

# ノンポイント汚染現象における 地表面・表流水・地下水の挙動 の関連知識

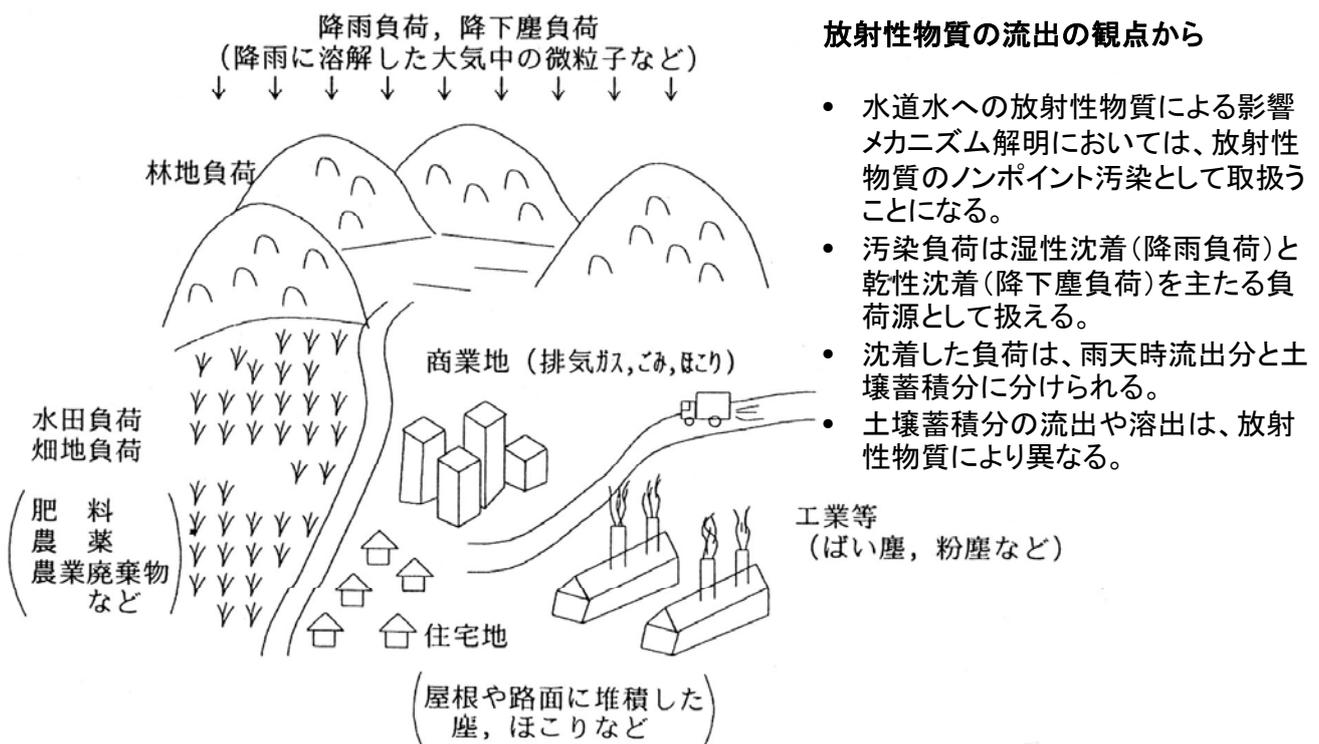
水道水への放射性物質による影響メカニズム解明に向けて

東京大学大学院工学系研究科

教授 古米弘明

2011.4.25

## ノンポイント負荷源と汚染現象



### 放射性物質の流出の観点から

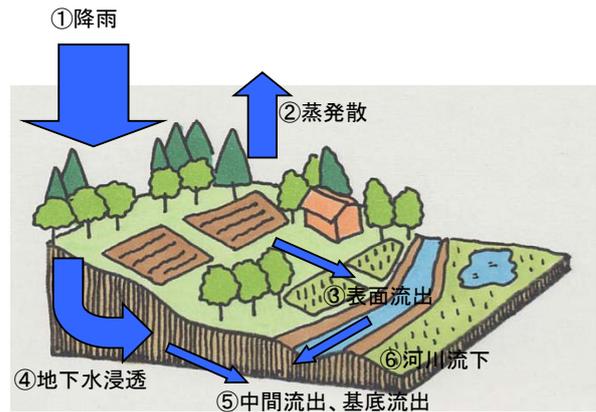
- 水道水への放射性物質による影響メカニズム解明においては、放射性物質のノンポイント汚染として取扱うことになる。
- 汚染負荷は湿性沈着(降雨負荷)と乾性沈着(降下塵負荷)を主たる負荷源として扱える。
- 沈着した負荷は、雨天時流出分と土壌蓄積分に分けられる。
- 土壌蓄積分の流出や溶出は、放射性物質により異なる。

図1-1 ノンポイント負荷の発生源 a)

# 流域における雨水流出メカニズム

## “水文・流出の素過程”

- 降水が地表面に到達する過程①
- 地表面から大気への蒸発する過程②
- 地表面を流出する過程③
- 地下に浸透する過程④
- 浸透水が河川流出する過程⑤
- 河川を流下する過程⑥

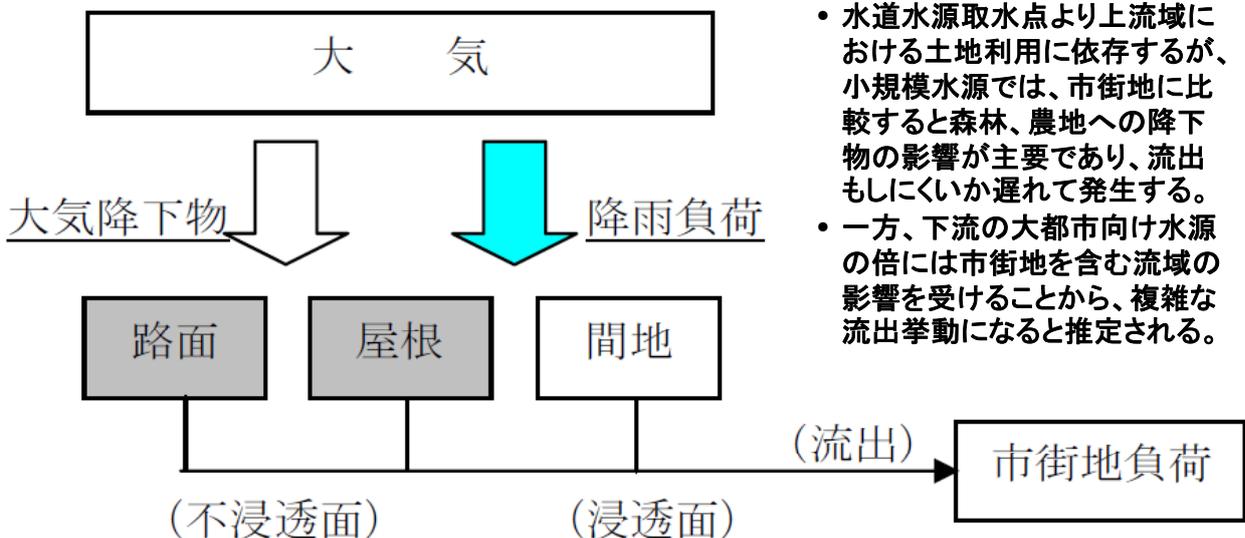


### 放射性物質の流出の観点から

- ① 降水由来の負荷評価
- ② 蒸発散による物質の蓄積？
- ③ 雨天時流出の負荷量評価
- ④ 地下浸透量、土壌保持量
- ⑤ 湧水、地下水由来、次降雨における流出負荷量
- ⑥ 河川流下過程における除去？

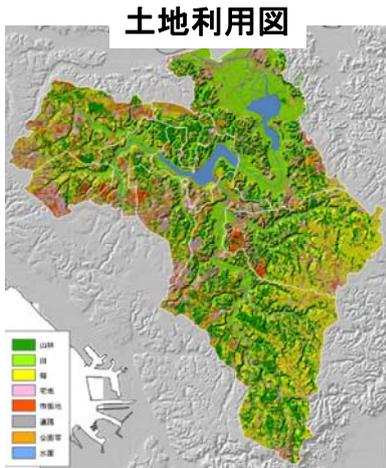
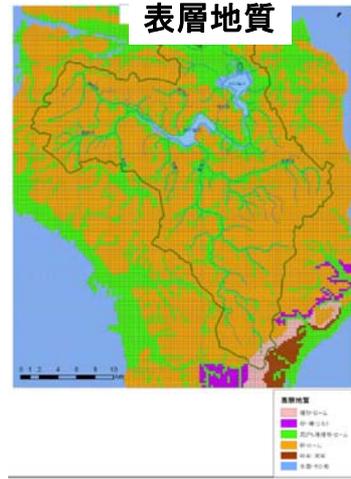
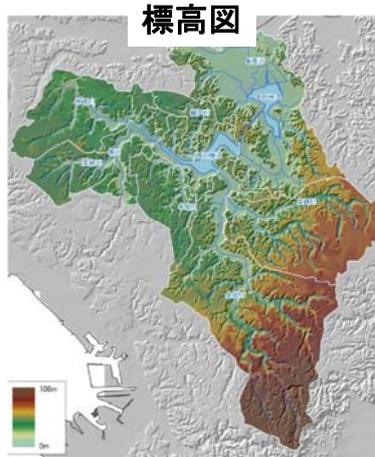
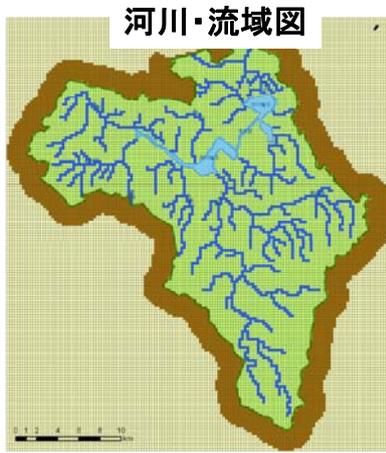
## 降雨負荷と大気降下物の汚濁負荷

例として、市街地における非特定汚染源の負荷(市街地負荷)



- 水道水源取水点より上流域における土地利用に依存するが、小規模水源では、市街地に比較すると森林、農地への降下物の影響が主要であり、流出もしにくいか遅れて発生する。
- 一方、下流の大都市向け水源の倍には市街地を含む流域の影響を受けることから、複雑な流出挙動になると推定される。





7

# 地表流モデル

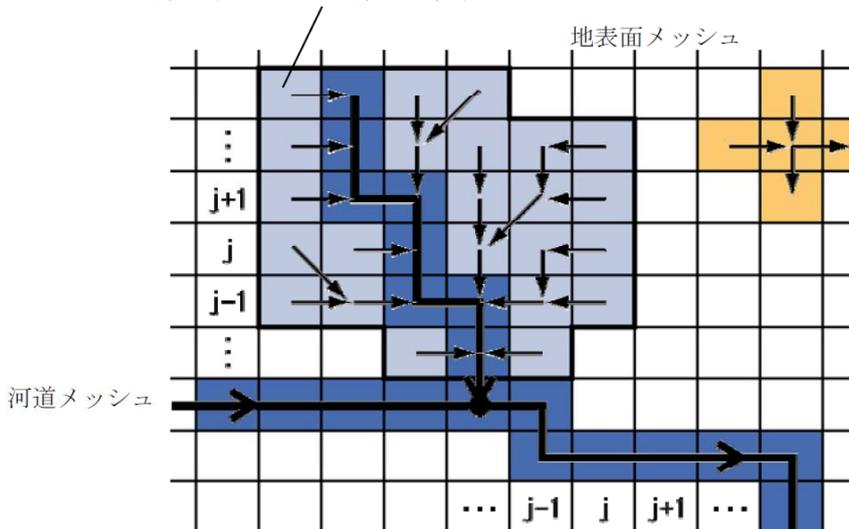
例: 1次元キネマティックウェーブ法

連続式:  $\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_L$       マニングの平均流速式:  $\frac{Q}{A} = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}}$

ここで、

集水域 (落水線が集まる領域)

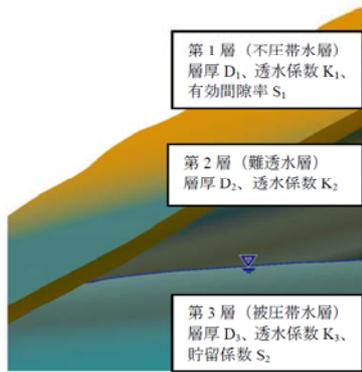
$Q$ : 流量、 $A$ : 流水断面積、 $q$ : 横流入量、 $R$ : 径深、 $n$ : 粗度係数、 $I$ : 河床勾配



- 標高データから落水線を作成する。
- 地表面も河道も同様に流れの解析を行う。
- 流域メッシュからの地表面流、地下水からの湧水量を考慮する。

8

# 地下水流動モデル



ここでの例は、土壌層の飽和側方浸透流と山体地層の地下水流動は、平面2次元多層浸透流により解析する方法である。

なお、今回の放射性物質の流出メカニズム解析においては、地表流、地下水流動をタンクモデルで解析することも想定される。

$$\text{(不圧帯水層)} : S_1 \frac{\partial h_1}{\partial t} = T_{1x} \frac{\partial^2 h_1}{\partial x^2} + T_{1y} \frac{\partial^2 h_1}{\partial y^2} + q_P - q_2 - Q_1 - q_{sp}$$

$$\text{(難透水層)} : q_2 = K_2 \times D_2 \times A \times (h_1 - h_3)$$

$$\text{(被圧帯水層)} : S_3 \frac{\partial h_3}{\partial t} = T_{3x} \frac{\partial^2 h_3}{\partial x^2} + T_{3y} \frac{\partial^2 h_3}{\partial y^2} + q_2 - Q_3$$

9

## 地下水水質：2次元移流拡散方程式

### 土壌との吸脱着反応等の考慮

地下水流動モデルで2次元流速が与えられれば、移流拡散方程式で物質輸送を考慮することが可能である。その際、放射性物質の土壌吸着などの反応を考慮する必要がある。

$$R_d \frac{\partial \theta \cdot C}{\partial t} + u \frac{\partial \theta \cdot C}{\partial x} + v \frac{\partial \theta \cdot C}{\partial y} \quad \text{生成・消失(反応項)}$$

X方向拡散項
Y方向拡散項

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left( \theta \cdot D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + \theta \cdot D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \theta \cdot D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + \theta \cdot D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + Y$$

$$\text{遅れ係数} : R_d = 1 + \frac{(1-n)\rho_s}{\theta} k_d \quad k_d = \frac{S}{C} \quad \text{分配係数(吸着しやすさ)}$$

吸着を評価する係数

浸透負荷－湧出負荷－反応項

$$\theta = \frac{V_w}{V_s} = \frac{n \cdot (h \cdot \Delta x \cdot \Delta y)}{(1-n) \cdot H \cdot \Delta x \cdot \Delta y} = \frac{n}{1-n} \cdot \frac{h}{H}$$

体積含水率

$$\text{発生、消滅項} : Y = L_{in} - L_{sp} - k_s \cdot C$$

放射性物質の吸着、脱着(溶出)などの機構やその速度定数が明確でない段階では、このような多くの係数を必要とする移流拡散方程式ではなく、単純なモデル化が望ましいと判断する。

10

# 降雨時における流出負荷量

降雨時の地表面から発生する負荷は、地表面の堆積負荷を考慮した雨天時流出負荷量算定モデルを用いる。このモデルは下式により表現される。また、各メッシュの各土地利用ごとに計算する。

$$L_{sf} = k \times S^m \times (Q - Q_c) Q^n$$

$$S = S_0 - \int L$$

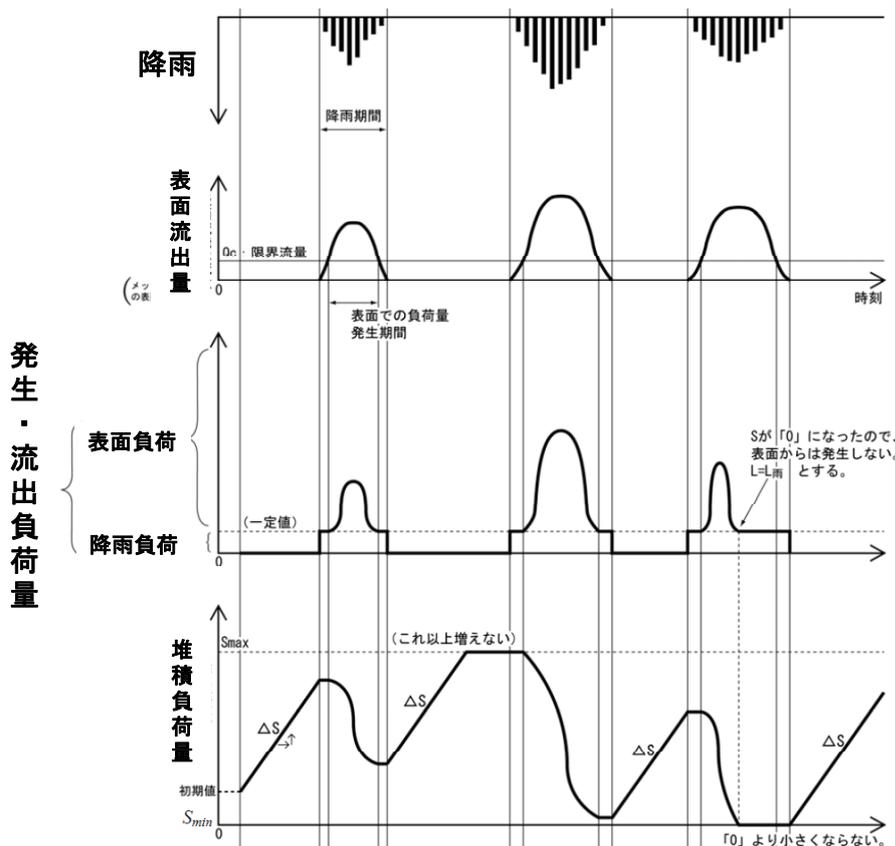
ただし、 $S \leq S_{min}$  となる場合、 $S = S_{min}$  とする。

ここで、 $L_{sf}$ : 流出負荷量 (g/s)、 $Q$ : 表面流出量 ( $m^3/s$ )、 $Q_c$ : 限界流量 ( $m^3/s$ )、 $S$ : 堆積負荷量 (g)、 $S_0$ : 初期堆積負荷量、 $k \cdot m \cdot n$ : パラメータ、 $S_{min}$ : 堆積負荷量最低値 (g)

- 降雨時に表面流出 $Q$ が生じ、限界流量 $Q_c$ を超えると、その時の堆積負荷量 $S$ に応じた負荷が発生し、流出する。負荷が流出することにより堆積負荷量 $S$ は減少する。
- 無降雨時には、 $\Delta S$ により堆積負荷量 $S$ が回復する。無降雨が継続し、最大堆積負荷量 $S_{max}$ に達すると、それ以上堆積負荷量は増えない。

11

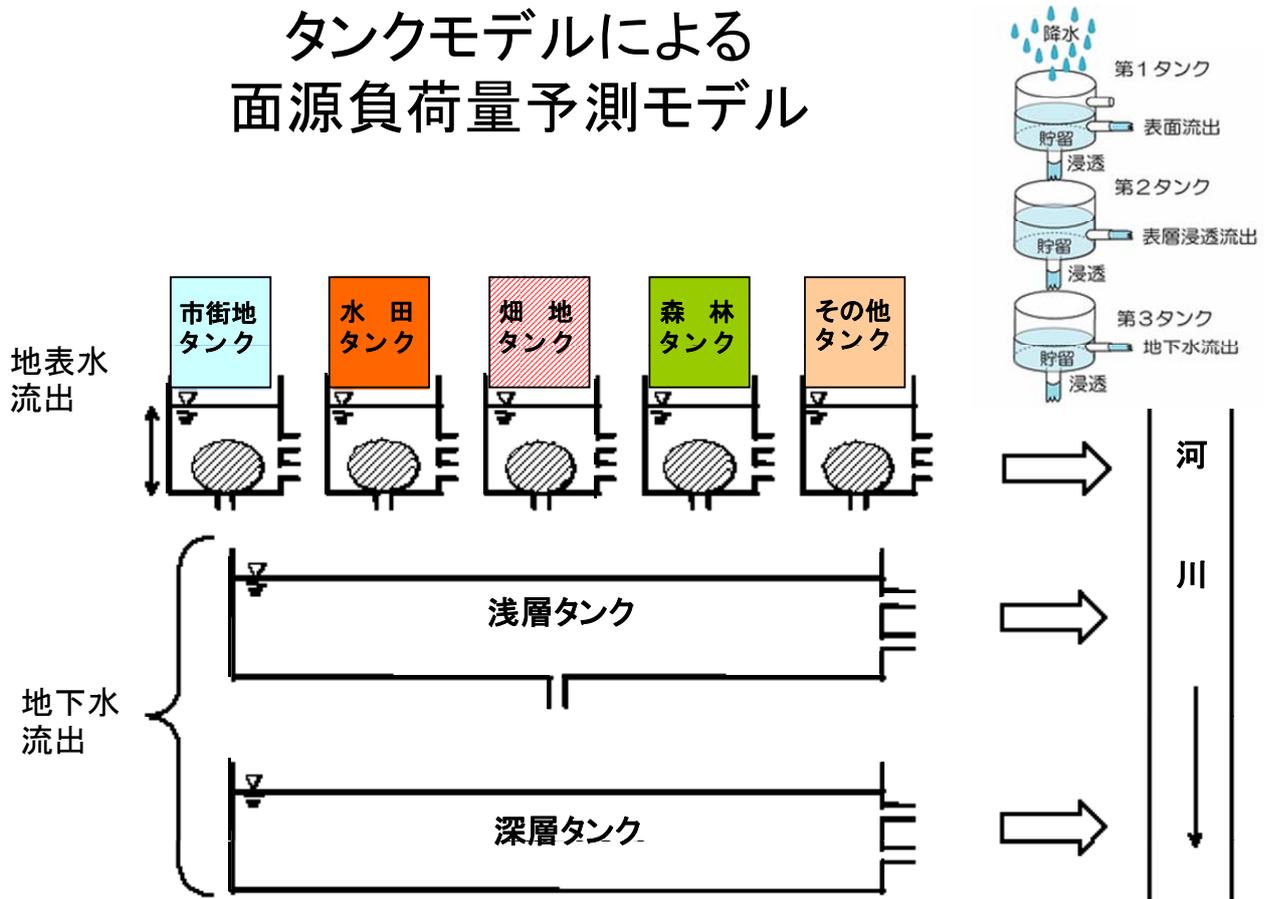
## 堆積負荷量と発生・流出負荷量の時間変化



この図では、 $\Delta S$ を線形増加で表現しているが、飽和関数で表現することも考えられる。

12

# タンクモデルによる 面源負荷量予測モデル

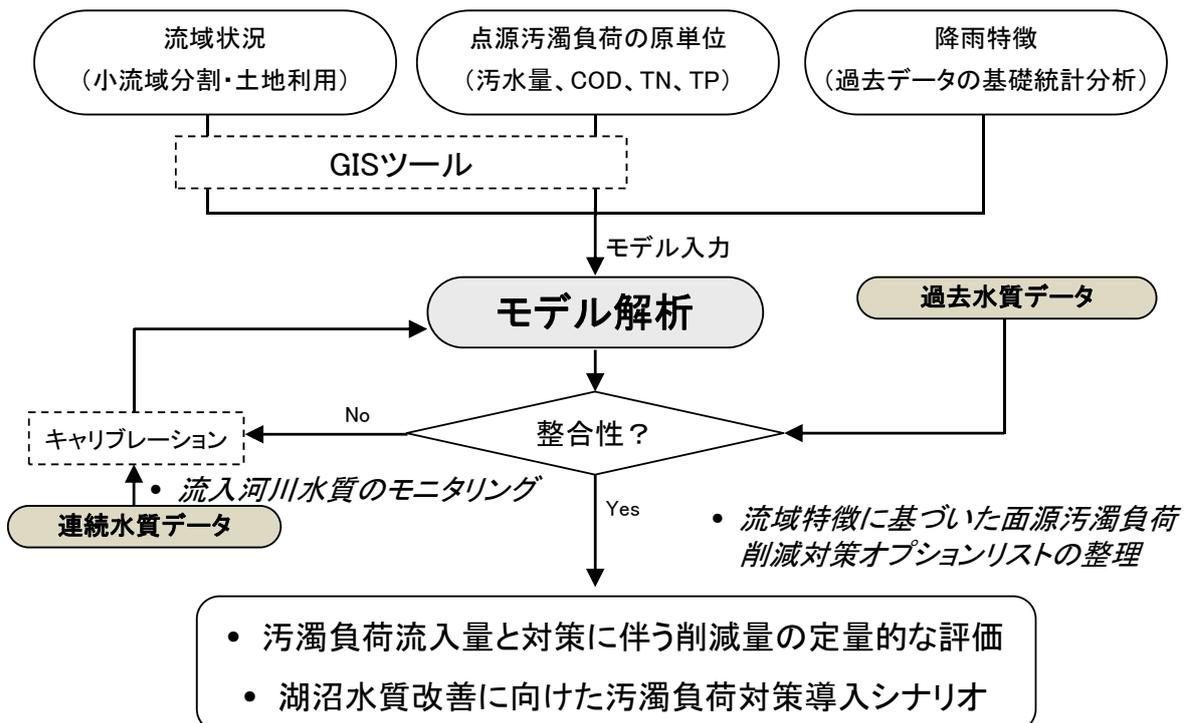


13

## 流域水循環モデルにおける流出汚濁解析の流れ

### 例: 印旛沼における面源汚濁負荷解析

- 流域の土地利用に基づく発生汚濁負荷の類型化



14