九州大学工学部	学生会員(○加島史浩
九州大学大学院工学府	学生会員	Pavel Ehler
九州大学大学院工学研究院	正会員	小宮哲平、中山裕文
九州大学大学院工学研究院	フェロー会員	島岡隆行

1. はじめに

福島第一原発事故に伴い発生した除染廃棄物はフレキシブルコンテナバッグ(以下、フレコンと呼ぶ。)に収納さ れ仮置場にて保管されている。除染廃棄物には草木等の有機物が含まれており、発酵熱が温度上昇を引き起こし、 火災発生の危険性が考えられる。除染廃棄物仮置場では環境省のガイドラインに従い火災防止策がとられているが、 除染廃棄物仮置場における熱挙動の科学的知見は未だ不十分と言える。

本研究では除染廃棄物仮置場における熱挙動の解明を目的に、除染廃棄物仮置場を模した実験を行い、熱挙動に関するデータを取得するともに、実験における熱挙動を再現可能な数値モデルの構築を試みた。

2. 模擬仮置場における熱挙動、ガスの組成変化に関する実験

2.1 実験概要

(1)模擬仮置場の作成:福岡市西区田尻にて、横5.0m×奥 行5.0m×高さ1.4mの模擬仮置場を設置した。地面に不織布、 遮水シート、不織布の3層構造の形をしたシートを敷設した 上に、土壌または草木類が充填されたフレコンを横5袋×奥 行5袋×高さ2段(計50袋)に積み上げ、その上を通気性 防水シートで覆蓋した。仮置場中央部分に草木類が入ったフ レコンを配置し、その周囲に土壌が入ったフレコンを配置した。 図1に模擬仮置場の中央断面、表1に草及び土の充填条件を示 す。2015年12月7日に模擬仮置場が完成し、その日を実験開始 日とした。なお、草のフレコンに充填した草は、刈られた日の 異なる草(11月24日~12月6日)を用いた。

(2)測定項目及び方法:仮置場内の温度分布測定のため、 仮置場内に熱電対を設置し、10分おきに温度を測定した。 仮置場内のガス組成を測定するため、仮置場内にガス採取用 のチューブを配置し、2日おきにガスを採取し、ガスクロマ トグラフ法 (TCD)でガス組成 (CO₂、O₂、N₂、CH₄及び CO) を測定した。温度測定及びガスのモニタリング位置は図1の 通りである。

2.2 実験結果及び考察

表2に温度が25 ℃以上まで上昇した地点の初期温度、最高温 度及び最高温度に達するのに要した時間を、図2及び図3に 二酸化炭素及び酸素濃度の経時変化を示す。仮置場中央下段 のフレコン(温度測定地点4)で最高温度(38.1℃)が観測された。 また、同じ地点(ガス採取地点b)において二酸化炭素の最高濃 度及び酸素の最低濃度が観測された。なお、N₂の濃度に経時

変化はほとんど見られず(80.0%前後で推移)、CH4及び CO は検出されなかった。



表	1	充填条	牛
~	-		

試料	かさ密度[kg/m ³]	重量[kg]	含水率[%]	
草木類	127	70	53	
土壌	2000	1000	20	

表2 模擬仮置場内部の温度変化

温度測定地点	2	3	4	6	9	10	11
初期温度(℃)	15.6	17.5	18.2	17.9	16.7	13.5	18.5
最高温度(℃)	32.3	32.5	38.1	29.5	25.1	27.7	37.5
最高温度到達時間(日)	8.00	8.00	6.13	7.13	8.00	7.01	7.77



3. 模擬仮置場における熱挙動の数値シミュレーション

3. 1 モデルの設定

(1) モデル式:本研究で用いたモデル式を以下に示す。

$$(\rho C_p)_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_{eq} \nabla T) + Q \quad (1)$$

$$k_{eq} = \theta_p k_p + (1 - \theta_p)k \tag{2}$$

$$(\rho C_p)_{eq} = \theta_p \rho_p C_{p,p} + (1 - \theta_p) \rho C_p \tag{3}$$

ここで、 ρ は密度[kg/m³]、Cpは定圧比熱容量[J/(kg・K)]、**u**は 流速ベクトル[m/s]、kは熱伝導率[W/m・K]、Qは発熱量[W/m³]、 θ は各相の体積率[-]である。式(1)~(3)において、添字 eq は固 相、液相及び気相の複合体を意味する。式(2)及び(3)において、 添字 p は固相、添字なしは液相及び気相を意味する。

(2)初期、境界条件の設定:表3にモデル式中のパラメー タの設定値を示す。また、草のフレコンの初期温度は18℃、 土のフレコンの初期温度は11℃でそれぞれ一定とした。境界 条件については底面部を断熱とみなし、それ以外の面におい ては熱輻射を考慮し、輻射率は0.94とした。また、外気温は 15℃で一定とみなした。

3.2 数値シミュレーション結果及びその精度

開始から6日後の模擬仮置場内の温度分布の実測値を図4 に、数値シミュレーション結果を図5に示す。また、図1で 示した温度測定点における測定温度と数値シミュレーショ ンによる温度の比較を表4に示す。図4と図5の比較より、 高温度を示す地点に関しては数値シミュレーションで再現 できた。しかし、ほとんどの測定点において実測値より解析 値が低くなっていることが表4から読み取れる。これは、通 気性防水シートによる覆蓋を考慮できていないこと、外気温 を一定にしたこと及びフレコン内の初期温度を正確に組み 込めていないことが原因であると考えられる。

4. まとめ

本研究では模擬仮置場の高温度を示す地点及び大まかな



図3 酸素濃度の経時変化

表3 モデルの設定値

記号	数値	設定根拠
$\rho_p C_{p,p}$	2200	混合ごみの埋立層の熱容量を適用 ¹⁾
k _p	0.32	混合ごみの埋立層の有効熱伝導率を適用 ¹⁾
k	0.026	20[℃]における熱伝導率 ²⁾
ρ	1.177	気体の状態方程式より導出
Cp	1000	空気の比熱容量
$\theta_{\rm p}$	0.068	草の密度から導出





図 5 数値シミュレーション結果 (内部温度:℃ スケール:m)

表4 実測値と解析値の比較

温度測定地点	2	3	4	6	9	10	11
実測値(℃)	28.9	31.6	38.1	29.5	24.3	27.2	36.9
解析値(℃)	24.5	30.2	33.1	21.5	23.4	29.1	31.0

最高温度を明らかにすることができた。これにより、現場の維持管理において、仮置場の中央下段のフレコンの中 心部をモニタリングすることが火災防止において重要であることが分かった。しかし、温度の値という点において は正確に再現することができなかった。原因として、初期条件及び境界条件の一部を簡潔にしたことが挙げられる。 今後の展開としては通気性防水シートによる覆蓋及び外気温の変化を考慮するなどし、モデルの正確性を向上させ ることが必要である。また、最終的にはそのモデルを実スケールの除染廃棄物仮置場に応用させ、実際の除染廃棄 物仮置場における熱挙動を解明していく必要がある。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 26820223 の助成を受けたものである。記して謝意を表す。

参考文献 1)田中信壽:環境安全な廃棄物埋立処分場の建設と管理,技報堂出版, p 224-226, 1999.

2)各物質の熱的性質 http://www.sensbey.co.jp/pdffile/materialpropety.pdf, 2015.12.21