

都市構造物に関連したマテリアルストックの推計・評価に関する研究

Estimation and Evaluation of the Material Stocks Embodied in Urban Civil Infrastructures

谷川寛樹*・松本亨**・井村秀文**

Hiroki TANIKAWA*, Toru MATSUMOTO**, Hidefumi IMURA**

ABSTRACT: The material input per unit service (MIPS) is a concept presented by Schmidt-Bleek, as a useful index for discussing the design of new socioeconomic systems in which higher welfare level should be achieved with less input of energy and materials. In this paper, the concept of MIPS is examined by applying it to the material stocks embodied in urban civil infrastructures. Kitakyushu City is taken up for case study and the concept is applied to a small residential area and the entire municipal area. Firstly, the total weight amount of material stock in urban civil infrastructure and facilities such as sewerage system, road, buildings and houses are estimated. Then, the services provided by the input of material to each type of these facilities are quantified. In this estimation, GIS (geographical information system) is used to assist the analysis of the location and size of facilities.

KEYWORDS: resources and environment, material stock, material balance, material input per unit of service(MIPS), geographic information system (GIS), urban infrastructure

1. はじめに

都市内の土木・建築物のストックは、着実に増加している。都市機能の増強、維持・管理のためには絶えず大量の資材が投入され、これらは都市インフラストラクチャーとして膨大な量が蓄積されている。その結果として、様々なサービスが発生する一方、今後、土木・建築物のストックの老朽化とともに廃棄物発生量の増大が予想される。わが国の1990年における総資源投入量は、22.8億トンで、そのうち5割弱(11.0億トン)は建設資材である。さらに、13.0億トンが建造物や工業製品の形で蓄積されている^[1]。また、構造物別にみた一人あたりの資材使用量は、関東地方のデータ(1994年)を元に試算した例^[2]によると、建築物が最も多く51.0t/人、道路17.4t/人、都市ガス供給設備4.4t/人、上水道1.9t/人、電力供給設備1.9t/人となっている。社会資本として増加したストックは、耐久年数経過後に廃棄されることから、投入量(フロー)とそれに伴うサービスの増加を比較し、ストックの増加を適切な量に抑えることは、持続可能な都市システムを構築するために重要である。そのため、都市活動を支える土木・建築物について、物質・エネルギーのストックを把握することは必要である。これは、ドイツのヴッパタール研究所が提案しているTMI(Total Material Input:総物質投入)およびTMC(Total Material Consumption:総物質消費)の考えに共通するものである。

土木・建築物の建設・更新に関する既存研究としては、藤田ら^[3]が都市更新活動に伴う環境負荷を低減するシナリオをLCAを用いて設計している。伊藤ら^[4]は、新規団地建設に伴う環境負荷をLCAを用いて、エネルギー・CO₂排出量の面から評価を行っている。筆者らは、一連の研究で、都市の物質・エネルギー収支勘定の定量化^[5]、GISを利用したエネルギー消費、マテリアルストックの定量化^[6]を行ってきた。

本研究の目的は、①GISを用いたエネルギー消費/マテリアルストック推計を街区レベルから市域レベルに拡張し、②都市構造物整備に伴い発生するサービスの定量化を行い、③両者を比較することで評価を行うことである。具体的に①のエネルギー消費/マテリアルストック推計作業では、GIS都市情報データベースより、評価対象地区に対して土木・建築物データを抽出する。さらに、個々の都市構造物の面積や構造をもとに、直接/間接エネルギー消費量・建設資材消費量の原単位を利用して、評価対象地区のマテリアルストック・エネルギー消費量を推計する。②では、都市構造物整備に伴い発生するサービスは複雑で、すべてを完全に算定するのは困難である。そこで研究の第一段階として、客観的に判断しやすい旅客輸送量や居住面積といった、数量化が容易な指標を取り上げ、サービス発生量とする。③においては、MIPS(Material Input Per unit of

*和歌山大学システム工学部環境システム学科

*Department of Environmental Systems, Wakayama University

**九州大学大学院工学研究科環境システム科学研究センター

**Institute of Environmental Systems, Graduate School of Engineering, Kyusyu University

Service)概念を応用し、マテリアルストックと都市構造物が発生するサービスを時系列で比較し評価を行う。ここで、本来ならば更新のシナリオや新技術の導入による効果を評価するべきであるが、データ不足のため、本研究では現状での評価にとどめざるを得なかった。実際の都市での評価を行うために、ケーススタディ対象として北九州市を選び、街区レベルでのエネルギー消費・マテリアルストックの推計と、市域レベルでのエネルギー消費・マテリアルストックの推計及びその評価を行う。

2. マテリアルストック推計及び評価方法

2.1 評価フレーム

都市における社会資本整備に伴うマテリアル・エネルギーフローの概念と本研究における評価範囲を図1に示す。社会資本の整備は建設・運用・廃棄のプロセスで行われ、各ステージで物質とエネルギーの投入がある。社会資本整備によるサービスが発生するのは運用段階であり、そのサービスを維持、拡大するためには新たな物質/エネルギー投入が必要である。しかし、過度のマテリアル・エネルギー投入は、それに伴い発生するエネルギー消費と、多くの廃棄物、環境負荷を生み出すことになる。そこで、マテリアルストックとそれにより発生するサービスの関係を定量化し、物質投入量を最適にコントロールすることが、持続可能な社会の実現への鍵となる。

本研究では、街区レベルから市域レベルまでのマテリアルストックの定量化を可能にするため、GISと都市情報データベースを用いて、マテリアルストック推計システムの構築を行う。また、LCE(Life Cycle Energy)データを用い、マテリアルフローに伴うエネルギー消費量の推計を行う。ここで、LCEの推計に際しては、既存研究により明らかにされている原単位を用いる。

また、サービス量を定量化する手法として、利用回数や利用量といった物量的な指標を用いる量的評価と、アンケートなどにより利用に対する支払意思額を問うことにより利用価値を評価する質的評価がある。後者は、環境価値評価の研究分野において、CVM(Contingent Valuation Method: 仮想評価法)やコンジョイント分析といった手法が用いられている¹⁷⁾。

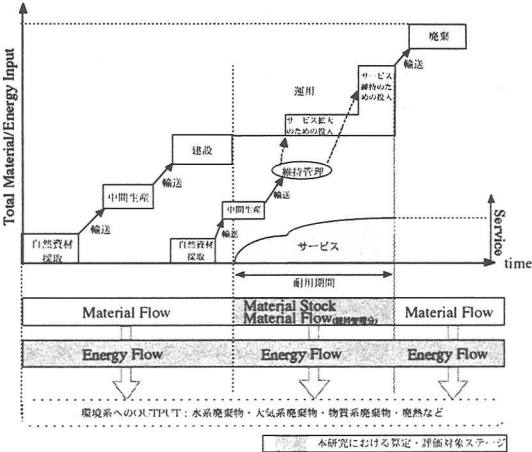


図1 都市構造物整備に伴うマテリアルフロー

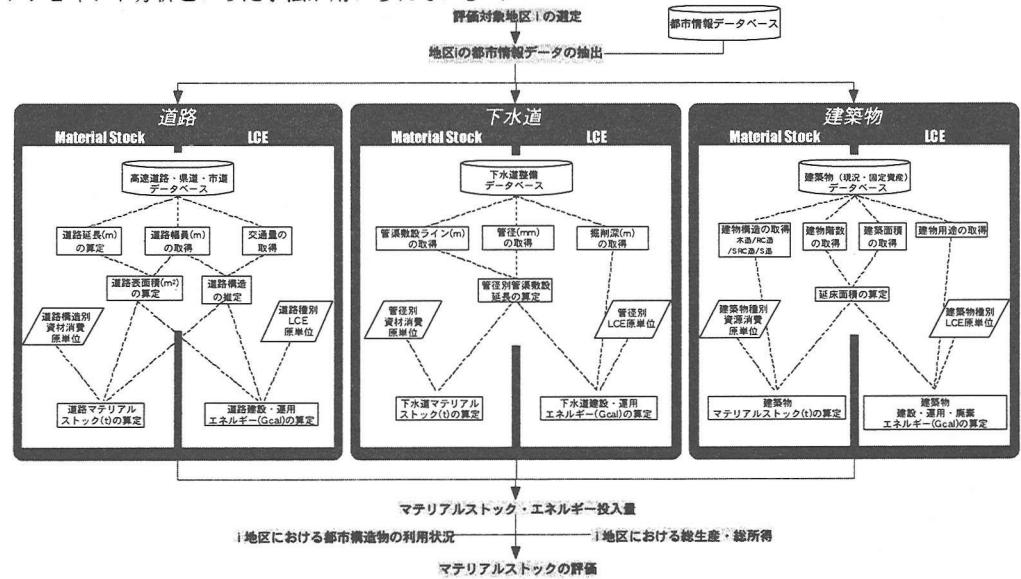


図2 マテリアルストック推計・評価方法

しかし、質的評価は地域や評価者の属性に影響される部分が大きく、評価基準として利用するにはその都度大規模な調査が必要となる。そのため、本研究では、客観性・汎用性に優れ、算定の比較的容易な量的評価をサービス量の定量化手法として用いる。

2.2 マテリアルストック推計方法

図2にマテリアルストック推計を行うための解析フローを示す。本研究では、田頭ら¹²⁾の推計により一人当たり資材消費量が多かった建築物、道路と、推計を行われていない下水道を取り上げ、マテリアルストックの推計を行う。まず、評価対象地区を選定した後、対象地区の都市情報を抽出する。その都市情報をもとに、道路、下水道、建築物のそれぞれのサブシステムにおいてマテリアルストック、エネルギー投入量の算定を行う。以下に道路、下水道、建築物のマテリアルストック推計サブシステムの算定方法について示す。

■道路：マテリアルストック算定では、高速道路・県道・市道のデータベース（図4）の中から、幅員・交通量等から道路構造を推定する。さらに道路構造別資源消費原単位と対象道路面積を乗じることにより、対象地区の道路マテリアルストックを推定する。また、エネルギー投入量は、幅員・交通量別にあらかじめケーススタディを行ったLCEデータから高速道路・県道・市道別に当てはめ、算定を行った。また、LCEデータでは、建設・維持管理・解体の3段階におけるエネルギー消費が考えられるが、都市インフラの場合、耐久年数が長く、解体・廃棄にあたる段階をライフサイクルの中で考えることは難しいため、ここでは建設と維持管理のみのエネルギー投入量を算定対象とする。

■下水道：マテリアルストック算定では、下水道整備データベース（図5）より、管径別の管渠敷設延長を取得する。さらに、掘削深と管径から資材に含まれる鉄量、エネルギー投入量を算定する。原単位としては管径ごとのLCE原単位を用いる。また、道路と同じく、エネルギー投入量は建設と維持管理のみ算定の対象とする。

■建築物：マテリアルストック算定では、建築物固定資産データベース（図6）より建物構造を取得し、建築物現況データベースより延床面積を取得する。さらに建物構造別資源消費原単位により建築物のマテリアルストックを算定する。エネルギー投入量に関しては、建築物固定資産データベースより建物用途を取得し、用途別エネルギー投入原単位と延床面積を乗じることによって算定を行う。

2.3 原単位の整理

マテリアルストック及びエネルギー投入量の算定において、道路・下水道・建築物のサブシステムで使用した原単位を表1に示す。時系列でマテリアルストックの評価を行う際、原単位も時系列で整理する必要があるが、現時点では資料入手が困難であるため、原単位は過去変化がないものと仮定して評価を行う。ここで、LCEの原単位に関しては、都市構造物のライフサイクルにわたって直接投入されるエネルギーと、間接投入されるエネルギー（ここでは、建設機材や建設資材の製造や流通段階で投入されるエネルギー）の合計値を耐久年数で除したALCE (Annual Life Cycle Energy: 耐用年数1年当たりのライフサイクルエネルギー)を用いる。

2.4 推計結果の評価手法

一般にマテリアルストックを評価する手法として、既存研究では、日本全国や都道府県レベルでの将来の廃棄物発生量の予測を行う方法などが行われている¹¹⁾。しかし、都市の適正なマテリアルバランスを考慮するた

表1 都市構造物のMaterial Stock及びLCE原単位

都市構造物		Material Stock (kg/m ²) (下水道のみkg/m)					Annual Life Cycle Energy (Mcal/m ² ・年) (下水道のみMcal/m・年)			耐用年数等	備 考	参考文献
		砂利・石材	木材	セメント	陶磁器類	鉄	その他	建設	運用	廃棄		
道路	高速道路	1,097	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	9	25	13	N.A.	20年（建設途） ・幅員26mの高級アスファルト舗装と仮定	Material Stock (8) LCE (9)
	都市高速道路	1,097	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	9	26	12	N.A.	20年（建設途） ・幅員19mの高級アスファルト舗装と仮定	
	国道・県道	1,097	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	9	26	12	N.A.	20年（建設途） ・幅員19mの高級アスファルト舗装と仮定	
	市道A	1,097	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	9	15	12	N.A.	20年（建設途） ・幅員10m以上高級アスファルト舗装と仮定	
	市道B	321	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	5	15	11	N.A.	20年（建設途） ・幅員10m未満簡易アスファルト舗装と仮定	
下水道	管渠・内径700mm	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	331	N.A.	20	39	N.A.	50年（管渠途） ・管渠分のみ使用（ポンプ場、処理場、汚泥処理施設は含まれていない） ・Material Stockはヒューム管によるもの	Material Stock/LCE (10)
	管渠・内径1000mm	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	669	N.A.	32	39	N.A.	50年（管渠途）	
	管渠・内径2000mm	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	2,344	N.A.	99	39	N.A.	50年（管渠途）	
建築物	住宅（戸建・木造）	939	162	93	116	39	23	27	5	2	30年	Material Stock (11) LCE (12)
	住宅（戸建・S造）	847	22	92	68	99	19	35	4	2	30年	
	住宅（集合・SRC造）	1,564	37	189	61	143	26	61	7	18	60年	

N.A.: Not Available

めには、資材採取から建設（生産）、運用、廃棄までの物質投入（Material Input）と、それにより発生する便益（Service）を比較することが必要である。本評価システムでは、GISを用いていることから、市や区、町丁目レベルでのマテリアルストックの推計を行うことが可能である。そのため、評価対象区域内にある都市インフラの発生する便益（サービス）や、便益により発生する生産・消費活動を把握することが比較的容易になる。物質投入量とそれにより発生するサービス量とを評価する概念として、MIPS(Material Input per unit of Service)⁶⁾ 評価がある。MIPSとは、製品の全生涯にわたるサービス単位あたりの物質集約度、すなわち、サービス単位や機能単位あたりの物質消費量（寿命期間中のエネルギー需要に必要な物質の流れも含む）を意味する。FriedrichSchmidt=BleekによるとMIPSは以下のように定義される¹²⁾。

$$MIPS = MI / S \qquad S = n \times p \qquad \cdots \textcircled{1}$$

ここで、MI：物質投入量、S：サービス発生量、n：利用回数（時間）、p：同時に利用する人数である。MIPSはサービスを提供する最終製品について定義され、最終製品の建造や製造のために使用される原料や補助材などについては適用されない¹²⁾。つまり、MIPSは、最終製品のライフサイクルにおいて直接投入される物質及び間接投入される物質すべてを評価する。本研究では、都市インフラにより構成される住宅地や商業地を都市機能（サービス）を提供する最終製品と見なし、サービス単位あたりの物質量の算定（MIPS 評価）を行う。MIPSはサービスが増加するに従って減少するので、MIPSカーブは0に近づく。都市インフラに代表される耐久年数が長い評価対象は、ストックとして長期間利用される。そのため、運用による物質投入があるので、運用開始後t年での物質投入量(MI)は以下になる。

$$MI = MI_{ini} + \sum MI_{run,t} \qquad \cdots \textcircled{2}$$

ここで、MI_{ini}：建設段階の物質投入量、MI_{run,t}：運用開始後t年の物質投入量である。土木・建築物が発生するサービスは多岐にわたり、波及効果も大きく、特定が困難であるため、本研究ではサービス量について、MIPSの定義に従い「何人がどれだけ利用したか」という指標をそれぞれの都市構造物のサービス量とする。具体的には、供用開始後t年目の道路についてのサービス量(Sroad,t)は、以下のようになる。

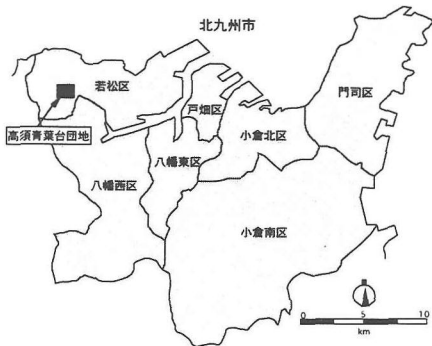


図3 解析対象範囲

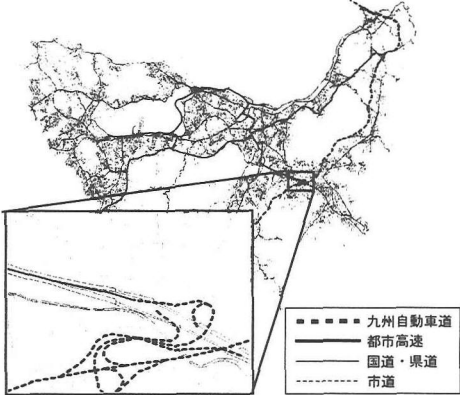


図4 道路GISデータベース

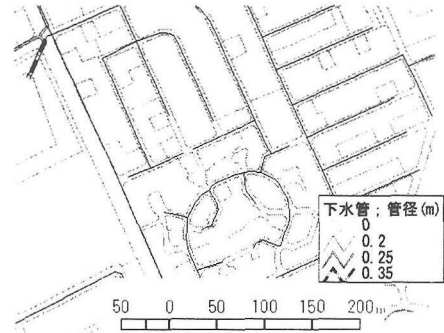


図5 下水道GISデータベース



図6 建築物GISデータベース

$$S_{road,t} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^P D_{i,t} \quad (t \leq E)$$

・・・③

ここで、E：道路の耐久年数、P：利用者数、 $D_{i,t}$ ：利用者iがt年に道路を利用した距離である。
式③の通り、本研究では、道路のサービス量として「道路利用年数×道路利用人数×道路利用距離」（単位は年・人・キロ）を用いる。この指標中の「道路利用人数×道路利用距離」（人・キロ）は明らかに旅客輸送量であるが、貨物輸送による道路利用については、「最終製品を対象」というMIPSの定義からすると、輸送された貨物は中間投入として扱うべきであるため、貨物輸送は本研究の対象外とした。詳細なサービス量の把握にはOD調査(origin destination survey)やPT調査(person trip survey)を用いて、対象地域内の旅客交通量を把握する必要がある。本研究では、小地域でのデータが得られなかったことから、道路のサービスとしての指標を、全国平均値から推計した自動車輸送量を用いる。自動車輸送量は、一車平均輸送量（全国値）を原単位として、対象地域の自動車保有台数から推計した年間の旅客輸送量である。

次に、建築物（住居）については、道路の場合と同様に、「何人がどれだけ建築面積を利用したか」という概念を定量化するために、築年数t年の建築物（住居）によるサービス量($Shouse,t$)を以下のように定義する。

$$Shouse,t = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^P A_{i,t} \quad (t \leq E)$$

・・・④

ここで、E：建築物の耐久年数、P：利用者数、 $A_{i,t}$ ：利用者iがt年に利用した居住面積である。

式③、式④において定義したサービス量 ($St: S_{road,t}, Shouse,t$) を用いて、運用開始t年後のMIPSは以下のように表すことができる。

$$MIPS = (MI_{ini} + \sum MI_{run,t}) / (St)$$

・・・⑤

この指標を用いてマテリアルストックの評価を試みる。

3. ケーススタディー ー北九州市への適用ー

ケーススタディ対象として、GISデータ等の整備状況を考慮し、北九州市を選定した。GISデータとしては、北九州都市計画情報システムのデータベースの中から建物現況データを、道路に関しては、高速道路・都市高速道路・国道・県道・市道のデータベースを用いた（図4）。また、下水道に関しては、評価対象地区の下水道設計図（マイクロフィルム）から、GISデータを作成した（図5）。また、時系列の解析において、GISデータは非常に少ないので、データを補うため、統計データ（平成6年刊北九州市長期時系列統計書、平成8年度版北九州市統計年鑑）を用いた。

3.1 街区レベルでのマテリアルストック推計及び評価結果

街区レベルでのマテリアルストックの推計例として、北九州市若松区高須青葉台団地を取り上げた。同団地は1980年代後半から建設が始まり、建設時からの道路・下水道・建築物のデータが残っていたことが選定理由である。評価地区の面積は南北1.5km×東西2.0km=3.0km²、平成9年の建築物数1757棟、居住世帯数2042世帯で典型的な新興住宅地である。評価

表2 高須青葉台団地におけるマテリアルストック・エネルギー投入量算定結果

都市構造物	マテリアルストック	エネルギー投入
建築物		
建設	378 × 10 ³ t	3,829 Gcal/年
運用	-	35,426 Gcal/年
解体	-	764 Gcal/年
道路		
建設	126 × 10 ³ t	4,347 Gcal/年
運用	-	3,446 Gcal/年
下水道		
建設	47 × 10 ³ t	840 Gcal/年
運用	-	675 Gcal/年
総計	551 × 10 ³ t	49,327 Gcal/年

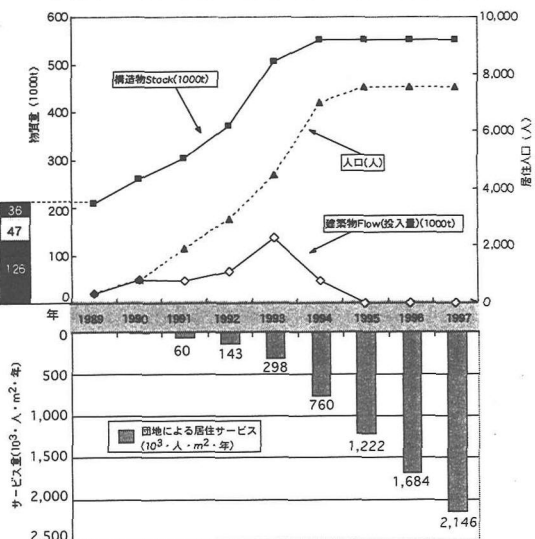


図6 高須青葉台団地におけるマテリアルストック・フローとサービス発生量の経年変化

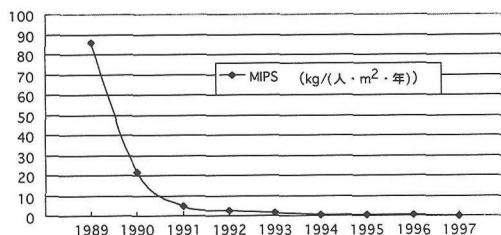


図7 高須青葉台団地におけるMIPSカーブ

対象期間は1989年から1997年である。

マテリアルストックとエネルギー投入量の推計結果を表2に示す。都市構造物によるマテリアルストックは $551 \times 10^3 \text{ t}$ 、ALCEは $49.3 \times 10^3 \text{ Gcal/年}$ であった。図6上部は、評価地域におけるマテリアルストックとフロー（投入量）、居住人口の経年変化を示したものである。対象地域は1989年から建築物の建設が始まったが、1989年の時点で道路・下水道が整備されていると仮定すると、建設初期では、既存建築物を含めて $210 \times 10^3 \text{ t}$ のマテリアルストックがあった。また、図6下部に示した棒グラフは、2.4で定義した団地による居住サービス量の推移である。ここでは居住サービスを取り上げているので、「何人がどのくらい利用したか」というサービスの概念を定量化するために、「居住年数×居住人口×居住面積」（単位は「年・人・ m^2 」）を用いる。団地の運用初期では、居住年数、居住人口、居住面積が少ないため、享受するサービス量が少ないが、運用開始7年後までは居住人口、居住面積が増加しているため、サービス量も急激に増加している。図7に、団地における構造物ストックを居住サービスで除したMIPSカーブを示す。居住サービス単位当たりのMIPSは、運用開始直後は $86.1 \text{ kg/年} \cdot \text{人} \cdot \text{m}^2$ であったが、その後のサービス量の急増から運用開始後2年で $5.0 \text{ kg/年} \cdot \text{人} \cdot \text{m}^2$ となった。本ケーススタディでは、団地の運用開始から9年間という短い期間しかデータが入手できなかったため、構造物更新における物質投入とそれに伴うサービス量の変化を算定することができなかった。今後、団地の維持・補修や居住面積拡張に伴う物質投入を行う際、複数の更新案によるサービス量を2.4で定義した方法で定量化し、今回算定したMIPSカーブの延長にプロットすることにより、環境に配慮した技術選択を検討する1つの指標を作成することができる。

表3 北九州市全域のエネルギー・物質投入量算定結果

都市構造物		マテリアルストック	エネルギー投入
建築物	建設	$122 \times 10^3 \text{ t}$	$1.68 \times 10^6 \text{ Gcal/年}$
	運用	-	$21.70 \times 10^6 \text{ Gcal/年}$
	解体	-	$0.33 \times 10^6 \text{ Gcal/年}$
道路	建設	$5.71 \times 10^3 \text{ t}$	$5.65 \times 10^6 \text{ Gcal/年}$
	運用	-	$0.06 \times 10^6 \text{ Gcal/年}$
総計		$128 \times 10^3 \text{ t}$	$29.42 \times 10^6 \text{ Gcal/年}$

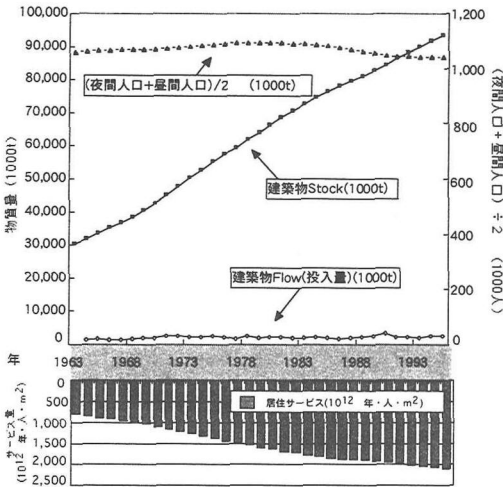


図8 北九州市域における建築物のマテリアルストック・フローとサービスの発生量の経年変化

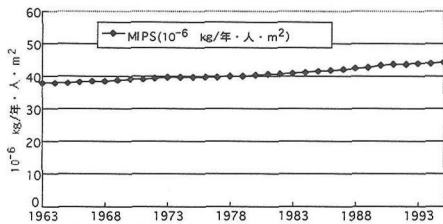


図9 北九州市域における建築物のMIPSカーブ

3.2 市域レベルでのマテリアルストック推計及び評価結果

前節より評価範囲を拡大し、北九州市全域でのマテリアルストック推計を行う。評価地域の面積は 482.95 km^2 、建築物数342,419棟、居住世帯392,623世帯、人口1,017,733人（平成8年）である。ここで、下水道データについては、入手が困難であった

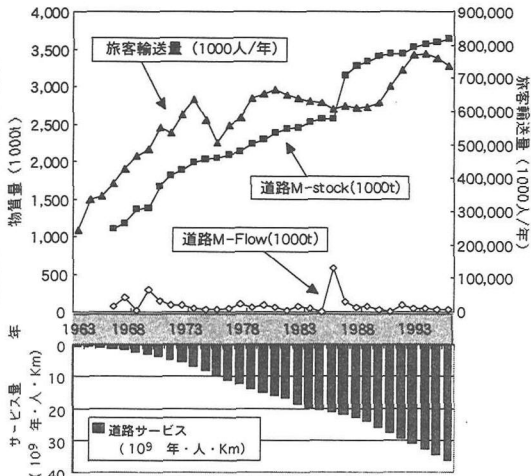


図10 北九州市域における道路のマテリアルストック・フローとサービスの発生量の経年変化

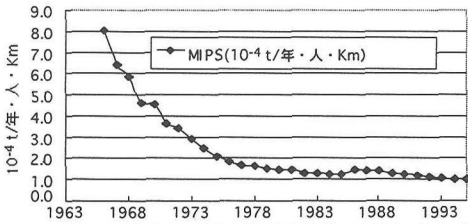


図11 北九州市域における道路のMIPSカーブ

ため除外し、評価対象を建築物と道路の2つに限定し算定を行なった。マテリアルストックとエネルギー投入量の推計結果を表3に示す。北九州市全体でのマテリアルストックは $128 \times 10^6 \text{t}$ （人口1人あたり126t）、インフラ整備に伴うエネルギー投入量は $2.94 \times 10^7 \text{Gcal}$ （人口1人あたり28.9Gcal）であった。

図8に、街区レベルの評価と同様に、建築物に関するマテリアルストック・フロー、人口の推移を示す。ここで、人口については、評価対象とする建築物が住宅だけでなく業務・商業施設も含まれることから、来訪人口を考慮し、昼間人口と夜間人口の平均を用いる。北九州市では建築物のストックは1963年以降、連続して増加しており、1996年のマテリアルストックは1963年の3.1倍である。その反面、人口はほとんど変化がみられない。図8下部に、2.4式④により算定されたサービス量の推移を示す。図9に北九州市の建築物を対象としたMIPSカーブを示す。サービス量（分母）の変化が少なく、投入量（分子）の増加が多い場合、MIPSはわずかに増加する。しかし、前節の新規団地建設のケーススタディと違って、業務施設や商業施設のような住宅以外の用途をもつ構造物が多いことを考慮しなければならない。北九州市のような百万人都市では、大規模な業務施設や商業施設の割合が高いため単位面積あたりのマテリアルストックが増加したこともMIPS増加の一因である。評価対象を建物用途別に細かく分類するか、都市構造物によるサービスを細分化することで、詳細なMIPS算定が可能である。

次に、道路を対象としたマテリアルストック・フローの推計結果と旅客輸送によるサービス量の算定を行った。ここで、サービス量としては、2.4で述べた通り、「何人がどれだけ道路を利用したか」というサービス量を定量化するために「道路利用年数×道路利用人数×道路利用距離」（単位は年・人・キロ）を算定した。ここで、「道路利用人数×道路利用距離」（人・キロ）は旅客輸送量であるが、詳細な輸送量の把握にはOD調査やPT調査が必要である。本研究では、道路のサービスとして輸送量を算定する際に、対象地域でのOD調査やPT調査のデータが得られなかったことから、代替案として、全国平均値から推計した自動車輸送量を用いる。本ケーススタディでは、全国の旅客輸送人キロ¹¹⁵を自動車保有台数¹¹⁶で除することにより、1台あたりの旅客輸送人キロを算定し、対象地区内の車種別保有台数を乗じることで、旅客輸送量（人・キロ）とした。さらに、道路利用年数は、その年の自動車平均使用年数¹¹⁶を用い、その値を旅客輸送量に乘じることで、道路の発生するサービス量とした。ここで、対象地区内で登録されている自動車を対象に算定しているの、対象地区での通過交通は評価の対象に含まれていない。この通過交通を把握するためには、前述の通りOD調査やPT調査が必要である。

北九州市における道路のマテリアルストックとサービス発生量の経年変化を図10に示す。計算結果として、市域全体の道路建設によるマテリアルストックは、1966年から1996年までの30年間で3.3倍になっていることがわかった。また、自動車の普及とともに道路のサービス量も増加し、同30年間で27倍になっていることがわかった。算定結果を用いて、道路のマテリアルストックを道路のサービス量で除したMIPSを算定したものが図11である。北九州市では、1966年から1985年までは道路利用の増大に伴い、サービス単位あたりの物質量は減少していたが、1985年から1986年にかけて新バイパスや新規建設道路が次々と供用を開始し、ストックが急激に増大したことにより、MIPSは一時的に増大したが、その後、サービス量も増加したことから、MIPSは減少に転じた。

4. まとめ

本研究では、GISを用いた都市情報データベースから、建築物、道路、下水道といった都市構造物を対象としたマテリアルストックと、都市構造物の整備に伴うライフサイクルエネルギーの推計システムの構築を行った。さらに、マテリアルストック推計値の評価を行うために、都市構造物によるサービス発生量を定量化し、MIPSという概念を用いて、マテリアルストック推計値の評価を行った。ケーススタディ対象として、GISデータ整備が進んでいる北九州市を選び、街区レベル・市域レベルにおいて、マテリアルストック・フロー量を推計した。さらに、推計量に対して、MIPS概念を用いた指標により、マテリアルストック推移の評価を行った。以下に本研究をにより得られた知見を示す。

(1) 面積3.0km²、居住世帯数2042世帯の新興住宅団地では、住宅地における都市構造物によるマテリアルストックは、 $6.56 \times 10^5 \text{t}$ であった。また、建築物（住宅）整備と利用によるMIPSカーブを作成することができた。今後、評価対象の団地において、維持補修や構造物更新を含んだMIPSカーブを作成する基礎を作ることができた。

(2) 同手法を面積482.95km²、人口1,017,733人（平成8年）の北九州市全域に適用した。その結果、北九州市全体でのマテリアルストックは $128 \times 10^6 \text{t}$ （人口1人あたり126t）であった。建築物を対象としたMIPS

値として、建築物のマテリアルストックと「居住年数×居住人口×居住面積」の推移を比較すると、新規建設団地の例とは正反対に、MIPSの値は増加しており、サービスの増加よりもストックの増加の方が大きいことがわかった。

(3) 北九州市全域の道路を対象とした推計では、1966年から1996年までの30年間で、マテリアルストックが3.3倍、道路のサービス量が27倍になっていることがわかった。

今後の検討課題として以下のことが挙げられる。

(1) サービスの定量化:MIPSを算定するに当たって、評価対象の物質投入量は定量化する事は可能であるが、そのサービスを特定することには慎重な議論が必要である。今回の算定では2.4に示した手法でサービスの定量化を行い、「何人がどれだけ利用したか」という概念を定式化した。しかし、式中に、居住施設整備による住みやすさや、道路整備による時間短縮効果といったサービスの質がこの指標ですべて表されているわけではない。そこで、居住年数の増加に伴う快適性の低下率や、道路拡幅や立体交差の導入による可能交通容量の増大率といった変数を式中に導入するなどの工夫が必要である。また、今回行った道路のサービス量算定において除外した貨物輸送のように、最終消費者が都市構造物を間接的に利用している場合、2.4で定義した算定式ではサービス量が評価されない。例えば、貨物輸送のための都市構造物(貨物鉄道や港湾)は多大なマテリアルストックがあるのに直接的にはサービスは発生しておらず、間接的にサービスを発生しているということになる。そこで、今回2.4で定義した方法に加えて間接的なサービス量を定量化する手法を検討する必要がある。

(2) 対象外の都市構造物:本論文で算定の対象外となった都市構造物(鉄道、上水道、電力供給施設、都市ガス供給施設、堤防・防波堤等)についても同様の算定を行い、都市構造物ごとのMIPSの傾向を国内外の複数の都市について調査し、比較を行うことでMIPSの絶対値についての検討を行うことが必要である。また、都市の特性を変数の一部として取り入れ、更新のシナリオや新技術の導入による効果をMIPSにより算定し、持続可能な都市づくりへの方向性を検討していくことが必要である。

(3) エネルギー集約度:本研究において、マテリアルフロー/ストックとエネルギー投入は表裏一体のものとして算定システムを構築した。その算定システムを活用した都市構造物の評価として、今回の論文ではMIPSの算定に主眼を置いたため、エネルギー投入量については総量を算定し、物質投入量に伴う総エネルギー投入量を算定するのみに留まった。今後、物質とエネルギーの両面からの評価を行うために、物質集約度に加えてエネルギー集約度とサービス発生量との比較を行うことを検討する必要がある。

【謝辞】

貴重なデータを提供していただきました北九州市役所の方々にここに記して感謝いたします。

本研究の一部は、科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業における「環境低負荷型の社会システム」研究領域(研究総括:慶應義塾大学 茅陽一教授)の公募研究「自立型都市をめざした都市代謝システムの開発」(研究代表者:東京農工大学 柏木孝夫教授)によった。

【参考文献】

- [1] 日本開発銀行:調査-建築系廃棄物の発生量予測とその対応策-,第175号,1993.
- [2] 田頭直人,鈴木勉,内山洋司:都市インフラストラクチャー構築の資源使用量と環境負荷,電力中央研究所報告,1996.
- [3] 藤田壮,盛岡通,酒井寛二,漆崎昇,中原智哉:都市更新に伴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,第三回エコバランス国際会議,pp.163-166,1998.
- [4] 伊藤武美,花木啓祐,本多博:ニュータウン建設における二酸化炭素排出量の概略推計方法の検討,環境システム研究,Vol.25, pp.379-384, 1997.
- [5] 谷川寛樹,藤倉良,井村秀文:都市の物質収支と環境勘定に関する研究:建設用資材の投入と建設副産物,環境システム研究, Vol.23, pp.274-278, 1995.
- [6] 白浜康弘,谷川寛樹,松本亨,井村秀文:GISを利用した都市内エネルギー及びマテリアルストックの推定,環境システム研究, Vol.25, pp.269-275, 1997.
- [7] 竹内憲司:環境評価の政策利用-CVMとトラベルコスト法の有効性-,勁草書房,1999.
- [8] 日本道路協会:簡易舗装要項・セメントコンクリート舗装要項・アスファルト舗装要項.
- [9] 岩瀬省,松本亨,井村秀文:再生路盤材のライフサイクルアセスメント,環境システム研究,Vol.24, pp.430-434, 1996.
- [10] 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-CO₂による評価,土木学会論文集, No.552, VII-1, pp.75-84, 1996.
- [11] 酒井寛二:建築活動と地球環境-建築物のライフサイクル環境負荷-,理工図書,1995.
- [12] (社)資源協会:家庭生活のライフサイクルエネルギー,あんほろめ,1994.
- [13] フリードリヒ・シュミット=ブレイク:ファクター10,シュフリンガー・フェアラー社,1997.
- [14] 松本亨,井村秀文:都市インフラ整備のLCA,クリーンエネルギー,第7巻第1号, pp.37-45, 1998.
- [15] 運輸省運輸政策局:自動車輸送統計年報,1995.
- [16] (財)自動車検査登録協会の我が国の自動車保有動向,1995.