

簡易モデルによる 流域内放射性物質の流出挙動把握

～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

目 次

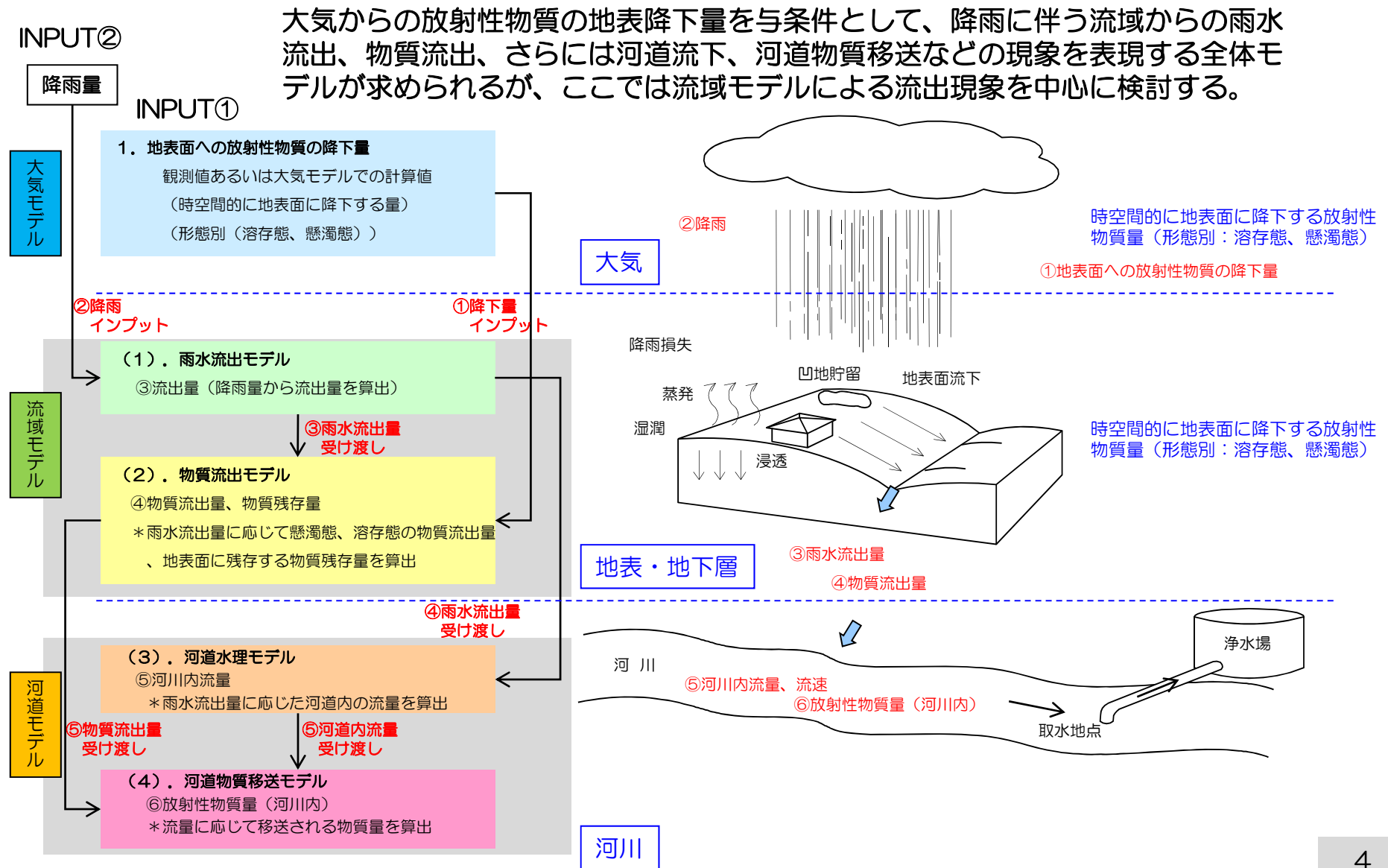
1. モデル解析の着眼点
 2. 放射性物質の流出解析モデルの概要
 3. 簡易モデルによる解析結果
 4. 河道流下過程の簡易な評価
 5. 考察：解析結果と水道水検出状況との比較
- 付録
- 1) 雨水流出と物質流出のモデル概要
 - 2) 物質流出モデルのパラメータ類
 - 3) 共通プラットフォームCommonMPの概要
 - 4) 河道水理モデルの例
 - 5) 河道物質移送モデルの例

1. モデル解析の着眼点

これまでの実測調査データに基づき、以下の着眼点からの簡易な流出モデルによる放射性物質の挙動把握を試みる。

- ①雨天時流出の現象（河川流出、取水地点までの流下）
- ②流域の土地利用、地表面状態の影響（流出現象）
- ③形態別放射性物質の挙動（溶存態と懸濁態、除去性）
- ④放射性物質の土壌への吸着性（ヨウ素とセシウム）
- ⑤長期的な流出挙動（地下水浸透、半減期）

2. 放射性物質の流出解析モデルの概要

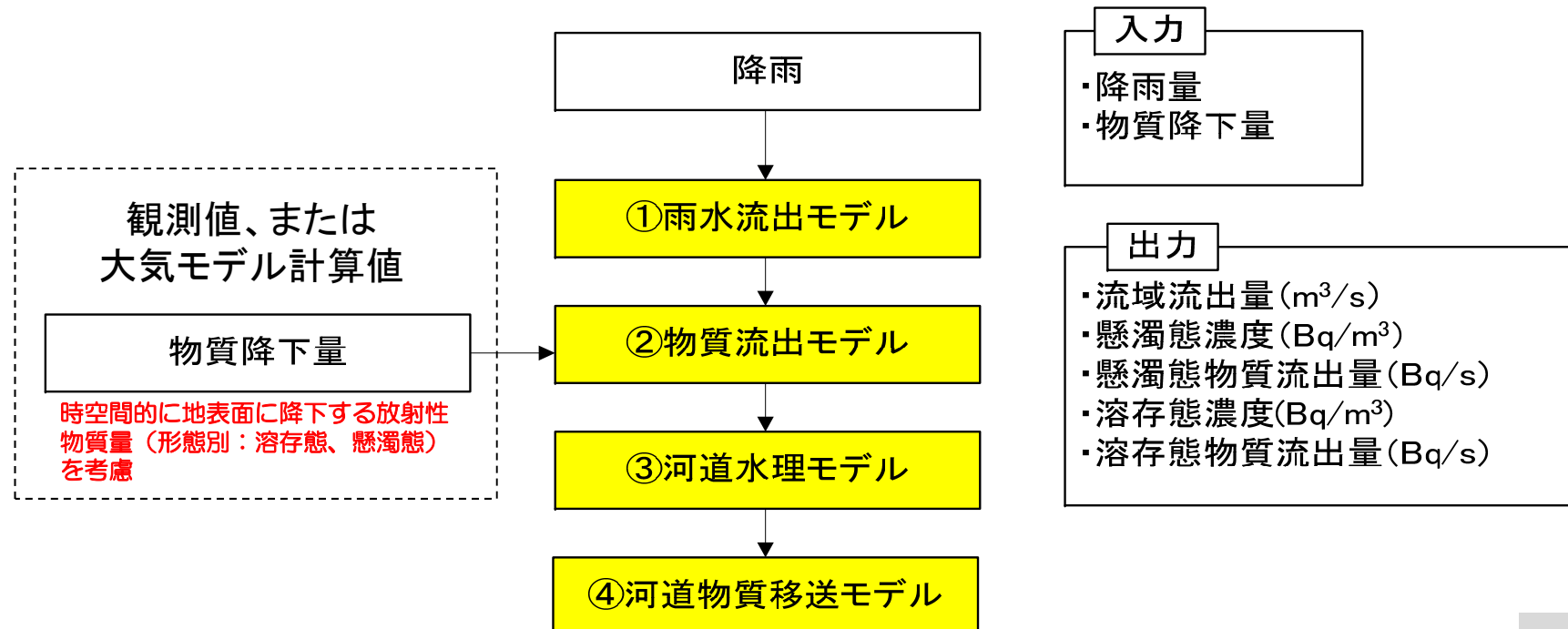


2. 放射性物質の流出解析モデルの概要

4つからなる流域からの流出解析モデル

流域からの物質流出モデルは、4つのモデルから構成される。

- ①雨水流出モデル : 降雨から雨水流出量を算定するモデル
- ②物質流出モデル : 雨水流出量を考慮して河川への物質流出量を算定するモデル
- ③河道水理モデル : 河道内の流出水量を算定するモデル
- ④河道物質移送モデル : 河道内の物質移送を算定するモデル



3. 簡易モデルによる解析結果

モデル解析の協力：（株）建設技術研究所

次の着眼点からの簡易な流出モデルでの挙動把握を試みる。

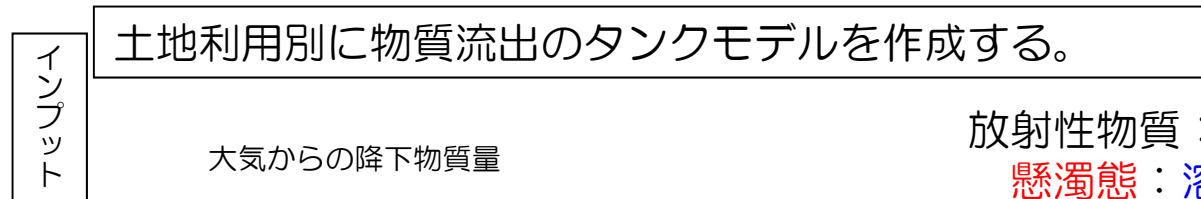
- ①雨天時流出の現象（河川流出、取水地点までの流下）
- ②流域の土地利用、地表面状態の影響（流出現象）
- ③形態別放射性物質の挙動（溶存態と懸濁態、除去性）
- ④放射性物質の土壌への吸着性（ヨウ素とセシウム）
- ⑤長期的な流出挙動（地下水浸透、半減期）

- 1) 異なる土地利用の流域ごとの流出挙動の違い
- 2) 溶存態と懸濁態、土壌への吸着の異なるヨウ素とセシウムの流出挙動の違い
- 3) 半減期の異なるヨウ素とセシウムの流出挙動の違い
- 4) 連続する降雨における流出挙動の違い

2. 放射性物質の流出解析モデルの概要

物質流出モデルの概要（2）

②物質流出モデル（流域タンクモデル）

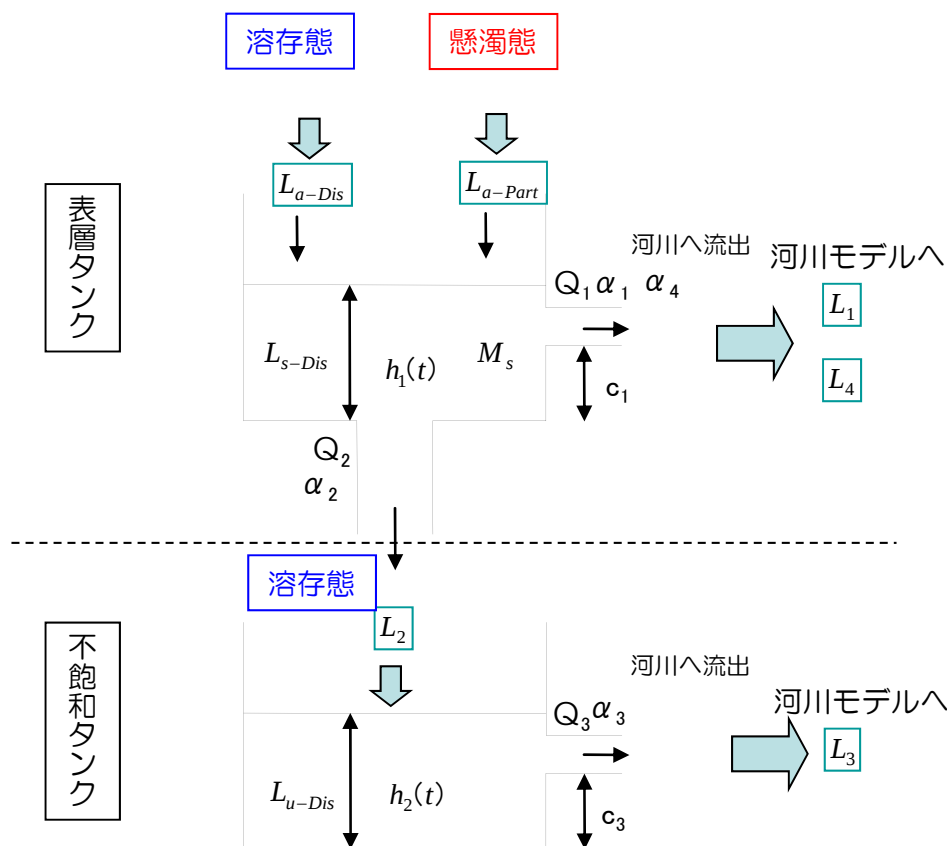


ヨウ素の多くは溶存態

放射性物質：ヨウ素

懸濁態：溶存態＝0.1：0.9

半減期：8日



物質流出モデル	
表層：側方流出係数(溶存態) $\alpha_1(-)$	1.0
表層：鉛直流出係数(溶存態) $\alpha_2(-)$	0.9
不飽和：側方流出係数(溶存態) $\alpha_3(-)$	0.9
表層：側方流出係数(懸濁態) $\alpha_4(1/m^3)$	0.001
表層：懸濁態限界流量 $Q_c(m^3/s)$	27.78
半減期(day) $T_{1/2}$	8

セシウムの多くは懸濁態

放射性物質：セシウム

懸濁態：溶存態＝0.9：0.1

半減期：30年

物質流出モデル	
表層：側方流出係数(溶存態) $\alpha_1(-)$	1.0
表層：鉛直流出係数(溶存態) $\alpha_2(-)$	0.1
不飽和：側方流出係数(溶存態) $\alpha_3(-)$	0.1
表層：側方流出係数(懸濁態) $\alpha_4(1/m^3)$	0.001
表層：懸濁態限界流量 $Q_c(m^3/s)$	27.78
半減期(day) $T_{1/2}$	10950

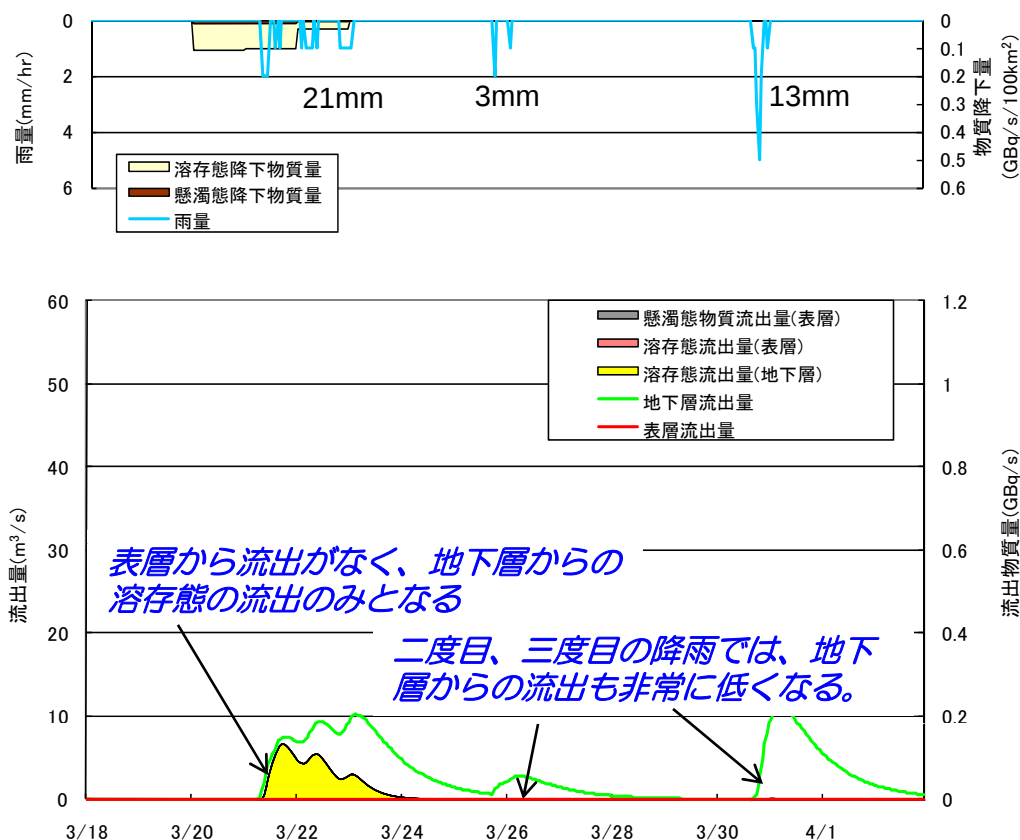
3. 簡易モデルによる解析結果

山林からの流出：ヨウ素

モデル解析の協力：（株）建設技術研究所

解析結果①（土地利用状況：山林）

浸透能力が高いため雨水が浸透され、表層から流出水がなく、地下層からの流出水とともに溶存態ヨウ素の流出がある。浸透能力を超える大雨が発生すれば、表層から流出することになる。



総降雨量：37mm

総降下量： 2.1×10^4 GBq

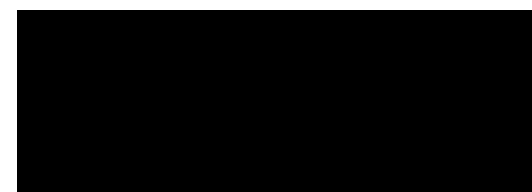
《計算条件》

流域面積 100km²

土地利用条件：山林

放射性物質：ヨウ素

懸濁態0.1、溶存態0.9



物質流出モデル	
表層：側方流出係数(溶存態) $\alpha_1(-)$	1.0
表層：鉛直流出係数(溶存態) $\alpha_2(-)$	0.9
不飽和：側方流出係数(溶存態) $\alpha_3(-)$	0.9
表層：側方流出係数(懸濁態) $\alpha_4(1/m^3)$	0.001
表層：懸濁態限界流量 $Q_c(m^3/s)$	27.78
半減期(day) $T_{1/2}$	8

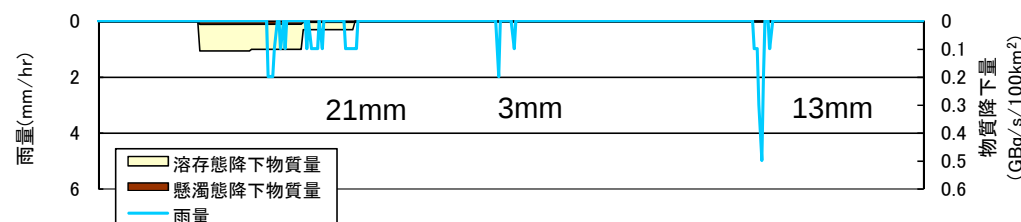
3. 簡易モデルによる解析結果

農地からの流出：ヨウ素

モデル解析の協力：（株）建設技術研究所

解析結果②（土地利用状況：農地）

農地では、山林と同様に浸透能力が高いため雨水が浸透され、表層から流出がなく、地下層からの溶存態ヨウ素の流出のみとなることが算定された。浸透能力を超える大雨が発生すれば、表層から流出することになる。



総降雨量：37mm

総降下量：2.1×10⁴GBq

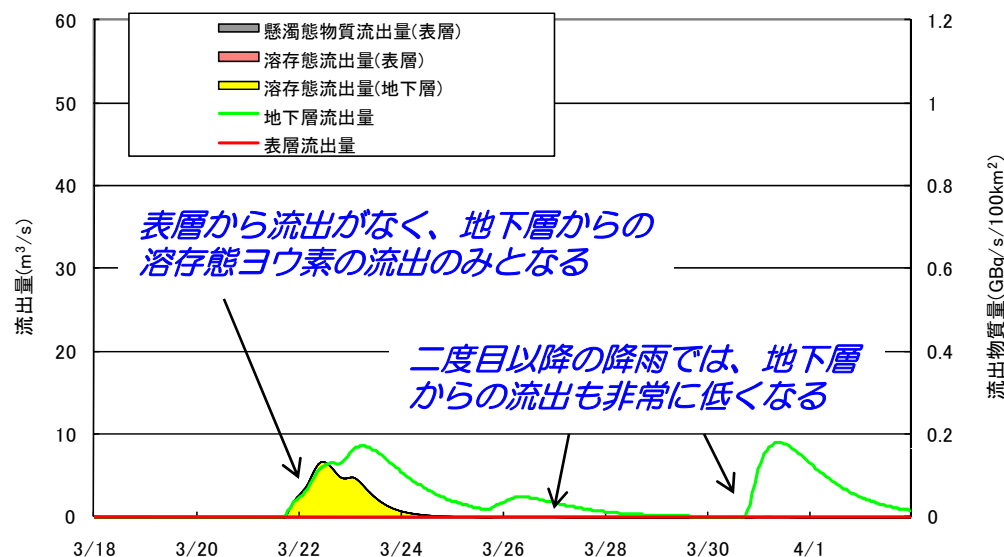
《計算条件》

流域面積 100km²

土地利用条件：農地

放射性物質：ヨウ素

懸濁態0.1、溶存態0.9



雨水流出モデル	
表層：側方流出係数 $a_1(-)$	0.1
表層：流出孔高さ $c_1(\text{mm})$	10
表層：鉛直流出係数 $b_1(-)$	0.1
地下層：側方流出係数 $a_3(-)$	0.05
地下層：流出孔高さ $c_3(\text{mm})$	5
流域面積 $A(\text{km}^2)$	100

物質流出モデル	
表層：側方流出係数(溶存態) $\alpha_1(-)$	1.0
表層：鉛直流出係数(溶存態) $\alpha_2(-)$	0.9
不飽和：側方流出係数(溶存態) $\alpha_3(-)$	0.9
表層：側方流出係数(懸濁態) $\alpha_4(1/\text{m}^3)$	0.001
表層：懸濁態限界流量 $Q_c(\text{m}^3/\text{s})$	27.78
半減期(day) $T_{1/2}$	8

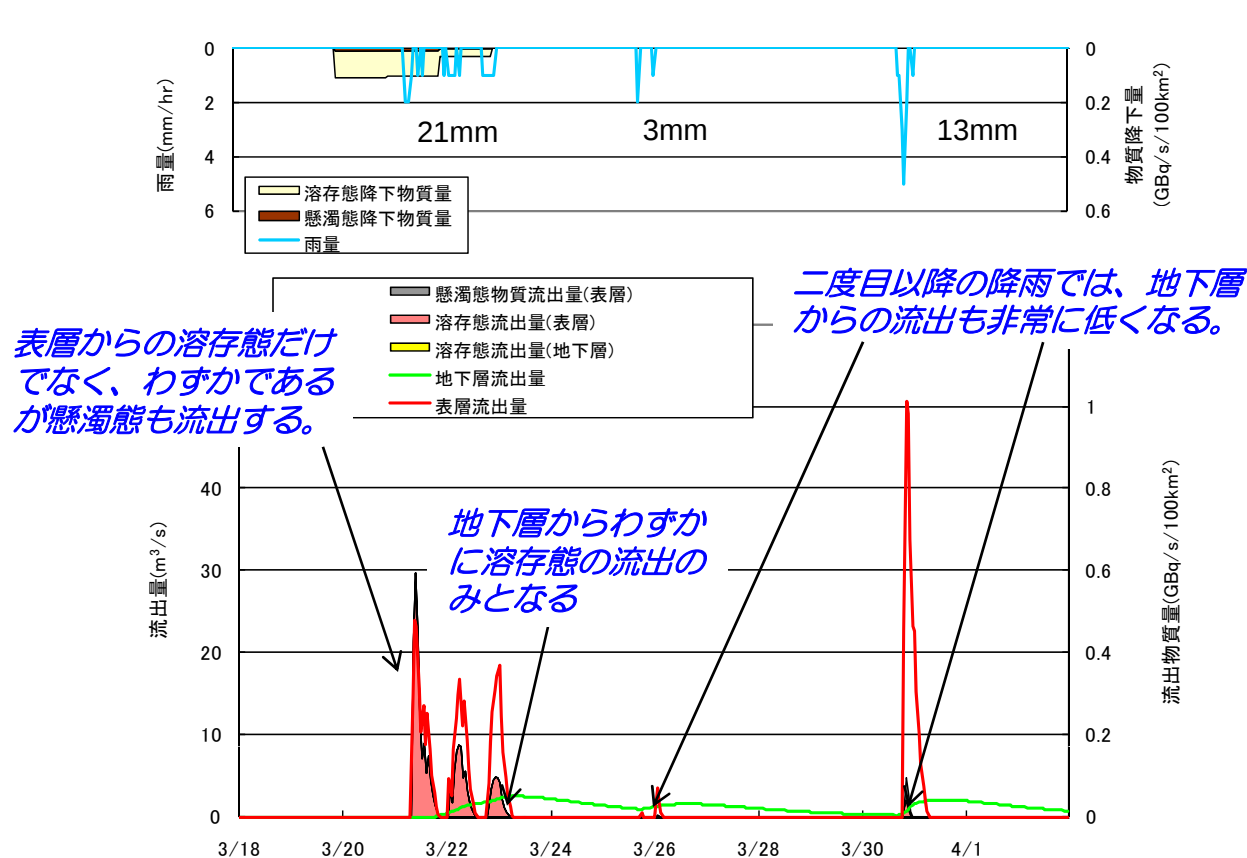
3. 簡易モデルによる解析結果

市街地からの流出：ヨウ素

モデル解析の協力：（株）建設技術研究所

解析結果③（土地利用状況：市街地）

表層からの流出水とともに溶存態ヨウ素が早いタイミングで高いピーク値を示す。また、わずかに懸濁態ヨウ素も流出する。表層よりも遅く地下層からも流出する。またその後の降雨時には、放射性物質の流出しないと算定される。



総降雨量：37mm

総降下量： 2.1×10^4 GBq

《計算条件》

流域面積 100km²

土地利用条件：市街地

放射性物質：ヨウ素

懸濁態0.1、溶存態0.9

雨水流出モデル	
表層：側方流出係数 $a_1(-)$	0.3
表層：流出孔高さ $c_1(\text{mm})$	2
表層：鉛直流出係数 $b_1(-)$	0.05
地下層：側方流出係数 $a_3(-)$	0.03
地下層：流出孔高さ $c_3(\text{mm})$	2
流域面積 $A(\text{km}^2)$	100

物質流出モデル	
表層：側方流出係数(溶存態) $\alpha_1(-)$	1.0
表層：鉛直流出係数(溶存態) $\alpha_2(-)$	0.9
不飽和：側方流出係数(溶存態) $\alpha_3(-)$	0.9
表層：側方流出係数(懸濁態) $\alpha_4(1/\text{m}^3)$	0.001
表層：懸濁態限界流量 $Q_c(\text{m}^3/\text{s})$	27.78
半減期(day) $T_{1/2}$	8

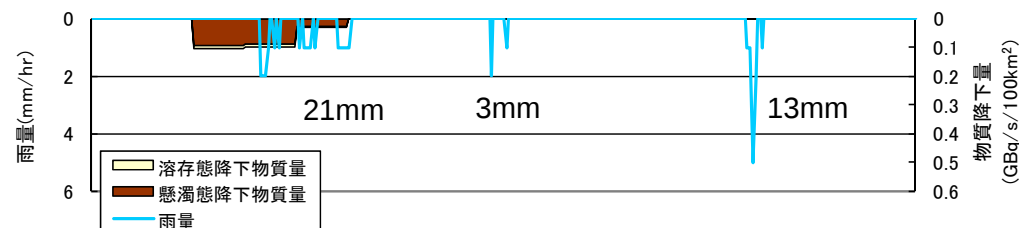
3. 簡易モデルによる解析結果

山林からの流出：セシウム

モデル解析の協力：（株）建設技術研究所

解析結果①（土地利用状況：山林）

浸透能力が高いため雨水が浸透され、表層から流出水がなく、地下層からの流出水はあるが、セシウムはわずかにしか流出しないと算定された。しかし、浸透能力を超える大雨が発生すれば、表層から流出する可能性はある。



総降雨量：37mm

総降下量： 2.8×10^3 GBq

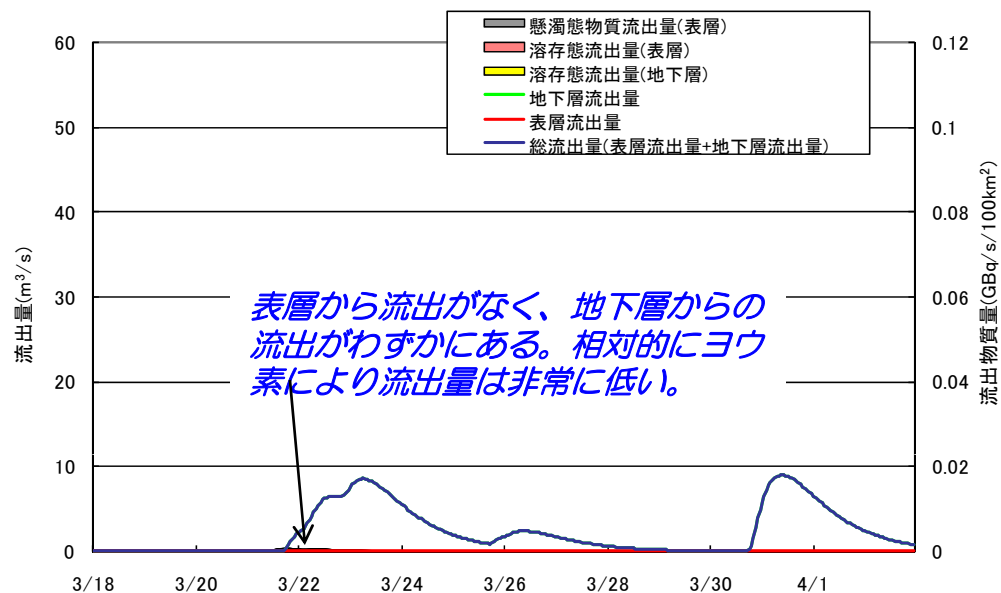
《計算条件》

流域面積 100km²

土地利用条件：山林

放射性物質：セシウム

懸濁態0.9、溶存態0.1



物質流出モデル	
表層：側方流出係数(溶存態) $\alpha_1(-)$	1.0
表層：鉛直流出係数(溶存態) $\alpha_2(-)$	0.1
不飽和：側方流出係数(溶存態) $\alpha_3(-)$	0.1
表層：側方流出係数(懸濁態) $\alpha_4(1/m^3)$	0.001
表層：懸濁態限界流量 $Q_c(m^3/s)$	27.78
半減期(day) $T_{1/2}$	10950

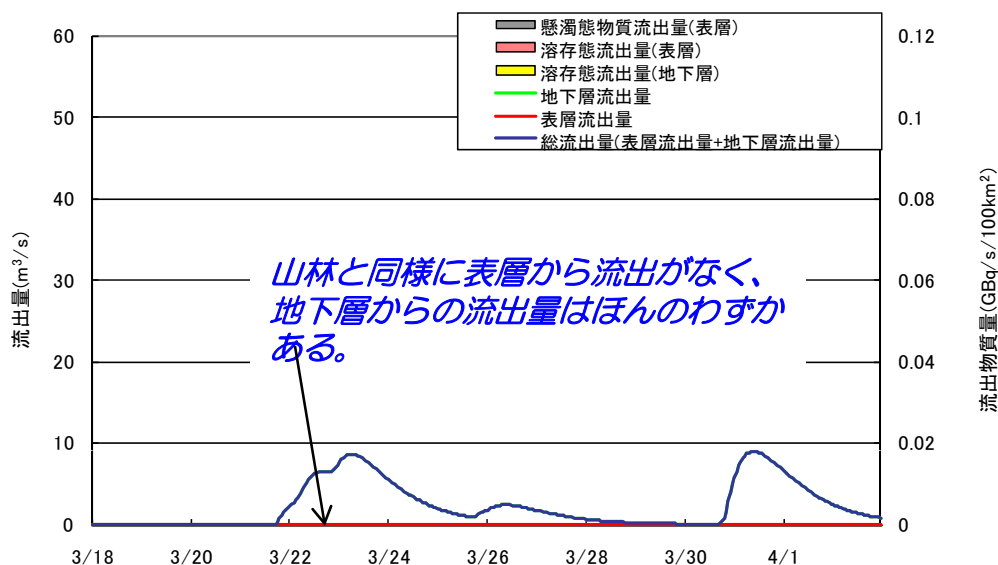
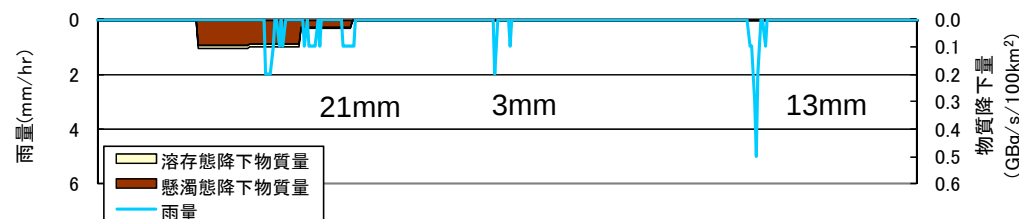
3. 簡易モデルによる解析結果

農地からの流出：セシウム

モデル解析の協力：（株）建設技術研究所

解析結果②（土地利用状況：農地）

農地では浸透能力が高いため雨水が浸透され、表層から流出がなく、地下層からの溶存態のわずかな流出のみとなる。浸透能力を超える大雨が発生すれば、表層から流出する可能性はある。



総降雨量：37mm

総降下量： 2.8×10^3 GBq

《計算条件》

流域面積 100km²

土地利用条件：農地

放射性物質：セシウム

懸濁態0.9、溶存態0.1

雨水流出モデル	
表層：側方流出係数 $a1(-)$	0.1
表層：流出孔高さ $c1(mm)$	10
表層：鉛直流出係数 $b1(-)$	0.1
地下層：側方流出係数 $a3(-)$	0.05
地下層：流出孔高さ $c3(mm)$	5
流域面積 $A(km^2)$	100

物質流出モデル	
表層：側方流出係数(溶存態) $\alpha_1(-)$	1.0
表層：鉛直流出係数(溶存態) $\alpha_2(-)$	0.1
不飽和：側方流出係数(溶存態) $\alpha_3(-)$	0.1
表層：側方流出係数(懸濁態) $\alpha_4(1/m^3)$	0.001
表層：懸濁態限界流量 $Qc(m^3/s)$	27.78
半減期(day) $T_{1/2}$	10950

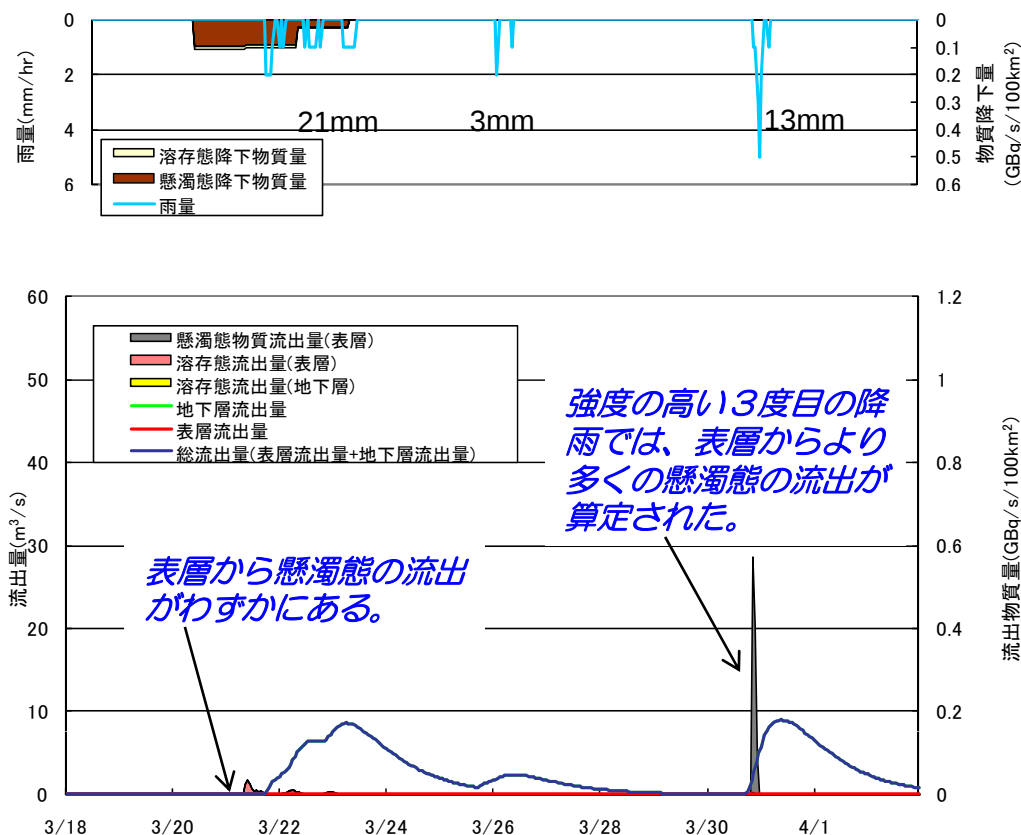
3. 簡易モデルによる解析結果

市街地からの流出：セシウム

モデル解析の協力：（株）建設技術研究所

解析結果③（土地利用状況：市街地）

表層から流出する溶存態が早いタイミングで高いピーク値を示す。また、表層よりも遅く地下層から流出される時間遅れの挙動が表現されている。また2回目の降雨時には、最初の降雨と同等の雨量が生じているが放射性物質は流出されないと算定された。



総降雨量：37mm
総降下量： 2.8×10^3 GBq

《計算条件》

流域面積 100km²

土地利用条件：市街地

放射性物質：セシウム

懸濁態0.9、溶存態0.1

雨水流出モデル	
表層：側方流出係数 $a1(-)$	0.3
表層：流出孔高さ $c1(mm)$	2
表層：鉛直流出係数 $b1(-)$	0.05
地下層：側方流出係数 $a3(-)$	0.03
地下層：流出孔高さ $c3(mm)$	2
流域面積 $A(km^2)$	100

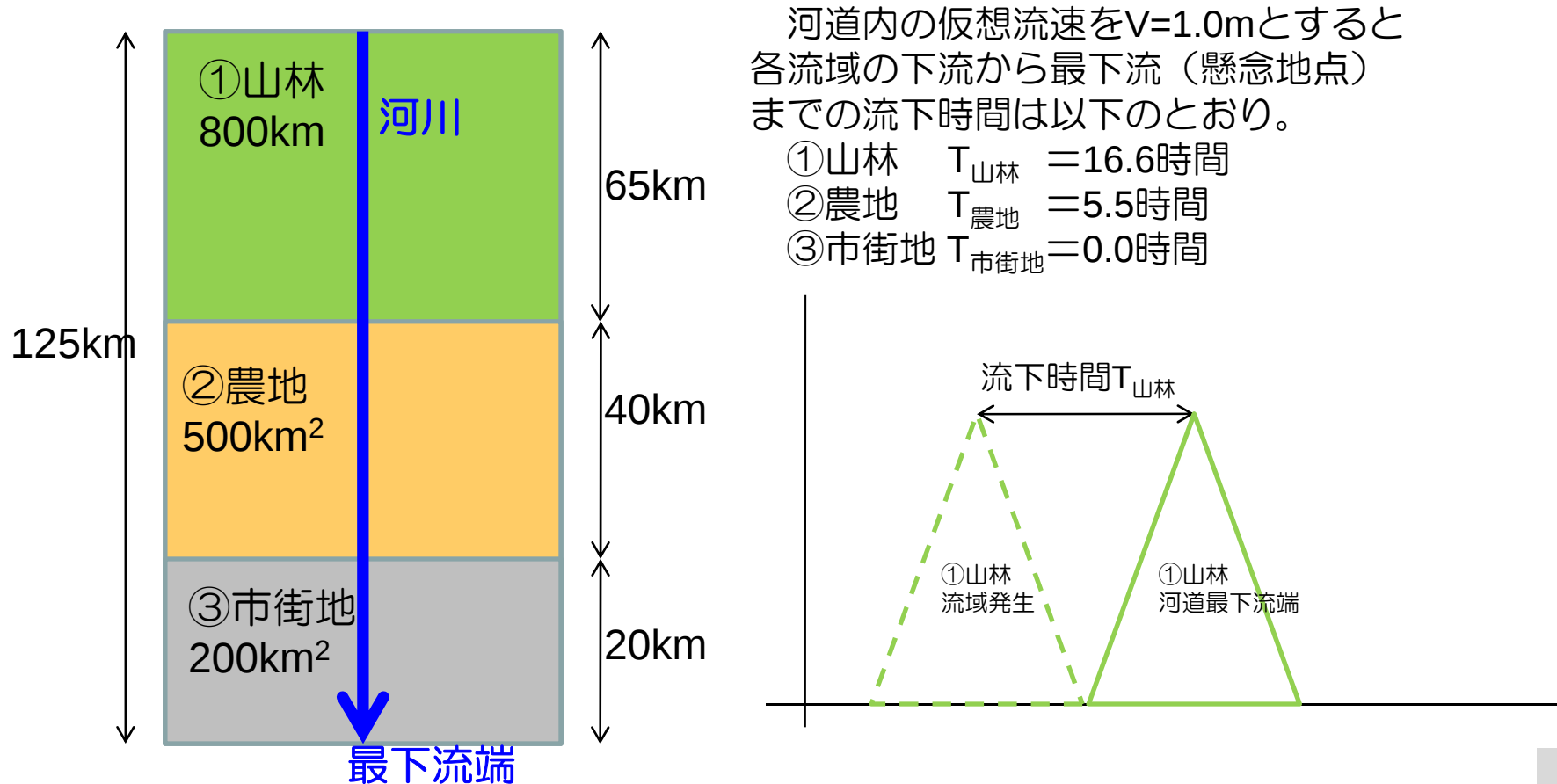
物質流出モデル	
表層：側方流出係数(溶存態) $\alpha_1(-)$	1.0
表層：鉛直流出係数(溶存態) $\alpha_2(-)$	0.1
不飽和：側方流出係数(溶存態) $\alpha_3(-)$	0.1
表層：側方流出係数(懸濁態) $\alpha_4(1/m^3)$	0.001
表層：懸濁態限界流量 $Qc(m^3/s)$	27.78
半減期(day) $T_{1/2}$	10950

4. 河道流下過程の簡易な評価

モデル解析の協力：（株）建設技術研究所

検討例：河道内の時間遅れを考慮した濃度ピーク流下時間

ここでは、河道内の平均流速を仮定し、各流域から河川へ流入する物質量が流速に応じて下流に移送（移流）することし、河道内の時間遅れを表現。

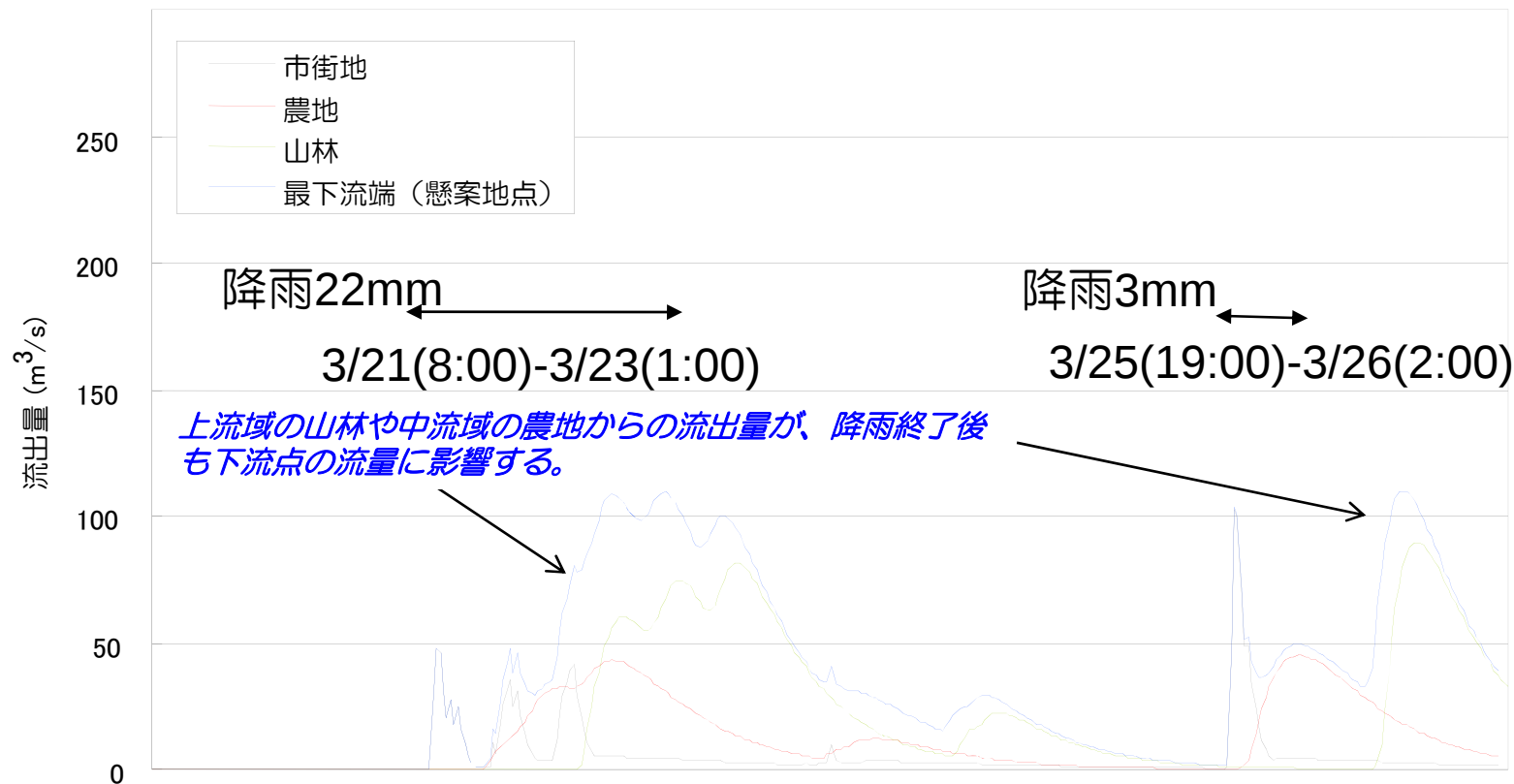


4. 河道流下過程の簡易な評価

下流点での流量変化（流域面積1500km²想定）

モデル解析の協力：（株）建設技術研究所

3月21日から23日に掛けた21mm降雨と3月25日から26日の3mm降雨による異なる土地利用流域からの流出量を合成した下流地点の流量変化

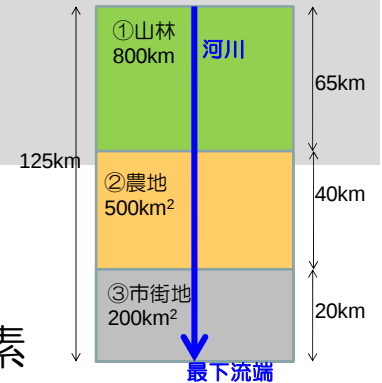


降雨量や流域面積に依存するが、流下時間の遅れの影響が表れて下流地点の流量は、降雨後数日の間は流量が増加した傾向が表れる。

4. 河道流下過程の簡易な評価

ヨウ素流出負荷量の変化

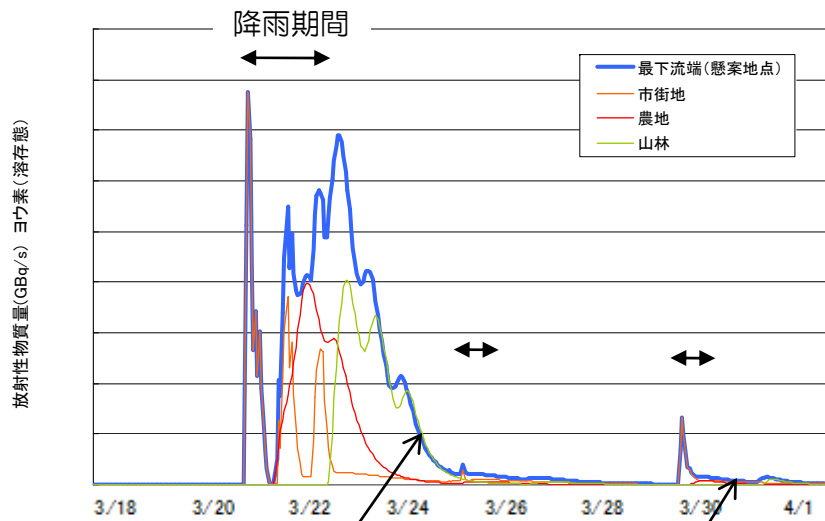
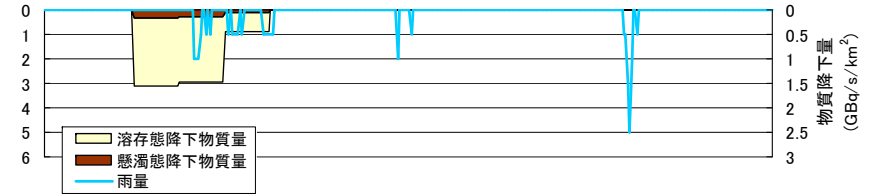
仮想的な流域の下流端における放射性物質の流出パターン



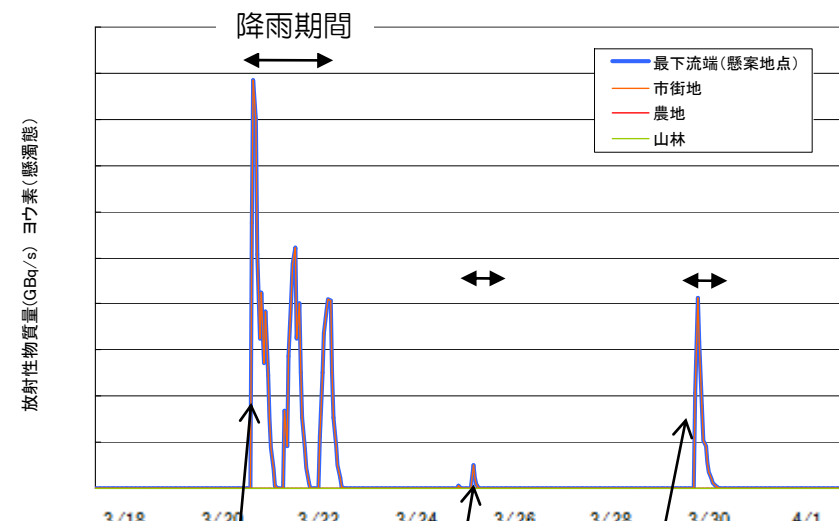
溶存態ヨウ素



懸濁態ヨウ素



最下流端での溶存態ヨウ素負荷量は、流量変化に応じて降雨後も数日影響が残る形で徐々に低減する傾向にある。



懸濁態ヨウ素負荷量は、降雨期間内に増加して、急激に低減する傾向にある。その多くは市街地由来となる。

5. 解析結果と水道水検出状況との比較

①雨天時流出の現象(河川流出、取水地点までの流下)

3月21-23日の降雨による流出で多くの放射性ヨウ素は流出し、セシウムは土壤に保持された形で蓄積されているものの、流出しにくい状況にあるものと推察される。

②流域の土地利用、地表面状態の影響(流出現象)

市街地を抱える流域の水源より、山林や農地の流域水源の方が流出の影響を受けにくいと考えられる。

③形態別放射性物質の挙動(溶存態と懸濁態、除去性)

強い降雨で懸濁態で流出する可能性はあるものの、ヨウ素は溶存態として流出する。

④放射性物質の土壤への吸着性(ヨウ素とセシウム)

セシウムは、その降下量がヨウ素と比較して少なかったことに加え、土壤吸着傾向が強いため、流出しにくい状態にある。

⑤長期的な流出挙動(地下水浸透、半減期)

地下浸透したヨウ素は、すでに半減期によりその蓄積量は低減している。

付録

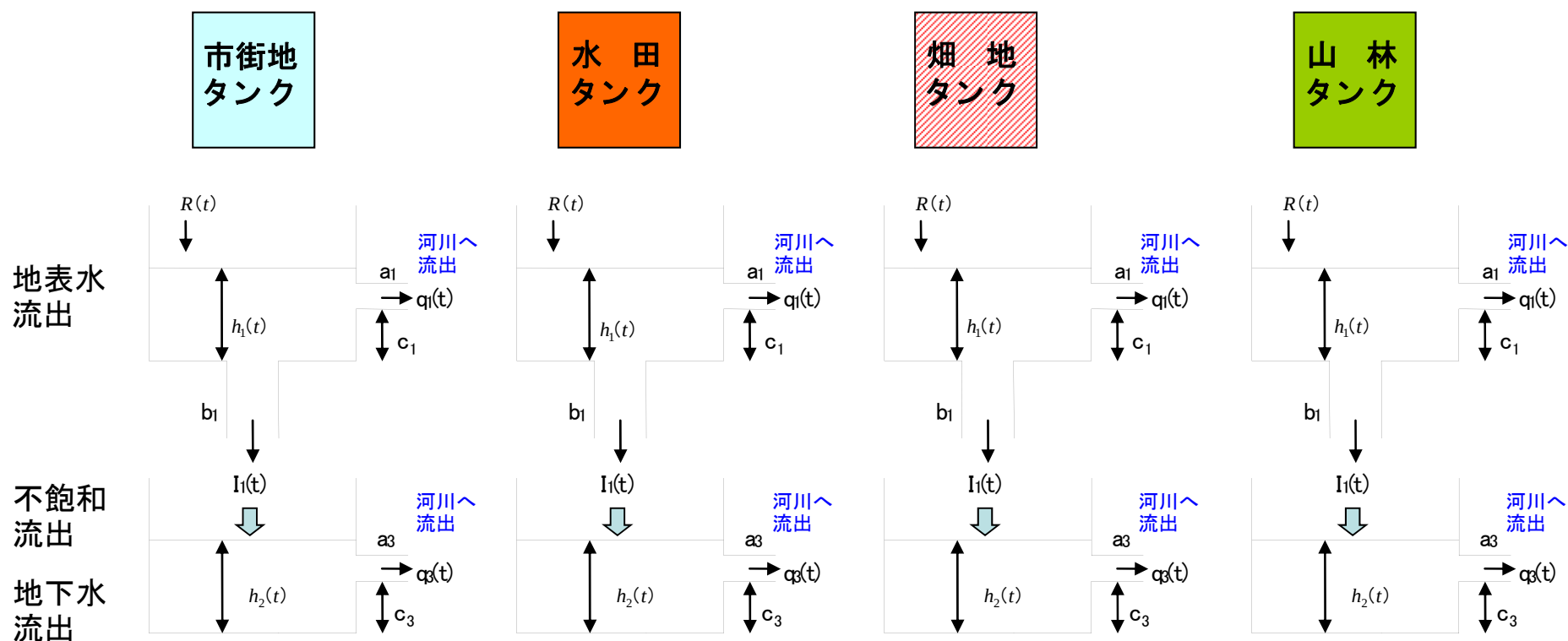
- 1) 雨水流出と物質流出のモデル概要
- 2) 物質流出モデルのパラメータ類
- 3) 共通プラットフォームCommonMPの概要
- 4) 河道水理モデルの例
- 5) 河道物質移送モデルの例

2. 放射性物質の流出解析モデルの概要

雨水流出モデルの概要（1）

①雨水流出モデル（流域タンクモデル）

土地利用ごとの2段タンクモデルにより、**地表層流出（早い流出）**、**地下浸透、不飽和流出（遅い流出）**を表現する。また、各係数を調整することで**土地利用状況に応じた流出量**を算定できるモデルとする。

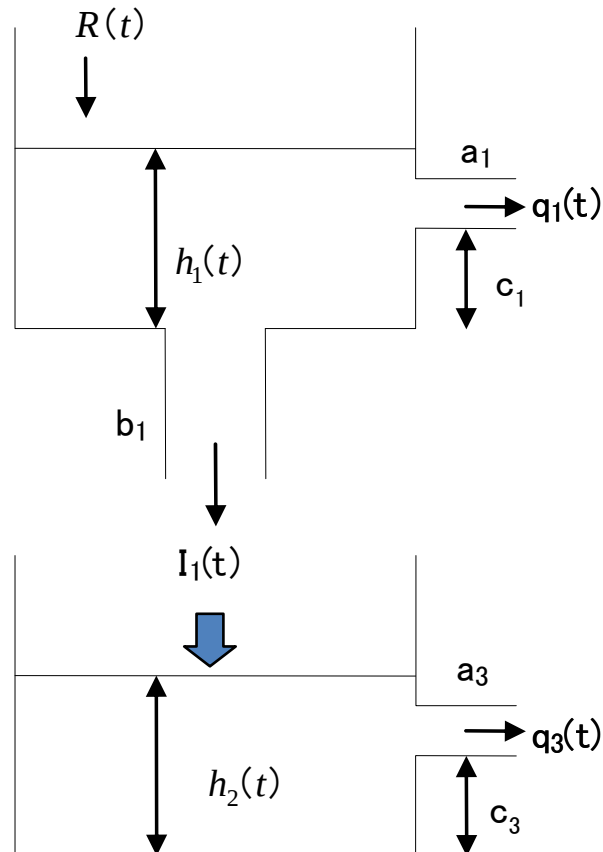


2. 放射性物質の流出解析モデルの概要

雨水流出モデルの概要（2）

①雨水流出モデル（流域タンクモデル）

1 段目の表層タンクからは表面流出量（側方流出）と地下浸透量（鉛直流出）、
2 段目のタンクからは地下水からの不飽和流出（側方流出）を表現する。



タンクiの貯留高 $\frac{dh_i(t)}{dt} = R(t) - q_i(t) - I_i(t)$

側方流出高 $q_i(t) = a_i \{h_i(t) - c_i\}$

鉛直流出高 $I_i(t) = b_i \cdot h_i(t)$

ここで、

$h_i(t)$: 貯留高(mm)

$q_i(t)$: 側方流出量(mm/h)

$I_i(t)$: 鉛直流出量(mm/h)

a_i : 側方流出係数(1/h)

b_i : 鉛直流出係数(1/h)

c_i : 側方流出開始高さ(mm)

$R(t)$: 雨量(mm/h)

物質流出モデルの概要（１）

②物質流出モデル（流域タンクモデル）

大気からの放射性物質の地表降下量を与えて、その地表面流出過程を表現できるモデルとする。その際の下記の点に留意している。

- 大気から降下する放射性物質（ヨウ素、セシウム）には、乾性沈着、湿性沈着があるが、地表面流出において溶存態と懸濁態の２形態を考える。地下に浸透するものは溶存態だけとする。また、半減期を考慮する。
- 土地利用別・形態別（溶存態、懸濁態）別に表現できるモデルとして、それぞれ流出する物質質量、浸透する物質質量、土壌へ吸着・残存する物質質量を流出・浸透量 Q 、係数 α 及び c で表現する。
- 懸濁態に関しては、地表面の限界掃流力を考慮し、限界流量 Q_c を設定し、限界流量以下の場合には、放射性物質は地表に留まり流出しないことを表現する。

物質流出モデルの概要（3）

インフット

溶存態

懸濁態

表層タンク

表層タンク

表層タンク

溶存態

懸濁態

①運動式

$$L_1 = \alpha_1 \cdot \frac{L_{s-Dis}}{A \cdot h_1} \cdot Q_1$$

②連続式

$$\frac{d(L_{s-Dis})}{dt} = L_{a-Dis} - L_1 - L_2$$

①運動式

$$L_4 = \alpha_4 \cdot M_s \cdot Q_1 - Q_C$$

②連続式

$$\frac{d(M_s)}{dt} = L_{a-Part} - L_4$$

不飽和タンク

不飽和タンク

不飽和タンク

溶存態

①運動式

$$L_3 = \alpha_3 \cdot \frac{L_{u-Dis}}{A \cdot h_2} \cdot Q_3$$

②連続式

$$\frac{d(L_{u-Dis})}{dt} = L_2 - L_3$$

アウト

アウト

アウト

2. 放射性物質の流出解析モデルの概要

物質流出モデルのパラメータ類

②物質流出モデル（流域タンクモデル）

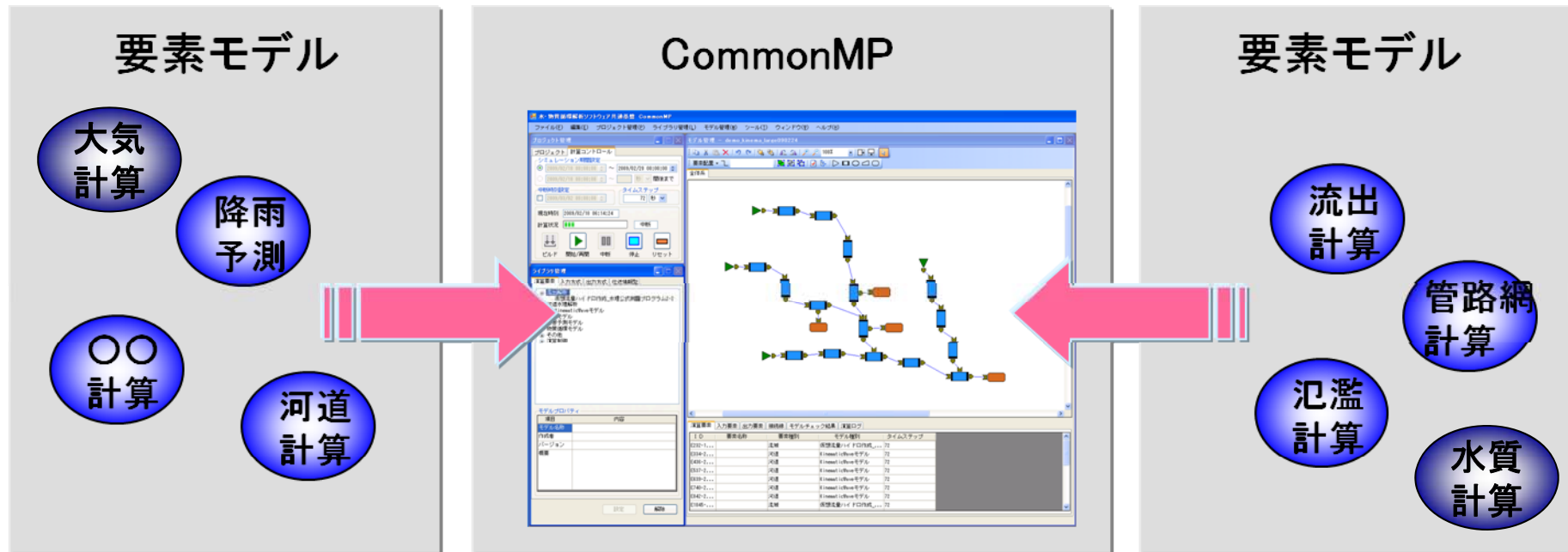
ここに、	L_{a-Dis}	:	大気からの溶存態降下物質量 (Bq/h)
	L_{a-Part}	:	大気からの懸濁態降下物質量 (Bq/h)
	L_1	:	表層モデルからの溶存態流出物質量 (Bq/h)
	L_2	:	表層モデルから不飽和タンクへの溶存態浸透物質量 (Bq/h)
	L_3	:	不飽和モデルからの溶存態流出物質量 (Bq/h)
	L_4	:	表層モデルからの懸濁態流出物質量 (Bq/h)
	Q_1	:	表層モデルの流出水量 (m^3/h)
	Q_2	:	表層モデルから中間タンクへの浸透水量 (m^3/h)
	Q_3	:	不飽和モデルからの流出水量 (m^3/h)
	Q_C	:	表層モデルからの懸濁物限界流量 (m^3/h)
	L_{s-Dis}	:	表層タンクの溶存態残存物質量 (Bq)
	L_{u-Dis}	:	不飽和タンクの溶存態残存物質量 (Bq)
	M_s	:	表層タンクの懸濁態残存物質量 (Bq)
	A	:	流域面積 (m^2)
	α^1	:	表層溶存態負荷流出係数 (-)
	α^2	:	表層溶存態負荷浸透係数 (-)
	α^3	:	不飽和層溶存態負荷流出係数 (-)
	α^4	:	表層懸濁態負荷流出係数 (m^{-3})

なお C_s 、 C_u は半減期を考慮する。 $-\frac{dC_s}{dt} = \lambda C_s$ 、 $-\frac{dC_u}{dt} = \lambda C_u$ 、(半減期) $t_{1/2} = 0.693/\lambda$

2) 共通プラットフォームCommonMPの概要

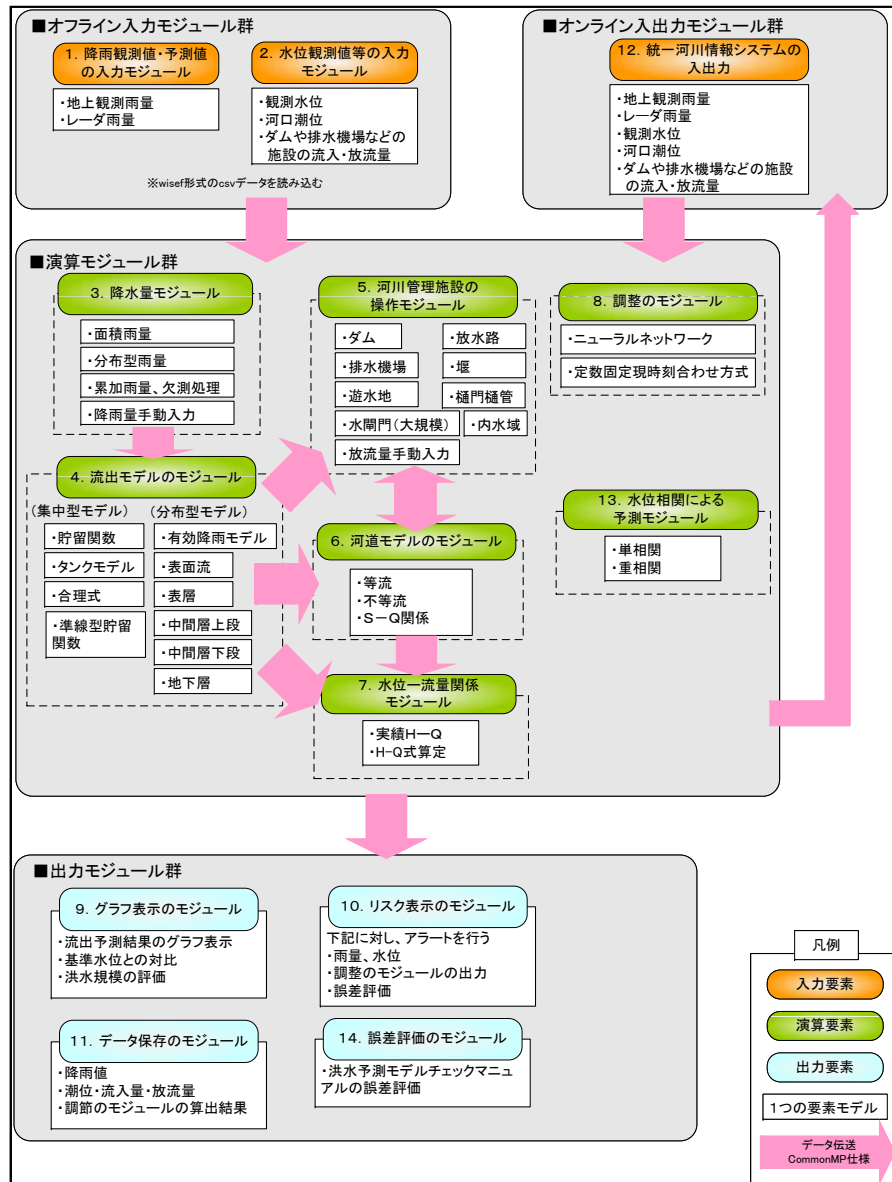
■CommonMPとは、様々な要素モデルを動かすための共通プラットフォームのことである。

■要素モデルとは、共通プラットフォームの仕様に基づいて構築した計算エンジン（プログラムソフト）



■要素モデルを自由自在に相互接続し、複合的な物理現象をシミュレートする全体系モデルを構築することが出来る

2) 共通プラットフォームCommonMPの概要



・国土交通省が主として河川系業務で使用頻度の高い要素モデルを開発している(あくまでも標準的なモデルであり、だれでも新たに要素モデルを作成し、他のモデルと組合せて使うことが可能)ただし、**H23.1現在、一般リリースはしていない**(国交省職員のみ利用可能)。コンソーシアム(後述)の運営評価部会において、H22年度から、要素モデルの認証ルールを検討を開始している。そのルールにより検証された要素モデルが順次一般公開される可能性がある。

・京都大学椎葉研究室が研究目的で複数の要素モデルを開発・公開している

・民間、大学など多くのユーザにより、様々なモデル開発が進むことが期待される。

国土交通省の既開発の要素モデルイメージ

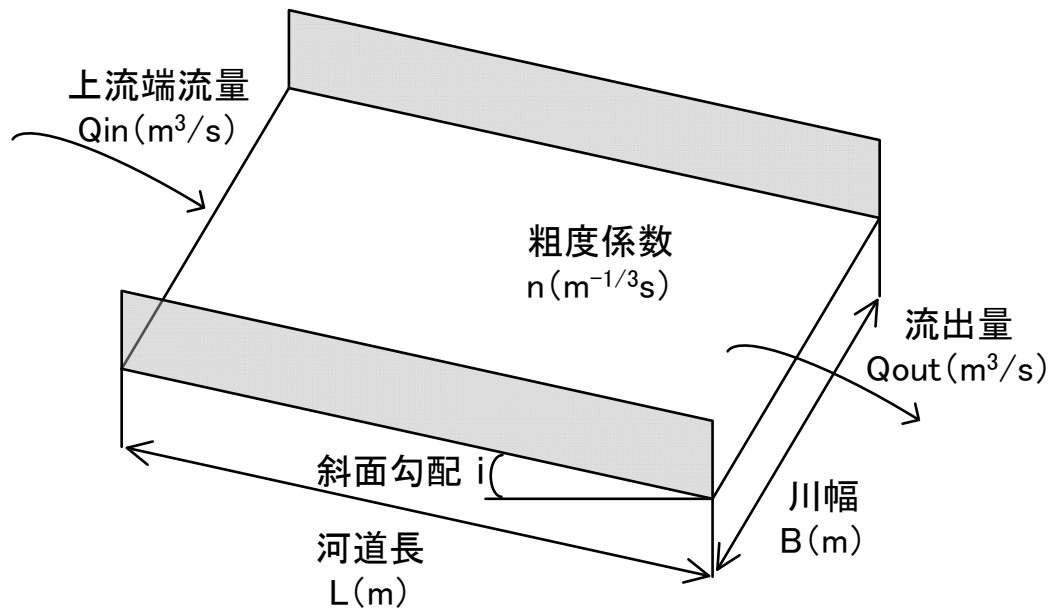
2) 共通プラットフォームCommonMPの概要



CommonMP ウェブサイト：http://framework.nilim.go.jp

3) 河道水理モデルの例

1次元の物理方程式（キネマティックウェーブモデル）により、河道内の雨水流出・流下を表現するモデルがある。河道延長及び川幅、粗度を考慮した物理モデルであり、河道内での時間遅れ等を再現する。



①連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = R_{in}$$

②運動量方程式

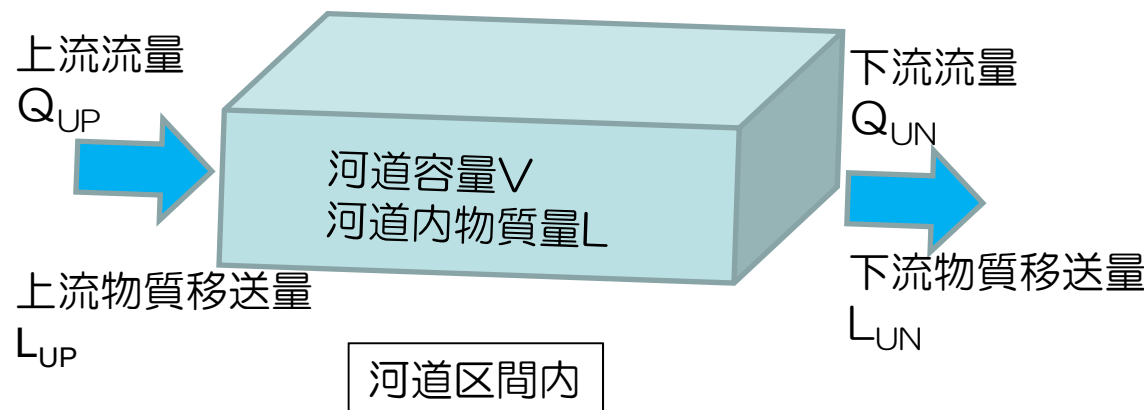
$$q = \frac{1}{n} h^{5/3} I^{1/2}$$

h	: 水深 (m)
q	: 単位幅流量 (m^2/s)
q_1	: 表層からの流量 (m/s)
q_3	: 不飽和層からの流量 (m/s)
Q_{out}	: 流出量 (m^3/s)
n	: 粗度係数
i	: 斜面勾配 (一)

4) 河道物質移送モデルの例

河道水理モデルで算出された河道区間内での上流流量及び下流流量より、移送（移流）するモデルがある。

評価する河道区間の長さを適切に設定することで移送効果を表現する。河道区間を与えて、物質輸送を算定する。



①連続式

$$\frac{d(L)}{dt} = L_{UP} - L_{UN}$$

$$L_{UN} = Q_{UN} \cdot (V / L)$$

- Q_{UP} : 上流流量 (m^3/s)
- Q_{UN} : 下流流量 (m^3/s)
- L_{UP} : 上流からの物質移送量 (Bq/s)
- L_{UN} : 下流への物質移送量 (Bq/s)
- V : 河道区間内 河道容量 (m^3)
- L : 河道区間内 物質質量 (Bq)