

京都大学	博士（工学）	氏名	謝 華 栄
論文題目	模擬古墳を用いた埋蔵環境下における遺物の保存に関する研究		

（論文内容の要旨）

本研究では、埋蔵環境下における遺物の現地保存のために埋蔵環境の温湿度、結露性状と酸素、二酸化炭素濃度の予測技術を確立することと、環境の形成メカニズムを明らかにすることを目的として、模擬古墳を用いた石室内温湿度、結露性状、酸素、二酸化炭素濃度など環境の予測技術を構築し、その形成メカニズムを把握した。その上で、石室内鉄製品の現地保存を事例として、石室内鉄製品の腐食速度と石室内の環境との関係について検討を行った。本論文は全6章から構成される。

第1章では、日本における未発掘古墳の石室内に埋蔵されている遺物の現地保存における課題であり、そのために石室内環境の形成メカニズムの把握と予測技術の確立の必要性が述べられた。その上で、埋蔵環境下の地下空間の環境の形成メカニズムと、環境因子が埋蔵される遺物の劣化の速度に及ぼす影響に関する既往研究を整理し、模擬古墳を用いる研究の必要性和古墳を対象とした埋蔵環境下における遺物の保存に関する課題をまとめ、本研究の目的と内容を示した。

第2章では、模擬古墳の長期間の計測結果から石室内温湿度、濡れ状態、酸素濃度と二酸化炭素濃度の年間変化及び周りの地盤内の環境、林内気象との関係を定量的に把握した。得られた主な結果を以下に示す。石室の年間平均気温は林内の気温とほぼ等しいが、変動幅は林内の気温の約3分の1であり、石室天井面と床面の温度の位相は林内気温から半月程度遅れた。夏期の石室の天井温度は床温度よりも最大約1.5°C高く、冬期は天井と床の温度は、夏期とは逆の関係で、温度差はわずかであった。石室の相対湿度は年間を通じてほぼ100%で一定であった。天井の濡れの程度は、天井の温度が低くなり結露が生じる冬期の方が大きくなった。模擬古墳の石室の酸素濃度は、年間は13%～18%の範囲で変化し、年平均は16%であった。石室の二酸化炭素濃度は、酸素濃度とほぼ逆の位相を持つ傾向であり、2016年には3%～9%の範囲で変動し、平均6%であった。一般的に言われている地盤内の酸素濃度と温度の間の相関は有意ではなく、降雨後に土壌中の酸素濃度の低下が観察され、含水率の増加と逆に酸素濃度は低下した。模擬古墳の石室内の温湿度、酸素、二酸化炭素濃度環境の年変動の傾向は、そのモデルとなった未発掘古墳の關鶏山古墳第二主体と類似しており、未発掘古墳の環境の一般的特性があることを確認した。

第3章では、熱水分同時移動理論に基づき模擬古墳地表面における枯葉層の熱水分移動抵抗を考慮した上で、模擬古墳石室内温湿度と結露性状の予測モデルを作成し、そのモデルを用いて石室内温湿度、結露性状の再現を行い、モデルの再現性を確認した。また、地表面枯葉、石室天井面石板の透水係数、石板の隙間がモデルの再現性に与える影響について検討を行った。その上で、解析結果から石室内温湿度、結露性状の形成メカニズムを検討した。得られた主な結果を以下に示す。作成したモデルにより、石室内温湿度と天井面結露性状の年間変動の傾向がほぼ再現できた。地表面における枯葉層が地盤と石室内温度、天井面結露量と時間の解析結果に大きく影響を与えることと、石室天井面と奥壁に設置した花崗岩の透水係数が天井面と石室内相対湿度の解析結果に及ぼす影響が大きいことを確認した。

第4章では、土壌呼吸の基礎理論に基づき石室内酸素、二酸化炭素濃度の予測モデルを構築し、模擬古墳における土壌呼吸に関する実験からモデルのパラメータを同定した。このモデルを第3章で作成した石室内温湿度の予測モデルと連成させ、石室内酸素、二酸化炭素濃度の数値解析を行い、石室内酸素濃度の年変動の測定値の再現性を確認した。その上で、石室内酸素、二酸化炭素濃度の形成メカニズムを検討した。得られた主な結果を以下に示す。構築した予測モデルは石室内酸素、二酸化炭素濃度の年間変化を概ね

京都大学	博士 (工学)	氏名	謝 華 栄
<p>再現できる。しかし、夏期の石室内酸素濃度の低下量と二酸化炭素濃度の増加量は実測結果よりやや小さいことが確認された。石室内酸素濃度は、石室天井面と奥壁の石板は酸素の移動が小さいことから、主に床面土における酸素濃度の影響を受けて形成されることを明らかにした。地盤内酸素と二酸化炭素濃度の変動は、大気と地盤の間の気相拡散と、地表面近傍で大きい微生物呼吸の影響を大きく受ける。降雨後に地盤内酸素濃度が低下し、二酸化炭素濃度が増加する要因は、地表面の含水率の増加が大気から地盤への酸素の気相拡散と地盤から大気への二酸化炭素の気相拡散の両方の移動を妨げ、その場所での微生物呼吸による酸素の消費と二酸化炭素の生成により酸素濃度が低下し、二酸化炭素濃度が増加することを明らかにした。</p> <p>第5章では、石室内鉄製品遺物の現地保存を事例として、石室内鉄製品の腐食速度と石室内環境との関係を明確することを目的として、石室内空气中に懸垂してある鉄製品の腐食に着目し検討を行った。まず既存の理論に基づいた石室内鉄製品の腐食原理とその影響因子の把握を行い、模擬古墳の石室内に設置した腐食速度を測定するACMセンサと炭素鋼試料の腐食速度の計測結果から石室空气中に設置する鉄製品の年間腐食速度とその傾向を把握した。次に、Hoerle et al.の鉄製品の腐食速度の予測モデルを用いて石室内空气中設置する鉄製品表面液膜の厚みは変化することを考慮した腐食速度の予測方法を提案し、その腐食速度と年変動の傾向の再現性の確認を行い、腐食速度の変動と石室内環境との関係について検討を行った。得られた主な結果を以下に示す。計測から、石室空气中に設置している炭素鋼試料一年目の年間腐食速度は約0.001~0.01mm/yであること、夏期にACMセンサの腐食速度の最大値が生じており、値の変動も大きいことが分かった。予測モデルを用いた模擬古墳石室内の鉄製品の腐食速度の解析値は、液膜の厚みがゼロと計算される一時期に腐食速度がゼロとなることを除いて、年間変動の予測が可能であることを示した。夏期に蒸発に伴い液膜の厚みと腐食速度はゼロとなる時期が存在するが、鉄製品表面の吸着の影響を考慮することで、年間を通じた液膜の存在が再現できる可能性があることを述べ、今後の課題とした。</p> <p>第6章では各章に得られた結論のまとめを述べ、石室内に存在する遺物に適した石室内環境の目標値とその制御方法を明らかにすることを含めた今後の課題についてまとめた。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、埋蔵環境下における遺物の現地保存に関する埋蔵環境の温湿度、結露性状と酸素、二酸化炭素濃度の予測技術を確認することと、環境の形成メカニズムを明らかにすることを目的として、模擬古墳を用いた石室内温湿度、結露性状、酸素、二酸化炭素濃度など環境の予測技術を構築し、その形成メカニズムを把握した。その上で、石室内鉄製品の現地保存を事例として、石室内鉄製品の腐食速度と石室内の環境との関係の検討を行った。得られた主な成果は次のとおりである。

1. 模擬古墳の長期間の計測結果から石室内温湿度、濡れ状態、酸素濃度と二酸化炭素濃度の年間変化及び周りの地盤内の環境、林内大気との関係を定量的に把握した。一般的に言われている地盤内の酸素濃度と温度の変化の間の相関は有意ではなく、降雨後に土壌中の酸素濃度の低下が観察され、含水率の増加と逆に酸素濃度は低下した。模擬古墳石室内の温湿度、酸素、二酸化炭素濃度環境の年変動の傾向は、そのモデルとなった未発掘古墳の鬮鷄山古墳第二主体と類似しており、未発掘古墳の環境の一般的特性があることを確認した。
2. 熱水分同時移動理論に基づき模擬古墳地表面における枯葉層の熱水分移動抵抗を考慮した上で、模擬古墳石室内温湿度と結露性状の予測モデルを作成し、そのモデルを用いて石室内温湿度、結露性状の再現を行い、モデルの再現性を確認した。また、地表面における枯葉層が地盤と石室内温度、天井面結露量と時間の解析結果に大きく影響を与えることと、石室天井面と奥壁に設置した花崗岩の透水係数が天井面と石室内相対湿度の解析結果に及ぼす影響が大きいことを確認した。
3. 土壌呼吸の基礎理論に基づき石室内酸素、二酸化炭素濃度の予測モデルを石室内温湿度の予測モデルと連成させ、石室内酸素、二酸化炭素濃度を数値解析を行い、石室内酸素濃度の年変動の測定値の再現性を確認した。降雨後に地盤内酸素濃度が低下し、二酸化炭素濃度が増加する要因は、地表面の含水率の増加が大気から地盤への酸素の気相拡散と地盤から大気への二酸化炭素の気相拡散の両方の移動を妨げ、その場所での微生物呼吸による酸素の消費と二酸化炭素の生成により酸素濃度が低下し、二酸化炭素濃度が増加することを明らかにした。
4. 石室内鉄製品遺物の現地保存を事例として、石室内鉄製品の腐食速度と石室内環境との関係を明確することを目的として、Hoerle et al. の腐食速度の予測モデルに基づき石室内鉄製品表面の液膜の厚みの変化を考慮した予測モデルを提案し、本モデルを用いた模擬古墳石室内の鉄製品の腐食速度の解析により、液膜の厚みがゼロと計算される一時期に腐食速度がゼロとなることを除いて、夏期に腐食速度が最大となる変動傾向の予測が可能であることを示した。また、鉄製品表面の吸着の影響を考慮することで、年間を通じて腐食速度が再現できる可能性があることを述べた。

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4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。