



2022/07/15

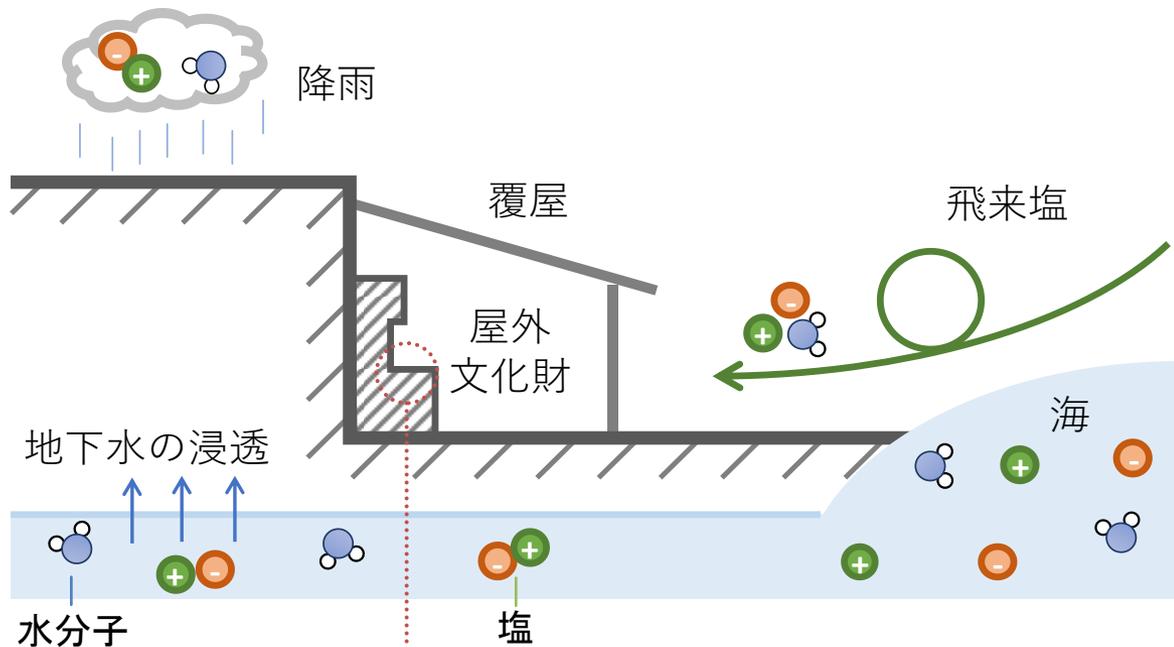
防水工法開発協議会
夏季研究開発協議会資料

遺構保存における覆屋建築の役割について —大分元町石仏の塩類風化抑制対策事例をもとに—

京都大学大学院 工学研究科

高取 伸光

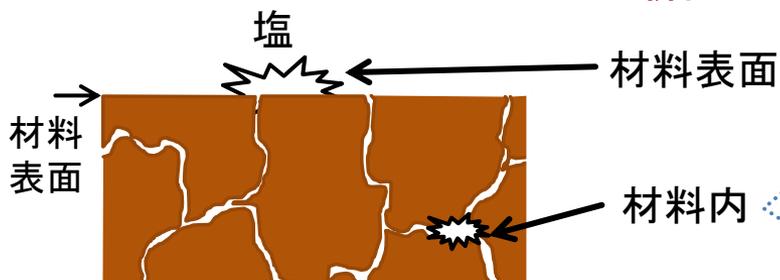
塩類風化現象とは



元町石仏とそれを保護する覆屋

塩類風化現象 ⇒ 抑制対策が必要

析出



- ・材料内で塩が析出
- ・析出塩が応力発生

⇒ 材料が破壊

塩類風化

実験・実測など

数値解析など

設計・施工など

問題

原因分析

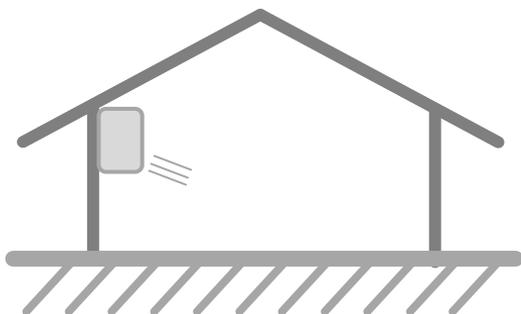
解決手法

結果予測

実施

塩の析出・応力発生抑制

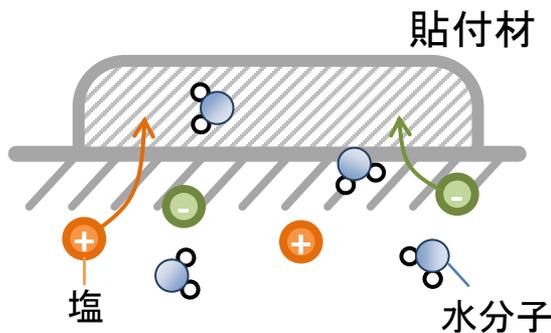
環境制御



塩の析出
応力発生) 抑制

塩の除去

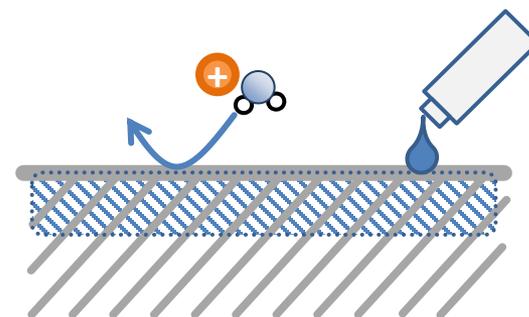
脱塩



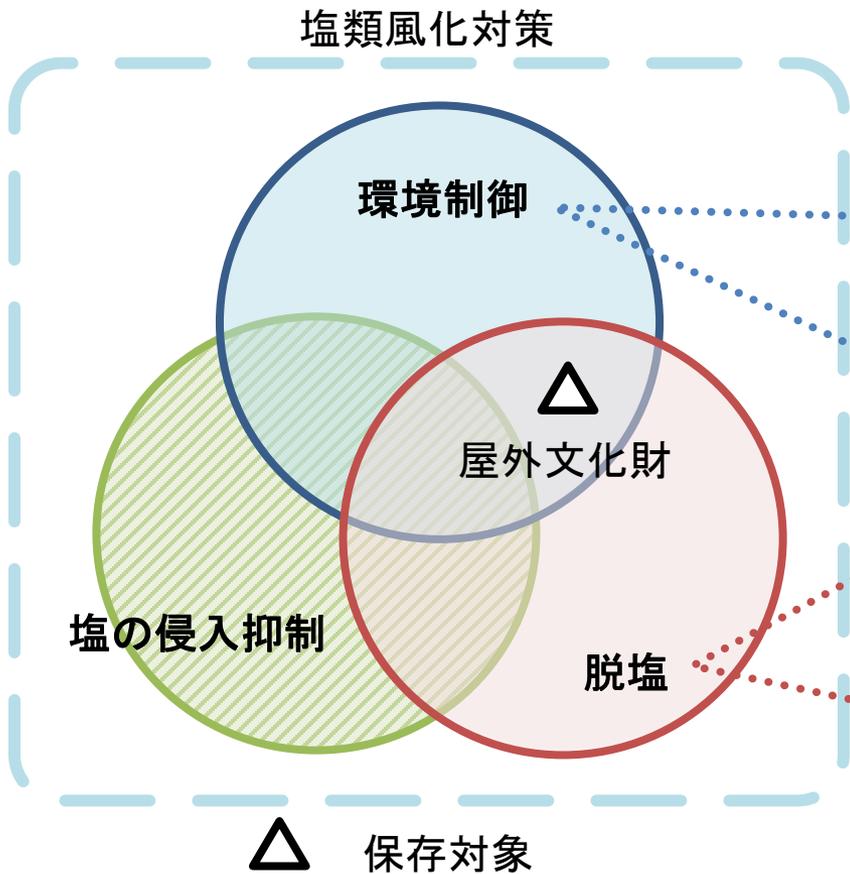
材料内の塩を除去

塩の侵入抑制

防水材料・撥水材



塩の侵入を防止



環境制御による塩類風化抑制

- ◆ 解決手法の具体例
 - ・空調制御 ・ 覆屋による環境調整 など
- ◆ 問題点
 - ・環境の制御目標が対象ごとに異なる
(地盤・空間側の環境、塩・材料の種類などに依存)
→ 対象ごとの**原因分析**と**結果予測**が重要

脱塩による塩類風化抑制

- ◆ 解決手法の具体例
 - ・貼付材を用いた脱塩 など
- ◆ 問題点
 - ・対象ごとに脱塩手法は異なる(同上)
 - ・**結果予測方法**の妥当性に議論の余地有り
(既往の理論で塩の移動を精緻に予測可能?)

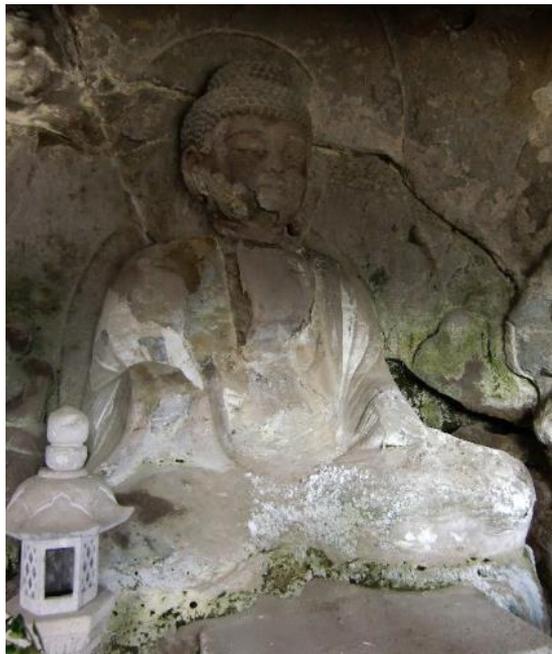
屋外文化財：塩の侵入抑制は困難な場合有り

研究の流れ

4



元町石仏を保護する覆屋



元町石仏薬師如来像 塩の析出が見られる



塩類風化抑制

環境制御

数値解析

目的

- ・覆屋による**環境制御**を用いた磨崖仏の塩類風化抑制効果を数値解析により明らかにすること



対象 : 元町石仏

- ・国指定史跡である**磨崖仏**
- ・塩類風化が懸念

方法

- ・**熱と水分のみの移動**を考慮した数値解析

→ 硫酸ナトリウム塩の応力発生機構を考慮

理由

- ・実環境下の塩濃度、成分が測定困難
- ・液水と溶液では移動の傾向は大きく変わらない

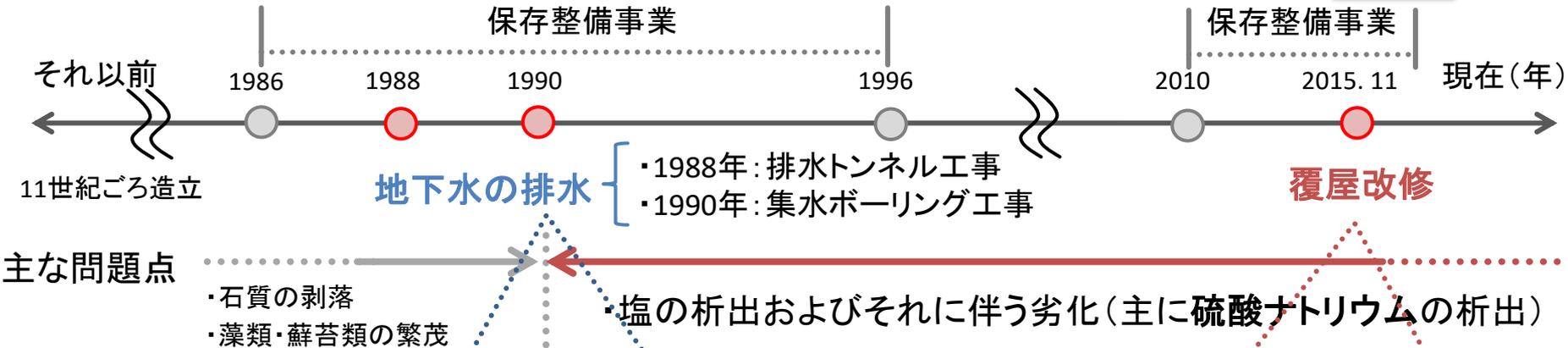


元町石仏・覆屋をモデル化 + 数値解析

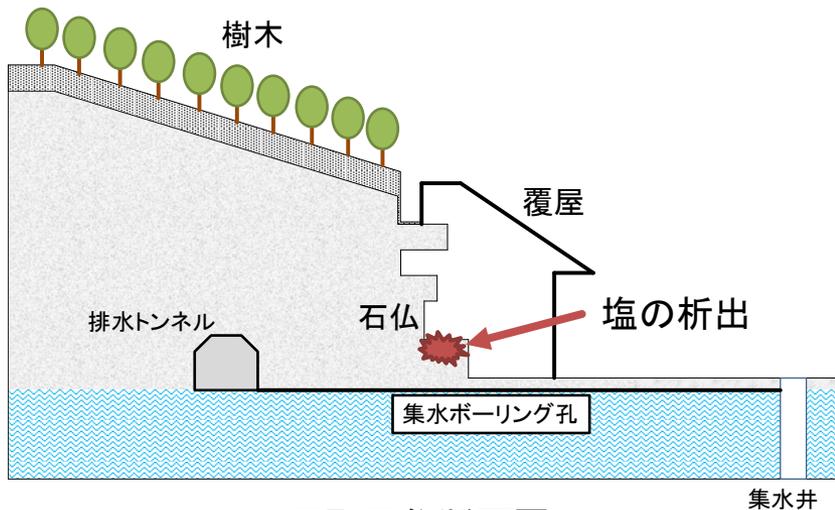
解明

- ・周辺温湿度環境と塩類風化の**原因**
- ・元町石仏の覆屋の環境性能と塩類風化**抑制効果**

元町石仏の保存背景

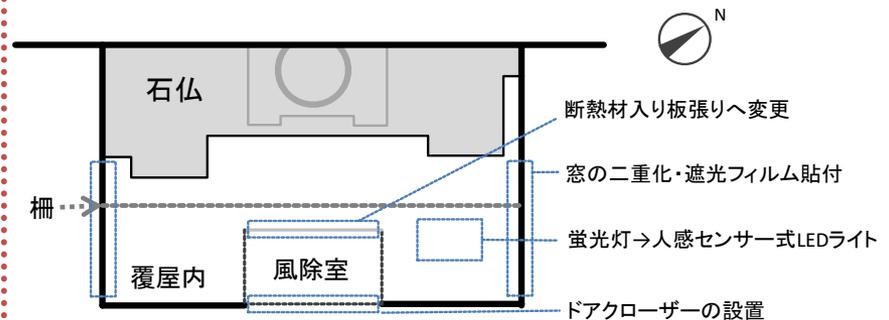


◆ 地下水の排水



地盤環境が変化

◆ 覆屋の改修

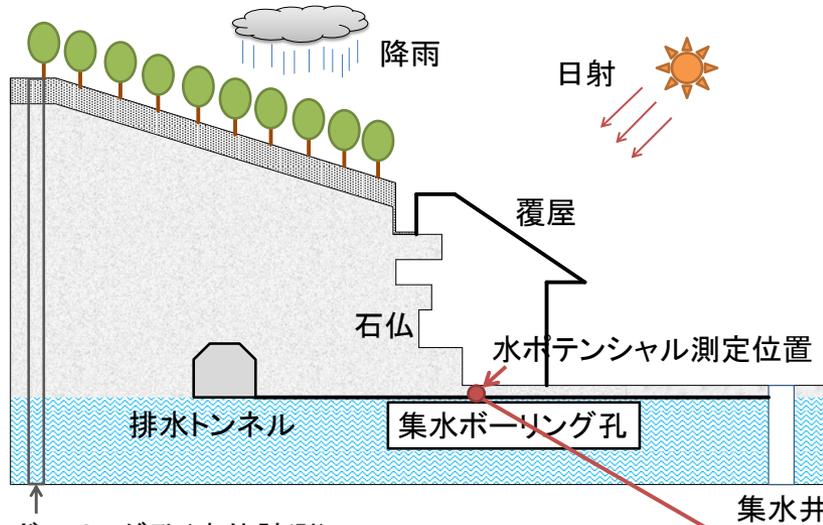


元町石仏平面図

覆屋の改修

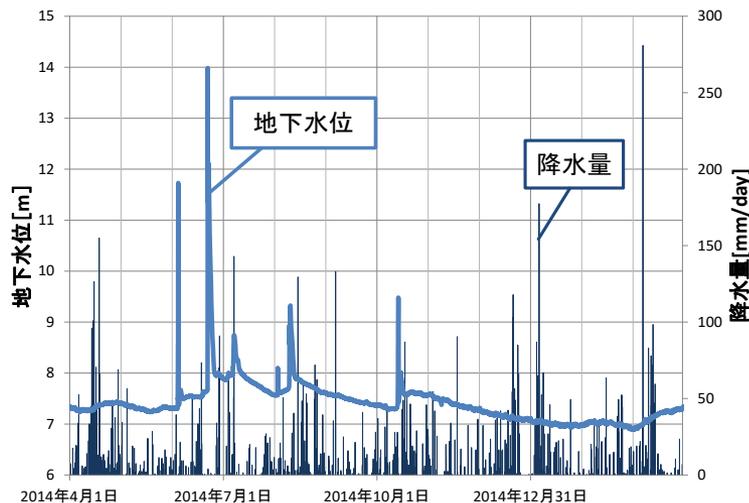
- ・断熱性向上 (Improvement of thermal insulation)
- ・気密性向上 (Improvement of airtightness)
- ・熱取得の削減 (Reduction of heat gain)

覆屋内環境が変化



ボーリング孔(水位計測)

水位計測結果(大分市教育委員会(2015)より作成)



◆ 地下水位

- ・ 年間を通じてほぼ一定(石仏床下約1m)

◆ 水ポテンシャル(石仏床下約10cm地点)

(覆屋改修後)

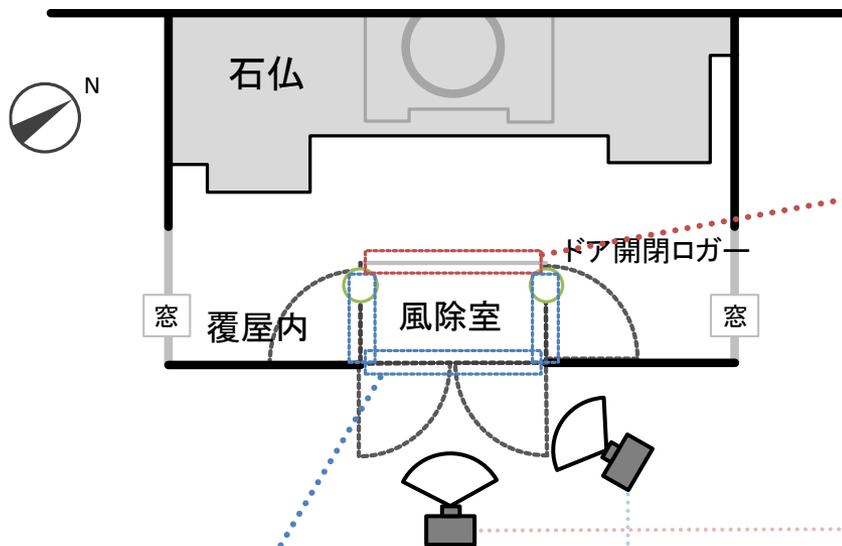
- ・ 降雨の影響は小さい
- ・ 年間を通じて変動は小さい (RH99%以上)

➡ 地盤は年間を通じて高湿状態

水ポテンシャル測定結果(覆屋改修後)(降雨量は気象庁より)



覆屋の改修(2015年)

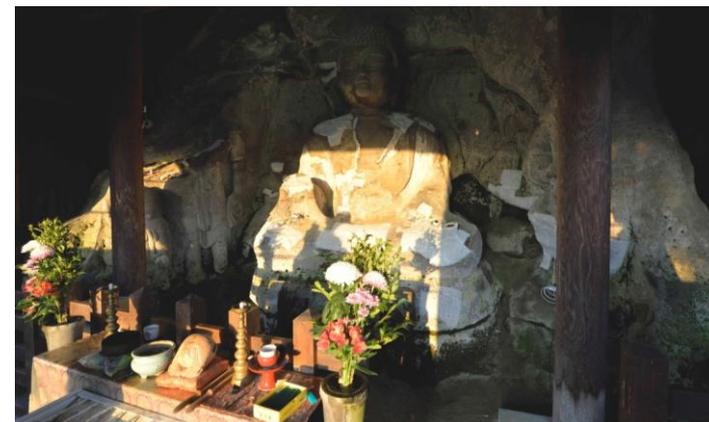
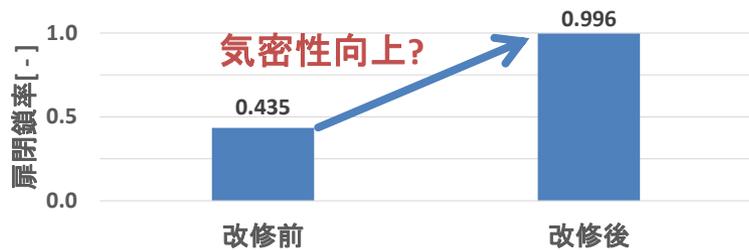


正面ガラス扉→断熱材入り板張りへ



(写真:大分市教育委員会(2016))

ドアクローザーの設置(写真:大分市教育委員会(2016))

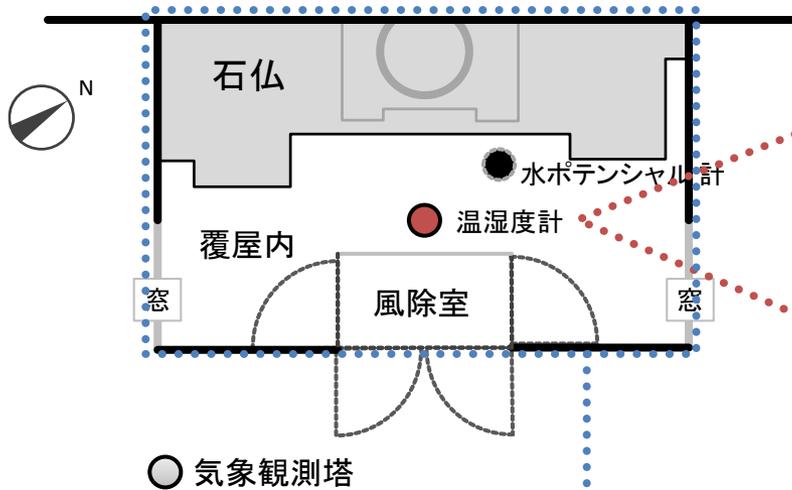


改修前 : 秋~冬に石仏に直達日射が当たる

◆ 覆屋の改修

- ・ 断熱性向上
- ・ 気密性向上
- ・ 熱取得の削減

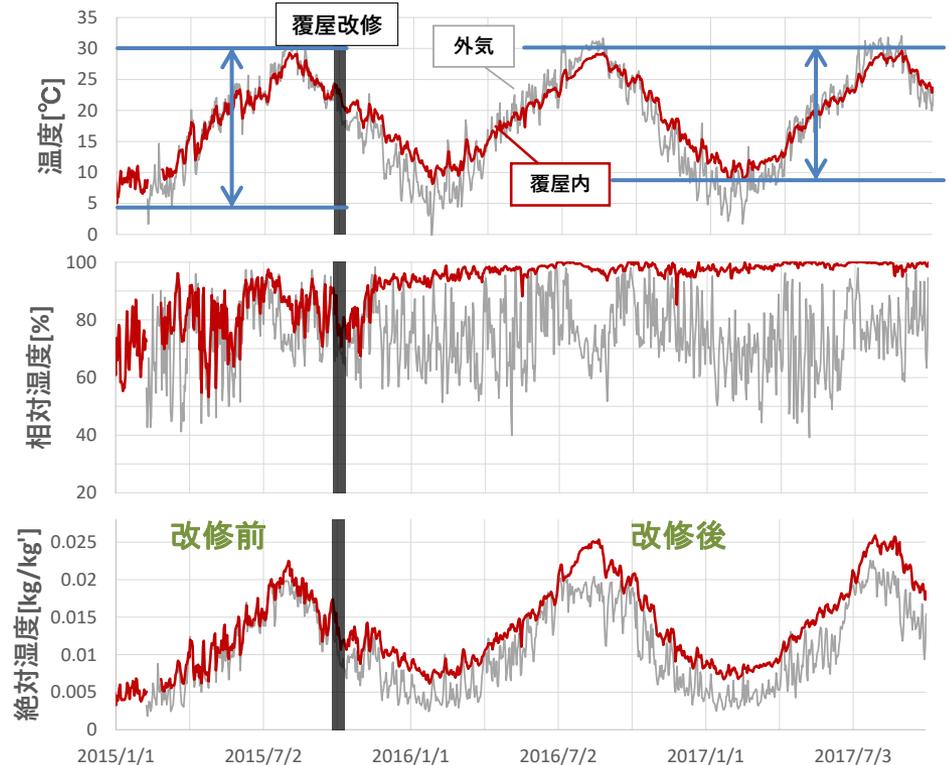
覆屋内の温湿度環境



覆屋内外換気回数 (CO₂減衰法にて測定)

改修後 { 窓閉鎖時 : 0.2 [回/h]
窓開放時 : 10.0 [回/h]

覆屋内外の約3年間の温湿度測定結果 (日平均値)



◆ 覆屋内相対湿度・絶対湿度 (覆屋改修後)

- ・ 相対湿度は90%以上で安定
- ・ 絶対湿度は外気より高い

◆ 覆屋内温度 (覆屋改修後)

- ・ 年間変動が縮小

地盤からの水分が原因?

実態を把握

モデル化 → 数値解析

塩類風化の評価方法

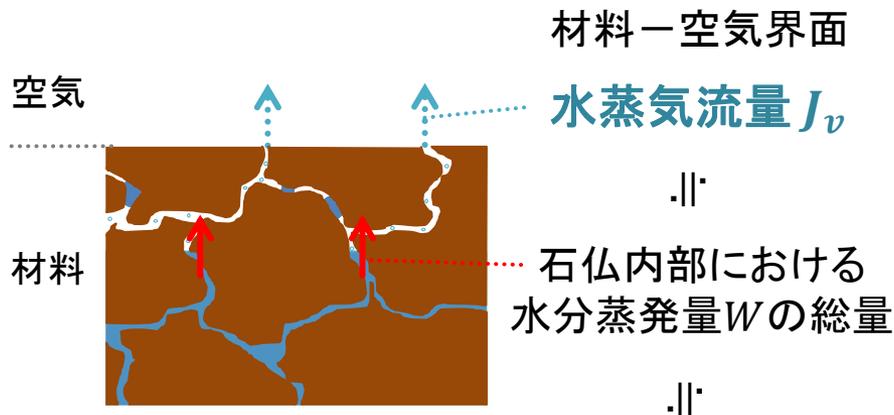
9



塩類風化による
材料破壊プロセス

- ・材料内で**塩が析出**
- ・析出塩が**応力発生**

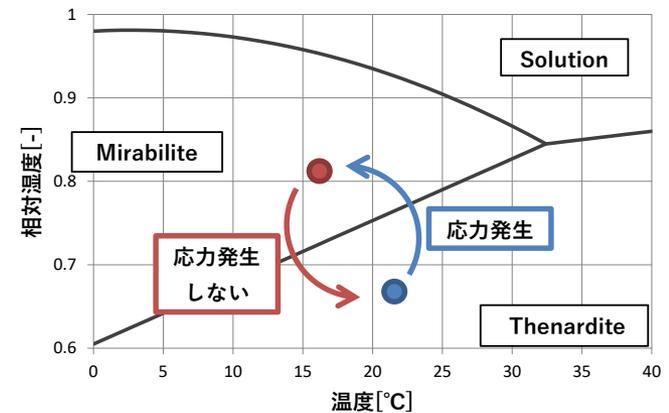
◆ 塩の析出プロセス



塩の析出傾向

◆ 塩 (Na_2SO_4) の応力発生プロセス

Flatt(2002)より



Na_2SO_4 相状態: 温度・相対湿度に応じて変化

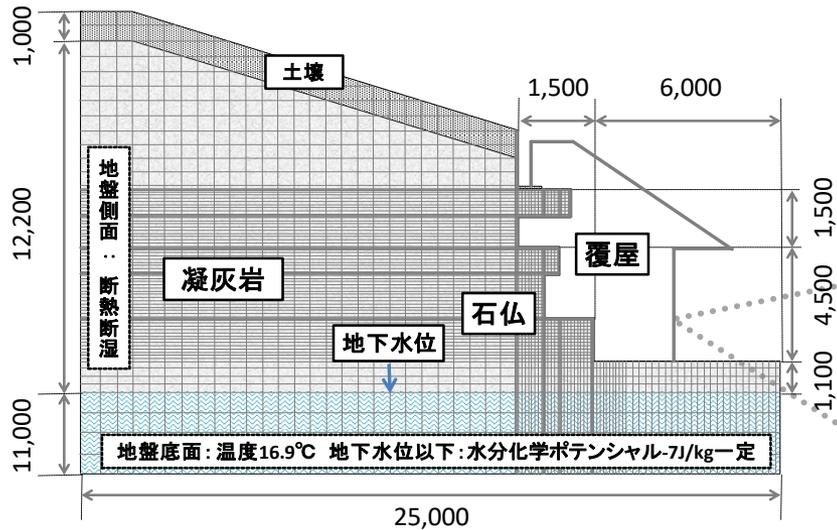
相変化時(Thenardite \Rightarrow Mirabilite)に応力発生

仮定

- ✓ 材料内の温湿度・塩の相が瞬時に平衡
- ✓ 塩の濃縮しやすい箇所を除けば塩濃度は希薄
(\equiv 塩が溶液の移動に与える影響は小さい)

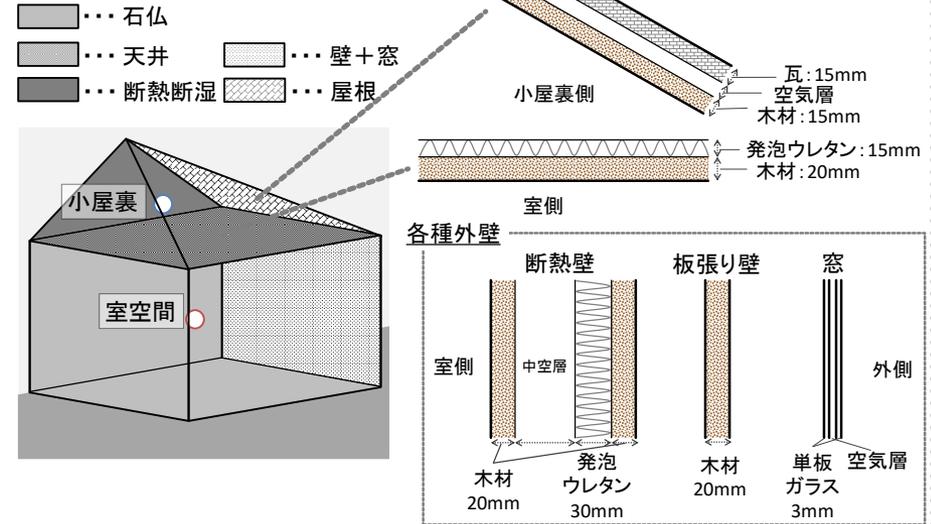
熱と水分のみの解析

\rightarrow 塩類風化を評価



石仏を含む崖面の2次元モデル

覆屋内温湿度解析モデル



覆屋壁体の1次元モデルと崖面の2次元モデルを連成した
覆屋内温湿度解析モデル

◆基礎方程式(材料内) 松本衛(1979)より

熱収支式 : $c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \{(\lambda + r\lambda'_{Tg})\nabla T\} + \nabla \cdot (r\lambda'_{\mu g}\nabla \mu)$
 水分収支式 : $\rho_w \left(\frac{\partial \psi_w}{\partial \mu}\right) \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla \cdot [\lambda'_{\mu}(\nabla \mu - n_x g)] + \nabla \cdot (\lambda'_T \nabla T)$
 熱境界条件 : $\alpha(T_0 - T_i) + r\alpha'_m(p_0 - p_i) + q_s = -(\lambda + r\lambda'_{Tg})\frac{\partial T}{\partial n} - r\lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial n}$
 水分境界条件 : $\alpha'_m(p_0 - p_i) + J_p = -\lambda'_{\mu} \left(\frac{\partial \mu}{\partial n} - n_x g\right) - \lambda'_T \frac{\partial T}{\partial n}$

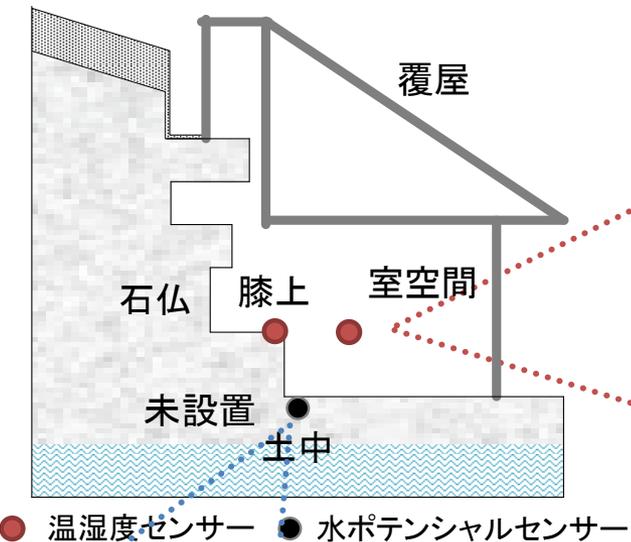
◆基礎方程式(空間)

熱収支式 : $c_A \rho_A V \frac{\partial T}{\partial t} = \sum S \alpha_i (T_w - T_i) + \sum c_A \rho_A V N (T_0 - T_i) + Q$
 水分収支式 : $\rho_A V \frac{\partial A}{\partial t} = \sum S \alpha_i (P_w - P_i) + \sum \rho_A V N (A_0 - A_i)$

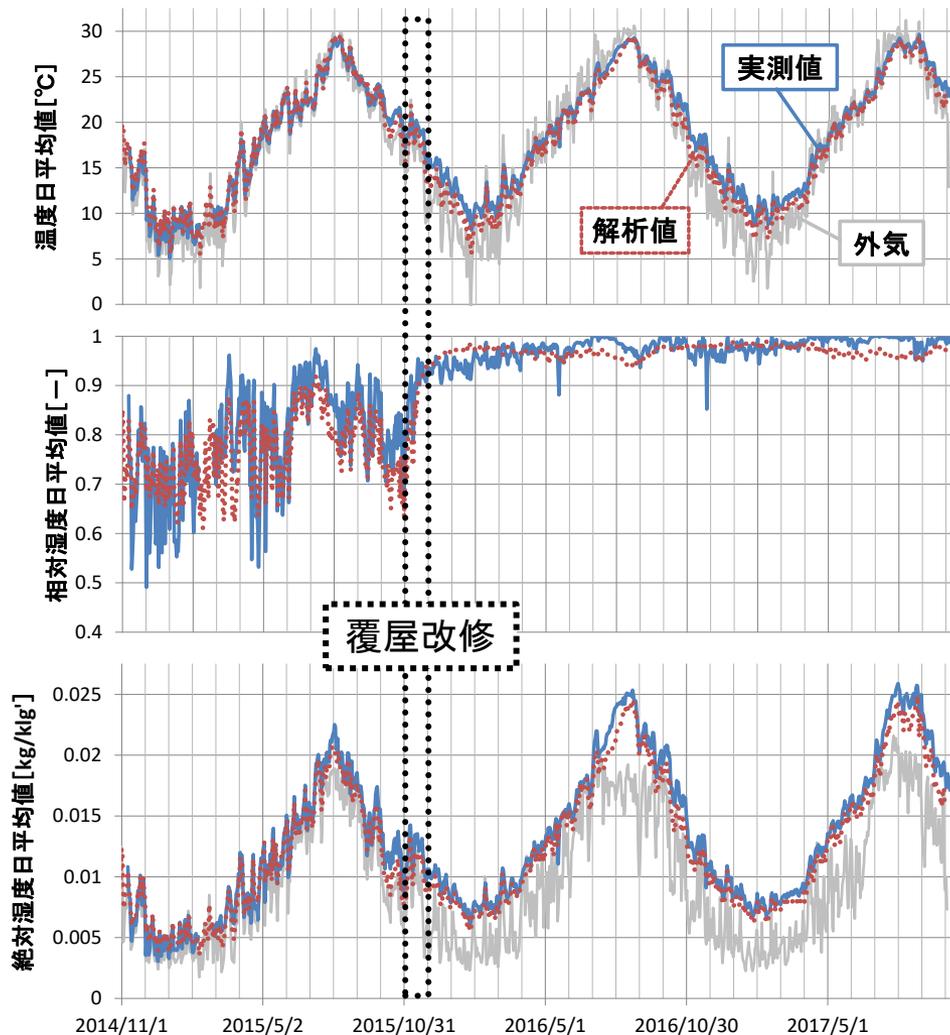
- ◆ 石仏+地盤(2次元)
 - … 日射・地下水浸透・降雨を考慮
 - ◆ 覆屋壁体(1次元)
 - … 覆屋の断熱性・気密性・熱取得を考慮
- } 連成
} 覆屋内空間

➡ 温湿度性状を有限差分法により計算

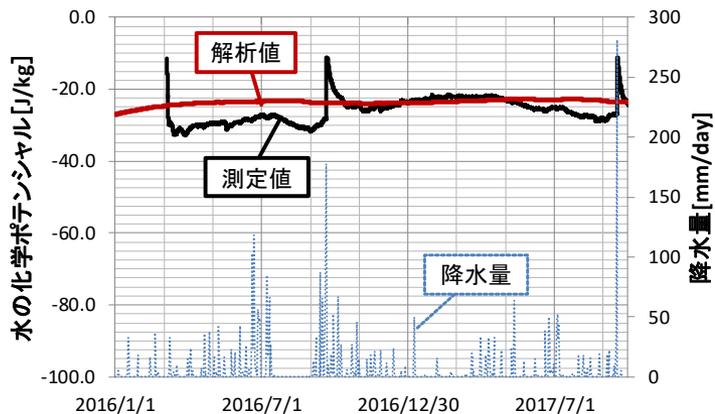
実測値と解析値の比較



室空間の温度・水分状態(日平均値)



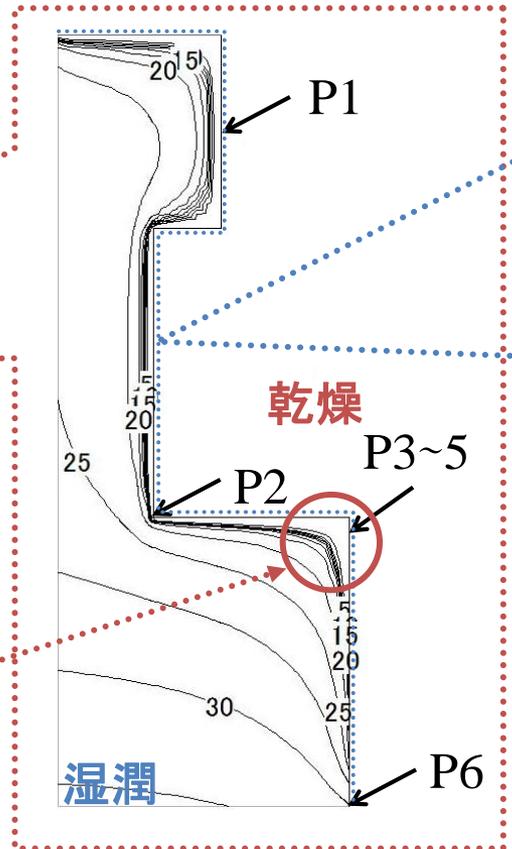
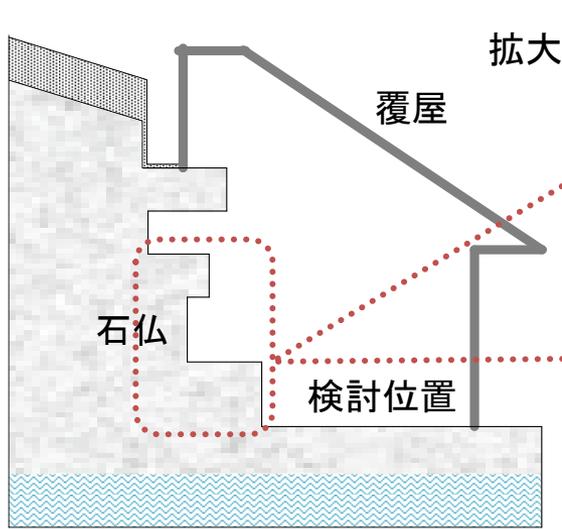
土中の水分状態(覆屋改修後のみ)



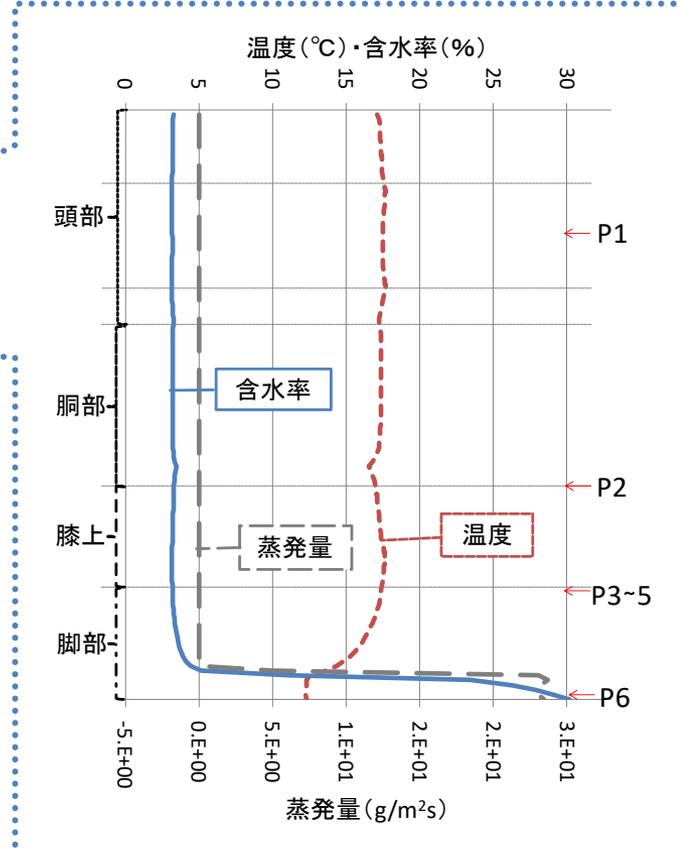
オーダーは概ね一致

覆屋改修前後ともに概ね一致

石仏表面・内部の水分状態



石仏内含水率分布



石仏表面温度・含水率分布

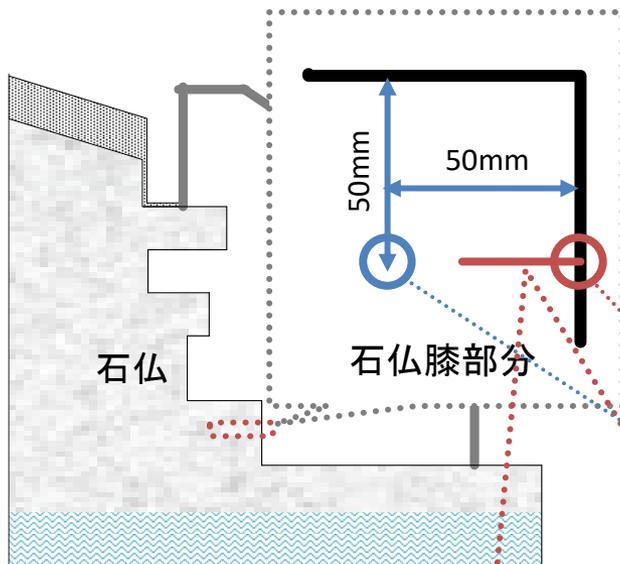
着目 : 石仏膝

→ 調査にて劣化が危惧

含水率分布

- 石仏内部 : 地下水の吸い上げにより高含水状態
- 石仏表面 : 足元以外は低含水率(乾燥)

石仏表面および内部の水分変動



◆ 石仏膝表面

水分性状 : 年間を通じて乾燥傾向

塩の相状態 : 主にThenardite状態を取る

◆ 石仏膝内部

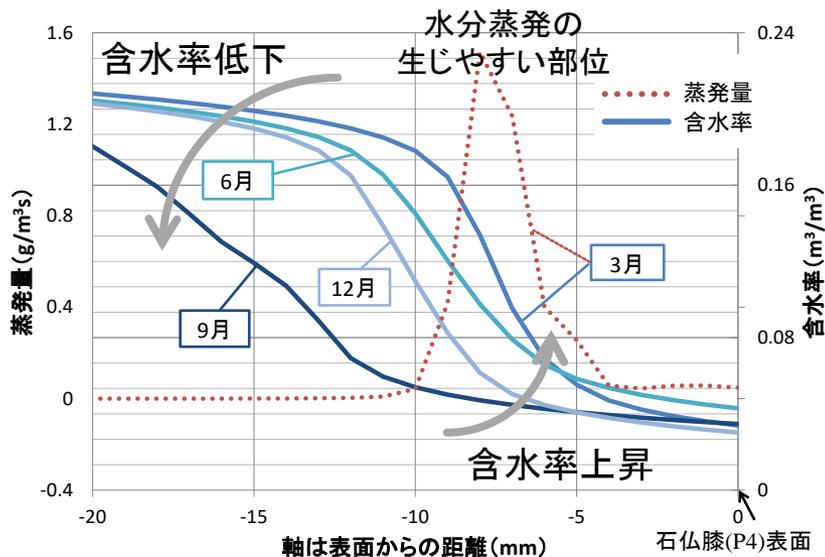
水分性状 : 乾燥と湿潤を繰り返す + 水分の蒸発が発生

塩の相状態 : Thenardite - Mirabilite境界付近を変動

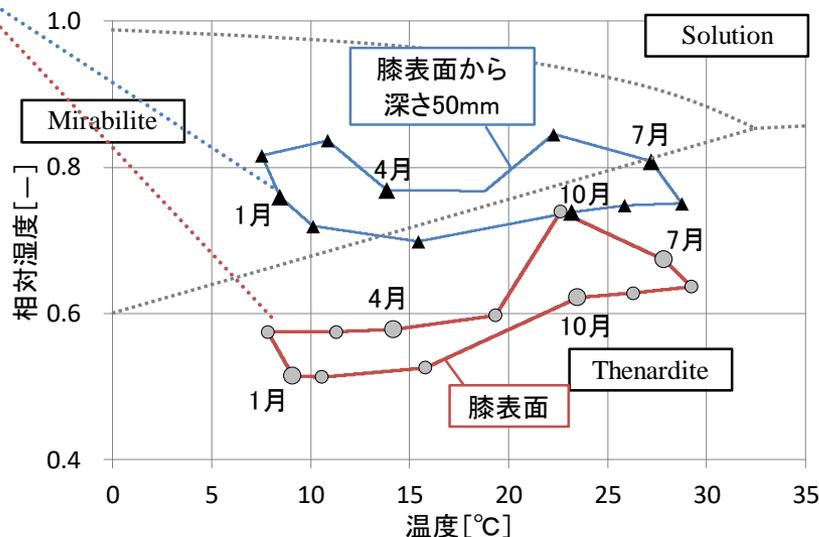
環境変動の影響



内部で塩の析出と応力発生 → 塩類風化の危険性が高い



膝内部の月平均含水率・蒸発量



温度・相対湿度月平均値を硫酸ナトリウムの相図にプロットした図

覆屋の改修効果検討のための計算条件

◆ 計算条件



覆屋の改修：環境性能を向上させる要素ごとに分離

	改修前	断熱改修後	気密性向上	熱取得削減	改修後
断熱性	Before	After	Before	Before	After
気密性	Before	Before	After	Before	After
熱取得削減	Before	Before	Before	After	After

✓ 断熱性の向上 = 壁体構成を変更

U_A値 { 改修前(Before) 2.54[W/(m²·K)]
改修後(After) 1.38[W/(m²·K)]

✓ 気密性の向上 = 室内外の換気回数変更

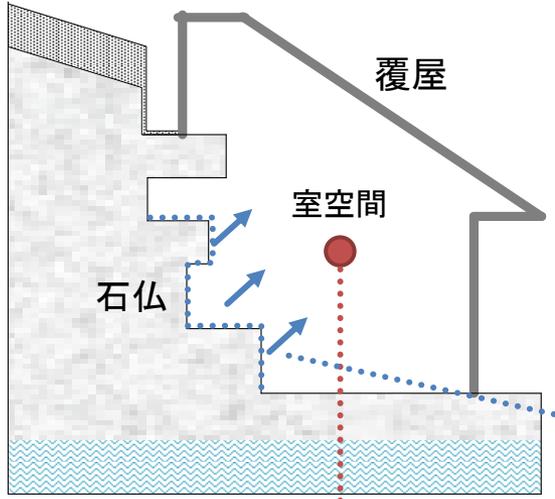
- ・ 改修前(Before) 10.0[回 / hour]
- ・ 改修後(After) 0.2[回 / hour]

✓ 熱取得の削減 = 日射量・照明発熱量削減

方位	表面積[m ²]			
	NE・SW		SE	
改修の有無	Before	After	Before	After
断熱壁	13.4		17.3	24.5
単板ガラス	5.17	0.0	9.5	0.0
二重窓	0.0	5.17	0.0	2.3

	改修前(Before)	改修後(After)
窓の日射透過率[-]	0.6	0.2
照明の発熱量[W]	300.0	0.0

覆屋の改修による塩の析出抑制効果



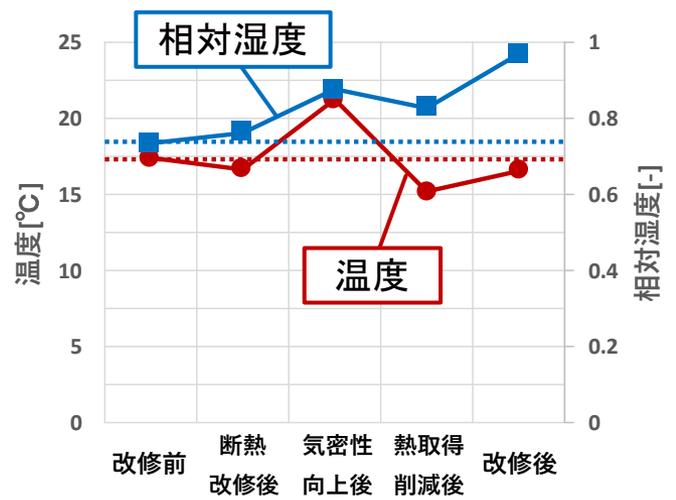
◆ 覆屋内の温湿度年平均値

相対湿度 : 全ての改修後で上昇

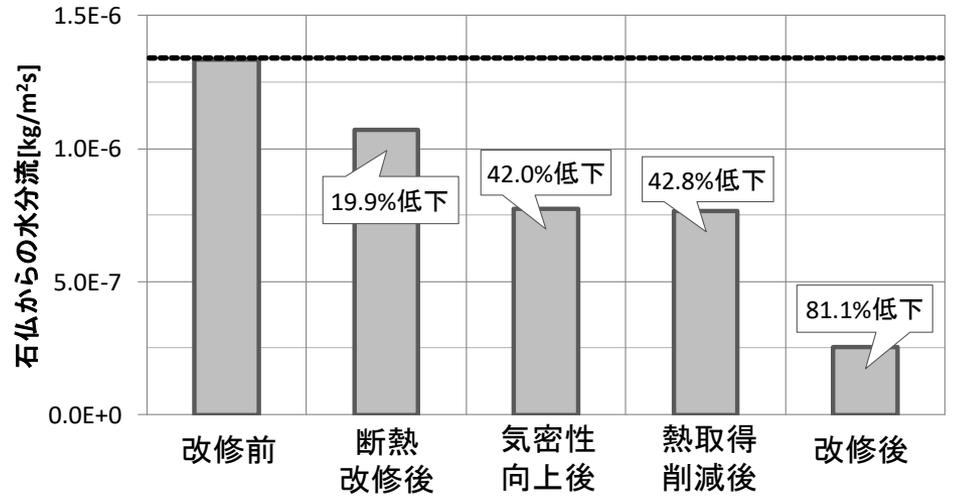
◆ 石仏表面からの年平均水分流量(≒塩の析出量)

- ・ 全ての改修後で低下
- ・ **気密性向上・熱取得の削減**が大きく寄与

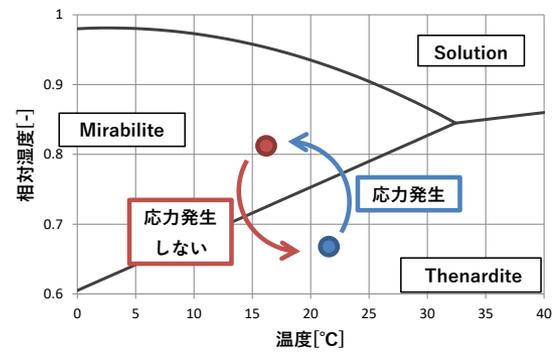
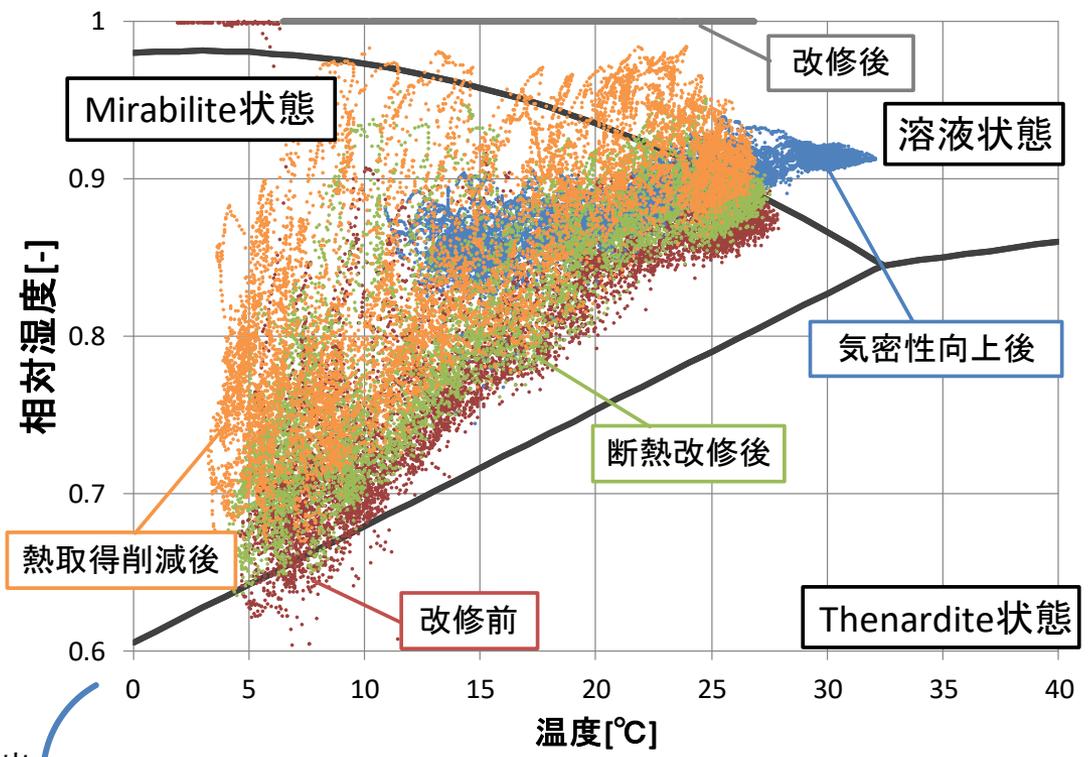
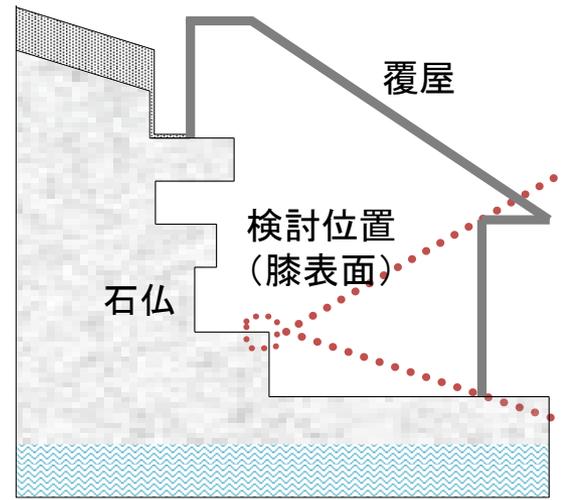
◆ 各改修前後の覆屋内温湿度の年平均値



◆ 石仏表面からの水分流の年平均値



塩による応力発生頻度の検証



算出

石仏膝部の1時間ごとの温湿度瞬時値と Na_2SO_4 の相図の一例

	改修前	断熱改修後	その他
相変化回数 [-]	71	7	0

相変化回数をカウント

※相変化回数は Thenardite
→ Mirabilite への変化回数をカウントした

覆屋の改修により Na_2SO_4 の相変化回数は低下

⇒ 塩の相変化に伴う応力発生は抑制

➤ 本研究の目的

- 元町石仏における**覆屋内の温湿度環境変動と塩類風化の危険性の関係**の解明
- 覆屋およびその改修による元町石仏の**塩類風化抑制効果**の解明

➤ 結論

- 実測調査により元町石仏では年間を通じて地盤の水分環境（地下水）が高い値で推移しており塩類風化との関連性が高いものと考えられる。また2015年における覆屋の改修により**断熱性の向上・気密性の向上・熱取得の削減**といった環境性能の向上が確認された。
- 実測調査を基に元町石仏を模した数値解析モデルを作成。熱と水分の移動を考慮した数値解析により実環境の温湿度を再現できることを明らかにした。
- 数値解析：**覆屋改修以前の環境**では、石仏内部で塩の析出および析出塩による応力が発生しやすい環境にあり、**塩類風化の生じやすい環境**であったことを明らかにした。
- 数値解析：元町石仏では覆屋の断熱性、気密性の向上、覆屋内への熱取得を削減により **塩の析出量および析出塩による応力の発生を抑制**できることを明らかにした。