

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

STUDY OF POLLUTANT TRANSPORTATION PROCESS IN THE BASIN USING GIS AND DISTRIBUTED RUNOFF MODEL

北原健司¹・菅原琢磨²・馬籠純³・竹内邦良⁴・石平博⁵

Kenji KITAHARA, Takuma SUGAHARA, Jun MAGOME,
Kuniyoshi TAKEUCHI and Hiroshi ISHIDAIRA

¹学生会員 山梨大学大学院 医学工学総合教育部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

²正会員 三井造船システム技研(株) (〒261-8501 千葉県千葉市美浜区中瀬1-3-D9)

³正会員 工博 山梨大学大学院 医学工学総合教育部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

⁴正会員 工博 山梨大学大学院教授 医学工学総合研究部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

⁵正会員 工博 山梨大学大学院助教授 医学工学総合研究部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

A basin-scale pollutant load and its transportation processes are discussed in this study. The unit loading method combined with census and GIS data is used to estimate spatial distribution of pollutant load within the basin. The method allows grid-base representation of pollutant load, and makes it possible to link the pollutant production with distributed hydrological model. The spatial distribution of pollutant load and channel purification process model are then integrated into the distributed hydrological model to simulate dynamic behavior of water quality and quantity along the stream. These methods have potential to be used for understanding the water quality over the large area with less data requirement, and could be applied for integrated river basin management.

Key Words : GIS, distributed hydrological model, unit loading method, purification, pollutant transportation process

1. はじめに

近年我が国では、人間の生命に直接かわるような深刻な水質汚染が発生する事は稀であるが、生活レベルの向上に伴い生活排水が増大し、「富栄養化」や「水質汚濁」といった問題が発生している。水処理技術が進歩しているにも関わらず、これらの問題は都市河川を中心に改善が進んでいるとはいえず、その原因の一つが、汚濁発生源の多様化、広域・重複化である。したがって、これらの水質問題に対応するためには、従来の水質の実測値に基づく「点」での水質評価だけでなく、流域全体の汚濁負荷量の排出も含めた「面」の評価が必要である。そのためには、汚濁発生源の把握、河川を介した汚濁物質流達過程の解明、およびそれらに基づく流域の水質・水量の総合的な評価技術の確立が求められている。流域規模での水量・水質評価を目的としたモデルや手法につ

いては、これまでも数多く検討がなされてきたが(例えばIWA,2001¹⁾など)、数100～数1000km²の流域を対象とした簡便かつ汎用性のある手法については、更なる開発及びその検討が必要である。

本研究では、流域規模での水質汚濁状況の総合的な把握を目的とする。具体的には、まず原単位と行政データを用いたGIS解析により、流域内汚濁負荷発生・排出量の推定を行った。次に、推定した汚濁負荷量と分布型流出モデルにより推定した流量を用いて、汚濁負荷量の流達率を算定し、汚濁物質の発生、流出過程の基礎的な検討を行った。さらに、水文量の空間分布を取り込むことのできる分布型流出モデルに、汚濁物質の河川での自浄作用を組み込み、汚濁物質輸送過程の検討を行った。

2. GIS解析による原単位と行政データを用いた 汚濁負荷発生量の推定

(1) グリッドベースの汚濁負荷量算定手法

表-1 発生源別原単位

種別		単位	COD	T-N
面源	土地利用	水田	8.56	2.77
		畑地	3.91	9.02
		森林	4.86	1.08
		市街地	12.97	3.34
		ゴルフ場	3.91	9.02
点源	畜産	牛	0.53	0.18
		豚	0.13	0.033
	人間	人間	0.024	0.0086
		食料品	69000	4930
	工業	飲料・飼料・たばこ	69000	4930
		繊維	30300	1500
		衣服・その他	260	15
		木材・木製品	220	15
		家具・装備品	290	18
		パルプ・紙	234000	10040
		出版・印刷	440	29
		化学	41800	4340
		石油・石炭	17900	610
		プラスチック	17900	610
		ゴム製品	34700	1100
		なめし革	28800	2770
		窯業・土石製品	1300	670
		鉄鋼業	1830	300
		非金属製品	550	387
		金属製品	365	620
		一般機械器具	183	170
		電気機械器具	1350	30
		輸送機械器具	550	15
		精密機械器具	730	4700
		その他	1530	1200
		秘匿	0	0

河川の集水域内から発生する汚濁物質の量を汚濁負荷発生量という。本研究では、工場・下水処理場・家庭(人間)・畜産の点源、および森林・農地(田・畑)・市街地・河川地などの面源からの汚濁負荷発生量を原単位法により推定した。原単位法は(1)式のように各発生源別原単位とその基数の積の総計で表され、各発生源別にCOD及び全窒素汚濁負荷発生量を算出した。

$$L = \sum L_i = \sum \alpha f_i p_i \quad (1)$$

ここで、 L は総汚濁負荷発生量、 L_i は発生源別発生量、 f_i は発生源別基数、 p_i は発生源別原単位、 α は排出率である。

原単位については、公表値にばらつきがあるが、本研究では、主に國松・村岡²⁾の値をもとに与えた(表-1)。工業由来の原単位は業種別、生産額を基とした汚濁負荷排出原単位である。なお点源の人間由来と畜産由来の負荷量については、下水終末処理場などの各種処理施設の排出率(表-2)も考慮した。発生源別基数には各種行政データを用いた(表-3)。以下、発生源別の汚濁負荷発生量の算出方法を示す。

a) 土地利用由来の負荷量

国土数値情報土地利用メッシュデータ(L03-03M)を用いて算出した。但し、このデータは土地利用を11分類しているため、表-1に示す土地利用5分類に再分類し、三次メッシュ(約1km×1km)ごとに負荷量を算出した。

表-2 各処理施設での排出率

排出率(%)	処理形態	COD	T-N
畜産	分離簡易処理(ボロ出し)	26	51
人間	下水処理	21	61
	戸別処理浄化槽	37	70

表-3 発生源基数に用いた各種行政データ

データ項目	出典
人口	国政調査地域メッシュ統計データ(H7年度)
工業生産額	工業統計メッシュデータ(H7年度)
下水道	普及率:(財)日本下水道協会HP (H12年度市町村別データ) 終末処理場位置: 国土数値情報及び各自治体HP
畜産頭羽数	農林水産省統計情報部HP(H13年度)
土地利用	国土数値情報土地利用メッシュ(H3年度)

b) 人間由来の負荷量

地域メッシュ統計データを用いて、三次メッシュごとの人間(家庭)由来の負荷量を算出した。それをメッシュ化された市町村別下水道普及率データを用いて各三次メッシュ内において、下水処理される負荷量と下水未処理(戸別処理される)負荷量に分類し、それぞれの排出率を考慮し人間由来の負荷量とした。下水処理される負荷量は、同一下水処理区域内の各三次メッシュの負荷発生量の総計が下水終末処理場の位置と対応するメッシュから排出されるものとし、下水未処理のものは、各三次メッシュから排出されるものとした。

c) 畜産由来の負荷量

市町村単位の畜産頭羽数データ³⁾より、市町村ごとの畜産由来負荷の総量を算出する。さらに、数値地図25000(行政界・海岸線)データから、各市町村に属する三次メッシュを特定し、そのグリッドに、市町村から発生する家畜由来負荷総量を均等に配分し、各三次メッシュごとの負荷量とした。

d) 工業由来の負荷量

工業統計メッシュデータを用いて、中分類別の負荷量を求め、さらに同一三次メッシュから排出される負荷量を合計して、工業由来の負荷量とした。

上記解析をGIS上で行うことで、大量の計算が容易にでき、その結果を視覚的に表現することができる。

(2) 汚濁負荷量の全国分布

上記の手法により、日本全国の汚濁負荷量分布の推定を行った結果を図-1に示す。人口密集地や工業地帯を中心に汚濁負荷量値が高くなっていることがわかる。また、北海道東部や九州南部では、家畜による負荷量の影響で値が高くなっている。次に、全国の一級河川108流域を対象として、流域別の汚濁負荷発生量(総量:kg)を算出す

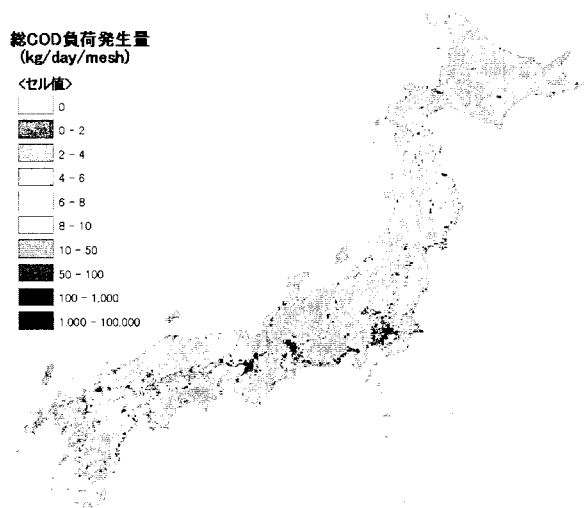


図-1 全国の総 COD 負荷発生量分布

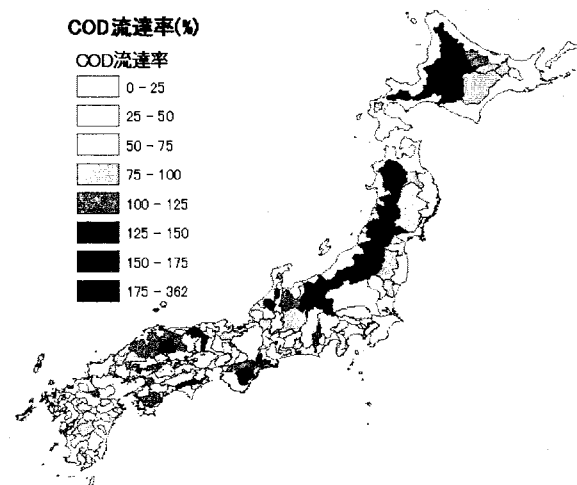


図-2 全国 108 流域の流達率

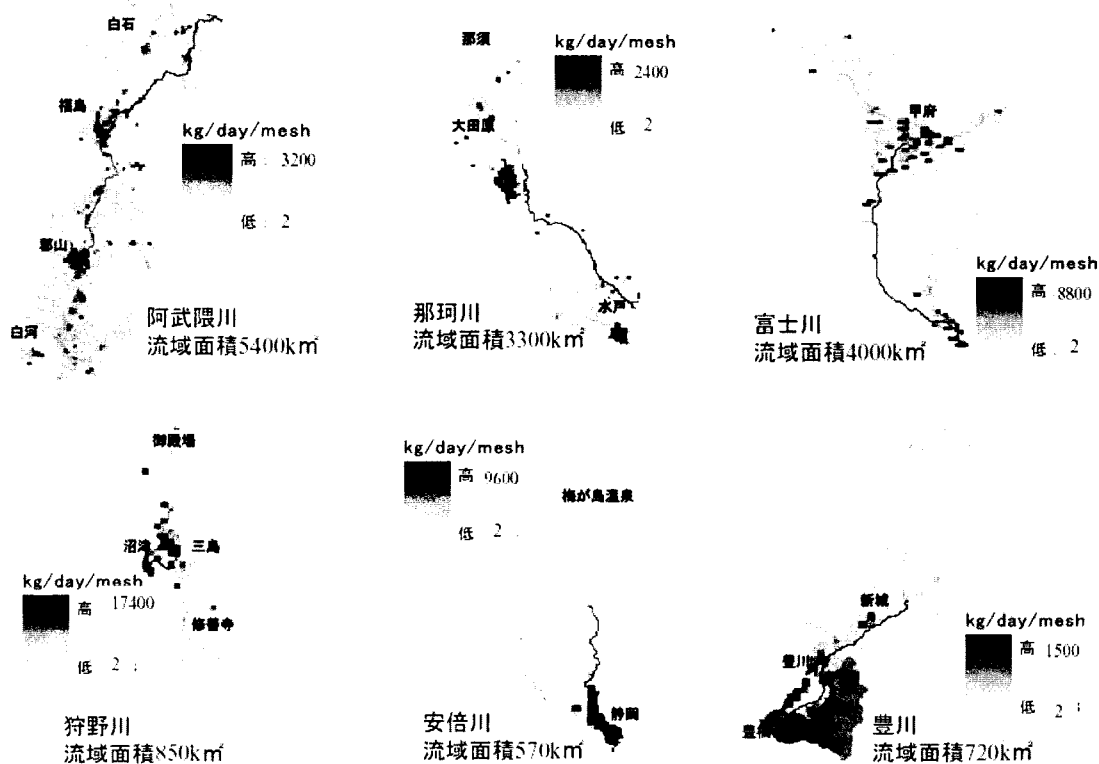


図-3 国内一級河川の流域別の総 COD 負荷発生量分布

るとともに、これと各流域の最下流実測流量観測点の流量実測データ・水質実測データを用いて流達率を算出した。流達率(%)とは(2)式のように定義され、汚濁負荷流達量は、実測された流量(m³/year)と水質(kg/m³)の積として与えられる。

$$\text{流達率} = \frac{\text{汚濁負荷流達量}}{\text{汚濁負荷発生量}} \times 100 \quad (2)$$

なお、実測流量については流量年表、実測水質は公共用水域水質データより取得した値の長期平均値(1987年

～1998年)を使用した。図-2は、全国108流域の流達率を示している。比較的年降水量が多い流域で流達率が高く、流域に大都市を含む都市河川流域で低くなる傾向が見られる。このように、本手法を用いることにより日本全国でのマクロな汚濁負荷の発生・流達状況を把握することができた。

3. 流域内における汚濁物質の発生・流出特性の検討

次に、流域内部での汚濁負荷量分布について検討する。また、推定した汚濁負荷量と擬河道網および分布型

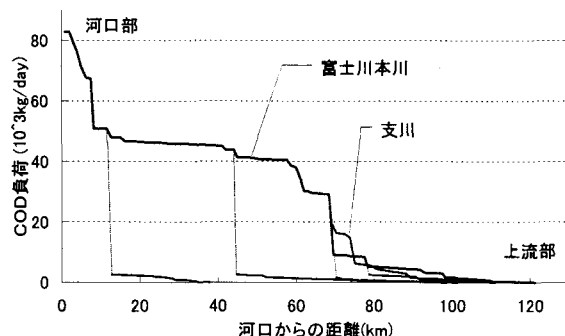


図-4 富士川流域における COD 負荷量の河川縦断方向分布

流出モデルにより推定される流量を組み合わせることにより、汚濁状況の空間的な分布だけでなく、河川水による汚濁物質の移動・集積過程に関する解析を行う。

本検討では、流出モデルとしてBTOPMC (Block-wise use of TOPMODEL with Muskingum-Cunge method)⁴⁾を用いた。このモデルは、擬河道網を介した河川水の追跡が可能なグリッドベースの分布型流出モデルであり、GISとのリンクが容易であること、水文量の時空間分布を容易に取り込めること、パラメータの数が少なく、かつその空間分布を考慮できるという特徴を持つ。なお、擬河道網を作成する際に使用したDEMは、富士川流域ではGLOBE(1kmグリッドサイズ)、他の流域では国土数値情報250メッシュ(標高)である。各DEMメッシュにおける負荷量については、前述の三次メッシュ単位で算出した値を対応するDEMメッシュに再配分することにより与えた。また、流出計算に必要な降水量データには、気象庁のAMeDASデータ(1992年～1998年)を用いた。

(1) 流域内における汚濁負荷の空間分布

日本国内の一級河川である富士川、阿武隈川、那珂川、狩野川、安部川、豊川を対象流域として、COD及び全窒素負荷発生量分布の推定を行った。その結果を図-3に示す。全体的には、土地利用で山間部よりも市街地に割り当てられる部分で負荷量が多くなっている。これは、市街地には人も多く居住し、その近郊には農地も存在することに起因する。また、下流部(河口付近)で値が大きくなっているのは工業由来の負荷量が大きく影響しているためである。

狩野川・安倍川・豊川のように下流部のみを中心に負荷量値が高くなっている流域と、阿武隈川・那珂川・富士川のように、下流部に加え、中流部にも負荷量値の高い部分の2つのタイプが見受けられる。後者は、中流部に盆地や平地が存在し、そこに都市が形成されているためであると考えられ、阿武隈川の福島・郡山・白河、那珂川の大田原・黒磯、富士川の甲府がその代表的な例である。前者は比較的流域が小さいことや下流にしか平地がないという地形的な制約により中上流部が山地(森林)で占められていることによるものであり、特に安倍

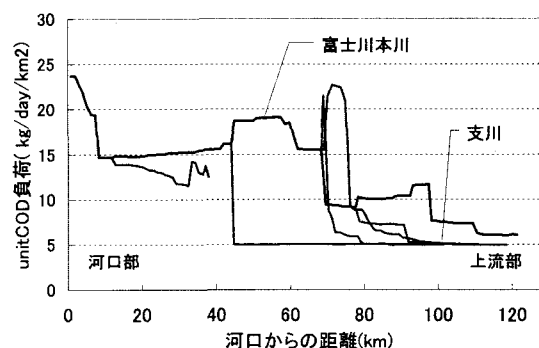


図-5 富士川流域における単位面積当たりCOD負荷量の河川縦断方向分布

川流域ではそれが顕著である。

その他流域別での特徴は、那珂川流域において、畜産業が盛んなため畜産由来の負荷量が多く、富士川流域では、甲府盆地周辺での果樹園(土地分類では畑地)が多いため負荷量がやや高くなっているなど、各流域・地域での産業形態の違いも、負荷量とその分布に大きく影響を与えている。

このように、負荷量算出を流域や市町村単位でなく、より細かなグリッド単位で見ることにより、汚濁負荷発生源・要因をより詳細に把握することが可能となる。

(2) 汚濁負荷量の河川縦断方向分布

汚濁負荷の空間的な分布だけでなく、河川縦断方向の連続的な変化を把握することを目的とし、擬河道網を用いて各グリッドからの汚濁負荷量の流下方向への積算を行った。

図-4は、富士川流域におけるCOD汚濁負荷量の河川縦断方向分布変化を表している。上流部から河口部に向かってつれ積算汚濁負荷量は増加するが、主要な支流の合流に伴い大幅に値が増加し河口に向け階段状の分布となる。

この図-4に示した積算汚濁負荷量を各地点の集水面積で除したものの(単位面積あたりの積算汚濁負荷量)の河川縦断方向変化を図-5に示す。このような解析を行うことにより、どの河川区間において高濃度の負荷が流入するかを推測する事ができる。ここに示した富士川流域において高い値を示している支流は、その流域に下水終末処理場や中規模の都市が存在しているため単位面積当たりの負荷量が大きくなっている。

図-6は、富士川本流における汚濁発生源別の単位面積当たりCOD負荷量の河川縦断方向分布変化である。これより、各汚濁負荷発生源の河川縦断方向分布を把握する事が可能である。富士川流域では、中流部と下流部で、工業由来によるCOD負荷量が大きくなるのが読み取れる。

以上のように河川縦断方向の汚濁負荷量を算定することにより、汚濁負荷量の排出場所、量が推定できるとことや、河川ごとの汚濁負荷量の比較を行うことができる。これらの解析結果は、今後の汚濁負荷発生量の軽減対策

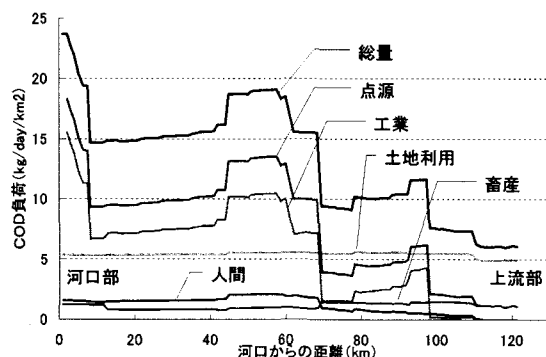


図-6 富士川本流の汚濁発生源別単位面積当たり COD 負荷量の河川縦断方向分布

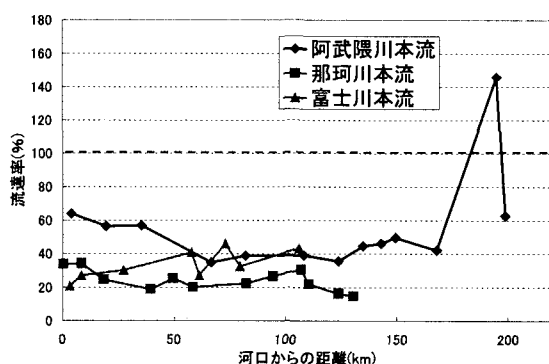


図-7 流域別 COD 平均流達率の河川縦断方向分布

などを考える上で有益な情報となり得るものである。

(3) 汚濁負荷量の流達率

縦断方向の積算汚濁負荷量と流域内の水質実測値を用いて、流達率の分布を算定した。なお、多くの水質実測地点において、流量実測値が得られていないことから、分布型流出モデルによる推定流量を代わりに使用し、(2)式により流達率を算出した。

図-7は、流域別のCOD平均流達率の河川縦断方向分布を示している。流域や地点によっては流達率が100%を超えた地点も見られたが、これは行政データの秘匿や流域外からの人口流動など本研究で考慮しなかった汚濁発生源があり、結果的に計算負荷量がやや過小評価となったことが主な原因と予想される。また、ここに示した各流域間での流達率の違いには、汚濁物質の流達過程の違いだけでなく原単位の差異の影響も含まれている。しかしながら、この手法により、富士川では中流部で、阿武隈川、那珂川では下流部で流達率が高くなっていると言ったような、流域内における汚濁負荷の流達状況を把握することができる。従来は水量・水質の実測地点の不一致によりこのような解析は困難であったが、流出モデルを用いた水質観測地点の流量推定により、限られた水質実測値を有効利用できる点が大きな特徴である。

図-8は、富士川本流における積算汚濁負荷発生量と汚濁負荷流達量とを比較したものである。汚濁負荷の発生

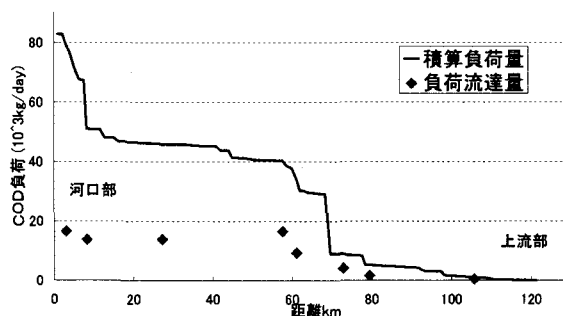


図-8 富士川本流における積算負荷量と負荷流達量の比較

量と流達量の算定値には、流量と負荷量の推定誤差も含まれているが、両者の差の主要な要因は、汚濁物質の流下過程でのトラップや浄化作用と考えられる。解析対象とした6流域の中では、流域面積が大きい阿武隈川(A=5400km²)、富士川(A=3500km²)、那珂川(A=3270km²)では、負荷量と流達量の差が大きく、流域面積の小さい豊川(A=720km²)、狩野川(A=850km²)、安倍川(A=570km²)においては両者の差は小さくなる傾向が見られ、また同じ流域内でも上下流など場所によって、この差は大きく異なっていた。

4. 分布型流出モデルを用いた汚濁物質輸送過程の検討

(1) 河川の自浄作用を考慮した汚濁物質輸送過程の検討

本検討では、自浄作用過程を考慮した河道縦断方向のCOD濃度分布の抽出を主目的とし、分布型流出モデル(BTOPMC)に河川の自浄作用過程を組み込み、その影響を考慮した汚濁物質輸送過程の検討を行った。

なお、長期間の物質輸送計算においては、数値解法(時間・空間的離散化の手法及びスケールの選択を含む)に起因する収支誤差の蓄積が問題となることがあるが、今回は各タイムステップ内での流下に伴うCODの変化を定常一次元物質収支式(3)⁵⁶⁾で近似的に表現し、(3)式の解析解である(4)式を擬河道網に適用することにより、各モデルグリッドにおけるCOD濃度を算出した。

$$u \frac{dC}{dx} = -k_b C - k_p C + L_c \quad (3)$$

$$C = \frac{L_c}{k_b + k_p} + \left(C_0 - \frac{L_c}{k_b + k_p} \right) \exp \left(- \frac{k_b + k_p}{u} x \right) \quad (4)$$

ここで、 C はCOD濃度(g/m³)、 C_0 は初期COD濃度(g/m³)(河道区間上流端でのCOD濃度)、 x は流下距離(m)、 u は流速(m/min)、 k_b は生物活動による酸素消費速度(1/min)、 k_p は物理・化学的作用によるCOD除去速度(1/min)、 L_c はCOD負荷量(g/m³/min)である。COD負荷量 L_c については、

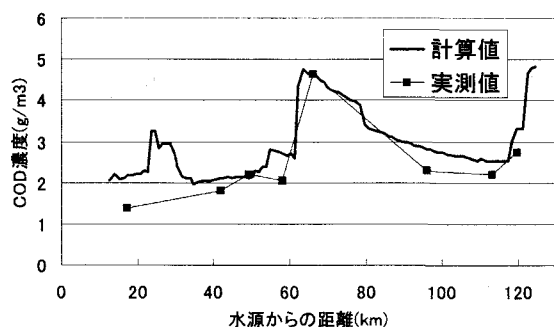


図-9 富士川本流における河川縦断方向のCOD濃度変化

各メッシュにおける推定COD負荷量を年間一定に与え、流下距離 x には各擬河道区間長、流速 u は分布型流出モデルにより計算したものを用いる。 C_0 については、まず計算開始時に負荷量と初期流量をもとにメッシュ毎に与え、その後は対象メッシュに流入する上流側メッシュのCOD濃度と流量から算出した。この計算を1タイムステップにおいて流域内全メッシュに対して行い、ステップ終了時点で各河道区間に存在しているCOD量は、次ステップの L_c に含めた。なお、最上流部(一次谷など)のメッシュでは無降雨時の流量低下により見掛け上のCOD濃度が急激に上昇するなどの問題が生ずるため、上記の計算は集水メッシュ数57個(約40km²)以上のメッシュ(河道メッシュ)について行い、それ以下の集水面積のメッシュ(斜面メッシュ)からの負荷については、そのメッシュから一番近い河道メッシュの負荷に加算することで処理した。

このように、本計算においては、場所ごとの発生負荷量の違い及び水理量の変化は考慮されているものの、負荷量の季節変化や河道への負荷流入過程における降雨の影響は考慮されていない。また、浄化パラメータ k_b 、 k_p についても、ここでは文献値を用い流域内一定の値(k_b 、 $k_p=0.0005(1/min)$)を与えている。

(2) 分布型流出モデル(BTOPMC)への適用とその結果

本章では、富士川流域を対象として河川の自浄作用を考慮したCOD濃度の計算を行った。解析期間は、1994年～1995年の二年間で、タイムステップは日単位である。

図-9は1995年9月26日の富士川本川における河川縦断方向のCOD濃度変化のグラフである。浄化パラメータの空間分布や負荷の季節変化が考慮されていないこともあり、地点によっては、計算値と実測値に差がある場合も見られたが、COD濃度の河川縦断方向の変化傾向は概ね一致していることが確認された。またモデル計算結果には、水源からの距離が20～40kmの河道区間に濃度が高くなっている地点が見られる。このような水質観測地点ではない任意地点での水質を推定することができる可能性を示唆している。このようなモデルの特性を生かし、今後は、点での水質実測値の補間をし、流域全体の水質

状況を把握するツールとして本モデルを利用していく予定である。

5. おわりに

本研究では、原単位と行政データを用いたGIS解析により日本全国及び流域ごとのグリッドベースの汚濁負荷発生量を推定しその分布図を示した。また、それを用いて、擬河道網と組み合わせることにより河川の縦断方向分布を示し、流達率を算定することにより、汚濁物質の発生・流達特性を把握することができた。さらに、分布型流出モデルに河川の自浄作用を組み込むことにより、汚濁物質輸送過程の検討、河川の縦断方向における水質変化の推定を行った。

技術的な課題としては、さらに詳細に河川における水質変化をモデル化するために汚濁物質の晴天時、降雨時流出を考慮した輸送過程を分布型流出モデルに組み込み、その影響を考慮した汚濁物質輸送過程の検討を行う必要がある。

しかしながら、今回示した手法は、国内において広く一般に公開されているセンサス、GIS、水文気象データのみを入力情報とするものであることから、日本各地への適用が可能である。また、やや空間解像度は落ちるものの、ほぼ同様のデータは全球規模で整備されつつあることから、水質監視が必要であり、かつ現在十分に行われていない途上国の河川流域への適用も今後進めていく予定である。

謝辞：本研究は、文部科学省 RR2002「アジアモンスーン地域における人工・自然改変に伴う水資源変動予測モデルの開発」(代表：山梨大学 竹内邦良)、文部科学省21世紀COEプログラム「アジアモンスーン域流域総合水管理研究教育」(拠点リーダー：山梨大学 竹内邦良)の援助を受けている。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) IWA, River Water Quality Model No.1, Scientific and Technical Report No.12, IWA Task Group on River Water Quality Modeling, 131p, 2001.
- 2) 國松 孝男, 村岡 浩爾: 河川汚濁のモデル解析, 技報堂出版, pp7-24, 1989.
- 3) 農林水産省: 統計データ 市町村の姿 グラフと統計で見る 農林水産業, <http://www.toukei.maff.go.jp/shityoson/index.html>, 2001.
- 4) 教 天其, 石平 博, 竹内 邦良: ブロック型TOPMODEL及びM-C法による分布型流出解析モデルの検討, 水工学論文集第43巻, pp.7-12, 1999.2.
- 5) 國松 孝男, 村岡 浩爾: 河川汚濁のモデル解析, 技報堂出版, pp101-105, 1989.
- 6) 土木学会: 水理公式集例題プログラム集, 第6編 水環境編, 例題6-13 河川のBOD,DOの一次元解析,2001.

(2004.9.30 受付)