

日本のエコロジカルフットプリント —土地資源に着目した環境指標に関する研究—

福田篤史¹・森杉雅史²・井村秀文³

¹学生会員 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 経修 名古屋大学助手 環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

³正会員 工博 名古屋大学教授 環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

人間活動の持続可能性を評価するための指標の開発については、既にさまざまな研究が行われている。たとえば、エネルギー消費は大気汚染物質や地球温暖化の原因となる二酸化炭素の排出と密接な関係にあるので、財・サービスの生産に消費された全エネルギーを表す内包エネルギーが、人間活動による環境負荷を総合的に表す代理指標として利用されている。他方、さまざまな資源の生産や汚染の浄化に必要となる土地面積を表すエコロジカルフットプリント (EF) は、自然資本ストックの再生能力を評価するための指標として注目されている。本論文では、産業連関分析の手法によって日本の EF を求める。次いで、EF を指標とした場合と、エネルギー消費を指標とした場合の両者を比較することによって、さまざまな産業が発生させる環境負荷の特徴を比較分析する。最後に、内包エネルギーと EF の両者を 1 つの指標に統合化する一つの試みを提案する。

Key Words : ecological footprint, I-O analysis, environmental indicator, land-use, embodied energy

1. はじめに

近年、人間活動にともなう環境負荷を定量的に評価しようという試みが活発になっている。ここで、環境負荷についての代表的な指標として化石燃料消費量と土地利用量があげられる。近代工業社会は、生産、消費、輸送のあらゆる局面でエネルギー、特に化石燃料を消費している。化石燃料はやがて枯渇する資源であり、また、地球温暖化の原因となる CO₂ の発生源である。化石燃料を大量に消費することは、現代文明の寿命を縮めることを意味する。そうした意味で、エネルギー消費量やエネルギー消費に伴う CO₂ 排出量は、人間活動の非持続可能性を表示する重要な指標である。

他方、土地は自然資本 (natural capital) として、人間のあらゆる生産・消費活動を支え、その上に存在する生態系によって二酸化炭素の固定、汚染の浄化などの機能も有している。土地は地球上のあらゆる生命を支えており、農業や居住のために人間が使用する土

地が増大するほど、野生動植物の生息や自然生態系の維持に必要な土地が減少し、それが地球の非持続性へとつながる。そこで、人間活動のために使われる土地総面積を指標化した「エコロジカルフットプリント (EF)」の概念が提示されている。しかし、エネルギー消費量や CO₂ 排出量に関する研究が地球温暖化問題との関係で活発に行われているのに対して、EF に関する分析は相対的にまだ少ないのが現状である。たとえば、産業連関表を用いて、産業部門ごとのエネルギー消費や CO₂ 排出量を分析する研究は最近活発に行われているが、EF についてのこうした分析の報告はまだ少ない。

ところで、土地とエネルギーは共に生産のために不可欠な要素であり、両者は相互に密接な関係にある。たとえば、農業では、機械化や農業の形で直接的、間接的に多くのエネルギーを投入することによって、少ない土地利用で多くの生産をあげることも可能である。また、化石燃料の代替として太陽光発電や風力等の自

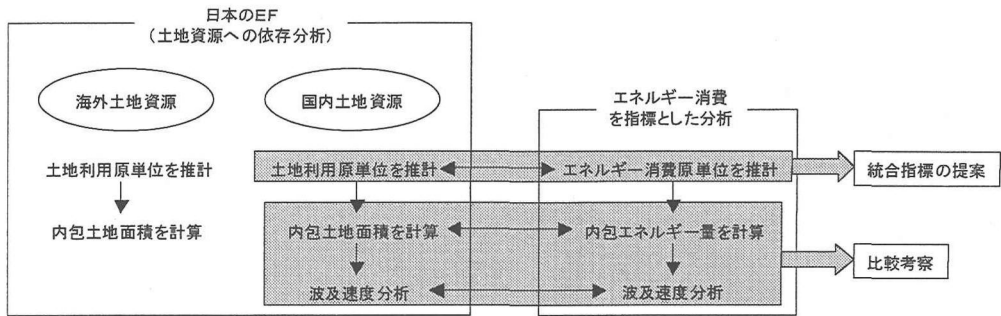


図-1 研究の流れ

然エネルギーを利用しようとすれば、多くの土地が必要となる。これらは、エネルギーと土地が代替の関係にある例であり、一方の負荷を削減すれば他方が増大する関係にある。したがって、人間活動に必要な土地とエネルギーという2つの要素について、両者を一体的に評価できるような指標の開発が望まれるところである。

以上の認識に基づき、本論文では、産業連関分析の手法によって日本のEFを求める。次いで、EFを指標とした場合と、エネルギー消費を指標とした場合の両者を比較することによって、さまざまな産業が誘発する環境負荷の特徴を比較分析する。最後に、EFとエネルギー消費の両者を1つの指標に統合化する一つの試みを提案する。

このため、まず、産業連関分析の一般的な手法を用いて、各産業部門の単位需要金額に内包される土地面積を求め、これをEFとする。これにより、産業別に土地資源への依存度を評価する。また、日本は輸入に大きく依存する国であるため、海外の土地資源への依存度が大きい。これについては、国際産業連関表を用いて、日本国内の食物生産のために海外で利用されている土地資源を求める。次に、土地利用面積(EF)を指標とした場合とエネルギー消費(内包エネルギー)を指標とした場合の環境負荷の比較を行う。比較の第一は、両者の絶対値の相対的比較である。これと同時に、ある産業部門が発生させた環境負荷が産業連関を通して他産業にどのように伝播していくかの波及経路についても比較する。最後に、環境負荷指標としての両者の補完的な役割について考察を行い、2つの指標を1つに統合化する試みを提案する。以上の分析フローの概略を図-1に示す。

2. 分析手法

(1) 既存研究の現状と課題

エコロジカルフットプリントの計算には、様々な方法が提案されている。Wackernagel¹⁾らは農地、森林、エネルギー生産地などの土地資源別に、以下の式によってEFを計算した。

$$EF = \frac{CON}{PRO} \times \frac{1}{POP} \quad (1)$$

CON : 生産物の地域内消費量

PRO : 単位面積当たり生産量

POP : 地域内人口

彼らは、単位面積当たり生産量(PRO)として世界平均値を用いることにより、先進国で3~4ha/cap以上、途上国で1ha/cap未満、世界平均で約2ha/capという値を得ている。他方、Bicknellら²⁾は、産業連関分析の方法によってニュージーランドのEFを推計し、3.49ha/cap(うち、農地1.41、森林0.28、輸入内包分0.91)という値を得ている。しかし、彼らの分析では、輸入品に内包される海外土地資源のEFについても国内と同じ原単位を用いて推計している。

本研究では、基本的にBicknellらの用いた手法を日本に適用する。しかし、日本はニュージーランドに比べて食料の海外依存が大きいと、輸入財の内包分をより正確に求めることが重要である。このため、国際産業連関表を用いて、日本が食料を輸入している地域ごとに原単位を推計し、土地資源利用の相互依存分析を行う。

(2) 原単位の推計方法

ある産業が財やサービスを生産する時には、使用する原料や機械等を生産する部門、電力を供給する部門、運輸部門など他の部門での活動を誘発している。その

結果、その産業が直接利用する土地とともに、他産業を通じて間接的に利用する土地が問題となる。産業連関分析の手法を用いれば、産業部門別に直接・間接的に利用する土地利用原単位（単位生産額あたり土地利用面積）を求めることが出来る。

各産業が、直接・間接的に利用する土地資源の和は、総生産に内包される土地資源と等しい。これを式に表すと次のようになる。

$$E_j + \sum_{i=1}^n \varepsilon_i (1 - m_i) X_{ij} = \varepsilon_j X_j \quad (2)$$

E_j : 直接利用面積

$\varepsilon_i, \varepsilon_j$: 土地利用原単位

m_i : 輸入係数

X_{ij} : i産業からj産業への取引額

X_j : 生産額

ここで、左辺第2項の輸入係数 m_i について説明を加えておく。この分析で用いているのは競争輸入方式の産業連関表であり、取引額 X_{ij} には国内財と輸入財とが含まれている。しかし、本研究では国内土地資源と海外土地資源とを分けて分析するため、取引額から輸入財分を控除する必要がある。ここでは輸入額が国内総需要（中間需要+最終需要）に比例し、各取引に一定の割合で含まれていると仮定して、以下のように輸入係数を計算している。

$$m_i = M_i / (\sum_{j=1}^n X_{ij} + F(D)_i) \quad (3)$$

M_i : i産業の輸入額

$F(D)_i$: i産業の国内最終需要

式(2)はある産業jの土地資源利用についてのものだが、これを全産業について連立させて行列計算を行うと次のように原単位を得る。

$$\varepsilon = E\hat{X}^{-1}(I - (I - \hat{M})X\hat{X}^{-1})^{-1} \quad (4)$$

ε : 原単位ベクトル

E : 直接利用ベクトル

$\hat{X}$: 生産額を成分とする対角行列

X : 中間投入行列

I : 単位行列

$\hat{M}$: 輸入係数を成分とする対角行列

3. 日本のエコロジカルフットプリント

(1) 土地利用原単位と内包資源

本研究では、農地、森林、製造業用地を代表的な土地資源として取り上げ、それぞれ、農業、林業、各製造業によって直接利用されているものとする。これ以外の産業部門については、土地利用面積のデータが入手できなかったため0としている。しかし、日本の国土の約4分の3が森林と農地で占められているから、上記の土地を取り上げるだけで日本の土地資源の大部分をカバーすることが出来る。また、陸域だけでなく、漁業等に利用する海域面積も重要であり、その分析には、漁業部門が利用する経済水域等の面積を加える方法等が考えられるが、ここではそれは行っていない。

日本における農地、森林面積のデータは「日本の統計」（総務庁）³⁾、各製造業用地の面積データは「工業統計」（通産省）⁴⁾に記載の1995年の値を用いる。産業連関表については通産省編の1995年の基本表を利用する。産業分類は細分類であるほうが望ましいが、土地利用データが得られる一番細かな区分が表-1に示す40分類なので、この分類に統合する。

分析は農地、森林、製造業用地とに分けて行い、式(4)を用いて産業別、土地用途別に原単位を求める。さらにその原単位に産業連関表中の国内最終需要額を乗じることによって、その最終需要に内包される土地面積（土地資源内包量）、すなわちEFを求める。これによって、日本国内の生産・消費活動と土地利用との関係を分析する。ここでも、国内最終需要額に含まれる輸入品分を控除し、内包資源量は以下の式で求める。

$$DOM = \varepsilon \times (I - \hat{M})\hat{F}_{(D)} \quad (5)$$

DOM : 必要土地資源ベクトル

$\hat{F}_{(D)}$: 国内最終需要を成分とする対角行列

分析の結果得られた原単位と内包面積とを部門別に、直接利用面積データとあわせて表-1に示す。見やすくするために、値の大きさが顕著な箇所は網掛けで示す。この結果によれば、国内最終需要に対し、林業（860万ha）、建設業（530万ha）、食料品（370万ha）等の部門でのEFが大きく、その中で食料品、建設部門は、農地、森林、製造業用地とも大きな値となっている。ところで、鋳業、鉄鋼部門においては国内最終需要がマイナスであるため、式(5)により求められる内包面積もマイナスとなっているが、これは産業連関表に記載される数値の統計的な問題に起因する。すなわち、鋳業、鉄鋼部門の生産物の大半が中間財として利用されていることと、これらの部門での在庫純増がマイナスとなっていることに起因している。これらの部門が

表-1 産業部門別土地利用原単位及び内包土地面積 (1995 年)

8分類	40分類	産業部門 直接利用 面積 (ha)	原単位 (ha/1億円)			国内最終 需要 (億円)	内包面積 (ha)			
			農地	森林	製造業 用地		農地	森林	製造業 用地	計
農林 水産業	農業	5,388,600	50.70	2.91	0.01	32,318	1,638,630	94,083	438	1,733,151
	林業	25,146,000	0.33	2096.46	0.01	4,078	1,360	8,549,624	27	8,551,011
水産業	漁業	0	0.49	1.09	0.01	5,838	2,890	6,376	77	9,343
	鮎業	0	0.02	1.43	0.01	-53	-1	-76	-0	-78
鉱業	石炭	0	0.03	12.19	0.01	3	0	36	0	36
	原油・天然ガス	0	0.01	1.26	0.01	8	0	10	0	10
製造業	食料品	12,083	9.34	4.20	0.05	272,115	2,541,264	1,142,678	13,169	3,697,110
	繊維製品	5,935	0.61	2.71	0.08	60,170	36,613	163,028	4,957	204,597
	パルプ・紙・木製品	9,783	0.06	111.69	0.09	19,144	1,074	2,138,146	1,680	2,140,899
	出版・印刷	1,281	0.02	14.50	0.03	15,920	339	230,911	474	231,723
	化学製品	16,513	0.13	5.57	0.10	29,703	3,824	165,306	2,914	172,044
	石油・石炭製品	5,506	0.01	0.29	0.06	26,210	166	7,681	1,475	9,322
	プラスチック製品	5,357	0.04	3.10	0.10	6,140	270	19,059	594	19,923
	ゴム製品	1,753	1.57	2.56	0.09	4,240	6,665	10,854	365	17,884
	なめし革・毛皮・同製品	213	0.84	10.92	0.04	7,388	6,170	80,684	327	87,181
	窯業・土石製品	11,577	0.03	3.41	0.14	4,491	118	15,315	650	16,083
	鉄鋼	18,143	0.02	1.15	0.18	-1,094	-18	-1,257	-192	-1,467
	非鉄金属	5,518	0.02	1.69	0.13	1,839	33	3,108	235	3,376
	金属製品	8,450	0.02	1.64	0.10	10,787	180	17,742	1,125	19,047
	一般機械	13,252	0.04	1.37	0.09	139,615	4,896	190,846	12,579	208,321
	電気機械	13,726	0.03	2.05	0.06	191,138	5,185	391,202	11,035	407,422
	輸送機械	15,794	0.06	1.43	0.10	124,986	7,621	178,474	12,077	198,173
	精密機械	1,399	0.03	1.92	0.06	18,985	627	36,528	1,199	38,354
	その他の製造業	1,545	0.88	7.70	0.06	29,786	26,252	229,360	1,704	257,316
建設	建設	0	0.10	6.47	0.03	800,295	77,997	5,180,673	26,002	5,284,672
	電力	0	0.01	0.96	0.01	46,126	600	44,455	290	45,345
電気・ガス ・水道等	ガス・熱供給	0	0.02	1.36	0.01	10,534	187	14,356	70	14,612
	水道・廃棄物処理	0	0.02	1.16	0.01	34,217	651	39,576	271	40,497
商業	商業	0	0.02	1.56	0.00	631,679	11,137	982,512	2,477	996,126
	金融・保険	0	0.01	1.33	0.00	75,960	781	100,865	264	101,910
運輸	不動産	0	0.01	0.52	0.00	535,389	3,364	280,328	1,019	284,711
	運輸	0	0.01	1.55	0.01	142,770	2,080	221,935	1,376	225,391
サービス	通信・放送	0	0.07	1.08	0.00	52,807	3,614	56,937	187	60,738
	公務	0	0.03	1.47	0.01	257,555	8,788	378,565	2,192	389,545
サービス	教育・研究	0	0.05	1.36	0.00	226,918	12,211	307,643	932	320,786
	医療・保健・社会保障	0	0.34	2.01	0.02	352,719	119,082	707,672	6,489	833,243
サービス	その他の公共サービス	0	0.03	3.35	0.01	35,065	1,151	117,545	274	118,970
	対事業所サービス	0	0.04	1.74	0.01	130,216	4,864	226,285	1,423	232,573
サービス	対個人サービス	0	1.55	2.85	0.01	510,042	791,808	1,454,064	4,846	2,250,778
	その他	0	0.06	14.38	0.02	226	13	3,243	5	3,261

注) 直接利用面積については日本の統計 (総務庁統計局)、工業統計表 用地・用水編 (平成 7 年) の出展による

利用した土地は、これらの部門の製品を中間財として利用した部門に計上されていることに留意する必要がある。

(2) 土地資源に関する波及速度分析

ある産業部門で需要が生じると、それは他産業への波及を引き起こす。表-1 に示したのは無限次までの波及を取り入れた原単位であるが、産業別の波及過程の比較によって土地資源利用の特徴を分析することができる。そこで、以下の方法によって、内包負荷の波及経路・速度について分析する。

式(4)の逆行列の部分を展開すると、以下の式が得られる。

$$\varepsilon = E\hat{X}^{-1}(I + \alpha + \alpha^2 + \alpha^3 + \alpha^4 \dots) \quad (6)$$

$$(\text{ただし、}\alpha = (I - \hat{M})X\hat{X}^{-1})$$

式(6)を用いて、最終段階 (式(4)) での原単位を 100 とした時の各段階での原単位の推移を調べる。初期段階で 100 に近づくものほど波及速度が速く、土地資源との直接的な結びつきが強い。産業分類を表-1 に示す 8 部門に統合して結果を示したのが、図 2～図 4 である。ここで、式(6)中の α の指数及び図中の ε の添え字は、ともに波及効果の回数に対応している。

製造業用地の利用については全体的に波及が速く、部門別で大きな差が見られない。これに対し農地、森林の利用については各部門で波及速度に差が見られる。詳しく見てみると、農地は製造業、建設業で、森林は鉱業、建設業部門での波及が速く、これらの産業と土地との関係が強いことを示している。

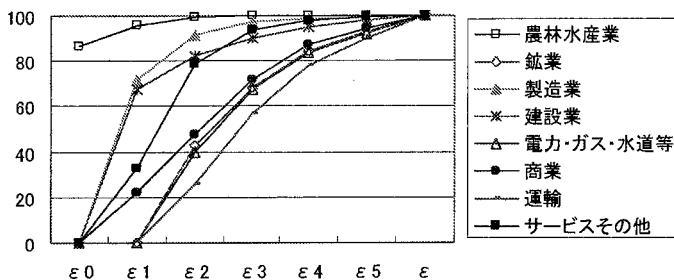


図-2 農地の波及速度分析 (1995 年)

注) ϵ の添え字は、式(6)に示す波及効果の次数に対応しており、図は ϵ を 100 とした時の各値を示す。

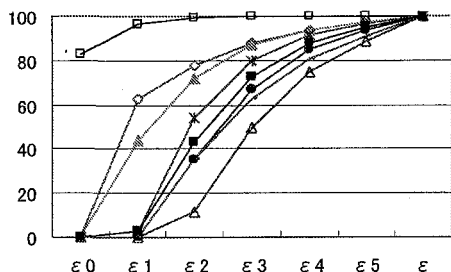


図-3 森林の波及速度分析 (1995 年)

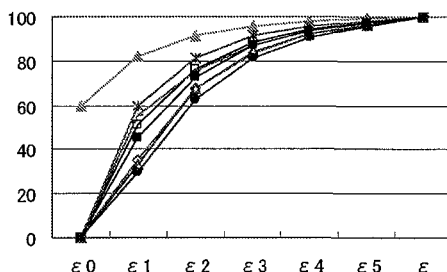


図-4 製造業用地の波及速度分析 (1995 年)

4. 国際間での土地資源依存

(1) 農地利用原単位の地域比較

各国は貿易を通じ、相互に他国の土地資源に依存している。この関係を把握するため、国際産業連関表を用いて、各地域の土地資源相互依存について分析する。国際産業連関表は 1990 年の 30 分類のものを利用した。国内の分析との整合性を確保するためには、データの年次、産業分類を一致させるのが望ましいが、データが入手できなかったのがこのような便法を採ることにした。この産業連関表では日本、アメリカ合衆国、EU (イギリス、フランス、ドイツ)、アジア (韓国、中国、台湾、タイ、マレーシア、フィリピン、シンガポール、インドネシア) の 4 地域についてそれぞれ取引額表、最終需要ベクトル及び他の 3 地域に ROW (Rest Of World) を加えた 4 地域に対する輸出入額が与えられている。ここでは、土地利用データが入手できた農地についてのみ分析を行うが、日本は農産物を多く輸入しており、また、農産物は生活上欠くことのできない重要な財であるから、農地に限った分析でも十分意味があると言ってよからう。日本及び上記 4 地域の農地面積については、文献⁹⁾から国別に得られたデータを各地域ごとに集計して用いる (表-2)。

式(4)により各地域での農地利用原単位を求めた結果を表-3 に示す。地域間での比較を行うと、単位生産額当たり農地利用面積はアメリカ、アジアで多く、EU や日本では少ない。しかし、土壌の質による生産性や肥料の投与等による環境負荷等を考慮すれば、利用面積が少ないことを単純に技術水準の高さとして評価することはできない。また、産業連関表からは取引額のみしか知ることができないが、価格の差が効いていることも考えられ、これを生産量単位で比較すればその差が小さくなることが予想される。物量ベースの産業連関表等が利用できれば、このような分析も可能になる。

(2) 国際間での農地依存分析

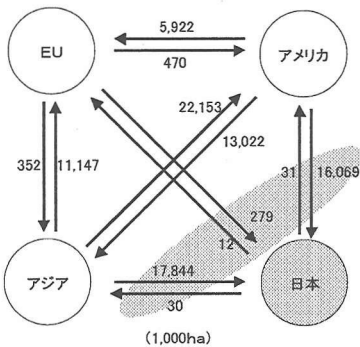
アメリカ、EU、アジアの 3 地域で得られた農地利用原単位に、それぞれ日本への輸出入額を乗じることにより、日本の輸入による海外農地への負荷を求めたのが表-3 である。アメリカからは農産物、EU からは食料品、アジアからは農産物、食料品のほか、繊維製品などの輸入によって発生する負荷が大きい。

また、3 地域からの輸入品に内包される総農地面積は約 34,000 千 ha となり、日本の国土面積 (38,000 千 ha) の約 90% (日本の農地面積の約 7 倍) に相当する。

表-2 世界の農地面積 (1990 年)

地域分類	農地面積 (1000ha)
日本	5,243
アメリカ合衆国	431,382
EU	66,497
アジア	569,609
ROW	3,773,563

(出展) 総務庁統計局：世界の統計



注) 矢印の向きは輸出入の向きを、
数字は内包される農地面積を表す。

図-5 農地の地域間依存

表-3 世界各地域における産業部門別農地利用原単位および
日本への輸入品に内包される農地面積

産業部門	地域別農地利用原単位 (ha/1億円)				輸入品に内包される 農地面積(1000ha)		
	日本	アメリカ	EU	アジア	アメリカ	EU	アジア
農業	47.06	2025.90	389.36	2113.15	11,680	42	5,480
林業・漁業	0.31	178.18	13.15	84.74	872	1	527
食料品	10.67	568.72	91.37	892.14	3,227	192	4,789
繊維製品	1.34	66.09	6.41	376.48	48	8	3,806
木製品	0.14	14.54	1.96	91.45	52	1	310
鉱業	0.11	1.34	0.63	25.26	2	0	402
化学製品	0.29	9.32	2.79	135.62	49	13	372
石油製品	0.02	1.86	0.43	17.86	1	0	83
窯業・土石製品	0.12	3.00	0.81	35.47	2	0	44
鉄鋼製品	0.08	2.93	0.71	23.13	1	0	67
非鉄金属製品	0.07	2.20	0.66	25.73	7	1	57
金属製品	0.09	2.54	0.65	34.10	2	0	39
一般機械	0.11	2.30	0.78	35.35	7	2	44
電気機械	0.13	2.60	0.79	29.47	30	2	202
自動車	0.14	4.76	0.95	38.59	6	7	7
その他の輸送用機械	0.12	2.65	0.72	37.18	14	0	7
精密機械	0.12	3.63	0.69	32.54	6	1	20
その他の製造業	0.94	6.78	0.95	162.50	8	1	405
新聞・印刷・出版	0.11	4.53	0.94	50.66	1	0	2
プラスチック製品	0.15	4.42	1.14	67.07	2	0	33
ゴム製品	1.07	8.97	5.81	463.82	2	1	89
皮革・革製品	1.18	6.38	5.52	435.76	1	3	884
建設	0.18	4.84	0.84	29.14	0	0	0
商業	0.11	4.97	1.77	34.43	36	3	106
電力・水道・ガス	0.10	1.76	0.51	16.40	0	0	0
金融・保険	0.10	4.24	0.96	18.35	0	0	0
郵便・通信	0.07	1.95	0.45	11.14	0	0	0
サービス業	0.52	18.54	3.18	95.19	0	0	0
その他	0.45	1.08	0.00	7.69	2	0	7
運輸	0.10	4.02	1.05	30.70	10	0	59
計					16,069	279	17,844

注) 1990 年の国際産業連関表を用いた分析による

井村ら⁶⁾は、日本が輸入する穀物(小麦・大麦・米・トウモロコシ・大豆)と牛肉について、輸出国(アメリカ、カナダ、オーストラリア、フランス、アルゼンチン)の生産のために海外で利用される土地の分析を行い、27,000千haという値を示している。対象としている地域も方法も異なるため単純には比較できないが、オーダー的に同程度と言える。これらの結果が示すとおり、日本は農産物の輸入により、少なくとも日本の国土面積に匹敵する農地を海外で必要としている。さらに、日本以外の地域にも同様の分析を行うことにより、図-5のような相互依存関係が得られた。EU、日本によるアメリカ、アジアの農地の間接的な利用面積が大きい結果になっている。しかし、特にアジアからの輸入については、前述のとおり、価格差のために実際以上に大きな面積になっている可能性が強く、これを考慮した検討が必要である。

5. エネルギー消費分析との比較

(1) 内包資源量の比較

はじめに述べたように、土地が地球上のあらゆる生

命を支える資源であるのに対し、エネルギーは近代産業を支える資源である。また、これらの両資源は互いに代替的あるいは補完的な役割を果たすことが多い。ここでは、エネルギー消費を指標とした分析を行い、土地利用を指標とした場合との比較を行うとともに、両者を統合した指標による環境負荷評価を試みる。

エネルギー利用原単位は国立環境研究所等の多くの研究によって、400以上の産業分類についての値が求められているが、土地資源との比較を容易にするためにここでは同じく40分類で原単位を求める。産業連関表についても土地資源の場合と同じもの(1995年)を用い、各エネルギーの国内総供給量データ(1995

表-4 日本のエネルギー供給データ

産業部門	エネルギー分類	(1995年) 供給量 (10 ¹⁵ J)
石炭	石炭	3,763
	原油	10,295
原油・天然ガス	天然ガス	2,467
	水力	791
電力	原子力	2,743
	新エネルギー等	297

(出展) 資源エネルギー庁：総合エネルギー統計

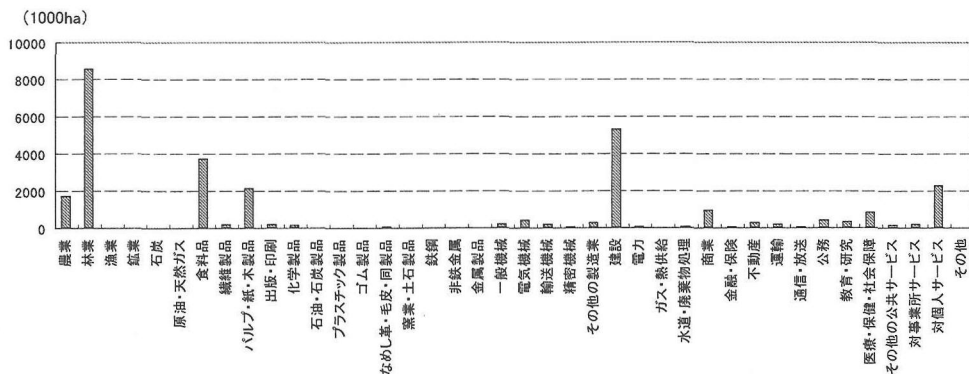


図-6 産業部門別土地資源内包量 (1995 年)

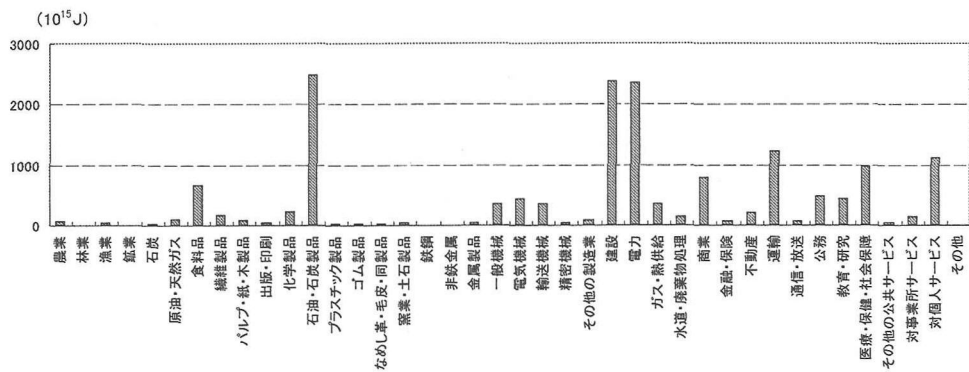


図-7 産業部門別エネルギー内包量 (1995 年)

年)は文献⁷⁾より得た。各エネルギーは表-4で示した産業部門に直接投入されるものとする。式(4)、(5)を用いて部門別での内包エネルギーを各エネルギーについて求め、それらを合計して内包エネルギーの総量とする。土地資源についても農地、森林、工業用地について求めた内包量を合計し、両者の比較を行った(図-6、図-7)。

単位需要金額当たりの土地(EF、内包土地資源)は、農業、林業、食料品、パルプ・紙・木製品、建設、サービス等で大きい。他方、内包エネルギーは、石油・石炭製品、建設、電力、運輸、サービス等で大きい。以上の結果は、土地資源が一次産品関連部門と、エネルギーは二次、三次産業との結びつきが強いことを示している。

また、産業別に見てみると、農業、林業、パルプ・紙・木製品等は土地資源への依存が大きく、エネルギーへの依存が小さい産業であり、石炭・石油製品、電力、運輸等については逆のことが言える。食料品、建

設、サービス等は土地、エネルギーともに多くを必要とする産業であることがわかる。

(2)波及速度の比較

式(4)、(6)を用いて各部門でのエネルギーの波及速度を分析した結果を図-8～図-10に示す。これらの図は土地資源における図-2～図-4と同様に、式(4)で得られた原単位を100とし、表-1に示す8分類で波及速度を比較したものである。

石炭と原油・天然ガスについては、間接1次、間接2次での利用が大きい。間接1次の利用は、化石燃料を直接製品化したり、電力に変換したりする産業の影響によるもので、間接2次の利用は、他産業による電力の消費と考えられる。これは原子力・水力等、電力部門のエネルギーが、ほとんどの産業で間接1次で利用されていることから説明がつく。土地資源での結果と比較すると、農地、森林では部門により波及速度に差が見られるのに対し、エネルギーは全部門で波及

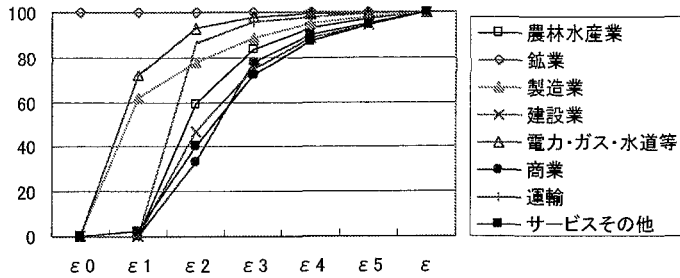


図-8 石炭の波及速度分析 (1995 年)

注) ε の添え字は、式(6)に示す波及効果の回数に対応しており、図は ε を 100 とした時の各値を示す。

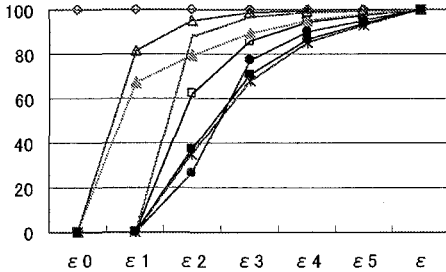


図-9 原油/天然ガスの波及速度分析 (1995 年)

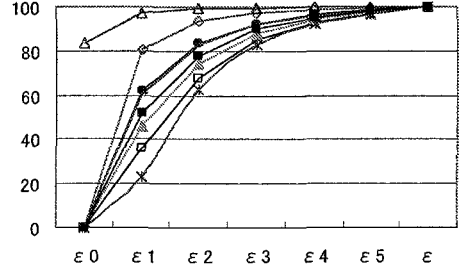


図-10 原子力・水力等の波及速度分析 (1995 年)

が速い。

(3) 土地・エネルギーの両者を指標とした環境負荷

以上において、産業別に、土地利用による環境負荷とエネルギー消費による環境負荷を比較分析したが、環境負荷の評価において土地利用とエネルギー消費のどちらが適しているかを一概に論じることはできない。そこで、それぞれの指標によって相対的な環境負荷の大きさを求めた上で、両者を統合化する指標について1つの試みを提案する。

まず、農地、森林、製造業地について求めた利用原単位を合計して土地利用原単位 $\varepsilon_j^{(L)}$ とし、石炭、原油・天然ガス、原子力・水力等についても同様に合計してエネルギー利用原単位 $\varepsilon_j^{(E)}$ とする。両原単位について、生産額をウェイトとして以下の式により加重平均を求める。

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum \varepsilon_j X_j}{\sum X_j} \quad (7)$$

この結果、平均原単位 $\bar{\varepsilon}^{(L)}$, $\bar{\varepsilon}^{(E)}$ はそれぞれ 9.24 (ha/1 億円), 6.22 (10^{12} J/1 億円) となった。平均原単位を 100 とした時の、各部門における原単位の相当量を $\sigma_j^{(L)}$, $\sigma_j^{(E)}$ と定義し、以下の Cobb-Douglas 型の式によ

り、土地利用、エネルギー消費双方による環境負荷を統合した指標を計算してみる

$$Y = (\sigma_j^{(L)})^\alpha (\sigma_j^{(E)})^{1-\alpha} \quad (8)$$

この式は、エネルギーと土地の2つを生産要素とした一次同次の生産関数をヒントとしている。すなわち、エネルギーと土地が代替的關係にあり、エネルギー消費、土地利用の両者が2倍になる場合に生産も2倍になるという仮定が成立する場合には、両者を統合化する良い指標になるものと期待できる。実際にこの仮定が成立するかどうか、この指標が有効かどうかは、検証を要する課題である。

ここではまず、土地、エネルギーのウェイトが等しくなるように、 $\alpha=0.50$ として値を求めてみた。その結果によれば、エネルギー、土地のいずれかでの負荷が大きかった林業、石炭、原油・天然ガス部門の値が大きい(表-5)。また、エネルギー、土地の両方について比較的負荷の大きかったパルプ・紙・木製品の値が大きい。このほかの産業については、エネルギーと土地の両方の寄与が相互にバランスしあって、指標値の差は縮小している。この結果、たとえば、エネルギー消費は大きい土地利用は小さい化学製品と、その反対に土地利用は大きいエネルギー消費は小さい食料品の値がほぼ似た値になっている。この $\alpha=0.50$ の場

表-5 土地利用、エネルギー消費を指標とした環境負荷の統合的評価 (1995 年)

産業部門	$\varepsilon^{(L)}$ (ha/1億円)	$\varepsilon^{(E)}$ (10^{12} J/1億円)	$\sigma_j^{(L)}$	$\sigma_j^{(E)}$	Y	
					$\alpha=0.50$	$\alpha=0.60$
農業	53.63	1.86	58.1	30	131.9	177.4
林業	2096.80	2.29	22,697	37	915.0	1739.2
漁業	1.60	5.60	17	90	39.5	33.5
鉱業	1.46	4.14	16	67	32.5	28.1
石炭	12.23	4469.01	132	71,877	3084.6	1643.3
原油・天然ガス	1.27	12148.41	14	195,389	1640.3	630.6
食料品	13.59	2.40	147	39	75.3	86.1
繊維製品	3.40	2.67	37	43	39.8	39.2
パルプ・紙・木製品	111.83	4.00	1,211	64	278.9	374.1
出版・印刷	14.56	1.98	158	32	70.8	83.1
化学製品	5.79	7.78	63	125	88.6	82.7
石油・石炭製品	0.36	94.60	4	1,521	76.5	42.1
プラスチック製品	3.24	4.34	35	70	49.5	46.3
ゴム製品	4.22	3.97	46	64	54.0	52.2
なめし革・毛皮・同製品	11.80	2.06	128	33	65.1	74.5
窯業・土石製品	3.58	7.77	39	125	69.6	61.9
鉄鋼	1.34	8.65	15	139	44.9	35.8
非鉄金属	1.84	3.90	20	63	35.3	31.5
金属製品	1.77	3.73	19	60	33.9	30.2
一般機械	1.49	2.57	16	41	25.8	23.5
電気機械	2.13	2.24	23	36	28.8	27.6
輸送機械	1.59	2.79	17	45	27.7	25.2
精密機械	2.02	2.07	22	33	27.0	25.9
その他の製造業	8.64	2.56	94	41	62.0	67.3
建設	6.60	2.97	71	48	58.4	60.8
電力	0.98	51.07	11	821	93.5	60.5
ガス・熱供給	1.39	32.77	15	527	89.0	62.3
水道・廃棄物処理	1.18	4.02	13	65	28.8	24.5
商業	1.58	1.24	17	20	18.5	18.2
金融・保険	1.34	0.68	15	11	12.6	13.0
不動産	0.53	0.39	6	6	6.0	6.0
運輸	1.58	8.51	17	137	48.4	39.3
通信・放送	1.15	1.15	12	18	15.2	14.6
公務	1.51	1.86	16	30	22.1	20.8
教育・研究	1.41	1.88	15	30	21.5	20.1
医療・保健・社会保障	2.36	2.73	26	44	33.5	31.7
その他の公共サービス	3.39	1.14	37	18	25.9	27.8
対事業所サービス	1.79	1.18	19	19	19.1	19.2
対個人サービス	4.41	2.18	48	35	40.9	42.2
その他	14.46	2.23	157	36	75.0	86.8

注) $\varepsilon_j^{(L)}$: 土地(農地、森林、製造業用地)利用原単位、 $\varepsilon_j^{(E)}$: 全エネルギー利用原単位

$\sigma_j^{(L)}$ 、 $\sigma_j^{(E)}$: 全産業平均原単位に対する相対量、Yについては式(8)を参照

合、式(8)におけるウェイトは等しいものの、表-5の結果においては、全体的にややエネルギーからの寄与分が指標値を大きくしている傾向が見られる。

次に、指標値のばらつきを小さくするため、Yの最大値と最小値との差が最小となるような α を0.01刻みで求めた結果、 $\alpha=0.60$ を得た。このときの指標値を見ると、林業、石炭部門での値が大きい。林業は土地で、石炭部門はエネルギーでの負荷が大きい産業であり、指標値が近似していることから、この場合、両者の寄与分がほぼ等しい状態であるといえる。土地の直接利用分が特に大きい農業、林業やエネルギー産業(石炭、原油・天然ガス)を除くと、他は比較的ばらつきは小さいが、その中でも食料品、パルプ・紙・木製品、化学製品等での指標値が大きいことがわかる。

このように、指数 α の値によって指標値は変化するので、その値の最も合理的な決定方法については今後

の課題である。

6. まとめ

本研究では、日本のEFを求めるために、産業連関分析を用いて土地利用原単位および内包資源量を各産業部門で求めた。また、エネルギーを指標とした場合との比較分析を行うとともに、両者の相互関係について考察を行った。この結果、以下の知見を得た。

- 1) 国内最終需要に対する土地資源(農地、森林、製造業地)の内包量は、林業(860万ha)、建設業(530万ha)、食料品(370万ha)の順に多い。
- 2) 日本への輸出品に内包される農地は、アメリカで1600万ha、EUで28万ha、アジアで1800万haとなり、日本人の生活及び日本の産業活動はア

メリカ、アジアの農地と結びつきが強い。ただし、アジアについては、農産物価格の差のために過大な推計になっている恐れがある。

- 3) 内包資源量、波及速度分析はともに、土地資源は第一次産品関連部門、エネルギーは第二次、第三次産業との関係が強いことを示している。
- 4) 土地利用による環境負荷と、エネルギー消費による環境負荷とを統合的に評価するための指標の提案を行った。指数 α の決定方法などに課題が残されているものの、この指標を用いることで、エネルギー消費は大きい土地利用は小さい部門と、その反対に土地利用は大きいエネルギー消費は小さい部門の比較が可能になる。

本分析では、土地資源の属性として、その利用面積にしか着目していないが、土地には、植物生産やCO₂固定能力、水源涵養機能等、多様な機能があり、機能の異なる土地を面積という1つの指標で評価することの問題点がある。また、都市用地、道路・交通施設用地、水面（海、湖沼、河川）なども考慮する必要がある。このように、土地を指標としたエコロジカルフットプリントそのものについても、多様なアプローチが求められる。他方、土地とエネルギーという2つの代表的指標を統合することによって、資源消費から見た

人間活動の持続可能性を評価する試みも重要と思われる。これについては、今後の試行錯誤の積み重ねによって、より良い指標を検証・提案していきたい。

参考文献

- 1) Wackernagel, M., Onisto, L., Bello, P., Linares, A.C., Falfan, I.S., L., Garcia, J.M., Guerrero, A.I.S., Guerrero, M.G.S.: Natinal natural capital accounting with the ecological footprint concept, *Ecological Economics* 29 (1999), pp.375-390, 1998.
- 2) Bicknell, K.B., Ball, R.J., Cullen, R., Bigsby, H.R.: New methodology for the ecological footprint with an application to the New Zealand economy, *Ecological Economics* 27 (1998), pp.149-160, 1997.
- 3) 総務庁統計局：日本の統計 1997年度版, 1997
- 4) 通商産業大臣官房調査統計部：平成7年 工業統計表 用地・用水編, 1995.
- 5) 総務庁統計局：世界の統計 1994年度版, 1994.
- 6) 芥川崇, 水野隆司, 松本亨, 藤倉良, 井村秀文：輸入農産物の国外環境負荷に関する研究, 第4回地球環境シンポジウム講演集, pp.217-222, 1996.
- 7) 資源エネルギー庁長官官房企画調査課：総合エネルギー統計, 2000.

THE ECOLOGICAL FOOTPRINT OF JAPAN: ENVIRONMENTAL INDICATOR FOCUSING ON LAND RESOURCE

Atsushi FUKUDA, Masafumi MORISUGI and Hidefumi IMURA

A number of studies have been made to develop indicators which can assess the sustainability of human activities. For example, the embodied energy or the total energy directly and indirectly consumed for the production of goods and services has been used as a proxy variable that can represent the overall environmental impact of economic activities, as energy use is related to the emission of air pollutants and carbon dioxide that causes the climatic change. On the other hand, ecological footprint (EF) or the land area required to produce the resources and assimilate the wastes is another indicator that focuses on the reproductivity of natural capital stocks. This paper presents an estimate of the ecological footprint of Japan based on the input-output model. Then it compares the environmental loads caused by different industry sectors, using embodied energy and EF as indicators. Finally, it presents an indicator that integrates the embodied energy and the ecological footprint.