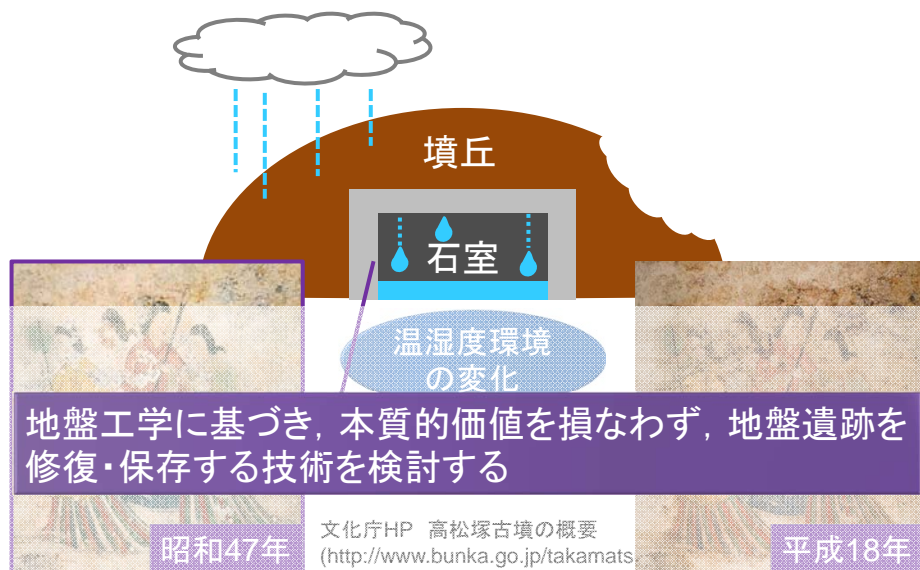


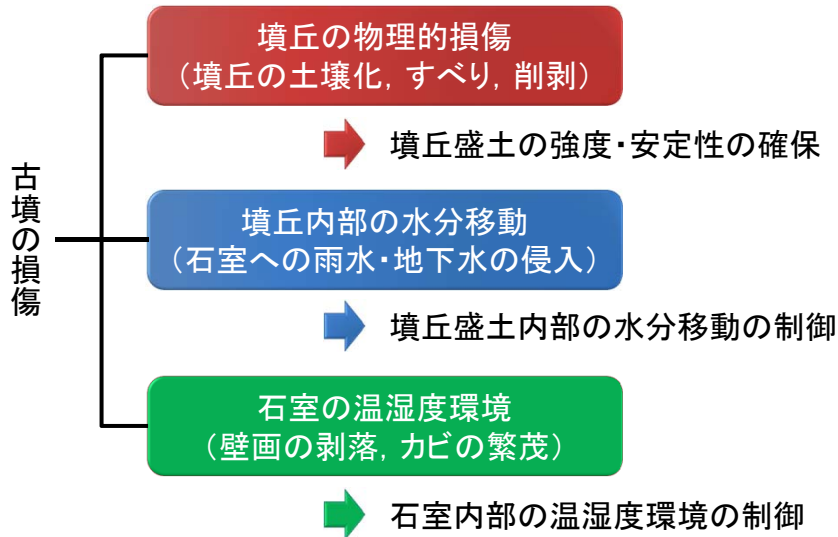
地盤工学から見た地盤遺跡の 修復と保全に関する技術的課題

京都大学大学院 工学研究科
都市社会工学専攻
三村 衛

背景と求められるもの



古墳の恒久的修復・保存の課題



検討が必要な項目

① 墳丘盛土の強度・安定性の確保

- 原位置と室内試験に基づく墳丘土の強度定数の評価
- 墳丘土の不飽和力学特性の把握

② 墳丘盛土内部の水分移動の制御

- 墳丘土の浸透特性の把握
- 模型実験と数値解析による墳丘盛土内部の水分移動の把握
- キャピラリーバリア(毛管遮水層)の発現条件と遮水効果の検討

③ 石室内部の温湿度環境の制御

- 墳丘土の熱物性値の測定と評価方法の検討
- 墳丘土の伝熱特性の把握

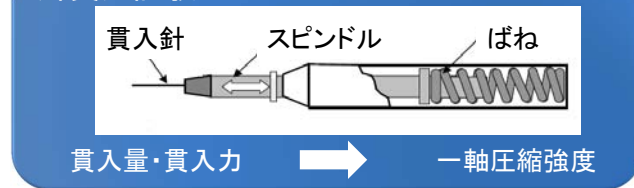
① 墳丘盛土の強度・安定性の確保

原位置と室内試験に基づく墳丘土の強度定数の評価

墳丘の破壊・改変の規制

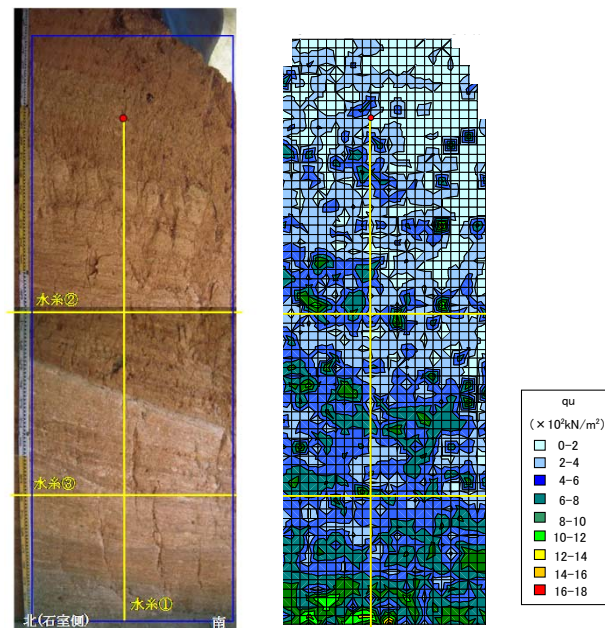
- 不攪乱試料が得られた場合
- 室内試験：一面せん断試験・一軸圧縮試験
- 原位置試験：非破壊

針貫入試験



両試験結果を比較し、適切な強度定数の評価方法を検討する

高松塚古墳南側墓道部東壁の強度分布



① 墳丘盛土の強度・安定性の確保

墳丘土の不飽和力学特性の把握

不飽和土のせん断強度

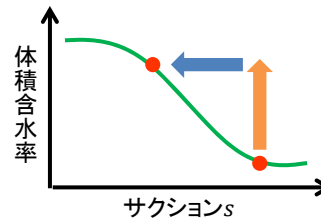
$$\tau = \sigma_{net} \tan \phi' + \underbrace{c' + \chi s \tan \phi'}_{\text{見かけの粘着力}}$$

飽和状態で発揮 サクシオンによる増分

σ_{net} : 基底応力 s : サクシオン
 ϕ' : せん断抵抗角 c' : 粘着力
 χ : サクシオンの有効応力への寄与

含水率の上昇に伴い低下

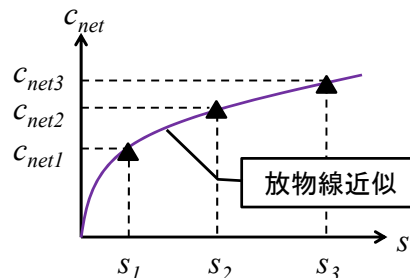
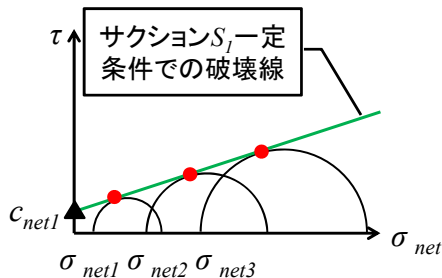
墳丘斜面の安定性の低下



墳丘土の見かけの粘着力～サクシオン関係を調べる

① 墳丘盛土の強度・安定性の確保

見かけの粘着力～サクシオンの関係



検討が必要な項目

① 墳丘盛土の強度・安定性の確保

- 原位置と室内試験に基づく墳丘土の強度定数の評価
- 墳丘土の不飽和力学特性の把握

② 墳丘盛土内部の水分移動の制御

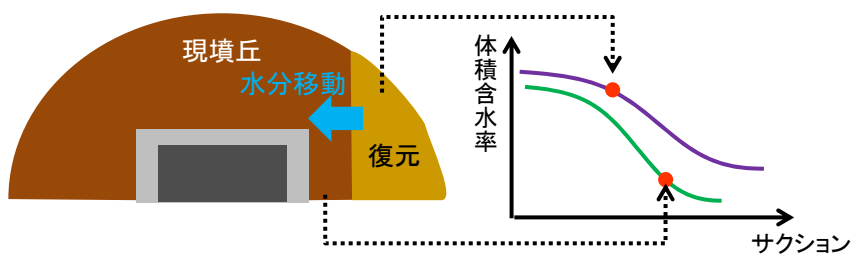
- 墳丘土の浸透特性の把握
- 模型実験と数値解析による墳丘盛土内部の水分移動の把握
- キャピラリーバリア(毛管遮水層)の発現条件と遮水効果の検討

③ 石室内部の温湿度環境の制御

- 墳丘土の熱物性値の測定と評価方法の検討
- 墳丘土の伝熱特性の把握

② 墳丘盛土内部の水分移動の制御

墳丘土の浸透特性の把握



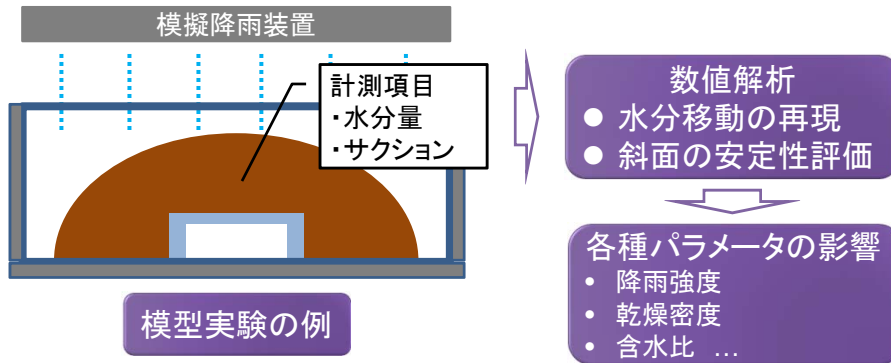
墳丘盛土内部の水分移動

- 水分特性曲線
- 不飽和透水係数

- 墳丘土の保水性試験, 透水試験を実施する
- 関数モデルの適用性を検討する

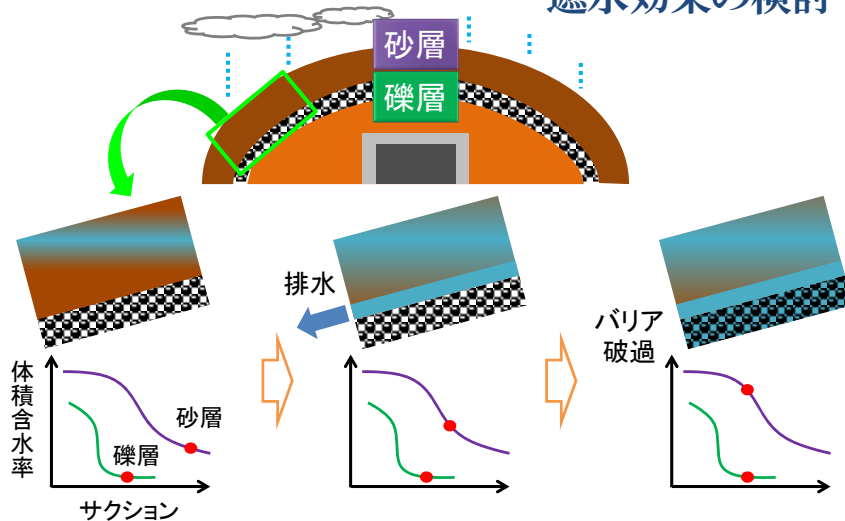
② 墳丘盛土内部の水分移動の制御

模型実験と数値解析による墳丘盛土内部の水分移動の把握



② 墳丘盛土内部の水分移動の制御

キャピラリーバリア(毛管遮水層)の発現条件と遮水効果の検討



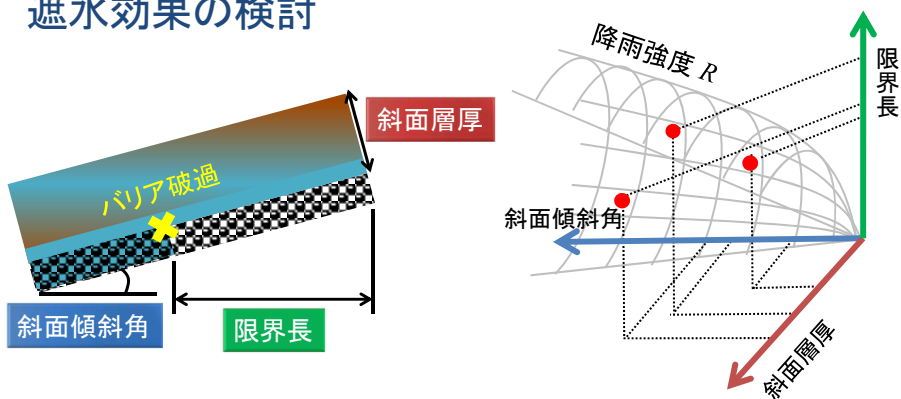
② 墳丘盛土内部の水分移動の制御

キャピラリーバリア発現実験



② 墳丘盛土内部の水分移動の制御

キャピラリーバリア(毛管遮水層)の発現条件と遮水効果の検討



- 模型実験と数値解析により、バリアの発現条件を求める
- バリアを適用した墳丘モデルを挙げて、遮水効果を検証する

検討が必要な項目

① 墳丘盛土の強度・安定性の確保

- 原位置と室内試験に基づく墳丘土の強度定数の評価
- 墳丘土の不飽和力学特性の把握

② 墳丘盛土内部の水分移動の制御

- 墳丘土の浸透特性の把握
- 模型実験と数値解析による墳丘盛土内部の水分移動の把握
- キャピラリーバリア(毛管遮水層)の発現条件と遮水効果の検討

③ 石室内部の温湿度環境の制御

- 墳丘土の熱物性値の測定と評価方法の検討
- 墳丘土の伝熱特性の把握

③ 石室内部の温湿度環境の制御

墳丘土の熱物性値の測定と評価方法の検討

温湿度環境の変化(高松塚古墳の例)

低温湿潤



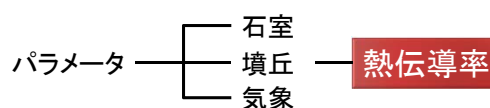
- 温度上昇
- 変動増大
- 乾燥

- 気象変化
- 被覆状況の変化
- 人の入退室

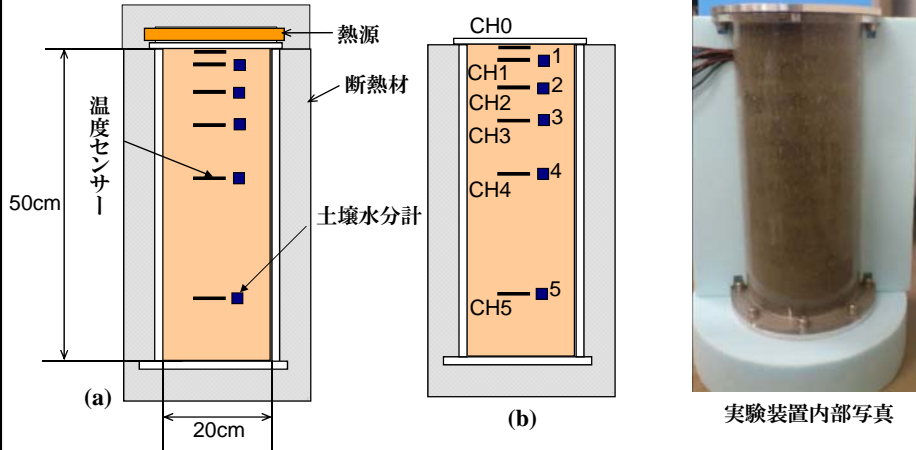
装飾壁画の損傷

- カビ・虫
- 結露
- 剥落

石室内部の温湿度環境の推定



③ 石室内部の温湿度環境の制御



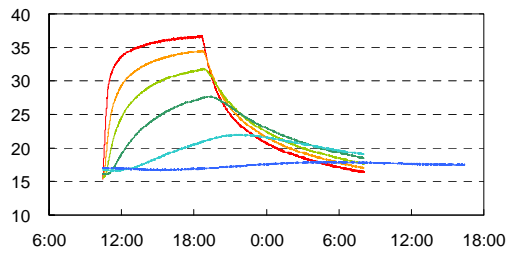
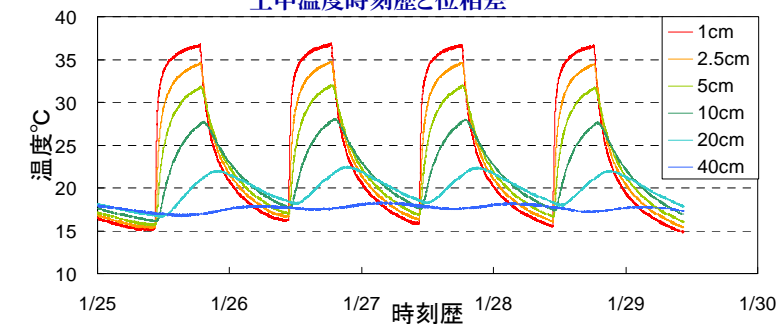
(a) 8時間40°Cの熱エネルギーを供給 → (b) 16時間熱を放射(室温15°C)

温度変化の再現性、位相差を確認

算出した
温度拡散係数と比較

③ 石室内部の温湿度環境の制御

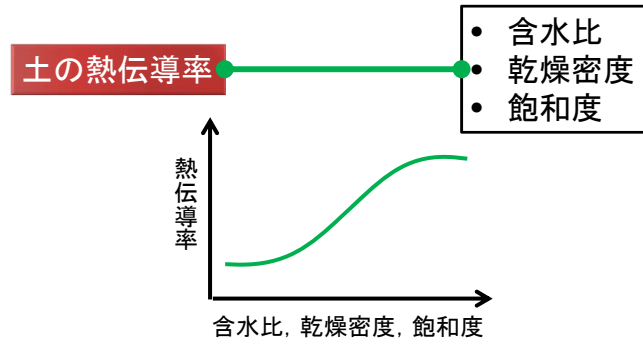
土中温度時刻歴と位相差



熱源以深 (cm)	温度変化 $\Delta T(^{\circ}\text{C})$	位相差 (hr)
1	21.6	0
2.5	19.5	0.08
5	16.7	0.33
10	12.6	1.5
20	6.9	3
40	1.5	7

③ 石室内部の温湿度環境の制御

墳丘土の伝熱特性の把握



温湿度環境の推定精度の向上

- 墳丘土の熱伝導率～含水比・乾燥密度・飽和度関係を調べる
- 熱伝導率の推定式の適用性を検討する

墳丘斜面の安定性

牽牛子塚古墳（奈良県明日香村）

2012年6月に豪雨によって墳丘の表層の一部が崩壊



2012年8月撮影

斜面のすべりのメカニズム

土塊の力のつり合いを考える

すべりを起こす力

すべりに抵抗する力
(摩擦力+粘着力)

すべりを起こす力 = すべりに抵抗する力
安定

斜面のすべりのメカニズム

自重の増加に伴って**増加**

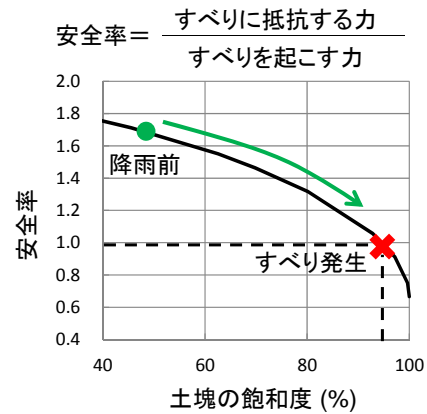
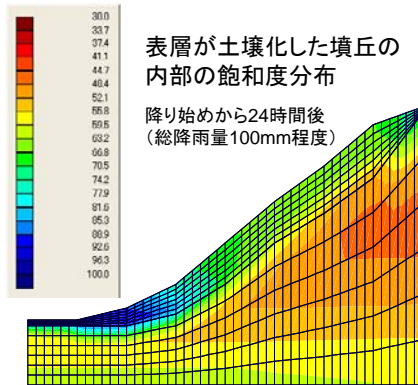
粘着力の低下に伴って**減少**

すべりを起こす力 > すべりに抵抗する力
すべり発生

安定性の検討方法

雨水の墳丘内部への浸透挙動をシミュレーション

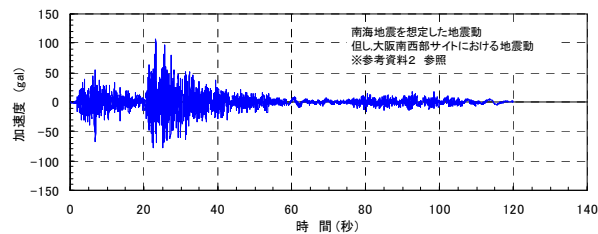
浸透による土塊の自重増加、強度低下を考慮して安全率を算定



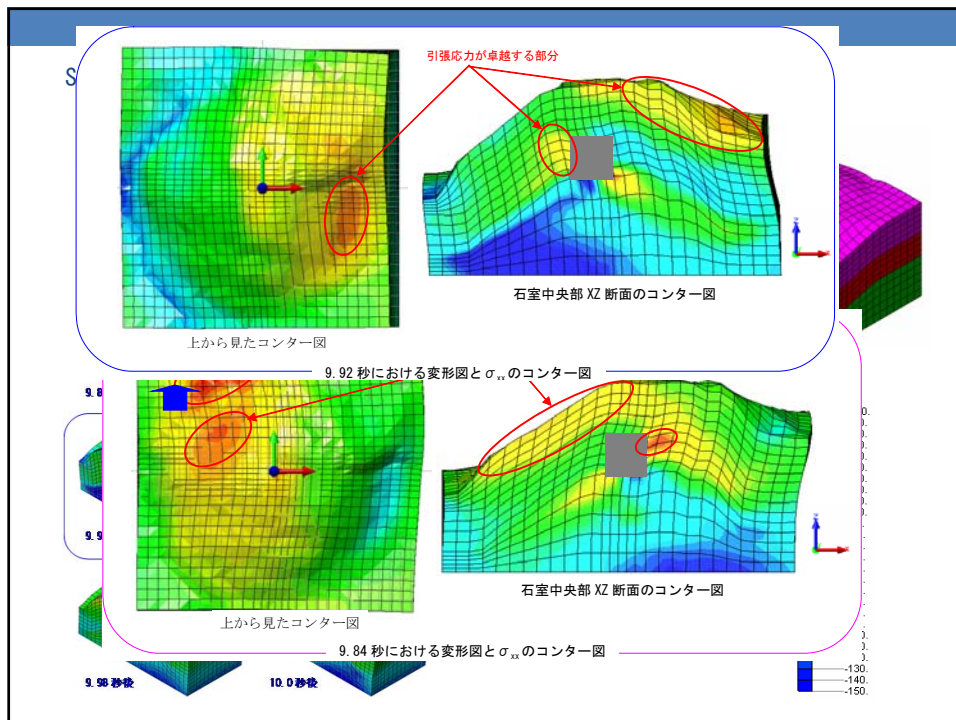
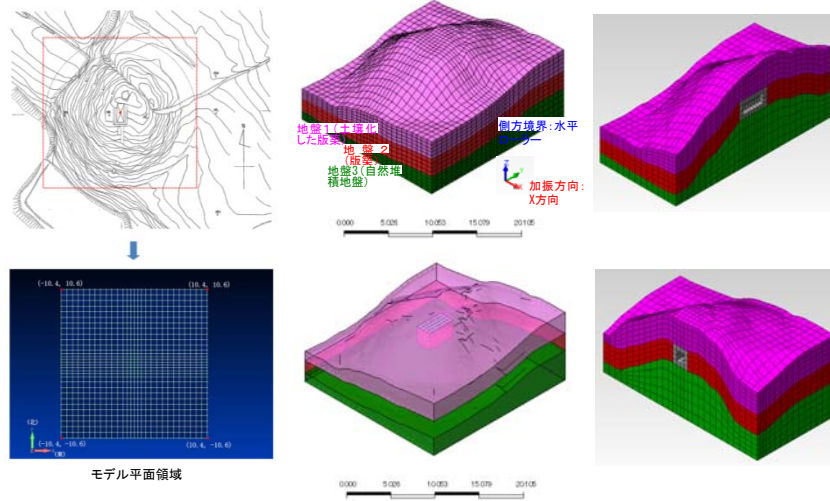
高松塚古墳3次元動的FEM解析

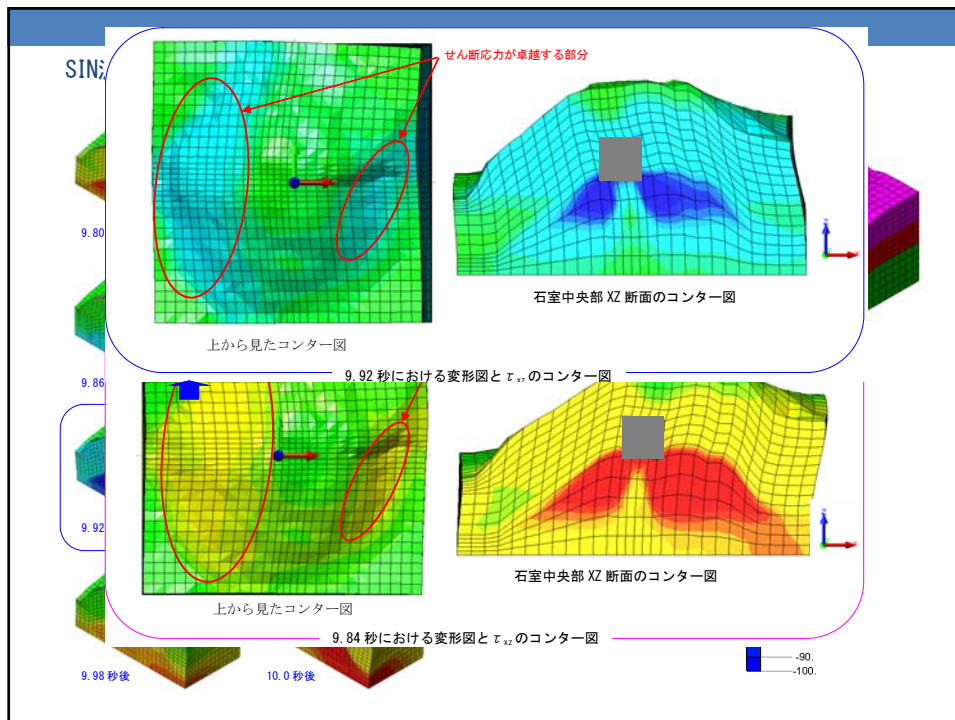
【解析条件】

- (1) 解析方法 : 3次元動的FEM解析
- (2) 解析範囲 : 墳丘周辺のみ
- (3) 材料モデル : ①地盤1 (土壌化した版築) →非線形材料 (R0モデル)
②地盤2 (版築) →非線形材料 (R0モデル)
③地盤3 (自然堆積土) →非線形材料 (R0モデル)
④石室 →弾性材料
- (4) 境界条件 : 側方境界 水平ローラー
- (5) 入力地震動 : ①正弦波 周期 1.0, 0.5, 0.2秒, 最大加速度 200, 400, 600 gal
②南海地震の想定地震動 (参考資料2 参照)



有限要素メッシュ





地震時の墳丘の挙動と考慮しておくべきポイント

- ①高松塚古墳の墳丘部の固有周期は0.17秒であり，地震としては，プレート境界型巨大地震より断層直下型地震による短周期の地震動の方が危険である。
- ②地震動による亀裂の要因となるせん断応力および引張応力は，石室の側壁部付近および墳丘の法尻付近に発生する。
- ③南海地震想定地震動では，せん断による亀裂が発生するレベルには達しないが，引張応力による表層付近の亀裂および石室側部の剥離に伴う石室上部から放射状に進展する亀裂の発生が考えられる。また繰り返し被災することで徐々に劣化することを考慮する必要がある。

おわりに

