

特集

材料・原料におけるエコロジー

近年，“エコロジー”という言葉は、広義に解釈されて広く使われるようになり、人間生活と自然環境との調和のための活動を意味することが一般的になっている。そのような活動には人間が意図するだけで実現できるものもあるが、新しい材料やシステムを必要とするものもあり、特に後者の重要性は年々高まっている。そこで本特集では、エコロジーにおいて重要な役割を果たす材料や原料、または材料・原料の製造・回収システムに焦点を当てることにした。言い換えると、「地球に優しい」・「自然環境へ配慮した」材料・原料あるいは関連のプロセスのことであり、それらの最新情報と今後の展開について紹介する。

(編集担当：岸田昌浩)†

原材料のエコロジーを考えるための背景

笠倉 忠夫

1. はじめに

エコロジー分野では人間活動の生産や消費等の上流側を動脈系 (arterial system)、そして廃棄物処理などの下流側を静脈系 (venous system) と呼んでいる。20 世紀後半に入って、高度に発達した科学技術に支えられて動脈系の活動が著しく活発化し、その結果として環境問題が激化した。動脈系と静脈系を通して移動するモノの質・量をいかに制御して行くかが問われているのである。環境問題に対しては、これまでも多くの研究・技術開発がおこなわれて来た。しかし、今後の途上国の発展や人口の増大などの世界情勢を考えると、更なる努力が求められている。本特集の「材料・原料におけるエコロジー」はエコロジーにおいて重要な役割を果たす材料や原料、あるいは材料や原料の製造・回収システムの最新情報を提供するものであり、これからの環境対応に向けた貴重な報告である。

これに対して本文は個別のテーマを取り上げるのではな



Background for Consideration of Material Ecology
Tadao KASAKURA (正会員)

1958年 早稲田大学第一理工学部応用化学科卒業

現在 (財)名古屋産業科学研究所 研究部
上席研究員

連絡先：〒478-0013 愛知県知多市南巽が丘
2-118

E-mail QYL00031@nifty.ne.jp

2011年7月20日受理

く、個々のテーマを考える背景となった現状の我が国の環境問題について、主として動脈系と静脈系を通したモノの流れを中心としたエコロジカルな考察をおこなうものである。

2. エコロジーという言葉の意味

エコロジーという言葉は、本来ドイツのヘッケルがギリシア語 oikos (家や家の周りという意味) から Ökologie (英語: ecology, 生態系) という学術用語として造語したものであるが、今日人々はこの言葉を源義と無関係に幅広い意味合いを持つ言葉として用いるようになった。かつて人類は自然生態系にはほとんど関心を払わず、人間社会の発展にのみ注力してきた。ただこのような世情の中でも、生態学の泰斗 E.P. オダムは既に 1963 年、名著「生態学」(Fundamentals of Ecology) の中で人々が生態系に目を向けるべきことを警告している。環境問題が深刻化するにつれ、人々はようやく自然生態系の重要性を知り、人々が自然生態系と共生しなければ人間生態系そのものが存続しえないことを自覚した。1987 年、国連「環境と開発に関する世界委員会」は報告書「Our Common Future」の中で、“人類が持続可能な発展をするためには、人間活動を自然生態系と調和させ、人間圏を生物圏と共生させなければならない”と説いた。必然的に人間生態系を自然生態系と調和させながら発展を考え

† Kishida, M. 平成 21, 22 年度化工誌編集委員 (11 号特集主査)
九州大学大学院工学研究院

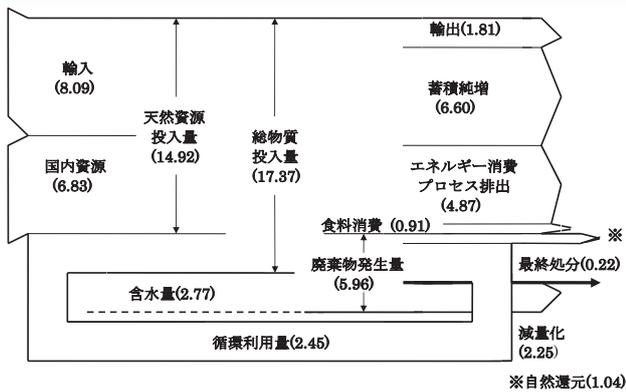


図1 2008年の我が国の物質フロー(単位は億トン/年)

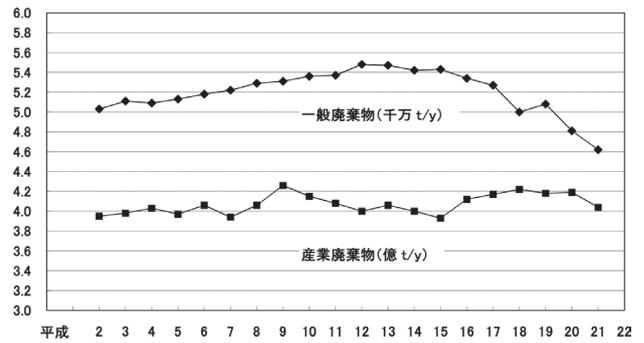


図2 平成年代における廃棄物排出推移

て行く、又そのようなライフスタイルを求めるといった気運が高まり、このような考え方や運動を幅広く表現する言葉として「エコロジー」と言う言葉が用いられるようになった。つまり、一般に「エコロジー」と言った場合に、それは「環境に配慮した考え方あるいは行動様式」と言った意味を持つ。このように、特殊な言語を一般的な言葉として用いて行くことを言語の社会用語化というが、本文でもエコロジーという言葉は社会用語化された言葉として用いて行く。

エコロジーと同様、一般的によく用いられながら誤用されている環境用語がある。環境保護(environmental conservation)と環境保全(environmental preservation)である。両者はよく混同され勝ちであるが、環境思想上では全く対立する概念である¹⁾。前者はエコロジー中心主義(eco centrism)と言われ環境に対しては観念的対応であるのに対し、後者は技術中心主義(techno centrism)と言われ環境に対して具体的対応を目的とした概念である。勿論、我々工学系の任務は環境保全であることは言うまでもない。この両者が激しく対立し、全国的に名を馳せた事件として1990年代後半に名古屋市で起きた「藤前干潟埋立問題」が挙げられる。結果的には干潟は保護され、後にラムサール条約登録干潟となった。この係争の中で筆者が興味を持ったのは、鷲田²⁾がおこなったCVM(仮想的市場評価法)による干潟の経済的評価であり、これによれば藤前干潟は2,960億円と算出された。金額の多寡や評価結果がどのように結末に影響したかは定かではないが、環境問題を客観的な学問的アプローチによって評価するという事は今後の方向として大いに活用して行くべきと考える。

3. 我が国の物質フロー

生産活動のエコロジー的立場からは、動脈系と静脈系を通して物質がどのように流れているかを知ることが必要であり、それは物質フローから得られる。図1に環境省平成

23年度版「環境統計表」に基づいた2008年度の我が国の物質フローを示したが、この図から我が国の物質フローを検討してみよう。動脈系への物質投入量の97%が資源であり、中でも原燃料を主とする輸入資源の比率が高い。輸入原燃料の内訳は、燃料が60%、鉱石が20%、そして食料が7%となっており、我が国の主要資源の海外依存度の高さがわかる。投入物質中に含水量というものがあるが、これは主として汚泥や家畜排泄物、鉱滓などに含まれる水分を指している。一方、静脈系で最も多量の項目は国内蓄積となっているが、これは土木構造物や耐久財などの主として社会インフラとなるものである。図では自然還元の中に、約1,800万トンと言われる家畜排泄物などからの堆肥も含めて示されている。注目すべきは最終処分量で、発生量2,200万トンは年間総物質移動量の1.1%であるが、この最終処分量は年々減少して来ており、現在量は10年前の40%である。我が国の物質フローを総合的に評価すると、年間の物質移動量が年毎に減少して来ており2008年度の総量20.14億トンは13年前(1995年度)24.74億トンの約81%に減量している。その主な要因は、国内資源、国内蓄積、廃棄物量の減少、そして輸用量、循環利用量の増加に起因していると考えられる。このような物質フローの趨勢から、我が国では環境意識が浸透し、徐々にではあるが世の中がエコロジカルな方向へ動いていると言って良いであろう。

物質フローに関しては、原材料のエコロジーを考えるとこの立場からは動脈系からの廃棄物の動向を認識して置く必要がある。我が国の過去20年間に渉る廃棄物発生状況を図2に示した。一般廃棄物は近年に至るまで年間5,000万トンを越す量が発生していたが、この数年から発生量の減少が見られ、平成20年には5,000万トンを下回った。近年の廃棄物からの資源回収が定着して来たことがその要因と考えられる。しかし、最近の大幅な減量については経済的要因も考慮すべきであろう。MSW(Municipal Solid Waste)と呼ばれる一般廃棄物発生量は、我が国を含め多くの国でGDPと相関すると言われ、景気後退期にはMSW発生量は

表1 国土条件の差による人間活動量の比較

比較項目	単位	日本	ドイツ	アメリカ
国土面積	10 ³ km ²	377.8	357.0	9,629
人口 ¹⁾	10 ⁸ 人	1.274	0.821	3.176
名目 GDP ¹⁾	10 ¹² US\$	5.549	3.316	14.658
一般廃棄物量 ²⁾	10 ⁶ t	48.1	52.8	232
平坦地面積	10 ³ km ² (%) ³⁾	80.5(21)	228(64)	4,580(48)
平坦地当たり人口	人/km ²	1,583	360.1	69.34
平坦地当たり GDP	10 ⁶ US\$/km ²	67.81	14.54	3.200
平坦地当たり廃棄物	t/km ²	598	232	50.6

注1)2010年 2)日本は2008年, 他は2005年 3)全面積に対する割合

低下するからである。一般廃棄物に対して、産業廃棄物はこれまで年間4億トンから4.2億トン前後の間を上下する発生量を示して来ている。我が国で排出される主な産業廃棄物の年間排出量を平成20年度データで見ると次の通りである(単位は百万トン)；

汚泥：176.1 動物糞尿：87.7 ガレキ類：61.2

鉱滓：18.4 バイ塵：16.6

産業廃棄物の場合、全体の2/3は汚泥、動物糞尿などの高水分物であり、これらの水分を除いた固形廃棄物は約3億トン前後と推定される。それらは焼却などの処理や循環利用され残余2,000万トン前後が最終処分される。

4. 人間活動を支える我が国の国土条件

世界の先進工業国の中でも、我が国は人間活動を行う上で最も厳しい国土条件の基に置かれていると言えよう。我が国は人間活動が可能な平坦地が国土全面積の21%と極めて低く、人間活動の大きな制約となっている。いま、生産活動指標としてGDP、環境負荷指標として一般廃棄物発生量を取り上げて、日本、ドイツ及びアメリカ三国について単位平坦地面積当たりのそれぞれの指標値の比較をおこなってみる。表1に結果を示したが、我が国の単位平坦地当たりの指標値はいずれも他の国に比較して大変大きい。動脈系の生産活動にとっては工場立地難などの問題、静脈系の産業としては廃棄物の処理処分の困難さ、いずれも、平坦地の狭隘さに起因している。殊に、廃棄物の関連施設は迷惑施設として殆どのケースでNIMBY(Not in my back yard)運動と対峙する。この問題に関しては秋山ら³⁾が興味深い研究をおこなっている。この研究によれば、迷惑施設からの距離と住民の迷惑感との関係はワイブル関数で近似し得るとされ、距離に無関係に反対する人々が存在する。秋山らはこれをNIABY(Not in anyone's back yard)と名付けたが、我が国特有の問題であろう。

動脈系の活動をバックアップする静脈系の在り方については、我が国の国土条件を考慮した合理的な方法を考慮し

て行かなければならない。我が国では元来内陸部での廃棄物埋立は大変困難である。そこで国は大都市圏の臨海部に公設の大規模な埋立処分場を建設する「広域臨海環境整備センター法(1981)」を制定した。いわゆるフェニックス計画である。この計画に基づいて「大阪湾広域臨海環境整備センター」が設置され、この事業は大阪湾圏域の環境保全に大いに貢献し大きな成果を挙げている。一方、工業出荷額日本一の愛知県は、産業廃棄物発生抑制を目的とした産業廃棄物税を導入すると共に、公益法人「愛知臨海環境整備センター(ASEC)」を設立し、平成4年から名古屋港(22年で事業完了)および衣浦港(22年より事業開始)で埋立事業をおこなっている。産業廃棄物の埋立処分地残存年数が数年と言われている中で、このような公設臨海埋立事業はこれからの環境施策の一つの方向であろう。

狭い国土条件の中で、資源問題として是非考えて置かねばならない問題が「食料問題」である。現在の我が国の食料自給率は先進国の中で最も低く40%である(一人1日当たり2,588kcalとしたカロリーベース)。先般発表された「国連世界人口推計」では、世界人口は2011年10月末で70億人、2050年93億人そして2100年に101億人に達するとしている。川島⁴⁾は本紙特集号「地球の限界容量」で世界人口のピークを90億として世界の食糧問題を考察しているが、国連の予測が正しいとすると世界の食料事情は極めて困難な状況を呈するであろう。我が国は抜本的な食料自給策を検討すべきである。

5. 環境活動指標

現在、3R(reduce reuse recycle)が環境活動の指標として国の環境施策にも採り入れられているが、これは1992年の国連環境開発会議アジェンダ21にある人間活動ガイドライン:minimizing waste, waste reuse and recyclingに端を発するものである。生産の場においてはreduceにプライオリティが置かれるべきであり、プロセスの効率改善、新プロセスの開発等徹底した排出物削減が計られるべきである。

表2 我が国の循環型社会指標の推移

指 標 \ 年	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
名目GDP(10 ¹² ¥)	503	498	491	490	498	502	507	516	504	470	479
資源生産性(10 ⁴ ¥/t)	26.3	25.9	27.1	29.4	30.9	32.9	34.8	36.1	36.1	—	—
循環利用率(%)	10.0	9.6	10.1	11.2	11.7	12.1	12.5	13.5	14.1	—	—
最終処分量(10 ⁷ t)	5.7	5.3	5.0	4.0	3.5	3.2	2.9	2.7	2.2	—	—

注 平成23年版 環境省環境統計集より

廃棄物は熱力学的に高エントロピー状態となって排出されるので、これをリサイクルするためには相当のエネルギー消費を伴い廃棄より環境負荷を増大させる可能性も有り得、十分な検討が必要である。一例として、最近注目を集めているレアメタルの回収・再生に関する伊藤⁵⁾の提案を紹介してみたい。レアメタルを含有する廃棄物は全体として高エントロピー状態にあり、そこから高純度のメタルを得るには相当量のエネルギー付加を必要とする。そこで先ずレアメタル使用製品は買い取りでは無くレンタル制とし、廃棄物となる時メーカーの責任で回収する。回収品は地域毎に可能な限り大量に収集しコンビナート方式でメタルの資源化を計るのである。この方式を「レアメタル資源再生コンビナート構想」と呼ぶ。

環境活動指標のように用いられるもう一つの言葉に「ゼロエミッション」がある。この言葉は1994年、国連大学のG.パウリのZERI (Zero emission research initiative) に発する言葉で、この標語の下、工業団地内で原材料をカスケード利用して排出を極限まで減らそうという試みなどがおこなわれた。一方、研究面では筆者も参加した文部省科研費研究「ゼロエミッションをめざした物質循環プロセスの構築」や文科省科学技術振興調整費研究「循環型社会システムの屋久島モデルの構築」という大型プロジェクト研究がおこなわれた。言うまでもなく、熱力学第二法則(エントロピー増大の法則)が示す通り、全ての活動において科学的意味でのゼロエミッションは有り得ない。今、この言葉は環境問題において人の目指すべき究極の理念と言う意味に転化された社会用語として用いられている。

6. 循環型社会の形成

2000年12月、国は「循環型社会形成推進基本法」を制定、国の進むべき方向を定めた。ここでいう循環型社会 (Sound material - cycle society) とは、“天然資源の消費量を減らし、環

境負荷を出来るだけ少なくした社会”としている。法に基いて「循環型社会形成基本計画」策定が定められ、現在は2008年3月に制定された第2次計画が進行中である。計画の中では循環型社会の評価指標として、資源循環性、循環利用率、最終処分量の三つの指標が定められ、計画進捗状況を評価することになっている。表2に、これまでの各評価指標の推移状況を示した。資源生産性は2007年まではGDP値の変動にも拘わらず、資源投入量削減により順調に伸びてきた。しかし2008年で伸びが止まっており今後の伸びが懸念される。他の二つの指標は資源生産性よりGDPの影響を受けにくいと考えられ年々改善されている。循環型社会形成に向けて今後も目標達成への努力が求められる。

7. 科学技術の在り方

20世紀後半、高度に進歩した科学技術によって次々とシステムの制約条件が解放された人間生態系は爆発的に進化した。しかしそのアンチテーゼとして、いま人間には環境問題が突き付けられている。現在の環境問題を考えると、これは現代の科学技術の在り方を問うことである。つまり、科学技術がいま求められているのは人間生態系の無制限な進化ではなく、現代文明を地球の有限性の内に成立させるということである。この中で化学工学に出来ることは何か、山田⁶⁾は学会誌で新しい社会システムのシナリオ作りには、プロセス工学を得意とする化学工学に期待すると述べているが、筆者もこの意見に全く同感である。

引用文献

- 1) 海上知明：地球環境史からの問い—環境思想の形成史, pp.328-341, 岩波書店(2009)
- 2) 鷲田豊明：日本学術振興会環境フォーラム2000, 平成12年10月14日, 豊橋, 「環境の最前線」予稿集, p.62
- 3) 秋山貴, 原科幸彦, 大迫政浩：廃棄物学会論文誌, 16(6), 429-440(2005)
- 4) 川島博之：化学工学, 65(9), 468-472(2001)
- 5) 伊藤秀章：化学, 66(2), 24-28(2011)
- 6) 山田興一：化学工学, 75(5), 259(2011)