

水位、流量観測に求められる 今後の役割について ～観測と解析の融合による現象把握の新たな視点～

広島大学大学院工学研究科
内田龍彦



1



HIROSHIMA UNIVERSITY 2

■ 国土交通省レーダー雨量計の歴史

(国交省レーダー雨量計の研究開発 50 年の成果より抜粋)

- 1966年 赤城山(群馬県)、田端(東京都)に設置されたXバンドレーダにより研究開始
- 1976年 現業用Cバンドレーダ雨量計初号機(赤城山)の運用開始
- 1986年 主として自治体へレーダ雨量情報の配信開始
- 2000年 Cバンドレーダ雨量計全国26基体制を構築
- 2001年 レーダ雨量情報の一般配信開始(「川の防災情報」の開設)
- 2002年 Cバンドレーダオンライン補正合成雨量データの配信開始
- 2010年 XバンドMPレーダ合成雨量データの試験運用開始
- 2014年 XバンドMPレーダ雨量計ネットワーク(XRAIN)の本運用開始
- 2015年 XバンドMPレーダ雨量計39基体制を構築
- 2016年 CバンドMPレーダ雨量計、XバンドMPレーダ雨量計の合成によるXRAINの配信エリア拡大

3



水災害多発時代の安全・安心を支える水文観測技術とは？

水災害多発時代？

「我が国においては、時間雨量 50mm を超える短時間強雨の発生回数が約 30 年前の約 1.4 倍に増加し、日降水量 100mm、200mm 以上の大雨日数も増加している」
“国土交通省気候変動適応計画”，平成27年、国土交通省より抜粋

30年前(1988年) Wikipediaより抜粋

内田龍彦 12歳(宇都市立厚南小学校6年生)

ファミリーコンピュータ全盛期。

ドラゴンクエストIII そして伝説ヘ...が発売

青函トンネルが開業

東京ドーム会場

ソウルオリンピック開幕

携帯電話は当然なく黒電話

パソコンはPC-98シリーズ、Windows登場(ただし初期 Windows 1.01)

5インチフロッピーディスク 0.1MB→今はUSBメモリーで~2TBまで(約1万倍)

HIROSHIMA UNIVERSITY 2

■ 30年前の技術

(水工学論文集 第32回より観測に関するものを抜粋)

レーダ雨量計から見た降雨の時空間特性について

吉野 文雄、水野 雅光、井川 貴史1-6

水文地形解析の自動化の試み

宝 鑑、高悼 琢馬、溝渕 伸一25-30

琵琶湖湖面蒸発量の観測・評価システムとそのシミュレーションモデルへの活用

池淵 周一、陣内 孝雄、岡久 宏史、大藤 明克155-160

洪水解析精度向上のための航空写真撮影法の改良

福岡 捷二、藤田 光一、荒木 智三341-346

超音波流速計による河川流の測定

渡瀬 昌憲、神田 徹353-358

都内中小河川の水位流量曲線

和泉 清365-370

不確定な水位流量曲線の修正の試み

李 淳赫、角屋 瞳、田中丸 治哉371-376

技術的課題について時代背景ほどの大きな時代の変化を感じない。水理実験系の課題は今とそれほど変わらない。しかし、一方で実験的研究が多く、現地洪水データなどを用いた研究は少ないように思える。



水文、洪水観測に関する周辺技術の発達にも合わせた新
たな考えが必要

4



水文観測の技術向上の恩恵

- ◆ 簡易化、省エネ化：高齢化社会に向けてこれまでの観測の質を維持する
- ◆ 高度化、高密度化：これまで分からなかったことを分かるようにする

他の技術との融合

水位、流速、雨量のビッグデータがもたらすもの

水位データは解析の信頼度を得るためにかなり重要である。大規模洪水だけでなく、津波時の河川の水位波形は津波外力を把握する上で貴重であった。

一方、洪水時に直接計測できるものは限られる

特に、洪水時の河床変化や流砂量を計測するのは困難である。

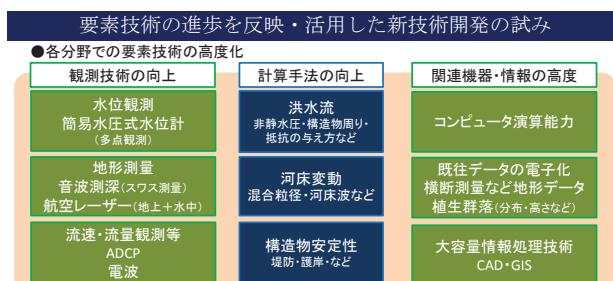
水文観測～水理解析のコンピネーションが重要

河川技術者、水文観測者両方にとって、水文観測の役割、目的と水理解析の原理を把握することが重要である

5

時代に合った河川観測技術とは？

2014年度・河川技術に関するシンポジウム「新しい河川整備・管理の理念とそれを支援する河川技術に関するシンポジウム、特定課題オーガナイズドセッション(OS)「河道計画・管理のための流れ・地形変化の解析技術力向上に向けて」」



これら要素技術の進歩の中で、既存の扱えるものの範囲や解析の枠組みに囚われずに、新しい方向性を議論すべきではないか！

問題の難易度に応じて様々な技術を組みなおすこともできるようになった！

- たとえば
 - ・多点水位観測+水流・河床変動・洪水伝播と出水中の河床変動の解明

7

内容

0. 時代認識

1. データ、情報と技術
2. 観測技術と解析技術
3. 高精度・高密度観測に対応できる解析法
4. 現象の見方の変化と観測データの意味
 - ・形状と粗度
 - ・流量観測と洪水流解析
5. まとめ

6



技術発達とその結果

河川測量、解析技術、コンピュータ技術の急速な発達



河川測量、解析データの飛躍的な高密度、高次元、高精度化



洪水流、河床変動特性理解、予測の？



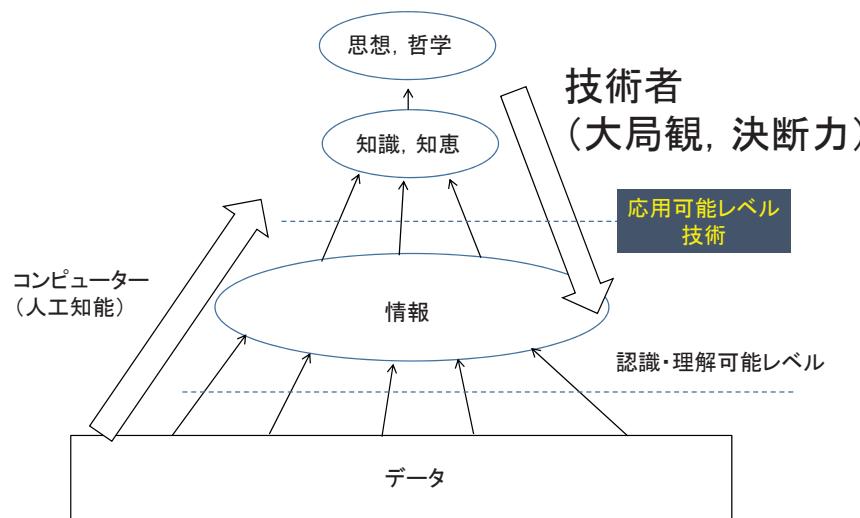
完全受け身状態？

水工学、河川工学などの学術の？ 河川の治水安全度の？

8



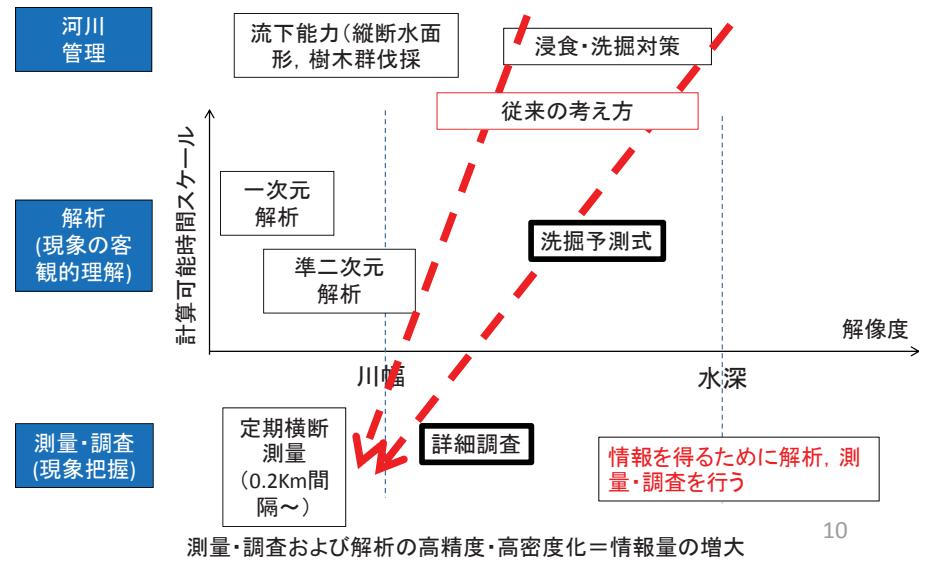
データ、情報と技術



9



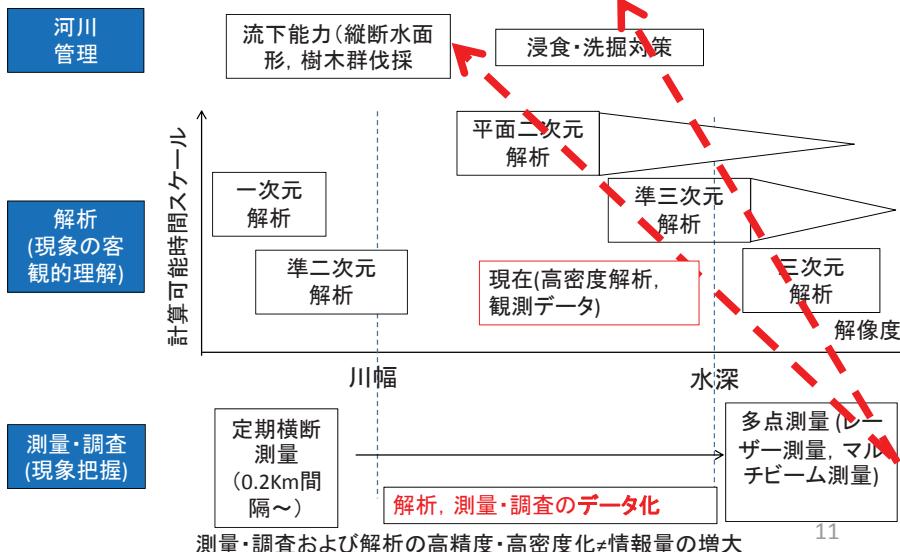
測量、解析技術の発展とデータ、情報、知恵のバランス(従来)



10



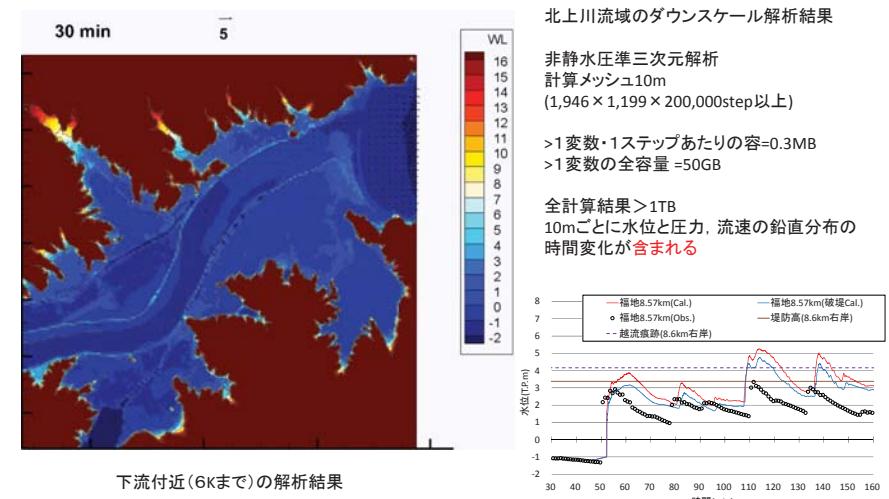
測量、解析技術の発展とデータ、情報、知恵のバランス(現在)



11



北上川津波氾濫解析の例



多量のデータがPCの中に保存されているのです
は取り出して認識することから始める

12

内容

0. 時代認識

1. データ、情報と技術

2. 観測技術と解析技術

3. 高精度・高密度観測に対応できる解析法

4. 現象の見方の変化と観測データの意味

- ・形状と粗度

- ・流量観測と洪水流解析

5. まとめ

13

水文観測と洪水流解析について

洪水流観測(水位)～洪水流解析

河道抵抗、通水能力の評価

横断測量、河床変動量調査～河床変動解析

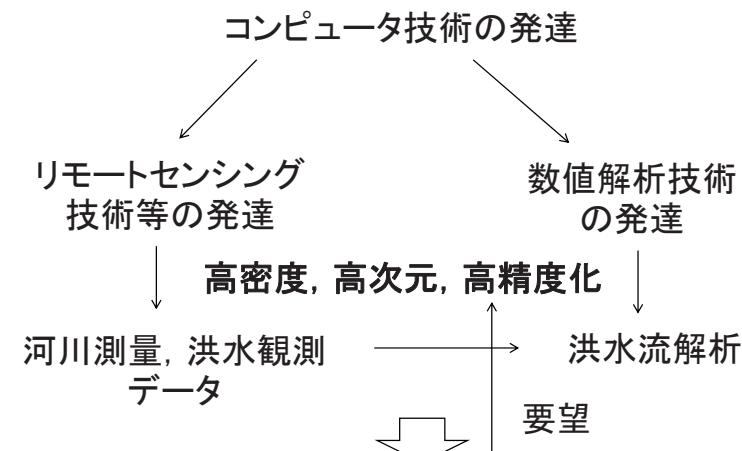
土砂輸送量、粒度分布の評価

観測と解析はセットで考えていく必要がある

14



近年の受動的技術発展 ～技術の発達の恩恵フロー～



15



一次元解析から準二次元解析

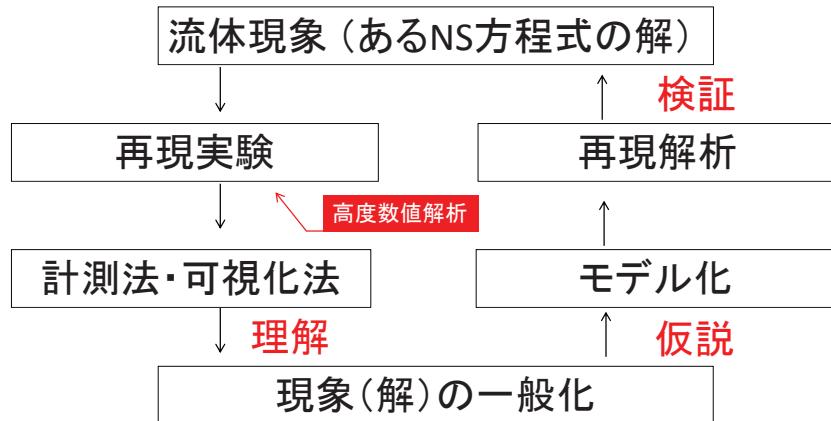


準二次元解析の断面分割の例

一次元解析:
断面積Aで水理量は一定
断面変化を考慮(能動的)

16

■ 実験とモデルによる流体運動の理解



高度な解析法(シミュレーション)は従来の解析法(モデル)とは役割、考え方方が異なることに注意。解析できしたことと現象を理解できたことは別

17

■ コンピュータの高度化の例

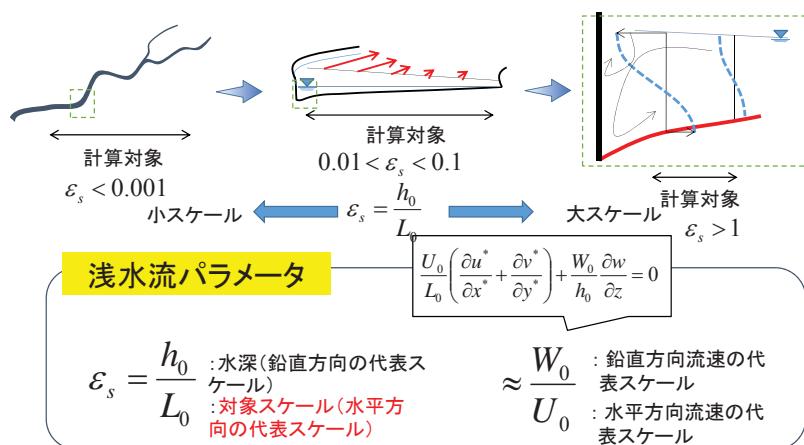
囲碁AI: 1日に100万局分のデータを学ぶ



コンピュータを使って学ぶ、から、コンピュータに学ばせる？

18

■ 高度な解析法は何を意味するか？ (データ密度と精度の関係の理論的考察)



19

■ 水深平均流速の基礎式(水面形を支配)

$$\rho \left(\frac{\partial U_i h}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j h}{\partial x_j} \right) = - \left(\frac{\partial \rho g h^2 / 2}{\partial x_i} + \frac{\partial h dp}{\partial x_i} + dp_b \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \right) - \rho g h \frac{\partial z_b}{\partial x_i} - \tau_{0i} + \frac{\partial h \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

連続式 $\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U_j h}{\partial x_j} = 0$

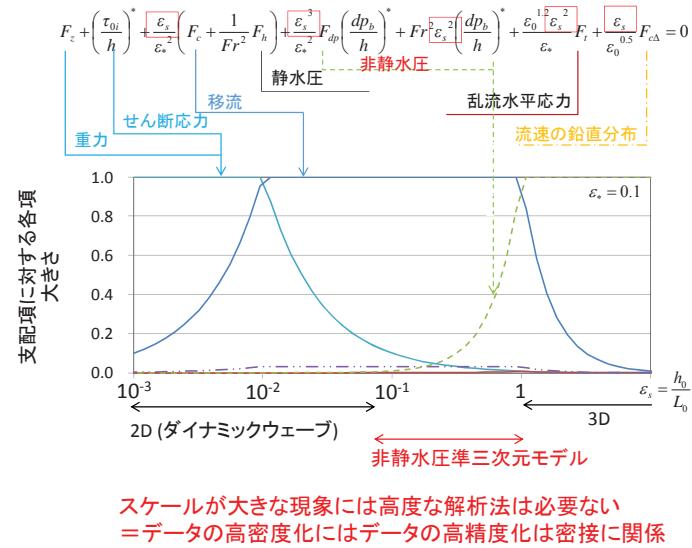
浅水流パラメータを用いた無次元化

$$\begin{aligned} U_i &= (U_i)^* U_0, \quad h = (h)^* h_0, \quad x_i = (x_i)^* L_0 \\ \tau_{0i} / \rho &= (\tau_{0i})^* U_0^2 \varepsilon_*^2, \quad dp = (dp)^* U_0^2 \varepsilon_*^2 \\ \nu_t S_{ij} &= \varepsilon_0^{1.2} U_0^2 \varepsilon_* \varepsilon_s (v_t)^* (S_{ij})^* \\ \overline{u_i' u_j'} &= \varepsilon_0^{-0.5} \varepsilon_*^2 U_0^2 (\overline{u_i' u_j'})^* \end{aligned}$$

20



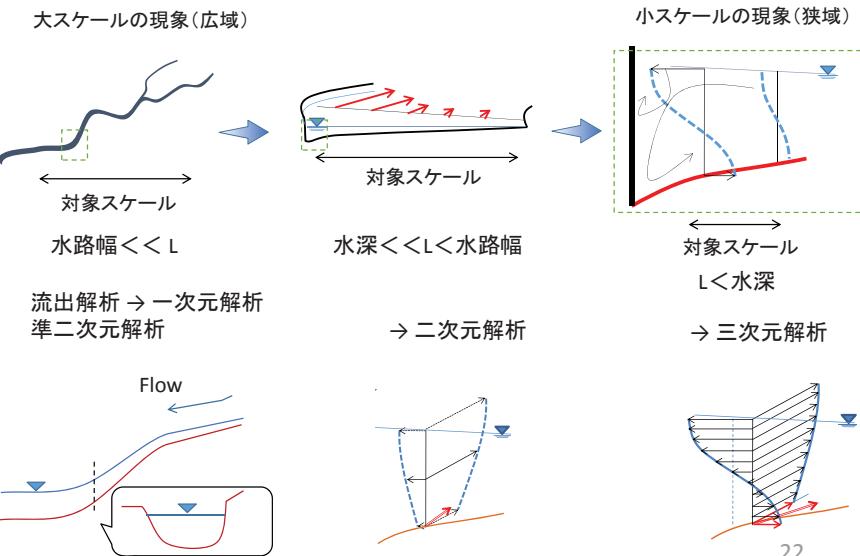
浅水パラメータによる各項の大きさの変化



21



様々な洪水流解析法と対象スケール



河床変動解析について

連続式

$$(1-\lambda) \frac{\partial z_B}{\partial t} + \frac{\partial q_{Bj}}{\partial x_j} = (1-\lambda) \frac{\partial z_B}{\partial t} + \frac{dq_B}{dy_B} \frac{\partial u_{bj}}{\partial x_j} = 0$$

底面流速方程式

$$u_{bi} = u_{si} - \varepsilon_{ij3} \left(\Omega_j h + \frac{\partial Wh}{\partial x_j} - w_s \frac{\partial z_s}{\partial x_j} + w_b \frac{\partial z_b}{\partial x_j} \right)$$

水深積分

無次元化

$$(u_{bi})^* = (u_{si})^* - \varepsilon_{ij3} \left\{ \frac{\Delta U_0}{U_0} (\Omega_j h)^* + \left(\frac{h_0}{L_0} \right)^2 \left(\frac{\partial Wh}{\partial x_j} \right)^* \right\}$$

水表面流速

渦度の水深積分

水深積分渦度方程式

水表面流速方程式

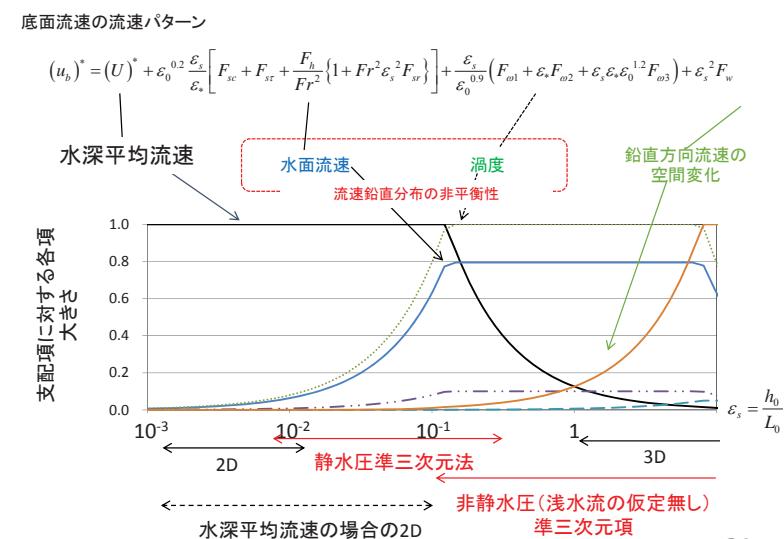
$\frac{\partial u_{si}}{\partial t} + u_{sj} \frac{\partial u_{si}}{\partial x_j} = -g' \frac{\partial z_s}{\partial x_i} + P_{si}$

$\frac{\partial \Omega_j h}{\partial t} = ER_{oi} + P_{oi} + \frac{\partial h D_{oj}}{\partial x_j}$

23



河床変動スケールと三次元流れ





流れの運動方程式から水文観測・洪水流観測について言えること

流れの運動方程式の性質

- ・河川流は見るべきスケールが小さくなると、流れの加速、減速の影響が表れ、さらに小さくなると流れの三次元性の影響を受ける。
- ・流れの三次元性の影響は見るべきスケールの大きさだけでなく、見るべき現象によっても変化する。



計測において注意すること

- ・高濃度・高精度計測の結果を解釈するには、小スケールの三次元性の影響が含まれる。
- ・計測目的、計測項目によって、求められるデータ密度、精度が変わる。
- ・**高精度・高密度の観測に対応する新たな解析法が必要**

25

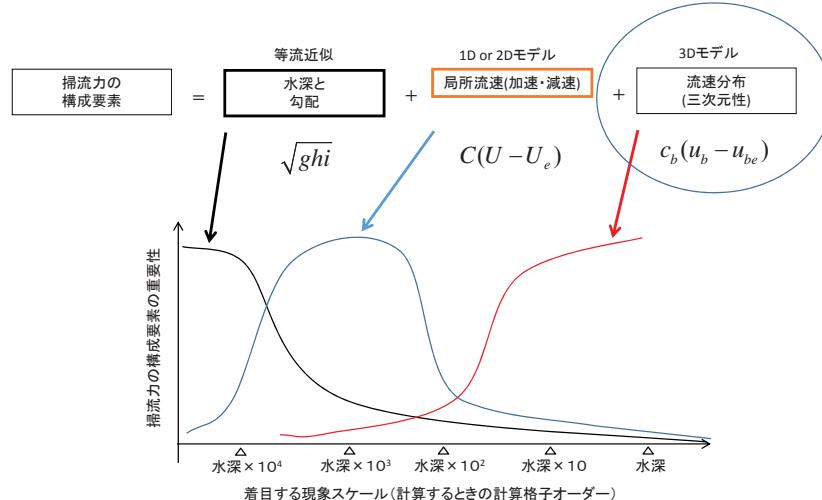
内容

0. 時代認識
1. データ、情報と技術
2. 観測技術と解析技術
- 3. 高精度・高密度観測に対応できる解析法**
4. 現象の見方の変化と観測データの意味
- ・形状と粗度
- ・流量観測と洪水流解析
5. まとめ

26



流れの運動方程式から水文観測・洪水流観測について言えること

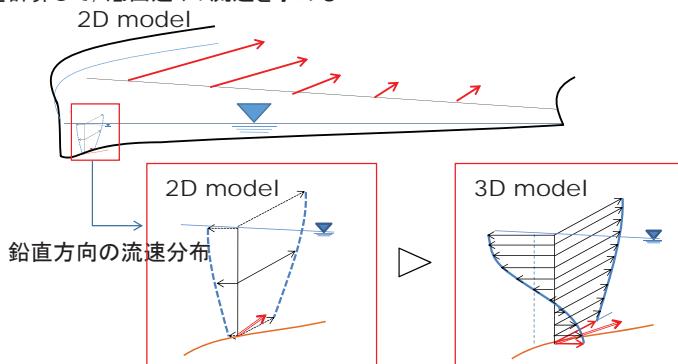


27



二次元解析と三次元解析

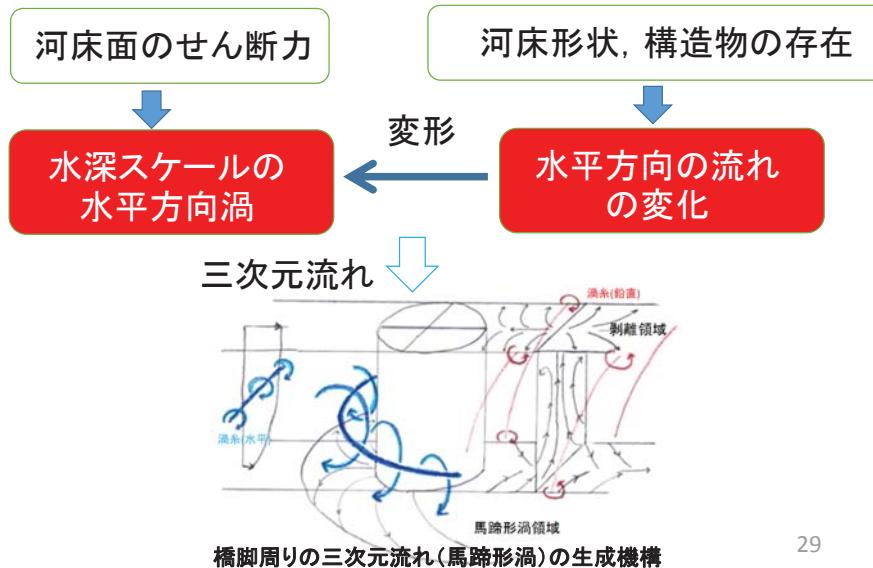
掃流力は基本的に底面近くの流速によって決まる。平面二次元解析では等流の流速分布を用いる(底面せん断力の評価を参照)が、三次元解析では鉛直方向にたくさんのか点を計算して、底面近くの流速を求める。



三次元解析法は三次元、高密度の計算格子で三次元流速と圧力を解く必要があるために、二次元解析に比べて一般に(原理的に)莫大なコストを要する。
⇒ いかに、三次元流れの影響を考慮してほしい計算結果(例えば底面流速)を得るか?

28

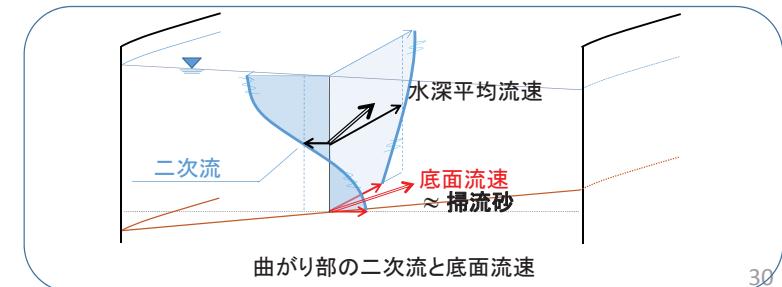
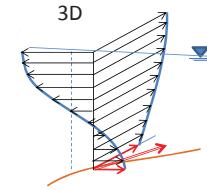
三次元流れはなぜ生じるか？



三次元流れの影響を考慮した解析法 (底面流速解析法)

三次元解析法では、底面近傍の流速を求めるために、鉛直方向に多数の点の流速と圧力を求めなくてはならない。
しかし、基本的には河床に作用する流れ以外、流速分布それ自体はそれほど重要でない。

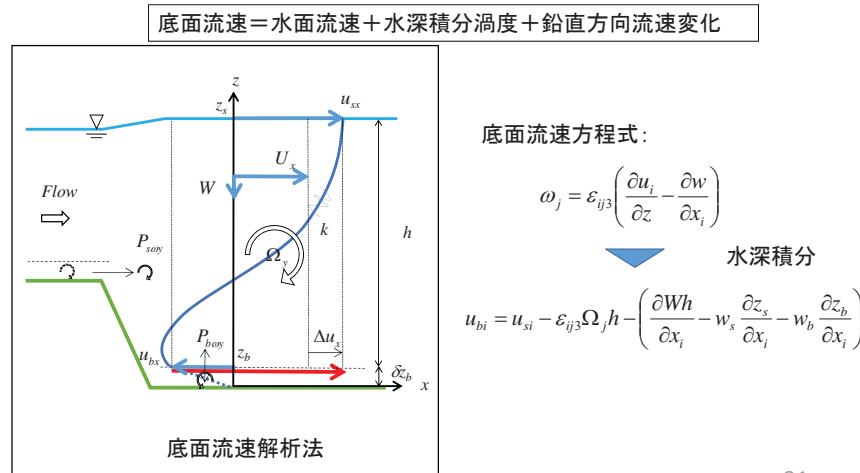
流速鉛直分布を解かずに河床砂に作用する底面近傍の流速を直接解析したい



底面流速の方程式

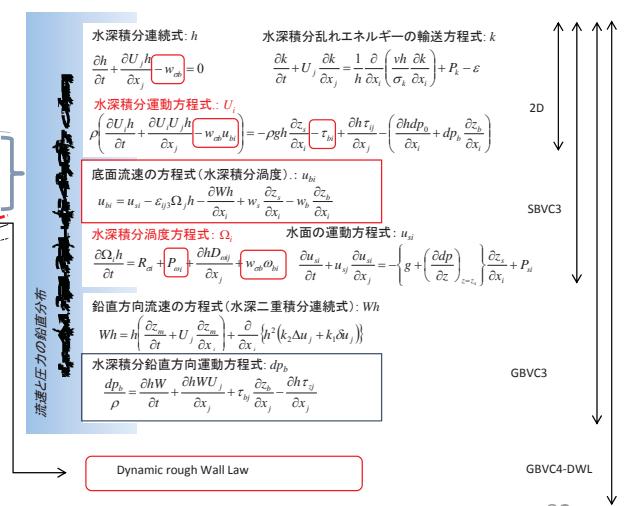
底面流速を計算するために、内田・福岡(2012)によって導かれた方程式。

内田龍彦、福岡捷二 浅水流の仮定を用いない水深積分モデルによる底面流速の解析法 水工学論文集 第56巻 1225-1230 2012.



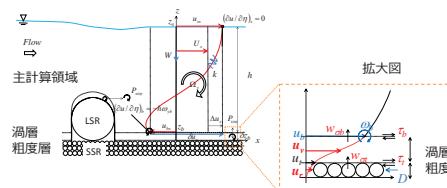
底面流速解析法の概略

底面流速を計算するための支配方程式が二次元解析法に追加される



底面流速解析法の種類

未知数	解析方法 * 鉛直方向流速の多項式の次数				
	2DC	HSBVC2	SBVC3	GBVC3	GBVC4-DWL
水平方向流速, 水深	○	○	○	○	○
水平方向流速分布	渦度	2*	3*	3*	4*
	水面流速		○	○	○
鉛直流速, 圧力			○	○	
渦層, 粗度層流速					○



- 1) 内田龍彦, 福岡捷二:一般底面流速解析法と非平衡粗面抵抗則に基づく水深積分型二相流解析法の適合性の検討, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.73, No.4, pp.1_937-1_942, 2017.
 2) Uchida, T., Fukuoka, S., Papanicolaou, A.N. and Takiris, A.G.: Non-hydrostatic quasi-3D model coupled with dynamic rough wall law for simulating flow over rough bed with submerged boulders, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.142, Issue 11, 04016054, 14p., 2016.

33

底面流速解析法を用いた解析例

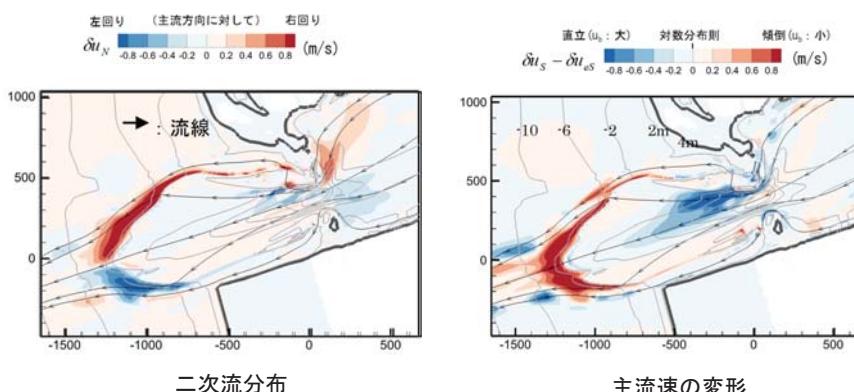
洪水時の河口砂州フラッシュ現象 平成23年7月洪水(阿賀野川下流)



34

河口砂州周辺の三次元流れの可視化

河口砂州周辺で二次流と底面流速の加速により、河口砂州がフラッシュされる流れが形成されていることが分かる



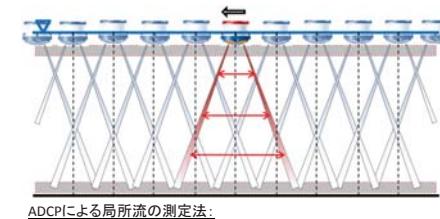
立山政樹, 内田龍彦, 福岡捷二 底面境界が大きな勾配を有する河口砂州周辺の三次元流れと河床変動の解析法 土木学会論文集B1(水工学) Vol.72, No.4 I_835-I_840 2016.2.

35

底面流速解析法を用いた解析例とADCPによる高精度流速観測法

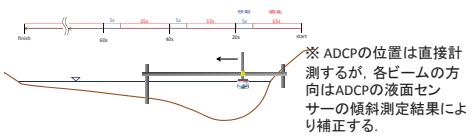


仮定: 4つのビームを囲む平面で流れ場の空間変化を無視する(同じ流速とする).
 ⇒ 各瞬間に4つのビーム方向の流速を合成し、3次元流速を算出する.
 ビームの広がり幅:
 H=1m(95.6cm), 2m(1.7m)



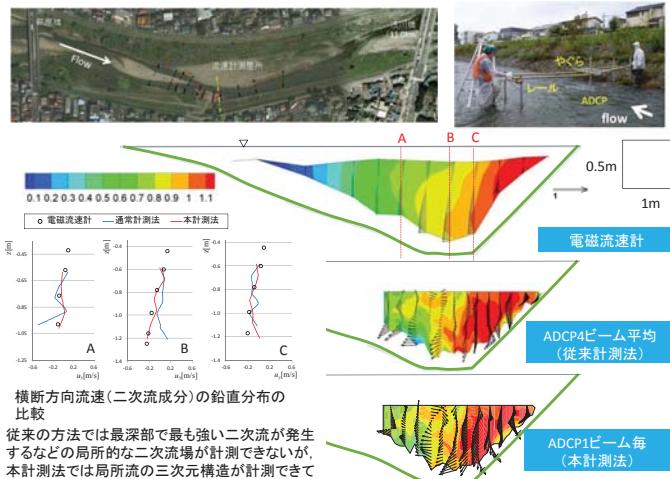
仮定: 計測時間における流れ場の時間変化を無視する.
 連続的に計測される一つ一つのビームのデータを時空間的に平均化・補間し、同じ計測点の4つのビームデータを合成し、三次元流速を算出する.

測定方法: ボートを用い固定式レールにより計測



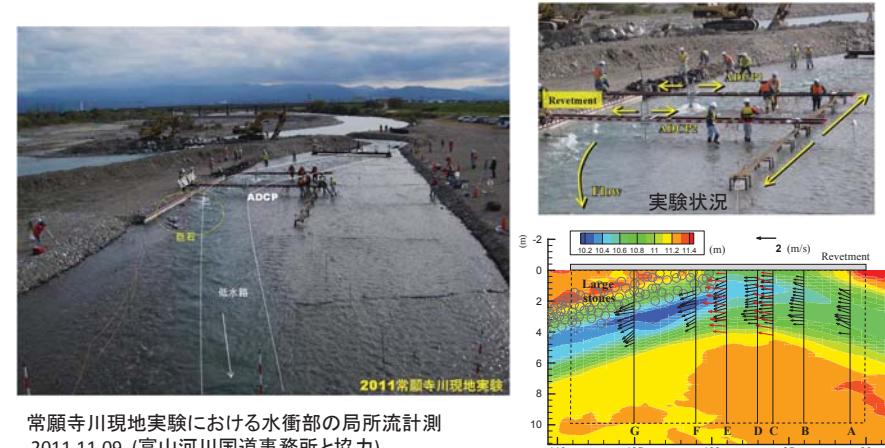
36

ADCP1beam法による局所三次元流速計測結果



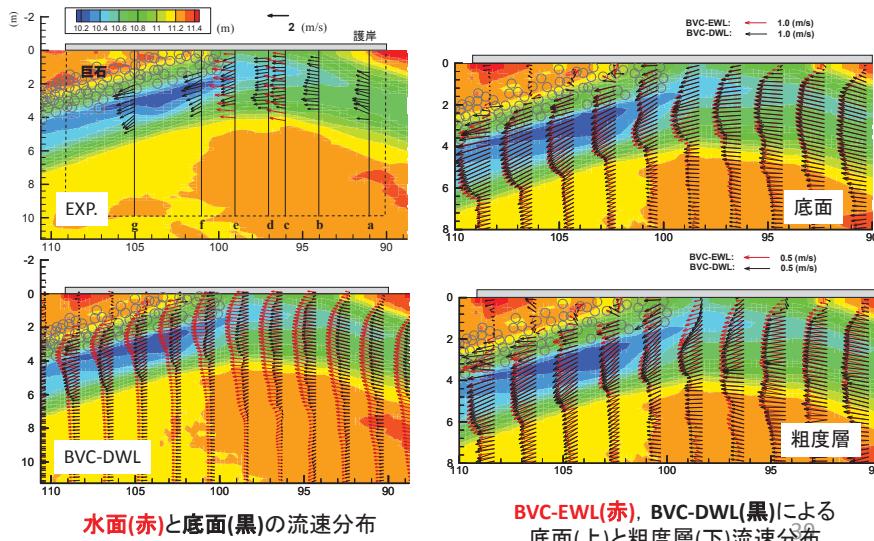
37

局所三次元流速の実験と解析の比較

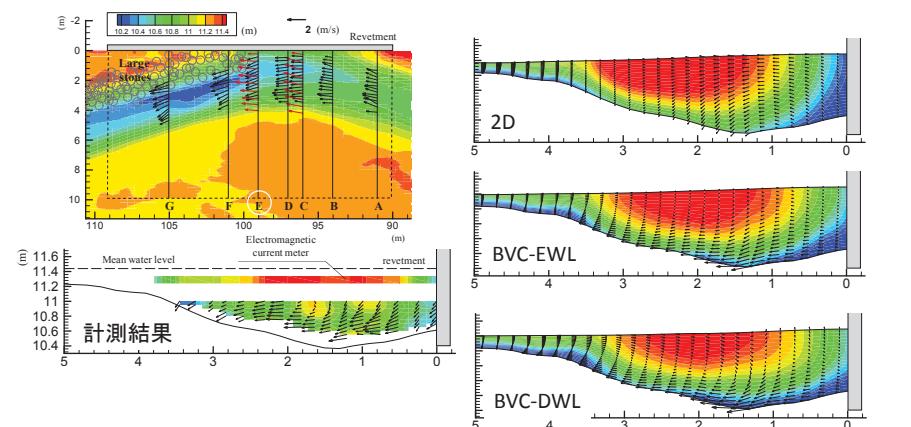


平面流速分布:
赤水面付近、黒底面付近(奥石ら、2013)

水面と河床面の流れの平面分布の比較



各断面の流れの三次元構造の比較



内田 龍彦、福岡 捷二 一般底面流速解析法と非平衡粗面抵抗則に基づく水深積分型二相流解析法の適合性の検討 土木学会論文集B1(水工学) Vol.73, No.4 I_937-I_941 2017.2.

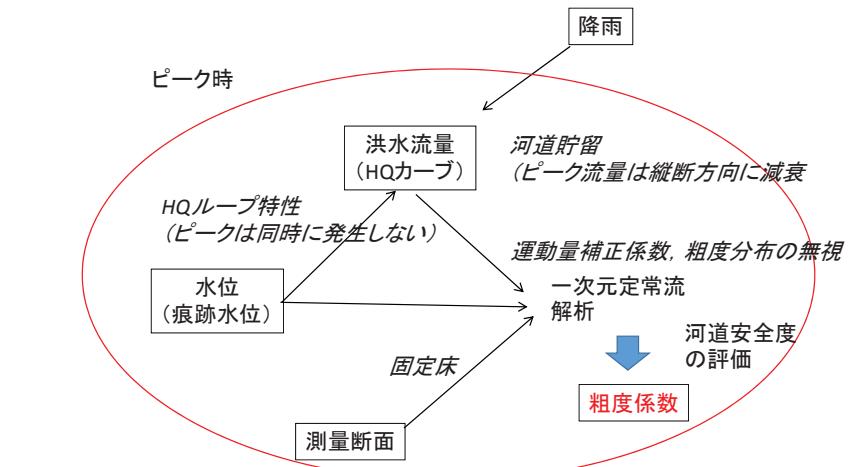
40

内容

0. 時代認識
1. データ、情報と技術
2. 観測技術と解析技術
3. 高精度・高密度観測に対応できる解析法
4. 現象の見方の変化と観測データの意味
 - ・形状と粗度
 - ・流量観測と洪水流解析
5. まとめ

41

流量と粗度係数

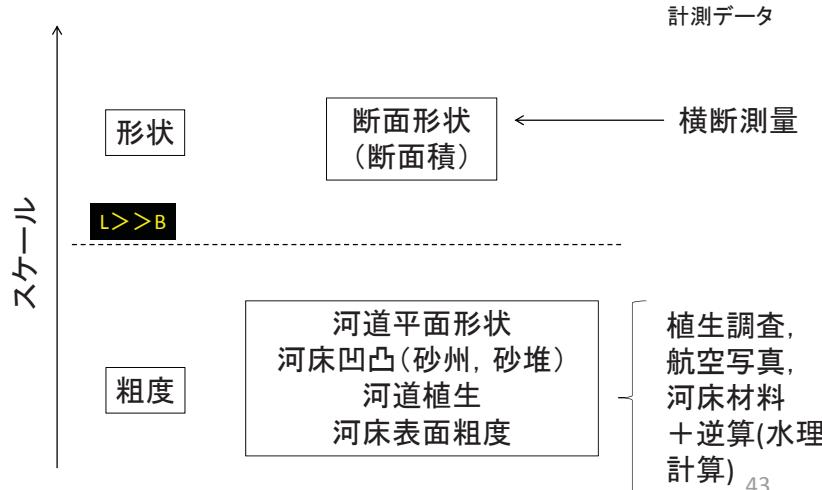


粗度係数は河川の安全度を表す固有のものであってほしいが、現実には、用いる解析に依存したパラメータである。解析法を改善すれば粗度係数は物理的意味に近づくが、多くの観測体制がこの枠組の中で行われていることが障害である。

42

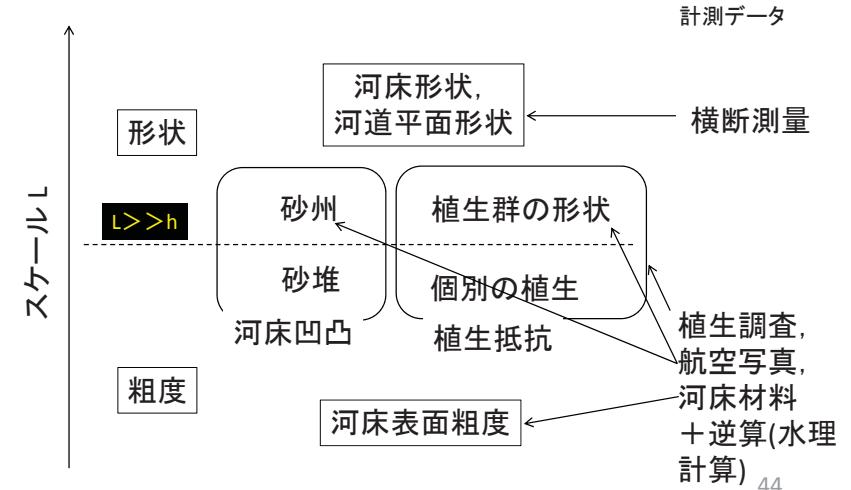
形状と粗度:一次元・準二次元

明確に分離！



形状と粗度:二次元

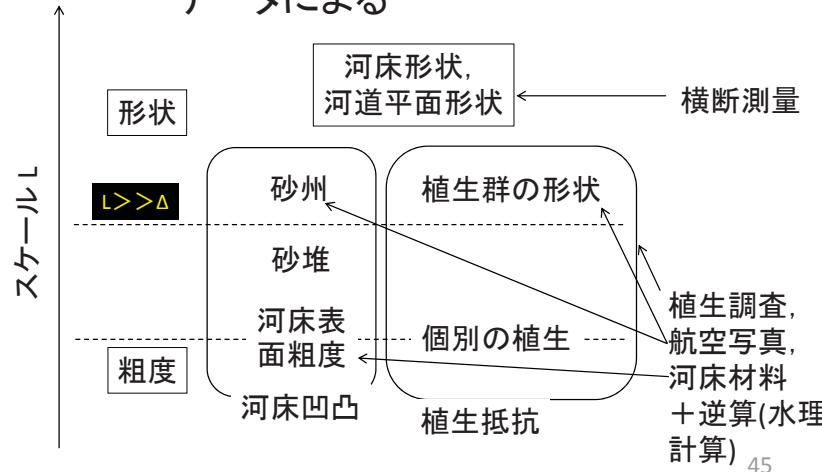
一部混在





形状と粗度:三次元解析

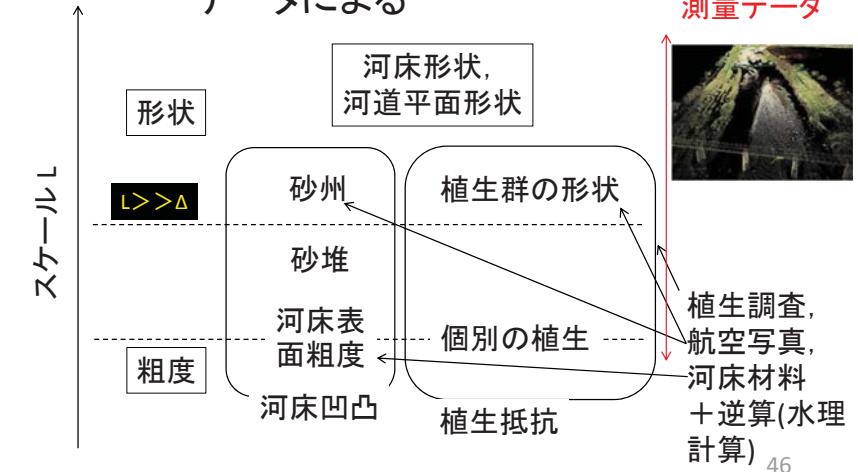
形状と粗度の境界はメッシュ形状、データによる



形状と粗度:三次元解析

形状と粗度の境界はメッシュ形状、データによる

レーザー, マルチビームなどの多点測量データ



形状と粗度の境界の曖昧化

形状と粗度の境界

↑解析法, メッシュの大きさ, データの解像度・質

多量点群測量データ

・形状情報と粗度情報が混在

・河道形状(空間平均), 粗度情報(凹凸など統計情報)は取得可能(データ→情報)

情報を得るためのデータの取得手法を検討

→情報を得るためのデータの整理手法を検討

※多量点群測量データを取得したからといって, 情報をたくさん取得したわけではない!

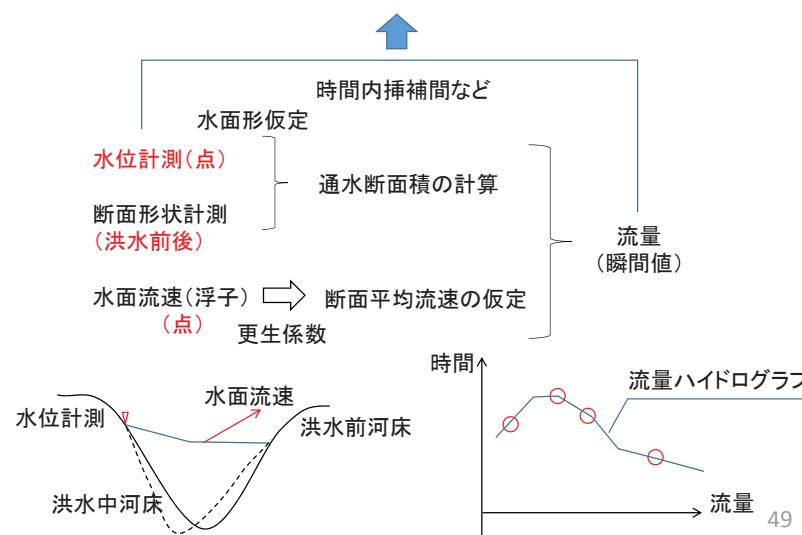
内容

0. 時代認識
1. データ, 情報と技術
2. 観測技術と解析技術
3. 高精度・高密度観測に対応できる解析法
4. 現象の見方の変化と観測データの意味
- ・形状と粗度
- ・流量観測と洪水流解析
5. まとめ



洪水流量観測

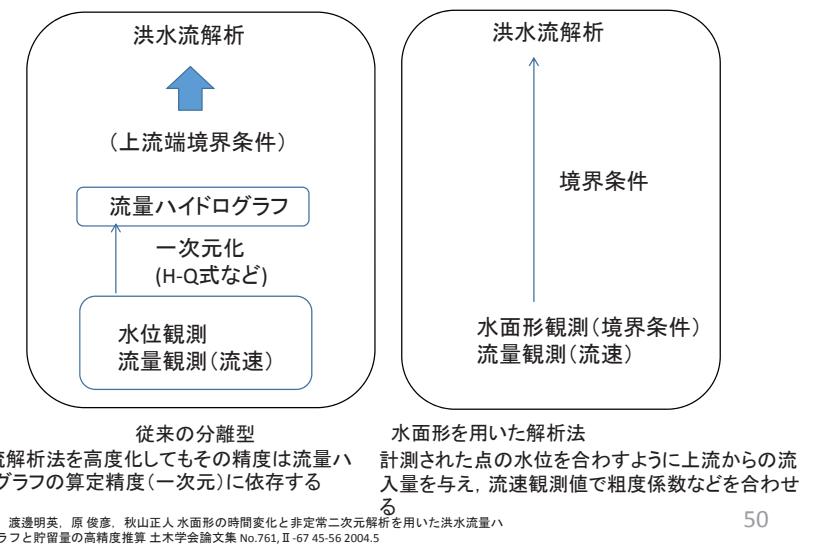
流量ハイドログラフ(上流端の境界条件. 一次元的精度)



49



観測と解析の分離から統合へ



50



水位データを用いた横流入量のある計算

- ・河道樹林化などによる流下能力の低下
- ・気候変化による洪水外力の増大

河道の流下能力及び洪水流の流下特性(河道貯留, ピーク流量の遮減特性など)を明らかにすることが求められている。

福岡・渡邊ら(2004)

水面形時系列データと非定常流解析を用いた洪水流量の推定法

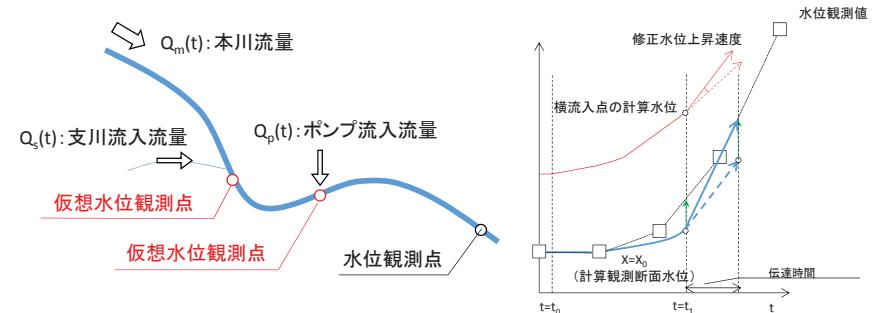
河川流量の直接計測が困難な河川上流域や感潮域において、本川水位データを用いた洪水流解析法と水位観測法を含めた解析法の活用法を検討する。

- ・河川上流域(浅川)：洪水到達時間が短い、支川のデータがない
- ・低平地河川(牛津川)：HQ式の適用が困難、支川、ポンプ排水などの多地点の横流入、植生の抵抗

51



多地点からの横流入のある河道システムにおける本川水位データを用いた洪水流解析法



仮想観測点における水位誤差 δH_v と観測点の水位誤差 δH の関係：

$$\delta H_v(t) = \delta H(t + t_0) / \alpha$$

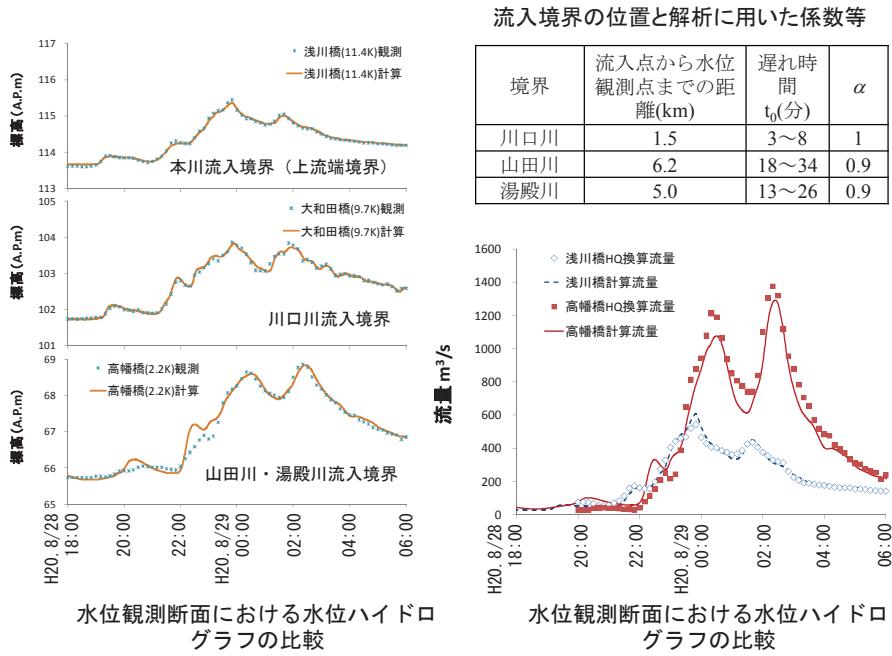
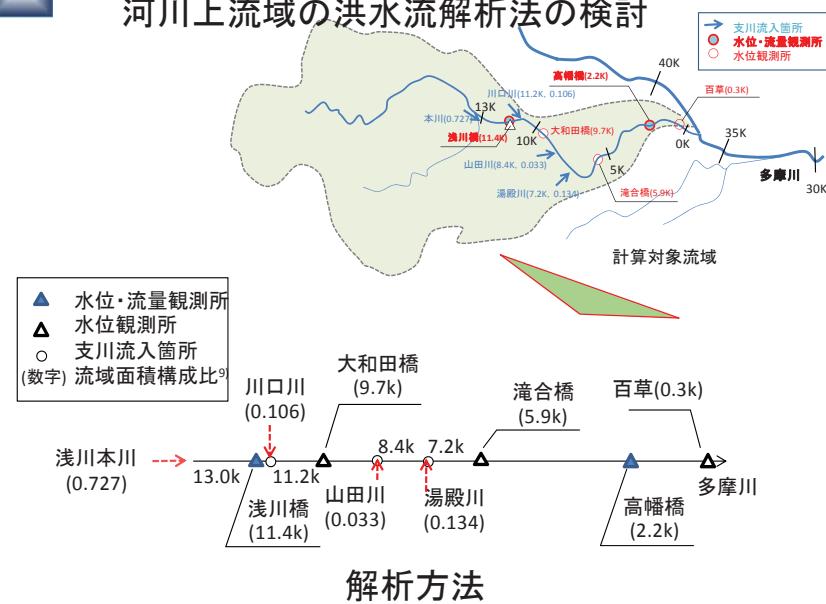
水位観測点における t_0 後の水位誤差：

$$H_{pre}(t + t_0) = H_{cal}(t) + \alpha t_0 \cdot H_v'(t)$$

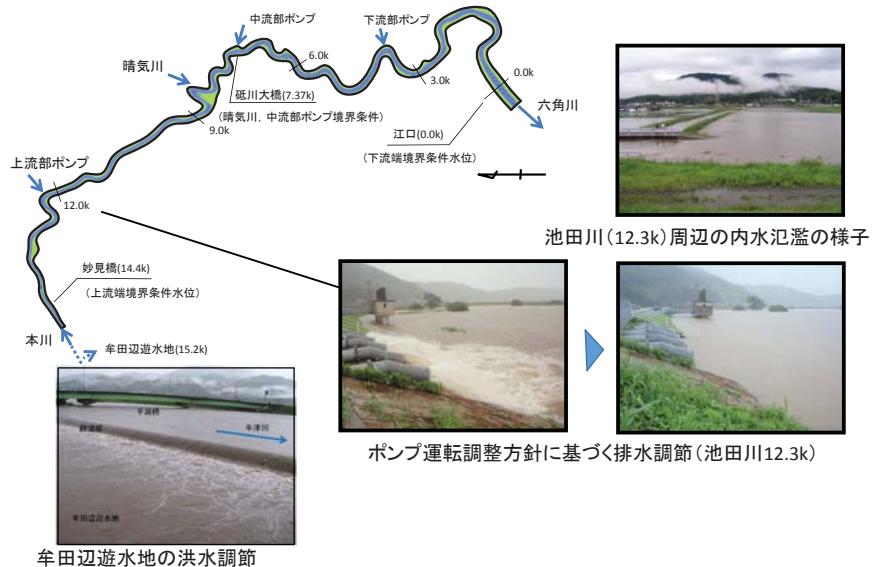
$$\delta H(t + t_0) = H_{pre}(t + t_0) - H_{obs}(t + t_0)$$



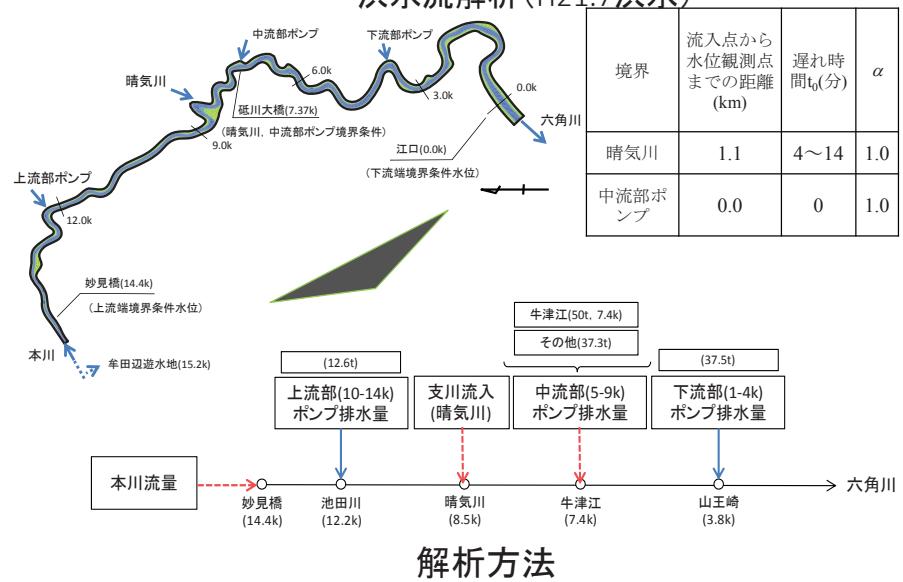
支川の河道・洪水データが不足している 河川上流域の洪水流解析法の検討



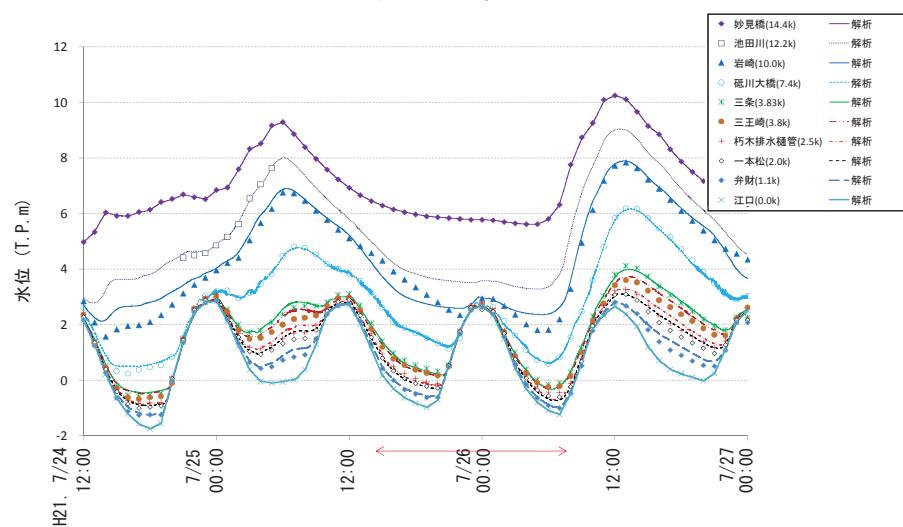
ポンプ排水のある低平地河川の水位データを用いた 洪水流解析(H21.7洪水)



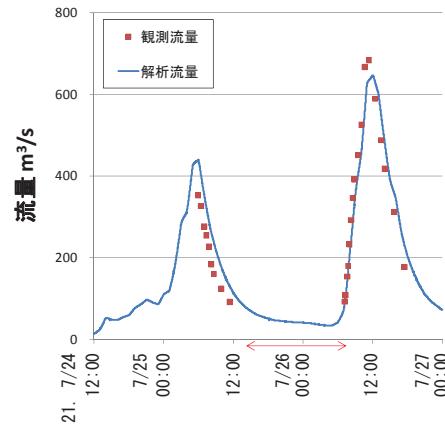
ポンプ排水のある低平地河川の水位データを用いた 洪水流解析(H21.7洪水)



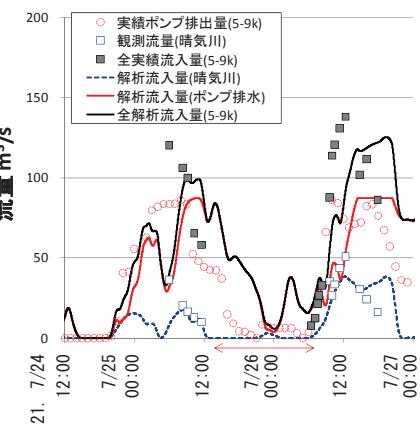
牛津川の水位ハイドログラフの解析結果と観測結果の比較



牛津川の解析流量と観測流量の比較

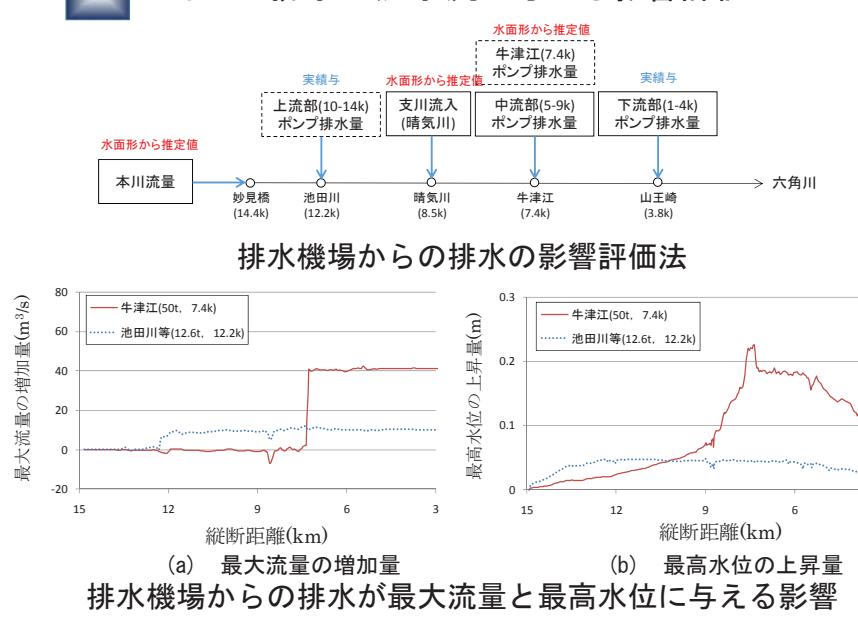


(a) 牛津川本川流量
(妙見橋14.0k)



(b) 晴氣川流入量、
牛津川中流ポンプ排水流入量

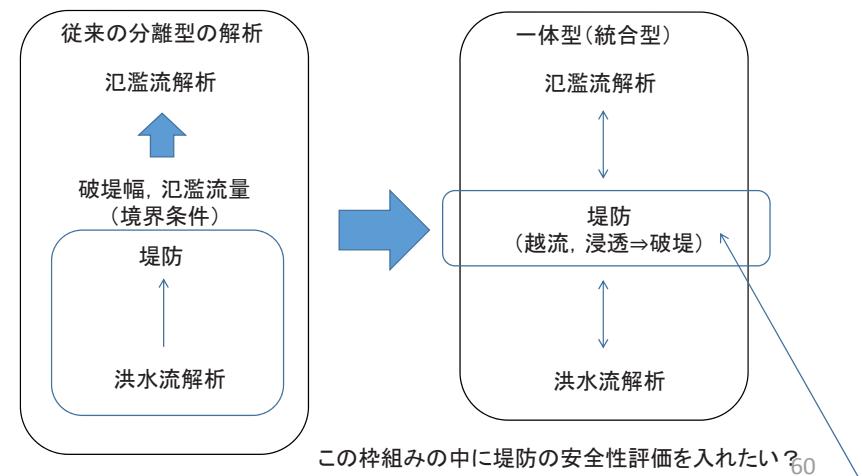
ポンプ排水が洪水流に与える影響評価



排水機場からの排水が最大流量と最高水位に与える影響

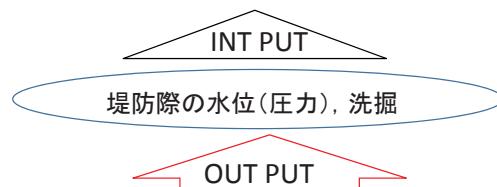
氾濫流解析における計測・技術の分離

従来、氾濫流解析は、氾濫流量という境界条件を用いて洪水流解析と分離されてきた。近年では、氾濫流解析を支配する氾濫流量の精度を上げるために、洪水流解析と統合した解析手法とともに堤防自体が着目されている。しかし、破壊する危険度までを検討する上では、洪水流解析・堤防とのリンクがまずは重要となる。



洪水流解析と堤防技術の関係

堤防: 洪水流を安全に河道内で流下させる最も重要な構造物



洪水流解析: 洪水流がどのように河道を流下するかを知る手段



洪水観測, 河川測量, 水理実験

堤防の設計論, 維持管理(堤防技術)の点から見ると, 洪水流解析は, 堤防の安全性を検証するための洪水外力の解析手法である.

61

洪水流解析と堤防技術の境界

堤防設計・安定性評価

与えられた外力として計算

固定

計画水位, 構造物の基礎

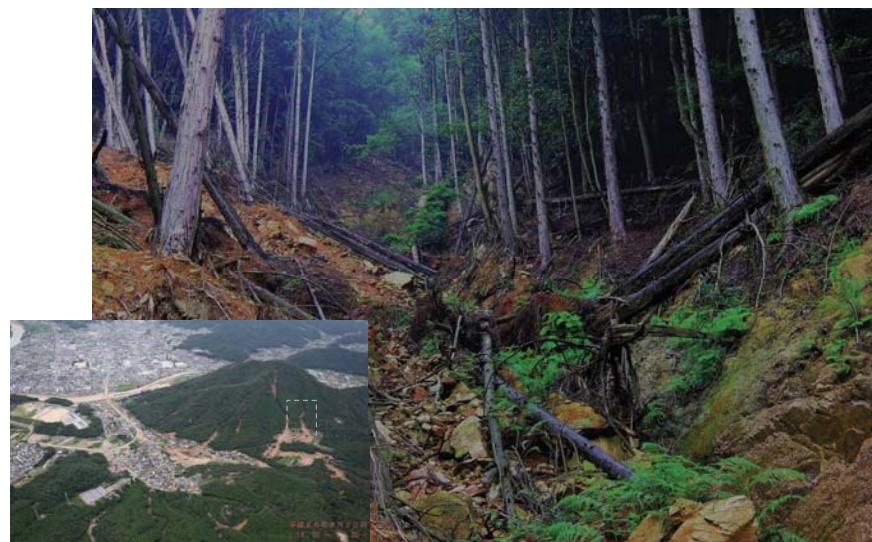
堤防を与えられた境界条件として計算

洪水流解析

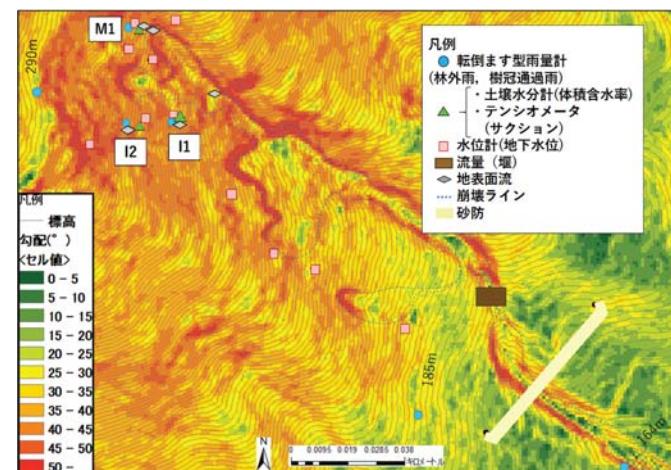
計画規模で考える場合, 計画流量, 計画水位という固定した外力(想定外力)で分離され, 堤防と河道がそれぞれ検討される. しかし, 現状の堤防の安全性評価となると, 河道が完成していないことから, 外力を固定し, 分離した検討は原理的に行えず, 洪水現象と一緒に考えていくことも必要である.

62

地道な水文観測の必要性 斜面崩壊はどうのうにして生じるのか?



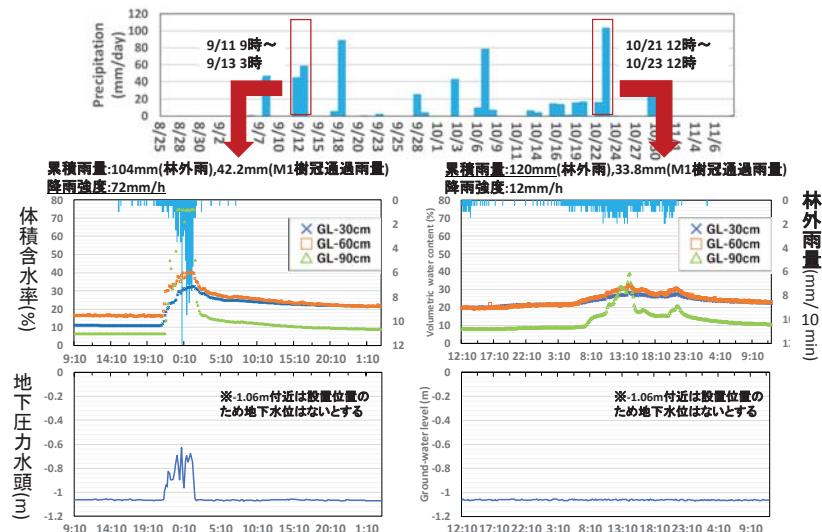
土砂災害危険区域の林地斜面における降雨の浸透過程の観測



寺尾晃平, 内田龍彦, 梶昭仁, 宮田英樹, 河原能久: 土砂災害危険区域の林地斜面における降雨の浸透過程の解明, 河川技術論文集, 第23巻, pp.439-444, 2018年6月.

64

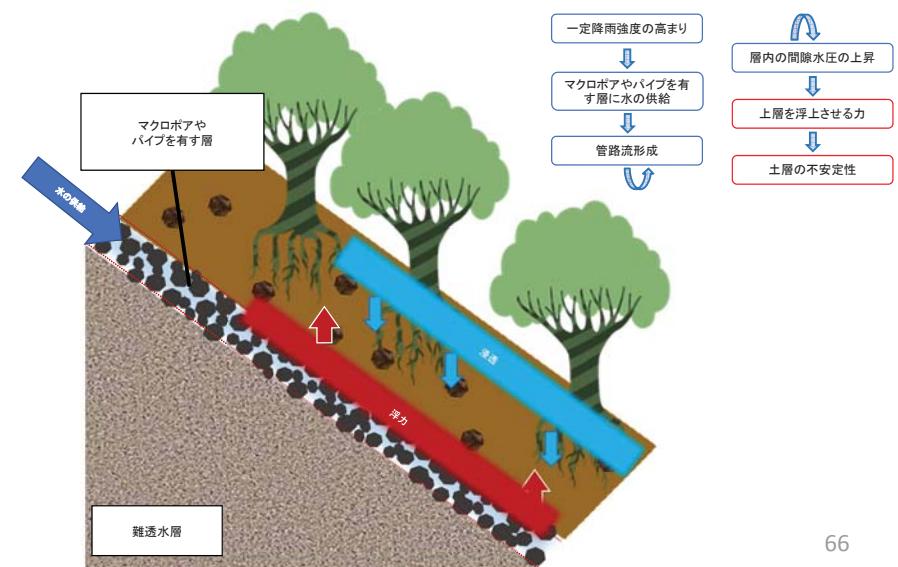
源頭部における降雨浸透過程の観測結果



強い降雨の場合、下層の圧力上昇が即座に生じ、上方向に浸潤する

65

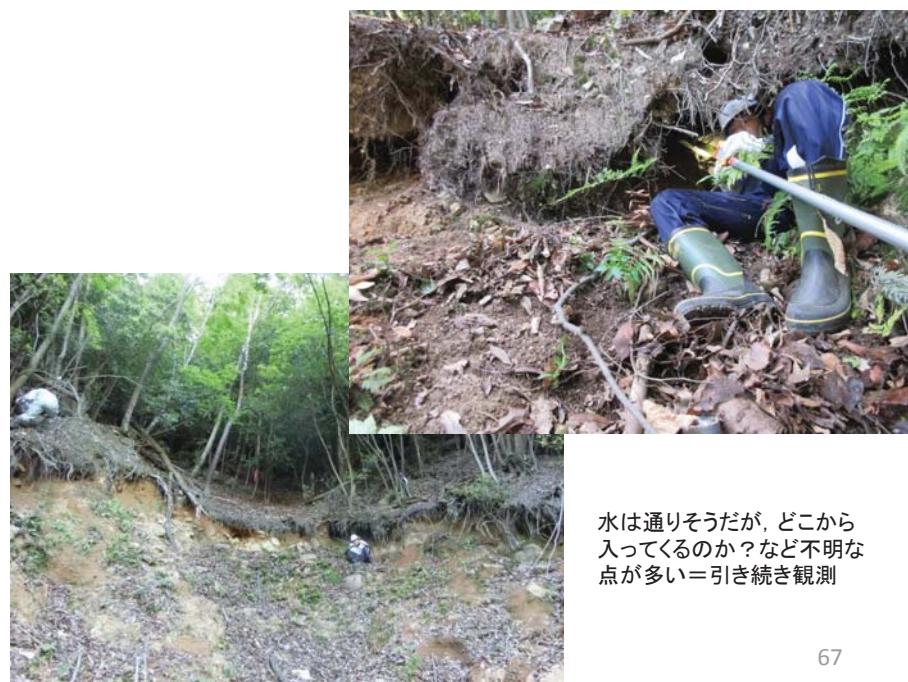
源頭部における破壊機構の仮説



66

まとめ

1. 多量のデータを取得することを目的化せず、データから情報、技術へと発展させていく必要がある。
2. 観測の目的は実現象把握であるから、観測技術と解析技術は併せて考える必要がある。
3. 従来の観測法は従来の解析法とバランスしているために、高精度・高密度観測に対して新たな解析法が必要である。
4. 現象の見方の変化と観測データの意味を考える必要がある。
 - ・形状と粗度は見方によって変わる相対的なものであり、目的、観測、解析精度によって変化するものである。
 - ・流量観測は水位、流速計測と一次元的考察などにより求められたものである。一次元解析法から二次元解析法などと高度化するとこの算定過程も見直す必要がある。このような分離的の考えは他にもあり、技術発展と併せて技術の融合を考えていく必要がある。
 - ・土砂崩壊機構などの基礎現象解明のためには、水文観測が引き続き重要であり、現象の本質を見極める必要がある



67

68