

都市構造物起源のマテリアルフローバランスの将来予測に関する研究

Prediction of Future Material Balance related Buildings and Roads using GIS and System Dynamics

須永 篤子¹ 谷川 寛樹¹ 橋本 征二² 森口 祐一²

Atsuko SUNAGA, Hiroki TANIKAWA, Seiji HASHIMOTO, Yuichi MORIGUCHI

Abstract : Construction materials account for 51% (1.1 billion tons, 2000) of all material flow in Japan. Most of these materials are accumulated in cities as stock. In the near future, the stock will cause the new material flow as wastes. In the present study, MFA (material flow analysis) is applied to Kitakyushu City, and the material stock used for construction and roads is quantified via GIS (geographical information systems). The balance of material flow in the near future, 10-30 years, is estimated using GIS data. And also OPM (overflow potential map) is made for visualizing material balance. Further the balance of material flow in the long future, 30-100 years, is simulated using System Dynamics model. The main results are as follows: (1) The amount of material stock for construction and roads was 74 million tons in 1995. (2) In 2020, the amount of overage stock is expected to become 1.4million tons.

Keywords : Material Flow Analysis, GIS (Geographical Information Systems), System Dynamics, Urban infrastructure

1. はじめに

建築物や道路などの都市インフラストラクチャーの整備や維持には、莫大な量の建設資材やエネルギーが投入されている。循環型社会白書¹⁾によると、2000年における我が国の総物質投入量は21.3億トンと推計されているが、うち11.5億トン(53%)が建造物などの形で蓄積されており、その大部分は都市構造物として都市内にストックされている。

蓄積された都市構造物は、維持・整備を繰り返し都市内に滞留し続けるが、耐久期間を過ぎると解体され、廃棄物として排出される。建設廃棄物の排出量は、全産業廃棄物排出量4億800万トンの約2割(7900万トン)²⁾を占めている。今後、高度成長期やバブル期にストックされた建設資材の更新時期が近づくと、廃棄物として大量のフローを引き起こすことが予測され、新たな対策が必要となってくる。

そこで、循環型社会形成推進基本方針が2000年に成立し、都市のマテリアルフローにおける新しい政策が始まった。建設資材に関しては「建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律(建設リサイクル法)」が制定され、建設廃棄物の抑制とリサイクル率の向上を図っている。この政策により、構造物の維持更新、解体により排出された廃棄物は建設副産物となり、再生資材として主に道路の路盤材に使用されることによって、社会の中に再びストックされるようになった。しかし、耐久期間の過ぎた都市構造物によって引き起こされる廃棄物量の増加や、建設副産物の主な受け入れ先となっている道

路の新規建設の減少により、現段階で均衡を保っていたマテリアルフローバランスの崩壊が危惧される。

そこで本研究では、都市構造物のマテリアルフローバランスを推計し、将来予測することを目的とする。実際の都市を対象に推計を行うため、詳細なデータの入手が可能であった北九州市をケーススタディ対象都市とし、都市構造物の中で最も物質量の占める割合が大きいと考えられる建築物と道路を推計対象として、それらが引き起こすマテリアルバランスの変化の予測を行う。将来予測については、20年後までのマテリアルフローバランスの変化を見る短期的な予測と、100年後までの変化を見る中長期的な予測を行う。短期予測については、GIS (Geographical Information Systems : 地理情報システム) データにもとづき詳細な推計を面的に行う。さらにOPM (Over-flow Potential Map) を作成し、近い将来どの地域にフローの発生が集中するか、またその量と内訳を面的に定量化し、視覚化を行う。中長期予測については、SD (System Dynamics) を用いて、建築物と道路の建設および更新・廃棄に関わる社会構造をモデル化し、短期予測の結果をもとに将来の変化に関わるシミュレーションを行う。またBAU (Business As Usual) シナリオに加えて、建築物や道路の長寿命化のシナリオを導入し、マテリアルバランスのシミュレーションを行うモデルを構築する。本モデルを用いて、建築物と道路の長寿命化技術導入のタイミングが、都市構造物に関するマテリアルバランスに与える影響について考察を行う。

1 和歌山大学システム工学部

Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

2 (独) 国立環境研究所

National Institute for Environmental Studies

2 分析フロー

本研究の分析の流れを図1に示す。

短期的な予測に関しては、まず、都市内の家屋情報および道路情報に関するGISデータ³⁾を用いて、個々の構造物の属性データを抽出する。次に、構造別資材投入原単位を用いて、マテリアルストックを算定する。構造種別に設定した更新・解体サイクルをもとに資材別の排出量・排出年の推計を行う。さらに、建設部門におけるリサイクル目標値を設定し、現存の構造物が更新時期を迎える2020年までの短期的なマテリアルフローの予測を行う。

中長期的な予測に関しては、短期的な予測の結果をベースとして、更新および新規建設の構造物がどのような資材を用い、何年の耐久性能があるのかを考慮し、マテリアルバランスの変化を推計する(図2)。ここでは、今後建設する構造物を対象としているため、現存する長寿命技術の普及等を考慮し、2100年までを推計対象とする。この推計作業においては、建設および更新・廃棄に関する社会構造をモデル化するため、SDを用いて、中長期的な変化についてのシミュレーションを行う。本研究では、投入は解体に起因するものとする。そこで、短期予測としてGISデータベースにもとづき推計した、2020年までの減少延床面積に応じた投入量を初めに設定する。つまり投入側としては、2000年以前に解体された分、つまりGISデータベースより推計された量と、2000年以降にそれらが投入される新たに解体された分を加算したものを投入量となるようにSDモデルを構築し、長寿命化技術導入などのシナリオを設定し、将来排出される廃棄量の中長期的変化を予測する。

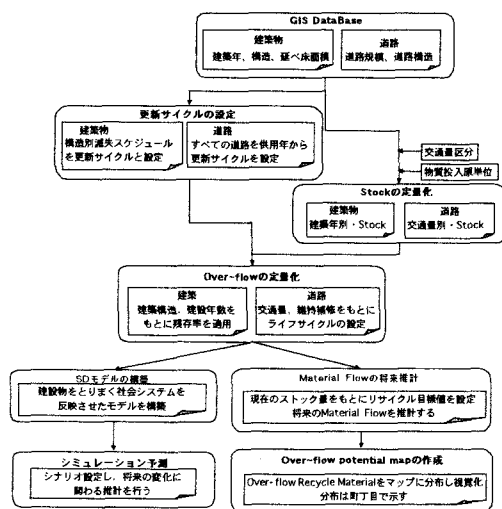


図1 本研究におけるフロー図

3. GISデータにもとづく短期的な将来推計

3.1 滞留年数別のマテリアルストックの定量化

都市の家屋情報および道路情報に関するGISデータ³⁾にもとづき、都市構造物(建築物・道路)に関する滞留年数別のマテリアルストックの定量化を行う。

建築物におけるマテリアルストックの定量化は、小倉北区、小倉南区、門司区、戸畑区、八幡東区、八幡西区、若松区の7つの行政区別のGISデータから構造別・建築年数別延床面積を抽出し、表1に示す構造別物質投入量原単位を乗じることによって推計する。更新サイクルに使用する建築物減失スケジュールについては、電力中央研究所⁴⁾の推計したパラメータを用い、築年数と構造別延床面積をもとに推計される。本研究ではSRC造とRC造は同一の減失スケジュールとし、図3に建築物構造別残存率を示す。

道路に関するマテリアルストックの定量化は、道路規模と道路構造、交通量をもとに推計を行う。道路規模についてはGISデータより道路延長、幅員を取得し、道路面積を割り出す。さらに物質投入量原単位⁵⁾⁶⁾を乗じ、ストックを推計する。高速道路、都市高速道路、国道、県道は、道路構造として高級アスファルト舗装を用いてい

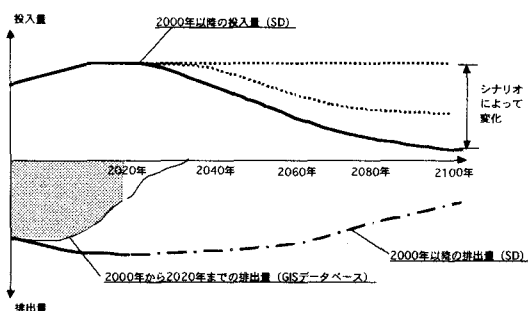


図2 本研究におけるマテリアルバランスの予測フレーム

表1 構造別建築資材投入量原単位 (kg/m²)

	L/m ²	砂利	石粉	木材	セメント	陶磁磚	鉄	その他
木造、住宅	0.4321	0.1317	0.0743	0.0627	0.016	0.013	0.013	0.013
5層未満所	0.521	0.001	0.0946	0.015	0.183	0.023	0.023	0.023
RC高層所	1.4485	0.0047	0.2737	0.0334	0.1467	0.0283	0.0283	0.0283
SRC高層所	1.273	0.0209	0.2468	0.0237	0.1315	0.0223	0.0223	0.0223

N.A.: Not available

表2 従来型舗装原単位 (kg/m²)

舗装工法	交通量区分	従来型		アスファルト		セメント		水硬性スラグ		クラック		下層部		合計
		厚さ	材料	厚さ	材料	厚さ	材料	厚さ	材料	厚さ	材料	厚さ	材料	
L.A.改良	道路幅員	118	110	8	212	510								840
	道路幅員	118	110	8		520	406							1046
	道路幅員	235	220	15	416	104								557
	道路幅員	235	220	15		416	406	210						1269
舗装舗装	道路幅員	353	330	23		406	115							1076
	道路幅員	353	330	23		416	306							1076
	道路幅員	475	435	31		705	406	630						1571
	道路幅員	475	435	31		705	406	630						2235

表3 維持補修原単位 (kg/m²)

舗装工法		各層資料名	表層				上層部		下層部		合計
			表層厚さ	砕材 (単位厚)	アスファルト	セメント	水硬性ス ラグ	グラブ シヤ 等	松葉砂 石	切込 み砂利	
縦断修補 オーバー レイ	表層修補厚さ	117.5	109.9	7.6	—	—	—	—	—	117.5	
	表層修補厚さ	94.0	87.9	6.1	—	—	—	—	—	94.0	
	表層修補厚さ	70.6	66.0	4.6	—	—	—	—	—	70.6	

※数字は補修する表層の厚さを示す 単位(cm)

るものとし、推計を行う。また、市道に関しては、幅員10m未満のものを簡易アスファルト舗装、幅員10m以上のものを高級アスファルト舗装とする。幅員について、市道は個々の道路に関して情報が得られたが、高速道路、都市高速道路に関してはデータがないため、一般的な規格から高速道路は1車線を5m（5車線20m）、都市高速道は1車線を4m（4車線16m）と仮定する。交通量区分については、高速道路と都市高速道路はD交通、国道、県道、市道（幅員10m以上）についてはB交通、市道（幅員10m未満）についてはL、A交通とした。道路の更新では、すべての道路が共用年から一定の周期で維持補修が行われるものと仮定し、道路建設後10年ごとに建設時と同じ構造を保つように、切削オーバーレイ工法を用いて維持管理を行うものとする。

3.2 マテリアルバランスの定量化

建築物起源の排出量は、構造別の減失スケジュールを用いて、2020年までの構造別減失延床面積の推移を求め、資材別排出量を推計する。高度経済成長期やバブル期にストックされた都市建造物の多くが2020年までに更新時期を迎え、この時期を境に2000年以降に建設された建造物の排出が増加すると考えられるため、現在のGISデータを用いた短期的な予測の期間を2020年までとした。

道路起源の排出量については、共用年から10年ごとに維持補修を行うものと設定する。本研究では、従来型の維持補修として切削オーバーレイ工法を用いるものとし、表層補修の厚さを5cmとした。また、L、A交通と設定した市道（幅員10m未満）は、薄層オーバーレイ工法を用いるものとする。維持補修原単位については表3に示す。

3.3 マテリアルバランスの視覚化

2020年までの排出量および再利用量をGISに反映させることで、OPM（Over-flow Potential Map）を構築する。OPMとは、建築物、道路を解体した時に発生する排出量から、再生資材としてリサイクルされ再び同じ地域に滞留する量を差し引いたもの、つまりオーバーフローの量を、地域（丁目目）ごとに表示したものである。OPMにより、マテリアルバランスを面的に把握することが可

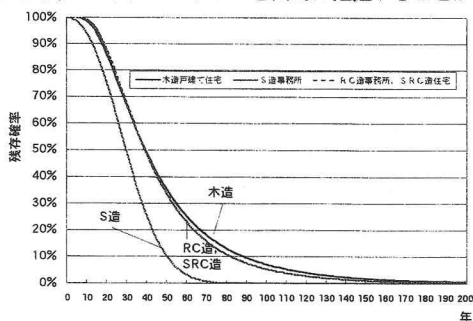


図3 建築物構造別減失スケジュール

能となり、短期的なマテリアルバランスの予測結果を効果的に伝えることができる。2020年までのマテリアルバランスの予測結果を視覚的に表すOPMを図4に示す。小倉北区、八幡西区といった集積率の高い地区では、更新サイクルが集中するため、大量の建設副産物が発生し、受け皿として道路の維持補修だけでは困難な状態となることがわかる。

4. SDを用いた中長期的な将来推計

4.1 都市構造物に関するSDモデル

建築物解体によって排出された廃棄物は、中間処理施設に送られ、再資源化されることによって路盤材として道路に使用されている。道路に一時的に蓄積された再生資材は、道路更新後は再び廃棄物となって道路から排出され、再資源化を繰り返していく。これらを表す社会システムを図5に示し、システムを構築する上でのフレームワークとする。ここで、システム全体ではフィードバックループを構成しており、各要素間を結ぶ「正の関係」とは、一方の要素が増加すると影響される要素も増加する関係を示し、「負の関係」とは、一方の要素が増加すると影響される要素は減少すること示す。

なおモデル構築にあたっては、視覚的に各要素間の関係構造を把握しつつモデリングすることが可能なSTELLA Research 5.1を解析ソフトウェアとして用いる。

4.2 建築物SDモデルの構築

一般に建築物は「建設」によって資材投入を伴い都市に投入され、「建築物」としてストックされていく。建築物は一定期間使用された後、ある確率に従って寿命を迎え、「解体」されて都市から排出される。

建築物として社会にストックされる時間は、寿命を迎えるまでの時間に依存し、この解体される確率を廃棄確率として、次のように想定する。

$$N = (\mu, s^2) \quad (1)$$

ここで、 μ : 平均寿命、 s : 標準偏差である。

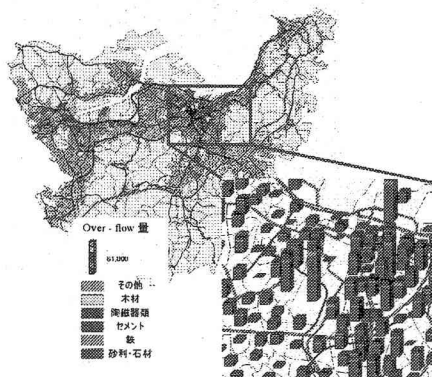


図4 Over-flow Potential Map (北九州市)

平均寿命付近で、全建築物の10パーセントが解体されるように正規分布を作成し、各年の投入量にこれに乗じることによって排出量を算出していく。なお今回使用した標準偏差 s は、「解体・リサイクル制度研究会報」が行った建築解体廃棄物発生予測⁷⁾で推定された3.989を用いる。

長寿命化を考慮し、耐久年数を変化させるシナリオを導入し、建築物解体に伴う廃棄物の推移が経年的に推計できるモデルの構築を行う。そこで、ある年代に排出される建築物起源の推計において、その年の廃棄物に含まれる、建築物耐久年数別の割合をあらかじめ設定し、年代ごとの平均耐久年数を平均寿命として廃棄確率を計算する。本研究では、構造種別による耐久年数の違いを考慮せず一律に30年とし、今後長寿命化技術が導入されることによって、耐久年数が50年、100年と変化していくように想定した。これらの長寿命化技術を導入するタイミングとして、耐久50年技術は2000年に、耐久100年技術は2050年に導入されるものとし、導入年以降に建てられた建築物は、その耐久年を平均寿命とした廃棄確率に沿って解体されるものとする。また2000年以前に建設された建築物については、耐久年数を30年として推計を行う。

平均寿命をもとに、各年代の廃棄確率の分布を作成した。図8は図6で設定したシナリオにもとづく廃棄確率の推移を示している。経過年数ごとに見てみると、例えば経過年数30年の場合、2000年、2050年、2100年と経過するにつれて、建設後30年で解体される確率というのは、小さくなっていくことがわかる。これは時代が進むと共に長寿命化技術が導入され、建設後30年が経過しても、ほとんどの建築物が残っているということである。同じく経過年数100年の場合では、2095年頃までは廃棄確率はほぼ0であり、2100年近くから急激に増えている。これは2000年から2050年までの間では、建築物のもつ寿命が短いことから、建設後100年間もつ建築物は存在しないということである。2050年以降は耐久100年技術が導入されるので、建設後100年経過して解体される建築物が増加することを意味している。

ここで、本研究で作成したモデルの特徴として、投入された建築物は、ストック中で経過年数ごとに貯められていくことが挙げられる。ある経過年数ストックから次の経過年数ストックに流れる場合、流れる量のある割合だけが廃棄としてストック外に流れ、残りは次の経過年数ストックに貯められるという仕組みである。つまりここでの廃棄確率は、ある時間変化後の時点でのストック量にかけられることになる。しかし想定した廃棄確率では、投入量すなわち初めのストック量にかけられることによって排出量を算出ようになっていく。そこで作成した廃棄確率分布をもとに、前年のストックに対する比率を推計し、残存率として各経過年数ストックに組み入れる。

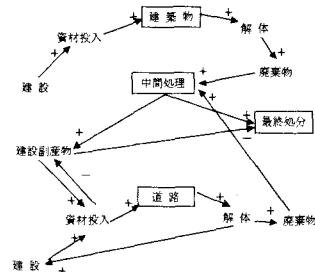


図5 都市構造を取り巻くシステム

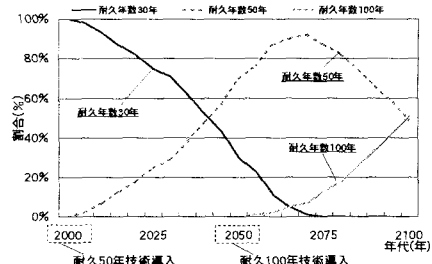


図6 廃棄物に含まれる建築物の耐久年数別割合

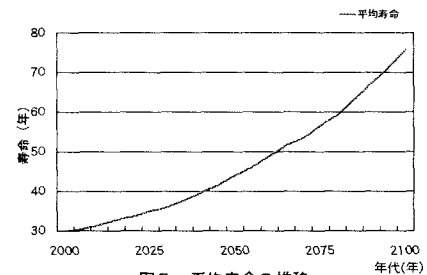


図7 平均寿命の推移

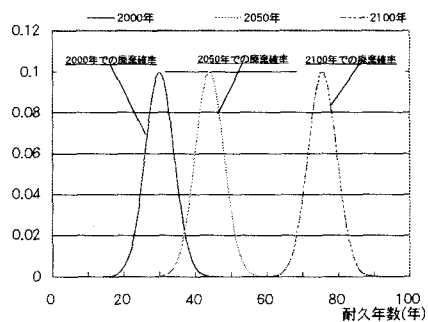


図8 平均寿命の変化による廃棄確率の推移

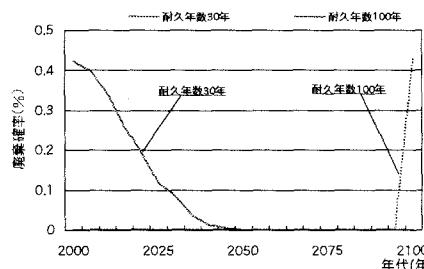


図9 耐久年数30年と100年における廃棄確率の推移

また本研究では、シミュレーション期間を2000年から2100年と長期間に設定したため、5年を1期間として推計を行った。そのため、t年における残存率は数式(2)のように表すことができる。

$$q_t = \frac{(1 - \sum p_t)}{(1 - \sum p_{t-5})} \quad (2)$$

ここで、 q_t とはt年における(t-5)年に対する残存率、 p_t とはt年における廃棄確率である。式(2)によって求まる残存率を、図10のモデルに当てはめていく。

4.3 中長期におけるマテリアルバランスの予測結果

本研究におけるシナリオを設定する際、その前提として、都市における建築物の総延床面積の推移は一定であると仮定した。都市人口の減少に伴い、必要とされる一人あたりの延床面積は減少すると考えられるが、ライフスタイルの変化に伴い1戸あたりの建設延床面積は増加することも考えられる。そこで、本研究では、都市への新たな投入となる「建設」による延床面積は、同時期の「解体」に伴う延床面積の減少を補うものとし、シミュレーションを行った。また、中長期予測は、GISデータにもとづく短期予測の推計結果(3章)をベースとし、投入側として、2000年から2020年までに減少が予測される延床面積を補う新規建設を計上し、排出側として2000年以降に建設された建築物の解体分を計上する。耐久年数については、4.2で述べたように長寿命化技術導入のタイミングをあらかじめ設定し、廃棄確率を変化させることにより、長寿命化がマテリアルバランスに与える影響を定量化する。道路モデルについては、建築モデルと同様に、都市への新たな投入はその年の維持修繕補修で減少した分を補うものとし、また維持修繕補修においては、表層部分だけでなく、全て新しく建

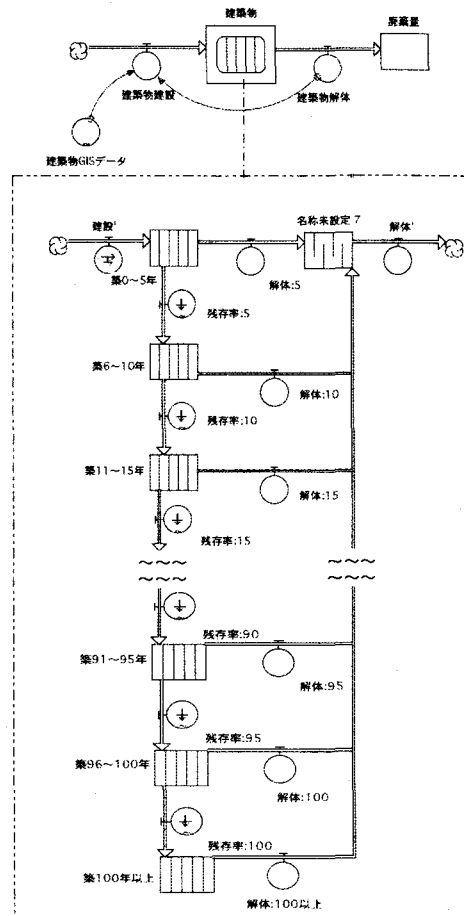


図10 作成した建築物モデル

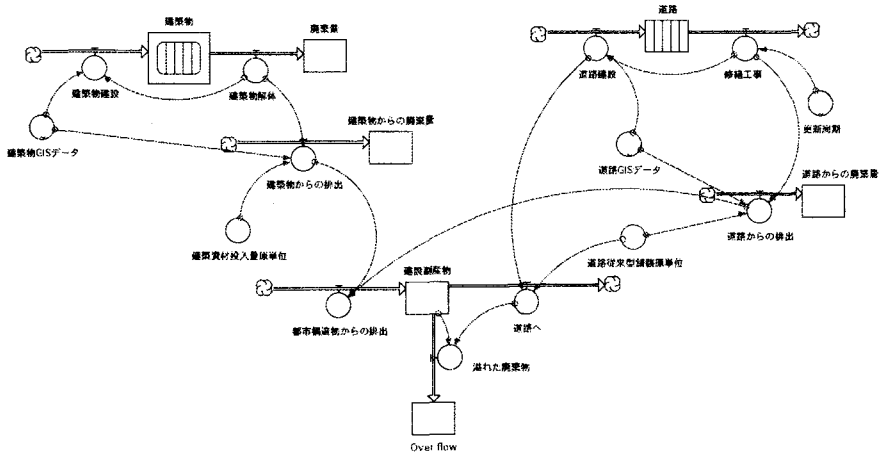


図11 建築物と道路構造を表したSDモデル

て替えるものとしてモデルを構築した。シナリオ設定においては、早期長寿命化の場合は、現在更新周期10年の所を2010年には更新周期30年とし、後に長寿命化技術を導入する場合は、2050年に更新周期が30年となるようにする。

構築した建築物と道路の関係構造モデルを図11に示す。構造物の長寿命化技術導入のタイミングを変化させたシナリオのもとで、2000年から2100年における排出量の変化の動きを予測した。ここで長寿命化技術を導入するタイミングを変化させ、次の3つのシナリオを設定する。

- (a) 現状維持シナリオ：長寿命化技術導入なし。
- (b) 建築物の長寿命化が先行し、道路の長寿命化が建築物の後に普及する。
- (c) 建築物、道路ともに同時に長寿命化する。

しかし、SDによるモデル化を行い、将来予測を行った結果、現状では、構築したモデルに次のような問題があることがわかった。本研究におけるシミュレーションでは、都市における総延床面積を一定にするため、都市に投入される「建設」量と「解体」量を等しくするとしたが、そのため、建築物や道路からの排出量が他の構成要素に大きな影響を与えてしまう結果となった。特に道路からの排出においては、道路の維持修繕補修は、すべて打ち換え工法により行われると仮定し、モデルの構築を行ったため、「建設された道路の維持修繕補修量」＝「初期道路建設で投入された量」となり、道路からの排出量が著しく増加し、都市構造物からの排出量のうち、道路による割合が高くなることがわかった。また発生する建設副産物のうち、道路に使用される物質量は、道路の新規建設および維持更新作業量に因ることと、建築物からの排出量の大部分が道路への投入量であることから、「道路への維持更新作業による投入量」＝「都市構造物からの排出量」となってしまう。そのため本論文で構築したモデルでは、道路モデルがモデル全体に適切に影響を及ぼすことができず、道路の長寿命化技術導入のシナリオ設定を行うことが困難であった。そこで、本論文では建築物モデルだけでシミュレーションを行い、長寿命化導入の有無による建築物からの移出量の変化を定

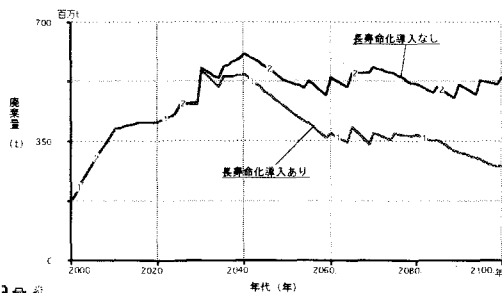


図12 長寿命化技術導入の有無による排出量の変化

化した（図12）。

5. まとめと今後の課題

GISデータにもとづく短期的な将来予測では、2020年に小倉北区、八幡西区において建設副産物の発生が集中することがわかった。また、OPMを用いて視覚的かつ面的にマテリアルバランスを把握することで、上記2区内において建設副産物の発生過多になる場所の特定をすることが可能となった。現在は道路が受け皿となり建設副産物を再資源として使用しているが、道路の維持修繕補修だけでは困難になることは明らかである。これらの区では膨大な廃棄量についての対策を講じなければならない。

SDを用いて行った中長期的な将来予測では、建築物の長寿命化が徐々に廃棄量に影響を与えることが明らかになった。今後、長寿命化技術を導入することにより、建築物から道路へと流れていく廃棄量を抑制できる。しかし、この現象は、建築物での物質の滞留期間を延ばすだけあり、いずれは再資源化先（たとえば道路）へ移動し、再滞留後、新たなフローを引き起こすため、都市の総物質フローを長寿命化技術導入だけで減少させるには長い年月が必要となる。

今後の課題としては、短期的な将来予測において、建設副産物の新たな受け皿として考えられている上下水道の設備や電力の供給設備なども推計対象に取り入れることが挙げられる。また、中長期予測においては、道路の長寿命化技術導入を考慮できるモデルを追加し、その導入タイミング別にシナリオを設定し、シミュレーションを行う必要がある。また、本論文における建築物モデルは、都市の総延床面積が一定であると仮定したため、都市内の建築物が解体された延床面積を補うもののみを投入要因とした。しかし、実際の社会システムでは、人口の増減や地価・住宅価格、金利や土地利用などの社会要因も大きな影響を与えていることから、それらを反映させたモデルを構築を目指す必要がある。

【参考文献】

- 1) 環境省：平成14年版循環型社会白書、2002。
- 2) 国土交通省総合政策局：建設リサイクルの推進について、2003。
- 3) 北九州市建築都市局：北九州市都市計画GISデータベース、1995。
- 4) 電力中央研究所：インフラストラクチャー整備のライフサイクル分析、p16、1997。
- 5) 建築業協会：我が国の建設分野における活動による環境付加と関連活動の実態調査結果および業界としての今後の活動方向について、1992。
- 6) 日本道路協会：アスファルト舗装要項、簡易舗装要項、1999。
- 7) 竹ヶ原啓介：都市再生と資源リサイクルー資源循環型社会の形成に向けてー、2002。