

RPF 燃焼残渣の地盤材料としての基本的性状

FOUNDAMENTAL PROPERTIES AS GEOMATERIALS OF
THE RESIDUE AFTER BURNING REFUSE DERIVED PAPER
AND PLASTIC DENSIFIED FUELS

佐野博昭*・山田幹雄**・田辺和康***・首藤聖司****・安部義紀*****

by Hiroaki SANO, Mikio YAMADA, Kazuyasu TANABE, Seiji SHUTOU and Yoshinori ABE

1. まえがき

「大量生産・大量消費・大量廃棄」型の社会から「適量生産・適量消費・最小廃棄」型の社会へ脱却し、持続可能な循環型社会への移行を実現するためには、日々発生する廃棄物への対応が必要不可欠である。我が国では、廃棄物問題が顕在化した高度経済成長期以降、廃棄物の最終処分量を減らすためにリサイクルシステムの構築をはじめとした技術的・制度的改善に取り組んできた。

リサイクルの方法としては、「マテリアルリサイクル」と「サーマルリサイクル」とがあり、これまでは“もの”として「再使用・再生利用」する「マテリアルリサイクル」に重点が置かれてきた。しかしながら、大林¹⁾は、「マテリアルリサイクル」について、「問題は少ないが、重量あたりの価格が安く、大量に世の中に出ている廃棄物等に適用すると大きな問題を惹起することは明白であろう。このうち、量とコスト負担が常につきまとう問題であるが、資源循環型社会システムの構築には少なくともこの二つの扱いについて整合性あるシステムが準備されていなければ破綻をきたすことは明らかである。」と指摘している。

一方、「サーマルリサイクル（熱回収）」とは廃棄物の燃焼熱を利用するものであり、回収した熱による発電や施設外への熱供給を目的としている。この中で、最も効果的な利用形態として発電が挙げられ、「廃棄物発電」と呼ばれている²⁾。

このような状況の下、「マテリアルリサイクル」と「サーマルリサイクル」双方に着目したリサイクル技術の開発をめざし、一般廃棄物や産業廃棄物から固形燃料をつくる技術が、環境保全とエネルギー資源確保を同時に実現する技術として注目されるよ
*大分工業高等専門学校 教授 都市・環境工学科（〒870-0152 大分市大字牧1666番地），**福井工業高等専門学校 教授 環境都市工学科，***福山大学 教授 工学部 建築・建設学科，****株式会社 東部開発 代表取締役，*****株式会社 東部開発 研究開発室長

うになった。このような廃棄物固形化燃料には、①燃料としての扱いやすさ、②効率的な熱回収、③ダイオキシン対策などの利点がある。

廃棄物固形化燃料RDF（Refuse Derived Fuel）については、1984年に東京都青梅市で施設が整備されて以来、「サーマルリサイクル」を推進するために各地で施設整備が行われてきた。また、2002年12月からのダイオキシン類排出規制強化に対応するために一般廃棄物処理施設の再整備が進められる中で廃棄物固形化燃料を広域的に収集し、発電を行う事業が開始され、廃棄物固形化燃料施設も増加してきた³⁾。

一方、RPF（Refuse Paper and Plastic Fuel）は、廃棄物由来の紙、プラスチックなどを主原料として、圧縮成形、押出成形などによって固形化した燃料である。

関⁴⁾は、RPFの開発経緯を詳細に示しており、ラミネート紙あるいは古紙・廃プラスチックを燃料として利用し、それをエネルギーに変えて活用する方法が最良であると述べている。さらに、関は、文献5)、6)で、石炭の代替材料として普及しつつあるRPFの現状と今後の見通しについて報告している。

表1は、RDFとRPFの性状を比較したものである⁷⁾。RDFは可燃性の一般廃棄物を主原料とする固形燃料で、家庭などから排出される厨芥類（台所で発生する生ごみなど）を含んでいることから、乾燥して水分を除去する必要がある。また、RPFは、産業廃棄物として分別収集された古紙およびプラスチックを主原料とする固形燃料で、原料性質が一般廃棄物と比較して安定しているため、製造工程はRDFよりも単純で、製造コストも低い。

このように、廃棄物固形化燃料であるRDFやRPFの使用を積極的に推進する一方で、その後には多量の燃焼残渣が発生する。この燃焼残渣は、一般廃棄物焼却灰や石炭火力発電所から排出される石炭灰と同様の性質を有しているものと推察され、地盤材料として十分に適用できる可能性があるが、この点についての研究例は非常に少ない。これより、廃棄物固

表1 RDFとRPFの性状の比較（文献7）に加筆

種 類	RDF (Refuse Derived Fuel)	RPF (Refuse Paper and Plastic Fuel)
分別収集方法	自治体による収集（不特定多数の排出元による生ごみを含む可燃ごみ）	民間企業の分別排出に基づく（排出元への引き取り条件提示による）
組 成	各家庭での分別に限界あり．塵芥，不燃物遺物，塩ビなどが混入し，塩素濃度は1～2%と高い．	産業廃棄物が主原料のため，異物の混入は少なく，塩素濃度は0.2%と低い．
含水率	家庭系ごみが分別されずに混入されているため，含水率は20%以下と高い．	民間企業から排出されるので含水率は5%以下と低い．
発熱量	3,000～4,000kcal/kg（調整不能）	5,000～10,000kcal/kg（紙混合比により調整可能）
サイズ	直径15～50mm（小径サイズの製造は困難）	直径6～50mm（空気輸送可能な小径まで対応可能）
灰分率	20%以下	7%以下

形化燃料の利用を推進するためには，燃焼後の残渣の有効活用方法についても十分に検討しておく必要があることになる。

そこで，本研究では，廃棄物固形化燃料の中でも大分市内で製造されている「廃棄物由来の紙，プラスチックなど固形化燃料（RPF）⁸⁾」（以後，RPFと称する）に着目し，この燃焼残渣の盛土材，埋戻し材，地盤改良材，造粒材などの地盤材料としての適用性を検討するために，RPF燃焼残渣（以後，RPF灰と称する）の概要を述べるとともに化学成分組成や有害物質溶出量および締固め特性や排出時期の異なるRPF灰の基本的性状の変動について検討した。



写真1 排出後山積みされたRPFの外観

2. RPF灰の概要および化学成分組成と有害物質溶出量

今回の研究の対象であるRPFは，大分市内の産業廃棄物中間処理施設で製造されたものである。写真1は，排出後に山積みされたRPFの外観を，写真2は，RPFの形状を示す。RPFは棒状に固形化（品種：RPF，等級：A）⁸⁾されたものであり，目視により廃プラスチック，紙くず，木くずから構成されていることが確認された。RPFの寸法を調べるために上記の施設で排出されたRPFの中から30個のRPFを無作為に取り出し，デジタルノギス（株）ミツトヨ製，測定範囲：0～150mm，最小表示量：0.01mm）により3箇所の直径と長さ⁸⁾を測って平均値を求め，さらに，質量の測定を行った。これより，直径は32.2～35.3mm（平均値33.3mm），長さは63.0～106.4mm（83.8mm），質量は43.2～73.7g（55.3g）という結果が得られ，平均寸法を用いて概略の密度を求めたところ0.76g/cm³となった。

本研究に用いたRPF灰は，先に述べた廃棄物中間処理施設で製造されたRPFを大分市内にある王子板紙（株）（現・王子マテリア（株））大分工場のRPFボイラーで燃料として利用され，その後排出された



写真2 RPFの形状

ものである。なお，同社では大分工場の他に王子グループの中で，苫小牧工場，春日井工場，米子工場，富岡工場にRPFボイラーを設置しており，燃焼方式は流動層を採用している。

大分工場の燃料構成は，概ね石炭が40～50%，RPFが50～60%となっている。

RPFを燃料として利用すると、燃焼後に残渣であるRPF灰が生じる。ここで、燃焼に際しては、RPFの他に石炭も使用していることから、得られた燃焼残渣の正確な性状を表現する用語としては「RPFと石炭の燃焼残渣」という表現が適当である。しかしながら、RPFの燃料中の割合が石炭と比較して大きいということから、先にも述べたように「RPF燃焼残渣」と称することにし、さらに、これを他の燃焼残渣、例えば、「石炭灰」などのように一般的に使用されている用語に倣って「RPF灰」と称するものである。

RPF灰は、粉粒体運搬車（バルク車：積載量10t）で1日4回（1回当たり約8t）産業廃棄物中間処理施設に運搬されている。

写真3は、RPF灰を示す。色調は灰色であり、石炭灰とほぼ同様の色調を示す。

表2は、2010年7月29日と2010年11月17日に排出されたRPF灰の化学成分組成（重量比）を示す。併せて、表中には比較のために苫小牧工場産RPF灰⁹⁾、石炭灰¹⁰⁾、普通ポルトランドセメント¹¹⁾および山土¹⁰⁾の概略の数値を示す。

表より、RPF灰の化学成分組成は、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 SO_3 が全体の約83%を占めていることがわかる。また、RPF灰の CaO は石炭灰と比較してもその量は多く、また、工場や排出時期の違いによっても異なることがわかる。

2010年7月29日に採取したRPF灰については、別途、遊離酸化カルシウム（f-CaO）の量（セメント協会標準試験方法 JCAS I-01-1997「遊離酸化カルシウムの定量方法」¹²⁾）を求めたところ2.1%、赤外吸収法により未燃炭素量を求めたところ3.3%という結果が得られた。さらに、比表面積を測定した結果、ブレン法¹³⁾で $5751\text{cm}^2/\text{g}$ 、BET法で $3.6\text{m}^2/\text{g}$ となった。

片岡ら¹⁴⁾は、異なる5種類の石炭灰の比表面積を測定し、ブレン法で $0.271\sim 0.437\text{m}^2/\text{g}$ （ $2710\sim 4370\text{cm}^2/\text{g}$ ）、BET法で $0.96\sim 4.47\text{m}^2/\text{g}$ と報告しており、RPF灰は石炭灰と比較しても比表面積が大きいことがわかる。

さらに、文献14)では、異なる種類の石炭灰を締め固めて一軸圧縮強さを求めたところ、強度発現が灰の種類によって異なることを示し、 CaO の量や式(1)で定義される酸性率と強度との相関性を検討した結果、 CaO の量が多いほど、酸性率が小さいほど強度が大きくなると報告している。ここで、酸性率とは、灰分の溶解性を表す指標であり、値が小さくなるほど溶解性が良くなるとされている。

$$\text{酸性率} = (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO}) \quad (1)$$



写真3 RPF灰

土居ら¹¹⁾は、酸性率と強度との関係について、2種類の一般廃棄物焼却灰および比較のために普通ポルトランドセメントの酸性率を求め、それぞれ、1.17, 1.23, 0.41となることを示し、これらの数値より一般廃棄物焼却灰の強度の発現性を期待している。

そこで、式(1)により本研究で用いたRPF灰の酸性率を計算したところ、大分工場産RPF灰では0.70（2010年7月29日排出）と1.12（2010年11月17日排出）となり、苫小牧工場産RPF灰では3.15となった。

これより、大分工場産のRPF灰は CaO 量が多く、また、酸性率は小さいということが明らかとなり、 CaO 量と酸性率の観点から石炭灰や一般廃棄物焼却灰と同等かそれ以上に強度の発現が期待される材料であるものと推察される。

表3は、2010年10月15日に大分工場から排出された代表的なRPF灰の有害物質の溶出試験結果を示す。いずれの項目も溶出量基準を満足していることがわかる。なお、同様の分析は定期的に行っており、有害物質が含まれていないことを確認している。

3. RPF灰の締め固め特性

RPF灰の適用先としては、盛土材や埋戻し材などの地盤材料が考えられる。そこで、地盤材料としての適用性を検討するにあたり、RPF灰の締め固め特性を調べることにした。締め固め試験の方法¹⁵⁾として、「繰返し法」と「非繰返し法」とがあるが、事前に行った予備試験の結果より、RPF灰は加水にともなって発熱現象が認められ、「繰返し法」と「非繰返し法」とでは結果が異なることが予想されたため、両方の方法によって締め固め試験を行うこととした。

図1は、RPF灰の締め固め曲線を示す。図より、締め固め曲線の形状は、通常地盤材料と同様に含水比の増加にともなって乾燥密度が増加し、上に凸の山形の曲線を示すことがわかる。

ここで、「繰返し法」と「非繰返し法」を比較すると、締め固め曲線のピークの位置がずれており、それにもなって最適含水比や最大乾燥密度が大き

表2 RPF灰, 石炭灰, 普通ポルトランドセメントおよび土壌の化学成分組成

化学成分	RPF灰			石炭灰 ¹⁰⁾		普通ポルトランドセメント ¹¹⁾	土壌 (山土の一例) ¹⁰⁾
	大分工場産		苫小牧工場産 ⁹⁾	国内炭	海外炭		
	2010/7/29	2010/11/17					
SiO ₂ (%)	22.78	21.75	50.2	50~55	40~75	22.9	62.8
Al ₂ O ₃ (%)	9.20	14.49	21.4	25~30	15~35	5.2	24.0
Fe ₂ O ₃ (%)	6.85	3.69	5.1	4~7	2~20	3.1	1.6
CaO (%)	37.65	26.79	13.9	4~7	1~10	64.2	0
MgO (%)	1.54	2.01	3.7	1~2	1~3	1.4	0.3
SO ₃ (%)	12.14	20.80	—	—	—	—	—
K ₂ O (%)	1.70	1.36	0.5	0~1	1~4	—	1.4
Na ₂ O (%)	1.00	0.98	0.5	1~2	1~2	—	0
TiO ₂ (%)	2.50	1.56	1.2	—	—	—	—
MnO (%)	0.15	0.10	—	—	—	—	—
P ₂ O ₅ (%)	0.46	1.10	0.5	—	—	—	—
ZnO (%)	1.71	0.51	0.4	—	—	—	—
CuO (%)	0.27	0.14	0.1	—	—	—	—

異なっていることがわかる。また、「非繰返し法」においてはピーク後の含水比の僅かな増加にもなって乾燥密度が急激に減少しており、最適含水比付近では含水比調整が困難であることを意味している。

このように、「繰返し法」と「非繰返し法」による締固め特性が異なった理由として、加水後の発熱が関わっている可能性が高い。このことは、加水後の放置時間の長短によって締固め特性が異なる可能性が高いことから、使用にあたっては十分に注意する必要がある。

4. 締め固めたRPF灰の断熱養生試験

先に述べたRPF灰の締固め試験を実施した折に、RPF灰に加水したところ、発熱による温度の上昇が確認された。この原因として、遊離酸化カルシウム (f-CaO) の含有が関係しているものと推察される。そこで、RPF灰が水と接触した後にどの程度温度が上昇するかを調べるために以下に示す断熱養生試験を行った。

断熱養生試験には、市販の発泡スチロール容器(縦10cm, 横10cm, 深さ10cm, 容積1,000cm³)を用いるものとし、先に述べた「非繰返し法」による締固め試験により得られた最適含水比 $w_{opt}=27.8\%$ を目標に含水比調整した試料を投入し、突き棒により4層に分けて試料を均一に締め固めた。ここで、締固め後の供試体の状態を測定したところ、含水比 $w=28.7\%$ 、乾燥密度 $\rho_d=0.86\text{g/cm}^3$ 、間隙比 $e=2.15$ 、飽和度 $S_r=36.1\%$ という結果が得られた。

温度の測定に当たっては、試料を詰める過程で容器の底部すなわち試料下部、試料中央部および試料

上部にボタン電池型温度ロガー(KNラボラトリーズ, サーモクロンGタイプ, 測定可能温度範囲: -40~85°C, 分解能: 0.5°C, 電源: 3Vリチウム金属電池内蔵, 直径17mm, 厚さ6mm, 質量3.3g)を埋設した。なお、ロガーにはシリコン製の防水キャップを装着し、測定間隔は2分間に設定した。

このようにして準備した発泡スチロール容器を温度20°Cに設定した恒温器内に静置し、約1日間(1600分間)測定を継続した。この際、容器の上蓋の上にボタン電池型温度ロガーを置き、併せて、恒温器内の温度の記録を行った。所定の時間が経過した後、試料を取り出し、含水比の測定を行うとともにボタン型温度データロガーを回収し、記録されたデータは、USB接続ケーブルを通じてパソコンに取り込んだ。

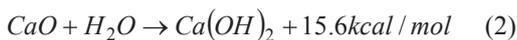
図2は、経過時間と温度との関係を示す。図より、供試体内部の温度は時間の経過にもなって上昇し、供試体下部で90~98分後に62.0°C、上部で88~98分後に63.0°Cに達した。また、供試体中央部では94~98分後に最大温度66°Cに達し、その後温度は下降し、約1440分(1日)経過して室温に達した。このように供試体上部および下部の温度が供試体内部の温度よりも3~4°Cと僅かに低い値を推移しており、概ね断熱状態は確保できたものと推察される。

一方、恒温器内の温度は16.0~21.5°C(平均17.5°C)を推移していた。

このような発熱現象は、式(2)に示すようにRPF灰中に含有している遊離酸化カルシウム (f-CaO) と水とが接触することによって、水酸化カルシウムになる時点で生じているものと考えられる¹⁶⁾。

表3 RPF灰の有害物質溶出量

項目	2010年10月15日 大分工場産RPF灰(mg/L)	溶出量基準(mg/L)
カドミウム	0.001未満	0.01以下
全シアン	不検出 (定量限界0.1)	検出されないこと
有機燐 (りん)	不検出 (定量限界0.1)	検出されないこと
鉛	0.005未満	0.01以下
六価クロム	0.01未満	0.05以下
砒 (ひ) 素	0.001未満	0.01以下
総水銀	0.0005未満	0.0005以下
アルキル水銀	不検出 (定量限界0.0005)	検出されないこと
ジクロロメタン	0.002未満	0.02以下
四塩化炭素	0.0002未満	0.002以下
1,2-ジクロロエタン	0.0004未満	0.004以下
1,1-ジクロロエチレン	0.002未満	0.02以下
シス-1,2-ジクロロエチレン	0.004未満	0.04以下
1,1,1-トリクロロエタン	0.0005未満	1以下
1,1,2-トリクロロエタン	0.0006未満	0.006以下
トリクロロエチレン	0.002未満	0.03以下
テトラクロロエチレン	0.0005未満	0.01以下
1,3-ジクロロプロペン	0.0002未満	0.002以下
チウラム	0.0006未満	0.006以下
シマジン	0.0003未満	0.003以下
チオベンカルブ	0.002未満	0.02以下
ベンゼン	0.001未満	0.01以下
セレン	0.002未満	0.01以下
ふっ素	0.68	0.8以下
ほう素	0.05未満	1以下



酸化カルシウムが水酸化カルシウムになる時点で体積が約2倍に膨張するため、加水後膨張する可能性が十分に考えられる。そこで、参考までに、RPF灰に加水し、締め固めによる一軸圧縮試験用の供試体を作製して20℃の恒温器内で1日静置したところ、供試体が膨張し、一軸圧縮試験を行うことができなかった。

以上の結果より、RPF灰を単体で締め固めて使用する際には膨張の可能性があることから、加水後一定時間放置してから締め固めを行うなどの検討が必要であろう。

5. 排出時期の異なるRPF灰の基本的性状の変動

RPF灰の適用先としては、盛土材、地盤改良材、埋戻し材、造粒材さらには凍上抑制層用材料⁹⁾などが考えられる。このような地盤材料として用いるに当たっては、材料の品質の変動幅を確認しておくこ

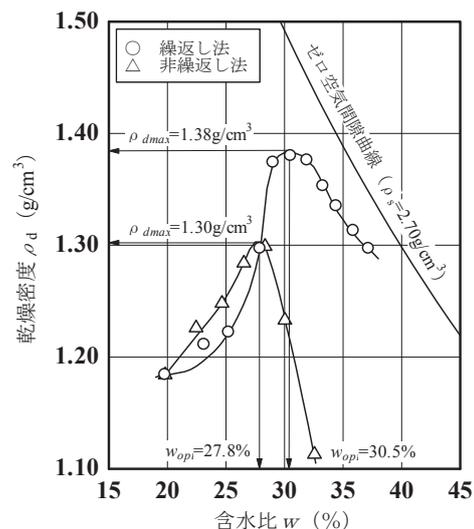


図1 RPF灰の締め固め曲線 (繰返し法, 非繰返し法)

とが重要である。そこで、2011年6月15日から2012年9月28日までの間、概ね1ヶ月に1回の割合 (合計14回) で試料を採取し、地盤材料としての基本的特性

である自然含水比，密度，粒度，比表面積， $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}, \text{KCl})$ ，電気伝導率，強熱減量の7項目を測定し，排出時期の違いによる各特性の変動状況を調べた．なお，各試験を行うにあたっては，データのばらつきを考慮に入れて3つの試料に対して行った．

ここで，測定にあたっては，自然含水比， $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}, \text{KCl})$ ，電気伝導率，強熱減量については地盤工学会基準¹⁵⁾に則って試験を行った．

一方，地盤材料としての土粒子の密度を求めるためには，通常，ピクノメーター¹⁵⁾が用いられているが，事前に行った予備試験の結果より，ピクノメーターにRPF灰を投入した後に水を入れて放置したところ固化した．そこで，密度を求めるにあたっては，セメントの物理試験方法に規定されている体積を測る上で，水の代わりに鉱油を用いる「セメントの密度試験¹³⁾」に準拠して試験を行った．

比表面積試験¹³⁾は，ブレン法により行った．ただし，試料の質量はそのポロシティーがセメントの標準試料のポロシティーにできるだけ近く，しかも，供試圧縮体がセメントの場合と同程度の圧力で詰められる程度の量となるように配慮した．

粒度試験は，レーザ回折/散乱式粒子径分布測定装置（株）堀場製作所製，LA-950）を用い，溶媒は蒸留水を使用した．

図3は，RPF灰の粒度加積曲線を示す．図より，RPF灰の粒度加積曲線は排出時期の違いによらずほぼ同様の形状を示しており，最大粒径は0.20～0.30mmであり，シルト分が平均で85%含まれていることが明らかとなった．なお，粒度加積曲線より，有効径 D_{10} を求めたところ，0.0059～0.0076mm（平均0.0066mm）， D_{30} は0.0103～0.0128mm（0.0115mm），平均粒径 D_{50} は0.0158～0.0210mm（0.0186mm）， D_{60} は0.0210～0.0305mm（0.0256mm）となった．

図4～7は，RPF灰の基本的性状の内，代表的な密度 ρ ，比表面積 S ， $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}, \text{KCl})$ および電気伝導率 χ の推移を示す．

密度 ρ は，2.551～2.697 g/cm^3 （平均2.620 g/cm^3 ）を推移しており，石炭灰（1.9～2.4 g/cm^3 ）¹⁰⁾と比較して大きな値を示している．

比表面積 S は，5310～7640 cm^2/g （平均6500 cm^2/g ）を推移している．参考までに，普通ポルトランドセメントの比表面積 S の規格値が2500 cm^2/g 以上¹³⁾，コンクリートまたはモルタルに混和材料として用いるフライアッシュ I 種の規格値が5000 cm^2/g 以上¹⁷⁾であり，RPF灰は普通ポルトランドセメントの2～3倍，フライアッシュ I 種の1.1～1.5倍の比表面積を有していることになる．

$\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ は，12.2～12.9（平均12.5）， $\text{pH}(\text{KCl})$ は，

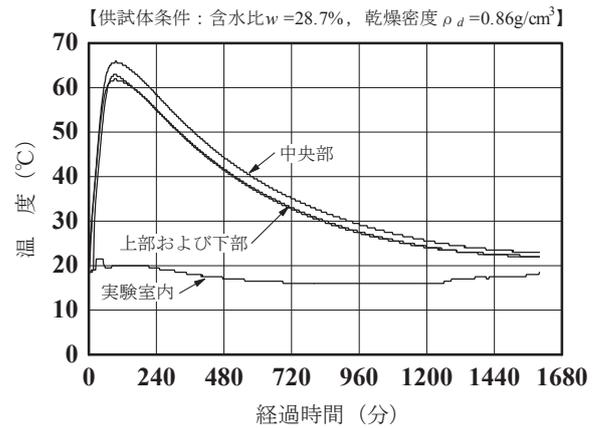


図2 締固めたRPF灰の時間の経過にともなう温度の推移

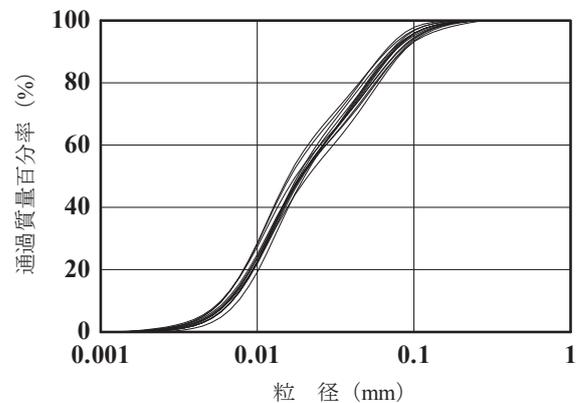


図3 RPF灰の粒度加積曲線

12.4～12.9（12.7）となり，石炭灰の $\text{pH}=11.8\sim 12.6$ ¹⁰⁾と同様にアルカリ性であることがわかる．また，電気伝導率 χ は，1116～1753 mS/m （1346 mS/m ）と通常の土懸濁液の値（0.68～445 mS/m ）¹⁵⁾と比較して大きな値を示しており，水に対して可溶性電解質成分を多く含んでいることがわかる．

表4は，試料を採取した2011年6月15日から2012年9月28日までの合計14回にわたって測定したRPF灰の基本的性状の統計的特性値（最大値，最小値，平均値，標準偏差，変動係数）を示す．

表より，電気伝導率 χ と強熱減量 L_i 以外の基本的性状の変動幅は小さいことがわかる．ここで，電気伝導率 χ は，標準偏差195.5 mS/m ，変動係数14.5%となっている．

強熱減量 L_i は，4.7～12.5%の間を推移しており，平均値8.3%，標準偏差2.41%，変動係数29.0%となっている．

なお，含水比 w_n については，変動係数が大きな値となっているが，0～0.7%の間を推移しており，地盤材料として使用するにあたっては問題のない数値

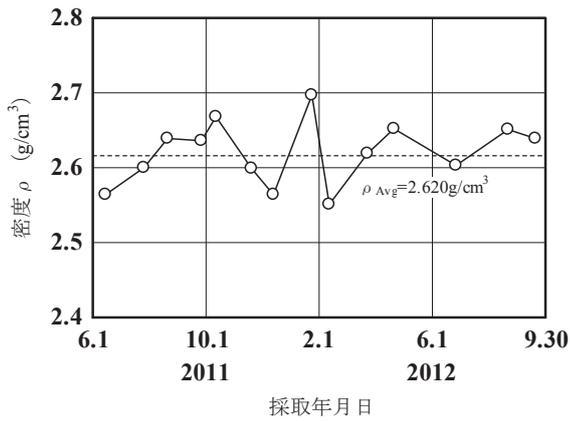


図4 排出時期の異なるRPF灰の密度の推移

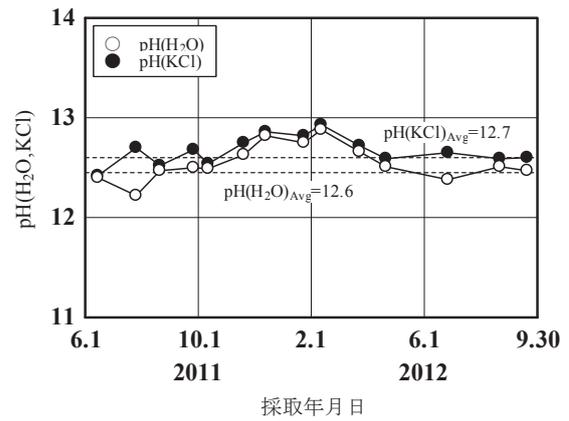


図6 排出時期の異なるRPF灰のpHの推移

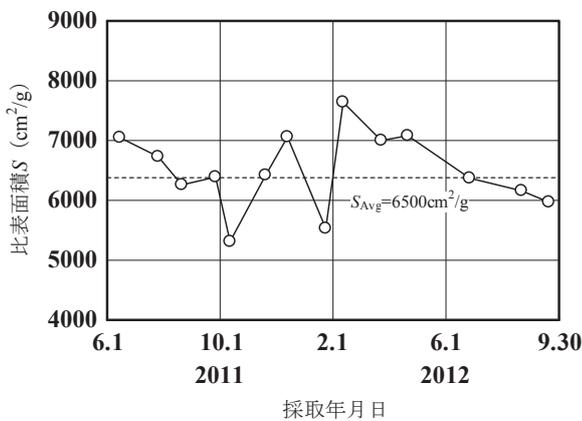


図5 排出時期の異なるRPF灰の比表面積の推移

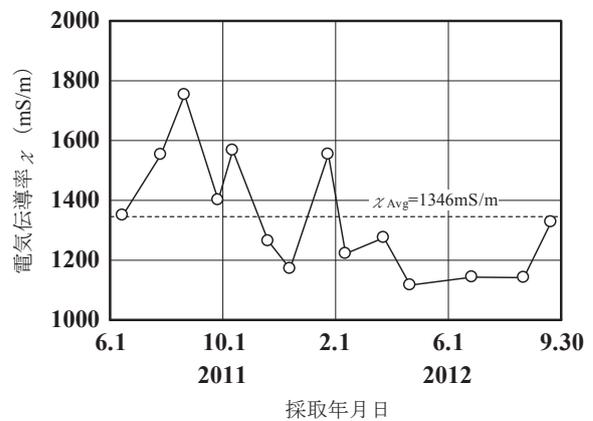


図7 排出時期の異なるRPF灰の電気伝導率の推移

表4 RPF灰の物理・化学的特性の統計的特性値

物理・化学的特性	統計的特性値				
	最大値	最小値	平均値	標準偏差	変動係数
自然含水比 w_n (%)	0.7	0.0	0.2	0.19	82.2%
密度 ρ (g/cm^3)	2.697	2.551	2.620	0.0424	1.6%
比表面積 S (cm^2/g)	7640	5310	6500	644.6	9.9%
均等係数 U_c	4.6	3.5	3.9	0.35	9.0%
曲率係数 U_c'	0.85	0.71	0.79	0.037	4.7%
pH(H_2O)	12.9	12.2	12.5	0.18	1.4%
pH(KCl)	12.9	12.4	12.7	0.14	1.1%
電気伝導率 χ (mS/m)	1753	1116	1346	195.5	14.5%
強熱減量 L_i (%)	12.5	4.7	8.3	2.41	29.0%

である。

今回、RPF灰を地盤材料、とりわけ、地盤改良材として用いる際には材料としての反応性の評価が重要であり、これに関連する基本的性状として比表面積が挙げられる。比表面積の測定(プレーン法、BET法)は、特殊な装置と熟練を要することから、他の性状から比表面積を評価できる方法を検討することが必要となる。そこで、以下では密度と比表面積の

相関性について検討してみることにした。

図8は、密度と比表面積との関係を示す。図より、両者の間には次式(3)に示すような比較的相関性の高い直線関係が成立しており、密度を求めることによって比表面積を比較的容易に推定することが可能となる。

$$S = -12801\rho + 38151 (r = 0.794) \quad (3)$$

6. まとめ

本研究では、RPF灰の地盤材料としての適用性を調べるために、RPFの概要を述べるとともにRPF灰の化学成分組成や有害物質溶出量および締固め特性や排出時期の異なるRPF灰の基本的性状の変動について検討を行った。本研究により得られた主要な結果を以下に列挙する。

- (1)化学成分組成は、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 SO_3 が全体の約83%を占めている。
- (2)有害物質の溶出試験結果より、いずれの項目も溶出量基準を満足している。
- (3)締固め曲線の形状は、通常の土質材料と同様に含水比の増加にともなって乾燥密度が増加し、上に凸の山形の曲線を示す。
- (4)RPF灰を単体で締め固めて使用するに際しては膨張の可能性があることから、加水後一定時間放置してから締固めを行うなどの検討が必要である。
- (5)基本的性状の内、電気伝導率と強熱減量の変動幅が大きいが、自然含水比、密度、粒度、比表面積、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}, \text{KCl})$ の変動幅は小さい。
- (6)密度と比表面積との間には比較的相関性の高い直線関係が成立している。

以上の結果より、約1年半の間、概ね1月に1回の割合でRPF灰を採取して基本的性状を調べたところ、RPF灰の性状は比較的安定していることが明らかとなった。今後は、盛土材、埋戻し材、地盤改良材、造粒材などの地盤材料としての適用性を検討するために、強度、変形特性や支持力特性について調べる予定である。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、王子板紙(株)(現・王子マテリア(株))大分工場・環境管理室長・坂下泰弘氏ならびに研究技術室長・吉竹顕智氏には貴重なご助言をいただいた。また、各種の室内試験および結果の整理には大分工業高等専門学校 都市システム工学科卒業生・高野春香氏(現・西日本コンサルタント(株))ならびに卒業研究生のご協力をいただいた。ここに、深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 大林茂昭：RDFシステム(J-カトレルシステム)の現状と今後のRPFの位置づけ、紙パ技協誌、第52巻、第10号、pp.28-37 (1998)
- 2) 松藤敏彦、角田芳忠、東條安匡：リサイクル・適性処分のための廃棄物工学の基礎知識、技報堂出版、p.108 (2003)
- 3) ごみ固形燃料適性管理検討会：ごみ固形燃料の適性管

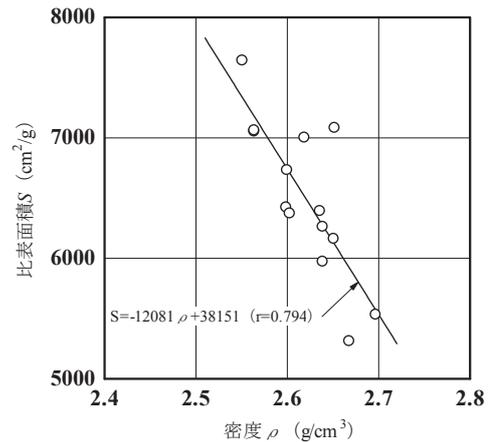


図8 密度と比表面積との関係

理方針について (2003)

- 4) 関 勝四郎：R.P.F.の製造とその課題、紙パ技協誌、第52巻、第10号、pp.19-24 (1998)
- 5) 関 勝四郎：RPFの現状と今後の見通し、紙パ技協誌、第56巻、第10号、pp.40-44 (2002)
- 6) 関 勝四郎：RPFの現状と今後の見通し、紙パ技協誌、第57巻、第5号、pp.15-20 (2003)
- 7) (社)日本RPF工業会：RPFとRDFの違い、<http://www.jpjrf.gr.jp/rpf-5.html>
- 8) (財)日本規格協会：廃棄物由来の紙、プラスチックなど固形化燃料(RPF)、JIS Z 7311:2010 (2010)
- 9) 北海道開発土木研究所構造部土質基礎研究室：平成16年度「造粒燃焼灰の土木材料への利用に関する研究」報告書、pp.1-23.
- 10) 港湾・空港等リサイクル推進協議会：港湾・空港等整備におけるリサイクル技術指針、pp.2-70 (2004)
- 11) 土居洋一、今泉繁良、山田充彦：一般廃棄物焼却灰の土質特性の経時変化、土木学会論文集、No.659/III-52、pp.103-112 (2000)
- 12) (社)日本セメント協会：遊離酸化カルシウムの定量方法、JCAS I-01-1997 (1997)
- 13) (財)日本規格協会：セメントの物理試験方法、JIS R 5201-1997 (1997)
- 14) 片岡哲之、緒方信英、岡本敏郎、横倉俊幸：締固めた石炭灰の強度特性、第26回土質工学研究発表会平成3年度発表講演集、D-6、706、pp.1883-1884 (1991)
- 15) (社)地盤工学会 地盤調査法改訂編集委員会編：地盤材料試験の方法と解説—二分冊の1— (2009)
- 16) 無機マテリアル学会編：セメント・セッコウ・石灰ハンドブック、技報堂出版 (1996)
- 17) (財)日本規格協会：コンクリート用フライアッシュ、JIS A 6201-1999 (1999)

(2012年12月18日受付 2013年2月26日受理)