

触媒懇談会ニュース

触媒学会シニア懇談会

真に有効な二酸化炭素排出の削減策は何か —ドイツの実績についての一考察—

御園生 誠

近年の地球温暖化はほとんどが人為的な要因によるとする通説とは異なり、地球温暖化の半分以上が自然要因であり、人為的要因は半分以上であると推定した（本ニュース No.102, 2017）。そうであれば、CO₂削減目標はパリ協定で要求される削減量の半分くらいでよいことになり、角を矯めて牛を殺す（社会を不安定にする）ような過激な対策をとらなくて済む¹⁾。

どちらが正しいにしても必要なのは CO₂ 排出の削減策である（CO₂ 削減無用説もあるが²⁾）。そこで、真に有効な削減策が何かについて、1990-2015 年の間で経済成長と CO₂ 削減を両立させたドイツを例に考察した。分かったことは、再生可能エネルギーなどエネルギー源の低炭素化よりも産業構造の変革と社会システム全体の効率化（エネルギー生産性の改善）の寄与がずっと大きいということである。

1. 環境クズネッツ曲線—CO₂の場合

環境クズネッツ曲線は、「経済成長と所得格差の関係」を論じたクズネッツ曲線を「経済成長と環境負荷の関係」に転用したものである。図に概略を示すが、タテ軸に環境負荷をとりヨコ軸の GDP（国民総生産=総消

費=総所得÷経済成長の指標）に対してプロットすると、当初、環境負荷は経済成長とともに増大するが、ある時点から技術の改良、法規制などにより反転減少し山形曲線を描くとするものである。つまり経済と環境の両立である（デカップリング、U ターン）。

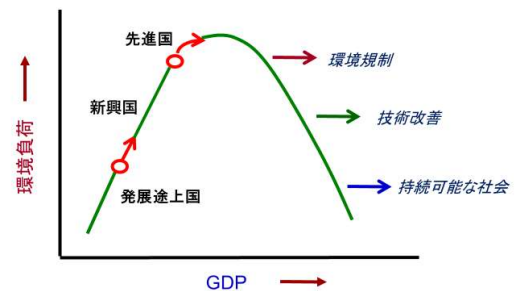


図 環境クズネッツ曲線（概念図）

経済成長と環境負荷低減の両立（デカップリング、U ターン）は可能か？

現実には、大気中の二酸化窒素や硫黄酸化物の濃度の例のように反転減少したものもあるが、CO₂ のように増え続けているものもある。CO₂ 排出が、人間活動に必須のエネルギー大量使用に必然的に伴うという事情は当分変わらないので、経済成長と CO₂ 削減を両立させることはきわめて難し

い。図に倣って、各国の一人当たりのエネルギー消費量（≒CO₂ 排出量）を一人当たりの GDP に対して両対数プロットすると、途上国は山形曲線の左山裾に、先進国は頂上付近にある。また、昔ほどの国も曲線の左山裾にあった。そして、今後反転して山を下るかどうかはまだわからない。

このように、経済成長と CO₂ 削減の両立（デカップリング、U ターン）の成否が CO₂ 排出の大幅削減のための鍵である。

2. CO₂ 排出の現実の動向

さて、本稿の主題である CO₂ 排出量を 1990-2015 年の 25 年間について見てみよう。世界の CO₂ 排出量は今も増加し続けているが増加速度には鈍化の兆候がある。中国、インドでは今も相当の勢いで増えているが、先進国を見るとイギリスやドイツなどでは減少し、アメリカでもその傾向が若干みられる。日本はというと、1990 年以後はあまり減らず原発事故以後はむしろ増加している（それでも日本は排出権取引など

を加えて京都議定書の目標値は達成)。この間、日本の経済成長は非常に小さい。バブル崩壊後の“失われた 20—30 年”に相当し経済が停滞した“平成時代”に重なる。

CO₂ 排出が減少したイギリス、ドイツはかなりの経済成長 (GDP 増加) を遂げているので、この間、経済成長と二酸化炭素排出のデカップリング (経済成長と CO₂ 削減の両立) に成功したことになる。どうやって成功したのであろうか。再生可能エネルギーの普及のおかげなのだろうか。ここで、再生可能エネルギーの優等生としてマスコミが喧伝するドイツの例を取り上げ、デカップリングし得た本当の理由を探ってみたい。少し面倒だが簡単な算数なのでしばし我慢してお付き合いをお願いしたい。

3. ドイツにおけるデカップリングの分析

茅陽一氏が提案した次の恒等式³⁾に従って分析する。簡単な式だが、経済成長と CO₂ 排出の関係についてエネルギーを中心に考えるうえで便利な式である。

$$\text{CO}_2 \text{ 排出量} = \{ \text{CO}_2 \text{ 排出量} / \text{一次エネルギー消費量} \} \times \{ \text{一次エネルギー消費量} / \text{GDP} \} \times \text{GDP} \quad (1)$$

右辺第 1 項 {CO₂ 排出量 / 一次エネルギー消費量} は、一次エネルギー消費 (≒供給) に対してどのくらい二酸化炭素を排出しているか、つまり一次エネルギー源の“炭素率” (+二次エネルギーへの変換効率)、第 2 項 {一次エネルギー消費量 / GDP} は、生み出す付加価値 (GDP) に対して一次エネルギーをどれだけ消費したか、つまりエネルギー生産性 (エネルギー効率) の逆数である。以下、必要に応じ、CO₂ 排出量を C、エネルギー消費量を E、GDP を G と略記する。また、X 年の C などを C(X)などと表記する。

なお、(1) 式は、GSC (グリーンサステイナブルケミストリー) の議論でよく使う恒等式、環境負荷 = (環境負荷 / GDP) × (GDP / 人口) × 人口、の環境負荷を CO₂ 排出量とし、右辺第 1 項を {CO₂ 排出量 / 一次エネルギー消費量} と {一次エネルギー消費量 / GDP} の二つに分け、人口を省略したものである。

ドイツの1990年と2015年のCとEを表1にまとめた(データはドイツ連邦経済エネルギー省による。少量の輸出入とその他は省略)。なお、物価上昇を補正した実質GDPは、この25年間で2.57兆ドルから

3.71兆ドルへ1.44倍に増大している(エネルギー・経済統計要覧2019)。

以下、(1)式に沿って、式の各変数が25年間で何倍に変化したかに注目して解析する。

表1 ドイツの1990年と2015年のCO₂排出量と一次エネルギー消費量

	CO ₂ 排出量		一次エネルギー消費 (10 ² PJ)					C/Ex10 ²
	(億トン)	総量	石油	ガス	石炭・褐炭	原子力	再生エネ	
1990	9.86	149	52.2	22.9	55.1	16.7	2.0	6.6
2015	7.48	133	44.9	27.7	32.9	10.0	16.4	5.6

*褐炭が多いことがドイツの特徴。再生可能エネルギーは風力発電>バイオマス(非発電が多い)>太陽光発電>>水力。

25年間で、E/Gは0.62倍(=133/149/1.44)になり、C/Eが9.86/149から7.46/133へと0.85倍になった。その結果CO₂排出が表1のように9.86億トンから7.48億トンにまで減った。C(2015)=9.86(C(1990))x0.85x0.62x1.44=7.48億トンで2.38億トン(=9.86-7.48)削減。

しかし、削減効果を考えるには、1990年の経済の枠組みをそのまま放っておけば(Business As Usual, BAU。言い換えればC/E, E/Gが一定ならば)、CO₂排出量はGDPに比例して1.44倍の14.20億トンになったはずであろうことを考慮しなければならない。この14.20億トンを基準にすると、25年間で14.20-7.48=6.72億トンのCO₂を削減したことになる。

ここで、6.72億トンのCO₂削減の中身を(1)式; C=C/E x E/G x Gに従って分析する。

まず、Gが1.44倍に増えたが、E/Gが0.62倍に減少したので、E(2015)/E(1990)=

E/Gの変化率 x Gの変化率 = 0.62 x 1.44 = 0.89倍になり消費エネルギーが減少した。

このときC/Eが1990年のままならCO₂排出量も14.20x0.62(=9.86x0.89)=8.80億トンになったはずである。従って、E/Gの低下によるCO₂削減量は14.20-8.80=5.40億トンになる。これは、省エネ、節エネ、効率向上の結果である(後述)。

これに加えて、エネルギーの炭素率C/Eが0.85倍になったことにより、CO₂排出量は8.80x0.85=7.48億トンとなる。この値は当然表1の数値に一致し、1.32億トンの追加削減になる。この分を加えると削減量は合計で5.40+1.32=6.72億トンとなる。

まとめると2015年のCO₂排出量=14.20{=9.86(C(1990))x1.44(Gの増加率)}x0.85(C/E低下率)x0.62(E/G低下率)=7.48億トンとなる。

このような考え方にたてば、CO₂削減量6.72億トンの大部分がエネルギー生産性の向上(E/G低下)によることになる。

以上の計算結果を表 2 にまとめた。表中のエネルギー低炭素化の内訳は後述。また、石油・天然ガスの変化の合計は相対的に小

さく、それらの C/E が平均値に近いのでその変化は考慮していない。

表 2 ドイツの全削減量 6.72 億トンの内訳

CO₂全削減量	—6.7 億トン
エネルギー生産性向上 (E/G) により	—5.4 億トン
エネルギー低炭素化(C/E)により	—1.3 億トン
1.3 億トンのうち、	
再生可能エネルギー拡大により	—1.0 億トン
原子力発電の縮小により	+0.4 億トン
一次エネルギー変換効率向上などにより(—1.3 + 1.0 — 0.4 =)	—0.7 億トン

E/G の減少 (エネルギー生産性の改善) が顕著だが、それは、産業構造の変化とエネルギー利用効率の改善 (省エネ・節エネ) によると考えられる。産業構造の変化とは、第 1, 2 次産業から金融、サービスなどの第 3 次産業への転換とエネルギー多消費型の素材産業の海外への移転ないし依存である。つまり、エネルギー少消費型の経済へのシフトである (4 節まとめ参照)。

C/E の減少(低炭素化)に貢献したのは、第一に褐炭・石炭の利用が減って、再生可能エネルギーが増えたことである (表 1)。再生可能エネルギー普及の寄与をエネルギー構成から推定すると 1.0 億トンになる。

これは以下のように推定した。CO₂ を出さないとされる再生可能エネルギーが他のエネルギーを代替したものとして、再生可能エネルギー増加分に平均の C/E を掛けて CO₂ 削減量に換算した (=代替され不要になったエネルギーの CO₂ 排出量の推定値)。

1990 年の C/E を使ったが、2015 年の C/E でも大差はない。

C/E の寄与 1.32 億トンから再生可能エネルギー貢献分 1.0 億トンを引いた残りの 0.32 億トンは、発電など一次エネルギーから二次エネルギーへの変換効率の向上・化石燃料の低炭素化による CO₂ 削減量と原子力発電の減少による CO₂ 増加量との差である。ここで原子力発電のエネルギー減少分に C/E を掛けて CO₂ 増加量とした。

ちなみに、日本の場合、CO₂ 排出は原子力が火力にシフトしたことが主な原因となっていて、1990 年～2015 年に 1.1 倍に増えた。それでも GDP 一人当たりの CO₂ 排出量はドイツとほぼ同じである。ドイツでは原子力が総エネルギーの 7～8%残っているのに対し日本の原子力がほぼゼロであることを考えると、日本は CO₂ 排出削減でよく健闘している。日本とドイツを対比して表 3 にまとめる。ドイツのデータは前出。日本の

データは「エネルギー経済統計要覧 2019」。データ源により数値は若干異なる。例えば、ドイツの一人当たり CO₂排出量はエネルギー

一経済統計要覧では 8.9 トンだが、日本とドイツが同レベルにあることは変わらない。

表 3 C, E, G の変化率 (2015/1990 比) のドイツと日本の対比

	C	=	C/E	x	E/G	x	G	一人当たり CO ₂ 排出量(2015)
ドイツ	0.76 倍		0.85 倍		0.62 倍		1.44 倍	9.2 トン/人
日本	1.10 倍		1.12 倍		0.77 倍		1.28 倍	9.0 トン/人

4. まとめ

現在の人類にとってのリスクは地球温暖化に限らない。国際的な政治や経済の変調・破綻や自然災害などのリスクも地球温暖化に勝るとも劣らない。科学技術が今の調子で進んでいくと破綻するかもしれないというリスクもある。我々は、これらのリスクに対してバランスよく対策を講じなければならない。そのためには、様々なリスクに対する各種の対策を評価して、コストパフォーマンスが良く貢献量の大きいもの(質と量)を選んで、優先順位をつけることが必要である。コストは社会負担の合計、パフォーマンスは人類の福祉全体への貢献を考えるのが理想であろう。

ドイツの実績を分析することは対策の優先順位をつける作業の一つである。その結果、ドイツが経済成長と CO₂の排出削減を両立できたのは、表 2 にあるようにエネルギー生産性の向上によるところが非常に大きいことが分かった(約 80%)。再生可能エネルギーの寄与は相対的に小さい(約 15%)。

従って、適切な削減対策をドイツの例に

学ぶとすると、エネルギー生産性の大幅な向上が何により実現したのか内訳を具体的に調べる必要がある。定量的な解析はできていないが、確かに産業構造では 3 次産業が増え、素材産業などのエネルギー多消費産業の海外移転ないし海外依存は進んでいる(海外移転・依存は世界の CO₂排出削減には貢献しない)。家屋の断熱化も生産プロセスの効率化もすすみ、要素部品・技術の効率(関連して文末の補足参照)もシステム全体の効率も改善している。

つまり、多くの技術を組み合わせ総合した結果として大幅な CO₂削減が実現している。従って、再生可能エネルギーも過大な期待はせずに、これら多くの技術のうちの一つとして位置付けるのがよいであろう。

もう一つの可能性をあえてあげると、自然のエネルギーをあまり加工せずに活用することがある。例として、太陽光・熱の直接利用、木、草の緑や川、池の水の利用(水蒸気の蒸発凝縮による環境変動の緩和、空気浄化など)、風の道や地下熱を活かした空調などなどがある。エネルギーを大量に使った力づくの改造や制御ではなく、自然と人

工の両者を程よく協調させる技術が大きな省エネルギーにつながるのではないだろうか。大都市部では太陽光からのエネルギーと電力・燃料油からのエネルギーが既に似たレベルになっている。人工的になりすぎてはいないだろうか。

補足1) 電気自動車 (EV) とガソリン自動車 (GV) の CO₂ 排出量

10 万キロ走行した場合の、EV 車 (リーフ) と GV 車の走行時・燃料 (電気) 製造時の CO₂ 排出量に自動車自身の製造時の CO₂ 排出量を加えた CO₂ 総排出量 を比較した¹⁾。その結果、GV のコンパクトカーと EV は同程度で、軽自動車はずっと小さく、GV の小型車は 1-3 割ほど多いことが推定された。高級セダンになると CO₂ 総排出量は圧倒的に多い。他方、価格は EV リーフ約 350 万円、軽自動車約 120 万円、コンパクトカー (ノート) 約 150 万円、小型車 (シルフィ) 約 200 万円、高級セダン 500 万円超である (いずれの車種もピンキリだが安めの価格をあげている)。

従って、CO₂ 削減コスト (CO₂ 1 トン削減に要するコスト) は EV 基準で、**軽 < コンパクトカー < 小型車 < EV < 高級セダン** となる。つまり、軽を EV に代えるとコストがかかるうえ CO₂ 排出量が増える。コンパクトカーを EV に代えると金はかか

って CO₂ はほとんど減らない。小型車から EV への転換は、ある程度 CO₂ が減るがかなりの費用が必要。燃費が悪く高価な高級セダンは CO₂ に関しては論外。EV が CO₂ 削減の決め手とはなりそうもない。

その上、他にも選択の基準は種々あって製品の選別も意外と難しい。結局は、消費者が乗り心地、価格、燃費などを勘案して自分の嗜好に合わせて決めることになるだろう。

補足2) 時間軸の問題。製造と使用の時間差

CO₂ 削減のための機器は、それらを製造・設置する間にもつぱら CO₂ を排出して削減効果はない。正味の CO₂ 削減効果が発生するのは機器の設置・稼働後しばらくたってからである。とりわけ急速に普及している間は CO₂ の排出が急増し続けるので、正味の削減効果が出るまでにはかなりの時間がかかる。

(参考文献)

1. 御園生 誠『現代の化学環境学』裳華房, 2017
2. 渡辺 正『「地球温暖化」狂騒曲 社会を壊す空騒ぎ』丸善出版, 2018
3. 茅 陽一編著『低炭素エコノミー』日本経済新聞社出版社, 2008