

(29) 災害廃棄物の収集運搬・処理連動モデルの 基礎的性能の検証

田内 裕人¹・黒木 秀和²・岩下 将也³・大塚 義一⁴・中野 正樹⁵

¹正会員 和歌山大学 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非会員 (株) ハイドロ総合技術研究所 研究開発センター (〒530-6126 大阪市北区中之島 3-3-23 中之島ダイビル 26F)

³正会員 (株) 奥村組 技術研究所 (〒300-2612 茨城県つくば市大砂 387)

⁴正会員 (株) 奥村組 営業本部 (〒108-8381 東京都港区芝 5-6-1)

⁵フェロー会員 名古屋大学 大学院工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

本研究は、様々な種類の災害廃棄物の収集運搬プロセスと、集積・分別・破碎・処分・リサイクルの全プロセスを表現可能な収集運搬・処理連動モデルについて、特にその計算速度性能を検証するものである。この目的のため、現実的な災害廃棄物量である 30 万トン～240 万トンを、一般的な車両・処理能力の設定で処理する数値実験を複数実施した。その結果、ほとんどの数値実験で解析時間が 10 秒程度以下となり、モデルの高速性が示された。また、解析時間は処理日数に対して極めて強い線形関係を持つことがわかり、処理期間が短い処理プロセスでは、高速なシミュレーションが可能であることを示した。一方、処理プロセスの複雑さも解析時間に影響を与えるものの、処理期間と比較してその影響は限定的であることも、あわせて示した。

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

1. はじめに

災害の復旧復興の観点から、災害廃棄物を適切・迅速に処理する必要がある。特に近年、豪雨災害や地震・津波災害の頻発に伴って大量の災害廃棄物が発生する事態が頻発しており¹⁾³⁾、この要求は益々高くなっている。この背景から著者らは、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⁴⁾⁹⁾。本モデルでは、廃棄物の発生量と質を入力し、処理プロセスを表現した多数のパラメータを設定し、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。最近では、本モデルを GIS と連動させることを念頭におき、これが可能な Python 言語に置き換え、基本的な物質収支や境界条件を満たすモデルであることも確認した⁹⁾。

本モデルで処理期間を算定するためには、例えば各集積所から搬出先である一次仮置場までの距離、その経路

に配置する車両の積載量と台数、一時仮置場における粗分別のためのバックホウの性能、二次仮置場の高度選別機器の性能、焼却施設における受け入れ可能量など、様々なパラメータを設定しなくてはならない。一方で、計画策定者としては、例えば市町村全体で用意できる車両総数が決まっている状況で、最も処理が迅速に進む車両の分配など、処理プロセスの最適解を求めたいという要求が強い。この要求に答えるには、本モデルの入力パラメータの組み合わせ(パラメータセット)を大量に発生させ、どの組み合わせで解析した際に、処理期間が最短となるかなど、結果を検証・パラメータセットのチューニングをするようなモデルの使い方が必要となる(図-1)。しかし、先述のように、本プロセスでは多種多様なパラメータが存在しており、その組み合わせは膨大な数が存在する。十分に最適化された解を得るためには、膨大なパラメータセットに対して一つ一つモデルでシミュレーションし、処理期間を比較検討する必要がある。本研究は、この最適化に本モデルを活用できるかを検

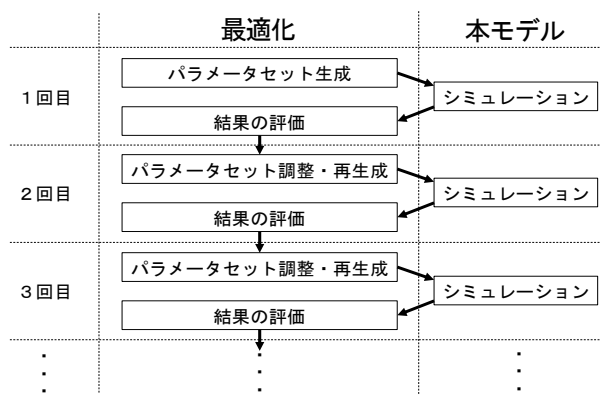


図-1 計画立案時における本モデルの使い方

証するため、様々なパラメータセットに対してモデルの解析時間がどの程度になるかに着目し、検証を行った。モデル解析時間が短くなればなるほど、一定時間内に検討できるパラメータセット数が増えるためである。

2. 収集運搬・処理連動モデル

収集運搬・処理連動モデルは、図-2 に示す全ての災害廃棄物処理プロセスを網羅した数理モデルとして設計されている。図-3 は、本モデルのネットワーク表現である⁹⁾。本モデルでは、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して、物質移動・変化をネットワークで表現する。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。アーク上には、施設間の距離や車両の平均移動速度、積込・積降時間、渋滞遅延などをパラメータとして設定する必要がある。これらの情報と収集運搬車両の容積、配置台数を設定・積算して、経路間の単位時間当たりの収集運搬の量が算出される。なお、図のケースでは、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、3 か所一次仮置場、さらなる分別が必要なら 2 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となる。本モデルでは、こうした各施設の数や接続関係も、容易に設定・変更可能である。本モデルの詳細は、田内ら（2020）を参照されたい⁹⁾。

図-3 では、単純化のため廃棄物種別は 1 種類を考えているが、実際の災害廃棄物処理の現場では、廃棄物種別数は可燃物、不燃物、木くず、金属、混合した堆積土砂など最低でも 5 程度で、丁寧な分別を行う場合数十に上



図-2 モデル化する全処理プロセス（出展：環境省⁷⁾）

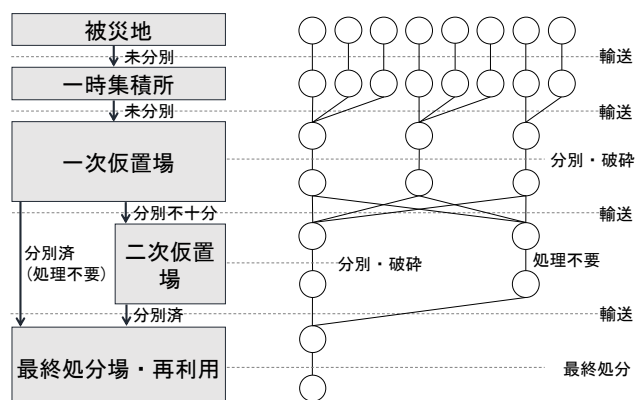


図-3 一般的な災害廃棄物処理の流れ（左）と、災害廃棄物の処理プロセスをネットワークで示した例（右）

ることもある。本モデルでは、廃棄物種別を任意の数・質で決定可能である。この際には、例えば廃棄物種別を 5 種類とするならば、各施設のノード数も 5 つとして表現される。なお、本稿の解析は全て、5 種類の災害廃棄物種別を想定し設定した。また、分別処理において発生する廃棄物残滓については、不燃ごみとして最終処分することとしている。

現実の災害廃棄物処理においては、例えば道路復旧に伴う収集運搬の経路変更や、仮置場の拡張・整備、焼却施設の新設など、様々な処理プロセスの途中変更が生じる。本モデルはこうした時間変化を反映させるため、図-2 に含まれるすべてのプロセスをシミュレーション途中で変更することが可能となっている。

3. 検証実験

表-1 は、本研究で実施したモデルの検証実験の詳細を表している。検証実験は、災害廃棄物発生量に対する処理期間（日数）と解析時間（秒）の関係および、処理プロセスの複雑さと解析時間の関係に着目して実施した。災害廃棄物の発生量は、近年の地震・豪雨災害において、処理の基本単位である各市町村での災害廃棄物の処理の経験などをもとに、数十万トン～数百万トン程度を想定した。災害廃棄物発生量に対する処理時間の変化およ

表-1 各実験の廃棄物発生量，アーク数（プロセスの複雑さ），合計車両台数（初期値・100日後），処理期間，解析時間

目的	ID	廃棄物発生量	被災地・集積所数	アーク数	合計車両台数[初期]	合計車両台数[100日後～]	処理期間[日]	解析時間[秒]
廃棄物量に対するモデル検証(1)	1	30	2	37	114	114	305	2.0
	2	60	2	37	114	114	569	3.7
	3	90	2	37	114	114	835	5.4
	4	120	2	37	114	114	1099	7.0
計画の途中変更無し	5	150	2	37	114	114	1365	8.7
	6	180	2	37	114	114	1627	10.3
	7	210	2	37	114	114	1895	12.4
	8	240	2	37	114	114	2159	13.7
廃棄物量に対するモデル検証(2)	9	30	2	37	114	185	219	1.5
	10	60	2	37	114	185	391	2.6
	11	90	2	37	114	185	555	3.6
	12	120	2	37	114	185	731	4.8
計画の途中変更あり	13	150	2	37	114	185	895	5.9
	14	180	2	37	114	185	1071	6.8
	15	210	2	37	114	185	1241	8.0
	16	240	2	37	114	185	1409	9.0
処理プロセス複雑さに対するモデル検証	17	150	2	37	354	354	971	6.1
	18	150	10	93	354	354	815	5.8
	19	150	20	167	354	354	779	6.5
	20	150	40	303	354	354	783	8.8

び解析時間の変化については，次章で詳述する。

被災地・一次集積所を 2・10・20・40 か所設定するシナリオをそれぞれ設け，一次仮置場を 2 か所，二次仮置場を 1 か所設置して，分別破碎済みの廃棄物を 5 か所の処理処分・リサイクル施設で処理することとした。一次・二次仮置場は，それぞれ全廃棄物種合計で 3 万トンの災害廃棄物を保管可能なように，容積を設定した。これは，災害廃棄物の比重を 1.1 トン/m³，積み上げ高さを 5m，廃棄物を保管できない作業スペースを保管スペースと同程度とすると想定⁹⁾すると，約 10900m²の面積の仮置場が必要であることを示す。仮置場には公有地である都市公園が使用されることが多いが，ある程度大きな都市公園であれば 10000m²を超えるため，各市町村で準備可能な現実的な設定であるといえる。

被災地から一時集積所に廃棄物が集まる住民搬出の速度は全被災地で一律 100 トン/h を想定しており，このうち 50%は住民が自主的に分別するものと想定している。一次仮置場においては，一律 100 トン/h で粗分別が進むものとし，この際の残滓発生率は 30%とした，また二次仮置場においては，高度選別速度 200t/h，残滓発生率 20%としている。二次仮置場で発生した最終残滓は，不燃物として処理する想定とした。

本研究におけるアークのパラメータ設定は以下の通りである。全てのアークにおいて，平均移動速度は 30km/h，積込・積降・渋滞遅延は合計で 12 分を想定している。一次集積所から一次仮置場までの距離は一律で 10km，この経路上を分別不十分の残滓が移動することになる。一方，住民の自主分別によって十分分別された廃棄物は，その半数が 10km 先の処理処分・リサイクル施設に，残りが 8km 先の同施設に送られるものとする。また，一次仮置場から二次仮置場までの距離は 8km を，二次仮置場から処理処分・リサイクル施設近傍の保管場所までの距離は 3km を，保管場所から処理処分・リサイクル施設までの距離は 0.1km をそれぞれ設定した。一次仮置場から

保管場所に直接至る経路距離は 5km または 4km と設定した。各経路に設置した収集運搬車両は 10 トン、8 トン、5 トン積載可能なものを混在させ，シミュレーションを実施した。

災害廃棄物の各種処理処分・リサイクル施設では，5 種類の廃棄物の合計で 200 万トン/h，すなわち各廃棄物種別において 1 時間当たり 40 トンを処理またはリサイクル可能であると設定した。この値は，現実と比較して大きな値となっており，実際には 1 時間当たり 10 万トン程度の処理量の施設が多いことに留意されたい。この値は，例えば 200 万トンの災害廃棄物発生量を 1 日 10 時間の施設運用時間で 500 日で処理する期間として想定している。ここで 1000 日は，環境省の指針⁹⁾において，災害廃棄物の処理を概ね 3 年以内で完了させることが示されていることから設定した。

また，以上の条件設定に加え，一時集積所において十分に分別された災害廃棄物に関しては，市町村外への搬出経路を想定した広域処理のモデル化も行った。広域処理先は全集積所から 100km 離れているものとし，無制限に廃棄物を搬出できるものとした。

4. 結果と考察

本モデルを上記の最適化に使用できるかを検討するため，処理期間と解析時間の関係に着目した検討，および処理プロセスの複雑さと解析時間の関係に着目した考察を実施した。表-1 には，設定した各プロセスで計算された処理期間と，その算出に要したモデル解析時間も示している。まず，被災地を 2 か所として廃棄物量を 30～240 トンに変更して行ったシミュレーション結果（表中の廃棄物量に対するモデル検証(1),(2)）に着目して考察する。(1)と(2)の違いは，計画の時間変化をモデル化の有無であり，(2)では，車両の台数を処理開始 100 日後

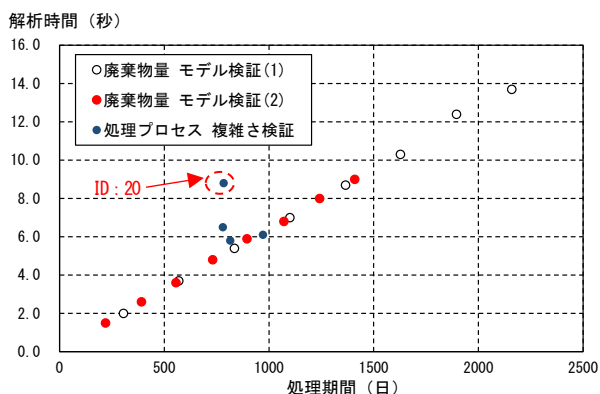


図-4 各シミュレーションの処理期間と解析時間の関係

に表-1 のように変更している。図-4 は、表中の解析時間と処理期間の関係を示すが、計画の時間変更の有無にかかわらず、この2検証では処理日数と解析時間の間に極めて強い線形関係があることがわかる。本モデルは、被災地で発生した廃棄物量が処理処分・リサイクル・広域処理を通して処理されるまで、繰り返し計算を行うモデル構造になっているため、こうした特徴があったと考えられる。一方で、回数が少ない限り、計画の途中変更を反映させて処理プロセスを変化させることは、計算時間全体には大きな影響を及ぼさないことが分かった。

一方で、特に ID : 20 の実験で顕著であるが、処理プロセスの複雑さが極端に増大すると、解析時間にある程度影響を与えることも合わせて示された。ID が 17 から 20 の実験は、災害廃棄物発生量を合計 150 万トンに固定し、被災地を $2 \cdot 10 \cdot 20 \cdot 40$ か所設定するシナリオでシミュレーションを行い、想定した経路数と解析時間を比較検討したものである。被災地・一次集積所を 2 か所とした場合には、一時集積所から最終処分場の経路は 2 か所 $\times$ 5 廃棄物種別数、一次仮置場から最終処分場は 2 か所 $\times$ 5 廃棄物種別数などと足し合わせ、総経路数は 37 であった。一方、一時集積所を $10 \cdot 20 \cdot 40$ か所と増大させると、総経路数は $93 \cdot 163 \cdot 303$ と、ID : 17 から 20 にかけて 8 倍程度に増加している。これは直接、処理プロセスの複雑さの増大と考えることができる。その一方で、ID : 17 から 20 に対し、解析時間は 1.3 倍程度増加したに過ぎないとも考えられる。すなわち、処理プロセスの複雑さの増大は、処理期間の増大と比較すると、解析時間への影響は限定的といえる。

最後に、この経路の複雑さの変化によって、廃棄物発生量が同じにもかかわらず処理日数が変化したことと言及する。具体的には、処理プロセスの複雑さに対するモデル検証で、被災地を 2 か所設定した際の処理期間が 971 日であった一方、20 か所設定した際にはこれが 779 日となり、約 20% 処理期間を短縮する結果となった。このことは、処理プロセスのうち、このような被災地の区

分や集積所の分布設定を最適化することで、処理日数の短縮が見込めることを示唆している。

5. おわりに

本研究では、災害廃棄物の収集運搬・処理連動モデルに対して、設定する必要のあるパラメータを最適化する機能を付与可能かを検討するため、解析時間に着目した検証実験を行った。この結果、解析時間はシミュレーションで得られた処理期間に強い相関をもつことが示された。このため、現実の災害廃棄物処理の想定を超えるような長期間、例えば 5 年間以上などの解析は行わない方が良いと考察される。一方で、処理プロセスの複雑さは、計算速度にあまり影響しないことが分かった。このことから、本モデルでは計算速度の観点からも様々な処理プロセスを柔軟に設定・検討できることがわかった。

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：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/t01_typhoon19/ >，（入手 2020.6.10）.
- 4) 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.
- 5) S. Asai, T. Akiyama, H. Tanouchi and N. Egusa: A Numerical Simulation of Disaster Waste Disposal in Wakayama City by Using DHT Model, *International Journal of GEOMATE*, Vol. 20, Issue.80, pp.23-28, 2021.
- 6) 田内裕人，浅井惣一郎，江種伸之：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，第 45 回土木情報学シンポジウム講演論文集，id:71，2020.
- 7) 国立環境研究所：災害廃棄物情報プラットフォーム < https://dwasteinfo.nies.go.jp/plan/project_man/after_kagoshima/after_kagoshima_06.pdf >，（入手：2021.6.10）.
- 8) 環境省：災害廃棄物対策指針（本編），
< http://kouikishori.env.go.jp/guidance/guideline/pdf/position_of_pointer_main.pdf >，（入手：2021.6.10）.