

序

自然共生・再生プロジェクトを共生システム理工学類の研究プロジェクトの一つとして立上げ2年が経過した。この間、文部科学省をはじめとして、福島県、福島市、国土交通省等から物心両面の支援をいただき、流域水循環系健全化という新たなシステム科学の創造を目指している。

阿武隈川流域を具体的な対象とした水循環系健全化という課題には、長距離輸送される大気質の問題など、流域のみでは解決できない問題を含みながら、流域の森林生態、地質、地下水、土地利用、都市環境など全てにおける物質循環を反映して形成される河川水質形成過程の理解が含まれている。また、この河川水は流れながら河床環境や河川生態によって様々な物質交換・変質をしており、物質循環を通して河川水質形成過程を理解することだけでも容易な課題ではない。

さらに、水循環系健全化の課題には、既存の水循環系の保全の課題や改善技術の吟味、検証、開発も含まれている。微生物を用いた改善技術の研究やバイオエコエンジニアリングによる環境負荷を低減しながら水質改善を行う技術の開発など多様な課題が山積している。

また、科学技術の成果を活用した流域水管理の方策の検討、行政や流域住民と連携したコミュニティづくり、その仕組みや制度を総合した対応施策の検討など大学のみでは果せない課題も水循環系健全化の課題として含まれている。

まさに、福島大学が掲げた地域貢献・文理融合の課題がスローガンではなく、阿武隈川流域の水循環系を健全化させるという具体的な課題として存在している。その意味でこのプロジェクトの成否は新生福島大学、とりわけ創設された共生システム理工学類の成否をかけた一つのプロジェクトでもあり、改めて掲げた課題の重さを感じている。

ここに2年度目における研究成果・過程をまとめた。研究成果は有効に活用され、課題が解決して意味があり、まだまだこの研究プロジェクトの目標は遠い。産官学民の連携を通したさらに多くの方々の支援が不可欠である。

本報告書をご高覧いただき、本プロジェクトのさらなる発展のために忌憚りの無いご意見をお寄せいただくとともに、プロジェクト推進のためにご支援くださいますようお願いいたします。

2007年3月1日

渡邊 明

目 次

【 I. 水循環系に係わる諸問題の現象<因果関係>の理解に関する研究 】

ーモニタリングとモデリングによる実態把握と将来予測ー

X-band radar を用いた 2 次元降水量精度向上の手法開発	渡邊 明	1
雨水のイオン降水量変動と環境負荷	渡邊 明	8
国土数値情報からみた福島県の土地利用の特徴と近年の変化	後藤 秀昭	13
阿武隈川流域の地質試料に関する地球化学的研究	長橋 良隆	20
流域の仮想集水域指標の開発	後藤 忍	32
河床を着色する微生物とその活性	難波 謙二	42
植物資料収集とデータベース化から見てきた福島県内の水域生態系の変遷		
(2) 猪苗代湖の水生植物相とその変化	黒沢 高秀	49
摺上川ダム建設後における摺上川の水生昆虫相	塘 忠顕	55

【 II. 既存技術／施策の有効性の検証と新技術の開発研究 】

微量分析のトータルダウンサイジングと阿武隈河川水の迅速分析	高貝 慶隆	71
油脂含有廃水の微生物処理技術の開発	杉森 大助	75
廃棄繊維素材を応用した水中含有の有機化合物の除去技術	金澤 等	80
畜産廃棄物資源化設備の運転状況と環境負荷	佐藤 理夫	84
有機性排水からのリン除去・回収技術の開発	稲森 悠平	87
テラヒト [®] ロフランの代わりにメチレンを反応溶媒とするナトリウムシクロペンタジエニド [®] の発生法と メタセン (Cp ₂ MCl ₂ ; M = Ti, Zr) の合成への応用	猪俣 慎二	95

【 III. 流域の水／環境マネジメントの総合化に関する研究 】

河川整備における流域土地利用計画の必要性について	鈴木 浩	99
福島地下水盆・郡山地下水盆の予察的シミュレーションモデルの構築と 地下水観測網の検討	柴崎 直明	103
阿武隈川流域における平常時水質の実態	木内 豪	114
総合的水管理／流域水マネジメントについて	虫明 功臣	120
平成 18 年度の主な活動		126
成果リスト		128

X-band radar を用いた 2 次元降水量精度向上の手法開発

渡邊 明(福島大学・共生システム理工学類)

1. はじめに

2006 年から気象庁は radar 観測網と AMeDAS 観測網を使用して空間分解能 1km, 時間分解能 30 分の降水量分布および降水量分布の 1 時間予測を開始している。しかし, 渡邊 (2006a,b) や Watanabe and Musiake(2006) が指摘しているように, 1998 年から実施されてきたレーダー・アメダス解析雨量は, 必ずしもその精度が高いものではなく, 特に積算された降水量には多くの問題が指摘されている。その原因は気象庁予報部 (1995), 新保(2001a,b) が指摘しているように, 広範囲 C-band radar を利用することによって

- ① radar 遠方の背の低い降水が探知不可能となり radar 雨量が過小評価になること
- ② 特に下層雲 (霧雨) 降水の探知が不可能で radar 雨量が過小評価になること
- ③ 広範囲 radar を使用することでビーム測定高度以下で雨滴が蒸発したり, 降水強化が生起しており, 蒸発していれば radar 雨量は過大評価になるし, 強化をしていけば過小評価になること
- ④ 雨量評価は反射強度によって行っているが Melting zone で反射粒径と水分量が大きくなるため echo 強度が増加し, レーダー雨量が過大評価されること
- ⑤ 大気成層状態によって鉛直水蒸気量の分布が大きいと反射強度が強くなり, レーダー雨量は過大評価となること
- ⑥ 大気の密度成層によって電波が屈折し, 測定位置が遠くなる程測定高度が高くなり, 過小評価となること

などの問題がある。しかし, こうした問題は AMeDAS 雨量と比較し, 雨量計数を求めることによって一定の補正が可能である。問題はこの雨量計数の空間代表性が十分地形などを考慮して計算されていないことに大きな誤差を生む要因があると考えられる。

こうした誤差を補正, 修正するためには, 独自に echo を観測し, その echo の地域特性を把握することによって, 気象庁が定常的に発表しているレーダー・アメダス解析雨量を補正して,

常時精度の高い 2 次元雨量を求めることが可能であると考え, 手軽に利用できる X-band radar を福島大学屋上に設置した。特に, 気象庁レーダーの山地によるビームカット領域となっている領域の正しい echo を計測し, 時間-空間分解の高い観測を実施することによってレーダー・アメダス解析雨量と比較し, 校正することを目的とした。

2. X-band radar

今回観測に用いた X-band radar を第 1 図に



第 1 図福島大学屋上に設置した X-band Radar

示す。この radar は, 最小受信電力 (S_{min}) -100 [dBm], レーダー半径 (r_0) 30 [km], 大気減衰係数 (K_g) 0.01 [dB/km], 給電系損失 (送信系) (L_t) 2.9 [dB], 給電系損失 (受信系) (L_r) 2.5 [dB], 送信電力 (P_t) 25 [kW], 空中線利得 (G) 36 [dB], 送信パルス幅 (τ) 1.2 [μ S], アンテナビーム幅 (水平) (θ_h) 1.8 [$^\circ$], (垂直) (θ_v) 2.0 [$^\circ$] 送信周波数 (f) 9740 [MHz], レーダー定数 (B) 200 , レーダー定数 (β) 1.6 , レーダー定数 (C) $6.69856E-09$, 定数 Z_1 23 [dBZ], 入力ログ最大 79 [dB], 反射強度演算式は,

入力 dB 値 $+S_{min}+20 \cdot \text{LOG}(r_0)+2 \cdot \text{Kg} \cdot r_0-10 \cdot \text{Log}(C)+L_t+L_r$

でもとめている。今回は気象庁レーダーと比較するため、これらの係数も含めて気象庁レーダーで設定している値を利用した。

X-band radar 観測では大型 radar の欠点を補い、大気下層での蒸発散や降雨強化の影響を受けない、降水として落下する直前を観測することを意識し、仰角 4 度に設定した。おおよそ最大レーダー半径 30km 付近で高度 2km における降水強度が測定される。なお、radar 設置の都合上、南東 113° から 138° の間は福島大学エレベータ塔によって遮蔽されている。

3. 観測結果

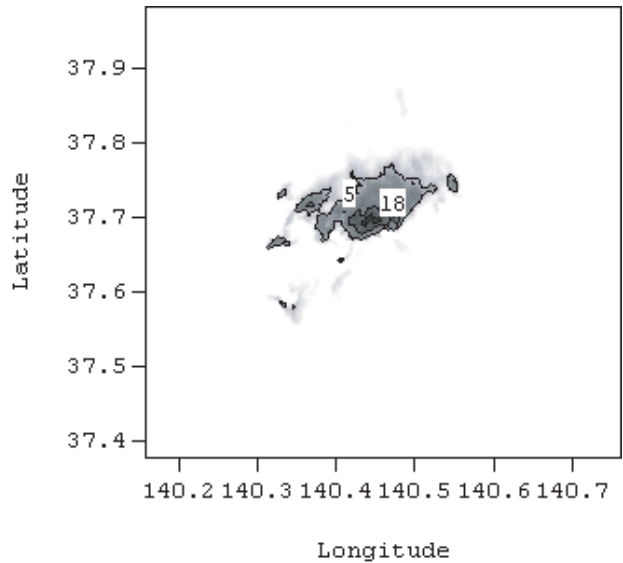
第 2 図に X-band radar の観測範囲を示す。福島大学を中心に東西 60km、南北 60km である。



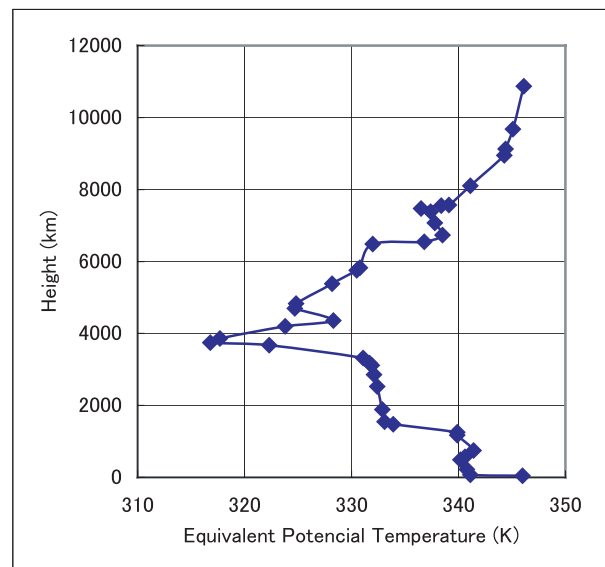
第 2 図 X-band Radar の観測範囲 (Google Earth 引用)

西部 20km 付近には吾妻・安達太良山系があり、東部は阿武隈山系が位置している。設定仰角 4° では阿武隈山系でレーダービームがカットされる所はほとんどないが、吾妻・安達太良山系ではビームカットされ、西部域約 20km 以西は正確な測定ができなかった。

第 3 図に X-band radar で観測した 8 月 14 日 17 時の降水分布を示す。福島市内中心部にある福島气象台では 1 時間降水量が 37.5mm という強雨が出現した。この日、本州南海上に台風 10 号があり、福島付近は本州東の高気圧に覆われていたが、北海道東沖の低気圧から伸びる前線

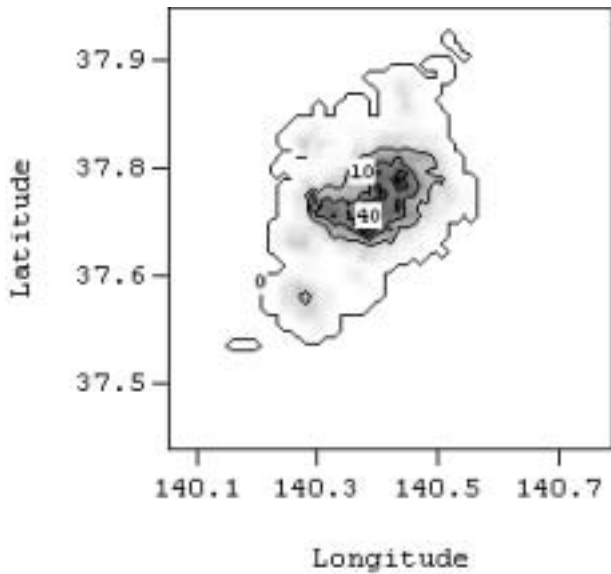


第 3 図 X-band Radar で観測した 8 月 14 日 17 時の降水量分布 (mm/hour)

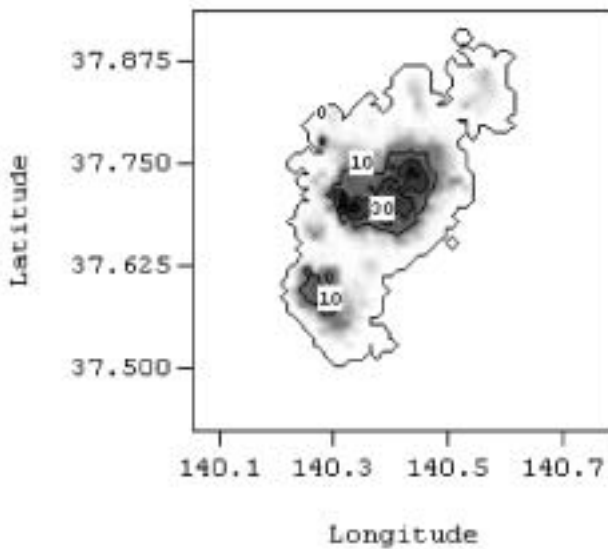


第 4 図仙台管区气象台で観測した 8 月 14 日 9 時の相当温位の鉛直分布

が潜在的に位置し、第 4 図に示すような対流不安定な大気成層になっていた。全層が顕著な対流不安定で高度 10km 程度の対流雲が出現する状況下にあった。X-band radar では福島大学の観測地点から、福島市にかけて 20mm/hour 前後の降雨強度が観測されている。これは 30sec 毎の積算値であるが、最大値が 35.9mm と气象台の観測値に近い値も観測されている。一方、第 5 図、第 6 図に、同時刻の気象庁レーダーの 10 分間ごとの観測値から求めた積算値と、30 分後との平均から求めたレーダー・アメダス解析雨量図を示す。X-band radar の観測領域と比較す



第5図 気象庁 Radar で観測した8月14日17時の降水量分布 (mm/hour)

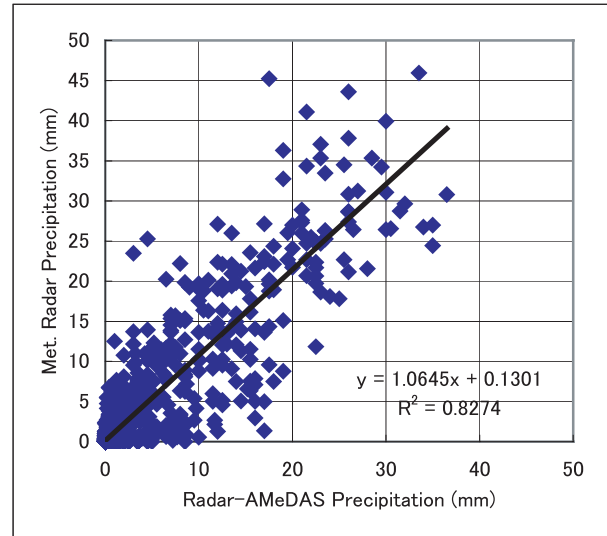


第6図 8月14日17時のレーダー・アメダス解析雨量分布 (mm/hour)

ると両者とも降雨域が広がっている。しかし、比較的強雨域は X-band radar 観測域とよく対応している。これは、今回の観測対象域が気象庁レーダーではより高高度を測定しているため、拡散している雲粒域を観測していることや、X-band radar が気象庁の使用している C-band radar に比べて降水減衰が大きいためと考えられる。また、レーダー・アメダス解析雨量はこの基本的に radar echo 分布から計算しており、雨量強度は小さくなっているが、むしろ降雨領域は拡大している。

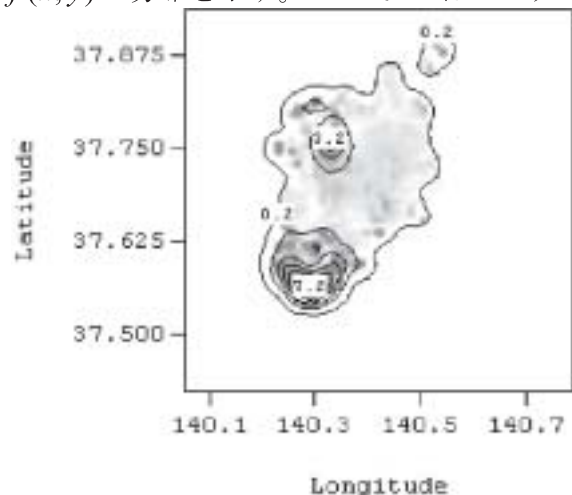
そこで、気象庁レーダーとレーダー・アメダ

ス解析雨量との関係を第7図に示す。この領域



第7図 8月14日17時のレーダー・アメダス解析雨量と気象庁レーダー雨量との相関

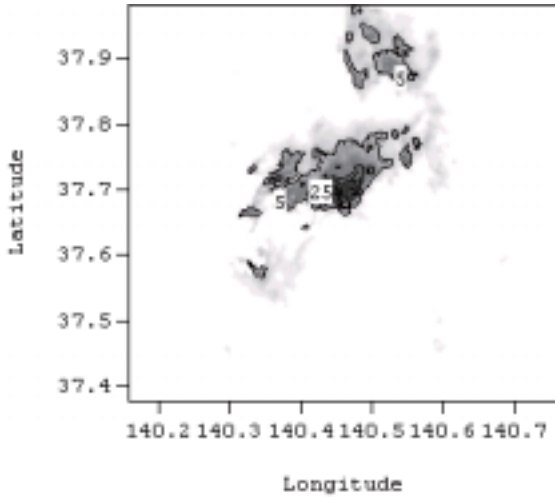
では平均的に7%程度レーダー雨量の方が強く計測されているものの、現象的には精度よく捉えている。ただし、10mm前後の領域では radar echo が無いところでも雨が降っていたり、また、両者を比較すると大きいところでは約2.3倍、小さいところでは約0.5倍の差異が生じている。気象庁(1995)が示しているように、雨量係数は radar echo 強度とアメダス雨量とを1次関数として求めているわけではなく、echo 観測で得られた雨量をビーム高度補正や空間的な重み付けを行い、さらに空間的に重みづけたアメダス観測雨量との関係を求めて決定している。その雨量係数の空間特性を把握するため第8図に $f(x, y) = Ra(x, y) / Re(x, y)$ でもとめた $f(x, y)$ の分布を示す。ここで Ra はレーダー・



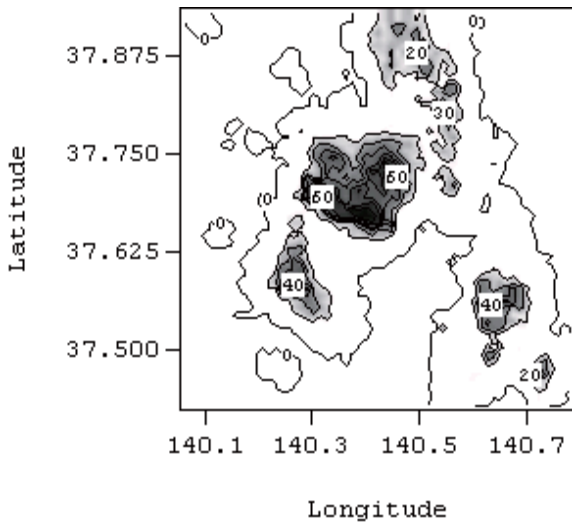
第8図 8月14日17時の雨量係数分布

アメダス解析雨量を示し, Re はレーダー雨量を示す。この分布を第2図で示した観測領域の地形と対比すると, 吾妻・安達太良山系の影の部分で大きくなっている。

同様に8月14日, 日積算雨量における3つの雨量分布を第9図, 第10図, 11図に示す。

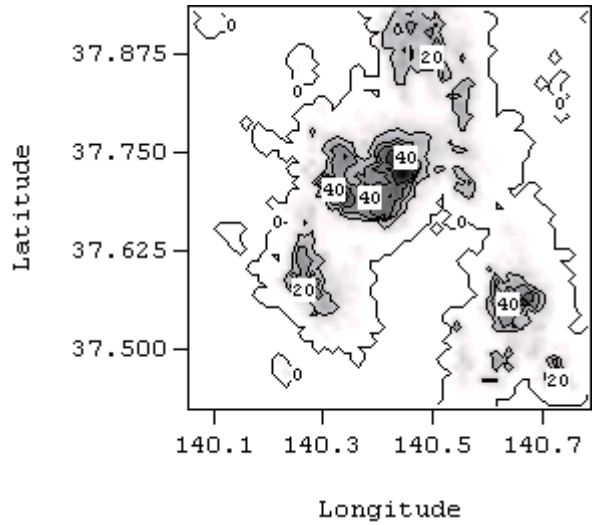


第9図 X-band radar による8月14日の日降水量分布 (mm)

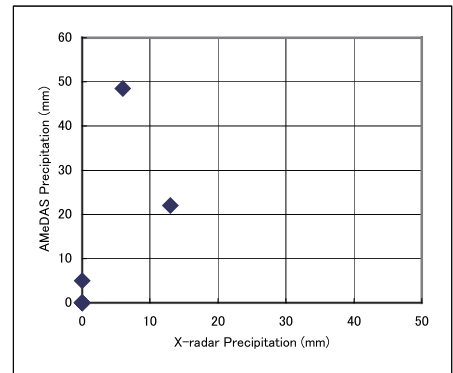


第10図気象庁レーダー観測による8月14日の日降水量分布 (mm)

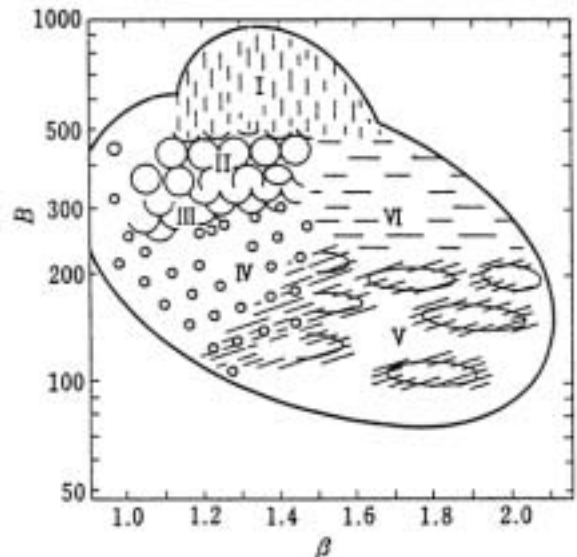
観測地域では, 時間降水量分布と同様に降雨領域では X-band radar による降雨域がもっとも小さくなっている。また, 雨量も最も少なくなっている。この日の X-band radar の観測値と観測領域下のアメダス観測地点雨量との関係を第12図に示す。X-band radar 観測領域で降水があったのは4地点で, 最大値は49mmを観測している。この点だけを比較するとレーダー・アメダス解析雨量が最も近い値になるが, 雨域分布のみを比較すると, レーダー・アメダ



第11図レーダー・アメダス解析雨量による8月14日の日降水量分布 (mm)



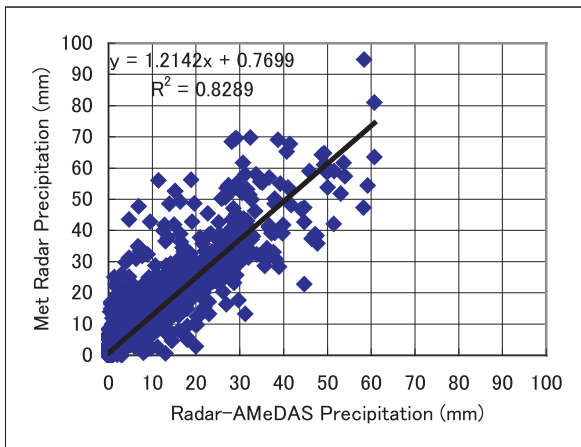
第12図 AmDAS と X-band radar の日降水量の相関。ス解析雨量域が最も広がっている。Fujiwara(1965) によればレーダー定数は降水システムによって大きく異なり, 第13図に示



第13図 Fujiwara(1965)による降水タイプによるレーダー定数(B & β)の関係

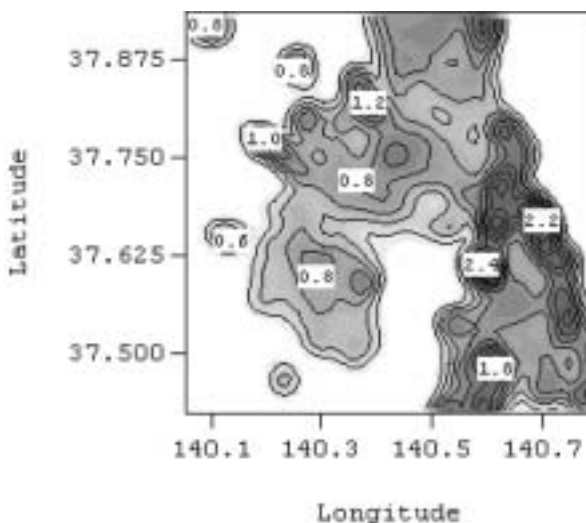
すように気象庁は一様に広がった層状 echo を仮定し、レーダー定数 B を 200, β を 1.6 とし て計算している。しかし、この観測例では発達 した積雲に対応し、第 13 図の II, III の領域の 値を使う必要がある。したがって、定数 B は 400 程度、 β は 1.3 程度を使用して Z-R 関係を求め ることが必要で、これによって約 2 倍程度の降 水強度になる。なお、X-band radar の降水域は 山や建物による遮蔽域を除けば、強雨域は気象 庁レーダー観測結果と一致している。

また、日降水量に関する雨量係数の空間分布 特性を把握するため、気象庁レーダー雨量によ る日降水量とレーダー・アメダス解析雨量との 関係を第 14 図に示す。平均的には気象庁レー ダー雨量の 0.8 程度になっていることが分かる。



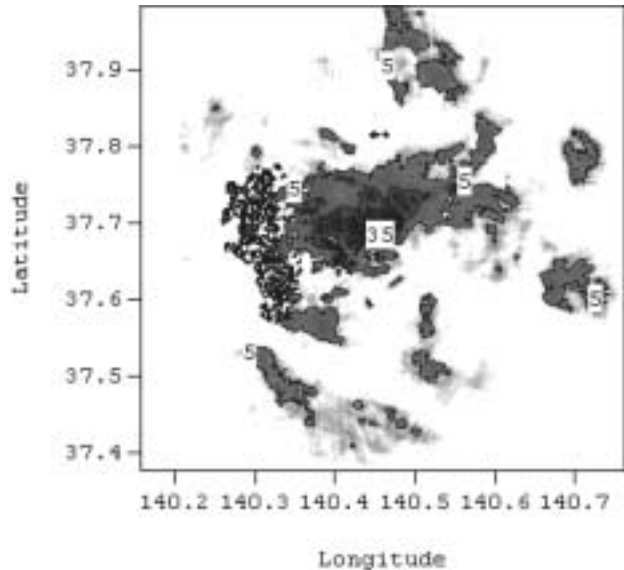
第 14 図レーダー・アメダス解析雨と気象庁レーダ ー雨量との相関

1 時間降水量分布に比べて、1 次関数的相関が 良くなっている。また、第 15 図にこの雨量係 数の分布を示す。阿武隈山系、吾妻山系の影

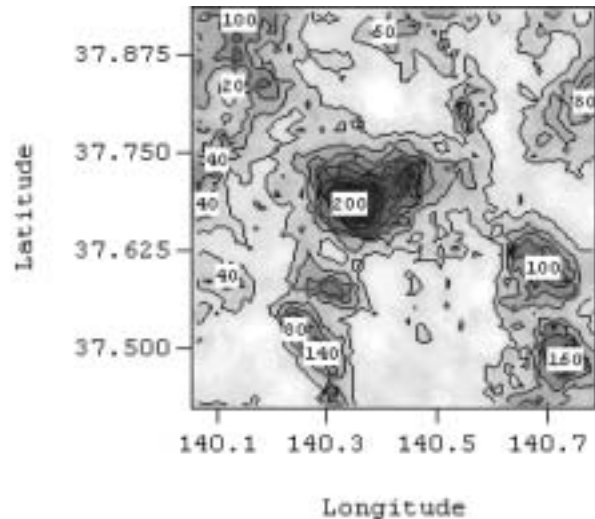


第 15 図 8 月 14 日の日雨量に対する雨量係数分布 で大きな値を示すが、中通り地方は比較的小さ い値になっている。また、渡邊 (2006b) で指 摘した放射状構造が生じていることもわかる。

さらに、2006 年 8 月の月降水量分布 (8 月 1 日から 20 日まで) で 3 つを比較するため第 16 図、第 17 図、第 18 図に X-band radar 月降水量分布、気象庁レーダー月降水量分布及びレー ダー・アメダス解析雨量月降水量分布を示す。

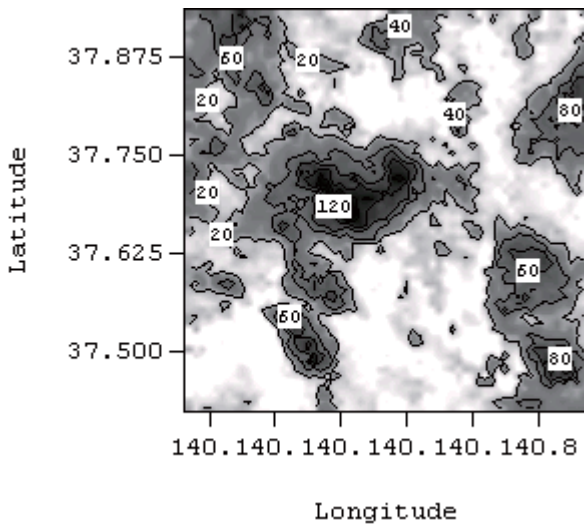


第 16 図 X-band radar による 8 月 1 日から 20 日の降 水量分布 (mm)



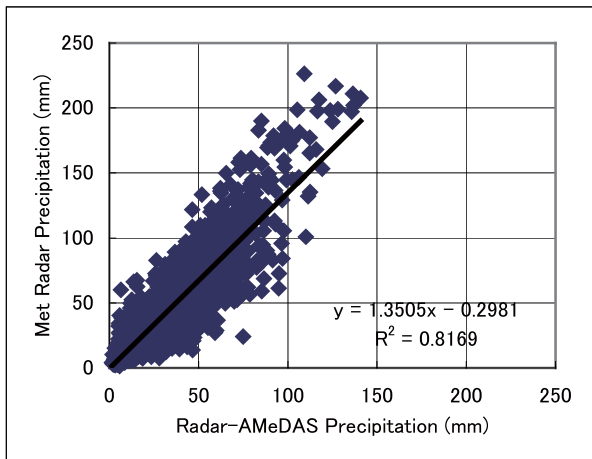
第 17 図気象庁 radar による 8 月 1 日から 20 日の降 水量分布 (mm)

全ての点で日降水量と同じ傾向を有している。 積算雨量として最も多いのは気象庁レーダ ー雨量で、次いでレーダー・アメダス解析雨量、 X-band radar 雨量の順位になっている。この期 間のアメダス地点の降水量の最大値が 59mm で レーダー・アメダス解析雨量と比較すると、その 1/2 程度になっている。一方、X-band radar の 月積算降水量では 0.6 倍程度の降水量になっ ている。降雨域の分布は X-band radar の遮蔽域 を除くとほとんど一致しており、2006 年からの



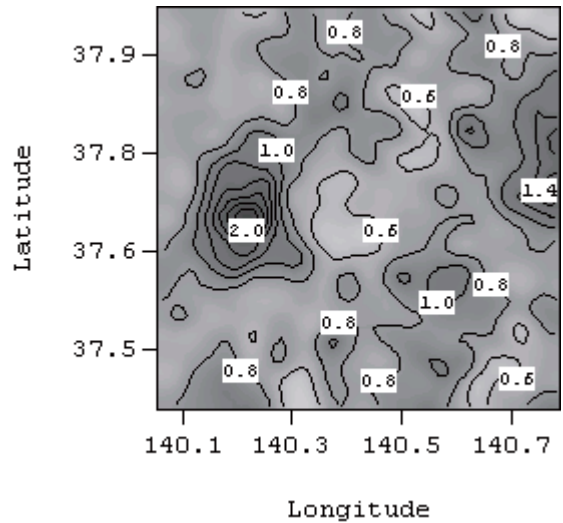
第 18 図レーダー・アメダス解析雨量による 8 月 1 日から 20 日の降水量分布 (mm)

レーダー・アメダス解析雨量は、かなり適切な降水域が設定されていると考えられる。ただし、積算雨量の量的補正の必要性は残されている。また、同期間の気象庁レーダー雨量とレーダー・アメダス解析雨量との関係を第 19 図に示す。



第 19 図 8 月 1 日から 20 日までのレーダー・アメダス解析雨と気象庁レーダー雨量との相関

す。降水システムの異なる降水が積算されているせいか、積算雨量になると両者の関係はやや日降水量より悪くなり、平均的にレーダー降水量の 0.75 倍程度になっている。なお、期間雨量に対する雨量係数に相当する係数の地域特性を見るため、第 20 図に係数の分布図を示す。日降水量に対する係数分布と比較すると、仙台からの放射形構造が明確に出現し、蔵王山系や吾妻・安達太良山系の陰になる領域の係数は 1 以上になり、中通り地方では係数は 0.6 程度と小さくなっている。また、阿武隈山系の影の部分も 1 より大きくなり、アメダス雨量との相関を取ることによって平均的にはビームカットされている領域の補正がなされていることがわかった。しかし、観測領域では気象庁レーダ



第 20 図 8 月 1 日から 20 日までの期間雨量に対する雨量係数分布

ーによる降水強度が強くなる傾向にあること、レーダー・アメダス解析雨量もアメダス雨量を用いた雨量係数で補正しても、さらに 2 倍程度の積算降水量になっていることがあり、2 次元降水量を求めるのはまだ検討すべき課題が多い。

4. まとめ

X-band radar による特別観測結果と気象庁レーダー、レーダー・アメダス解析雨量をそれぞれ比較し、最終的には特別観測結果を用いてレーダー・アメダス解析雨量を補正することによって、定常的に精度の高い 2 次元降水量を求めることを目的とした。

今回の実験では、気象庁レーダーの観測値はビーム高度が高くなるために、降雨領域も降雨強度も大きくすぎる傾向を有していることが分かった。これらを X-band radar の観測結果を使用することによって補正することは容易であるが、現在、X-band radar の観測結果は、開発途上のところもあり、レーダー定数の適切な設定や、地形処理、充満率、雨量減衰問題等の課題を解決しないと、適切な雨量を測定していることにならず、これらの課題を解決して、補正係数を求めたいと考えている。しかし、今回の調査で、ほぼ気象庁レーダー、レーダー・アメダス解析雨量、X-band radar それぞれの特性が明らかになり、今後さらに、X-band radar の補正をしつつ、適切な 2 次元雨量計測の課題を追求したいと考えている。また、ここでは X-band radar はレーダー・アメダス解析雨量を補正する目的で使用しているが、このレーダーは比較的維持・管理が容易で、安価なため、2

次元雨量計として広く活用できる可能性もでてきつつある。このためのシステム開発も検討したいと考えている。

引用文献

- Fujiwara, M., 1965: Raindrop-size distribution from individual storms. *J. Atmos. Science.*, 22, 589-591.
- 気象庁, 1995: レーダー・アメダス解析雨量の解析手法と精度, 測候時報, Vol. 62, 279-339.
- 新保明彦, 2001a: レーダー・アメダス解析雨量 (I), 天気, Vol. 48, 579-583.
- 新保明彦, 2001b: レーダー・アメダス解析雨量 (II), 天気, Vol. 48, 777-784.
- 渡邊 明, 2006a: 短時間強雨監視のための面的雨量の推定, 東北地域災害科学研究, Vol. 42, 149-154.
- 渡邊 明, 2006b: 面的雨量の精度向上と雨水による酸性物質の負荷量について, 共生のシステム, Vol. 2, 9-16.
- Watanabe, A. and K. Mushiake, 2006: Measurement of the Exact Two-Dimensional Precipitation, The 3rd APHW conference, 391-398.

雨水のイオン降下量変動と環境負荷

渡邊 明 (福島大学・共生システム理工学類) 渡邊 絵美 (福島大学・教育学部)

1. はじめに

近年、雨水の酸性化に伴う生態系への影響が大きな地球環境問題の一つになっており、特に Leivestad and Muniz(1976) による北欧での融雪期の高イオン濃度、高酸性度が魚類に影響を及ぼしているとの報告をはじめ、国内でも中部山岳地帯で栗田ほか(1993,2006)の河川・湖沼での pH 低下が指摘され、雨水による酸性物質の環境負荷が無視できない状況にある。河川や湖沼、土壌に及ぼす雨水酸性化の影響としてのイオン降下量を監視し、その影響を見積もることが重要になっている。福島大学では1988年4月より一雨降水毎に雨水を採取し、1994年から Dionex 社製イオンクロマトグラフを用いて一雨ごとのイオン分析を継続してきた。ここでは、これまで測定してきた9種のイオンの濃度の変動が雨水ごとにどのような特徴を有しているか、また、その降下量がどのように変動しているのかを解明するとともに、河川水への環境負荷について検討したのでその結果を報告する。

2. 分析方法

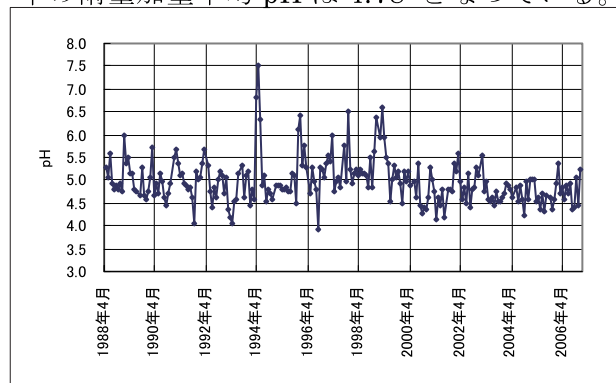
福島大学屋上では1988年1月からSHIBATA 製ろ過式バルクサンプラー(Model W-101)を用いて一雨毎採取し、化学組成を Dionex 社製イオンクロマトグラフ(1994年から2001年10月までMODEL-14, 2001年10月からDX-320)で分析して、その変動を調べた。イオンクロマトグラフで分析したイオン種は F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} の9種を対象とした。

また、国土交通省東北地方整備局摺上川ダム管理事務所気象観測露場(以下摺上川ダム)、白河地方水道用水供給企業団芝原浄水場(以下真舟)では直径20cm、高さ2mの亚克力製円筒採取器の上部に東洋ろ紙 No.1 をセットし、約1ヶ月ごとに採取した。なお、冬期は降雪を採取するためろ紙をセットせずに採取した。また、環境負荷の目安としてダム管理事務所の計測値、及びダム下流の中茂庭の摺上川で採水す

ると同時に、真舟茅窪の阿武隈川で採水し、メンブランフィルターでろ過した後、大学屋上降水と同様な分析を行った。

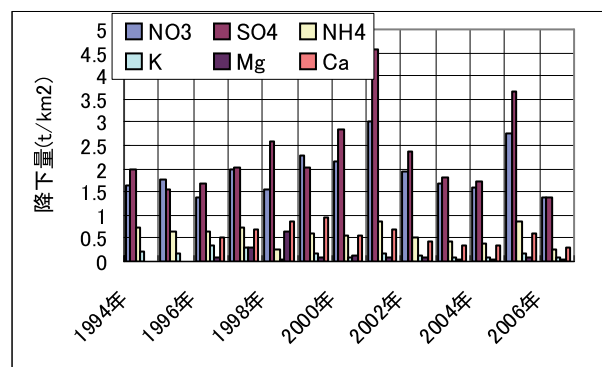
3. 分析結果

第1図に1998年4月から2006年12月までの雨水の雨量加重月平均 pH の変動を示す。福島大学屋上降水では、1988年の観測開始以来1995年まで雨水 pH は減少傾向にあったが、1996年ごろから2000年頃までいったん上昇し、その後、また減少傾向が続いている。全年の雨量加重平均 pH は4.77となっており、2006年の雨量加重平均 pH は4.78となっている。



第1図雨量加重平均月平均 pH の変動

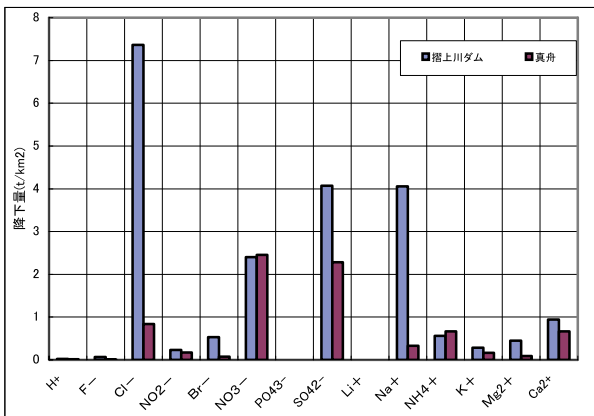
こうした pH 変動を示す中、環境負荷の要因となる各種イオン降下量を第2図に示す。2006年の降水量は1207mmと平常並みであったが、イオン降下量は一部のイオンを除いて全体的



第2図福島大学屋上降水の各種イオン降下量変動に過去13年間で最も少ない量となっている。特に、酸性化で問題になる硝酸イオンは2005

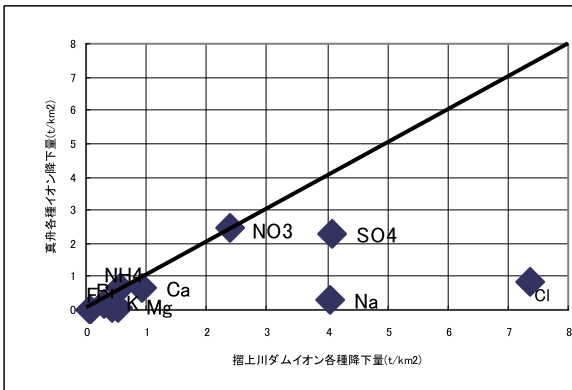
年に比べて 1/2,硫酸イオンは 2005 年の 1/3 と少なくなっている。また,長距離輸送の問題の一つであった,アンモニウムイオンも 2005 年急増したものの,2006 年は 2005 年の 1/4 程度に急減している。

こうした降下量の空間的代表的性を検討するため,2005 年 10 月より摺上川ダムと真舟浄水場でも約 1 ヶ月毎に雨水を採取し,降下量を測定した。第 3 図は両地点の降下量をイオンごと



第 3 図摺上川ダムと真舟の各種イオン降下量

に示したものである。硝酸イオンについてはほとんど降下量に差がなく空間的代表的性が高いものと考えられるが,硫酸イオンやナトリウムイオン,塩素イオンでは大きな差が生じており,特に,摺上川ダムでの降水には塩素イオンが多く含まれている。一般に塩素イオンはナトリウムイオンとバランスし,海塩由来のものと考えられていたが,ナトリウムイオン全てが海塩由来と仮定して,非海塩由来の塩素イオンを推定すると,非海塩由来の塩素イオンは,おおよそ海塩由来の塩素イオンの倍の量になっている。第 4 図は摺上川ダムと真舟の各種イオンの降

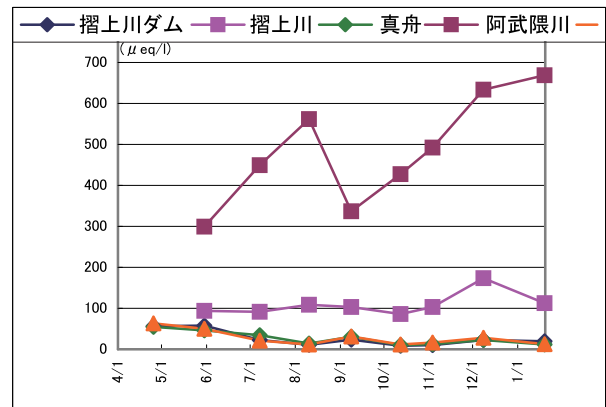


第 4 図摺上川ダム, 真舟の各種イオン降下量の関係
下量の関係を示したものである。比較的濃度の低い F-, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺イオンにつ

いては明瞭な差異は認められない。

4. 河川環境への影響

降水による各種イオン負荷量がどの程度河川など環境に影響するのかを確認するため,摺上川ダムおよびダム下流の中茂庭の摺上川,真舟浄水場およびその近くの阿武隈川で同日に採取して降水と河川水を分析し,各種イオンの濃度を比較した。第 5 図に福島大学屋上降水を含めた 5 地点の硫酸イオン濃度の 2006 年 4 月



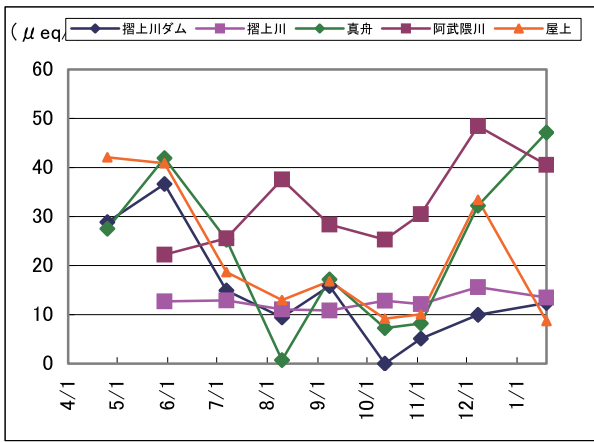
第 5 図摺上川ダム, 摺上川, 真舟, 阿武隈川, 大学屋上の 2006 年 4 月から 2007 年 1 月までの硫酸イオン濃度変化

から 2007 年 1 月までのデータを示す。3 地点の降水中濃度はほとんど同じ濃度,傾向を示し,硫酸イオン濃度は比較的空間的代表的性が高いことを示している。降下量での差異が生じていたのは,降水量の空間的代表的性が小さいために発生していたものと考えられる。従って,逆に,降水量に差があるのに硝酸イオンなどで降下量が比較的同じ量を示すのは,濃度としての空間的代表的性がないことを意味している。

雨水の硫酸イオン濃度は阿武隈川の濃度の 1/10 程度を示し,摺上川でも 1/2 倍程度の濃度を示している。これは基本的に温泉排水や土壌中で硫酸イオンが増加して流出しているものと考えられる。従って,雨水がそのまま河川に流出しているとする,その負荷量は阿武隈川で 10%程度,摺上川では大きい時には 50%程度の影響があり,さらに,地表や土壌中を通過する段階で 90%から 50%程度付加されて流出していると考えられる。

さらに,イオン種ごとに比較すると,第 6 図に示すように,硝酸イオン濃度については比較的大きな影響が考えられる濃度変化を示して

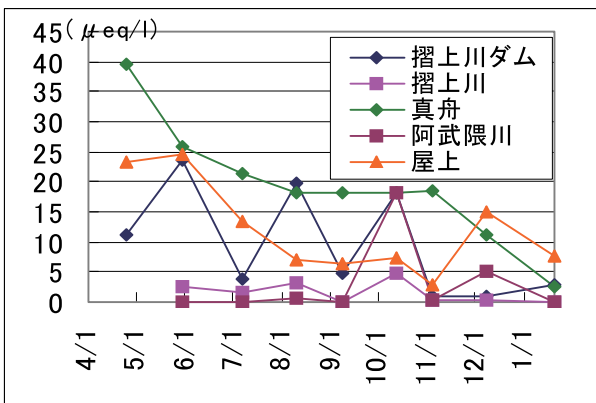
いる。すなわち、真舟浄水場と阿武隈川の硝酸イオン濃度は同様な濃度変化をすると同時に、



第6図 摺上川ダム, 摺上川, 真舟, 阿武隈川, 大学屋上の2006年4月から2007年1月までの硝酸イオン濃度変化

平均的には雨水は阿武隈川河川水の1/2程度の濃度になっている。また、冬季から春季にかけては雨水濃度の方が大きい時もある。一方、摺上川ダムと摺上川でも、ほぼ同様な濃度を有しながら、雨水は大きく変動するが、河川水は大きな変動しない状態で推移していることがわかる。

さらに、陽イオンの変動で最も顕著な変動を示すアンモニウムイオンの5地点の濃度変化を第7図に示す。雨水より河川水の濃度の方が低くなっている。これは、基本的に、雨水で供給



第7図 摺上川ダム, 摺上川, 真舟, 阿武隈川, 大学屋上の2006年4月から2007年1月までのアンモニウムイオン濃度変化

されるアンモニアイオンが土壌や河床等で吸収されていることを示していると考えられる。このように河川水のイオン濃度と雨水のイオン濃度を比較することによって、おおよそ雨水がどの程度影響を有しているのかを理解する

ことができるが、実際に河川へ流出するまでの変質過程は複雑で土壌・表層過程をブラックボックスにして、流出イオンを推定することは困難である。しかし、雨量の多い月はほぼ雨量と同じ濃度を示すイオンも多いことを考えると、イオン流出のパラメタ化も可能であると考えられ、今後の課題としたい。

5. 河川水のpH変動

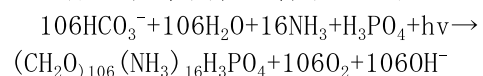
摺上川中茂庭では2006年5月末と9月末に第8図に示すような河床に緑の藻が繁茂した。



第8図 摺上川中茂庭の河床の写真(2006年5月30日)

9月末に繁茂した藻は10月6日から7日にかけて122mmの降水量があり、10月12日の河床では、第9図のように所々に藻が生えている程度で、9月末に繁茂した藻はほとんど消失しており、同日のpHも6.9と平均的な値を示していた。しかし、5月30日の観測ではpH8.9と高pHを示すと同時に川幅約20m幅のpHには0.2程度の差があるものの、ほとんど一様であった。この時の河川水の各種イオン濃度を第10図に示す。比較的高濃度を示すイオンは塩素イオン、硫酸イオン、ナトリウムイオン、カルシウムイオンである。マグネシウムイオンやカルシウムイオンは粉塵等土壌粒子に依存するものと考えられ、ナトリウムイオンと塩素イオンは海塩起源と考えられるバランスを示している。

一般に富栄養化に伴う水生植物の生産は

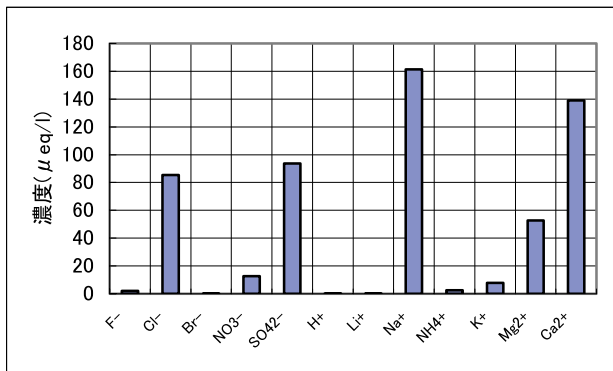


で表現することができる。佐藤ほか(2006)はヌルの1次生産について上式をあてはめ逢瀬川

における藻の発生に適応し、窒素やリンがその原因であることを指摘している。一方、中村、



第9図 摺上川中茂庭の河床の写真(2006年10月12日)

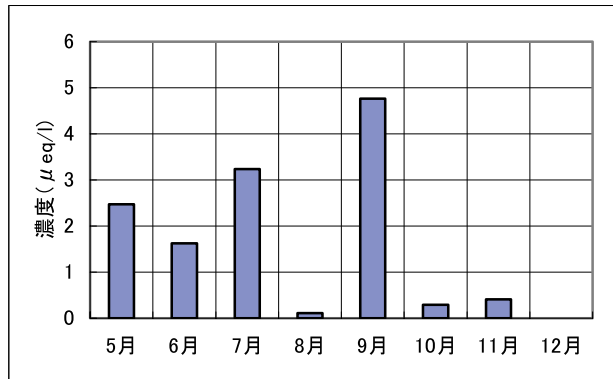


第10図 5月30日採水した摺上川の各種イオン濃度

藤田(2006)は同様な生産過程を基に、猪苗代湖のpH上昇を植物プランクトンの生成によって説明している。

同様な方法で河床藻の生成との関連を概算すると、平均的なpH7.0からpH8.9になるためには0.0078 mol/lの水酸イオンが必要になる。水生植物生産量は1molの水酸イオンあたり33.5gであるから、pH上昇が生物生産に起因するとすると1m³あたり0.26g生産されていることになる。これに基づき中茂庭の河床藻の生産速度を計算する。幅20m、長さ100mの領域で、水深50cm、流速1m/sでpH7.0で上流から流入する河川水が、この領域を通過することでpH8.9になったとすると、乾燥重量100g/m²の藻を生産する時間は22時間程度になる。光合成を十分できる時間を6時間とすれば、約4日程度で河床藻が生産されることになり、急激な藻の発生と対応したpH変化と考えられる。しかし、上記に示した反応に対応するリン酸イオンは第10図に示すとおり検出されていない。

これは、河床藻が消費して検出されなかったと理解することもできる。また、もう一つの反応に必要なアンモニウムイオンは消費されながらも検出されている。第11図にアンモ



第11図 摺上川のアンモニウムイオンの濃度変化

ニウムイオンの濃度変化を示す。アンモニウムイオンは藻が発生していた5月には相対的に低くなっているが、8月や10月以降と比較してそれ程低い濃度ではない。ただし、大量に藻が発生する以前に対応する9月にはアンモニウムイオン濃度が增大しており、その後急減期に減少する変化をしている。もちろん、河川水や降雨による希釈効果等を考慮しなければアンモニウムイオンの濃度変化を説明できないが、観測値は一定光合成に伴う河床藻の生産性に対応した変化も示している。

以上の結果を考えると、藻の発生は基本的にアンモニアとリン酸の増加に伴うことが大きな要因で、さらに、9月末の降雨増加による消失を考えると流速、流量低下が藻の発生の大きな要因になっている可能性が高いと考えられる。

5. まとめ

河川の生態系破壊の一つとして、pH低下に伴う問題が古くから指摘され、特に福島県でも融雪期に、急激なpH低下が伊南川で観測されている。河川におけるpH低下は主に硝酸イオンが原因であることを青井(1989)が指摘しているが、阿武隈流域では、硫酸イオンの方がやや多い傾向を示している。今回は融雪期のみに限らず、雨水がどの程度河川水の水質に影響しているのかを明らかにするため、比較的人口的な排水の混入しない2地点で試行観測を実施したが、表層-地下水間のイオン負荷過程をブラックボックスにしても、豪雨時を除けば同時に流出しているわけではなく、流域における滞留時

間等を理解することも重要である。そのためにはより詳細なサンプリングによる雨水－河川水の計測が不可欠である。また土地利用の差異毎に代表的な地点からの流入水についてもイオン分析の必要性があり、降雨による環境負荷量を具体的に見積もるには多くの課題が残されている。今後さらに調査を継続して検討したいと考えている。

最後に、資料採取や資料提供に多大な支援を戴いた国土交通省東北地方整備局摺上川ダム管理事務所および白河地方水道用水供給企業団芝原浄水場の方々に謝意を表します。

引用文献

青井孝夫, 1989: 酸性降下物(雨)の陸水影響予測について－諸国の例を中心に－, 公害と対策, Vol.25, 249-255.

栗田秀實, 堀純一, 浜田安雄, 植田洋匡, 1993: 中部山岳地域河川上流域における河川・湖沼 pH の経年的低下と酸性雨の関係について, 大気汚染学会誌, Vol.28, 308-315.

栗田秀實, 植田洋匡, 2006: 中部山岳地域河川上流域における陸水 pH の長期的低下, 大気環境学会誌, Vol.41, 45-64.

Leivestad, H. and Muniz, I. P., 1976: Fish kill at low pH in a Norwegian river, Nature, Vol.295, 391-392.

中村玄正, 藤田豊, 2006: 水生植物による pH 変化について, 学術研究報告会講演要旨, No.49, 39-42.

佐藤孝児, 佐藤洋一, 中村玄正, 2006: 河川における水質課題と水質特性, 学術研究報告会講演要旨, No.49, 9-12.

国土数値情報からみた福島県の土地利用の特徴と近年の変化

後藤秀昭（福島大学・人間発達文化学類）

1. はじめに

土地利用に関する研究は、単にその様子を図示することにとどまらず、その歴史的推移、自然環境との関連、利用形式の地域性、他地域との関連性を明らかにする研究であり（渡辺，1955）、極めて地理的課題である。戦前から行われてきた土地利用に関する研究は、1970年代後期からは国土地理院によって作成された国土数値情報と呼ばれるメッシュデータによって主に分析が行われるようになった（瀬戸，1984；尾藤，1987；赤桐，1992 など）。コンピュータの利用により、広域的な地域を対象として、数量的、統計的な分析が可能となっている（西川，1995）。近年では、パソコンの高性能化とインターネットの普及を背景として、地理情報システム（GIS）を用いて多様な分析が行われている。環境問題（例えば、山本，2006）や土地利用規制の問題（例えば、古市ほか，2000）などの社会的な問題に対する科学的な分析手段として利用されているものが多く見られる。

本研究は、福島県を対象として土地利用とその変化を定量的に明らかにし、地域的な違いを検討することを目的とする。福島県は脊梁山脈の両側に広がる数少ない県であり、太平洋側と日本海側の両方の側面を有するとともに、会津地域や阿武隈山地を中心に中山間地域が大部分を占めている¹⁾。県域全体の土地利用の変化は日本の中山間地域の縮図をとらえることにつながると考えられる。

2. 分析に用いた資料と研究の方法

本研究では、国土数値情報²⁾の土地利用メッシュを用いた。この情報は、三次メッシュの10分の1細分方眼に卓越利用により分類されて作成されており、実際には約100×100mの単位メッシュに正規化されているものである。これまでに1976年、87年、91

年、97年と4度の調査が実施されている。本研究で分析に用いたのは、データが比較的良好に整理されているもののうち最も古い1987年と最も新しい1997年のデータである。これら2時点とも、国土地理院発行の2,5000分の1地形図をもとに作成されているが、1987年では12、1997年では11に分類されており、分類の項目と数が異なる（表1）。本研究では、両時点間で共通した項目を用いるとともに数の少ないセルを排除して、5つの項目に再分類した（表1）。

1987	1997	本研究
田	田	田
畑	その他の農地	田以外の農地
果樹園		
その他の樹木畑		
森林	森林	森林
建物用地	建物用地	市街地
荒地	荒地	その他
幹線交通用地	幹線交通用地	
その他の用地	その他の用地	
内水地	河川地および湖沼	
海浜	海浜	
海水域	海水域	
	ゴルフ場	

表1 国土数値情報(1987, 1998)の分類と本研究の分類

本研究で分析に使用したGISはESRI社作成の「ArcGIS 9.1」と「spatial analyst」のエクステンションであり、データは分析前に以下の手順で福島県域のみのラスター形式のデータとした。1) 国土交通省のwebサイトより福島県域が入った二次メッ

シュを取得し、エクシード社製の「国土数値情報変換ツール」により shape ファイルに変換して ArcGIS に読み込んだ。2) ArcGIS において 100m 四方のメッシュとなるようにラスターに変換した後、国土地理院発行の「数値地図 (行政界・海岸線)」のポリゴンを用いて、福島県域のみを抽出した。これにより、1セルが 1 ha となる 1,377,342 のセルからなる福島県の土地利用図が準備された。

土地利用の分析は、まず最初に福島県全体の特徴を把握するために、各年時点の分類ごとの数や変化の有無、変化前後の土地利用を集計・図化した。その上で、「数値地図 (行政界・海岸線)」を利用して市町村別に土地利用を集計し³⁾、変化の地域的な違いを検討した。

3. 福島県全体の土地利用と変化の特徴

1) 福島県の土地利用の特徴

福島県の土地利用図を見ると、越後山地や奥羽山地、阿武隈山地を中心とする山地部で森林、会津盆地や中通り、浜通りの平野部を中心に田と市街地が広く分布しているのがわかる (図1, 2)。また、越後山地など会津地域の山間部では、大きな谷筋にそって森林以外の土地利用が見られるが、阿武隈山地では市街地や田以外の農地からなる小さな塊状の分布域が分散して認められ、小さな谷筋や小盆地の分布を示しているように見える。さらに細かく見れば、阿武隈山地以外では、田以外の農地は扇状地や丘陵

部などの盆地の縁に多く分布しているが、福島盆地では低地部にも一定程度まとまっているのがわかる。また、浜通りの北部～中部の海岸付近では、農業的土地利用および市街地が森林を境にして東西方向に何列にも並んでおり、段丘や低地、丘陵などの地形的な違いを表しているものと考えられる。

福島県全体の土地利用の面積を 1987 年時点で集計すると、森林が 996,177ha であり、県土の約 4 分の 3 を占めている (表 2)。1987 年福島県農林業統計では、981,622ha であり、国土数値情報の方が約 1.5% 大きい。これを見る限り、国土数値情報は実態と大きな違いはないように見える。森林について田が 157,284ha で 1 割程度を占める。田と田以外の農地とあわせた農業的土地利用は 253,521ha であり、県土の約 18% となる。1987 年福島農林水産統計年報では、田は 118,000ha、耕地総面積は 190,100ha であり、国土数値情報の方がともに約 33% 大きい⁴⁾。

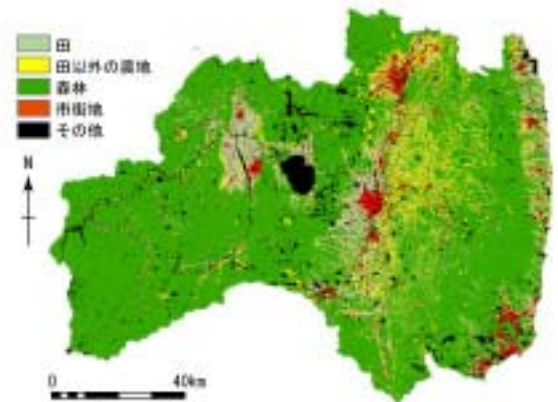


図2 1997年の福島県の土地利用
「国土数値情報 (土地利用メッシュデータ) 国土交通省」を利用して作成



図1 1987年の福島県の土地利用
「国土数値情報 (土地利用メッシュデータ) 国土交通省」を利用して作成

	1987		1997		増減	
	面積(ha)	(%)	面積(ha)	(%)	面積(ha)	(%)
田	157282	(11.4)	149093	(10.8)	-8189	-0.05
田以外の農地	96239	(7.0)	102628	(7.5)	6389	0.06
森林	996177	(72.3)	971181	(70.5)	-24996	-0.03
市街地	42895	(3.1)	54647	(4.0)	11752	0.22
その他	84749	(6.2)	99793	(7.2)	15044	0.15
合計	1377342	(100.0)	1377342	(100.0)	0	0.00

表2 福島県全体の項目別の土地利用と増減率

森林や農業的土地利用に続いて、その他が約6%、市街地が3%となっている。

5万分の1地形図をもとに2kmメッシュで全国の土地利用を調査した西川(1995)では、1985年時点で森林が約76%、農業的土地利用が約17%、市街地が約5%であり、福島県は全国平均に比べて森林面積の割合が大きく、市街地が小さい。

2) 1987年と1997年の土地利用の変化

1997年においては、1987年に比べて占有率の順位に変化はないものの、項目によって増減が認められる(表2)。10年間の占有面積の変化を見ると、田と森林が減少し、市街地とその他が増加している。田と森林はともに大きな面積を有しているため、減少率としてはそれぞれ-0.03%、-0.05%と大きくないが、市街地は0.22%、その他は0.15%増加している。ただし、その他の土地利用が増加したのは、図3を見る限り、幹線交通用地とゴルフ場が大きな要因のように思える。データの取得過程での卓越度や分類項目の変化による見かけ上の変化である可能性がある。

1987年と1997年の地点ごとの土地利用の変化を分析したところ、変化したメッシュは福島県全体で448877haで全体の3.5%であった(表3)。変化前には、森林であったところが25,699haと約半分で、田が12,738haで約4分の1、田以外の農地が6,654haで約8分の1である(表4)。一方、変化後には、田以外の農地と市街地が約4分の1ずつで、その他が4割弱を占める(表4)。なお、その他の増加については、上述の通り、データの問題に起因する可能性がある。少ないとはいえ、田になった場所が9.3%、森林になった場所が1.4%あるのは注目される。現地調査などさらに詳細な検討が必要であろう。

地点ごとの土地利用の変化について詳しく見ると、森林からその他に変化したものが11,281haで4分の1近くを占め、最も多い(表4)。森林から田以外の農地に変化したものが8,511haで17.4%とそれに続く。森林から田に変化したものをあわせれば、森林が農業的土地利用に変化した場所が11,902haで

24.3%と大きな面積を占める。一方、田以外の農地から田に変化した場所は1.8%であるのに対し、田から田以外の農地に変化した場所は8%あり、農業的土地利用のなかでも田以外の農地としての利用の方が増加していることがうかがえる。

農地が市街化する様子も読み取ることができる。田から市街地に変化した場所は8.5%、田以外の農地から市街地に変化した場所は7.5%であり、農業的土地利用から市街地となった場所は16%に達する。森林から市街地への変化は5.1%であり、農地から市街地への変化はほど大きくない。

	面積(ha)	(%)
変化なし	1328465	(96.5)
変化あり	48877	(3.5)
合計	1377342	(100.0)

表3 1987年から1997年に変化した場所の面積

4. 市町村別の土地利用変化と地域的な違い

1) 土地利用変化の大きい地域と変化前後の概要

1987年と1997年で土地利用に変化が見られた場所について、1987年時での土地利用(図3)と1997年時での土地利用(図4)をそれぞれ図化した。また、これらを市町村別に集計し、市町村の面積に占める変化した場所の面積を算出、図化した(図5)。

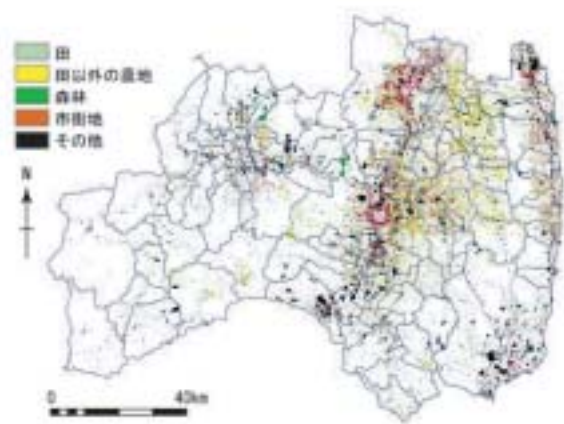


図3 1987年と1997年との間で変化した地点における1987年の土地利用
(国土数値情報「土地利用メッシュデータ」 国土交通省) を使用して作成

これらから、変化した面積が大きいのは、会津盆地、中通り、浜通りの平野部とともに、阿武隈山地の中部及び北部であることが読み取れる。一方、変化のあまり認められないのは、会津盆地を除く会津と八溝山地に位置する東白川郡である。

変化前の土地利用を見ると、森林は変化の面積の大きい場所のいずれでも認められる(図3)。一方、変化後の土地利用を見ると、中通り南部やいわきとその周辺で主に見られる塊状に分布するその他の土地利用や、線上に延びるその他の土地利用が目立つ(図4)。また、会津盆地や中通り、浜通りの平野部では市街地が広がっているのが顕著である。

		1997年の土地利用					合計
		田	田以外の農地	森林	市街地	その他	
1987年の土地利用	田		3,925 (8.0)	2 (0.0)	4,141 (8.5)	4,670 (9.6)	12,738 (26.1)
	田以外の農地	887 (1.8)		2	3,670 (7.5)	2,095 (4.3)	6,654 (13.6)
	森林	3,391 (6.9)	8,511 (17.4)		2,516 (5.1)	11,281 (23.1)	25,699 (52.6)
	市街地	3 (0.0)	8 (0.0)	5 (0.0)		384 (0.8)	400 (0.8)
	その他	268 (0.5)	599 (1.2)	694 (1.4)	1,825 (3.7)		3,386 (6.9)
合計		4,549 (9.3)	13,043 (26.7)	703 (1.4)	12,152 (24.9)	18,430 (37.7)	48,877 (100.0)

上段:面積(ha), 下段:%

表4 1987年と1997年の変化前後の土地利用とその面積

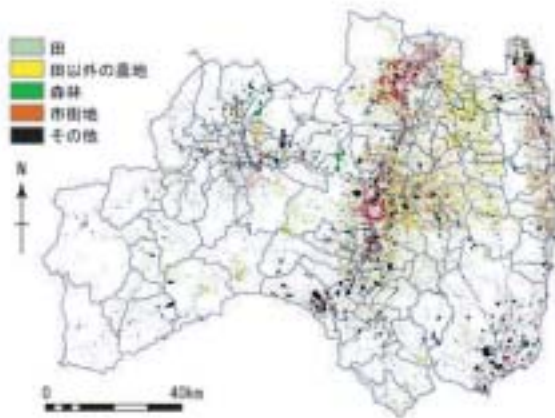


図4 1987年と1997年との間で変化した地点における1987年の土地利用
『国土数値情報(土地利用メッシュデータ) 国土交通省』を使用して作成。

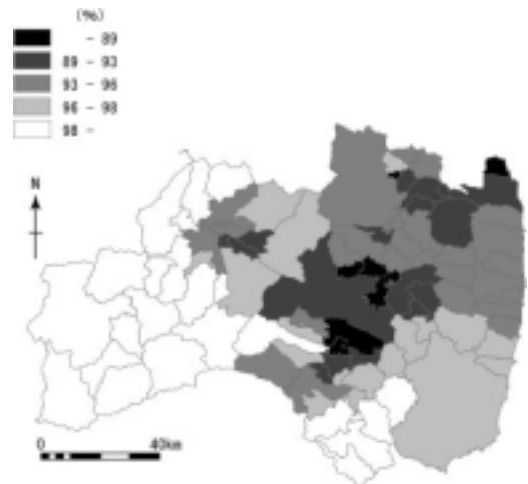


図5 1987年と1997年との間で土地利用の変化した割合
『国土数値情報(土地利用メッシュデータ) 国土交通省』を使用して作成。

2) 市町村別にみる変化形態の違い

土地利用の変化をさらに詳しく分析するため、表4に示した地点ごとの変化形態を市町村別に集計・図化した。その結果、その他の土地利用への変化を除いて変化面積が最も大きい、森林から田以外の農地への変化では、阿武隈山地中部および北部が割合が高く、中通りや会津盆地がそれに続いていることが読み取れる(図6A)。また、それに続く面積にある田から田以外の農地への変化は、県中の東部と阿武隈山地北部に多い(図6B)。阿武隈山地中部および北部の変化は、主に田以外の農地への変化であり、森林や田から変わったものであるといえる。

一方、阿武隈山地以外で変化面積に大きい会津盆地や中通り、浜通りの平野部は、田から市街地の変化の分布とほぼ一致する(図6C)。中通りの中部と北部、浜通りの北部の平野部では、これに田以外の農地から市街地への変化が加わっており(図6D)、都市近郊に位置する旧養蚕地域が主に該当しているようである。

3) 阿武隈山地の地域開発と土地利用図

阿武隈山地では、1973年に「阿武隈地域広域農業開発基本計画」が策定され、農用地開発公団法にもとづいて国の補助金と財政投融资資金によって2700haに及ぶ面積で開発が行われた。開発の内容は、主に畜産のための施設建設や牧場造成である。

国土数値情報の分析で認められた阿武隈山地で土地利用の変化している場所は、広域開発にともなって造成された場所と一致する場所が多い。森林や田から田以外の農地に変化した多くは、この計画に伴う開発であると考えられる。

この事業では阿武隈山地をいくつかの地域に分けて開発しており、完了年は南部区域で1979年、いわき区域で1981年、阿武隈北部区域で1982年、阿武隈中部第一区域で1984年である。1981年に完了したいわき区域の開発地は、国土数値地図ではよくわからないが、1982年完了の阿武隈北部地区の開発地は土地利用の変化した場所とよく一致している。1982年に造成されたものが1997年の国土数値

地図でようやく表現された可能性が高い。国土数値情報が地形図をもとにつくられたことを考えれば、国土数値情報は地形図作成当時の土地利用であり、実際の土地利用とは時間差があると考えられる。この点において国土数値情報の使用にあたっては注意が必要であろう。

5. おわりに

地理情報システムを用いて、国土数値情報の土地利用メッシュデータを分析し、福島県の土地利用について分析を行った。その結果、福島県の土地利用分布の特徴や変化の地域的な違いが明らかになった。また、変化の地域的な違いを変化形態の違いによって2つのパターンに分けられることを明らかにした。すなわち、田以外の農地に変化した地域と市街地に変化した地域である。前者は阿武隈山地中部および北部で見られ、森林や田から変化した地域であり、後者は会津盆地、中通り、浜通りの低地部で見られ、農業的土地利用からの変化した地域である。

分析した2時点間には、1994年のGATTのウルグアイラウンドの合意を挟んでおり、その後の農産物の輸入自由化による中山間地域の変化を土地利用から検討することを試みたが、国土数値情報は作成年よりも数年前の土地利用の様子を示しているようであり、これについては検討できなかった。

日本でパソコンによる作図をリードしてきた氷見山は、「土地利用を研究する諸分野のなかで野外調査を特に重視してきたのは地理学であり、この伝統は今後も大切にされるべきである」(氷見山・岡本、1992)としている。今回は既成の情報の分析に終始したが、その後の変化を含め、現地調査をして確かめていきたい。

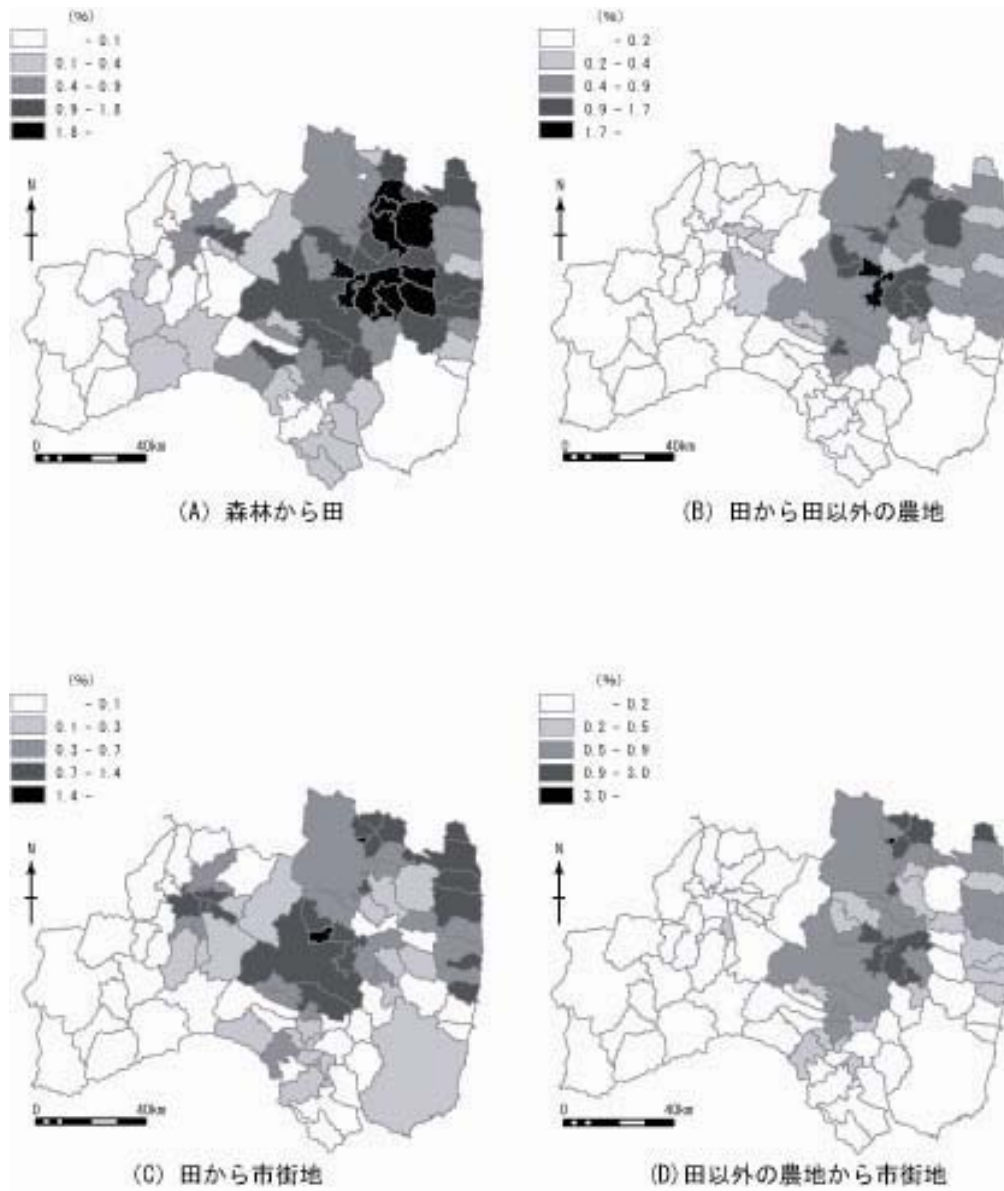


図6 1987年と1997年との間で変化した地点に占める変化形態の割合
「国土数値情報（土地利用メッシュデータ）国土交通省」を使用して作成

注

- 1) 中山間地域として統一された明確な定義はないが、福島県(2004)によると、「過疎地域自立促進特別措置法」で32町村、「山村振興法」で44市町村、「特定農山村地域における農林業等の活性化のための基盤整備に関する法律」で58町村、「福島県市町村振興基金貸し付け規制における準過疎地域」で11町村、「農業統計上の中間農業地域及び山間農業地域」で55市町村が全部または一部該当する。上記の法律等で指定されていない地域は、中通りの平野部、会津盆地内、浜通の平野の一部であり、全90市町村のうち、全く含まれていない市町村は、13市町村にすぎない。
- 2) 全国の土地利用を網羅した数値情報は、このほかに国土庁の「農林業センサスメッシュデータ」、環境庁「自然環境保全基礎調査植生調査」がある(西川, 1995)。国土数値情報は、国土交通省のwebサイトよりダウンロードできる。
- 3) 「数値地図(行政界・海岸線)」で作成した福島県の市町村別のポリゴンを100mメッシュのラスターに変換した後、ArcGISでクロス集計を行った。その結果、全市町村のラスターの合計は1,376,542セルとなった。福島県全域のラスターの合計1,377,642セルに比べて、1,100セル少ないが、0.08%と極小さく、分析に大きな問題はないと考えられる。
- 4) 「国土数値情報」は卓越度から判断した100mメッシュデータであり、「福島農林水産統計年報」実地測量による統計がある。統計取得方法が異なるとはいえ、この差は有意と考えられる。違いが生じた理由については今後の検討課題。

引用文献

- 赤桐毅一(1992): 細密数値情報の整備と利用-1979年から1984年の首都圏の土地利用変化(利用例)-。氷見山幸夫・岡本次郎編著(1992): 『土地利用とその問題』古今書院, pp. 58-77.
- 市古太郎・玉川英則・中林一樹(2000): 1996年用途地域見直し時の土地利用実態からみた新制度運用の特性。都市計画, vol. 48, 57-65.
- 瀬戸玲子(1986): 日本における地形分類別土地利用-メッシュデータによる分析-。地図, vol24, no. 4, pp. 1-11.
- 西川 治監修・氷見山幸夫・新井 正・太田 勇・久保幸夫・田村俊和・野上道男・村山祐司・寄藤 昂編著(1995): 『アトラス 日本列島の環境変化』朝倉書店, 187p.
- 氷見山幸夫・岡本次郎編著(1992): 『土地利用とその問題』古今書院, 273p.
- 尾藤章雄(1987): 神奈川県東部地域における土地利用形態-国土数値情報を利用して-。筑波大学人文地理学研究, XI, pp. 165-179.
- 福島県(2004): 『福島県過疎・中山間地域振興戦略』40p.
- 山本佳世子(2006): 『GISによる環境保全のための土地利用解析-環境情報の共有化-』古今書院, 162p.
- 渡辺 光監修・山口恵一郎編著(1955): 『日本の土地利用 地方編(1)』古今書院, 279p.

阿武隈川流域の地質試料に関する地球化学的研究

長橋良隆¹⁾・高瀬つぎ子¹⁾・佐藤岳志²⁾・樋口 潤²⁾・馬上悠吾²⁾

(¹⁾ 福島大学・共生システム理工学類 ²⁾ 福島大学・教育学部)

1. はじめに

地質試料の化学的特性を把握する目的は、地表環境における元素濃度のバックグラウンド値を知ることと、鉱物組成とあわせて解析することにより物質循環の定量化とその時代変遷の解明へ向けての基礎資料を得るためである。

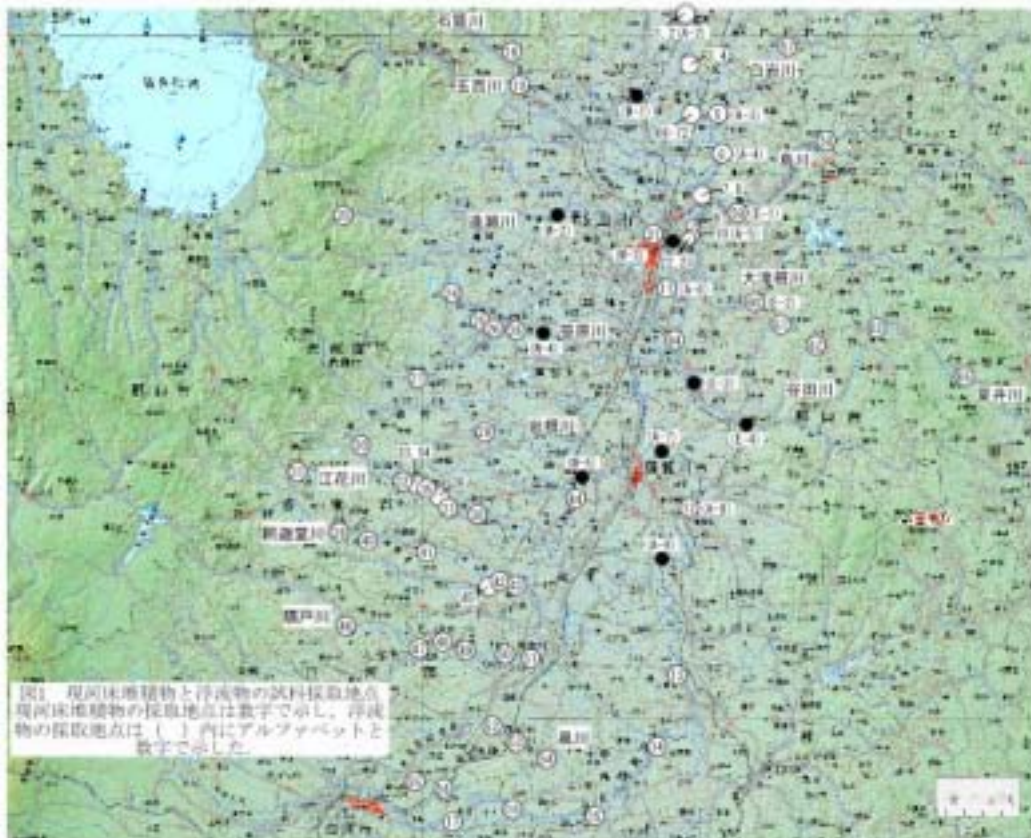
ここでいう地質試料とは地表に露出する地層や岩石だけでなく、河床に堆積した粒子と河川水に浮流している物質を含む。この報告では、1) 郡山市西方の地層と岩石、2) 本宮より南の阿武隈川とその支流に堆積した現河床堆積物、3) 高水位時の河川水に浮流している物質を対象に、その化学組成や鉱物組成について報告する。

2. 分析試料と分析方法

久保ほか(2003)の地質区分に基づき、郡山西方に露出する地層・岩石から合計 69 試料を採取した。

それらは、白亜紀の花こう閃緑岩から 2 試料、前期中新世の岩上山層から 4 試料、中期中新世の大久保層と堀口層からそれぞれ 7 試料と 34 試料、後期中新世の白石層から 10 試料、鮮新世の三春火砕流堆積物から 12 試料である。現河床堆積物は阿武隈川本流の 18 地点、西側支流の 39 地点、東側支流の 9 地点で採取した(図 1)。採取した試料は風乾したのち、るいを用いて 0.18mm<2mm と 0.18mm 未満の粒子に分けた。これらの試料は次に述べる方法で化学分析を行った。

化学分析は福島大学の蛍光 X 線(XRF)分析装置(株リガク社製 RIX-1000)を用いて行った。測定用の試料は、微粉化した試料 5g とバインダー(ポリスチレン系粉末) 0.5g を混合し、プレス機で加圧整形して作成した。測定は主要 10 元素(Si・Ti・Al・Fe・Mn・Mg・Ca・Na・K・P)と微量 18 元素(As・Ba・Cd



・Ce・Co・Cr・Cu・Ga・Nb・Ni・Pb・Rb・Sr・Th・V・Zn・Zr) について行った。主要元素の測定時間は15分、微量元素の測定時間は85分である。次に浮流物試料と分析方法について述べる。ここでは、浮流物を高水位時に河川水とともに流れる懸濁物質の総称とする。河川水の採取は、2005年7月27日、2006年5月2日、2006年7月26日、2006年9月27～28日に行った。採取地点は阿武隈川本流の9地点、西側支流の5地点、東側支流の4地点である(図1)。約12kgの河川水を濾過して浮流物を分離した。

浮流物の化学分析は、福島大学の蛍光X線(XRF)分析装置(株リガク社製 RIX-1000)を用いて行った。得られた浮流物の量が最大でも2.6gと微量なため、先に述べたものと同じ測定試料を作成できない。そのため微量試料容器を用いて、オーダー分析(半定量分析)により主要10元素の化学組成を求めた。また浮流物に含まれる鉱物の同定は、粉末X線回折装置(株リガク社製 RINT Ultima III)を用いて行った。

3. 分析結果の概要

1) 地層・岩石と現河床堆積物の化学組成

郡山西方の地層・岩石69試料と現河床堆積物66地点144試料の分析値の平均を表1に示した。この平均値は日本の上部地殻の平均組成(Togashi et al., 2000)と比較的近い値をもっている(表1)。

分析元素の濃集程度を定量的に議論するのに、濃縮係数という指標があり、それは以下の式で求められる(Calvert and Pedersen, 1993)。

$$\text{Enrichment factor} = (M/\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{sample}} / (M/\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{background}}$$

ここで「M」は対象とする成分をあらわす。乳井ほか(2005)は名古屋市の公園土壌について、重金属の濃集を議論するのにこの指標を導入した。乳井ほか(2005)は仮想的なバックグラウンドとして、日本の上部地殻の平均組成(Togashi et al., 2000)を用いている。本報告でも同様に濃縮係数を求めた(表2)。このように規格化すると、対象とする成分と日本の上部地殻の平均組成との多寡を比較することができる。ただし、 Al_2O_3 の含有量が上部地殻の平均組成と極端に異なる場合は、過大または過小に評価されることに注意が必要である。今回の分析試料

における Al_2O_3 の平均値は上部地殻の平均組成と近く、標準偏差も比較的小さいので、ほとんどの試料はこの濃縮係数で評価できる。ただし郡山西方の地層・岩石試料では、 Al_2O_3 量10wt%未満のものが7試料、20wt%以上のものが8試料ある。

濃縮係数の最大値でみると、上部地殻の数10倍もの元素がある。例えば、現河床堆積物のV(バナジウム)は平均値で約8倍、最大値で約41倍を示す(表2)。バナジウムを多く含む資料はCr(クロム)も多く含み、逆に SiO_2 量が50wt%未満と少ない。これは水流による淘汰により、鉄-チタン酸化物(いわゆる砂鉄)が現河床堆積物に濃集したことで説明できる。バナジウムとクロムは鉄-チタン酸化物(もしくはマフィック鉱物)が晶出するときに取り込まれやすい元素である。またZr(ジルコニウム)はジルコンに、Th(トリウム)はモナズ石に取り込まれやすい元素である。As(ヒ素)については、郡山西方の地層・岩石の最大値が約37倍、現河床堆積物の最大値が約22倍である(表2)。ヒ素を含む鉱物の代表は硫化鉱物であるが、黄鉄鉱(FeS_2)にもヒ素が含まれる。黄鉄鉱は熱水変質によって既存の岩石中にも生ずる。またヒ素は鉄の水酸化物の表面にも吸着する。今回分析した試料の一部にヒ素が濃集していることについては、いまのところその原因を特定できていない。なお地層・岩石・鉱物中のヒ素については、久保田(1997)による概説がある。

2) 浮流物の化学組成と鉱物組成

浮流物の化学組成は、現河床堆積物と比較すると SiO_2 量が少なく、 $\text{TiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 量が多い。 MnO と P_2O_5 については定量精度に問題があった可能性が高い。その他の $\text{MgO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{K}_2\text{O}$ は現河床堆積物と近似している。

浮流物はそのほとんどがシルトサイズ以下の微細な物質からなる。その主体は粘土鉱物と考えられるが、具体的にどんな粘土鉱物であるかを同定するには至らなかった。ただし粉末X線回折では浮流物に含まれるいくつかの鉱物を同定することができた。すなわち東側支流から得られた浮流物は黒雲母(とおそらくカオリナイト)を含む(図2)のに対して、西側支流から得られた浮流物には黒雲母のピークは

認められないか認められてもそのピークの高さは低い (図 3). 阿武隈川本流から得られた浮流物では、そのほとんどに黒雲母のピークが認められる (図 4). その他、石英と長石のピークはいずれの試料にも認められる.

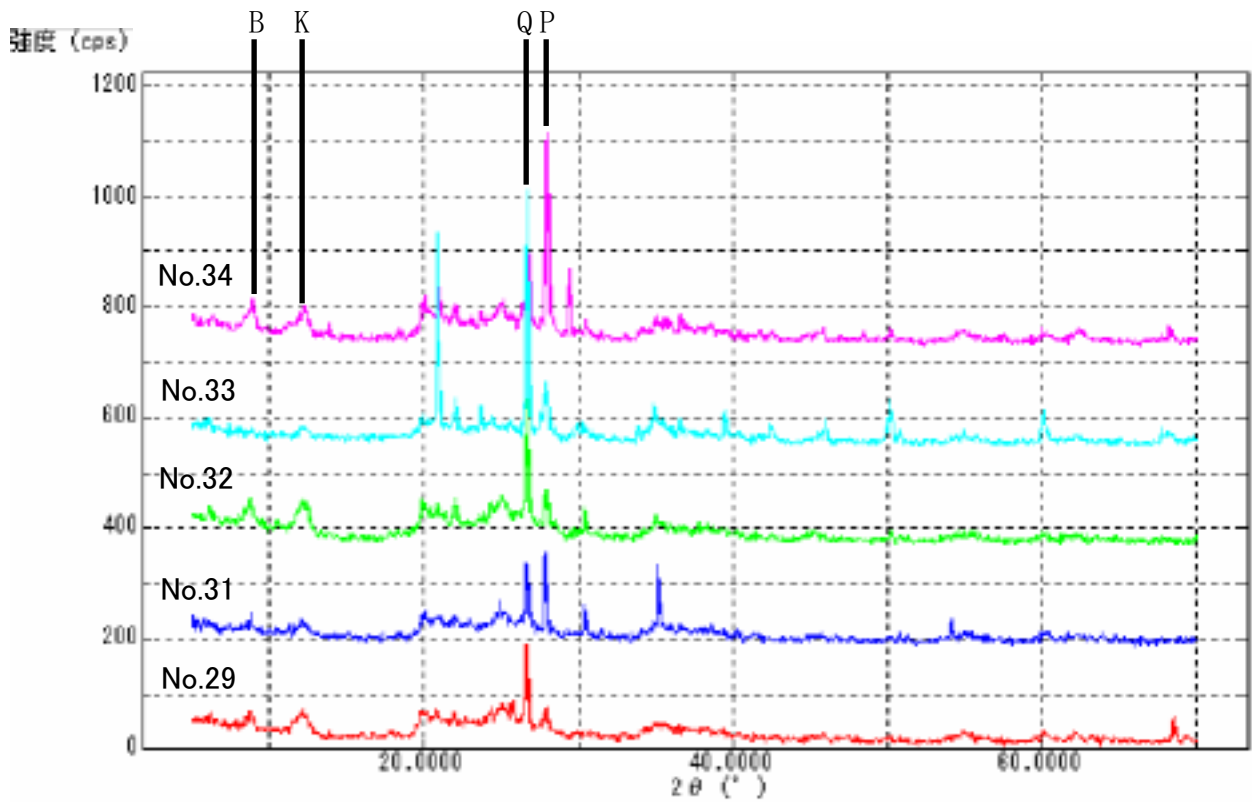
東側支流は阿武隈山地の花崗岩分布域を流れているので、花崗岩に含まれる石英・長石・黒雲母に加えて長石の変質鉱物であるカオリナイトが含まれる. 西側支流域に露出する花崗岩は限られているので、黒雲母は含まれないことが多いと考えられる. 西側支流の浮流物は長石よりも石英のピークの方が高いことが特徴であり、これは西側支流域に比較的広く分布する白河火砕流堆積物が起源と考えられる. 当然のことではあるが、阿武隈川本流から得られた浮流物はこれらが混合した結果を示している.

4. おわりに

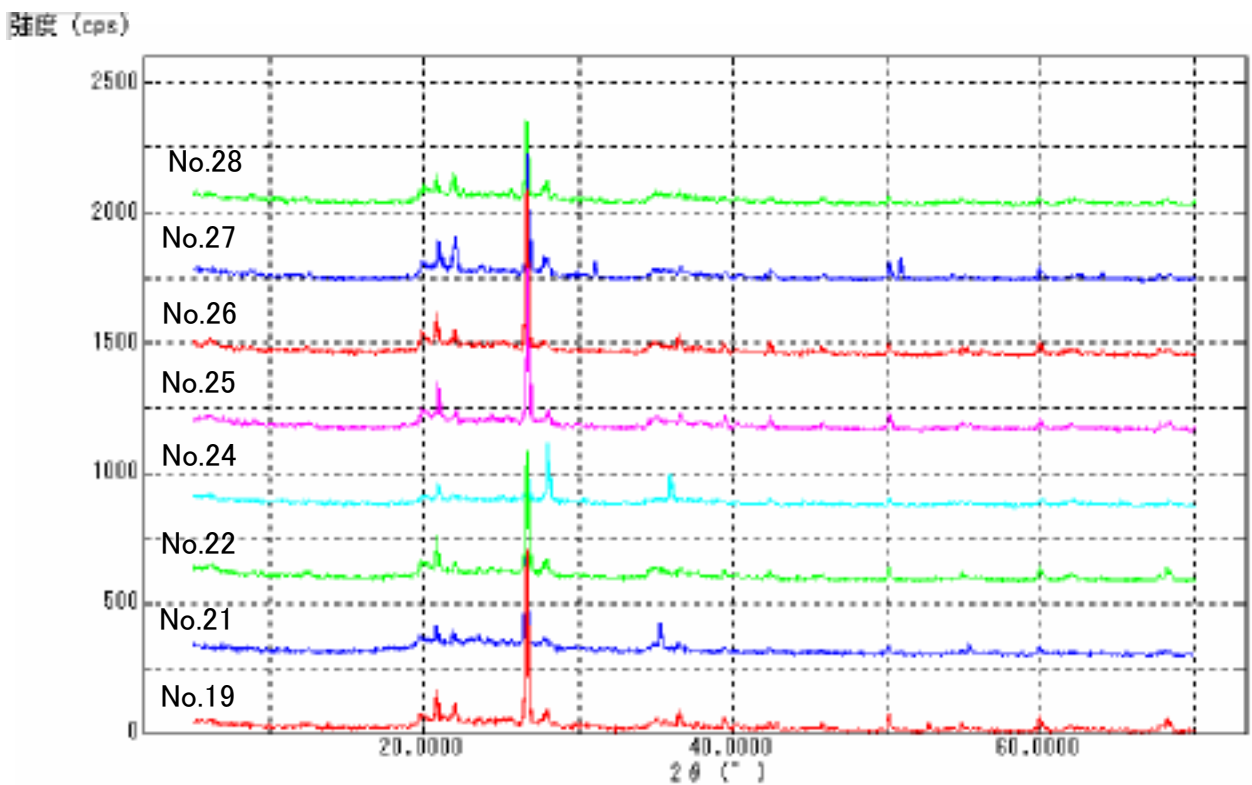
この研究では本宮より南の阿武隈川流域における地球化学的特性 (自然状態のバックグラウンド値) を一定程度把握することができた. 現河床堆積物と浮流物の化学組成や鉱物組成は、それらの後背となる地質を反映している. ただし砂サイズ以上の粒子とシルトサイズ以下の粒子では水流のエネルギーに対する挙動が異なる. また、その運搬速度や堆積場も異なる. 定量的に評価するには地質時代の河川性堆積物やダム湖底に堆積した物質を分析の対象とすることが必要であろう.

文献

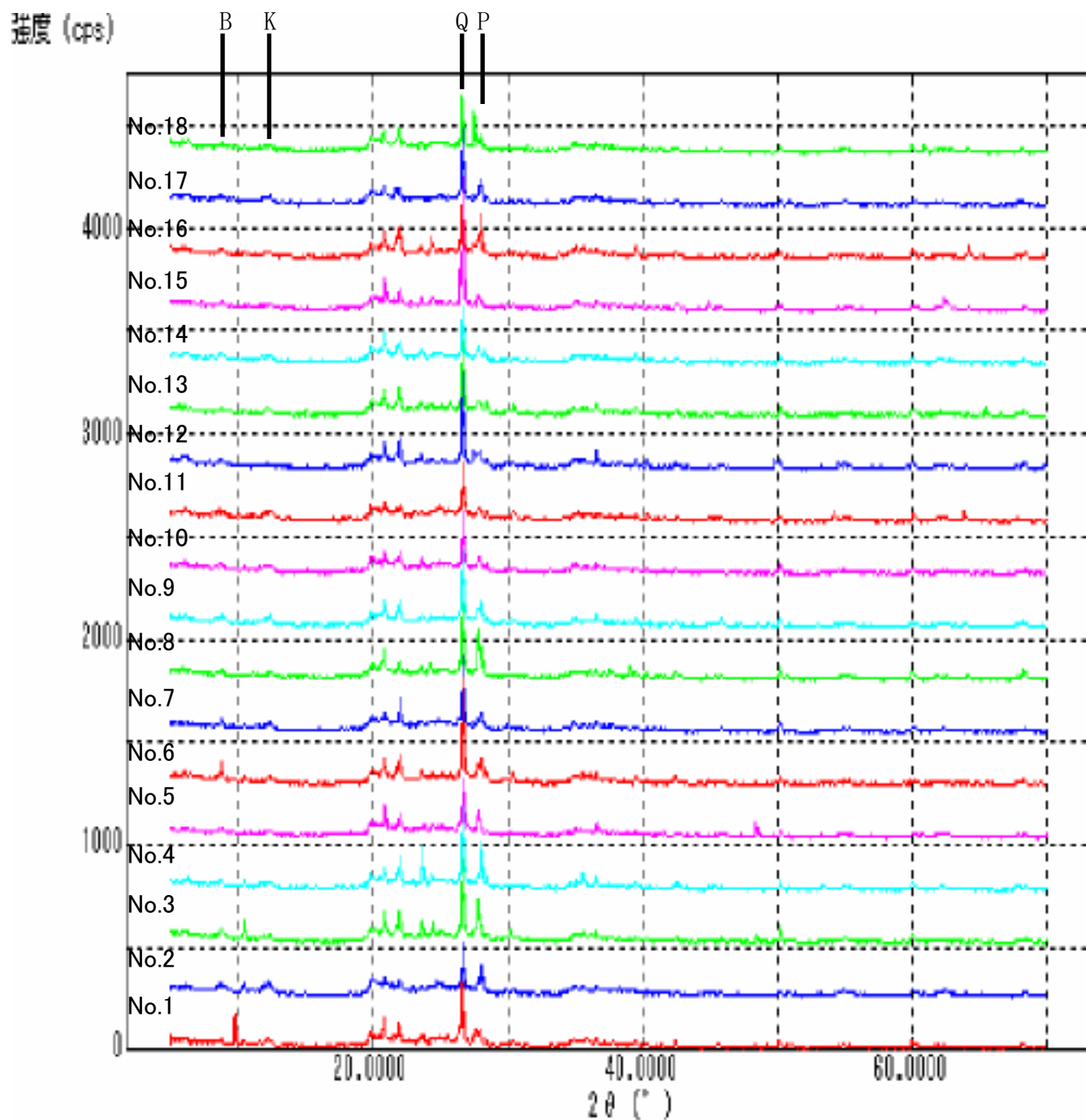
- Calvert, S. E. and Pedersen, T. F. (1993) Geochemistry of recent oxic and anoxic marine sediments: Implication for geological record. *Marine Geology*, 113, 67-88.
- 久保田喜裕 (1997) ヒ素の地質的分布-地下水ヒ素汚染におけるヒ素の起源-. *地学教育と科学運動 特別号*, 53-59.
- 乳井 豪・ほか (2005) 名古屋市の公園土壌の細粒画分 (<32 μ m) における重金属の濃集について. *地質汚染-医療地質-社会地質学会誌*, 1, 27-34.
- Togashi et al. (2000) Young upper crust chemical composition of the orogenic Japan Arc. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 1, 1-45.



第2図 東側支流から得られた浮流物の粉末X線回折分析の結果
B: 黒雲母, K: カオリナイト, Q: 石英, P: 長石



第3図 西側支流から得られた浮流物の粉末X線回折分析の結果



第4図 阿武隈川本流から得られた浮流物の粉末X線回折分析の結果
B:黒雲母, K:カオリナイト, Q:石英, P:長石

表1 郡山西方の地層・岩石と現河床堆積物の化学組成

主要成分	郡山西方の地層と岩石				現河床堆積物				上部地殻の
	平均	標準偏差	最小	最大	平均	標準偏差	最小	最大	平均組成
SiO ₂ (wt.%)	69.22	8.67	43.39	85.00	64.40	10.85	19.62	79.91	67.53
TiO ₂	0.38	0.20	0.04	0.81	0.68	0.53	0.14	2.75	0.62
Al ₂ O ₃	15.10	3.93	5.46	24.22	15.40	2.59	9.86	20.02	14.67
Fe ₂ O ₃	4.80	2.42	0.83	11.64	8.04	7.72	1.93	48.65	5.39
MnO	0.08	0.06	0.00	0.33	0.15	0.08	0.05	0.46	0.11
MgO	1.92	1.65	-0.14	6.42	2.20	1.00	0.17	6.39	2.53
CaO	2.84	4.13	-0.03	30.32	2.98	1.41	0.40	6.99	3.9
Na ₂ O	1.33	1.02	-0.36	6.01	1.85	0.42	0.81	3.13	2.72
K ₂ O	2.14	1.17	0.35	5.96	2.10	0.53	0.89	4.16	2.42
P ₂ O ₅	0.14	0.54	-0.02	4.48	0.09	0.04	-0.03	0.27	0.12
Total	97.95	2.13	89.09	101.12	97.88	1.61	93.18	101.51	100.01
微量元素									
As (ppm)	18	47	0	300	13	19	0	143	7.1
Ba	422	195	112	1315	369	116	-40	674	458
Cd	4	1	2	6	4	1	-1	6	
Ce	34	12	1	81	46	35	12	230	46.4
Co	9	8	0	50	16	12	4	74	15
Cr	31	22	8	113	41	43	5	262	84
Cu	10	10	-4	35	23	41	1	382	25
Ga	17	4	6	28	16	4	9	31	
Nb	9	3	3	23	10	6	3	51	9
Ni	13	13	0	50	12	8	2	41	38
Pb	11	5	2	26	18	9	6	66	16.9
Rb	63	31	7	141	57	18	17	117	85
Sr	197	145	-44	925	174	44	80	294	225
Th	9	22	2	184	8	8	2	67	8.3
V	102	87	6	399	227	209	15	1069	26
Y	29	22	8	186	22	8	10	55	26
Zn	74	33	6	174	138	91	28	576	74.1
Zr	126	46	33	264	193	254	51	1924	135
Total	1170	295	571	2640	1369	498	693	4020	1279

表2 Enrichment factorの平均と最小・最大

主要成分	郡山西方の地層と岩石				現河床堆積物			
	平均	標準偏差	最小	最大	平均	標準偏差	最小	最大
SiO ₂	1.09	0.41	0.45	2.37	0.95	0.29	0.23	1.68
TiO ₂	0.61	0.34	0.08	1.78	1.05	0.90	0.28	5.10
Al ₂ O ₃								
Fe ₂ O ₃	0.89	0.42	0.18	1.76	1.45	1.55	0.44	10.42
MnO	0.72	0.55	0.00	2.78	1.34	0.78	0.50	4.22
MgO	0.79	0.70	-0.04	2.73	0.84	0.44	0.07	2.99
CaO	0.99	2.56	-0.01	20.89	0.73	0.34	0.10	2.03
Na ₂ O	0.49	0.38	-0.36	2.38	0.67	0.20	0.24	1.28
K ₂ O	0.88	0.43	0.11	2.09	0.85	0.25	0.31	2.09
P ₂ O ₅	2.11	12.02	-0.15	100.31	0.75	0.29	-0.18	1.89
微量元素								
As	2.33	5.76	0.04	36.91	1.75	2.82	0.04	21.50
Ba	0.93	0.47	0.00	3.13	0.79	0.29	-0.07	1.64
Cd								
Ce	0.76	0.33	0.02	2.42	0.93	0.69	0.26	4.68
Co	0.59	0.46	0.00	2.03	1.02	0.87	0.33	5.66
Cr	0.40	0.35	0.08	1.71	0.47	0.53	0.05	3.53
Cu	0.41	0.42	-0.20	1.50	0.87	1.49	0.07	12.61
Ga								
Nb	1.06	0.41	0.29	2.78	1.01	0.59	0.29	4.39
Ni	0.40	0.49	0.00	2.11	0.30	0.19	0.06	1.08
Pb	0.66	0.37	0.12	2.70	1.00	0.50	0.38	3.82
Rb	0.76	0.38	0.09	1.56	0.65	0.21	0.16	1.77
Sr	0.95	0.78	-0.19	4.48	0.74	0.17	0.33	1.08
Th	1.10	3.06	0.16	25.95	0.95	0.82	0.21	7.37
V	3.73	2.83	0.26	10.70	8.36	8.27	0.76	41.31
Y	1.21	1.04	0.28	6.97	0.82	0.27	0.32	2.16
Zn	1.04	0.56	0.07	2.78	1.78	1.23	0.49	7.49
Zr	0.96	0.37	0.15	1.77	1.31	1.59	0.33	12.75

付表1 郡山西方に分布する地層・岩石のEnrichment factor

	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	As	Ba	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	Ga	Nb	Ni	Pb	Rb	Sr	Th	V	Y	Zn	Zr
花崗岩	0.94	0.83		0.86	0.61	0.64	0.74	1.13	1.09	1.35	0.17	1.09		0.81	0.49	0.19	0.04		1.11	0.10	0.71	1.15	1.08	0.55	2.35	0.68	0.80	1.09
花崗岩	0.88	0.99		0.80	0.58	0.70	0.70	1.06	1.04	1.44	0.08	0.87		0.02	0.50	0.17	0.08		1.25	0.12	0.72	1.17	1.04	1.54	2.64	0.87	0.79	1.37
岩上山層	1.17	0.11		0.18	0.09	0.05	-0.01	0.93	1.49	0.08	0.51	1.65		0.48	0.04	0.13	-0.11		0.88	0.02	0.12	1.06	0.12	0.76	0.27	0.69	0.27	0.56
岩上山層	0.69	0.78		1.05	0.70	0.62	0.17	0.66	1.00	0.51	0.50	0.83		0.70	0.87	0.40	0.34		0.75	0.36	0.80	0.58	0.36	0.72	5.28	0.54	0.76	0.81
岩上山層	0.82	0.87		1.12	1.22	1.47	0.58	0.85	0.87	0.45	0.61	0.71		0.72	0.83	0.39	0.20		1.01	0.29	0.58	0.53	0.47	0.80	5.92	1.08	0.97	1.02
岩上山層	0.92	0.57		0.96	0.78	1.30	0.02	0.53	1.58	0.80	3.03	0.00		0.91	0.31	0.11	0.50		1.47	0.07	0.45	1.07	0.17	0.73	1.85	1.15	1.55	1.53
大久保層	0.74	0.66		0.85	0.72	1.00	0.03	0.83	1.00	0.46	0.50	0.75		0.36	0.60	0.43	0.28		0.80	0.39	0.58	0.70	0.23	0.40	4.58	0.44	0.87	0.61
大久保層	1.13	0.16		0.28	0.09	0.05	0.01	0.07	1.78	0.16	1.81	0.82		0.40	0.12	0.16	0.02		1.74	0.09	0.77	1.21	-0.19	0.89	0.95	6.97	0.15	0.61
大久保層	1.04	0.12		0.36	0.00	0.11	0.00	0.04	1.12	0.07	2.25	0.22		0.70	0.12	0.16	0.02		1.28	0.07	0.31	0.96	0.02	1.01	0.62	1.63	0.31	1.00
大久保層	0.88	0.63		0.99	0.32	0.14	0.00	0.07	1.55	0.29	36.91	1.13		0.79	0.05	0.13	0.71		0.57	0.07	0.55	1.06	0.07	0.45	9.33	0.28	0.11	0.66
大久保層	0.72	0.40		0.42	0.13	-0.04	-0.01	0.06	1.79	0.18	18.70	0.88		0.46	0.00	0.13	0.92		0.63	0.02	0.12	1.13	0.04	0.20	3.19	0.35	0.13	0.76
大久保層	0.78	0.96		0.99	0.71	1.71	0.81	0.72	0.66	0.65	0.17	0.48		0.52	0.80	0.51	0.24		0.83	0.43	0.52	0.54	0.96	0.31	4.95	0.59	0.84	0.65
大久保層	0.64	0.35		0.85	0.56	0.23	0.04	0.08	0.81	0.40	13.83	0.57		0.57	0.84	0.13	0.75		0.43	0.23	0.80	0.68	0.11	0.51	6.52	0.44	0.89	0.43
堀口層	1.08	0.61		0.74	0.78	0.33	0.72	2.38	1.10	0.54	2.75	1.51		1.29	0.24	0.22	0.03		1.63	0.10	0.75	0.98	0.92	1.19	0.67	1.83	1.00	1.77
堀口層	1.07	0.58		1.09	1.09	0.28	1.14	0.53	2.09	0.46	20.59	1.20		1.22	0.71	0.51	0.09		2.78	0.27	1.12	0.12	0.66	0.70	3.84	1.17	1.35	1.30
堀口層	1.96	1.03		1.39	1.26	2.03	1.94	0.43	0.89	1.30	2.34	0.86		1.51	1.03	1.03	0.49		1.41	1.12	2.70	0.88	1.90	1.96	5.25	1.10	1.44	1.39
堀口層	2.13	0.78		1.16	0.98	2.07	1.01	0.90	0.82	1.49	1.89	1.01		0.96	0.73	0.94	0.45		1.41	1.39	0.94	0.81	1.25	1.36	4.50	1.53	1.49	1.01
堀口層	2.01	0.98		1.27	1.00	1.27	4.09	0.44	0.59	1.69	5.99	0.81		1.15	0.82	1.05	1.50		1.35	2.11	1.24	0.93	2.51	1.35	4.36	1.61	2.45	1.15
堀口層	1.05	0.96		1.07	0.79	1.08	1.53	0.27	0.98	0.63	0.96	0.87		0.89	0.91	0.95	0.65		1.13	0.92	0.85	1.17	1.58	0.80	5.69	0.93	1.36	1.01
堀口層	1.43	0.68		1.20	0.93	1.00	0.30	0.23	1.13	0.74	1.20	1.23		0.91	0.98	0.89	1.12		1.25	0.90	0.97	1.30	1.85	1.11	7.46	1.29	1.65	1.21
堀口層	1.27	0.35		0.29	0.20	0.33	0.75	0.80	0.62	0.36	0.22	1.15		0.83	0.13	0.20	0.08		1.18	0.09	0.72	0.55	1.14	0.71	0.57	0.99	1.37	1.20
堀口層	0.86	1.26		1.63	1.36	2.54	1.32	0.97	0.48	2.17	0.06	0.79		1.09	1.36	0.17	0.53		1.20	0.14	0.57	0.30	1.66	0.45	6.44	1.36	1.13	1.19
堀口層	0.88	0.30		0.57	0.76	0.17	0.48	0.47	0.58	0.14	0.15	1.13		0.74	0.27	0.18	0.09		1.06	0.09	0.86	1.01	1.12	0.61	0.51	1.27	0.72	1.14
堀口層	1.28	0.26		0.66	1.55	0.30	0.96	0.73	0.93	0.09	0.26	1.35		0.76	0.20	0.19	0.15		1.29	0.11	0.78	0.65	1.01	0.62	0.82	2.34	1.08	1.27
堀口層	1.73	1.78		1.72	2.44	1.03	20.89	-0.36	0.98	100.3	0.91	1.09		2.42	1.34	1.71	1.41		2.03	1.85	1.11	1.48	2.85	0.78	1.29	6.08	2.78	1.52
堀口層	0.70	0.80		1.27	1.13	1.65	0.30	0.46	0.93	0.35	0.61	0.59		0.58	0.99	0.66	0.57		0.97	0.68	0.62	0.82	0.55	0.38	6.21	0.64	1.29	0.62
堀口層	2.37	0.65		1.42	1.22	2.55	0.18	0.26	1.01	0.96	1.38	1.22		0.68	1.03	0.98	1.40		1.54	1.43	1.17	1.56	0.81	1.32	8.39	2.04	2.30	1.40
堀口層	0.55	0.78		1.02	0.48	0.47	0.07	0.24	0.66	0.27	0.79	0.61		0.75	0.93	0.69	0.60		0.77	0.66	0.63	0.61	0.27	0.73	6.21	0.50	0.80	0.73
堀口層	1.30	0.58		1.24	1.63	1.48	0.24	0.35	0.86	0.40	1.18	0.84		0.80	1.07	0.93	1.30		1.19	1.58	0.95	1.10	0.67	1.01	8.14	1.50	1.84	1.07
堀口層	1.61	0.97		1.08	0.95	1.25	2.58	0.41	0.92	1.25	0.89	1.16		0.74	0.96	0.94	1.12		1.28	1.18	0.90	1.26	1.54	1.19	5.41	1.22	1.67	1.15
堀口層	0.45	0.44		1.31	1.05	1.14	0.16	0.07	0.15	0.45	0.36	0.18		0.51	2.03	0.25	0.59		0.29	0.40	0.20	0.18	0.37	0.16	9.30	0.38	1.01	0.15
堀口層	0.82	0.76		0.83	0.79	0.71	0.72	0.57	1.12	0.65	0.36	0.44		0.72	0.67	0.41	0.18		0.70	0.34	0.42	0.94	0.66	1.32	5.04	0.61	0.77	0.67
堀口層	0.82	0.25		1.09	2.78	2.01	0.91	0.39	1.33	-0.15	0.84	0.75		0.98	0.86	0.78	0.68		0.92	0.89	0.85	1.54	1.29	0.69	8.02	0.75	1.45	0.97
堀口層	0.72	0.80		0.91	0.66	1.10	0.88	0.55	0.68	0.47	0.32	0.52		0.63	0.78	0.46	0.28		0.81	0.43	0.45	0.66	0.98	0.31	4.20	0.55	0.84	0.50
堀口層	0.81	1.23		1.73	1.37	1.28	1.53	0.82	0.45	1.10	0.16	0.48		0.62	1.63	0.09	0.92		0.58	0.09	0.33	0.44	1.20	0.36	8.73	0.76	1.03	0.56
堀口層	1.82	0.09		0.40	0.53	0.11	0.20	0.60	1.21	0.36	8.28	1.30		0.47	0.16	0.25	-0.20		0.47	0.05	0.72	0.69	0.52	0.37	0.87	0.49	0.24	0.37
堀口層	1.10	0.79		0.88	0.69	1.64	0.88	0.87	0.89	0.63	0.26	1.26		0.93	0.69	0.61	0.26		1.11	0.47	0.78	0.87	2.33	0.74	4.01	0.89	0.94	1.43

付表1 郡山西方に分布する地層・岩石のEnrichment factor

堀口層	0.85	0.57	0.71	0.56	1.04	0.88	0.49	0.83	0.37	0.30	1.32	0.83	0.45	0.41	0.24	0.84	0.32	0.66	0.81	0.00	0.55	2.72	0.73	0.85	1.72
堀口層	0.99	1.04	1.59	1.57	2.21	1.19	0.86	0.59	1.70	0.49	0.83	0.81	1.31	0.14	0.50	1.24	0.10	0.31	0.40	1.21	0.32	6.33	1.83	1.35	1.16
堀口層	0.71	0.91	1.27	1.20	1.23	1.23	0.80	0.48	1.10	0.21	0.52	0.62	1.03	0.12	0.29	0.98	0.09	0.38	0.33	1.10	0.35	5.09	1.14	1.23	1.00
堀口層	1.13	0.08	0.30	0.09	0.02	0.01	0.06	1.76	0.08	11.73	1.08	0.72	0.05	0.14	0.03	1.29	0.02	0.30	1.17	0.09	1.13	0.51	1.13	0.22	0.96
堀口層	0.71	0.15	0.42	0.19	0.40	0.12	0.43	0.51	5.88	0.04	0.59	0.89	0.09	0.12	-0.03	1.21	0.03	0.75	0.40	0.53	1.18	0.30	1.22	0.58	0.83
堀口層	1.04	0.09	0.22	0.08	0.10	0.07	0.33	0.62	0.15	1.69	1.04	0.34	0.02	0.16	-0.12	0.54	0.00	0.69	0.45	0.29	0.48	0.58	0.47	0.07	0.38
堀口層	0.96	1.08	1.76	1.47	2.73	1.87	0.71	0.17	0.81	0.62	0.43	0.56	1.59	0.17	0.93	0.49	0.10	0.31	0.22	0.88	0.26	10.70	1.16	1.15	0.53
堀口層	0.99	0.16	0.37	0.50	0.02	0.19	0.87	1.89	0.15	1.38	1.17	0.76	0.21	0.14	0.75	1.05	0.08	1.26	1.41	0.44	0.95	0.49	0.98	1.11	1.28
堀口層	1.00	0.59	0.96	0.70	1.45	0.25	0.19	0.63	0.24	0.65	1.21	0.61	0.79	0.68	0.64	1.22	1.17	0.73	0.96	0.69	0.91	5.78	1.06	1.33	1.17
堀口層	1.00	0.44	0.66	0.60	0.49	0.56	0.39	0.96	0.39	0.66	1.72	0.99	0.49	0.40	0.26	0.88	0.36	0.70	0.67	1.96	1.11	3.11	0.95	0.85	0.63
白石層	1.28	0.77	1.22	0.98	1.15	0.36	0.26	1.17	0.90	1.56	0.90	0.91	1.08	0.97	1.13	1.13	1.05	0.83	1.31	0.52	0.93	8.43	1.44	1.59	1.06
白石層	0.84	0.97	1.00	0.59	0.76	1.17	0.30	1.08	0.62	0.68	0.64	0.72	1.00	1.24	0.82	1.03	0.94	0.62	1.03	1.03	0.64	6.07	0.70	1.19	0.92
白石層	0.73	0.38	0.52	0.40	0.21	0.29	0.24	1.01	0.12	0.49	0.56	0.82	0.38	0.44	0.25	0.79	0.34	0.53	0.63	0.37	0.90	2.96	1.13	0.66	0.53
白石層	0.56	0.47	1.09	0.35	0.19	0.00	0.06	0.22	0.32	1.26	0.63	0.49	0.89	0.13	0.91	0.41	0.18	0.50	0.20	0.05	0.50	6.42	0.52	0.64	0.46
白石層	1.55	0.33	0.39	0.12	0.31	0.68	0.46	1.10	0.43	0.11	1.41	0.82	0.07	0.25	0.03	1.50	0.07	0.67	1.24	1.36	0.62	0.45	1.64	0.76	1.54
白石層	0.95	0.45	0.65	0.08	0.29	0.31	0.29	0.36	0.29	0.28	0.71	1.51	0.04	0.18	0.09	1.22	0.08	0.26	0.39	1.28	0.61	0.61	1.39	0.87	1.18
白石層	1.71	0.40	0.21	0.13	0.32	0.68	0.60	0.84	0.35	0.16	1.08	0.60	0.19	0.23	-0.02	1.03	0.04	0.65	0.71	1.47	0.62	0.92	0.87	0.61	1.17
白石層	1.39	0.26	0.31	0.11	0.29	0.48	0.21	1.35	0.10	0.12	1.84	0.75	0.10	0.17	0.00	0.99	0.08	0.19	0.09	0.32	25.95	0.26	1.28	0.45	0.45
白石層	1.11	1.13	0.95	0.88	0.62	4.24	0.26	0.98	0.80	0.95	0.90	0.93	0.71	0.77	0.68	1.11	0.88	0.77	1.02	1.99	0.71	3.29	1.15	1.27	0.98
白石層	1.39	0.37	0.56	0.15	0.06	0.26	0.97	1.12	0.55	0.74	1.37	0.50	0.21	0.24	0.24	1.50	1.00	0.86	0.89	0.73	0.91	0.71	0.88	0.71	1.65
三春火砕流	1.29	0.23	0.27	0.10	0.46	0.53	0.17	0.80	0.18	0.09	1.59	0.88	0.04	0.17	0.00	1.17	0.07	1.06	0.80	1.39	1.17	1.00	1.41	0.80	1.20
三春火砕流	2.00	0.93	1.72	0.31	0.50	0.70	0.62	0.75	1.84	0.69	0.96	0.57	0.51	0.37	0.10	1.21	0.13	0.37	0.59	1.53	0.49	2.03	1.72	1.79	0.91
三春火砕流	0.82	0.78	1.01	0.45	0.43	0.40	0.37	0.21	0.34	0.28	0.32	0.49	0.31	0.25	0.23	0.69	0.14	0.33	0.17	0.78	0.29	2.26	0.72	1.81	0.51
三春火砕流	0.97	0.69	0.94	1.04	0.74	1.10	0.86	0.23	0.87	0.12	0.31	0.79	0.71	0.24	0.20	0.86	0.07	0.44	0.18	0.90	0.40	2.40	0.88	2.24	0.78
三春火砕流	0.72	0.53	1.16	1.04	0.25	0.45	0.28	0.11	0.32	0.22	0.37	0.35	0.31	0.17	0.13	0.53	0.09	0.27	0.14	1.11	0.18	1.37	0.38	0.98	0.40
三春火砕流	1.36	0.68	1.31	1.25	0.69	0.99	0.39	0.69	0.83	0.56	0.72	0.88	0.44	0.18	0.10	1.09	0.10	0.60	0.42	1.29	0.51	2.35	1.19	1.57	0.92
三春火砕流	0.64	0.72	0.67	0.18	0.22	0.09	0.19	0.43	0.11	0.48	0.35	0.58	0.41	0.33	0.14	0.77	0.23	0.56	0.41	0.35	0.59	4.60	0.41	0.59	0.86
三春火砕流	1.19	0.57	0.55	0.19	0.52	0.73	0.61	0.64	0.89	0.10	1.11	0.62	0.15	0.19	0.12	0.98	0.09	0.71	0.50	1.28	0.50	1.28	1.22	0.99	0.88
三春火砕流	0.79	0.21	0.44	0.27	0.20	0.10	0.19	0.71	0.06	0.29	1.09	0.66	0.08	0.14	0.25	1.25	0.14	0.55	0.63	0.18	1.09	1.23	1.88	0.98	1.02
三春火砕流	1.30	0.16	0.33	0.20	0.48	0.45	0.12	0.66	0.18	0.12	3.13	0.61	0.07	0.15	-0.03	1.29	0.05	0.29	0.79	4.48	0.77	0.77	2.20	0.46	1.25
三春火砕流	0.70	0.46	1.06	0.59	0.14	0.06	0.17	0.35	0.12	0.45	0.80	0.14	0.80	0.08	0.96	0.43	0.09	0.21	0.26	0.44	0.20	6.25	0.84	0.95	0.50
三春火砕流	1.56	0.68	0.93	0.37	0.54	0.76	0.64	0.58	1.01	1.36	1.33	0.78	0.34	0.21	0.10	1.37	0.06	0.65	0.72	1.09	0.78	1.57	1.42	0.79	1.30

付表2 現河床堆積物のEnrichment factor

試料番号	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	As	Ba	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	Ga	Nb	Ni	Pb	Rb	Sr	Th	V	Y	Zn	Zr
1- (粗粒)	1.54	0.51		0.75	1.01	0.84	0.65	0.94	1.17	0.76	0.75	1.23	0.38	0.52	0.24	0.14		0.76	0.18	0.82	0.83	0.99	0.55	3.14	0.70	0.94	0.62	
1- (細粒)	0.63	3.44		5.57	3.89	2.58	1.86	0.66	0.95	0.53	0.66		2.06	3.63	1.74	1.06		3.12	0.80	1.59	0.44	0.74	1.01	39.61	1.51	3.63	2.73	
2- (粗粒)	0.96	0.51		0.62	0.75	0.68	0.79	0.84	0.80	0.59	0.58	0.82	0.39	0.53	0.22	0.27		0.57	0.18	0.63	0.62	0.91	0.39	2.65	0.55	0.92	0.42	
2- (細粒)	0.71	2.36		2.58	2.13	1.24	1.23	0.67	0.84	0.75	0.81	0.31	2.05	1.87	1.04	0.85		1.98	0.68	1.02	0.49	0.78	1.30	19.38	1.33	2.25	4.26	
3- (粗粒)	1.08	0.55		0.76	0.80	0.69	0.58	0.86	0.92	0.72	1.88	0.91	0.77	0.60	0.23	0.30		0.75	0.24	1.09	0.77	0.87	0.87	3.11	0.65	1.10	0.65	
3- (細粒)	1.08	0.55		0.76	0.80	0.69	0.58	0.86	0.92	0.72	1.88	0.91	0.77	0.60	0.23	0.30		0.75	0.24	1.09	0.77	0.87	0.87	3.11	0.65	1.10	0.65	
4- (粗粒)	0.95	0.54		0.67	0.70	0.66	0.72	0.82	0.83	0.62	0.93	0.85	0.33	0.45	0.22	0.26		0.61	0.21	0.62	0.66	0.87	0.46	2.84	0.54	1.01	0.48	
4- (細粒)	0.79	1.98		1.97	1.71	1.02	0.99	0.73	0.87	0.74	1.43	0.48	1.83	1.45	0.74	0.70		1.62	0.47	0.89	0.56	0.82	1.45	14.77	1.15	1.91	4.10	
5- (粗粒)	1.49	1.02		1.18	1.54	1.15	0.70	0.91	1.16	0.70	0.71	0.99	0.38	0.83	0.38	0.48		0.92	0.19	0.83	0.80	0.85	0.69	6.12	0.90	1.21	0.62	
5- (細粒)	0.67	1.34		1.49	1.48	0.97	0.91	0.60	0.78	0.84	0.47	0.56	1.12	1.20	0.54	0.85		1.26	0.51	1.01	0.61	0.86	0.90	10.16	0.85	1.76	1.70	
6- (粗粒)	1.09	0.71		0.92	1.20	0.84	0.57	0.75	1.11	0.88	0.75	1.08	0.89	0.71	0.38	0.68		0.84	0.39	1.49	1.00	0.85	1.00	4.83	0.73	1.60	1.21	
6- (細粒)	0.89	1.02		1.31	1.71	1.49	1.31	0.89	0.74	0.56	0.45	0.65	0.63	1.17	0.41	0.44		0.98	0.34	0.69	0.50	0.92	0.56	6.61	0.95	1.43	0.51	
7- (粗粒)	1.24	0.49		0.60	0.80	0.55	0.59	0.86	1.05	0.56	0.74	1.08	0.40	0.47	0.23	0.23		0.54	0.16	0.80	0.81	0.83	0.52	2.79	0.58	0.87	0.55	
7- (細粒)	0.23	2.05		6.45	3.14	1.07	1.12	0.33	1.07	0.27	1.02		3.86	3.08	2.08	1.49		4.39	0.83	1.81	0.43	0.55	2.16	32.03	1.14	3.52	9.38	
8- (粗粒)	1.52	0.46		0.58	0.71	0.67	0.48	0.94	1.21	0.84	0.54	1.23	0.41	0.42	0.25	0.16		0.62	0.21	0.81	0.91	0.90	0.55	2.75	0.50	0.79	0.56	
8- (細粒)	0.79	1.57		1.65	1.75	1.35	1.38	0.79	0.74	0.95	0.40	0.54	1.53	1.39	0.83	0.58		1.71	0.51	0.88	0.50	0.88	1.28	10.22	1.49	1.61	3.42	
9- (粗粒)	1.68	0.82		1.26	1.80	1.47	0.77	0.91	1.09	0.69	0.71	0.98	0.61	0.94	0.36	0.20		0.86	0.21	0.76	0.74	0.85	0.76	5.31	0.93	1.37	0.60	
9- (細粒)	0.72	0.95		1.30	1.81	0.93	0.81	0.57	0.73	0.52	0.79	0.55	1.20	1.05	0.50	1.11		1.04	0.47	1.08	0.58	0.74	0.89	10.09	0.83	1.98	1.71	
10- (粗粒)	1.19	0.42		0.54	0.73	0.58	0.68	0.86	0.94	0.51	0.71	0.97	0.30	0.44	0.23	0.14		0.48	0.18	0.72	0.71	0.88	0.52	2.47	0.50	0.75	0.45	
10- (細粒)	0.68	0.75		1.05	1.29	0.82	0.72	0.50	0.69	0.78	0.58	0.65	0.88	0.91	0.50	0.74		0.96	0.57	0.86	0.66	0.76	0.77	6.04	0.77	1.62	1.12	
11- (粗粒)	0.97	0.68		0.92	1.15	0.94	0.83	0.76	0.73	0.63	0.92	0.74	0.48	0.76	0.29	0.41		0.64	0.21	0.65	0.56	0.79	0.39	4.26	0.67	1.34	0.50	
11- (細粒)	0.79	1.03		1.17	1.20	0.78	0.70	0.57	0.71	0.87	1.13	0.66	0.88	0.97	0.47	0.70		0.92	0.35	0.92	0.55	0.71	0.79	8.37	0.83	1.74	1.42	
12- (粗粒)	0.71	0.77		1.02	1.09	0.84	0.74	0.50	0.77	0.74	0.43	0.66	0.43	0.93	0.40	0.62		0.77	0.36	0.64	0.70	0.76	0.38	5.86	0.60	1.36	0.54	
12- (細粒)	0.64	1.19		1.42	1.49	1.02	0.95	0.51	0.59	0.92	0.50	0.50	1.20	1.22	0.66	0.78		1.11	0.50	0.72	0.49	0.74	0.75	9.38	0.98	1.63	2.16	
13- (粗粒)	0.90	1.11		1.26	3.98	1.20	1.19	0.86	0.73	0.63	0.26	0.64	0.44	1.10	0.45	0.41		0.86	0.30	0.59	0.52	0.94	0.49	7.20	0.83	1.21	0.54	
13- (細粒)	0.62	4.36		6.45	3.65	2.28	2.03	0.60	0.88	1.09	0.68		4.68	3.96	3.53	1.26		3.10	1.08	0.87	0.33	0.79	2.72	41.31	2.16	3.81		
14- (粗粒)	1.10	0.39		0.49	0.57	0.60	0.86	1.01	0.58	0.39	0.52	0.61	0.26	0.38	0.18	0.10		0.29	0.10	0.42	0.50	0.88	0.21	1.87	0.54	0.54	0.38	
14- (細粒)	0.84	1.12		1.46	1.47	1.04	1.12	0.80	0.55	0.62	0.67	0.53	0.53	1.19	0.42	0.51		0.56	0.26	0.64	0.45	0.82	0.66	8.56	0.89	1.45	0.83	
15- (粗粒)	0.81	1.13		1.18	1.05	0.82	0.85	0.70	0.54	0.86	0.80	0.55	0.67	1.06	0.29	0.70		0.58	0.24	0.61	0.46	0.74	0.49	7.39	0.78	1.52	0.71	
15- (細粒)	0.76	1.35		1.35	0.86	0.69	0.58	0.52	0.57	1.26	0.97	0.58	0.88	1.23	0.48	1.02		0.67	0.32	0.88	0.51	0.65	1.23	10.93	0.83	1.94	1.22	
16- (粗粒)	0.85	0.51		0.68	0.72	0.62	0.74	0.76	0.55	0.77	0.83	0.67	0.42	0.53	0.21	0.49		0.38	0.18	0.71	0.54	0.78	0.52	3.18	0.61	1.05	0.50	
16- (細粒)	0.96	0.84		1.06	1.32	0.83	0.69	0.73	0.81	0.84	2.29	0.77	1.00	0.82	0.48	0.70		1.05	0.35	1.83	0.73	0.81	1.33	6.00	0.90	1.52	1.34	
17- (粗粒)	0.83	0.51		0.66	0.73	0.65	0.82	0.79	0.54	0.52	0.91	0.64	0.41	0.51	0.20	0.47		0.35	0.16	0.59	0.49	0.79	0.43	3.17	0.62	0.91	0.47	
17- (細粒)	0.87	0.89		1.03	1.12	0.57	0.45	0.45	0.75	0.46	1.25	0.44	0.66	1.45	0.41	0.86		0.68	0.28	0.69	0.46	0.69	0.54	12.17	0.87	1.85	0.84	
18- (粗粒)	1.47	0.28		0.67	1.03	0.22	0.25	0.60	1.13	0.33	19.29	0.95	1.08	0.38	0.19	0.24		1.02	0.09	0.67	1.07	0.53	0.59	1.94	1.24	1.14	1.08	
18- (細粒)	1.19	0.41		0.80	1.24	0.07	0.28	0.55	1.06	0.38	21.50	0.78	1.16	0.53	0.27	0.39		1.10	0.15	1.10	1.10	0.48	0.81	3.81	1.22	1.41	1.17	
19- (粗粒)	1.32	0.61		1.17	1.28	1.19	0.68	0.84	0.90	0.70	5.33	0.93	0.86	0.91	0.42	0.50		0.76	0.36	0.70	0.73	0.80	0.68	5.16	0.84	1.35	0.80	
19- (細粒)	0.95	0.54		1.02	1.48	0.54	0.45	0.52	0.86	0.68	12.72	0.77	1.15	0.77	0.42	0.81		1.04	0.36	1.20	0.92	0.55	0.82	5.91	1.21	2.12	1.31	
20- (粗粒)	1.00	0.43		0.69	0.66	0.54	0.10	0.60	1.07	0.40	2.99	0.93	0.45	0.51	0.27	0.17		0.71	0.21	0.77	0.77	0.33	0.65	3.96	0.56	0.84	0.50	
20- (細粒)	0.70	0.58		0.73	0.78	0.40	0.16	0.54	1.00	0.52	3.48	0.97	0.82	0.57	0.36	0.28		0.86	0.29	0.84	0.78	0.38	0.76	5.24	0.60	1.03	0.91	
21- (粗粒)	0.90	2.17		2.53	2.53	1.68	1.19	0.78	0.96	0.51	0.33	0.38	1.24	1.81	0.42	0.59		1.43	0.34	2.25	0.62	0.88	1.13	16.51	0.79	2.09	0.61	

付表2 現河床堆積物のEnrichment factor

試料番号	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	As	Ba	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	Ga	Nb	Ni	Pb	Rb	Sr	Th	V	Y	Zn	Zr
22- (粗粒)	1.45	0.66		0.73	0.90	0.86	0.67	1.03	0.83	0.74	0.63	0.85	0.58	0.46	0.27	0.14		0.58	0.20	0.66	0.55	1.06	0.89	2.35	0.53	0.98	0.48	
22- (細粒)	0.71	2.04		2.08	1.82	0.85	0.68	0.55	0.82	1.01	1.27	0.34	2.35	1.35	1.42	1.71		2.51	0.61	1.73	0.59	0.75	2.13	16.49	0.94	3.08	6.22	
23- (粗粒)	1.24	1.17		1.07	1.27	1.02	0.71	0.93	0.88	0.89	0.78	0.79	0.93	0.73	0.33	0.41		0.91	0.21	0.75	0.57	0.97	1.61	5.51	0.64	1.37	0.67	
23- (細粒)	0.87	1.34		1.31	1.44	0.99	0.66	0.67	0.72	1.44	1.26	0.67	1.39	0.89	0.68	0.96		1.33	0.43	1.19	0.60	0.82	1.28	8.75	0.81	2.33	3.16	
24- (粗粒)	1.27	0.40		0.60	0.74	0.42	0.42	0.84	0.93	0.57	0.62	1.20	0.51	0.38	0.19	0.19		0.60	0.13	0.69	0.70	0.76	0.66	2.72	0.61	0.81	0.60	
24- (細粒)	0.66	0.37		1.35	2.64	0.75	0.75	0.37	0.51	-0.18	1.24	0.61	0.75	1.00	0.33	0.92		0.82	0.30	0.81	0.55	0.56	0.77	8.95	0.83	2.38	0.89	
25- (粗粒)	0.98	0.58		1.03	0.84	0.69	0.26	0.38	0.75	1.28	6.54	0.88	0.73	0.85	0.31	1.12		0.73	0.26	1.11	0.69	0.45	0.89	5.85	0.63	2.09	0.63	
25- (細粒)	0.82	0.67		1.11	1.14	0.69	0.27	0.30	0.60	1.52	5.72	0.74	1.13	1.10	0.62	1.31		0.87	0.38	1.41	0.66	0.43	1.02	7.61	0.85	2.84	1.44	
26- (粗粒)	0.85	0.42		0.74	0.79	0.56	0.33	0.36	0.67	0.67	3.97	0.75	0.55	0.51	0.21	0.50		0.61	0.19	0.81	0.55	0.50	0.59	4.08	0.54	1.22	0.51	
26- (細粒)	0.86	0.54		0.74	0.95	0.54	0.33	0.42	0.72	0.59	3.12	0.74	0.67	0.61	0.33	0.53		0.76	0.21	0.79	0.55	0.50	0.70	5.09	0.64	1.24	1.07	
27- (粗粒)	1.02	0.58		0.88	0.87	0.58	0.39	0.57	1.29	0.58	4.78	1.22	1.42	0.76	0.30	2.20		0.77	0.20	3.82	1.08	0.66	1.66	4.96	0.64	7.29	0.70	
27- (細粒)	0.95	0.75		0.98	0.98	0.64	0.48	0.51	1.24	0.60	3.90	1.32	1.34	0.84	0.43	3.17		1.04	0.25	3.60	1.05	0.75	1.71	6.59	0.82	7.45	1.38	
28- (粗粒)	1.27	0.45		0.78	0.69	0.64	0.31	0.58	0.89	0.55	4.23	1.02	0.45	0.51	0.17	0.44		0.66	0.12	0.90	0.68	0.52	0.71	4.04	0.74	1.43	0.68	
28- (細粒)	0.83	1.35		1.72	1.54	1.10	1.01	0.68	0.55	0.87	2.93	0.92	0.83	0.79	0.45	1.63		1.04	0.24	1.02	0.55	0.60	0.90	7.50	0.80	1.65	1.88	
29- (粗粒)	0.54	2.89		2.68	1.88	0.98	1.22	0.60	0.39	0.36	0.34	-0.07	0.75	1.48	0.05	0.47		1.59	0.21	0.50	0.16	0.69	0.44	19.63	0.71	1.57	1.12	
29- (細粒)	0.57	1.69		1.75	1.52	0.42	0.65	0.37	0.48	0.40	0.65	0.23	1.11	1.26	0.25	0.69		1.22	0.25	0.80	0.30	0.53	0.81	14.76	0.85	1.42	2.46	
30- (粗粒)	1.22	0.60		0.87	0.69	0.66	0.49	0.86	0.80	0.79	1.78	0.95	0.64	0.48	0.24	0.29		0.79	0.15	0.67	0.65	0.67	0.66	3.22	1.03	1.14	0.85	
30- (細粒)	0.88	0.76		0.94	0.92	0.63	0.58	0.57	0.72	0.87	1.79	0.82	0.83	0.66	0.34	0.99		0.87	0.24	1.05	0.64	0.76	0.80	5.97	0.85	1.35	0.91	
31- (粗粒)	1.23	0.40		0.69	0.86	0.71	0.48	0.80	1.09	0.48	3.13	1.26	0.60	0.45	0.16	0.89		0.63	0.07	1.07	0.79	0.56	0.79	3.15	0.87	1.39	0.63	
32- (粗粒)	1.34	0.46		0.73	0.63	0.62	0.38	0.89	1.17	0.62	3.17	1.30	0.66	0.39	0.14	0.57		0.70	0.08	0.94	0.93	0.49	0.98	3.22	1.08	1.17	0.79	
32- (細粒)	0.93	0.66		1.21	1.42	0.72	0.50	0.57	0.78	1.13	4.79	1.02	1.22	0.76	0.23	1.58		0.89	0.21	1.53	0.76	0.60	1.15	6.61	1.01	1.99	0.98	
33- (粗粒)	1.33	0.45		0.69	0.54	0.53	0.36	0.90	1.22	0.61	2.77	1.42	0.60	0.37	0.16	0.61		0.70	0.08	0.94	0.95	0.52	1.04	2.94	0.97	1.21	0.79	
33- (細粒)	0.95	0.61		0.81	0.89	0.59	0.50	0.59	0.80	0.95	2.88	0.90	0.87	0.55	0.27	1.50		0.77	0.16	1.24	0.68	0.64	0.95	4.88	0.87	1.78	0.95	
34- (粗粒)	1.10	0.39		0.57	0.50	0.61	0.58	0.78	0.85	0.55	1.77	0.99	0.48	0.33	0.17	0.58		0.52	0.06	0.78	0.60	0.73	0.72	2.39	0.67	1.06	0.51	
34- (細粒)	0.98	0.94		1.01	0.90	0.63	0.61	0.72	0.87	0.76	2.28	0.87	0.93	0.65	0.24	1.16		0.95	0.15	1.21	0.65	0.70	0.95	6.84	0.88	1.84	1.13	
35- (粗粒)	1.28	0.43		0.67	0.60	0.55	0.42	0.86	1.08	0.57	2.81	1.24	0.58	0.44	0.18	0.50		0.64	0.09	0.92	0.83	0.57	0.74	2.92	0.84	1.28	0.70	
35- (細粒)	0.93	0.78		1.11	1.24	0.69	0.54	0.57	0.79	0.89	4.31	0.89	1.00	0.80	0.21	1.49		0.97	0.16	1.51	0.67	0.61	1.05	6.98	0.93	2.28	0.99	
36- (粗粒)	1.40	1.69		1.67	1.25	0.91	0.56	0.81	1.12	0.81	1.99	0.92	0.84	1.09	0.18	0.76		1.17	0.14	1.06	0.74	0.61	0.94	10.77	1.01	1.77	0.98	
36- (細粒)	0.88	1.97		1.83	1.14	0.60	0.58	0.60	0.95	0.92	1.71	0.66	1.30	1.13	0.41	1.34		1.56	0.26	1.54	0.63	0.70	1.10	16.15	0.94	2.47	1.81	
37- (粗粒)	0.82	1.85		2.21	1.70	0.67	0.58	0.49	0.88	1.08	2.88	0.58	1.54	1.17	0.39	2.11		1.65	0.33	1.66	0.65	0.60	1.20	18.60	1.01	3.03	1.76	
38- (粗粒)	1.54	0.44		0.69	0.57	0.63	0.40	0.94	1.13	0.66	2.38	1.29	0.38	0.43	0.19	0.39		0.62	0.07	0.83	0.84	0.55	0.96	2.95	0.99	1.13	0.70	
38- (細粒)	0.82	0.81		1.44	2.01	0.65	0.53	0.41	0.69	0.70	3.84	0.76	1.22	0.99	0.30	1.79		1.12	0.28	1.71	0.67	0.60	1.16	11.05	1.02	2.52	1.22	
39- (粗粒)	1.26	0.44		0.61	0.59	0.48	0.44	0.72	1.15	0.74	0.65	1.64	0.50	0.36	0.26	0.23		0.74	0.11	0.87	0.82	0.83	0.71	2.41	0.49	0.87	0.66	
39- (細粒)	0.69	0.74		1.10	1.16	0.57	0.41	0.30	0.56	1.16	1.23	0.70	1.10	0.89	0.30	0.85		0.94	0.27	1.34	0.67	0.59	1.04	6.76	0.72	1.92	1.22	
40- (粗粒)	0.77	0.65		1.00	1.51	0.73	0.63	0.43	0.65	0.82	1.40	0.70	1.08	0.82	0.47	0.98		0.98	0.32	1.74	0.71	0.61	1.10	6.47	0.84	2.92	1.13	
40- (細粒)	1.18	0.43		0.63	0.81	0.55	0.46	0.70	1.09	0.73	0.87	1.30	0.60	0.38	0.29	0.30		0.65	0.17	1.09	0.73	0.74	0.66	3.12	0.48	1.31	0.60	
41- (粗粒)	1.14	0.41		0.66	0.65	0.42	0.33	0.73	1.17	0.68	1.60	1.52	0.59	0.40	0.19	0.17		0.72	0.16	0.93	0.75	0.47	0.73	2.89	1.03	1.12	0.56	
41- (細粒)	0.81	0.28		0.85	1.63	0.49	0.40	0.39	0.93	0.40	2.57	0.76	1.08	0.59	0.28	0.64		0.92	0.20	1.71	0.91	0.36	1.25	4.46	1.18	2.44	0.84	

付表2 現河床堆積物のEnrichment factor

試料番号	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	As	Ba	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	Ga	Nb	Ni	Pb	Rb	Sr	Th	V	Y	Zn	Zr
42- (粗粒)	1.19	0.41		0.67	0.69	0.70	0.59	0.81	0.92	0.52	1.97	1.07	0.53	0.44	0.19	0.29		0.50	0.08	0.89	0.64	0.70	0.55	3.13	0.72	1.30	0.51	
42- (細粒)	0.89	1.21		1.75	1.42	0.83	0.51	0.52	0.81	1.22	3.18	0.82	1.04	1.22	0.32	1.09		0.94	0.28	2.06	0.72	0.60	1.16	12.82	0.85	3.10	0.99	
43- (粗粒)	1.04	0.90		1.18	1.49	0.73	0.73	0.63	0.74	0.42	0.93	0.76	0.61	0.90	0.17	12.17		0.62	0.16	1.02	0.47	0.68	0.69	7.20	0.64	0.97	0.48	
43- (細粒)	0.78	0.57		1.16	1.49	0.45	0.34	0.35	0.65	0.52	1.55	0.76	1.03	0.93	0.23	12.61		0.68	0.23	1.60	0.58	0.45	1.02	7.89	0.74	1.31	0.75	
44- (粗粒)	1.04	3.46		4.96	3.69	2.57	1.46	0.70	0.75	0.97	0.99		0.86	3.03	0.35	0.93		1.67	0.46	0.72	0.37	0.80	0.45	33.55	1.01	3.49	0.96	
44- (細粒)	0.53	4.71		10.42	4.22	1.44	1.30	0.48	0.98	1.40	2.01		2.45	5.65	3.02	1.78		2.87	0.92	1.92	0.40	0.69	1.37	38.90	1.21	6.76	2.52	
45- (粗粒)	1.05	0.43		0.86	0.71	0.67	0.21	0.38	0.88	0.62	6.58	0.94	0.73	0.47	0.24	0.80		0.70	0.17	1.01	0.67	0.39	0.70	4.69	0.60	1.10	0.60	
45- (細粒)	0.79	0.60		0.89	0.89	0.68	0.27	0.33	0.80	0.61	5.41	0.81	0.87	0.64	0.36	0.79		0.79	0.28	1.08	0.60	0.47	0.79	6.51	0.65	1.26	1.27	
46- (粗粒)	1.30	0.44		0.71	1.04	0.89	0.99	0.93	0.53	0.47	1.37	0.68	0.38	0.52	0.19	0.15		0.41	0.07	0.59	0.39	0.88	0.42	2.41	0.85	1.07	0.50	
47- (粗粒)	1.28	0.44		0.60	0.73	0.52	0.70	0.91	0.67	0.55	1.45	0.85	0.49	0.41	0.20	0.22		0.50	0.08	0.61	0.51	0.81	0.55	2.24	0.73	0.95	0.58	
47- (細粒)	0.77	0.49		0.81	1.62	0.52	0.84	0.52	0.58	0.42	1.03	0.77	0.94	0.57	0.35	0.85		0.55	0.22	1.74	0.56	0.75	1.02	5.41	0.70	2.93	0.71	
48- (粗粒)	1.34	0.87		0.44	1.34	0.90	0.84	0.93	0.64	0.63	0.98	0.74	0.40	0.64	0.19	0.38		0.62	0.14	0.53	0.47	0.84	0.57	5.33	0.80	1.48	0.70	
49- (粗粒)	0.88	3.35		4.00	2.64	1.49	1.32	0.78	0.53	1.34	0.58	0.26	0.81	2.58	0.52	0.96		1.20	0.36	0.63	0.30	0.93	0.50	27.58	0.96	3.15	1.24	
49- (細粒)	0.48	5.10		10.38	3.66	1.01	1.12	0.39	0.72	1.89	1.16		2.38	5.66	3.15	1.79		2.21	0.96	1.68	0.38	0.75	1.05	28.19	1.15	7.49	2.15	
50- (粗粒)	0.97	2.64		4.03	3.69	2.99	1.80	0.83	0.45	0.93	0.64	0.12	0.55	2.77	0.44	0.89		1.16	0.41	0.47	0.26	0.87	0.36	25.35	1.18	3.41	1.00	
50- (細粒)	0.63	3.70		5.34	2.46	0.83	0.87	0.42	0.71	1.56	1.07	0.07	1.32	3.54	1.35	1.80		1.62	0.61	1.25	0.43	0.71	0.90	37.10	1.08	5.56	1.86	
51- (粗粒)	0.92	1.68		2.85	3.45	2.80	1.82	1.28	0.43	0.50	0.66	0.29	0.54	2.34	0.45	0.69		0.96	0.32	0.38	0.27	0.83	0.41	15.32	1.20	2.89	0.84	
51- (細粒)	0.74	1.10		1.32	1.38	0.50	0.80	0.58	0.57	0.71	0.71	0.64	0.82	1.09	0.33	0.96		0.70	0.26	0.87	0.46	0.77	0.60	9.66	0.73	2.45	0.91	
52- (粗粒)	0.76	1.27		1.17	1.08	0.66	0.81	0.63	0.67	0.56	0.34	0.54	0.54	0.91	0.30	0.47		0.66	0.26	0.64	0.52	0.72	0.51	7.17	0.50	1.20	0.46	
52- (細粒)	0.87	2.17		2.05	1.22	0.63	0.61	0.60	0.97	0.92	1.82	0.64	1.53	1.28	0.30	1.29		1.64	0.26	1.47	0.64	0.68	1.09	17.37	0.95	2.58	2.22	
53- (粗粒)	0.76	1.85		2.03	1.96	1.21	1.00	0.64	0.79	0.46	0.46	0.32	0.56	1.65	0.32	0.61		0.97	0.34	0.57	0.50	0.63	0.40	13.80	0.63	1.77	0.49	
53- (細粒)	0.49	3.00		4.93	2.55	1.11	0.82	0.43	1.00	0.58	0.58		1.79	3.02	1.99	1.08		2.00	0.65	0.94	0.47	0.51	1.45	33.42	0.99	3.02	2.36	
54- (粗粒)	0.90	0.94		0.89	1.05	0.77	0.87	0.76	0.72	0.41	0.26	0.63	0.32	0.74	0.28	0.30		0.53	0.20	0.50	0.51	0.78	0.35	4.20	0.42	0.95	0.42	
54- (細粒)	0.75	1.06		1.36	1.60	0.84	0.71	0.55	0.70	0.54	0.53	0.55	0.70	1.26	0.60	0.62		0.86	0.42	0.68	0.53	0.59	0.74	8.61	0.72	1.61	0.91	
55- (粗粒)	0.79	0.45		0.63	0.63	0.35	0.57	0.57	0.60	0.99	0.99	0.71	0.53	0.47	0.23	0.55		0.54	0.20	0.83	0.66	0.62	0.69	2.93	0.61	1.36	0.50	
55- (細粒)	0.74	0.63		0.92	0.98	0.36	0.33	0.29	0.45	1.78	1.67	0.80	1.11	0.71	0.63	1.41		0.77	0.31	1.25	0.66	0.44	1.19	5.55	1.06	2.45	1.25	
56- (粗粒)	0.85	0.51		0.95	1.35	0.76	0.91	0.67	0.50	1.02	0.85	0.61	0.54	0.78	0.27	0.55		0.46	0.23	0.74	0.55	0.72	5.69	3.87	0.69	1.36	0.47	
56- (細粒)	0.73	0.46		1.29	2.17	0.49	0.47	0.24	0.31	0.86	1.68	0.79	1.19	0.95	0.48	1.61		0.74	0.41	1.89	0.63	0.46	1.40	7.31	0.96	2.53	0.99	
57- (粗粒)	0.74	0.71		0.74	0.67	0.66	0.63	0.54	0.87	0.86	0.09	0.72	0.47	0.62	0.19	0.17		0.68	0.13	0.85	0.48	0.95	0.62	3.26	0.32	1.10	0.37	
57- (細粒)	0.60	1.75		1.37	1.46	1.02	1.22	0.65	0.69	0.53	0.26	0.32	1.34	0.93	0.23	0.34		1.90	0.20	0.75	0.27	0.93	1.28	7.79	0.85	1.31	3.42	
58- (粗粒)	0.68	0.89		0.96	0.83	0.78	0.48	0.41	0.91	0.96	0.13	0.72	0.49	0.80	0.18	0.34		1.04	0.15	0.52	0.70	0.73	0.35	4.42	0.36	1.20	0.45	
58- (細粒)	0.61	1.04		1.02	1.05	0.88	0.91	0.51	0.63	0.92	0.18	0.51	0.69	0.80	0.24	0.35		1.25	0.16	0.53	0.43	0.92	0.59	5.07	0.67	1.15	1.28	
59- (粗粒)	1.12	0.82		0.84	1.07	0.99	0.78	0.98	1.03	1.12	0.21	1.03	0.68	0.67	0.31	0.32		1.21	0.27	0.70	0.77	1.03	0.88	3.64	0.69	1.06	0.64	
59- (細粒)	0.67	2.03		1.98	1.78	1.22	1.28	0.77	0.84	0.98	0.33	0.50	1.84	1.28	0.72	0.84		2.32	0.48	0.88	0.55	0.97	1.93	11.66	1.21	1.70	4.64	
60- (粗粒)	0.68	0.91		1.12	1.06	0.74	0.70	0.52	1.12	0.78	0.15	0.78	0.68	1.00	0.34	0.42		1.11	0.28	0.73	1.04	0.86	0.47	5.40	0.55	1.35	0.99	
60- (細粒)	0.67	0.87		1.02	1.14	0.88	1.07	0.72	0.70	0.92	0.17	0.64	1.20	0.84	0.42	0.41		1.12	0.34	0.66	0.57	0.97	0.85	5.01	1.03	1.11	2.80	
61- (粗粒)	1.18	0.68		0.83	1.02	0.83	0.64	0.75	1.49	0.71	0.12	1.34	0.61	0.66	0.41	0.37		1.25	0.53	0.99	1.14	1.00	0.71	4.44	0.62	1.04	0.68	
61- (細粒)	0.71	1.08		1.37	1.57	0.98	1.08	0.78	0.93	0.70	0.21	0.74	2.31	1.12	1.11	0.84		1.24	0.88	1.26	0.76	1.08	1.73	8.80	1.03	1.54	6.95	
62- (粗粒)	0.90	0.77		0.94	0.92	0.84	0.71	0.62	1.17	0.80	0.04	1.02	0.63	0.77	0.34	0.40		1.07	0.48	0.79	0.90	0.90	0.80	4.67	0.60	1.51	0.64	

付表2 現河床堆積物のEnrichment factor

試料番号	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	As	Ba	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	Ga	Nb	Ni	Pb	Rb	Sr	Th	V	Y	Zn	Zr
62- (細粒)	0.66	0.96		0.98	0.95	0.72	0.87	0.68	0.90	0.64	0.13	0.77	1.01	0.80	0.44	0.50	1.15	0.48	0.82	0.66	1.00	0.86	5.20	0.66	1.68	1.57		
63- (粗粒)	1.18	1.03		1.01	1.27	0.90	0.80	0.92	1.41	0.70	1.56	1.10	0.58	0.72	0.83	0.35	1.35	0.57	0.75	0.94	1.06	1.24	5.73	0.72	0.83	0.81		
63- (細粒)	0.62	2.41		2.77	2.33	1.51	1.58	0.69	0.95	0.77	0.40	0.35	4.18	1.92	1.92	0.89	2.31	0.87	0.84	0.56	0.91	3.35	18.40	1.88	1.86	12.75		
64- (粗粒)	0.70	0.63		0.83	0.90	0.78	0.73	0.67	0.92	0.51	0.07	0.71	0.50	0.92	0.29	0.28	0.85	0.33	0.75	0.79	0.79	0.52	3.98	0.43	1.01	0.33		
64- (細粒)	0.65	0.98		1.18	1.22	1.06	0.99	0.62	0.75	0.63	0.14	0.55	1.05	1.16	0.62	0.46	1.07	0.59	0.70	0.58	0.76	1.16	7.04	0.97	1.12	1.86		
65- (粗粒)	0.81	1.22		1.24	1.30	0.67	0.82	0.77	1.56	0.48	0.16	0.76	2.88	1.16	0.80	0.37	1.35	0.41	1.21	1.21	0.78	7.37	7.72	1.53	1.05	3.10		
65- (細粒)	1.48	0.32		0.48	0.68	0.39	0.48	0.72	2.09	0.46	0.14	0.50	0.39	0.55	0.41	0.07	0.83	0.14	1.16	1.77	0.80	0.69	2.42	0.57	0.49	0.71		
66- (粗粒)	1.44	0.48		0.73	1.09	0.94	0.78	0.97	0.97	0.61	0.55	1.02	0.54	0.61	0.23	0.11	0.67	0.18	0.62	0.68	0.99	0.65	2.69	0.67	0.88	0.50		
66- (細粒)	0.71	0.64		0.92	1.08	0.75	0.62	0.49	0.64	0.88	0.66	0.70	0.78	0.84	0.36	0.69	0.78	0.37	0.99	0.66	0.73	0.72	4.91	0.70	1.48	0.71		
67- (粗粒)	1.51	0.39		0.55	0.78	0.68	0.59	0.94	1.11	0.64	0.63	1.18	0.32	0.42	0.19	0.11	0.53	0.13	0.67	0.78	0.95	0.47	2.12	0.53	0.74	0.52		
67- (細粒)	0.69	0.89		1.14	1.16	0.77	0.61	0.43	0.70	0.87	0.82	0.65	0.87	0.91	0.43	0.85	0.98	0.44	0.95	0.66	0.72	0.70	7.29	0.76	1.61	1.28		
68- (粗粒)	1.53	0.37		0.54	0.79	0.64	0.58	0.96	1.11	0.66	0.56	1.17	0.53	0.38	0.23	0.08	0.49	0.18	0.72	0.79	0.97	1.17	2.19	0.55	0.73	0.54		
68- (細粒)	0.73	0.68		0.89	0.93	0.76	0.69	0.60	0.68	0.81	0.47	0.69	0.78	0.76	0.35	0.58	0.76	0.34	0.93	0.65	0.81	0.72	4.45	0.67	1.33	0.77		
69- (粗粒)	1.53	0.40		0.63	0.94	0.82	0.69	0.98	1.03	0.66	0.52	1.04	0.35	0.46	0.25	0.99	0.61	0.17	0.72	0.74	0.97	0.45	2.28	0.54	0.81	0.54		
69- (細粒)	0.71	0.62		0.79	0.85	0.68	0.63	0.52	0.68	0.82	0.61	0.69	0.68	0.74	0.36	0.55	0.69	0.29	0.79	0.62	0.81	0.63	4.07	0.59	1.24	0.63		
70- (粗粒)	1.51	0.40		0.59	0.87	0.70	0.65	0.98	1.07	0.66	0.58	1.11	0.39	0.42	0.22	0.08	0.61	0.15	0.69	0.73	0.94	0.45	2.46	0.60	0.77	0.50		
70- (細粒)	0.74	0.80		1.01	1.06	0.82	0.73	0.59	0.70	0.82	0.70	0.66	0.67	0.88	0.42	0.64	0.87	0.35	0.78	0.65	0.79	0.73	5.33	0.75	1.42	1.07		
71- (粗粒)	1.48	0.37		0.50	0.69	0.56	0.53	0.95	1.18	0.70	0.55	1.20	0.42	0.38	0.21	0.07	0.49	0.14	0.73	0.84	0.95	0.90	0.76	0.49	0.71	0.55		
71- (細粒)	0.72	0.68		0.87	0.92	0.76	0.69	0.56	0.70	0.77	0.59	0.69	0.52	0.74	0.36	0.55	0.75	0.32	0.75	0.62	0.80	0.65	4.44	0.67	1.26	0.68		
72- (粗粒)	1.48	0.44		0.68	1.03	0.87	0.72	0.97	0.99	0.65	0.63	1.06	0.39	0.51	0.31	0.08	0.66	0.17	0.43	0.71	0.96	0.42	2.51	0.78	0.87	0.56		
72- (細粒)	0.73	0.73		0.93	0.95	0.75	0.68	0.58	0.69	0.80	0.67	0.70	0.75	0.79	0.35	0.60	0.82	0.33	0.77	0.65	0.79	0.70	4.82	0.67	1.35	0.74		

流域の仮想集水域指標の開発

後藤 忍（福島大学・共生システム理工学類）

1. 研究の背景と目的

近年、流域や流域圏を単位とする総合的な水資源管理の重要性が再認識されるようになってきている。エコシステムの単位としての流域圏の重要性はかねてから指摘されており、1977年の第三次全国総合開発計画においても、定住圏構想の一つの圏域を表すものとしてその概念が採り入れられてきた。しかし、糠谷(2002)¹が指摘するように、流域圏を地域開発の基礎的な単位とする考え方は十分浸透することがなかった。その背景には、かつての広域的な生活経済圏としての流域の意味合いが小さくなっていること、また河川と流域住民の日常的な接触が希薄になっていること、などが考えられる。人々の生活は道路や鉄道等の交通ネットワークに支えられており、自然の水系のネットワークを基盤とするものではなくなっている。また、上下水道の普及により、取水や排水などの行為と水系との関わりは人々の生活からますます離れていっている。加えて、近年盛んに実施された市町村合併なども、流域とは関係なく行われているところも多い。筆者がこれまでに調査を行った阿武隈川支流流域においても、河川の上流と下流で別々の市に合併したところなどの事例が見られる²。

つまり、流域や流域圏の重要性は、理念的には健全な水循環を確保するという環境保全上の観点から叫ばれる一方で、現実的な人々の認識や生活経済圏のレベルではますます薄れていっているのが実情である。このような、失われていく流域への認識を時代の流れとしてそのままにしておくのか、それとも、流域単位での管理を行っていくために、河川に親しみ、河川を意識できるような施策を講じていくべきかについて判断が迫られており、筆者は後者の立場に立って本研究を構想している。

本研究は、「流域」を単位とした水資源管理に役立てることを目的として、新たな指標として「仮想集水域指標」の開発を目指すものである。ここで「仮想集水域」とは、人々が暮らしを送っている地理的な集水域ではなく、域内の水利用と域外に依存する水利用とを含めた仮想的な水資源へのインパクトを表現する概念的な指標である。この指標により、流域での水利用状況が、地理的な集水域の水資源賦存量の範囲内に収まっているかどうかや、逆に使いすぎ（オーバーシュート）がどの程度であるかといった評価が可能になる。さらに、地理的な集水域と仮想集水域との乖離具合を表現できるため、日常生活でイメージすることが困難になってきている「流域」に対する人々の認識を促進する効果が期待できると考えられる。

2. 水資源および流域に関する指標開発の状況

2-1 指標の類型

水資源や流域について、その健全さを表すための指標はこれまでも開発されてきた。また、近年では、新しい視点からの指標も開発されてきている。ここでは、それらの指標開発の潮流について、1) 流域の環境特性を表すための指標、2) 人々への分かりやすさを目的とした指標、3) 隠れたインパクトを含めるための指標、4) 持続可能な発展を表すための指標、の4つの類型に分けて、動向を整理したい。なお、各類型における指標の例の考え方や内容については、表1に整理している。

2-2 流域の環境特性を表すための指標

流域を単位とした総合的な水資源管理に関する研究は、近年盛んに行われてきている。2002年度には総合科学技術会議が示した重点分野に「自然と共生した流域圏・都市の再生」が位置づけら

れ、様々な研究プロジェクトが行われている。すでに成果がまとめられているものとしては、日本学術振興会和田プロジェクト(2002)による流域管理のための総合調査マニュアル³があげられる。この中では、流域に関わる環境指標の体系的な整理が行われており、その中で流域の環境容量に関する環境持続性指標の例として「水質持続度」と「水量持続度」の2つがあげられている。原田ら(2001)⁴では、これら2つの指標とともに、「有機廃棄物指標」、「食料指標」、「二酸化炭素指標」を加えた計5つの指標で、流域を単位とした環境評価を行っている。同様の視点から流域の環境容量を評価した研究として、大西ら(1995)⁵によるものがある。この中では、「CO₂固定容量」や「水資源容量」など5つの指標で流域の環境容量を定量的に推計している。そのほか、水収支に対する人間活動のインパクトを分析した澤田ら(1999)⁶、原単位法によって排出負荷量を推計した三浦ら(2004)⁷などの研究がある。

2-3 人々への分かりやすさを目的とした指標

河川の水質や環境の状態をより分かりやすく伝えるための指標の見直しが近年進められている。国土交通省は、従来のBODのみでは評価しきれない川の水質を住民に対して分かりやすく評価するという観点から、2004年に新たな指標を設定して評価を始めている⁸。1)人と河川の豊かなふれあいの確保、2)豊かな生態系の確保、3)利用しやすい水質の確保、4)下流域や滞留水域に影響の少ない水質の確保、5)河川の基本的特徴の表現、の5つの視点から整理を行い、重点的に評価を行う項目として「ゴミの量」「透視度」「川底の感触」「水の臭い」「水生生物の生息」などを提示している。また、同じく2004年から、河川水および流域の水利用、水循環に対する関心や理解を高めることを狙いとして、河川水の利用の度合いを表す「フレッシュ度」⁹を新たに定義して、試算を行っている。一方、環境省も、従来の指標であるBODやCODでは汚濁度が国民にとって分かりにくいことや、統一的な国際基準がないために国際比較

が行いにくいことなどの理由から、水質環境基準の指標の見直しについて2006年度から検討を始めている。

2-4 隠れたインパクトを含めるための指標

1990年代以降、直接的な環境負荷だけではなく、間接的な負荷を含めて計上する試みが行われてきている。物の流れの背後に隠れたフロー(hidden flow)を計上するエコロジカル・リュックサック(ecological rucksack)指標や、地理的な境界を越えて踏みつけた土地面積として計上するエコロジカル・フットプリント(ecological footprint 以下EFPと略す)指標などが代表的なものである。同様の考え方により、水資源に関しても1990年代初頭にT. Allanがヴァーチャル・ウォーター(virtual water, 以下VWと略す)の概念を提唱した。VWは、日用品やサービスを生み出すのに必要となる水の量のことであり、特に国際貿易において他国での生産に伴う水の量を計上する概念として広がった。そして、VWの概念をEFP指標に応用する形で、ウォーター・フットプリント(water footprint 以下WFPと略す)の概念が2002年にHoekstraによって提唱され、EFPと同様に国際的な推計が行われている¹⁰。ある国のWFPは、その国の人々によって消費される財やサービスを生み出すに必要な水量として定義され、国内のWFP(internal WFP: IWFP)と国外のWFP(external WFP: EWFP)の和で構成される。IWFPは、農業用水、工業用水、生活用水の使用量の和から、輸出品に伴うVWを引いたものとして表現される。一方、EWFPは、輸入品に伴うVWから、再輸出されるVWを引いたものである。

ここで、WFPの基礎となっているEFPについて、その内容や評価項目を整理しておきたい。EFPは、コミュニティを維持するために必要となる土地の面積であり、地理的境界を越える土地も含めたものである。様々な環境負荷を、踏みつけた土地の面積として足し合わせて総合的に評価するという、高度に集約された指標である点が特徴である。需要量を必要な面積で表すことができるデ

表1 近年開発された水資源および流域に関する指標の例

類型	研究主体・指標の概要	指標の項目	指標の内容
流域の環境特性を捉えるための指標	大西ら(1995) 集水域を単位とした 環境特性	CO ₂ 固定容量 = 固定量 / 放出量 × 100 (%)	固定量 = 森林蓄積量 (m ³) × 林木材積成長率 (0.0%) / 年 × 固定対象木質部比 (0.45%) × 木質部密度比 (0.50 t/m ³) × 植物成長に伴う CO ₂ 固定 (1.6 t/ton)
	集水域を単位とした 環境特性指標	クーリング容量 = 現熱収収量 / 潜在熱収収量 × 100 (%)	放出量 = 1 人当たり年間 CO ₂ 放出量 (9.44 t/a/人/年) × 人口 (人)
水量特性度 = 水資源供給量 / 水資源使用量 × 100 (%)		現熱収収量 = 55.0 °C × (樹木系土壌利用 × (-63.0 °C) + 水面系土壌利用 × (-31.6 °C) + 芝生系土壌利用 × 18.8 °C + 構造物系土壌利用 × 55.0 °C) / 全 土壌利用 潜在熱収収量 = 55.0 °C × (-63.0 °C)	
集水域を単位とした 環境特性指標	水量特性度 = (TH 許容流入負荷量 / TH 流入負荷量 + TP 許容流入負荷量 / TP 流入負荷量) × (1/2) × 100 (%)	生活容量 = 自給人口 / 現人口 × 100 (%)	潜在熱収収量 (kcal/m ² h): 樹木領域 - 63.0, 池の領域 - 31.6, 芝生領域 18.8, 建築物・沿道領域 55.0 自給人口 = 生活容量に対応した土地利用 / (耕作地 0.25 a/人/年) + 家畜用草地 (2.25 a/人/年) + 都市系 (0.0 a/人/年) 生活容量に対応した土地利用 = 全面積 - (森林用地 + 果樹園用地 + その他農地 + 内水地 + 海浜)
	集水域を単位とした 環境特性指標	水量特性度 = 水資源供給量 / 水資源需要量 × 100 (%)	水資源容量 = 水資源供給量 / 水資源需要量 × 100 (%)
集水域を単位とした 環境特性指標		水量特性度 = 水資源供給量 / 水資源使用量 × 100 (%)	木材資源容量 = 供給量 / 需要量 × 100 (%)
	集水域を単位とした 環境特性指標	水量特性度 = 水資源供給量 / 水資源使用量 × 100 (%)	水資源供給量 / 水資源使用量 × 100 (%)
集水域を単位とした 環境特性指標		水量特性度 = 水資源供給量 / 水資源使用量 × 100 (%)	工業用水 (m ³ /年) = 単位金額当たり工業用水使用量 (m ³ /年/万円) × 工業出荷額 (万円) 単位金額当たり工業用水使用量 (m ³ /年/万円) = 総工業用水供給量 (m ³ /年) / 総工業出荷額 (万円)

<p>利用、水循環への関 心、理解を高める指標</p>	<p>Water Footprint (WFP)</p> <p>A. E. Chapagain & A. Y. Hoekstra(2004)など 生産ベースの水使用 量だけでなく、消費ベ ースの使用量を表す 指標</p>	<p>WFPは以下の式で表される。 $WFP = IWFP + EWFP$ $IWFP$: internal water footprint $EWFP$: external water footprint $IWFP = AWU + IWU + DIWU - VWU$ AWU: agricultural water use IWU: industrial water withdrawals $DIWU$: domestic water withdrawals VWU_{dom}: virtual water export/inflow related to: export of domestically produced products $EWFP = VWU - VWU_{export}$ VWU: virtual water import VWU_{export}: virtual water export to other countries as a result of re-export of imported products</p>	<p>WFP以下の式で表される。 $WFP = IWFP + EWFP$ $IWFP$: internal water footprint $EWFP$: external water footprint $IWFP = AWU + IWU + DIWU - VWU$ AWU: agricultural water use IWU: industrial water withdrawals $DIWU$: domestic water withdrawals VWU_{dom}: virtual water export/inflow related to: export of domestically produced products $EWFP = VWU - VWU_{export}$ VWU: virtual water import VWU_{export}: virtual water export to other countries as a result of re-export of imported products</p>
<p>OECD(2006)</p> <p>経済成長だけでなく 環境への負荷を総合 的に評価する指標群</p>	<p>Key Environmental Indicators</p>	<p>環境汚染の問題について5つの分野、資源の問題について5つの分野の計10の領域でそれぞれ一つずつの指標を導き、 水資源についてはFreshwater QualityとFreshwater Resourcesの二つがある。 Freshwater Quality waste water treatment connection rates Freshwater Resources intensity of use of water resources</p>	<p>環境の問題だけでなく、経済、社会、制度の各側面を含めて評価することを目的とした指標群を開発。3rd versionでは14のテーマに計50の指標 が設定されている中で、水資源に関しては「Fresh Water」の中にWater Quantity とWater Qualityの二つがある Water Quantity Water use as a percentage of renewable water resources Water use intensity by industry Water Quality BOD in Water Bodies Concentration of fecal coliform in freshwater Waste water treatment</p>
<p>持続可能な発展を表すための指標</p>	<p>UNHCD(2007)</p> <p>持続可能な発展に關 する政策や意思決定 を支援するための指 標群</p>	<p>CSD indicators of sustainable development</p>	<p>環境の問題だけでなく、経済、社会、制度の各側面を含めて評価することを目的とした指標群を開発。3rd versionでは14のテーマに計50の指標 が設定されている中で、水資源に関しては「Fresh Water」の中にWater Quantity とWater Qualityの二つがある Water Quantity Water use as a percentage of renewable water resources Water use intensity by industry Water Quality BOD in Water Bodies Concentration of fecal coliform in freshwater Waste water treatment</p>

ータが存在するものだけが含まれるため、質的な環境負荷を明示的に計上できない側面があるが、地理的境界を越えた環境へのインパクトを分かりやすく表現した総合的環境指標として広く認知されつつある。国連や各国・各地の自治体などによる環境調査や政策立案で活用されており、日本でも第三次環境基本計画において、総合的環境指標の3つのタイプのうち、タイプⅢの指標の一つとして位置づけられている¹¹。その評価項目としては、1)森林生産物の消費に必要な森林面積、2)農産物の消費に必要な農地面積、3)畜産物の消費に必要な牧草地面積、4)海産物の消費に必要な海域面積、5)建設に必要な建設地、6)エネルギー消費により排出されるCO₂の吸収に必要な森林面積、が主に計上される。このように、直接面積として計上可能なものだけでなく、エネルギーの消費量をCO₂の吸収に必要な森林面積として計上するなど、面積に馴染まない環境負荷についても評価に組み込むためのアイデアが用いられている¹²。

2-5 持続可能な発展を表すための指標

総合的な環境影響を評価するもう一つの手法として、持続可能な発展に関する個々の分野ごとに指標を設定する方法がある。OECDによるコアセット指標や、UNCSDによるコア指標などがその例である。OECDは、環境問題の因果関係の流れ(Pressure-State-Response)から指標を考えようとするPSRフレームワークに基づいて環境指標のコアセットを選定し、各国の状況レポートを1993年に公表した。1998年には約100の指標群からなるコアセット指標を提示した。その後、数を絞った指標群を「キー指標(key indicators)」として用いるようになっていく¹³。その中では、環境汚染の問題について5つの分野、資源の問題について5つの分野の計10の領域でそれぞれ一つずつ計10個の指標が選定されている。水資源に関するものとしては「水質(Water Quality)」と「水資源(Water Resources)」があり、指標としてそれぞれ「汚水処理接続率(waste water treatment

connection rates)」と「水資源使用強度(intensity of use of water resources)」が選定されている。

持続可能な発展について、環境の側面だけでなく、経済、社会、制度の各側面を含めて評価することを目的とした指標群の開発も行われている。国連持続可能な発展委員会(UNCSD)は、1996年からコア指標を提示してきており、それらの中に水資源に関する指標も含まれている。2001年に2nd versionを選定したが、淡水に関する指標には「水量(Water Quantity)」と「水質(Water Quality)」があり、水量については「利用可能な水総量に占める地表および地下水の年間取水量(Annual Withdrawal of Ground and Surface Water as a Percent of Total Available Water)」、水質については「BOD濃度(BOD in Water Bodies)」と「淡水中の糞便性大腸菌の濃度(Concentration of Faecal Coliform in freshwater)」が位置づけられている¹⁴。2007年には3rd versionが策定されることになっており、ここでは新しく50の指標からなるコア指標が選定されている。これらは、より大きな98の指標の中においてコアとなるものである。その中で、水に関する指標には2nd versionと同様に「水量」と「水質」の二つがあり、水量については「再生利用可能な水資源の利用割合(Water use as a percentage of renewable water resources)」と「産業による水の利用強度(Water use intensity by industry)」の2つがあげられている。また水の質については「BOD濃度」、「淡水中の糞便性大腸菌濃度」、「排水処理(Waste water treatment)」の3つがあげられている¹⁵。

2-6 水資源および流域に関する指標の開発状況のまとめ

これまでの整理から、水資源および流域に関する指標の潮流として、総合的に評価できること、より少ない指標で表すことができること、人々に分かりやすいこと、などを目的として開発が進められてきていることが分かる。これらは、社会的な要請を受けた上での潮流であり、本研究で着目する流域の仮想集水域指標も同じ視点に立つも

のである。

指標の先行事例には優れたものが数多くあるが、流域の水資源に関する総合的な環境指標として用いるにはいくつかの課題がある。第一に、水量と水質で指標が分けられている例が多いということである。流域管理のための総合調査マニュアルや原田ら(2001)における水質持続度と水量持続度も個別に推計しているし、OECD や UNCSD のコア指標も水量と水質で分けられている。第二に、水に関わる総合的な指標においては、水質が明示的に組み込まれていないという点である。WFP では VW を含む水量の計上が目的であり、水質に関する項目は含まれていない。また、その元になっている EFP においても、水は間接的な形でのみ算入されており、例えば淡水の過剰使用は生物生産力の変化として反映される¹⁶。水質汚染による負荷についても同様である。第三に、流域の状態を分かりやすく表現する指標がまだ発展途上であるということである。少ない数の指標で総合的に評価される方が人々に理解されやすいと考えられ、EFP や WFP のアイデアはインパクトの直感的なイメージを可能にするという意味で優れた指標であると筆者も考えているが、そのまま流域に適用するには上記のような課題がある。

つまり、これらの課題を克服するには、流域を対象に EFP と WFP のアイデアを適用するとともに、水質に関する評価項目を加えるなどの修正を行うことによって、新しい総合的環境指標を開発することが一つの方法と考えられる。本研究における仮想集水域指標は、このような発想に基づいている。

3. 仮想集水域指標の開発

3-1 仮想集水域指標の考え方

仮想集水域を考えるにあたっては、環境容量に占める割合や使いすぎの状況を表すことができるという EFP の特長を生かすとともに、水の使用量を計上する WFP の概念も適用する。ここで、仮想集水域を、「物理的な集水域の水資源賦存量

に対する、仮想的な水の使用量の割合を考慮した、概念的な集水域の広さ」と定義する。人々が暮らしを送っている地理的な集水域ではなく、域内での水利用と域外に依存する水利用とを含めた仮想的な水資源へのインパクトを表現するものである。流域の捉え方として虫明(2005)は、流域圏＝集水域＋利水域＋排水域＋氾濫域という考え方を提示しているが¹⁷、仮想集水域はこの中の氾濫域を除く集水域＋利水域＋排水域について、仮想的な面積を推計する概念と位置づけられる。

計算にあたっては、流域における水資源賦存量に対する、仮想的な水の使用量の割合を求め、その比を集水域面積に乗じることによって計上する。つまり、仮想集水域は次式で表現される。

$$\text{仮想集水域(ha)} = \text{集水域(ha)} \times \frac{\text{仮想水使用量(m}^3\text{/年)}}{\text{水資源賦存量(m}^3\text{/年)}} \quad (1)$$

単位は、水の使用量をもとに面積を算出するため、主に計上する項目は水量であるが、仮想集水域は面積で表される。

なお、用語についても確認しておく。流域を意味する英語表現には、basin, river basin, drainage basin, watershed, などがある。河川流域管理計画は River Basin Management Plan の訳として用いられている。また、集水域としては catchment area が使われるが、catchment basin area と表現されることもある。ここでは、仮想的に「取水する面積」という意味合いがイメージしやすいと思われる catchment area を用いるものとし、英語では virtual catchment area、日本語では仮想集水域と表現する。

3-2 仮想集水域の算定項目

(1) 式の中で、集水域は地理的に求まるものであり、また水資源賦存量は先行研究の事例があるので、従来の手法で計上可能である。一方、仮想水使用量については、WFP の項目に少し工夫が必要である。IWFP と EWFP の考え方はそのまま適用して、集水域内の水使用量と集水域外からの水使用量とすることができるが、流域を単位とし

た統計資料はほとんどないため、実際の推計では産業連関表や原単位を援用するなどの方法が必要と考えられる。集水域外水使用量には、疏水などによる直接的な使用量に加えて、貿易を通じたVWを含めることにより、原田ら(2001)の水量持続度や大西ら(1995)の水資源容量で表されているものよりも、隠れたインパクトまで含めることが可能となる。

一方、水質に与えるインパクトについても、仮想水使用量に換算することを考えたい。この際に参考になるのは、EFPにおける fossil forest、つまりエネルギー消費量をCO₂排出量の吸収に必要な森林面積として換算する方法である。ここでは、水質汚染の状況を仮想的な水使用量に換算するため、「汚濁希釈仮想水」の考え方をを用いる。

汚濁希釈仮想水は、その水の状態を、人間活動の影響がないレベルにまで希釈するのに必要となる水と定義する。対象とする流域で、最も下流にある水質測定点の測定結果をもとに、その量を計上する。どの汚染物質に着目するか、また自然の状態の濃度はどのくらいであるかによって異なるため、実際の運用は困難が伴うが、現時点では河川の代表的な汚濁指標であるBODで考えたい。BODは、自然公園内の河川など人為的汚濁の

ない河川で1 mg/l以下であり、0.2~0.3 mg/l程度とされている。また、全国の河川の調査結果を見ると、最も低い値は0.5 mg/l程度である。流域によって環境状態値は異なるが、人為的な影響のない地点の調査データは必ずしも各流域でそろっていないため、試みにここでは0.5 mg/lを基準として考える。このとき、例えば下流の測定点での流量が 3.0×10^9 m³/年、BOD年間75%水質値が1.5 mg/lの流域がある場合、必要となる汚濁希釈仮想水は 6.0×10^9 m³/年となる。

以上の仮定から、仮想水使用量は次の式で表現される。

$$\begin{aligned} \text{仮想水使用量(m}^3\text{/年)} &= \text{集水域内水使用量(m}^3\text{/年)} \\ &+ \text{集水域外水使用量(m}^3\text{/年)} \\ &+ \text{汚濁希釈仮想水(m}^3\text{/年)} \end{aligned} \quad (2)$$

また、流域の集水域面積を S_1 、水資源賦存量を M_1 、仮想水使用量を M_2 としたときの仮想集水域 S_2 の概念図を表すと図1のようになる。EFPと同様に、負荷が大きくなれば仮想集水域は実際の集水域よりも広い面積となる。

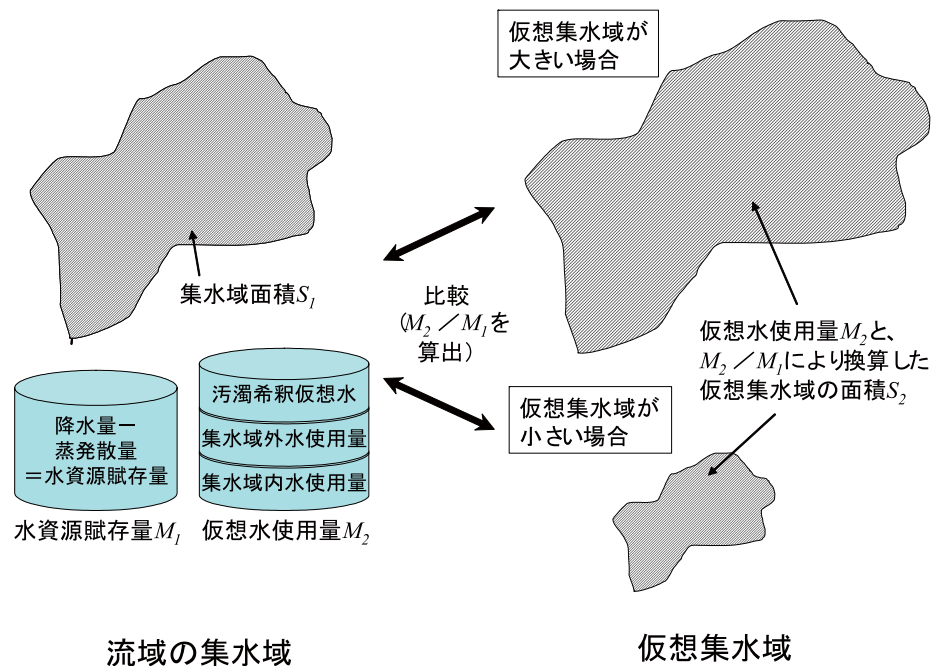


図1 仮想集水域指標のイメージ

4. 仮想集水域指標の適用可能性

仮想集水域指標の概念的な枠組みは以上のように考えているが、実際に流域に適用できるかどうかについてはチェックが必要である。現在は、阿武隈川流域のいくつかの支流で適用すべく、枠組みの精緻化や、統計資料・地理情報の整備を行っている段階である。ここでは、適用に際して事前に注意すべき点について確認しておく。

4-1 水資源賦存量に占める水使用量の割合

まず、流域の水資源賦存量に占める、人間活動の直接的な使用量がどの程度であるのかについて確認しておきたい。日本全体の水資源の利用状況¹⁸については、2003年度の数値で、水資源賦存量 4200 億 m^3 /年に対して使用量は 839 億 m^3 /年となっており、その割合は約 20%程度である。澤田ら(1999)の研究でも、岩手県岩木川流域における人間活動の影響を水収支の面から定量的に把握した結果、流出量に占める総水利用量は約 35%となっている。また、大西ら(1995)の研究では、水資源容量として水資源供給量/水需要量を計算しているが、近畿地方 2 府 5 県（大阪府、京都府、兵庫県、滋賀県、奈良県、和歌山県、三重県）を対象に、集水域を中心に 30 の基本区分と 127 の細区分をエコユニットとして設定して求めた結果、最大値は宮川水系最上流域で約 1 万 7200%であり、その他のユニットの最大値は 2000~3000%のレベルであった。約 62%以上のエコユニットで 100%以上の容量があり、約 51%以上で 200%以上の容量があるとの結果が得られている。これらのことから、人間活動による直接的な水使用量は、賦存量に対してそれほど大きな割合を占めているわけではないと言える。ただし、大西ら(1995)の分析において、最小値を示すユニットは淀川水系河口域で約 1%であった。つまり、人間活動の集中度や流域の分け方によっては、使用量が賦存量を大きく上回る場合もある。

以上のように、流域の水資源に占める直接的な水使用量の割合は、平均で 20~30%程度であり、人間活動の集中度や流域の分け方によって大き

な差があるということが指摘できる。また、仮想集水域指標では、これらの先行研究には含まれていない VW を計上することを想定しているため、水資源賦存量に対する割合はより大きくなる。

4-2 仮想水使用量に占める汚濁希釈仮想水の割合

仮想集水域指標の特徴の一つは、水質汚濁のインパクトを汚濁希釈仮想水として組み込んでいることであるが、これが相対的にどの程度の大きさになるのかについて確認しておきたい。現在のところ、BOD_{0.5} mg/l を基準として希釈する場合の仮想水を想定しているため、BOD が高い流域では 10 倍を超えるところもあると考えられる。水質へのインパクトを分かりやすく表現するという意味では効果的であるが、他の項目より桁が違うほど大きくなる場合が多ければ、基準の修正が望ましいと考えられる。

汚濁希釈仮想水の幅の目安を見るため、阿武隈川流域の水質測定結果で確認する。2004 年度の水質年報¹⁹をもとに、阿武隈川流域 59 地点の BOD 年間 75%水質値を 0.5mg/l で除した値の度数分布は図 2 の通りである。

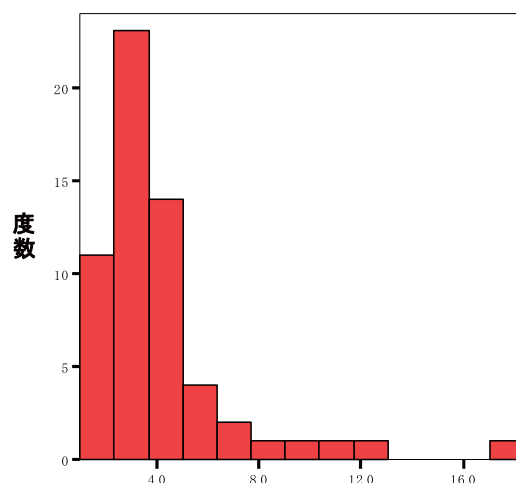


図 2 2004 年度の阿武隈川流域の測定点における BOD 年間 75%水質値/(0.5 mg/l) の度数分布

最も BOD が高いのは六角川の 9.4 mg/l であり、これを 0.5 mg/l に希釈するには 18.8 倍の仮想水を必

要とする。最も小さいのは荒川、松川、須川の 0.5 mg/l であり、同値のため仮想水は必要ではない。図 2 から分かるように、阿武隈川流域における汚濁希釈仮想水の量は各河川流量の 0~20 倍の範囲であり、4 倍以下が多くなると推定される。汚濁希釈仮想水が大きすぎる場合は、基準となる BOD 値に環境基準を用いるなどの修正を行う。

なお、参考までに、汚濁希釈仮想水のアイデアの元となった、EFP における CO₂ 排出量の吸収に必要な森林面積の割合について見ておく。WWF の試算²⁰によると、2003 年における日本人一人当たりの EFP は 4.4ha であり、世界平均の 2.2ha を上回っているが、その中で CO₂ 排出量の吸収に必要な森林面積は 2.45ha と最も大きく、全体の約 56% を占めている。同割合の世界平均は約 48% であり、最大値はクエートの約 87% である。つまり、CO₂ 排出量の吸収に必要な森林面積の大きさは、EFP の残りの面積に対して平均で約 1 倍、最大でも約 6.7 倍のレベルである。このように、EFP における CO₂ 排出量の吸収に必要な森林面積の割合は、ここでの汚濁希釈仮想水の換算割合に比べて小さい範囲に収まっていると言える。これらの点にも留意しながら、基準となる BOD の値を設定したい。

5. 終わりに

本研究では、流域の水資源へのインパクトを総合的に表す分かりやすい指標として、水量と水質の両側面を含む仮想集水域指標を新たに考案し、その概念整理を行った。今後は、実際の流域への適用を行いながら、評価方法を改善していくことが課題である。また、流域の総合的環境指標としての可能性に目処が立てば、既存の指標と合わせて、分かりやすさやコミュニケーション特性に関する調査を行いたいと考えている。

¹ 糠谷真平(2002), 国土計画と圏域の考え方—流域との関連において—, 環境情報科学, 31 巻 4 号, pp.2-8

² 後藤忍・塩谷弘康(2005), 広瀬川における流域

連携, 阿武隈川流域総合調査プロジェクト 2004 年度活動報告書, pp.34-86

³ 日本学術振興会・和田プロジェクト編 (2002), 『流域管理のための総合調査マニュアル』, 384pp

⁴ 原田茂樹・山田譲・金再奎・森野真理・内藤正明(2001), 琵琶湖集水域における環境影響評価手法に関する研究, 環境システム研究論文集, vol.29, pp.291-297

⁵ 大西文秀・増田昇・安部大就・西脇園博・杉本三千雄・佐藤吉之(1995), 集水域を単位とした環境容量を求める新しい試み, 環境情報科学, 24 巻 1 号, pp59-71

⁶ 澤田信一・古川洋・佐藤大輔(1999), 岩木川流域の水収支への人間活動による影響の定量的評価, 環境科学会誌, 12(2), pp.171-183

⁷ 三浦真吾・相崎守弘・松重一夫(2004), GIS を用いた流域管理—原単位法を用いて算定した排出負荷量の評価—, 環境科学会誌, 17 (2), pp.109-119

⁸ 国土交通省河川局河川環境課(2005), 『今後の河川水質管理の指標について(案)』

⁹ 国土交通省河川局河川環境課(2004), 全国の河川における「フレッシュ度」について, http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha04/05/051203_2_.html

¹⁰ A. K. Chapagain & A. Y. Hoekstra(2004), 'Water Footprints of Nations' Volume 1, Value of Water Research Report Series No.16

¹¹ 環境省(2006), 『第三次環境基本計画』 http://www.env.go.jp/policy/kihon_keikaku/thirdplan01.html

¹² Mathis Wackernagel & William Rees(1996), 'Our EcologicalFootprint', New Society Publishers

¹³ OECD(2005), 'Key Environmental Indicators', <http://www.oecd.org/dataoecd/20/40/37551205.pdf>

¹⁴ United Nations(2001), 'Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies'

¹⁵ United Nations Division for Sustainable Development, 'Third, Revised CSD Indicators of Sustainable Development, Fact Sheet', 4 January 2007, <http://www.un.org/esa/sustdev/natlinfo/indicators/factSheet.pdf>

¹⁶ WWF Japan ホームページ, <http://www.wwf.or.jp/activity/lib/lpr/lpr2004/question.htm>

¹⁷ 虫明功臣(2005), 流域圏における水循環系の健全化、「自然と共生した流域圏・都市の再生」ワークショップ実行委員会編著『自然と共生した流域圏・都市の再生』, 山海堂, pp.151-161

¹⁸ 国土交通省土地・水資源局水資源部編(2006), 『平成 18 年版 日本の水資源』, 国立印刷局

¹⁹ 福島県(2006), 『平成 16 年度 水質年報』

²⁰ WWF(2006), 'Living Planet Report 2006'