

[巻頭論説]

廃棄物処理技術分類学の試み

北海道大学大学院工学研究科 松藤敏彦

1. はじめに

汚物掃除法（1900年）において主に伝染病対策のため「なるべく焼却する」とされて以来、焼却はわが国の廃棄物処理の中心的方法となっている。世界的に見れば埋め立てが圧倒的に多いが、施設として高価な焼却施設の建設が進んだのは、国の方針づけと、1963年に始まった補助金交付によるところが大きい。その結果、一般廃棄物の焼却率は80%近くに達し、燃えるごみを焼却し、焼却残さと燃えないごみを埋め立てることが標準的な処理となった。ごみ処理方法は都市、農村によらず画一的となり、自治体のごみ処理計画は、ごみ量の増加に対応するための施設建設計画が中心であった。

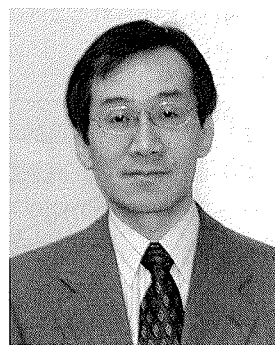
しかし、1990年代後半に焼却施設から発生するダイオキシンが問題となり、同時に浸出水漏出によって最終処分場の信頼性が疑われ、さらには地球環境問題に対する取組みが世界的課題となったことから、大量生産・大量消費社会から循環型社会への転換が課題となった。これにともなって、画一的であった廃棄物処理のオプション数は格段に増加した。たとえば、焼却は灰溶融、ガス化溶融が新たな選択肢となり、埋め立てはしゃ水の高度化とともに屋根付き処分場の増加、保管型処分場の提案があり、資源化は従来の品目に加えて容器包装が回収対象となり、生ごみのリサイクルも進められようとしている。各自治体は、こうした数多くの処理オプションの中から、地域の状況に合った処理方法の組み合わせを選択する必要性に迫られている。技術選択は、コスト、エネルギー消費量（あるいは回収量）、資源回収量などを相互に比較して行うのが望ましい。環境省は「一般廃棄物会計基準」、「一般廃棄物処理システム指針」を作成しているが、データの整備と共通化にはまだ時間がかかりそうである。

一方で、廃棄物処理の各オプションは基本的原理に応じて、産物が異なる。たとえば焼却は燃焼により発生するエネルギーの回収が可能だが、熱分解は可燃性ガスや炭化物を有用物として回収できる。また埋め立ては嫌気性と好気性では、発生する浸出水、埋立ガスの質（組成）が異なり、安定化までの時間にも大きな差がある。どのような特性や産物が自治体にとって望ましいかは、技術選択の最重要判断基準となるべきである。2.2で述べるように、廃棄物処理技術は装置的な違いによって名称がつけられているが、原理により分類することで特徴が把握しやすく、技術選択の方向づけが得られると考える。本稿では主な処理技術について、原理に基づく分類を試みようと思う。

2. 廃棄物処理の目的は何か

2.1 廃棄物を処理しないと何が問題か

まず、なぜ廃棄物を処理しなければならないのだろうか。廃棄物処理法の第一条には「適正な処理によって、生活環境保全、公衆衛生の向上を図る（要約）」と述べられている。ごみが家庭あるいは都市内にあると、悪臭を放ち、衛生状態が悪化する。汚物掃除法制定の背景にコレラなど伝染病の発生があったように、病原性や危険性があるかもしれない。したがって都市化が進み生活密度が高まると、一か所に集めて処理することが必要となる。法の第一条はこのことを述べている。それでは衛生上の問題がなければよいのだろうか。腐敗性のごみ以外であっても、



家の中にごみがたまると邪魔であり、生活に支障がある。廃木材やがれきが放置されるとやはり都市内の有効スペースが減少し、美観上も問題である。すなわち家庭や都市といった発生箇所からごみを「除去・排除」し、空間を作り出すことも、ごみ処理の重要な目的である。

収集された後はどうだろうか。江戸時代や現在の発展途上国のように、最も基本のごみ処理方法は埋立であり、収集→埋立がごみ処理の基本的な流れと考えてよい。しかしすべてを埋め立てると、大きな空間が必要となる。国土が狭い(とされる)わが国で焼却が推進された理由は、埋め立て空間削減(埋立地延命化)のための減量化であり、同時に有機物安定化による埋立地からの環境影響低減である。すなわち焼却と埋め立ては二者択一的な処理方法と見られているが、焼却は最終的な処分である埋め立ての前処理であり、他の処理も同様の意味をもっている。堆肥化、メタン発酵などはやはり有機物を安定化する前処理であり、埋立スペースを削減するとともに、堆肥、メタンガスといった有用物を回収できる。

循環型社会の目標としては環境負荷の低減とともに、天然資源の消費削減が掲げられている。環境や資源の有限さは1970年頃より指摘されていたが、その深刻さが実感されたのは20世紀の末、地球環境問題が世界共通課題として取り上げられてからである。廃棄物処理は製品の最終段階にあたり、廃棄物からの資源循環は重要な役割を負っている。

2.2 廃棄物処理の目的

以上のことから、廃棄物処理の各プロセスと目的の関係を、表1のようにまとめてみた。廃棄物処理の目的は ① ごみによる空間占有の解消または低減、② ごみによる影響発生の低減、そして③ 有用物・資源の回収である。一方、処理は収集輸送、埋め立て

表1 廃棄物処理の目的

処理の段階	処理プロセス	処理の目的		
		①ごみによる空間占有の解消	②ごみによる影響の低減	③資源循環
[発生源の対策]	収集・輸送	発生源の空間確保	発生源の環境	発生源分別
[埋立前処理]	物理的処理 熱処理 生物処理	減量化 可燃物減量 有機物分解	— 可燃物安定化 有機物安定化	資源物回収 エネルギー回収 有用物回収
[最終処分]	埋立処分	—	環境からの隔離	(メタンガス)

前処理、埋め立ての3つがあり、埋め立て前処理は、大きく物理的処理(資源選別施設など)、熱処理(焼却など)、生物処理(堆肥化など)に分けられる。化学的処理は一般的でないので、分類に含めていない。焼却処理ではなく「熱処理」としたのは、焼却以外にも方法があるためである。

収集・輸送の主要な目的は、発生源における①②である。収集時点での「分別」は資源化の最も有効な方法であるため、③として発生源分別を記載した。埋め立て前処理のうち、熱処理、生物処理は対象物の範囲が異なるが、埋め立ての減量化、安定化、およびエネルギー等の回収物を得、①②③すべてが目的である。物理的処理は、③の資源物回収が主要目的である。埋め立ては、環境への影響を最小化すること(②)が第一の目的である。

2.3 従来の技術分類

3以下では表1のうち熱処理、生物処理、埋め立て処分を分類するが、「ごみ処理施設整備の計画・設計要領」などを参考にすると現在の分類は表2のようである。燃焼装置は焼却炉とガス化溶融炉に区別し、それぞれが炉形式によりさらに分類されている。高速堆肥化は、装置

表2 形状や条件による従来の処理施設分類

		炉形式	
燃焼装置	焼却炉	ストーカー式 流動床式 キルン式	連続/バッチ
	ガス化溶融炉	シャフト キルン式 流動層式	
		形状	
高速堆肥化	縦型	多段式	レーキ式 パドル式
		サイロ式	
	横型	平面式 野積み式	スクープ式 パドル式
回転型	円筒式		
		条件	
メタン発酵	固形物濃度	DRY/WET	
	運転方法 混合方式 処理温度	連続式/バッチ式 完全混合/押し出し流れ 高温/中温	
		条件	
埋立地	立地	平地/山間/海面	
	廃棄物 廃棄物(産廃) 被覆	一般廃棄物/産業廃棄物 安定型/管理型/遮断型	

の形状と攪拌装置によって名前が付けられている。焼却装置と高速堆肥化は、焼却炉—ストーカー式—連続というように系統的分類となっているが、メタン発酵、埋立地は、条件ごとに種類がある。すなわちメタン発酵の場合は、4つの条件があるので、 $2^4=16$ とおりの組み合わせができる。

以上のような分類は装置形状、運転方法、処理物といった「条件」によるものである。灰溶融が登場したときも、熱源の種類、加熱方法、炉形式などにより、実にさまざまな「方式」が示された。しかしいずれも「高温で溶融しスラグ化する」装置であり、形状は本質的ではない。技術の原理に注目すると、表2のガス化溶融のキルン式は熱分解であって、燃焼とは区別しなければならない。高速堆肥化とメタン発酵はどちらも生物処理であり、酸素濃度で考えると焼却、熱分解の関係と同じである。高速堆肥化の中の「野積み式」はエアレーションがないため、一部が嫌氣的になるという意味で高速堆肥化とメタン発酵の中間と考えられる。以下では、このような視点で技術を分類する。

3. 熱処理の分類

3.1 酸素濃度と温度による各方式の位置づけ

表2の焼却装置のうちガス化溶融は、まずダイオキシン対策として灰溶融技術が開発され、そののちに「焼却と灰溶融を連続的に行う」施設として考えられたと思われる。前段部分の装置形状からキルン式、流動床式、シャフト式に分類されているが、ガス化と呼ばれていても酸素濃度には大きな差がある。熱処理は十分な酸素のもとでは「燃焼」、無酸素状態（あるいはごく低酸素濃度）では「熱分解」、両者の中間の不十分な酸素濃度では「部分燃焼（部分酸化）」が起こる。広義の熱分解には部分酸化を含めるが、ここでは両者を区別することとし、酸素濃度と温度を軸にとると運転条件は図1のように表

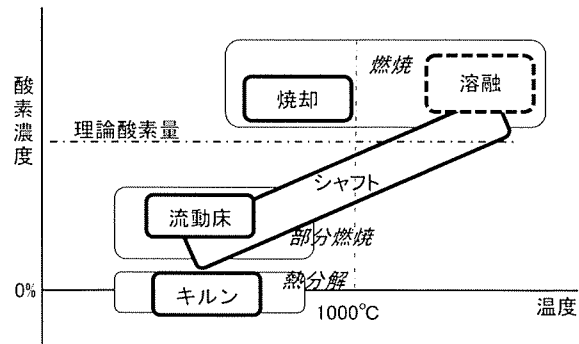


図1 熱処理技術の分類

すことができる。3種類のガス化溶融のうちキルン式が熱分解、流動床式は部分燃焼によって生じた可燃ガスやチャーを、高温で燃焼して溶融している（すなわち、図の右上で処理する）。一方、シャフト式は上部から供給された廃棄物が下降するにつれて、低温での熱分解から部分燃焼を経て、最下部で溶融に至る連続的な技術である。

3.2 熱分解・ガス化の分類

わが国では上記3種の分類が用いられているが、熱分解あるいは部分燃焼を用いた施設には、さまざまな種類がある。熱分解、部分燃焼の産物はチャーと可燃ガスであるが、それらを高温で燃焼してスラグ化する場合もある。また、熱分解、部分燃焼、燃焼の組み合わせ方にもいくつかある。そこで文献2)、3)を参考にして、海外の事例を回収物と装置の組み合わせによって分類すると図2のようになる。横方向は主な回収物であり、縦方向は炉が一段か、2段かで分けている。ただし、ガス化 (gasifier) という表現は比較的低温での部分酸化にも、1,000°Cを超える高温での燃焼にも「ガスを得る」との意味で使われている。後者はスラグが主になれば溶融 (melting) と呼ばれる。以下では、低温での部分酸化による gasifier は「ガス化」と書いた。

A1、A2は熱分解あるいは部分酸化によって、可燃ガス (syngas) とチャー (char) を取り出す。熱分解によってチャー製造を目的とするA1が「炭化」である。部分酸化の場合 (A2)、可燃ガスのみを目的とすることがある (チャーを取り出さない) ため、チャーをカッコ書きとした。B1~B3は、A1、A2で得られたチャーをさらに処理するもので、目的産物はガス化かスラグ化である。B1はガス化によって可燃ガスを得、B2、B3は溶融によってスラグ化する。B2はスラグとともに可燃ガスも取り出すが、スラグ化を主目的とする場合はB3のように可燃ガスを溶融の熱源に用いる。Cは、熱分解あるいは部分酸化ののち、生成物を分離せずすべて溶融する。このほか、A3は部分酸化と溶融をひとつの装置内で行うプロセスである。わが国でキルン式、流動床式、シャフト式と呼ばれているガス化溶融プロセスは、それぞれB3、C、A3に相当する。なお、可燃ガスは燃焼しボイラ熱

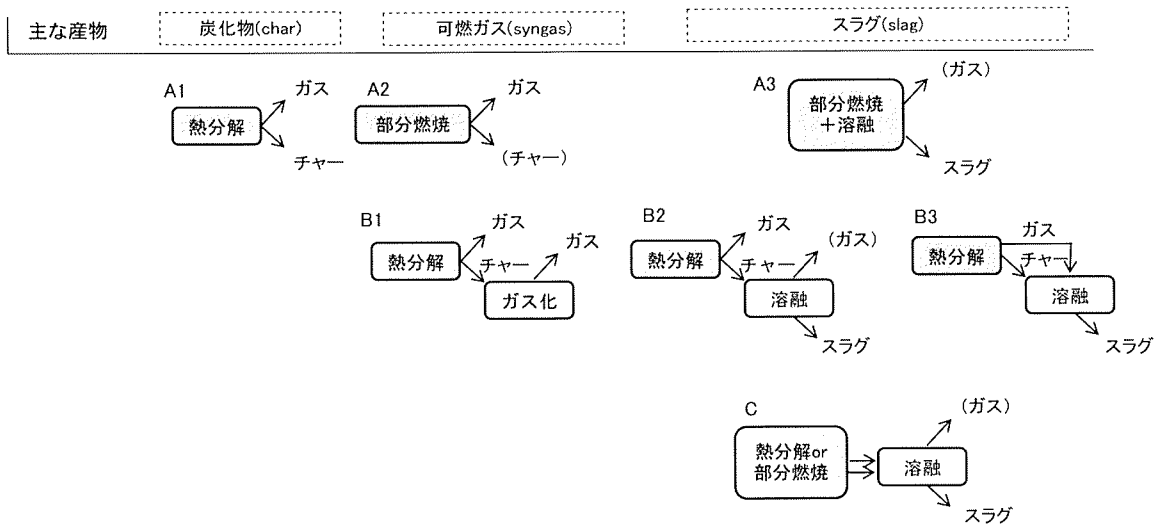


図2 熱分解技術の分類（横方向は処理産物）

回収、発電、あるいはガス改質する場合がある。ガス回収を目的としたA2, B1は、海外で多くの例がある。

3.3 熱処理技術と回収物の関係

次に、熱処理の単独技術とその産物（回収物）に注目してみよう。焼却はごみを燃焼し、エネルギーを回収するのみだが、熱分解あるいは部分燃焼は他への転用が可能な可燃ガス、炭化物を取り出すことができる。熱処理技術と得られる回収物の可能性の関係を整理すると、図3となる。

焼却①はごみをそのまま燃焼し、ボイラでエネルギーを回収することができる。熱分解（あるいは部分燃焼）によるガス化②、炭化③は、それぞれ可燃ガス、炭化物を回収物として得る技術である。燃料としての利用のほか、ガスは化学原料として使用可能であり、廃プラスチックのガス化（コークス炉化学原料化）がその例である。炭化物は吸着剤、土壌改良材などマテリアルとして多くの利用方法がある。図3の太線は、これらの主要と考えられる利用法を示す。

一方、炭化物、可燃ガスを回収せずに溶融④するのがガス化溶融で、回収物はスラグである。RDF化⑤は「ごみ燃料化」として、一般的に焼却とは別に扱われている。しかし最終的には燃やすため、焼却前の物理的な前処理技術として考えるのが適当である。ASTM（米国試験・材料協会）は、RDFを単に不燃物を除いたもの、粉末状とするものなど、固形化を含めて7つに分類している。不燃物を除いたものはRDF3、固形化したものはRDF5だが、ガス燃料化はRDF7にあたる。最近では、ごみを一旦固形RDF化し、炭化する例⑥も現れている。

図3を回収物の利用方法から見ると、エネルギーしか回収できない焼却と比べて、ガス化、炭化によって利用方法が広がるのがわかる。RDF化、ガス化、炭化は、ごみの質を向上させる技術といえる。もちろん、得られる回収物の質・量が、処理に投入されるエネルギー、コストに見合うかどうか技術選定の条件となる。

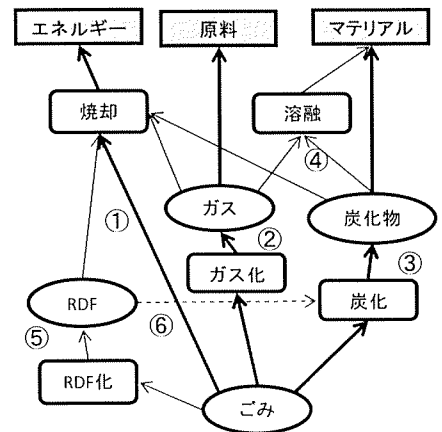


図3 熱処理技術の方法と回収物

4. 生物処理

4.1 酸素濃度と水分による分類

有機物の微生物による分解は、酸素の有無により好気性分解と嫌気性分解に分けられる。前者の最終産物は二酸化炭素と水、後者は主として二酸化炭素とメタンガスであり、その代表的な処理方法が堆肥化とメタン発酵（バイオガス化）である。微生物活性を左右する水分と酸素濃度によって図示すると、各種の技術は図4のように分類することができる。

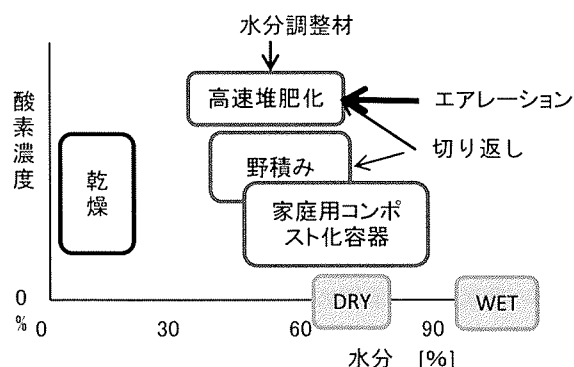


図4 生物処理の分類

4.2 堆肥化の種類

高速堆肥化は、有機性廃棄物内の好気的条件を保つことが最も重要であり、強制的なエアレーションと定期的な切り返しを行う。また微生物は水分が低下すると急激に活性を失うが、一方で水分が高すぎると廃棄物中の空隙をふさいで通気性が悪くなるため、水分調整のためにおがくず、もみ殻などの副資材を入れる。表2の野積み式はウィンドローとも呼ばれ、単に積んでおき、定期的に切り返しを行うものである。強制的なエアレーションを行わないので、部分的に嫌気領域が存在する。家庭用のコンポスト化容器は、一般に水分が高く、切り返しを行うことは困難である。そのため好気状態を保てずに腐敗が起り、悪臭、害虫の発生が起きやすい。これらは堆肥化といっても、順に嫌気的部分が多くなっている。家庭用生ごみ処理機には副資材を入れて攪拌を行う高速堆肥化に近いものがあるが、乾燥タイプは生物処理ではない。

4.3 メタン発酵と堆肥化の相違点・類似点

好気性分解には、細菌（バクテリア、原核細胞からなる単細胞生物）、菌類、放線菌など、数多くの微生物が関与する⁴⁾。これらは一般環境中どこでも存在するので、好気条件と水分さえ適切であれば分解は進行する。これに対してメタン発酵は加水分解、酸生成、メタン生成などの段階があり、それぞれ関与する微生物が異なる。メタン生成菌は絶対嫌気性菌（分子状酸素があってはならない）であり、至適 pH の範囲は狭く、増殖速度が遅いため、微生物の集合としての制御は、好気性分解と較べて技術的な高度さが要求される。このように関与する微生物の普遍性の程度が、大きな違いである。メタン発酵は従来より、し尿、下水汚泥などの高濃度排水に使用されていた。廃棄物に利用する場合には、表1に示したように DRY（固形物濃度 20～40%）、WET（10% 以下）に分類されているが、水分の高い廃棄物に向いている点が堆肥化とは対照的である。

メタン発酵は、関与するメタン生成菌の生存条件によって中温発酵（30～45℃）、高温発酵（50～60℃）に分類されることはよく知られている。しかしこの分類は嫌気性菌に特別なものではない。堆肥化は初期に中温菌が単糖類、脂質、ペプチドを分解し、温度が上昇すると高温菌が中心となる。通常1～2週間でこのプロセスは終了するが、堆肥として利用するには未分解有機物をゆっくり分解する熟成が必要であり、中温菌、低温菌（0～30℃）が関与する⁵⁾。分解の温度範囲が一定かどうかの違いである。

5. 埋立地⁶⁾

5.1 嫌気性埋め立てと好気性埋め立て

埋立地内で進行する生物分解は、好気的あるいは嫌氣的に分解される。すなわち埋立地とは、堆肥化あるいはメタン発酵を原位置（in situ）で行うのと同じであり、そのため埋立地をバイオリクターと呼ぶことがある。埋立地の表層では好気性分解が起き、ごみ中に有機物があると酸素が消費されて内部は嫌気的条件となるが、好気状態と嫌気部分が混在している点は図4の野積みや家庭用コンポスト化容器と同じである。

生ごみも埋め立てる欧米の埋立地は、内部が嫌氣的となっている。さらに水処理コスト削減、地下水汚染リスク低減のため、埋立地表面に底部しゃ水と同程度の低い透水係数をもつキャップをし（キャッピングと呼ぶ）、空気は侵入できない。嫌氣性分解によって発生するメタンガスは、規模の大きい埋立地ではブロー吸引して利用することがある。以上が、欧米における埋立地の代表的姿であった。一方、わが国は浸出水集排水管とガス抜き管を連結してネットワークを構成し、端部を大気開放して埋立地内部へ空気を流入させる準好氣性を標準的構造としている。集排水管周囲に形成される好氣的領域において浸出水中の BOD 成分が分解され、有機物の分解に伴って好氣的領域が埋立層内に広がっていく。また降雨量が多く、埋め立て終了後の最終覆土は雨水の浸透を遮断するものではない。したがって、日本は好氣的な、自然降雨による洗い出しタイプ、欧米は嫌氣的な封じ込めタイプとの理解が一般的であった。

5.2 欧米における埋め立ての見直し

しかし欧米の埋立地の考え方は、嫌氣的埋立地の安定化に 100 年オーダーの時間を要するとの認識が広まったため、最近大きく変化している。

アメリカでは、埋立地を工学的に制御し、安定化を促進するバイオリクター埋立地 (Bioreactor Landfill) の研究を行っている。pH、廃棄物粒径、栄養、微生物植種など、さまざまな制御が考えられたが、最も重要なのは水分の制御であり、嫌氣的分解を最大化するために最大水分保持状態に保つことが目標とされる。これによってメタン回収も短期間で効率的に行うことができ、水分を供給するという意味で封じ込め型から大きく転換している。

有機物の安定化は、嫌氣性分解に比べて好氣性分解は数倍早い。そこで古い埋立地の安定化を促進するため、空気圧入管、ガス抽出管を打ち込み（供給-抽出は交互に切り替える）、埋立地全体の完全な好氣化を図る試みがある。さらにバイオリクターも水分に次いで嫌氣/好氣状態が重要なパラメータであるとし、空気を送入する好氣的バイオリクターが考えられている。現在のバイオリクターの定義は「廃棄物の生物学的安定化を促進するために、廃棄物層への水分あるいは空気供給を制御する埋立地」とされ、「空気供給」が重要な制御要因になった。

5.3 水分・空気の制御による埋立地の分類

以上のように、欧米では埋立地における水分と酸素濃度の考え方に変化が見られ、好氣的な洗い出しタイプであるわが国の埋立地と共通点が多くなっている。そこで、この2つを座標軸として埋立地を分類すると、図5(a)のようになる。横軸は水分、縦軸は空気の制御の程度を示している。

右下の「嫌氣性埋立」は空気の供給方法を持たない埋立地であり、途上国で多く見られるオープンダンプもこれに該当する。何の制御も行わないので、水分の変動幅は大きい。従来、欧米で中心的であった「封じ込め型埋立地」は、図の左下に位置する。水分が低いため微生物活動が停止し、外部への影響はないが廃棄物が分解せずに長期間とどまり、Dry Tomb (乾燥した墓) あるいは Dry Landfill と呼ばれていた。

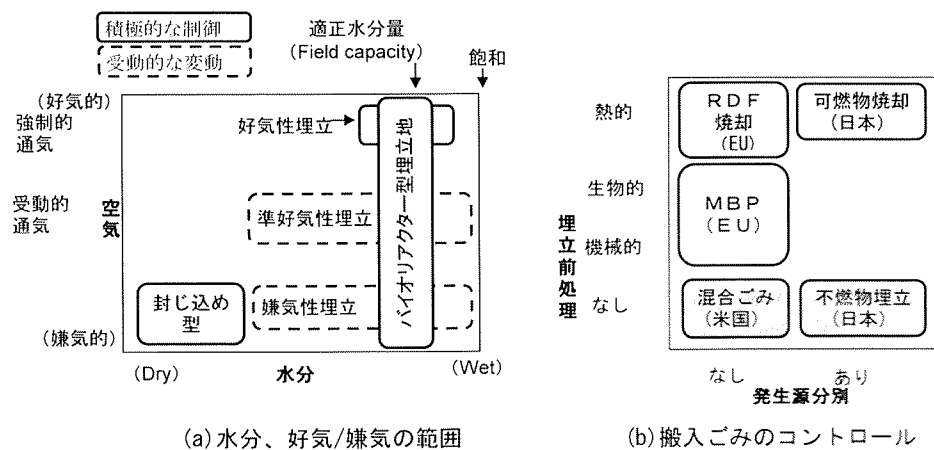


図5 埋立処分地の分類

嫌気性埋立に対し、強制的な送気（エアレーション）を行う好気性埋立は、図の右上となる。プロアの運転にエネルギーを消費するために実例はほとんどなかったが、バイオリクター埋立地のひとつとして現実的なシステムとなった。バイオリクターは嫌気タイプもあるので、縦方向に幅があり、水分を一定範囲に制御することが特徴である。欧米では図の左下から右上に向かう傾向にあるが、日本の準好気性埋立は受動的ではあるが好気性を目指し、また水分を供給する（同時に洗い出しも行う）埋立地でもあり、図の中間に位置づけられる。すでに欧米が目指す方向にあったといえる。

5.4 搬入物制御による分類

埋立地安定化が長期化することの対応として、欧州では有機物を埋立地から排除するとの方針をとった。そのため、機械的前処理（破碎、選別）と生物処理を組み合わせたMBP（Mechanical Biological Pretreatment）を前処理として行い、埋立地への有機物量を減らすこととした。有機物量の基準が設定されているがMBPでは達成が難しく、将来的には焼却に移行するのではないかと予想されている。これに対し、日本は発生源分別によって可燃物を焼却し、無機化された残渣と分別収集された不燃物を埋め立てている。さらに、焼却が処理の中心であったことから、可燃物と不燃物を発生源で分別することが、古くから行われている。

埋立前処理の程度と、発生源分別の有無で埋め立て方法を整理すると、図5(b)のようになる。米国は有機物の前処理なしで、生ごみを含む混合ごみの埋め立てであるが、EUはMBP処理物、あるいはそこで選別された可燃物を焼却し、埋立物の有機物量を減少させようとしている。これに対し、日本は発生源分別によって可燃物を焼却し、無機化された残渣と分別収集された不燃物を埋め立てている。特に分別は、MBPのような施設選別によらず、効率的な熱的処理による廃棄物の無機化を行っている。

6. おわりに

巻頭論説の依頼に乗じて、目頃感じていた廃棄物処理技術の分類に対する考察を行ってみた。日本は新しい用語を発明するのが得意な国である。適正処理困難物、特別管理廃棄物、最近では循環型社会など、名称だけでは内容がわからないものがたくさんある。技術についても同じで、装置の特徴を表現する名称が次々に生まれた。「新技術が登場し、処理のメニューが増加するにつれて、新たな技術を採用し、その運転管理自体が目的となり、何のために処理するのかが忘れられてはいないか。技術は目的があって開発され、その目的は処理の原理と密接な関連がある。したがって、原理をもとに分類すれば、どのような目的のためにその技術を使えるかが整理できるのではないか。ごみ処理全体における位置づけと必要性も、整理できるのではないか」。これが本稿の動機であった。

「原理で整理すると、技術間の類似性と相違点が理解しやすく、相対的な位置づけが明確になる。対極的であると考えられていた欧米と日本の埋立地も、実は連続性が認められる。」など、ある程度の成果は得られた。しかし知識の不正確さ、情報の不十分さにより、誤りや勘違いがあるかもしれない。本稿は概念的な整理の第一歩であるとして、不完全さに関してはご容赦を願いたい。

参考文献

- 1) 全国都市清掃会議、廃棄物研究財団：ごみ処理施設整備の計画・設計要領（1999）
- 2) Malkow, T.: Novel and innovative pyrolysis and gasification technologies for energy efficient and environmentally sound MSW disposal. Waste management, 24, pp.53-79 (2004)
- 3) URS corporation: Evaluation of alternative solid waste processing technologies, In: Appendix E. Supplier Evaluations. Los Angeles, USA, pp.E1-E154 (2005)
- 4) 藤田賢二：コンポスト化技術－廃棄物有効利用のテクノロジー、技報堂出版（1993）
- 5) A. Chiumenti et. al.: Modern composting technology, The JP Press Inc. (2005)
- 6) 松藤敏彦：欧米における埋立地安定化促進戦略と日本の埋立技術、月刊廃棄物、Vol.32, No.422, pp.17-21 (2006)