

# 全世界の産業部門におけるエネルギー消費量の 推計手法の開発と適用

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@athehost.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 Energy Balance はエネルギー統計の中では最も有用なエネルギー統計の一つであるが、いくつかの問題を有し、産業部門のエネルギー消費量のデータに限っても、少なくとも3つの問題がある。本研究はそれらの問題を解決できる調整手法を提案、適用し、全世界 106 地域の 1971 年-2003 年における産業 13 部門のエネルギー消費量を推計した。推計の結果、IEA の Energy Balance が抱えている問題は改善されたことが示された。IEA 報告値から推計値への修正を地域別、部門別、年別の要因に分解したところ、地域別の要因の寄与が大きかった。OECD 諸国は全般に修正の割合が小さかったが、中には大きな修正が行われた国も見られた。年別要因について見ると、1970 年代で大きくなり、古い年のデータほど大きな修正がなされた。

*Key Words : industry, energy intensity, energy balance, reconciliation*

## 1. はじめに

世界全体で見ると、産業部門由来の温室効果ガス (GHG) の排出量は、人為活動由来の GHG 排出量全体の 19.4% を占めており、エネルギー供給部門 (25.9%) に次いで大きな割合を占めている (Rogner *et al.*, 2007<sup>1)</sup>)。今後の GHG 排出量の削減を考えるに当たって、産業部門は重要な部門の一つであろう。

現在、世界全域における産業部門全体のエネルギー消費量、二酸化炭素排出量に関する情報は、比較的信頼できるものが得られている。そのような情報は国際エネルギー機関 (IEA) の Energy Balance (IEA, 2007a<sup>2)</sup>; 2007b<sup>3)</sup>)、などから得られるからである。しかし、産業部門の中の細かい部門別のエネルギー消費量 (例えば鉄鋼、非鉄金属部門、紙・パルプ部門等) のエネルギー消費量に関する信頼できる情報を世界全域、過去数十年にわたって得るのは困難である。IEA の Energy Balance はそのような情報を収録しているが、信頼できるとはいえない (どのような点で信頼できないかは次章で述べる)。従って、産業部門のエネルギー消費量、二酸化炭素排出量、またそれらとそのエネルギー消費を牽引するような指標、例えば、産業の生産に関する指数、交通量など (以降、ドライビングフォースと呼ぶ) との関係について分析を行った主要な既往研究は対象を限定したものとなっている。その例を以下に挙げる。

- [1] 産業部門全体を対象とした分析 (Price *et al.*, 1998<sup>4)</sup>; de la Rue Can and Price, 2008<sup>5)</sup>)
- [2] OECD など比較的データが信頼できると思われる国のみを対象とした分析 (Schipper, 1997<sup>6)</sup>; IEA, 2007<sup>7)</sup>)
- [3] 鉄鋼などのある特定の産業のみを分析 (Worrell *et al.*, 1997<sup>8)</sup>; Farla *et al.*, 1997<sup>9)</sup>)

今後の GHG 削減施策を考える場合に、世界全体で詳細な産業部門のエネルギー消費量に関する情報は重要な情報となる可能性がありながら、未だに整備されていない。例えば、花岡ら (2008)<sup>10)</sup> ではエネルギーサービス需要を用いて、将来の GHG 削減ポテンシャルを推計しているが、この中で用いられる産業のエネルギーサービス需要に関するパラメータのキャリブレーションは、問題を抱える IEA の Energy Balance に依拠している。

そこで、本研究は IEA の Energy Balance の問題を解決するデータの調整手法を開発する。そして、その手法を全世界 106 の国・地域、過去 33 年間 (1971-2003 年) に適用する。本研究は産業部門のみに焦点を当てる。

本論文の構成を以下に述べる。2 章では、IEA の Energy Balance の問題点について述べる。3 章では本研究の対象と各種分類について述べる。4 章ではエネルギーデータの調整方法について述べ、5 章は調整方法の適用結果について示す。6 章では本研究のまとめを行う。

## 2. IEA の Energy Balance

### (1) 世界全域を対象とするエネルギー統計

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>2)</sup>; 2007b)<sup>3)</sup>, Enerdata の Globalstat (Enerdata, 2008)<sup>10)</sup>, EIA, BP のエネルギー統計 (EIA, 2007<sup>12)</sup>; BP, 2007<sup>13)</sup>, 国連エネルギー統計 (UN, 2006)<sup>14)</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。EIA, BP 以外の3つの統計は、前述のエネルギー転換や最終消費に関する情報を集録する。しかし、国連のエネルギー統計は、藤森ら(2008)<sup>15)</sup>によってその信頼性に疑問があることが指摘されている。Enerdata は IEA の Energy Balance がデータソースとなっている。よって、IEA の Energy Balance は現存するエネルギー統計の中でも最も有用かつ重要な統計と考えられる。

### (2) IEA の Energy Balance とは

IEA は、第1次石油危機以降、世界全体のエネルギーの需給動向に関する統計情報を収集し、その情報を Energy Statistics (IEA, 2007c<sup>16)</sup>; 2007d<sup>17)</sup>)という形で発行している。Energy Statistics は、各国・地域の報告に基づき、エネルギー源別の需給量をそれぞれの物量単位で収録している。各国報告は IEA のマニュアル (IEA, 2005)<sup>18)</sup>を基にしている。しかし、各エネルギー源の供給量と需要量のバランスはとられておらず、エネルギー源の単位が異なる。

そこで、IEA では独自に部門分類やエネルギー源の分類、単位の調整を行い、その結果を Energy Balance という形で発行している。IEA の Energy Balance は各国のエネルギー源別の一次エネルギー供給量(生産・輸出入・在庫増減量)、部門別のエネルギー転換量、最終エネルギー消費量をエネルギー単位で収録し、各エネルギー源の供給量と需要量が一致したデータとなっている。

以降この IEA の Energy Balance を IEA の報告と呼ぶ。

### (3) IEA の Energy Balance の抱える問題

前述のように IEA の報告に収録されているデータは、IEA が調整を行ったものであるが、依然としていくつかの問題を抱えている。その中でも産業部門のエネルギー消費量のデータは、以下の問題を有する。

- [1] 産業部門で消費されたことは判明しているが、それが産業の中のいずれの部門で消費されたのかが不明であるエネルギーが、Non-specified という分類に計上されている、もしくは定義変更により、不連続

が見られる。

- [2] ドライビングフォースあたりのエネルギー消費量(以降、エネルギー消費強度と呼ぶ)が異常な挙動をする。
- [3] 欠測が多く存在し、無視できない量となっている。(欠測には分類の相違により報告不可能なものも含む)

問題[1], [2]の例として IEA の報告のアメリカの産業部門の部門別エネルギー消費量、エネルギー消費強度(2000年を1とした指標)を図-1, 図-2に示す(部門と図中記号の対応は表-1を参照)。また、2000年のエネルギー消費強度を1としたときのエネルギー消費強度の推移を図-2に示す。ここで、ドライビングフォースには産業活動量を表す指標としての適切性、データの利用可能性の観点から実質付加価値額を使用した。図-1からは、その他部門(Non-specified; XIN)が過去に遡るほど大きくなり、1990年以前ではアメリカの大部分を占めることがわかる。また、特定の4,5年(例えば1990年, 1994年等)で階段状の変化をしていることもわかる。IEA の報告のアメリカにおける産業部門のデータは、製造業のエネルギー消費調査(Manufacturing Energy Consumption Survey (MECS))がそのデータソースとなっている。同調査は1985, 1988, 1991, 1994, 1998, 2002に実施されたが、IEA の報告における大きな段差とその調査年とは、一致する年が存在する。従って、その調査ごとに部門やエネルギー財の定義が変更され、それに伴って発生した段差と考えられる。エネルギー消費強度についてみると(図-2), 1990年, 1994年付近などで複数の部門のエネルギー消費強度が急激な変化をしている。例えば、建設(CNS)が異常な挙動をしていることが読み取れる。

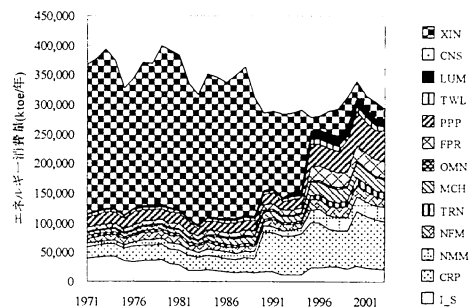


図-1 アメリカにおける産業部門のエネルギー消費量(IEA)

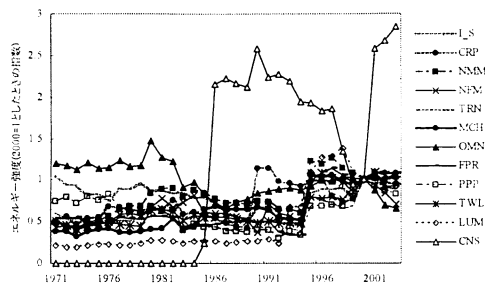


図-2 2000年を1としたアメリカにおけるエネルギー消費強度(IEA)(ただしその他部門(XIN)を除く)

次に、問題[3]の例としてマレーシアの産業部門の部門別エネルギー消費量を図-3示す。マレーシアの場合、産業部門のエネルギー消費量の大部分がその他部門(XIN)に計上されていて、非金属部門(NMM)を除いた部門は欠測している。

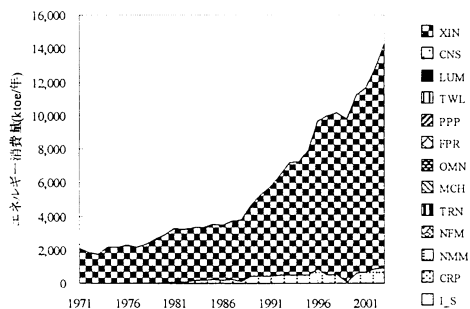


図-3 マレーシアにおける産業部門のエネルギー消費量(IEA)

### 3. 対象と分類

#### (1) 対象地域・期間

本研究の対象地域は全世界(106 地域(94 カ国+12 地域))であり、対象年は1971-2003年である。Energy Balance(IEA, 2007a<sup>2)</sup>; 2007b<sup>3)</sup>は、2005年までのデータを収録しているが、産業のドライビングフォースのデータの入手可能性から、本研究では対象を2003年までとした。この地域区分は、2000年においてGDP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。

#### (2) 対象部門

本研究は産業部門を対象とするが、その産業部門を表-1に示す13部門に分割する。

表-1 部門分類一覧

コード	部門名	コード	部門名
L_S	鉄鋼	OMN	鉱業
CRP	化学	LUM	製材
NFM	非鉄金属	FPR	食料加工
NMM	非金属	TWL	繊維
MCH	機械	CNS	建設
TRN	輸送機器	XIN	その他産業
PPP	紙パルプ		

#### (3) 対象エネルギー源

本研究で対象とするエネルギー源は以下の6つである、石炭、石油製品、天然ガス、電気、熱、バイオマスである。

### 4. エネルギーデータの調整手法

#### (1) 概要

前章で述べたIEAの報告の問題を修正できる、地域別、部門別、エネルギー源別のエネルギー消費量の調整手法を示す。以下にその概要を示す。

- 推計されるエネルギー消費量は、部門別の報告値とその他部門(XIN)に計上されている量の一部の和と近い値となるようにする(ただし、調整はXINのみとは限らない)。
- エネルギー消費強度の参照となる値(世界の標準的なエネルギー消費強度を設定する)を与え、その参照値と推計されるエネルギー消費強度が近くなるようにする。ただし、その他部門(XIN)に計上されているエネルギー消費量が多い年・国ほど、参照値の情報としての重みは大きくする。
- エネルギー消費強度の経年変化がなだらかになるようにする。(これは、それぞれの部門が保有するエネルギー機器が1年で大きく更新されるとことは極めて稀であると考えられるためである。)
- 各部門のエネルギー消費量のドライビングフォースデータが存在するが、IEAの報告でエネルギー消費量が欠測している場合、参照となるエネルギー消費強度を用いてエネルギー消費量が推計されるようにする
- 産業全体のエネルギー消費量には、世界全体の貿易バランスの調整(藤森ら, 2008)<sup>15)</sup>、エネルギー転換部門の調整(藤森ら, submitted)<sup>16)</sup>を行った結果を用いる。

本研究では、定義の変更や部門分類等相違等により経年的な大きくジャンプするようなデータに対処するために、上記の3つ目の条件を用いていた。しかし、ある産業において大部分のエネルギー機器が一年以内に更新され、エネルギー消費強度が大きく変化するような国・産

業が存在した場合は、前述の条件が実態にそぐわない可能性があることには留意する必要がある。

以上の要件を次節では数式で示す。

## (2) 定式化

### a) ドライビングフォースとエネルギー消費量

部門  $j$ 、地域  $r$ 、 $t$  年におけるドライビングフォースを  $Q'_{r,j}$ 、エネルギー源  $i$  (前節で示した対象エネルギー源 6 つと全エネルギー源の合計の 7 種類) のエネルギー消費量を  $E'_{r,i,j}$  とする。エネルギー消費量はドライビングフォースにエネルギー消費強度  $\beta'_{r,i,j}$  を乗じたものとする。

$$E'_{r,i,j} = \beta'_{r,i,j} \cdot Q'_{r,j} \quad \forall t \in T, r \in R, j \in J, i \in I \quad (1)$$

ここで、 $T, R, J, I$  は、それぞれ年、地域、部門、エネルギー源の集合を表す。

### b) 集約、被集約関係に関連する制約条件

産業全体のエネルギー源  $i$  のエネルギー消費量  $\overline{TE'_{r,i}}$  は、藤森ら(Submitted)<sup>19)</sup>の結果を用いる。ここで、 $\overline{TE'_{r,i}}$  に Energy Balance の値を用いなかった理由は、以下の二つの理由がある。第一に、貿易収支バランスやエネルギー転換部門の調整を行ったデータを用いるためであり、第二にその他オセアニア等に欠測が見られるのである。そして、以下の制約条件を満たすようにする。

$$\overline{TE'_{r,i}} = \sum_{j \in J} E'_{r,i,j} \quad \forall t \in T, r \in R, i \in I \quad (2)$$

また、ある部門  $j$  のエネルギー消費量総量を  $E'_{r,TOT,j}$  とすると以下のような制約がある。

$$E'_{r,TOT,j} = \sum_{i \in I_{nd}} E'_{r,i,j} \quad \forall t \in T, r \in R, j \in J \quad (3)$$

ここで、 $I_{nd}$  は全エネルギー源の合計“TOT”を除くエネルギー源の集合を表す。

### c) 推計値と報告値、参照値の関係に関する諸式

次に、各種報告値や参照値と推計値の関係について記述する。まず、部門  $j$  におけるエネルギー源  $i$  のエネルギー消費量  $E'_{r,i,j}$  は、IEA の報告値  $\overline{IEA'_{r,i,j}}$  と、その他部門(XIN)に計上されているエネルギー量のうち本来部門  $j$  のエネルギー消費量として計上されるべき量  $d'_{r,i,j}$  の和

に、報告誤差  $\varepsilon'_{r,i,j}$  を足したものであるとする。

$$E'_{r,i,j} = \overline{IEA'_{r,i,j}} + d'_{r,i,j} + \varepsilon'_{r,i,j} \quad \forall t \in T, r \in R, j \in J, i \in I \quad (4)$$

$$d'_{r,i,j} \geq 0$$

その他部門(XIN)に計上されているエネルギー量のうち本来部門  $j$  のエネルギー消費量として計上されるべき  $d'_{r,i,j}$  は、以下の式を満たす。

$$\overline{IEA'_{r,i,j,XIN}} = \sum_{j \in J} d'_{r,i,j} \quad \forall t \in T, r \in R, i \in I \quad (5)$$

部門“XIN”はその他部門(XIN)を表す。

次に、エネルギー消費強度  $\beta'_{r,i,j}$  に対して参照値  $\overline{\rho'_{r,i,j}}$  が存在するとする。エネルギー消費強度の推計値と参照値との差を  $\varepsilon'_{2r,i,j}$  として、推計値を以下の式で表す。 $\overline{\rho'_{r,i,j}}$  の設定方法は(3)節で示す。

$$\beta'_{r,i,j} = \overline{\rho'_{r,i,j}} + \varepsilon'_{2r,i,j} \quad \forall t \in T, r \in R, j \in J, i \in I \quad (6)$$

### d) 目的関数

目的関数を以下のように設定し、最小化する。エネルギー消費強度  $\beta'_{r,i,j}$  は経年変化が大きくなるように、経年変化をなだらかにするための最適化条件である Hodrick-Prescott filter(以降 HP filter と呼ぶ)(Hodrick *et al.*, 1997)<sup>19)</sup> をかける。

$$\min_{r \in R} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} v_{r,i,j} \cdot \varepsilon'_{r,i,j}{}^2 + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \varphi_{r,i,j} \cdot \varepsilon'_{2r,i,j}{}^2 + \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \lambda_{r,j} \cdot \{(\beta'_{r,i,j} - \overline{\beta'_{r,i,j}}) - (\beta'_{r,i,j} - \overline{\beta'_{r,i,j}})\}^2 \quad (7)$$

ここで、 $T_m$  は対象期間の最後と最初の年を除く年の集合である。 $v_{r,i,j}$ 、 $\varphi_{r,i,j}$ 、 $\lambda_{r,j}$  は重みを表す係数である。

## (3) 諸変数の設定

### a) ドライビングフォース

ドライビングフォース  $Q'_{r,j}$  には、(藤森ら, 2008)<sup>19)</sup>の部門別付加価値額を第二次産業デフレーターと購買力平価換算係数(The World Bank, 2007<sup>21)</sup>)で実質化したものを使用した。ドライビングフォースに付加価値を用いた理由は2つあり、第一に世界全体で産業別の活動量に関連する指標が付加価値でしか得られなかったこと、第二に既往研究でも付加価値を用いていることである。

b) エネルギー消費強度参照値

エネルギー消費強度の参照値  $\overline{\rho_{r,i,j}^i}$  は、以下の手順で決める。

- [1] 2000年付近(2000年-2003年)の世界の標準的なエネルギー消費強度  $\overline{\rho_{0r,i,j}^i}$  を IEA の報告値から計算する(計算方法は後述する)。
- [2] 各地域、年のドライビングフォースと産業部門のエネルギー消費量を用いて、 $\overline{\rho_{r,i,j}^i}$  をスケーリング(式(8))する。

$$\overline{\rho_{r,i,j}^i} = \overline{\rho_{0r,i,j}^i} \cdot \frac{\overline{TE_{r,i,j}^i}}{\sum_{j \in J} \overline{\rho_{0r,i,j}^i} \cdot \overline{Q_{r,i,j}^i}} \quad (8)$$

[1]の手順の世界の標準的なエネルギー消費強度は以下のようにして計算した。データの信頼性が著しく低いと考えられた国以外の2000年-2003年におけるエネルギー消費強度を計算し、その中央値を標準的なエネルギー消費強度とした。ここで、データの信頼性が著しく低いかどうかは、その他部門(XIN)のエネルギー消費強度が0.80ktoe/mil\$以上であることとした。この値0.80ktoe/mil\$は比較的データの信頼性が高いと考えられたOECD諸国のエネルギー消費強度から決定した。2000年-2003年のみを対象として標準的なエネルギー消費強度を決めたのは、IEAの報告値を事前に精査したところ、対象期間のうち過去に遡るほどその信頼性が低くなると考えられたためである(この傾向が実際に観察されたことは次章で示す)。各部門における世界の標準的なエネルギー消費強度を表-2に示す。

表-2 世界の標準的なエネルギー消費強度(ktoe/mil\$)

エネルギー 総量	石炭	天然 ガス	石油	電気	熱	バイオ マス
鉄鋼	0.813	0.357	0.211	0.041	0.226	0.033
化学	0.239	0.014	0.076	0.051	0.074	0.047
非金属	0.567	0.114	0.173	0.083	0.074	0.007
非鉄金属	0.642	0.052	0.094	0.040	0.300	0.024
輸送機器	0.052	0.003	0.019	0.007	0.023	0.005
機械	0.043	0.001	0.014	0.005	0.021	0.002
鉱業	0.243	0.024	0.040	0.100	0.079	0.018
食料加工	0.139	0.006	0.049	0.025	0.033	0.006
紙パルプ	0.170	0.017	0.043	0.011	0.051	0.013
繊維	0.095	0.004	0.032	0.015	0.033	0.007
製材	0.156	0.005	0.020	0.016	0.047	0.006
建設	0.015	0.001	0.002	0.009	0.002	0.001
その他産業	0.238	0.010	0.050	0.045	0.083	0.016

手順[2]のスケーリングは、前述の標準的なエネルギー消費強度をそのまま適用した場合、産業部門全体のエネルギー消費量の制約により、国によっては著しい修正が必要となり、ある特定の部門でエネルギー消費強度が標準的なエネルギー消費強度と大きく乖離する結果となつ

た。そこで、国によって参照とするエネルギー消費強度を産業部門全体のエネルギー消費量を用いてスケーリングすることとした。

c) 重み  $\overline{w_{r,i,j}}$ ,  $\overline{\varphi_{r,i,j}}$ ,  $\overline{\lambda_{r,i,j}}$

重みのパラメータである  $\overline{w_{r,i,j}}$ ,  $\overline{\varphi_{r,i,j}}$ ,  $\overline{\lambda_{r,i,j}}$  は以下のよう設定した。

$$\overline{w_{r,i,j}} = \overline{w_i} \cdot \left( \frac{\sum_{i \in I} \overline{P_{r,i,j}^i} \cdot \overline{\rho_{r,i,j}^i}}{\sum_{i \in I} 1} \right)^{-2} \quad \forall i \in I, j \in J, r \in R \quad (9)$$

$$\overline{\varphi_{r,i,j}} = \begin{cases} \overline{w_i} \cdot \left( 0.1 + 0.9 \left( \frac{IEA_{i,r}^{XIN}}{TE_{r,i,j}^i} \right)^2 \right) \left( \frac{\sum_{i \in I} \overline{\rho_{r,i,j}^i}}{\sum_{i \in I} 1} \right)^{-2} & \forall i \in I, j \in J_{m^c}, r \in R \\ \overline{w_i} \cdot \left( \frac{\sum_{i \in I} \overline{\rho_{r,i,j}^i}}{\sum_{i \in I} 1} \right)^{-2} & \forall i \in I, j = "XIN", r \in R \end{cases} \quad (10)$$

$$\overline{\lambda_{r,i,j}} = \overline{w_i} \cdot \left( \frac{\sum_{i \in I} \overline{\rho_{r,i,j}^i}}{\sum_{i \in I} 1} \right)^{-2} \quad \forall i \in I, j \in J, r \in R \quad (11)$$

ここで、 $J_m$ はその他部門(XIN)以外の産業部門の集合を表す。

$\overline{w_{r,i,j}}$ ,  $\overline{\lambda_{r,i,j}}$  は、それぞれの項の重みを同程度として扱うように、それぞれの推計値に対応する参照値、報告値等の年平均値の2乗の逆数を重みとして設定した。エネルギー消費強度の参照値と推計値の誤差に対する重み  $\overline{\varphi_{r,i,j}}$  は、その他部門(XIN)に計上されているエネルギー量が産業全体のエネルギー消費量に対して大きいほど、大きくなるようにした。また  $\overline{w_i}$  はエネルギー源別の重みであり、今回は全エネルギー源の合計については6(エネルギー源の数)、それ以外は1とした。これは集約、非集約関係にある情報に差をつけるためである。

HP filter を年データに適用する場合、HP filter の重みの係数  $\overline{\lambda_{r,i,j}}$  は、経験的に100とするのが望ましいという文献が見られる(Ekkehart, 2005<sup>22</sup>)など)。既往のHPfilterを用いた研究では、単位の異なるものを同時に最適化するという調整は行われておらず、金額単位情報のみといったものに適用されてきた。本研究は、エネルギー消費強度、エネルギー量という異なる単位のものを同時に最適化しており、経験的に良いとされている100をそのまま適用するのは不適切であると判断されたため、上記のような設定を行った。

## 5. 調整計算の結果

本章では調整の結果を示す。まず、2章で挙げたアメリカの調整計算の結果を示す。次に、エネルギー消費強度の経年変化について示し、次いでIEAの報告の欠測の補完について示す。最後にIEAの報告値と推計値を比較し、本推計手法によってIEAの報告値はどのように修正されたかを示す。

### (1) 調整結果の例

調整計算の結果の一例としてアメリカにおけるエネルギー消費量の推計結果を図-4に、エネルギー消費強度の推計結果を図-5に示す。ただし、図-5は2000年を1とした指数で表している。

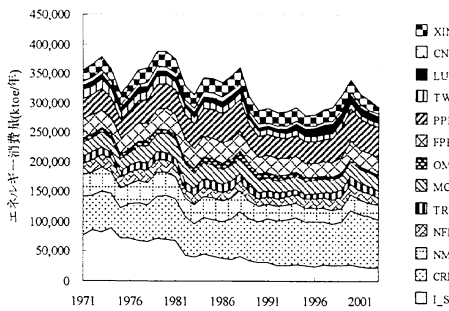


図-4 アメリカの産業部門のエネルギー消費量(推計値)

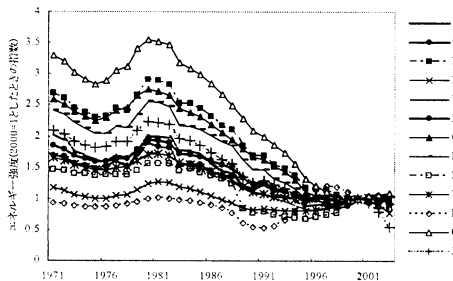


図-5 2000年を1としたアメリカにおけるエネルギー消費強度(推計値)

IEAの報告値(図-1)と推計値(図-4)を比べると、推計値ではその他部門(XIN)が小さくなり、その分がその他部門(XIN)以外の部門へ分配されていることがわかる。また、図-5からわかるようにエネルギー消費強度が滑らかに推移するようになった。

### (2) IEAの報告の欠測の補完

本節ではIEAの報告において欠測していたが、本研究

推計により補完されたものがどの程度あったかを示す。

ここでは、以下の式で定義される欠測量の割合  $Miss_j^t$ 、

欠測数の割合  $Missn_j^t$  を年、部門別で比較する。

$$miss_j^t = \frac{\sum_{(i,r) \in MS} E'_{r,i,j}}{\sum_{(i,r) \in ET} E'_{r,i,j}} \quad \forall t \in T, j \in J$$

$$missn_j^t = \frac{\sum_{(i,r) \in MS} 1}{\sum_{(i,r) \in ET} 1} \quad \forall t \in T, j \in J \quad (12)$$

$$MS = \{(i, j, r, t) | E'_{r,i,j} > 0 \text{ and } \overline{IEA'_{r,i,j}} = 0\}$$

$$ET = \{(i, r, t) | E'_{r,i,j} > 0\}$$

IEAの報告における欠測量の割合、欠測数の割合を図-6、図-7に示す。

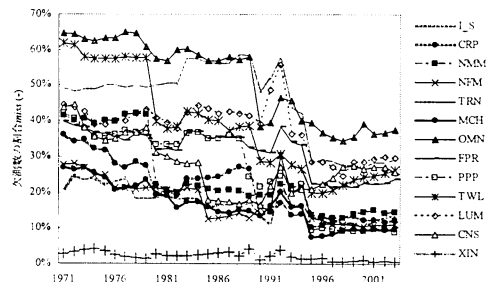


図-6 欠測量の割合 miss の変遷

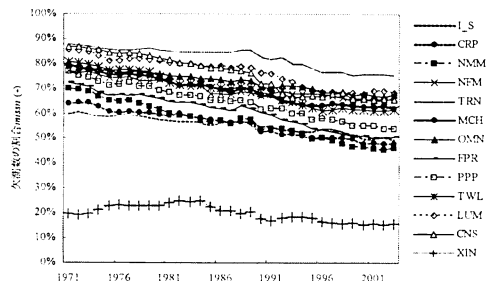


図-7 欠測数の割合 missn の変遷

まず、欠測量の割合に注目するといずれの部門でも年を遡るにつれて、欠測量の割合が大きくなることから、欠測量の割合は部門によって幅があり、その他部門(XIN)は対象期間を通して5%以下であったが、それ以外の部門は概ね10%以上となった。2章でも述べたように、その他部門(XIN)は本来その他部門以外に計上されるべきエネルギー消費量が計上されているため、このような結果となったと考えられる。その他部門(XIN)を除いた欠測量の割合は1971年で21%-65%、2003年で9%-38%で

あった。対象期間全体を通して欠測量の割合が大きかったのは鉱業(OMN)、輸送機器(TRN)、繊維(TWL)、製材(LUM)などの部門であった。これらの部門はエネルギー消費量が比較的小さな部門であるという特徴を有する。

次に欠測数の割合に注目する(図-7)。欠測数の割合も年を遡るにつれて割合が大きくなる傾向を示した。その他部門(XIN)を除いた欠測数の割合は1971年で59%-87%、2003年で46%-75%であった。対象期間を通して、欠測数の割合が大きかったのは、輸送機器(TRN)、製材(LUM)、建設(CNS)などの部門であった。

### (3) 経年変化の比較

本節では、IEAの報告値の問題の一つであった異常なエネルギー消費強度の経年的推移が改善されたことを示す。

まずIEA報告値と推計値の全エネルギー源のエネルギー消費強度の年変化の比の対数(式(13))を計算する。次いでそれらの平均、分散、最大、最小、5倍以上の変化があった数を計算した。ここで、対数をとって分析した理由は、比が1より小さいものと1より大きいものを同等に比較するためである。例えば10倍と1/10を同じ大きさとして扱うためである。

その結果を表-3に示す。平均で見るとIEA報告値、推計値に大きな差異は見られないが、分散、最大、最小は大きく異なり、いずれの指標でもIEA報告値の方が本研究推計値よりもばらつきが大きいことがわかる(分散の違いは、1%有意水準のF検定で有意)。また、5倍以上の年変化が存在した数もIEA報告値は230と多く存在したが、本研究推計値では34へと減少している。

$$\log_{10} \frac{\beta'_{r,tor^*j}}{\beta_{r,tor^*j}}, \log_{10} \frac{\beta'_{r,tor^*j}}{IEA'_{r,tor^*j} / Q'_{r,tor^*j}} \quad (13)$$

表-3 エネルギー消費強度の年変化の比の対数の統計量

	平均	分散	最大	最小	データ数	5倍以上 の変化の あったもの
IEA報告値	0.001	0.018	5.398	-2.432	34578	230
推計値	-0.001	0.006	1.686	-1.509	39450	34

### (4) IEAの報告値から推計値への修正

#### a) 分析手法

本節ではIEAの報告値から推計値への修正の傾向を示す。各部門のエネルギー消費量のIEAの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)、部門別の要因(Sec)、年別の要因(Time)を持つていと仮定して、数量化1類を用いた重回帰分析を行い、その回帰係数などを分析することで、修正の傾向を示す。重回帰分析には以下の式を用いた。

$$\log_{10} \frac{E'_{r,tor^*j}}{IEA'_{r,tor^*j}} = \mu + Reg_r + Sec_j + Time_t + \varepsilon'_{r,t} \quad (14)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \sum_r Reg_r &= \sum_j Sec_j = \sum_t Time_t = 0 \\ \sum_r \sum_j \varepsilon'_{r,t} &= 0, \sum_r \sum_t \varepsilon'_{r,t} = 0, \sum_j \sum_t \varepsilon'_{r,t} = 0, \varepsilon'_{r,t} \sim N(0, \sigma^2) \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、 $\mu$ は平均値、 $Reg_r$ は地域別の要因、 $Sec_j$ は部門別の要因、 $Time_t$ は年別の要因を表す。 $\varepsilon'_{r,t}$ は残差項であ

る。ただし、その他部門(XIN)は2章で示したように比較の対象として不適切と考えられたので今回の対象から除外した。また、2章で示したマレーシアのように、対象期間、対象部門の大部分で欠測が見られるような地域は、わずかな観測データから地域別要因が推定され、もともとのデータの精度よりも過大もしくは過少評価されてしまう可能性がある。そこで、各地域の欠測率  $missr_t$  を式(16)で定義し、その欠測率が大きな地域を今回の分析から除外した。ここでは仮に欠測率が67%以上の地域を分析対象から除外した。除外された地域は38地域あり、その一覧を表-4に示す(採用された地域は後述の表-9中に示す地域である)。

$$missr_t = \frac{\sum_{(j,t) \in MIS} E'_{r,tor^*j}}{\sum_{(j,t) \in ET} E'_{r,tor^*j}} \quad \forall r \in R \quad (16)$$

表-4 分析対象から除外した地域

地域名		
UAE	イラク	北朝鮮
アルゼンチン	ケニア	カタール
バングラディッシュ	クウェート	サウジアラビア
ブルネイ	レバノン	スーダン
コスタリカ	リビア	シンガポール
セルビアモンテネグロ	スリランカ	エルサルバドル
キューバ	モンゴル	シリア
東ドイツ	マレーシア	ウルグアイ
ドミニカ共和国	ナイジェリア	ウズベキスタン
エクアドル	オマーン	ベトナム
エジプト	パキスタン	その他中東
ガテマラ	パナマ	その他オセアニア
イラン	ペルー	

#### b) 説明変数の選択の妥当性

まず、想定した3つの要因を説明変数として用いたことの妥当性を示す。ここでは、IEAの報告値と推計値の比の対数のそれぞれの要因別平均値に有意な差があるかどうかを1元配置法を用いた分散分析で示す。表-5、表-6、表-7は地域別要因、部門別要因、年別要因の分散分析表である。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表す。いずれの要因も有意水準1%を満たし、高度に有意である。よって、これらを説明変数として選

扱することは妥当である。

表-5 地域別要因の平均値の分散分析表

	S	φ	V	F <sub>0</sub>	有意水準	
					5%	1%
地域別要因変動	2695.1	63	42.779	6552.6 **	1.31	1.46
その他変動	112.3	17203	0.007			
全体変動	2807.4	17266	0.163			

表-6 部門別要因の平均値の分散分析表

	S	φ	V	F <sub>0</sub>	有意水準	
					5%	1%
部門別要因変動	257.9	11	23.448	158.7 **	1.79	2.25
その他変動	2549.4	17255	0.148			
全体変動	2807.4	17266	0.163			

表-7 年別要因の平均値の分散分析表

	S	φ	V	F <sub>0</sub>	有意水準	
					5%	1%
年別要因変動	133.7	32	4.178	26.9 **	1.44	1.67
その他変動	2673.7	17234	0.155			
全体変動	2807.4	17266	0.163			

\*:5%有意水準で有意、\*\*:1%有意水準で有意

c) 各要因の影響の差異

本回帰式を適用した結果、自由度修正済み決定係数は0.32、回帰式の分散のF値は77.7(1%水準で有意)であった。

それぞれの要因の影響度の大きさを比較する。表-8は、それぞれの要因の回帰係数の偏相関係数とレンジを示している。偏相関係数、レンジともに、地域別の要因(Reg)、部門別の要因(Sec)、年別の要因(Time)の順に大きく、影響力はこの順番に大きかった。

表-8 回帰係数の偏相関係数とレンジ

要因	偏相関係数	レンジ
Reg <sub>r</sub> 地域別要因	0.55	1.23
Sec <sub>j</sub> 部門別要因	0.19	0.23
Time <sub>t</sub> 年別要因	0.15	0.20

d) 地域別の要因

各要因の大きさについて分析する。平均値μは0.265となり、IEAの報告値よりも推計値は大きくなる傾向にあった。

次に、最も影響力の大きかった地域別の要因についてみる。表-9に、地域別の要因(Reg)と、地域別の要因(Reg)に平均値μを足した値を示す。表-9は順番はRegが小さな順となっている。また、OECD諸国は網かけしている。ポーランドを除く全ての地域でReg+μは0以上であった。すなわち、ほとんどの地域で、IEAの報告値は推計値よりも小さい傾向にあった。IEAの報告値と推計値の乖離が比較的小さかったのは、ポーランド、ハンガリー、旧ソ連、フランス、オーストラリアなどの地

域であった。OECD諸国のRegは全般に小さい傾向にあるが、メキシコ、ニュージーランド、アメリカなどの国のように、OECD諸国であるがRegが比較的大きな地域も見られた。Regが大きい地域に注目するとその他アフリカ、その他EFTAなど集約化地域が多かった。

表-9 地域別要因(Reg)

地域名	Reg <sub>r</sub>	Reg <sub>r</sub> +μ	地域名	Reg <sub>r</sub>	Reg <sub>r</sub> +μ
ポーランド	-0.28	-0.02	旧ユーゴスラビア	-0.06	0.20
ハンガリー	-0.26	0.00	カナダ	-0.05	0.21
旧ソ連	-0.23	0.03	ギリシャ	-0.05	0.22
フランス	-0.23	0.04	アルジェリア	-0.04	0.22
オーストラリア	-0.23	0.04	スイス	0.00	0.26
オーストリア	-0.23	0.04	韓国	0.01	0.28
クロアチア	-0.21	0.05	チリ	0.01	0.28
ポルトガル	-0.21	0.06	トルコ	0.02	0.29
バルト三国	-0.21	0.06	ルーマニア	0.03	0.30
スペイン	-0.20	0.06	アイスランド	0.05	0.32
スウェーデン	-0.20	0.06	ベネゼエラ	0.05	0.32
スロベニア	-0.19	0.07	イスラエル	0.07	0.33
日本	-0.19	0.07	ペラルーシ	0.07	0.34
ブラジル	-0.19	0.07	フィリピン	0.09	0.35
フィンランド	-0.19	0.07	アメリカ	0.10	0.36
台湾	-0.18	0.08	その他欧州	0.12	0.38
スロバキア	-0.18	0.09	ニュージーランド	0.12	0.39
デンマーク	-0.18	0.09	カザフスタン	0.14	0.41
西ドイツ	-0.17	0.09	南アフリカ	0.16	0.42
中国	-0.17	0.09	インドネシア	0.16	0.42
イギリス	-0.16	0.10	メキシコ	0.19	0.45
ドイツ	-0.16	0.11	チェコスロバキア	0.19	0.46
オランダ	-0.15	0.12	インドネシア	0.21	0.47
ブルガリア	-0.15	0.12	モロッコ	0.24	0.51
イタリア	-0.14	0.13	コートジボアール	0.30	0.57
ロシア	-0.13	0.14	チュニジア	0.33	0.59
チェコ	-0.12	0.15	その他CIS	0.34	0.61
ベルギー・モルクセンブルグ	-0.12	0.15	ウクライナ	0.37	0.64
コロンビア	-0.11	0.15	その他カリビアン	0.44	0.70
ノルウェー	-0.11	0.15	その他EFTA	0.48	0.74
タイ	-0.09	0.18	香港	0.61	0.87
その他ユーゴスラビア	-0.08	0.19	その他アフリカ	0.95	1.22

e) 部門別要因

次に、部門別要因について見てみる。表-10に、部門別の要因(Sec)と、部門別の要因(Sec)に平均値μを足した値を示す。表-10の順番は部門別の要因(Sec)が小さな順となっている。

鉄鋼、非金属、製材、化学、非鉄金属の順に部門別要因Secが小さかった。しかし、最も部門別要因Secが小さな値を示した鉄鋼でも、部門別要因Secと平均値μの和は0.14となった。産業の中でも一般にエネルギー消費量が大きいといわれる鉄鋼、非金属(セメント産業を含む)は、他の部門と比較して、修正量が小さかった。逆に、修正量の大きかったのは、紙パルプ、機械、繊維などの部門であった。



表- 10 部門別要因(Sec)

部門コード	部門名	Sec <sub>j</sub>	Sec <sub>j</sub> + μ
LS	鉄鋼	-0.13	0.14
NMM	非金属	-0.05	0.21
LUM	製材	-0.04	0.23
CRP	化学	-0.04	0.24
NFM	非鉄金属	-0.03	0.26
FPR	食料加工	-0.02	0.27
TRN	輸送機器	-0.01	0.27
CNS	建設	0.05	0.28
OMN	鉱業	0.05	0.33
TWL	繊維	0.06	0.31
MCH	機械	0.06	0.32
PPP	紙パルプ	0.10	0.33

f) 年別要因

次に年別要因について見てみる。図- 8 に、年別要因(Time)に平均値μを足したものをグラフで示す。過去に遡るほど、IEA の報告値の修正量が大きかったことがわかる。特に1980年以前で修正量は大きくなる傾向にあった。

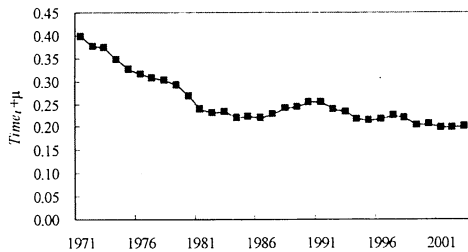


図- 8 年別の要因(Time)

g) 残渣項の分析

次に、残渣項  $\varepsilon'_{j,t}$  について分析し、地域別、部門別、年別の要因を取り除いた 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、部門別、年別の分散を計算し、残渣項全体の分散と、地域別、部門別、年別の分散に違いがあるものに着目する。ここで、分散が大きいと判断されるものは、IEA 報告値から推計値への修正のばらつきが大きいことを意味する。分散に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(φ), F 値( $F_0$ )を示す。

まず年別の分散が大きかったものを見ると、1971 年代が並び、1970 年代以外は 1992 年のみが有意となった。前項で年別要因(Time)は 1970 年代に大きくなることが示されたが、残渣項の分散も 1970 年代で大きかった。これは、1970 年代の IEA 報告値は、推計値よりも小さい傾向を有しているのみならず、ばらつきも大きいことを表している。

次に、部門別分散の大きな部門についてみてみると、非鉄金属、鉱業、建設、非金属が有意水準を満たした。これらの部門はエネルギーの消費量の比較的大きな部門(非鉄金属、非金属)と、そうでない部門(鉱業、建設)が混在しており、特に共通の特徴は見られなかった。

地域別分散の大きな地域は 23 地域あった。集約化地域が多かったが、それ以外に地理的な分布等の特徴は見られなかった。

表- 11 残渣項において分散が大きかった項目

	V	φ	F <sub>0</sub>	
年	1971	0.23	402	2.10 **
	1972	0.18	417	1.60 **
	1973	0.17	434	1.57 **
	1974	0.16	439	1.42 **
	1975	0.15	456	1.38 **
	1976	0.14	450	1.32 **
	1977	0.14	443	1.26 **
	1978	0.13	454	1.23 **
	1979	0.13	456	1.18 **
	1992	0.13	594	1.14 **
部門	非鉄金属	0.20	1342	1.79 **
	鉱業	0.18	1440	1.63 **
	建設	0.17	1362	1.56 **
	非金属	0.13	1660	1.14 **
地域	その他カリビアン	0.67	142	6.09 **
	その他アフリカ	0.66	256	6.02 **
	アルジェリア	0.38	141	3.47 **
	ベラルーシ	0.37	132	3.34 **
	チェコスロバキア	0.31	264	2.87 **
	インドネシア	0.31	200	2.86 **
	その他CIS	0.31	138	2.81 **
	カザフスタン	0.27	144	2.49 **
	その他欧州	0.23	230	2.13 **
	南アフリカ	0.23	329	2.08 **
	その他EFTA	0.22	174	1.99 **
	モロッコ	0.22	267	1.98 **
	メキシコ	0.21	301	1.94 **
	香港	0.21	134	1.94 **
	ルーマニア	0.21	241	1.87 **
	ニュージーランド	0.18	345	1.68 **
	コートジボアール	0.17	166	1.55 **
	その他ユーゴスラビア	0.16	144	1.47 **
	スイス	0.15	288	1.34 **
	ブラジル	0.15	269	1.33 **
	イスラエル	0.15	202	1.33 **
	アイルランド	0.13	370	1.22 **
	西ドイツ	0.13	228	1.19 *
	残渣項全体	0.12	17266	

\*:5%有意水準で有意、\*\*:1%有意水準で有意

6. おわりに

本研究は、世界全体の産業部門におけるエネルギー消費量の推計手法の開発とその適用を行った。IEA の Energy Balance は現存するエネルギー統計の中では最も有用なエネルギー統計の一つであるが、いくつかの問題を有する。産業部門のエネルギー消費量のデータに限っても、少なくとも3つの問題があり、本研究はそれらの問題を解決できる調整手法を提案し、実際に適用することで、全世界 106 地域の 1971 年-2003 年における産業 13

部門のエネルギー消費量を推計した。推計の結果、IEAの報告の問題点は改善されたことが示された。IEA報告値から推計値への修正を地域別、部門別、年別の要因に分解したところ、地域別の要因の寄与が大きかった。これはIEAの報告値は国別によって大きなバイアスを持っていることを意味していた。OECD諸国は全般に修正の割合が小さかったが、OECD諸国の中には大きな修正が行われた国も見られた。年別要因について見ると、1970年代で大きくなり、IEA報告値は、古い年のデータほど大きな修正がなされた。

ただし、本研究は、IEAのEnergy Balanceを修正する方法を示し、その結果を解析したが、その修正によって得られた値が真値に近づいているかどうかということは明らかになっていない。この点の検証については今後の研究課題としたい。

#### 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 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

- Rogner, H.-H., D. Zhou, R. Bradley, P. Crabbé, O. Edenhofer, B.Hare, L. Kuijpers, M. Yamaguchi: Introduction. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- IEA(International Energy Agency): *Energy Balance of OECD countries*, International Energy Agency, Paris, France, 2007a.
- IEA(International Energy Agency): *Energy Balance of non-OECD countries*, International Energy Agency, Paris, France, 2007b.
- Price, L., L. Michaelis, E. Worrell, M. Khrushch: Sectoral trends and driving forces of global energy use and greenhouse gas emissions, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Vol.3, pp. 263-319, 1998.
- de la Rue du Can, S., L. Price: Sectoral trends in global energy use and greenhouse gas emissions, *Energy Policy*, Vol.36, Issue 4, pp1386-1403, 2008.
- Schipper, L., T. Michael, K. Marta, G. William: The evolution of carbon dioxide emissions from energy use in industrialized countries: an end-use analysis, *Energy Policy*, Vol.25, 7-9, pp. 651-672, 1997.
- IEA(International Energy Agency): *Energy use in the new millennium*, International Energy Agency, Paris, France, 2007.
- Worrell, E., L. Price, N. Martin, J. Farla and R. Schaeffer: Energy intensity in the iron and steel industry: a comparison of physical and economic indicators, *Energy Policy*, Vol.25, 7-9, pp. 724-744, 1997.
- Farla, J., K. Blok, L. Schipper: Energy efficiency developments in the pulp and paper industry, *Energy Policy*, Vol. 25, 7-9, pp. 745-758, 1997.
- 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.
- Enerdata: Globalstat, Enerdata, Grenoble, France, 2008.
- EIA(Energy Information Administration): *Energy Statistics*, U.S. Department of Energy, Washington, DC, USA, 2007.
- BP(British Petroleum): *Statistical Review of World Energy*, BP, 2007.
- UN(United Nations): *Energy Statistics database*, United Nations, New York, USA, 2007.
- 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.
- IEA(International Energy Agency): *Energy Statistics of OECD countries*, International Energy Agency, Paris, France, 2007a.
- IEA(International Energy Agency): *Energy Statistics of non-OECD countries*, International Energy Agency, Paris, France, 2007d.
- IEA(International Energy Agency): *Energy Statistics manual*, International Energy Agency, Paris, France, 2005.
- 藤森真一郎, 松岡謙 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, *地球環境シンポジウム*, submitted.
- Hodrick, R., E. Prescott: Postwar U.S. business cycles: An empirical investigation, *Journal of Money, Credit and Banking*, Vol. 29, No.1, pp. 1-16, 1997.
- The World Bank: *World Development Indicators*, The World Bank, Washington D.C., USA, 2007.
- Ekkchart, S.: Estimating the smoothing parameter in the so-called hodrick-prescott filter, *Journal of the Japan Statistical Society*, vol. 35, No. 1, pp. 99-119, 2005

## Development of a Method to Estimate Global Industrial Energy Consumption 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 one of the most useful energy statistics in the world, but it has several issues. There are at least three issues in the industrial energy consumption data of IEA. This article proposes the reconciliation method to solve those issues and applies the method to the world divided into 106 regions from 1971 to 2003. Industrial sectors are classified into 13. The results show that those three issues are solved. We decompose the modification from IEA to our estimation by three factors; yearly, sectoral and regional factors. The regional factor is largest among the three factors. Though the modification of OECD countries are comparatively smaller than the other countries, some OECD countries show large gap between the IEA and the estimation. Focusing on the yearly factor, we could find that the older IEA data are more modified than the newer one.