

都市構造物の整備に伴うマテリアルフローの経年変化に関する研究

Study on secular change of the material flow accompanying maintenance of urban infrastructure

穴見 淳也*・谷川 寛樹**

Junya ANAMI and Hiroki TANIKAWA

Abstract : The construction material is account for 48% (1.1 billion tons, 1995) of all material flow in Japan. Most of the construction material is accumulated as a stock in the city. And in the near future, the overage stock causes the new material flow as a waste. In this study, MFA (material flow analysis) is applied to Kitakyushu City, and the material stock of buildings and roads is quantified using the GIS (geographical information systems). The change of the material flow is then estimated for the near future. The Kitakyushu City was taken up as a case study city. The target materials of this estimation are iron, wood, sand and gravel, cement, and asphalt. In order to quantify future changes in material flow, the renewal cycle is set on based on the build year of any remaining structure. Material flow related roadways and building in 1970, 1995 and 2020 are estimated using statistic data and GIS data of roadways and buildings. The main results obtained herein 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 1.4 million tons.

Keywords : MFA (material flow analysis), Hidden Material Flow, GIS (geographical information systems)

1. はじめに

1.1 研究の背景と目的

現代の都市では、豊かな生活を支えるために建築物や道路などの都市構造物を整備・維持するために莫大な量の建設資材やエネルギーが投入されている。日本開発銀行¹⁾によると、わが国の1990年における総資源投入量は22.8億トンと推計されているが、そのうち11.0億トン(48%)は建設資材であった。また、投入資源のうちの13.0億トンが建造物や製品の形で蓄積されたが、その相当部分は都市内の構造物のストックとなっている。このように、投入資源の多くは、ストックとして都市に滞留するが、老朽化し不要となったストックは廃棄物として新たなマテリアルフローを引き起こす。近い将来、高度成長期に大量にストックされた建設資材が、耐久期間を過ぎ、廃棄物として新たなフローを引き起こすことが予想される。

一方、2000年に循環型社会形成推進基本法が成立し、都市のマテリアルフローにおける「下流側」の対策が整いつつある。建設部門においても、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)により、建設資材廃棄物の発生を抑制し、リサイクル率の向上を目指している。平成12年度の建設副

産物実態調査²⁾によると、排出量は、公共工事や建築着工戸数等の減少等により、9,900万トン(平成7年度)から8,500万トン(平成12年度)となり、約15%減少し、再資源化等率は、58%(平成7年度)から85%(平成12年度)に上昇している。しかし、今後、①耐久期間を過ぎた都市構造物の増大による廃棄物発生量の増大や、②再資源化された資材の主な利用先となる道路建設(路盤材などに利用)などの土木工事の減少を考えると、マテリアルバランスの変化を引き起こす可能性がある。つまり、当面の対策としては下流側の処理は重要であるが、大量リサイクル社会とならないためにも、長期的には「上流側」の対策が重要である。

そこで本研究では、都市内の構造物に蓄積されている物質量を建設年数別・資材別に定量化し、都市の将来におけるマテリアルフローの変化を推計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する。また、推計対象とする都市構造物として、都市内において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取り上げる。ここで、推計を行うためのツールとして、GIS

*和歌山大学大学院システム工学研究科 Graduate School of Systems engineering, Wakayama University

**和歌山大学システム工学部 Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

(Geographical Information Systems：地理情報システム)を用い、個々の都市構造物ごとに資材ストックの推計作業を行うことを可能とした。

2. 研究方法

2.1 本研究における分析フロー

本研究において都市構造物を対象としたマテリアルフロー分析の研究手順を図1に示す。まず、都市のGISデータ³⁾より、個々の都市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。次に、残存する構造物の建設年数をもとに更新サイクルを設定する。さらに、建築物着工データや道路延長といった統計情報も用いて過去から現在までの都市構造物に関連するマテリアルフローの推計を行う。これらの推計結果をもとにマテリアルフローの将来推計を行い、その変化を明らかにする。

推計に使用したGISデータベースの概観を図2に示す。

2.2 都市構造物のマテリアルストックの定量化

都市のGISデータより、個々の都市構造物の属性を抽出し、その構造・規模をもとに構造別資材投入原単位を乗じることで、各構造物の建設資材ストックを推計する。ここでは、統計情報との整合性を測るために、GISデータから7つの行政区（門司区、若松区、戸畑区、小倉北区、小倉南区、八幡東区、八幡西区）ごとの建設資材ストック量を集計する。

建設資材ストックは、以下の式を用いて推計を行う。都市内の個々の建築物、道路について、それぞれの建設資材ストックの積み上げにより資材蓄積量(Stock)の推計を行う。

$$Stock = \sum_n \sum_i (\gamma^{(n)} \cdot S_i^{(n)}) \quad (1)$$

ここで、Stock：評価対象域内における施設種 n （施設種とは建築物、道路、下水道などの都市構造物）の資材蓄積量、 $\gamma^{(n)}$ ：施設種 n の面積または延長距離あたりの建設資材投入量、 $S_i^{(n)}$ ：施設種 n の構造物 i の規模（面積または延長距離）である。

構造別資材投入原単位 $\gamma^{(n)}$ については、建築物および道路について整理を行った。表1に、施設別の構造別資材投入原単位を示す。以下に建築物と道路について、建設資材ストックの推計について詳細を記す。

(1) 建築物による資材ストックの推計

建築構造別の資材固定原単位は、建築業協会⁴⁾により推計が行われている。建築業協会は、積み上げ法により構造・建築用途別に11分類に分けて固定資源量を推計している。本研究においても、積み上げ法を

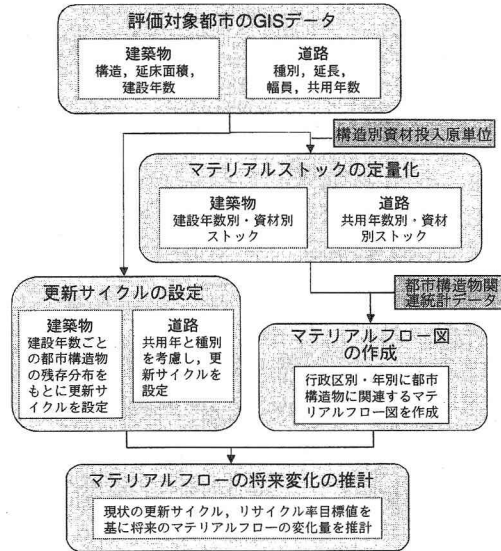


図1 本研究における分析フロー

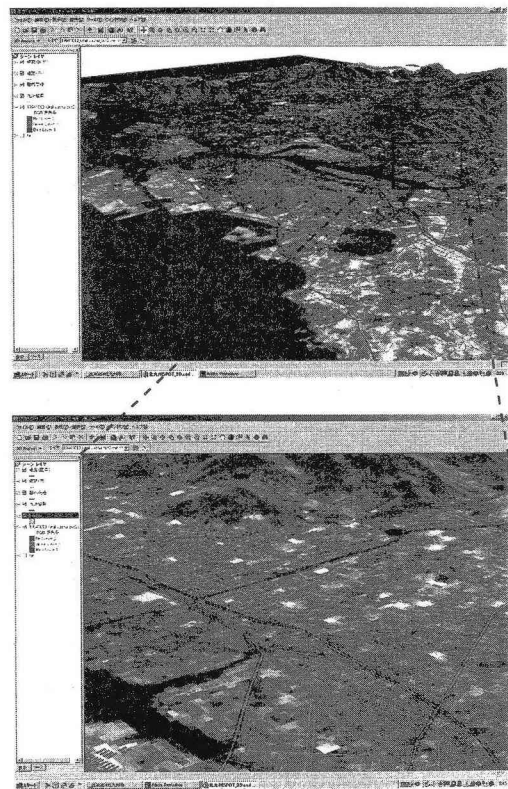


図2 推計に使用したGISデータベースの概観

ベースに推計を行うため、建築業協会の原単位を採用する。これらの原単位は、1985年の建築物を対象としたものであるが、建設年や規模により原単位が変化すると考えられる。しかし、橋本・寺島⁵⁾によると、建設基準法改正による鉄の使用量の若干の増加を除けば、1976年から1991年にかけて大きな変化はないと報告している。そのため、本研究では、構造別の資材投入原単位に関しては、変化はないものとして算定を行う。

建築物の建設資材ストックは、個々の建築物の構造にあった上記の原単位に、その延床面積を乗じることで推計を行う。1995年における北九州市全域の建築物の建築年次別ストックを図3に示す。

(2) 道路による資材ストックの推計

道路(高速道路、都市高速道路、国道、県道、市道)についても建設資材ストックを算定する際には、式(1)の通り、道路規模と道路構造から推計する。道路規模については、GISデータベース³⁾より、道路延長、幅員を取得できるため、これらより道路面積を算定し、ストック推計を行う。道路構造については、直接データを取得することは難しいため、仮定する必要がある。一般に道路構造は、高級舗装と簡易舗装に分けられ、それぞれ、アスファルト舗装要項⁶⁾や簡易舗装要項⁷⁾により、構造決定までのプロセスが細かく提示されている。この中で、道路構造を決定する大きな要因は、CBR、計画交通量であるが、個々の道路に対してこのデータを入手するのは非常に困難であるため、本論文では、次のように道路構造を仮定する。高速道路、都市高速道路、国道、県道の道路構造については、高級アスファルト舗装として建設資材ストックを推計する。また、もっとも面積割合の大きい市道については、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仮定する。

以上のように、建設規模(道路面積)と構造を特定し、構造別建設資材投入原単位を乗じることで、個々の道路ごとに建設資材ストックを推計する。北九州市における道路ストックの推移を図4に示す。自動車の普及に伴い、道路ストックが大幅に増加していることがわかる。1986年においてストックに著しい伸びがみられるのは、都市高速道路1号線、都市計画道路8号線が供用を開始したことによるものである。

表1 構造別資材投入原単位

t/m	砂利、石材類	木材	セメント	陶磁器類	鉄	その他
木造、住宅	0.4321	0.1317	0.0743	0.0627	0.016	0.013
S造事務所	0.521	0.001	0.0984	0.015	0.183	0.0223
R C造事務所	1.4485	0.0047	0.2737	0.0334	0.1467	0.0283
S R C造住宅	1.273	0.0209	0.2468	0.0237	0.1315	0.0225
高級舗装、幹線道路	0.565	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0.2350
高級舗装、支幹線道路	0.455	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0.1175
簡易舗装、専用道路	0.3185	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0.0940

N. A. : Not available

表2 建設素材のHMF原単位
(参考文献9より引用)

素材1tあたりのHMF	トン(t)	算出方法
粗鋼	2.38	輸入相手国での採掘(2.13t)+鉄鉄製造、粗鋼生産段階(0.25t)
コンクリート	0.14	セメント(0.14t)+コンクリート生産過程(0.01t未満)
木材	0.79	伐採(0.66t)+製材加工過程(0.13t)

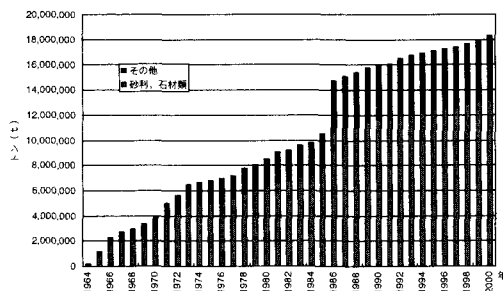


図4 北九州市全域道路ストックの推移

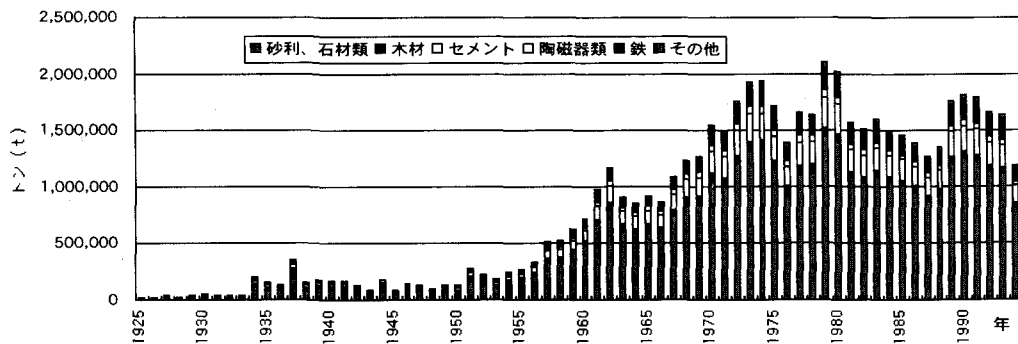


図3 建築年次別ストック(北九州市, 1995年)

2.3 建設資材製造に関するマテリアルフロー

建設資材製造に関するマテリアルフローに関しては、都市構造物の直接物質投入量DMI (Direct Material Input)⁸⁾に加え、主要な建設資材である鉄、コンクリート、木材について隠れたフロー量HMF (Hidden Material Flow)⁹⁾を考慮する。原単位については、森口⁸⁾、谷川・井村⁹⁾の推計結果にもとづいた。本研究で用いた建設素材のHMF原単位を表2に示す。

2.4 都市構造物の更新サイクルの設定

(1) 建築物

図1に示したとおり、統計データから取得した着工建築物の構造別延床面積と、1995年におけるGISデータをもとに集計した構造別・建築年数別・延床面積とを比較する。これにより、建築物の残存率を知ることができ、構造別の耐用年数を推計することができる。しかし、1966年(市政開始)以前の着工データは入手できなかったため、本論文では、既存研究¹⁰⁾に従い、建築物の構造別滅失スケジュールを信頼性理論にもとづく故障密度確率関数として対数正規分布およびワイブル分布に従うものとして推計する。なお、SRC造についてはRC造と同一の滅失スケジュールとする。表3に、建築物の構造別滅失スケジュールを求める際に用いたパラメータを、また図5に建築物構造別残存率を示す。

(2) 道路

道路の維持管理のための更新は、建築物と比べると計画的に行われている。道路の老朽化は、主にその構造と交通量に影響される。しかし、2.2(2)で述べたように、計画交通量及び実際の交通量のデータを今回入手することができなかったため、すべての道路が供用年から一定の周期で計画的に維持、補修が行われるものと仮定した。道路建設後10年ごとに、建設時と同じ構造を保つよう、表層打ち換え(切削オーバーレイ)工法を用いて維持管理工事を行うものとする¹¹⁾。

2.5 マテリアルフローの将来推計

2.4の更新スケジュールをもとに、建築物と道路に関して建設資材ストックと更新による物質投入量を定量化することができる。また、既存研究⁹⁾より物質投入に伴い発生する隠れたフローも推計し、これらの推計値をもとに、建築物と道路の整備によるマテリアルフローが、今度どのように変化していくのか考察する。具体的には、1970年、1995年におけるマテリアルフローを定量化し、2020年におけるストック老朽化に伴うマテリアルフローの変化を推計する。

2001年以降の建築物、道路着工床面積を1995年から2000年までの着工統計より回帰分析を用いて予測し、1995年の都市構造物ストックをもとにそれ以後の新規着工、解体、維持補修を積み上げることによ

表3 建築物の構造別滅失スケジュール推計に用いたパラメータ(参考文献10より引用)

用途・構造	分布系	50%滅失年数	パラメータ値
木造戸建住宅	対数正規	38.98	$\mu=3.662955$, $\sigma=0.6368878$
S造事務所	ワイブル	29.29	$m=2.367776$, $\eta=36.14284$, $\delta=-1.672601$
RC造事務所	対数正規	38.72	$\mu=3.656244$, $\sigma=0.5834942$
SRC造住宅	RC造と同じとする		

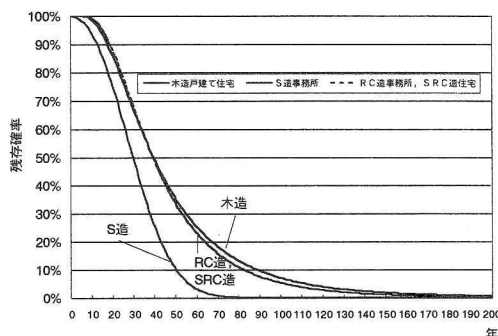


図5 建築物構造別残存率

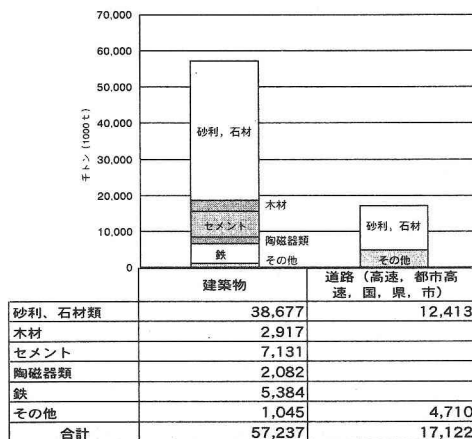


図6 建設資材ストック(北九州市全域,1995)

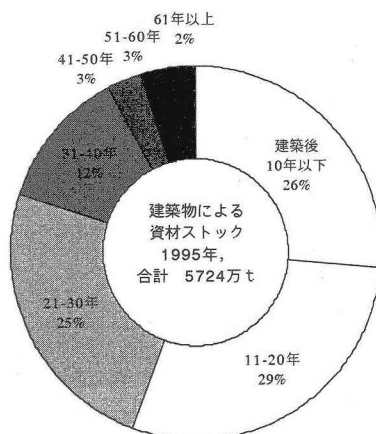


図7 建築物による資材ストックの経過年数(1995)

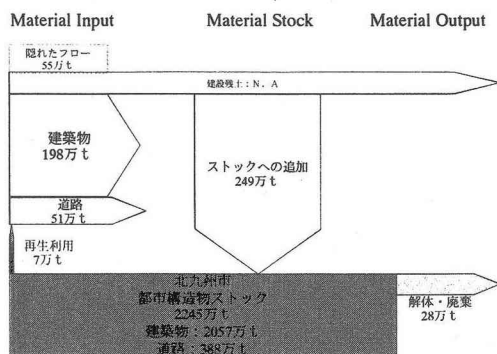


図8 建築物、道路に関するマテリアルフロー (1970年)

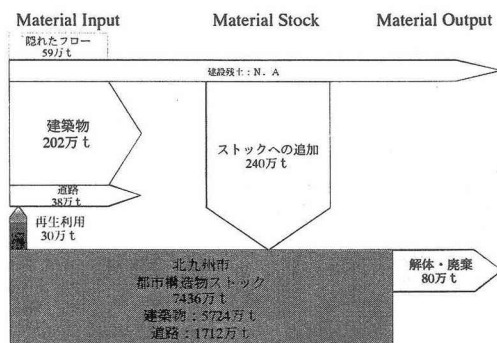


図9 建築物、道路に関するマテリアルフロー (1995年)

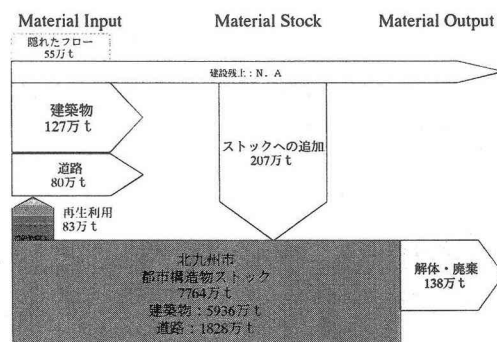


図10 建築物、道路に関するマテリアルフロー (2020年予測値)

て、2020年の建築物、道路による都市構造物ストックを推計する。2020年の建築物、道路新規着工分と、道路の維持管理分を合計したものを物質投入量とする。廃棄量については、2.4 (1) の建築物減失スケジュールによる建設資材の廃棄量と道路の表層打ち換えに伴う廃棄量を合計する。建築物解体の際の建設廃棄物のリサイクル率は、参考文献⁽¹²⁾⁽¹³⁾より実態調査が開始された1990年以降のデータを用いる。1970年には26% (1990年九州地区実態調査)、1995年には37% (1995年九州地区実態調査)、2020年には60% (2000年九州地区目標値) を用いて推計を行う。

3. 推計結果

3.1 北九州市における都市構造物ストック

北九州市全体で建築物、道路に投入された建設資材によるストック量は、1995年では約7,400万tであった。その内訳は砂利石材が5,109万t、木材が292万t、鉄が538万tだった。また建築物については、建設後30年を越えている資材が全体の20%を占めていることがわかった。道路、建築物のストックにおける割合、またその内訳を図6に示す。また、建築物による資材ストックの経過年数の割合を図7に示す。

3.2 都市構造物の建設年数経過に伴うマテリアルフローの変化

北九州市における建設資材 (建築物、道路) のマテリアルフローを図8 (1970年)、図9 (1995年)、図10 (2020年予測値) に示す。

1970年 (図8) と1995年 (図9) を比較すると道路のストックが著しくのびている。これは、1980年代の高度経済成長期に北九州市の人口増加に伴い、道路網が急速に発展したことに起因していると考えられる。一方、道路の投入量は、新規建設が減り、維持、補修によるものが増加するため全体としては、暫減している。また、建築物による物質投入量は、図11を見てわかるようにRC造、SRC造の着工が増加し、

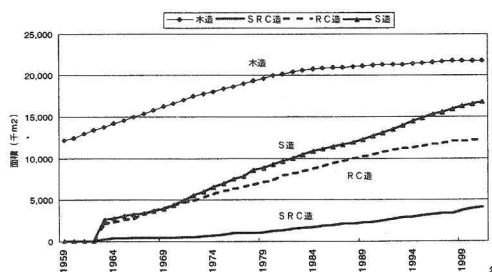


図11 建築構造別ストック床面積推移

砂利・石材、鉄の建設資材が用いられるようになったため、全体として増加している。

2020年(図10)では、都市整備がある程度整い、新規建設が減少し、ストックの増加率も緩やかに推移することが予想されるため、マテリアルフローの大きな変化は見られない。しかし、急速に発達した道路網の維持、補修に対して多大な物質投入が必要となってくる。道路の物質投入量(80万t)の52%が維持補修に起因するものである。1985年から1990年前後にかけて建設された建築物の寿命が集中し、それらの解体に伴い多大な廃棄フローが予想される。近年建築物の構造が、木造からS造、RC造へと移行しそれらのストックに占める割合が増加したことにより将来廃棄物の内訳も砂利石材が60%(1995年)から65%、鉄が8%(1995年)から12%へと割合が増加している。結果として、物質投入量に以前と比べ大きな差は見られないが、ストックからのフローが138万tに増加する。また、現在のリサイクル率をあてはまると、建築物の解体に伴い発生する83万tもの建設副産物の巨大な受け皿が必要となってくる。

4. 結論および今後の課題

本研究では、GISデータの積み上げにより都市構造物のマテリアルストックを定量化し、その建設、維持、補修等に伴い発生するフローの経年変化を推測した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

①対象地区として北九州市について、GISデータでのボトムアップアプローチによる建築物、道路ストックの推計を行い、建築物5,724万t、道路1,712万tのストックがあることがわかった。

②都市のマテリアルフローについて経年変化を予測し、2020年には物質投入量としては210万tのフローがあり、北九州市の社会資本ストックから都市構造物の解体、補修に伴い140万tの廃棄フローが考えられる。現在のリサイクル目標を満たすには80万tもの建設副産物の再生利用が課題となってくる。

③将来、都市構造物の解体に伴う建設副産物のフローに加え、維持、補修に対しての膨大な物質投入が必要となり、それに伴う建設現場での土砂移動などストックに対するフローの割合が増加する。

また、本研究の今後の課題は以下の通りである。

①複数年でのGISデータによる建築物、道路の更新サイクルの詳細化、検証を行い、マテリアルフロー将来推計の精度を上げる。また、データの信頼性を衛星情報を利用して把握する。

②構造、建築用途の多分類化、時系列での施工法の変化による物質投入量原単位の調整を行う。

③都市構造物の耐用年数、建設副産物のリサイクル率

が向上した場合でのモデル分けを行い、マテリアルフローの変化を考察する。

参考文献

- 1)日本開発銀行:建設系廃棄物の発生量予測とその対応策,第175号,1993.
- 2)国土交通省:平成12年建設部副産物実態調査報告書,2001.
- 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)建築業協会:我が国の建設分野における活動による環境負荷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の方向について,1992.
- 5)橋本征二,寺島泰:建築物解体廃棄物の原単位設定,廃棄物学会論文誌,10(1),pp.35-44,1999.
- 6)日本道路協会:アスファルト舗装要項,1999.
- 7)日本道路協会:簡易舗装要項,1999.
- 8)WRI,Wuppertal Institute, Netherlands Ministry of Housing, Spatial Planning, and Environment, and NIES: Resource Flows - The Material Basis of Industrial Economies, WRI,pp.66,1997.
- 9)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, No.671/ - 18, pp35-48, 2000.
- 10)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.
- 11)天野耕二,牧田和也:舗装道路の建設と維持修繕に伴う環境負荷とコストのライフサイクル評価, 土木学会論文集 Vol.657/ VII-16, pp57-64, 2000.
- 12)国土交通省:建設副産物対策行動計画<リサイクルプラン21>, 1994.
- 13)国土交通省:平成7年度建設副産物実態調査, 1997.