

学術論文

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 —

Methods of Environment-conscious Materials Design and Environment-conscious Life-cycle Design
— as a Basis of Establishment of Sustainable Eco-buildings and Eco-cities —

福島敏夫 Toshio Fukushima

Abstract

In order to supply a basis to develop sustainable eco-buildings and eco-cities in the future, taking into account the resources circulation and the preservation of the environment, concepts and procedures of environment-conscious materials (ecomaterials), environment-conscious materials design (ecomaterials design), and environment-conscious life-cycle design (eco-life-cycle design) are proposed and reported for building materials, and components. Ecomaterial-type building materials are classified and various indicators such as materials efficiency, recyclability etc. are proposed and quantified to evaluate ecobalance performance. Examples of application of ecomaterials design and eco-life-cycle design are shown for short-cut fiber reinforced cement composites and new external thermal insulation systems, respectively.

Key Words

building materials, environment-conscious materials (ecomaterials), environment-conscious materials design (ecomaterials design), environment-conscious life-cycle design (eco-life-cycle design), ecobalance performance

建築材料・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）・環境調和性

1 はじめに

産業革命以後、人類は、地球の無限の浄化能力と自浄能力を過信し、地球から大量の資源・エネルギー源を採取し、加工・組立を通じて製品化し、設計耐用年数の間の有効な活用により、人間の物質及び消費生活を豊かにし、使用が終了した後は、大地に戻す体系で、文明社会を成り立たせてきた(図1)¹⁾。太い線で示されるように、更新不可能な枯渇性のエネルギー・資源（非再生産資源）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、資源容量と環境容量の限界を既に越え、諸々の環境問題が生じるようになった。持続的発展可能な環境調和型・資源循環型社会の実現のためには、できる限り、細い線で示される更新可能なエネルギー・資源（再生産資源）の利用率を上げると共に、非再生産資源の3R（リデュース・リユース・リサイクル）の徹底を図る必要がある。他方、近代・現代における建築及び建築業の実態を鳥瞰すると、本来、建築は、過去に文化遺産となった名建築も多く残っているように、衣・食・住の生活の場である空間を作るという魅力ある創造行為であり、環境にも貢献しているはずであるが、実は、生産と解体時に大量の材料の使用と副産物・廃棄物発生を伴い、使用期間中は、居住者の生活活動の一環として、膨大な資源とエネルギーを消費するために、環境問題及び資源・エネルギー問題との関係が極めて深い。近代以降、建築および建築業は、大量生産・大量消費・大量廃棄型の物質文明の恩恵を十分すぎるくらいに享受し、また、その一翼を担う形で発達を遂げたものである。それ

故、資源・エネルギー・環境問題に対する責任も重い、その解決法が実現した場合には、環境保全と資源循環に配慮した持続的発展可能な環境調和型・資源循環型社会の実現に向けての貢献は極めて大きい。ただ、その際に、建築物の長寿命化と省エネルギー・省資源の徹底という旧来型技術的対応だけでは不十分であり、もう少し、環境調和型・資源循環型の建築及び建築業及び居住スタイルに脱皮し、「環境および景観」と「経済」と「安全性／長寿命性」の3つのバランスを保った持続的発展可能な建築・都市の構築を図る必要がある。そのためには、先ずは、建築を形成するための素材として、多種多様に大量に使用され、大きな環境負荷を与えることになりかねない建築材料を、“環境と人に優しい”環境調和型材料（エコマテリアル）

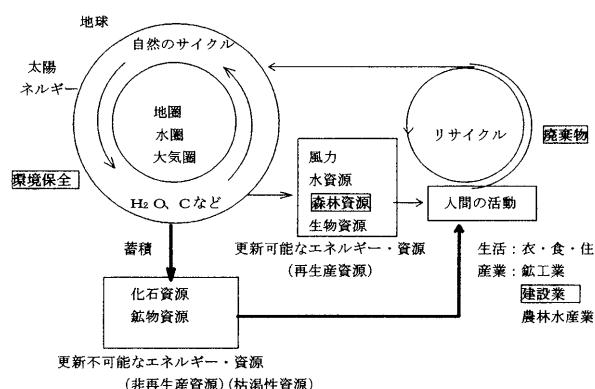


図1 資源・エネルギーの利用による人間活動と自然のサイクルとの関係
(鈴木 胖編「リサイクル工学」の4頁の図1.1-4に加筆・修正)

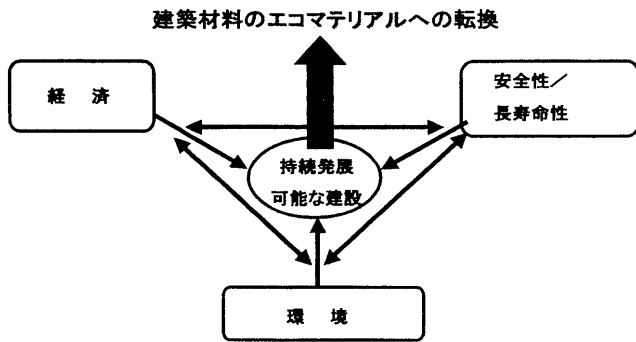


図2 持続的発展可能な建築および建設の条件

へ転換を図る必要がある（図2）。また、設計の段階から、環境に配慮した環境調和型材料設計（エコマテリアル・デザイン）および環境調和型生涯設計（エコライフサイクル・デザイン）を行う必要がある。本論文は、このエコマテリアル、エコマテリアル・デザイン、エコライフサイクル・デザインの基本的考え方とその体系化の方法論について述べると共に、環境調和性の評価のために設定する各種の評価尺度に関する理論的・実験的研究成果を交えて、総合論文としてまとめたものである。

2 研究方法と研究結果

2.1 建築材料のエコマテリアル化とエコマテリアル型建材

環境との調和のとれた材料技術の発展は、今後の人類の存在と活動の基盤となる持続的発展可能な環境調和型社会の構築のために不可欠であることが認識されるようになってきた。このため、日本を情報発信源として提唱され、地球環境保全に向けて材料からのアプローチを図るエコマテリアルの概念の重要性が、世界的にも認識されるようになり^{2)・3)}、建築材料についてもその視点が益々要請されるようになってきている。今後は、リサイクル性や環境負荷低減性などの環境調和性を持った“地球に優しいエコマテリアルである”という特性も必要になってきている。また、アスベスト、ラドン等による肺癌誘発の問題や内装材や接着剤、塗料などから遊離するホルムアルデヒド等の揮発性有機化合物（VOC）による健康障害に見られるように、人間の居住環境を損なうような建築材料の開発や使用はしないというような哲学も必要である。この意味では、特に建築材料は、“地球環境にも人間居住環境にも優しい”エコマテリアルである必要がある⁴⁾。図3に建築材料と地球環境と人間居住環境の相互の三角関係を示す。

1) エコマテリアル型建材の分類

エコマテリアル型建材への期待に対する世の中の動きも活発化する趣勢にある。ただ、機能材料だけでなく、構造材料のエコマテリアルへの転換（エコマテリアル化）^{注1)}を図ることができれば、その社会的インパクトは大きいと考えることができる。最近、建築分野においても、建築材料のエコマテリアル化あるいはエコマテリアルの建築材料としての有効活用必要性が叫ばれ、エコマテリアル型建材も徐々に開発されるようになってきている。その時、どのようにして、エコマテリアル度^{注2)}あ

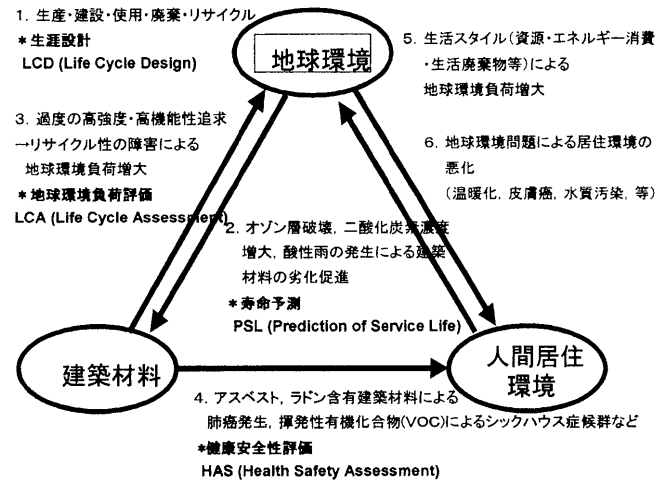


図3 建築材料と地球環境と人間居住環境の相互の三角関係

るいは環境調和性を評価するかの判断が必要になる。このために、本研究では、エコマテリアル型建材の分類と環境調和性の評価法について諸検討を行った^{5)・6)}。表1は、資源面からみた建築材料の分類を示すものである。かなりの程度、枯渇性の非再生産資源に由来する建築材料が多いと考えることができる。このために、建築材料のリサイクル率の改善による資源循環の流れを考える必要がある。長寿命性、資源循環性、有害化学物質の発生抑制・除去、資源・環境容量の改善、物質・材料効率の向上という5つの環境負荷低減項目と資源採取、生産、組立／建設、使用／維持・保全、解体、リサイクル／再使用／再生産、減容化／最終処分というライフサイクルの7つのライフステージを組み合わせた5行×7列のエコライフサイクル・マトリックスを考え、各行列要素に対応させて、エコマテリアル型建材の分類を行った（表2）。まだ埋まっていない行列要素には、今後開発されると予想されるエコマテリアル型建材が対応するもので、メンデレーエフの元素周期律表と同じように、それらの特徴をある程度推定することができる。

2) 環境調和性（エコマテリアル度）の評価法

環境調和性は、表2における縦の項目の定量的表現を考えればよい。もちろん、ある建築材料のライフサイクルでの環境負荷低減効果を見るためには、ライフサイクル・アセスメント（LCA）が必要である。ただLCA的評価尺度としては、ライフサイクルでのエネルギー使用量と二酸化炭素（CO₂）発生量の統合型評価としてのライフサイクル・インヴェントリ（Life-Cycle Inventory：LCI）だけでは不十分であり、地球環境影響度評価（Life-Cycle Global Environmental Impact Analysis：LCIA）^{注3)}、リサイクル性評価尺度（Recyclability Indicator：RI）、廃棄物非占有率評価尺度（Waste Unoccupamy Indicator：WUI）^{注4)}、物質・材料効率評価尺度（Materials Efficiency Indicator：MEI）などの他のLCA評価尺度も考えて、環境調和性の的確な評価が必要であり、これらの評価尺度の定量化が必要である。

A) 物質・材料効率

特に、新材料の資源容量・環境容量の観点からの環境負荷低減効果の評価尺度として、物質・材料効率がある。これは、環

表1 資源面かためた建築材料の分類

	資源の種類	素材	建築用材料	
			構造材料	非構造材料
Ⅰ. 更新可能な再生産資源に由来するもの	1. 森林資源	・天然木材 ・天然ゴム	・構造木材 ・（免震用ゴム）	・内層木材
	2. 草資源	・わら・かや	・たたみ	・畳、屋根葺材
	3. 空気資源	・空中窒素固定法によるアンモニア合成からの尿素樹脂	・	・内装材
	4. 穀物資源	・でんぶん		・（接着剤）
Ⅱ. 更新不可能な非再生産資源に由来するもの	1. 化石資源	・合成有機高分子材料 ・繊維強化プラスチック（FRP）	・ ・（構造用 FRP）	・各種内装材・外装仕上塗材・塗料 ・給水タンク
	2. 鉱物資源	・鉄鋼 ・アルミニウム	・構造鋼材 ・構造アルミニウム合金	・ ・アルミサッシ
	3. 岩石資源	・石材 ・セメント ・コンクリート	・構造用石材 ・PC 部材 ・RC 構造部材	・化粧用石材 ・屋根瓦・ボード
	4. 土資源	・珪藻土 ・壁土		・非構造壁材 〃
Ⅲ. 再生産資源と非再生産資源両方に由来するもの		・セルローズ繊維強化複合材料 ・集成木材 ・日干しレンガ	・構造用集成材 ・（構造用レンガ）	・FRC, FRP

境効率とともに、資源容量の有限性を認識したときに、人間の活動の基盤としての製品及びサービスに対する材料の最適な投入量と環境負荷量を考えるものであり、次のように定義される。

◎物質・材料効率＝製品及びサービスの要求性能／総材料投入量（Total Materials Requirement：TMR） (1)

例えば、築部位における要求性能・機能を満足させるために投入すべき処女資源を、未利用資源や再生資源で置換してほぼ同等の性能・機能が得られれば、物質・材料効率を改善できることになる。このことは、再生資源や未利用資源による処女資源置換率を p として、そのときの性能低下率を r とすれば、要求性能を P とすれば、次のような形の式でも表せることになる。

◎物質・材料効率評価尺度＝ $P(1-r)/TMR(1-p)$ (2)

B) 資源循環性（リサイクル性の評価尺度）

これは、使用中の材料の劣化とリサイクルに伴う性能低下率を考慮しながらも、使用状況下での最低限必要な力学的性能に達するまで、繰り返しリサイクルを行い、「何度リサイクルが可能か」ということで、リサイクル性の評価尺度とするものである（図4）。例えば、短繊維—FRCの初期力学的性能（ P_0 ）を考え、リサイクルに伴う性能低下率（ r ）を考慮しながらも、ある使用状況下での最低限必要な力学的性能（ P_{cr} ）に達するまで、セメントとしての再生を媒体として、何度（ n ）も繰り返し部分リサイクル（カスケード・リサイクル）するとすれば、PAN—CFRC（PAN（ポリアクリロニトリル）系炭素短繊維補強セメント系複合材料）では初期曲げ強度 $P_0 = 20 \text{ kN/mm}^2$ であり、 $P_{cr} = 8 \text{ kN/mm}^2$ 、性能低下率を 20% とすれば、 $P_4 = P_0(1-r)^4 = 20 \times (1-0.2)^4 = 20 \times 0.4096 = 8.2 \geq 8$ であり、したがって、4 回まで繰り返し部分リサイクルができることになる。

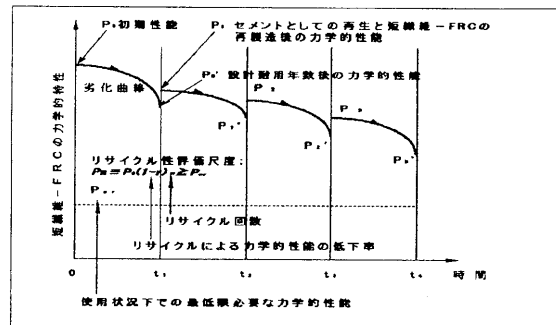


図4 短繊維補強セメント系複合材料（短繊維—FRC）の繰り返し部分リサイクル（カスケード・リサイクル）の概念

2.2 環境調和型材料設計（エコマテリアル・デザイン）と環境調和型生涯設計（エコライフサイクル・デザイン）の基本概念^{7)・8)}

資源循環と環境保全に配慮し、持続的発展可能な建築・都市の構築を基礎とした 21 世紀の環境調和型社会を築くためには、大量生産・大量消費・大量廃棄型の 20 世紀型物質文明の一翼を担う形で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。もちろん、建築材料のリサイクルの促進を図ることは重要である。しかし、建築物の設計耐用年数に達した後で、解体が難しく、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しまうという現実が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、建築材料の多くは、供用中に劣化が起ることと、変換効率等を考えると、完全リサイクルは難しいこと、また、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るというジレンマも指摘されている。このため、建築物の設計の段階から、長寿命化と同時に、易解体性・易リサイクル性及び環境負荷低減性などの環境

表2 エコマテリアル型建材の分類

ライフステージ 環境負荷 低減項目	資源採取	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	減溶化／ 最終処分
1. 長寿命化に 寄与				・高耐候性鋼 ・高耐久性コンクリート ・高耐久性高分子仕上塗材 ・免震ゴム ・連続繊維補強コンクリート (FRPRC) ・自己修復性プログラム埋め込みコンクリート及び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 ・高性能接合用金物／FRP ・ボルト接合型集成木材	・低合金リサイクル性鉄鋼／アルミニウム ・生分解性／光分解性／熱分解性／化学分解性プラスチック／FRP建材 ・自己崩壊プログラム埋め込みコンクリート及びFRP防腐／防蟻／防虫用重金属含有量の少ない構造用木材 ・天然性接着剤使用構造集成木材	
3. 有害化学物質の発生抑制・除去に 寄与 (VOC、 フロン、ダイ オキシン、重 金属類など)				・珪藻土壁材 ・光触媒埋め込みモルタル ・非塩ビ性壁紙 ・漆喰系左官材 ・水性塗料／接着剤 ・天然ワックス／接着剤 ・ケナフ利用壁紙 ・天然こうぞ壁紙 ・ポリオレフィン系内装材 ・非フロン性断熱材			・(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)		・軽量・薄肉化材料 (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 ・天然木材内装材 ・天然畳 (ヒバ畳、備長炭入り畳、有機稲本畳) ・屋根一体型太陽電池／太陽温水器 ・透明アクリル樹脂トップライト	・(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・非弾性 率の大きい 材料)	・再生骨材 ・高炉スラグ ・フライアッシュ ・廃FRP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 ・再生ロックウール化粧吸音板	・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による軽量 ・高強度FRPRC構造部材				・(資源投入量が少なく、嵩張らない新構造材料)

調和性を配慮した設計が必要である。建築材料・部材・構法に関する研究も、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。

環境調和型材料設計 (エコマテリアル・デザイン) とは、建築物の想定部位において、力学的特性、防・耐火性、耐久性という三大要求性能を満足させるための建築材料の組み合わせ方を考え、その製造・選定・評価としての総合大系としての材料設計において、事前にリサイクル性や、CO₂ 及びエネルギーに関する環境荷低減性などの環境調和性を新たな性能評価項目として追加し、諸性能のバランスに配慮した設計する考え方である。

環境調和型生涯設計 (エコライフサイクル・デザイン) は、資源採取、生産、輸送、組立／建設、使用／維持・保全、解体、リサイクル／再利用／最終処分の全ライフサイクルにおいて、物質・材料効率の向上と環境負荷低減性を配慮した環境適合型の設計をする考え方である。エコライフサイクル・デザインは、エコマテリアル・デザインよりも高次の概念で、建築材料のエコマテリアル化、エコマテリアル・デザインの手法をも包括し、かつ寿命予測 (Prediction of Service Life : PSL)、ライフサイクル・コスト分析 (Life-Cycle Cost Analysis : LCC) 及びライフサイクル・アセスメント (Life-Cycle Assessment : LCA) 的な評価の方法論を基礎として、全ライフサイクルでの

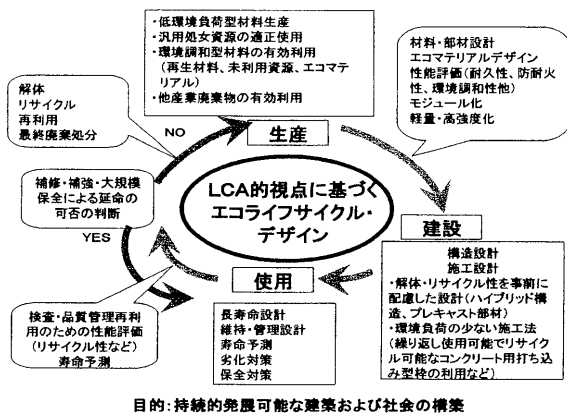


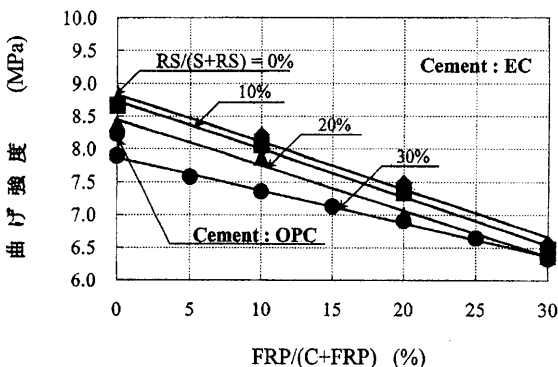
図5 環境調和型生涯設計（エコライフサイクル・デザイン）の基本的概念

諸々のプロセスに関連してくるものである。図5にその概念を図解する。

2.3. エコマテリアル・デザインの具体例—ピッチ系炭素短繊維-FRC を例として—⁹⁾

2.3.1 エコマテリアル化と資源循環プロセス

短繊維補強セメント系複合材料（短繊維-FRC）は、肺ガンの問題により使用が制限されつつある石綿繊維セメント板代替としての外装材などへの応用への道を切り開くもので、十分エコマテリアルとしての特徴を持つ。しかし、リサイクル性の観点からすると、短繊維が分散して混入されるために、パネル部材としてそのまま再使用する場合を除き、マテリアル・リサイクルが最も難しい材料のひとつである。それ故、エコセメントや、微粉末化廃FRPで普通ポルトランドセメントを置換し、川砂を再生細骨材で置換し、物質・材料効率の向上を図ると共に、設計耐用年数終了後のリサイクル時には、セメントに再転換することにより、エコマテリアル化と資源循環プロセスの流れを促進するための実験的検討を行った。図6に、実験結果の一部として、曲げ強度の試験結果を示す。この実験結果から、次のことが明らかになった。①都市ゴミからの再生材料であるエコセメントを用いたピッチCFRCを、普通ポルトランドセメントを用いたピッチCFRCと比較すると、エコセメントの粒度が、普通ポルトランドセメントよりも小さいため、分散性が良く、材料特性がかえって向上し、再生材料の利用による性能向上現象というおもしろい結果が得られた。②微粉末化



OPC：普通ポルトランドセメント、EC：エコセメント

図6 ピッチCFRCの曲げ強度に及ぼす微粉末化FRP置換率の影響（再生細骨材率をパラメータとする）

廃FRP及び再生細骨材の置換率（15%まで）の増大と共に、直線的に曲げ及び引張強度が低下する。③エコセメントに対する微粉末化FRPの置換率が5%、川砂に対する再生骨材の置換率5%の範囲であれば、処女資源のみを用いたピッチCFRCの材料特性と遜色がなく、物質・材料効率率が約10%向上することが明らかになり、短繊維-FRCのエコマテリアル化と資源循環プロセスの大きな道筋が得られた。

2.2 エコマテリアル・デザイン

ある環境条件下におけるある建築物の想定部位の要求性能・機能を満足させるためには、どのような既存の短繊維-FRCを選択するか、または、物性改善法を含めて、目標とする性能・機能を持つものをどのように新たに製造するかという時に必要となるのが、材料設計である。建築分野での3大要求性能は、力学的特性、耐久性、防・耐火性である。しかし、地球環境問題への有効な対応を考えると、短繊維-FRCにおいても、リサイクル性や環境負荷低減性などの環境調和性という新たな性能評価項目を設定して、それを配慮したものに変換することが必要不可欠である。このため、従来の建築材料の選択・評価システムとしての材料設計法を踏襲しながらも、環境調和性を考慮した環境調和型材料設計（エコマテリアル・デザイン）の基本体系の構築を図った。例えば、海岸地帯の防火地区での事務所建築の外断熱構法に、CFRCを利用しようとする時、データベースと4大要求性能を比較し、満足する性能が得られるかの判断を行うことになる。この時、要求性能の数値化と性能評価試験・計算法の確立が重要になる。また、この基本体系の基礎として、各種の繊維及びそれを用いた短繊維-FRCのデータベースが構築される必要があるが、既に、現在使用されているすべての力学的特性および製造時の混練特性などが、数値データとして収納されたデータベースが整備されている。

2.4 エコライフサイクル・デザインの具体例—新外断熱構法を例として¹⁰⁾

断熱材を含む短繊維-FRCを外装材とした断熱パネルを鉄筋コンクリート構造躯体に取り付けて一体化する新外断熱工法について、エコマテリアル・デザインとエコライフサイクル・デザインの適用を試みた。図7に各構成材のエコマテリアル化を考慮した環境調和型新外断熱構法概念を示す。外装-FRCの物質・材料効率の向上を図り、高強度・高耐久性で、リサイ

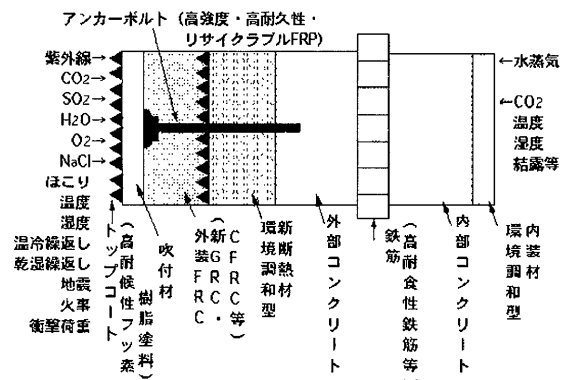


図7 環境調和型新外断熱構法概念図

クルが可能で熱橋にもなりにくい、熱可塑性樹脂による FRP アンカーボルトによる接合方式とし、断熱材や内装材は、VOC や環境ホルモンの発生が少ないエコマテリアルに転換すると共に、各構成材の高耐久性と構法全体の耐久性に配慮するのがポイントである。

3 結 論

1)「環境および景観」と「経済」と「安全性／長寿命性」の3つのバランスを保った持続的発展可能な環境調和型・資源循環型の建築・都市を構築するための基礎として、建築材料の環境調和型材料（エコマテリアル）への転換とともに、環境調和型材料設計（エコマテリアル・デザイン）と環境調和型生涯設計法（エコライフサイクル・デザイン）の基本的体系について基礎的検討を行った。

2)特に、資源面に着目して、建築材料の分類を行った。かなりの程度、枯渇性の非再生産資源に由来する建築材料が多いと考えることができる。資源循環と自然のサイクルの輪が描けるような持続的発展のためには、成長速度の範囲内であるが、再生産資源に由来する建築材料の利用率を上げると共に、非再生産資源に由来する建築材料のリサイクル率の改善による資源循環の流れを考え、3R（リデュース、リユース、リサイクル）の徹底を図る必要がある。

3)長寿命性、資源循環性、有害化学物質の発生抑制・除去、資源・環境容量の改善、物質・材料効率の向上という5つの環境負荷低減項目と資源採取、生産、組立／建設、使用／維持・保全、解体、リサイクル／再使用／再生産、減容化／最終処分というライフサイクルの7つのライフステージを組み合わせた5行×7列のエコライフサイクルマトリックスを考え、各行列要素に対応させて、エコマテリアル型建材の分類を行った。まだ埋まっていない行列要素には、今後開発されると予想されるエコマテリアル型建材が対応するもので、メンデレーエフの元素周期律表と同じように、それらの特徴をある程度推定することができる。

4)エコマテリアル度または環境調和性の評価方法について検討

を加えた。ある建築材料のライフサイクルでの環境負荷低減効果を見るためには、ライフサイクル・アセスメント（LCA）が必要であるが、LCA 的評価尺度としては、ライフサイクルでのエネルギー使用量と二酸化炭素（CO₂）発生量の統合型評価としてのライフサイクル・インヴェントリだけでは不十分である。地球環境影響度評価、リサイクル性評価尺度、廃棄物非占有率、物質・材料効率などの他の評価尺度も考え、総合的に評価する必要がある。特に、物質・材料効率とリサイクル性については、実験結果の考察に基づいて、それらの尺度の定量化を図り、実りある成果が得られた。

5)エコマテリアル・デザインおよびエコライフサイクル・デザインの設計法が、今後、大河の流れになってゆく暁には、省資源・省エネルギーやリサイクル技術と共に、持続的発展可能な環境調和型・資源循環型建築・都市と環境調和型・資源循環型社会の確立に大いに寄与するものである。

4 謝 辞

短繊維-FRC についての環境調和型材料設計については、共同研究者である東海大学土木学科助教授の笠井哲朗氏と（株）大林組の木村耕三氏に、またその基礎となる各種の短繊維-FRC の力学的特性を中心としたデータベースの作成には、元（株）三菱化学の前田利勝氏に多大な貢献を頂いた。ここに記して深謝したい。また、ピッチャー CFRC のエコマテリアル化のための実験的検討については、共同研究者の（株）太平洋セメントの曾根徳明氏に感謝したい。環境調和型生涯設計の基本的考え方は、（財）建材試験センターに設置された「エコライフサイクル・デザイン研究委員会」（委員長：菅原進一東京大学教授）で諸検討が行われた。委員各位に深謝したい。

参考文献

- 1) 鈴木 胖編著：リサイクル工学；循環型社会の構築を目指して、エネルギー・資源学会（1996），4p. エネルギー・資源学会
- 2) 科学技術振興調整費総合研究「材料のエコマテリアル化のための評価・設計技術の確立に関する研究」（第Ⅰ期：平成5

表3 構成材の組合せと耐用年数に基づく外断熱構法の生涯熱負荷低減効果の算出例

分類	外壁の構成	総括熱貫流率 (kcal m ² ・hr・℃)*	1年当りの熱量損失 (kcal)**	耐用年数 (年)	生涯熱量損失 (Kcal)	生涯熱負荷低減効果 (Kcal)	生涯熱負荷低減率
No. 1	1. 打放し鉄筋コンクリート外壁 (内装を含む) コンクリート (15 cm) + モルタル (10 cm) + プラスター (0.3 cm)	3.09	427	30 60 100	12,180 25,620 42,700		1.00
No. 2	2-1 外断熱化した鉄筋コンクリート外壁 (その1) GRC (2 cm) + 押出発砲ポリスチレン (5 cm) + コンクリート (15 cm) + モルタル (1 cm) + プラスター (0.3 cm)	0.29	124	30 60 100	3,720 7,440 12,400	9,090 8,180 30,300	0.70
No. 3	2-2 外断熱化した鉄筋コンクリート外壁 (その2) CFRC (2 cm) + 押出発砲ポリスチレン (5 cm) + コンクリート (15 cm) + モルタル (1 cm) + プラスター (0.3 cm)	0.25	107	30 60 100	3,210 6,420 10,700	9,600 19,200 32,000	0.74

- ～7年度成果報告書，同（第Ⅱ期：平成8～9年度）成果報告書，（1997），（1999），科学技術庁研究開発局／（社）未踏科学技術協会エコマテリアル研究会
- 3) 未踏科学技術協会「エコマテリアル研究会」監修，教科書作成委員会編：「エコマテリアル学—基礎と応用」，日科技連出版（2002）
- 4) 福島敏夫：エコマテリアルと言われる新素材・複合材料及び新技術の開発—特集「環境世紀のエコマテリアル」—，建材フォーラム，Vol.285，pp.16-20（2000）
- 5) 福島敏夫：建築素材におけるエコマテリアルの使用，エネルギー・資源，Vol.23，No.1，pp.48-54（2002）
- 6) 福島敏夫：エコマテリアル型建材と環境調和性評価法，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），A-1（材料施工），pp.321-322（2002）
- 7) Fukushima, T. : Environment-conscious Life-Cycle Design of Building Structural Composite Materials, and/or components, Proc. RILEM/CIB/ISO Interntl. Sym. on Integrated Life-Cycle Design of Materials and Structures, held on May 22-24, 2000, Helsinki, Finland, pp.463-466（2000）
- 8) 福島敏夫：特別講演“GRCのエコマテリアル化，エコマテリアル・デザイン及びエコライフサイクル・デザイン”，第13回GRCシムポジウム講演要旨集，郵便貯金会館，日本GRC工業会，pp.1-17（2001）
- 9) Fukushima, T., Kasai, T., Kimura, K., and Shiire, T. : Ecomaterials Design of Short-cut Fiber Reinforced Cement Composites, Proc, 4th Interntl. Conf. on Ecomaterials, held on Nov.9-12, 1999, at Gifu, Japan, G-2 (K), pp.221-224, 1999
- 11) 福島敏夫，高巢幸二，井戸川純子：新外断熱構法の環境調和型生涯設計（エコライフサイクル・デザイン）の試みとその方法論，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），A-1（材料施工），pp.390-391（2001）

注

- 注1)：筆者が定義した用語：材料を環境調和性に富んだエコマテリアルに転換するために，工夫する過程及び行為をいう．
- 注2)：筆者が定義した用語：材料がどの程度環境調和性に富んだエコマテリアルであるか，その度合いを示す尺度をいう．
- 注3)：筆者が定義した用語：ある材料の使用のライフサイクルにおいて，例えば，地球の大気中の二酸化炭素濃度が増えるのか，減るのかというように，地球環境への影響の程度を評価する手法およびその尺度．
- 注4)：筆者が定義した用語：ある都市面積の中での廃棄物の占有しない面席率．廃棄物の占める割合が増えすぎると，地域環境への環境負荷が著しく大きくなると考え，例えば，その値が60％以下にならないようにする．

（2002年8月19日原稿受理・2002年11月13日採用決定）