市町村アカデミー 講義 Again

3Rの推進による循環型社会の形成と廃棄物マネジメント

北海道大学大学院工学研究院教授　松藤　敏彦

わが国の廃棄物処理は、ダイオキシン、不法投棄、埋立地からの浸出水漏出などを背景にして、1990年代後半より大きく変化した。3Rと適正処理を目指す循環型社会への転換が叫ばれ、2007年の「21世紀環境立国戦略の策定に向けた提言」によって低炭素社会が同時に目指されるようになった。その結果自治体のごみ処理において資源循環、温暖化防止をも考えなければならなくなり、容器包装をはじめとするさまざまなリサイクル、廃棄物からのエネルギー回収も必要とされ、ごみ処理は格段に複雑で難しくなった。自治体は理屈を考える間もなく、新たなものを十分な根拠なしに受け入れることが多いように思う。本稿では、どのような視点を持つべきかを述べることにする。

1．バイオマスエネルギーとリサイクルの意味

(1) どう技術を見るか

近年、とりわけ注目されているのはメタン発酵である。燃えにくい生ごみなどの有機物からメタンガスを取り出せるのだから、低炭素化のためには大変に魅力的な技術に見える。しかし施設はごみピット、発酵槽、ガスタンクなどのプロセスからなっている（図1）。施設の運転を順に考えると、まず反応槽の加温、破砕機などの機器運転のためにエネルギーが必要である。得られたガスの一部を燃やして加温に使い、発電した電力の一部又は大部分を運転に使っているかもしれない。また生ごみはすべて分解しないので排水（消化液）に残り、液肥として使えないかぎり水処理が必要になる。これは下水処理施設を持つようなもので、窒素が多いためにそれを分解する微生物のエネルギー源としてエタノールを入れなければならない。こうして見ていくと、エネルギー回収施設となっているのかどうかが断言できないことがわかる[1)]。

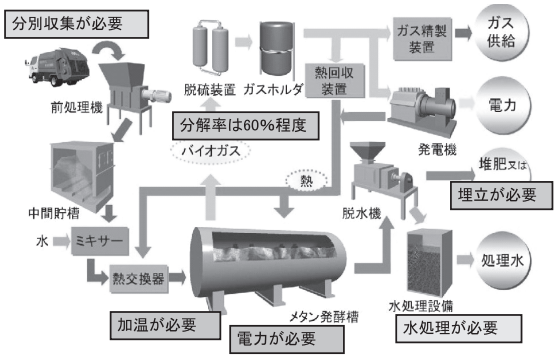


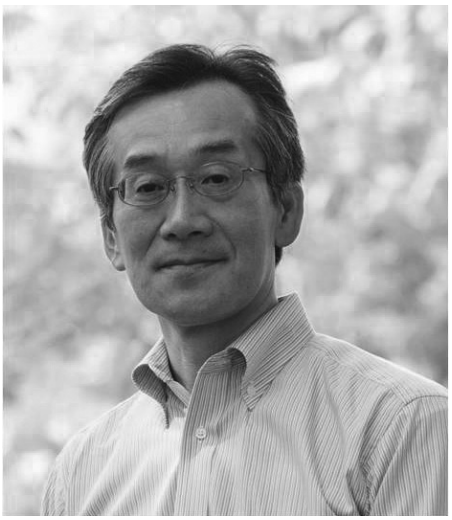
図1　メタン発酵のプロセスと留意点

私たちは部分（特に回収物）だけを見がちだが、廃棄物の投入から排水処理、ガス利用までの「ライフサイクル」あるいは「システム全体」を考えなければならない。有機物の何%がガスとして取り出されたのか、ガスとして得られたエネルギーのどれだけを外部へ取り出せるか、電気を買っている場合には正味ではプラスかどうかなどは、物質とエネルギーのフロー（流れ）と収支（バランス）である。特にモノの流れはマテリアルフローと呼ばれ、すべての分析の基本となるものである。システム全体のイメージをもつことが、大事である。

(2) 異なる技術との比較

ごみからのエネルギー回収の代表技術といえば焼却である。それでは、メタン発酵の方がより望ましいエネルギー回収方法だろうか。

エネルギーの元は、どちらも有機物である。焼却は燃焼による発生熱をボイラーで回収し、メタン発酵は微生物がメタンガスに変換して燃料を得るとの、経路の違いにすぎない（図2）。どちらも最後は熱利用か発電で、利用形態も同じである。生ごみのメタン発酵が優れて見えるのは、水分が多い生ごみを扱うにはメタン



松藤敏彦（まつとう・としひこ）

1956年北海道・中富良野町生まれ。1983年北海道大学大学院工学研究科博士課程修了。同年清掃工学講座の助手となり、廃棄物の研究を始める。2006年より北海道大学大学院教授。最初の研究が収集で、ごみ発生に興味をもちごみ流れ（今でいうマテリアルフロー）が研究のベースとなる。一般廃棄物処理システムの評価プログラムを1990年代後半に作成し、それがきっかけでさまざまな処理施設の物質収支、エネルギー収支を分析、評価のためリスク評価、コスト、住民意識の調査分析を行う。ごみの発生から埋立まで、すべてを含む総合的廃棄物処理が研究対象。著書に「ごみ問題の総合的理解のために（技報堂）」、「環境問題に取り組むための移動現象・物質収支入門（丸善）」「調べよう　ごみと資源（全6巻）（小峰書店）」などがある。

焼却

有機物 ＋酸素 ？ ガス ＋灰 ＋ **熱**

高温のガスがもつエネルギーを
水に吸収させて蒸気とする。
高温高圧蒸気によりタービンを回して発電する

バイオガス

有機物 ＋水 ？ **メタンガス** ＋二酸化炭素

エネルギーをメタンガスの形で取り出す

図２　焼却とバイオガス化の比較

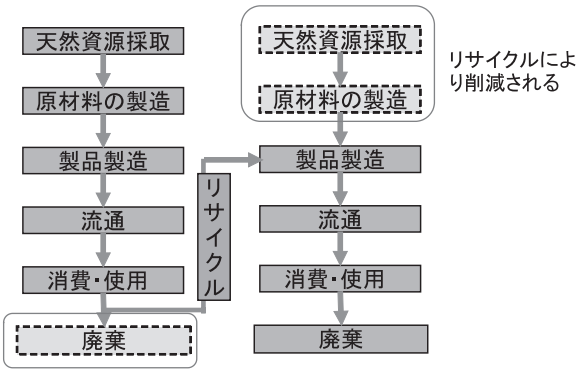


図３　製品のライフサイクルとリサイクルにより削減される負荷

発酵が適しているということであり、どちらが有利かは対象とする廃棄物の特性によって異なる。逆に言うと、すべての廃棄物に対して最良の技術はなく、上記のようにプロセス内の消費エネルギーなどをすべて含めた「総合的効率」を見なければならない。

それでは、金属、古紙、ガラスなどのリサイクルは、エネルギー回収とは無縁だろうか。有機性廃棄物の代表的な資源化技術は、堆肥化である。堆肥は土壌改良材や肥料として用いられ、エネルギーとは無関係に思える。しかし堆肥にはリン、窒素、カリウムが含まれているので、合成肥料の使用量を減らすことができる。（ただし堆肥は遅効性なので即効性の合成肥料と併せて使用しなければならない。）合成肥料の製造にはエネルギーが必要なので、そのエネルギーの節約になる。図3のような製品のライフサイクルを考えると、一般に資源の採取、素材の製造におけるエネルギー消費が大きい。その代表はアルミ缶であり、ボーキサイトから電気分解を経て製造するのと較べて、回収缶の溶融には3%のエネルギー消費で済むという。したがって社会全体を考えると、リサイクルによる素材回収はエネルギー節約に大きな貢献を果たしている。

エネルギー回収にも、いわゆる炭焼きと同じ炭化、可燃ごみを破砕・選別したのち固化するごみ燃料化などさまざまな方法があり、それぞれ原料として適した廃棄物がある。有機性廃棄物はすべてメタン発酵との風潮があるが、廃棄物の特性に合わせた技術を選択し、プロセス全体の効率を比較して処理方法を決定する必要がある。

2．ごみ処理施策のライフサイクル評価

各自治体は数多くのごみ処理施策を行っているが、処理システムの回収物だけを見るのと同じように、ごみの発生から最終処分あるいは資源化までの一点のみに注目していることが多い。ライフサイクルを通して考えるとどのような問題があるか、いくつかの例を挙げる。

(1) 資源選別施設のロス

資源物の収集方法には品目別と混合があり、後者の場合は選別施設が必要になる。A市ではガラスびん、スチール缶、アルミ缶、PETボトルを混合収集し、機械選別、手選別などによって種類別に回収している[2)]。アルミ、スチールは圧縮して矩形のかたまりに、PETボトルは圧縮梱包、ガラスは色別のカレット（ガラスくず）

となるが、これらの合計は搬入量の60%程度しかない。汚れにより除去される容器もあるが、この差の主な原因はパッカー車で収集される際にガラスびんが割れてしまい、施設内の振動ふるいから落下して「ごみ」となることによる。資源物収集には異物が入らないような分別の徹底がはかられるが、最終利用者まで渡らなければリサイクルにはならない。分別後の最終的な行き先までを考えなければならない。

(2) リサイクル方法の質

最終的に何に使われるかは、大変重要である。容器包装プラスチックについてはリサイクル法施行の当初から、マテリアル（材料）リサイクルが優先されている。選別、洗浄等の処理を経てペレット化し製品原料とするが、純度が低いために単独で製品とはできず、工業系プラスチックに増量剤として利用されるのみである。家電製品のプラスチックは一部が再び部品に再生され、水平リサイクルと呼ぶのに対し、質が低い用途へのリサイクルをダウングレードリサイクルという。容器包装プラスチックはかさばるため収集費が高く、選別・洗浄などのため再商品化コストも他のリサイクル方法より高いとの不利さがある。素材を選ぶため利用率は50%程度にとどまり残渣は最終的に焼却されているのだから、質の低いマテリアル利用をするよりも最初からエネルギー利用するのがよいように思われる。

ガラスびんも、すべてがガラスびんに再生されるわけではなく、路盤材としての利用もある。これは図3において利用の質が低い例であり、収集、選別コストを考えると無駄の多いリサイクルといえる。「リサイクルすればよい」ではなく、「どのようにリサイクルされるのか」までしっかり考えなければならない。

(3) 利用先の確保

せっかく回収しても利用方法がないと、リサイクルは完結しない。1990年代のダイオキシン問題によってガス化溶融、灰溶融施設が急激に数を増やした。高温処理のためダイオキシンを分解する、溶融スラグをリサイクルできるので埋立地を消費しないなどが魅力的な利点として挙げられ、全国で稼働する焼却施設約1150のうちガス化溶融、灰溶融を備える焼却施設がそれぞれ100施設以上との状況にある。しかし最近になって、灰溶融施設の休止・廃止が増えている。スラグ利用困難がその理由の一つである。海面処分場の残存年数減少を危機的問題として抱える東京都は全量溶融を掲げていたが、休止が相次いでいる。処分場の地盤改良に使用していたが必要量は大幅に減少の見込みで、それ以外の土木資材利用が困難というのが、その理由である。ごみ溶融スラグの生産量77万トン[3]は、鉄鋼スラグ3751万トン[4]の50分の1にすぎず、従来から主に自治体内部での自己利用にとどまっていた。従来のスラグより市場的に不利であることは十分に予想されたはずなので、初めから「利用」が軽視されていたといえる。利用基準を鉛の「含有量」としてしまったことも、利用の拡大を妨げた。

製品製造の場合は、「売れる」かどうかを最初に調査する。しかしリサイクルの場合は、とにかく集めて資源化することが重視され、利用の開拓が後まわしにされる傾向にある。リサイクルも市場を調査し、ユーザーの要求に合わせた処理あるいは分別を行うようにすれば、過剰又は不足のないシステムを組むことができる。

(4) 施設における収支

（1）で述べた資源選別の例は物質の収支を把握することの重要性を示しているが、エネルギーについても同様である。ごみ焼却施設のエネルギー回収の指標は発電効率であり、高効率ごみ発電施設の補助金交付対象は発電効率23%以上となっている。しかし施設内利用が大きいと、実質的な外部取り出し電力は低下する。発電効率は高いが複雑な機器構成のため運転消費電力が大きい施設は、エネルギー回収施設とは呼べない。発電端効率ではなく送電端効率で評価すべきだが、なかなか見直しがされない。

メタン発酵の補助金もメタンガス発生量（およびガスの発熱量）が要件とされる。しかし、加温のためにガスを使用する、発電しても運転に使っているならば、やはりエネルギー回収にならないどころか、マイナスかもしれない。システム全体としての収支は、大変に重要である。

(5) 分別の目的と効果

多くの市民がごみ処理を意識するのは、収集時点までである。分別と収集は市民と行政を結ぶ唯一の接点と言え、それだけに両者とも分別を適正に行うかどうかについての関心が高い。行政は分別方法についてパンフレット等で広報するが、より詳細なガイドとして分別辞典を作成している自治体は多い。項目数には幅があるが、数百から1000というのが平均的なところだろう。市町村アカデミーの講義で受講者に尋ねると「意味がある」との回答が大多数だし、講義で学生に話しても同じような反応である。「ボールペンの芯は燃やせるご

み、軽石は燃やせないごみ」は、確かに妥当と思える。しかし軽石一個を焼却したら何か問題が起こるだろうか。ボールペンの芯を埋めたら埋立地の寿命が短くなったり、有害物が流出するだろうか。

不燃物を除くのは、焼却できないものを減らして発熱量を上げ、焼却しやすくするためである。つまり分別とは、後続の処理を容易にするために行うのだが、ボールペンの芯や軽石は量がわずかなら処理物全体の特性を変化させることはない。この点から見ると、市民の協力率、実施率も同時に目標としなければならない。もし1割の市民が完ぺきな分別をしても、残りが協力しなければごみの中身は大きくは変わらないからである。分別辞典は作っても多くの市民がその存在を知らないのでは、何の効果も生まれない。おそらく協力率1割も過大な見積もりなので、残念ながら分別辞典は処理とは関係のない「素材」辞典であり、ごみ処理を改善する施策とはなっていない。処理が目的であることに立ち返り、詳細に製品名を並べるのではなく（これはきりがない）、「どのような特性のものは適さないか」というネガティブリストの作成がよいと思う。

3．住民とのコミュニケーション

(1) 施設建設における誤解

ごみ処理施設に対する住民反対は、自治体のごみ処理行政の中で最も難しい問題であろう。悪臭や振動などは感知できるので両者の認識が大きく異なることはないが、大気や水中の有害物質になると、しばしば「あぶない、あぶなくない」の応酬になる。環境基準がその際の目安となるが、「基準を超えたらあぶない、決して超えてはならない」との認識があると思われる。最終処分場浸出水を例に、筆者が「リスクと基準に関する誤解」と考えていることを以下で説明する。

①環境基準項目の中に、有害性があると考えられる物質が「健康項目」として指定されている。それでは基準を超えて含む水を飲んだら、すぐに健康影響が表れるだろうか。強力な毒物は摂取するとすぐに表れ、これを急性毒性というが、健康項目とは「低濃度の化学物質の生涯にわたる慢性影響」を問題としている。したがって一度口にしたら危ないというものではない。

②基準は、まず動物実験などから影響のない最小量（無毒性量）を決め、さらに安全率（10～1000倍）をみて摂取量の上限（一日耐容摂取量）を決める。次に食品等をどれだけ食べるか、飲むかから基準値が決定される。つまり、危なくない量の10～1000分の1を基準としている。

③ある有害物質の飲料水の基準（水道水質基準）は、上記②によって設定されている。そして河川等の水質環境基準は、それと同じ数値とされている。安全性を「十分」考慮し、河川水を直接飲料しつづけるかもしれないという「最悪ケース」を想定するからである。施設が順守しなければならない排水基準は環境基準の10倍なので、飲料水の10倍の濃度まできれいにして排出せよとの、大変に厳しい基準である。

④河川の水を飲まなくても、健康に影響があるのではないかとの意見がありうる。大気からの吸引、食べ物・飲み物の摂取、皮膚からの吸収により体内に侵入することを「暴露」というが、「あるかどうか」が問題とされ、どのような経路でヒトに到達するかを想像することが欠けている。河川→取水→浄水処理→水道水、あるいは河川→地下水→土壌→野菜という経路を考えると、その量は無視できるほど小さいことがわかるだろう。

(2) 信頼性の重要さ

上記のことが理解されていないため、ごみ処理施設は「過剰」になりがちである。大気汚染防止法で定められた排ガス基準に「上乗せ」した低い自主基準設定はその代表例で、「基準=危なさの境界」と考え、下げることで住民理解を得やすいことによるのだろう。全国の全連続式焼却施設を調べたところ[5]、95%の施設がHCl（塩化水素）の自主基準を法定より低くしており、30%は10分の1以下であった。濃度を低くするには、より高度な設備を必要とする。環境中の濃度は100、1000倍という対数レベルで考えるべきであり、2分の1、5分の1にしたところで影響の度合いに大差はない。

以前、廃棄物処理施設に対する周辺住民の反対理由[6]を調べたことがある。施設からの影響とともに、行政・業者の対応が反対の原因となり、住民の無視、説明不十分、トラブル隠しなどが含まれた。つまり行政に対する「不信」であり、逆にそれらに問題がなく信頼されている場合には住民に受け入れられていた。

「信頼性」の要素は、知識と専門性、率直さ・正直さ、である。後者は当然だが、前者がない説明は説得力がない。特にごみ処理施設は高度な専門性を必要とする。筆者は旭川市最終処分場に関わって、身をもってこれらの大事さを実感した。

(3) 旭川市におけるリスク・コミュニケーション

2006年、旭川市の現処分場建設計画に対して、周辺住民から建設差し止め請求があった。予定地にはこれまでに埋立地が集中し、管理の悪さのために住民が被害を受けていた。協定書を締結し、建設を着工したが、周辺地域の環境保全のため監視委員会が設置され、会長を任されることとなった。委員会の構成は事件申請人4名、周辺住民4名、公募委員4名、学識経験者3名であり、埋立地のことを大変よく勉強していた事件申請人と他の委員の間に、大きな知識の差があった。そこで当初から会議中での専門用語等の解説、勉強会の開催、他施設の見学会、環境測定の立会などの工夫をして、専門的知識の共有をはかった。その結果、以下のような成果があった[7),8)]。

①冬の除雪作業によって、しゃ水シートを破損するとの事故が起きた。住民への通報遅れがあったことから、「事故等対応基準」を作成した。何らかの異状が発生したときは、すぐに会長に連絡してその重大度を判断し、委員に事故等の状況と対応策を連絡して意見を求め、ただちに地域住民に報告することとした。重大性が低い場合は事後報告である。水処理施設でのパイプ破損なども含めて2年に1回程度この基準が適用されているが、迅速な対応を行うことで住民からの苦情は生じていない。

②以前は、河川水、水田土壌、河川底質などの環境調査を多数行っていた。しかし放流水を監視しているので、ダイオキシンなどが検出されたとしても原因は埋立地以外であること、多くの測定は埋立地とは別の調査となっていることなどを、環境調査結果報告の際に説明した。監視委員会設置から5年ほどたったころ、地域選出の委員から埋立地の影響でないことはわかったので、測定点は減らしてよいとの提案があった。その結果、年間3000万円以上の調査費を削減できた。

③通常、住民は当該施設のみに関心をもつ。監視委員会では、定期的な勉強会を開催し、まず埋立地の構造・基準、海外との比較などを説明し、話題は広がってダイオキシンとPCB、リサイクル、有料化などにわたった。これは、埋立地を工学的に理解してもらい、収集から始まる最後の処理が埋立であり、埋立以前のプロセスの選択も重要であることなどを知ってもらうためである。また他施設の見学会は、他との比較によって当処分場の相対的な評価をしてもらうことができた。

④会議の議題の中には、当初から埋立地の予算も含まれていた。次第に費用の細かな内訳を資料とすることになり、水処理の見直しを行うことになった。例えば放流水の色をオゾン処理によって除去していたが、法定放流基準項目ではなく、有害物質濃度は常に確認されていることから運転を停止し、年間1500万円の電気代を節約できた。そのほか、カルシウム除去の停止、自主基準の見直しなどもおこなった。

4．自治体の数値目標

(1) 科学性とコミュニケーション

以上述べたことをまとめるならば、①科学的合理性と②コミュニケーション、が重要ということになる。①については、「一部ではなく全体、最初から最後まで（ライフサイクル）」、「その間の物質収支（途中でのロスはないか、利用先はあるか、無駄に使われないか）」、「全体としてのエネルギー収支（損していないか）、コストバランス（費用は過大でないか）」などの視点を挙げた。また②については、「①を定量的、明示的に示すこと」、「それらをきちんと説明すること（説明者が理解していること）」が重要である。リサイクルについては、2 (1)～(4) について①を示して住民が納得できるような説明を望みたい。有料化を除けば、ごみ処理やリサイクルで大きな反対が起こることはあまりない。特に、リサイクルの施策については、住民の反応はおおむね好意的である。だからこそ、きちんとした説明をすべきである。

(2) 数値目標の問題点

最後に、自治体の数値目標について述べることにする。各自治体は処理基本計画の中で基本理念、基本方針とともに具体的な数値目標を設定し、ごみ排出量、リサイクル率が最も多く用いられている。施策が効果を上げるには、「何を（対象）、根拠（なぜ）、方法（どのように）」が明確でなければならない。「燃やすごみの中で古紙が多いので、雑がみ区分の分別を呼び掛ける」はこれらが明確な例だが、調べてみると定量的な根拠が不明である場合が大変に多い。

ごみの排出からの流れは、図4のように示すことができる。自治体の定期収集と集団回収が主な資源化ルートであり、Aの「排出量」、「資源化量÷排出量」が、「日本の廃棄物」に全国自治体の「リデュース取り組み（一人1日あたりごみ排出量）」「リサイクルの取り組み（リサイクル率）」上位10市町村が示されている指標である。先の表の数値目標はこの2つであり、全国市町村が施策の目安としている数値である。しかし、これら

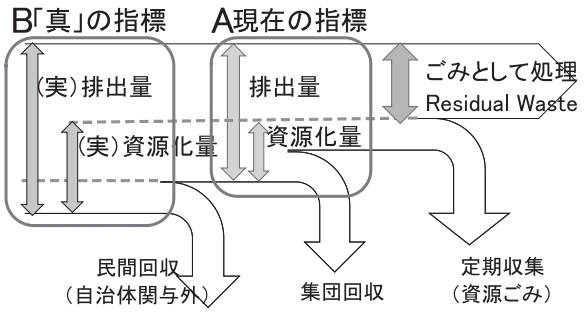


図4　ごみのフローにおける排出量とリサイクル率

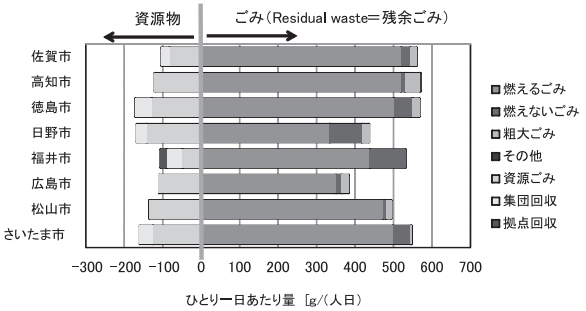


図5　ひとりあたり残余ごみと資源物

には以下の問題がある。

①図の排出量は一般廃棄物である。事業系の割合に影響されるので、家庭系と事業系を区別すべきである。

②計画収集、集団回収以外にも、販売店での拠点回収、新聞販売店による古紙回収などがある。つまり、真の排出量、リサイクル率は、Bである。

③真の排出量、リサイクル率を把握することは、すべての拠点を調査し、数値を集計しなければならないため、現実的に難しい。

④Bで資源化される量が多いほど、Aでのリサイクル率は低く評価される。リサイクル率を高めるには自治体が計画的に収集すればよいが、コスト増大が避けられない。

⑤すべての資源化の結果残るのが後述の残余ごみである。残余ごみ中に資源物がなければ、どこかで回収されているということである。

(3) 望ましい指標

図4のResidual wasteは欧米で一般的に用いられている用語で、資源化・減量化をできるだけ行って、最後に残った（Residual=残り）ものをごみ処理の対象とするとの考えによる。日本語にすると、残余ごみと訳せる。一方、日本で指標としている「一人当たり排出量」とは資源物も含めて少なくしようとするもので、どれだけ資源の分別収集をしても減らない。定期収集で古紙やガラスびんなどを「資源ごみ」と呼ぶことは、資源と本当のごみ（残余ごみ）との区別ができていないことの表れである。

図5は、いくつかの自治体について左に資源、右に残余ごみを示したものである。図中広島市は資源の量が少ないので、リサイクル率は低い（家庭系ごみについて)。しかし残余ごみも少なく、これは集団回収を「自治体外」として集計していないためである。つまり、どれだけ資源物を自治体が回収しリサイクル率を上げるかではなく、いかに残余ごみを減らすかが、自治体のごみ処理目標として最もふさわしい。

なお、筆者は環境研究総合推進費によって昨年度までの3年間「廃棄物処理システムの持続可能性評価手法と改善戦略に関する研究」(3K153002) を実施した。自治体のごみ処理について、すべてのデータをただ一枚の表に統合管理したのち、マテリアルフローを見える形で示して他自治体との比較も可能とし、問題点の発見と改善をはかろうとするものである。上記4の内容は、その一部である。研究室ホームページにごみ処理分析ガイドライン[9]を掲載しているので、参考にしていただきたいと思う。

参考文献

1) 松藤敏彦：バイオマス活用・リサイクルは適正に行われているか、クリーンエネルギー、25 (1)、2016.1
2) 松藤敏彦、田中信壽、小石哲央、柴田哲也：自治体における飲料容器収集および選別のマテリアルフロー分析、廃棄物学会論文誌、16 (6)、pp.451-442、2005
3) エコスラグ有効利用の現状とデータ集、一般社団法人日本産業機械工業会エコスラグ利用普及委員会 (2015年度版)
4) 鉄鋼スラグ協会ホームページ、http://www.slg.jp/statistics/index.html
5) 松藤敏彦、鮫島良二、松本暁洋：都市ごみ全連続式焼却施設における排ガス処理設備の設置状況、第21回廃棄物学会研究発表会講演論文集、pp.361-362、2010
6) 松藤敏彦、ベンノ・ラハディアン、藤本有華、田中信壽：廃棄物焼却施設・埋立地に対する住民の意識と建設反対の要因,廃棄物学会論文誌、16 (3)、pp.232-243、2005.
7) 松藤敏彦：旭川廃棄物最終処分場監視委員会・協議会におけるリスク・コミュニケーション、都市清掃、65 (308)、pp.343-347、2012.7
8) 松藤敏彦、吉田英樹、小寺史浩、鎌田昭範、尾崎理人、内藤論：旭川市最終処分場における維持管理コスト削減の試み、都市清掃、70 (337)、pp.249-254、2017.5
9) マテリアルフローにもとづく自治体ごみ処理分析ガイドライン、北海道大学大学院工学研究院廃棄物処分工学研究室http://labs.eng.hokudai.ac.jp/labo/waste/ (研究実績→報告書)