



中部電力

クラスタリング技術を援用した 極限平衡理論に基づく広域斜面安定解析

公益社団法人 地盤工学会 中部支部
第35回調査・設計・施工技術報告会

中部電力株式会社 ○渡邊 康介 今井哲久 久住隆夫
東北大学 森口周二 寺田賢二郎 野村怜佳

■ 背景

- 広域斜面安定解析の必要性
- 極限平衡法による安全率算出
- 研究課題 「すべり面抽出」・「計算コスト」

■ 課題①すべり面抽出

- すべり面抽出の課題
- クラスタリング手法『Flood-fill』の援用

■ 課題②計算コスト

- 計算コストの課題
- 最適化手法『ベイズ最適化』の援用

■ 再現解析（対象：令和元年東日本台風）

■ まとめ

背景（広域斜面安定解析の必要性）

- 日本には急峻な山岳地域が広く分布
- 気候変動による豪雨等の増加

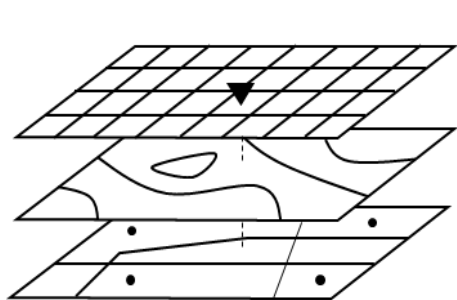
➡ **被害最小化に向け、広域かつ高精度な事前対策**

➡ **力学的手法によって、精度の高い解析**

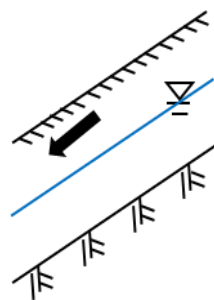


<令和元年東日本台風による地すべり^[1]>

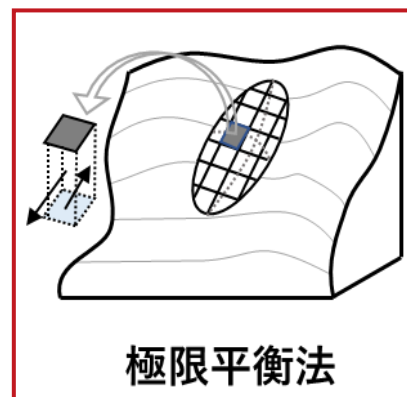
広域への適用のため、計算効率性の観点から三次元極限平衡法による解析



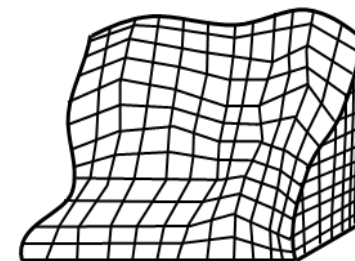
統計モデル



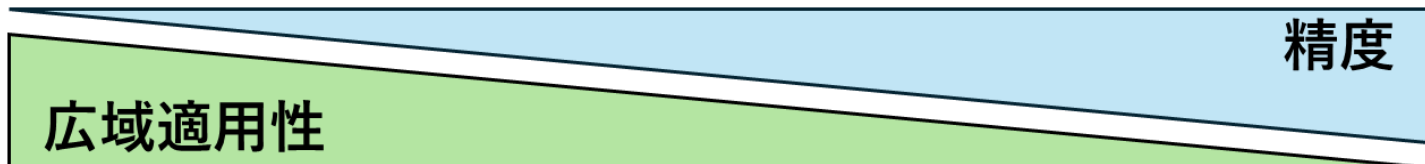
簡易力学モデル



極限平衡法



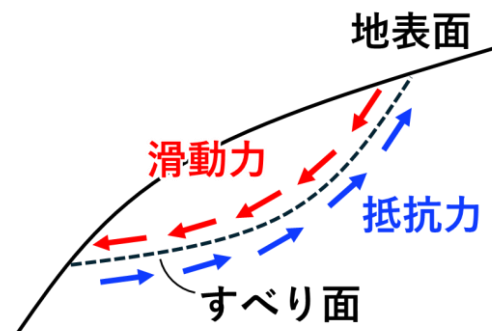
高度な数値解析



背景（極限平衡法による安全率算出）

- 斜面方向の**滑動力**と**抵抗力**の比として安全率を算出

$$F \text{ (安全率)} = \frac{\text{滑動力}}{\text{抵抗力}} \quad \begin{array}{l} F > 1 : \text{安定} \\ F < 1 : \text{不安定} \end{array}$$



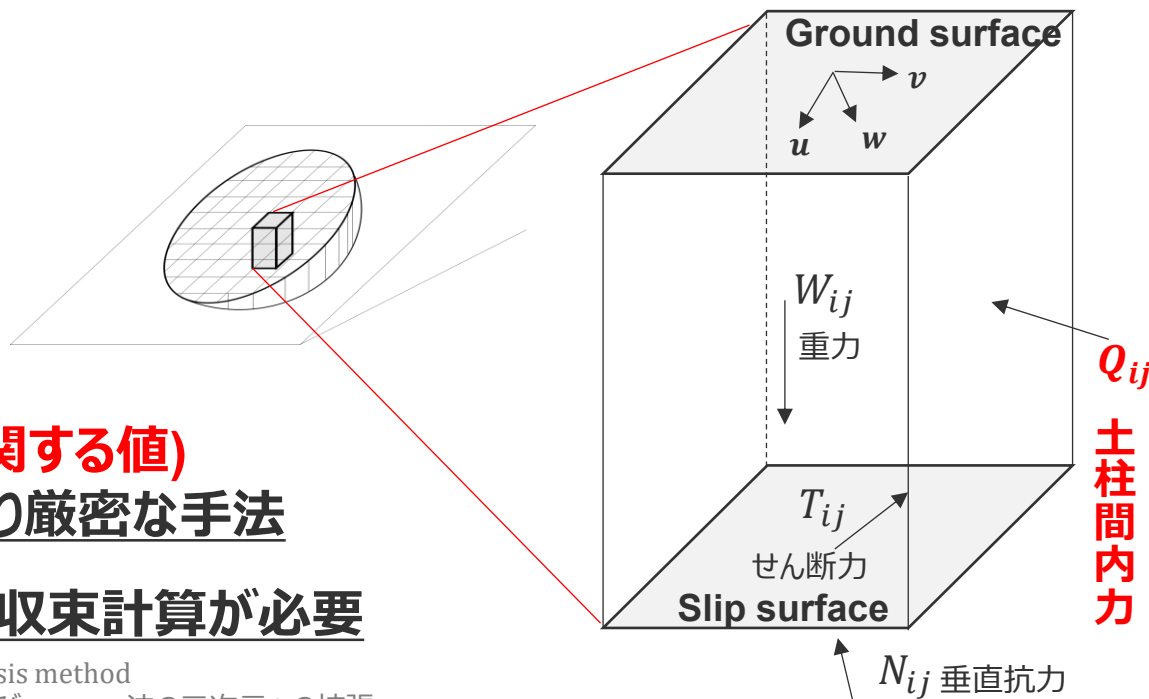
Hovland法^[2]

- 土柱間内力はゼロ
- 未知数：**F(安全率)**
- **計算コストが低**

三次元簡易Bishop法^[3]

- 土柱間内力(Q_{ij})を一部考慮
- 未知数：**F(安全率)**, η (内力に関する値)
- **計算コストが比較的高いが、より厳密な手法**

➡ **三次元簡易Bishop法では収束計算が必要**



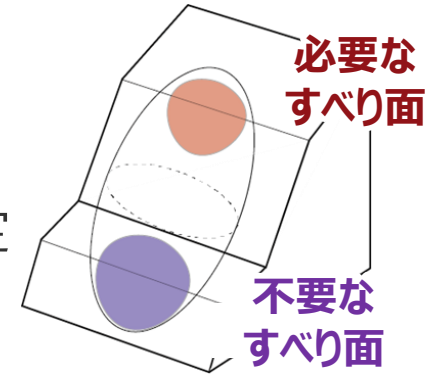
[2]Hovland, H. J. : Three-dimensional slope stability analysis method

[3]鶴飼恵三, 細堀健司 : 簡易bishop 法, 簡易janbu 法およびspencer 法の三次元への拡張

課題①

1.すべり面の決定

- 極限平衡法では、一つのすべり面を想定して計算
- 複雑な地形では一つの楕円体で複数のすべり面を仮定

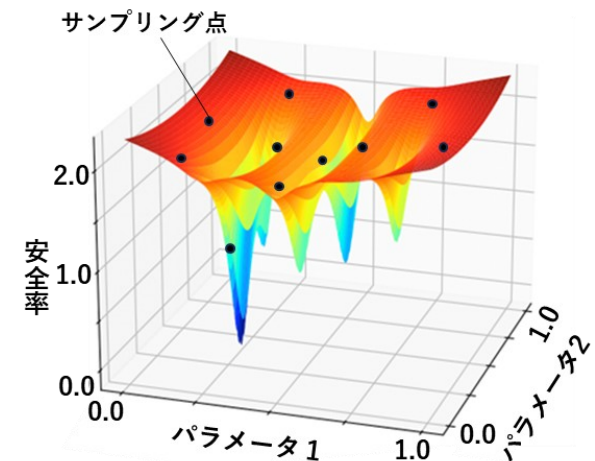


① 複雑な実地形において不要なすべり面を自動で除外する手法の確立

2.安全率計算

課題②

- 広域の臨界すべり面探索の計算コスト

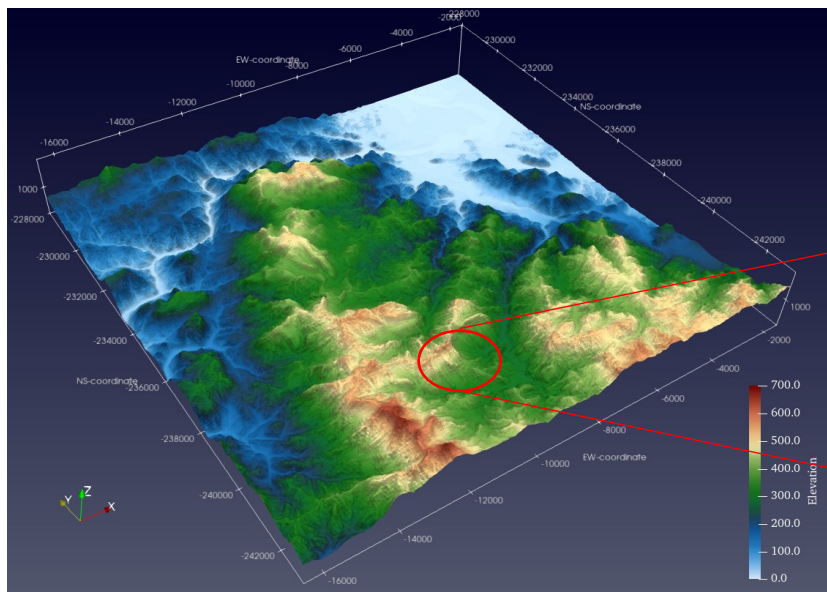


3.臨界すべり面の算出

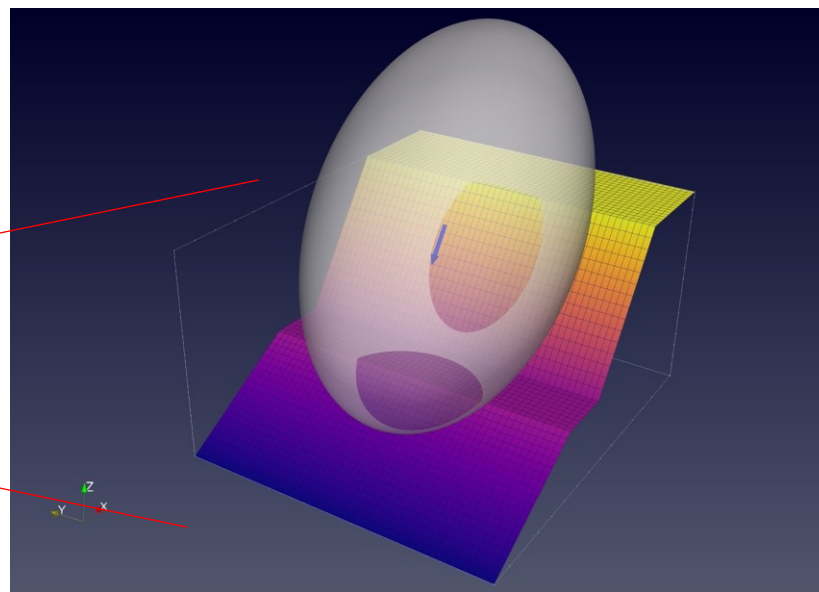
② 臨界すべり面を効率的に算出する手法の確立

課題①（すべり面抽出の課題）

- 広域に対して繰り返し楕円体で切り取り、すべり面を仮定
- 仮定したすべり面に対して安全率を算出



〈計算対象領域〉



〈楕円体でのすべり面抽出イメージ〉

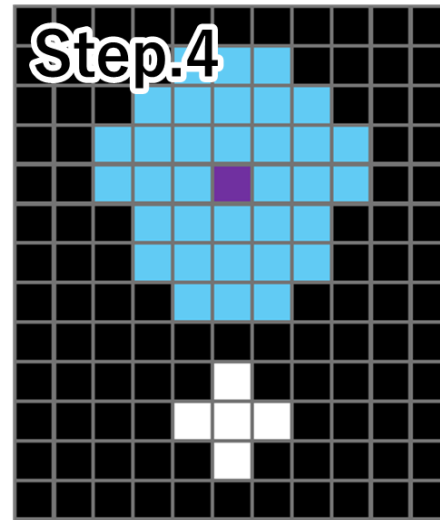
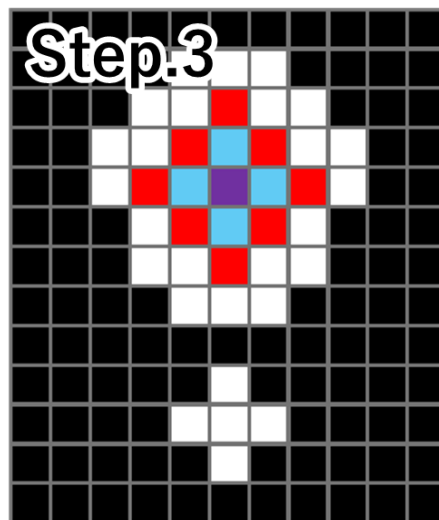
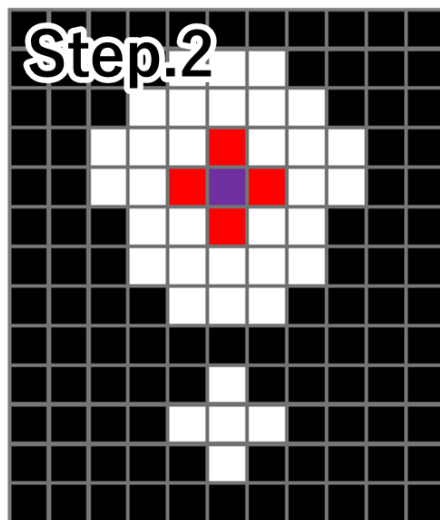
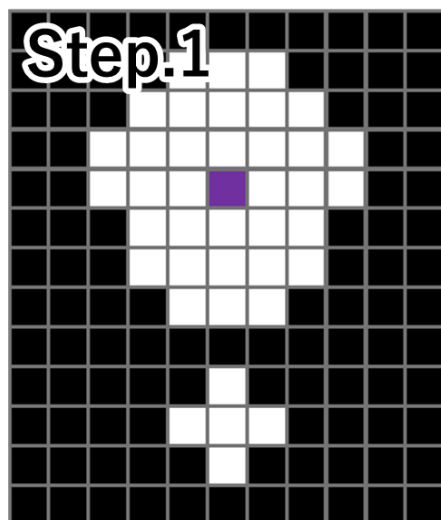
広域かつ複雑地形上では、一つの楕円体で複数のすべり面を仮定してしまう

極限平衡法では一つの楕円で一つのすべり面を切り取ると想定

想定していないすべり面を自動的に除外することのできるアルゴリズムの導入

Flood-fill

- データ集合を一定の規則に基づいて複数のグループに分類するクラスタリングの一つ
- 画像編集ソフトの塗りつぶし機能などに用いられる代表的なアルゴリズム



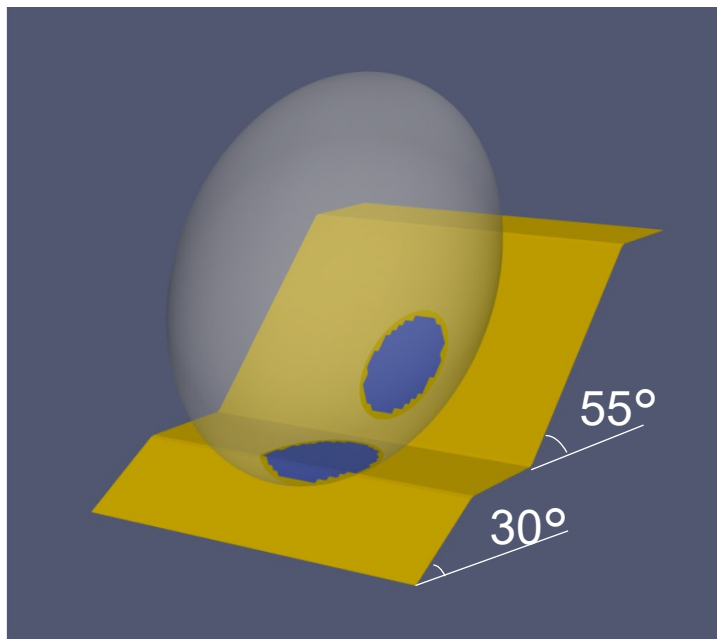
Step.1 起点となる要素を選択する（本研究では楕円体中心）

Step.2 選択した要素と接続している上下左右の要素を塗りつぶす

Step.3 塗りつぶされた要素の接続要素がなくなるまで②を繰り返す

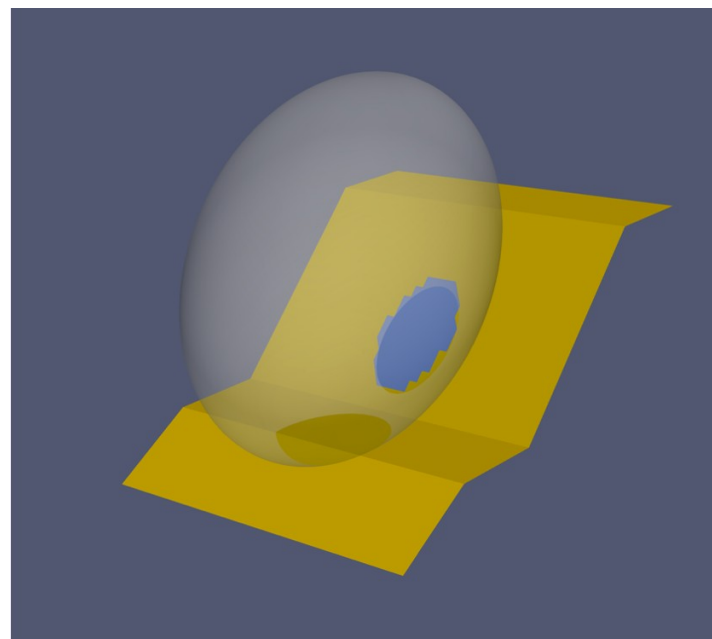
Step.4 塗りつぶし終了

Flood-fillなし



安全率 $F = 3.63$

Flood-fillあり

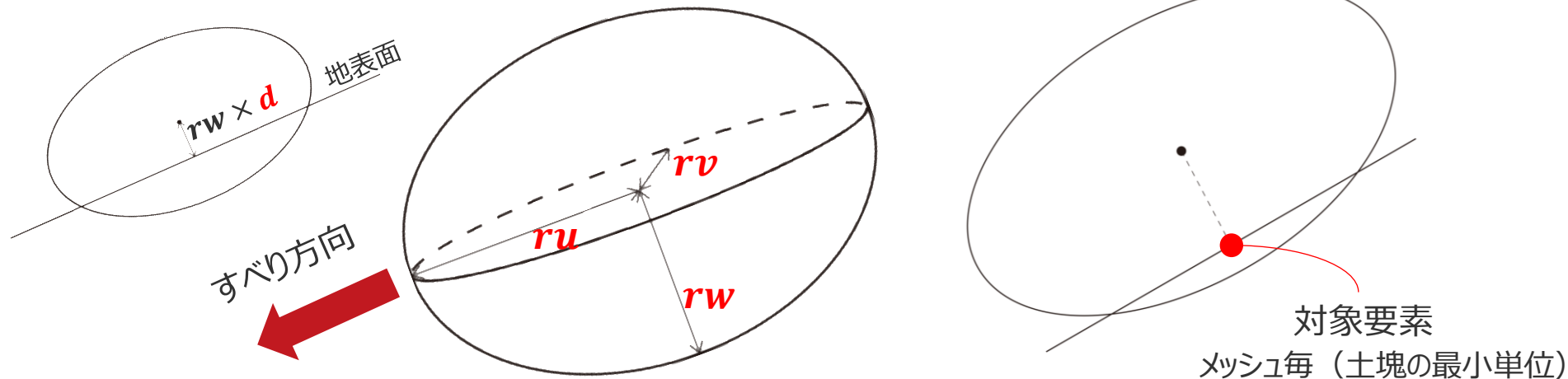


安全率 $F = 1.40$

- ✓ Flood-fillにより、不要なすべり面の排除に成功
- ✓ 適切なすべり面の設定により、解析の安定性を向上

課題② (計算コストの課題)

- すべり面の規模や形状が異なると安全率も変化
- 一つの対象要素に対して複数規模・形状のすべり面での安全率計算が必要
- 楕円体の三軸方向半径 (ru, rv, rw) ・深さ比率 (d) の4つのパラメータを組み合わせる



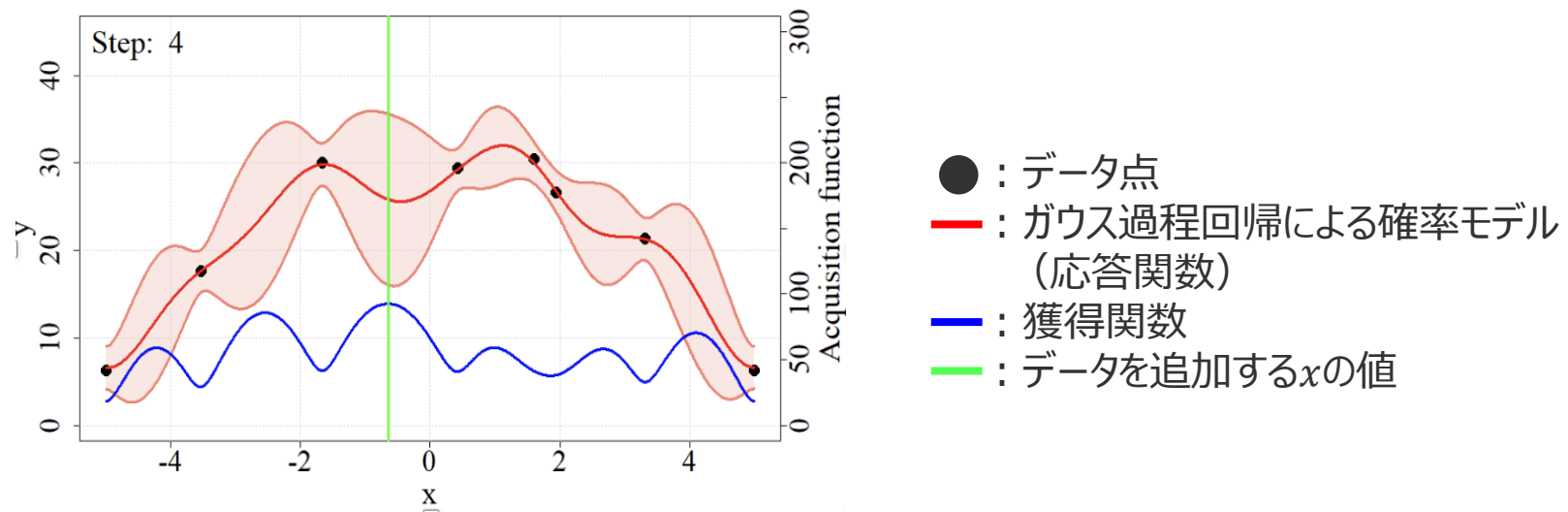
グリッドサーチ

- ◆ 従来の臨界すべり面探索の一般的な手法
- ◆ 各パラメータを等間隔で分割し、全組み合わせで計算
- ◆ 多くの形状での計算が必要であり、**広域評価では計算コストが増大する**

➡ すべり形状変更回数を減らし臨界すべり面探索の計算コストを削減したい

ベイズ最適化

- 少ない試行回数で最適な条件を見つける効率的な探し方
- 少数データに基づく確率モデル（ガウス過程回帰）を逐次更新し、期待値と不確実性を考慮して評価点を選択することで、少数試行で最適解を探索する手法



- Step.1** 少数データからガウス過程回帰で確率モデル（応答関数）を推定
- Step.2** 最適値より良くなる可能性の度合いを表す獲得関数を評価
- Step.3** 獲得関数が最大となるような観測点（追加する点）を探索
- Step.4** 追加した点をデータに加え、統計モデルを更新

課題②（最適化手法『ベイズ最適化』の援用）（2）

◆土質定数

粘着力：10 kPa

内部摩擦角：30 °

単位体積重量：20 kN/m³

◆楕円体変更範囲

	Min	Max
r_u [m]	10	20
r_v [m]	10	20
r_w [m]	10	20
d	0.5	0.9

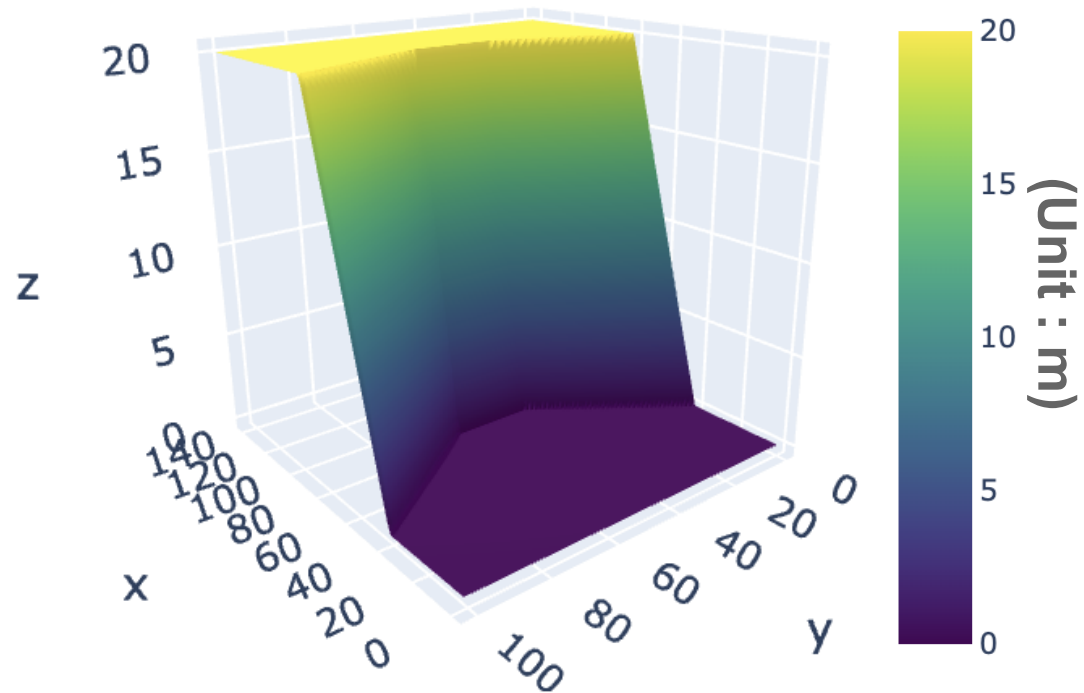
◆計算条件（解析条件）

✓ グリッドサーチ

分割幅：(r_u, r_v, r_w : 1m, d : 0.1)

✓ ベイズ最適化

初期サンプリング点：10, 終了条件：8回連続最小値の更新なし



<計算対象領域>

課題②（最適化手法『ベイズ最適化』の援用）（3）

Hovland法

手法	安全率	安全率 計算回数	計算時間 (s)
ベイズ 最適化	0.85	25	12.3
グリッド サーチ	0.85	6655	9.9

三次元簡易Bishop法

※収束計算が必要

手法	安全率	安全率 計算回数	計算時間 (s)
ベイズ 最適化	1.05	26	12.4
グリッド サーチ	1.07	6655	91.3

- ✓ 全ての手法でほぼ同程度の安全率となることを確認
- ✓ Hovland法では、ベイズ最適化の方が計算時間を要しているが、これは最適化する中で関数の更新に計算コストを要したためと推測される
- ✓ 収束計算を必要とする三次元簡易Bishop法では、グリッドサーチよりもベイズ最適化の計算時間が大幅に短くなった
- ✓ ベイズ最適化では計算手法が原因の計算コスト増加の影響を受けにくい

再現解析（対象：令和元年東日本台風）（1）

◆岩手県釜石市^[4]

- ✓ 600 m×600 m
- ✓ 1 mメッシュ (UAV測量)

◆土質定数

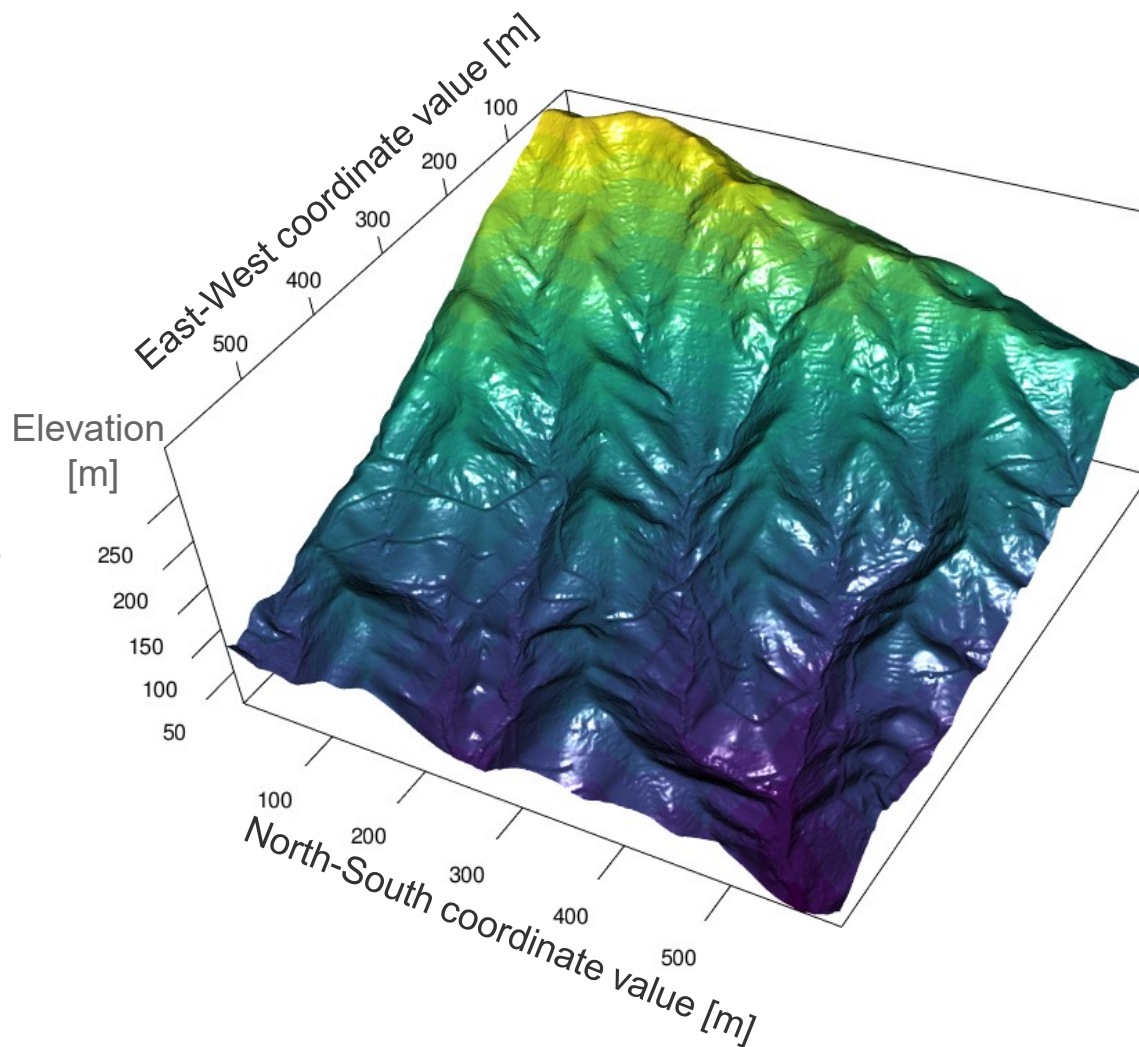
粘着力：10 kPa

内部摩擦角：30°

単位体積重量：20 kN/m³

◆楕円体変更範囲

	Min	Max
ru [m]	10	20
rv [m]	10	20
rw [m]	10	20
d	0.5	0.9

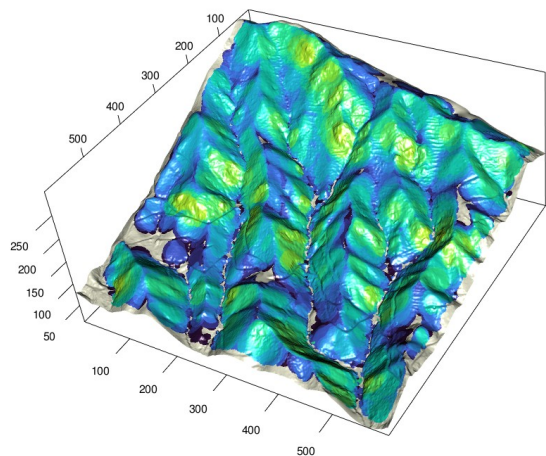


<計算対象領域>

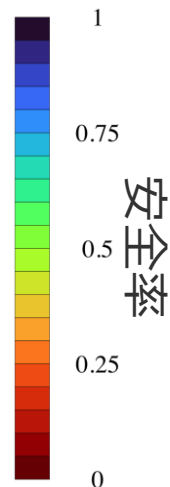
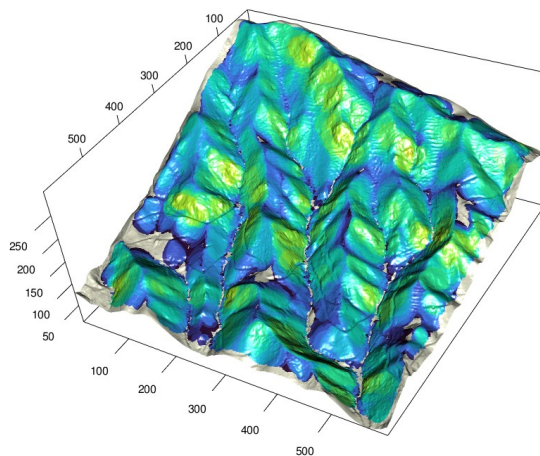
再現解析（対象：令和元年東日本台風）（2）

Hovland法

グリッドサーチ

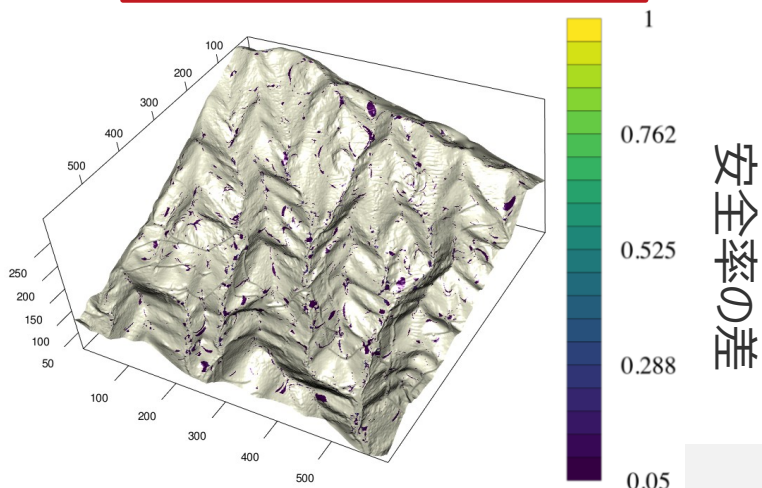


ベイズ最適化



手法	計算時間 (s)
ベイズ最適化	3107
グリッドサーチ	1327

グリッドサーチとベイズ最適化の差

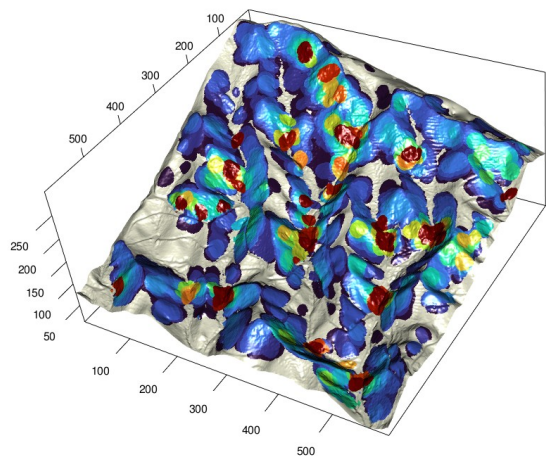


- ✓ 全ての手法でほぼ同様な安全率分布
- ✓ グリッドサーチとベイズ最適化で求めた安全率に大きな差はない
- ✓ Hovland法のような計算負荷の軽い計算においてベイズ最適化は不向き

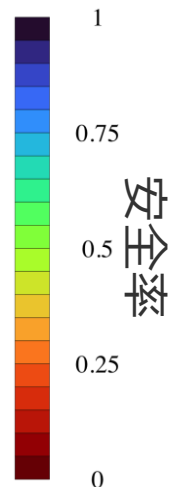
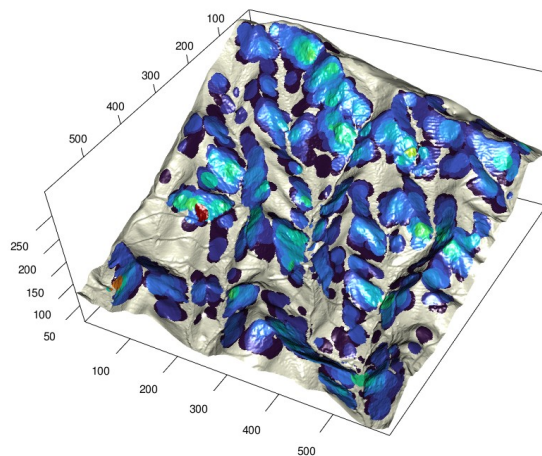
再現解析（対象：令和元年東日本台風）（3）

三次元簡易Bishop法

グリッドサーチ

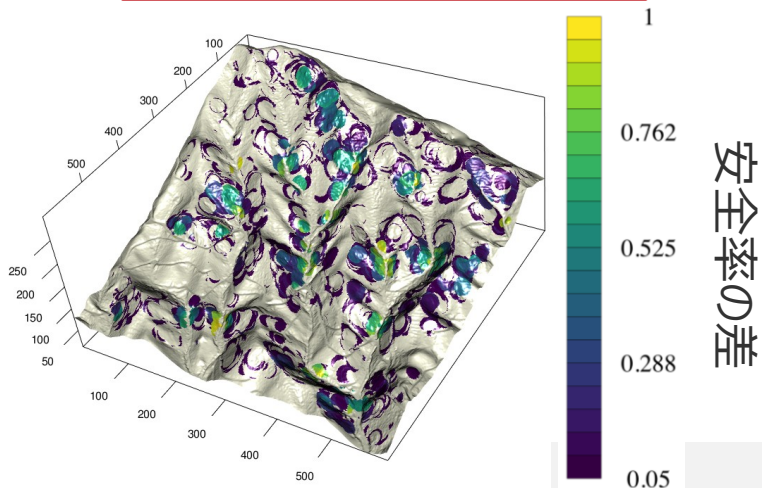


ベイズ最適化



手法	計算時間 (s)
ベイズ最適化	3420
グリッドサーチ	20143

グリッドサーチとベイズ最適化の差



- ✓ グリッドサーチでは収束計算の不具合が発生し、谷部等で極度に安全率が低くなる
- ✓ グリッドサーチの安全率が不自然に低い箇所以外では求めた安全率の差がない
- ✓ ベイズ最適化の計算時間は、グリッドサーチよりも大幅に短い

課題

- 課題①：想定していないすべり面の発生
- 課題②：臨界すべり面算出の計算効率

結果

- 想定していないすべり面を**自動で除外する手法**の確立
- 最適化手法の援用により、**臨界すべり面の効率的な算出**を実現
- **ベイズ最適化による臨界すべり面探索は三次元簡易Bishop法に有効**

今後の展望

- **実現象との比較による精度の検討**
- 三次元簡易Bishop法の計算の不安定性の解消
- 最適化手法の更なる検討による計算コスト削減



本発表は中部電力(株)原子力安全技術研究所の公募研究,「クラスタリングとベイズ更新を援用した力学に基づく広域斜面安定解析」(2024, 2025年度, 東北大学 森口周二, 寺田賢二郎, 野村怜佳と中部電力(株)の共同研究)の内容である。研究にご尽力いただいた東北大学の先生方および学生の皆さまに心より感謝の意を表します。