

資源枯渇：もうひとつの脅威

青木 健 Takeshi Aoki

杏林大学総合政策学部 客員教授

(財)国際貿易投資研究所 客員研究員

IPCC（気候変動に関する政府間パネル）は地球温暖化に対する危機感をこれまででない調子で警告した。IPCC 第4次評価報告書で報告しているように、食糧資源や水資源はもとより生態系などへの深刻な影響を及ぼすためである。この主因は地球温暖化である。それをもたらす二酸化炭素（CO₂）の増加である。CO₂増加の地球や人類への影響はIPCCよりはるか前に論じられていた。それは1972年マサチューセッツ工科大学のドネラ・H・メドウズ女史率いるローマ・クラブが発表した『成長の限界』である。

『成長の限界』がもうひとつ指摘していた重要な問題がCO₂増加の影響と表裏一体である生活水準向上に伴う資源枯渇である。これをエコロジカルフットプリント（EF：Ecological Footprint）という観点から論じる。EFとは「世界が必要とする資源（穀物・飼料・木材・魚および都市部の土地）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である」。EFで示す面積と実際の面積を比較することによって、環境負担と資源消費水準の持続性を比較することができる。この指標によると、世界全体のEFは1980年代には既に環境容量を上回っており、2003年現在25%も超過している。世界中の人間が米国並みの生活水準となったら、地球は5.4個また日本並では2.5個必要になる。世界が早急に目指さなければならないのは「地球一個分の資源やサービスを前提とした」環境容量に合わせた世界の経済社会を再構築することである。

中国の台頭

2005年中国のGDP規模は2.25兆ドルとなり、フランスを抜き世界5位となる。輸出入規模では2004年にはともに世界第3位となる。1人当り所得も確実に上昇している。世界銀行によれば、1970年当時の中国は低所得国で、1人当りGDPはわずか130ドルでしかなかったが（日本は高・中所得国で1950ドル、米国は高所得国で4970ドル）。1979年に改革開放政策が採られる直前の1978年には379ドルとなり、その後高度成長を反映して2001年に1000ドルを超え、2004年には1486ドルとこれまでの最高となる。中国经济が今後も引き続き順調に推移していけば（年率8%成長）、1人当り所得水準は2031年には米国並みになると予測されている（注1）。もし米国と同様に、中国人4人のうち3人が車を持てば、総数は11億台になる。2003年現在の世界の総台数は8億4000万余である。さらに日量9900万バレルの石油が必要になるが、大きな増産は不可能かもしれない（レ

スター・ブラウン米地球政策研究所理事長）。紙の消費量は現在の2倍になる。地球上の森林は消滅に向かうだろう。世界の現在の穀物総収穫量の3分の2相当を推定14億5000万の中国人が消費することになる。

こうした状況は地球環境の悪化（CO₂の発生）や石油の枯渇などを想定させるものである。実はこれと全く同様な事態を想定させる状況が30年以上前にあった。第2次世界大戦後の復興を終え、1960年代を経て、1970年代初頭に至るまでの高度成長期を経験した特に先進工業国は大量生産、大量消費というライフスタイルを形成し、大量の資源を浪費した。こうした状況の中で、1972年マサチューセッツ工科大学のドネラ・H・メドウズ女史率いるローマ・クラブが発表した『成長の限界』である。同報告は次の3点を強調した（注2）。

1) 世界人口、工業化、汚染、食糧生産および資源の使用の現在の成長率が不変のまま続けば、来るべき100年以内に地球上の成長は限界点に到達するであろう。もっとも起こる見込みの強い結末は人口と工

業力のかかなり突然の、制御不可能な減少であろう。

2) こうした成長の趨勢を変更し、将来長期にわたって持続可能な生態学的ならびに経済的な安定性を打ち立てることは可能である。この全般的な均衡状態は、地球上のすべての人の基本的な物質の必要が満たされ、すべての人が個人としての人間的な能力を実現する平等な機会をもつように設計しうるのである。

3) もしも世界中の人々が第1の結末でなく第2の結末にいたるために努力することを決意するならば、その達成のために行動を開始するのが早ければ早いほど、それに成功する機会は大いであろう。

『成長の限界』が発表された翌1973年10月、第4次中東戦争勃発を契機にOPECが石油戦略を発動し、石油価格が急騰し世界的に石油の需給が逼迫した。資源制約から『成長の限界』が警告したことが身近な現実的なものと受け止められ、世界を震撼させた。

幾何級数的成長

1960年代世界経済は高度成長期にあり、「人口、食糧生産、工業化、汚染および再生不可能な天然資源の消費」すべてが増大しつつあった。その成長パターンは「毎年の増加が、数学者が幾何級数的成長と呼ぶ」ものである(注3)。それは「ある量が、一定期間に、一定量だけ増加している」線形的成長と違い、「ある量が、一定期間に、その総量に対し、一定の割合で増加する」成長である。これを理解するために、ある量が2倍になるのにどれくらいの期間が必要であるのかを以下の例でみよう。

年率平均成長率を x とする。ある量が2倍となるまでに n 年を要するとすると、両者の間に $(1+x)^n = 2$ と関係づけられる。 x と n 2つの変数の間に、近似的に $xn=70$ という関係が成立する(表1)。倍増に関する卑近な例として銀行預金がある。預金金利が年率7%で100ドル預金すると、複利計算で10年後には200ドルとなる。年率成長率が0.1%の場合、ある量が2倍になるのに、700年を要する。経済成長率が7%だと

すると、経済規模が2倍になるのは10年後である。1960年代「所得倍増計画」を掲げた日本の経済成長率は年率10.2%という高いものであった。日本は10年を経ず経済規模を2倍にしてしまった。1968年日本のGNP規模は資本主義諸国のうちで米国に次ぐ第2位となった。現在、1960年代の日本経済と同様に速い成長を遂げているのが中国である。中国の平均経済成長率は1980年代9.7%、1990年代10.0%に高まり、2004年には10.1%を記録した。

高度成長の1960年代を通じ、工業化は進展し、食料生産も増加した。世界全体で経済成長率は年率6%（実質）、人口増加率は2.0%であった。1人当たりGNPの増加率は年率3.9%である。高まる生活水準を支えるにはエネルギーが必要である。『成長の限界』は1人当たりGNPと1人当たりエネルギー消費量はかなりよく相関し、全体として、両者の関係は直線的である（注4）。1970年までのデータによると、「世界の1人当たりエネルギー消費量は年1.3%の率で上昇しており、それは人口成長を含めた総量では、年平均3.4%で増加してい

ることを意味する」（注5）。これを表1の「倍増期間」でみると、21年で世界全体のエネルギー消費量は2倍になるということである。『成長の限界』発表当時、「工業用エネルギー生産の97%は、再生不可能な天然資源である化石燃料（石炭、石油、天然ガス）の使用であった（注6）。実際の化石燃料を起源とする世界全体の産業の最終エネルギー消費量は、1971年の1460百万トンから2000年の2145百万トンを経て、2003年には2223百万トンになった。これの1971年から2003年までの年率増加率は1.3%である。その他のエネルギー起源を含む世界全体の最終エネルギー消費量は1971年の3641百万トンから2003年には6484百万トンになり、これの年平均増加率は1.8%である（注7）。この間の世界の人口増加率は約1.6%であるので、1人当たりの最終エネルギー消費量の増加率はわずか0.2%であるということである。これは1971年までの1.3%を大きく下回り、世界全体で省エネルギーが強力に推進されたことを証明するものである。

しかし化石燃料が燃焼されると、

他の物質とともに二酸化炭素（CO₂）が放出される。これらは環境を汚染させる物質で特にCO₂は地球温暖化の最大要因である。CO₂排出量は幾何級数的に増加しており、例えば1950年から2002年にかけて、人為的CO₂は年率2.8%のスピードで排出されている（注8）。幾何級数的増加の意味の全地球に及ぼす影響を論じる前に、それに関する要因をみよう。

以上の変化は基本的には経済と人口成長によってもたらされたものである。産業革命以前の世界のGDP成長率は極めて緩慢なもので、表2によれば、年率0.33%で、1人当りGDPに至っては0.04%である。これは、表1でみた倍増期間によれば、生活水準が2倍になるには1750年かかる。これは、その時代に生きた人間は生涯生まれた時のままの生活水準であったということである。今日は昨日の繰り返しであり、それが一生続いたということである。もし人生50年であったらならば、同じ生活水準が35代にわたって続くことになる。1820年以降1人当りGDP成長率は1.21%に高まるが、それでも

生活水準が2倍になるには約58年かかる。これは生涯をかけた時間に相当する。世界の1人当りGDPの成長率をもう少し期間を区切ってみると、1950-70年2.87%と高まるが、2つの石油危機があった1970年代を挟み1970-98年には1.43%に低下する。しかし1900-98年平均では1.53%になる（注9）。

1人当り所得水準の向上に伴い人口が増加する。さらに生活水準が向上すると、死亡率が低下し、人口が一層増加する。歴史的観察から、長期人口動態は出生率と死亡率の差である自然増加率から、4つの局面を迎える。第1段階は多産多死である。これは社会経済的発展が生じない、例えば産業革命以前では常態であった。第2段階は多産少死である。この段階は、生産力の増強とこれによる所得の向上で、栄養と住環境さらに医療技術の改善などにより死亡率が低下するが、出生率は余り低下せず、自然増加率が最も高いものになる。死亡率の低下に遅れて、出生率が低下し始めるのが、第3段階である。このラグは出生に関する人々の考え方や、その社会の歴史的慣行な

どを反映するからである。第4段階は、第3段階をさらに発展させた少死少産型で、自然増加率は低くなり、人口ゼロ成長に近い状況になる。先進国はほとんど全てこの段階にあり、東アジアの一部諸国も突入しつつある。

第2次世界大戦後の世界の人口増加率は1950-60年1.8%、1960-70年2.0%、1970-80年1.9%、1980-90

年1.7%、1990-2000年1.4%へと低下しつつあるものの、「それを上回る速度で人口基盤が拡大する」(注10)。そのため人口総数自体は増える。世界の人口は1950年の2524百万人から1990年5282百万人と2倍を経て、2000年6055百万人になった。米国商務省の推計によると、2006年の世界の総人口は約65億人に達し、20年後には79億人になるという。

表1 倍増期間

成長率 (年、%)	倍増期間 (年数)	xn
0.1	700	70
0.5	140	70
1.0	70	70
2.0	35	70
4.0	18	72
5.0	14	70
7.0	10	70
10.0	7	70

(注) 数学的に厳密的に計算すると、例えば成長率5%の場合14.2年、10%の場合7.3年となる

表2 世界経済の平均成長率

(単位: %)

項目	1500-1820年	1820-1992年
世界の人口	0.29	0.95
1人当りGDP	0.04	1.21
世界のGDP	0.33	2.17
世界の輸出	na	3.73

(出所) アンガス・マディソン『世界経済の成長史 1820~1992年』東洋経済新報社、2001年、6ページ

フィードバック・ループ

人口増加率が低下しているにもかかわらず、総人口が増加するのは「正のフィードバックループ」が作用して、幾何級数的増大をもたらしているからである。「現在の人口が多ければ多いほど、生まれる子どもの数も多くなる。生まれる子どもの数が増えると、人口もそれだけ増加する。この子どもたちが成長して親になるまでの時間がたつと、彼らからさらに多くの子どもが生まれる。こうして人口は膨張を続ける」（注11）。「正のフィードバック・ループ」とは、「それ自体で閉じた因果関係の連鎖であり、したがって一つの要素に変化が生じると、まわりまわって、もとの要素を同じ方向にさらに変化させる。増加はさらなる増加を生む」。つまり「グループ全体の因果関係の方向を強化する」ということである（注12）。『成長の限界』は幾何級数的に成長するもうひとつ「工業資本」があると指摘する。資本は機械や工場を生産する。人口と「工業資本」を生産要素（投入物）とみれば、それを投入して生産物を生産するとい

う一種の世界規模大の生産関数とみなすことができる。生産物の増加は世界の経済成長率に象徴される。

何も制約がないと「正のフィードバック・ループ」は無限に幾何級数的成長を続ける可能性があるが、これを「打ち消す、ないしは逆転させる」あるいは制約するように作用する要因が世界に内在する。生産要素投入の過程で、環境の汚染、天然資源の枯渇、廃棄物、飢餓、CO₂が生じる。これらが「負のフィードバック・ループ」として作用する。つまり「成長がシステムの究極の限界すなわち生命維持能力の限界に近づくにつれ、しだいに強くなる。最後には、負のグループが正のグループとバランスするか、あるいはこれに打ち勝って成長は終わりを告げる」（注13）。それは地球という閉じられたシステムはどのようなものであっても、「衰退する可能性のある限界、止むことのない成長の追求、そして近づく限界に対する社会の反応の遅れ」という3つの特徴を内在させており、「行き過ぎて崩壊する可能性がある」（注14）。上記3つの特徴を幾何級数という概念をコアに「正負のフ

ィードバック・ループ」と表現したのが「ワールド 3」というモデルである。

「正負のフィードバック・ループ」および人口、資本、食糧、天然資源、汚染という 5 つの基本的な数量または水準をベースに「世界モデル（ワールド 3）」を作成し、地球規模大の世界の将来を展望したのが『成長の限界』である。「世界モデル」は世界システムの発展を支配してきた物理的、経済的、社会的関係に大きな変化がないと仮定し、1900 年から 1970 年までの実際のデータから予測に必要なパラメータを計測し、5 つの基本的な数量がこれまでと同様のテンポで 2100 年まで推移するとしてみたのが「標準計算」（スタンダード・ラン）で、その結論が冒頭で紹介した 3 点である。再び『成長の限界』から引用（107-108 ページ）すると以下のとおりである。

破局は、再生不可能な天然資源の枯渇によって発生する。工業資本ストックは、資源の莫大な投入を要求するほどに成長している。その成長過程自体で、使用可能な資源埋蔵量の大部分は、底をついてしまう。資

源の価格が上がり、資源が底をつくにつれ、資源を得るために、ますます多くの資本がつぎ込まれなければならない。将来の成長のために、投資する余裕はなくなってしまう。遂に、投資は資本の減耗に追いつかなくなり、産業の基盤が崩壊し、それとともに、工業からの投入物（化学肥料、殺虫剤、医療設備、コンピュータそしてとくに、機械化のためのエネルギー）に頼るようになっていくサービスや、農業システムを巻き添えにする。年齢構造と、社会適応の過程につきものの時間的遅れのために、人口は増え続けるので、短期間のうちに事態はとりわけ深刻なものになる。食料不足と健康維持のためのサービスの不足によって、死亡率が引き上げられて、人口は遂に減少する。

『成長の限界』では、1900 年から 2100 年までの発展を示す 12 のシナリオを分析しているが、当時天然資源の枯渇が強く意識されていたということで、技術の新しい発見や発展で、経済的に利用できる資源の量が倍増された場合（『成長の限界』図 36）と天然資源が「無制限」のケー

ス（同図 37）を仮定したシミュレーションをみよう。前者は他の仮定を「標準計算」と同じくし、1900年の資源埋蔵量を2倍にした。資源消費は急激に減少しないので、工業化はもっと高いレベルに到達できる。しかし高い工業化は高率の汚染をまきちらし、環境の汚染吸収機構は飽和してしまう。汚染は、死亡率の直接的な増加と食糧生産の減少を起しつつ急激に増加する。資源は利用可能性を2倍にしたにもかかわらず、遂に枯渇してしまう。後者の資源枯渇は2つの仮定で解決される。第1は「無制限」の核エネルギーで開発可能な資源が2倍になり、第2は核エネルギーにより広範囲な資源の再循環と代替が可能になる。こうした仮定でも前者と同様に汚染の増大により、成長が止められる。

1991年に発表された『限界を超えて』は、フィードバックを考慮した非線型性に加えて一定時間内に処理されるものの量を示す重要な概念であり同時にツールである「スループット」を導入している（注15）。それは原料やエネルギーの供給（「ソース」）の生産物からその廃棄物や汚染

を吸収（「シンク」）するフローの過程である。しかし生産物の供給および吸収ともに限界がある。前者の限界とはエネルギーと原料を利用できる量と速度である。後者の限界とは生産物が最終消費として吸収できないこと、およびその結果発生する廃棄物と汚染である。特に「汚染水準があまりにも高くなりすぎると、自然の吸収機能自体が損なわれ汚染の蓄積速度にいつそう拍車がかかる」

（注16）。『成長の限界』が発表された1970年代初頭には、汚染吸収システムの損傷を裏づける証拠はほとんどなかった。当時想定されていたことのひとつは温室効果ガスの増加で、森林の死滅でCO₂の主要なシンクの減少であった（注17）。しかし『成長の限界』から『限界を超えて』までの20年間に、「地域レベルでは、砂漠化、鉱物や地下水の枯渇、残留期間の長い有害廃棄物による土壌や森林の有毒化など」、地球規模では、「気候を調節し、水や空気を浄化し、バイオマスを再生し、多様性を守り、廃棄物を守り、廃棄物を栄養素に転換させる自然の大きな維持サイクルを崩壊させかねない」などが進行し

た。これらはいずれも「行き過ぎから破局へのプロセスとみることができ(注 18)。これは現実のシステムはそれを進行させる傾向があるからである(注 19)。

資源の採取や汚染の排出が持続不可能なペースで行われている時点で、人口と経済は行き過ぎの状態にある。ただそれを減速させるほど、地球の維持システムへのストレスが強くないだけだ。「行き過ぎ」が起こるのはフィードバックの遅れに原因がある。つまり、限界を「行き過ぎた」という情報が、行き過ぎてからかなり経つまでシステム内の政策決定者たちに届かないか、あるいは、彼らが情報を信じてそれに基づいて行動しようとしないうちに原因がある。そして行き過ぎの最後の原因は成長である。最終的に行き過ぎ状態を破局に至らしめるのは、非線形的性質に促された侵食作用である。侵食作用とは、システムへのストレスであり、早急に治療されない限り自ら増殖する。

「ワールド3」に「行き過ぎ・破局」の傾向が強いのは次のような仮定に基づいているからである。先に指摘

したが再び挙げる(注 20)。1) 人口・経済の成長が幾何級数的であるからである。2) 人口と経済を維持する原料とエネルギーのソースの物理的限界、人間の活動が生み出す排出物を吸収するシンクにも限界があること。

『成長の限界を超えて』でも「ワールド3」を若干バージョンアップかつ『成長の限界』が1972年に発表された以降地球に関するデータの蓄積、20年間に学習したことを反映させて13のシナリオを提示している。条件を様々変えて13のシナリオを検討した結果、『限界を超えて』も『成長の限界』で導き出した結論は現在でも有効であるとしつつも、それを補強する必要があるとし、以下のよう書き換えた。

1) 人間が必要不可欠な資源を消費し、汚染物質の産出速度は、多くの場合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、1人当たりの食糧生産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かたちで減少するであろう。

2) しかしこうした減少も避けられないわけではない。ただし、そのためには2つの変化が要求される。まず、物質の消費や人口を増大させるような政策や慣行を広範にわたって改めること。次に、原料やエネルギーの利用効率を速やかに、かつ大幅に改善すること。

3) 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。持続可能な社会に移行するためには、長期目標と短期目標のバランスを慎重にとる必要がある。また、産出量の多少よりも、十分さや公平さ、生活の質などを重視しなければならない。それには、生産性や技術以上のもの、つまり成熟、憐れみの心、智慧といった要素が要求されるだろう。

「均衡状態の世界」(注21)

行き過ぎや破局を防ぐために、『成長の限界』は様々な異なる条件のシミュレーションを検討した結果、次

のようにいう。1) 人口の安定化だけでは不十分である、2) 資本を一定に押え人口の増加を許すような計算でもやはり不十分である、かくして3) 「両方の」正のフィードバック・ループを同時に制御下に置くことである。つまり人口は出生率と死亡率に、資本はその減耗率に、それぞれともに等しくするということがある。そこで『成長の限界』は、1) 1975年以降出生率と死亡率を等しくする(図44)、2) これに加えて資本の投資率と減耗率を等しくする(図45)、3) 成長抑制政策に技術政策を追加(図46)、4) 以上の条件に産児制限と子供2人という家族構成を1975年に達成するなどという様々な条件を追加して、将来展望をシミュレートしている。

その結果によると、成長制約条件が強いほど1人当たり工業生産と1人当たり食糧は高まる一方、資源は下降テンポに違いがあるが、いずれも枯渇するようになる。上記1)と2)のような人口と資本が一定の状態を『成長の限界』は「均衡」と称する。つまり均衡とは、「相反する力がバランスしたあるいは等しい状態を意味

する。世界モデルのダイナミクスにおいて、相反する力は、人口と資本ストックを増加させる力（望ましい家族規模が大きいこと、産児制限の効果が低いこと、資本投資率が高いこと）と、人口と資本ストックを減少させる力（食糧不足、汚染、資本の減耗あるいは陳腐化の率が高いこと）である（注22）。『限界を超えて』でも『成長の限界』以降の変化を導入して「正のフィードバック・ループ」と「負のフィードバック・ループ」のバランスがとれた「均衡状態」の達成が可能であるという。それは「人口と工業生産の安定化に加え、汚染排出、土地の侵食、資源利用の削減に関する技術を1995年に取り入れた場合」（シナリオ10）である。これによると2100年までの世界は以下のようなものである（注23）。

「シナリオ10」の人口は80億人弱で安定化し、ほぼ一世紀のあいだ望ましい物質的な生活水準で暮らす。2010年以降の平均期待寿命は80歳強で維持される。1人当りのサービスは1990年水準を210パーセント上回り、すべての人に十分な食糧が供給される。汚染は不可逆的な損害を

出す前にピークを迎え下降する。再生不能資源の枯渇はきわめてゆっくりと進行し、モデル上の2100年にはまだ元の資源量の半分が残されている。

「シナリオ10」の社会は、2040年が過ぎると間もなく、環境への負荷を全体的に軽減しはじめる。再生不能資源の採取ペースは2010年以降低下し、土地の侵食も、2040年以降急激に減少する。分解されにくい汚染物質の産出量も2015年のピークに減少する。システムは限界以下に落ちつき、制御されない破局は回避され、生活水準も維持される。そして、完全とまではいかなくとも均衡に近い状態が維持される。

Ecological Footprint

「シナリオ10」によると、「均衡状態の世界」はかなりの期間続くが、『成長の限界』の後継『限界を超えて』はもう一歩踏み込んで「持続可能な社会」という着想を導入する。それは1987年当時のグロ・ハルレム・ブルントラント・ノルウェー首相が委員長を務めた「環境と開発に

関する世界委員会（WCED）」（通称ブルントラント委員会）が定義した「将来の世代がそのニーズを満たすための能力を損なうことなく、現世代のニーズを満たす」社会である（注24）。「シナリオ10」はそうした角度からみると、「持続可能な社会」であるという（注25）。「人口は77億人、食糧、消費財、サービスとも、その1人1人を物質的に快適な状態で維持するのに十分である。この社会では、土地を守り、汚染を減らし、再生不能資源の利用効率を高めるためにかなりの労力が費やされ、絶えず改良を続ける技術が取り入れられている。成長は緩慢で、最終的には停止するため、問題も処理可能なもので、実際にきちんと管理されている」。「シナリオ11」（人口と工業生産の安定化に加え、汚染排出、土地浸食、資源利用の削減に関する技術を1975年に取り入れた場合）および「シナリオ12」（人口と工業生産の安定化に加え、汚染排出、土地浸食、資源利用の削減に関する技術を2015年に取り入れた場合）でも可能である。しかし前者（「シナリオ11」）は「過去には実現できた未来だった

が、いまではもはや実現不可能である」（注26）。後者はこれからのことである。

しかし世界は「シナリオ10」の「均衡状態の世界」を超えて、「持続可能な社会」に向けて動いているのであろうか。これを判断するため、2004年に発刊された『限界を超えて』の後継『成長の限界・人類の選択』も、再び先に指摘したWCEDの「持続可能性」を強調している（注27）。同時にこれまでの10年間に、「行き過ぎ」を議論するために登場した新しい語彙や尺度として「エコロジカル・フットプリント（EF:Ecological Footprint）」という概念を導入する（注28）。それは「世界が必要とする資源（穀物・飼料・木材・魚および都市部の土地）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である」。EFで示す面積と実際の面積を比較することによって、環境負担と資源消費水準の持続性を比較することができる。これは1990年代にブリティッシュ・コロンビア大学のマーティス・ワクナゲルらが開発したもので、実際に利用可能な土地の面積と比べた結果、EFで測った2003年の資源の消費量は地球の扶

養力（生物学的生産能力の限界）を25%も上回っている。これは人類が1年間に使用した生態学的資源を地球が生産するのに、およそ1年3ヶ月かかることを意味している（注29）。地球規模のEFは現在も日一日と大きくなっている。「人類が最後に持続可能なレベルだったのは1980年代だ」（注30）。

主要国のEFは表3で示すとおりである。米国のEFは世界平均の5.4倍、日本のそれは2.5倍である。これは世界中の人間が米国並みの生活水準になったら、地球は5.4個また日本並では2.5個必要であることを意味する（注31）。

なお実際に供給可能な面積と環境に対する「負債」（EFのかなりの部分は化石燃料使用による二酸化炭素の排出が占める。2003年のEFに占める生物生産力の割合は81.8%であるので、残りつまり18.2%が「負債」である）に分離して、国別のEF（ha/人）をみると次のようである（表3）。①世界全体のEFは生物生産力を上回る。②EFの大きい上位12カ国のうち、生物生産力が上回っているのは3カ国（ロシア、ブラジル、カナダ）のみである。③生物学的不足が最も大きいのは米国で、以下英国、日本、イタリアと続く。

表3 主要国のEF（2003年）

	EF 合計 gha/100万	1人当たりEF	生物生産力	生物学的 余力/不足(▲)
世界	14073	2.2	1.8	▲ 0.4
米国	2819	9.6	4.7	▲ 4.8
中国	2152	1.6	0.8	▲ 0.9
インド	802	0.8	0.4	▲ 0.4
ロシア	631	4.4	6.9	2.5
日本	556	4.4	0.7	▲ 3.6
ブラジル	383	2.1	9.9	7.8
ドイツ	375	4.5	1.7	▲ 2.8
フランス	339	5.6	3.0	▲ 2.6
英国	333	5.6	1.6	▲ 4.0
メキシコ	265	2.6	1.7	▲ 0.9
カナダ	240	7.6	14.5	6.9
イタリア	239	4.2	1.0	▲ 3.1

（注）他の項目は1人当たり gha

（資料）WWF for a living planet 2006(邦訳:『生きている地球 2006』)

WWF International 事務局長の J・リープ氏は次のように警告する。「深刻な“超過”状態に陥っている。地球が再生できるよりもはるかに多くの資源を消費している。この傾向が続くのであれば、恐ろしい影響を予測することになる。重要な選択をする時が来ている。生活水準を向上させつつ自然界に対する影響を減らすことは、決して簡単なことではない。今私たちがどのような都市や発電所や建物を築くかが重要である。それによって将来に過剰消費の負債を負わせてしまうかもしれないし、逆に持続可能な生活を営める未来を後押しできるかもしれない」(注 32)。

「地球生命維持システムは、およそ地表面から上空 10km、地下 10km の空間を占める物質系である。地球史をみると、太陽からのエネルギーを宇宙に放出する過程である水循環にともなった物質の移動と化学反応の中から、循環する仕組みだけが選択され、それが十分に複雑化した結果、地球生命維持システムになったと考えられる」(注 33)。地球は完全に閉じた生命体である。「地球に限界(環境容量)がある以上、地球一個分の

資源やサービス(浄化、供給能力)を前提にした」(注 34) サステナブルな経済社会にしなければならないことは言うまでもない。

『限界を超えて』は資源の消費量や CO₂ に象徴される汚染排出量が持続可能な限界を超えて増大している状況を「行き過ぎ」と称している(注 35)。「行き過ぎ」とは環境からの遅れたシグナルが成長を止めさせるほど顕著でない状態をいう。これはまずソース(供給源)の資源ストックの減少とシンクの汚染の増加がその兆候である。「行き過ぎ」の状態にあるからといって、必ず破局につながるわけではない。しかし破局を回避するためには速やかに断固たる行動が必要である。まず原料とエネルギーの削減である(注 36)。この狙いは明らかである。地球温暖化の最大元凶である CO₂ 排出量の削減であり減少である。上記を含めシステムを管理可能で持続的なものに転換するために、その構造的長を次のように逆にするのである(注 37)。

1) エネルギーと原料の効率をたかめることで、そのスループットを減らす(省エネや省資源技術革新で生

産物一単位当りに必要な原材料の投入量を減少させること。2) 入手可能な技術を用いて限界を可能な限り引き上げる。3) 限界のシグナルをうまくとらえ、それに対する反応をスピードアップさせる。社会はその進路選択にあたって、長期的に損益を判断する。4) 侵食を防止する。すでに侵食が見られる部分は、元の状態に戻す。5) 資本と人口の成長を減速させ、最終的に成長を止める。

上記5つのうち「まず一刻も早く減らさなければならぬのは原料とエネルギーのスループットである」。物質的にかつエネルギー的に持続可能であるためには、経済のスループットが不可欠であるからである。ただしそのためには次の3つの条件を満たさなければならない。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再生不可能な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な資源が開発されるペースを上回ってはならない。③汚染排出のペースは、環境の吸収能力を上回ってはならない(注38)。つまりまず省資源と省エネルギーを目指せということ

である。

これらはかなり可能である。なぜならばまず「現在の世界経済にはあまりにも多くの無駄と効率の悪さが存在する」からである(注39)。さらにこれまで営々と推進してきた温暖化への技術的対策に大きな進展がみられ、緩和対策に大きなポテンシャルがありその具体化の可能性もあることが判明している。例えば大気中に放出されるCO₂を分離・回収し、地下1000メートル以上の帯水層などに貯留する「二酸化炭素回収・貯留(CCS)」(注40)がある。それどころか米国の国境に近いカナダのサスカチワン州ウェイバーン油田はCCSの先進地で、同油田にパイプラインで米国から引張ってきたCO₂を高圧にして、地下1400mに注入して枯渇していた産油層が劇的に回復したという。この場合石油や石炭を押えなくてすむ(注41)。さらに省エネ・技術の開発、エネルギー代替、新エネルギーの開発、廃棄物の活用(バイオマス)、リサイクル(3R)などあらゆる分野で技術開発が強力に進行している。

かつて日本は1973年第1次石油危

機を受け全治3年という大打撃を受けた。当時日本はそのためにオフィスでは昼休みには消灯やエレベーターの稼動を半分にするとか国を挙げて省エネに努めた。その後日本は世界最高の省エネルギーや省資源の技術を開発した。現在CO₂排出量を減らす「低炭素社会」を目指す技術が毎日陸続として報道されている。これでも日本は世界の最先端を走っている。2007年5月に開催されたIPCC第3部会は様々な対応策を発表しているが、地球温暖化や資源の枯渇は今や全球的規模で取り組まなければならない。それではどのような枠組みで取組むのか。

産業革命以降の工業化と人口の急増は、地球が自らの生命維持システムを構築する過程で生み出した資源を消滅ないし枯渇さらに膨大な産業と家庭からの廃棄物を生み出した。加えてCO₂の排出を急増させ地球を温暖化させた。「物質リスク」と「気候リスク」の発生である(注42)。「気候リスク」が目標とする社会は「脱温暖化社会」であり、その手法は「低炭素エネルギーの開発とエネルギー効率の向上」である。「物質リスク」

の手法は「資源生産性と環境効率の向上」で、その目標は「循環型社会」の構築である(注43)。

「脱温暖化社会」と「循環型社会」は先に指摘したEFおよびサステナブル社会からみて当然のことながら表裏一体である。あるいはこうもいえる。「地球維持生命システム」を守る両輪である。どちらを欠いても地球は守れない。

地球環境を配慮した循環型社会とは、省エネ・資源をもたらす新しい素材の開発や技術革新を出発点(入口)とし出口としての最終製品までの生産構造の再編であり効率化である。この循環構造の入口と出口との間にあるのが再生可能資源や廃棄物である。3R (Reduce, Reuse, Recycle) は再生資源の活用であり、バイオマスなどのエネルギー化は廃棄物の有効利用である。これらは地球温暖化の要因であるCO₂を減らす。

2000年の世界の廃棄物の総排出量は約127億トンで、2050年には約270億トンにも達すると見込まれている(注44)。このため2002年9月のヨハネスブルグ・サミット実施計画に基づき、各国は持続可能な生

産・消費形態への転換を加速する 10 年間の枠組みを策定することになっている。しかしこの廃棄物を数量的にどのように把握するかが課題である。この問題を解決する方策が、1992 年の「地球サミット」の開催前の 1990 年頃に次世代の構造材料の課題を探索する日本の調査委員会の中にあつた。その概念は「エコマテリアル」で、環境調和性やアメニティ性を配慮して、材料が有する特性を最大限引き出す LCA (Life Cycle Assessment) や LCC (Life Cycle Cost) を用いて環境負荷を定量的に評価することができる(注 45)。日本は 2000 年には「循環型社会形成推進基本法」(「循環基本法」)を制定した。一国の経済がどれだけの資源を採取、消費さらに廃棄しているかをみる手法として物質フロー分析 (Material Flow Analysis:MFA) がある。これは「特定の分野に投入される資源やエネルギーと、そこから産出される製品、副産物、廃棄物、汚染物質などについて、その総量やそこに含まれる特定の物質の量、これらの収支バランスを体系的・定量的に把握する手法の総称で、「物質フロー会計

(Material Flow Account)」や「マテリアルバランス (物質収支)」とも呼ばれる(注 46)。

日本は「循環計画」で、物質フローの「入口」、「出口」、「循環」に関する 3 つの指標に次のような目標を設定している(注 47)。①「入口」では資源生産性(=GDP/天然資源の投入量)。これは 1990 年度の約 21 万円から 2000 年度約 28 万円を経て、2003 年度には約 31.6 万円に上昇した。2010 年度には約 39 万円を目標とする(いずれもトン当り)。②循環利用率(=循環利用料/(循環利用量+天然資源投入量))は前項目に対応して約 8%、約 10%、約 11.3%に高まり、2010 年度には約 14%を目指す。③最終処分量は 1990 年度の約 110 百万トンから 2003 年度には約 40 百万トンへと大幅に減少し、さらに 2010 年度には約 28 百万トンへの減少を目指す。

(注)

- (1) 読売新聞 2006 年 5 月 14 日付け朝刊。
- (2) ドネラ・H・メドゥズ、デニス・L・メドゥズ、J・ラーンダズ、W・W・ベアランズ 3 世『成長の限界』(The

- Limits to Growth) (大来佐武郎監訳) ダイアモンド社、2005年(第61版)、11-12 ページ。1972年に刊行されて以来2005年8月4日現在61刷を記録しているロングセラーである。
- (3) 同上、13 ページ。
- (4) 同上、57 ページ。
- (5) 同上、58-59 ページ。
- (6) 同上、59 ページ)。
- (7) 日本エネルギー経済研究所『エネルギー・経済統計要覧2006年』より計算。
- (8) 地球・人間環境フォーラム『環境要覧2005/2006』古今書院、2005年、99 ページ。
- (9) 小浜裕久・浦田秀次郎『世界経済の20世紀』日本評論社、2001年、表1-1。
- (10) ドネラ・H・メドウズ、デニス・L・メドウズ、J・ラーンダズ、『限界を超えて・生きるための選択』(Beyond the Limits:Confronting Global Collapse, Envisioning a Sustainable Future) (茅陽一監訳) ダイアモンド社、2002年(第8版)、32 ページ。
- (11) 同上、32 ページ。
- (12) 同上、26 ページ。
- (13) 『成長の限界』139-140 ページ、『限界を超えて・生きるための選択』26 ページなど。
- (14) 『限界を超えて・生きるための選択』163-178 ページ。
- (15) 『限界を超えて・生きるための選択』10 ページ、54-55 ページ、136 ページ。
- (16) 『成長の限界』164 ページ。
- (17) 同上、165 ページ。
- (18) 『限界を超えて・生きるための選択』166 ページ。
- (19) 同上、173 ページ。
- (20) 同上、177-178 ページ。
- (21) 『成長の限界』第V章。
- (22) 同上、154-155 ページ。
- (23) 『限界を超えて・生きるための選択』246-257。
- (24) 同上、267 ページ。
- (25) 同上、258 ページ。
- (26) 同上、261 ページ。
- (27) ドネラ・H・メドウズ、デニス・L・メドウズ、J・ラーンダズ『成長の限界・人類の選択』(Limits to Growth: The 30-year Update) (枝廣淳子訳) ダイアモンド社、2005年、324 ページ。
- (28) 同上、xiv-xvi。
- (29) WWF for a living planet 2006 (邦訳：『生きている地球レポート2006』14

ページ)。

(30) 同上、xvi。

(31) 同上、xv。世界平均の1人当たりEF (2.2gha) が地球の扶養力 (生物学的生産能力の限界) を25%超えている。世界有数の生活水準を誇る米国のEFが9.6ghaで、もし全世界の人口が米国並みの生活したときに必要な地球の数をxとすると、次の方程式を解けばよい。 $2.2 : 1.25 = 9.6 : x \rightarrow 2.2x = 1.25 * 9.6 \rightarrow x = 5.4$ 。日本についても同様である。

(32) 『生きている地球レポート2006年版』 (人類のフットプリントさらに拡大、記者発表資料、2006年10月24日)。

(33) 鈴木淳史編『エコマテリアルハンドブック』丸善株式会社、平成18年、4ページ。

(34) 同上、3ページ。

(35) 『限界を超えて・生きるための選択』246ページ。

(36) 同上、176—177ページ。

(37) 同上、178ページ。

(38) 『成長の限界・人類の選択』325ページ。

(39) 同上、177ページ。

(40) IPCCによるとCCSは全世界で少なくとも2兆トンの貯蔵能力があると

いう。つまり世界のCO₂排出量の約100年分を封じ込めることが可能であるということである。日本は年間排出量の4—110倍に相当する52—1500億トンの貯留能力があるとみられている。技術的には既に実用のレベルにある。欧州連合はポーランドで実証実験をしている。2007年3月EUは2015年までに12の実験プラントを立ち上げることを決定した。ノルウェーでは天然ガス採掘業者が北海で実用化している (毎日新聞2007年1月22日、日本経済新聞2007年2月21日、3月22日付け各朝刊)。日本ではJパワー、経済産業省などは火力発電所が排出するCO₂を液化して地中に埋蔵する事業化を豪州でしている (日本経済新聞2006年5月4日付け朝刊)。日本の環境省はCO₂の海底貯留を許可制とすることを決定した。免許は5年毎に更新する (日本経済新聞2007年2月21日付け朝刊)。その背後にCO₂の分離・回収技術実務の行動がある。それは石炭に限らず、石油や天然ガスなど化石燃料を燃やす排ガスなどからCO₂だけを分離し回収すると、地球温暖化の主因であるとされるCO₂排

出の減少に向けて大きく削減する可能性が出てくる。この分野で日本はその技術を実用化できる位置にあるという（産経新聞 2006 年 10 月 23 日、朝日新聞 2007 年 4 月 13 日付け各朝刊）。日本、米国、中国、韓国およびインドの 5 カ国は石炭発電の CO₂ の排出ゼロを目指して石炭火力発電所の共同開発をする。開発する発電所は石炭をガス化し、まず発電効率を高め従来型に比べ CO₂ 排出量を 2 割減らし、さらに発電の際に生じる CO₂ を液化し地下に閉じ込め CO₂ の排出量ゼロを目指す（日本経済新聞 2007 年 4 月 22 日付け朝刊）。日本では地球環境産業技術研究機構が CO₂ を地下に封じ込める CCS の試験を新潟県長岡市と北海道夕張市で既にしている（朝日新聞 2007 年 5

月 5 日付け朝刊）。

- (41) 読売新聞 2007 年 6 月 2 日付け朝刊。米国エネルギー省などによると、工場や火力発電所などの発生源で捕獲できる CO₂ は将来、米国の排出量の 55% を占めるという。
- (42) 鈴木淳史編前掲書、4 ページ。
- (43) 同上、4 ページ。
- (44) 環境省『循環環境型社会』平成 19 年版、52 ページ。
- (45) 鈴木淳史編前掲書、11 ページ。
- (46) 環境省『循環白書』平成 18 年版、第 1 章。環境省（上記白書）は「我が国の循環型社会づくりを支える技術—3R・廃棄物処理技術の発展と変遷—」（総説 2）は詳しく分析している。
- (47) 環境省編『循環型社会白書』平成 18 年版、48-49 ページ。