

鷲ノ木遺跡の環状列石を取り巻く温度環境の測定と解析

石崎武志 ISHIZAKI, Takeshi / 文化財保存修復研究センター長・教授

高橋 毅 TAKAHASHI, Tsuyoshi / 森町教育委員会・社会教育課文化財保護係長

松田 玄 MATSUDA, Gen / 東北芸術工科大学芸術学部 文化財保存修復学科 4年

1. はじめに

鷲ノ木遺跡は、北海道の森町にある縄文時代後期前半（約4,000年前）の環状列石と竪穴墓域からなる遺跡である。この遺跡は、平成15年の北海道縦貫自動車道建設に伴う発掘調査中に発見された。1640年に噴火した駒ヶ岳の火山灰に覆われ、良好な保存状態であった。環状列石は、3重の構造をしており、外側は、36.9×33.8mのほぼ円形である。多くの石は地面に埋められ、直立するか斜めに傾いている。平均30～40cmの扁平な石が多く、602個ある。石の供給地は最も近い地点で約1km離れた桂川河口である¹⁾。

発掘調査により発見された環状列石等の学術的な重要性から、平成17年2月に道路工事の工法変更による環状列石等の現状保存が決定した。工事は、土被りが3m以下でも遺跡を保存することができるパイプルーフ工法が選択された²⁾。横から見た断面を図1に示す。地盤の厚さは、2.3mで、地盤の下は、ボックスカルバートと呼ばれるコンクリート構造になっており、コンクリートの厚さは0.7mである。冬季には、環状列石は気温の低下により上部から冷却されるのと、地盤は下部のボックスカルバートのコンクリート部分の温度低下から地盤下部から凍結することが予測される。著者は、森町教育委員会より依頼を受け、環状列石の温度低下や地盤面の温度低下に関して、



図1. 鷲ノ木遺跡およびボックスカルバートの状況

2015年～2020年まで現地観測を行うと共に、地盤の温度低下による地盤の凍結に関して数値解析を行ったので、以下に報告する。

2. 気象および温度環境測定

冬季は、気温が低下し、環状列石の温度が0度以下になると、岩石に含まれる水が凍結し、温度が上昇すると融解する。この過程の繰り返しにより、岩石が劣化する可能性がある。ここでは、環状列石に2重のシートをかけ、環状列石の保存対策を行っている。現地では、石材表面の温度、地表面の温度、シート表面の温度など冬季に測定した。石材表面に温度センサーを設置した状況を図



図2. 地表面、20cm深さの地温および石表面の温度測定



図3. 石表面にシートをかけた状態

2に示す。測定用石材をシートで覆い（図3）、さらにその上をシートで覆い（図4）、2重のシートで、石材を保護した。石材表面等の温度測定には、オンセット社製ホボプロ V2 (U23-003) を用い30分ごとに測定した。地表面の積雪状態を確認するために、タイムラプスカメラ (brinno 社製) を設置し、1日に1回撮影した。また、現地のソーラーラジエーションシールドを用いた温湿度測定を、オンセット社製ホボプロ V2 (U23-002) を用い30分ごとに測定した。タイムラプスカメラおよび温湿度測定装置の設置状況を図5に示す。



図4. シートをかけシート上面の温度を計測



図5. 外気の温湿度測定装置およびタイムラプスカメラの設置状況

3. 気象および温度環境測定結果

2015年～2020年の冬期間、現地で観測を行った。観測結果の内、2015年～2016年および2017年～2018年の結果を以下に示す。

3-1. 2015年～2016年の観測結果

鷲ノ木遺跡で測定された外気日平均温度の変化を図6に示す。比較のため森町のアメダスデータも示している。現地で観測された外気温と、森町のアメダス地点で観測された測定値には、図に示したように良い対応が見られた。また、森町のアメダス地点で観測された積雪深のデータを図7に示す。

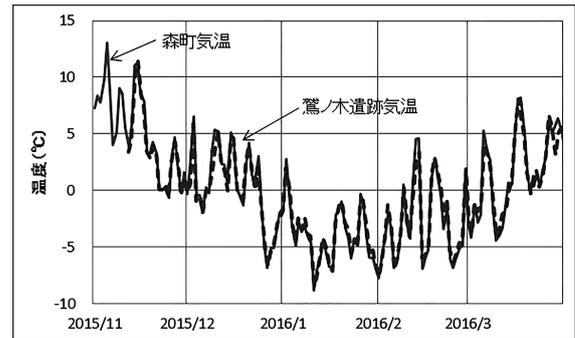


図6. 鷲ノ木遺跡の気温（破線）と森町アメダス地点で観測された気温（実線）の変化

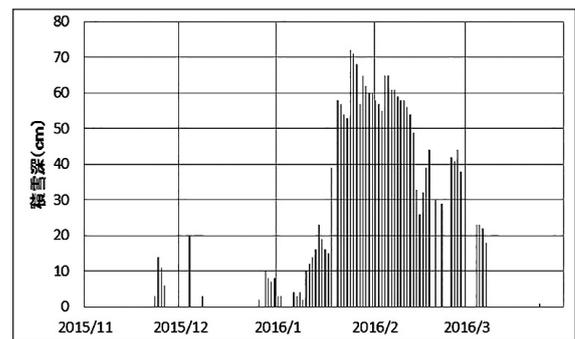


図7. 森町アメダス地点で観測された積雪深の変化

シート内の地表面温度および20cm深さの地温の日平均値を図8に示す。図から、シート内の地表面温度は、0℃以下になっていないのが分かる。特に積雪のある時期の温度はほとんど変化していないため、積雪層が断熱材として有効に働いていることが分かる。シート内石表面温度の日平均値およびシート外表面温度の日平均値変化を図9に示す。図9から、シートの外表面は、-5℃まで温度が低下しているが、2重シート内の石の表面温度は、最低でも-1.1℃（2016/1/12に記録）程度しか低下しておらず、2重のシートの断熱効果は有効であると考えられる。

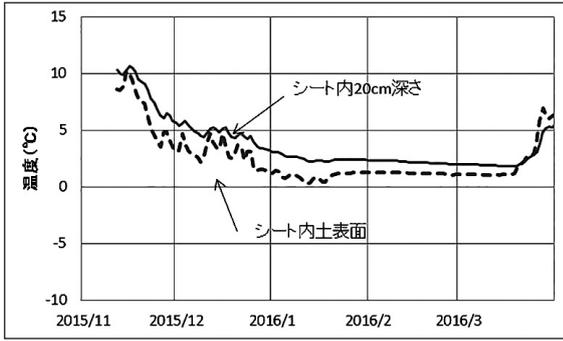


図8. シート内土表面温度（破線）および20cm深さでの地温（実線）変化

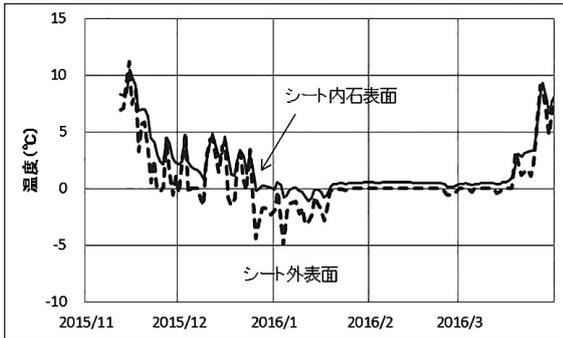


図9. シート内石表面温度（実線）およびシート外表面温度（破線）変化

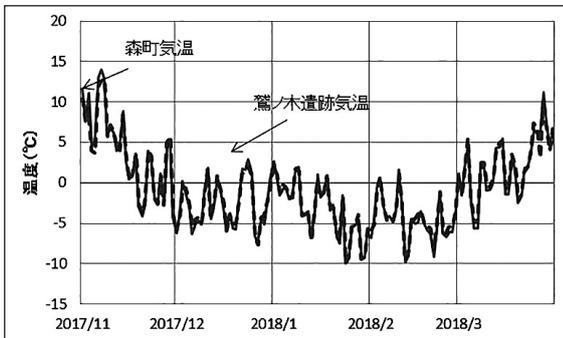


図10. 鷺ノ木遺跡の気温（破線）と森町アメダス地点で観測された気温（実線）変化

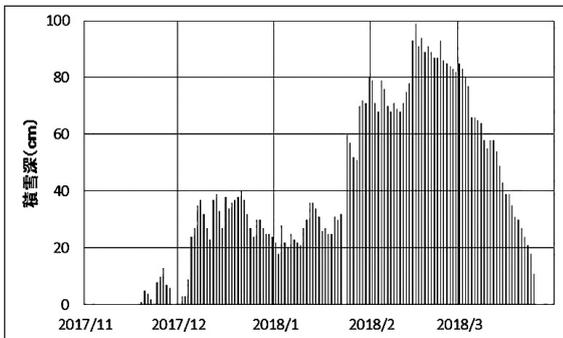


図11. 森町アメダス地点で観測された積雪深の変化

3-2. 2017年～2018年の観測結果

鷺ノ木遺跡で測定された外気日平均温度の変化を図10に示す。比較のため森町のアメダスデータも示している。現地で観測された外気温と、森町のアメダス地点で観測された測定値には、図に示したように良い対応が見られた。また、森町のアメダス地点で観測された積雪深のデータを図11に示す。

シート内の地表面温度および20cm深さの日平均地温を図12に示す。図から、シート内の地表面温度は、0℃以下になっていないのが分かる。特に積雪のある時期の温度はほとんど変化していないため、積雪層が断熱材として有効に働いていることが分かる。シート内石表面温度およびシート外表面日平均温度変化を図13に示す。図13から、シートの外表面は、-6.5℃まで温度が低下しているが、2重シート内の石の表面温度は、最低でも-0.4℃（2017/12/1に記録）程度しか低下しておらず、2重のシートの断熱効果は有効であると考えられる。また、12月1日に、シート面温度が、低下しているのは図11に見られる様に、積雪深が0になり、積雪の断熱効果が無かったためと考えられる。

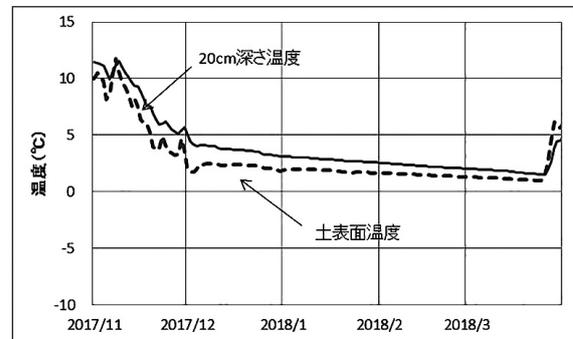


図12. シート内土表面温度（破線）および20cm深さでの地温（実線）変化

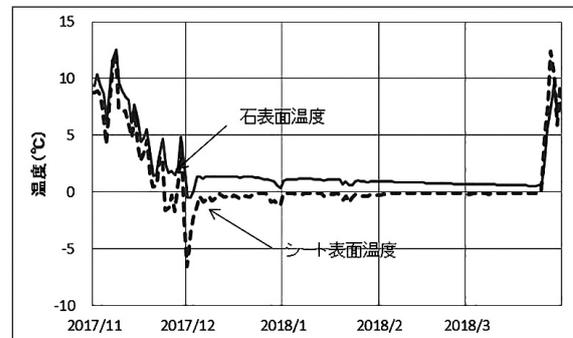


図13. シート内石表面温度（実線）およびシート外表面温度（破線）変化

4. 地盤部分のボックスカルバートからの冷却に関する熱解析

4-1. 1次元構造の熱解析

4-1-1. 地盤中の温度解析

寒冷地において、冬季に気温が下がると地表面の温度が下がり、地表面の温度が零度以下になると地盤が凍結する。地盤中の熱流(Q)は、地盤中の温度勾配に比例する。ここで、温度をT、位置座標をxで表すと、(1)式のように表される。これは、フーリエの法則と呼ばれる。ここで、式にマイナスが付いているのは、熱は、温度の低い方に流れることを示している。この比例定数Kを熱伝導率という。

$$Q = -K dT / dx \quad (1)$$

次に、熱がある領域に入って来て蓄積されると、その部分の温度は上昇する。ある領域に蓄積される熱量は、入ってきた熱量から、出て行く熱量を引いた値になるので、その関係は(2)式の様にかける。ここで、tは時間、Cは、熱容量(比熱)を表す。

$$C dT / dt = -dQ / dx \quad (2)$$

(2)式を(1)式に代入すると、(3)式が得られる。これを、熱伝導微分方程式という。

$$C dT / dt = K d^2 T / dx^2 \quad (3)$$

この(3)式は、地盤の表面温度を気象観測データなどで求め、境界条件として解くことにより、地盤中の温度を計算でき、凍結深さを求めることができる。これを解く方法としては、計算式を用いて、解析的に解く方法と、計算機を用いて数値的に解く方法がある。ここでは、GeoSlope社の熱伝導解析ソフトウェアTEMP/Wを用いた。

4-1-2. 温度解析モデル

地盤の下に、コンクリートのボックスカルバートがあり、鷺ノ木遺跡の地盤が、下から冷やされることによりどの程度、凍結するのかを解析するために、図14の様な、簡単な構造モデルを作成した。ここで、地盤の厚さは2.3mでボックスカルバートのコンクリートの厚さは、0.7mとする。

4-1-3. 温度境界条件

温度境界条件として、地盤の表層は2017年11月から、2018年4月に現地で測定された地表面温度(図12)を入力した。また、コンクリート下面には、2017年11月から、2018年4月に現地

で測定された気温(図10)を入力した。

4-1-4. 有限要素法における温度解析のメッシュ構造

有限要素法とは、構造を部分的な構造(メッシュ)に分け、それぞれのメッシュにおいて(3)式の熱伝導微分方程式を解くことにより、メッシュ内の温度変化を計算する方法である。ここでは、ボックスカルバートの下部は、気温変化が境界条件として入力されるため温度変化が大きいので、正確な温度を得るため、メッシュの大きさは小さく設定されている。一方、上部に行くに従って温度変化はゆっくりとなるため、メッシュの大きさは大きく設定されている。

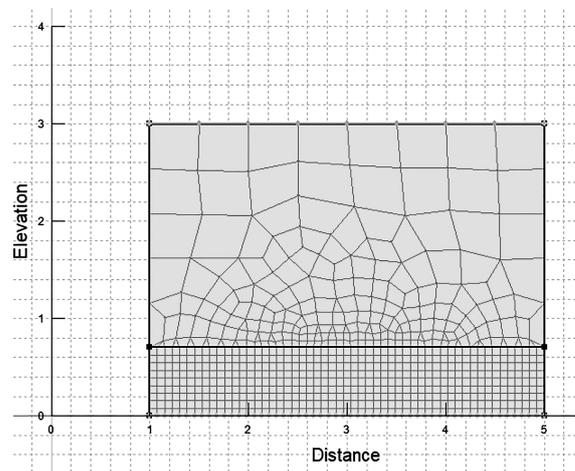


図14. 温度解析のための有限要素法メッシュ図

4-1-5. 解析のための熱物性値

(3)式の熱伝導微分方程式を解くためには、コンクリートおよび地盤土の熱伝導率および熱容量の値が必要である。ここでは、Geoslope社の文献にある物性値³⁾を参照して、下記の通り設定した。凍結した地盤土の熱伝導率は、不凍水という凍結しない水分量が温度により変化するため一定ではない。本解析モデルでは、その変化も考慮できる計算モデルとなっている。

○コンクリート

熱伝導率(凍結、未凍結) 200 kJ/days/m/°C

熱容量(凍結、未凍結) 2010 kJ/m³/°C、体積含水率0%

○地盤

熱伝導率(0°C) 165 kJ/days/m/°C、その他

の温度に関しては、不凍水分量により計算する。
 熱容量（凍結）2300 kJ/m³/°C、（未凍結）1900 kJ/m³/°C、体積含水率50%

4-1-6. 解析結果

以上の条件の下に、ボックスカルバートのコンクリート部分および地盤部分の温度解析を行った。解析の開始は2017年11月1日で2018年4月1日まで行った。計算結果を以下に示す。凍結開

始は、2017年11月19日である。これを図15に示す。図中の青い点線が、0°C線を示す。凍結線は、コンクリートの下部から、15cm程度の位置である。凍結線は12月1日には、50cm（図16）、1月1日には90cm（図17）、2月1日には100cm（図18）、3月1日には120cm（図19）、4月1日には120cm（図20）となった。最大凍結深さは、120cmであった。ボックスカルバートの厚さは、70cmであるため、ボックスカルバートの上の地盤の凍結深さ

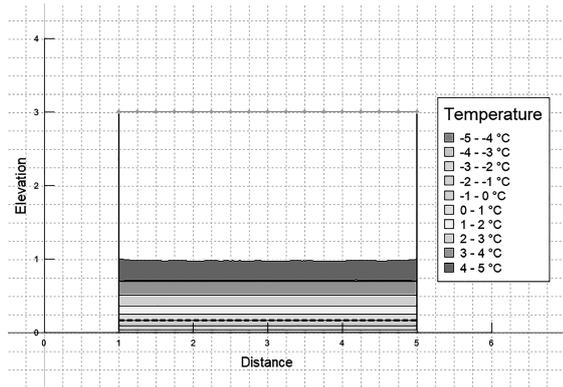


図15. コンクリートおよび地盤中の温度分布
 (2017年11月19日) 凍結深さ15cm

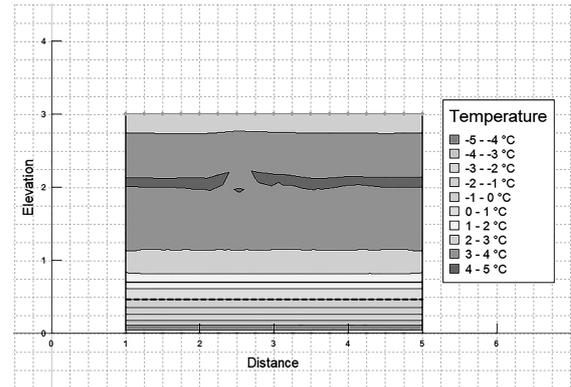


図16. コンクリートおよび地盤中の温度分布
 (2017年12月1日) 凍結深さ50cm

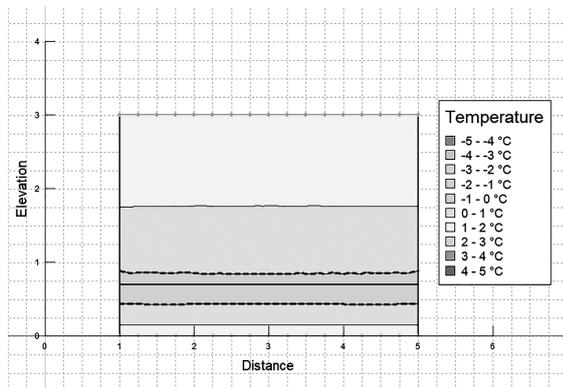


図17. コンクリートおよび地盤中の温度分布
 (2018年1月1日) 凍結深さ90cm

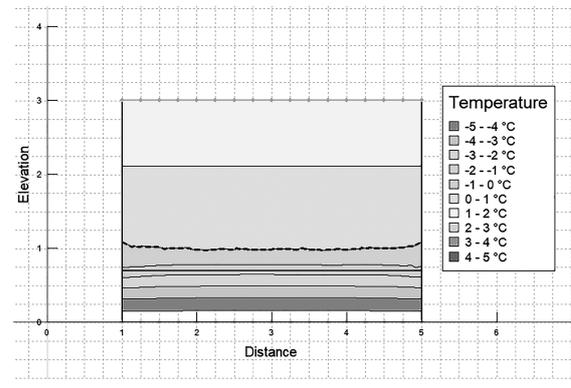


図18. コンクリートおよび地盤中の温度分布
 (2018年2月1日) 凍結深さ100cm

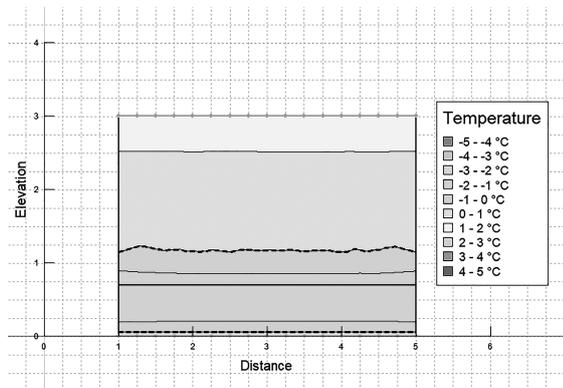


図19. コンクリートおよび地盤中の温度分布
 (2018年3月1日) 凍結深さ120cm

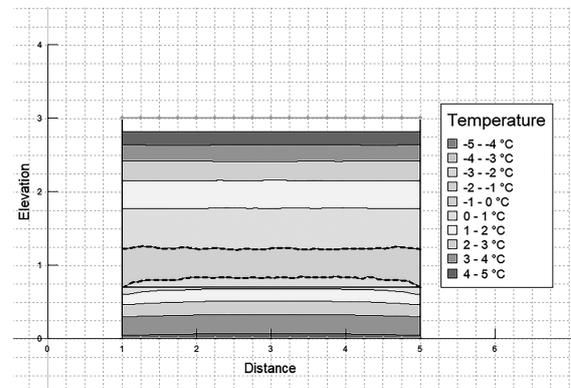


図20. コンクリートおよび地盤中の温度分布
 (2018年3月1日) 凍結深さ120cm

は、50cmと推定された。

以上の結果から、地盤の凍結は、下面から50cm程度までであり、環状列石周辺の地盤の厚さは230cmであるため、地盤表面から180cmは凍結しておらず、地盤に対する凍結の影響は小さいと考えられる。

4-2. ボックスカルバート周辺地盤の熱解析

参考に、ボックスカルバート周辺地盤全体の半分を対象に、温度解析を行った結果を以下に示す。熱物性の値、地表面温度、ボックスカルバート内面温度の設定は、4-1での解析と同様である。

4-2-1. ボックスカルバート周辺地盤の有限要素法メッシュ構造

ここでは、ボックスカルバートの内部は、気温変化が境界条件として入力されるため、温度変化が大きいため、正確な温度を得るため、メッシュの大きさは小さく設定されている。一方、周辺部に行くに従って温度変化は、ゆっくりとなるため、メッシュの大きさは大きく設定されている。ボックスカルバートの下面は高速道路路面であり、実際にはアスファルト、砂利層などの構造があるが、ここでは計算を簡略化するため、コンクリート構造としている。

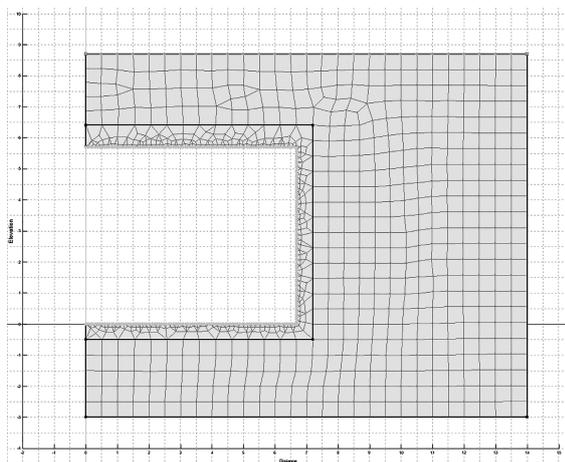


図21. 温度解析のための有限要素法メッシュ図

4-2-2. 解析結果

以上の条件の下に、ボックスカルバートのコンクリート部分および地盤部分の温度解析を行った。解析の開始は2017年11月1日で2018年4月1日まで行った。計算結果を以下に示す。凍結開

始は、2017年11月19日である。これを図22に示す。図中の青い点線が、0℃線を示す。凍結線は、コンクリートの下部から、15cm程度の位置である。凍結線は12月1日には、50cm (図23)、1月1日には90cm (図24)、2月1日には100cm (図25)、3月1日には120cm (図26)、4月1日には120cm (図27) となった。最大凍結深さは、120cmであった。ボックスカルバートの厚さは、70cmであるため、ボックスカルバートの上の地盤の凍結深さは、50cmと推定された。また、これらの計算から、ボックスカルバートの横方向の凍結、また高速道路表面下の地盤に関しても同様に凍結が進行していくことが確認された。

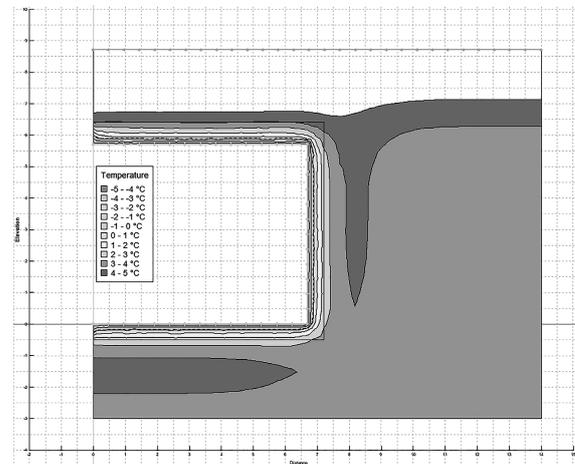


図22. ボックスカルバート周辺地盤の温度分布 (2017年11月19日)

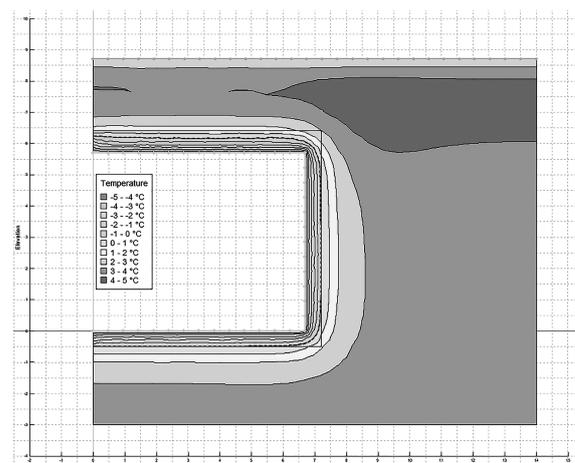


図23. ボックスカルバート周辺地盤の温度分布 (2017年12月1日)

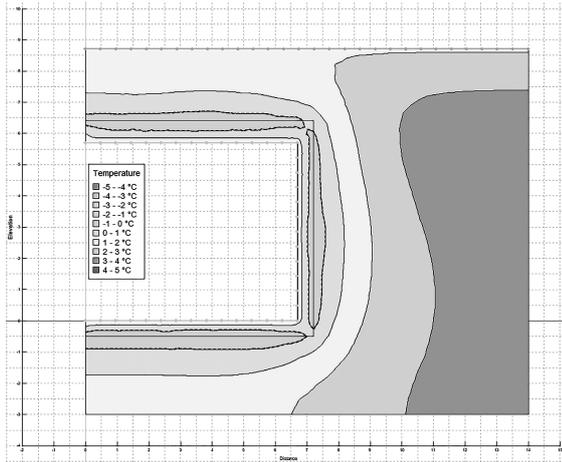


図24. ボックスカルバート周辺地盤の温度分布
(2018年1月1日)

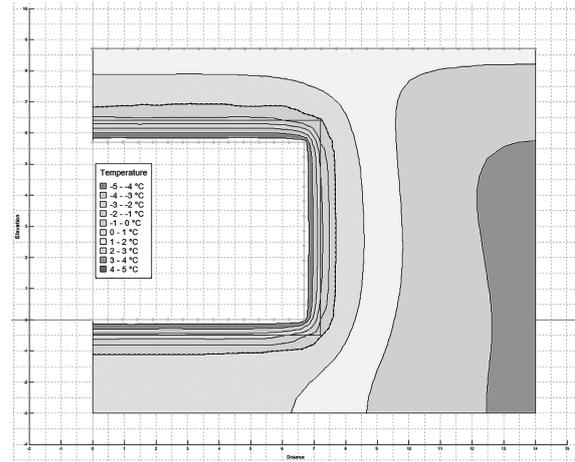


図25. ボックスカルバート周辺地盤の温度分布
(2018年2月1日)

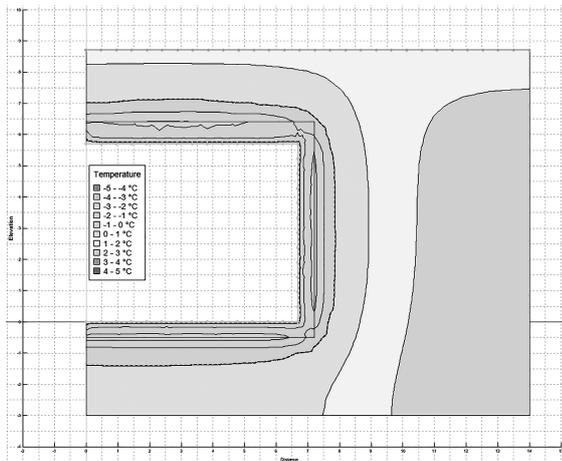


図26. ボックスカルバート周辺地盤の温度分布
(2018年3月1日)

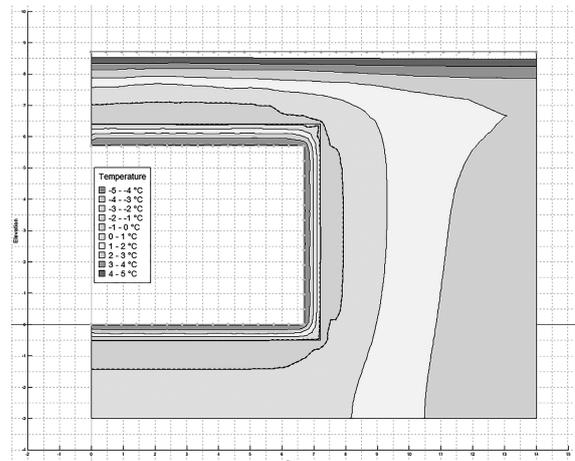


図27. ボックスカルバート周辺地盤の温度分布
(2018年4月1日)

5. まとめ

史跡鷺ノ木遺跡の環状列石の保存のため環状列石の温度低下や地盤面の温度低下に関して、2015年～2020年まで現地観測を行うと共に、地盤面の温度低下による地盤の凍結に関して数値解析を行った。現地観測結果によると、日平均気温は、 -10°C 程度まで下がる日も見られるが、2重のシート内部にある石材の温度は、大きく温度低下が見られない結果となった。これは、2重シートの断熱効果および冬期間の積雪が断熱材として機能しているためであり、シートで環状列石を養生することは、保存対策として有効であることが分かった。しかし、積雪の無い状態で気温が急に下がると石材の温度も 0°C 以下に低下すると考えられるので、今後も現地調査を継続していくことが重要であると考えられる。地盤は、下部のボック

スカルバートから冬季に冷却されることによる凍結の懸念があったため、有限要素法熱伝導解析プログラムを用いて、温度分布および凍結深さの解析を行った。解析により、地盤の凍結は下面から50cm程度までであり、環状列石周辺の地盤の厚さは230cmであることから、地盤表面から180cmは凍結しておらず、地盤に対する凍結の影響は小さいという結果が得られた。今後は、夏季は遺跡の公開に伴い、シートカバーを外して、環状列石を見せることになると考えられるが、気温の低下する冬季間は、やはりシートで環状列石を養生することが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 森町教育委員会：森町の縄文文化、pp. 25 (2016)
- 2) 長沼孝、高橋毅：鷺ノ木遺跡の保存を実現したトンネル工法、日本遺跡学会誌「遺跡研究」第9号、p. 226-229 (2012)
- 3) GEO-SLOPE International Ltd. : Thermal Modeling with TEMP/W An Engineering Methodology September 2014 Edition, pp. 164 (2014)