

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23300324

研究課題名(和文)古墳石槨内環境の実態把握と制御

研究課題名(英文)Not yet

研究代表者

銚井 修一 (Hokoi, Shuichi)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80111938

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円、(間接経費) 3,990,000円

研究成果の概要(和文)：石槨内埋葬品や石槨壁面で生じる結露・蒸発が埋葬品の保存状態に与える影響、特に金属器の錆の進行、石槨内の高いCO₂濃度、低いO₂濃度が石槨内埋葬物の化学反応に及ぼす影響を明確にすることを目的とし、古墳内石室を模擬した空間を丘陵地の地中に造り、環境計測、観察を行い、以下のことを明らかにした。

1) 冬季に石室内では天井部の方が床地盤より温度が低く結露が見られる、2) 石室内の相対湿度は常に100%であり、鬮鷄山古墳の石槨内相対湿度より高い、3) 石室内O₂濃度は外気と比べて3～4%低く、CO₂濃度は約3%であり、鬮鷄山古墳の石槨内濃度と同等の値である、4) 金属版には設置後数ヶ月で錆の発生が見られた。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify the influences that condensation and evaporation give on the conservation of the buried properties such as metal rust and the influence that high CO₂ and low O₂ concentrations give on the chemical reactions of the buried properties in the stone chamber of a tumulus, a underground space simulating a chamber was constructed in a hilly area, and by measuring both the inside and outside environmental conditions of the artificial stone chamber, the followings results were obtained.

1) Since the ceiling temperature of the stone chamber was lower than that of the floor in the winter, condensation occurred there, 2) the relative humidity in the chamber was always 100%, which was higher than in Tsugeyama tumulus, 3) the O₂ concentration in the chamber was by 3 to 4 % higher than that of the outdoor air, and the CO₂ concentration was about 3%, These results were almost the same as those in Tsugeyama tumulus, 4) the rust could be seen on the metal samples in a few months.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学、建築環境・設備

キーワード：古墳 石槨 粘土棺床 熱水分移動 生物の呼吸 植生

1. 研究開始当初の背景

(1)古墳を中心とする地下埋設文化財の保存に関する研究は数多くなされておられ、多くの貴重な成果が得られている。地中では温度が安定しているため、外部から酸素や栄養分の補給が無ければ地盤は保存にとって必ずしも悪い環境ではない。ただ、水分に関しては殆ど(水蒸気圧が)飽和に近く、それに付随した多くの障害が発生する可能性が高い。高松塚古墳の保存と解体過程に関与した経験から、古墳石室内の埋葬品の保存には内部空間側から環境を制御するのではなく、地盤の大きな熱容量を利用して、古墳地表側の環境調整により適切な石室内環境を形成するのが望ましいと考えるようになった。

(2)高松塚古墳においては、壁面がカビやバクテリアなどの微生物による被害が深刻な問題であった。關鷄山古墳においても高湿や結露によるカビがやはり問題となっているが、更に石積み天井部から結露水が滴り落ち、棺床粘土の湿潤・乾燥の繰返しによる硬化とひび割れ、床面にある金属器の錆、木棺の腐朽を引き起こしているようである。年間を通しての外気の温湿度変動により、天井面と床面において結露・蒸発が繰り返されることは高松塚古墳の検討ですでに明らかにしたが、水滴落下による影響については考慮していない。關鷄山古墳の石槨天井部が地表から2m程度のため、高松塚に比して年間の温度変動が大きく、結露・蒸発量も大きくなる。

(3)關鷄山古墳石槨内のCO₂濃度は3%程度と非常に高い。これは植物の根が石槨の壁石の間から伸びていることから植物の呼吸によるものと考えられているが、CO₂と水分が棺床粘土の劣化に及ぼす影響が懸念される一方で、O₂濃度の低下により金属器、木の劣化が抑制されるかもしれない。

(4)關鷄山古墳の石槨においても高松塚同様、近年温度が上昇しているようである。外気温の上昇は顕著ではないため、可能性としては発掘調査に伴う植生の変化が考えられる。植生については、農学分野では灌漑との関連で地盤の含水状態に注目した研究は多いが、地盤の温度制御、根の呼吸作用が石室内環境に与える影響に関する研究は見られない。



図1 關鷄山古墳
第一主体

2. 研究の目的

(1)本研究では、高槻市にある国史跡・關鷄山古墳(前方後円墳、未盗掘の堅穴式石槨)を検討対象とする。關鷄山古墳では、近年、石槨内の温度上昇、結露発生の増加、菌糸成長の進行などが見られる。

(2)本研究の目的は、環境変化が石槨内に保存されている金属器(三角縁神獸鏡、鉄刀など)の錆、木棺の腐朽、棺床粘土の湿潤・乾燥ひび割れなどの劣化に及ぼす影響の実態を把握すること、発掘調査に伴う植生の変化や植物の根の成長と石槨内の温湿度・空気質環境の形成との関係を明らかにすること、それらの結果を基礎として、古墳地表周りの環境の調整により、石槨内の温湿度や空気質環境を適切に制御・維持するための基礎的な資料を提供することである。

(3)明らかにしようとする項目は以下である。

1.古墳地表の植生が石槨内の温熱環境、特に高温化に及ぼす影響を定量的に明らかにすること。

2.石槨内埋葬品や石槨壁面で生じる結露・蒸発過程が埋葬品の保存状態に与える影響を把握すること。特に金属器の錆の進行、棺床粘土とCO₂との化学反応とその反応に及ぼす水分の影響を把握すること。石槨内の高い二酸化炭素濃度、低い酸素濃度の影響を明確にすること。

3.石槨内のCO₂濃度の予測:植物の根の呼吸と、土壌を通しての石槨-外気間のCO₂の拡散を考慮して、石槨内のCO₂濃度を推定すること。

3. 研究の方法

研究目的で記述した事項を、以下の計画・方法に基づいて検討する。

1.植生の有無が地盤の温度・含水率に与える影響を、關鷄山古墳周りに類似した植生地における測定により明らかにする。更に、植生・地盤を含む熱水分移動モデルを作成し、植生の影響予測を目指す。

2.粘土、金属、木材などが周辺の温湿度、二酸化炭素・酸素および結露水から受ける影響を、模擬古墳を作製し調査測定する。

3.植物の根の呼吸と土壌を通しての石槨-外気間のCO₂の拡散を考慮した熱水分移動・CO₂・O₂生成モデルを作成し、石槨内のCO₂濃度を推定する。

4. 研究成果

4.1 模擬古墳を用いた古墳内外の環境計測と遺物の劣化性状の把握

(1)目的と概要

本章では、周辺環境の影響を受けて形成される古墳石室内部の環境と、その影響を受ける遺物の劣化の実態と機構を明らかにするために、古墳内石室を模擬して丘陵地の林内の

土中に空間（模擬石室）を造り、気象、地盤内部、石室の環境計測を行った。遺物としては主として金属製品および粘土を考え、数種の金属板を石室内に設置して、計測及び観察を行った。

(2) 模擬石室と計測の概要

模擬古墳は、京都市西京区京都大学桂キャンパス内の丘陵地の林中に位置する（図2）。前室と石室の2室から成り、林内気候、石室内、土中の環境計測を行っている（図3、4）。石室は前室から窓越しに観察できる。2室間は空気の流入が無いよう密閉処理をしている。また、前室との熱移動を抑えるために石室前に断熱材を設置している。計測内容と計測地点を下表に示す。

	①	②	③	④	⑤
地盤温度	深度40cm	深度100cm	深度180cm	石室天井部	石室土中
温湿度	石室上部 (床上40cm)	石室下部 (床上20cm)	-	-	-
水分化学 ポテンシャル	深度40cm	深度100cm	深度180cm	石室土中(左部)	石室土中(右部)
含水率	深度40cm	深度100cm	深度180cm	石室土中(左部)	石室土中(右部)
O ₂ 濃度	深度40cm	深度100cm	深度180cm	石室気中	石室土中
CO ₂ 濃度	深度40cm	石室内部	深度180cm	-	-



図2 模擬古墳外観

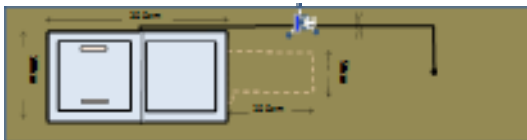


図3 模擬古墳平面図

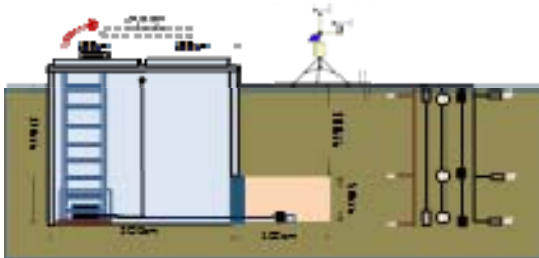


図4 模擬古墳断面図

(3) 金属腐食実験の概要

金属劣化（腐食）の実態と機構を明らかにするために、以下の実験を行っている。

目視観察と腐食量の計測

鉄製や青銅製の遺物を想定し、

- ① 炭素鋼 (ss400)
 - ② 青銅 (C5191 Cu:94% Sn:5.5~7.0%)
 - ③ 青銅 (CAC503A Cu:84~88% Sn:12~15%)
- の3種類の金属板各20枚を気中に10枚ずつ

地中に10枚ずつ設置した。気中では天井からの結露水の金属表面への落下・流下の影響が、地中では溶解したFe²⁺が金属表面から拡散する影響が考えられる。金属の種類の違いに加え、気中と地中の周囲環境の違いが劣化にどう影響するのかを観察した。設置から一定時間後に、腐食量の測定を行う。

ACMセンサーによる腐食速度計測

ACMセンサーは金属の腐食電流を直接計測できるセンサーであり、腐食電流と腐食速度の相関関係を用いて石室内での腐食速度を計測する。気中に6個、地中に2個設置しており、気中のうち3個は天井からの結露水の滴下を防ぐ傘が設けられている。周囲環境の水分の条件は腐食に大きな影響を及ぼすため、気中と地中の周囲環境の違いや結露水の影響の有無は腐食速度に大きく影響する。

(4) 計測結果：外界気象－林内気候

模擬古墳は林内に位置するため、植生が林内気象に影響を与える。林内気象と京都地方気象台の値との比較を行う。

外気温は気象台(①)の方が林内(②)より全体的に約1.5℃高い(図5)。外気絶対湿度の最大は同程度だが、最低は林内(②)の方が気象台(①)よりも僅かに高い。周辺樹木や土壌からの蒸散の影響が考えられる

1日の累計降水量(図6)は、林内(②)の方が気象台(①)より最大で約5mm少ない。これは模擬古墳周辺の樹木で遮蔽されるためと考えられる。

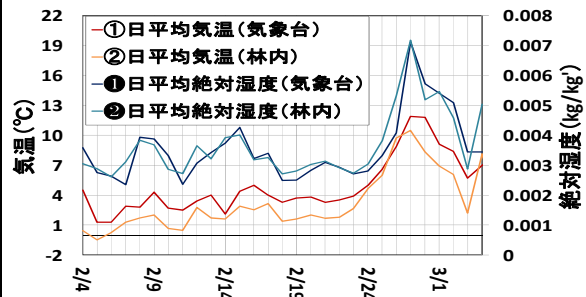


図5 外気温湿度計測結果

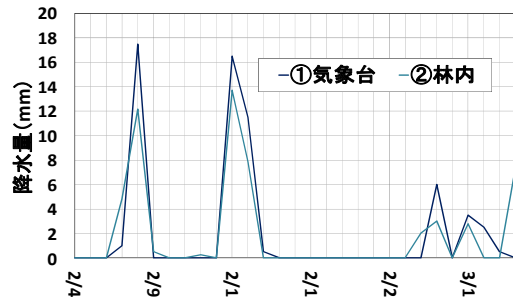


図6 1日の累計降水量計測結果

(5) 計測結果：地盤・石室内環境

模擬石室製作直後の石室内の温湿度、水分化学ポテンシャル、含水率、O₂濃度、CO₂濃度の計測結果を以下に示し、鬮山古墳との比較を行う。

温湿度 (図7) : 地中深くなる程温度は高くなる。石室内は、天井部の方が床面より温度が低く、結露が観察された。石室内 (⑥⑦) はともに低温の石室天井 (④) に挙動が近づいており、冬期の石室内の温度形成は天井側地盤の影響が強いと考えられる。また、模擬石室は鬮鷄山古墳第2主体と同程度の深さであるが、石室内温度は第2主体の冬期の温度よりも3~4℃低い。2月の平均外気温は林内の方が鬮鷄山古墳よりも低く、気象条件の影響等が考えられる。模擬石室内の相対湿度は100%で一定であり、第2主体より約5%高い。

水分化学ポテンシアル・含水率 : 計器設置後約2ヶ月の間、全ての計器で値は上昇傾向にあり、土壌が湿潤傾向にあり、設置初期の影響が含まれると考えられる。含水率については、同じ石室床地盤でも大きな隔りがある。石室の地盤には礫が含まれており、これが場所によって含水率の差が生じる要因と考えられるが、結露水の落下も考えられる。

O₂ 濃度 (図8) : 石室内及び土中の O₂ 濃度は大幅に低下する。石室内では17~18%と外気(21%)より3~4%低く、また鬮鷄山古墳の冬期の2基の石槨内 O₂ 濃度17~21%と概ね合致する。降雨後は全ての計器で約0.5%の濃度減少が確認された。石室開口後、閉じて元の濃度に戻るまでに約2週間かかった。

CO₂ 濃度 (図9) : 地盤深度40cm (①) は0.5%で一定である。石室内 (②) は石室閉鎖後約3%まで上昇し、外気(約0.004%)と比べかなり高く、鬮鷄山古墳の冬期の2基の石槨内 CO₂ 濃度2~4%と概ね合致する。地盤深度130cm (③) は4%で一定だが、機器の計測幅が0~4%であることから、実際の濃度はさらに高い可能性も考えられる。石室開口後、閉じて元の濃度環境に戻るまでに約2週間かかった。

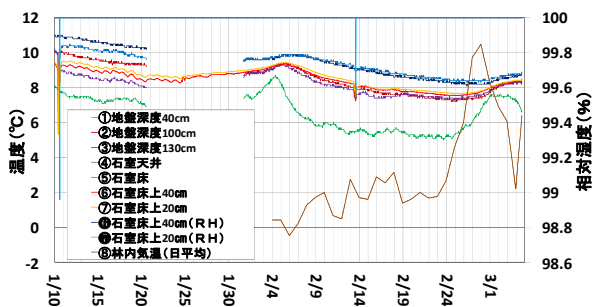


図7 温湿度計測結果

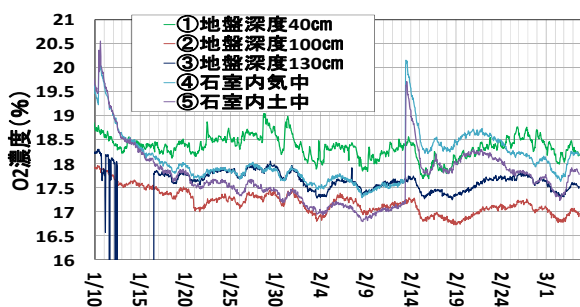


図8 O₂濃度計測結果

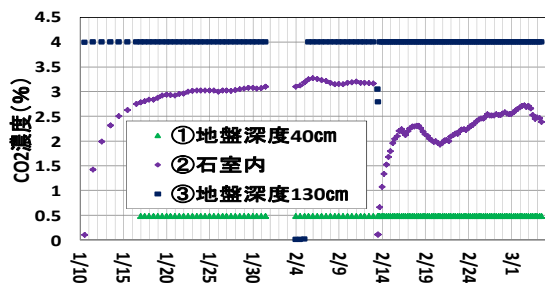


図9 CO₂濃度計測結果

(6)まとめ

周辺を植生に囲まれた模擬古墳内外の環境測定より、鬮鷄山古墳とほぼ同様の結果を得ることができた。これをもとに遺物の劣化挙動の観測および接触・破壊による詳細測定が可能なフィールドを得ることができた。金属の劣化については、数か月と言う比較的短時間で錆の発生が見られること、天井からの結露水が大きな影響を与えていると推定される結果が得られている。本科研の終了した後も計測を継続し、貴重なデータを収集する予定である。

4.2 土壌および石槨内の生物活動が酸素・二酸化炭素濃度に与える影響

(1)鬮鷄山古墳の現状

鬮鷄山古墳は未盗掘の竪穴式石槨2基(第1及び第2主体)を有し、発掘調査を実施して副葬品等を取り上げる方法が検討されており、そのためには覆屋の設置と空調システムの構築が不可欠と考えられている。

しかし、現状の石槨内 O₂ 濃度は約18%と外気よりも低く、CO₂ 濃度は約2%と外気よりも高い(図10)。また、O₂ 濃度は夏場に低く冬場に高く、CO₂ 濃度は夏場に高く冬場に低い。発掘作業者の健康面を考慮すると、O₂ 濃度を高く CO₂ 濃度を低く保つ必要があるが、微生物による副葬品の汚損や金属器のさびが進行する危険性が予想される。従って、石槨内部の温湿度だけでなく、O₂ 濃度や CO₂ 濃度などの空気質環境も適切に制御する必要があり、それらの挙動の予測が重要となる。

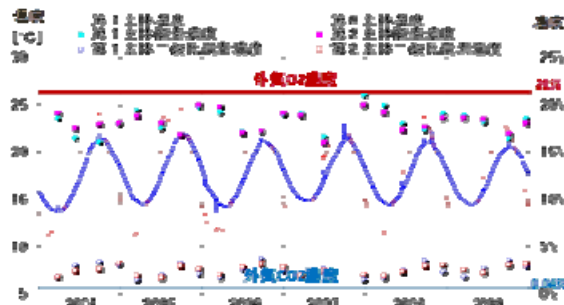


図10 石槨内 O₂・CO₂濃度と温度の測定値

(2)O₂、CO₂濃度予測の必要性

石槨内部発掘調査時の石槨周辺の適切な温湿度・空気質環境の制御方法を明らかにするためには、先ずそれらの予測が必要となる。

我々はすでに、鬮鶏山古墳石槨内の温湿度およびO₂・CO₂濃度の予測モデルを提案し、第2主体の温湿度、O₂・CO₂濃度については妥当な結果を得ている。本研究ではこの予測モデルを第1主体に用いた場合の再現性を調べ、その上で第1主体、第2主体の両基の石槨のO₂・CO₂濃度の挙動を再現できるような一般的な予測モデルの構築を行う。

(3) 既報のO₂・CO₂予測モデルによる解析

我々は、Jassal(2004)やMolz(1986)らの理論を用いて、土中のO₂とCO₂の移流・拡散、生成・消費を考慮した収支式を提案した(以下、既報モデルと呼ぶ)。図11に土中のO₂消費・CO₂生成過程の概要を示す。微生物と植物根によるO₂消費・CO₂生成も同様の過程で行われるものとした。

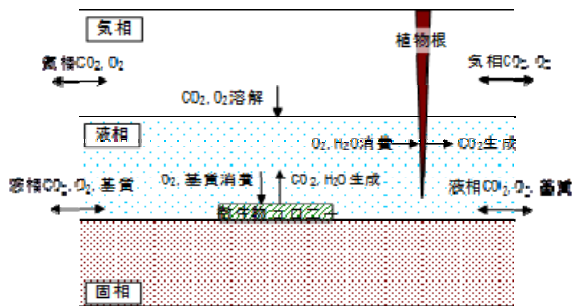


図11 土中のO₂消費・CO₂生成過程の概要

計算対象を図12に示す。第1主体、第2主体とも、石槨の短辺方向の断面を切り出し、古墳墳丘部の計算領域は水平方向15m×鉛直方向15mの2次元とした。第1主体は深度2m、第2主体は深度1mの位置に石槨の天井があり、いずれも幅0.5m×高さ1mの空間である。土壌は地表面から深さ5cmまでを砂質土壌、それ以降を粘土質土壌とし、石槨天井面及び壁面は厚さ10cmの石とした。外界条件には2004~2009年の現地計測値を用いた。境界条件は、石槨から水平方向に十分離れた地盤境界は断熱・断湿とし、底部境界では17.4℃・水分化学ポテンシャル-5.0J/kgとした。地表面の気相O₂・CO₂濃度はそれぞれ外気と同じ21%、0.034%とした。石槨内空気中のO₂・CO₂濃度は周囲地盤との物質伝達により決定され、物質伝達率は、ルイス関係を用いて対流熱伝達率より算出する。2年間助走計算した後の3年目以降の結果と比較検討を行う。

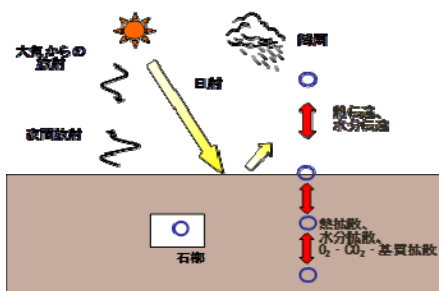


図12 解析モデルの概要

この既報モデルを用いて2主体の温湿度・O₂・CO₂濃度を計算した結果を図13~15に示す。温度の解析値は測定値とよく一致しており、相対湿度の解析値はやや高いものの、年変動の挙動はよく再現できている。一方、O₂・CO₂濃度は、第2主体については良く一致しているが、第1主体については振幅、位相ともに一致が悪く、改善が必要である。

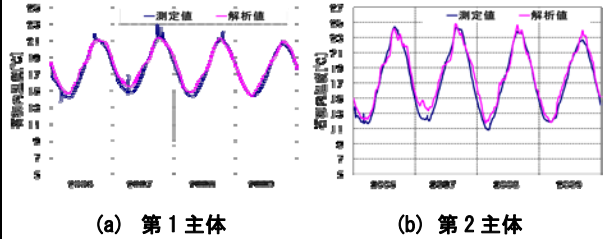


図13 既報モデルによる石槨内温度解析結果

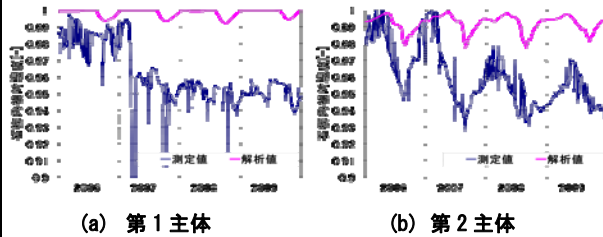


図14 既報モデルによる石槨内相対湿度解析結果

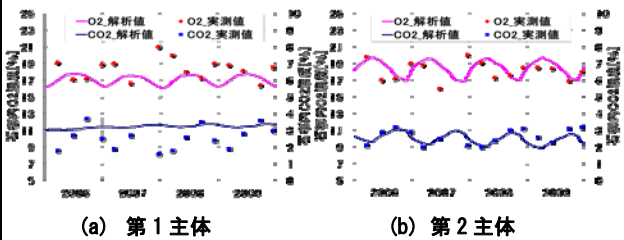


図15 既報モデルによる石槨内O₂・CO₂濃度解析結果

(4) 既報モデルの改善と生物活動の影響評価

既報モデルでは、O₂・CO₂の変動は土中の微生物・植物根の活動と拡散が支配的である。これらの影響を調整することで、第1主体の実測値の再現が可能かどうかを検討したが、大きな改善は見られなかった(図16, 17)。

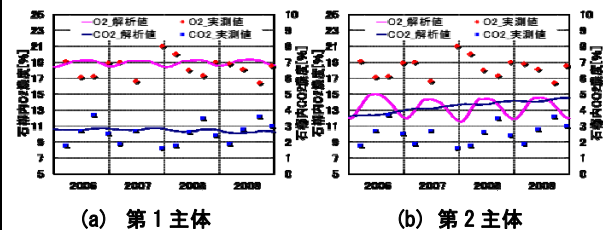


図16 微生物・植物根量を変化させた場合の解析結果

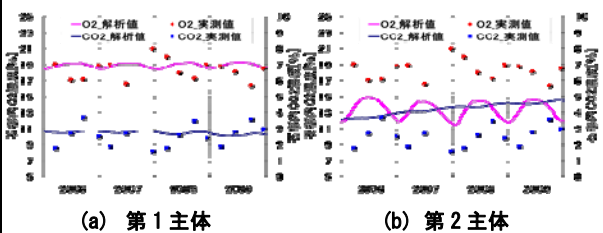


図17 拡散係数を変化させた場合の解析結果

そこで、石槨内においても微生物や植物根が確認されるため(図 18)、石槨内の生物活動の項を既報モデルに加えた。O₂ の収支も同様である。また諸係数にも次のような修正を行った。①物質伝達率 h を 1/10 倍、②O₂・CO₂ 拡散係数を 2 倍、③CO₂ 濃度初期値を 2%に変更。



図 18 第 1 主体内の樹根と菌糸類

石槨内の生物活動を加えた場合の結果を図 19 に示す。第 2 主体は図 15 と比べると若干振幅が大きくなるが、ほぼ同様の結果となっており、第 1 主体では O₂・CO₂ 濃度の解析値は、位相も実測値と概ね一致している。図 20 に、石槨内の生物活動を考慮しない場合と考慮した場合を併せて示す。破線は図 19 に示した結果である。石槨内の生物活動を考慮しなければ、両主体ともに位相・振幅がずれ、特に第 1 主体の違いが大きい。

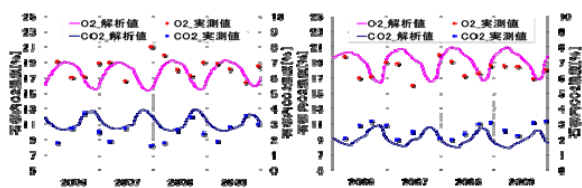


図 19 石槨内の生物活動を加えた場合の解析結果

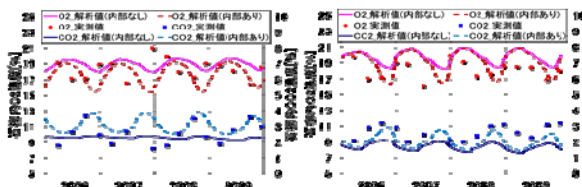


図 20 石槨内の生物活動の有無の比較

(5)まとめ

既報の O₂・CO₂ 濃度予測モデルに、石槨内の微生物・植物根活動を付け加えることで、關鷄山古墳の 2 基の石槨内の O₂・CO₂ 濃度の挙動を同時に再現できることが分かった。これは、石槨内の O₂ および CO₂ 濃度の予測において、石槨内における微生物・植物根の活動を無視できないことを意味しており、高松塚古墳を始め、古墳内部の環境形成に生物活動が重要な役割を果たしていることを明らかにした結果と言える。關鷄山古墳の発掘調査に関しては、このことに十分配慮して計画を立てる必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 吉田 有里, 銚井 修一, 小椋 大輔、スコータイ遺跡におけるレンガ造大仏の劣化に関する研究、日本建築学会環境系論文集、査読有、第 78 巻、第 689 号、2013、981-989
DOI:

[学会発表] (計 5 件)

- ① 安井洋之、小椋大輔、銚井修一、關鷄山古墳の石槨内部発掘調査に伴う空調制御方法に関する研究(その 3) 石槨内の生物活動が酸素・二酸化炭素濃度に与える影響、日本建築学会大会学術講演会、2013、267-268
- ② 森田直樹、小椋大輔、銚井修一、含水量による古墳壁画の見え方変化の予測に関する研究 その 2 : 色差を考慮した顔料・石材の見え方の変化、日本建築学会大会学術講演会、2013、517-518
- ③ 桑原範好、銚井修一、脇谷草一郎、小椋大輔、平城宮跡遺構展示館における露出展示遺構の劣化に関する研究、日本建築学会大会学術講演会、2013、269-270
- ④ 中田雄基、銚井修一、小椋大輔、岡田健、蘇伯民、宇野 朋子、高林弘美、渡辺真樹子、敦煌莫高窟第 285 窟壁画の劣化に及ぼす太陽光の影響、日本建築学会大会学術講演会、2013、85-86
- ⑤ 中嶋麻起子、銚井修一、小椋大輔、建物外壁における藻類の生育状況に関する研究 仁和寺九所明神での藻類生育と外壁表面温度についての考察、日本建築学会大会学術講演会、2013、87-88

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

銚井 修一 (HOKOI, Shuichi)
研究者番号 : 8 0 1 1 1 9 3 8

(2) 研究分担者

小椋 大輔 (OGURA, Daisuke)
研究者番号 : 6 0 2 8 3 8 6 8

(3) 連携研究者

高林 弘実 (TAKABAYASHI, Hiromi)
研究者番号 : 7 0 4 4 3 9 0 0