

除染による除去土を海面処分場に埋立処分したときの費用に関する検討

A Study on Disposal Cost of Removed Soil Generated by Decontamination
in Coastal Disposal Facility栗原 大 Ooki KURIHARA (広島大学大学院工学研究科)
土田 孝 Takashi TSUCHIDA (広島大学大学院工学研究科)

福島県内の除染作業に伴って発生した除去土は中間貯蔵開始後 30 年以内に最終処分を行うことが決まっているが、最終処分の方法や費用は不明である。本研究では、除去土を海面処分場に最終処分したときの費用について、海面処分場の構造や施工、除去土の輸送方法や輸送距離、埋立方法等の条件を仮定して、試算を行った。試算した費用は 4,776 億～5,492 億円となり、処分容量 1m³あたりの費用は中間貯蔵にかかる費用の試算や既存の海面処分場、埋立事業と同程度の費用となった。また、運搬距離 5～180km のとき、除去土の陸上の輸送単価は海上の輸送単価と比べて 3.5～4.7 倍高くなり、輸送費用と建設費用を総合的に考慮した最終処分方法の検討が必要であるといえる。

キーワード：放射線災害、埋立、廃棄物処分場、建設マネジメント

(IGC : H11, H03, K12)

1. はじめに

2011 年の福島第一原子力発電所事故後、除染作業に伴って発生した除去土や廃棄物は、福島県の各市町村に多数設置された仮置場で保管され、現在福島県の大熊町及び双葉町にある中間貯蔵施設に搬入が行われている。福島県内の除染により発生した除去土等の発生量は、2016 年 1 月時点で 8,000Bq/kg 以下の土が約 1,000 万 m³、8,000Bq/kg 超 10 万 Bq/kg 以下の土が約 1,000 万 m³、10 万 Bq/kg 超の土が 1 万 m³、焼却灰が約 160 万 m³と推定されている¹⁾。これらの除去土等は中間貯蔵開始後 30 年以内に最終処分を行うことが決まっており、最終処分に向けた減容化や再生利用の実証事業が行われているが²⁾、最終処分の方法についての具体的な検討はまだ行われていない。

これまで筆者らは、除去土等の最終処分方法の選択肢の一つとして、海面処分場を用いた最終処分について研究を行ってきた。海面処分場は、陸上の処分場と比べて一箇所で大きな処分容量を確保できる利点があり、過去の関東大震災や阪神・淡路大震災などの震災においても災害廃棄物の処分に利用されている³⁾。海面処分場はその立地条件から人々の生活空間と一定の距離を確保できるという利点があるが、一方で処分された除去土や廃棄物に含まれる放射性セシウムが土中水を通じて外海へ浸出ことを防止する遮水工がきわめて重要になる。さらに遮水工は、地震力および波浪や津波等の沿岸域特有の大きな外力に対しても十分な安全性と遮水機能の維持が求められる。

奥田ら⁴⁾は、除去土等を対象とした海面処分場の護岸と遮水工の巨大地震に対する構造安全性と遮水機能の維持について検討している。海面処分場の護岸と遮水工は長期にわたり汚染水の流出を防止する機能を維持する必要が

あり、この間に発生する可能性があるレベル 2 相当の巨大地震時に対しても安全性と機能の維持が求められる。奥田ら⁴⁾は、重力式護岸と鋼管矢板二重締切り内に土質系遮水材を充填した遮水工による構造とし、両者の間に幅広の裏込めを設けて分離する護岸断面を提案し、遠心載荷模型実験、模型振動台実験、数値解析によって処分場の護岸と遮水矢板の性能について検討した。その結果、静的震度 0.25 として港湾の基準で設計した構造は、レベル 2 地震においても遮水工の変形が十分に小さく遮水機能を維持できるとしている。

村上ら⁵⁾や高橋ら⁶⁾は、除去土等が処分される海面処分場がよく締まった砂質地盤上に立地する場合を想定し、底面遮水工に用いる遮水地盤材料に関する検討を行った。砂地盤の立地を想定したのは、連続した粘土層が厚く堆積している箇所は大きな河川の河口など限定された場所であり、このような粘土地盤は一般に軟弱であるため、巨大地震に対する安全性を確保することが困難であることを考慮したものである。村上ら⁵⁾や高橋ら⁶⁾は、海面処分場の遮水工に用いる遮水地盤材料に必要な遮水性能とセシウム吸着性能を検討し、海成粘土にベントナイトやゼオライトを添加混合することによって必要性能を満足する遮水地盤材料を作成できることを報告した。

栗原ら⁷⁾は、砂質地盤上に立地する海面処分場の底面遮水工に用いる遮水地盤材料に乾燥質量比 2～4%程度のセメントを添加する「少量セメント添加」によって施工時に必要な強度を付与する方法について検討を行っている。遮水地盤材料による底面遮水では、処分場完成後に作用する外力による変形に対して十分に追従し遮水性能を維持すると同時に、底面遮水工施工後の保護土層の施工やその後の廃棄物の投入に対してすべりを発生させない程度のせ

ん断力を有することが求められる。栗原ら⁷⁾は、少量セメント添加粘土の強度発現特性、透水特性、大変形後の透水特性の変化について検討し、少量セメント添加によって施工上必要な強度を付与でき、せん断変形により遮水性能の低下がみられないことを報告している。

本研究では、これらの研究に基づき、除染に伴って発生した除去土を海面処分場に処分したときの建設および処分に要する費用について検討を行った。現在、中間貯蔵される除去土の最終処分方法の検討は行われていないが、費用の観点から検討することは、今後必要となる検討を行う上で有意義な情報になると考えられる。

福島第一原発による放射線災害について、Yasutakaら⁸⁾は、福島県内における表土剥ぎ取り等による除染作業、除去土の仮置場、輸送と中間貯蔵施設での保管の費用を試算して発表した。表-1に試算の概要、表-2にYasutakaらが試算で用いられた単価を示した。Yasutakaらによると政府の方針に沿ったシナリオでは除染作業から中間貯蔵までの総費用として約2兆円、そのうち輸送及び中間貯蔵にかかる費用は約5,700億円と試算されている。表-2中の不燃物貯蔵費用(30,000円/袋(0.9m³))は、中間貯蔵施設内の土壌貯蔵施設の構造が管理型最終処分場の構造と類似していることから、低濃度・非溶出性物質対応型の既存の管理型最終処分場の残土受入単価が採用されている。また、別のシナリオとして、森林を除染する場合を設定し費用と効果についても論じているが、費用は約16兆円とみつもられている。これらは、復興事業の根幹である除染事業の有効な方策を検討する上で役に立つ情報であると考えられる。

政府の方針によると、中間貯蔵される除去土等は、中間貯蔵開始後30年後までに最終処分するとされているが、最終処分にかかる費用を具体的に試算した研究はこれまでに行われていない。本研究では、筆者らがこれまで検討してきた海面処分場による最終処分を想定し、海面処分場の建設費と中間貯蔵施設に貯蔵された除去土を海面処分場まで運搬し安全に処分するための費用の試算を行った。

2. 汚染された底質の浚渫・海面埋立の事例

本研究で想定した海面処分場による最終処分のように、これまでに有害物質で汚染された土が浚渫・海面埋立された例として、山口県徳山湾や熊本県水俣湾で水銀濃度の高い底質の浚渫・埋立が行われた事業がある。

徳山湾の事例^{9),10)}では、1952年から1972年まで苛性ソーダ(NaOH)の生産により2つのソーダ工場から徳山湾に水銀が排出された。総排出量は6.64トンと公表されている。徳山湾における底質除去基準値は15ppmと定められ、1975年7月から1977年3月まで図-1に示す汚泥の浚渫・埋立事業(処理面積:57万m², 処理土量:57万m³)が行われた。

水俣湾の事例^{10),11),12)}では、1932年から1968年までチッ

表-1 除染及び除去土等の中間貯蔵に要する費用 (Yasutakaら⁸⁾) (数値は原論文ママ)

	除染特別地域		汚染状況重点調査地域		合計	
	対象面積	除染面積	対象面積	除染面積	対象面積	除染面積
	1,117km ²	295km ²	7,836km ²	922~3,330km ²	8,953km ²	1,317~3,625km ²
沿環境省の方針に沿ったシナリオ	合計	1.33	0.7	2.03		
林除染シナリオ	合計	5.72	10.45	16.17		
除染	0.29	26%	0.41	59%	0.70	38%
フレキシブルコンテナ仮置き	0.11	9%	0.04	6%	0.15	8%
輸送・中間貯蔵	0.31	28%	0.1	14%	0.41	22%
輸送・中間貯蔵	0.43	37%	0.14	20%	0.57	31%
除染	1.22	21%	3.52	34%	4.74	29%
フレキシブルコンテナ仮置き	0.60	10%	1.15	11%	1.75	11%
輸送・中間貯蔵	1.80	32%	2.88	28%	4.68	29%
輸送・中間貯蔵	2.11	36%	2.90	28%	5.01	31%

(単位:兆円)

表-2 除去土等の輸送・保管に関する単価 (Yasutakaら⁸⁾)

項目	単価 (円/袋)	
	1袋:0.9m ³	(円/m ³)
保管容器	8,000	8,900
輸送1	3,100	3,400
除染場所→仮置場		
仮置場	20,000	22,200
輸送2	3,800-	4,200-
仮置場→中間貯蔵施設	16,000	17,800
中間貯蔵施設		
可燃物減容化	2,000	2,200
可燃物の焼却	100,000	111,100
残渣の貯蔵		
不燃物貯蔵	30,000	33,300

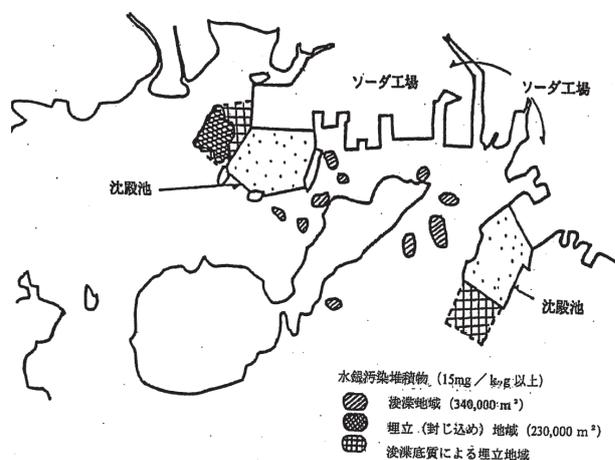


図-1 徳山湾の浚渫・埋立事業概要図¹⁰⁾

ソ(株)水俣工場でアセトアルデヒド製造の触媒として硫酸水銀が使われ、その過程で生成されるメチル水銀化合物が工場排水とともに水俣湾に排出された。37年間に排出された水銀量は70~150トンとされている。

水俣湾に堆積する水銀を含む底質を早急かつ安全に浚渫・埋立処分するため、水俣湾等堆積汚泥処理事業(処理面積:209万m², 処理汚泥量:151万m³)が1977年10月から1990年3月まで総事業費約485億円で実施された。なお、事業開始直後の1977年12月から1980年6月までの間は「水俣湾等ヘドロ浚渫工事差止仮処分申請」に基づ



写真-1 水俣湾奥部埋立地，浚渫区域¹²⁾

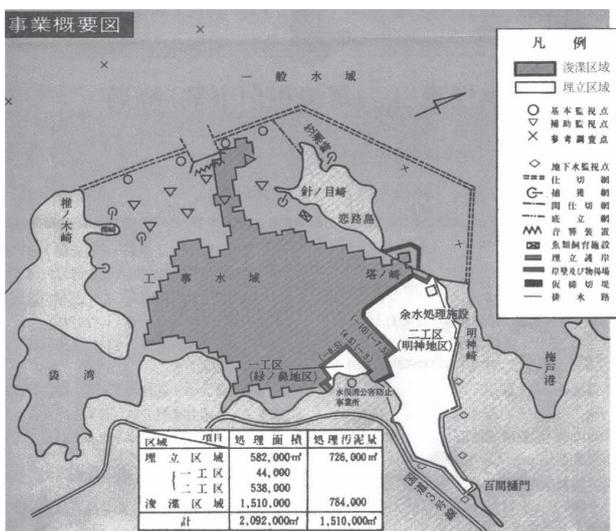


図-2 水俣湾奥部埋立区域，浚渫区域の概要図¹²⁾

く裁判により工事が中断しており，実質的な事業開始は1980年である。

水銀を含む底質をどの濃度まで除去するかについては，いずれも平均値として，魚介類の水銀許容濃度（総水銀0.4ppm，メチル水銀0.3ppm），魚介類の水銀濃縮係数（ 1×10^3 ），水銀の底質からの溶出率（ 1.6×10^{-4} ），海水中における水銀の拡散（潮位差で近似）及び安全率（100）が考慮され，これらの数値に基づき除去基準値（除去すべき底質水銀濃度）が25ppmと決定された。通常，人体に関わる環境汚染の問題では安全率10が設定されているが，濃縮や溶出・拡散などの不確実な要素や，大量の水銀による汚染を受けている実態と食習慣として多量の魚介類を摂取する状況にあることを考慮して，安全率100が設定された。

除去工法には，写真-1及び図-2に示すように，堆積汚泥の水銀濃度が高い（200～500ppm）湾奥部を埋立護岸で仕切り，比較的濃度が低い湾中央部の浚渫汚泥をその中に埋立処理する，一部浚渫・一部埋立方式が採用された。具体的には，湾内流による浮泥の拡散防止等のための仮締切堤の建設，浚渫汚泥を処分する埋立護岸の建設（地盤改良，鋼矢板セル，締切部の施工等），汚泥の浚渫埋立，埋立地

表-3 水俣湾等堆積汚泥処理事業の工種別事業費¹⁰⁾

工種	事業費 (百万円)	工種別事業費 の割合
仮締切堤	846	1.7%
埋立護岸	5,479	11.3%
浚渫・埋立	4,547	9.4%
余水処理施設	2,044	4.2%
中締切堤	391	0.8%
表面処理	2,129	4.4%
覆土	1,830	3.8%
明神船溜り	444	0.9%
緑鼻ふ頭地区	5,762	11.9%
明神ふ頭地区	5,643	11.6%
百間船溜り	1,473	3.0%
排水路	1,265	2.6%
測量試験費	2,688	5.5%
監視（仕切網）	4,821	9.9%
補償費	3,910	8.1%
営繕費他	720	1.5%
事務費	4,492	9.3%
計	48,483	100.0%

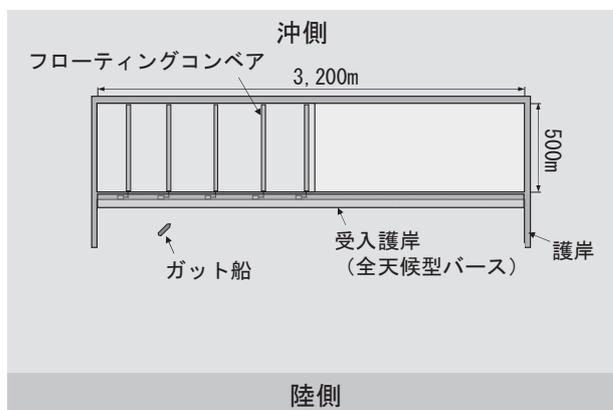


図-3 海面処分場の平面図

内の余水処理，埋立土砂の表層処理などが行われた。工種別の事業費は表-3に示すとおりである。埋立区域には層厚約10mの軟弱地盤が堆積していたことから，鋼矢板セル構造の安定を確保するためサンドコンパクションパイル工法とサンドドレーン工法による地盤改良が行われており，埋立護岸の事業費が総事業費に占める割合が高くなっている。

以上に示したように，汚染土壌の海面の埋立は大きな社会問題となっていた公害の対策と環境の修復に寄与してきた背景がある。しかし，徳山湾や水俣湾の事例は有害物質で汚染された沿岸の底泥を同じ沿岸で処分するものであるが，本研究で想定した除去土の海面処分場での埋立処分は，陸上で発生した除去土を沿岸で処分するものである。従って，本研究の海面処分場と他の事例を単純に比較することはできないが，最終処分方法を検討する上で処分に必要な費用は重要な要素の一つであると考えられることから，本研究では，海面処分場を用いた最終処分を除去土の最終処分方法の選択肢の一つと考え，海面処分場の建設と除去土の運搬に要する費用の検討を行い，他の事例との比較を行った。

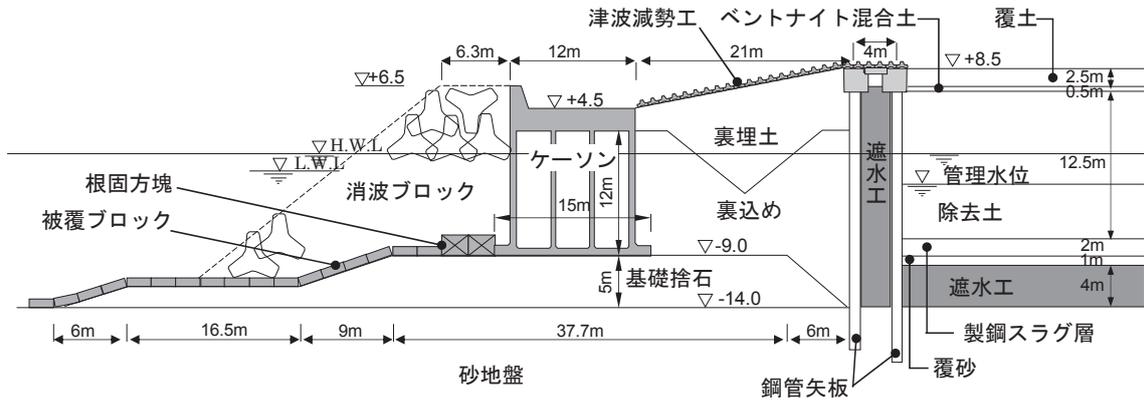


図-4 検討に用いた海面処分場の構造

3. 方法

海面最終処分場の護岸構造と遮水構造に求められる性能とその性能を満足すると考えられる構造については、奥田らの論文で検討されている。本研究では、護岸構造と基本的な遮水構造についてこれらに従って想定した。ただし、遮水地盤材料による遮水層の配合については筆者らの最近の研究成果を活用し、一部を修正して想定を行った。

3.1 処分対象とする除去土

本研究で想定した海面処分場に埋立可能な除去土は放射能濃度が 10 万 Bq/kg 以下の除去土とした。中間貯蔵開始 30 年後の 2045 年には、放射性セシウムの放射能濃度は事故当初の 4 分の 1 以下に自然減衰し、除去土等の総発生見込み量のうち約 7 割は 8,000 Bq/kg 以下に、約 3 割は 8,000 ~ 10 万 Bq/kg になると推定されている¹⁾。現在推計されている除去土の発生量は約 2,000 万 m³ であることから¹⁾、海面処分場の処分容量は 2,000 万 m³ とした。

3.2 海面処分場の構造

本研究で想定した海面処分場の平面図を図-3 に示す。海面処分場の面積は 160ha (3,200m×500m)、除去土層厚は 12.5m、除去土埋立容量は 2,000 万 m³ とした。奥田らは、沖合のよく締まった砂地盤でその海底面は T.P.-14.0m を想定し、重力式護岸の背後に剛性に優れた鋼管矢板二重締切り内に土質系遮水材を充填した側面遮水工を有する遮水護岸構造を考えた。また、大地震時の遮水構造の安全性を考慮し、重力式護岸と遮水矢板は幅広の裏込めをおこなって離隔を確保し、両者を構造上分離することで、護岸変形が遮水工に及ぼす影響を低減する断面構造とした。さらに、除去土の埋立時に余水処理を行わないように、あらかじめ処分場の海面を低下させておくことを想定し、遮水層の上にはカウンターウェイトとして覆土層を設置する。以上の海面処分場の護岸及び遮水構造を図-4 に示す。護岸工、遮水工、裏込め工、消波工の詳細は以下のとおりである。

(1) 護岸工

海面処分場の施工で多くの実績を持つ重力式護岸のケ

ースン (高さ 12m×幅 15m×奥行 20m) とし、前壁厚を 600mm として長期の耐久性を確保した。ケースン底面には摩擦増大マットを敷設して、動抵抗を増大させ、護岸の安定性と経済性を確保した。津波や高潮の越流による汚染物質の流出を防止するため、パラペット天端高は T.P.+6.50m に設定した。

(2) 遮水工

遮水工は除去土埋立て箇所の底面および側面に設ける。底面遮水工は埋立て箇所の直下に土質系遮水材を打設したものとし、層厚はトラベルタイムを考慮した 4m とした。側面遮水工は鋼管矢板 (φ 1,000mm) による二重締切り内部に土質系遮水材を充填し、埋立て箇所周囲に設置する。土質系遮水材は、海成粘土にベントナイト (透水係数の低減)、ゼオライト (セシウム吸着量の増加)、セメント (せん断強度の付与) を添加し、透水係数 $k=5.0 \times 10^{-10}(\text{m/s})$ 以下と十分なセシウム吸着特性を確保する配合とした⁵⁾。ここでは、代表的な遮水地盤材料の配合として以下を用いた。

遮水地盤材料 1m³ あたりの配合

粘土：原泥で 0.75m³ (液性限界 80% (平均)、自然含水比 80%の海成粘土を浚渫し、建設地点までガット船で運搬)

水：0.25m³

ベントナイト：50kg (ワイオミング産)

ゼオライト：50kg (国産)

セメント：15kg

埋立時には図-4 のように管理水位を設定して処分場内の水位を低下させる。このため、遮水地盤材料の上には覆土層 (製鋼スラグ 2.0m、砂層 1.0m) を施工する。

二重締切りの矢板壁離隔は 4m とし、矢板継手部は P-T 継手でグラウトジャケットによる止水処理する。

(3) 裏込め工

裏込め工は、港湾の施設の技術上の基準に従って崩壊角から定めた影響範囲に余裕代を見込み、幅を 21m とした。護岸工と遮水工を繋ぐタイ材は埋立てが完了すると構造上不要となるので、埋立て後にタイ材を切断して、護岸工と遮水工を構造上分離する。これにより、巨大地震により護岸工が変形した際の遮水工への影響を低減した。

(4) 消波工

レベル 1 およびレベル 2 津波時に覆土の被災による汚染物質の流出を防止するため、裏込め層地表面に津波減勢工(エクスブロック 0.5t 突起型)を設置する。長期にわたる波浪や衝突物によるケーソンの損傷を防止するため、消波ブロック(50t 型)を護岸前面に設置する。

3.3 海面処分場の施工

施工のフローとしては、以下のような工程を想定する。

(a) 防波堤(重力式ケーソン)の構築

海面処分場の外郭を構成する防波堤を構築する。防波堤の構造は図-5 に示すように、わが国で一般的に採用されている混成堤である。施工手順は以下になる。

- ① ケーソンの製作
- ② 捨石マウンドの設置
- ③ ケーソンの据え付け
- ④ 上部工の設置
- ⑤ 裏込め石の設置
- ⑥ 消波ブロックの設置

(b) 遮水壁の構築

防波堤の背後に側方遮水壁を構築する。遮水壁は鋼管矢板構造で防波堤のケーソンとタイ材で結合する。その後、底面遮水工を行う。施工手順は以下になる。

- ① A 列(外側)鋼管矢板の打設
- ② タイ材を A 列矢板とケーソン頭部間に設置
- ③ 裏込め材を設置(ここまで図-6)
- ④ B 列(内側)鋼管矢板を打設
- ⑤ A 列矢板と B 列矢板にタイ材を設置
- ⑥ 矢板の間に側壁遮水地盤材料を打設
- ⑦ 海底面に遮水地盤材料を打設
- ⑧ シートおよび覆砂を施工(ここまで図-7)

(c) 処分場における除去土埋立て

遮水工が完成した後、管理水位を決定し管理水位まで処分場内の水位を下げる。この状態で除去土の埋立を実施する。埋立が終了した後に、表面遮水工、覆土盛土、舗装工を施工する。

- ① 管理水位の調整
- ② 除去土埋め立て
- ③ 表面遮水工の設置(ここまで図-8)
- ④ 覆土盛土
- ⑤ 路盤表面舗装

3.4 除去土の輸送・埋立方法

以下に、輸送・埋立方法を示す。

(1) 除去土集積

仮置場から中間貯蔵施設に輸送された除去土等の入ったフレキシブルコンテナは破碎処理され、フレキシブルコンテナ残渣や草木・根等の分別が行われた後、分別された除去土が中間貯蔵施設内の土壌貯蔵施設に埋立されている¹³⁾。この除去土をダンプトラックにより集積所に輸送する(図-9)。除去土に含まれる放射性物質の飛散を防止す

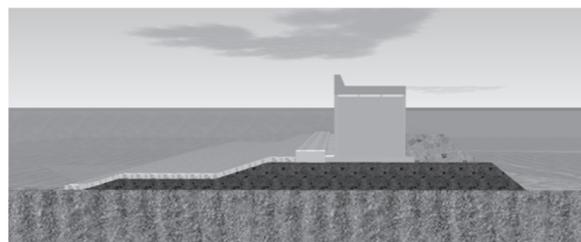


図-5 重力式護岸(建設中は防波堤の機能を有する)の施工

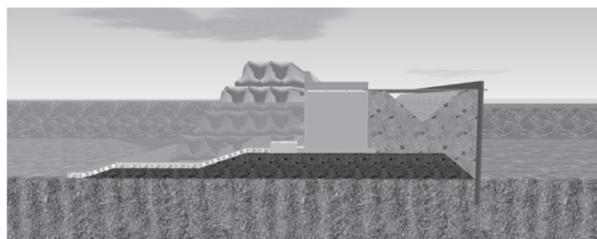


図-6 側面遮水のための鋼管矢板の打設と裏込め材の施工

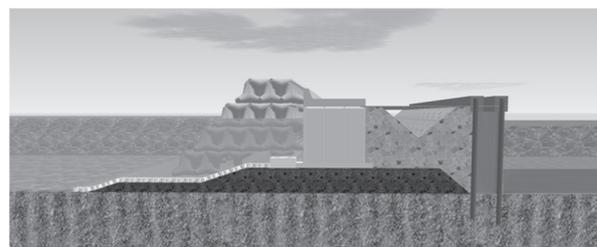


図-7 側面遮水壁の構築と底面遮水の施工

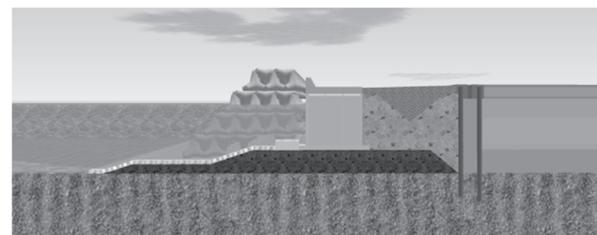


図-8 除去土の埋立と表面遮水工の施工海面処分場

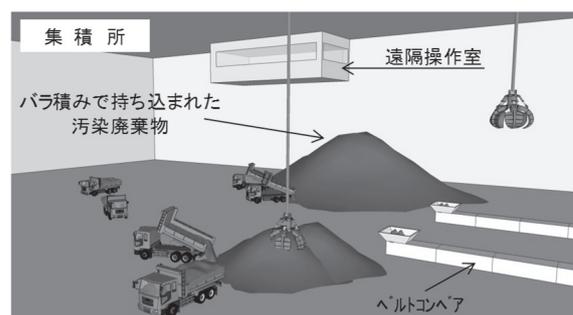


図-9 除去土集積所

るため、運搬中は荷台を飛散防止シート等で覆う。除去土はベルトコンベアにて積出し基地へ運ばれる。

(2) 除去土積載

集積所からベルトコンベアにて運ばれて来た除去土は積出し基地にてガット船に積載される(図-10)。積出し基地は風雨による除去土の飛散を防止するために、全天候型バースとする。除去土の積み出しには飛散防止シートを掛けたガット船を使用する。

表-4 浚渫土及び除去土の運搬費

運搬距離 (km)	作業時間 (h)				就業時間 (h)	1 航海あたり (千円)	運搬量 /1 航海 (m ³)	浚渫土 運搬費 (円/m ³)	除去土 運搬費 (円/m ³)
	積込	運搬	排出	帰港					
5	3.5	0.3	3.5	0.3	7.6	950	850	1,100	1,200
10	3.5	1.0	3.5	1.0	9.0	1,090	850	1,200	1,400
50	3.5	3.0	3.5	3.0	13.0	1,490	850	1,700	1,900
100	3.5	5.0	3.5	5.0	17.0	1,940	850	2,200	2,500
200	3.5	11.0	3.5	11.0	29.0	3,180	850	3,700	4,100

※ガット船 850m³積, 時速 18.5km/h を想定. 除去土運搬費は飛散防止シートによる密閉費を考慮し浚渫土運搬費の 1 割増として計算した.

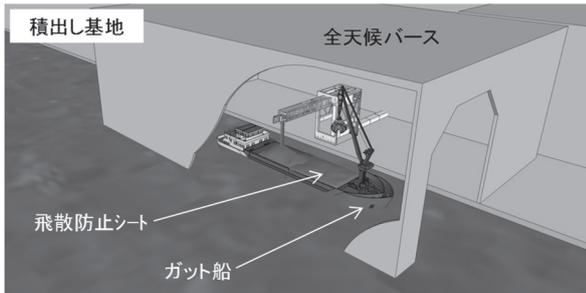


図-10 除去土積出し基地

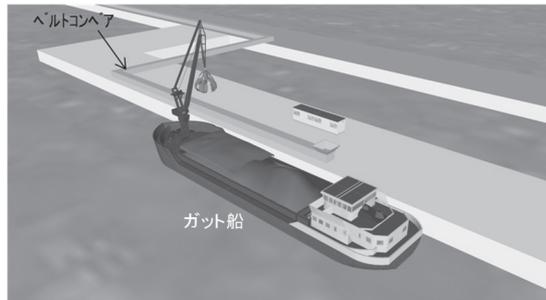


図-11 バラ積み除去土受入護岸

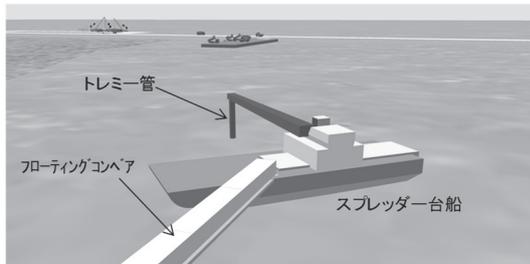


図-12 除去土投入状況

(3) 除去土揚陸

除去土は, 全天候型パースの受入護岸にてガット船搭載のグラブにより護岸上のベルトコンベアに荷降ろしされる (図-11). ベルトコンベアは投入箇所まで敷設されており, 風雨による除去土の飛散を防止するため, カバー付の構造とする. 受入護岸は 5 パース設置し, 一隻で 850m³ 運搬可能なガット船 10 隻を 1 日 1 回 (午前・午後一隻ずつ) 接岸すると仮定すると, 埋立土量は 8,500m³/日となる. したがって, 作業日数 2,353 日で 2,000 万 m³ の土を埋め立て処分することが可能である.

(4) 除去土投入

除去土の投入にはスプレッダー台船を使用し, トレミー管を用いた水中投入により投入時の除去土の大気中への

表-5 運搬費

名称	金額 (円/m ³)	数量 (m ³)
浚渫土運搬 (海上)	1,100~3,700	5,250,000
除去土運搬 (陸上)	3,000	20,000,000
除去土運搬 (海上)	1,200~4,100	20,000,000

飛散を防止することを原則とする (図-12). なお, 埋立箇所上はフローティングコンベアを使用する.

以上の除去土埋立て手順により, 除去土の大気および海中への飛散・流出の防止や作業員の被ばく防止を可能にする.

3.5 除去土及び浚渫土の運搬費用

遮水工に用いる浚渫土は, 海面処分場の設置場所から離れた箇所で浚渫を行い, 海面処分場の設置場所までガット船を用いて運搬することが考えられる. 浚渫箇所から海面処分場設置場所までの距離を仮定し運搬距離に応じた浚渫土運搬費の単価を表-4 に示した. 同様に, 積出し基地から海面処分場設置場所までのガット船を用いた除去土運搬費の単価も運搬距離を仮定して表-4 に示した. 除去土運搬費の単価は, 飛散防止シートによる密閉費を考慮するものとした. 密閉費は運搬距離には依らないと考えられるが, 運搬量が多く長期の使用に耐えられる密閉設備の設置に係る費用を考慮するため, 本試算では除去土運搬費の単価は, 浚渫土運搬費の単価の 1 割増とした. また, 中間貯蔵施設から集積所まで除去土を運搬する費用の単価は, 運搬距離 20km, 10 トンダンプトラックを想定し, 通常の土砂運搬単価に飛散防止シートによる密閉費として 1 割程度割増した 3,000 円/m³ とした. また, 遮水地盤材料 1m³ あたりの原泥 (浚渫土) の体積を 0.75m³ とし, 底面遮水工 640 万 m³ (3,200m×500m×4m), 側面遮水工 60 万 m³ (4m×20m×7,400m) の遮水地盤材料 700 万 m³ に必要な浚渫土を 525 万 m³ とした. 以上の運搬費の単価と数量をそれぞれ表-5 に示した.

3.6 海面処分場および積出し基地の建設費用

海面処分場の単位当たりの費用及び数量を表-6~表-9 に示す. 表-6 は積出し基地・受入護岸工事費, 表-7 は海面処分場護岸工事費, 表-8 は底面遮水工工事費, 表-9 は最終覆土工工事費を示す. 各項目の費用は, 土田¹⁴⁾の報告や建設会社への聞き取りに基づいて仮定した.

除染による除去土を海面処分場に埋立処分したときの費用に関する検討

表-6 積出し基地・受入護岸工事費

名称	金額 (千円)	数量
全天候型バース棧橋 (積出し基地)	500/m ²	10,000m ²
ベルトコンベア	1,000/m	1,000m
全天候型バース (受入護岸)	200/m ²	108,000m ²
陸上コンベア	370,000 /バース	5 バース
フローティング コンベア	3,000/m	2,500m

表-7 処分場護岸工事費

名称	金額 (千円/m)	備考	数量 (m)
重力式護岸工	7,625	地盤改良を含まず	7,800
側面遮水工	9,110	底面遮水工を含まず	7,400
海側鋼管矢板	(2,870)		
陸側鋼管矢板	(2,240)		
遮水地盤材料打設工	(4,000)		
消波工	3,076	海象条件による	7,800
中仕切り工	5,987	地盤改良を含まず	3,700
津波減勢工	223		7,400

表-8 底面遮水工工事費

名称	金額 (円/m ²)	数量 (m ²)
遮水地盤材料打設工	60,000	1,600,000
セメント添加	600	1,600,000
ベントナイト添加	12,000	1,600,000
ゼオライト添加	12,000	1,600,000
製鋼スラグ敷設工	12,000	1,600,000

表-9 最終覆土工工事費

名称	金額 (円/m ²)	数量 (m ²)
覆土工	12,000	1,600,000
ベントナイト添加	1,500	1,600,000

本研究では、遮水地盤材料に少量セメント添加を行い、せん断強度を付与することで遮水工にすべりが発生しないようにしたため、遮水工上の保護シート敷設工が不要となり、底面遮水工工事費のうち土田¹⁴⁾が報告していた保護シート敷設工 (11,800 円/m²) を省くことができた。

4. 結果

表-10 に海面処分場の建設・投入費 (浚渫土の運搬費を除く) と浚渫土および除去土の海面処分場までの運搬費の項目毎の金額を示した。浚渫土と除去土の運搬費は海面処分場までの距離 (ここでは 5km~200km とした) によって大きく異なってくるので、距離によらず計算できる建設・投入費の合計に対する比 (%) も表中に示している。また、費用としては、直接工事費と直接工事費の 3 割増とした概算工事費を示した。海上の運搬距離を 5~200km としたと

表-10 総工事費

名称	金額 (億円)	対建設・投入費計比
浚渫土運搬 (海上) 運搬距離 5km	58	1.5%
~200km	~194	~5.0%
除去土運搬 (陸上)	600	15.5%
除去土運搬 (海上) 運搬距離 5km	240	6.2%
~200km	~820	~21.1%
運搬費計		
(浚渫土及び除去土の運搬距離 5~200km)	898	23.2%
	~1,614	~41.6%
全天候型バース棧橋 (積出し基地)	50	1.3%
ベルトコンベア	10	0.3%
全天候型バース (受入護岸)	216	5.6%
陸上コンベア	19	0.5%
フローティングコンベア	75	1.9%
重力式護岸工	595	15.3%
側面遮水工	674	17.4%
消波工	240	6.2%
中仕切り工	222	5.7%
津波減勢工	17	0.4%
遮水地盤材料打設工	960	24.8%
セメント添加	10	0.2%
ベントナイト添加	192	5.0%
ゼオライト添加	192	5.0%
製鋼スラグ敷設工	192	5.0%
覆土工	192	5.0%
ベントナイト添加	24	0.6%
建設・投入費計		
(処分場の建設費と除去土の投入費、ただし浚渫土の運搬費は除く)	3,878	100.0%
建設・投入費(直接工事費)	3,878	19,400/m ³
概算建設・投入費(直工×1.3)	5,041	25,300/m ³
浚渫土運搬費を含む建設・投入費(直接工事費)	3,936	19,700/m ³
	~4,072	~20,400/m ³
浚渫土運搬費を含む概算建設・投入費(直工×1.3)	5,117	25,600/m ³
	~5,294	~26,500/m ³
除去土運搬費を加えた総処分費(直接工事費)	4,776	23,900/m ³
	~5,492	~27,500/m ³
除去土運搬費を加えた概算総処分費(直工×1.3)	6,209	31,100/m ³
	~7,140	~35,700/m ³

(処分容量 2,000 万 m³)

きの運搬費 (直接工事費) は 898 億~1,614 億円、建設・投入費 (直接工事費) は 3,878 億円となり、運搬費は建設・投入費の 23~42%であった。したがって、海面処分場の設置場所や浚渫粘土の入手箇所によって、総工事費は対建設費合計比約 19%、約 720 億円変わることがわかった。

建設・投入費と浚渫土運搬費を合わせた処分場の概算工事費は 5,117~5,294 億円 (処分容量 1m³ あたり 25,600~26,500 円) であり、Yasutaka ら⁸⁾が用いている低濃度・非溶出性物質対応型の既存の管理型最終処分場の残土受入単価に基づいて計算された 33,300 円/m³ (表-2) と比較して 7,700~6,800 円安かった。比較した既存の管理型最終処分場の廃棄物埋立容量は 90 万 m³ であるが、除去土の最終処分方法として海面処分場を用いた場合、2,000 万 m³ の処

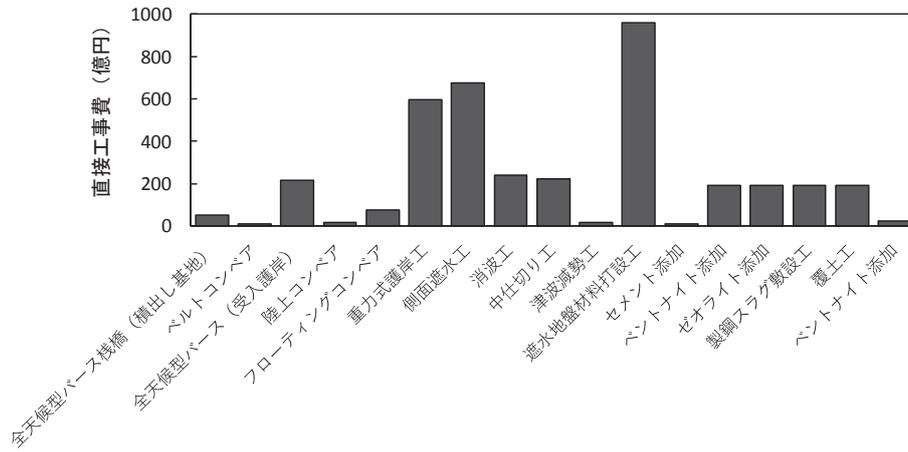


図-13 建設・投入費の項目別比較

分容量を1箇所確保し、かつ、1m³あたりの費用も安くなる可能性があることがわかった。

建設・投入費(浚渫土運搬費を含む)と除去土の処分場までの運搬費を合わせた総費用は、直接工事費で4,776億~5,492億円、概算工事費で6,209億~7,140億円となった。Yasutaka からは除去土の輸送と中間貯蔵に要する費用を5,700億円と試算しており(表-1)、除去土の最終処分方法として海面処分場を用いた場合、中間貯蔵と同規模の費用が必要となることがわかった。

図-13は建設・投入費(直接工事費)の項目別の比較である。図のようにもっとも大きな費用は遮水地盤材料の打設の費用960億円であり、次に側面遮水工の674億円、重力式護岸工595億円であった。底面遮水工と側面遮水工の合計は浚渫土運搬費用を除く建設・投入費の42.2%を占めており、これに遮水地盤材料の原料であり浚渫土の運搬費58億円~194億円を加えると、建設・投入費のほぼ半分が遮水構造を構築する費用である。

5. 考察

5.1 輸送費用の比較

図-14に浚渫土および除去土の1m³あたりの運搬費用と運搬距離の関係を示した。ガット船を用いた除去土の海上運搬費は1,200~4,100円/m³(運搬距離5~200km)、ダンプトラックを用いた除去土の陸上運搬費は3,000円(運搬距離20km)である(表-5)。一方、Yasutaka からは除去土運搬単価によると、計算対象の市町村の位置から輸送距離約5~180kmと考えられる仮置場から中間貯蔵施設までの輸送で約4,200~17,800円/m³であり(表-2)、海上の運搬費に比べて陸上の運搬費は3.5~4.7倍(運搬距離5~180km)高くなっている。

図-15に浚渫土および除去土の運搬費用を示した。Yasutaka からは単価を用いると、陸上の最終処分場への運搬や除去土の再生利用等により除去土2,000万m³をダンプトラックを用いて運搬した場合、840~3,560億円(運搬距離5~180km)の費用となる。これは、本研究で

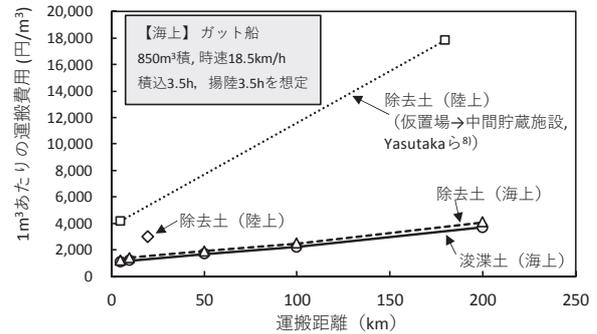


図-14 浚渫土および除去土の運搬費用(1m³あたり)

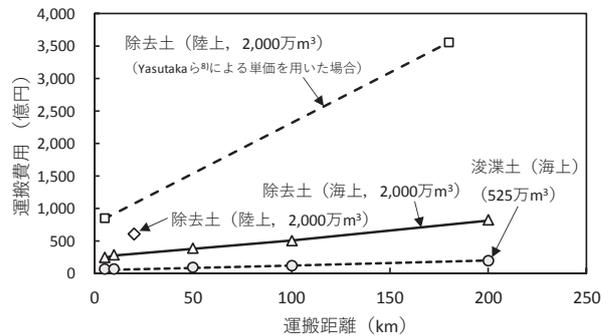


図-15 浚渫土および除去土の運搬費用

試算した除去土運搬費用(陸上+海上)840億~1,360億円の1~2.6倍必要となり、陸上での最終処分の場合、除去土運搬費用が占める割合が非常に大きくなると予想される。

5.2 処分費用の比較

本研究で提案した海面処分場による除去土の処分費用の妥当性を検討するため、表-11に種々の処分場や埋立事業毎の処分容量、事業費、処分容量1m³あたりの費用、図-16に処分容量1m³あたりの費用を示した。本研究で検討した海面処分場については、浚渫土運搬費を含む概算建設・投入費と、除去土運搬費を加えた概算総処分費について示した。また、比較のため、Yasutaka からは中間貯蔵施設の不燃物貯蔵費用の試算に用いた中間貯蔵施設内の土壌貯蔵施設の構造と類似した既存の低濃度・非溶出性物質

対応型の管理型最終処分場、水俣湾等堆積汚泥処理事業¹⁰⁾、広島港の出島処分場（管理型最終処分場）¹⁵⁾、東京港の新海面処分場（管理型・安定型最終処分場）¹⁶⁾を示した。

表-3 に示したように水俣湾等堆積汚泥処理事業の費用には約 30%を占める監視（仕切網）、補償費、営繕費、事務費等の建設・投入費以外の費用も含まれているが、直接工事費の 3 割増とした本研究の海面処分場の概算総処分費は、表-11 および図-16 から処分容量 1m³あたりの費用について比較すると、水俣湾等堆積汚泥処理事業と同程度の費用が必要であることがわかる。

また、管理型の海面処分場である出島処分場の整備事業費から求めた単価と比較すると、本研究の海面処分場の概算建設・投入費から求めた処分容量 1m³あたりの費用は、一般的な管理型の海面処分場と同程度である。

国内最大規模の処分容量をもつ東京港の新海面処分場は、浚渫土や建設発生土を A.P. (Arakawa Peil) +6.0m まで埋立後、廃棄物を A.P.+6.0m～A.P.+30.0m まで埋め立てる構造であるため、護岸延長に対して埋立容量が極めて大きく、護岸整備費から求めた処分容量 1m³あたりの費用が極端に安くなっている。本研究で行った除去土の最終処分のための海面処分場では、処分場の安定性に及ぼす影響から大規模な高盛土は想定しなかった。

以上のように、本研究で提案した海面処分場の処分容量 1m³あたりの費用は、比較した他の処分場や埋立事業と比べて同程度であり、妥当であるといえる。また、比較に用いた海面の処分場等は陸地に隣接して護岸を延長した事業であるが、本研究で提案した海面処分場は四周を護岸で囲むことを想定しており、埋立面積に対して護岸延長が比較的長くなっているが、処分容量 1m³あたりの費用は同程度であった。

5.3 浚渫土利用の実現可能性

本研究で想定した海面処分場では、遮水工の母材として浚渫した海成粘土 525 万 m³（浚渫土）を使用することとした。2016 年度の国内の浚渫土量は 1,055 万 m³、2017 年度は 781 万 m³であり¹⁷⁾、全国の年間浚渫土量の半分以上の浚渫土量が必要であることがわかった。また、これらの浚渫土量は砂と粘土を合わせた量であることを考慮すると、処分容量 2,000 万 m³の海面処分場に必要海成粘土の調達課題となると考えられる。一方で、船舶の大型化や航行船舶の安全確保のために航路の増深や拡幅などの浚渫が港湾整備において必要となっており、浚渫土を海面処分場の建設材料として有効利用することへの需要はあると考えられる。したがって、航路等の浚渫時期と海面処分場建設による浚渫土の受入時期が一致する必要があるものの、浚渫土利用の可能性はあると考えられる。

6. 結論

本研究では、これまで筆者らが行ってきた、除染に伴っ

表-11 処分にかかる費用の比較

	種別	容量 (万 m ³)	費用 (億円)	単価 (円/m ³)
本研究の海面処分場 (浚渫土運搬費を含む 概算建設・投入費)	海面	2,000	5,117 ~5,294	25,600 ~26,500
本研究の海面処分場 (除去土運搬費を加え た概算総処分費)	海面	2,000	6,209 ~7,140	31,100 ~35,700
既存の管理型最終処分 場(低濃度・非溶出性物 質対応型) ⁸⁾	陸上	90		33,300 (残土受 入単価)
水俣湾等堆積汚泥処理 事業 ¹⁰⁾	海面	151	485	32,000
出島処分場 ¹⁵⁾	海面	190	502	26,400
新海面処分場 ¹⁶⁾	海面	12,037	4,500 (護岸整 備費)	3,700

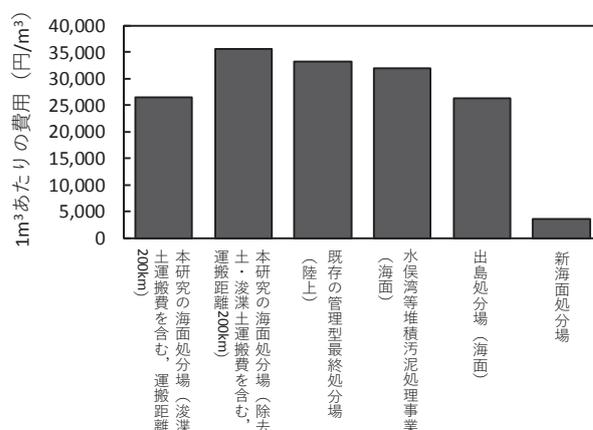


図-16 処分容量 1m³あたりの費用

て発生した除去土の最終処分を想定した海面処分場の護岸や遮水工の構造や遮水地盤材料の研究に基づき、除去土を海面処分場に処分したときの建設および処分に要する費用について検討を行った。

- (1) 除去土や遮水工に用いる浚渫土の海上の運搬距離を 5～200km としたとき、海面処分場の建設費と運搬費を合わせた直接工事費は 4,776 億～5,492 億円、概算工事費は 6,209 億～7,140 億円であった。Yasutaka ら⁸⁾は輸送と中間貯蔵施設にかかる費用を 5,700 億円と試算しており、海面処分場による除去土の最終処分には、中間貯蔵施設と同規模の費用が必要となることがわかった。
- (2) 処分容量 1m³あたりの建設費と浚渫土運搬費を合わせた概算工事費は 25,600～26,500 円となり、Yasutaka ら⁸⁾が試算に用いた既存の管理型最終処分場（処分容量 90 万 m³）の残土受入単価 33,300 円/m³と比較して 7,700～6,800 円安かった。除去土の最終処分に海面処分場を用いた場合、2,000 万 m³の処分容量を 1 箇所確保し、1m³あたりの工事費も安くできる可能性があることがわかった。
- (3) 除去土の海上運搬費と Yasutaka ら⁸⁾の試算による除去土の陸上運搬費の比較により、運搬距離 5～180km の

とき海上の運搬費に比べて陸上の運搬費は3.5~4.7倍高くなることがわかった。従って、輸送費用と建設費用を総合的に考慮した最終処分方法の検討が必要であるといえる。

- (4) 本研究で提案した海面処分場の処分容量 1m³あたりの費用は、他の処分場や埋立事業と同程度であり、試算した除去土の処分費用は概ね妥当であると考えられる。
- (5) 処分容量 2,000 万 m³ の海面処分場の遮水工及び最終覆土工に用いる海成粘土量として試算した 525 万 m³ は全国の年間浚渫土量の半分以上であり、海面処分場の建設に必要な海成粘土の調達が計画時の課題となると考えられる。

謝辞

本文は、平成 25 年度環境研究総合推進費補助金による研究事業「放射能で汚染された廃棄物を対象とした海面最終処分場に関する研究 (3K122109)」の成果の一部を、最近の研究結果と考察を加えてまとめたものである。五洋建設株式会社に多大な協力をいただいたことを記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 環境省：中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略，2016，
http://josen.env.go.jp/chukanchozou/facility/effort/investigative_commission/pdf/investigative_commission_text.pdf，(参照 2018.6.18)。
- 2) 環境省：中間貯蔵開始後 30 年以内に福島県外での最終処分を完了するための取組の進捗状況に関する報告，2018，
http://josen.env.go.jp/chukanchozou/action/pdf/report_180605.pdf，(参照 2018.6.18)。
- 3) 東京都港湾局：東京港の歴史，
<http://www.kouwan.metro.tokyo.jp/yakuwari/rekishi/>，(参照 2018.6.18)。
- 4) 奥田一弘，土田孝，渡部要一，上野一彦，金子崇，村上博紀：巨大地震に対して高い安全性を求められる海面処分場の護岸構造の提案，地盤工学ジャーナル，Vol.10, No.3, pp.343-358, 2015.
- 5) 村上博紀，土田孝，安部太紀，上野一彦，田中裕一：放射性セシウムを含む廃棄物等を対象とした海面処分場に用いる遮水地盤材料の研究，地盤工学ジャーナル，Vol.10, No.1, pp.17-32, 2015.
- 6) 高橋源貴，土田孝，村上博紀：海面処分場に用いる遮水地盤材料の吸着性能に関する研究，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol.71, No.2, pp.I_1071-I_1076, 2015.
- 7) 栗原大，高岡慶人，土田孝，白神拓也，岡村郁耶，熊谷隆宏：少量セメント添加粘土を用いた海面処分場用遮水地盤材料の透水特性，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol.74, No.2, pp.I_910-I_915, 2018.
- 8) Yasutaka, T., & Naito, W.: Assessing cost and effectiveness of radiation decontamination in Fukushima Prefecture, Japan, *Journal of environmental radioactivity*, Vol.151, pp.512-520, 2016.
- 9) 中西弘，浮田正夫：底泥および魚介類の水銀汚染に関する研究，衛生工学研究討論会講演論文集，Vol.13, pp.163-168, 1977.
- 10) 中山靖之：水俣湾環境復元事業におけるプロジェクトマネジメントと評価に関する研究，Diss.，東京大学，1999.
- 11) 広瀬宗一，山口晶敬：水俣湾公害防止対策事業，土木学会論文集，No.421, pp.233-242, 1990.
- 12) 中島重旗：水俣湾における環境復旧事業の経過，環境技術，Vol.31, No.11, pp.891-897, 2002.
- 13) 環境省：中間貯蔵施設環境安全委員会（第 10 回）資料，2018，
http://josen.env.go.jp/chukanchozou/action/safety_commission/pdf/safety_commission_01_180322.pdf，(参照 2018.6.18)。
- 14) 土田孝：放射能で汚染された廃棄物を対象とした海面最終処分場に関する研究，2014。
https://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/kadai/syuryo_report/h25/pdf/3K122109.pdf，(参照 2018.6.18)。
- 15) 広島県産業廃棄物対策課：出島廃棄物処分場の概要，
<https://www.pref.hiroshima.lg.jp/uploaded/attachment/173437.pdf>，(参照 2018.10.10)。
- 16) 東京都港湾局：新海面処分場パンフレット，
<http://www.kouwan.metro.tokyo.jp/shinkaimen.pdf>，(参照 2018.10.10)。
- 17) 日刊建設工業新聞：埋没協会員／17 年度埋立浚渫土量契約実績／国内 26%減，海外 32%増 [2018 年 6 月 22 日 2 面]，<http://www.decn.co.jp/?p=100419>，(参照 2018.6.23)。

(2018 年 6 月 25 日 受付)