展
望

都市環境システム工学のコンセプトと展望

平 林 忠 道

名古屋工業大学大学院

都市循環システム工学という耳慣れない新しい学問領域について、それが資源を大切にし環境に負荷をかけない循環型社会を構築し、支えていくための多角的な工学的アプローチを組織化したものであることを紹介する。とくに高分子とのかかわりでは、21世紀にはプラスチック廃棄物の再資源化が必須の重要目標となるだろうとの展望を示している。

1. はじめに

幾多の生物が興亡を繰り返してきた地球上で、人間は間違いなく現在の主人公である。その主人公の飛躍的に進化した“脳力”の行使が、自らの生存の基盤を日々危ういものに行っているとしたならば悲劇である。新世紀まで残り日数を数えて待つ今日、このような警句を単なる杞憂として聞き流せるほど状況は甘くない。

今世紀100年は地質学的尺度ではほんの一瞬に過ぎないのだが人類にとっては十分長く、膨大な理学的な知を蓄積し、それに基づいてとくに後半に工学的な技術を爆発的に発展させた。それは人類に物質的豊かさの保証を与える方向で展開し、ペースが落ちたとはいえなおその推進力を失っていない。これはわが国だけの特殊性でなく、どの国においても程度の差はあれ産業構造を一次産業から脱却させ、工業化を進める政策をとった。この基本方向は悪いことではないが、従来の物質の工業的大量生産・大量消費システムは資源への配慮が著しく欠けていたため、結果として各種資源の枯渇にどう対応するか考えなければならぬほどの危機的状況を招くに至った。問題は資源枯渇だけではない。今や60億を超える人類は都市へ集中し、そこをベースに産業を興し生活を営んでいるのだが、それに伴って地球規模の問題を含めこのまま放置したのでは解決困難な諸々の問題をひき起こした。これらは図1に示すように、互いに不可分の因果関係がある。

Tadamichi HIRABAYASHI 名古屋工業大学大学院工学研究科(466-8555 名古屋市昭和区御器所町)都市循環システム工学専攻・教授。工学博士。専門は高分子合成、有機金属。〈趣味〉登山

The Concept of Environmental Technology with Urban Planning and Its Vistus in the 21th Century

もちろん人類はこれを見過ごさず、まず地球規模の自然環境の変調に留意し、各国の首脳がこの問題に関連して一堂に会して話し合うまでになった。必ずしも万全と言えないけれども、温暖化ガスの排出規制に関して国際的な締約¹⁾を交わした京都会議-COP3-(1997)は記憶に新しい。この頃のキーワードは「環境」であり、大学においても理工学の面からこの問題を組織的に扱う大学院の独立研究科や専攻、学部の新設・再編成が集中した。

筆者の勤務する大学でも、上述の諸問題に対処するための工学体系の創成を目的とした研究教育組織の立上げを図ったが、キーワードとしてあえて「環境」を探らずに「循環」を選び、循環型都市社会システムを確立するうえでの学術的基盤となる科学技術の創成や洗練化を目的とした博士課程独立専攻「都市循環システム工学」専攻を1997年春に発足させた。その際に通産省工業技術院名古屋工業技術研究所の研究スタッフにも加わっていただいた。この新しい組織の基本的な考え方、とくに筆者がかかわる高分子合成との関連を述べるのが小稿の目的である。

図1 グローバル問題とその因果関係

2. 都市循環システム工学とは

今日人類が抱える困難な環境問題は生産経済活動の拠点である都市への人口集中と深く関連し、都市での従来型生産・生活システムを変革しないと、近い将来人類の生存に必要なシステムが各所で破綻しかねないことを図1で示した。何よりもまず資源とエネルギーの無制限な消費、自然の還元能力を超えた大量の廃棄物の排出を改めるべきである。天然資源の枯渇と廃棄物増大は表裏をなすので、今後は廃棄物の資源化を支援するための先端工業技術開発を精力的に行う必要がある。「都市循環システム工学」の基本概念は資源を大切に、人類が都市で行う活動が環境に及ぼす負荷を最少にするために、今まで軽視しがちだった視点—循環思想—を明確にもって行う諸々の工学的アプローチのことである。

都市循環システム工学専攻に置かれた4つの基幹講座は①マテリアルリサイクル(物質循環)システム、②エネルギー循環システム、③生産循環システム、④都市管理システムである。これですべての問題に対応できるわけではないが要所は抑えてあると言えよう。

各講座の主要テーマを概観してみよう。①では付加重合系高分子の一次構造の多重制御による高性能化、新規生分解性高分子の設計、糖などの天然資源を活用した機能性高分子材料の設計、非天然ポリペプチドの分子設計と機能化(たとえば環境汚染物質の選択的補足機能など)、精密設計された有機金属クラスターによる環境汚染物質の固定など、②では高効率かつ安価な太陽電池の開発、複数機能を統合するシステム光電子集積回路の開発、環境モニター用半導体センサーの試作、ミューオン触媒核融合の研究など、③では乱流熱流体現象の理論解析、生産現場における温熱環境の最適設計、調光機能をもつ遷移金属酸化物薄膜の開発、一次元量子デバイス用の金属内包炭素ナノチューブの作製など、そして④では産業副産物のコンクリートへの再利用、高性能建築用リサイクルボードの開発、環境を考慮した都市交通計画、都市温熱環境に対する人間の生理と心理解析、などが研究されている。さらに名工研の講座では深刻な域内公害問題を克服した経験を発展させ、大気環境保全システム用の高性能固体触媒の開発や省エネルギー的バイオミネラライゼーションプロセスを活用した環境調和型無機材料の開発などが行われている。このような研究テーマを見ればひとつひとつがまるで巨像に群がる蟻のようにも見えなくはないが、これは循環型社会システムまたは環境問題は広い裾野がある証拠である。

現代都市の抱える環境面での諸問題は現象的には実に多様であり、多数の要因が複雑に絡み合うことが多い。また単独では小さな影響でもその長期累積・相乗効果が問題となったり、ひとつの課題の解決が他の課題をいっそう深刻にする**ドレードオフ**効果なども考慮しなければならない典

型的な「複合問題」である。したがって次世代の科学者・技術者はしばしば学際的あるいは複眼的思考力をもって懸案と対峙しなければならないだろう。この点を重視して専攻所属の院生に履修させる講義課目には、所属分野での研究を推進するに必要な従来型専門課目のほかに、視点と思考回路を広げてもらう意図で、都市政治文化論、科学技術史、環境生態学、地球資源論、環境科学、リサイクル関連法規なども用意した。

3. 循環型社会と高分子工業との接点

ここでは高分子と循環型社会の接点を考えることで、高分子科学分野での「都市循環システム工学」像を浮かび上がらせたい。都市環境問題と高分子との最大の接点は、膨大な量の生活・産業廃棄物に占める高分子の割合が多いうえにその処理が困難になっている点にあり、また安易な廃棄が資源の浪費と重なる点にある。製品化されてから廃棄にいたる期間は短期(包装材料、飲食料容器など)、中期(自動車、家電など)、比較的長期のもの(建築構造材など)といろいろあるが、すべて含めた統計ではわが国のプラスチック年産量(約1,200万トン)の50~55%ほどがその年に廃棄される勘定になる¹⁾。他の材料には見られないこの驚くべき数字は、この材料が再考を迫られている「使い捨て文明」の寵児であることを示す。

高分子材料はこの半世紀間に性能や機能において顕著な進化を遂げ、他の素材を押し回して利用が可能なあらゆる分野に進出してきた。この材料の使い勝手の良さと優れた可能性を知った人類は、21世紀になってもこれを手放さずに依存度をより高めるものと予想される。ところがいったん廃棄物となった高分子の評判は残念ながらひどい言われ方で、たとえばリサイクルを扱った啓蒙書^{2~4)}の中では「ゴミの中の厄介者(物)」といった手厳しい表現が目立ち、関係者としては実に肩身が狭い。

ゴミ処理は現在のところ大部分を焼却と埋め立てで行っている。前者はエネルギー回収の一面もあるが、焼却中に発生する内分泌攪乱人工物などの問題が顕在化し、また後者は適地が少なくその行為自体が自然環境の破壊につながる場合もあっていき詰まっている。経緯は新聞紙上を賑わしたのでよく承知のことと思うが、本年春先に名古屋市の藤前千潟ゴミ処理場計画があえなく頓挫したのも、新しい価値観のうねりにもはや逆らえないことを象徴している。高分子廃棄物の処理には、原料である石油資源の近未来における枯渇も視野に入れると再資源化がもっとも望ましいのだが、複合して使うことの多い高分子材料では分別回収がそれほど簡単ではないことやコストの問題から、通常の生産システムとの並行化は思うようには進展しなかった。

当面とる策は、より長寿命の高性能材料(すなわち安易にゴミにできない)や生分解性などの付加価値をもつ易分

解性高分子材料（すなわちゴミになっても環境に負荷をかけない）の開発を進める一方、高分子廃棄物リサイクル回路の構築、その過程で必要ないわゆる環境触媒⁵⁾などの開発や化学工学的装置の改善などを腰を据えて進めることである。これらは次世代の持続的発展への展望を明るくし、またわれわれが作り出してきた物に責任をもつ意味からも必要なことであり、高分子関係者が取組む価値ある仕事のひとつである。

4. 高分子材料のリサイクル

廃棄高分子材料の可能な物質循環回路を図2に示す。

もっとも小さな回路[1]は製品外形をそのままにして何回も使用する再使用(Reuse)を意味する。30年ぐらい前までは牛乳、醤油、酒類などの容器はこれが当然であった。現在これらの容器は紙パック、スチールやアルミ缶とともにプラスチック製も多いが、衛生上の問題もあり再使用はほとんど行われていない。現在のシステムは再使用に勝る利便性・経済性があるからである。

回路[2]は狭義のマテリアルリサイクルで素材高分子に戻して再加工し前と同じ製品、悪くても低グレード製品として再利用する回路で、とくに単一成分しか含まない廃材に向き、最近この体制の実施条件が整えられつつある。たとえばポリプロピレン製自動車用バンパーやコンテナは、バージン成分を若干加えながら何度も熔融・再加工して製品化するようになった。関係企業がこのプロセスを軌道にのせるため技術の洗練化を推進している。またポリスチレン製トレイなどを園芸用プランターにしたり、PETボトルを熔融繊維化して作業衣などの原糸にすることも実施されている。いずれも諸物性値が純新品より劣ることやコスト高になることなどが問題となる。回路を成立させるには再生製品が恒常的に市場にさばけることも重要な条件である。PETボトルの繊維化において、中学や高校生の制服素材にこれを使うことを義務化（もちろん色やデザインは自由）しようという提案は暴論だろうか。

構成成分が複数で分離分別が困難なものはまずダスト化し、その中から金属やガラスなどを除いた後に熱（光）分

解して低分子有機化合物（の混合物）または石油類似物まで戻すのが回路[3]である。このような油化反応に水素を共存させて粗製ガソリンや擬灯油を得る方法が数多く研究されている⁶⁾。加水分解などを組み合わせる場合もある。これらはケミカルリサイクルと総称されるが、この回路を工業的に合理性のある形で完成させることが次世代の重要な目標となろう。付加重合系高分子の熱分解挙動はポリマーの種類で解重合型、ランダム切断型などと大体決まるが、もしも先端的に解重合型分解をひき起こす触媒系が開発されると、その分解プロセスの価値はきわめて高い。回収した単一成分製品を高収率でモノマーに戻し、再び重合させることを繰り返せば著しい省資源効果が期待できるからである。縮合系高分子をモノマーに戻すのは比較的容易で、たとえばPETの加メタノール分解で、エチレングリコールとジメチルテレフタレートが回収できる。6-および6,6-ナイロンも化学的には分解できる。一般新聞紙でさえ市民を対象にモノマーリサイクルの解説をして、分別の必要性を啓蒙するようになったのは心強いが、問題はこれらのプロセスが概して多量のエネルギーを要し、物質収支とエネルギー収支バランスがとれない点である。仮に物質としては循環回路ができて、そのためのエネルギー源に発電用石油を大量に消費したら意味がない。これに限らず都市循環システムの構築にはいつも多角的な目配りが必要となる。また押し固めて固形燃料(RDF)化の技術、ガス化熔融法などの技術も資源化という意味でこのカテゴリーにはいる。

右上への回路のうち[4]は焼却酸化である。燃焼熱を発電、給湯、工場や地域の暖房などのエネルギー源として回収、物質としては炭酸ガス、水などに還す。燃料として石油を直接燃やしたのと同様な結果に至るが、その前に化学製品として一働きしている。ここでも比較的均質な高分子廃棄物なら問題は少ないが、雑多なゴミと一緒に燃焼後の排ガスなどに厳しい注意が必要である。

一番外の回路[5]は微生物の力を借りた高分子材料の処理である。生分解性高分子と称される一部の高分子（おもに脂肪族ポリエステル）は微生物の出す体外酵素によって分解され、分解物は彼らの食餌として体内にとりこまれ代謝回路にはいって微生物の生命維持エネルギーを与えつつ、二酸化炭素と水を大気中に戻す。余剰摂食した分は微生物体内に高分子形で備蓄されるので、この種の微生物に生合成させた高分子の利用も夢がある。生分解性高分子は医薬学分野への特化した応用だけでなく、使用後そのまま放置しても環境にあまり負荷をかけずに分解できる利を活かして、ゴミになりやすい包装材や容器類、農業用や土木工事用シートなどに用途が広がっている。残念ながら現在生産量の多い汎用高分子はまったく生分解性をもたない。また生物が食餌として好む高分子が、工業化社会の中で望ましい材料特性をもつとは限らない。しかし両者の折り合

図2 高分子材料のリサイクル回路

いを求めて多様な分子設計上の工夫が可能であり、大学研究室を含め各方面で環境適合性、あるいは環境調和型高分子材料として盛んに研究されている⁷⁾。

5. 次世紀に期待を込めて

都市循環システム工学の基本概念、とくに啓蒙的な言辞の部分は誰もが納得してくれるであろう。しかしその名を冠した専攻に属する各研究者でさえ、自分の考えを信じて模索的に試行錯誤している段階かもしれない。今後社会的要請の大きい課題に対して、構成する各専門分野の多様な実績を重ね合わせた大きなシステムを組立てる試みが必要と思われる。その場合新産業を生み出すセンスに富んだ民間企業にも参画してもらいたい。

このような問題を正面に掲げた専攻や学科が増えたこともあって、環境問題、資源・エネルギー循環型社会構築に興味があるという学生が増えたことは喜ばしいが、実体はまだ底が浅い。たとえば研究の途中で「泥臭くてやっつけられない」となり、熱意が衰えることもある。同じ研究室で華々しく脚光を浴びている他の分子設計関連のテーマに目移りし、自分の泥臭いと思ひ込むからである。若い研究者がこの問題に対して確固たる使命感と価値観を見いだせる状況をつくらなければならない。大きな循環回路の輪をつなごうとする地道な研究への評価がもっとあってほしいと思う。また「これは環境資源問題に資する」と謳った数多い研究の中から、実際に循環型の生産システムへの移行に衝撃的に役立ったという研究が出てくると状況は変わりうる。幸いにも高分子学会において、本年度の年次大会から「環境と高分子」という発表分野を新たに常設する英断を下し、今までの何か場違いな会場で発表するような感覚からの開放を図った。まだ発表件数は少ないが、そこでの熱心な討論が今後の大きな潮流をもたらすことを強く願っている。

さらに言えばこの工学が成り立つには、「われわれの生活上で何をもっとも大切と考えるのか」という価値観の再構築が必要である。これは大学や企業内個々の研究者の意識だけでなく、国民全体、できるなら世界的規模で共有する価値観でないと、諸々の努力がもろくも崩れてしまう。そのような意味では工学的アプローチと併せて政策的な決断も必要となる。それに関し、1995年制定の容器包装リサイクル法⁸⁾の全面実施を睨んで、他の政令指定都市に先駆けて8月から細かい分別回収の実施に踏み切った名古屋市の例を紹介して結びにしよう。

容器・包装はゴミの総容積の8割を占めるので、廃棄物として出てくる段階で資源循環回路のルートに乗せれば一石二鳥の効果が期待できる。今まで名古屋市都市産業振興公社などが参加するインバースマニファクチャリングシステム (IMS) 研究会や環境適合性有機材料フォーラムを通じて、何度も市のゴミ回収システムは手ぬるいと批判してきた。今回の施策は筆者らの意見だけで決まったのではないが、とにかく意見が入れられたからには回収した資源ゴミを資源として効果的に再活用する工学的技術の高度化をもって応えなければならないと思う。市長は特別談話で、「面倒で費用も掛かる策を採ったのは、名古屋市のゴミ処分場がきわめて厳しい状況にあるのを契機として、循環型都市地域社会の構築を目指したいからだ」と未来を強調し、さらに「今回の分別制度が面倒だと思う方は今までの利便の享受を優先する限り部屋の中にゴミが溜まる。面倒なものは家に持ち込まない暮らし方に転換するように」と訴えている⁹⁾。実施当初、回収を拒否されたゴミ袋がそれを伝えるラベルを貼られて放置される風景が多々見られ、混乱があったことは確かである。それを批判冷笑する意見もあるようだが、市は後退しないほしい。近いうちに東京都が続く、さらに全国の大都市に波及するのは間違いのない。21世紀初頭は種々の困難を克服して、少なくとも日本の都市圏が高分子を介して、循環型社会へ明確に舵を切り替えた時代として記憶されるだろう。

文 献

- 1) 資源リサイクル問題研究会編：資源・環境・リサイクル—循環型産業経済システムの確立—(政府資料集)，(株)産業技術会議 (1999)
- 2) 本田淳裕：工業生産とリサイクル，(財)クリーンジャパンセンター (1996)
- 3) 村田徳治：最新リサイクル技術，オーム社 (1993)
- 4) 久保田 宏，松田 智：廃棄物工学—リサイクル社会を創るために—，化学工学会編 (1995)
- 5) 宮崎栄三，御園生誠，宮本 明：環境触媒—実際と展望—，日本表面化学会編，共立出版 (1997)
- 6) 飯島林蔵，伊東亮一，重森喜夫，越生昭徳，橋本健治，猪川弘徳，塚田正隆：廃プラスチック油化技術の開発と動向，NTS，(1995)
- 7) 土肥義治 (代表)：生分解性プラスチックハンドブック，生分解性プラスチック研究会編，NTS (1995)，以降の膨大な個々の文献はここでは省略する
- 8) 石川禎昭：廃棄物・リサイクル関係法令早分かり，オーム社 (1999)，pp. 190-226
- 9) 朝日新聞記者：「松原武久名古屋市長に聞く」(8月8日名古屋版より)，朝日新聞社 (2000)