

13. 阿武隈川流域の降雨変化と土砂生産特性の解析

伊藤 圭祐^{1*}・紺野 和広¹・川越 清樹¹・佐藤 裕美¹

¹福島大学共生システム理工学類 (〒960-1296 福島県福島市金谷川1)

* E-mail: kawagoe@sss.fukushima-u.ac.jp

流域における降雨、および流量に応じた浮遊砂の特性を求めると同時に、土砂の質的な評価を行うための基礎調査として浮遊砂を化学的に把握する試みに取り組んだ。その結果として、年々の浮遊砂の流出傾向、融雪や降雨に従う季節に応じた流出特徴、異常出水に応じた空間的な浮遊砂の変動傾向が明らかにされた。具体的には、福島市街地から下流側は2000年代に変化することで浮遊砂の負荷量が増加している傾向、5月と8月にSS濃度の高まりが認められること、火山性の浮遊砂が認められることである。今後、追跡調査を実施し、更に緻密な時空間分布、土砂生産源を明らかにする調査を継続する。

Key Words : *Extrem rain fall, Sem analysis, Sediment control system in basin*

1. はじめに

流域内の水循環から駆動される土砂による生産、移動、堆積の過程は、地表浅層の地殻活動であり、国土形成を担う物理現象である。流域の土砂の動態は、国土形成にとどまらず、水域に接して社会活動をなす人間や、水域で居住、そして連鎖する生態等にも関わるものである。そのため、流域に関わる生命体の便益と損失に影響を及ぼしているといえる。従来、治水、利水のニーズに応じて砂防、ダム貯水池、河道、海岸毎に個別の水域開発が進められてきた。個別の水域開発は、直接の事業対象地に便益をもたらす一方で、水循環で関連付けられる間接的な領域に損失を与えることも多いものであった。内陸地域の砂防対策が海岸域の砂浜減少に関与する土砂問題はこの事例に含まれる。こうした水域で間接的に生ずる土砂問題に対して、水系一貫の土砂管理が提案、および展開された¹⁾。具体的には「流す砂防技術」、「ダムの排砂技術」、「海岸養浜」等による「流砂系」に関わる問題の改善、環境の維持保全が取り組まれている。しかしながら、改善されつつある「流砂系」の総合土砂管理にも多様な地球環境、および社会の変化に応じた新たな課題も浮上している。地球環境変化として近年の重点的問題である気候システムの温暖化を例にすると、数値気候モデルから予見される短時間の降雨量増大、多降雨頻度の増加が土砂生産量を促進させること²⁾、海面上昇が海浜の減少を加速させること³⁾を指摘している。事例に

示される多様な地球環境変化に対応するため、事前に影響を見積るための数値解析を行うことが効果的である。

また、解析結果を基に総合土砂管理における適応策を計画、設計することが重要となる。流砂系に関わる数値計算手法として、kinematic wave法を用いて土砂流出追跡させる流出モデル⁴⁾、流域を土砂生産域に設定して斜面と土砂輸送域としての河道を分類させた流域スケール数値モデル⁵⁾など存在するが、こうした流出解析に関連付けられたモデルに「流砂系」の駆動要因となる降雨量の変化を入力することで、将来への土砂の影響を見積もることが可能になる。また、緻密な土砂観測を基に土地被覆、流出量の関係を定式化して流域の固有性を把握する研究も取り組まれている⁶⁾が、この結果も将来見込まれる流出量を求めることで将来的な土砂動態を予測できる有効な手法となりえる。しかしながら、これらの数値解析は、全て物理的過程に応じて土砂動態を把握することに着目したものであり、求められる解も量的なものに特化している。地球環境変化も含めた影響を見積もるためには、流域の固有性を見据えて、土砂の「質的」な部分も探求する必要がある。土砂の質的評価は、土砂の生産源の追跡も可能にするため、より効率的な適応策の検討にも利用できる可能性を持つ。

以上の背景をふまえ本研究では、流域における降雨、および流量に応じた浮遊砂の特性を求めると同時に、土砂の質的な評価を行うための基礎調査として浮遊砂を化学的に把握する試みに取り組んだ。これらの研究を進

めることで、地球環境変動に応じた土砂問題予測への貢献をはかる意向である。

2. 研究対象領域と流砂系問題

研究対象領域として阿武隈川を設定した(図-1 参照)。阿武隈川は、那須連峰を水源に、福島県中通りから宮城県南部を流下しており、流域内に人口、資産の集中する市街地が連続的に位置する延長約240kmの河川である。約5,400km²の流域面積内には、森林56%、水田16%、畑14%、建物用地・幹線交通用地7%、荒地・内水地・その他7%の多様な土地利用が認められる。本流域西側には、奥羽山脈が急峻な地形勾配を成しながら南北方向に連なる。地質的に火山噴出物が広く分布するが、支流より火山起源の未固結の土砂が押し出され、山麓地帯に扇状地が発達する。本流域東側には、花崗岩質の阿武隈山地丘陵からなり、比較的緩勾配の支川が流下する。阿武隈川本川の河床勾配は、郡山盆地、福島盆地付近で緩く、双方の間に位置する二本松市付近で局所的急勾配を呈している。

阿武隈川流域内の土砂問題に関連した現象を示すと、①河川の河床上昇、②河道の土砂堆積による樹林面積の拡大、③海岸浸食、④栄養塩類負荷等が挙げられている。また、これらの各々より波及する土砂問題を解消するために様々な研究が取り組まれている。例えば、阿武隈川河口砂州の変形過程の解析⁷⁾、土砂に付着して輸送される栄養塩の過剰な海域流出に伴う赤潮の影響や砂浜減少を見据えた土砂輸送および収支の解析⁸⁾などである。数値計算、土砂粒径観測等の結果を利用し、先端的な取り組みを含みながら量的な土砂動態の把握を試みている。一方、特に栄養塩類に関わる内容の中で、土砂生産のみに限らず汚濁物質も含まれるような水質形成に関わる解析⁹⁾も進められている。こうした解析を考慮した場合、量的な土砂動態だけではなく「質的」な側面も踏まえた土砂解析が必要と解釈される。また、東日本大震災に関連して原発事故に伴う放射線問題が当該流域で生じているが、こうした放射性物質の付着を考慮しても土砂の質的な動態把握が必要とされている。

3. 浮遊砂解析手法

本研究では、以下の取り組みを行った

- ① 阿武隈流域内で観測された雨量、流量、および浮遊砂のデータを利用し、経年、月毎のSS(浮遊砂)の特徴、および異常出水時(平成23年9月19～22日)のSSの状況について分析を行い、流域内の浮遊砂特徴をまとめた。(浮遊砂データによる変化傾向の分析)

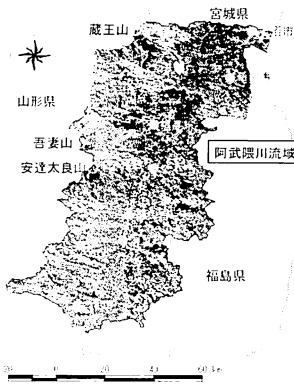


図-1 解析領域位置図

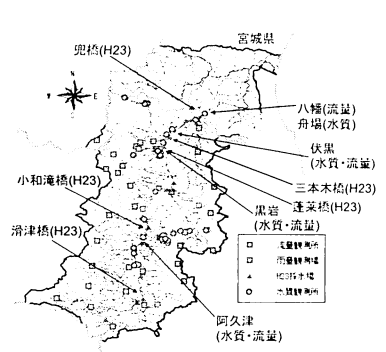


図-2 データ観測所位置図

表-1 土壌の元素組成含有率構成表

元 素	地殻	土壌
酸素 O2	47.7%	48.9%
珪素 Si	27.9%	33.0%
アルミニウム Al	8.3%	7.1%
鉄 Fe	4.1%	4.0%
炭素 C	0.0%	2.0%
カルシウム Ca	4.1%	1.5%
カリウム K	2.1%	1.4%
ナトリウム Na	2.3%	0.5%
マグネシウム Mg	2.3%	0.5%
その他	1.2%	2.1%

- ② 近年の最大出水である平成23年台風15号のSSについてSEM(走査式電子顕微鏡)を用いて元素分析を行い解析結果をまとめた。(SEMによる分析)

取り組み①について、国土交通省水文水質データベース(参照URL: <http://www1.river.go.jp/>)、および阿武隈川流砂系調査業務¹⁰⁾より取得可能できるデータを基に分析を試みた。データ取得された観測所位置を図-2に示す。なお既往観測より得られた流量と浮遊土砂の関係式(L-Q式)、経年の月別浮遊砂の変動状況、異常出水時の浮遊砂分析より流域内の浮遊砂特徴を整理した。

取り組み②について、なお、元素分析よりもとめられる項目はO2, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Feである。参考までに、表-1は浅見により整理された地殻、土壌の元素組成の構成を示す¹¹⁾。この一般的な組成との比較分析などで更に緻密な解析を行うことも可能である。

取り組み①、②の解析結果を総合的に整理することで、阿武隈川流域の浮遊砂の「質」に関わる評価を行い、浮遊砂特性に関わる結果を考察としてまとめた。

4. 浮遊砂データによる変化傾向の分析

(1) 流量と浮遊砂の関係の分析

1989年から2011年までの河川流量、浮遊砂のデータを利用して日平均流量(m³/s)と日当り浮遊砂量(ton/day)の関係図を作成し、L-Q式を求めた。また、近年の浮遊砂の傾向を明らかにするため、1990年以降(1989年も便宜的に1990年に含んだ)と2000年以降のL-Q式を比較した。検討対象地点は阿武隈川本川の舟場(流量データのみ八幡

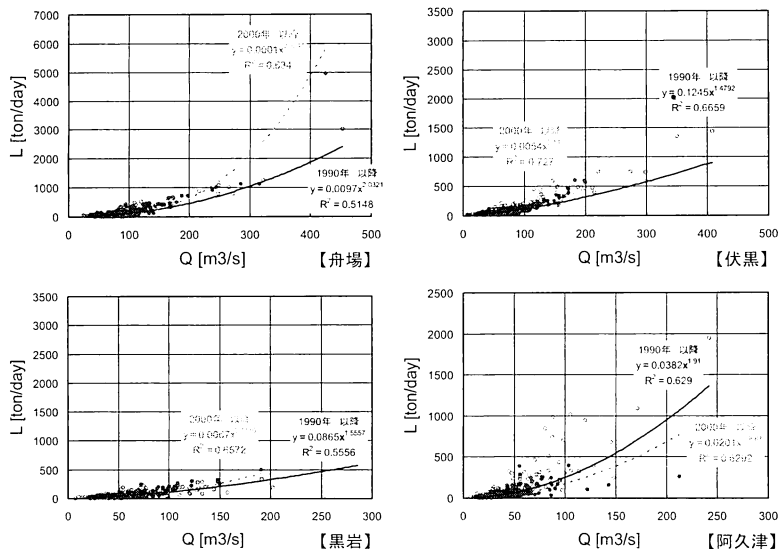


図-3 日平均流量と浮遊砂量の関係図

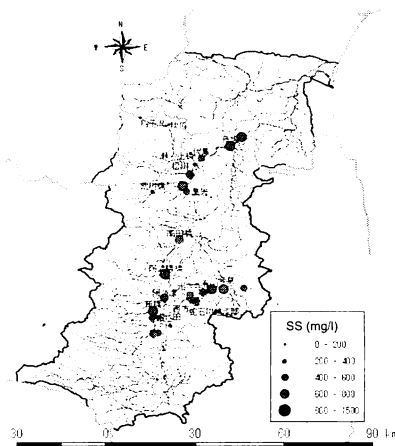


図-4 年平均SS濃度の空間分布

を利用), 伏黒, 黒岩, 阿久津とした。

図-3に各観測所の関係図とL-Q式を示す。各検討対象地点とも決定係数R2で約0.5から0.7の強い相関関係が認められており、降雨、融雪に伴う流量増加に従って浮遊砂量も増加する傾向が明らかにされた。決定係数やL-Q式の係数から上下流の位置的な変化による規則性は認められず、概ね各ポイントとも同様の傾向が示されている。なお、時間変化に伴うLQ式の状況を比較すると、福島市街地から下流側は2000年代に変化することで浮遊砂の負荷量が増加している傾向が見てとれる。対して郡山付近に位置する阿久津に関しては2000年代になり浮遊砂の負荷量が減少していることが明らかにされた。この傾向は、河川構造物による土砂制御の効果、もしくは土地利用状況に起因した浮遊砂負荷量が福島市側と郡山市側で異なっている可能性を示唆するものである。

(2) 浮遊砂時空間的变化の分析

阿武隈川流域内で常時水質計測されている観測所の浮遊砂の時間、および空間的な変化を求めるため、1989年以降のデータを利用し、平年的な空間情報と月毎の時系列的特徴を示す情報のデータ分析に取り組んだ。なお、浮遊砂についてはSS濃度で示している。

図-4は年平均浮遊砂量の空間情報である。SS濃度の高まる地域として、阿武隈本川の郡山市から須賀川市内、三春ダム上流の大滝根川流域、荒川、松川下流域の阿武隈合流付近、福島県から宮城県の県境付近が挙げられる。土地利用として、阿武隈本川の郡山市から須賀川市内は水田地帯、三春ダム上流の大滝根川流域は畜産地帯を多く含む地域である。河道への流出過程の中で農業関連に由来した浮遊砂が多く認められている可能性が示唆される。荒川、松川下流域の阿武隈合流付近は前者の流域と比較すると土地被覆として農業地帯の少ない流域である。その一方で、火山性堆積物の地質分布をなし、急峻

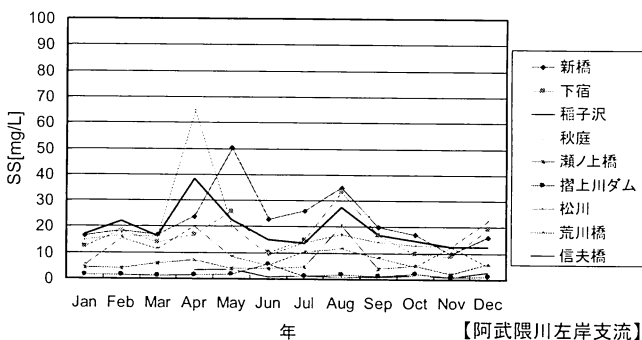
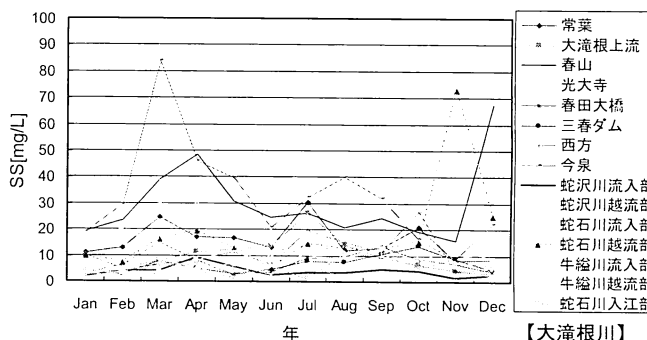
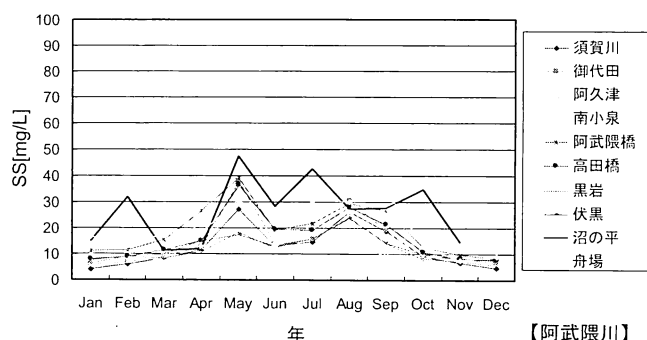
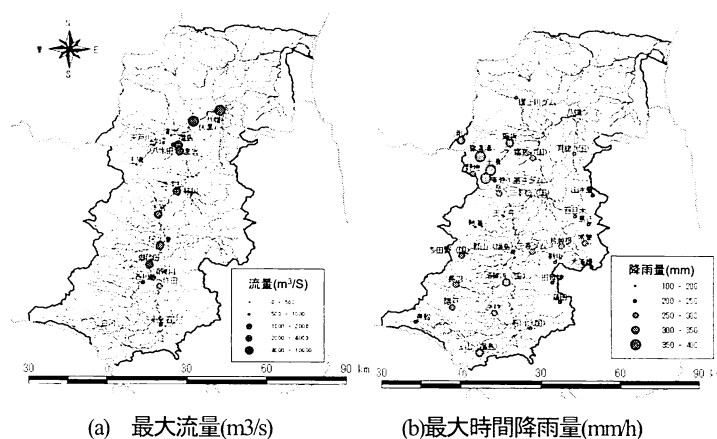


図-5 SS濃度の月別変化

な地形勾配をなす流域であることから、斜面崩壊などの土砂生産が活発な地域といわれている。土砂生産性の高さから、これら支川と阿武隈川合流部付近の河床は著しく上昇している状況も把握されている。こうした背景か

らも斜面崩壊などの土砂生産に関連付けられる浮遊砂である可能性が示唆される。福島県から宮城県の間境付近に関しては、分析対象領域中の最下流であるが、この地域周辺も水田地帯であるため、農業関連に由来した浮遊砂の可能性が示唆される。これらに列挙されるSS濃度の高まる地域一方で福島市街地周辺でSS濃度が低い傾向が見てとれる。木内らは、荒川と阿武隈川本川の試料を混合するとリン酸態リン総量が混合前に較べて減少することを明らかにしている。また、この減少量は荒川の混合量やSS量が高くなるほど大きくなる傾向を示している¹²⁾。阿武隈川本川の浮遊砂がリン酸態リンに関連付けられていると仮定すれば、火山性土壌に含まれるAlに由来する浮遊砂が結合、沈下し、河川底質になることも想定される。そのため、火山性土壌の影響により福島市内の本川浮遊砂も変化している可能性が示唆される。また、福島市街地よりやや上流に存在する電力ダム施設への堆砂としての影響も推測される。

図-5は月毎の平均SS濃度を阿武隈川本川、大滝根川流域、阿武隈川左岸支流群毎に整理したものである。阿武隈川本線のSS濃度の傾向は概ね同様な傾向を示しており、5月、8月の2ヶ月にSS濃度のピークが認められる。なお、5月は融雪、8月は台風に伴う豪雨という気象状況と関連付けることができるため、こうした降水、出水の過程の中でSS濃度が高まる可能性を示している。また、5月と8月のピーク傾向を比較すると、5月の方がSS濃度の高い傾向を示すが、これは5月に融雪出水の方が比較的安定的である影響を受けている。平均的評価において、8月のSS濃度変化は台風接近、上陸の豪雨発生イベント回数に従うため、1イベントあたりの濃度の高まり幅が大きいものの、豪雨イベントが生じない限り濃度は高まらない。全データで日毎のSS濃度の比較を行うと上位には8月中のものが多くなる一方で、豪雨が生じない場合には下位になるものの存在している。8月には、豪雨イベント発生有無による濃度のばらつきが認められている。なお、阿武隈川左岸支流群も阿武隈川本川と類似したSS濃度の時系列変化傾向を示している。ただし、融雪時期のSS濃度ピークは4月になるケースも存在している。阿武隈川本川と阿武隈川左岸支流群で認められる融雪時期のSS濃度高まりの差異に関して、阿武隈川左岸支流群では、融雪時期の起因する土砂生産影響が直接的に浮遊砂に関わる一方で、阿武隈川本川の浮遊砂は融雪水に関わる土地利用の影響も含まれているものと推測される。例としては、融雪を水田に引水することで代掻きを行う等の自然現象と利水活動によるものなどが挙げられ、規則的な濃度上昇が生じやすくなる過程が影響している可能性もある。大滝根川流域に関すれば、観測地域によって変化傾向が異なることが示されている。こう



(a) 最大流量(m³/s) (b)最大時間降雨量(mm/h)

図-6 台風15号時の流量と降雨量状況

した変化の背景として、個別水系の土地被覆、土地利用の影響が及んでいると推測される。

(3) 2011年9月の台風15号による浮遊砂変化の分析

平成23年9月19日から22日の台風15号時には、阿武隈川本川で既往最大の水位が各所で認められた。この時の気象、河況を異常出水イベントとして設定し、浮遊砂変化の分析を行った。参考までに、この期間の流量と降水状況を図-6に示す。流量として、福島県内の阿武隈川最下流の流量観測地点八幡で最大流量5694.82m³/sが2011年9月22日4:00に記録されており、9月21日20時から9月22日4:00の間に福島県の流量観測所で最大流量が認められている。日降雨量として流域内全域で約200mmから400mmが認められている。最大日降雨量は福島県福島市土湯温泉の土湯観測所で397mmと記録されている。なお、時間当たり降雨量としては、流域内全域で約25mm/hだが、最大日降雨量は福島県須賀川市の須賀川観測所で45mmと記録されている。基本的に阿武隈川本川上流側で時間当たり降雨量が多い傾向を示している。

最大流量発生時のものではなかったものの、その約4時間後から採水が取り組まれ、福島県内の阿武隈川流域で21箇所の試料が得られた。また、概ねで22日8:00から10:30(以下 T1)、10:00から12:30(T2)、12:30から15:00(T3)、15:00から17:00(T4)の4つの時間帯で試料は採取されている。この結果は図-7に示すとおりである。各時間帯共に福島市から伊達市におよぶ福島県内の阿武隈川本川下流側地点で高いSS濃度が認められている。なお、T1に福島市から伊達市におよぶ阿武隈川本川下流側の採水地点で850mg/lから1200mg/lのSS濃度が認められ、徳江橋にて最大の1210mg/lが記録された。T2に福島市から伊達市エリアのSS濃度は600mg/lから900mg/lに低減する。T3に関しては、T1からT2への低減幅が小さく福島市から伊達市エリアのSS濃度は400mg/lから800mg/lにとどまる。T4では、福島市から伊達市におよぶ福島県内の阿武隈川本川下流側地点で認められたSS濃度の高さが、他地点と

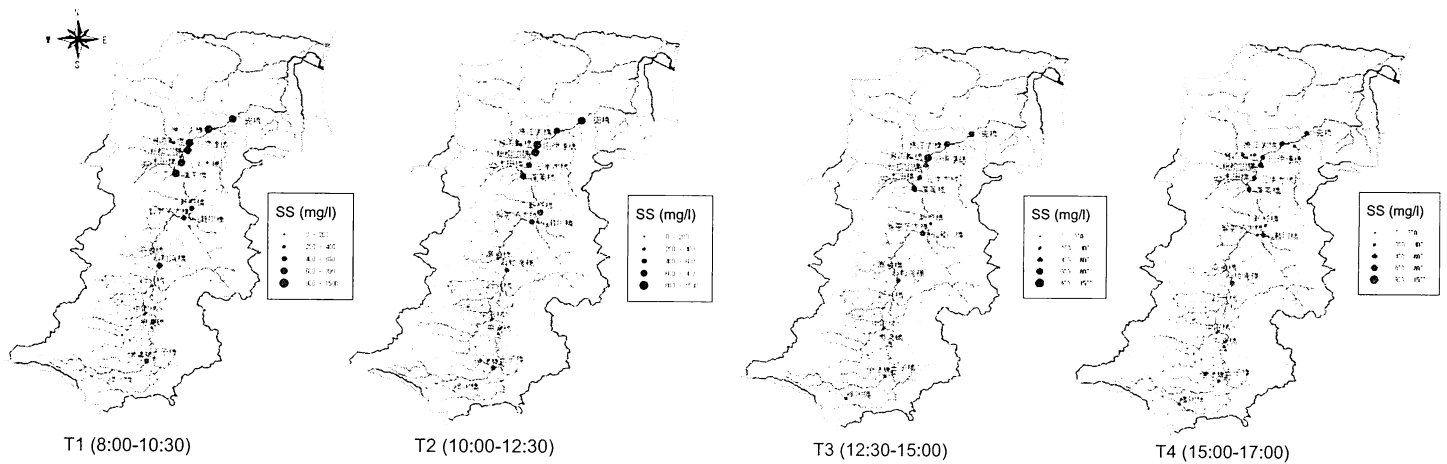


図-7 台風15号時のSS濃度

比較して著しいものではなく、むしろ阿武隈川右岸の支流である移川で最大SS濃度が認められている状況にある。

SS濃度の結果から、今回の豪雨イベントに關しての浮遊砂は、福島市内の阿武隈川支流からの流出の可能性を示している。降雨量の傾向を見ても阿武隈川左岸側での降雨量増大が明らかにされており、荒川、松川での雨食などの影響により活発に土砂流出された過程が推測される。

5. SEMによる元素分析

平成23年台風15号のSSについてSEM(走査式電子顕微鏡)を用いて元素分析を行い解析結果をまとめた。図-8はSEM分析の写真事例、図-9は分析結果総括図である(ただし、O2は除いた結果である)。

概ねの地点で、Siが45%程度、Feが30%弱、Alが10%程度の構成をなしており、一般的な地殻(O2除きでSi約53%、Fe約8%、Al約15%)、土壌(O2除きでSi約64%、Fe約8%、Al約14%)と比較すると、Si、Alが少なく、Feの多い元素組成を成している。総じて、Siの少なさより粘土分含有が少なく、Feの大きさより火山性の土砂含有、および花崗岩起源の浮遊砂が多い傾向を示している。ただし、Alも火山性の土砂含有に含まれているものであり、ややFeに偏りのある火山性土壌である構成であることが示唆される。

空間的な関係性より、以下の①から③の特徴が認められる。

- ① 三本木橋、蓬萊橋はSiが約55%で、比較的に大きな割合を示している。
- ② 広瀬橋はFeの割合が42%と比較的に大きな割合を示す。
- ③ 小和滝橋は先に示すSi、Fe、Al以外の元素割合が比較

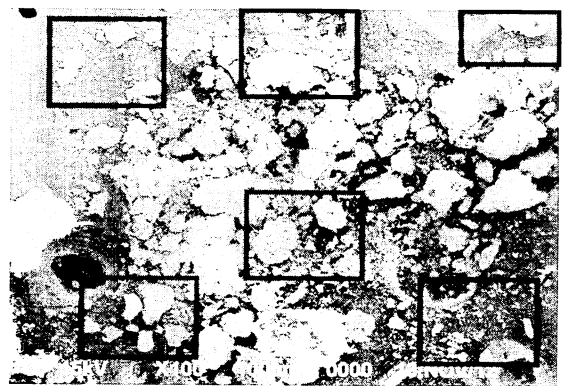


図-8 SEM分析の事例

的に大きい。

これら空間的なSiの広がりに関しては粘土鉱物の主要存在量であることから、三本木橋から小和滝橋までの支川では土砂由来の浮遊物質の多さを示唆している。また、広瀬橋のFeに関しては、阿武隈高原の花崗岩の有色鉱物由来の浮遊砂が多く流出している。小和滝橋のSi、Fe、Al以外の元素割合に関しては、土砂以外の浮遊物質の流出を示唆している。蓬萊橋 - 新舟橋、小和滝橋 - 行合橋の急激なSS濃度の増加は各支川、河川構造物から土砂流出を推測させるが、小和滝橋の元素組成分析より、小和滝橋上流では土砂以外の懸濁物質の流出も示唆される。一方、蓬萊橋 - 新舟橋に関しては、Siの傾向より粘土由来の物質が多い結果が得られており、奥羽山脈側に分布する火山性堆積物から粘土成分の流出が示唆される。

傾向として、地域に応じた元素特性が認められており、今後この流出経路を現地調査、地形地質・土地被覆情報と検証し、浮遊砂の発生源を追跡していく必要がある。現在も継続して採水、分析を行っているため、その結果を求めて浮遊砂流出過程の結論を明らかにする意向である。

6. 結 論

流域における降雨、および流量に応じた浮遊砂の特性を求めると同時に、土砂の質的な評価を行うための基礎調査として浮遊砂を化学的に把握する試みに取り組んだ。その結果として、年々の浮遊砂の流出傾向、融雪や降雨に従う季節に応じた流出特徴、異常出水に応じた空間的な浮遊砂の変動傾向が明らかにされた。また、土砂生産源への追跡の可能性が認められた。今後は、継続計測と共に、周辺土地被覆、地形地質に着目した分析、解析を追跡して阿武隈川の土砂循環を検討する意向である。

謝辞：本研究の遂行において国土交通省福島河川国道事務所、日本工営株式会社の協力を得た。また、本研究の一部は、環境省の環境研究総合推進費（S-8）の支援により実施された。ここに謝意を表する。

参考文献

1) 水山高久：流砂系における土砂動態と土砂管理そして砂防、土木学会論文集Ⅱ, Vol.66, pp. 1-8, 2004..

2) 秋本嗣美・川越清樹・風間聡：数値気候モデルを用いた土砂生産量予測, 土木学会水工学論文集, No.53, pp. 655-660, 2009.

3) 吉田 惇・有働恵子・真野明：日本の5 海岸における過去の長期汀線変化特性と気候変動による将来の汀線変化予測, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.68, 1_1246-1_1250, 2012.

4) 徳田慎治・黒木幹男・板倉忠興：河道網を用いた浮遊砂モデルの構築とその適用, 土木学会水工学論文集, No.45, pp. 793-798, 2001.

5) 舩屋繁和・清水康之・ウォンササニット・村上泰啓：流域規模での洪水流出および土砂流出特性について, 土木学会水工学論文集, No.50, pp. 319-324, 2005.

6) 金 勲・丸谷知己・宮崎敏孝：山地流域における浮遊砂と掃流砂の流出変化, 砂防学会誌, Vol.55, pp. 21-32, 2003..

7) 沢本正樹・首藤伸夫・谷口哲也：阿武隈川河口砂州の変形過程, 土木学会論文集Ⅱ, Vol.8, pp. 179-188, 1987.

8) 富樫昇・真野明：阿武隈川の洪水時における浮遊土砂輸送, 土木学会水工学論文集, No.48, pp. 949-954, 2004.

9) 木内豪・虫明功臣：阿武隈川流域における平常時の水質と栄養塩負荷の実態, 土木学会水工学論文集, No.51, pp. 1177-1182, 2007.

10) 国土交通省福島河川国道事務所：阿武隈川流砂系調査検討業務 概要書, pp.31, 2012.

11) 岡崎正規・木村園子ドロテア・波多野隆介・豊田剛己・林健太郎：図説 日本の土壌, 朝倉書店, pp.174, 2010.

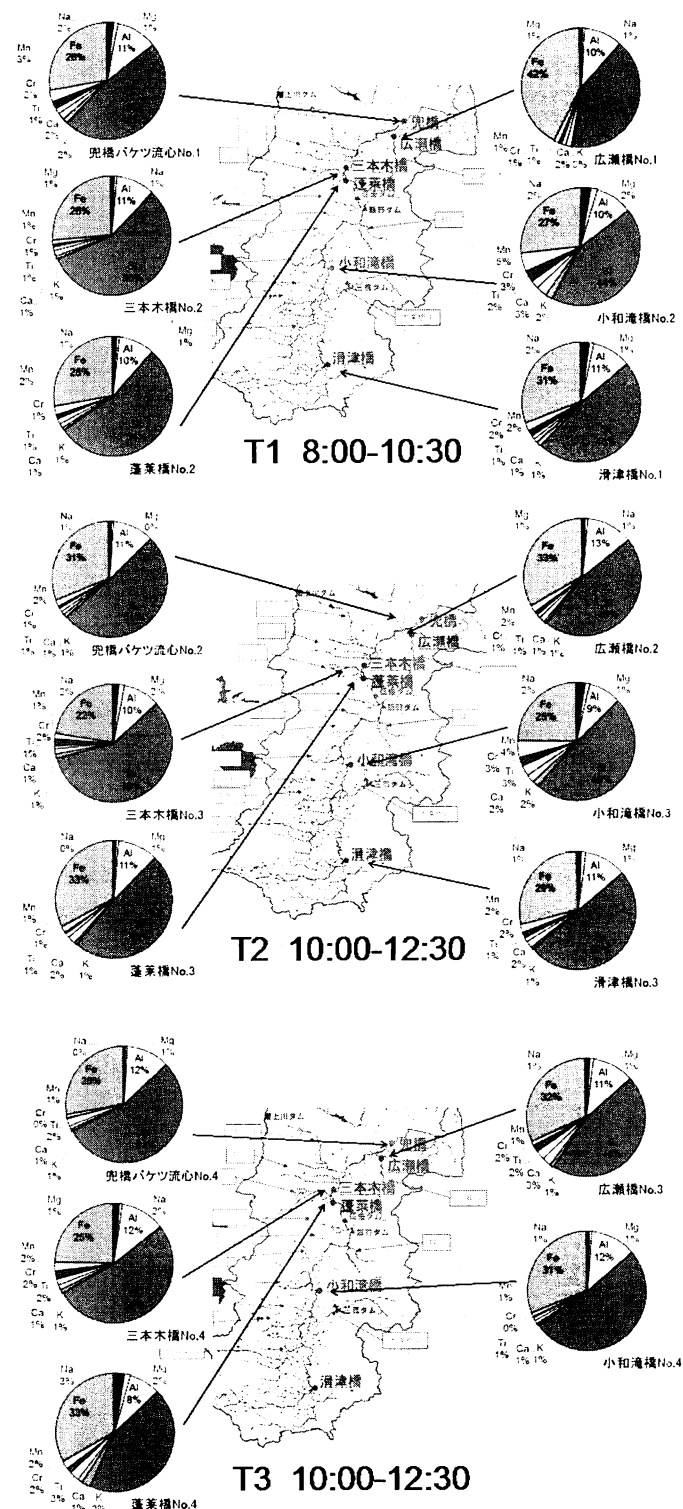


図-9 元素分析総括図

12) 木内豪・清野彩香：阿武隈川の支川合流によるリンの除去機能について, 河川技術論文集, Vol.15, pp.189-194, 2009.