

直列待ち行列モデルによる産業廃棄物管理型最終処分場 における搬入車両の輻輳解析

吉成 昇^{1,†1} 大内 東^{1,a)}

受付日 2017年1月24日, 再受付日 2017年3月22日/2017年6月7日/2017年7月6日,
採録日 2017年7月23日

概要: 本論文は, 産業廃棄物管理型最終処分場の運営において主要な業務の1つである廃棄物を搬入する運搬車両の取扱いについて, 受付から廃棄物のダンピング, 退去までの挙動を待ち行列モデルにより解析し, 処分場の運用に関して有用な情報を得るための一般的解析方法を提案する. また, 実際の処分場の実測データを収集して, モデル計算結果の妥当性を検証する. 解析方法の主要点は搬入車両の場内滞在時間の考察である. 場内滞在時間の観点から, 1日に対応可能な車両台数などを算出し, 搬入車両の待機場の設計, 作業員の人員計画, 受付業務の改善など, 管理型最終処分場の建設設計や施設運用に役立てる結果を導く.

キーワード: 産業廃棄物, 最終処分場, 待ち行列, システム内滞在時間

Tandem Queue Analysis of Congestion of Vehicles in Industrial Waste Disposal Landfill

NOBORU YOSHINARI^{1,†1} AZUMA OHUCHI^{1,a)}

Received: January 24, 2017, Revised: March 22, 2017/June 7, 2017/July 6, 2017,
Accepted: July 23, 2017

Abstract: This paper examines an important element regarding managing final disposal landfills for industrial wastes, namely, handling waste transport vehicles. By examining a queuing model that includes each stage, from waste loading to waste material dumping and site departure, an analysis method, which is useful for obtaining information regarding managing disposal landfills, is proposed. The validity of the proposed method when the model is applied to actual disposal landfills is also considered. The analysis mainly focuses on considering the time spent by waste disposal vehicles at disposal sites. This helps calculate the number of vehicles that can be handled per day. This calculation generates useful findings on the construction design and management of management-type final disposal landfills, including the design of transport vehicle waiting areas, human resources planning for workers, and improving load-in work practices.

Keywords: industrial waste, waste disposal final landfill, queuing theory, system times

1. はじめに

廃棄物処理, とりわけ産業廃棄物処理は, わが国の工業生産プロセスに必須のプロセスである. 生産と廃棄物処理は一体であり, 生産プロセスをさかんにするためには廃棄

物処理能力を高める必要がある. さらに, 近年頻発している大規模自然災害の復旧において産業廃棄物処理事業者が果たす役割は大きい. 環境省もその事実をふまえ, 2015年に法令改正や省令変更を行い, 災害廃棄物処理において, 産業廃棄物処理事業者が持つ人材, スキル, 施設などの活用を図る方向で進めている [1], [2], [3], [4].

産業廃棄物の処理は「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」(以下, 「廃掃法」)によって規定されている許可事業である. 排出事業者から委託を受けて産業廃棄物処理の一部

¹ 吉成総合研究所
YOSHINARI RESEARCH INSTITUTE, Sapporo,
Hokkaido 001-0021, Japan

^{†1} 現在, 北海道大学
Presently with Hokkaido University

^{a)} azuma@kdn.biglobe.ne.jp

あるいは全部を行う事業が産業廃棄物事業である。産業廃棄物事業者となるためには、産業廃棄物収集運搬業や産業廃棄物処分業などの許可が取扱品目ごとに必要である。さらに、産業廃棄物処理施設を設置・改良する場合は、事業の許可とは別に「施設設置許可」が必要であり、工事の着手前に必ず設置場所を管轄する行政長の許可を受ける必要がある。

以上のような状況から産業廃棄物処理事業に参画し、経営を行うことは容易ではない。たとえ、処理施設を建設してきたとしても、社会情勢や経済状況の変化など、その運用は難しい。著者らは産業廃棄物処理事業の管理・運営において、科学的方法論の導入を積極的に検討している企業と共同研究を行っている [5]。本論文ではその研究の1つとして、管理型最終処分場の運営において主要な業務の1つである廃棄物を搬入する運搬車両の取扱いについて、受付から廃棄物のダンピング、退去までの挙動を待ち行列モデルにより解析する方法を提案する。また、実際の処分場の実測データを収集して、モデル計算結果の妥当性を検証する。モデルによって計算される場内滞在時間の観点から、1日に対応可能な車両台数などを算出し、搬入車両の待機場の設計、作業員の人員計画、受付業務の改善など、管理型最終処分場の建設設計や施設運用に役立てる結果を導く一般的方法を提案する。

本論文で応用する待ち行列モデルは、M/M/1 モデルを基本とする直列モデルである。この直列モデルは独立性が成立することから、モデル化、および、解析が容易であり、現場担当者にとっても理解や利用が可能である。多くの実システムを対象とする研究において、M/M/1 モデルを採用する理由は、研究の初期段階において詳細なモデルを構築することは困難であることと、車両の到着が過去に依存しない「無記憶性」を持ち、最もランダムに到着すると見なす指数分布を用いて、待ち時間などの理論的評価値を実際よりもやや過剰に算出することとし、それをふまえて実システムの設計に活かすためである。本研究においてもこのアプローチをとる。

産業廃棄物処理に関する研究は、廃棄物処理関連の学会においてさへ多くはない。また、管理型最終処分場を対象とした研究は非常に少ないのが現状である。さらに、最終処分場における運搬車両の輻輳解析に関する研究は他に類をみない。本研究が日常的に行われている業務に対し科学的アプローチの方法を提案し、処分場運営の戦略立案を可能とすることで産業廃棄物処理事業の発展につなげることを目指す。

2. 廃棄物処理の概要

2.1 廃棄物の定義

日本における廃棄物処理は、廃掃法により規定されている [6]。「廃掃法」では、廃棄物を一般廃棄物、産業廃棄物

などに区分し、それぞれ自治体や排出者の処理責任について規定しているほか、廃棄物処理業や処理施設に対する規制、環境保全のための様々な措置について定めている。

- 廃棄物

廃掃法第2条では廃棄物とは「ごみ、粗大ごみ、燃え殻、汚泥、糞尿、廃油、廃酸、廃アルカリ、動物の死体その他の汚物または不要物であって、固形状または液状のもの（放射性物質及びこれによって汚染されたものを除く）」と定義している。なお、放射性廃棄物はこの法律に該当する産業廃棄物ではない。

- 産業廃棄物と一般廃棄物

廃棄物は大きく産業廃棄物と一般廃棄物に大別される。産業廃棄物とは、廃掃法に定められた20種類の廃棄物であり、一般的には、会社や工場などの事業活動にともなって発生した廃棄物である。

一般廃棄物とは、産業廃棄物以外の廃棄物を指す。通常、一般廃棄物は市町村に、産業廃棄物は民間の廃棄物処理事業業者によって処理される。廃棄物を一般廃棄物と産業廃棄物に分類するのはわが国の歴史的事情に由来するものであり、わが国特有のものである。海外においては、有害廃棄物か否かで分類するのが一般的である。

2.2 産業廃棄物システム

産業廃棄物の処理は、収集と運搬、中間処理、リサイクル、最終処分場の各処理をそれぞれの施設で実行する（図1）[7]。

- 収集と運搬

発生した産業廃棄物は、自社あるいは委託業者の輸送機関により中間処理場や最終処分場へ運ぶ。廃棄物の運搬に特有な車両には、ダンプ車、フルトレーラ、セミトレーラ、コンテナ専用車、強力吸引車、粉粒体運搬車などがある。

- 中間処理

リサイクルや最終処分を考慮した分別・選別、破碎・切断・圧縮、焼却、溶融、脱水などの適正処理によって、廃棄物の減容化、減量化、無害化、安定化、資源化などを目的に行う。

- リサイクル

自社でリサイクル可能な製品は自社で、製品化がで

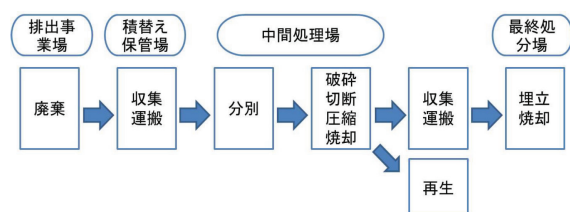


図1 産業廃棄物の処理

Fig. 1 Waste processing of industrial waste.

きないものは契約企業へ委託してリサイクルする。

● 最終処分

再利用が不可能な中間処理後の残渣などは、最終処分場に埋め立てる。最終処分場は、環境保全の観点から汚水の外部流出、地下水汚染、廃棄物の飛散・流出、ガス発生、そ（鼠）族昆虫の発生などを防止しながら、所要量の廃棄物を安全に埋め立て処分できる構造物である。

● 排出事業者責任

産業廃棄物を排出した事業者は、原則として排出した産業廃棄物を自らの責任で処理しなければならない。自ら処理できない場合は、産業廃棄物処理業の許可を持っている処理業者に処理を委託することができる。委託基準では、排出事業者は委託先の産業廃棄物処理業者とお互いの役割と責任を明確にした委託契約の締結や、契約のとおり産業廃棄物が適正に処理されたことを確認するための産業廃棄物管理票（マニフェスト）を利用して確認することなどが義務付けられている。

2.3 産業廃棄物処理事業

排出事業者から委託を受けて産業廃棄物処理の一部あるいは全部を行う事業が産業廃棄物事業である。産業廃棄物事業者となるためには、産業廃棄物収集運搬業や産業廃棄物処分業などの許可が取扱品目ごとに必要である。

2.4 産業廃棄物処理施設

産業廃棄物処理施設を設置・改良する場合は、事業の許可とは別に「施設設置許可」が必要であり、工事の着手前に必ず設置場所を管轄する行政長の許可を受ける必要がある。また、許可を受けた施設の変更、休止、廃止、譲り受けまたは借り受け、合併や分割などを行う場合にも、許認可申請や届出などの手続きが必要になる。処理施設の設置にあたっては、廃棄物処理法だけでなく、建築基準法、大気汚染防止法、水質汚濁防止法などの様々な法律の適用や、周辺地域の環境保全、周辺住民への配慮を目的とした調査や協議が必要な場合もある。

最終処分場は、廃棄物処理法によって安定型最終処分場および管理型最終処分場、遮断型最終処分場の3つに分類され、各々の処分場に埋め立て処分できる産業廃棄物と最終処分場の構造基準・維持管理基準が定められている。

安定型最終処分場は、廃プラスチック類、ゴムくず、金属くず、カラスくず、コンクリートくず、がれき類などの安定型産業廃棄物を埋め立て処分する。管理型最終処分場は浸出水処理が必要な焼却残渣、汚泥などを埋め立てる処理を行う。遮水工が設けられ、浸出水処理施設も必要になる。遮断型最終処分場は有害な産業廃棄物を埋め立てる。

2.5 わが国における産業廃棄物処理の現状

平成26年4月1日現在の環境省の統計によると、年間に排出される廃棄物のうち、一般廃棄物が約4,432万トン、産業廃棄物は約3億9284万トンである。産業廃棄物処理業の許可件数は約22万2千件である。そのうち、約94%（約20万8千件）は収集運搬業の許可件数、残りの約6%（約1万4千件）は処分業の許可件数である。また、産業廃棄物処理施設の設置許可件数は、中間処理施設が18,691施設、最終処分場が1,880施設となっている。最終処分場は、安定型が全体の60%（1,120施設）、管理型39%（736施設）、遮断型1%（24施設）となっている。さらに、産業廃棄物最終処分場の残余容量は、約17,181万立方メートル、残余年数は全国では14.7年と推計されている [8], [9]。

3. 応用する待ち行列理論

本論文では、最終処分場における運搬車両の挙動の解析を行う。システムを最終処分場、客を廃棄物搬送車両として対応させ、 N 個の待ち行列を直列に接続した N ステージ直列待ち行列モデルとしてモデル化する。待ち行列理論に関してはすでに多くの解説書があるので、本論文に必要な部分のみをまとめる [10], [11]。

本論文で対象とするモデルは、車両の到来はポアソン分布でサービス時間に指数分布を仮定するM/M/1モデルを基礎とし、待ち行列長の制限やサービス窓口が塞がっていたときに車両が退去する呼損は考えないこととする。なお、サービス時間が指数分布とならない場合の解析については、後に述べる。

3.1 M/M/1 単一ステージ待ち行列

以下の記号を定義する。

T : 1日あたりの営業時間 [時間]

n : 1日あたりの到来車両数 [台]

λ : 平均到着率 (単位時間に到着する車両数の平均値)

$$\lambda = n/T$$

$1/\lambda$: 平均到着時間間隔 [時間]

μ : 平均サービス率 (単位時間あたり受付処理を行う件数の平均値)

$1/\mu$: 平均サービス時間 [時間]

ρ : サービス利用率 (= λ/μ)

以上の記号を用いると、待ち行列の諸特性は以下の式で求められる。

$$\text{受付を待つ客の平均数: } L_q = \rho^2 / (1 - \rho) \quad (1)$$

$$\text{システム内の平均数: } L = L_q + \lambda / \mu \quad (2)$$

$$\text{平均待ち時間 [時間]: } W_q = L_q / \lambda \quad (3)$$

$$\text{システム内平均滞在時間 [時間]: } W = W_q + 1 / \mu \quad (4)$$

一方、リトルの公式

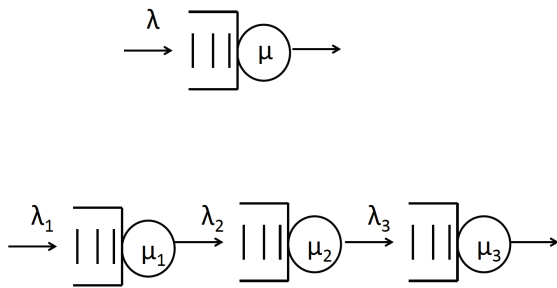


図 2 単一ステージ M/M/1 モデルと 3 ステージ M/M/1 モデル
 Fig. 2 Single M/M/1 model and 3-stages M/M/1 model.

$$L_q = \lambda \cdot W_q \quad (5)$$

$$L = \lambda \cdot W \quad (6)$$

から以下の関係式を得ることができる。

$$W = L/\lambda = \frac{1}{(1-\rho)} \frac{1}{\mu} \quad (7)$$

さらに、このシステムの出力過程については、次の Burke の定理が適用できる。

Burke の定理 到着率が λ のポアソン分布で、サービス率が μ の指数分布に従う M/M/1 型の待ち行列システムが $\lambda < \mu$ で平衡状態であるならば、その出力過程は到着率が λ のポアソン過程となる。

つまり、M/M/1 型の待ち行列の出力が次の待ち行列の入力(到着)となる場合、次の待ち行列の到着時間間隔がポアソン分布となる。そのため、次に続く待ち行列のサービス時間が指数分布に従うとすると、次の待ち行列も M/M/1 型として解析可能となる。

3.2 N ステージ直列待ち行列

単一待ち行列が直列に N 個続く待ち行列が N ステージ直列待ち行列である(図 2)。

ステージ j ($j = 1, \dots, N$) に対し、以下の待ち行列特性を仮定する。

- M/M/1 型の待ち行列である。
- 到着率が λ_j のポアソン分布で、サービス率が μ_j の指数分布に従うものとする。
- $\rho_j = \lambda_j/\mu_j$ をそれぞれのステージでの利用率とする。

M/M/1 型の理論により、各ステージが定常状態であるための条件は、 $\rho_j < 1$ ($j = 1, \dots, N$) である。

直列型待ち行列システムで問題になるのは、各ステージへの客の到着分布である。これは、先に述べた Burke の定理により、次のステージへの待ちに制限(ブロッキング)がなければ、ステージ j ($j = 2, \dots, N$) への客の到着はポアソン分布になる。すなわち、

$$\lambda_j = \lambda \quad (j = 1, \dots, N) \quad (8)$$

とおくことができる。この場合は、N 個の M/M/1 型の待ち行列システムが直列接続したモデルとして、N 個のス

テージを切り離して解析することができることを意味している。したがって、

$$W = \sum_{j=1}^N W_j = \sum_{j=1}^N \frac{1}{(1-\rho_j)} \frac{1}{\mu_j} \quad (9)$$

ただし、

$$\rho_j = \frac{\lambda}{\mu_j} \quad (j = 1, \dots, N) \quad (10)$$

となる。

4. 管理型最終処分場における運搬車両の処理業務

4.1 管理型最終処分場における課題

業務担当者との議論から明らかとなった最終処分場における主な課題は以下のようにまとめられる。

- (1) 運営に関する課題： 需要予測と受け入れ計画
- (2) 処分場の状態監視： 安定化状態データの収集と管理
- (3) 運搬車両： 搬入車両の輻輳制御と安全管理
- (4) 浸出水の浄化： 安価な浄化技術の開発

本論文では、このうち(3)の搬入車両の輻輳に関する課題を取り上げる。この課題に対して解決策を提案するためには、処分場の施設や構造、作業業務内容などに関する知識が必要である。このため著者らは、詳細な業務内容の調査を行い現場担当者と議論を重ねてきた。その結果、当日搬入車両の場内滞在時間の短縮が主要な課題であることが明らかとなった。なぜなら、運搬事業者は処分場事業者にとっての顧客であるため、顧客サービスの観点から、場内滞在時間の短縮が非常に重要であるからである。したがって、本論文ではこれまで説明した N ステージ型直接待ち行列モデルを用いて、当日搬入車両の場内滞在時間の短縮を目指すための解析方法を提案する。

4.2 最終処分場の構成施設

本論文で対象とする管理型最終処分場は図 3 のような施設であり、外部搬入路、受付待機場、受付、トラックスケール、ダンピングヤードまでの往復移動路、ダンピングヤード、タイヤ洗浄施設などの設備から構成される一般的なものである [7]。その規模は事業者により様々であるが、この施設は埋め立て面積で 5 万 [m²]、容積で 120 万 [m³] 程度であり、よく引き合いに出される東京ドーム容積 1 個分と考えてよい。また、営業日・営業時間は一般的に以下のとおりである、

受け入れ曜日：月曜日～金曜日
 受け入れ時間：9：00～12：00, 13：00～16：00
 休業日：土曜日および日曜日、祝祭日, 12/29～1/31

4.3 運搬車両の処理業務フロー

本論文の目的とする搬入車両の場内滞在時間の短縮を考

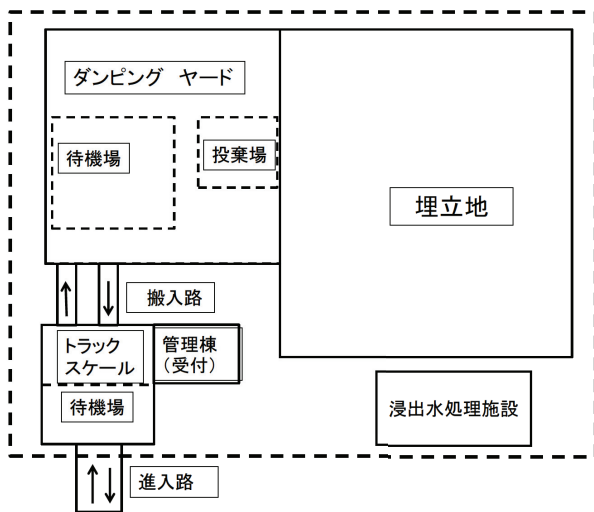


図 3 最終処分場の施設

Fig. 3 Facilities in final disposal landfill.

察するためには、運搬車両の場内における当日作業内容について熟知する必要がある。

表 1 はわが国における多くの最終処分場において採用されている廃棄物の受け入れに関する一般的な手続き内容である。その手続きは、事前処理、当日処理、後日処理に分けられる。運搬事業者は、決められている申請期限前（数週間前）までに搬入日、搬入内容などを申請して許可を得なければならない。

当日作業の主要な点についてまとめると以下のようなになる。

搬入車両の当日作業フロー

- (1) 受付待機駐車場： 運搬車両は処分場入口から進入し、待機駐車場において受付の順番を待つ。
- (2) トラックスケール： 順番が来るとトラックスケールに乗り、搬入物を積んだ実車重量を計測する。最近では計量と同時に放射線量の計測も行う。
- (3) 受付： マニフェスト、伝票など必要な受付事務を行う。
- (4) 移動： 受付処理が終わると、処分場内にある実際に埋め立てを行うダンピングヤードまで移動する。
- (5) ダンピング待機場： ダンピングの順番を待つ。
- (6) ダンピング： ダンピングを行う。必要に応じてダンピング後に車台の清掃なども行う。
- (7) 移動： 再び受付へ戻る。
- (8) 終了処理： 受付で必要な作業終了手続きを終えて処分場から退去する。

5. 運搬車両の待ち行列モデル

搬入車両は 4.3 節のフローの中で、受付窓口、ダンピング場、最終報告窓口の 3カ所をこの順序で進み処理を行わなければならない。途中離脱、途中割込み、飛越などでは

表 1 管理型最終処分場の処分依頼から処分料金納入までの業務概要

Table 1 work flow of dumping application.

1. 事前手続き	
(1) 処理依頼搬入開始希望日の数週間前までに以下の書類を揃えて処理依頼を受け付ける	<ul style="list-style-type: none"> ・産業廃棄物処分委託申込書 ・産業廃棄物性状表 ・運搬車両登録票 ・分析証明書の写真 ・その他必要な書類
(2) 受入審査	<ul style="list-style-type: none"> ・産業廃棄物ごとの書類審査の実施 ・必要に応じて現物審査、現地調査
(3) 処分委託契約締結	<ul style="list-style-type: none"> ・「産業廃棄物処分委託契約書」 ・(正) 排出業者 ・(写) 受託管理者 ・5年間保管 ・契約者カード交付 ・その他（遵守事項などの説明など）
2. 当日の廃棄物受入業務	
(1) 契約者カード提示と確認	<ul style="list-style-type: none"> ・マニフェスト提出と確認 ・運搬車両の運搬表示版と確認 ・受入検査への協力と確認 ・廃棄物の確認（目視） ・計量（トラックスケール） ・展開検査の実施 ・必要に応じて精密検査の実施
(2) 受入検査結果の通知	<ul style="list-style-type: none"> ・適合、不適合 ・搬入産業廃棄物の持ち帰り ・受入拒否（契約の解除）
(3) ダンピングヤードへの乗入れとダンピング	<ul style="list-style-type: none"> ・産業廃棄物のダンピング投棄 ・タイヤ洗浄施設を通り退出時手続き
(4) 退出処理（管理事務所）	<ul style="list-style-type: none"> ・受入書 ・計量（トラックスケール） ・書類の受取り
3. 事後手続き	
(1) 処分料金請求	
(2) 納付	

きない。さらに、施設から施設への移動に際してブロッキングは発生しない。したがって、輻輳が発生すると思われる場所は、受付窓口、ダンピング場、最終報告窓口の3カ所である（図 4）。これらの施設をそれぞれステージ 1 (S1)、ステージ 2 (S2)、ステージ 3 (S3) とすれば、3ステージ直列待ち行列としてモデル化することができる。また、ブロッキングは発生しないことから、Burke の定理も成立する。

5.1 3 ステージ直列 M/M/1 モデル

上記で述べたステージ 1 (S1), ステージ 2 (S2), ステージ 3 (S3) を以下のように定める.

S1: 受付待機場と受付窓口から構成する. 受付窓口は 1 つであり, 受付待ちまでの待機時間, 受付事務処理にかかる時間を考察対象とする. S1 における滞在時間を W_1 とする.

S2: ダンプ待機場とダンプグヤードから構成する. ダンプグヤードは 1 カ所とする. ダンプの順番を待つ時間, ダンプの時間を考察対象とする. S2 における滞在時間を W_2 とする.

S3: 終了受付待機場と終了受付窓口から構成する. 受付窓口は 1 つであり, 終了処理待ち時間, 処理時間を考察対象とする. S3 における滞在時間を W_3 とする.

ステージ間の移動時間: S1 と S2 の移動距離を d_1 [km], S2 と S3 の移動距離を d_2 [km] とし, それぞれの間の移動速度を時速 s_1 [km/h], s_2 [km/h] とすると, 移動時間はそれぞれ, d_1/s_1 [時間], d_2/s_2 [時間] となる. したがって, 往復の移動時間 W_4 は, $W_4 = d_1/s_1 + d_2/s_2$ となる.

場内滞在時間: 場内滞在時間 W_T は各ステージにおける滞在時間 (式 (9)) において $N = 3$ とした値

に往復移動時間 W_4 を加えて求める. すなわち, $W_T = W_1 + W_2 + W_3 + W_4$ である.

M/M/1 型の理論により, 各ステージが定常状態であるための条件は, $\rho_1 < 1$, $\rho_2 < 1$, $\rho_3 < 1$ である.

6. モデルによる計算結果と考察

6.1 モデル計算結果

5 章のモデルによって待ち行列の特性量を計算し, その利用について述べる. 計算に際して用いたパラメータは, 実際の現場の状況を反映するため, 事業者から提供していただいた実際の処分場における典型的な値とした (表 2).

例として $n = 70$ の場合の計算結果を表 3 に示す. この場合, S1 と S2 は, 平均待ち台数 2 台, 平均待ち時間 19 分, S3 は待ち台数, 待ち時間はほぼ 0 であり, S1, S2, S3 の滞在時間に往復移動時間を加えた場内滞在時間は $19 + 19 + 2 + 6 = 46$ [分] となる.

図 5 は, 営業時間が 8 時間, すなわち $T = 8$ の場合, $n = 50, 60, 70, 80, 90$ 台に対して, 場内滞在時間の変化を示したものである. ここで, 括弧内は $\lambda = n/T$ の値である.

表 2 計算実験のパラメータセット

Table 2 Set of parameters.

n	50, 60, 70, 80, 90, 100, 110
T	8, 9, 10, 11, 12
$1/\mu_j$	$1/\mu_1 = 5$ [min.], $1/\mu_2 = 5$ [min.], $1/\mu_3 = 2$ [min.]
d, s	1 [km], 20 [km/h]

表 3 $T = 8$, $n = 70$ の計算例

Table 3 Computational result in case $T = 8$, $n = 70$.

S_j	λ	μ	ρ	L_q	W_q [分]	W [分]
S1	8.75	12.00	0.73	1.96	13.46	18.46
S2	8.75	12.00	0.73	1.96	13.46	18.46
S3	8.75	30.00	0.29	0.12	0.82	2.82



図 4 上から順に, S1 待機場, S1 受付, S2 ダンプグヤード
Fig. 4 From the top, S1 parking lot, S1 reception, and S2 dumping yard.

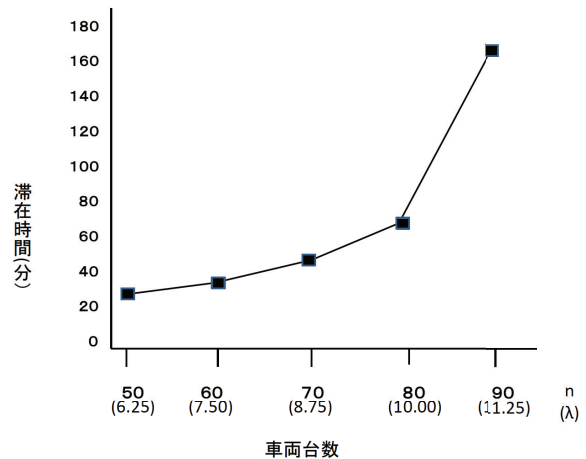


図 5 車両台数と場内滞在時間の関係
Fig. 5 Number of vehicle vs total system time.

6.2 モデル計算結果の考察

6.2.1 理論的最大受け入れ台数の算出

提案モデルにより、通常営業において処分場で取り扱うことができる最大車両台数は以下のようにして求めることができる。

各ステージで定常状態が存在するための条件は、 $\rho_1 < 1$, $\rho_2 < 1$, $\rho_3 < 1$ である。これより、 $T = 8$, $\mu_1 = 12$ とすると、 $n < 96$ となる。たとえば、1日の処理台数を定常状態となるための限界値に近い90台 ($n = 90$) とすると、S1, S2, S3の車両待機場には平均して14台の車両が待機しており、場内滞在時間はおよそ3時間となるのが計算から導かれる。

6.2.2 場内滞在時間の短縮に関する方策

理論的に場内滞在時間を短縮する方法は、式(9)の窓口利用率 ρ を小さくすることである。窓口利用率は $\rho = \lambda/\mu$, $\lambda = n/T$ で定義されるため、 ρ を減少させる方法は、 μ の増加、あるいは、 λ の減少で実現できる。

μ の増加：

- サービス率を α 倍する $\Rightarrow \rho = \lambda/\alpha\mu$
- 窓口数を c に増やす $\Rightarrow \rho = 1/(c\rho)$

λ の減少：

- T を β 倍延長 $\Rightarrow \rho = \lambda/\beta\mu$

以下では具体的に処分場運営の観点から、理論に対応させて説明する。

(a) 窓口サービス時間の短縮

サービス時間の短縮のために最初に考えられる対策は、受付窓口のサービス時間の短縮である。業務の単純化、情報システム導入による時間短縮などが考えられる。

(b) 窓口数の増加

c 個の窓口を持つ M/M/c モデルでは、サービス利用率 ρ は、 $1/(c\rho)$ となり、待ち行列長や待ち時間は窓口が1つの場合と比べて $1/c$ 以下になることが知られている [11]。

$c = 2$ の場合は、 ρ は窓口が1つの場合の $1/2$ となり、これから計算される待ち時間や待ち行列長は窓口が1つの場合の半分以下に短縮される。

(c) 営業時間の延長

$\lambda = n/T$ において、 n は営業努力の結果であるため容易に小さくすることはできない。したがって、制御できるパラメータは T である。 T が長ければ一般に車両の到来は分散し輻輳は緩和されると考えられる。逆に、 T が短ければ、車両の到来が集中し輻輳は増幅される。つまり、営業時間 T の延長は到着率の低減につながる。

通常の待ち行列解析においては、到着率の制御は難しい場合が多い。しかし、本モデルの場合は、当日の

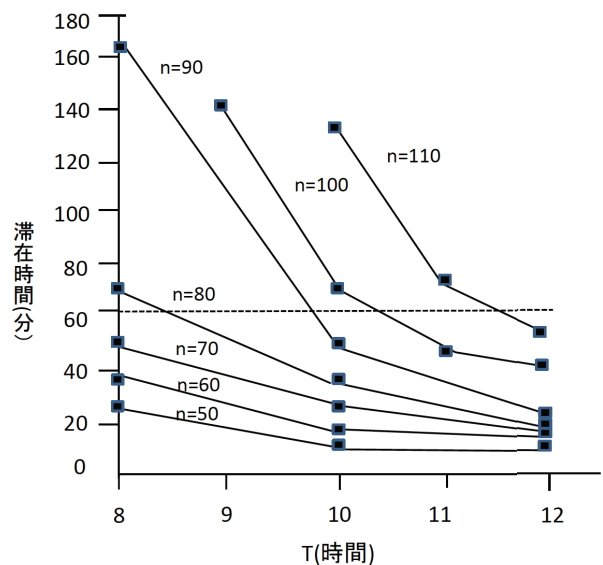


図 6 営業時間と場内滞在時間の関係

Fig. 6 Relationship between T vs total system time with n .

到来車両数は数週間前に把握できることから、営業時間を適切に設定することにより到着率を制御できる。したがって、到来車両数予測に応じて営業時間を延長することが可能であれば、混雑解消のための現実的な対応方法になると考えられる。

図 6 は、営業時間 T を現在の 8 時間から $T = 9, 10, 11, 12$ と増やしたときに、車両台数 n の変化 ($n = 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110$) に対して場内滞在時間がどう変化するかを示した図である。 $n = 100$ の場合は $T = 10, 11, 12$ の場合のみ定常状態が存在し、 $n = 110$ の場合は $T = 11, 12$ に対してのみ定常状態が存在する。たとえば、場内滞在時間を 1 時間以内にするためには $n = 90, 100, 110$ に対し、それぞれ $T \geq 10$, $T \geq 11$, $T \geq 12$ が必要であることが図 6 から読み取れる。

7. 実測データの収集と分析

本章では事業者の協力で得られた現場のデータに対して、待ち行列モデルから計算される値と実際の計測結果との関連について考察する。

7.1 データ収集の方法

実際に運用している現場において、1日を通してデータを収集することはきわめて困難である。そのため、収集日 1~収集日 4 (以下、D1~D4) の 4 日間において、それぞれ数時間のサンプリング時間帯を設定して、その時間帯に到着した運搬車両を対象としたデータを収集した。サンプリングデータの一例として、D3の実測値を図 7 に示す。時間の計測は、S1, S2, S3 それぞれのステージにおける入場時間と退去時間を計測し滞在時間を算出した。なお、

施設入場	計量・受付	場内入場	場内退場	施設退場	所要時間
13:00	13:00	13:03	13:08	13:13	0.13
13:00	0:00	0:03	0:05	0:05	0.13
13:00	13:03	13:06	13:17	13:19	0.19
13:02	0:03	0:02	0:10	0:02	0.17
13:00	13:07	13:11	13:19	13:22	0.22
13:07	0:07	0:04	0:08	0:03	0.22
13:07	13:12	13:15	13:24	13:30	0.23
13:17	0:05	0:03	0:09	0:06	0.23
13:17	13:23	13:27	13:36	13:42	0.25
13:30	0:06	0:04	0:09	0:06	0.25
13:30	13:45	13:48	14:04	14:06	0.36
13:35	0:15	0:03	0:16	0:02	0.36
13:35	13:40	13:44	13:50	13:55	0.20
	0:05	0:04	0:06	0:05	0.20

図 7 サンプルデータ (D3)

Fig. 7 Sample data (D3).

表 4 サンプルデータ一覧

Table 4 Table of sample data

調査日	D1	D2	D3	D4
時間帯	8:30-10:00	10:30-12:00	13:00-15:00	13:00-14:30
実績 n	55	53	42	68
実績 λ	6.85	6.63	5.25	8.5
計算結果 W (分)	35	33	29	46
調査時 n	9	9	14	11
調査時 λ	6.0	6.0	7.0	7.3
調査時 ρ_1	0.3	0.4	0.4	0.4
調査時 ρ_2	0.9	0.8	0.7	1.8
調査時 ρ_3	0.5	0.5	0.1	0.4
調査時 W (分)	30	33	22	37

紙面の関係から S1 は待ち時間と処理時間を区別して表示, S2 と S3 は待ち時間と処理時間の合計を記述している. また, 移動時間は S2 の処理時間に含めてある.

収集した全データから得られた待ち行列特性を表 4 に示す. 上段は調査日と時間帯, 中段は当日 1 日の実績と 5 章のモデルによる計算結果である. 下段はサンプルデータとデータから計算した待ち行列特性 λ と各ステージの ρ_j , および, サンプル時間帯における車両到来数である.

7.2 処理内容と滞在時間

D1~D4 の調査時間帯における S1, S2, S3 の処理の内容と処理時間を詳しく調べた. S1 における処理はトラックスケールでの計量に関して時間がかかっており, 車両の種類によって, 時間にばらつきがあった. また, 受付窓口での処理は数分以内で完了し, ほぼ一定であった. S2 においては, ダンプ時間よりもダンプ前後の処理, たとえば, 車両洗浄に時間を要しており, ばらつきが見られた. S3 は待ち時間, 終了受け付けともほとんど時間がかかっていない.

上述の結果は, 表 4 から見てもとれる. すなわち, 調査日全体を通して, S2 の ρ_2 が他の値と比較して大きな値となっていることから, S2 が直列待ち行列における, いわゆる, 混雑するボトルネックとなっていることが理解できる. なお, 表 4 の下段 D4 で $\rho_2 = 1.8 > 1$ となっており,

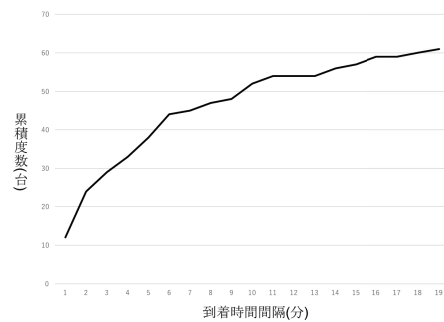


図 8 到着時間間隔の累積分布

Fig. 8 Columtive distribution of arrival time.

平衡条件を満たしていない. 当日の状況をヒアリングしたところ, 「当日は午前から到来車両が集中した. 特に S2 が非常に混雑したため, 現場担当者を増やして, ダンプ場での整理を行い, 車両を制御した」ということであった. このように, ρ の値は各ステージの混雑状況を把握する目安として利用できる.

場内滞在時間に関しては, 表 4 上段の計算結果 W と下段の調査時 W を比較すると, 6.1 節において用いたパラメータセットによる計算結果によってもおよその目安を与えることができると思われる.

また, 受付事務における書類処理は情報機器の導入が進んでおり, ほぼ一定で短時間で処理が終了している. 一方, 人手に依存する作業は時間も長くばらつきも大きい. これらは, 今後の業務改善の課題となると考えられる.

7.3 到着時間間隔と処理時間分布

モデルにおける到着はポアソン到着を仮定しており, ポアソン到着事象の到着時間間隔は指数分布となることが知られている. D1~D4 の調査時間帯における到着時間間隔の累積分布を調べた (図 8). 正確な近似はできないが, 図から推測すると指数分布に近く, モデルの仮定であるポアソン到着と考えられるため, D1~D4 すべての到着時間間隔分布について統計的検定を行った. まず, 到着時間間隔が指数分布に従うという仮定のもと, その平均値に基づき指数関数の母数 λ を求め, λ を母数とする指数分布とのカイ二乗検定による適合性検定を行った. 「到着時間間隔分布が指数関数に従う」との帰無仮説に対して検定を行った結果, p 値が 0.19 で有意水準 5% で帰無仮説が棄却されない結果となった.

一方, モデルで仮定している処理時間の指数分布について考察する. 図 9 に D1~D4 における S1~S3 それぞれの処理時間の累積度数分布を示した. この結果をみると, 処理時間は一定分布や指数分布以外の分布, たとえば, 正規分布などに近いようにもみえる. 到着時間間隔と同様に, 「処理時間が指数分布に従う」との帰無仮説について適合性検定を行った結果, 有意水準 5% において, 棄却されな

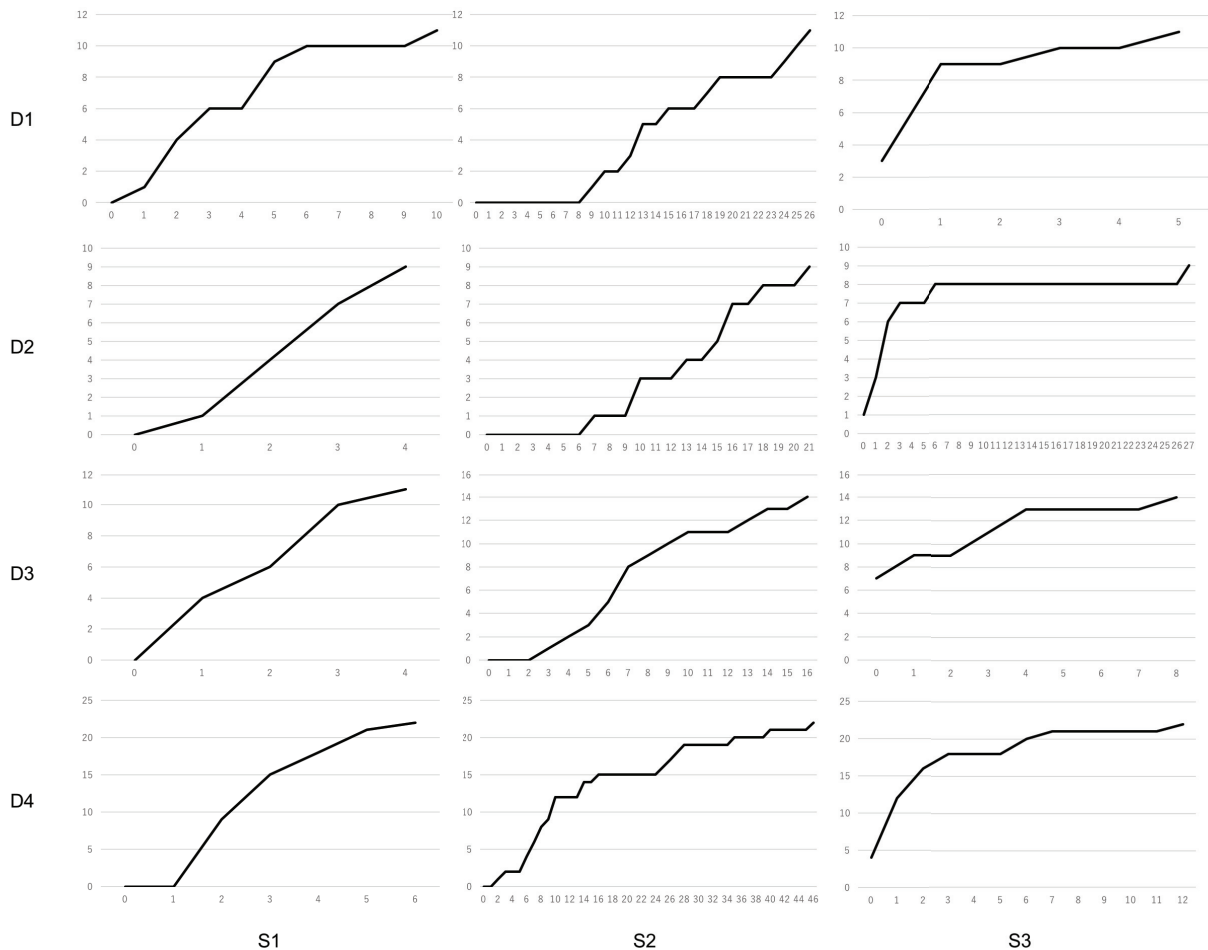


図 9 処理時間の累積分布 (横軸: 処理時間 (分), 縦軸: 累積台数 (台))

Fig. 9 Columtive distribution of service time.

かったのは, D1 の S1 (p 値: 0.098), S3 (p 値: 0.051), D3 の S2 (p 値: 0.533), D4 の S2 (p 値: 0.109) となった。つまり, これ以外の分布については, 指数分布に従うとはいえないことが分かった。それぞれのサンプル数が少ないこともあるが, 処理時間の分布は別な分布に従っていると考えられる。

本論文においては, 研究の第 1 段階として理論的な解析を行うことを目的としたため, 処理時間が指数関数に従うと仮定した。そのため場内滞在時間は実際よりもやや過剰に算出されたものの, 実際の運用に資する知見を得ることができた。より実情に近い分布を仮定し, M/G/1 モデルによる分析を行うことは, 本研究の重要な今後の課題である。

7.4 研究のまとめ

研究のまとめとして, 現場担当者から出された実際の運営の観点からの意見を下記に掲載する。

- (a) 日常業務のモデル化 日常の業務がこのようなモデルで考察できることは, 今後の処分場運営の観点から大変参考になった。
- (b) 計算結果の妥当性 日常業務で得られる場内滞在時間

は, これまで実際に計測したことはなかったので, 感覚的に 30 分から 1 時間と考えている。モデル計算結果は, この感覚とよくあっていると思われる。

- (c) 繁忙期の到来車両台数 過去の到来車両のデータから繁忙期の到来車両台数を予測し, 営業時間の延長について考えたい。
- (d) データ収集 これまで運搬車両に関するデータ収集を考えたことがある。しかし, 収集すべきデータに関して, 内容, 精度, 量を明確にできなくて実施できなかった。この研究によって収集すべきデータが明確になった。しかしながら, 今回のデータ収集を通して, その難しさを実感した。現場におけるデータ収集はそれ自体が研究課題ではないかと思われる。
- (e) 費用対効果分析 事業経営の観点からは, 多くの車両を受け入れることが望ましい。理論的観点からの提案はよく理解できる。しかしながら, 本研究のような分析を行い, 費用対効果の面から根本的な改善の検討を行う必要があると考えられる。
これらの意見から, 提案モデルは現場からも受け入れられるものであり今後の普及が期待できる。

8. おわりに

本論文では、最終処分場内における運搬車両の輻輳について考察し、基本的な待ち行列モデルが適用できることを示した。本研究の結果は管理型最終処分場を運営中の事業者、あるいは現在管理型最終処分場を計画中の事業者に対して、業務の見直しや規模の設計に有効であると考えられる。今後は、実際の現場の状況を取り入れて、課題解決の研究を行う計画である。これらの研究成果については稿を改めて報告したい。

謝辞 本研究に際し、現場での貴重なご意見をお聞かせいただき、データを提供していただいた仙台環境開発株式会社の関係諸氏に対し感謝する。待ち行列に関する有益な助言をいただいた栗原正仁教授（北海道大学大学院情報科学研究科）に感謝する。研究のまとめに関して助言をいただいた山本雅人教授（北海道大学大学院情報科学研究科）に感謝する。

参考文献

- [1] 吉成 昇, 大内 東: 災害復旧における産廃物処理事業者のインテリジェンス活動—東日本大震災の事例を通じて, コンペティティブ・インテリジェンス学会, Vol.3, No.1, pp.27-42 (2011).
- [2] Yoshinari, N., Ohuchi, A. and Sugasawa, Y.: Waste Management Data Collection during Disaster Recovery – A Case Study of Great East Japan Earthquake, *Progress in Competitive Intelligence* (2012), pp.74-106, 華夏出版社 (2012).
- [3] 吉成 昇, 大内 東: 東日本大震災から学ぶ災害廃棄物処理における諸課題, 日本 OR 学会春季発表会 (東京) (2013).
- [4] Yoshinari, N., Oyanagi, Y., Ohuchi, A. and Yamamoto, M.: Analyses of a Waste Management Company Activities in the Great East Japan Earthquake, *The 3rd 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management*, Hanoi (2016).
- [5] 仙台環境開発株式会社ホームページ: 入手先 (<http://sendaikankyo.co.jp/>) (参照 2017-01-20).
- [6] 環境省 廃棄物の処理及び清掃に関する法律: 入手先 (<http://www.env.go.jp/recycle/waste/laws.html>) (参照 2017-01-20).
- [7] 公益財団法人 日本産業廃棄物処理振興センター 学ぼう産廃: 入手先 (www.jwnet.or.jp/waste/knowledge/manifest.html) (参照 2016-12-05).
- [8] 環境省 産業廃棄物の排出及び処理状況等について: 入手先 (<http://www.env.go.jp/recycle/waste/sangyo.html>) (参照 2017-01-20).
- [9] 環境省 産業廃棄物処理施設の設置, 産業廃棄物処理業の許認可に関する状況について: 入手先 (<https://www.env.go.jp/press/101858.html>) (参照 2017-01-20).
- [10] ORWiKi: 日本 OR 学会, 入手先 (WWW.orsj.or.jp/wiki/) (参照 2016-12-05).
- [11] 高橋幸雄, 森村英典: 混雑と待ち, 朝倉書店 (2007).



吉成 昇

タイプインテリジェンス学会理事。

1943年生。2012年日本経済大学大学院経営学専攻修了。2004年仙台環境開発株式会社社主。2014年吉成総合研究所設立, 所長。産業廃棄物処理事業の科学的方法論の導入に関する研究に従事。2011年9月日本コンペティ



大内 東 (正会員)

吉成総合研究所, 所長代行。産業廃棄物処理に関する研究に従事。1990年情報処理学会創立30周年記念論文賞。日本 OR 学会会員。

1945年生。1974年北海道大学大学院情報工学専攻修了。工学博士。1974年北海道大学助手。1992年同大学助教授。1989年同大学教授。2009年北海道大学名誉教授。同年仙台環境開発株式会社総合技術研究所所長。2014年