

エントロピーと環境効率からみた 持続可能な社会の指標に関する考察

小 幡 範 雄

1. はじめに
2. 資源消費の現状と予測
 - (1) 幾何級数的な成長と貧富の格差
 - (2) 増大するエネルギー消費
 - (3) 資源消費大国になる中国
3. 環境負荷の増大と危機予測
 - (1) 増え続ける二酸化炭素
 - (2) IPCCによる被害の想定
 - (3) 地球温暖化等による甚大な被害予測
4. 地球資源の有限性の認識
 - (1) ピークオイル
 - (2) 環境収容力を超えているエコロジカル・フットプリント
 - (3) 地球資源の有限性
5. 環境保全と経済の統合は可能か
 - (1) 環境効率指標の盲点
 - (2) エントロピーの法則
 - (3) エントロピーによる生産と廃棄の一体化
 - (4) 過剰消費の対応策
6. 維持可能な社会のイメージの形成
7. おわりに

1. はじめに

危機状況にある地球環境、エネルギー・資源が枯渇する、8 億人近い栄養失調者、アメリカのような生活水準であれば地球は 5 個必要であるなど、地球環境は限界をすでに超えているのかのようにみえる主張や事実が非常に多く見られるようになった。

『成長の限界人類の選択』（ドネラ・メドウズ他、2005 年）の予測結果を見てみよう¹⁾。予測結果の標準とされるものは、2020～30 年ごろまでは順調に成長を続けるが、その後は経済成長が止まり、下降しはじめる。その大きな原因は、資源消費に伴う、再生不可能な資源コストの急騰である。このコスト上昇がさまざま経済分野に影響を及ぼし、工業生産、食糧生産が低下、人口も低下し、破局の方向に向かうというものである。著者も言うように、これら本は資源枯渇と地球の危機を予測したものではない、我々に地球環境が維持できるような方策もあることを指し示したものである。予測の考え方、条件の設定方法など、予測への批判も数多くあることも事実である。

2100 年後の地球の気温を予測したものにも多くの数値がある²⁾。上昇幅を最大の予測値と最低のそれをレンジで示している。これらの予測も正しいのかどうかは現時点では判断できない。温暖化防止対策ひとつを取り上げても、二酸化炭素の削減率は 40～50% 必要である、あるいは京都議定書にみられる先進国で 5% でもいいとするものや、はたまた温暖化に対する懐疑論まである。しかし、一つだけ確信を持って言えることがある。それは、多くの場合、予測は当たらないということである。危機的な状況に陥る予測ができれば、軌道を修正して、そうならないようにするからである。

本論文では、地球が有限であるという視点から、資源消費・使用の現状と予測について整理し、持続可能性について環境効率とエントロピーの概念から検討していくことを目的としている。

これまでの予測では、枯渇性資源状況の予測、地球温暖化の予測、環境ビジネスの予測、自然との関わりあいの予測など各種のものがなされているが、どのような社会になっているのか、あるいはどんな社会を造ればいいのか、暮らしや生活はどうなっているのかを検討していくための条件として、市民の合意を形成することの重要性も最後に指摘したい。

2. 資源消費の現状と予測

(1) 幾何級数的な成長と貧富の格差

20 世紀後半、エネルギーと資源の消費は、人口成長率を上回る速度で増加した。表 1 に、代表的な資源について 1950～2000 年の推移を示す³⁾。

50 年の変化でみると、2000 年時点で世界人口は 1950 年の 247% に達しているのに対して、石油消費は 1950 年の 727%、天然ガス消費は 1454%、石炭消費は 364%、発電容量は 2104% に達している。また、その他の鉱物、天然資源も人口成長率を大きく上回る伸び率を示している。この急激な変化の原動力となっているのは人口と物質経済の幾何級数的な成長である。

年3%の成長率であれば、倍増する期間は24年で、5%であればわずか14年である。年7%の成長率であれば、10年ごとに2倍になる。成長が続く限り、幾何級数的に資源も消費されるのである。

20世紀後半、人口増加とともに、より豊かなライフスタイルが先進国を中心に広まったことを示している。2000年時点で、日米欧を中心にこのような豊かなライフスタイルを送っている人口は10億人前後と推定され、全体の6人に1人という割合である。

しかし、この著しい成長の快適さと恩恵は一握りの国々だけにもたらされている。一方には極貧生活者も存在している。国連食糧農業機関（FAO）によると、2000年時点で、なお発展途上国で7億9800万人は十分な栄養がとれず、常に飢える危険にさらされている（1999～2001年平均値）。これは、1990～1992年の平均値8億1700万人から1900万人の改善にすぎない。国連が2000年に設定した「ミレニアム開発目標」では、1990年比で2015年までにその半減を目標として掲げているが、達成は厳しい。また、1998年時点では、1日1.08ドル以下の所得（世界銀行が試算した貧困境界線）で暮らす人々は12億人であった。割合としては、1987年での地球人口の28%から1998年の24%へと若干減少してはいるものの、人口増加に伴い貧困者の絶対数は増加している⁴⁾。

私たちは経済成長のコントロールと貧富の格差の解消という大きな課題を突きつけられている。

表1 人間活動や製品にみる世界的な成長¹⁾

	1950年	2000年	増加率 (%)
世界人口 (億人)	25.2	60.6	240
登録自動車数 (億台)	0.7	7.23	1029
石油消費/年 (億バレル)	38	276	726
電力生産/年 (億 kWh)	1.54	32.4	2133
小麦生産/年 (億トン)	1.4	5.84	417
米生産/年 (億トン)	1.5	5.98	399
鉄生産/年 (億トン)	1.34	5.8	446

(2) 増大するエネルギー消費

アジア/世界エネルギーアウトック2007は2030年のエネルギー関連の予測を行っている⁵⁾。予測の前提条件は以下のようである。

世界全体の経済成長は2005年から2030年まで、年率3.1%で着実に成長すると見込まれる。また、アジア（日本を除く）の経済成長率は5.3%と今後も世界経済の牽引役となる。とりわけ中国は6.2%、インドは6.1%で成長し、両国は重要な位置を占めるとしている。2005年の世界人口64億人に対し、2030年には82億人に増加。アジアでは中国が14.5億人、インドが14.9億人に達し、アジア全体では44億人と世界人口の54%を占めるようになるとしている。また、原油価格についても緩やかな上昇を見込んだものとなっている。

予測ケースは2通りある。レファレンス・ケースは、現時点における経済・社会情勢、政策

等を踏まえ、より現実性の高い将来のエネルギー需給を予測するものである。技術進展ケースは、中国、インドを中心としたアジア各国が一層のエネルギー安定供給確保や地球温暖化抑制に向けた省エネルギー・環境政策を採用した際のエネルギー需給へのインパクトを考慮したものである。

このような前提の下でのレファレンス・ケースでの予測結果は次のとおりである。

世界の一次エネルギー消費は2030年まで年率1.9%の増加が見込まれ、2005年の103億トン（石油換算トン、以下同様）から2030年には165億トンへと増加する。増加量の87%を化石燃料が占め、化石燃料は今後も主要エネルギー源としての役割を担う。

一次エネルギー消費予測を国別に見ると、中国は2005年15億トンから2030年31億トンになり、年平均伸び率は3.0%となっている。インドは2005年3.8億トンが2030年11億トンとなり、年平均伸び率は4.3%となり、これまた幾何級数的な伸びとなっている。これに対して、日本は2005年5.3億トンが2030年5.3億トンとなり、年平均伸び率は0%で現状維持となっている。

表2 エネルギー・経済指標等の見通し⁵⁾

	1980年	1990年	2005年	2010年	2020年	2030年
GDP (2000年価格十億米ドル)	18,023	24,321	37,066	44,184	60,311	79,887
人口 (百万人)	4,425	5,247	6,416	6,801	7,544	8,221
一次エネルギー消費 (石油換算百万トン)	6,448	7,890	10,315	11,523	13,978	16,480
発電量 (Twh)	8,207	11,800	18,223	21,321	27,991	35,435
CO ₂ 排出量 (炭素換算百万トン)	5,025	5,864	7,543	8,363	10,002	11,734
一人当り GDP (2000年価格米ドル/人)	4,073	4,635	5,777	6,497	7,994	9,717
一人当り一次エネルギー消費 (石油換算トン/人)	1.46	1.50	1.61	1.69	1.85	2.00
GDP当り一次エネルギー消費 (石油換算トン/百万ドル)	358	324	278	261	232	206
GDP当り CO ₂ 排出量 (炭素換算百万トン/百万ドル)	279	241	203	189	166	147
一次エネルギー消費当り CO ₂ 排出量 (炭素換算百万トン/石油換算百万トン)	0.78	0.74	0.73	0.73	0.72	0.71
自動車保有台数 (百万台)	420	584	899	1,043	1,408	1,762
千人当り自動車保有台数 (台/千人)	95	111	140	153	187	214

この報告では、CO₂排出量（炭素換算百万トン）も予測している。2005年75億トンの量が2030年には117億トンに増加している。

World Energy Outlook 2008 では世界の一次エネルギーの需要予測を2006年から2030年に117.3億石油換算トンから170.1億石油換算トンへと45%、年平均で1.6%増加するとしている⁶⁾。この予測はレファレンス・シナリオと呼ばれるもので、2008年半ばまでに制定もしくは採択された政府の政策・措置の効果については考慮されているが、新規の政策・措置の効果については考慮されていない、いわゆるベース・ラインと呼べるケースである。

いづれにしても、相当な伸びとなることは確実である。特に、中国、インドでの伸びは注目

していく必要がある。中国は現在のところアメリカに次ぐ世界第2位のエネルギー消費国であるが、2030年には現在のアメリカ並みの水準に近づくことになる。2030年までに中国、インドは世界の一次エネルギー消費の約4分の1を占め、一次エネルギー消費増加量の約4割を占める見通しである。

また、太陽光発電など再生可能エネルギーの利用の増加は今後の鍵を握るものとして、大きな話題となっている。アジア/世界エネルギーアウトック 2007によれば、一次エネルギー構成で再生可能エネルギーが占める割合は、2030年に3.4%である。化石燃料は2030年には、一次エネルギー源の約85%程度を占めている。

(3) 資源消費大国になる中国

これまでみてきたように、地球は2つの危機、あるいは困難に突き当たっている。一つはトータルにみた資源の枯渇の危険性がある、もう一つは地球内部の豊かな先進国と極めて貧しい国との間の格差の拡大ということである。経済学は、希少な資源をより効率的に利用できる方法を研究する。そのための生産・交換・分配・消費といった行動の選択を行い、より豊かな生活を過ごすことを目指している。個々の部分では豊かさは実現できて成功しているかもしれないが、全体としてみれば多くの選択行動は失敗していると言わざるを得ない。

レスター・ブラウンはプラン B 2.0 に次のような事実と推定を示している⁷⁾。世界の五つの主要産品（穀物、食肉、石油、石炭、鉄鋼）のうち、石油以外では中国の消費量はアメリカを超えている。2005年の中国の穀物消費量は、3億8000万トンで、アメリカの2億6000万トンより圧倒的に多い。三大穀物のうち、小麦とコメの消費量は中国が最大で、トウモロコシだけアメリカに次ぐ2位となっている。2005年の中国の食肉消費量は6700万トンで、アメリカの3800万トンを大きく引き離している。中国は、世界の穀物収穫量の3分の2に相当する量を消費することになる。また、中国の紙の消費量は世界の現在の生産量の2倍となり、世界中の森林が消えてなくなってしまう

2004年の石油使用量ではアメリカは中国の3倍以上で（アメリカは一日当たり2040万バレルで、中国は650万バレル）、依然として1位であった。しかし、1994年から2004年にかけて、石油使用量の増加は、アメリカがわずか15%だったのに対し、中国では倍増し、日本をしのぐ石油消費国になった。中国の石炭利用は、国家のエネルギー使用量の3分の2近くを占めて、年間9億6000万トンは、アメリカの使用量の5億6000万トンを優に超えている。これだけの量の石炭を使用しながら、石油と天然ガスの使用量も急増していることから、中国がアメリカに匹敵するほど二酸化炭素を排出するようになるのは時間の問題である。

中国経済が年間8%の割合で成長を続けると、2031年までに、一人当たりの所得は2004年のアメリカと同水準になる。さらに、2031年には14億5000万人に達するこの裕福な中国の人々が、2004年のアメリカ人とほぼ同じ程度に消費すると仮定すれば、地球全体の資源配分はどのようなのであろうか。これらの見通しは中国全体としての話である。もう一つ重要な問題もある。沿岸地域と内陸部の成長の格差、豊かさの享受の開きはここでは論じられていない。中国も日

本と同じように地域格差の是正は大きい課題となることも予想される。中国に成長するなどは言えない。とすれば、先進国が成長のスピードを落とし、これまでとは違った経路による発展をしなければならないのであろうか。少なくともこれまでのような成長は無理であることは間違いないであろう。

3. 環境負荷の増大と危機予測

(1) 増え続ける二酸化炭素

2008年までの二酸化炭素の濃度は1960年以降常に増加している。2008年は385ppmで1960年より70ppm程度上昇している（気候変動監視レポート2008：気象庁（2008））。

IPCC第4次評価報告書 統合報告書－政策決定者向け要約：文部科学省・経済産業省・気象庁・環境省（2007年11月）では、2100年までの二酸化炭素を含む温室効果ガスと気温の予測をシナリオ別に図2に示している。温室効果ガス排出量は2100年には2000年に対して、2～3倍程度である。気温の上昇も同様にしてみれば2～3℃である。

この増加は非常に大きいもので次項で延べるような様々な被害をもたらすと予想される。

なお、SRES（Special Report on Emission Scenarios, IPCC 2000）シナリオは、A－B軸：経済（Economic）志向－環境（Environmental）志向、1－2軸：地球主義（Global）志向－地域主義（Regional）志向の組合せのA1、A2、B1、B2のシナリオファミリー別に、人口、経済成長、技術、エネルギーシステムについて、2100年までの40のシナリオが作られている。

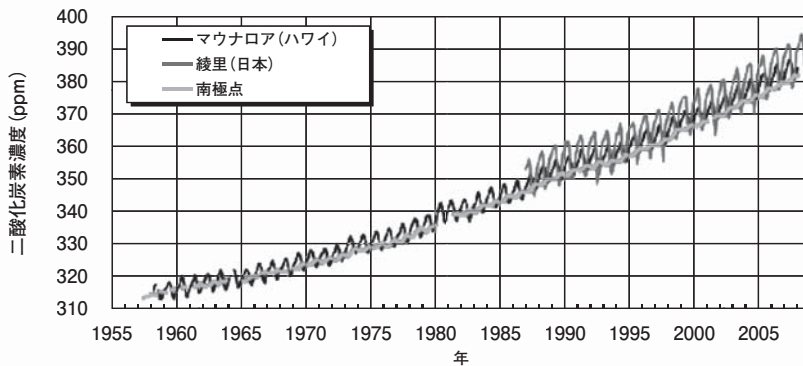


図1 2008年までの大気中の二酸化炭素濃度の経年変化

出典：http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/monitor/2008/pdf/ccmr2008_chap3.pdf

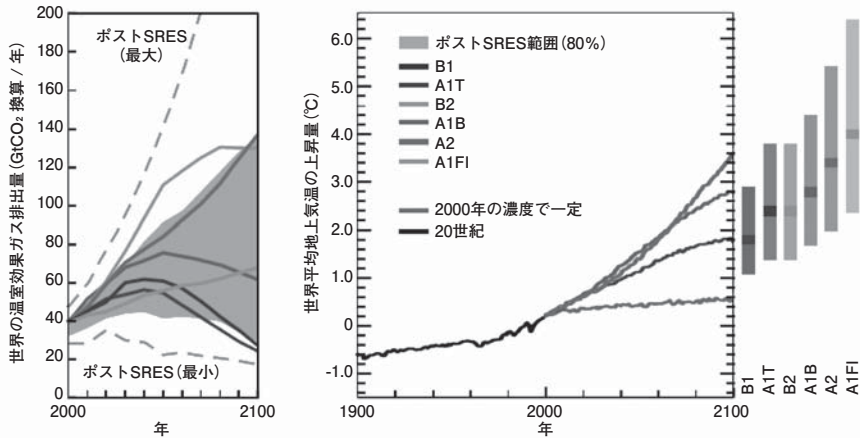


図2 2000～2100年の温室効果ガス排出シナリオ（追加的な気候政策を含まない）及び地上気温の予測
 出典：http://www.env.go.jp/earth/ipcc/4th/interim-j.pdf

ここでもう1つ重要な着目点がある。それは、中国とインドの排出量である。WORLD ENERGY OUTLOOK 2007の予測によれば、図3に示しように、中国とインドの2005年から2030年におけるCO₂排出量は、1900年から2005年の排出量を大きく上回り、1900年以降の累積排出量でも先進国に匹敵するとの予測が出ている。

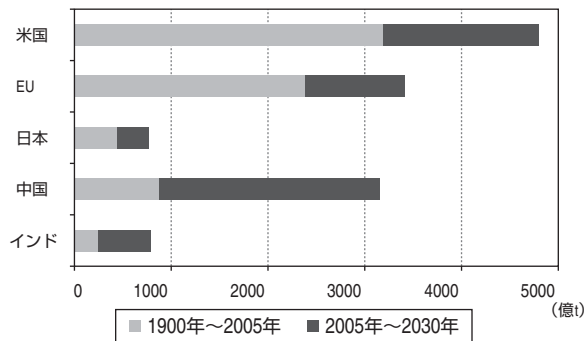


図3 エネルギー消費による累積CO₂排出量
 出典：World Energy Outlook 2007

(2) IPCCによる被害の想定

IPCC（気候変動に関する政府間パネル）が2007年（平成19年）に取りまとめた第4次評価報告書によると、世界平均地上気温は1906～2005年の間に0.74（0.56～0.92）℃上昇し、20世紀を通じて平均海面水位は17（12～22）cm上昇している。また、最近50年間の気温上昇の速度は、過去100年間のほぼ2倍に増大しており、海面上昇の速度も近年ではより大きくなっている。

また、同報告では、世界全体の経済成長や人口、技術開発、経済・エネルギー構造等の動向

について複数のシナリオに基づく将来予測を行っており、1980年から1999年までに比べ、21世紀末（2090年～2099年）の平均気温上昇は、環境の保全と経済の発展が地球規模で両立する社会では、約1.8（1.1～2.9）℃とする一方、高度経済成長が続く中で化石エネルギー源を重視した社会では約4.0（2.4～6.4）℃と予測している。

今後、気温上昇によって生じる自然および人類の環境への影響は次のように纏められている。

- ・水資源の大幅な増減、雪解け水の減少。
- ・1.5～2.5℃の平均気温上昇により、約20～30%の種の動植物が絶滅の危機に瀕する。
- ・1.5～2.5℃を超える上昇幅では、生態系の構造や機能に大きな変化が予測される。これにより、水や食料の供給などにも悪影響が予測される。
- ・海洋の酸性化の進行により、珊瑚や貝類、さらにそれらに依存する種に悪影響が予測される。
- ・食料、繊維、森林資源、海岸地域や低地、工業、居住、社会、健康への悪影響。
- ・1～4℃の平均気温上昇により、数世紀または数千年の間に4～6mまたはそれ以上の海面上昇がおこる（中程度の信頼性）。グリーンランドや西南極氷床が完全に融解した場合、それぞれ7mおよび5mの海面上昇を起こす。
- ・気候変化による被害は重大なものになり、時間と共に増大する可能性が高い。
- ・2～3℃を超える平均気温の上昇により、全ての地域で利益が減少またはコストが増大する可能性がかなり高い。

日本においても、気候の変動が生態系、農業、社会基盤、人の健康などに多大な影響を与えることが予想されている。

(3) 地球温暖化等による甚大な被害予測

国連環境計画（UNEP）は、洪水や巨大台風など、異常気象による被害額が近年、増加傾向にあり、地球温暖化がこのまま進めば、2040年ごろには年1兆ドル（約118兆円）を超える可能性があるとして、ナイロビでの地球温暖化防止条約締約国会議で発表した⁸⁾。この報告書によると、損害保険金の支払額などから推定した世界の自然災害による被害額は1950年から2005年までの間、年6%ずつ増加する。また、平均気温は、2040年ごろには少なくとも現在より0.6度上昇して巨大台風や洪水、干ばつなどが増加し、被害額は1兆ドルを超える可能性があるとして推定している。

イギリス政府では、現状のままで推移すると地球の温暖化ガス排出量が2035年には2倍に膨らみ、干ばつなどで世界全体で国内総生産（GDP）の20%相当が失われるとする報告書をまとめている⁹⁾。この報告書によれば、対策を講じなければ、干ばつや海面上昇で2億人が難民となり、世界全体で一人当たりの消費が5～20%落ち込むと分析している。経済への影響は従来予想より大きく、20世紀前半の大恐慌並みになるという。

4. 地球資源の有限性の認識

(1) ピークオイル

世界の産油国の可能な石油生産量（在来型石油）に関してピークオイル仮説が議論されている。仮説は、地質学者の M. キング・ハバートが提唱した資源枯渇曲線が発端となっており、生産量がまもなく限界、すなわちピークオイルに達し、その後生産量は減少の一途を辿らざるを得ないとする主張である。

米国地質調査所の採掘可能な石油資源を 2.2 兆～3.9 兆バレルの間とする推計と、EIA による世界の石油需要の年率 2% 増とを組み合わせた試算の結果で、計算上ピークオイルは実際に採掘可能な石油の量により、2026～2047 年の間に起きるとしている¹⁰⁾。やや保守的なほか予想でも、ピークオイルは 21 世紀前半に訪れるとされており、世界的な消費増大により、ピークを超えたあとの曲線が急速に低下することがわかる。

世界の石油資源量を 3 兆バレルとした米国地質調査所（USGS）の評価は、いわゆる資源楽観論の代表的なもので、IEA、EIA はじめ多くの公的機関が採用している見解であり、各国政府もこれをほぼ前提とした政策を立案しているものと解されている。しかし、このような楽観論をもってしても、ピークオイルは高々 30 年程度延期されるに過ぎない。そして、この 30 年は、人類にとって持続的なエネルギー源を確保するための猶予期間と認識しておくべきであろう。

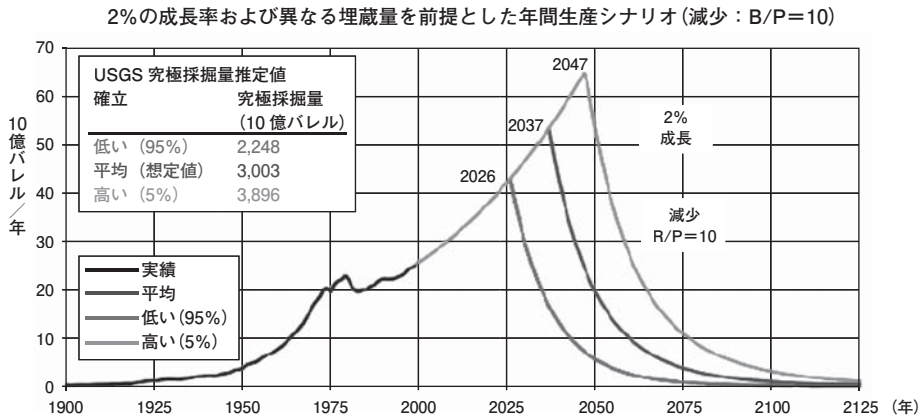


図 4 EIA によるピークオイルシナリオ¹⁰⁾

出典：EIA

注：世界合計を算出するにあたり、米国埋蔵量を USGS の海外埋蔵量に足している

ASPO (The Association for the Study of Peak Oil and Gas) は¹¹⁾、世界の石油生産のピークは 2006 年頃を想定している。米国（アラスカ、ハワイを除く 48 州）や欧州の減退は現実の傾向を示していると言えるが、ロシアも、大水深域も、更には中東までもが 2000 年代後半には一斉に石油生産の減退期に入るとされている。

(2) 環境収容力を超えているエコロジカル・フットプリント¹²⁾

エコロジカル・フットプリントとは、人間経済活動による資源再生・廃棄物浄化サービスに対する需要量に着目し、その需要量を生態系が持続的に満たすと仮定した場合、必要とされる生態系面積の合計（陸上の土地面積ばかりでなく海洋・湖沼などの水域面積も含める）となる。需要サイドの面積が、供給サイドの面積（バイオキャパシティ、生物生産力、Biocapacity）を超えていれば、生態学的な意味での持続可能性が達成されていないことになる。

EF は次の面積で計算される。

- ①「農地」（食糧、飼料、タバコ、イグサ、綿花などの生産のために必要とされる土地）
- ②「牧草地」（牧草、羊毛などの生産のために必要とされる土地）
- ③「森林地」（家具、建材や紙製品など生産のために必要とされる土地）
- ④「エネルギー地」＝「CO₂ 吸収地」（化石燃料燃焼からの CO₂ を吸収するための森林地）、または、「バイオマス代替燃料生産地」＋水力発電のための「貯水区域面積」。原子力発電については化石燃料に代替して発電した場合の CO₂ 吸収地として計算
- ⑤「生産能力阻害地」（道路・建物・廃棄物処分場、金属資源採掘現場など生産可能地の生産を阻害している土地）
- ⑥「海洋・淡水域」（魚や海藻を産み出す海洋河川湖沼等の水域）

人類全体のエコロジカル・フットプリント総計は 2005 年には、175 億 gha となっており、地球の生産可能な土地面積（生物生産力）を約 29% 上回っている。人間のエコロジカル・フットプリントが、1 人当たり 0.6 グローバル・ヘクタールも地球の生物生産力を上回った。人類の経済活動を支えるためには地球 1.3 個分が必要である。そのうち、エネルギー・フットプリントは、91 億 1000 万 gha で、全体の 52% を占めている。農地・牧草地・森林のなど農林資源の消費のエコロジカル・フットプリントは、73 億 4000 万 gha であり、全体の 42% であった。生産能力阻害地は、4 億 4000 万 gha で、全エコロジカル・フットプリントの 3% 程度である。

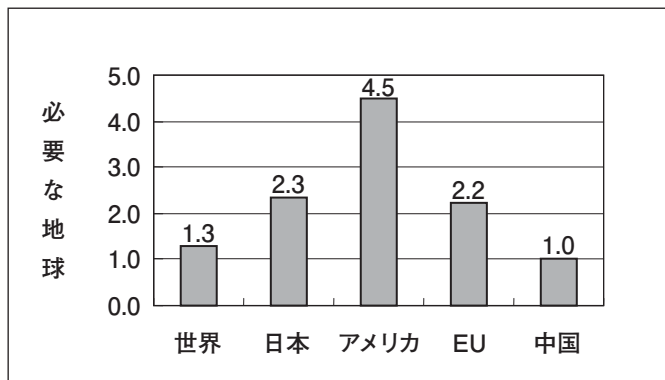


図5 各国のエコロジカル・フットプリントからみた必要な地球
 出典：LIVING PLANET REPORT 2008 より作成

人類のEFの世界総計は、1980年代後半から、地球の限界（世界生物生産力）を超え、年毎に増え続けている。より具体的には、1987年時点で人類のEFは、113億3000万ghaとなり、世界の総生物生産力を約3%超えた。その超過分、すなわち「生態学的赤字」はますます拡大し続けて、2030年には100%の超過になり地球がもう一つ必要となる。

国別にみると、1人当たりのエコロジカル・フットプリントはアメリカの9.4ghaで、全世界の人がアメリカ人のような生活をする、地球は4.5個必要になる。日本は2.3ghaで、同様に、地球が2.3個必要になる。中国は2.1ghaで、現在の地球の持っている生産力水準と一致しており、中国のような暮らしであれば全世界の人が暮らせることになる。しかし、大半の国々は全世界の平均値を下回っており、貧しい生活をしていることなる。

(3) 地球資源の有限性

ドネラ・H・メドウズ、デニス・L・メドウズ、ヨンゲル・ランダース他は、「成長の限界」：大来佐武郎監訳（1772年5月）、「成長の限界 限界を超えて」：茅陽一監訳（1992年12月）、「成長の限界 人類の選択」：枝廣淳子訳（2005年3月）と3冊の本を出版している。これらの本はどれも幾何級数的な成長で地球の環境容量の限界を超えてしまうというのが主たる主張である。

このうち2冊目では、1冊目の結論を次のように次のように補強すべきとしている。

人間が必要不可欠な資源を消費し、汚染物質を算出する速さは、多くの場合にすでに物理的に持続可能な速度を超えてしまった。物質およびエネルギーのフローを大幅に削減しない限り、一人当たりの食料生産量、およびエネルギー消費量、工業生産量は、何十年か後にはもはや制御できないようなかたちで減少するだろう。しかし、こうした減少も避けられないわけではない。

持続可能な社会は、技術的にも経済的にもまだ実現可能である。持続可能な社会は、絶えず拡大することによって種々の問題を解決しようとする社会よりも、はるかに望ましい社会かもしれない。

3冊目では2冊目で指摘した限界を超えたことが多くのデータで立証されたことを示し、対応してもその効果が十分に現れずそのまま崩壊につながる場合と、効果が現れて崩壊に至らず持続可能な状態を維持できる限界値に再び戻る場合があることを述べ、まだ間に合うから持続可能な社会を目指そうと再び訴えている。

この説明のために、前項で述べたエコロジカル・フットプリントを用いて予測している。世界が必要とする穀物、飼料、木材、魚などの資源を提供し、二酸化炭素の排出を吸収するために必要な土地の面積をエコロジカル・フットプリントと定義し、その量は人間が利用できる土地の面積を既に20%も超えていることを示している。

これらは、基本的にはシステム・ダイナミクスを適用したモデルで検討されており、再現性は確保されていると主張している。世界モデルによる予測結果は10数個あり、様々な対応・対策をすれば破局から逃れられると述べている。

このように予測前提の設定によっては、今のままのライフスタイルを続けると地球は破局するという結果になり、対応をすれば地球は定常的な安定に向かうという結果もだせる。今、言え

ることは、少なくとも幾何級数的な生産と消費を続けることに大きな警告を出しているのだと思われる。

5. 環境保全と経済の統合は可能か

(1) 環境効率指標の盲点

環境効率は1992年にWBCSD (World Business Council for Sustainable Development) が概念を提示したもので、より少ない環境への影響でより多くの価値を創造すること (less impact, more value) である。また、OECDは1998年にエコ効率を提案した。エコ効率とは、人間の欲求を満たすために有効に用いることができる生態資源の効率性を表している。これは産出を投入で除した割合と考えることができる。

環境効率は環境と経済のバランスを考えた指標であり、いづれにしても、環境の評価と経済の価値が1つの式で捉えられることになった。

環境効率とは次式のように表される。

環境効率 = 経済価値 (GDP、生産額、売上げ高など) / 環境負荷 (エネルギー消費、CO₂排出量など)

この環境効率は図6に示すように、ある国の一定期間 (i時点からi+1時点) における環境負荷 (L) の変化 ($\Delta L = L_{i+1} - L_i$) と経済価値 (V) の変化 ($\Delta V = V_{i+1} - V_i$) による環境効率の向上 (傾きの変化 = E_{i+1} / E_i) と表され、経済価値と環境負荷の2軸で表現される¹³⁾。直線の傾き (V / L) が、環境効率の値となる。環境負荷 (L) と経済価値 (V) の交点であるA点 (i時点) からB点 (i+1時点) への変化にともない、i時点の傾き ($E_i = V_i / L_i$; 直線OA) よりもi+1時点の傾き ($E_{i+1} = V_{i+1} / L_{i+1}$; 直線OB) が高くなれば、環境効率は向上したことになる。逆にi時点より傾きが下がれば、環境効率は低下したことになる。

この環境効率の変化のパターンは図7に示すように6種類ある。I、II、IIIパターンは環境効率が向上することになり、IV、V、VIパターンは環境効率の悪化を示す。私たちはこの6つのパターンのうちいずれを選択するかが問われてくる。環境効率が改善されるI、II、IIIをみていこう。パターンIは、環境負荷 (L) が減少し経済価値 (V) が増加しているため、環境効率は大きく上昇することになる。II、IIIパターンは、環境負荷 (L) と経済価値 (V) の増減が互いに逆方向となるが、いずれも環境効率は改善している。これまでの議論では、パターンIが最も良いものと評価されてきた。経済価値が伸びる、かつ環境負荷が低下することになり、最も良さそうに見える。

しかし、どこまでも経済価値の増大は続くのであろうか。もし経済価値を経済成長と置き換えた場合は、難しいものとなる。自動車のハイブリッド化、燃料電池など新エネルギーの開発、ペットボトルの小型化、家電のトップランナー方式、などなど技術がいくら進んでも需要を抑えなければならない。これらの総数、総量が増加すればするほど環境負荷を低減効果は薄れていくのである。地球上の資源・エネルギーにいつくるかはわからないが限界があるのが事実と

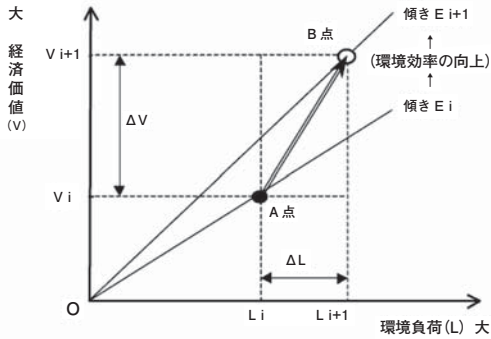


図6 環境効率の向上イメージ¹³⁾

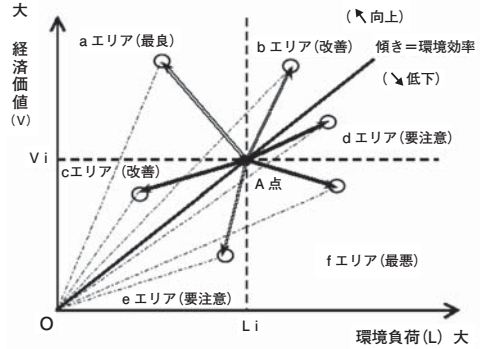


図7 環境効率の変化パターン（6種類）¹³⁾

すれば、定常状態に向かわなければならないのである。

この意味からは、地球規模での総量規制をかけた、気候変動枠組み条約の第3回締約国会議でCO₂の地球規模での削減目標を決定したことはきわめて大きな意義がある。ただし、目標数値は全世界で5.2%というのは少ないものでしかないが。今後は、この削減目標を大きな目標値としていき、定常安定化へ向かう道筋を探していくことになるであろう。

(2) エントロピーの法則

環境効率で計測したところで、資源・エネルギーへの限界に対する指標にはなりえない。ものを生産する過程で投入する資源・エネルギーと廃棄される不要物を同時に見るエントロピーの概念で見てみよう。エントロピーで環境・資源・エネルギーを論じたものには、資源物理学入門（1982年）、水土の経済学－エコロジカル・ライフの思想（1982年、1991年）、なぜ経済学は自然を無限ととらえたか（1995年）など、多くのものがある。

エントロピーには次に示す法則がある。

熱力学第1法則（エネルギー保存の法則）：宇宙の全エネルギーは一定であり、創生・消滅することはない。

石油を燃やせば、熱を出し二酸化炭素（CO₂）と水蒸気（H₂O）になる。これらは散らばるが天空を含めて地球上のどこかにある。なお、資源はエネルギーと等価とし、エネルギーに含めて考える。

熱力学第2法則（エントロピー増大の法則）：自然な過程では、エネルギーの価値は退化する方向すなわちエントロピーが増大する方向に進む。このことをクラウジウスが論証した。

石油を燃やしても、上記第1法則によりエネルギーの総量は変わらないが、石油としての直接的な利用価値は消滅する。このように、エネルギーの価値は、退化する方向に進み回復されることはない。

資源やエネルギーをはじめあらゆる物、地球すらも有限であり、すべては熱力学のエントロ

ピーの法則に従っている。この法則によれば、物質とエネルギーは1つの方向のみ、すなわち、使用可能なものから使用不可能なものへ、あるいは利用可能なものから利用不可能なものへ、あるいはまた、秩序化されたものから無秩序なものへと変化するというもので、宇宙のあらゆる物はこの法則に従っている。すなわち、万物はみなエントロピーが増大し、利用可能なものから利用不可能（カオス）なものへと移行するのである。

地球の全ての資源は、当初はエントロピーの低い状態で存在し、これに人為的な作業（新しいエントロピーの投入）により純粋化、精製し、物質の特定の性質が高められる。これを人間が使うことによって、よりエントロピーの大きな状態に移行する。エントロピーが大きくなり過ぎると、もはや現状の経済メカニズムでは回収できず、人間にとって無用の長物すなわち廃棄物となる。

このように常に地球上の行為は低いエントロピーを投入し続けて、高エントロピーを排出するのである。とすると、地球は破滅する、いわゆる熱死と呼ばれる状況になる運命にあるのだろうか。高いエントロピーから低エントロピーを生産することもある。植物の光合成による生命活動である。生命活動は物質代謝を行うことで、常にエントロピーを外部に放棄することで、生命を維持している。生物は低エントロピーの水や食料を取り入れ、高エントロピーの廃棄物や廃熱を放出することで、増大するエントロピーを捨てて自身を維持するのである。これらの廃棄物は熱エネルギーや堆肥やリサイクル素材などに変換されエントロピーの低い状態にされている。しかし、このリサイクルは永遠に続けることはできず、またリサイクルの過程でまた多くの資源を使用し、高エントロピーを発生することになる。結果としてやはり高いエントロピーを作り続けていることになる。

日本でのリサイクル量を見れば僅かに十数パーセントに留まっており、これを大きくする目標が掲げられているが、単純なりサイクルよりもっと違う方向も検討する必要もあろう。

また、地球は宇宙に開かれた系となっている。地球上での廃熱は宇宙空間に放出される。この開放系のお陰で地球の気温は 15℃ に保たれているのである。しかし、廃棄物は重力のため地球上に残る。廃棄物は微生物により分解さて、一部は気体になり、水の循環で上昇し、宇宙に排出されるか、焼却処分にして燃焼して、廃熱を宇宙に排熱するしかないのである

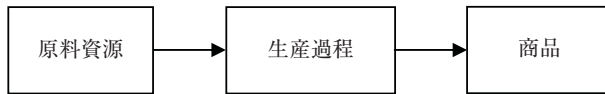
(3) エントロピーによる生産と廃棄の一体化

図8にエントロピー論による生産概念を示す¹⁴⁾。(a)の従来の生産概念は、原材料の原料資源から商品を取り出すという単純な生産概念を示している。原料資源は、人間の手にかかれば商品というより低い物質エントロピーの物質に生まれ変わるように見える。ところがここには重要なことが隠されている。(b)の鉄鋼生産における高エントロピー物質の発生を見ればわかるように、鉄鋼を生産するには鉄鉱石、石灰石、コークスを投入し、さらに電力、重油、淡水などの投入が必要となる。要するに、化石エネルギーなどの低熱エントロピー資源と淡水などの低物質エントロピー資源、つまりこれら低エントロピー資源の投入があってはじめて生産が可能となるのである。さらに重要なことは汚水、廃物など様々な環境負荷を与える高エントロ

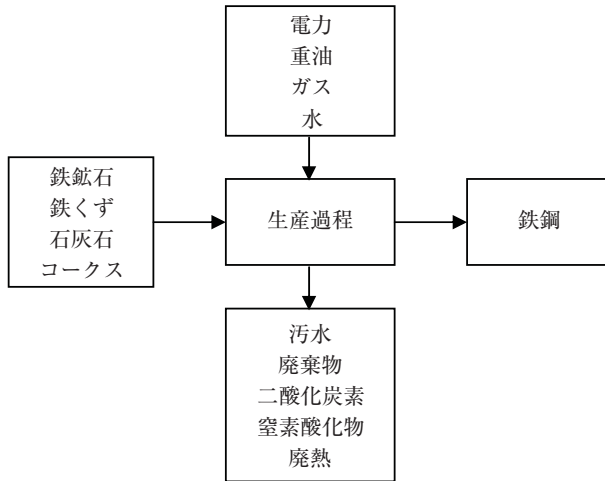
ピーな副産物が発生することである。これを一般化したものが (c) のエントロピー論による生産概念である。生産過程では実は低エントロピー資源を使っている。原料資源の方は商品として手元に残り、文字通りの消費のあと廃棄した時点で消費が完了する。

次に、廃物・廃熱に目を向けよう。環境負荷低減策の一つにゼロエミッションがある。これはある生産過程で排出された廃物・廃熱を別の生産過程で利用し、これらをゼロに近づけていく試みである。トータル環境負荷は減らせるが、低エントロピーを使用するので抜本的な対策とはならない。熱力学の法則を打ち破るようなシステムはないのである。

(a) 従来の生産概念



(b) 製鉄生産における高エントロピーの発生



(c) エントロピー論による生産概念

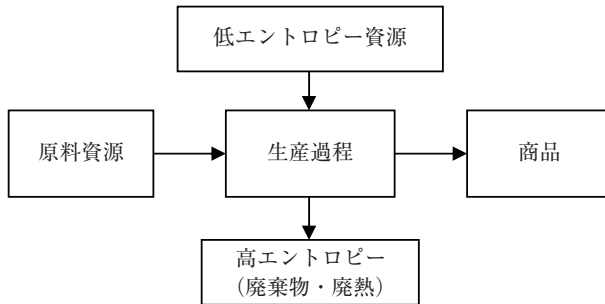


図8 エントロピー論による生産概念¹⁴⁾

循環型社会計画の目標数値である資源投入の入口部分の目標は、天然資源と輸入品目を合算して総資源投入量とされているが、材料・素材と半製品、完成済み製品はエントロピーから見れば全く別のものである。例えば、電化製品を中国で生産し、完成品を日本が輸入した場合、家電製品を生産する過程での材料投入や加工に伴う水やエネルギーの消費に伴う資源消費やエントロピー増大は中国国内で生じることになる。日本の場合は使用段階のエネルギー消費だけ生じることになる。

循環型社会計画による数値目標の算出には、見方によったら、システムの境界をどのように設定するかという問題が残る。全世界で見れば問題はないのであるが国別に見れば大きな問題が生じる。エントロピーのような環境負荷統計の場合、アジア環境圏域、ヨーロッパ環境圏域など新しい区分も必要になる。

(4) 過剰消費の対応策

エントロピーを生産過程に取り込んだ生命系の経済学がある¹⁵⁾。投入－産出過程は図に示すように2つの行程で形成されている。原料を投入して商品をつくるというポジティブな行程と廃物・廃熱という通常は市場には出回らないネガティブな行程があることを理解しなければならない。これまでに、みてきたような資源の多消費はポジティブな面だけに着目し、ネガティブな部分を無視してきたことがあげられる。商品を過剰に生産し、廃棄物を増大しつづけるような生産物のリサイクルをすることは、エントロピーを増大させることになり、結果として新規の原材料を投入することになる。

生命維持サービス供給能力と需要との均衡がとれているか、あるいは需要過剰（＝オーバーシュート）が発生しているかを判断するのが、エコロジカル・フットプリントである。

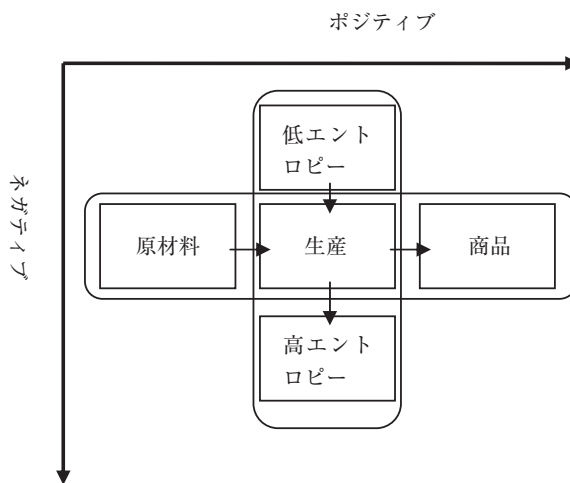


図9 生命系の経済学¹⁵⁾

オーバーシュートとは、環境収容力を超過して成長拡大した状態である¹⁶⁾。自然資本は減少し、環境収容力が減り、やがて自然所得も減少する。オーバーシュートの危険な点は、この状態の危険性が自覚され難いことにある。資源消費量が供給量上限（環境収容力）を超えても、危険を知らせるシグナルが微弱であるか、または顕在化するまでタイムラグがあるため、危険を感知することは難しい。しかし、オーバーシュートは、原資である自然資本を食い潰す過程であるため、生態系の崩壊（カタストロフィー）を引き起こす可能性がある。オーバーシュートの概念は、既存の経済学の学問体系や実務上の国民経済計算の中に存在していなかった。

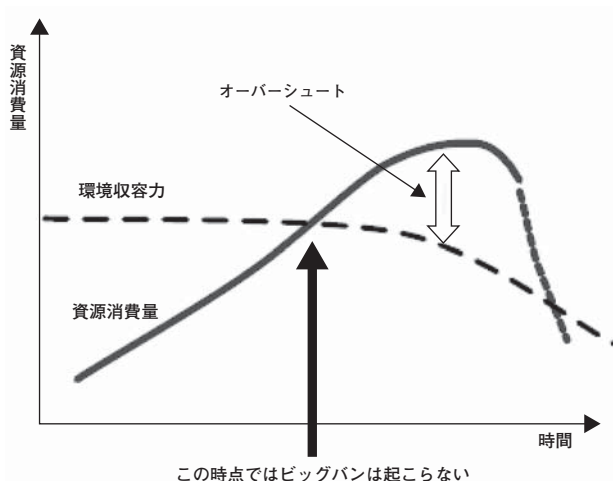


図10 オーバーシュートの概念図¹⁶⁾

これらの現象の原因としては、時間効率が第一に重視されていることがあげられる。ポール・ホーケンによれば¹⁷⁾、産業や商業の時間的枠組みが、地球や生物といった自然の時間的枠組みを抑圧したり、無視したりして暴走することが地球環境問題につながっているといえる。生態系には、生物時間の枠組みの中で物質を循環させるという物質循環があって生命を維持している。エネルギー消費、二酸化酸素の排出量などが爆発的に増加することで、生物時間枠組みが変調をきたしている。

このように地球資源の容量以上に需要があることは多くの推定値、予測値から想像できることである。当然、これらの予測には数々の批判があることも事実である。しかし、30年～50年という時間的オーダーで考えれば、限界に達することは間違いないものと思われる。ここで注意しなければならないことがある。予測はその多くが外れるという運命を背負っているということである。2100年までに気温が4℃上がるという予測結果があれば、そうならないように予測からはずれた行動を選択し、モデルにはなかった条件下での予測が必要になる。予測の逸話を一つ示しておきたい。馬、馬車による交通量を予測したときに、馬が道路いっぱいなり交通はきわめて困難になるというものである。結果はどうであったか。自動車交通になりかわって、馬車はほとんど無くなっていったというものである。

6. 維持可能な社会のイメージの形成

維持可能な社会の姿は、経済成長スピードが程ほどで、環境負荷が少なく、公平性で確保されたスローライフが主流な社会であるといえよう。問題はどれ程のスピードであれば、どれ程少ない環境負荷、どんな内容でどの程度の公平性が確保されれば良いのかを検討しなければならない。

維持可能性の現在ある定義や原則によれば、
ハーマン・デイリーは、次のように定義した、

- ①再生可能な資源の消費ペースは、その再生ペースを上回ってはならない。
- ②再生不能資源の消費ペースは、それに代わりうる持続可能な再生可能資源が開発されるペースを上回ってはならない。
- ③汚染の排出量は環境の収容能力を上回ってはならない。

公平性という点からは、持続可能な発展とは、次の3つの公平性の原則に基づく新たな発展経路を探る理念ということになる。

- ①世代間の公平性（現世代と将来世代）
- ②空間的／階層的公平性（途上国と先進国、都市と農山村、健常者と社会的弱者）
- ③生命的公平性（自然・環境価値の重視）

これらの全ての条件を満たす解を満たす社会を描くことができれば良いのであるが、このこと自体非常に難しくなる。ここでは、総量的な規制が公平なもつで実施されるという前提で考えてゆきたい。

例えば、CO₂排出量は図11に示す方程式で表現される。この式で左辺を何倍にするかによって、政策を示す右辺が決まるのである。

$$\begin{array}{l}
 \text{CO}_2 \text{ 排出量} = \boxed{\text{人口}} \times \boxed{\frac{\text{GDP}}{\text{人口}}} \times \boxed{\frac{\text{サービス需要}}{\text{GDP}}} \times \boxed{\frac{\text{エネルギー}}{\text{サービス需要}}} \times \boxed{\frac{\text{CO}_2}{\text{エネルギー}}} \\
 \boxed{\text{CO}_2 \text{ を 約0.3倍に}} = \boxed{\text{人口は 約0.7倍}} \times \boxed{\text{一人当たり GDP約2.7倍}} \times \boxed{\text{サービス産業化 需要減で約0.4倍}} \times \boxed{\text{エネ効率改善で 約0.7倍}} \times \boxed{\text{低炭素化で 約0.4倍}}
 \end{array}$$

図 11 CO₂ 排出量 70%削減を実現する各要素の関係
出典：国立環境研究所資料

今、仮に CO₂ の排出量を現状の 0.3 倍とした場合、右辺の掛け算の式のところも 0.3 となる必要がある。政策の方向を示す解として、現状に比べて人口は 0.7 倍、一人当たり GDP で 2.7 倍、サービス産業化需要減で 0.4 倍、エネ効率改善で 0.7 倍、低炭素化で 0.4 倍とすれば、左辺の 0.3 と等しくなる。

この一人当たり GDP、サービス産業化需要、エネ効率改善、低炭素化という項目をどの程度の意気込みで実施するか、予算はどうかなどを考慮して政策が決定されることになる。

これとは逆に CO₂ そのものを削減する方策を示す方法もある。

R.H. ソコロウ、S.W. パカラは CO₂ の削減計画において、今後の 50 年間に達成しなければならない総排出量を 1750 億トンと見越した将来のビジョンを描き、これを達成する 15 の削減メニューを表 3 に示している¹⁸⁾。これらのメニューは、個人や企業でのエネルギー効率向上・節約、発電、CO₂ の回収と貯留、代替エネルギー、農業と林業の 5 つの領域で、家庭やオフィス、商店での電力消費量を 25%削減する、20 億台の車の年間走行距離を半減させて 5000 マイル（約 8000km）にする（燃費は 1 ガロン当たり 30 マイルを想定）、森林伐採をすべて中止、太陽光発電を 700 倍にして石炭火力発電と代替、世界の耕作地の 1 / 6 を使用してバイオ燃料（エタノール）を生産し、20 億台の車を走らせる、などを示している。これらの 1 つのメニューで 50 年間に CO₂ 排出を 10 億トン（炭素換算）削減できる。これらのメニューがどう重なり合ってどんな社会になっているのかは示されていない。この論文の最後には、最も重要なことに、地球という惑星に生きているという意識が高まり、人類は国や人種を超えた運命共同体として、この惑星を共有することを学ぶようになるだろうと述べている。

表 3 二酸化炭素削減の 15 のメニュー¹⁸⁾

エネルギー効率の向上	20 億台分の車の燃費を現在の 2 倍の 25km/ リットルにする
	車 1 台当たりの年間走行距離を半減させ、8000km にする
	冷暖房や電気器具の効率を 25% 向上
	石炭火力発電の発電効率を 40% から 60% に向上
CO ₂ の回収・貯留	CO ₂ の回収・貯留システム（CCS）を石炭火力発電所 800 基または天然ガス火力発電所 1600 基に導入
	車 10 億台分の燃料を生産する石炭使用の水素工場に、CCS を導入
	1日48億リットルを生産する石炭使用の合成燃料工場に、CCSを導入
低炭素エネルギーへの転換	1400 基の大型の石炭火力発電所を、天然ガス火力発電所に転換
	原子力発電所の効率を現在の 3 倍にし、石炭使用の火力発電所を削減
代替エネルギーと自然界への再固定	風力による発電量を 25 倍に増加
	太陽光による発電量を 700 倍に増加
	風力による発電量を 50 倍に増やし、自動車用燃料電池の水素を生産
	世界の耕作地の約 6 分の 1 を使ってバイオエタノール燃料の生産を 50 倍に
	森林伐採の全面停止
	不耕起農法などの環境保全型農業をすべての農地に拡大し、土壌からの CO ₂ 放出を減らす

パカラ氏らが提唱した CO₂ を減らす 15 のくさび。くさび 1 個分は CO₂ 排出量を炭素換算で年間 10 億 t 削減する対策。2057 年までに現状の半分にするためには表のなかの 11 の対策を実行する必要がある

私たちは今後どのような社会で活動するのか、或いは作るのかが問われている。一人ひとり答えは異なるであろうが、この大きな政策の方向に合意しなければ何もできない。究極にはエコロジー社会主義により環境的な数値規制をかける環境絶対主義が基本的には自由経済主義の見えざる手に任せるのかの判断に迫られているようにも思える。

このどちらが良いかを判断をする前に私たちは私たち自身の夢と希望を語らなければならないと思う。そして社会的な合意を目指すべきであろう。

そのひとつの方法として、バックキャストイングを活用することが考えられる。バックキャストイング方法とは、将来の社会経済活動を支える地球環境に大変動が予測されるような場合、将来の持続可能な社会の姿を想定し、そこをベースとして現在を振り返り、想定され得る破局の回避のために、現在の段階からどのような取り組みが必要かを考えて政策を出していくのである。

環境省の循環型社会白書では¹⁹⁾、シナリオ A：極めて高度な工業化社会となることを想定している、シナリオ B：大量生産・大量消費・大量廃棄の暮らしではなく、多少の忍耐と努力が求められる社会に暮らしている、シナリオ C：環境効率性の高い社会で産業の高次化が進んだイメージである、という3つのシナリオを掲げており、このような社会での経済成長率、環境負荷などを算出して、私たちに選択肢を示している。

国土交通省では²⁰⁾、環境・農業を重視するシナリオ、東アジア経済発展シナリオ、多様性社会シナリオ、地域コミュニティ活性化シナリオの4つのシナリオを想定した将来像を描いている。

市民エネルギー調査会では²¹⁾、現状の社会イメージをゆでガエルとして、いきカエルときりカエルのイメージを設定して、将来のGDPやCO₂の発生量を予測している。いきカエルシナリオは、今日の社会経済の仕組みのもとで環境と経済の達成を目指す。このシナリオは、環境大国ニッポンと呼び、環境産業を次代の戦略産業とすることにより産業の空洞化を克服し、現在の経済・社会の仕組みの下で、経済の活性化と環境保全を同時に達成しようというものである。きりカエルシナリオは、社会経済パラダイムの転換を先取りした、時間の豊かな社会（スロライフ・ニッポン）である。

このように異なる社会イメージを巡っての好き嫌い、メリットとデメリット、実現可能性などの本音の部分の話し合い、選択のための条件をまとめ、進むべき方向性を定めていくことになる。科学的な情報提示と民主的な決定を同一空間で行うという社会実験となる。

7. おわりに

この論文では、人間の地球資源の利用・使用（地球から見れば人類への供給ということになる）実態を明らかにし、人間の需要のほうが供給を上回りつつあることを指摘した。さらに、環境負荷と経済成長は調和的に発展するという持続的発展のキー概念として用いられている環境効率の限界性を指摘した。環境効率は環境負荷と経済価値とを相対化したものであり、環境負荷の増大よりも経済価値の増大のほうが大きければ環境効率は大きくなる。絶対量そのもので評価しなければならない。環境負荷の絶対量の捉え方や評価はエントロピーの概念が有効である。

地球温暖化問題、ピークオイルなど資源・エネルギー問題、廃棄物問題など数多くの問題に対して身近な対策から全世界的な対応策まで提案されて来ている。私たちは政策効果と実現可能性を比較して対策を実施しなければならない。日本政府が2009年に約束した温室効果ガスの

削減目標は2030年に1990年比マイナス25%である。この目標数値は1970年水準と同じ程度となるという検討結果もあるという。この削減目標は極めて大きい数値であることは確かである。しかし、削減幅を全世界レベルで見れば、僅かに1%程度であることも事実である。

私たちは何を判断の基準にすればいいのか。少なくとも言えることは、今、意思決定し、行動し、決定しなければならない時である。猶予は許されないのである。

参考・引用文献

- 1) デニス・メドウズ他（枝廣淳子訳）：成長の限界 人類の選択、ダイヤモンド社、2005年
- 2) IPCC 編：IPCC 地球温暖化第三次レポート、中央法規出版、2002年
- 3) デニス・メドウズ他（枝廣淳子訳）：成長の限界 人類の選択、ダイヤモンド社、2005年
- 4) 世界銀行：World Development Indicators 2000
- 5) 日本エネルギー経済研究所：EDMC / エネルギー・経済統計要覧2009年版、省エネルギーセンター2009年
- 6) IEA：World Energy Outlook 2008
- 7) デニス・メドウズ他（枝廣淳子訳）：成長の限界 人類の選択、ダイヤモンド社、2005年
- 8) 日本経済新聞：2006/11/16
- 9) 日本経済新聞：2006/10/31
- 10) EIA：H. Wood, J.H., Long, G.R. and Morehouse, D.F. "Long-Term World Oil Supply Scenarios : The Future Is Neither as Bleak or Rosy as Some Assert" 2004
- 11) ジェレミー・レゲット（益岡賢他訳）：ピーク・オイル・パニックー迫る石油危機と代替エネルギーの可能性ー、2006年、作品社
- 12) WWF：Living Planet Report 2008
- 13) 川村雅彦：「環境経営指標」の時代へー環境負荷と経済価値のバランスから環境経営を評価ー、ニッセイ基礎研究所所報 Vol.26、2002年
- 14) 渡辺 雄二：エントロピー論による「生産」という言葉の考察と持続可能社会の展望、山形県立産業技術短期大学校紀要 No.8、2002年
- 15) 玉野井芳郎、生命系のエネルギー、新評論、1982年
- 16) WWF：Living Planet Report 2006
- 17) ポール・ホーケン、イマジンー未来への構想力、（非戦、坂本龍一監修、2002年、所収）
- 18) R.H. ソコロウ、S.W. バカラ、排出安定化15の糸口、日経サイエンス2006年
- 19) 環境省：循環型社会白書平成14年版、2002年
- 20) 国土交通省のホームページ
- 21) 市民エネルギー調査会：持続可能なエネルギー社会を目指してーエネルギー・環境・経済問題への未来シナリオー、2004年