

都市圏における統合的な施策評価のための 水環境評価モデルの開発

馬場剛¹・森田哲夫²・杉田浩³・小島浩⁴・吉田朗⁵

¹(財)計量計画研究所 環境資源研究室 (〒162-0845 東京都新宿区市ヶ谷本村町2-9)

E-mail: tbaba@ibs.or.jp

²正会員 群馬工業高等専門学校環境都市工学科 (〒371-8530 群馬県前橋市鳥羽町580)

³正会員 (財)計量計画研究所 (〒162-0845 東京都新宿区市ヶ谷本村町2-9)

⁴(財)計量計画研究所 東北事務所 (〒980-0802 宮城県仙台市青葉区二日町3-10)

⁵正会員 東北芸術工科大学デザイン工学部 (〒990-9530 山形県山形市上桜田200)

著者らは、パーソントリップ調査が実施されている都市圏を対象に、都市環境施策が交通や土地利用等の都市活動に及ぼす影響を表現し、環境負荷、生活の質、経済の視点から評価するシミュレーションモデルを開発している。本稿では、このシミュレーションモデルに新たに追加した水環境評価モデルについて報告し、仙台都市圏を対象にしたケーススタディの結果を示す。分析の結果、水環境評価モデルは現況再現性が得られており、水環境評価のための十分な精度を確認できた。ケーススタディでは、土地利用施策、下水道施策、水資源施策を行った場合の環境への影響を評価し、流域保水能力、水質改善度への効果を明らかにした。

Key Words : aquatic impact assessment, environmental load, assessment model, water quality

1. はじめに

(1) 研究の背景

全国各地で環境共生型都市や低炭素型都市の検討が進められており、都市計画における環境配慮が益々重要になりつつある。日本では、内閣府が公募した環境モデル都市に80を超える自治体が応募するなど環境に対する関心は高く、海外を見ても、欧州のサステイナブルシティ戦略や、イギリスのエコタウン、フランスのエコシティなど環境に配慮した都市づくりの事例に事欠かない。しかし、都市計画の計画段階における環境への配慮は、地球温暖化対応策に重点が置かれ、水環境や熱環境、動植物・生態系等のその他の環境要素については、関心が高いものの実際の取組みは手薄である。特に水環境は、都市構造や土地利用の影響が大きく受けるにも係らず、計画段階で水環境への影響を配慮した検討事例は、これまであまり見受けられない。

一方で、地球温暖化の進行に伴う降水パターンの変化や海面上昇は、都市の水環境に多大な影響を与えることになる。近年のゲリラ豪雨の影響を見ても、ダムや堤防、都市内の排水処理システムのみに対応を任せるのではなく、土地利用や都市施設の配置も含めて流域全体で対応することが求められている。特に、都市計画の計画段階

において水環境への影響を踏まえながら都市構造方針や土地利用計画を検討・立案することが必要である。

このような背景を受け、著者らは、都市環境施策が交通や土地利用等の都市活動に及ぼす影響を表現し、環境負荷、生活の質、経済の視点から評価する既報のシミュレーションモデルを拡張し、水環境評価が可能なモデルの開発を進めている。

(2) 研究の目的

本稿は、著者らが開発を進めている都市環境シミュレーションモデルの一部を構成する水環境評価モデルについての開発研究報告である。本研究の目的は、以下に示す2つである。

- a) 既に開発している都市環境シミュレーションモデルが、大気環境（大気質、騒音）や地球環境（温室効果ガス）の評価に留まり、環境負荷を総合的に評価するためには、多様な環境指標を評価可能なモデルが必要であること。特に、政策により人口分布、土地利用の変化が見込まれることから、土地利用と関係の深い水環境評価モデルを構築する。
- b) 仙台都市圏の名取川・広瀬側流域を対象に、土地利用施策、下水道施策、水資源施策について、総合的な環境評価のケーススタディを行う。

2 本研究の特色

(1) 既存研究の整理

本研究に関連する既存研究について、土地利用・交通モデルと環境評価モデルを組み合わせた総合的なモデルと、水環境を評価するモデルの2点から整理する。

土地利用・交通モデルと環境評価モデルを組み合わせた総合的なモデルについては、Miyamoto, Kitazumeにより開発されたRURBAN¹⁾を用いたモデルがある。RURBANは、土地利用・交通モデルであるが、これに環境指標を算出する過程を加えることにより、環境指標を評価可能なモデルとなっている。一方、PROPOLIS²⁾や森田ら³⁾のモデルは、土地利用・交通モデルに、大気拡散式や騒音レベル予測式等の環境評価モデルを統合し、CO₂・NO_x排出量の他、NO₂・PMの曝露状況、騒音等の多くの評価指標を算出できる。これらモデルは、施策による土地利用や交通の変化をモデル内で表現している点がメリットである一方、デメリットとして、環境評価を主目的にしていないため、環境を総合的に評価するためには、算出できる評価指標が限られている点が挙げられる。PROPOLISや森田等のモデルは多くの環境指標が評価できるように開発が進められてきたが、それでも、水環境や熱環境、動植物・生物多様性を評価するには至っていない。

水環境を評価するモデルについては、水循環のみを扱うモデルと物質循環も併せて扱うモデルがある。水循環のみを扱うモデルとしては陸ら⁴⁾、木内ら⁵⁾、敖ら⁶⁾、羽田野ら⁷⁾の分布型流出モデルの研究がある。羽田野らは多摩川流域を対象に、斜面を多段タンクモデル、河道をkinematic wave法で計算するモデルを開発しており、上水や工業用水、農業用水といった人工系の水循環も考慮したモデルを開発している。多段タンクモデルの表層タンクは土地利用を考慮しており、土地利用や人口配置の変化が河川流量に与える影響を評価することが可能である。一方、水循環と物質循環を併せて扱うモデルについては、稲森ら⁸⁾、奥川ら⁹⁾、辻倉ら¹⁰⁾のモデルがある。稲森らは分布型流出モデルに汚濁負荷発生モデルと流出・流下過程モデルを組合せたモデルを霞ヶ浦周辺で構築しており、辻倉らは更に人工系の水循環及び汚濁負荷を考慮したモデルを開発している。これらのモデルのメリットは、現象を詳細に再現し、精度高い環境評価が可能である点である。一方、デメリットは、土地利用・交通モデルと連動していないため、施策の事前評価に向いていないこと、単体モデルとして開発されているため入出力データの受け渡しが考慮されていないことが挙げられる。

(2) 本研究の特色

前節における既存モデルのメリット、デメリットを鑑

み、本研究のモデルの位置づけを整理する。土地利用・交通モデルと環境評価モデルを組み合わせた総合的なモデルとの関係では、これまで扱われてこなかった水環境を評価指標に加え、既開発の全体モデルが更に多くの環境指標で評価可能なモデルとする。水文学、水工学分野における水循環、物質循環モデルとの関係では、本研究のモデルが、当該分野で開発されてきた既往モデルの詳細化を図るものではなく、各モデルの特徴を踏まえながら、土木計画学分野で開発されている土地利用・交通モデルに連結可能なモデルとする。

以上より、本研究の特色は、著者らが既開発のモデル（都市環境に関わる諸施策（交通、による都市活動の変化を予測し、環境、生活の質、経済等の視点から評価するモデルシステム）に、都市内河川の流量や水質といった水環境の評価が可能なモデルを追加する点にある（図-1参照）。そして、土地利用・交通モデルの下位にアタッチメント型のモデルとして水環境評価モデルを組み込むために、人口分布と土地利用に関連づける人口・土地利用変換モデルを用意することや、土地利用の変化が水循環や物質循環に与える影響を評価可能な水環境評価モデルを構築することに特色がある。

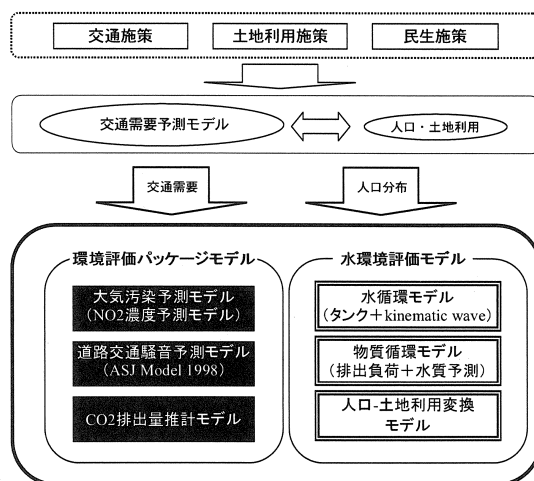


図-1 モデル体系

3 水環境評価モデルの作成

(1) モデルの構成

水循環モデルは、河川、地下水などの挙動を説明する自然系水循環モデル、上下水道や工業・農業用水における水の流れを説明する人工系水循環モデル、水質汚濁物質の発生と挙動を説明する汚濁物質移流モデルにより構成するものとし、自然系水循環モデルでは斜面系に分布型多段タンクモデル、河道系にkinematic wave法を用い

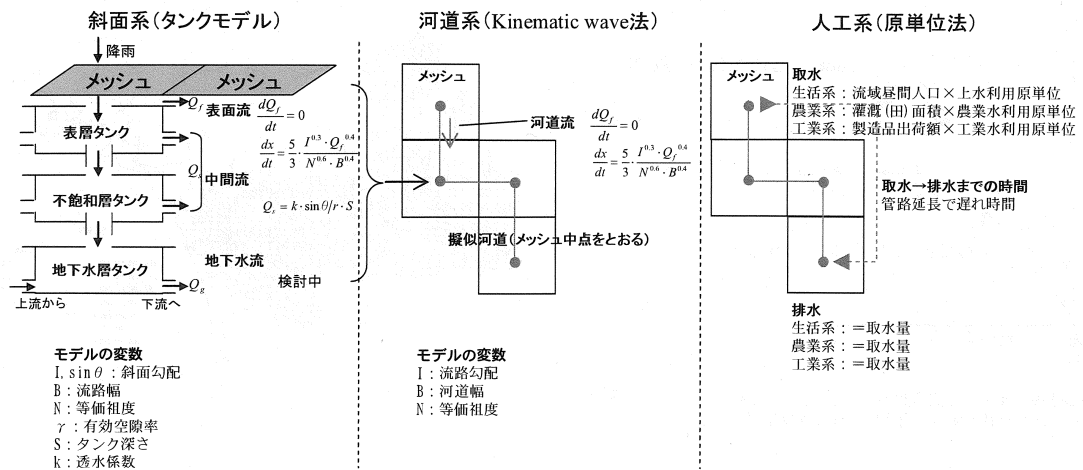


図-2 水循環モデルの構造

て推計するモデルを検討した(図-2)。

既作成モデルが仙台都市圏を対象としていることから、本水環境評価モデルは仙台都市圏の名取川・広瀬川流域を対象に検討を行った。

(2) 水循環モデル

流量を予測するモデルは、斜面系に多段タンクモデル、河道系にkinematic wave法を用いた分布型流出モデルである。計算時間間隔は1時間とし、空間分解能は1km×1km(3次メッシュ)である。

a) タンクモデル(斜面)

流域の各メッシュは、図-3の3層構造のタンクで表現した。地表面への降雨は、浸透能を超過した場合に地表面流として流出する(図-3 ①Tankoutput1)。一方、中間流タンクへの浸透流(図-3 ②shin)は、土壌厚(=タンク深さ)を上限に貯留される。ここで、貯留高が土壌厚を超過した場合、超過分は表面流として地表を流れる(図-3 ③Tankoutput2)。これらの表面流は、時間毎にkinematic wave法へと受け渡される。

一方、中間流は浸透流の他に上流のメッシュからの流入があり(図-3 ②Tankinput(x, y, jikan))、n-1時間前の貯留量とあわせることでn時間における貯留量を求める(Tank(x, y))。このタンクからの流出は、側方タンクへの流出(Tankoutput(x, y, jikan))と地下への流出である(図-3 ④)。Tankoutputはダルシー則を適用して、

$$Tankoutput(x, y, jikan) = k \sin \theta / \gamma \cdot S$$

で推計した。Sは中間流タンクの水深であり、Tank(x, y)とメッシュ面積Aから求める。透水係数k、勾配 $\sin \theta$ 、有効空隙率 γ は地形・土地利用・土壌から設定した。以上の計算を上流のメッシュから順次計算することにより

タンクモデルによる斜面流量の推計が可能である。なお、河道があるメッシュでは、地表面流・中間流とも河道に流出すると想定した。

b) Kinematic waveモデル(河道・表面流)

Kinematic waveモデルでは、メッシュの中心点を結んだ擬似河道網を作成し、各メッシュからの直接流出成分(タンクモデルから受け渡されるもの)を、この擬似河道を伝播して流域出口まで追跡計算を行うことで流量を計算した。追跡計算では流路への流入・流出をメッシュ中心点で行うものと想定し(図-4 式(1))、当該メッシュの直接流出成分と上流メッシュからの流入からなるものと仮定した。擬似河道網の伝播については、マンニング則を用いた図4の式(2)を適用して流速を求め、メッシュ中心間の距離から到達時間を求めた。

図-4はあるメッシュ中心から下流のメッシュ中心への

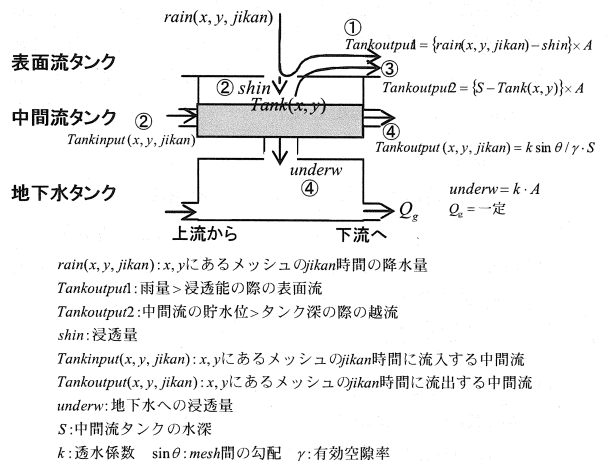


図-3 タンクモデルの構造

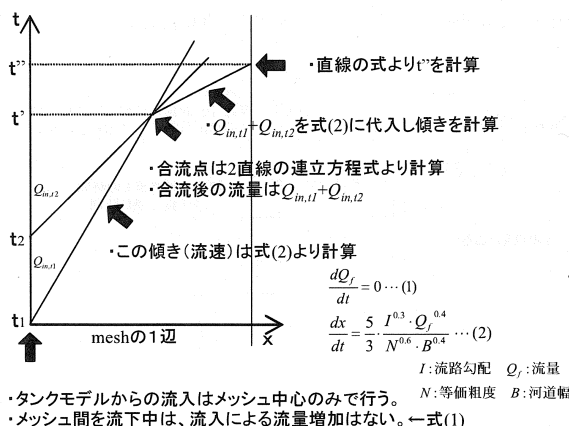


図-4 Kinematic wave モデルの構造

流量計算の考え方を整理したものである。式(2)を適用すると、メッシュ中心間の伝達時間は上流端の流量を用いて計算できるため、発時間毎に直線を引くことができる。 $t1$, $t2$ を発した流量は、その差が小さい場合は合流せずに流れるが、差が大きい場合には図4のような合流を繰り返す。合流後の流量は各発時点の流量総和となり、再び式(2)を用いて流速を求めると合流点からの直線を求めることが可能となり、下流メッシュ中心点への到達時間が求められる。

以上の計算を発時間毎に行い、上流端のメッシュから下流のメッシュへと順次、到達時間と流量を引き渡すことで、全河川での流量計算を行った。

c) 基底流量の初期値の設定

基底流量の初期値については、「河道のあるメッシュ」において地下水から基底流出されると仮定し、流域に数ポイントある河川流量観測所の晴天時の流量(基底流量)をチェックデータに、各流域からの基底流出量を算定した。考え方としては、タンクモデルの地下水の部分にダルシー則を適用し、地下水面の高さ・勾配を全流域同じと仮定した。推計の結果、各流路での降雨前の基底流量を $0.05\text{m}^3/\text{s}$ を想定した。

d) 雨量分布データの設定

収集した雨量データは、観測所の時系列データであるが、モデルに使用する場合には流域の面的な雨量データが必要となる。本研究では、流域のメッシュがどの観測所と対応するのかをVoronoi図を用いて検討し、雨量分布データを作成した。

e) 計算優先度の設定

水循環モデルの計算では、Kinematic wave法の特性から上流から順々に計算する必要がある。そこで、流域の全メッシュに対して上流端から下流端に向けて昇順に計

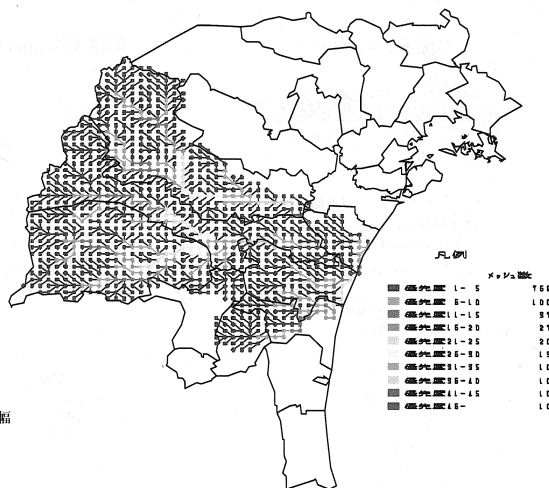


図-5 計算優先度ランク

算優先度を設定した。

計算優先度の設定では、収集したメッシュ別標高データから隣接メッシュへの8つの勾配を計算し、その最大値となる方向を流下方向と設定した。ただし、流路に該当するメッシュについては、上記の方法では正確な流下方向を設定できないため、流路該当メッシュを抽出して、流下方向を設定した。最終的には地形図と対比させながら流下方向を決定した。

全メッシュの流下方向が決定したのち、各上流端から下流端に向けてメッシュを移動することに優先度を1追加し、全メッシュの優先度を設定した(図-5)。

f) 水循環モデルの評価

2002年7月10日から7月12日までと同年10月19日から10月22日までの2つの期間で雨量と流量の観測データを用意し、水循環モデルの評価を行った。図-6, 7は、名取橋における時系列での実測値と計算値の比較したのものである。10月19日から10月22日までの比較でピーク時流量が若干過少となっているが、概ね良好な再現結果が得られている。

(3) 物質循環モデル

a) 排出負荷量推計モデル

住宅からの排出負荷は、人口に排出負荷原単位(1人当たりの排出量)を乗じて推計した。ただし、下水道等の処理施設が整備されている地域では施設で処理されて排出されるため、各施設の位置と処理効率を設定し、メッシュ別の負荷量を推計した。なお、処理効率は下水道統計より設定した。

工場からの排出負荷は、製造品出荷額に排出負荷原単位(出荷額当たりの排出量)を乗じて推計した。製造品出荷額は工業統計のメッシュデータを使用し、原単位は産業細分類別の値を使用した。工業統計のメッシュデータは秘匿値が4割と多いため、工業統計詳細情報(都道

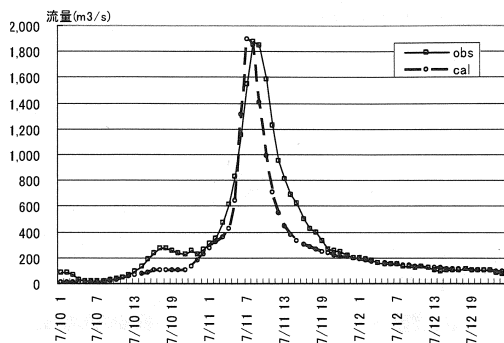


図-6 実測値 (obs) と計算値 (cal) の比較 (名取橋7/10-7/12)

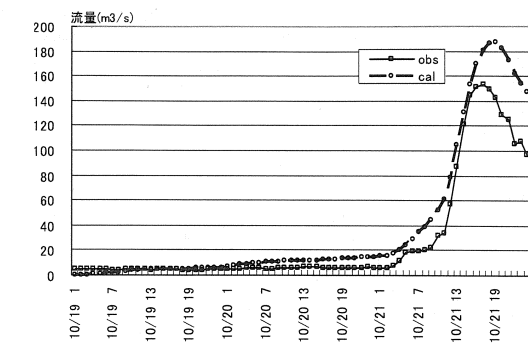


図-7 実測値 (obs) と計算値 (cal) の比較 (名取橋10/19-10/22)

府県、市町村別データ) などで補足して使用した。また、河川から離れた工場については下水道等で処理するものと仮定し、下水処理施設のあるメッシュから処理されて排出するものとした。

畜舎(牛、豚、鶏)からの排出負荷は、飼育頭数に排出負荷原単位(頭または羽当たりの排出量)と処理形態別の排出率を乗じて推計した。頭数は対象地域の仙台市・川崎町の統計値を1:25,000の地形図とホームページの情報から読み取った畜舎のあるメッシュ数で均等配分して、メッシュ別の頭数を求めた。また、糞尿処理の形態については「家畜排せつ物の利用の促進を図るための宮城県計画」から現況の処理状況を抽出して設定した。なお、排水処理は混合高級処理と仮定した。

山林、田、畑、市街地からの排出負荷は、土地利用面積に排出負荷原単位(面積当たりの排出量)を乗じて推計した。土地利用面積は国土数値情報を使用した。

現況の排出負荷は上記の方法で求めたが、施策を講じて土地利用が変化した場合の排出負荷については、住宅と山林、田、畑、市街地からの排出負荷のみ変化するものとした。工場や畜舎からの排出負荷は土地利用と製造品出荷額等との関係性が設定できなかったため、本研究では現況の値をそのまま適用することとした。

b) 水質予測モデル

i) タンクモデルにおける水質予測

タンクモデルでの負荷量移動計算は、以下の連立微分方程式を解くことで推計を行った。ただし、実際の計算では数学的に解くのではなく、プログラムによる順次計算により簡便化して解いた。

地表面からの流出負荷量は、晴天時は河川が存在するメッシュの表面流を式(1)、雨天時の表面流は面源流出に点源掃流、面源掃流を加えた式(2)で、中間流は式(3)で推計を行った。

$$L_{po} = fL_p \quad \dots(1)$$

$$L_a = C_a R_a A + k_{wp} S_{ap} R_a A + k_{wr} S_{ar} R_a^2 A \quad \dots(2)$$

$$L_{bout} = C_b R_b A \quad \dots(3)$$

また、地表から中間流のタンクへの浸透負荷量は式(4)、中間流のタンクから地下水流のタンクへの浸透負荷量は式(5)より推計を行った。

$$L_{ab} = C_a R_{ab} A \quad \dots(4)$$

$$L_{bc} = C_b R_{bc} A \quad \dots(5)$$

表面流の濃度変動は式(6)、表層タンクの点源堆積物の変動を式(7)、面源堆積物の変動を式(8)で求めた。

$$A \frac{d(C_a H_a)}{dt} = C_p R_a A - C_a R_a A - k_{a1} C_a H_a A + k_{a2} S_{ar} A - C_a R_{ab} A \quad \dots(6)$$

$$A \frac{dS_{ap}}{dt} = (1-f)L_p - k_{ap} S_{ap} A - k_{wp} S_{ap} R_a A \quad \dots(7)$$

$$A \frac{dS_{ar}}{dt} = L_{np} - k_{dr} S_{ar} A + k_{a1} C_a H_a A - k_{a2} S_{ar} A - k_{wr} S_{ar} R_a^2 A \quad \dots(8)$$

一方、中間流については、濃度変動を式(9)、土壌内の蓄積・溶脱過程を式(10)で求めた。

$$A \frac{d(C_b H_b)}{dt} = C_a R_{ab} A + L_{bin} - L_{bout} - C_b R_{bc} A - k_b \left\{ C_b H_b - r \frac{S_b + S_{b0}}{S_{b0}} S_{b0} H_{bmx} \right\} A \quad \dots(9)$$

$$A \frac{d(S_b H_{bmx})}{dt} = k_b \left\{ C_b H_b - r \frac{S_b + S_{b0}}{S_{b0}} S_{b0} H_{bmx} \right\} A - k_{db} S_b H_{bmx} A \quad \dots(10)$$

L_p : 点源排出負荷(kg/hr), A : mesh面積(km²), f : 晴天時流出率, 表面流中の濃度(mg/l), 中間流中の濃度(mg/l), 点源由来堆積物の掃流係数(1/mm), 面源由来堆積物の掃流係数(hr/mm²), 表面流の流出高(mm/hr), 中間流の流出高(mm/hr), 地表面から中間流タンクへの浸透高(mm/hr), 中間流タンクから地下水流タンクへの浸透高(mm/hr), 点源由来堆積物(kg/m²), 面源由来堆積物(kg/m²), 地表面の貯水位(mm), 中間流タンクの貯水位(mm), 中間流タンクの貯水位最大値(=土壌厚), 表面流点源堆積物の減衰係数(1/hr), 表面流点源堆積物の減衰係数(1/hr), 中間流堆積物の減衰係数(1/hr), 表面流吸着速度係数(1/hr), 表面流脱着速度係数(1/hr), 中間流吸着速度係数(1/hr), 降雨濃度(mg/l), 降雨量(mm/hr), 中間流タンクの土壌内蓄積量(kg/m²), 吸着平衡定数, 吸着飽和係数

ii) kinematic wave法による水質追従計算

kinematic wave法での負荷量移動計算は、式(11)と式(12)の連立式を解くことで求めた。Srの初期値を0とし、t時間のSr増減分を積み上げることでSrを求め(式(12)), 式(11)よりLoutを求めた。

$$L_{out} = L_{in} \cdot \exp(-(k_1 + k_3)t) + k_w \cdot S_r \cdot Q_{in} \quad \dots(11)$$

$$\frac{dS_r}{dt} = L_{in} \cdot (1 - \exp(-(k_1 + k_3)t)) - k_w \cdot S_r \cdot Q_{in} \quad \dots(12)$$

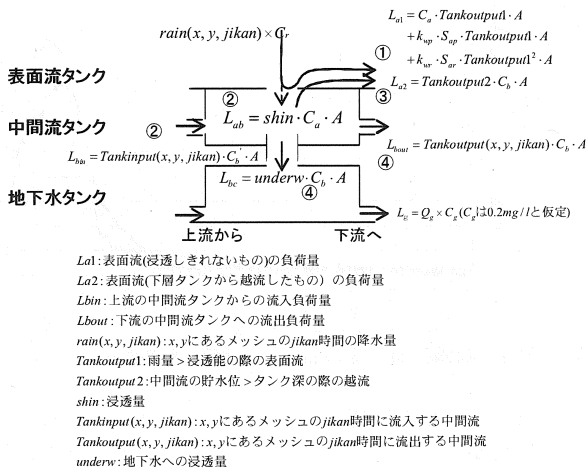


図8 タンクモデルによる水質予測

しかし、kinematic wave法は図-9に示すように流量の追従計算を行っているため、時刻t1に出発した流量Q1と時刻t2に出発したQ2が流下途中で合流する可能性がある。負荷量L1, L2についても同様に合流すること考えなければならぬが、これを式(12)について考えると、メッシュを横切る流路(およそ1km)の中で距離別に堆積量が異なることを意味しており計算の煩雑度が飛躍的に増す。そこで、便宜的に下流端における流量と流速から、この流路を通過した時間を求め、この時間と流量、下流端での負荷量Linから式(12)より堆積量Srを求め、式(11)の負荷量Loutを推計した。

c) 物質循環モデルの評価

水質予測モデルについては、パラメータの設定などを十分に検討できていない状況ではあるが、流量が比較的良好に再現されている名取橋を対象に水質(BOD濃度)の比較を行った。評価期間は10月19日から10月24日までの期間である。

BOD濃度の予測値は10月19日から10月22日までの期間の最小値が0.67mg/l、最大値が1.2mg/lであった。実測濃度をみると、通年で0.6~1.6mg/lで推移し、予測日の周辺では10月16日が1.4mg/l、11月6日は0.8mg/lと概ね良好な結果が得られている。

(4) 人口-土地利用変換モデル

水環境評価モデルでは、地表面の土地利用によりタンクモデル(表層タンク)の浸透能や土壌厚、透水係数が設定されており、土地利用変化が河川流量に影響を与えるモデルとなっている。現況については、国土数値情報のメッシュ別土地利用データを使用して水環境評価モデルを構築し、再現性を確認しているが、将来ケースでは、夜間人口や従業人口の総量及び分布パターンが変化して土地利用も更新されることから、現況のデータをそのま

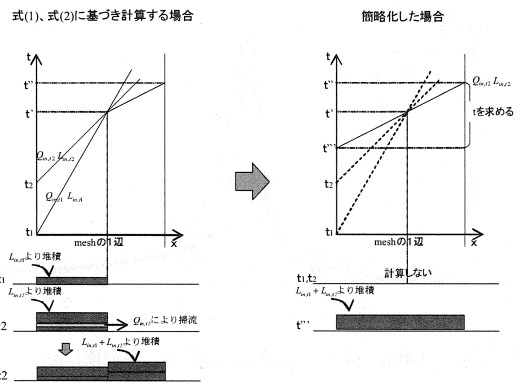


図9 水質追従計算の簡略化

ま使用することはできない。したがって、将来ケースに適用する水環境評価モデルとしては、人口を土地利用に転換するモデルが必要である。

水環境評価モデルでは田、その他の農地、森林、荒地、建物用地、幹線交通用地、その他の用地、河川・湖沼、ゴルフ場の9つの土地利用別に浸透能などのパラメータを与えている。これらの土地利用はメッシュ別に土地利用別構成比という形でデータ化されている。したがって、人口-土地利用モデルで具体的に求める値はメッシュ別土地利用別構成比である。

また、他のモデルから引き渡される変数は、経済モデルからゾーン別の夜間人口、1~3次従業人口、交通モデルから幹線道路の道路延長である。また、ケース設定の際に都市計画区域(市街化区域、市街化調整区域)や森林地域・農振農用地など(以下、「指定地域」という)の設定を変更することが考えられる。したがって、モデルの説明変数としては、夜間人口、1~3次従業人口、指定地域の占有率などである。

本研究の人口-土地利用変換モデルでは、ロジット型のシェア・モデルを採用した。ロジット型のシェア・モデルを用いることで、用途jのシェアは次式であらわすことができる。

$$S_{ij} = \frac{a_{ij}}{A_i} = \frac{\exp(\beta_{1j}x_{i1} + \beta_{2j}x_{i2} + \dots)}{\sum_{j=1}^n \exp(\beta_{1j}x_{i1} + \beta_{2j}x_{i2} + \dots)} \dots (13)$$

ここに、i: 3次メッシュ、j: 土地利用区分(j = 1, 2, 3, ..., n)

a_{ij} : iメッシュ、j用途の土地面積

A_i : iゾーンの土地面積

x_{im} : 説明要因

β_{mj} : 未知パラメータ

平成7年度国勢調査および平成8年度企業・事業所統計

表-1 人口・土地利用変換モデルのパラメータ

	田の面積	森林面積	建物用地面積
森林地域面積		0.0005	
夜間人口			488.86
第1次従業人口	26,240.3		
√2.3次従業人口			9.551
農業地域面積	0.00027		
道路延長			0.0059
定数	-0.309		-0.144
R-sq	0.727	0.885	0.843

調査の地域統計データからメッシュ別の夜間人口、1～3次産業就業人口、2,3次従業人口を設定し、国土数値情報から3次メッシュ別の土地利用、指定地域(都市計画区域、農業地域、森林地域、自然公園地域、自然環境地域)、湖沼および流路延長を設定して、式(13)のパラメータを推定した。推定結果は表の通りで、水環境評価モデルの精度を左右する森林や建物用地面積の再現性は良好であった。なお、政策として土地利用を変更する場合は、上記モデルを使用せず、当該区域の土地利用を予め変更して水環境評価モデルの入力データとした。

4 仙台都市圏におけるケーススタディ

(1) シミュレーションケースの設定

本研究で作成した水環境評価モデルを用いてシミュレーションを実施した。対象とする都市環境施策は土地利用施策等であり、活動モデルと水環境評価モデルへの入力値を変更することで評価が可能な施策である。著者がケーススタディとして試みた施策は表-2のとおりである。これら施策内容の具体的な設定は、仙台都市圏における計画、構想等を踏まえた。

土地利用施策は、趨勢型、都市居住型、副都心型を設定した。都心はJR仙台駅を中心とする半径2kmのエリアであり、副都心は都心から6～9km離れた東西南北の4箇所に設定した。下水道整備施策では、名取川上流(青根、釜房)、広瀬川上流(秋保)の下水道を高次処理(BODの除去率を90%→98%)とし、広瀬川上流のコミュニティプラントや農業集落排水の処理能力を向上させるケースを設定した。水資源施策では、仙台市の緑の配置計画を参考に、上流域が全て森林で覆われる(森林面

表-2 評価対象施策

	施策名	内容
土地利用施策	趨勢型	・トレンドの人口動向
	都心居住型	・都心居住の負担軽減
	副都心型	・副都心整備による職住近接
水関連施策	下水道施策	・上流下水道の高度処理 ・農業集落排水等の処理能力向上
	水資源施策	・上流域の森林面積を100%に整備 ・森林管理による浸透能の向上

積率100%)と設定し、また、手入れによる森林管理の充実により浸透能が向上(200→260mm/h)するケースを設定した。

(2) 流量・流域保水能力による評価

流域保水能力は河川流量がピーク時点(10/21 15:00)と河川流量が基底流量に落ち着いた時点(10/24 23:00)での名取橋・広瀬橋各測定地点における流量で比較した。流域保水能力の評価は基底流量の他、ピーク時流量も用いて評価を行った。ピーク流量が低いほど流域に保水する水量が多くなり、無降雨時の基底流量が多くなる。

土地利用施策の趨勢型を基準に比較を行うと、都心居住型は広瀬橋でピーク時流量が若干減少、名取橋で大きく減少し、郊外開発の抑制により流域保水能力が向上する傾向が見られた。一方、副都心型は名取橋でピーク時流量が減少したものの、広瀬橋では逆に多くなり、広瀬川流域での保水能力が低下する傾向が見られた。これは副都心の1つが広瀬川の中・上流域にあり、このエリアの開発が影響したためである。また、基底流量については施策間の比較を行ったところ、差は僅かしかなく、都心居住型の流量が多くなる傾向は見られなかった。

下水道施策については、土地利用施策の趨勢型と比較して流量の変化は見られなかった。一方、水資源施策ではピーク時流量は大きく減少、基底流量が若干増加し、流域の保水能力が向上する傾向が見られた。

(3) 水質改善度による評価

水質改善度で評価は、河川流量が基底流量に落ち着いた時点(10/24 23:00)での名取橋・広瀬橋各測定地点におけるBOD濃度で比較した。

土地利用施策の趨勢型を基準に比較を行うと、都心居住型、副都心型ともBOD濃度はほぼ同じ値であり、土地利用施策による違いは見られなかった。

下水道施策については、土地利用施策の趨勢型と比較して名取橋・広瀬橋の両測定地点においてBOD濃度が改善し、水質改善度が向上した。また、水資源施策につい

表-3 水環境評価モデルによる施策評価結果

	流域保水能力 (mm/s)				水質改善度 BOD濃度 (mg/l)	
	ピーク時流量		基底流量		名取橋	広瀬橋
	名取橋	広瀬橋	名取橋	広瀬橋		
趨勢型	160.90	59.6	5.770	4.39	1.17	2.01
都心居住型	127.51	59.5	5.691	4.34	1.17	2.02
副都心型	127.58	64.6	5.734	4.36	1.17	2.02
下水道整備	160.90	59.6	5.770	4.39	1.09	1.94
水資源施策	160.88	45.2	5.772	4.55	1.17	1.96

ても基底流量が増加することにより、BOD濃度が改善する傾向が見られた。

以上のケーススタディの結果から、仙台都市圏においては、土地利用を都心居住型の都市構造に転換することや、水資源施策を実施することにより、流域保水能力が向上し、水質改善度を高めることが可能である。これらの施策に加え、更に、下水道施策を実施することにより水質改善度をより高めることが可能である。

5. おわりに

(1) 研究の成果

本研究の目的に沿い、研究の成果を整理する。

- a) 既開発の総合的な環境評価のためのパッケージモデルに、流水保水能力や水質改善度を評価可能な水評価モデルを追加することができた。土地利用・交通モデルから算出される人口データと雨量分布データ等を入力し、河川水量と水質を評価するモデルを、実績値との精度検証を行いながら作成することができた。
- b) 水環境評価モデルを用い、仙台都市圏を対象に、土地利用施策、下水道施策、水資源施策のケーススタディを行った。仙台都市圏においては、都心居住型の土地利用が開発を抑制することから水環境にとって良好であること。但し、流域保水能力の向上については水資源施策の実施がより効果的であること、また、水質改善度の向上には下水道施策の実施がより効果的であることを明らかにした。

(2) 今後の研究課題

今後の研究課題を2点整理する。

まず、本研究の水環境評価モデルは水循環モデルと物質循環モデルの2つのモデルで構成されているが、物質循環モデルの再現性が水循環モデルに比較してやや悪い傾向がある。この原因として、排出負荷量を推計する際の活動量（製造品出荷額や飼育頭数等）の精度が低いこと、排出負荷原単位が古い値であること、下水処理の有無が判別しづらい（工場の処理方式や合流式下水のため雨天時の排出負荷の扱い）こと等が課題である。これらの課題については、直ちに解決できるものではないが、今後得られる知見を踏まえながら改善していきたい。また、水循環モデルの基底流量については、もう少し詳細にモデルの再現性を確認していきたいと考えている。

2つめは、本研究のケーススタディが施策実施有無の評価に留まる点、また、評価指標が限定されている点である。本評価モデルは、施策を1kmメッシュ毎に設定することが可能であり、同じ面積に施策を投入する場合でも、異なるエリアを設定することで効果が異なることを評価することも可能である。本研究では、評価モデルの

作成に重点を置いたためにケース設定のバリエーションが少なくなってしまうが、今後、ケース設定を充実させ、施策の導入量、位置などによる効果を明らかにすることで、政策決定の基礎資料とすることが望まれる。また、評価指標についても、モデルで計算された値を様々な集計することにより、より効果的な評価も可能である。本研究では1時点の評価に留まっているが、例えば時系列での評価など今後工夫していきたいと考えている。

謝辞：本研究は、2004年度「環境に配慮した地域づくり施策評価モデル構築に関する研究（国土交通省国土交通政策研究所）」における検討を契機とし、その後、著者らが自主的な研究活動を継続し、2008年度において、科学研究費補助金・基盤研究(c)（課題番号20560499）の助成を受けとりまとめたものである。ここに記し感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Miyamoto, K., Kitazume, K.: A land-use model based on random utility/rent-bidding analysis (RURBAN), *Selected Proceedings of The Fifth World Conference on Transport Research*, Vol.4, pp.107-121, 1989.
- 2) Planning and Research of Policies for Land Use and Transportation for Increasing Urban Sustainability, *Final Report*, 2004.
- 3) 森田哲夫, 吉田朗, 小島浩, 馬場剛, 樋野誠: 都市環境に関わる諸施策を評価するモデルシステムの提案, 土木学会論文集 D, Vol.64, No.3, pp.457-472, 2008.
- 4) 陸曼皎, 小池俊雄, 石平博: 分布型水文モデルに基づく水利用シミュレーションモデルの試み, 土木学会水工学論文集, 第46巻, 2002.
- 5) 木内豪, 賈仰文, 戸嶋光映, 古谷純一, 倪广恒: 農地と都市が混在する流域における WEPMODEL を用いた水循環解析, 土木学会水工学論文集, 第46巻, 2002.
- 6) 敖天其, 古谷純一, 深見和彦, 松浦直, 竹内邦良, 石平博: 分布型流出モデル BTOPMC の大流域へ適用する場合の地形解析に関する研究, 土木学会水工学論文集, 第47巻, 2003.
- 7) 羽田野琢磨, 高木康行, 中嶋規行, 中村茂, Srikantha HERATH: グリッド型水循環系解析モデルの玉川流域への適用, 土木学会水工学論文集, 第47巻, pp.199-204, 2003.
- 8) 独立行政法人国立環境研究所: 国立環境研究所特別研究報告「環境低負荷型・資源循環型の水環境改善システムに関する調査研究」SR-45-2002, 国立環境研究所, 2002.
- 9) 奥川光治, 宗宮功, 津野洋: メッシュ法に基づく河川水質予測コンピュータシステムの開発, 土木学会論文集, No.497 II-28, pp.111-118, 1994.
- 10) 辻倉裕喜, 安倍和雄, 大八木豊, 田中伸治: 湖沼流域管理のための総合的な水循環・物質流動モデルの構築, 土木学会水工学論文集, 第47巻, pp.217-222, 2003.

STUDY ON AQUATIC IMPACT ASSESSMENT MODELS IN URBAN AREA

Tsuyoshi BABA, Tetsuo MORITA, Hiroshi SUGITA, Hiroshi KOJIMA
and Akira YOSHIDA

We have promoted the simulation models to express how the diverse policies involving transportation, land use, and way of living or working influence on the urban activities. The models also enable to evaluate quantitatively the effects on environment, quality of life and economics through the changes in urban activities. This paper explains the structure of the aquatic impact assessment model which is a subpart of described above models, and the consideration about water environmental influence caused by urban planning results on the case study of Sendai Metropolitan Area. We secured sufficient accuracy for the aquatic impact assessment model by checking reproducibility of simulation outputs about watershed water-holding capability and water quality improvement index, and enable to compare the environmental influence of sewerage planning, water resource planning and urban planning using this model.