

## 20. エネルギー転換効率を考慮したエネルギー産出投入表 の推計手法の開発とその適用

藤森真一郎<sup>1</sup>・松岡 譲<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 京都大学大学院 工学研究科・日本学術振興会特別研究員 PD  
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂キャンパス C クラスター1-3)

E-mail: sfujimori@atthost.env.kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科

IEA のエネルギーバランス表は世界全域をカバーするエネルギー統計の代表的なものであるが、いくつかの不整合性を抱えている。本研究では、その不整合点を修正し、整合性の取れたエネルギーデータを推計する方法を開発し、1971-2003 年の全世界に適用した。その結果、IEA 報告値と推計値を最終エネルギー消費量と比較すると、中東諸国、その他の集約化地域で乖離が大きな傾向を示した。エネルギー転換効率について見ると、IEA 報告値では石油の発電プラント、天然ガスの発熱プラントで工学的上限を上回っている国・年数が多かったが、本研究推計値ではそれらが解消された。IEA 報告値から推計値への修正量を地域別、年別、部門・フロー種(産出、投入)別に分解したところ、地域の要因、部門・フロー種別の要因の寄与が大きかった。

**Key Words :** Energy Balance, Cross-entropy method, Energy transformation

### 1. はじめに

GHG の排出量削減を世界単位で考える場合、GHG 排出削減可能量、GHG 排出削減コスト、そのコストの分担方法、炭素税等の政策の効果と影響等、いくつかの事項をマクロ的に把握する必要がある。そのような知見は、多くの場合シミュレーションモデルによる推計から得られる(e.c. 花岡ら, 2008<sup>1)</sup>; Fujino *et al.*, 2006<sup>2)</sup>)。このようなシミュレーションには世界全域をカバーし、かつ信頼できるエネルギー統計が不可欠である。

現在、世界全域をカバーした主要なエネルギー統計としては、IEA の Energy Balance(IEA, 2007a<sup>3)</sup>; 2007b<sup>4)</sup>)、Enerdata の Globalstat(Enerdata, 2008)<sup>5)</sup>、EIA、BP のエネルギー統計(EIA, 2007<sup>6)</sup>; BP, 2007<sup>7)</sup>)などが挙げられる。このうち、EIA と BP のエネルギー統計は、化石燃料、電力、再生可能エネルギーの生産量と輸出入量程度の情報しか収録しておらず、エネルギー転換の過程や部門別の最終エネルギー消費に関する情報を収録していない。そのため、これらのエネルギー統計のみを用いて、部門別のエネルギー消費量、温室効果ガス排出量やその削減可能量を推計することは困難である。一方、IEA と Enerdata のエネルギー統計には、各エネルギー財の生産、輸出入だけでなくエネルギー転換、部門別の最終エネルギー消費量といった情報が収録されている。ところが、これらの統計は少なくとも以下の5つの問題を抱えている。

- [1] 経済統計、例えば国民経済計算や産業連関表における貨幣単位の情報との間に不整合が存在する
- [2] エネルギー財の世界全体の輸出総量、輸入総量の不一致
- [3] エネルギー転換効率値が工学的に非現実的なものが含まれる
- [4] 時系列変化を見たときに、外れ値と思われるものが少なからず含まれる
- [5] 欠測が存在する。

こういった問題が生じる理由はいくつか考えられる。例えば、生産・輸出入量などの一次供給に関しては、貿易統計や生産統計等で計測が比較的容易であるが、部門別のエネルギーの消費量の計測は困難であること、計測のシステム変更などがその理由として挙げられる。これまで、上記の問題の[1], [2]に対し、著者らは経済統計とエネルギー統計の統合を行うことで解決を図った(藤森ら, 2008)<sup>8)</sup>。藤森ら(2008)<sup>8)</sup>は、広範囲に渡る統計情報を Cross-entropy 法を用いて統合・調整し、社会会計表とエネルギーの生産・輸出入量を同時に調整した。その結果、経済統計と整合性のとれ、世界全体の貿易総量に矛盾のない化石燃料のエネルギー単位の一次エネルギー供給量、すなわち生産量、輸出量、輸入量を得ることができた。本論文は、残りの問題[3]-[5]の解決を行うことを目的とする。

以下では本論文の構成について述べる。第2章では、

部門やエネルギー源の定義、本研究で提案する勘定表について示す。次に、第3章ではその勘定表に基づいたエネルギーフローの推計方法を示す。推計にはCross-entropy法を用いた。Cross-entropy法は、求めたい変数と事前に得られる変数に関する参照値との距離をCross-Entropyの形で表し、その総和を最小化することで、変数の解を得る手法である。第4章では適用対象と適用時のパラメータ等について示す。第5章の結果・考察では、既存の統計と推計値がどの程度異なるのかを中心に検討する。

## 2. 勘定体系

### (1) 部門、エネルギー源

本研究で対象とする物質・エネルギーは、現在世界で用いられている主要なエネルギー源(例えば石油、石炭、原子力等)を「エネルギー源」と呼ぶ。エネルギー源として本研究では、表-1に示す19種類を扱う。

表-1 エネルギー源一覧

エネルギー源	
石炭	原子力
石炭製品	水力
コークス	地熱
溶鉱炉ガス	太陽光
コークス炉ガス	太陽熱
天然ガス	波力
原油	風力
石油製品	バイオマス
電力	その他再生可能エネルギー
熱	

また、エネルギーの入力、出力を行う活動主体を部門と呼ぶことにする。部門は集約度に応じ、大分類、中分類、小分類を設定する(表-2)。

大部門は一次エネルギー供給、エネルギー転換、最終消費の3つに分ける。次に、中部門は大部門を以下のよ

うに分割する。すなわち、一次エネルギー供給を生産、国外貿易、在庫増減の3種類、エネルギー転換をエネルギー転換活動、自家消費活動、エネルギー分配ロスの3種類、最終消費を産業、交通、その他、非エネルギー利用の4種類に分割する。ここで、エネルギー転換部門の中部門は制度ベースではなく活動ベースの分類とした。また、中部門のうち、エネルギー転換活動、自家消費活動、産業、交通、その他の部門は、さらに細かい単位の小部門に分け、エネルギー転換活動は29の部門、自家消費活動は9の部門、産業は13部門、交通は6、その他は3の部門に分けた。これらの部門の一覧を表-2に示す。

表-2 部門一覧

大分類	中分類	小分類
一次エネルギー供給	生産	石炭発電、石油発電、ガス発電、原子力発電、水力発電、地熱発電、太陽光発電、太陽熱発電、波力発電、風力発電、その他再生可能エネルギー発電
	国外貿易 在庫増減	石炭CHP発電、石油CHP発電、ガスCHP発電、原子力CHP発電、地熱CHP発電、太陽熱CHP発電、その他再生可能エネルギーCHP発電
エネルギー転換部門	エネルギー転換活動	石炭熱供給プラント発熱、石油熱供給プラント発熱、ガス熱供給プラント発熱、地熱供給プラント発熱、太陽熱供給プラント発熱、その他再生可能エネルギー熱供給プラント発熱
	自家消費活動	コークス製造 石炭転換 原料生成 その他転換 高炉転換
エネルギー分配ロス	自家消費活動	プラント自家消費、コークス炉自家消費、高炉自家消費、石炭転換自家消費、石油精製自家消費、ガス供給自家消費、その他エネルギー転換自家消費
	エネルギー分配ロス	石炭採掘 石油・天然ガス採掘
最終消費	産業	鉄鋼、化学、非鉄金属、非金属、機械、輸送機器、紙パルプ、鉱業、繊維、食料、木材、建設、その他
	交通	道路、鉄道、内航船舶、国際船舶、国内航空、国際航空
	その他	家庭、業務、農業
	非エネルギー利用	非エネルギー利用

### (2) 対象地域・期間

本勘定表の対象地域・期間を以下に示す。対象地域は

図-1 勘定表枠組み

大分類	中分類	コード	一次エネルギー供給			エネルギー転換部門			最終消費部門				エネルギー源									消費損失				
			生産	国外	在庫増減	エネルギー転換活動	自家消費活動	エネルギー分配ロス	産業	交通	その他	非エネルギー利用	COL	NGS	CRU	OL	ELY	HET	NUC	HYD	ORN		TFL			
			EXT	FOR	STC	TIF	TOU	TDL	TIN	TTR	TOR	TNE														
一次エネルギー供給	生産	EXT																								
	国外	FOR																								
	在庫増減	STC																								
エネルギー転換部門	エネルギー転換活動	TIF																								
	自家消費活動	TOU																								
	エネルギー分配ロス	TDL																								
最終消費部門	産業	TIN																								
	交通	TTR																								
	その他	TOR																								
	非エネルギー利用	TNE																								
エネルギー源	石炭	COL		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	天然ガス	NGS		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	原油	CRU		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	石油製品	OL		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	電力	ELY		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	熱	HET																								
	原子力	NUC					+																			
	水力	HYD					+																			
	その他再生可能エネルギー	ORN					+																			
	損失エネルギー	TFL																								

全世界(106 地域(94 カ国+12 地域))であり、対象年は1971-2003 年である。この地域区分は、2000 年においてGDP(US\$ Current Price)が上位99%以上の国を単一国とし、残りの国を地理的分布に従う集約地域とするという原則に基づいて決定した。

### (3) 勘定表の枠組み

本研究ではエネルギーの投入と産出を定量的に表現するエネルギー投入産出勘定表を作成する。その概要を図-1に示す。

エネルギー投入産出勘定表の行列においては、行と列項目は同一であり、部門とエネルギー源で構成される。エネルギー源が部門から産出された場合、表中の右上部分にそのフロー量が計上され、エネルギー源が部門へ投入された場合はそのフロー量が左下の部分に計上される。表中に+で示されている部分は定義上フローが存在するところを表し、空白の部分は定義上エネルギーフローが存在しない。

## 3. 推計方法

本章では、前章で示したエネルギー投入産出表の推計方法について述べる。

本研究では、推計で得られるエネルギー投入産出表を推計マトリクスと呼び、特に断らない限り推計マトリクスの値を推計値と呼ぶ。また、推計には推計マトリクスの参照となるエネルギー投入産出表の値を用いる。そのマトリクスのことを基準マトリクスと呼び、その値を基準値と呼ぶ。

### (1) 推計の方針

以下では本手法の基本方針を示す。図-2に推計の概要図を示す。エネルギーフローの統計報告値、経済統計と整合性の取れたデータ、エネルギー転換効率を用い、調整計算を行い、エネルギー投入産出表推計値を得る。その調整計算は、欠測の補完や経年変化が妥当になるように定式化を行う。

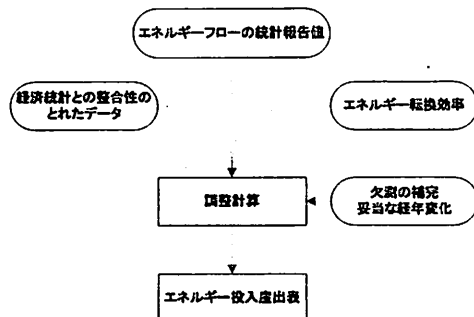


図-2 推計の概要図

### a) エネルギー統計の報告値との整合性

エネルギー統計の報告値が存在する場合は推計値と報告値が近くなるようにする。また、ある地域における総一次エネルギー供給量(生産量+輸出量-輸入量+在庫増減の全エネルギー源の総和)は、複数のエネルギー統計から作成し、外生的に与え、固定されるものとする(具体的な値の設定方法は4(2)節で示す)。

### b) 世界全体の貿易の整合性と経済統計との整合性

化石燃料の生産量、輸出量、輸入量に関しては、経済統計と整合性の取れた藤森ら(2008)<sup>9)</sup>を用いることで問題[1], [2](経済統計との間に不整合が存在する、エネルギー財の世界全体の輸出総量、輸入総量の不一致)を解決する。

### c) 妥当な経年変化と欠測の補完

問題[4], [5](時系列変化を見たときに、外れ値と思われるものが少なからず含まれる、欠測が存在する)は以下の方針で解決を図る。

- 基準マトリクスと推計マトリクスで、全エネルギー投入係数、投入係数、産出係数という3種類の係数を定義し、基準マトリクスと推計マトリクスにおけるこれらの係数の乖離が小さくなるようにする(ここで、全エネルギー投入係数とは、ある地域全体のエネルギー投入総量に対する部門別エネルギー投入量の比とする。投入係数とはある部門のエネルギー投入総量に対するあるエネルギー源の投入量の比とし、産出係数とはあるエネルギー源のエネルギー産出総量に対するある部門の産出量の比とする)。
- 推計は毎年別、地域別で行う。そして、最近年の推計から順にさかのぼって推計する(2003, 2002, ... のようにさかのぼる)。各年の推計では後年の推計値(2002年の推計であれば2003年の推計値)を基準値として使う。

ここで、エネルギーフローの値そのものではなく、3種類の比の経年変化が大きくないようにするのは、以下の理由による。すなわち、エネルギーフローの値そのものの経年変化は大きいことも想定される(例えば、戦争、国の分裂統合、大恐慌など、社会経済に大きな変化が起こった場合がそれにあたる)、多くの場合フロー間の比はそこまで大きな変化がないと考えられたためである。これは、エネルギーの消費・生産はそれぞれの用途に応じたエネルギー機器を用いるが、その機器のフローは一年で変化が起こったとしてもストックの更新、廃棄は大きく変化しないためである。

### d) 妥当なエネルギー転換効率

問題[3](エネルギー転換効率値が工学的に非現実的なものが含まれる)は以下の方針で解決を図る。

- エネルギー転換効率(ある部門におけるエネルギー

投入量あたりのエネルギー産出量の参照値と推計マトリクスにおけるエネルギー転換効率値の乖離が小さくなるようにする。

- それぞれの部門に対してエネルギー転換効率値の上限値を設定する。

以下では、推計の方法を具体的に示す。

## (2) エネルギー統計の報告値との整合性

まず、部門  $j$  に投入されるエネルギー源  $i$  を  $EU_{ij}$ 、部門  $j$  が産出するエネルギー源  $i$  を  $EV_{ij}$  とする(以降、前者を投入フロー、後者を産出フローと呼ぶ)。

総一次エネルギー供給量  $\overline{TPES}$  は外生的に与え固定されるものとする。

$$\overline{TPES} = \sum_{i \in I} (EV_{i,prd} + RV_{i,urd} + RV_{i,sc} - RU_{i,urd} - RU_{i,sc}) \quad (1)$$

ここで、 $I$  はエネルギー源の集合を表す。 $j = "prd", "urd", "sc"$  は生産、国外、在庫増減を表す。

エネルギーの投入フローと産出フローについて統計の報告値が得られるので、その報告値と推計値の乖離を小さくする。報告値は本研究で定義した単一のあるエネルギー源  $i$ 、部門  $j$  に対して得られる場合もあるが、そうではなく複数のエネルギー源、部門の合計量に対して得られる場合もある。後者の例として、化石燃料全体の火力発電量、エネルギー種全体の最終エネルギー消費量等が挙げられる。そこで、一般に、ある単一もしくは集約的な部門の集合を  $AJ$  としてその要素を  $aj$ 、ある単一もしくは集約的なエネルギー源の集合を  $AI$  としてその要素を  $ai$  とする。そして、(統計)情報種  $s$  のエネルギー源  $ai$ 、部門  $aj$  の投入量の報告値  $\overline{OU}_{ai,aj,s}$  が得られたとする。こ

の報告値に対応する投入フローを定義し、統計報告値と推計値の乖離を小さくする。あるエネルギー源  $ai$ 、部門  $aj$  における投入フロー  $AU_{ai,aj}$  を以下のように表す。

$$AU_{ai,aj} = \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \overline{\lambda}_{ai,aj,i,j} EU_{i,j} \quad \forall ai \in AI, aj \in AJ \quad (2)$$

ここで、 $\overline{\lambda}_{ai,aj,i,j}$  はエネルギー源の  $ai$  と  $i$ 、部門の  $aj$  と  $j$  の対応付けをする設定変数である。投入フローの報告値に対する推計値の比を  $\varepsilon U_{ai,aj,s}$  とすると以下のように表すことができる。

$$\varepsilon U_{ai,aj,s} = \frac{AU_{ai,aj}}{\overline{OU}_{ai,aj,s}} \quad \forall (s, ai, aj) \in SA_{exist}^u \quad (3)$$

ここで、

$$SA_{exist}^u = \{(s, ai, aj) | \overline{OU}_{s,ai,aj} > 0\} \quad (4)$$

同様に、産出フローについても定式化する。情報種(統計)  $s$  のエネルギー源  $ai$ 、部門  $aj$  の報告値  $\overline{OV}_{ai,aj,s}$  が得られ

たとする。この報告値に対応する産出フローを定義する。あるエネルギー源の集合の要素  $ai$ 、部門の集合の要素  $aj$  における産出フロー  $AV_{ai,aj}$  を以下のように表す。

$$AV_{ai,aj} = \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \overline{\lambda}_{ai,aj,i,j} EV_{i,j} \quad \forall ai \in AI, aj \in AJ \quad (5)$$

投入フローの報告値に対する推計値の比を  $\varepsilon V_{ai,aj,s}$  とすると以下のように表すことができる。

$$\varepsilon V_{ai,aj,s} = \frac{AV_{ai,aj}}{\overline{OV}_{ai,aj,s}} \quad \forall (s, ai, aj) \in SA_{exist}^v \quad (6)$$

ここで、

$$SA_{ou} = \{(s, ai, aj) | \overline{OU}_{s,ai,aj} > 0\} \quad (7)$$

次に、投入フロー、産出フローの報告値に対する推計値の比  $\varepsilon U_{ai,aj,s}$ 、 $\varepsilon V_{ai,aj,s}$  の対数をとったものを以下のような式で表す。

$$\ln \varepsilon U_{ai,aj,s} = \sum_h WU_{ai,aj,s,h} \cdot \overline{VU}_{ai,aj,s,h} \quad \forall (s, ai, aj) \in SA_{exist}^u \quad (8)$$

$$\ln \varepsilon V_{ai,aj,s} = \sum_h WV_{ai,aj,s,h} \cdot \overline{VU}_{ai,aj,s,h} \quad \forall (s, ai, aj) \in SA_{exist}^v \quad (9)$$

ただし、

$$\sum_h WU_{ai,aj,s,h} = 1 \quad \forall (s, ai, aj) \in SA_{exist}^u, 0 \leq WU_{ai,aj,s,h} \leq 1 \quad (10)$$

$$\sum_h WV_{ai,aj,s,h} = 1 \quad \forall (s, ai, aj) \in SA_{exist}^v, 0 \leq WV_{ai,aj,s,h} \leq 1 \quad (11)$$

これらの式の意味するところは、統計報告値と推計値の比の対数は、ある既知の変数  $\overline{VU}_{ai,aj,s,h}$ 、 $\overline{VU}_{ai,aj,s,h}$  の加重平均  $WU_{ai,aj,s,h}$ 、 $WV_{ai,aj,s,h}$  で表されるということである。

ただし、実際の適用時には、 $h$  を2つのみを設定し、 $\overline{VU}_{ai,aj,s,1} = -\overline{VU}_{ai,aj,s,2}$ 、 $\overline{VU}_{ai,aj,s,1} = -\overline{VU}_{ai,aj,s,2}$  とする。そして、以下のように目的関数を設定する。ここでは、Cross-entropy 法(Golan *et al.*, 1996)<sup>9)</sup>を用い、以下の関数  $L$  を最小化する。

$$L = \sum_{(s, ai, aj) \in SA_{exist}^u} \overline{\omega 1}_{ai,aj,s} \left( \sum_h WU_{ai,aj,s,h} \ln \frac{WU_{ai,aj,s,h}}{1/n} \right) + \sum_{(s, ai, aj) \in SA_{exist}^v} \overline{\omega 2}_{ai,aj,s} \left( \sum_h WV_{ai,aj,s,h} \ln \frac{WV_{ai,aj,s,h}}{1/n} \right) \quad (12)$$

ここで、 $n$  は  $h$  の数を表し、適用時には2となる。また、 $\overline{\omega 1}_{ai,aj,s}$ 、 $\overline{\omega 2}_{ai,aj,s}$  は報告値に対する重みを表す。 $WU_{ai,aj,s,h}$ 、 $WV_{ai,aj,s,h}$  が  $h$  について等分されるときに目的関

数は最も小さくなる、つまり統計報告値と推計値の比の対数  $\ln \varepsilon U_{a,t,q,s}$ ,  $\ln \varepsilon V_{a,t,q,s}$  が0 となるときの目的関数は最小となる。

(3) 世界全体の貿易の整合性と経済統計との整合性

化石燃料の生産量、輸出量、輸入量に関しては、経済統計と整合性の取れた藤森ら(2008)<sup>8)</sup>を用いる。

$$\frac{EV_{i,j}}{EU_{i,j}} = \frac{\overline{EV}_{i,j}}{\overline{EU}_{i,j}} \quad \forall i \in I_{ff}, j \in J_{pm} \quad (13)$$

ここで、 $I_{ff}$ は化石燃料のエネルギー財の集合を表す。また、 $J_{pm}$ は一次エネルギー供給部門を表す。

(4) 妥当な経年変化と欠測の補完(基準マトリクスと推計値の関係)

3(1)節で述べた全エネルギー投入係数、投入係数、産出係数を定義する。

全エネルギー投入係数(全部門のエネルギー投入量に対する部門  $j$  のエネルギー投入量)を  $RI_j$  とすると、以下のように表される。

$$RI_j = \frac{\sum_{i \in I} EU_{i,j}}{\sum_{j \in J} \sum_{i \in I} EU_{i,j}} \quad \forall j \in J \quad (14)$$

ここで、 $J$ は部門の集合を表す。

ある部門  $j$  の投入係数(エネルギー投入総量に対するエネルギー源  $i$  の投入量の比)を  $RU_{i,j}$  とし、産出係数(あるエネルギー源  $i$  のエネルギー産出量に対する部門  $j$  の産出量の比)を  $RV_{i,j}$  とする。投入係数、産出係数は次の式のように表される。

$$RU_{i,j} = \frac{EU_{i,j}}{\sum_{i \in I} EU_{i,j}} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (15)$$

$$RV_{i,j} = \frac{RV_{i,j}}{\sum_{j \in J} RV_{i,j}} \quad \forall i \in I, j \in J_r \quad (16)$$

ここで、 $I$ はエネルギー源の集合、 $J_r$ は、エネルギー転換部門のエネルギー転換部門の集合を表す。

次に、基準マトリクスでも同様の式を用いて、全エネ

ルギー投入係数  $RI_j$ , 投入係数  $RU_{i,j}$  と産出係数  $RV_{i,j}$  をそれぞれ計算する。それらを推計値に対する参照値とし、推計値と参照値との乖離を小さくする。ここでは、式(12)を以下のように書き換える。

$$L = \sum_{(s,a,q) \in S_{a,q}} \overline{\omega^1}_{a,t,q,s} \left( \sum_h WU_{a,t,q,s,h} \ln \frac{WU_{a,t,q,s,h}}{1/n} \right) + \sum_{(s,a,q) \in S_{a,q}} \overline{\omega^2}_{a,t,q,s} \left( \sum_h WV_{a,t,q,s,h} \ln \frac{WV_{a,t,q,s,h}}{1/n} \right) + \sum_{j \in J} RI_j \ln \frac{RI_j}{\overline{RI}_j} + \sum_{(i,j) \in I_{ru}} RU_{i,j} \ln \frac{RU_{i,j}}{\overline{RU}_{i,j}} + \sum_{(i,j) \in I_{rv}} RV_{i,j} \ln \frac{RV_{i,j}}{\overline{RV}_{i,j}} \quad (17)$$

ここで、

$$\sum_{j \in J} RI_j = 1 \quad (18)$$

$$IJ_{ru} = \{(i,j) | \overline{RU}_{i,j} > 0\} \quad (19)$$

$$IJ_{rv} = \{(i,j) | \overline{RV}_{i,j} > 0\} \quad (20)$$

$$\sum_{i \in I} RU_{i,j} = 1 \quad \forall j \in J \quad (21)$$

$$\sum_{j \in J} RV_{i,j} = 1 \quad \forall i \in I \quad (22)$$

各エネルギー源の投入総量と産出総量をバランスさせるために、次の式(23)を制約条件とする。

$$\sum_{j \in J} EV_{i,j} = \sum_{j \in J} EU_{i,j} \quad \forall i \in I \quad (23)$$

式(23)の左辺はエネルギー源の総産出量、右辺は総投入量を表す。

(5) エネルギー転換効率等

発電や石油精製などの部門のエネルギー転換効率について制約条件を加える。エネルギー転換効率の参照値を与え、その参照値と推計値の乖離を小さくし、さらに上限値を設定する。

部門  $j$  におけるエネルギー転換効率を  $RE_j$  とし、以下のように表す。

$$RE_j = \frac{\sum_{i \in I} EV_{i,j}}{\sum_{i \in I} EU_{i,j}} \quad \forall j \in J_r \quad (24)$$

エネルギー転換活動におけるエネルギー転換効率の工学的上限を設定する(式(25))。

表-3 エネルギー転換効率上限設定値

	発電	CHP	熱	コークス炉	高炉	石炭変換	石油精製
石炭	0.42 *1	0.90 *4	0.90 *5	0.95 *5	0.95 *5	0.95 *5	
天然ガス	0.52 *2	0.90 *4	0.90 *5				
石油	0.48 *3	0.90 *4	0.90 *5				0.95 *5

\*1 日本の発電効率(IEA, 2008)<sup>10)</sup>

\*2 IEA(2008)<sup>10)</sup>によると西ヨーロッパで最大の49%となっていた。一方、IEAではイギリスが2003年で51%を超える発電効率となっていた。それ以外はおおよそ、50%以下であり、50%を超えてくるような国は明らかに異常報告であると判断した。

\*3 日本の1999-2003年の5年間の発電効率が47%代であった。

\*4 Energy Balanceからは何も判断できなかったため、IEA(2008)<sup>10)</sup>を参考として決めた。

\*5 Energy Balanceのデータより判断

表-4 エネルギー転換効率中央値

	発電	CHP	熱	コークス炉	高炉	石炭変換	石油精製
石炭	0.33	0.57	0.80	0.87	0.40	0.79	
天然ガス	0.34	0.73	0.85				
石油	0.32	0.65	0.82				0.93

$$RE_j \leq \bar{\tau}_j \quad \forall j \in J_r \quad (25)$$

ここで、 $\bar{\tau}_j$  はエネルギー転換活動  $j$  におけるエネルギー転換効率の工学的上限である。

次に、情報種  $s$  の部門  $j$  におけるエネルギー転換効率の参照値を  $\bar{\mu}_{j,s}$  とする。そして、エネルギー転換効率の参照値と推計値の比を  $\varepsilon E_{j,s}$  とし、 $\varepsilon E_{j,s}$  を以下のように表す。

$$\varepsilon E_{j,s} = \frac{RE_j}{\bar{\mu}_{j,s}} \quad \forall (s,j) \in SJ_{exist}^{eff} \quad (26)$$

$$SJ_{exist}^{eff} = \left\{ (s,j) \mid \bar{\mu}_{j,s} > 0 \right\} \quad (27)$$

式(8)などで表したように  $\varepsilon E_{j,s}$  の対数がある既知の変数  $\overline{VE_{j,s,h}}$  の加重平均で表す。

$$\ln \varepsilon E_{j,s} = \sum_h \overline{WE_{j,s,h}} \cdot \overline{VE_{j,s,h}} \quad \forall (s,j) \in SJ_{exist}^{eff} \quad (28)$$

$$\sum_h \overline{WE_{j,s,h}} = 1 \quad \forall (s,j) \in SJ_{exist}^{eff}, \quad 0 \leq \overline{WE_{j,s,h}} \leq 1 \quad (29)$$

そして、目的関数にエネルギー転換効率の推計値と参照値の乖離に関する項を加える。

$$L = \sum_{(i,m,q) \in SC_m} \omega_{1,i,m,q} \left( \sum_h \overline{WU_{i,m,q,h}} \ln \frac{WU_{i,m,q,h}}{1/n} \right) + \sum_{(i,m,q) \in SC_m} \omega_{2,i,m,q} \left( \sum_h \overline{WV_{i,m,q,h}} \ln \frac{WV_{i,m,q,h}}{1/n} \right) + \sum_{i,j} R_{i,j} \ln \frac{R_{i,j}}{R'_{i,j}} + \sum_{(i,j) \in \Omega_m} R_{i,j} \ln \frac{R_{i,j}}{R'_{i,j}} + \sum_{(i,j) \in \Omega_m} R_{i,j} \ln \frac{RV_{i,j}}{RV'_{i,j}} + \sum_{(i,j) \in SJ_{exist}^{eff}} \omega_{3,i,j} \left( \sum_h \overline{WE_{i,j,h}} \ln \frac{WE_{i,j,h}}{1/n} \right) \quad (30)$$

ここで、 $\omega_{3,i,j}$  はエネルギー転換効率の参照値に関する重みである。同様の概念を用いて、自家消費率、分配ロス率等も定式化し、それらの参照値と推計値の乖離項を目的関数に加える。

#### 4. 適用と各種設定

##### (1) 計算の手順と基準マトリクス

前節で示した問題を、各国・地域、各年別に適用する。

計算は各国・地域 2003 年、2002 年、2001 年というように順番にさかのぼっていく。また、基準マトリクスは計算実行の年の後の年(2002 年の実行時には 2003 年)とし、推計されたものが次の計算の基準マトリクスとなるようにしていく。各国・地域の計算の最初の年(一部分裂統合のあった国・地域は異なるが、大部分の国・地域は 2003 年)は、基準マトリクスとして、IEA Energy Balance(IEA, 2007a<sup>3)</sup>; 2007b<sup>4)</sup>) (以降、IEA 報告値と呼ぶ)から作成したものをを用いた。

##### (2) 統計報告値

報告値には、IEA の Energy Balance(IEA, 2007a<sup>3)</sup>; 2007b<sup>4)</sup>)、Enerdata の Globalstat(Enerdata, 2008)<sup>5)</sup>、EIA、BP のエネルギー統計(EIA, 2007<sup>6)</sup>; BP, 2007<sup>7)</sup>)、藤森ら(2008)<sup>8)</sup> の推計結果を用いた。ただし、これらの統計の中で桁落ち等により報告値として使用するのに不適切なものは使用しなかった。

各地域の総一次エネルギー供給量は、以下のように計算する。まず化石燃料の生産量、輸出量、輸入量、電力の輸出量、輸入量は藤森ら(2008)<sup>8)</sup>、水力、原子力、バイオマス等の非化石燃料エネルギー源の生産量は IEA 報告値、Enerdata の Globalstat(Enerdata, 2008)<sup>5)</sup>、EIA、BP のエネルギー統計(EIA, 2007<sup>6)</sup>; BP, 2007<sup>7)</sup>) の平均値、在庫増減量は IEA 報告値の値として、すべてのエネルギー源について生産量+輸入量-輸出量+在庫増減量を計算し足し合わせた。

##### (3) エネルギー転換効率の参照値と上限値

エネルギー転換効率の参照値は、IEA の報告値から計算したエネルギー転換効率を用いる。ただし、IEA 報告値から計算したエネルギー転換効率がある場合、もしくは欠測している場合は、以下の基準で参照値を設定する。上限値については表-3 に示す。

- (i) 対象期間のうち一部が上限値を超える、もしくは欠測している場合は、上限値を超えない年の値で線形補完する。
- (ii) 対象期間のすべてにわたって、欠測もしくは上限値を超えている場合は、世界各国・地域のエネルギー転換効率の中央値を用いた(表-4)。

#### 5. 結果および考察

本章では、本手法で得られた結果と、その結果の考察

について示す。まず、全エネルギー源の最終エネルギー消費量について推計値と統計報告値を比較する。次に、既存の統計の問題点として挙げたエネルギー転換効率の問題を示し、それが本研究の方法により改善したことを示す。最後に、報告値と推計値の乖離度を要因分解し、どの国・地域、部門で報告値と推計値の乖離が大きかったかを示す。

(1) 最終エネルギー消費量の報告値と推計値の比較

IEA 報告値と本研究推計値の最終エネルギー消費量(産業、交通、その他、非エネルギー利用部門へのエネルギー投入量)を比較する。本項では比較する指標として、平均平方誤差率(RMSE)、平均絶対誤差率(AME)、最大誤差率(ME)を用い、これらの指標を地域別に比較した。以下に上記の3つの指標の推計式を示す。

$$RMSE_r = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|TFCest_{r,i} - TFCia_{r,i}|}{TFCia_{r,i}}} \quad (31)$$

$$AME_r = \frac{\sum_{i=1}^n |TFCest_{r,i} - TFCia_{r,i}|}{\sum_{i=1}^n TFCia_{r,i}} \quad (32)$$

$$ME_r = \max_i \left| \frac{TFCest_{r,i}}{TFCia_{r,i}} \right| - 1 \quad (33)$$

ここで、 $TFCest_{r,i}$  は本研究推計値の最終エネルギー消費量、 $TFCia_{r,i}$  は IEA 報告値の最終エネルギー消費量である。

これらの3つの指標の一覧を表-5に示す。OECD 諸国は網掛けで示し、各指標で上位10地域に該当する箇所は斜体・下線で示した。また、右下段には各指標の世界の中央値、OECD 諸国の中央値、非 OECD 諸国の中央値を示した。また、世界全体の最終エネルギー消費量に占める各地域の最終エネルギー消費量の割合の平均値を表の右端に示した。

まず世界全域について見ると、いずれの指標も3%以内となり、IEA 報告値からの修正量は大きくなかった。

表-5 IEA のエネルギーバランス表と本研究推計値の最終エネルギー消費量の比較

	平均平方誤差率	絶対平均誤差率	最大誤差率	世界全体に占める最終エネルギー消費量(平均値)		平均平方誤差率	絶対平均誤差率	最大誤差率	世界全体に占める最終エネルギー消費量(平均値)
その他オセアニア	60.2%	57.1%	114.2%	0.0%	オランダ	4.6%	3.1%	20.2%	1.1%
その他南米	47.2%	48.7%	74.4%	0.1%	モロッコ	4.5%	3.4%	8.3%	0.1%
その他南アジア	34.2%	26.2%	64.3%	0.1%	北朝鮮	4.2%	1.4%	23.6%	0.4%
その他中東	32.0%	27.4%	158.6%	0.1%	台湾	4.2%	3.8%	9.5%	0.5%
サウジアラビア	26.2%	22.7%	54.6%	0.5%	インドネシア	4.2%	4.1%	7.3%	1.2%
その他東南アジア	24.6%	17.7%	38.3%	0.2%	メキシコ	4.2%	3.4%	9.5%	1.3%
シンガポール	18.2%	8.5%	46.1%	0.3%	コートジボワール	3.9%	2.8%	10.7%	0.1%
クウェート	17.2%	14.7%	66.8%	0.1%	デンマーク	3.8%	2.3%	18.0%	0.3%
UAE	13.8%	12.8%	41.7%	0.3%	チェコスロバキア	3.8%	3.3%	7.3%	0.8%
カタール	13.6%	10.8%	27.5%	0.1%	アフリカ	3.7%	3.0%	8.3%	23.1%
その他欧州	13.5%	13.0%	25.1%	0.1%	イタリア	3.7%	3.3%	6.4%	1.9%
イラク	11.9%	9.7%	39.3%	0.2%	フランス	3.7%	3.5%	6.8%	2.6%
イエメン	11.2%	9.6%	25.0%	0.0%	スイス	3.7%	3.2%	7.8%	0.3%
レバノン	10.9%	9.9%	31.6%	0.0%	シリア	3.7%	2.8%	12.2%	0.1%
ベネゼエラ	10.0%	7.0%	30.1%	0.4%	スペイン	3.6%	3.5%	6.9%	1.1%
エルサルバドル	9.8%	7.9%	24.0%	0.0%	トルコ	3.6%	3.5%	7.2%	0.6%
バルブエ	9.3%	7.4%	21.3%	0.3%	ベルギー・ルクセンブルグ	3.5%	3.3%	6.2%	0.7%
ブルガリア	9.1%	8.8%	20.4%	0.2%	フィンランド	3.5%	2.9%	8.2%	0.4%
その他カリビアン	9.0%	8.9%	13.0%	0.2%	ローマニア	3.5%	3.2%	8.0%	0.7%
韓国	8.4%	2.7%	24.4%	1.1%	スロベニア	3.4%	2.5%	6.7%	0.1%
リビア	8.3%	4.6%	26.5%	0.1%	コロンビア	3.4%	3.0%	8.1%	0.3%
イラン	7.9%	7.9%	16.7%	0.8%	ポーランド	3.3%	2.9%	7.0%	1.2%
クロアチア	7.9%	7.8%	11.5%	0.1%	その他アフリカ	3.3%	2.7%	7.8%	1.8%
スロバキア	7.5%	6.9%	15.2%	0.2%	スリランカ	3.2%	2.6%	8.7%	0.1%
ベラルーシ	7.4%	6.3%	18.6%	0.3%	アイルランド	3.2%	2.9%	7.7%	0.1%
インドネシア	7.4%	7.3%	8.6%	4.3%	イスラエル	3.2%	1.7%	14.3%	0.1%
パナマ	7.2%	5.2%	25.9%	0.0%	パキスタン	3.0%	2.7%	8.3%	0.6%
アルジェリア	7.1%	5.4%	18.9%	0.2%	旧ソ連	2.9%	2.2%	5.4%	13.5%
オーストラリア	6.9%	6.7%	14.0%	0.9%	チェンジア	2.9%	2.4%	5.2%	0.1%
その他EFTA	6.8%	6.5%	14.4%	0.0%	チリ	2.8%	2.4%	5.5%	0.2%
ドミニカ共和国	6.7%	5.4%	24.0%	0.1%	キューバ	2.6%	2.1%	7.2%	0.2%
その他CIS	6.7%	4.9%	17.7%	0.5%	ウルグアイ	2.5%	1.9%	7.0%	0.0%
オーストリア	6.6%	6.6%	8.4%	0.4%	ウズベキスタン	2.5%	2.1%	3.9%	0.6%
ウクライナ	6.6%	5.8%	17.1%	1.4%	イギリス	2.4%	2.2%	3.9%	2.6%
ガマラ	6.5%	6.0%	18.5%	0.1%	エジプト	2.3%	1.2%	6.6%	0.4%
ハンガリー	6.3%	6.1%	9.8%	0.3%	カザフスタン	2.3%	2.1%	4.7%	0.5%
ケニア	6.0%	4.8%	9.3%	0.1%	スーダン	2.2%	1.4%	7.2%	0.1%
ギンシャ	6.0%	5.6%	17.0%	0.3%	オーストリア	2.2%	2.0%	3.5%	0.3%
モンゴル	5.9%	5.4%	10.6%	0.0%	ロシア	2.1%	1.6%	3.5%	7.8%
バルト三国	5.8%	5.2%	9.8%	0.2%	タイ	2.0%	2.1%	5.1%	0.5%
マレーシア	5.7%	2.8%	15.7%	0.3%	ドイツ	2.0%	1.7%	3.8%	4.2%
南アフリカ	5.6%	3.6%	13.4%	0.8%	ニュージーランド	1.9%	1.5%	5.1%	0.2%
オマーン	5.5%	4.1%	14.2%	0.0%	中国	1.9%	1.7%	4.4%	10.5%
スウェーデン	5.5%	4.8%	10.1%	0.6%	ベトナム	1.7%	1.2%	2.9%	0.4%
カナダ	5.5%	5.3%	11.5%	2.6%	香港	1.6%	1.2%	3.3%	0.1%
ブルネイ	5.2%	5.3%	15.7%	0.0%	アルゼンチン	1.6%	1.4%	3.9%	0.6%
コスタリカ	5.2%	4.0%	17.7%	0.0%	その他ユーゴスラビア	1.3%	1.1%	2.6%	0.1%
セルビアモンテネグロ	5.1%	4.7%	9.6%	0.1%	バングラディッシュ	1.2%	1.0%	3.8%	0.2%
エクアドル	5.0%	4.1%	9.8%	0.1%	ブラジル	1.1%	0.9%	2.1%	1.9%
ペルー	5.0%	4.1%	11.5%	0.2%	ナイジェリア	0.9%	0.8%	2.0%	1.0%
ポルトガル	4.9%	3.7%	14.5%	0.2%	世界全域	2.1%	2.0%	3.3%	100.0%
旧ユーゴスラビア	4.8%	3.6%	13.0%	0.4%					
西ドイツ	4.7%	4.6%	6.4%	4.1%	世界中央値	4.7%	3.7%	10.9%	
フィリピン	4.7%	3.5%	14.3%	0.3%	OECD中央値	3.8%	3.4%	8.4%	
日本	4.6%	4.0%	9.4%	4.7%	非OECD中央値	5.0%	3.8%	11.9%	

次にOECD諸国について見てみる。OECD諸国のRMSE, AME, MEの中央値はそれぞれ3.8%, 3.4%, 8.4%であり、それぞれの指標の世界全体の中央値(4.7%, 3.7%, 10.9%)を下回っている。しかし、OECD諸国であれば推計値のIEA報告値からの修正量が必ずしも小さいわけではない。例えばオーストラリア、カナダ、ギリシャ、ハンガリー、韓国、スロバキアなどを見るとRMSEが5%以上、MEが10%以上などの数値が見られる。これらの国はOECD諸国であるが、IEA報告値からの修正量が比較的大きかった。

次に、各指標が大きな値を示した地域に注目してみる。各指標の上位10地域を抽出し、それらの地域のうち、複数の指標が上位10地域に該当するものは、UAE、イラク、クウェート、サウジアラビア、ベネズエラ、その他中東、その他オセアニア、その他南アジア、その他東南アジア、その他東南アジア、その他南米であった。中東諸国、集約化地域が多く含まれていることがわかる。これらの地域ではIEA報告値から大きな修正が行われた。ただし、これらの地域におけるエネルギー消費量は小さいことが表右端の世界全体に占める各地域の最終エネルギー消費量の割合よりわかる。

## (2) エネルギー転換効率

IEA報告値のエネルギー転換効率が本研究で設定した上限を越えたケース(国・地域及び年を通じた延べ数)を表-6に示す。

表-6 IEA報告値においてエネルギー転換効率が上限を越えたケース

	発電	CHP	熱
石炭	70	47	63
天然ガス	76	42	126
石油	148	76	95
石炭	4.2%	5.7%	16.3%
天然ガス	3.9%	5.6%	28.4%
石油	4.9%	8.5%	20.4%

表-6では、石炭、天然ガス、石油それぞれについて発電、CHP、熱プラントの転換効率が、上限を越えたケース数を表した。また、本表下段は全ケース数に対する割合を表している。上限を越えたケース数で見ると、石油の発電、天然ガスの発熱が大きく、それぞれ148、126となった。割合で見ると、熱プラントが大きく、天然ガス、石油でそれぞれ28.4%、20.4%となり、20%を越える国・地域、年で上限を越えていた。発電やCHPでも天然ガスの発電を除き4%以上の国・地域、年が上限を越えていた。

本研究の推計作業により、これらの問題は大幅に解消されている。例えば、図-3は石炭の発電のエネルギー

転換効率を国・地域別にプロットしたものである。同じ項目についてIEA報告値から算出した値を図-4に示しているが、この図に示されている異常な転換効率値(通常発電効率45%を超えるような石炭発電はないと考えられる)は図-3においてほとんど消滅しており、時系列変化として異常と思われるものも解消されている。

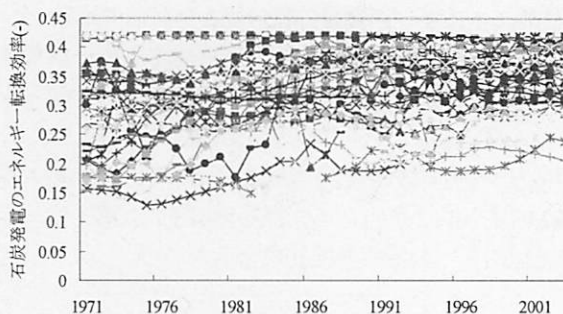


図-3 石炭発電のエネルギー転換効率(本研究による推計値)  
(図中の線は各地域のエネルギー転換効率を表している)

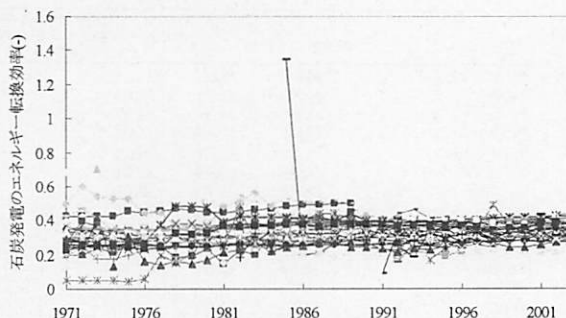


図-4 石炭発電のエネルギー転換効率(IEA報告値)  
(図中の線は各地域のエネルギー転換効率を表している)

## (3) 推計値の報告値からの修正量

### a) 分散分析

本節では、IEA報告値と推計値の差異について解析する。IEA報告値と推計値の比の対数が、3つの要因、すなわち、地域別の要因(Reg)、部門・フロー種の要因(Sec)、年別の要因(Time)とそれらの交互作用のバイアスを持っていると仮定して、分散分析を行う(次式)。

$$\log_{10} \frac{x_{i,j,m,r,t}}{x_{i,j,m,r,t}} = \mu + Reg_r + Sec_{j,m} + Time_t + RS_{r,j,m} + RT_{r,t} + ST_{j,m,t} + RST_{r,j,m,t} + \varepsilon_{i,j,m,r,t} \quad (34)$$

ただし、



$$\begin{aligned}
\sum_r Reg_r &= \sum_{j,m} Sec_{j,m} = \sum_t Time_t = 0 \\
\sum_r RS_{r,j,m} &= \sum_{j,m} RS_{r,j,m} = 0 \\
\sum_r RT_{r,t} &= \sum_t RT_{r,t} = 0 \\
\sum_{j,m} ST_{j,m,t} &= \sum_t ST_{j,m,t} = 0 \\
\sum_r RST_{r,j,m,t} &= \sum_{j,m} RST_{r,j,m,t} = \sum_t RST_{r,j,m,t} = 0 \\
\varepsilon_{i,j,m,r,t} &\sim N(0, \sigma^2)
\end{aligned}
\tag{35}$$

ここで、 $x_{ij,m,r,t}$  は、 $t$  年、 $r$  地域における  $i$  行、 $j$  列における、フロー種  $m$  の推計値を表す。ここで、フロー種  $m$  とは、図-1 で示した勘定表の左下部分の投入フロー、あるいは右上部分の産出フローの別を示すサフィックスである。 $\overline{x_{i,j,m,r,t}}$  は、推計値に対応する IEA 報告値である。

$\mu$  は平均、 $Reg_r$  は地域別の要因、 $Sec_{j,m}$  は部門・フロー種別の要因、 $Time_t$  は年別の要因を表し、 $RS_{r,j,m}$ 、 $RT_{r,t}$ 、 $ST_{j,m,t}$ 、 $RST_{r,j,m,t}$  は交互作用、すなわちそれぞれ、地域・部門・フロー種別要因、部門・フロー種・年別要因、地域・年別要因を表す。 $\varepsilon_{ij,m,r,t}$  は残差項である。

分散分析には繰り返しのある 3 元配置法を用いた。表-7 にその分析結果である分散分析表を示す。表中の  $S$  は平方和、 $\phi$  は自由度、 $V$  は分散、 $F_0$  は  $F$  値(それぞれの要因の分散を誤差の分散で除したものを)を表す。

表-7 3元配置法を用いた分散分析表

要因	$S$	$\phi$	$V$	$F_0$	有意水準	
					5%	1%
$Reg_r$	23.6	104	0.227	12.14 **	1.24	1.35
$Sec_{j,m}$	10.2	16	0.637	34.13 **	1.64	2.00
$Time_t$	0.3	32	0.009	0.46	1.44	1.67
$RS_{r,j,m}$	78.7	1664	0.047	2.53 **	1.06	1.09
$RT_{r,t}$	3.0	3328	0.001	0.05	1.04	1.06
$ST_{j,m,t}$	3.0	512	0.006	0.32	1.11	1.15
$RST_{r,j,m,t}$	87.6	53248	0.002	0.09	1.02	1.03
$\varepsilon_{i,j,m,r,t}$	308.8	16539	0.019			
$T$	530.1	75443	0.007			

\*: 5%有意水準で有意, \*\*: 1%有意水準で有意

表-7 より有意水準を満たすのは、地域別の要因( $Reg_r$ )、部門・フロー種別の要因( $Sec_{j,m}$ )、これらの交互作用( $RS_{r,j,m}$ )のみであり、いずれも高度に有意であった(1%有意水準間)。また、年別の要因( $Time_t$ )は有意水準を満たさなかった。

以上の結果より、年別の要因( $Time_t$ )に関連する項をプールし、繰り返しのある 2 元配置法で分散分析を行った。その結果を表-8 に示す。いずれの要因も高度に有意である。

表-8 2元配置法を用いた分散分析表

要因	$S$	$\phi$	$V$	$F_0$	有意水準	
					5%	1%
$Reg_r$	23.6	104	0.227	39.99 **	1.24	1.35
$Sec_{j,m}$	10.2	16	0.637	112.39 **	1.64	2.00
$RS_{r,j,m}$	78.7	1664	0.047	8.35 **	1.06	1.08
$\varepsilon_{i,j,m,r,t}$	417.5	73659	0.006			
$T$	530.1	75443	0.007			

### b) 要因別の分析

次に、地域別の要因( $Reg_r$ )、部門・フロー種別の要因( $Sec_{j,m}$ )について分析する。まず、国・地域によるバイアスを表す  $Reg_r$  の一覧を表-9 に示す(表中数値は 10 を底とした指数で表している)。値が 1 から離れるほど、IEA 報告値と推計値は乖離していることを意味する。表-9 は、 $Reg_r$  が大きい国・地域から順に並べている。 $Reg_r$  の上位 10 地域、下位 10 地域について注目すると集約化地域(その他中東、その他南アジア、その他オセアニアなど)が多く含まれることがわかる。最終エネルギー消費量の分析では、中東諸国の IEA 報告値と推計値の乖離が大きかったが、本項の結果では、そういった中東諸国(例えば、サウジアラビア、クウェート、UAE、イラクなど)の多くは  $Reg_r$  が小さい地域であった。この結果は、これらの地域の IEA 報告値が推計値と比較して大きな値を報告していたことを意味する。逆に  $Reg_r$  が大きかった地域には、地理的な分布の特徴は見られなかったが、ロシア、ドイツなどエネルギー消費量の大きい国が含まれていることが特徴として挙げられる。こういった国々では IEA 報告値が本研究推計値よりも全般に小さい値をとっていたことを示している。

次に、部門・フロー種別の要因を表す  $Sec_{j,m}$  について示す。図-5 は、 $Sec_{j,m}$  の 10 を底とした指数をグラフで示したものである。

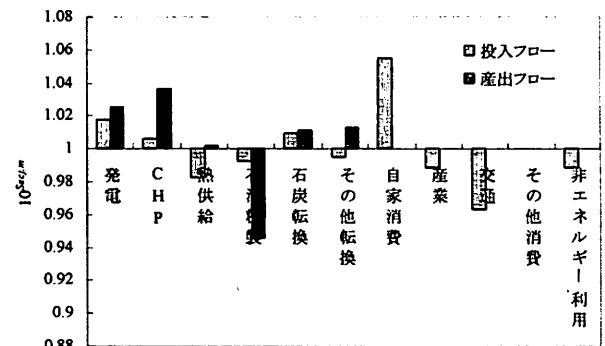


図-5 部門・フロー種別の要因( $Sec_{j,m}$ )

地域の要因と同様に、 $10^{Reg_r}$  が 1 から離れているものほど、IEA 報告値と推計値の乖離が大きいかを表す。乖離が大きな部門は、CHP プラント、石油精製、自家消費であった。これらの部門は IEA の報告値が全般に大き

めもしくは小さめの値を報告していたことを示唆している。例えば、石油精製について見てみると、産出フローは、投入フローよりも1から乖離している。これは、石油精製部門のエネルギー転換効率を見た場合、IEA 報告値は過大に報告されていることを示唆している。そこで、図-6、図-7にIEAの報告値と本研究推計値の国・地域別石油精製部門のエネルギー転換効率を示す。これらのグラフを見てもわかるように、IEA 報告値のエネルギー転換効率は、1を超えている国・地域が多数見られ、今回の調整により、石油精製でエネルギー転換効率が下がるように調整されたため、以上のような結果となったと考えられる。

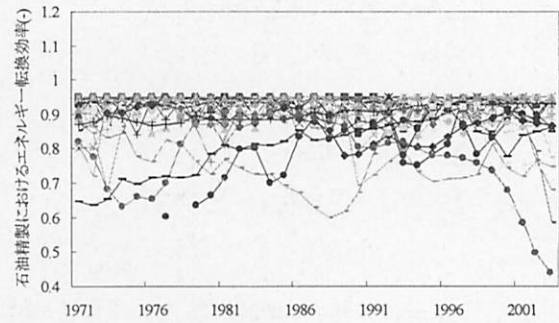


図-7 石油精製部門のエネルギー転換効率推計値  
(図中の線は各地域のエネルギー転換効率を表している)

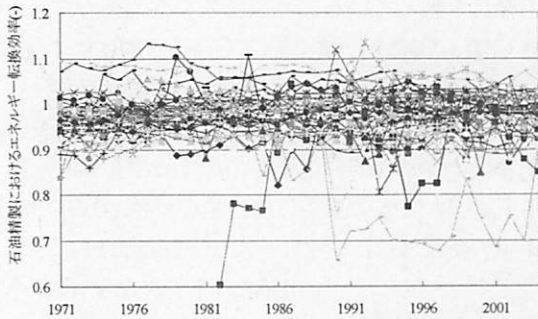


図-6 石油精製部門のエネルギー転換効率(IEA 報告値)  
(図中の線は各地域のエネルギー転換効率を表している)

次に、地域、部門・フローの要因の交互作用( $RS_{ijm}$ )についてみる。交互作用は自由度が1600以上であり、すべての値を掲載することは困難であるため、特に要因の大きかったものについて示す。ここでは、要因の大きかった項目を( $10^{(RS)_{ijm}} \leq 0.8$  or  $1.25 \leq 10^{(RS)_{ijm}}$ )という基準を満たすかどうかで判断した。要因の大きかったものの一覧を表-10に示す。

表-9 地域別の要因( $Reg_i$ )

地域名	$10^{Reg}$	地域名	$10^{Reg}$	地域名	$10^{Reg}$
その他中東	0.834	ベルー	0.989	ニュージーランド	1.004
サウジアラビア	0.875	タイ	0.990	エジプト	1.005
クウェート	0.915	コートジボアール	0.990	ブラジル	1.005
その他欧州	0.936	台湾	0.991	カナダ	1.006
UAE	0.938	バングラディッシュ	0.992	モンゴル	1.006
その他EFTA	0.951	ベトナム	0.992	中国	1.007
イエメン	0.958	ギリシャ	0.993	スペイン	1.007
イラク	0.958	コロンビア	0.993	ブルガリア	1.009
リビア	0.962	キューバ	0.993	ハンガリー	1.009
カタール	0.964	スイス	0.994	シリア	1.010
マレーシア	0.967	インドネシア	0.994	インドネシア	1.011
ベラルーシ	0.967	トルコ	0.995	旧ソ連	1.011
レバノン	0.967	ローマニア	0.996	ウズベキスタン	1.013
パナマ	0.968	メキシコ	0.996	その他アフリカ	1.013
スリランカ	0.973	ベルギー=ルクセンブルグ	0.997	スウェーデン	1.014
クロアチア	0.973	ベネゼエラ	0.997	オランダ	1.014
セルビアモンテネグロ	0.974	イスラエル	0.997	ブルネイ	1.016
ウクライナ	0.974	スロバキア	0.998	アルゼンチン	1.017
香港	0.978	フィンランド	0.999	ケニア	1.019
その他カリビアン	0.981	イギリス	0.999	スロベニア	1.021
ドミニカ共和国	0.982	フィリピン	0.999	ポルトガル	1.023
北朝鮮	0.982	その他ユーゴスラビア	1.000	モロッコ	1.024
オーストラリア	0.982	コスタリカ	1.000	ノルウェー	1.027
その他CIS	0.983	エルサルバドル	1.001	カザフスタン	1.030
チェコ	0.983	ウルグアイ	1.001	ポーランド	1.032
イラン	0.985	フランス	1.001	オーストリア	1.035
エクアドル	0.986	アメリカ	1.002	ドイツ	1.038
デンマーク	0.986	オマーン	1.002	ロシア	1.040
アルジェリア	0.986	韓国	1.002	チェコスロバキア	1.055
ナイジェリア	0.988	旧ユーゴスラビア	1.002	その他東南アジア	1.061
アイルランド	0.988	西ドイツ	1.003	シンガポール	1.076
イタリア	0.988	スーダン	1.003	バルト三国	1.082
日本	0.988	パキスタン	1.003	その他南米	1.094
南アフリカ	0.988	チュニジア	1.003	その他南アジア	1.252
ガテマラ	0.989	チリ	1.004	その他オセアニア	1.265

表- 10 交互作用( $RS_{ij,m}$ )の大きかった要因とその値

地域名	部門	フロー種	$10^{RS}$
バルト三国	発電	投入	2.21
チェコスロバキア	CHP	産出	1.97
ドイツ	熱供給	産出	1.83
バルト三国	発電	産出	1.81
スロベニア	熱供給	産出	1.79
オーストリア	CHP	産出	1.75
その他南アジア	発電	産出	1.74
ブルガリア	発電	投入	1.72
その他中東	交通	投入	0.63
その他南アジア	発電	投入	1.55
その他オセアニア	発電	産出	1.50
ロシア	非エネルギー利用	投入	1.50
その他南米	その他消費	投入	1.47
その他アフリカ	その他転換	産出	1.47
ポルトガル	その他消費	投入	1.43
カザフスタン	石炭転換	産出	1.41
UAE	自家消費	投入	1.38
モロッコ	産業	投入	1.38
その他南アジア	自家消費	投入	0.73
ノルウェー	石油精製	投入	1.35
その他欧州	熱供給	産出	0.75
その他アフリカ	その他転換	投入	0.76
その他欧州	熱供給	投入	0.76
その他オセアニア	その他転換	産出	0.78
マレーシア	自家消費	投入	0.78
サウジアラビア	交通	投入	0.78
バルト三国	CHP	産出	0.78
その他南米	自家消費	投入	1.27
UAE	石油精製	産出	0.79
バルト三国	CHP	投入	0.79
旧ユーゴスラビア	CHP	産出	0.80
その他南アジア	産業	投入	0.80
その他南米	石油精製	産出	0.80

表- 10 の要因は、 $RS_{ij,m}$ の絶対値が大きくなると並べられている。また、集約化地域は網がけをしている。33の要因が前述の基準を満たした。このうち、半数以上の18項目は集約化地域であった。集約化地域は、国・地域の要因のところでも大きな値を示したが、交互作用でも大きな値を示した。部門・フロー種別では主だった特徴は見られなかった。

### c) 残渣項の分析

ここまでの分析では、IEA 報告値と推計値の地域や部門・フロー種による系統的なバイアスについてみてきた。次に、残渣項  $\epsilon_{ij,m}$  について分析し、系統的バイアスを取り除いたIEA 報告値と推計値の乖離の性質を分析する。ここでは、残渣項の地域別、部門・フロー種別の分散を計算し、残渣項全体の分散と、地域別、部門・フロー種別の分散の違いがあるものに着目する。分散の違いがあるか否かは、5%、1%有意水準のF検定で判断した。表- 11 に、分散の大きかった項目とそれらの分散( $V$ )、自由度( $\phi$ )、F値( $F_0$ )を示す。

残渣項における部門・フロー種別の分散が大きかった項目は、その他部門の投入フロー、発電の投入フロー、CHP 産出フロー、自家消費投入フローであった。地域別では、モロッコ、その他南米、ポルトガル、ハンガリーで残渣項の分散が大きかった。これらの部門・フロー種、

地域では、表- 9や表- 10で見られたIEA 統計値と推計値の間にある系統的なバイアス以外の乖離が大きく含まれていることを示している。

表- 11 残渣項において分散が大きかった項目

	$V$	$\phi$	$F_0$
その他部門-投入フロー	0.0129	9096	2.61 **
発電-投入フロー	0.0106	984	2.16 **
CHP-産出フロー	0.0073	8857	1.48 **
自家消費-投入フロー	0.0052	11920	1.05 **
モロッコ	0.0314	621	6.38 **
その他南米	0.0287	710	5.83 **
ポルトガル	0.0255	967	5.18 **
ハンガリー	0.0252	1266	5.11 **
ブルガリア	0.0206	915	4.19 **
その他オセアニア	0.0204	376	4.14 **
ベトナム	0.0155	520	3.16 **
ロシア	0.0155	519	3.14 **
その他南アジア	0.0154	301	3.14 **
バルト三国	0.0148	458	3.02 **
マレーシア	0.0126	739	2.56 **
カナダ	0.0120	1142	2.45 **
UAE	0.0111	431	2.25 **
アルゼンチン	0.0102	1012	2.08 **
その他中東	0.0095	517	1.94 **
デンマーク	0.0094	919	1.91 **
バングラディッシュ	0.0080	649	1.63 **
南アフリカ	0.0077	918	1.57 **
トルコ	0.0077	1106	1.56 **
オーストリア	0.0074	1238	1.50 **
スロバキア	0.0070	413	1.42 **
西ドイツ	0.0069	772	1.40 **
その他東南アジア	0.0066	672	1.34 **
スウェーデン	0.0060	1164	1.22 **
クウェート	0.0055	468	1.12 *
旧ユーゴスラビア	0.0055	635	1.12 *
残渣項全体	0.0049	73665	

\*:5%有意水準で有意、\*\*:1%有意水準で有意

## 6. おわりに

本研究では、IEA の Energy Balance の問題点を指摘し、それを修正する手法を提案した。また、実際にその手法を適用し、データの修正を試みた。その結果、IEA の報告値と本研究の推計値を比較した結果以下のことが明らかとなった。最終エネルギー消費量で見ると、中東諸国、その他の集約化地域でIEA 報告値と推計値との乖離が大きかった。発電プラント、発熱プラントのエネルギー転換効率について見ると IEA では、石油の発電プラント、天然ガスの発熱プラントで工学的上限を突破している数が多かった。IEA 報告値と本研究推計値の比を地域別、年別、部門・フロー種(産出、投入)別に分解したところ、地域の要因、部門・フロー種別の要因は高度に有意であったが、年別の要因は有意ではなかった。地域別要因と部門・フロー種別要因について解析したところ、地域別で見ると、IEA の報告値よりも推計値のほうが小さくな

るの中東諸国に多かった。また、部門・フロー種別で見ると、CHPプラント、石油精製、自家消費でIEA報告値と本研究推計値に乖離が大きかった。これらの乖離は、統計報告が、本研究の調整で制約を課したような当然考慮されるべきであろう制約条件を考慮せずに行われていることが原因と考えられた。

本研究の成果は、世界を対象とした経済モデルを用いたエネルギー需給のシミュレーション(Fujino *et al.*, 2006<sup>2)</sup>)やボトムアップ型のエネルギーモデルのシミュレーション(花岡ら, 2008<sup>1)</sup>)の入力情報として使用される予定である。

ただし、本研究の推計では、エネルギー消費量のドライビングフォース、例えば、交通部門の輸送量との整合性を図るところまではいたらなかった。特にボトムアップ型のモデルはそのようなドライビングフォースと整合性が取れたエネルギー消費量のデータを必要とするため、そういった点を考慮した調整が今後の課題のひとつとして挙げられる。

#### 謝辞

本研究は環境省地球環境研究総合推進費 BC-088 「統合評価モデルを用いた気候変動統合シナリオの作成及び気候変動政策分析」、日本学術振興会科学研究費補助金 20-1061 「世界全域を対象とした社会経済システムにおける物質フローとストックの解明」による研究成果の一部である。ここに記して感謝の意を表す。

#### 参考文献

1) 花岡達也, 明石修, 日比野剛, 長谷川知子, 藤野純一, 松岡

謙, 甲斐沼美紀子: 世界地域別の温室効果ガス排出削減量と削減費用の評価, *エネルギー・資源*, Vol. 129, No. 4, pp36-42, 2008.

- 2) Fujino, J., R. Nair, M. Kainuma, T. Masui, Y. Matsuoka: Multi-gas mitigation analysis on stabilization scenarios using AIM-global model. *Multigas Mitigation and Climate Policy. The Energy Journal Special Issue*, 2006.
- 3) IEA(International Energy Agency): Energy Balance of OECD countries, International Energy Agency, Paris, France, 2007a.
- 4) IEA(International Energy Agency): Energy Balance of non-OECD countries, International Energy Agency, Paris, France, 2007b.
- 5) Enerdata: Globalstat, Enerdata, Grenoble, France, 2008.
- 6) EIA(Energy Information Administration): Energy Statistics, U.S. Department of Energy, Washington, DC, USA, 2007.
- 7) BP(British Petroleum): Statistical Review of World Energy, BP, 2007.
- 8) 藤森真一郎, 松岡謙: エネルギー統計・経済統計の統合とそれを用いた世界全域における化石燃料起源のエネルギー消費量と二酸化炭素排出量の推計に関する研究, *環境システム研究論文集*, Vol.36, pp37-48, 2008.
- 9) Golan, A., G. Judge, and D. Miller: Maximum Entropy Econometrics: Robust Estimation with Limited Data, John Wiley & Sons Ltd, England, 1996.
- 10) IEA(International Energy Agency): Energy Technology Perspectives, International Energy Agency, Paris, France, 2008.

## Development of a Method to Estimate Energy Input-Output Table Considering Energy Transformation Efficiency and Its Application

Shinichiro FUJIMORI<sup>1</sup> and Yuzuru MATSUOKA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Urban and Environmental Engineering, Kyoto University

Energy Balances published by IEA is the one of the valuable energy statistics which covers most world countries. However, Energy Balances has several inconsistencies. This article describes a method of reconciling those inconsistencies using Cross-entropy method and its application. As a result, comparing final energy consumption between those of the reconciliation results and IEA, Middle East countries and other aggregated regions show large discrepancy. Focusing on the energy transformation efficiency of electric power plants and heat plants reported by IEA, oil thermal power plant and gas-fired heat supply plant in many countries are over physical or engineering higher limit. Our reconciliation results could eliminate such outliers. The magnitude of reconciliation from IEA to the results was decomposed to three factors; yearly effect, regional effect and sector effect and the regional effect and sectors effect were larger than the others.