

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 -

谷川寛樹¹・井村秀文²

¹正会員 工博 和歌山大学助手 システム工学部環境システム学科 (〒640-8510 和歌山市栄谷930番地)

²正会員 工博 名古屋大学教授 大学院工学研究科地図環境工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

マテリアルフロー分析(MFA)の概念を住宅地に適用し、住宅地建設における総物質必要量(TMR)の推計手法の提案と、実際の住宅団地への適用を行った。本推計では、住宅地造成や住宅建築段階で直接投入された建設資材量(直接物質投入:DMI)に加えて、造成や資材生産活動に伴い発生した土壌移動や森林伐採量(隠れたフロー:HMF)を考慮した。ここで、代表的な建設資材(鉄、コンクリート、木材)について、製品1トンあたりのマテリアルフローを定量化することで、DMI、HMF原単位を作成した。本研究で構築したTMR推計手法を日本の都市開発の標準ケースを満たす住宅団地へ適用し、住宅地建設に伴うマテリアルフロー分析を行った。その結果、低い丘陵地での住宅地建設では、DMI:54トン/人、HMF:1,591トン/人、TMR:1,645トン/人になることが分かった。

Key Words: Material Flow Analysis (MFA), Direct Material Input (DMI), Hidden Material Flow (HMF), Residential Development

1. はじめに

都市の整備及びその活動維持のためには、さまざまな施設・構造物の建設、維持・管理にともなう多量の資材・エネルギーの投入が必要である。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。建設資材としては鉄、セメント、木材が大部分を占めるが、この外に、建設工事、建設用資材生産及びこれらのために消費されるエネルギー生産(たとえば、石炭の採掘)に際してさまざまな地表改変が行われるので、これにともなう土の移動量も大きい。

こうした資源移動量は、人間活動の規模とそれが環境に及ぼす影響を評価する指標として注目されている。たとえば、土の移動量は、土地利用変化のような他の指標とあわせて見ることによって、人間活動が自然環境に及ぼすインパクトを評価する上で有用である。ここで、このような資源移動量を評価する手法として最近開発されたのがMFA(Material Flow Analysis/

Accounting: マテリアルフロー分析/勘定)である²⁾。これは、経済活動と自然環境の相互関係を、両者の間の資源移動量によって定量化し、経済指標では表されない環境へのインパクトを評価しようとするものである。MFAでは、まず、自然界から経済活動への資源の実投入量DMI(Direct Material Input: 直接資源投入量)を定量化する。次いで、「土の移動」「非商品としての森林伐採」のように、人間活動によって引き起こされながらも、経済財としては扱われない「隠れたフロー量HMF(Hidden Material Flow: 隠れたフロー、エコロジカルリユクサック)」を定量化する。さらにDMIとHMFを合計したTMR(Total Material Requirement: 総物質必要量)を算定することで、資源消費量及び資源採掘に伴う自然改変量を定量化する。

ある都市(地域)についてMFAが推計されれば、その都市の活動を維持するために必要な資源のフローとストックが、都市の内部及び外部における直接的・間接的な物質投入量として示され、都市活動にともなう環境インパクトを評価する上で有用である。他方、資材製造から廃棄段階までのライフサイクルでの物質投入量(物質集約度)を定量化する分析としてMAIA(Material Intensity Analysis: 物質集約度分析)が開発されてお

り、これを応用すれば、都市が提供するさまざまなサービスの水準と資源投入量の関係を MIPS (Material Input per unit of Service: 単位サービスあたりの物質集約度) として表示することが可能となる^{3),4)}。

ここで、物質移動量とエネルギー消費量は密接に関係していると考えられる。最近、都市を構成するさまざまな土木・建築構造物についてのライフサイクルアセスメントが活発に行われているが、これまでの多くの研究での採用指標はライフサイクルエネルギー (LC-E) やライフサイクルCO₂ (LC-CO₂) に限定されがちであった。ライフサイクルでの物質投入量を定量化することで、LC-EやLC-CO₂と物質移動を合わせたより包括的な指標を構築することができる。

このようにMFAは有意義であるが、実際にそれを実行するには複雑な物質循環の定量化が必要であり、現在、国の経済システム全体や特定の産業部門を対象として物質収支を計量する研究が行われているところである。日本全体を対象としたMFAは、森口²⁾、森口・吉田⁵⁾(1997) によって実行され、国内でのTMR (1990) は約56億トン、1人あたり約46トンと報告されている。また、A.Adriaanseら⁶⁾(1997) は、ドイツ、オランダ、日本、アメリカの4カ国のTMRを比較した。それによれば、年間人口1人あたり総物質必要量 (1990年) は、ドイツ84トン、日本46トン、オランダ85トン、アメリカ83トンである。また、天野・村田⁷⁾(1998) は、セメント・コンクリート産業についてのMFAを行った。その結果、生コンクリート1トンあたり、TMR2.5トン (1990年) であることを示した。また、地域を対象としたMFAの例として、守田・田淵⁸⁾(1999) は、東京都におけるマテリアルバランスを物流の面から定量化している。同研究では東京都の物質投入量を約12トン/人 (1994年) と推計している。

これらの既往研究では、評価対象を国あるいは地域全体とし、マクロ的なデータを用いたトップダウン型のマテリアルフロー分析を行っている。しかし、マテリアルフロー分析を地域の環境管理施策に反映させるためには、対象地域の環境特性を考慮した上で、評価対象物がどれだけの環境資源を利用し、どれだけのサービスを生み出しているかを定量化する必要がある。そのためには、地域ごとの特性を反映したミクロなデータを用いたボトムアップ型の詳細な分析を行い、地域における環境の量的・質的变化を捉えることが必要である。このため、筆者らの研究グループでは、都市を対象とした物質・エネルギー収支の定量化を行ってきた^{9),10),11)}。都市構造物によるマテリアルストック量に着目し、都市構造物整備 (建築物・道路) に伴う資材蓄積量を推計した結果、福岡市78トン/人 (1990年)、北九州市126トン/人 (1996年) であることを示した。

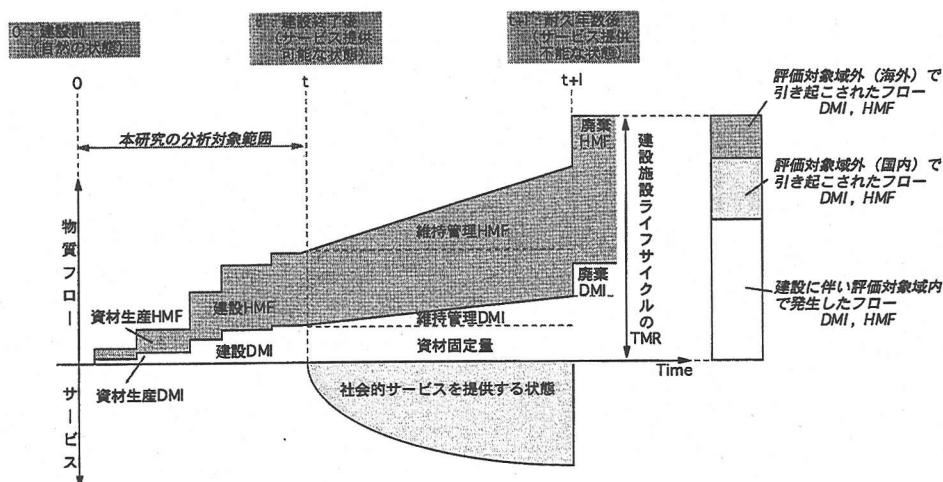
本研究では、MFAの対象を都市内住宅地の街区レベルに設定することで、ボトムアップ型の分析による推計を試みる。MFAは、一般に国や地域といった社会総体を対象としているが、住宅地のような空間領域に設定することで、領域の中での人間活動を詳細に把握することができ、物質量という代理指標を用いて、相対的に環境へのインパクトが大きい活動を特定し易くすることができる。それにより、活動主体間での利得や責任の帰属を明らかにすることができ、建設計画や設計段階にフィードバックすることが可能となる。

また、HMFとしてカウントされる「建設工事による掘削量」や、DMIとしてカウントされる「資材固定量」は、建設プロジェクトごとの工事で発生するため、評価対象を住宅地建設プロジェクトとすることで、必要な物質量の算定を行う。このように、評価対象街区での直接物質投入(DMI)だけでなく、経済活動に表れない物質投入(HMF)の算定を行うことで、自然界に及ぼしている環境インパクトに関する1つの評価指標 (代理指標) を提示する。そのために、建設資材として主要な3素材 (鉄、コンクリート、木材) について、製品1トンあたりのマテリアルフローを定量化し、DMI, HMF原単位を作成する。さらに、推計手法を適用するために、日本の都市開発の標準ケースを満たしている住宅地を選定し、標準的な住宅地建設工事に対してマテリアルフロー分析を行う。評価対象地区の開発前後における物質ストックの変化量を算定することで、都市内住宅地整備にともなう資源消費をマテリアルフロー図とともに環境資源勘定表 (物量ベース) として表現する。また、本研究で構築を行ったTMR推計手法を用いて、建設用地が丘陵地であった場合と平地であった場合のTMRの違い、住宅形態が戸建住宅の場合と集合住宅の場合のTMRの違いを分析する。

2. 宅地造成による TMR 推計手法

(1) 分析フレーム

都市構造物のライフサイクルでのマテリアルフローの概念を図-1に示す。建設活動は、資材の投入により環境状態の改変を行い、環境ストックを変化させ、社会的サービスの提供を可能とする。サービスを提供する一方で、維持管理のためのエネルギー、物質のフローが発生し、さらに、施設の寿命期間後では廃棄処理に伴うフローが発生する。一般に物質フローに伴い様々な環境負荷が引き起こされていることを考慮すると、これら一連の物質フローを定量化し、一種の代理指標として評価することは重要である。さらに、森口²⁾が指摘するように、経済的価値を持たないために従来のマテリ



アルフローの把握から漏れていた「隠れたフロー(HMF)」についても定量化し、物質フローを補完する必要がある。具体的にHMFとしてカウントされるのは、鉱物の採鉱段階の掘削土量や、鉱滓のように鉱物から分離される物質、建設活動に伴う地表の掘削量といった物質である。

このHMFと直接物質投入量(DMI)とを合計したものが総物質必要量(TMR)である。最終的な研究目標としては、図-1に示すように、建設施設のライフサイクル全体でのTMRを算定し、さらに、そのフローの発生場所(域内・国内・海外)を特定することである。しかし、現時点では、データの制約上、廃棄段階に至るまでのDMI、HMFをすべて算定することは困難である。

そこで、本研究では、建設施設がサービスを提供するまでのTMRを推計することを目的とする。ここで、HMFはフローの発生場所によって3つ（域内、国内、海外）に分類し、宅地造成に伴って発生したHMFの場所を明確にする。また、本研究は、既往研究と違い単年ごとのMFAを行うものではなく、1つの最終製品（団地）がサービスを発生させるまでの期間についてMFAを行う。

都市建設におけるTMRは、以下のように表現することができる。

$$TMR = \sum_i (DMI_{STOCK_i} + HMF_{STOCK_i}) \quad (1)$$

$$+ \sum_j (HMF_{CONSTRUCTION_j})$$

ここで、 $DMI_{STOCK\ i}$:都市構造物 i の資材固定量に対する
 DMI , $HMF_{STOCK\ i}$:都市構造物 i の資材固定量に対する
 HMF , $HMF_{CONSTRUCTION\ j}$:都市構造物整備のための工事
 j に対する HMF (土工事による掘削量や造成工事による

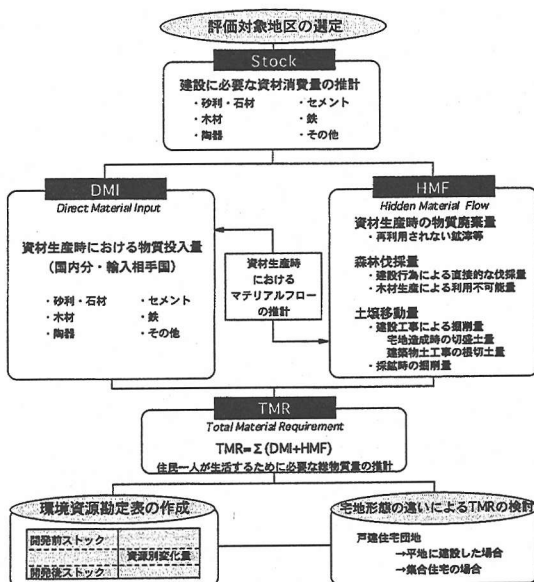


図-2 本研究における分析フロー

森林伐採量など) である。

本研究において宅地を対象としたMFAの分析フローを図-2に示す。まず、評価対象団地として選定した地区内の物質ストック量を建設資材別に定量化する。次に建設資材生産に伴うDMI、HMF(域外HMF)を建設資材別に定量化し、投入資材に伴うMFAを行う。評価対象地区内の環境状態の改変を定量化(域内HMF)するために、建設前後の土地被覆状況の変化、標高の変化から、森林伐採量、土壌移動量(切盛土量)の算定を行う。また、建築物の構造別・敷地面積別の根切量を推計することで、住宅建築に伴う土壌移動について定量化

化する。さらに、推計されたDMI, HMFの合計によりTMIを算定する。実際の算定システムでは、行政が整備しているGISデータベースを活用し、不足分のデータは、評価対象地区の設計図面からGISデータを作成し補うことで詳細な推計を行う。

MFAの結果を表現する手段として、一般的に用いられているフロー図形式と、環境資源勘定表形式を用いて物質フロー、物質収支の表現を行う。

MFAを用いた評価の例として、本研究で構築したTMR推計手法を用い、同団地（戸建住宅団地）が中規模集合住宅団地、大規模集合住宅団地であった場合の比較を行い、MFAから見た住宅地の建設方法の評価を行う。

(2) 建設による資材蓄積量 (STOCK) の推計

住宅地の建設資材蓄積量を以下の式を用い推計を行う。評価地区内の個々の建築物、道路、下水道等について、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。

$$Stock = \sum_n \sum_l (\gamma^{(n)} \cdot S_l^{(n)}) \quad (2)$$

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、下水道等）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、 $S_l^{(n)}$ ：施設種 *n* の構造物 *l* の規模（面積または延長距離）である。

建設資材投入原単位 $\gamma^{(n)}$ については、以下の a)～g) に示す通り、居住施設、交通施設、電力供給施設、ガス供給施設、上水・下水・雨水排水施設の各施設について整理・調査を行った。表-1に施設別の建設資材固定原単位の整理・調査結果一覧を示す。以下に各施設における原単位について記す。

a) 居住施設

居住施設の建築構造別の資材固定原単位は、建築業協会¹²⁾と酒井¹³⁾により推計が行われている。建築業協会¹²⁾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。酒井¹³⁾は、産業連関表を利用し「限定間接需要算入法」を用いて、代表的な4種類の建築構造別に基礎資材使用量を算定した。本研究では、積み上げ法を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。また、これらの原単位を補完するために、独自に住宅メーカーにヒアリングを行い、「木質系プレハブ造」、「軽量鉄骨プレハブ造」を追加した。

建築物の資材固定量は、構造物ごと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。構造別の延床面積は、行政において整備されている建築物GISデータ¹⁴⁾より抽出する。

b) 交通施設

交通施設については、道路を対象として資材固定量の算定を行う。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¹⁵⁾や簡易舗装要項¹⁶⁾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。住宅地の中の道路種類としては、幹線道路、準幹線道路、補助幹線道路、専用道路、区画道路、歩行者用道路の6種類があげられる。本研究では、幅員、車線数、計画交通量、設計時CBRの状況から、幹線道路を高級舗装（アスファルト層10cm、上層基盤10cm、下層基盤15cm）、準幹線道路を高級舗装（アスファルト層5cm、上層基盤10cm、下層基盤10cm）、残りを簡易舗装（アスファルト層4cm、上層基盤7cm、下層基盤7cm）として推計を行う。また、密度については、アスファルト舗装修繕技術¹⁷⁾より、アスファルト層2.35t/m²、砂利石材（上層基盤）2.35t/m²、砂利石材（下層基盤）2.20t/m²とする。評価地区内の道路網における計画交通量や幅員については、行政が整備している高速道路・国道・県道・市道データベース¹⁴⁾を用いる。

c) 電力・情報供給施設

電力・情報供給施設として、評価地区内の送電線、電話線、電信柱を算定対象とする。ここで、発電施設は域外（国内）にあるため、国内でのフロー（HMF）として算定すべきであるが、発電施設建設・運用に関するマテリアルフローデータの不足のため、本研究では評価対象から除外する。

送電線、電話線については延長距離を算定し、単位長さあたりの金属重量を乗じることにより、評価地区における資材固定量を算定する。電信柱についても同様の算定を行う。算定に用いた原単位は、電線メーカーや電力会社からのヒアリングを元に作成した。評価地区内の電線網については、現地調査をもとにGISデータを作成し、資材固定量の算定を行う。

d) ガス供給施設

ガス供給施設として、評価地区内のガス管を算定対象とした。ガス管は延長距離をGISデータベースより管径別に算定し、単位長さあたりの資材重量を乗じることにより、評価地区における資材固定量を算定する。ガス管は上水管、下水管、雨水管（場所による）と地中に埋設しているので、埋設深さから掘削量を推計しHMFとしてカウントする。算定に用いた原単位は、ガス供給会社からのヒアリングを元に作成した。現在では、幹線管に鋼管またはダクタイル鋳鉄管、各世帯に供給する管としてポリエチレン管を用いることが多いので、表中の通り、重量的には小さな値となる。評価地区内のガス管網については、施工時の設計図面をもとにGISデータを作成し、資材固定量の算定を行う。

表-1 施設別の資材固定原単位

施設名	構 造	単位	資 材 固 定 量							合計	参考文献 No.
			砂利・石 材類	木材	セメント	陶磁器類	鉄	その他			
居住・ 商工業施設	住宅、 木造	kg/m ²	432.1	131.7	74.3	62.7	16.0	塗料、 合成樹脂製品、 ガラス、 鋼、 アルミニウム等	13.0	729.8	12)
	住宅、 鉄筋コンクリート造	kg/m ²	1,315.9	19.7	254.3	37.6	112.0		26.0	1,765.5	
	住宅、 鉄骨・鉄筋コンクリート造	kg/m ²	1,273.0	20.9	246.8	23.7	131.5		22.5	1,718.4	
	住宅、 木質系プレハブ造	kg/m ²	7.9	38.4	1.8	4.1	0.0		N.A.	52.3	ヒアリング 調査
	住宅、 軽鋼骨系プレハブ造	kg/m ²	475.8	61.1	110.8	6.9	90.6		N.A.	745.3	12)
	事務所、 木造	kg/m ²	391.4	100.9	66.0	37.5	16.2		9.6	621.6	
	事務所、 鉄骨造	kg/m ²	521.0	1.0	98.4	15.0	183.2		22.3	840.9	
	事務所、 鉄筋コンクリート造	kg/m ²	1,448.5	4.7	273.7	33.4	146.7		28.3	1,935.3	
	事務所、 鉄骨・鉄筋コンクリート造	kg/m ²	1,624.1	3.2	301.0	40.4	207.4		35.4	2,211.5	
	店舗、 鉄筋コンクリート造	kg/m ²	1,457.4	2.2	279.4	20.3	114.8		23.1	1,897.2	
	校舎、 鉄筋コンクリート造	kg/m ²	1,493.8	8.8	286.2	32.6	152.9		19.1	1,993.4	
	工場、 鉄骨造	kg/m ²	481.0	1.0	92.7	8.1	141.4		13.6	737.8	
	工場、 鉄筋コンクリート造	kg/m ²	1,804.5	0.7	353.3	23.9	120.1		16.3	2,318.8	
交通施設	幹線道路、 高級舗装	kg/m ²	565.0	0	0	0	0	アスファルト	235.0	800.0	15)
	準幹線道路、 高級舗装	kg/m ²	455.0	0	0	0	0		117.5	572.5	
	補助幹線道路、 簡易舗装	kg/m ²	318.5	0	0	0	0		94.0	412.5	16)
	専用道路、 簡易舗装	kg/m ²	318.5	0	0	0	0		94.0	412.5	
	区画道路、 簡易舗装	kg/m ²	318.5	0	0	0	0		94.0	412.5	
	歩行者用道路、 簡易舗装	kg/m ²	318.5	0	0	0	0		94.0	412.5	
電力・情報 供給施設	送電線、 銅線	kg/m	0	0	0	0	0	銅	3.4	3.4	ヒアリング 調査
	電話線、 銅線	kg/m	0	0	0	0	0		1.1	1.1	
	電信柱、 柱高 13m (長)	kg/本	1,170.3	0	272.6	0	69.4		0	1,512.3	
	電信柱、 柱高 8m (短)	kg/本	476.7	0	111.0	0	28.3		0	616.0	
ガス供給 施設	ポリエチレン管、 管径50cm	kg/m	0	0	0	0	0	ポリエチレン	0.9	0.0	ヒアリング 調査
	ポリエチレン管、 管径75cm	kg/m	0	0	0	0	0		2.1	0.0	
	ポリエチレン管、 管径100cm	kg/m	0	0	0	0	0		3.4	0.0	
	ダクタイル鋳鉄管、 管径100cm	kg/m	0	0	0	0	22.6	0	22.6		
	ダクタイル鋳鉄管、 管径150cm	kg/m	0	0	0	0	32.6	0	32.6		
	ダクタイル鋳鉄管、 管径200cm	kg/m	0	0	0	0	43.0	0	43.0		
	ダクタイル鋳鉄管、 管径300cm	kg/m	0	0	0	0	50.0	0	50.0		
	鋼管、 管径50cm	kg/m	0	0	0	0	5.3	0	5.3		
	鋼管、 管径80cm	kg/m	0	0	0	0	8.8	0	8.8		
	鋼管、 管径150cm	kg/m	0	0	0	0	19.8	0	19.8		
上水道	ダクタイル鋳鉄管、 管径75cm	kg/m	1.7	0	0.5	0	17.6	0	19.8	17)	
	ダクタイル鋳鉄管、 管径100cm	kg/m	2.3	0	1.0	0	23.1	0	26.3		
	ダクタイル鋳鉄管、 管径200cm	kg/m	5.8	0	1.4	0	53.5	0	60.7		
	ダクタイル鋳鉄管、 管径300cm	kg/m	15.7	0	1.7	0	95.0	0	112.4		
	ダクタイル鋳鉄管、 管径400cm	kg/m	21.0	0	3.7	0	139.8	0	164.4		
下水道	塩化ビニル管、 管径20cm	kg/m	0	0	0	0	0	塩化ビニル	7.1	0.0	18)
	陶管、 管径25cm	kg/m	0	0	0	54.0	0	0	54.0		
	陶管、 管径35cm	kg/m	0	0	0	95.0	0	0	95.0		
雨水排水 施設	L型側溝	kg/m	220.8	0	25.1	0	0	0	245.8	ヒアリング 調査	
	ヒューム管、管径300cm	kg/m	62.7	0	14.6	0	1.7	0	79.0		
	ヒューム管、管径500cm	kg/m	143.8	0	33.5	0	3.6	0	180.9		
	ヒューム管、管径900cm	kg/m	474.6	0	110.6	0	14.0	0	599.1		
	ヒューム管、管径1200cm	kg/m	807.0	0	188.0	0	30.1	0	1,025.1		
	ヒューム管、管径1500cm	kg/m	1,042.7	0	242.9	0	42.1	0	1,327.6		
	ヒューム管、管径1800cm	kg/m	1,413.4	0	329.2	0	55.9	0	1,798.6		

N.A. : Not Available

e) 上水道

上水道については、評価対象地区内の上水管に使われる資材量の推計を行う。上水管メーカーにヒアリング調査を行った結果、上水管にはダクタイル鋳鉄管を用いていることが分かった。その管径別の重量は、表-1に示す通りである。評価地区内の上水管網については、施工図面をもとに管径、材質、埋設深さを含むGISデータを作成し、資材固定量の算定を行う。

f) 下水道

下水道については、評価対象地区内の下水管に使われる資材量の算定を行う。ここで用いた資材固定原単位は、下水管メーカーにヒアリング調査を行い作成した。下水管としては、塩化ビニル管、陶管が用いられており、それぞれの管径別重量を表-1に示す。評価地区内の下水管網については、施工図面をもとに管径、材質、埋設深さを含むGISデータを作成し、資材固定量の算定を行う。

g) 雨水管

雨水管にはヒューム管が用いられ、その原材料は、セメント、砂利石材、鉄である。それぞれ重量を管径ごとに表-1に示す。ここでの原単位は、ヒューム管を生産している企業にヒアリング調査を行い、まとめたものである。評価地区内の雨水管網については、施工図面をもとに管径、材質、埋設深さを含むGISデータを作成し、資材固定量の算定を行う。

(3)単位資材生産量あたりのDMI, HMFの推計

建設資材投入量のうち、建設工事において資源消費量の多い、鉄、コンクリート、木材の3項目について資材生産量あたりのDMI, HMFを整理、推計した。

a) 粗鋼

粗鋼生産におけるマテリアルフローを図-3に示す。粗鋼生産プロセスは3段階に大別される。

第1段階は資源採掘段階である。ここでは自然界から原料（鉄鉱石）を取り出す段階である。1995年における鉄鉱石の海外依存度は100%であるため、資源採掘にともなうHMFはすべて輸入相手国で発生している。A.Adriaanseら⁹⁾(1997)によると、1994年における鉄鉱石の輸入量116百万トン、それに伴う土壌侵食などによるHMFは277百万トンと算出している。つまり鉄鉱石輸入量1トンあたりのHMF原単位は2.39トン/トンとなる。本研究での対象年は1995年であるが、A.Adriaanseら⁹⁾の研究では1994年までの算定を行っているため、1994年の原単位を1995年の算定に代用した。

第2段階は、高炉処理を行い、鉄鉄を製造する段階である。鉄鉄を製造するためには、原料である鉄鉱石に石灰石とコークスを加え、高炉処理を行う。この処理前

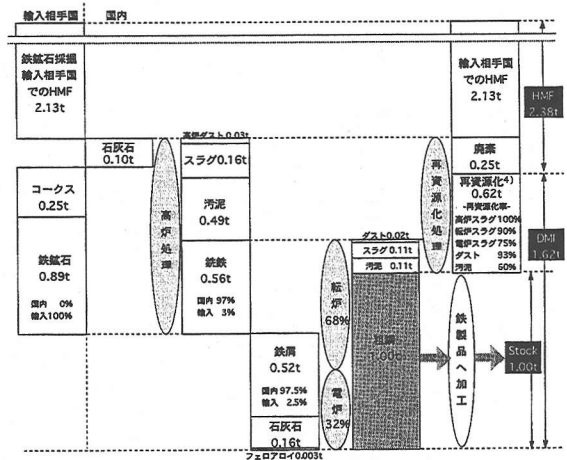


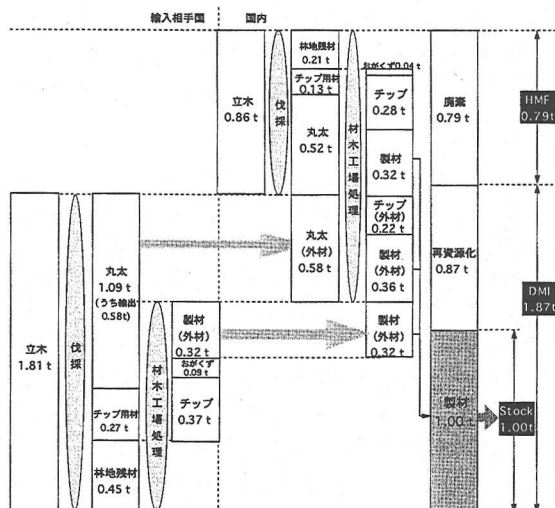
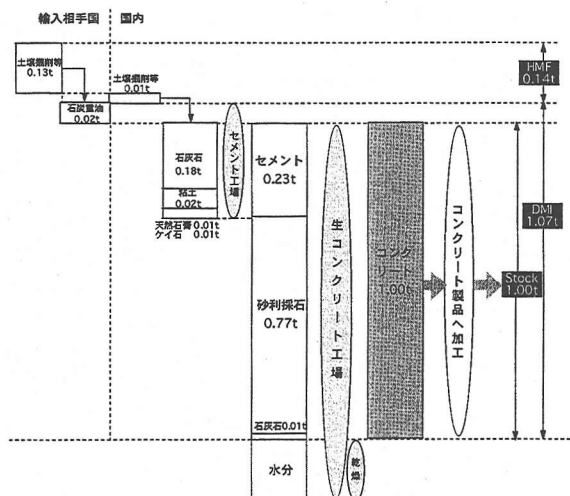
図-3 粗鋼のマテリアルフロー
(粗鋼生産1トンあたり)(1995年)

後での物質収支は、1995年産業連関表²⁰⁾の物量表やコンクリート総覧²¹⁾をもとに算定を行った。

第3段階は転炉や電炉を用いて粗鋼を生産する段階である。転炉は高炉で生産した鉄鉄から連続して生産し、電炉は主に鉄屑等を原料とし粗鋼として再資源化する。粗鋼を生産する転炉と電炉の割合は、全国平均で転炉68%、電炉32%であるが²²⁾、それぞれに投入される物質量を1995年産業連関表²⁰⁾の物量表より整理した。その結果、粗鋼1トン生産すると、汚泥0.11トン、スラグ0.11トン、ダスト0.02トンの物質が生成される。さらに、一連の工程において再資源化処理がなされており²³⁾、その結果、粗鋼1トンあたり、再資源化量0.62トン、廃棄量0.25トンとなる。この廃棄量と第一段階で発生したHMFを加えると粗鋼1トンあたりのHMFは2.38トンになることが分かった。

b) コンクリート

コンクリート生産におけるマテリアルフローを図-4に示す。コンクリートの原料となるのは、砂利石材、セメントである。さらにセメントの原料となるのは、石灰石、粘土、石膏である。このことから分かるように、原料のほとんどは日本国内で供給可能である。しかしその中で、セメント産業が利用する石炭・重油が海外依存度100%（1995年）であり、この原料の生産に伴って海外においてHMFが発生している。この石炭・重油のHMFや石灰石、粘土、石膏のHMFについて、天野・村田⁷⁾は推計を行っている。天野らの結果より算定した1994年における原料別DMI 1トンあたりのHMFは、石炭7.61トン、石灰石0.05トン、粘土0.18トン、ケイ石0.05トン、天然石膏0.01トンである。1995年産業連関表²⁰⁾の物量表を用いて、1995年におけるセメント産業の物質収支、生コンクリート産業の物質収支を



定量化したうえで、1994年のDMI、HMF原単位を用いて、1995年におけるコンクリート生産1トンあたりのマテリアルフローを推計した。

c) 木材

木材におけるマテリアルフローを図-5に示す。木材需給表によると、日本において流通している製材は、国内起源のものが32%、海外起源のものが68%（1995年）となっている²⁴⁾。このうち建材として使われる木材について、杉をモデルとした原木1本から作られる製材、チップ、林地残材を推計した。

まず、林業白書²⁵⁾より、杉立木1本あたりの製品供給量を参考に、製材1トンあたりの立木、チップ、林地残材の量を算出する。ここで、スギの気乾密度は、 $0.38\text{g}/\text{cm}^3$ として計算する²⁶⁾。次に、木材需給報告書²⁴⁾より、国産材・外材丸太・外材製材の流通量を調査し、各流通量を製材1トンあたりの投入量として表したものが、図-5である。この推計より、製材1トンにつきDMI1.86トン、HMF0.8トンであった。また、国内で製材を1トン使うと、国内の立木0.91トン、海外の立木1.71トンが消費されていることが分かる。

(4)域内における資材生産を伴わないHMFの推計

宅地造成工事区域内において、資材生産を伴わないHMFとして、宅地造成時の土工量、宅地造成時の原生林伐採、管渠敷設時の掘削、住宅建設時の掘削の4つを取り上げ、それぞれの物質量の推計を行う。

a) 宅地造成時の土工量

HMFとして宅地造成時の土工量を算定するためには、建設残土量だけでなく、移動土量そのものを把握する必要がある。宅地開発事業に伴う造成工事では、地盤安定や地盤沈下に対して安全上の配慮がなされた上で、

切土量と盛土量が均衡するように計画されるのが一般的である。ここでは、宅地造成前の等高線と宅地造成後の等高線を用いて、切土量と盛土量を推計する。

利用するデータについては、デジタルデータがあれば好ましい。現在の標高データは、各自治体が土地利用基本図（1/2500）のデジタル化を進めているので、その中から等高線データを抽出し、推計に用いる。過去の標高データについては、デジタルデータとして整備されていることは少ないので、土地利用基本図（1/2500）をもとに作成することとする。過去の等高線データの作成手順としては、土地利用基本図をスキャナーにより読み取り、等高線を取得する。次に、幾何補正により現在の等高線データとの位置合わせを行い、等高線をベクトル化し、線情報としてGISデータベースに保存する。さらに、各等高線に標高情報を入力し、現在の等高線との比較を可能にする。

造成による土砂移動量は、上記により整備された等高線データをもとに、以下の式を用いて推計を行う。

$$HMF^{(Soil)} = \rho \cdot \sum_i (V_{0,i} - V_{1,i}) \quad (3)$$

ここで、 $HMF^{(Soil)}$: 評価対象地区における造成に伴う土砂移動量、 ρ : 土砂密度、 $V_{0,i}$: 地点*i*における造成前の体積、 $V_{1,i}$: 地点*i*における造成後の体積である。

体積 $V_{0,i}$ 、 $V_{1,i}$ を推計は、以下のような作業により行う。まず、2時点での等高線データにおいて、TIN (Triangulated Irregular Network) によるサーフェスの作成を行い、等高線情報を立体化する。つぎに、立体化された造成前と造成後の標高情報をもとに、5m メッシュに区切られた地域の体積を行う。さらに、式 (3) の通り、2時点での体積差をそれぞれのメッシュにおいて計算し、土壌移動量と土壌移動分布を推計する。図-6は、式 (3) をもとに推計した体積変化による土壌移動分布である。ここで、工事設計条件として、 ρ を $1.8t/m^3$ と仮定し、推計を行った。

b) 宅地造成時の原生林伐採量

宅地造成の準備工として、開発地域の伐採・焼却が行われる。域内での伐採量は、資源生産を伴わないため、HMFに分類される。そこで、伐採量を重量で定量化するため、以下の方法で推計を行った。まず、対象地区と対象地区周辺の宅地造成以前の土地利用基本図をGISデータとして入力する。この土地利用基本図を現在のもものと比較し、宅地造成周辺で土地利用が変化していない地域を抽出する。次に現地調査により、抽出された過去の原生林が残っている地区の樹高を調査し、GISデータとして入力する。これらのデータをもとに、造成に伴う原生林伐採量 $HMF^{(Wood)}$ を以下のように推計する。

$$HMF^{(Wood)} = \sum_i (\rho_w \cdot H_i \cdot S_i) \quad (4)$$

ここで、 $HMF^{(Wood)}$: 評価対象地区における造成に伴う原生林伐採総量、 ρ_w : 現存量密度²⁷⁾、 H_i : 地区*i*における樹高、 S_i : 地区*i*の面積である。

式 (4) は、森林体積を算定し、森林地上部の現存量密度を乗じることで、伐採重量の算定を行うが、現存量とは、単位土地面積当たりの乾物重量で表し、森林の地上部の現存量密度とは、土地面積と上層木樹高がつくる立体的空間内の単位空間当たりの現存量を表す。また、現存量密度は、樹種や樹高による違いはあまりなく、平均して $1.0 \pm 0.5kg/m^3$ であり、生育段階が進むにつれて、幹や根の現存量は増加するが、葉の現存量は比較的早い段階で最大値をもち、その後の変化は少ない²⁷⁾。本研究では、現存量密度を中間値より $1.0kg/m^3$ として推計を行う。また、樹種や樹高により現存量密度

表-2 ヒアリング調査による住宅建築時の土壌移動量

用途	用途	階数		土工量				掘削土量 ²⁾ (m^3)	掘削土量 ³⁾ (m^3)	掘削土量 ⁴⁾ (m^3)	掘削土量 ⁵⁾ (m^3)	$\rho^2 \cdot \rho^3 \cdot \rho^4 \cdot \rho^5$ (t/m^3)
		地上	地下	掘削土量	掘削土量	掘削土量	掘削土量					
木造	戸建住宅	2	0	52	3	0	0	0.25	0.00	0.44		
木造	戸建住宅	3	0	198	35	53	0	0.61	0.00	1.09		
5階	集合住宅	2	0	257	107	327	0	0.54	0.18	1.30		
5階	集合住宅	3	0	663	191	231	0	0.29	0.00	0.93		
SRC造	集合住宅	13	1	19,735	3,780	4,253	3,780	0.58	0.00	1.05		
SRC造	集合住宅	15	1	28,010	19,580	21,580	4,747					
RCC造	集合住宅	2	0	147	87	101	0					
RCC造	集合住宅	6	0	6,894	1,917	3,454	0					
RCC造	集合住宅	8	0	3,343	1,211	1,415	395					
RCC造	集合住宅	16	1	77,975	20,300	20,760	0					
鉄筋コンクリート	戸建住宅	2	0	141	27	82	0	0.58	0.00	1.05		

$\rho^2=1.8, \rho^3=1.8$

は、あまり変わらないことから、針葉樹林や二次林においても同値を適用可能と考えられる。

c) 管渠敷設に伴う土砂移動量

粗造成が終わると管渠の敷設を行うが、このとき掘削に伴う土砂の移動が発生する。この土砂移動量を域内のHMFとしてカウントする。

埋設管の種類は、ガス管、上水管、下水管、雨水管の4種類がある。これらの管渠は、将来のメンテナンスのために、必ず公共用地に敷設されることになっている。ここで言う公共用地とは、道路部分のことを指し、造成が完了すると、市に移管され公共用地となる。整備を行ったGISデータを見ると、ガス管、上水管、下水管は、ほぼすべての道路に埋設されているが、雨水管はすべての道路に埋設されているわけではない。実際の工事では、3管または4管の標準断面を組み合わせた共同掘削方式を用いることから、GISデータベースにより、3管が埋まっている道路と4管が埋まっている道路を抽出し、それぞれにおいて掘削量 $HMF^{(Pipe)}$ の定量化を行う。

$$HMF^{(Pipe)} = \left\{ \begin{array}{l} \sum_i \rho \cdot S_i \cdot l_i, (n=4) \\ \sum_i \rho \cdot S_i \cdot l_i, (n=3) \end{array} \right\} \quad (5)$$

ここで、 $HMF^{(Pipe)}$: 管埋設による土壌掘削量、 ρ : 掘削時の土砂密度、 S : 3管または4管埋設時の設計断面積、 l_i : 道路*i*の延長距離である。

工事設計条件として $\rho=1.8t/m^3$ 、 $S_4=6.6m^2$ 、 $S_3=4.8m^2$ と仮定し、推計を行った。

d) 住宅建築時における土砂移動量

住宅建築時の土工事において、根切りを行う際に土砂の移動が発生する。域内において発生土砂の処理ができない場合、残土処分として域外に搬出される。また、土質改良などの目的で土砂の搬入が行われる場合もある。そこで、建築時の土壌移動量 $HMF^{(Soil)}$ を以下のように定義する。

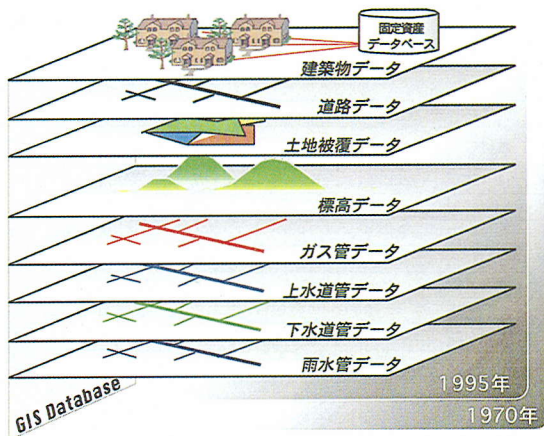


図-7 データ構造

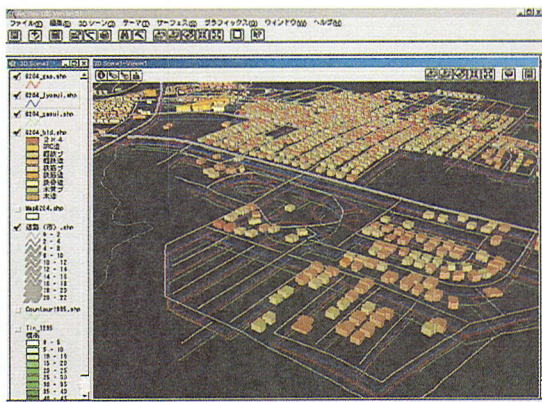


図-8 GISデータ (1995年, 詳細3D)

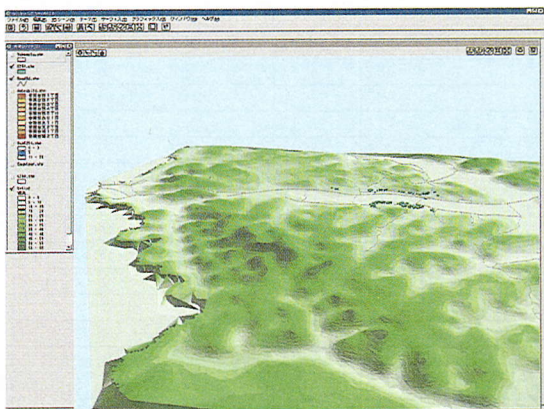


図-9 GISデータ (1970年, 3D)



図-10 GISデータ (1995年, 3D)

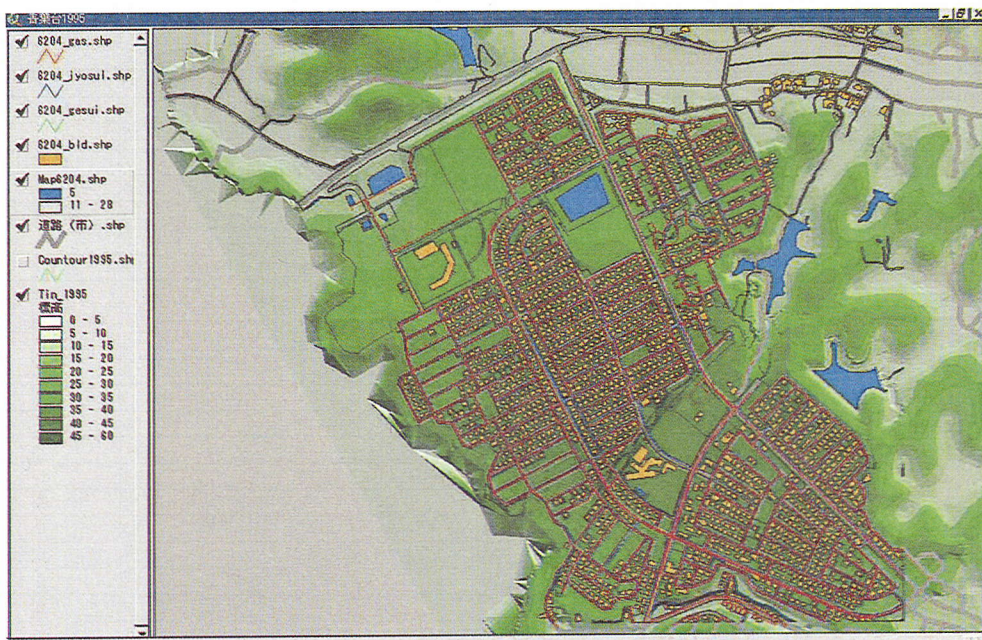


図-11 GISデータ (1995年, 全景2D)

表-3 ケーススタディ対象地区における構造物による資材固定量

施設名	構 造	規 模 (総面積、総延長)	資 材 固 定 量 (単位: トン)						
			砂利・石材類	木材	セメント	陶磁器類	鉄	その他	合計
居住施設	木造	111,384 m ²	48,129	14,669	8,276	6,984	1,782	1,448	81,288
	鉄骨造	985 m ²	513	1	97	15	180	22	828
	鉄筋コンクリート造	24,995 m ²	32,891	492	6,356	940	2,799	650	44,129
	軽鉄プレハブ造	76,910 m ²	36,592	4,700	8,524	533	6,971	-	57,320
	小 計		118,125	19,863	23,253	8,472	11,733	2,120	183,565
交通施設	幹線道路, 高級舗装	40,994 m ²	23,162	0	0	0	0	9,634	32,795
	準幹線道路, 高級舗装	25,791 m ²	11,735	0	0	0	0	3,030	14,766
	補助幹線道路, 簡易舗装	17,992 m ²	5,731	0	0	0	0	1,691	7,422
	専用道路, 簡易舗装	13,823 m ²	4,403	0	0	0	0	1,299	5,702
	区画道路, 簡易舗装	122,426 m ²	38,993	0	0	0	0	11,508	50,501
	歩行者用道路, 簡易舗装	27,558 m ²	8,777	0	0	0	0	2,590	11,368
	小 計		92,800	0	0	0	0	29,753	122,553
電力・情報 供給施設	送電線, 銅線	32,482 m	0	0	0	0	0	109	109
	電話線, 銅線	32,482 m	0	0	0	0	0	36	36
	電信柱, 柱高 13m (長)	148 本	173	0	40	0	10	0	224
	電信柱, 柱高 8m (短)	1,008 本	481	0	112	0	28	0	621
	小 計		654	0	152	0	39	146	990
ガス供給 施設	ポリエチレン管, 管径50cm	20,302 m	0	0	0	0	0	19	19
	ポリエチレン管, 管径75cm	3,524 m	0	0	0	0	0	7	7
	ポリエチレン管, 管径100cm	1,512 m	0	0	0	0	0	5	5
	ダクタイル鋳鉄管, 管径100cm	85 m	0	0	0	0	2	0	2
	ダクタイル鋳鉄管, 管径150cm	2,852 m	0	0	0	0	93	0	93
	ダクタイル鋳鉄管, 管径200cm	2,444 m	0	0	0	0	105	0	105
	ダクタイル鋳鉄管, 管径300cm	1,811 m	0	0	0	0	91	0	91
	鋼管, 管径50cm	644 m	0	0	0	0	3	0	3
	鋼管, 管径80cm	60 m	0	0	0	0	1	0	1
	鋼管, 管径150cm	649 m	0	0	0	0	13	0	13
	小 計		0	0	0	0	307	32	339
上水道	ダクタイル鉄管, 管径100cm	26,453 m	45	0	14	0	464	0	524
	ダクタイル鉄管, 管径150cm	3,003 m	7	0	3	0	69	0	79
	ダクタイル鉄管, 管径200cm	3,173 m	18	0	4	0	170	0	192
	ダクタイル鉄管, 管径250cm	269 m	4	0	0	0	26	0	30
	ダクタイル鉄管, 管径300cm	621 m	13	0	2	0	87	0	102
	小 計		88	0	24	0	816	0	927
下水道	塩化ビニル管、管径200cm	26,298 m	0	0	0	0	0	187	187
	陶管、管径250cm	581 m	0	0	0	31	0	0	31
	陶管、管径300cm	55 m	0	0	0	5	0	0	5
	小 計		0	0	0	37	0	187	224
雨水排水 施設	側溝	33,729 m	7,447	0	845	0	0	0	8,292
	ヒューム管、管径300cm	306 m	19	0	4	0	1	0	24
	ヒューム管、管径350cm	30 m	2	0	1	0	0	0	3
	ヒューム管、管径400cm	369 m	35	0	8	0	1	0	45
	ヒューム管、管径450cm	450 m	52	0	12	0	1	0	66
	ヒューム管、管径500cm	1,375 m	198	0	46	0	5	0	249
	ヒューム管、管径600cm	1,562 m	322	0	75	0	10	0	406
	ヒューム管、管径700cm	1,096 m	308	0	72	0	8	0	388
	ヒューム管、管径800cm	1,067 m	390	0	91	0	11	0	492
	ヒューム管、管径900cm	1,118 m	531	0	124	0	16	0	670
	ヒューム管、管径1000cm	970 m	556	0	130	0	21	0	707
	ヒューム管、管径1100cm	537 m	365	0	85	0	14	0	464
	ヒューム管、管径1200cm	437 m	353	0	82	0	13	0	448
	ヒューム管、管径1350cm	464 m	458	0	107	0	19	0	584
	ヒューム管、管径1500cm	260 m	271	0	63	0	11	0	345
	ヒューム管、管径1600cm	248 m	304	0	71	0	12	0	387
	ヒューム管、管径1800cm	102 m	144	0	34	0	6	0	184
	小 計		11,757	0	1,849	0	148	0	13,755
総 計			223,423	19,863	25,278	8,508	13,043	32,237	322,352

$$HMF^{(bid)} = \sum (\rho^0 \cdot S_i^0 + \rho^{in} \cdot S_i^{in}) \quad (6)$$

ここで、 $HMF^{(bid)}$:住宅建設時の土壌移動総量、 ρ^0 :掘削時における土砂密度、 ρ^{in} :搬入時における土砂密度、 S_i^0 :住宅建設時の土工事における根切量(体積)、 S_i^{in} :住宅建設時の土工事における搬入土量(体積)である。

建築物の土工量については、住宅メーカーやゼネコン数社に、建築物の構造・延床面積ごとの発生残土量、根切土量、搬入土量についてヒアリング調査を行った。さらにヒアリング調査の結果をもとに、式(6)により建築時の土壌移動量を推計した結果を表-2示す。ここで、工事設計条件として ρ^0 、 ρ^{in} を $1.8t/m^3$ と仮定し、推計を行った。

3. 住宅団地における TMR 推計結果

(1) 分析対象地区の概要

住宅団地におけるTMR推計を行うため、日本の都市開発の標準ケースを満たしている北九州市T団地をケーススタディ対象として取り上げた。同団地の戸建住宅の画地規模は、平均260㎡であり、同市の開発行為許可要項で示す標準画地規模の150㎡～300㎡を満たしている。さらに、建築面積においても、同市の基本構想・長期構想の提唱する建築規模(100㎡)を満たしている。このように標準的な住宅団地であること、建設時からの標高・道路・下水道・建築物のデータが残っていることが同団地の選定理由である。開発前の土地利用状況は山林62%、原野23%、残りの15%が田・畑・宅地である。また、開発前の地形は、海に近い低丘陵地内で、標高は0m～70mと全体的になだらかな起伏を呈していた。評価地区の面積は1,312,945㎡、1997年の建築物数1757棟、居住世帯数2,042世帯、居住人口7,535人の大規模な新興住宅団地である。

(2) 推計に使用したデータベース

推計に使用したデータベースの概要を図-7に示す。自然地形データ、構造物データ、土地利用分類データが、実際の立体的な位置情報を持ったまま階層構造をなしており、固定資産データが各構造物データにリンクしている。推計に際して、ESRI社ArcView3.1、Microsoft社Access2000を用いてGISデータベースの構築、TMRの推計を行った。評価対象地区の開発前後の状況をGISにより再現したものが、図-9、図-10である。図-10は、1995年の3D画像であるが、この画像からサーフェス情報を外すと地下の状況を見ることができ、下水管やガス管、上水管等の埋設状況が、図-8のように見ることができる。図-11は1995年におけ

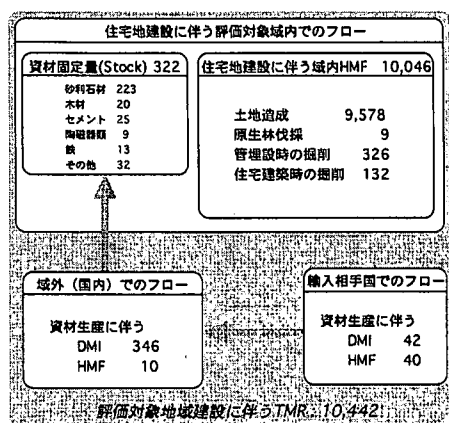


図-12 住宅地建設に伴うマテリアルフロー
(単位: 1000 トン)

る評価対象地区の全景である。

(3) 評価対象地区における TMR 推計結果

TMR(総物質投入量)を推計するために、構造物による素材別資源固定量の推計、素材別DMI(直接物質投入量)・HMF(隠れたフロー)の推計、評価地域内の資材生産を伴わないHMFの推計を行う。

表-3に、2.(2)の推計手順に従って推計した建造物による素材別資源固定量を示す。推計結果によると、建築物18万トン(57%)、道路12万トン(38%)、その他2万トンとなり、合計32万トンとなった。素材別に見ると、砂利石材が圧倒的に多く、22万トン(67%)、次いでセメント2.4万トン(8%)、木材2.0万トン(6%)、鉄1.3万トン(4%)であった。個別に見ると、木造建築を行うときに使う砂利石材の量が最も多く4.8万トン、次いで軽量鉄骨プレハブ造の砂利石材量が3.6万トンであった。

上記の結果に、素材別DMI・HMF、評価地域内の資材生産を伴わないHMFを合わせて整理し、TMR(総物質投入量)を推計した結果を図-12に示す。住宅地建設に伴う総物質必要量は、1,040万トンであった。この中で、土地造成に伴う土壌掘削量が最大で、958万トン(92%)であった。域内に固定される資材量は32万トン、その資材固定のために国内で発生するマテリアルフローは、DMI35万トン(固定資材量含む)、HMF5万トン、さらに海外でのマテリアルフローはDMI4万トン、HMF4万トンであった。DMI、HMFの算定に際しては、2.(3)において推計した粗鋼、コンクリート(砂利石材、セメント)、木材の値のみ使用している。その他の建設資材については、DMI=Stock量、HMF=0として推計しているので、その分が過小推計になっていると考えられる。

ケーススタディ対象範囲における宅地造成に伴う物

表-4 ケーススタディ対象範囲における
宅地造成に伴う物質収支表 (単位: 1000 トン)

	域内				域外 (国内)	輸入相手国
	構造物	木	土	合計		
STOCK1970	0	9	0 (自然地形)	9	-	-
FLOW	投入量	322	-	322	42	0
	搬出量	-	-	0	-322	-42
	発生量	-	-	10,036	304	0
	処理量	-	-9	-10,036	-10	-40
STOCK1995	322	0	0	322	13	-82

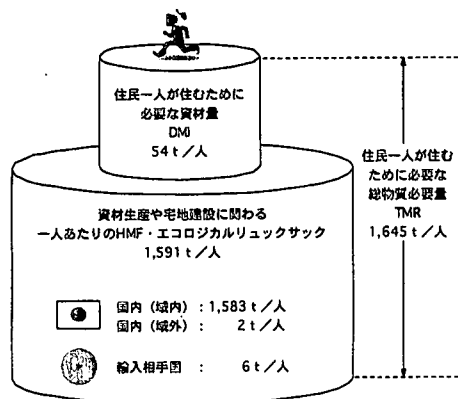


図-13 住民一人に必要な物質量

質量を収支表形式で表したものが、表-4である。評価対象域内の開発前後の物質量は、9千トンから32万トンに増加していることが分かる。それに伴う、国内のストック変化は、+1.4万トンであるが、これは資材生産時の副産物をリサイクルしたものである。また、輸入相手国のストックは、8.2万トン減少している。これは、資材・原材料輸出によるストック減と、資材・原材料生産に伴う廃棄物量、土壌掘削量を合計したものである。

居住人口一人あたりの物質投入量を表したものが、図-13である。この表は、図-12の推計結果を評価対象地区の居住人口で除したものである。住民一人が居住するために投入された資材量は54トン/人であった。その背後で行われる資材生産や原料採取、宅地建設に関わる自然の改変を合計すると、住民一人あたり1,645トン/人になることが分かった。

4. 建設条件変更による TMR 推計

(1) 算定条件

3章により、戸建住宅団地でのMFAを行い、団地建設に伴う物質フローが明らかになった。2.(1)で述べたとおり、このフローに伴い様々な環境負荷が引き起こされていることから、3章の結果は、環境負荷を間接的に示す代理指標であると考えられる。たとえば、建設活

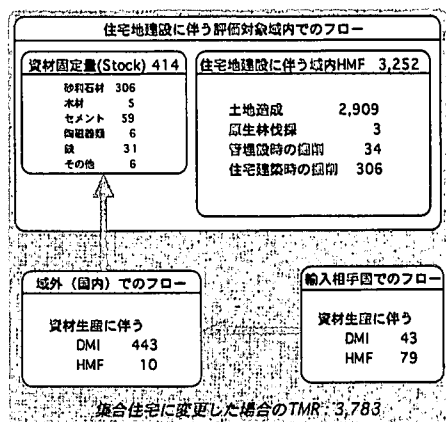


図-14 住宅形態変更に伴うマテリアルフロー
(単位: 1000 トン)

動による生態的な価値の変化、森林植生の保全価値の変化等を考慮する際でも、間接的にTMRがその原因となる物質フローの量を表している。

以上の点を考慮し、建設面積が少ない集合住宅に変更した場合、平地に建設を行った場合は、どの程度TMRに変化があるのかを推計した。

評価対象地区における住宅の総延床面積は、214,000 m²であるので、この面積に相当する集合住宅を建設した場合の検討を行う。建築基準法を満たすため、集合住宅は、耐火構造を持つ鉄筋・鉄骨コンクリート造とし、地上11階、居住エリアは2階から11階とした。この集合住宅を10棟建設し、居住面積は戸建住宅団地と同じ条件であるとした。また、団地内の道路についても、建築基準法の制限を受けるものとし、道路仕様を幅員12m、高級アスファルト舗装とした。現状の戸建住宅団地の面積は131万m²であるが、集合住宅に変更した場合、35万m²を用いるものと仮定した。推計方法については、現状の住宅団地と同様のGISデータベースにより推計を行った。平地に建設した場合については、宅地造成工事による土壌掘削量は少ないものとし、建築工事による掘削量と道路工事による掘削量、管渠敷設工事による掘削量のみを域内HMFとして計上する。

(2) 建設条件変更による TMR 推計結果

住宅形態を戸建住宅から集合住宅に変更した場合のMFA、平地に建設を行った場合のMFAを行った。図-14に集合住宅団地建設に伴うマテリアルフローを示す。集合住宅団地の場合、戸建住宅団地に比べて、建築床面積縮小に伴って団地全体の建設エリアも縮小されるため、住宅地建設における土壌造成工事による土砂移動量が667万トン減少し、290万トンになった。一方、木造中心の戸建住宅から、単位重量の重い鉄筋鉄骨コンクリート造の集合住宅に変更したことにより、評価対

表-5 住宅形態・建設地変更に伴うTMR, DMI, HMF

	戸建住宅団地	集合住宅団地
丘陵地	TMR 10,442 千t 1,645 人/人	TMR 3,783 千t 596 人/人
	DMI 346 千t 54 人/人	DMI 443 千t 70 人/人
	HMF 10,096 千t 1,591 人/人	HMF 3,340 千t 526 人/人
	うち輸入相手国HMF 40 千t 6 人/人	うち輸入相手国HMF 79 千t 12 人/人
平地	TMR 863 千t 136 人/人	TMR 874 千t 138 人/人
	DMI 346 千t 54 人/人	DMI 443 千t 70 人/人
	HMF 518 千t 82 人/人	HMF 431 千t 68 人/人
	うち輸入相手国HMF 40 千t 6 人/人	うち輸入相手国HMF 79 千t 12 人/人

象域内の資材固定量は9万トン増加し、41万トンになった。その中でも鉄をより多く使うため、輸入相手国のHMFが4万トン増加し、8万トンになった。このように、戸建住宅団地から集合住宅団地に変更した場合、建設面積縮小により域内の自然改変は押さえることができるが、建設資材増加により、輸入相手国での自然改変は増加させてしまうことがわかった。

住宅形態を戸建住宅から集合住宅に変更した場合、平地に建設を行った場合のTMR, DMI, HMFを表-5に示す。平地に建設した場合の推計では、宅地造成工事による土地掘削量がないために、大幅にHMFが減少し、結果としてTMRも減少しているが、都市近郊農地を宅地転換した場合に当てはまるものと考えられる。

5. まとめ

住宅団地建設に伴う総物質必要量を明らかにするために、街区レベルでのマテリアルフロー分析手法を提案し、ケーススタディ地区を対象に総物質必要量の推計を行った。推計を行うために、造成前と造成後のGISデータベースを構築し、土壌移動量、原生林伐採量、建築物・土木構造物による資源固定量を定量化し、さらに資材利用に伴う国内、海外でのフローを検討し、以下の結論を得た。

- ①居住施設に関連する構造物の資源固定原単位について、既存文献からの調査に合わせて、企業等にヒアリング調査した結果を表-1にまとめた。
- ②建設における基本資材である鉄、コンクリート、木材について、資材1トンあたりのMFAを行った。その結果、鉄については、DMI 1.62トン、HMF 2.38トン、コンクリートは、DMI 1.07トン、HMF 0.14トン、木材は、DMI 1.87トン、HMF 0.79トンであった。3つの資材のうち、製品1トンに関わる物質量が

最も多いのは鉄であった。

- ③面積1,312,945 m²、建築物数1757棟、居住世帯数2,042世帯、居住人口7,535人の大規模な新興住宅団地をケーススタディ対象として、住宅団地建設のMFAを行った結果、TMRは1,040万トンであった。このうち最も多くを占めたのは、住宅地建設における土地造成工事で958万トンであった。
- ④評価対象地区の物質収支表(表-4)によると、域内でのストック増加は、9千トンから32万トンに増加していることが分かる。それに伴う国内のストック変化は、+1.4万トン、輸入相手国のストック変化は、-8.2万トンであることが分かった。
- ⑤住民一人が居住するために投入された資材量は54トン/人であった。その背後で行われる資材生産や原料採取、宅地建設に関わる自然の改変を合計すると、住民一人あたり1,645トン/人になることが分かった。
- ⑥住宅形態を戸建住宅から集合住宅に変更した場合のMFAを行った。その結果、建築床面積縮小に伴って住宅地も建設エリアも縮小されるため、住宅地建設における土地造成工事が290万トンに減少した。一方、構造を変更し、鉄をより多く使うため、輸入相手国のHMFが増加し8万トンになった。集合住宅に変更した場合、域内の自然改変は押さえることができるが、輸入相手国での自然改変は増加させてしまうことが明らかになった。

今後の課題として、以下の2点が挙げられる。

- ①過小推計の見直しを行うことが必要である。原因は以下の3点が考えられる。1点目は、発電所・上水場・下水処理場の建設重量の配分の問題がある。今回は電線や配管についてのみの算定を行った。しかし、実際には発電所、下水処理施設、浄水処理施設をMFAに含めることが必要である。2点目は、建設に伴う燃料消費(ガソリン等)のHMFを計上していない点である。これは、HMF原単位が把握できなかったことが原因である。3点目は、資材別のDMI, HMFのデータが少ないことである。本研究において資材別のDMI, HMFを代表的な3資材(鉄、コンクリート、木材)のみに絞ったが、その他の資材についてもDMI, HMFを算定し、正確な算定を行うことが必要である。
- ②マテリアルフロー分析とLC-CO₂分析との相関関係を定量化することが必要である。物質移動とエネルギー消費は密接に関係していると考えられるが、その相関性を定量化することで、現在行われているLC-CO₂分析とマテリアルフロー分析を合わせた新しい指標体系を構築することができる。LC-CO₂は、地球環境への負荷を定量化する指標として用いられているが、大規模な自然改変等を評価することができるマテリアルフローとリンクすることで、環境管理施策に新

たな指標を提供することができる。

謝辞:本研究を行うにあたり、貴重なデータを提供していただいた北九州市建築都市局及び担当していただいた深堀氏、恒川氏、ヒアリング調査等でお世話になった皆さまに厚く御礼申し上げます。また、データ収集、入力には和歌山大学卒研究生の広瀬君の協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

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) 森口祐一:マテリアルフロー分析からみた人間活動と環境負荷, 環境システム研究, Vol.25, pp.557-568, 1997.
- 3) Bringeze, S., Stiller, H. and Schmidt-Bleek, F.: Material Intensity Analysis-A Screening Step For LCA, The Second International Conference on EcoBalance, Japan, 1996.
- 4) F.シュミットブレイク(佐々木建訳):ファクター10, シュプリンガーフェアラーク東京, 1997.
- 5) 森口祐一, 吉田雅哉:マテリアルフロー勘定と資源輸入の環境負荷分析, 第13回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集, pp.37-42, 1997.
- 6) Adriaanse, A., Bringeze, S., Hammond, A., Moriguchi, Y., Rondenburg, E., Rogich, D. and Schuetz, H.: Resource Flows-The Material Basis of Industrial Economies, WRI, 1997.
- 7) 天野耕二, 村田真樹:マテリアルフロー分析を用いたセメント・コンクリート産業の環境負荷評価, 環境システム研究, Vol.26, pp.391-396, 1998.
- 8) 守田優, 田淵勲:東京の物質収支の内部構造とその経年変化について, 環境システム研究, Vol.27, pp.623-628, 1999.
- 9) 谷川寛樹, 藤倉良, 井村秀文:都市の物質収支と環境資源勘定に関する研究: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.
- 10) 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計, 環境システム研究, Vol.25, pp.269-275, 1997.
- 11) 谷川寛樹, 松本亨, 井村秀文: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, 環境システム研究, Vol.27, pp.347-354, 1999.
- 12) 建築物協会: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方向について-建設業にかかわる地球環境問題の研究その二-, 1992.
- 13) 酒井寛二:建築活動と地球環境-建築のライフサイクル環境負荷-, 空気調和・衛生工学会新刊, 1995.
- 14) 北九州市建築都市局:北九州市都市計画GISデータベース.
- 15) 日本道路協会:アスファルト舗装要項, 1999.
- 16) 日本道路協会:簡易舗装要項, 1999.
- 17) 日本ダクタイル鉄管協会:便覧, 1999.
- 18) 建設物価調査会:建設物価, 1999.
- 19) 山之口浩, 丸山暉彦:アスファルト舗装修繕技術, 山海堂, 1997.
- 20) 総務庁:1995年産業連関表-計数編(2)-, 全国統計協会連合会, pp.563-592, 1999.
- 21) 笠井芳夫:コンクリート総覧, 技術書院, pp.218, 1999.
- 22) 矢野恒太郎記念会:日本国勢図会, 国勢社, 1999.
- 23) 鈴木胖:リサイクル工学-循環型社会の構築を目指して-, エネルギー・資源学会, pp.75-87, 1996.
- 24) 農林水産省:木材需給報告書-平成7年, 農林統計協会, 1996.
- 25) 林野庁:林業白書平成7年版, pp.26, 1995.
- 26) 岡野健, 鈴木正治, 薬石猛夫, 則元京, 増田稔:木材居住環境ハンドブック, 朝倉書店, pp.15, 1995.
- 27) 太田猛彦, 北村昌美, 熊崎美, 鈴木和夫, 須藤彰司, 只木良也, 藤森隆郎:森林の百科事典, 丸善, pp.260, 1996.

(2000.2.10 受付)

QUANTIFICATION AND EVALUATION OF TOTAL MATERIAL REQUIREMENT RELATED TO THE URBAN CONSTRUCTION : CASE STUDY FOR RESIDENTIAL DEVELOPMENT

Hiroki TANIKAWA and Hidefumi IMURA

With the urban development, the large-scale implication for the natural environment is caused through transferring huge amounts of natural resources and energy from various regions to urban area. In order to evaluate such environment Impact, quantification material transfer related to the urban development by using Material Flow Analysis (MFA) is necessary. Therefore, this paper proposes a method of estimating TMR about urban development, which includes estimation of Direct Material Input (DMI) as well as Hidden Material Flow (HMF). Compared with the other method, the proposed method is bottom-up method and can be applied in the micro scale with the help of GIS. In addition, this method is applied to actual case of residence construction. As the result of case study in Kitakyushu City, it shows TMP for residence construction in low hilly area is about 1,645 Ton/person in which HMF is about 1,591 Ton/person and DMI about 59 Ton/person.