

平成29年度河川情報シンポジウム 2017.12.1 13:30-14:10 @ベルサール半蔵門

新たな水位データ同化手法 (DIEX-Flood)に基づく 洪水予測手法の開発と応用

 **二瓶泰雄**
[東京理科大学 理工学部 土木工学科]

背景 1/31





水防災意識社会再構築ビジョン
「施設では防ぎきれない大洪水は必ず発生するもの」へと意識を変革

水防法等の一部を改正する法律
逃げ遅れゼロ・社会経済被害の最小化

ハード対策

- ・洪水氾濫を未然に防ぐ対策
- ・危機管理型ハード対策

住民目線のソフト対策

- ・リスク情報の周知・事前の避難計画・訓練
- ・避難行動のための情報のリアルタイム提供

適切な対策実現には充実した河川モニタリングが必須
→ 流量・水位他

背景 | 水位モニタリングの実態 2/31



水位観測 → **堤防越水**
10km間隔程度 → 数m～数百m
検知・予測が困難

水位予測「点」予測・低精度

2015年関東・東北豪雨
鬼怒川・水海道地点(11k)
2015/9/10 6時予報 単位:m

	予報	実測	差
7:00(予測時+1hr)	5.41	5.62	0.21
8:00(予測時+2hr)	5.78	6.26	0.48
9:00(予測時+3hr)	6.10	6.84	0.74

H27関東・東北豪雨の例

背景 | 危機管理型水位計(国交省) 3/31

洪水時に特化した低コストな水位計(概要) (参考)

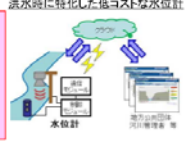
【目的】
洪水時のみの水位観測に特化した低コストな水位計を開発し、都道府県や市町村が管理する中小河川等への普及を促進し、水位観測網の充実を図る。

【特徴】

- 長期間メンテナンスフリー(無給電で5年以上稼働)
- 省スペース(小型化)(橋梁等へ容易に設置が可能)
- 初期コストの低減
(洪水時のみの水位観測により、機器の小型化や電池及び通信機器等の技術開発によるコスト低減)(機器設置費用は、100万円/台以下)
- 維持管理コストの低減
(洪水時のみに特化した水位観測によりデータ量を低減し、IoT技術とあわせ通信コストを削減)

【現状及び今後の予定】

- 開発12チーム(21者)により機器開発中
- 平成29年8月から、開発した水位計を鶴見川水系烏山川(横浜市内)に順次設置し、試験的に水位観測を開始
- 計測の確実性及び計測データの精度等を検証
- 平成29年内に機器開発を完了の後、機器特性をとりまとめ公表
- 平成30年より、順次現場へ設置予定



<http://www.mlit.go.jp/common/001200761.pdf>

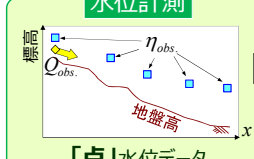
本研究の目的 4/31

「水位」に特化した新しいデータ同化手法に基づいて

Step1 現在時刻の「点」→「線」水位内外挿法(nowcast)
Step2 将来時刻の「線」水位予測法(forecast)

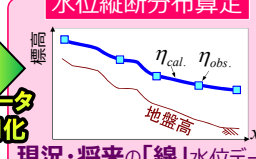
が可能な洪水予測手法(**DIEX-Flood**)を開発・応用

水位計測



「点」水位データ

水位縦断分布算定



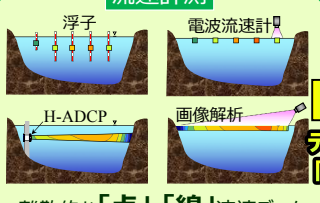
データ同化
現況・将来の「線」水位データ

DIEX法の原点: 流量算出用 5/31

力学的内外挿法 (Dynamic Interpolation and Extrapolation(DIEX) method)

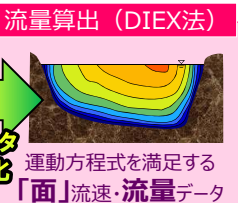
- 離散的な「点」または「線」流速データから、運動方程式を満足した形で、「面」流速データや流量を算出
- 現地観測データを合理的に取り込めるデータ同化手法を導入

流速計測



離散的な「点」「線」流速データ

流量算出 (DIEX法)



データ同化
運動方程式を満足する「面」流速・流量データ

既往研究 | 流量算出用DIEX法の基礎方程式 6/31

主流方向3次元運動方程式

$$\cancel{\frac{\partial u}{\partial t}} = gI + \cancel{\frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial u}{\partial x} \right)} + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{1}{D^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(A_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)$$

無視 無視 簡略化

基礎方程式

$$\bar{F}_a + gI + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{1}{D^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(A_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) = 0 \quad (1)$$

付加項

水深平均基礎方程式

$$\bar{F}_a + gI + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A_H}{A} \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{C_f}{D} \bar{u}^2 = 0 \quad (2)$$

データ同化

(x, y, σ) : 主流、横断、鉛直方向 u, v, w : (x, y, σ) 方向の流速 D : 水深 C_f : 底面摩擦係数 ($= \frac{gn^2}{D^{4/3}}$)
 A_H : 水平渦動粘性係数 A_V : 鉛直渦動粘性係数 I : 水位勾配 n : マニングの粗度係数

既往研究 | 流量算出用DIEX法の計算手順 7/31

データ同化

式(2)を用いて、観測位置の F_a を算出

Step1

式(2)を用いて、観測位置の F_a を算出

Step2

誤差最小化のため、 F_a を3次関数近似

Step3

F_a の横断分布と式(1)より流速横断分布を算定

Step4

Step1~3を解が収束するまで繰り返す

収束

流量

DIEX-Flood (DIEX for Flood prediction) のコンセプト 8/31

● DIEX法の概念を**水位データ同化に拡張**

● 離散的な「点」水位データを運動方程式・連続式を満足する**現況の「線」水位データ**に内外挿し、さらに**洪水予測**を実施

水位計測

離散的な「点」水位データ

データ同化

運動方程式・連続式を満足する**現況の「線」水位データ**

水位縦断分布算定 DIEX-Flood

将来時刻の「線」水位データ

DIEX-Flood の概念図 9/31

事前計算

痕跡水位が存在する場合

痕跡水位

地盤高

データ同化

Eq. 2

計算パラメータに使用

Nowcast: データ同化による水位縦断分布算定

標高

観測水位 $\eta_{obs.}$

計算水位 $\eta_{cal.}$

地盤高

Eq. 5

Eq. 3

Eq. 4

収束

Forecast: 最新の河道・水理条件に基づいた洪水予測

DIEX-Flood の基礎方程式系 10/31

定常

運動方程式 Eq.1

$$\frac{2Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}} = 0$$

データ同化 Eq.2

$$n = \sqrt{\frac{R^{4/3} A^2}{Q |Q|} \left\{ \frac{2Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right\}}$$

非常

連続式 Eq.3

$$B \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

運動方程式 Eq.4

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}} + F_a = 0$$

付加項

データ同化 Eq.5

$$F_a = - \left(\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}} \right)$$

江戸川・実洪水データへの適用 江戸川 11/31

名称	江戸川
計算区間	44.6km
断面形	複断面
境界条件	上流端 H-ADCP流量観測システム @野田地点を時間差考慮
下流端	市川地点水位
格子間隔	約100m
同化データ	松戸～西関宿の5地点, 60分間隔

イベント	台風0709号
計算期間	2007/09/05 - 11
ピーク流量	1459m ³ /s

実河川洪水流の計算範囲

西関宿(河口から58.41km)

東金野井(49.08km)

野田(39.93km)

流山(27.63km)

松戸(19.53km)

市川(13.75km)

約45km

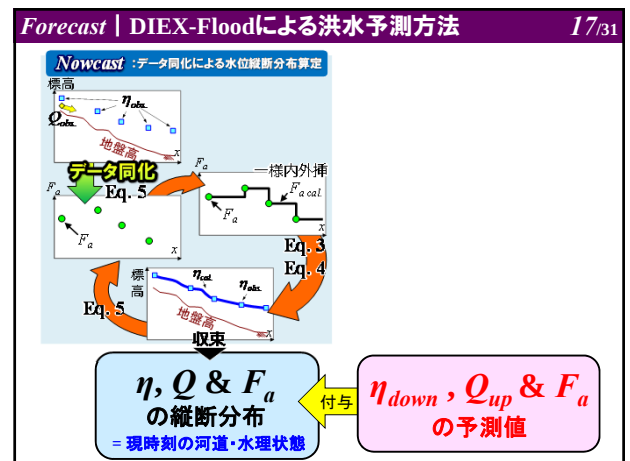
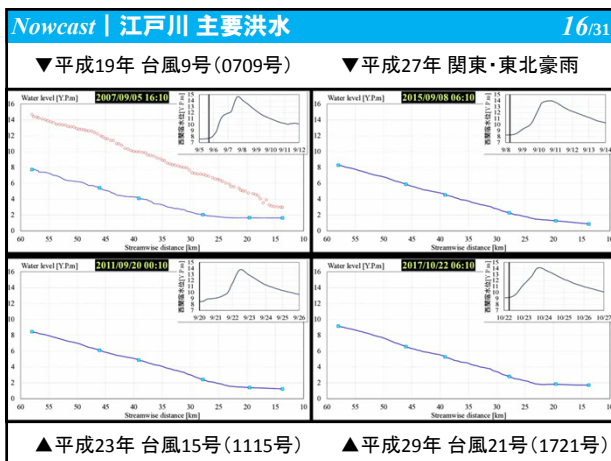
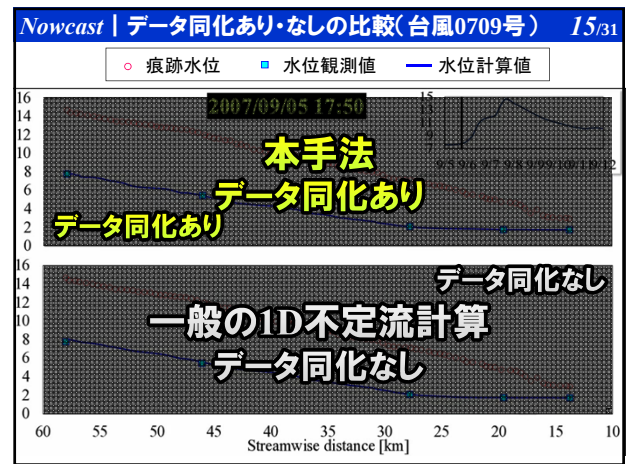
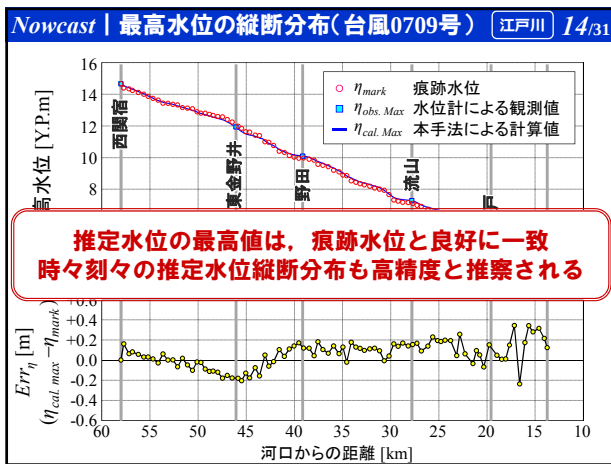
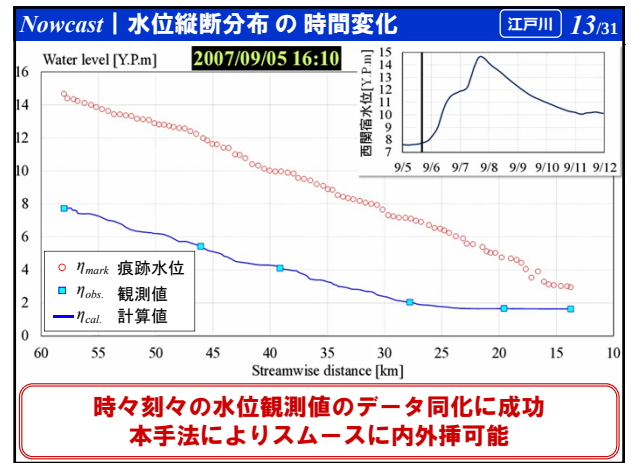
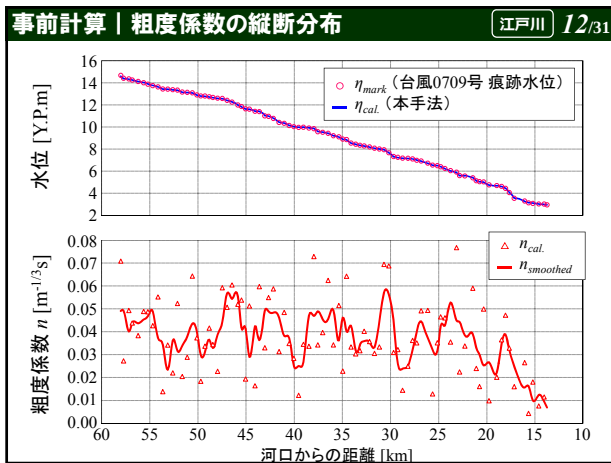
茨城県

埼玉県

千葉県

東京都

東京湾

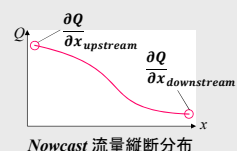


Forecast | 洪水予測に関する計算ケース

江戸川 18/31

Case	Boundary conditions		F_a
	Q	η	
1	観測値	観測値	最新時刻 F_a を一定付与
2	予測値*	予測値*	最新時刻 F_a を一定付与

※Case2における境界条件の設定方法

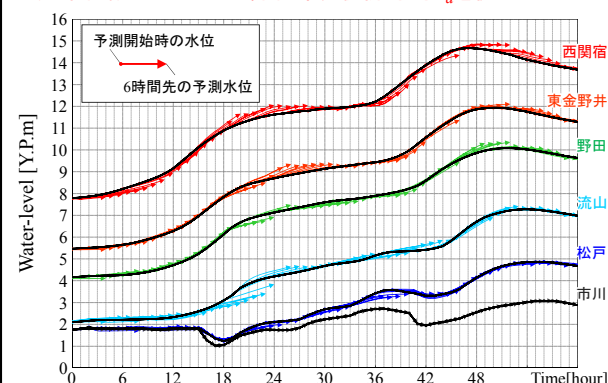


- Nowcast で得られる流量縦断分布から、上下流端の $\frac{\partial Q}{\partial x}$ を記録
- 将来時刻において、 $\frac{\partial Q}{\partial x}$ を維持する上流端流量・下流端水位を設定
ただし、下流端水位は現時刻水位以上のみ有効とした

Forecast | Case1

江戸川 19/31

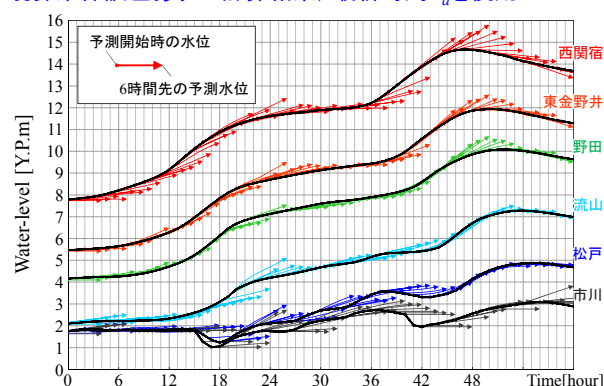
境界条件誤差なしの計算結果、最新時刻 F_a を使用



Forecast | Case2

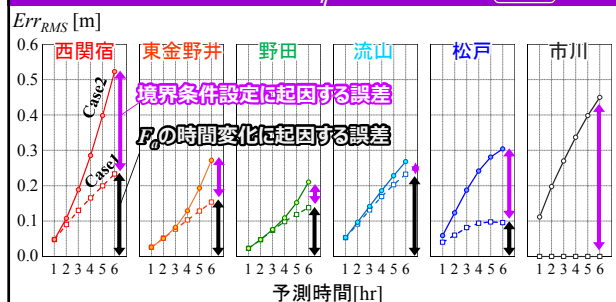
江戸川 20/31

境界条件誤差ありの計算結果、最新時刻 F_a を使用



Forecast | Case1とCase2のErr_ηのRMS値比較

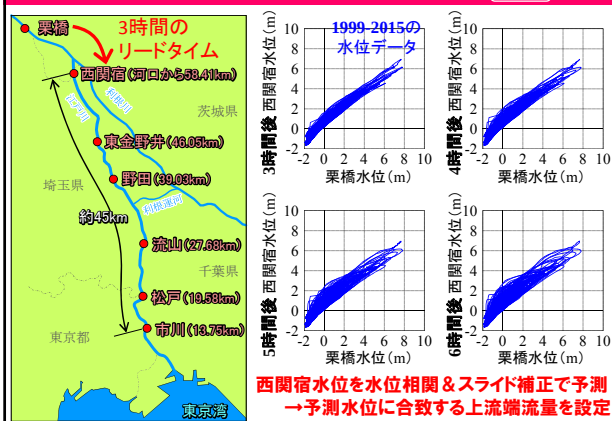
江戸川 21/31



境界条件誤差なし(Case1)では、全川で高精度
境界条件誤差あり(Case2)でも、上下流端付近以外高精度
⇒境界条件の与え方に改善の余地あり

Forecast | Case3 上流端流量予測の導入

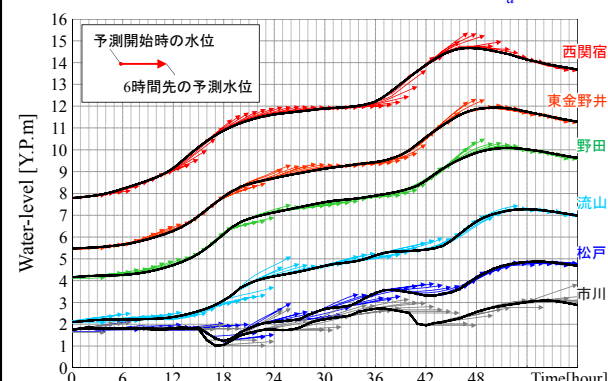
江戸川 22/31

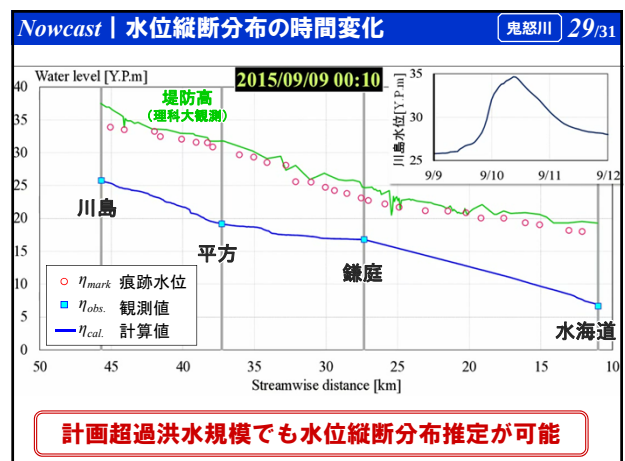
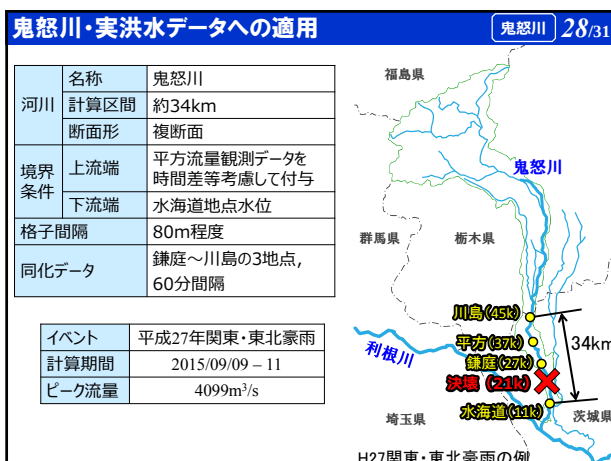
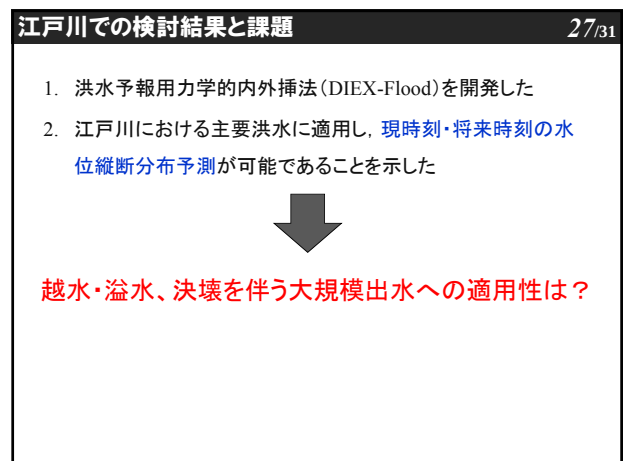
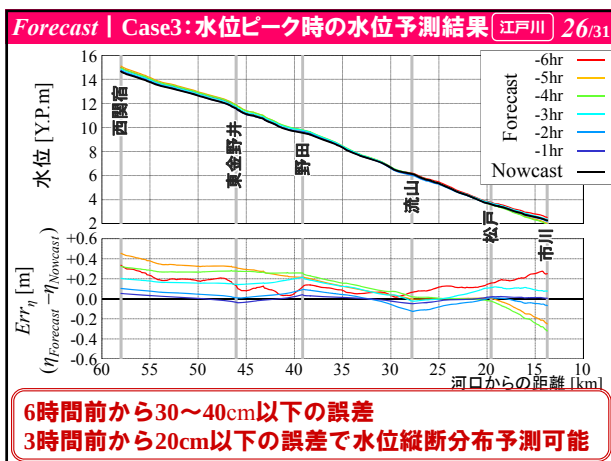
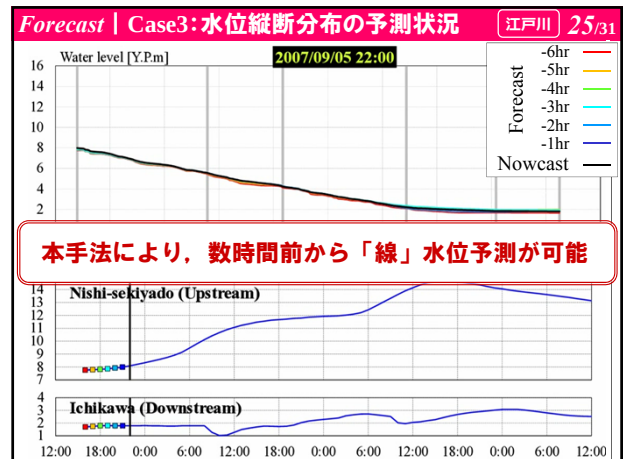
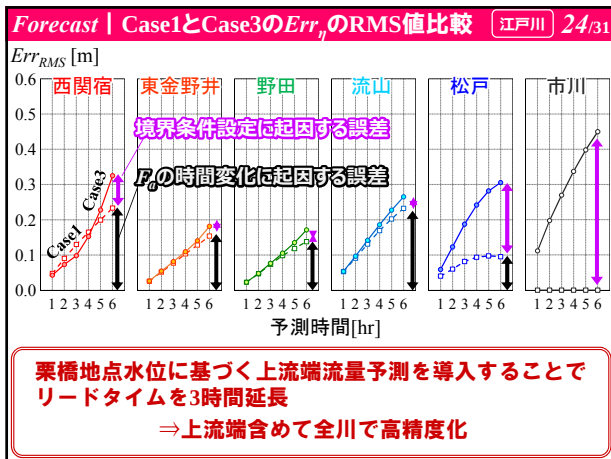


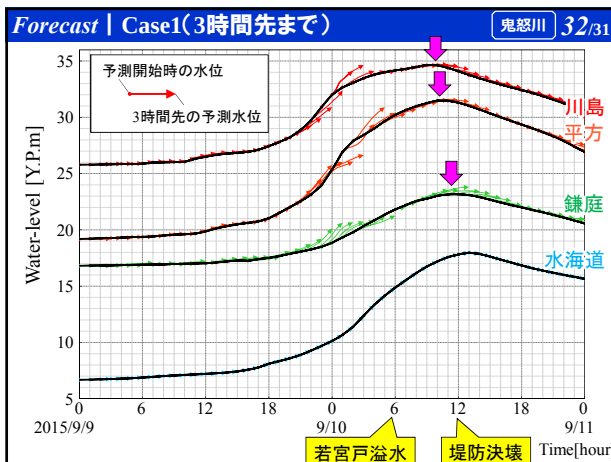
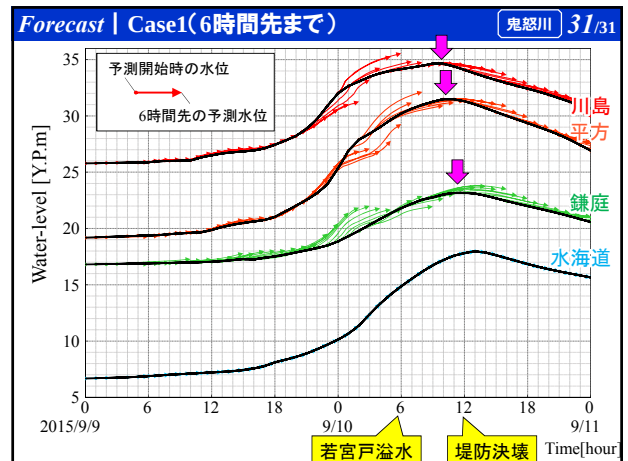
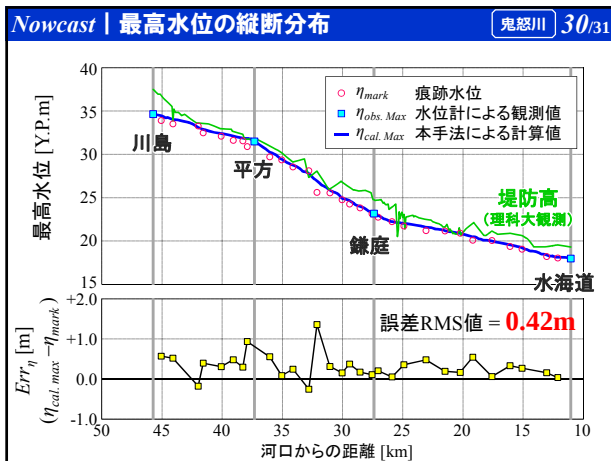
Forecast | Case3

江戸川 23/31

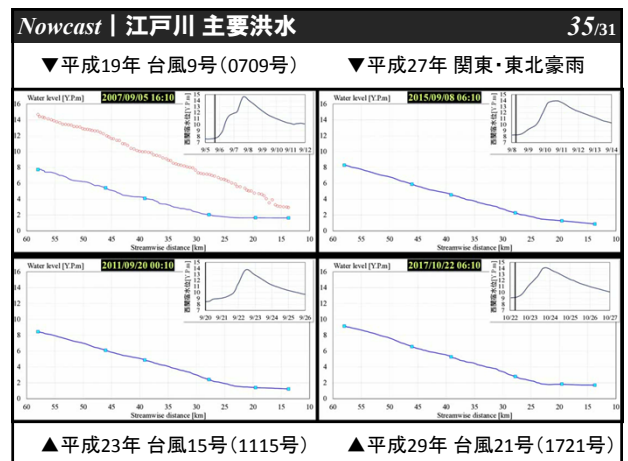
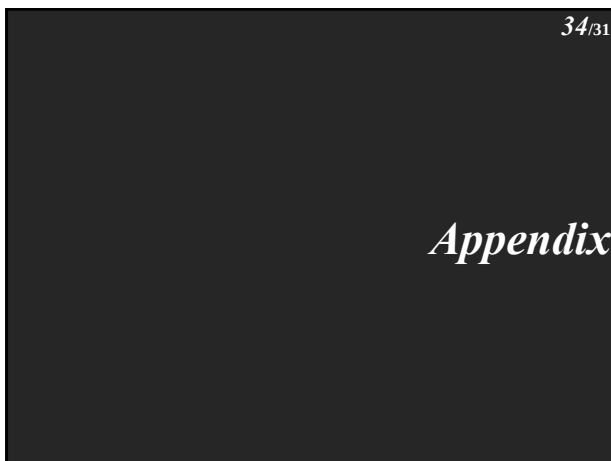
西関宿予測水位に基づく上流端流量、最新時刻 F_a を使用

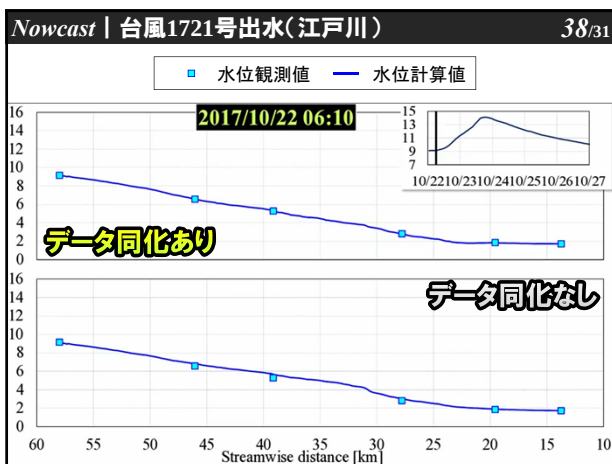
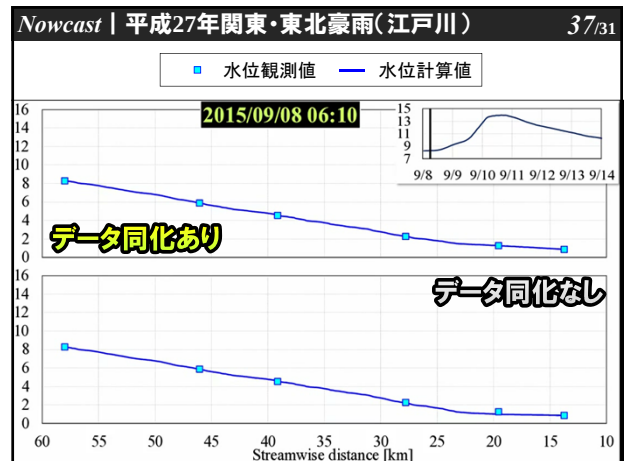
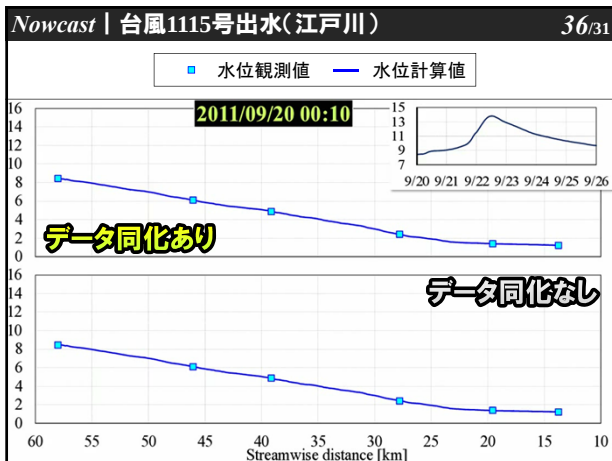




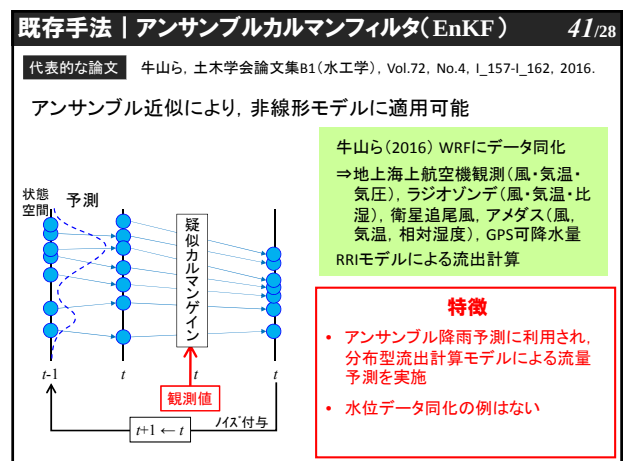
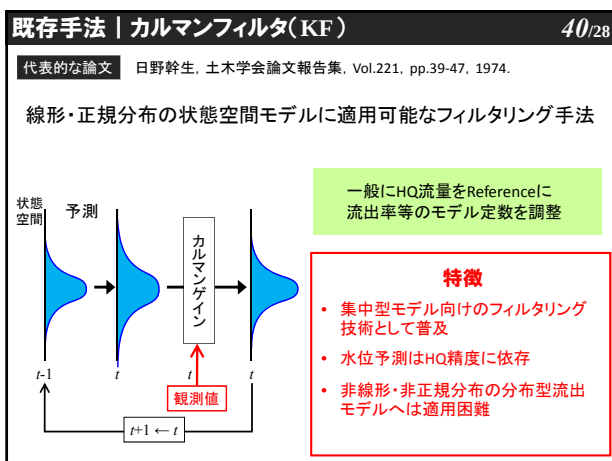


- まとめ** 33/31
1. 洪水予報用力学的内外挿法(DIEX-Flood)を開発した
 2. 江戸川における主要洪水に適用し、現時刻・将来時刻の水位縦断分布予測が可能であることを示した
 3. H27関東・東北豪雨時の鬼怒川洪水にDIEX-Floodを適用し、越水を考慮しながら水位縦断分布推定および洪水予測が可能であることを示した





- ・ 貯留関数モデル + カルマンフィルタ
- ・ 分布型流出計算モデル + アンサンブルカルマンフィルタ
- ・ 分布型流出計算モデル + 粒子フィルタ
- ・ 不定流計算モデル + 粒子フィルタ
- ・ 不定流計算モデル + Adjoint法
- ・ 分布型流出計算モデル + 不定流計算モデル + 粒子フィルタ
- ・ ニューラルネットワーク(深層学習含む)



既存手法 | 粒子フィルタ(PF) 開発当初「モンテカルロフィルタ」 42/28

代表的な論文 立川ら, 水工学論文集, Vol.55, PP.511-516, 2011.

非線形・非正規の状態空間モデルに適用可能
 多数の粒子(異なるパラメータを配置した不定流計算モデル)を実行し, 尤度の高い粒子をリサンプリング

立川ら(2011)は, 不定流計算モデルに水位データを同化し, 粗度係数と流量(流出計算)に乗じる係数を粒子化, 残流域流量係数やタンク水位などを粒子とする例など多様化

特徴

- 1地点水位データ同化, 1地点水位予測が実用段階
- 粒子化の対象や粒子数の設定が重要で, 計算精度・負荷を決定づける
- モデル開発が比較的容易

立川ら(2011)を元に作成

既存手法 | Adjoint法 43/28

代表的な論文 渡邊ら, 河川技術論文集, Vol.23, PP.197-202, 2017.

非逐次データ同化手法(時間や空間に対して連続的な同化解析)

特徴

- 時間や空間に対して連続的な同化
- 水位縦断分布を算定
- 計算負荷が大きい
- アジョイントコードの作成が容易でない

渡邊ら(2017) 観測流量と計算流量のミスフィット

評価関数 $J = J_H + J_Q + J_{n_init} + J_{K_init}$ を最小化

樹木透過係数の初期設定と同化後最適値の差異
 粗度係数の初期設定と同化後最適値の差異

既存手法 | ニューラルネットワーク・深層学習 44/28

代表的な論文 一言ら, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.72, pp.187-192, 2016.

複数の中間層を用いたNNIにより学習を行う手法

特徴

- 低計算負荷でリアルタイム性に優れる
- 1地点水位予測
- 過学習, 学習不足が問題となりやすい
- 河道整備効果などの考慮が難しい

一言ら(2016)

時刻0からt時間予測を行う場合の入力

種別	地点	時刻
時刻水位	水位予測地点	-1, 0
1時間の水位変化	流域内5地点	-2, -1, 0
時刻雨量	流域内14地点	t-5, t-4, t-3, t-2, t-1

出力

水位予測地点における時刻0~tの水位変化