

総論 1

リサイクルとエコマ テリアルの技術開発 と評価—建築材料の 視点から—

福島敏夫

長寿命性と資源循環性と環境調和性の鼎立方法の重要性

最近、金融危機に端を発する世界的同時不況の中で、景気回復施策が錦の御旗のように喧伝されているようだ。しかし、見方を変えるならば、これまでわれわれが享受してきた大量生産・大量消費・大量廃棄の欧米型物質文明及び経済体系の破綻を認識し、そのあり方を見直し、改めて、資源循環と環境保全に配慮した持続可能性を如何に模索するかを考える好機と考えることもできる。リサイクルとエコマテリアルもちろん重要だが、建築材料の視点から考えると、ライフサイクルを考慮した長寿命性と資源循環性と環境調和性の鼎立を図ることが、資源循環型・環境調和型の持続可能な建築・都市・社会の基礎となるものと考えることができる。

持続可能性の条件

持続可能な建築・都市・社会の構築の基礎としては、ライフサイクルでの資源生産性の向上を目指した資源循環型のシステムの構築が強調されることが多い。循環型社会基本法も制定され、人間居住環境・地域環境・広域環境・地球環境の保全とエネルギー・資源の枯渇を防ぐために、非枯渇性の再生産資源の有効利用と枯渇性非再生産資源の3R（廃棄物減容化、再使用、リサイクル）（**Reduce, Reuse, Recycle**）の徹底化による自然の物質循環のサイクルの再構成が重要になるからである。また、昨今問題になっている地球環境問題、資源・エネルギー枯渇問題、大量の混合廃棄物問題への対処の仕方のひとつとして、耐用年数の調整と環境調和性に配慮しつつ、材料・部材・部品・製品・構造物の長寿命化を目指した耐久設計の重要性が説かれることも多い。資源の良好なストック化とともに、廃棄物の発生回数と発生量を減らすことができ、断熱化を図れば、省エネルギー効果の持続性により、生涯環境負荷量を大いに低減できるからである。一方、日本は、災害に見舞われやすく、建築物では、地震、火事、風・水害等による災害対策も必要だし、環境ホルモンや揮発性有機化合物（VOC）あるいは、アスベストなどの有害化学物質に対するリスク回避などの安全性も考慮する必要もあ

る。持続的な安定成長の視点からは、やはり経済性も重要視される。この意味で、環境／景観と長寿命性／安全性と経済の3つの視点のバランスに配慮するのが、持続可能性の基礎と考えられる。

物質文明と資源循環

人類が地球上に出現してから産業革命にいたる前までは、更新可能なエネルギー・資源（再生産資源）（森林・風力・水）を利用した産業・生活スタイルであったために、自然のサイクルと資源循環の輪が描かれていた。人類の諸活動は、自然と融合し、例え廃棄物が排出されても、自然の浄化能力と自浄能力の範囲内であった。人間の居住のための建築を支える建築材料も、太古の昔から綿々と使用されてきた天然材料である自然の木、竹、草、土、石が主体であった。人工材料としては、わずかに、青銅器と、砂鉄等に由来する鑄鉄であった。しかし、産業革命以後、更新不可能な枯渇性のエネルギー・資源（非再生産資源）（鉱物・化石・岩石）に頼った大量生産・大量消費・大量廃棄型物質文明の発達により、資源循環と自然のサイクルの輪が描けなくなり、多くの問題が生じている。循環型社会への転換が叫ばれるゆえんである。建築材料は、建築物を支える素材として、大量生産・大量消費・大量廃棄の近代以後の欧米型物質文明の一翼を担って発達を遂げ、更新不可能な非再生産資源に由来するものが多く使われる。図1は、建設業も含めた人間の諸活動と資源循環の流れを示すものであるが、持続可能な建築・都市・社会を構築してゆくには、図の青色の線で示されるように、更新可能なエネルギー・資源の利用率を上げるとともに、黒色の線で示される非再生産資源に由来する材料の3Rの徹底を図り、大量の混合廃棄物の発生による環境負荷を低減して、地球の物質循環の再構築を図る必要がある。

リサイクルの重要性

建築材料は、建築部位に使用されて性能・機能性を発揮するが、設計耐用年数後、あるいは早期劣化により、廃棄される段階になると、大量の難処理性の混合廃棄物の山と化

して、資源の枯渇に拍車をかけることになりかねない。建設廃棄物は、体積換算だと全産業分野の廃棄物の約40%を占め、その半分は、建築廃棄物である。また、不法投棄の70

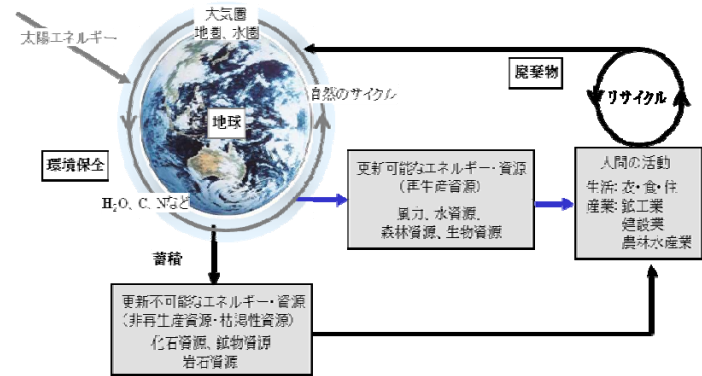


図1 人間活動と資源循環（鈴木 胖編「リサイクル工学」の4頁の図1.1-4 に加筆・修正）

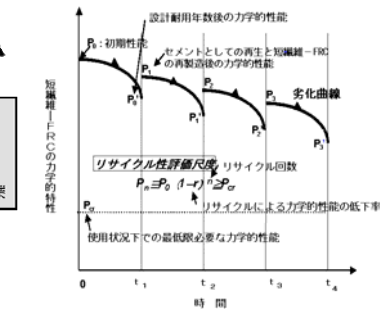


図2 繰り返し部分リサイクル（カスケード・リサイクル）の原理

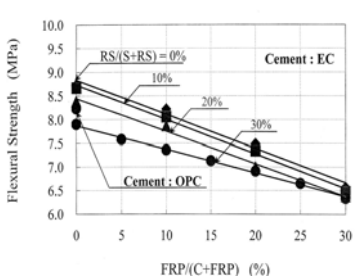


図3 ピッチャー炭素短繊維補強セメント系複合材料（ピッチャーCFRC）の曲げ強度に及ぼす微粉末化廃FRP置換率の影響（EC：エコセメント、OPC：普通ポルトランドセメント）（EC90%微粉末化廃FRP10%で物質・材料効率が10%向上）

リサイクルのジレンマ

建築物の設計耐用年数に達した後に、解体・リサイクルがかなり難しく、また解体したとしても大量の混合廃棄物になってしまう建築材料も多く、その後の処理がどうにもならないガレキの山となり、最終処分場の収容能力が満杯状態になって、不法投棄による居住環境・地域環境・広域環境・地球環境に多大な負荷を与えてしまうという現実も認識されるようになってきた。また、資源循環の立場からは、リサイクルは有効だが、建築材料・部材は、供用中に劣化が起ることを免れないこと、エントロピーの法則からは、無序化することが安定であり、元に戻すためには膨大なエネルギーを必要とすること、化学反応の観点からは、酵素反応を除き、変換率は100%にはなり得ないため、完全リサイクルには限界があって、リサイクルする度に少しずつ資源は散材化して集中度は失われてゆく。また、アルミニウムなどの一部の例外を除いて、一般的には、リサイクルにかかるコストとエネルギーは、処女資源を使うよりはるかに大きくなり、また有害化学物質の散在化による環境汚染も進むジレンマも指摘されている。ただ、「リサイクルしてはいけない」という書籍を著した著者¹⁾は、プラスチック廃棄物を燃やすことにより、残渣として、金属資源の蓄積により、日本が資源大国になることが期待できると極めて楽天的な考えを述べているが、建設廃棄物は、コンクリート、木材、ガラス、金属類の混合廃棄物となりやすいので、ただ燃やせばよいと言う論法では、建築分野の混合廃棄物問題に関して、何の解決にもならないのは、いうまでもない。個別のリサイクル技術の積み上げばかりでなく、もう少し、リサイクルの哲学と方法論の再構築も必要である。性能の低下という問題もあるが、一

0%近くに達しており、有効な処置に対する建築分野の責任が問われている。このために、建設リサイクル法も制定され、建築材料のリサイクルの社会的推進が進められている。特

回だけのリサイクルで自己満足するのではなく、数回行うことも必要である。図一2は、繰り返し部分サイクルの考え方である。また、図一3は、グレードアップ・リサイクルの実験的研究成果である

建築材料のエコマテリアル化

環境調和型材料(エコマテリアル)、は、日本を情報信源として、世界的に普及した重要な材料の概念であり、従来のフロンティア性やアメニティ性のほかに、リサイクル性や環境負荷削減性などの環境調和性を併せ持つ均衡型の材料を言う。建築材料は、特に、“人にも地球にも優しいエコマテリアル”である必要がある。最近では、それに沿って、いろいろなエコマテリアル及びエコマテリアル型建材も開発されるようになった。表1は、これらのエコマテリアル型建材を分類したものである。エコマテリアル型建材の6つの環境調和性評価項目（長寿命性、資源循環性、有害化学物質非発生性、資源・環境容量改善性、物質・材料効率改善性、健康安全性）と8つのライフステージ（資源採取、輸送、生産、組立/建設、供用/維持/保全、解体、リサクル/再使用/再生産、減容化/最終処分）の組み合わせによる6行×8列のエコライフサイクル・マトリックスにもとづく。通常行われる生涯環境負荷評価（LCA）としてのライフサイクル・インベントリ（LCI）以外の環境調和性評価項目を加味し、ライフサイクルでのステージとして、輸送が組み入れられているのが、ポイントである。また、この表では、（社）日本建築家協会が指定しているエコマテリアル型建材と（社）日本環境協会の指定するエコマーク付き建材も取り入れられている。図4は、長寿命性、資源循環性、有害物質非発生性、資源容量・環境容量改善性、物質・材料効率、健康安全性の6つの環境評

価項目に関する材料のエコマテリアル度を示した例である。GFRCは、かなり優れたエコマテリアルと考えられるが、物質・材料効率と資源循環性はやや劣る。珪藻土入りの土壁は、資源循環性、物質・材料効率、健康安全性に優れた材料であることがわかる。

環境調和型材料（エコマテリアル）、環境調和型材料設計（エコマテリアル・デザイン）及び環境調和型生涯設計（エコライフサイクル・デザイン）のすすめ

資源循環と環境保全に配慮し、持続可能な建築・都市・社会を築くためには、大量生産・大量消費・大量廃棄の20世紀型の欧米物質文の一翼を担う形で発達を遂げ、環境に大きな負荷を与え易い建築材料のリサイクル技術の確立が必要であると声高く叫ばれて久しい。しかし、その必要性とともに、その限界も明らかになってきた。このため、建築物の設計の段階から、ライフサイクルを考慮した長寿命性と資源循環性と環境調和性の鼎立を図る仕組みを考える必要がある。建築材料の環境調和型材料（エコマテリアル）へ転換と共に、環境調和型設計（エコマテリアル・デザイン）、あるいは、環境調和型生涯設計（エコライフサイクル・デザイン）を行うことが重要であり、建築材料・部材・構法に関する研究・技術開発も、この大きな流れに添ったものにシフトする必要がある、また望まれるところである^{2)～3)}。

参考文献

1) 武田邦久：リサイクルしてはいけない、219pp、青年出版社(2000)
2) 福島敏夫：環境調和型材料設計・生涯設計法―持続的発展可能な環境調和型建築・都市の構築の基

礎として、日本建築学会総合論文誌第1号（地球環境建築のフロンティア）、pp.74-80, 2003

3) 福島敏夫：人と地球に優しい持続可能型住環境を

目指して一環境調和型材料（エコマテリアル）、環境調和型材料設計（エコマテリアル・デザイン）、環境調和型生涯設計（エコライフサイクル・デザイン）のすす

めー、Civil Engineering Consultant、
Vol.229 (Oct. 2005) pp.28-31

表1 エコマテリアル型建材の分類

	資源採取	輸送	生産	組立・建設	供用・維持・保全	解体	リサイクル/再使用/再生産	減容化/最終処分
1. 長寿命化に寄与		・軽量・高耐久性FRP ・軽量アルミニウム			・高耐腐性鋼 ・高耐久コンクリート ・高耐久高分子仕上塗料 ・免震ゴム ・連続繊維補強コンクリート(FRRC) ・自己修復生プログラム埋め込みコンクリート/FRP			
2. 資源循環性に寄与 (リデュース/リユース/リサイクル性に富むもの)				・モジュール化部材		・プレキャストPC部材 ・高性能複合用金物/FRP ・ボルト接合型集成木材	・低合金リサイクル性鋼材 ・生分解生プラスチック/熱可塑性樹脂 ・自己修復生プログラム埋め込みコンクリート及びFRP ・重金属含有量の少ない構造用木材	
3. 有害化学物質の発生抑制・除去に寄与(フロン、ダイオキシン、重金属類など)					・ポリオレフィン系塗料 ・非フロン性接着剤 ・珪藻土塗料 ・光触媒型埋め込みモルタル			・最終処分において重金属の溶出やダイオキシン発生のない材料
4. 資源/環境容量の改善(再生産資源の有効利用・省エネルギー材料)	・(製造エネルギー及びCO ₂ 発生・排出量の少ない材料)	・(輸送に伴うエネルギー及びCO ₂ 発生・排出量の少ない材料)		・軽量・薄型化材(FRP, FRC) ・繰り返し使用可能でリサイクル性に優れたコンクリート型枠(FRTP) ・針葉樹合板型枠	・羊毛断熱材 ・天然木材断熱材 ・天然量(ヒノキ量、備長炭入り量、有機稲本量) ・屋根一体型太陽電池太陽量水器 ・透明アクリル樹脂指トップライト	・(解体エネルギー及びCO ₂ 発生・排出量の少ない材料)	・(リサイクル/再生産エネルギー及びCO ₂ 発生・排出量の少ない材料)	
5. 物質・材料効率の向上(再生材料・未利用材料、比強度・比弾性率の大きい材料)	・再生骨材 ・高炉スラグ ・フライアッシュ ・廃FR微粉末 ・廃ガラス		・エコセメント ・再生コンクリート ・再生プラスチック ・再生木材 ・再生建築ボード ・再生石膏ボード		・高強度鉄筋と軽量・高強度コンクリートの組み合わせによる軽量・高強度RC構造部材 ・高強度FRP補強筋と軽量・高強度コンクリートの組み合わせ部材			・資源投入量が少なく、嵩張らない新構造材料
6. 健康安全性に寄与(VOCによるシックハウス症候群の改善、ラドンおよびアスベストによる肺がん発生の改善)					・非塩ビ性断熱紙 ・漆喰系左官材 ・水溶性塗料接着剤 ・天然ワックス接着剤 ・ケナフ利用断熱紙 ・天然コーティング紙			

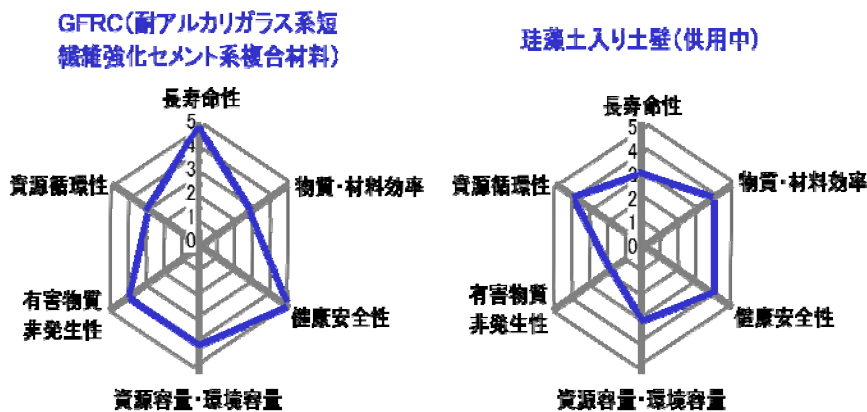


図4 レーダーチャートによるエコマテリアル度の評価例

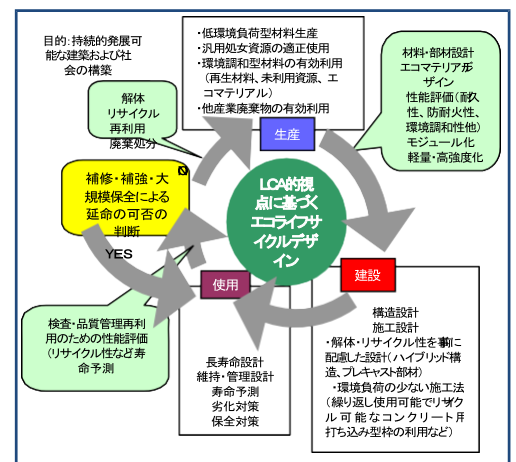


図5 環境調和型生涯設計(エコライフサイクル・デザイン)の考え方

