

出水時の阿武隈川における栄養塩負荷と 輸送に関するモデル化の検討

MODELING OF A NUTRIENT LOAD AND TRANSPORT IN A FLOODING ABUKUMAGAWA RIVER

長林久夫¹・小川裕正²・真野明³

Hisao NAGABAYASHI, Yasutada OGAWA and Akira MANO

¹正会員 博士(工学) 日本大学教授 工学部土木工学科 (〒963-8642 郡山市田村町徳定中河原1)

²学生会員 工修 日本大学大学院 工学研究科 (〒963-8642 郡山市田村町徳定中河原1)

³正会員 工博 東北大学大学院教授 災害制御研究センター (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻青葉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 was performed by the observation of seven times of a flood in Abukumagawa River. The processes of nutrient load and transport were evaluated by a numerical model based on a channel network system which composed by flow discharge in kinematic-wave method, conservation equation of suspended load, and nutrient load evaluated by regression equations. Nutrient was discussed separately on dissolved and particulate matter. Dissolved nutrient was expressed by a mass loading rate and particulate matter was discussed by a regression equation obtain from a relation of suspended solid. Adaptation of numerical model was examined on floods and there problems was discussed in detailed.

Key Words: *flooding river, channel network, simulation, suspended load, nutrient transport, dissolved nutrient and particulate*

1. はじめに

近年、水質の排出規制等の施策の展開と下水道施設等の整備により、多くの河川で水質改善のきざしが報告されている。しかし、より高水準の水質改善に向けては、点源や非点源負荷源からの汚濁の発生と流出及び流達について、階層的に輻輳化している機構を広域の水域において検討する必要がある。例えば、平水時から出水時までを扱うモデルの構築においては負荷発生と輸送、流達を山間地から都市域及び河口域に至る間の地域特性に対応した評価が必要である。流域一貫としたモデルの構築と適用に関する研究は水環境センサスデータとGIS解析による広域流域管理への適用¹⁾²⁾の検討やデジタル標高データと洪水流出、土砂及び汚濁負荷の発生、流達モデルを用いた研究³⁾⁴⁾など数多くなされている。

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、沿岸域への土砂や栄養塩類の輸送や補給の過程を明らかにする上で重

要である。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おり、阿武隈川において浮遊土砂や栄養塩に関する計測と土砂や栄養塩の発生輸送機構に関する検討⁵⁾¹²⁾を実施してきた。本論文においては、これまでの出水に関する阿久津地点の汚濁負荷特性の検討を拡張して、溶存態と懸濁態栄養塩の負荷過程をモデル化し、国土数値情報を用いた擬河道網モデルに物理過程を組み込んだ流出、流達モデルを構築してその適用について検討した。さらに、上流域から河口域までの計測と計算とを比較検討してモデル適用の問題点を整理した。

2. 流域及び出水の概要と測定方法

図-1に流域の概要図を示す。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の河川であり、長さでは全国6位、流域面積では全国11位の河川である。

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月出水で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^{7), 11), 12)}を行った。さらに、1998年9月においても須賀川から岩沼にかけての移動計測を行っている。移動観測の計測点は本川の背水の影響がないと見なされる支川部分と支川合流部の直上流地点の橋梁とした。上流から社川合流点の白河（河口からの距離：190.6km）、釈迦堂川合流地点の須賀川（147.7km）、郡山阿久津（133.4km）、安達太良川合流地点の本宮（117.9km）、荒川合流地点の福島（77km）、摺上川下流の伏黒（65.9km）、広瀬川合流点の八幡（60.0km）、白石川合流地点の江尻（20.8km）及び阿武隈大堰下流の岩沼（8.0km）である。

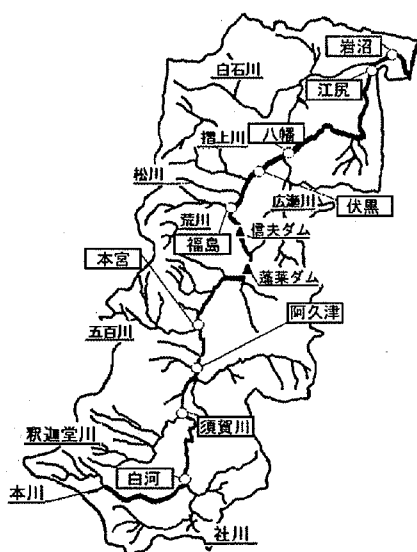


図-1 阿武隈川流域概要図

測定は1998年までは真野が開発した深度計付きの採水器¹³⁾を用いて深度に応じた採水を実施したが、特に福島より上流の計測点においては流速が速いために、深度に応じた採水が困難であるために、以降はバケツによる表層水の採水を行っている。

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（懸濁態）と水中に溶存する栄養塩（溶存態）を区分するために1μm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懸濁態としている。また、1998年からは硝酸態窒素（NO₃-N(mg/l)）、亜硝酸態窒素（NO₂-N(mg/l)）、アンモニア態窒素（NH₄-N(mg/l)）及びオルトリン酸態リン（PO₄-P(mg/l)）の懸濁態と溶存態について分析している。

3. 出水時の浮遊土砂及び汚濁負荷特性

(1) 出水特性

図-2に阿久津地点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9月、2000年7月、2001年8月、2001年9月が中規模であり、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。

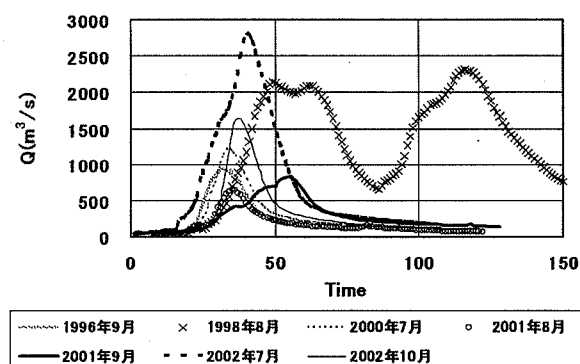


図-2 阿久津における出水特性の比較

(2) 阿久津における浮遊土砂の特性

日本の河川における出水時の浮遊土砂の流出量は流量に対してほぼ2乗の関係を有することが報告されている。図-3に阿久津における流量（Q）と浮遊土砂量（LSS）との関係を示す。図中の実線は実測値から求めた回帰式である。2002年10月は回帰式より低値を示すものがあり、2002年7月の大きな出水の直後であることから、出水履歴の影響であると推定される。これらより阿久津においては2乗に近い指数関係が示された。

出水時の浮遊土砂濃度の推移は掃流力に対応した浮遊土砂の輸送過程を検討する上で重要である。図-4に阿久津と福島における2001年以降の出水比較を示す。測定はレーザ回折・散乱式粒度分布測定装置（ホリバLA-920）で行った。各図には計測値の中から増水期、流量ピーク時、減減期を選択して示しており、1μmから1000μmの

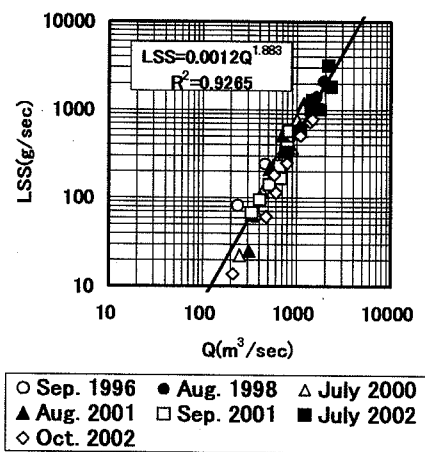


図-3 阿久津における流量と浮遊砂量との関係

範囲における浮遊砂濃を示す。ピーク粒径は2002年10月を除いては約 $30\mu\text{m}$ であった。2002年10月は流量増水期に $40\mu\text{m}$ と $200\mu\text{m}$ 程度に双峰型のピークを持つ分布を示している。時間経過に従った細粒化の傾向は、上流域からの細流分の補給を示すものであり、約3ヶ月前に発生した流量約 $2700\text{m}^3/\text{sec}$ にも達する出水は阿久津上流域における細流分を多量にフラッシュしたことを示している。図の最下段に示す福島地点における2002年の10月出水は、流量ピーク時から低減期にかけて阿久津地点に比べて粗粒化が見られ、ピーク粒径はさらに増大している。福島地点の直上流部には蓬菜と信夫の2つの発電用の低ダムが本川河道に建設されており、出水時にはこのダムが浮遊土砂や栄養塩類等の発生源となることを本計測^{7), 10)}と杉木・真野¹²⁾が明らかにしている。さらに市毛・真野・長林⁵⁻⁶⁾、富樫・真野¹³⁻¹⁴⁾は標高データにもとづく擬河道網モデルを用いて本川河道上の計測点における流量と浮遊砂の計算モデルを構築しており、これらのダムからの出水時における排出量を評価し、洪水によるダムからの土砂排出量が河口部における年間土砂排出量の大部分を占めることを指摘している。

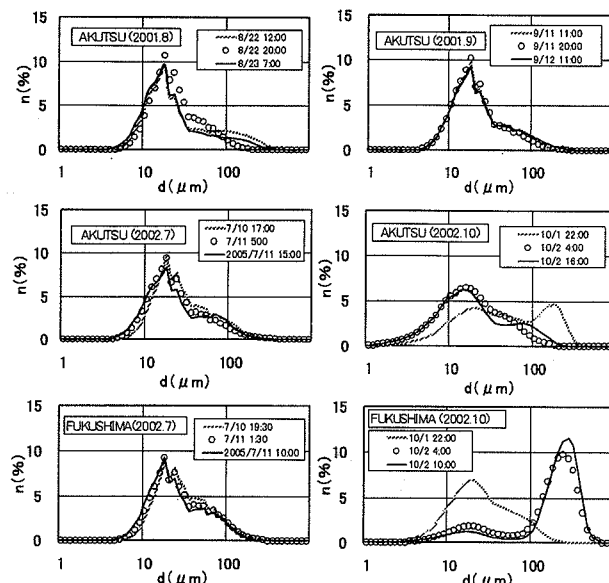


図-4 阿久津及び福島における出水時の浮遊土砂濃度分布特性

(3) 阿久津における汚濁負荷特性の検討

小澤ら¹²⁾は本論文と同じ出水について全窒素、全リン及び無機態窒素、無機態リン等の出水特性を比較検討しており、阿久津の無機態窒素中の約70%が硝酸 ($\text{NO}_3\text{-N}$) であり、アンモニア ($\text{NH}_4\text{-N}$) は15%程度、残りが亜硝酸 ($\text{NO}_2\text{-N}$) であること、また、溶存態・懸濁態比率は流量規模が小さい場合、硝酸の約80%は溶存態であるが、アンモニアと亜硝酸は流量増加に従って懸濁態比率が増加し、流量が $1500\text{m}^3/\text{sec}$ を越えると約80%が懸濁態となること、さらに、全リンは約80%が懸濁態であることを示した。しかし2002年7月の大規模出水については全窒素、全リンともに溶存態比率の高い出水であることなどを指摘した。そして、栄養塩類に対する負荷流量関係を求めて、阿久津上流の支川の負荷を推定して、阿久津に及ぼす支川の効果を検討した。

以下では、分布型流出モデルに窒素やリン等の栄養塩類の発生、輸送、沈降の諸過程を組み込むために、溶存

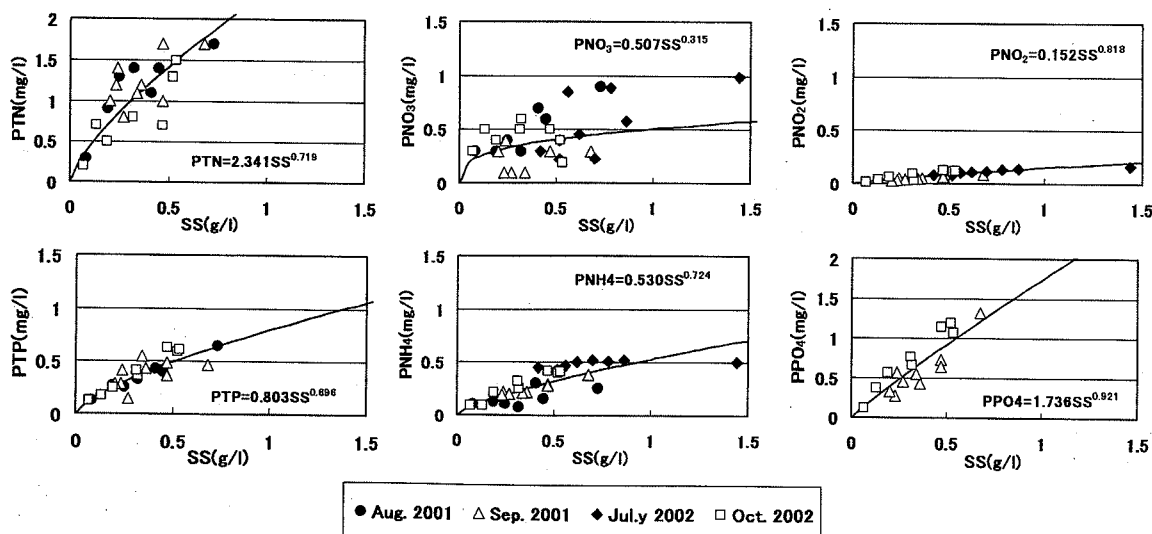


図-5 阿久津における浮遊砂濃度と懸濁態栄養塩類の相関関係

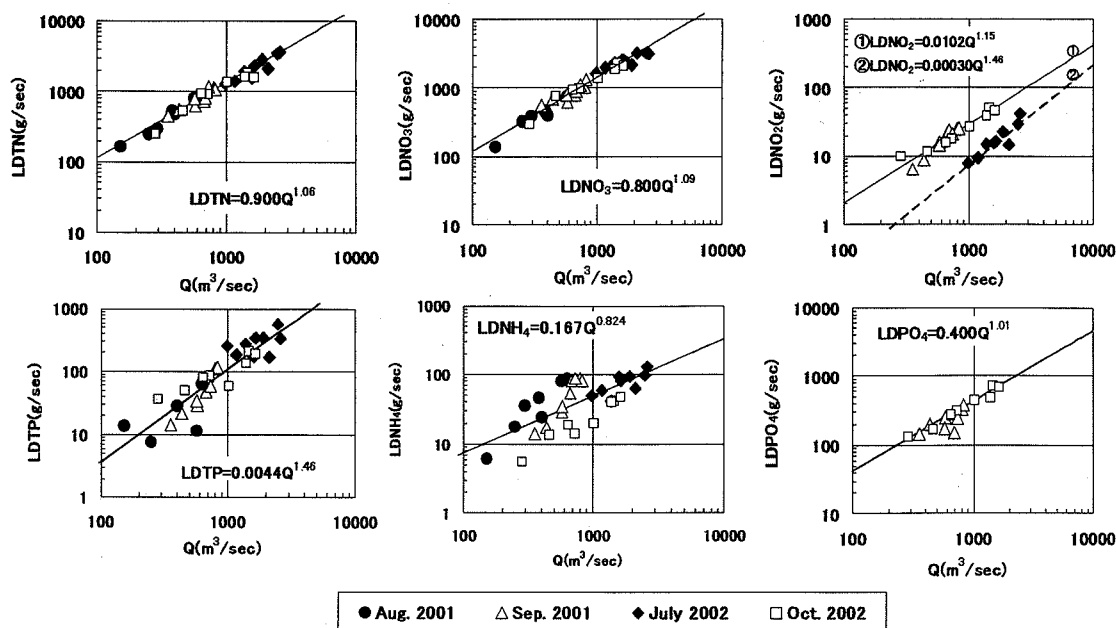


図-6 流量と溶存態栄養塩負荷量との関係

態成分と懸濁態成分を区分して検討する。

図-5に阿久津における浮遊砂濃度と懸濁態栄養塩類との関係を示す。図中の実線は実測値から得られた回帰式である。ここでは懸濁態の栄養塩類をParticulateの頭文字のPを付加している。全リン(PTP)とオルトリン酸態リン(PO₄)は前述のように懸濁態比率が高く、浮遊砂濃度との相関関係が良い、また、懸濁態窒素についてはアンモニア態窒素(PNH₄)と亜硝酸態窒素(PNO₂)の相関は高いものの、硝酸態窒素(PNO₃)は浮遊砂に対する懸濁態比率が出水によって異なり、特に2002年7月には流量逓減時の懸濁態比率が高まる。また2001年9月の継続時間の長い出水においてはピーク流量時のほぼ全量が溶存態で占められ、浮遊砂濃度に対する硝酸の懸濁態比率は負荷の過程に従って特性が大きく異なっている。

図-6に流量と溶存態栄養塩類の負荷量との関係を示す。図中の関係式を式(1)に示す負荷流量曲線で与えている。

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

ここで、 L : 物質負荷量(g/sec)、 Q : 流量(m³/sec)である。図中の縦軸は溶存態の栄養塩類でありLoad of Dissolved Matterの頭文字のLDを付加して示している。溶存態負荷量の全窒素(LDTN)と硝酸態窒素(LDNO₃)の回帰式は良い相関を示すが、アンモニア態窒素(LDNH₄)と亜硝酸態窒素(LDNO₂)は回帰式における分散が大きい。しかし、これらは硝酸態窒素の1オーダー小さい値をとっている。また、2002年7月の亜硝酸態窒素については他のデータと傾向が異なるために別な回帰式を求めている。全リン(LDTP)とオルトリン酸態リン(LDPO₄)については高い相関関係が得られた。

4. 汚濁負荷・輸送モデルの検討

(1) 分布型流出モデル

阿武隈川流域の疑河道網モデルは国土地理院による国土数値情報から1kmメッシュの河道モデルを作成し、各支川上流端から数えたメッシュの位数が4以上を河道としそれ以外を斜面としたモデルを用いている。流出計算は各メッシュの直接流出成分のみを考慮して、Kinematic wave法を用いた市毛らのモデル⁶⁾を使用した。

(2) 浮流土砂計算及び栄養塩輸送モデル

浮遊砂の計算は浮遊砂の連続式を用いて、断面内で濃度一様とし、流下方向の拡散は無視できるものとして、式(2)に示す、1次元方程式を用いた。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} A - F_d B + F_u B - C \gamma_e B_{sl} \quad (2)$$

ここで、 C は浮遊土砂濃度、 F_d と F_u は沈降及び巻き上げによる土砂フラックス、 u は断面平均流速、 A は流積、 B は水面幅、 r_e は有効降雨、 B_{sl} は降雨を与える幅である。 F_d はRebeyの沈降速度 w_0 を用い、 $F_d = w_0 C$ で与え、 F_u については市毛ら⁶⁾に従い、泉ら¹⁰⁾の式を用いている。

$$F_u = 0.001 f(p) \tau_*^2 R_f^{-2} w_0 \quad (3)$$

ここで、 $f(p)$ は砂層交換層内の細砂分の存在割合、 τ_* はシールズ数、 R_f は無次元沈降速度であり、 $R_f = w_0 / (sgd)^{1/2}$ で示し、 sl は砂粒子の水中比重である。

(3) モデルによる阿久津における出水の再現性の検討

流量計算はアメダスデータから対象洪水について1時間ごとの降雨メッシュデータを作成した。河道と斜面の洪水波はkinematic wave法を用いて計算した。阿久津における洪水ハイドログラフの比較を図-7に示す、この計算における粗度係数は河道では $n=0.04$ 、斜面では

$n=0.035$ とした。本解析は表面流出のみを対象しており各出水のピーク流量に合うように流出率 f を2001年8月、2001年9月、2002年7月、2002年10月において0.45、0.53、0.58、0.53としている。

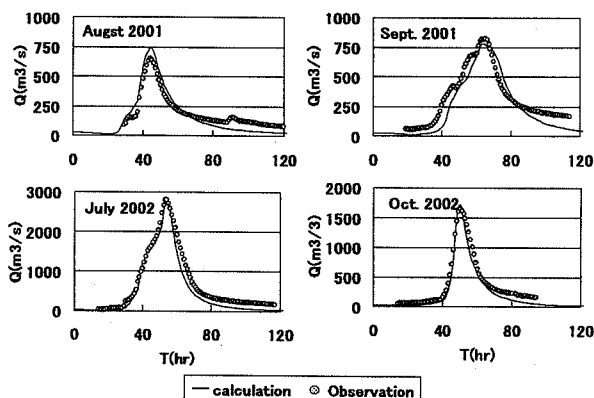


図-7 阿久津における流量の実測値と計算値の比較

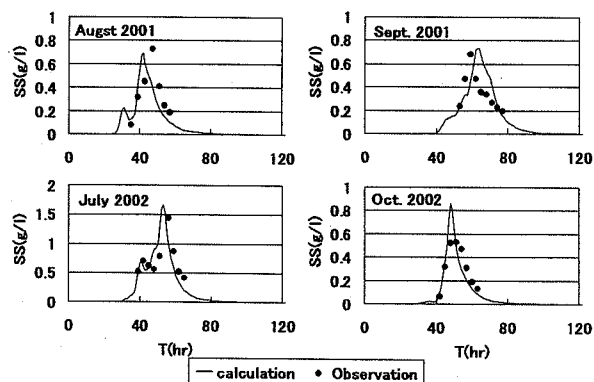


図-8 阿久津における浮遊土砂濃度の実測値と計算値の比較

図-8に阿久津における浮遊土砂の実測値と計算値の比較を示す。計算に用いた粒径は $d=0.0030\text{cm}$ の一樣粒径とした。時間経過に対する実測値の推移は示すものの、2001年9月の実測値は計算値に比べて、早く逓減しており計算に比べてやせた分布となっている。また、式(3)中の細砂分の存在割合 $f(p)$ をシルズ数の関数として斜面及び河道に与え、 $f(p)=a(\tau_*-0.05)$ とした。浮遊砂量のピークを再現するように $f(p)$ 中に係数 a を与えており、それぞれの出水に対して、全流域において0.0002、0.00012、0.00008、0.00008とした。流量規模に応じて細砂分の存在割合を変える必要が認められた。

(4) 阿久津における出水時の栄養塩類の計算

阿久津における全窒素(TN)の計算値と実測値の比較を図-9に示す。溶存態物質は平均流速によって移流するものとして、マニング式による流量と図-6の中に示す $L-Q$ 関係式を用いて計算している。全窒素は流量変化に対応せず出水ピーク時においてもその値は大きく変化しない。これは無機態窒素の中で大きな割合を持つ硝酸の負荷流量式が流量にほぼ比例しており、濃度に換算すると流量中の割合は一定値を保つことを示している。懸濁態は流

量ピーク時で溶存態濃度と同程度となる。2002年7月は懸濁態濃度の実測値が著しく低下している。

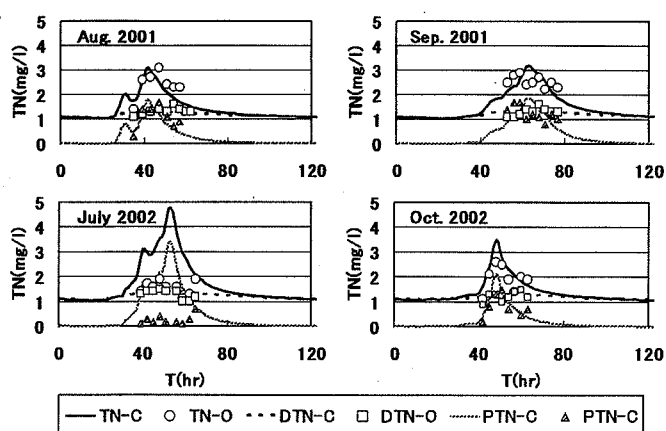


図-9 阿久津における全窒素濃度の実測値と計算値の比較

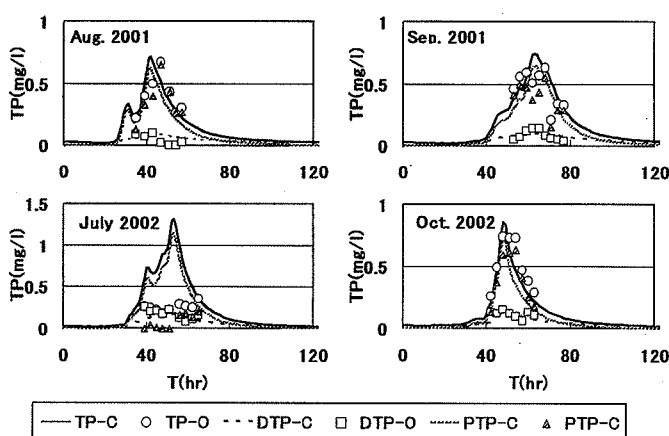


図-10 阿久津における全リンの実測値と計算値の比較

図-10に示すように全リンの溶存態濃度は極めて小さく、懸濁態はほぼ全量に近い値である。流量規模の大きな2002年7月の溶存態分布は実測値を表現しているが、懸濁態の実測値は全窒素と同様にきわめて小さい。この出水の浮遊土砂量は回帰式に従っており土砂量は多いが、懸濁態量は少ないことを示している。この点に関してはデータの蓄積も含めて、今後の検討としたい。

(5) 1996年出水のピーク時移動計測の解析検討

図-11に1996年出水のピーク流量に対応して本川上を上流から下流へ移動計測したデータの解析例を示す。阿久津、福島、岩沼における流量の時間推移と阿久津の浮遊砂濃度の分布を再現するパラメータを選定し、流出率 f を0.52、細粒分粒径 $d=0.0030\text{cm}$ とし、砂層交換層内の細砂分の存在割合の係数 a を0.0002とした。図中の計算値は各物理量の最大値を示している。浮遊土砂濃度において白河・須賀川、福島・伏黒、江尻・岩沼の計算値が過小であり、全窒素、全リンについても同様な傾向が得られた。特に福島では発電用の低ダムからの高い負荷が

観測^{5), 7), 11)}されており、本解析ではこの点を考慮していない。富樫・真野¹⁵⁾⁻¹⁶⁾は洪水時に福島上流のダムからの流砂量を見積もっており、それらを取り入れたモデルに改善する必要がある。また、江尻、岩沼においては河床勾配が緩く、滞留時間が長いためにこの程度の粒子でも沈降する。よって上下流の流量の相違によるウォッシュロードの増加分を考慮するとともに阿武隈川大堰や河道内負荷による新たな負荷源を検討する必要があると示された。

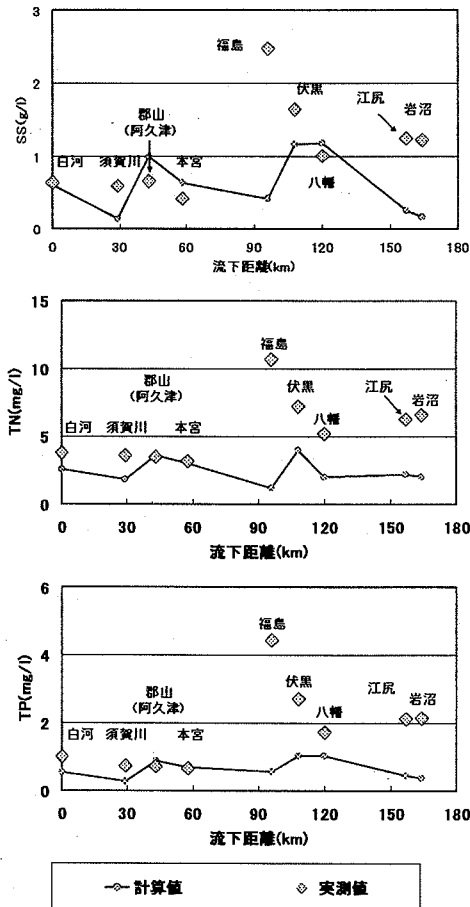


図-11 本川における1996年出水における浮遊砂濃度、全窒素、全リンの推移の検討

5. おわりに

阿武隈川における7回の出水計測データをもとに擬河道網モデルと浮遊砂の輸送方程式を用いた流量、浮遊砂、窒素、リン等の栄養塩の計算モデルを構築して、全流域に適用して流量規模の相違と流達特性の比較検討によりモデル適用の問題点を検討した。阿久津における2001年以降の4回の洪水解析において、負荷流量曲線に基づく溶存態栄養塩類の解析はほぼ実測の分布を表現することができた。しかし、懸濁態は2002年7月の大規模出水において浮遊砂濃度の計算は妥当な値であったが、実測の懸濁態栄養塩類の濃度は著しく低い値であり、この点に関しては今後の計測を含めての検討課題である。ピーク流量時の移動計測において、阿久津の実測値に適合する

解析では須賀川と福島及び河口近傍で計算が低く乖離する結果を得た。河道内に設置された大型構造物や河道特性に従った負荷を考慮する必要があることを示した。

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）の一貫として実施したものである。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 阿倍・辻倉・大八木・安田：水センサーデータベースの流域管理への適用，水工学論文集，第47巻，pp. 247-252，2003.
- 2) 守利・椎原・堀・市川：流域規模での水・土砂動態のモデル化及び実流域への適用，水工学論文集，第47巻，pp. 733-738，2003.
- 3) 北原・菅原・馬籠・竹内・石平：GIS及び分布型流出モデルを用いた流域内の汚濁物質輸送過程の検討，水工学論文集，第49巻，pp. 1585-1591，2005
- 4) 森尾紀之，野口正人：都市域の点源及び非点源負荷流出—長崎市の事例—，水工学論文集，第48巻，pp. 1441-1446，2004.
- 5) 市毛輝和，真野明，長林久夫：浮遊砂輸送モデルにおける河床細砂の影響，土木学会第53回年次学術講演会，pp. 490-491，1997.
- 6) 市毛輝和，真野明，長林久夫：阿武隈川全流域の分布型浮遊砂輸送モデルの開発，土木学会東北支部技術研究発表会，pp. 272-273，1998
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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
- 11) 小澤・小川・湯田・長林・真野：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，水工学論文集，第49巻，pp. 1507-1512，2005.
- 12) 杉木基泰・真野明：阿武隈川における細粒土砂の観測と時空間分布，水工学論文集，第41巻，pp. 783-788，1997
- 13) 富樫昇・真野明：大規模洪水に対する阿武隈川本川の土砂輸送評価，水工学論文集，第47巻，pp. 721-726，2003.
- 14) 富樫昇・真野明：阿武隈川の洪水時における浮遊土砂輸送，水工学論文集，第48巻，pp. 949-954，2004.
- 15) 泉典洋・パーカー，ゲーリー：礫床河道内に堆砂する細砂について，水工学論文集，第39巻，pp. 665-670，1995

(2005. 4. 7 受付)