



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	安全安心な廃棄物処理を目指して：田中信壽先生が残した足跡
Author(s)	松藤, 敏彦; 角田, 芳忠; 東條, 安匡 他
Description	第13回衛生工学シンポジウム（平成17年11月17日（木）-18日（金）北海道大学クラーク会館）．安全安心な廃棄物処理を目指して - 田中信壽先生が残した足跡-（企画セッション1）
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 13, 1-17
Issue Date	2005-11-16
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/1321">https://hdl.handle.net/2115/1321</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	k1_p1-17.pdf



## 企画セッション 1

# 「安全安心な廃棄物処理を目指して―田中信壽先生が残した足跡―」

北海道大学大学院 松藤敏彦, 角田芳忠, 東條安匡  
宮崎大学 土手 裕  
室蘭工業大学 吉田英樹  
明星大学 宮脇健太郎  
秋田高専 肴倉宏史

## 1. はじめに

本企画セッションでは、最終講義をすることなく本年 3 月に他界された故田中信壽先生の研究の足跡を、かつて田中先生と共に「安全安心な廃棄物処理」の実現を目指して研究活動を行った門下生からの報告によって振り返り、田中先生の遺志として我々が取り組まねばならない研究課題を再確認する。

田中先生が対象とされた研究の範囲は広く、廃棄物処理・管理のすべての領域に渡る。しかし、特に、長年、廃棄物埋立地を対象とした研究を活動の中心として行っており、埋立地に関する研究では、我が国の第一人者であったといえる。そこで、本稿では、まず、廃棄物埋立地に関する研究について田中先生の研究成果を概観する。次いで、埋立地以外に展開した代表的研究を整理し、最後に、田中先生が晩年様々な場で説かれていた「持続可能な埋立処分のあり方」に関する考え方を掲載する。

## 2. 埋立地を対象に展開した研究

### 2.1 嫌気性埋立から準好気性埋立までの実験と理論解析

#### 1) 嫌気性埋立における有機物分解挙動の解明

【研究の期間： 1980～1988】

##### (1) 目的

廃棄物埋立地から発生する浸出水やガスの質や量に影響を与える因子には、廃棄物の性状や埋立層内の有機物分解過程など多くの要素が複雑に関わっている。しかし、1980 年代当時、それらの相互の関係や影響は詳細に把握されていなかった。浸出水量削減や水質の改善に与える埋立法の影響を検討するためにいくつかのライシメーター実験は行われていたが、温度制御、酸素侵入などの点で実埋立地とは乖離が大きいことが指摘されており、また、内部で生じている現象に関しても詳細な検討がなされていなかった。そのような背景から、小規模であっても層内条件を明確にコントロールした実験が、層内現象の解明にはより普遍的な情報を得られるという着眼点から、嫌気性埋立を対象として、詳細に廃棄物の分解過程を解明する研究に田中先生は北大赴任直後から着手した。

##### (2) 結果

断面積 25cm<sup>2</sup>、充填深さ 30cm という小型カラムを 4 基作成し、焼却残渣、不燃ごみ、混合ごみ、人工ごみを実験試料として約 400 日間の嫌気性埋立模擬実験が実施された。特に嫌気性条件を再現するために厳密な密閉構造とし、温度は 20 度に制御された条件を維持した。分析項目は、浸出

水としてpH, EC, COD, BOD, TOC, ケルダール窒素,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , IC,  $\text{Cl}^-$ , 要素消費量,  $\text{Fe}^{2+}$ , TS, IL, 各種有機酸, および 11 種の金属, またガスとしてはガス量, ガス組成 ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) と多岐に渡った. 400 日間の実験結果を基に, 動力学的な解析を行い, 各廃棄物の反応速度 (揮発性有機酸の生成反応速度, 金属類の可溶化速度など) を求めた. 結論的に, ①有機酸の生成速度は実験初期に可溶性有機物の酸発酵により大きい, その後もさらに長く生成が固形有機物の加水分解と酸生成によって継続する. メタン発酵が活発になると有機酸が急激に減少する. ②初期の酸生成反応では急激なガス発生を伴うが, その後の有機酸生成反応でのガス発生速度は小さい. ③アンモニア生成は, 初期に認められた後, メタン発酵の開始と共に急激に減少する. ④Fe, Mnなどの金属類は実験初期の嫌気化の過程で急激な溶出があり, その後は洗い出しにより浸出する. 等の知見を得ている. こうした知見は, 廃棄物層の嫌気性反応過程として言及されていたものであるが, それを複数の廃棄物を対象に実験的に再現すると共に, 廃棄物毎の反応過程の相違, その相違に影響を与えている因子を明確化すると共に, 現象の動的な解明の礎となる知見をもたらしたと言える.

## 2)強制通気による好気性分解反応に関する研究

【研究の期間： 1980～1984】

### (1)目的

この頃, 花嶋らが準好気性埋立地を提唱し, 好気性分解反応を利用した埋立地内部での浄化による早期安定化を目指すようになり, 埋立地内の好気性分解反応に関する研究が脚光を浴びていたものと考えられる. 田中先生は, 厨芥や紙を主体とした人工ごみを用いて, 強制通気による好気性分解反応に関するカラム実験を行った. そこで, バッチ試験による好気性反応熱と反応速度の推定, あるいはカラム実験について熱収支方程式 (集中化による常微分方程式) によるシミュレーションを用いた熱発生速度の推定などを行った.

### (2)結果

まず, 人工ごみについての好気性反応による発熱量として,  $90\text{kcal/mol-O}_2$  を求めた. また, カラム実験においては, 好気性反応に最適なごみ充填密度, プラスチックの混入によって好気性条件が妨げられること, 初期水分として 70% 以下が望ましいこと, などを明らかにしている. そして, このような実験結果を実際の埋立地に適応する上での問題点を指摘している. 筆者の個人的な意見として, 熱移動に関しては特に実験室レベルと実埋立地でのスケールの差異による影響が問題となり, これは現時点でも大きな課題と考えられている.

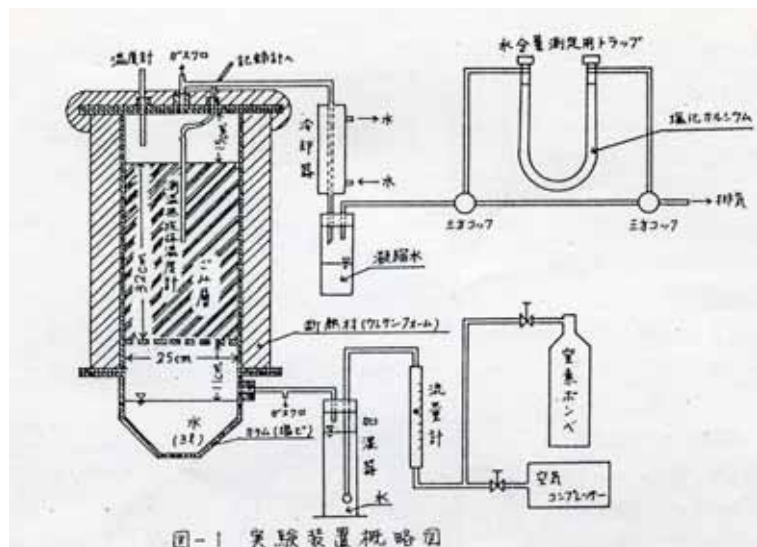


図1 強制通気による好気性反应用実験カラム

### 3)自然通気による好気性分解反応に関する研究

【研究期間：1985～1986】

#### (1)目的

埋立地における好気性分解反応を考えた場合、埋立地表層から空気中の酸素が侵入する過程は重要なものの1つである(もう1つはガス抜き管及び集水管からの酸素侵入)。熱移動と直接関連しないが、処分場内部の熱移動と関連が深いので、ここで記述することにする。この頃、田中先生は大規模なカラム実験を行う試みを行っている。そして、埋立地表面からの酸素の侵入深さを埋立地内部での酸素消費速度(つまり好気性分解反応速度)を考慮した拡散方程式を用いて、詳細な理論的考察を行っている。ただし、この時点ではガス移動と熱移動を連立させた理論についてはまだ行われていない。

#### (2)結果

最も重要な結論は、「埋立地内部の酸素消費速度が大きいと、酸素は深くまで侵入できない」ことを理論的に解明したことであった。つまり、有機物が多量に含まれる埋立ごみは内部まで酸素が十分侵入しないために全体としての好気性反応は小さくなる、逆に有機物が少量であれば酸素が十分に侵入するため全体としての好気性反応は大きくなる、という可能性があることになる。これは有機物量が少ない不燃ごみ埋立地でも内部温度が顕著に上昇する理由となっていると考えられる。

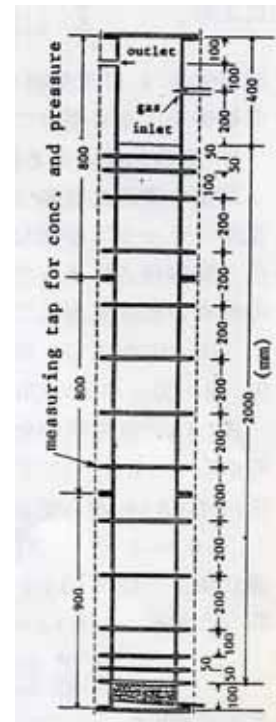


図 2 自然通気による好気性反应用実験カラム

## 2.2 埋立層内での重金属類の挙動

【研究の期間：1984～1988】

#### 1)目的

埋立地には、焼却灰等に含まれた形で多量の重金属が投入されているが、浸出水中には低濃度でしか含まれていない。このことは、重金属が埋立地に蓄積されていることを意味し、将来に埋立地の環境が変化した場合に、高濃度で出てくる可能性がある。そこで、本研究ではカドミウムを対象として、カドミウムが埋立地に保持されている機構を明らかにし、どの条件がどのように変化した場合に重金属がいつ溶出してくるかを検討し、重金属の溶出を防ぐ埋立地の管理を提案した。

#### 2)結果

##### (1)水中における化学平衡システム

カドミウムと共存し、カドミウム濃度に影響を与える物質として、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{OH}^-$ 、 $\text{S}^{2-}$ であることを明らかにし、各平衡定数を決定した。その際にイオン強度の影響も考慮した。このうち、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{OH}^-$ 系については、ビーカー試験によって実験的に平衡定数を決定した。

準好気、嫌気、海面埋立を想定して、混合ごみあるいは焼却灰を充填したカラム実験を行い、硫化物の生成が始まるまでは $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{OH}^-$ の反応システムでカドミウムの濃度が決まるが、硫化物の供給に伴い、硫化カドミウムの生成により、溶存濃度が非常に小さくなることを確認し

た。その際、供給される硫黄のうちカドミウムと結合する硫黄の割合を導入することが有効であることが分かった。

上記の充填物を用いてカドミウムの吸着実験を行い、分配係数を決定した。

## (2) ボックスモデルによるシミュレーション

上記で得られたパラメータを用いて、埋立ごみとして、混合ごみと焼却残渣、埋立雰囲気として嫌気と準好気を組み合わせた埋立層を想定して、それぞれについて、pH、塩化物イオン濃度、酸素浸入時期、タンパク質分解時期、硫酸還元時期、ガス発生期についてのシナリオを作成して、ボックスモデルにより、溶出カドミウム濃度のシミュレーションを約55年の期間で行った。図3に一例を示す。その結果、硫酸還元期に硫黄がカドミウムに対して十分に供給された場合は、カドミウム濃度は非常に低くなり、埋立層が好気になり酸素の浸入があっても、硫化カドミウムの酸化分解は非常に遅く、55年経過しても溶出するカドミウム濃度は $10^{-4}\text{mg/L}$ 程度であった。

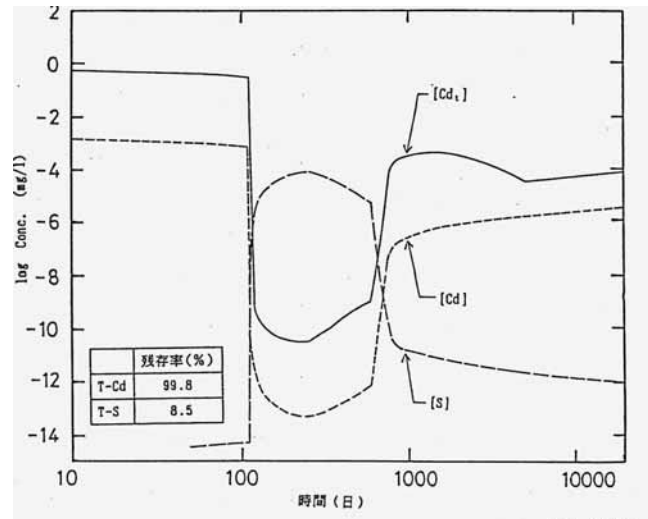


図3 焼却灰・嫌気領域での溶出Cd濃度の経年変化

## (3) 埋立工法の提言

長期的に重金属の溶出を抑制するためには、重金属に対して十分な量の硫黄を与え、一時的でよいから硫酸還元を起こさせることが必要である。

## 2.3 埋立地内での重金属の固定・安定化

### 1) 硫化物による重金属固定メカニズムに関する検討

【研究の期間：1991～1996】

#### (1) 目的

本研究課題は、長年に渡り田中先生が行ってきた埋立地における有害物質の挙動に関する研究の一部であり、有害物質の内、特に重金属について実験的に検討を行ったものである。重金属は分解することも無く、埋立地内に長期にわたり固定されるか、長期にわたり流出するかのいずれかである。田中先生の常々このことを話されていた。また、重金属の挙動は、周辺環境への影響や埋立地の安定化においても重要な課題であった。

本研究は、本研究以前に実施された土手らによる「埋立層内での重金属類の挙動」の延長上にある。田中先生は、これまでの重金属挙動に関する研究を通して、埋立地内で実際に重金属がどのようなメカニズムであるかを推定しており、ここでは特に重金属の最も安定した形態である硫化物に着目し、埋立地内で発生している微生物活動による重金属固定について、実験的検討を行った。

筆者ら学生（当時）は、田中先生の指導の下、現在の埋立地条件である低栄養状態での微生物

活動に注目し、焼却残渣中での硫酸塩還元細菌の活動と硫化物生成について実験を行った。

## (2)結果

それ以前にも硫酸塩還元細菌による硫化物生成について、様々な検討が行われていたが、低栄養条件での検討は始めてのものであった。また、焼却灰層は、強アルカリ性を示すため、研究開始当時は、微生物活動もさほど活発に生じるとは考えられていなかった。実験自体も様々な予備的な検討を経て、バッチ試験による、最低栄養条件、カラム試験を焼却残渣層の硫酸塩還元能力（重金属固定能力）についての実験的研究を実施した。研究では、埋立地での重金属固定化メカニズムの概略を考え(図4)、最終的にはカラム試験より、焼却残渣主体埋立地中など低栄養時の硫酸塩還元能力（≒重金属固定能力）を推定した(図5)。（「同時に、焼却残渣中の硫化物生成における微生物反応は、酢酸蓄積を伴う乳酸資化（不完全酸化）硫酸塩還元反応であることを推定した(図6)。

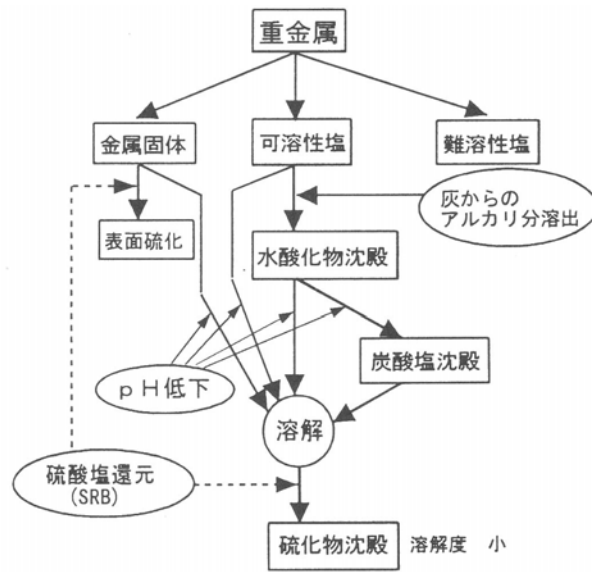


図4 不溶化メカニズム概略

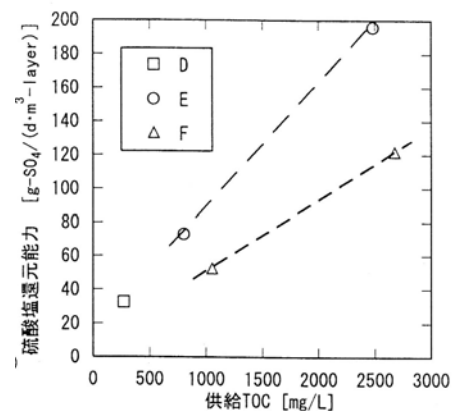


図5 焼却残渣の硫酸塩還元能力

## 2)埋立地内の pH 中性化に関する検討

【研究の期間： 1991～1996】

### (1)目的

重金属の溶解には、特に pH が重要であり、埋立地内の pH を化学平衡論から計算により予測する試みも最近では行われている。近年の埋立地においては、焼却残渣がアルカリ性物質を含むことから、埋立廃棄物層では間隙水が pH11 近い高い値を示すことが知られている。しかし一般廃棄物の焼却残渣を処分している埋立地からの浸出水は、弱アルカリ性を示すことが多い。微生物活動においても、pH は重要な因子である。本研究では、大気中の炭酸ガスによる焼却残渣の中性化について検討を行った。

### (2)結果

焼却灰の炭酸ガス吸収量を把握し、pH 低

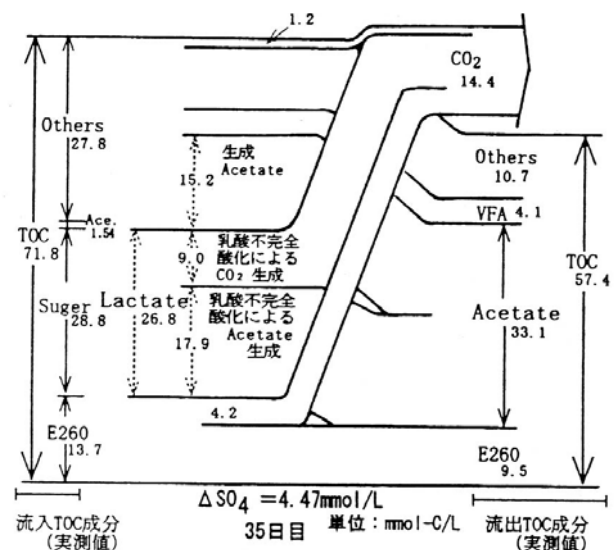


図6 カラム試験での炭素収支図

下の状況を再現することで、埋立地での炭酸ガスによる中性化の機構をモデル化し推定した。結果として、大気中の炭酸ガスレベルでも十分 pH を低下できること、固相中アルカリと反応が律速となることが推測された。

## 2.4 埋立地内の熱移動現象

### 1)埋立地内部の熱移動現象に関する基礎理論

【研究期間：1987～1989】

田中先生は 1981 年から 1986 年にかけて好気性反応を想定した室内実験に関連した熱移動現象の解明を行っておられたが、これを埋立地全体に適用するための理論作りに取りかかった。計算対象としたのは東京都の海面埋立地での温度分布測定事例であった（図 7）。このような温度分布がどのようにして形成されるのかということが主テーマであった。筆者は大学院修士課程の研究テーマとして、埋立地内部の熱移動現象というテーマを与えられ、研究に参画させていただいた。まず、熱移動現象に関わる研究事例として、1) 農業土木における土壌内部の熱移動現象実験・理論、2) 化学工学における乾燥に関わる熱移動現象実験・理論、を参考にした。最終的には、主に 1) を参考として理論を構築した。ただし、土壌での熱移動と大きく異なるのはガス移動現象を伴うことであった。しかし、ガス移動現象に関しては、それまで田中先生が研究されておられた埋立地への酸素侵入理論を基礎とすることで、解決することができた。最終的に、図 8 に示したような項目を考慮した 1 次元熱収支方程式が提案された。

### 研究の成果

開発された 1 次元熱収支方程式を基礎として、内部が好気性分解反応と嫌気性分解反応が進行している領域をわけて、温度分布の数値シミュレーションを行った。好気性分解反応領域（つまり埋立表層の酸素侵入深さ）は、田中先生が開発された理論モデルを用いて決定したが、好気性と嫌気性では分解反応に伴う熱発生が大きく異なるため、好気性分解反応領域の条件によって温度分布は大きく変化した。この計算を通して、後に明らかになる埋立過程での埋立地表層での好気性分解反応による温度上昇への寄与に関する示唆を得ることになった。

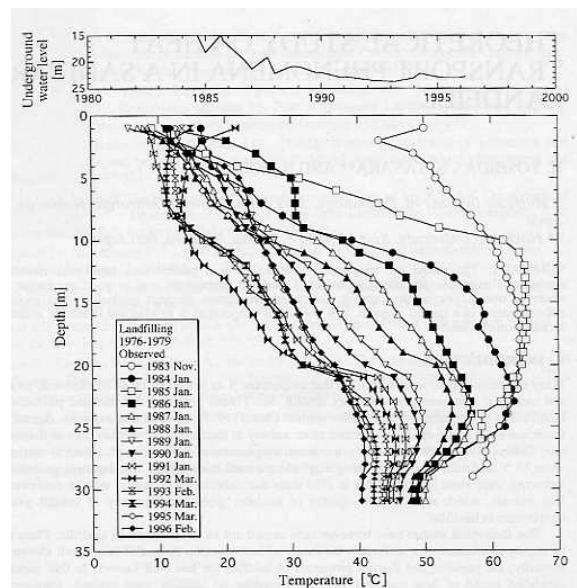


図 7 東京都海面埋立地温度分布実測例

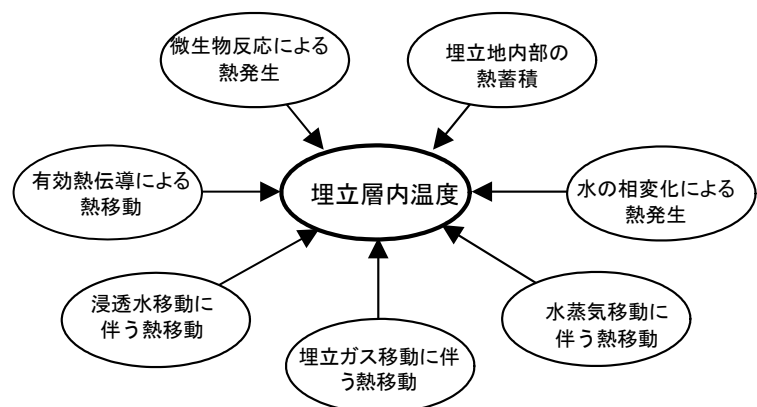


図 8 熱収支方程式で考慮した現象

## 2)埋立過程での好気性分解反応による温度分布への寄与に関する研究

【研究期間：1990～1996】

田中先生は先に示した東京都海面埋立地の高い温度分布形成は嫌気性分解反応が大きく寄与したためと考えておられたようだった。これは海面埋立地が海水中にごみを投入する埋立方法を取り、この場合は好気性反応が寄与する可能性は低いという推察があったためである。しかし、筆者が詳細に東京都海面埋立地について調べたところ、多くのごみ層が陸上埋立型で埋め立てていたことが判明した。さらに、現場で模擬埋立セルを使った温度測定実験が行われ、その結果内部温度がきわめて早期に上昇し、約50℃で安定することが観測されていた。これを説明するには、埋立直後の好気性分解反応による急激な温度上昇がなければありえない状況であった。そこで、埋立過程での埋立地表層での好気性分解反応を考慮するための「積み上げモデル」が考案された。これは筆者が1993年頃に着想を持っていたものであるが、最終的には田中先生が3次元の積み上げモデルまで拡張し、熱・物質・水分移動すべてを考慮したコンパートメントモデルを開発されている。しかし、この時点では1次元的に埋立地が積み上がる過程を表現したものにはすぎなかった。しかし、このモデルを用いることにより、東京都の実測温度分布の推移を比較的良好に模擬しうることがわかった(図9)。これを発端にして、埋立地では埋立過程で顕著な温度上昇が起こっていることが推察され、埋立中ですでに高い温度分布が形成されている場合のメカニズムをある程度説明しうるものと思われる。

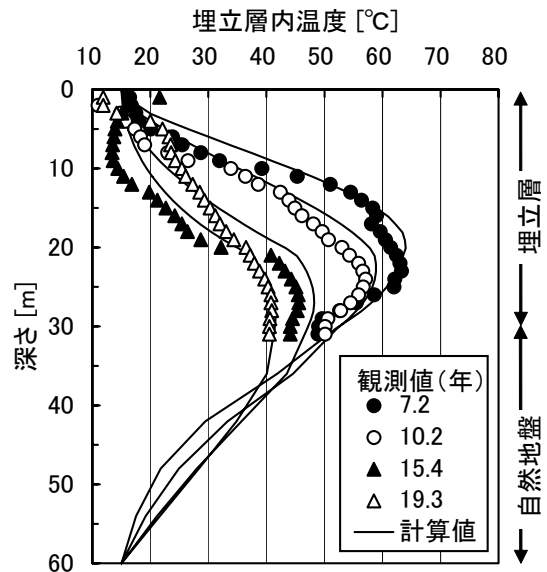


図9 温度分布シミュレーション例

## 3)数値埋立工学での熱移動の取り扱い

【研究期間：～2004】

田中先生が理論の基礎とされていた(であろう) R.B.Bird の *Transport Phenomena* でも輸送現象をモーメンタム、エネルギー、マスの3つに分けて叙述したように、埋立地内部の輸送現象を解明する上では熱移動は大きな課題の1つであったと思われるが、その集大成として田中先生がまとめられた数値埋立処分工学の開発(平成12～14年科研費報告書)では、熱移動現象に関しては、1)熱伝導、2)埋立ガス移動による顕熱移動、3)好気性反応熱、4)嫌気性反応熱(酸発酵及びメタン発酵のプロセス別)までを考慮した3次元熱移動モデルを構築した。ここで微生物反応速度への温度影響を組み込み、微生物反応による温度上昇によって、微生物反応がさらに加速される過程も記述している。ここで注目すべきは、埋立セル内での温度上昇への嫌気性反応熱による寄与である。筆者は嫌気性分解反応による温度上昇についてはきわめて否定的であったが、海外の大規模な嫌気的条件下の埋立地で顕著な温度上昇が見られる事例もあり、また

近年のバイオリアクター的な研究でも酸発酵・メタン発酵期での熱発生に注目していることから、田中先生が計算の中で新たに提示した新たな知見は、今後の埋立地内部温度に関する研究できわめて重要な示唆を与えているものと考えられる。

## 2.5 埋立地内の水分移動と長期モデリング

### 1) 浸出水量予測マクロモデルの開発

【研究の期間：1989～2000】

#### (1) 目的

埋立地では、降雨や降雪・融雪により浸出水量が大きく変動する。そのため浸出水処理施設的设计においては、この水量を正確に予測することがきわめて重要な要素となる。田中先生は、北大に来る以前の京都府研究所時代からこの研究に着手された。手法は、浸出水量変動を、気象データを入力データとして、埋立地のマクロな水分収支から計算するというものであった。マクロ水分収支とは、埋立地への水分の流入（降雨、融雪、表面流入等）と流出（蒸発、表面流出等）および内部貯留量から、浸出水流出量を推定する。こうした収支計算は水文学等で一般的に採用される方法である。しかし、田中モデルの特徴は、埋立地をタンクモデルとみなし、水分収支モデルに時間遅れ概念を取り込んでいるところにある。1980年に発表された一連の論文に記述された予測式は、その後、「最終処分場設計指針」における浸出水量予測式として合理式と並び掲載されている。北大に赴任されてからは、全国の処分場へのアンケート調査、および実流出データと気象データの照合から、このマクロモデルにおけるパラメータを決定する研究に着手した。

#### (2) 結果

従来、廃棄物処分場の多くは、浸出水量の原水量データではなく、処理水量データを記録しているところが多い。そのため、アンケートの回答として戻ってきたデータも、降雨量等データに回答せず処理水量として一定量で推移しているものが多く、予測モデルの検証には不適なものが多かった。しかし、そのなかでも、数少ない原水量データを記録している処分場に関しては、図10に示すとおり、予測モデルは、極めて良好な一致を示している。

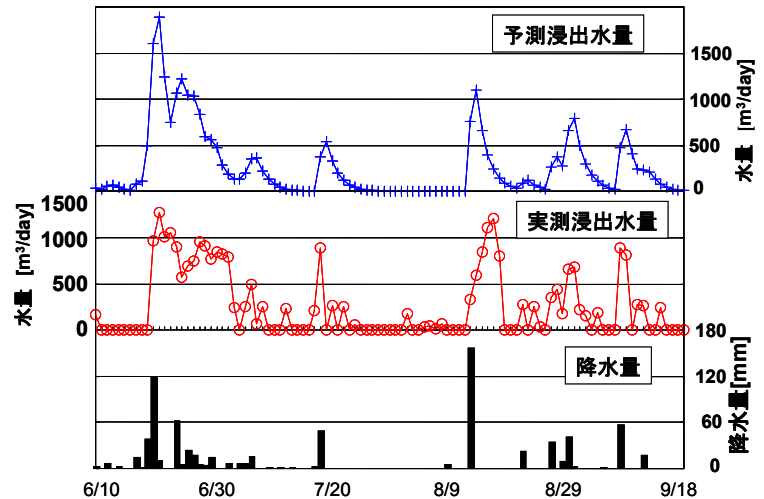


図10 A 処分場の実測浸出水量と予測値の比較

### 2) 廃棄物処分場内の不飽和流れの解明と水分移動制御

【研究期間：1982～2002】

有機物の分解、重金属の挙動等、埋立地内における反応に水分移動は重要な役割を果たしている。また、浸出水が分解産物等の様々な物質の移動媒体であることから、埋立地における水分移動の把握は重要である。しかし、廃棄物層内は、廃棄物自体が極めて不均質であり、様々な大

きさの廃棄物が覆土と複雑な層を成しているなど、均質な土壌に比してかなり特殊である。したがって、廃棄物層内の水分移動現象について検討するには、まず均質土壌では一般的とされる浸透理論の適用性から検討しなければならなかった。1982年頃から、廃棄物をカラムに充填し、降雨をインパルス、ステップ状に与え、その応答を測定する実験に着手した。また、各廃棄物の水分保持曲線を実験的に決定し、数値解析によりその応答特性の再現を試みた。また、不飽和透水係数の決定方法に関して、廃棄物層の特殊性を考慮した手法も提案している。筆者は、1994年頃より、主に廃棄物層における水分移動を制御する手法について田中先生の下で研究を実施した。キャピラリーバリアとは、毛細管吸引力の差で水分を分離する構造であるが、田中先生はこの名称が出る以前から、2層にして毛管力で浸出水を分けられないか、それを埋立地の底部に使用すれば浸出水の水圧がシートにかかることを防げる、ということ提案していた。そこで、小型・大型の2次元カラムを用いて、その効果を検証する実験を多数行い、バリアが埋立地底部においても十分機能を発揮することを確認した。また、より重要と言われたのは、それを設計する手法を提供せよ、ということだった。数値計算より、使用する材料、規模、勾配、浸透水の浸入強度に対してバリアの排水能力の関係を整理し、実際のAMEDAS降雨データを用いていくつかの地域を対象に、多層構造を有する埋立地での水分移動制御の可能性について検討した。その結果、適正な中間流による側方排除とバリアで、浸出水による底部水圧発生は回避できることが明らかとなった。

### 3)数値埋立工学—埋立地シミュレータの開発—

【研究期間：2000～2004】

#### (1)目的

田中先生が埋立地研究の最終的なゴールとして目指したもののひとつが、数値埋立工学の完成である。それはすなわち、埋立地内で起こる諸現象を計算機内で再現する“Landfill Simulator”を築き、埋め立てられるもの、埋立の仕方、埋立地の構造、および気象条件などの変化が、廃棄物の長期的な安定化や各種物質の放出にどのような影響を与えるのかを、迅速、正確に、且つ誰でも分かるような易しい形で提供できるツールを開発することであった。埋立地内においては、分解、溶出、移動現象などが相互に絡み合い、また、埋立物の多様性、様々な設計方法、50年から100年という長い期間現象が継続するため、実際の実験などでの再現は極めて難しい。数値埋立工学の確立は、そうした障壁を乗り越え、埋立地における現象理解に有効に機能すると考えられた。しかし、精密な現象表現を行うには、個々の現象を丹念に検証することはもちろん、それらの関連も見据えた総合的な視点が必要である。これまで行われた様々な方向からのアプローチ、すなわち、有機物分解挙動、重金属類の挙動、熱移動、水分移動などに関する実験的検討およびその解析・数値モデル化といった一連の研究は、その布石であったともいえる。田中先生は、これまでの研究成果を集約して各現象を可能な限り精緻に表現し、計算モデルに取り込むことを試みた。さらに、本モデルを広く公開し、多くの方が様々な現象を取り込み、議論を深めることによって、より埋立地内で起こる現象の科学的解明が進むことが先生の最終目標であった。

#### (2)結果

埋立地の一つの埋立セルを、固相、液相、気相に分割し、固相内に各有機物、微生物種を設定し、それらが、酸素分圧条件によって嫌気性・好気性反応により分解されていく過程をモデル化

した。有機物分解の結果生成する分解産物が液相，気相へと排出され，周囲との濃度勾配や圧力差から，セル外へ放出される。有機物分解は温度，pH，含水率に影響されることから，系外との熱移動，水分移動も考慮した。さらに，有機酸生成による液相の pH 変化を計算し，無機物中に含まれる各種重金属類の溶出挙動も表現した。図 11 に，一連の分解プロセスによる埋立セル内での各物質の濃度変化を示す。計算期間は 250 年とした。一般的に言われるように，初期に酸素が急激に消費さ

れ，層内が嫌気化し，嫌気性の酸発酵が起こり，次いで，生成された酸がメタン発酵により，メタンに分解される。層内に有機物がなくなると次第に，窒素，酸素が浸入し，廃棄物層が安定化していく様子が，的確に再現されている。

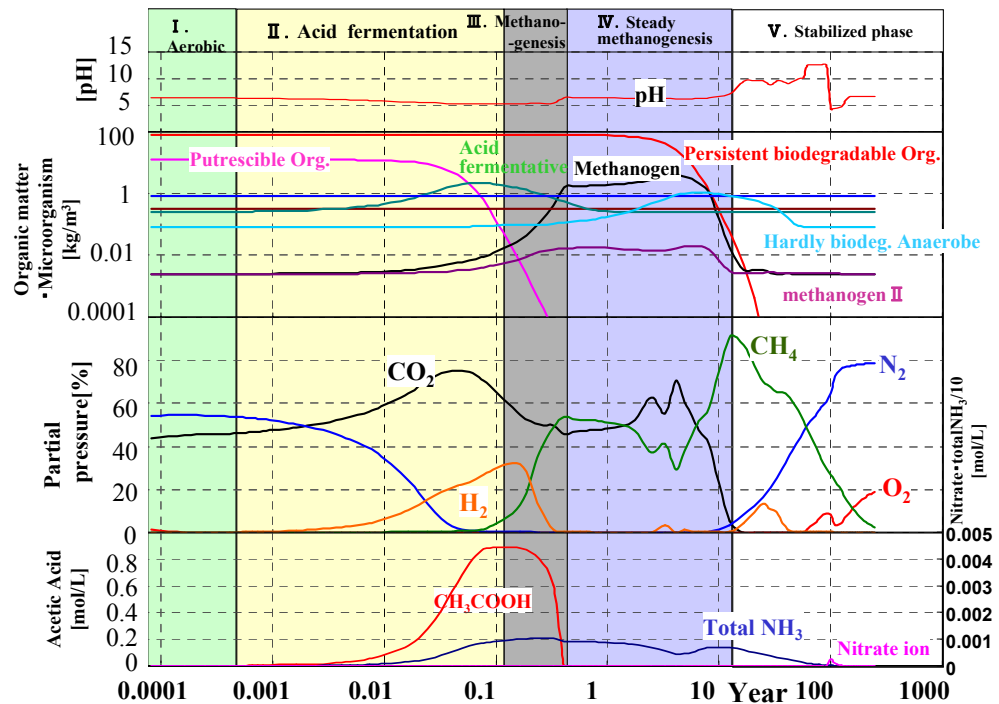


図 11 埋立地シミュレータによる 250 年間の有機物分解挙動

### 3. 廃棄物処理の総合的評価

#### 3.1 焼却処理におけるダイオキシン低減

##### 1) ごみ焼却炉燃焼室内のガス流動と混合に関する研究

【研究期間：1989～1991，1994～1998】

都市ごみ（一般廃棄物）の焼却処理では，ダイオキシン類低減対策として燃焼室内でのガス混合が重要視されていたが，経験に基づく施設設計や運転管理など実用面での対策・検討が先行し，燃焼室内のガス挙動の定量把握など基礎的な研究は十分行われていなかった。田中信壽先生は，「炉内燃焼反応を明らかにしたい，計算したい」との目標をもち基礎的研究に着手された。初期段階において煙トレーサ法，タフト法などを用いた燃焼室内ガス混合の可視化研究に取り組み，ノーズとよばれる炉形状変化による渦領域混合の効果などを実験的に明らかにしたが定性的把握にとどまっていた。その後，1/10 焼却炉模型を用いて，シャボン玉注入流跡法と画像解析を組み合わせた混合可視化実験，NO-O<sub>3</sub>の常温での反応を利用した混合反応実験，セミホットモデルによる混合可視化実験，さらには汎用熱流動解析ソフトによる数値解析を実施し，実際の焼却炉

での知見を交えて燃焼室内のガス流動と混合に関する研究として体系的に整理された。

図 12 は結果の一例である。横軸は炉内ガス流れの軌跡を追ってその重なりから求めた混合の程度を表す指標であり、縦軸は未燃性ガスと燃焼空気との混合効果を反応面から表したものである。炉内での燃焼反応では混合が最も重要な支配要因であり、滞留時間、炉形状、噴流吹き込み位置などの因子に比べ影響が大きいことを示している。その他、数値シミュレーションにおける各種パラメータの妥当性などを検討し、それらの研究成果は実際の燃焼室設計やガス化溶融炉などの開発に生かされている。

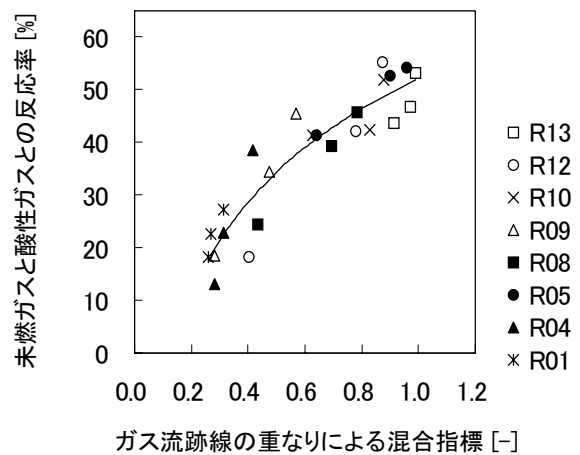


図 12 混合指標と反応率との関係

## 2)ごみ焼却飛灰中のダイオキシン類加熱分解に関する研究

【研究期間：2001～2003】

焼却処理におけるダイオキシン類 (DXNs) 問題では、発生源となる燃焼室での対応のほかに、全排出量の約 75%を占める集じん飛灰中に移行した DXNs 対策が重要となる。実用プロセスとして脱塩素化や酸化分解による加熱処理方法が普及していたが、加熱処理後の冷却過程での二次生成 (デノボ合成) に関して異なる見解が示されていた。田中信壽先生は、「デノボ合成の支配的因子は飛灰中の未燃炭素である」との仮定のもとに、分解機構解明の基礎的研究に着手された。

図 13 は結果の一例であるが、飛灰の DXNs 再合成に対する未燃炭素の強い影響が見出され、特に低温 (450°C) で燃焼しやすい炭素量との関係が顕著であった。また、加熱分解実験が実処理規模での分解をほぼ模擬できたことが同族体分布の変化からも確認された。その他、加熱処理温度と飛灰中の DXNs 濃度や未燃炭素量との関係、触媒作用があると言われる Cu 含有量との関係が明らかにされるなど、本研究成果により従来方式に比べ簡便な飛灰中 DXNs 加熱分解システムの技術開発が可能になった。

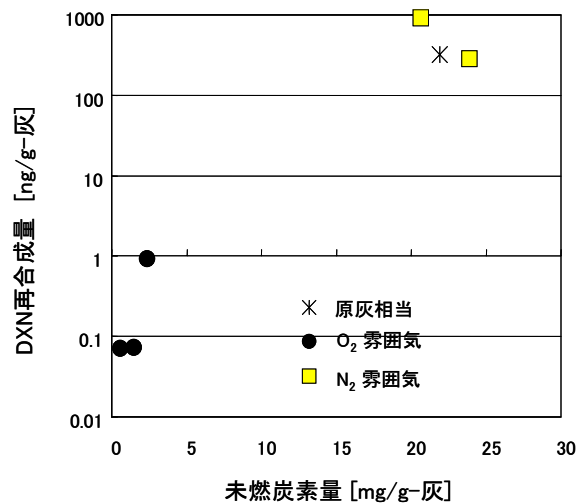


図 13 飛灰の DXN 再合成量と未燃炭素量との関係

## <追記> 流動層技術を用いた粗大ごみ破砕物の高効率選別に関する研究

【研究期間：1998～2003】

本研究は上記のごみ燃焼技術とは異なり、家具・小型家電品・自転車など家庭系粗大ごみの破砕物を対象とした流動層選別に関する研究である。粗大ごみ破砕処理施設では、破砕後、振動ふ

るいまたは回転ふるいを用いた粒度選別によって可燃物と不燃物に分類し、それぞれ焼却施設、埋立地で処理、処分されている。しかし、その分離効率が平均で35%程度と低く、焼却施設ではクリンカ生成による燃焼阻害、埋立地では安定化阻害の一因となっている。田中信壽先生は、乾式選別手法である流動層を用いた比重差選別に着目し基礎的研究から取り組まれた。

まず、粗大ごみ破碎粒子の密度を測定し、可燃物である木類・紙類・プラスチック類・ゴム類と不燃物である金属類・ガラス類が密度 1.5 g/cm<sup>3</sup>で分離可能なこと、風力選別に比べ明確に分離できることが見出され、340 μmのガラスビーズが流動媒体として有効であることを示した。その後、回分実験、小型連続実験装置による研究を重ね、右図に示すように、可燃物を浮遊物として不燃物を沈降物として高効率で分離回収し、80%というニュートン効率（総合分離効率）を得た。また、供給量変動の影響、フィルム状プラスチック含有量など阻害要因の影響など各種運転操作因子に関する検討を経て、実用化技術として十分適用可能であることを示した。

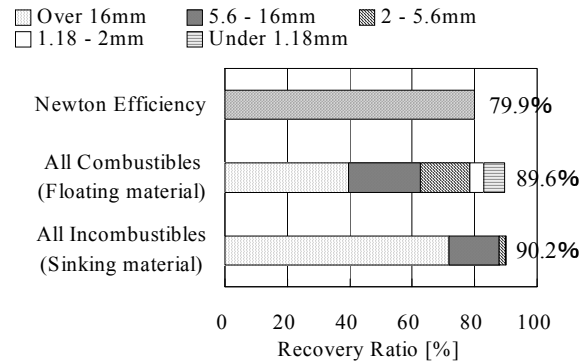


図 14 可燃物と不燃物の回収率,

### 3.2 各種中間処理残渣の安全性評価

#### 1) ごみ溶融スラグ中の重金属溶出機構解明と評価

【研究の期間：1994～2000】

##### (1) 目的と方法

研究開始当時、都市ごみや焼却残渣の溶融処理が、埋立地確保難問題の解決手段として注目されていた。しかし溶融施設の建設や運転には多大なエネルギーを費やすケースが多いので、発生するスラグは単に埋立処分するのではなく建設資材へ利用すべきとの立場で、スラグの安全性を多角的に評価するべくこの研究が開始された。手法は、自治体などで実際に稼働している施設から試料の送付を受け、組成分析、バッチ溶出試験、カラム通水試験などを適用し、スラグに残留する重金属の溶出機構を解明・評価する、というものであった。当時稼働していたほとんどの溶融施設で試料送付を快諾していただき、様々ある溶融方式をほぼ網羅し合計 28 種のスラグを評価した。

##### (2) 結果

組成分析や環境庁告示溶出試験の結果、スラグ特性は

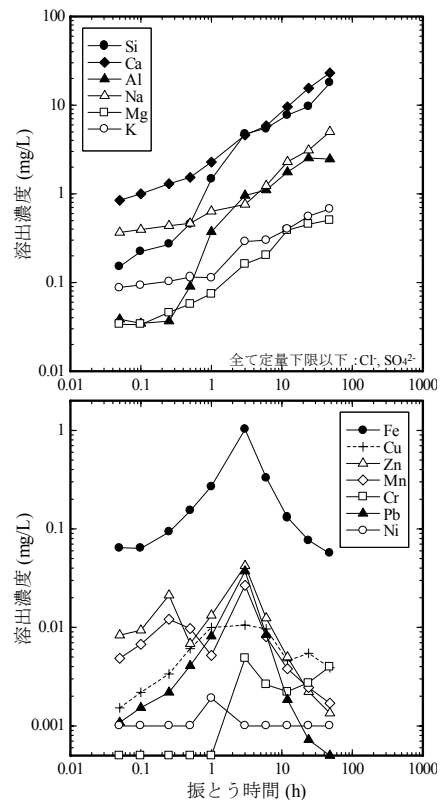


図 15 バッチ試験でのスラグ溶出濃度変化の例

溶融方式別に見ると最も良く分類された。すなわちスラグは、溶融炉の温度・滞留時間・攪拌特性や、流動性を高めるために投入される副原料の影響を大きく受けることが明らかになった。またバッチ試験容器内での重金属溶出機構の解明を試み、溶媒の酸濃度が高いとスラグ表面が侵食されるため、その結果としての溶出量（溶出濃度）は含有量の影響を受けるが、蒸留水溶媒では、溶液内で鉄イオンが飽和・沈殿することによって他の微量金属イオンも共沈する現象を明らかにした（図 15）。さらにカラム通水試験の結果から、溶出機構は次第に拡散律速に移行し、重金属溶出量は極めて少なく抑制されることを示した。これらの成果はその後、筆者を通じてスラグ類の JIS 溶出試験法の制定に活用されている。

## 2) 飛灰キレート処理の適正化と処理飛灰中重金属再溶出要因の解明

【研究期間：1996～2000】

### (1) 目的と方法

都市ごみ焼却飛灰は 1991 年の廃棄物処理法改正により特別管理一般廃棄物に指定され、埋立処分に際しては事前に重金属溶出抑制処理を行い環境庁告示溶出試験に合格することが条件とされた。キレート処理は溶出試験合格の条件達成が比較的容易であるが、高価な薬剤の過剰添加の問題や、処理効果の長期持続性に対する疑問などが指摘されていたことから、これらの課題解決に取り組むこととなった。焼却飛灰 3 種に対し実際に使用されている薬剤 12 種を用いてキレート処理飛灰を作成し、溶出試験、カラム通水試験などを実施した。

### (2) 結果

都市ごみ焼却飛灰からは鉛が高濃度で溶出するため、鉛の溶出抑制を十分に達成する必要がある。その他、飛灰中には銅と亜鉛が大量に含まれる。実験の成果として、キレート剤は鉛よりも優先して銅と反応するため、溶出試験合格に必要なキレート剤は銅と鉛の含有量から決定できることを明らかにした。しかし、処理効果の長期持続性に対する懸念はカラム通水試験によって明確なものとなった。すなわち溶出試験に合格したキレート処理飛灰からも未処理飛灰と同程度の高濃度の鉛が継続して流出した。その原因を解明するため処理飛灰を乾燥／湿潤と空気／窒素環境中の条件を組み合わせる期間放置後に溶出試験を実施した結果、灰が密封状態に置かれなければ処理効果は持続しないことが示された。重金属が灰埋立地から大量に流出したなどの事例は報告されていないものの、ワーストケース、例えば溶融飛灰単独埋立地で重金属流出が生じないという保証は無く、飛灰中金属の回収など埋立戦略の見直しに真剣に取り組むべきと考えている。

## 3.3 都市ごみ処理の LCA 評価

わが国のごみ処理は、可燃物の焼却率を高めることを大きな目標としてきた。この方針は 1900 年の汚物掃除法において、伝染病を予防する衛生的な処理方法として焼却が推奨されたことに始まり、庫補助制度が作られてからは、焼却施設建設が推進され、自治体数 3000 あまりに対して一般廃棄物焼却施設数が 2000 という焼却大国となった。しかし 1990 年代後半に焼却施設からのダイオキシン発生、埋立地しゃ水の信頼性低下、不法投棄の増大などの問題によって、廃棄物処理施設建設に対する住民の反対が強まり、特に埋立処分場の建設が困難となったことから、ごみ

処理の抜本的な見直しが必要となった。これまでの大量消費・大量廃棄によって後始末的であった社会システムを、処理にいたるまでの廃棄物減量、資源化・再利用を進めて天然資源消費の抑制、環境負荷の低減をはかろうとする循環型社会への転換である。従来の焼却中心、施設整備中心のごみ処理計画は大きな転換を迫られることになった。これに伴って1) 循環型社会にふさわしいごみ処理のため、さまざまな処理方法が提案され、選択すべきオプションが増大し、2) 環境負荷を小さくすることがごみ処理の評価基準となった。また、高度な処理に伴う処理費増大のため、コスト低減が現実的な制約となってきた。

こうした課題を解決するには、さまざまな処理プロセスから成る廃棄物処理を「システム」として考え、その最適化をはかることが必要である。そのための研究を1995年頃から進めてきた。概要は、以下のとおりである。

- ① 対象：一般廃棄物処理（自治体事業）。事業系一般廃棄物を含む。
- ② 対象プロセス：分別方法、収集輸送（中継方式含む）、資源選別施設、破碎施設、焼却、ガス化溶融堆肥化、メタン発酵、RDF化、最終処分。指定した分別方法によってごみ量と組成を決定し、各処理施設の概略設計を行う。
- ③ インプットデータ／設定条件：①人口、事業所種類別従業員数、②組成別不要物発生量（既定値として与えている）、③施設設計のための主要パラメータ（詳細データは既定値として与えているため、専門知識のないユーザーでも容易に使用できる。）
- ④ アウトプット：①処理施設ごとの物質収支・概略設計値、②施設間のマスバランス、③処理ごとのコスト（施設建設、運転、人件費）、④処理ごとのエネルギー消費量（建設、薬剤使用など間接消費を含む）、⑤処理ごとの二酸化炭素排出量（バイオマス由来を区別して出力）
- ⑤ インベントリーデータ：原単位データは文献調査によって収集。組成別不要物発生量、処理施設のデータは、独自の調査によって収集。
- ⑥ 特に強調できるツールの特長：①ごみ処理システムを評価。②さまざまな分別方法、処理の選択に対応できる。③わずかなユーザー入力で計算ができる。④使用データ、計算方法の透明性（すべて見ることができ、修正容易）、⑤データベースの提供。⑥特定の自治体モデルが容易に作成できる。
- ⑦ 現在の状況：エクセルベースのプログラムが完成。プログラムの概要、使用方法、モデルの詳細説明、一般廃棄物処理演習、の4章からなる本として出版準備中。プログラムをCD-ROMで添付する。

#### 4. 「持続可能な埋立処分のあり方」

晩年、田中先生が埋立地に関して持っていた問題意識は、いかにして埋立地を「次世代への負の遺産」としないかと言うことであった。本節では、2004年11月に田中先生が学会に寄稿された将来の埋立地像に関する原稿をそのまま掲載する。

##### 1) はじめに

廃棄物問題が大きな社会問題となり、社会全体の仕組みを大量生産・大量消費・大量廃棄から適量生産・適量消費・最小廃棄に転換することで廃棄物問題を根本的に解決するものとして、循

環型社会形成が合意されている。しかし、具体的な姿についてはほとんどが不明のまま進行している。特に、循環型社会において廃棄物処理の仕組みはどう変わる必要があるのか霧の中にある。ましてや、最終処分の姿も明確でない。循環型社会における最終処分のあり方を考え、それに基づいて生産・消費のあり方、廃棄物管理のあり方について提言していく必要がある。自分たちの立場から上流側はどう変わって欲しいのか、どう変えて欲しいのか、発言することが求められている。

埋立地の問題は、廃棄物問題が社会問題化する問題点の一つとして取り上げられ、埋立処分場の建設難・残余容量の不足がそれであり、いわゆる住民の反対によって極めて困難となったとされている。その背景として、安定型埋立地において安定化物以外の廃棄物が処分されたり、検出されてはならない筈の重金属などの有害物質が検出されたり、発生するはずのない硫化水素ガスが発生していたり、予定量を超えて埋め立てされていたりと住民の不信を増す事件が多くあった。また、管理型処分場・都市ごみ埋立地では遮水シートからの漏水が疑われ長期の裁判となり、また一部の地域で産業廃棄物処分場の建設差し止め裁判で差し止め判決が出たり、住民投票により建設反対が多数となり、埋立処分場は安全でない施設であるという見方が広がった。

人々の不安が大きくなり、もう一度原点に戻って、科学的に安全で、仕組みとして合理的であると同時に、人々が直感的に安心できる、安全安心な埋立処分場作りをしなければならなくなった。1997年の基準改正や生活環境影響調査、知事の認可権限などもこれに対応しようとするものであったが、根本的な解決になっているかどうか、循環型社会作りという新しい時代に即しているか検討する必要がある。

一方で、世界的な潮流として、埋立地概念に再検討の大きな動きが生じている。時代のキーワードである持続可能な最終処分場作りである。その重要な鍵は、早期の安定化にある。筆者は、次世代に負の遺産を残さない、一世代で安定化し、汚染地とならない埋立跡地を利用できる土地として残すことであると考え提唱している。

また、日本では、埋立地を巡る議論の中で色んな埋立地が提案されている。筆者の独断的な分類であるが、それを示すことで、本小集会での議論の始めとしたい。

特に、埋立地に関する論点として、(1)入れるもの(埋立物)、(2)入れ方(前処理、埋立方法)、(3)入れもの(構造、施設)、(4)立地の4つの観点から議論されるべきであることを指摘しておきたい。

## 2)近年に見られる最終処分概念

循環の概念から、物の流れを捉えると、生態系を通した循環と、リサイクルと言われる人為的(社会的)循環がある。したがって、廃棄物処理の最終段階にある、「最終処分」とは、生態系循環への還元であり、海洋投入処分と埋立処分が想定されている(現実には埋立処分しかない)。廃棄物処理全体から広く言えば、再生利用と埋立処分が廃棄物の行き先(最終処分先)である。

しかし、現実を見ると、「埋立処分は廃棄物処理の最後の砦」として、(極端に言えば)何でも受け入れて土中に埋めてきた。土中に埋めてしまえばいずれ何とかなると考えてきた。工業製品がなく、ごみ量がわずかであった時代には有効な考えであった。しかし、種々の化学物質が使われ、金属などの複合製品が埋立処分される現代社会においてはこの概念は間違っている。

このような状況で、最終処分=環境還元できないものをどうすればよいのか。永久に閉じ込めておけば良い、埋立地に入れておいていずれ掘り起こして再生利用すればよいなどの考えが出て

きている。前者については、住民の安全安心に結びつくのか、持続性はあるのか検討する必要がある。後者については、一時的保管であり、埋立処分=最終処分と区別する必要がある。

最近、次のような（広義の）最終処分が議論されている。

#### 【基本形】

①恒久土中保管型埋立地(Permanently Managed Containment Type Landfill)：これまでの基本的な最終処分概念であり、(基本的にはどんな廃棄物でも)土中に閉じ込め、外部に汚染が出てこなければよいと考える。時間概念としては長期の土中保持を考えていて再び掘り起こすことは想定されていない。土地の上面利用は考えられ、永久管理地として管理される。

#### 【変形（地下水汚染防止強化）型】

②容器構造強化型埋立地(Super-Containment Type Landfill)：漏水が問題となっているので、漏水リスクを減らすための技術を駆使したもの。遮水を強化する、屋根付きの埋立地、鋼板遮水の埋立地などで安全性を極度に高める。現在の日本の埋立地作りの一つの方向となっている。

③保持機能強化型埋立地(Super-Storage type Landfill)：重金属や有害化学物質に対応するため、それらを保持捕捉する機能を強化した埋立地。

#### 【変形（時間促進）型】

④安定化促進型埋立地 (early-stabilization landfill)：安定化状態を不活性物状態と考え、それを早期に実現することを目指す埋立地。埋立地内の反応を促進するもの（アメリカ流）、埋立物中の有機物を前処理で減らすもの（ヨーロッパでは、MBP埋立地、日本では（焼却残渣+不燃ごみ）埋立地）。

⑤安定化物埋立地(Final Storage Quality Landfill)：前処理において廃棄物を不活性物にして処分する。一つの極論的な姿として存在。

⑥埋立物選択型埋立地(Landfill Waste Selected Landfill)：埋立物の混合を避けて、分割埋立する。あるいは、適した埋立物を混合して安定化が早くなるようにする。

#### 【土壌還元型】

⑦持続可能な埋立地(Sustainable landfill)：土壌還元を目指し、一世代で安定化させることを目指した埋立地。そのためには、埋立物の厳密化、埋立前処理が重要と考える。

#### 【保管・掘り出し型】

⑧備蓄保管型埋立地(Stockpile Type Landfill for Recycling/Treatment in Near Future)：将来、資源として利用できるのを埋立地内に貯めておく。将来掘り起こして利用する。埋立地構造物に保管することが、無責任な埋立につながらないようにする必要がある（掘り起こさなかったら問題が起きないという条件が必要）。

⑨中間処理型埋立地(Waste Processing type Landfill)：埋立地に廃棄物を入れ、保管中に安定化させて掘り出して土壌などとして使う。

#### 【埋立地不要】

⑩埋立ゴミゼロ(Minimization of Landfill waste)：徹底的なリサイクル、燃やして灰を熔融する、灰からセメントを作る、熔融飛灰は山元還元 などにより、埋立物を作らない。これも、現在の日本の埋立地作りの一つの方向となっている。

⑪都市内管理付き有効利用：熔融スラグや、微粒子除外・養生処理焼却灰を、管理しながら道路路盤材などとして使用する。埋立地が作れない地域ではこの方向しかないという議論がある。

⑫屋内長期保管：作られた再生資源はその時点では、需要がないが、やがて使用されるようになるので、建物内に貯蔵しておく。あるいは、現時点の技術では無害化できないときに保管せざるを得ない。需給調整のための保管。

色んな提案がある。これらが、地域の条件・時代の条件（循環型社会が進展したとき、地域ごとにどのような廃棄物が発生するのか、どのような埋立前処理システムが地域の特性を生かして組まれるのか、最終的に環境還元すべき埋立物は何か）と共に選択されていくだろうと思われる。しかし、常に、持続性としての「未来世代に負の遺産を残さない」を意識すること、獲得できる安全性と必要なコスト・炭酸ガス排出量・消費エネルギー量・使用資材などとの比、つまり費用対効果を冷静に評価することが、必要である。