

東日本大震災により発生した津波堆積物の
処理・処分に関する環境影響評価

平成 24 年 2 月 22 日

京都大学工学部地球工学科土木工学コース

奥野 直紀

要 旨

2011年3月11日午後2時46分、本州北東部の東方海域でM9.0の巨大地震が発生し、広い範囲が震度6以上の強震に襲われ、その後、沿岸部を大津波が繰り返し襲った。この苛烈な自然現象により、東日本の各地で地震によるライフラインや輸送ルート为社会基盤が被害を受けた。また、震災で発生した災害廃棄物は東北三県で $2200 \times 10^4 \text{t}$ に及ぶと想定されており、阪神淡路大震災を超える甚大な被害となっている。宮城県において発生した災害廃棄物量は、1年の一般廃棄物量20年分を超える量であり、仮置き場の整備もままならない状況である。こうした現状に対して、環境省は処理指針に関するマスタープランを提示する等して、県、市町村、国、関係業界等に迅速かつ効率的な処理を促している。

災害廃棄物に含まれる有害物質は、環境に負荷を与え、また土地の占有による環境破壊を起こす。こうした二次的な環境被害を避けるためには、適切な処理・処分が行われる必要がある。また、処理・処分を迅速に行うために他県受入れを含めた広域処理、最終処分量減量のための再利用が求められる。

本研究では災害廃棄物の一つである津波堆積物に着目し、津波堆積物の中間処理、最終処分、他県受入れ、再利用に関する環境影響を定量的に算出し、異なる処理・処分シナリオ間での比較を行う。また、処理・処分の時間的推移に着目し環境影響を時間軸の視点からの考察も行う。ただし、環境影響評価法は未だ発展途上であり、且つ津波堆積物の処理・処分は様々な不確実性を包含している。よって、環境影響の定量化に当たり評価の不確実性を考慮する必要がある。本研究では感度分析によって不確実要素の内、支配的な要因を洗い出し、さらに、あらゆる処理・処分状況を想定するためモンテカルロシミュレーションを実行している。さらに最適な処理・処分を検討するため、上記の結果を用いて、環境影響と時間の関連性について議論している。

目 次

第1章 序 論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	2
1.3 内容と構成	2
第2章 災害廃棄物	4
2.1 災害廃棄物の現状	4
2.1.1 災害廃棄物の性状	4
2.1.2 災害廃棄物の処理・処分	4
2.1.3 仮置き場の状況	5
2.1.4 広域処理	6
2.2 津波堆積物	6
2.2.1 津波堆積物の定義	6
2.2.2 津波堆積物の性状	7
2.2.3 津波堆積物の処理・処分	9
2.3 津波堆積物の再利用	10
2.4 他県受入れ	10
第3章 津波堆積物に関する環境影響評価モデルの構築	11
3.1 概要	11
3.2 ライフサイクルアセスメント	11
3.2.1 ライフサイクルアセスメントの概要	11
3.2.2 ライフサイクルアセスメントの適用	12
3.3 環境影響度	13
3.4 時間スケール	13
3.5 津波堆積物による環境影響の定量化	13
3.5.1 有害物質による汚染	14
3.5.2 土地の占有による環境影響度	14
3.6 処理処分の環境影響の定量化	16
3.6.1 中間処理の環境影響の定量化	16
3.6.2 最終処分の環境影響の定量化	16
3.6.3 再利用の環境影響の定量化	17
3.6.4 他県受入れの環境影響の定量化	18

3.6.5 他県受入れ先が複数の場合	18
3.7 時間スケール	19
3.8 環境評価モデルにおける不確実性の考慮	19
3.8.1 不確実性の考慮の必要性	19
3.8.2 感度分析	20
3.8.3 モンテカルロシミュレーション	20
第4章 津波堆積物の処理・処分に関する環境影響評価と考察	21
4.1 概要	21
4.2 仮定条件	21
4.3 シナリオ作成	21
4.4 ベースケースでの試算結果	22
4.5 支配的要因の抽出	23
4.6 不確実性の考慮	24
4.6.1 仮定	24
4.6.2 環境影響度のシナリオ間比較	24
4.6.3 中間処理を行わない場合との比較	25
4.6.4 終了時間のシナリオ比較	26
4.6.5 一日単位での不確実性の変動	26
4.7 環境影響度と終了時間の総合的評価	26
4.7.1 概要	26
4.7.2 時間的価値	27
第5章 結 論	29
5.1 本研究の成果	29
5.2 今後の課題	29
参考文献	31
謝 辞	32

第1章 序 論

1.1 研究の背景

我が国では2011年東北地方太平洋沖地震とそれに伴って発生した津波、およびその後の余震によって、経済・インフラは然り、あらゆる面で未曾有の被害を受けた（以降、東日本大震災と称する）。そのため、東日本大震災から復興するための課題は山積している。中でも、東日本大震災によって発生した災害廃棄物処理は重要課題の一つである。東日本大震災では、特に岩手、宮城、福島での津波による被害が大きく、環境省の推計によると、3県の沿岸市町村で発生した災害廃棄物量は約 $2,200 \times 10^4 \text{t}$ に上る。ここで、阪神淡路大震災における災害廃棄物発生量が約 $1,477 \times 10^4 \text{t}$ であったことより、東日本大震災で発生した災害廃棄物量の膨大さが判る。また、宮城県の災害廃棄物発生量は同県の一般廃棄物処理量 $82.5 \times 10^4 \text{t}$ の約20年分に相当し、自県のみで処理・処分を行うのは数十年レベルで多大な時間を要すると考えられる¹⁾。

上記のように甚大な量の災害廃棄物が突然発生したことから、仮置き場（一次仮置き場および二次仮置き場）の確保や環境面への配慮といった部分は十分に考慮されているとは言い難い。なお、災害廃棄物の一次仮置き場への搬入も2011年7月中旬の時点で約40%である。このような状況を考えた時、最も優先すべき事項は災害廃棄物の迅速な処理と言えるが、同時に、中長期的な視点に即した、すなわち環境影響を考慮した処理・処分を行うことも非常に重要である。これは現在、被災した地域の住民は別の地域に移住していると考えられるが、災害廃棄物の処理・処分が終了し、これから復往・復興する時点において二次的に発生した環境問題によって復往・復興が阻害されることにもなり得るためである。すなわち、迅速な処理と環境問題を総合的に考えることが、東北地域の復興に関して重要であると考えられる。

一方、平時の日本社会においては循環型社会が謳われている。循環型社会とは平成12年に「循環型社会形成推進法」によって、「製品等が廃棄物等となることが抑制され、並びに製品等が循環資源となった場合においてはこれについて適正に循環的な利用が行われることが促進され、および循環的な利用が行われない循環資源については適正な処分が確保され、もって天然資源の消費を抑制し、環境への負荷が可能な限り低減される社会」として定義されている。なお、「循環資源」とは「廃棄物の内、有用なもの」を指す。東日本大震災に関する災害廃棄物の処理に関しても、循環型社会への社会全体の変遷を踏まえ再利用できるものは行うべきである。環境省が発表した処理・処分に関するマスタープラン⁴⁾においても災害廃棄物の再利用は重要視されている。特に木質系廃棄物、コンクリート屑が再利用の対象となっている。また、東北地域の最終処分場残余容量等を考えた時、他県の協力は必要不可欠であり、災害廃棄物

を他県へ受入れることも考慮する必要がある。東京都や山形県は積極的な姿勢を見せているが、放射線物質を含む災害廃棄物に対してどう対処するかで住民との議論が起きている。科学的技術はもちろん、対象物質の基準といった法整備も含めて考えていかねばならない。

今後、首都直下型地震、東南海地震が発生する確率は30年以内に70%、60%とも言われており、また両者が連動する確率も非常に高く、発生した時の被害は東日本大震災を超えるとも言われている。また、環境はいまや全世界が考慮すべき事項であり、我々の生活に密接に関係している。このような状況で廃棄物処理マネジメントは重要性が高いと考えられ、本研究における処理・処分の環境影響に着目した評価は災害廃棄物の処理マネジメント確立のための一助になると考えらえる。

本研究では災害廃棄物の内、津波堆積物に着目する。津波堆積物の発生量は、被災6県（青森、岩手、宮城、福島、茨城、千葉）で約 $1,300\sim 2,800\times 10^4$ tと推計されている⁵⁾。このように莫大な量の津波堆積物を処理・処分する際には平時以上の環境影響が考えられる。また、早急な復旧・復興のためには津波堆積物の処理・処分を速やかに終了させることは重要である。環境影響・時間の二面的な軸を持つ環境評価モデルを作成しなければならない。

1.2 研究の目的

1.1 で述べたように、震災で発生した災害廃棄物は膨大であり、適切な処理・処分を行うことが復旧・復興を早めることになる。ただし、処理・処分の方法によっては二次的な環境被害を起こす可能性もある。本研究では、環境影響の視点から処理・処分を効率的に行うための評価・検討を行う。そのためには、災害廃棄物および処理・処分に伴う環境影響を定量的に評価する必要がある。また、時間軸での評価も行うために、環境影響と時間を総合的に評価する指標の決定を行う。本研究では災害廃棄物の内、津波堆積物に着目するが、そのような指標を示すことができれば他の災害廃棄物にも適用できる。

本研究の目的は以下に大別される。

- (1) 津波堆積物と処理・処分における環境影響評価モデルの構築
- (2) 環境影響の定量化
- (3) 環境影響評価モデルによるシミュレーションおよび評価・検討
- (4) 津波堆積物の処理・処分への提言

1.3 内容と構成

本研究の内容と構成を以下に示す。また、図 1.1 に本研究のフローを示す。

(1) 災害廃棄物および津波堆積物の現状把握

津波堆積物の性状を踏まえ、処理・処分の現状を考えたとき、環境影響の視点からの問題点を考える。

(2) 津波堆積物の処理・処分における環境影響度評価モデルの構築

環境影響を定量的に議論するためのモデルを作成し、処理・処分におけるシナリオを作成する。また、不確実な条件を考慮しパラメータを設定する。

(3) 津波堆積物および処理・処分に関する環境影響のモデルによる評価検討

評価モデルの推定結果から、津波堆積物の処理・処分に関する評価を行い、シナリオ間での比較・検討を行う。また、処理・処分における他県受入れ、再利用の有用性を示し、環境影響および時間の両面からの評価を行う。

(4) 考察と処理・処分方法への提言

評価モデルの結果を用いて、津波堆積物の処理・処分に関する考察を行う。また、津波堆積物の処理・処分への提言を行う。

第2章 災害廃棄物

2.1 災害廃棄物の現状

2.1.1 災害廃棄物の性状

災害廃棄物とは地震・津波に伴って生じた一般廃棄物ならびに産業廃棄物の総称である。特に、岩手、宮城、福島の前北3県における津波による災害廃棄物の発生量が大い。環境省の推定によれば、3県の沿岸市町村で発生した災害廃棄物量は、岩手県 $442 \times 10^4 \text{t}$ 、宮城県 $1,588 \times 10^4 \text{t}$ 、福島県 $228 \times 10^4 \text{t}$ であり、3県合計でおよそ $2,250 \times 10^4 \text{t}$ となっている（図 2.1）¹⁾。この量は、阪神・淡路大震災（ $1,477 \times 10^4 \text{t}$ ）を超える甚大な量である。宮城県における災害廃棄物発生量は、1年間の一般廃棄物量（ $82.5 \times 10^4 \text{t}$ ）の約20年分に相当する。また、市町村レベルで発生量が最も多いのは宮城県石巻市の $616 \times 10^4 \text{t}$ となっている。環境省の推定は衛星画像をもとに、津波により倒壊した家屋等について推計したものであり、内陸部の災害廃棄物、道路・堤防のがれき、自動車、船舶、ヘドロを加味すると、推定値を上回る可能性もある。また、上記の3県のほか青森県で約 $22 \times 10^4 \text{t}$ 、茨城県で約 $50 \times 10^4 \text{t}$ 、千葉県で約 $12 \times 10^4 \text{t}$ の災害廃棄物が発生している¹⁾。また、今回の震災の災害廃棄物の特徴として津波による発生であることが考えられる。災害廃棄物の一部は、海底に沈んだり、海面や海中を漂流したりしている。潮に乗って移動しており正確に量を把握するのは困難である。

具体的な災害廃棄物の内訳としては、可燃物（木屑、廃プラスチック類、廃タイヤ、家具等の可燃粗大ごみ、紙・布製品、衣類）、不燃物（がれき類、ガラス、陶磁器屑、瓦、金属屑、自動車等の不燃粗大ごみ）、家電製品、有害廃棄物、津波堆積物と区分される。例として石巻地区の災害廃棄物発生状況は、可燃物 $210 \times 10^4 \text{m}^3$ 、不燃物 $636 \times 10^4 \text{m}^3$ 、津波堆積物 $380 \times 10^4 \text{m}^3$ となっている（図 2.2）²⁾。

また、災害廃棄物の一次仮置き場への搬入状況を図 2.3 に示す³⁾。時間の経過とともに搬入は進んでいる。図 2.3 の搬入済量は全ての災害廃棄物の推定量に対する割合であり、解体を除いた災害廃棄物の推定量に対する割合は、岩手県・宮城県ではほぼ100%でありほとんど全ての搬入は完了している。一方、福島県ではほぼ60%であり、放射性物質の影響から一次仮置き場への搬入もあまり進んでいない。

2.1.2 災害廃棄物の処理・処分

適正且つ効率的な処理・処分を行うために国、県、市町村が連携しながら行動する必要がある。主に以下の役割に分けられる⁴⁾。

➤ 国

市町村または事業委託を受けた県による災害廃棄物の処理が適正且つ効率的に

行われるよう、処理指針（マスタープラン）作成、廃棄物等の調査、財政措置、専門家の派遣、広域的な処理の旗振り役、県外の自治体や民間事業者の処理施設に係る情報提供が考えられる。また、マスタープランを図 2.4 に示す⁵⁾。

➤ 県

仮置き場の設置や災害廃棄物の処理について、市町村等との話し合いを実施し、具体的な処理方法を定めた実行計画を作成する。計画作成には専門家等から広くアイデアを募る。二次仮置き場の管理、廃棄物の処理、広域処理の調整を行う。

➤ 市町村

県が作成した災害廃棄物処理の実行計画を踏まえ、災害廃棄物の処理を実施する。具体的には、二次仮置き場への運搬までの処理を行う。また、地元の復興工事の調整を行う。災害廃棄物の処理・処分の流れとしては、収集を行い一次仮置き場で可燃物、不燃物等に粗分別を行い、二次仮置き場に搬送し、分別・破碎といった中間処理を行った後に最終処分または再利用を行う。再利用に関して、主な再資源化方法と利用用途例、コストを表 2.1 に示す⁶⁾。ここで、特に注意すべきは環境負荷を考慮する必要がある廃棄物である。以下の廃棄物が挙げられる⁷⁾。

✓ PCB（電気機器、家電製品）

分別保管を行い、PCB の飛散・流出を防止する。

✓ アスベスト

吹き付け石綿等の廃石綿またはその疑いのあるものを確認し、除去・回収した場合は区別して保管する。

✓ 津波堆積物

事前に性状を把握し、土壌への影響を考慮して適正に保管を行う。組成・性状の把握に関しては被災地周辺の有害物質存在状況を把握して対応する。

✓ 放射性物質汚染廃棄物

周辺環境への影響を配慮するため、一時保管場所からの敷地境界での空間線量率をモニタリングする。

✓ その他

可燃性の高いものに関しては仮置き場での火災等の二次災害を防ぐために十分注意する必要がある。分別が困難である場合や危険物が混入している場合もあるので注意して処理・処分を行う必要がある。

2.1.3 二次仮置き場の状況

二次仮置き場は被災現場から最初に災害廃棄物が運び込まれる一次仮置き場を経て、

分別等が行われる場所である。災害廃棄物は一度に大量に発生したため、あらかじめ指定された場所だけでなく、急きょ二次仮置き場になった場所も多い。そのため、十分な施設整備がなされておらず、環境影響が発生しやすい。例えば、住宅隣接による民家への粉塵や騒音問題、堆積物の崩落や火災、有機物の腐敗による公衆衛生の悪化、有害物質の流出など様々な問題点がある。実際の二次仮置き場の様子を図 2.5 に示す。これは 2011 年 10 月下旬に撮影されたもので、石巻市（石巻ブロック）および相馬市（相馬ブロック）における二次仮置き場の状況である。これらより、二次仮置き場において、適切な管理が行われているとは言い難い。災害廃棄物に関して大まかな分別は行われているが、周辺への配慮を施してはならず、有害物質による汚染が見られる。堆積状況は積み上げられただけであり、非常に危険である¹⁰⁾。また、二次仮置き場の環境管理に対しては処理・処分に比べて、十分な対策が施されていない。これらのことから適切な仮置き場の管理が極めて重要で、対策を行う必要がある。なお、二次仮置き場内での分別は進んでいるものの、分別後の廃棄物の再利用も含めた処理・処分は未だ公的な見解や方針が示されていない。

2.1.4 広域処理

廃棄物の発生量は、例えば宮城県では 1 年当たりの一般廃棄物量の 20 年以上、非常に膨大な量であり、被災地だけで処理・処分を行うと非常に長期の時間を要する。被災地での処理・処分を優先すべきであるが、既設中間処理施設や最終処分場の余力、および一定規模の仮設中間処理施設の設置等を考慮しても、被災地内で処理・処分を完結することは困難な状況である。そのため、処理期間を短縮し、被災地の復旧・復興を迅速に行うには、被災地域だけではなく、国や同一県内地域の協力が必要であり、広域的な処理・処分を行うための連携体制を整えなければならない⁸⁾。環境省は 30 都道府県の 272 市町村から災害廃棄物の受入れに協力する旨を得ており、その受入れ可能量は焼却処理 $180 \times 10^4 \text{t}$ 、破碎処理 $65 \times 10^4 \text{t}$ 、埋め立て処理 $36 \times 10^4 \text{t}$ である。これは災害廃棄物量全体の 3~4 割に相当する（図 2.6）¹⁾。

2.2 津波堆積物

2.2.1 津波堆積物の定義

本研究では津波堆積物に着目する。津波堆積物には重金属といった有害物質や津波による塩分が含まれている⁵⁾。また、本研究では被災地において発生した津波堆積物が一次仮置き場を経て、二次仮置き場にある状況を考え、分別がなされた状態の津波堆積物を考えることにする。

2.2.2 津波堆積物の性状

東日本大震災における津波堆積物発生量は被災 6 県（青森、岩手、宮城、福島、茨城、千葉）で $2,000 \times 10^4 \text{t}$ 程度と推定されている。化学的な性状については、岩手県および宮城県の津波を受けた沿岸部における堆積物をもとにしたデータが環境省から発表されている。分析データは以下のとおりである（表 2.2）⁹⁾。

① 一般項目

- 密度は約 2.7g/cm^3 である。
- pH は 7.0～9.0 の間であるが試料によって強酸性、アルカリ性を示すものもあった。
- 熱しゃく減量は 1.2% から 16.3% まで広い幅があった。主に有機物の指標となる。

② 塩分濃度

- 塩分濃度を測る指標として EC（電気伝導率）が活用できる。EC は数 mS/m から $5,000 \text{mS/m}$ を超えるものまであった。
- 一般的な土の EC は 10mS/m 程度であり、海水の EC は約 $5,000 \text{mS/m}$ であることから海水の影響を受けている。

③ 油分

- n-ヘキサン抽出物質を指標とする。水産用水基準による底質の基準値が n-ヘキサン抽出物質 1000ppm 以下となっている。
- 柱状トランス下の堆積物、産業廃棄物処理場近辺の堆積物から %オーダーの高濃度が検出されている。

④ ダイオキシン類

- 含有量基準値として、土壤中の環境基準 ($1,000 \text{pg-TEQ/g}$ 、TEQ は 2,3,7,8-テトラクロロジベンゾーパラジオキシンの毒性に換算した値)、土壤中の調査指標値 (250pg-TEQ/g)、水底底質の環境基準 (150pg-TEQ/g) が考えられる。これらの基準の内、水底底質の環境基準はその他の媒体の基準と TEQ の算出方法が異なるため、双方で算出を行われた。
- 津波堆積物では、特異的に高濃度 (520pg-TEQ/g) を示すものが、1 試料発見された。これは野焼き残渣であり、同族体や異性体は燃焼由来のパターンを示している。一方、他の試料では TEQ が土壌ベースで、範囲 $0.11 \sim 78 \text{pg-TEQ/g}$ 、底質ベースで範囲 $1.2 \sim 79 \text{pg-TEQ/g}$ であった。これらは、土壌および水底底質の環境基準値を下回る結果となった。
- 平時に行われた調査により得られた結果の濃度とほぼ同レベルであると考えられる。

⑤ PCB

- 含有量基準値としては、PCB を含む底質の暫定除去基準値（10mg/kg 以上、公共用水域の水質汚濁、魚介類汚染等の原因となる汚染底質の除去等の基準）が考えられる。また、特別管理産業廃棄物に当たらないとする PCB 処理物の卒業判定基準値が廃油で 0.5mg/kg 以下と定められている。
- いずれも廃油の卒業判定基準値 0.5mg/kg を 1 桁以上下回る PCB 濃度（範囲：0.0003～0.18mg/kg）である。ただし、堆積物試料間の濃度幅には 3 桁の開きがあり、採取場所による濃度のばらつきがみられた。比較的高濃度が検出された試料は、それぞれ、0.18、0.16、0.13mg/kg である。同族体のパターンから PCB 製剤（工業製品）由来であると推定された。
- 平時に行われた調査により得られた結果の濃度と、前述の比較的高濃度の 3 試料を除けば、ほぼ同レベルであると考えられる。

⑥ 石綿

- 仙台市、石巻市、釜石市、陸前高田市の計 24 試料について石綿の分析が行われたが、検出されなかった。

⑦ 重金属類

- 重金属類の含有量は、多くの項目（カドミウム、砒素、セレン、六価クロム、水銀、ふっ素、ほう素）においてほとんどの試料が不検出であったが、鉛が多くの試料から数 10mg/kg までの範囲で検出された。1 試料のみ、680mg/kg と土壤環境基準を超える結果となった。
- 重金属類の溶出量（平成 3 年環境庁告示第 46 号に準拠する方法）は、カドミウム、セレン、六価クロム、水銀が全試料で不検出であった。一方、鉛が 3 試料から環境基準値（0.01mg/L）を超過する値、砒素が 6 試料から環境基準値（0.01mg/L）を超過する値、ほう素が 15 試料から環境基準値（0.8mg/L）を超過する値、フッ素が 1 試料で環境基準値（0.01mg/L）を超える値でそれぞれ検出された。鉛や砒素の溶出量が基準値を超過することについて、元素の自然由来による溶出基準超過が考えられる。一概に汚染があると判断することはできない。ふっ素、ほう素は、海水中の濃度がそれぞれ 4.5mg/L、1.5mg/L であり海水の影響があった可能性がある。
- 重金属類の溶出量（昭和 48 年環境庁告示第 13 号に準拠する方法）は、カドミウム、セレン、六価クロム、水銀が全試料で不検出であり、鉛と砒素は溶出濃度が多くの試料から検出された。廃棄物の埋め立て処分に係る判定基準値は、鉛と砒素が 0.3mg/L であり、2 試料において基準値を超過した。これら 2 試料は工業地帯での採取であり、産業系の汚染源の影響可能性が推察さ

れる。

⑧ PFOF および PFOA

- PFOS は、表面処理剤や界面活性剤として用いられた有機フッ素化合物であり、ストックホルム条約における残留性有機汚染物質として、化審法第一種特定化学物質に指定されている。
- PFOS はいずれも分解残さの排出目標目安値 3 桁以上下回る濃度（最高濃度 3.5ng/g）であった。
- 同モニタリング調査における全国の底質の測定結果は、0.0033～0.5ng/g であり今回対象とした堆積物試料の PFOS と PFOA は一般の底質に比較してほぼ同レベルであると考えられる。

⑨ 有機スズ化合物

- 対象物質としてはトリブチルスズ (TBT)、トリフェニルスズ (TPT)、ジブチルスズ (DBT)、ジフェニルスズ (DPT)、ジオクチルスズ (DOT) について調査が行われ、主に環境省化学物質環境実態調査で継続している底質のモニタリング調査結果と比較が行われた。
- 対象とした物質の中で、濃度が比較的高いものが TBT と DBT であった。仙台市の堆積物中の TBT は 0.5～180ng/g であり、底質モニタリング調査で行っている仙台湾の通常濃度と比べて、同レベルであった。TPT については、仙台市のレベルは 0.2～0.3ng/g であり、底質モニタリング調査で行っている仙台湾の通常濃度と比べて、低いレベルであった。

その他に多環芳香族炭化水素類、農薬類、揮発性有機化合物について分析が行われたが、対象物質は検出されない、または基準値を大きく下回る結果となっている。

2.2.3 津波堆積物の処理・処分⁵⁾

津波堆積物の処理・処分は災害廃棄物と同様に、撤去、収集・運搬、中間処理、最終処分・再利用の流れで行われる（図 2.7）。津波堆積物の堆積状況は、農地、森林、水路、市街地、水没地等様々である。撤去方法については、それほど含水率が高くないものについては重機、泥状になっているものについては湿地用ブルドーザー、クローラーダンプ、更に含水率が高いエリアにおいては汚泥吸排車の活用のように、現地や堆積状況を含めて効率的な方法を選択する。津波堆積物には、有害物質等や危険物が含まれるものがあり、また含水率の高い泥状のものがあつたりする等、組成や性状は多様であるため、収集・運搬については津波堆積物の性状を事前に把握して運搬機械、資材を選定する必要がある。また、他の災害廃棄物以上に仮置き場における保管が重要である。悪臭や粉じんの飛散対策といった応急対策や降雨や地下水による有害

物質の流出の防止が必要となる。ゾーニング（立地施設や土地利用の確認）、現地スクリーニングといった津波堆積物の組成・性状把握も重要であり、その後の適切な処理・処分につながる。中間処理に関しては、浄化处理、不溶化处理、無害化处理、焼却処理が考えられる。その後、最終処分または再利用を行う。最終処分が困難な場合、法律上の手続きを行い海洋投入処分も検討する。

2.3 津波堆積物の再利用

津波堆積物の再利用として、木屑、コンクリート屑が混入している津波堆積物についてはそれらを除去する。トロンメル（円筒形の回転式ふるい）、振動ふるい等の分別機で除去を行う。木屑は木質系ボード等の原料やボイラーや発電の燃料として活用できる。林野庁は、倒壊家屋から発生した木質系廃棄物の内1～2割を再利用したい考えである⁵⁾。しかしながら、津波をかぶった木質系廃棄物は塩分を含んでおり、利用する際には注意が必要である。ボイラー腐食やダイオキシン発生の問題点があり、廃木材業者は敬遠している。燃料試験で塩化水素濃度、ダイオキシン濃度を調べる必要がある。コンクリート屑については路盤材、骨材、埋め戻し材等の建築資材として再利用する。木屑、コンクリート屑が除去された津波堆積物は有害物質を処理した上で、埋め戻し材、盛土等の建築資材、セメント原料化、舗装用ブロック等の原料化といった再利用が考えられる。いずれの場合も利用先と物理的・化学的性状を十分配慮する必要がある。例えば、セメント原料化であればエコセメントとして用いられることになる。普通セメントと性能に遜色はなく、重金属が溶出し難い¹⁰⁾。再利用は、何よりも最終処分場の埋め立て量を減らせることが利点である。

2.4 他県受入れ

災害廃棄物と同様に被災地以外での処理を含めた広域的な処理が必要である。具体的には、東京都は積極的な受入れを表明しているが、放射線物質を含んだ災害廃棄物の受入れに対して住民の反対も強く受入れに至っていない県も多くあり、円滑に進んでいるとは言い難い。加えて、交通網や処分場の受入れ体制等不十分な点は多い。しかしながら、全世界の地震の20%以上が日本で発生しているといわれており、30年以内に東南海地震が発生するといったデータを考えたとき、発生した災害廃棄物を日本全体で処理・処分を行うためのシステム作りが必要である。今回の震災においても協力体制を築いておくことが重要である。

第3章 津波堆積物に関する環境影響評価モデルの構築

3.1 概要

震災からの復旧・復興のためには津波堆積物の迅速な処理・処分は不可欠である。現在の日本では処理・処分に関して再利用が推進されており、循環型社会の形成が求められており、そうした取り組みが廃棄物に関する環境影響を抑えている。震災で発生した津波堆積物の処理・処分において、一刻も早い処理を行う中でも環境負荷を可能な限り低減させることができる処理・処分を行う必要がある。しかしながら、実際に環境負荷量を低減させるには、そのための対策としての行動に伴うCO₂排出といったように、別の環境負荷が生じ得る。また、緊急時の処理・処分においては津波堆積物の除去が優先され、環境への二次的な影響はないがしろにされがちである。環境影響は中長期的なスパンで見たときに発現する問題も多く、短期的なスパン、迅速な処理・処分が要求される場合には評価し難い。そのため、環境の面から見て最適な津波堆積物の迅速な処理・処分を行うためには、時間スケールと環境影響の相互的な関係性を評価する必要がある。そこで津波堆積物および処理・処分に起因する環境影響を環境影響度として定義し、貨幣価値で一元化を行い定量的な評価・検討を行う。環境影響を貨幣価値に換算して評価するイメージを図3.1に示す。環境影響度とは環境への影響の度合いを示しており、モデルにおける指標である。また、時間的スケールを考慮するために、算出の際には時間をパラメータに組み込み環境影響との関係性を検討する。評価モデルの概要を図3.2に示す。

3.2 ライフサイクルアセスメント

3.2.1 ライフサイクルアセスメントの概要

LCA(ライフサイクルアセスメント)は、製品を構成する原料の採取から材料入手、製品製造、使用、廃棄、リサイクルに至る一連のライフサイクルを全て網羅して、発生させる環境負荷や環境負荷を定量的に評価するためのツールである。LCAによって、環境的な優位性、環境効率向上のための優先事項を客観的に分析することができる。LCAの実施手順は以下のステップに大別できる。

① 目的と調査範囲の設定

LCA実施の目的を明確にし、調査する対象範囲を定める。

② ライフサイクルインベントリ分析

対象範囲におけるインプットとアウトプットのデータを収集する。結果は環境負荷物質ごとに物理量で表現する。

③ ライフサイクル影響評価

インベントリ分析で得られた結果をもとに環境負荷によって発生し得る潜在的な環境影響の大きさを分析し評価する。

④ ライフサイクル解釈

これまでの分析・評価結果から、ライフサイクルにおいてどのプロセスや影響領域が重要であるかを考察する。

これらを実施する際に特に肝要なポイントとなるのがインベントリデータの収集と信頼性の高い LCIA (Life Cycle Impact Assessment) 手法¹¹⁾の利用である。LCIA は LCA においてインベントリデータを環境影響としてアウトプットするための手法であり、LCA のステップ③にあたる。LCIA 手法は近年では企業活動や国レベルでの経済活動による環境影響にも利用されており、評価結果は専門家以外でも理解しやすい。

ところで、ISO14042 が国際規格化された 2000 年頃から、人間健康や生物多様性などのエンドポイントが受ける潜在的被害量を評価するための手法開発が注目され始めた。ISO14042 とは国際標準化機構が発行した環境マネジメントシステムに関する国際規格 ISO14000 における LCA に関するものでライフサイクル影響評価の規格である。環境影響をエンドポイントにレベルに集約し、エンドポイント間での比較を行った後に統合化するものである。エンドポイントの対象は 3~4 項目程度であり、結果がわかりやすい。日本では、産業技術総合研究所ライフサイクル研究センターが開発した被害算定型影響評価手法 (Lifecycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling : LIME) が採用されている。LIME は、コンジョイント分析による統一指標として貨幣価値を用いるため、環境影響を貨幣価値で算出することができる。貨幣価値に換算することで、CO₂ 貨幣価値をもとに算出された環境コストや直接コストとの合算、比較が可能である。また、どのパラメータを考え評価したのか、なぜそのような結果になったのかが明確であり透明性が高い。本研究では LIME を援用しつつ、ライフサイクルアセスメントを行う。

3.2.2 ライフサイクルアセスメントの適用

本研究では、LCA の枠組みを意識しつつ、津波堆積物の処理・処分に関する環境影響を評価する。津波堆積物の処理・処分のライフサイクルとしては図 3.3 のような過程が考えられる。LCA における調査範囲としては津波堆積物が仮置き場 (3, 4 章では断りがない限り、仮置き場が二次仮置き場を表すものとする) へ運搬され、処理・処分が完了するまでを考える。着目する処理・処分過程に沿って環境影響を定量化する。また、津波堆積物の中間処理場 (施設) から最終処分場への運搬といった処理・処分過程における CO₂ 排出による環境影響は考慮しない。ただし、他県受入れのみ運搬時

の環境影響を考慮する。中間処理場（施設）や最終処分場の建設、運搬車両の製造、仮置き場等の施設の建設に必要な資材、加工における環境影響は考慮しない。

3.3 環境影響度

モデルの構築に当たり、処理・処分過程における環境影響を定量化する。処理・処分過程は仮置き場に運搬されてから、中間処理を経て最終処分または再利用が行われるまでを考える。また、モデルにおける環境影響の算出においては、仮置き場、中間処理、最終処分、再利用、他県受入れに関する環境影響に着目して算出を行う。これらの環境影響度を項目別に分けて算出する。本研究では主に項目別の環境影響度の総和¹²⁾に関する比較・検討を行う。環境影響度の総和の大きさについてはモデル全体の環境影響を表しているものとし、値の大小によって処理・処分の妥当性を評価する。

$$E = E_t + E_i + E_f + E_r + E_a \quad (3.1)$$

ここで、 E ：モデル全体の環境影響度、 E_t ：仮置き場の環境影響度、 E_i ：中間処理に関する環境影響度、 E_f ：最終処分に関する環境影響度、 E_r ：再利用に関する環境影響度、 E_a ：他県受入れに関する環境影響度を指す。単位は全て円で表す。

3.4 時間スケール

本研究では時間軸を考慮して環境影響を評価し、環境影響度の時間の経過による変動も考察する。時間スケールに関しては、津波堆積物が仮置き場に運搬・堆積された時点をもとに $t=0$ とする。津波堆積物の処理・処分は、 $t=0$ から始まるとし、中間処理・最終処分・再利用が始まるまでの時間のずれは考慮しない。また、津波堆積物の運搬に要する時間も考慮しない。他県受入れに関しても、要する時間は処分時間に比べて無視できるとする。津波堆積物は最終的に、最終処分もしくは再利用のいずれかに振り分けられるとし、最終処分かつ再利用が終了する時間を処理・処分の終了時間とする。

3.5 津波堆積物による環境影響の定量化

津波堆積物に関する環境影響の定量化においては、津波堆積物が仮置き場に堆積されている状況での環境負荷を考える。仮置き場における環境影響としては、津波堆積物に含まれる有害物質による汚染、津波堆積物が仮置き場において土地を占有することによる一次生産の減少、塩分による土壌汚染、悪臭・粉塵・害虫の発生といった公衆衛生の悪化、居住環境の悪化等が考えられる（図 3.4）。本研究ではこれらの環境影響の内、有害物質による汚染と堆積物が土地を占有することによる一次生産の減少に

着目する。また、仮置き場の津波堆積物が除去されるに従い環境影響度は減少していくものとし、仮置き場から全ての津波堆積物が除去された時の環境影響度は0となる。

$$E_t = E_c + E_o \quad (3.2)$$

ここで、 E_c :有害物質による汚染に関する環境影響度、 E_o :土地の占有に関する環境影響度を指す。

3.5.1 有害物質による汚染

有害物質による汚染としてはダイオキシンによる土壌汚染、重金属による土壌・地下水汚染、塩分による土壌汚染などが考えられる。塩分の含有については全ての津波堆積物に含まれるとし、塩分による仮置き場での環境影響は算出しない。中間処理に関する環境影響においては塩分も含めて定量化することにする。そこで、本研究では津波堆積物の仮置き場での環境影響に関して特に重金属、ダイオキシン、PCBによる汚染に着目する。処理・津波堆積物中の汚染物質含有量に、対応する環境負荷係数(表3.1)¹³⁾を乗じることで環境影響度を算出する。多くの場合、環境影響は中長期的なスパンで考えたときの算出値となるため、本研究での有害物質による汚染に関する環境影響度は中長期的な環境影響を含めたポテンシャルとして評価する。そのため、環境影響度の大きさが、ある時間における具体的な環境影響、環境被害を表しているものではないことに注意したい。また、津波堆積物に起因する環境影響度はある時間での環境影響のポテンシャルを考えるため、仮置き場での環境影響度は津波堆積物の除去が終了するときには0となる。また、有害物質含有量の独立性が保たれると仮定する。

$$E_c = \sum_{i=1}^n y_i \cdot x_i(t) \quad (3.3)$$

$$x_i(t) = m \times (W - b \cdot t) \quad (3.4)$$

ここで、 y_i :環境負荷係数(円/kg)、 $x_i(t)$:津波堆積物中の有害物質含有量(kg)、 m :1kg当たりの物質含有量(kg)、 W :初期質量(kg)、 b :一日当たりに仮置き場から除去される量(kg)を指し、 i は物質の種類を表す。

3.5.2 土地の占有に関する環境影響度

津波堆積物が土地を占有する際に生じる、植物の純一次生産 NPP (Net Primary Productivity) のダメージを考える。 NPP とは、植物が1年間に太陽エネルギーと水と二酸化炭素を用いて光合成を行った有機物量総生産から、植物自体の呼吸によって消

費される有機物量を差し引いた値である。つまり、植物による一単位区間における見かけ上の光合成生産量、すなわち CO₂ の削減量と言い換えることができる。津波堆積物による土地の占有を行われることで、占有期間、改変された植生 NPP_a から本来の植生 NPP_p に回復するまでの期間の NPP の損失を ΔNPP として以下のように算出する¹⁴⁾。なお、植生の回復は線形に行われるとして回復期間は 30 年とする。 NPP 損失のイメージを図 3.5 に示す。

$$\Delta NPP = (NPP_p - NPP_a) \times T_a + \frac{1}{2} \times (NPP_p - NPP_a) \times T_{a \rightarrow p} \quad (3.5)$$

ここで、 ΔNPP : 一次生産 NPP の損失、 NPP_p : 本来の植生での一次生産 (t-CO₂/year·ha)、 NPP_a : 土地改変後の一次生産 (t-CO₂/year·ha)、 T_a : 土地占有の期間、 $T_{a \rightarrow p}$: 土地の克服にかかる期間 (year) である。

ΔNPP に改変された土地の面積と CO₂ 貨幣価値原単位を乗じることで、津波堆積物による土地の占有に関する環境影響度を算出する。

$$E_o = \text{CO}_2 \text{ 貨幣価値原単位 [円/t-CO}_2] \times \Delta NPP [\text{t-CO}_2 / \text{ha}] \times S [\text{ha}] \quad (3.6)$$

ところで、CO₂ 貨幣価値原単位に関しては多様な評価手法があり、既往の研究から国や企業によって様々な値が設定されており、評価対象によってバラつきがある。また、貨幣価値原単位算出の考え方には主に以下の 3 パターンが用いられている¹⁵⁾。

i. 被害費用に基づく計測

CO₂ により引き起こされる温暖化によって引き起こされる被害費用を推定することから貨幣価値原単位を算出する。メリットとして政策動向などの外部環境から影響を受けにくい点、および既存研究の蓄積が充実しているという点が挙げられ、国際的に広く認知されている計測である。

ii. 対策費用に基づく計測

CO₂ の削減目標および削減手法を設定し、それを達成するためにかかる費用から貨幣価値原単位を算出する。メリットとして国の将来の削減目標などに整合した形で推定ができる。しかしながら、諸外国の設定方法に原単位が大きく左右する点、技術革新によって対策費用が変化してしまう点から中長期的に外部要因の影響を受けやすく不安定であるとされ、高めの設定となる傾向がある。

iii. 排出権取引価格に基づく計測

排出権取引市場で用いられる排出権取引市場の価格を貨幣価値原単位として採用する。メリットとして市場価格としての理論的な妥当性が担保される点がある。しかし、まだ排出権取引市場が成熟しておらず価格が不安定であり、また取引価

格が限界費用を表現していない可能性が大きい。

本研究では、処理・処分が主に行政主導であるとして考え、国土交通省によって日本の CO₂ 貨幣価値原単位として設定されている 2,890 円/t-CO₂ を用いて計算を行う。

3.5.3 仮置き場の状況の考慮

本研究では仮置き場の環境影響度を算出にあたり、仮置き場の状況を考慮する。仮置き場の状況とは仮置き場における津波堆積物の保管環境のことを指し、様々な外的要因を含むものとする。例えば、津波堆積物が仮置き場にあるとき、仮置き場が劣悪な環境であれば環境影響度は増大しやすく、綿密に管理されている環境であれば増大はなされないと考えられる。また、時間スケールも考慮する必要がある。そこで、時間の経過により変動する関数 $F(t)$ を設定する。関数の設定により、ある時間を超過すれば環境影響度が顕著に増大するといった現象や指数的に増大していくといった現象を表現できる。関数 $F(t)$ を考慮した場合の仮置き場の環境影響度は次式 (3.7) となる。

$$E_t = (E_c + E_o) \times F(t) \quad (3.7)$$

3.6 処理・処分の環境影響の定量化

3.6.1 中間処理の環境影響の定量化

中間処理を行った際に環境負荷は発生する。中間処理の環境影響の定量化において、本研究では中間処理施設稼働に伴って排出される CO₂ 排出量をもとに算出を行う。CO₂ 排出係数には先ほどの NPP 算出の時と同様に国土交通省が発表している値を用い、それに CO₂ 排出量に乗じることで環境影響度を算出する (表 3.2)¹⁶⁾。中間処理の環境影響度は一日当たりの中間処理量に比例すると考える。また、津波堆積物を最終処分および再利用を行うための処理は中間処理で全て行われるとする。最終処分を行うための中間処理と再利用を行うための中間処理は異なると考えられるので、中間処理施設稼働に伴う環境影響度に不確実性を与え、幅を持たせる。

$$E_i = \text{CO}_2 \text{貨幣価値原単位} [\text{円/t-CO}_2] \times C \quad (3.8)$$

$$C = \text{CO}_2 \text{排出係数} \times \text{エネルギー使用量} \quad (3.9)$$

ここで、 C : CO₂ 排出量 (t-CO₂) である。

3.6.2 最終処分の環境影響の定量化

最終処分の環境影響の定量化 最終処分に関する環境影響の定量化においては、有害物質の汚染による環境影響を考える。津波堆積物は中間処理を行うことで有害物質

が減少するが完全に有害性を除去することは困難と考えられるので、除去しきれなかった有害性による環境影響を定量化する。最終処分量は基本的に中間処理量に準ずるものとして考える。また、中間処理によって、津波堆積物中の有害物質が処理される割合を処理度 a とおく。処理度は中間処理の処理レベルを表している。処理度が大きいほど、津波堆積物の有害性は除去される。また、処理度は中間処理コストに線形に比例するものとし、中間処理コストを高くすると処理度は大きく低く設定すると小さくなるものとする。処理度の中央値と最大値・最小値の差は 0.25 とする。

$$E_f = \sum_{i=1}^n y_i \cdot z_i(t) \times (1 - a) \quad (3.10)$$

$$z_i(t) = m \times n \times t \quad (3.11)$$

ここで、 y_i ：環境負荷係数（円/kg）、 $z_i(t)$ ： t 時点での最終処分堆積物中の有害物質含有量（kg）、 a ：処理度、 n ：一日当たりの中間処理量（t/日）を指し、 i は物質の種類を表す。

3.6.3 再利用の環境影響の定量化

再利用に関する環境影響の定量化においては、最終処分に関する環境影響度と同様に有害物質の汚染による環境影響を考える。中間処理コストの変動に対して比例するように処理度を設定し有害性の減少度を決定する。また、再利用を行う際の利点として、最終処分量の減量という点が挙げられる。発生した津波堆積物に対して最終処分場の容量は十分足りているとは言えず、再利用を行うことは資源消費を抑えるだけでなく、最終処分量を抑えることに対して非常に効果的である。本研究では再利用を行う際の付加価値を「津波堆積物が最終処分された場合にかかる費用」として考え、再利用を行う際にはこの価値を考慮して環境影響度の算出を行う¹⁷⁾。ところで、最終処分に関する費用は処分する廃棄物の種類によって異なる。1977年に「最終処分場に係る技術上の基準を定める省令」が施行され、環境に影響を与える可能性のある廃棄物は管理型最終処分場へ、不活性で無害と考えられる廃棄物は安定型最終処分場に最終処分を行うことが定められた。管理型最終処分場に処分される廃棄物は、分解する過程で有機物や栄養塩が生成してしまうため、埋め立てた廃棄物が安定するまで浸出水を処理しなければならず、遮水工や浸出水処理施設などの設置が義務付けられている。一方、安定型最終処分場は不活性な廃棄物のみを処分できる。

本研究で着目する津波堆積物は管理型最終処分場において処分が行われると考えられるので、管理型最終処分場で処分する際の処分単価をもとに計算を行う。処分単価は最終処分場の建設費と維持管理費を合わせた全経費を 10 年間分の埋め立て容積

で除したものとする。最終処分場の分類別の費用を表 3.3 に示す^{18),19)}。また、津波堆積物全量に対する再利用による処理の割合を s とおき、再利用率と定める。

$$E_r = \sum_{i=1}^n y_i \cdot z_i(t) \times (1-a) \times s - p[\text{円}/t] \times W[t] \times s \quad (3.12)$$

ここで、 p ：最終処分単価（円/m³）、 s ：再利用率を指す。

このとき最終処分による処理の割合は $(1-s)$ であるので、再利用を処理・処分過程において併用する際の最終処分に関する環境影響度は

$$E_f = \sum_{i=1}^n y_i \cdot z_i(t) \times (1-a) \times (1-s) \quad (3.13)$$

となる。

3.6.4 他県受入れの環境影響の定量化

他県受入れに関する環境影響を定量化においては、運搬時の環境影響を考える。広域的な処理を行う際に、津波堆積物を仮置き場から離れた地域の中間処理場（施設）、最終処分場まで輸送するには運搬車両を用いる。運搬車両を利用した場合、様々な大気汚染物質が排出されるが、本研究では CO₂ に着目して、CO₂ 排出量を輸送に伴う環境影響として算出する。国土交通省が発表する 1t の荷物を 1km 輸送するのに排出される CO₂ 排出量に関する輸送排出原単位を用いて環境影響度の算出を行う²⁰⁾。輸送手段ごとの輸送排出原単位を表 3.4 に示す。また、他県受入れ量は津波堆積物の受入れ可能量によって変化する。

$$E_a = \text{CO}_2 \text{貨幣価値原単位}[\text{円}/t - \text{CO}_2] \times \text{輸送排出原単位} \times W_a[t] \times L[\text{km}] \quad (3.14)$$

ここで、 W_a ：輸送される重量（t）、 L ：輸送距離（km）を指す。

また、他県受入れを行う際には、現地での処理・処分における環境影響度と別々に算出する。変数は現地と他県で独立に与え、環境影響度と終了時間を算出する。

3.6.5 他県受入れ先が複数の場合

津波堆積物を複数の県・地域が受け入れる場合、それぞれの地区における他県受入れ量、中間処理、最終処分、再利用に関する環境影響度を考える必要がある。すなわち、環境影響度は他県受入れ先が n ヶ所ある場合以下のようにそれぞれの環境影響度の和で表される。

$$E_i = \text{CO}_2\text{貨幣価値原単位}[\text{円}/t - \text{CO}_2] \times C + \sum_{i=1}^n \text{CO}_2\text{貨幣価値原単位}[\text{円}/t - \text{CO}_2] \times C_i \quad (3.15)$$

$$E_f = \sum_{i=1}^n y_i \cdot z_i(t) \times (1-a) \times (1-s) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_{ij} \cdot z_{ij}(t) \times (1-a_i) \times (1-s_i) \quad (3.16)$$

$$E_r = \sum_{i=1}^n y_i \cdot z_i(t) \times (1-a) \times s - p[\text{円}/t] \times W[t] \times s + \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m y_{ij} \cdot z_{ij}(t) \times (1-a_i) \times s_i - p_i[\text{円}/t] \times W_i[t] \times s_i \right) \quad (3.17)$$

$$E_a = \sum_{i=1}^n \text{CO}_2\text{貨幣価値原単位}[\text{円}/t - \text{CO}_2] \times \text{輸送排出原単位} \times W_{ai}[t] \times L_i[\text{km}] \quad (3.18)$$

ここで i : 他県受入れ先、 j : 物質の種類を表している。すなわち他県受入れ先が n ケある場合、環境影響度は $4n+4$ 個の項の足しあわせで算出される。

3.7 終了時間の算出

終了時間とは津波堆積物の処理・処分過程が全て終了する時間とする。終了時間は処理・処分の終了は最終処分・再利用の終了を意味するので、現地における最終処分終了の時間を t_l 、再利用終了の時間を t'_l 、他県における最終処分終了の時間を t_i 、再利用終了の時間を t'_i とすると、処理・処分全体の終了時間 t_a は

$$t_a = \max(t_l, t'_l, t_i, t'_i) \quad (3.19)$$

$$t_l = w_l / D_l, t'_l = w'_l / D'_l, t_i = w_i / D_i, t'_i = w'_i / D'_i$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

で与えられる。ここで、 i は他県受入れ先、 w : 最終処分、再利用が行われる重量、 D : 最終処分、再利用の一日当たりの処理量を表している。

3.8 環境評価モデルにおける不確実性の考慮

3.8.1 不確実性の考慮の必要性

津波堆積物の処理・処分における環境影響評価を行うには、これまで述べてきたように様々なデータが必要となる。これらのデータの数値は状況によって変化するためパラメータの幅を持たせる必要がある²¹⁾。例としては、輸送排出原単位は主に車両による運搬をもとに算出を行うが、津波堆積物の発生量は膨大であることから鉄道、船舶による輸送も考えられる。輸送距離に関しては、どの都道府県、市町村に輸送するかで輸送距離が大きく異なる。また、津波堆積物の性状が異なれば生じる環境影響にも差が生じる。本研究では時間スケールをモデルに組み込んでいるが、中間処理量、

他県受け入れ量といった数値は、天候や交通状況等によって逐一変化する。このようにデータは変動性を持つ。加えて、環境影響度の総和の算出式では非線形式となっており、データの変動性を受けやすい。また、環境会計は近年になって急速に発展してきている分野であるため、環境価値を正確に評価できているかの検証が十分行われているとは言えない。すなわち、環境評価モデルの対象範囲や算定基準等に改善の余地がある。よって、変動性と不確実性によりベースケースとして算出した評価が実際の評価と大きく乖離する可能性がある。その結果、環境保全を推進する行為が期待すべきものとは異なるベクトルの効果として現れる危険性がある。環境保全・抑制が実際の環境負荷の減少につながるために、不確実性の考慮は不可欠と言える。

3.8.2 感度分析

不確実性を考慮するために使われる手法の一つに感度分析がある²²⁾。感度分析とは、分析したいアウトプットをインプットとなるいくつかの変数に分け、その内一つの要素を最小値から最大値まで変化させたときの、結果がどれだけ変化したのかを分析する手法である。なお、変動させる変数以外の変数はベースケースに固定する。感度分析をモデル中の全ての不確実要素で行い、アウトプットの変化の振れ幅の大小によって、その不確実要素がどれだけ支配的であるかを知ることができる。不確実要素の影響度を知ることによって、津波堆積物の処理・処分において優先的に対処すべき対象が把握でき、環境影響の抑制を効率的に行うことが可能となる。

3.8.3 モンテカルロシミュレーション

モンテカルロシミュレーションとは、感度分析が一つの不確実要素を変化させる手法であるのに対し、全ての不確実要素を同時に変化させることで確率的に起こり得る全ての現象を把握する手法である。まず、不確実要素に確率分布を定義し、乱数を発生させる。確率分布に対応する累積分布関数と乱数の関係からランダムにインプットの値を抽出する試行を繰り返し行い、得られた結果からアウトプットの分布を推定する。このとき、連続量となる確率変数を近似的に離散量として扱っている。同様に、全ての不確実要素を変化させる分析法に、ベストケース・ワーストケース分析がある。しかしながら、この場合個々の値の変化がアウトプットに及ぼす影響は分析されずアウトプットの最大値、最小値を与える値の組み合わせのみが分析され、実際の値と乖離することが多い。このためモンテカルロシミュレーションの方が実用的である。

第4章 津波堆積物の処理・処分に関する環境影響評価と考察

4.1 概要

第3章では、津波堆積物の処理・処分に関する環境影響を定量化するための評価モデルの構築を行った。本章では、評価モデルを処理・処分シナリオに適用し、津波堆積物の処理・処分過程における環境影響を定量化する。また、異なるシナリオ間での比較・検討を行い効率的な処理シナリオを決定する。

4.2 仮定条件

津波堆積物の処理・処分における環境影響評価を行うにあたり、仮定条件は以下のとおりである。

- ② 時間 (t) =0 において仮置き場に存在する津波堆積物は 1,000,000t とする。
- ③ 比重は汚泥の密度 1.1t/m^3 を用いる。
- ④ 仮置き場の津波堆積物は高さ 5m・仰角 45° の正四角錐台の形に積まれているとする (図 4.1 参照)。
- ⑤ $t=0$ より仮置き場における津波堆積物の環境影響度を算出し、全ての処理・処分が始まるとする。
- ⑥ 処理・処分における時間の遅滞 (ずれ) は考慮しない。
- ⑦ 中間処理、最終処分、再利用を行う際の運搬に生じる CO_2 排出量は考慮しない。
- ⑧ 津波堆積物の処理・処分の終了は、最終処分または再利用が行われ完了した時点とする。
- ⑨ 他県受入れの運搬に要する時間は考慮しない。
- ⑩ 再利用もしくは最終処分を行う際は、原則として中間処理を経るものとする。

4.3 シナリオ作成

シナリオ作成にあたっては、環境省より発表された「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)」⁴⁾を参考にする。マスタープランにおける災害廃棄物処理の概略的な流れとしては、仮置き場の確保、収集、中間処理、最終処分・再利用の順である。本研究では津波堆積物の収集は既に行われている時点 (すなわち、津波堆積物は全て仮置き場に集積されている) からの環境影響を評価する。

ベースラインシナリオとして仮置き場から中間処理、最終処分を行うシナリオを設定する。津波堆積物の移動を考慮してシナリオ作成は行われる。また、マスタープランでは広域処理の重要性が述べられており、被災地だけでは処理能力が足りないことに加えて、広域処理を併用して行うことで処理・処分が効率的になる場合があり、処

理方法の選択肢を広げる観点からも促進を図る必要性がある。本研究においても、広域処理の必要性を踏まえ、他県受入れの表現で処理・処分シナリオに組み込む。また、他県受入れ量は受入れ状況の変化によって大きく異なると考え、受入れ可能他県数、他県受入れ量を様々な値に設定したシナリオを作成する。他県受入れを行う際は、仮置き場からの運搬を考え、中間処理、最終処分は運搬した場所で行われるとする。再利用の促進もマスタープランで重要な項目の一つとなっている。津波堆積物の発生現場において危険物、資源物を分別収集するなど、可能な限り粗分別を行い仮置き場へ運搬した後に災害廃棄物の特性に応じて適切な処理を行う必要性がある。また、再利用を促進するため、再利用が可能な廃棄物の種類や発生量等を把握することも肝要である。その結果として、廃棄物処理コストの低減、最終処分量の削減に寄与する。本研究では仮置き場においては粗分別は行われているものとして考え、特に最終処分量の削減に着目して再利用を考え、処理・処分シナリオに組み込む。シナリオのイメージを図 4.2 に示す。また、中間処理を行わないシナリオと処理を何も施さないシナリオを考え、処理・処分が環境影響度の減少に寄与しているかを検討する。

シナリオ設定の変数として一県あたりの他県受入れ量、受入れ可能な県の数、現地での再利用率、他県での再利用率を考える。本研究では主に単一県への受入れを想定するので三つの変数をシナリオ設定変数とする。また、他県受入れ量 100t/日を単位量として、他県倍率を設定する。他県倍率は他県受入れ量の大きさを表し、他県受入れ量は他県倍率×100t となる。シナリオ設定に関して、他県倍率は 0～10、現地再利用率と他県再利用率は 0～1 の範囲を考える。

シナリオ表示は（他県倍率，現地再利用率，他県再利用率）のように表し、例えば（1，0.5，0）であれば他県倍率が 1、現地再利用率が 0.5、他県再利用率が 0 を表す。ベースシナリオは（0，0，0）とする。処理・処分との対応例を表 4.1 に示す。

4.4 ベースケースでの試算結果

津波堆積物の処理・処分に関する環境影響度と終了時間をシナリオ間ごとに算出する。断りがないかぎり環境影響度とは項目別の環境影響度の総和を意味する。また、既往の研究・文献等^{6),15),16),18),19)}から得られた、ベースケースとして設定した値を表 4.2 に示す。シナリオの設定としては、他県倍率を 0、1、10、現地・他県再利用率を 0、1 の組み合わせを考える。他県倍率が 0 のとき他県再利用率は 0 となるため 10 通りの処理・処分シナリオを考えればよい。

設定したシナリオに沿って、汚染物質が環境基準値である場合で計算した時間－環境影響度の関係を図 4.3 に示す。直線が折れ曲がる点が処理終了の時点を表している。この点での環境影響度と時間をシナリオごとに比較する。終了時点における環境影響

度と終了時間のシナリオごとの値を表 4.3 に示す。まず環境影響度に関する比較を行う。(0, 0, 0)における環境影響度は 325×10^8 円となった。各シナリオにおいてこの環境影響度と $\pm 10\%$ 以上の差がでるのは (0, 1, 0)、(1, 1, 0)、(1, 1, 1)、(10, 1, 0)、(10, 0, 1)、(10, 1, 1) の場合である。環境影響度はそれぞれ 273×10^8 円、 278×10^8 円、 274×10^8 円、 302×10^8 円、 302×10^8 円、 276×10^8 円となった。これらは全て再利用を行った場合であり、再利用による価値が環境影響度に反映されたものと考えられる。また、(0, 1, 0) と (1, 1, 1) のように他県受入れ倍率のみが異なるシナリオの場合、再利用における値の差は他県受入れを行った場合の環境影響度の差を表している。次に終了時間での比較を行う。(0, 0, 0)における値は 1000 日であり、他県倍率を大きくするに従い、終了時間は短縮される。他県倍率 1 のとき 909 日であり、他県倍率 10 のとき 500 日となる。

また、同様の操作を汚染物質が調査値⁹⁾である場合でも行う。このときの時間－環境影響度の関係を図 4.4 に示す。環境影響度に関して (0, 0, 0)における値は 44.5×10^8 円となった。この値は環境基準値を用いて計算した際のおよそ 7 倍となっている。(0, 1, 0)、(1, 1, 0)、(1, 1, 1)、(10, 1, 0)、(10, 0, 1)、(10, 1, 1) において $\pm 10\%$ の差が見られ、値は -8.27×10^8 円、 -2.82×10^8 円、 -7.62×10^8 円、 21.7×10^8 円、 21.7×10^8 円、 -4.66×10^8 円となった。やはり再利用における環境影響度の減少が大きい。終了時間に関しては環境基準値を用いて計算した場合と変わらない。

これらの結果から環境影響度を減少させるためには再利用率を、終了時間を短縮させるためには他県倍率を大きくすればよい。すなわち、これは広域的処理を促進し、可能な限り再利用を行うという環境省のマスタープランに合致すると考えられる。

4.5 支配的要因の抽出

環境影響に大きな影響を与える要因を探るために感度分析を行う。ここで、環境影響度算出における不確実要素の最小値・中央値・最大値を表 4.4 に表している。また、津波堆積物中の汚染物質の環境基準値、調査値の最小値・中央値・最大値を表 4.5 および表 4.6 に表す。着目した不確実要素を最小値から最大値まで動かし、他の不確実要素は中央値で固定させた場合のアウトプット（環境影響度の値）の変化の差を考察する。アウトプットの振れ幅によって、不確実要素のアウトプットに対する影響度を図ることができる。ここでの環境影響度の値とは津波堆積物の処理・処分が終了する時間における環境影響度とする。また、感度分析を行う際のベースシナリオは (1, 0.5, 0.5) と設定して行う。しかしながら、他県倍率、現地・他県再利用率の値を変動させる場合はこの限りではなく、他県倍率の値を 0 とするときは他県再利用率も 0 として計算している。

汚染物質の含有量に関して、環境基準値を用いた場合の感度分析の結果を図 4.5 に示す。影響度の大きさとしては、重金属の影響度が非常に大きい。また、現地中間コストにおける影響度も大きい。これは中間処理コストの大小によって汚染物質の有害性をどれほど減少できるかが決定されるためであり、中間処理コストを重視して適切に汚染物質を除去することが環境影響度に極めて大きな影響を与える結果となった。現地再利用における価値の影響度も大きい。現地再利用率の影響度も大きく再利用が環境影響度に大きく関係していることがわかる。ただし、不確実要素の内、現地と他県の違いについては、現地と他県での処理量が異なる点のみに依存することに注意する必要がある。

次に、汚染物質の含有量に関して、観測値を用いた場合の感度分析の結果を図 4.6 に示す。基準値を用いた場合と同様に重金属に関する影響度が大きい。基準値の場合より重金属の含有量が小さい分、再利用に関する影響度が相対的に大きくなっている。どちらの場合においても重金属が処理・処分過程において与える影響は大きく特に注意深く対策する必要がある。

処理・処分の終了時間についても本来ならば感度分析を行う必要があるが、本研究では終了時間は各処分段階の処理量のみ依存するため本研究では取り扱わない。

4.6 不確実性の考慮

4.6.1 仮定

全ての不確実要素を考慮するため、モンテカルロシミュレーションを行う。仮定条件は以下のとおりである。

- (1) 不確実要素の確率分布について表 4.4 にもとづき三角分布を作成する。
- (2) 試行は同じシナリオに対し 1,000 回行うものとする。

シナリオを変えてモンテカルロシミュレーションを行い、シナリオごとの環境影響度と処理・処分の終了時間を求め、比較・検討を行う。

4.6.2 環境影響度のシナリオ間比較

シナリオごとのモンテカルロシミュレーションによって得られた環境影響度に関するヒストグラムを図 4.7 に示す。全てのヒストグラムで平均値が中央値より大きい結果となっており、その差は $9.75 \times 10^8 \sim 3.42 \times 10^8$ 円の間にある。標準偏差は $9.58 \times 10^9 \sim 1.09 \times 10^{10}$ となっており、シナリオ間で値のばらつきに大きな差はないと考えられる。

環境影響度の分散と他県倍率・再利用率との関係を図 4.8 および図 4.9 に示す。また、他県受入れに関する環境影響度と総和から他県受入れに関する環境影響度を引いた環境影響度、再利用に関する環境影響度と総和から再利用に関する環境影響度を引

いた環境影響度の相関係数の関係を図 4.10 および図 4.11 に示す。他県倍率を大きくするほど分散の値は小さくなっている。また、このとき相関係数は小さくなっている。一方、再利用率の値が大きくなると分散は大きくなり、相関係数は小さくなっている。これらの結果から他県受入れ量を増やすことと再利用率を大きくすることによる、環境影響度への総和に対する相関性は異なる。

4.6.3 中間処理を行わない場合との比較

これまで考えたシナリオは最終処分・再利用を行う際に中間処理を経るものとして考えていた。しかしながら、十分な中間処理をせずに最終処分・再利用を行ってしまう場合も考えられる。よって、処理・処分過程において中間処理を行わない場合のシナリオを考え、比較・検討を行う。具体的には (1, 0.5, 0.5) において、現地での処分に関して中間処理を行わない場合 (現地なし)、他県での処分に関して中間処理を行わない場合 (他県なし)、現地・他県どちらの処分に関しても中間処理を行わない場合 (両方なし) を考える。

ここで、例として (1, 0.5, 0.5) における環境影響度のヒストグラムと対応する累積分布関数を図 4.12 に示す。モンテカルロシミュレーションを 1000 回試行した場合、あらゆる状況を考慮して値が算出されるが、誤差が生じると考えられ、全てのアウトプットを信頼できるわけではない。そこで、モンテカルロシミュレーションで得られたヒストグラムにおける環境影響度の値の内、誤差を考慮した算出値の範囲を信頼水準として考える。ここでは信頼水準を 95%、99% とし、信頼水準における最大値を Z とする。 Z とは一定の信頼水準における予想最大環境影響度ということになる。 Z をシナリオ間で比較することでシナリオにおける環境影響度のリスクを探る。中間処理を行う、現地なし、他県なし、両方なしのシナリオにおける平均、分散を表 4.7、信頼水準 95%、99% での Z を表 4.8 に示す。また、これらのシナリオの環境影響度に関するヒストグラムを図 4.13 に示す。他県、現地含めた中間処理における処理量は大きい順に、中間処理を行う、他県なし、現地なし、両方なしであり中間処理量に反比例して平均、分散は大きくなっている。また、信頼水準 95% のとき Z は、中間処理を行う場合が 372×10^8 円、現地なしが 620×10^8 円、他県なしが 396×10^8 円、両方なしが 664×10^8 円となった。信頼水準 99% の場合は 463×10^8 円、 710×10^8 円、 484×10^8 円、 798×10^8 円である。この値が大きいほど環境に与えるダメージは大きく、中間処理を行わない場合はその分環境影響に関してリスクが増大すると考えられる。

ここまでは他県での受入れを考慮したシナリオにおける中間処理の有無に焦点を当てて議論を行っていたが、中間処理量のみを考えるため現地だけで処理を行う場合を考える。処理を行う津波堆積物の全量の内、中間処理を行う割合と Z 、分散の関係を

図 4.14 に示す。中間処理を行う割合が減少するにつれ、Z、分散とも上昇している。また、平均は中間処理の割合が 10%減少するごとに環境影響度は 22.5×10^8 円上昇している。

これらの結果から中間処理を行い、津波堆積物中の汚染物質の有害度を減少させることが、処理・処分過程における環境影響を抑えるためには重要であることが考えられる。

4.6.4 終了時間のシナリオ間比較

シナリオごとのモンテカルロシミュレーションによって得られた終了時間に関するヒストグラムを図 4.15 に示す。再利用を行う場合と行わない場合とでは分布は同じ形状をしており、違いはないと考えられる。他県受入れを行う場合では、他県受入れ量を増大させるほど分布の分散は小さくなり、終了時間は短縮されている。このことから、終了時間は他県受入れを行うと短縮されると考えられる。これは、終了時間が仮置き場から津波堆積物を除去する一日当たりの量にのみ依存しているからで、本研究では除去量の増減が他県受入れを行うことのみで変化するためである。

4.6.5 一日単位での不確実性の変動

処理・処分過程において一日経つごとに不確実要素を変化させてモンテカルロシミュレーションを 1000 日経過するまで行う。この試行を 100 回行いシナリオごとの不確実要素に対する幅を検討する。ベースシナリオ (0, 0, 0)、他県受け入れを行うシナリオ (10, 0, 0)、再利用を行うシナリオ (0, 1, 0) で評価を行った。このときの時間ごとの 100 ある値の内、最大値と最小値をプロットしてシナリオにおける不確実要素の幅を評価する (図 4.16)。また、シナリオ間での幅と時間の関係を図 4.17 に示す。t=250 まではシナリオ間で大きな変化はないが他県受け入れを行うシナリオの幅がやや大きい。また、再利用を行う場合ベースシナリオよりやや振れ幅が大きい。これは、環境影響度算出の際の項目が多いからである。

4.7 環境影響度と終了時間の総合的評価

4.7.1 概要

本研究では津波堆積物の処理処分を環境影響と時間軸の両面から評価・検討を行ってきたが、どちらか片方をシナリオ間で比較するのみにとどまっている。しかしながら、津波堆積物による環境影響は時間的に変化を伴い、処理・処分が終了する時間によって評価すべき環境影響は異なるはずである。環境影響を評価する際には時間をパラメータに含めなければならない。よって、環境影響と時間を双方から最適な処理・

処分方法を決定するには、二つの評価変量を総合的に定量化する必要がある。定量化に伴い、環境影響と時間を関連付ける架け橋となる基準が必要である。ここでは、ある時間における環境影響度を算出し、シナリオ間の相対的な優劣を決定する方法の検討を行う。

4.7.2 時間的価値

時間—環境影響度の関係の一例を図 4.18 に示す。図のように二つのシナリオを考える。 ΔE は $t=0$ における環境影響度と処理・処分の終了時点における環境影響度との差の値、 Δt は終了時間を意味する。シナリオ A は処理時間がシナリオ B より短いが環境影響度は大きく、シナリオ B は処理時間がシナリオ A より大きいが環境影響度が小さいシナリオである。シナリオ A の傾きは $\Delta E_1/\Delta t_1$ であり、シナリオ B の傾きは $\Delta E_2/\Delta t_2$ である。 $\Delta E_1 < \Delta E_2$ または $\Delta t_1 > \Delta t_2$ であれば、傾きの大きさによってシナリオの優劣を判断する。ここでは、 $\Delta E_1 > \Delta E_2$ かつ $\Delta t_1 < \Delta t_2$ の場合を考える。このとき $t = \Delta t_1$ における環境影響度はシナリオ A では $E - \Delta E_1$ 、シナリオ B では $E - \Delta E_2 \times \Delta t_1 / \Delta t_2$ となる。両者の差を時間的価値として

$$T_v = \Delta E_2 \times \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} - \Delta E_1 \quad (4.1)$$

とおく。 T_v は処理時間が短いシナリオ A における、処理時間がかかるシナリオ B に対する相対的な価値として終了時の環境影響度から引く。この値をシナリオ B の環境影響度と比較することでシナリオ間の優劣を決定する。つまり、評価式

$$D = \Delta E_2 - \Delta E_1 - T_v \quad (4.2)$$

が正であればシナリオ A が支持され、負であればシナリオ B が支持されることになる。この評価式を用いて最適なシナリオを考える。4.6.2 で、環境影響度が一番小さいシナリオは (0, 1, 0)、最も処理時間が短いシナリオは (10, 0, 0) という結果が得られた。また、(10, 0, 0) と (10, 1, 1) を比較した場合終了時間は同じであるが、環境影響度は (10, 1, 1) の方が小さいので (10, 1, 1) の方が優れている。そこで、(0, 1, 0) と (10, 1, 1) を比較することにする。モンテカルロシミュレーションを 1000 回行い、両者の値を比較して優劣を決定する。不確実性を考慮した結果、二つのシナリオの時間—環境影響度の関係としては図 4.19 のようなものが考えられた。4 通りの場合が考えられ、(a), (c) に関しては T_v を用いて優劣を決定する。(b)、(d) に関してはどちらか一方が環境影響度、終了時間も優れているため明らかに優劣が決定す

る。全ての場合における優劣の結果を表 4.9 に示す。表に記載している数字は優れていた回数を表しており、88.7%の確率で (0, 1, 0) より優れている。本研究におけるシナリオ設定で最も優れたシナリオは (10, 1, 1) という結果となった。これは本研究において、他県受入れを 1000t/日行った場合に生じる環境影響度は処理時間を短縮する場合に得られる時間的価値より小さいことを意味しており、広域的な処理を推進したほうが環境影響は抑制できることを示している。

第5章 結 論

5.1 本研究の成果

本研究では東日本大震災により発生した津波堆積物の処理・処分過程における環境影響を定量化し、時間スケールと環境影響度の二つの軸から考察をおこなった。なお、これらの評価・検討を行うことは、一般的な災害廃棄物の処理・処分に関する評価の基盤となり得る。本研究で得られた成果は以下のとおりである。

- (1) 津波堆積物の処理・処分に関する環境影響評価モデルを構築・適用し、環境影響を環境影響度として貨幣価値に換算することができた。また、処理・処分が完了するまでの時間を定量化することで、一元的な評価だけでなく様々な角度からの評価が可能になった。また、二次仮置き場における津波堆積物の環境影響を定量化することで、二次仮置き場の環境管理の重要性が明らかになった。
- (2) 感度分析をおこなうことによって、津波堆積物の処理・処分で生じる環境影響に大きな影響を与える要因が重金属量、最終処分に要する費用、再利用の割合であることが明らかになった。重金属量が最大値のときとベースケースとを比べると環境影響度は 149×10^8 円増大している結果となった。また、他県受入れに関する不確実要素の影響度は小さく、他県受入れを促進する結果が得られた。
- (3) モンテカルロシミュレーションの実施によって、実際に起こり得るアウトプットの分布が確認できた。複数のシナリオ間で分布を比較することで、処理・処分において環境影響を抑制するために肝要な部分がわかった。再利用の割合を増やすと環境影響度が減少する。これは最終処分量の減量のためである。全て再利用を行う場合とまったく行わない場合を比べると、環境影響度の差は 52×10^8 円であった。処理時間には処理量が大きく関係しており、他県受入れといった広域的な処理を行い、処理量を増やすことが処理時間の短縮に寄与することが確認できた。また、中間処理を行う場合と行わない場合とでは、環境影響度に大きな差が生じ、中間処理を行う割合が10%減少するごとに環境影響度は 22.5×10^8 円増大した。
- (4) 終了時間と環境影響度を総合的に評価するため、処理・処分が早く終わるシナリオにおける終了時間の短縮の時間的価値を定量化した。これにより、環境影響度と終了時間において大小が異なるシナリオの比較が可能になった。他県受入れ、再利用を可能な限り行う (10, 1, 1) が最も優れたシナリオとなった。

5.2 本研究の課題

本研究は以下のとおりである。

- (1) 本研究の評価モデルの構築において、文献調査等によって得た値は技術革新や環

境影響の価値の変動によって変化する可能性がある。文献調査等を継続して行い、パラメータ設定の精度を向上させる必要がある。

- (2) 時間スケールを考慮して環境影響の評価を行ったが、処理・処分の開始時間の遅延（ずれ）や運搬に生じる時間は省略している。今後時間軸から見たモデルの改善を行う必要がある。
- (3) 処理・処分過程における環境影響を定量化してシナリオの比較・検討を行ったが、より一般的な処理・処分を扱うには直接コストを含めた定量化が必要である。直接コストを含めたモデルを構築する必要がある。
- (4) 本研究では LCIA をもとに環境影響を定量化したが、環境影響評価手法の進展は著しく信頼性が高いものが日進月歩で開発されている。その点もモデルに組み込んでいく必要がある。

最後に、本研究では津波堆積物の処理・処分に関して、環境影響を定量化し時間スケールからの視点を取り入れることで最適な処理・処分方法の決定モデルを構築してきた。環境影響に時間スケールを取り入れることで環境影響を実現象と有機的に結び付けることが可能になり、再利用・広域的処理を定量的に支持することで、津波堆積物の適切な処理・処分の推進に大きく貢献できたのではないだろうか。この結果を用いて政策決定などの意思決定の指標としたい。また、環境影響評価モデルを一般的な処理・処分においても適用し、最適な処理・処分方法の決定、循環型社会の形成に役立てていきたい。

参考文献

- 1) 農林水産省：東日本大震災後の災害廃棄物処理， 2011.
- 2) 宮城県：宮城県災害廃棄物処理実行計画， 2011.
- 3) 環境省：沿岸市町村の災害廃棄物処理の進捗状況， 2011.
- 4) 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.
- 5) 環境省：東日本大震災津波堆積物処理指針， 2011.
- 6) 財団法人先端建設技術センター：建設汚泥リサイクル指針，大成出版社， p.147～149， 1999.
- 7) 日本廃棄物コンサルタント協会：災害廃棄物の推進モデル事業に関するセミナー， 2011.
- 8) 環境省：災害廃棄物の広域処理， 2011.
- 9) 環境省：津波堆積物の化学的性状について， 2011.
- 10) 岡山大学廃棄物マネジメント研究センター：「東日本大震災の災害廃棄物処理の現状と課題」セミナー， 2011.
- 11) 伊坪徳宏・稲葉 敦：ライフサイクル環境影響評価手法， pp.16-58， 丸善株式会社， 2005.
- 12) 全国木材資源リサイクル協会連合会：災害廃&震災産廃の今後の処理の見通し
社団法人地盤工学会九州支部：環境と経済を考慮した建設発生土と廃棄物の再利用， pp.1-86， 2003.
- 13) 前出 12) pp.192-235.
- 14) 前出 12) pp.258-285.
- 15) 環境省：温室効果ガス排出量算定方法検討会：廃棄物分科会報告書， 2002.
- 16) 環境省：産業廃棄物処理分野における温暖化対策の手引き， 2008.
- 17) 農村工学研究所：バイオマス利活用システムの評価手法， 2006.
- 18) 田中信壽：環境安全な廃棄物埋立処分場の建設と管理，技法堂出版， 2000
- 19) 土田大輔・中山裕文・島岡隆行：安定型最終処分場の分類による削減された最終処分費用と潜在的な環境修復費用の推定， 2008.
- 20) 国土交通省：自動車輸送統計年報.
- 21) 澤田美樹子・佐藤夕子：不確実化の意思決定のためのリスク分析手法， 2002.
- 22) 国土交通省：公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針， 2004.

謝辞

本論文の執筆にあたり多くの方々に多くの方々に支えられて研究課題に取り組むことができました。無事1年間を過ごせたことに感謝し、お世話になった方々に心から御礼申し上げます。

京都大学大学院工学研究科・教授・大津宏康先生には、出張等でお忙しい中何度も発表の機会を与えて、その都度厳しくも温かい示唆に富んだ御意見を頂戴することで、混迷を極めた研究の方向性を定めていくことができました。先生のご指導のもとで研究ができたことを誇りに感じるとともに、心より感謝の意を表したいと思います。

京都大学地球環境学堂・准教授・乾徹先生には、本論文の副査を務めていただきました。至らない部分をご指摘頂き、論文を更に充実させることができました。また、研究に関して激励して頂き、深くお礼申し上げます。

京都大学工学研究科・准教授・塩谷智基先生には、普段より気さくに話しかけていただき、研究者とはなんたるかを肌で感じることができました。深く感謝を申し上げます。

京都大学工学研究科・助教・稲積真哉先生には、本研究を全面的にご指導していただき、貴重なお時間を割いて何度も何度もミーティングをして頂きました。本研究に関して数多くのご教授をいただき、研究の道標を示していただきました。また、研究以外の面でもサポートしていただき心から感謝いたします。

伊東宏美秘書には、学生生活全般を支えていただき本当に有難うございます。

また、普段から見守り支えてくださり、時に研究に対する貴重なアドバイスをしていただいた京都大学工学研究科大津研究室の先輩方に心よりお礼を申し上げたいと思います。また同回生の方々にはお互いに助け合い、研究に対する刺激を受けることができました。本当にありがとうございました。

最後に本論文を書き上げることができたのも、大学で勉学を続けさせてくれた両親をはじめとする家族や友人のおかげであり、深く感謝したいと思います。

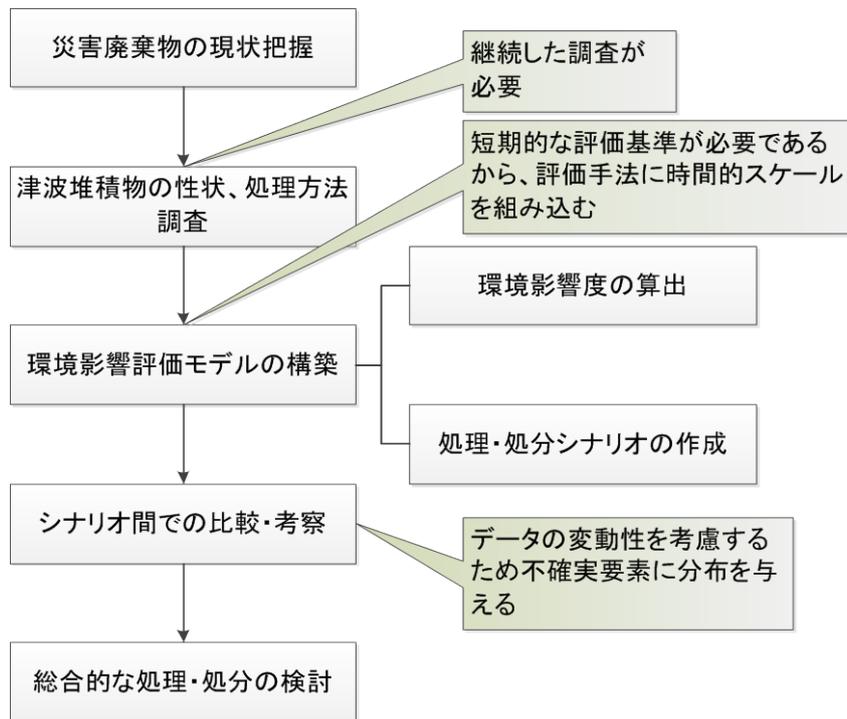


図 1.1 研究のフロー

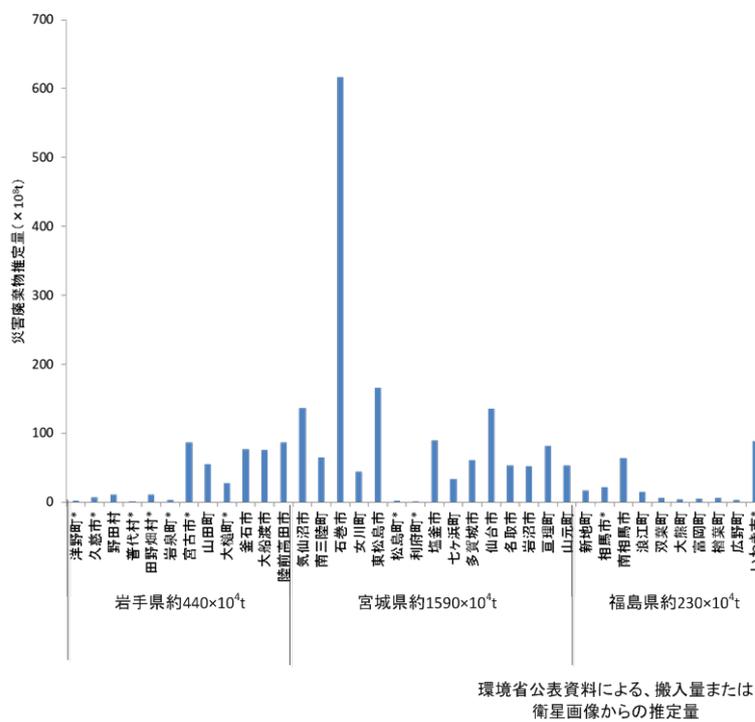


図 2.1 東北3県において発生した災害廃棄物量

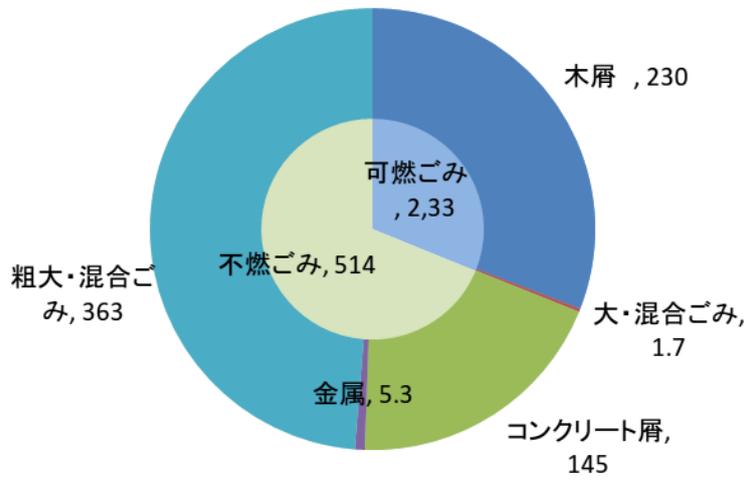


図 2.2 石巻地区の災害廃棄物内訳 (×10⁴t)

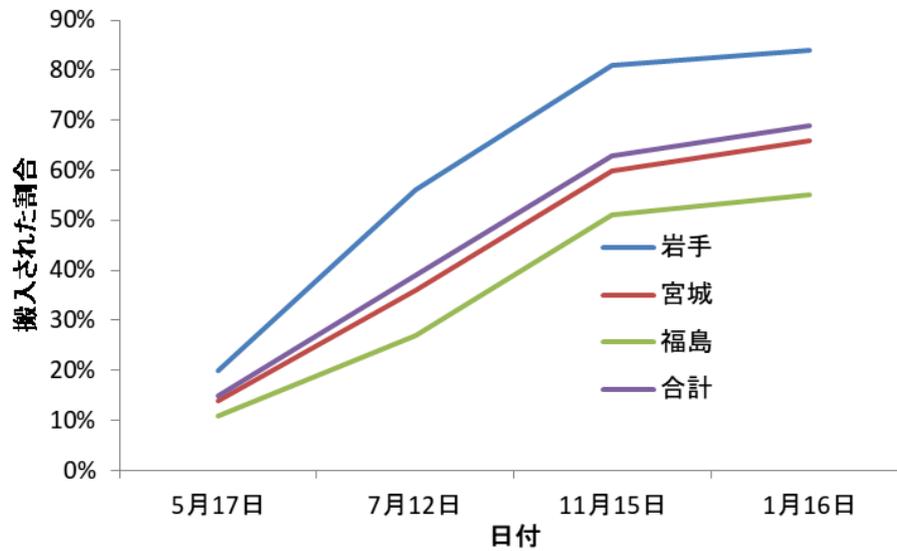


図 2.3 災害廃棄物の一次仮置き場への搬入状況の割合

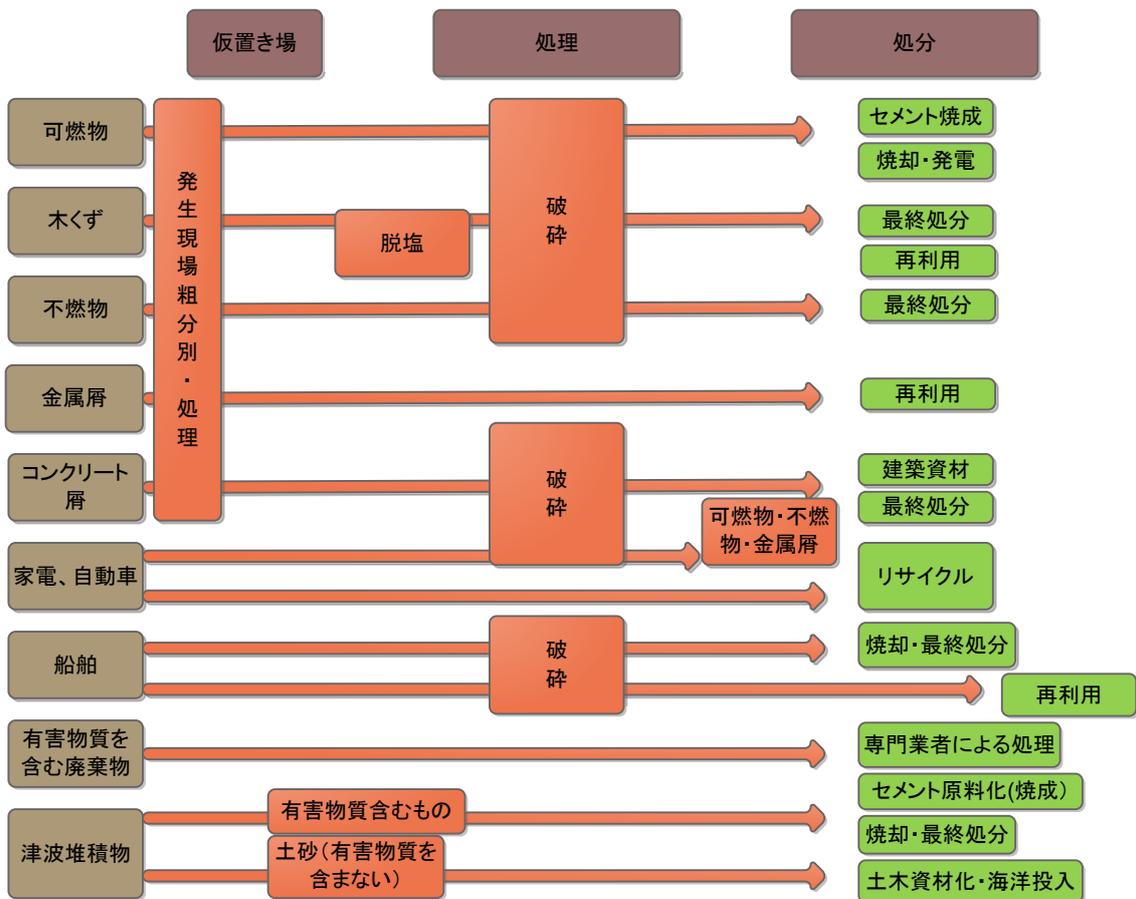


図 2.4 マスタープランによる災害廃棄物処理の概要



(a) 堆積状況①（石巻ブロック災害廃棄物処理場）



(b) 堆積状況②（石巻ブロック災害廃棄物処理場）



(c) 有害物質による汚染（相馬市災害外廃棄物中間処理現場）

図 2.5 二次仮置き場の状況

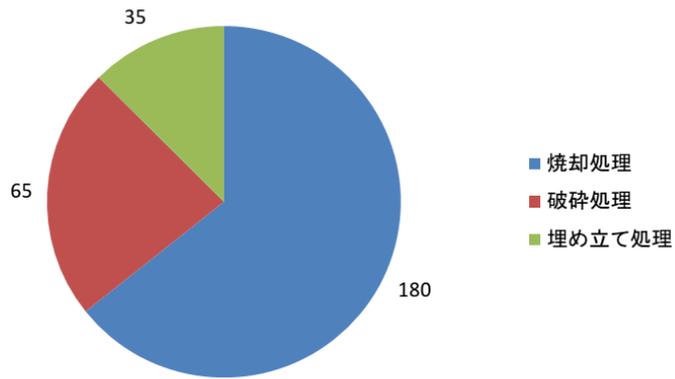


図 2.6 他県受入れにおける受入れ可能量の割合 (×10⁴t)

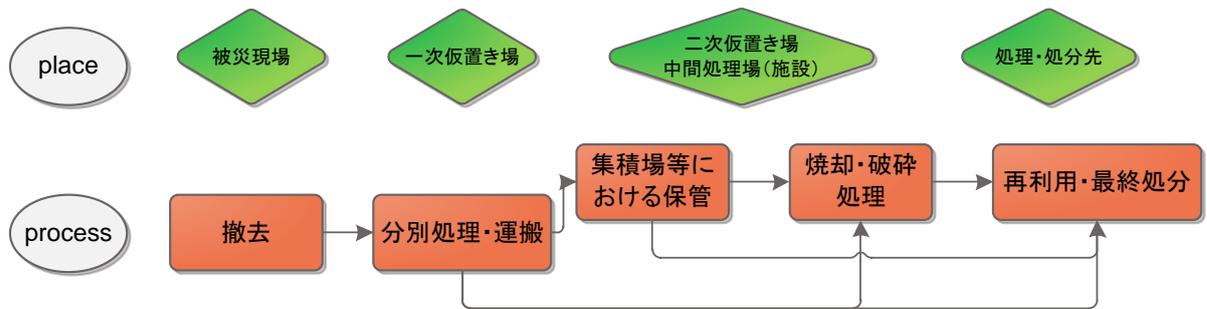


図 2.7 津波堆積物の処理・処分フロー

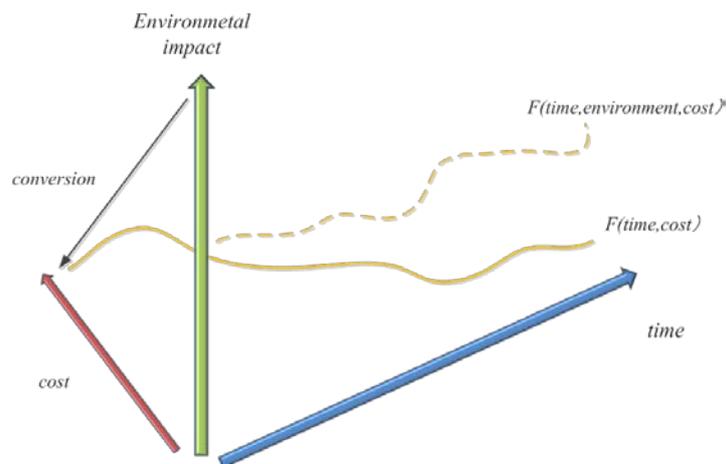


図 3.1 環境影響評価のイメージ

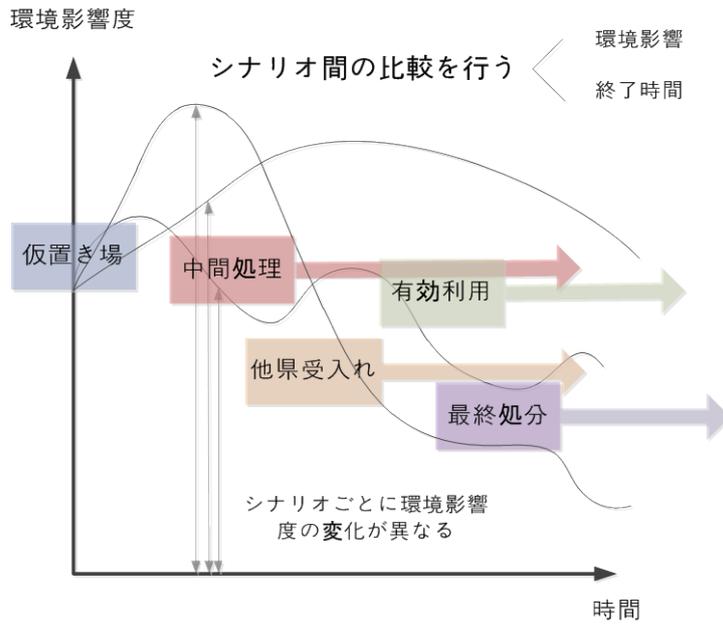


図 3.2 環境影響評価モデルの概要

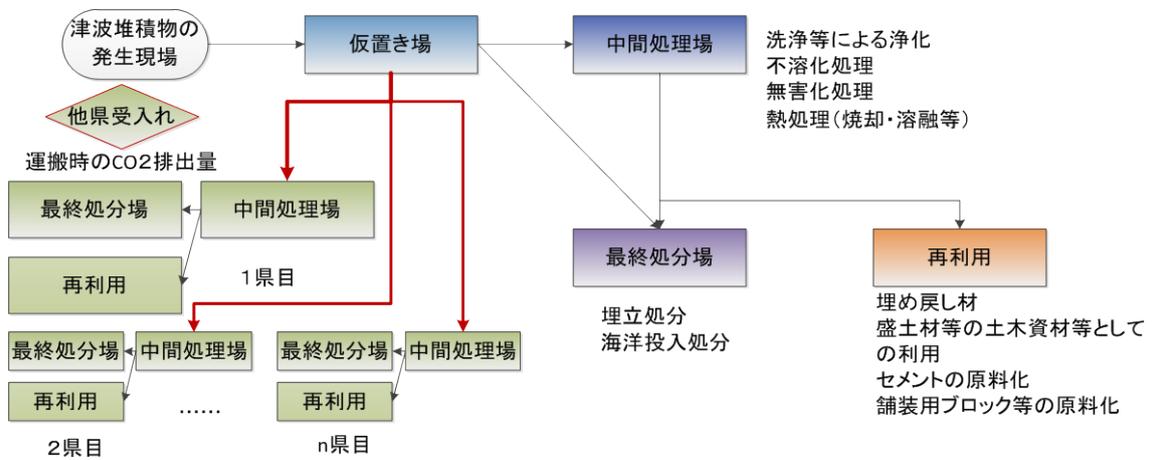


図 3.3 処理・処分のサイクル

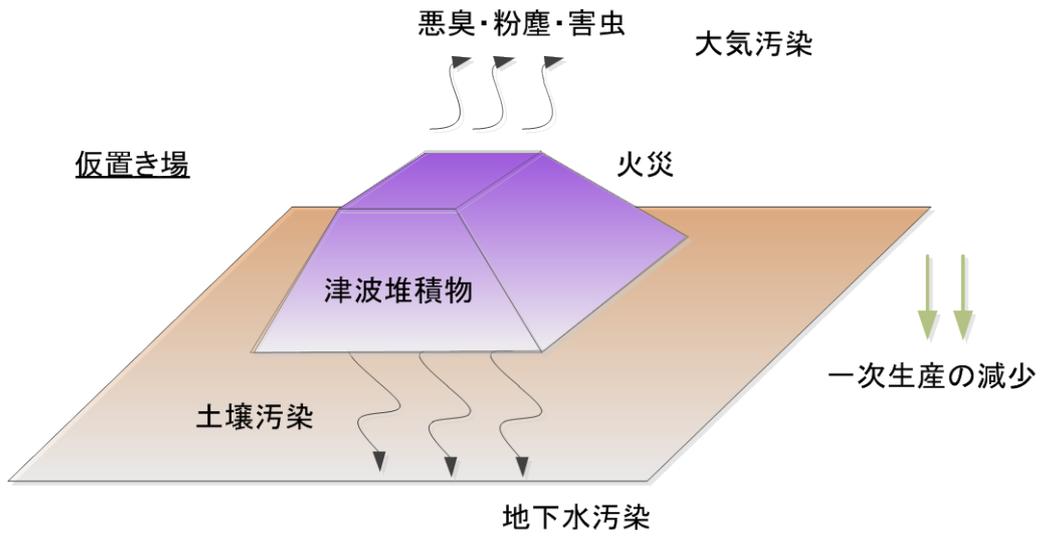


図 3.4 津波堆積物の仮置き場での堆積状況

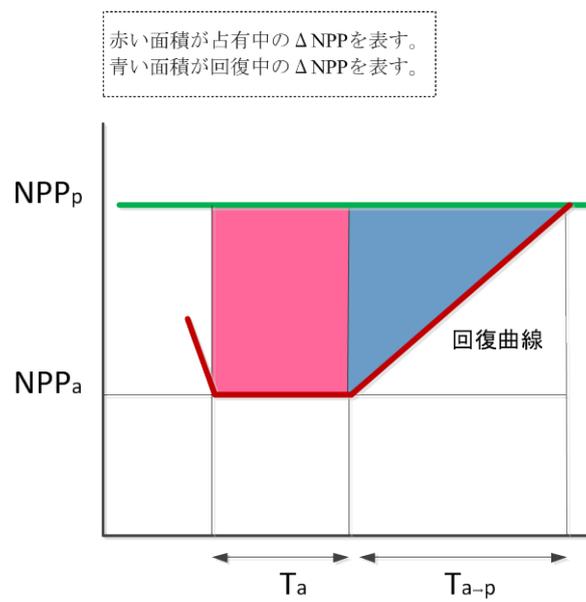


図 3.5 NPP の損失イメージ

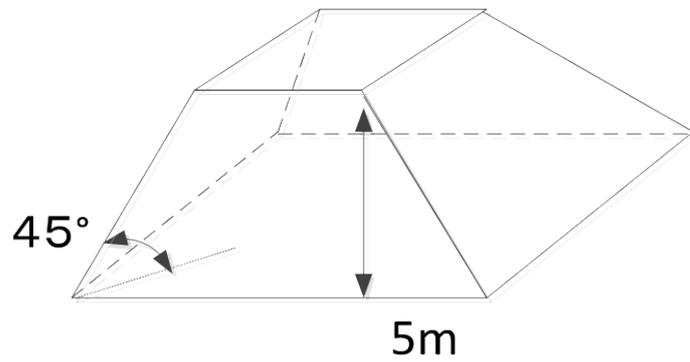


図 4.1 津波堆積物の仮置き場での堆積状況

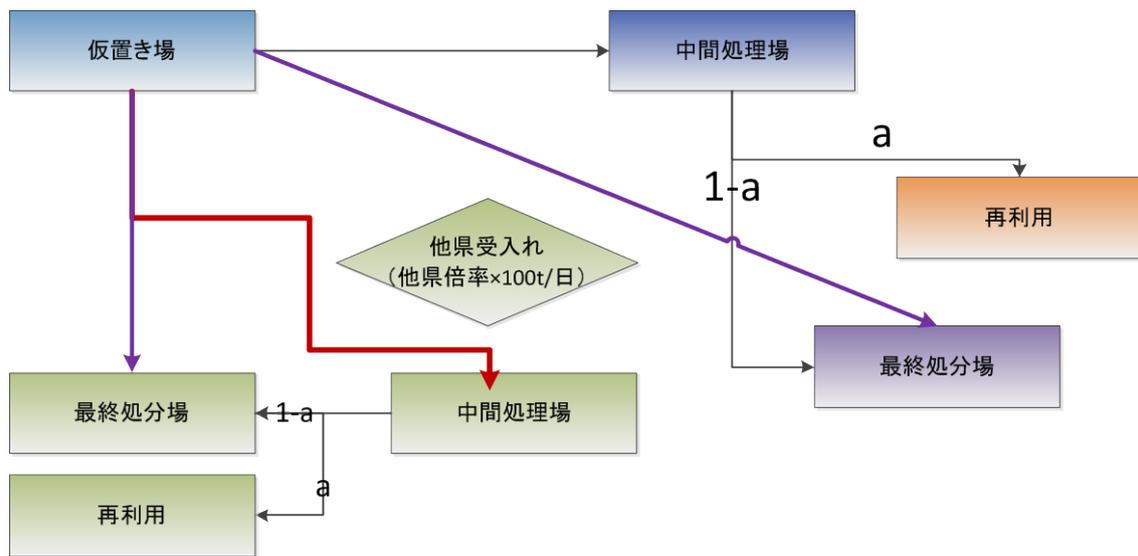


図 4.2 シナリオ作成の際のフロー

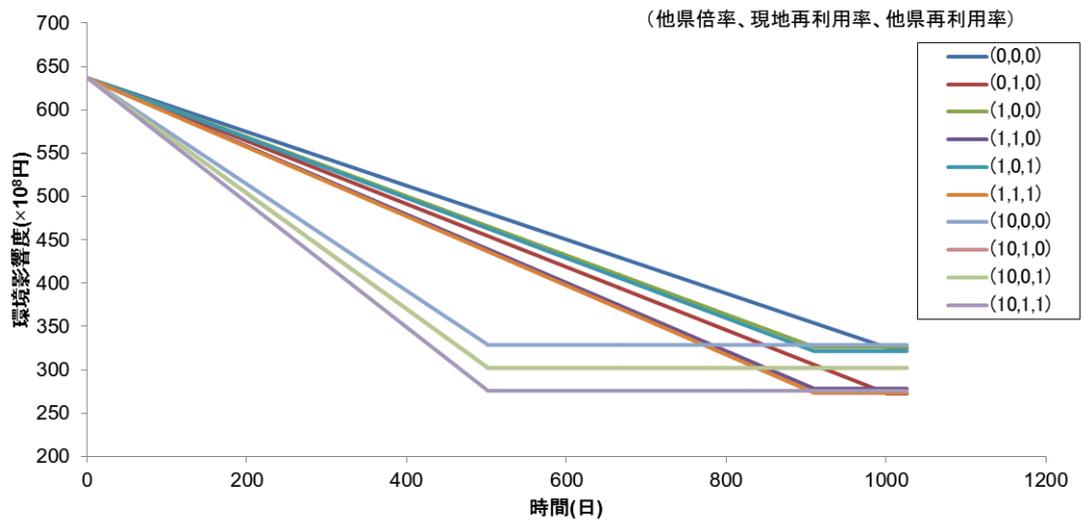


図 4.3 環境基準値を用いた際の時間－環境影響度の関係

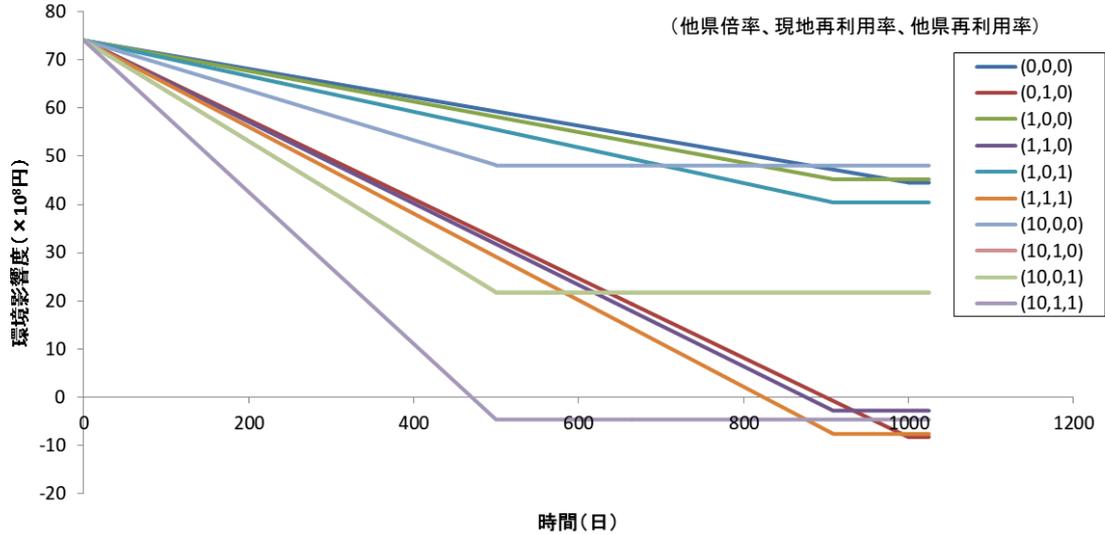


図 4.4 調査値を用いた際の時間－環境影響度の関係

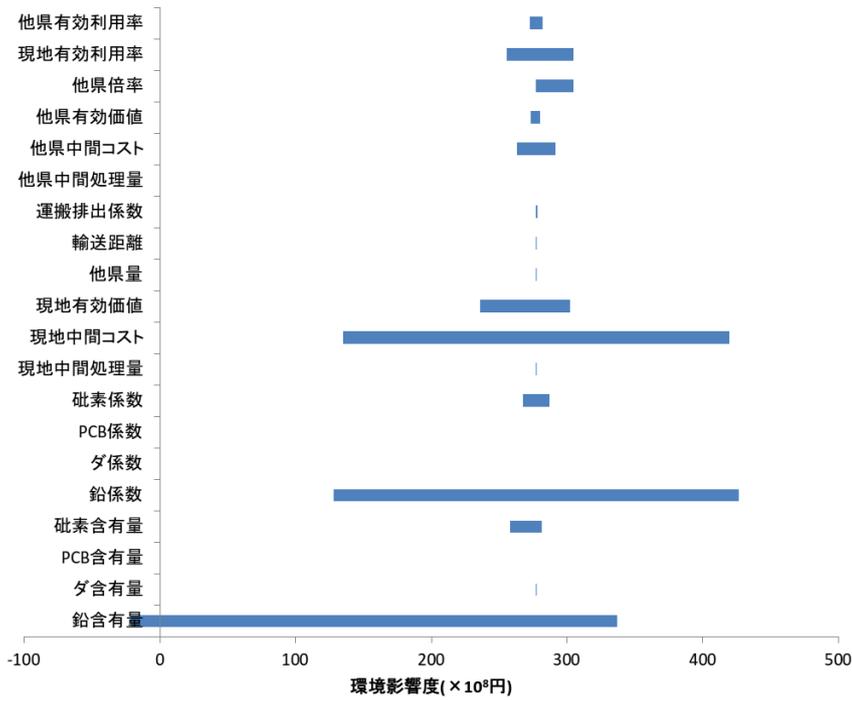


図 4.5 環境基準値を用いた際の感度分析結果

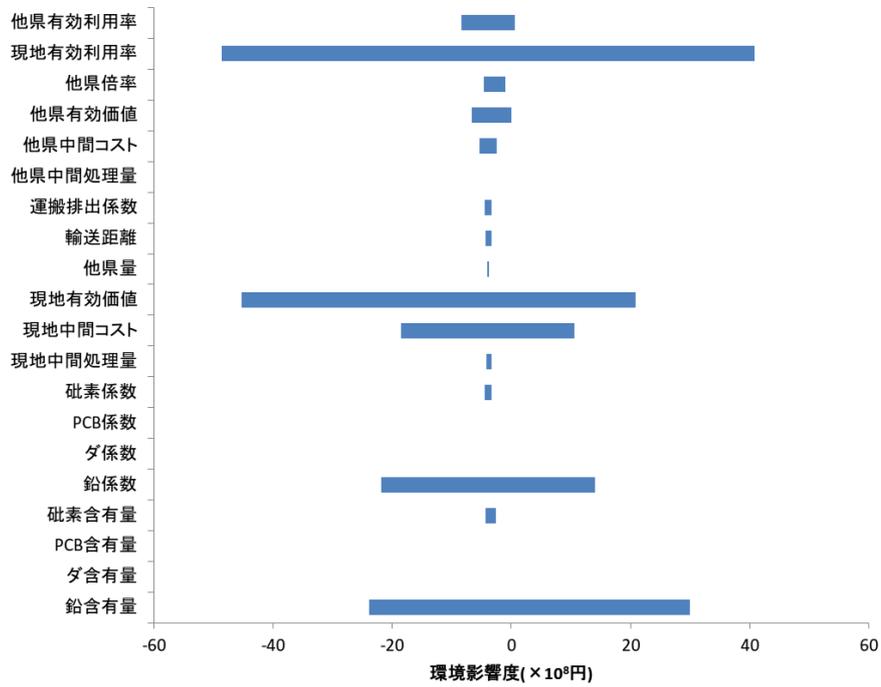
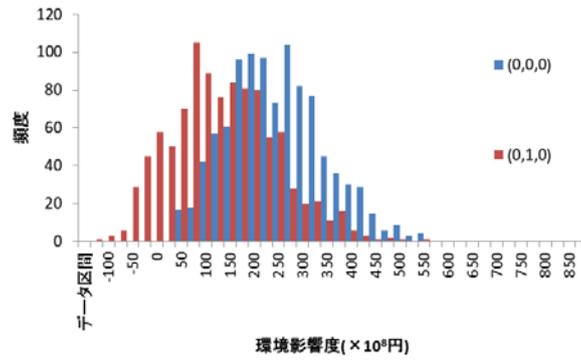
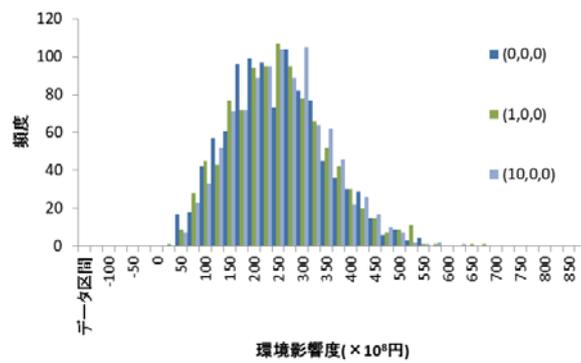


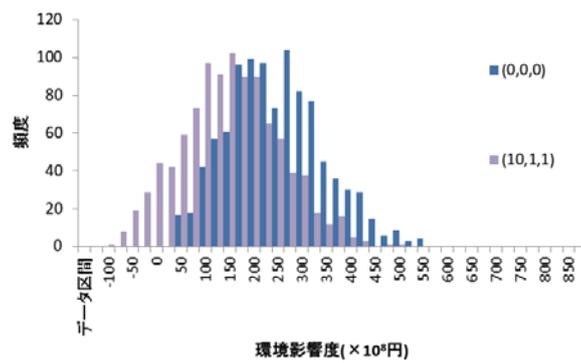
図 4.6 調査値を用いた際の感度分析結果



(a) 再利用を行う場合との比較



(b) 他県受入れを行う場合との比較



(c) 再利用・他県受入れを行う場合との比較

図 4.7 モンテカルロシミュレーションの結果

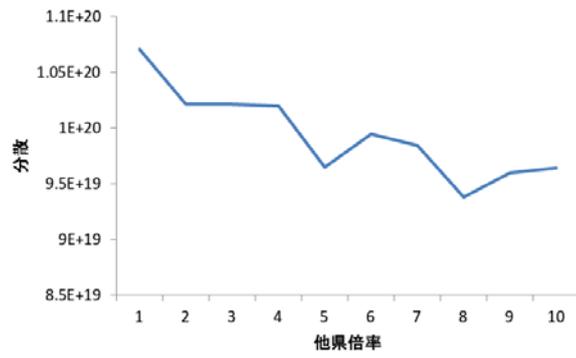


図 4.8 環境影響度の分散と他県倍率との関係

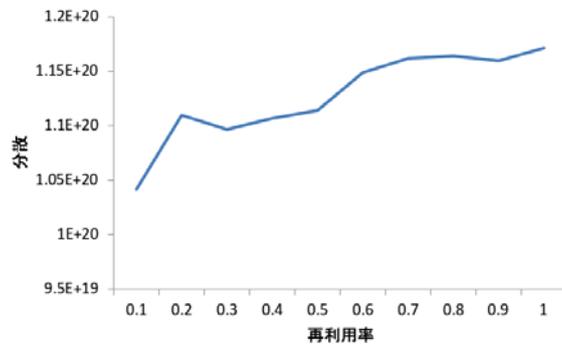


図 4.9 環境影響度の分散と再利用率との関係

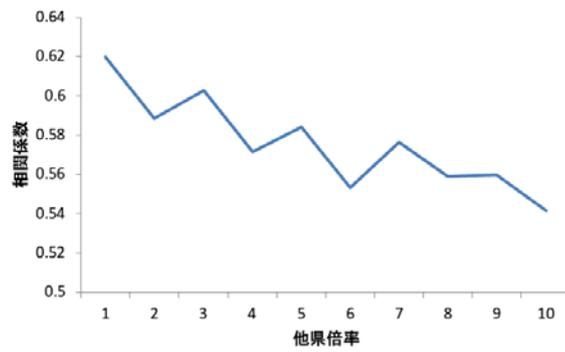


図 4.10 他県倍率と相関係数の関係

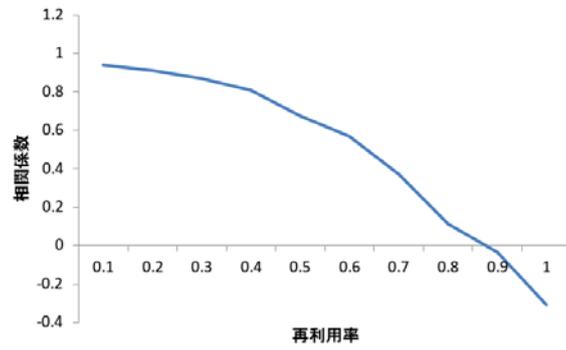


図 4.11 再利用率と相関係数の関係

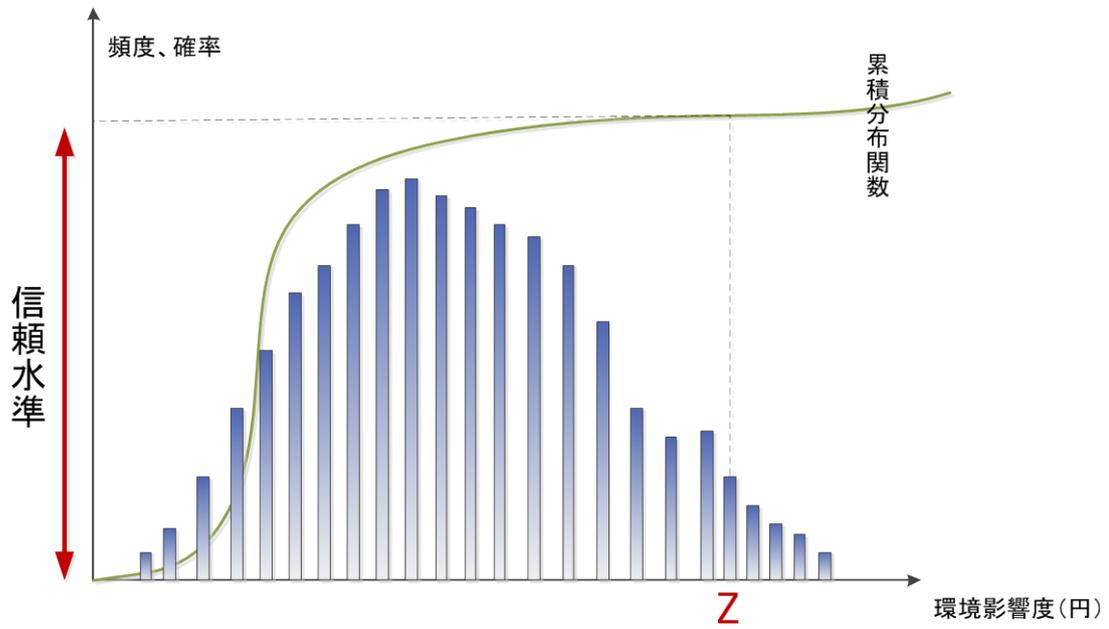
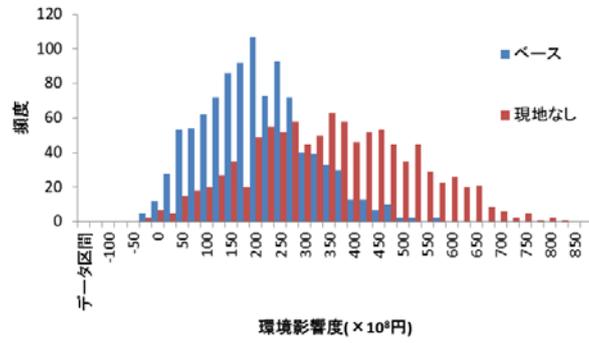
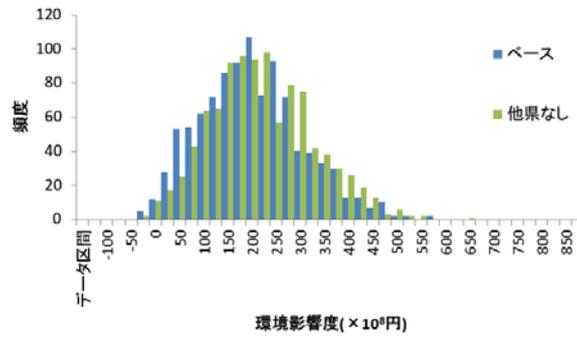


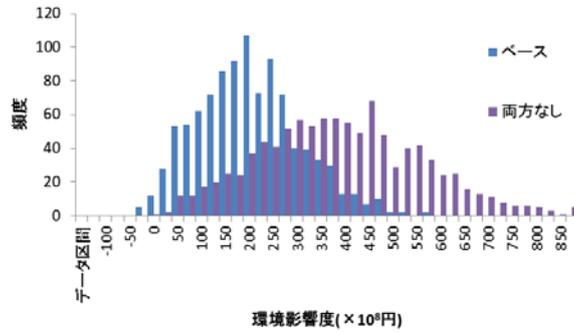
図 4.12 環境影響度のヒストグラムと累積分布関数



(a) 現地での中間処理を行わない場合との比較



(b) 他県での中間処理を行わない場合との比較



(c) 中間処理を一切行わない場合との比較

図 4.13 モンテカルロシミュレーションの結果

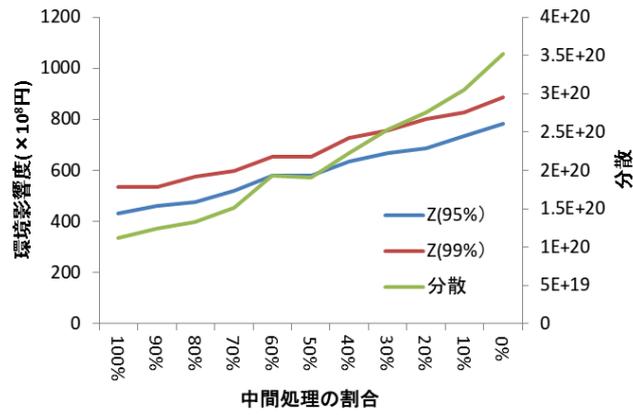
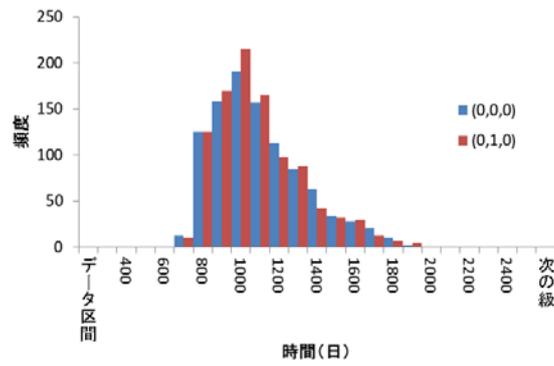
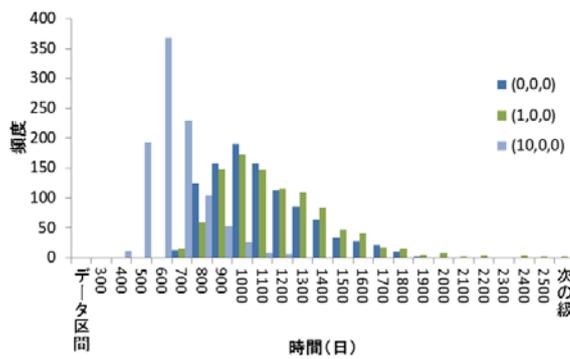


図 4.14 中間処理の割合と Z (95%)、Z (99%)、分散の関係

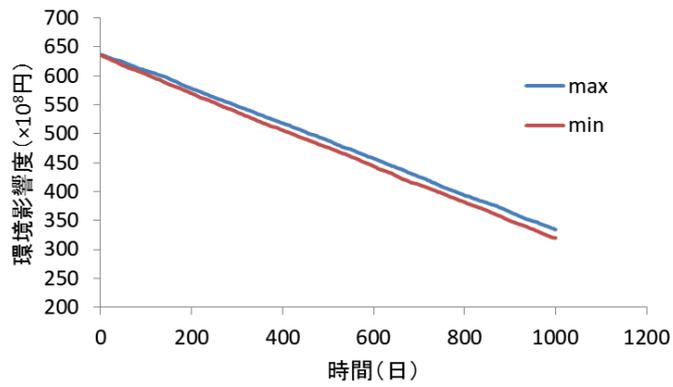


(a) 再利用を行う場合との比較

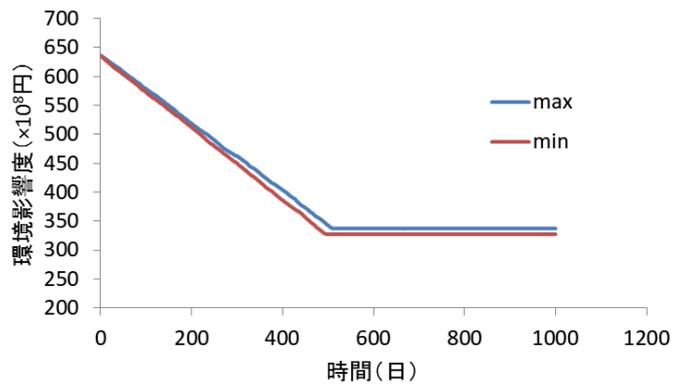


(b) 他県受入れを行う場合との比較

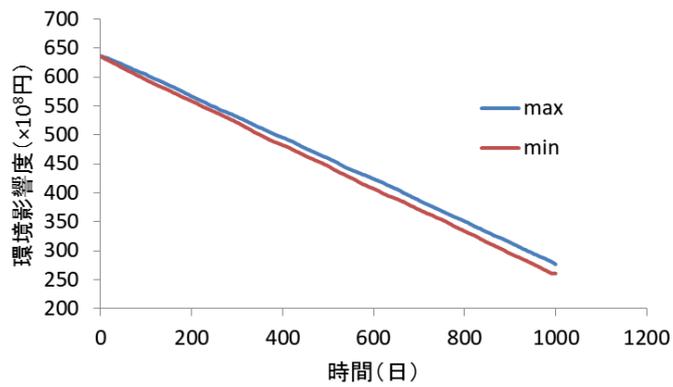
図 4.15 モンテカルロシミュレーションの結果



(a) ベースシナリオ



(b) 他県受け入れを行う場合



(c) 再利用を行う場合

図 4.16 一日単位で不確実要素を変化させたときの最大値・最小値の推移

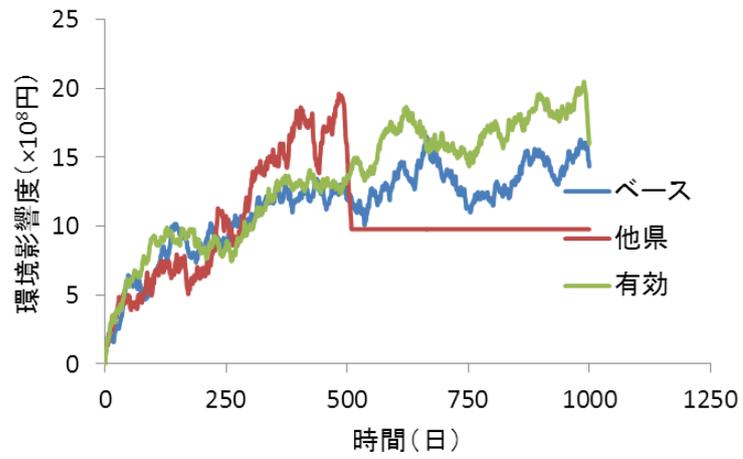


図 4.17 環境影響度の幅と時間の関係

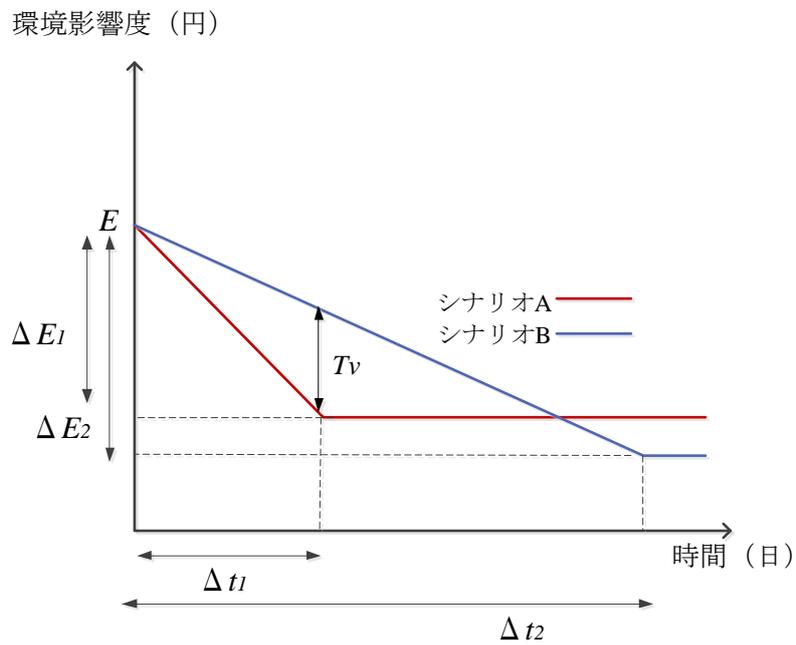
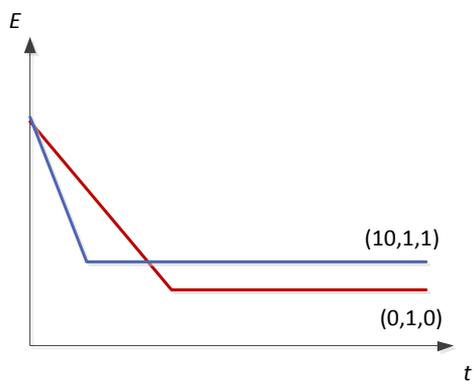
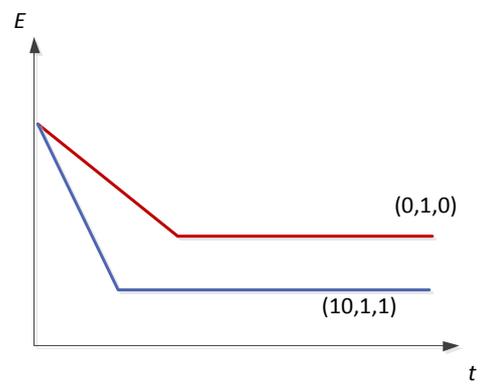


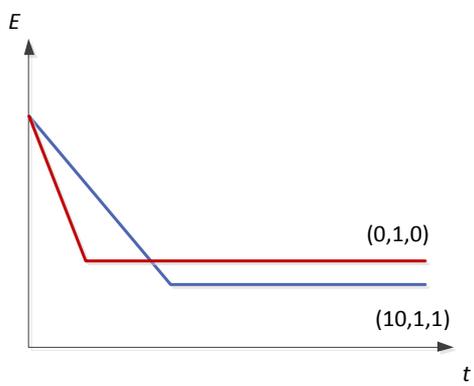
図 4.18 環境影響度の推移



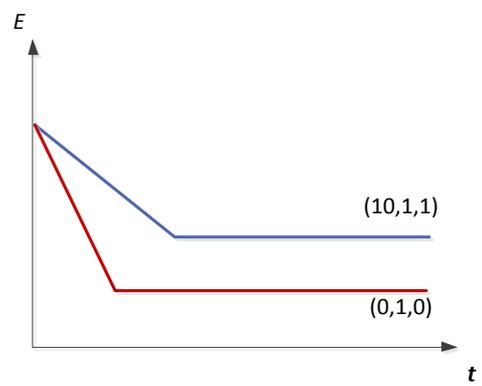
(a)



(b)



(c)



(d)

図 4.19 シナリオ比較における場合分け

表 2.1 再資源化方法と利用用途例

再資源化方法	形状など	主な利用用途例	再資源化処理費 (円/m ³)
焼成処理	粒状	ドレーン材 骨材 緑化基盤材 園芸用土 ブロック	7,000~50,000
高度安定処理	粒状、塊状	砕石代替品 砂代替品 ブロック	5,000~13,000
溶融処理	粒状、塊状	砕石代替品 砂代替品 ブロック	30,000~50,000
高度脱水処理	脱水ケーキ	盛土材 埋戻し材	5,000~10,000
安定処理	改良土	盛土材 埋戻し材	2,000~8,000
乾燥処理	土~粉体	盛土材	5,000~10,000

表 2.2 津波堆積物中の有害物質

	含有量	備考
ダイオキシン	0.11~78pg-TEQ/g	基準値を下回る、過去の農薬使用反映
PCB	0.0003~0.18mg/kg	基準値を一桁以上下回る、PCB 製剤(工業製品)由来と推定
重金属	数十 mg/kg	鉛が多くの資料から検出、フッ素、ホウ素に関しては海水の影響の可能性
有機スズ	0.5~180ng	TBT (トリブチルスズ) の濃度
PFOS,PFOA	最高濃度で 3.5ng/g	一般の底質に比較してほぼ同レベル 基準は設定されていない
油分		海域では n-ヘキサン抽出物質 0.1%以下が基準

表 3.1 環境負荷係数 (円/kg)

物質	大気経由	水質経由	土壌経由
カドミウム	2.91E+05	8.53E+05	6.45E+05
鉛	2.24E+04	6.55E+04	4.95E+04
ダイオキシン	1.28E+09	1.09E+10	1.57E+07
PCB	7.25E+05	7.85E+06	1.15E+04
六価クロム	2.29E+04	6.72E+04	5.08E+04
砒素	5.03E+04	1.47E+05	1.11E+05
総水銀	9.07E+04	4.06E+06	3.07E+06

表 3.2 エネルギー使用に関する二酸化炭素排出係数

(1) 電力の使用に伴う排出係数

事業者名	CO ₂ 排出係数
省令の値	0.555t-CO ₂ /kWh

(2) 化石燃料の使用に伴う排出係数

燃料	CO ₂ 排出係数
ガソリン	2.322kg-CO ₂ /ℓ
軽油	2.619kg-CO ₂ /ℓ
灯油	2.489kg-CO ₂ /ℓ
A 重油	2.710kg-CO ₂ /ℓ
B・C 重油	2.982kg-CO ₂ /ℓ
LPG	3.000kg-CO ₂ /kg
LNG	2.698kg-CO ₂ /kg
都市ガス	2.080kg-CO ₂ /Nm ³

表 3.3 最終処分場の分類と費用

	安定型	標準管理型	高機能管理型
建設費（埋め立て工事費、浸出水処理施設建設費、最終覆土工事費、重機・土地購入費）（千円）	257,909	936,771	1,567,009
維持管理費（人件費、電力費、燃料費、薬品費、整備補修費、埋め立て後の浸出水処理費）（千円）	377,626	749,636	1,332,607
処分単価（千円）（年間埋め立て容積は 15,000m ³ ）	4,237	11,243	19,331

表 3.4 1t の荷物を 1km 運ぶために排出する CO₂ 排出量

輸送手段	CO ₂ 排出原単位
営業用普通トラック	178g-CO ₂ /t・km
営業小型トラック	819g-CO ₂ /t・km
営業用軽トラック	1,933g-CO ₂ /t・km
鉄道	21g-CO ₂ /t・km
船舶	39g-CO ₂ /t・km

表 4.1 シナリオの設定

	(0,0,0)	(0,1,0)	(1,0,0)	(1,1,0)	(1,0,1)	(1,1,1)	(10,0,0)	(10,1,0)	(10,0,1)	(10,1,1)
他県受 入れ量 (t/日)	0	0	100	100	100	100	1000	1000	1000	1000
現地再 利用	行わ ない	行う	行わ ない	行う	行わ ない	行う	行わな い	行う	行わな い	行う
他県再 利用	行わ ない	行わ ない	行わ ない	行わ ない	行う	行う	行わな い	行わな い	行う	行う

表 4.2 ベースケースの値

	ベースケース	備考
Δ NPP (t-CO ₂ /ha)	2.0	文献調査に基づく ¹⁴⁾
中間処理量 (t/日)	1000	石巻ブロック処理量に基づく
中間処理コスト (円/m ³)	5,000	文献調査に基づく ⁶⁾
最終処分単価 (円/m ³)	10,000	文献調査に基づく ¹⁹⁾
他県受け入れ量 (t/日)	100	東京都受け入れ可能量に基づく
他県受け入れの際の運搬距離(km)	250	東京、山形と東北三県の直線距離に基づく
他県受け入れの運搬に関する輸出 排出原単位 (kg-CO ₂ /t*km)	1.0	運搬車両の原単位に基づく (表 3.4)

表 4.3 ベースケースにおける処理・処分終了の際の環境影響度と時間

	環境影響度(×10 ⁸ 円)	時間(日)
(0,0,0)	325	1000
(0,1,0)	273	1000
(1,0,0)	326	909
(1,1,0)	278	909
(1,0,1)	322	909
(1,1,1)	274	909
(10,0,0)	329	500
(10,1,0)	302	500
(10,0,1)	302	500
(10,1,1)	276	500

表 4.4 不確実要素の最小値・中央値・最大値

	最小値	中央値	最大値
ΔNPP (CO ₂ /t*ha)	0	2	9
中間処理量 (t/日)	500	1000	1500
中間処理コスト (円/m ³)	2,000	5,000	8,000
最終処分コスト (円/m ³)	4,000	10,000	20,000
他県受け入れ量 (t/日)	50	100	150
他県受け入れの際の運搬 距離 (km)	65	250	450
他県受け入れの運搬に関 する輸出排出原単位 (kg-CO ₂ /t*km)	0.2	1.0	2.0

表 4.5 津波堆積物における汚染物質の環境基準値

	最小値	中央値	最大値
P b 含有量 (mg/kg)	0	150	180
ダイオキシン(pg-TEQ/g)	0	1000	1200
PCB(ng/g)	0	0.5	0.6
砒素 (mg/kg)	0	150	180

表 4.6 津波堆積物における汚染物質の観測値

	最小値	中央値	最大値
P b 含有量 (mg/kg)	8	18	35
ダイオキシン(pg-TEQ/g)	0	40	80
PCB(ng/g)	0	0.09	0.18
砒素 (mg/kg)	6	9	13

表 4.7 中間処理の有無比較における平均、分散

	ベース	現地なし	他県なし	両方なし
平均 ($\times 10^8$ 円)	189	345	207	377
中央値 ($\times 10^8$ 円)	183	342	198	370
分散	1.12.E+20	2.67E+20	1.13E+20	2.81E+20

表 4.8 信頼水準 95, 99%における危険値

信頼水準	ベース	現地なし	他県なし	両方なし
95% ($\times 10^8$ 円)	372	620	396	664
99% ($\times 10^8$ 円)	463	710	484	798

表 4.9 シナリオ間の優劣

	(a)	(b)	(c)	(d)	sum
(10, 1, 1)	406	468	13	0	887
(0, 1, 0)	92	0	4	17	113