

【 総 説 】

持続可能な埋立地をめざす早期安定化戦略

— 欧米における研究のレビューとわが国の位置付け —

松 藤 敏 彦*・田 中 信 壽*

【要 旨】 廃棄物の埋立に関して、わが国は準好気性埋立、豊富な降雨による洗い出し、無機物埋立など、欧米とは大きく異なっていると考えられている。本稿は、欧米における廃棄物埋立地安定化に関する研究を整理し、わが国の埋立の位置付けを考えた。

まず過去の研究を嫌気性分解の促進、有機物前処理、部分的な好気性処理、洗い出しに分類した。その後欧米が標準とした封じ込め型埋立は、埋立地の安定化を促進する方向へ変化し、北米は埋立地内の分解を促進するバイオリクター埋立地、欧州は廃棄物前処理による有機物の無機化、という異なった戦略をとろうとしている。しかしどちらも埋立地は次第に好気化に向かっており、他の方法もわが国ですでに実行されているものが多い。日本は欧米が現在目指している戦略をいち早く進んでいたといえる。

キーワード：埋立地、早期安定化、好気性処理、埋立前処理、持続可能性

1. はじめに

近代的な埋立地の歴史は、それほど古くはない。米国で最終処分場が地下水汚染を引き起こすことを広く認識するようになったのは1970年代になってからのことである。日本の廃棄物処理法にあたるRCRA（資源保全回収法）が制定されたのは1976年であり、Subtitle Dに埋立の構造、管理基準などが示された¹⁾。わが国では1971年に最終処分場処分基準が定められたが、施設の構造基準、維持管理基準はその6年後の1977年、「一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場の技術上の基準を定める命令」（いわゆる共同命令）によってであり、米国とほぼ同時期である。しかしその後の方向性は、大きく異なったものとなった。

すなわち「日本は準好気性埋立構造が標準とされ、欧米の嫌気性埋立とは異なったコンセプトによって設計さ

れている。また欧米は降雨をできるだけ排除する密閉型の構造をとるのに対し、日本は降雨の進入を許す洗い出し方の埋立地である。埋立物も、焼却や分別により無機的であり、有機物リッチな欧米とは違う」。このような理解が一般的になされていると筆者らは考えている。しかし、本文中で紹介するように欧米では廃棄物の分解促進のため、浸出水循環という方法で埋立地内に水分を導入したり、さらには浸出水/水を大量に流して洗い出しを行うことも提案されている。また、好気的前処理を分解促進のために行い、さらには好気性埋立の提案も見られる。わが国と欧米の考え方は決して対立するものではなく、次第に近づいてきているように思える。

残念ながら、わが国の状況は欧米によく知られているとはいえ、欧米の動向についての情報は断片的に伝えられることが多い。わが国では「循環型社会」が目指すべき姿とされているが、欧米でも「持続可能」であることが廃棄物処理における目標になっている。表現は違うが、「将来世代に負の遺産を残さない」ことが共通した目標であり、そのためには長期間の環境負荷となる埋立地の早期安定化が必要である。埋立地の技術的変遷については、田中²⁾による埋立地の概念・技術の歴史、研究の動向の詳しいレビューがある。本稿では早期安定化のための方法・戦略に焦点を絞り、まず欧米における埋

原稿受付 2004. 10. 29

* 北海道大学大学院工学研究科 環境資源工学専攻
廃棄物資源工学講座

連絡先：〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目

北海道大学大学院工学研究科 環境資源工学専攻

廃棄物資源工学講座 松藤 敏彦

E-mail: matsuto@eng.hokudai.ac.jp

立地安定化に関する研究を振り返り、最近の研究の動向を整理する。そしてわが国の戦略が、実は同じ方向にあったことを示し、持続可能性に向けた戦略を展望する。

2. 埋立地安定化に関する従来研究

2.1 嫌氣的分解の促進

埋立地は、微生物活動によって有機物を安定化する生物反応器（バイオリアクター）であるとの考え方は古くからあり、分解促進の要因に関する研究が数多く行われている。Christensenら³⁾（1992）は1980年代後半までの研究を表にまとめ、堆肥化前処理、緩衝剤の添加、浸出水循環が廃棄物の分解促進に効果があるとしている。Komilisら⁴⁾（1999）は設計・運転の点から好気処理ごみの敷設、即日覆土、石炭灰との混合埋立、水分量、緩衝剤添加などの効果をレビューしている。さまざまな操作因子のうち、最も重要なのは廃棄物の水分を保水容量近くに保つことであり、そのため浸出水の循環（leachate recirculation）が行われる。浸出水循環は、廃棄物中の水分を適正なレベルに保つ以外に、水分流動によって被分解物（汚濁成分）、栄養分を輸送・希釈し、廃棄物層内を均一化する。浸出水循環をしない埋立地は、single passと呼ばれる⁵⁾。

一方、2相嫌気性消化法の埋立地への応用も研究されている。嫌気性微生物分解は、高分子有機物の加水分解、酸生成によって低分子有機酸が発生し、メタン生成菌によってメタン、二酸化炭素に分解される。しかし埋立初期には前2者の速度がメタン生成速度を上回って有機酸が蓄積し、メタン菌の最適pH域が6～7であることからこの状態が続くと活発なメタン生成までに長時間を要する。嫌気性分解の促進のためには、両者のバランスをいかにコントロールするかが重要な要因である。Lagerkvist⁶⁾（1994）は、第1セルを浸出（leaching）セルとして浸出水を循環し、第2セルで第1セルの浸出水のメタン発酵を行う実験をおこなっている。またWangら⁷⁾（2000）はやはり2相を分離し、循環液を固液分離して液を好氣的活性汚泥処理している。活性汚泥処理後の液は第1セルに戻している。

2.2 有機物量の低減（前処理）

上で述べたように、メタン生成の促進には酸生成による阻害をコントロールする必要がある。それには、易分解性有機物量を減らして酸生成を弱めるのがひとつの方法である。Brummelerら⁸⁾（1990）はリサイクルプラントで選別された有機物を対象とし、好気性前処理（カラム）による有機物量（VS）減少の効果を検討してい

る。その結果VSを20%程度減少させるとメタン生成が速やかに活発化し、約2か月で終了したと報告している。ただしメタン生成量は40%減少した。Brinkmannら⁹⁾（1995）は前処理として破碎と堆肥化を行ったのち嫌気性分解を行わせ、好気前処理によるメタン生成開始時期の早さとTOC、NH₄の低下を報告している。Collins¹⁰⁾（1991）はリサイクルと好気性前処理の埋立に及ぼす効果をライシメータ実験で検討し、浸出水質の向上を報告している。圧縮が容易となり、埋立容積必要量が減少するとの利点もあげている。

2.3 好気性前処理

埋立地全体を好氣的にするとの考え方はコンポストに似ており、1960年代から研究が行われてきた¹¹⁾（Reinhart 1998）。その後嫌気性埋立が研究の中心となったが、好気性前処理あるいは部分的な好気化の効果が研究されている。

Hamら¹²⁾（1982）はテストセルを用い、第1層を6か月間覆土なしで放置した。その後フレッシュな都市ごみを埋め立てたところ、速やかなメタン濃度増加が見られたとしている。ただし、メタン生成量の増加は不明である。大規模な実験として、Stegmann¹³⁾（1983）はやはり一層目を圧縮せず、1年間カバーなしで放置し、その後通常の埋立を開始してCODが著しく低下したことを報告し、浸出水量は多くなるがごみをできるだけ広く、薄く（20～30cm）圧縮するのがよく、即日覆土は避けるべきであると述べている。また即日覆土の効果については、Bookterら¹⁴⁾（1982）もテストセルを用いた実験において、即日覆土をしないことで初期に好気分解を行わせ、次のごみが投入されたのちのメタン生成が促進されることを示している。

Hamら¹²⁾（1982）は、底部に安定化した廃棄物を置くことで、その上部の廃棄物からの浸出水CODが85～90%減少したとし、安定化の方法は嫌気的か好気的かによらないとしている。Stegmannら¹⁵⁾（1987）は、好氣的処理された廃棄物をライシメータの底部に置くことで、浸出水BOD濃度が低下し、前処理廃棄物を混合した場合よりもメタン生成が速やかに進行したとしている。またFlecherら¹⁶⁾（1989）はより積極的にAir injectionと称して垂直ガス井戸から空気を送入し、その後のメタンガス発生を促進する方法も試みている。

Stegmann¹⁷⁾（1989）は部分的な好気処理、あるいは好気処理された廃棄物を混合することによるメタン生成の活性化の理由として、①コンポスト化の過程で嫌気的プロセスもある程度起こり、メタン生成菌が増殖する、②易分解性有機物が分解し、酸生成が弱まる、③有機

酸濃度を希釈することをあげている。

2.4 Flushing bioreactor

浸出水循環は Landfill bioreactor の大きな特徴であり、適正水分の保持、有機酸の希釈などにより分解を促進するための手段である。そこで分解促進よりも、水分流動による汚濁成分の溶出、洗い出しを行うことで、環境負荷を埋立地から外部へ除くとの考え方があり、Flushing bioreactor と呼ばれている。欧州においては窒素の基準がきびしく、アンモニア除去の促進が課題であるが¹⁸⁾ (Burton, 1998), flushing はこれに有効である。

Walker ら¹⁹⁾ (1997) はアンモニア性窒素の安定化には、数十年～100年以上もの年月を必要とすることから高速の洗い出しを伴うバイオリアクターが必要であるとしている。埋立深さ 30 m の場合、50 年で洗い出しを完了(濃度を 100 分の 1)するには年間 3,000 mm の水量が必要で、 10^{-7} m/s 以上の透水係数を確保しなければならないとしている。Karnik ら²⁰⁾ (1997) は嫌気性ガスとして排除できるのは 50% にすぎず、残りは環境へ放出されることから、環境負荷物質の洗い出しが必要であるとしている。洗い出しの主対象はアンモニア、無機イオンであり、5 bed volume (通水量/廃棄物容積)の通水で大部分が除去されるとしている。

以上の 2 つは概念的だが、Purcell ら²¹⁾ (1997) は破碎ごみを 6 つのテストセルに充填し、洗い出し水量(脱気蒸留水)を変えて TOC, N の流出率を測定している。充填量の 4 倍(4 bed volume)の通水で、浸出水中 TOC 濃度が 61%, アンモニア濃度が 99% 減少した。Vroon ら²²⁾ (1999) は機械的選別によって得られた有機性残渣(MSOR, Mechanically separated organic waste)の安定化のため、まず通常の浸出水循環を行ったのちメタン生成期浸出水を循環してメタン発生を促進し、その後水で洗い出しを行った。洗い出しの水量は 3.5 bed volume であり、その後好気処理を行ったが CO₂ 発生、温度上昇が見られず、廃棄物がほぼ安定したとしている。

Flushing の障害として Karnik ら²⁰⁾ (1997) は、①埋立地深さ・密度の増大により透水係数が低下する、短絡流れが起こりうる、②洗い出しのために大量の水が必要となる、③水処理が必要となる(処理水を洗い出しに使用すれば必要水量は少なくなるが、Cl の蓄積が生じる)、④廃棄物の不均一性のため、均質に水分飽和にすることが困難であることをあげている。

3. 封じ込め型埋立から早期安定化へ

欧米では、上部からの浸透を最小限にすることで浸出水量を減らして浸出水処理コストを削減し、漏水ポテンシャルを小さくするため、埋立終了後の低透水性トップカバー敷設を一般的な構造としてきた。米国においては都市ごみ埋立地(Subtitle D landfill)は HDPE (高密度ポリエチレン)シートと 2 フィート厚以上の圧縮粘土の複合ライナーによるしゃ水が必要であるが、埋立地終了時(closure 時)には底部しゃ水と同程度かそれ以上のしゃ水能力をもつトップカバー(Final cover)を設置しなければならない(連邦基準 CRF 258.60)。「ふた」をした状態にすることから landfill cap あるいは capping と呼ばれ、浸出水への漏出を最小にする、いわゆる封じ込め型埋立地(Containment landfill)である。底部ライナーに較べてトップカバーは維持管理が容易で放出物制御に重要な役割を果たすことから、Christensen ら²³⁾ (1994) トップカバー(surface liner)が主、底部ライナー(bottom barrier)がバックアップと述べている。米国では 1993 年以降、すべての都市ごみ埋立地はトップカバーを設置しなければならないようになった。

しかし、封じ込め型埋立地の是非については従来から議論があった²⁴⁾。「底部ライナーからの漏出が長期的には避けられず、環境リスク発生を長期化させるだけ」との批判がある一方で、「雨水の浸入を許すと浸出水処理コストが増加し、浸出水が廃棄物層内を一様には流れないので全体が安定化することはない」との、封じ込めを支持する意見もあった。後者の意見が採用されていたわけだが、最近では長期リスクを考慮して前者の見方が優勢となっている。たとえば McDougall ら²⁵⁾ (2001) は「しゃ水は将来、必ず機能が損なわれ、水分が浸入し浸出水・埋立ガスが発生したときには集排水・集ガスの機能もいずれ損なわれるのでそれらを回収することはできなくなる」としている。封じ込め型埋立は廃棄物を乾燥したまま閉じ込めるので最近では Dry tomb (乾燥したごみの墓)と呼ばれており、これに代わって早期安定化のための方法が考えられている。

安定化促進をめざす要因としては、埋立終了後の管理を短縮したいとの意図がある。埋立の終了は“closure”であり、それ以降の埋立地は“Closed landfill”あるいは“Completed landfill”と呼ばれ、アフターケアが行われる。アフターケアは、Post-closure care (closure 後のケア)、あるいは時間がかかることから“Long-term care (長期間のケア)”とも呼ばれている。アフターケアについては米国では USEPA の RCRA (資源保全回収法) Subtitle D (非有害廃棄物の基準)によって、ま

たEUでは埋立指令(99/31/EC)によって、30年間のアフターケアを行い、そのための資金を確保することが義務付けられている²⁶⁾。主として資金的な規定であり、米国では「構造、運転が基準を守り、適切なカバーがされ、過去10年間に水質モニタリングで異常が検出されていないときに終了できる」²⁷⁾としているが、アフターケアの終了を“release from aftercare”(解放)との表現が使用されるように、費用がかかることからいかにアフターケア期間を短縮するかが、欧米でも問題となっている。アフターケア終了後は、自然の浄化能力に任せることになる。

なお、わが国では埋立の終了を、開口部を土砂等で閉鎖することから「閉鎖」、浸出水、埋立ガスが安定化し、埋立地管理の必要性がなくなると埋立地としての許可登録が不要となることから「(許可登録の)廃止」と呼ばれている。欧米と較べると、閉鎖は“closure”であり訳としても一致しているが、「廃止」は欧米ではアフターケアの終了にあたる。

4. 米国における現在の安定化戦略

北米では、2.1で述べたバイオリクターによって埋立地の安定化を促進しようとしている。現在のBioreactor landfillは、pH、廃棄物の粒径、栄養、温度制御、水分の制御、さらには微生物植種なども行って「工学的に分解条件の最適化をはかる」²⁸⁾ものである。最も重要な制御因子は水分である。浸出水再循環は1980年代から広く行われていたが、Bioreactor landfillは嫌氣的分解を最大化するために廃棄物層を一様にField capacity、すなわち最大水分保持状態に保つことが目標となっている。したがって、浸出水以外にも、雨水、汚水処理水なども利用する。SWANA(北米廃棄物処理協会)の調査によると、1997年の時点で浸出水循環は多くの州で認められていたがBioreactorを認めていたのは6州のみであった²⁹⁾。水分供給方法としては、埋立地表面から(池、トレンチ、スプレー)、鉛直井戸による供給、水平方向の埋め込みトレンチからの供給に分けられる。大型ライシメータ、あるいは実規模での実験が行われており、米国ではカリフォルニアのYolo County埋立地(ごみ量8,000 ton、深さ12 mのセルが2つ)など、4つの大規模プロジェクトが進行中である。カナダの例³⁰⁾では、浸出水の水位、ライナー上・廃棄物の温度、廃棄物の水分、廃棄物のサクション、廃棄物の沈下・圧縮、浸出水組成・発生量、ガス組成・発生量、廃棄物の特性、有機物含有量を測定しており、評価のためのデータを取得中である。

5. 欧州における現在の安定化戦略

欧州の埋立地も米国と同様な封じ込め型であったが、1999年公布のEU埋立指令(99/31/EC)によって大きく変わろうとしている。埋立指令の主な内容は(①埋立地の分類：有機物、有害廃棄物、非有害廃棄物、安定廃棄物)、②埋立禁止(液状廃棄物、爆発性・腐食性・酸化性・引火性廃棄物、感染性廃棄物、研究等に使用した環境影響が未知の化学物質、使用済みタイヤ、未処理の廃棄物)、③廃棄物は埋立される前に、前処理をしなければならない、④生物分解性廃棄物の埋立量を減少することである。③④によって混合埋立を改める必要が生じ、④の生物分解性有機物量は1995年を基準として2006年までに25%、2009年までに50%、2016年までに65%とすることが具体的に定められている。すなわち、2.2で述べた前処理が義務付けられたのであり、これをMBP(Mechanical Biological Pre-treatment、物理・生物的前処理)によって達成しようとしている。図1にフローの例(文献31)の図より作成)を示すが、混合ごみを、破碎、選別、ふるい分けによって可燃物、不燃物、有機性ごみに分け、可燃物は熱処理(エネルギー回収)、有機性ごみは生物処理(好気性または嫌気性)し、それらの安定化物を埋め立てるものである。具体的なフローとして、Cossuら³²⁾は大型ごみ除去後に破碎し、トロンメルで選別、その残渣を2~3週間堆肥化。さらに3~4週間野積みし、熱処理残渣(スラグとボトムアッシュ)の20 mmふるい下を1:9で充填したライシメータ埋立実験を行っている。

MBP処理物の安定化度評価については多くの研究(たとえば^{33, 34)})がなされ、ドイツでは表1に示すMBP処理物埋立基準が設けられた。ここでAT、GBはそれぞれ好氣的雰囲気での酸素消費量、嫌氣的雰囲気でのガス

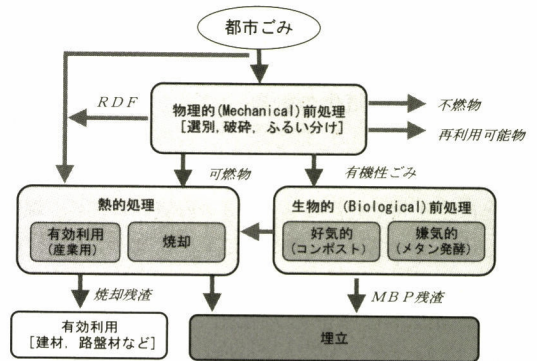


図1 MBP (Mechanical Biological Pre-treatment) のフロー例 (文献31より作成)

表 1 ドイツにおける MBP 処理物の埋立基準 (AbfAblV (2001))

項目	単位	基準値	内 容
AT ₄	mg O ₂ (gTS) ⁻¹	5	酸素雰囲気における 4 日間の生物学的酸素消費量
GB ₂₁	ml (g TS) ⁻¹	20	21 日間の嫌気ガス発生可能量
TOC _{Eluat}	mg l ⁻¹	250	溶出試験 (L/S 10, 24 時間) における TOC 溶出量
H ₀	kJ kg ⁻¹	6,000	発熱量
TOC	TS あたり重量%	18	乾燥固形物 (TS) あたりの TOC

表 2 EU 埋立指令による廃棄物受入基準 (非有害物埋立地)

	L/S = 2 l/kg mg/kg-dry	L/S = 10 l/kg mg/kg-dry	C ₀ mg/l
Cd	0.6	1	0.3
Cr-total	4	10	2.5
Pb	5	10	3
塩化物	10,000	15,000	8,500
フッ化物	60	150	40
硫酸塩	10,000	20,000	7,000
DOC*	380	800	250
TDS**	40,000	60,000	—

C₀: カラム試験において L/S = 0.1 l/kg までの最初の浸出液濃度
 * L/S = 2 (pH 調整なし) で DOC が基準に満たない場合、pH を 7.5-8.0 に調整し L/S = 10 で試験する。
 **TDS は塩化物、硫酸塩の代わりに使うことができる。
 (注: これ以外 As, Ba, Cu, Hg, Mo, Ni, Sb, Se, Zn の基準値がある)

発生量であり、生物分解活性を直接測定する指標である。

表 2 は、EU 埋立指令に対して 2002 年に示された非有害物埋立地の受入基準である (2003/33/EC)。MBP はこの基準を満たすことができるのかとの疑問、また処理プロセスは図 1 に示すように複雑であり、前処理物の生物分解性有機物低減が焼却には及ばないことから、「MBP が採用されるのは、これまで多大の投資をした埋立地の使用をやめ、新たに建設費の高い焼却炉を建設することが困難である、という経済的・政治的理由によるもので、将来は焼却をすることになる³⁵⁾」との意見がある。Soyez³⁶⁾ のように、埋立前処理としての目的よりも、可燃物を RDF として回収することに意義があるとの見方もされている。

6. 埋立地好気化の動き

過去の欧米における埋立地研究は、基本的に嫌気性分解を前提としていた。2.2, 2.3 の好気性処理も、嫌気性分解を促進するため前処理であった。しかし最近、積極的に好気化をはかろうとする試みが盛んになってきた。

まず、嫌気的な埋立地の安定化には、100 年オーダーの時間を要することから、古い埋立地に強制通気を行うことが行われている。Heyer³⁷⁾ (1999) は底部ライナーのない埋立地 (埋立面積 3.2 ha) 内に空気圧入管、

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 (landfill body) の完全な好気化を図っている。埋立終了から 14 年が経過しており、2001 年から運転を開始したところ、2 年後もガス発生が続き、温度が 50 ~ 60°C と高く、さらに 1 年エアレーションを継続する³⁸⁾ と報告している。Cossu³⁹⁾ は高速鉄道建設のため廃棄物を取り除く必要が生じたことから、バイオガスと浸出水発生の問題を解決するため、やはり現場でのエアレーションを行った。

これらは埋立終了後の好気性化であるが、埋立を好氣的雰囲気として安定化を促進する試みもある。Hudgins⁴⁰⁾ は PVC 製のパイプを挿入し、通気とともに水分を供給して廃棄物をコンポスト化し、掘り起こして埋立物から有価物を回収し、埋立地を再利用することを提案している。Aerobic landfill (好氣的埋立) → Landfill Mining (廃棄物掘り起こし) → Recycling (有価物回収) → Reuse of landfill space (埋立空間の再利用) を 4 年サイクルで繰り返すもので、Sustainable Landfill と呼んでいる。埋立地自体を堆肥化装置とするものと見なすことができる。また Hudgins⁴¹⁾ (1999) は、EPA の基準に従う dry tomb 型の 2 つの埋立地で、実規模の好気性埋立の実験を行っている。まず浸出水を循環し、含水率が 60% 以上となったのち垂直空気注入井戸から 1 日に埋立容積の 2 ~ 3 倍量の空気を挿入し、メタンガス量、浸出水量、浸出水 BOD の低下を報告している。

Cossu⁴²⁾ は動力を要さずに好気化をはかるわが国の準好気性埋立に注目し、MBP と準好気性を組み合わせた実験を行っている。アンモニア、無機イオンの低減のために 2.4 の洗い出しも同時に行うもので、PAF (Pretreated Aerobic Flushing) モデルと呼んでいる。

4 で述べた北米のバイオリクターは当初は嫌氣的分解、メタンガス回収の効率化を目指したものであったが、現在では水分に次いで嫌気/好気状態が重要なパラメータであるとし、EPA は好氣的、嫌氣的、ハイブリッド (好気-嫌気) の 3 種類に分類している。ハイブリッドとは好気、嫌気を切り替えるもので、Reinhart²⁹⁾ は、「短時間の好気化によって温度を上げて嫌気分解を促進する、嫌気分解後の余剰水分を除く、硝化・脱窒を促進する、などの利点がある」と述べており、2.3 の効果を取り入れたものと考えられる。SWANA は、バイオリクターを「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」と定義している²⁸⁾。

7. わが国の安定化戦略の位置付け

Stegmann⁴³⁾ は、埋立地を持続可能とするための前処理からアフターケアまでを、図2のように描いている。左が米国の Bioreactor, 中段が EU の MBP 埋立, そして右が可燃物 (あるいは混合ごみ) の焼却であり、右に行くほど廃棄物は無機の状態となり、安定化度合いが高まる。3 で述べたように、EU は長期的には焼却に移行すると予想され、北米の Bioreactor との両極化が進むかもしれない。

さて、最後にわが国の廃棄物処分方法を、以上述べた欧米の方法と比較してみる。まず2.3の好気化については準好気性埋立として、すでに標準となっている。ただし Komilis ら⁴⁾ (1999b) が解釈しているように、「底部を好気性に保つ部分的好気化」であり、2.3に示した方法とは異なっている。また欧米に較べて透水性の高い最終覆土のため、2.4の Flushing が行われている。Flushing bioreactor は人為的に浸出水あるいは水を流すものだが、日本ではそれを豊富な降雨に任せていると考えられる。ただし日本は「自然任せ」であり、微生物分解に適正な水分、洗い出し水量を制御することは考えられていない点が bioreactor の概念と異なっている。さらに、5で述べた EU の MBP は要するに破碎選別による可燃分の回収と有機物堆肥化であり、わが国の RDF 化施設にもこのような、堆肥化を並行しておこなう施設があった。製品堆肥中に異物が多いとの問題があったが、MBP は堆肥化を安定化前処理と考えていることが異なる。焼却については、わが国は1900年の汚物掃除法において「塵芥はなるべく之を焼却すべし」とされて以来、焼却をごみ処理の中心に位置付けてきた歴史がある。その結果、焼却を容易にするため、可燃物と不燃物の分別が1970年代から多くの自治体で行われてき

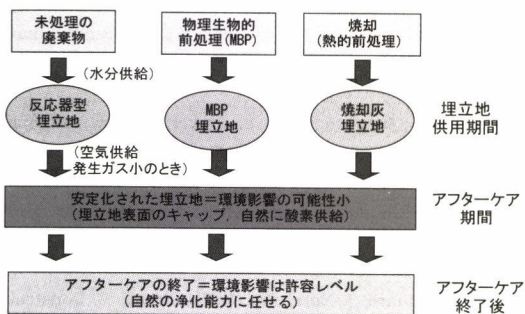


図2 欧米の埋立地安定化戦略 (文献43の図を和訳)

た。すなわち、MBPのような施設選別によらず、図2右のような効率的な熱的処理による廃棄物の無機化を行っている。

2で整理した従来からの様々な安定化促進方法、および4,5で説明した北米、EUの戦略は、主として水分、好気/嫌気雰囲気、および埋立物や有機物を制御対象としている。これらを図的に示すと、図3のようになる。図3(a)は水分と空気の制御であり、欧米では埋立地内に降雨が進入する嫌気性埋立から、浸出水によるリスク低減のため乾燥封じ込め型を標準とした。しかし北米では、水分を適正水分量に保持する Bioreactor landfill に移行している。日本の準好気性埋立は受動的な好気化であるが、より積極的な好気化も試みられており、全体としては図3(a)の左下から右上に向かっている。Flushing bioreactor は、洗い出しのため水分量をさらに多くした埋立地である。図3(b)は埋立物の前処理により分類したものである。米国は有機物の前処理なしで埋め立てるが、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。

このようにしてみると、わが国の廃棄物処理戦略は欧米が現在めざしている方向をいち早く進めていたように思える。日本ではさらに熔融スラグ化による完全無機化、埋立前処理としての焼却残渣の洗浄、屋根つき処分場における水分の完全管理などの方法もオプションとして考えられている。ただし、それらは個別の提案であり、廃棄物処理システムの中でどのような位置付けなのか、さらには全体としてどのような廃棄物処理をめざしているのかが明確とはいえない。現在、廃棄物学会埋立処分部会(代表、田中信壽)では、将来の埋立物予測、海外のトレンド、有害物質の安定化、最終安定化物理埋立、低負荷反応器型埋立地などについて、循環型社会における埋立地のあり方に関する議論を行っている。こうした総合

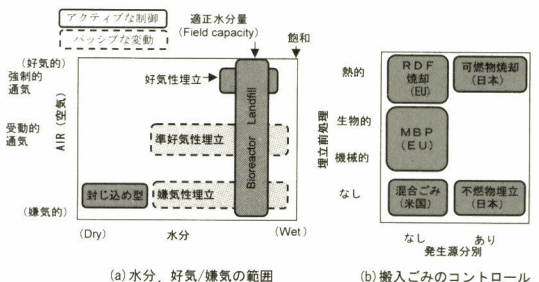


図3 埋立地安定化戦略の制御対象による分類

的な検討を通じて、図3でStegmannが描いたような持続可能な廃棄物処理のための戦略(日本版)を、しっかりとしたデータと考え方にもとづいて立てる必要がある。

参考文献

- 1) C. A. Wentz: Hazardous Waste Management, McGraw-Hill, p. 73 (1989)
- 2) 田中信壽: 循環型社会に向けた埋立処分研究の展望——今, どんな埋立技術研究が必要か——, 土木学会論文集, 720 (VII-25), pp. 1-11 (2002)
- 3) T. H. Christensen, P. Kjeldsen and R. Stegmann: Effects of Landfill Management Procedures on Landfill Stabilization and Leachate and Gas Quality (in Landfilling of Waste: Leachate), pp. 119-133 (1992)
- 4) D. P. Komilis, R. K. Ham and R. Stegmann: The effect of landfill design and operation practices on waste degradation behavior: a review, Waste Management & Research, 17, pp. 20-26 (1999)
- 5) D. R. Reinhart and T. G. Townend: Landfill Bioreactor Design and Operation, Lewis Publishers, p. 112 (1998)
- 6) A. Lagerkvist: Experiences of two step anaerobic degradation of MSW in laboratory and field experiments, Proc. of the 17th International Madison Waste Conference, (1994)
- 7) Z. Wang and C. J. Banks: Accelerated hydrolysis and acidification of municipal solid waste (MSW) in a flushing anaerobic bio-reactor using treated leachate recirculation, Waste Management & Research, 18, pp. 215-223 (2000)
- 8) E. ten Brummerler and I. W. Koster: Enhancement of Dry Anaerobic Batch Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste by an Aerobic Pretreatment Step, Biological Wastes, 31, pp. 199-210 (1990)
- 9) U. Brinkmann, K. Horing, M. Heim and H. J. Ehrig: Effect of Pre-composting on the Long Term Behavior of MSW Landfills, Sardinia 95, pp. 971-985 (1995)
- 10) H. J. Collins: Influences of Recycling Household Refuse upon Sanitary Landfills, Sardinia 91, pp. 1111-1123 (1991)
- 11) 5) と同じ, p. 139 (1998)
- 12) R. K. Ham and T. J. Bookter: Decomposition of Solid Waste In Test Lysimeters, Journal of Environmental Engineering, Vol. 108, No. EE6, pp. 1147-1170 (1982)
- 13) R. Stegmann: New Aspects of Enhancing Biological Processes in Sanitary Landfill, Waste Management & Research, 1, pp. 201-211 (1983)
- 14) T. J. Bookter and R. K. Ham: Stabilization of solid waste in landfills, Journal of Environmental Engineering, Vol. 108, No. EE6, pp. 1089-1100 (1982)
- 15) R. Stegmann and H. H. Spendlin: Enhancement of biochemical processes in sanitary landfills, International Sanitary Landfill, 2, pp. 1-16 (1987) (文献4) で引用)
- 16) P. Fletcher: Landfill gas enhancement technology—laboratory studies and field research, In Proc. Of Energy from Biomass and Wastes, XIII, IGT, pp. 1001 (1989) (文献5) で引用)
- 17) R. Stegmann and H. H. Spendlin: Enhancement of Degradation: Laboratory Scale Experiments (in Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact, Academic Press), p. 64 (1989)
- 18) S. A. Q. Burton and I. A. Watson-Craik: Ammonia and nitrogen fluxes in landfill sites: applicability to sustainable landfilling, Waste Management & Research, Vol. 16, No. 1, pp. 41-53 (1998)
- 19) A. N. Walker, R. P. Beaven and W. Powrie: Overcoming Problems in the Development of a High Rate Flushing Bioreactor Landfill, Sardinia 97, pp. I 397-408 (1997)
- 20) M. Karnik and C. Parry: Cost Implications of Operating Landfills as Flushing Bioreactors, Sardinia 97, pp. I 419-425 (1997)
- 21) B. E. Purcell, C. J. Sollars and A. P. Butler: Enhanced moisture movement in Simulated Landfill Environments, Sardinia 97, pp. I 409-418 (1997)
- 22) R. C. Vroon, H. Oonk and W. G. van Marwijk: A Lab-scale Exploration of the Long term Behaviour of MSOR in a Flushing Bioreactor, Sardinia 99, pp. I 305-312 (1999)
- 23) T. H. Christensen, R. Cossu and R. Stegman: Principles of Landfill Barrier Systems (in Landfilling of Waste: Barriers, E & FN SPON), p. 9 (1994)
- 24) A. Bagchi: Design, Construction and Monitoring of Landfills (2nd Ed.), John Wiley & Sons, pp. 116-118 (1994)
- 25) F. R. McDougall, P. R. White, M. Franke and P. Hindle: Integrated Solid Waste Management: a Life Cycle Inventory, Blackwell, p. 301 (2001)
- 26) P. R. O'Leary & P. Walsh: The problems of long-term post-closure landfill care—Is 30 years long enough?, Waste Management World, July-August 2003, pp. 87-94 (2003)
- 27) Department of Environmental Protection: Chapter 62-701 (Solid Waste Management Facilities), 620 Long-Term Care
- 28) <http://www.epa.gov/epaoswer/non-hw/muncpl/landfill/bioreactors.htm> (U.S.EPA ホームページ)
- 29) D. R. Reinhart, P. T. McCreanor and T. Townsent: The Bioreactor Landfill: Its Status and Future, Waste Management & Research, 20, pp. 172-186 (2002)
- 30) A. Simard, J. Norstorm and H. Bourque: Construction, Operation and Monitoring of a Bioreactor Landfill in Sainte-Sophie, Quebec, Canada, Sar-

- dinia (2003) (CD-ROM)
- 31) T. Scheelhaase, D. Capelletti, G. Giannini, K. U. Heyer, K. Hupe and R. Stegmann: An Integrated Waste Management Concept including Mechanical-Biological Pretreatment for the Region of Emilia-Romagna in Italy, Sardinia 2001, pp. V 139 - 146 (2001)
 - 32) R. Cossu, R. Raga and E. Rocchetto: Co-Disposal In Landfill Of Mechanical Biological And Thermal Pretreated Waste: Lab Scale Tests, Sardinia (2003) (CD-ROM)
 - 33) R. Cossu, R. Raga and V. Vascellari: Comparison of Different Stability Criteria For MBP Waste in View of Landfilling, Sardinia 99, pp. I 473 - 478 (1999)
 - 34) E. Binner, A. Zac and P. Lechner: Test Methods Describing the Biological Reactivity of Pretreated Residual Wastes, Sardinia 99, pp. I 465 - 472 (1999)
 - 35) P. H. Brunner 談話: 東條安匡氏によるヒアリング
 - 36) K. Soyez and S. Plickert: Material Flux Management of Waste By Mechanical-Biological Pretreatment, Sardinia (2003) (CD-ROM)
 - 37) K. U. Heyer, K. Hupe, J. Heerenklage, M. Ritzkowski, F. Dalheimer and R. Stegmann: Aeration of Old Landfills as an Innovative Method of Process Enhancement and Remediation, Sardinia 99, pp. IV 563 - 571 (1999)
 - 38) M. Ritzkowski, K.-U. Heyer and R. Stegmann: In Situ Aeration of Old Landfills: Carbon Balances, Temperatures and Settlements, Sardinia (2003) (CD-ROM)
 - 39) R. Cossu, R. Raga and D. Rossetti: Full Scale Application of in Situ Aerobic Stabilization of Old Landfills, Sardinia (2003) (CD-ROM)
 - 40) M. Hudgins: Cost-Benefit Analysis of Aerobic Landfills and Their Potential Impact on MSW Sustainability, Intercontinental Landfill Research Symposium (ICLRS 2002), Asheville (2002)
 - 41) M. Hudgins and S. Harper: Operational Characteristics of Two Aerobic Landfill Systems, Sardinia 99, pp. I 327 - 334 (1999)
 - 42) R. Cossu, R. Raga and D. Rossetti: Experimental Reduction of Landfill Emissions Based on Different Concepts. The PAF Model, Sardinia 2001, pp. I 219 - 230 (2001)
 - 43) R. Stegmann, K.-U. Heyer and K. Hupe: Discussion of Criteria for the Completion of Landfill Aftercare, Sardinia (2003) (CD-ROM)

Sustainable Landfill Strategies

— Literature Review of Approaches to
Landfill Research in the West and Japan —

Toshihiko Matsuto* and Nobutoshi Tanaka*

Laboratory of Solid Waste Disposal Engineering, Hokkaido University

* Correspondence should be addressed to Toshihiko Matsuto:
(Kita 13 Nishi 8, Kita-ku, Sapporo, 060 - 8628 Japan)

Abstract

Landfill research on the promotion of stabilization in EU and North America were reviewed. The approaches employed before the mid-90's were categorized into: encouraging anaerobic decomposition, reduction of organics in waste being landfilled, partial aeration of waste, and flushing of organics. By increasing concern regarding the disadvantages of containment landfill or dry tomb, EU and North America have pursued different approaches: landfill bioreactor and reduction of organics by pre-treatment. However, both sides recently began to employ aerobic stabilization, which has been the standard in Japan for the past 30 years. Other approaches taken in western countries have also been incorporated in the general operation of landfills in Japan. This concludes that Japan has been a leading runner of sustainable strategies for landfill stabilization.

Key words: MSW landfill, promotion of landfill stabilization, aerobic landfill, pre-treatment of waste, sustainable landfill