

輸送統合管理システムの開発

－ ICT による環境リスク管理や到着管理機能の統合化 －

Development of Total Management System Including Transport Control - Integration of Environmental Risk and Vehicle Arrival Management Function using ICT -

大塚義一* 小西正郎** 森本克秀** 今井亮介*

要 旨

近年、様々な激甚災害が多発しており、被災から迅速に回復を図ることが社会的要請として求められ、災害廃棄物の適切な処理が要点となる場面が多々ある。特に、東日本大震災では莫大な量の災害廃棄物等の処理・処分に加えて、同震災に起因して発生した放射性物質の広域的汚染からの環境回復が、除染等の国家的事業として進められている。この事業では、土木建築工事では被ばくに関する知見が少ない従事者のリスク管理、公道を利用して除去土壌等を輸送する場合の周辺環境影響へのリスク管理、さらに計画変更への迅速な追従性及的確な意思決定が求められる。そのためには、輸送・環境リスク・業務管理、計画変更追従性、および最適な運行管理を統括した一元管理と、輻輳する管理に対し最新の情報を反映させる現場マネジメント支援、あるいは代替が可能な輸送統合管理システムの構築が重要となる。ここでは、初期に構築した災害廃棄物処理と除染等工事に用いたシステムに輸送管理機能を組み込んで開発した輸送統合管理システムの機能について報告する。

キーワード：災害廃棄物、指定廃棄物、除染等工事、輸送管理システム、セシウム

1. まえがき

未曾有の災害をもたらした平成 23 年 3 月 11 日の東日本大震災 (Mw9.0) から約 6 年の歳月が経過し、福島第一原子力発電所の原子炉冷却機能喪失事故による放射性物質による環境回復を目指した除染事業では、帰還困難区域を除く除染特別地域の面的除染が平成 29 年 3 月で完了した。この除染事業で発生する除去土壌等は、1,600 万～2,200 万 m³と見込まれ、平成 27 年 3 月～平成 28 年 3 月までに実施されたパイロット輸送とその後の輸送実施計画に基づいた本格的な輸送で、貯蔵先の中間貯蔵施設保管場 (大熊町、双葉町) への搬出工事が進められている。今後は、復興・創生期間の最終年度である平成 32 年度までに 500～1,250 万 m³程度の除去土壌等が搬出される見通しである。また、1 キログラム当たり 8,000 ベクレルを超える放射性セシウム (Cs) を含む焼却灰等については、環境大臣が指定廃棄物¹⁾として指定して、管理型処分場に速やかに埋立処分する方針である。福島県では、100 カ所以上に分散保管されている焼却灰等を既存の管理型処分場 (旧フクシマエコテッククリーンセンター) に輸送する計画が進められている。これらの輸送対象物は放射性セシウムを一定量含むため、厳密

な輸送管理が必須であり、所定ルート逸脱の防止や万が一の事故への細心の対応が求められている。こうした対処と円滑な輸送を行うためには、輸送道中はもちろん、積み込み場所での積載物情報や受け入れ先の車両台数の標準化などを管理するためのツールの導入が有効である。

一方、既往の建設工事においては、国土交通省の i-Construction 推進の動きもあり、土や生コンクリートといった建設資材を運搬する車両の運行管理において幾つかのシステムが実用化されている。また、中間貯蔵事業の要求水準書では、これらの運行管理機能に加え、事業者システムとして多岐にわたる要求事項があり、事業に参画している各社がシステム開発を進めている状況にある²⁾。しかしながら、車両運行管理を主要機能としたシステムがほとんどであり、勤怠や安全教育履歴等のその他の機能との統合化を図った管理システムの構築には至っていない。

そこで、筆者らは、災害廃棄物処理事業³⁾と除染等事業で導入したシステムをベースとして、放射線被ばく線量管理、教育履歴や業務履行状況管理機能を改良し、さらに車両の到着管理機能等を組み込み、これらの一元管理によって効率的・省力的に関係業務を統括管理できる輸送統合管理システム (以下、「インフォクロス」) を開

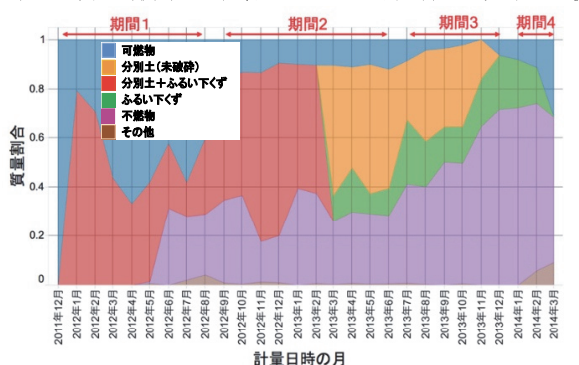
* 土木本部環境技術室 ** 東日本支社福島復興プロジェクト

発した。これらのシステムは、いずれも伊藤忠テクノソリューションズと共同で開発したものである。

2. システム適用事業の概要

2.1 災害廃棄物処理業務

平成 23 年の岩手県山田町における津波災害廃棄物の処理事業において、選別・破砕により分別した災害廃棄物を対象として、各処分先への搬出管理、車両運行管理、稼働重機の作業時間管理、搬出廃棄物の重量管理機能を有する「災害廃棄物統合管理システム」を開発した。本システムで、6 種類に区分管理した高度選別処理物を質量割合推移として記録した例が図一 1 である。本事業では、約 61 万トンの災害廃棄物を 200 台/日以上以上のダンプトラックで、選別場所と区分に応じた 28 カ所の処分先に対する搬出・運行管理によって不具合なく完了した。

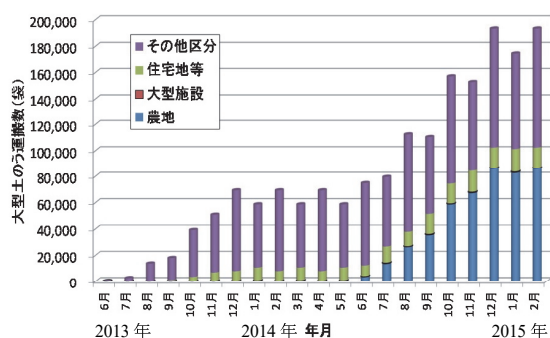


図一 1 高度選別処理物（6種類）の質量割合推移

2.2 本格除染工事

除染等事業を管理するために、災害廃棄物統合管理システムに大型土のう等の物のトレーサビリティ機能、作業員の勤怠管理、放射線被ばく線量管理、特別教育等

の履歴管理、および大型フレコン追跡機能等を追加した「除染統合管理システム」を開発し、平成 24 年からの葛尾村除染等工事に適用した。本工事は、宅地等 470 戸、農地 317ha、森林 646ha、その他用地約 450ha の除染と、除去した土壌等約 71.7 万袋の大型土のうを村内の仮置場等に保管する作業等が原設計である。導入システムで、延べ 492,061 人の従事者の勤怠・被ばく線量、約 176 万袋の大型土のうのタグ情報（表面線量、発生・保管場所等）を管理した。図一 2 に示すように、本システムで登録管理した大型土のうの運搬数推移は、発生場所の変遷、および区分毎の累計推移等を記録管理して除染工事を遂行した。



図一 2 発生場所ごとに管理した大型土のうの運搬数推移

2.3 指定廃棄物の詰替・搬出工事

福島県内の保管場所に保管されている指定廃棄物に対して、各保管場所で所定の収納容器に詰替え処理し、その後最終的に富岡町の管理型処分場に搬出する工事が現在進められている。この工事では、搬入先である処分・埋立場の車両待機場所が限られているために到着管理も必須である等の課題があった。そのため、図一 3 に示すように、搬出場所の環境モニタリング、従事する作



図一 3 輸送統合管理システム概念図

業員の被ばく線量管理、収納容器に詰替えられた指定廃棄物の積出しと搬出時の個体管理、車両運行、および到着管理機能を備え、これらの管理情報を極力人を介さずに収集する方式を導入し、それらをクラウドで共有して一元管理するインフォクロスを構築した。インフォクロスは、これ以前の対象物や人の勤怠等を管理するシステムに、省人化と効率化を図るための改善、および車両の到着管理機能等を加味して開発したものである。その開発内容を次節以下に示す。

3. 輸送統合管理システムの概要

3.1 インフォクロスの機能

平成 28 年度からの指定廃棄物詰替・搬出工事を効率的に進めることを目的として、既存システムの機能に RFID (Radio Frequency Identifier) タグの採用、事前の準備計画機能、車両位置情報をリアルタイムに把握する車両運行管理機能、作業員被ばく量の常時把握機能、運搬車両の到着管理機能および車両の運行シミュレーション機能等を付加した。

3.2 要素機能の開発と特長

a. RFID タグの採用による効率化

収納容器の管理に用いるタグ情報の効率的取得を目的として、非接触で読み込みを行うことができる RFID タグを採用した。RFID タグは廃棄物の運搬業務に使われた事例がないため、写真-1 に示す実車と実際に使用される収納容器 (サイズ: 1.5×1.5×0.5m) を用いた RFID タグの読み込み実験およびその他の機能確認実験を行った。これらの実験により表-1 の結果を得て、実際に使用できることを確認した。

b. 収納容器のトレーサビリティ管理

膨大な数の収納容器を指定の管理型処分場へ効率的に搬出するため、運搬車両に積載した収納容器毎の内容物、発生場所、放射線量等の情報をそれぞれの RFID タグから遠隔で読み込んで、クラウドサーバに保管し、そのデータを常時検出できるようにした。それによって収納容器の個体検索と確実なトレーサビリティを実現した。RFID タグを用いた収納容器の管理では、図-4 に示す作業毎に下記の業務を行い、収納容器の管理を行う方式とした。



写真-1 RFID タグ読み込み実験状況

- i. 搬出準備時：保管場所で収納容器に RFID タグを取付け、線量、重量などの測定データと RFID タグ管理番号を紐付けてクラウドサーバに情報を転送
- ii. 搬出時：ゲート部で車両に積載した収納容器の RFID タグを一括して読み込み、指示書を発行するとともに搬出情報をクラウドサーバに転送
- iii. 受入時：ゲート部で搬出時と同様に RFID タグを一括して読み込み、搬出時と同じであることをクラウドサーバ内の情報と照合
- iv. 埋立時：RFID タグと埋立位置情報を紐付けて、クラウドサーバに情報を転送

なお、RFID タグには管理番号のみが記録されており紐付けられたデータは全てクラウドサーバに保管されている。さらに採用したシート上のタグ表面には管理番号が記載 (写真-1 参照) されており、運搬途中等でタグが損傷しても、復旧が可能である。

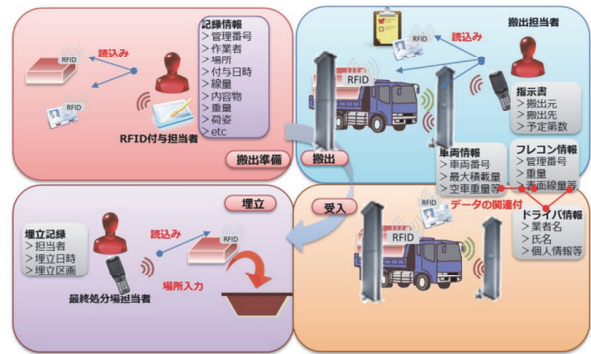


図-4 搬出準備から保管までの収納容器管理

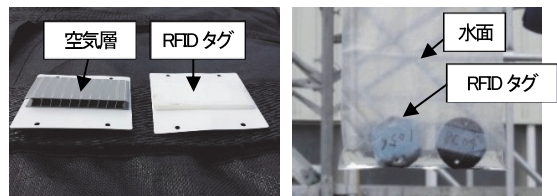


写真-2 タグ背面の空気層 写真-3 タグの水没状況

表-1 RFID タグ読み取り実験結果

確認項目	実験結果
車両速度	15km/h でも読み取り可能だが、5km/h 程度で確度が高い
アンテナ位置	高さ 3.0~3.7m、下向き約 25° 程度が最適
タグの取付け方法 (写真-2 参照)	収納容器上面あるいは側面に設置するタグ背面には、土の中の土壌に含まれる金属類による干渉を回避するために若干の空気層を設ける
収納容器位置	車両中央部に積み込み、タグ位置が運搬車両のあおりに遮へいされない箇所へ固定しなければならない
運搬車両認識用タグの設置	運搬車両に設置するタグは、ガラスに接しない工夫が必要
気象状況の影響 (写真-3 参照)	部分的な水没時に読み取り不能となる
高線量下の耐性	22~84 μ Sv/h の線量下に放置後も正常なタグ情報読み込みを確認

c. 作業員の被ばく線量の常時監視機能

全作業員の被ばく線量を確実に把握するため、全員にRFID付きの個人カードと自動読み取り機能付きポケット線量計を携帯させ、作業員ごとの被ばく線量計測値や作業時間等のデータをリアルタイムで記録することで、作業員の個人被ばく線量の常時監視を実用化した。

この機能により、複数の保管場所で指定廃棄物等の詰替え業務に従事する作業員、最終処分場までの廃棄物運搬業務に従事する運転手等の被ばく管理が可能である。実施手順は、作業員や運転手が出退勤時、管理区域入退時および教育受講時に個人カードをRFID読取機にかざして情報を記録(図-5参照)するもので、出退勤時や管理区域入退時に個人線量計の測定値を自動的に読取る方法で個人被ばく線量が累積され、管理値到達アラートで配置転換を考慮する等の管理を行うことができる。

また、本事業の特徴である複数箇所での同時作業であっても、分散して収集されたデータが即時クラウドサーバに転送され一元管理されるため、管理者は常時従事者の勤怠、被ばく管理を行うことができる。



図-5 従事者の勤怠、および被ばく線量管理

4. 到着管理による輸送計画の自動作成方法

搬出元から受け入れ先までの輸送を円滑に行うためには、運行ルート交通状況が大きく影響する。その点を反映した合理的な輸送計画を作成するために、先ず数学モデルを構築した。同モデルのアルゴリズムは、最適化手法の一つである混合整数計画法を用いて、搬出場所・搬出時間帯・運行ルート・車両の必要台数等の最適解を算出し、最適な輸送計画を立案するものである。混合整数計画法は、整数値をとる変数と実数値をとる変数が混在する状況で、いくつかの等式や不等式の制約がある場合に、目的とする関数を最大化あるいは最小化する計算手法である。

この輸送計画に基づいて運搬作業指示を行う場面を想定すると、指定廃棄物の収納容器の運搬作業中に交通規制や渋滞等が発生した際、迅速に搬出元や受入施設に到着時刻を連絡し、簡便に運行調整ができることが望まし

い。そのため、運搬車両毎に現在地から目的地に到着する時刻を自動計算した結果を管理画面に数値表示できる統合管理システムの機能(到着管理機能)を組み込んだ。この到着管理機能によって、搬出入先との日常的な情報連携を密に図り、計画工程の履行をより確実に実行可能とした。

4.1 運行計画作成方法

運行計画は、計画期間および離散化データ数の違いにより、①年間月別計画、②月間日別計画、③当日運搬計画の3つの計画作成から構成する。以下に、年間月別、月間日別、および当日運搬計画作成の流れを示す。

a. 年間月別計画の作成

保管施設毎の予定運搬数、1日当たりの運搬数等をパラメータとして入力することで、全事業計画に基づく年次ごとの袋数の運搬が可能となるような保管施設毎・月毎の運搬袋数が計算され、以下の点が考慮された計画が自動作成される。

- i. 施設の受入能力範囲内で運搬袋数を各月に配分
- ii. 遠距離運搬だけの月や近距離運搬だけの月といった偏りを軽減するため計画期間内の仕事量を平準化
- iii. 月毎に余裕を分散し受入施設毎の稼働率を平準化
- iv. 月単位で稼働する保管施設数を平準化

b. 月間日別計画

月間日別計画では、年間月別計画結果(月毎の運搬袋数)を入力値として、保管施設毎・日毎の運搬回数および運搬回数が計算される。月間日別計画では以下の点が考慮される。

- i. 施設の受入能力範囲内で運搬回数を各日に配分
- ii. 日単位での仕事量を平準化
- iii. 受入施設の能力余裕を日毎に分配し受入施設毎の日々の稼働率を平準化
- iv. 保管施設の能力余裕を日毎に分配し保管施設の日々の運搬数を平準化

また、設定した運搬回数を基に、下記の順でトラックの必要台数が算出される。

- ・仕事量を基に概算のトラック必要台数を算出
- ・運行パターンでトラック最小必要台数を推定

c. 当日運搬計画

当日運搬計画では、月間日別計画結果(日毎の運搬袋数・運搬回数)を入力値として、トラック毎・日毎の運行スケジュールが算定される。当日運搬計画では以下の点が考慮される。

- i. 受入施設でのトラック待ち時間を低減
- ii. 車両空車移動時間の短縮および稼働率を平準化
- iii. 遠距離運搬を受入施設の終了時間間際に計画しないことを配慮
- iv. 運転手の昼休み、稼働時間上限、事務所から荷積み場所までの距離を考慮

また当日運搬計画においては、トラック台数について以下の2つの手法を選択した計画の立案が可能である。

- i. 車両台数指定モードとして、指定した台数のトラックでの計画作成
- ii. 車両台数計画モードとして、なるべく少ない台数のトラックでの計画作成

4.2 運行計画作成結果

前節の年間月別、月間日別、及び当日運搬計画から、最終的には図-6のような各運搬車両の運行表を作成し、配車を行う。運搬中には運行管理システムにより、車両毎の運行状況をリアルタイムで把握し、運行表と差異が生じた際には、この状況を考慮した当日運搬計画を再計算することで、翌日以降の計画を再検討できる。

トラック1	荷積A	運搬	余裕	荷降C	
トラック2	荷積A	運搬	余裕	荷降C	
トラック3	荷積A	運搬	余裕	荷降C	
トラック4				荷積A	運搬
トラック5	荷積B	運搬	余裕	荷降C	
トラック6	荷積B	運搬	余裕	荷降C	
設備A	荷積A	荷積A	荷積A	荷積A	
設備B	荷積B	荷積B			
設備C			荷降C	荷降C	荷降C

図-6 当日運行表の一例

5. シミュレーションによる輸送計画の評価

5.1 運行シミュレーションの方法

運行シミュレーションでは、表-2に示すように、道路情報等を設定したうえで、当日運搬計画結果を手順4として入力し、作業時間や走行時間にバラツキを持たせ実際の運行を模擬して事前評価を行う。運行シミュレーションでは、当日運搬計画の車両の1回目の荷積み開始時刻に荷積み場所から車両を出発させる条件からスタートし、次をアウトプット情報として選択できる。

- i. 荷積み→運搬→荷降→空走行を再現
- ii. 荷積みと荷降し場所での待ち時間を表示
- iii. 指定時刻に運搬中止イベントを発生させて、運搬中止時の状況を再現

5.2 シミュレーション結果

受け入れ先の管理型処分場での待ち台数や待ち時間のばらつきを検証する目的で、当日運搬計画に対して疑似乱数による変動を与えてシミュレーションした。その検証結果を表-3に示す。具体的入力値は、走行ルートの各区間に80km/hまたは40km/hの速度を設定し-10km/h~0km/hの間で4種類(ケースNo2~5)の1様乱数を発生させ運搬車両の遅延状況を模擬した。その結果、管理型処分場の受付では待ち台数で2~4台、待ち時間で6~17分(荷卸しでは待ち台数で2~5台、待ち時間で14~34分)の変動が生じることを確認した。この方法によって、設定した4つの目的関数の最適条件を事前に

把握できる。

交通事故などによる通行止めが発生した場合に、運行中止指示の適用範囲やそのタイミングについての検証結果を図-7に示す。図は、3台の車両に対し、仮に16時に運行中止指示が出た場合の検証で、最遅車両が17時15分に作業完了する結果である。これにより、中止した車両の積荷を受け入れる保管施設の作業延長時間、トラック運転手の労働延長時間、運搬車両の運行中止を行うタイミングが検証でき、当日運搬計画における遠距離運搬の受入施設到着時刻の条件を適正化できる。

当日運搬計画結果を入力値としてトラックを出発させ、走行時間の適正な余裕を検証した結果を表-4に示す。表中の※1は、受入施設の当日計画の到着時刻に対するシミュレーションの到着時刻との差で、プラスは遅延、マイナスは早着を示す。走行時間余裕とトラック台数はトレードオフの関係にあり、走行時間余裕を増やすと遅延は減るがトラック台数は増加する傾向がある。複数のシミュレーションケースの結果から、トラック台数と走行時間余裕値の相関を定量的に把握することができ、適正な走行時間余裕値を予め把握できる。

保管施設での搬出作業の開始時期による運搬回数と施設稼働率の予測結果を図-8に示す。ケース1は、保管施設の開始・終了月を指定しない場合、ケース2は、保管施設の最早開始月と最遅終了月を指定した場合であり、各ケースの運搬回数と施設稼働率を模擬した。平均運搬回数のグラフから、ケース1では保管施設側の運搬開始と終了月の制約がないため計画期間全体(76カ月間)の平準化が見込める。また、ケース2では保管施設側の運搬開始と終了月が設定されているため、計画期間全体の平準化が期待できないことが明らかになった。一方、平均稼働率のグラフでは、両ケースの場合での施設の稼働率(=100×受入袋数/受入可能袋数)が100%を超えないことを確認できた。ここで、受入可能袋数とは、受入施設が受け入れることができる最大の袋数である。

このように、各種の条件における運行シミュレーション

表-2 運行シミュレーションの実行手順

手順	実行名称	処理内容
1	道路ノード情報の設定	運搬経路上の分岐・合流・交差点(高速道路ICおよびCT、一般道の交差点)および保管施設ならびに受入施設を道路ノードとして設定する。
2	道路リンク情報の設定	運搬経路として使用する道路区間(リンク)の両端となる道路ノードおよびリンク種別(高速道または一般道)ならびに速度を設定する。
3	施設内の作業パラメータの設定	施設内の作業時間や移動時間、および作業場所や待機場所の数、ならびに操業条件を設定する。
4	当日運搬計画結果の取込み	当日運搬計画で立案した運搬タスク情報を読み込む。
5	運行管理上のイベント情報の設定	必要に応じて運行管理イベント情報(通行止めや運搬中止指示など)を設定する。
6	シミュレーション実行	シミュレータを起動し、手順1~5の情報を元に運行シミュレーションを実行する。

表-3 管理型処分場での待ち台数と待ち時間

受入施設	ケースNo	乱数系列	受付最大待ち台数	受付最大待ち時間	荷降し最大待ち台数	荷降し最大待ち時間
管理型処分場	1	-	3台	11分	3台	17分
	2	1	4台	17分	3台	14分
	3	2	2台	7分	5台	34分
	4	3	2台	6分	4台	18分
	5	4	2台	9分	2台	25分

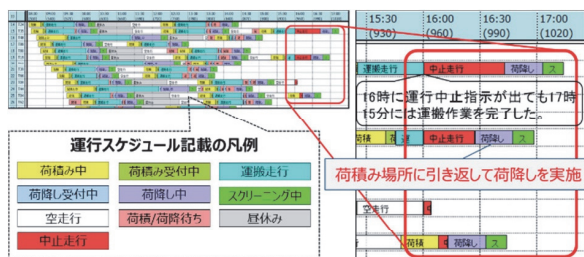


図-7 運行中止が発生した場合の運行スケジュール

表-4 走行時間の適正な余裕についての検証結果

検証ケース	当日計画	運行シミュレーション	
	運搬回数	計画されたトラック台数	受入施設到着時間差平均 ※1
ケース1 走行時間余裕なし	62回	26台	18.0分
ケース2 走行時間の15%を余裕として加算		28台(+2台)	-2.5分
ケース3 走行時間の30%を余裕として加算		29台(+3台)	-17.1分

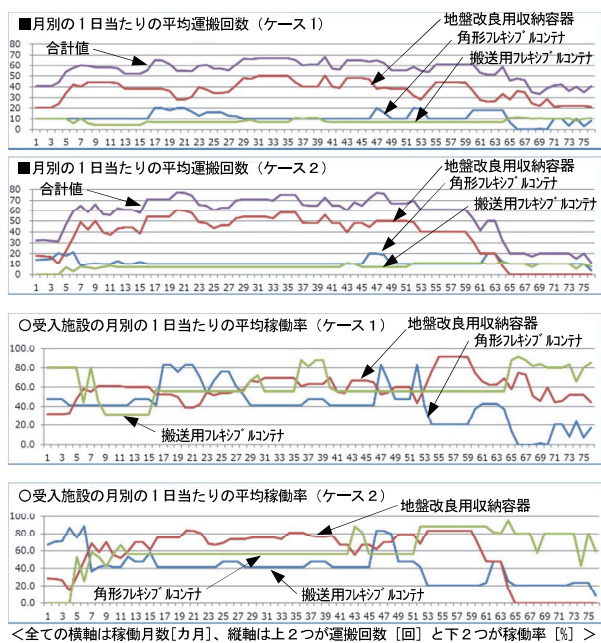


図-8 月別の1日当たりの平均運搬回数と平均稼働率

ン手法を予め実施しておくことで、現場で突然発生する様々な状況を把握でき、実際の運行管理に対して臨機応変に対応することが可能になる。

6. あとがき

福島県では放射性物質汚染対処特措法に基づいた特定廃棄物等と除去土壌等の仮置場からの搬出作業が実施されており、大型土のう1袋毎の管理や輸送車両のGPSを用いた常時モニタリングなど環境影響に細心の配慮を払いながら輸送事業が進められている。除去土壌等についてはパイロット輸送が平成26年度から約1年間運用され、その後に本格輸送が平成28年に開始され、それぞれ約4.3万m³、平成28年3月から同年11月の本格輸送で85,442m³の除染土壌等の輸送が完了した^{4), 5)}。平

成29年度の総搬入予定量は、概ね1年間で50万m³程度が計画されており、輸送車両は年間平均して350往復/日程度走行すると想定されている⁶⁾。平成28年12月時点での福島県内の輸送対象物量は、減容化前で1,870万~2,815万m³とされており、輸送量は今後も増大する見込みである。本事業はあくまでも30年を前提とした中間貯蔵であり、その後の再利用方法として、放射性物質濃度の低い土壌について、県外の造成事業等に活用する方針も検討されている。このような特殊な土壌という扱いではあるが、厳格な管理を伴う輸送は今後も長期にわたって継続されることになり、本開発技術の適用期間も長期に及ぶと考えられる。

本報告では、初期に開発した「災害廃棄物統合管理システム」および「除染統合管理システム」の概要と、被ばくをできるだけ低減するための作業の迅速化、および車両の待機時間調整機能付加による一連の運行の効率化を組み込んだインフォクロスの開発内容、および機能について述べた。前2者については既にも実績が得られているが、インフォクロスの運用効果は、今後の事業適用によって明らかにしていく予定であり、適用成果については改めて報告したい。

最後になるが、本システムに係る知見や基礎資料の提供に際し、伊藤忠テクノソリューションズ株式会社の各位には絶えず協力を頂いた。また、京都大学大学院の勝見武教授には災害廃棄物処理業務における研究データも参考にさせて頂いた。ここに謝してお礼申し上げる。

【参考文献】

- 1) 遠藤和人、「オフサイトにおける除染・放射性セシウム制御と土木技術」、土木学会誌、Vol.99、No.3、pp.18-21、2014
- 2) 前田建設工業株式会社、「除去土壌等の安全確実な輸送を実現する運行管理システムの開発」、プレスリリース、2015.2.18 など
- 3) 倉品 悠、今井亮介、森本克秀、酒井一紀、西村龍彦、「輸送統合管理システムの開発、環境浄化技術」、Vol.15、No.6、pp.50-55、2016.11-12
- 4) 環境省「パイロット輸送に係る検証報告について（平成28年3月改訂）」、<http://josen.env.go.jp/chukanchozou/action/investigative_commission/pdf/pilot_transportation_160331_01.pdf> (参照 2017.5.11)
- 5) 環境省「中間貯蔵施設への除染土壌等の輸送に係る検証報告（平成28年11月）」、<http://josen.env.go.jp/chukanchozou/action/investigative_commission/pdf/pilot_transportation_161129_01.pdf> (参照 2017.5.11)
- 6) 環境省「中間貯蔵施設への除染土壌等の輸送に係る実施計画（平成28年12月更新）」、<http://josen.env.go.jp/chukanchozou/action/investigative_commission/pdf/pilot_transportation_161222_01.pdf> (参照 2017.5.11)