欠ける欠点もある。

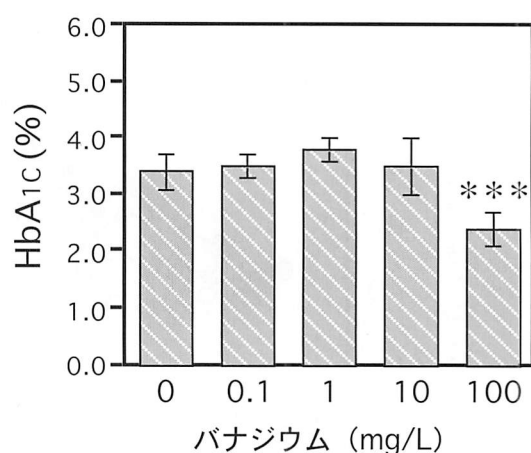


図28 バナジウム含有飲料水を与えて飼育した糖尿病モデル動物におけるHbA1c量（15週齢）（***p<0.005）

HbA1cを動物が15週齢のとき測定した結果、100 mg/Lバナジウム溶液で飼育した動物においてのみ、有意にHbA1cの低下が認められた。従って、100 mg/Lのバナジウムがインスリン様作用を示すことがHbA1cの測定結果からも示された。

総コレステロールならびに中性脂肪

糖尿病患者、特に2型糖尿病では高コレステロール血症や高中性脂肪血症が多くみられることが知られている。そこで、動物の総コレステロールおよび中性脂肪量の測定を行った。その結果を図29に示す。総コレステロールに関しては、精製水（0mg/L）を与えて飼育した動物に比べ、バナジウム10 mg/Lおよび100 mg/L投与群で、有意な減少が認められた。しかし、精製水を与えた動物の総コレステロール量（170mg/dL）は高コレステロール血症と診断されるレベルではない。従って、このデータは正常範囲内のコレステロール値をさらに下げたことを意味している。高コレステロールの値をバナジウムが下げるかどうかは今後の検討課題である。一方、

中性脂肪は0 mg/L群で400 mg/dL（高い中性脂肪血症レベル）の値を示し、100 mg/L投与群で320 mg/dLにまで有意に減少することが認められた。これらの結果から、バナジウムが糖代謝以外に脂質の代謝にも影響を示す可能性が示された。

臓器中バナジウム蓄積量

飲料水から摂取したバナジウムが、体内のどの臓器に蓄積しているのかを明らかにするため、ICP-MS装置を用いて、臓器中バナジウムの測定を行った。図30に示すごとく肝臓、腎臓、心臓、脾臓、膵臓、脳の各臓器中バナジウムは、投与量の増加に伴い上昇することが明らかとなった。また、これまでの結果から示された、インスリン様作用を示した100mg/Lのバナジウムを摂取した場合、明らかにバナジウムが各臓器で高濃度蓄積してい

た。しかし現時点で、バナジウムのインスリン様作用のメカニズムは解明されていない。従って、バナジウムがどの臓器に多く蓄積すると血糖値が下がるのか不明である。今後、バナジウムが各臓器中でどのような化学形で存在するのかを検討し、バナジウムの代謝機構に関する研究も必要である。

臓器重量ならびに毒性指標

(1)の実験で示したように、0.1 mg/Lのバナジウム溶液は健常動物に一年間以上飲ませ続けても、毒性は発現しなかった。しかし、バナジウムを糖尿病の治療に用いる場合の有効濃度は10mg/L以上であると考えられる。従って、この濃度は0.1mg/Lに比べて100倍以上高く、臓器中に蓄積したバナジウム量も非常に多い（図30）。従って、バナジウムのインスリン様作用に伴う副作用

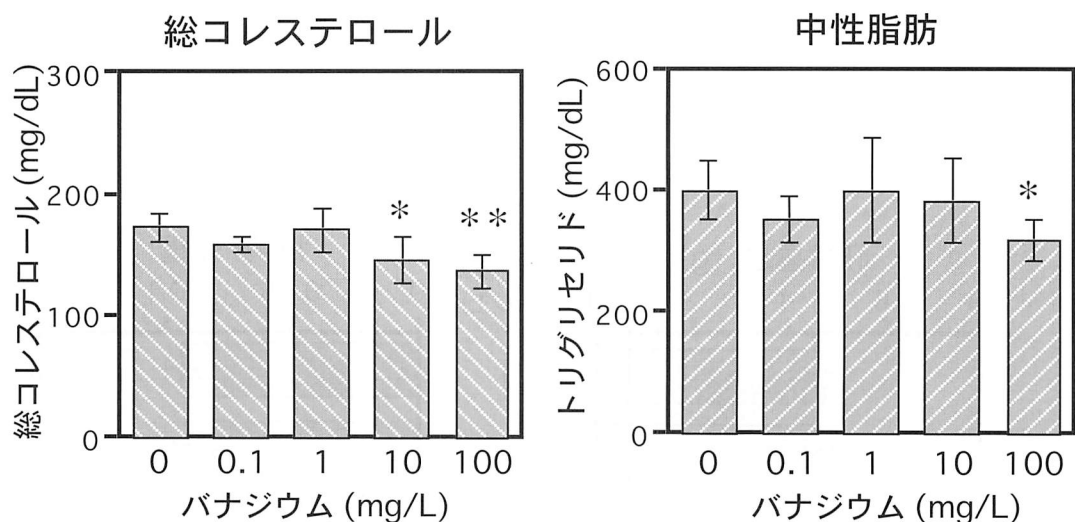


図29 バナジウム含有飲料水を与えて飼育した糖尿病モデル動物における総コレステロールおよび中性脂肪（15週齢）(* $p<0.05$, ** $p<0.01$)

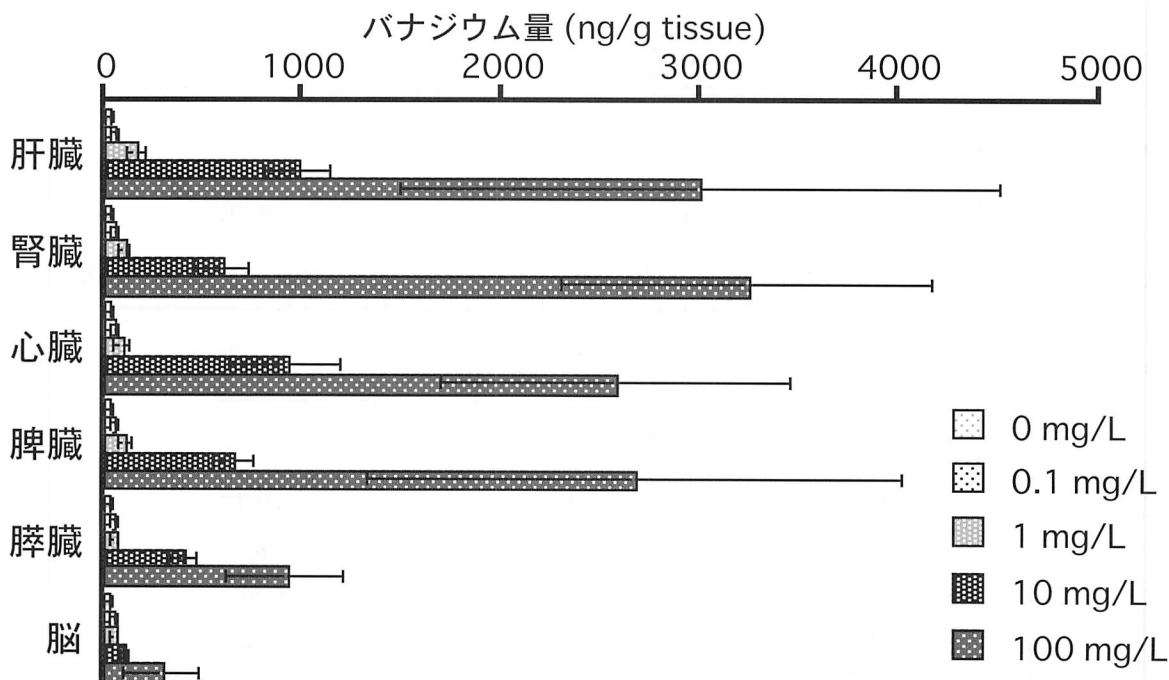


図30 バナジウム含有飲料水を与えて飼育した糖尿病モデル動物の臓器中バナジウム量（15週齢）

(毒性)が心配となる。そこで、障害の指標として、臓器重量ならびに生化学的検査 (GOT、GPT、BUN) を行った。

肝臓の重量を図31に示す。図の左側は臓器重量の測定結果を示した。100mg/Lを与えた動物で、肝重量の有意な減少が認められた。しかし、この群の動物は体重の減少も認められている (図23)。そこで、右側に肝重量を動物の体重あたりに換算した結果を示す。このデータにおいても、バナジウム100mg/Lを与えた動物で有意な減少がみとめられた。

糖尿病を発症すると、肝臓には脂肪が蓄積して脂肪肝の症状を呈することが知られている。従って、100 mg/Lバナジウムを与え、血糖値が減少している動物における肝重量の減少の原因として、①脂肪肝の改善、②肝障害の発現、の二つが考えられる。このことに関しては、生化学的検査の結果 (図35) のところで詳細に考察する。

図32、図33および図34にそれぞれ腎臓、心臓ならびに脾臓の測定結果を示す。腎臓および心臓は、肝臓と同様

に高濃度のバナジウムを与えたマウスで重量の減少が認められた。しかし、体重あたりに換算した結果、これら臓器の重量減少は認められなくなった。これらの結果は単に、動物の体重が少ないため腎臓と心臓も小さい、ということの意味している。一方、脾臓においては統計学的に有意ではないが、肥大する傾向が認められた。

図35にバナジウム含有飲料水を与えて飼育した糖尿病モデル動物の生化学的検査結果を示す。一般に、GOTならびにGPT活性は肝臓に障害が認められる場合に増加し、BUN値は腎臓に障害が認められると上昇する。しかし、図35に示すごとく、これら生化学的検査の値はバナジウムの投与量の増加に伴い減少することが認められた。すなわち、糖尿病を発病している精製水 (0 mg/L) 投与マウスに比べて減少している訳である。この原因として、図31に示した肝臓の重量の変動の場合と同様に次の二つの事が考えられる。①精製水 (0 mg/L) 投与マウスは、糖尿病に伴う合併症として肝臓および腎臓に障害が発生し、そのために生化学的検査の値が上昇していた。そして、バナジウム摂取により糖尿

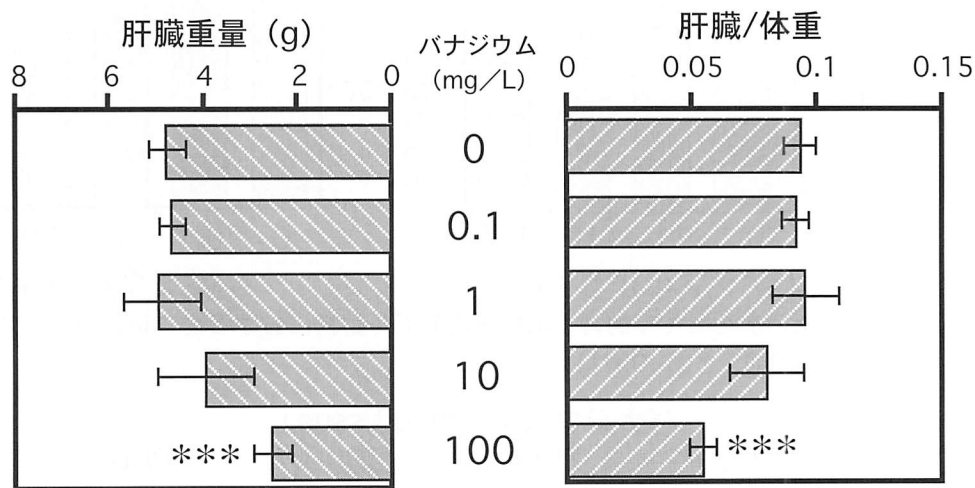


図31 バナジウム含有飲料水を与えて飼育した糖尿病モデル動物の肝臓重量 (15週齢) (**p<0.005)

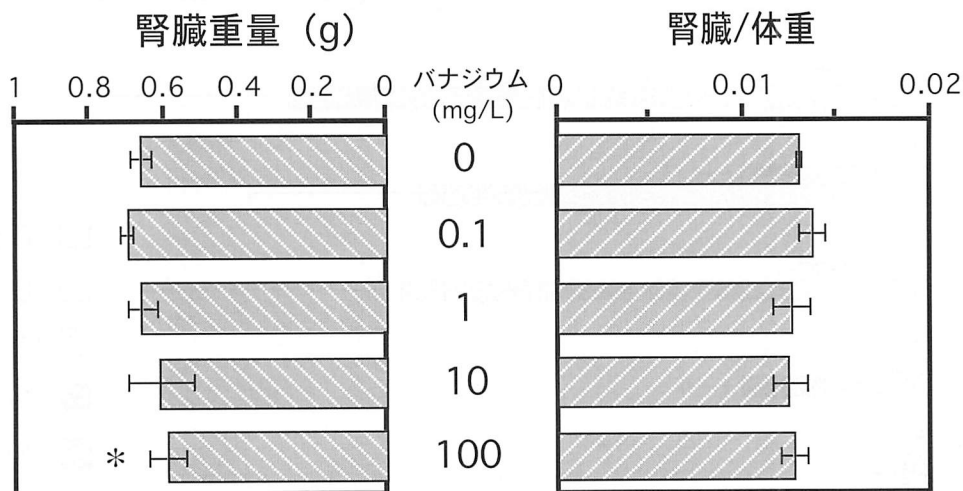


図32 バナジウム含有飲料水を与えて飼育した糖尿病モデル動物の腎臓重量15週齢 (*p<0.05)

病および合併症が改善され、生化学的検査の値が減少した。②バナジウムがGOTやGPTなどの酵素にアタックしてその活性を阻害したため（バナジウムの毒性のため）生化学的検査の値が低下した。

我々はこれら二つの仮定を想定しているが、これまでの検討では結論は導き出せない。なぜならば、今回実験に使用した糖尿病疾患モデル動物（KKマウス）は、体重増加に伴い血糖値が上昇して糖尿病を発病する。従っ

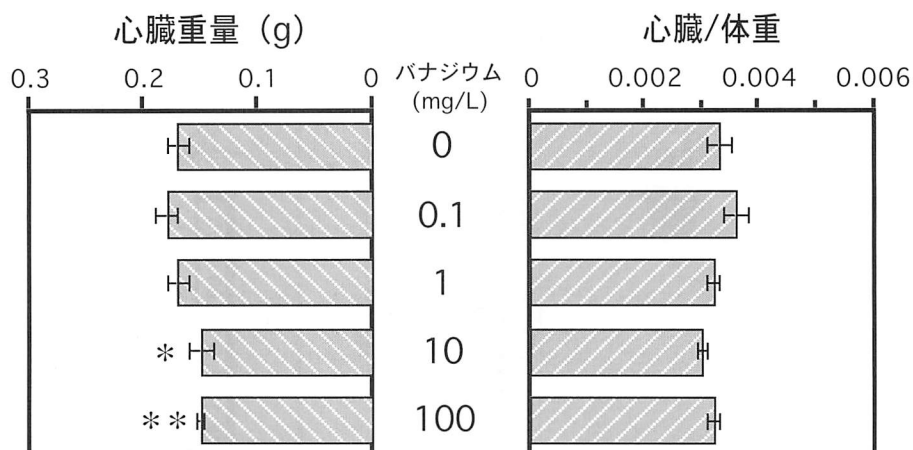


図33 バナジウム含有飲料水を与えて飼育した糖尿病モデル動物の心臓重量（15週齢）
(*p<0.05, **p<0.01)

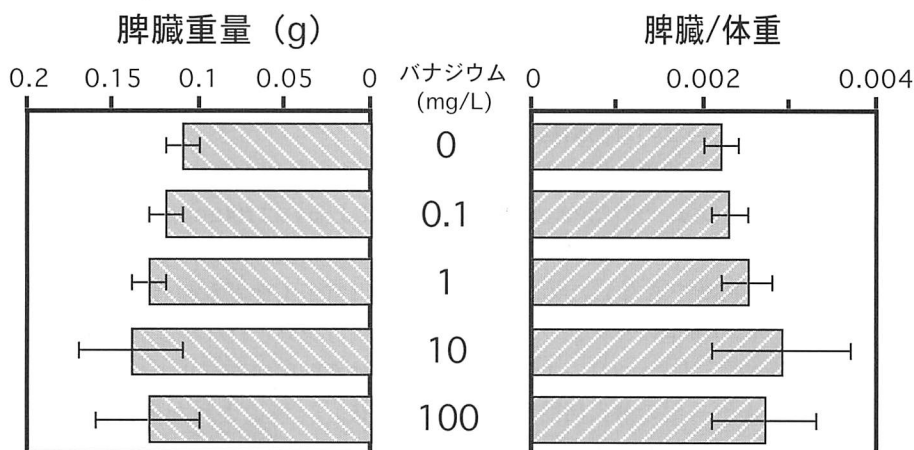


図34 バナジウム含有飲料水を与えて飼育した糖尿病モデル動物の脾臓重量（15週齢）

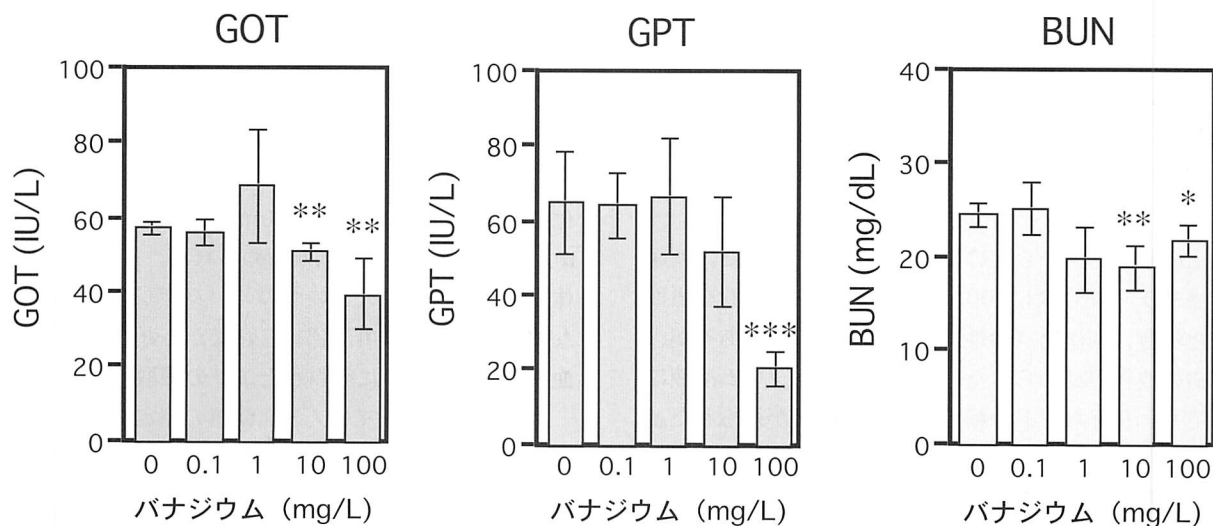


図35 バナジウム含有飲料水を与えて飼育した糖尿病モデル動物の生化学的検査結果（15週齢）
(*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.005)

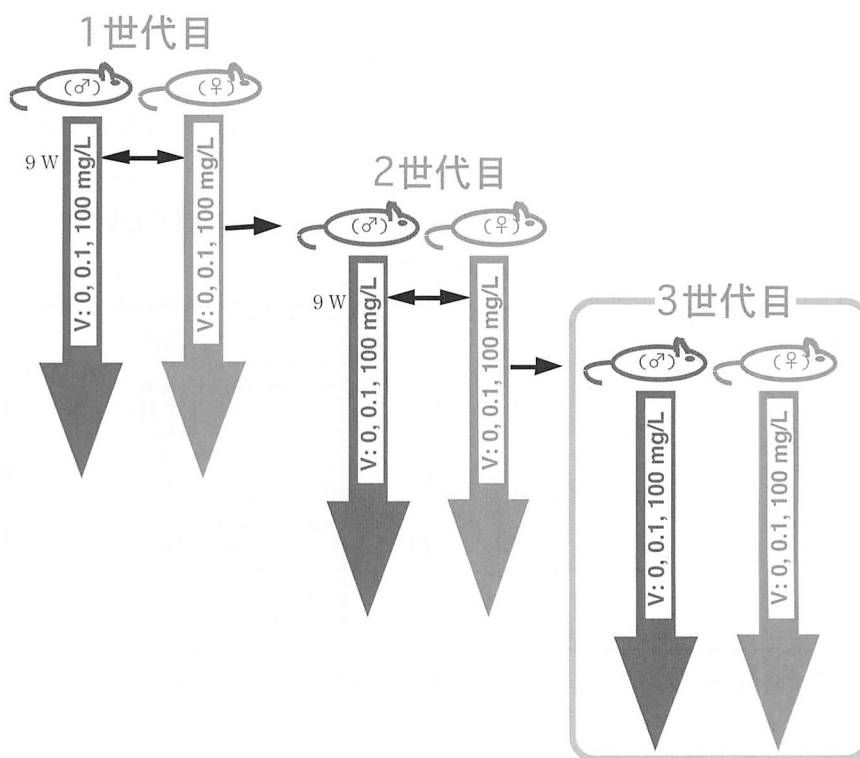


図36 経世代的（親子三代目）にバナジウム含有飲料水を与えて飼育

て、生化学的検査を行った15週齢の動物は、全て糖尿病を発症しており、糖尿病を発症していない対照動物が得られない（通常、生化学的検査の値は週齢に伴い変動するため、他の週齢との比較は難しい）。そのため、精製水（0mg/L）投与マウスの生化学的検査の値が異常値（障害を発現している）なのか判断できないためである。一方、Adachiら（2000）は中毒量のバナジウムをラットに長期間摂取させるとGOT、GPT、コリンエステラーゼおよびアルカリフォスファターゼの酵素活性がそれぞれ阻害されることを報告している。もちろん、我々の実験でも同様の現象が起きている可能性がある。従って、インスリン様作用が認められる高濃度のバナジウム溶液の摂取に関しては、安全性（毒性発機構）を明らかにするための、さらなる研究も必要である。

まとめ

以上の研究結果から次のことが明らかとなった。糖尿病疾患モデルマウスに100mg/Lバナジウム溶液を摂取させた場合、副作用（毒性）の問題は未解決であるが、糖尿病の改善が認められた。10mg/Lバナジウム溶液においても、良好なブドウ糖負荷試験の成績が得られた。しかし、富士山地下水と同レベルの0.1mg/Lバナジウム溶液には糖尿病治療作用は認められなかった。

2) バナジウム水溶液（0.1および100 mg/L）で三代目飼育

1) の実験により、糖尿病モデル動物をバナジウム10 mg/Lあるいは100mg/L溶液で10週間飼育した場合、糖尿病治療効果が示された。しかし、0.1mg/Lバナジウム溶液（富士山地下水のバナジウムレベル）には、全く治療効果は認められなかった。そこで、0.1mg/Lバナジウム溶液を糖尿病モデルマウスに長期間・経世代的（親子三代目）に摂取された場合について検討を行った（図36）。この実験は富士北麓地域の住民が親子代々水道水からバナジウムを長期間摂取している現状のモデル実験としても位置づけることができる。

動物の体重変化

糖尿病モデル動物にバナジウム含有飲料水を与え、交配をくり返して作製した3世代目のオス・マウスの体重変化を図37に示す。精製水（0mg/L）、0.1mg/L、100 mg/L群ともに体重増加が認められた。100mg/L群では体重のバラツキが大きいものの、バナジウムによる有意な体重増加抑制作用は認められなかった。

血糖値変化ならびに飲料水とエサの摂取量

3世代目のオス・マウスの血糖値の測定結果を図38に示す。精製水（0mg/L）を与えて飼育した動物の血糖値は7週齢以降に上昇した。バナジウム濃度0.1mg/Lで3世代飼育しても、血糖値の上昇を抑制することはできなかった。血糖値は100mg/L群でのみ抑制することが示され

た。

図39に飲料水およびエサの摂取量を測定した結果を示す。飲料水の摂取量においては、0mg/Lおよび0.1mg/L群においてその量が増加したが、100mg/L群では増加することは認められなかった。すなわち、血糖値の上昇が認められた2つの群（0mg/Lおよび0.1mg/L群）

では、糖尿病に起因する水分摂取の増加が起こったと考えられた。一方、エサの摂取量は3群とも変化しなかった。

経口ブドウ糖負荷試験ならびにヘモグロビンA1c量

3世代目の動物の11週齢および18週齢の時点でそれぞれブドウ糖負荷試験を行った（ブドウ糖負荷試験は現在

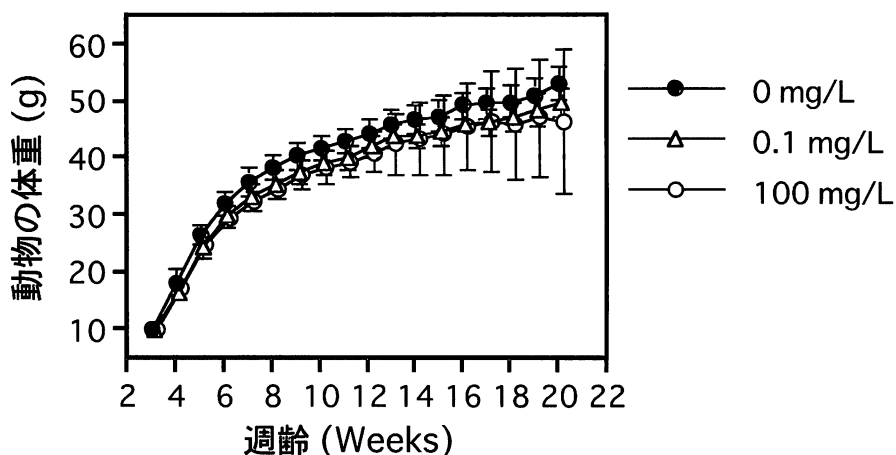


図37 バナジウム含有飲料水を与えて飼育した3世代目の糖尿病モデル動物の体重変化

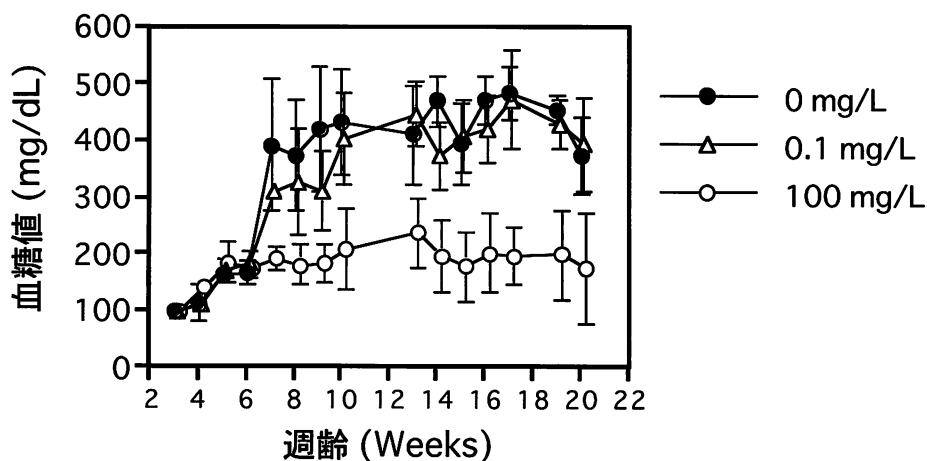


図38 バナジウム含有飲料水を与えて飼育した3世代目の糖尿病モデル動物の 血糖値変化

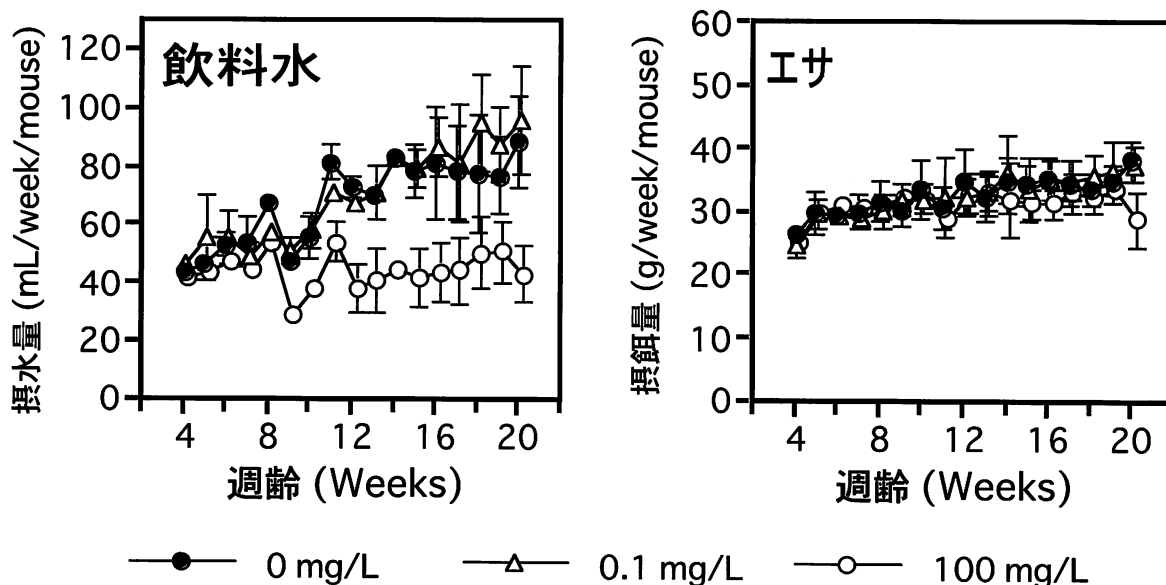


図39 バナジウム含有飲料水を与えて飼育した3世代目の糖尿病モデル動物の飲料水ならびにエサの摂取量

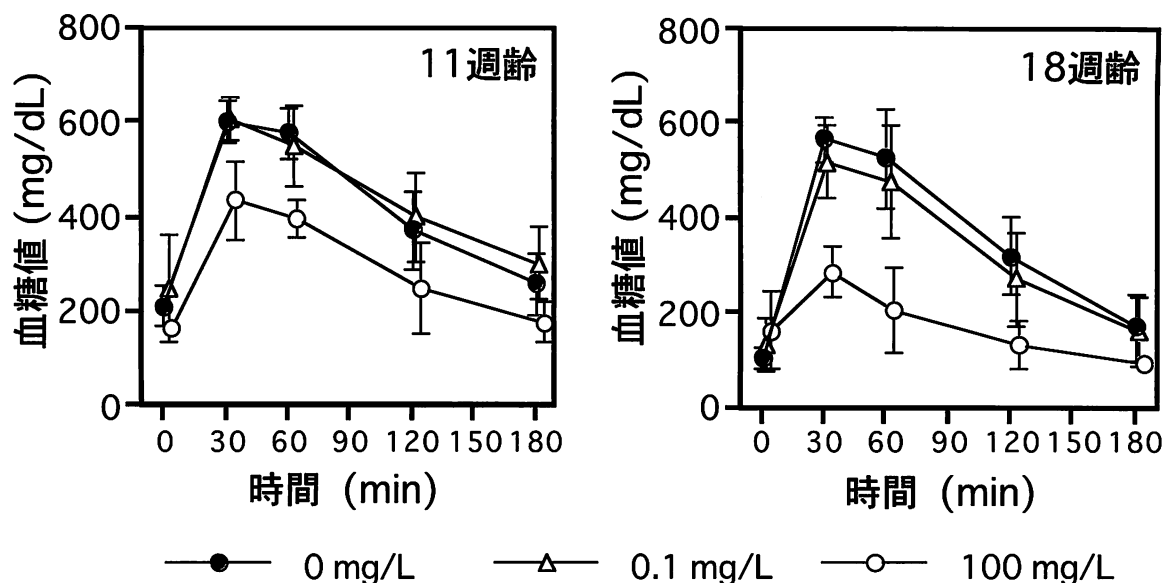


図40 バナジウム含有飲料水を与えて飼育した3世代目の糖尿病モデル動物における経口ブドウ糖負荷試験

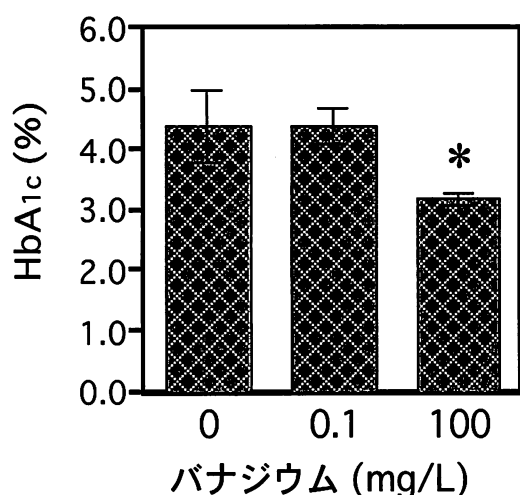


図41 バナジウム含有飲料水を与えて飼育した3世代目の糖尿病モデル動物のHbA1c量 (20週齢) (* $p < 0.05$)

最も信頼性のある糖尿病の診断方法である。詳細は前述の(2)1) ②を参照)。その結果、どちらの時点においても、0.1mg/L群のマウスの血糖値は対照群 (0.1mg/L) と差はなく、糖尿病の改善効果は認められなかった。一方、100mg/L群においては明らかに対照群 (0.1 mg/L) と比べ、血糖値が低いことが示された (図40)。

ヘモグロビンA1c (HbA1c) の測定結果を図41に示す。HbA1cは食事に影響されない長期の血糖の指標としてきわめて有用な測定項目として知られている (詳細は前述の(2) 1) ②を参照)。その結果、100mg/L群においてHbA1c量が対照群 (0mg/L) に比べ有意に減少することが示された。しかし、0.1 mg/L群は0 mg/L群と差は認められなかった。これらの結果から、3世代の間

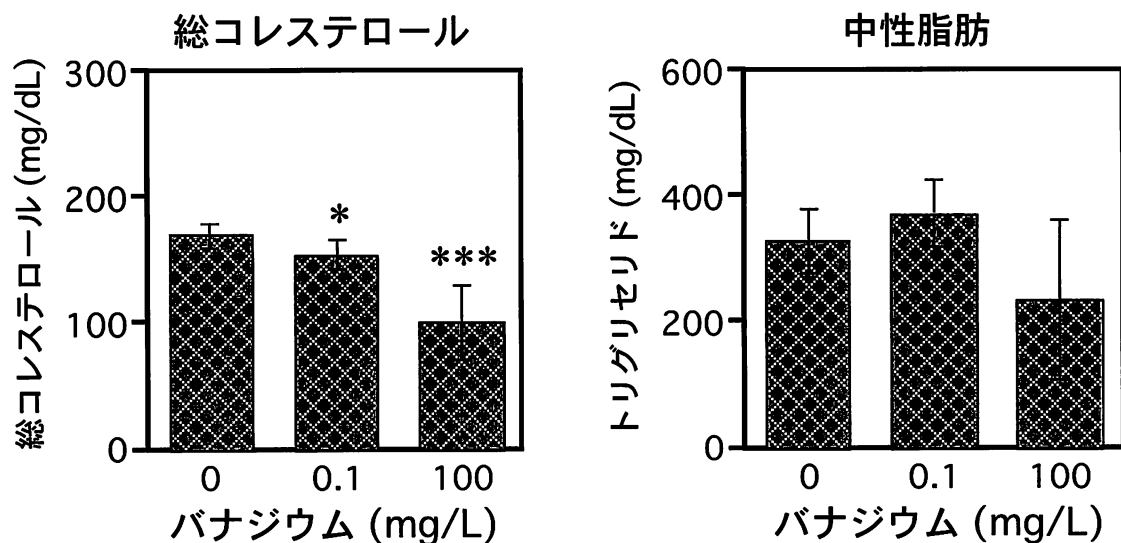


図42 バナジウム含有飲料水を与えて飼育した3世代目の糖尿病モデル動物の総コレステロールおよび中性脂肪 (20週齢) (* $p < 0.05$, *** $p < 0.005$)

0.1 mg/Lのバナジウム水溶液を飲み続けても、糖尿病の改善は起こらないと考えられた。

総コレステロールならびに中性脂肪

前述の (2) 1) ④で示した実験において、バナジウムが脂質の代謝に影響を示す可能性が示された。そこで、バナジウム溶液で3世代飼育した糖尿病モデル動物の総コレステロールと中性脂肪量の測定を行った。その結果を図42に示す。

総コレステロールにおいては、対照群 (0mg/L) の値が175mg/dLと正常範囲内であるが、この値と比べ0.1 mg/L群でわずかではあるが有意に減少することが認められた。100mg/L群では101mg/dLと0mg/Lの約58%にまで減少した。一方、中性脂肪においては統計学的に有意ではないものの、0mg/L群の329mg/dL (高い中性脂肪レベル) に対して、100mg/L群では減少する傾向が認められた。

臓器重量

バナジウム水溶液で飼育した3世代目のオス-マウスの臓器重量 (20週齢) を図43、図44、図45、図46に示す。肝臓においては (図43) 100mg/L群で重量の減少が認められた。

腎臓 (図44) および心臓 (図45) はともに、バナジウム投与による重量変化は認められなかった。また、図46に示すごとく脾臓は、100mg/L群で統計学的に有意ではないものの臓器が肥大する傾向が認められた。

まとめ

これらの検討結果ら、富士山地下水中バナジウム濃度レベルである0.1mg/Lのバナジウム溶液を、3世代に渡り糖尿病モデル動物に飲ませたが、糖尿病改善効果は期待できないと考えられた。

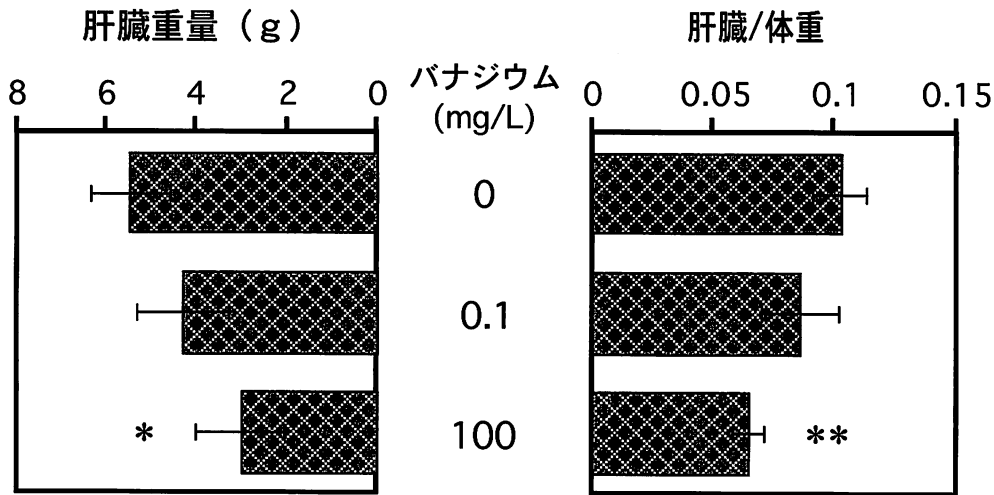


図43 バナジウム含有飲料水を与えて飼育した3世代目の糖尿病モデル動物の 肝臓重量 (20週齢) (*p<0.05, **p<0.01)

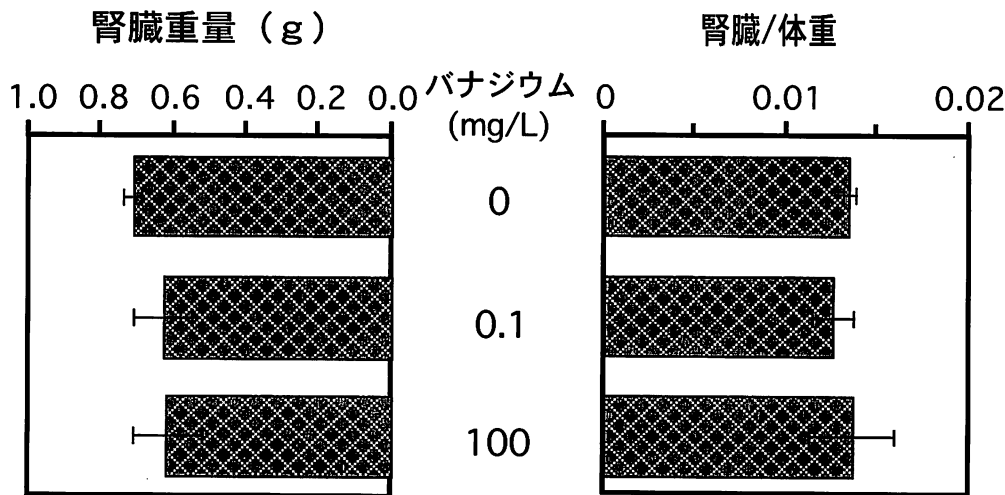


図44 バナジウム含有飲料水を与えて飼育した3世代目の糖尿病モデル動物の腎臓重量 (20週齢)

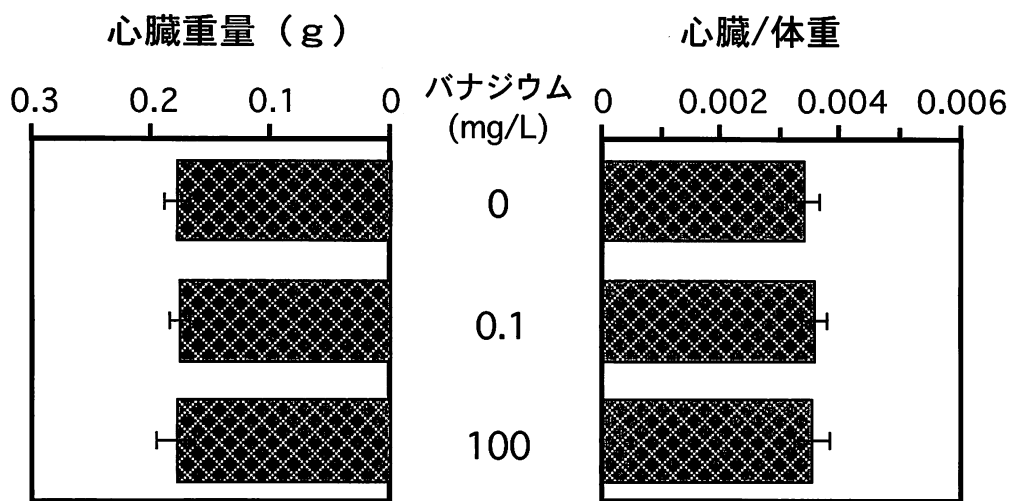


図45 バナジウム含有飲料水を与えて飼育した3世代目の糖尿病モデル動物の心臓重量（20週齢）

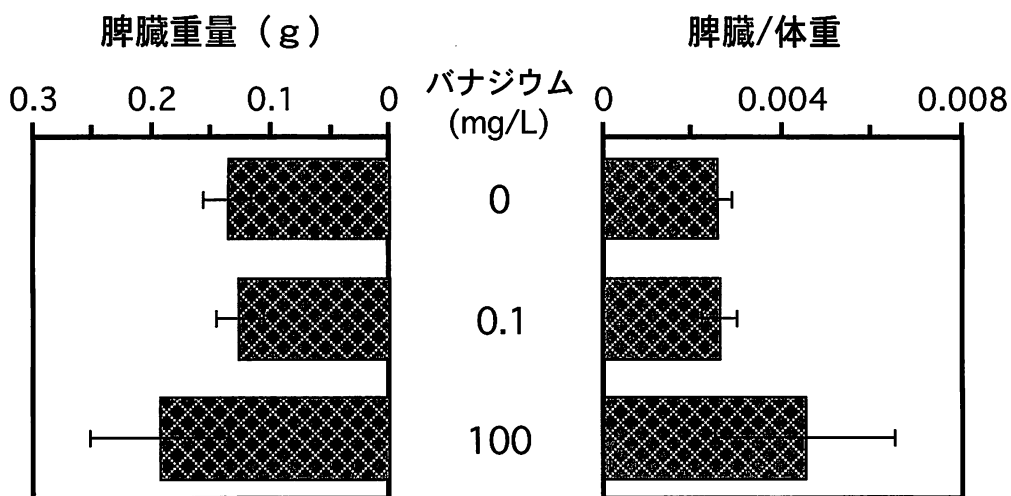


図46 バナジウム含有飲料水を与えて飼育した3世代目の糖尿病モデル動物の脾臓重量（20週齢）

3) 富士山地下水で28週間飼育

前述の2つの実験では、糖尿病動物へのバナジウムの影響を調べるため、試薬として市販されているメタバナジン酸アンモニウム (NH_4VO_3) を精製水に溶かし、バナジウム溶液を調製して実験に用いてきた。しかし、富士山地下水にはバナジウム以外のミネラル成分も含まれており、これらの成分がバナジウムの作用を増強する可能性も考えられる。そこで、糖尿病モデル動物に、実際の富士山地下水を飲料水として与え、6ヶ月間（28週間）飼育して富士山地下水の抗糖尿病作用に関して検討を行うこととした。

また、これまでの検討結果から、富士山地下水の抗糖尿病効果は劇的な作用ではないと考えられる。そこで、比較的糖尿病症状の軽い「軽度の糖尿病モデルマウス」を作製し検討を行った。一般に、糖尿病モデル動物の実験では、動物のエサのカロリー量を増加させている。このことにより、血糖値上昇の時期が早くなり、さらに、

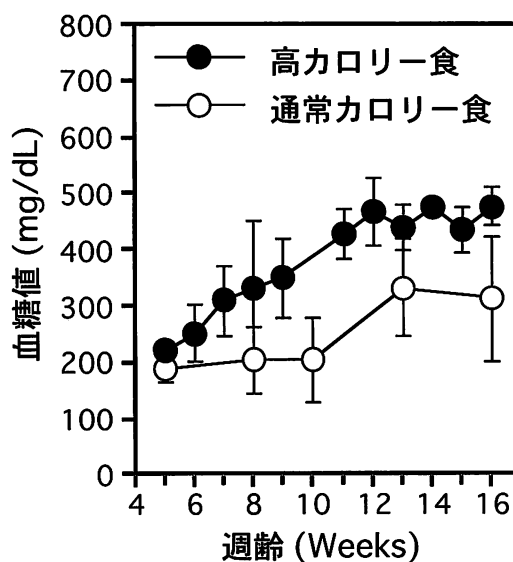


図47 エサ中のカロリー量を変化させた場合の糖尿病モデル動物の血糖値の推移

表1 富士山地下水中微量元素濃度*
(バナジウム、亜鉛、銅)

	バナジウム	亜鉛	銅
富士山地下水	66.9 ± 4	11.3 ± 2	1.8 ± 1
精製水	0.1 以下	0.1 以下	0.1 以下

* μg/L (平均±標準偏差)

表2 動物の餌(CE-2) 中微量元素濃度*
(バナジウム、亜鉛、銅)

バナジウム	亜鉛	銅
120 ± 50	66,300 ± 20,700	10,100 ± 4,100

* μg/kg (平均±標準偏差)

血糖値がより高くなる(図47)。そこで今回は、エサのカロリー量を高くしないエサ(通常カロリー食)を用いて飼育した。

なお、動物に与えた富士山地下水は、山梨県環境科学研究所敷地内(富士吉田市上吉田字剣丸尾5597-1)の地下水(塩素消毒なし)を、メンブランフィルター(0.45 μm)で濾過滅菌して調製した。表1に採水した地下水ならびに対照として用いた精製水に含まれるバナジウム、亜鉛および銅の平均濃度を示す。また参考として、エサ中のバナジウム、亜鉛および銅の測定結果を表2に示す。

動物の体重変化

富士山地下水を与え28週間(8週齢から36週齢の間)飼育した糖尿病モデル動物の体重変化を図48に示す。精製水を与えた糖尿病モデル動物の体重増加と、富士山地下水を与えた動物のそれとの間で有意な差は認められなかった。

血糖値変化ならびに飲料水とエサの摂取量

図49に富士山地下水ならびに精製水をそれぞれ与えた飼育した糖尿病モデル動物の血糖値変化を示す。2つの群で血糖値の上昇に有意な違いは認められなかった。飲料水とエサの摂取量の測定結果を図50に示す。飲料水と

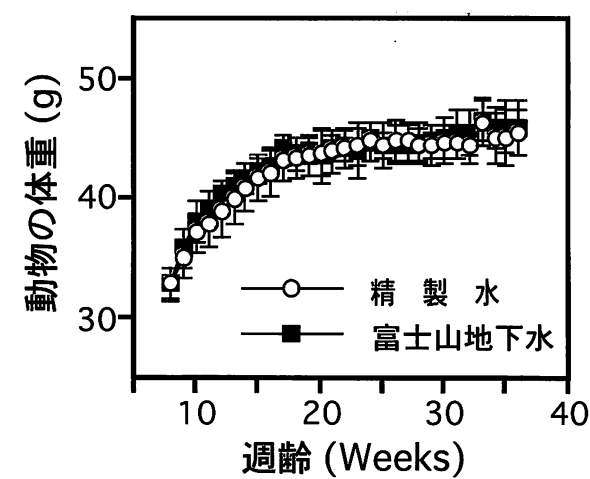


図48 富士山地下水を与えて飼育した糖尿病モデル動物の体重変化

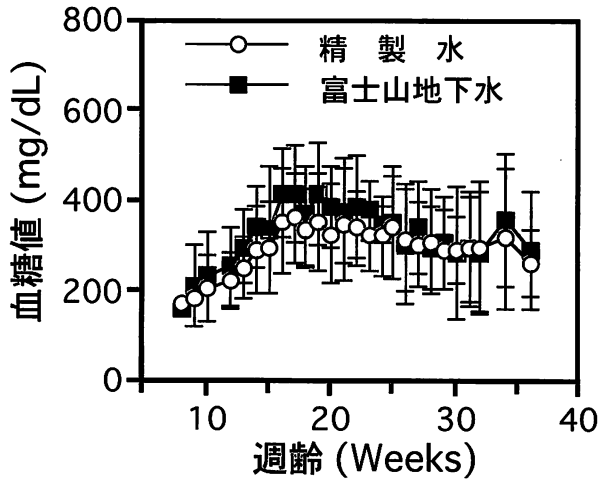


図49 富士山地下水を与えて飼育した糖尿病モデル動物の血糖値変化

して与えた富士山地下水ならびに精製水とも、血糖値の上昇に伴い摂水量が上昇した。しかし、2つの飲料水で違いは認められなかった。一方、エサの摂取量に関しては、ほとんど一定の値を示した。

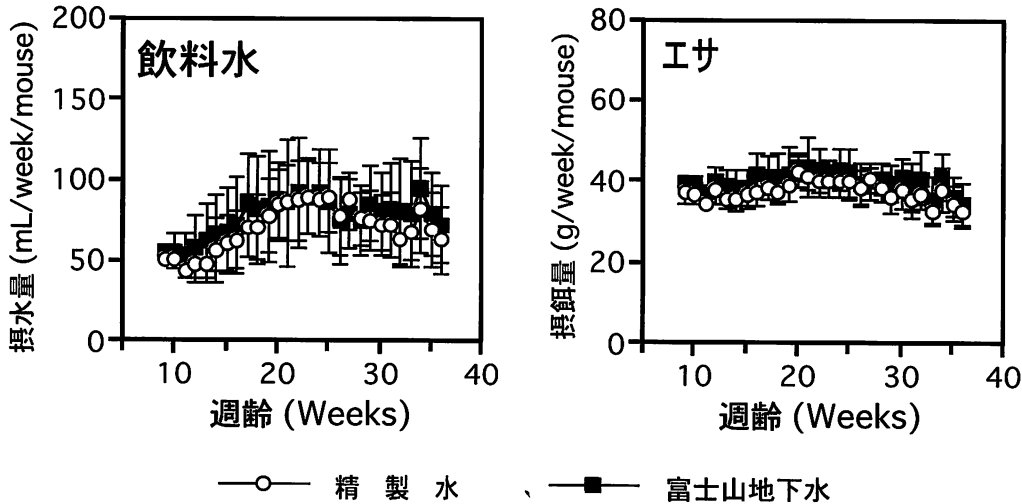


図50 富士山地下水を与えて飼育した糖尿病モデル動物の飲料水ならびにエサの摂取量

経口ブドウ糖負荷試験ならびにヘモグロビンA1c量

糖尿病診断の指標であるブドウ糖負荷試験ならびにヘモグロビンA1c (HbA1c) の測定を行った。その結果を図51ならびに図52にそれぞれ示す。どちらの結果も富士山地下水群と対照の精製水群との間で有意な違いは全く認められなかった。

総コレステロールならびに中性脂肪

これまでの検討結果から、低濃度のバナジウムが脂質の代謝に影響を示す可能性が示された(図29および図42)。そこで、これらの現象が富士山地下水でも認めら

れるか否かを明確にさせるため、富士山地下水で飼育した糖尿病モデル動物においても、総コレステロールならびに中性脂肪の測定を行った。図53に示すごとく、富士山地下水で飼育した糖尿病モデル動物の総コレステロール量が有意に減少することが認められた。中性脂肪に関しては平均値がわずかに減少しているものの、この差は統計学的に有意なものではなかった。

この実験の結果においても、わずかながら、脂質代謝にバナジウムが影響を及ぼす可能性がさらに強く示唆された。このことに関しては今後、高脂血症モデル動物による詳細な検討が必要である。

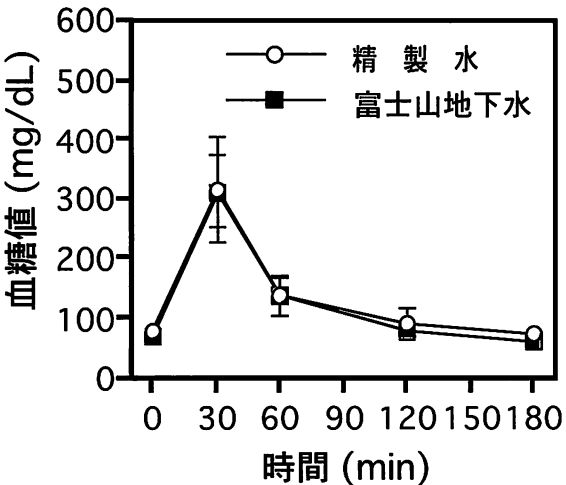


図51 富士山地下水を与えて飼育した糖尿病モデル動物における経口ブドウ糖負荷試験 (33週齢)

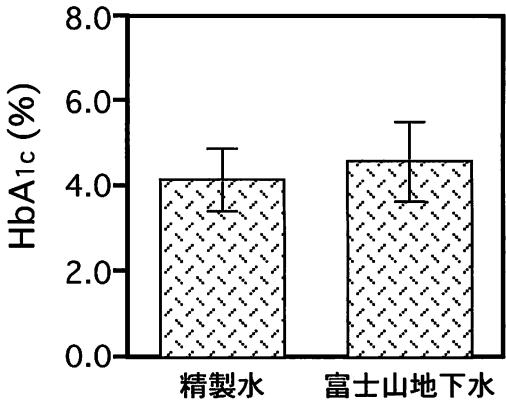


図52 富士山地下水を与えて飼育した糖尿病モデル動物のHbA1c量 (36週齢)

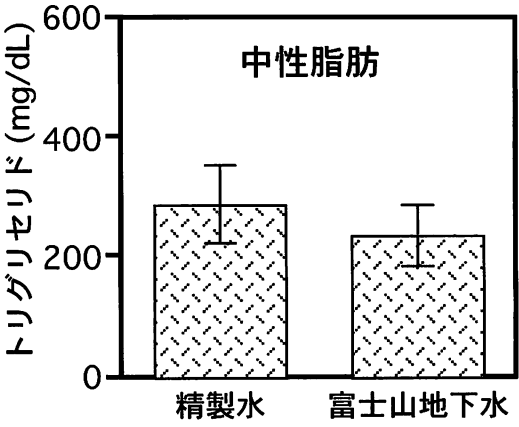
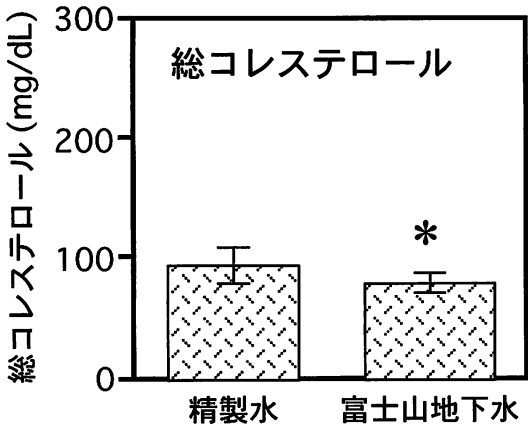


図53 富士山地下水を与えて飼育した糖尿病モデル動物の総コレステロールおよび中性脂肪 (36週齢) (*p<0.05)

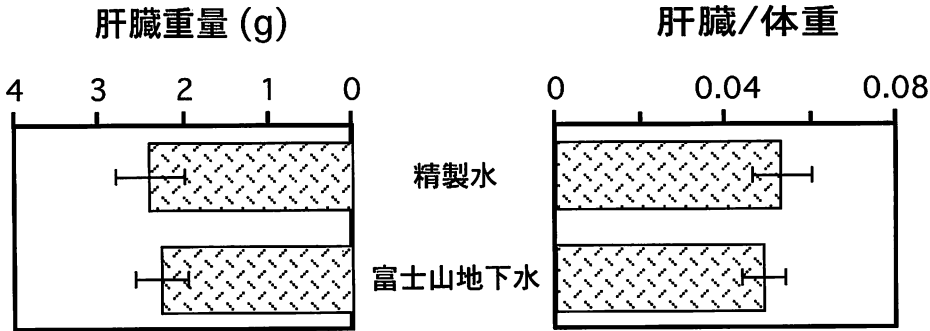


図54 富士山地下水を与えて飼育した糖尿病モデル動物の肝臓重量 (36週齢)

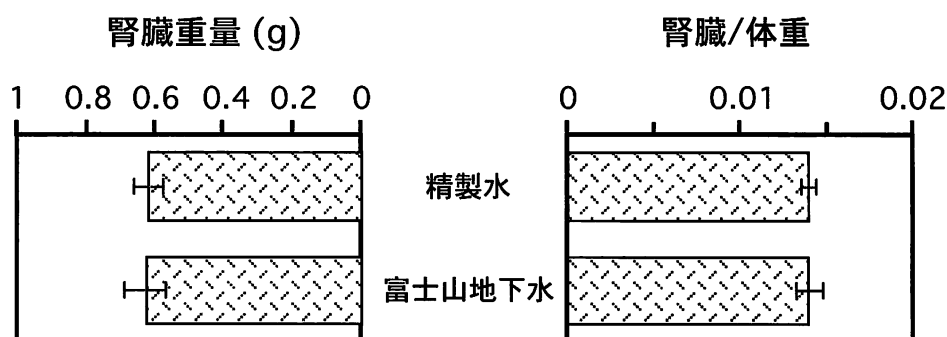


図55 富士山地下水を与えて飼育した糖尿病モデル動物の腎臓重量 (36週齢)

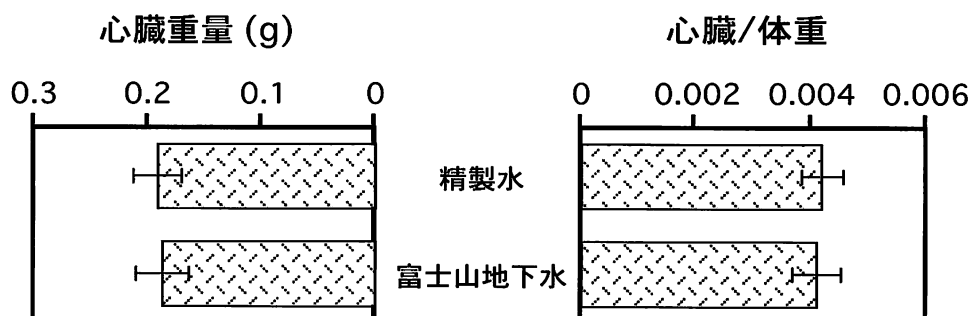


図56 富士山地下水を与えて飼育した糖尿病モデル動物の心臓重量 (36週齢)

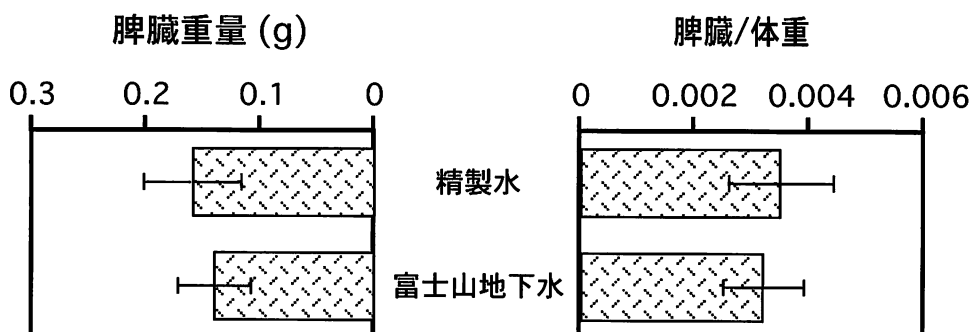


図57 富士山地下水を与えて飼育した糖尿病モデル動物の脾臓重量 (36週齢)

臓器重量

富士山地下水で飼育した糖尿病モデル動物の肝臓、腎臓、心臓および脾臓の重量の測定結果を図54、図55、図56、図57にそれぞれ示す。どの臓器においても、精製水群と富士山地下水群とで有意な差は認められなかった。

臓器中バナジウム蓄積量

富士山地下水で飼育した糖尿病モデル動物の各臓器に蓄積したバナジウム量の測定結果を図58に示す。バナジウムは富士山地下水で飼育することによって、肝臓、心臓および大腿骨で対照の精製水で飼育した動物に比べ僅かながら多く蓄積することが明らかとなった。一方、亜鉛や銅はデータには示さないが、飲料水の違いによる蓄積の差は認められなかった。この違いは、亜鉛や銅は飲料水と比べるとエサに多く含まれており、飲料水からの摂取量は非常に少ないことによる (表1、表2)。

一方、バナジウムはエサにも含まれているが、その量は亜鉛や銅に比べるとわずかであり、飲料水中のバナジ

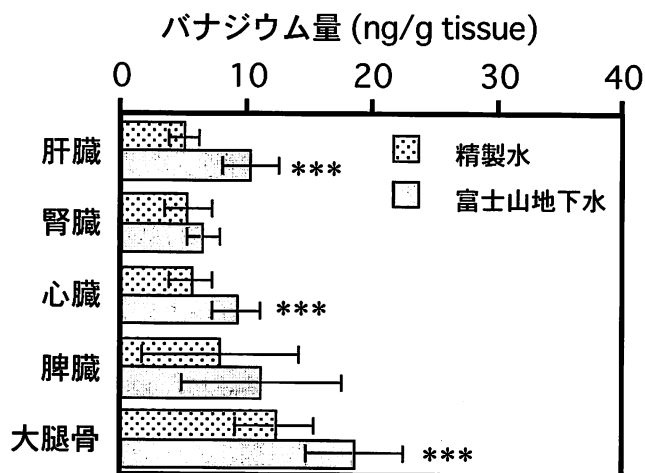


図58 富士山地下水を与えて飼育した糖尿病モデル動物の臓器中バナジウム (V) 蓄積量 (36週齢) (***) $p<0.005$

ウム濃度の増加は、摂取量の増加に大きく影響し、バナジウム蓄積量に富士山地下水群と精製水群とで差が認められたと考えられる（精製水を飲ませた動物においては、餌が唯一のバナジウム摂取経路となる）。バナジウムは必須微量元素の可能性も示唆されている元素であるが、残念ながら現時点では、バナジウムのインスリン様作用のメカニズムや、ヒトの体内でのバナジウムの働き（生理作用）は解明されていない。従って、富士山地下水摂取により僅かながら増加した臓器中のバナジウムが何らかの影響を及ぼしているか否かは不明である。今後、これら臓器中に蓄積したバナジウムの化学形なども検討し、バナジウムと健康との関連性を解明して行きたいと考えている。

まとめ

バナジウム以外に他のミネラル成分を含む富士山地下水を糖尿病モデル動物に6ヶ月間飲料水として与え、糖尿病治療効果に関して検討を行ったが、血糖値、経口ブドウ糖負荷試験、ヘモグロビンA1cならびに飲水量を指標として検討する限りにおいて、富士山地下水による糖尿病治療効果は認められなかった。

しかし、富士山地下水に含まれる微量のバナジウムが臓器中へのバナジウム蓄積量および脂質代謝に影響を及ぼすことが示された。このことは非常に興味深く、富士山地下水が糖尿病患者に有効である可能性も考えられ、今後の研究が不可欠である。

総括

富士山地下水に含まれる微量元素バナジウムの健康影響（毒性）ならびにインスリン様作用（抗糖尿病作用）に関して動物（マウス）を用いた基礎研究を行った。その結果次のことが明らかとなった。

(1) 富士山地下水および0.1mg/Lのバナジウム溶液（富士山地下水と同程度のバナジウム濃度）で健常動物を1年以上飼育しても、バナジウムに起因する毒性発現は認められなかった。また、健常動物の正常な血糖値を下げる効果も示されなかった。

(2) 糖尿病疾患モデルマウスに100mg/Lバナジウム溶液を10週間摂取させた場合、副作用（毒性）の問題はあるが、糖尿病の改善が認められた。10mg/Lバナジウム溶液においても、良好なブドウ糖負荷試験の成績が得られた。しかし、富士山地下水と同レベルの0.1mg/Lバナジウム溶液には糖尿病治療作用は認められなかった。

(3) 0.1mg/Lのバナジウム溶液を、3世代に渡り糖尿病モデル動物に飲用させたが、糖尿病改善効果は認められなかった。

(4) 富士山地下水を糖尿病モデル動物に6ヶ月間飲料水として与え、糖尿病治療効果に関して検討を行ったが、富士山地下水による糖尿病治療効果は認められなかった。

(5) 富士山地下水に含まれる微量のバナジウムが臓器中へのバナジウム蓄積量および脂質代謝に影響を及ぼすことが示された。

以上の成果を基に今後は、①バナジウムの脂質代謝への影響、②富士山地下水と糖尿病薬との相互作用の検討、③富士山地下水濃縮液による糖尿病治療効果の検討を行い、バナジウムの新たな機能性を明らかにして行きたい。

また、今回の研究で問題点が浮き彫りとなったバナジウムの毒性発現機構や代謝経路の解明、さらに、バナジウムの生理作用についても研究を行っていく予定である。

引用文献

- Adachi, A., Asai, K., Koyama, Y., Matsumoto, Y. and Okano, T. (2000) Subacute vanadium toxicity in rats. *J. Health Sci.*, 46, 503-508.
- Ding, W., Hasegawa, T., Hosaka, H., Peng, D., Takahashi, K. and Seko, Y. (2001) Long-term effect of vanadate administration in drinking water on glucose homeostasis in diabetic KK mouse. *J. Trace Elements Med. Biol.*, 80, 159-174.
- 長谷川達也、保坂仁美、高橋幸治、瀬子義幸 (1999) HPLC/ICP-MSシステムによる生体内バナジウムの測定法の検討. *Biomed. Res. Trace Elements*, 10, 273-274.
- 長谷川達也、瀬子義幸 (2000) 生体および環境試料中のバナジウムの形態分析. *Biomed. Res. Trace Elements*, 11, 441-442.
- Heyliger, E.C., Tahiliani, G.A. and McNeill, H.J. (1985) Effect of vanadate on elevated blood glucose and depressed cardiac performance of diabetic rats. *Science*, 227, 1474-1477.
- 橘田力 (1999) バナ・ウオーターで始まった糖尿病ゼロ革命、東洋健康新書.
- Meyerovitch, J., Farfel, Z., Sack, J. and Shechter, Y. (1987) Oral administration of vanadate normalizes blood glucose levels in streptozotocin-treated rats. *J. Biol. Chem.*, 262, 6658-6662.
- 野村修三 監修 (2000) 富士山伏流水で血糖値が下がった、扶桑社.

奥田拓道 監修 (2002) 富士山の偉大な恵み、現代書
林.

桜井弘 (1996) 糖尿病治療薬としてのバナジウム錯体.
現代化学, 7, 14-20.

Schwarz, K. and Milne, D.B. (1971) Growth effects

of vanadium in the rat. *Science*, 174, 426-428.

バナジウム・ミネラルウォーター研究会 編 (2001) 日
本人を糖尿病から救うバナジウム含有天然水、KKベ
ストブック.

リモートセンシングによる富士五湖の水質測定

宮崎忠国、杉田幹夫（環境計画学研究室）

1. はじめに

富士五湖の水質計測の概要

富士山と富士五湖は日本が世界に誇る名勝地であり、山梨県にとっても貴重な観光資源である。我が国では第二次世界大戦後、経済活動が活発になる段階で、各地に少なからず大気汚染や水質汚濁などの公害問題が起ってきた。幸いなことに、山梨県の富士五湖流域には、諏訪湖や琵琶湖などと異なり、水質汚濁を引き起こすような工業は立地していなかった。また、流域が富士箱根伊豆国立公園に含まれることや、やや高冷地で気候も厳しいため目立った企業もないことから、人口の伸びも少なかった。そのため、富士五湖の水質汚濁の原因となるものは、住民の生活によるわずかな排水と農業を含めた自然負荷によるものが主で、湖は昔ながらの清水と景観を保っていた。

しかし、国民生活が豊かになり交通網が整備されてくると、観光地には多くの人々が訪れるようになり、富士五湖もその例外ではなかった。すなわち、富士スバルライン（1964年）、御坂トンネル（1967年）、中央自動車道河口湖線の開通（1969年）や自動車の普及、観光施設の整備などに伴い、富士五湖への観光客は飛躍的に増え、観光客や観光関連業による汚濁負荷量の増大が懸念された。

このころ、各家庭では生活の快適化のため競って水洗トイレを設置し、また生活レベルの向上に伴い生活雑排水の水質の悪化と量の増加が起り始め、生活排水による富士五湖の水質汚濁の加速が心配された。

山梨県ではこの様な状況下、富士五湖の水質汚濁が目

立ち始めたことを憂慮し、昭和45年（1970）五湖の総合的水質調査を行い、「富士五湖の水質調査結果報告書」を作成した。さらに1971年には山梨県、環境庁、国立公衆衛生院が共同で富士五湖の水質の実態とその汚濁の背景を調査し、「富士五湖水質調査報告書」（1973年）を作成し、水質汚濁防止対策策定の基本資料とした。

1970年に水質汚濁防止法が制定されるとともに、水質汚濁に係わる環境基準も告示された（1971年）。これにより公共用水域での水質の常時監視測定が義務づけられ、山梨県も1971年から富士五湖については6つの定点で月1回の水質測定を開始した。1974年4月には、富士五湖に対して水質汚濁に係わる環境基準の類型指定を行って、本栖湖をAA類型、山中、河口、西、精進の4湖をA類型と定めた。山梨県が行う富士五湖の水質常時監視のための水質測定分析は、1971年の調査開始から現在まで6地点で行ってきた。調査項目は、一般項目、生活環境項目、健康項目、要監視項目および特殊項目である。他方、山梨県衛生公害研究所では1977年以降、富士五湖水質補足調査を担当し、1980年からは富士五湖の沿岸部50地点において年4回（5、7、8、11月）の水質調査を開始した。この調査は地点数の増減や調査湖の縮小（初め5湖、のち山中、河口、精進の3湖）などはあるものの、現在も引き続いて行われている。

富士五湖の形態と水理

富士五湖全域の流域の概要を図1-1に、各湖の湖沼形態に関連する数値を表1-1に示す。各湖の形態については、国土地理院1万分の1湖沼図が詳しいのでそちらを

表1-1 富士五湖の形態

湖名	水面標高 ¹⁾ m	湖水面積 ²⁾ km ²	湖容積 ²⁾ 10 ⁻³ km ³	最大水深 ²⁾ m	平均深度 ²⁾ m	平均半径 ²⁾ km	湖岸線長 ³⁾ km	流域面積 ⁴⁾ km ²	基準水位 ⁵⁾ m
山中湖	981.5	6.89	64.8	14.3	9.4	1.48	13.5	65.5	978.485
河口湖	832.0	5.96	55.5	16.1	9.3	1.38	17.4	126.4	833.525
西湖	901.5	2.17	83.6	73.2	38.5	0.83	9.5	33.0	899.233
精進湖	901.0	0.50	3.52	16.2	7.0	0.4	7.0	25.8	899.233
本栖湖	900.5	4.83	328.0	122.1	67.9	1.24	10.4	34.5	899.233

1) 1972年初から1974年末までの平均的水位を0.5m単位で表した数字。
2) 山梨県衛生公害研究所年報 第25号 32～34pp.(1980), 上記水面標高での値。
3) 堀江正治：陸水学雑誌 18, 22～23(1956)
4) 山梨県土木部：山梨県河川図(1978)
5) 水位観測のための標準面

参照して頂きたい。

富士五湖の流域図のうち、富士山麓側は地表面からかなり深い地層まで通水性の良い地質であるため、相当量の降水でも表流水とはならず地下へ浸透する。そのため、この流域図は地形図上の流域を示したもので、湖の真の集水域を示したものではない。また、本栖湖、西湖、精進湖の3湖については元来1つの湖であったと言われているため、集水域を共有している可能性がある。

湖水面積は山中湖が最も広く、次いで河口湖、本栖湖、西湖、精進湖の順となっている。最深部の水深は本栖湖が最も深く122m、次が西湖の73mとなっているが、山中、河口、精進の3湖は15m前後の深さしかない。また、平均水深（湖容積／湖水面積）も本栖湖、西湖は深くそれぞれ約68mおよび39mであるが、他の3湖はいずれも10m前後である。

表1-2は山梨県環境局（現森林環境部）により算出された富士五湖の降水量、滞留時間および回転率である。湖の表からわかるように、湖水の滞留時間は本栖湖が約7.9年で最長で、精進湖が約40日間で最短である。

山中湖への流入河川としては一級河川が2本あるが、両河川とも晴天時には流水がない。そのため、山中湖へ流入する水の大

部分は地下水または伏流水として流入したものと考えられる。また、山中湖には流出河川があり相模川の源流、桂川の出発点となっている。

河口湖へは一級河川9本が流入しているが晴天時には

表1-2 富士五湖の降水量と滞留時間および回転率

湖名	降水量 mm/年	流域面積 km2	平均流入量 m ³ /sec	滞留時間 年	回転率 回/年
山中湖	2,500	65.5	3.93	0.52	1.9
河口湖	1,800	124.6	4.82	0.37	2.7
西湖	1,700	33.0	1.15	2.3	0.43
精進湖	1,800	25.8	0.98	0.11	8.8
本栖湖	1,800	34.5	1.31	7.9	0.13
西部3湖	1,700～ 1,800	93.3	3.44	3.8	0.26

降水量は山梨県気象平年値表の読取り値。平均流入量は蒸発散量を600mm/年と仮定して計算。滞留時間＝湖容積÷年間流入量。回転率は滞留時間の逆数。

表1-3 富士五湖の透明度の統計値（1971.6～1992.3）

		単位 m			
湖沼・地点名		平均値	標準偏差	最大値とその日	最小値とその日
山中湖	湖 心	4.0	1.0	8.0(1991.8. 8)	1.8(1989.5.8)
河口湖	湖 心	3.5	1.2	7.5(1990.1.31)	0.8(1983.8.24)
河口湖	船津沖	3.4	1.2	7.8(1990.1.31)	0.7(1983.8.24)
西湖	湖 心	8.2	2.1	14.0(1987.6.22)	2.9(1976.6.14)
精進湖	湖 心	2.4	0.9	7.4(1984.3.28)	0.9(1980.10.22)
本栖湖	湖 心	13.1	2.9	21.0(1975.2.19)	3.0(1983.10.25)

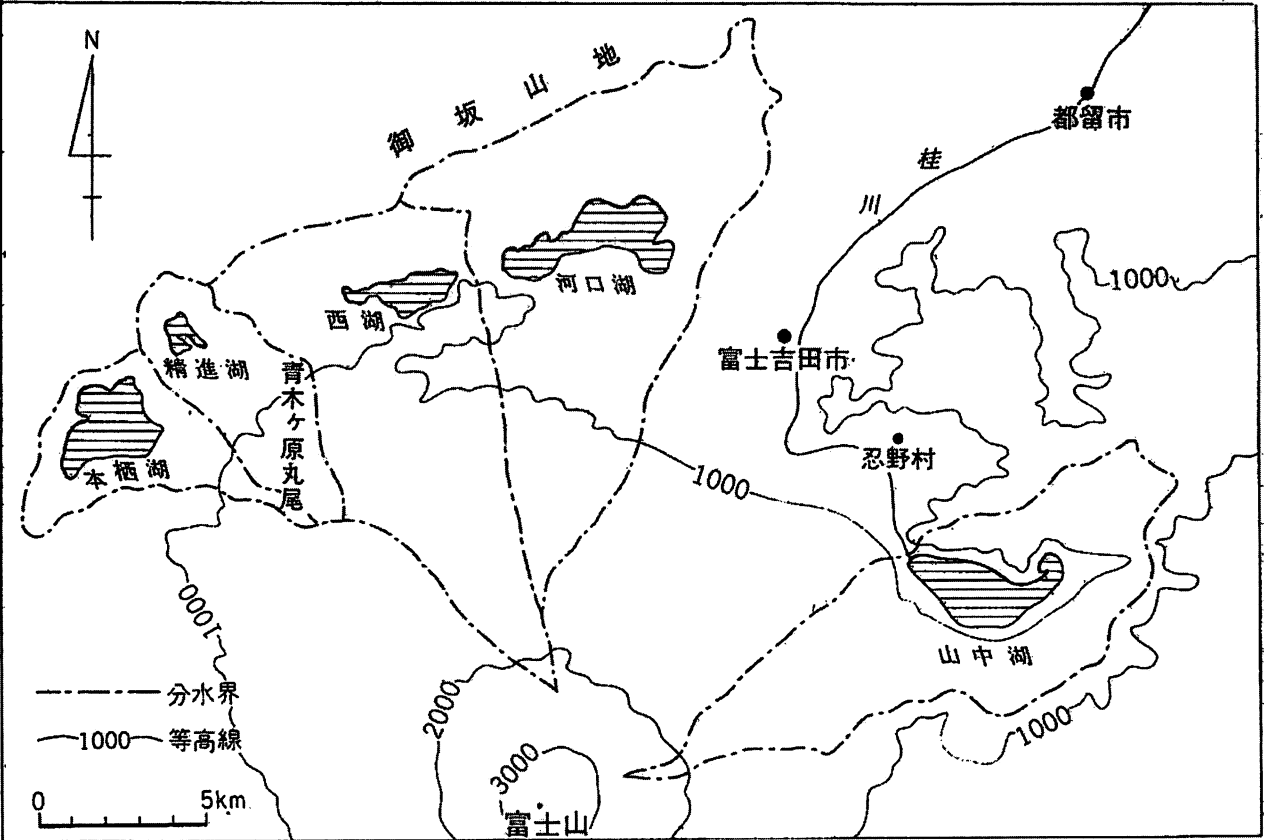


図1-1 富士五湖の集水域

(山本莊毅 (1970)：富士山とその周辺の陸水, 富士山・富士山総合学術調査報告書, pp.150-209)

表1-4 富士五湖のCODとSSの統計値（1971.6～1992.3）

湖沼・地点名	COD*				SS*			
	平均値	標準偏差	最小値	最大値	平均値	標準偏差	最小値	最大値
山中湖 湖心	2.3	0.6	0.7	4.6	1.7	1.3	0.2	12.1
河口湖 湖心	2.8	0.8	0.1	5.5	1.9	1.1	0.7	7.4
河口湖 船津沖	2.9	0.8	0.8	5.9	2.0	1.3	0.6	8.8
西湖 湖心	1.6	0.6	0.4	3.5	0.9	0.5	0.0	4.0
精進湖 湖心	3.2	1.0	1.0	7.7	2.9	2.0	0.5	16.0
本栖湖 湖心	0.9	0.5	0.0	2.7	0.7	0.5	0.0	2.5

*：COD<0.5の場合は0.4mg/lとして、SS<1.0の場合は0.7mg/lとして平均値と標準値を算出した。

表流水は見られない。流出は嘯（うそぶき）川が流出河川となっているが、ここは、東京電力の発電用トンネル放水路と山梨県が洪水防止のために建設した放水路の放水場所となっている。

西湖には二級河川が5本あるが、ここでも、流域面積がごく狭いので通常流水は見られない。この湖にも東京電力の発電用トンネル放水路がある。精進湖へは二級河川1本が流入している。本栖湖には流入河川はない。流出口は日本軽金属の発電用トンネル放水口がある。

富士五湖の水質の変遷

富士五湖の公共用水域水質常時監視のための水質調査地点は、河口湖については湖心と船津沖の2地点、他の湖では各湖とも湖心の1定点で水質調査を行っている。

表1-3は富士五湖の透明度の統計値を示した表である。6地点の21年間の平均値、標準偏差、最大値、最小値である。透明度は豪雨等に伴う土砂の流入などにより一時的に低下する場合を除くと、富士五湖のように流入河川のほとんどない湖の湖心部分の透明度は主として湖水中の植物プランクトンやバクテリア等の微小生物の量によって左右される。河口湖の透明度は県が水質調査を始めた頃には2～3m程度の透明度しかなく、一時は1mを切ることもあり関係者を心配させた。その後、透明度は平均で5m程度に回復している。1976年から工事に着手した富士北麓流域下水道の敷設が進み、1986年には供用が開始され、湖畔のホテル、旅館、民家等が排水を下水道に接続し始めたため、その効果が現れたものと考えられる。

精進湖でも透明度が1m程度しかないことがしばしばあったが、1986年の国体を前に、1984年のコイの網生養殖場の撤去以降、透明度は3～4mに回復した。西湖、山中湖は透明度に急激な変化はなく、透明度はそれぞれ平均で7～8m、4mである。

表1-4に各湖のCOD（化学的酸素要求量）とSS（浮遊物質質量）の統計値を示す。図1-2（a～f）はCODの年間平均値をグラフにしたものである。

前述したように、富士五湖の環境基準は、本栖湖がAA-イ類型（COD：1.0mg/l）、その他の4湖はA-イ類型（COD：3.0mg/l）ときめられている。これらの図からわかるように、山中湖湖心、西湖湖心は環境基準を満たしているが河口湖、精進湖、本栖湖では環境基準値前後の値を示している。特に、本栖湖では昭和56年まで環境基準を満たしていたが、その後は環境基準を達成できず、明らかに水質が悪くなっていることがわかる。

表1-5には富士五湖のクロロフィル-a濃度の統計値を示す。精進湖湖心が他の湖よりクロロフィル-a濃度の平均値が高いことがわかる。

表1-5 富士五湖のクロロフィル-a濃度の統計値（1975.3～1980.11，1990.4～1992.3）

湖沼・地点名	平均値*	標準偏差*	最小値	最大値
山中湖 湖心	0.004	0.003	<0.001	0.022
河口湖 湖心	0.005	0.004	<0.001	0.024
河口湖 船津沖	0.005	0.003	<0.001	0.019
西湖 湖心	0.002	0.001	<0.001	0.005
精進湖 湖心	0.011	0.011	0.001	0.090
本栖湖 湖心	0.001	0.000	<0.001	0.002

表1-6 富士北麓流域 下水道の計画

計画	全体計画	許可計画
年次	S50～H17	S50～H12
計画面積	5,561ha	2,240ha
計画人口	84,500人	55,520人
管渠延長	33.4km	29.3km
浄化センター	3系列 (12池)	1.5系列 (6池)
処理能力	89,800m ³ /日	51,000m ³ /日
浄化センター面積	10.7ha (含国有地)	10.7ha (含国有地)
放流河川	相模川（桂川）	相模川（桂川）
建設費	277億	245億

表1-7 富士北麓流域関連公共下水道

平成12年3月31日現在

市町村名	行政人口 (人) A	処理区域内 人口 (人) B	水洗化人口 (人) C	普及率 (%) B/A	水洗化率 (%) C/B
富士吉田市	55,257	18,984	13,959	34.4	73.5
河口湖町	18,973	9,303	7,233	49.0	77.7
山中湖町	8,403	4,481	3,488	53.3	77.8
忍野村	5,842	4,435	2,805	75.9	63.2
勝山村	2,543	2,395	1,967	94.2	82.1
足和田村	1,648	1,287	864	78.1	67.1
計	92,666	40,885	30,316	44.1	74.1

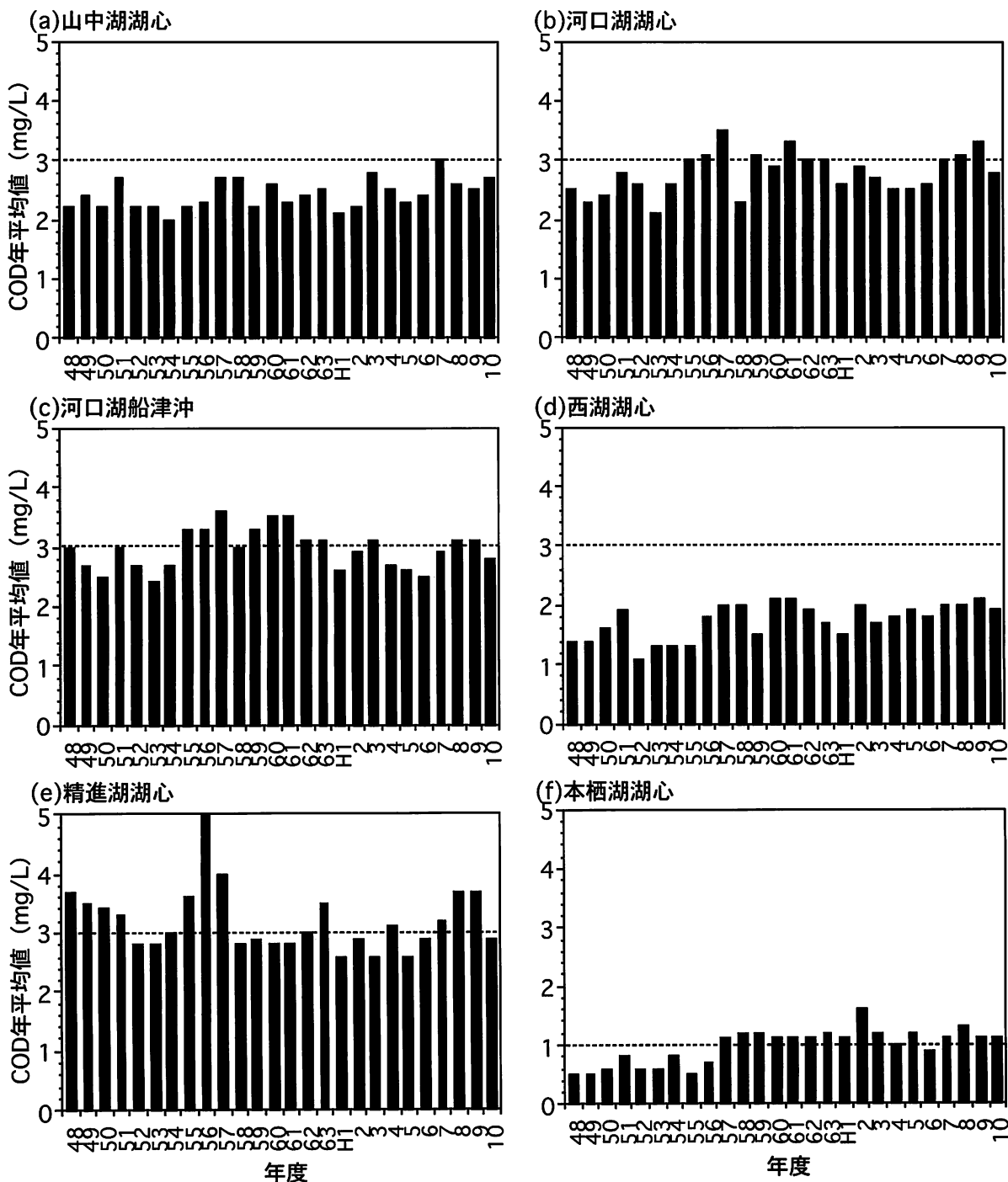


図1-2 富士五湖のCOD（年度別平均値）

-----：環境基準

富士北麓流域下水道

富士北麓流域下水道は昭和50年度(1975)から富士北麓の1市1町4村の区域を対象に事業に着手し、昭和61年(1986)に1市1町が供用を開始して以来、平成2年(1990)までに全市町村が一部供用開始した。平成11年度には汚水6,463,000ton/年を処理し、流域内普及率は44%となった。図1-3に富士北麓流域下水道計画図を示す。また、表1-6、表1-7はそれぞれ富士北麓流域下水道の全体計画と普及率である。

流域下水道の整備、普及は湖に流入する汚濁物質の量を減少させ、湖水の富栄養化を防止する。例えば、図1-4に示すように、甲府市街地を流れる濁川は県下で最も水質の悪い河川の一つであったが、昭和53年(1978)に上流域の下水道の供用開始が始まり、昭和55年(1980)より水質浄化が進むようになった。流域下水道の整備は公共用水域の水質保全ばかりでなく、生活環境の改善や人の健康にも良い影響を与えるため、今後も普及率の向上に重点を置いて下水道事業の推進を図ってほしい。

本研究の目的

本県は、周囲を高山に囲まれた地形であり、富士箱根伊豆、秩父多摩甲斐、南アルプスの3つの国立公園と八ヶ岳中信国定公園を有し、自然の宝庫ともいべき県土を形成し、また、富士北麓の

富士五湖、忍野八海、八ヶ岳の三分一湧水などに代表される豊かな水環境にも恵まれた山紫水明の地域である。

富士北麓流域下水道（富士北麓処理区）

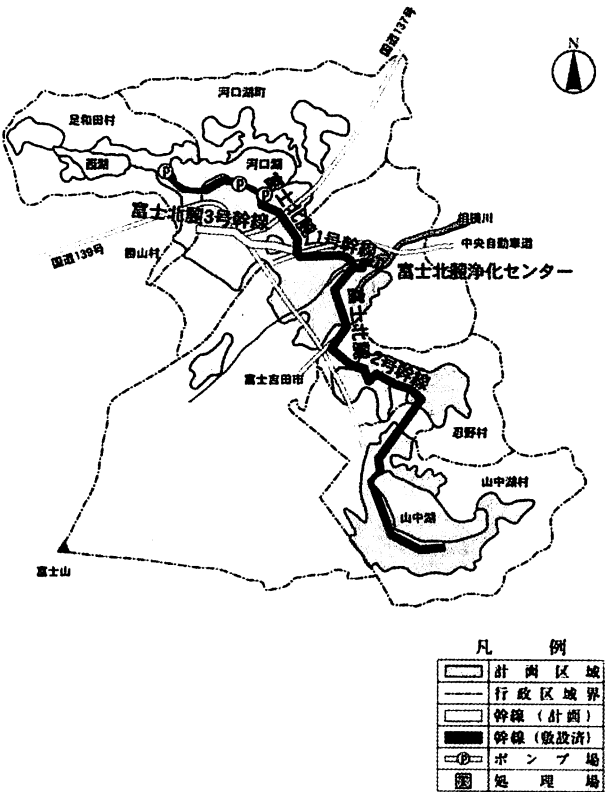


図1-3 富士北麓流域下水道（富士北麓処理区）

下水道の普及と都市河川の水質

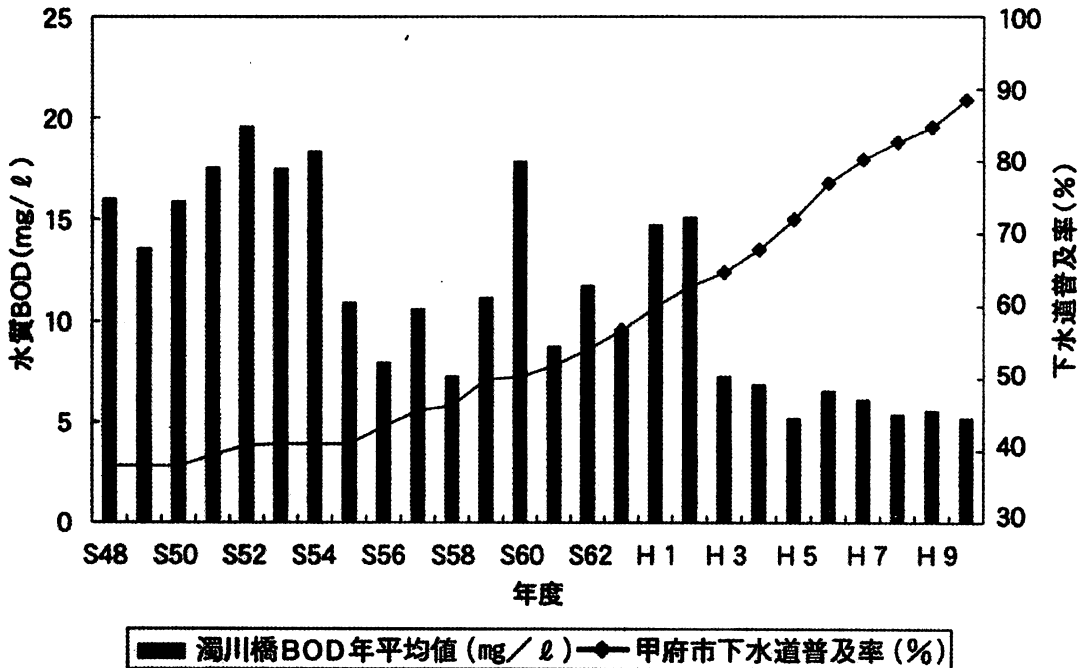


図1-4 下水道の普及率と都市河川の水質

しかしながら、本県においても近年、急速な産業の発展、人口の集中化、観光人口の増加、生活様式の多様化、高度化に伴い、河川や湖沼の水質汚濁が危惧されており、この豊かな水環境を次世代に引き継ぐためには、湖沼の水質保全に関する施策や流域下水道の整備が急務となっている。

1970年に水質汚濁防止法が制定され、公共用水域での水質の常時監視測定が義務づけられ、山梨県では1972年から富士五湖の6定点で水質測定を開始した。これらの定点は湖心部分に設定され、ここでの測定値はその湖を代表する値ではないため、家庭雑排水が流入する湖岸部分の水質や湖全体の水質の変化を把握することが求められている。

本研究の目的は、湖水面汚濁の検出に有効な定性的水質分布作成が可能であることを示すため、富士五湖の中でも比較的汚濁していると考えられる山中湖および河口湖を対象として、湖の水質を2次元的に把握するため、リモートセンシング技術を用いた湖水の定性的水質把握のための手法を開発し、山中湖および河口湖の水質汚濁分布図を作成し、環境行政や湖沼の水質保全の支援を行うことである。

今後は、富士五湖全湖の水質汚濁分布図を作成するとともに、年度の異なった水質汚濁分布図を作成し、湖の水質の変化把握を行う。また、リモートセンシングデータを用いた定量的水質計測手法を開発する。

2. リモートセンシングによる水質測定の原理

リモートセンシングとは

リモートセンシング(remotesensing)とは、地球表面や大気で放射、散乱、反射した種々の電磁波を航空機や人工衛星など離れた場所から計測し、それを地球環境や地球資源の観測、評価、管理などに役立てる技術の総称である。図2-1は、リモートセンシングによる観測の概念図を示したものである。観測対象には、陸地、海洋、大気など、航空機や人工衛星などから観測できるほとんどすべてのものが含まれる。上空または宇宙から地球を観測するので、広域の情報を同時に収集することができる。山梨県、日本、アジア、あるいは地球全体といった広域にわたり何らかの調査や解析を行うには、不可欠な技術である。また、人工衛星によるリモートセンシングの場合には、周期的な観測が可能であり、刻々と変化する現象の把握、地球環境の解明に不可欠な観測手段となっている。

リモートセンシングでは、対象から反射または放射される光や電波など、さまざまな電磁波に感度を持つセンサを使った電磁波計測を主な観測手段としている。セン

サは人間の眼に相当する。人間の眼は、電磁波のうち可視光域と呼ばれるごく限られた一部の範囲しか感じることができないのに対して、リモートセンシングでは、光領域(可視光域、近赤外域、中間赤外域)、熱赤外域、マイクロ波域など、可視光域以外にもいろいろな波長域の電磁波を利用している。このため、リモートセンシングを利用した観測では、人間の眼では検知できない様々な現象の観測が可能になっている。

リモートセンシングの応用分野は、広域的な陸地・海洋情報の収集、地球規模の環境変動の監視など多岐にわたっている。都市、地域スケールでは、土地開発の進展や緑地・植生の変化監視などに利用されている。海洋では、海面水位、汚濁状況、植物性プランクトンの分布状況、海面温度など様々な情報が収集できる。大気については、二酸化炭素やオゾンなど微量成分の組成の調査や、雲画像から気象現象の解析などにも利用できる。

電磁波の波長帯域

電磁波には、波長の短いものから順に、 γ 線、X線、紫外線、可視光線、赤外線、電波と呼ばれている。表2-1は、紫外線から電波までについて電磁波の波長帯域を示したものである。

ただし、赤外線の区分名称とその波長範囲およびマイクロ波の波長範囲は、利用する分野で異なり確定したものではない。ここでは、リモートセンシングで一般的に利用される名称と波長範囲を示した。図2-2は、電磁波を波長の順に配列した電磁波スペクトルである。現在、リモートセンシングで主に利用されている電磁波の波長域は、可視光線(波長 $0.4\sim 0.7\mu\text{m}$)、赤外線の一部($0.7\sim 14\mu\text{m}$)、およびマイクロ波($1\text{mm}\sim 1\text{m}$)である。

ランドサット衛星について

ランドサット(LANDSAT)衛星は地球を観測する人工衛星の代表的なものである。1972年、アメリカ航空宇宙局(NASA)によって、最初の地球資源観測衛星が打ち上げられ、その後現在までに7号機まで打ち上げられている。本研究で用いたランドサット5号には、MSS(マルチスペクトルスキャナー)とTM(セマティックマップ)と呼ばれる2種類の観測機器(センサ)が搭載されている。

TMセンサは地球表面を可視域から熱赤外域までの7つのバンドで観測する。表2-3にランドサットTMの各バンドの観測波長帯と特徴を示す。

水質分布の観測原理

人間が視覚的に感じることができる電磁波の領域は、可視光域(波長 $0.4\sim 0.7\mu\text{m}$)と呼ばれる。水中の懸濁物質粒子による吸収、散乱は、可視光域で観測することが出

来る。

一般に、地表被覆物を構成する物体は、いろいろな光の波長域に対してそれぞれ特有の分光特性を有している。図2-3は、可視光域・近赤外域について、地表面の分光反射特性の典型的な例を示したものである。水の反射率は全体に小さく、近赤外域ではほとんど0に等しい。一方、乾燥土壌は広い波長域にわたって大きな反射を示す。植生は、可視光緑色域(0.5 μ m)にピークがあり、同じく可視光の青色域と赤色域の反射は低くなっている。また、近赤外域では大きな反射を示し、このグラフには示していないが、短波長赤外域の1.4 μ mと1.9 μ m付近では、植物中の水の吸収による大きな谷を持っている。

リモートセンシングでは、こうした対象物の分光反射特性を主として利用し、さまざまな波長域に分けて観測を行い、対象物に関する多くの情報を得ている。このような複数の波長域で観測するセンサは、マルチスペクトルセンサと呼ばれる。ランドサット衛星のMSS,TMやスポット(SPOT)衛星のXSなどは、可視域から近赤外域を観測するマルチスペクトルセンサの代表である。

水の分光特性において、他の地表被覆物と比較して特筆される特徴は、近赤外域での吸収特性である。近赤外域の光は、湖沼や河川を構成する水であろうと、植物体や土壌中の水分であろうと、水によって吸収される。この吸収特性のため、リモートセンシングデータから水域の範囲を抽出するには、近赤外域のデータが用いられる。ランドサットTMデータの場合には、近赤外域に相当するバンド4のデジタル値を用いる。

これに対し、可視光域では、水の様々な状態が分光特性に影響する。可視光域においては、光エネルギーと物質との多種多様で、しかも相互に関係しあった要因が、複雑に絡みあっているからである。例えば、水面での鏡面反射、水中浮遊物質の存在、水底などの影響で、水面の反射率は増大する。水底の影響が無視できるほど深い水であっても、反射特性は、水そのものだけではなく、水中に含まれる物質にも依存する。

澄みきった水は、他の波長帯と比較して約0.6 μ mより短い波長の可視

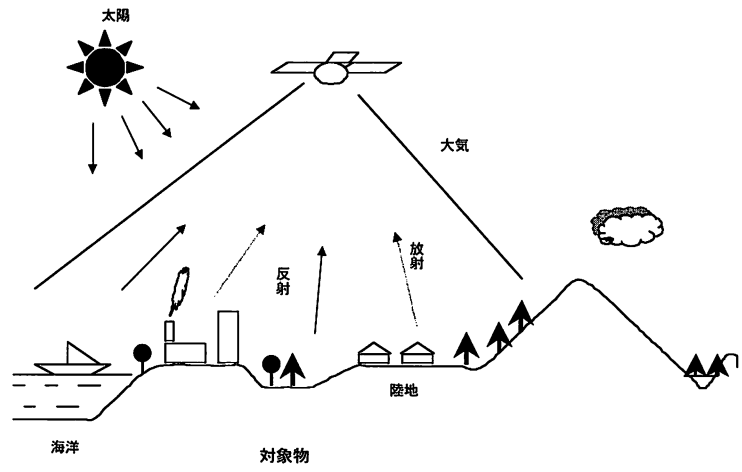


図2-1 リモートセンシングの観測概念図

表2-1. 電磁波の分類と名称

名 称		波 長 範 囲
紫 外 線		10nm~0.4 μ m
可 視 光 線		0.4~0.7 μ m
赤外線	近 赤 外	0.7~1.3 μ m
	短波長赤外	1.3~3 μ m
	中 間 赤 外	3~8 μ m
	熱 赤 外	8~14 μ m
	遠 赤 外	14 μ m~1mm
電 波	サブミリ波	0.1~1mm
	マイクロ波	1mm~1m
	超 短 波 (VHF)	1~10m
	短 波 (HF)	10~100m
	中 波 (MF)	0.1~1km
	長 波 (LF)	1~10km
	超 長 波 (VLF)	10~100km

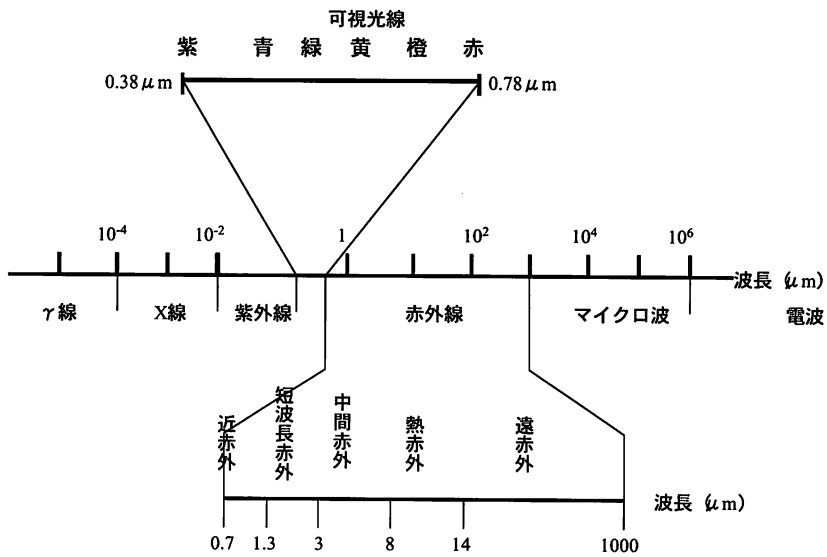


図2-2 電磁波スペクトル

光域において、吸収が少し弱い。結果として青色から緑色の波長帯での透過率が最大となるのが特徴である。有機物や無機物により、水中の濁りが変化すると、透過率が劇的に変化し、それが反射率の劇的な変化に結びつく。例えば、土砂侵食による多量の懸濁物質を含んだ水は、周囲の澄んだ水に比較して、反射率が際立って高くなる。同様に、水中のクロロフィル濃度も水の反射率変化の要因となる。すなわち、クロロフィル濃度が増加すれば、青色波長域での反射率は減少し、緑色波長域の反射率は増加する。これらの変化特性は、リモートセンシングを用いた藻類や植物プランクトン濃度のモニタリングや濃度推定に利用されてきている。このほか、油などによる汚染や工場廃棄水など数多くの水質汚染原因の検出にも、分光反射データが利用されている。

酸性度や塩分濃度をはじめ多くの重要な水質パラメータを、水面の分光反射データから直接的に観測することは出来ない。しかし、水質パラメータと分光反射特性との間の関係を導くことが出来れば、水面の分光反射データから間接的に水質を計測することが可能である。

温度分布の観測原理

あらゆる物質はその絶対温度の4乗に比例する強度の電磁波を放射している。常温（約300K）の物体が放射するエネルギーのピークは、波長10μmの付近にあるため、この波長帯の放射を計測することにより、物体の温度を測定することができる。

これが放射温度計の原理である。波長10μm付近は、大気の透過率が非常に高い領域であるため、人工衛星に搭載された熱赤外センサーでも、数百km下方の地表面の温度を捉えることができる。

物体が放出する電磁波の強さや波長分布は物体の温度と物質によって決まり、熱放射と呼ばれる。一般に、電

表2-2 ランドサット5号の諸元

主力センサ	MSS, TM
軌道	太陽周期準回帰軌道、円形の準極軌道
周期	約99分
高度	約705 km
回帰日数	16日
地上空間分析能	30m（バンド6のみ120m）
ラジオメトリック分解能	8ビット（0～255の256段階）

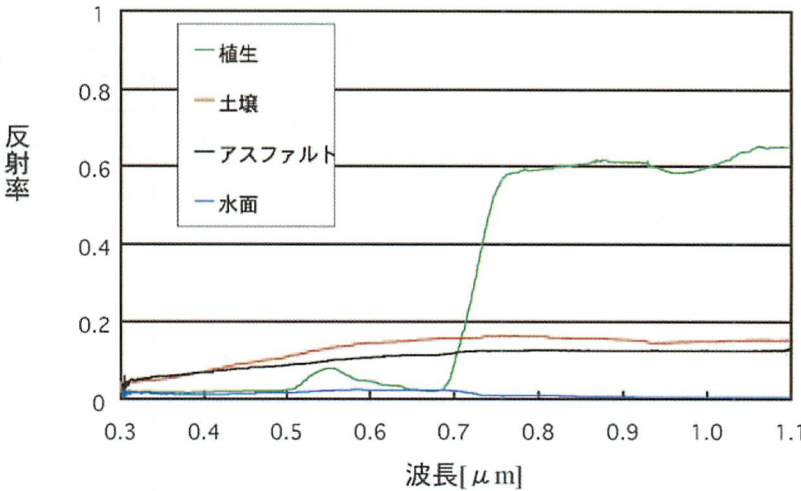


図2-3 代表的な地上被覆物の分光反射特性

表2-3 ランドサットTMの観測バンドの特徴

バンド	観測波長帯[μm]	波長帯名称	特 徴
1	0.45～0.52	可視光線（青色光）	沿岸水域図化、濁水分布の把握、落葉樹と針葉樹の判別、土壌と植生の区別に利用される。波長が短いため、大気による散乱の影響を受けやすく、気象条件や季節の変化による影響を受けやすい。
2	0.52～0.60	可視光線（緑色光）	植物葉のクロロフィルの反射スペクトルピークに対応し、植物活性の分析に利用される。その他、濁水分布の把握、道路、鉄道、地表構造物などの識別ができる。
3	0.63～0.69	可視光線（赤色光）	活性の高い緑色植物のクロロフィルが吸収する光の波長帯であり、植種の判別に利用される。土壌や地質の境界を特定しやすい。大気による影響がバンド1、2に比べて少なく、コントラストが高い。水陸の境界、植物域、地表構造物などの識別ができる。
4	0.76～0.90	近赤外	植物の活性度、植物量（バイオマス）の調査などに適する。水域と陸域の境界線抽出に役立つ。
5	1.55～1.75	短波長赤外	土壌中や植物中の水分量に敏感。雲・雪および氷を区別できる。地表構造物の識別ができる。
6	10.40～12.50	熱赤外	地表や海面の温度分布、都市環境温度分布を表示できる。地熱の活動調査、熱慣性による岩石分布図作成や植物のストレス解析などに利用される。
7	2.08～2.35	短波長赤外	地質における熱水変質地域の識別が目的。岩石や粘土鉱物などの分類に役立つ。植生や水域は暗く見える。水陸の境界を識別できる。

磁波をよく放射する物体は、入射する電磁波をよく吸収する。そこで、入射してきた電磁波をすべて吸収し、反射も透過もしないような仮想的な物体を考える。このような物体のことを黒体 (blackbody) という。黒体からの熱放射 (黒体放射) を記述する具体的な法則は、プランクの法則である。

シュテファンの実験とボルツマンの理論的考察によって「黒体からの放射エネルギーEはその黒体の絶対温度Tの4乗に比例する」というシュテファン・ボルツマンの法則が発見された。

$$E = \sigma T^4$$

ここで、 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} [\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}]$ (シュテファン・ボルツマンの定数) である。シュテファン・ボルツマンの法則は、プランクの法則から導くことができる。この式は、物体表面から放射されるエネルギーがわかれば、その物体の表面温度を求めることが可能であることを示す。また、物体の温度が高くなるに従って、その色が波長の短い方へずれ、単位波長あたりの放射強度が最大となる波長 $\lambda_m [\mu\text{m}]$ は温度 $T [\text{K}]$ に逆比例する。その関係は以下の式によって表される。

$$\lambda_m = 2897 / T$$

これを、ウィーンの変位則という。この式から、温度Tがわかれば最大放射を示す波長 λ_m を求めることができることになる。太陽の表面温度6000Kを代入すると放射量が最大になる波長は0.5 μm 程度の可視光となる。常温の300Kを代入すると λ_m は10 μm 程度となる。この10 μm 周辺の波長領域は大気による減衰が少ない窓領域と一致し、地上の温度環境の観測に適する。ランドサット衛星の場合には、10.40~12.50 μm の波長域を観測するTMバンド6の観測値を用いることができる。

シュテファン・ボルツマンの法則は黒体が対象であり、一般の物質の放射は黒体の放射より小さくなる。ある物質の熱放射と、その物質と同じ温度の黒体放射の比を放射率(emissivity) ε とすると、一般の物質は放射率が1よりも小さいからである。放射率は波長にも依存し、それを分光放射率と呼ぶ。放射率が波長に依らず一定の物体を、黒体と対比して、グレーボディと呼ぶ。例えば、20℃の水はグレーボディと見なすことができ、その放射率は波長に依らず約0.96である。グレーボディの場合、シュテファン・ボルツマンの法則は

$$E = \varepsilon \sigma T^4$$

となる。したがって、測定対象の放射エネルギーを計測し、放射率で補正することによって対象の表面温度がわかる。

地球からの放射は、大気中で水蒸気などによって吸収されるが、波長が11 μm あたりを中心として8~12 μm の波長域では、大気による吸収が弱いことが知られている。一般に地球表面からの放射は、ほぼ黒体放射に近い

と見なすことができる。したがって、人工衛星に搭載された放射計を使って、地球大気の外から熱赤外領域の放射の強さを測定することにより、その放射計の視野内にある対象物の表面温度を推定できる。このようにして測定した温度を輝度温度という。水面や地面は赤外線に関しては、放射率が1に近いグレーボディであり、ほぼ黒体と考えてよいので、輝度温度は実際の温度の良い近似になっている。

衛星データから輝度温度、更には表面温度に変換するには、温度校正が必要となる。複数の地点の表面温度実測値と、その地点に対応するTM画像の熱赤外バンドのデジタル値との間の関係を求めることにより、衛星画像の全ての画素に対応する地点について、表面温度の推定が可能になる。しかし、放射率が一定である領域については、衛星データのデジタル値の大小が、そのまま温度の高低に対応するので、温度校正をしなくても、衛星データのデジタル値の濃淡画像として、相対的な温度分布画像を表せる。例えば、衛星画像から水面だけを切り出し、熱赤外バンドの濃淡画像で温度分布を知ることができる。

3. 定性的水質分布図

水質を構成するものは、水温、pH、クロロフィル、SS (浮遊物質質量)、COD (化学的酸素要求量) 窒素化合物、リン化合物など色々な要素がある。このうち、いくつかの水質パラメータはリモートセンシングデータとの対応関係を基に、その面的分布の監視に利用することが期待されている。例えば、クロロフィルは近赤外波長域 (ランドサットTMデータのバンド4に対応) で特徴のあるスペクトルを示し、SSは0.5~0.6 μm の波長帯 (ランドサットTMデータのバンド1、2に対応) で特徴的なスペクトルを示す。したがって、これらの波長帯の衛星観測データを用いることにより、クロロフィル濃度とSSが高い場合、あるいは空間的に広く分布している場合、リモートセンシングデータから検出される可能性がある。ただし、ランドサットTMセンサは陸域観測を主目的にしているため、その近赤外波長帯であるバンド4においては太陽光の大部分が水に吸収され、水に対応する衛星観測データのダイナミックレンジが小さいという欠点が存在する。また、衛星観測データから水質の定量的分布図を作成するためには、衛星飛来時に合わせた湖水サンプリングによる湖上での水質計測データと衛星観測データとの間の関係解析が必須となる。本研究では、このような定量的水質分布図の作成の前段階として、単一の衛星データ内で相対的に清濁を判断することができるような定性的水質分布図を作成することを目指した。以下に、本研究で採用した定性的水質分布図の作成

手順を述べる。

使用データ

本研究では、衛星データから湖水面汚濁の検出に有効な相対的水質分布が作成できるかという基礎的解析と位置づけ、雲の無い良質のデータでかつ季節変化の少ない2時期のランドサットTMデータを選んで定性的水質分布図の作成を行った。解析対象とした河口湖と山中湖が観測範囲に含まれるのはパスローウが108-35のランドサットTMデータである。山梨県環境科学研究所で保有するランドサットTMデータ（1987年～2000年、約40シーン）から条件の良いデータを選んだ結果、解析に使用する2時期の観測日はそれぞれ1995年5月18日と2000年4月29日となった。

定性的水質分布図作成手順

以下の分布図作成処理では、ERDAS社のIMAGINEソフトウェアを利用した。前処理として、幾何補正処理と水域の切り出し処理を行う。

地表面の情報は通常、地図に対応させて取り扱うことが多い。従って、地形図などの地図を歪みのない2次元平面画像と考えると、地図と衛星画像との幾何学的なズレを衛星画像の歪みと見なすことが出来る。例えば、人工衛星の飛行軌道は地表の南北方向とは一致しないため、観測された衛星画像の縦・横方向が、地図上の南北方向・東西方向とは一致しないことは、地図と衛星画像の歪みのひとつである。観測時期の異なる衛星画像を比較できるようにする目的もあり、複数の観測時期の衛星画像を地形図に対して位置合わせして、衛星画像の歪みを除去する処理、すなわち幾何補正を行う。

衛星画像の幾何補正処理は、補正式(座標変換式)の型を決定し、衛星画像と地図の間で対応する点、すなわち基準点（Ground Control Point, GCP）を適切な数、適切な分布で取得し、基準点の画像座標と地図座標の間の補正式を決定し、この補正式に基づいて衛星画像の画素を並べ替える（再配列する）ことにより行われる。

本研究では、ランドサット衛星画像の幾何補正の基準となる地図投影画像として、精密な航空写真オルソ画像モザイク（図3-1）を利用した。この航空写真オルソ画像は2万5千分の1地形図に対して、精密な幾何補正が行われている。2万5千分の1地形図を直接用いても、ランドサット衛星画像の幾何補正が可能であるが、衛星画像と地形図との間で基準点を取得するよりも、衛星画像と航空写真オルソ画像との間で基準点を取得する方がより容易で、しかもより正確に取得できるため、幾何補正の基準画像として航空写真オルソ画像モザイクを利用し

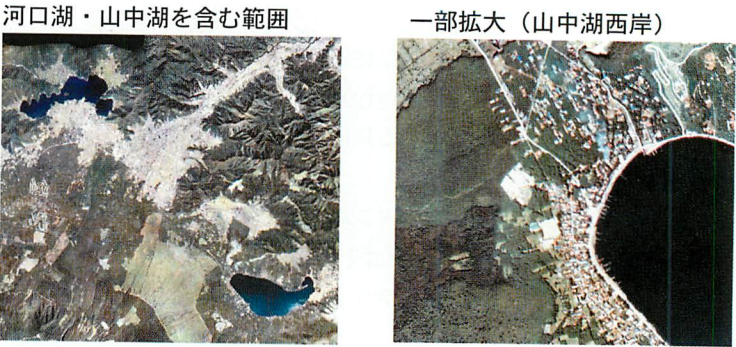


図3-1 航空写真オルソ画像モザイク

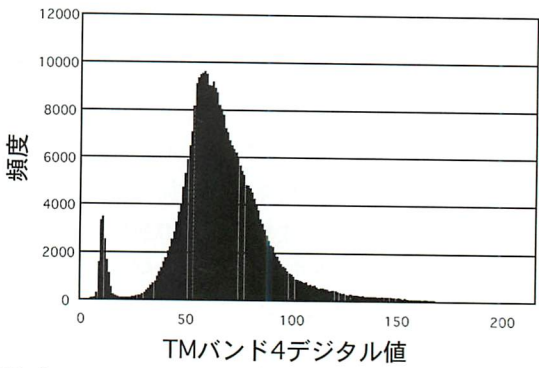


図3-2 TMバンド4の観測地ヒストグラム

表3-1. 水域のデジタル値の分布

バンド	平均	標準偏差
1	66.5	3.1
2	23	1.7
3	19.1	2.7

た。本研究では、河口湖および山中湖が解析対象であることから、湖岸線およびその周辺部から取得した約20点のGCPを使って幾何補正を行った。IMAGINEには、ランドサット衛星画像の幾何補正の際、標高データを利用した地形補正機能が備わっているため、国土院発行の数値地図50mメッシュ(標高)を利用して、地形補正を加味した幾何補正を行った。

次に、幾何補正後の衛星画像から水面領域を切り出す処理を行う。表2-3に示した通り、ランドサット衛星TMセンサの観測バンドのうち、近赤外域を観測波長帯とするバンド4は、水が近赤外線をほとんど吸収する特徴のために、水域と陸域を判別するのに適したバンドである。これを利用して、バンド4の観測値が適切な閾値より小さい領域を抽出することにより、衛星画像から水域を切り出す。図3-2は、1995年5月18日の富士北麓地域の衛星データから作成した、TMバンド4のデジタル値のヒストグラムである。このヒストグラムや画像上での観測値の分布を目視で評価することにより、水域に対応する観測値の範囲を容易に選定することが可能である。地

形図などから湖の範囲を取り出して水域とすることも可能であるが、湖岸のうち浅瀬になっている箇所は、衛星観測時の水位の高低に応じて湖岸線が変化するので、衛星観測時の水域を把握するため、衛星データ近赤外バンドのデジタル値の閾値処理により、水域を抽出する方法をとった。湖の浅瀬の部分は、可視光域で観測すると水底の影響を大きく受けるの

で、近赤外バンドを使った水域抽出により、水底の影響を受けるような浅瀬を分布図作成から除外する効果も期待した。

衛星画像から水域の範囲を切り出した後、可視バンドをカラーレベルスライス表示することにより、定性的水質分布図を作成する。ランドサット衛星TMセンサの観測バンドのうち、可視バンドに相当するのは、バンド1から3までである。1995年5月18日のシーンを例にとると、河口湖・山中湖を含む水域を切り出し、3つの可視バンド、すなわちバンド1からバンド3までについて、観測値の大小に合わせて濃淡を付けた画像は、図3-3となる。3つの濃淡画像は、概ね似た濃淡分布を示している。この画像で示されたTMセンサのバンド1から3までの観測値は、表3-1に示す統計量となった。

この表から、水面に関しては、TM可視バンドのうち、バンド1の観測値標準偏差が最も大きいことが分かる。水質の変化による水面反射率の変化を把握するためには、観測値の範囲が大きなバンドの観測値を利用する

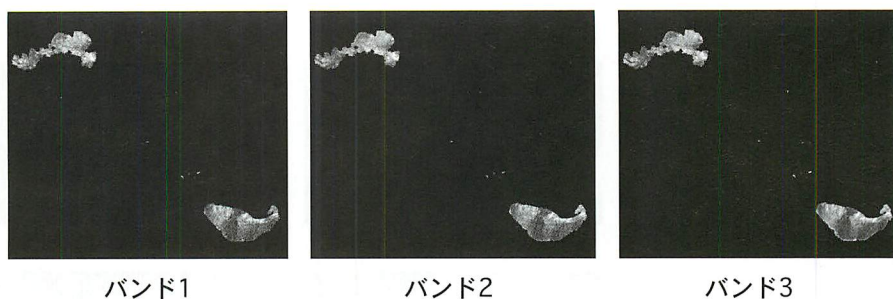


図3-3 TMバンド1～3の単バンド濃淡画像

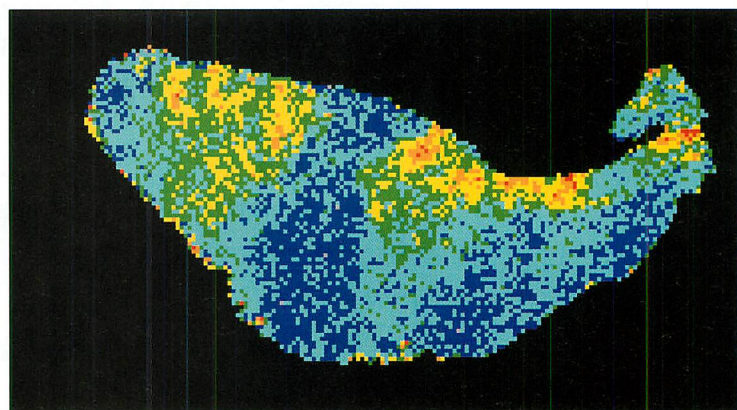


図3-4 TMバンド1カラーレベルスライス画像

方が有利である。従って、レベルスライス表示による定性的水質分布図作成には、TMセンサバンド1の観測値を利用した。

図3-4に、1995年5月18日観測のランドサットTMデータから作成した、山中湖のレベルスライス画像を示す。この図では、局所的なデータの変動を反映した分布が散在し、大局的な水質分布状況を把握しづらい。このよう

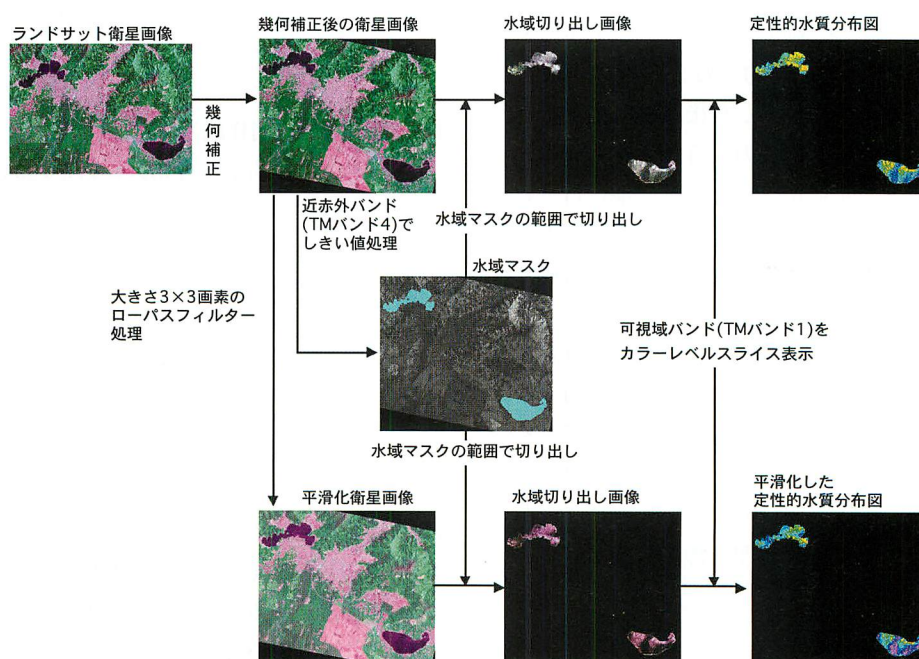


図3-5 定性的水質分布図作成手順

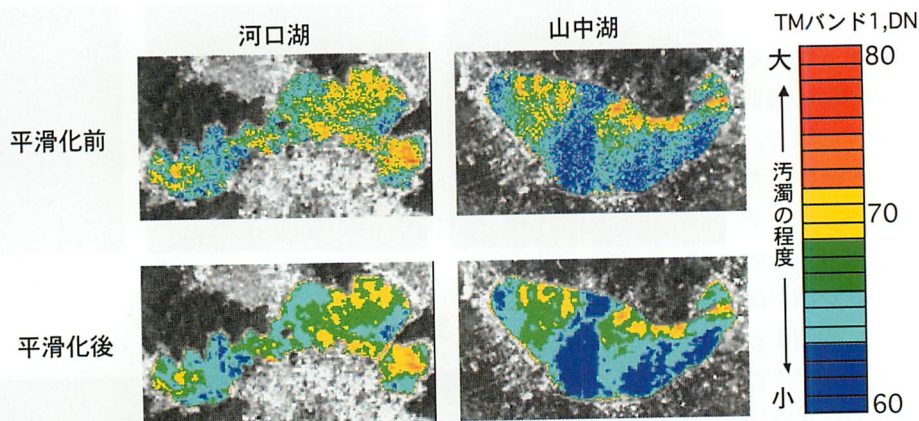


図3-6 1995年5月18日観測のランドサットTMデータから作成した河口湖・山中湖の定性的水質分布図
(画像の範囲は何れも東西5.5km、南北3km)

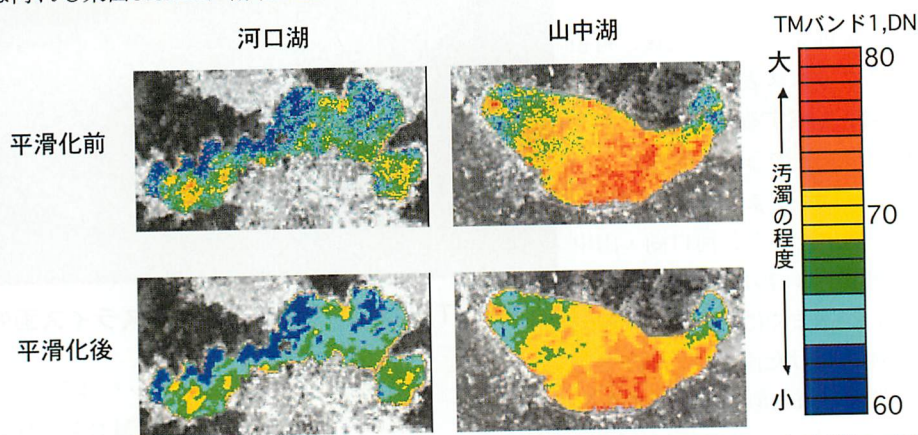


図3-7 2000年4月29日観測のランドサットTMデータから作成した河口湖・山中湖の定性的水質分布図
(画像の範囲は何れも東西5.5km、南北3km)

な局所変動分布は、適当な大きさのエリアごとに観測データを吟味し、エリアの中心地点の特異データを取り除いて、周辺のデータを用いて補完することにより、低減することが可能である。このような処理は平滑化処理と呼ばれ、本研究では、3×3画素のローパスフィルター処理を行って、平滑化した定性的水質分布図の作成を行った。このとき、水域を切り出した後に平滑化すると水域と背景の境界において、情報の欠落が大きくなる。このため、平滑化処理は水域切り出し処理の前に行う。

以上の処理の流れを図にまとめると、図3-5に示す流れ図になる。この処理手順により作成した定性的水質分布図を図3-6および図3-7に示す。

1995年の定性的水質分布図（図3-6）では、河口湖の東側（図の右側）が西側よりも相対的に汚濁し、山中湖の北側（図の上側）が南側よりも相対的に汚濁している状況がわかる。また、2000年の定性的水質分布図（図3-7）では、河口湖の南側が北側よりも相対的に汚濁し、山中湖の南側を中心に広い範囲に汚濁領域が広がっている。

4. 相対的水温分布図

使用データ

相対的水温分布図の作成に使用したデータは、前節（4. 定性的水質分布図）と同じく、1995年5月18日および2000年4月29日に観測された、パスローウが108-35のランドサットTMデータである。

相対的水温分布図作成手順

前節（3. 定性的水質分布図）の定性的水質分布図作成の場合と同じく、前処理として、幾何補正処理と水域の切り出し処理を行う。前処理の後、熱赤外バンドをレベルスライス表示することにより、相対的水温分布図を作成する。ランドサット衛星TMセンサの観測バンドのうち、熱赤外バンドに相当するのはバンド6である。TMバンド6の観測値は、通常の温度の単位には直接対応しないが、水面や地表面の温度と強い相関がある。このため、TMバンド6の観測値の大小に応じて濃淡表示した図は、水面・地表面の温度分布を相対的に表す図となる。1995年5月18日観測のシーンを例にとると、河口湖・山中湖を含む水域を切り出し、熱赤外バンド、すなわちTMバンド6について、観測値の大小に応じて濃淡を付けた相対的な水面温度分布画像は、図4-1となる。

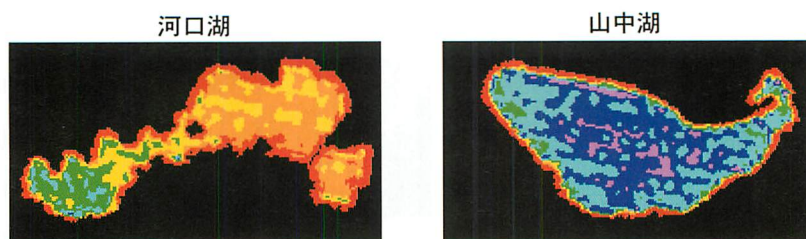


図4-1 TMバンド6カラーレベルスライス画像

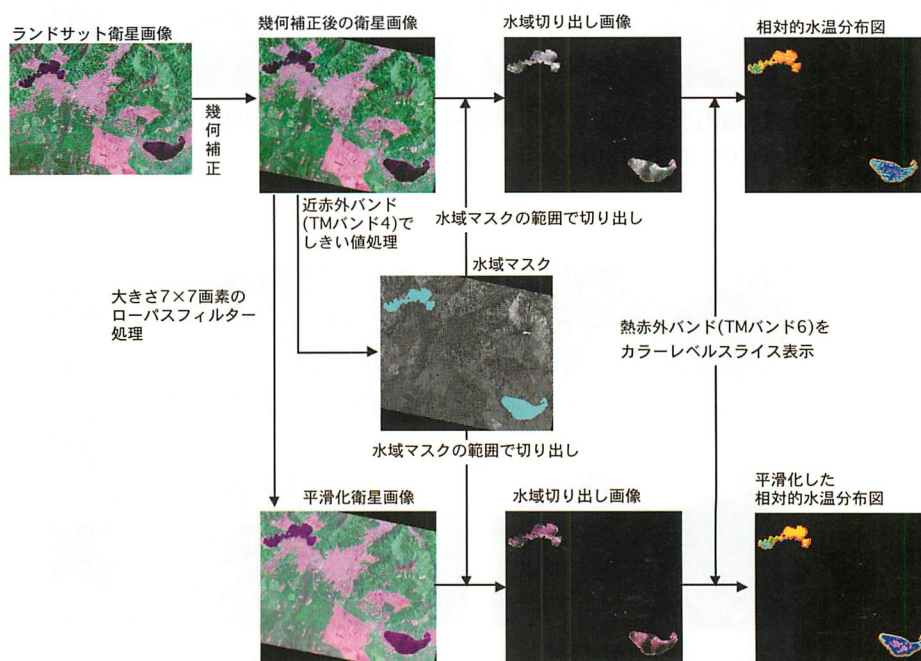


图4-2 相对的水温分布图作成手順

この図には、西北西から東南東の方向に平行な斜め横縞状の構造が見られる。この構造は、センサ観測時に起因するものと考えられる構造で、特に水域で顕著に現れ、水温分布を調べる場合にはノイズになってしまう。このような縞状構造は、水質分布図作成の場合と同様に、ローパスフィルタを用いた平滑化により抑制することができる。ランドサット衛星TMバンド1のセンサの地上空間分解能が30mなのに対し、熱赤外域のバンド6の地上空間分解能は120m（他のバンドに比べ1/4の分解能）である。水質分布図の場合には、3x3画素の大きさのローパスフィルターを用いたことから、11x11画素あるいは13x13画素の大きさのローパスフィルターを用いることも考えられるが、大きなサイズのエリアを用いた平滑化では、湖岸周辺の情報が相対的に温度の高い陸地側のデータとの平滑化で失われたり、細部の温度分布情報が失われることから、7x7画素の大きさのローパスフィルターを用いて平滑化を行うこととした。

以上の処理の流れを図にまとめると、図4-2 に示す流れ図になる。

この処理手順により作成した相対的水温分布図を図4-

3および図4-4に示す。この図から1995年、2000年の両時期において、河口湖では東側（図の右側）が西側よりも相対的に表面水温が高い傾向で、山中湖では湖岸部が中心部より相対的に表面水温が高い傾向であることがわかった。

まとめ

富士五湖のうち、山中湖および河口湖を対象として、湖の水質を2次元的に把握するため、リモートセンシング技術を用いた湖水の定性的水質把握手法を開発し、山中湖および河口湖の水質汚濁分布図および相対的水温分布図の作成を行った。定性的水質分布図の作成方法として、ランドサット衛星画像から湖水域の範囲を切り出し、可視バンドであるTMバンド1の観測値の大小に応じて色付け(カラーレベルスライス表示)する方法を採用した。1995年の定性的水質分布図では、河口湖の東側が西側よりも相対的に汚濁し、山中湖の北側が南側よりも相対的に汚濁していたことがわかった。また、2000年の定性的水質分布図では、河口湖の南側が北側よりも相対的に汚濁し、山中湖の南側を中心に広い範囲に汚濁領域

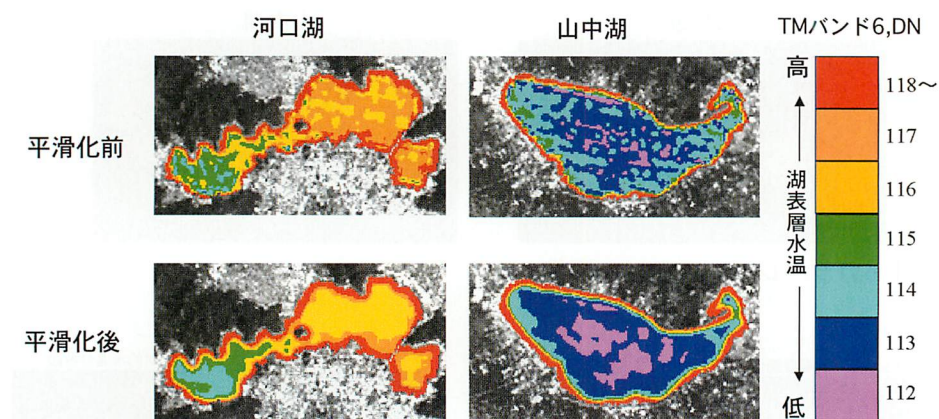


図4-3 1995年5月18日観測のランドサットTMデータから作成した河口湖・山中湖の相対的水温分布図
(画像の範囲は何れも東西5.5km、南北3km)

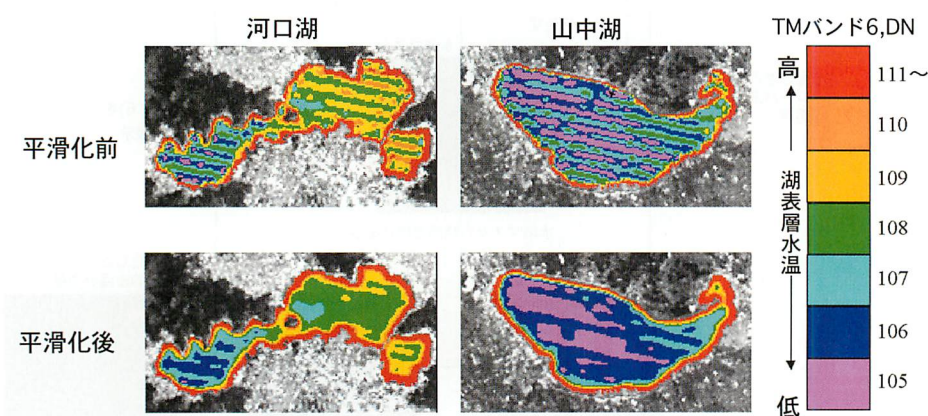


図4-4 2000年4月29日観測のランドサットTMデータから作成した河口湖・山中湖の相対的水温分布図
(画像の範囲は何れも東西5.5km、南北3km)

が広がっていたことがわかった。

相対的水温分布図の作成方法として、同じくランドサット衛星画像から湖水域の範囲を切り出し、熱赤外バンドであるTMバンド6の観測データをカラーレベルスライス表示する方法を採用した。作成した相対的水温分布図から1995年、2000年の両時期において、河口湖では東側が西側よりも相対的に表面水温が高い傾向であり、山中湖では湖岸部が中心部より相対的に表面水温が高い傾向であることがわかった。

山梨県環境科学研究所では、本研究で分布図作成に使用したデータと同範囲を観測したランドサットTMデータを1987年から2000年の期間で約40シーン保有してお

り、今後は、季節的なデータ、年次の異なるデータ进行处理して、比較研究に活用する。本プロジェクト研究を引き継ぐプロジェクト研究「山梨県の水質特性とその健康影響に関する研究」においては、衛星飛来時に同期した採水による水上での水質計測を行い、定量的な汚濁分布図（クロロフィル濃度分布図、SS分布図、透明度分布図）を作成する手法の研究開発に取り組む。

データ提供

本研究で使用したランドサット（LANDSAT）衛星データは米国政府所有で、宇宙開発事業団が受信処理し、研究目的として提供されたものである。

R-02-2004

平成15年度
山梨県環境科学研究所研究報告書
第9号

YIES Research Report

2004年3月発行

編集・発行
山梨県環境科学研究所

〒403-0005 山梨県富士吉田市上吉田字剣丸尾5597-1

電話：0555-72-6211

FAX：0555-72-6204

<http://www.yies.pref.yamanashi.jp/>

印刷 株式会社サンニチ印刷

