

東日本大震災で発生した岩手県の災害廃棄物 分別土砂の品質とその変化

高井 敦史¹・川島 光博²・勝見 武³・乾 徹⁴・岩下 信一⁵・大河原 正文⁶

¹正会員 京都大学助教 大学院地球環境学堂 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)
E-mail: takai.atsushi.2s@kyoto-u.ac.jp

²非会員 岩手県 環境生活部資源循環推進課 (〒020-8570 岩手県盛岡市内丸10-1)
E-mail: M-Kawashima@pref.iwate.jp

³正会員 京都大学教授 大学院地球環境学堂 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)
E-mail: katsumi.takeshi.6v@kyoto-u.ac.jp

⁴正会員 京都大学准教授 大学院地球環境学堂 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)
E-mail: inui.toru.3v@kyoto-u.ac.jp

⁵非会員 応用地質株式会社 執行役員 (〒101-8486 東京都千代田区神田美土代町7)
E-mail: iwashita-shinich@oyonet.oyo.co.jp

⁶正会員 岩手大学准教授 工学部 (〒020-0105 岩手県盛岡市上田4-3-5)
E-mail: okawara@iwate-u.ac.jp

東日本大震災からの復旧・復興においては、質量比で約3分の1を占めた土砂分の地盤材料としての再資源化が重要課題の一つであった。しかし、処理方法や設備仕様は地区ごとに様々であったため、得られる処理物の特性も多様であったことから、処理物の材料特性を包括的に明らかにすることは、将来の災害対応にとっても重要な知見となり得る。本研究では、岩手県における計404件のデータに基づき、1)空間的ばらつきと処理内容との関係、2)処理期間内での変動、の2点から分別土砂の地盤材料特性を精査した。その結果、分別土砂は有効活用のための要求品質を満足し、通常の土砂と同等の特性を有していること、改質目的の添加材が物理化学特性に影響を及ぼすこと、等が明らかとなった。さらに各特性の経時変化を評価し、各特性の変動傾向を明らかにした。

Key Words : East Japan earthquake and tsunami, disaster waste treatment, recovered soils, material property, geomaterial, characterization, improvement

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震とその後津波は、岩手県、宮城県、福島県の3県を含む東日本沿岸部に甚大な被害をもたらした。東日本大震災で顕在化した地盤環境問題として、放射能汚染や津波による農地塩害に加え、写真-1に示す膨大な量の災害廃棄物ならびに津波堆積物の処理と再資源化が挙げられる¹⁾。災害廃棄物・津波堆積物の処理は、被災地の復興における最重要課題であったが、既存処理施設の処理能力の限界から、積極的な分別と再資源化が求められた。

発災後、環境省は比較的早期に災害廃棄物と津波堆積物の処理に関する指針^{2),3)}を示し、基本方針を概念的に示したものの、膨大な災害廃棄物の発生と処理、有効活用

は人類にとって近代史上初めての経験であり、詳細な技術的方策は事前に整備されていなかった。平成7年兵庫県南部地震での経験も踏まえて定められた、3年間という災害廃棄物処理の時限を達成するため、地盤工学分野で蓄積されていた副産物や廃棄物の有効利用に関する経験知を結集させて産官学が連携して処理を行い、福島県の一部を除く全域において、2014年3月末に災害廃棄物等の処理を終えている。

発生した災害廃棄物と処理を要する津波堆積物は合わせて約3000万トンであり、津波浸水面積1 km²あたり約3.4万トンにもものぼるが⁴⁾、その約3分の1を土砂分が占めていた。そのため、適切な選別処理により得られる分別土砂は、復旧復興事業に不可欠な地盤材料としての再資源化が求められ、その受け皿として期待される公共事業



写真-1 仮置きされた災害廃棄物 (2011年11月岩手県沿岸部にて撮影)

への利用に関して、種々のガイドラインや通知も示された^{5),6),7),8)}。現場採取した津波堆積物や分別土砂の材料特性は、これまでも幾つか報告されている^{9),10),11),12)}。東日本大震災における災害廃棄物処理では、地区ごとの創意工夫により、様々な処理設備やシステムによりシステムが構成、改良されており、そのため得られる分別土砂の特性も地区や時間的に異なっていたことから、これらの時間的・空間的なばらつきを考慮して地盤材料特性を取りまとめておくことは、将来の巨大災害にとっても重要な知見となる。本研究では、岩手県で発生した分別土砂を対象とし、岩手県が発行した計量証明書に記載の特性値を精査し、地盤材料特性の空間的なばらつきと処理内容との関係を評価するとともに、特性の経時変化を調べた。この計量証明書は、岩手県が災害廃棄物処理事業の進捗と分別土砂の品質管理を目的に発行したものであり、本研究では計404件のデータに対して分析を行った。

2. 分別土砂の分類

図-1は、災害廃棄物の処理と復興資材の活用に関する経緯をまとめたものである¹³⁾。環境省は地震発生から半年以内に津波堆積物と災害廃棄物の処理に関する基本方針を示したものの、災害廃棄物処理が本格的に稼働したのは2011年後半である。その後、2012年6月までに国土交通省や林野庁から公園緑地⁹⁾や宅地造成盛土⁷⁾、海岸林⁸⁾に復興資材を活用する際の技術的指針が、本研究の対象である岩手県では復興資材活用マニュアル¹⁴⁾が、それぞれ定められたが、分別土砂の利用が本格化したのは2012年度後半であった。前述のとおり、東日本大震災における災害廃棄物等の処理事業は、福島県の一部の地域を除いて2013年度内にはほぼ終了し、2014年度には災害廃棄物再生資材の利用や仮置場・処理現場の返還等が進められ、現在は東日本大震災の災害廃棄物処理の経験を将来の災害時の対応に活かすべく様々な検討が進められており、

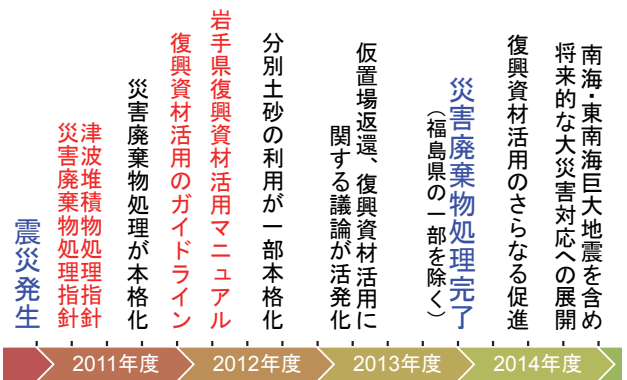


図-1 災害廃棄物処理と復興資材活用の進捗 (参考文献 13)に
加筆)

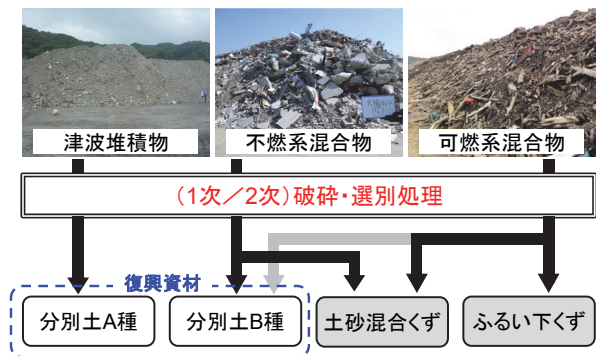


図-2 岩手県における分別土砂の基本的な流れと分類

特に2015年には災害廃棄物処理に関して「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」と「災害対策基本法」の一部改正が進められた。

2013年2月に改訂された岩手県復興資材活用マニュアル(以下、マニュアルと称する)では、復興資材の分類や品質評価方法等が詳述されている。被災地から撤去され仮置きされた災害廃棄物は、一次仮置場での粗選別を経て二次仮置場へ運搬される。その後、破碎・選別等を組み合わせたより精細な二次処理を経て、復興資材又は廃棄物として分類され、再資源化または処理がなされる。図-2は、岩手県における災害廃棄物処理から分別土砂取得までの基本的な流れを示したものであるが、マニュアルではコンクリートがらの他に、処理を経て最終的に排出される15 mmあるいは20 mmのふるい通過試料を、その品質に応じて、分別土A種、分別土B種、土砂混合くず、ふるい下くず、の4種類に区分した。津波堆積物を処理したものを「分別土A種」、不燃系・可燃系混合物を起源とする処理物は、品質基準を満足したものを「分別土B種」と称し、これら2種類を復興資材として活用した。一方、不燃系・可燃系混合物を起源とし、品質基準を満足しなかった処理物は、「土砂混合くず」または「ふるい下くず」と区分され、原則、廃棄物として処分あるいはセメント原料として利用された。なお、可燃系混合物を起源とする処理物についても、十分な品質を有するものは分別土

B種として再資源化する方針が立てられたものの(図-2中の灰色矢印)、実際にはそのような処理物は発生せず、全量が処理を経て土砂混合くずあるいはふるい下くずとして処分された。災害廃棄物処理を経ても、解体廃材由来の細かい木片の混入は不可避であり、一般的に分別土A種、分別土B種、土砂混合くず、ふるい下くずの順にその残存量は多い。残存する木片の長期的な生分解が材料

特性に及ぼす影響に関して科学的な知見が乏しく、施工管理等に関する技術的課題も多く、土砂混合くずとふるい下くずは、東日本大震災の復興事業では地盤材料として利用されなかった。しかし、混入する木片の生分解の影響も含め、分別土砂の特性について様々な研究が進められており^{15), 16)}、今後の研究の発展次第では、将来的な災害時には再資源化が期待される。マニュアルでは処理物の判定方法も定めており、3,000 m³ごとに有害物質等が混入していないことを確認した上で、表-1に示す要求項目について各試験を行い、品質判定証を発行した。全項目が要求品質を満足していれば、用途に応じた追加の評価を行い、再生資材として復興事業に利用した。

図-3は、災害廃棄物から再生された復興資材の有効活用ガイドライン¹⁸⁾の分類に従い、分別土A種とB種の活用用途を割合で示したものである。この結果から、分別土A種は、農用地、海岸防災林、公園・緑地造成等の強度が要求されない用途に、全体の約60%が用いられていることが分かる。分別土B種は宅地造成、道路盛土、工作物の埋戻し材への利用が主要であるが、それらの多くはグラウンド整備事業や嵩上げ工事、復興工事中用仮設道路盛土等での利用がほとんどであり、上部荷重が恒久的に作用する箇所ではない。また、道路盛土、工作物の埋戻し材については、それらのほとんどが、後述する大船渡地区のコンクリートがらを混合した分別土B種であり、強度や粒度が改善されたことも適用用途拡大の一因となったと考えられる。

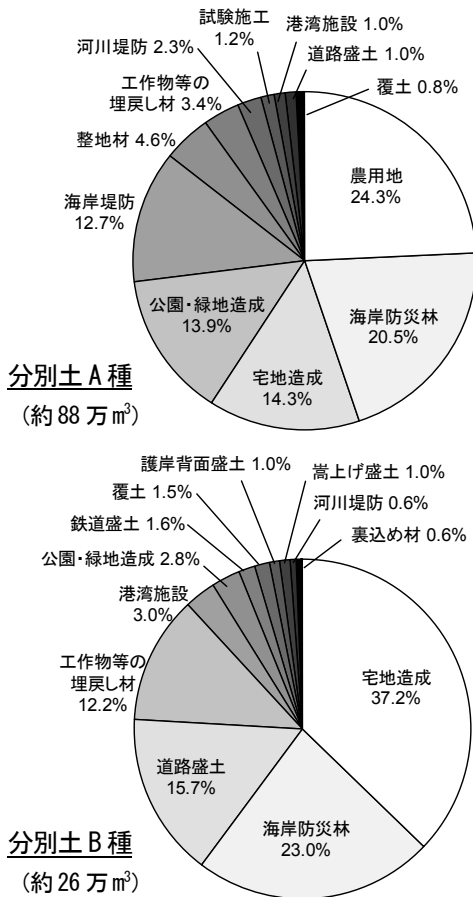


図-3 分別土 A 種と B 種の活用用途

3. 各地区の処理内容と対象データ

本研究では、処理物の約3,000 m³ごとに岩手県が発行した品質判定証のデータ、計404件を分析した。岩手県が

表-1 要求品質と試験方法

要求項目	要求品質	試験方法	試験方法
土粒子密度	—	土粒子の密度試験	JIS A 1202:2009
自然含水比	—	土の含水比試験	JIS A 1203:2009
粒度分布	$D_{max} \leq 300 \text{ mm}$	土の粒度試験	JIS A 1204:2009
液・塑性限界	—	土の液性限界・塑性限界試験	JIS A 1205:2009
コーン指数	200 kN/m ² 以上	締固めた土のコーン指数試験	JIS A 1228:2009
塩化物含有量	1 mg/g 以下	土の水溶性成分試験	JGS 0241-2009
電気伝導率	200 mS/m 以下	土懸濁液の電気伝導率試験	JGS 0212-2009
pH	6 以上 9 以下	土懸濁液の pH 試験	JGS 0211-2009
強熱減量	—	強熱減量試験	JIS A 1226:2009*1
放射線量	0.01 mSv/年以下	空間放射線量測定	*2
放射能濃度	¹³⁴ Cs+ ¹³⁷ Cs で 100 Bq/kg 以下	放射性物質濃度測定	*2

*1 ふるいによる粒度調整を行わず、有姿試料のまま試験に供する。

*2 測定方法は、放射能濃度等測定方法ガイドライン(平成23年12月第1版, 環境省)¹⁷⁾に準ずる。

管理した項目は表-1のとおりであるが、本研究では地盤材料特性に着目し、土粒子密度、粒度分布、液・塑性限界、コーン指数、塩化物含有量、電気伝導率、pH、強熱減量の8項目について精査した。対象地区は図-4に示すとおりであり、岩手県の災害廃棄物処理二次仮置場が設置された、久慈、宮古、山田、大槌、釜石、大船渡、陸前高田の7地区を対象とした。この他に独自に処理を行った地域があったが、岩手県全域で発生した618万トンの災害廃棄物と津波堆積物のうち、615万トンが上記の7地区で処理されている。このうち、分別土砂の発生量は約184万トンであり、約3,000 m³ごとの404検体、約120万m³を対象とした。これは、岩手県で発生したほぼ全ての分別土砂を網羅していることになる。

実施事業体の経験や創意工夫に基づき、各地区では様々な処理設備や機材が異なる系統で導入されたため、排出される処理物の性状も多種多様であったが¹⁹⁾、大きくは乾式での振動型スクリーンや比重差選別、手選別による分別工程と、重機による破碎工程から成る。久慈、宮古、山田、大槌の4地区では、資機材の仕様や系統は異なるものの、これら2つの工程により災害廃棄物等が処理されたが、釜石地区、大船渡地区、陸前高田地区の3地区では、表-2に示すような特徴的な処理がなされた。釜石地区では、分別効率の向上と品質改善を目的に、鉄鋼スラグ系改質材を分別土砂に混合しており²⁰⁾、大船渡地区ではコンクリートがらを添加して強度改善を目指した。同じく大船渡地区では、塩分濃度の高い一部の試料を別途設置した除塩施設で湿式処理しており、湿式サイクロンを用いて砂分と細粒分に分級した後、重量比で10%の生石灰を添加して含水比調整を行った。陸前高田地区では、他地区と比較すると津波被災農地面積が大きかったため²¹⁾、処理物の農地利用を目的に処理システムが構成されており、地盤材料として良質な砂分のみを再資源化



図-4 対象地区と位置関係

するのではなく、所要の性状となるよう砂分と細粒分を任意の割合で混合した。このように、釜石、大船渡、陸前高田の3地区では、改質材の添加や異なる処理目標などの特殊性があり、これらの影響を考慮して処理物の特性を評価する必要がある。久慈、宮古、山田、大槌の4地区で導入された機材の仕様や系統の違いは、処理物の諸特性に大きく影響しないと仮定し、以下の検討を行った。

本研究の対象データの地区毎、種類毎の内訳を表-3に示す。基本的な分類は、岩手県の復興資材活用マニュアルに準ずるが、大船渡地区の分級後に生石灰を添加した材料や、陸前高田地区の農地利用用の粒度調整試料、農地堆積物等をまとめて「その他」と称することとする。これらの個別のデータ件数は、他の処理物と比較し相対的に少なく、傾向を評価する上で有意でないため、便宜上一括して評価した。

4. 地区毎の比較

品質判定証に記載のデータを解析し、ヒストグラムを

表-2 地区ごとの特徴的な処理内容一覧

地区名	内容
釜石	・鉄鋼スラグ系改質材を重量比で約40%添加して、分別土A種とB種を改質。
大船渡	・コンクリートがらを任意の割合で添加して、分別土B種を改質。 ・塩分濃度の高い一部の試料を湿式で除塩。除塩後、湿式サイクロンで砂分と細粒分を比重差選別により分けて排出。 ・分級後の試料には、含水比調整の目的で、重量比で10%の生石灰を添加。
陸前高田	・復旧事業のための地盤材料としての再資源化を目的とした他地区と異なり、農地の基盤部への利用を目的に処理を実施。 ・農地上に堆積した津波堆積土は、他の災害廃棄物と分けて単独で運搬・処理。 ・一部の試料は、湿式分級後、砂分と細粒分を混合して粒度調整。

表-3 処理物の種類とデータ件数

地区名	分別土A種	分別土B種	土砂混合くず	ふるい下くず	その他	計
久慈	20	5				25
宮古	69	13	2	1		85
山田	15	8	3	1		27
大槌	52	16		1		69
釜石	16	34				50
大船渡	2	35		8	15	60
陸前高田	77				11	88
計	251	111	5	11	26	404

表-4 各特性の平均と標準偏差(上段:平均値, 下段:標準偏差)

地区名	土粒子密度 (g/cm ³)	細粒分含有率 (%)	コーン指数 (kN/m ²)	強熱減量 (%)	pH (-)	電気伝導率 (mS/m)	塩化物含有量 (mg/g)	
久慈	A種	2.598 ±0.060	28.8 ±8.2	3572 ±3318	5.7 ±1.8	7.6 ±0.7	30 ±14	0.26 ±0.43
	B種	2.605 ±0.110	26.2 ±2.6	4163 ±2324	8.0 ±0.7	7.5 ±0.2	182 ±40	1.17 ±0.94
宮古	A種	2.672 ±0.028	24.0 ±8.1	3934 ±3763	4.4 ±1.3	7.8 ±0.4	88 ±50	0.54 ±0.56
	B種	2.636 ±0.049	17.7 ±12.5	9037 ±5709	6.6 ±3.5	8.7 ±1.5	64 ±41	0.20 ±0.21
山田	A種	2.653 ±0.044	24.6 ±5.5	4795 ±3462	4.9 ±1.1	7.8 ±0.4	103 ±25	0.16 ±0.10
	B種	2.610 ±0.044	25.0 ±6.1	5306 ±7536	8.7 ±2.2	8.1 ±1.4	119 ±37	0.44 ±0.25
大槌	A種	2.691 ±0.015	27.5 ±7.0	4965 ±2923	5.7 ±0.8	7.7 ±0.2	118 ±33	0.70 ±0.92
	B種	2.664 ±0.019	27.5 ±6.9	4564 ±2263	8.1 ±2.0	7.8 ±0.2	120 ±41	0.29 ±0.18
釜石	A種	3.028 ±0.059	24.4 ±2.2	7973 ±2194	4.0 ±0.6	12.2 ±0.7	197 ±103	0.15 ±0.07
	B種	2.954 ±0.143	26.2 ±3.9	4808 ±1852	3.9 ±0.6	12.2 ±1.7	274 ±111	0.10 ±0.04
大船渡	A種	2.641 ±0.003	22.9 ±1.9	4598 ±974	10.0 ±0.0	7.6 0.0	165 ±7	5.1 0.0
	B種	2.701 ±0.022	14.6 ±5.6	10975 ±4453	11.3 ±4.0	11.1 ±0.7	69 ±27	0.29 ±0.11
陸前高田	A種	2.707 ±0.023	35.5 ±10.3	2117 ±1770	6.4 ±1.4	7.9 ±0.4	51 ±46	0.36 ±0.91

用いて各特性を地区ごとに比較するとともに、表-4に示すとおり平均値と標準偏差を評価した。いずれの図も、地図上で北から南に向かうよう、久慈、宮古、山田、大槌、釜石、大船渡、陸前高田の順に示している。なお、検体数が地区毎に異なるため、ヒストグラムの縦軸の範囲は地区ごとに異なる点に留意されたい。

(1) 土粒子密度

土粒子密度のヒストグラムを図-5に示す。添加材による改質を行っていない久慈、宮古、山田、大槌、陸前高田地区では、粒子密度は約2.60~2.71 g/cm³の平均値を有しており、一般的な土質材料と同程度の値であることが分かる。北から南に向かうほど、最頻値や平均値が若干大きくなる傾向にあるが、表-4のとおり強熱減量の値に明確な差異がなく、木片の粒子密度による影響は同程度であることを考慮すると、分別土砂に含まれる海底由来の土砂そのものの特性が地域によって異なることが示唆される⁹⁾。処理物の種類で比較すると、分別土A種の方が、残存する木片が多い分別土B種や土砂混合くず、ふるい下くずより高い値を示している。鉄鋼スラグ系改質材を混合して改質を行った釜石地区では、2.90~3.20 g/cm³の高い値を示した。鉄鋼スラグ系改質材の粒子密度が約3.3 g/cm³であり²⁰⁾、処理物に対して質量比で約40%添加して

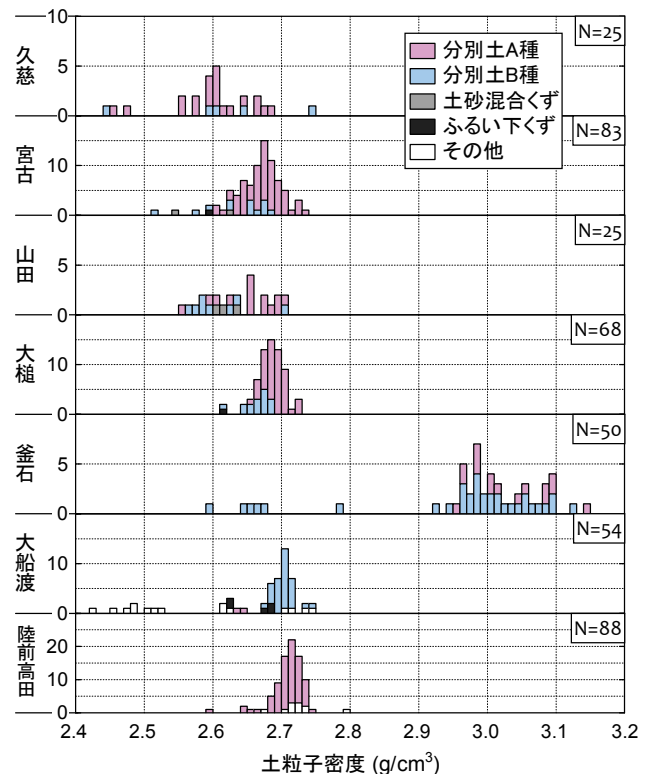


図-5 土粒子密度の地区別ヒストグラム

いたことを考慮すれば、妥当な値である。

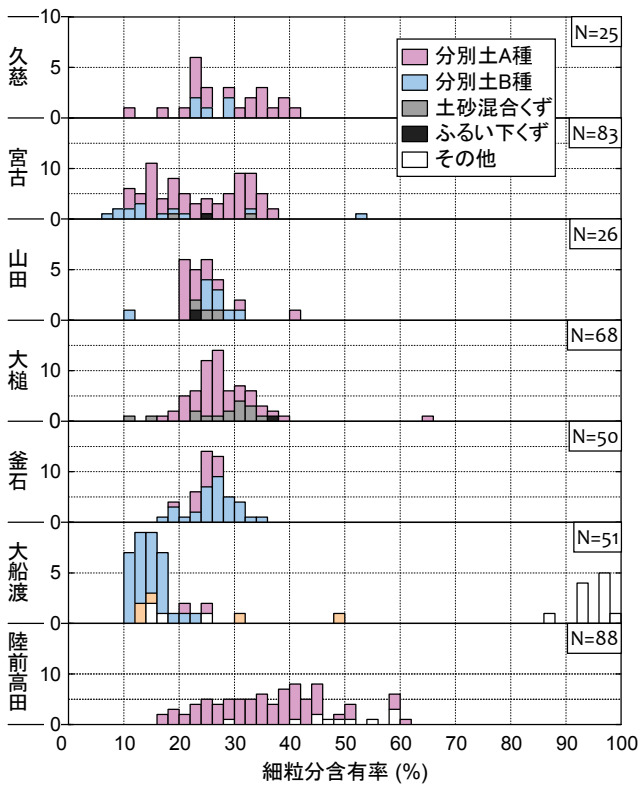


図-6 細粒含有率の地区別ヒストグラム

(2) 細粒含有率

細粒含有率のヒストグラムを図-6に示す。一般的な処理が行われた久慈、宮古、山田、大槌の4地区（以下、「一般4地区」と称する）の細粒含有率は、分別土砂の種類に関わらず35%未満の範囲に分布しており、粗粒分が相対的に多いものの、処理後も細粒分がある程度残存していることが分かる。大船渡地区の処理物は他地区と比べ低い細粒含有率を示しているが、これは混合したコンクリートがらに含まれる細粒分が少ないためである。細粒含有率が90%を越える試料が存在しているが、これらは湿式サイクロンによって分級された粘土分である。表-4に示すとおり、釜石地区と大船渡地区では細粒含有率の標準偏差が小さく、ばらつきが小さい。陸前高田地区では、農地利用を目的として任意の割合で粘土分と砂分を混合調整したため、他地区と異なり10~60%の広い範囲に値が分布しており、平均値は最も高い。

図-7はJGS 0051-2009に準拠した工学的分類（中分類）を示したものであるが、いずれの地区においても、多くの試料が細粒分まじり砂{SF}に区分されることが分かる。陸前高田地区の細粒含有率は相対的に高いものの、一部の試料を除き50%未満であるため、他地区と同様に細粒分まじり砂{SF}に区分された。粗大なコンクリートがらを混合した大船渡地区の処理物は{GS}や{GF}などの礫質土に分類されるものの、多くは砂質土に分類されることが分かる。

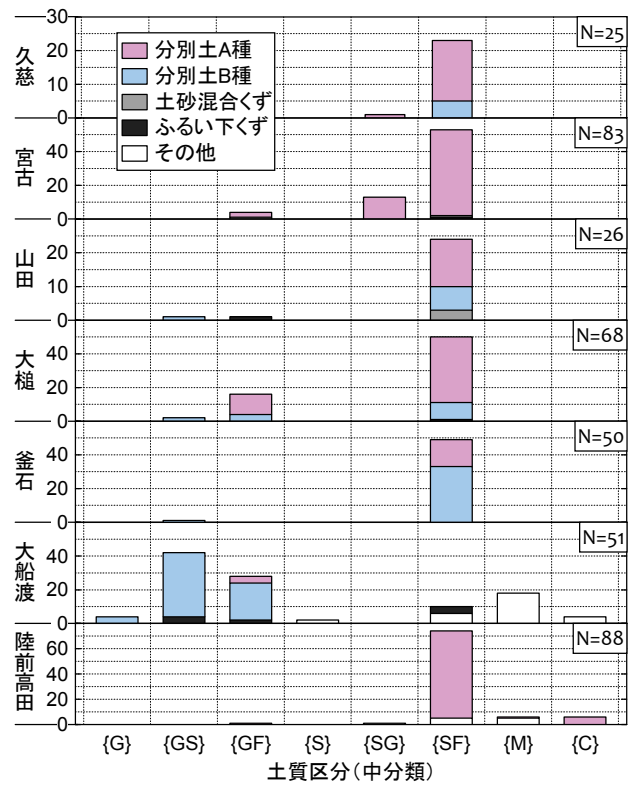


図-7 工学的分類（中分類）の地区別ヒストグラム

(3) コーン指数

コーン指数のヒストグラムを図-8に示す。表-4のとおりいずれの地区においても、木片の混入が少ない分別土A種に比べ、分別土B種の方が高いコーン指数を示した。このことから、混在する木片が補強材のように作用し、強度の増大に寄与したと考えられる。一般4地区と釜石地区の分別土は同程度のコーン指数を有しており、鉄鋼スラグ系改質材の混合による強度改善効果は小さい。一方、大船渡地区の分別土B種のコーン指数は、他地区よりも高く、コンクリートがらの添加が強度増加に寄与したと考えられる。陸前高田地区では農地利用が処理目的のため、コーン指数は相対的に低い範囲に分布している。分別土砂の種類に関わらず、395/397検体の試料が第4種建設発生土相当の200 kN/m²以上のコーン指数を有しており、そのうち337検体が第2種建設発生土相当の800 kN/m²を満足した。

発生土利用基準²²⁾に基づき、工学的分類とコーン指数から区分すると、図-9に示すとおり分別土A種では6.5%が、分別土B種では38.0%が、第1種建設発生土に相当する。第1種建設発生土相当の分別土B種41検体のうち、大船渡地区の試料が32検体を占めることから、コンクリートがらの混合により強度が増大し、前述の適用範囲の拡大につながったと考えられる。同様に、分別土A種の77.6%、分別土B種の59.3%が第2種建設発生土相当であり、

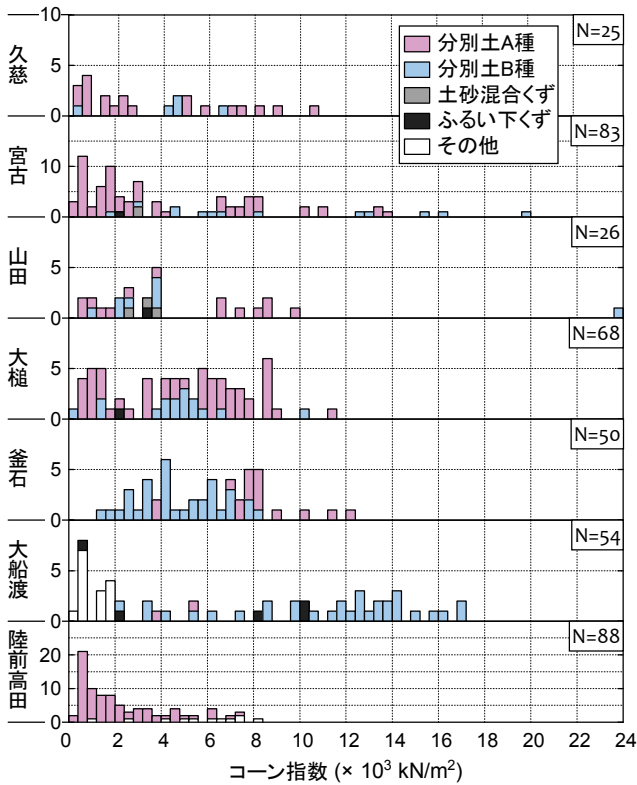


図-8 コーン指数の地区別ヒストグラム

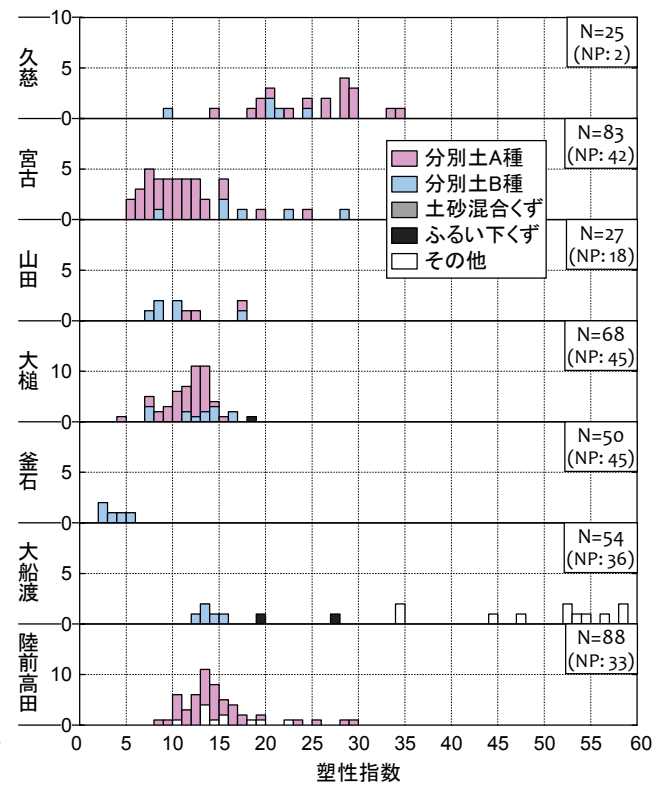
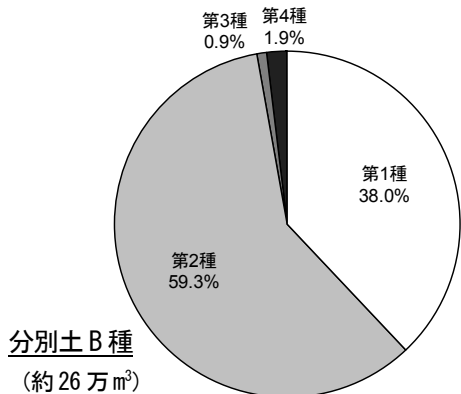
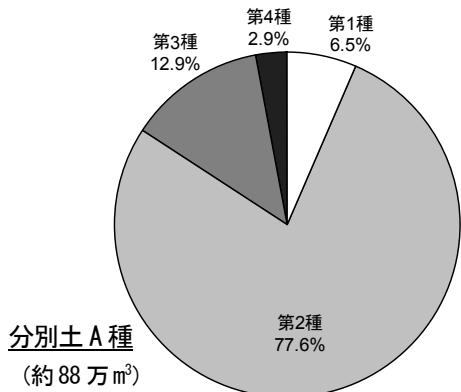


図-10 塑性指数の地区別ヒストグラム



土質区分基準 (本研究の対象試料に関して)
 第1種: {G}{GS}{S}{SG}
 第2種: コーン指数が 800 kN/m² 以上の{GF}{SF}
 第3種: コーン指数が 400 kN/m² 以上の{SF}{M}{C}
 第4種: コーン指数が 200 kN/m² 以上の{SF}{M}{C}

図-9 発生土利用基準に基づく分別土 A 種と B 種の区分

表-5 塑性指数が NP の検体数

地区名	分別土 A 種	分別土 B 種	土砂混合くず	ふるい下くず	その他
久慈	2/20	0/5			
宮古	32/67	7/13	2/2	1/1	
山田	12/15	2/8	3/3	1/1	
大槌	11/51	3/16		0/1	
釜石	16/16	29/34			
大船渡	2/2	27/32		3/5	4/15
陸前高田	33/77				0/11
計	108/248	68/108	5/5	5/8	4/26

注) NP 検体数/対象試料数

泥土に区分される試料は無かったことから、貫入抵抗と粒度の観点からは分別土砂は高い品質を有しており、地盤材料として利用可能と判断できる。

(4) 塑性指数

塑性指数のヒストグラムを図-10に、塑性指数がNP(非塑性)であった地区別の試料数を、表-5に示す。一般4地区の中でも、久慈地区はNP検体数が少なく、相対的に高い値を示した。図-6に示したとおり、75 μm以下の細粒分含有率は一般4地区で大差がないにも関わらず、久慈地区の分別土砂は相対的にNPを示した検体数が少ない。これは細粒分のうち、5 μm以下の粘土分の割合が他地区と比べて高かったためであると考えられる。表に示すとおり、釜石地区は添加した鉄鋼スラグの影響により多くの

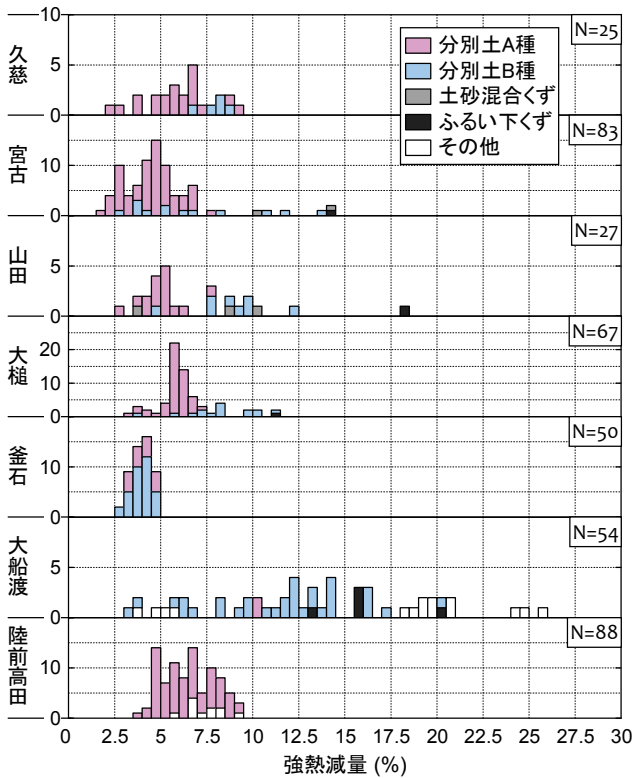


図-11 強熱減量の地区別ヒストグラム

試料がNPであり、値が得られた試料についても平均で $I_p = 3.5$ の小さい値を示した。大船渡地区で高い値を示したものは湿式サイクロンにより得られた粘土分であり、湿式処理を施した後も高い保水力を有していることが分かる。陸前高田地区の分別土砂も混合調整した粘土分の影響により、塑性指数は相対的に大きい。

2012年9月に採取した土砂混合くずとふるい下くずの液・塑性限界は、採取場所に関わらず多くの試料でNPであったが¹⁰⁾、本研究でも同様の傾向を示した。分別土A種とB種でNPを示した試料は全体で49%であるが、釜石地区と大船渡地区におけるNP試料の割合がそれぞれ90%、85%であることから、粗粒分の添加が試料のコンシステンシーや保水力に大きく影響したことが分かる。分別土A種と比較し、分別土B種の方がNPを示す比率が高いが、木片の混入量が増えることで相対的に土砂分の割合が低くなったためであると考えられる。

(5) 強熱減量

図-11に強熱減量のヒストグラムを示す。一般4地区では、分別土A種より分別土B種が高い値を示しており、分別土A種は4.4~5.7%、分別土B種は6.6~8.7%の平均値を有していた。大船渡地区では、分別土B種のみでも標準偏差は4.0%と他地区より大きく、広範囲に値が分布している。これは分別土砂に含まれる木片等の有機物だけでなく、全粒径を燃焼に供したためコンクリートがらに含まれるセメント水和物の分解が影響したためであ

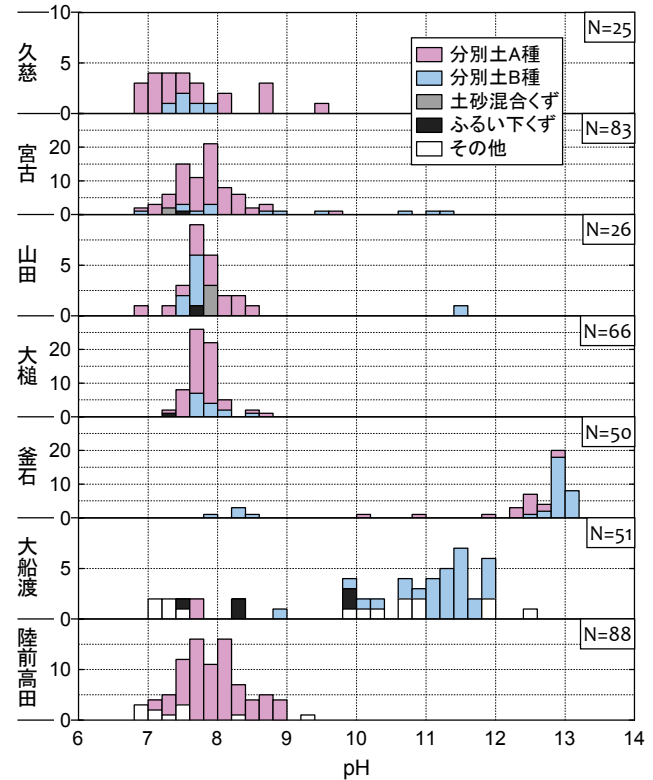


図-12 pHの地区別ヒストグラム

る。15.0%以上の高い値を示したものは湿式分級で得られた粘土分であり、海底由来の有機物や鉱物に含まれる結晶水に加え、含水比調整のために添加された生石灰由来の水和水が影響したと考えられる。鉄鋼スラグを添加した釜石地区では、表-4に示すとおり他地区より小さい値を示し、さらに標準偏差も小さいが、これは鉄鋼スラグの強熱減量が極めて小さく、かつ粒子密度が大きいため、燃焼分の相対量が小さく評価されるためである。このように、処理物の強熱減量は添加材の影響を大きく受けることが分かる。強熱減量は分別土砂の利用判断基準にも挙げられているものの、基準値は明確に設定されていない。また、JIS A 1226:2009で定める750±50℃での燃焼では、水和水等も逸散するため、分別土砂に残存する有機物量の同定手法として330℃での加熱法も検討されており²³⁾、目的に応じた測定方法と品質基準を今後確立する必要がある。

(6) pH

pHのヒストグラムを図-12に示す。釜石地区と大船渡地区を除く地区では、pH=8前後の中性~弱アルカリ域に概ね分布している。釜石地区と大船渡地区では、鉄鋼スラグやコンクリートがら中の酸化カルシウム等と水の反応により生成される水酸化物イオンの影響を受け、pH=10~14の高い値を示した。ただし、セメント系改良材による地盤改良は一般的に広く採用されており、さらに経験的にも時間とともに周辺地盤と同程度のpHに戻る

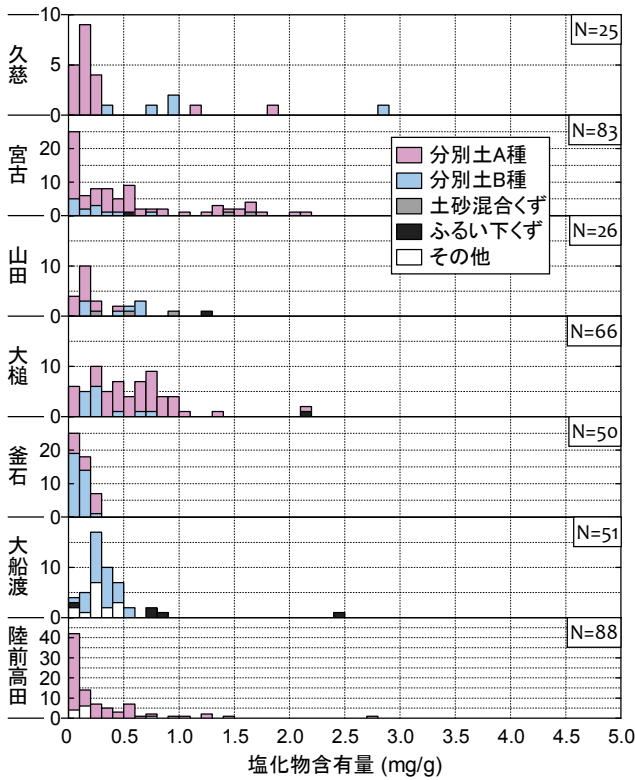


図-13 塩化物含有量の地区別ヒストグラム

ことが知られており、岩手県の復興資材活用マニュアルでも、地盤改良や安定化処理等の品質改善対策により利用が可能になる場合、pH の上限値 (pH=9) は適用しないことが記されている。ただし、海域あるいは公共用水域に隣接する箇所で使用する場合には、地盤材料からの溶出水が流出しないよう、対策を検討する必要がある。

(7) 塩化物含有量

塩化物含有量の分布を図-13に示す。塩化物含有量の要求品質である1.0 mg/gを超過した試料は、全体で35/40検体であり、グラフ表示外では大槌地区で6.6 mg/gが1検体、大船渡地区で5.1 mg/gの2検体、陸前高田地区で7.4 mg/gの1検体 (計4検体、全て分別土A種) がそれぞれ存在した。種類別には分別土A種の超過率が最も高く、13.8%と処理を経ても海水由来の塩分が残存していたことが伺える。地区別では、久慈地区で3検体 (A種2検体、B種1検体)、宮古地区で16検体 (A種14検体、土砂混合くず2検体)、山田地区で1検体 (ふるい下くず)、大槌地区で5検体 (A種4検体、ふるい下くず1検体)、大船渡地区で3検体 (A種2検体、ふるい下くず1検体)、陸前高田地区で6検体 (A種) であった。釜石地区の塩化物含有量は、他地区と比べ平均値、ばらつきともに小さいが、これは強熱減量と同様に、鉄鋼スラグそのものの塩化物含有量が低く、粒子密度が大きいためと考えられる。

塩化物含有量の要求品質は、鋼材の腐食を防止するための基準であるが、被災地沿岸部を含めた海岸近傍の地

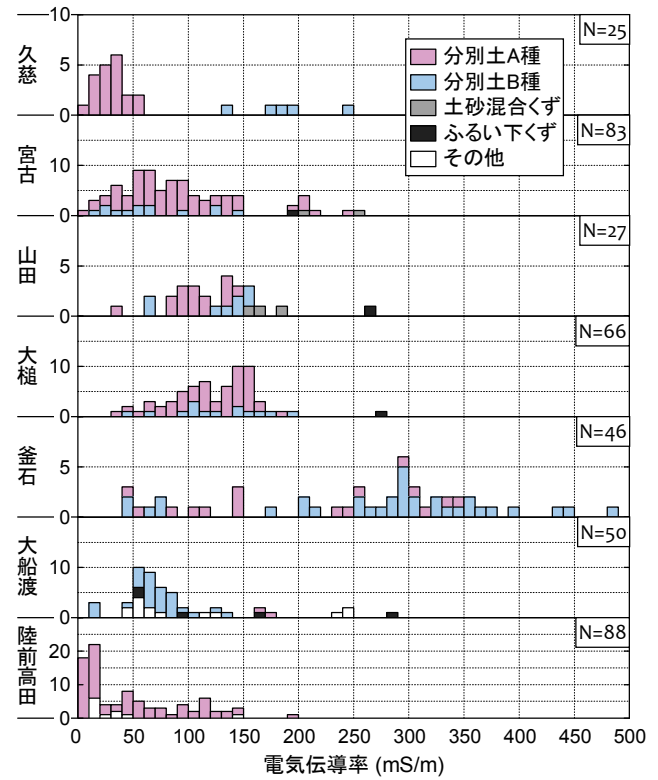


図-14 電気伝導率の地区別ヒストグラム

表-6 分別土砂の一般的な特性

土粒子密度：2.6~2.8 g/cm ³	強熱減量：< 10%
細粒分含有率：10~40%	pH：7~9
ユーン指数：200~10000 kN/m ²	塩化物含有量：< 1.0 mg/g
液・塑性限界：NP	電気伝導率：< 200 mS/m

域では従来から塩化物含有量が高かったと考えられる。そのため復興資材活用マニュアルでも、海岸近くでの活用、埋設物や植生を伴わない場所での活用が明確な場合にはこの規定を適用しないことが記載されている。

(8) 電気伝導率

電気伝導率の分布を図-14に示す。電気伝導率は懸濁液中の電解質濃度の指標であるため、地区に関わらず要求品質の200 mS/mを概ね満足していること、久慈地区、陸前高田地区は他地区と比べ低い値を示していることなど塩化物含有量と同様の傾向が釜石地区を除いて確認される。釜石地区では、塩化物含有量が相対的に低いにも関わらず、高い電気伝導率を示した。これは、鉄鋼スラグが水と反応することで、主要な構成要素である酸化カルシウムや酸化マグネシウムが溶解したためであると考えられ、高pHを示した結果とも整合性がある。

(9) 材料特性の一般化

以上の結果をまとめると、表-6に示すとおり、破碎と

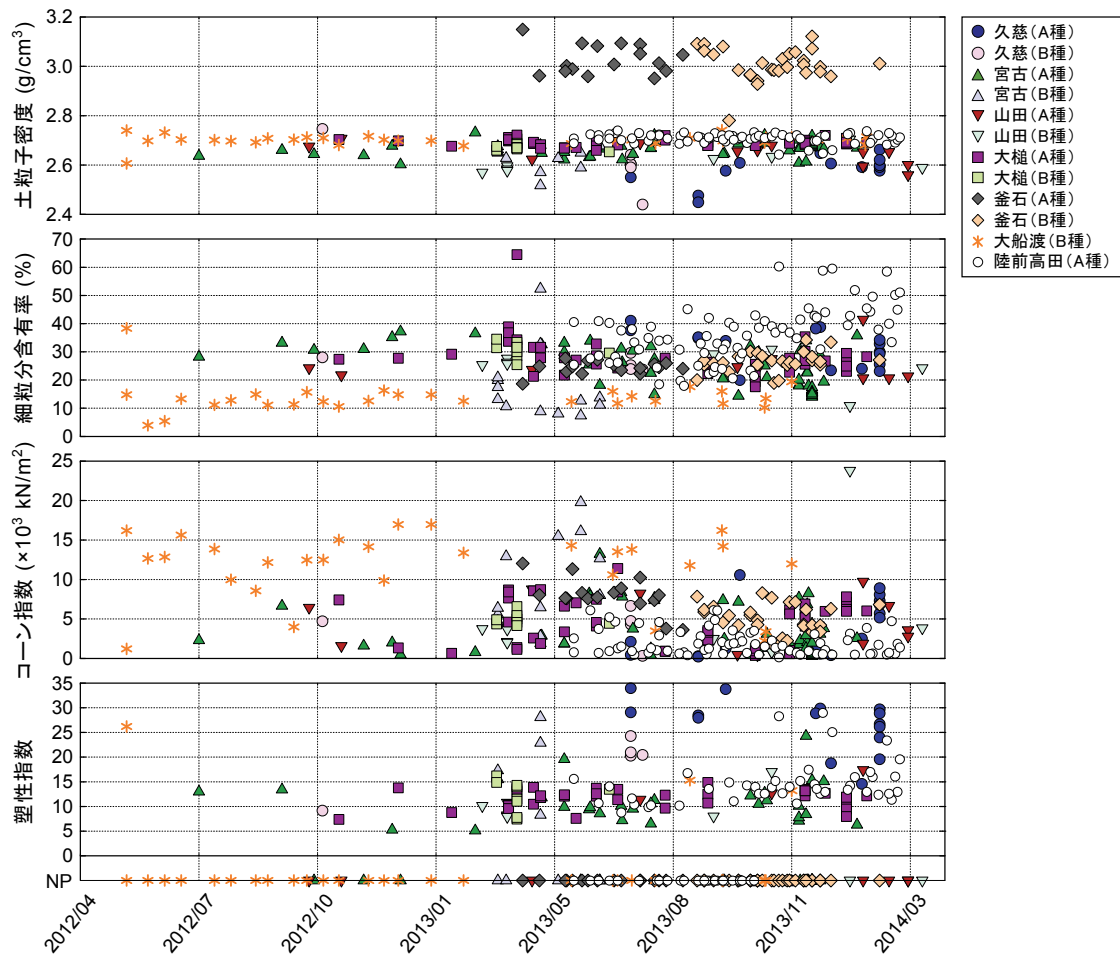


図-15 物理特性の経時変化

分別のみの標準的な災害廃棄物処理を行った一般4地区の試料の物理化学特性を一般化できる。一般的な土質材料と比較すると、塩化物含有量と電気伝導率は海水の影響を受け若干高くなるものの、多くの試料が品質基準を満足しており、鋼材を利用する場合には既存の防食技術を併用すれば塩分による腐食の影響を軽減しうると言える。物理特性の観点からは、分別土砂は一般的な土質材料と同等の土粒子密度を有しており、液・塑性限界はNPを示すものが多い。また砂分主体で高いコーン指数を有しているため、地盤材料として十分に再資源化が可能と判断できる。

5. 経時変化

以下では、処理物のうち分別土A種とB種に着目し、各特性の経時変化を精査した。横軸に示す日時は試料採取日であるが、試料採取日の記載が無い171/346検体は、試験実施日を用いて補完した。なお、多くの試料で試験実施日は試料採取日の約20日後である。大船渡地区の分別土A種は、試料採取日、試験実施日ともに未記載であっ

ため除外した。

(1) 物理特性

物理特性の経時変化を図-15に示す。宮古地区の分別土A種、大船渡地区の分別土B種は2012年度初旬からデータが存在するが、他の地区では2013年度に集中して分別土砂が排出、分析されたことが伺える。

土粒子密度は、前述のとおり釜石地区の分別土が3.0 g/cm³程度の高い値で推移した。一般4地区では、ほぼ同程度であるが、僅かに減少傾向を示した。

細粒分含有率は、大船渡地区の分別土B種が期間を通して相対的に低く、陸前高田地区の分別土A種は処理後半になるほど高い値を示した。一般4地区では、時間の経過とともに細粒分含有率は低下する傾向にあり、特に宮古地区の分別土A種は処理期間の前半と後半で細粒分含有率は10%程度低かった。

コーン指数は、大船渡地区の分別土B種はコンクリートがらを混合しているため、初期から高い値を示している。一般4地区では、期間を通してばらつきが大きい。

塑性指数は、4章で述べたとおりNPと算出される試料が全期間で多い。陸前高田地区の分別土A種は、2013年

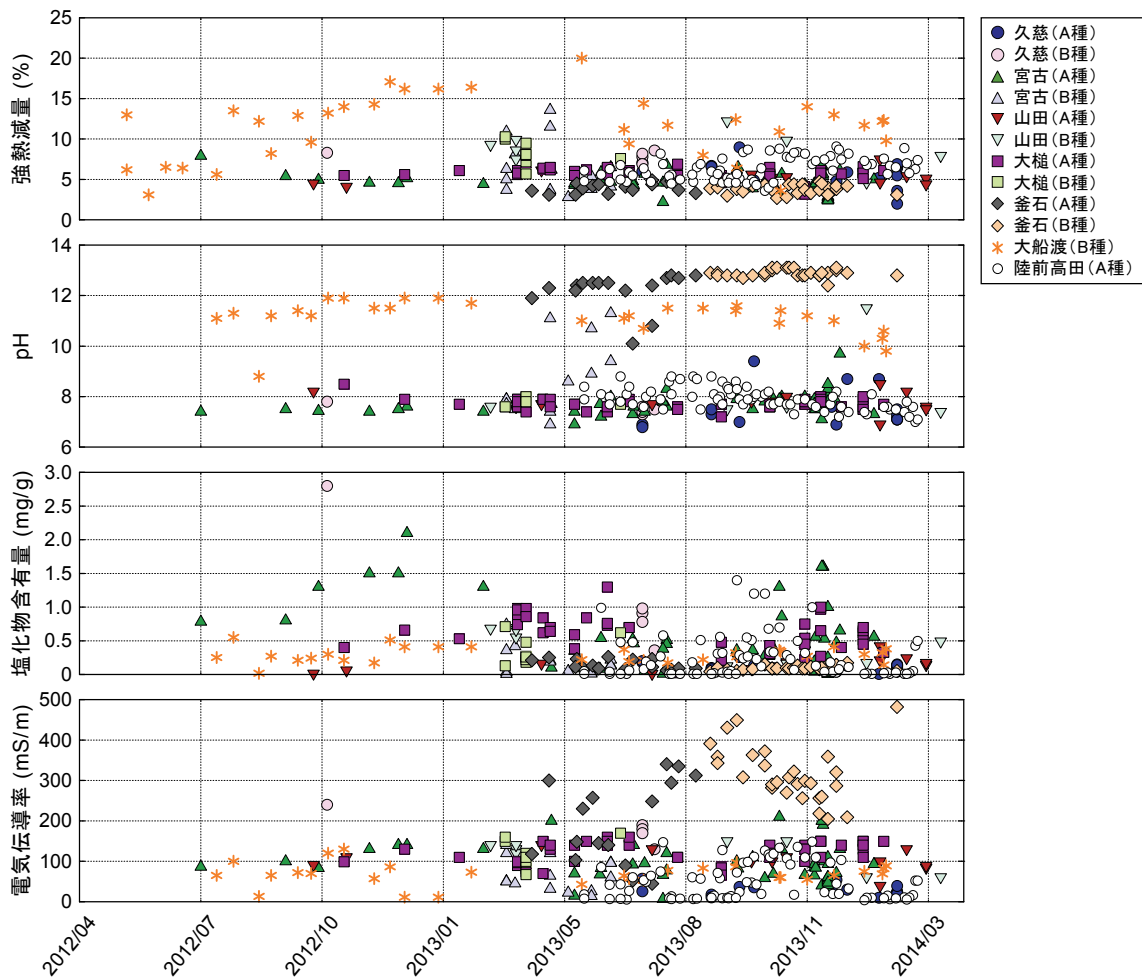


図-16 化学特性の経時変化

度前半にNPの試料が多いものの、その他の地域では明確な傾向は確認されなかった。

(2) 化学特性

化学特性の経時変化を図-16に示す。大船渡地区の分別土B種の強熱減量は、混合したコンクリートがらの影響で期間を通して相対的に高いが、2012年度後半に15%を超える値まで増加し、その後低下する傾向にあることが伺える。陸前高田地区の細粒分含有率は、時間の経過とともに漸増傾向を示したが、細粒分に含まれる吸着水の量も増えるため、強熱減量も増加傾向を示したと考えられる。一般4地区では、期間を通してほぼ同等の強熱減量を示しており、大きな変動は見られない。細粒分含有率は経時的に低下しており、細粒分由来の吸着水が時間とともに減少した可能性を考慮すれば、木片由来の有機物量が経時変化に対して比例的に増加していた可能性も示唆されるが、有機炭素量等のデータが無いため確定的に判断することは難しい。

大船渡地区の高い強熱減量は、混合したコンクリートがらに由来すると考えられるが、含有される酸化カルシウムはpHにも同様に影響を与える。このことを考慮する

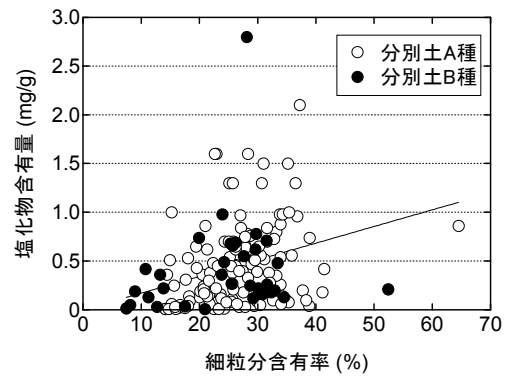


図-17 細粒分含有率と塩化物含有量の関係

と、大船渡地区の分別土B種で、強熱減量とpHが同様の変動傾向を示したことは整合性がある。釜石地区の分別土のpHは漸増傾向を示しているが、一般4地区の分別土のpHは期間を通してほぼ一定であった。

塩化物含有量は、要求品質の1.0 mg/gを超える試料は2012年度に相対的に多く、全体的には処理期間後半にかけて低下傾向にあることが伺える。同様の傾向は、一般4地区にも見られる。図-17は、一般4地区の細粒分含有率と塩化物含有量の関係を示したものであるが、細粒分主

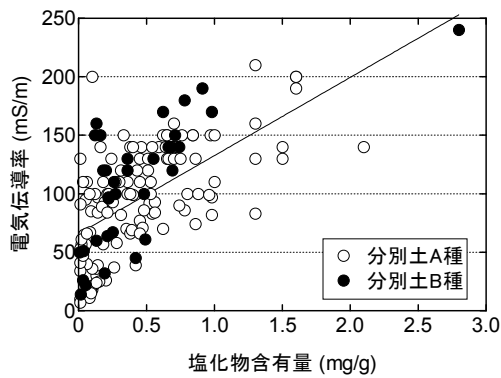


図-18 塩化物含有量と電気伝導率の関係

体の津波堆積物の方が砂分主体のものより塩化物含有量が高いことを示した既往の研究結果⁹⁾を踏まえると、塩化物含有量が高いものは細粒分含有率も高い結果は、妥当であると言える。

4章で述べたとおり、釜石地区の処理物は鉄鋼スラグ由来のカチオンが溶脱し、高い電気伝導率を示しており、分別土B種では時間とともに値が減少している。一般4地区では、塩化物含有量と同様に漸減傾向を示している。

図-18は、一般4地区の塩化物含有量と電気伝導率の関係を示したものである。海水に含まれる塩化物イオン以外のイオン種の影響を受け、塩化物含有量が低い範囲でもある程度の電気伝導率を有しているものの、分別土を対象とした場合においても両者の間には正の相関があることが分かる。

これらの結果から、添加材を用いて改質を行った釜石地区、大船渡地区の分別土砂は、一般4地区の分別土砂と比較すると期間を通してばらつきが相対的に小さく、比較的安定した材料品質の分別土砂が排出されていたことが分かる。一般4地区の分別土砂については、細粒分含有率、塩化物含有量、電気伝導率が僅かな減少傾向を示したものの、期間を通して著しい変動はないことから、処理時期に関わらず地盤材料として利用可能と言える。

6. 結論

本研究では、岩手県で発生した分別土砂を対象とし、計404件の計量証明書に基づき、地盤材料特性の空間的なばらつきと経時変化を評価した。その結果、以下に示す成果が得られた。

- (1) 改質の有無や処理地区の違いに関わらず、分別土は高いコーン指数と良い粒度を有する。分別土A種の6.5%、分別土B種の38.0%が第1種建設発生土に相当し、分別土A種の72.3%、分別土B種の59.3%が第2種建設発生土相当する。化学特性の観点からは、一般4地区の86.9%の分別土砂が要求品質を満足する。

- (2) コンクリートがらの添加は、粒度の改善とコーン指数の増加に寄与する。一方、コンクリートがらに含まれるセメント水和物の分解により、強熱減量が高くなるとともに、pHは10~14のアルカリ性を示す。鉄鋼スラグの添加は強度増加には寄与せず、構成要素である酸化物の溶解により、pHと電気伝導率が上昇する。
- (3) 鉄鋼スラグの添加により分別土の粒子密度が増加すると、質量換算で算出される強熱減量、塩化物含有量等の値は小さく評価される。また、現行の強熱減量試験法では、分別土に残存する有機物量の同定手法として適当ではなく、分別土の特性を考慮した測定方法を確立する必要がある。
- (4) 一般的な処理を行った久慈、宮古、山田、大槌の4地区では、時間の経過とともに分別土A種およびB種の土粒子密度、細粒分含有率、塩化物含有量、電気伝導率は減少していた。コーン指数、強熱減量、pHについては、処理の経過との明確な相関は見られない。

謝辞：本研究の実施にあたり、環境省環境研究総合推進費(3K133003)を受けるとともに、松本 実氏をはじめとする岩手県環境生活部の各位、大塚義一氏((株)奥村組)、山根華織氏(元京都大学大学院生)の関係各位にご助力頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Inui, T., Yasutaka, T., Endo, K. and Katsumi, T.: Geo-environmental issues induced by the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake and tsunami, *Soils and Foundations*, Vol.52, Issue 5, pp.856-871, 2012.
- 2) 環境省：東日本大震災に係る災害廃棄物の処理指針(マスタープラン), 2011.
- 3) 環境省：東日本大震災津波堆積物処理指針, 2011.
- 4) 鶴房佑樹, 森口祐一, 中谷隼：東日本大震災における沿岸市町村の災害廃棄物の発生量・処理量の比較分析, 土木学会論文集 G(環境), Vol.70, No.6, pp.II_23-II_32, 2014.
- 5) 環境省：東日本大震災からの復旧復興のための公共工事における災害廃棄物由来の再生資材の活用について(通知), 2012.
- 6) 国土交通省：東日本大震災からの復興に係る公園緑地整備に関する技術的指針, 2012.
- 7) 国土交通省：迅速な復旧・復興に資する再生資材の宅地造成盛土への活用に向けた基本的考え方, 2012.
- 8) 林野庁：海岸防災林造成に当たっての災害廃棄物由来の再生資材の取り扱いについて(事務連絡), 2012.
- 9) 高井敦史, 保高徹生, 遠藤和人, 勝見 武, 東日本大震災対応調査研究委員会地盤環境研究委員会：東日本大震災における津波堆積物の分布特性と物理化学特性, 地盤工学ジャーナル, Vol.8, No.3, pp.391-402, 2013.
- 10) 大河原正文, 大塚義一, 阪本廣行, 高井敦史, 今西 肇,

- 遠藤和人, 大嶺 聖, 風間基樹, 加藤雅彦, 小竹 望, 珠玖隆行, 鈴木弘明, 中川雅夫, 中野正樹, 西村伸一, 藤川拓朗, 松山祐介, 山中 稔, 勝見 武: 災害廃棄物処理過程で発生する分別土砂の特性評価, 第 10 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp.355-360, 2013.
- 11) 川辺能成, 原 淳子, 保高徹生, 坂本靖英, 張 銘, 駒井 武: 東日本大震災における津波堆積物中の重金属類とそのリスク, 土木学会論文集 G(環境), Vol.68, No.3, pp.195-202, 2012.
 - 12) 太田綾子, 海野 円, 宇野浩樹, 石井裕泰, 根岸昌範, 高畑 陽: 気仙沼市の災害廃棄物処理における改質材および不溶化材による津波堆積物の再資源化, 第 11 回地盤改良シンポジウム論文集, 日本材料学会, pp.79-86, 2014.
 - 13) 勝見 武: 災害によって生じた地盤環境課題への対応と復興事業との調和, 基礎工, Vol.43, No.9, pp.3-6, 2015.
 - 14) 岩手県: 岩手県復興資材活用マニュアル(改訂版), <http://www.pref.iwate.jp/view.rbz?nd=4406&of=1&ik=1&pnp=4406&cd=43951> (2015年2月10日閲覧), 2013.
 - 15) Nonoyama, H., Nakano, M., Araki, T. and Hamajima, K.: Mechanical behaviour of soil-wood chip mixtures generated from earthquake waste, *Proceedings of the 7th International Congress on Environmental Geotechnics*, A. Bouazza, S. T. S. Yuen, B. Brown (eds.), Engineers Australia, pp.525-532, 2014.
 - 16) Takai, A., Uddin, M. N., Inui, T. and Katsumi, T.: Mechanical properties of geomaterial recovered from disaster debris after the 2011 earthquake, *Proceedings of the 7th International Congress on Environmental Geotechnics*, S. T. S. Yuen, B. Brown (eds.), Engineers Australia, pp.1602-1609, 2014.
 - 17) 環境省: 放射能濃度等測定方法ガイドライン(第1版), 2011.
 - 18) 地盤工学会: 災害廃棄物から再生された復興資材の有効活用ガイドライン, 2014.
 - 19) 山際勝治, 宮城英徳, 八村幸一, 佐藤靖彦, 小嶋平三, 大塚義一: 災害廃棄物の対応の状況, 地盤工学会誌, Vol.61, No.2, pp.8-11, 2013.
 - 20) 中川雅夫, 赤司有三, 聖生守雄, 平嶋裕, 飯室賢一朗, 平石耕一: カルスピン工法によるがれき混じり津波堆積土の利用技術, 第 10 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp.377-384, 2013.
 - 21) 小針美和: 岩手県津波被災地における農業復旧・復興の現状と課題, 農林金融, 2016年3月号, pp.17-31, 2016.
 - 22) 国土交通省: 発生日利用基準について, 2006.
 - 23) 高井敦史, 森田康平, 勝見 武, Uddin, M. N., 山根華織, 乾 徹: 災害廃棄物分別土の材料特性に及ぼす木片混入量・木片寸法の影響, 第 11 回地盤改良シンポジウム論文集, 日本材料学会, pp.67-70, 2014.

(2015. 12. 28 受付)

QUALITY AND ITS VARIATION OF SOILS RECOVERED FROM DISASTER DEBRIS IN IWATE PREFECTURE AFTER THE 2011 EAST JAPAN EARTHQUAKE

Atsushi TAKAI, Mitsuhiro KAWASHIMA, Takeshi KATSUMI, Toru INUI,
Shin-ichi IWASHITA and Masafumi OKAWARA

Utilization of soil fractions recovered from disaster debris as geomaterials was strongly desirable after the 2011 East Japan earthquake and tsunami because the soil fraction accounted for a third of the approximately 30 million-ton disaster debris and tsunami deposits. Because the quality of recovered soils varied according to treatment systems at each site as well as the characteristics of original seabed sediments, clarification of material properties of recovered soils is important for future catastrophes. In this research, a total of 404 data, which were archived in Iwate Prefecture, were analyzed to verify particularly the following two issues: 1) the properties of the recovered materials as geomaterial and their relationships with treatment methods, and 2) variation in the quality with treatment progress. A series of analysis indicated that the soil fractions recovered from disaster debris mostly satisfy requirements for utilization as geomaterials and have quality equivalent to general geomaterials, regardless of treatment progress. Some of the chemical and physical properties are significantly affected by additive materials, such as crushed concrete and a steel slag-based material, applied for the purpose of improvement.