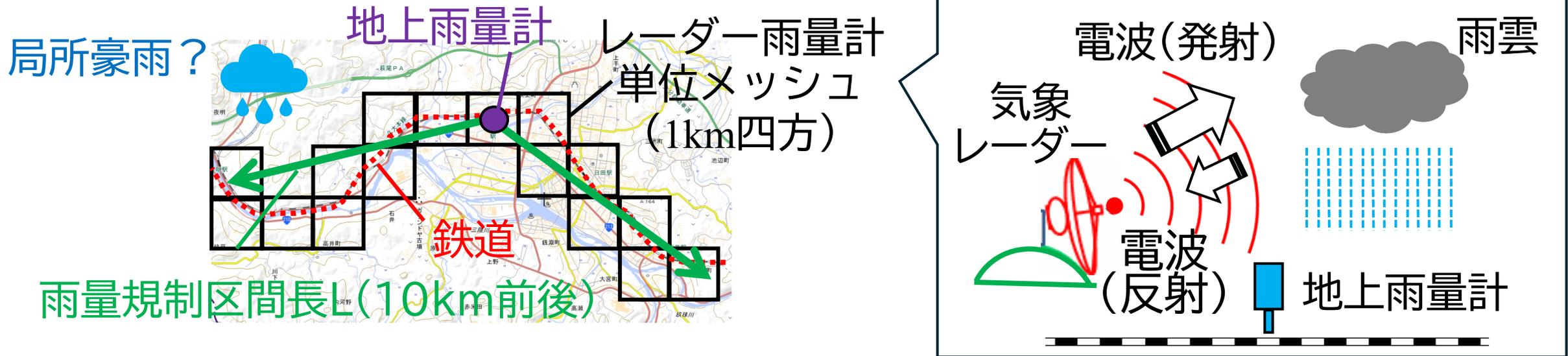


レーダー雨量計および浸透流解析を 活用した降雨時運転規制の高度化

防災技術研究部 地盤防災研究室
主任研究員 高柳 剛

降雨時運転規制(運転中止)の課題

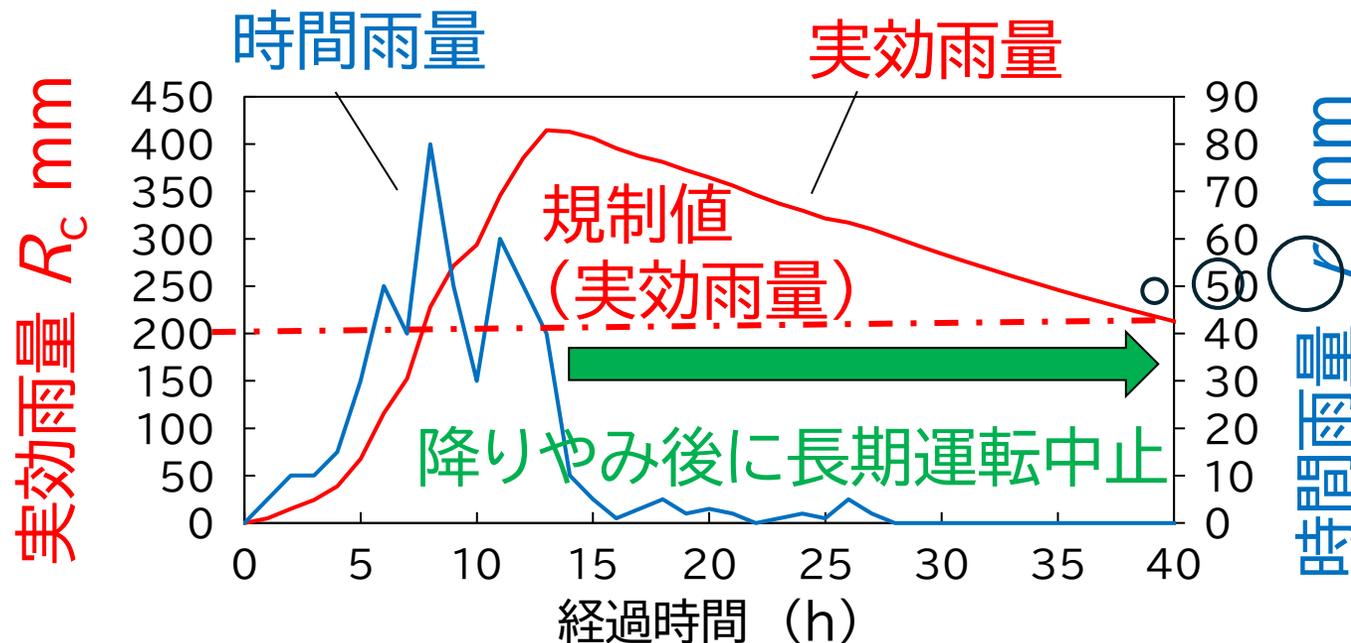
- 地上雨量計による定点観測では**局所豪雨**を見逃す場合あり
- **レーダー雨量計**は面的な雨量が得られる一方、**規制時間が増加する懸念**
- 安定・安全輸送と両立する**レーダー雨量計用の規制値の設定法**が望まれる



地上雨量計と雨量規制区間，レーダー雨量計との関係性の概念図

降雨時運転規制(運転再開)の課題

- 強雨で**累積的雨水量指標**(実効雨量など)が規制値を大幅に超過した場合
⇒ 指標が閾値以下に回復するまで**運転中止が長期化**
- 降雨の作用に対する**地盤の水分応答の実態**に基づく運転再開判断手法が必要



運転規制発令が長期化する場合の例

- 研究構成
- 地上雨量計の区間代表性の検証
- レーダー雨量規制値の簡易設定手法
- 浸透流解析を用いた強雨降りやみ後の運転再開判断手法
- 簡易現場透水試験手法の開発
- まとめ
- 成果の活用
- 参考文献

強雨時の運転中止手法

地上雨量計の区間代表性の検証

- ・レーダー雨量計の精度検証
- ・地上雨量計から離れた位置の雨量差分



レーダー雨量計の活用

レーダー雨量規制値の 簡易設定手法

- ・具体的な規制値の設定手法の提案

強雨後の運転再開手法

浸透流解析を用いた強雨 降りやみ後の運転再開判断手法

- ・浸透流解析の妥当性検証
- ・運転再開判断手法の提案



浸透流解析への反映

簡易現場透水試験の開発

- ・地盤の飽和透水係数の推定手法

地上雨量計の区間代表性の検証

レーダー雨量計と地上雨量計の比較(精度検証)

- 対象地域: A線沿線
- 地上雨量計: 5箇所設置(鉄道延長30km)
- 分析期間: 2024/07/25 0:00~
07/26 12:00 ※2024年山形・秋田豪雨
- レーダー雨量: CバンドMP



地上雨量計設置位置

出典(加筆): 地理院地図, <https://maps.gsi.go.jp/>



レーダ雨量計配置図

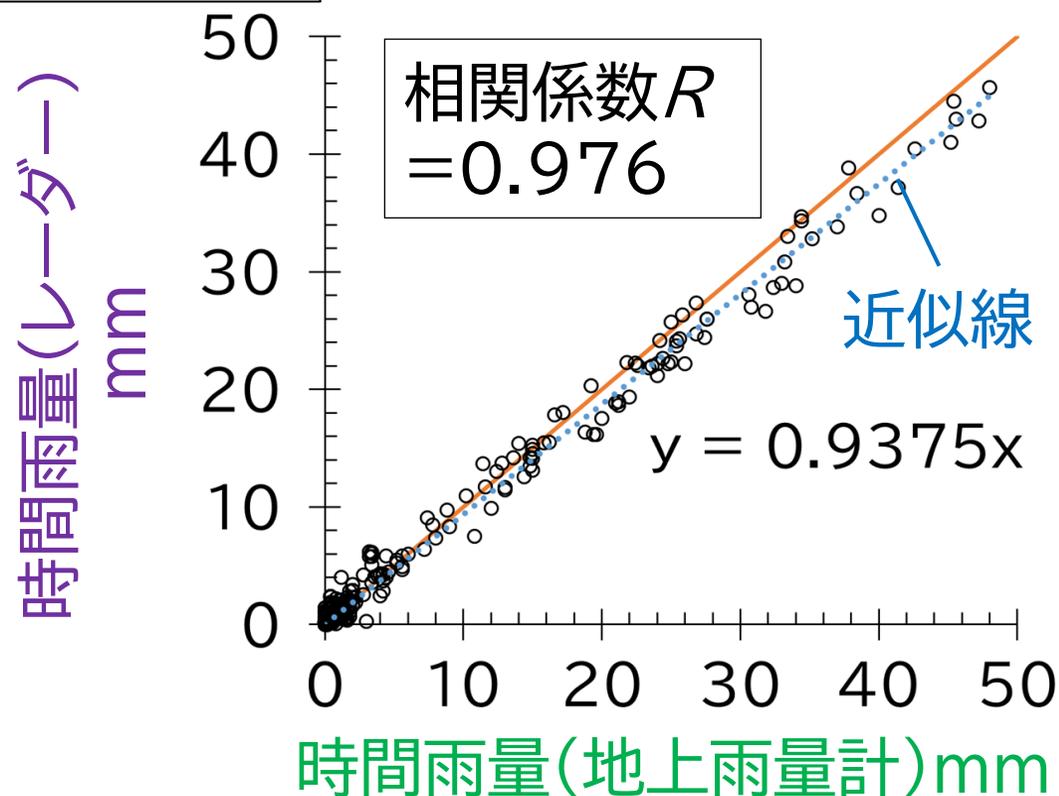
出典: 国土交通省,
https://www.mlit.go.jp/tec/tec_fr_000040.html

地上雨量計の区間代表性の検証

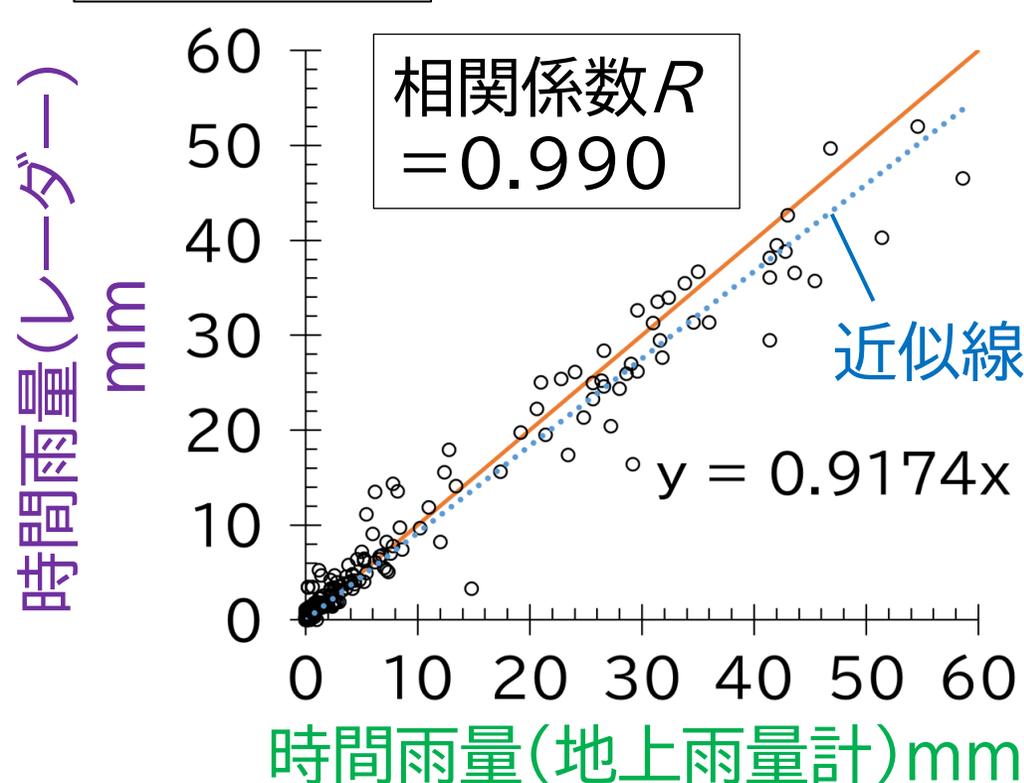
レーダー雨量計と地上雨量計の比較(精度検証)

縦軸:レーダー雨量
横軸:地上雨量

雨量計e



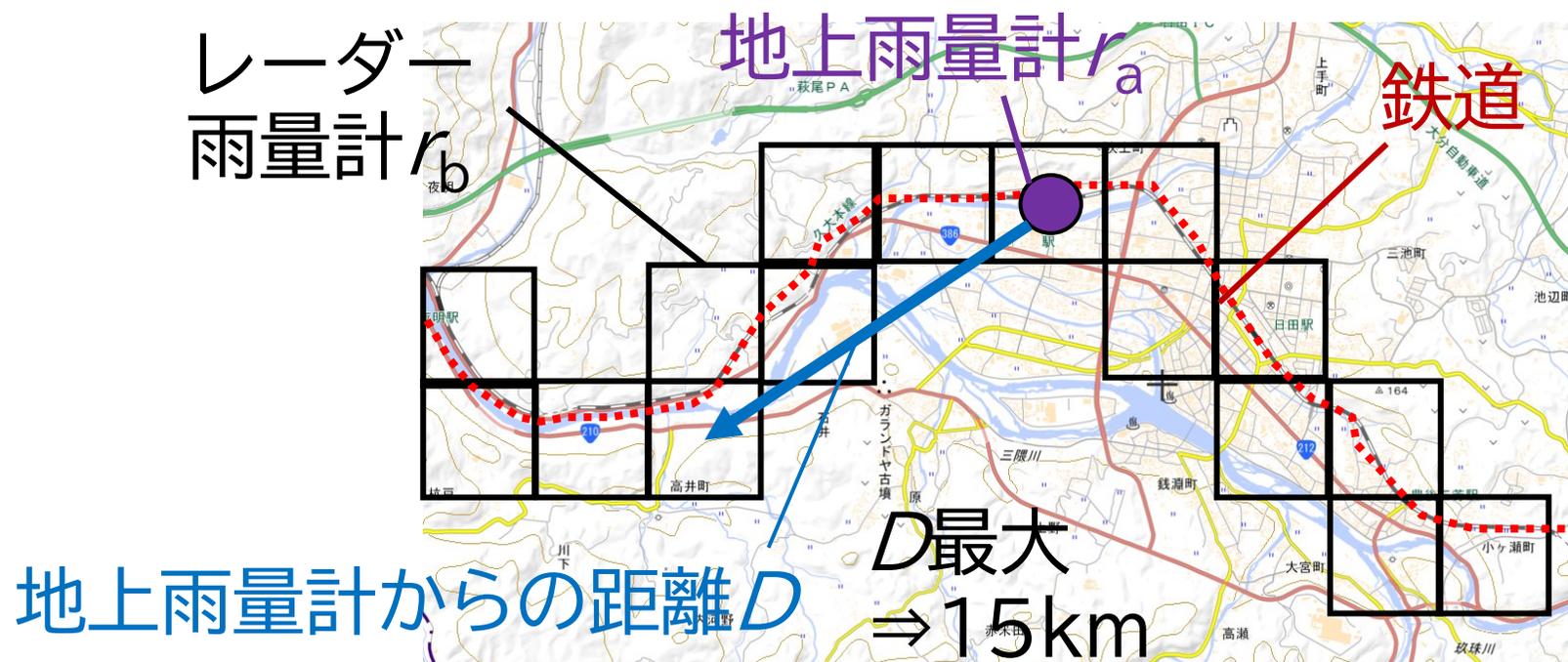
雨量計a



⇒再現期間100年以上の豪雨でもレーダーに一定の精度を期待できる

地上雨量計の区間代表性の検証

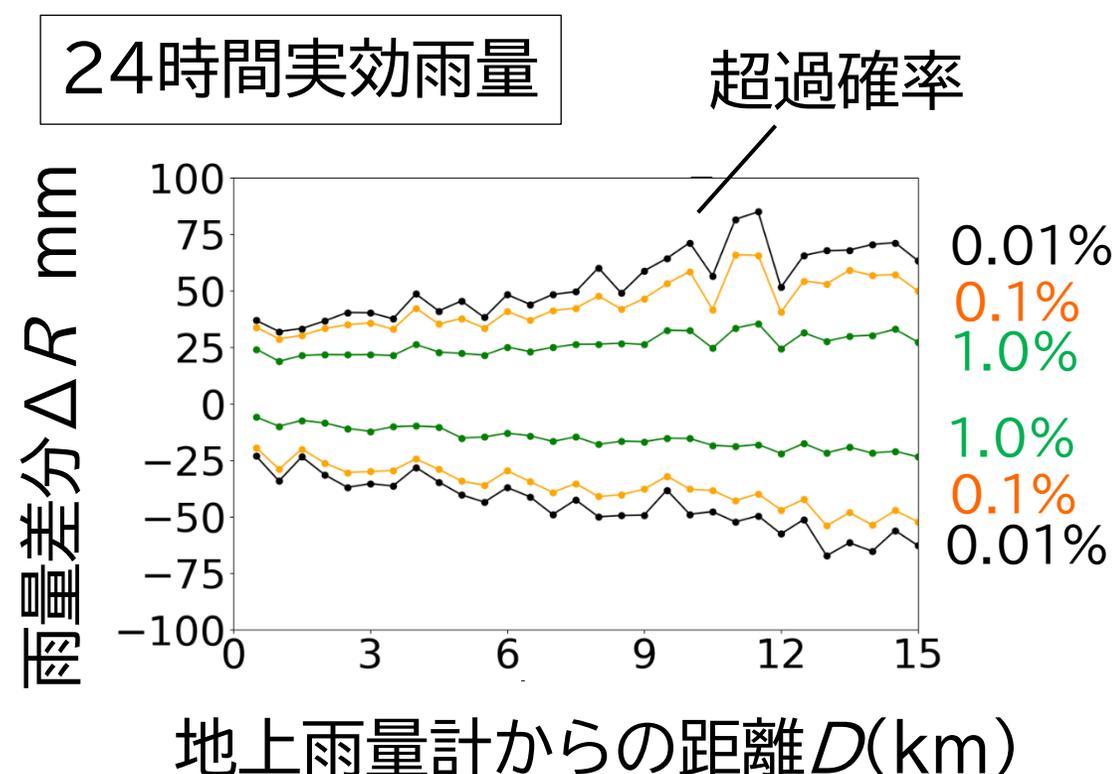
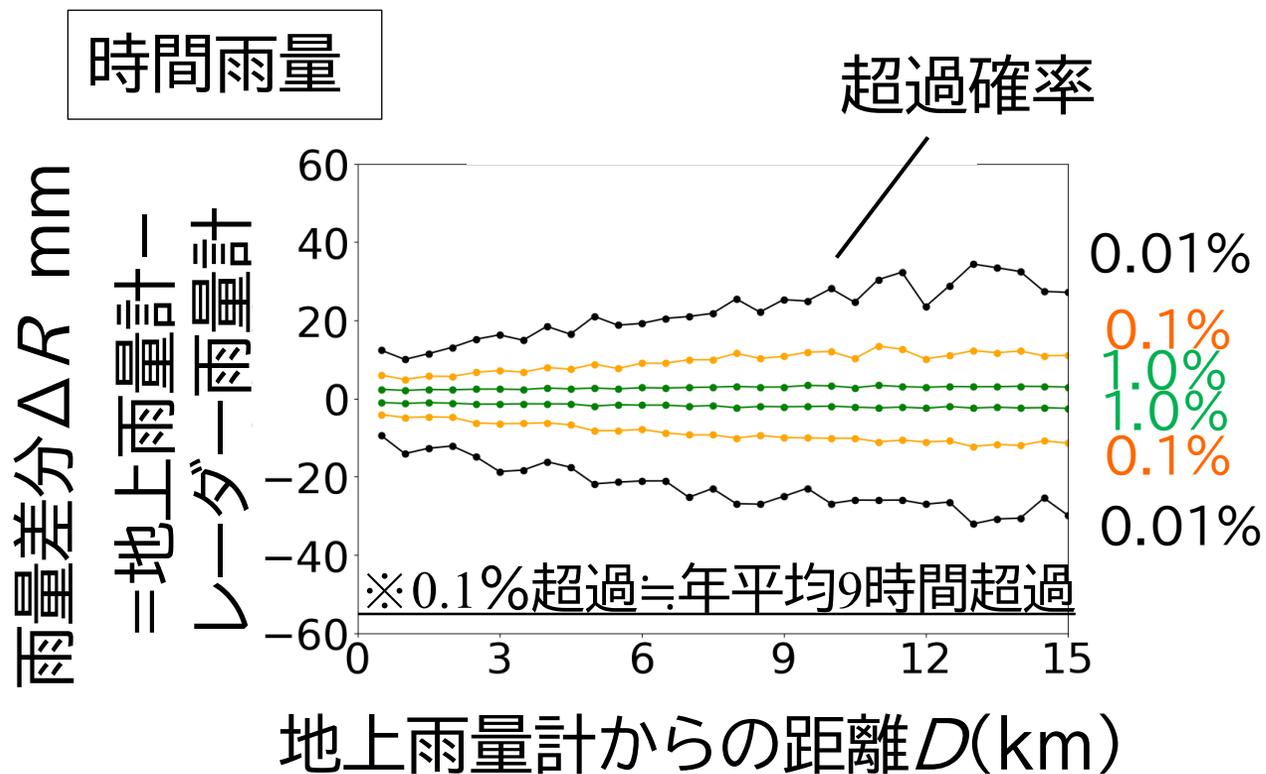
- 地上雨量計からの距離 D により生じる雨量差分 ΔR の実態を把握
- 雨量差分 $\Delta R = \text{地上雨量計 } r_a - \text{レーダー雨量計 } r_b$
- 雨量差分 ΔR の平均的な発生確率を分析(九州・四国12か所, 5年間)



地上雨量計からの距離 D の概念

地上雨量計の区間代表性の検証

地上雨量計からの距離 D と雨量差分 ΔR の関係(九州・四国平均)



雨量差分 ΔR は距離 D に応じて増加し、
運転規制の空振り・見逃し原因となる実態を把握した

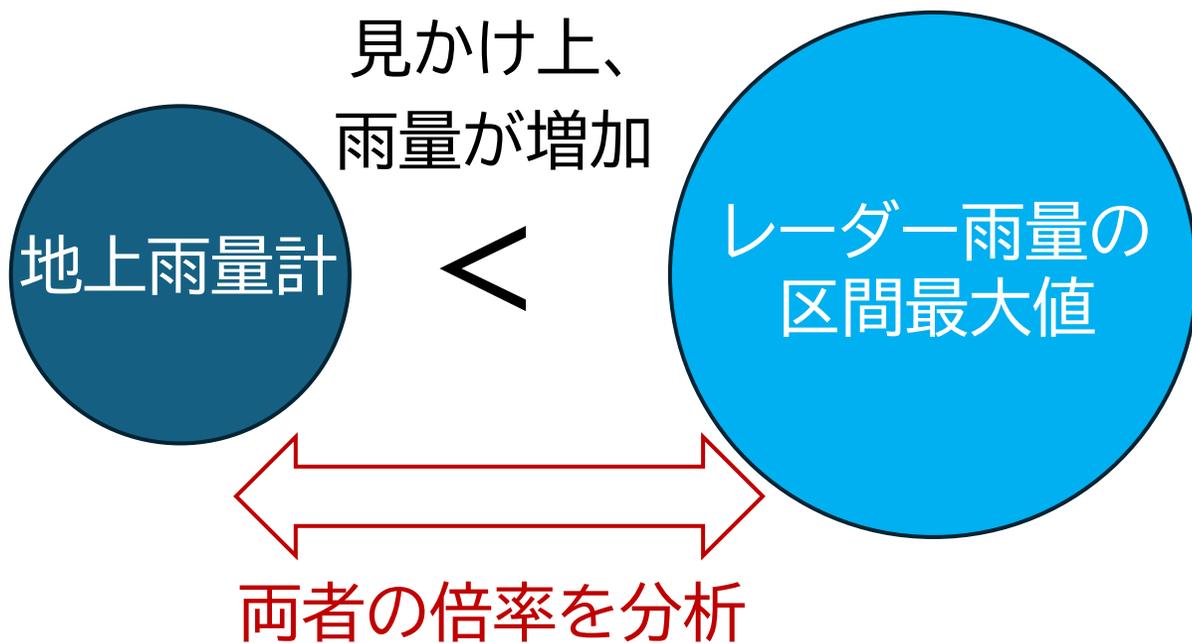
レーダー雨量規制値の簡易設定手法

レーダー雨量による運転規制運用の想定

規制区間内のメッシュ1つ以上が規制値を超過

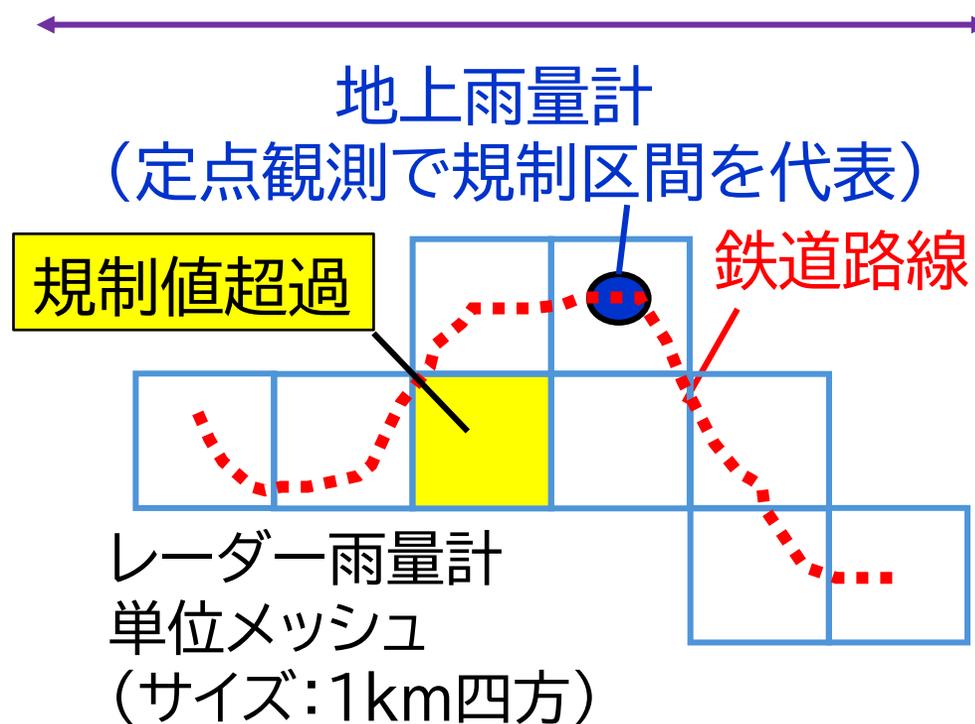
⇒規制区間全体に規制が発令

レーダー雨量の区間最大値で運転規制を判断



レーダー雨量の運転規制値の設定に利用

雨量規制区間長 L



雨量規制区間、地上雨量計、レーダー雨量計との関係性に関する概念図

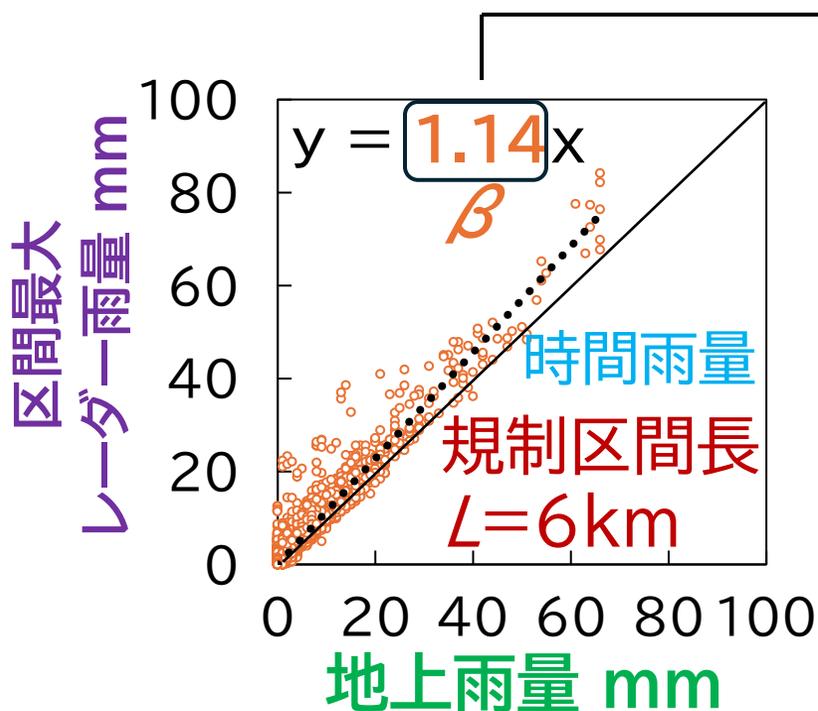
レーダー雨量規制値の簡易設定手法

レーダー雨量規制値の簡易設定手法

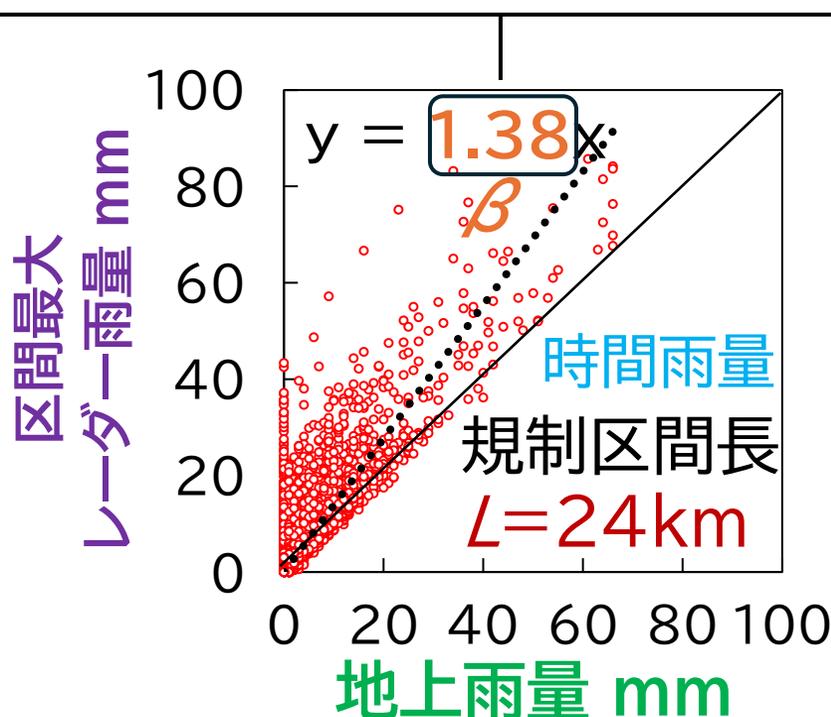
雨量規制区間 L (km) に応じて設定

レーダー雨量規制値 = 地上雨量計の規制値 \times 換算倍率 β

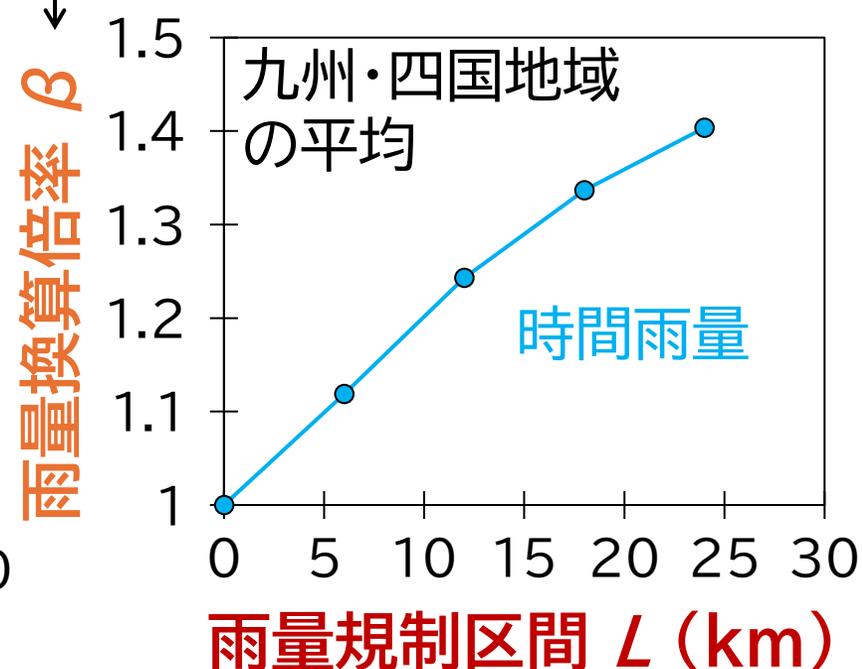
見かけ上の雨量の増加倍率 (雨量換算倍率 β) を複数の雨量規制区間 L の条件で算出



雨量換算倍率 β の算出方法の概念



雨量規制区間 L と雨量換算倍率 β



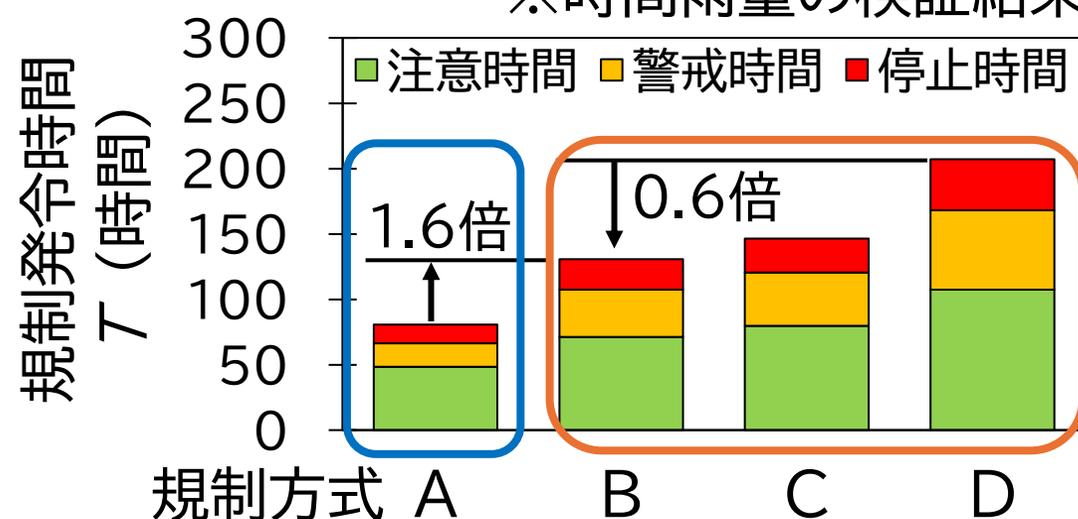
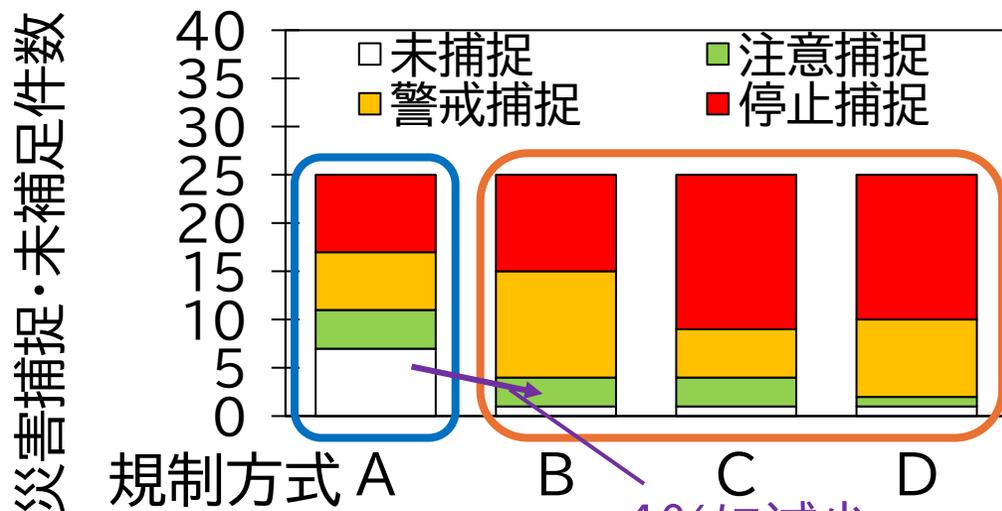
レーダー雨量規制値の簡易設定手法

提案手法の妥当性の検証

既往手法と提案手法の災害捕捉件数・未補足件数と規制発令時間を算出

期間:2018年~2023年, 災害事例:25事例

※時間雨量の検証結果



従来手法

レーダー雨量計活用

規制方式	A	B	C	D
地上雨量計	使う【補正なし】	使わない	使う【補正なし】	使わない
レーダー雨量計	なし	使う【補正あり】	使う【補正あり】	使う【補正なし】

規制時間は1.6倍に増加するが, 災害未補足率は28%から4%に減少

浸透流解析を用いた強雨降りやみ後の運転再開判断手法

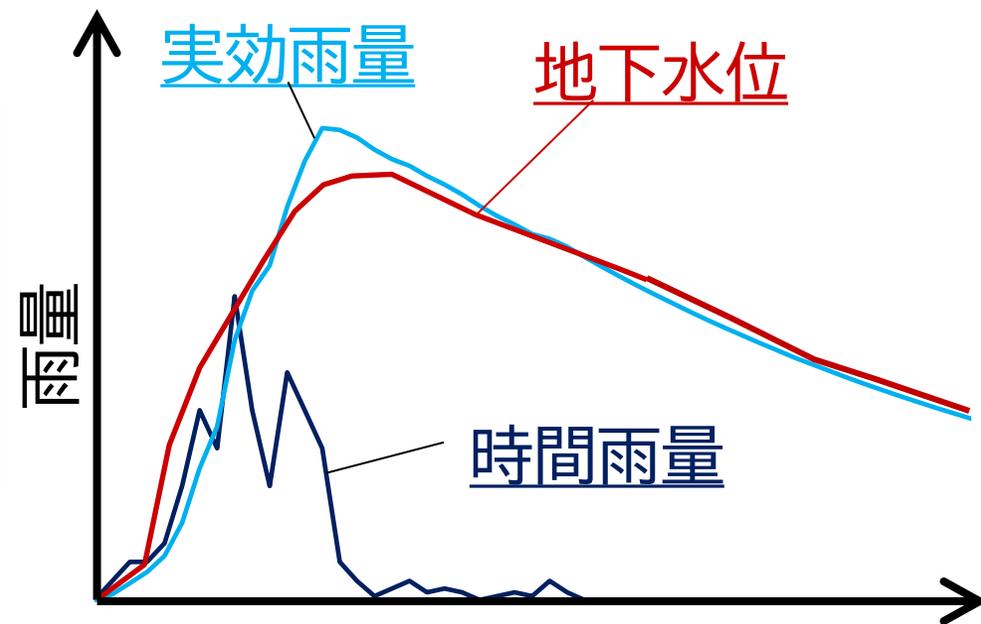
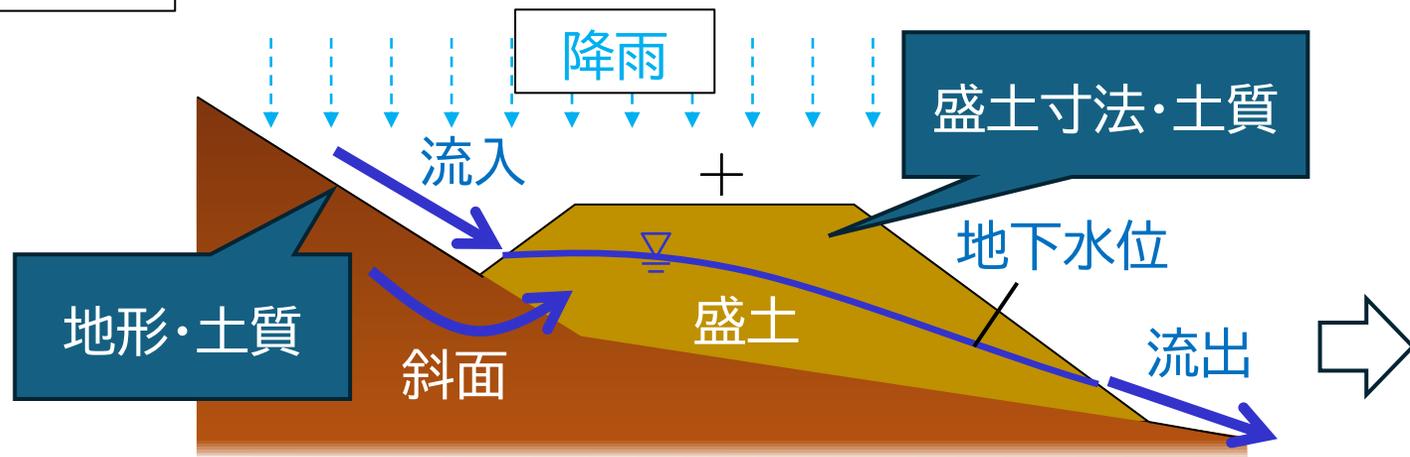
Railway Technical Research Institute

実効雨量を用いた運転再開判断手法

実効雨量：土中水分挙動と連動する雨量指標
⇒強雨後の運転再開の判断に利用

半減期 T ：土中水分の排出に要する時間に関連する実効雨量の重要なパラメータ

課題 本来は半減期 T は現地条件に応じて異なる



経過時間
地下水位と連動する実効雨量
のイメージ

浸透流解析で現地地盤の
半減期 T を推定

現地の土中水分挙動に強く連動する実効雨量を用いて運転再開を判断

浸透流解析を用いた強雨降りやみ後の運転再開判断手法

広域斜面浸透流解析(SWB)の概要

計算フロー

解析条件の設定
(盛土・土質・降雨)

盛土内水収支 ΔQ_t を計算

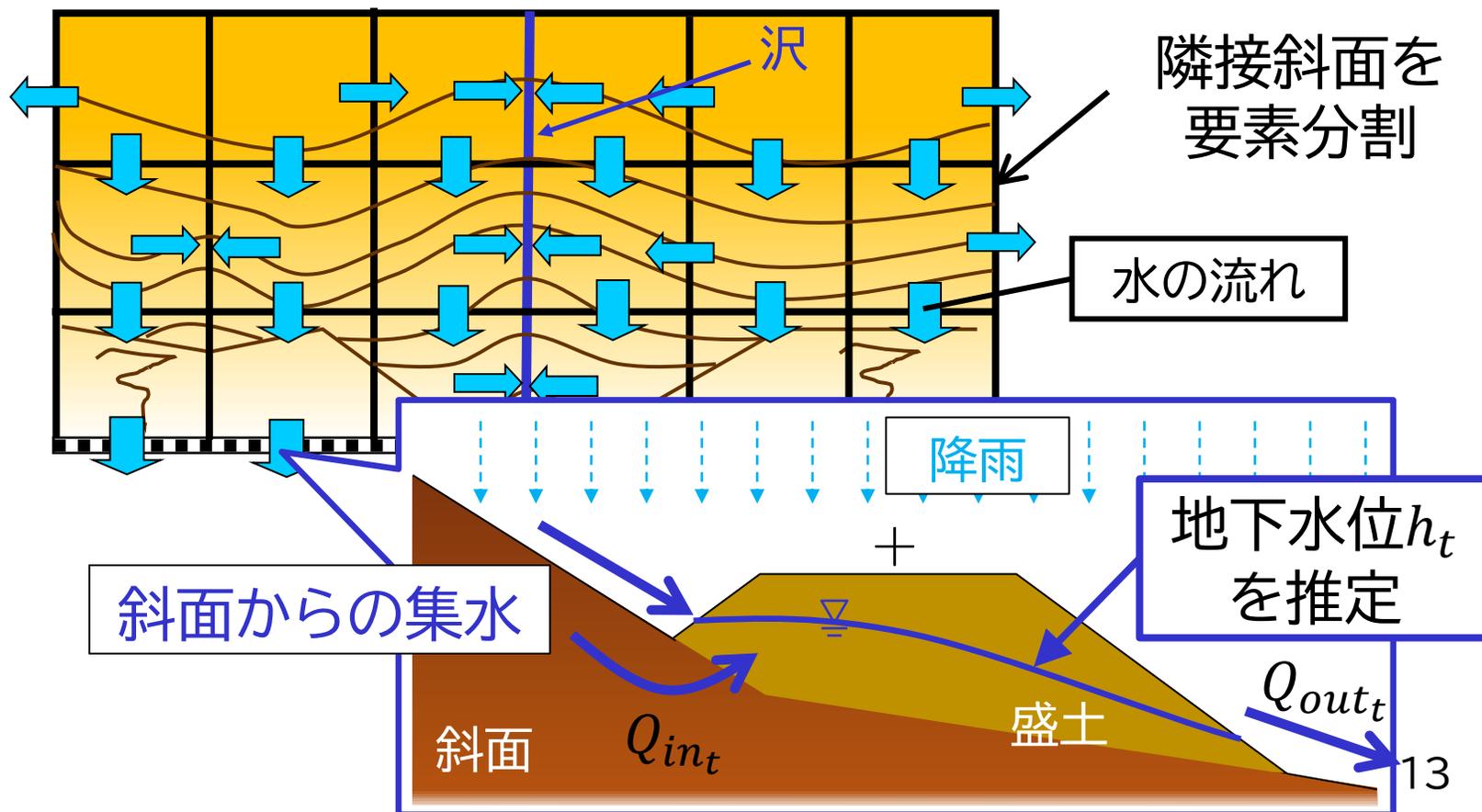
- ・盛土への流入水量 Q_{int}
- ・盛土からの流出水量 Q_{out_t}

盛土の地下水位 h_t の計算

- ・飽和度の平均値を指標

盛土への流入水量

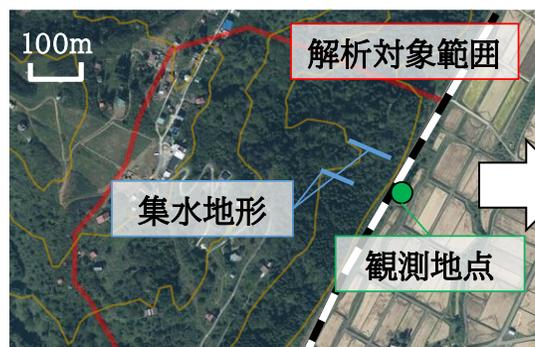
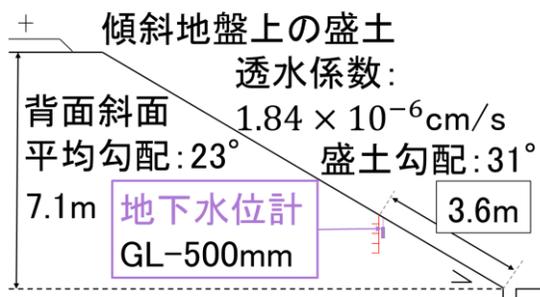
- ・隣接斜面を地盤要素とした水収支計算
- ・降雨 + 隣接斜面からの浸透水 \Rightarrow 盛土内の水収支を算出



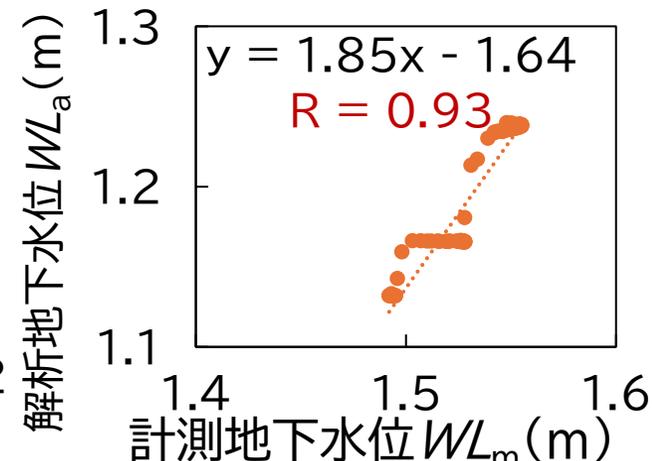
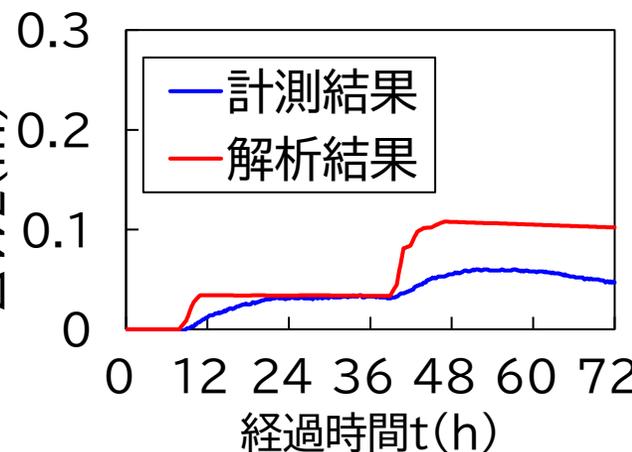
浸透流解析を用いた強雨降りやみ後の運転再開判断手法

現地計測との比較による広域斜面浸透流解析の妥当性検証

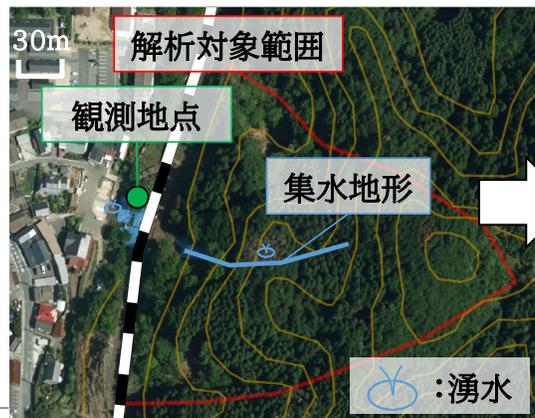
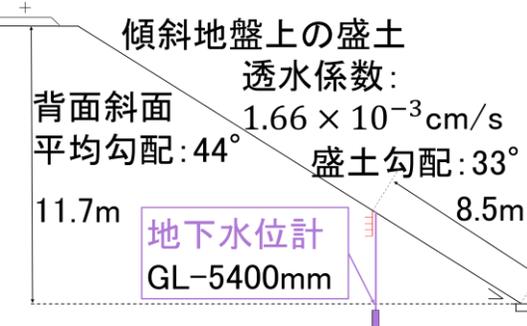
盛土A



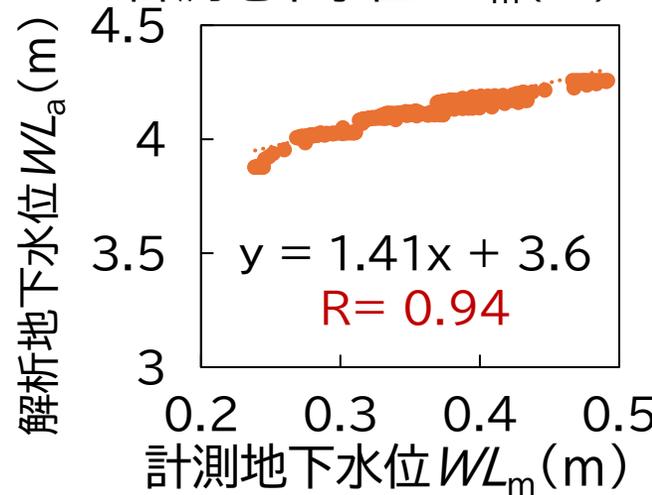
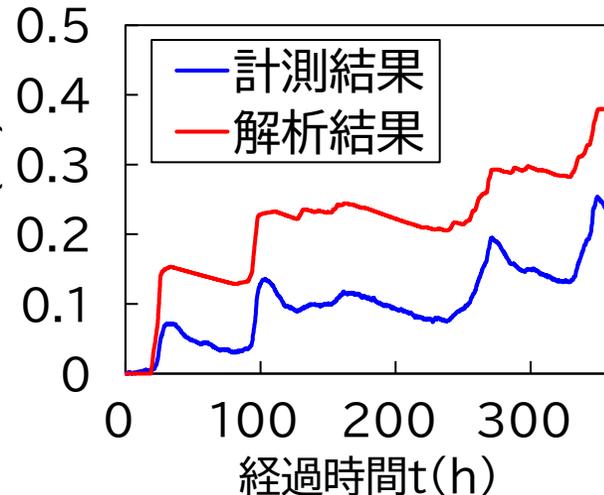
地下水位の変化量 $\Delta WL(\text{m})$



盛土B



地下水位の変化量 $\Delta WL(\text{m})$



出典(加筆):地理院地図, <https://maps.gsi.go.jp/>

検証盛土2か所において地下水位の解析値と実測値に高い相関性を確認 14

浸透流解析を用いた強雨降りやみ後の運転再開判断手法

運転再開判断手法の検討フロー

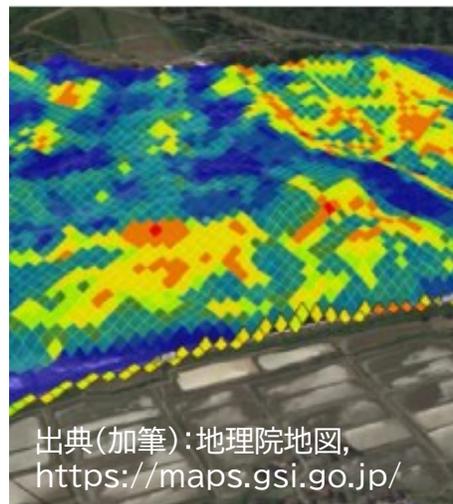
現地地盤条件(盛土形状, 盛土飽和透水係数, 自然斜面表層厚)を把握

広域斜面浸透流解析(SWB)により, 現地の盛土や斜面の地下水位挙動と相関性が高い実効雨量の半減期 T を事前に特定

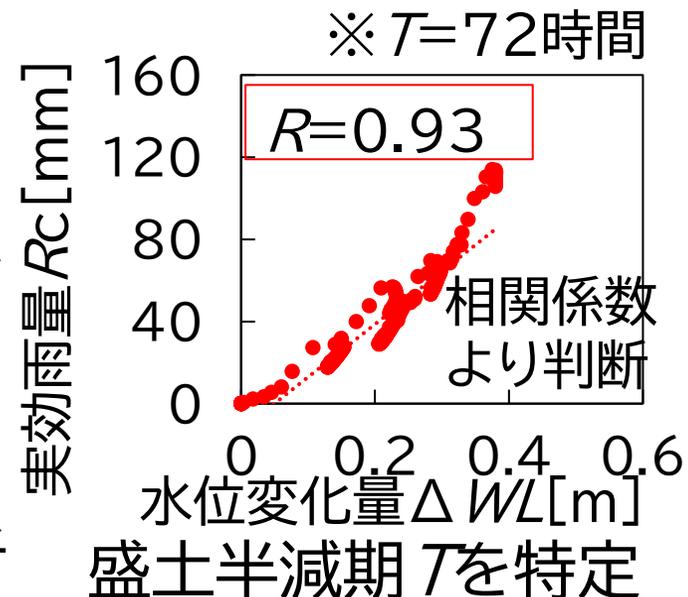
半減期 T を反映した実効雨量 R_c を降雨イベントで逐次計算

実効雨量 R_c で強雨後の盛土や斜面の安定性回復傾向を評価

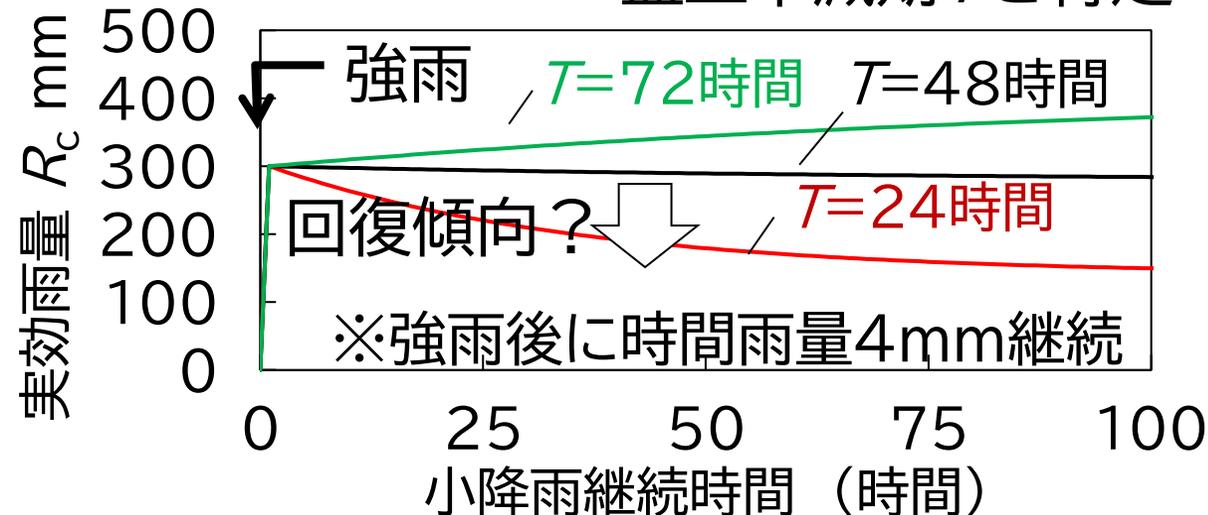
手法の検討フロー



広域斜面浸透流解析



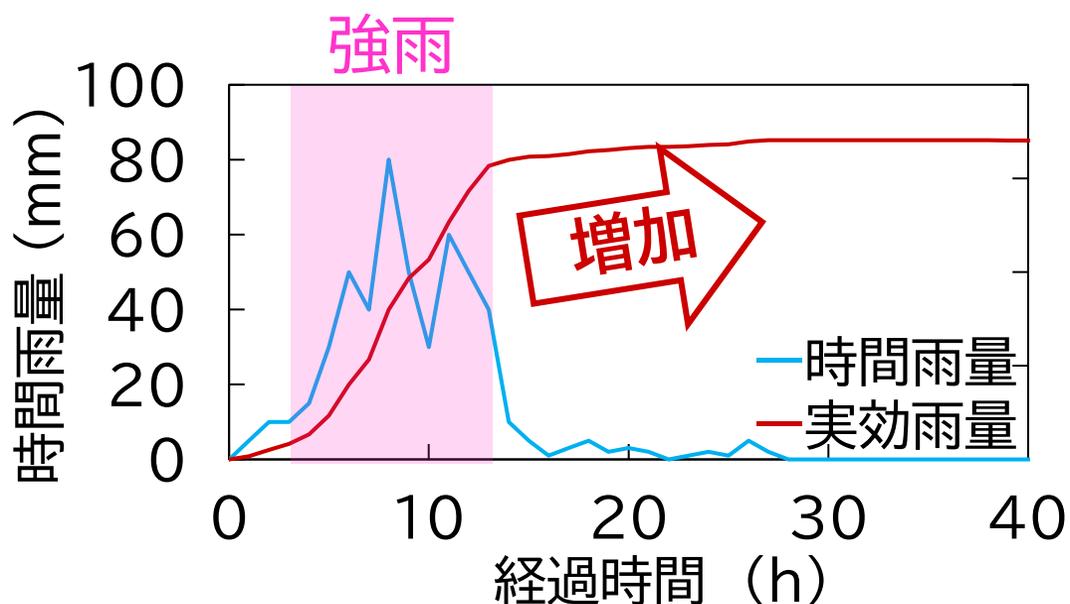
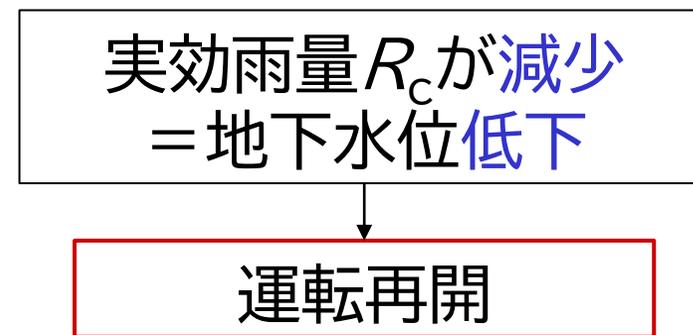
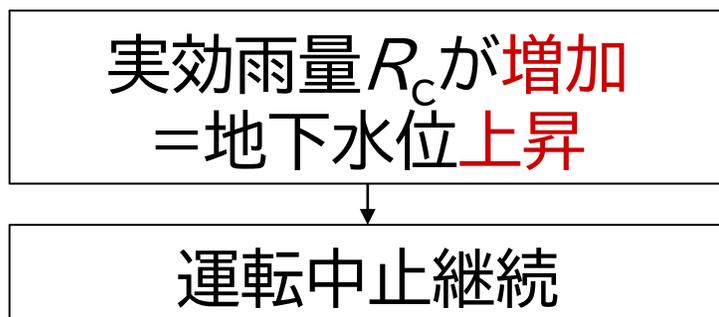
盛土半減期 T を特定



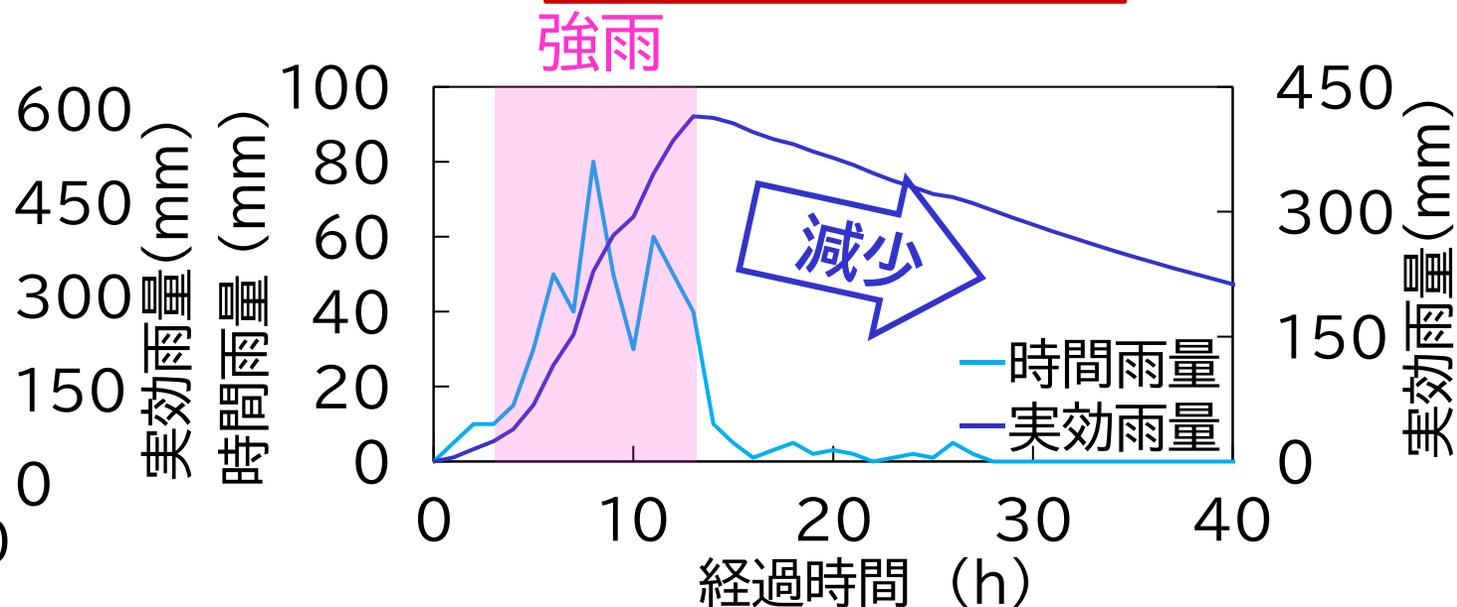
豪雨後小降雨での安定性回復傾向の違い15

浸透流解析を用いた強雨降りやみ後の運転再開判断手法

提案手法の実運用のイメージ



現地地盤の半減期 T が長いケース



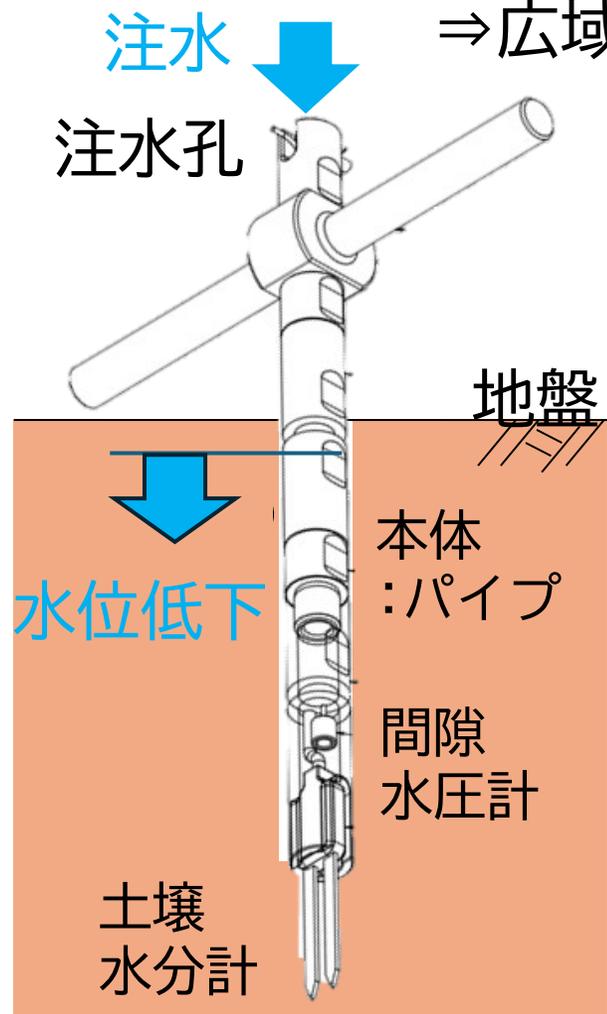
現地地盤の半減期 T が短いケース

運転再開判断の考え方

簡易現場透水試験手法の開発

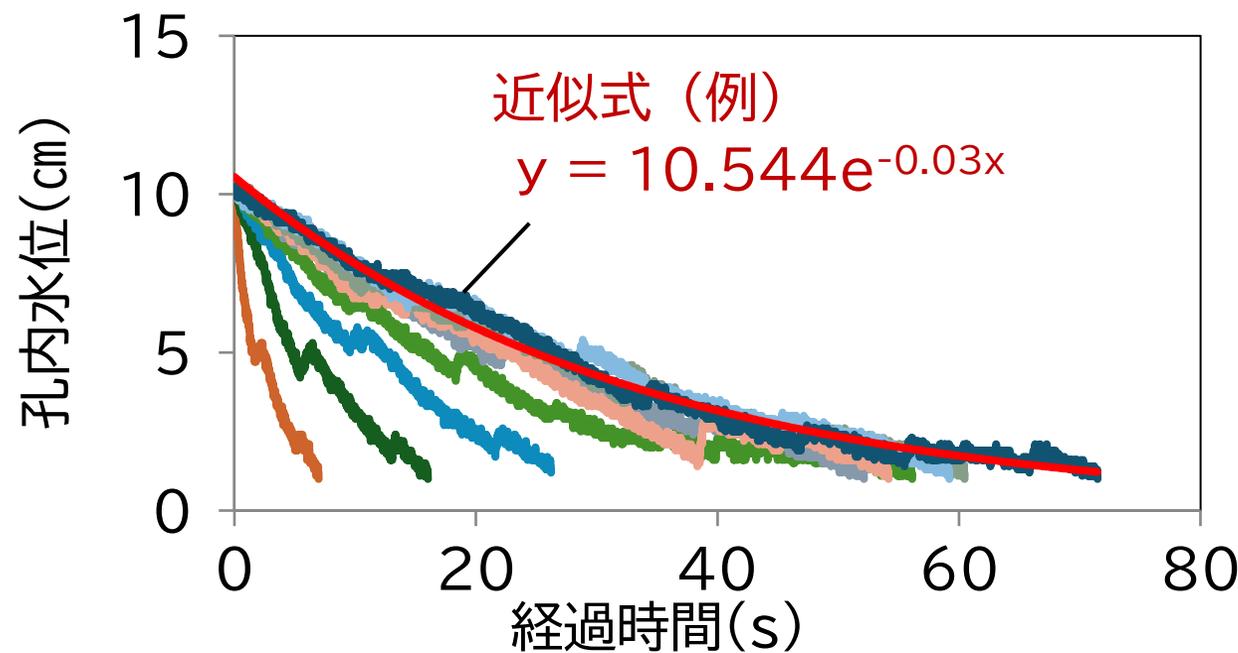
試験機の概要 孔内注水した後の水位の減少速度より地盤の飽和透水係数を推定

⇒ 広域斜面浸透流解析に反映



$$N = N_0 \times (1/2)^{t/T}$$

N : 水位 (cm), N_0 : 初期水位 (cm) T : 水位半減期 (h),
 t : 経過時間 (h)



土中水分試験機の概要

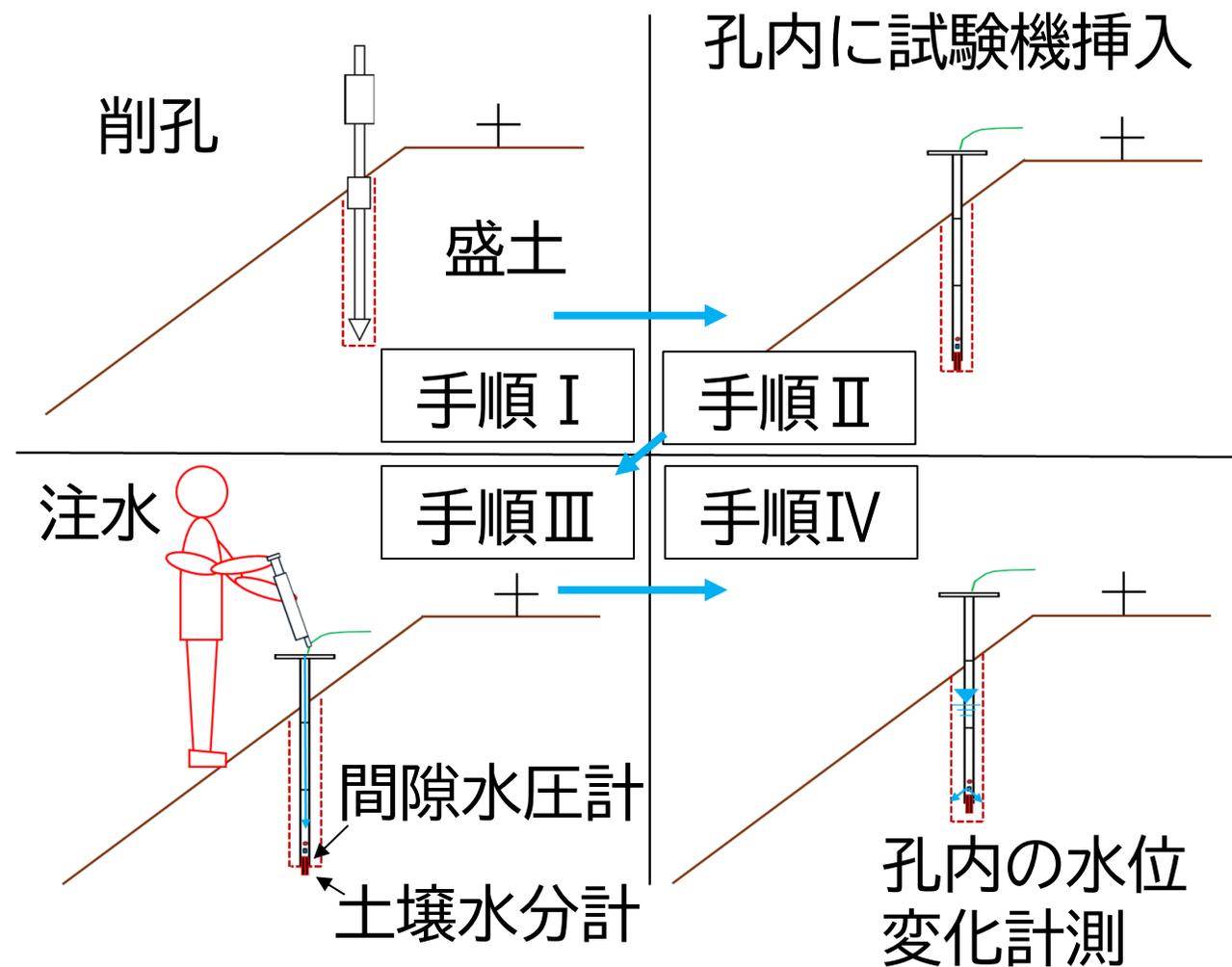
孔内水位の低下挙動 (複数の土質)

簡易現場透水試験手法の開発

試験手順

- I. サウンディング試験等により削孔
($\phi 25\text{mm}$)
- II. 土中水分試験機を I の削孔穴に挿入
- III. 土壌水分計より体積含水率を計測
土中水分試験機上端から注水
(水量: 100ml , 注水速度 200ml/s 程度)
- IV. 中空ロッド内の間隙水圧計で水位測定

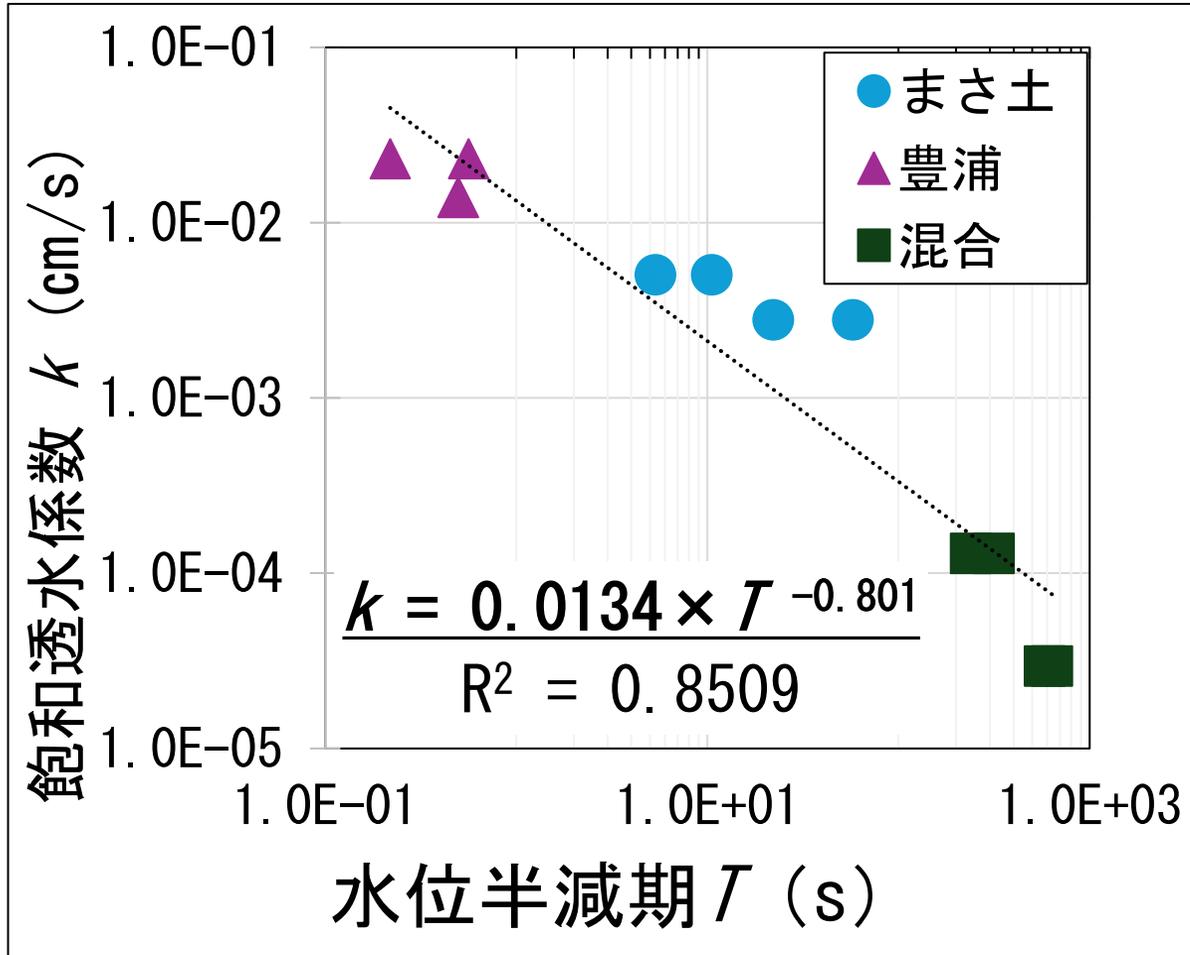
人力作業で数mの深度の地盤の飽和透水係数を評価



簡易現場透水試験手法の開発

飽和透水係数の推定手法

室内試験結果



水位半減期 T (s)より
飽和透水係数 k (cm/s)を評価する
経験式を提案

$$k = 0.0134 \times T^{-0.801}$$

課題：安定と安全輸送が両立するレーダー雨量計用の規制値の設定法が必要。

⇒新たにレーダー雨量計用の規制値を既往規制値に基づいて設定する手法を提案し、同手法により過去災害の補足性を検証した結果、規制発令時間はやや増加(1.6倍)するものの災害未補足率が28%から4%に減少する結果が得られた。

課題：降雨に対する地盤の水分応答の実態に基づく運転再開判断手法が必要

⇒広域斜面浸透流解析(SWB)により、現地地盤の土中水分と強く連動する実効雨量 R_c を特定し、これをベンチマークとした強雨後の運転再開判断手法を提案。

⇒同解析に必要な地盤の透水係数を簡易に取得する現地試験手法を提案。

- 降雨時運転規制にレーダー雨量を導入する場合のレーダー雨量用規制値の設定に活用
- 鉄道の安全と安定輸送を両立する、強雨降りやみ後の早期運転再開判断手法の設定に活用
- 現地盛土や斜面の透水性を簡便に把握するための原位置試験として活用

1. 西脇 博也, 小原 慶吾, 高柳 剛, レーダー雨量計を用いた鉄道の運転規制閾値の決定手法に関する検討, 土木学会, 学術講演会, 2025
2. 鈴木 亜季, 入 栄貴, 高柳 剛: 簡易モデルによる実盛土内の土中水分応答の再現解析および運転再開指標の提案, 地盤工学会, 地盤工学研究発表会, 2025
3. 加藤 豊, 高柳 剛, 藤原 将真, 西脇 博也: 地盤の含水状態・透水性を把握する簡易現地試験法の検討, 地盤工学会, 地盤工学研究発表会, 2025