

CFD を用いた風環境による露出展示遺構の劣化の予測に関する研究

～猪方小川塚古墳を事例に～

A Study on CFD Predicting Deterioration of the Exposed Archaeological Features Influenced by Wind Environment: A Case of Inogata Ogawa Tomb

田 夢儀
Tian Mengyi

1. 序論

(1) 研究背景

近年、国民が文化財や環境に対する関心が高まった。(Fig. 1)また、各地方公共団体は個性豊かな地域づくりを目的として、地域の文化や歴史を物語る遺構に目を付けた。このような社会的要請が高まったという課題に対し、2007年に文化庁は埋蔵文化財の適切な保存を図りつつ、その積極的な展示活用を進めることを提唱した。¹⁾



Fig. 1 市民が竊差遺跡発掘調査成果現地説明会に参加した様子 (2018)

<https://www.city.kusatsu.shiga.jp/bunka/rekishi/bunkazai0526.html> より参照 (アクセス日: 2019/01/05)

地下遺構の展示活用する際に、主に複製展示と露出展示という二種の整備方法がある。保存面では、複製展示は遺構を土中に埋め戻すことにより外気にさらされないため、より安定な環境に保存することができると考えられる。展示面としてはレプリカの材質が遺構の材質と異なったり、完全に細部まで型取りできなかつたりすることで遺構の真実性が問われる。一方、露出展示は保存面において遺構は土中での安定した状態から露出になるのは環境の変化により劣化が発生しやすい。展示面においては遺構の実物を見ることで遺構の存在感、臨場感、遺構の内

容と価値を最も的確に伝えられると考えられる。²⁾
(Fig. 2)

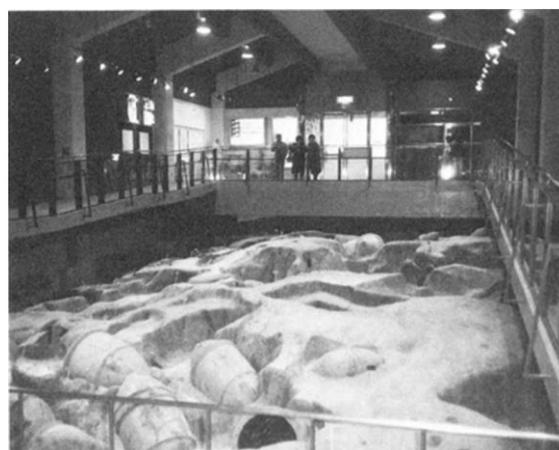


Fig. 2 露出展示の金隈遺跡 『史跡等整備のてびき一保存と活用のために 計画編』より参照

地下遺構が露出展示するにあたり、温度、湿度、風、光などといった多種の環境要素が相互作用しつつ遺構に影響を及ぼす。より安定的な環境で保存するために、遺構の上に覆屋を架け、環境制御に関する技術を取り入れて整備する必要がある。しかし、現在の事例では遺構の整備計画の段階、整備が保存環境に与える影響の検討が不十分だったため、劣化が発生したケースは少なくない。(Fig. 3)

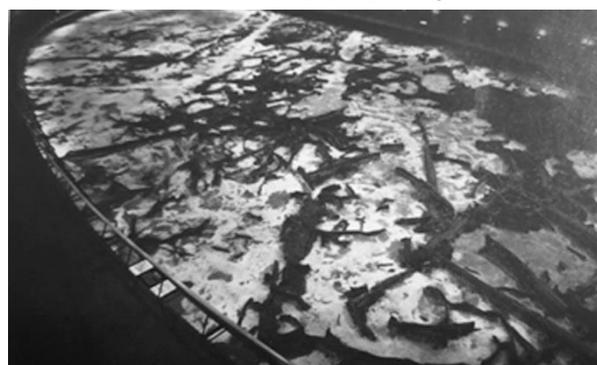


Fig. 3 富沢遺跡還気ダクト付近の土壌塩類風化「仙台市富沢遺跡保存館研究報告10」より参照

劣化の代表的な例として挙げられるのが塩類風化である。遺構表面空気の蒸気圧が遺構表面に含まれる塩溶液の飽和蒸気圧より低い場合（平衡に至るまで）飽和塩溶液から水分が蒸発し、塩溶液から塩が析出する。遺構表面空気の蒸気圧が遺構表面に含まれる塩溶液の飽和蒸気圧より高い場合、空気中の水蒸気が凝縮して液体の状態になり、析出した塩に移動し、塩は潮解する。塩が析出する際、応力を発生させる。そして、析出と潮解を繰り返すことで遺構の破壊をもたらす。

対流熱伝達の方程式は以下である。

$$Nu = 0.664 \times Re^{\frac{1}{2}} \times Pr^{\frac{1}{3}} (Re < 5 \times 10^5) \quad (1)$$

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad (2)$$

$$Re = \frac{U_{\infty} \times L}{\nu} \quad (3)$$

$$\alpha = 3.86 \times \left(\frac{U_{\infty}}{L} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

ここで、 Nu はヌセルト数、 Pr はプラントル数と呼ばれる無次元数で、物性値表に記載されている。 Re はレイノルズ数と呼ばれる無次元数であり、 α は熱伝達率[W/(m²°C)]、 L は遺構表面長さ[m]、 λ は空気の熱伝導率[W/(m°°C)]、 U_{∞} は流速[m/s]、 ν は動粘性係数[m²/s]である。物性値を20°Cの空気として式(1)～(3)から求めると、(4)が得られる。(4)を見ると、風速が大きいほど、遺構表面近傍における空気と遺構表面塩溶液の熱伝達率が大きくなる。したがって、放熱量が大きくなり、遺構表面空気と表面塩溶液の温度差が大きくなる。蒸気圧は温度に依存して決まるものであるため、遺構表面空気と表面塩溶液の蒸気圧差が大きくなる。遺構表面空気が塩溶液より温度が高い場合は、風速が大きいほど、水分の蒸発が促進することで塩の析出が早くなる。遺構表面空気が塩溶液より温度が低い場合は、風速が大きいほど、水蒸気の凝縮が促進することで塩の潮解が早くなる。したがって、風環境と塩類風化の密接な関係性があると考えられる。

風環境を把握するために用いられる1つの手段がCFDである。CFD (Computational Fluid Dynamic) は数値流体力学のことであり、コンピューターで流体の運動に関する方程式を用いて解析を行うことにより、流体の流れをシミュレーションする。この種のシミュレーションをλ通じて極めて複雑な流れ場でも、そこにおける各位置の基本物理量（速度、圧力、

温度、濃度など）及びそれらが時間に伴う変化を知ることができる。CFDは流体の運動をシミュレーションすることで環境物理量の分布を予測することができる。遺構からデータを読み取り、モデルを作成し、温湿度、風速など流体に関する環境物理量を設定し、解析を行えば環境物理量の分布が見られる。これに基づいて劣化予測することができる。

(2) 研究目的

劣化の発生を最低限に抑制するために、事前に整備後の環境を予測することが望ましいとされている。したがって本研究では露出展示する予定の猪方小川塚古墳を対象に、猪方小川塚古墳の石室をモデル化し、CFDを用いて露出後の風環境のシミュレーションを行うことで劣化を予測し、それに基づいて古墳の整備を提言することを目的とする。

(3) 論文構成

本論文はCFDを用いた風環境による露出展示遺構の劣化の予測について研究を行う。本論文の以下の構成は次になっている。第1章では研究背景、研究目的及び論文構成について述べる。第2章ではCFDを用いて解析を行う際の手順及び保存分野でのCFDの運用に関する文献調査について述べる。第3章では猪方小川塚古墳の石室を対象に風環境のシミュレーションを行う。形状の違いにより解析結果に及ぼす影響を明らかにし、風洞実験により解析モデルの検討を行う。最後に第四章にて、本論文のまとめと今後の展望について述べる。

2. CFD解析手順及び保存分野での運用

(1) 解析手順

解析手順は以下である。

- a. 事前分析と準備

解析モデルを決める。形状モデル制作と境界条件に必要なデータを収集する。
- b. 形状モデル作成

解析対象と流体運動の解析領域を作成する。
- c. 境界条件の確立

CFDは限られた領域しかが計算できない。シミュレーションを行う際、解析対象領域の境界が境界領域となり、条件設定が必要である。
- d. メッシュ生成

形状モデルをメッシュ化させ、座標ができることにより節点座標を計算できる。
- e. 離散化

離散方程式によって格子点及び中間点における数

値解を求める。

f. 結果の出力

(2) 保存分野での CFD の運用に関する文献調査

(i) 目的

文化財の劣化を最小限に抑えるために、劣化に関わる環境因子の物理量分布を把握してこまめに保存対策を行うことや保存環境を予測して予防的保存を図ることが大事だと考えられる。従来保存分野では CFD を用いて研究する際に、どのような研究方法、解析モデル、解析ソフトウェアを使用したかを知るため、文献調査を行った。

(ii) 結果

W. Uyttenhove らはベルギーにおける聖堂 St. Pieter' s Church を対象にモニタリングと CFD ソフトウェアの FLUENT を用いてシミュレーションを実施することで暖房設備が室内の温湿度分布に与える影響について検討を行った。³⁾

Cinzia Buratti はイタリアの S. DOMENICO' S BASILICA 聖堂において FLUENT を使用してステンドグラス窓の温度分布を求めることで保存推奨値と大きく異なることを明らかにした。⁴⁾

Essam E Khalil はエジプトにおける王家の谷の墓を対象に FLUENT を用いて $k-\epsilon$ モデルでいくつかの墓内部の湿度、風速分布のシミュレーションを行った。より適する換気システムを明らかにした。⁵⁾

Ashraf S. Husseina らはエジプトにおけるギザ台地を対象に風環境が遺跡表面の劣化に与える影響について研究を行った。露天の遺跡に対し、遺跡表面の浸食をもたらす主な原因は風だと考えられる。ギザ台地にある大ピラミッド像で見られた浸食現象と風環境との関係を検証するため、大ピラミッドを解析対象にモデルを作成し、遺跡の卓越風と年平均風速で設定されたインレット条件で $k-\epsilon$ モデルを用いてシミュレーションを行い、風速と圧力係数分布を求めた。解析結果を検証するため、大ピラミッド像の写真と照合した。それによると、解析結果が示した風速と圧力係数が大きい場所は大ピラミッド像における深刻な浸食現象が確認された部位に適合することが分かった。⁶⁾

(略)

(iii) まとめ

保存分野で CFD を用いて行われた既往研究を明らかにするために、文献研究を手法として整理を行った。その結果から以下のことが分かった。

CFD を用いて遺跡の風環境を行なった事例があった。事例の中で最も使用されている解析ソフトは FLUENT である。また、保存分野においては、主にシミュレーションの対象となるのは空気であるため、 $k-\epsilon$ モデルが使われる。しかし、 $k-\epsilon$ モデルでも様々な改良型が存在している一方で、事例の中でそれぞれ明示されておらず、それを明らかにする必要があった。

3. 猪方小川塚古墳に対するシミュレーション

(1) 猪方小川塚古墳の概要

猪江猪方小川塚古墳は、東京都猪江市の住宅地に位置する。(Fig. 4) 猪江市内には、かつて数多くの古墳が築造され、その様相は「猪江百塚」と呼ばれるほどであった。猪江古墳群には、もとも 70 基から 80 基ほどの古墳が残っていたと想定されており、そのほとんどが 5 世紀半ばから 6 世紀半ばにかけて、すなわち古墳時代中期から後期のきわめて短期間に、集中的に築造された古墳群として、多摩川流域のみならず、全国的にみても著名な古墳群である。



Fig. 4 猪江市の地理位置 GOOGLE MAP より参照

猪方小川塚古墳は 2011 年 9 月に、事業者から当該地での宅地造成にもなう発掘の届出が出され、試掘調査を行ったところ、敷地内に残されていた径約 5 メートル、高さ 1 メートルほど築山状の盛土が古墳と確認されたため本調査を実施することになった。本調査では、古墳の主体部が検出され、主体部は凝灰質砂岩による切石切組積みの横穴式石室であることが分かった。この発見により猪方小川塚古墳は、5 世紀半ば～6 世紀半ば集中的に造営されたと考えられてきた猪江古墳群の造営時期について見直しを

迫るもので、極めて貴重な事例であることが確認された。この結果を受けて市では現地保存に向けて事業者側と協議を進め、市は開発敷地内の一部を猪方小川塚古墳保存整備用地として購入した。2012年6月に市教育委員会は狛江市猪方小川塚古墳調査保存検討委員会を設置し、9月から保存目的の調査を実施した。調査の結果によると、石室は壁面上部の一部から天井部分が破壊されていたが、比較的遺存状態が良いと考えられる。遺体を安置した「玄室」の規模は内幅約1.3m×長さ2.6mで、その手前に長さ約1.8mの「前室」が作られている。壁面は1.2mの高さで、切石積みの約4段分が残された。玄室床面には小礫が敷き詰められており、耳環、鉄鎌などの副葬品が出土している。その後、2013年6月には、猪方小川塚古墳及び猪方小川塚古墳出土遺物を、市史跡及び市重宝（考古資料）に指定した。（Fig. 5）



Fig. 5 猪方小川塚古墳 狛江市市役所ホームページにより参照し、筆者により加筆

猪方小川塚古墳調査保存検討委員会において猪方小川塚古墳の整備に対して検討を行った結果、露出展示することが決定された。現在は整備に向けて仮設覆屋で保存される。⁷⁾ (Fig. 6)



Fig. 6 仮設覆屋で保存される様子
筆者撮影 撮影日：2017/6/18

(2) シミュレーションの目的

猪方小川塚古墳の北、東、西の面には住宅地があり、それらの面からの風はある程度防ぐことができる。（Fig. 7）したがって、南からの風の影響が最も大きいと考えられる。それに加えて狛江市の卓越風は南方からの風である。以上を踏まえ、猪方小川塚古墳における南からの風環境について明らかにする重要性があると考えられる。



Fig. 7 猪方小川塚古墳周辺図 GOOGLE MAP より参照、筆者により加筆

(3) ソフトウェア及び境界条件の設定

形状モデル作成：Sketch Up 2014

CFD 解析：ANSYS R19.0 Academic Fluent

流入境界条件 (Inlet)：3m/s

流出境界条件 (Outlet)：勾配ゼロに

地表面と石室境界条件：一般化対数則 (Wall)

側面及び上空境界条件：Symmetry

(4) 形状モデルの違いに関する解析

(i) 形状モデルの違い

実測図を基づいて形状モデルを作成したが、データが複雑でモデルの読み取りができなかったため、モデルを単純化させる必要があった。形状を単純化することで解析結果にいかの影響を及ぼすことを明らかにするために、合計6種類のモデルを作った。それらの寸法は以下である。

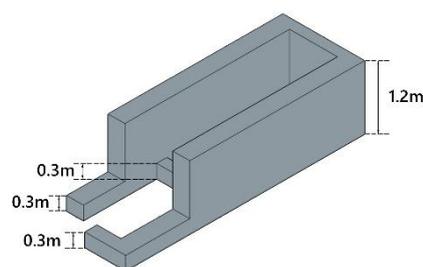


Fig. 8 A、B、Cの透視図

前室の壁の高さが同様に玄室内側の幅のみが違う A、B、C を作成した。(Fig. 8, Fig. 9) A は 1.1m で B は 1.2m、C は 1.3m である。最も実際の玄室内側の幅に近いのは C の 1.3m のモデルである。

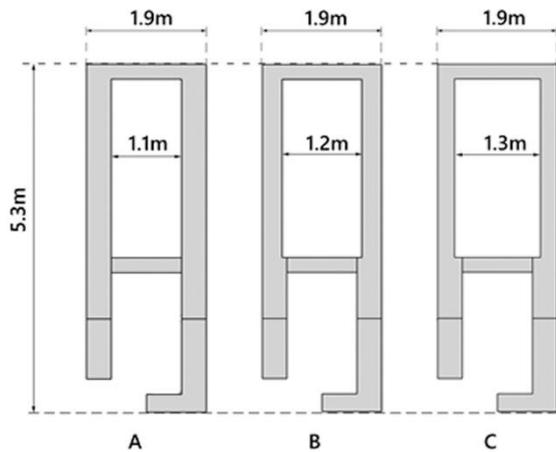


Fig. 9 A、B、C の平面図

そして、内側の幅が同様に 1.3m で前室の壁の高さのみ異なる D、E、F を作成した。D の壁は 0.6m で E が 0.8m、F は 1.0m である。最も実際の前室の壁の高さに近いのは F の 1.0m のモデルである。(Fig. 10)

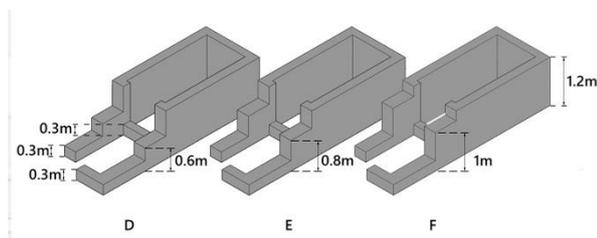


Fig. 10 D、E、F の透視図

(ii) 結果

結果の一覧は以下である。(Fig. 11)

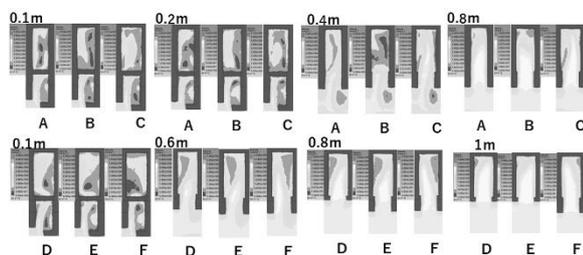


Fig. 11 A、B、C、D、E、F の風速分布図

結果としては空気の流れ場が複雑であるため、形状の違いと風速の相関性は把握しにくいことが分かった。

一方、明らかになった点が以下である。

a. 標高 0.3m 以下の場合には標高 0.3m 以上の場合に比

べ壁面の数が多いことで乱流が発生しやすく、流れ場がより複雑である

b. 標高 0.3m 以下の場合には標高 0.3m 以上の場合に比べ、低風速域が多く、淀みが多かった。

c. 標高 0.3m 以下の場合には気流が前門欠陥部により入り込み、風速大きくなる。前門と玄門の遮蔽によって前門残存部後部と玄門後部が低風速域である。

(5) 解析モデルの違いに関する解析

(i) 解析モデルの違い

今回使用された解析モデルは FLUENT が備わった、標準型 $k-\epsilon$ モデル、RNG $k-\epsilon$ モデル、Realizable $k-\epsilon$ モデル 3 つのモデルである。それぞれの違いは以下の通りである。

a. 標準型 $k-\epsilon$ モデル：壁面近傍において乱れエネルギーの値を過大に評価する可能性がある。

b. RNG $k-\epsilon$ モデル：RNG $k-\epsilon$ モデルが標準型 $k-\epsilon$ モデルより剥離など壁面近傍の乱流をよく予測することができる。

c. Realizable $k-\epsilon$ モデル：曲率や旋回がある流れなどに有効とされる。

(ii) 風洞実験と解析結果の照合

一般的に解析モデルの決定をするには、現地実測と風洞実験が行われる。猪方小川塚古墳は仮設覆屋が設置されているため現地実測を行うことはできない。そのため、模擬石室を制作して風洞実験を行い、塩結晶の析出部位を解析により得た風速分布図と照合することで解析モデルを決定する。

塩析出の分布の結果は図が示した通である。(Fig. 12)

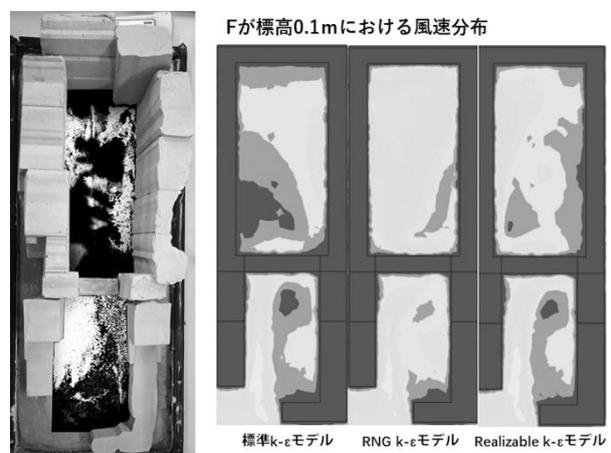


Fig. 12 塩結晶の析出分布と F が 0.1m における風速分布の照合図

壁面近傍において塩の析出が多いため、風速が高いと考えられる。そこで RNG $k-\epsilon$ モデルが適する可

能性が示唆された。玄室の中間部において渦領域があり、予測として旋回流を予測できる Realizable $k-\epsilon$ モデルが適する可能性があった。最適なモデルを明らかにするために実際のモデルに一番近い F の形状モデルを用いてシミュレーションを行った。

F が標高 0.1m における風速分布図から見ると、標準モデルが塩の析出モデルにもっとも近いと考えられた。

(iii) 誤差の原因

模擬石室で観測された塩の析出とシミュレーションの風速分布は完全に一致しているわけではなかったが、これの原因には以下の 3 点が考えられる。

a. 縮尺効果

縮尺したモデルでは乱れが大きくなる。

b. 表面の粗さ

表面が粗いことで壁面近傍における乱れが多くなる傾向がある。

c. 形状モデル

形状の違いが解析結果に影響を及ぼす。

(iiii) 考察

以上を踏まえ、標準モデルが最も類似している理由を検討した。本研究のモデルでは壁面の凹凸がないため、壁面近傍の乱れが実物より少ないと考えられる。標準 $k-\epsilon$ モデルは壁面近傍において乱れエネルギーの値を過大に評価する傾向があるため、実物の場合の凹凸による発生した乱れを補う可能性がある。そのため、解析対象が滑らかな壁面の形状モデルに適すると考えられる。

4. まとめと今後の展望

本研究は露出展示に向けて保存整備を行う猪方小川塚古墳を事例として CFD を用いて風環境に対してシミュレーションを行った。シミュレーションの結果により高風速域の分布が明らかになった。この問題は今後の劣化に繋がる恐れがあるため、露出展示する前において視野に入れ、対策を策定する方が望ましい。猪方小川塚古墳をモデリングすることで今後の保存計画を立てる際に予測を行い、保存環境の改善を図る。

参考文献

- 1) 文化庁ホームページ：埋蔵文化財の保存と活用、
http://www.bunka.go.jp/seisaku/bunkazai/shokai/pdf/hoku_07.pdf。(参照 2019 年 1 月 9 日)
- 2) 文化庁文化財部記念物課：史跡等整備のてびき—保存と活用

のために 計画編, 同成社, 2005

- 3) M. D. P. A. J. W. Uyttenhove, “CFD-modelling of Temperature and Humidity Distribution in the St. Pieter’s Church,” 2004.
- 4) C. Buratti, “THE ARTISTIC GLASS OF S. DOMENICO’S BASILICA IN PERUGIA: MEASUREMENTS AND SIMULATIONS OF THE MICRO - CLIMATE CONDITIONS,” 2005.
- 5) E. E. Khalil, “On the Modeling of Air Flow in the Tombs of the Valley of Kings,” 2017. Available:
<https://www.omicsonline.org/open-access/on-the-modeling-of-air-flow-in-the-tombs-of-the-valley-of-kings-2476-2296-1000166.php?aid=92387>.
- 6) A. S. Hussein, “Influences of wind flow over heritage sites: A case study of the wind environment over the Giza Plateau in Egypt,” *Environmental Modelling & Software*, pp. Pages 389-410, 2009.
- 7) 平成 25 年度第 1 回猪方小川塚古墳保存整備検討委員会議事録 (平成 25 年 7 月 31 日開催) Available:
<http://www.komae.ed.jp/index.cfm/1,550,12,131,html>.
(参照 2019 年 1 月 9 日)