

都市インフラストラクチャーを対象としたMIPS評価システムの構築に関する研究

The Establishment of the MIPS Evaluation System for Urban Infrastructure

白濱康弘*

谷川寛樹**

松本亨*

井村秀文*

Yasuhiro SHIRAHAMA* Hiroki TANIKAWA** Toru MATSUMOTO* Hidefumi IMURA*

ABSTRACT: The material input per unit service (MIPS) is an index for making sustainable development policy to reduce the consumption of energy and material. In this paper, MIPS evaluation, taking residential section as an object, is carried out from the viewpoint that consider urban infrastructure as final product. Firstly, the kinds of services coming from input of material in urban infrastructure are sorted out. Then, based on the assumption that sewerage system, road, building are components of residential section, the services resulting from input of material in those components and residential section are quantified, further, MIPS is evaluated. In above process, in order to grasp activity amount of facilities, GIS is used to analyze the location, scale and activity of facilities. The MIPS is estimated on a residential area in Kitakyushu City as a case study of the calculation of the MIPS for the urban infrastructure. The material input for the construction of the area are 656,000 tons, respectively. The energy input for the construction and maintenance of the area are 243,792 Gcal and 39,547 Gcal/year, respectively. Number of residents and the term are calculated as services provided from the area. Based on the result, the MIPS is obtained.

KEYWORDS: material flow accounting, material input per unit of service(MIPS), geographic information system (GIS)

1. はじめに

都市の建設、都市機能の維持・管理のためには絶えず大量の資材が投入され、その結果として、様々なサービスが発生する一方、大量の廃棄物が発生している。道路・鉄道・地下鉄・上水道・廃棄物処理施設など、都市のインフラストラクチャー（以下都市インフラ）の整備は、人間活動に利便性と快適性をもたらす一方で、各種構造物の建設・維持に大量の資材が投入され、解体時にも大量の廃棄物が発生するなど、地球環境に及ぼしている負荷は大きい。都市活動を支える都市インフラについて、物質・エネルギーのストックを定量的に把握することは重要である。これは、ドイツのヴッパタール研究所が提案している TMI（総物質投入）および TMC（物質総消費）の考えに共通するものである。

この考えに基づき、物質・エネルギーのストックとフローが構築できれば、それは都市の環境資源勘定の構成要素としてサテライト勘定として位置づけられるものになる。筆者らは、これまでの研究で、①都市の物質・エネルギー収支勘定の定量化^[1]、②GISを利用したエネルギー消費量・マテリアルストックの推計^[2]についての研究を行ってきた。①では、都市全体としてのフローとストックを評価するため、統計書等によるマクロ的分析を行った。②においては、民生部門を構成する個々の建築物についてエネルギー消費・マテリアルストックを把握するため、都市内部の地区ごとのミクロな違いを考慮した積み上げ型の分析（ボトムアップアプローチ）を行った。

*九州大学工学部環境システム科学研究センター

*Institute of Environmental System, Faculty of Engineering, Kyusyu University

**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

これらの手法を利用して、都市インフラについてMIPS (Material Input Per unit of Service) 評価を行う。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。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^[3]。本研究では、都市インフラにより構成される住宅地を都市機能 (サービス) を提供する最終製品と見なし、MIPS 評価を行う。評価の前段として、都市インフラの整備に伴うエネルギー・マテリアルフロー及びそれに伴って発生するサービスを定量化する。エネルギー・マテリアルフローについては、上述のボトムアップアプローチを用いて定量化を行う。また、サービス発生量の定量的手法には、CVM (仮想市場評価法) のようなサービス利用者の主観による質的評価と、サービス利用量 (たとえば、道路整備に伴う物流の増加量や、森林の炭素固定量など) の算定による物量的評価がある。本研究では、様々な地域の比較や、汎用性のある指標づくりを目指すため、物量的評価を用いたサービス量の定量化を行う。ここで、建築物や道路・下水道システムといった都市内インフラによるエネルギー・マテリアルフローとこれが提供するサービス量を算定するには、施設単位における活動量を把握する必要がある。そのため、GIS を用い、施設の位置・規模・活動内容を地図データ化して解析した。

2. 住宅地を対象とした MIPS 評価方法

2.1 MIPS 評価フレーム

Friedrich Schmidt=Bleek によると MIPS は以下のように定義される^[3]。

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

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

住宅地を対象として評価を行う場合、境界が曖昧になりがちであるので、MI と S について明確にしなければならない。住宅地を構成する都市インフラと、住宅地がもたらすサービスについてまとめたものが図 1 である。初期の物質投入量 (MI, Initial) としては、道路、下水道、水道、電気、ガス、電気通信といったインフラストラクチャーの建設によるものと、公園、住宅や店舗といったスーパーストラクチャーの建設によるものがある。運用のための物質投入量 (MI, Running) としては、乗用車、家電といった耐久消費財、食料品などの非耐久消費財によるものと、電気、水道、ガスといったエネルギー消費によるものがある。算定にあたってはいずれの投入物もエコロジカルリユクサックを考慮しなければならない。本研究では、道路、下水道、住宅を取り上げエネルギーについてのエコロジカルリユクサックを LCE を用いて算定した。サービス発生量については、「居住」できることを一つのサービスととらえ、その量を物量的に表現した。具体的には、各住居ごとに居住年数 (年) × 居住人数 (人), 居住面積 (㎡) × 居住人数 (人) を算定することで、サービス量とする。

住宅地を対象とした MIPS 評価グラフについて考察したものが図 2 である。図中の左側では、都市インフラを整備する段階で投入される物資量を積み上げている。右側はサービス発生に伴う MIPS 変化を示したものである。式①からも分かるように、MIPS はサービスが増加するに従って減少するの

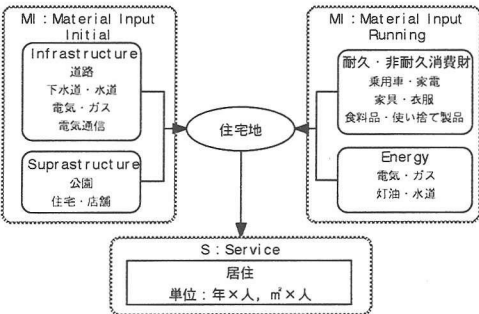


図1 住宅地における物質投入量とサービス

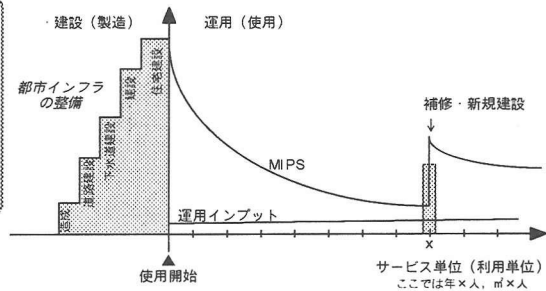


図2 住宅地における MIPS カーブ

で、MIPS カーブは 0 に近く、しかし、運用のための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

$$MI = MI_{ini} + \sum MI_{run,t} \quad \dots \textcircled{2}$$

ここで MI_{ini} : 建設段階の物質投入量, $MI_{run,t}$: 運用開始後 t 年での物質投入量である。

サービス S を居住年数 t (年) $\times$ 居住人数 p (人) とした場合、運用開始 t 年後の MIPS は

$$MIPS = (MI_{ini} + \sum MI_{run,t}) / (t \times p) \quad \dots \textcircled{3}$$

と表現できる。式③より分かるように運用のための物質投入があると MIPS カーブに漸近線が発生し、図 2 右側のグラフになる。また、道路補修などのメンテナンス・修理を行ったり、新たなインフラの建設を行い、サービスの充実を図った場合、MIPS インパルス^[3]が生じる (図 2 x 点)。この MIPS インパルスの大きさが、インフラ更新の一つの指標となりうる。

しかし、住宅地 (団地) を最終消費財と見なし、都市インフラの MIPS 評価を行うにあたっては、いくつかの欠点が考えられる。まず、住宅地を構成する都市インフラが発生するサービスはすべて住宅地の住民のためのものとみなされる。そのため、都市インフラが、評価対象地域以外に貢献するものであっても、そのサービスは評価されない。例えば、道路については、評価対象地区の住民が生活するために利便性をもたらすというサービス以外 (通過交通の物流への貢献など) は、考慮されない。次に、本来であれば都市インフラを構成する各要素について、それぞれの固有のサービスを評価すべきであるが、ここでは、住宅地という大きな単位について居住サービスだけを評価の対象としている点にある。

2.2 エネルギー・物質投入量の定量化手法

(1) ライフサイクルエネルギー (LCE) を考慮したエネルギー投入量の算定

物質投入量を評価するには、エコロジカルリユクサックを考慮する必要がある。そのため、エネルギーの投入量の算定に関してはライフサイクルエネルギー (LCE) の手法を用い評価を行う。ここでは GIS を利用することで、積み上げ計算を可能とする。

住宅地についての評価を行った場合、対象範囲内に都市インフラシステム全体を含んでいるわけではない。そこで問題となるのが、域外に大きな環境負荷を発生する施設を有する場合である。エネルギー供給システムにおける発電所、廃棄物処理システムにおける清掃工場・最終処分場がこれにあたる。本研究で対象とした下水道システムも同様であり、域内に処理場が存在しない場合には管渠のみを積み上げ対象とするのではなく、下水処理場に関しても処理水量 (実際には人口) で按分した値を用いた。つまり、これは下水道管渠の LCA か、排水処理システム全体の LCA かという問題であり、以下の分析はあくまで後者とすべきとの考えに基づいた。

道路: 道路に関しては、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、一般に施設の解体・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、本研究では建設と維持管理のみを対象とする。

道路の建設・運用エネルギー解析フローを図 3 に示す。GIS データにある道路形状から、道路中心線を入力し、幅員を属性データとして入力する。さらに、交通量と幅員により道路を 7 種類に分類し、7 分類による単位道路面積あたり年間エネルギー消費量原単位^[4]に道路面積を乗じることにより、対象地区の年間エネルギー消費量を求める。

下水道: 下水道のエネルギーに関して、基本的に道路と同じ手法で解析を行う。1 人あたりエネルギー消費量のデータを用いたため、各建築物の居住人口を求めなければならない。本研究では、住居系に関しては北九州市全世帯人員を住宅の延べ床面積で除した値を、業務系では同じく全労働人口を住居

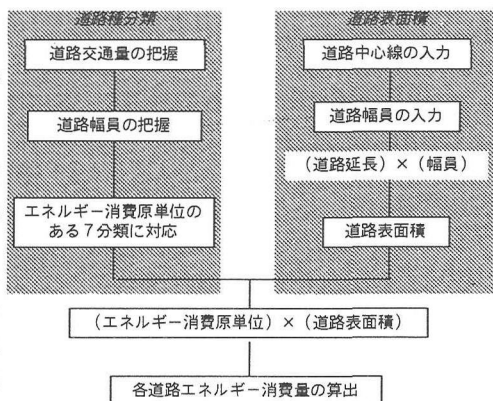


図 3 道路エネルギー解析フロー

系以外の建築物の延べ床面積で除した値を原単位として、床面積を乗じることにより、該当建築物の居住人口、及び労働人口を推計する。その上で1人あたりエネルギー消費量を乗ずることにより、対象地区における下水道システムのエネルギー消費量を求める。下水道建設・運用に伴うエネルギー消費量のフローを図4に示す。

建築物：建築物の直接消費エネルギー算定フローを図5に示す。GISデータベースの建物現況データ及び固定資産データから、各建築物の建物用途を抽出する。エネルギー消費原単位データ^[5]の整備状況に合わせた9業種に対応させるため、各建築物業種を建物用途から推測する。ただし、ここで用いたエネルギー消費の原単位は、業務系では延べ床面積あたり、住宅系では世帯あたりとなっているので、建物業種によって取り扱いが違ふ点に注意しなければならない。延べ床面積については、固定資産データのある建築物については、データにある延べ床面積を用い、データが無い物については建物現況データにある建築物の外形から建築面積を算定し、GISの機能を利用し、延べ床面積を算定する。階数データの無い木造住宅については、2階建てと仮定し算定を行う。住宅系業種の世帯数について、建物用途が住宅であるものについては全て1.5世帯、共同住宅であるものについては、住宅の平均延べ床面積と世帯数(1.5世帯)から1世帯あたり延べ床面積を定め、世帯数の推計を行う。

間接エネルギーの解析フローを図6に示す。各々の建築物について、業種による原単位と延べ床面積を乗ずることにより、建築物の消費するエネルギーを求める。また、建築物に関する間接エネルギーとして、建設・解体段階でのエネルギー消費を求める。具体的には、事業所、木造住宅、RC造住宅の3分類によるCO₂排出量^{[6][7]}を、部門別環境付加量算定結果^[8]を用い、エネルギー資源量に換算を行う。床面積あたりエネルギー原単位と、前節で算定した延べ床面積を乗ずることにより、建築物の建設・解体時におけるエネルギー消費を求める。

(2) 物質投入量の推計

物質投入量については、データの制約上、直接投入量のための算定を行う。

道路：道路建設における資源消費原単位については、谷川^[9]による原単位を用いる。その前提として、建築物の舗装種類を定める必要がある。本研究では、主に高速道路で用いられるコンクリート舗装は対象地域には無いものとし、幅員が15m以上の道

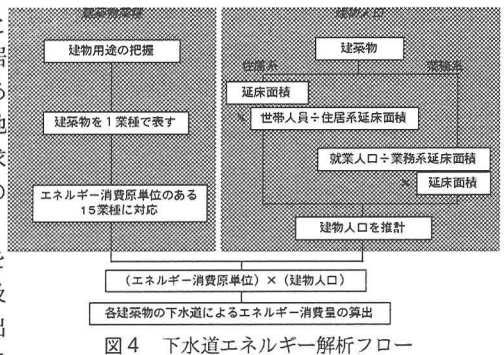


図4 下水道エネルギー解析フロー

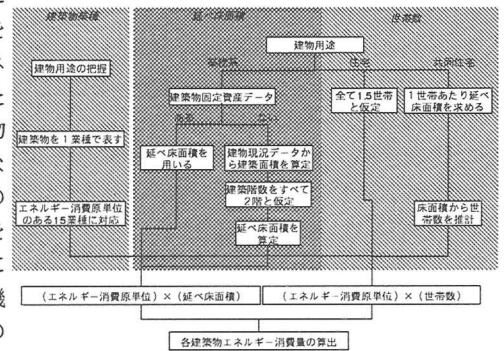


図5 建築物直接エネルギー解析フロー

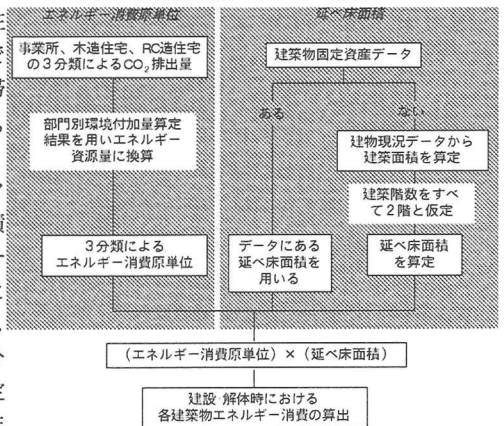


図6 建築物間接エネルギー解析フロー

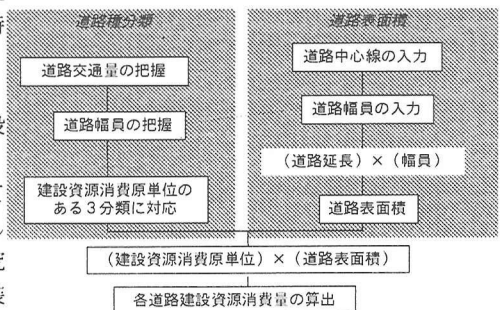


図7 道路マテリアル解析手法フロー

路を高級アスファルト舗装、その他を簡易アスファルト舗装と仮定して解析を行う。GISデータ内の道路延長と幅員を乗じた道路表面積と、分類ごとの道路資源消費量を乗じることにより、道路の資源消費量を求める。

土地造成：本研究における対象地域において、都市インフラ建設時とともに無視できないマテリアルの移動として、団地を造成する際の土工量があげられる。

下水道：下水道システムは大きく下水管渠・ポンプ場・下水処理場の3つに分けられ、それぞれにおいて物質投入がある。管渠については、下水道の建設における資源消費量原単位については、下水道のLCE原単位算出仮定において求められる各建築資材の消費量データを用いて管径ごとに求める。その上でGISデータからわかる管渠の長さを乗ずる事により、下水管渠のマテリアルストックが求まる。ポンプ場・下水処理場については、各施設のマテリアルストックを求め、その施設の処理人口と対象地域人口により対象地域におけるマテリアルストックの按分値を求める。

建築物：建築物を建設する場合の建築構造別資源消費量について、岡本・酒井¹⁹⁾による原単位データを利用する前提として、既存建築物の構造種別が明確である必要がある。そのため、固定資産データのある建築物については主体構造データを用いる。データのない建築物に関しては、一戸建住宅はすべて木造、その他はすべて鉄筋コンクリート造と仮定する。延べ床面積についても、固定資産データのある建築物についてはそのデータを用い、それ以外の建築物については建築物の敷地面積と階数から床面積を計算する。この床面積に床面積あたりの資源消費量（建築資材量）を乗じて、地区に存在する建築物の全物質ストックを推計する。

2.3 住宅地におけるサービスの定量化手法

本研究では、住宅地を最終消費財とし、建築物・道路・下水道などの都市インフラは中間投入物と見なす。そのデメリットは2.1で述べたとおりだが、評価するサービスは純粋に「居住」のみとなっていることである。そこで、住宅地におけるサービス単位として、各住居ごとに居住年数（年）×居住人数（人）、居住面積（㎡）×居住人数（人）を採用する。

3. 住宅地におけるMIPS評価のケーススタディ

3.1 評価対象地区の概要

ケーススタディ対象地区としては、団地を作る際土地の造成を行っている事、及び各インフラデータの整備状況などを考慮して、福岡県北九州市若松区の高須青葉台団地を選定した（図10）。評価地区の面積は縦1.5km×横2.0km=3.0，建築物数1757棟、居住世帯2042世帯（平成9年）である。

評価対象地区のデータの概要は次の通りである。建築物データは北九州市都市計画情報システムの

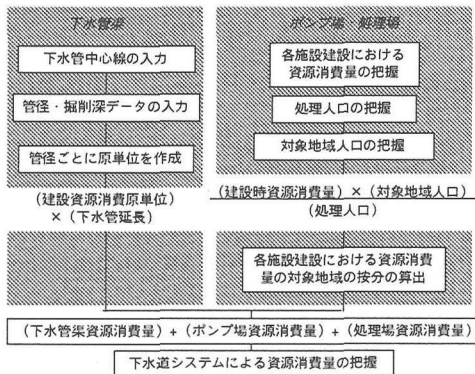


図8 下水道マテリアル解析手法フロー

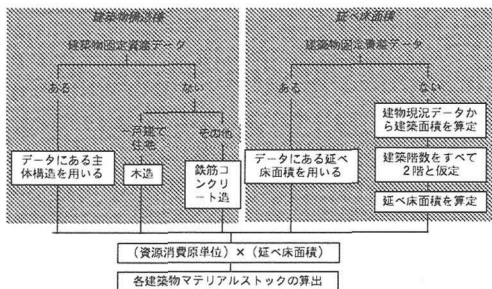


図9 建築物マテリアル解析手法フロー



図10 ケーススタディ対象地区全体図(GIS画面)

データベースの建物現況データを用いた。道路に関しては、平成7年度版土地利用データにある道路概形から中心線を入力し、幅員をGIS上で測定し、属性データとして入力した。下水管に関しては、北九州市下水道局所有の高須青葉台下水管設計図を元に、下水管路線網、管径、掘削深を入力した。インフラ現況データ入力例として、下水管の場合を図11に示す。

3.2 評価対象地区におけるエネルギー・物質投入量推定結果

ケーススタディ対象地区として選定した北九州市若松区高須青葉台団地についてのエネルギー・物質投入量を算定した結果を表1に示す。インフラ建設によるエネルギー投入量は間接分も含めて $2.44 \times 10^5 \text{ Gcal}$ 、物質投入量は $6.56 \times 10^5 \text{ t}$ （直接投入量のみ）であった。運用に伴う年間エネルギー投入量は $3.95 \times 10^4 \text{ Gcal}$ であった。図12は物質投入量の経年変化である。評価対象とした団地は1989年に建設が着工され、1995年の完成までの間に約66万tの物質が直接投入された。

3.3 評価対象地区におけるMIPS評価結果

実際の住宅地を対象にMIPS評価を行った結果は図13の通りである。物質投入量として土地造成 $5.37 \times 10^6 \text{ トン}$ 、道路建設 $4.83 \times 10^5 \text{ トン}$ 、下水道建設 $4.70 \times 10^4 \text{ トン}$ 、住宅建設 $4.83 \times 10^5 \text{ トン}$ 、合計 $6.02 \times 10^6 \text{ トン}$ の資材が投入された。前述の通り、この物質量は建設に伴う直接投入量であるので、エコロジカルリユクサック分および運用のための投入量は含まれていない。また、サービスの発生に伴うMIPS変化は図13に示す通りである。



図11 データ入力例-下水管路線網

表1 物質投入量の算定結果

都市インフラ	エネルギー直接投入	エネルギー間接投入	物質直接投入
建築物			
建設		114,855 Gcal	$483 \times 10^3 \text{ t}$
運用	35,426 Gcal/年	←	—
解体		22,932 Gcal	—
道路			
建設		86,942 Gcal	$126 \times 10^3 \text{ t}$
運用	3,446 Gcal/年	←	—
下水道			
建設		41,996 Gcal	$47 \times 10^3 \text{ t}$
運用	675 Gcal/年	←	—
総計	39,547 Gcal/年	266,724 Gcal	$656 \times 10^3 \text{ t}$

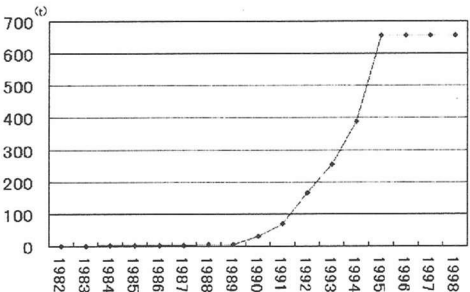
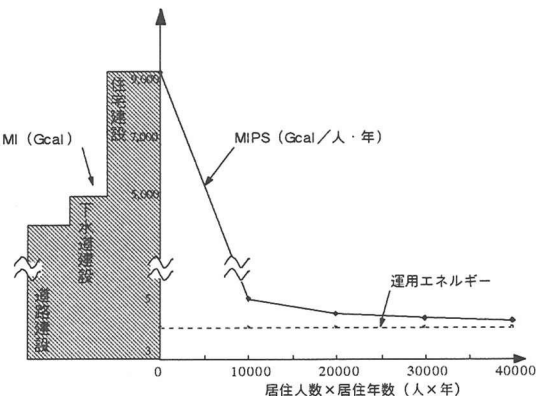
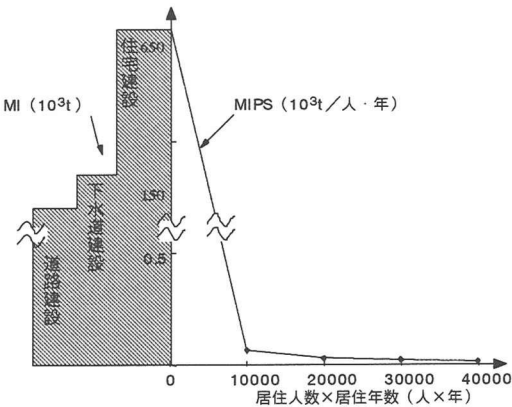


図12 物質投入量の経年変化



(a) エネルギー投入



(b) 物質投入

図13 ケーススタディ対象の住宅地におけるMIPS評価

4. まとめ

本研究では、住宅地における物質投入量とサービスの発生量を定量化し、MIPS 評価を試みた。

(1) 住宅地を支える都市インフラについて、エネルギー・物質投入量を算定した。算定方法としては、エネルギーについては、直接・間接消費を算定するために ILCA (Infrastructure Life Cycle Assessment) の評価結果を用いた。また、物質投入量については、直接投入量の算定を行った。その結果、住宅建設に伴うエネルギー投入は $2.44 \times 10^5 \text{ Gcal}$ 、物質投入は $6.56 \times 10^5 \text{ t}$ 、運用に伴うエネルギー投入は $3.95 \times 10^4 \text{ Gcal/年}$ となった。

(2) 住宅地が発生するサービス量として、居住年数×居住人数をとった。その結果、住宅地としてのサービスを限定したものの、サービスを定量的に扱うことが可能となった。

(3) 具体的に MIPS 評価を行うために、ケーススタディ対象として北九州市の住宅地を例に取り、具体的な MIPS 算定作業を行った。

本研究では単一の対象地域について評価を行ったため、算出された MIPS 値及び MIPS カーブが適正なものかどうか判断できなかった。今後の課題としては、間接分の物質投入量を算定し、様々な地域において MIPS の比較評価を行うことである。そうすることで、評価対象地域の環境面での優位性についての評価を行うことが可能となる。また、住宅地の補修方法や、インフラ建設における代替案などの評価を MIPS を利用して環境的に優れているかどうかといった評価手法の確立も必要となる。

謝辞: 貴重なデータを提供していただいた北九州市役所の方々にここに記して感謝いたします。また、本研究の一部は、平成 8、9 年度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] 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, pp274-278, 1995
- [2] 白浜、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, pp269-275, 1997
- [3] フリードリヒ・シュミット＝ブレイク、「ファクター10」、シュプリンガー・フェアラーク社、1997
- [4] 岩渕省、道路整備のライフサイクルアセスメントに関する研究、九州大学卒業論文、1996
- [5] 住環境計画研究所、業種別エネルギー消費原単位（負荷ベース）、1997
- [6] 伊加賀俊治、ライフサイクル CO_2 の試算例、地球と都市・建築に関する総合的研究、96-97, 1994
- [7] 伊藤武美、ライフサイクル分析を援用した都市環境計画、東京大学博士学位論文、1997
- [8] 鶴巻峰夫・野池達也、LCA における多項目環境負荷量の定量化に関する研究、環境システム研究、Vol.25, pp217-227, 1997
- [9] 浦野明・荒巻俊也、土木・建設事業におけるゼロエミッション化の可能性の評価、平成 9 年度文部省科学研究費重点領域研究成果報告、pp138-139, 1998