土質遺構の含水率分布図から検討した塩類析出と熱解析を利用した藻類のスチーム処置について

栗原典子　KURIHARA,Noriko／東北芸術工科大学 芸術工学研究科 芸術文化専攻 保存修復領域 修士２年
米村祥央　YONEMURA,Sachio／文化財保存修復研究センター研究員・准教授
石﨑武志　ISHIZAKI,Takeshi／文化財保存修復研究センター長・教授

１．緒言

地底の森ミュージアム(仙台市富沢遺跡保存館)の地下展示室では、旧石器時代の森やたき火跡等が残る遺跡を露出展示している。地下水の浸入を防ぐため地下 20mの外壁と排水ポンプが設置されているが、開館当初から遺構面に塩類が析出し、特に樹木を支える土への影響が深刻である。2007年の調査では硫酸マグネシウムと硫酸カルシウムの析出が確認され、地下水位を上昇させ高湿度環境にすることで析出を抑制している。以前より改善されたものの、現在も標高が高いため乾燥している場所(北側から遺構中央)で析出が多いと考えられている。またこの塩類対策によって一部に藻類やカビが発生し問題視されている。藻類に対してはスチーム処置で一定の効果を得ているが、凹凸等によってスチーム機が土と密着しにくい場所は再発が続いている。

本研究では地下水位を上昇させて塩類析出を抑制する処置が実施され 12 年が経過した現在、改めて遺構の現状を把握するため、遺構全体の含水率の測定と析出塩類を同定した。またスチーム処置の効果を高めるため、各含水率における処置時間を熱解析から求め、その結果をもとに処置を行った。

２．含水率の測定

同ミュージアムで問題とされている塩類析出と藻類の発生には、水分が関与している。またスチーム処置の熱伝導は土中の水分量によって異なるため含水率を測定した。

2-1. 方法

現地にて TDR 水分測定装置(ドイツイムコ社製)を用いて遺構表面全体の含水率を２ヶ月に一度、計５回測定した。測定箇所は北側の一部と樹木部分を除いた範囲内、310～333 箇所である。

2-2. 結果と考察

本遺構表面の含水率の最小値は 10 月の 8.9%、最大値は８月の 41.1%であった。測定結果を相対評価するために Surfer®(等高線図作成ソフト)を用いて含水率分布図を作成した(図２～６)。

含水率は年間を通して全面的に一定の値を示さず、６月から 12 月にかけて全体が乾燥していることがわかった。また北側から遺構中央までの範囲は変動が大きく塩類析出が多い範囲でもあることから、含水率の変動と塩類析出の関係があると考えられる。遺構中央の南側部分は 12 月になるにつれてやや乾燥しているものの湿潤状態を保っており、藻類が発生している場所と一致する。

また各測定箇所の含水率に対して標高値をプロットした散布図(図７)より、両者には相関関係はないと判断でき、含水率は標高ではなく換気口や樹脂(ポリシロキサン系薬剤「シリコーンコポリマー」)等が関与していると考えられる。

３．析出塩類の同定

塩類の同定は2007 年にも調査されたが、現在析出している塩類を調べるため再調査した。

3-1. 方法

塩類の分析には走査型電子顕微鏡エネルギー分散型Ｘ線分析装置(日本電子製分析電子顕微鏡 SEM-EDS)を使用し、測定試料は過去の調査と同じ 22 箇所より採取した(図８)。本来であればX線回折を用いて結晶構造を同定するべきであるが、今回は元素分析のみの結果となる。

3-2. 結果と考察

元素分析の結果(表１)より、Ca、S、O の検出から全体的に硫酸カルシウムが析出していると推定した。主に遺構の北側では Ca、S、O に加えて Mg と Na も検出したことから、硫酸マグネシウムと

硫酸ナトリウムが析出していると考えられる。展示室の壁面に析出していた塩からはCa、O、C、Naが検出しており、炭酸カルシウムと硫酸ナトリウムであると推定した。本調査では過去の報告にはない硫酸ナトリウムが析出している可能性がある。地下水位を上昇させたことで目視では塩類析出が軽減したと思われたが、水分の供給により土壌や地下水に含まれた塩が析出しやすくなり前回の調査よりも多様な種類の塩が析出したと考えられる。

含水率と析出塩類の関係を考察すると、硫酸マグネシウムと硫酸ナトリウムは比較的水分量が少なく、含水率の変動が大きい北側部分に多く析出している。反対に硫酸カルシウムは含水率の変動が少ない遺構中央から南側に多く析出している。これは硫酸マグネシウムや硫酸ナトリウムが可溶性塩類であり含水率の変動と共に変化し、含水率が高い時は土中の水分に溶け、含水率が下がり乾燥するときに析出すると考えられる。硫酸カルシウムは難溶性であるため含水率が高く変動が少ない場所で析出している傾向があり、北側の含水率の変動が大きい場所に析出している硫酸カルシウムは一度析出し、析出したままの状態であると考えられる。

４．藻類のスチーム処置の適正時間

これまで藻類には100℃のスチームを10秒ほど当てる処置で一定の効果を得てきたが、遺構表面の凹凸等によってスチーム機が土に密着できない場合は効果が小さかった。この問題を解決するためにスチーム処置の適正時間について熱解析を用いてシミュレーションを実施し、その結果を元に現場実験を行った。土中の水分量によって熱伝導が異なるため、シミュレーションで得られた適正時間と含水率分布図を照らし合わせて処置をすることでより高い効果が期待できると想定した。

4-1.熱解析によるシミュレーション

4-1-1.方法

シミュレーションをするために同ミュージアムで実際に使用しているスチーム機と遺構の土を用いて深さごとの温度変化と熱伝導率を測定し、その結果を元に熱解析ソフト(GEO-SLOPE社TEMP/W)を用いて土中の温度変化について熱解析を実施した。熱解析の結果が深さごとの温度変化の結果と類似するように調整し、それを同ミュージアムの条件(土中平均温度 22.2℃、土中の最低温度17.0℃、含水率 10～45%)に合わせてシミュレーションを行った。そのシミュレーションを元に、実際に遺構に処置をするための各含水率に対するスチームの噴霧時間を検討した。

スチームを当てた時の表面温度は、土とスチーム機の距離が0cm、2cm、3cmの3種類を深さごとの温度変化測定の実験と同法で求めた。

また藻類の生育上限温度は60℃であり、加熱水蒸気処置の先行研究から死滅には表面温度 60℃以上で 20 秒噴霧が必要であること、藻類の大きさは最大0.1cmであるため、表面から0.1cmの深さで60℃以上が20秒維持されることを、藻類除去の条件とした。

4-1-2.深さごとの温度変化の測定

温度計(TECHNOL SEVEN社1/100 高精度サーミスタ温度計 D642)を用いて、特定の含水率における深さごとの温度変化と表面温度を測定した。

含水率 33%の土にスチーム機を密着させて 60秒噴霧した場合、深さ0.6cm地点が60秒後に46℃になった(図９)。スチームを当てる前の土中温度の平均は25.61℃、最低温度は25.59℃だった。

また土とスチーム機の距離が0cmの時、表面の平均温度は 80.25℃だった。土とスチーム機の距離が2cmの時は70.19℃、3cmの時は65.36℃だった。

4-1-3.熱伝導率の測定

熱伝導率は含水率によって変化するため、熱特性分析装置(DECAGON 社 Thermal properties analyzer KD2)を用いて、含水率ごとの熱伝導率を測定した。

含水率7%、10%、15%、20%、27%、33%の熱伝導率を測定した結果、含水率が上がると熱伝導率も上昇した。測定結果から散布図(図10)を作成し回帰直線式を求めたところ、相関関係があった。シミュレーションでは散布図で得られた数式(y=0.023x+0.074)から熱伝導率を求めた値を使用した。

4-1-4.結果

スチーム機と土の距離が0cm、2cm、3cmの時の表面温度で、含水率 10%から 45%のスチーム処置に必要な時間を求めることができた（表２)。

遺構土壌深さ0.1cmで60℃を超える条件は、スチーム機と土を密着させた表面温度 80℃で含水

率45%の時に最短であり6.5秒であった（図11）。よって処置時間は26.5秒となる。表面温度80℃での最長時間は含水率 10%の 21 秒で処置時間は41秒である（図12）。表面温度が70℃(スチーム機と土の距離が2cm)の場合、含水率45%では18秒で60℃に達した（図13）。含水率10%では58.5秒掛かった。表面温度65℃（スチーム機と土の距離が3cm）では含水率45%の時に56秒で60℃を超えた（図14）。含水率10%では192秒であり全ての中で最も遅かった。

4-2. 現場実験

4-2-1. 方法

含水率分布図とシミュレーションを元に、実際に遺構面でスチーム処置を実施した。実施箇所はA：土とスチーム機が密着する箇所とB：凹凸があるため密着できず土から2㎝離した箇所で、どちらも含水率は30%である。

4-2-2. 結果

A を熱解析によって求めたスチームの処置時間29秒で噴霧したところ、余熱により表面の乾燥が確認され土壌処理材への影響が懸念されたため、10秒と20秒の処置で比較した。処置時間10秒部分は、17日後の目視観察で藻類が半分程度残留していたが、20秒噴霧部分は残留が認められなかった。Bの熱解析によって求めた処置時間は45.5秒であり、実際に噴霧したところ効果が確認された。

以上の結果から含水率 30%の箇所で土とスチーム機を密着させて処置する場合は 20 秒、土とスチーム機の距離が離れる場合は熱解析によって得られた処置時間を元にスチームを噴霧することが有効と判断した。

5．結言

遺構の含水率分布に着目し、同ミュージアムにおいて問題視されていた塩類析出と藻類のスチーム処置について検討した。

遺構の含水率は 8.9%～41.1%であり、結果を含水率分布図で可視化した。

現状の析出塩類の把握のため元素分析をしたところ、全体的に硫酸カルシウムが析出していると推測し、含水率の変動が大きい遺構北側では硫酸マグネシウムと硫酸ナトリウムが析出していると考えられた。今回の析出塩類の同定から、過去の報告にはない硫酸ナトリウムが析出している可能性がある。

同ミュージアムにおける藻類のスチーム処置について、文献調査より除去の条件を土中の深さ0.1cm 地点において 60℃以上を 20 秒間噴霧することを設定した。以上の条件に当てはまる処置時間を求めるために熱解析を用いたシミュレーションを実施し、含水率ごとに有効なスチームの処置時間を得ることができた。現場実験では余熱なども考慮し、状況に応じた処置時間の設定が必要とされた。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、地底の森ミュージアムの平塚幸人様、株式会社C＆P研究所の遊垣誠宏様をはじめ仙台市教育委員会や地底の森ミュージアムの皆様には多大なるご協力を賜りました。ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

仙台市教育委員会「仙台市富沢遺跡保存館研究報告9」(2006)p.19-22

仙台市教育委員会「仙台市富沢遺跡保存館研究報告10」(2007)p.30-31

仙台市教育委員会「地底の森ミュージアム・縄文の森広場研究報告2011」p.13

仙台市教育委員会『地底の森ミュージアム・縄文の森広場　研究報告2015』(2016)p.19-23

仙台市教育委員会「地底の森ミュージアム・縄文の森広場　研究報告2018」(2019)p.24

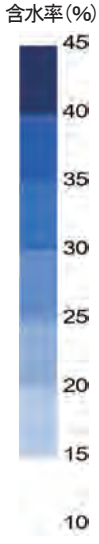
浅井元朗「蒸気処理による作物収穫後地表面の雑草種子駆除技術」農研機構

https://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/narc/2012/152d0_03_11.html（最終閲覧2019年10月）

図１　遺構全景
（仙台市教育委員会「仙台市富沢遺跡保存館研究報告 10」）

図２　2019 年 6 月の含水率分布図
最大値 40. 9%　最小値 15. 7%

図３　2019 年 8 月の含水率分布図
最大値 41. 1%　最小値 12. 4%



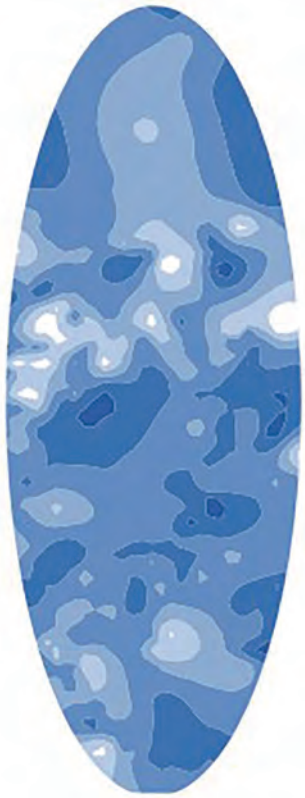


図４　2019 年 10 月の含水率分布図
最大値 39. 6%　最小値 8. 9%

図５　2019 年 12 月の含水率分布図
最大値 38. 8%　最小値 9. 8%

図６　2019 年 2 月の含水率分布図
最大値 38. 0%　最小値 14. 2%

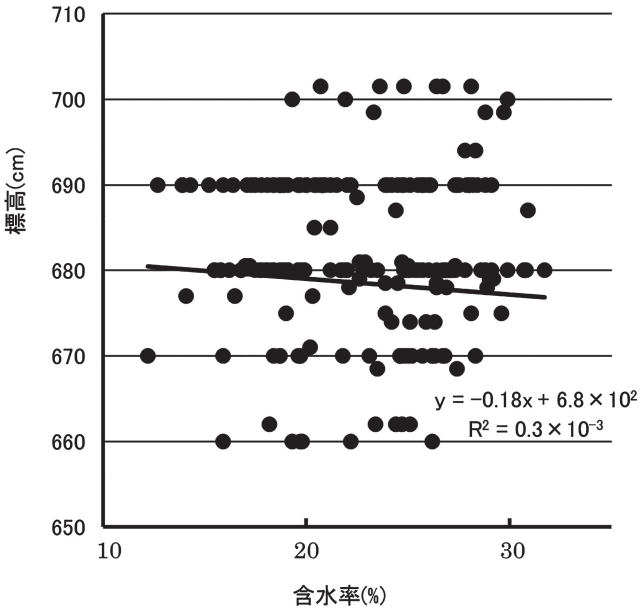


図７　勾配傾向と含水率の関係

図８　塩類の採取地点

（仙台市教育委員会「仙台市富沢遺跡保存館研究報告 10」に加筆）

表１　元素分析の結果

地点	検出元素	推定化合物	2007 年の調査
A	O, S, Ca, Si, Al	$CaSO_4$, SiO_2	$MgSO_4・H_2O$
B	O, S, Ca, Na, Mg, Si, Al	$CaSO_4$, $MgSO_4$, Na_2SO_4	$MgSO_4・H_2O$
C	Mg, S, O	$MgSO_4$	—
D	Ca, S, O, Si, Na, Mg, K	$CaSO_4$, SiO_2, $MgSO_4$, Na_2SO_4, K_2O	—
E	S, O, Si, Na, Ca, Al, Mg	SiO_2, $CaSO_4$, Na_2SO_4, $MgSO_4$	SiO_2, $CaSO_3$
F	O, S, Ca	$CaSO_4$	$CaSO_3$？
G	Ca, S, O, Si, Al	$CaSO_4$, SiO_2	$CaSO_3$？
H	O, S, Ca, Si, Mg	$CaSO_4$, SiO_2, $MgSO_4$	$CaSO_3$？
I	Ca, S, O, Si, Al, Na	$CaSO_4$, SiO_2, Na_2SO_4	$CaSO_3$？
J	Ca, S, O	$CaSO_4$	—
K	O, S, Ca, Si, Al	$CaSO_4$, SiO_2	—
L	O, S, Ca, Si, Al	$CaSO_4$, SiO_2	—
M	O, S, Ca, Si	$CaSO_4$, SiO_2	$CaSO_3$？
N	S, O, Ca, Si, Al	$CaSO_4$, SiO_2	$CaSO_4$
O	S, O, Ca	$CaSO_4$	—
P	S, O, Ca, Si	$CaSO_4$, SiO_2	—
Q	Ca, S, O	$CaSO_4$	—
R	Ca, S, O, Si, Al, Na	$CaSO_4$, SiO_2, Na_2SO_4	—
Y	O, S, Ca, Mg, Si, Al	$CaSO_4$, SiO_2, $MgSO_4$	$CaSO_3$？
Z	O, S, Ca	$CaSO_4$	SiO_2
壁1	Ca, O, C, Na	$CaCO_3$, Na_2CO_3	$CaCO_3$
壁2	Ca, O, C, Na	$CaCO_3$, Na_2CO_3	$CaCO_3$

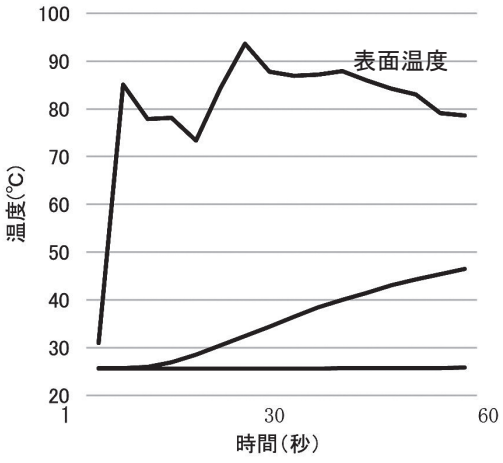


図９　含水率 33%の時の深さごとの温度変化

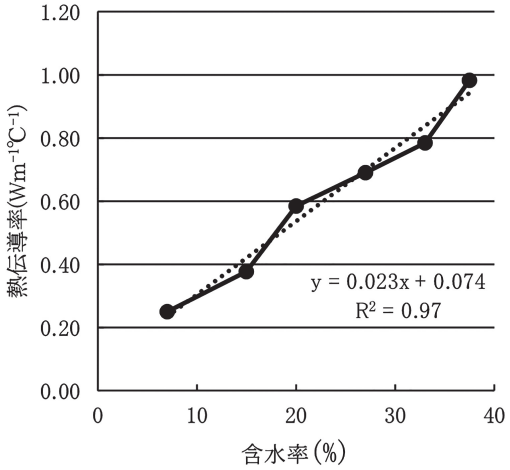


図 10　含水率と熱伝導率の関係

表２　スチームの処置時間（秒）

含水率(%)	土と密着 80℃	土から 2cm 70℃	土から 3cm 65℃
45	26.5	38	76
40	27	39.5	84
35	28	42.5	92
30	29	45.5	100
25	31	48.5	112
20	33	54.5	132
15	36	63.5	160
10	41	78.5	212

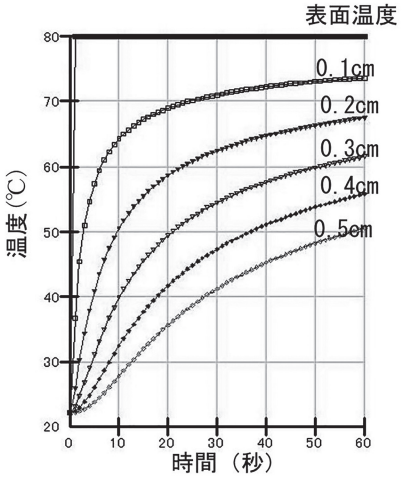


図 11　表面温度 80℃・
含水率 45%の時の熱解析の結果

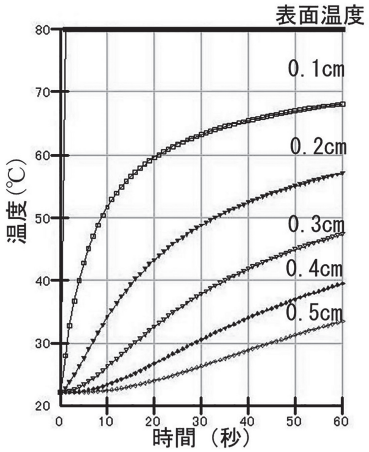


図 12　表面温度 80℃・
含水率 10%の時の熱解析の結果

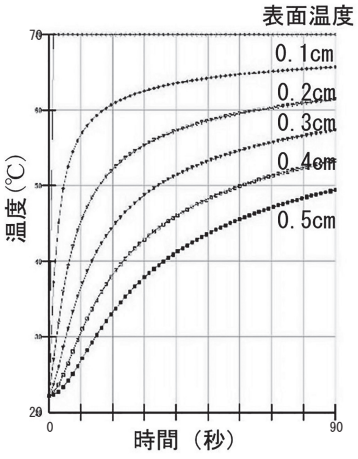


図 13　表面温度 70℃・
含水率 45%の時の熱解析の結果

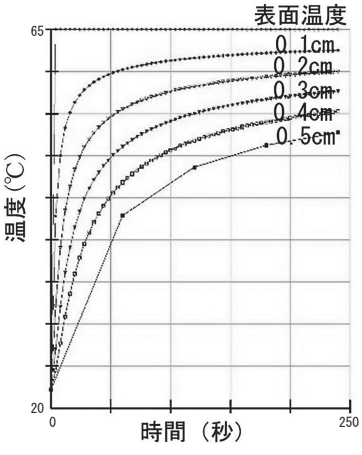


図 14　表面温度 65℃・
含水率 45%の時の熱解析の結果