

# 50年にわたるエネルギー起源の 二酸化炭素排出の要因分析と国際的な対応の影響

小川 芳 樹

地球温暖化問題への国際的な対応は1992年の地球サミットを契機に開始され、現在は2015年に合意後に191ヶ国が批准したパリ協定の下で温室効果ガスのゼロエミッション化が本格化しようとしている。本研究では、1971年から2018年まで50年近くに及ぶエネルギー起源の二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出の変化を様々な角度から分析した。

分析結果に基づくと、1990年から2018年までの二酸化炭素排出でその重みが急上昇しているのは中国を始めとする新興途上地域で、ゼロエミッション化にはこの地域の削減が不可欠である。また、欧州で進展した再生可能エネルギーの導入拡大を他の地域でも拡大する必要がある。

1970年代の石油危機で培った省エネルギー先進国としてのわが国の優位性はすでに失われている。わが国は環境や省エネルギーの分野でトップランナーの優位性を再び確立するべく叡智を結集して注力する必要がある。

**keywords** : 地球温暖化問題、二酸化炭素排出、省エネルギー、燃料転換、環境クズネツ曲線

## 目 次

- |                    |                      |
|--------------------|----------------------|
| 1. はじめに            | 3.2 二酸化炭素排出の要因分析     |
| 2. データと分析方法        | 3.3 二酸化炭素排出と環境クズネツ曲線 |
| 3. 分析結果と考察         | 4. 結論                |
| 3.1 二酸化炭素排出の全体的な変化 |                      |

## 1 はじめに

ブラジルのリオデジャネイロで1992年に開催された地球サミットで気候変動枠組み条約が採択されてから30年余の時間が経過しようとしている。この気候変動枠組み条約の締結によって世界全体で地球温暖化問題に対する国際的な対応が始まったといっても過言ではない。しかしながら、地球温暖化問題は各国の利害対立が根深く、国際的な対応がこれまで必ずしも順調に進んできたわけではない。

その後、地球温暖化問題に対する国際的な対応は、1997年の京都議定書の採択、2015年のパリ協定の採択と進んで、2020年以降はパリ協定に基づく具体的な対応が本格化しようとしている。努力目標で足並みをそろえる精神的な合意を目指した気候変動枠組み条約、トップダウンで先進国を中心に義務を負う目標を設定した京都議定書、ボトムアップで全加盟国の取り組みを求めたパリ協定といろいろ試みられたが、必ずしも十分な成果は上がっていない。

地球温暖化問題の国際的な対応がなかなか思い通りに進展しない理由は、すでに述べたように、各国の利害対立が根深く南北問題に直結していることと温室効果ガスの及ぼす影響に関する科学的な不確実性が大きいことである。しかしながら、地球サミットから約30年を経過した現在は世界各地で異常気象による災害が深刻化しており、パリ協定でも産業革命以降の気温上昇を1.5℃以内に抑え、そのために温室効果ガスのゼロエミッション化を目指すことが求められている<sup>1)</sup>。

本研究では、国際エネルギー機関（IEA）のデータ<sup>2)</sup>を用いて1971年から2018年まで50年弱にわたるエネルギー起源の二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出に関して世界全体および地域別の分析を加え、地球温暖化問題に対する国際的な対応の問題点と今後の課題を検討してみたい。地球温暖化問題が国際的に認識さ

れて30年が経過した現時点でこの問題の国際的な対応には何が本質的に必要か考えてみたい。

## 2 データと分析手法

本研究で取り扱ったデータは、上述のように、国際エネルギー機関（IEA）がまとめた<sup>2)</sup> エネルギー起源の二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出のデータおよび関連データから算出したエネルギー消費、実質国民総生産、人口のデータである。国際エネルギー機関は世界計や地域計等の集計も行っているが、これらについては本研究で個別の国々のデータを集計した。第1の二酸化炭素排出の分析として50年近くのエネルギー起源の二酸化炭素排出を地域別に整理してその特徴を俯瞰した。

なお、データの算出・集計にあたっては以下の点を留意した。国際エネルギー機関の世界計は国際的な船舶や航空機の燃料（バンカー）消費による二酸化排出も含むが、本研究では地域別の特徴をみることに力点を置いたので、バンカー消費による二酸化炭素排出は含めていない。原データは2020年発表の最新版を用いているが、旧ソ連のデータに関しては1990年時点の接続に大きな不整合があったので、国際エネルギー機関の過去の同データに基づいて修正を加えた。

第2の二酸化炭素排出の分析は、以下で説明する分析方法を適用して個別の国々の要因分析を行い、その結果を地域別および世界計に集約した。二酸化炭素の排出は次の4つの要素を組み合わせて考えることができる。

$$CO_2 = (CO_2/E) * (E/GDP) * (GDP/P) * P \quad (1)$$

ここでCO<sub>2</sub>は二酸化炭素排出、Eはエネルギー消費、GDPは実質国内総生産、Pは人口である。この式は、いわゆる茅方程式<sup>3)</sup> と呼ばれるものにPの人口の項を加えたものである<sup>4)</sup>。ここでCO<sub>2</sub>をC、CO<sub>2</sub>/EをF、E/GDPをU、GDP/PをGとし、時間に関して微分した後、両辺にCをかけて変形すると、

$$\Delta C = (C/F) * \Delta F + (C/U) * \Delta U + (C/G) * \Delta G + (C/P) * \Delta P \quad (2)$$

を最終的に得ることができる<sup>4)</sup>。

この(2)式で左辺のΔCは二酸化炭素排出全体の変化を示すが、右辺の各項はそれぞれ第1項が燃料転換要因、第2項が省エネルギー要因、第3項が経済成長要因、第4項が人口増加要因による二酸化炭素排出の変化を示す。本研究では、個別の国々のデータから(2)式に基づく要因分析を行って地域別や世界計に集計した。

第3の二酸化炭素排出の分析は、クズネッツによる国民所得と所得格差の仮説<sup>5)</sup>を環境に適用した環境クズネッツ曲線の考え方にに基づき、経済成長といくつかの環境指標との関係を検討した。

## 3 分析結果と考察

### 3.1 二酸化炭素排出の全体的な変化

1971年から2018年まで国際エネルギー機関のデータに基づいて本研究で集計したエネルギー起源の二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出の結果を世界計と先進地域、旧ソ連地域、新興途上地域、その他途上地域の4つに分けておおよそ10年刻みで表1に概括する。各年で世界計を100%とした各地域の構成比と1990年以前、以降の年平均増加率も示す。なお、本研究の新興途上地域は中国、香港、台湾、シンガポール、フィリピン、マレーシア、インドネシア、タイ、インド、エジプト、南アフリカ連邦、ブラジル、アルゼンチンの13ヶ国である。

世界全体の二酸化炭素排出は、1971年の134.2億トンから年平均増加率1.98%で増加して気候変動枠組み条約の基準年である1990年に198.9億トンとなった。地球温暖化問題への国際的取り組みの実施にも関わらず、その後も年平均増加率1.68%で増加を続けて2018年には322.0億トンへ到達した。世界全体の

表1 1971年から2018年にいたるエネルギー起源の二酸化炭素排出の推移

(単位：億トン-CO<sub>2</sub>)

		世界計	先進	旧ソ連	新興途上	その他途上
1971年	実数	134.2	95.9	19.4	14.3	4.6
	構成比 (%)	(100.0)	(71.4)	(14.5)	(10.7)	(3.4)
1980年	実数	171.5	109.4	29.4	23.9	8.8
	構成比 (%)	(100.0)	(63.8)	(17.1)	(14.0)	(5.1)
1990年	実数	198.9	113.4	36.1	36.9	12.5
	構成比 (%)	(100.0)	(57.0)	(18.1)	(18.6)	(6.3)
2000年	実数	223.9	127.5	21.7	56.7	18.0
	構成比 (%)	(100.0)	(56.9)	(9.7)	(25.3)	(8.0)
2010年	実数	294.6	125.7	23.4	117.4	28.1
	構成比 (%)	(100.0)	(42.7)	(7.9)	(39.9)	(9.5)
2018年	実数	322.0	118.4	23.2	145.6	34.9
	構成比 (%)	(100.0)	(36.8)	(7.2)	(45.2)	(10.8)
年平均増減率 (%)	1990/1971	1.98	0.84	3.15	4.85	5.12
	2018/1990	1.68	0.15	-1.51	4.85	3.60

(出所) IEA, “CO<sub>2</sub> Highlight 2020” のデータに基づいて本研究で集計した結果

(注1) 先進地域は現時点のOECD加盟国(旧ソ連の当該3ヶ国を除く33ヶ国)とOECD以外の東欧など(12ヶ国)である。旧ソ連地域は分裂前の旧ソ連に属した国(15ヶ国)である。新興途上地域には中国、香港、台湾、シンガポール、フィリピン、マレーシア、インドネシア、タイ、インド、エジプト、南アフリカ連邦、ブラジル、アルゼンチンの13ヶ国が含まれる。その他途上地域は残りの発展途上地域の国々(64ヶ国プラス3地域)である。

(注2) 船舶や航空機の国際的な運航に伴うバンカー燃料の二酸化炭素排出は含まれていない。

(注3) 旧ソ連地域の二酸化炭素排出は過去のIEAデータに基づいて不連続な接続を修正した。

(注4) 丸目の誤差によって各地域の合計と世界計が一致しない場合がある。

変化をみると二酸化炭素排出は増加の一途といわざるを得ない。

しかし、地域別にみると、1971年に世界全体の71.4%を占めていた先進地域は1990年に57.0%、さらに2018年に36.8%と大幅に低下した。2018年の排出量は1990年と比較すると微増であるが2000年と比較すると減少へ転じており、京都議定書など国際的な取り組みで一定の成果があったと判断される。旧ソ連地域は1980年代末の分裂による経済混乱で大幅な減少から微増へ変化し、世界全体の構成比は1990年の18.1%から2018年の7.2%へ大幅低下した。

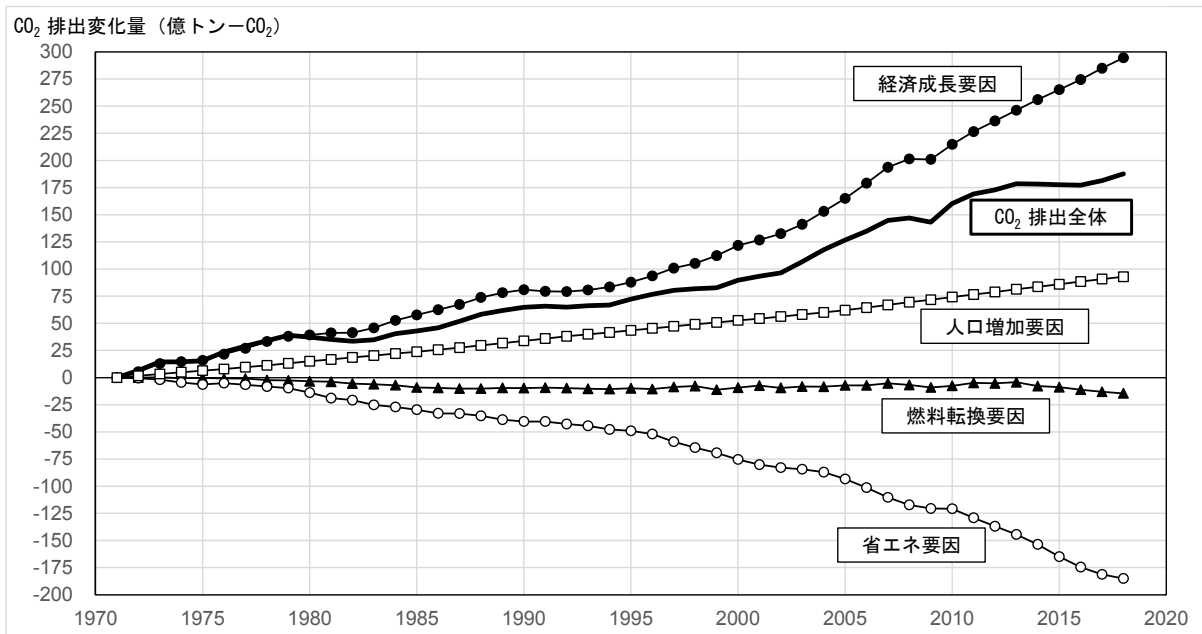
二酸化炭素排出を大幅に増加させているのは新興途上地域である。1971年は14.3億トン(10.3%)で旧ソ連地域よりも低い水準であったが、1990年に36.9億トン(18.6%)と旧ソ連地域と肩を並べ、その後は急増して2018年に145.6億トン(45.2%)と先進地域を大きく上回った。年平均増加率は1971年から2018年まで4.85%と高い値を続けている。その他途上地域も1971年から増加を続け、2018年には34.9億トンと旧ソ連地域をはるかに超える規模となった。

上述の2つの途上地域は1990年から2018年までの国際的な取り組みは効を奏しておらず、世界全体の二酸化炭素排出が増加の一途をたどる大きな原因になったといわざるを得ない。

### 3.2 二酸化炭素排出の要因分析

次に第2の分析方法で示した二酸化炭素排出の要因分析の結果をまとめる。図1は、1971年からの累積変化でみた世界全体の二酸化炭素排出の変化を全体のほかに燃料転換、省エネルギー(省エネ)、経済成長、人口増加の4つの要因に分けた結果である。すでに述べたように、世界全体の二酸化炭素排出は1971年から2018年と増加の一途をたどっている。

図1 1971年からの累積変化でみた世界全体の二酸化炭素排出の要因別変化



(出所) 本研究の分析結果に基づいて作成

要因別にみると、増加の最も大きな要因は経済成長要因で、人口増加要因と比べるとかなりの差があることがわかる。これに対して、減少には省エネルギー要因が大きく働いているが、燃料転換要因はそれに比べると2018年までほとんど効いていない。全体をまとめると、省エネ要因の減少が人口増加要因の増加を打ち消して経済成長要因の増加も部分的に打ち消しているが、なお大きなものが残るため増加の一途をたどる結果となったといえる。

図2は、これに対して要因分析の結果を地域別に分けて二酸化炭素排出パターンの違いをみたものである。先進地域を北米、欧州、アジア・オセアニアの3つに分け、それに旧ソ連地域と新興途上地域、その他途上地域の3つを加えている。

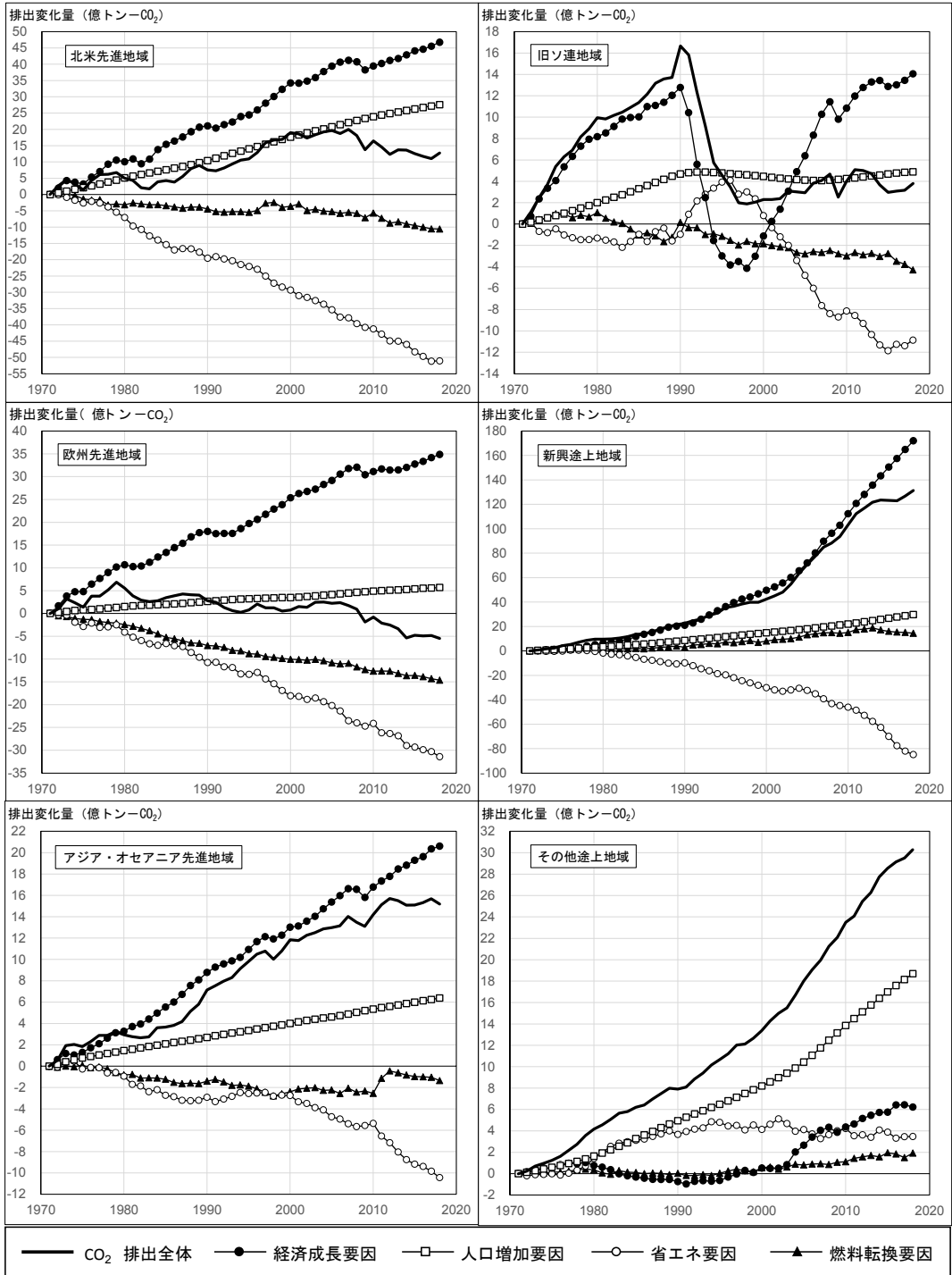
先進地域の欧州では、省エネルギー要因の他に燃料転換要因が減少の方向へ強く働き、全体変化も減少へ向かっている。北米では移民等による人口増加要因がより強く働き、減少では省エネルギー要因が大きい、燃料転換要因は欧州に比べ大きく働いていない。しかし、2008年以降の全体変化は減少へ転じ温暖化対応による一定の成果が上がっているといえる。わが国を含むアジア・オセアニアでは、省エネルギー要因の減少がみられるが全体変化は増加を継続といわざるを得ない。

上述の先進地域の変化に対して、旧ソ連地域では分裂に伴う経済混乱によるドラスティックな減少が1990年から2000年まで出現し、2000年以降の経済回復に対しては省エネルギー要因や燃料転換要因の減少が働くことで全体変化を穏やかな増加にとどめている。

新興途上地域は最も大きな排出増加を示し、特に2000年以降の排出増加が著しい。2010年代に入ると省エネルギー要因による減少が加速し燃料転換要因が減少に転じた結果、全体に増加の鈍化をもたらしている。その他途上地域は、人口増加要因が排出増加に最も大きく働き、最近省エネルギー要因が減少に寄与し始め、燃料転換要因は増加に寄与している点に特徴がある。

以上のように、地域によって要因の働き方はかなり異なっているので、それぞれの地域や個別の国の変化をしっかりと押さえた分析と対策の検討が必要になると考えられる。

図2 地域別にみた二酸化炭素排出の要因変化



(出所) 本研究の分析結果に基づいて作成

(注) 先進地域は現時点のOECD加盟国(旧ソ連の当該国は含まない)である。旧ソ連地域は分裂前の旧ソ連に属した国である。新興途上地域には中国、香港、台湾、シンガポール、フィリピン、マレーシア、インドネシア、タイ、インド、エジプト、南アフリカ連邦、ブラジル、アルゼンチンの13ヶ国が含まれる。その他途上地域は残りの発展途上地域の国々ある。



### 3.3 二酸化炭素排出と環境クズネツ曲線

環境クズネツ曲線は、クズネツが国民所得と所得格差の関係を分析して得られた仮説<sup>6)</sup>を環境問題に適用した考え方である。環境クズネツ曲線の仮説から導かれる典型的なインプリケーションは、所得水準が低いと所得水準が上がるにつれて環境汚染が増大していくが、所得水準が一定水準に達すると環境汚染の増大はピークを迎え、その後は所得水準が上がると環境汚染が減少するというものである。

本研究では、国際エネルギー機関の多様な国々のデータを整理していくつかの環境指標が得られたので、それを図示して上述の環境クズネツ曲線の仮説を検証してみる。分析を加えた環境指標は、省エネルギー要因を示す実質GDP当たりエネルギー消費量、燃料転換要因を示すエネルギー消費量当たりCO<sub>2</sub>排出量と1人当たりCO<sub>2</sub>排出量の3つである。

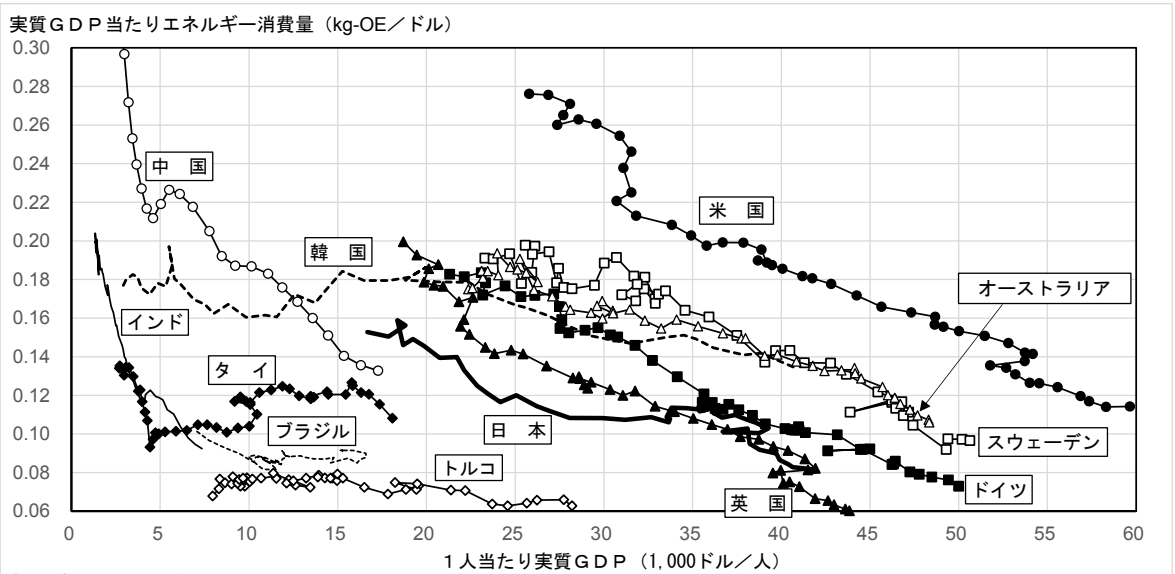
本研究では先進地域と新興途上地域から代表的な12ヶ国を選択した。具体的には、米国、ドイツ、英国、スウェーデン、日本、オーストラリア、韓国、トルコ、ブラジル、タイ、中国、インドである。経済水準（所得水準）の指標として1人当たり実質国内総生産（GDP）を横軸に取り、国別に実質GDP当たりエネルギー消費量の変化を図3に示す。実質GDP当たりエネルギー消費量（エネルギー消費原単位）は、省エネルギーの度合いを示す典型的な環境指標である。

実質GDP当たりエネルギー消費量の変化をみると、水準の違いはあるが米国、スウェーデン、オーストラリア、ドイツ、英国、日本といった先進地域で石油危機が起こった1970年代の早期から右肩下がりで改善が進んできたといえる。ブラジル（新興途上地域）も右肩下がりの穏やかな改善を示している。

先進地域で韓国とトルコだけが経済水準の上昇過程でこの指標の増加が観測され、その後は改善へ向かっている。これは、上述の環境クズネツ曲線のインプリケーションに該当する変化といえる。タイ（新興途上地域）の80年代以降の変化も、韓国に類似した変化を示しており、環境クズネツ曲線で想定する変化に該当する。

途上地域の中で、中国やインドでは、非常に非効率な実質GDP当たりエネルギー消費量の段階から他の国々と同等の水準へ改善する変化がみられ、タイの70年代の変化もこれに類似している。これらの

図3 経済水準と実質GDP当たりエネルギー消費量の変化



(出所) 本研究で得られたデータに基づいて作成

(注) 各国の折れ線は、1970年から2018年までの1人当たり実質GDPが横軸であるので、マイナス成長でない限り左から右へ時系列的な変化を表している。

変化は、上述の変化とは性格の異なる非効率な段階からの改善が進んだと考えた方がよいかもしれない。

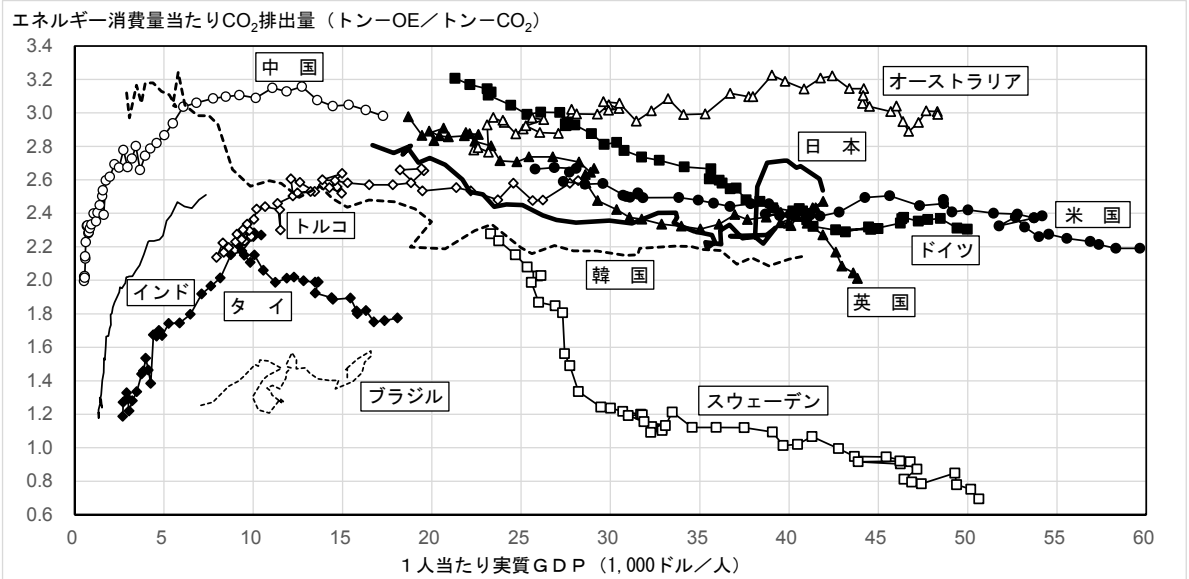
わが国は2回の石油危機で進んだエネルギー改善から省エネルギー先進国を自負してきたが、最近こそエネルギー改善が再び進み始めているものの、1985年から2010年までの四半世紀にわたってほとんど改善が進んでおらず、省エネルギーのトップランナーとはいえない。その意味では、対策強化の検討が必要と考えられる。

実質GDP当たりエネルギー消費量（エネルギー消費原単位）の変化をみてきたが、特に先進地域は1970年代から改善が始まっており、環境クズネット曲線のインプリケーションを確認するには、さらに過去の変化を検証する必要がある。また、中国やインドなどでみられた変化は、次元の異なる要因も考えられるので、別途の検討が必要である。

次に、経済水準（所得水準）の変化に対して国別にエネルギー消費量当たり二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出量の変化を図4に示す。エネルギー消費量当たり二酸化炭素排出量（炭素強度）は、燃料転換の度合いを示す典型的な環境指標である。

エネルギー消費量当たり二酸化炭素排出量の変化をみると、これも水準の違いはあるが、ドイツ、英国、スウェーデンといった欧州の先進地域で1970年代から右肩下がりの低下が顕著である。欧州では風力、バイオマス、太陽光、水力など再生可能エネルギーの拡大がこの変化に寄与したといえる。欧州の

図4 経済水準とエネルギー消費量当たり二酸化炭素排出量の変化



(出所) 本研究で得られたデータに基づいて作成

(注) 各国の折れ線は、1970年から2018年までの1人当たり実質GDPが横軸であるので、マイナス成長でない限り左から右へ時系列的な変化を表している。

国々ほどではないが、米国も穏やかな右肩下がりの変化を示している。

日本や韓国は70年代から80あるいは90年代にかけてこの指標の低下がみられるが、これは原子力や天然ガスの拡大によるものと考えられる。わが国の場合、東日本大震災による原発事故の影響でこの指標が著しく悪化した。その後は再生可能エネルギーの拡大も寄与して徐々に低下し始めている。その後の韓国はほぼ横ばいの変化で、この指標の改善はあまり進んでいない。

オーストラリアとトルコは、どちらかというこの指標が上昇する方向で変化してきたが、オースト

ラリアの場合は21世紀に入って減少方向へ転じ、トルコの場合はほぼ横ばいの推移となっている。ブラジル（新興途上地域）の場合も、どちらかといえば上昇方向での変化となっている。

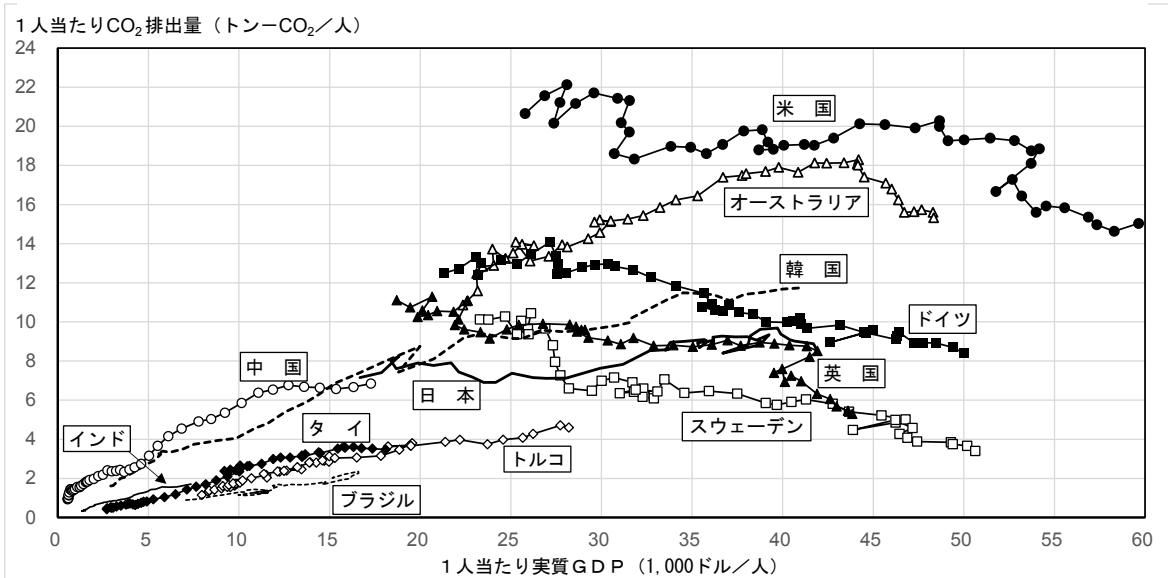
新興途上地域の中で中国、インド、タイの場合、70年代早期から80年代までこの指標が増加の一途をたどっているが、これは植物由来の伝統的な非商業燃料から石炭、石油などの商業燃料への転換が進んだためと考えられる。タイの場合、90年代に入ると減少に転じているが、これは天然ガスの消費が拡大したためと考えられる。

エネルギー消費量当たり二酸化炭素排出量（炭素強度）の変化をみてきたが、1970年代からの低下は原子力や天然ガスの拡大が主な要因である。しかし、これらの要因が将来も大きく働くには一定の限界があると考えられる。その意味で、この指標で環境クズネツ曲線のインプリケーションを示せる本命の1つは再生可能エネルギーの拡大である。欧州の国々ではこの要因が効果を示し始めているが、それ以外の国々では今後の導入拡大による効果を期待する必要がある。

最後に、経済水準（所得水準）の変化に対して国別に1人当たり二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出量の変化を図5に示す。省エネルギーの要素は70年代の石油危機の時代から多くの国で働いており、燃料転換の要素は本命の再生可能エネルギーの影響が欧州に限られていたが、この環境指標ではもう少し全体に共通する変化を確認できるのではないかと期待して取り上げた。

1人当たり二酸化炭素排出量の変化をみると、トルコ、ブラジル、タイ、インドのグループとドイツ、英国、スウェーデン、日本、韓国、中国のグループは冬の暖房燃料の必要性の有無で二酸化炭素排出の水準が異なっているようにみえる。また、米国とオーストラリアは自動車燃料の消費規模の違いで前の

図5 経済水準と1人当たり二酸化炭素排出量の変化



2グループと水準が異なっているようにみえる。

上述の水準の違いの可能性を踏まえた上でこの環境指標の変化をみると、欧州のドイツ、英国、スウェーデンは比較的早期から継続的な低下を続けてきた。米国は横ばい、オーストラリアは増加の期間が長く続いたが、最近の10年前後は減少に転じている。わが国は第2次石油危機後の期間に減少したが、



その後は増加を続けて最近になって減少に転じた。ただし、わが国は欧州の国々のように長期にわたる減少を続けているわけではない。

これに対して、すでに述べた水準の違いはあるが、韓国とトルコは全期間にわたってこの指標の増加傾向が継続している。新興工業地域の中でタイ、ブラジル、インドは同様に全期間にわたって増加傾向が続いているが、過去に増加の一途をたどってきた中国は2010年代に入って横ばい傾向に転じている。

1人当たり二酸化炭素排出量の変化をみてきたが、すでに述べたエネルギー消費パターンの相異による水準の違いはあるとしても、図5に示した変化の全体を見渡すと、この環境指標が環境クズネツ曲線のインプリケーションをより明確に示す結果であると考えられる。その意味では、この指標のさらなる分析が必要であるといえる。

## 4 結論

地球温暖化問題の国際的な取り組みが始まって30年が経過しつつあるが、世界全体のエネルギー起源の二酸化炭素排出は、1971年134.2億トン、1990年198.8億トン、2018年の322.0億トンと増加の一途をたどっている。1971年は先進地域が排出量の71.4%を占めたが、2018年は中国を始めとする新興途上地域が45.2%に達した。今後、温室効果ガスのゼロエミッション化を進めるとすれば、発展途上地域の排出削減を何としても実現することが不可欠である。このためには新興途上地域やその他発展途上地域の経済発展段階と排出のピークアウトの関係を見極めるとともに、それに適合した国際的な支援・協力の仕組みを構築することが重要である。

二酸化炭素排出の要因分析の結果をみると、経済成長要因と人口増加要因が排出の増加方向に働き、省エネルギー要因と燃料転換要因が排出の減少方向に働くが、現状の燃料転換要因の効果はあまり大きくない。省エネルギー要因の減少は人口増加要因の増加を打ち消す力はあるが、経済成長要因の増加は部分的にしか打ち消せない。欧州の国々でみられたように、今後は再生可能エネルギーの導入等を本格化させて燃料転換要因の効果をさらに強める必要がある。

エネルギー消費パターンの相異による排出水準の違いは考慮する必要があるが、経済水準の変化に対する1人当たりCO<sub>2</sub>排出量の変化を環境クズネツ曲線の考え方に基づいて多様な国々のあり方、バランスを俯瞰的に把握することは重要である。過去のデータを充実させ、今後のデータをさらに追加してさらなる検討を加えることが必要である。

わが国は石油危機への対応によって省エネルギー先進国を自負してきたが、90年代以降の環境指標や二酸化炭素排出の変化をみる限りでは、その優位性はすでに失われ強みを持たない三流国に転落したといわざるを得ない。わが国の叡智を結集して環境や省エネルギーなどの分野で国際的トップランナーの優位性を再び確立すべく今後大いに注力することが必要である。

### 参考文献

- 1) 気候変動に関する政府間パネル（IPCC），“Global Warming of 1.5°C Presentation to the wrap-up of the Talanoa Dialogue preparatory phase,” 2018年.
- 2) 国際エネルギー機関（IEA），“CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion 2020,” 2020年.
- 3) 茅陽一、山地憲治、松橋隆治，“Grand Strategy for Global Warming,” Proceedings of the Government Symposium on Global Environment, Tokyo, 1989年.
- 4) 小川芳樹，“Economic Activity and the Greenhouse Effect,” The Energy Journal, Vol. 12, No. 1, 1991年.
- 5) Kuznetz, S., “Economic growth and income inequality,” *American Economic Review*, 45, pp. 1-28, 1955年.