

流量データのない河川でも利用可能な 流出計算ソルバーの開発

室蘭工業大学 中津川 誠

研究の背景と目標

■背景

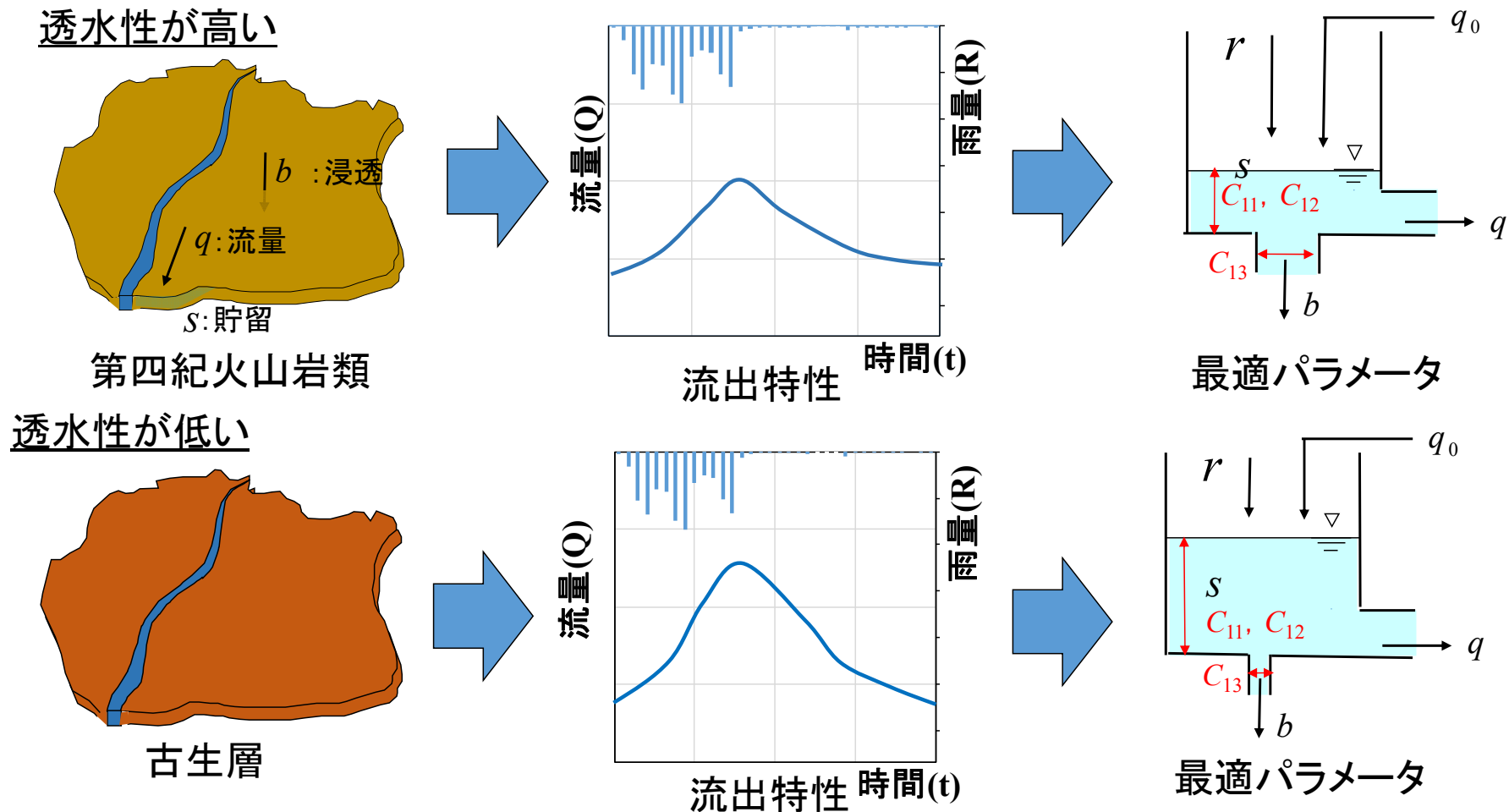
- 毎年、全国各地で観測史上最大を塗り替えるような大雨の頻発 ⇒ 素早く＋全国を網羅した情報提供体制が必要
- しかしながら、全国規模でみると流量観測データの無い河川が多い
- 任意の時間、任意の河川で妥当な流量、水位を推算できる手段とそれを実装したアプリが求められている

地質情報に基づく計算手法の開発

■目標

いかなる河川であっても信頼性のある流量が推算でき、それをユーザーの使いやすいアプリとして実装する。

地質情報に基づく流出計算のイメージ

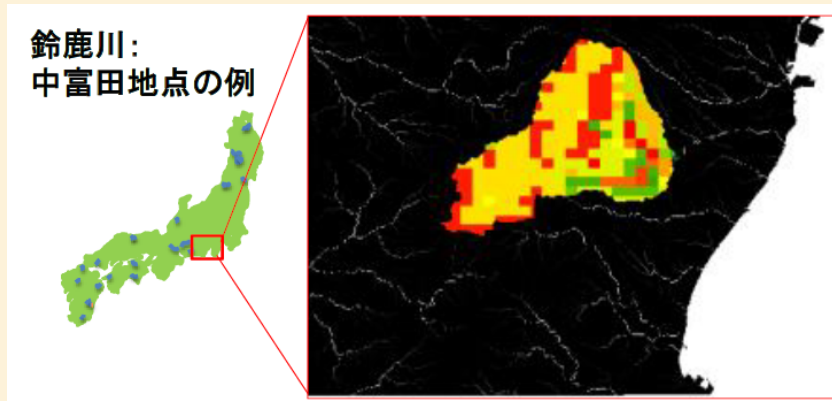


虫明功臣, 高橋裕, 安藤義久, 日本の山地河川の流況に及ぼす流域の地質の効果, 土木学会論文報告集 309, pp.51-62, 1981.

といった先行研究の知見を具体化する！

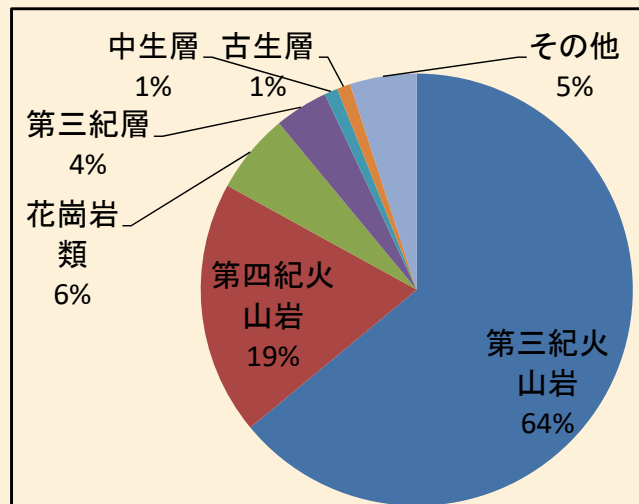
地質情報に基づく流出計算のイメージ

流域内地質分布



地質6区分に整理

地質区分の
面積率



奥泉宗一郎, 中津川誠, 臼谷友秀,
GISを用いた汎用的な流出計算手法の提案,
水文・水資源学会誌原著論文, Vol.29, No.1,
pp.32-43, 2016.

流出モデルパラメータ ～地質別面積率の重回帰式

$$c_n = \sum_{i=1}^6 a_{n,i} g_i + b_n$$

c_n : 流出モデルパラメータ, g_i : 地質別面積率, $a_{n,i}$: 重回帰係数

地質情報からモデルパラメータ
が与えられれば, **任意の地点**
の流量推算が可能に!

地質情報の取得～国土数値情報の利用

虫明らの分類	国土数値情報		
	表層地質分類	岩石区分	時代区分
第三紀火山岩類	火山性岩石	火山灰、軽石、シラス、玄武岩、安山岩	古第三紀、新第三紀、第三紀
第四紀火山岩類	火山性岩石	火山灰、軽石、シラス、玄武岩、安山岩	洪積世、沖積世
花崗岩類	花崗岩類	花崗岩	全時代
第三紀層	未固結堆積物	砂、泥、礫、シルト、粘土、碎屑物、泥炭	古第三紀、新第三紀、第三紀
	半固結-固結堆積物	砂岩、泥岩、礫岩、石灰岩、スコリア	
中生層	未固結堆積物	砂、泥、礫、シルト、粘土、碎屑物、泥炭	中生代、ジュラ紀、白亜紀
	半固結-固結堆積物	砂岩、泥岩、礫岩、石灰岩、スコリア	
古生層	未固結堆積物	砂、泥、礫、シルト、粘土、碎屑物、泥炭	古生代
	半固結-固結堆積物	砂岩、泥岩、礫岩、石灰岩、スコリア	
その他	深成岩類	斑岩、角閃岩	全時代
	変成岩類	ホルフェンス、緑色片岩、黒色片岩、結晶片岩	
	圧砕岩	圧砕岩	

国土数値情報の地質情報からモデルパラメータが設定できる

流出モデル～1段タンク型貯留関数モデル

$$\frac{ds}{dt} = r - q - b + q_0$$

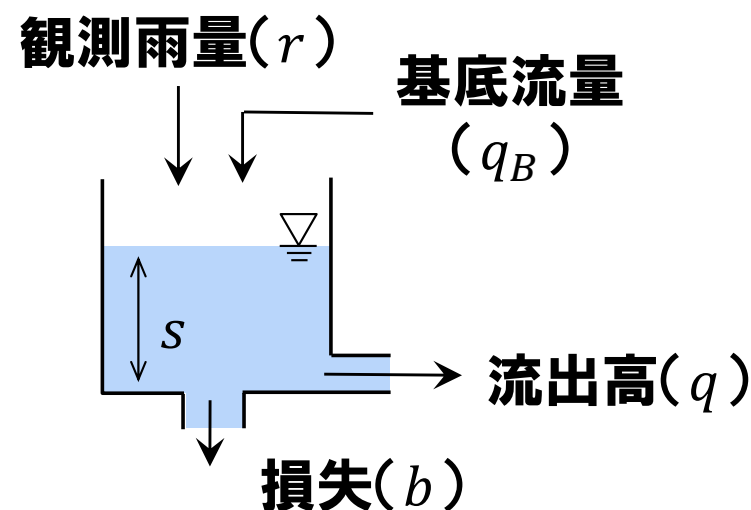
$$s = k_{11}q^{p_1} + k_{12}\frac{d}{dt}(q^{p_2})$$

$$b = k_{13}q = (c_{13} - 1)q$$

$$q_0 = q_B \exp(-\lambda t)$$

$$k_{11} = c_{11}A^{0.24}, \quad k_{12} = c_{12}k_{11}^2(\bar{r})^{-0.2648}$$

■模式図



s :貯留高(mm), r :観測雨量(mm/h), q :観測流出高(mm/h), b :損失高(mm/h),
 q_0 :基底流出高(mm/h), q_B :初期流出高(mm/h), k_{11}, k_{12} :貯留係数, k_{13} :損失
係数, p_1, p_2 :貯留指数, λ :減衰係数, A :流域面積(km²), c_{11}, c_{12}, c_{13} :モデル定
数(未知定数).

流出モデル～2段タンク型貯留関数モデル

1
段目
タンク

$$\frac{ds_1}{dt} = r - q_1 - f_1$$

$$s_1 = k_{11}q_1^{p_1} + k_{12}\frac{d}{dt}(q_1^{p_2})$$

$$f_1 = k_{13}q_1 = (c_{23} - 1)q_1$$

$$k_{11} = c_{21}A^{0.24}, \quad k_{12} = c_{22}k_{11}^2(\bar{r})^{-0.2648}$$

s_1 : 1段目タンク貯留高(mm), r : 観測雨量(mm/h), q_1 : 表面・中間流出高 (mm/h), f_1 : 1段目タンクから2段目タンクへの浸透供給量(mm/h), k_{11}, k_{12} : 貯留係数, k_{13} : 浸透係数, p_1, p_2 : 貯留指数, A : 流域面積(km²), c_{21}, c_{22}, c_{23} : モデル定数(未知定数).

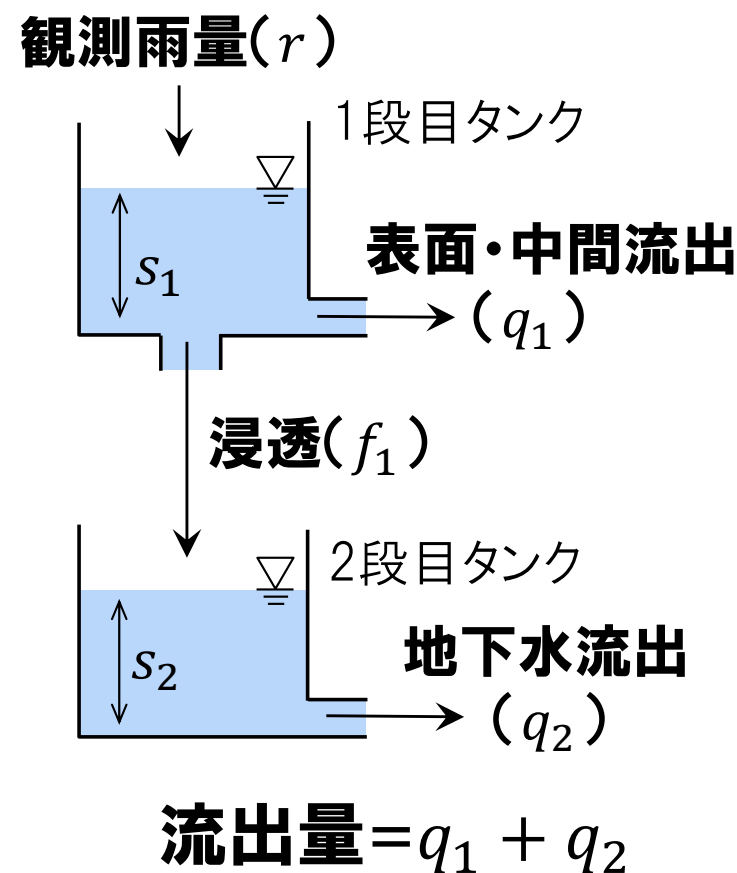
2
段目
タンク

$$\frac{ds_2}{dt} = f_1 - q_2, \quad s_2 = k_{21}q_2 + k_{22}\frac{dq_2}{dt}$$

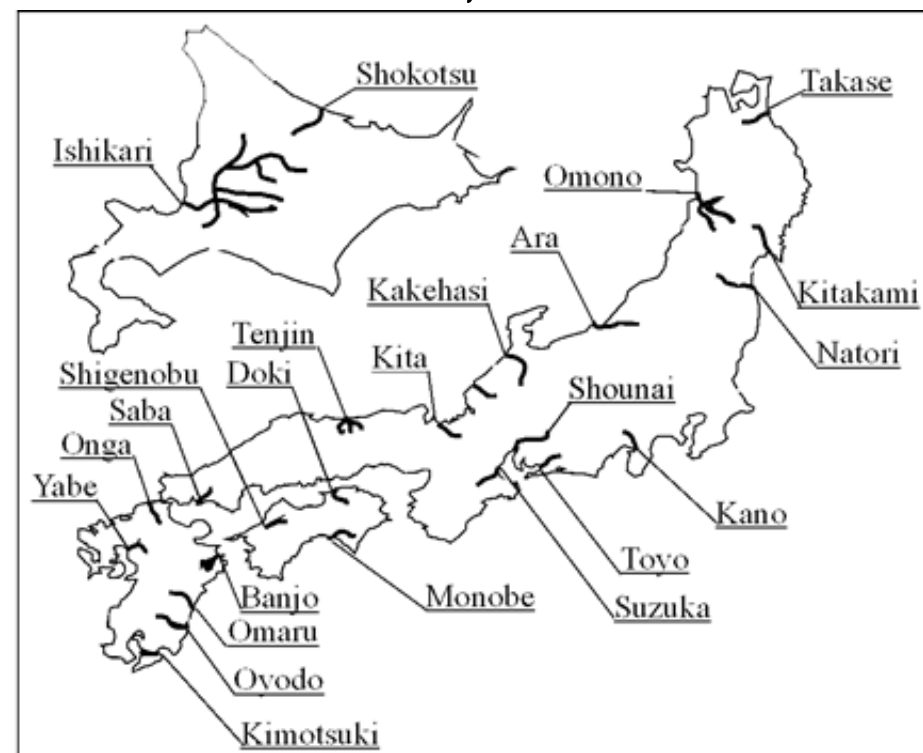
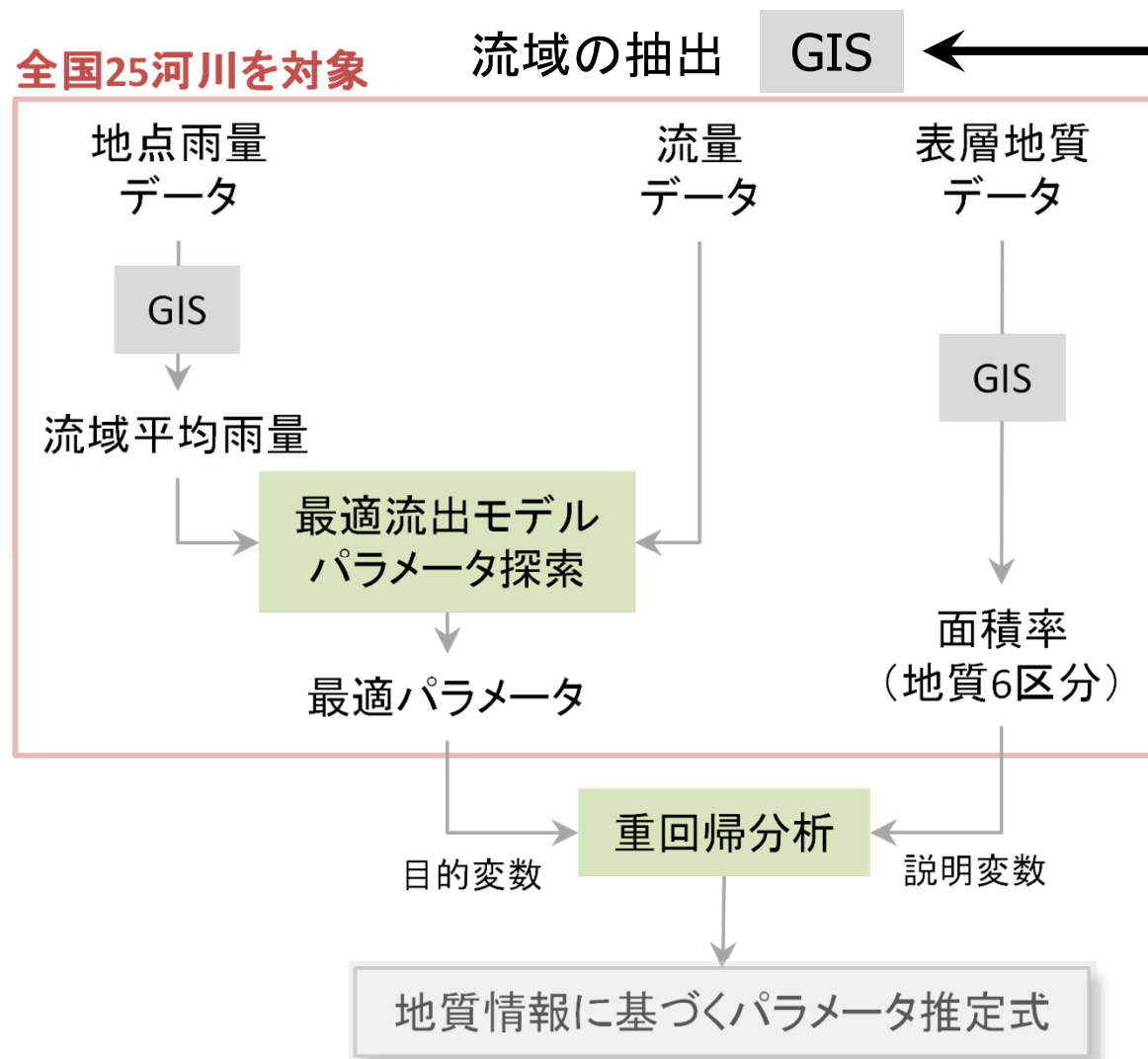
$$k_{21} = k_{13}T_c, \quad k_{22} = (k_{13}T_c^2)/\delta^2$$

s_2 : 2段目タンク貯留高(mm), k_{21}, k_{22} : 貯留係数, q_2 : 地下水流出高 (mm/h), T_c : 地下水流出成分の分離定数, δ : 減衰係数.

■模式図

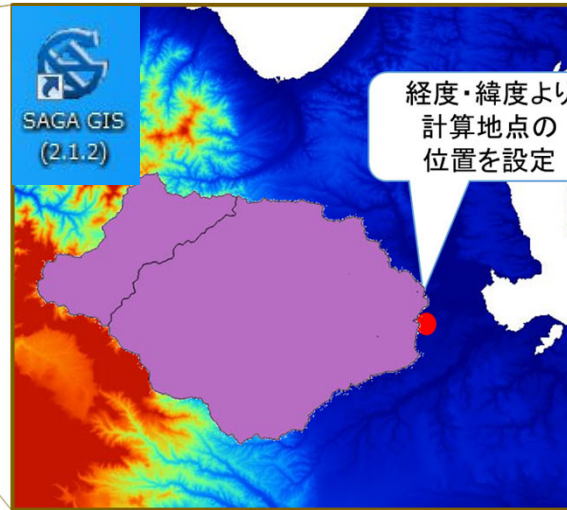
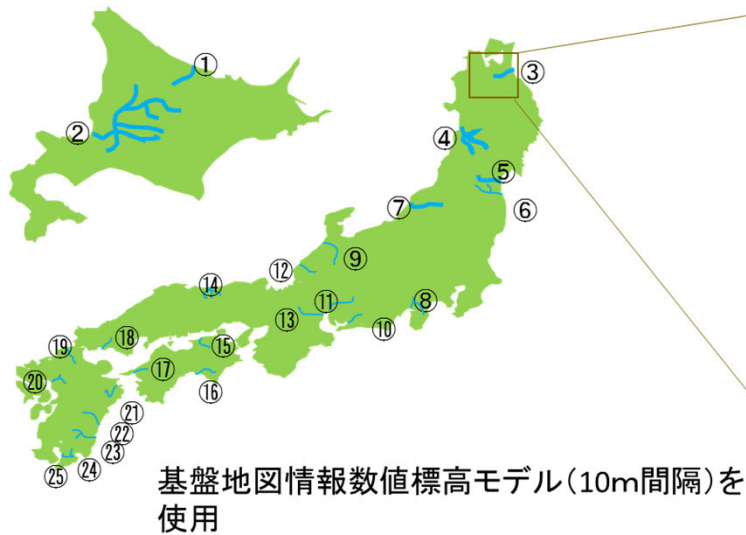


モデルパラメータの設定手順

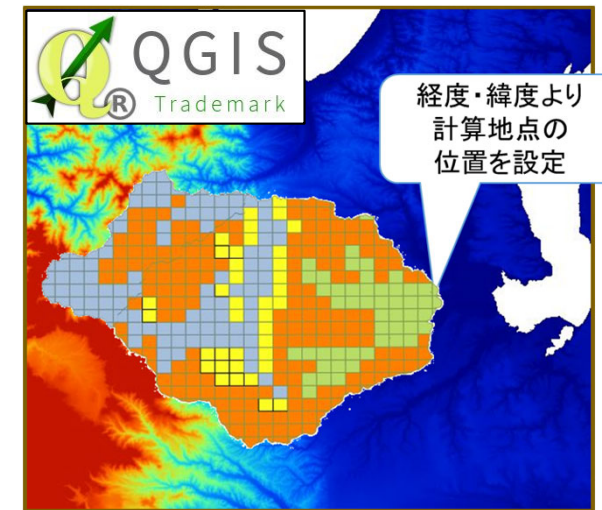


GISを活用した各種情報の抽出

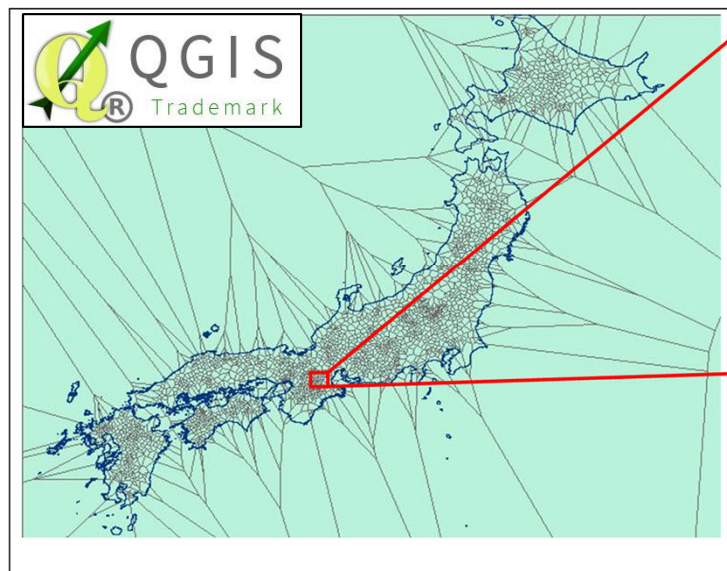
流域抽出



地質面積率



流域平均雨量



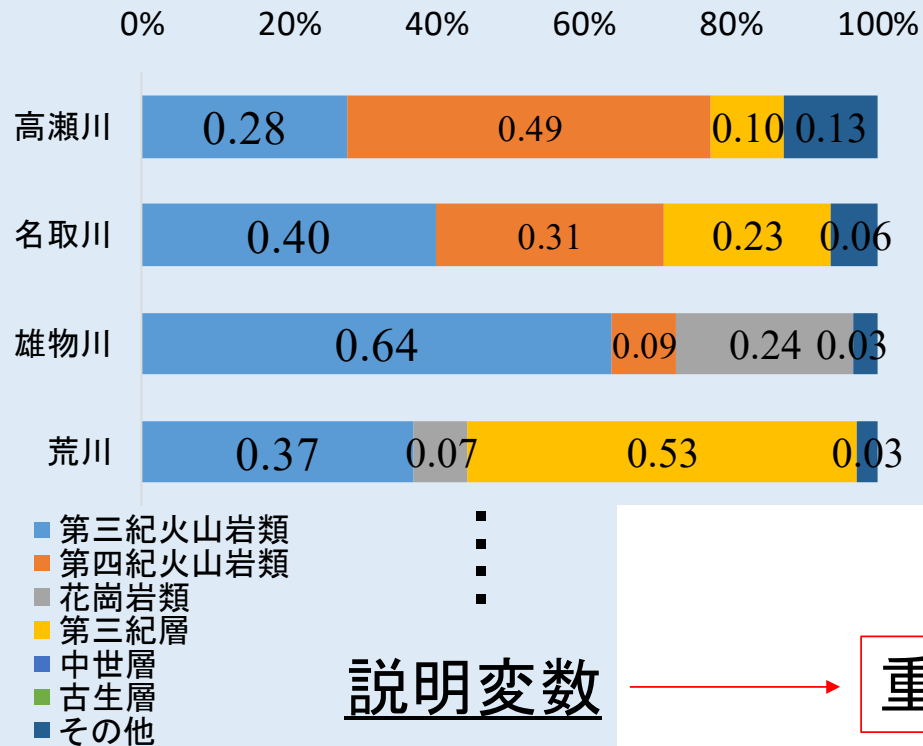
$$\text{流域平均雨量 (mm/h)} = \frac{A_1 R_1 + A_2 R_2 + A_3 R_3 + \dots + A_n R_n}{A}$$

A_n : 支配面積
 R_n : 観測雨量
 A : 流域面積
 n : 雨量観測所数

年月日	時刻	雨量(mm/h)
2002/07/09	20:00	0.0
2002/07/09	21:00	0.0
2002/07/09	22:00	0.0
2002/07/09	23:00	17.0
2002/07/09	24:00	46.0
2002/07/10	01:00	3.0
2002/07/10	02:00	6.0
2002/07/10	03:00	23.0
2002/07/10	04:00	24.0
2002/07/10	05:00	8.0
2002/07/10	06:00	19.0
2002/07/10	07:00	5.0
2002/07/10	08:00	3.0
2002/07/10	09:00	2.0
2002/07/10	10:00	0.0
2002/07/10	11:00	1.0
2002/07/10	12:00	1.0
2002/07/10	13:00	0.0
2002/07/10	14:00	8.0
2002/07/10	15:00	6.0
2002/07/10	16:00	1.0
2002/07/10	17:00	0.0
2002/07/10	18:00	0.0
2002/07/10	19:00	0.0
2002/07/10	20:00	0.0
2002/07/10	21:00	0.0
2002/07/10	22:00	0.0
2002/07/10	23:00	0.0
2002/07/10	24:00	0.0

地質情報を用いたモデルパラメータ推定式の作成

洪水が発生した流域界内の地質情報



洪水時に最適化したモデルパラメータ

	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{21}	C_{22}	C_{23}
高瀬川	14.473	0.140	2.025	8.492	0.592	3.806
名取川	10.662	0.090	1.724	7.835	0.290	2.591
雄物川	15.366	0.091	2.952	8.657	0.490	4.675
荒川	13.552	0.062	2.881	8.721	0.294	4.340

重回帰式

目的変数

$$C_{ij} = a_1 g_1 + a_2 g_2 + a_3 g_3 + a_4 g_4 + a_5 g_5 + a_6 g_6 + b_{ij}$$

結果～モデルパラメータ推定式

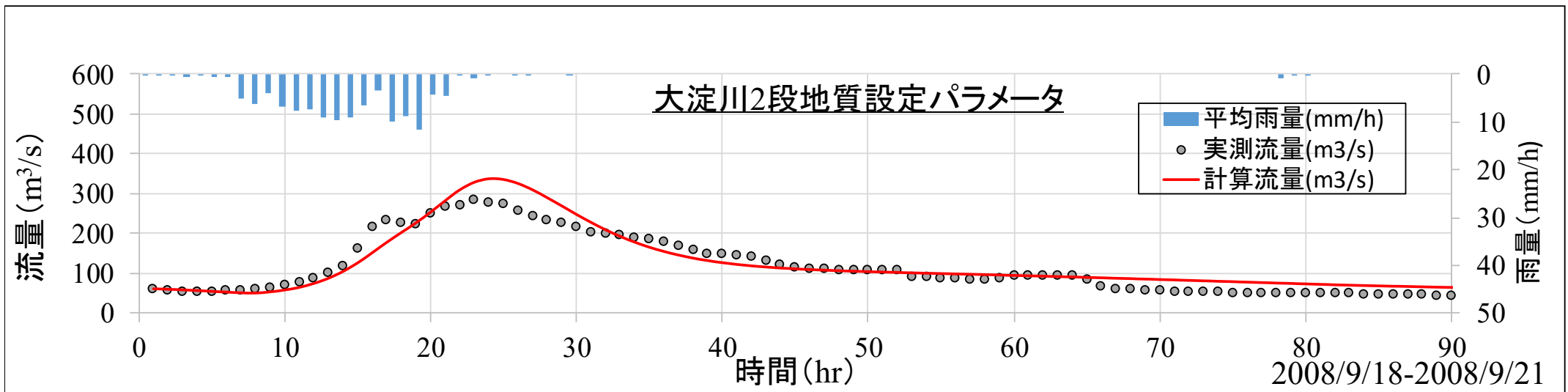
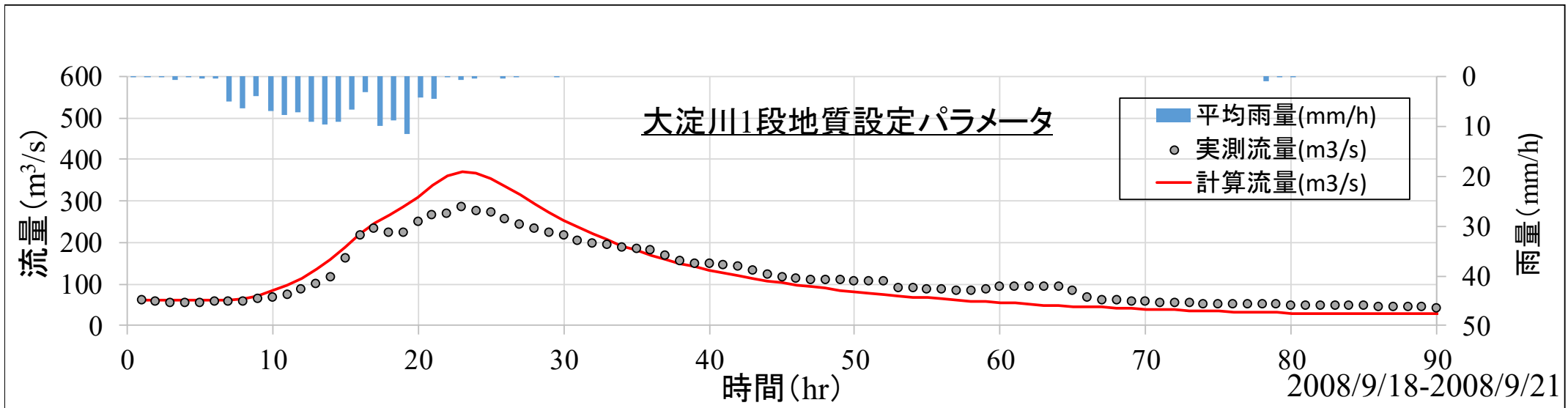
$$\begin{bmatrix} c_{11} \\ c_{12} \\ c_{13} \\ c_{21} \\ c_{22} \\ c_{23} \\ \lambda \\ T_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0432 & 2.061 & -9.217 & -2.286 & -4.698 & -0.162 \\ -0.016 & -0.006 & -0.008 & -0.059 & 0.063 & -0.055 \\ 1.733 & -0.016 & -0.006 & -0.008 & -0.059 & 0.063 \\ 1.395 & 3.390 & -1.361 & -0.108 & 0.248 & -0.790 \\ -0.089 & 0.060 & -0.121 & 0.054 & -0.049 & 0.245 \\ 1.009 & 0.301 & 0.468 & -0.020 & -1.563 & 0.515 \\ 0.013 & 0.008 & 0.008 & 0.021 & 0.002 & 0.021 \\ -31.948 & -5.817 & -12.178 & -37.517 & -12.939 & -34.021 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \\ g_5 \\ g_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 15.287 \\ 0.083 \\ 1.733 \\ 8.759 \\ 0.287 \\ 2.636 \\ 0.008 \\ 77.533 \end{bmatrix}$$

$c_{11}, c_{12}, c_{13}, \lambda$: 1段タンク型貯留関数モデルのパラメータ

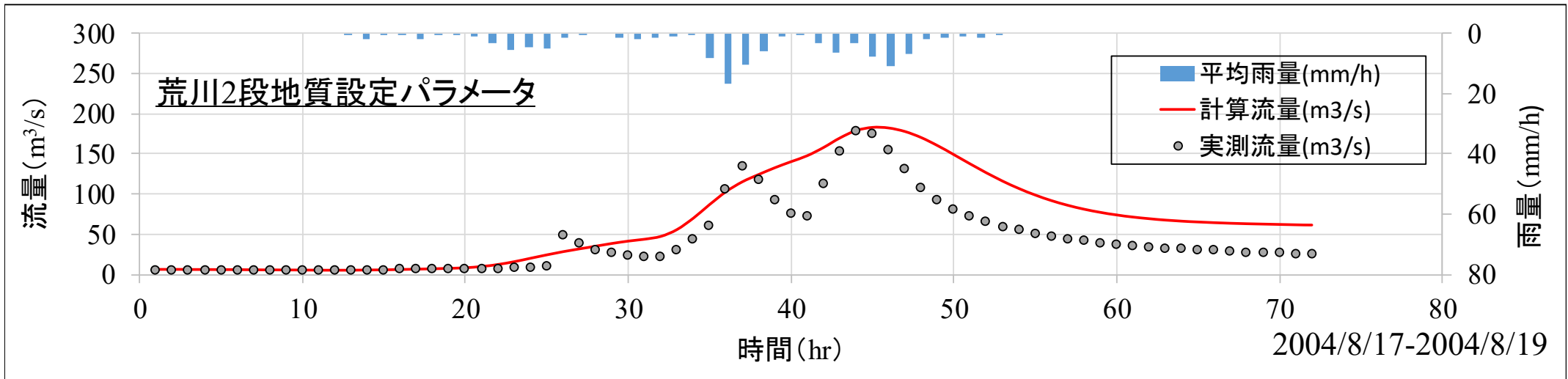
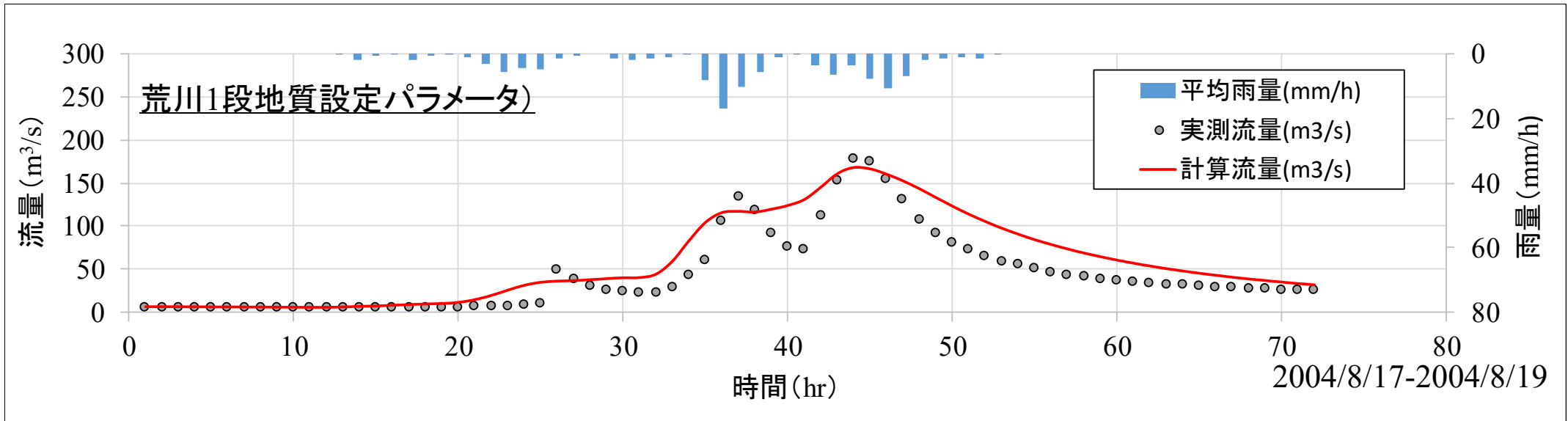
$c_{21}, c_{22}, c_{23}, T_c$: 2段タンク型貯留関数モデルのパラメータ

$g_1, g_2, g_3, g_4, g_5, g_6$: 各々第三紀火山岩類, 第四紀火山岩類, 花崗岩類, 第三紀層, 中生層, 古生層の面積率 (0～1)

結果～大淀川の例



結果～荒川の例

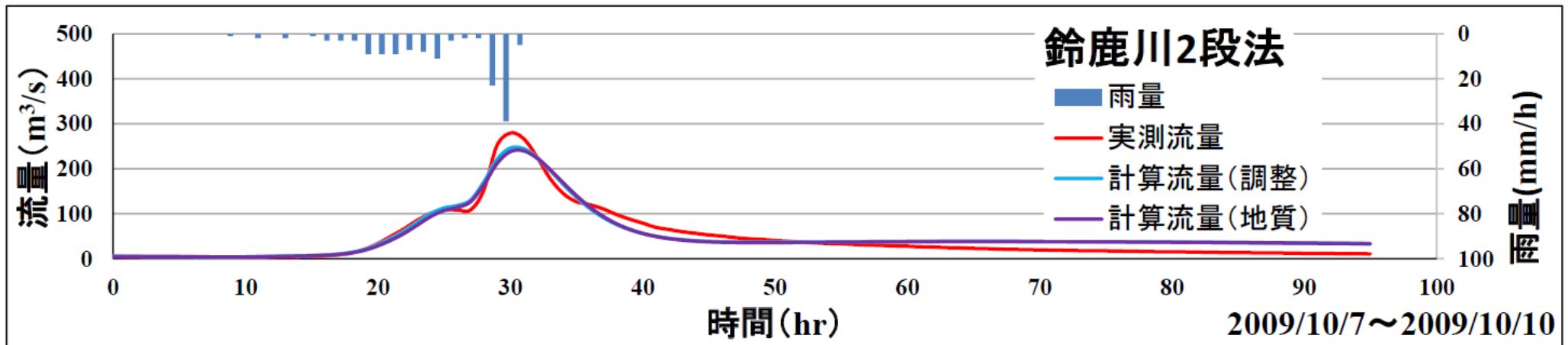


結果～流量推定の例

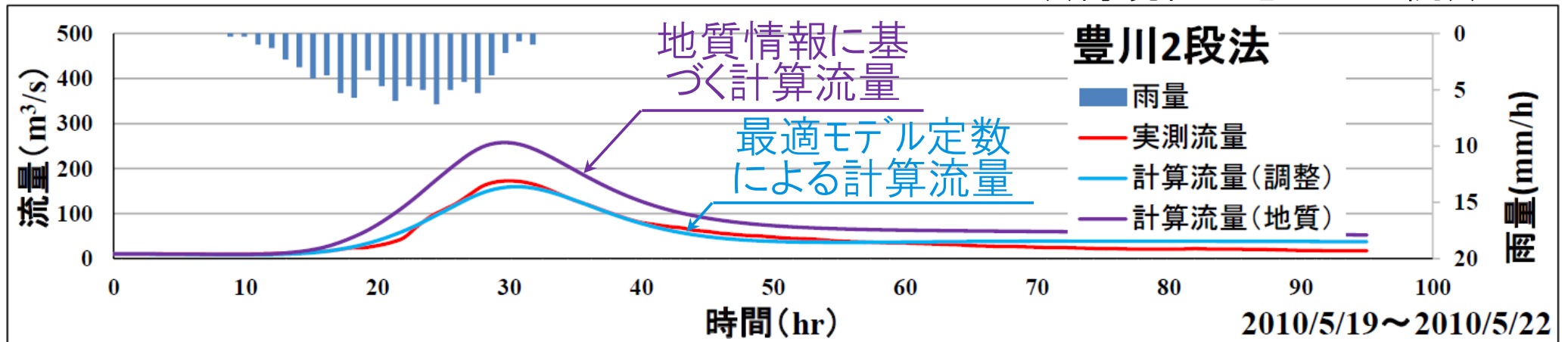
全国18河川で検証

多くの河川で良好な結果

2段タンク型貯留関数モデル



((再現性の悪かった例))



結果～精度指標

NASH係数

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \{q_o(i) - q_c(i)\}^2}{\sum_{i=1}^N \{q_o(i) - q_{av}\}^2}$$

※ グラフ全体の評価指標

※ 1.0～0.7で精度が高い

河川名	洪水年	月/日	一段タンク型貯留関数法 地質設定パラメータ	二段タンク型貯留関数法 地質設定パラメータ
石狩川	2001	9/10 - 9/14	0.906	0.945
渚滑川	2000	9/2 - 9/6	0.855	0.825
高瀬川	2006	9/27 - 9/30	0.902	0.955
名取川	2000	7/8 - 7/10	0.962	0.929
雄物川	2011	8/17 - 8/20	0.898	0.793
北上川	1999	9/15 - 9/18	0.502	0.711
荒川	2004	8/17 - 8/19	0.802	0.606
梯川	2011	7/4 - 7/7	0.713	0.657
豊川	2010	9/27 - 9/30	0.830	0.758
庄内川	2010	9/27 - 9/30	0.822	0.691
鈴鹿川	2009	9/7 - 9/10	0.949	0.902
狩野川	2011	6/12 - 6/15	0.777	0.673
北川	2005	7/3 - 7/7	0.910	0.823
天神川	2002	9/7 - 9/10	0.729	0.278
佐波川	2004	9/7 - 9/11	0.663	0.484
土器川	2006	7/20 - 7/23	0.801	0.481
物部川	2002	8/9 - 8/14	0.761	0.656
重信川	2011	9/2 - 9/5	0.681	0.641
肝属川-俣瀬	2005	9/4 - 9/9	0.853	0.688
肝属川-豊栄	2004	8/29 - 9/1	0.857	0.782
小丸川	2005	9/3 - 9/7	0.609	0.562
番匠川	2002	7/25 - 7/29	0.702	0.718
遠賀川	2009	7/29 - 7/22	0.725	0.742
矢部川	2009	7/24 - 7/29	0.617	0.558
大淀川	2008	9/18 - 9/21	0.821	0.809
平均			0.786	0.707

計算手法の実装と普及：「iRIC」とは？

iRIC

iRICソフトウェアとは？

iRIC(International River Interface Cooperative)ソフトウェアは、これまでUSGS(アメリカ地質調査所)で開発してきたMD_SWMSと(財)北海道河川防災研究センターで開発してきたRIC-Naysの機能を統合した河川の流れ・河床変動解析ソフトウェアです。

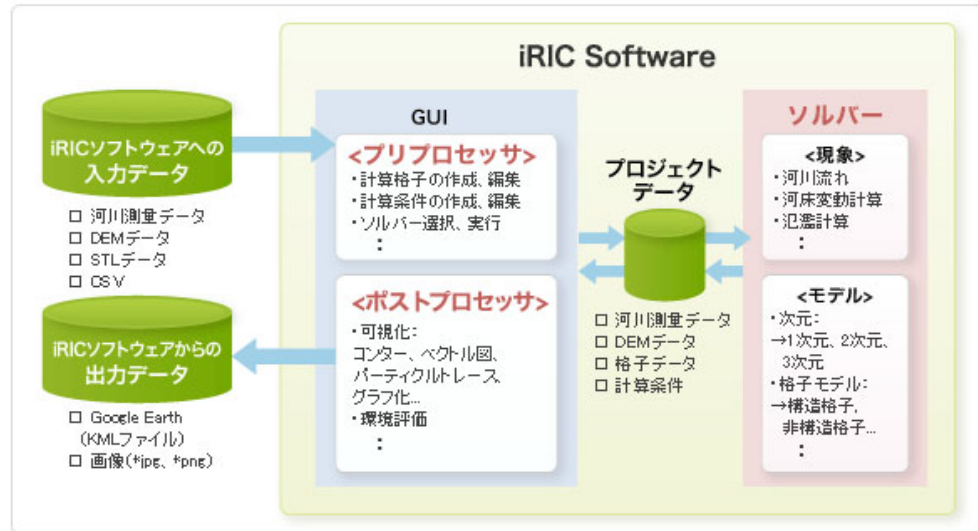
ソフトウェアの統合は、清水康行教授(北海道大学)とJonNelson博士(USGS)の提唱により実現したもので、これまでMD_SWMSとRIC-Naysの開発で培われてきた解析技術やソフトウェア技術を取りこんだ仕様となっています。今後も最新の技術を取り込みつつ、また、皆様のご要望も参考にさせていただきながら、より有益にご活用いただけるソフトウェアとして開発・提供をおこなっていく予定です。

皆様とともに、より有益なソフトウェアを創造していければと考えています。

以下、iRICソフトウェアの概要と各機能の特長についてご紹介いたします。

iRICソフトウェアの概要・特長

iRICソフトウェアは、**プリプロセッサ**、**ポストプロセッサ**、**ソルバー**の3つの機能から構成されています。



iRIC Project ホームページ

The screenshot shows the iRIC Project homepage with a navigation bar (HOME, iRIC, Gallery, Community, Columns, Events, Blog) and a main banner about simulating rivers. A red box highlights the '幅広い用途に対応したソルバー群' (Solver group corresponding to a wide range of uses) section on the right, which lists several updates:

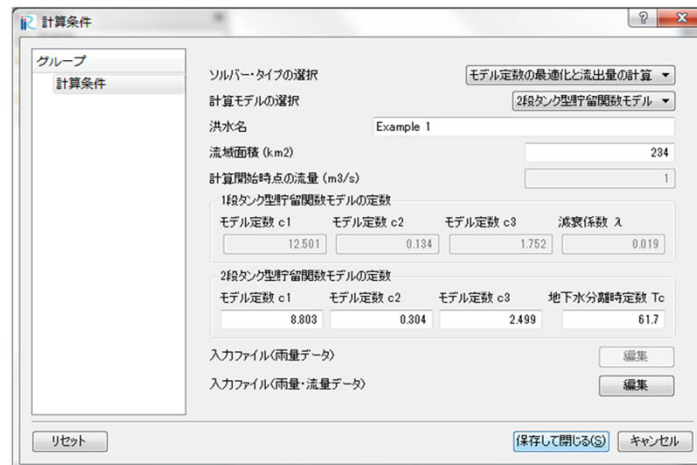
- Nays2DH Version2.3 で追加**
従来のiRICに搭載されていたNays2DとMorpho2Dを統合させた非定常2次元の河川流モデルです。複雑な地形や入力条件（混合粒径、掃流砂と浮遊砂の混在、岩盤などの固定床を含む流れ場、上流からの土砂供給量の変化など）に対応した河床・河岸変動計算が可能です。
- SRM Version2.3 で追加**
貯留関数モデルを用いた流出計算用ソルバーです。雨量データから洪水ハイドログラフの計算が可能です。
- Mflow_02 Version2.3 で追加**
有限要素法を用いた非構造格子による非定常2次元の河川流モデルです。多数の分合流を有する河川域と氾濫域とを一体型計算領域としての氾濫計算等が可能なモデルです。
- NaysEddy Version2.3 で追加**
直交座標系で有限体積法を用いた構造格子による3次元流れの解析ソルバーです。Large eddy simulation (LES) を用いており、複雑な地形がもたらす乱流流れの高精度な計算が可能です。
- EvaTrip Version2.3 で追加**
Nays2DHなどで計算した物理データを利用し、魚類や植生の選好曲線 SI (Suitability Index) を与えることで物理環境の評価を行うことが可能です。
- NaysCUBE version 3.0 を追加リリース**
3次元流れ・河床変動モデルです。構造物周りや湾曲部の深掘れ箇所など、局所的な流れの解析が可能です。ver.3.00.6 β版より、流木計算機能などが新しく追加されました。
- Nays2D Flood version 5.0 を追加リリース**
Nays2Dを氾濫解析用にアレンジしてつくられたモデルです。河川は標高で認識し、設定された氾濫地点での氾濫流量が地形の高低差で流れ広がる現象を計算できます。
- FaSTMECH**
米国地質調査所(USGS)で開発された準3次元、擬似定常流の河川流モデルです。計算時間が早いので長期間の解析に力を発揮します。
- ELIMO**
ELIMO は、“簡単に津波計算”をキーワードに、iRIC の GUI 環境のサポートのもと津波計算パッケージとしてソルバーです。
- その他**
非構造格子を用いた平面2次元流れの解析ソルバーとして、Alberta大学で開発されたRiver2D、USGSで開発されたSTORMも搭載されています。

計算手法の実装と普及：「SRM」とは？

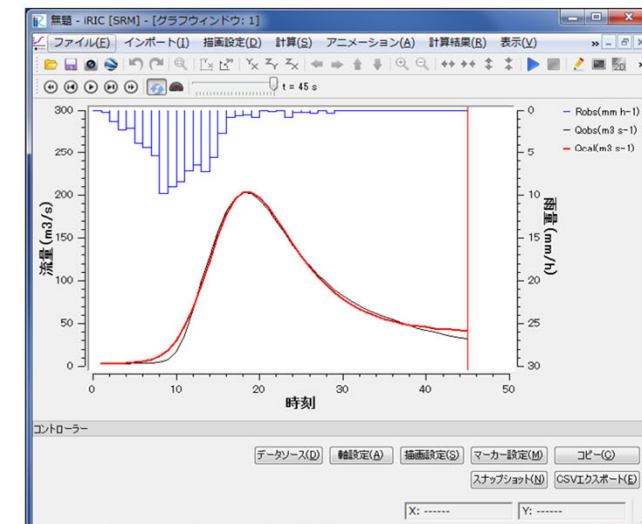
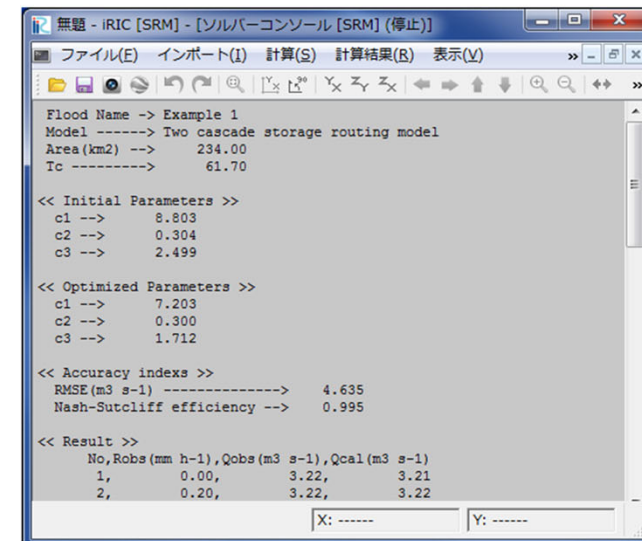
流出解析用 Solver「SRM」 2014.7 公開



雨量(もしくは、
雨量・流量)データ
と計算条件を与え
ると、モデル定数の
同定や流出量が計
算される。



流出モデル定数の最適化結果



「SRM」の機能

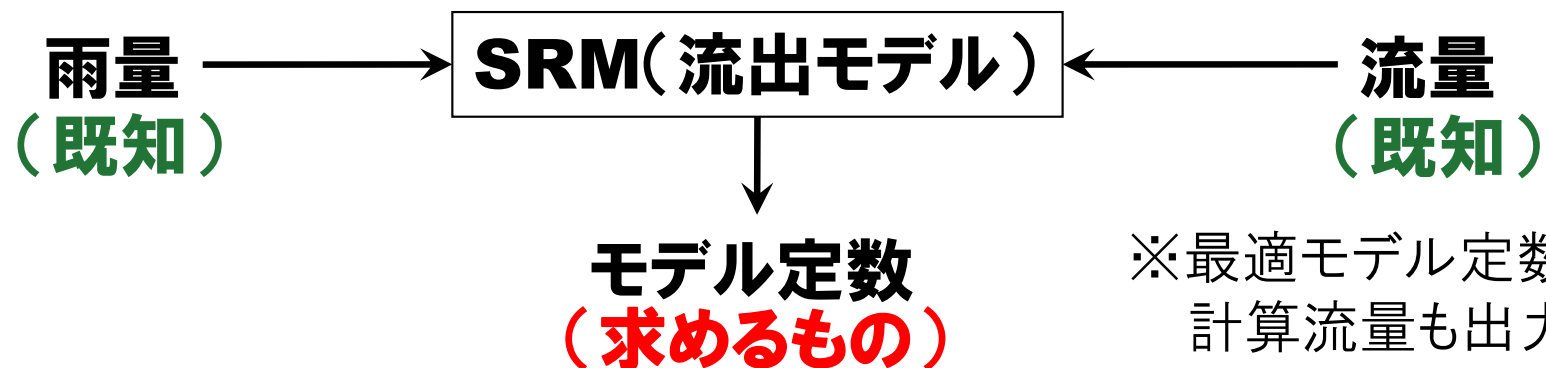
機能1) 雨量データから流量を計算

: ソルバー・タイプ「流出量の計算」



機能2) 流出モデル定数の最適化

: ソルバー・タイプ「モデル定数の最適化と流出量の計算」



※最適モデル定数を用いた
計算流量も出力される。

「SRM」のイメージ：計算条件の設定

計算条件は、この一つの画面で全て完了。

ソルバー・タイプ、計算モデルの選択

計算条件

グループ

計算条件

ソルバー・タイプの選択

流出量の計算

計算モデルの選択

1段タンク型貯留関数モデル

洪水名

X_station(1981)

流域面積 (km2)

234.1

計算開始時点の流量 (m3/s)

2.00

1段タンク型貯留関数モデルの定数

モデル定数 c1	モデル定数 c2	モデル定数 c3	減衰係数 λ
12.501	0.134	1.752	0.019

2段タンク型貯留関数モデルの定数

モデル定数 c1	モデル定数 c2	モデル定数 c3	地下水分離時定数 Tc
8.803	0.304	2.499	61.7

入力ファイル(雨量データ)

編集

入力ファイル(雨量・流量データ)

編集

リセット

保存して閉じる(S)

キャンセル

計算条件を入力

前述の「モデル定数の代表値」を入力

雨量データを指定

「SRM」のイメージ：雨量データの入力

計算条件の設定画面

計算条件

グループ
計算条件

ソルバー・タイプの選択: 流出量の計算

計算モデルの選択: 1段タンク型貯留関数モデル

洪水名: X_station(1981)

流域面積 (km²): 234.1

計算開始時点の流量 (m³/s): 2.00

1段タンク型貯留関数モデルの定数

モデル定数 c1	モデル定数 c2	モデル定数 c3	減衰係数 λ
12.501	0.134	1.752	0.019

2段タンク型貯留関数モデルの定数

モデル定数 c1	モデル定数 c2	モデル定数 c3	地下水分離時定数 Tc
8.803	0.304	2.499	61.7

入力ファイル(雨量データ): 編集

入力ファイル(雨量・流量データ): 編集

リセット 保存して閉じる(S) キャンセル

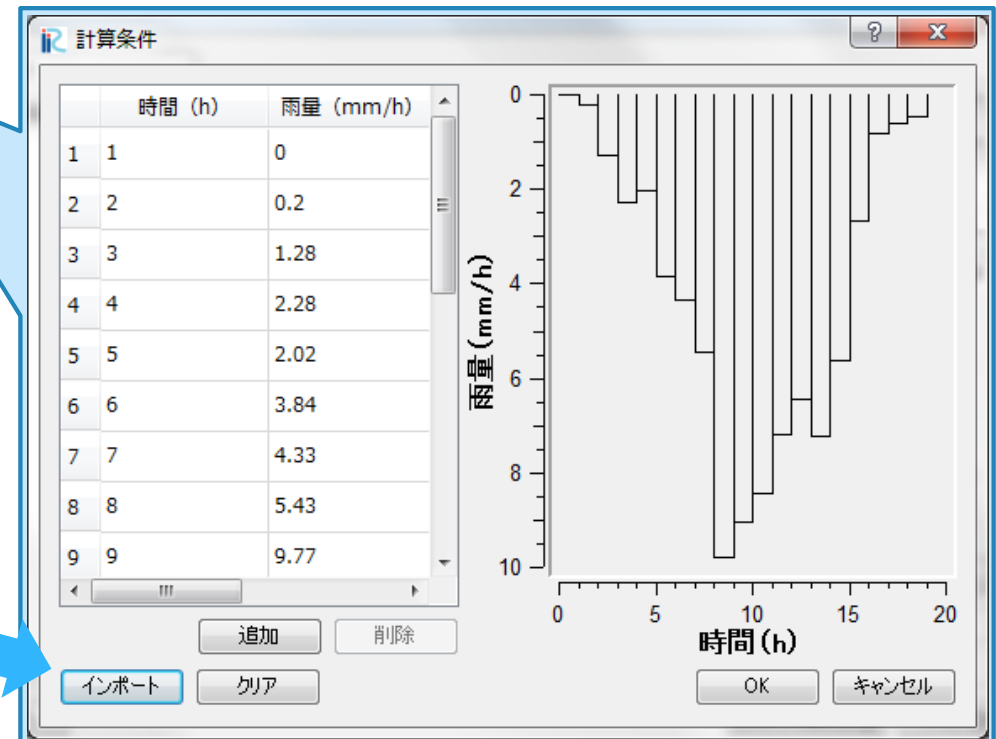
雨量データをインポートすると設定は終了.

読み込んだ数値データ, グラフが表示される.

雨量のテキストデータ

時間 (h)	雨量 (mm/h)
1	0.00
2	0.20
3	1.28
4	2.28
5	2.02
6	3.84
7	4.33
8	5.43
9	9.77

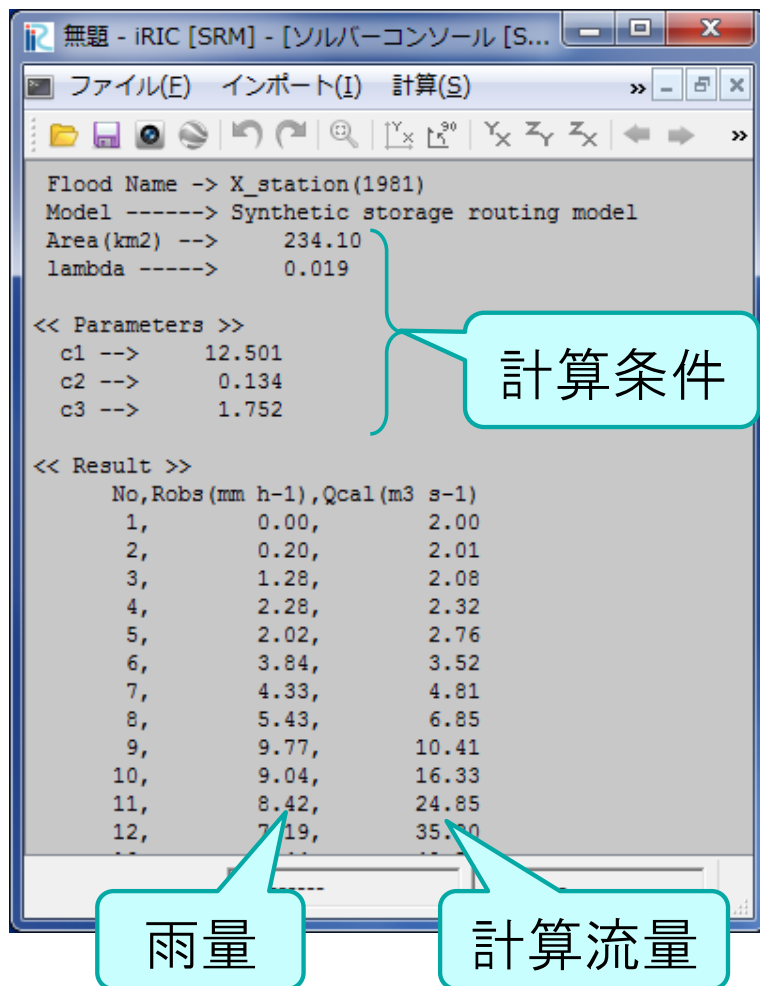
Text 20行, 1桁 日本語 (シフト JIS)



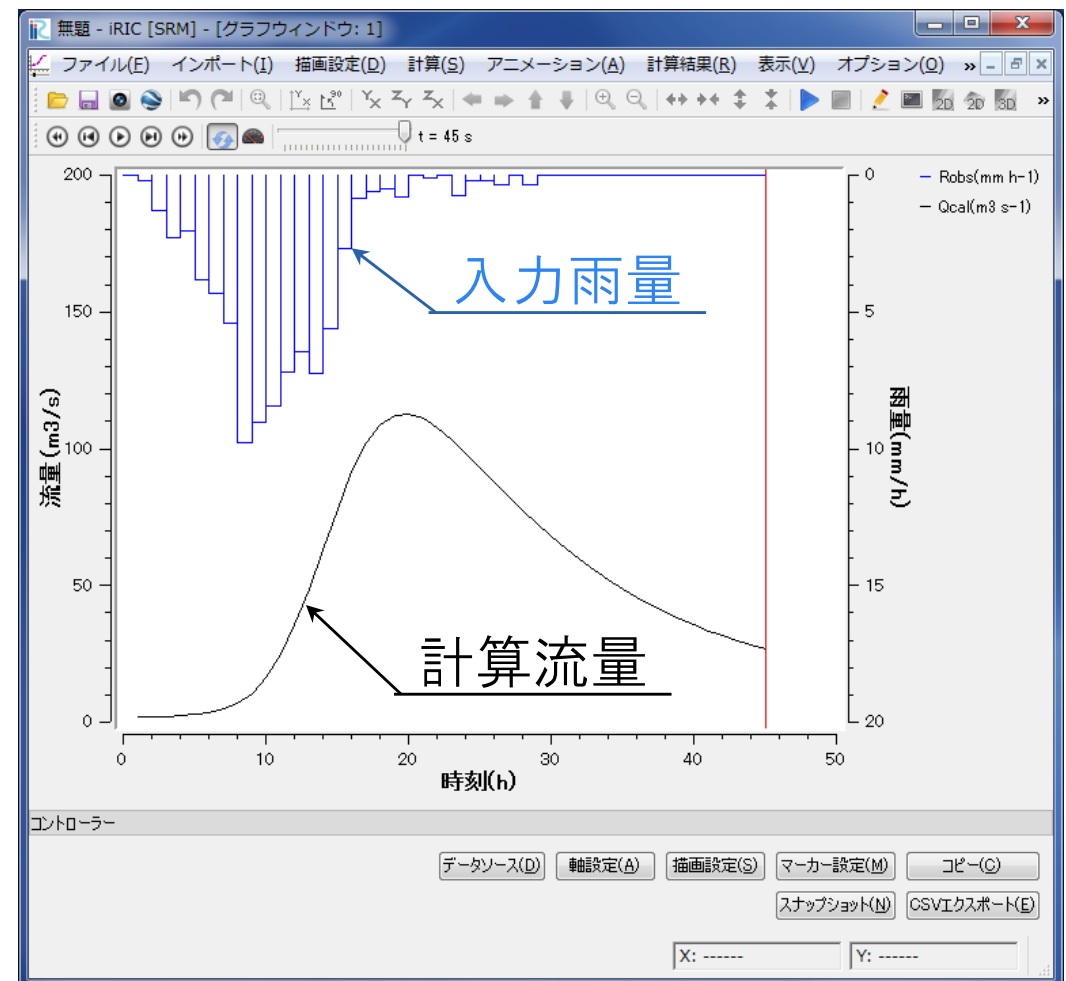
「SRM」のイメージ：計算結果の出力

計算を実行するとソルバーコンソールに計算結果が表示され、計算は終了. iRIC の標準機能によりハイドログラフが作成できる.

＜ソルバーコンソール＞

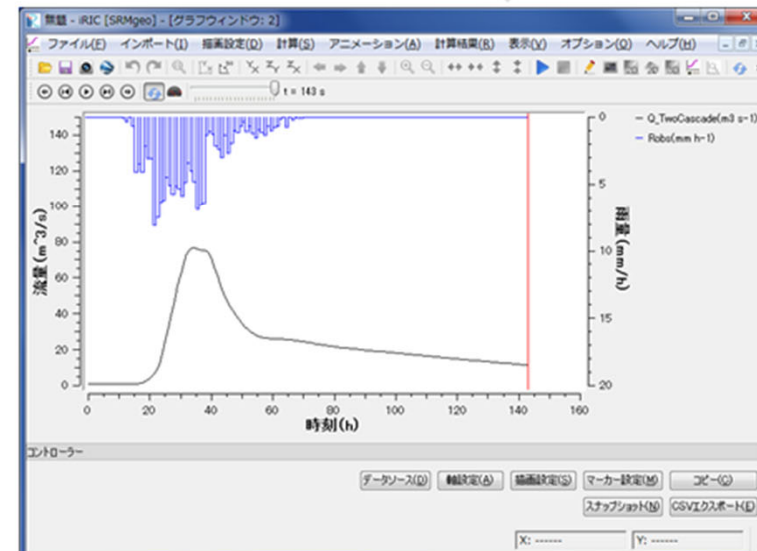
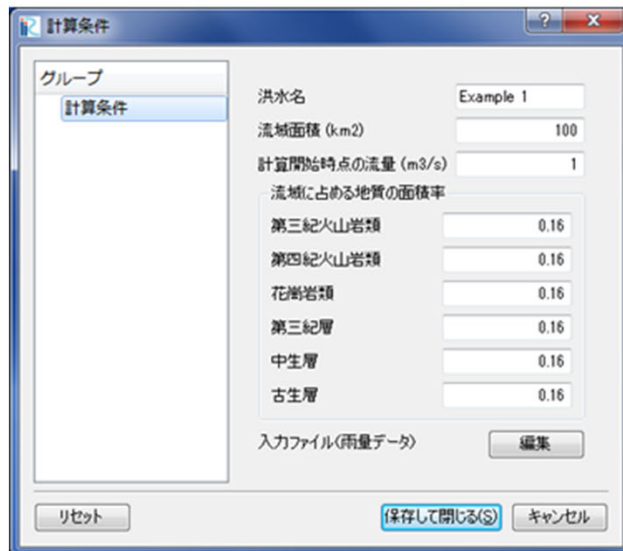
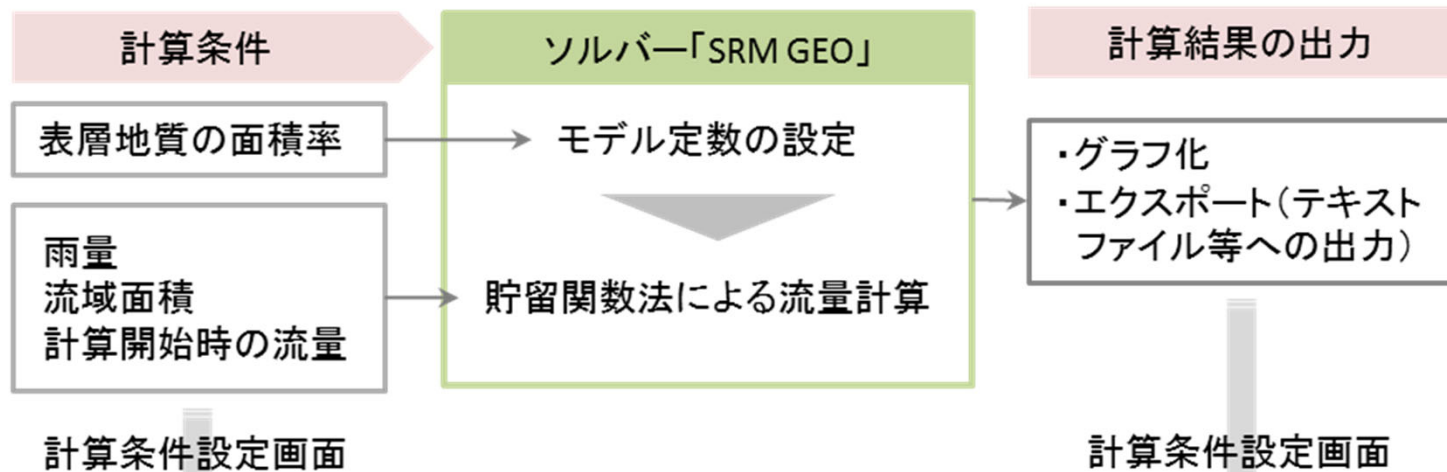


＜iRIC標準機能による作図＞



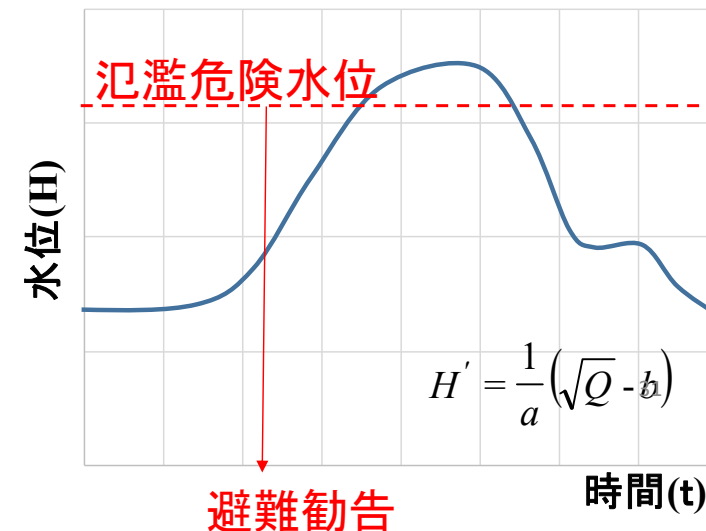
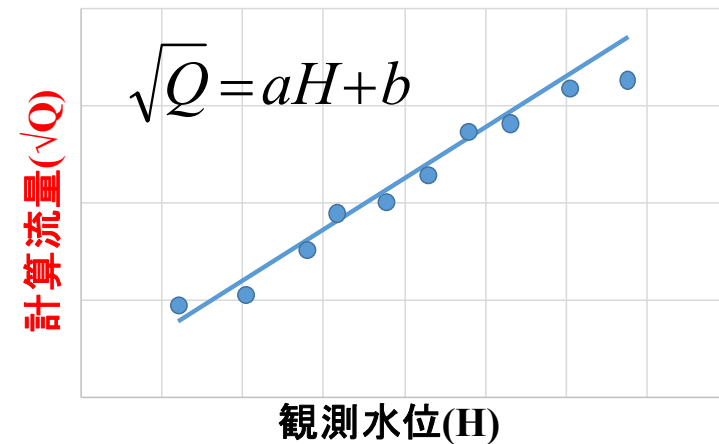
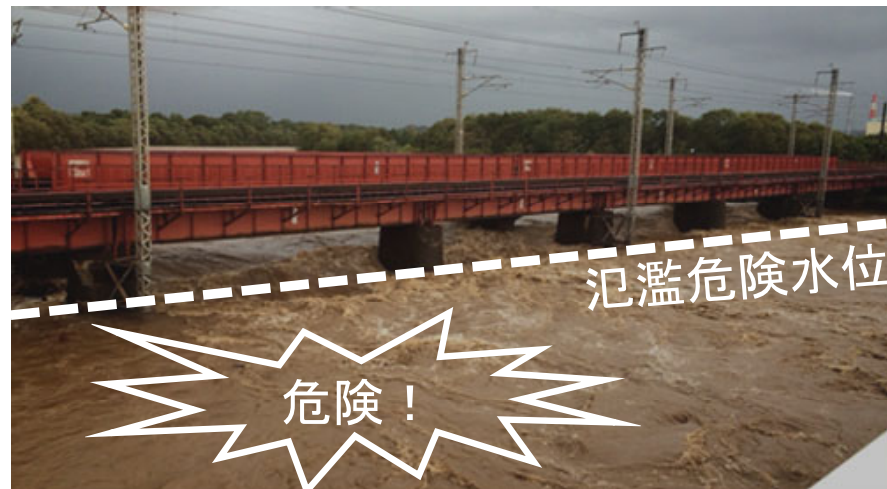
ソルバー「SRM GEO」への展開

- ①任意流域の地質情報からモデルパラメータを自動設定
- ②任意流域の地点雨量情報から流域平均雨量を自動設定



活用イメージ：洪水予測(PUB)

流量観測データがない → 計算流量と水位でH-Q式作成



*PUB; Prediction in Ungauged Basin

活用イメージ：洪水予測(PUB)

ウヨロ川:ウヨロ橋地点

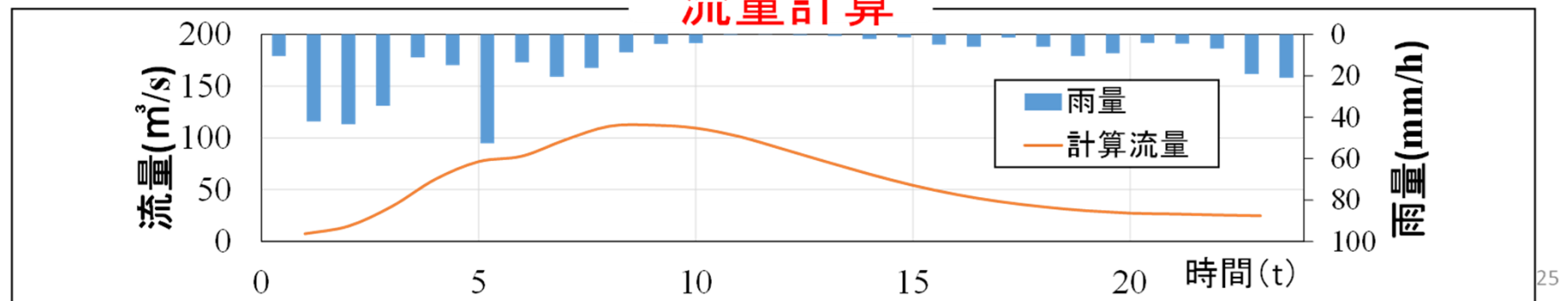
洪水:2014(09/09~09/10)
の雨量を使用

雨量データ

流域界の作成

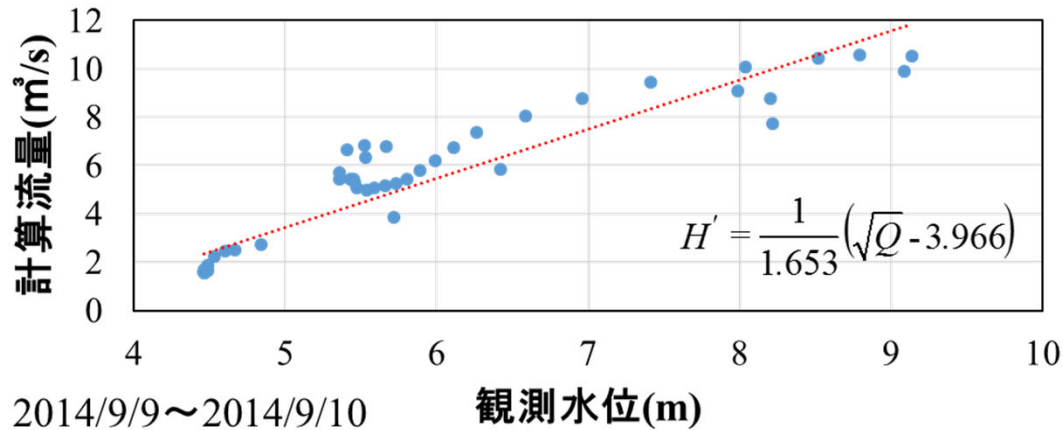
地質の抽出

流量計算

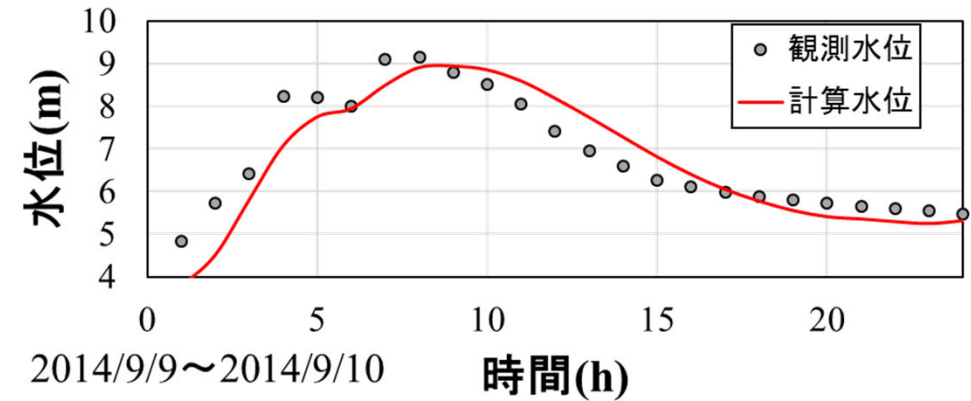


活用イメージ：洪水予測(PUB)

H-√Q



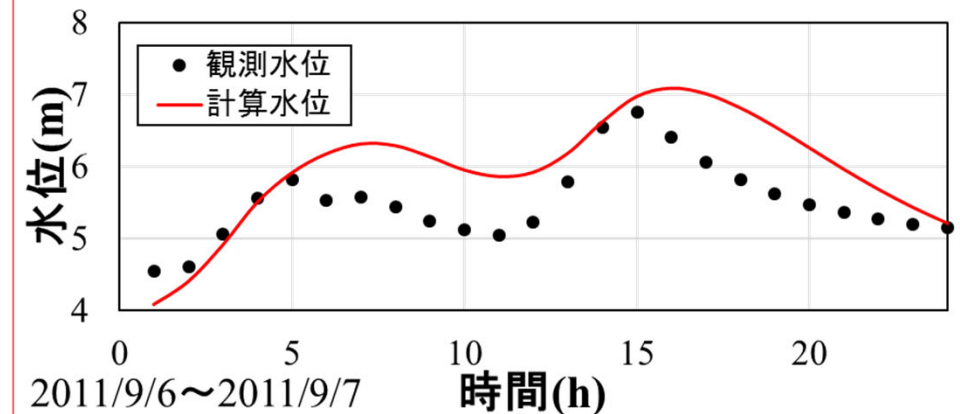
水位再現



計算流量と観測水位からH-Q式を作成

地質情報から求めた計算流量でも、
過小評価のない
水位の計算が可能である。

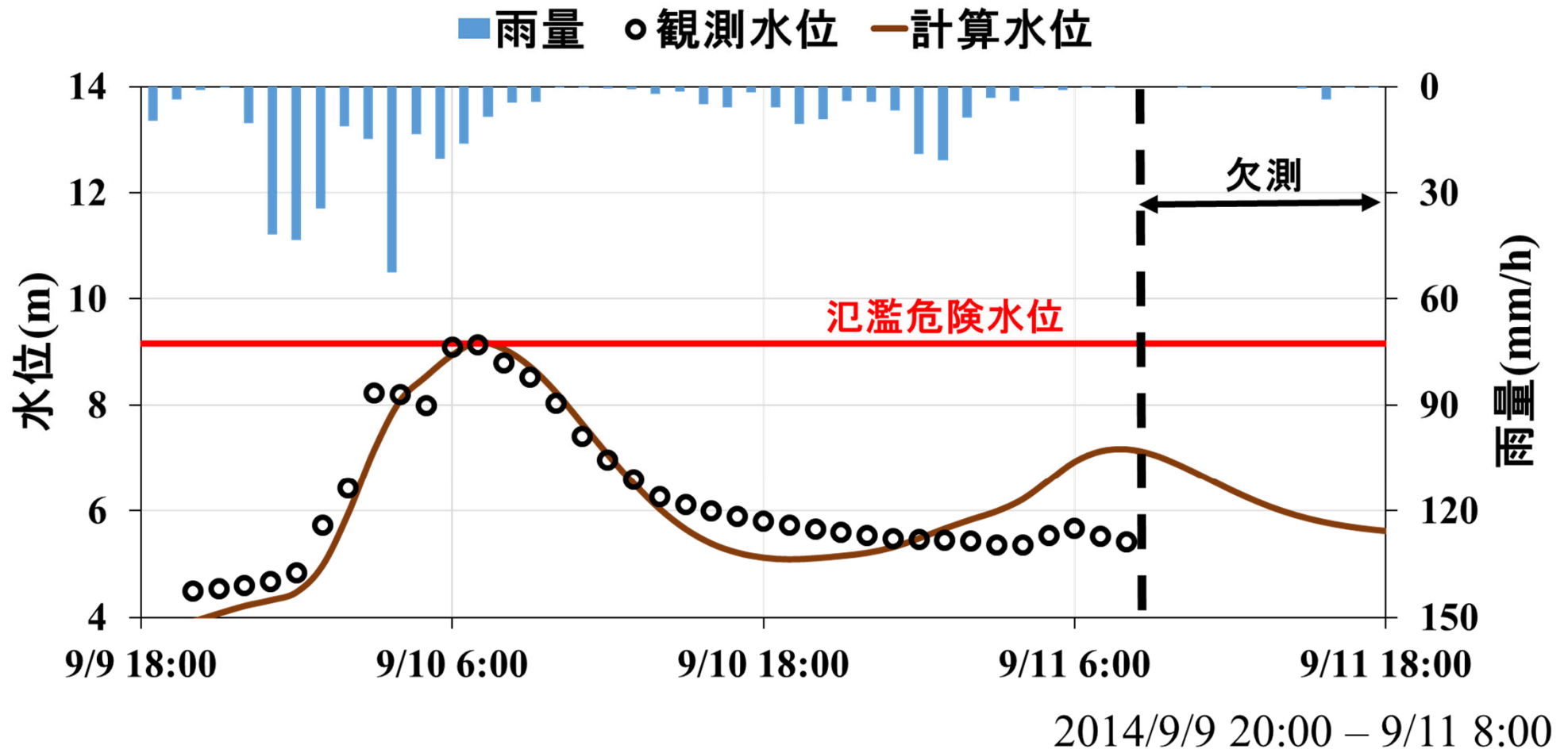
水位再現



活用イメージ：洪水予測(PUB)

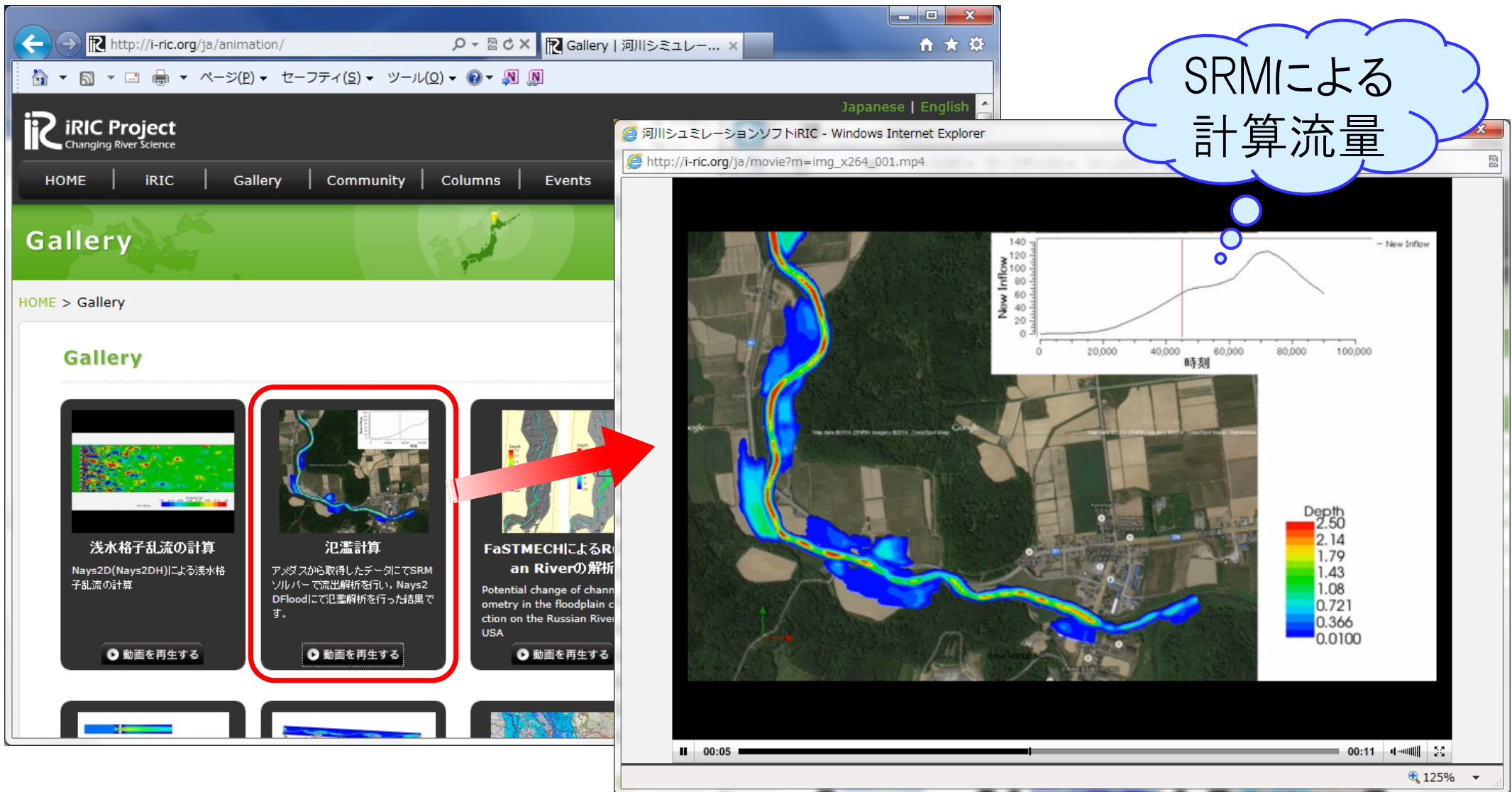
欠測しても水位予測が可能！

ウヨロ川の例



活用イメージ：氾濫解析

計算流量を入力条件とした水理解析～他のソルバーとの連携



まとめ

- 流出計算モデルパラメータと地質面積率との関係を表す重回帰式を得た.
- 全般的には地質情報のみでモデルパラメータを設定しても妥当な流出量の推算が可能であることが分かった.
- 全国の任意の河川を対象に流出計算ができるように上記手法を実装したソルバー(iRIC GEO)の基本フレームを設計開発した.
- 今後はiRIC GEOの公開*を目指すとともに、広域流域や海外流域への適用を目指し、分布型流出モデルの実装、レーダー雨量や衛星雨量、グローバルな地理情報の利用などを検討していきたい.

*公開にはマニュアル・チュートリアル(日本語版+英語版)の整備が要件となっている.

最後に本研究の助成に対し心より謝意を表します.