

■ 研究論文 ■

鉄屑リサイクルシステムへの三次元産業連関分析の応用

Applying Three-Dimensional Input-Output Tables to the Analysis of Recycling of Iron Scraps

吉田好邦*・石谷久**・松橋隆治***

Yoshikuni Yoshida Hisashi Ishitani Ryuji Matsuhashi

(原稿受付日1997年10月3日, 受理日1998年4月17日)

Abstract

3 DIO(three-dimensional input-output table)is the extension of conventional I-O tables. It shows the interrelations between all of the sectors and consists of I-O tables which are made for each product. First, in this paper, price model of 3 DIO is suggested. It corresponds to the price model of conventional I-O analysis and indicates the component ratio of each product. Price model of 3 DIO enables us to evaluate the value of by-products compared with main products. Secondly we make 3 DIO by extending the published I-O tables of 1990 and evaluate the energy conservation in the recycling system of iron scraps. Data of by-products are provided by "Tables on Input and Output of By-products and Scrap", which belongs to the I-O tables of 1990.

Two options are taken for the energy conservation in steel industries : growth in the share of electric furnaces and increase of the scrap inputted in the revolving furnaces. 4 Mt-C and 2 Mt-C of CO₂ emissions per a year are respectively reduced by the options. More activities in the former case have the effects of CO₂ mitigation than the latter. The effects of price abatement by each option are also analyzed.

1. はじめに

三次元産業連関分析(3 DIO: 3-Dimensional Input-Output Analysis)は, 各部門間で各製品がどれだけ取引されたかを明示するために, 製品ごとの連関表を作成することによって, 結合生産を陽に扱うことを可能にするツールである¹⁾. 本文では産業連関分析の価格モデルに対応する3 DIOの価格モデルの構成を明らかにし, その応用例として, 実際の産業連関表に基づいて3 DIOを作成し, 鉄屑のリサイクルによる省エネルギーについて検討する.

2. 3 DIOの価格モデルと簡略表記法

2.1 3 DIOの価格モデル

通常の連関表を列方向に読むことで価格モデルが得られるのと同様に, 3 DIOでも同様に価格モデルを次のように構成できる.

$$A^T (Pe) + V = P \quad (2.1)$$

A^T : 製品*i*についての投入係数行列(2次元行列)の転置行列 A_i^T ($i = 1, \dots, n$)の集合

P : 価格行列(成分 p_{ik} は部門*i*の平均価格における製品*k*の占める費用を示す)

V : 付加価値行列(成分 v_{ik} は部門*i*の平均価格における製品*k*の付加価値分を示す)

$$e^T = (1 \dots 1)$$

A^T は3次元行列で, 成分 a_{ijk} は部門*i*の産出する製品の平均価格に占める, 部門*i*から部門*j*に投入される製品*k*の価格構成を示す. ただし, 式(2.1)において3次元行列 A^T とベクトル Pe の積 $A^T (Pe)$ は, 次式(2.2)の3次元行列とベクトルの積の定義に従って計算する. すなわち, 3個の指標を持つ量 $A = (a_{ijk})$ とベクトル $x = (x_j)$ の積 $Ax = (d_{ik})$ は,

$$d_{ik} = \sum_j a_{ijk} x_j \quad (2.2)$$

と定める¹⁾. つまり, A の第2成分*j*について x との縮約積をとるものとする.

この価格モデルは各部門の価格の構成を表現し, 通常の連関表の価格モデルと同様にすべての製品の価格

* 東京大学工学系研究科地球システム工学専攻助手

** " " 教授

*** " " 助教授

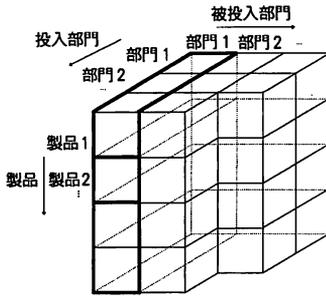


図-1 3 DIOの価格モデルの概念図

が1に等しくなるような単位(円価値単位)を仮定している。例えば、図-1の左端の太線で囲んだ部分は部門1への各製品の投入を表す面であるが、その投入係数の総和が部門1の平均価格を表す。またその面の上から2段目の筒は部門1の中での製品2の費用割合を示し、その筒内の投入係数の総和

$$p_{12} = \sum_{i=1}^n a_{i12} \quad (2.3)$$

で与えられる。図-1では製品数が3であるから、例えば部門1を「鉄」部門、部門2を「鉄屑(回収サービス)」部門、部門3を「付加価値」部門とすると、鉄の価格に占める鉄屑の費用 p_{12} は、

- ・鉄1単位生産するために鉄部門から鉄部門に投入される鉄屑の費用 a_{112}
- ・鉄1単位生産するために鉄屑部門から鉄部門に投入される鉄屑の費用 a_{212}
- ・鉄1単位生産するために付加価値部門から鉄部門に投入される鉄屑の費用 a_{312} (通常は0)の和になる。

従来のマイナス投入方式²⁾では副産物の産出がカウントされないため、副産物の価値を表現できない問題があり、この意味では連関表に現れない副産物の価格が明示できる点で従来手法を補うことが可能であるといえる。また、部門分割方式¹⁾では結合生産を扱うために生産物の種類ごとに部門を分割しており、その場合価格モデルでは投入を受ける単一の部門が複数の部門に分割されるため、取り扱いが極めて煩雑になるが、3 DIOの価格モデルでは整合的に表現することが可能である。

2.2 3 DIOの簡略表現

本節では3 DIOの表記の簡略化について述べる。ここまでは連関表のシートを製品ごとにひとつずつ作成するとしていたが、副産物として生産されない製品(つまり部門間の代替性をもたない製品)はまとめて

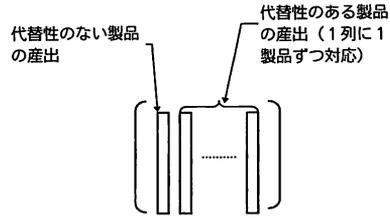


図-2 非代替製品の統合の際の総生産行列と最終需要行列

同一のシートに連関を記述できる。統合した連関表のシートは従来の連関表と同様な一部門一製品の形式をとり、副産物として生産される製品の連関表のみを個別に作成する。また総生産行列、最終需要行列は、図-2のように代替性のない、各部門の主産物の産出をまとめて第1列目に記し、第2列目以降に代替性のある製品の産出を1列に1製品ずつ記す。これによって連関表のシートの数が減って形式上の製品の数が減るが、生産のバランスの式 $A(Xe) + F = X$ は保持される。この操作によって3 DIOは大幅に簡略化でき、実際の産業連関表の3次元化が容易になる。

3. 鉄屑リサイクルシステムへの適用

本節では公表されている産業連関表を基に3 DIOを作成し、屑・副産物の中で最も大きな割合を占める鉄のスクラップに焦点を当てた分析をおこなった結果を示す。

3.1 1990年版3 DIOの作成

実データに基づいた3 DIOを作成するにあたって、産業連関表はOne Activity, One Commodityを原則としているため、副産物に関するデータは1990年産業連関表³⁾の、結合生産だけを特別に取り扱った「屑・副産物発生及び投入表」を利用した。「屑・副産物発生及び投入表」は「取引基本表」から屑と副産物を抜き出して、屑・副産物の種類別に発生状況と投入状況を一覧表にしたものである。ただし屑・副産物がどの部門で発生して、それがどの部門へ投入されたかを知ることはできないため、実際に3 DIOを作成するにあたっては、発生した屑・副産物の各部門への投入割合は、各部門の投入される総量に比例して配分すると仮定した。例えば、鉄屑全体の投入の構造が鉄鋼部門へ90単位、化学部門へ10単位となっている場合、機械部門から10単位発生した鉄屑は鉄鋼部門へ9単位、化学部門へ1単位投入されるものとする。また屑・副産物は取引金額の最も大きい鉄屑に限定して3 DIOを作成



図-3 本モデルと1990年産業連関表との部門の対応関係

し、その他の屑・副産物は従来通りマイナス投入方式により取り扱った。

3.1.1 部門の分割・統合

部門数は32部門の統合大分類を基に、図-3のように24部門に統合・分割した。鉄のスクラップのリサイクルを評価し、同時にその省エネルギー性を検討することを目的とするため、鉄とエネルギー関係の部門は部門分割し、逆に非製造業は統合している。鋳業部門は

鉄鉱石と非鉄鋳業および化石資源（石炭・原油・天然ガス）に分割し、鉄鋼部門は粗鋼を転炉・電気炉別に、ならびに銑鉄・フェロアロイ部門および鋼材・鉄鋼製品部門に部門分割した。また家計部門を内生化し、家計の所得の増大に伴う家計消費の増加を考慮することを可能にすると同時に、3 DIOでは家計部門からの鉄屑のリサイクルを評価することが可能になる。家計部門は粗付加価値から「雇用者所得」および「営業余剰」を統合し、最終需要から「民間消費支出」及び、一般機械部門・建設部門以外の「国内総資本形成」を統合して作成し、それらの差は家計貯蓄等によって調整されるものとみなした。

3.1.2 鉄スクラップの分類

各部門から発生する鉄屑はその性状によってリサイクルの用途が異なるため、次に示す3種類に分類した。

(1) 自家発生屑

鉄鋼製造過程で発生する屑であり、その大部分は発生向上でリターン消費される。化学成分がはっきりしており、性状も安定している上級屑である。

(2) 加工屑

鉄鋼ユーザが鋼材を加工する際に発生する屑で、一般に自家発生屑と同様に化学成分がはっきりした上級屑が多い。品質スペックが厳しい特殊鋼メーカーや普通鋼電炉などに使用される。

(3) 老廃屑

建材、自動車、家電等の鉄鋼最終製品が消費者にわたり、その耐用年数を終えた後に鉄屑化したものである。発生源が不明なものが多く、不純物の混入も相対的に多い。

3 DIOは2.2節に示した手法で各部門の主産物に関する連関シートを統合し、主産物および上記3種類の鉄屑のそれぞれについて計4つの連関シートを作成する。

3.1.3 3 DIOの作成方法

産業連関表の基本取引表では副産物をマイナス投入方式によって取り扱っている。鉄屑は鋼材・鉄鋼製品部門に分類されているが、例えば建設部門からの鉄屑の発生は、鋼材・鉄鋼製品部門から建設部門へ負の投入がされると表現し、鋼材・鉄鋼製品部門から電気炉などの部門に鉄屑に相当する正の投入が計上されるため、鉄屑の取引量は連関表上では相殺されてゼロとなる。したがって、3 DIOで鉄屑以外の各部門の「主産物」の連関シートを作成する際には、建設部門にマイナス投入されていた鉄屑および電気炉などの部門へ投

表1 自家発生屑の連関シート（抜粋；単位：百万円）

	銑鉄・フェ ロアロイ	転炉	電気炉	鋼材・鉄鋼 製品
銑鉄・フェ ロアロイ	282	3057	0	0
転炉	0	65621	0	26429
鋼材・鉄鋼 製品	0	0	11571	80274

表2 加工屑の連関シート（抜粋；単位：百万円）

	化学製品	電気炉
電気炉	0	30928
鋼材・鉄鋼製品	0	0
金属製品	288	39469
その他の製造工業製品	4	615
一般機械	604	82715

表3 老廃屑の連関シート（抜粋；単位：百万円）

	電気炉	輸出（含調整項）	（控除）輸入計
建設	57157	1686	-48616
家計	198177	5846	0

入されていた鉄屑をそれぞれ取り消した上で、改めて鉄屑の取引量を「鉄屑」の連関シートに記録する必要がある。また輸入屑は国内生産分に含まないため、国内分と区別せず中間投入し、最終需要の輸入の項で負の値を計上して処理する。輸入屑の性状は老廃屑レベルであるから、形式的に一旦老廃屑を発生する部門（建設部門）が輸入し、これを他部門に投入する簡略的な取り扱いをしている。老廃屑と同等な性状の輸出屑も同様に建設部門が一括して輸出する扱いをする。また家計部門を作成する際に、固定資本形成部門（一般機械・建設以外）を家計部門に統合しているため、固定資本形成から発生する屑は、家計部門からの発生と仮定する。

以上の条件の下に作成した3 DIOの内、自家発生屑、加工屑、老廃屑の連関を表1～3に示す。紙面の制約上、投入産出がある部分のみを抜き出している。これら以外の主産物の連関は、鉄屑を差し引いている点を除いてオリジナルの産業連関表と同様である。

3.2 鉄屑のリサイクルの省エネルギー評価

本節では鉄屑のリサイクルとして、転炉鋼から電気炉鋼への代替ならびに転炉スクラップ比の上昇を取り上げて、省エネルギー性を評価する。

高炉一貫製鉄による転炉鋼のエネルギー原単位は電気炉鋼よりも大きいため、転炉鋼を電気炉鋼に代替す

表4 各ケースの化石燃料消費減少率とCO₂削減率

	石炭	原油	天然ガス	CO ₂
電気炉代替	4.86%	-0.06%	-0.40%	1.25%
転炉スクラップ比上昇	2.00%	0.06%	0.05%	0.59%

ることにより、エネルギー消費を抑制できる。しかし、製品の品質は一般に転炉鋼が高く、電気炉鋼に代替可能な量には限界がある。本文では松橋ら⁴⁾の試算結果を用いて、電炉鋼で賄える需要の総量を5600万トンとし、これを電炉鋼の限界とする。この値と物量表から、5600万トンの上限まで代替したときに投入係数の変化率を計算すると、「電気炉→鋼材・鉄鋼製品」の投入係数は1.6倍となり、増加分を「転炉→鋼材・鉄鋼製品」の投入係数から割り引く。変化させた投入係数でエネルギー消費量を計算すると、表4に示すように石炭の消費が約5%減少する。CO₂排出量では約4 Mt (1.3%)の減少となる。わずかながら原油と天然ガスの消費が増大しているのは、電力の消費量の増加が原因と考えられる。

次に転炉スクラップ比の上昇を取り上げる。転炉スクラップ比は、転炉への投入のうちスクラップの割合であり、銑鉄とスクラップの転炉への投入量の合計に対するスクラップの投入量の比で示される。1990年の日本の値は5.8%であるが、この値が増大すれば、銑鉄の投入が減少して、化石燃料の消費が抑制される。転炉には自家発生屑のように高品質の鉄屑が投入されるが、ここでは各部門で発生した自家発生屑のすべてを転炉に投入するケースを仮定して、その省エネルギー性を評価する。これは転炉スクラップ比がほぼ米国並み(17.4%)に上昇することに相当する。

すべての自家発生屑を転炉に投入すると、自家発生屑の投入を受けていた転炉以外の部門で、自家発生屑に代替する財の投入が必要となるが、ここでは品質を重視して転炉粗鋼で代替するものとした。投入係数変化後のエネルギー消費を計算すると表4のように、石炭の消費が約2%、CO₂排出は約2 Mt (0.6%)減少している。

3.3 価格上昇に対する緩和効果

鉄屑のリサイクルによりヴァージン鉄鉱石の消費を抑制すると同時に、化石燃料（特に石炭）の燃焼によるCO₂の排出を抑えることが可能である。本節では3 DIOの価格モデルを利用して、化石燃料、及び鉄鉱石の価格上昇ケースについて、各部門への価格波及を求

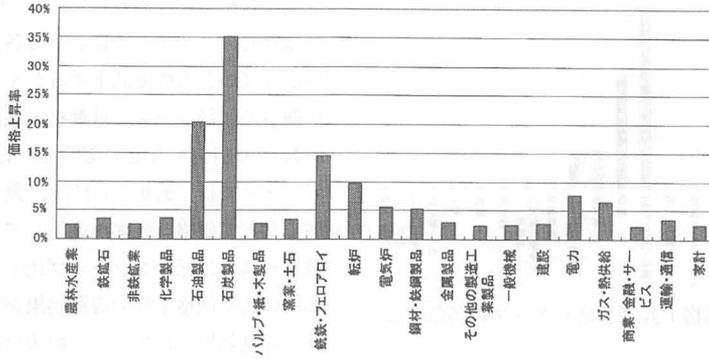


図-4 化石燃料の価格上昇（1万円/t-C）による各部門の価格上昇率

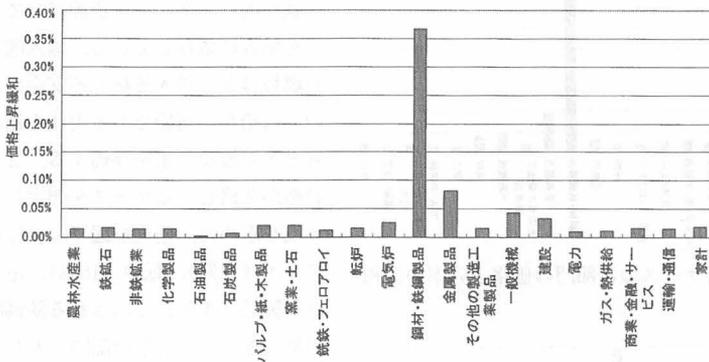


図-5 電炉鋼への代替ケースの各部門の価格上昇率の緩和

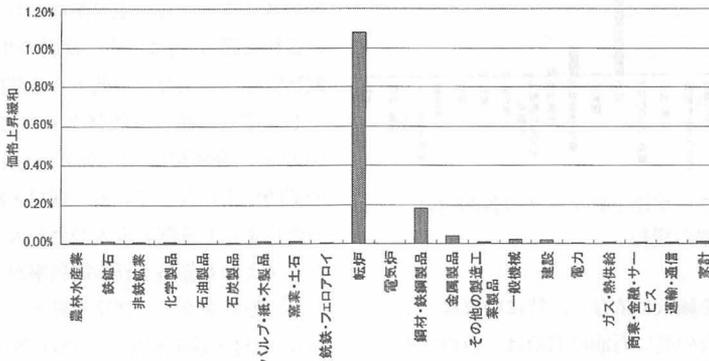


図-6 転炉スクラップ比上昇ケースの各部門の価格上昇率の緩和

めて、鉄屑のリサイクルがどの程度価格の上昇を緩和する効果があるかを検討する。リサイクルのオプションには前述の電気炉代替および転炉スクラップ比の上昇を取り上げる。

波及効果の分析には産業連関表が極めて有効なツールであるが、3 DIOを用いることによって、副産物を含めた各製品の価格の投入素材別の費用構成が示すことが可能となり、鉄屑の投入が価格上昇の緩和にどの

程度寄与できるかを明示的に評価することができる。なお、本研究では化石燃料、及び鉄鉱石の価格上昇に対しての、最終需要の減退による需給関係の変化は考慮せず、鉄屑リサイクルの導入によって、部門間の投入構造がどのように変化するかを産業連関表の枠内で検討した。

3.3.1 化石燃料の価格上昇ケース

周知の通り、我が国は主となる一次エネルギー源の

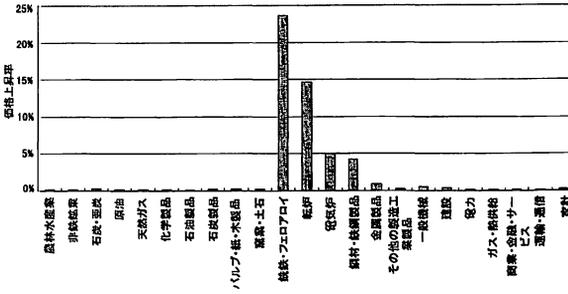


図-7 鉱物資源の価格上昇（2倍）ケースの各部門の価格上昇率

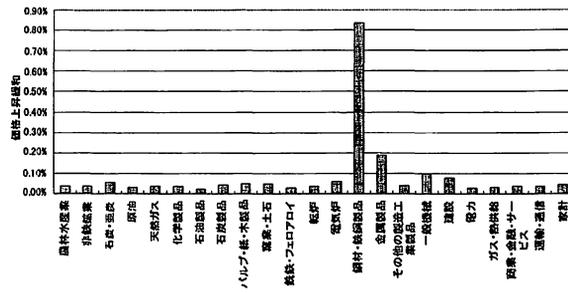


図-8 電炉鋼への代替ケースの各部門の価格上昇率の緩和

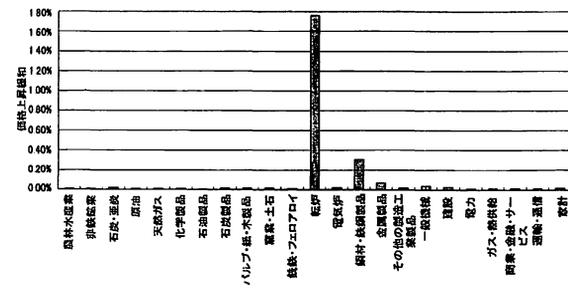


図-9 転炉スクラップ比上昇ケースの各部門の価格上昇率の緩和

化石燃料のほとんどを輸入に依存し、特に中東などの産油国に依存する割合の高い石油の需給は、極めて不安定であるといわざるを得ない。一方で二酸化炭素抑制を目的に炭素税の導入が検討されているが、その影響は化石燃料だけでなく、石油製品などの加工製品の価格にも及ぶ。これらの状況を踏まえて、ここでは炭素1tあたり1万円の価格上昇（ガソリン価格換算で7円程度）を想定して、各部門への価格波及を計算した。結果を図-4に示す。石炭製品（35%）、石油製品（20%）、鉄鉄・フェロアロイ（14%）などの化石燃料の多消費部門で価格上昇が大きくなっている。ここで3.2節の二つの鉄屑リサイクル方策を施した場合、価格

上昇の緩和分を求めると、図-5、6のようになる。これは鉄屑のリサイクルによって各部門において化石燃料依存度がどの程度低下するかを示すものである。電炉鋼への代替ケースでは鋼材・鉄鋼製品（0.4%）、金属製品（0.1%）などの部門で、転炉スクラップ比上昇ケースでは、転炉（1.1%）、鋼材・鉄鋼製品（0.2%）などで価格上昇率が低下している。電炉鋼への代替ケースでは転炉スクラップ比上昇ケースよりも、各部門に広く価格上昇の緩和効果が表れており、量的なCO₂抑制効果だけでなく、幅広い部門からCO₂排出を抑制する対策であるといえる。

3.3.2 鉄鉱石の価格上昇ケース

我が国はエネルギー資源だけでなく、鉱物資源の多くを輸入に依存している。輸入国の分散化によって化石燃料ほどの輸入価格の不安定要素は見られないものの、自給が不可能である現状を鑑みて、輸入価格の上昇とその波及効果を評価する。ここでは鉄鉱石の輸入価格が2倍となるケースを想定して、各部門への価格波及を求めた。結果を図-7に示したが、鉄鉄・フェロアロイ（24%）、転炉（15%）、電気炉（5%）、鋼材・鉄鋼製品（4%）で示される鉄鋼関連部門への波及が当然大きく、その他の部門に対しては化石燃料のケースよりも波及効果は小さい。

化石燃料ケースの場合と同様に電気炉鋼への代替と転炉スクラップ比の上昇がなされた場合の価格上昇率の緩和を図-8、9に示す。鉄屑のリサイクルによって、鉱物資源への依存度が低下する部門で価格上昇率が低下し、電気炉鋼への代替ケースでは鋼材・鉄鋼製品（0.8%）、金属製品（0.2%）、一般機械（0.1%）などの部門が主になっている。鋼材・鉄鋼製品部門では化石燃料よりも鉄鋼の投入割合が大きいため、化石燃料ケースよりも価格上昇の緩和率が大きくなっている。また、転炉スクラップ比上昇ケースでは、転炉（1.7%）、鋼材・鉄鋼製品（0.3%）等で価格上昇率が大きく低下している。

さて、3 DIOの価格モデルでは部門分割方式と異なり、投入される部門が唯ひとつにもかかわらず、分割して表示される難点が生じない。鉄屑の投入割合が大きい電気炉鋼について、化石燃料ケース、鉄鉱石ケースの価格上昇率全体（図-4、7）に対する各製品の寄与を検討した。図-10は化石燃料価格上昇ケース（1万円/t-C）の電気炉部門の価格上昇率（5.5%）の製品ごとの寄与割合を示している。「主産物」は電気炉部門に投入される鉄屑以外のすべての製品を示してい

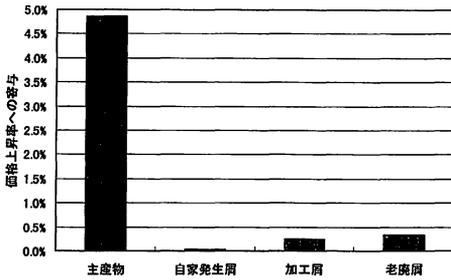


図-10 化石燃料の価格上昇(1万円/t-C)ケースの電気炉部門の価格上昇率(5.5%)への寄与

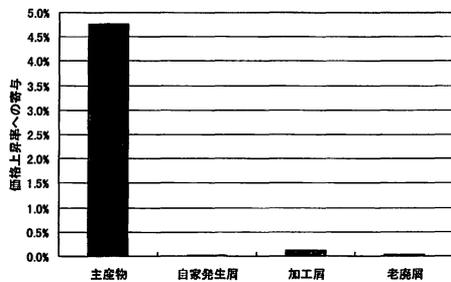


図-11 鉄鉱石価格2倍ケースの電気炉部門の価格上昇率(4.9%)への寄与

る。これによると鉄屑の寄与は化石燃料ケースで10%を超えており、無視できない大きさであることがわかる。マイナス投入方式で表現された従来の連関表による同様の計算では、鉄屑の取引が陽に表れないため、この値が欠落してしまうが、3 DIOを用いることによって、この点を補うことが可能となる。また図-11の鉄鉱石ケースでは老廃屑の価格上昇への寄与が小さくなるなど、異なる傾向が見られるが、老廃屑は主に電気炉でリサイクルされるため、化石燃料ケースでの価格上昇の寄与が大きくなるものと考えられる。

4. おわりに

本文では結合生産を明示的に表現するための三次元産業連関分析の価格モデルを構成し、その応用例として、鉄屑のリサイクルによる省エネルギーを実際の産

業連関表に基づいた3 DIOによって評価した。3 DIOの価格モデルを用いることにより、量的に無視できない鉄屑などの副産物を評価の枠組みに入れることが可能となり、また副産物によって部門を分割することによって、投入される部門が唯ひとつにもかかわらず、分割される問題を回避することができる。また産業連関表の付帯表である「屑・副産物発生及び投入表」と投入産出表を統合することにより、1990年データによる3 DIOを作成した。3 DIOによって家計部門からの鉄屑のリサイクルを考慮することが可能となり、また応用例として、鉄屑リサイクルのオプションとして電気炉のシェア向上、転炉スクラップ比の上昇を取り上げたが、電気炉のシェア向上により最大約4 Mt-C、転炉スクラップ比の上昇により最大2 Mt-CのCO₂が削減可能である。部門ごとの削減割合をみると、電気炉ケースでは転炉スクラップ比ケースよりも多岐に渡る部門で化石燃料の消費が抑制されており、幅広い波及がみられた。また、化石燃料の価格上昇ケースでは電気炉鋼の価格上昇の10%以上が鉄屑の寄与であり、副産物が無視できない大きさであることが明らかになった。

参考文献

- 1) 吉田好邦ほか「結合生産を表現するための三次元産業連関分析とその枠組み」エネルギー・資源 (同時投稿中)。
- 2) R. Stone, "Report on Conceptual Problems arising in the Construction of Input-Output Tables and Input-Output Analysis", 1955.
- 3) 総務庁ほか11省庁共同編集「平成2年(1990年)産業連関表—計数編(1)(2)」1994.
- 4) 松橋隆治ほか「鉄屑のリサイクルを考慮に入れた鉄鋼業の省エネルギー可能性評価」, エネルギー・資源, 14巻6号(1993), 68-73.
- 5) ㈱日本鉄鋼連盟「鉄鋼統計要覧」1991.
- 6) 宮沢健一編「産業連関分析入門」日経文庫.
- 7) 内田忠夫ほか「産業連関分析」有斐閣.
- 8) 岡崎不二男ほか「産業連関の経済学」春秋社.
- 9) 総務庁ほか11省庁共同編集「平成2年(1990年)産業連関表—総合解説編」1994.