

出水時の阿武隈川における汚濁負荷の計測と 物質輸送機構の検討

THE MECHANISM OF NUTRIENT LOAD AND MATERIAL
TRANSPORTATION OF A FLOOD IN ABUKUMAGAWA RIVER

小澤 貴幸¹・小川 裕正²・湯田 純一³・長林 久夫⁴・真野 明⁵

Takayuki OZAWA, Yasutada OGAWA, Junichi YUDA, Hisao NAGABAYASI and Akira MANO

¹学生会員 日本大学工学研究科 土木工学専攻 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1 番地)

²学生会員 工修 日本大学工学研究科 土木工学専攻 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1 番地)

³東日本測量株式会社 (〒974-8261 福島県いわき市植田町林内 26-5)

⁴正会員 工博 日本大学教授 土木工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1 番地)

⁵正会員 工博 東北大学教授 工学研究科付属災害制御研究センター (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

For the water quality management in wide area of a river course, quantitative evaluation for the processes of sediment transport and nutrient load is very important. Present study is focused on the contamination load in a flooding river. The investigation performed by the observation of seven times of a flood in Abukumagawa River. And, the processes of nutrient load and transportation were evaluated by the numerical model based on a mass loading rate and the channel network system using kinematic-wave method.

Key Words: flooding river, nutrient load, material transportation, dissolved nutrient salt, particular nutrient salt

1. はじめに

出水時の河川における汚濁負荷物質の輸送は海域を含む広範囲の水質を特徴づけるものであり、出水時における物質負荷の輸送を測定して定量的に評価するシステムを構築することは水質の維持管理及び制御において重要であり、豊かな水環境を保全する上で急務の課題である。

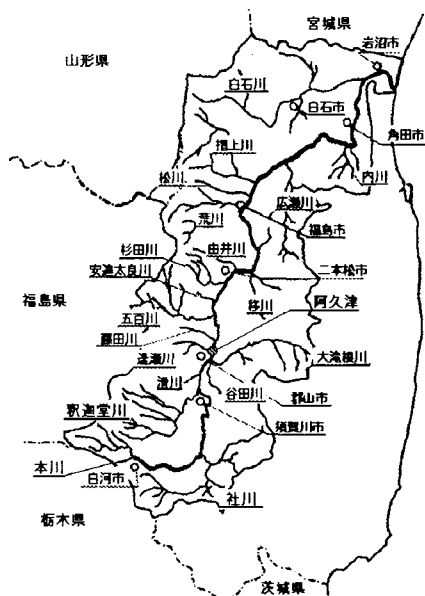
本研究は出水時の河川における濁質や窒素、リン等の栄養塩を計測して、沈降、巻き上げ、変成、逸散を含む輸送過程を水理学的手法により検討し、流域内における物質輸送を定量的に評価するシステムを構築することを目的としている。平水時の河川における汚濁負荷は点源負荷を主要因としており、流量が少なく流速が遅い場合には負荷源周辺に沈降し河道内に蓄積される。出水時にはこれらの負荷と上流からの土砂供給が加わることにより、その負荷特性は平水時とは大きく異なったものとなる。本研究においては出水時の阿武隈川における浮遊土砂や栄養塩に関する計測^{1)~5)}を実施してきた。ここでは、これまでの出水に関する汚

濁負荷特性を示し、その輸送過程についてのモデル化の検討を行った。

2. 流域概要及び調査概要

図-1に流域概要図を示す。阿武隈川は、福島県西白河郡旭岳を源流として白河市、須賀川市、郡山市、二本松市、福島市、角田市と多くの都市を貫流し、宮城県亘理の仙台湾へと流下する、流域面積 5400km²、幹線流路延長 239km の河川である。

出水時の計測は福島県郡山市阿久津地点を基本点として、これまでに 1996 年 9 月、1998 年 8 月、2000 年 7 月、2001 年 8 月、2001 年 9 月、2002 年 7 月、2002 年 10 月の計 7 回実施している。体制が整った場合には東北大学と協力して福島、岩沼においても観測を実施している。特に、1996 年 8 月出水については阿久津と岩沼地点における出水の時間的な推移を計測する定点観測とピーク時の物質輸送特性を観測する移動計測^{1), 5), 6)}を行った。水質試験項目は浮遊土砂 (SS (g/l))、強熱減量 (VS (g/l))、全窒素 (T-N (mg/l))、全リン



(T-P(mg/l)), 生物化学的酸素要求量(BOD(mg/l))である。窒素とリンについては粒子に吸着する栄養塩(粒子態)と水中に溶存する栄養塩(溶存態)を区分するために1 μ mフィルターを用いた濾液の栄養塩を溶存態として計測しており、全量の濃度から溶存態を差し引いたものを粒子態としている。また、1998年からは窒素について硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N(mg/l)}$), 亜硝酸態窒素($\text{NO}_2\text{-N(mg/l)}$), アンモニア態窒素($\text{NH}_4\text{-N(mg/l)}$)の粒子態と溶存態についても分析している。

3. 出水時の汚濁負荷特性の検討

(1) 出水狀況

図-2 に郡山市阿久津における出水のハイドログラフを示す。この図は各出水の増水期をほぼそろえて表示している。出水規模は1996年8月、2000年7月、2001年8月、2001年9月が中程度であり、阿久津地点では高水敷まで冠水している。また、2001年9月は連続した降雨により継続時間の長い出水であった。1998年8月、2002年7月、2002年10月の出水は大規模であり、1998年は福島県と栃木県の県境部を中心とした上流域での豪雨による出水であり、5日間に年間降水量の約8割に相当する1200mmの降雨があった。2002年7月は台風6号による出水であり、ほぼ全流域の均等な降雨によっている。

(2) 各出水における SS 及び汚濁負荷の特性

図-3及び図-4に阿久津における流量とSS及びSSと全窒素、全リンとの関係を示す。図中の式は、1996年出水における国土交通省の水質観測点の濁度から換算した値と現地計測データから求めた推定式¹⁾である。ここで、推定式の物理量の単位は $Q(\text{m}^3/\text{sec})$, $\text{SS}(\text{g/l})$, $\text{T-N}(\text{mg/l})$, $\text{T-P}(\text{mg/l})$ である。図-3において、

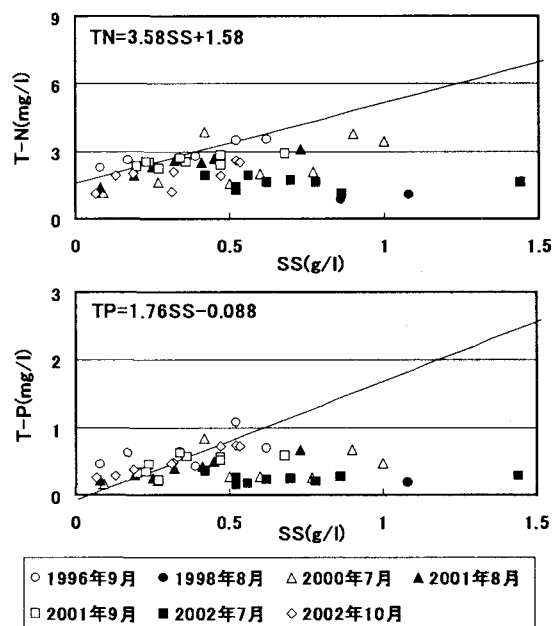
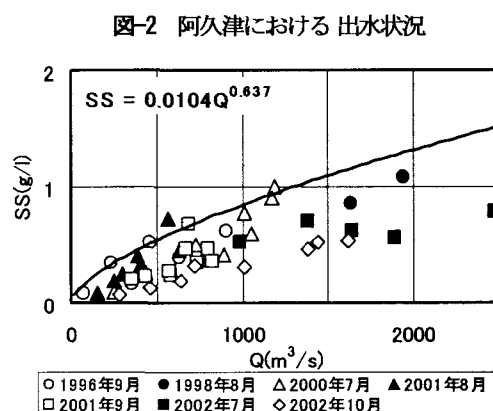
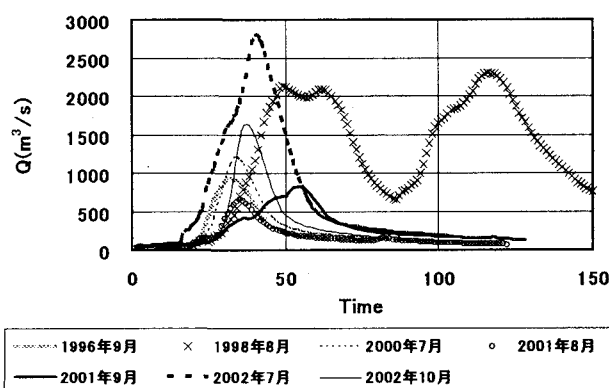
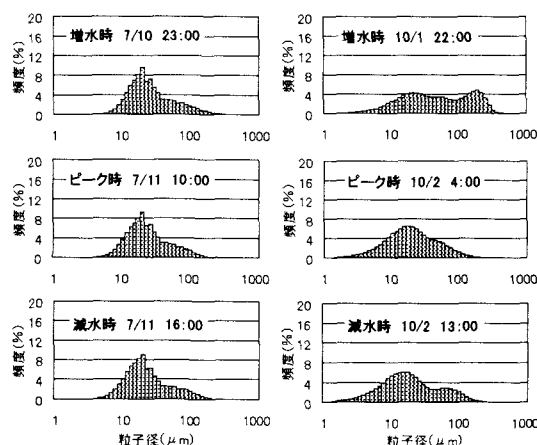
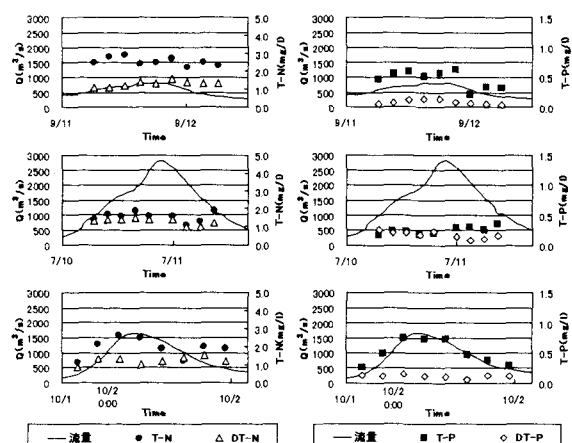


図-4 阿久津における主な出水の T-N、T-P と SS の関係

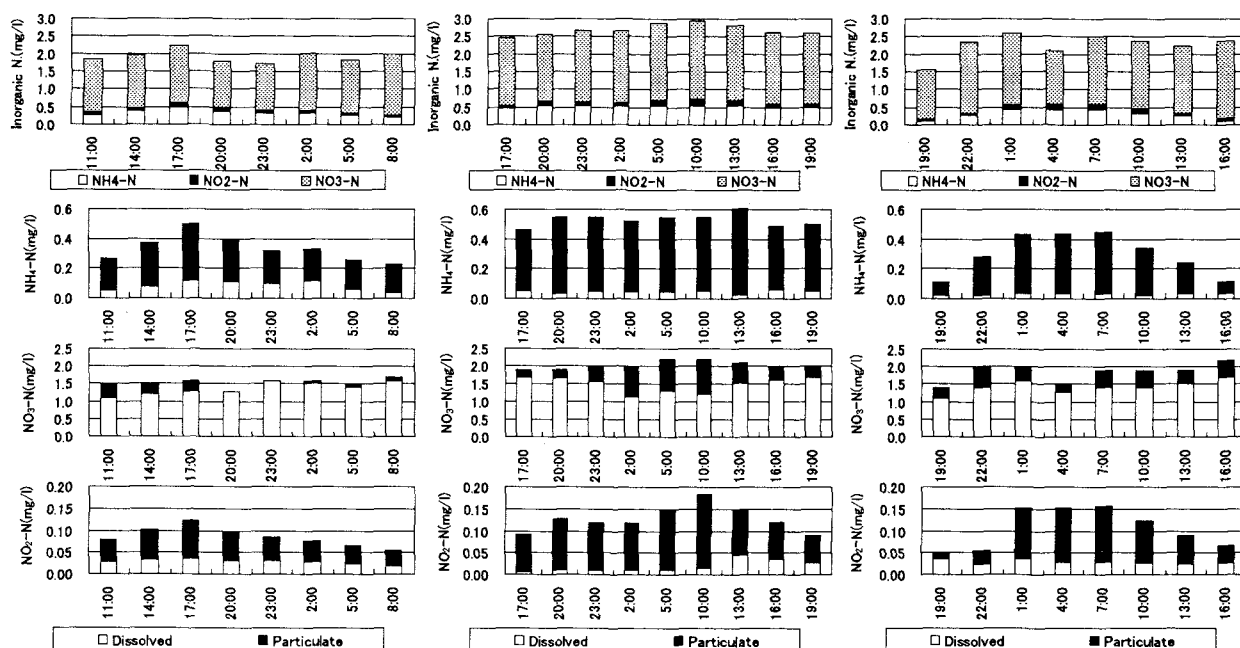
流量に対する SS の含有量は 2001 年 8 月を除いて、1996 年の推定式に比べて低い値が観測された。出水規模をピーク流量が $1000\text{m}^3/\text{sec}$ を境界として中規模出水と大規模出水に分類すると、1998 年 8 月、2002 年 7 月、2002 年 10 月の大規模出水は流量に対する浮遊土砂濃度が低くなる傾向を示している。図-4 は SS に対する全窒素



2002年7月 2002年10月
上段：増水期，中段：ピーク時，下段：減水期
図-5 阿久津における出水時の浮遊土砂の粒度分析特性



上段：2001年9月，中段：2002年7月，下段：2002年10月
図-6 阿久津における出水時の全窒素，全リン濃度と溶存態成分の分布特性



(a) 2001年9月 (b) 2002年7月 (c) 2002年10月
図-7 阿久津における出水時の無機態窒素の粒子態，溶存態比率の推移

と全リンの関係であり，図-3と同様に大規模出水においてはSSに対する栄養塩濃度が低いことが認められた。

(3) 出水期間中の浮遊土砂の粒度分布特性

図-5に阿久津における2002年7月と2002年10月出水の浮遊土砂の粒度分布を示す。図の上段から下方に向かってそれぞれ増水時，ピーク時，減水時の順である。図より，2002年7月は増水時から減水時まで類似した分布型を有しており，粒径20～30μmにピークを持ち，70μm～300μmまでなだらかに減少する傾向を示している。10月は増水時に20～30μmと200μmに2つのピークがあり，時間経過とともに細粒分に移行するが，減水時には再び粗粒分の粒径が増加する傾向が得られた。しかし，一地点における浮遊土砂粒径の推移は，上流からの出水に従った流送過程に依存してお

り，今後はそれらとの関係を検討する必要がある。

(4) 出水時の栄養塩特性

図-6に阿久津における最近の出水に関する全窒素及び全リンの全量濃度とフィルターにより濾過した後の濾液に対する溶存態濃度（DT-N，DT-P）及び流量の時系列分布との関係を示す。図の上部より，2001年9月，2002年7月，2002年10月の出水を示している。使用したフィルターは1μmであり，粒子に吸着した成分はこれにより分離されている。従って，全量と溶存態の栄養塩の差は粒子態のものとなる。ここに示す出水の流量規模は上段の2001年9月の出水は中規模であるが，その他二つは大規模である。この図より出水期間中における全窒素，全リンの溶存態濃度は流量規模に関わらずほぼ一定の値を示した。2001年9月と2002年10

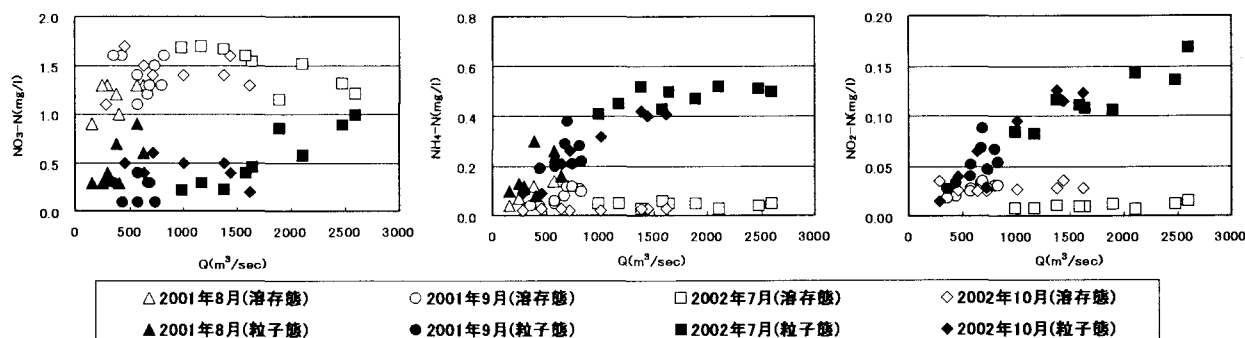


図-8 阿久津における出水時の流量と無機態窒素の関係

月の全量濃度は流量の増減に対応した推移を示すが、流量規模の特に大きな2002年7月出水は大半が溶存態で占められていた。

上記のように出水時における浮遊土砂の特性は、対象流域における負荷特性や先行降雨の有無及び流域内での有機物分解によって大きく変わってくる。しかし、出水時における栄養塩の構成比や栄養塩の負荷特性については不明な点が多い。従って、これらを把握し定式化を行うことは、モデル化する上で必要であり、以下に無機態窒素の検討を行う。図-7に阿久津における出水時の無機態窒素の構成とアンモニア態窒素、硝酸態窒素及び亜硝酸態窒素の溶存態・粒子態濃度の推移を示す。図の最上段に示す無機態窒素の構成は約80%が硝酸態窒素であり、アンモニア態窒素は約15%、残りは亜硝酸態窒素である。図の2段から4段に示す硝酸、アンモニア、亜硝酸の溶存態、粒子態濃度において硝酸は約80～90%が溶存態であるが、アンモニア、亜硝酸は80～90%が粒子態成分であった。特に、アンモニアと亜硝酸の推移は流量の増減に対応する変化を示しているが、一方、硝酸は出水の初期と終期には溶存態濃度の割合が高く、ピーク時において溶存態濃度が減少することが認められた。また、硝酸の粒子態濃度の増減は出水によって異なっている。

図-8に阿久津における流量に対する無機態窒素の溶存態、粒子態濃度との関係を示す。ここで、図中の白抜き印は溶存態、黒印は粒子態栄養塩である。硝酸態窒素における溶存態濃度は、分散が大きいが流量1000m³/sec以上で濃度が一樣になる傾向を示す。粒子態濃度は、2002年7月出水で流量2000m³/sec以上で増加を示すものの、それ以下では0.3mg/l程度の一様傾向を示す。アンモニア及び亜硝酸態窒素は粒子態栄養塩において、流量が増加するとほぼ一定量に近づく傾向を示す。溶存態栄養塩についてはアンモニア、亜硝酸態窒素ともにほぼ一様の濃度を示している。従って硝酸は溶存態成分について、アンモニア及び亜硝酸は粒子態成分に関するモデル化の可能性が示唆される。

4. 出水時の河川における汚濁負荷物質の輸送機構に関する検討

出水時の河川における負荷と物質輸送のモデル化においては、上流域からの輸送に加えて、支川からの流入と河道内における負荷の発生を検討することが必要になる。流域における負荷発生・輸送モデルの構築についてはタンクモデルに代表される集中型モデルと各ノード点における負荷の発生と輸送をモデル化してこれらを結合して流域を表現する分布型モデルに大別できる。分布型モデルは各要素点における諸現象の物理モデルを用いて流域の所要地点の流量や浮遊砂及び栄養塩が計算可能な手法の一つであり、流域一貫とした管理に用いることができる有用な方法である。八代川は阿武隈川の擬河道網モデルを計算機上に作成して降雨の斜面流出と非定常流計算による輸送を考慮した分布型流出モデルを構築しており、流量及び浮遊土砂輸送について既往の出水との適応性を検討している。本研究では擬河道モデル上に栄養塩負荷発生、輸送モデルを構築することを目的としている。ここでは、L-Q式を用いた物質輸送機構について検討を行う。

出水時における流量とSS及び栄養塩に関する相関関係は出水規模や流出形態によって異なること、全窒素や全リンの粒子態と溶存態の比率も出水ごとに異なることを示した。しかし、無機態窒素においてアンモニアと亜硝酸態窒素は粒子に吸着して流送される粒子態の負荷の割合が高く、硝酸は溶存態の栄養塩を主体とすることが示された。流量Qに対するSSや栄養塩などの物質負荷量Lとの関係は出水ごとに異なることが予想されるが、式の取り扱いが容易であることと、また物質間のL-Q式を重ね合わせで表現が可能であることなどの利点を有している。式(1)にL-Q式を示す。

$$L = \alpha Q^{\beta} \quad (1)$$

ここで、L：物質負荷量(g/sec)，Q：流量(m³/sec)である。

図-9に阿久津における出水時の栄養塩のL-Q式を示す。図の横軸は流量であり、縦軸は栄養塩の濃度と流

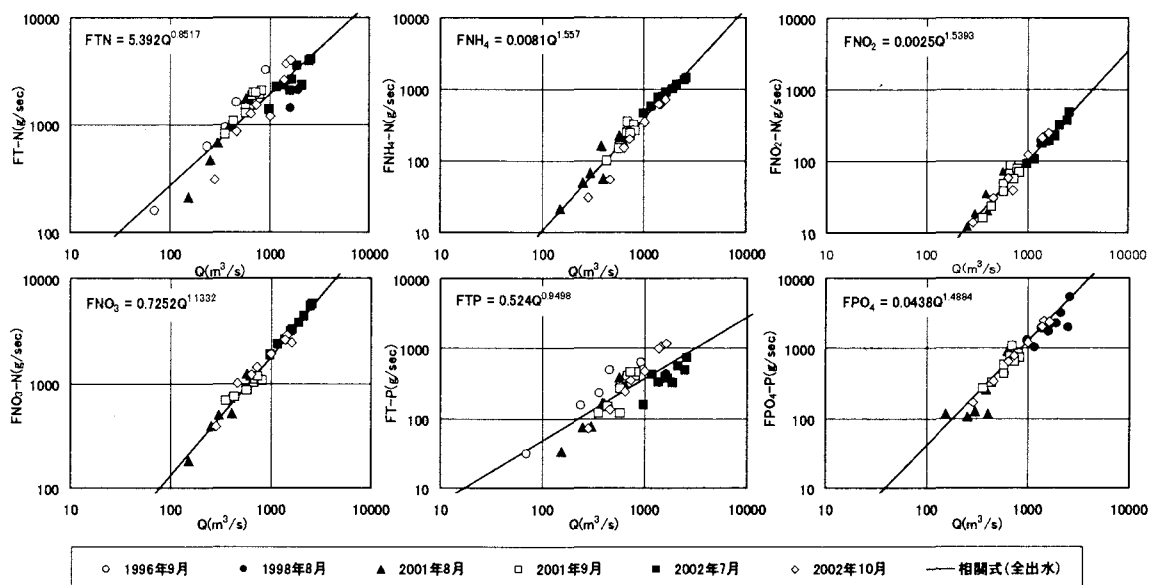
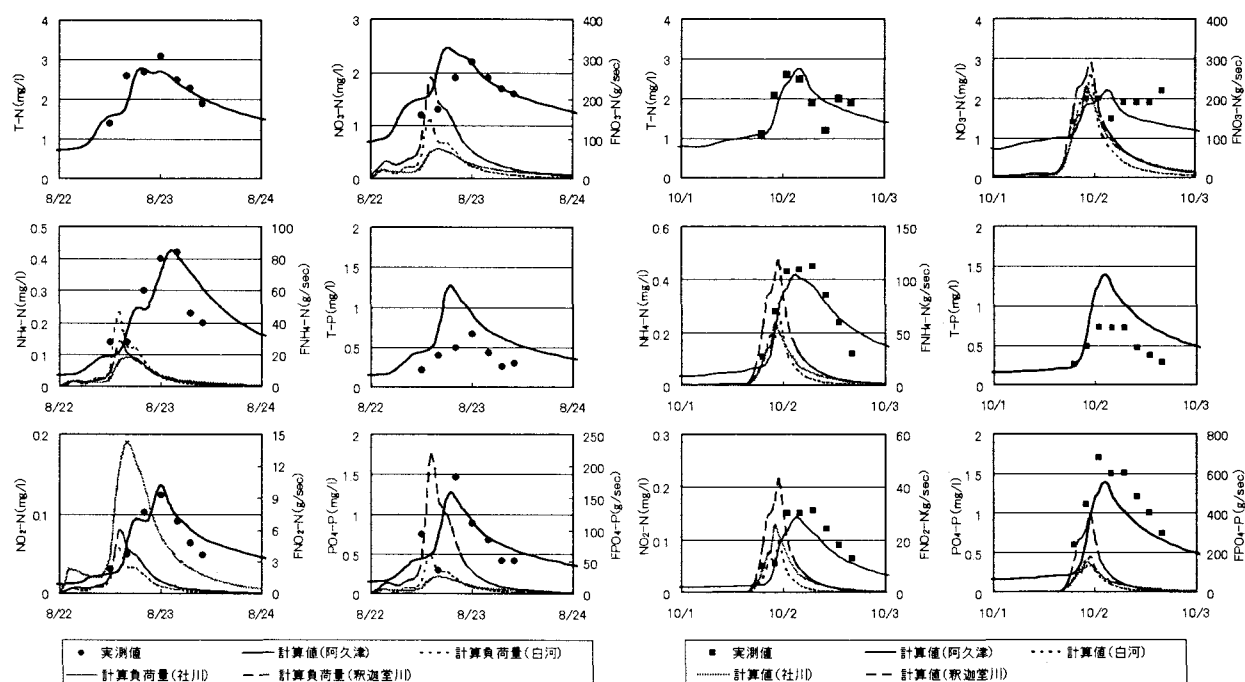


図-9 阿久津における出水時のL-Q式の検討



2001年8月

2002年10月

図-10 無機態窒素及びリンのL-Q式を用いた阿久津における2001年8月と2002年10月出水の栄養塩特性

量を掛けた負荷量である。図中の実線は全出水に対する相関式である。これより、全窒素と全リンは出水ごとの分散が大きく、無機態栄養塩に比べて相関式の精度が低い。一方、無機態窒素と無機態リンのオルトリン酸($\text{PO}_4\text{-P(g/sec)}$)は相関式に対する分散が小さくモデル化の可能性が高い。図-8において変動幅の大きな硝酸態窒素においても、全量に対しては比較的良好なL-Q関係が得られている。

以下では、無機態窒素と無機態リンをL-Q式によりモデル化して阿久津における全窒素と全リンの再現を試みる。阿久津から上流の主な流入は本川の白河観測

所、右支川社川、左支川釈迦堂川の3河川と流量規模の小さな支川6河川である。流量規模の小さな6河川の各栄養塩のL-Q式は全データの相関式を用いて、流量規模の大きな3河川についてはL-Q式を実測値の範囲内で相関式を変化させて、どの程度実測値を再現できるのかを検討した。

図-10に2001年8月と2002年10月出水の解析例を示す。各出水の計算要素点の時間ごとの流量はKinematic-wave法を用いた擬河道モデルによって計算している。栄養塩については白河観測点を本川最上流部の負荷源とし計算の出発点としている。白河からの

移流に伴い、各支川において L-Q 式からの流入負荷を与えている。物質は本川上を平均流速で移流するものとして計算している。全窒素、全リンは有機態成分が強く影響するものであるが、全窒素についてはアンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素の濃度の合計を、全リンについてはオルトリン酸を全リンとして計算を行った。2001 年 8 月及び 2002 年 10 月の出水は共に計算値は実測値を良く表現している。図中の白河、杜川、釈迦堂川の分布は負荷量を示しており、阿久津への影響を考慮するためには白河においては移流距離で約 50km、杜川では 35km、そして釈迦堂川では 15km の時間差を考慮する必要がある。2001 年 8 月出水のアンモニア態窒素、亜硝酸態窒素については都市域がある白河地点で負荷量の最急勾配を、釈迦堂川では都市域が少ないことから緩勾配式を使用している。硝酸態窒素では従来の研究で溶存態がほぼ 8 割を占めることから降雨によるものと考え全地点において平均の相関式を使用している。オルトリン酸では釈迦堂川で急勾配の式を使用している。2002 年 10 月の計算においてはアンモニアと硝酸は平均の負荷量式を与え、亜硝酸は負荷の小さな式を与えている。また、オルトリン酸は平均の負荷式を与えている。無機態窒素を合計した全窒素については比較的良好に再現ができています。また、計算を通じてオルトリン酸を用いた場合の全リンについては過大評価になることが多いが、これは測定法の相違によりオルトリン酸の濃度が全リンの値より高いことが原因している。また、2002 年 10 月の硝酸態窒素の適合性が悪い場合、全窒素の適合性に大きく影響されることが認められた。

本検討においては、無機態窒素と無機態リンの溶存態、粒子態の全量に対する L-Q 式を用い、出水時の全窒素、全リンの分布に対するモデル検討の可能性を示した。しかし、全流域に対する分布型モデルへの適用のためには溶存態、粒子態の L-Q 関係と他の物理過程を考慮に入れたモデル化の検討が必要である。

5. おわりに

阿武隈川における 7 回の出水観測データをもとに出水時における汚濁負荷特性を示し、輸送機構に関するモデル化の検討を行った。本研究における主な結論を下記に要約する。

(1) 阿久津における浮遊土砂に対する流量の関係は出水ごとにその特性を異にしている。特に、流量の大きな出水においては流量に対する浮遊土砂濃度は低い値を示していた。さらに、全窒素、全リンにおいても大規模出水においては SS 濃度に対して低い栄養塩濃度を示すことが認められた。

(2) 出水時における浮遊土砂の細粒分の粒子径は 20～30 μm にピークを有しており、出水によっては増水期に

100～200 μm にも粒度のピークを有する分布が認められた。

(3) 出水時の栄養塩の粒子態成分と溶存態成分の比率は出水により異なっており、2002 年 7 月の大規模出水においては全窒素、全リンともに溶存態栄養塩の比率の高い出水であることが認められた。また、無機態窒素においては硝酸態窒素がその 80% 程度を占めており、アンモニア態窒素は 15% で残りが亜硝酸態窒素となっている。さらに、硝酸態窒素は約 70% 程度が溶存態であるが、アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素は 80% 程度が粒子態成分であることが認められた。

(4) 阿久津における無機態窒素、無機態リンの全量に対する L-Q 式を用いて検討した結果、出水時における全窒素、全リンにモデル化の可能性を見いだすことができた。

今後は、さらに溶存態と粒子態の栄養塩のモデル化の検討を進め、分布型モデルの検討を進める予定である。

謝辞：本研究は日本大学工学部文部科学省学術フロンティア推進事業（研究代表：小野沢元久）ならびに日本大学学術助成金国際総合研究（研究代表：堀田新太郎）の一貫として実施されたものである。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 長林・真野・小林：阿武隈川における出水時の水質特性に関する検討，第 4 回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp. 231-236, 1998.
- 2) 長林・真野・木村ら：出水時における阿武隈川の水質特性，東北地域災害科学研究，第 33 巻，pp. 141-149, 1997.
- 3) 小林・長林・真野：阿武隈川の河道内堆積物に含有される栄養塩量調査，東北地域災害科学研究，第 36 巻，pp. 153-158, 2000.
- 4) 牧，長林，真野：阿武隈川における窒素・リン輸送解析，東北地域災害科学研究，第 37 巻，pp. 123-126, 2001.
- 5) H. Nagabayashi, N. Kobayashi, A. Mano: The Mechanism of Nutrient Load and Material Transportation of Flooding River, 12th Cong. APD-IAHR, pp. 161-169, 2000, Bangkok, Thailand
- 6) 杉木・真野：阿武隈川における細流土砂の観測と時間空間分布，水工学論文集，第 41 巻，pp. 783-788, 1998.
- 7) 八代・杉木・真野：河道特性を考慮した阿武隈川流域の流出解析，土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集，第 2 部，pp. 704-705, 1996.

(2004. 9. 30 受付)