

現地浸水情報を用いた 氾濫予測システムにおける 補正手法の比較評価

2026年6月18日 河川技術に関するシンポジウム

(一財) 河川情報センター
 (一財) 河川情報センター
 (一財) 河川情報センター
 (一財) 河川情報センター
 (一財) 河川情報センター
 (一財) 河川情報センター
 中央大学研究開発機構
 (一財) 河川情報センター理事長・東京大学名誉教授
 中央大学研究開発機構 教授

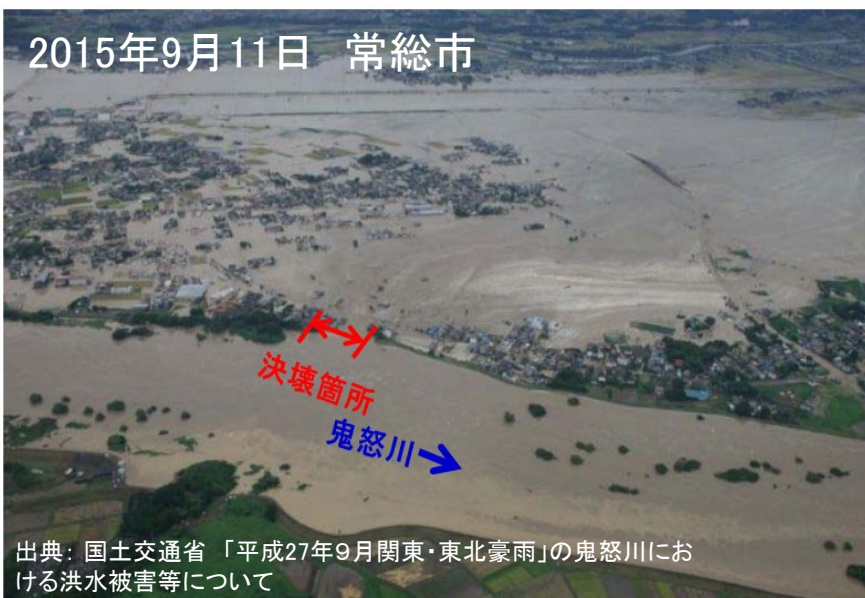
久保英二郎 修士 (工)
 濱田 拓也 修士 (工)
 船橋 昇治 博士 (工)
 銭 潮潮
 中安 正晃
 朝堀 泰明 修士 (工)
 小山 直紀 博士 (工)
 池内 幸司 博士 (工)
 山田 正 工博

近年、水災害の激甚化・頻発化が一般に指摘されている。その中で、避難指示等が出ているにも関わらず住民が**避難行動に移らない等の『避難の遅れ』**が発生している。

2015年関東・東北豪雨：常総市における避難遅れの状況※

避難の遅れ等により**約4300人もの住民が孤立した**。
そのうち**1,339人がヘリにより救助された**。

2015年9月11日 常総市



出典：国土交通省「平成27年9月関東・東北豪雨」の鬼怒川における洪水被害等について

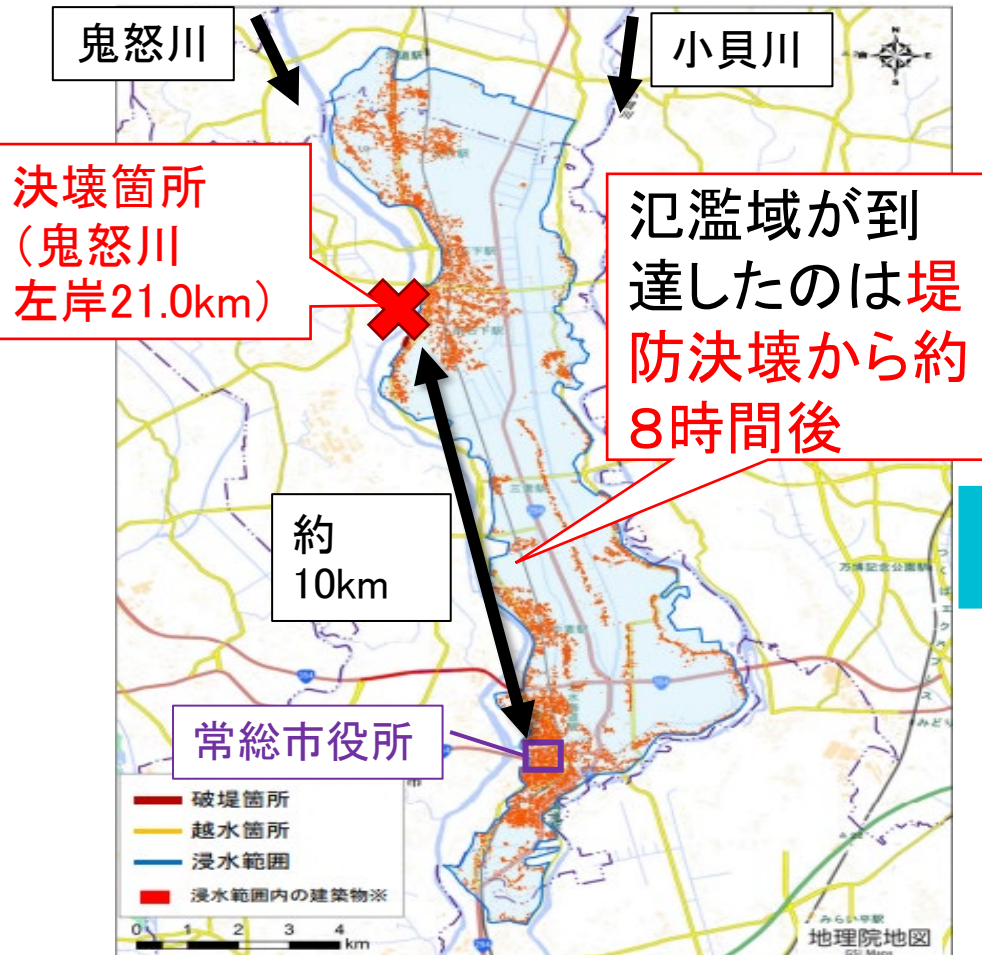


出典：朝日新聞デジタル

※出典：国土交通省：平成27年9月 関東・東北豪雨における洪水及び被害などの概要，https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouinkai/daikibohanran/1/pdf/daikibo1_04_s2.pdf

鬼怒川左岸21.0km地点の決壊後、その決壊地点から約10km離れた常総市役所に氾濫流が到達するまで**概ね8時間**を要している※。

※出典：佐山敬洋：鬼怒川氾濫による常総市周辺の浸水被害に関する研究・調査報告，2016年度 河川技術に関するシンポジウム 研究・調査報告，2016.6.
https://committees.jsce.or.jp/hydraulic01/system/files/05%20OS1sayama_0.pdf



堤防の決壊箇所から離れたエリア

決壊後から避難を開始したとしても、**氾濫水が到達するまでの時間には余裕があり**，適切な避難を促すことは重要である。

2019年台風19号(千曲川の決壊氾濫)に対する被災世帯調査では、避難勧告の内容に対して「**緊迫感が伝わってこない**」「**どのくらい危険な状況かわからない**」という回答が41.8%を占めている※。

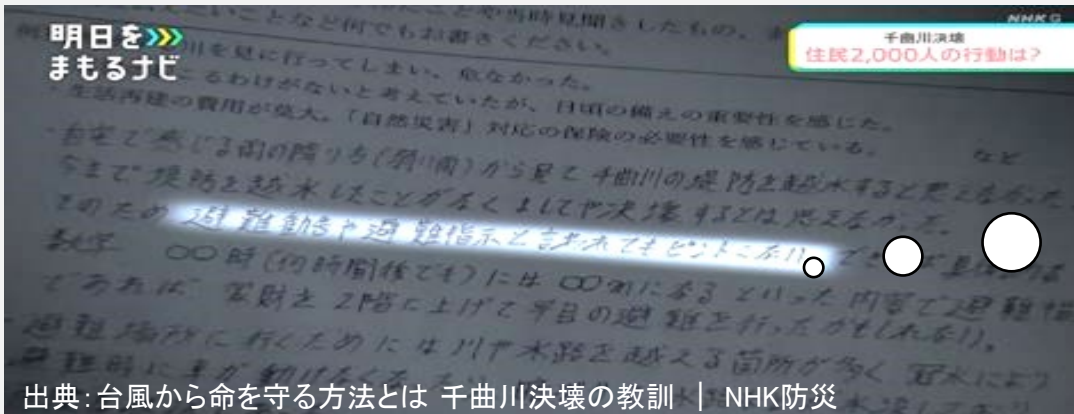


氾濫発生時に避難行動のきっかけとなる**リアリティのある情報提供**が重要

2019年台風第19号における避難行動と情報に関するアンケート※

- 千曲川氾濫の避難指示の内容について、
 - ・「緊迫感が伝わらず危険な状況が分かりにくい」： 41.8%
 - ・「自分の地区が対象か分かりにくい」： 33.5%

※出典:令和元年台風第19号における避難行動と情報に関するアンケート調査(千曲川・犀川大規模氾濫に関する減災対策協議会 情報提供検討部会 協力:一般財団法人河川情報センター)



避難勧告や避難指示といわれてもピンとこない

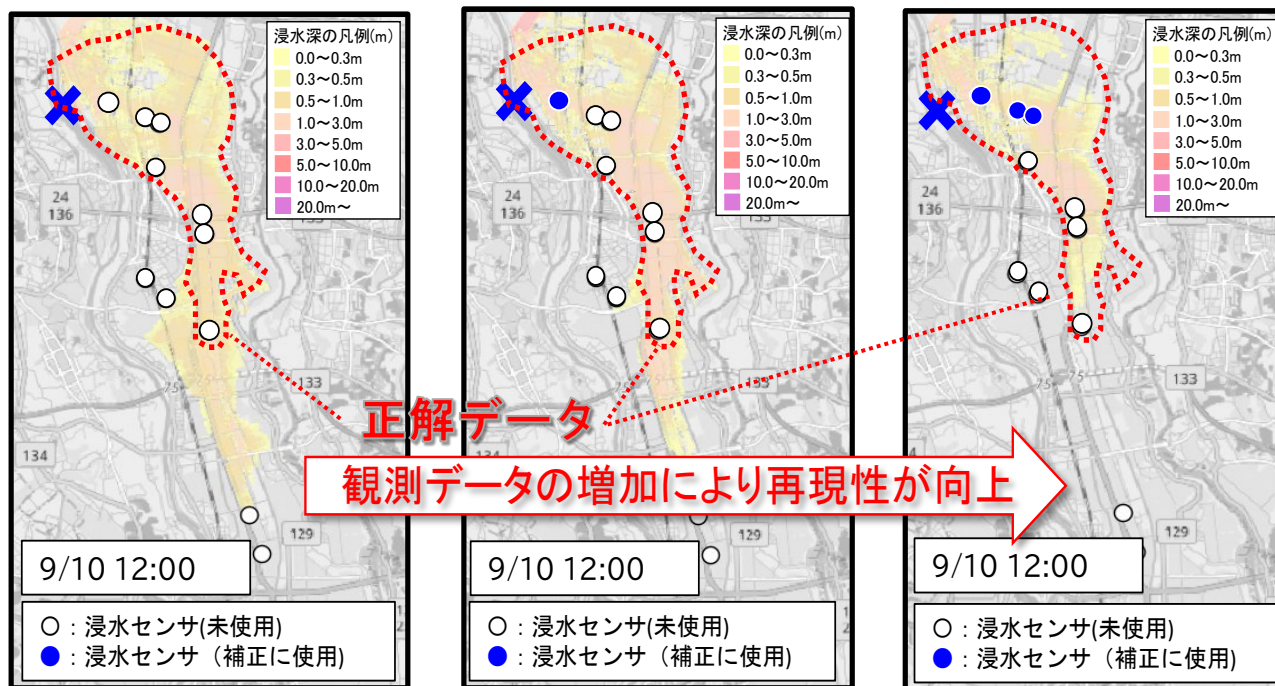
以上の経緯から、**外水氾濫発生後に迅速かつリアリティのある氾濫域の予測情報を生成するための計算システム『氾濫予測プロトタイプシステム』の研究開発を進めてきた※。**

※ 久保 英二郎，八巻 俊則，中太 大智，松崎 祐樹，鮎川 一史，船橋 昇治，朝堀 泰明，小山 直紀，池内 幸司，山田 正：種々の浸水情報を考慮したリアルタイム洪水氾濫予測システムの開発，土木学会論文集，第82巻，2026

【研究開発システム(仮)】

- 現在、発生している氾濫状況に即した予測情報を提供
- 再現性(リアリティ)を向上するため、現地浸水情報(浸水センサ等)を用いて予測計算を補正

氾濫予測プロトタイプシステム：計算イメージ



氾濫予測プロトタイプシステムの課題

- 氾濫予測プロトタイプシステムでは、再現性（リアリティ）向上のために、現地浸水情報を踏まえた補正計算（いわゆる最適化アルゴリズム）を実装している。
- ただし、最適化アルゴリズム自体は非常に多数提案されているものの、本システムに適した手法の選定にあたっては、十分な検討はできていない。



本研究の目的

- 本プロトタイプシステムに実装可能な最適化アルゴリズムを複数選定し、その中で予測性能（精度や頑健性）が優れている手法を選定する

2. 氾濫予測プロトタイプシステムの 概要と本研究における改良方針

～

3. 氾濫予測プロトタイプシステムの 改良

既往研究では、氾濫予測の**迅速性**及び**再現性(リアリティ)**に対する要求から、『**氾濫解析の高速化**』と『**現地浸水情報を用いた補正計算**』の両方から研究開発を実施し、プロトタイプシステムを構築した。

氾濫解析の**高速化**に関する研究

【研究方針】

氾濫予測を行う上で、計算速度を大いに向上できる/予測精度に頑健性がある手法を選定する。

【既往研究での整理】

・中央大学 小山らの提案する、氾濫予測に対する動的モード分解※による氾濫解析を実装。

現地浸水情報による**補正手法**の研究

【研究方針】

実際に取得可能な浸水情報を活用した氾濫解析の補正手法を検討する。

【既往研究での整理】

浸水センサの観測データや、SAR衛星画像/空撮画像解析を補正に用いることを想定する。

動的モード分解による高速化された氾濫解析結果を、現地情報に応じて補正し、現地の浸水状況に即したリアリティのある予測情報を構築する

【浅水流方程式による氾濫解析(浸水想定マニュアル第四版型※1)】

$$\gamma \frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma \frac{Q_x^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma \frac{Q_x Q_y}{h} \right) + g \gamma h \frac{\partial (h + z_b)}{\partial x} + g \gamma m^2 \frac{Q_x \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}}{h^{7/3}} + \frac{1}{2} C_D' (1 - \gamma) \frac{Q_x \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}}{h} = 0$$

$$\gamma \frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma \frac{Q_x Q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma \frac{Q_y^2}{h} \right) + g \gamma h \frac{\partial (h + z_b)}{\partial y} + g \gamma m^2 \frac{Q_y \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}}{h^{7/3}} + \frac{1}{2} C_D' (1 - \gamma) \frac{Q_y \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}}{h} = 0$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (\gamma Q_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\gamma Q_y)}{\partial y} = q$$

※1:国土交通省水管理・国土保全局河川環境課水防企画室, 国土技術政策総合研究所河川研究部水害研究室: 洪水浸水想定区域図作成マニュアル (第4版)

簡略・高速化

【DMDモデル※2】

$$h(t) = \varphi \exp\{\Omega t\} \varphi^T h_0$$

t : 時間、 $h(t)$: 時間 t における浸水深分布
 φ : DMDの空間モード、 $\exp\{\Omega t\}$: DMDの時間発展モード

$$h(t) = \theta_a \varphi \exp\{\Omega \theta_b (t - \theta_c)\} \varphi^T h_0$$

θ_a : 浸水深を調整するパラメータ

θ_b : 氾濫の拡大速度を調整するパラメータ

θ_c : 氾濫開始時刻を調整するパラメータ

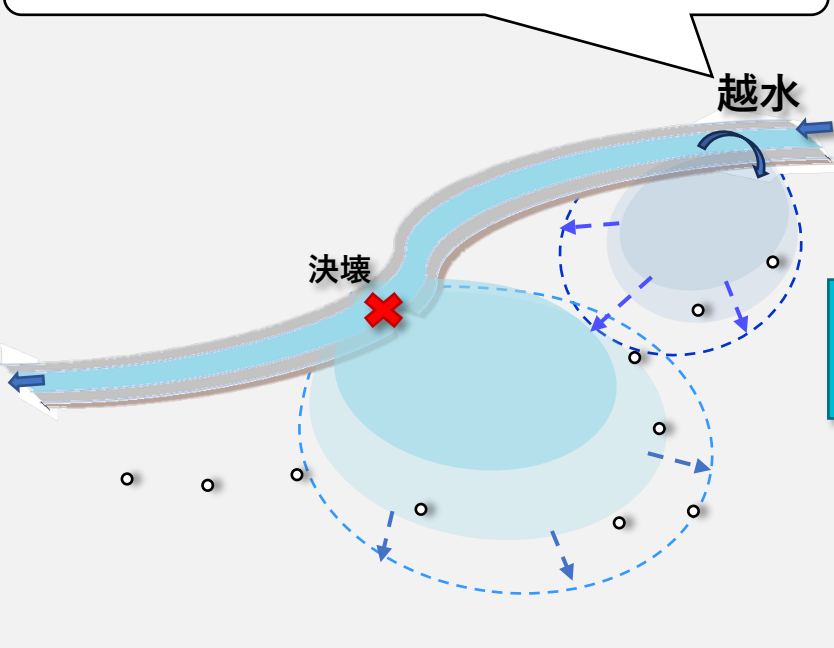
浸水センサの反応状況等を再現するようにパラメータを調整し、浸水予測を行う。

※2: 小山直紀; 山田朋人; 山田正. 動的モード分解を用いた超高速氾濫解析手法の提案. 河川技術論文集, 2024, 30: 459-464.

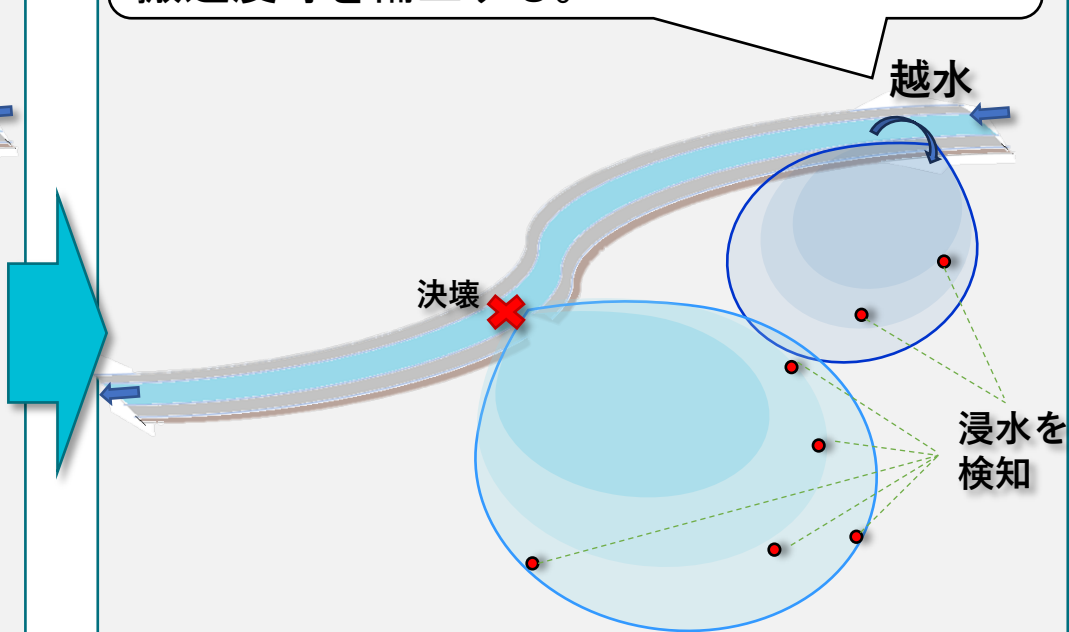
【現地情報を用いた補正計算について】

- 導入したパラメータに対して浸水センサの反応状況等を再現するように最適化計算を行うことで、現地浸水情報による氾濫計算の補正を実施
- パラメータの調整は応答曲面法を用いた最適化計算により実施

①DMDによる氾濫予測計算を実行



②浸水センサなどのデータより浸水深や伝搬速度等を補正する。

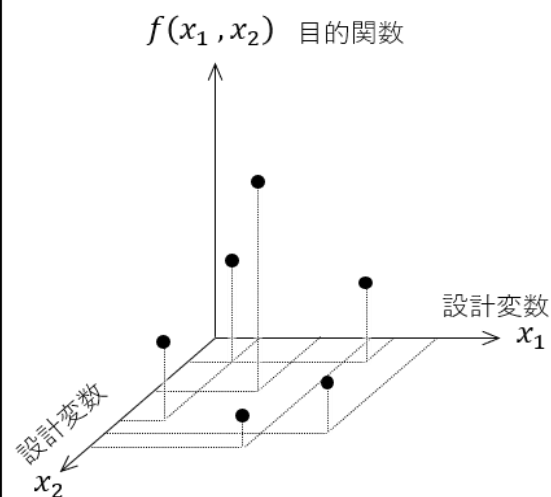


浸水センサは、同一洪水で初めて浸水したタイミングのみを把握できるものとする※。

【応答曲面法とは】

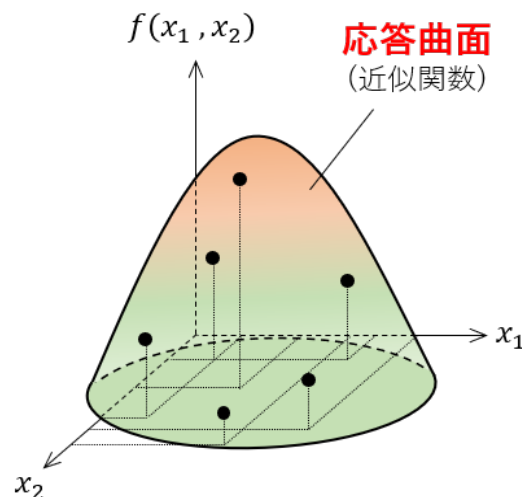
最適化計算において、説明変数・目的関数のサンプル値から近似曲面を生成し、最適化などを行う設計技法→この近似曲面を生成するために機械学習の一種である『ガウシアンプロセス(GP)』を採用した。

①実験データ



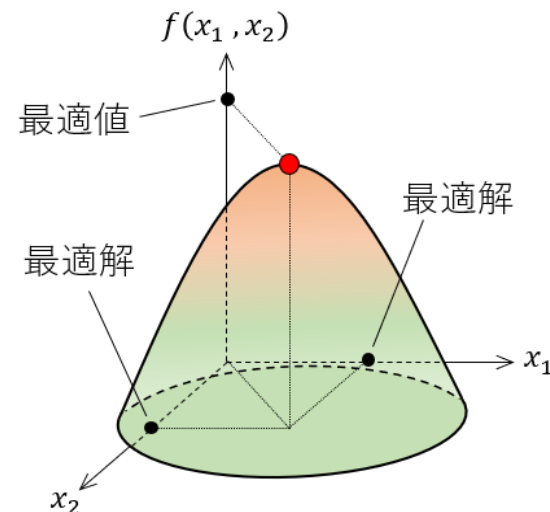
設計変数:2の場合のイメージ

②曲面フィッティング



多項式曲面などで近似曲面を生成する

③最適解の探索



制約付き非線形最適化問題

図出典：応答曲面法による最適化設計（第一回）応答曲面法の概要 - TECHNO OH, https://tech-oh.com/2022/04/22/rsm_1/

応答曲面法：Khuri, A. I., & Mukhopadhyay, S.: Response surface methodology. Wiley interdisciplinary reviews: Computational statistics, 2(2), pp.128-149, 2010.

ガウシアンプロセス：Seeger, M.: Gaussian processes for machine learning, International Journal of Neural Systems, Vol. 14 (02), pp. 69-106, 2004.

持橋大地, 大羽成征：ガウス過程と機械学習(機械学習プロフェッショナルシリーズ), 講談社, 2019.

【システムの改良方針】

現在実装している『応答曲面法:GP』&『最適化手法:GA』に代替可能な手法は複数存在する。応答曲面法による補正計算の枠組みは踏襲しつつ、複数の代替手法(計21手法)を比較検討する

応答曲面の生成(曲面フィッティング)手法

ガウシアンプロセス：RBFカーネル
GP(rbf kernel)

ガウシアンプロセス：5/2Matern
カーネルGP(5/2 Matern kernel)

逆距離荷重法(IDW)

ニューラルネットワーク：
中間層[64 × 32](NN-shallow)

ニューラルネットワーク：
中間層[128 × 64 × 32](NN-deep)

最適化計算の手法

遺伝的アルゴリズム(GA)

シミュレーテッドアニーリング
(SA)

ネルダーミード法(NEL)

パウエル法 (Powell)

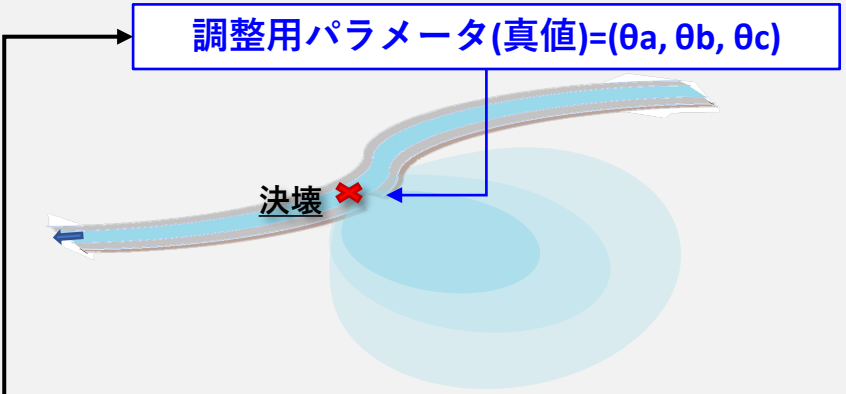
ベイズ最適化 = GP(rbf kernel) + 期待改善量 (EI) に基づく補正 (BO)

4. 双子実験による 各補正計算手法の比較評価

氾濫予測プロトタイプシステムを用いて双子実験を行い、本システムに実装する最適化計算手法の適用性を比較する。

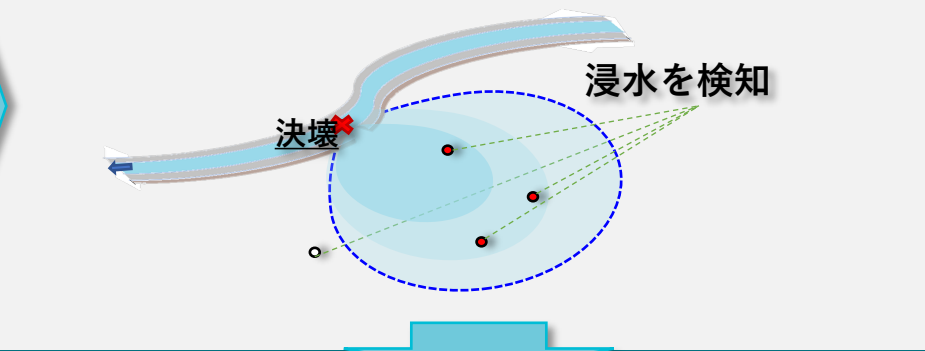
手順①：正解データ/真値条件の作成

氾濫予測プロトタイプシステムに対して、適当なパラメータを正解データとして与えて、氾濫解析を行う



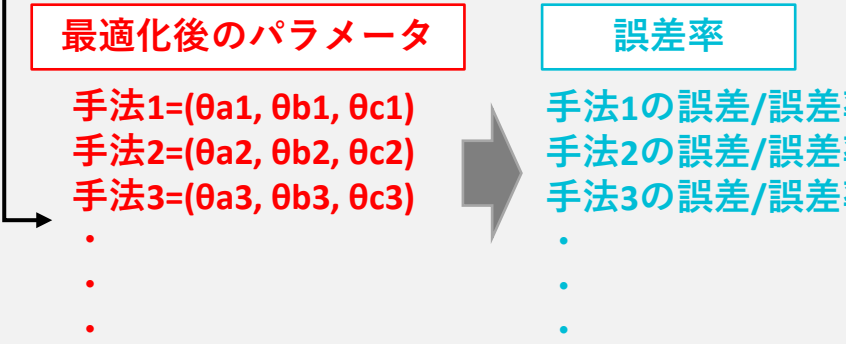
手順②：仮想観測データの作成

氾濫原に(仮想的な)浸水センサを設置。正解データに基づき、仮想的な観測データを作成する。また一定時間後には、浸水域の面情報が取得可能とする。



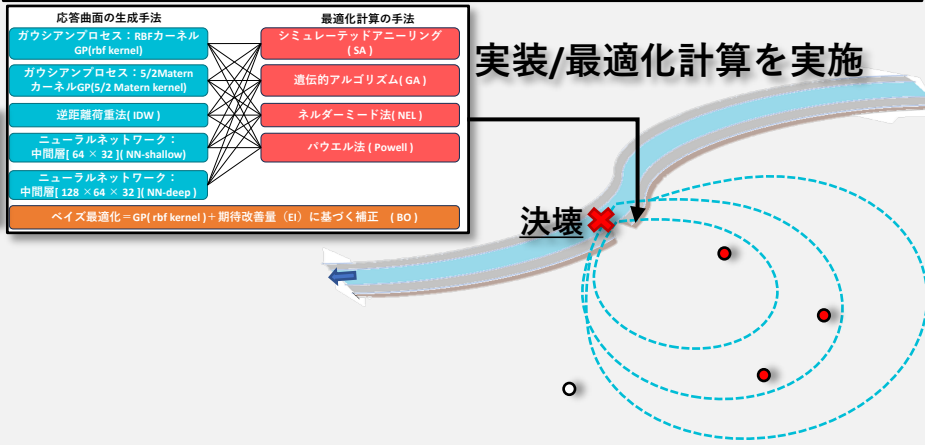
手順④：最適化性能の評価

手法別/観測状況別で最適化計算により探索された調整用パラメータの値を、真値条件(①)と比較して精度(誤差/誤差率)を分析する。



手順③：各種計算手法の実装/補正計算の実施

各種計算手法を実装し、観測データに併せて補正計算



4. 双子実験による各補正計算手法の比較評価

その他、双子実験の条件について

対象範囲/その他、実験条件

- 対象範囲: 帯広市街地を対象氾濫原とし、十勝川の64.8kp地点からの氾濫を想定
- 氾濫流の進行方向に対して、1kmピッチ間隔で浸水センサを仮想的に配置。氾濫発生5時間後には、浸水域の面情報を取得
- 応答曲面生成のためのサンプリング計算は1000回。各手法はランダム性を有するため、各手法5回計算を行いその絶対値平均から誤差(率)を分析する

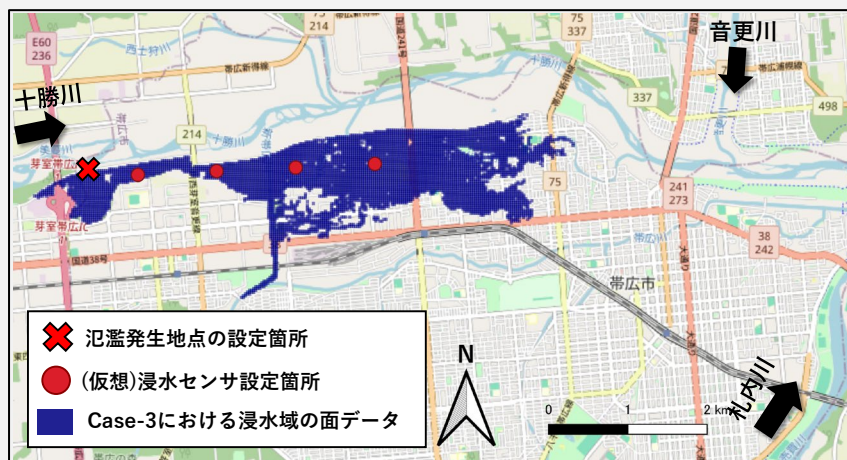


表-1：調整パラメータ：正解値

浸水深の調整パラメータ(θ_a)	氾濫の拡大速度の調整パラメータ(θ_b)	氾濫発生時刻の調整パラメータ(θ_c)
2.0倍	0.9倍	予測時間：48時間の6.25%(3時間)の遅延

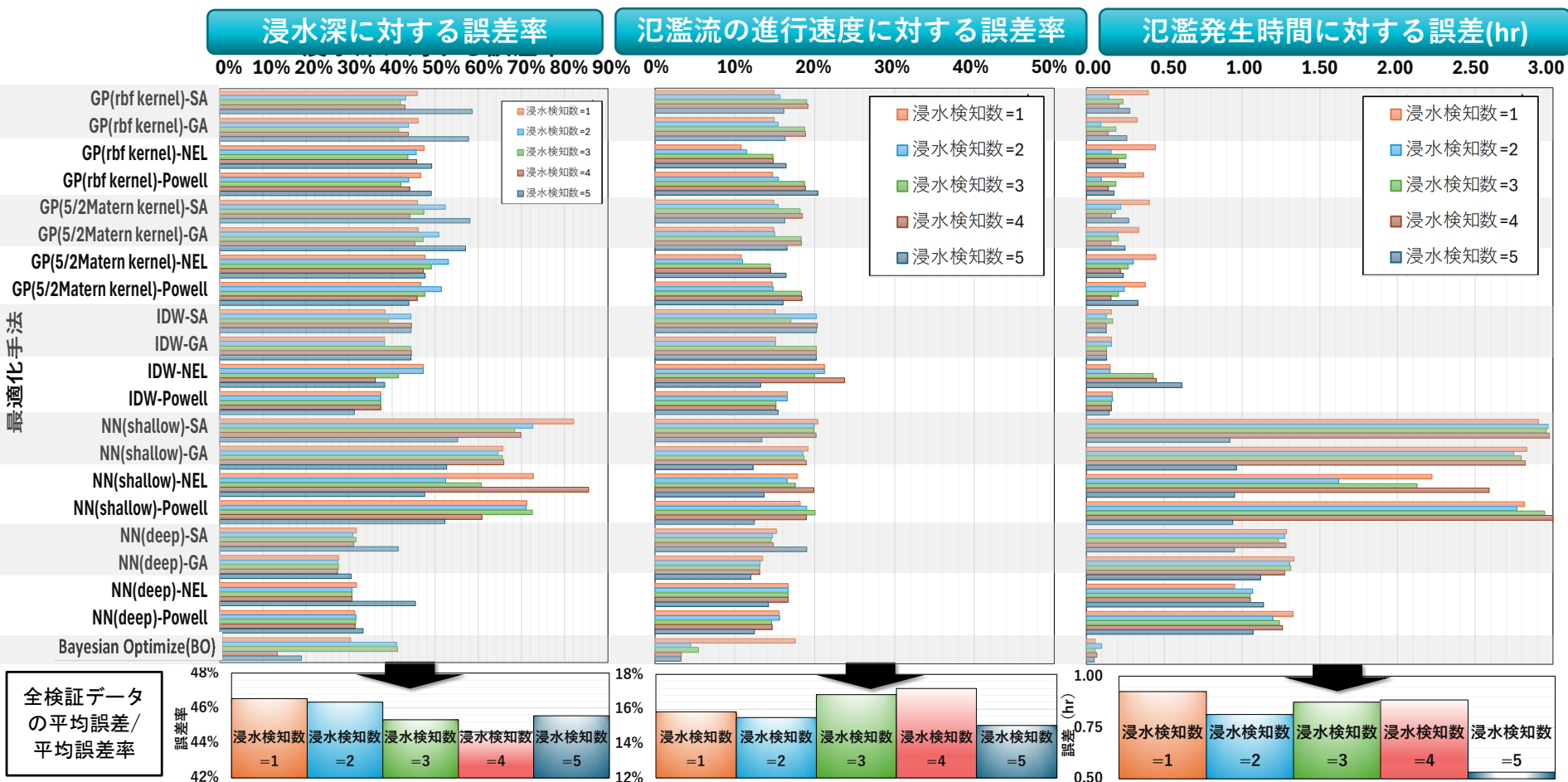
表-2：各種最適化手法の計算条件

最適化手法	パラメータ等、検討条件
SA	初期温度: 5230.0 (Scipyデフォルト値) 徐冷関数: Cauchy-Lorentzの訪問分布により温度を更新。 訪問分布のパラメータ $q_v = 2.62$ とする (Scipyデフォルト値)
GA	個体数:500, 世代数:50, 交差率:90%, 突然変異率:10% (既往文献の通りとする)
NEL	反射係数:1.0, 拡大係数:2.0, 収縮係数:0.5, 縮小係数:0.5 とする (Scipyデフォルト値であり文献の通り)
応答曲面の生成	サンプリング計算回数は1000回とする。
全手法共通	- 各補正パラメータの探索範囲は以下の通り $\theta_a \in [0.5, 4.0]$ $\theta_b \in [0.75, 1.25]$ $\theta_c \in [-0.25, 0.25]$ - NEL/Powellは探索初期地点として $(\theta_a, \theta_b, \theta_c) = (1.0, 1.0, 0.0)$ を採用する。 - その他のパラメータは既往文献と同様とする

表-3：計算機のスペック

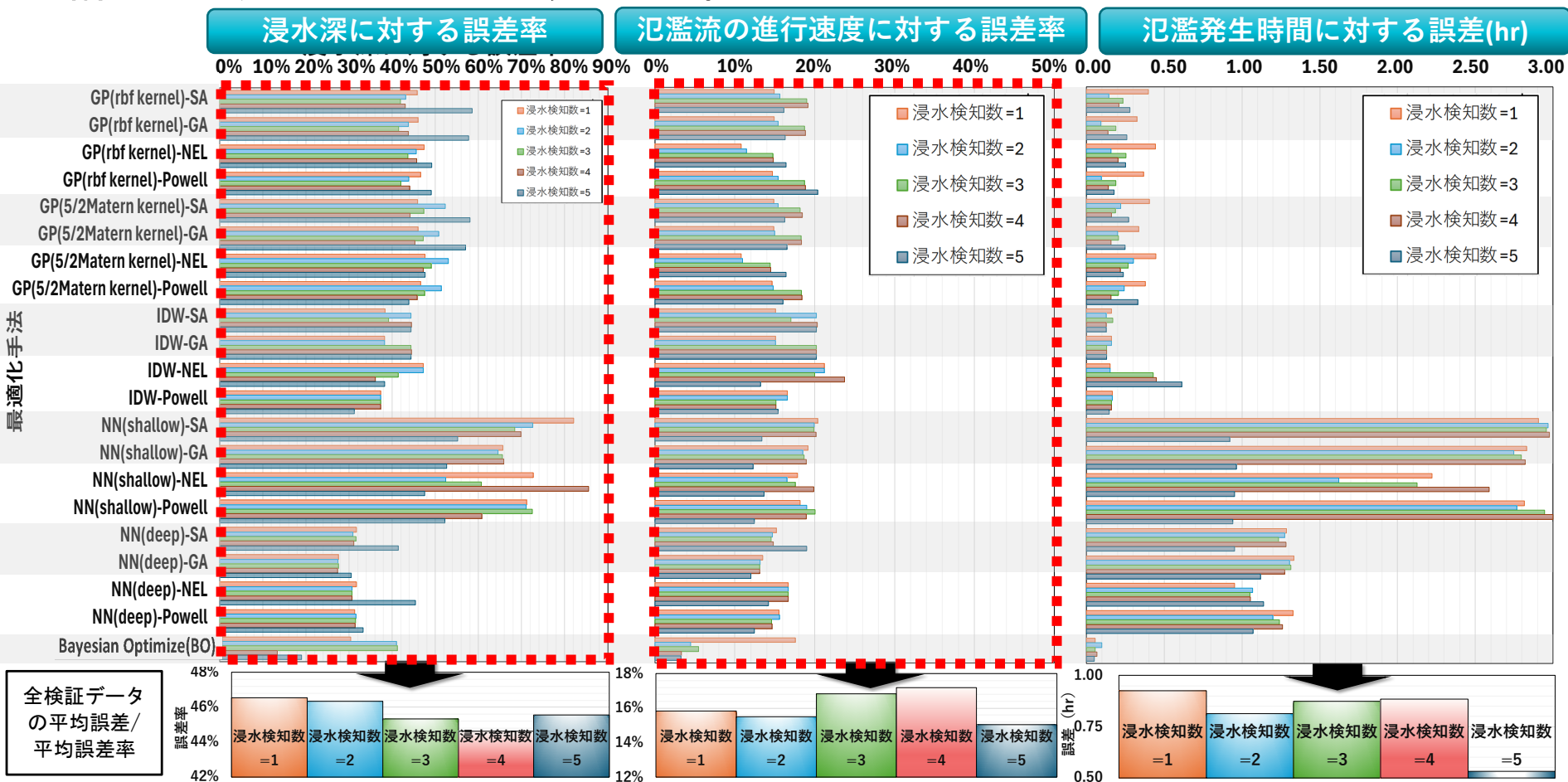
項目	内容
CPU	Intel Xeon Gold 6254×2
RAM	376GB

- 各最適化計算で算定された最適化パラメータと、事前に設定した真値パラメータとの絶対値誤差(率)の平均値を整理した。
- なお、現地からの浸水情報(浸水センサ、浸水面データ等)の取得状況に応じて最適化計算結果も異なることが想定されることから、浸水情報の数(浸水検知数) $=1 \sim 5$ となる場合のそれぞれで、最適化計算を実施。



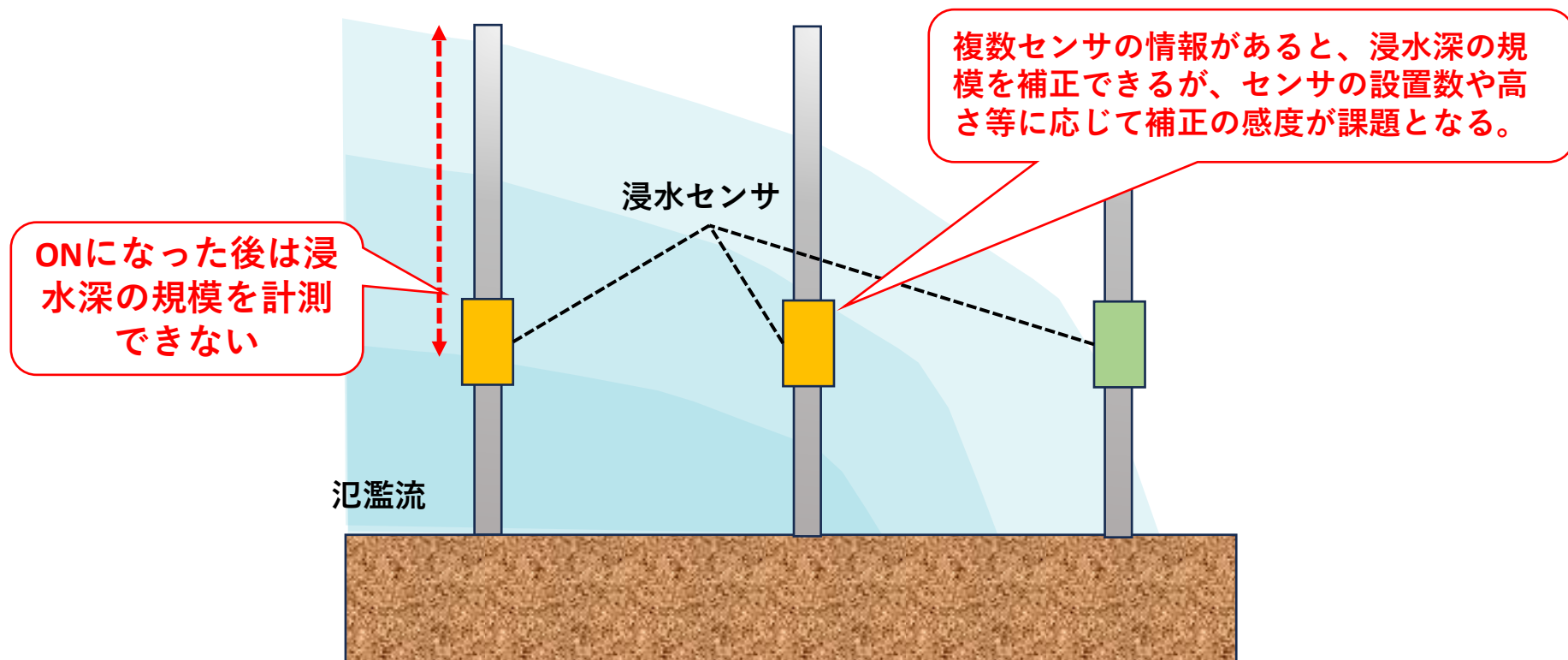
【パラメータの補正傾向について】

- 『浸水深に対する誤差率』は、進行速度に対する誤差率よりも大きく評価される傾向がある。
- 浸水センサの観測データはセンサのON/OFF(浸水あり/なし)のみを把握するものである。複数地点で浸水を検知していなければ浸水深の補正に対して、適切な補正となりづらいことが示唆される。



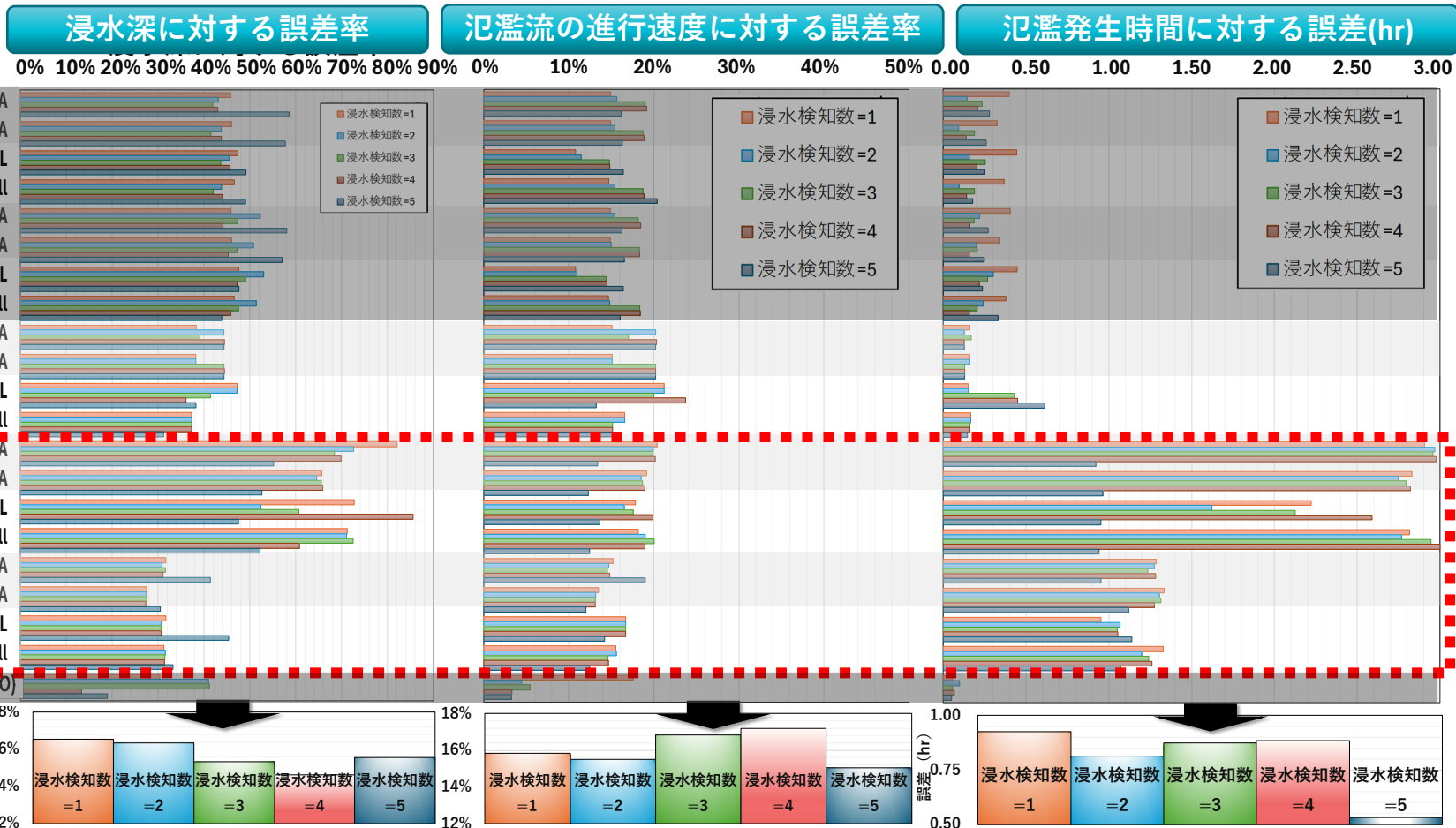
【パラメータの補正傾向について】

- 『浸水深に対する誤差率』は、進行速度に対する誤差率よりも大きく評価される傾向がある。
- 浸水センサの観測データはセンサのON/OFF(浸水あり/なし)のみを把握するものである。複数地点で浸水を検知していなければ浸水深の補正に対して、適切な補正となりづらいことが示唆される。



【各手法の補正計算結果について】

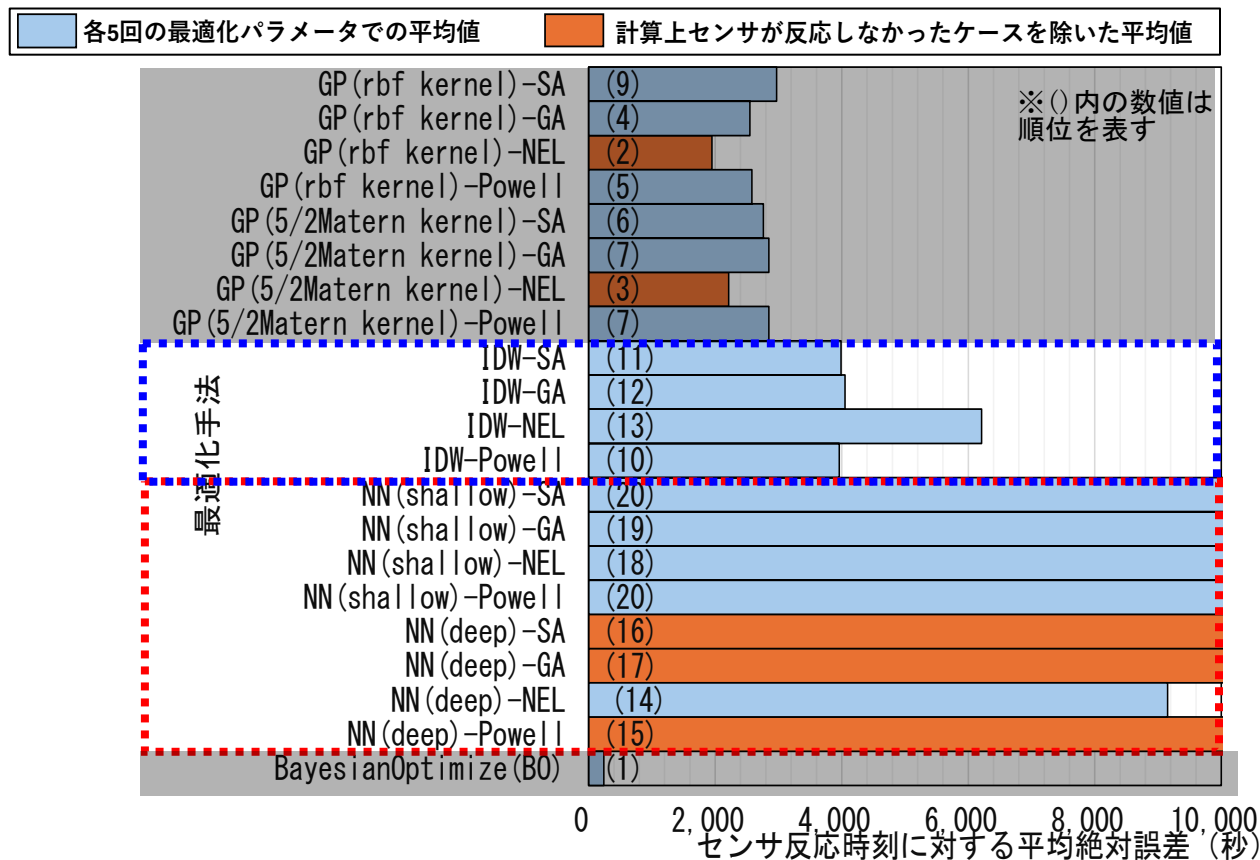
- 高い表現力を有するニューラルネット(NN)による応答曲面では、他の手法として比較的大きな誤差が確認された。
- 応答曲面を生成するためのサンプリング計算数=1000回という条件下では、表現力の高さは必ずしも優位ではない、と言える。
- 簡易的な逆距離荷重法(IDW)による応答曲面は、比較的に精度が良好といえる。



【各手法の補正計算結果について】

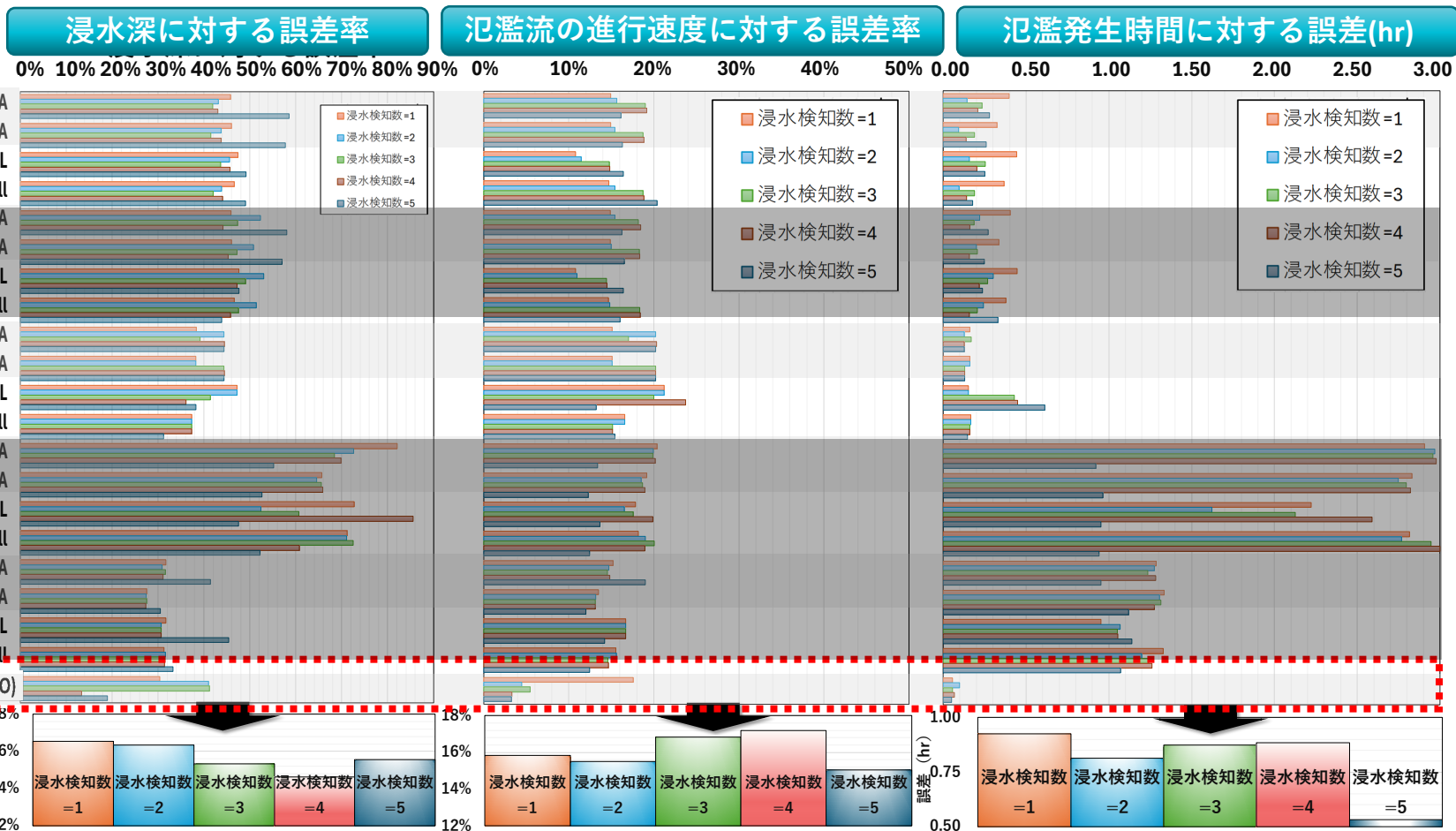
- 高い表現力を有するニューラルネット(NN)による応答曲面では、他の手法として比較的大きな誤差が確認された。
- 応答曲面を生成するためのサンプリング計算数=1000回という条件下では、表現力の高さは必ずしも優位ではない、と言える。
- 簡易的な逆距離荷重法(IDW)による応答曲面は、比較的に精度が良好といえる。

疑似観測データ（浸水センサ）に対する、観測時刻誤差(sec)



【各手法の補正計算結果について】

- ただしIDWや既存手法であるGP(rbf-kernel)での最適化計算よりも、ベイズ最適化(BO)は精度が良好であった
- BOはサンプリング計算の過程で応答曲面を逐次更新し、応答曲面の情報から次ステップでのサンプリング点を効率的に探索する最適化手法
- 計算量の制約がある中で、本検討条件の中では最も優位な精度であると言える。



5. まとめ

- 本研究では、複数の応答曲面法／最適化手法を氾濫予測プロトタイプシステムに実装した上で、双子実験により各手法の性能を比較した.
- 比較の結果、既存手法であるGP(rbf kernel)-GAは必ずしも優位ではなく、BOが最も精度が良い結果となった.
- 一方で浸水センサのデータでは、浸水深の調整パラメータは誤差が生じやすいことが示唆された. システムを運用する上では、浸水センサ等の配置や設置数が、実装水準の向上のために必要であるといえる.
- なお本補正計算は10分以内に処理が完了できている。浸水センサの更新頻度が10分であることを踏まえると概ね迅速性を有しているといえる.

- 1) 国土交通省：水害リスクライン, <https://frl.river.go.jp/>
- 2) 国土交通省：「平成27年9月関東・東北豪雨」に係る洪水被害及び復旧状況について, 2017.4.
https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000687586.pdf
- 3) NHK放送文化研究所：放送研究と調査（2016）第66巻第8号, 2016.8.https://www.nhk.or.jp/bunken/research/domestic/pdf/20160801_6.pdf
- 4) 千曲川・犀川大規模氾濫に関する減災対策協議会：第6回（R2.06.11(木)Web会議）資料, 2020.6.
<https://www.hrr.mlit.go.jp/chikuma/bousai/gensai/siryou/6/4-1.pdf>
- 5) 佐山敬洋：鬼怒川氾濫による常総市周辺の浸水被害に関する研究・調査報告, 2016年度河川技術に関するシンポジウム研究・調査報告, 2016.6. https://committees.jsce.or.jp/hydraulic01/system/files/05%20OS1sayama_0.pdf.
- 6) 久保英二郎, 八巻俊則, 中太大智, 松崎祐樹, 鮎川一史, 船橋昇治, 朝堀泰明, 小山直紀, 池内幸司, 山田正：種々の浸水情報を考慮したリアルタイム洪水氾濫予測システムの開発, 土木学会論文集, 第82巻, 2026.
- 7) Schmid, P. J.: Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 656, pp. 5-28, 2010.
- 8) 小山直紀, 山田朋人, 山田正：動的モード分解を用いた超高速氾濫解析手法の提案, 河川技術論文集, 第30巻, 2024.
- 9) Holland, J. H.: Genetic algorithms, Scientific American, Vol. 267 (1), pp. 66-73, 1992.
- 10) Seeger, M.: Gaussian processes for machine learning, International Journal of Neural Systems, Vol. 14 (02), pp. 69-106, 2004.
- 11) Scipy : <https://scipy.org/>
- 12) Scikit-learn : <https://scikit-learn.org/stable/>
- 13) Deap : <https://deap.readthedocs.io/en/master/>
- 14) Optuna : <https://optuna.org/>
- 15) 今村秀明, 松井孝太：増補改訂版 ベイズ最適化: 一適応的実験計画の基礎と実践一, 近代科学社, 2025.
- 16) Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. Jr. and Vecchi, M. P.: Optimization by simulated annealing, Science, Vol.220, pp.671-680, 1983.
- 17) 喜多一：シミュレーテッドアニーリング, 日本ファジィ学会誌, Vol.9(6), pp.870-875, 1997.
- 18) GAO, Fuchang; HAN, Lixing. Implementing the Nelder-Mead simplex algorithm with adaptive parameters. Computational Optimization and Applications, 2012, 51.1: 259-277.
- 19) POWELL, Michael JD. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives. The computer journal, 1964, 7.2: 155-162