

(29) 社会資本整備にともなう環境インパクトの定量化に関する研究

Study on the Quantification of Life Cycle Environmental Impacts
Pertinent to Infrastructure Provision

池田秀昭*, 井村秀文*

Hideaki IKEDA*, Hidefumi IMURA*

ABSTRACT; The global warming has become a grave concern for mankind. Necessity of energy conservation in our daily life is advocated and policies for saving energy have been discussed in relation to urban environmental management. Here, growing attention has been paid to our lifestyles. In addition, however, we must consider the large amount of energy that are consumed for the improvement of urban infrastructures. Most of it is used through the input of materials such as irons and cements for construction works. From this viewpoint, the present study aims to analyze the energy consumption pertinent to urban infrastructure provision. Firstly, a method for analyzing such energy consumption is developed on the basis of the input-output model. Input of energy for a unit production expressed in monetary terms is calculated by using national input-output tables available today. It is shown that the input energy has been decreased remarkably during the 1955-1989 period in Japan. Secondly, estimation is made on the total energy value of the existing stocks of various infrastructures in the country. Thus this study aims to conduct the quantification of the life cycle environmental impacts related to the provision of various urban infrastructures.

KEYWORDS; input-output analysis, urban energy analysis, embodied energy, environmental impacts of infrastructure provision, global warming

1. はじめに

地球温暖化問題を契機として、現在の経済社会システム全体をエネルギー消費の少ないものに改善していくことが重大なテーマになっている。これは、国や地域の産業構造、国民のライフスタイル等にまたがる広範な問題であるが、現在のところ、エネルギーを直接消費する部門での対策に議論の中心が置かれがちである。個々の工場における製造プロセスの改善や発電効率の向上といった対策がその典型である。しかし、あらゆる財・サービスには、その生産・流通・消費の過程で多くのエネルギーが消費されている。つまり、我々は財・サービスの消費を通じて間接的にも多量のエネルギーを消費している。これが内包エネルギー ("embodied energy") の考え方である^[1]。

1991年度について見ると、日本の建設業における直接的エネルギー消費量は産業部門全体の3.3%、国の全最終エネルギー消費の1.6%に過ぎない。しかし、社会資本整備には、鉄、セメント等の資材が使用され、その製造・運搬のために大量のエネルギーが消費されていることを忘れてはならない。こうした間接的なエネルギー消費の評価は、産業連関分析の手法によって行えるが、最近の報告によれば、建設業及びその関連産業（不動産業等）のエネルギー消費は国全体の30%にも達する^[2]。近年、地域や都市を単位とした地球温暖化対策の議論が活発化しているが、上の議論から明らかなように、家庭生活や自動車利用等にもなう直接的なエネルギー消費に関心を当てるだけでは不十分である。地域や都市をハード面から支える様々な社会資本の建設と

* 九州大学工学部環境システム工学研究センター

Institute of Environmental systems, Faculty of Engineering, Kyusyu University

その維持管理に要するエネルギーに目を向ける必要がある。

ところで、ほとんどの社会資本は、建設後、年月とともに老朽化し、やがては新規設備に更新される（図1参照）。環境にやさしい製品の議論が活発になり、製造、流通、消費、廃棄の全体を通した製品のライフサイクルの評価が議論されているが、社会資本のライフサイクルについても同様の議論があてはまる。

本研究では、以上の視点から、地域の社会資本整備のライフサイクルに着目し、その建設等に要するエネルギーについて分析を試みる。すなわち、社会資本整備に要するフローとしてのエネルギー消費とともに、現存する社会資本ストック全体のエネルギー的価値を評価する。ここで、エネルギーの消費量は、大気汚染物質や二酸化炭素の発生等の面で、地球環境負荷の直接的指標となり得るものである。また、エネルギー以外の資源についても同様の解析が可能であり、こうした分析は、地球環境管理の上で最近注目されている環境資源勘定体系の1つのモデルにもなるものである。

なお、一般に社会資本の定義には、住宅及びそれに類する建築物等は含まないが、産業連関表を用いた建設分野のエネルギー消費構造の分析を行なうにあたって、社会資本と私的資本の区別をつけるのは困難であり、また、私的資本でも公共性の高いものもある。このため、本論文ではこれらを総称して社会資本の範囲に含め論じることとする。

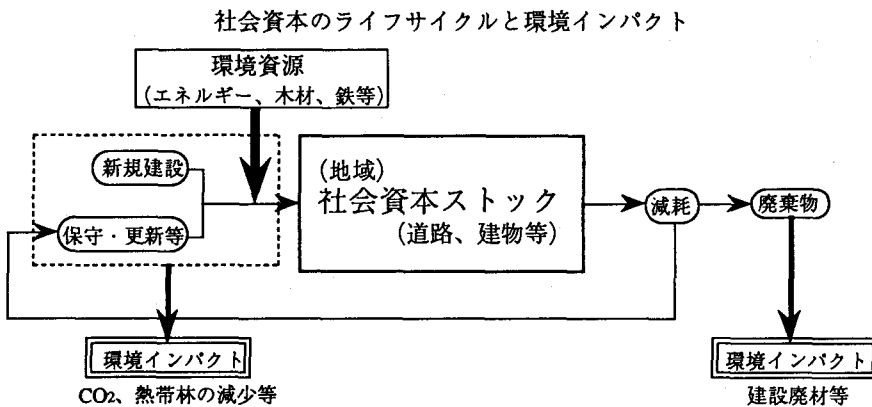


図1 社会資本のライフサイクルの概念図

2. 社会資本ストックの内包エネルギーの評価方法

2.1 単位生産当たりの内包エネルギー

まず、産業連関モデルによって、各産業の単位生産当たりに直接的及び間接的に投入されたエネルギー（内包エネルギー）を求める。産業 j に直接投入されるエネルギーを E_j 、単位生産当たり内包エネルギーを ε_j とすれば、産業 j の資源・エネルギー収支は次式で表される：

$$\varepsilon_j \bar{X}_j = E_j + \sum_{i=1}^n \varepsilon_i X_{ij} \quad (1)$$

行列形式で表すと、

$$E = \varepsilon (\bar{X} - X) \quad (2)$$

これより、

$$\varepsilon = E (\bar{X} - X)^{-1} \quad (3)$$

となる。ここで、 $\bar{X}$ は、需要合計である。これは、輸入財の内包エネルギーを無視する計算となっている。

なお、輸入財の内包エネルギーも考慮するため、輸入財と国内財を同等と仮定し、

$$\varepsilon_j \bar{X}_j = E_j + \sum_{i=1}^n \varepsilon_i X_{ij} + \varepsilon_j \bar{M}_j \quad (4)$$

X_{ij} : 産業 i から産業 j への財またはサービスの流れ
 ε_j : 産業 j の単位生産当たりに内包されるエネルギー
 $\bar{X}_j$: 産業 j の需要合計
 E_j : 産業 j に外生的に投入されるエネルギー

によって計算する方法もある（ $\bar{M}_j$ は産業jの輸入）。この場合には、

$$\epsilon_j \bar{X}_j^* = E_j + \sum_{i=1}^n \epsilon_i X_{ij} \quad (5)$$

であり、 $\bar{X}_j^* = \bar{X}_j - \bar{M}_j$ は国内総生産である。

本論文の計算においては、式（1）を用いることとし、エネルギー源としては、地球環境的に重大な関心の持たれている化石燃料（石油、石炭、天然ガス）を対象とする。これらの資源は、まず最初にエネルギー部門（原油、石油製品、石炭、ガスの各部門）に投入した上で、産業連関を通じた各産業への波及を見る。なお、新炭材等もCO₂排出に寄与しているが、わが国の総排出量占める割合では約1.3%と量的に少ない^[2]、バイオマス起源のものはCO₂排出にカウントしない場合もある、等の理由により今回は対象外とした。

なお、森口ら^[3]は、CO₂の排出構造を分析するため、物量表等を用いて各産業ごとの燃料別消費量から産業別にCO₂の直接排出量を算定し、これを各産業に外生的に投入している。本論文の方法によって計算された化石燃料消費量にCO₂排出原単位を単純に乗じた場合には、最終的に化石燃料を燃焼しているわけではない石油産業等において、実際より多くのCO₂が排出されている結果になる。しかし、筆者らが試算したところでは、CO₂排出分析において特別な取り扱いを要するエネルギー転換、鉄鋼、セメント等の産業を除けば、両者の違いはせいぜい1～2%程度と小さい。

建設業について、単位生産あたりに内包されるエネルギー ϵ （エネルギー原単位）を求め、これに総工事費額を乗じれば、社会資本整備に要するエネルギー消費量が算出できる。建設業内部における産業分類としては、現在利用可能な産業連関表の分類を用いる。すなわち、総務庁発行の統合表（84分類統合表）においては土木及び建設の2部門、建設産業連関表（一般分類表）では46部門である。

原単位 ϵ の値は、各産業によって異なるが、建築及び土木の両部門だけに注目しても、時期的に違いがある。そこで、産業連関表の統合表（昭和40年～55年は61部門、昭和55年は72部門、昭和60年は84部門）を用いて、両部門のエネルギー原単位を算出したのが図2である。ただし、時系列推移については、各年によって物価水準に差があるため、昭和60年を基準として総合卸売物価指数によって調整した。

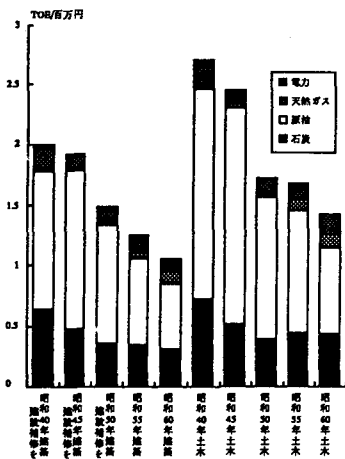


図2 社会資本整備に要するエネルギー原単位の推移

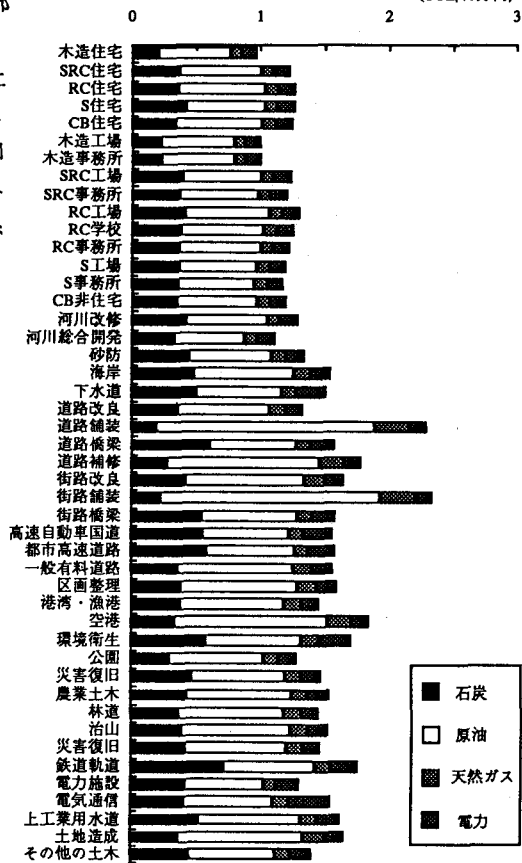


図3 社会資本別エネルギー原単位

なお、用いた産業連関表の産業部門数が年によって異なるため、結果の比較には注意を要するが、森口ら^[4]によれば、分類部門数の違いによる結果の違いは比較的小さいことが示されている。

建築及び土木の両部門において、部門をさらに細かく分類すれば部門ごとにエネルギー原単位は異なる。建設部門分析用産業連関表の一般分類表（1985年、建設46部門）を用いて社会資本整備の事業別のエネルギー原単位を算出したのが図3である。

2. 2 社会資本類型別エネルギー消費量

社会資本類型別エネルギー原単位 ϵ_j にそれぞれの総工事費額（建築工事費：着工建築物工事費予定額、土木工事費：公共工事着工統計総工事費額）を乗じて、過去から現在までの社会資本整備に投入された総エネルギー量（ストック）を評価する。なお、産業連関表では、土木及び建築の両部門において新規建設だけでなく維持補修も含んでおり、総エネルギーは維持補修に要したエネルギーも含む。

その際に採用するエネルギー原単位には2通りの考え方がある。第一は、各年ごとに算出された原単位を用いる方法である。第二の方法は、現在の原単位を用いる方法である。後者は、過去に建設された社会資本の現在価値を、現在の技術水準によって評価（仮に現在の技術によって、同等のものを建設する場合に必要なエネルギー量によって評価）するものである。ただし、いずれの方法でも、建設費の単価については別途調整する。

第一の方法は、現実消費されたエネルギー消費を忠実に評価する上で素直なアプローチであるが、産業連関表の発行されている年についてしかエネルギー原単位が求められない等、データ上の制約がある。これに対し、第二の方法は、現存の社会資本を現在技術で建設するとした場合にいくらエネルギーが必要かを評価するものであるが、最新年のデータで算定できるという利点がある。現実の技術進歩を考えると、第二の方法による値は、第一の場合よりも過小に評価されるはずである。

このような問題があるものの、本論文においては、主にデータ制約のため、第二の方法を採用することとし、原単位は1985年の値を用いる。すると、社会資本 α の総ストックに内包されるエネルギーは、次式で評価される：

$$S_{\alpha} = \sum_{n=0}^N \frac{\epsilon_{\alpha} B_{\alpha,n} \pi_{\alpha,n}}{(1+r)^n} \quad (6)$$

ただし、 $B_{\alpha,n}$ は、現在より n 年前の社会資本 α の総工事費、 $\pi_{\alpha,n}$ はその単価の変動を補正するためのデフレーターである。 r は、社会資本の年々の老朽化にともなう減耗率である。平均耐用年数（減価償却年数）を L とすれば、 $rL \approx 1$ である。 N は、現存の一番古い社会資本の建設年次であるが、多くの建築物の耐用年数が30年程度であることを考慮し、ここでは、建築及び土木の2部門に統合した計算においては、 $N=35$ 年とした。すなわち、1955年～1989年までの35年間に建設された社会資本ストックについて計算した。社会資本別の計算では、データの入手制約のため、これより短い期間についてしか計算できなかった。また、減耗率は分析結果を大きく左右する因子であるが、本論の計算では $r=0.03 \sim 0.05$ の値を採用した。

2. 3 資本減耗の意味

社会資本建設に投入されたエネルギー消費を評価するには、二つの考え方がある。第一は、社会資本建設時にそれに要するすべてのエネルギーを消費したとする考え方である。第二は、減耗率を考慮することによって、建設後の使用時に、資本の減耗分に見合うだけのエネルギーを見かけ上消費し、バランス勘定の上では、それにとまって CO_2 も排出されるという考え方である。前者は、現実忠実にあるが、 CO_2 排出の責任がすべて建設者に帰属されることになる。それに対して、後者の場合、エネルギーは建設後にその社会資本を利用する者の責任とみなされる。この考え方の違いが、減耗率に反映されることになる。

式（6）を資源勘定として整合的に解釈するには、資本建設に投入されたエネルギー量を初期ストックに計上し、その使用とともに資本減耗分を毎年のフローとして控除していき、残存ストックをもって資本の現在価

値と考える必要がある。

3. 計算結果

3. 1 全国の社会資本に内包されるエネルギー

全国について、土木部門と建設部門をそれぞれひとまとめにした場合のエネルギー消費量（フロー）の経年変化を示したのが図4である。ここで、エネルギー原単位は、各年とも1985年の値を用いたため実際の消費量よりは過小評価になっている。また、上式(6)によって、社会資本ストックに内包される総エネルギー量を計算した結果が表1である。同様の評価を、道路、下水道、治水等の社会資本整備事業の類型別に行なった結果が図5、表2、表3及び表4である。ただし、入手できたデータの制約上、道路、下水道、治水については1960年以降の30年間、その他の土木部門社会資本については1983年以降の8年間、建築部門の社会資本については1978年以降の13年間に建設されたものについて計算している。30年間について計算できたものについては、現存の全ストックをかなりカバーできているものと思われるが、その他のものについては、現存ストックのすべてを評価しているとは言えない。これは、もっぱらデータ整備上の制約によるものである。なお、道路や下水道については、物理的施設として具象的であるが、治水などの場合には、施設としての姿が明快でない場合もある。ここでの計算には、物理的姿としては捉えにくいこの種の事業に要したエネルギーも含まれている。また、ストックのフロー（1985年）に対する割合を表5に示した。これは、ストックとフローの相関を示す一つの指標であり、ストックが現在のフローに対してどれくらいかが分かる。

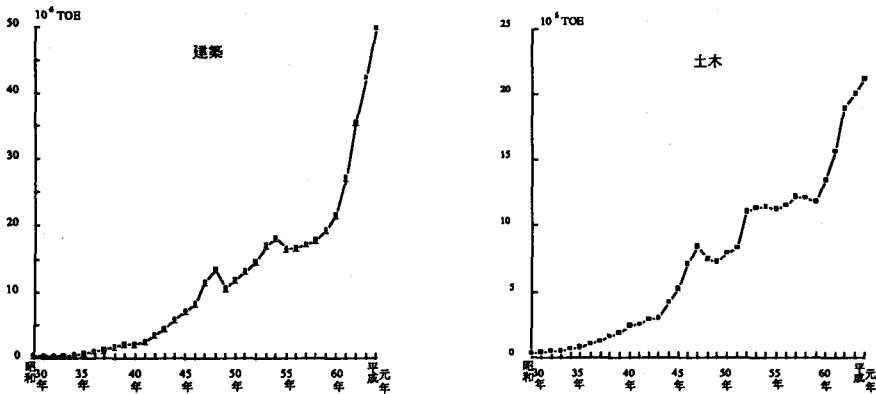


図4 建築及び土木部門のエネルギー投入量の推移（フローの経年変化、 $r=0.04$ として計算）

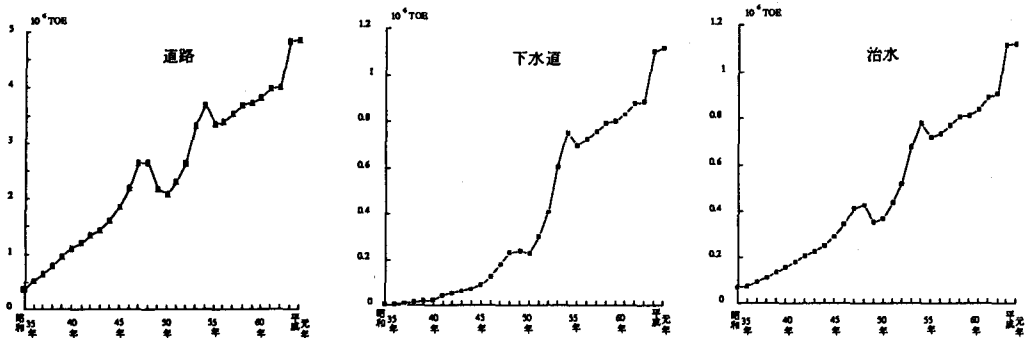


図5 道路、下水道、治水の各社会資本のエネルギー投入量の推移（フローの経年変化、 $r=0.04$ として計算）

表1 建築及び土木部門のエネルギー蓄積量
(ストック、 $r=0.04$ として計算)

	(10 ⁶ TOE)	
	建築部門	土木部門
ストックの現在価値	416	258
社会資本整備にともなう総エネルギー需要量 (1985年) (フロー)	24.8	15.6
全国一次エネルギー総供給量 (1955年～1989年)	9,853	
全国一次エネルギー総供給量 (1955年～1989年、1989年技術換算*)	8,250	

*単位GNPあたりの一次エネルギー総供給量で換算

表2 社会資本別(道路、下水道、治水)エネルギー蓄積量 (ストック、 $r=0.04$ として計算)

	(10 ⁶ TOE)		
	道路	下水道	治水
ストックの現在価値	74.6	12.0	14.8
社会資本整備にともなう総エネルギー需要量 (1985年) (フロー)	4.47	0.96	0.99
全国一次エネルギー総供給量 (1960年～1989年)	9,479		
全国一次エネルギー総供給量 (1960年～1989年、1985年技術換算*)	7,996		

*単位GNPあたりの一次エネルギー総供給量で換算

表3 土木部門社会資本のエネルギー投入量
(1983年～1990年の8年間、 $r=0.04$ として計算)

	(10 ³ TOE)	
	1985年のエネルギー投入量 (フロー)	1983年～1990年の8年間のエネルギー蓄積量 (ストック)
治山・治水	10.1	113
港湾・空港	3.2	63
下水道・公園	11.6	169
災害復旧	4.8	54
土地造成	2.1	34
鉄道軌道	2.4	28
上工業用水道	3.4	44

表4 建築部門社会資本のエネルギー投入量
(1978年～1990年の13年間、 $r=0.04$ として計算)

	(10 ³ TOE)	
	1985年のエネルギー投入量 (フロー)	1978年～1990年の13年間のエネルギー蓄積量 (ストック)
木造	74.9	846
鉄骨鉄筋コンクリート造	32.9	531
鉄筋コンクリート造	63.9	991
鉄骨造	67.4	1,004
コンクリート造	0.5	8

表5 ストックのフロー (1985年) に対する割合 ($r=0$ として計算)

	(10 ⁶ TOE)				
	建築部門	土木部門	道路	下水道	治水
ストックの現在価値	588	384	115.9	16.0	22.0
社会資本整備にともなう総エネルギー需要量 (1985年) (フロー)	24.8	15.6	4.47	0.96	0.99
ストックの現在価値を1985年の総エネルギー需要量 (フロー) で除した値	(23.7年分)	(24.6年分)	(25.9年分)	(16.7年分)	(22.2年分)

3. 2 地域ごとの社会資本に内包されるエネルギー

地域ごとの社会資本ストックの内包エネルギーを評価する上で気になるのは、地域による原単位の違いである。違いの原因としては、地域による工事費、工法、材料輸送コストの差などが考えられる。このため、全国を10ブロックに分けた地域間産業連関表によって、ブロックによる原単位の違いを見たのが図6である。ここでは、ブロックごとの燃料別エネルギー消費量データが石油についてしか入手できなかったため、石油のみの計算となっている。このため、厳密な比較は出来ないが、ブロック間での原単位の差は最大10%程度の範囲内に収まっている。したがって、全国の平均原単位を地域の計算に用いたとしても、誤差はこの程度の範囲に収まるのではないかと推量される。本論文では、この仮定に基づいて計算を行う (つまり、全国平均値を用いる)。

地域単位の評価として、九州各県のそれぞれの総工事費額 (1990年) に社会資本別エネルギー原単位を乗じてエネルギー投入量を算出したのが図7である。

当然のことながら、地域のエネルギーストックは、社会資本の整備度と密接に相関しており、九州地域では、福岡県の値が大きい。また、社会資本類型の内訳では、都市部が多いほど建築関係の比率が高くなる。

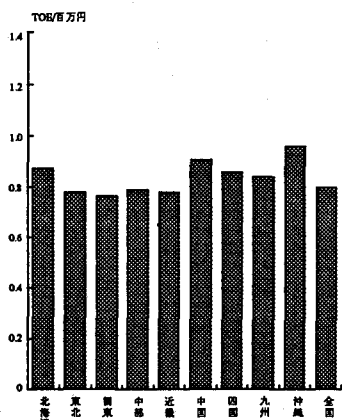


図6 社会資本整備に要するエネルギー原単位
(原油と天然ガスのみ)の地域格差

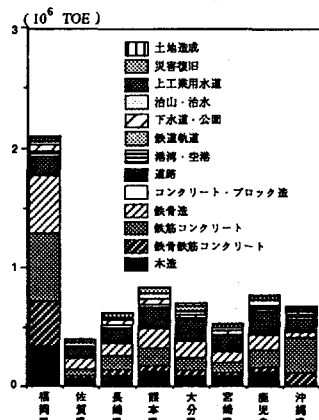


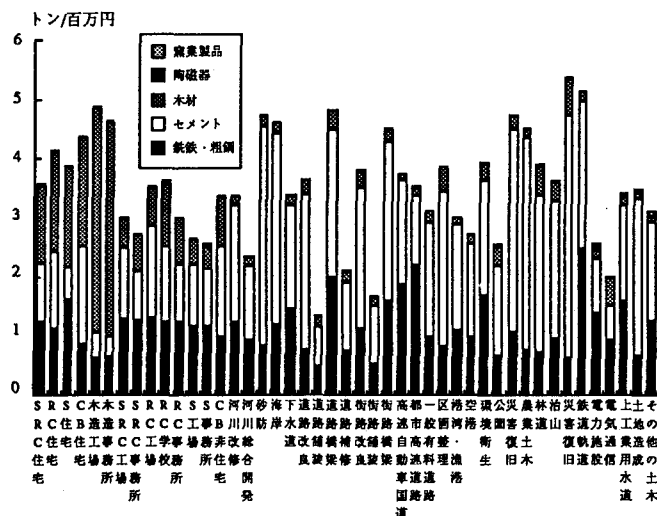
図7 九州各県の社会資本整備に投入された
総エネルギー量(1985年) (フロー)

4. その他の資源消費解析

社会資本整備には、エネルギーだけでなく鉄、木材、セメント等の資材が大量に用いられている。木材の使用が、熱帯雨林の伐採等により地球温暖化を促進する等、これらの資材の消費も、化石燃料と同様に地球環境に大きな影響を及ぼしている。そこで、これらの資源についての解析をエネルギーの場合と同様に行った。これらの素材投入量は、社会資本の老朽化にともなう廃棄物の発生量と密接に関連する。

社会資本整備に使用される建設資材（鉄、セメント、木材、陶磁器、窯業製品）について、単位生産あたりの投入量（トン/百万円）を昭和60年について算出したのが図8である。分析にあたっては、鉄、セメント、木材、陶磁器、窯業製品をそれぞれ銑鉄・粗鋼、セメント・セメント製品、製材・木製品、陶磁器、その他の窯業、土石製品に投入する。重量で総投入の約8割を占める砂利は省略した。計算結果を見ると、木を多く使う木造工場等は木材の使用が多く、砂防、海岸等ではセメントの使用が多くなっている。なお、土木工事にともなう各種資源の消費フローに関する詳しい解析結果が、最近岡本ら^[5]によって報告されている。

建築・土木部門はさまざまな資材のエンドユーザーに近い。このため、他のさまざまな産業からの波及を通じて間接的に消費される資源の割合が大きい。その特性が最も顕著に現われているのがエネルギーであるが、鉄・セメント等の素材については、直接投入されるものの割合が大きく、施設タイプごとの物理的構造物としての特徴をより強く反映した結果になっている。



5. 結 論

本論文においては、内包エネルギーの考え方を用いて、過去から現在までの期間に建設された社会資本ストックのエネルギー的価値を評価した。また、鉄、セメント等の建設資材について、各種社会資本整備に要する投入量を計算した。現存する全国社会資本ストックを、現在の技術で建設するとすれば、昭和60年に社会資本整備に投入されたエネルギー量（フロー）の約24倍を要する（ $r=0$ として計算）。建設業における単位工事費当たりのエネルギー原単位は年々減少している。これは、材料の軽量化、工法の合理化など建設業そのものにおける技術向上の成果であると同時に、鉄、セメント等の素材産業における省エネルギー化をはじめ、日本の産業構造全体の変化による部分も大きい。建設業は、エネルギーの間接的エンドユーザーとして非常に大きな位置を占めており、そこにおける原単位改善は、地球温暖化対策においても重要な意義をもつ。

将来的に、社会資本の新規整備が徐々に完了すれば、その整備に要するエネルギーは保守や維持管理が中心になるであろう。そして、現存ストックからの減耗分と新規需要のためのフロー分とで一定のバランスが達成されるものと予想される。

本研究の次の課題としては、都市を対象単位として、その社会資本整備のライフサイクルについて、資源・エネルギー消費とそれともなう汚染物質、廃棄物の発生等の環境インパクトの定量化を目指したい。ライフサイクルについての環境インパクトを評価するためには、建設廃棄物による影響や、そのリサイクル、再利用についての環境資源的な評価も不可欠である。本研究では、まだこの問題に立ち入れなかったが、今後の研究課題としたい。

参考文献

- [1] 金川 琢、加藤英輔、井村秀文：環境システム研究, Vol.20, pp.242-251, 1992
- [2] 総合エネルギー統計（資源エネルギー庁長官官房企画調査課編、平成4年度版）, p.366
- [3] 森口祐一、近藤美則、清水 浩：「わが国における部門別・起源別CO₂排出量の推計」エネルギー・資源, 第14巻, 1993
- [4] 森口祐一、近藤美則、清水 浩：エネルギー・資源学会第9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.233-238, 1992
- [5] 岡本英靖、酒井寛二、漆崎昇：第一回地球環境シンポジウム講演集（土木学会）, pp.93-98, 1993
- [6] 昭和40、45、50、55、60年全国産業連関表（総務庁）
- [7] 建設部門分析用産業連関表（建設物価調査会、昭和60年）