特集1・有機性資源循環をめぐる視点

炭素循環過程における無限循環評価の考え方

平井 康宏*・高月 紘*・酒井 伸一**

1. はじめに

食品リサイクル法の制定に見られるように、有機質資源の循環利用が求められている。その背景には、土壌有機物の継続的な供給による農地の地力回復、化学肥料の過剰施用による環境負荷の抑制、廃棄物処理に伴う負荷の軽減、磷鉍石資源枯渇への対応といったプラス面への期待がある。一方、有機質資源の循環利用においては、農地への重金属蓄積などのマイナス面も懸念される。食品廃棄物を原料としたコンポスト化を進める上では、分別の不徹底によるコンポストへの異物混入やそれに伴う農地の重金属汚染が問題となることが多い。また、コンポストによって農地に持ち込まれた化学物質の一部は作物に吸収され、その一部は食品残渣となりコンポスト化されて再び農地に投入される。このため、コンポストを集中的に利用した場合には、残留性化学物質が

農地に濃縮されるおそれがある。このような閉じたループを持つ循環システムの評価においては、リサイクルを1回行うことに対する評価結果とリサイクルを繰り返すことに対する評価結果とが異なったものとなりうる。本稿では、このような繰り返しを伴う物質循環の評価に適した手法を取り上げ、農地への重金属類蓄積に対する適用事例を紹介する。

2. 無限循環に伴う化学物質挙動の評価手法

2.1 循環システムの評価手法

これまで、物質循環・廃棄物管理の評価においては、マテリアルフロー解析^{1,2)}、ライフサイクルアセスメント (LCA: Life Cycle Assessment)³⁾、リスクアセスメント⁴⁾ などの評価手法がしばしば用いられてきた。マテリアルフロー解析 (MFA: Material Flow Analysis) のうち、特に有害物質の動きに着目したものは、サブスタンスフロー解析 (SFA

表1 物質循環の評価に用いられる3手法の比較

	評価手法			改良・融合の方向性
	LCA	MFA	RA	
評価の総合性				
多様な環境負荷の考慮	○	△* ¹	×	PRTRデータの産業連関表への割付
ライフサイクル全体の考慮	○	○	×* ²	ライフサイクル全体を通じたりスク評価
物質循環の記述				
プロセス内での物質収支	○	○* ³	×	PRTRデータの産業連関表への割付
プロセス間での需給バランス	×* ⁴	○	×	マテリアルフロー全体を対象とした評価
有害物質の評価				
環境挙動モデルの詳細さ	△* ⁵	×	○	環境挙動・暴露モデルの精緻化
公平性の評価	×* ⁶	×	○* ⁷	個人リスクおよび集団リスクを用いた評価

LCA＝ライフサイクルアセスメント, MFA＝マテリアルフローアナリシス, RA＝リスクアセスメント

*1:付帯表形式での拡張は可能 *2:サイト毎の評価が中心

*3:産業連関表では無価値物の流れは把握困難

*4:微小変化を前提とした「機能単位」での比較が中心 *5:暴露経路が限られるなど簡易的

*6:被害の合計のみで分布は考慮しない *7:サブグループ毎のリスク算出が可能

*京都大学環境保全センター Yasuhiro HIRAI, Hiroshi TAKATSUKI

**国立環境研究所循環型社会形成推進・廃棄物研究センター Shin-ichi SAKAI

: Substance Flow Analysis) と呼ばれる。表1は、これら3手法の特徴を比較したものである。リスクアセスメントの利点は、化学物質によるリスクの精緻な評価を可能とする点に、LCAの利点は、多様な環境側面および全てのライフサイクルにわたる統合的な評価を可能とする点にある。これに対し、マテリアルフロー解析やサブスタンスフロー解析の利点は、局所的な物質循環の記述ではなく、社会経済活動全体の物質循環の記述を可能とする点にあるといえる。LCAにおいては、機能単位での比較が推奨されており、大局的な物質循環に影響を及ぼさない微小変化を前提とすることが多い。また、リスクアセスメントにおいては、サイト毎の評価を重視する傾向があり、物質循環の全体像を描写するのには適さない。このため、再生品の需給バランスなど大局的な物質循環を考慮する必要がある。その時の制約条件を扱う場合には、マテリアルフロー解析やサブスタンスフロー解析が優れている。

2.2 サブスタンスフロー解析による無限循環評価

サブスタンスフロー解析は、「対象とするシステムの定義」「フローおよびストックの定量化」「結果の解釈」の3段階より構成される²⁾。

「対象とするシステムの定義」においては、システムを、(a) 対象物質、(b) システムを構成するプロセスの範囲、(c) 時間的範囲、の観点から定義する。対象物質としては、あらゆる物質の重量を合計した物質総量から、木材やプラスチックなどの特定の素材、塩素系有機化合物などの化合物、カドミウムや窒素などの元素にいたるまで様々なレベルが対象となりうる。有害物質の環境排出によるリスクの削減や枯渇性資源の保全を目的とした研究には、個々の元素や化合物を対象物質とすることが適している。プロセスの範囲としては、空間的範囲(例: 国内、都道府県)または機能的範囲(例: 資源採取—素材生産—製品加工—消費—廃棄)をもとに設定する。時間的範囲は統計データの入手可能性などから1年単位とすることが多い。無限循環の評価など、物質フローの時間的推移を扱う場合には、分解能を1年として複数年にまたがった時間的範囲を対象システムとする。

「フローおよびストックの定量化」においては、プロセス間の対象物質のフローおよびプロセス内部での対象物質の蓄積を定量化する。定量化の手法は、(a) 固定数表モデル、(b) 数式モデルに大別される。

固定数表モデルは、ある特定の時間における物質フローの静止画像をとらえたものであり、マテリアルフローの現状の把握や時間的変化の事後的考察に適用可能である。数式モデルは、物質フローが生じるメカニズムを記述したものであり、将来予測や政策効果の評価に用いることもできる。

「結果の解釈」においては、定量化された対象物質のフローおよびストックの概要をもとに、推定結果の検証や政策的含意の検討、推定結果の指標への集約などを行う。

3. 無限循環の試算例

3.1 試算条件

3.1.1 評価対象とするシナリオ

食品残渣のコンポスト化および焼却を対象とした無限循環評価の例を以下に示す。評価対象期間は1年単位とし、100年から数千年までの影響について試算を行った。評価対象とする化学物質は、重金属類(As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn)とした。システムを構成するプロセスは、1) 作物生産、2) 作物消費、3) コンポスト生産、4) 食品残渣処理の4プロセスとし、図-1に示した以下の4シナリオを評価対象とした。

シナリオ1: 一過型シナリオにおいては、食品残渣は全量焼却処理され、コンポストは生産されない。肥料は全て化学肥料である。

シナリオ2: コンポスト均一還元シナリオにおいては、食品残渣は全量コンポスト化される。コンポストの施用量は全ての農地で等しく均一であるとする。化学肥料の一部をコンポストが代替する。

シナリオ3: コンポスト集中的利用シナリオにおいては、食品残渣は全量コンポスト化される。コンポストは一部の農地でのみ継続して施用される。化学肥料のみを用いる農地(農地1)と、コンポストを最大限利用する農地(農地2)とを区別して考える。農地2では、化学肥料のうち窒素肥料をコンポストで完全に代替し、リン酸肥料の一部も代替する。

シナリオ4: 重金属局在シナリオは、作物中重金属濃度の分布が最も局在化するケースとする。農地1は化学肥料のみを用い、農地2~8はコンポストを利用する(図-1では農地4までを示した)。農地jで生産された作物に由来する食品残渣は農地j+1で利用されるコンポストの原料となる(1 ≤ j ≤ 7)。また、農地8に由来する食品残渣は農地

図-1 各シナリオでのマテリアルフローの概要

8で利用される。

3.1.2 各プロセスについての仮定

土壌中の化学物質含有量 (M_{soil}) は、大気からの沈降 (M_{air})、肥料による持ち込み (M_{fert})、作物による持ち出し (M_{crop})、雨水による流失 (M_{leach}) により変化するとした。土壌における重金属のマスバランスは下式で示される⁵⁾。

$$M_{soil}(t+1) = M_{soil}(t) + M_{air}(t) + M_{fert}(t) - M_{crop}(t) - M_{leach}(t) \quad (1)$$

大気からの重金属降下量は文献^{6,7)}より設定した。作物による重金属類の吸収量は、土壌中の重金属濃度に比例するとした。

降雨による流失は、雨水に溶け込んだ重金属の下層への移動によるものとし、土壌粒子と土壌間隙水との分配より算出した。

肥料による重金属の持ち込み量は、化学肥料由来とコンポスト由来の合計とした。各農地では、窒素およびリン酸の投入量がそれぞれの必要量に等しくなるように化学肥料およびコンポストが適用されるとした。単純化のため、窒素の無機態／有機態の違いは区別せずに扱った。

コンポスト化の前後で重金属の消失はなく、原料中の重金属はそのままコンポスト中に残存するとした。ただし、食品残渣に含まれる重金属は、作物のみでなく、異物などの混入にも由来するとした。コンポスト生産過程での食品残渣の分解率（乾燥重量

ベース）は50%，窒素の分解率（アンモニアとしての揮発率）は15%とした。

3.2 試算結果

シナリオ1, 2, 3における土壌での重金属の流入および流出を表2に、シミュレーション開始から100年間の土壌における重金属濃度の推移を図-2に示した。

3.2.1 コンポスト利用と化学肥料利用との比較

図-2に示したように、コンポストを用いる土壌（シナリオ2, シナリオ3の農地2）は、化学肥料のみを用いる土壌（シナリオ1, シナリオ3の農地1）に比べ、Cd以外の重金属濃度が高くなるとの結果を得た。Cdについては、逆の結果を得た。コンポスト利用によって土壌中重金属濃度が増加するか否かは、コンポストが代替する化学肥料に含まれる重金属量に比べコンポストに含まれる重金属量が多いか少ないかによって決まる。図-3に、コンポストによる農地への重金属流入量と化学肥料によるそれとの比較を示した。図-3には、シミュレーションに用いた値に加え、文献値⁸⁻¹²⁾の範囲も示した。コンポスト⁸⁻¹¹⁾および化学肥料¹²⁾のいずれも重金属含有量には大きな幅があるが、化学肥料に比べコンポストの方が重金属濃度は高い傾向にある。ただし、Cdについては、化学肥料（特にリン酸肥料）が比較的高濃度のCdを含む⁵⁾ことが知られており、コンポストによる流入量と化学肥料による流入量との

表2 農地への重金属類の流入・流出（初期状態）[mg/m²/yr]

内訳	シナリオ**	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
ストック*		2,640	106	12,000	8,160	6,720	6,960	20,640
流入 大気降下物	シナリオ1-3	0.10	0.09	0.23	0.89	0.37	1.80	6.80
窒素肥料	シナリオ1	0.07	0.01	0.11	0.12	0.02	0.09	0.23
	シナリオ2	0.07	0.01	0.11	0.11	0.02	0.09	0.21
	シナリオ3 農地2	0	0	0	0	0	0	0
リン酸肥料	シナリオ1	0.39	1.04	2.47	0.16	0.52	0.39	3.19
	シナリオ2	0.37	0.99	2.35	0.15	0.50	0.37	3.04
	シナリオ3 農地2	0.15	0.40	0.94	0.06	0.20	0.15	1.22
コンポスト	シナリオ1	0	0	0	0	0	0	0
	シナリオ2	0.05	0.03	1.35	2.64	0.77	2.04	6.48
	シナリオ3 農地2	0.63	0.33	17.64	34.51	10.00	26.67	84.71
小計	シナリオ1	0.56	1.15	2.81	1.17	0.92	2.29	10.22
	シナリオ2	0.59	1.12	4.03	3.79	1.65	4.30	16.53
	シナリオ3 農地2	0.88	0.82	18.81	35.46	10.57	28.62	92.72
流出 作物持ち出し	シナリオ1-3	0.11	0.06	0.10	1.36	1.12	0.23	8.60
	雨水による溶出	1.12	0.06	0.56	3.92	0.17	1.68	11.20
	小計	1.23	0.12	0.66	5.28	1.29	1.91	19.80
流入-流出	シナリオ1	-0.67	1.03	2.15	-4.11	-0.37	0.37	-9.58
	シナリオ2	-0.65	1.00	3.37	-1.49	0.37	2.39	-3.27
	シナリオ3 農地2	-0.36	0.70	18.15	30.18	9.28	26.70	72.92

* 地表から20 cmまでの深さの土壤に含まれる重金属量 [mg/m²]

** シナリオ3の農地1の重金属類流入・流出は、シナリオ1のそれと等しい。

図-2 シミュレーション開始から100年間の土壤中重金属濃度の推移

違いは明確でない。図-2に示したシミュレーション結果は、これら図-3の特徴を反映している。コンポスト中の重金属濃度を低下させる方法としては、コンポスト化過程での窒素の揮発を防ぐことにより肥料成分あたりの重金属の濃縮を回避することや、コンポストへの異物混入を防ぐことなどがある。

3.2.2 コンポストの利用方法の違いによる重金属濃度の偏りへの影響

土壤中の重金属濃度の推移を、化学肥料のみを用いるシナリオ1とコンポストを全ての農地で均一に利用するシナリオ2について比べると、両者はほぼ同じ推移を示した(図-2)。これは、シナリオ2でコンポストが代替する化学肥料量が少なく(約8%)、農地への重金属の流入量に大きな変化を生

図-3 コンポスト中重金属量と化学肥料中重金属量との比較

じないためである(表2)。一方、コンポストを集中的に利用するシナリオ3の農地2では、農地1からの重金属濃度の乖離が顕著であり、100年後に農地2の濃度が農地1の濃度よりも40%ほど高くなるケースも見られた。農地全体で見た重金属の流入流出はシナリオ2とシナリオ3で等しいが、コンポストの使用方法によって一部の農地に重金属の集中を生じることがある。

3.2.3 重金属濃度の偏りがもっとも極端となるケース

重金属の偏りが最も極端に生じるケースについて考える。図-4は、シナリオ4における(a)100年後および(b)平衡状態での土壤中重金属濃度を、農地1を1とした相対濃度で示す。図-4(b)より、長期間経過した後の平衡状態においては、農地間で重金属濃度の違いが顕著となるケースも生じた。増加パターンは農地での重金属類の挙動に依存し、土壌からの流出に占める作物持ち出しの比率が高い重金属ほど濃度増加が顕著となる。一方、100年後の土壤中重金属濃度は、農地1と農地2～8との間にのみ差違が認められ、農地2～8ではほぼ等

図-4 シナリオ4の結果

しい(図-4(a))。100年後に農地2～8の間に濃度差が生じないのは、平衡状態にいたるまでに長い時間を必要とするためである。当面は農地2～8の間の差違に注意を払うよりも、農地1と農地2との違いを注視した対策をとることが有効であると言える。

4. おわりに

本稿では、無限循環システムの評価手法としてサブスタンスフロー分析を中心に上げ、農地への重金属類蓄積に対する適用事例を紹介した。「はじめに」で述べたように、有機質資源の循環利用にかかる期待は、窒素やリンなどの物質循環の健全化にも向けられている。また、食品廃棄物の再利用方法として堆肥化農地還元のみならず、家畜飼料としての循環利用も進められている。本稿では重金属の蓄積のみを取り上げたが、対象物質に窒素やリンを含

め、システムを構成するプロセスとして飼料生産や畜産を扱うことも可能である。これらの検討により、リスクを回避しつつ食品廃棄物の持続的な循環利用を可能とする条件を明らかにすることが必要であるが、新たな研究進展に合わせて、稿を改めて論じたい。

引用文献

- 1) Joosten, L.A.J., Hekkert, M.P., Worrell, E. and Turkenburg, W.C.: STREAMS : a new method for analysing material flows through society. Resources, Conservation and Recycling, 27 : 249-266 (1999)
- 2) Van der Voet, E., Kleun, R., Van Oers, L., Heijungs, R., Huele, R. and Mulder, P. : Studying substance flows through the economy and environment of a region - Part I: systems definition. Environmental Science and Pollution Research, 2 (2) : 89-96 (1995)
- 3) White, P.R., Franke, M. and Hindle, P.: Integrated Solid Waste Management: A Lifecycle Inventory, Blackie Academic and Professional (1995)
- 4) Boudet, Celine; Zmirou, Denis; Benoit-Guyod, Jean-Louis: Health Risk Assessment of a Modern Municipal Waste Incinerator. Risk analysis, 19 (6) : 1215-1222 (1999)
- 5) Alloway BJ: Heavy Metals in Soils. 2nd ed. Blackie Academic and Professional, London (1995)
- 6) 環境省：平成12年度地方公共団体等における有害大気汚染物質モニタリング調査結果 http://www.env.go.jp/air/osen/mon_h12/table7.html (2001)
- 7) 船坂邦弘, 宮崎竹二, 神浦俊一, 杉本弘, 鶴保謙四郎：最近5年間の市内浮遊粉じんの動向と金属粒子の挙動について, 大阪市立環境科学研究所報告 62 : 11-18 (2000)
- 8) 伊達昇ら：東京都ごみコンポストの炭素率と黒ボク土野菜畑への施用効果, 日本土壌肥科学会誌 155 : 206-212 (1984)
- 9) Mato S, Otero D, Garcia M: Composting of < 100 mm fraction of municipal solid waste. Waste Management and Research, 12 : 315-325 (1994)
- 10) Fricke K, Vogtmann H: Quality of source separated compost. BioCycle 34 (10) : 64-70 (1993)
- 11) 小川泰一, 鈴木功一：堆肥化実施都市の処理状況について, 都市清掃, 46 (197) : 595-603 (1993)
- 12) US EPA: Background Report on Fertilizer Use, Contaminants and Regulations. EPA 747-R-98-003. United States Environmental Protection Agency, Washington DC. (1999)

会 告

「年間講読料」について

みなさまには日頃より「環境技術」をご講読いただきましてありがとうございます。心よりお礼申し上げます。ご承知いただいておりますように、本誌は学術団体の機関誌です。したがって現在各書店を通じて本誌を定期講読していただいている読者のみなさまは、小会に直接ご入会いただいている「会員」とは異なり、「年間講読者」という位置づけになります。

本来、小会は、学術団体として会費収入と会員の交流、諸活動に支えられて、協会運営がなされております。そのため「年間講読者」の方には、できるだけ「会員」になっていただく、つまり小会へのご入会を日頃よりお願いいたしております。

しかし残念ながら、やむを得ぬ事情によりご入会がご無理な場合もございます。そこで年間購読料については会員会費の18,000円に対し20,160円にさせていただきます。この金額は、「環境技術」を雑誌として定価でお求めいただいた場合と同額の金額となっております。これは小会の活動のさらなる発展を目指して、会員層の把握と、共有するテーマの構築を可能にするための措置であり、みなさまにはぜひご入会手続きも併せてご検討いただきますようお願い申し上げます。

環境技術研究協会 (<http://www3.osk3web.ne.jp/~riet/>)

tel 06-6357-7611 fax 06-6357-7612