

論文 石炭灰および RDF 焼却飛灰を出発原料とする道路用土木材料

齊藤 義明^{*1}・鳥羽 峰樹^{*2}・福元 貴司^{*3}・松下 博通^{*4}

要旨：廃棄物である石炭灰，排煙脱硫スラッジおよび RDF 焼却飛灰を原料とし，水和活性を有効に活用した路盤，路床材料として必要な基礎物性の測定および実証実験を行った。その結果，セメントを使用して水和反応を制御する事により，10 日強度 0.7MPa 以上，28 日固化体の弾性係数 600MPa 以上の材料が製造可能で，路盤あるいは路床の設計が容易な事を明らかにした。また，廃棄物利用で最も重要である重金属類等による環境汚染も土壤環境基準値を満足する安全な材料である事を明らかにし，リサイクル材料としての有効性を実証した。

キーワード：石炭灰，RDF 焼却飛灰，リサイクル，路盤材料，土壤環境基準

1. はじめに

家庭から排出される廃棄物の処理問題解決策のひとつとして，廃棄物の中に含まれている可燃物を熱エネルギーとして有効利用する廃棄物固形化燃料（Refuse Derived Fuel，以下“RDF”という）の製造技術が開発され，その安定した利用方法として RDF 焼却発電事業が注目されている。しかし，RDF 焼却発電事業から発生する焼却灰については，その有効利用が多方面に渡り検討されているものの，効果的な方法の確立には至っていない。

一方，従来の石炭火力発電事業においても燃焼副産物である石炭灰の有効利用に関して同様の課題を持っている。これらの課題を解決し発電事業計画を円滑に推進するため，過去さまざまな石炭灰有効利用技術が検討されてきた¹⁾。その中で応用が可能な技術として常温固化技術がある²⁾。RDF 焼却灰と石炭灰は燃焼温度に差はあるものの，その物理特性あるいは化学特性に共通点が多く見られる。従って，RDF 焼却灰と石炭灰を組み合わせ有効利用する事は可能であり，環境問題解決の糸口を見出し，早期に課題を解決する方法として有効と考えられる。そこで，これらの材料に期待される水硬性を利用

した土木材料を検討し，エネルギー消費が少なく，環境への影響が少なく，かつ，大量に使用できる土木材料の開発により，循環型社会に寄与する事を目的とする。

2. 実験方法

2.1 実験方法

RDF 焼却飛灰，石炭灰，排煙脱硫スラッジ，その他添加試料を試験配合に従い秤量し，混練容器に投入し，万能混合攪拌機により混合した。原材料の内，約 20%の水分を持つ排煙脱硫スラッジは予め乾燥して使用した。得られた混合物を JIS A 1216 に定められた「土の一軸圧縮試験方法」を準用し，直径 50mm 高さ 100mm の供試体を作成し，所定の材令まで湿空養生を行ない，強度試験を実施した。また，化学組成については JIS R 5202 に従って行ない，微量成分の溶出試験は環境庁告示 46 号に従って行った。

2.2 試料

実験に用いた石炭灰，排煙脱硫スラッジは福岡県大牟田市にある石炭火力発電所から，また，RDF 焼却飛灰は福岡県北九州市にある実証用流動床炉から排出されたものであり，RDF の製造個所別に 5 種類の RDF 焼却飛灰を用いた。

*1 三井鉱山マテリアル（株） 代表取締役 工修（正会員）

*2 福岡県保健環境研究所 環境科学部

*3 三井鉱山セメント（株） 田川事業所品質管理課長 工修

*4 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門教授 工博（正会員）

3. 結果および考察

3.1 原材料の化学成分

表-1 に原材料の化学成分を示す。石炭灰は化学成分の 70%以上がシリカおよびアルミナであり、これらは高温場で熱変成を受けた後、急冷されているために活性を有し、これが硬化反応すなわちポズラン反応の要因である。排煙脱硫スラッジは亜硫酸カルシウムおよび硫酸カルシウムが主成分であり、これらが石炭灰あるいは RDF 焼却飛灰と反応してエトリンガイト系水和生成物を生成し、初期強度に寄与すると考えられる。一方、RDF 焼却飛灰は石炭灰に比べシリカおよびアルミナが少なく、カルシウムさらに、塩素含有量が多いが、これは RDF の製造過程および燃焼時の排ガス処理過程に起因し、一般ご

みの焼却灰に共通する特徴である。また、RDF 焼却飛灰の真比重は約 2.7 と石炭灰の約 2.2 に比較して大きいにもかかわらず、粉末度は 3330~4620 cm²/g と石炭灰の 3470 cm²/g と比較して同等もしくは大きい傾向が認められた。これは RDF 焼却飛灰の表面積が石炭灰に比較して大きいことを示しており、RDF 焼却飛灰の活性が高いことを示唆しているが、カルシウムとともに塩素が共存し、pH は 11 以下と石炭灰に比較して低く水和活性を阻害する可能性がある。

3.2 原材料の微量成分溶出量

原材料の微量成分の溶出試験結果を環境基準値と共に表-2 に示す。なお、土壤環境基準値は現在、全 27 項目となっているが、有機系 18 項目は高温での燃焼灰のため「含有している可能

表-1 原材料の化学成分 (%)

	石炭灰	排煙脱硫スラッジ	RDF 焼却飛灰				
			H 産	N 産	I 産	K 産	U 産
強熱減量	4.7	7.1	10.0	14.0	12.1	12.8	14.2
SiO ₂	43.8	1.1	23.2	19.8	25.2	26.2	19.4
Al ₂ O ₃	31.0	0.9	14.6	10.8	11.3	11.5	11.1
Fe ₂ O ₃	6.2	0.3	3.8	3.2	3.6	2.9	3.7
CaO	7.3	49.4	27.7	30.2	25.7	24.6	29.4
MgO	2.4	0.0	2.7	2.7	2.9	2.9	2.9
SO ₃	1.2	—	2.4	2.5	2.4	2.6	2.4
Na ₂ O	0.9	0.2	4.2	3.9	4.1	4.0	4.1
K ₂ O	0.6	0.1	1.9	2.1	2.1	2.2	2.0
TiO ₂	1.5	0.1	5.4	5.3	1.5	1.4	1.6
P ₂ O ₅	0.4	0.1	1.7	1.6	2.0	2.2	1.8
MnO	0.0	0.0	0.1	1.8	0.0	0.0	0.0
Cl	<0.01	—	5.9	7.3	7.0	6.7	7.4
pH	12.1	9.0	11.0	11.0	10.8	10.8	10.7

表-2 原材料の微量成分溶出量 (mg/l)

	石炭灰	排煙脱硫スラッジ	RDF 焼却飛灰					土壤環境基準値
			H 産	N 産	I 産	K 産	U 産	
T-Hg	<0.0005	<0.0005	10.0	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	≦0.0005
Cd	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	≦0.01
Pb	0.007	<0.005	<0.005	<0.005	0.013	<0.005	<0.005	≦0.01
Cr(VI)	<0.04	<0.04	1.5	<0.04	<0.04	0.12	0.08	≦0.05
As	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	≦0.01
Se	0.127	0.002	0.009	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	≦0.01

性を無視出来る」とし、また、銅、フッ素およびホウ素については「用途上排除出来るもの」として除外した³⁾。全ての項目で土壤環境基準値を満足したのは排煙脱硫スラッジのみであった。石炭灰ではセレンの溶出が土壤基準値を超過した。一方、RDF 焼却飛灰では総水銀および鉛の溶出で1種、六価クロムの溶出で3種の焼却灰が土壤環境基準を超過した。これらの材料を混合し、土木材料として有効利用する際、総水銀、鉛、六価クロムおよびセレンの溶出については十分な溶出抑制対策が必要である。

3.3 配合基礎試験

全ての実験で水量については突固め試験により最適含水比を求め、操作中に失われる水分量を1.5%と推定して、加算した。なお、ここではH産のRDF 焼却飛灰を代表として使用した。

(1) RDF 焼却飛灰混和率

RDF 焼却飛灰の標準配合を決定するために、石炭灰と排煙脱硫スラッジの比率を施工例²⁾の最も多い3:1とし、石炭灰の一部をRDF 焼却飛灰で置換して力学特性および環境特性を検討した。表-3に試験配合を示す。水和促進剤には最も利用が容易な普通ポルトランドセメントを使用した。

図-1, 2にRDF 焼却飛灰混和率と一軸圧縮強度および弾性係数の関係を示す。RDF 焼却飛灰の混和率の増加に伴って一軸圧縮強度および弾性係数はともに減少していく傾向がある。これはRDF 焼却飛灰のカルシウム含有量は高いもののpHが低く、添加率の増加により水和活性が低下したものと考えられる。しかし、一軸圧縮強度は日本道路協会が経験に基づく設計方法⁴⁾として示している下層路盤の石灰安定処理を目安とすればいずれの配合においても材齢10日で0.7MPaを満足している。今回の材料のように自硬性を持ち、剛性の高い層を形成することが可能な材料の場合、一般には理論的な設計方法によることが合理的と考えられる。その場合、弾性係数は最も重要な物性値である。本材料の弾性係数は300~1000 MPa程度と幅広く設定可能

表-3 RDF 焼却飛灰混和率検討配合表

RDF 焼却飛灰混和率	単位量 (kg/m ³)				
	石炭灰	RDF 焼却飛灰	排煙脱硫スラッジ	普通ポルトランドセメント	水
0%	792	0	264	32	296
10%	698	78	258	31	296
20%	636	159	265	32	294
30%	578	248	275	33	286
50%	413	413	275	33	271

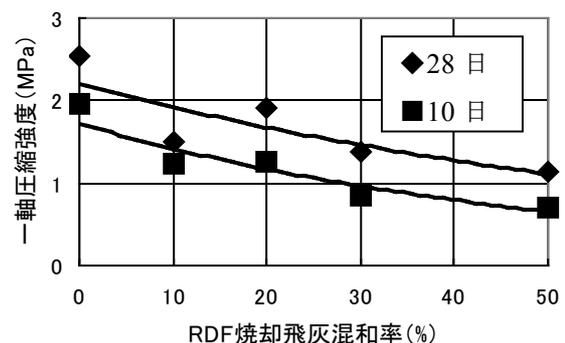


図-1 RDF 焼却飛灰混和率と強度の関係

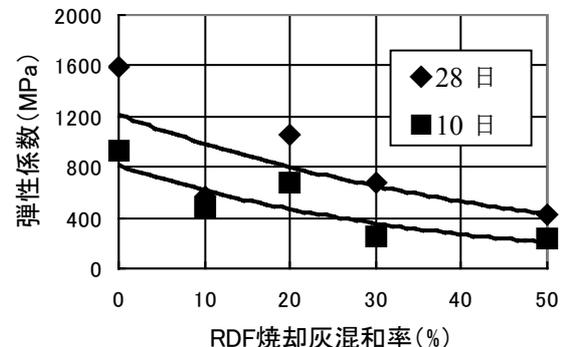


図-2 RDF 焼却飛灰混和率と弾性係数の関係

であるが、剛性の高い層として効果が発揮されるのは600 MPa以上と考えられる。図-2に示した弾性係数からRDF 焼却飛灰の混合率が約30%程度までが、効果的な範囲といえる。

28日固化体の溶出試験の結果、セレン以外は全ての配合において定量限界未満であり、表-2に示す土壤環境基準値を満足しており、環境特性は安定していることが分った。表-4には基準値を超えたセレンのみの溶出量を示す。

材料のみの溶出試験結果では石炭灰でセレン、RDF 焼却飛灰で総水銀および六価クロムの溶出

表-4 硬化体のセレン溶出量

RDF 焼却飛灰 混和率 (%)	Se (mg/l)
0	0.011
10	0.010
20	0.006
30	0.007
50	0.004
土壌環境基準値	≤0.01

が土壌環境基準を超過していたがポゾラン反応による水和鉱物の生成により溶出が土壌環境基準値以下になることが明らかになった。ただし、石炭灰に起因するセレンの溶出には注意が必要で石炭灰の特性によっては RDF 焼却飛灰の混合率を高めることも考慮すべきである。

これらの力学特性、環境特性の両面から標準的な RDF 焼却飛灰の混合率は石炭灰に対して 20%程度が望ましいと考えられる。

(2) セメント添加率

水和促進剤として使用するセメントの添加率が強度、弾性係数および微量成分の溶出に与える影響を検討した。石炭灰と排煙脱硫スラッジの比率を標準的な 3:1 とし、RDF 焼却飛灰による石炭灰の置換率は前項で定めた 20%とした。

表-5 に試験配合を示す。

図-3、4 にセメント添加率と一軸圧縮強度および弾性係数の関係を示す。一軸圧縮強度、弾性係数ともセメント添加率の増加に伴い大きくなる傾向にある。セメント無添加では 10 日材齢の一軸圧縮強度は 0.7MPa を満足せず、28 日材齢の弾性係数は 1%添加でも 600MPa を満足しなかった。しかし、少量のセメント添加により力学特性は改善され、特に 3%以上の添加率では一軸圧縮強度、弾性係数ともに無添加の約 2 倍とその効果は著しいことがわかった。

28 日固化体の溶出は前項と同様にセレン以外は全ての配合において定量限界未満であり、表-2 に示す土壌環境基準値を満足しており、環境特性は安定していることが分った。表-6 には基準値を超えたセレンのみの溶出量を示す。セ

表-5 セメント添加率検討配合表

セメント 添加率	単位量 (kg/m ³)				
	石炭灰	RDF 焼却飛灰	排煙脱硫スラッジ	普通ポルトランドセメント	水
0%	752	188	313	0	337
1%	734	184	306	12	332
3%	636	159	265	32	294
5%	692	173	288	58	326

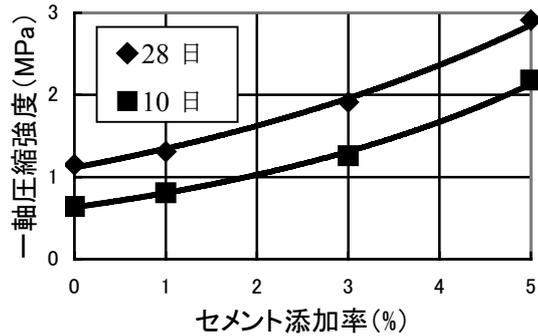


図-3 セメント添加率と一軸圧縮強度の関係

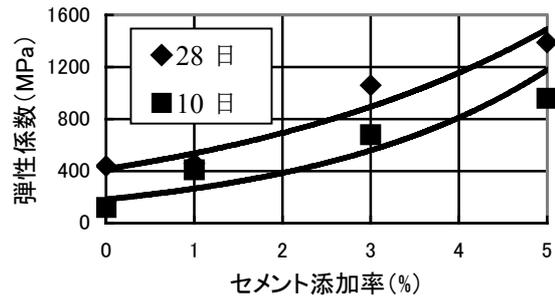


図-4 セメント添加率と弾性係数の関係

表-6 硬化体の微量成分溶出量

セメント添加率 (%)	Se (mg/l)
0	0.004
1	0.006
3	0.006
5	0.011
土壌環境基準値	≤0.01

メント量の増加により溶出量も増加し、添加率 5%で土壌環境基準値をわずかに上回った。しかし、使用したセメントのセレン溶出量は 0.015 mg/l であり、セメント添加量から考えればセレン溶出に与える影響は少ないと考えられ、セレンはその大半が石炭灰に起因したものと推定さ

れる。セレン溶出量の増加原因は明らかではないが、力学特性を担保するためにセメント添加率を増加させる場合は注意が必要である。

これらの結果から、力学特性、環境特性の両面から標準的なセメント添加率は3%程度が望ましいと考えられる。

(3) 排煙脱硫スラッジ混合率

次に、排煙脱硫スラッジと石炭灰および RDF 焼却飛灰の混合率を検討した。ここで混合率は石炭灰および RDF 焼却飛灰の合計量に対する比で表記した。また、前項までの結果を元に、RDF 焼却飛灰による石炭灰の置換率は20%、セメント添加率は3%とした。表-7 に試験配合を示す。

図-5, 6 に排煙脱硫スラッジ混和率と一軸圧縮強度および弾性係数の関係を示すが、力学特性に与える影響は少ないと考えられる。これは10日、および28日材齢では既にエトリンタイト生成の水和反応はほぼ終了し、明確な差が認められなかったものと考えられる。

全ての28日固化体で溶出試験結果は表-2 に示す土壤環境基準値を満足していたが排煙脱硫スラッジの混和率を小さくすると、石炭灰の配合量が多くなりセレンの溶出が高くなる。したがって、使用する石炭灰の特性によっては排煙脱硫スラッジの混和率をさらに高くすることが必要であろう。これらのことから、標準的な配合としては焼却灰に対して25%の配合率が安全上、望ましいと考えられる。

3.4 種々の RDF 焼却飛灰による固化試験

これまでの結果より、RDF 焼却飛灰による石炭灰の置換率は20%、排煙脱硫スラッジの配合率は25%、セメント添加率は3%が望ましい配合であることが分った。この配合を元に種々の RDF 焼却飛灰を用いて水和固化体を試験製造すると共に、幅員10mの福岡県県道において道路長200mで施工厚さ400mmの下層路盤で施工試験を行った。表-8 に試験配合を示す。ここで、試験施工にはN, I, およびK産のRDF 焼却飛灰からなる混合飛灰を使用し、プラントで混合した後、固化する前に施工した。表-9 に力学特

表-7 排煙脱硫スラッジ混合率検討配合表

スラッジ混合率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
	石炭灰	RDF 焼却飛灰	排煙脱硫スラッジ	普通ポルトランドセメント	水
9.1	816	204	102	34	301
14.3	746	186	155	33	274
25.0	636	159	265	32	294

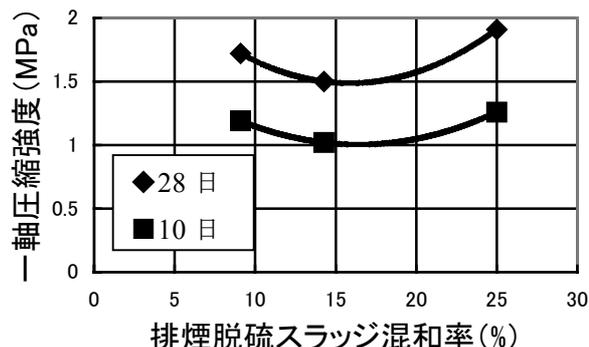


図-5 排煙脱硫スラッジ混和率と一軸圧縮強度

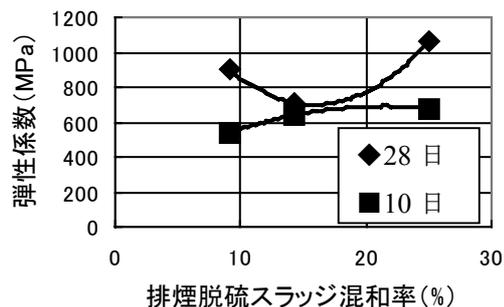


図-6 排煙脱硫スラッジ混和率と弾性係数

表-8 種々の RDF 焼却飛灰を用いた配合表

RDF 焼却飛灰種類	単位量 (kg/m ³)				
	石炭灰	RDF 焼却飛灰	排煙脱硫スラッジ	普通ポルトランドセメント	水
H	636	159	265	32	294
N	651	163	271	33	306
I	654	164	273	33	247
K	686	171	286	34	282
U	655	164	273	33	288
混合*	630	157	262	31	281

*) N, I, およびK産のRDF 焼却飛灰からなる混合飛灰性の結果を示す。これらの結果、いずれのRDF 焼却飛灰においても、基準とした10日一軸圧縮強度0.7MPa以上、28日固化体の弾性係数

600MPa以上の値が得られ、基礎配合試験の結果に共通性があることがわかった。また、混合飛灰では現場施工個所から採取したコアによる測定値である。ここで得られた硬化体は比重が約1.2と既存の材料に比べて極めて軽量な材料であった。表-10に室内試験硬化体の環境特性を示す。前節と同様にセレン以外は全ての配合において定量限界未満であり、表-2に示す土壤環境基準値を満足しており、環境特性は安定していることが分った。表には定量限界を超えたセレンのみの溶出量を示す。また、現場より採取したコアについては1ヵ月後から6ヵ月後まで、いずれの成分も検出限界以下であり、環境に与える影響はきわめて低いことが実証された。

4. まとめ

家庭から排出される廃棄物の処理問題解決策のひとつとして開発されたRDFの燃焼発電事業から発生する焼却灰および石炭火力発電所において燃焼副産物として発生する石炭灰ならびに排煙脱硫スラッジが共通して持つ廃棄物処理の問題を、水和活性を有効に利用することで解決を検討した。

その結果、土木材料として、水和反応による水和化合物の生成により剛性の高い層が構築可能で舗装厚さの低減につながる、土砂に比べて軽量であり軟弱地盤上に適応する場合に有利である、水和による硬化反応を利用しているため製造に多大なエネルギーを消費しない、廃棄物のリサイクルであるが土壤環境基準を満足する安全性がある材料であり今後求められる循環型社会への対応性という観点からも優れた材料である、という結論を得た。

このようにセメントを水和反応の制御に使用することで、エネルギー消費が少なく、大量に消費が可能な土木材料として利用できることが明らかになったが、今回使用したRDF焼却飛灰は全国各地で製造されているRDFを実証試験設備で燃焼し得られたものであり、定量的な評価

表-9 種々のRDF焼却飛灰による水和固化体の力学特性

RDF 焼却飛灰種類	一軸圧縮強度 (MPa)		弾性係数 (MPa)	
	10日	28日	10日	28日
H	1.26	1.91	680	1060
N	1.26	1.85	640	690
I	1.17	1.78	490	650
K	1.36	1.95	640	750
U	1.95	2.94	810	1390
混合*	1ヶ月	3ヶ月	1ヶ月	3ヶ月
	1.30	1.48	504	666

*) N, I, およびK産のRDF焼却飛灰からなる混合飛灰

表-10 硬化体の微量成分溶出量

RDF 焼却飛灰	Se (mg/l)
H産	0.006
N産	0.006
I産	0.006
K産	0.007
U産	0.006
土壤環境基準値	≤0.01

は、地域性やプラントの特性等を反映させ、実際に使用するRDF焼却灰を調査した上で行う必要がある。しかしながら、今回の試験結果ならびに考察は定性的な特徴は共通しているものと考えられ、新たな有効利用を考える上で一つの指針として有用であると言える。

参考文献

- 1) 例えば、環境技術協会、日本フライアッシュ協会：石炭灰ハンドブック、日本フライアッシュ協会、1994
- 2) (財)土木研究センター：土木系材料技術・技術審査証明報告書「ポゾテック」(技審証書第0609号)、1999
- 3) 環境省通達(環水土第44号)：土壤の汚染に係る環境基準値についての一部改正について、2000
- 4) (社)日本道路協会：舗装設計施工指針、1981