

(71) Python による災害廃棄物の収集運搬・処理連動モデルのプロトタイプの開発

田内 裕人¹・浅井 惣一郎²・江種 伸之³

¹正会員 和歌山大学助教 システム工学部 (〒640-8510 和歌山県和歌山市栄谷 930)

E-mail: tanouchi@wakayama-u.ac.jp

²学生会員 和歌山大学 システム工学研究科 (〒640-8510 和歌山県和歌山市栄谷 930)

³正会員 和歌山大学教授 システム工学部 (〒640-8510 和歌山県和歌山市栄谷 930)

本研究は、災害廃棄物の処理プロセスをモデル化した収集運搬・処理連動モデルを、Python 言語に移植し改良するものである。Python 言語はパラメータ最適化に使用可能なライブラリと、GIS データを扱うライブラリが充実している。本研究で開発されたモデルをパラメータ最適化手法および GIS 機能と連動させることにより、一定の条件下における最適な災害廃棄物の処理計画が出力可能になると期待される。本モデルの妥当性を検証するため、被災地、一時集積所、仮置場、最終処分場で構成される仮想的な災害廃棄物の処理工程をモデル化し、モデルの挙動を確認した。その結果、モデル内での物質収支に齟齬は見られず、妥当な解析を実施することができた。

Key Words: disaster waste disposal, Python, hauling/transportation model, waste treatment

1. はじめに

災害に伴う災害廃棄物を適切・迅速に処理することが、復旧復興の観点から重要である。1995年の阪神淡路大震災においては、約2000万tにおよぶ災害廃棄物が瞬時に発生した。これは、当時の兵庫県で発生する一般廃棄物の総排出量の8年分に相当する¹⁾。2011年の東日本大震災においても約2000万tの災害廃棄物が発生しており²⁾、今後発生が想定される南海トラフ巨大地震では、その発生量が3億2000万tに及ぶとの予測もある³⁾。さらに、豪雨災害において大量の災害廃棄物が発生する事例も増えており、2019年台風19号で発生した廃棄物が復旧復興の障害となったことは記憶に新しい⁴⁾。以上の背景から、災害廃棄物の適切・迅速・安価な処理のために、処理計画策定を支援するシステムの需要が高まっている。

著者らは、災害廃棄物の運搬、分別・破碎やリサイクル、最終処分などの様々なプロセスをモデル化した、収集運搬・処理連動モデルを開発してきた⁵⁾。本モデルでは、廃棄物の発生量と質を入力し、廃棄物の処理がすべて完了するまでに要する期間を算出するものである。本モデルで実在する市町村の災害廃棄物処理計画を再現した結果、当該市町村が想定するよりもはるかに長い処理期間が必要になることが示された。

一方、災害廃棄物処理の現場では、あらかじめ処理に

要する日数や運用資金が決められており、これらの条件を満たす中で最適な実行計画を立案する必要がある。この課題は、収集運搬車両や分別破碎機器の性能と台数、配置、仮置場の運用形態などのパラメータとする最適化問題とみなせるが、パラメータの組合せは無数に存在し、最良とされる組合せを選び出すことは困難を極める。また、この変動可能な条件の中には、経路情報などの空間情報 (GIS) も含まれる。

以上の背景から本研究では、パラメータ最適化の機能と結合可能で、かつGISの機能と連動させることが可能な収集運搬・処理連動モデルのプロトタイプを開発する。具体的には、同モデルをプログラミング言語のPythonに移植する。Python言語を採用した理由は、同言語にはパラメータ最適化のための機械学習ライブラリとGISソフトウェアであるArcGISを制御するライブラリが充実しているためである。また、開発したモデルで簡易な災害廃棄物処理プロセスを表現・シミュレーションし、物質収支の観点からモデルの妥当性を検証する。

2. 収集運搬・処理連動モデルの概略

(1) 災害廃棄物の処理プロセス⁵⁾

本研究でモデル化を目指す災害廃棄物処理の一般的

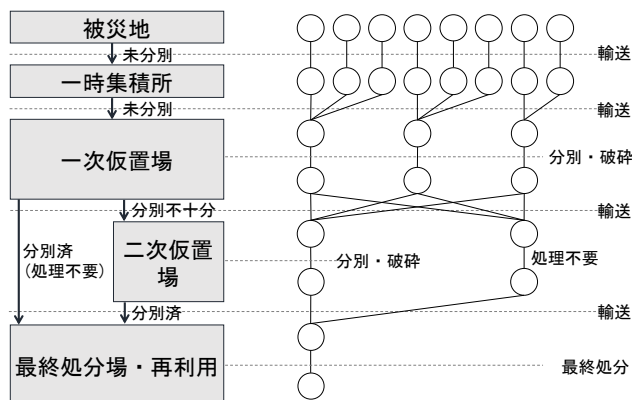


図-1 一般的な災害廃棄物処理の流れ（左）と、災害廃棄物の収集運搬・処理のプロセスをネットワーク図で示した例（右）。

な流れを図-1（左）に示す。まず、被災地で発生した災害廃棄物は小学校区を基準にした小領域ごとに一時集積所へ集積され、次いで、各一時集積所から一次仮置場へと輸送される。一次仮置場の災害廃棄物は、手作業や重機によって粗選別され、処理・処分先に輸送されるまで同仮置場に仮置きされる。一次仮置場での分別・破碎処理が不十分な災害廃棄物(混合廃棄物)は、二次仮置場へと輸送される。二次仮置場に輸送された混合廃棄物は選別作業等を経て、一次仮置場と同様に処理・処分先に輸送されるまで種別ごとに仮置きされる。一次仮置場および二次仮置場に仮置きされた分別後の災害廃棄物は、焼却処理や埋立処分等を行うために、処理・処分先へと種別ごとに逐次輸送される。また処理・処分先では復興資材への利用のため、災害廃棄物の再資源化も積極的に行われる。自治体によっては、一時集積所においても簡単な分別を実施する場合や、一次・二次仮置場を統合して一つの仮置場として運用する場合があるなど、処理プロセスには様々なパターンが存在する。たとえば図-1 は、8 か所の被災地で発生した災害廃棄物を 8 か所の一時集積所、2 か所一次仮置場、さらなる分別が必要なら 1 か所の二次仮置場を介して、最終処分場に送り処分する例を示す。

(2) ネットワークとしてのモデル化

図-1（右）は、同図左の具体的な災害廃棄物処理の流れをネットワークで表現したものである。収集運搬・処理連動モデルでは、一時集積所、一次・二次仮置場および最終処分場・リサイクル等の各施設をノード、各施設間の接続経路をアークとするネットワークで表現することができる。各ノードには、災害廃棄物の発生量や種別、受け入れ可能な最大容積などをパラメータとして与える。また、分別破碎機器や最終処分・リサイクル施設の性能など、各施設における処理速度もパラメータとなる。被災地のノードに与えられた災害廃棄物は、各アークとノ

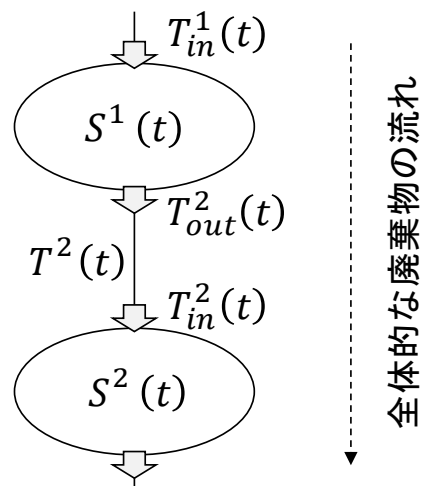


図-2 1列のノードとアークの模式図

ードを経由し、最終処分場に該当するノードからネットワークの外に排出される。

3. モデル設計

(1) Python 言語の特性と妥当性⁹⁾

近年、プログラミング言語 Python の発展が目覚ましい。Python はオブジェクト指向型の言語であり、パラメータ最適化で活用可能な、AI や機械学習に関するライブラリを容易に導入・結合可能である。また、ArcGIS を外部からコントロールすることが可能なライブラリも提供されている。以上の理由から、本研究の目指す、GIS データを動的に扱いながら、同時にパラメータの最適化の機能をもつモデルの開発を、Python で行うことは妥当と考えられる。また将来的には、収集運搬・処理連動モデル・パラメータ最適化ライブラリ・ArcGIS ライブラリを結合することも想定している。

(2) ノード・アークにおける廃棄物の収支

図-2 は、単純なネットワークの例として、連結された 2 つのノードが入出力のアークで接続したものである。同一アーク上の $T_{out}^2(t)$ と $T_{in}^2(t)$ は、物質収支の観点から同じ値 ($T^2(t)$) となる必要がある。アークは一時集積所から一次仮置場等の経路間の輸送を表現するものと、一次仮置場や最終処分場などでの分別破碎または最終処分の処理過程を表現するものに大別される（図-1（右））。輸送のアークにおける $T(t)$ は、収集運搬車両の台数や経路間距離などによって決定される。一方で、処理過程のアークにおける $T(t)$ は、分別破碎機器の性能や台数、処理施設的能力などから算定される。

図-2 の例だと、ノード 1 における時刻 t の災害廃棄物量 $S^1(t)$ は、以下の式(1)で計算できる。

$$S^1(t) = S^1(t-1) + T_{in}^1(t) - T_{out}^2(t) \quad (1)$$

通常、 $S^1(t)$ はその前の時刻における災害廃棄物量 $S^1(t-1)$ に、アークからの流入量 $T_{in}^1(t)$ を加え、流出量 $T_{out}^2(t)$ を差し引いた値として計算される。

なお、各ノードの最大容積 S_{max} を超える災害廃棄物量は保管できない。この場合、各ノードの容積がボトルネックとなっていることを示す。また $S^1(t)$ は0未満の値をとることはできない。この場合には、 $T_{out}(t)$ が過剰であるとみなせる。以上の場合はいずれも、いずれかの $T(t)$ に余剰が発生し、運搬能力や処理能力が余っていることを示しており、災害廃棄物処理計画の効率化の観点から望ましくない。効率的な計画を出力可能なシステムの開発では、こうした余剰を小さくするパラメータの最適化手法の導入が必要と考えられる。

(3) ノードとモデルの階層構造

図-1 は、モデルの階層構造も示している。災害廃棄物は発生した被災地から一時集積所、一次仮置場、二次仮置場を経て最終処分・再利用施設で処分される。この場合、階層数は被災地、一時集積所、一次仮置場（未処理）、一次仮置場（処理済）、二次仮置場（未処理）、二次仮置場（処理済）、最終処分場（一次保管）、最終処分場（処理済）の8層が想定され、最上位の一時集積所の層から下位の層に向かって、アークを通して廃棄物が移動するモデルで概念化できる。アークには輸送に関するものと分別破碎処理、または最終処分に関するものがあるが、ネットワーク内におけるノード間の廃棄物の移動経路、という概念では同じと考えられる。

災害廃棄物処理の現場では、たとえば2次仮置場を省略して合計6層となる場合や、一時集積所を未分別・分別済みに分けて合計9層以上とする場合も想定される。本モデルでは、各階層の災害廃棄物の収支を単純な行列計算式として表現し、階層ごとの物質収支の計算は1行のプログラムで記述されている。このことは、本モデルが自治体の要求に応じて階層数を柔軟に変更可能であることを示す。なお図-1（左）のように、一次仮置場から二次仮置場を介さずに直接、最終処分場に輸送される廃棄物も存在する。この場合においても、図-1（右）の二次仮置場の階層のように、処理不要の2つのノードを仮想的に与えることで容易に表現可能である。

4. モデルのプロトタイプの開発と挙動の検証

本研究で提案したモデルによって災害廃棄物処理が可能となるか検証するために、Python で本モデルを実装し、その挙動を確認した。表-1 は、本研究でモデル化した

仮想的な災害廃棄物の発生量と各施設の容積を、また表-2 は、各施設間の単位時間当たりの輸送または処理の能力を示す。被災地から一次仮置場へは、1時間あたり50tの災害廃棄物が一律で集まるものとした。被災地20か所で発生した合計58万トンの災害廃棄物がそれぞれの一時集積所に集められ、その後、2か所の仮置場に輸送され、分別破碎処理と保管を経て、1か所の最終処分場で輸送・処理されることを想定している。災害廃棄物の発生量、各施設の最大容積 S_{max} は表の通りである。また余剰が発生していない場合の $T(t)$ 、すなわち分別破碎・最終処分の処理速度または各経路における輸送速度の最大値は表の通りである。図-3 は、この処理プロセスをネットワークで表現したものである。

図-4 は、各施設における災害廃棄物量の時系列変化を示している。被災地で発生した合計58万トンの災害廃棄物が、一時集積所、仮置場を介して最終処分されていることが確認できる。最終処分に要する時間は7620時間と計算された。紙面の都合から個別施設における詳細な検証結果は示さないが、各施設において、災害廃棄物の量が負の値となったり、容積を超える災害廃棄物量が保管されるなどの問題は見られなかった。このことから、本モデルによって物質収支に問題のないシミュレーションが可能であるという結論が得られた。

5. むすび

本研究では、災害廃棄物処理の各種プロセスを表現した収集運搬・処理連動モデルを、GISの機能と呼び出すことが可能で、かつモデル入力パラメータの最適化が可能となるようにPython言語に移植した。同モデルで単純

表-1 被災地ごとの災害廃棄物発生量と各施設の容積

被災地の災害廃棄物発生量 (t)	ID	発生量	被災地の一時集積所容積 (t)	ID	容積	仮置場（未処理・処理済） 最終処分場の容積 (t)	ID	容積
	1	10000		11	10000		仮・未 1	50000
	2	5000		12	5000		仮・未 2	60000
	3	50000		13	50000		仮・済 1	10000
	4	50000		14	50000		仮・済 2	15000
	5	30000		15	30000		最終 1	10000
	6	10000		16	10000			
	7	5000		17	5000			
	8	50000		18	50000			
	9	50000		19	50000			
10	30000	20	30000					

表-2 各ノード間の災害廃棄物の輸送または処理速度

一時集積所 ID	仮・未 ID	輸送速度 (t/h)	一時集積所 ID	仮・未 ID	輸送速度 (t/h)	仮・済 ID	最終 ID	輸送速度 (t/h)
1	1	50	11	2	40	1	1	230
2	1	30	12	2	60	2	2	150
3	1	50	13	2	40			
4	1	30	14	2	60			
5	1	50	15	2	40			
6	1	30	16	2	60			
7	1	50	17	2	40			
8	1	30	18	2	60			
9	2	40	19	2	40			
10	2	60	20	2	60			

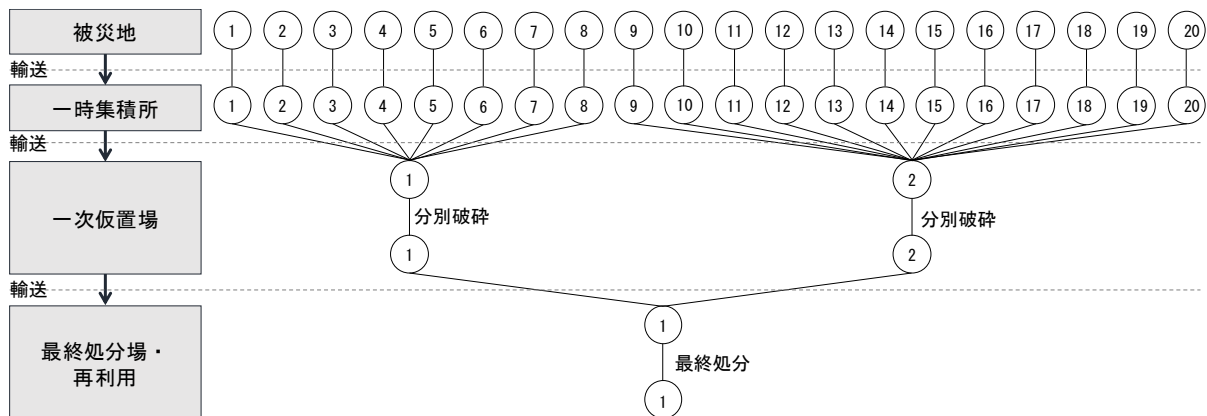


図-3 本研究でモデル化した仮想的な災害廃棄物処理計画のネットワーク図

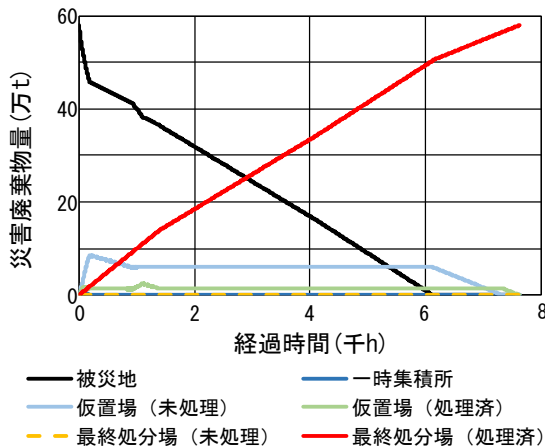


図-4 仮想的な災害廃棄物処理の進捗状況

な災害廃棄物処理プロセスを表現して解析を行い、モデルの挙動を確認した。その結果、災害廃棄物の物質収支の観点からシミュレーション結果に問題は見られず、同モデルを用いて災害廃棄物処理プロセスを再現できることがわかった。今後はまず、本モデルを災害廃棄物の種別ごとの解析ができるように拡張する。その後、本モデルと GIS およびパラメータ最適化の各ライブラリと結合し、最適な災害廃棄物処理計画を出力可能なシステムの開発を行う予定である。

謝辞：本研究は、（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（1-2004）により実施した。

参考文献

- 1) 廃棄物資源循環学会：災害廃棄物，p.16，中央法規出版，2009.
- 2) 土木学会：災害廃棄物の処分と有効活用—東日本大震災の記録と教訓，p.15，丸善出版，2014.
- 3) 環境省：災害廃棄物等の発生量の推計，
<http://kouikishori.env.go.jp/action/investigative_commission/h25_fiscal_year/estimate/>，（入手 2020.6.10）.
- 4) 環境省：令和元年東日本台風（令和元年台風第 19 号）による災害廃棄物対策について，
<http://kouikishori.env.go.jp/archive/r01_typhoon19/>，（入手 2020.6.10）.
- 5) 坂口直也・田内 裕人・江種 伸之・大塚 義一：災害廃棄物の適切な処理計画策定支援を目的とした収集運搬・処理連動モデルの開発，土木学会論文集 G(環境)，Vol.72，No.5，pp.195-202，2018.
- 6) Python Japan：プログラミング言語 Python
<<https://www.python.jp/>>，（入手 2020.6.10）.