

石炭灰の重金属不溶化と改良盛土材の環境安全性

田島 孝敏 井出 一貴 千野 裕之
 山田 祐樹 佐々木 徹 熊谷 祐一
(本社生産技術本部) (相馬環境サービス)

Environmental Safety of Improved Coal Ash by Insolubilizing Heavy Metals

Takatoshi Tajima Kazuki Ide Hiroyuki Chino
 Yuki Yamada Toru Sasaki Yuichi Kumagai

Abstract

More than 12 million tons of coal ash are generated per year and mainly used for cement raw material. We considered its reuse as an embankment material by insolubilizing the heavy metals in coal ash. We examined the heavy metal elution of various coal ashes improved by cement and some assistants, and determined the appropriate quantities for the cement and assistant for insolubilization. We conducted elution tests for the long-term curing of specimens, along with a yearlong outdoor weathering test, and the following results were obtained. 1) The elution amount of the heavy metals was consistently less than the soil environmental standard. 2) Progress of the neutralization was suppressed by the cover soil. Furthermore, a full-scale embankment model was constructed, and the elution of heavy metals was examined, which confirmed the environmental safety of the improved coal ash.

概要

石炭灰は年間1,200万トン以上発生し、主にセメント原料等に利用されている。石炭灰発生量は年々増加する傾向にあるが、セメント需要の増加はさほど期待できない。著者らは、土木分野での用途を拡げるため、石炭灰に含まれる重金属をセメント等で不溶化して盛土材への活用を考えた。まず、性状の異なる石炭灰を用いて改良材の重金属等の溶出量を調べ、不溶化に適した材料を選定し基本配合を設定した。次に、長期養生した改良材の溶出試験および盛土のり面を模擬した屋外曝露試験を行って改良材の環境安全性を検証した。その結果、1年間気中養生した改良体の重金属等の溶出量は土壤環境基準値未満で安定していること、改良材表面に覆土を施すことにより中性化の進行が抑制されることが明らかになった。さらに、実規模の防潮堤盛土を構築し、1年以上にわたって環境モニタリングを行い、盛土材利用技術の成立性を確認した。

1. はじめに

石炭灰は火力発電所などから年間約1,200万トン発生し、約7割がセメント分野で利用されている¹⁾。石炭火力発電所の増設等に伴って今後も大量に発生する見込みであるが、埋立処分場の残余容量がひっ迫しており、セメント分野以外の利用拡大が求められている。

石炭灰の中でも発生量が特に多いフライアッシュの利用促進が望まれていることから、筆者らはフライアッシュに微量に含まれる重金属等を不溶化し、天然土砂の代替材として利用する技術を開発し、Fig. 1に示す防潮堤や



Fig. 1 石炭灰改良材の土木分野への利用例
 Use of Improved Coal Ash for Civil Engineering

防災緑地等の盛土材への活用を考えた。

本報では、室内試験、屋外曝露試験および実規模の防潮堤盛土のモニタリング試験によって、石炭灰改良材を盛土材に利用したときの環境安全性を検証した結果について報告する。

2. 石炭灰の物理化学特性

2.1 表面形態

フライアッシュは、微粉碎された石炭がボイラーで1400°Cの高温で燃焼し、熔融状態の燃え殻が表面張力で球形になり空気中で冷やされて固まったものである。走査型電子顕微鏡(SEM)で観察した写真をPhoto 1に示す。フライアッシュは直径10 μm前後の球形粒子が主体で、未燃カーボンなどの不定形粒子を含む。

2.2 構成鉱物と化学組成

フライアッシュは、非晶質と結晶質で構成され、結晶質として、主に石英(SiO₂)、ムライト(Al₆Si₂O₁₃)、マグネ

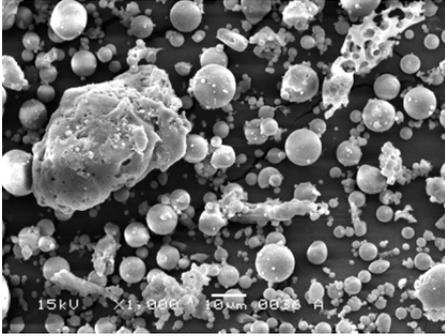


Photo 1 フライアッシュのSEM写真
SEM Image of Fly Ash

タイト(Fe_3O_4), ヘマタイト(Fe_2O_3)などの鉱物が含まれる。
化学成分はケイ素が60%程度と最も多く、次いでアルミニウム、鉄、カルシウムが比較的多く含まれ、ナトリウム、カリウムなどのアルカリ金属が少量含まれる。

2.3 微量元素

石炭灰中の微量元素は熱分解あるいは酸化作用を受け、燃焼過程で微量元素の大部分は石炭灰中に残留し、灰の中の無機質や有機質と結合して存在している。既往の文献におけるフライアッシュの溶出試験（環境庁告示46号溶出試験、以下、環告46号法と称する）によると、ほう素、六価クロム、砒素、セレン、水銀、鉛の溶出量が土壌環境基準値を超過する灰が多い²⁾。フライアッシュからの微量元素の溶出を抑制する方法としてセメント等による不溶化があるが、その他に酸性溶液で灰を洗浄して微量元素を除去する技術も開発されている^{3), 4)}。

2.4 微量元素の含有量と溶出量

石炭火力発電所から排出されるフライアッシュとJISフライアッシュについて、性状が異なる28種類の灰を対象とし、微量元素の含有量と溶出量の関係を調べた。含有量試験は底質調査法⁵⁾に準じて全含有量を測定し、溶出試験は環告46号法に準じて溶出量を測定した。

多くの灰について、砒素、セレン、ふっ素、ほう素および六価クロムの溶出量が土壌環境基準値を超過し、特にほう素は全ての灰が基準値を超過した。

含有量と溶出量の関係をFig. 2に示す。微量元素によって両者の相関性が異なり、下記のように分類される。

- 1) 相関性が認められる : セレン, ほう素
- 2) ゆるやかな相関性が認められる : ふっ素, クロム
- 3) 相関性が認められない : 砒素

含有量と溶出量の相関性は、灰に含まれる無機成分や有機成分との結合性、灰の表面や内部などの存在箇所の相違に起因すると推定される。

3. 微量元素の不溶化

3.1 セメント等による不溶化方法

重金属等に汚染された土壌やこれらを含む汚泥の不溶

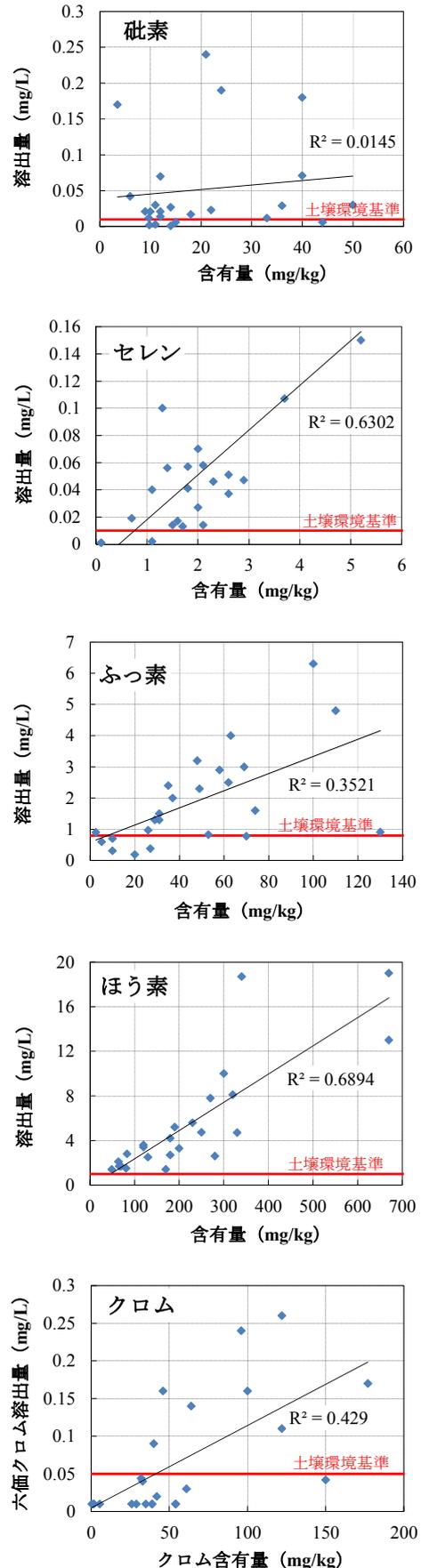


Fig. 2 含有量と溶出量の関係
Relationship between Content and Elution of Trace Elements

化ではセメントを主体とした不溶化材の他に、酸化マグネシウム等を用いた不溶化材が開発されている。その不溶化機構は、①難溶性の水酸化化合物の生成による固定、②セメント水和物への吸着や置換固定（エトリンガイトは、結晶構造中の硫酸イオンが、重金属のオキソ酸イオンと置換しやすい性質を有する）③硬化体組織の緻密化による封じ込めが考えられている^{6),7)}。

重金属汚染土の不溶化に用いられるセメントや不溶化材を対象に、多種の重金属等を含む石炭灰に対する単独使用での効果、ならびに材料の組合せ（主材+助材）の効果を室内配合試験により調査した。

3.2 室内配合試験方法

3.2.1 試験手順 試験手順を以下に示す。

(1) 材料混合 石炭灰にセメントなどの不溶化材を加えてミキサーで混合する。次に改良材の最適含水比に相当する量の水を加えて混練する。

(2) 試験体作製 混合材料をプラスチック製モールド（φ5cm×h10cm）に4層に分けて充填し、ランマーで所定の密度（締固め度85%）となるように締固める。上面をフィルムで封かんし、気中養生を行う。

(3) 溶出試験 材齢28日に脱型し、試料を2mm以下に粉砕し、環告46号法により溶出試験を行う。

3.2.2 使用石炭灰 2種類の新生灰を使用した。灰の溶出量をTable 1に示す。いずれの灰もアルカリ性で、A灰はセレンとほう素の溶出量が多く、B灰は砒素とセレンの溶出量が多いのが特徴である。

3.2.3 不溶化材 セメントおよびセメント系固化材を主材として用い、不溶化を補助する材料を助材として使用した。主材は高炉セメントB種、セメント系固化材を、助材はカルシウム化合物、マグネシウム化合物、鉄化合物を使用した。

3.3 改良材の不溶化試験結果

3.3.1 主材単独 灰1000kg（乾燥質量）に対して、高炉セメントを100～150kgの割合で添加し、不溶化に必要な添加量を調べた。材齢28日の砒素とほう素の溶出量をFig. 3に示す。セメント添加量の増加に伴って溶出量が低下し、A灰の場合、砒素はセメント112.5kg以上で、ほう素はセメント150kgで、それぞれ土壤環境基準に適合した。重金属等5項目全てが土壤環境基準に適合したのはセメント150kgであった。B灰はセメント125kgで5項目全てが土壤環境基準に適合した。

セメント系固化材については、灰1000kg（乾燥質量）に固化材を125kgの割合で添加した。材齢28日の溶出試験の結果、A灰ではセレン、ふっ素、ほう素が、B灰では砒素が土壤環境基準に適合しなかった。

これらの結果より、主材単独の場合、高炉セメントの不溶化効果はセメント系固化材に比べてやや高く、試験に供した2灰種を不溶化するためには灰1000kgに対し150kg必要であることがわかった。

3.3.2 主材と助材の組合せ

(1) カルシウム系助材 灰1000kg（乾燥質量）に対して、①主材50kg+助材10、20kg、②主材75kg+助材7.5～22.5kg（主材の10～30%に相当）の割合で添加し、助材の不溶化効果を調べた。試験ケースをTable 2に示す。

試験結果の一例として、主材75kgのケース（No.3～5）について、助材添加量に対する砒素、ほう素の溶出量をFig. 4に示す。主材が高炉セメント、セメント系固化材のいずれも助材添加量の増加とともに溶出量が低下した。

Table 1 使用石炭灰の溶出試験結果
Elution of Trace Elements in Coal Ashes

| 灰種 | pH | 溶出量 [mg/L] (環告46号法) | | | | |
|--------|------|---------------------|-------|-------|-----|-----|
| | | 六価クロム | 砒素 | セレン | ふっ素 | ほう素 |
| A灰 | 10.8 | 0.03 | 0.012 | 0.150 | 2.5 | 8.1 |
| B灰 | 10.3 | <0.01 | 0.071 | 0.068 | 0.9 | 3.4 |
| 土壤環境基準 | | 0.05 | 0.01 | 0.01 | 0.8 | 1 |

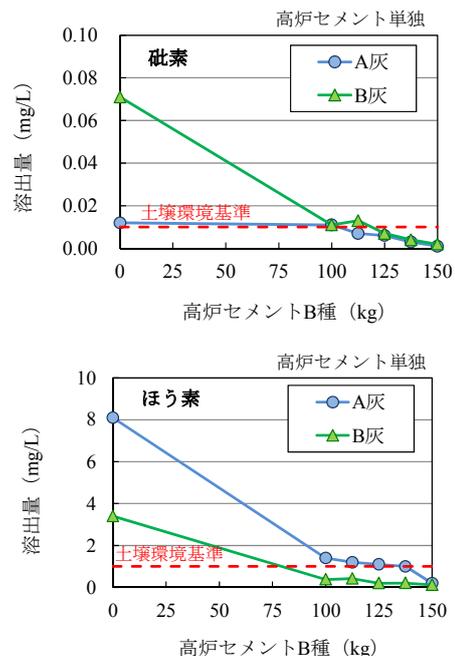


Fig. 3 主材添加量と溶出量の関係
Elution against Adding Quantity of Main Material

Table 2 試験ケース
Material Mixtures of Laboratory Test (kg)

| 配合 No. | 石炭灰 (乾燥) | 主材 | |
|--------|----------|----------|------|
| | A灰, B灰 | 高炉セメント | 助材 |
| 1 | 1000 | 高炉セメント | 10 |
| 2 | | 高炉セメント | 20 |
| 3 | | セメント系固化材 | 7.5 |
| 4 | | セメント系固化材 | 15 |
| 5 | | セメント系固化材 | 22.5 |

主材が高炉セメントの場合、配合No.2, 4, 5でA灰、B灰ともに5項目全て土壤環境基準に適合した。一方、主材がセメント系固化材の場合、B灰で5項目全てが土壤環境基準に適合した配合ケースはなかった。高炉セメントとカルシウム系助材との組合せにより、高炉セメント単独に比べて不溶化効果が高くなった⁸⁾。

- (2) マグネシウム系助材 B灰を用いて配合No.1の試験を行った。図示しないが、主材が高炉セメント、セメント系固化材のいずれも材齢28日の砒素の溶出量が土壤環境基準値を超過した。
- (3) 鉄系助材 B灰を用いて配合No.1の試験を行った。主材は高炉セメントのみとした。図示しないが、材齢28日の砒素の溶出量が土壤環境基準値を超過した。

3.3.3 基本配合の設定 2種類の灰を用いた改良材の重金属等5項目の溶出量が土壤環境基準に適合した材料は、高炉セメント単独、もしくは高炉セメント+カルシウム系助材の組合せであった。その中から、下記の材料・配合を基本配合の候補に選定した。

- 1) 高炉セメント150kg
- 2) 高炉セメント50kg+カルシウム系助材20kg
- 3) 高炉セメント75kg+カルシウム系助材15kg
(数値は灰1000kg-dryに対する添加量を示す)

1)はセメント量が多く必要以上に強度が発現すること、2)は助材が多いと強度発現に影響を及ぼす可能性が考えられることを考慮し、3)を基本配合に設定した。なお、灰の種類によって不溶化に必要な添加量が異なるため、重金属等の溶出量が多い場合は、基本配合のセメントと助材の割合を保ちながら添加量を増加することとした。

4. 長期材齢の溶出試験

4.1 使用材料

石炭灰は発電所の新生灰とJISフライアッシュの計8種類を用いた。石炭灰の基本性状をTable 3に示す。灰の多くはアルカリ性を示し、六価クロム、砒素、セレン、ふっ素、ほう素の溶出量が土壤環境基準値を超過していた。不溶化材は、高炉セメントB種を主材に、カルシウム系材料を助材にそれぞれ使用した。

4.2 試験体作製

石炭灰にセメントと助材を添加し、灰の最適含水比相当量の水を加えてホバートミキサーを用いて攪拌混合した。これをモールド(φ5cm×h10cm)に充填してランマーで突固めた後、上面をフィルムで封かんして気中養生を行った。配合はTable 4に示す2ケース、養生期間は、7, 28, 56, 112, 224, 365日とした。

4.3 溶出試験方法と試験結果

所定の養生期間後に試験体を脱型して、溶出試験を行

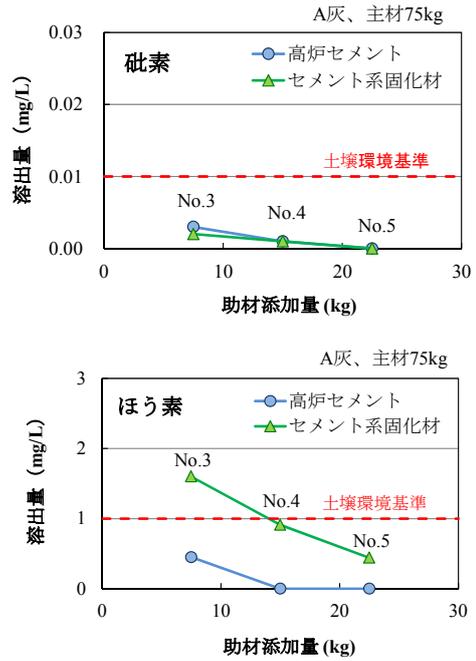


Fig. 4 助材添加量と溶出量の関係
Relationship between Elution and Quantity of Assistant

Table 3 石炭灰の溶出特性
Elution Properties of Coal Ashes

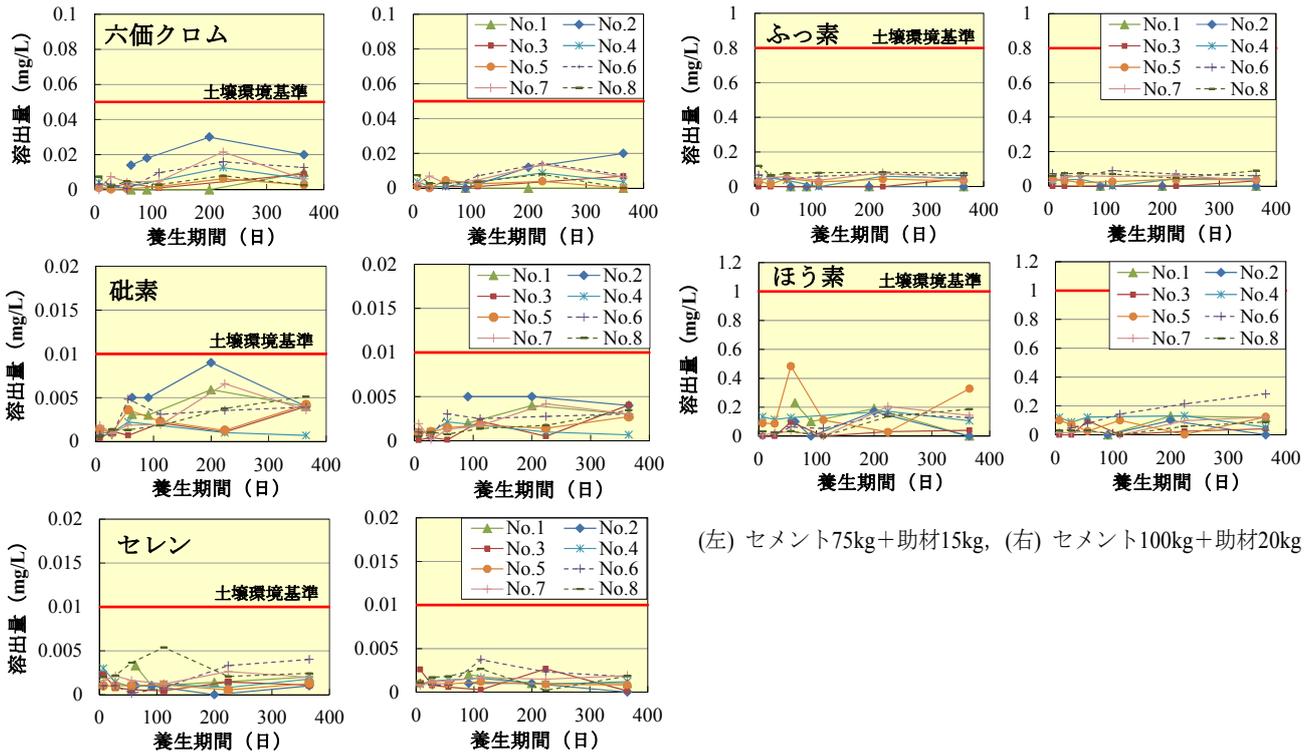
| No. | pH | 溶出量 [mg/L] (環告46号法) | | | | |
|--------|------|---------------------|-------|-------|-----|------|
| | | 六価クロム | 砒素 | セレン | ふっ素 | ほう素 |
| 1 | 10.8 | 0.03 | 0.012 | 0.150 | 2.5 | 8.1 |
| 2 | 10.3 | <0.01 | 0.071 | 0.068 | 0.9 | 3.4 |
| 3 | 8.4 | 0.01 | 0.240 | 0.051 | 2.3 | 1.7 |
| 4 | 11.0 | 0.09 | 0.006 | 0.027 | 1.6 | 13.0 |
| 5 | 11.1 | — | 0.023 | 0.019 | 0.6 | 19.0 |
| 6 | 10.3 | 0.11 | 0.020 | 0.144 | 4.1 | 5.5 |
| 7 | 7.8 | — | 0.170 | 0.100 | 0.9 | 2.7 |
| 8 | 9.9 | 0.04 | 0.029 | 0.107 | 6.3 | 7.8 |
| 土壤環境基準 | | 0.05 | 0.01 | 0.01 | 0.8 | 1 |

Table 4 室内試験の配合
Material Mixtures of Laboratory Test (kg)

| | 石炭灰 (乾燥) | 高炉セメント | Ca系助材 |
|-----|----------|--------|-------|
| 配合1 | 1000 | 75 | 15 |
| 配合2 | 1000 | 100 | 20 |

った。石炭灰改良材を盛土に利用する場合、成形固化された状態を維持することから、溶出試験はスラグ類の「JIS K 0058-1 5. 利用有姿による試験」⁹⁾を採用した。溶出試験方法の考え方は、石炭灰混合材料有効利用ガイドライン¹⁰⁾が参考となる。

養生期間ごとの溶出量をFig. 5に示す。8灰種、2配合の全てのケースにおいて、重金属等の溶出量は土壤環境基準に適合した。一部のケースで溶出量の変動が認められたが、養生期間1年を通じて溶出量は土壤環境基準値未満で安定していることを確認できた。



(左) セメント75kg+助材15kg, (右) セメント100kg+助材20kg

Fig. 5 長期養生試験体の溶出試験結果
Elution Test Results of Long Term Curing Specimens

5. 屋外曝露試験

盛土斜面を模擬した試験体を屋外に1年間曝露し、日射や降雨等の外的影響を受けたときの環境安全性を調べた。

5.1 試験概要

試験場所は東京都清瀬市の大林組技術研究所敷地内、試験期間は1年間(2013年6月~2014年6月)とした。期間中、降雨水を試験体の横に設置した柵に溜め、試験体表面を流下した雨水をバケツに集めて、それぞれpHを測定した。1年間曝露した後に石炭灰改良材からコアを採取し、Table 5に示す試験を行った。

5.2 使用材料

石炭灰はTable 3のNo.3を使用し、添加材は高炉セメントB種とカルシウム系助材を用いた。材料混合のバラツキを考慮して添加量を割り増した。配合をTable 6に示す。

5.3 試験体作製

材料を強制二軸ミキサーで攪拌混合した。次に、塩ビ製の土槽(幅50cm×長さ180cm)の底部に碎石層(t=5cm)を設け、その上に石炭灰改良材を敷き均し、手押しローラとパイプレータを用いて3層に分けて締め固め、厚さ10cmに仕上げた。締め固め度は95% ($\rho_{dmax}=1.372g/cm^3$)とした。改良材表面に覆土(t=5cm)と芝生(t≒3cm)を載せた「覆土あり」と、表面が露出した「覆土なし」の2種類を作製した。盛土斜面を模擬するため、土槽を1:1.5勾配で傾けて設置した。設置状況をPhoto2に示す。

Table 5 コア試料の試験項目
Weathering Test Items and Methods

| 調査項目 | 試験方法 |
|---------|---------------------|
| 圧縮強度 | 一軸圧縮試験 |
| 透水係数 | 変水位透水試験 |
| 中性化深さ | フェノールフタレイン法 |
| 構成鉱物の定性 | 粉末法X線回折 |
| 溶出試験 | JIS K 0058-1 5.利用有姿 |

Table 6 屋外曝露試験体の配合
Material Mixture of Weathering Test (kg)

| 石炭灰(乾燥) | 高炉セメント | 助材 | 水 |
|---------|--------|----|-----|
| 1000 | 120 | 24 | 252 |



Photo 2 屋外曝露試験体
Specimens for Weathering Test

5.4 試験結果

5.4.1 雨水と表面水のpH 試験期間中に採取した雨水と表面水のpHの変化をFig. 6に示す。雨水のpHは4~7で変動した。覆土ありの表面水のpHは最初4を示し、その後6~8を推移した。一方、覆土なしの表面水のpHは最初10以上を示し、その後、8前後を推移した。初期の表面水のpHに影響を及ぼした要因として、覆土ありは芝生の肥料成分の溶出、覆土なしはセメントのアルカリ成分の溶出が考えられる。

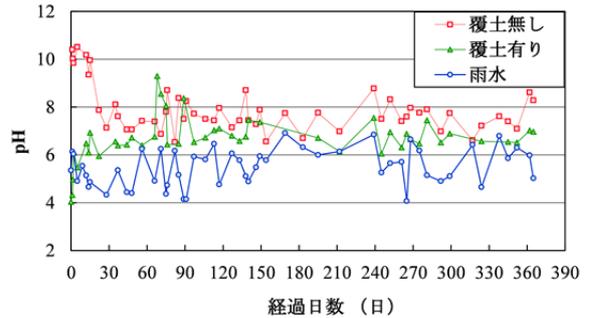


Fig. 6 雨水と表面水のpH
pH of Rainwater and Surface Water

5.4.2 圧縮強度 試験体長手方向3カ所からコアを採取し、一軸圧縮試験を行った。覆土ありの強度は6,600~12,900kN/m²、覆土なしは6,700~9,200kN/m²であった。

5.4.3 透水係数 試験体長手方向2カ所からコアを採取し、透水試験を行った。覆土ありと覆土なしの透水係数は10⁻¹⁰~10⁻⁸m/sのオーダーであった。これは土質遮水工の透水係数(1×10⁻⁸m/s以下)に近似し、石炭灰改良材は水が浸透しにくい材料と言える。

5.4.4 中性化深さ 試験体長手方向5カ所からコアを採取し中性化深さを測定した。割裂面にフェノールフタレインを噴霧した後の写真をPhoto 3に示す。覆土なしの中性化深さは10~12mmであったのに対して、覆土ありは0~3mmと小さく、覆土によって中性化の進行が抑制された。中性化および未中性化の箇所から試料を採取し、X線回折法により定性分析を行った。X線回折図をFig. 7に示す。中性化部分はエトリンガイトのピークが消失し、カルサイトのピークが発現もしくは未中性化部分に比べてピーク強度が増大していた。

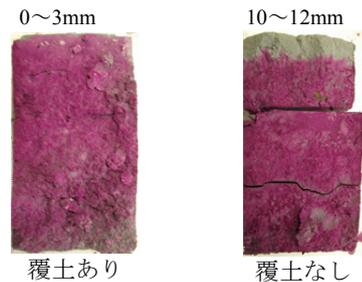


Photo 3 中性化深さ
Depth of Neutralization

5.4.5 溶出試験 中性化部分と未中性化部分を区分して溶出試験を行った。試験結果をTable 7に示す。中性化部分は未中性化に比べてpHが低く、ほう素の溶出量がやや多かった。

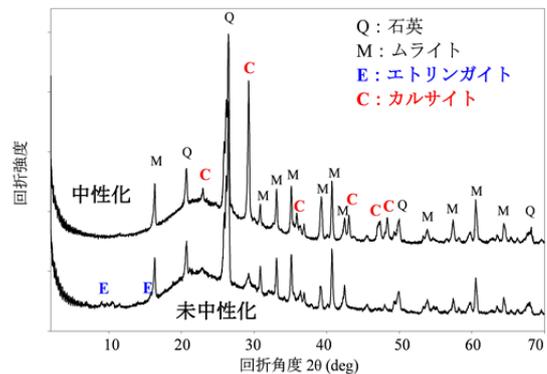


Fig. 7 X線回折図
X-ray Diffraction Diagram

5.4.6 試験結果のまとめ 石炭灰改良材の表面に覆土を施すことにより、表面水のpH上昇が緩和され、中性化の進行が抑制された。中性化部分も土壤環境基準に適合したが、ほう素の溶出量が幾分増加する傾向が見られた。これより、環境安全性を十分確保するにはアルカリ性の維持が必要と考えられる。覆土は降雨による改良材表面の浸食を防止し、改良材からのアルカリ溶出対策としても有効である¹¹⁾。

Table 7 溶出試験結果 (JIS K 0058-1 5.利用有姿)
Result of Elution Tests

| 試験項目 | 未中性化 | 中性化 | 土壤環境基準 |
|--------------|-------|--------|--------|
| 検液のpH | 10.2 | 8.8 | — |
| 検液のEC (mS/m) | 13 | 11 | — |
| 溶出量 (mg/L) | 六価クロム | <0.01 | 0.05 |
| | 砒素 | <0.005 | 0.01 |
| | セレン | <0.005 | 0.01 |
| | ふっ素 | <0.1 | 0.8 |
| | ほう素 | <0.1 | 0.12 |

6. 防潮堤盛土の長期モニタリング

石炭灰を防潮堤等の盛土材として活用することを目的として、実規模の防潮堤を構築し、盛土材の製造方法、施工性、環境安全性を検証してきた^{12)~15)}。盛土構築後、1.5年にわたって実施したモニタリング調査の結果を以下に述べる。

6.1 モニタリング調査の概要

6.1.1 防潮堤盛土の概要 防潮堤盛土の平面図および断面図をFig. 8に示す。防潮堤盛土は幅14m、高さ3.5m

(石炭灰改良材3m, 基礎砕石0.2m, 覆土0.3m), 延長39mで、のり面勾配は1:1.5である。防潮堤の施工概要等については参考文献12)~15)を参照されたい。

防潮堤盛土の構築に際し、2種類の石炭灰を使用した。

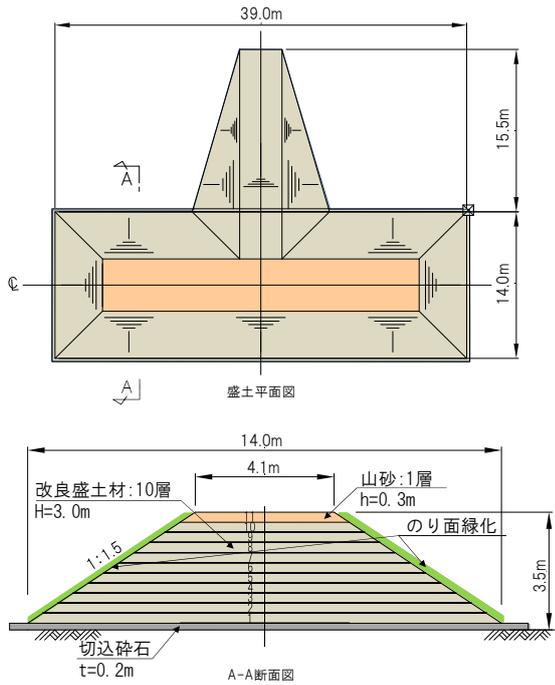


Fig. 8 防潮堤盛土の平面・断面図
Plan and Cross Section of Embankment

これらの溶出試験結果をTable 8に示す。いずれも重金属等の溶出量が土壌環境基準値を超過していたため、室内配合試験の結果に基づいて、改良盛土材の配合をTable 9に示すように設定した。

6.1.2 モニタリング方法 施工完了後、改良盛土材の溶出試験と盛土近傍の地下水の水質分析を行った。

2種類の石炭灰を用いて堤体を構築し、盛土下部（層厚2.1m）は石炭灰①、盛土上部（層厚0.9m）は石炭灰②を使用している。そのため、モニタリング試験用の試料は、堤体の頂部からコアドリルを用いて、盛土上部・下部から採取し、これらのコア試料を試験に供した。改良盛土材の溶出試験方法は、盛土材は成形固化された状態で使用され、将来、土質材料として再利用されないことを想定して「JIS K 0058-1 5. 利用有姿による試験」⁹⁾を採用した。

6.2 環境安全性に関するモニタリング結果

6.2.1 改良盛土材の溶出試験 コア試料の利用有姿による試験の結果をTable 10に示す。盛土上部・下部ともに施工完了から5ヵ月、11ヵ月および18ヵ月において土壌環境基準に適合しており、目標とする環境安全性を有していることを確認できた。

6.2.2 地下水の水質試験 盛土から5m離れた位置に設置した地下水観測孔（GL-15mまで削孔）から採水し、水質分析を行った。分析結果をTable 11に示す。いずれの項目も地下水環境基準に適合した。

7. まとめ

石炭灰に含まれる重金属等を不溶化するための材料と

Table 8 使用石炭灰の溶出試験結果
Elution Test Results of Coal Ash

| 試験項目 | 単位 | 石炭灰① | 石炭灰② | 基準値 | |
|--------------|-------|------|-------|-------|------|
| pH | — | 8.4 | 11.0 | — | |
| EC | mS/m | 40.6 | 100 | — | |
| 溶出量 環告46号 | 六価クロム | mg/L | <0.01 | 0.09 | 0.05 |
| | 砒素 | mg/L | 0.24 | 0.006 | 0.01 |
| | セレン | mg/L | 0.051 | 0.027 | 0.01 |
| | ふっ素 | mg/L | 2.3 | 1.6 | 0.8 |
| | ほう素 | mg/L | 1.7 | 13 | 1 |

Table 9 改良盛土材の配合
Mixture of Materials for Improved Coal Ash

| 石炭灰 | 高炉セメント | 助材 | 水 |
|------------------|--------|-------|-------|
| 1000kg (乾燥質量) | 100 kg | 20 kg | 116 L |

Table 10 長期モニタリング溶出試験結果
Elution Test Results of Boring Core Samples

| 試料位置 | 項目 | 単位 | 施工完了からの経過時間 | | | 基準値 |
|------|-------|------|-------------|--------|--------|------|
| | | | 5ヵ月 | 11ヵ月 | 18ヵ月 | |
| 盛土上部 | 六価クロム | mg/L | <0.01 | <0.01 | <0.01 | 0.05 |
| | 砒素 | mg/L | 0.001 | 0.005 | <0.001 | 0.01 |
| | セレン | mg/L | <0.001 | <0.001 | <0.001 | 0.01 |
| | ふっ素 | mg/L | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.8 |
| | ほう素 | mg/L | <0.1 | 0.14 | 0.22 | 1 |
| 盛土下部 | 六価クロム | mg/L | <0.01 | <0.01 | <0.01 | 0.05 |
| | 砒素 | mg/L | 0.003 | 0.002 | <0.001 | 0.01 |
| | セレン | mg/L | <0.001 | <0.001 | <0.001 | 0.01 |
| | ふっ素 | mg/L | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.8 |
| | ほう素 | mg/L | <0.1 | 0.21 | 0.13 | 1 |

Table 11 地下水の水質試験結果
Results of Groundwater Quality

| 項目 | 単位 | 施工前 | 施工完了からの経過時間 | | | 基準値 |
|-------|------|---------|-------------|---------|---------|--------|
| | | | 直後 | 11ヵ月 | 18ヵ月 | |
| pH | — | 6.1 | 6.3 | 6.3 | 6.8 | — |
| EC | mS/m | 158 | 163 | 86.9 | 114 | — |
| 水温 | ℃ | 12 | 14 | 17 | 12 | — |
| カドミウム | mg/L | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | 0.003 |
| 鉛 | mg/L | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | 0.01 |
| 六価クロム | mg/L | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | 0.05 |
| 砒素 | mg/L | <0.005 | <0.005 | <0.005 | <0.005 | 0.01 |
| 水銀 | mg/L | <0.0005 | <0.0005 | <0.0005 | <0.0005 | 0.0005 |
| セレン | mg/L | <0.005 | <0.005 | <0.005 | <0.005 | 0.01 |
| ふっ素 | mg/L | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.8 |
| ほう素 | mg/L | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 1 |

配合を設定し、室内試験、屋外曝露試験および防潮堤盛土のモニタリングにより、石炭灰改良材の環境安全性を検証した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 石炭灰に微量に含まれる重金属等の溶出を抑制する材料として、高炉セメントとカルシウム系材料

の組合せが最も効果的であった。

- 2) 8種類の石炭灰を用いて各々2配合の試験体を作製して最長1年間気中養生を行い、所定の期間に溶出試験を行った。すべてのケースについて重金属等の溶出量は土壤環境基準値未満で安定していた。
- 3) 石炭灰改良材を屋外に1年間曝露した結果、改良材表面に覆土を施工することにより、表面水のpH上昇と中性化の進行が抑制された。これより、覆土が環境安全性の確保に有効と判断される。
- 4) 実規模の防潮堤盛土からコアを採取し溶出試験を行った。構築して18ヶ月後の重金属等の溶出量は土壤環境基準に適合し、目標の環境安全性を有していることを確認できた。

石炭灰改良材を用いた盛土工法は、2015年4月に国土交通省の新技术情報システム（NETIS）に登録された¹⁶⁾。

謝辞

試験に用いた石炭灰の提供ならびに防潮堤盛土実証試験を実施するための試験ヤードと石炭灰の提供等、多大なご支援を頂きました相馬共同火力発電(株)新地発電所の関係各位に深謝致します。

参考文献

- 1) 一般財団法人石炭エネルギーセンターHP：
<http://www.jcoal.or.jp/coaldb/tech/coalash/>, 2015.6閲覧
- 2) 社団法人土木学会：コンクリートライブラリ132 循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術, pp.17-20, 2009.12
- 3) 井出一貴, 甚野智子, 熊谷祐一, 久保博, 佐藤祐司：石炭灰の有効利用に関する安全性向上技術の開発（その3）直接脱水方式による酸洗浄ほう素抽出試験, 第17回廃棄物学会研究発表会, pp.792-793, 2006.11
- 4) 熊谷祐一, 菅野栄, 久保博, 田島孝敏, 甚野智子：石炭灰の安全安心な再生資源化を目指した酸洗浄処理技術の開発—連続運転遠心脱水機を採用した現場

- 実証試験—, 第19回廃棄物学会研究発表会, pp.376-378, 2008.11
- 5) 環境省 水・大気環境局：底質調査法, 2012.8
https://www.env.go.jp/water/teishitsu-chousa/00_full.pdf
- 6) Solem-Tishmack, McCarthy, High-calcium Coal Combustion By-products: Engineering Properties, Ettringite Formation, and Potential Application in Solidification and Stabilization of Selenium and Boron, Cem. Con. Res., 25, pp.658-670, 1995.4
- 7) Heebink, Hassett, Coal Fly Ash Trace Element Mobility in Soil Stabilization, 2001 International Ash Utilization Symposium, 2001.10
- 8) 井出一貴, 青木雄二, 田島孝敏, 熊谷祐一：石炭灰を用いた盛土材の性状—盛土材利用時の重金属等の溶出試験結果—, 土木学会第68回年次学術講演会, pp.207-208, 2013.9
- 9) 日本工業規格 JIS K 0058-1 スラグ類の化学物質試験方法—第1部：溶出試験方法, 2005.3
- 10) 一般財団法人石炭エネルギーセンター：石炭灰混合材料有効利用ガイドライン（震災復興資材編）, pp.93-103, 2014.3
- 11) 独立行政法人土木研究所：建設汚泥再生利用マニュアル, pp.80-82, 2008.12
- 12) 佐々木徹, 井出一貴, 熊谷祐一：石炭灰を活用した復興工事への取り組み, 土木施工 2013 Sep, Vol.54, No.9, pp.87-90, 2013.9
- 13) 熊谷祐一, 佐々木徹, 山田祐樹, 井出一貴：石炭灰を活用した防潮堤盛土実証試験の結果報告, 第24回廃棄物資源循環学会研究発表会, pp.251-252, 2013.11
- 14) 佐々木徹, 山田祐樹, 井出一貴, 熊谷祐一：石炭灰を活用した防潮堤盛土実証試験, 第69回土木学会年次学術講演会, pp.619-620, 2014.9
- 15) 山田祐樹, 佐々木徹, 井出一貴, 熊谷祐一：石炭灰改良土を用いた防潮堤盛土の長期モニタリング, pp.2395-2396, 第50回地盤工学研究発表会, 2015.9
- 16) 国土交通省 公共工事等における新技术活用システム(NETIS)：石炭灰（ソマッシュ）を用いた盛土工法, NETIS登録番号TH-150002-A, 2015.4