

■ 展望・解説 ■

資源連関分析—資源多消費社会の分析をめざして

On the Assessment of Resource Requirements for Social Activities

齋藤雄志*

Takeshi Saito



1. まえがき

近年、工業製品、生活用品を含むさまざまな製品の生産から廃棄にいたる環境負荷を総合的に評価しようとする「ライフサイクル・アセスメント (LCA)」が盛んになりつつある。またかつて、同じ様な手法としてエネルギーの直接間接の投入量に着目した「エネルギー分析」が盛んだったこともある。前者の場合は近年のグローバルな環境問題の高まりの中で着目されつつあり、後者はエネルギー危機の中でクローズアップされたものである。

LCAとは、対象とする製品ののための資源の採掘・精錬から始まり、原材料の加工、部品の組立、製品の輸送、使用、再使用、保守、リサイクル、廃棄にいたるライフサイクルにおいて、環境に対してどのような負荷を発生するかを総合的に評価する手法である⁵⁾。

この手法の特徴は、その言葉どおり製品が生まれる時から廃棄されるまでのライフサイクルに着目し、主に環境面での影響を分析する点にある。一方、エネルギー分析は製品を生産するために直接間接に必要とするエネルギーを産業間の波及的連関構造を考慮して求め、その製品がエネルギー的にどのような負荷がかかっているかを評価する手法である。LCAは環境負荷に、エネルギー分析はエネルギー負荷にその評価基準があるという違いがあるが、製品の波及的生産構造に着目して分析を行う点については、ほとんど同じフレームワークに基づいている。

ところで本稿における「資源連関分析」とは、エネルギー分析の概念をエネルギーだけでなく、資源一般に拡張したものである。資源連関分析はもともと科学技術庁資源調査会の資源連関特別部会で導入された概

念である¹⁰⁾。

エネルギー分析においては、その作業プロセスの中で、製品を生産するために必要な各種の資源の必要量の評価が行われていたが、それは単にエネルギー必要量を計算するための手段でしかなかった。従来、資源の中でエネルギーが特に着目されていたのは石油危機の影響やエネルギーが消失型の資源（使用段階で消失という性質）であることによる。

非エネルギー資源の場合は、生産プロセスにおいて投入された資源の多くが消失せず製品に移転し、製品や設備のなかに保持されるが、実際は時間の経過によって錆等により消失し、また製品や設備のなかの残存した資源もそれをリサイクルして使用するために、資源・エネルギーを必要とする。生産段階においても通常は原材料の歩留まり率は1未満であるから投入資源の一部は屑・廃棄物となる。資源も長期的に考えればエネルギーと同様に消失していく。

資源連関分析の目的は社会におけるこのような資源のフローとストック、個別製品の資源必要量などを明らかにすることである。

環境問題の重要性も、人口の増加、生活水準の向上によって社会における資源とその加工物である製品の消費の増大が大きな原因である。資源問題すなわち、資源枯渇の問題であると割り切ることは必ずしも適切な視点でないが、少なくとも生産段階において資源消費効率を高め、また消費生活においてもより省資源的ライフスタイルに移行していくことは、資源面、環境面のいずれから見ても不可欠である。資源問題と環境問題は一体の問題として考えるべきであろう。

2. 資源連関分析のフレームワーク

すでに述べたように資源連関分析は、ミクロ的にはさまざまな製品を対象としその資源必要量を評価するが、マクロ的に考えれば、社会のなかにおける資源の

* 専修大学経営学部教授

〒214 川崎市多摩区東三田2-1-1

フローやストックを詳細に把握することを目指した分析手法でもある。

社会における資源のフローは、最初採掘された段階の一次資源から、原材料、中間材料、加工材料、部品、最終製品と加工過程を経ることによりより高度な製品となっていく。製品は加工された資源でもある。ここで資源連関分析が対象とする資源とはなにかを整理しておく必要がある。まず、資源連関分析が対象とするものには、一次的（根源的）資源がある。一次的資源とは我々が定義した「経済システム」に外部から流入し生産の基礎となる資源である。たとえば、地下資源としての原油は我々がそれを採掘することによって経済システムに流入し最も重要なエネルギーの1つとして生産活動、消費活動の基礎となる。

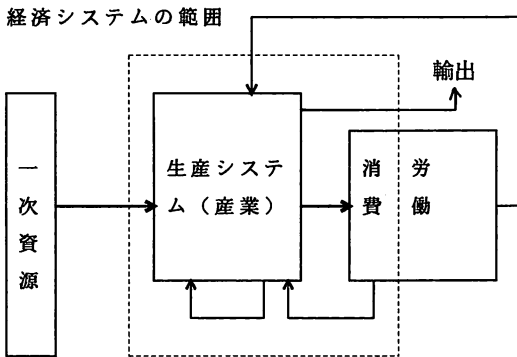


図-1 経済システムと一次資源

しかしながら一次資源であるかは経済システムの設定による。たとえば、植林活動によって生産される木材は、植林活動を経済システムの中に入れれば一次資源でなく、この場合の一次資源は木の成長に必要な太陽エネルギー、水、空気、土中の栄養素だけになり、木材は二次的資源でしかない。しかしこのような考え方で太陽エネルギーの必要量を計算することにはあまり意味があるわけではないので、資源連関分析の目的によっては経済システムの範囲を変更する必要がある。木材資源が減少していることが社会的経済的に問題であれば木材は一次資源として経済システムの範囲外に置き、経済活動に伴う木材の必要量を評価することに意味が生ずる。この意味においてなにか一次資源であるかは我々の分析目的による。

資源連関分析を詳細に行うにはデータのさまざまな障害があるが、一次資源については、ある程度細かい分類のもとで分析を行なう必要がある。

原材料以後の中間材料、加工材料、部品、最終製品は「二次エネルギー」とのアナロジーで二次資源と呼ぶのが適切であろう。原材料-最終製品を単に製品（財貨だけでなくサービスを含まれることもある）と呼ぶ。リサイクル等によって使用される屑、副産物は二次資源である。

労働を一次資源として取扱うかどうかは資源連関分析の根幹に関わるさまざまな問題を含んでいる。資源連関分析は、製品を生産するために直接間接に必要な資源を評価するが、労働も生産要素の一つである。ところが労働を原材料と同じような生産要素とするとその前段階の投入、つまり、労働を「生産」するために必要な財貨・サービスを考慮するのが自然になる。しかし、このように考えると、労働という間接の鎖を通じて、資源連関分析の意味が変質する。つまり労働を経済システム内に置き、一次資源と考えない場合は、労働の生産を通じて過去と現在が接続することになり、間接的な投入の範囲がすべての過去にまで広がってしまい、資源連関分析の意味が不明になってしまう。労働の扱いについては再び論ずるが、労働は（他の資源では合成されない）独立な一次資源と考えた方が適切である。図-1ではこの意味で労働を経済システムの外においている。

また、概念を拡大解釈すれば、環境を資源と考えることができる。きれいな環境の悪化を広義の資源の消費として含めるならば、資源連関分析の範囲が拡大する。

資源連関分析の大きな目的は、個人のライフスタイルや生活社会環境（社会的ライフスタイル）の資源への影響分析を目指すことである。つまり、生産と消費の連関的構造を資源面、技術面よりとらえることにより、資源負荷へどのような波及的影響を与えるかを明らかにしようとするものである。このような意味で資源連関分析の中心課題は「広い意味でのライフスタイル」の資源評価といってもよいであろう。

個人のライフスタイル、都市等の生活社会環境、産業生産物等の変化が、生産技術や産業構造その他を通してどのように資源の消費の変化に結びつくかを分析するためには、生産や消費に利用される各種の財貨サービス、設備がどのような技術で生産され、そしてその生産技術としてどのような代替技術があるかを明らかにした上で、それらの技術における原材料、サービス、設備、労働等の生産要素投入技術構造と産業間の連関関係を通じて、どのように一次資源へ影響するか

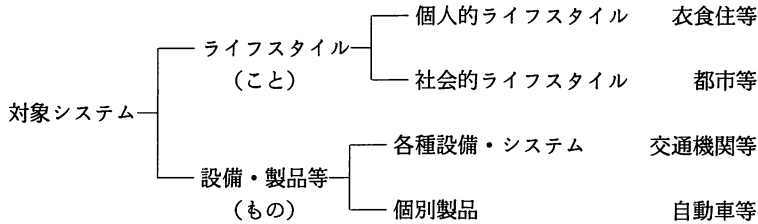


図-2 資源連関分析の対象

分析する必要がある。

資源連関分析の対象には「もの」と「こと」の二種類がある。前者は設備や製品などの物であり、後者は行為である。従来のエネルギー分析やLCAでは前者に着目される傾向が多かったが、ライフスタイルのような行為の資源連関分析も重要であろう。

3. 資源連関分析の現状

(1) 資源原連関表

かつて、科学技術庁資源調査会資源連関特別部会では、資源連関分析の基礎としてつぎの8つの表が提案された¹⁰⁾。この提案にもとづいて超伝導発電機等のハイテク製品¹¹⁾について資源連関表が作成されたが、その後、本格的作業は行われていない。

①資源含有率表

各種製品の資源含有率に関するデータベース。

②資源・エネルギー細分化産業連関表

資源関連部分を詳細化した産業連関表。

③資源・エネルギー連関表

資源毎に部門間の資源のフローを表す表で、単に「資源連関表」ともよぶ。n種の資源に対してn枚の資源連関表が必要である。産業間で取引される製品に含有されている資源の部門間移動に関するデータであるが、部門分類をかなり詳細にしても情報量的には③は②の中に含まれない。

④資源蓄積表

社会（部門別、地域別）における資源の蓄積に関するデータベース。

⑤資源回収表

各種の資源に含まれている資源の回収可能性に関するデータ。

⑥社会賦存量表

資源蓄積表のうち、回収可能な資源をまとめたもの。

⑦資源代替表

製品毎に生産プロセスなどにおける各種資源の代替可能性をまとめたもの。

⑧天然資源埋蔵量表

資源別、地域別の天然資源の埋蔵量に関するデータ。

(2) LCA

ライフサイクル・アセスメント（LCA）の歴史、現状についてはエコマテリアル研究会によって詳細にまとめられている⁹⁾。同報告書によれば1969年にコカコーラ社の委託でMidwest Research Institute社において飲料容器に関する環境影響評価が実施されたのが、LCAの原点であるという。米国では環境保護庁によって手法の開発が進められると同時にLCAの研究者組織もでき、ごみ問題を含む各種の環境問題に適用されてきた。その中で概念や用語の明確化、手法の改善がなされてきた。

ヨーロッパにおいても米国とほぼ同時に研究が開始され、使い捨て容器などの環境影響評価を中心にLCA研究が活発に行われ、環境問題における公的な活動の基礎になっている。LCAは近年の地球環境問題の高まりのなかで環境監査の規格の議論の中でも1つの方法として検討されているという。日本では、(社)プラスチック処理促進協会、日本生活協同組合連合会、科学技術庁エコマテリアル研究プロジェクト、その他においてプラスチック製品、家電製品、発電プラント等の評価が行われている。最近ではさまざまな民間企業において自社製品のLCAがなされているようであるが、その事例は必ずしも多くなく、方法や評価の精度にもばらつきがあるようである。

一般に、第三者がLCAを行うための最大の障壁は製品の原材料原単位や各種技術特性に関する専門的データの不足にある。その意味では製品の製造を行っている企業では比較的 analysis を実施しやすいといえよう。

LCAは環境負荷に着目しており近年は炭酸ガスの排出量の分析を中心としたLCA研究も多く見受けられる。その一例としては、(財)電力中央研究所内山洋司氏による発電プラントの温暖化影響評価¹²⁾である。

(3) ライフサイクルエネルギー

環境負荷評価でなく、エネルギー消費に着目した分

析は、科学科学技術庁資源調査所やその委託で、(社)資源協会によってライフサイクルエネルギーという名前で研究されている。「家庭生活ライフサイクルエネルギー」(表1および文献1)参照)はその集大成である。本調査では、モデル家庭を設定して、住生活、食生活、衣生活、その他(医療・保健分野、図書・新聞、公共施設、廃棄物等)の分野におけるライフサイクルエネルギーを詳細に評価している。ライフサイクルエネルギーとは、たとえば、住宅でいえば、建物、設備の製造、輸送、施工、保守、解体に伴うエネルギーであり、住宅が資源から生産・加工され、廃棄されるまでのエネルギーを指す。

表1 モデル家庭の投入エネルギー Mcal/年

	投入エネルギー		
	設備	消費	計
住生活	5,663.3	24,302.6	29,965.9
食生活	943.2	8,044.3	8,987.5
衣生活	2,529.4	664.5	3,193.9
共通	684.0	803.2	1487.2
医療・保険	6.8	4,461.0	4,467.8
図書・新聞	261.9	2,357.3	2,619.2
廃棄物処理等	48.7	369.2	417.9
総計	10,137.3	41,002.1	51,139.4

(4) その他

かつてのエネルギー分析¹²⁾の中にも多数の資源連関分析が行われている。一般に計算作業の中身は公表されないことが多いが、公表されていない分析の中にも資源連関分析的に見てきわめて優れたものが多い。

4. 資源連関分析の方法論的基礎

以下では、資源連関分析を行うに当たっての用語、概念、方法論の問題点を簡単にまとめた。

(資源濃度)

1単位(物量、あるいは金額)の製品(財貨・サービス)を生産するために直接・間接に必要な資源量を、その資源濃度と呼ぶ。

製品を生産するためには、直接的にその生産部門での資源の投入が必要であるということはいうまでもないが、生産構造の波及的連関を通じて間接的な資源の投入が必要になる。この間接的に投入される資源は、しばしば製品を生産するために必要な資源のかなりの部分占めるので、これを無視すると資源的に誤った判

断を行う可能性がある。当然ながら加工度の高い産業ほど間接的投入資源が多い。産業連関表による分析によると、エネルギー投入の直接/直接・間接に比率は、素材産業が67%と高く、サービス業で、全産業平均で45%程度である(NIRA:産業部門における消費効率化の分析による)。ただし、直接的投入と間接的投入の境界は定義の問題でもあるので、部門数によっても数値は異なる。

産業連関表的にみると7-8部門まで遡れば直接間接の投入エネルギーの95%以上はおさえることができる。一般に産業生産物の主要な原材料は7-8部門さかのぼると輸入資源(あるいは採掘資源)に達するから、このことはマイクロ積み上げ計算においても、主要な原材料のフローをおさえればある程度正確な資源連関分析が可能であることをいっている。

産業連関表とマイクロ積み上げによるエネルギー濃度の比較をしてみると、粗鋼、フェアラロイ、電気銅、アルミなどについての、2つの方法による結果は、意外に一致することがある。一般に資源連関分析による結果は、計算モデルなどの違いにより少なくとも30%程度の誤差は見込まねばならないとされているから、両者の結果はかなり一致しているとも解釈できる。しかし、製品によっては製造方法などの違いによってその資源濃度が大きく異なるので、最終的には詳細なマイクロの積み上げが必要である。

(設備製造による投入エネルギー)

資源連関分析においては間接的投入資源の中に設備製造用資源が含まれている。たとえば家庭用エアコンの製造エネルギーは石油換算で90kg程度であるが、それがフローとして消費するエネルギーはその使用期間を通じて石油換算400kg(電力を発電効率で石油に換算)程度であり、設備用のエネルギーは直接間接の投入エネルギーの20%程度である。また原子力発電の場合も直接間接の投入エネルギーのうち70%は濃縮用であり、設備製造用は20%前後あるいはそれ以下である。設備を介しての資源投入は意外に少ない場合が多い。

エネルギー以外を対象にした資源連関分析においても間接的投入を考慮する必要があることは言うまでもない。原材料として使用される非エネルギー資源の場合には、投入資源の一部が製品にそのまま移転するのでより正確な投入資源量の評価が行われないと、資源含有率と積み上げ計算等によって求められた資源濃度の間に不整合が発生してしまうことがある。鉄のよう

な汎用性のある資源を除くと資源の間接的必要量を産業連関表で計算することはきわめて難しい。このため資源連関表の開発が必要であるが、これについては広範な製品についての資源含有率データが必要になる。

(価格と資源濃度)

価格と資源（特にエネルギー）の直接間接の投入量の間には関係があるように思える。もちろん両者の関係は単純な比例関係でないが、適当な製品のグループを設定して考えると、価格が高いと資源濃度も大きいようである。神前氏による計算（技術開発のプライオリティ評価の方法、昭和59年）によれば同一の加工度もつ製品の価格はエネルギー濃度とある程度比例している。今、 P ：重量当たり価格、 K ：設備原単位、 E ：重量当たり投入エネルギー、 L ：労働原単位、 $f(K,L)$ ：加工度として、この仮説を、 $P=f(K,L)E$ として単純化すれば、素材のように自動生産による製品は係数 f が小さく、原子炉部品のように加工度の高いいわば手作りの生産物の場合は係数 f が大きい。

(間接的資源投入の意味)

資源連関分析は財貨・サービスを生産するために直接間接に必要な資源量を物量ベースで詳細に計測することによって、財貨・サービスの生産や消費における問題点を資源の側面から分析するための手法である。それゆえ、資源連関分析においては「間接的に投入される資源量」という概念が重要であるが、この間接の意味は必ずしも明確ではない。間接の概念は単純でなく一意には定まらない。これには労働や設備の扱いが関係している。

労働も物を生産するための一つのサービスと考えるならば、資源連関分析の自然な考え方によって、労働もそれを生産するために直接・間接に資源が必要である。しかし通常の資源連関分析ではこの考え方は採用されない。労働の取扱いは資源連関分析の間接の概念に強く関係しており、その取扱い方によって資源連関分析の意味が変化する。

資源連関分析における労働の取扱いの変化が資源連関分析自体の意味へどのような影響をもたらすかを考えるためにはごく簡単な産業連関モデルを考えれば十分である。通常の資源連関分析の考え方にしたがって、労働も資源濃度を有していると考えよう。つまり、労働が生産要素として投入される場合、それを生産するために直接間接投入された資源が労働を介して投入されるものと考えよう。

経済システムに対する直接・間接の資源投入の根源

は資源の採掘、輸入にあるが、資源連関分析においては、直接間接の資源フローには形式的に「不滅の法則」が成り立つものとしているから、結局のところ、これらの全ての資源が、産業部門から最終需要部門に投入されることになる。そして、今、簡単のために輸出を考えないことにすれば、この投入された資源は、労働を通じて産業部門へフィードバックされる。今考えている経済システムは閉じていて経済の「グラフ」(ネットワーク)には「直接間接の資源フロー」のシンクがないから、この資源フローは年々蓄積されることになる。この結果として労働を通じて過去の資源投入が未来に結び付けられる。この考えのもとでは、任意のある年に生産された全財貨・サービスの生産のために直接・間接に必要なとした資源は過去に投入された全資源の和である。このような考え方にもとづき定常な経済を前提にして計算を行うと、製品の資源濃度は発散してしまう。

通常は、このようなことを回避するため労働の資源濃度をゼロと仮定する。このことは労働を直接・間接的エネルギーフローのシンクと考えることに等しい。

一部の農業のエネルギー連関分析等を除けば、大部分の資源連関分析はこのような考え方にもとづいて計算が行われている。(農業では食品のエネルギーをもって労働のエネルギーとしている場合があるがこの考え方は合理性に欠ける)

この仮定は問題を一応形式的に解決するが、一つ大きな問題が残されている。それは、設備と労働の提供母体である人間との関係である。労働を生み出す人間は食物系のエネルギーと情報の複合体であるが、エネルギー投入を受けて作動する設備の姿もまたエネルギーと情報の複合体である。エレクトロニクスと制御機器の発達により工業用ロボットなどにみられるがごとく、生産設備と人間は感覚的にも近づきつつある。

この生産設備と人間の位相同型的性格をベースとして考えるならば、労働の資源濃度をゼロとするならば、生産設備の資源濃度をゼロとしてもよいという考え方も成立する。この資源連関分析に関する問題は解決していないように思える。

(計算のためのプロセスモデル)

製品の生産のために直接・間接に投入される資源量は、その生産のための設備、原材料、直接投入資源、及びそれらを生産するための間接的なプロセスや原材料を全て与えなければ定まらない。これは産業構造にも関係することである。

つまり、資源連関分析の結果は、対象とする製品を生産する直接間接の生産プロセスのモデルに依存する。どのような技術的モデルを設定するかが計算結果に大きな影響を与える。

(計算結果の不安定性)

資源連関分析で用いられるさまざまな指標はそれが物量ベースの指標であるからといっても常に信頼しうるとは限らない。エネルギー収支分析において、その結果を表現する手段であるエネルギー比はしばしば不安定な結果を示すのでエネルギー収支分析が不信を持たれる一つの理由になっている。エネルギー比が不安定であることには2つの原因があって、第1にはエネルギー収支分析を行うモデルや計算方法の違いがあげられる。モデルが異なれば、結果が異なるのは言わば当然であって、これをエネルギー収支分析の信頼性の問題と混同することは適切ではない。

第2にはエネルギー比が多様に定義することが可能なローカルな概念であることに着目する必要がある。今、電力生産システムを考えれば、生産される電力をどのような換算率でエネルギーに換算するか、生産される電力をどの程度投入側にフィードバックするかにより数種類のエネルギー比が考えられる⁹⁾。これらのエネルギー比はそれぞれ別の意味をもっていること、異なる定義を用いると値が著しく異なることに注意する必要がある。

いま、石油火力1基と原子力1基のペアとそれらを維持するための間接的経済システムを2つを考える。タイプAでは濃縮用の電力を石油火力によって供給し、タイプBでは運転開始以後の濃縮用の電力を原子力が自分自身で供給するものとする。AとBで原子力発電のエネルギー比は異なるが(3倍の差がある)、ペア全体で見ると石油の投入量と電力の発生量は同じであるから、A、Bの2つの発電システムは同じエネルギー比を持っている。この意味でエネルギー比はローカルな概念であることがわかる。このように資源連関分析で用いられる概念はしばしばローカルな概念である。資源集中度という概念さえもグローバルな整合性という点では未解決の問題がある。

5. あとがき

本文で述べたように、資源連関分析は目新しい概念

ではなく、エネルギー分析、LCA、ライフサイクル・エネルギーと同じフレームワークにもとづいた手法である。その意味で従来からさまざまな研究・調査がなされているとみてよいが、作業を行うためのデータベースが十分確立していない点もあって、その結果を広範に利用するまでにはいっていないように思える。また本稿で述べたようなさまざまな問題点もあることにはあまり注意が払われていないように思える。

超長期的に考えれば現在のライフスタイルはやがて行きづまる可能性があることは多くの人々によって指摘されている。資源連関分析的な情報は、人々にライフスタイルを変える1つのきっかけを与える情報として役に立つものと考えている。現在、筆者自身は、ライフスタイルと資源消費の関係の分析の一つとして、都市の資源連関分析を行っており、機会があれば別途報告したい。

参考文献

- 1) (社)資源協会編：家庭生活のライフサイクルエネルギー、(社)資源協会発行、平成6年9月。
- 2) 科学技術庁資源調査所編：自然エネルギーと発電技術、資源協会、1983。
- 3) 原子力エネルギー等社会システム基本情報調査、(社)資源協会、平成5年3月。
- 4) 原子力エネルギー等社会システム基本情報調査、(社)資源協会、平成7年3月。(予定)
- 5) 日本におけるLCA研究の現状と将来の課題、エコマテリアル研究会、平成5年12月。
- 6) 茅陽一編著：エネルギーアナリシス、電力新報社、昭和55年。
- 7) 科学技術庁資源調査会編：衣・食・住のライフサイクルエネルギー、大蔵省印刷局、昭和54年。
- 8) I. Boustead and G. H. Hancock：“Handbook of Industrial Energy Analysis”，Ellis Horwood Limited, England, 1979.
- 9) 斎藤雄志：エネルギー収支分析の有効性、電力中央研究所報告、No. 581011, 1982.
- 10) 資源調査会編：資源・エネルギーをベースとした連関表作成に関する調査、資料第108号、科学技術庁資源調査会、昭和58年。
- 11) 資源調査会編：資源・エネルギー面からの超電導技術に関する調査—超電導発電機を中心として—、資料第144号、科学技術庁資源調査会、昭和62年。
- 12) 内山洋司：発電プラントの温暖化影響評価、電力経済研究、No. 32, pp. 3-16, 1993.
- 13) 斎藤雄志：資源連関分析—その基礎的諸問題の検討—、第10回エネルギーシステム・経済コンファレンス、1994年。