

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820223

研究課題名(和文) 廃棄物の火災防止のための保管方法及び発火時の熱源特定手法に関する研究

研究課題名(英文) Temporary storage method of radioactive decontamination solid waste for fire prevention and thermal source positional estimation in solid waste landfill

研究代表者

小宮 哲平 (Komiya, Teppei)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：20457451

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では除染廃棄物の仮置場における火災防止のための適正な保管方法の提案を目的に、仮置場模擬実験及び数値シミュレーションを行い、除染廃棄物の風乾の有効性や除染廃棄物の積上げ高さや間詰めの有無が仮置場内部温度に及ぼす影響を定量的に明らかにした。また、地表に複数の局所的な高温箇所が見られる廃棄物層を対象とした熱源位置推定手法を提案し、土槽実験及び数値シミュレーションにより、提案手法による熱源位置推定精度を定量的に明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, in order to propose the proper temporary storage method of radioactive decontamination solid waste, experiments and numerical simulations were carried out, and the effectiveness of air drying the decontamination waste and the effect of piling up height and the filling spaces on the temperature inside a storage site were quantitatively clarified. Moreover, the thermal source positional estimation method in the solid waste layer which had several spots of high temperature locally on the surface was proposed, and the accuracy of the positional estimation by the proposed method was quantitatively clarified through experiments and numerical simulations.

研究分野：廃棄物資源循環工学

キーワード：廃棄物 火災 除染廃棄物 仮置き 廃棄物埋立地 熱源

1. 研究開始当初の背景

(1) 除染廃棄物の保管場における火災防止に関する科学的知見の必要性

福島第一原子力発電所事故に付随し拡散した放射性物質の除染により膨大な除染廃棄物が発生している。除染廃棄物は、中間貯蔵施設ができるまでの間、仮置場や除染現場で一時保管されることとなっている。除染廃棄物には草木類も多く、有機物の発酵に由来する温度上昇や可燃性ガスにより、火災発生の恐れがあることから、適正な保管、管理がなされる必要がある。

一方、災害廃棄物の保管方法については、環境省(2011)より火災防止のガイドラインが示されており、除染廃棄物の保管方法についてもそのガイドラインが援用されている。しかし、災害廃棄物は基本的に野ざらしの状態であるのに対し、除染廃棄物はフレコンバッグや大型土嚢に入れられ、遮水シートの上に山積みされ、さらに上部は遮水シートまたは通気性防水シートで覆われており、両者の保管状態は大きく異なる。除染廃棄物の保管場における熱の挙動は十分に解明されておらず、火災防止に関する科学的知見が早急に望まれる。

(2) 内部発熱を有する廃棄物層における熱源特定手法の必要性

不適正処分場や災害廃棄物の仮置場においてしばしば内部発熱が生じ、蓄熱が進むと火災に発展する可能性がある。万が一火災が発生した場合、散水による熱源の鎮火や掘削による熱源の除去等の消火対策が早急に講じられなければならない。火災の効果的な予防または鎮火を行うためには、熱源の位置を特定する必要があるが、熱源位置を特定する有効な手法は存在していないのが現状である。

物体内部の熱源を特定する手法として、熱収支モデルを用い、物体の表面温度分布を境界条件とし、逆解析により内部温度分布を推定し、熱源の特定を行うことが考えられるが、廃棄物層のように種々の物質が混合状態で存在し、空間的な不均質性を有する場合には、モデルにおける物体内部の熱特性値(比熱、熱伝導率等)の設定が困難であり、熱源の推定は不可能といえる。

一方、応募者らは、サーモグラフィーを用いた地表温度分布観測による廃棄物層内の熱源特定手法の検討を行ってきた。その検討の中で、地表の高温箇所(ホットスポット)の多くは、大きな間隙(大間隙)を有する場所(主に砕石やコンクリート片からなる場所、廃棄物層のクラック、擁壁との隙間等)であることが分かってきた。大間隙が地表から熱源まで連続的に存在することで、大間隙を通して内部の高温ガスが放出され、地表ホットスポットが形成されているものと推察される。

一般に、地中温度は、一定の深さ(60cm程度)以深では気象の日変動の影響をほとんど

受けないことを考えると、内部高温ガスの放出口である地表ホットスポットの温度は、気象や地表の影響を受けにくく、内部熱分布の推定に適した指標になりうると考えられる。

ここで、応募者は、地表ホットスポットから熱源まで連続する間隙における熱輸送及びガス輸送に関する連立方程式を立て、理想的な条件を仮定しつつ解き、次式の解析解を得ている。

$$\frac{1}{D_i} \ln \frac{T_* - T_0}{T_i - T_0} = Const.$$

上式は、地表ホットスポットから熱源までの距離(D_i)、地表ホットスポットの温度(T_i)、熱源温度(T_*)、地中温度(T_0)の間には一定の関係があることを示している。上式に温度(T_i 、 T_* 、 T_0)を与えると熱源までの距離(D_i)が得られることから、複数の地表ホットスポットからの熱源までの距離を用いて、幾何学的に熱源の位置を推定できる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では、(1) 除染廃棄物の保管場における熱挙動の解明と火災防止のための保管方法の提案を目的とし、除染廃棄物の保管実験を行い、実験で得られた熱挙動データを用いて熱挙動モデルの構築及びその精度評価を行うとともに、熱挙動の数値シミュレーションを通して、適切な保管方法の提案を行う。また、(2) 内部発熱を有する廃棄物層における火災防止または早期鎮火のための熱源特定手法の確立を目的とし、熱源を有する廃棄物模型槽実験を行い、実験で得られた熱挙動データを用いて熱源位置推定モデルの構築及びその精度評価を行う。

3. 研究の方法

(1) 除染廃棄物の保管実験

実験試料として除染廃棄物を模擬した草または土壌を用い、フレキシブルコンテナ(以下、フレコンと呼ぶ。)に充填し、実験に供した。フレコン単体を配置した室内実験と、除染廃棄物の保管場を模擬して50袋のフレコンを配置(縦5袋×横5袋×高さ2袋)した屋外実験を行った。気象(気温、湿度)とともに、各フレコンの温度分布、重量、密度、沈下量、ガス組成の定期的な観測を行い、発酵熱に伴う熱挙動の把握を行った。実験開始時には、充填試料の初期性状(草木の植物種、組成、含水率、強熱減量、重量、密度)の把握を行い、「(2)熱挙動モデル」における初期条件設定のためのデータとした。

(2) 除染廃棄物の保管場の熱挙動モデルの構築及び数値シミュレーションによる除染廃棄物の保管方法の提案

応募者らが構築した有機性廃棄物主体の廃棄物埋立地モデルを拡張し、除染廃棄物の

保管場の熱挙動モデルを構築した。モデルでは、廃棄物層を固相、液相、気相に分け、有機物分解、ガス輸送、熱輸送等を考慮した。モデルの精度は「(1)除染廃棄物の保管実験」の再現性により評価した。

構築したモデルを用いた数値シミュレーションにより、様々な条件（積上げ高さ、間詰めの有無等）下における除染廃棄物仮置場内部温度分布の数値シミュレーションを行い、火災防止のための適切な保管方法の提案を行った。

(3) 熱源及び連続する大間隙を有する廃棄物模型槽実験

内部熱源を有する廃棄物埋立地を模擬し、廃棄物模型槽を作成した。主な充填材は土壌とし、内部に熱源となる発熱器を設置し、地表から熱源まで連続する大間隙（碎石等）を複数本配置した。地表面温度分布及び内部温度分布等の観測を行い、地表ホットスポットの温度と位置、熱源の温度と位置、地中温度分布の間の関連性を明らかにするための熱挙動データを取得した。

(4) 地表ホットスポットの温度及び位置の情報に基づく熱源位置推定

内部熱源及び内部高温ガスの抜け道（熱源から地表まで連続する大間隙）を有する廃棄物層を対象に、熱源の位置、ガスの抜け道の配置、熱源温度、熱源におけるガス発生速度をパラメータとした様々な条件における伝熱及びガス輸送の数値シミュレーションを行った。シミュレーションで得られた地表面温度分布における地表ホットスポットの温度、シミュレーションにおける設定条件である地表ホットスポットの位置、熱源温度及び地中温度を 1.(2)で示した熱源位置推定モデル式に入力し、熱源位置を推定し、熱源位置の推定精度の検証を行った。数値シミュレーションに用いる数値モデルの精度は「(3)廃棄物模型槽実験」の再現性により検証した。

4. 研究成果

(1) 草充填フレコン内部温度に及ぼす含水率及び充填密度の影響

除染廃棄物を模擬するものとして草を用い、充填された草の含水率及び充填密度の異なる 8 袋のフレコンを室内に 90 日間保管した結果、含水率が温度上昇に大きな影響を与え、初期含水率 81.3%のフレコンにおいて実験開始から約 1 週間で温度は最高温度 69.1 に達し、約 2 週間で酸素濃度は最小値 1.5%、二酸化炭素濃度は最高値 21.4%に達した。一方、充填前に風乾し、初期含水率 14.6%の場合では、フレコン内で発熱が生じなかった。また、初期含水率が高いフレコンにおいて大幅な重量減少と沈下が起きた。

以上より、発熱及び自然発火の防止において、草を風乾等により乾燥させて初期含水率を低下させた上でフレコンに充填し、保管す

ることが有効であると考えられた。また、草のフレコンの沈下を抑制するには草を高密度に充填することが有効であると考えられた。

(2) 模擬仮置場における熱挙動の把握

計 50 袋のフレコン（草充填 6 袋、土充填 44 袋）を縦横に 5 列の 2 段に積上げ、キャッピングシートで覆蓋し、模擬仮置場を作成し、内部の温度分布及びガス濃度の経時変化を 75 日間測定した結果、模擬仮置場内の温度は実験開始から 20 日で最大温度 70.6 に達し、フレコン内の二酸化炭素濃度は最大で 10.4%まで増加し、酸素濃度は最大で 5.8%まで低下した。草を充填したフレコンの高さは最大で 74%減少し、草のフレコンを配置した仮置場の中央付近のキャッピングシートは大きく沈み込み、キャッピングシートの破損をもたらす恐れのある水溜りが生じた。

(3) 熱挙動モデルを用いた数値シミュレーションによる除染廃棄物の適正な保管方法の提案

上記(1)及び(2)の実験結果に基づき、有機物の生物学的発熱及び有機物の酸化反応による発熱を考慮した熱挙動モデルを構築し、数値シミュレーションにより含水率や充填密度の異なる複数の実験の熱挙動の再現が可能であることを確認した。その上で、除染廃棄物の仮置場の火災防止のための廃棄物の適正な保管方法について数値シミュレーションにより検討した結果、フレコンは最大で 3 段まで積上げ可能であること、フレコン間は土壌等の充填物を充填せずに空隙のままにしておくことが火災防止の観点から有効であることが示された。

(4) 熱源位置推定手法の精度検証

3.(3)の廃棄物模型槽実験における地表及び内部の温度分布を再現可能な伝熱モデルを構築した上で、熱源位置、ガスの抜け道の配置、熱源温度、ガス発生速度を変化させた様々な条件における伝熱数値シミュレーションを行い、地表ホットスポットの温度及び位置から熱源位置の推定を行った結果、提案手法で推定された熱源位置は実際の熱源位置に比べて鉛直方向に大きなずれが生じることはあるが、水平方向の誤差は 1m 程度と小さかった。本提案手法は熱源の水平位置を高精度で推定可能であることが示された。

(5) 内部発熱を有する産業廃棄物処分場における熱源位置推定手法の適用

調査対象の産業廃棄物処分場において高所から熱赤外映像装置で地表面温度分布を観測した結果、地表面に特異な高温を示す箇所は見られず、地表ホットスポット（ガスの抜け道の出口）は存在しないと判断された。一方、当処分場には地表から埋立廃棄物層底層まで貫通する廃棄物層モニタリング孔が

複数設置されており、その内部温度は気温（11℃）よりも高い温度（22～42℃）を示していた。そこで、廃棄物層モニタリング孔の出口を地表ホットスポットとみなし、その温度及び位置から本研究で提案する熱源位置推定手法による内部熱源位置の推定を試みた。また、推定結果の比較対象として、現地で1m深地温調査（10mメッシュ）を行い、内部温度分布データを取得した。その結果、提案手法による熱源推定位置は1m深地温で最高温度を示したメッシュと一致した。熱源推定位置と1m深地温分布の間には整合が見られ、本提案手法の有効性が確認された。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計1件）

Pavel Ehler, Teppei Komiya, Hirofumi Nakayama, Takayuki Shimaoka, Heat generation and transport at a temporary storage site of radioactive decontamination waste, 環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 査読有, Vol. 11, 2015, pp. 489-496

〔学会発表〕（計9件）

諸木駿、小宮哲平、中山裕文、島岡隆行、内部熱源を有する廃棄物不適正処分場における熱源位置特定手法に関する基礎的研究、平成26年度土木学会西部支部研究発表会、2015年3月7日、琉球大学（沖縄県中頭郡西原町）

Pavel Ehler, Teppei Komiya, Takayuki Shimaoka, Temperature distribution and self-heating of biomass during storage in flexible intermediate bulk containers, The 2nd 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management, May 21, 2015, Daejeon (Korea)

小宮哲平、諸木駿、中山裕文、島岡隆行、廃棄物不適正処分場における地表ホットスポットの温度に基づく熱源位置推定に関する基礎的研究、平成27年度廃棄物資源循環学会春の研究発表会、2015年5月28日、川崎市産業振興会館（神奈川県川崎市）

Pavel Ehler, Teppei Komiya, Hirofumi Nakayama, Takayuki Shimaoka, Heat generation and transport at a temporary storage site of radioactive decontamination waste, 第11回環境地盤工学シンポジウム, 2015年7月7日, 日本大学（福島県郡山市）

Teppei Komiya, Keita Akayama, Hirofumi Nakayama, Takayuki Shimaoka, Estimation of thermal source position in inappropriate landfill site based on hot spots' temperatures and positions on landfill surface, The 6th China-Japan Joint Conference on Material Recycling and Solid Waste Management, August 6, 2015, Qingdao (China)

加島史浩、Pavel Ehler、小宮哲平、中山裕文、島岡隆行、除染廃棄物仮置場における熱挙動に関する基礎的研究、平成27年度土木学会西部支部研究発表会、2016年3月6日、九州産業大学（福岡県福岡市）

赤山啓太、小宮哲平、中山裕文、島岡隆行、内部熱源が存在する廃棄物層における熱源位置特定に関する研究、平成27年度土木学会西部支部研究発表会、2016年3月6日、九州産業大学（福岡県福岡市）

Teppei Komiya, Keita Akayama, Hirofumi Nakayama, Takayuki Shimaoka, Estimation of thermal source position in solid waste landfill sites based on hot spots' temperature and position on landfill surface, The 3rd 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management, March 10, 2016, Hanoi (Vietnam)

Teppei Komiya, Keita Akayama, Hirofumi Nakayama, Takayuki Shimaoka, Thermal source positional estimation in landfill using surface hot spots, 2016 Spring Scientific Conference by Korea Society of Waste Management, May 12, 2016, Seoul (Korea)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小宮 哲平 (KOMIYA, Tepei)
九州大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：20457451