

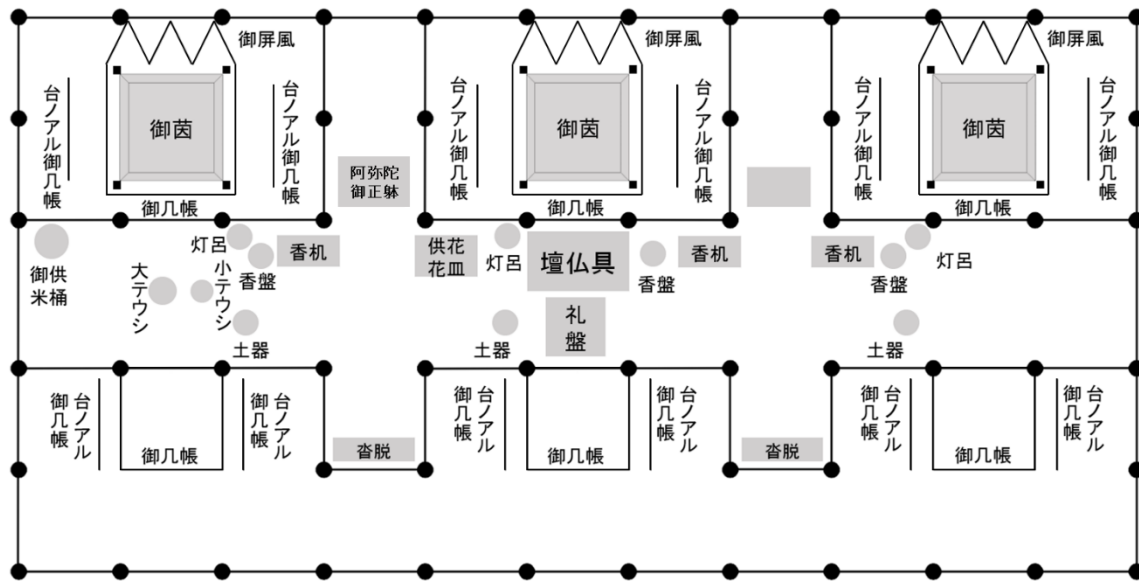


図 6： 石清水八幡宮本殿の室礼（『八幡宮寺内外殿之間事』による）

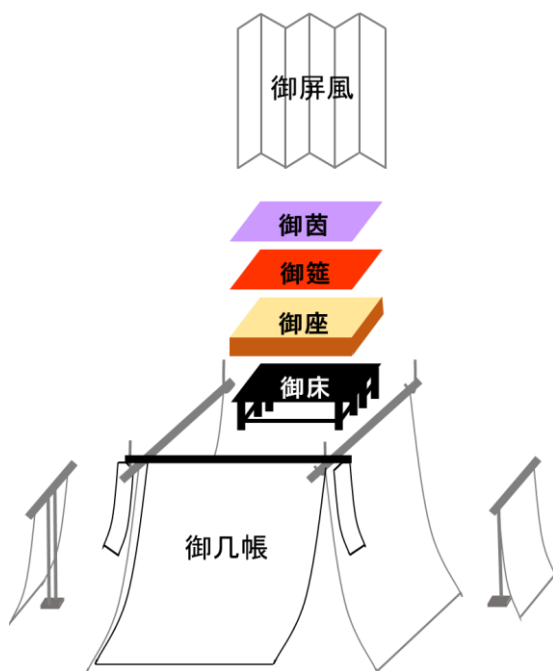


図 7： 神座における各調度の配置



図 8：「壇 仏具」（上）と礼盤（下）



図 9：『石清水八幡宮御指図』にみる椅子

どうして古墳の副葬品は現在まで残るのか？

ー模擬古墳による金属製品の腐食メカニズムの検討

埋蔵文化財センター 保存修復科学研究室

柳田 明進

1. はじめに

古墳から出土した鉄剣は褐色を呈し、分厚いさびに覆われている。また、青銅鏡は緑色の腐食生成物に覆われ、中には光沢を有する腐食層が表面を覆い、鏡面が今でも鏡として見えそうなものもある。鉾石を精練して作りだした金属製品は、当初、鉄であれば銀色、青銅では赤～銀色の金属光沢を有していたはずである^{註1}。古墳の中の金属製品はどのような過程で、現在、私たちが博物館で鑑賞するような状態に至ったのであろうか。ここでは、模擬古墳による腐食実験というユニークな研究の成果の一端を紹介し、古墳石室内で金属製品がどのような過程で現在に至ったのか、思いをはせていただきたい。

2. 古墳に埋葬された金属製品の腐食研究の意義

古墳の金属製品の腐食を研究する意義は、文化財の保存の観点でも重要である。そもそも、遺跡は遺構と遺物からなり、これらが一体として存在することに価値があるとされる。古墳の副葬品は埋納状態自体が古墳そのものの価値に直結するため、遺跡の保護

の立場から石室内で副葬品を保護する「現地保存」を検討すべきとの指摘がある（建石：2020^{註2}）。では、古墳の石室内で金属製品の保存を図ることはできるのだろうか？^{註3}

これを評価するには、石室内の物理環境と金属の腐食の関係を定量的に把握する必要がある。一方、継続的な調査を実際の古墳と副葬品で実施することは難しいため、模擬古墳による実験的手法が有効である。さらに、環境と腐食の関係が理解できれば、墳丘の状態を改良するなどして（例えば土盛りなど）、より劣化が抑制される環境を積極的に調整し、保存を図るという視点も生まれる（図1）。博物館の収蔵庫のように、空調機をもちいて環境を制御することで保管する場合と比べて、この方法はエネルギー的に圧倒的に有利であり、サステナビリティの観点でも有効と考えられる。

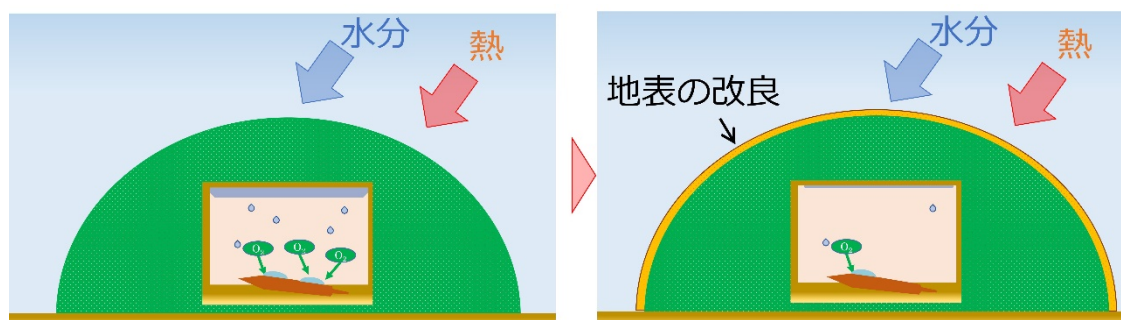


図1 古墳での現地保存の考え方

3. 模擬古墳での腐食実験の概要

3. 1 模擬古墳の構造

実験は京都市西京区に位置する京都大学桂キャンパス内の丘陵地に建設した模擬古墳の石室内で実施している（図2（a））^{註4}。模擬古墳は前室と石室からなる。石室の床面は地表から1.5 mの深さに位置し、石室の寸法は約50×50×100 cmである。なお、

模擬古墳の地盤および石室内では詳細な環境計測が実施されており、石室内の埋蔵環境とその形成要因については、既報を参照されたい (Xie *et al.*: 2020)。

3. 2 腐食実験の概要

石室内での腐食挙動を検討するため、腐食センサおよび金属試料を設置した。腐食センサは石室内の床面から 10 cm の高さの亚克力台の上に水平に設置した状態 (以下、カサなしセンサ)、同じく石室内で天井石からの水滴の滴下を防ぐ覆いをかけた状態 (以下、カサありセンサ) で設置した (図2 (b)、(c))。

また、鉄製品、青銅製品を想定し、 $50 \times 50 \times 5 \text{ mm}^3$ の炭素鋼、スズ含有量が異なる 2 種類の青銅 (以下、低スズ青銅、高スズ青銅) を石室内に懸垂した状態 (以下、懸垂試料)、床面の土中に埋設した状態 (以下、土中試料) で 2014 年 2 月に設置した。

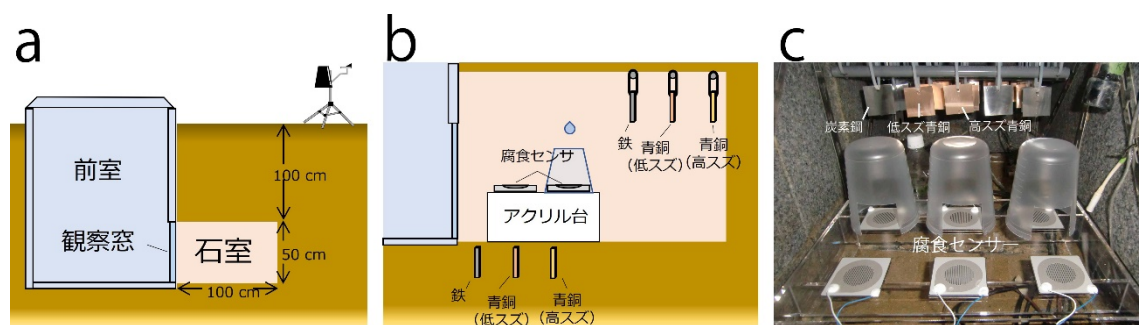


図2 模擬古墳の構造と腐食試験の状況
(a) 模擬古墳の構造、(b) 腐食試験の模式図、(c) 石室内の写真

4. 模擬古墳から見てきた金属製品の腐食メカニズム

4. 1 環境の季節変化が金属製品の腐食に及ぼす影響

金属の腐食は、酸素などの酸化剤と水が存在することで進行する。古墳の石室内では、酸素濃度は最も低下する夏期においても 15%以上^{註5} (大気中は 20.9%) を維持して

おり、金属製品の表面に形成される水膜が腐食の進行を支配する。図3に石室内の腐食センサの出力の変化とこの結果から考えらえる腐食の季節変化を示す。夏期においては、天井側が高温となり、床面付近で結露しやすい環境にあり、金属製品の結露で腐食が進行したと考えられる。一方で、冬期は天井が低温部となり、結露が生じることで水滴が金属製品に滴下し、その腐食が進行すると考えられる。

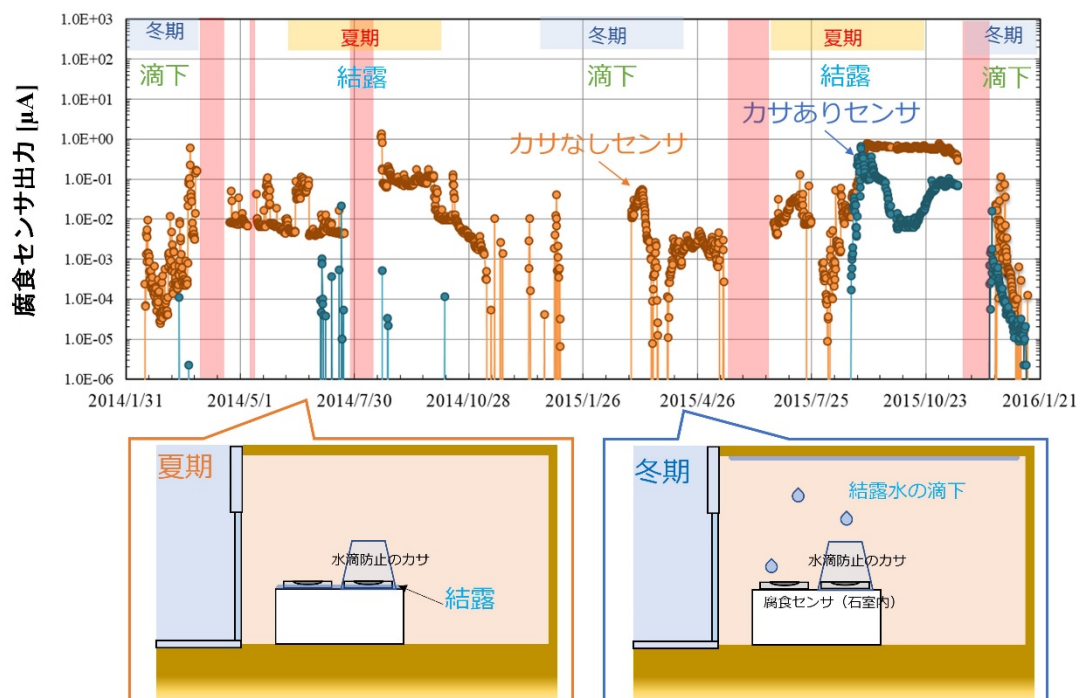


図3 腐食センサーの出力の変化と腐食の季節変動のモデル

4. 2 炭素鋼試料の腐食過程

回収した試料の状態を図4に示す。炭素鋼では、石室内に設置したものに比べて床面土中に設置したもので、顕著に腐食が進行した。石室内に比べて床面土中では腐食が顕著であった要因として次の3つが考えられる。(1) 懸垂試料では季節によって表面の濡れ面積が低下するのに対して、土中では常に高い含水状態が維持され、常にその表面

が濡れた状態であること、(2) 懸垂試料の水膜は結露に由来するため、その電気伝導度は低いのに対して、土中の間隙水では電気伝導度が高く腐食が進行すること、(3) 懸垂試料では水膜の鉄イオンはその表面にとどまるのに対して、土中試料では降雨の影響^{注6}で溶出した鉄イオンが除去されるため、腐食は促進されたと考えられる。

4. 3 青銅試料の腐食過程

青銅製試料では、黒色のスズからなる腐食生成物の上部に孔雀石と呼ばれる緑色の腐食生成物が生成した(図4)。また、緑色の腐食生成物は夏に顕著に成長した。夏に石室内の二酸化炭素濃度が上昇した結果^{注5}、塩基性炭酸銅からなる緑色の腐食層が形成されたと考えられる。青銅試料では、高スズ青銅にくらべて低スズ青銅で腐食が顕著であった。これは、低スズ青銅と高スズ青銅での金属組織の違いに由来していると考えられ、青銅製品ではスズ含有量が腐食に影響を及ぼす重要な因子と考えられる。

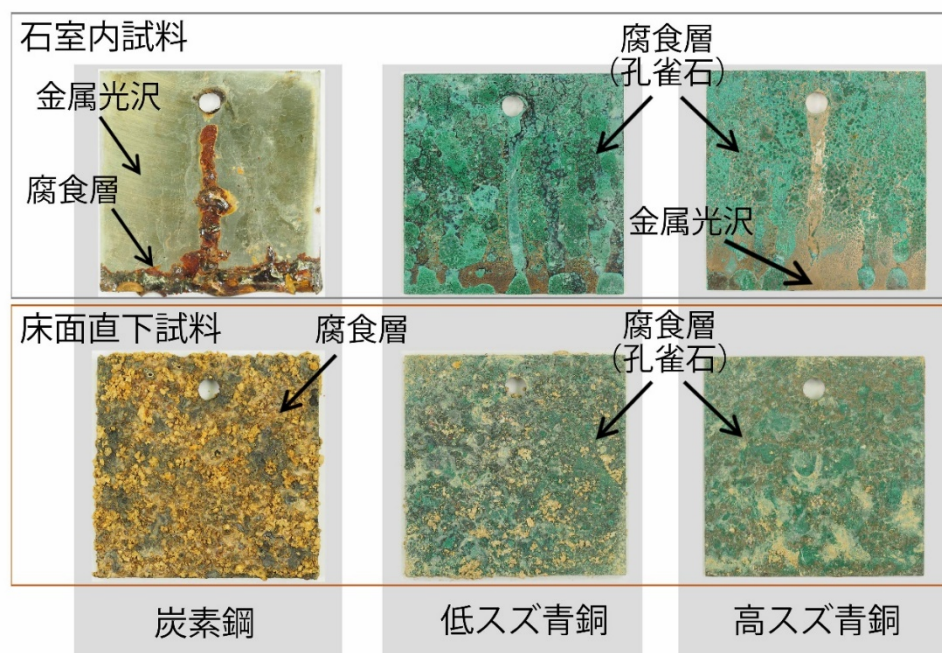


図4 金属試料の腐食状態

5. 模擬古墳に埋設した試料と出土金属製品の腐食状態の比較

では、実験試料は実際の出土金属製品の腐食状態と類似しているのでしょうか？図5

(a) は古墳から出土した短甲で、床面の土中と接触していた部分が顕著に腐食し^{注7}、金属鉄が溶出した一方で、石室内空間にあった箇所では、オリジナルの形状をとどめており、非常に腐食が緩慢であったことが認められる。これは、模擬古墳での挙動と整合する結果であり、模擬古墳から得られた結果が、実際古墳から出土した鉄製品の腐食挙動に外挿され得ると考えられる。また、図5 (b) はスズ含有量が異なる青銅製品であり、スズ含有量が低いものでは、腐食によって顕著な減肉が生じている一方、スズ含有量が高いものでは、黒色の緻密な腐食層が形成され、当初の文様などが良好に残っている。青銅試料の腐食状態においても実際の出土品と調和的な結果を示している。

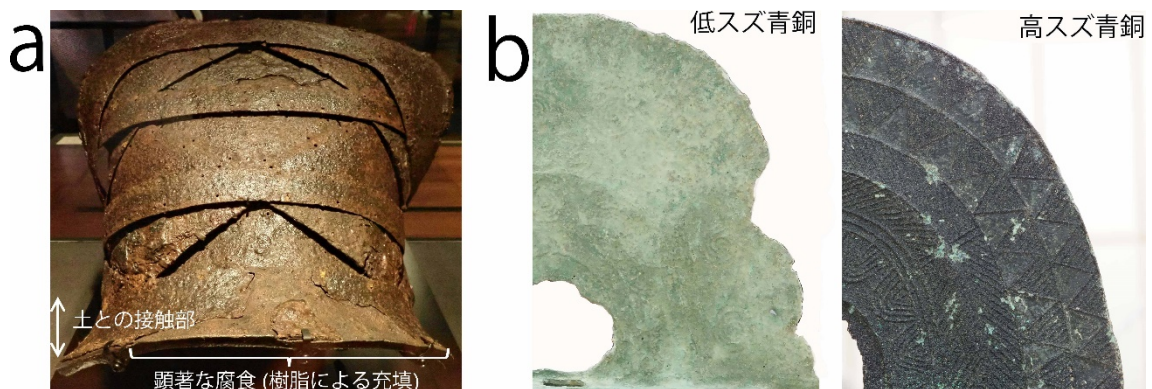


図4 出土金属製品の腐食状態

- (a) 土中に接していた箇所では腐食が激しく石室内空間と接していた箇所では腐食は緩慢である。(宮崎県立西都原考古博物館の所蔵)
- (b) 低スズの青銅は腐食が激しく、高スズの青銅は当時の形状をよくとどめている(島根県古代出雲歴史博物館所蔵)。

6. 今後の展望

本研究では模擬古墳を用いた実験的検討から、金属製品が埋葬されてから、私たちが博物館で鑑賞するような状態に至るまでの腐食過程の一端を明らかにした。古墳出土金属製品は、季節的な腐食メカニズムの変化のなかで、埋設位置や金属の組成などが相互に影響を及ぼし、長年をかけて変質した結果である。また、環境条件が整うことで、石室内の金属製品の腐食速度は非常に低く維持され得ることが示され、古墳石室内での金属製品の現地保存の可能性が示唆された。さらに金属製品の腐食に対する環境因子の影響を詳細に解析し、古墳の石室内の環境調整による現地保存も視野に入れて、研究を進めていきたい。

註

- 1) 青銅の色調は、銅とスズの混合比によって変化し、銅の含有量が多い場合は、赤色を帯び、スズの含有量が増えるにつれて、白銀色を呈するようになる。
- 2) 古墳の石室内での遺物保存の考え方や考古学研究者からみた本研究の意義については、考古学研究第 67 巻第 1 号から 4 回にわたり特集記事として連載されている。ご興味のある方は是非ご参照いただきたい。
- 3) 印象として、石室のような高湿度環境にある金属製品は著しく腐食するように思われるが、時には金属光沢をとどめたまま出土する遺物も見受けられる。このように良好に残存する環境的な要因を把握することが重要と考えられる。
- 4) 本研究は京都大学大学院建築学専攻小椋教授の研究チームと共同で進めており、本発表での検討内容についても、多くの貴重なご助言をいただいている。
- 5) 土中空間の酸素濃度は主に大気からの供給と微生物の呼吸による消費の収支によって形成される。そのため、夏期の気温の上昇に伴い微生物活動が活発になるため、酸素濃度は低下する。一方、微生物の呼吸によって生成する二酸化炭素は酸素と逆の挙動を示す。
- 6) 模擬古墳では、降雨により供給された水が、石室内の床面土中に供給されることを、土中の含水率測定から確認している。