

食品系有機廃棄物の再資源化による環境負荷削減効果

Reduction of Environmental Loads by means of Recycling Organic Waste from Food Industries

楠部孝誠* 津村和志* 内藤正明*

Takasei KUSUBE*, Kazushi TSUMURA*, Masaaki NAITO*

ABSTRACT ; This paper aims to evaluate a reduction of environmental loads (CO_2) and energy consumption by means of recycling organic by-products from food industries. In past, organic wastes from food industries was recycled as fertilizer or feed of livestock. But, now the link between the materials and energy used in each sector e.g. manufacturing and commerce, agriculture and forestry, and consumers, has been destroyed and most organic wastes has been incinerated. It is necessary nowadays to reconstruct the recycle network of organic wastes.

Firstly, the characteristics and the mount of organic wastes e.g. bean-curd refuse, soy sauce cake and crumbs of bread, from food industries is investigated. Secondly, the energy consumption by burning and by feeding the bean-curd refuse, soy sauce cake and crumbs of bread is calculated, respectively. The reduction of environmental loads(CO_2 emission) through recycling three organic wastes is calculated as 61.96, 60.16 and 79.08kgC/t, respectively. Finally, simulation has been made on how long distance the wastes can be transported in terms of some economic conditions.

KEYWORDS ; by-product, recycling, energy consumption, CO_2 emission, transport distance

1. はじめに

資源、エネルギーの大量生産・大量消費・大量廃棄型システム、いわゆる一過型システムが限界に直面したことで、社会全体が資源の再利用、再資源化が急速に進みつつある。戦後、経済の合理性を追及した我が国は、結果として、経済復興を達成したが、同時に多くの副作用を起こしたことも事実である。それは、資源の海外依存を基調とする大規模工業化によって、当時としては当然のように行われていた産業間の連携に基づく再利用、再資源化といった循環の鎖を切断したことである。これにより、大量の廃棄物が発生し、 CO_2 をはじめとする多種多様な環境負荷が地域、地球環境に排出された。特に一次系産業に関して注目すれば、農畜林漁業の衰退、農山村地域の荒廃、過疎・過密化、食料・飼料自給率の低下など、我が国の近代化によって失われた多くのものが「農業的循環」と密接に関連している。

本研究では、廃棄物の有効利用を目指した有機廃棄物の再資源化、特に一次産業系との連繋による食品系有機廃棄物の再資源化によって、環境に与える負荷が現状からどの程度削減できるかを検討した。まず、食品製造業から発生する代表的な食品加工廃棄物、いわゆる食品副産物の現状の処理について分析した。次に3種類の食品加工廃棄物に関して、現状の焼却を中心とした処理システムと再資源化を基調とする循環システムについて、環境負荷発生量を各段階でLCA的に分析した。ここでは環境負荷として CO_2 排出量を取り上げた。最後に循環システムが再生するために、どのような経済的な変化が起こればよいのかを、“産業廃

*: 京都大学大学院工学研究科環境地球工学専攻 Department of Global Environment Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University

This work has been supported by the CREST (Core Research for Evolutional Science and Technology) of Japan Science and Technology Corporation (JST).

棄物処理費用、為替レート・穀物相場価格変動、輸送距離” から検討し、現状の一過型システムから循環型システムへ移行するための課題と可能性を考察する。

2. 食品系廃棄物の現状分析

本研究で対象となる食品系廃棄物とは、食品加工において発生する副産物あるいは製品ロスをさし、特に今回は「オカラ、醤油粕、パン屑」の3種類の食品加工廃棄物を検討する。

(1) オカラ

オカラは水に浸漬した大豆に、加水しながら磨砕したものを加熱して濾別し、豆乳と豆腐粕（おから）に分離する段階で発生する、大豆の皮及び細胞壁を主体とする不溶性分である。また、搾りきれない豆乳が残っており、易分解性が多い。オカラの発生率は、製造する豆腐の種類、豆乳の絞り方、加水量、磨砕粒度、分離法、脱水法等に影響されるが、概ね豆腐生産に用いられた原材料量の約130～140%とされている。1993年に全国で豆腐生産に用いられた大豆が537,000tであることから類推すれば、約733,500t発生していることになる^{1) 2)}。現状の処理状況は、一部大手製造業者が飼料化を行っているが小売店になるとほとんどが廃棄物として処理されていることがヒアリング調査から分かった。オカラの成分については表1に示すが、特に特筆すべきは栄養分が高いため、飼料利用には非常に有利であるが、それゆえに微生物の増殖に適しており、短時間で腐敗が起り、強い悪臭が発生することが欠点である。

(2) 醤油粕

醤油粕は麴と塩の混合物である諸味の熟成物から製造過程の最後に圧搾され、醤油と分離されることで発生する。醤油粕の発生率は原料投入量の25%であり³⁾、平成6年度の醤油総生産量は116.6万t、年間一人当たり9.3kgの消費⁴⁾等から推定すれば、醤油から約10万tの醤油粕が発生していることになる。醤油粕の処理状況もオカラ同様、一部大手製造業者以外は廃棄物として処理されているようである。成分は良質の豆科牧草に近似した栄養価を持っており、蛋白質を豊富に含み原料大豆の約6割の成分を持つが、乾物中で7～10%の塩分を含んでいることから、飼料利用には長年の経験が必要になることが問題である⁵⁾。

(3) パン屑

パン屑は上述のオカラ、醤油粕とは異なり、食品加工段階で発生するいわゆる食品副産物ではなく、主に流通、店舗から排出される食品流通廃棄物である。このパン屑は、検査段階で重量基準に適しないもの、包装資材の不良品などパン自体に問題があるものではなく、いわゆる製品ロスとして扱われているものである。ゆえに全国

表 1. 食品系廃棄物の成分値

	オカラ	醤油粕	パン屑	トウモロコシ
含水率	79.3	26.5	10.0	13.5
TDN(牛)	18.7	52.3	90.1	79.9
TDN(豚)	14.6	47.6	89.1	80.7
DCP(牛)	4.6	15.1	12.1	6.9
DCP(豚)	3.7	14.5	12.2	6.7
CP	5.4	22.6	13.1	8.8
CF	3.3	12.3	0.5	1.9

TDN:Total Digestible Nutrient
DCP:Digestible Crude Protein
CP:Crude Protein
CF:Crude Fiber

でどの程度発生しているのかは推定できないが、神戸のある工場にヒアリングした値を参考までに示すと、食パン、菓子パン等の総生産量が約10,000tに対して、パン耳が約200t、製品ロスが1500t発生している。この工場では、パン耳は飼料として再資源化しているが、製品ロスはすべて廃棄処分している。表1に示すように、パン屑自体は非常に栄養価が高く、高い飼料価値がある⁶⁾にもかかわらず、廃棄処分されているには大きな原因がある。それは、食品加工廃棄物（食品副産物）と違い、発生時パン単独ではなく、包装資材と同時に発生しているため、再資源化には包装資材との分離作業が必要であり、これが再資源化を困難にし

ている。

3. 食品系有機廃物処理の比較評価

前節で述べたオカラ、醤油粕、パン屑の3種類の食品有機廃棄物について、(1)現状での主要な処理法である焼却・廃棄を基本とする一過型プロセス、(2)再資源化として飼料化を行う循環型プロセス、の2つのプロセスにおける「エネルギー消費量、二酸化炭素排出量」について比較評価を行う。計算の条件として、各食品系有機廃物はすべて工場から発生すると仮定する。発生量はオカラが18t/日、醤油粕が20t/日、パン屑は5t/日とする。これらはヒアリング調査を行った工場の実績値を参考としている。

(1)一過型プロセス

焼却・廃棄を中心とする現状の処理は次の4段階、①回収段階、②焼却段階、③灰処理段階、④代替輸入段階、に分割して計算する(表2-1、2-2、2-3)。

回収段階では工場から焼却場までの距離を20kmと仮定した(図1)。焼却段階では直接消費のみを考慮し、食品有機廃棄物の直接燃焼によるCO₂発生量は対象外とした。これは食品有機廃棄物の燃焼によって発生するCO₂はオカラ(豆腐)、醤油粕(醤油)、パン屑(パン)の原料である大豆、小麦等の作物成長で消費されるCO₂と同量と仮定したことによる。この仮定は食品有機廃棄物が非常に短い周期で炭素循環が行われていることに起因している⁷⁾。灰処理段階では、焼却場から埋立地までの距離を20kmと仮定した。焼却及び灰処理におけるデータは文献8)から抽出した。代替輸入段階は焼却されることで失われる飼料要素分をアメリカからの輸入飼料に換算したものである。LCA的に評価をするならば、輸送に用いられた車両、焼却場建設等も考慮に入れるべきであるが、運用時における消費エネルギー、CO₂と比較して非常に小さく、また耐用年数等によって大きく値が変化することを考慮して本研究では除外した。

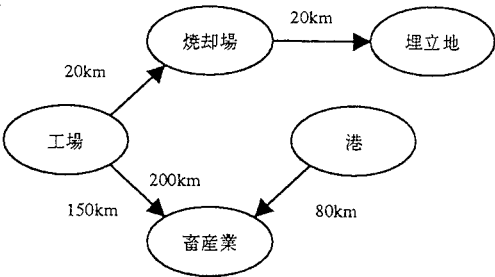


図1 計算の前提条件

表2-1 焼却・廃棄処理に関するエネルギー消費量原単位

単位:kcal/t			
焼却・廃棄処理	オカラ	醤油粕	パン屑
回収プロセス			
運用	16,356	14,720	18,400
小計	16,356	14,720	18,400
焼却プロセス			
運用	239,599	239,599	239,599
小計	239,599	239,599	239,599
灰処理プロセス			
灰搬出	2,728	2,728	2,728
灰埋立	5,401	5,401	5,401
小計	8,130	8,130	8,130
代替輸入プロセス			
アメリカ国内輸送	32,973	92,295	158,945
海上輸送	41,348	115,739	199,318
日本国内輸送	13,778	38,566	66,417
小計	88,098	246,600	424,680
合計	352,183	509,049	690,808

表2-2 焼却・廃棄処理に関するCO₂排出量原単位

単位:kgC/t			
焼却・廃棄処理	オカラ	醤油粕	パン屑
回収プロセス			
運用	1.28	1.15	1.44
小計	1.28	1.15	1.44
焼却プロセス			
運用	62.45	62.45	62.45
小計	62.45	62.45	62.45
灰処理プロセス			
灰搬出	0.21	0.21	0.21
灰埋立	0.67	0.67	0.67
小計	0.88	0.88	0.88
代替輸入プロセス			
アメリカ国内輸送	2.61	7.30	12.58
海上輸送	3.27	9.16	15.77
日本国内輸送	1.08	3.02	5.21
小計	6.96	19.48	33.55
合計	71.58	83.97	98.33

(2)循環型プロセス

再資源化として飼料化を行う循環型プロセスは次の2段階、①回収段階、②飼料加工段階、に分割して計算する（表3-1、3-2、3-3）。(1)と同様に運用時における消費のみを考慮している。回収段階では、工場から畜産業までの距離を現状データを参考にオカラ、パン屑は150kmとし、醤油粕は200kmとする。飼料加工段階では、オカラは無処理、醤油粕は粉碎処理、パン屑は包装資材の分離処理を行う。粉碎処理に関するデータは文献5)、包装分離に関しては三重県のY法人で開発した包装分離機⁹⁾のデータを用いた。(1)一過型プロセス、(2)循環型プロセスを通して、エネルギー及びCO₂原単位は文献8)、10)、11)、12)を参照した。

表 2-3 各プロセスの計算条件

回収プロセス	オカラ	醤油粕	パン屑
運用	10tトラック使用	10tトラック使用	5tトラック使用
	燃費2.5km/l(軽油)	燃費2.5km/l(軽油)	燃費4.0km/l(軽油)
	輸送距離 20km		
焼却プロセス	オカラ	醤油粕	パン屑
運用	焼却施設処理量 330,414t/年		
	焼却運用エネルギー量 79,166,878Mcal/年		
灰処理プロセス	オカラ	醤油粕	パン屑
灰搬出	灰搬出 8tトラック使用		
	燃費 2.5km/l		
	灰搬出輸送距離 20km		
	総焼却灰量 337,946t/年		
灰埋立	残灰率 14.3%		
	総埋立処理量 375,914t		
	埋立総エネルギー消費量 14,199,094Mcal/年		
代替輸入プロセス	残灰率 14.3%		
	オカラ	醤油粕	パン屑
	7月国内輸送 2,000km		
7月国内輸送	貨物船 1,500t/隻		
	燃費 0.088km/l(重油)		
	燃費 19.01/t(重油)		
海上輸送	燃費 19.01/t(重油)		
	日本国内輸送	10tトラック使用	10tトラック使用
		燃費2.5km/l(軽油)	燃費2.5km/l(軽油)
		輸送距離 80km	燃費2.5km/l(軽油)
	燃費2.5km/l(軽油)		
	輸送距離 80km		
	変換量 0.234t	変換量 0.655t	変換量 1.128t

表 3-1 飼料化に関するエネルギー消費量原単位

単位: kcal/t			
飼料化	オカラ	醤油粕	パン屑
回収プロセス	122,667	147,200	138,000
飼料加工	0	44,550	30,600
合計	122,667	191,750	168,600

表 3-2 飼料化に関するCO₂排出量原単位

単位: kgC/t			
飼料化	オカラ	醤油粕	パン屑
回収プロセス	9.62	11.54	10.82
飼料加工	0.00	12.28	8.43
合計	9.62	23.82	19.25

(3)比較評価

計算結果に基づけば、再資源化である飼料化（循環型プロセス）と、現状の主な処理である焼却・廃棄処理（一過型プロセス）を比較してみると、エネルギー消費量及び二酸化炭素排出量の両項目において顕著に飼料化の優位性が認められた（表4）。

表 3-3 各プロセスの計算条件

回収プロセス	オカラ	醤油粕	パン屑
運用	10tトラック使用	10tトラック使用	5tトラック使用
	燃費2.5km/l(軽油)	燃費2.5km/l(軽油)	燃費4.0km/l(軽油)
	輸送距離 150km	輸送距離 200km	輸送距離 150km
飼料加工プロセス	オカラ	醤油粕	パン屑
運用	粉碎機×3台		
	処理量 20t/3台・日		
	使用電力 22kW/台		
	使用時間 6時間/日		
	包装分離機		
	処理量 5t/日		
	使用電力 17kW/台		
	使用時間 4時間/日		

特に食品有機廃棄物の回収、代替輸入プロセスといった各段階に含まれる“輸送”がエネルギー消費、二酸化炭素排出に対して、大きく影響している要素であることが分かった。また、コスト面で両者を比較した場合、現状の経済メカニズムでは焼却・廃棄処理の方が優位であり¹³⁾、食品有機廃棄物の発生源である食品加工産業が焼却・廃棄処理を選択するのは当然である。逆に考えれば、飼料化コストが焼却・廃棄処理コストよりも優位になれば、必然的に循環型プロセスにシフトし、環境負荷削減が期待できるということになる。

この飼料化コストに大きく影響するのは、為替レート、シカゴ穀物相場、輸送距離、廃棄物処理費用の4要素であり、本研究では特に輸送距離に着目し、現状で循環型プロセスを可能とする食品有機廃棄物の輸送距離の算定を試みた。前提条件として、為替レート (Ex) を 130 円/\$、シカゴ穀物 (トウモロコシ) 相場 (Ma) を 2.40\$/bushel、産業廃棄物処理費用 (WC) を 8 円/kg とした。まず、為替レート、シカゴ穀物相場から食品加工産業が飼料化を行う場合のコスト (TC) を以下の式によって推定する。その推定値と産業廃棄物処理費用を比較することによって、輸送可能であるかどうかを判断する。

$$V = ((Ma + F) \cdot CJ \cdot Ex \cdot CT + EC) / T$$

$$TC = FC + X + V \cdot C$$

V: トウモロコシ日本到着値、Ma: シカゴ相場価格、F: 船賃及び米国内輸送費

CJ: 重量換算係数 1、Ex: 為替レート、CT: 通関、保険等に関する係数

EC: その他経費、T: 重量換算係数 2、TC: 飼料化コスト

FC: 飼料加工コスト、X: 輸送コスト、C: トウモロコシ価格に対する有機廃物飼料価格への変換係数

WC > TC の場合は再資源化 (循環) 可能であり、WC < TC の場合は再資源化 (循環) 不可能となる。オカラは飼料化 (循環プロセスに移行) することは非常に困難であり、醤油粕も輸送距離が 250km を超える場合は不可能になる。パン屑は飼料価値が高いこともあり、400km を超える場合でも輸送

可能であることが分かった (図 2)。しかし、都市近郊で食品工場から発生する大きなロットの食品有機廃棄物を受け入れ可能な畜産業は皆無であり、必然的に食品工場からの輸送距離が伸びているのが現状である。循環型プロセスへの移行において、輸送距離以外の要因である為替レート、シカゴ穀物相場価格、産業廃棄物処理費用であるが、世界的な食糧危機、最終処分場問題が危惧されることを踏まえれば、循環型プロセスに有利に展開すると予測される。

表 4 飼料化によるエネルギー消費、CO₂ 排出の削減効果

単位: kcal/t			
エネルギー消費量	オカラ	醤油粕	パン屑
焼却・廃棄処理	352,183	509,049	690,808
飼料化	122,667	191,750	168,600
削減効果	229,516	317,299	522,208

単位: kgC/t			
二酸化炭素排出量	オカラ	醤油粕	パン屑
焼却・廃棄処理	71.58	83.97	98.33
飼料化	9.62	23.82	19.25
削減効果	61.96	60.16	79.08

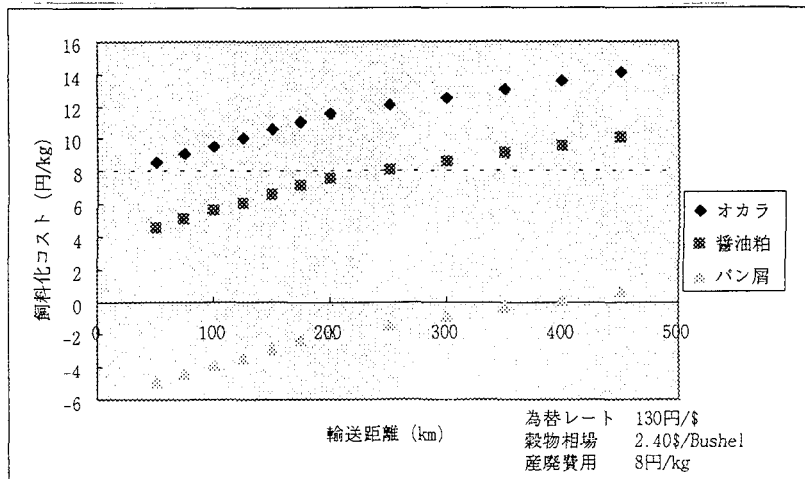


図 2 循環プロセスを可能とする各副産物輸送距離

4. さいごに

本研究では循環型の飼料化プロセスが現状の焼却・廃棄処理よりも「エネルギー消費、二酸化炭素排出」に対して、極めて優位であることを示した。さらに、再資源化（循環）プロセスへの移行を実現する条件として飼料コストと輸送距離の関係を示した。

飼料化等の再資源化を基本とする循環型プロセスは我が国でも高度成長期以前は当然のように行われていたが、産業形態が大規模な工業化に移行することで望んだ経済復興と引き換えに失われ、必要以上の資源消費を促し、各セクターからの環境負荷を増大させた。今後さらに深刻な問題として予測される化石資源の枯渇、地球環境変動に対して各セクターが、新たな価値判断の下、社会全体で環境負荷発生を抑制するためにも、再生可能資源に立脚した自立的な社会構造へ変革していかなばならないだろうが、本報がそれに向けての基礎情報となることを期待したい。

参考文献

- 1) 大豆加工食品副産物利用促進対策事業 - オカラ利用促進対策中央協議会報告書 -, 財団法人食品産業センター, 1996
- 2) 有機質資源化推進会議編：有機廃棄物資源化大辞典, 社団法人農山漁村文化協会, 1997
- 3) 飼料用資源効率の利用普及推進事業報告書, 社団法人中央畜産会, 1992
- 4) 食料自給表, 農林水産省, 1997
- 5) 袖野玲子：食品産業廃棄物の実態分析と循環型社会への課題, 京都大学大学院工学研究科修士論文, 1997
- 6) 農林水産省農林水産技術会議事務局編：日本標準飼料成分表, 社団法人中央畜産会, 1995
- 7) 内藤正明：循環型社会の見取り図, 環境情報科学 27-2, pp.2-6, 1998
- 8) 社団法人資源協会編：家庭生活のライフサイクルエネルギー, あんほるめ, 1994
- 9) 内藤正明、楠部孝誠：食品廃棄物を対象とする循環システムの形成, 食品機械装置 VOL35. Pp73-81, 1998
- 10) 岩川貴志：食品副産物再利用による環境負荷削減効果の推定, 京都大学工学部卒業論文, 1998
- 11) 社団法人環境情報科学センター編：ライフサイクルアセスメントの実践, 化学工業日報社, 1996
- 12) 資源エネルギー庁長官官房企画調査課編：総合エネルギー統計平成9年度版, 通商産業研究社, 1998
- 13) 楠部孝誠、津村和志、内藤正明：有機物の再資源化による循環システムの確立, 第6回地球環境シンポジウム講演論文集, pp.161-166, 1998