

排出年度の異なる回転式ストーカ主灰を用いた路盤材利用及び炭素固定の検討

福岡大学工学部	学生会員	大塚 祐磨	寺野 綜太	
福岡大学工学部	正会員	佐藤 研一	藤川 拓朗	古賀 千佳嗣
(株) 神鋼環境ソリューション	正会員	谷田 克義	藤田 淳	細田 博之

1. はじめに

筆者らは、これまで清掃工場（階段式ストーカ炉や回転式ストーカ炉）から排出される一般廃棄物焼却主灰（以後、焼却主灰）を炭酸化処理し、土木資材として有効利用する検討を行っている¹⁾。回転式ストーカ炉は、炉体の回転によりごみを効率的に混合し攪拌しながら燃焼する方式であり、処理性能、発電効率、耐久性に優れている点が特徴²⁾であるが、排出された焼却主灰の土木資材化に関する検討については研究データが少ないのが現状である。そこで本報では、回転式ストーカ炉から排出される焼却主灰の炭酸化処理に着目し、排出年度の違いが路盤材としての有効利用及び炭素固定に与える影響について検討した結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 実験試料 本研究では排出年度の違いに着目し、A市の清掃工場から2021年度及び2022年度に排出された回転式ストーカ主灰（19mm以下に篩分けしたもの）を使用した。図-1に2021年度及び2022年度に採取した主灰の物理組成を示す。いずれの年も全体質量の約87%が灰分・非鉄金属・その他（礫・砂など）を占めており、鉄含有物、ガラス類、陶器の割合は年によって変動が見られた。図-2に灰粒子密度を示す。ストーカ炉の形式が焼却主灰の物理特性に与える影響を把握するため、回転式ストーカ主灰の結果のみならず、各都市の通常のストーカ炉から排出された主灰の結果を併せて示す。A市（回転式ストーカ）についてみると、年度の違いによって灰粒子密度は異なることが分かる。また、他都市の焼却主灰と比較した場合、顕著な差は見られず平均的な範囲に分布していることが分かる。

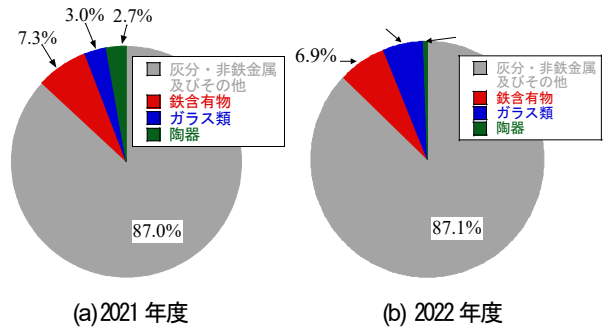


図-1 回転式ストーカ主灰の物理組成

図-2に灰粒子密度を示す。ストーカ炉の形式が焼却主灰の物理特性に与える影響を把握するため、回転式ストーカ主灰の結果のみならず、各都市の通常のストーカ炉から排出された主灰の結果を併せて示す。A市（回転式ストーカ）についてみると、年度の違いによって灰粒子密度は異なることが分かる。また、他都市の焼却主灰と比較した場合、顕著な差は見られず平均的な範囲に分布していることが分かる。

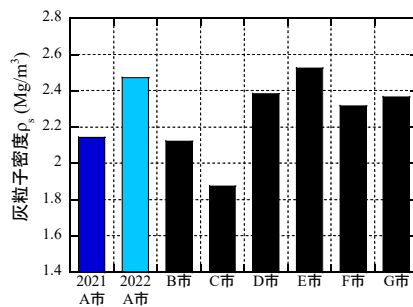


図-2 灰粒子密度の比較

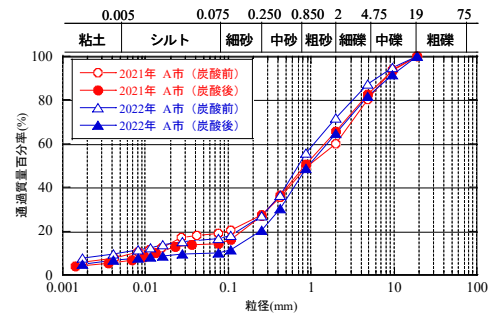


図-3 焼却主灰の粒度分布

図-3にA市の主灰の粒度分布を示す。粒度分布（炭酸化前）には排出年度による違い顕著な差は見られないものの、2022年の方が僅かに砂礫分が多い傾向が見られた。

2.2 炭酸化処理方法 図-4に示す炭酸化処理装置（灰充填部：640×440×320mm）を用いて、自然含水比状態の主灰を $\rho_f=1.0\text{Mg/m}^3$ となるように充填し、コンテナ下部のガス導入部からCO₂を通気することで炭酸化処理する方法を用いた。CO₂通気量は過去の研究成果³⁾を参考に、通気速度30L/min、通気時間15時間とし、CO₂量が90g/kgDWとなるように設定して、2021年度と2022年の主灰それぞれに対し炭酸化処理を行った。また、写真-1に示すようにコンテナ内6箇所温度計を挿し、炭酸化処理過程での主灰の温度変化を測定した。なお、後述する各実験に必要な試料量を確保するために写真-1に示すようにコンテナ2つ（A,B）を使用して炭酸化処理を実施した。

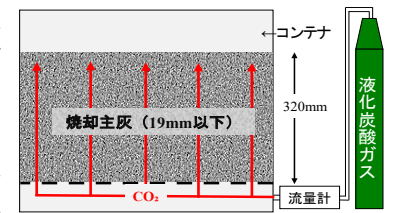


図-4 炭酸化処理装置概略図



写真-1 炭酸化処理の様子と温度測定

2.3 実験条件

- 1) 路盤材利用の検討 2021年度及び2022年度に排出された回転式ストーカ主灰の炭酸化前後の灰をそれぞれ用いて締固め試験（E-b法）（JISA1210）及びCBR試験を行い、路盤材としての評価を行った。
- 2) 炭素固定量の評価方法 炭酸化処理による炭素固定量を測定すべく、灰中の炭酸塩と塩酸との反応により発生するガス圧を測定する手法⁴⁾を用いた。フラスコの底面を3mol/Lの塩酸20mlで満たし、採取した焼却灰0.500gを密閉した状態で反応させ、CO₂ガス圧を測定し、式(1)を用いて炭素固定量を算出した。

$$M_{CO_2} = m_{CaCO_3} \times \frac{MW_{CO_2}}{MW_{CaCO_3}} \times \frac{1}{m_{ash}} \quad (1)$$

ここで、 M_{CO_2} ：炭素固定量、 m_{CaCO_3} ：炭酸カルシウム含有量(g)、 MW_{CO_2} ：二酸化炭素の分子量、 MW_{CaCO_3} ：炭酸カルシウムの分子量、 m_{ash} ：用いた焼却灰の質量(g)である。

3. 実験結果及び考察

3.1 炭酸化処理が路盤材利用に与える影響

図-5 (a) (b) は各年度で炭酸化処理を行った際の炭酸化処理過程における主灰中の温度変化を示している。いずれのコンテナでも CO_2 を通気後、直ちに温度上昇がみられ、最終的には $25^{\circ}C$ 程度の温度上昇がみられたことから炭酸化反応が進行したことがわかる⁹⁾。またどちらのコンテナの結果を見ても各地点での時間経過における温度上昇量に大きな差がないことから均一に炭酸化処理が進行したと推察できる。図-6 に締固め試験の実験結果を示す。灰排出年度の違いにより最大乾燥密度及び最適含水比に違いがみられた。また炭酸化前後に着目すると、2021 年度の主灰では炭酸化処理後わずかに最大乾燥密度が増加し、最適含水比が減少している。これは炭酸化処理により細粒分含有率がわずかに減少した影響によるものだと考えられる。次に、これらの締固め試験で得られた条件を用いて行った CBR 試験により得られた修正 CBR 値の結果を図-7 に示す。これまでの研究より、炭酸化処理後の修正 95%CBR 値は低下する傾向にあり、本検討でも同様に修正 95%CBR 値は減少傾向を示した。また、回転式ストーカ主灰は炭酸化処理前後においても上層路盤材としての基準は満たさないものの、下層路盤材としての基準は十分満足することが明らかとなった。

3.2 炭素固定量の評価 図-8 に示すガス圧試験結果の炭酸化前後での発生ガス圧の差から炭酸化処理により生じた炭酸カルシウム量を求めた。この炭酸カルシウムの量および式 (1) より炭素固定量を算出し、その結果を表-1 に示す。2021 年度の灰には主灰 1t (乾燥質量) あたり 42.2kg、2022 年度の灰には 42.0kg の二酸化炭素が炭酸化処理により固定できたと算出され、炭素固定量には排出年度の違いによる差異は見られなかった。また、年間埋立処分されている焼却灰 340 万 t/年 (乾燥質量にして約 260 万 t/年) のすべてに二酸化炭素を吸収させたと仮定すると 1 年間で 11 万トンの炭素を灰中に固定できる計算となる。これは杉の木約 800 万本の 1 年間の二酸化炭素吸収量と等しく、焼却灰が炭素固定に対して高いポテンシャルを持つことが明らかになった。

4. まとめ 1) 回転式ストーカ炉主灰の排出年度の違いは、物理組成や力学特性に少なからず影響を与えることが示唆された。2) 排出年度に関わらず、炭酸化処理に伴い CBR 値は低下するものの、下層路盤材としての品質を満足することが明らかとなった。3) 回転式ストーカ主灰の炭酸化処理により灰 1t あたり約 42kg の CO_2 を固定できることが可能であり、カーボンニュートラル達成に貢献できると考えられる。

【参考文献】 1) 永山ら：清掃工場の廃ガス及び CO_2 により炭酸化処理を施した一般廃棄物焼却主灰の地盤材料特性と長期安定性, 第 14 回地盤改良シンポジウム論文集, pp 377-380, 2020. 2) 株式会社神鋼環境ソリューションホームページ：ストーカ式焼却炉, URL：https://www.kobelco-eco.co.jp/product/waste_treatment/grate_type_incinerator.html. 3) 福江ら：土の炭酸塩含有量試験の測定方法と結果の解釈, 土の基礎, vol.49, No.2, 2000. 4) Saito et al. : Evaluation of Carbon Fixation Method by Permeating Water Through Coal Fly Ash Waste Ground in Coastal Landfill, GEE2022, 12, pp 98-105, 2022. 5) 繁泉ら：清掃工場の排ガス・回収 CO_2 を用いて促進炭酸化処理を施した焼却主灰の溶出および力学特性, 廃棄物循環工学学会論文誌, Vol.31, pp 116-130, 2020.

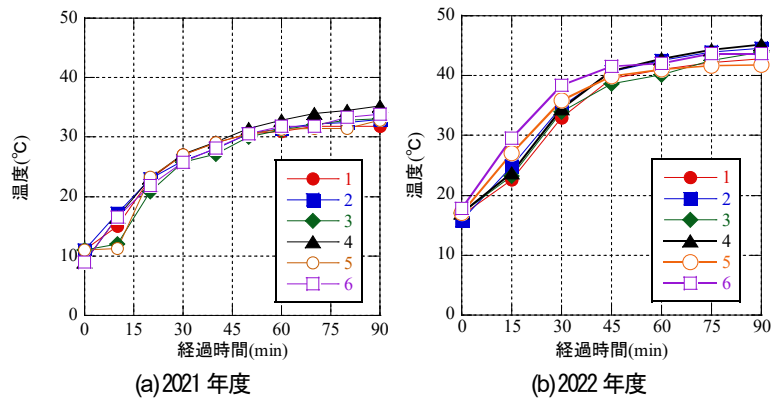


図-5 炭酸化処理における焼却主灰の温度変化

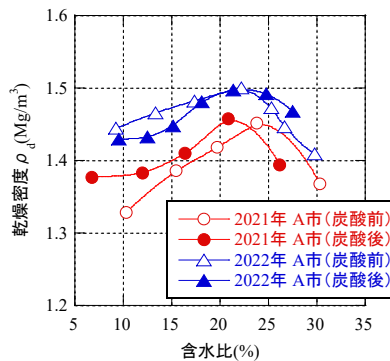


図-6 炭酸化処理前後の締固め試験結果

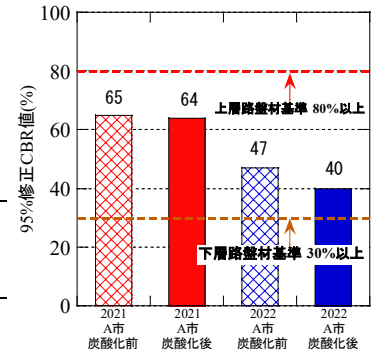


図-7 炭酸化処理前後の修正 CBR 試験結果

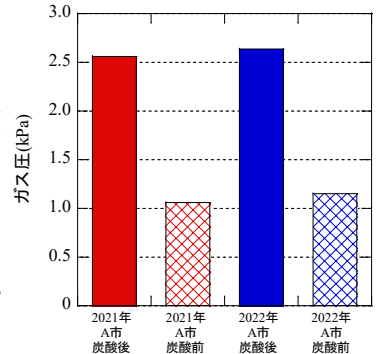


図-8 それぞれの灰における発生ガス圧

表-1 それぞれの灰における炭素固定量

灰の種類	2021年 A市	2022年 A市
炭酸化前後でのガス圧の差 (kPa)	1.50	1.49
1kgあたりの炭素固定量 (gCO ₂ /kg _{ash})	42.2	42.0