

5. 阿武隈川河口での窒素・リンの輸送特性

Transport Characteristics of Nitrogen and Phosphorus at the Abukuma River Mouth

金野 修*・真野 明*

Osamu KONNO*, Akira MANO*

ABSTRACT ; This study has executed field observations and analyses on the nutrient transport at the river mouth. The measurements show the change of mixing layer by the sea water intrusion distance and the tidal phase. During flood, there is a well correlation between SS and nutrients. Major part of nitrogen and phosphorus during flood is found in fine particles in the flow. During ordinal flow salinity governs the concentration of nutrients.

KEYWORDS ; river mouth, nutrient, mixing

1.はじめに

沿岸域の環境を考える際に栄養塩による富栄養化は重要な問題である。窒素、リンを代表とする栄養塩は河川流域で人為的作用を受けて多量に排出される。河口は河川全域で排出される窒素・リンの情報が集約されたものが流れる場となる。つまり河口域での分布特性は流域特性の縮図といえるだろう。ところが河口域における栄養塩輸送メカニズムについては十分明らかになっていない。そこで本研究では、仙台湾に注ぐ阿武隈川を対象河川とし、流入負荷の大きくなる出水時と塩水遡上の影響を受ける平水時にそれぞれ河口で採水を行い窒素・リンの輸送特性を考察した。

阿武隈川は流域面積 5400km²、幹川流路延長 239km で仙台湾に注ぐ 2 番目に大きな川であり、湾域に対する水や土砂などの流入が最も大きい川である。平常時の流量が約 100～180m³/s である。また塩水は、最大で河口上流 11km まで遡上するが、通常は河口 10km 地点には 1982 年に完成した阿武隈大堰によりせき止められる。阿武隈川は河口近くで左右に蛇行しており、滞筋はさらに大きく蛇行するため、平面形状、横断形状、縦断形状とも複雑で、河口砂州による急拡と合わせて海水混合の要因となる。図 1 に阿武隈川河口周辺図を示す。

阿武隈川中流域と上流域における濁質や栄養塩については高橋¹⁾が浮遊土砂量と流量の関係や T-N、T-P の特性について報告している。

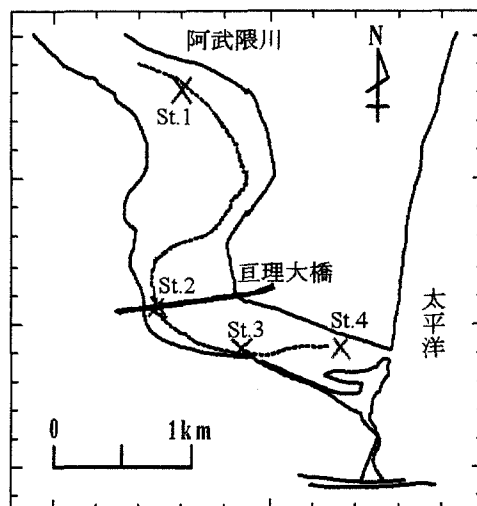
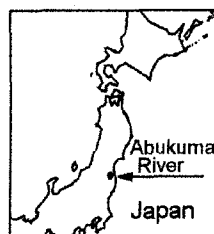


図 1 阿武隈川河口周辺図

*東北大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Tohoku University

2. 観測概要

出水時の観測は2000年7月8日、2001年9月11日に亘理大橋にて橋の上からの採水を行い、水質を分析した。採水した試料は実験室にてSS、粒度分布、栄養塩(総窒素(TN)、総リン(TP)、硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)、亜硝酸態窒素($\text{NO}_2\text{-N}$)、アンモニア態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)、リン酸($\text{PO}_4\text{-P}$))を分析した。採水した試料からは塩分が検出されなかったので出水時に塩水は河口外に押し流されているものと考えられる。溶存態の栄養塩は現地で $0.45\mu\text{m}$ のフィルターを用いてろ過を行いフィルターを通過した分とした。正味の懸濁態窒素に関してはTNからDTN(溶存無機態窒素と溶存有機態窒素の総量)を引いたものとなる。本研究にはすべての試料についてのDTNの分析は行っておらず、2001年11月15日の試料のうち一部についてDTNを計った。その結果DINの1~1.2倍の値を示した。本研究ではTN-DINを懸濁態の窒素として扱い、以後懸濁態窒素と記述する。リンも同様に懸濁態リンと記述されるものはTPから $\text{PO}_4\text{-P}$ を引いたものを表す。粒度分析にはレーザ回折散乱方式で粒径別に体積分布を求めるマイクロトラック粒度分析計を用いた。

平水時の水質観測は水位変動の大きくなる大潮の日を選び2000年7月15日、2001年7月7日、2001年11月15日に行った。調査は船をチャーターして干潮、上潮、満潮、下げ潮の各位相で河口から河口上流約6km地点まで移動して船上にて水質計と採水による観測を行った。観測地点はGPSを用いて把握した。採水は各観測点において水面、混合層内で2~5試料、河床付近でそれぞれ行った。水質計による観測には多項目水質計(塩分濃度、濁度、水温)を用い、また採水した試料は実験室にてSS、粒度分布、栄養塩濃度を分析した。

2001年11月2日には河口上流8km地点の阿武隈大橋と河口外における水質調査を行った。これは上流側の水質と沿岸域での水質を把握するために行った。

3. 結果

3.1 出水時観測結果

観測は河口上流8km地点にある岩沼流量観測地点で水位が2mを越えてから2~3時間後に開始した。2000年7月8日は8:00から1時間おきに18:00まで11回、2001年9月11日は14:00から2時間おきに翌9日12:00まで12回採水を行った。採水はそれぞれの時刻で水面下1m付近のものと河床から1mの2つの試料を採水した。以後これら2試料を平均したものを示す。図2に流量とSSの経時変化を示す。2000年の出水では最大流量は21:00頃に約 $2800\text{m}^3/\text{s}$ を記録した。SSの経時変化では流量が約 $1000\text{m}^3/\text{s}$ を越えた12:00から急増した。また流量が増加を続ける15:00頃にピークが見られその後は減少している。2001年の出水時の最大流量は約 $1750\text{m}^3/\text{s}$ であった。

SSは流量のピークから4時間ほど遅れる形でピークが見られた。2000年の出水時には今まで阿武隈川で報告されている出水と同様に右回り、つまり出水初期にSSを多く含んだ流出が先行して起こる現象が見られた。一方2001年の出水では左回りの分布変動を見せた。今までの調査で観測されなかった左回りの変動が見られたのは興味深い現象だといえる。

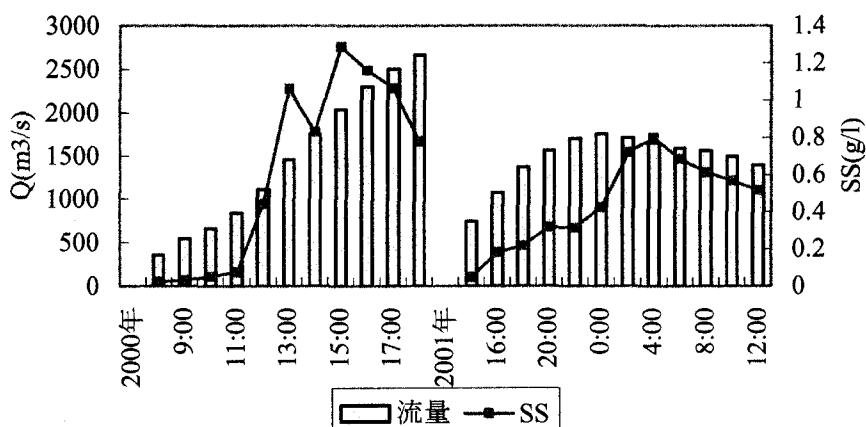


図2 流量とSSの経時変化

図3に流量とTNの関係を示す。2000年出水時には流量が1000m³/sを越えたあたりでTNが急増しているのがわかる。また2001年の出水では左回りの変動が見られる。これらの変動はSSの時とほぼ同じ挙動を見せる。

図4に流量とTPの関係を示す。2001年の出水時においてTPはSSやTNとは異なり2000年の出水時のものに比べて高濃度の出水が見られた。2001年のTPの変動は左回りである。

以下に2000年、2001年出水時の観測結果から得られた栄養塩濃度と流量の関係を示す。

$$TN \propto Q^{0.6 \sim 0.8},$$

$$TP \propto Q^{1.1 \sim 2.3}$$

この関係により流入負荷は濃度に流量をかけたものなので以下になる。

$$Flux_{TN} \propto Q^{1.6 \sim 1.8},$$

$$Flux_{TP} \propto Q^{2.1 \sim 3.3}$$

出水時に流量が20倍になると流入負荷は400倍以上になり、1回の出水で1年以上の栄養塩の流入負荷があるものと考えられる。

図5、図6に2000年出水時のそれぞれ窒素とリンの形態の経時変化を示す。2001年の出水時のものも考慮するとTNに占める懸濁態窒素の割合は初期に20～50%だったものが流量が増えるにつれ増加していき、70%近くまで増加した。またリンは初期に70～90%が懸濁態であったが流量が増えると最大で99%が懸濁態のリンとなる。出水時には栄養塩の大部分が懸濁態に付着する形態で流入していることがわかる。

出水時にはSSによって多くの懸濁態の栄養塩が輸送されてくるが栄養塩はSS粒子のどこの部分を占めるのだろうか。まずは、SSの粒度分布に注目する。

図7に2000年出水時におけるSSの粒度分布を示す。折れ線が粒径加積曲線を表し、棒グラフは各粒径における頻度を表す。これによると2000年出水時には粒径がほぼ一定だった、また2001年の出水時には出水初期は徐々に粒径大きくなっていき出水中期からは大きな変化は見られなかった。

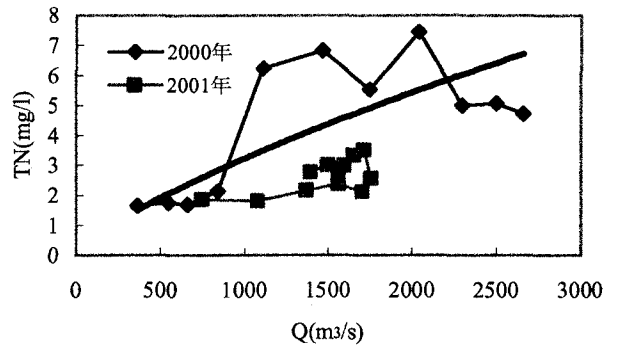


図3 流量と総窒素の関係

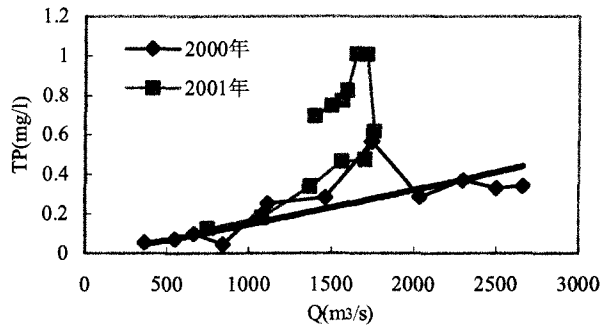


図4 流量と総リンの関係

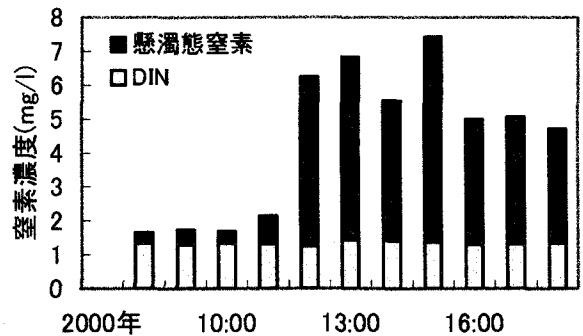


図5 窒素の形態の経時変化

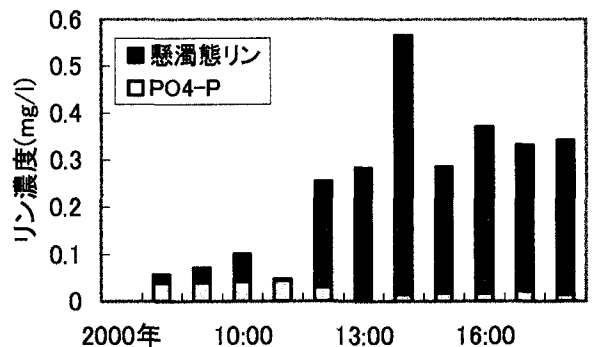


図6 リンの形態の経時変化

図 8 に試料 1 ℓ 当り SS 総表面積と SS 総体積の関係を示す。ここで SS 総体積は浮遊物質の密度を 2.65g/cm³ と仮定して SS を密度で割ったものを表す。SS 総表面積は粒度分布をもとに体積と表面積の関係から求めた。2000 年出水時には直線にのっており、SS 総表面積と SS 総体積の間に比例関係がある。2001 年の出水時ではやや曲線になっているが、比例に近い関係がみられる。

図 9 に懸濁態窒素と SS 総体積の関係を示す。表 1 より懸濁態窒素と SS 総体積、SS 総表面積の相関をそれぞれとったときにそれぞれ良い相関を見せるが懸濁態窒素と SS 総体積の方が相関がやや良かった。出水規模の小さかった 2001 年のものは 2000 年の出水時に比べ良い相関が見られる。

同様にして懸濁態リンは SS 総表面積とも SS 総体積とも相関が良かったが、懸濁態窒素が SS 総体積との相関の方がよかったのに対し懸濁態リンは 2000 年では表面積とまた 2001 年では体積との相関の方が良かった。

以上のことから出水時において懸濁態窒素は SS 総体積と相関が良い、つまり SS 全体に分布していると考えられる。また懸濁態リンについては SS 総表面積との相関が良いことから SS 表面に付着する形で輸送されることがわかる。

図 10 に出水時の試料 1 ℓ 当りの SS 総体積と単位体積当り懸濁態窒素(懸濁態窒素を SS 総体積で除したものの)の関係を示す。またこれと同様に図 11 に平水時 2001 年 7 月 7 日において淡水中の SS 単位体積当り懸濁態窒素がほぼ一樣になる淡水試料 1 ℓ 当りの SS 総体積と単位体積当り懸濁態窒素量の関係を示す。これにより出水時よりも平水時のほうが SS 単位体積当りに付着している懸濁態濃度が高いことがわかる。同様にして SS 単位表面積当り懸濁態リンに関しても平水時のほうが SS 単位表面積当りに付着している量が多かった。平水時に SS 単位体積あるいは単位表面積に対する懸濁体栄養塩濃度が高いことから平水時には高濃度の栄養塩を付着させる要因となるソースの存在が考えられる。

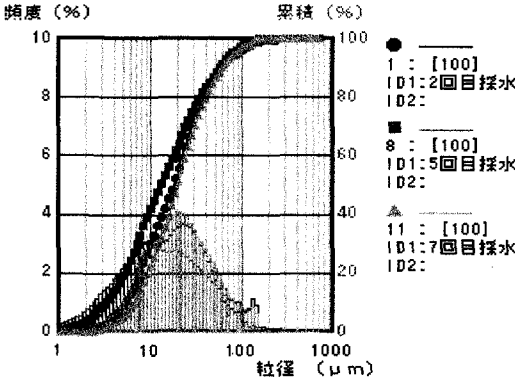


図 7 SS の粒度分布

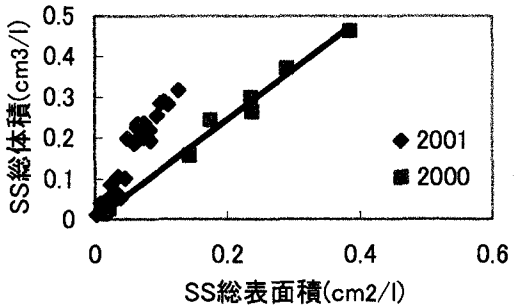


図 8 SS 総表面積と総体積の関係

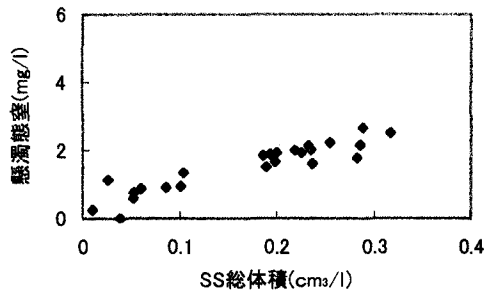


図 9 SS 総体積と懸濁態窒素の関係

表 1 懸濁態栄養塩と SS の相関

相関係数		懸濁態窒素	懸濁態リン
2000	SS 総体積	0.713	0.746
	SS 総表面積	0.705	0.757
2001	SS 総体積	0.926	0.968
	SS 総表面積	0.908	0.908

3.2 平水時観測結果

平水時における調査結果においてTN,TPは各観測点で鉛直方向に塩分濃度が増加するにつれ減少する傾向が見られた。鉛直方向に最も変動が現れる塩分濃度と栄養塩の関係について考える必要がある。

図12は2001年11月2日に行った阿武隈大橋と海域での調査における塩分濃度とTNを表す。海域での窒素濃度に比べ陸域の濃度は8倍以上の値を示した。同様にしてリンに関しては海域に比べ陸域のほうが2倍近くの値を示した。よって窒素・リン共に陸域から由来する。その他上流から流下してきた栄養塩は塩水によって希釈され溶存無機態窒素には特に塩分濃度との強い相関が見られた。窒素に関して塩水と淡水との混合では溶存態窒素の方が希釈され易く、懸濁態窒素に関しては希釈のほかに沈降現象によるものと考えられる分布にばらつきが見られた。

図13に平水時の塩分濃度と窒素の形態との関係を示す。上流域ではTNに対して懸濁態窒素の占める割合は20~40%となっており、下流に向かって塩分濃度が増加するにつれ溶存無機態窒素の希釈により懸濁態の割合が20~80%に増加する。同様にしてリンは上流で懸濁態リンの割合が50~90%なのに対して海域では60~90%となりこちらも懸濁態の割合がやや増加した。よって平水時に河口域において窒素は溶存無機態、リンは懸濁態の形態で輸送されるものの挙動が重要になるといえる。

図14に平水時の塩分濃度、SS、懸濁態リンの鉛直分布の例を示す。縦軸は深さを表す。混合層内でSS、懸濁態リン共にピークが見られる。懸濁態リンの沈降粒子の一部が蓄積しているからだと考えられ、平水時において塩水遡上によりブロック化した懸濁態栄養塩の沈降粒子は、塩水層の密度が高いため、もしくは塩化物イオンの影響により混合層内に蓄積しやすいものと考えられる。

図15に2001年11月15日の上潮時、St.2における試料の粒径加積曲線を示す。縦軸は体積百分率(%)である。グラフ右側のID1は採水した深さをID2は塩分濃度を表す。干潮時には混合層上部に粒度の大きな分布が見られる。この粒度の大きな分布は上潮時には混合層のやや中央より移動していき満潮時には一様に近い分布を示した。これは混合により凝集した粒子が時間と共に沈降していくことを示していると考えられる。

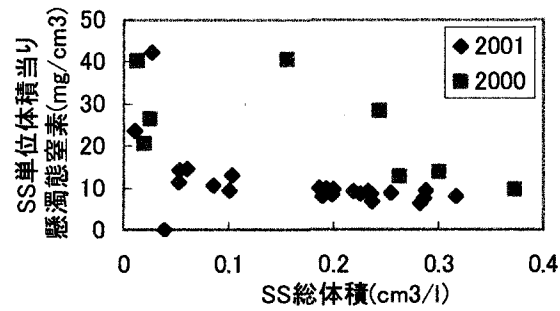


図10 出水時：SS 総体積とSS 単位体積当り懸濁態窒素の関係

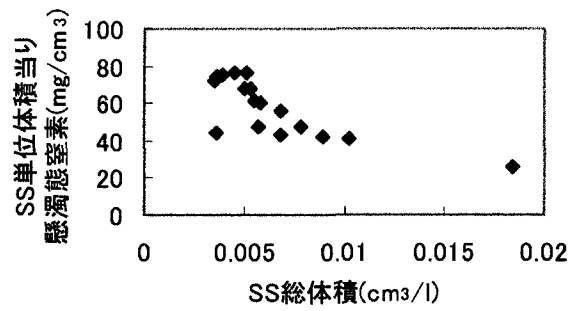


図11 平水時：SS 総体積とSS 単位体積当り懸濁態窒素の関係

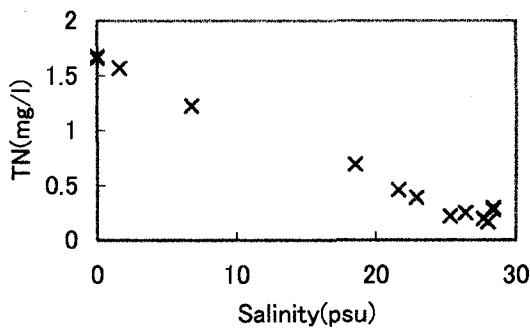


図12 河川上流と海域の塩分濃度とTNの関係

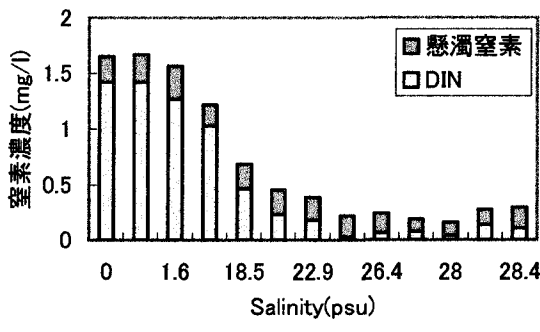


図13 塩分濃度と窒素の形態

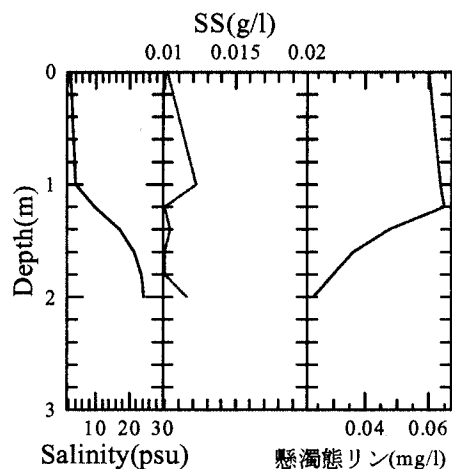


図 14 平水時塩分濃度, SS, 濁態リン

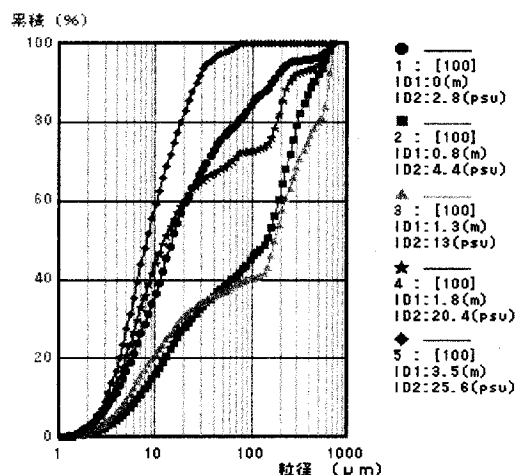


図 15 平水時粒径加積曲線

4. 結論

流量が 20 倍になると平水時の 400 倍以上の濃度の負荷が流出し, 1 回の出水で平水時の 1 年以上の負荷が流入していると考えられる。

出水時の栄養塩の形態としては TN, TP に対してそれぞれ懸濁態窒素は 70%, 懸濁態リンは 99% を占め大部分が懸濁態として輸送される。

2000 年の出水時には通じて粒度分布がほとんど変化せず, SS 総体積と SS 総表面積の間に比例関係が見られた。SS 総体積, 共に相関が見られる原因として粒度分布から SS 総体積と SS 総表面積との間に比例関係があるからだと考えられる。懸濁態リンに関しては SS 総表面積との相関が良い。これらから懸濁態窒素は SS 粒子全体に分布しており, 懸濁態リンは SS 表面に分布していると考えられる。

出水時に比べて平水時の方が SS 単位表面積当り, 単位体積当りに付着している懸濁態の栄養塩の濃度が高く, これは平水時には点源に由来する栄養塩が輸送されるからであると考えられる。

平水時の輸送形態としては河川由来の懸濁態栄養塩は全窒素の 20~40% を占め, 懸濁態リンは全リンの 50~90% を占める。平水時には窒素は溶存無機態, リンは懸濁態の形態で輸送されるものの挙動が重要になるといえる。

平水時において塩水遡上によりフロック化した懸濁態栄養塩の沈降粒子は, 塩水層の密度が高い, もしくは塩化物イオンの影響により混合層内に蓄積しやすいものと考えられる。

謝辞:本研究を行うにあたり貴重な資料を提供していただいた国土交通省東北地方整備局仙台工事事務所に深く感謝いたします。

参考文献:

1) 高橋迪夫: 阿武隈水系ダム流域における洪水時の土砂輸送と汚濁負荷の特性, 平成 11 年度河川整備基金報告書, pp11-22, 2000.