

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2) 石槨内空気質の予測法の提案

正会員 ○木村奈津子*1 同 小椋大輔*2 同 鉾井修一*3

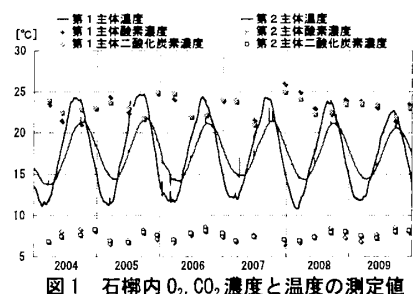
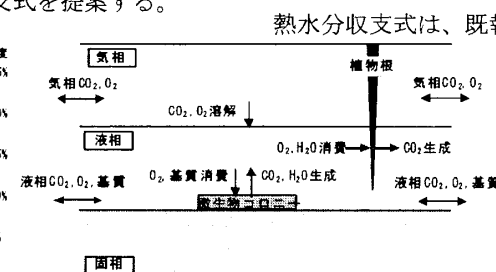
文化財保存, 空気質, 熱水分同時移動, 解析, 古墳

1. 序論 關鷄山古墳は未盗掘の堅穴式石槨 2 基を有し、現在、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、外気の影響を極力抑える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。既報¹⁾では、石槨周辺の適切な温湿度制御方法について、発掘調査以前からの地表面断熱及び盛土による石槨内温度変動の抑制効果等を明らかにした。一方、現状の石槨内酸素(以下 O_2)濃度、二酸化炭素(以下 CO_2)濃度はそれぞれ約 18%, 2.5%と外気と大きく異なる。このため、発掘作業者の健康面を考慮すると、発掘調査時には石槨内に空気を送り込み、 O_2 濃度を高く、 CO_2 濃度を低く保つ必要がある。しかし、 O_2 濃度を高くすると、微生物による木棺や繊維製品の汚損や、金属器のさびが進行する危険性が予想されるため、両者を考慮して石槨内 $O_2 \cdot CO_2$ 濃度といった空気質環境も適切に制御する必要がある。本研究では、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ことを目的とし、本報では石槨内 $O_2 \cdot CO_2$ 予測モデルを構築する。

2. 現状の石槨内酸素・二酸化炭素濃度 図1に第1, 第2主体の $O_2 \cdot CO_2$ 濃度の測定値を温度の測定値と共に示す。 O_2 濃度の平均値は約 18%と外気(約 21%)よりも低く、 CO_2 濃度の平均値は約 2.5%と外気(約 0.04%)よりも高い。また、 O_2 濃度は夏場に低く冬場に高い。一方、 CO_2 濃度は夏場に高く冬場に低い。この挙動を明らかにするため、次章以降で $O_2 \cdot CO_2$ 予測モデルの構築を行う。

3. 石槨及び周辺地盤の酸素・二酸化炭素予測モデル

3.1 はじめに 一般に、土中の $O_2 \cdot CO_2$ 濃度は、微生物や植物根等の生物活動に大きく影響される。Jassal(2004)は、微生物と植物根による CO_2 生成過程を単純に表し、熱・水分とともに土中を移流・拡散する解析モデルを提案した²⁾。Molz(1986)は、土中の微生物の増殖死滅を、 O_2 濃度と基質(微生物の栄養源)濃度を用いて表し、土中の O_2 と基質の移流・拡散をモデル化した³⁾。本研究ではこれらの理論を参考にし、土中の $O_2 \cdot CO_2$ の移流・拡散、生成・消費を考慮した収支式を提案する。

図1 石槨内 O_2 , CO_2 濃度と温度の測定値図2 土中の O_2 消費・ CO_2 生成過程の概要

3.2 基礎方程式 図2に土中の O_2 消費・ CO_2 生成過程の概要を示す。ここでは、土を気相・液相・固相の3層で構成し、 $O_2 \cdot CO_2$ は気相と液相、基質は液相にそれぞれ存在するものとする。微小要素内の各相における $O_2 \cdot CO_2$ ・基質濃度はそれぞれ一様とする。以上の仮定に基づき土中の $O_2 \cdot CO_2$ ・基質濃度の収支式を2次元系で示す。土中の O_2 収支は、気相と液相の正味流入量、微生物による消失量、植物根の呼吸と水分の吸い上げに伴う消失量により決まり、式(1)となる。

$$\frac{\partial \alpha_{T_{O_2}}}{\partial t} = A_{V_{O_2}} + A_{L_{O_2}} - F_{M_{O_2}} \phi - F_{R_{O_2}} - U_{O_2} \quad (1)$$

土中の CO_2 収支は、気相と液相の正味流入量、微生物による生成量、植物根の呼吸による生成量、植物根の水分の吸い上げに伴う消失量により決まり、式(2)となる。

$$\frac{\partial \alpha_{T_{CO_2}}}{\partial t} = A_{V_{CO_2}} + A_{L_{CO_2}} + F_{M_{CO_2}} \phi + F_{R_{CO_2}} - U_{CO_2} \quad (2)$$

土中の基質収支は、液相の正味流入量、微生物による消失量により決まり、式(3)となる。

$$\frac{\partial \alpha_{T_S}}{\partial t} = A_{L_S} \phi - F_{M_S} \phi \quad (3)$$

なお、土中の $O_2 \cdot CO_2$ 濃度は、気相濃度及び液相濃度を用いて表すことができ、式(4)となる。

$$C_T = (\theta_s - \phi) C_V + \phi C_L \quad (4)$$

式(1), (2)における気相の $O_2 \cdot CO_2$ の正味流入量は、空隙中の濃度拡散と液相への溶解により決まる。 O_2 の場合を式(5)に示す。 CO_2 もこれと同様に表せる。

$$A_{V_{O_2}} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{V_{O_2}} \frac{\partial \alpha_{V_{O_2}}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{V_{O_2}} \frac{\partial \alpha_{V_{O_2}}}{\partial y} \right) + \alpha_{V_{L_{O_2}}} (f(C_{L_{O_2}}) - C_{V_{O_2}}) \quad (5)$$

式(1) ~ (3)における液相の $O_2 \cdot CO_2$ ・基質の正味流入量は、細孔溶液内の濃度拡散、液水流に伴う移動、気相からの溶解により決まる。 O_2 の場合を式(6)に示す。

$$A_{L_{O_2}} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{L_{O_2}} \frac{\partial \alpha_{L_{O_2}}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{L_{O_2}} \frac{\partial \alpha_{L_{O_2}}}{\partial y} \right) - \frac{\partial \alpha_s C_{L_{O_2}}}{\partial x} - \frac{\partial \alpha_s C_{L_{O_2}}}{\partial y} - \alpha_{V_{L_{O_2}}} (f(C_{L_{O_2}}) - C_{V_{O_2}}) \quad (6)$$

熱水分収支式は、既報¹⁾と同様である。

3.3 解析モデル 図3に墳丘部の解析モデルの概要を示す。解析対象は、第2主体を含む古墳墳丘部で、石槨の短辺方向の断面を切り出し、水平方向 15m × 鉛直方向 15mの2次元とした。石槨は深度 1mの位置に天井がく

Study on the method of control on air conditioning in the stone chamber
with excavation of Tsugeyama Tumulus

Part 2: Prediction method of indoor air quality of the stone chamber

KIMURA Natsuko,
OGURA Daisuke and HOKOI Shuichi

るようにし、水平方向 0.5m × 鉛直方向 1m とした。土壌は地表面から深さ 5cm ままで砂質土壌、それ以降を粘土質土壌とし、石槨天井面及び壁面は厚さ 10 cm の石とした。

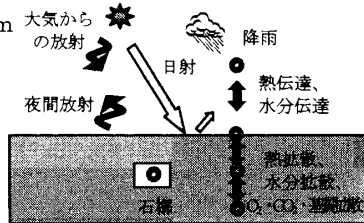


図3 解析モデルの概要

3.4 解析方法 外界条件は 2004～2009 年の現地計測値を用いる。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°C ・水分化学ポテンシャル -5.0J/kg を固定する。地表面の気相 O_2 ・ CO_2 濃度はそれぞれ外気と同じ 21%、0.034% とした。石槨内空気の O_2 ・ CO_2 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。計算は前進型有限差分法を用い、2 年間助走計算した後の 3 年目以降の結果で比較検討を行う。

4. 解析結果

4.1 微生物・植物根を考慮しない場合 図 4 に解析結果を示す。 O_2 ・ CO_2 濃度ともに、夏場に高くなり、冬場に低くなる。これは、気体の水への溶解度が温度に逆比例となる関係が大きく影響している。測定値の O_2 濃度とは逆の傾向であり、 O_2 ・ CO_2 の大気からの拡散だけでは測定値の性状は再現できない。

4.2 微生物・植物根を考慮した場合 基質量一定とし微生物と植物根の活動を考慮した解析を行った。図 5～7 に石槨内 O_2 ・ CO_2 濃度、温度、相対湿度の解析結果を測定値とともに示す。石槨内の温度の解析値は測定値とよく一致し、相対湿度の解析値は、夏期の低下がよく再現できている。 O_2 濃度の解析値は夏期に低く冬期に高くなり、 CO_2 濃度は逆の変動であり、実測値の変動と一致する。

4.3 微生物・植物根の酸素消費係数の影響 図 8 に 4.2 節の計算で用いた微生物・植物根の酸素消費係数を 1/4 倍、2 倍として計算した結果を示す。酸素消費係数を 1/4 倍にすると、 O_2 濃度は高くなり、年変動も小さくなる。 CO_2 濃度は植物根を考慮しない場合と同様に低下し続ける。酸素消費係数を 2 倍にすると、 O_2 濃度の年平均値は約 3% 低くなり、 CO_2 濃度の年平均値は約 1% 高くなり、両者の年振幅も大きくなる。以上から、植物根の生物活動が結果に大きく影響を与えることが分かる。

4.4 酸素・二酸化炭素拡散係数の影響 図 9 に 4.2 節の計算で用いた拡散係数を 1/2 倍、2 倍として計算した結果を示す。拡散係数を 1/2 倍にすると、 O_2 濃度は約 2% 低く、 CO_2 濃度は約 0.5% 低くなる。地表からの拡散が小さくなるためである。拡散係数を 2 倍にすると、 O_2 濃度は約 1% 高く、 CO_2 濃度は約 1% 低くなる。地表からの拡散が大きくなるためである。地表からの拡散も結果に大きく影響を与えることが分かる。

5. 結論

関鶏山古墳の石槨内部発掘調査時の適切な温湿

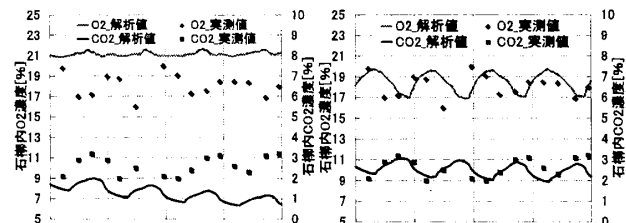


図4 生物活動を考慮しない場合の解析結果

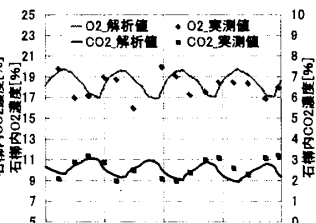
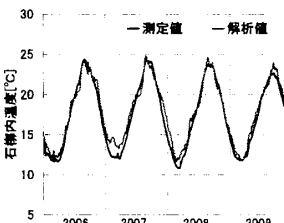
図5 微生物・植物根を考慮した場合の解析結果 (O_2 ・ CO_2 濃度)

図6 微生物・植物根を考慮した解析結果 (温度)

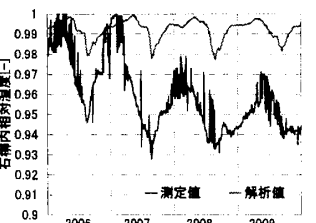


図7 微生物・植物根を考慮した解析結果 (相対湿度)

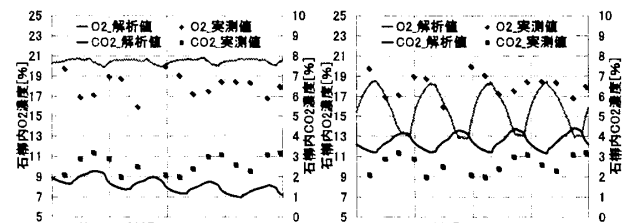


図8 微生物・植物根の酸素消費係数を変化させた場合の解析結果

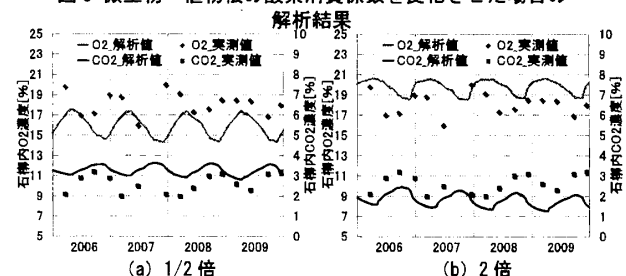


図9 拡散係数を変化させた場合の解析結果

度・空気質環境の制御方法を明らかにするため、現状の石槨内 O_2 ・ CO_2 の挙動の再現を目的とした。石槨内空気質予測モデルを構築し、植物根等の生物活動と大気からの拡散の両者を考慮し、石槨内温湿度の予測と組み合わせることで測定値の変動を十分再現できることを示した。

【謝辞】本研究の一部は、高槻市教育委員会の委託を受けて行われた。また平成 22 年度科学研究費補助金基盤研究 (C) (課題番号 20560549 研究代表者 小柳大輔) の補助を受けた。ここに記して謝意を表す。【記号】 C : 濃度 [kg/m^3]、 θ : 空隙率 [m^3/m^3]、 ϕ : 含水率 [m^3/m^3]、 A : 各相の正味流入量 [$\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$]、 F_{O_2} 、 F_{CO_2} 、 $F_{\text{H}_2\text{O}}$: 微生物による O_2 消費量、 CO_2 生成量、基質消費量 [$\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$]、 F_{O_2} 、 F_{CO_2} : 植物根の呼吸に伴う O_2 消費量、 CO_2 生成量 [$\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$]、 U : 植物根の水分の吸い上げに伴う消費量 [$\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$]、 D : 拡散係数 [m^2/s]、 α_L : 気相と液相との溶解速度係数 [$1/\text{s}$]、 $f(C)$: 液相濃度と平衡する気相濃度 [kg/m^3]、 v_x 、 v_y : 液水流速の x 成分、 y 成分 [m/s] 【添字】 T : 材料、 V : 気相、 L : 液相、 O_2 : 酸素、 CO_2 : 二酸化炭素、 S : 基質 【参考文献】1) 木村余津子ほか、関鶏山古墳の石槨内部発掘調査に伴う空気環境制御方法に関する研究(その1)石槨周辺の温湿度制御方法の検討、日本建築大会(北学)学術講演要録集 D-2、pp241-242 (2010) 2) R.S. Jassal: A model of the production and transport of CO_2 in soil: predicting soil CO_2 concentrations and CO_2 efflux from a forest floor, Agricultural and Forest Meteorology, 124, pp.219-236 (2004) 3) F.J. Molz: Simulation of Microbial Growth Dynamics Coupled to Nutrient and Oxygen Transport in Porous Media, Water Resources Research, Vol. 22, No. 8, pp. 1207-1216 (1986)

*1 株式会社大林組 (当時京都大学大学院生) 修士 (工学)

*2 京都大学大学院工学研究科 准教授・博士 (工学)

*3 京都大学大学院工学研究科 教授・工学博士

Obayashi Corporation (Former Graduate Student of Kyoto University) M.Eng.

Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Kyoto University, Dr. Eng.

Prof., Graduate School of Engineering, Kyoto University, Dr. Eng.