

[ 四万十・流域圏学会誌 第7巻 第1号 23-28 2007 ]

<解説論文>

# 「エコロジカル・サニテーション」と「バイオトイレ」 ～大規模・集中から小規模・分散システムへの政策転換の意義～

村 上 雅 博 (高知工科大学)

## &lt;解説論文&gt;

## 「エコロジカル・サニテーション」と「バイオトイレ」

～大規模・集中から小規模・分散システムへの政策転換の意義～

村上 雅博\*

## 1. はじめに

世界の総人口 60 億人 (2000 年) のうち 10 億人の人々が安全な飲み水を得ることができず、24 億人が適切なトイレなどの衛生施設をもたない。世界で発生する排水の 90% は不完全な処理または全く処理されないで排出されている。世界中に下水道を整備することは、全世界の経済レベルをはるかに超えていることが認識されており (Wildere 2001)、汚水を集中的に集めて処理をする従来型コンセプトの下水道では今後の問題解決策にはならないとの議論が展開されている。特に下水道建設費の約 3/4 は下水管路の整備に必要とされていることに注目すると、ドイツの例では今後の下水管路の更新と維持管理費に約 1,000 億ユーロ (=14 兆円) 必要となることが試算されている。

日本でも大都市圏では旧来の合流式下水道システムを基盤として整備事業が展開されてきた経緯から、分流システムの転換が困難な部分では合流改善を含めた高度な環境整備を行いつつ巨大な管路システムの更新に取り組む時期を迎える。都市型下水道整備が必要な地方の市町村レベルでは巨額の基盤整備資金投資が財政難の主要因となっており、さらに施設の維持管理や更新のために町が潰れるとの危機感まで出ている。

高知県香美市土佐山田町の例では、水道水源は伏流水 (地下水) 依存しているため安全な飲料水を 90 円/m<sup>3</sup> という比較的低い水道料金で設定して収支がとれるが、15 年前に完成した下水道は事業収支をとるために水道料金の 2 倍に当たる 180 円/m<sup>3</sup> を町民から徴収している。利用者の立場に立てば、下水道が飲み水の 2 倍ものコストがかかっているという現実に注意と関心が必要である。さらに問題なのは、個人や集合住宅の敷地内部の污水配管や水洗トイレ設置費用は民地内にあるため個人負担となり一軒当たり約 70 万円程度の支払いが必要となるため、下水道システムが完備されている町であるにもかかわらず一部の地域では水洗化が進まず、旧来型の“し尿”は汲み取り方式、“家庭雑排水”は用水路や河川に垂れ流しという状態が続いており、物部川の水質汚染の元凶と言われ続けている。

家庭で使用される水の 25% 程度が水洗トイレの洗浄水である。これは 1 飲料に適するレベルの淡水資源の浪費を意味している。またトイレで使用された洗浄水は標準型 (活性汚泥方式) 下水処理場で処理されるが、有機物 (BOD) は 90 程度除去できるものの窒素・リン (N, P) は殆ど除去されないため、処理水中の栄養塩 (N, P) が湖沼や海域に放流され、富栄養化を起こす主要因となっている。さらに水洗トイレ化によ

って、江戸時代に都市で発生した尿や糞便をし尿に替えて化学肥料を利用したことで、都市・農村結合型の循環型社会のケーテクノロジーを切り離し、農地環境は化学的な汚染が進み自然養分不足となる傾向が顕著である。我々は、日本の伝統的な衛生管理システムの原点を最評価し尿=排泄物という考え方から、し尿=資源の考え方に戻り、資源循環型社会の再生を目指す必要があると考えている。

衛生対策とは、社会の平等性や社会の持続性を可能にする決定因子である。衛生対策への新しい挑戦がなされなければ、私たちは次世代へ問題を残さずに現世代の要求を満たすことができないであろう。それゆえに衛生対策というものは廃棄物を取り扱う考えではなく、資源を取り扱う考えなのである。最近に注目を集めている新しい環境技術戦略の一つであるエコロジカルサニテーションは、従来の排泄物を“処分”するという考え方から、廃棄物を“出さず”・“再利用”“する”という考え方にコンセプトを変えていくことにある。“集めない”・“混ぜない”<集中⇒分散>という基本的なコンセプトを共有し、エコロジカルに浄化した未利用資源 (人間のし尿: N, P) を農地や森林に戻すことで土壌の改良や植物の栄養素の補給に再利用し、環境を汚染することなく自然の循環系を持続的に繰り返す。水洗トイレの水の節約と水質汚染を同時に著しく軽減し、エコロジカルな適正技術であるがゆえに水資源の保全のみならず地球温暖化対策の一助にもなると期待されている。もともとは、ベトナムの地方農村の伝統的なトイレにエコロジカルサニテーションの原理と適用のヒントを得たスウェーデンの環境エンジニアが、自国でシステム化し周辺のドイツでも開発が進み、さらに水不足に苦しむアフリカ諸国のトイレ普及のための国際技術協力の戦略的なオプションとしても世界の注目を集めている (Steven, 2001)。

集中から分散への政策コンセプトに移行するために適合する地域はどこかという、都市部ですでに下水道が完璧に整備されているところではなく、下水道整備が未だに行き届いていない地方で、小規模の住宅郡と農地や隣地が共存する地域にある。とくに高知県の中山間地域のように気候が温暖で農地 (畑) と森林が近接するロケーションと自然環境はエコロジカルサニテーションの導入にインセンティブを与えているため、高知県西部地域の中山間地域をモデルに検討を進めている。エコロジカルサニテーションの原型は糞と尿の分離にあるが、資源循環に展開する段階で、糞は自然 (発酵) 乾燥により量・容積ともに大幅に減少するものの大量に発生する尿は未処理のまま密閉して貯蔵し運搬する過程におい

\* 高知工科大学 フロンティア工学コース 〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮の口 185

て問題が生じている。本研究の概念モデルで提案している四十万循環コンセプトは、家庭排水から生活雑排水 (Grey water) とし尿 (Black water) を分離するが、尿と糞便をわけずにし尿としてオガクズ (間伐材の切りカス) と混合して加熱する好気式のコンポストトイレと雑排水 (Grey water) を自然循環式 (四十万川方式) 浄化システムおよび土壌処理を軸としたサステイナブル・サニテーション・システムの適用が地方村落地域の衛生環境管理の新しい政策的なオプションになることを期待している。

## 2. 下水道システムの現状と最先端の課題

下水道システムは基本的に雨水と汚水を混ぜるタイプの“合流式”と分離するタイプの“分流式”からなり、都市下水道整備では過去は合流式、今日は分流式が主流である。分流式タイプの下水道整備は生活排水 (雑排水 (Grey water)、し尿 (Black water)) を集めて集中的に標準活性汚泥法による二次処理を行い、処理水を水系に放流している。都市域では下水道整備 (国土交通省所管) が基本であるが、地方の人口非密集地域では下水道の配管コストが著しく高くなるため、水洗トイレ化を進めるために日本独自の技術で開発された合併浄化槽 (厚生省所管) の普及が進んでいる。下水道システムか合併浄化槽システムにするかは、汚水を集めて流す配管 (ポンプアップを含む) 費用の占める割合によってほぼ決まる。

浄化槽には汚水のうち、1) し尿 (Black water)、2) 生活雑排水 (Grey water)、3) し尿 (Black water) + 生活雑排水 (Grey water) の3者を対象として、それぞれの目的に合わせた規模で処理をしている。このうち今日では最も普及が進んでいる、し尿と生活雑排水を合わせて処理する合併浄化槽には一軒の家庭レベルの個別浄化槽から数百~千人規模を処理対象とした中型浄化槽まである。合併浄化槽の欠点は、処理 (滞留) 時間が標準活性汚泥法の8時間に対して24時間と3倍ほど長く、処理施設の設置面積がより必要なため、コスト的な問題で人口が密集して高度な土地利用がなされる都市部に適応されることは殆どない。

最近では生ゴミのデイスポージャー処理が進んできているため、汚濁負荷増大に対応した浄化槽の開発も進められている。さらに最先端の研究では、全ての生ゴミ (デイスポージャー) と生活排水 (雑排水+し尿) をUASB方式等で一括して嫌気処理してメタンガスを発生させた後に処理水中に含まれる未利用微量有用成分を抽出するシステムも検討されている。さらに生活生ゴミをし尿と一括して処理をするコンポスト型バイオトイレの開発も進んでいる。下水処理技術の最先端では、衛生対策というものは廃棄物を取り扱う考えではなく、資源を取り扱う考えに転換してきている。従来の排泄物を処分するという考え方から、廃棄物を出さず再利用するという考え方に変えていくことから大切な水資源を保全する循環型のコンセプトにチャレンジするために開発された手法がエコロジカルサニテーションであり、生活雑排水とし尿を分離して、1) 糞便と尿を分離して処理する、2) 糞便と尿を合わせて処理する、の2系統のアプローチがある。共に水洗便所とは異なり、基本的に水で洗い流すことはしないが、衛生状況を確保するために霧吹きで便器を洗うため、水

の使用量は水洗便所の8-10リットル/回に比べて、1/100以下とごく微小である。この方式は生物分解型 (エコロジカル・サニテーション) バイオトイレとも呼ばれ、今回に適用するエコロジカル・サニテーションの概念 (水を使わず人間の排泄物を安全なものとし、農業に利用する) に最も近いものである。原理としては、水を一切 (殆ど) 使わず、おが屑と排泄物中に含まれる腸内細菌の働きによってし尿を分解するというものである。使用済みおが屑は窒素、カリウム、リンなどの無機物を含んでおり、肥料として循環再利用できるエコロジカルなシステムである。

## 3. エコロジカル・サニテーションシステムとバイオトイレ

生活排水処理の要点は、家庭雑排水とし尿をいかに処理するかにあるが、し尿の処理はトイレのシステムを工夫することから、水を使わないで処理可能な処システムが検討されている。上に述べたような水洗トイレの問題点から、新しいタイプのトイレが開発されている。それらのトイレは大きく洗浄水循環型、焼却・乾燥型、生物分解型 (バイオトイレ) に分けられる。

(1) 洗浄水循環型: 一度洗浄に使用した排水を浄化し、再び洗浄水として利用するというものである。したがってし尿の洗浄、運搬に使用される水は繰り返し使われるので、ほとんど排水されない。このことは水を浪費しないという点では評価できる。しかし、し尿に含まれる栄養素は土壌に還元されないという問題が残る。

(2) 焼却・乾燥型: ドライトイレとも言われるが、排泄物の水分を蒸発させて (焼却して)、灰にしてしまうというものである。洗浄水として多少の水も使用できる。排泄物が少量の灰になり、扱いが容易になる反面、エネルギーが大きく、コストもかかる。

(3) 生物分解型: バイオトイレとも呼ばれ、エコロジカル・サニテーションの概念 (水を使わず人間の排泄物を安全なものとし、農業に利用する) に最も近いものである。原理としては、水を一切使わず、おが屑と排泄物中に含まれる腸内細菌の働きによってし尿を分解するというものである。使用済みおが屑は窒素、カリウム、リンなどの無機物を含んでおり、肥料として利用できる。バイオトイレは便器の下が昔のくみ取り式の便槽になっている。使用後にスイッチを押して便槽のおが屑の中のスクリュウを回転させる。細菌の働きを活発にするため、おが屑を下からヒーターで暖め、更にスクリュウでかき混ぜることで酸素を供給する。糞尿は約4~8時間で分解処理される。おが屑の交換は便槽の容量や家族数で異なるが、年に1~2回の交換で済む。

人間の排泄物は、微生物やその卵、その他様々な生物を含んでいる。生物の中には病気を引き起こすものもいて病原体と呼ばれている。また、人間に寄生しているものもいる (寄生虫)。これらの生物のほとんどが糞便中に発見されているが、尿は一般に無菌である。新鮮な人間の糞便中にはバクテ

リア・ウイルス・原生動物・蠕虫（腸内寄生虫）といった四つの主な生物のグループがある。これらの生物は排出されたあと、すぐ感染するもの・感染までにある期間を要するもの・感染するまでに媒介としての宿主を必要としたりするものに分けられる。汚染された環境は人間を感染症や病気を引き起こす病原体という危険にさらす。

②上述した環境条件の一つ一つは、病原体が生存するのに適したいくらかの幅を持つ。自然変化や人為的によって条件が変化すれば、病原体の死滅速度も変化する。例えば、温度が上昇すれば病原体の死滅速度も増加する。土壤中では糞便性大腸菌が99%死滅するのに、夏場は約2週間、冬場は約3週間かかる。温度が60℃以上になると、糞便中のほとんどの病原体はすぐに死滅する（表-1参照）。

温度が50℃から60℃の範囲においては、バクテリアは成長することができず数分で死滅する。ほとんどの病原体は30分以内で死滅す原生動物から排出されたクリプトスポリジウムの接合子は、非常に強い抵抗性を示す。それらは回虫以上に環境のストレス（寒さ・高温・塩素やオゾンを用いた水処理）に耐えると考えられている。しかし、脱水化であればクリプトスポリジウムを死滅させることができる。実験によると2時間乾燥させたら97%のクリプトスポリジウムの結合子が死滅し、4時間ですべてが死滅した（松井 2003）。

#### 4. エコロジカルサニテーションと物質循環

日本における一人当たり生活雑排水のBOD負荷量は27g/day、し尿排水のBOD負荷量は13g/day（財）日本環境整備教育センター、2001）である。家庭排水の発生源別汚濁物質負荷を整理すると、し尿の負荷は有機物(BOD)で44%、アンモニア態窒素で約97%、リンで80%を占める。し尿(Black Water)を分離・処理すれば栄養塩の循環再利用が可能となる。すなわち、排水を発生源で分離し、処理する、「集めない」システムの導入が望まれる。

人間の排泄物中の植物栄養素のほとんどは尿中に発見されている。成人一人当たり年間約400Lの尿を排出し、それには4.0kgの窒素、0.4kgのリン、0.9kgのカリウムが含まれている。面白いことにこれらの栄養素は植物に吸収されやすい理想的な状態で存在する（窒素は尿素の形で、リンは過リン酸塩の形で、カリウムはイオンの形で）。尿中の栄養素のバランスは化学肥料のそれと比べて十分に適している。1年間各々の人間によって排出される400~500Lの尿は、1年間一人を充分養える250kgの穀物を育成するのに十分な植物性養分を含んでいる。スウェーデンで1993年に排出された人間の尿中の窒素・リン・カリウムといった栄養素は、肥料総使用量の15~20%に匹敵する。化学肥料と比べて重金属の混入が極めて少ないというのも尿を利用した肥料の利点の一つである。密閉型のコンテナで保存すれば、アンモニアの減少は最小限に抑えられる。

人間の糞便は主に消化されずに残った有機物、例えば食物繊維などを含む。一人1年当たりの糞便の量は25~50kgで、0.55kgの窒素、0.18kgのリン、0.37kgのカリウムを含む。栄養素の含有量は尿より少ないが、それらは非常によい土壌改良剤である。脱水化や分解により病原体が死滅されてきた無害の有機物は、土壌の有機物量・保水能力・栄養濃

度などを高めるために利用される。分解の過程によってできた腐植土は、植物を土壌の病原体から守る有用な土壌生物の健全な数を維持するのも助ける。

#### 5. 栄養塩の管理と再利用

家庭で使用される水の25%程度が水洗トイレの洗浄水である。これは水資源の浪費を意味している。またトイレで使用された洗浄水は下水処理場で活性汚泥法により二次処理されるが、有機物(BOD)の90%は削減されるものの栄養塩の代表である窒素、リンが殆ど除去できないために湖沼や海域に放流され、富栄養化を起こす原因になっている。富栄養化現象は水中のリン濃度に最も強い支配を受けているため、河川(流域)で100%近く下水道整備が行われたのにもかかわらず、下流域の湖や沿岸海域では水質汚染問題(富栄養化)が未だに解決されていないという現実がある。さらに下水道の普及(水洗トイレ化)によってし尿を肥料としないことから起こった問題もある。これはし尿に替えて化学肥料を利用したことで、農地が養分不足となったことである。最近の有機農業へのチャレンジは食の安全性と土壌・生物資源環境の保全という地球環境的な視点から、日本のみならず、世界共通の問題意識になっている。特にリンは植物生産上の必須元素であるが、我が国は、リン需要のほぼ100%を輸入に頼っている。輸入されたリンの多くは、肥料として利用されており、農産物を通して人間に吸収されている。一方、人間は、リンを3~4g/日・人程度(P205換算)排泄しているため、し尿には多量のリンが排出されている。リンは限りある貴重な天然資源であるが、21世紀末までにはリン鉱石資源の枯渇が確実視されているため、エコロジカルサニテーション技術を適用した未利用生物資源(し尿)の物資循環利用の可能性に注目が集まっている。肥料の国内市場規模については、国内の化学肥料の販売額は、平成11年度で国内約1,570億円程度である。この内、熔成リン肥の市場は50億円/年程度である。

肥料要素である栄養塩(N,P)のうち、リン鉱石資源の枯渇が目に見えてきたことから、新しい未利用資源の一つであるし尿に多量に含まれるリンの回収が求められている。し尿から衛生的に肥料要素(N,P)を回収し、農業に循環再利用するシステムが構築されれば、結果として湖沼や沿岸海域の富栄養化の防止や軽減につながる。

下水処理分野では「リンが汚泥中に濃縮する下水道の特性を活かし、そのリンを活用する資源化技術」は、汚泥の最終処分という廃棄物問題だけでなく、天然資源枯渇問題にも貢献でき、供給側と利用側の思惑が一致した「付加価値の高い資源化製品」として流通させることが可能になると考えられているため、別途に開発研究が進められている問題は一般の都市下水には重金属や微量汚染物質(ホルモンや医薬品残渣)が含まれる可能性があるため循環再利用には注意が必要である。一方、本研究は住宅地系であるために生活排水のみを対象にできるため、排水の質が比較的在一定で安定しているため処理・再利用に適している。

#### 6. 中山間地域の仮想宅地開発計画におけるエコロジカルサニテーションの予備的検討

エコロジカルサニテーションの適用の具体的なケースとして、高知県中山間地域の仮想宅地開発計画について以下に検討する。このニュータウンは総人口1,333人と設定し、人口構成は1)一戸建て住宅(660人)、集合住宅(140名)、老人ホーム(50名)、寄宿舎・小学校(430名)である。地形的には丘陵地のゴルフ場を想定し、周辺は森林と農地(畑)に囲まれている。集合住宅、老人ホーム、寄宿舎・小学校は地形の低い場所にまとめて配置される土地利用計画である。よって配管費用の制約が低いために通常の合併浄化槽の適応が可能で、全ての生ゴミ(デシスポーザー)と生活排水(雑排水+し尿)をUASB方式等で一括して嫌気処理してメタンガスを発生させた後に処理水中に含まれる未利用微量有用成分を抽出するシステムの検討も可能である。計画対象地域内に分散して配置されている一戸建て住宅(660人)は雨水排水も下水排水も地形と地理的な条件から配管費がかなりコスト高になることから、分散型のオンサイト処理が有利であるとい一般に考えられる。計画総人口の50%を占める一戸建て住宅(660人)に、生活排水のうち、一般雑排水(Grey water)は単独浄化槽(自然循環型・四万十方式)、糞便と尿をあわせておがくずを循環利用して自然(微生物)熱処理するタイプのエコロジカルサニテーション(バイオトイレ)、を適用する。バイオトイレで処理する糞便はから生成される最終生成物(コンポスト)が植物(農作物b)の肥料としてのポテンシャルを計算した。原単位は計画水量:3001/日/人、計画生活排水量:240 1/日/人、尿量:400 1/年/人、糞便量:36.5kg/年/人と仮定した場合、最終プロダクトとして生成されるコンポストの栄養塩(窒素:N、リン:P、カリ:K)は、尿系からN=2,460kg/年、P=264kg/年、K=594kg/年、糞便系からN=363kg/年、P=119kg/年、K=244kg/年 生産できるポテンシャルがある。し尿系の合計ではN=2,823kg/年、P=383kg/年、K=838kg/年である。一方、殆どが尿系に含まれる塩分は原単位を9g/日/人と仮定すると年間で2,168kg生産される。よって尿系は極めて効率の良い窒素肥料の代替となるが塩分を含んでいるため、土壌が降雨でリーチングされる野外の露地栽培に適していると考えられる。エコロジカルサニテーションが最初に検討されたスウェーデンの試算によれば、1993年に排出された人間の尿中の窒素・リン・カリウムといった栄養素は、肥料総使用量の15~20%に匹敵するとの例もあるため、より気候(雨量と日射量)に恵まれる高知県での適用性に期待がもてる。

## 7. エコロジカルサニテーション(バイオトイレ)を成功させるための条件

エコロジカルサニテーション(バイオトイレ)を計画する際に、以下の4点の留意事項と問題点と課題に注意が必要である。

(1) キャパシティービルディング(利用者の認識、管理不足)の問題

最初に、世界で大規模にエコロジカルサニテーション(バイオトイレ)を導入して失敗したプロジェクトのレビューを紹介する。具体的には、使用者の認識、管理不足の問題使用

者に適切な使用方法を教育することなしに実施して失敗した例がある。1992年から1994年にかけてIDB(米州開発銀行)の社会投資基金財政でエルサルバドル政府がエコロジカルサニテーション(バイオトイレ)を50,263台導入した。導入の際の地域住民の参加はなく、地域住民に対する訓練もほとんどなかったということである。1994年エコロジカルサニテーション(バイオトイレ)の使用状況に関して6380家庭に対してサンプリング調査が行われたが、39%が適切に使用され、25%が不適切に使用され、36%が全く使用されていなかったという結果が出た。その後この結果を踏まえて、家庭訪問による家族全員に対する教育、女性の参加、教育資料、使用者に分かりやすいモニタリングと評価といった衛生教育戦略ができた。最初の教育後に再度調査が行われ、そこでは適切に使用されている比率が72%、不適切に使用されていたのが18%、使用されなかったのが10%という結果であった。このことから、エコロジカルサニテーション(バイオトイレ)を成功させるためには、トイレを設置する際に住民を参加させ、衛生教育を行うことがいかに大切であるかが分かる。使用者を参加させることで、自ら問題や必要性を完全に把握し、解決策の工夫、発見、健康と環境への影響を把握させるのである。

### (2) コストとメンテナンスの問題

エコロジカルサニテーション(バイオトイレ)は現時点で、一般家庭用(一日16回使用)で68万円(本体価格)のコストがかかる。当然のことながら適切な維持管理が必要で合併浄化槽並みの費用もかかる。現段階ではバイオトイレと浄化槽と水洗便所導入のいずれもが70万円程度の費用がかかる。水洗便所導入の場合は、水使用量の25%を占める水道代金に加えてより高い下水処理代金までも支払う必要がある。エコロジカルサニテーション(バイオトイレ)の場合は、毎回の噴霧器洗浄など使用者が自分自身で手動でやらなければならない部分と、専門的なスタッフが定期的に施設のメンテナンスをおこなう部分に配慮しなければならない。どのタイプのトイレにおいても定期的な衛生検査と最終的にできた生成物(コンポスト)の除去が必要となる。基本的な操作やメンテナンスのマニュアルが整備され、自治体やNPO方式の衛生環境管理に民間委託専門スタッフが参画してシステムティックに維持管理が実施されるならば、利用者の負担が最小限に押さえられ可能性がある。

### (3) 地域への適応性

エコロジカルサニテーション(バイオトイレ)には様々なタイプがあるが、どれだけ地域の個別の環境・社会条件に適応するかが成功の鍵である。適切なエコロジカルサニテーション(バイオトイレ)を選択するために考えられる地域的な環境・社会条件の留意点は以下の9点である。

- 1) 気候(温度、湿度、降水量)
- 2) 地形、土壌の特徴(水や汚染物質の土壌浸透状況)
- 3) エネルギー(太陽熱などの地域特有エネルギーが利用できるかどうか)
- 4) 社会性や文化性(習慣、信仰、価値観)
- 5) 経済(エコロジカルサニテーション(バイオトイレ)を支援するための個人、地域社会の経済的資源)

