

都市構造物の製品連鎖マネジメントの システム構築とケーススタディ評価

村野昭人¹・藤田 壮²・盛岡 通³・小岩真之⁴

¹学生会員 大阪大学大学院 工学研究科環境工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

²正会員 博(工) 大阪大学大学院助教授 工学研究科環境工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

³正会員 工博 大阪大学大学院教授 工学研究科環境工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

⁴正会員 環境省総合環境政策局環境影響評価課 (〒100-8975 東京都千代田区霞ヶ関 1-2-2)

日本では、高度成長期に建設された大量の都市構造物の解体に伴い、21世紀前半には建設廃棄物が大量に発生することが予想されている。さらに、最終処分場の用地不足や天然資源の希少化が経済活動の制約になると考えられており、都市構造物の建設や廃棄に伴い発生する環境負荷を制御することが、緊急の社会要請となっている。本研究では、まず製品連鎖マネジメントの概念に基づき、都市構造物をマネジメントする政策オプションの整理を行った。次に、政策オプションの導入効果を評価するためのシステムを構築した。最後に、政策オプションを組み合わせることによって政策シナリオを作成し、各シナリオの環境負荷削減効果について国土を対象としたケーススタディ評価を行った。

Key Words: urban structures, construction wastes, product-chain-management, policy option, eco-efficiency

1. はじめに

わが国では建設産業から排出される廃棄物の量が1995年で約1億トンに達し、全産業廃棄物量の1/4を占める¹⁾。また、産業廃棄物の最終処分場の確保は年々困難になっており、その大きな割合を占める建設廃棄物の削減は緊急の社会要請でもある。さらに、高度成長期の比較的短い期間に建設が集中した、大量の都市構造物が一斉に解体・廃棄の時期を迎えることになれば、現状水準をはるかに上回る大量の建設廃棄物が、21世紀の前半期に発生することも見込まれる。2000年に公布された「建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律(建設資材リサイクル法)」では、『建設資材について、その再生資源の十分な利用及び廃棄物の減量等を通じて、資源の有効な利用の確保及び廃棄物の適正な処理を図る』ことを定めている。しかし、他のリサイクル法と同様に、新たな建設工事における副産物のリサイクルを主眼としており、すでに社会に蓄積された膨大な構造物のストックを含めて、フローとストックを総合的にマネジメントする社会

システムについての議論は、未だ端緒についたばかりである。

本研究では、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)のアプローチにもとづき、政策の代替的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、効率の高いマネジメントシステムを構築することを志向する。具体的には、第一に建設廃棄物を対象としたリサイクルの現状、及び既往研究を踏まえて、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。第二に、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。第三に、政策オプションを組み合わせることで政策シナリオを作成し、国土を対象としてその評価を行う。

2. 製品連鎖マネジメントのフレーム

(1) 建設廃棄物のリサイクルによる環境負荷削減に関する既往研究

建設廃棄物を対象にして、リサイクルによる環境負荷削減に関する研究はすでに広く行われている。林ら(1996)²⁾は、建設発生土を再利用するために必要な地域間協力のあり方について提案を行っている。天野ら(1998)³⁾は、道路の舗装工事に伴って発生するアスファルト・コンクリート塊など資材を対象に、リサイクルした場合のCO₂排出量削減効果及び建設コスト削減効果について分析している。橋本ら(1998)⁴⁾は、民家の再生において、全面的に解体するのではなく一部を再利用することによる廃棄物及びコストの削減効果について試算を行っている。

筆者らは、これまでの個別のリサイクルシステムを総合的に計画・評価するアプローチを指向してきた。Fujita et al. (2000)⁵⁾では、構造物のライフサイクルにおいて発生する環境負荷を算定する方法論の整理を行い、算定システムを構築した。次に、都心地区から発生・派生するCO₂発生量の算定及び環境施策の効果分析を行い、都市環境政策への展開についての提言を行った⁶⁾。藤田他(2000)⁷⁾では、空間的に多層的なリサイクルシステムの都市スケールでの社会的な導入可能性を評価した。さらに藤田、村野、盛岡(2001)⁸⁾⁹⁾では、具体的なコンクリートリサイクル施設のシステムの計画に基づき、経済的な制約を考慮した場合の環境改善効果について分析を行った。

(2) 製品連鎖マネジメントのフレーム

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^{10) 11)}。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¹²⁾、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により、環境負荷削減と環境効率の向上を期待できる。

(3) 都市環境計画における製品連鎖マネジメント

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¹³⁾。

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、環境政策の評価をおこなう。

3. 製品連鎖マネジメントの政策オプション

(1) 政策オプションのフレーム

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利用する。都市構造物の代謝構造を循環型へと転換する政策オプションは、3つのオプション群に分類される。第一の分類は、生産のプロセスを循環指向型に転換するプロセス、いわば「循環型の動脈生産システム」に転換するオプション群である。この中には、エコマテリアルを出来るだけ多く使用する環境配慮型設計や、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志向する環境配慮型設計、及びこれらの設計を制度として展開する環境配慮型設計の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

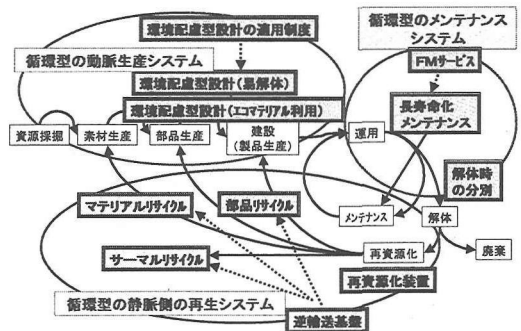


図1 製品連鎖マネジメントの政策オプション

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となる。

第二の分類は、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オプション群である。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実行が必要となる。これらの政策オプションは「循環型のメンテナンスシステム」の構築に分類する。

第三の分類は、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を行うオプション軍である。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は「循環型の静脈側の再生システム」の構築に分類される。(図1)

(2) 政策オプションのシステム

本研究では、製品連鎖マネジメントの代替的な政策オプションについて、技術的検討が進められて、事業の取り組みが試行されている。「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」をとりあげている。

a) 環境配慮型設計

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。

これは、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ことから、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にする¹⁴⁾。

b) 長寿命化メンテナンス

構造物の寿命は、物理的要因による劣化、経済的要因による劣化、社会的要因による劣化によって決定される。

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。

c) マテリアルリサイクル

発生したコンクリート塊から骨材を再生し、新たなコンクリートの材料としてリサイクル利用することを促進

するため、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。

破碎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。加熱する方法の場合、多くのコンクリート塊を処理することが出来る一方で、処理に伴い多くのエネルギーが必要となる。偏心ローターによる方法の場合、消費エネルギーは少ない。図2に、再生骨材生産プラントの再生骨材製造フローの例を示す¹⁵⁾。

再生骨材利用を促進するには、技術的な課題に加えて、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ことが必要である。そのためには、生産プラントやストックヤードなどの分散立地によって輸送コストを下げるなど、循環基盤整備を行うことが重要となる。

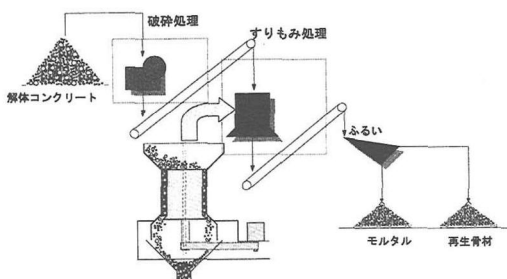


図2 コンクリート塊の再生骨材化フロー¹⁵⁾

4. 製品連鎖マネジメントの政策オプションの計画と評価

(1) 計画と評価の全体フレーム

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評価するために、すでに立地している構造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から、年度ごとの新規の着工量を算定する。構造物はその用途と構造によって分類した上で、それぞれのカテゴリーについて寿命関数を設定している。構造物の現状ストックデータをもとに代謝量を予測する方法については、筆者らがFujita et al.⁶⁾で紹介している。また林・加藤ら(2000)¹⁶⁾は「住宅コーホート」と呼ぶ同様の方法を用いて、名古屋における構造物の代謝を予測している。

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。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

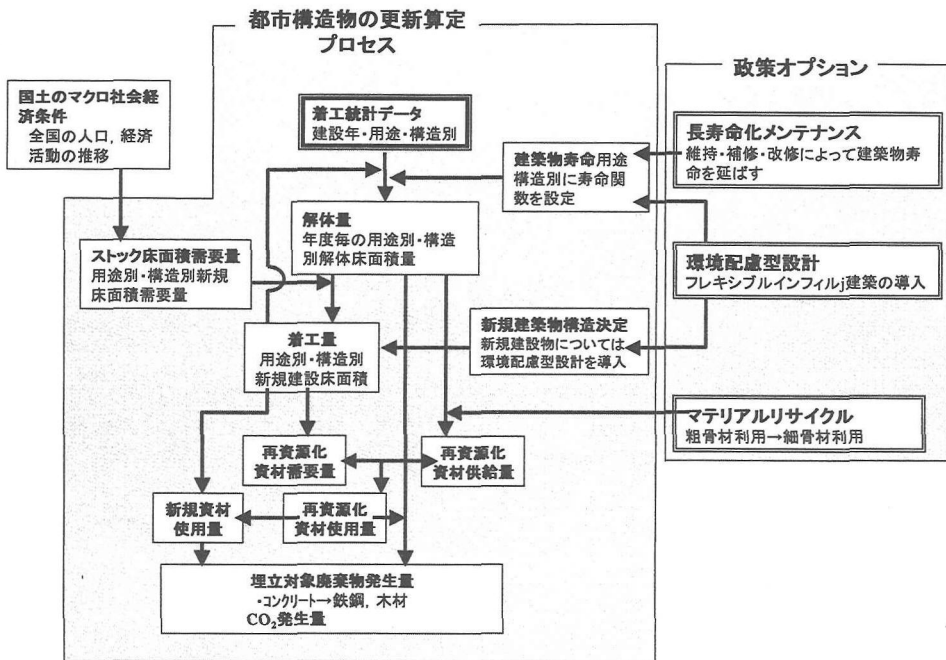


図3 製品連鎖マネジメントの政策オプションの評価システム全体構造

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できるものとする。図3に計画と評価の全体フレームを示す。

(2) 構造物更新の計算条件の設定

構造物更新の算定は、構造をS造、RC造、SRC造、木造の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種類に分けておこなう。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ことからGDPの将来予測にもとづいて算出する。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。ストック需要量における用途割合の変化や同じ用途内での構造種割合の変化については、結果に対する影響が小さいという判断の下で一定と扱った。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¹⁷⁾の研究を参考にした(表1)。

表1 寿命関数の設定

用途	構造	従来型		環境配慮型設計		長寿命化メンテナンス	
		平均寿命(年)	分散	スケルトン	インフィル	スケルトン	インフィル
一戸建て住宅	W	47.2	910.8	60.0	20.0	60.0	20.0
	SRC			一戸建て住宅RCの値で代用			
	RC	40.3	130.9	100.0	20.0	60.0	20.0
	S	31.7	109.2	100.0	20.0	60.0	20.0
共同住宅	W	36.9	356.5	60.0	20.0	60.0	20.0
	SRC			共同住宅RCの値で代用			
	RC	51.0	374.9	100.0	20.0	60.0	20.0
	S	29.0	75.1	100.0	20.0	60.0	20.0
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	36.2	185.3	100.0	20.0	60.0	20.0
	S	28.9	160.6	100.0	20.0	60.0	20.0
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						

(3) 政策オプションの設定

a) 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。木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¹⁴⁾。木造の構造物の平均寿命は、構造材(スケルトン)60年、内装設備材(インフィル)20年と設定する¹⁵⁾(表1)。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、既存の適用事例における実績値をもとに、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%増加すると
の前提をおいた¹⁹⁾。環境配慮型設計を導入しない通常の
構造物における資材使用量原単位については、参考文献
を参照されたい¹⁹⁾。

b) 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により
建築物の環境効果を評価する。建設大臣官房官庁営繕部
が建築物のライフサイクルコストを算出する際に用いた
計画更新年数をもとに、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²⁰⁾。また、長寿命
化メンテナンスに伴い発生するCO₂発生量を、適用事例
の実績値をもとに、表2のように設定する¹⁹⁾。

表2 長寿命化メンテナンスに伴う用途別
CO₂発生量 (kg-CO₂/年・m²)

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

c) マテリアルリサイクル

構造物の解体に伴い発生したコンクリート塊について、
前章の図2で述べた偏心ロータリーによってすりもみ処理
による再生骨材製造をする、マテリアルリサイクルの環
境効果を算定する。廃棄物の処分量を削減するとともに、
再生骨材として利用することにより新規骨材の使用量が
減少する。設備の稼働に伴う消費エネルギー量を、実験
結果に基づいて3kW/tと設定している¹⁵⁾。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. 製品連鎖マネジメントの政策オプション導入 による環境改善効果

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
て国土を対象に試算を行う。

(1) 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4に、S造、RC造、SRC造、木造別の構造物スト
ック需要量の推移を示す。図5に従来型更新における解
体量の推移を示す。図6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、ストック需要
量は2010～2020年においてピークをむかえるのに対し
て、解体量は2020～2030年においてピークをむかえる。

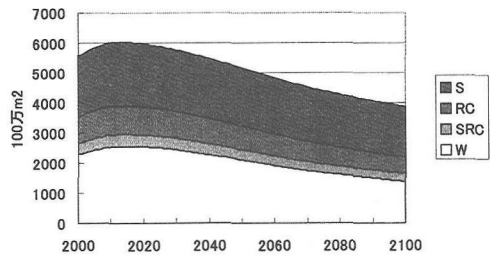


図4 スtock需要量の推移

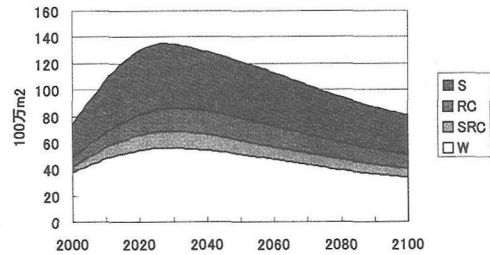


図5 従来型更新における解体量の推移

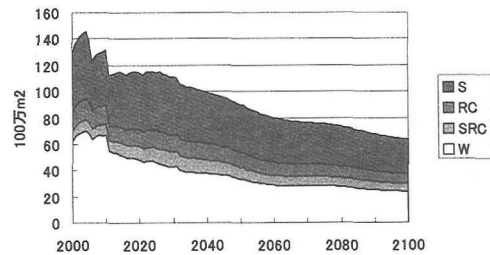


図6 従来型更新における着工量の推移

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を始めとする環境問題
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。

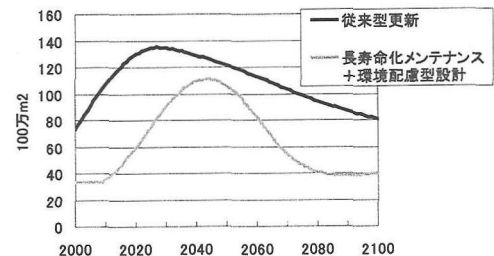


図7 政策オプション導入による解体量の変化

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る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により削減することができる。(図7)

長寿命化メンテナンスと環境配慮型設計を組み合わせる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8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。

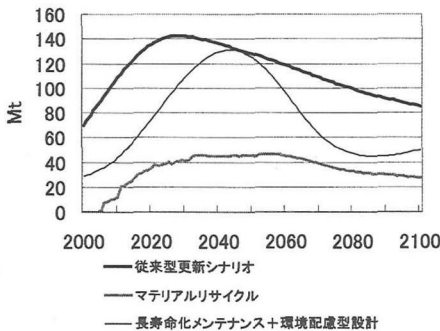


図8 最終処分廃棄物量の推移 (コンクリート)

(2) 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、従来型更新を含めて6つのシナリオを設定し(図9)、シナリオ間での環境改善効果をライフサイクルCO₂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10、図11)。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、最終処分廃棄物量を100年間の合計で81%削減できる。最終処分廃棄物量に関しては、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

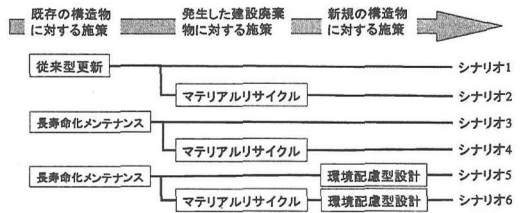


図9 政策シナリオの構成

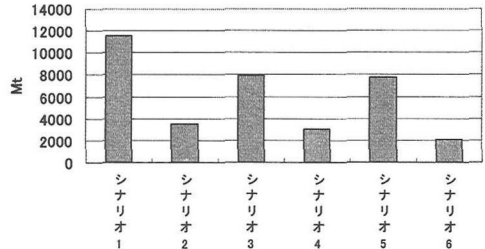


図10 政策シナリオ別のコンクリート塊最終処分廃棄物量

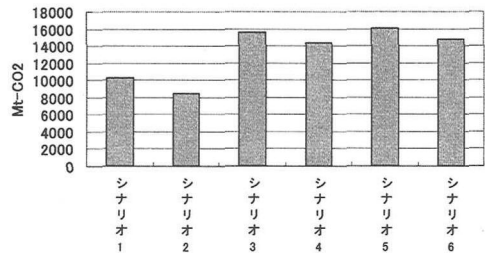
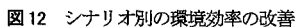


図11 政策シナリオ別のLCCO₂発生量

イクルCO₂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、4章で示したように、環境配慮型設計を導入する際に資材使用量が増加すること、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ることにより、CO₂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CO₂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やその導入対象とする領域の設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LCCO₂発生量への影響との関係を明らかにするため、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12に示す。製品連鎖のプロセスで生産される財やサービスの価値に対する、その過程で発生する環境負荷比を、技術や社会システムの評価指標とする環境効率²¹⁾を計算するために、2001



6. 結論

謝辞：本研究は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术の開発」（研究代表 盛岡通）の一環として行われ、研究を進めるに当たりその支援を得た。ここに記して感謝の意を表します。

³⁾ 天野耕二, 牧田和也: 舗装発生材のリサイクルによる二酸化炭素削減効果の算定

21) 山本良一監訳：エコエフィシエンシーへの挑戦，日科技連，1998 (L.D.DeSimone and F. Popoff with the WBCSD: ECO-EFFICIENCYJUSE PRESS,LTD,1997)

POLICY PLANNING AND ESTIMATION SYSTEM FOR PRODUCT-CHAIN-MANAGEMENT OF
URBAN STRUCTURES; EMPIRICAL ESTIMATION FOR NATIONAL-SCALE POLICIES

Akito MURANO, Tsuyoshi FUJITA, Tohru MORIOKA, Masayuki KOIWA

The amount of construction wastes are estimated to increase steeply in the first half of the 21st century in Japan as a result of intensive urbanization during the last century. Alternative policies for management and renewal system to urban structures considering lacking landfill sites and increasing scarcity of natural resources are planned and their environmental effects are estimated by applying LCA methods. In this paper, an approach from the viewpoint of product chain management is applied for urban structures. First, alternative management policies of urban structures, such as building design for recycling, facility management, and material recycling for building wastes, are designed extending the concept of product chain management. Secondly, estimation process of different future building locational patterns is prepared. Finally, the environmental improvement effects are estimated for different management scenarios in the national scale.