

河川環境確保のための土地利用と許容人口の関係

RELATION BETWEEN LANDUSE AND ALLOWABLE POPULATION FOR CONSERVATION OF RIVER ENVIRONMENT

土田 恭平¹・風間 聡²・沢本 正樹³

Kyohei TSUCHIDA, So KAZAMA, Masaki SAWAMOTO

¹学生会員 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

²正会員 博士(工学) 東北大学大学院環境科学研究科環境科学専攻 (同上)

³フェロー 工博 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (同上)

Many people request river environmental preservation and regeneration for nature conservation. Although it is important to assess the river environment on a planning stage, the evaluation method has not been established yet. Almost rivers are artificially influenced, therefore the method based on residable population within a basin is proposed as the index which can be used for future basin development and a future river planning. The relation between allowance population and discharge is obtained for each ratio in paddy field cover. The pollution load is estimated using the discharge obtained from runoff model and pollutant load factor, and the population is estimated as the index of water environment satisfying water quality condition.

Key Words : Allowable population, pollutant load factor, paddy field cover, river planning

1. はじめに

平成9年の河川法改正にも見られるように, 自然豊かな河川環境の保存・再生が求められるようになり, 計画段階からの環境評価が重要になってきている。過去には水質, 生態, 河川構造といった要素の点数付けから河川環境を評価した研究もあるが^{1), 2)}, 指標の選択や地域特性の考慮などの課題もあり, 定量的評価手法の確立には至っていない。都市部を流れる河川や多くの自然を残した河川などさまざまな河川があるが, 日本における河川はいずれにしても人為的な影響を受けていることが多く, 遷移過程にある自然と, 人間活動の間にある半自然の状態にあると言える。そのような河川の状態に大きな影響を与えるもののひとつとして流域内人口がある。人口が増加すれば, 河川に与える影響も大きくなり, また, それぞれの河川に期待される役割も大きく異なってくる。

ある河川が健全な状態を保つためにはある流量が必要になる。そのためには水資源量が水需要量を上回らなければならない。また住民が望む水質を確保するには土地利用または人口を制限するか, 処理場(投資)が必要となる。上水のために水源から質と量を確保すると, 自然状態では人口が増加するに従い流量の減少と水質の悪化が生じる。この水質と水量と人口の関係から, 河川環境

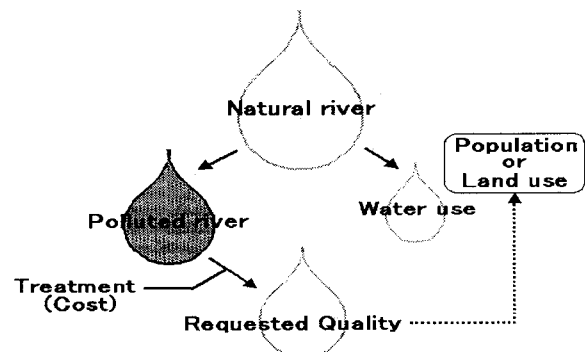


図-1 研究概念図

指標を提案することを最終目標とする。本研究ではこの一部として, 水質を固定させ, 集水域内の水量と人口の関係を土地利用から評価することを目的とする。

分布型流出モデルから得た流量を水資源量とし, 人口と水田による水使用量の関係から河川流量を求めた。分布型モデルの場合, スケールを変更させることにより1流域の中でも様々な流域を取り扱うことができる。これらから土地利用, 人口と河川水質の関係を導くことができる。逆に水質を固定すれば各地域での許容人口が決定されるはずである。本研究では多様な土地利用を持つ名取川を対象にこれらの関係を導き, その結果を考察した。

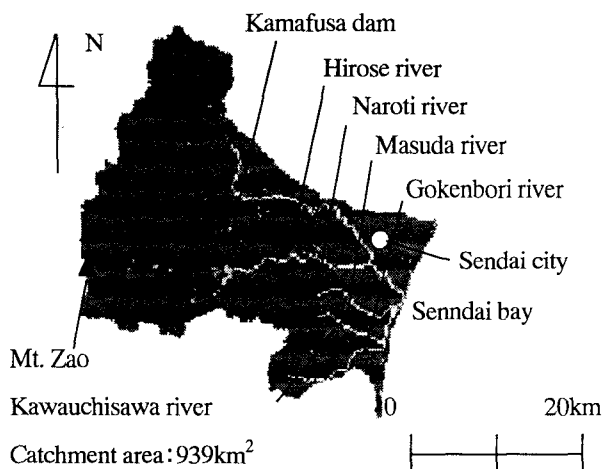


図-2 名取川流域図

2. 対象流域およびデータセット

(1) 対象流域

対象地域は一級河川名取川水系(図-2)である。宮城県中央部に位置し、奥羽山脈から仙台湾へと注ぐ。幹線流路延長は55km、流域面積は939km²(山地675.1km²、平地245.1km²、河川区域20.7km²)である。流域内には仙台市を代表とする都市圏、蔵王山系を中心とする積雪域、穀倉地帯である水田域、森林が広く分布し種々の土地利用が存在する。

(2) データセット

流出モデルのデータセットとして、国土数値情報をもとに流域内の標高、土地利用図を作成した。蒸発散マップは人工衛星NOAA/AVHRRの画像から作成した。降水量は気象庁月報から仙台、新川、川崎のデータを、また降雪量の標高補正のためにレーダーアメダスのデータを用いた。

(3) NDVIを用いた蒸発散量の推定

蒸発散量を支配する因子には、気温、地表面温度、日照時間、湿度、風速、土壌水分等があるが、これらは全てその地域の植生に影響を与えており、また植物自身も、蒸発散量に影響を与えていると考えられる。そこで、植生をパラメータとして蒸発散量を推定できることが考えられる。したがって、NDVIを用いることで蒸発散量を推定し得ると考えられる。

これまでの蒸発散量は、限られた地点の情報、または流域全体の水収支からしか算定されなかった。そのため広域面からの蒸発散や流域内での空間的分布の推定は困難であった。しかし、NDVIによる推定が可能であれば、広域の面的情報が得られ、蒸発散量の分布を容易に知ることが出来る。さらにNDVIだけを使った推定であれば、気象、水文情報の整備されていない地域につい

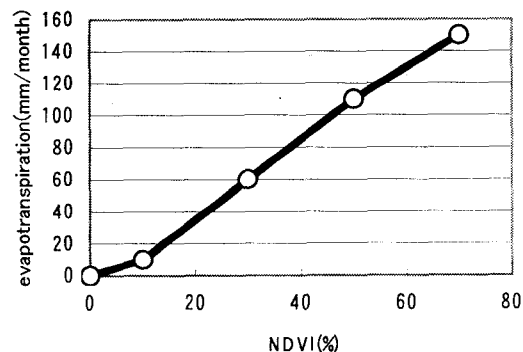


図-3 釜房ダム流域におけるNDVIと蒸発散の関係

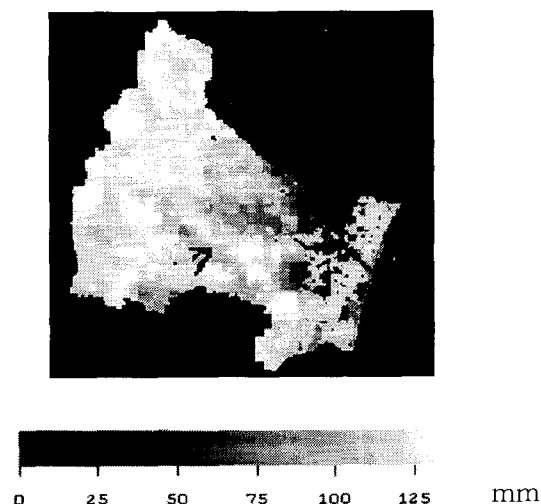


図-4 7月のNDVIによる蒸発散量分布

ても蒸発散量を推定することが可能となる。そこで本章では、図-3に示す多田³⁾が求めた釜房ダム流域におけるNDVIと蒸発散量との関係を用いて、名取川水系の蒸発散量及び、その空間的分布の推定を行った⁴⁾。

3. 流出計算

流域はそれぞれ固有の河道網と斜面から成り立っているため、流域を河道と斜面とに分割し、河道系と斜面系それぞれについて水理学的に追跡を行う。本研究では、名取川水系のうち流量が大きくなる下流部の名取川、広瀬川、増田川、川内沢川、五間堀の5つの河川を河道系として扱った。斜面部は、積雪・融雪層、直接流層、基底流層の3層から構成され、直接流にはkinematic waveモデルを、基底流には貯留関数法を用いた。河道流出にはdynamic waveモデルを用いた。

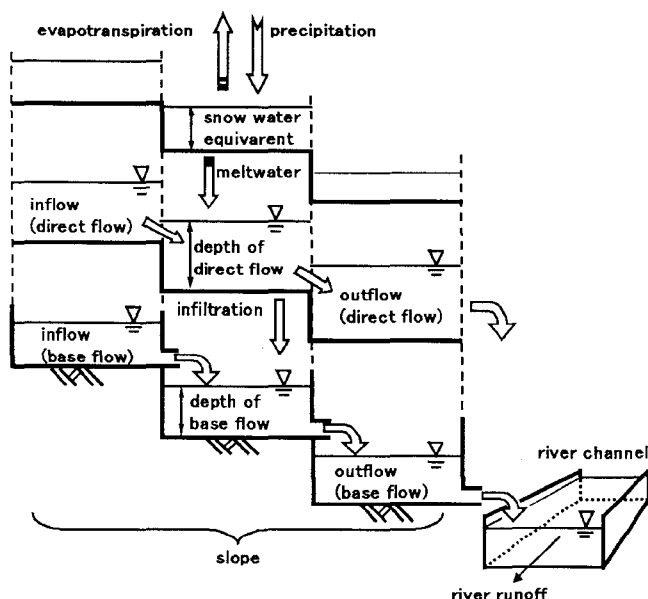


図-5 流出計算概念図

(1) 積雪・融雪層

降水形態を気温 2°C 以上で雨、 2°C 未満で雪として、各計算メッシュの積雪水頭量を求め、そこからの融雪量を degree-day法^{5), 6), 7)}により求めた。融雪係数は戸塚ら⁸⁾が推定した値を用いた。流域内の降水量および気温は川崎、仙台、新川のデータから重み付き距離平均法を用いて推定した。気温は気温減率 ($0.6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$) により補正した。また、降水形態が雪と判断された場合は、降雪量の標高依存性を考慮して次式により補正した。

$$SF' = SF \times (1 + 0.001 \times ELV) \quad (1)$$

ここで、 SF' ：補正後の降雪量、 SF ：降雪量、 ELV ：標高、である。

(2) 直接流層

直接流は kinematic wave 法により推定した。kinematic wave 法は、雨水流出を運動方程式と連続の式を用いて水理学的に追跡する方法で、雨水流下の下流側の条件が上流側に及ばないという仮定のもとに成り立っている。kinematic wave モデルは、本来、斜面上を流下する地表流を対象としている。しかし、豪雨時の出水解析には表面流と中間流を合わせた直接流出に対して kinematic wave モデルを適用しても十分な結果が得られることが多い。本研究では、降雨および融雪による全流出量から蒸発散量を引いたものがすべて地表流であるとして kinematic wave 法を用いた。

降雨および流出はメッシュ点でのみ起こるものとし、このとき各メッシュへの流入量に降雨量および融雪量が加わり下流へ伝播される。連続の式は次のようになる。

$$Qdt + (r + s_m - E)dx Bdt - \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial t} dx \right) dt = \left(\frac{\partial A}{\partial t} dt \right) dx \quad (2)$$

A : 流水断面積 B : 水面幅 Q : 流量
 t : 時間 x : 流下方向の距離 r : 降雨量
 s_m : 融雪量 E : 蒸発散量

上式で矩形断面を仮定し整理すると、下式が得られる。

$$\Delta h = \frac{\Delta t}{B \Delta x} (Q_{in} - Q_{out}) + (r + s_m - E) \Delta t \quad (3)$$

Δh : メッシュの水深変化量 Q_{in} : 流入流量
 Q_{out} : 流出流量 Δt : 計算時間間隔
 Δx : 計算メッシュ間隔

上式の第1項、第2項はそれぞれ流入、流出による水深の変化量を表している。よって第2項をメッシュごとに求め、その値を流下先のメッシュに加えることにより各メッシュでの水深変化を求めていく。

(3) 基底流層

基底流は貯留関数法により計算した。木村⁹⁾により全国の河川で調べられた総合貯留関数

$$S = \alpha q^{\beta} \quad (4)$$

q : 流出高 S : 貯留水量

をもとに計算した。ここで α , β はそれぞれ実測値と最もよく一致した70.3, 0.5 を用いた。

(4) dynamic wave 法について

河道を流れる洪水流は時間的・空間的に変化する。洪水流を支配している方程式は非線形の偏微分方程式であり、厳密な解を得ることは困難である。そのため、様々な数値解析法が提案されている¹⁰⁾。dynamic wave モデルとは差分法を用いて洪水流計算を行うモデルであり、運動方程式を全く省略せずに計算を行うことができる。

洪水流の基礎方程式は次の連続式 (5) と運動方程式 (6) から成っている。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q = 0 \quad (5)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{2g} \frac{\partial v^2}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{n^2 |v| v}{h^{4/3}} = 0 \quad (6)$$

A : 断面積 Q : 流量 q : 横流入量
 g : 重力加速度 v : 流速 H : 水位
 n : マニングの粗度係数¹¹⁾ h : 水深

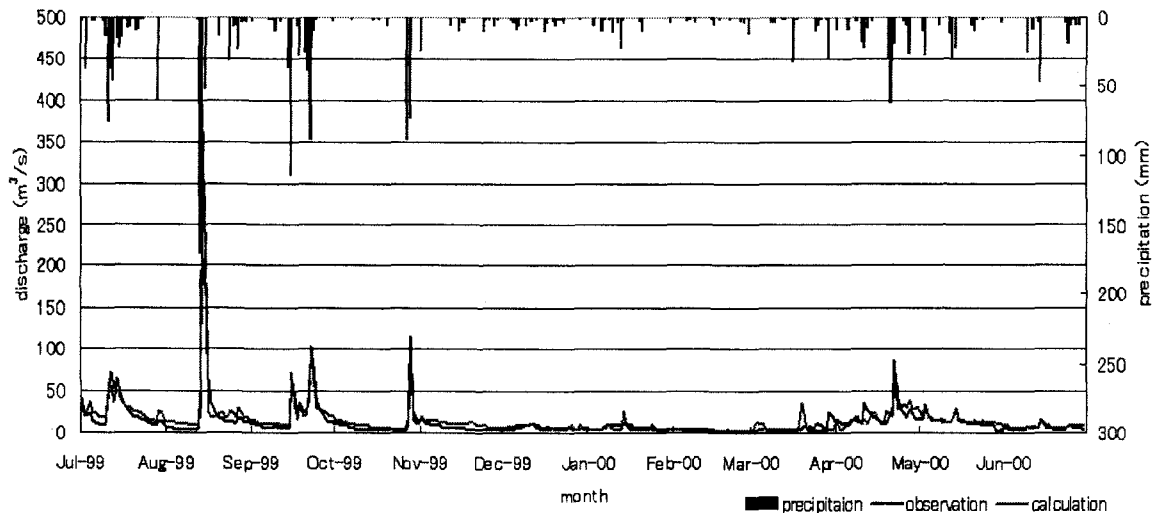


図-6 釜房ダムへの実測流入量と計算流入量

連続式 (5) で水路を矩形断面とし、時刻 n 、メッシュ番号 i の点を差分中心として差分化したものを ${}_{n+1}h_i$ について解くと、以下の式 (7) が得られる。

$${}_{n+1}h_i = {}_{n-1}h_i - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(\frac{{}_{n-1}h_i + {}_{n-1}h_{i+2}}{2} {}_nV_{i+1} - \frac{{}_{n-1}h_{i-2} + {}_{n-1}h_i}{2} {}_nV_{i-1} \right) - \frac{\Delta t}{B} q \quad (7)$$

運動方程式 (6) を、時刻 n 、格子番号 i の点を差分中心として差分化し、 ${}_{n+1}V_i$ について解くと、以下の式 (8) が得られる。

$${}_{n+1}V_i = \frac{{}_{n-1}V_i(1-fr) - \frac{\Delta t}{4\Delta x}({}_{n-1}V_{i+2}^2 - {}_{n-1}V_{i-2}^2) - g \frac{\Delta t}{\Delta x}({}_nH_{i+1} - {}_nH_i)}{1+fr} \quad (8)$$

$$fr = \frac{gn^2|{}_nV_i| \Delta t}{2h^{4/3}}$$

河道では式 (7)、(8) を用いた差分計算により流出計算を行った。

(5) 計算結果

流出計算の概念図を図-5に示す。また、釜房ダム流入の実測値と計算値を図-6に示す。

4. 汚濁負荷量の推定

(1) 原単位

名取流域各メッシュそれぞれの集水域内の土地利用と汚濁負荷原単位をもとに汚濁負荷量の推定を行う。汚濁負荷の発生源は市街地、水田、森林とした。市街地と水田の負荷流出原単位を表-1に示す¹²⁾。

表-1 汚濁負荷原単位

		TN
生活下水(g/人・日)	し尿	10
	雑排水	2
	食物由来	1.8
	洗剤類由来	0.2
	合計	12
水田(kg/ha・年)	表面流出	8
	地下流出	11.7
	総流出量	19.7

森林からの流出負荷は、降雨時には平水時の数百倍にも のぼるといわれている。森林からの流出負荷量は以下の式で求められる。

$$L = \alpha Q^\beta \quad (8)$$

ここで、 L ：負荷量、 Q ：流量 である。 α 、 β は係数で 國松らによると窒素の場合それぞれ0.16、1.09である。

(2) 集水域内人口

人口の分布データは(財)統計情報研究開発センターが提供している地域メッシュ統計(平成12年国勢調査)のデータを利用した。総務省統計局をはじめとする国の行政機関が作成している地域メッシュ統計の主なものは、「統計に用いる標準地域メッシュ及び標準地域メッシュコードのメッシュ地図」を使用して作成されている。一辺約500mのメッシュに人口のデータが収められている。図-7に名取川流域の人口の分布図と各メッシュの集水域内人口を示す。集水域内人口とは各メッシュの集水域内の総人口である。

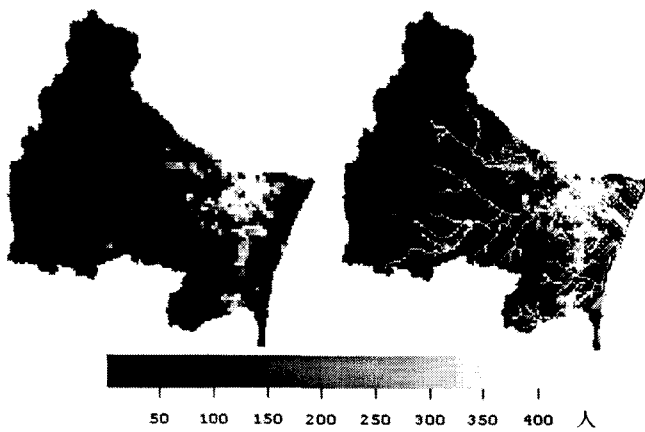


図-7 人口分布図（左）と集水域内人口（右）

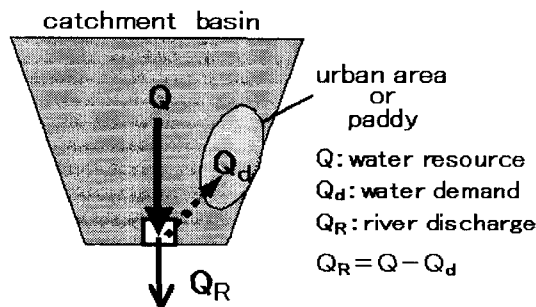


図-8 河川流量イメージ図

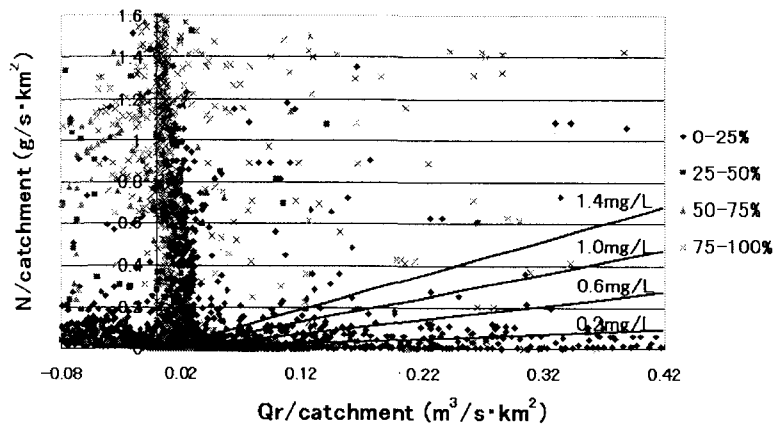


図-9 流量と汚濁負荷量の関係

(3) 河川水質の評価

(1),(2)で評価した汚濁負荷量と河川流量の関係から河川水質を評価する。河川流量 Q_R は図-8に示すように、流出モデルで求めた流量（水資源量） Q と、そのメッシュの集水域内で必要とされる水量 Q_d の差で表す。河川流量は、水田の湛水期間である5月から8月のうち、最も流量の少ない6月の流量を用いた。水使用量は、一人あたり322L/日（国土交通省水資源部）、水田での減水深は一般的な30mm/日として計算した。図-9に各メッシュにおける窒素の汚濁負荷量と河川流量の関係を示す。集水域の大きさの影響を取り除くために、どちらも集水面積で除した値となっている。また点の色分けは集水域内の市街化率を表す。ここでの市街化率は、対象メッ

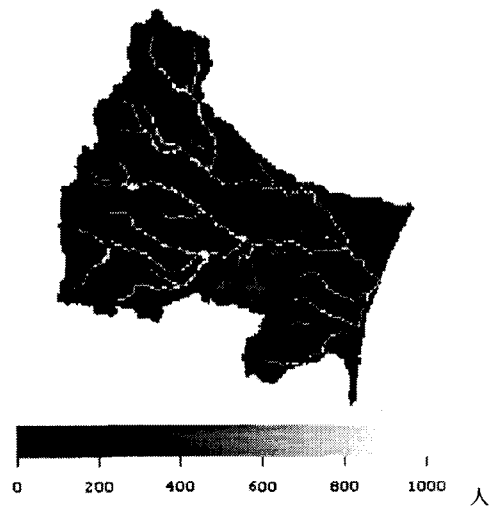


図-10 流域内許容人口

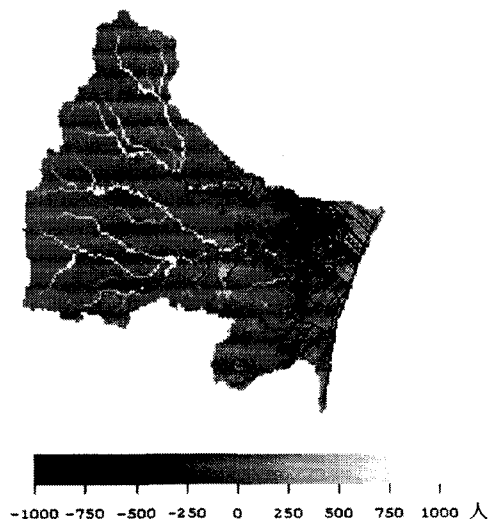


図-11 人口分布図と許容人口との差

シュを中心とした3×3メッシュ内で土地利用が「建物用地」、「幹線交通用地」、「その他用地」となるメッシュの占める割合とした。図-9で河川流量が $0(\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 以上のメッシュでは傾きがそこでの窒素濃度を表す。 $0(\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 以下のメッシュは水不足量と汚濁負荷量の比になっており、原点から離れるほど状況が悪くなる。

5. 集水域内許容人口

(1) 水質基準

次に、図-9をもとに、ある水質基準を満たすことができる各点の集水域内の許容可能人口を求める。河川環境保全のための水質基準は様々なものがあるが¹³⁾、その河川が流れる場所や周辺環境、あるいは用途などを考えて設定されなければならない。例えば都市部を流れ多くの人の生活を支える河川であれば、その分水は汚れやすいが、水をどれくらいの状態まで浄化するかは住民や都市計画などにより決定される。

今回の対象河川である名取川水系のうち広瀬川、名取川は、東北地方で最大の都市である仙台市街地を蛇行しながら流れ、水辺のあるオープンスペースとして、また自然の空間として市民の憩いの場を提供している。鮎が生息するなど、豊かな自然も残っている。広瀬川の清流を守る条例では鮎を指標にするなど住民の関心も高い。そこで今回は日本水産資源保護協会が定める水産用水基準のうち鮎の生息条件（窒素濃度0.2mg/L以下）を基準に流域内許容人口を求めた。集水域内に人が住んでいない状態から人口を増加させ、水質基準を満たすことができる最大の人口を集水域内許容人口とする。図-10に集水域内許容人口を、図-11に実際の集水域内人口分布（図-7右）との差を示す。図-11で値が負のメッシュ（黒いメッシュ）は人口が許容量を超えていることを表し、その絶対値が条件を満たすために減らさなければならない人数を表す。

(2) 結果

図-11より、仙台市市街地を中心に許容人口以上の人が生活していることがわかる。実際には名取川流域では630852人の人々が生活しており、これらの人々の生活は南蒲生浄化センター、定義浄化センター、広瀬川浄化センター、秋保温泉浄化センター、宮城県県南浄化センターなどの下水道処理施設により支えられている。これらの施設で年間271億円（平成13年）の下水道事業費により生活が可能となっている。

稲作が盛んな日本では、灌漑期の水田への取水が河川流量を減少させ、河川環境に大きく影響する。名取川の名取頭首工でも5月1日から15日までは $8.84\text{m}^3/\text{s}$ 、5月15日から8月31日までは $7.64\text{m}^3/\text{s}$ の農業用水が取水されている。そこで、各集水域内の土地利用のうち、水田が占める割合を0%から10%まで変化させたときの名取流域内各メッシュでの流量と許容人口の関係を示した（図-12）。水田が増えるにつれて許容人口は小さくなる。水田面積率が0%のときは流域内の最大許容人口は約11万人であるが、10%になると7万2千人程度となる。水田面積率10%の減少に対して許容人口は30%程減少する。また、水田面積率が10%になると、人が生活するのに約 $35\text{m}^3/\text{s}$ の流量が必要となることがわかる。

6. まとめ

本研究では斜面部3層と河川部からなる流出モデルを作成し、流出モデルから得た流量に水需要量を考慮した河川流量と、汚濁負荷原単位等から流域内各点での水質を推定した。そこからある水質基準を満たすことができる最大人数として集水域内の許容人口を求めた。流域開発に伴う土地利用の変化と目標とする水質から集水域内の許容人口を求めることにより、そこで必要となる浄化施設や、あるいは新しい開発計画などの議論が可能とな

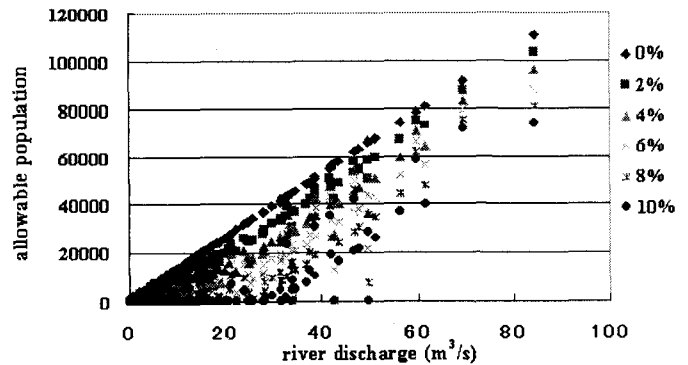


図-12 水田面積率による許容人口の変化

る。今回は水質基準を設定してから許容人口や土地利用の変化による考察を行ったが、それらを同時に扱える指標の作成や、名取川以外の河川での検討が今後の課題である。

謝意：本研究を遂行するに際しては、国土交通省東北地方整備局釜房ダム管理所に放水量のデータを利用させていただいた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 土屋十圀, 和泉 清: 河川環境評価についての一考察, 水工学論文集, 34巻, pp55-60, 1990.
- 2) 豊崎貞治: 河川環境評価に関する基礎的研究, 土木学会年次講演会論文集, 53巻, pp768-767, 1998.
- 3) 多田毅: 衛星データによる東北地方の蒸発散推定手法の開発, 東北大学修士論文, 1995.
- 4) 渡辺浩明, 風間聡, 多田毅, 澤本正樹, 岡崎新太郎: 土地利用を考慮した時空間蒸発散解析, 河川技術論文集, 8巻, 2002.
- 5) 塚本良則: 森林水文学, pp201-210.
- 6) 日野幹男, 長谷部正彦: 水文流出解析, pp192-198
- 7) 太田岳史: 気温および降水量による山地積雪水量の経時変化の推定, 日本雪氷学会誌51巻1号pp37-48
- 8) 戸塚岳大: 積雪モデルと衛星積雪面情報を用いた東北地方の積雪分布解析, 土木学会東北支部技術研究発表会, 2003.
- 9) 吉川秀夫: 河川工学, 朝倉書店, pp45-48, 1966.
- 10) 伊藤剛: 数値解析の応用と基礎, アテネ出版, 1971.
- 11) 氾濫シミュレーション(2), 土木研究所資料第2175号
- 12) 國松孝男, 村岡浩爾: 河川汚濁のモデル解析, 技報堂出版, 1989.
- 13) 大垣眞一郎, 吉川秀夫: 流域マネジメント, 技報堂出版, 2002.

(2003.9.30)