

トピック

二酸化炭素原単位の要因分解

—エネルギー需給構造に基づく積み上げ手法—

計量分析ユニット 柳澤明

要約

周知の通り、「2020年の温室効果ガス排出量を1990年比で25%削減」という極めて厳しい目標が設定された。その流れで言えば、GDPあたりの二酸化炭素排出量である二酸化炭素原単位は、合理的な目標設定に資するための国際比較指標としての役割よりも、目標の達成へ向けたPDCAサイクルにおける指針としての意味合いと、その時系列変化がより重要視されてゆくであろう。また、コペンハーゲン合意に基づく目標では、中国やインドは排出量ではなく二酸化炭素原単位の削減を掲げている。いずれにしても、二酸化炭素原単位は今後ますます重要になってこよう。

今後の目標をふまえた現状評価や排出削減対策の立案においては、二酸化炭素原単位を一次供給レベル一括より詳細に分析できることが望ましい。そこで、エネルギー需給構造に沿った部門積み上げに基づく要因分解手法を紹介する。これにより、二酸化炭素原単位の変化に寄与している要因をより深いレベルで確認できるほか、一次電力の想定発電効率に起因するエネルギー原単位、炭素含有率の歪みの影響を回避できる。

茅の式に基づく要因分解は容易に計算できるという特長を持つが、一次エネルギー供給計という高度に集約されたレベルでの分析であることから、時に背後にある事象の影響を覆い隠してしまうことがある。状況と目的に応じて、適切な要因分解の分析レベルと手法を選択することが必要であろう。

1. はじめに

周知の通り、「2020年の温室効果ガス排出量を1990年比で25%削減」という極めて厳しい目標が設定された。そのことにより、我が国が推進していたセクトラル・アプローチは、結局一番大きなところで事実上意義を失った。その流れで言えば、GDPあたりの二酸化炭素排出量である二酸化炭素原単位やエネルギー原単位は、合理的な目標設定に資するための国際比較指標としての役割よりも、目標の達成へ向けたPDCA¹サイクルにおける指針としての意味合いと、その時系列変化がより重要視されてゆくであろう。

他方、コペンハーゲン合意に基づき、中国は2020年の二酸化炭素原単位を2005年比40～45%削減、インドは排出原単位²を2005年比20～25%削減するという目標を国連に提出している。これらの国においては、まさに二酸化炭素原単位そのものが目標(の中心)である。いずれにしても、二酸化炭素原単位は今後ますます重要になってこよう。

¹ 計画(Plan)、実行(Do)、評価(Check)、改善(Act)。

² 農業部門を除く。他の温室効果ガスを含む。

さて、国などマクロレベルの二酸化炭素排出³の増減要因を簡便に切り分ける1つの方法として、茅の式を用いた要因分解がある。これは、二酸化炭素排出量を、

- ・人口
- ・1人あたりGDP
- ・GDPあたりのエネルギー消費量(エネルギー原単位)
- ・エネルギー消費量あたりの二酸化炭素排出量(炭素含有率)

の積として(1)式のように定義し(人口と1人あたりGDPとをまとめてGDP総額とすることもある)、各要因がどの程度二酸化炭素排出量の増減に寄与しているかを見るものである。

$$\text{二酸化炭素排出量} = \text{人口} \times \frac{\text{GDP}}{\text{人口}} \times \frac{\text{エネルギー消費量}}{\text{GDP}} \times \frac{\text{二酸化炭素排出量}}{\text{エネルギー消費量}} \quad (1)$$

(1)式の最後の2つの要素をまとめると、GDPあたりの二酸化炭素排出量、すなわち二酸化炭素原単位である。この二酸化炭素原単位は容易に算出できるという特長を持つ指標であるが、茅の式に基づけば、エネルギー原単位と炭素含有率の2要因にしか分解できない。また、それらエネルギー原単位と炭素含有率も、一次エネルギー供給レベルの大括りな指標である。それゆえに、どの部門が、あるいはどの要因が、どの程度二酸化炭素原単位の低減に貢献しているのか、といったことをうかがい知ることはできない。より詳細な分析としては、産業連関表を用いた要因分解も行われているが、毎年データの入手可能性や速報性などに難がある。

一方で、ミクロなエネルギー・二酸化炭素効率指標－粗鋼生産量あたりのエネルギー消費量、家電製品の消費電力量、自動車の燃費など－は、エネルギー利用技術と密接に関連しているという意味で優れた指標である。しかしながら、国全体のエネルギー消費量や二酸化炭素排出量とは次元が異なりすぎ、マクロな二酸化炭素原単位の説明要因としては用いにくい。

今後の目標をふまえた現状評価や排出削減対策の立案においては、国全体のエネルギー消費量や二酸化炭素排出量との直接的な関連を保持させつつ、二酸化炭素原単位を一次供給レベル－括よりは詳細に分析できることが望ましい。そこで、続く第2節で、トップダウンかつエネルギー需給構造に沿った－具体的には、エネルギー需給分析の基本ツールであるエネルギーバランス表の考え方に則った－部門積み上げに基づく手法を紹介する。その利点を先んじて記しておけば、二酸化炭素原単位の変化に寄与している要因をより深いレベルで確認できるほか、一次電力の想定発電効率に起因するエネルギー原単位、炭素含有率の歪みの影響を回避できる(第3節)ことが挙げられる。第4節では、G20諸国を対象に二酸化炭素原単位の変化を要因分解した結果を提示する。

³ 以下では、エネルギー起源二酸化炭素を対象とする。

2. 定式化

2.1 二酸化炭素原単位の分解

GDPあたりの二酸化炭素排出量である二酸化炭素原単位は、エネルギーバランス表の部門構成に従い、(2)式のように定義的に分解できる。

$$\begin{aligned}\frac{C}{GDP} &= \frac{C_{IN}}{GDP} + \frac{C_{TN}}{GDP} + \frac{C_{HS}}{GDP} + \frac{C_{CM}}{GDP} + \frac{C_{AG}}{GDP} + \frac{C_{NE}}{GDP} + \frac{C_{OT}}{GDP} \\ &= \sum_i \frac{C_i}{GDP}.\end{aligned}\quad (2)$$

ここで、

C_i : 部門*i*の二酸化炭素排出量(直接排出量・間接排出量)

GDP: GDP

IN: 産業部門, TN: 運輸部門, HS: 家庭部門, CM: 業務部門, AG: 農林水産部門,

NE: 非エネルギー消費部門, OT: エネルギー転換部門

である。さらに、各最終消費部門の二酸化炭素原単位をGDPあたりの最終エネルギー消費量と最終エネルギー消費量あたりの二酸化炭素排出量である炭素含有率とに分解する。

$$\frac{C}{GDP} = \sum_i \frac{FD_i}{GDP} \frac{C_i}{FD_i} + \frac{C_{OT}}{GDP}.\quad (3)$$

ここで、

FD_i : 部門*i*の最終エネルギー消費量合計

である。また、時間の経過とともに、各最終消費部門におけるエネルギー*j*の構成比率が変化してゆくことを考慮すれば、(3)式は以下のように変形できる。

$$\frac{C}{GDP} = \sum_i \sum_j \frac{FD_i}{GDP} \frac{FD_{i,j}}{FD_i} \frac{C_{i,j}}{FD_{i,j}} + \frac{C_{OT}}{GDP}.\quad (4)$$

産業部門、業務部門、農林水産部門については、これらの部門の活動水準を表現するものとして、GDP総額よりも関連の深い産業、サービス業、農林水産業の付加価値額が利用可能であるので、最終的に二酸化炭素原単位は(5)式のように書き換えることができる。

$$\frac{C}{GDP} = \sum_i \sum_j \frac{VA_i}{GDP} \frac{FD_i}{VA_i} \frac{FD_{i,j}}{FD_i} \frac{C_{i,j}}{FD_{i,j}} + \frac{C_{OT}}{GDP}.\quad (5)$$

ここで、

VA_i : 部門*i*の付加価値額

であり、表現を簡潔にするために、記号を $VA_{TN} = VA_{HS} = VA_{NE} = GDP$ と定義した。

すなわち、二酸化炭素原単位は、

①経済構造: 付加価値シェア

VA_i/GDP (産業、業務、農林水産)

- ②エネルギー原単位⁴: 付加価値あたりエネルギー消費量
 FD_i/VA_i (産業、業務、農林水産)、 FD_i/GDP (運輸、家庭、非エネルギー消費)
- ③エネルギー構成: 最終部門別エネルギーシェア
 $FD_{i,j}/FD_i$
- ④炭素含有率: エネルギー消費量あたり二酸化炭素排出量
 $C_{i,j}/FD_{i,j}$

の積和として表現することができる。

2.2 二酸化炭素原単位変化の要因分解

時点 s から時点 t への二酸化炭素原単位の変化 $\Delta_{s,t}$ は、物価指数で言うラスパイレス指数の算式に則せば、以下のように要因分解できる⁵。

$$\begin{aligned}
 \Delta_{s,t} &= \frac{C_t}{GDP_t} - \frac{C_s}{GDP_s} \\
 &= \sum_i \sum_j \left(\frac{VA_{i,t}}{GDP_t} - \frac{VA_{i,s}}{GDP_s} \right) \frac{FD_{i,s}}{VA_{i,s}} \frac{FD_{i,j,s}}{FD_{i,s}} \frac{C_{i,j,s}}{FD_{i,j,s}} \dots\dots \text{経済構造要因} \\
 &\quad + \sum_i \sum_j \frac{VA_{i,s}}{GDP_s} \left(\frac{FD_{i,t}}{VA_{i,t}} - \frac{FD_{i,s}}{VA_{i,s}} \right) \frac{FD_{i,j,s}}{FD_{i,s}} \frac{C_{i,j,s}}{FD_{i,j,s}} \dots\dots \text{エネルギー原単位要因} \\
 &\quad + \sum_i \sum_j \frac{VA_{i,s}}{GDP_s} \frac{FD_{i,s}}{VA_{i,s}} \left(\frac{FD_{i,j,t}}{FD_{i,t}} - \frac{FD_{i,j,s}}{FD_{i,s}} \right) \frac{C_{i,j,s}}{FD_{i,j,s}} \dots\dots \text{エネルギー構成要因} \\
 &\quad + \sum_i \sum_j \frac{VA_{i,s}}{GDP_s} \frac{FD_{i,s}}{VA_{i,s}} \frac{FD_{i,j,s}}{FD_{i,s}} \left(\frac{C_{i,j,t}}{FD_{i,j,t}} - \frac{C_{i,j,s}}{FD_{i,j,s}} \right) \dots\dots \text{炭素含有率要因} \\
 &\quad + \left(\frac{C_{OT,t}}{GDP_t} - \frac{C_{OT,s}}{GDP_s} \right) \dots\dots \text{その他要因} \\
 &\quad + \text{交絡項.}
 \end{aligned} \tag{6}$$

なお、大気中の二酸化炭素濃度は累積排出量に依存するという視点に基づけば、時点0から時点 t への二酸化炭素原単位の変化 $\Delta_{0,t}$ に対する各要因の寄与は、ラスパイレス指数の算式で時点0から時点 t まで一足飛びに計算するより、(ラスパイレス型)連鎖指数の算式に従い、時点0から時点1, 時点1から時点2, ..., 時点 $t-1$ から時点 t と、経路依存的に計算したほうが好ましいと考えられる。すなわち、 $\Delta_{0,t}$ に対する各要因の寄与は(7)式に従った要因分解により算出することとする。

$$\Delta_{0,t} = \Delta_{0,1} + \Delta_{1,2} + \dots + \Delta_{t-1,t} \tag{7}$$

⁴ ここで定義されるエネルギー原単位は広義のエネルギー効率であり、その変化はミクロなエネルギー効率の変化と各部門内の構造変化の合成である。

⁵ Log-mean Divisia Index方式に則れば、交絡項を発生させずに要因分解することができるが、これは各要素の指数関数的な変化を仮定することに等しい。

3. 一次電力の発電効率に起因する問題

3.1 一次電力の発電効率

水力、原子力、地熱、太陽光、風力などの一次電力は、発電にかかる投入エネルギー量を直接計量することができない。そのため、通常は発電効率を想定して発電量から投入エネルギー量を逆算推計する。この想定発電効率(投入熱量換算係数)は、統計ごとに異なる値が用いられている。例えば、日本のエネルギーバランス表の場合は、火力発電の発電効率を参照した値を用いている。アメリカのエネルギー統計や中国のエネルギーバランス表などでも同様である。一方、火力発電のシェアが小さいフランスやカナダの統計では、一次電力の発電効率として100%が想定されている。国際統計でも取扱いが異なっており、国際エネルギー機関(International Energy Agency, IEA)の“Energy Balances”では、水力、太陽光、風力などが100%、原子力が33%、地熱が原則として10%とされている。他方、国際連合の“Energy Statistics Yearbook”では全ての一次電力に対し100%が想定されている。また、BPの“Statistical Review of World Energy”では、火力発電効率に準じた38%が用いられている。

3.2 エネルギー原単位、炭素含有率への影響

当然のことながら、国により異なる想定発電効率に基づく計算では、一次エネルギー供給の正確な比較ができない。例えば、一次エネルギー供給ベースでアメリカの水力発電1 kWhがカナダの水力発電1 kWhの約2.5倍のエネルギー量と評価されているのは、そのままでは比較の障害となる。

また、代表的な国際統計であるIEA統計では、上述の通り一次電力の種類により異なる発電効率が想定されているのも注意すべき点である。仮に原子力発電が同量の他の電力によって置き換えられる場合を考える。IEA統計では原子力発電の想定発電効率は33%であるから、代替電源が想定発電効率10%の地熱の場合は、投入エネルギー(=一次エネルギー供給)は増加し、エネルギー原単位も増加する。一方で、二酸化炭素排出量是不変であるから、炭素含有率は減少する。これに対し、代替電源が想定発電効率100%の水力他である場合、エネルギー原単位は減少する反面、炭素含有率は増加する。代替電源が火力発電の場合、火力の発電効率は40%程度であるから、エネルギー原単位は減少し、炭素含有率は増加する(発電効率の差だけでなく、火力発電に伴う追加的二酸化炭素排出の影響もある)。

表1 IEA統計での一次電力の想定発電効率の影響(例: 原子力発電が代替される場合)

代替電源	発電効率	エネルギー原単位	炭素含有率
地熱	10%	増加	減少
原子力	33%	不変	不変
水力	100%	減少	増加
太陽光、風力など	100%	減少	増加
火力	40%程度	減少	増加

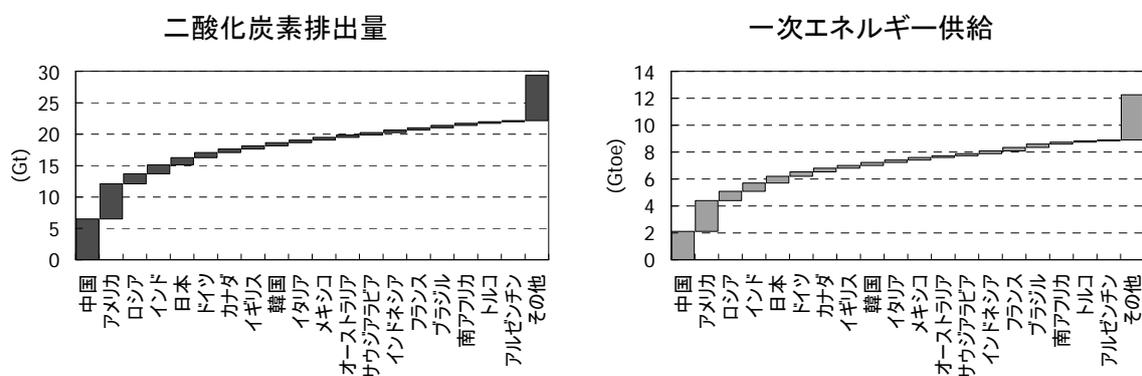
一次エネルギー供給に基づく要因分解は、当然、これら一次電力の想定発電効率の影響を受ける。しかしながら、第2節で紹介した部門積み上げによる手法は、最終エネルギー消費に基づいた要因分解を行うため、各最終エネルギー消費部門の評価において、この影響を回避することができる。

4. 実証分析

4.1 データ

G20諸国⁶の1990年から最新データ年の2008年までの二酸化炭素原単位の変化を対象として実証分析を行った。なお、2008年において、G20諸国は世界の二酸化炭素排出量、エネルギー消費量の約4分の3を占めている(図1)。

図1 G20諸国の二酸化炭素排出と一次エネルギー供給, 2008年



出所: IEA 「CO₂ Emissions from Fuel Combustion」、同 「Energy Balances」

分析において、エネルギーデータはIEAの“Energy Balances”、二酸化炭素データはIEAの“CO₂ Emissions from Fuel Combustion”、付加価値データは国際連合の“National Accounts Main Aggregates”を用いた。なお、Gas works gasは“Energy Balances”ではガス、“CO₂ Emissions from Fuel Combustion”では石炭として区分されているが、ここではガスに区分しなおした。

4.2 茅の式に基づく二酸化炭素排出量、二酸化炭素原単位の要因分解

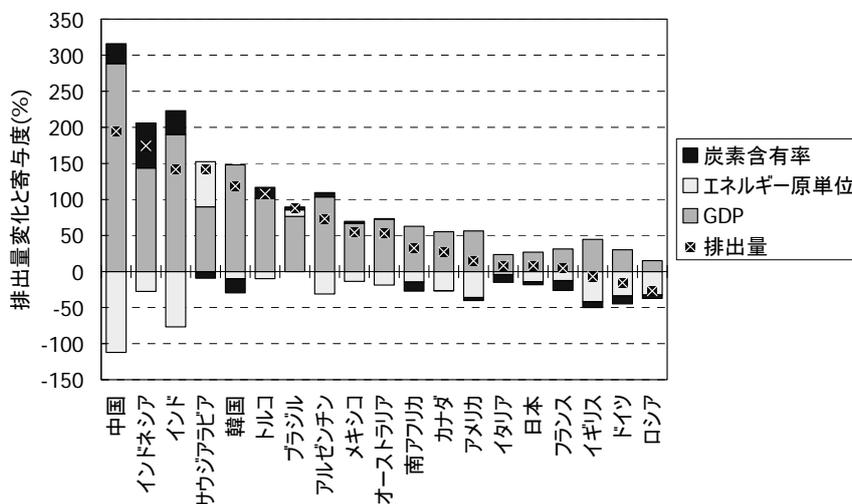
まず、比較のため、茅の式に基づく二酸化炭素排出量の要因分解結果と、一次供給ベースの二酸化炭素原単位の要因分解結果を示す。

G20のほとんどの国において、GDPが排出量の増加に大きく寄与している一方で、エネルギー原単位はこれを(多少なりとも)相殺する形で減少に寄与している(図2)。炭素含有率はGDPやエネルギー原単位に比べ寄与が小さいが、(伝統的)バイオマスから化石燃料への

⁶ G20諸国は、アルゼンチン、オーストラリア、ブラジル、カナダ、中国、フランス、ドイツ、インド、インドネシア、イタリア、日本、韓国、メキシコ、ロシア、サウジアラビア、南アフリカ、トルコ、イギリス、アメリカ、EUである。いずれの為替レートを採用するかが結果に影響するため、EUは分析対象から除外した。

エネルギー転換が進んでいる発展途上国においては、少なからず排出量の増加に寄与している。

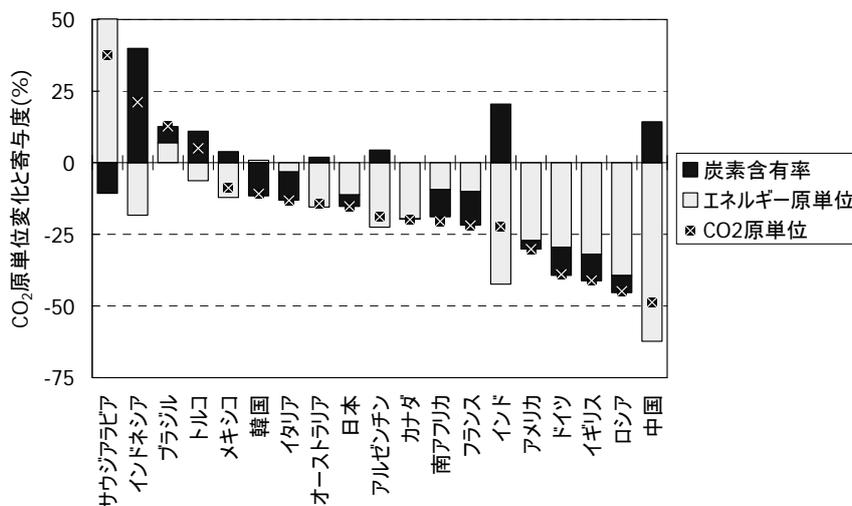
図2 二酸化炭素排出量変化と各要因の寄与度(一次供給ベース), 1990-2008年



注: 茅の式に基づく。交絡項のため、各要因の和は排出量の変化と一致しない。以下同じ。

図3は、二酸化炭素原単位の変化を一次供給ベースでエネルギー原単位要因と炭素含有率要因とに要因分解した結果である。省エネルギーポテンシャルの大きさを背景に、中国やロシアが二酸化炭素原単位を大きく減少させている。これに対し、廉価なエネルギー価格による浪費が指摘されることもあるサウジアラビアは、例外的にエネルギー原単位の悪化が二酸化炭素原単位を大きく増大させている。

図3 二酸化炭素原単位変化と各要因の寄与度(一次供給ベース), 1990-2008年



4.3 部門積み上げに基づく二酸化炭素原単位の要因分解

部門積み上げに基づく要因分解では、二酸化炭素原単位の変化を(6)式の通り詳細に分解することができるが、ここではまずそれらの要因をある程度再統合した結果を示す。

一例を挙げると、サウジアラビアは、一次供給ベースの要因分解(図3)ではエネルギー原単位要因が増加に寄与(寄与度50%)する一方、炭素含有率要因がこれを多少相殺(同-11%)し、結果、二酸化炭素原単位は38%増加した構図となっている。しかしながら、部門積み上げによる要因分解(図4、図5)によれば、この二酸化炭素原単位の38%の増加のうち、エネルギー原単位要因によるものは33%にとどまる一方、炭素含有率は減少には寄与していない。

図4 二酸化炭素原単位変化と各要因の寄与度(部門積み上げ), 1990-2008年

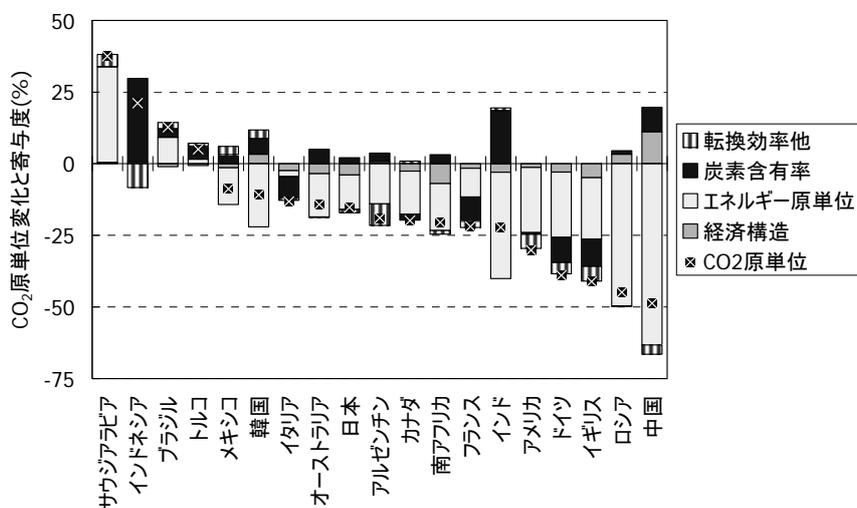
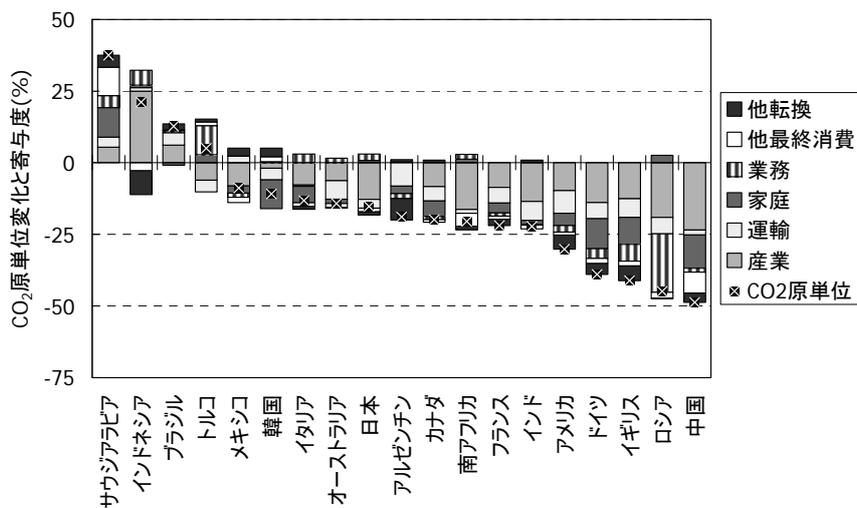


図5 二酸化炭素原単位変化と各部門の寄与度, 1990-2008年



要因分解手法の違いによる結果のこの相違は、サウジアラビアで伸張している石油化学(非エネルギー消費)の動向が影響している。フィードストック用途においては化石燃料に含まれる炭素分が石油化学製品に固定されるため、二酸化炭素排出量はわずかである。そのため、エネルギー多消費な石油化学の増大は、エネルギー消費原単位の増加をもたらすものの、一次供給ベースの要因分解では炭素含有率の減少として計測される。炭素含有率の減少というと、再生可能エネルギーや原子力などの低炭素エネルギーの普及が進んでいるように聞こえるが、実際にはそうではない。

片や、韓国は、一次供給ベースでのエネルギー原単位要因は若干の悪化となっている。しかしながら、部門積み上げによればエネルギー原単位要因は先進国では屈指の改善寄与を示している。一次供給ベースでのエネルギー原単位要因の増加は、実際には産業部門の発展などによる経済構造の変化(寄与度3.3%)と、急速な電化の進展(=燃料転換、同8.4%)のため⁷である。各最終消費部門におけるエネルギー効率の改善は急速に進んでいると捉えるのが正しいであろう。

表2 韓国の二酸化炭素原単位変化と各要因の寄与度(部門積み上げ), 1990-2008年

	一次エネルギー供給	最終エネルギー消費						電力送配損失	その他	
		産業	運輸	家庭	業務	農林水産	非エネ			
総変動	-10.9%	-13.9%	-1.9%	-4.1%	-10.0%	0.4%	-0.7%	2.4%	0.6%	2.4%
経済構造		3.3%	5.9%			-0.8%	-1.7%			
エネルギー原単位	0.9%	-22.1%	-9.2%	-3.6%	-9.1%	-2.8%	0.9%	1.7%		
炭素含有率	-11.5%	5.5%	1.3%	-0.5%	-0.5%	4.2%	0.3%	0.7%		
燃料転換	0.7%	8.4%	2.4%	-0.2%	0.6%	5.3%	0.4%	0.0%		
石炭	3.5%	-1.4%	-1.4%	-	-0.0%	-0.0%	-	-0.0%		
石油	-15.8%	2.6%	2.3%	-0.3%	-0.2%	0.1%	0.0%	0.6%		
ガス	0.1%	0.0%	-0.0%	0.0%	-0.0%	0.0%	0.0%	-		
電力・熱		-4.1%	-2.0%	-0.0%	-0.8%	-1.2%	-0.1%	-		
交絡項	-0.2%	-0.6%	0.1%	0.0%	-0.5%	-0.2%	-0.1%	0.1%		

注: 一次エネルギー供給ベースの総変動は変化率、他は総変動に対する寄与度である。

これらのように、一次供給ベースの要因分解を素朴に眺めるだけでは、正確な理解をし損ねる可能性がある。

5. おわりに

茅の式に基づく要因分解は、容易に計算できるという特長を持つが、一次エネルギー供給計という高度に集約されたレベルでの分析であることから、時に背後にある事象の影響を覆い隠してしまうことがある。状況と目的に応じて、適切な要因分解の分析レベルと手法を選択することが必要であろう。

⁷ 電力自体の炭素含有率は低減しており、4.1%の減少寄与となっている。