The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	都市構造物を対象とする製品連鎖マネジメントのシステム構築とその評価
Author(s)	村野, 昭人
Citation	大阪大学, 2002, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2680
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

邸市構造物を対象とする製品連鎖マネジメントのシステム構築とその評価

2002年

村野　昭人

目次

第１章　序論 1
1.1　研究の背景 1
1.2　研究の構成 2
【参考文献・資料】 4
第２章　都市構造物のマテリアルフローの特性 5
2.1　緒言 5
2.2　都市構造物のマテリアルフロー分析 5
2.2.1　マテリアルフロー分析の概念 5
2.2.2　国土の都市構造物についてのマテリアルフロー分析 6
2.3　国土における主要な建設資材のマテリアルフロー分析 8
2.3.1　コンクリート製品のマテリアルフロー 8
2.3.2　鉄鋼製品のマテリアルフロー 9
2.3.3　木材製品のマテリアルフロー 10
2.4　国土における土木建設活動に伴う環境負荷 11
2.5　建設資材のリサイクル・チャンネル 12
2.5.1　カスケードのリサイクル 12
2.5.2　建設資材のカスケードのリサイクル・チャンネル 13
(1)　コンクリート製品のリサイクル・チャンネル 13
(2)　鉄鋼製品のリサイクル・チャンネル 14
(3)　木材製品のリサイクル・チャンネル 15
2.6　建設資材の循環を促進する製品連鎖マネジメント 17
2.6.1　都市構造物の製品連鎖マネジメントのシステム 17
2.6.2　製品連鎖マネジメントの政策オプション 17
2.6.3　政策オプションの概要 18
(1)　長寿命化メンテナンス 18
(2)　環境配慮型設計－フレキシブル・インフィル設計－ 21
(3)　マテリアルリサイクル 23
2.7　本章のまとめ 26
【参考文献・資料】 26
第３章　都市構造物を対象とするライフサイクル環境負荷の評価プログラム 28
3.1　緒言 28
3.2　都市構造物へのLCA手法の適用 28
3.2.1　LCA手法の概要 28
3.2.2　都市構造物にLCAを用いる上での課題 29
3.3　都市構造物のライフサイクル評価システム 31

3.3.1 LCAに基づく環境負荷算定の論理フレーム 31
3.3.2 プログラムの論理構成 32
3.3.3 パラメータの構造 33
(1) 都市構造物のインベントリー 33
(2) 解析手法と各種原単位の算出法 34
3.3.4 サブシステムの構造 39
(1) 情報入力サブシステム 39
(2) 戦略的代替案策定サブシステム 40
(3) 環境負荷算定サブシステム 42
(4) 出力表示サブシステム 42
3.4 本章のまとめ 43
【参考文献・資料】 43
第4章 LCA手法による環境負荷削減の代替案の評価 45
4.1 緒言 45
4.2 都市構造物に起因するライフサイクル環境負荷の分類 45
4.3 都市構造物から発生・派生する環境負荷の特性 46
4.3.1 評価対象地区の概要 46
4.3.2 都市構造物更新のスケジュール 47
4.3.3 都市構造物から発生・派生する環境負荷の特性 48
4.4 環境負荷削減の代替案の評価 49
4.4.1 環境負荷削減の代替案の分類 49
4.4.2 環境負荷削減の代替案の効果 51
4.5 本章のまとめ 53
【参考文献・資料】 54
第5章 製品連鎖マネジメントのマテリアルフロー分析 55
5.1 緒言 55
5.2 製品連鎖マネジメントの政策オプションの評価 55
5.2.1 政策オプションの評価の全体フレーム 55
5.2.2 構造物更新の計算条件の設定 56
(1) ストック需要量の予測 56
a) 住宅ストック床面積需要予測 57
b) 非住宅ストック床面積需要予測 58
(2) 新規着工床面積の予測 59
(3) 除却床面積の予測 60
(4) 再資源化資材使用量の算定 62
5.3 製品連鎖マネジメントの政策オプションによる環境改善効果 64

5.3.1　政策オプションの設定 64
(1)　長寿命化メンテナンス 64
(2)　環境配慮型設計 65
(3)　マテリアルリサイクル 66
5.3.2　政策オプション別の着工延床面積，解体延床面積量の推移 66
5.3.3　製品連鎖マネジメントの政策オプションの比較 69
5.4　本章のまとめ 71
【参考文献・資料】 71
第6章　製品連鎖マネジメントのコスト分析 73
6.1　緒言 73
6.2　製品連鎖マネジメントのコスト評価のフレーム 73
6.2.1　コスト評価の全体フレーム 73
6.2.2　コスト評価関数の設定 74
6.3　コスト制約を考慮した製品連鎖マネジメントの評価 74
6.3.1　シナリオの構築 74
6.3.2　物理的限界を考慮した評価 76
6.3.3　コスト制約を加味した評価 76
6.3.4　再資源化基盤整備による評価 78
6.4　本章のまとめ 78
【参考文献・資料】 79
第7章　結論と今後の課題 80
7.1　総括と結論 80
7.2　今後の課題 82
謝辞 83

第1章　序論

1.1　研究の背景

19 世紀に産業化社会への門戸を開いたわが国では，終戦後の復興期を通じて急速に産業化が進展するとともに，大都市への急速な人口流入が起こった．戦後の復興から高度経済成長にかけて建設された住宅・ビル・インフラなどの都市構造物は，量的充足することを最優先とする使命のもとで，循環型社会において備えるべきものとはほど遠い仕様で建設されてきた．その結果，新規着工，新規設置のビジネスが優先され，長く使いこなすことが有利になる制度や文化を育むことなく現在に至っている．住宅やオフィスビルも短寿命型の仕様となり，資源消費や環境負荷の排出の面で，環境へ大きなインパクトを与える状態となっている[1)]．一方で，日本の活力の源泉とされてきた若年人口の労働力供給をはじめとする経済活動の推進要素は，21 世紀の初頭に安定期あるいは停滞期を迎えることが確実となっている．このため，都市インフラを良好な状態に維持するための資金を確保しつつ，循環型に組み換えていくマネジメントシステムを設計し，実現することが緊急の課題となっている[2)]．

都市構造物は通常の工業製品と比較すると，規模が大きく製品寿命が長いという特性を持つ．長期にわたり使用され続けることは，製造・建設するプロセスとともに，運用・利用のプロセスでの環境負荷の制御が重要な意味を持つ．例えば断熱性を高めたエネルギー効率の高いビルを建設した場合，建設時に追加的に必要となる資材が発生することで，資材生産時の消費エネルギーが増加する一方で，運用時の消費エネルギーを削減できる結果となり，それらを総合して評価する必要が生じる．同時に，関連するステイクホルダーが多岐にわたるため，生産者責任を発展する，適切な主体間の分担構造を描く必要があるという側面を持つ．

その上で，社会の合理的な選択のためには，可能な限り幅広い都市政策のオプションから代替的な政策シナリオを設計して，最適の組み合わせを考えることが必要となる．負荷発生に対する取り組みの責任は，まず発生源に求められる．このことは汚染者負担の原則として確立されてきた考え方である．加えて，工業製品の分野では，供給側にライフサイクルで発生する環境負荷を抑制する責任を求める拡大生産者責任(Extended Producer's Responsibility)の原則が，産業社会の共通認識として定着しつつある．都市構造物のマネジメントにおいても，情報の非対称性や事前対応効果の面から，従来以上に源流側すなわち供給側に同様な責任分担の原則をもって，社会マネジメントを設計することが要請されている．すなわち都市活動から発生する排出物を処理する末端技術（End of Pipe Technology）への関心にとどまらず，活動の源にも目を向けることが必要である[3)]．それでは，構造物で提供されるサービスを支えるために生じる環境負荷を，そのサービスや構造物のトータル・ライフに沿って計上したとき，その負荷削減の責務を誰が負うべきであろうか？当然，直接の排出者は責任のかなりを負う．さらに，その構造物やそれと不可分で設置された装置や施設の計画にあたった事業者の責務も認められる．さらに，地域や都市の公共的な空間の運営に関することゆえに，政府の責務も認められる．それらの間での適切な分担構造を描くためには，都市構造物のもたらす環境負荷を資材生産から廃棄に至るライフサイクルのステージで計測することが検討の基本となる．都市構造物から発生する

環境負荷は，施工現場から発生する建設に直接関連する負荷から，資材の生産や輸送に伴って発生する負荷，さらには施設で行われる都市活動やサービスの生産の過程で発生する負荷など多岐にわたる．従って，都市構造物に起因する環境負荷を的確に評価するには，都市を構成する資材の生産段階から加工，建設，運用などの諸段階を経て廃棄段階に至る工程の効率をライフサイクルで評価する．

一つの製品が全生涯に及ぼす社会への影響，とくに環境影響を総合的に評価する手法は，ライフサイクルアセスメント（Life Cycle Assessment : LCA）手法と呼ばれ，工業製品から発生する環境負荷の評価に広く用いられており[4) 5) 6)]，主にプラスチック製品や包装材を対象として複数製品との比較評価が行われてきた．さらに，LCA 手法を適用することによって，建築物から広く社会資本施設までを対象とする都市構造物から発生する環境負荷をライフサイクルで評価する研究はすでに広く行われている[7) 8) 9) 10) 11)]．これらの研究を通じて，都市構造物の建設や更新に伴う CO_2 排出量やエネルギー使用量などの環境負荷原単位の整備やインベントリーの体系化が進められてきた．しかし，分析によって得られた知見を環境計画へと展開する研究はまだ始められたばかりであり，評価した測定値を意思決定の場にどのような論理を持って提示すべきかが研究の課題として残されている．

また，2000 年 6 月 2 日に環境庁（現環境省）から公布された循環型社会形成推進基本法では，「循環型社会」を，『製品等が廃棄物等となることが抑制され，並びに製品等が循環資源となった場合においてはこれについて適正に循環的な利用が行われていることが促進され，及び循環的な利用が行われない循環資源については適正な処分が確保され，もって天然資源の消費を抑制し，環境への負荷ができる限り低減される社会』と定義している．物質循環に重点が置かれているのは，水循環，熱エネルギー循環に対して，無機，有機の資源，あるいは建設資材などの物質循環の構築はまだ着手したばかりであることにもよる．都市構造物の廃棄物の発生が抑制し，発生した場合でもその適正な再資源化を促進して，天然資源の消費を抑制し，環境への負荷を可能な限り低減するマネジメントシステムを構築することを本研究のねらいとする．

1.2 研究の構成

都市構造物から発生する環境負荷を削減するには，容積率規制などの量的規制が非常に有効な手段となる．しかし床面積のニーズが存在する以上，ある場所で規制を行った場合，他の場所における新たな立地を誘発する結果となり，全体として環境負荷発生量を削減することにはつながらない．また，先進諸国では，都市への人口流入はすでに過去の事象となっており，そのような手段は現実的であるとは言い難い．そこで本論文では，工業製品等の環境評価に用いられる LCA 手法を，多様な製品の集合体である都市構造物に対して適用する方法論を確立するとともに，既に立地している都市構造物を含めたマネジメントに主眼をおいた戦略を評価するシステムの構築を行う．そして，環境低負荷型の都市システムの実現を目指し，環境配慮型設計の導入，建築物の長寿命化，マテリアルリサイクルの導入などの施策について評価を行うことを目的とする．

論文の構成を図 1-1 に示す．

第 1 章では，現代の都市構造物が抱える課題及び将来のあるべき姿について整理するとともに，都市構造物を循環型のものへとマネジメントする必要性が唱えられてきた背景に

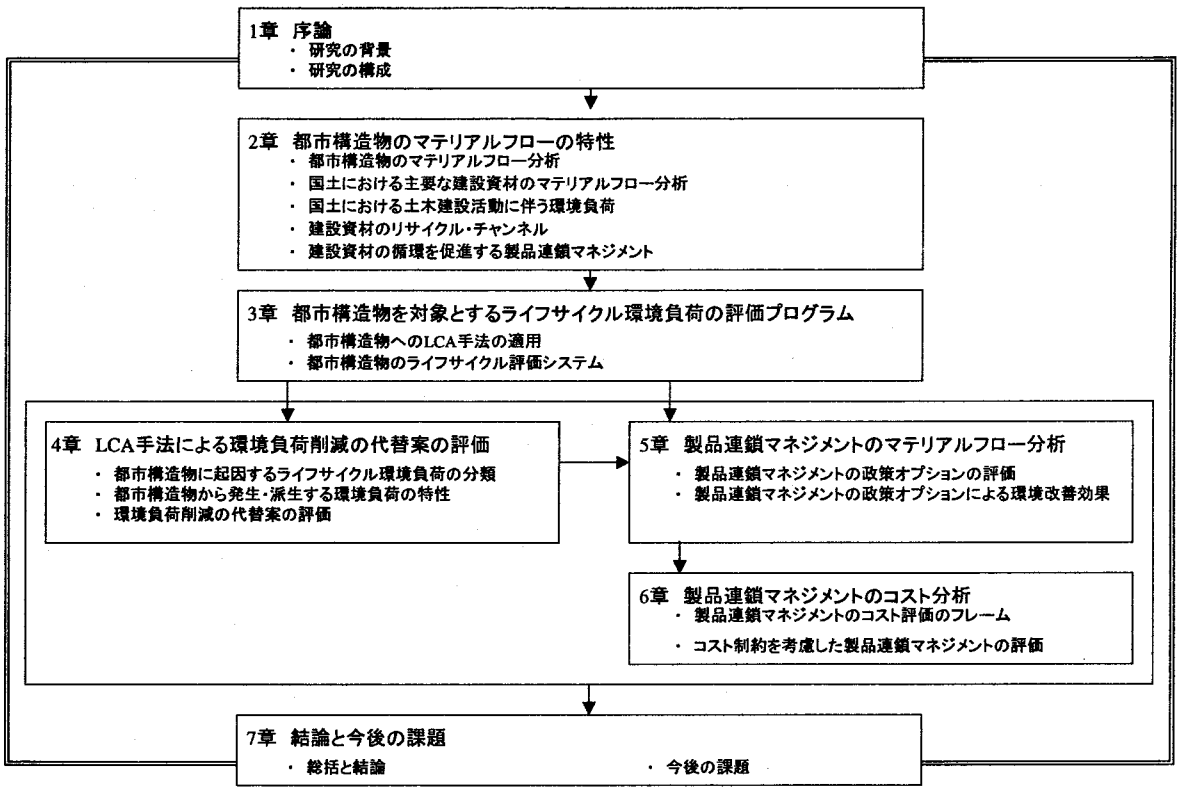


図 1-1　論文の構成

ついて述べた．さらに LCA 手法を援用した都市構造物の評価システムの構築及びマネジメント施策の評価を研究の目的として提示し，最後に本論文の構成を示した．

第 2 章では，国土全体におけるマテリアルフローを調査し，物質収支において都市構造物が占める割合を把握した．さらにコンクリート，鉄鋼，木材の主要建設資材についてマテリアルフロー分析を行い，その特性を明らかにした．さらに製品連鎖マネジメントの必要性について整理し，それに基づいた代替的な政策オプションの概要を示した．

第 3 章では，都市構造物から発生する環境負荷を把握するため，都市構造物に付随する都市活動を含めた環境負荷の評価を行うツールの開発を行った．評価に用いる手法としてライフサイクルアセスメント手法を採用し，都市構造物へと適用するシステムを構築した．

第 4 章では， 3 章で構築したシステムを援用し，中之島西部地区に存在する建築物，エネルギー供給基盤，水道基盤，交通基盤，廃棄物処理基盤を対象として，都市構造物から発生・派生する環境負荷の特性を把握した．さらに，エコマテリアル利用，省エネルギー，容積率規制などの施策代替案の評価を行った．

第 5 章では，製品連鎖マネジメントの概念に基づき，建築物を対象とした環境負荷削減施策として，環境配慮型設計，長寿命化メンテナンス，マテリアルリサイクルを選定し，それらの効果を評価するためのシステムを構築した．そして，国土の建築物を対象として各施策のマテリアルフロー分析を行った．

第 6 章では，製品連鎖マネジメントの施策の中からマテリアルリサイクルを取り上げ，コスト制約を考慮した評価を行った．新規資源購入コスト，再資源化コスト，最終処分コスト及び再資源化施設の立地を操作してその影響を分析した．対象とした解体コンクリー

トは，単位体積あたりの付加価値が低いため，輸送コストが制約となる．輸送コストを要素に取り入れるために，都市を対象として分析を行った．

第 7 章では，各章の結果をとりまとめ，本論文で得られた成果を述べるとともに，今後の課題を示した．

【参考文献・資料】

1) 環境庁，環境白書 平成 12 年版各論，2000

2) 盛岡通（代表）：社会実験地での循環複合体のシステム構築と環境調和技術の開発，CREST 最終報告書，第 4 編 都市集積更新における循環複合体の構築，2001

3) 盛岡通（代表）：社会実験地での循環複合体のシステム構築と環境調和技術の開発，CREST 中間報告書，pp.151-183，2000

4) （社）プラスチック処理促進協会：廃プラスチック処理・再資源化に関する環境評価報告書，1992

5) 日本生活協同組合連合会：容器包装の環境評価に関する中間報告，1993

6) （社）未踏科学技術協会・エコマテリアル研究会編：LCA の全て－環境への負荷を評価する－，工業調査会，1995

7) 酒井寛二，漆崎昇：建設業の資源消費量解析と環境負荷の推定，環境情報科学 vol21-2，pp130-135，1992

8) 土木学会地球環境委員会：土木建設業における環境負荷評価（LCA）検討部会平成 7 年度調査研究報告書，1995

9) 盛岡通：土木建設システムにおける LCA の考え方と事例，第 4 回地球環境シンポジウム講演集，pp29－34，1996

10) 伊藤武美，花木啓裕，谷口孚幸，有浦幸隆：二酸化炭素排出抑制技術・システムのニュータウン建設への適用，環境システム研究 vol.24，pp250-259，1996

11) 中嶋芳紀，河野幸次，松本亨，井村秀文：港湾整備事業のライフサイクルアセスメントに関する研究：福岡市アイランドシティのケーススタディ，土木学会論文集 No. 566/Ⅶ-3，p35-47，1997

第2章　都市構造物のマテリアルフローの特性

2.1　緒言

本章では，都市構造物が環境に与えている影響について，マテリアルフロー分析を用いて定量的に分析し，その特性を明らかにする．まず都市における物資代謝を取り扱った研究の流れについて整理する．次に国土全体におけるマテリアルフローを調査して，その中で建設資材が占める割合を把握する．さらに，コンクリート，鉄鋼，木材の主要建設資材のマテリアルフローを算出し，建設資材の物質代謝構造を明らかにする．そして建設廃棄物を対象としたリサイクルの現状を踏まえて，製品連鎖マネジメントにおける代替的な政策オプションについて整理する．

2.2　都市構造物のマテリアルフロー分析

2.2.1　マテリアルフロー分析の概念

日本には，すでに膨大な都市構造物のストックが社会に蓄積されており，都市構造物が環境へ及ぼす影響を低減するシステムを構築するには，新たな建設フローとともに既存のストックを総合的にマネジメントする必要がある．そこで建設物の国土におけるマクロなマテリアルフローを調べて，都市構造物に関わるストックとフローの特性を明らかにする．マテリアルフローとは，対象となる地域や施設において，どれ程の物質が投入・排出・蓄積されているのか，すなわち物質（material）の流れ（flow）を示すものである．

都市でのマクロな物質の代謝については，1960 年代にアベル・ウォルマン[1]によって概念図が提示された．そして 1971 年に末石・盛岡ら[2]がビデオテープレコーダーを用いた都市の物質流の断面流動調査を行い，定量的な考察が行われるようになった．1974 年に盛岡[3]は，鉄・木材の流れをマテリアルフロー図として描いている．また半谷ら[4]は，建築物，建築物に内蔵される諸設備，日常生活用品などの諸物，道路・橋・自動車・電車などの運輸に用いられる諸物質，上下水道における配管などを人工物質として，東京都における存在量について算出を行った．

一方で輸出入の統計は金額ベースで捉えられることが一般的であったため，重量ベースで捉えることは困難であることから，国全体のマテリアルフローを把握しようとする試みは限定的であった．そのような中で平岡ら[5]は，外国貿易概況の品目別に記されている重量，容量，または数量指数から重量を推計し，国土全体のマテリアルフローを試算した．その後，マテリアルフローの把握を試みる研究が多く見られるようになり，環境庁のリサイクル研究会[6]では，国内の産出分も含めたマテリアルフローを作成した．また，酒井ら[7]は，建設活動において直接及び間接的に消費される資材量を，産業連関表を用いて算定した．そして，その結果をもとに，建築・土木分野における消費エネルギー量及び排出炭素量を包括的に推定し，建築物が目指すべき方向性を示した．谷川ら[8]は，自然界から経済活動への資源の実投入量とともに，「土の移動」や「非商品としての森林伐採」など，経済財としては扱われない隠れたフロー量を定量化することで，住宅団地の建設に伴う総物質必要量について分析を行っている．

2.2.2 国土の都市構造物についてのマテリアルフロー分析

環境庁のリサイクル研究会は国土全体のマテリアルフローを集計的に算定した[6]．それによると日本では1987年度において，国内から約12億3千万トン，国外から約6億トンの新規資源が投入された．排出量は全体で約7億6千万トンであり，その内訳は海外への輸出が約8千万トン，食料としての消費が約8千万トン，これらを支えるエネルギーとしての消費が約3億3千万トン，産業廃棄物の排出分が再生利用を除き約2億3千万トン，一般廃棄物の排出分が約4千万トンである．

投入量と排出量の差である約10億7千万トンが国内に蓄積された量であり，建設資材等の約8億9千万トンが際立っており，製品等の1億8千万トンと比較してもはるかに大きな量が国内に蓄積されていることが分かる．都市構造物関連の内訳では，建設用砕石・砂利に関する新規資源投入は約7億9千万トンであり，国内蓄積の増加分も約7億9千万トンとなっており，日本のマテリアルフローにおいて大きな割合を占めていることが分かる．（図2-1）

都市構造物は多種類の資材によって構成される．図2-2に，建築物の単位延床面積あたりの資材投入量を構造別に示す．さらに主な資材が占める割合を表2-1に示す．これによると，コンクリート，鉄鋼，木材の三資材が大きな割合を占めることが分かる．

建設副産物の排出を詳細に見ると，1995年度では約1億トンのうち．コンクリート塊，ア

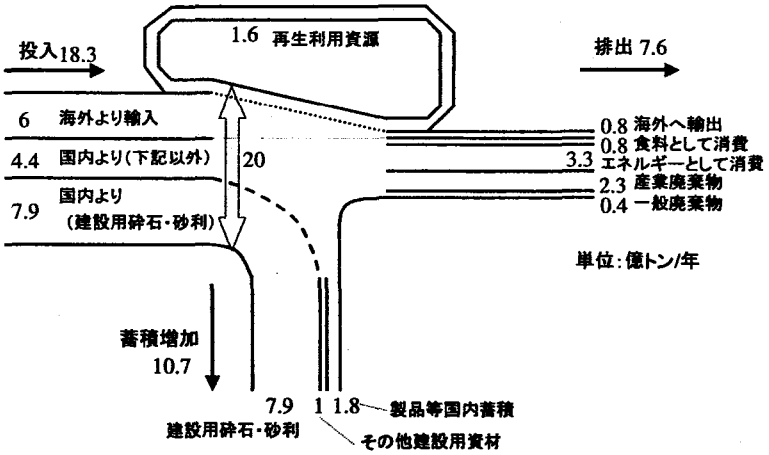


図2-1 国土におけるマテリアルフロー（1987）[6]

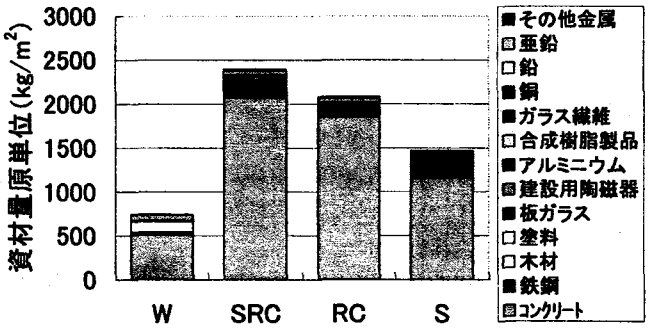


図2-2 資材別投入量原単位

表 2-1　資材別投入量の重量構成

	コンクリート	鉄鋼	木材
W	68.1%	4.3%	15.8%
SRC	86.4%	10.1%	0.6%
RC	88.7%	7.1%	0.7%
S	78.8%	17.7%	0.1%

スファルト塊が，それぞれ全体の約 4 割を占めている[9]．(図 2-3) コンクリート塊，アスファルト塊，建設汚泥などは，比較的価値の低い重量物であることが特徴である．

一方で，産業廃棄物の最終処分場の残余年数は，全国平均で 2.6 年（平成 7 年 4 月現在）[10] となっており（表 2-2)，さらにダイオキシン問題・水質汚濁・土壌汚染などの環境問題のために新たな処分場の確保が困難となっている．産業廃棄物において約 4 分の 1 を占める建設副産物の削減は緊急の課題と言える．さらに，国内で増え続ける都市構造物ストックが，今後老朽化して廃棄物としての処分が必要となると，その状況は一層深刻化することも懸念される．そこで，2000 年 5 月には，建築物に係る分別解体等及び再資源化等の義務づけや解体工事業者の登録制度を創設することを内容とする「建設工事に係る資材の再資源化に関する法律案」が公布された[11]．

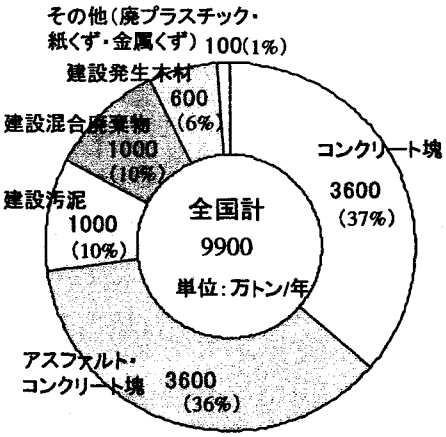


図 2-3　建設副産物の種類別排出量

表 2-2　産業廃棄物最終処分場の残余年数
（1995 年 4 月現在）

	必要埋立処分量（万t）	残余容量（万m3）	残余年数（年）
首都圏	2128	2007	0.9
近畿圏	1159	4040	3.5
全国	8000	20801	2.6

2.3 国土における主要な建設資材のマテリアルフロー分析

2.3.1 コンクリート製品のマテリアルフロー

建設物のコンクリート製品についてのマテリアルフローを図 2-4 に示す. セメントについてはセメント協会による統計[12] を, 骨材については日本砂利協会による統計[13] を, 生コンクリートについては日本建設産業協会の統計[14] を, 廃棄物量, 再資源化量については建設副産物リサイクル広報推進会議の資料 [9] をもとに算出した. データ源の違いにより, インプット量とアウトプット量が完全には一致しない部分が存在する. 発生したコンクリート塊, 約 3600 万トンのうち, 再生砕石として 2100 万トン, 再生コンクリート砂として 200 万トンが再利用されている. すなわち発生したコンクリート塊の 60%以上が道路建設等に再利用されている. しかし, コンクリート塊として発生している物質量は, 骨材やセメントとして新たな建設とともに投入される量約 8 億 3000 万トンの合計の 4%に過ぎない. すなわち, 現在も国土におけるコンクリートの物質ストックがなおも増大していることが明らかになる.

さらに都市構造物の廃棄物が路盤材や捨てコンなどの非建築物用のコンクリート骨材として利用されている. すなわち, かなり低品質の用途へのダウンリサイクルの姿を示していることに注目する. 21 世紀の前半期に, 高度成長期の比較的短い期間に大量に建設されたコンクリート構造物の多くが, 物理的に機能劣化することが見込まれていることから, 路盤材などの低次のコンクリート骨材としての利用だけではリサイクル材の利用用途が限定され, 大量の供給余剰が生じることが危惧される. 建築物用のコンクリート骨材としての再利用を促進する一方で, 再生骨材の品質を向上させるといった技術的な問題の他に, 再生骨材の需給バランスや新規資源との価格競合といった問題を解決する必要がある.

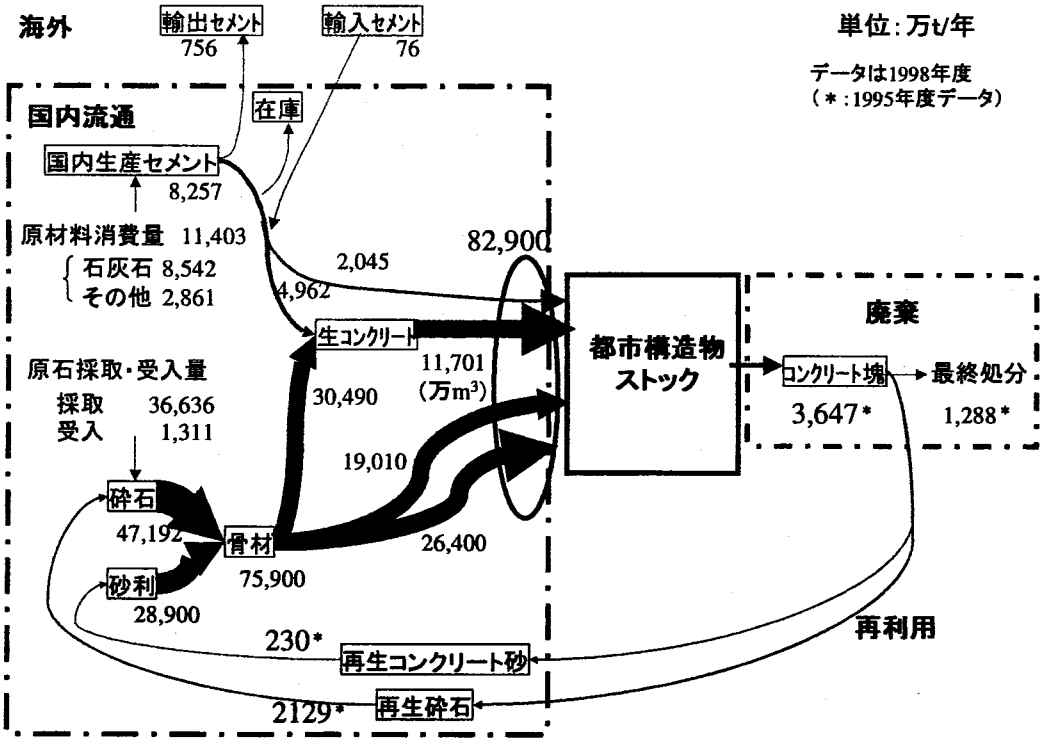


図 2−4 コンクリート製品のマテリアルフロー (1998 年度) [15]

2.3.2 鉄鋼製品のマテリアルフロー

鉄鋼も都市構造物に用いられる資材としては量的にも多く，しかも鉄鋼の廃材は資源として価値が高い．循環型社会の形成にあたっては，リサイクル資源の価値の高い鉄鋼のリサイクルを促進し，そこから得られた知見を他の資材のリサイクル・チャンネルの構築にも活用する姿勢が必要となっている．

1991 年度における鉄の生産からリサイクルまでの日本全体における流れを図 2-5 に示す[16) 17) 18)]．鉄鋼製品は，本来リサイクルし易い材料であるとともに，リサイクルによる経済的ナメリットが大きいことから，すでに分別回収の社会的なシステムが成立している．電炉メーカーと高炉メーカー間の生産調整の必要が指摘される機会は多いが，スクラップ鉄を主原料とする電炉鋼の割合は近年一貫して伸びており，国内で消費する鉄鋼製品の約 1 億 500 万トンのうち，約 45%にあたる 4700 万トンが再資源化原料として再利用されている．なお，スクラップなどの鉄屑は有価で引き取られ原材料とすることができるため，建設副産物ではあるが建設廃棄物の範疇には入らない[9)]．

都市構造物の部材としては，国内で消費される鉄鋼製品のうちの約 20%にあたる約 2100 万トンが新規の建設等に消費されている．スクラップ鉄は，その発生源によって，鉄鋼製品の製造の際に発生する自家発生鉄屑，鉄鋼製品を加工して製品を製造する際，すなわち都市構造物においては施工の際に発生する加工鉄屑，解体・廃棄の際に発生する老廃鉄屑の 3 つに分類される．都市構造物に起因する鉄屑の発生量は，加工鉄屑 130 万トン，老廃鉄屑 830 万トンとなっており，合計で消費鉄鋼量の約 45%となる．すなわち，現在も国土

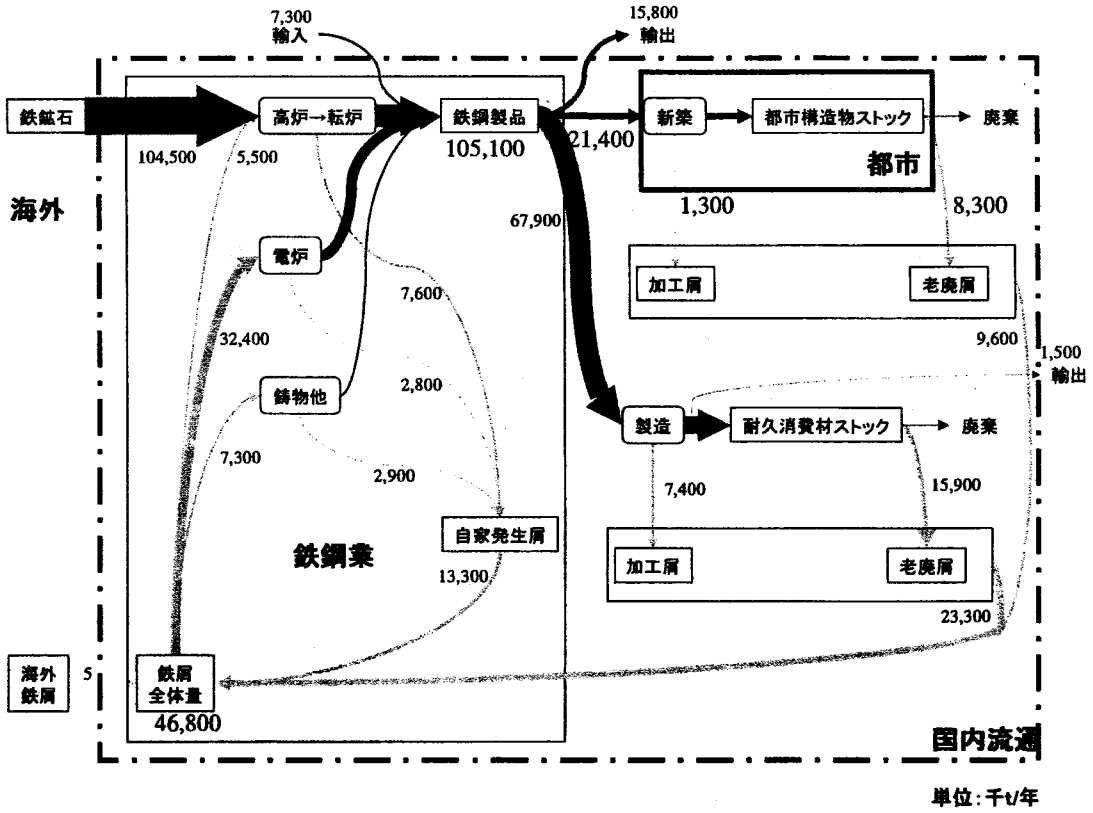


図 2−5 鉄鋼製品のマテリアルフロー（1997 年度）[15)]

における鉄鋼の物質ストックが毎年 1200 トンずつ増大していることが分かる．

2.3.3 木材製品のマテリアルフロー

木材が日本全体でどのように流通し，それが現在の都市代謝とどう関連しているかについて，木材製品のマテリアルフローを図 2-6 に示す[19) 20) 21) 22)]．

日本で使用される木材製品約 5600 万トンのうち，80%にあたる約 4500 万トンが輸入されている．海外もしくは国内で生産された木材のうち，40%にあたる約 2200 万トンがパルプやチップに回され，約 3300 万トンが製材，合板となる．製材，合板用の木材のうち，約 4 割が建築材料として使われて，日本の国土上でたくわえられることになる．パルプやチップなど加工度の高い用途の原材料として，4 割強もの天然木材資源が使われていることは，自然資源の過剰摂取による使い捨て型の利用としてまずは問題である．加えて，相対的に品質の高い側への自然資源のリサイクルを促すという観点からも非常に問題である．この 4 割強の新規資源の投入分を再生木材資源へと変換していくことが必要である．

海外において持続的な森林経営が行われていれば，海外で生産された木材資源が日本で使用され，最終的に二酸化炭素となって地球全体の大気に排出されても，その分だけ森林域で二酸化炭素が固定され，地球規模での循環が行われていることになる．しかし，現状では熱帯雨林などにおいて，伐採した後に十分に管理された再植林をしない収奪的な森林経営が行われている．また，海外の森林の管理が困難であることからすれば，国内産の木材の使用割合を増やし，国内で持続可能な林業のシステムへと転換していくことが求められ

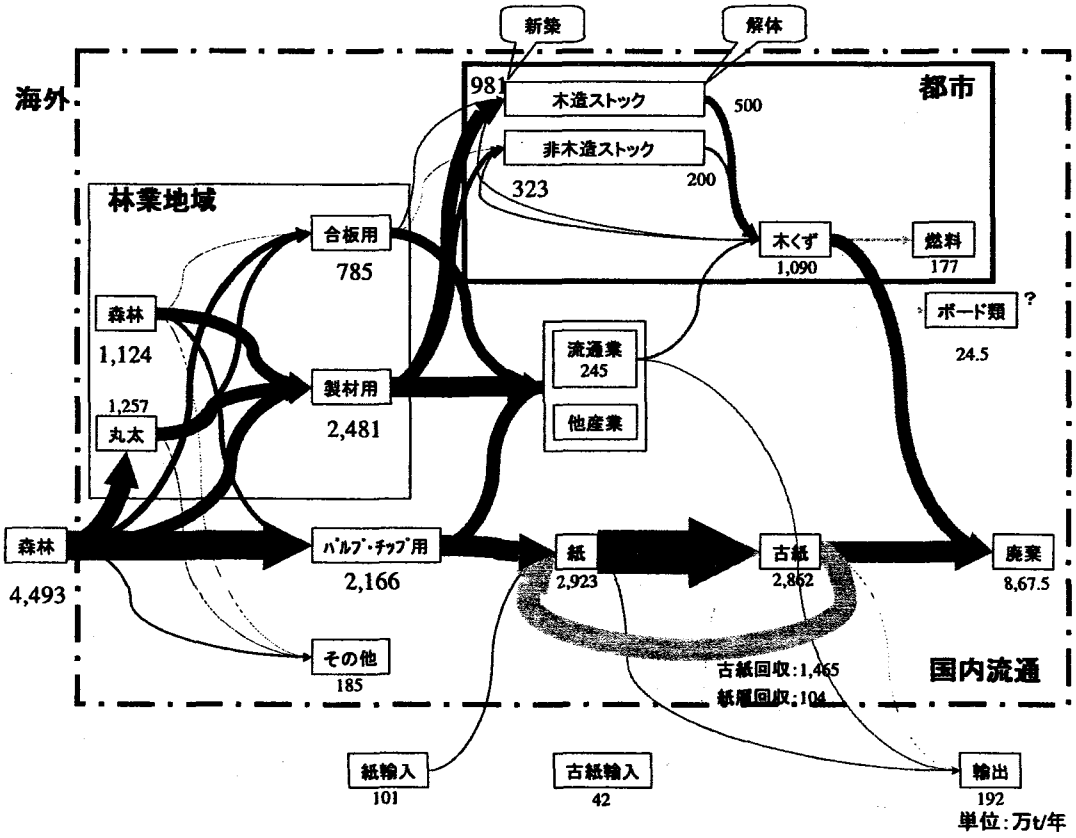


図 2−6 木材製品のマテリアルフロー（1998 年度）[15)]

る．

2.4 国土における土木建設活動に伴う環境負荷

建設活動は，建設資材の生産，輸送等を通じて他の産業部門と広い関わりを持っている．従って，産業連関分析を用いることで，建設活動に必要な財・サービスの中間需要を供給するために，その川上で他のどの産業部門にどの程度の環境負荷の排出や資源消費を委ねているかを定量的に把握することができる．CO_2 排出量，埋立廃棄物発生量，鉄鋼消費量について，盛岡・吉田により試算がなされていて，その結果を図 2-7 に引用する[23]．CO_2 排出量は合計で約 57Mt-C 排出されている．これは，建設工事に伴う直接排出量 3.5Mt-C の約 16 倍に相当する．運用時の排出量 34Mt-C と合わせると，日本全体の CO_2 排出量約 340Mt-C の 4 割近くを占める．部門別に見ると，窯業・土石部門のシェアが最も大きく，建設活動に起因する CO_2 排出量の 35%にあたる 19.8Mt-C を排出している．鉄鋼部門（資材や装置・器具に使用される鉄の供給），電力部門（資材や装置の製造動力の提供），輸送部門（資材や装置・器具の輸送）は，いずれも窯業・土石部門の約半分の寄与であり，それぞれ 9.6Mt-C（17%），11.6Mt-C（20%），9.9Mt-C（17%）の排出となっている．

埋立廃棄物発生量では，窯業・土石部門のシェアが CO_2 排出量に比して大きく上昇し 52%を占める．続いて鉄鋼部門が 10%，非鉄が 6%を占め，その他の部門の寄与は相対的に低くなっている．

鉄鋼消費量では，構造物そのものへの現場施工での消費が 67%を占め，コンクリートの既製品等への組込みは 3%程度である．それ以外では，非鉄部門において建設・建築用金属製品の一部として消費される鉄鋼が 28%と大きなシェアを占めており，解体後の再資源化を考えると，強度の維持を前提として易解体性設計（Design for Disassembly）への配慮が重要となる．

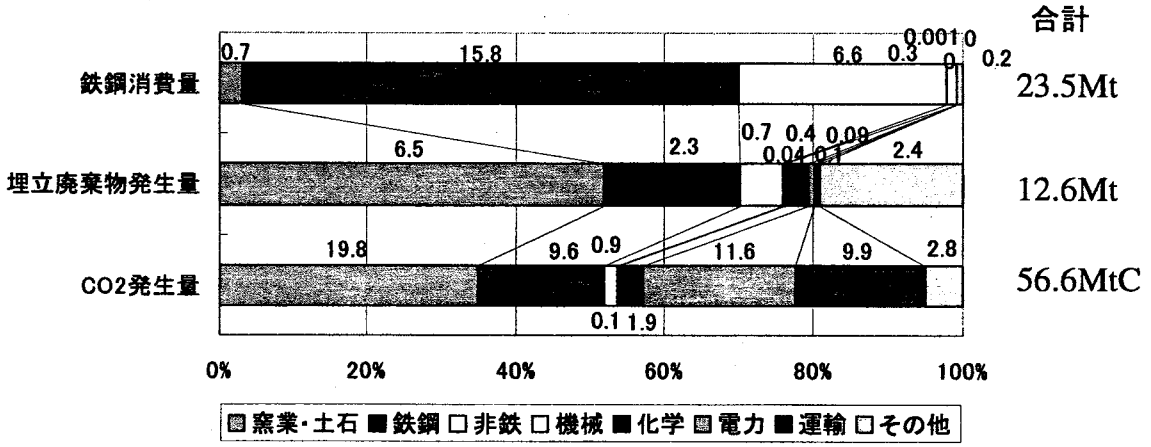


図 2-7 建設活動に伴う環境負荷連鎖[23]

2.5 建設資材のリサイクル・チャンネル

2.5.1 カスケードのリサイクル

物質の循環利用については，リサイクルをサーマルリサイクルとマテリアルリサイクルに区別する理念や3R（Reduce，Reuse，Recycle）などが提示されている．社会的な財やサービスの水準を維持しつつ，発生する環境負荷を低減するには，重層的なリサイクルのチャンネルを準備して，発生する副産物や廃棄物の特性に合わせて，技術的に可能な限り高いレベルで活用するリサイクルを行うことが課題となっている．

リサイクルのチャンネルとしては，製品としてのリユース，素材を活用しての部材リサイクル，物理的構造や化学的組成を活かして再生するマテリアルリサイクル，さらにエネルギー源として利用するサーマルリサイクルを区別することができる．もともと熱力学の理論から言えば，化学反応を受け，加工されて組みたてられた物材を単純な素材にまで戻してから，もう一度加工したり組みたてたりするとなると，必ず追加的なエネルギーや資源の投入を必要とする．そこで，たとえリサイクルをおこなう場合にも，廃棄物と化した状態から近い姿のままで再資源化の先を選択することが環境負荷の削減に効果的である．すなわち製品としての組みたての高い上位の水準での再資源化を行うことにより，投入資源あたりの再生量を最大にしたり，追加投入資源量を環境負荷量に換算して修正した環境負荷量あたりの製品サービスを最大にしたりすることができる．よって副産物を特性に応じて，順に分解経路に沿ってくり返し再利用することを通して，いわゆる環境効率の上昇が期待できる．

主要な建設資材に対する技術的に可能なリサイクル・チャンネルを，表2-3に示す．廃棄回避も広義のリサイクルに含まれるという解釈により，表中に含めている．マテリアルリサイクルに関しては，資材ごとにそれぞれ技術が開発されておりチャンネルが用意されている．一方で，より上位の再資源化である部材リサイクルや，廃棄回避に該当するチャンネルには，すべての資材に共通するものが多い．

表2-3 主要な建設資材のカスケードのリサイクル・チャンネル

対象資材	コンクリート	鉄鋼	木材
廃棄回避	既存構造物の長寿命化：維持，補修，改修		
	新規構造物の長寿命化：フレキシブルインフィル設計の導入，維持，補修		
製品リユース	プレキャスト・リユース	鋼構造の移築	木構造の移築
部材リサイクル	構造部材の規格化，ユニット化		
	規格部材の再使用	鉄骨の再使用	角材や装飾材の再使用
マテリアルリサイクル	再生骨材	再生電炉鋼	再生合板材
	路盤材		パーティクルボード
	埋め戻し材		ファイバーボード
サーマルリサイクル			燃料用チップ

90年代には，製造業の分野で産業エコロジーの論理フレームの構築と，その実現に向けての検討が急ピッチで進んだ．再利用の用途を高い水準に維持すべきとする産業エコロジーは，環境配慮型の生産と設計システム（Design for Environment：DfE）やリバース・ロジスティクスなど具体的な産業システムの一部として，すでに実用化を検討する局面を迎えている．そこでは，リユース，マテリアルリサイクル，サーマルリサイクルという優先順位とともに，リサイクルの代替的な選択肢が用意されている[24]．

一方で，都市ストックを構成する都市構造物に目を転じると，21 世紀に大量に発生することが予測されるコンクリート塊を，路盤材などの低次の利用に回すことなく，汎用的な骨材やセメント原料として再生利用する等の，多層的なリサイクルのチャンネルを用意することについては，技術開発に着手されたばかりであり，実用化の水準には達していない．都市政策の領域では，都市活動から発生する排出物を処理する末端技術（End of Pipe Technology）への関心にとどまらず，活動の源にも目を向けてマネジメントの体系を構築することが重要となる．そこで，都市構造物から発生する環境負荷を抑制するために，素材生産から廃棄までのライフサイクルを対象とした製品上での連鎖を制御するアプローチである製品連鎖マネジメントを用いて，環境政策の評価を行う．

2.5.2 建設資材のカスケードのリサイクル・チャンネル

(1) コンクリート製品のリサイクル・チャンネル

都市構造物を構成する資材のうち，フロー量が最も大きいコンクリートのリサイクルについては，品質のばらつきを残したままで利用可能な砕石・道路路盤材としての利用が主となっている．ついでフロー量の大きいアスファルトが，廃棄物となった後，再びアスファルト原料としてリサイクルされる閉じた循環系を形成していることと対比をなす．セメント・コンクリートの解体後のリサイクルには技術的制度的課題が多いと言える．

1995 年度の建設副産物実態調査によると，解体コンクリートの再利用の割合は全国平均で排出量の 65%となっており [9]，再資源化施設の多い大都市圏を中心に再利用が進んでいる．（表 2-4）その用途は路盤材や埋立材が大部分である．これは，強靭で化学的にも物理的にも安定性が高いという解体コンクリートの均一な品質を利用したマテリアルリサイクルである．また，主に建築物を解体した後の解体コンクリートを再び構造物の資材に利用するのではなく，より低水準の品質しか要求されない埋立材や路盤材に落として（ダウン・リサイクル）資源化している．このような状態を，元に戻らないという意味でオープンリサイクルと呼ぶことがあるが，リサイクル促進におけるオープン・コミュニケーションと紛らわしいので，サイクルのクローズド化（閉ループ化）の反語としては用いない．今後，埋め立てや新規道路の需要が減っていく中で，より上位の質の高い用途へのリサイクルを促進する必要があろう．

しかし，部材リサイクルについては，コンクリートが分解可能な個別の部品としては設計されていないため，既存の構造物についての対策とすることは不可能である．ただし，プレキャストで部材として供給されるコンクリート製品の一部には用途を限定すれば部材として再使用するチャンネルも想定しうる．実践での対応として，研究開発が進んでいる

表 2-4 建設副産物としてのコンクリートのリサイクル（1995 年度）

	コンクリートリサイクルに占める割合(%)
製品リユース	0
部材リサイクル	0
マテリアルリサイクル	64.7
サーマルリサイクル	0
廃棄	35.3

のは，コンクリート塊を破砕後，モルタル分を分離し，再びコンクリート用骨材として再生することでマテリアルリサイクルを推進しようというものである．

現時点では，コンクリート用骨材として再利用されているものはほとんどない．その理由として，再生骨材の品質に関する技術上の問題，価格や需給バランスといった経済上の問題，規格に関する法律上の問題等があげられる．高度成長期に建設された建築物，構造物の改築が始まる21世紀の初頭から，解体コンクリートの発生量も急増することが予想されている．これらのより一層の再利用を進めていく上で，これらの課題を解決することが不可欠である．

解体コンクリートのリサイクルにあたり，いくつかの経路が想定できるので，これらの多様なリサイクル・チャンネルを積極的に開拓してゆくことが望まれている．再生骨材をコンクリート用骨材として利用することは，研究開発の結果，技術的には十分な段階に達し，実用化の域にある．建設省（現，国土交通省）から，1994年4月にコンクリート用再生骨材の暫定品質基準案が通達され（表 2-5），その後「新たな再生骨材の品質区分案」が提案されている[25]．（表2-6）しかし，再生品のほうが割高と言う経済的な問題等のため，再生骨材がコンクリート用に使用されている量が極めて少ないのが現状である．

表 2-5　コンクリート用再生骨材の暫定品質基準案

		吸水率(%)
再生粗骨材	1種	3以下
	2種	5以下
	3種	7以下
再生細骨材	1種	5以下
	2種	10以下

表 2-6　再生骨材の品質区分案

再生骨材コンクリートの種類	強度 (N/mm2)	使用用途	使用粗骨材	使用細骨材
Ⅰ	18.4～21.4	鉄筋コンクリート，無筋コンクリート等	再生粗骨材1種	普通骨材
Ⅱ	16.3～18.4	無筋コンクリート等	再生粗骨材2種	普通骨材or 再生細骨材1種
Ⅲ	16.3未満	捨てコンクリート等	再生粗骨材3種	再生細骨材2種

(2)　鉄鋼製品のリサイクル・チャンネル

鉄のリサイクルのうちで最も典型的なのは，電気炉に投入して鉄鋼を再生させるチャンネルであり，鉄屑を鉄鉱石の代わりに用いて，電炉鋼として精製している．鉄屑は，その発生源によって自家発生鉄屑，加工鉄屑，老廃鉄屑の３つに分類される．自家発生鉄屑とは鉄鋼製造工場内部で発生するもので，発生量が安定しており，その品質も判明していることから発生工場内でリサイクル使用されている．高炉－転炉方式でも転炉に鉄屑が投入されているが，鋼材の成分規格を厳しく守るために，そのほとんどが自家発生鉄屑である．加工鉄屑は鉄鋼ユーザーである自動車，機械，建設業などが鋼材を加工した時に発生する

もので，良形状，良品質であるため，鉄屑から鋼材を生産する際の成分調整に使われている．老廃鉄屑は，自動車，機械，建築物が使用後に廃棄または解体された時に発生したもので不純物の混入が少なくない．電炉は，鋼材の成分規格が転炉鋼に比べ緩いため，この加工鉄屑と老廃鉄屑が投入されている．現在，鉄鋼が国内に鉄製品として蓄積されていく量は増加し続けており，今後，老廃鉄屑の量も増加していくと見られる．

建設業で使用された鉄鋼製品の現在のリサイクル状況を表 2-7 に示す[9]．現状では，ほとんどすべての鉄鋼製品が，マテリアルリサイクルに回されていることが分かる．今後，建設業や構造物の解体業が関与する分野で，さらに鉄のリサイクルを高度に進めていくためには，購入側からのインセンティブとして使用する鉄鋼製品のうちで電炉鋼の割合を高めていくことが，まず考えられる．現在，電炉鋼は鉄筋として使われているに止まっているが，今後は鉄骨などへの電炉鋼の使用を行うことや，ボルト接合した鉄骨を分解し，再び

表 2-7　建設副産物としての鉄鋼のリサイクル（1997 年度）[9]

	鉄鋼リサイクルに占める割合(%)
製品リユース	0
部材リサイクル	0
マテリアルリサイクル	93.0
サーマルリサイクル	0
廃棄	7.0

鉄骨として使用する部材リサイクルなどが想定される．

(3)　木材製品のリサイクル・チャンネル

木材製品から発生した副産物を見ると，古紙については再資源化のための回収率，再生資源の利用率共にほぼ 50%で，回収システムも整っている．これに対して木くずでは，再資源化のための回収率は 20%程度である．

木くずに関して詳しく見ると，日本全体では，燃料チップ，銭湯燃料など熱資源としてサーマルリサイクルされるのが 16.2%，紙パルプ用の資源としてリサイクルされるのが 1.9%，建築用材や家具などの素材としてリサイクルされるのが 2.2%であり，残りの 8 割近くが廃棄されている．

建設産業から発生する木くずについては，1995 年度の建設副産物実態調査によると，リサイクル回収率は 37%にとどまっている．また，大阪市の 1984 年のデータによると，燃

表 2-8　建設副産物としての木材のリサイクル（1984 年度，大阪市）

	木材リサイクルに占める割合(%)
製品リユース	0
部材リサイクル	0.6
マテリアルリサイクル	33.8
サーマルリサイクル	27.3
廃棄	38.2

料チップなどの熱資源としてサーマルリサイクルされるのが 27.3%，紙パルプ用の資源としてリサイクルされるのが 33.8%，建築用材などの部材としてリサイクルされるのが 0.6%，残りの 38.2%が廃棄されている（表 2-8）．建設業では，産業界全体での木くずのリサイクル率よりも高いが，その類型ごとの割合を見ると，部材リサイクルの割合が少なく，サーマルリサイクルや紙パルプとしてマテリアルリサイクルされている割合が高いことが明らかである．

木造建築を部品に分解してリユースすることは一部で実践が見られるが，伝統的建築物の移築などの構造物に限られている．将来的な見通しとしても，既存の構造物について古材として最流通する割合が建設木材の大半を占めることは考えにくい．今後は，これから建設される新規の構造物については解体性を考慮する設計を採用することなどにより，部材リサイクルの割合を増やすことが必要である．

その他に，木材のマテリアルリサイクルの用途には，再生集成材と再生パーティクルボード，ファイバーボードがある．再生集成材は，製材された板材や小角材などを乾燥し、節や割れなどの部分を取り除いて，繊維方向を揃えて，接着剤を使って集成接着した木材で，家具，建築等の材料となる．再生集成材は，新規の製材，小角材の代わりに解体廃材を用いたものである．集成材は，構造用と造作用とに分けられ，構造用は柱・梁など力学的性能が要求される部分に使用されるもので，造作用は内装材，家具として使用されるものである．パーティクルボードは，もともとマテリアルリサイクルのための技術であり，木材の切削片・破砕片（パーティクル）に合成樹脂接着剤を塗布し、人工的に成板したものである．パーティクルボードは新規の合板の代わりに，内装材（床板など）や家具などに用いられる．ファイバーボードは，チップを高温・高圧により解繊した繊維を，接着剤とともに熱圧成形して製造する木質繊維板である．軽量なうえ，強度に優れており，合板の代替品としての利用が拡大している．一般の合板と，リサイクル木材であるパーテイクルボード、ファイバーボードの消費量の比率を各国で比較すると，表 2-9 のようになる[26]．ドイツなどでパーティクルボードの割合が非常に高いのに比べ，日本では合板の割合が高く，パーティクルボードの利用は非常に低い割合となっている．

表 2-9　合板・パーティクルボード・ファイバーボードの利用割合 [25]

	合板	パーティクルボード	ファイバーボード
ドイツ	11%	81%	8%
オーストラリア	19%	74%	7%
イギリス	26%	61%	13%
USA	51%	30%	19%
韓国	55%	26%	19%
日本	74%	13%	13%
世界平均	41%	43%	16%

2.6 建設資材の循環を促進する製品連鎖マネジメント

2.6.1 都市構造物の製品連鎖マネジメントのシステム

本節では，都市における構造物の集積について，その新たな建設フローとともに既存のストックの環境への影響を低減するために，製品連鎖マネジメント（Product Chain Management）のアプローチに基づき，政策の代替的オプションを設計する．

社会における財やサービスの生産と消費を維持しつつ，発生する環境負荷を低減するには，多層的なリサイクルの経路を用意して，生産や消費に伴って発生する副産物や廃棄物の特性を可能な限り活用するリサイクルを行うことが有効となる[27) 28)]．産業エコロジーサイクルとして示すように，副産物をリサイクル再利用するには追加的な資源とエネルギーが必要となることから[29)]，副産物の再利用ポテンシャルを活かして可能な限り発生と再利用の近い段階でリサイクルを進める，できるだけ上位のリサイクル経路を選択する社会システムを構築することにより，環境負荷削減と環境効率の上昇を期待できる．

2.6.2 製品連鎖マネジメントの政策オプション

都市構造物を対象として製品連鎖マネジメントのシステムを作成する上で，計画を構成する要素（計画エレメント）である政策オプションから構成する．製品連鎖マネジメントでは，資源採掘，素材生産，部品生産，建設，運用，メンテナンス，解体，再資源化，廃棄の，生産の川上から消費，廃棄にかけての代替的な政策オプションを用意する．都市構造物の製品連鎖を循環型へと転換する政策オプションは，3 つのオプションの類型に分類される．

第一は，生産のプロセスを循環指向型に転換するプロセスであり，いわば「循環型の動脈側の生産システム」に転換するオプションである．この中には，エコマテリアルを出来る

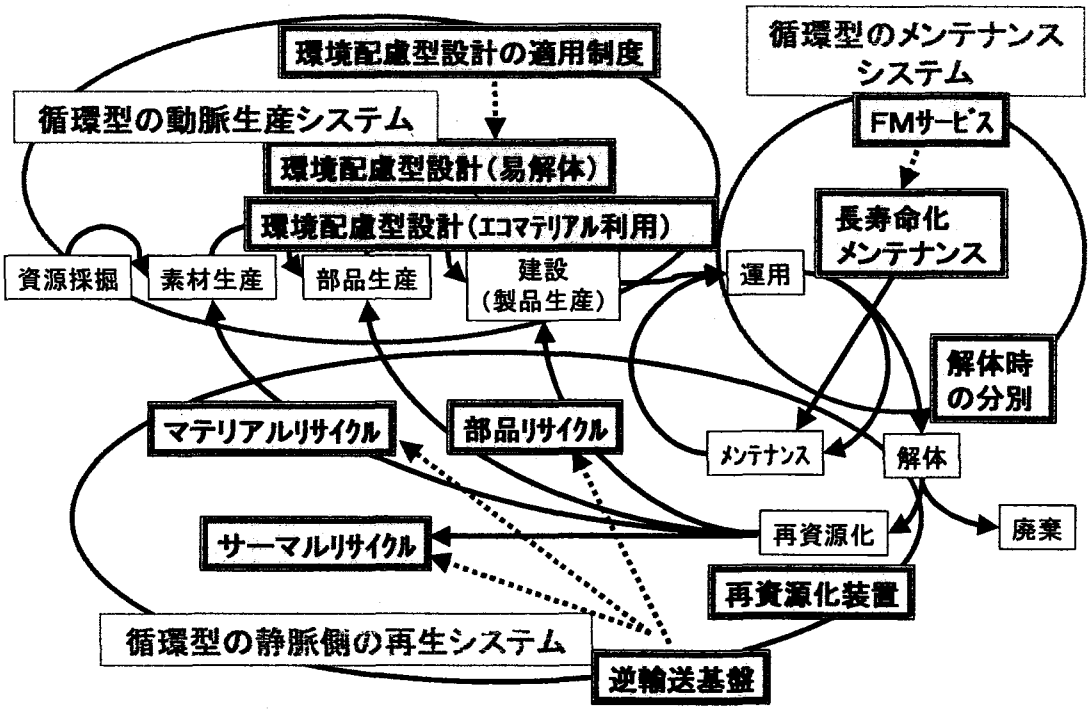


図 2-8 製品連鎖マネジメントの政策オプション

だけ多く使用するなどの環境配慮設計（Design for Environment : DfE）や，建設物の解体後にその廃棄資材の再利用を前提にして易解体型を指向する易解体設計（Design for Disassembly : DfD），及びこれらの設計を制度として展開する適用制度が含まれる．これらの政策オプションは，これから建設される新規の建設物に対しては有効となるが，既に存在している建設ストックに対しては効果が限定的される．

第二に，解体時に分別を進めるとともに，既存の施設を出来るだけ長く利用しつつ社会活動にとって制約とならない工夫を行う長寿命化メンテナンス，さらに建設物の運営サービスの提供を通じてその最適な運用を図るファシリティマネジメントの提供が必要となる．これらの政策オプションを「循環型のメンテナンスシステム」として分類する．

第三に，既存施設の解体時に発生する建設廃棄物について出来るだけ効率的に分別再資源化，その部品としてのリサイクル，素材としてのマテリアルリサイクル，熱源としてのサーマルリサイクルなどを推進することが重要となる．また，そのようなリサイクルを推進するためには，再資源化基盤及び逆輸送基盤を整備することが不可欠である．これらの政策オプションを「循環型の静脈側の再生システム」として分類する（図 2-8）．

2.6.3 政策オプションの概要

製品連鎖マネジメントの概念に基づき，都市構造物をの代替的な政策オプションについて，3 つのカテゴリーから，技術的検討が進められ事業の取り組みが試行されている，「長寿命化メンテナンス」「環境配慮型設計」「マテリアルリサイクル」について着目して，そのシステムを検討するとともに，国土スケールのマテリアルフローについて，政策として取り入れることの効果を評価する．

(1) 長寿命化メンテナンス

a) 構造物の劣化要因

構造物の劣化は，物理的要因，経済的要因，社会的要因によって引き起こされる．（図 2-9）物理的要因としては，構造的な疲労，金属の錆びや磨耗，コンクリートにおけるアルカリ骨材反応や亀裂などがある．それらによって躯体の強度の低下による安全性

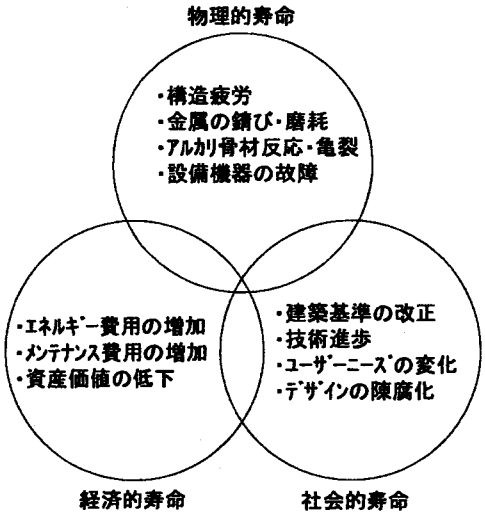


図 2-9 劣化要因による寿命分類

の低下，外装・内装の剥離，設備機器の故障の頻発が起こる．経済的要因としては，設備機器のエネルギー効率の低下，故障の頻度と規模の増加，外装，内装などの汚れなどがある．それらによってエネルギー費用の増加，メンテナンス費用の増加，資産価値の低下などが起こる．社会的要因としては，法改正による建築当時の基準との不適合の発生，技術進歩による過去の技術による性能と最新技術で達成可能な性能との乖離の発生，ユーザーのニーズの変化による要求される性能の変化，流行の変化による建築デザインの陳腐化などがある．社会的要因によって劣化が進行すると，構造物は寿命を迎え更新され，建替え需要が生まれる．

物理的寿命が安全性，経済的寿命が経済性，社会的寿命が社会性や個人の嗜好性にそれぞれ影響を受ける．一般的に社会的寿命が最も短くなり，経済的寿命，物理的寿命の順で寿命が長くなる．また，求められる安全性に対して，経済状況や社会状況，流行などの方がより早く変化することも寿命の長さの違いに結びつく．従って，社会的寿命，経済的寿命によって更新が選択される現状を見直し，構造物の長寿命化を図るため，社会的劣化と経済的劣化を防止し，さらに改善していくための維持・補修・改修を計画的に行うことが必要となる．

b)　日本における構造物の寿命実態

建設省（官庁営繕部）は構造物のライフサイクルコストを算出する際に用いる計画更新年数をRC造躯体，S造躯体で65年としている[30]．一方，大蔵省令で定められた減価償却の基準となる法定耐用年数は，表2-10に示すように建設省の計画更新年数に比べ短い．これは，建設省の計画年数は政府施設の建設，修繕についての基準であり，緊急時にも一貫した公共サービスを継続的に提供する基盤であるとともに，国家の象徴としての役割をも果たす必要があることから，社会状況の変化への対応や経済性よりも物理的な耐久性が求められるためとされる．そのため建設省の計画更新年数は物理的寿命によって比較的長い年数が設定される．一方で，大蔵省令での法定耐用年数は，その建築物の持っている資産価値の減価償却の基礎となるもので，実際の建築物の寿命実態を踏まえたものとなっており，物理的要因に加え，経済・社会的要因の影響を受けることになる．

表2-10　構造物の法定耐用年数（平成10年3月）[30]

	SRC造 RC造	S造 (肉厚4mm～)	S造 (肉厚3mm～4mm)
住宅用	47	34	27
事務所用	50	38	30
店舗用	39	34	27
工場用	31	27	19

注）工場用については，塩素，塩酸，硫酸，放射線，塩，チリ硝石，蒸気等の影響がないもの

現実に存在する建築物の寿命実態については，小松らの研究結果[31]によると，1987年時点において，木造専用住宅が，38年，RC造専用住宅が41年，S造専用住宅が33年，木造共同住宅が32年，RC共同住宅が39年，S造共同住宅が，29年，RC造事務所が35年，S造事務所が29年という寿命の代表値が示されている．これらの寿命実態は，建設省営繕部の用いる計画更新年数より短く，大蔵省令が定める法定耐用年数に近いものになっている．これは，先ほど述べたように，建設省営繕部の用いる計画更新年数が主に物理的要因をもとに決定され，法定耐用年数が主に経済的要因によって決定されているのに対して，実際の寿命が社会的要因によって決定されることが一般的であることに起因する．

c)　構造物のメンテナンス

維持・補修・改修を行うには，対象となる建築物の劣化の進度を把握するために建築物の診断を行い，その結果に基づき維持計画・補修計画・改修計画を立案することが必要である．また，改修内容は，現在においてもバリアフリーなどの高齢化対応，OAフロアなど情報化対応，耐震補強などの防災・安全性の向上，省エネ化，快適性の向

表 2-11　維持・補修・改修の実施率

		維持	補修	改修（耐震補強）
一戸建て住宅	躯体	19.40%	0.60%	1.70%
	外装		5.40%	
	内装		4.50%	
	設備		4.50%	
共同住宅占有部	躯体	21.60%	—	—
	外装		—	
	内装		5.60%	
	設備		4.40%	
共同住宅共有部	躯体	100.00%	1.00%	1.40%
	外装		3.80%	
	内装		4.40%	
	設備		4.20%	
事務所	躯体	67.10%	8.30%	2.50%
	外装		10.00%	
	内装		9.40%	
	設備		12.80%	
店舗	躯体	67.10%	8.50%	0.50%
	外装		10.90%	
	内装		8.50%	
	設備		12.80%	
工場	躯体	34.10%	10.40%	3.10%
	外装		12.70%	
	内装		9.30%	
	設備		13.90%	

上，イメージの向上など多岐に渡り，今後も要求される機能が社会状況の変化に合わせ，常に変化していくことが想定される．

改修によって延命化を図る場合，最も重要となるのが耐震性である．建築基準法における耐震設計は，戦後のいくつかの大地震を契機として次第に強化されてきた．まず，1968 年の十勝沖地震を教訓に 1971 年に改訂された規定では，RC 造柱のせん断破壊防止と靭性向上のためにせん断補強筋が増加された．次に 1978 年の宮城県沖地震を契機として，1981 年に改訂された規定では，従来の震度法に代わって，地盤や建物の振動特性を考慮した動的応答解析の結果を反映させたいわゆる「新耐震設計法」が導入された．設計時の建築基準法には合法的であったが，その後の基準法改正によって，新たな法令に適合しなかった建築物は，「既存不適格建築物」と呼ばれ，一部分であっても改修を行う際には，すべてが新基準を満たすように改善することが求められている．1995 年に発生した阪神大震災では，「新耐震設計法」が導入される 1981 年以前に建てられた「既存不適格建築物」に被害が集中した[32]．これを受け，同年「建築物の耐震改修の促進に関する法律」が制定され，不特定多数が利用する建築物に対して耐震補強の努力義務を課し，耐震診断，耐震改修のための手続きを簡素化した．耐震補強技術としては，RC 耐震壁の増設，鉄骨ブレース補強，RC 造と SRC 造の柱に対する鋼板巻き補強や炭素繊維シート巻き補強，さらには免震装置を組み込む方法などが挙げられる．

表 2-11 に，1997 年に行ったアンケート調査に基づく維持・補修・耐震補強の改修の実施率を示す．維持については，共同住宅の共有部については 100%実施され，事務所，店舗については 7 割弱の実施率であるのに対して，工場や一戸建て住宅，共同住宅の専有部の実施率は低い水準である．補修についても，ほとんどの建築物で実施率は一割にも満たず，耐震補強については，阪神大震災の 2 年後であるのにも関わらずほとんどの建築物で未だ行われていないことが現状である．今後，維持・補修・改修を計画的に行うことで長寿命化を行うためには，経済的・社会的インセンティブを用意することが必要となる．

(2) 環境配慮型設計－フレキシブル・インフィル設計－

環境配慮型設計としては，エコマテリアルの利用，建設部品の規格化，ユニット化，易解体性設計などの施策が提案されている．本研究では，すでに技術的に実用段階に達し，適用事例も存在するフレキシブル・インフィル設計を採用する．

従来の構造物では，内装・外装の老朽化に伴い，構造物全体の更新を行わなければならなかった．フレキシブル・インフィル設計では，スケルトン（躯体）とインフィル（内装・外装）を明確に分離し，スケルトンについては耐久性を高めて長寿命化を図り，インフィルについては社会変化や使用者のライフスタイルの変化に応じて短いサイクルで容易に変化できるようあらかじめ設計を行う[33]．（図 2-10）

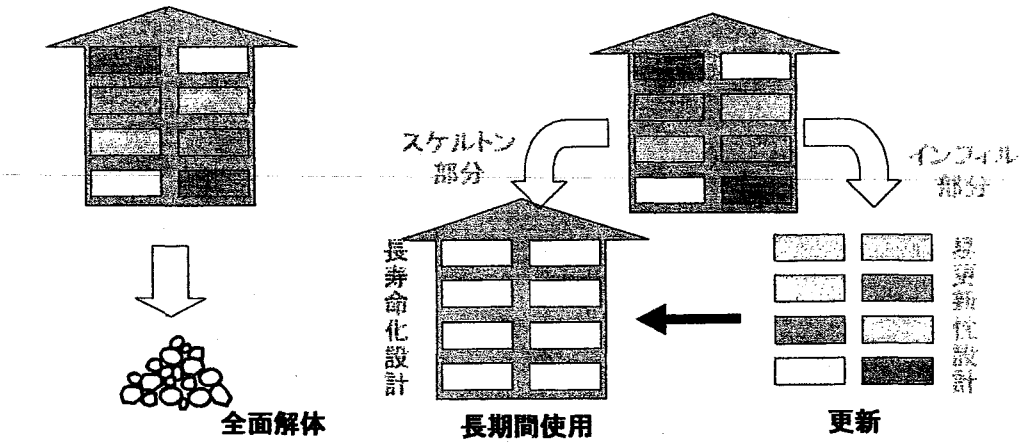


図 2-10　フレキシブルインフィル設計のイメージ図

フレキシブル・インフィル設計の場合，通常の構造物の場合と比較して，資材使用量は増加するため，素材生産，資材生産段階の環境負荷発生量は増加する．また，運用段階においても，インフィル部分の更新に伴い環境負荷が増加する．一方，インフィル部分の更新によって構造物全体の寿命を延ばし，新規建設の頻度を減らすことにより，長期間のトータルでの環境負荷の発生を抑制することができる（図 2-11）．

構造物としてのシステム全体の寿命と，躯体，外装，内装，設備などの各ユニットの寿命との関係については，外装，内装について，建設省の計画更新年数では，基盤となる部分は躯体と同じ 65 年であるが，それらの表面を仕上げる塗装・防水用被膜・タイル・カーペット・窓・建具等は 20 年～30 年程度と，躯体に比べると短くなっている．設備については，建設省の計画更新年数，法定耐用年数に加え，（社）建築・設備維持

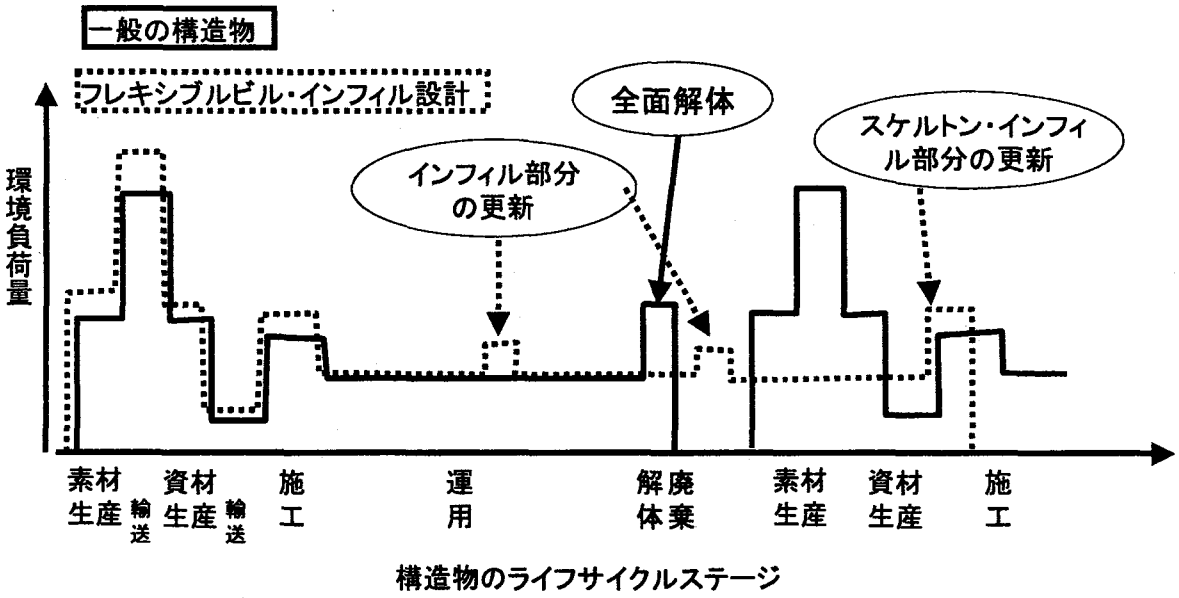


図 2-11　フレキシブル・インフィル設計による環境負荷削減

保全推進協会の耐用年数[34]が設定されているが，15 年～30 年と躯体よりも非常に短い寿命となっている．

これは，外装・内装の表面仕上げ部分と設備はその構造及び設置される環境上，物理的劣化が進行しやすい．さらに構造物というシステムにおいては，躯体によって物理的な耐久性を支え建築物全体の物理的寿命を決定するのに対して，構造物の資産価値，性能，デザインなどは外装と内装の目に見える部分と設備によって決定される．その寿命は経済的寿命や社会的寿命に近いものとなる一方で，物理的耐久性を決定する躯体は，物理的寿命を全うするように設計されている．経済的要因，社会的要因に対応して常に改修され，短期間で更新される目に見える部分と設備とは対照的である．実際の建築物では，外装，内装，設備の適切な維持管理や躯体と切り離したユニットとしての更新が円滑に行われていない．実際に東京都内の共同住宅においては，14%の建築物で適切な保全が行われないため，換気設備の性能不良があることが指摘されている[35]．この結果，既存の構造物では，外装，内装，設備の劣化の進行により，構造物というシステム全体が物理的寿命を迎える前に経済的寿命や社会的寿命が顕在化して更新されることで，構造物全体が実際の寿命期以前に解体・更新されることが実状となっている．

実際にフレキシブル・インフィル設計を社会システムとして実現するには，スケルトンとインフィル部分の設計・施工の責任区分，財産上の区分（所有・権利関係・費用負担の区分）を明確にし，共同で維持管理するスケルトンと個人が自由に変更できるインフィルを別々に管理していくことで，従来に比べ，維持・補修・改修時の所有者間の合意形成が容易になる．

このようなフレシキブルインフィル建築は，RC，SRC，S 造の共同住宅に導入されてきたが，最近では，一戸建て住宅や木造住宅についてもフレシキブルインフィル建築の研究が進んでいる[36]．フレシキブルインフィル建築が満たす要件として以下のものが挙げられる[33]．

① 建物がスケルトンとインフィルに明確に分離されていること．
② スケルトンについては，大規模な補修等を加えずに長期間の使用に耐えることとともに，遮音性，断熱性が確保されること．
③ さらに，インフィルの可変性を確保するため，スケルトン部分の面積，階高などを十分な広さ，高さにすること．
④ 建物のデザインを周辺の街並みに配慮し，将来も親しまれるものにする．
⑤ インフィルについては，維持・補修・改修が容易に行えるような構造にするとともに，その運営形態を持つこと．

(3) マテリアルリサイクル

コンクリート塊が構造材としてほとんど利用されていない原因として，再生骨材の品質に関する技術の問題，価格や需給バランスといった経済の問題，規格に関する法律の問題等が挙げられる．

法律上の対策として，建設省（現，国土交通省）では，1994 年 4 月にコンクリート用再生骨材の暫定品質基準案が通達され，その後「新たな再生骨材の品質区分案」が

提案されている[25].

一方，技術的には，表 2-12 に示すように，複数の企業ですでに製造プラントが建設され，技術開発が実証実験の段階にある．破砕したコンクリート塊から骨材を製造する方法としては，加熱した後にすりもみを行う方法，偏心ローターを用いてすりもみを行う方法，などがある．三菱マテリアルでは前者の技術を，竹中工務店では後者の技術を開発している．

図 2-12 に，すりもみ処理を用いた再生骨材生産プラントの再生骨材製造フローを示す[37]．まず発生したコンクリート塊を，クラッシャーによって 40mm 以下に破砕する．次に偏心ローター式処理装置に投入してすりもみ処理を行い，コンクリート塊に付着

表 2-12　再生骨材製造技術

	三菱マテリアル	竹中工務店	京星
場所	黒崎工場	北九州エコタウン	枚方市
生産能力	1300t/年	―	200t/h
敷地面積	70000m2	―	―
処理方法	加熱・すりもみ法	偏心ローター処理	路盤材用は乾式・再生生コン用は路盤材用を湿式で加工
再生コンクリート製造時のCO2換算値	102.9kg-C/m3	82.1kg-C/m3	―
プラント面積	2000m2（50m×40m）（原材料・細骨材ヤードを除く）	18m×16m程度	ストックヤード6万トン貯蔵可能
処理能力	3t/h	20～60t/h	―
回収率	粗骨材（5mm以上）44%，細骨材（5mm以下）31%，微粉（1mm以下）25%	粗骨材のみ回収した場合30～35%　粗骨材+細骨材回収で55～60%	―

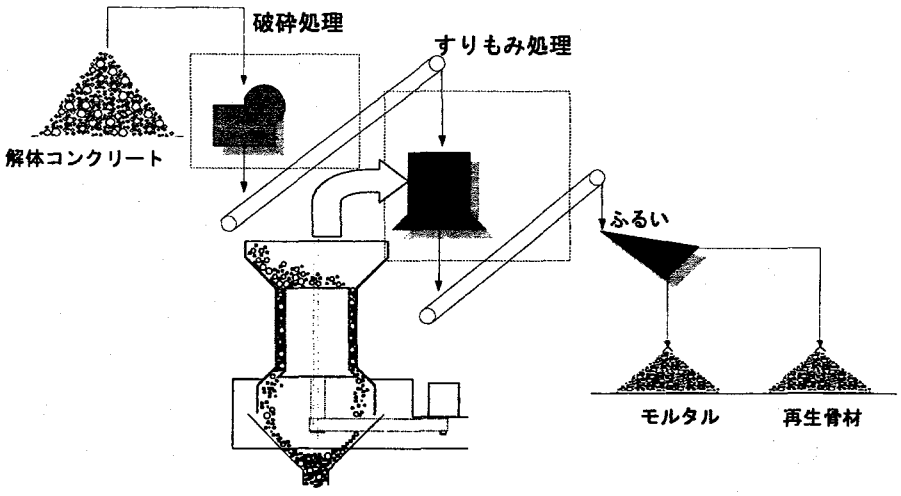


図 2-12　コンクリート塊の再生骨材化フロー[37]
（（株）竹中工務店 北九州エコタウン実証研究）

しているモルタル分を分離する．最後にふるいにかけて，骨材を取り出す．実証実験によって得られた，原骨材と再生粗骨材の品質の関係を図 2-13 に示す[38]．骨材の品質は，製造技術よりも，再資源化対象となるコンクリート塊の品質によって左右される．従って，分別解体を徹底して混入物を防ぐことが重要であり，さらに今後建設される構造物には易解体性設計を導入することが求められる．新規資源との価格競争といった経済的な課題を克服するには，大量生産によるスケールメリットを活かして生産コストを下げたり，製造プラントやストックヤードなどの分散立地，リバースロジスティクスの整備等によって輸送コストを下げたりするなど，物質循環のための基盤整備を行うことが重要となる．

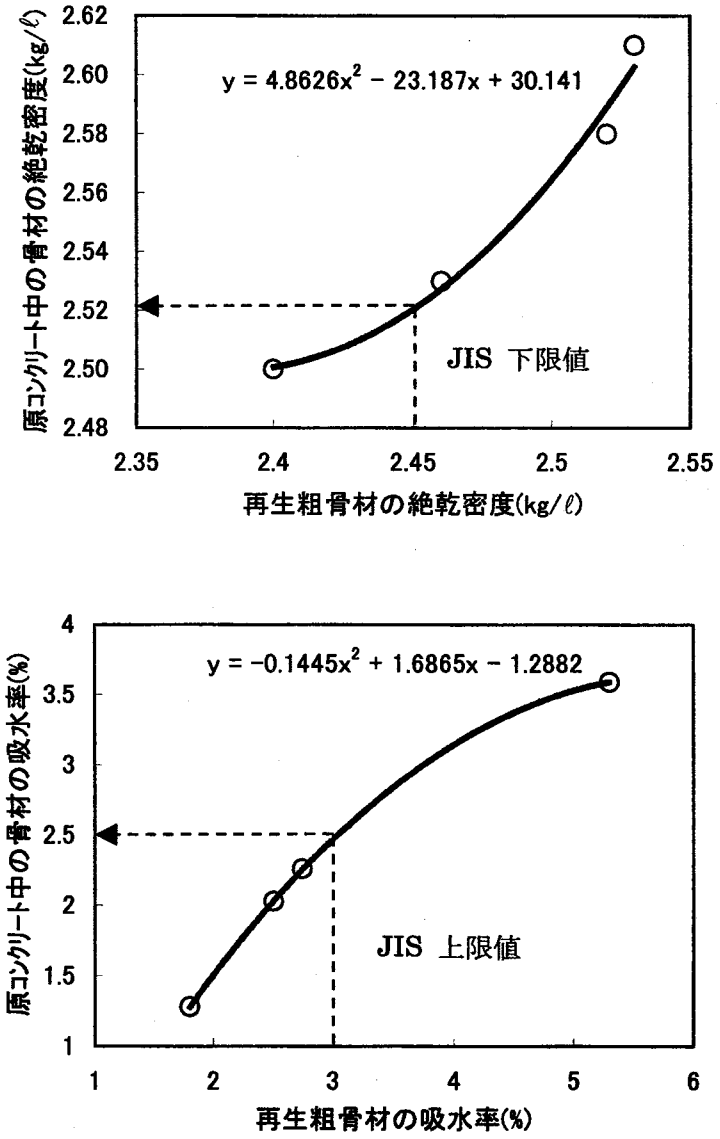


図 2-13　原骨材と再生粗骨材の品質の関係[38]

2.7 本章のまとめ

本章では，マテリアルフロー分析を用いて，都市構造物がもたらす環境負荷についてそのマテリアル特性を把握した．さらに，主要な建設資材におけるリサイクルの現状を調査した．最後に製品連鎖マネジメントの必要性を示すとともに，それに基づく政策プションについて概要を述べた．得られた知見を以下に記す．

- 国土全体では，投入量が排出量を大きく上回っており，年間 10 億トンにも及ぶ膨大なマテリアルが国内に蓄積されつつある．また，蓄積される建設資材が年間約 9 億トンに達しており，マテリアルフローの中で占める割合が大きい．
- 日本では建設資材の物質循環が進んでおらず，大量に投入された資材が構造物として蓄積されつつある構造になっている．コンクリートの再利用の割合は全国平均で排出量の 65%となっており大都市圏を中心に再利用が進んでいるが，その用途は路盤材や埋立材といった，低次のリサイクルが大部分を占める．鉄鋼に関しては，廃棄された鉄くずの 93%が電炉鋼の原料としてマテリアルリサイクルされている．木材に関しては，燃料チップなどの熱資源としてサーマルリサイクルされるのが 27%，紙パルプ用の資源としてマテリアルリサイクルされるのが 34%，建築用材などの部材として部材リサイクルされるのが 1%，残りの 38%が廃棄されており，部材リサイクルなどの上位のリサイクルはほとんど行われていない．
- 都市構造物を対象とした製品連鎖マネジメントでは，資源採掘，素材生産，部品生産，建設，運用，メンテナンス，解体，再資源化，廃棄の，生産の川上から消費，廃棄にかけての代替的な政策オプションを用意することが必要である．
- 都市構造物の製品連鎖を循環型へと転換する政策オプションは，「循環型の動脈側の生産システム」「循環型のメンテナンスシステム」「循環型の静脈側の再生システム」の 3 つのオプションの類型に分類される．

【参考文献・資料】

1) アベル・ウォルマン：Scientific American" Citys", Alfred A.Knopt Inc., 1965
2) 末石冨太郎，盛岡通：断面流動調査に基づく廃棄物環境の解析，土木学会論文集 No.200, pp31～42, 1972
3) 盛岡通：廃棄物の流動を指標とした環境計画に関する基礎的研究，京都大学学位論文，1974
4) 半谷高久，松田雄孝編：都市環境入門，東海大学出版会，1977
5) 平岡正勝：新体系土木工学 91 廃棄物処理，技報堂出版，1979
6) 環境庁リサイクル研究会：リサイクル新時代，中央法規，1991
7) 酒井寛二，漆崎昇：建設業の資源消費量解析と環境負荷の推定，環境情報科学 21 巻 2 号，pp130-135, 1992
8) 谷川寛樹，井村秀文：都市建設にともなう総物質必要量の定量化と評価に関する研究-住宅地整備のケーススタディ-，土木学会論文集 No671/VII-18, pp35-48, 2001
9) 建設副産物リサイクル広報推進会議：平成 12 年度版総合建設副産物対策，建設副産物リサイクル広報推進会議，2000
10) 厚生省：厚生白書平成 10 年版，1998
11) 環境庁：環境白書（各論）平成 12 年版，2000

12) (社) セメント協会：セメントハンドブック，1999
13) (社) 日本砂利協会：骨材需給表，1995
14) (社) 日本建設産業協会：建材統計要覧，1999
15) 藤田壮，盛岡通，小岩真之：建設物の木材に関する製品連鎖マネジメントによる都市の代謝効率改善評価，第8回地球環境シンポジウム講演論文集，pp106-113，2000
16) (社) 鉄源協会：鉄源年報第4号（1993），第5号（1995）
17) 通産省：鉄鋼統計年報，1998
18) 鉄鋼流通情報社：鉄鋼生産実績推定表，1997
19) 林野庁：林業統計要覧，1998
20) 林野庁：新たな林業木材政策の基本政策，地球社，1995
21) 秋山俊夫他：木材のリサイクル，産調出版，1998
22) 安井至他：リサイクルのすすめ，丸善，1995
23) 盛岡通，吉田登：土木建設活動全体のLCA的評価，建設のLCA，pp199-208，オーム社，2001
24) 藤田壮，盛岡通，小岩真之：建設物の木材に関する製品連鎖マネジメントによる都市の代謝効率改善評価，第8回地球環境シンポジウム講演論文集，pp106-113，2000
25) (社) 土木学会：資源有効利用の現状と課題，コンクリートライブラリー96，1999
26) 日本ノボパン工業ホームページ http://www.novopan.co.jp/p03/03sita02.htm
27) 下川泰三，漆崎昇，酒井寛二：建築資材循環利用の現状と今後の課題（その1）－建設資材の循環使用量の実態－，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.965-966，2000
28) 漆崎昇，下川泰三，酒井寛二：建築資材循環利用の現状と今後の課題（その2）－建設物の解体廃棄物とリサイクル－，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.967-968，2000
29) Graedel T.E.，Allenby, B.R.共著，後藤典弘訳：産業エコロジー，トッパン，1996
30) 財団法人経済調査会：建築物のライフサイクルコスト，建設大臣官房官庁営繕部，2000
31) 小松幸夫，加藤裕久，吉田倬朗，野城智也：わが国における各種住宅の寿命分布に関する調査報告，日本建築学会計画系論文報告集，第439号，1992.9
32) 大成建設建築構造わかる会：第一線の設計者が語る耐震設計，(財) 日本規格協会，1996
33) 建設省建築研究所：長期耐用都市型集合住宅の建設・再生技術の開発（マンション総プロ）中間報告書，2000
34) 建築環境技術研究会：建築にかかわる設備計画，鹿島出版会，2000
35) (財) 日本住宅総合センター：マンション建築設備の劣化現状，1992
36) 南山和也，星野五六：戸建住宅のSI対応システムの開発，日本建築学会大会学術講演梗概集，E－1，建築計画Ⅰ，2000
37) (株) 竹中工務店技術研究所：高品質再生粗骨材「サイクライト」，2000
38) 柳橋邦生：建設物解体コンクリートの循環製品マネジメントのシステム設計と，その環境特性・事業特性の評価に関する研究，(株) 竹中工務店 技術研究所，2001

第3章　都市構造物を対象とするライフサイクル環境負荷の評価プログラム

3.1　緒言

本章では，都市構造物から発生する環境負荷量を評価するために用いる手法として，ライフサイクルアセスメント（LCA ：Life Cycle Assessment）手法を取り上げ，その概要を述べるとともに，都市構造物の評価に適用する際の留意点を明らかにする．その上で，都市構造物から発生するライフサイクルの環境負荷量を評価するシステムの構築を行う．まずシステムの論理構成を示し，次に都市構造物のインベントリーを構築する．そしてシステムを構成するサブシステムについて述べ，システムを動かすために必要な基礎データについて言及する．

3.2　都市構造物へのLCA手法の適用

3.2.1　LCA手法の概要

LCAの手順はいくつかのサブプロセスから成り立つ．ISO14040の規定によれば，①目的及び調査範囲の設定②ライフサイクルインベントリー分析③ライフサイクル影響評価④ライフサイクル解釈⑤報告⑥クリティカルレビューの6段階から構成される[1]．しかし都市構造物を対象とする場合，②のインベントリー分析までしか行われていないケースが多い．その原因として，都市構造物は多様な製品の集合体であるため，様々な環境負荷を発生させる．③の影響評価を行うためには，それらを統合評価する必要があり，統合する論拠がまだ確立していないことが挙げられる．ここでは，①と②を，目的設定，評価対象の設定，データの収集，インベントリーの算定の各段階に分割して述べる．

LCAの目的には，製品や技術について環境負荷の大きさを把握する，あるいは経済性や利便性といった面まで評価を行う等の様々なケースがある．従って，最初に目的が何であるかについて明確化する必要がある．それによって，評価対象の設定や収集するデータが異なる．

目的を明らかにした後，評価対象を定める．評価対象を定める過程は，3つの過程に分割することができる．第一に，どのような製品や技術を対象にするかを設定する過程である．第二に，資材生産，輸送，部品生産，加工，流通，使用，廃棄，収集，処理，処分といったライフサイクルを構成するステージの中のどの部分を評価対象とするかを設定する過程である．第三に，評価対象とした各ステージにおいて，どこまでを評価対象とするかを設定する過程である．例えば，部品生産において，生産時に直接投入したエネルギー使用量や資源消費量のみを対象とするのか，あるいは部品生産工場を建設した際のエネルギー使用量や資源消費量までを対象とするのかを設定する．

データの収集過程では，各ステージにおいて必要となる資材量，部品量，エネルギー使用量，労働力などのインプット側のデータと，生産物，副産物，廃棄物の発生量や二酸化炭素の排出量などアウトプット側のデータを収集する．それらのデータを単位生産物あたりの値に直したものを原単位と呼ぶ．従来のLCA研究では原単位を作成することに主眼が置かれていたが，現在では，公的機関や学会などが推奨する原単位データが公表されており，本研究では，それらを活用する．

最後に物質インベントリーの算定を行う．物質インベントリー（inventory）とは，目録，一覧といった意味であり，一つの製品を製造する際に必要な資材量やエネルギー量，また製造に伴い発生する環境負荷量を示す．算定したインベントリーを基にして，外部環境への影響を評価する影響分析（Impact Analysis）を試みる研究も行われている[2]が，各インベントリー値を統合する際の重み付けの際に恣意性を排除することが困難であり，現在ではインベントリー分析の段階までの研究が主流である．

以上の各段階を経てライフサイクルアセスメントを行うことにより，製品や技術の評価を行うことができる．また，複数の製品や技術に対する評価結果を比較することにより，製品開発や政策決定の材料とすることができる．

3.2.2 都市構造物にLCAを用いる上での課題

都市構造物を構成する製品の連鎖に沿って循環形成を図り，構造物が都市や空間の中で代謝・更新される過程で廃棄物の最終処分量を可能な限りゼロに近づけるには，環境負荷を定量的に把握するツールを都市構造物に適した形で開発する必要がある．その基本ツールとはライフサイクルアセスメント（LCA，Life Cycle Assessment）とGIS（Geographical Information System）であり，代替的な都市環境改善のオプションの比較を定量的に行うこととなる．ライフサイクルアセスメントを，都市構造物の更新に関する環境政策や，その計画の立案に適用するには，以下の課題を考慮する．

①都市活動を通して構造物に関与する主体の多様性；都市には様々な種類の施設，製品，活動が組み合わさって存在している．通常のLCA分析では，単独の製品を対象にその製造から廃棄までに発生する環境負荷を評価することにより，その結果が生産主体の意思決定に反映される．それに対し，都市構造物を対象としたLCA分析では，基盤の建設や利用，維持，管理などで多様な主体が関係しているため，複数の製品や活動のライフサイクルでの効果を総合して評価することが必要となる．

②評価対象領域を設定する論理；多様な活動が評価の対象となるため，単一の製品のライフサイクルに注目するのではなく，複合的な構造物や都市空間を評価対象として設定することとなるが，その領域境界を一意的に決定する論理的根拠が存在しない．

③将来の施設立地を予測する論理；都市構造物を対象とするマテリアルマネジメントや，空間マネジメント，都市成長マネジメントなどの多様な環境改善施策の効果を定量的に評価するには，現状の建物のライフサイクルの分析を行うことに加えて，都市構造物が更新され，変化する構造物に対して代替的な見通しとしてのシナリオと，更新を規定する長期的なスケジュールを用意しておくことが求められる．

④環境負荷指標の統合；都市環境の改善施策はさまざまな環境負荷の削減をもたらす．そこで，都市環境政策の選択に反映させるためには，資源やエネルギーの消費や二酸化炭素，廃棄物の発生など，複数の環境負荷指標を統合的に取り扱うことが求められる．

⑤責任分担の論理；一般の工業製品においては，拡大生産者責任の概念が広まりつつある．一方，都市構造物には関与する主体が多様であり，かつ製品寿命が長いため，特定の主体に一元的に責任を負わせることが困難である．従って，関与する主体間での責任分担を規定する論理が必要となる[3]．

建築物・発電施設・下水道施設などの都市施設を単体で取り上げ，それらを集計した場合の環境負荷量をライフサイクルで評価した研究はすでに数多くなされてきた[4]．都市施設を対象としたLCA研究の近年の傾向を示す研究例を表3-1に示す．井村ら[5]及び伊藤ら[6]は，これまで単体で取り上げられてきた各施設の評価を統合することによって，埋立地・ニュータウンといった複合的な面開発事業の環境負荷を評価している．また中村ら[7]は，自動車交通に着目して，都市施設を利用した都市活動がもたらす環境負荷を精密に評価している．そこで，あらためてこれらの研究を総括した上で，都市施設を幅広く評価対象に組み入れた上で面開発事業の評価を行い，さらに環境負荷の将来予測と改善施策の効果の評価を行う．

表 3—1　LCA を用いて都市構造物からの環境負荷を評価している研究

		井村ら（1997）	伊藤ら（1996）	中村ら（1998）
研究対象事業		港湾埋立整備事業（アイランドシティ整備事業，約400ha）	ニュータウン建設（宮城県のPニュータウン，約160ha，計画人口9600人）	都市間高速道路（道路を構成する高架・橋梁／土工／トンネルとその上の舗装）
LCAの範囲		土木構造物の建設 建築物の建設・運用（熱需要のみ）	土木構造物の建設 建築物の建設・運用（電気・ガス・上下水道の使用量，ごみの排出量）	土木構造物の建設・供用
評価対象とする環境負荷		LCE（ライフサイクルエネルギー），$LCCO_2$（ライフサイクルCO_2）	$LCCO_2$（ライフサイクルCO_2）	$LCCO_2$（ライフサイクルCO_2）
環境負荷原単位の求め方		「組み合わせ方式」 金額ベース 資材投入量と機械運転時間を基準とする	「組み合わせ方式」 可能な限り物量ベース，データが不明確な場合には金額ベース	「組み合わせ方式」 物量ベース （産業連関法を用いた内包CO_2排出原単位）
環境負荷原単位作成に使用するデータ		建設部門分析用産業連関表	既往研究における検討値 産業連関表	酒井の研究論文[6]
環境負荷算定におけるステージ分け		1埋立土地造成工事 （護岸・岸壁工事と浚渫・埋立工事に分ける） 2上部構造物の建設 3上部構造物の運用 の3ステージ	1造成工事 （14の工種に分ける） 2建設工事 3供用 の3ステージ	1建設 2維持管理 3道路供用後の車両走行 の3ステージ
造成・建設ステージにおけるサブステージ		1機械の運転 2建設機械製造 3資材の製造 4上部構造物の建設 の4サブステージ	1造成の労務 2造成の材料 3造成の機械損料 4造成の燃料 5造成の間接工事 6建築物の建設 の6サブステージ	1資材使用 2機械使用 の2サブシステム （資材の製造・運搬に関しては原単位に内包されている）
造成・建設ステージのサブステージのカテゴリー分け	直接投入	機械の運転 上部構造物の建設	造成の燃料 造成の間接工事 建築物の建設 造成の労務	機械使用
	資材製造	資材の製造 上部構造物の建設	造成の材料 建築物の建設	資材使用
	資材運搬			原単位に内包
	機械製造	建設機械製造 上部構造物の建設	造成の機械損料 建築物の建設	原単位に内包

環境負荷算定方法（建設ステージ）	工事を工法，工程，資材（5種類）レベルに分類し，施工時に使用される建設機械運転時間，資材投入量を積み上げる．その値に原単位を掛ける．上部構造物に関しては，用地区分ごとに建築構造別建設原単位（各構造別の単位床面積あたりの建設資材使用量）を用いて算定する．	工事を各工種に分類して，施工時に使用される建設機械運転時間，資材投入量を積み上げる．その値に原単位を掛ける． 建築物に関しては構造別の延床面積にCO_2排出量原単位を掛ける．	道路の構造形式ごとに横断面を想定し，それに基づいて施工断面積・体積・投入資材量を推定しCO_2排出量原単位を掛ける．
環境負荷算定方法（運用・供用ステージ）	上部構造物における熱需要に関するエネルギー量をCO_2排出量に変換する．	建築関連の空調・給湯・照明などのエネルギー消費量をCO_2排出量に変換する．	交通量と道路容量から走行速度を算出し，それを基に消費燃料を求め，その値をCO_2排出量に変換する．
環境負荷算定方法（その他のステージ）	廃棄についてはデータが入手できなかったため考慮しない	修繕・解体については，造成工事について主に検証するという意図により，考慮しない	維持管理ステージについては道路構造形式別・車線数別の維持管理費のデータと単位維持管理費あたりのCO_2排出量原単位を乗じて求める．
建築物の分類	4種類（木造，SRC，RC，S）	3種類（個別住宅，集合住宅，その他）	建築物は対象としていない
結論	土地造成及び上部構造物の建設に伴うCO_2発生量は運用に伴うCO_2発生量の約15年分に相当する	各CO_2排出削減施策を強力に導入の場合全体の8.9%，現実的な導入の場合2.9%削減できる	総CO_2発生量を抑えるには，「渋滞が起こらない範囲で，最小の規模の道路を建設する」ことが望ましい
研究課題	・資材の運搬による環境負荷を考慮していない ・土木構造物の供用段階の評価 ・建築物の運用段階の評価の強化	・資材の運搬による環境負荷を考慮していない ・土木構造物の供用段階の評価	・建築物の評価とのリンク ・他の環境負荷指標（NOxなど）との総合評価

3.3 都市構造物のライフサイクル評価システム

3.3.1 LCAに基づく環境負荷算定の論理フレーム

都市の構造物や活動の全体に対するLCA手法の適用はまだ着手されたばかりであり，国際的にも支援ツールの開発事例はみられない．一方，建築物単体の詳細な解析ソフトに限れば，欧米を中心に一般公開または市販されている先進的な事例がいくつかみられる．これらの事例の共通点は，建築物単体の既存物件又は新規の計画物件を個別に解析するものであること，基本設計から詳細設計にいたる段階における設備・仕様データを入力情報として，建築・設備設計担当者又は専門コンサルタントが利用すると用途を設定していることなどである．

都市構造物の環境負荷削減にあたっては，個々の構造物での算定を確定的に詳細に行うことよりもむしろ，都市や地区スケールにおける不確実で多様な状況のもとで，幅広い施策を将来の更新を

シナリオで描いて，そのうちでも効果的と判断される施策を先導的に誘導することが求められる．そこで，建築・設備設計者より，むしろ都市環境計画を立案する者にとって利用しやすいシステムの開発を行うものとして，システム構築の基本方針は下記の通りとした[9]．

1) 都市計画や環境計画として取り上げうる環境負荷削減施策として，容積率規制や街区共同化などの施策を，容積率の設定や更新時期の設定を通じて戦略的に導入したサブシステムを組み入れる．
2) 広域での都市構造物のマネジメントや地域での開発方針策定などの企画構想段階で，構造物に関する概略の情報によって演算が可能であるシステムとする．
3) 現況の構造物プロフィールや施設立地を算定プロセスに内部化する．
4) 各種原単位や標準設定値の算定諸元は基本的にシステム内部で事前に準備し，適宜ユーザー側からの変更・追加を可能とする．
5) ライフサイクルでの負荷の総量の算定にとどまらず，1～10 年単位での時系列の各断面においても評価，表現することができ，複数のケースでの代替案比較を可能とする．
6) 汎用性や今後の研究発展性を考慮し， Windows を OS として作成し，Excel や Access などのデータテーブルとの連携を容易なものとする．

3.3.2 プログラムの論理構成

評価システムにおいて対象とした構造物とライフサイクルの，分析ステージ，及び LCA の環境負荷の項目について図 3-1 に示す．全体システムを，「情報入力サブシステム」，「戦略的代替案計画サブシステム」，「環境負荷算定サブシステム」，「出力表示サブシステム」の４つのサブシステムで構成する．図 3-2 にその基本構成を示す．

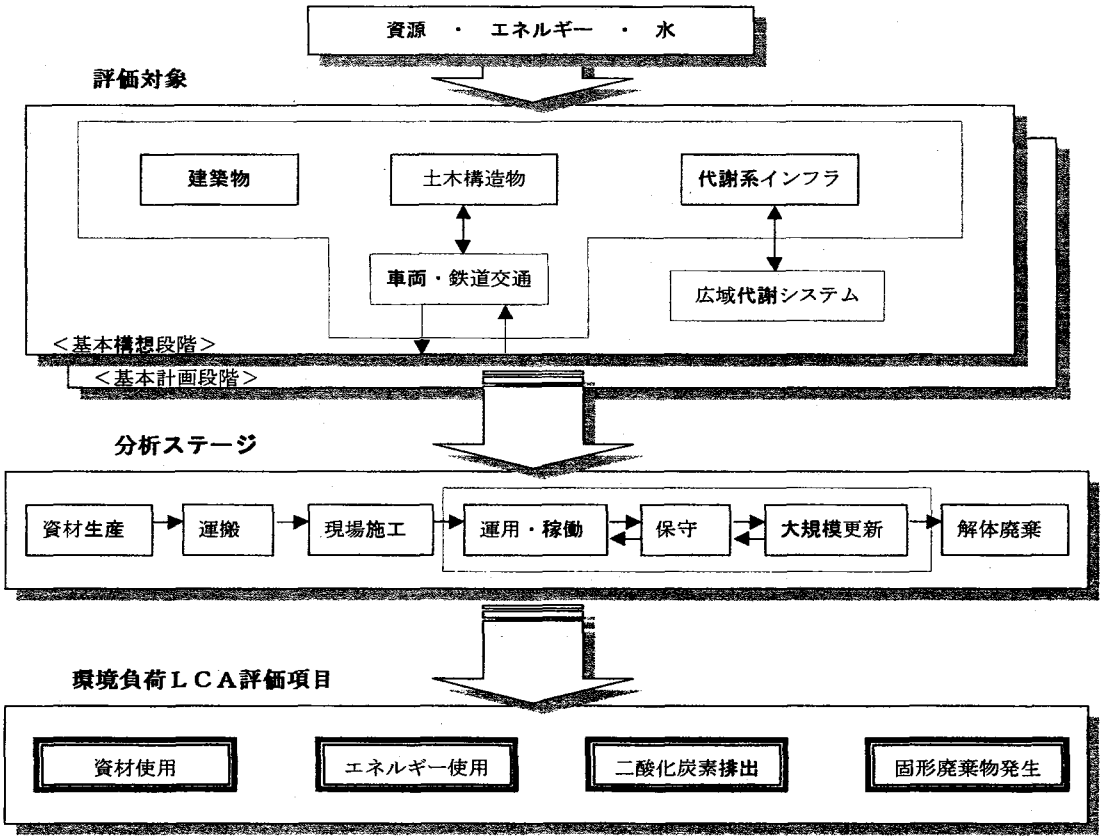


図 3-1 環境負荷の評価システム

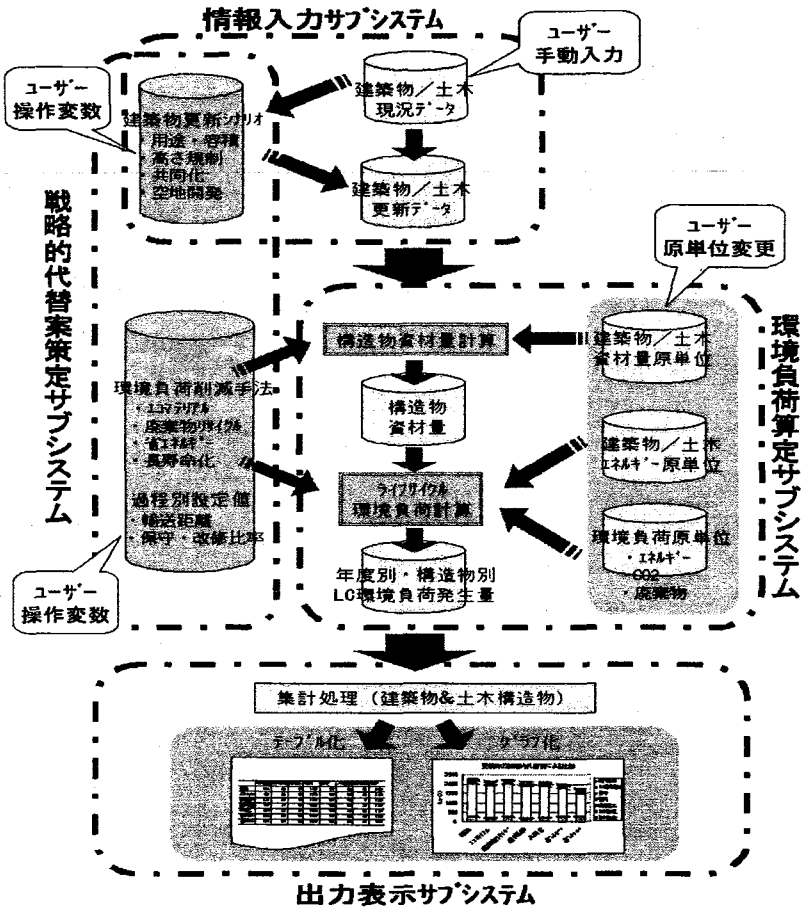


図 3-2　環境負荷評価の全体システムの基本構成

「情報入力サブシステム」において建築物や土木構造物属性データを入力・作成し，「戦略的代替案計画サブシステム」において環境負荷削減手法等を取り込みながら，「環境負荷算定サブシステム」で構造物属性データに各種原単位・標準値データ等を適用させることにより，構造物資材量及びライフサイクル環境負荷の演算を行う．「出力表示サブシステム」では演算結果を集計し，テーブル及びグラフとして出力を行い，代替案の環境改善効果を定量的に比較することを可能とする．

評価対象とする都市構造物は建築物及び土木構造物とする．ライフサイクルステージを資材生産・資材輸送・現場施工・運用・保守・大規模改修・解体除却の７段階に分割して，環境負荷の算定を行う．また，評価指標としては二酸化炭素排出量，建設廃棄物発生量，資材使用量，エネルギー使用量をとりあげる．

3.3.3　パラメータの構造

(1)　都市構造物のインベントリー

都市構造物のLCA評価システムの中では，都市構造物の構成要素を階層的に類型化したインベントリーを構築している．本章では都市構造物のマネジメントに関わる多様な領域を考慮して，街区単位や個別構造物の立地情報を評価に反映することができるものとした．個別構造物の計画・設計段階の詳細情報への対応は省略している．具体的には図3-3に示す構成とし，データ整備を行う．すなわち，都市構造物を建築物，土木構造物，代謝系インフラに分類した上で，それぞれを構造や形式によって体系化する．また，長期間の空間単位での評価を可能とするために，施設更新に関する

要素を操作可能な変数項目として内部化した.

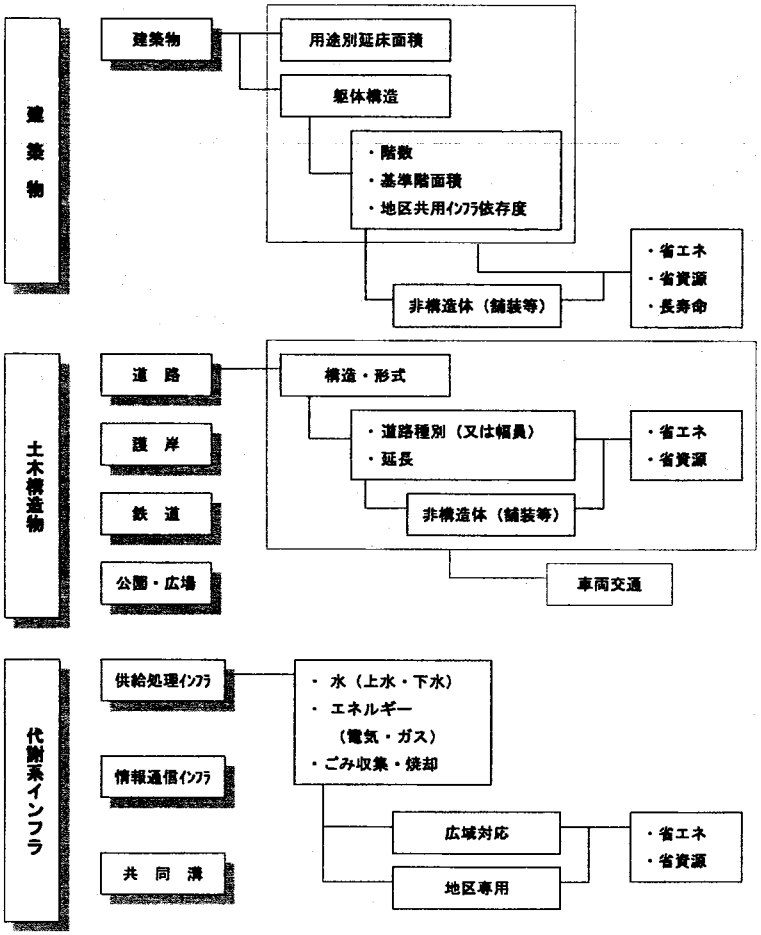


図3-3　都市構造物のインベントリーの概要

(2)　解析手法と各種原単位の算出法

資材製造時のエネルギー使用量と二酸化炭素排出量については，いくつかの原単位が提案されている[10) 11) 12)]．ここで，二酸化炭素排出量については，表3-2に示す土木学会が暫定推奨値とした値[13)]を使用する．この値は，産業連関表を基礎データとして利用し，積み上げ法も部分的に併用して産業間の波及効果を含めたものである．また，表3-2に示す主要資材製造に伴う廃棄物原単位は，平成2年度の業種別産業廃棄物排出量データ[14)]と1990年度産業連関表を使用して算出した[15) 16)]．なお，ここに示す廃棄物原単位は，発生する産業廃棄物量が業種間で取引する金額（生産者価格）に比例することを前提として求めている．

a)　資源消費量

資源消費量を求めるために，建築物に関しては，建築業協会が試算している用途別・構造別の延床面積当たりの資材量より原単位を求めた[17)]．但し事務所ビルについては，(株) 大林組の施工物件のデータをもとに階数，基準階面積による近似式を作成した．土木構造物については，図面より資材量を見積もった上で，その面積や体積あるいは長さあたりの原単位を標準値として用いる方法をとった．代謝系インフラについては，文献調査[18) 19) 20) 21)]により求めた．代謝系インフラは当対象地域のみを対象に建設されたものではないので，各インフラの供給量に見合った資材を負担するものとした．以下，二酸化炭素排出量，及び廃棄物発生量についても，代謝系インフラの扱いは同様

である.

b)　二酸化炭素排出量

資材生産時の二酸化炭素排出量は各資材の二酸化炭素排出量原単位を乗じて試算した．運搬の際の二酸化炭素排出量は，資材の運搬距離を往復120kmとし，積載重量輸送距離当たりの原単位を乗じたて求めることとした．ただし，ここでの運搬距離などの初期設定値は変更可能な形でシステムを組み立てることとした．また，建築施工時の二酸化炭素排出量は，総合エネルギー統計と着工床面積より算出した原単位[22]を用いた．土木構造物の施工時の排出量に関しては，土木学会の報告書[23]を参考にした．代謝系インフラの施工時の原単位については，文献調査[24]により求めた．運用時の二酸化炭素排出量は，建築では用途別床面積当たりの原単位[25]より，土木構造物では，地下鉄の電力消費量及び運行資料，自動車交通量調査より推定した[26] [27]．

c)　環境負荷としての廃棄物発生量

廃棄物発生量も各段階ごとに原単位を設定する．資材生産時の廃棄物は，表3-2の右の欄の原単位を用いて算定することにした．建築物の施工段階の廃棄物量は，建築業協会の調査の結果[28]を引用し，土木構造物は土木学会の報告書[29]をもとに，それぞれの値を求めた．運用時の廃棄物として，事務所，住宅，その他の施設から排出される廃棄物を想定した．解体時の廃棄物量は，製造時の資材が全て廃棄物になると仮定した．ただし地下構造物及び道路の躯体は解体されないものとした．

表3-3，表3-4に建築物ならびに土木構造物の環境負荷の原単位の形式を，図3-4，図3-5に建築物ならびに土木構造物のライフサイクル負荷を算定するプロセスを示す．

表３－２　主要資材製造時のＣＯ２排出、
ｴﾈﾙｷﾞｰ使用、廃棄物発生原単位

分類項目	CO2排出原単位		ｴﾈﾙｷﾞｰ使用原単位 kcal/kg	廃棄物発生原単位 kg/t
砂利・採石	0.00154	(kg-C/kg)	3	0.074
砕石	0.00189	(kg-C/kg)	7	
製材品	0.0297	(kg-C/kg)	240 (kcal/m^3)	
合　板	0.0519	(kg-C/kg)	2,379 (kcal/m^3)	
ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	0.228	(kg-C/kg)	1,193	37.75
高炉ｾﾒﾝﾄ	0.135	(kg-C/kg)	779	
高炉鋼材	0.411	(kg-C/kg)	3,621	154.2
電炉鋼材	0.128	(kg-C/kg)	2,044	
ｱﾙﾐﾆｳﾑ	2.03	(kg-C/kg)	2,012	
ｶﾞﾗｽ	0.486	(kg-C/kg)	4,900	
ﾌﾟﾗｽﾁｯｸ製品	0.492	(kg-C/kg)	3,497	
ｱｽﾌｧﾙﾄ混合物	0.0113	(kg-C/kg)	100	
軽油	0.779	(kg-C/l)		
天然ｶﾞｽ	0.669	(kg-C/m3)		
液化石油ｶﾞｽ	0.868	(kg-C/kg)		
電力	0.129	(kg-C/kWh)		
運輸	0.093	(kg-C/t･km)	1,098 (kcal/t･km)	

表 3-3　建築物の環境負荷の原単位の形式

	資材使用量	エネルギー使用量・二酸化炭素排出量	廃棄物発生量
資材生産段階	構造別、延床面積当たりの建築・設備資材使用量	資材製造時のエネルギー使用量・二酸化炭素排出量	資材製造時の廃棄物発生量
資材運搬段階	－	積載重量輸送距離当りのエネルギー使用量・二酸化炭素排出量	－
現場施工段階	－	施工床面積当りのエネルギー使用量・二酸化炭素排出量	施工床面積当りの廃棄物発生量
運用・稼働段階	－	用途別、規模別のエネルギー使用量・二酸化炭素排出量	延床面積当たりのゴミ発生量
保守段階*	躯体・外装・内装・設備別の資材使用量	資材製造時、運搬時、施工時のエネルギー使用量・二酸化炭素排出量	資材製造時、施工時の廃棄物発生量
大規模改修段階*	外装・内装・設備別の資材使用量	資材製造時、運搬時、施工時、廃棄物輸送時のエネルギー使用量・二酸化炭素排出量	資材製造時、施工時の廃棄物発生量
解体廃棄段階**	－	解体工事時、廃棄物輸送時のエネルギー使用量・二酸化炭素排出量	建設時の資材使用量

＊保守・大規模改修段階での運搬及び施工は別途計算

＊＊解体段階での運搬は別途計算

表 3-4　土木構造物の環境負荷の原単位の形式

	資材使用量	エネルギー使用量・二酸化炭素排出量	廃棄物発生量
資材生産段階	工種毎の資材使用量	資材製造時のエネルギー使用量・二酸化炭素排出量	資材製造時の廃棄物発生量
資材運搬段階	－	積載重量輸送距離当りのエネルギー使用量・二酸化炭素排出量	－
現場施工段階	－	工種毎のエネルギー使用量・二酸化炭素排出量	工種毎の廃棄物発生量
運用・稼働段階	－	工種毎の運用時のエネルギー使用量・二酸化炭素排出量	－
大規模改修段階*	工種毎の資材使用量	資材製造時、運搬時、施工時、廃棄物輸送時のエネルギー使用量・二酸化炭素排出量	資材製造時施工時の廃棄物発生
解体廃棄段階**	－	解体工事時、廃棄物輸送時のエネルギー使用量・二酸化炭素排出量	建設時の資材使用量

＊大規模改修段階での運搬及び施工は別途計算

＊＊解体段階での運搬は別途計算

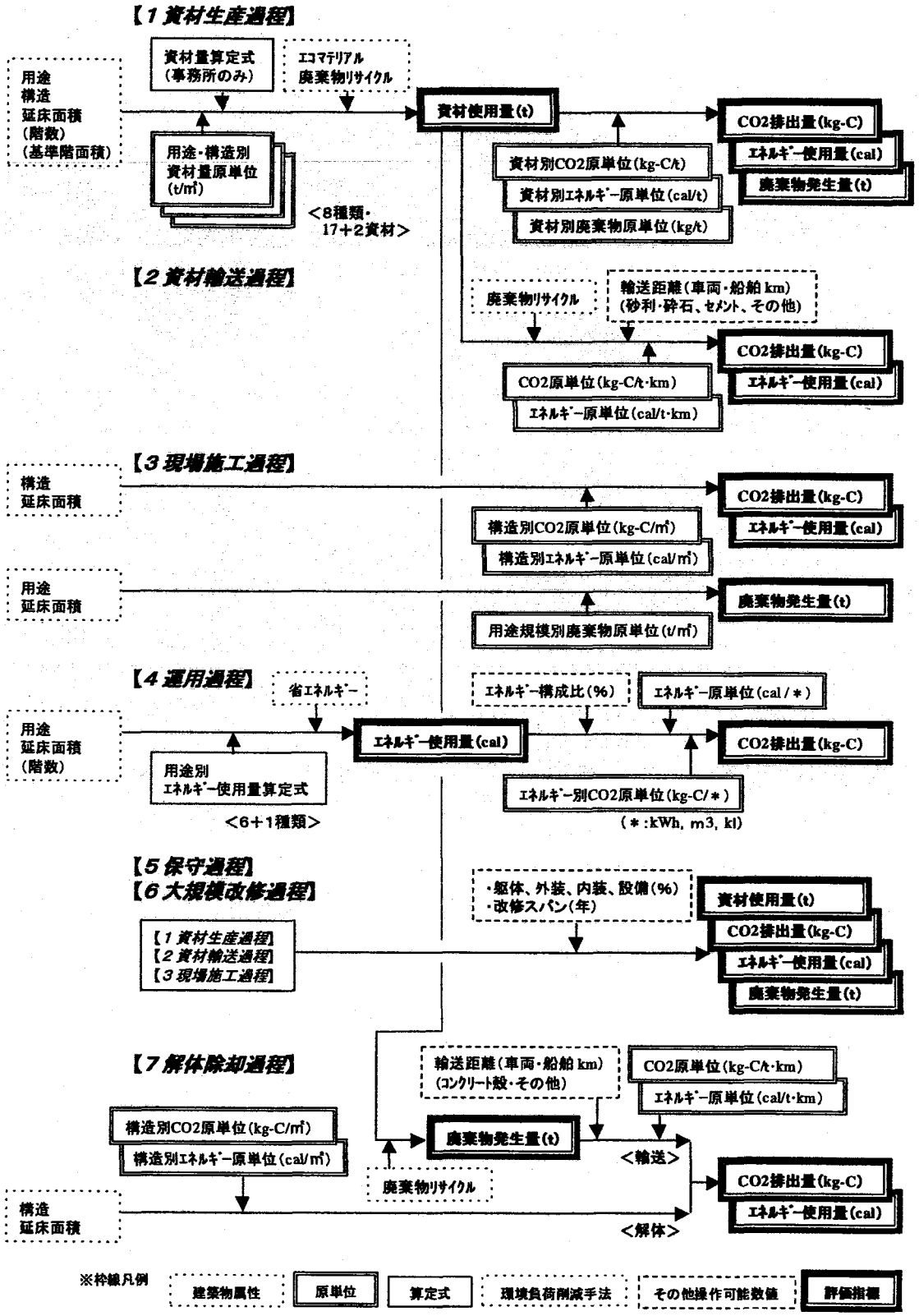


図3-4 建築物のLCAの負荷算定プロセス

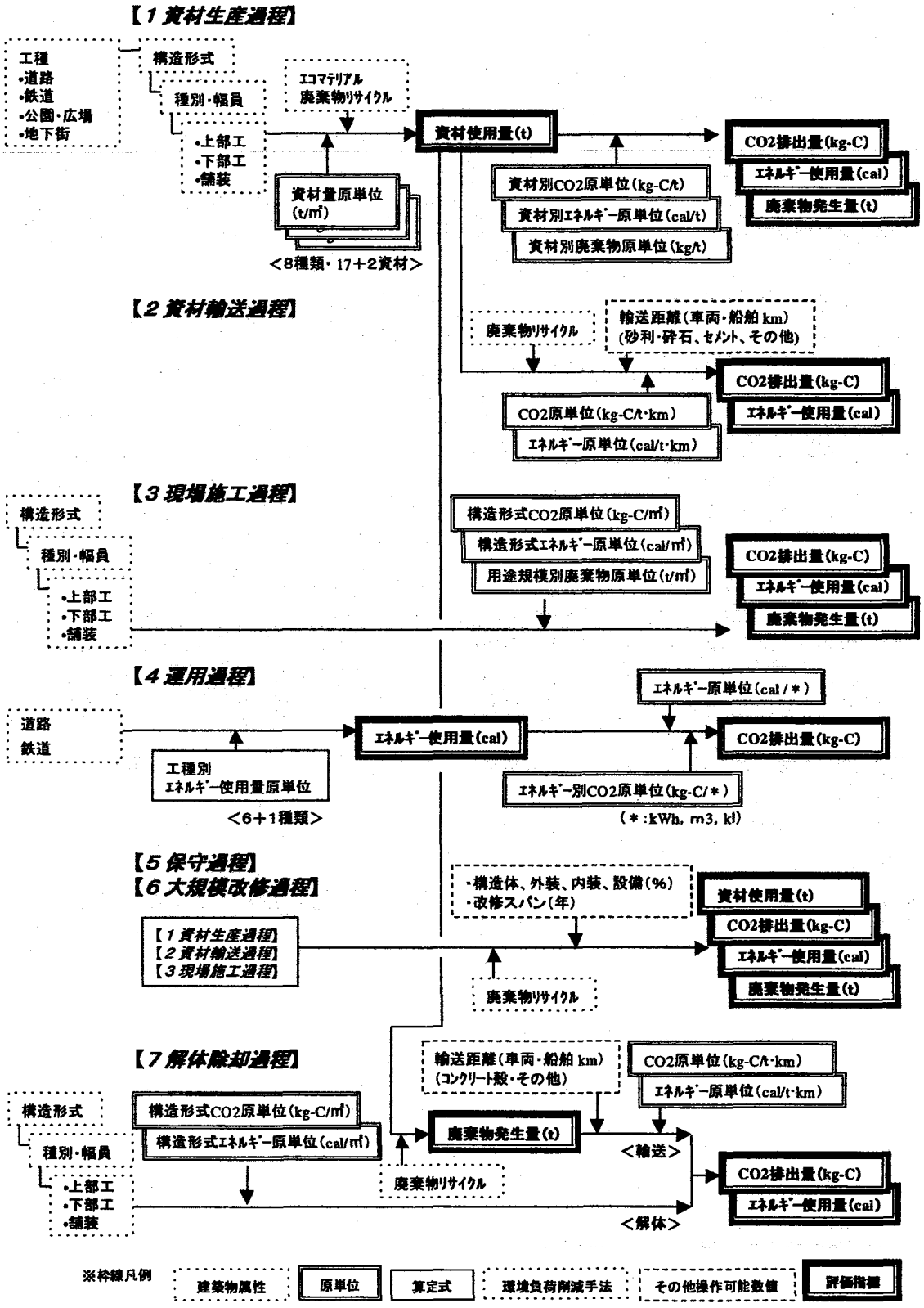


図3-5 土木構造物のLCAの負荷算定プロセス

3.3.4 サブシステムの構造

(1) 情報入力サブシステム

建設物属性のうち，用途・構造・階数・延床面積・着工年度など基本条件にかかるデータのみの入力と作成を行うことで演算が可能である．現況の属性データは当初は全て手動により入力を行うが，Excel や Access 等のデータテーブルによるインポート／エクスポートには対応可能としている．また，更新後に隣接建物の共同化を想定する場合は利用者が独自に想定した街区・ブロックデータを入力することにより対応することもできる．更新後のデータについては，“更新条件”を設定することにより既存データからの変化として自動作成することが可能である．“更新条件”は，空間・時間的な簡易条件を設定するものであり，“更新形態”と“更新（共同化）スケジュール”の２つの組み合わせからなる．“更新形態”では建替方法，用途，構造，高さ（階数），基準階面積，空地開発の有無などを規定し，“更新（共同化）スケジュール”では一斉更新又は逐次更新の選択や共同化更新時期などの設定を可能としている．共同化更新時期は，共同化の対象となる建築物全体の用地面積，建築面積または延床面積の合計に対する使用寿命期間を経過した物件の割合を基準に決定している．“更新条件”は，様々な敷地条件や構造物条件に適合する物件毎に異なる条件を適用させることもできる．なお，更新データを自動作成する場合には，建物構造，施工期間，運用期間などのデータは“標準設定値”から自動的に与えることも可能とした．

土木構造物属性についても，建築物と同様に，種類，形式，面積（幅員・延長），着工年度など基本条件のデータの入力，作成を行う．使用寿命期間を過ぎたあと，繰り返して同一の更新を行う場合には更新後データの自動作成が可能である．なお，交通量については都市の規模や活動水準によって大幅に異なるので，対象区域の観察地などを参考に外生的に与えることとしているが，サブシステムとして別途に詳細なルールを持つことも想定している．

“建築物データ入力/変更”及び“更新形態”の GUI（Graphical User Interface）の画

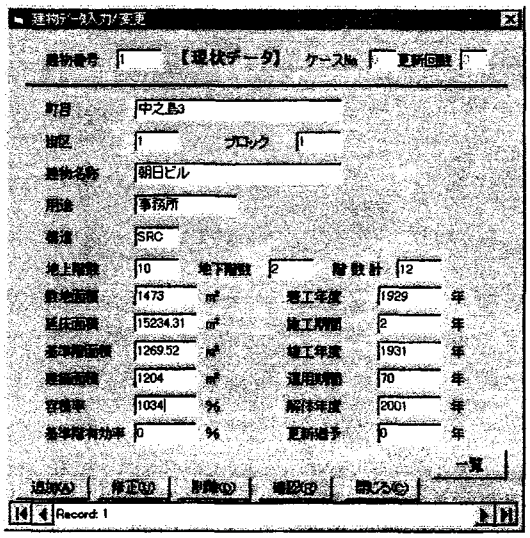


図 3-6 “建築物データ入力/変更”の GUI の表示

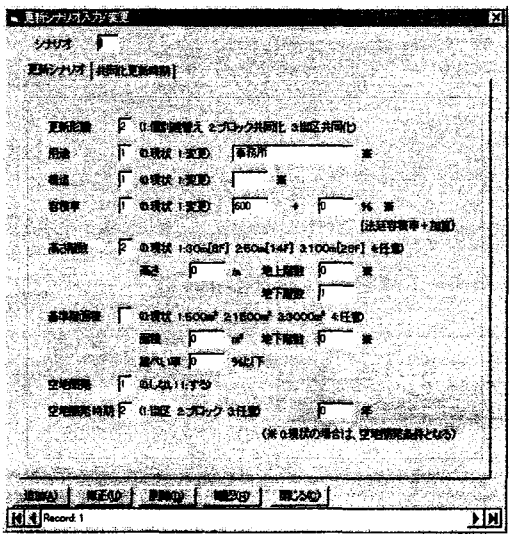


図 3-7 “更新形態”の GUI の表示

面を図 3-6，図 3-7 に示す．また，建築物属性データへの更新条件の適用のプロセスを図 3-8 に示す[8]．

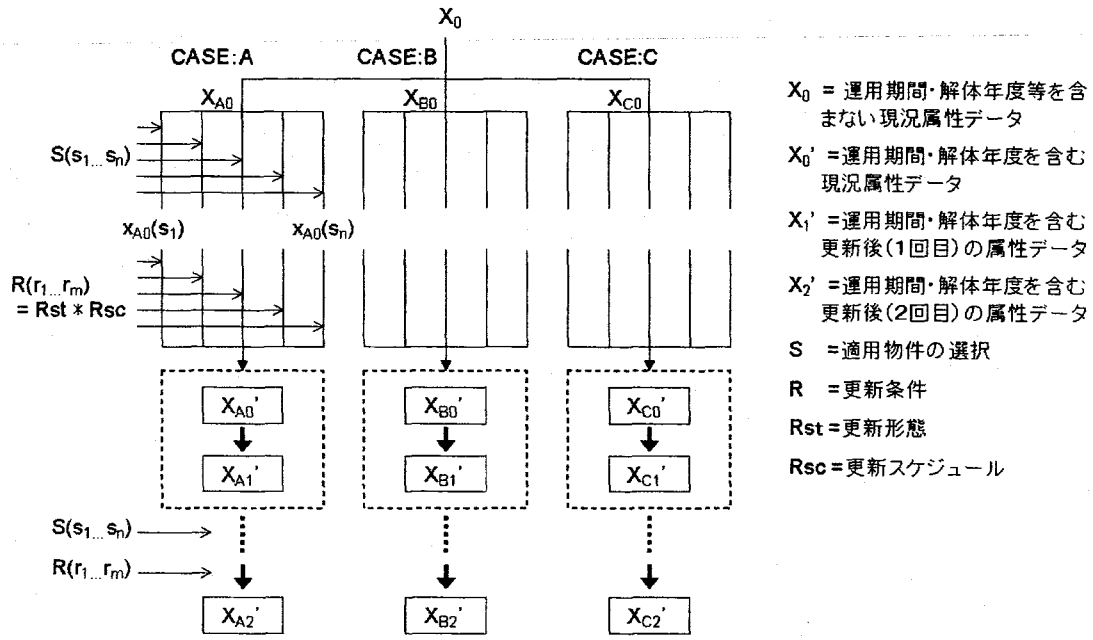


図 3-8　属性データの更新条件の適用

(2)　戦略的代替案策定サブシステム

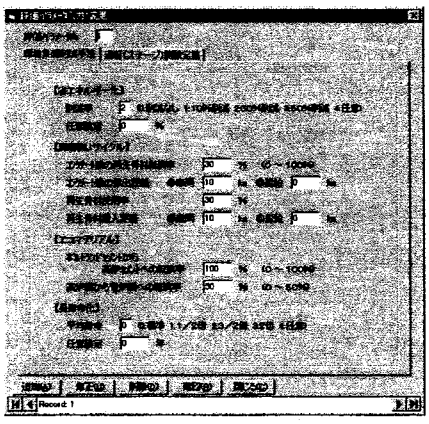
都市に集積する構造物を建設もしくは管理する施策を工夫することで環境負荷の削減が期待される場合に，その手法を戦略的な代替案として取り込み，その効果を環境負荷の将来予測に反映させることができる．環境負荷削減の手法の類型はシステム側で事前に用意する形をとっているため，ユーザーは容易に操作変数を取り扱い代替案の諸条件を設定して，その効果を把握することが可能である．システムにあらかじめ導入した環境負荷削減の手法を表 3-5 に示す．

“環境負荷削減手法”は“過程別設定値”との自由な組み合わせにより，代替案ケース

表 3-5 環境負荷削減手法

項　目	概　　要
エコマテリアル使用	・高炉鋼から電炉鋼への転換率の設定 ・ポルトランドセメントから高炉スラグ入りセメントへの転換率の設定
省エネルギー	・運用過程におけるエネルギー使用量削減率の設定
建設廃棄物リサイクル	・再生骨材の使用率・搬入距離の設定及びコンクリート殻のリサイクル率・搬出距離の設定 ・再生アスファルトの使用率・搬入距離の設定及びアスファルト殻のリサイクル率・搬出距離の設定

ごとの評価パラメータとして登録され，環境負荷計算の際に利用される．資材生産及び運用過程の“過程別設定値”に関しては，算定式を用いる計算または標準値による計算の選択，資材輸送距離，初期投資に対する保守・大規模改修比率，解体材搬出距離などが設定される．また，“更新条件”の場合と同様に，評価パラメータは，様々な敷地条件や構造物条件に適合する物件ごとに異なる値を適用させることもできる．“環境負荷削減手法”及び“過程別設定値”の GUI の表示を図 3-9，図 3-10 に示す．また，構造物属性データへの評価パラメータの適用手法を図 3-11 に示す．



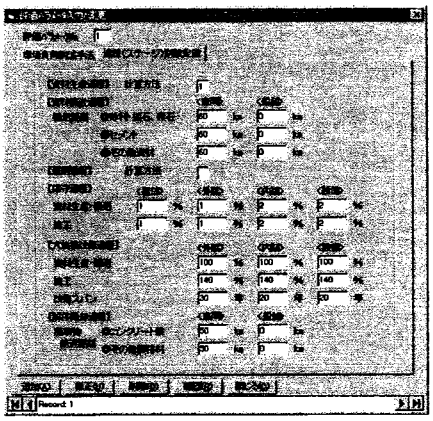


図 3 -9“環境負荷削減手法”の GUI の表示　図 3-10　“過程別設定値”の GUI の表示

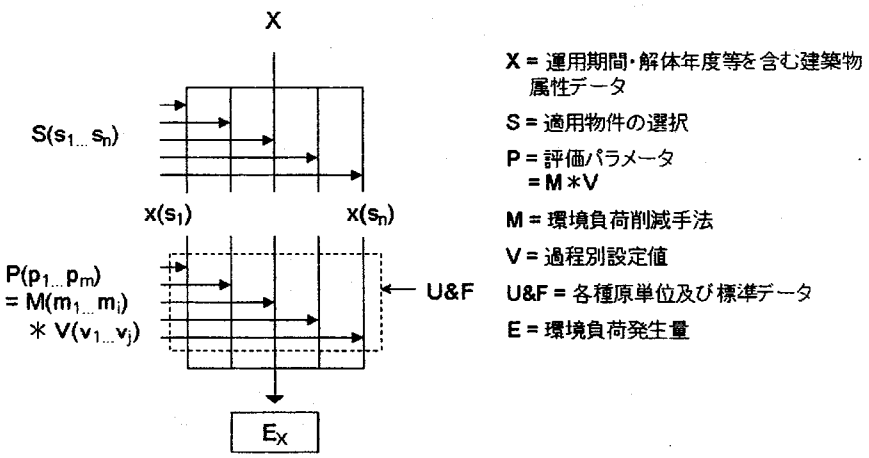


図 3-11　属性データの評価パラメータの適用

(3)　環境負荷算定サブシステム

環境負荷の算定は，環境負荷削減手法及び過程別設定値の代替的ケースについての構造物データ及び評価パラメータを指定することにより，様々な組み合わせで実行される．まず，構造物属性データと用途・構造別の資材使用量原単位（主要 17 資材）及び算定式（セメント，高炉鋼，電炉鋼）をもとに評価パラメータを適用して，構造物別の資材使用量を求める．ここで，資材使用量原単位を独自に変更することも可能である．次に，この資材使用量をもとに，ライフサイクルの各過程（ステージ）の環境負荷原単位，用途別エネルギー使用量算定式及び評価パラメータを用いて，ライフサイクルステージ別の環境負荷の発生量を計算する．ここで，着工年度，竣工年度から解体年度に至る一連のデータをもとに，各ライフサイクルの過程ごとの算定値を年次別に積算することで，構造物類型ごとの過程別の環境負荷の発生量を時系列で求めることができる．なお，システム側で，演算に必要な各種原単位や標準値を事前に準備しているが，これらの数値はいずれも GUI を通してユーザー側で適宜変更・追加が可能である．さらに各種原単位や計算結果は，Excel や Access データテーブルとのインポート／エクスポートと対応する．

(4)　出力表示サブシステム

“集計レポート出力”では，“構造物入力/変更”で入力・作成した構造物データと“環境負荷削減手法”“過程別設定値”で設定した評価パラメータとの自由な組み合わせによる比較パターンを複数設定することができる．集計のための条件として，集計対象（全体，建築物，土木構造物，道路，鉄道，人工地盤），集計エリア（地区全体，街区別，ブロック別），集計種別（全体，年度別），集計単位（総量，年間当たり）及び集計指標（資材使用量，エネルギー使用量，二酸化炭素排出量，建設廃棄物発生量）を準備していて，それらの選択にしたがって集計し，環境負荷の源泉を項目ごとに整理するところのいわゆる「インベントリ分析」を行う．集計結果の出力表示は Excel を自動起動させ，作表，作図を行うことで，代替案の環境負荷削減効果を定量的に可視的に比較することが可能である．グラフ出力例を図 3-12 に示す．

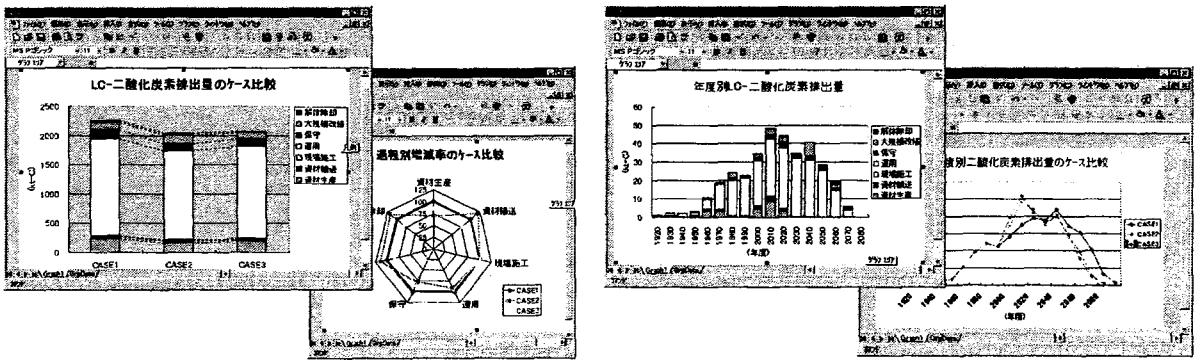


図 3-12　グラフ出力例

3.4 本章のまとめ

本章では，都市構造物から発生する環境負荷を評価するための手法として，ライフサイクルアセスメント（LCA）手法を取り上げた．まず，LCA 手法の概要及び都市構造物に適用する際の問題点について整理するともに，既存の適用事例についてまとめた．次に，都市構造物に LCA 手法を適用するシステムを構築し，システムを構成する各サブシステムやデータについて示した．

都市構造物のライフサイクル環境負荷を各空間スケールで分析，評価することが可能なプロトタイプシステムとして本システムを活用し，空間情報の取得，加工および表示を行うサブシステムを連結することで，都市・地区レベルの課題に応じて LCA 手法を適用し，様々な計画シナリオによる環境負荷改善効果を容易に定量解析することが可能となる．

以下では，全体システムの構築にあたり，次のような機能を導入することで作業目標を達成する．

- 建築物や交通基盤整備に対応した発生・集中交通量や広域対応・地区専用のエネルギー供給施設及び廃棄物処理システムに起因する環境負荷の評価
- 既存デジタル DB や GIS の活用により建築物及び土木構造物属性データを入力するサブシステム
- 複数環境負荷指標の総合的な評価及び最適計画案策定を支援するサブシステム
- 都市・環境計画実務者が利用可能な汎用性・機能性・操作性の向上

本システムが循環型の都市構造物マネジメントの提案を行う上での分析ツールとして用いられるためには，環境負荷の定量的な評価の面から提案内容の具体化を支援するとともに，そのオペレーションの成果をもとに，自治体の開発ガイドラインや都市マスタープランの策定，戦略的環境アセスメント等に利用可能なシステムとして充実を図ることが課題である．

【参考文献・資料】

1) 井村秀文編著：建設の LCA，オーム社，2001

2) 森口祐一，寺園淳：影響の受け手への暴露分布を考慮した大気環境負荷のインパクトアセスメント，第 4 回エコバランス国際会議講演集，pp265-267，2000

3) 盛岡通（代表）：社会実験地での循環複合体のシステム構築と環境調和技術の開発，CREST 中間報告書，pp.151-183，2000

4) 盛岡通：土木建設システムにおける LCA の考え方と事例，第 4 回地球環境シンポジウム講演集，pp29－34，1996

5) 中嶋芳紀，河野幸次，松本亨，井村秀文：港湾整備事業のライフサイクルアセスメントに関する研究：福岡市アイランドシティのケーススタディ，土木学会論文集 No. 566/VII-3，p35-47，1997

6) 伊藤武美，花木啓裕，谷口孚幸，有浦幸隆：二酸化炭素排出抑制技術･システムのニュータウン建設への適用，環境システム研究 vol.24，pp250-259，1996

7) 中村英樹，加藤博和，丸田浩史，二村達：都市間高速道路の横断面構成の相違による CO_2

排出量のライフサイクル評価，環境システム研究 vol.26，pp261-270，1998
8) 酒井寛二，漆崎昇：建設業の資源消費量解析と環境負荷の推定，環境情報科学 vol21-2，pp130-135，1992
9) 藤田壮，中原智哉，鈴木斉，盛岡通：都市更新にともない発生する環境負荷のライフサイクル評価に関する研究，第6回地球環境シンポジウム講演論文集，p57-62，1998
10) (財) 国土開発技術センター：省資源・省エネルギー型国土建設技術の開発（建設委員会）報告書，p16-18，31-36，1994
11) 「地球環境時代における建設設備の課題」，建築学会・空調衛生学会，p73-79，123-133，1995
12) 酒井寛二：土木建設物の二酸化炭素排出量原単位の推定，土木学会第4回地球環境シンポジウム講演集，pp43-48，1996
13) 土木学会　地球環境委員会　環境負荷評価(LCA)検討委員会：土木建設業における環境負荷評価(LCA)検討部会平成7年度調査報告書，平成8年4月
14) 厚生省水道環境部産業廃棄物対策室：産業廃棄物の排出及び処理状況，クリーンジャパン，1994
15) 中原智哉，酒井寛二，漆崎昇，武元和治：都市更新における環境負荷に関する研究　第1報　研究対象と解析手法，日本建築学会大会学術講演梗概集，1998
16) 漆崎昇，酒井寛二，武元和治，中原智哉：都市更新における環境負荷に関する研究　第2報　中之島西部地区の現状分析，日本建築学会大会学術講演梗概集，1998
17) (社) 建築業協会：建設業に係わる地球環境問題の研究 中間報告，1994
18) (社) 資源協会編：家庭生活のライフサイクルエネルギー，1994
19) 大阪市水道局工務部資料平成7年度データ
20) 東京都清掃局：事業系一般廃棄物実態調査，1991
21) 東京都清掃局：平成2年度東京都清掃局事業概要
22) (社) 建築設備技術者協会：建築設備情報年鑑・竣工設備データ ELPAC 3-1 事務所，1994
23) 土木学会　地球環境委員会　環境負荷評価(LCA)検討委員会：土木建設業における環境負荷評価(LCA)検討部会平成7年度調査報告書，1996
24) 井村秀文，銭谷賢治，中嶋芳紀，森下兼年，池田秀昭：下水道システムのライフサイクルアセスメント：LCE及びLC-CO_2による評価，土木学会論文集，No.552/Ⅶ-1，pp75-84，1996
25) (社) ｴﾈﾙｷﾞｰ総合管理技術協会：建築物ｴﾈﾙｷﾞｰ消費量調査報告書，平成7年度版，平成8年度版
26) 大阪市計画局：大阪市主要街路自動車交通量図，平成6年度
27) 大阪市交通局資料 平成8年度データ
28) (社) 建築業協会：建築系混合廃棄物の原単位調査報告書，1997
29) 土木学会　地球環境委員会　環境負荷評価(LCA)検討委員会：土木建設業における環境負荷評価(LCA)検討部会平成8年度調査報告書，1997

第 4 章　LCA 手法による環境負荷削減の代替案の評価
-都心地区を対象としたケーススタディ

4.1　緒言

本章では，3 章で構築した都市構造物のライフサイクル環境負荷評価システムを用いて，実在する都心地区についてのライフサイクル環境負荷を評価することによってその特性を分析する．

具体的には，大阪市の都心部に位置する中之島西部地区を評価対象として，ライフサイクル評価を行い，集積した都市構造物から発生する環境負荷特性を把握する．さらに，都市構造物から発生する環境負荷の抑制のための省エネビル化や省資源化など，構造物そのものに対する製品連鎖マネジメントの施策に加えて，建物の配置や更新の立地制御やそこでの活動のマネジメントを含む，環境改善の施策の体系を構築する．そのうえで，複数の成長シナリオを設定しつつ，個別の環境負荷の改善効果を比較評価する．

4.2　都市構造物に起因するライフサイクル環境負荷の分類

都市構造物の建設・維持に起因する環境負荷と都市活動に起因する環境負荷に分類する．前者は，都市構造物のストックに関わる環境負荷であり，建築物及び道路・鉄道・水道施設（浄水場・処理場・水道管など）・発電所・ガス管・廃棄物処理場などのインフラ施設の建設・維持管理に伴う負荷を含む．建設や維持管理段階において使用される資材の生産・加工・運搬に伴う負荷もこの分類に含まれる．後者は，都市構造物のフローに関わる負荷であり，居住・生産・業務活動などに伴い消費するエネルギーに伴う負荷や交通車両等の走行によって発生する負荷，各インフラ施設の運用に伴い発生する負荷を含む．道路の場合には，その道路構造物の維持に伴って発生する環境負荷は道路に帰属させる．その道

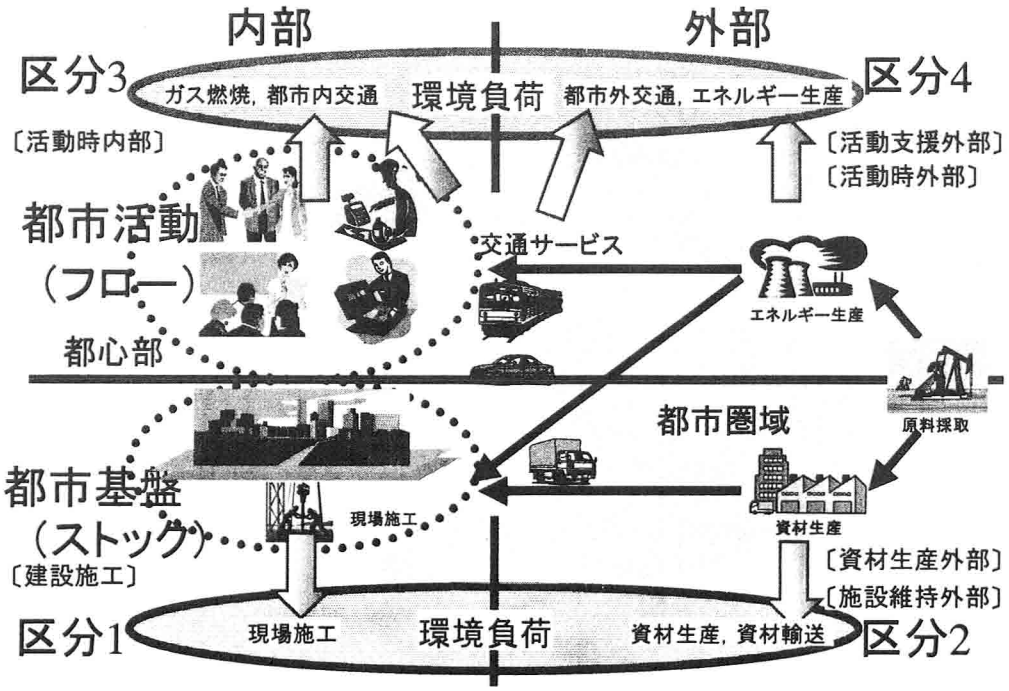


図 4-1　環境負荷の区分の概念図

路を使う自動車交通の燃料の消費については，道路交通と鉄道交通とを比較する場合には道路に帰属させることも可能なように，勘定と集計に切り替えを用意する．通常の経済的取引きや負担に準拠すれば，自動車交通に伴う燃料消費の環境負荷は，交通の利用者の責任分として帰属させることになるが，都市活動の密度を高める施策も集合的には交通量の増大の責任の一端を負うことになろう．

さらに，都市の内部で発生する環境負荷と都市の外部で派生する環境負荷に分類する．前者は，建設工事において直接発生する負荷や都市活動の結果として都市内で直接発生する負荷を含む．後者は，使用される資材が外部にある工場で生産される場合にその工場において発生する負荷，都市内で使用されるエネルギーを生産する際に都市外で発生する負荷，都市へ通勤する人間が都市外を走行することで生じる負荷などを含む．

属性による分類と発生場所による分類を組み合わせて，都市構造物から発生・派生する環境負荷を区分 1～4 に分類する．各区分の概念図を図 4-1 に示す[1]．区分 1 には施工現場において建設工事によって直接発生する環境負荷，区分 2 には都市施設の建設・維持管理のために使用される資材の生産・加工・運搬に伴う環境負荷，区分 3 には都市構造物を利用して行われる都市活動の結果として直接発生する環境負荷，区分 4 には都市活動を行うために必要となる環境負荷がそれぞれ含まれる．

4.3 都市構造物から発生・派生する環境負荷の特性

4.3.1 評価対象地区の概要

都市構造物から発生，派生する環境負荷を計算して，システム[2]としての適用性を判定するため，中之島西部地区を対象地区としてケーススタディを行う．図 4-2 に示すように，対象地区は大阪市の都心部に位置しており，堂島川と土佐堀川にはさまれ， 33ha の面積を持つ．業務施設を中心にホテルや文化施設が数多く立地するが，大阪大学医学部の跡地をはじめとして駐車場や空地もあり，いくつかの再開発事業が現在構想，計画されている．1997 年時点では，建築施設の延床面積が約 78 万 m², 遊歩道や高速道路を除いた一般道の総面積が約 69000m² となっている．

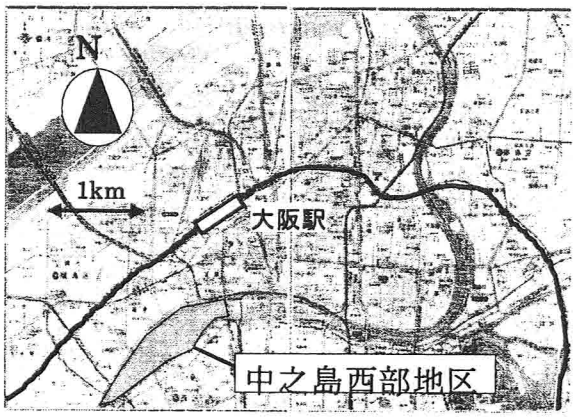


図 4-2　中之島西部地区地図

4.3.2 都市構造物更新のスケジュール

更新後の建築物については，現状の建物の施工，運用，解体および，権利調整などの再開発までの待機期間 t_1，t_2，t_3，t_4 について，t_1 は建築物の構造・階数・延床面積によって決定される内生変数とし，t_2，t_3，t_4 は外生的に決定する．建築物ごとの着工年度（T_0）を入力することにより現状の建築物解体年次，再開発後の建築物の施工開始年次，更に運用開始年次を決定する．建築物の運用期間や更新猶予期間，及び更新後の建築物の建蔽率，敷地面積，用途を操作的に変更できる算定システム[3]を構築する（図 4-3）．

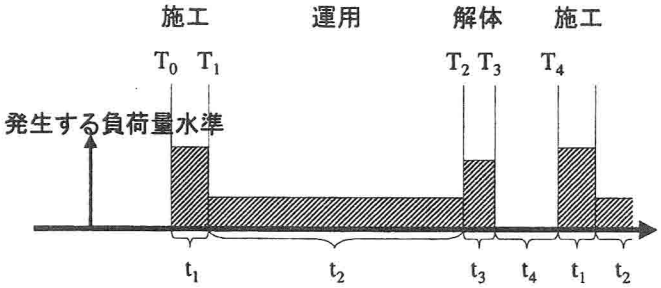


図 4-3　都市構造物更新スケジュール

建築物の更新について以下の前提を設けて，2000 年から 2049 年までの 50 年間の累計 CO_2 発生量を算定する．50 年間で評価したのは，建設省（官庁営繕部）[5]による SRC 造の法定耐用年数が 50 年であることに基づく．

①解体された建築物から順に設定容積率の建築物に更新されていくとする．

②1997 年時点では対象地区全体の容積率は平均で約 307%だが，中之島西部地区に対して指定されている法定容積率を面積をもとに加重平均した建設可能容積率は約 700%である（図 4-4）．そこで現状の容積率を前提とする「現状更新型シナリオ」と法定限界よりやや少ない目の 600%の開発を行う「高度利用型シナリオ」を採用する．

③現状で空地となっている区域には，所属するブロック内で最も早く更新される建築物の着工年度に合わせて事務所目的の建築物が着工される．

ここでは，法的規制，地区レベルでの建築上の慣習や，床面積を活用する経済的動機などを単純化して表現しているが，これらのシナリオを表現するサブシステムは別途追加することが出来る．

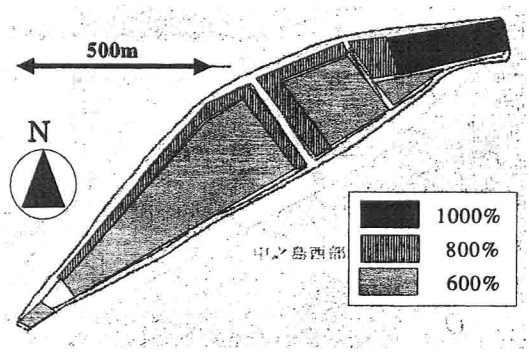


図 4-4　中之島西部地区における法定容積率

4.3.3 都市構造物から発生・派生する環境負荷の特性

中之島西部地区における現状データをもとに，現状更新型シナリオと高度利用型シナリオのそれぞれに対する CO_2 発生量を算定した結果を図 4-5 に示す．更新される時期を考慮すると，容積率の差は必ずしもライフサイクル CO_2 の発生量と一致しない．基盤別に算定した結果，水道基盤・廃棄物処理基盤からの負荷は他の基盤からの負荷に比べて無視できるほど小さい（図 4-6）．一方で，交通基盤やエネルギー基盤に起因するライフサイクル CO_2 の量が大きく，特にその活動段階で地区の外部で発生していることがわかる．

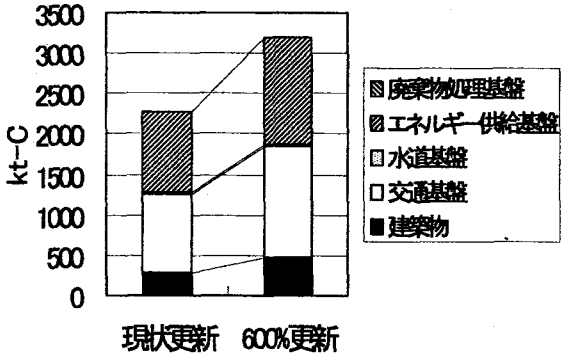


図 4-5　容積率シナリオ別 CO_2 発生量

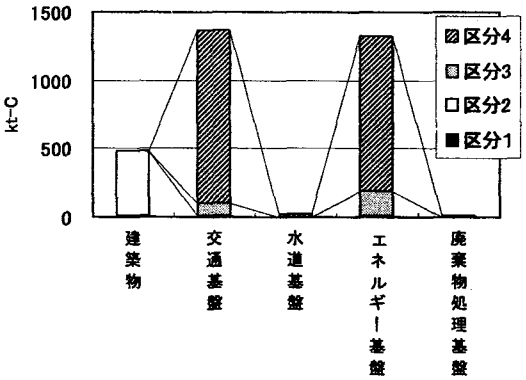


図 4-6　600%更新シナリオでの
基盤別 CO_2 発生量(2000－2049)

区分別に算定した結果，当該地区の都市活動を支えるために，地区外でおこなわれる活動にともない地区外で派生する負荷である区分 4 が全体の大部分を占め，都市施設の建設･維持管理において地区内で直接発生する負荷である区分 1 は他の区分と比較して無視できるほど少ない（図 4-7）．都市施設の建設･維持管理に伴い地区外で派生する負荷である区分 2 の大部分は建築物に起因しており，各インフラ施設に起因する負荷は相対的には小さい．都市活動において地区内で直接発生する負荷である区分 3 の内訳は，交通基盤の地区内の自動車走行と，エネルギー供給基盤のうち地区内でのガスの燃焼による．

都市活動に伴う CO_2 発生の主要因は，交通走行（交通基盤区分の類型 3，4），エネルギー使用（エネルギー基盤区分の類型 3，4），建築物の建設（建築物区分の類型 1，2）である．区分 1+2 と区分 3+4 を比較すると，後者が全体の 80%以上を占め，都市活動に対する対策が有効かつ重要と言える．また区分 1+3 と区分 2+4 を比較すると，後者が全体の 90%以上を占め，構造物で支える都市活動や基盤整備が環境面で外部に大きく依存していることが明らかになった．

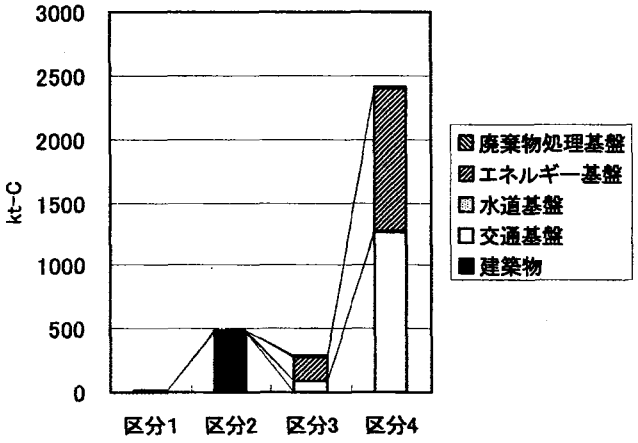


図 4-7　600%更新における
区分別 CO2 発生量（2000－2049）

4.4　環境負荷削減の代替案の評価

4.4.1　環境負荷削減の代替案の分類

環境負荷削減施策を，ビルディングマネジメント・ユーティリティマネジメント・空間マネジメントの三種類に分類する．それぞれをさらに区分して，リサイクル資材の利用のエコマテリアル推進策，廃棄物リサイクル促進策，省エネルギー促進策，交通燃費改善策，交通モーダルシフト策，開発街区集中策，街区共同建築化策，高さ規制策などを想定した．本研究で採用した施策とその設定を表 4-1 に記す．施策の採用においては，対象地区の地理特性で確定するのではなく，広く採用可能な施策であることを考慮して選んである．

表 4-1　環境負荷削減施策の設定

施策対象	施策名	内容
ビルディング	エコマテリアル	建築物の建設や維持管理において使用される資材のうち，セメントがポルドランドセメントから高炉セメントへ100%転換，鋼が高炉鋼から電炉鋼へ50%転換
	廃棄物リサイクル	建築物の解体に伴い発生する廃棄コンクリート殻を再生工場に運搬して再生骨材に転換し，建築物の建設や維持管理において骨材として使用
ユーティリティー	省エネルギー	建築物の運用段階において使用されるエネルギー量を30%省力化
	燃費改善	自動車の走行段階において，走行燃費が向上し，発生CO2原単位が10%減少
	モーダルシフト	自動車から鉄道へと分担率が5%シフトすることを想定
空間	東街区集中利用	中之島西部地区における全延床面積を東街区に集中して配分
	街区共同化	更新の際，ブロックごとに一体化させて更新
	高さ規制	容積率はそのままに，建築物の高さを10Fに規制．建蔽率を増し，建築面積を増加させることによって容積率は維持する

街区共同化において用いたアルゴリズムを図 4-8 に示す．街区共同化はブロックごとに行う．ブロックとは，既存の道路構造などを考慮して中之島西部地区を敷地面積が約 1ha となる 22 個所に分割したものである．共同化の時期は，ブロックに存在する建築物の総延床面積に対し，使用寿命期間を経過した建築物の延床面積の合計値が一定の割合に達した時期とする．図中の t と x が操作値となり，ここでは t の初期値として 1998 年，x として 70% の値を用いた．

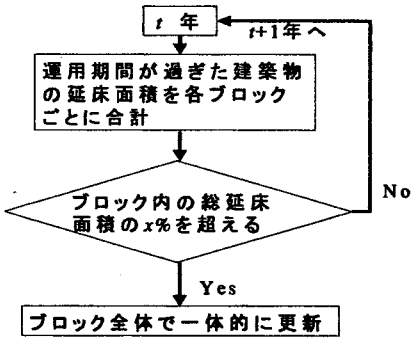


図 4-8 街区共同化のアルゴリズム

4.4.2 環境負荷削減の代替案の効果

各環境負荷を削減する施策の効果を，高度利用型シナリオの場合について算定した結果を図 4-9 に示す．図中の容積率 300%増加による発生量とは，現状更新型シナリオと，高度利用型シナリオにおける環境負荷削減施策なしの場合の CO_2 発生量の差を表しており，これを比較する基準ケースとして表示する．この図から，省エネルギーやモーダルシフトなどユーティリティーマネジメントに分類される施策の効果が最も大きいが，空間マネジメントに分類される施策もそれらと比肩しうる効果を持つことがわかる．一方で廃棄物リサイクルや高さ規制は，それぞれ廃棄物発生量や景観といった他の環境指標で考える際に重要となる施策であるが，ライフサイクル CO_2 という観点から見た場合にはほとんど効果がない．各施策の効果を単純に合計すると，容積率 300%増加による発生量を打ち消すほどの値となっている．すなわち各施策を並行して導入した場合，高度利用を行いながら現状の CO_2 発生量と同じ環境負荷の水準をおおむね維持することが可能であることがわかる．

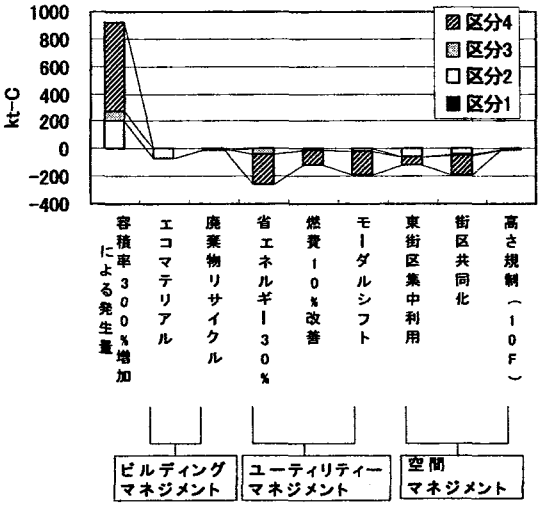


図 4-9 各施策による CO_2 排出削減量

構造物の製品特性を改善するビルディングマネジメント施策や省エネルギービル化は，構造物の耐久年数が経過した後で順次更新するよりも，早い時期に環境高効率型に転換するシナリオが，地区全体ではより大きな環境負荷削減効果を持つことが考えられる．

そこで，建築物の製品寿命を考慮して個別に更新を進める「逐次更新シナリオ」と，評価対象期間の最初に地区全体の計画的な都市更新を実現する「一括更新シナリオ」を設定して，現状更新と高度利用シナリオとの組み合わせで，それぞれ 4 つのシナリオを構成する．１ａは現状の土地利用密度で逐次更新を進めるシナリオ，１ｂは現状水準で一括更新を実現するシナリオ，２ａは現実の法定容積率まで地区の高度利用が進む場合であり，敷地ごとに逐次更新が進むシナリオである．このシナリオは，地区から発生する環境負荷を削減するためのダウンゾーニングや計画的開発を導入しない Bau (Business As Usual) 的シナリオとなる．２ｂは高度利用が進行することを前提としつつ，一括更新によって地区の構造を変革するシナリオ．シナリオ毎に異なる環境改善施策の組み合わせを想定し（表 4-2)，合計２２のシミュレーション計算を行った結果を図 4-10 に示す．各シナリオにおける効果は，個別の施策の効果を加算して算出しており，複数の施策を導入することによる相乗効果については考慮

していない．ただし，地区の交通分担を自動車から公共交通にシフトする「モーダルシフト」施策や，駅の周辺ブロックでの建築物立地を促す「東街区集中利用」施策は，地区スケールの一括的な都市更新を実施する場合にのみ導入が可能となるとの前提を置く．

1998 年水準に容積率を制御する１ａ－０シナリオに比較すると，法定容積率まで開発を許容する２ａ－０シナリオでは，21 世紀前半期のライフサイクル CO_2 発生量が約 60%増加する．後者のシナリオは，対象地区が大阪市のビジネス中心地区と近接して立地していることを考慮すると，必ずしも非現実的な想定ではない．むしろ，現状の容積率の水準に開発を抑制するには，何らかの成長コントロールの施策を導入することが求められる状況といえる．

一方で 600%の高度利用を認めつつ，環境負荷削減の施策を組み合わせることにより，21 世紀前半期に地区から発生，派生する総 CO_2 発生量の増加を 98 年水準の 29%増加まで抑

表 4-2　シナリオ構成

	逐次更新型	一括更新型
現状更新型	1a	1b
高度利用型	2a	2b

施策分類	施策名	1a-1	1a-2	1a-3	1a-4	1a-5	1b-1	1b-2	1b-3	1b-4	1b-5	1b-6
ビルディング	エコマテリアル	○				○	○					○
	廃棄物リサイクル	○				○	○					○
ユーティリティー	省エネルギー		○			○		○				○
	燃費改善			○		○			○	○		○
	モーダルシフト									○		○
空間	街区共同化				○	○					○	○
	東街区集中利用										○	○

施策分類	施策名	2a-1	2a-2	2a-3	2a-4	2a-5	2b-1	2b-2	2b-3	2b-4	2b-5	2b-6
ビルディング	エコマテリアル	○				○	○					○
	廃棄物リサイクル	○				○	○					○
ユーティリティー	省エネルギー		○			○		○				○
	燃費改善			○		○			○	○		○
	モーダルシフト									○		○
空間	街区共同化				○	○					○	○
	東街区集中利用										○	○

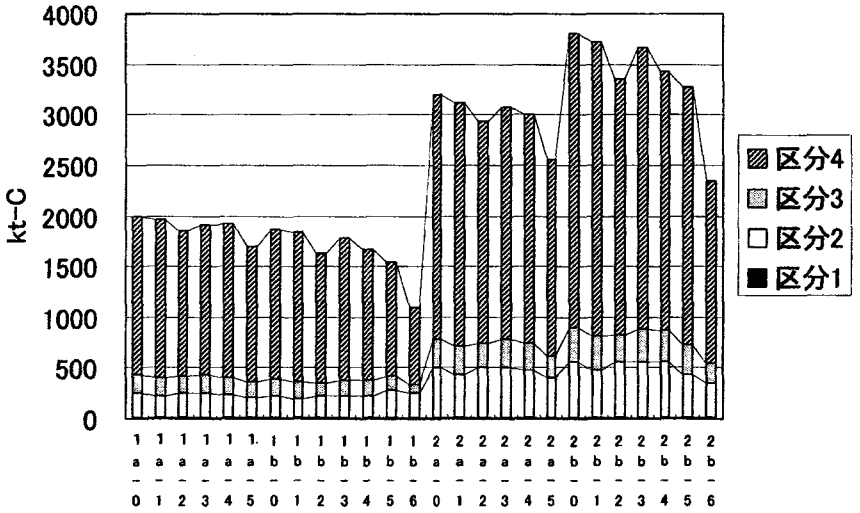


図 4-10　シナリオ別総 CO_2 発生量（2000-2049）

制することも可能となる（２ａ－５シナリオ）．さらに同じ高度利用更新シナリオでも，一括更新によって地区の構造をより環境低負荷型に改変することにより，その増加を 18%まで制御することが可能になる(２ｂ－６シナリオ)．高度な施設集積を都心地区への社会的要請であると是認する場合でも，高い環境効率をもつ地区構造を計画的開発によって実現するとともに，多彩な環境負荷削減技術の組み合わせを採用することにより，発生する総 CO_2 を抑制できることが明らかになった．

4.5 本章のまとめ

本章では，3 章で構築したシステムを利用して，地区を対象として都市構造物から発生する環境負荷の特性を把握した．まず，環境負荷をその発生する場所及び都市活動／都市構造物のいずれに由来するのかによって分類した．次に，大阪市の中之島西部地区を対象として，建築物・交通基盤・水道基盤・エネルギー基盤・廃棄物処理基盤から発生・派生する環境負荷の特性を分析した．得られた知見を以下に示す．

- 建築物の建設段階・建築物の運用段階（エネルギーの使用）・交通の走行段階の 3 つが，集積した都市構造物から発生する CO_2 の主な発生源であり，それぞれ全体の 15%，41%，42%を占める．
- 都市外から発生する CO_2 が全体の 91%を占め，外部に大きく依存している．
- 都市活動に由来する CO_2 が全体の 84%を占め，CO_2 を削減する場合には都市活動のマネジメントが重要である．
- 地区を対象とした環境負荷の削減施策はビルディングマネジメント，ユーティリティーマネジメント，空間マネジメントの 3 つに分類することができる．
- 各マネジメント施策導入の効果を分析した結果，省エネルギーによって 8.2%，自動車の燃費改善によって 3.7%，駅周辺地区の重点的開発によって 3.6%，CO_2 を削減することが可能である．
- 各施策を組み合わせた場合には，地区全体の容積率が現在の 2 倍になった場合でも，CO_2 の排出量を現状水準に抑えることが可能である．

【参考文献・資料】

1) Fujita, T., Morioka, T., Sakai, K., Urushizaki, N., Nakahara, T. : Life-Cycle Estimation of Environmental Emission from Urban Development Process, Proceedings of The Third International Conference on Eco Balance – Progress in LCA for a Sustainable Society –, pp.163-168, 1998.

2) Urushizaki, N., Takemoto, K., Fujiwara, T. : Life Cycle Estimation of Environmental Emission for Urban Structures, Proceeding of CREST International Workshop 1999, pp.165-176, 1999.

3) Nakahara, T. : Estimation Package for Life Cycle Environmental Emission of Urban Renewal Alternatives, Proceeding of CREST International Workshop 1999, pp.177-187, 1999.

4) 財団法人経済調査会：建築物のライフサイクルコスト，建設大臣官房官庁営繕部，2000

第5章　製品連鎖マネジメントのマテリアルフロー分析
-国土を対象としたケーススタディ

5.1　緒言

本章では，都市に集積された構造物について，その新たな建設フローとともに既存のストックの環境への影響を低減するために，製品連鎖マネジメント（Product Chain Management）のアプローチに基づき，代替的な政策オプションを設計して，その評価を国土スケールで行うことを目指す．すなわち，工業製品の循環システムを構築するに向けて，発生する副産物の再利用ポテンシャルを活かしたリサイクルの道筋を複数用意した上で，その代替的な効果を評価することにより，より効率の高いマネジメントシステムの構築を試行する．具体的には，まず政策オプションの導入による環境負荷削減効果を評価するシステムを構築する．そして，政策オプションを組み合わせて政策シナリオを作成し，その評価を行う．評価の対象とする政策オプションが主に建築物に関わるものであるため，都市構造物の中の建築物のみを対象に分析する．

5.2　製品連鎖マネジメントの政策オプションの評価

5.2.1　政策オプションの評価の全体フレーム

本節では，政策オプションを都市構造物のマネジメントへ導入することの効果を，国土の建築物ストックを対象として評価する．評価対象とする政策オプションが主に建築

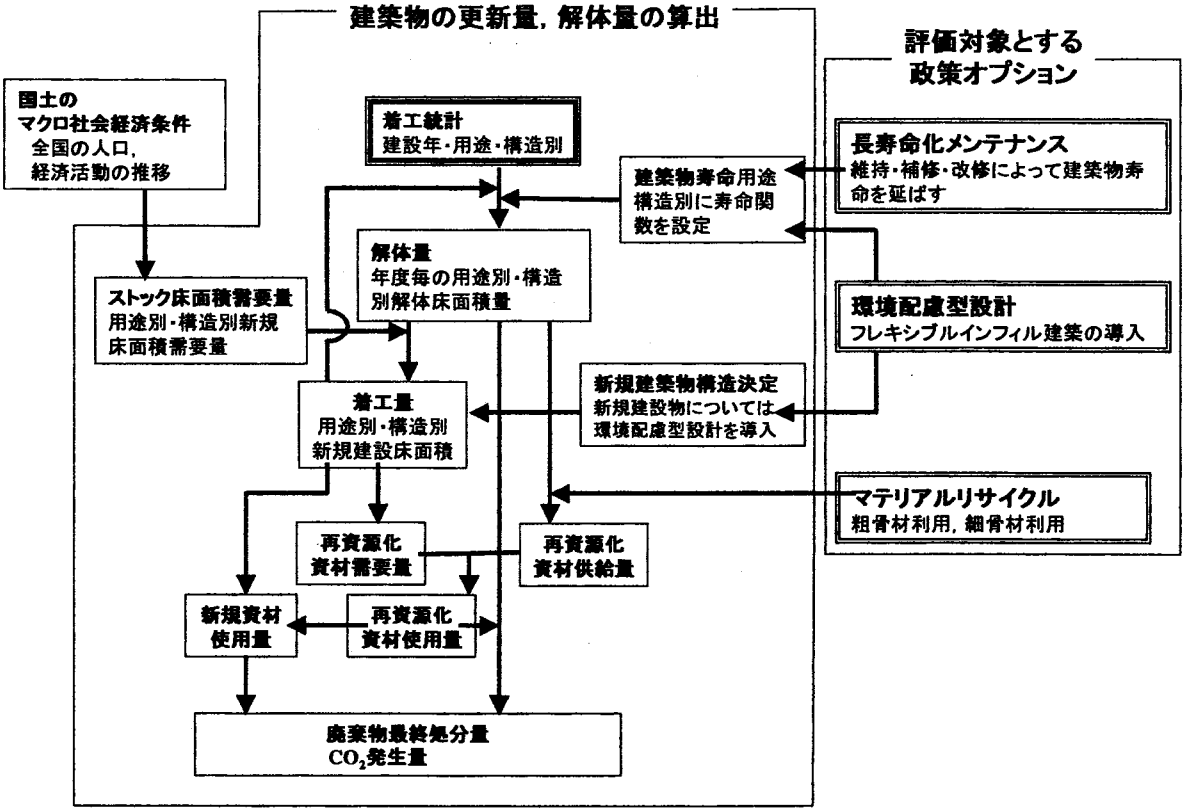


図 5-1　評価システムの全体構造

物に関わるものであるため，土木構造物や代謝系インフラは評価の対象とせず，建築物のみを対象として分析する．

既存の立地している建築物のストックデータから，年度ごとの構造物の更新・解体量を算定して，国土全体の構造物の需要量との差分から，年度ごとの新規の着工量を算定する．まず着工統計データから，建設年度ごとの用途別，構造別の延床面積を得て，寿命関数を適用して年度別の解体量を算出する．そして，一方で社会経済の条件から各年の施設需要量を外生的に与えることにより，時系列の構造物更新の着工量を算定する．更新される構造物の仕様についても操作的に取り扱う計算の枠組みを備えることにより，環境配慮型設計の導入による消費資材のインベントリーの変化や解体構造物からの副産物の再資源化利用量を算定する．図 5-1 に評価の全体フレームを示す．

5.2.2 構造物更新の計算条件の設定

構造物更新量，解体量の算定は，3 章で構築したライフサイクル環境負荷評価システムを援用し，建築物については構造を S 造，RC 造，SRC 造，W 造の 4 種類，用途を一戸建て住宅，共同住宅，事務所，店舗，工場の 5 種類に分けて行う．まずストック需要量について，住宅は人口及び世帯数の将来予測をもとに算出し，非住宅構造物に関しては，経済状況によって左右されるとの仮定から GDP の将来予測に基づいて算出する．人口・世帯数予測には，国立社会保障・人口問題研究所[1] の「日本の将来推計人口 (CD-ROM)」，「日本の世帯数の将来予測」の値を用いて，GDP の将来予測には，2025 年までは日本経済研究センター[2] が行った予測値を用い，その後は GDP 伸び率を 0%と仮定した．解体量を求める際には，過去の新規着工量のデータに対して，寿命関数を適用することで算定する．寿命関数の設定においては，小松ら[3] の研究を参考にした．

(1) ストック需要量の予測

建設量ストック需要量の将来予測は，住宅と非住宅（事務所，工場，店舗）に分けて行っている（図 5-2）．住宅は，人間が生活を送るためには，最低限必要なものである．従って経済状況に関わらず，世帯数に応じて住宅は不足がないように供給されるものと仮定した． これに対して非住宅（事務所，工場，店舗）は，人口や世帯数などとは関

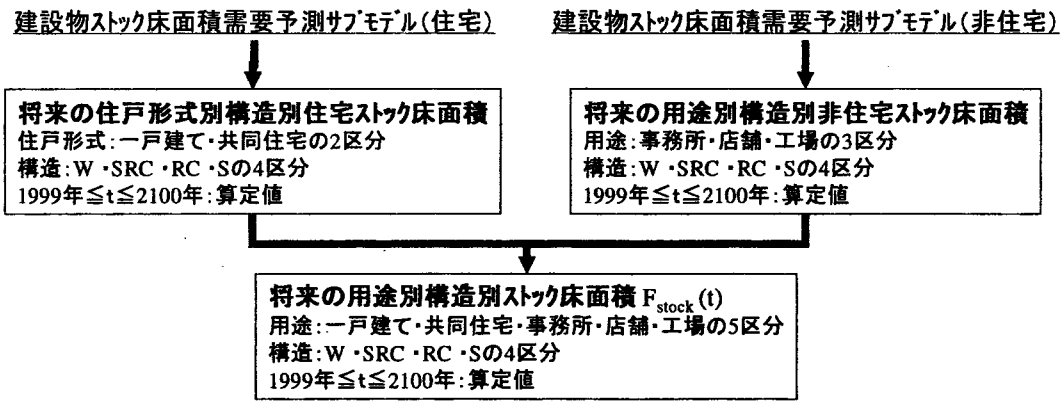


図 5-2 建築物ストック床面積需要予測プロセス

係なく経済水準，経済構造によって大きく変わってくる．人口が減少しても生産効率を上げれば，経済水準は上がり，非住宅は増加するし，人口が多くても農業の比率が大きい経済構造であれば，非住宅の必要性は少なくなる．従って，非住宅のストック需要量は経済水準と経済構造から決定するものとした．ただし，経済構造の変化については外生的に決定することを提示する．

a）住宅ストック床面積需要予測

住宅のストック床面積需要は，人口→世帯数→住戸形式別住宅数→住宅床面積→住宅の建築構造の順序で算定する（図 5-3）．まず将来の人口を算定し，世帯の規模を設定する．次に一戸建てと共同住宅の住戸の割合を設定して，その上で住戸の規模，建築構造を設定する．

経済的な低成長及び少子高齢化が進むことが予測される．ここでは経済水準は今後，低成長もしくは，ゼロ成長が続くと仮定し，経済水準による一戸当りの床面積の増減はないと仮定した．一方で，少子高齢化によって，世帯規模が変化することで，一戸当りの床面積が変わってくることを考慮する．

①年齢別世帯数

人口と世帯数は，年齢別人口に世帯主年齢別世帯率をかけることで年齢別世帯数を算出する．年齢別人口は，国立社会保障・人口問題研究所の「日本の将来推計人

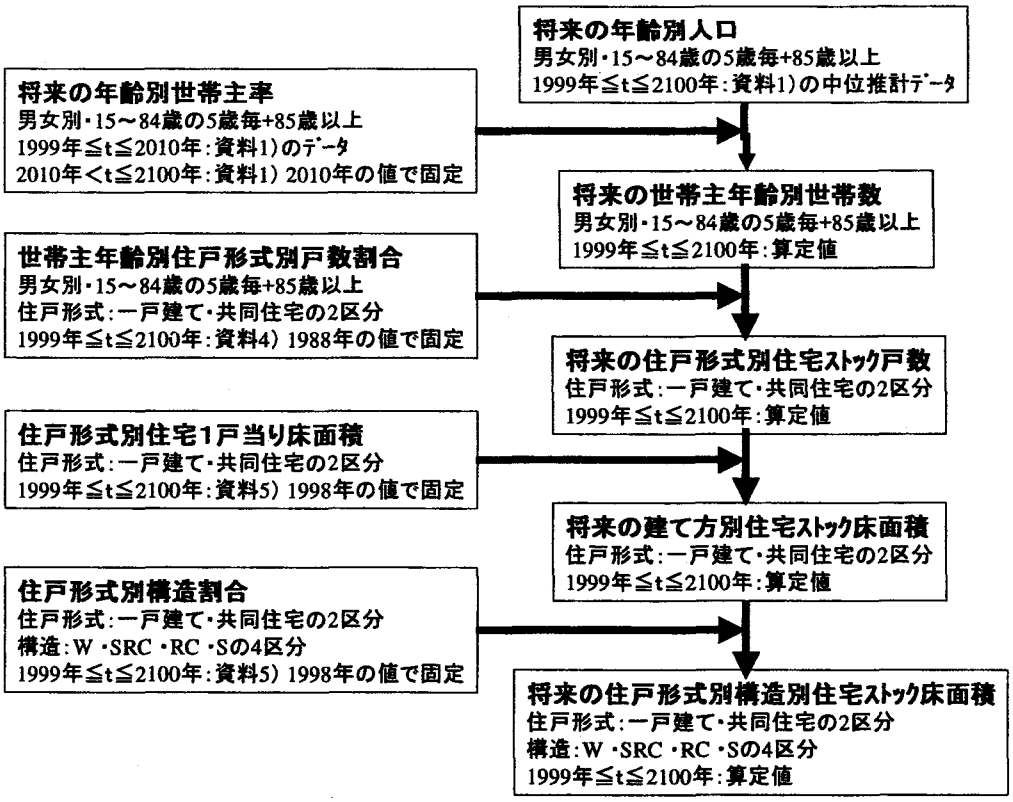


図 5-3　建築物ストック床面積需要予測プロセス（住宅）

口（CD－ROM）」平成９年１月推計の中位推計値を用いた．世帯主年齢別世帯主率は，2020 年までは，国立社会保障・人口問題研究所の「日本の世帯数の将来予測」の値を用いた．それ以降については，2020 年の段階での年齢別の世帯主率が将来も続くと仮定して，年齢別人口に世帯主率を掛けることで算定した．この値に，世帯主年齢別世帯主率をかけることで，世帯数を算定する．

②住戸形式別住宅ストック数

世帯主の年齢，経済状況，住んでいる場所の地価などによって，その世帯が共同住宅に住むのか，一戸建てに住むのか設定する．住宅を持たない間借りなどの割合も考慮する．1993 年の住宅統計[4] から，世帯主の年齢別に，共同住宅に住む世帯数，一戸建てに住む世帯数，住宅を持たない世帯数のデータを入力し，その割合については固定的に取り扱って，住戸形式別住宅数を算定した．一戸建てか共同住宅かの選択要因のうち世帯主年齢以外（世帯主の経済状況，住んでいる場所の地価など）の要素はここでは考慮していない．

③住戸形式別住宅ストック床面積

一戸当りの床面積は，住戸形式によって大きく異なる．また，世帯主の経済状況，住んでいる場所の地価によっても決定される．ここでは，平成 11 年度版建築統計年報[5]から，1998 年に着工された住戸形式別の一戸当り床面積のデータを入力し，その水準が将来も続くと仮定して住戸形式別住宅ストック床面積を算定した．世帯主の経済状況，地価の影響はここでは一律としている．

④住戸形式別構造別住宅ストック床面積

建築構造としては，木造，鉄骨鉄筋コンクリート造，鉄筋コンクリート造，鉄骨造の４種類に分類した．住宅の建築構造については，共同住宅か一戸建て住宅か，住宅の階数，世帯主の経済状況，さらに着工当時の建築基準などによって変わる．ここでは，平成 11 年度版建築統計年報から，1998 年に着工された住戸形式別の構造割合のデータを入手して，その割合が将来も続くと仮定して住戸形式別構造別住宅ストック床面積を算定した．住宅の階数，世帯主の経済状況，さらに着工当時の建築基準などについては考慮していない．

b）非住宅ストック床面積需要予測

非住宅建築物として事務所，店舗，工場の３種類に分類して，病院，学校などは事務所として算定した． GDP から用途別非住宅ストック床面積を設定して，用途別の構造別非住宅ストック床面積を算定した（図 5-4）．

①用途別非住宅ストック床面積

GDP の将来予測値から単位 GDP 当りの用途別非住宅ストック床面積原単位として，用途別の非住宅ストック床面積を算定した．GDP の将来予測は，2025 年までは日本経済研究センターの GDP 予測を用いた． 2025 年以降は GDP 伸び率を

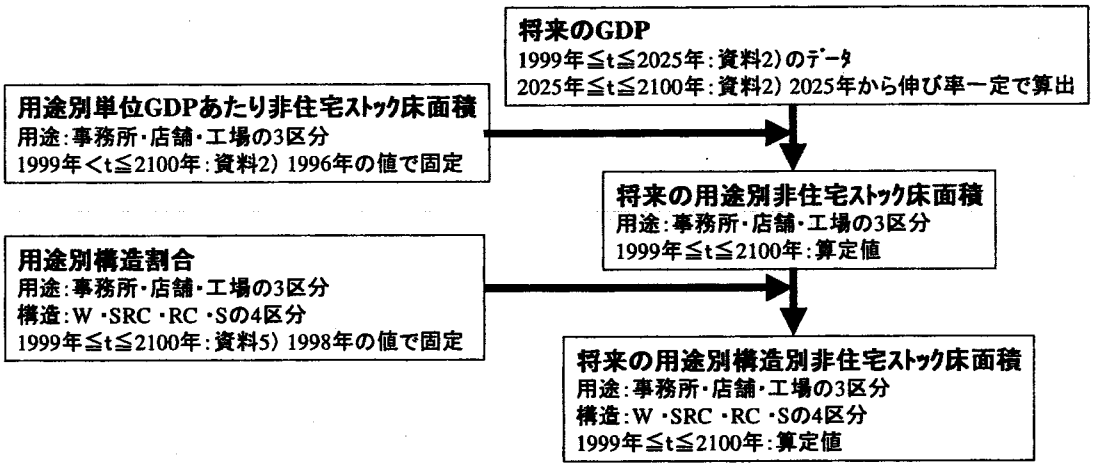


図 5-4　建築物ストック床面積需要予測プロセス（非住宅）

0%と仮定して算定している．単位 GDP 当たりの用途別の非住宅ストック床面積については，1996 年の水準を一律に仮定している．単位 GDP 当りの非住宅床面積の時間的推移，経済構造の将来傾向などは算定に取り入れていない．

②用途別構造別非住宅ストック床面積

住宅と同様に建築構造としては，木造，鉄骨鉄筋コンクリート造，鉄筋コンクリート造，鉄骨造の４種類に分類した．非住宅の建築構造については，用途，階数，所有主体の経済状況，さらに着工当時の建築基準などによって決定される．ここでは，建築統計年報から，1998 年に着工された用途別の構造割合のデータを原単位として用いて，用途別の構造別住宅ストック床面積を算定した．階数，所有主体の経済状況，さらに着工当時の建築基準などの影響は算定外とし，用途による構造割合の違いのみを考慮する．

(2)　新規着工床面積の予測

建設物のストック床面積量の供給不足や供給過剰は，ここでは算定に取り入れない．すなわち需要が不足したストックはその年度に供給されると仮定した．あるいは，ストック床面積の需要以上に新規着工され，空き家や空き部屋が存在するといったこともなく正確な需要予測の元で着工が行われると仮定した．

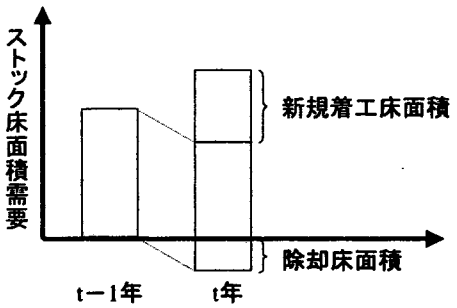


図 5-5　新規着工床面積予測の考え方

従って，図 5-5 で示すように，新規着工床面積はストック床面積需要の増分と除却床面積を加えたものとなり，以下の式で表される．

$$F_{new}(t) = \Delta F_{stock}(t) + F_{dis}(t) = F_{stock}(t) - F_{stock}(t-1) + F_{dis}(t) \qquad (5-1)$$

F_{new} ：新規着工床面積

F_{stock} ：建築物ストック床面積

F_{dis} ：除却床面積

ここで，将来の新規着工床面積は，建築物ストック床面積需要予測プロセスで求める建築物ストック床面積と次項でのべる除却床面積予測プロセスで求める除却床面積を用いて算定する．新規着工床面積予測の流れを図 5-6 に示す．

なお，除却床面積の算定にあたって，1999 年以前のデータは建築統計年報の実績値を用いた．

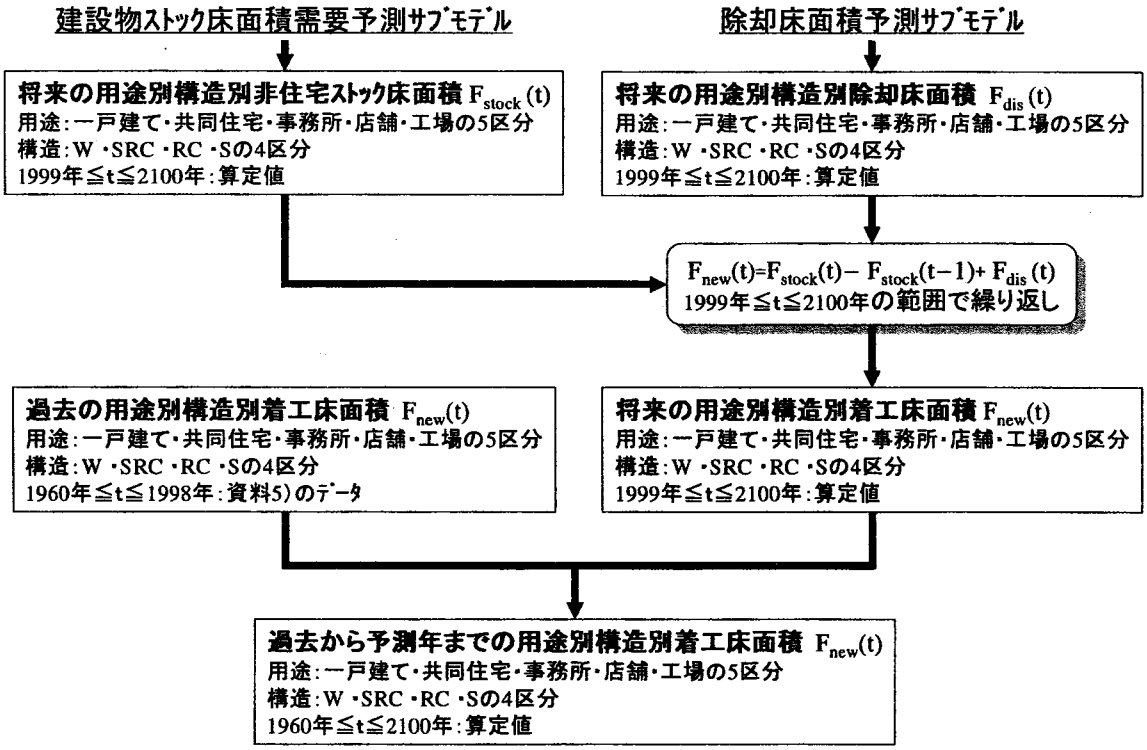


図 5-6　新規着工床面積予測プロセス

(3)　除却床面積の予測

新規着工床面積のうち，除却床面積を予測したい年よりも過去の値に寿命関数を当てはめることで算定する．

$$F_{dis}(t) = f\{F_{new}(t; t \geqq 1960年)\} \tag{5-2}$$

ここで $f(\ )$ は寿命関数を表す．寿命関数としては最も広く利用され汎用性の高いワイブル分布を用いた．表 5-1 に使用した寿命関数のパラメーターを示す．

表 5-1　用途・構造別の寿命関数パラメーター

用途	構造	パラメーター m	パラメーター η	パラメーター δ	平均寿命 年	分散
一戸建て住宅	W	1.094	34.118	14.194	47.175	910.842
	SRC	一戸建て住宅RCの値で代用				
	RC	4.270	47.557	−2.905	40.363	130.903
	S	6.747	64.372	−28.441	31.659	109.180
共同住宅	W	1.255	25.300	13.381	36.924	356.468
	SRC	共同住宅RCの値で代用				
	RC	3.091	61.195	−3.740	50.980	374.880
	S	5.978	48.069	−15.587	28.998	75.148
事務所	W	共同住宅Wの値で代用				
	SRC	事務所RCの値で代用				
	RC	2.887	40.591	0.027	36.215	185.308
	S	3.127	40.444	−7.329	28.855	160.552
店舗	W	事務所の値で代用				
	SRC					
	RC					
	S					
工場	W	事務所の値で代用				
	SRC					
	RC					
	S					

以上で説明した除却床面積予測プロセスの構造を図 5-7 に示す．予測対象年よりも過去の用途別構造別着工床面積にシナリオごとに設定した寿命関数を適用することにより，将来の除却床面積を求める．

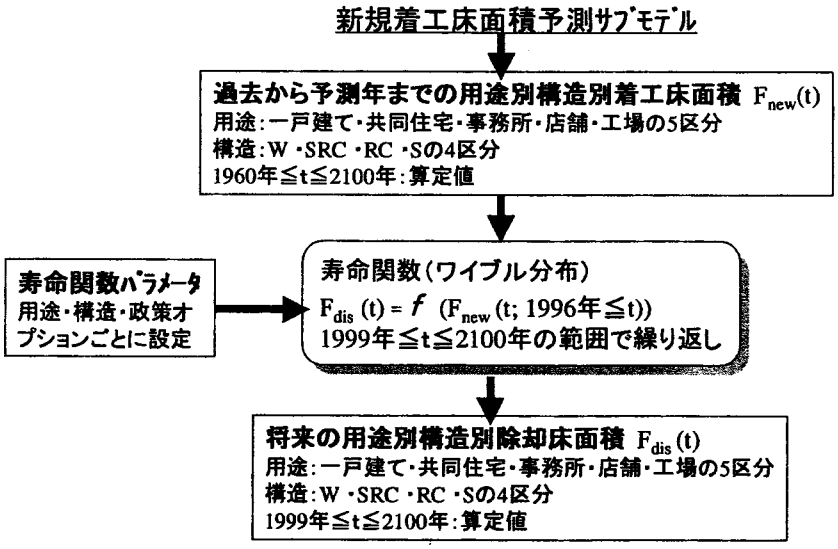


図 5-7　除却床面積予測プロセス

(4) 再資源化資材使用量の算定

新規着工床面積と資材量原単位から，資材使用量を算定する．この資材量原単位には，建築業協会[6]が試算している用途別・構造別の延床面積当たりの資材量より求めた．ただし，長寿命化メンテナンスを行う場合には，表 5-2 に示すように耐震補強によって躯体の資材量原単位が増加するものとした[7]．資材使用量に再資源化資材利用率をかけた値が，再資源化資材の需要量を求めることができる（図 5-8）．

表 5-2 耐震補強に伴う資材量原単位増加量

(kg/㎡)

資材名	SRC	RC	S
粗骨材	9.97	9.97	
細骨材	5.44	5.44	
セメント	2.59	2.59	
高炉鋼(鉄骨)	4.00		4.00
電炉鋼(鉄筋)	1.13	1.05	

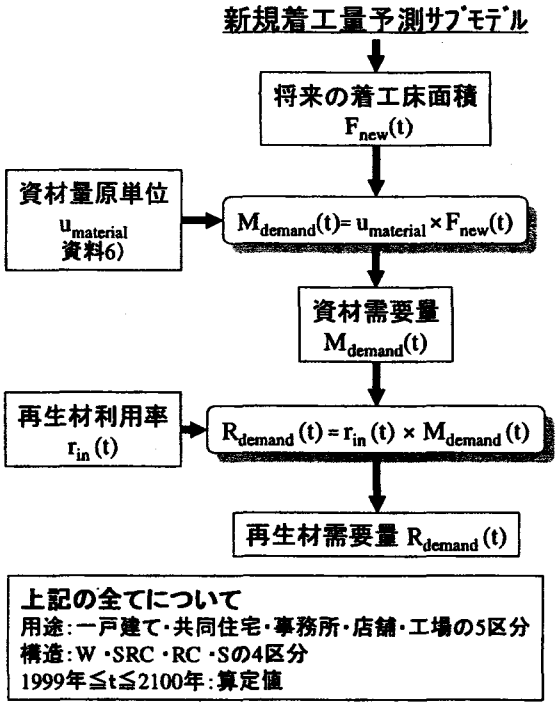


図 5-8 再資源化資材需要量算定プロセス

次に，再資源化資材供給量算定プロセスでは，投入資材量から，建築物及び設備，インフィル等の除却時の副産物を算定する．すなわち，除却床面積 F_{dis} と資材量原単位 $u_{material}$ から副産物発生量を算定する．さらに再資源化率 r_{supply} を用いて再資源化資材供給量 R_{supply} を算定する（図 5-9）．

再資源化資材の需要量と供給量は，必ずしも一致するとは限らない．この算定では，日本国内におけるクローズドリサイクルの効果を算定するため，需給ギャップが生じた場合にも，他産業での利用や国外への輸出入は行わないものと仮定する．従って，需要量が供給量を上回り，供給不足となった場合には，実際の再利用量は再資源化資材供給量の水準とし，残りは新規資材が使用される．逆に，供給過剰となった場合は，実際の再資源化量は再資源化資材需要量の水準まで下げられ，過剰分は廃棄処分されるとする．

すなわち，実際に再資源化されて再利用される再資源化資材使用量は，再生材利用可能量 R_{demand} と再資源化可能量 R_{supply} のうち少ない方と一致する．

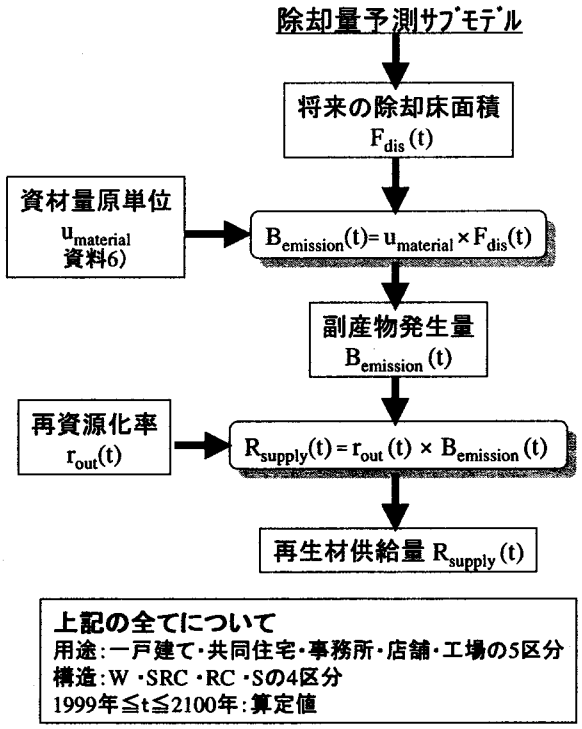


図 5-9　再資源化資材供給量算定プロセス

5.3 製品連鎖マネジメントの政策オプションによる環境改善効果

5.3.1 政策オプションの設定

長寿命化メンテナンス，環境配慮型設計，マテリアルリサイクル，の各政策オプションの環境改善効果について国土スケールで試算を行う．

副産物発生量から再資源化資材使用量を引いた値を，廃棄物最終処分量とする．ライフサイクル CO_2 発生量の算出は，資材生産，建設，運用，メンテナンス，解体，再資源化，廃棄の各段階毎に，CO_2 発生量原単位を用いて算出する．資材の輸送については，順工程での総輸送距離と逆工程での総輸送距離が日本全体で見るとほぼ等しく，リサイクルの有無による CO_2 発生量の増減は少ない，という仮定をとる．

(1) 長寿命化メンテナンス

既存の構造物に対して，長寿命化メンテナンスを行う．それに伴い構造物の平均寿命が，スケルトン 60 年，インフィル 20 年になると設定する．(表 5-3) また，長寿命化メンテナンスに伴い発生する CO_2 発生量を，適用事例の実績値 [7] をもとに設定する (表 5-4)．耐震補強の際の耐震壁の打ち増し，鉄骨柱による柱補強，炭素繊維による柱補強，及びそれらの工事に伴う内装・設備の改修の工程における追加資材の投入を考慮している．

表 5-3 長寿命化メンテナンスにおける寿命関数パラメーター

		躯体・外装・内装					設備				
		パラメーター			平均寿命		パラメーター			平均寿命	
用途	構造	m	η	δ	年	分散	m	η	δ	年	分散
一戸建て住宅	W	1.094	34.118	27.019	60.000	910.842	1.094	34.118	-12.981	20.000	910.842
	SRC	一戸建て住宅RCの値で代用					一戸建て住宅RCの値で代用				
	RC	4.270	47.557	16.732	60.000	130.903	4.270	47.557	-23.268	20.000	130.903
	S	6.747	64.372	-0.100	60.000	109.180	6.747	64.372	-40.100	20.000	109.180
共同住宅	W	1.255	25.300	36.457	60.000	356.468	1.255	25.300	-3.543	20.000	356.468
	SRC	共同住宅RCの値で代用					共同住宅RCの値で代用				
	RC	3.091	61.195	5.280	60.000	374.880	3.091	61.195	-34.720	20.000	374.880
	S	5.978	48.069	15.415	60.000	75.148	5.978	48.069	-24.585	20.000	75.148
事務所	W	共同住宅Wの値で代用					共同住宅Wの値で代用				
	SRC	事務所RCの値で代用					事務所RCの値で代用				
	RC	2.887	40.591	23.812	60.000	185.308	2.887	40.591	-16.188	20.000	185.308
	S	3.127	40.444	23.816	60.000	160.552	3.127	40.444	-16.184	20.000	160.552
店舗	W	事務所の値で代用					事務所の値で代用				
	SRC										
	RC										
	S										
工場	W	事務所の値で代用					事務所の値で代用				
	SRC										
	RC										
	S										

表 5-4 長寿命化メンテナンスに伴う用途別 CO_2 発生量 ($kg\text{-}CO_2$/年・m^2)

一戸建て住宅	16.9
共同住宅	28.3
事務所	25.8
店舗	26.7
工場	3.6

(2) 環境配慮型設計

環境配慮型設計として，フレキシブル・インフィル設計を新規の構造物に対して導入する．W 造以外の構造物の平均寿命をスケルトン 100 年，インフィル 20 年と設定する[8]．W 造の構造物の平均寿命は，スケルトン 60 年，インフィル 20 年と設定する[9]．(表 5-5) フレキシブル・インフィル設計の導入に伴う使用資材量の増加は，設定の寿命を実現するための構造計算から算定した．その結果，階高増加に伴いスケルトンの使用資材量原単位が 12.1%増加し，コンクリートのかぶり厚の増加に伴い粗骨材・細骨材・セメントの資材使用量がさらに 17.5%増加する[7]．

表 5-5 環境配慮型設計の寿命関数パラメーター

		躯体・外装・内装					設備				
		パラメーター			平均寿命		パラメーター			平均寿命	
用途	構造	m	η	δ	年	分散	m	η	δ	年	分散
一戸建て住宅	W	1.094	34.118	27.019	60.000	910.842	1.094	34.118	-12.981	20.000	910.842
	SRC	一戸建て住宅RCの値で代用					一戸建て住宅RCの値で代用				
	RC	4.270	47.557	56.732	100.000	130.903	4.270	47.557	-23.268	20.000	130.903
	S	6.747	64.372	39.900	100.000	109.180	6.747	64.372	-40.100	20.000	109.180
共同住宅	W	1.255	25.300	36.457	60.000	356.468	1.255	25.300	-3.543	20.000	356.468
	SRC	共同住宅RCの値で代用					共同住宅RCの値で代用				
	RC	3.091	61.195	45.280	100.000	374.880	3.091	61.195	-34.720	20.000	374.880
	S	5.978	48.069	55.415	100.000	75.148	5.978	48.069	-24.585	20.000	75.148
事務所	W	共同住宅Wの値で代用					共同住宅Wの値で代用				
	SRC	事務所RCの値で代用					事務所RCの値で代用				
	RC	2.887	40.591	63.812	100.000	185.308	2.887	40.591	-16.188	20.000	185.308
	S	3.127	40.444	63.816	100.000	160.552	3.127	40.444	-16.184	20.000	160.552
店舗	W	事務所の値で代用					事務所の値で代用				
	SRC										
	RC										
	S										
工場	W	事務所の値で代用					事務所の値で代用				
	SRC										
	RC										
	S										

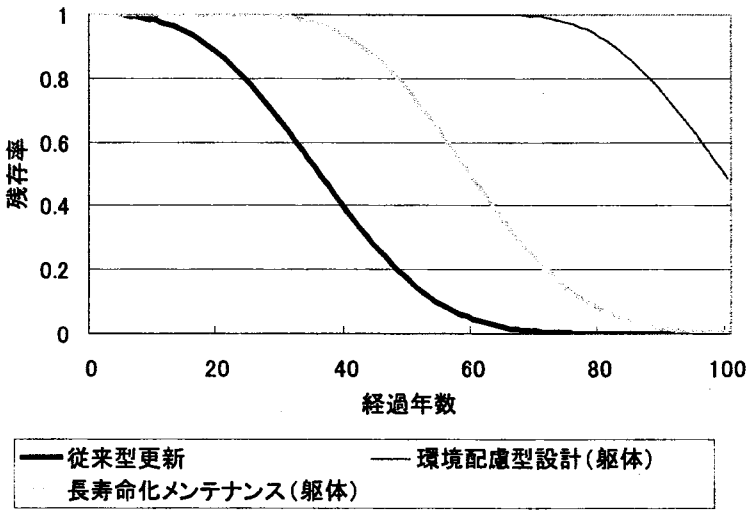


図 5-10 政策オプション導入による残存率推移の変化
(事務所・RC 造)

長寿命化メンテナンス，環境配慮型設計を導入した場合の，建築物の残存率の推移を図 5-10 に示す．政策オプションを導入しない場合には，35 年ほどで 50%の建築物が解体される．長寿命化メンテナンスを導入した場合には，建築されてから 30 年経過するまではほとんど解体されず，60 年経過時に約 50%の割合で解体される．環境配慮型設計を導入した場合には，70 年経過するまではほとんど解体されず，100 年経過時でも約 50%の割合で残存しており，長寿命化効果が大きいことが分かる．

(3) マテリアルリサイクル

発生したコンクリート塊に対して，偏心ローターによってすりもみ処理を行い再生骨材を製造し，マテリアルリサイクルを行う．再生骨材を使用することにより，新規骨材の使用量が減少する．偏心ローター本体，クラッシャー，ふるい，ベルトコンベアなどの付帯設備の稼動に伴う消費エネルギー量を，実験結果に基づいて 3kW/t と設定する．粗骨材の回収率は重量換算で 35%，細骨材の再資源化率は 30%と設定する．

5.3.2 政策オプション別の着工延床面積，解体延床面積量の推移

図 5-11 に，S 造，RC 造，SRC 造，W 造別の構造物ストック需要量の推移を示す．これによると，2010～2020 年にストック需要量はピークを迎える．用途別に見た場合，人口・世帯数をもとに算出した一戸建て住宅・共同住宅のストック需要量は，2015 年ごろにピークを迎え，以後は徐々に減少し 2100 年にはピークの約半分となる．一方，GDP をもとに算出した事務所・店舗・工場のストック需要量は，2005 年ごろをピークとするが，ほぼ一定である（図 5-12）．

図 5-13 に従来型更新における解体量の推移を示す．図 5-14 に従来型更新における着工量の推移を示す．これによると，循環型の政策オプションを採用しない「従来型更新シナリオ」では，解体量は 2020～2030 年においてピークを迎える．日本経済が長期的に再び成長期に戻るかは議論が別れるところであるが，現状での人口減少傾向を前提とすれば，構造物の解体に伴う廃棄物の発生する影響は，21 世紀の前半期に最も深刻となることも予想される．一方で，この従来型の更新シナリオでは，既存ストックの劣化に伴う建て替え需要が増加することから，21 世紀前半までは，現在と同じ水準の建設が進むこととなる．

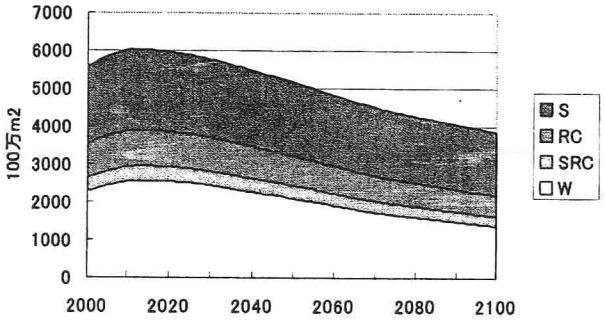


図5-11　構造別のストック需要量の推移

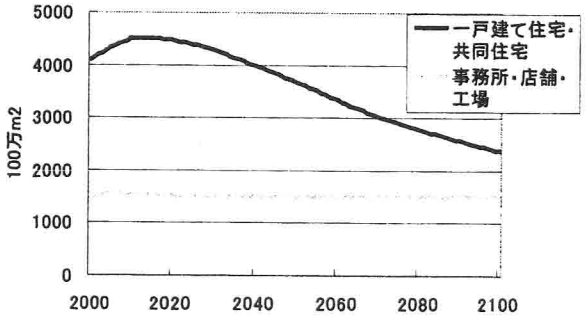


図5-12　用途別のストック需要量の推移

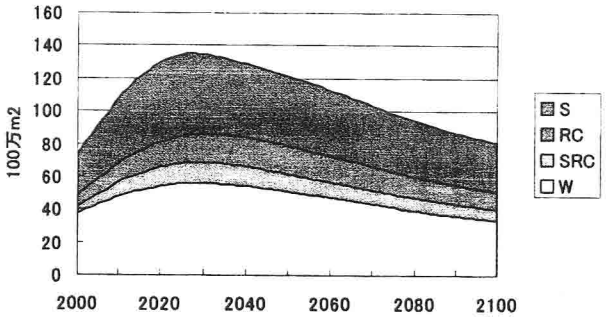


図5-13　従来型更新における解体量の推移

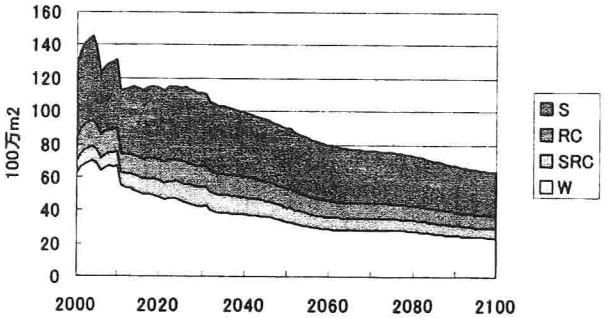


図5-14　従来型更新における着工量の推移

次に，環境配慮型設計，長寿命化メンテナンス，マテリアルリサイクルについて，その導入効果を算定する．マテリアルリサイクルは構造物の解体後に発生する廃棄物の最終処分量を削減する，前二者は構造物の更新に伴う物質のフローを制御する．長寿命化メンテナンスと環境配慮型設計を組み合わせて導入することにより，解体量の変化を従来型更新と比較する．長寿命化メンテナンスの導入により，解体を必要とする構造物の量を 100 年間の累計で 41%削減することができる一方で，新規の建設物に環境配慮型設計を採用することによって，これから建設する構造物が解体期を迎える際の建設物のピーク量を分散低減することができる．(図 5-15)

長寿命化メンテナンスと環境配慮型設計を組み合わせによるマネジメントと，マテリアルリサイクルによるマネジメントの最終処分の対象となる廃棄物発生量を図 5-16 に示す．建設廃棄物の約 9 割近くをコンクリートが占めることから，ここではコンクリート廃棄物量を代替指標として取り扱っている．マテリアルリサイクルにより，建設物に起因する廃棄物の 21 世紀前半におけるピークの 71%を削減することが可能となる一方で，設計・運用段階のマネジメントにより既存の構造物の 21 世紀前半での廃棄物量の削減とともに，21 世紀後半での廃棄物発生量を最大で 74%削減することができる．

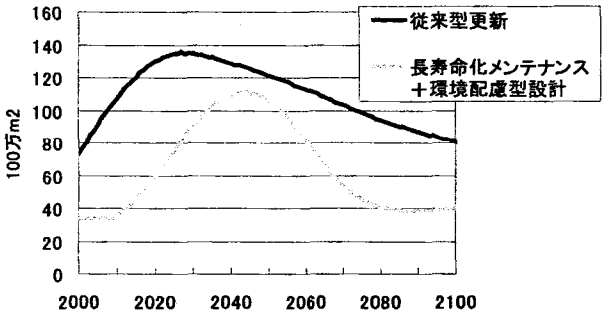


図 5-15　政策オプション導入による解体量の変化

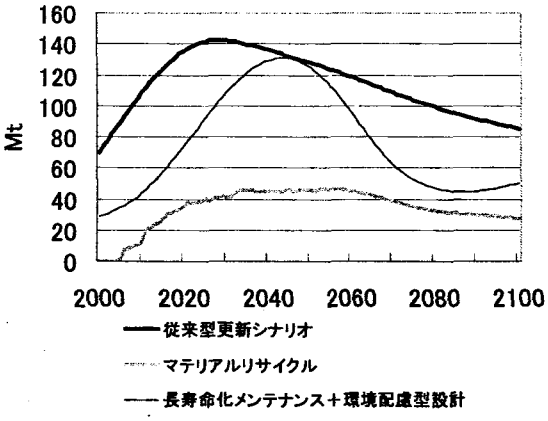


図 5-16　廃棄物最終処分量の推移（コンクリート）

5.3.3 製品連鎖マネジメントの政策オプションの比較

3 つの政策オプションを組み合わせて，従来型更新を含めて 6 つのシナリオを設定し（図 5-17），シナリオ間での環境改善効果をライフサイクル CO_2 と建設廃棄物について 2001 年からの 100 年間の集計値を算定した．（図 5-18，図 5-19）3 つの政策オプションを，構造物の更新に伴う物質のフローを制御する長寿命化メンテナンスと環境配慮型設計，構造物の解体後に発生する廃棄物の最終処分量を削減するマテリアルリサイクルの二つに分類して，シナリオを構築する．

すなわち，フローの制御に対して，①対策を取らない，②既存・新規の構造物の双

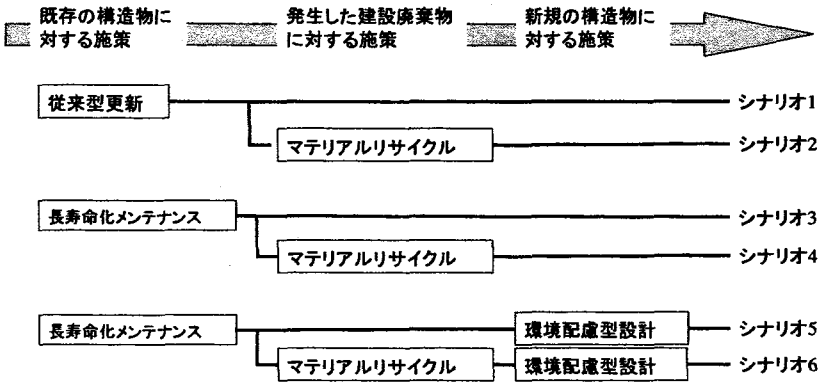


図 5-17　政策シナリオの構成

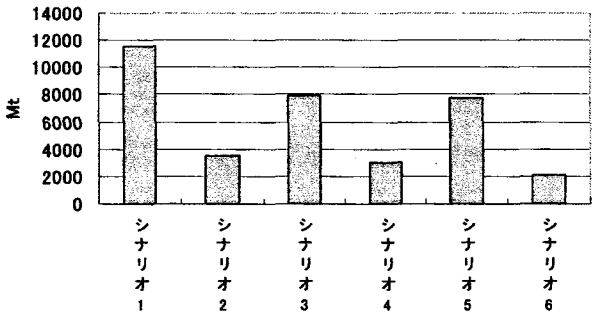


図 5-18　政策シナリオ別の廃棄物最終処分量（コンクリート）

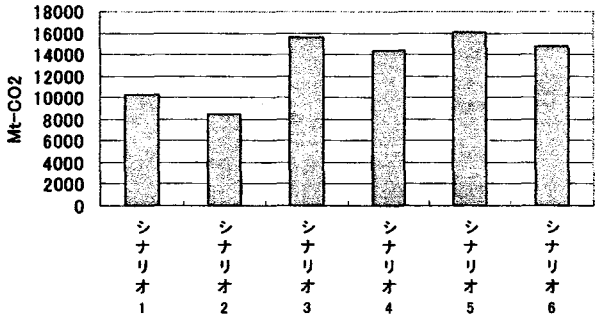


図 5-19　政策シナリオ別の $LCCO_2$ 発生量

方に対して長寿命化メンテナンスを採用,③既存の構造物に対しては長寿命化メンテナンス，新規の構造物に対しては環境配慮型設計を採用する，の 3 通りのパッケージを想定する．一方，最終処分量の削減に対しては，①対策を取らない②マテリアルリサイクルを採用する，の 2 通りのパッケージを想定する．それぞれを組み合わせて 6 つのシナリオを構築した．

長寿命化メンテナンス，マテリアルリサイクル，環境配慮型設計を合わせて導入した政策シナリオ（シナリオ 6）では，廃棄物最終処分量を 100 年間の合計で 81%削減できる．廃棄物最終処分量に関しては，従来型更新シナリオ（シナリオ 1）で最も環境負荷が大きくなる一方で，ライフサイクル CO_2 発生量ではマテリアルリサイクルのみ採用するシナリオを除くすべての政策シナリオにおいて発生量が増加している．これは，長寿命化メンテナンスのための改修工事を行う際や，内装・外装の更新の際に，新たに資材投入が必要となり， CO_2 が多く発生するためである．これらの政策は，構造物の更新量とそれに起因する廃棄物量の制御には有効であるが，追加的なライフサイクル CO_2 の発生やエネルギー消費を考慮して，代替的な政策の選定を検討することが必要となる．

シナリオごとの廃棄物量の制御効果と $LCCO_2$ 発生量への影響との関係をより明らかにするため，代替的なシナリオについて環境効率を算定した結果を図 5-20 に示す．環境効率の概念について，シュミット・ブレーク[10] は，MIPS (Mateial-Intensitat Pro Serviceeinheit) という指標を用い，『製品の生涯にわたるサービス単位当たりの物質集約度』と定義した．それを受けて平成 10 年版の環境白書では，『環境効率性とは，財やサービスの生産に伴って発生する環境への負荷に関わる概念であり，同じ機能・役割を果たす財やサービスの生産を比べた場合に，それに伴って発生する環境への負荷が小さければ,それだけ環境効率性が高いということになる.』と，環境効率を定義している[11]．すなわち，サービス/環境負荷の値が環境効率となり，ここでは 2001 年から 2100

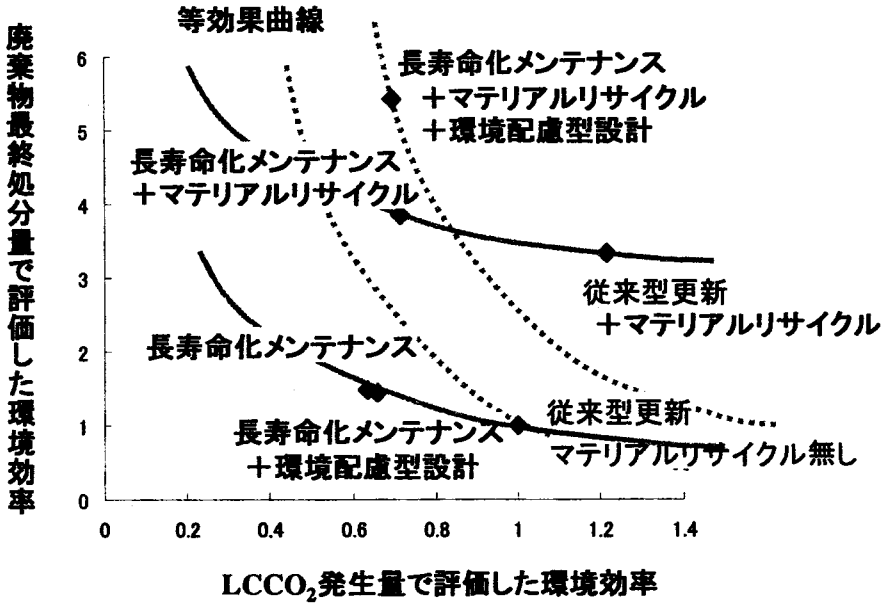


図 5-20　政策シナリオ別の環境効率

年までの 100 年間の総延床面積量を環境負荷発生量で割った値を環境効率として算出した．従来型更新かつマテリアルリサイクルを行わないシナリオの値を 1 としている．

計算結果では廃棄物最終処分量で評価した環境効率が最大で 5 まで向上しているのに対し，ライフサイクル CO_2 発生量で評価した環境効率は最大でも 1.2 までしか向上していない．両軸に取った二つの値が比較可能であると仮定した際の等効果曲線を図 5-18 上に示す．実線は廃棄物最終処分量発生量の重みが大きいケース，点線はライフサイクル CO_2 発生量の重みが大きいケースを表している．前者の場合，3 つの政策オプションを採用したシナリオの効果が最大となるが，後者の場合，マテリアルリサイクルのみを採用したシナリオの効果が最大となる．すなわち，環境負荷指標環の重みに応じて，政策シナリオの選択を行う必要がある．

5.4 本章のまとめ

本章では，都市構造物を対象とする製品連鎖マネジメントの政策オプションを評価する．まず，そのための評価システムを構築し，各サブシステムやデータについて示した．次に国土の建築物を対象として，長寿命化メンテナンス，環境配慮型設計，マテリアルリサイクルについて評価を行った．得られた知見を以下に記す．

- 評価システムは，建築物のストック需要量の予測，新規着工床面積の予測，除却床面積の予測，再資源化資材使用量の予測から構成され，政策オプション導入による消費資材のインベントリーの変化や再資源化資材利用量の変化に対応する．
- 除却床面積の算定において寿命関数を導入することにより，建築物の長寿命化の影響を定量的に分析できるシステムを構築する．
- マテリアルリサイクルを導入した場合，今後 100 年間で廃棄物の最終処分量を 71%削減することが可能である．
- 長寿命化メンテナンス及び環境配慮型設計を導入した場合，構造物の更新量とそれに起因する廃棄物量の制御には有効であり，廃棄物の最終処分量を 53%削減することが可能であるが，追加的なライフサイクル CO_2 の発生やエネルギー消費が発生し，CO_2 排出量が 58%増加する．すなわち，環境負荷指標環の重みに応じて，施策の選択を行う必要がある．

【参考文献・資料】

1) 国立社会保障・人口問題研究所：日本の将来推計人口（CD－ROM），（財）厚生統計協会，1997

2) 日本経済研究センター：21 世紀 日本経済－再生のシナリオ，2001

3) 小松幸夫，加藤裕久，吉田倬朗，野城智也：わが国における各種住宅の寿命分布に関する調査報告，日本建築学会計画系論文報告集，第 439 号，1992

4) 総務庁統計局：平成 5 年住宅統計調査全国編，（財）日本統計協会，1993

5) 建設省建設経済局調査情報課：平成 11 年度版建築統計年報，（財）建設物価調査会，1999

6) 建築業協会：建設業に係わる地球環境問題の研究　中間報告書，1994

7) 盛岡通（代表）：社会実験地での循環複合体のシステム構築と環境調和技術の開発，CREST 最終報告書，第 4 編 都市集積更新における循環複合体の構築，2001

8) 建設省建築研究所：長期耐用都市型集合住宅の建設・再生技術の開発（マンション総プロ）中間報告書，2000
9) 大野義昭，伊藤俊一，槙島裕二，星野五六：木造軸組み住宅のSI対応躯体システムの研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，E－1，建築計画Ⅰ，2000
10) F. シュミット=ブレーク，佐々木健訳：ファクター10 エコ効率革命を実現する，シュプリンガー・フェアラーク東京，1997
11) 環境庁：環境白書 平成10年版総説，1998

第 6 章　製品連鎖マネジメントのコスト分析

－都市を対象としたケーススタディー

6.1　緒言

本章では，製品連鎖マネジメントの導入の際に，コスト制約を考慮することによりその導入領域を設定し，環境負荷の削減効果を分析する．

具体的には，コンクリートのマテリアルリサイクルを分析対象とする．解体コンクリートは，単位体積あたりの付加価値が低いため，マテリアルリサイクルを行う上では輸送コストが制約となる．輸送コストを操作要素として扱うため，都市を対象として分析を行う．新規資源購入コスト，再資源化コスト，最終処分コストを操作した場合の環境負荷の削減効果，及び再資源化基盤の整備を行った場合の効果を把握する．

6.2　製品連鎖マネジメントのコスト評価のフレーム

6.2.1　コスト評価の全体フレーム

解体コンクリートを高品質の再生骨材として再利用するクローズドのリサイクルシステムのフレームを検討し，大阪市におけるケーススタディを通じてその環境負荷削減効果と実現性について検討する．大阪市の臨海部に位置する舞洲は，近年造成された埋立地であり，この地区では循環型社会の構築の基盤となる施設が数多く建設・計画されている．本研究では舞洲に再資源化施設を建設してコンクリートのマテリアルリサイクルを行った場合の分析を行う．

まず建築物の解体によって発生した解体コンクリートを再資源化施設へ輸送し，再生骨材を施設内のストックヤードに一定期間保管した後，生コンクリート製造工場へと運ぶ．この結果，最終処分場へ輸送される廃棄物量及び，骨材として新規資源を購入する量が削減される．ケーススタディにおいて評価対象とする領域を図 6-1 に示す．リサイクルを行わないケースを非循環型システム，行うケースを循環型システムと呼んでいる．

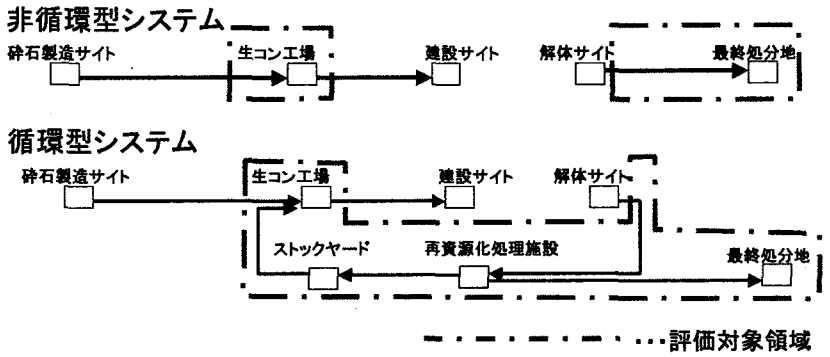


図 6-1　評価対象領域

6.2.2 コスト評価関数の設定

6.2.1 で示した評価フレームに基づき，評価関数を作成する．各システムにおける製品マネジメントの総費用は，新規資源購入費用・最終処分コスト・輸送コスト・再資源化処理コスト・ストックコストの合計となる．各システムの製品マネジメントコストの式を以下に示す．ケーススタディにおいて使用した値を表 6-1 に示す．

非循環型システムの製品マネジメントコスト

$$= P_{virgin} \times V + C_{landfill} \times V + C_{transport} \times d_{dem\text{-}landfill} \times V$$

循環型システムの製品マネジメントコスト

$$= P_{virgin} \times (1-\alpha) \times V + C_{landfill} \times (1-\alpha) \times V + C_{processing} \times V + C_{stock} \times \alpha \times V$$
$$+ C_{transport} \times \{ d_{dem\text{-}rec} \times V + d_{rec\text{-}landfill} \times (1-\alpha) \times V + d_{rec\text{-}con} \times \alpha \times V \}$$

V：解体コンクリート発生量

α：再資源化率（＝粗骨材回収率）

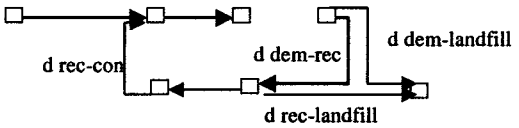
P virgin：骨材購入価格

C landfill：最終処分コスト

C processing：再資源化コスト

C stock：ストックコスト

C transport：単位輸送コスト



d dem-landfill：解体サイトから最終処分場までの距離

d dem-rec：解体サイトから再資源化施設までの距離

d rec-landfill：再資源化施設から最終処分地までの距離

d rec-con：再資源化施設から生コン工場までの距離
（ストックヤードが再資源化処理施設内にあると仮定）

表 6-1 ケースタディにおける設定

	値	設定
P virgin：骨材購入価格	4000¥/m3	大阪におけるコンクリート用砕石購入価格（建築物価，2000・7より）
C landfill：最終処分コスト	8000¥/m3	土木学会コンクリート資源有効利用小委員会「資源有効利用の現状と課題」，1999より
C processing：再資源化コスト	3000¥/m3	再資源化プラント稼働率100%における予測値
C stock：ストックコスト	2200¥/m3	地代を地価30万円/m2の5%とする 3mの高さに1ヶ月保管
C transport：単位輸送コスト	輸送単価 ＝300¥/km・m3	土木工事積算標準単価平成11年度版より大阪の4tトラック・コンクリート塊（鉄筋）・DIDありの10km値
α：粗骨材回収率	33%	再資源化プラント実証実験における値
骨材の単位容積質量	1.4t/m3	

6.3 コスト制約を考慮した製品連鎖マネジメントの評価

6.3.1 シナリオの構築

コンクリートリサイクルシステムの環境改善効果を算定する際に用いるシナリオとして，再資源化処理コスト減少シナリオ， 新規資源価格上昇シナリオ， 最終処分コスト上昇シナリオの 3 つを考える．

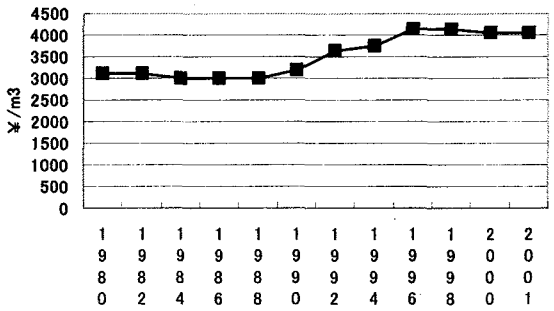
(1) 再資源化処理コスト減少シナリオ

コンクリートリサイクルを行うと，再資源化処理のためのコストが必要となる．従って，このコストが減少すると，リサイクルが経済的に成立しうる領域が広がる．現在の設定コ

スト 3000 円/m³ が 1000 円/m³ に減少するシナリオを設定する[1].

(2)　新規資源価格上昇シナリオ

コンクリートリサイクルを行うと，新規資源購入量が減少する．従って，新規資源の価格が上昇すると，リサイクルが経済的に成立しうる領域が広がる．新規コンクリート用砕石の価格の，大阪における経年変化を図 6-2 に，地域分布を図 6-3 に示す[2]．これによると，20 年前に比べて，新規骨材の価格は約 30%上昇しており，また地域によって約 2 倍のばらつきがある．砕石は単位体積当たりの価格が低いために，販売価格に対して輸送に伴うコストの占める割合が相対的に大きくなる．よって採石場が都市から遠隔化するに従って販売価格が上昇すると解釈することができる．以上のことから，新規砕石の価格が現在の 4000 円/m³ から，倍の 8000 円/m³ 水準まで上昇するシナリオを設定する．



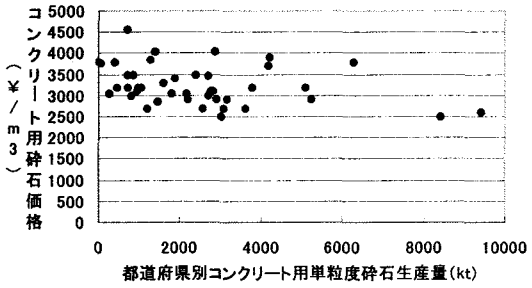


図 6-2　コンクリート用砕石価格の経年変化　図 6-3　コンクリート用砕石価格の地域分布

(3)　最終処分コスト上昇シナリオ

コンクリートリサイクルを行うと，最終処分量が減少する．従って，最終処分コストが上昇すると，リサイクルが経済的に成立しうる領域が広がる．表 6-2 に，大阪湾フェニックス計画におけるガレキの引取料金の推移を示す．これによると，計画開始当初に比べ引取料金が約 70%増加している．また，最終処分場用地不足に悩む関東地方では，管理型処分場における受入料金が 25000 円/m³ となっているケースもある．以上のことから，最終処分コストが現在の 8000 円/m³ から，倍の 16000 円/m³ に上昇するシナリオを設定する．

表 6-2　大阪湾フェニックス計画における引取料金

	ガレキ(¥/t)
1994.8	2060
1995.2	2060
1996.2	2060
1997.2	2060
1998.2	2100
1999.4	3360
2000.1	3360
2001.1	3360

6.3.2 物理的限界を考慮した評価

廃棄物最終処分量削減率の技術的な上限は，現状技術水準では廃棄物発生地域に関わらず33%で一定である[3]．一方，CO_2排出量の削減量は地域により異なる．これは，輸送に伴うCO_2排出量が廃棄物発生場所によって左右されるからである．CO_2排出削減量の地域ごとの値を図6-4に示す．輸送距離の算出においては，大阪市内にメッシュ状に道路が存在していると仮定し，その道路を用いて最短距離で輸送を行うと設定した．

これによると，再資源化施設に近い地域の方が，多くのCO_2を削減できることが分かる．市全体の合計値を求めると，24.06kt-Cから21.09kt-Cへ減少している．すなわちCO_2排出量を12.3%削減することが可能である．

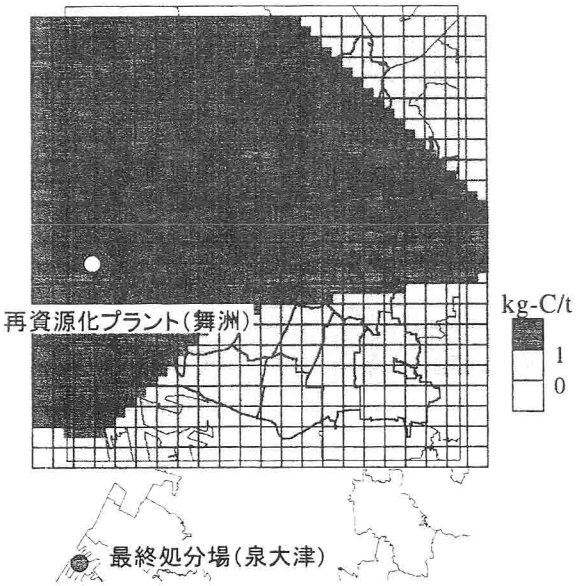


図6-4 単位解体コンクリート塊当たりのCO_2排出削減量

6.3.3 コスト制約を加味した評価

非循環型システムと循環型システムにおける製品マネジメントコストが等しくなるのは，新規資源購入に伴うコストの減少分と最終処分に伴うコストの減少分の合計が，再資源化処理コストと輸送コストの増加分の合計が等しくなる場合である．従って，新規資源価格，最終処分コスト，再資源化処理コストを一定とした場合，輸送コストの増加分によって，いずれのシステムにおける製品マネジメントコストが高くなるかが左右される．輸送コストの増加分は，解体サイトと再資源化施設までの距離及び解体サイトと最終処分地までの距離の関係によって決定されるため，解体サイト・再資源化施設・最終処分地の3点の関係によって，経済的にコンクリート再資源化が可能となるエリアが決まる（図6-5）．

求めたエリアを対象に，環境負荷削減量を算出する．（再資源化コスト，新規資源価格，最終処分コスト）が（3000，4000，8000）（値の単位は円/m^3）の場合，廃棄物最終処分量削減率，CO2排出量削減率ともに0.0%となる．再資源化コストが減少し，（1000，4000，8000）となった場合，それぞれ0.5%，0.3%となる．新規資源価格及び最終処分コストが2倍になり，（3000，8000，16000）となった場合，それぞれ4.1%，2.1%となる．

現状では，解体コンクリートリサイクルが経済的に成立しうるエリアは多くはない．しか

し，将来の再生骨材化技術の向上に伴い，細骨材や微粉末の再生利用が進むことにより，成立エリアが拡大し，廃棄物最終処分量，CO2 排出量の削減幅が大きくなることが考えられる．

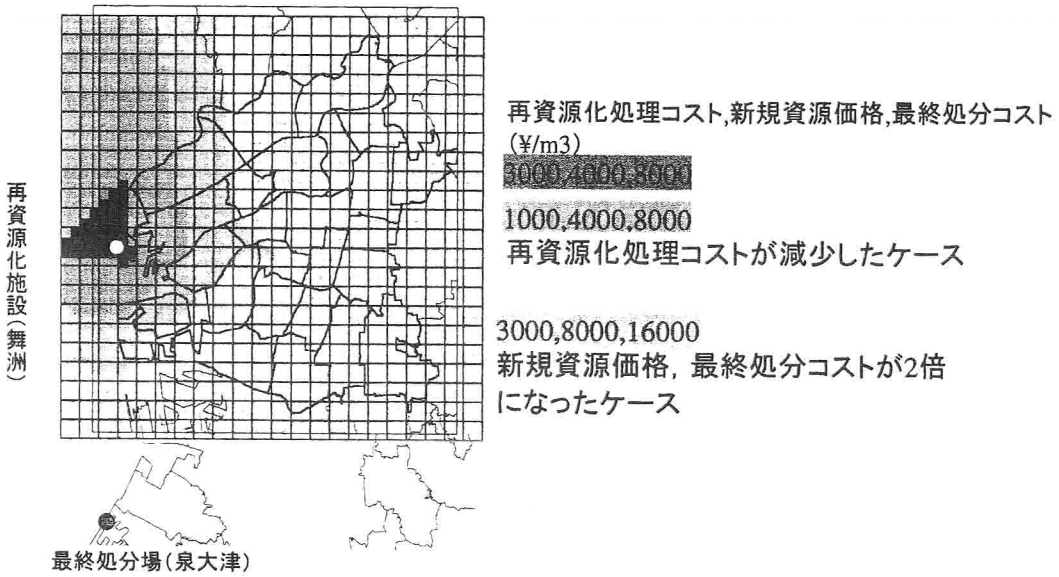


図 6-5　解体コンクリートリサイクル経済的可能領域

6.3.4 再資源化基盤整備による評価

前項では再資源化拠点を舞洲一ヶ所のみに置いて評価を行った．本項では，さらに再資源化拠点を一箇所設置した場合，すなわち再資源化基盤整備を行った際の影響について調べる．

新たな再資源化拠点の立地場所を選定する際には，解体コンクリートがより近い再資源化拠点へと運ばれると仮定に立ち，市内の各地点から再資源化拠点までの距離の最大値が最小となるよう考慮した．

（再資源化コスト，新規資源価格，最終処分コスト）が（3000，4000，16000）（値の単位は円/m³）の場合における，再資源化可能領域の変化を図 6-6 に示す．再資源化拠点が一箇所の場合，埋立対象廃棄物発生量削減率は 4.1%であったのに対し，二箇所の場合には，31.8%となり，大きな差が生じた．

この結果，コンクリートのマテリアルリサイクルを促進するためには，再資源化基盤整備を行い，再資源化拠点を分散立地させることが非常に重要であることが明らかとなった．ただし，分散立地をした場合，再資源化処理におけるスケールメリットや再資源化拠点を立地する土地の地価の違い等の要素がマイナスに働くことが予想され，都市の環境計画に適用する際には，それらの要素も加味した評価が必要となる．

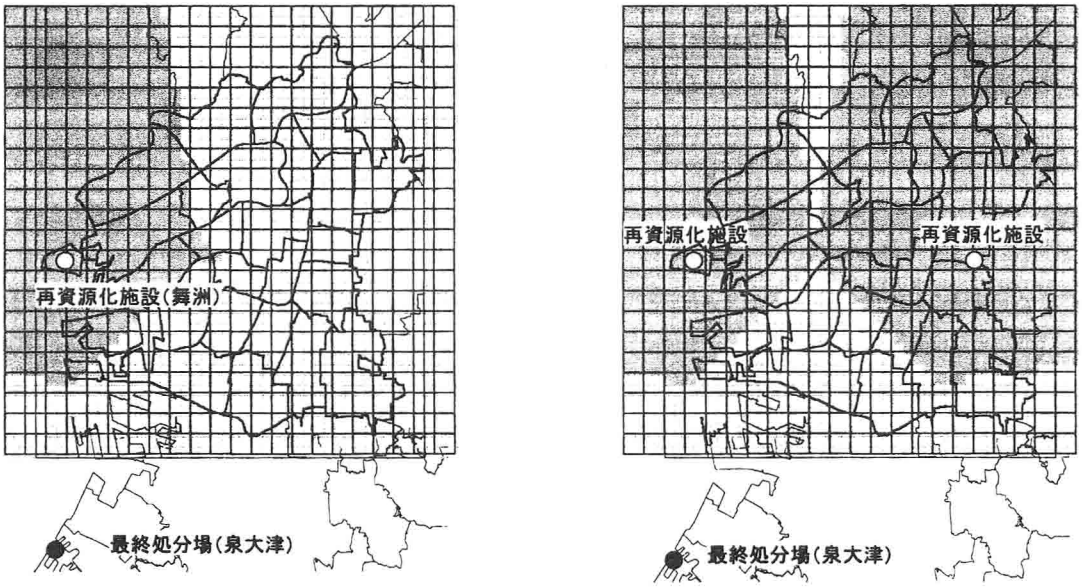


図 6-6　再資源化基盤整備による再資源化可能領域の拡大

6.4 本章のまとめ

本章ではコスト制約を考慮することによって，製品連鎖マネジメント施策の導入可能性について分析を行った．コンクリートのマテリアルリサイクルを評価対象施策として取り上げ，輸送コストやストックコストを考慮するために，大阪市を対象エリアとして，再生骨材利用の可能性について分析した．得られた知見を以下に示す．

- 解体コンクリートの単位体積あたりの付加価値が低いため，解体コンクリートから再生骨材を製造・利用するためにかかる総費用の中では，輸送コストの占める割合が大

きい.

- 新規資源購入コスト，再資源化コスト，最終処分コストをマテリアルリサイクルを促進する上で有利なように操作した場合でも,廃棄物最終処分量の削減率は4.1%にとどまる.
- 再資源化基盤の整備を行った場合，廃棄物最終処分量の削減率は31.8%となり効果が大きい.

【参考文献・資料】

1) （株）竹中工務店技術研究所：高品質再生粗骨材「サイクライト」，2000

2) （財）建設物価調査会：建設物価，2000.7

3) 土木学会コンクリート委員会コンクリート資源有効利用小委員会：資源有効利用の現状と課題，土木学会，1999

第7章　結論と今後の課題

7.1　総括と結論

本論文では，工業製品等の環境評価に用いられるLCA手法を，都市構造物に対して適用する方法論を確立した．そして都市構造物が循環型のものへと更新されるようマネジメントする施策を評価するシステムを構築し，環境配慮型設計の導入，建築物の長寿命化，マテリアルリサイクルの推進について，環境負荷の削減効果を分析した．さらにマテリアルリサイクル施策についてはコスト制約を考慮した評価を行った．

第1章では，環境問題の深刻化に対して，人口・機能が集中している都市を循環型へ転換することが社会的な命題であることを指摘し，都市構造物のマネジメント施策を評価するシステムの構築及びその評価を研究の目的として提示するととも，本論文の構成を示した．

第2章では，1章で整理した論点を定量的に示すべく，マテリアルフロー分析を用いて，都市構造物がもたらす環境負荷についてその特性を把握した．まず，国土全体におけるマテリアルフローを調査した結果，1987年において排出量が約7.6億トンであるのに対して投入量が約18.3億トンと大きく上回っており，年間10億トン以上の膨大なマテリアルが国内に蓄積されつつあることが明らかとなった．また，蓄積されつつあるマテリアルの中で，建設資材が占める割合が約80%と大きいことが明らかとなった．次に，コンクリート，鉄鋼，木材の主要建設資材のマテリアルフローを統計資料より算出した結果，リサイクル率がコンクリートは65%，鉄鋼は93%，木材は40%となった．すなわち日本では鉄鋼をのぞく建設資材の物質循環があまり進んでおらず，大量生産・大量廃棄のワンウェイ型の物質代謝構造になっていることを明らかにした．さらにリサイクルの内訳を見ると，サーマルリサイクル，マテリアルリサイクルといった低次のリサイクルが大部分を占めており，部材リサイクルはほとんど行われていないことを示した．最後に製品連鎖マネジメントの概念について整理し，それに基づく政策オプションを，製品連鎖上における位置をもとに分類した．

第3章では，都市構造物から発生する環境負荷を評価するために，ライフサイクルアセスメント（LCA）手法を援用したシステムを構築した．従来の構造物単体を評価するシステムではなく，都市構造物の集合体である都市を評価の対象としたシステムを構築することにより，街区の共同化などの空間をマネジメントする施策を評価することを可能とした．まずLCA手法の概要及び都市構造物に適用する際の問題点について整理するともに，既存の適用事例についてまとめた．次に，都市構造物にLCA手法を適用するシステムを，「情報入力サブシステム」，「戦略的代替案計画サブシステム」，「環境負荷算定サブシステム」，「出力表示サブシステム」の4つのサブシステムに分けて構築した．さらにシステムを利用する上で必要となる，環境負荷原単位などの基礎データの収集を行った．

第4章では，3章で構築したシステムを利用して，都市構造物から発生する環境負荷の分析を行い，その特性を把握した．この章での分析においては，建築物，交通基盤，水道基盤，エネルギー供給基盤，廃棄物処理基盤を対象とし，モデルの精度よりも全体をバランスよく把握することを優先した．3章で構築したシステムを用いた分析においては，各建築物の用途，構造，敷地面積，容積率などのミクロなデータが必要となるため，地区を対象として分析を行った．まず，環境負荷の特性を把握するため，発生する場所及び都市活動

／都市構造物のいずれに由来するのかによって分類した．次に，評価の対象地区として選定した大阪市の中之島西部地区の概要について説明し，都市構造物が更新されるスケジュールを定めた．分析の結果，建築物の建設段階・建築物の運用段階（エネルギーの使用）・交通の走行段階の 3 つが，集積した都市構造物から発生する CO_2 の主な発生源であり，それぞれ全体の 15%，41%，42%を占めることが明らかとなった．また，都市外から発生する CO_2 が全体の 91%を占め，都市活動に由来する CO_2 が 84%を占めることが明らかとなった．最後に，環境負荷削減の施策代替案をビルディングマネジメント，ユーティリティーマネジメント，空間マネジメントの 3 つに分類し，それらを導入するシナリオを作成・評価して，マネジメントの効果を分析した．その結果，省エネルギーによって 8.2%，自動車の燃費改善によって 3.7%，駅周辺地区の重点的開発によって 3.6%，CO_2 を削減することが可能であり，各施策を組み合わせた場合には，地区全体の容積率が現在の 2 倍になった場合でも，CO_2 の排出量を現状水準に抑えることが可能であることが分かった．

第 5 章では，製品連鎖マネジメントの概念に基づいた政策オプションを評価するシステムを構築し，3 つの政策オプションの効果を分析した．まず，建築物のストック需要量，新規着工床面積，除却床面積，再資源化資材使用量を算定するサブシステムから構成される評価システムを構築し，政策オプション導入による消費資材のインベントリーの変化や再資源化資材利用量の変化に対応させた．また，除却床面積の算定において寿命関数を導入することにより，建築物の長寿命化の影響を定量的に分析できるシステムを構築した．次に，建築物を対象として環境配慮型設計，長寿命化メンテナンス，マテリアルリサイクルの 3 つの政策オプションを導入した場合の効果について国土スケールで評価を行った．その結果，マテリアルリサイクルを導入した場合，廃棄物の最終処分量を最大で 71%削減することが可能であることが明らかになった．一方，長寿命化メンテナンス及び環境配慮型設計を導入した場合，構造物の更新量とそれに起因する廃棄物量の制御には有効であり，廃棄物の最終処分量を最大で 53%削減することが可能であるが，追加的なライフサイクル CO_2 の発生やエネルギー消費が発生し，CO_2 排出量が約 58%増加することが明らかとなった．すなわち，環境負荷指標環の重みに応じて，施策の選択を行う必要があることが明らかとなった．

第 6 章では，5 章で取り上げた製品連鎖マネジメントの施策の中からコンクリートのマテリアルリサイクルを取り上げ，コスト制約を考慮した環境負荷の削減効果を分析した．対象とした解体コンクリートは，単位体積あたりの付加価値が低いため，マテリアルリサイクルを行う上では輸送コストが制約となる．輸送コストを要素に取り入れるために，都市を対象として分析を行った結果，新規資源購入コスト，再資源化コスト，最終処分コストを操作しても，廃棄物最終処分量の削減率は 4.1%にとどまることが明らかとなった．一方，再資源化基盤の整備を行ったところ，廃棄物最終処分量の削減率は 31.8%となり効果が大きいことが分かった．

以上，本論文の結論として，環境負荷の発生の少ない都市構造物を実現するには，その前提として環境負荷の発生量を的確に評価する必要がある．そのためのツールとして，ライフサイクルアセスメント手法を都市構造物の評価に適用するシステム及び製品連鎖マネジメントに基づく施策を評価するシステムを構築した．さらに構築したシステムを利用す

ることによって，都市構造物は環境負荷の大きな発生源となっており対策が必要であること，都市構造物からの環境負荷を削減するためには製品連鎖に沿った一体的なマネジメントを行うことが重要であること，マネジメント施策の導入の際には技術開発とともに基盤整備を行うことが有効であることを明らかにした．

7.2 今後の課題

本論文では，都市構造物から発生する環境負荷特性の分析結果を踏まえ，都市構造物を循環型へと転換するマネジメントとして，都市構造物をストックとして捉え，製品連鎖マネジメントの概念に基づいた施策を評価するシステムの構築及びその評価を行った．今後の課題を以下に示す．

- 循環型の都市構造物を実現する製品連鎖マネジメント施策として，本論文では主に技術的な施策のみを取り上げて評価した．税制面での優遇措置や古い建築物に対する価値観の変化などの制度的・社会的施策へその評価対象を広げる．
- 都市環境政策は土地利用政策を軸として実施されることが多い．そこで，本研究で構築した評価システムを地理情報システム（GIS）上に組み込むことによって，土地利用のマネジメントを組み合わせた評価が可能なシステムへと展開する．
- 都市構造物はそれ自体の建設・廃棄に伴い多くの環境負荷を発生させる一方，都市行動を支える媒体でもある．従って，都市行動がもたらすサービス及び環境負荷を評価の枠組みに含めた総合的な評価を行う．

謝辞

本論文は，大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻における研究成果を，学位請求論文としてとりまとめたものである．研究を進めるにあたり多くの方々のご指導・ご協力を得たことに対し，この場を借りて感謝の意を表します．

本論文を作成・編集するにあたり，指導教官である大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻の盛岡 通 教授に甚大なる謝意を表します．博士前期課程から後期課程における研究ゼミを通じて，常に有益かつ鋭いご指導・ご助言をいただき，学位請求論文のとりまとめに対しても，常に暖かく，また時には厳しくご指導していただいた．特に，細かい分析のみにこだわりがちな筆者に対し，研究の全体像を広い視野に立脚して構築することの重要性を繰り返しご指摘いただいた．

大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻の藤田 壮 助教授には，研究の課題設定から論文の校正に至るまで，すべてにわたって懇切丁寧にご指導をいただいた．こうして本論文をまとめ上げることができたのも藤田助教授の熱意あるご指導のおかげであり，深く感謝いたします．

査読をしていただいた大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻の鳴海 邦碩 教授には，主に都市計画者の立場に立った様々なご意見を頂戴した．同じく査読をしていただいた大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻水野 稔 教授には，主に分析結果の解釈に関して有益なご意見を頂戴した．残念ながら，筆者の力量不足のため，いただいたご意見を論文に十分に反映させることはできていない．しかしながら，両教授のご意見は，今後の研究の展開において貴重な示唆を与えてくださった．鳴海教授，水野教授に対しまして，深く感謝いたします．

筆者は，博士後期課程のうちの約1年間（2000年4月から2001年5月まで），科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業（CREST）の「社会実験地での循環複合体のシステム構築と環境調和技術の開発」（研究代表 盛岡通）研究プロジェクトに，研究補助員として参加させていただいた．プロジェクトを通じて，様々な分野の研究者の方と議論させていただく機会や研究発表を行う機会を得ることができ，研究遂行の大きな助けとなった．

（株）大林組の酒井 寛二様，漆崎 昇様，中原 智哉様，下川 泰三様には，ライフサイクルアセスメントを用いた環境負荷の算出について多くのご助言いただくとともに，貴重なデータをご提供いただいた．特に評価プログラムの開発は，中原様のご協力がなければ不可能であった．ここに謝意を表します．

大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻の下田 吉之 助教授には，都市内部での省エネルギーの可能性について，多くのご教示をいただいた．ここに謝意を表します．

（株）竹中工務店の柳橋 邦生様には，解体コンクリートからの再生骨材製造プロセスについて，見学の機会を与えていただくとともに，貴重なデータを提供いただいた．ここに謝意を表します．

科学技術振興事業団の研究員の恒見 清孝様（現大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻助手）楠部 孝誠様（現京都大学大学院工学研究科環境地球工学専攻），後藤 忍様（現福島大学行政社会学部講師），技術員の今堀 律子様には，プロジェクトにおける会合をはじめ様々な場において有益な意見をいただいた．ここに謝意を表します．

また，博士後期課程の田口 誠様，岡寺 智大君，林 周君，山本 裕吾君におかれまして

は，よき相談相手として筆者の研究活動を支えていただいた．また，研究室の後輩の小岩 真之君，徳永 拓君，松田 圭洋君には，分析作業において多くの助力を得た．これら大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻環境システム学講座環境マネジメント領域の先輩，同僚，後輩の支えに対しまして謝意を表します．
最後に，筆者の学生生活を支え，研究活動を温かく見守ってくれた両親に感謝いたします．