特集≫≫　解体，3R，建設発生土・廃棄物処理

ハイパースペクトルを用いた災害廃棄物の種類と量の推定

羽　渕　博　臣

近年，気候変動等に伴い自然災害が頻発化・激甚化しており，その度に災害廃棄物が大量に発生している。災害廃棄物は，災害の種類や発生箇所等により種類と量が異なるため，それらを正確に把握することは難しい。被災地の早期復旧・復興においては，災害廃棄物処理を円滑に進めることが重要であり，そのために災害廃棄物の発生量と種類を正確に把握することが肝要である。そこで，奥村組では，ハイパースペクトルカメラ（以下，HSC）を用いた災害廃棄物の種類と量の迅速判定について，その可能性を検討したので紹介する。

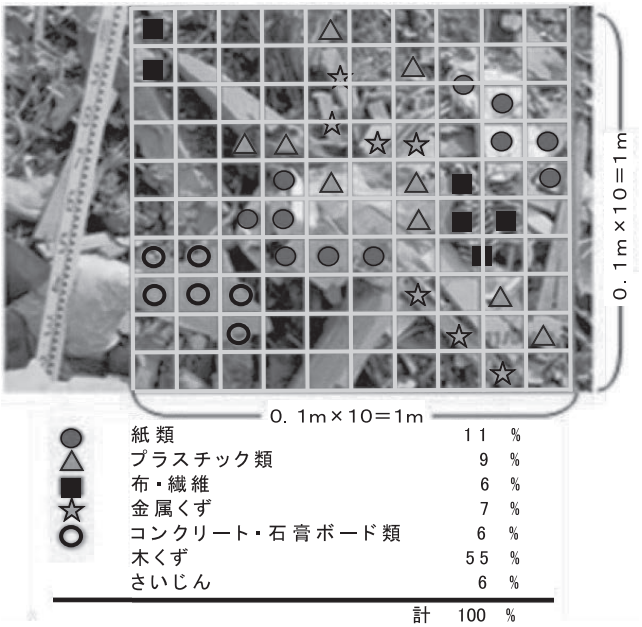
キーワード：ハイパースペクトルカメラ，災害廃棄物，種類，発生量

1. 背景，目的

気候変動等に伴い自然災害が頻発化・激甚化しており，その度に災害廃棄物が大量に発生している。急に発生する災害廃棄物への対策として，自治体は被害状況などから統計的に災害廃棄物の種類と量を予測し，発災後に策定する災害廃棄物処理実行計画に反映している。しかしながら，災害廃棄物は災害の種類や発生個所等，災害ごとに異なり正確に把握することは難しい。発生量の把握が遅れることで，災害廃棄物処理実行計画の策定自体が遅れ，災害廃棄物の処理効率の低下を招くことが危惧される。

現状の災害廃棄物の仮置場への搬入済量については「現地計測や重量測定により把握する」ことが環境省の災害廃棄物対策指針[1]に示されている。具体的な推計方法としては，現場で直接，選別，計量して組成を分類する方法や，災害廃棄物表面を撮影したRGB画像の1 m × 1 mを代表領域として，この範囲を0.1 mのメッシュで区分し，メッシュごとの種類を目視により分類する手法がある（**図―1**）[2]。しかしながら，これらの方法は，重機や作業員の安全確保が必要であったり，目測作業者によって判断が異なるといった問題もある。このように災害廃棄物処理を円滑に進めるためには，発生量と種類の正確な把握が課題であるとともに，ICTやリモートセンシング技術により，さらに簡便かつ正確に発生量・要処理量を推計する手法の開発が望まれている[3]。

そこで，可視光の波長領域外（900 ～ 1,700 nm）を撮像するHSCに着目し，HSCを用いた災害廃棄物の種類と量の迅速判定について検討したので，報告する。



図―1　写真を用いた表面組成の分類

2. HSCの技術概要

一般的なカメラでは，入射光を光の三原色であるR（650 nm波長），G（550 nm波長），B（450 nm波長）の3バンドに分解し，その重ね合わせによって可視光情報（約380 ～ 750 nm波長）を表現するが，HSCでは，より広範囲な波長領域を多くのバンド帯で分解することができる。例えば，本研究で用いたHSC（RESONON



図―２　HSC の波長領域

社製 PIKA NIR-320）では，**図―２**に示すように 900 ～ 1,700 nm の波長領域の入射光を波長分解能 4.9 nm で 164 バンド帯に分解することができる。また，各チャンネルの波長強度を結ぶことで，スペクトルを表現することもできる。これらのスペクトル特性を分析することで，一般的なカメラでは困難な対象物の識別が可能となる。

3. 実験概要

災害廃棄物総量のうち，ある特定の組成（種類）の廃棄物量は，「総体積×組成（区分別割合）×みかけ比重」で算出される。総体積の算出については，仮置場に集積された災害廃棄物の山の底面積を GPS 測量等で，高さをレーザー距離計や水準測量等により測定して算出する方法や，トータルステーションなどの測量器機を使用して，集積された災害廃棄物の山の体積を求める既存手法等がある。みかけ比重は，廃棄物同士の空隙も含んだ体積で重量を除して求められる値であり，体積の測定方法や測定時の状態（水分量，圧密度，他）によって値が変化し，内容物によって大きく変動するものであるが，過去の災害における実績値[4), 5)]や，環境省が示した体積重量換算係数[6)]等によって推定される。

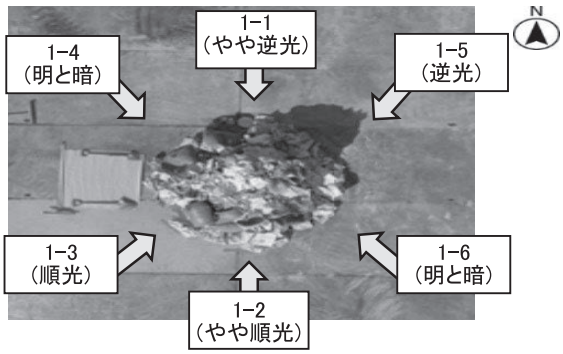
一方，災害廃棄物の組成（区分別割合）は災害ごとに異なり，発災後の仮置場での現地作業によって算定することから，可視光の波長領域外（900 ～ 1,700 nm）を撮像する HSC を導入することにより効率化と精度向上を図れる可能性があると判断した。そこで本稿では，HSC を用いて以下の３つの実験とその結果から得られた知見について報告する。

ⅰ．模擬災害廃棄物を用いた撮影実験
ⅱ．ベルトコンベア上の災害廃棄物を対象とした撮影実験
ⅲ．令和６年能登半島地震・災害廃棄物仮置場における撮影実験

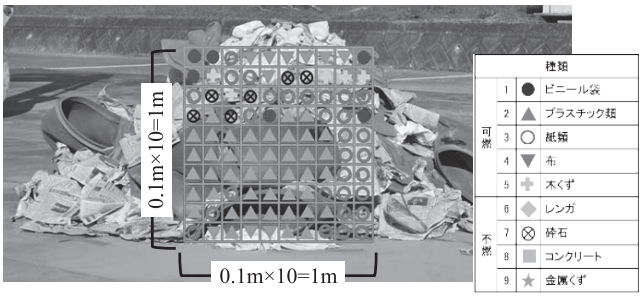
4. 模擬災害廃棄物を用いた撮影実験

(1) 実験概要

東日本大震災の実績[7)]をもとに，模擬災害廃棄物を種類別の質量割合（可燃物 24％：ビニール，プラスチック，紙，布，木くず，不燃物 76％：レンガ，砕石，コンクリート，金属くず）で作成し，混合後に堆積させ，日照条件が異なる側方６方向から HSC で撮影（**図―３**）した。また，HSC による分類（以下，HSC 法）と，第１章で紹介したメッシュごとの種類を目測による分類（**図―４**）（以下，従来法）を行い，分類精度の違いを比較した。



図―３　側方６方向からの撮影状況

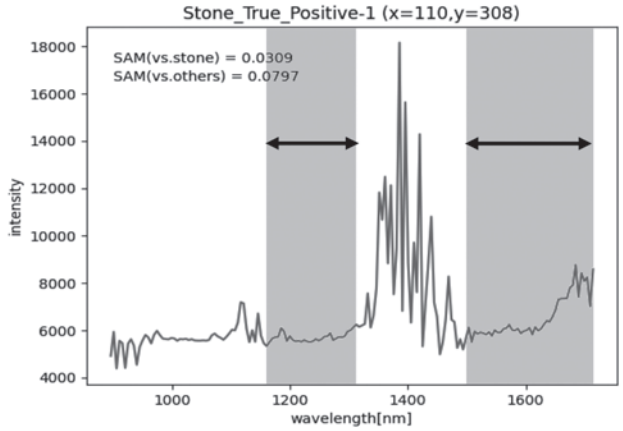


図―４　目測による分類

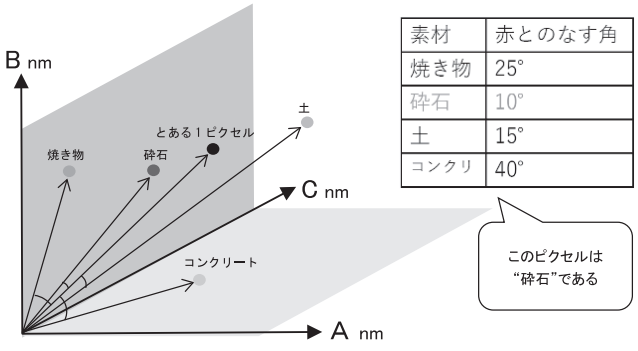
(2) HSC 法の画像分類方法

画像分類で使用する波長領域は，HSC で取得可能な 900 ～ 1,700 nm のうち，940 nm 近傍や 1,100 nm 近傍，1,400 nm 近傍は大気中の水蒸気等による吸収が大きく，解析への使用に適さない。そのため，1,100 ～ 1,300 nm および 1,500 ～ 1,700 nm 間の波長領域を使用し（**図―５**），画像解析ソフト perClass Mira を用いて画像解析を行った。

HSC で取得した画像分類のアルゴリズムは，Spectral Angle Mapper（SAM：スペクトル角マッパー）を用いた。SAM では，まずスペクトルが n バンド帯の場合，各素材のスペクトル情報をあらかじめ教師データ（正解データ）として機械学習させる。次に，学習させた各素材のスペクトルを n 次元空間にベクトル表示しておき，分類対象の計測されたターゲット・スペクトルをプロットしてスペクトル角が一番小さい素材ほど類似性が高いと判定して分類する。**図―６**に，３



図―５　解析に用いた波長領域



素材	赤とのなす角
焼き物	25°
砕石	10°
土	15°
コンクリ	40°

図―６　SAM の概念図

次元の場合の SAM の概念図を示す。

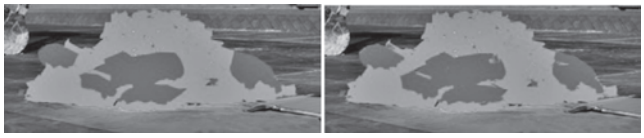
分類対象の教師画像（正解画像）は，RGB 画像で撮影し，画像編集ソフト Gimp に取り込み作成した。この教師画像をもとに，Gimp を用いて手作業で災害廃棄物の素材ごとの領域を区分し，領域ごとのピクセル数をカウントすることで，災害廃棄物の組成（区分別割合）を算出した。解析結果の性能評価については，ピクセル数を用いて，HSC で識別された領域と，実際の正しい領域の２つの重なり度合いを表す IoU（Intersection over Union，２つの領域の論理積を論理和で割った値）で行った。

(3) 実験結果と考察

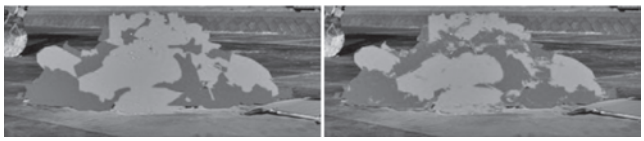
日照条件が異なる側方６方向から HSC で撮影した結果，不燃物は総じて IoU が低い傾向にあり，順光下で撮影した Case1-2（やや順光）や Case1-3（順光）は，IoU が高く，逆光や影があると IoU が低下する傾向がみられた。日照条件が異なると，あらかじめ機械学習させたスペクトル情報と識別対象物のターゲット・スペクトルとで差異が生じ，識別精度に影響を及ぼすことがわかった。Case1-3 の RGB 画像を**図―７**に，HSC で分類した画像のうち，IoU が 91.3％と最も高かったプラスチック類を**図―８**に，67.8％の紙類を**図―９**に，6.3％と最も低かった金属を**図―10** に示す。各図とも濃灰色が解析対象，薄灰色が解析対象以外の領域である。



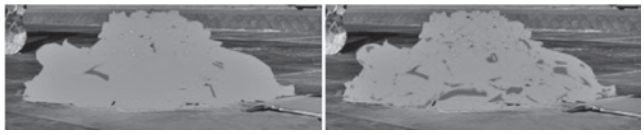
図―７　Case1-3 RGB 画像



図―８　Case1-3 プラスチック（左：教師，右：HSC）



図―９　Case1-3 紙（左：教師，右：HSC）



図―10　Case1-3 金属（左：教師，右：HSC）

従来法と HSC 法の結果においては，両者の分類精度に大きな差異はなく同等の結果が得られた。また，従来法は，作業者が人為的に判別するため，例えば，従来法には,「ある」ものが「ない」,「ない」ものが「ある」といった判定ミスが所々あったのに対し，HSC 法は判定ミスがないのが特徴的な結果であった。

本実験の結果，HSC を用いて災害廃棄物の種類の分類ができ，日照条件が分類精度に影響するものの，HSC 法は，従来法の代替となり得ることが示唆された。

5. ベルトコンベア上の災害廃棄物を対象とした撮影実験

(1) 実験概要

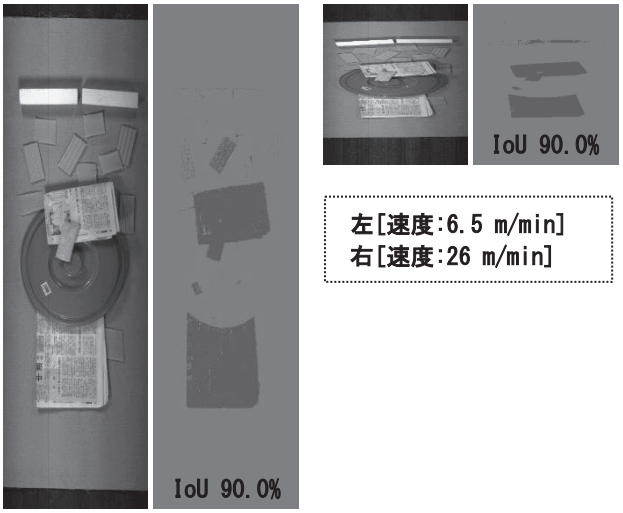
災害廃棄物は，通常，仮置場等に一旦集積され，仮置場において，重機や選別機械等を用いて種類ごとに分類される。具体的には，バックホウで粗選別，破砕機でサイズ調整，磁選機で金属除去，回転篩機で土砂除去，風力選別機で可燃物分離，人力で手選別等，こ

れらの処理を経て，再資源化施設や最終処分場に運ばれる。本実験では，このような破砕・選別処理の機械間を接続するベルトコンベア上に HSC を設置し，災害廃棄物をさらに高精度に分類することを目的とした。また，第 4 章の実験から HSC の識別は，日照条件が悪い場合は，精度が低下するという知見から，HSC を内蔵した暗室を設置し，被写体をハロゲンライトで照射する構造とした。暗室内の模式図を**図―11** に，実験の状況写真を**写真―1** に示す。

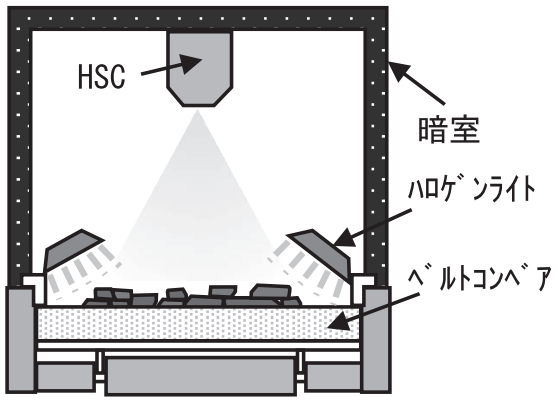
(2) 実験結果と考察

可燃物（プラスチック，紙，布，木くず）は，概ね 60％以上の IoU が得られ，不燃物（レンガ，金属くず）と比べて，全体的に IoU が高い傾向にあった。ベルトコンベア速度の比較（**図―12**）では，6.5 m/min から 26 m/min の速い速度に変えても画像のアスペクト比が変形するものの，IoU には影響がないことが確認できた。また，暗室の有無の比較（**図―13**）では，暗室のある場合は，暗室が無く太陽光のみの条件下の場合と比べて IoU が高い傾向にあり，ハロゲンライトの光源でも分類可能であることがわかった。

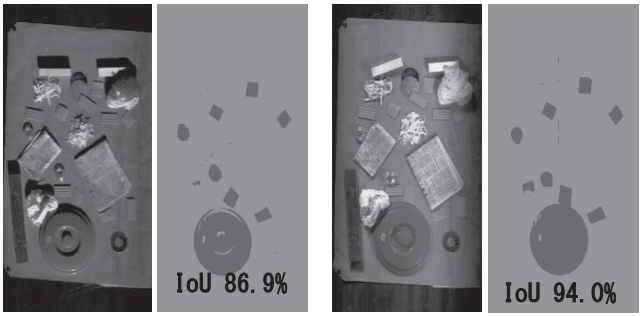
被写体の素材によって識別精度に違いがあるものの，全体を通して，可燃物の IoU が高く，不燃物の IoU が低かったことから，例えば，可燃物を検出し，可燃物以外（異物）を識別することで，再資源化率や処理品質の向上に寄与できる可能性が示唆された。また，日照条件が識別精度に影響を及ぼすことが懸念されていたが，撮影時の光源を太陽光に限定せず，HSC を暗室内に内蔵し，ハロゲンライトで一定に保つことで，天候の影響を受けずに分類できることが明らかとなった。



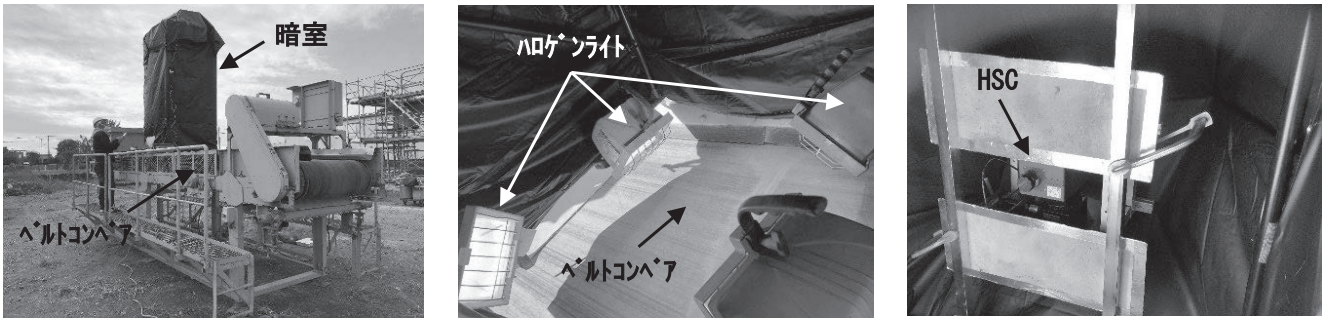
図―12 ベルトコンベア速度の比較（紙類）



図―11 暗室内の模式図



図―13 暗室の有無による比較（プラスチック）



写真―1 ベルトコンベア上に HSC を内蔵した暗室

6. 令和 6 年能登半島地震・災害廃棄物仮置場における撮影実験

(1) 実験概要

令和 6 年能登半島地震により発生した実際の災害廃棄物を用いて，珠洲市ジャンボリー会場跡地災害廃棄物仮置場（**図**― 14）および輪島市第一仮置場において，種類と量を推定する実験を行った。

ここでは，災害廃棄物を山状に 5 ～ 8 m^3 ほど堆積させ（**写真**― 2），HSC で撮影を行い，従来法と比較するため，IoU の算出は，1 m × 1 m の範囲を対象とした。災害廃棄物の量（体積）については，LiDAR センサー搭載の iPhone と GNSS 位置情報を利用するスマートフォンアプリ GeoScan（オプティム社製）を用いて点群データを取得した後，3 次元化し，Trend-Point（福井コンピュータ社製）で体積を算出した。



図― 14　UAV で撮影したオルソ画像



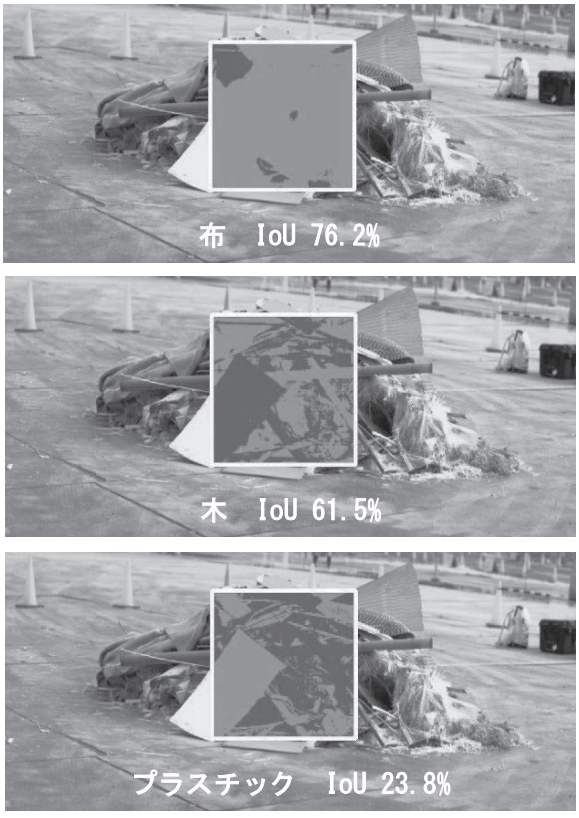
写真― 2　実験の被写体

(2) 実験結果と考察

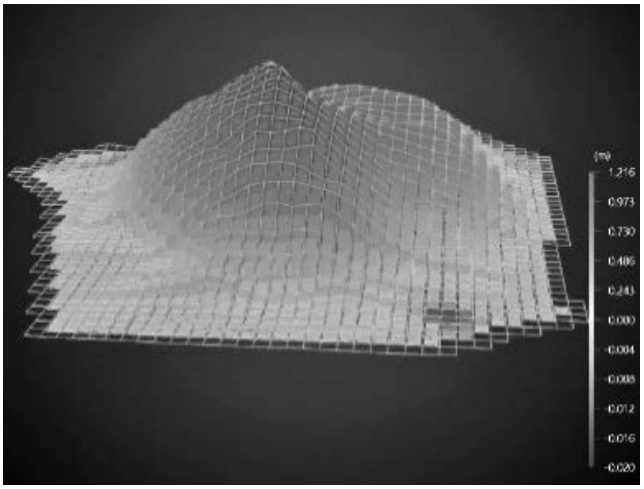
珠洲市ジャンボリー会場跡地災害廃棄物仮置場における結果の一例を**図**― 15 に示す。4 種類（①木，②プラスチック，③布，④その他）に分類した結果，IoU は布 76.2%，木 61.5%，プラスチック 23.8%となり，布および木は，精度良く分類される結果が得られた。第 4 章および第 5 章の実験で IoU が高かったプラスチックは，複数種類の素材（パイプ状の素材や表面塗装，凹凸のある素材など）があったため，IoU が低下したと考えられるものの，可燃物 3 種類を一括りでみると，IoU は 60.2%となった。災害廃棄物量の算出結果を**図**― 16 に示す。

7. おわりに

本稿では，3 つの実験を通じて，HSC を用いた災害廃棄物の種類と量の推定方法を紹介し，①可燃物をさらに詳細に分ける（再資源化率の向上），②可燃物からその他の廃棄物を検出する（処理品質の向上）といった場面に適用できる可能性を示した。実用化に向けては，光源などの撮影条件や不均一な素材，不燃物などが識別精度に影響を及ぼすことから，撮影時に光源を一定に保つための工夫，設備の付加等，さらなる精度向上とデータ蓄積が必要である。



図― 15　IoU および分類結果（枠内の濃灰色）



図―16　災害廃棄物量（体積）の推定

《参考文献》
1）環境省環境再生・資源循環局災害廃棄物対策室，「災害廃棄物対策指針（改定版）」，2018
2）環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部，「東日本大震災等の経験に基づく災害廃棄物処理の技術的事項に関する報告書」，pp.5-14，2017
3）多島良ほか：災害対応マネジメントの観点からみた災害廃棄物発生量推計方法の現状と展望，廃棄物資源循環学会論文誌 Vol.29，pp.104-118，2018
4）高月紘ほか，「災害と廃棄物性状―災害廃棄物の発生原単位と一般廃棄物組成の変化―」，廃棄物学会誌，Vol.6，No.5，pp.351-359，1995
5）宮城県環境生活部震災廃棄物対策課，「災害廃棄物処理業務の記録」，p.249，2014
6）環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部産業廃棄物課長，「産業廃棄物管理票に関する報告書および電子マニフェストの普及について（通知）」，環廃産 061227006 号，2006
7）環境省災害廃棄物対策情報サイト，「災害廃棄物等の発生量の推計 資料 2」，2013

JCMA



［筆者紹介］
羽渕　博臣（はぶち　ひろおみ）
㈱奥村組
技術本部　環境ソリューション部　環境企画課
課長

