

京都大学	博士（工学）	氏名	高 取 伸 光
論文題目	塩類風化抑制のための磨崖仏の覆屋環境と塩溶液移動に関する基礎的研究		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、塩類風化抑制手法としての覆屋による環境制御手法と、脱塩を目的とした多孔質材料中の塩溶液移動に関する基礎的研究を主題としている。第 1 部は現在塩類風化が危惧されている磨崖仏である元町石仏を対象とし、覆屋を用いた環境制御による塩類風化抑制手法について、元町石仏およびその覆屋を模したモデルの熱水分数値解析から覆屋改修以前における元町石仏の塩類風化の危険性と、覆屋の改修による塩類風化抑制効果について検討を行ったものであり、8 章からなる。</p> <p>第 1 部 1 章は序論であり、研究背景および地盤に接する文化財の保存、塩類風化に関する既往研究を整理し、地盤に接する文化財の塩類風化抑制に関する課題についてまとめ、研究目的を述べている。</p> <p>第 1 部 2 章では、元町石仏の保存対策の経緯を整理し、これまで石質剥落や着生植物の繁茂、塩の析出といった劣化抑制を目的として、覆屋及び地盤の水分環境を変更する大規模な保存修理事業がこれまで行われてきたことを示し、元町石仏の塩類風化に影響を与える環境因子について考察を行った。</p> <p>第 1 部 3 章では、元町石仏の劣化状況調査および覆屋内および周辺環境の現地調査の結果と考察を行い、元町石仏および覆屋内の温湿度環境のモデル化方法について検討を行った。覆屋内および周辺環境調査結果から、地盤内部の水分状態は極めて高い値で推移していること、このため覆屋の気密性を向上させると覆屋内は極めて高湿な環境になるという知見を得た。</p> <p>第 1 部 4 章では、塩類風化のメカニズムについて既往研究を整理し、本研究における検討方法について示した。ここでは硫酸ナトリウム (Na_2SO_4) による塩類風化に着目し、塩類風化を (1) 塩が材料内部に析出すること、(2) 析出した塩が材料を破壊するほどの圧力を生じることの 2 つの過程に分離し検討を行うことを示した。</p> <p>第 1 部 5 章では、元町石仏における塩類風化を評価するための数値解析モデルについて示した。ここでは石仏を含む崖面を 2 次元で、覆屋の壁体を 1 次元でモデル化し、これらのモデルの室内側表面を境界面として室空気と連成することで覆屋内空間のモデル化を行った。また、これらのモデルの熱水分性状を明らかにするための基礎方程式および熱水分境界条件の計算方法、解析条件について示した。</p> <p>第 1 部 6 章では、元町石仏の形状および周辺環境と塩類風化の関係を数値解析により明らかにすることを目的とし、覆屋改修前における覆屋内環境が元町石仏薬師如来像の塩類風化に及ぼす影響について数値解析より検討を行った。得られた主な結論は以下の通りである。覆屋改修以前において元町石仏は石仏表面は乾燥傾向にあるものの、地下水の浸透の影響により石仏深部の含水率が高くなる傾向にある。そのため、水分の蒸発およびそれに伴う塩の析出は石仏内部の含水率の急激に減少する部位で主に生じる。また Na_2SO_4 の相変化に伴う応力発生は、凹部である石仏腰では石仏表面近傍の浅い位置で生じるのに対し、凸部では石仏膝では石仏内部の深い位置においても生じうると考えられ、凸部である石仏膝は塩の析出およびそれに伴う応力発生が生じやすい環境であることを示した。</p> <p>第 1 部 7 章では、覆屋の改修による元町石仏の塩類風化抑制効果について覆屋内温湿度環境の数値解析により明らかにした。ここではまず覆屋改修時期を含む 2014 年 11 月 1 日から 2017 年 9 月 31 日までの期間における覆屋内温湿度変動を数値解析により概ね再現することで解析モデルの妥当性を確かめた。また、覆屋の改修を「断熱性向上」・「気密性向上」・「日射遮蔽性向上」の 3 要素に分けることで、覆屋の改修要素ごとの塩類風化抑制効果について検討を行った。その結果、元町石仏では「断熱性向上」・</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	高 取 伸 光
<p>「気密性向上」・「日射遮蔽性向上」の全ての改修で石仏からの水分蒸発に起因する塩の析出を抑制できること、Na_2SO_4の相変化に伴う塩類風化の危険性は減少しうることを示し、覆屋の改修後では、塩類風化の危険性が大幅に抑制された可能性が高いことを示した。</p> <p>第1部8章は結論であり、第1部で得られた成果と今後の課題について整理した。</p> <p>第2部は、脱塩量の数値解析による定量的評価を目的とした多孔質材料中における熱・水分・塩同時移動理論の開発を行ったものであり、特に粘土のように電荷を有する粒子で構成される多孔質材料中における浸透による脱塩に着目し、浸透現象を材料と塩溶液間の静電気力および塩溶液間の塩濃度差の連成問題と捉え、非平衡熱力学に基づいた熱・水分・塩の同時移動理論を示した。また、既往の粘土を用いた浸透による脱塩実験に対する数値解析により本理論の再現性を確認することで、脱塩における浸透現象の利用可能性について考察を行った。第2部は7章からなる。</p> <p>第2部1章は序論であり、多孔質材料中における熱・水分・塩移動ならびに粘土鉱物中における塩溶液移動、また溶液の浸透移動に関する既往研究についてまとめ、研究目的を述べている。</p> <p>第2部2章では、非平衡熱力学の基礎理論について示すとともに、非平衡熱力学に基づいた多孔質材料中に存在する塩溶液の駆動力について検討を行った。またこの検討結果をもとに、松本の多孔質材料中における熱水分同時移動方程式を塩を含んだ場合に拡張することで、多孔質材料中の熱水分塩同時移動の基礎方程式を構築し、多孔質材料中に存在する塩溶液の駆動力として“自由水を基準とした化学ポテンシャル”、“毛管力”、“静電気力”、“重力”、“内部圧”、“塩濃度”に分けて表現できることを示した。</p> <p>第2部3章では、材料の静電気力が多孔質材料中の塩溶液移動に及ぼす影響について溶液の電気二重層構造を考慮することで検討を行った。ここでは多孔質材料中の溶液は微小領域において電気的中性を保つという仮定の元で静電気力による溶液の駆動力を溶液の体積および領域内の平均的な塩濃度の関数としてモデル化することで静電気力による多孔質材料中塩溶液移動の基礎方程式を示した。</p> <p>第2部4章では、粘土のように電荷を有する多孔質材料中における浸透現象について、溶液の電気二重層中では材料電荷と対になるイオン、バルク層中では材料電荷と同じ符号のイオンの移動が制限されることが浸透現象の原因である考え、溶液の浸透現象を引き起こす材料の半透膜性能の指標である反射係数のモデル化を行った。このことから粘土内部への浸透現象は生じるが、粘土内から電荷を持たない通常材料中への浸透は生じないことを示した。</p> <p>第2部5章では、数値解析における内部圧のモデル化方法を明らかにすることを目的とし、粘土膜のような溶質を透過する膜を介した塩溶液の浸透圧形成過程ならびに解消過程における塩溶液移動および内部圧の形成・解消過程の実態を実験および数値解析により明らかにした。</p> <p>第2部6章では、第2部の2章から5章までで示した電荷を有する多孔質材料中における熱水分塩同時移動理論による実現現象の再現性および、粘土中の浸透現象を静電気力と塩濃度差の連成問題と捉えたモデル化の妥当性を明らかにすることを目的とした数値解析を行った。数値解析では粘土膜を用いた脱塩に関する既往研究の実験結果を対象とし、実験結果と解析結果の比較・検討から数値解析の再現性および浸透による脱塩の利用可能性について検討を行った。この結果から本研究で提案した理論が既往の脱塩実験の結果を十分に再現できること、粘土膜を用いた脱塩には粘土が崩壊しないような拘束力が必要であることを示した。</p> <p>第2部7章は結論であり、第1部で得られた成果と今後の課題および本研究で構築した理論のこれからの展望について示した。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、塩類風化抑制手法としての環境制御による塩の析出および応力発生抑制方法と、脱塩による多孔質材料中に存在する塩の除去方法に関する基礎的研究である。第1部では現在塩類風化が危惧されている磨崖仏である元町石仏を対象とし、周辺環境と塩類風化の原因を解明し、覆屋を用いた環境制御による塩の析出やそれに伴う応力発生の抑制方法を解明することを目的としている。第2部では塩類風化抑制手法の一つである脱塩時の塩移動量を定量的に評価することを最終的な目標とした多孔質材料中における熱水分塩同時移動理論の開発を目的としている。得られた主な成果を以下に示す。

1. 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、これが塩類風化に影響を与えている可能性を実測調査により指摘した。また2015年における覆屋の改修により、覆屋の断熱性および気密性が向上したこと、日射熱取得の削減といった覆屋の環境性能が向上したことを実測調査により明らかにした。
2. 元町石仏およびそれを覆う覆屋を対象に、多孔質材料中の熱水分同時移動理論を用いた数値解析により覆屋内温湿度環境および石仏内の温湿度性状を明らかにし、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、覆屋の改修により断熱性、気密性の向上および覆屋内の日射熱取得を削減することで元町石仏における塩の析出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。
3. 粘土のように電荷あるいは極性を有する粒子で構成される多孔質材料中における熱水分塩同時移動方程式を、松本の熱水分同時移動方程式を非平衡熱力学に基づき塩を含んだ場合に拡張する形で構築した。この方程式では電荷を有する多孔質材料中塩溶液の静電気力および塩濃度差による流れが溶液の電気二重層構造を考慮することで生じることを明らかにした。また溶液の浸透移動を引き起こす材料の半透膜性能の指標である反射係数を電気二重層構造と連成することでモデル化を行った。
4. 既往の粘土を用いた浸透による脱塩実験に対する数値解析により、本理論が粘土内における浸透現象を十分に再現できること、また粘土中の浸透現象が材料と塩溶液間の静電気力および塩溶液間の塩濃度差の連成問題であることを検証した。また、数値解析の結果から浸透を用いた脱塩を利用するためには、セロファン紙のような濾過膜よりも粘土のようなイオン交換により浸透現象を引き起こす材料を脱塩材と基材との間を挿入したほうが良いこと、脱塩材および粘土には浸透圧による材料変形が生じない程度の強度あるいは拘束力が求められるという課題を示した。

以上のように、本論文は学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和2年2月17日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。