
人類によるバイオマス資源の利用

内嶋 善兵衛

<お茶の水女子大学名誉教授>

要 旨

太陽-地球-生物圏システムでのエネルギー流の分析から、陸上・海洋の光合成生物群が吸収・固定するエネルギー量は、入射太陽エネルギー量の 0.11%とごくわずかであり、さらに作物群の生産する食料エネルギー量はそれの約 1.1%と計算された。この結果は地球上の生物そして人類を支えるエネルギーの糸が非常に細いことを示している。

陸上植生の生産力に関する多くのデータから、植生群の全純一次生産量 (TNP_o) は 1271±99 億トン/年と推定した。赤道を挟む両半球の 20 度帯では、純一次生産力は約 24 トン乾物/ha・年と高く、これは高温多湿域に発達する熱帯雨林のためであった。両半球とも、この高生産力帯から少し高緯度帯へ移動すると、生産力は急減した。これはこの緯度帯に発達する亜熱帯高気圧 (少雨・乾燥気候) のためであった。

人類は耕地・牧草地等を利用して多量の食料を生産しているが、その中で穀類は大きな役割を担っている。ここ 50 年間、穀類生産量は 4 倍も増加し、20 世紀末には約 20 億トンに達した。人口増加にも係わらず、人当生産量も順当に増加し、1987 年頃には 360kg/人に達したが、その後僅かながら低下し始めている。これには、穀類増産に寄与した高収性農業技術の進歩の停滞や優良耕地の減少などが関係していると推測された。

農作物・畜産物・林産物の生産・収穫のために利用する植物資源量は、西暦 2000 年頃で全純一次生産量の 25-35 %で、2050 年頃 (人口 90 億人、経済規模 50 兆ドル) には 55-65%と予想された。これは同じく植物生産物を生存エネルギーと安全な生息場所としている野生生物群に厳しいインパクトを与えると思われる。人類と地球生態系との持続的な共生のためには、新しい高収性農業・林業技術の開発と生物資源の浪費の抑制が必要である。

キーワード 緑色植物群 (緑のアトラス)、バイオマス資源、生存エネルギー、純一次生産力 (NPP)、地球生態系、人間圏

I はしがき

光合成活動を営む緑色植物は、約 1.5 億 km 離れた太陽と地球上の全生命体を結ぶ役割を、はるか約 40 億年前の太古から現在まで担い続けている。すなわち、植物群が吸収・固定する太陽エネルギーは、自らを含めて全ての生物群の生存エネルギーとして利用される。このエネルギーを利用して、全ての生物は自らの個体発生と系統発生を限りなく繰り返して、現在に至っている。

地球環境は一定でなく、宇宙的な原因および地球的な原因によって、大小様々な変化と変動とを繰り返してきた。著しい環境変化が生じて植物群の生産する生存エネルギーが極度に減少

した時には、多くの生物が生存の危機に直面したことが知られている。

それゆえ、緑色植物群は地球上のすべての生命を、遙か遠くの太古から現在まで、そして現在から遠い未来まで、その肩に担ってゆく『緑のアトラス』とも呼ばれている[Shulgin 1978]。優れた科学技術を駆使して、地球を自分たちだけの惑星に作り替えたかに見える人類も、緑のアトラスの働きなしでは生き延びることは出来ない。

この緑のアトラスのカー生物扶養能力を評価するには、次のような量が用いられる。

総一次生産力 (Gross Primary Productivity, GPP)

純一次生産力 (Net Primary Productivity, NPP)

現存量 (Standing Crop)

生物体量 (Biomass, B)

総一次生産力と純一次生産力は、ある空間内の植物群が一定期間に、光合成活動で生産する有機物量を示し、一般に $t\ DM\ ha^{-1}\ yr^{-1}$ で表される (DM (Dry Matter) は乾物量を示す)。両者の間には次の関係がある。

$$NPP = GPP - R$$

ここで R は植物群の呼吸活動 (維持呼吸と形成呼吸) によって失われる光合成産物量を示す。植物生態学の分野では、現存量と生物体量とは同じ意味で用いられ、ある時点である空間内に生存する生物群の乾物体重を表している。一般に、 $t\ DM\ ha^{-1}$ で表される。現存量は純一次生産力の時間積分的な性質を持っている。

上の説明から分かるように、緑色植物群は無機世界から生物世界への生存エネルギーの入口 (Gate) である。この入口へ流入するエネルギーの多少は、それぞれの地域の生態系の規模・活動度・多様性を決めている。この原則は、我々が日常自然のなかで経験する通りで、生産力の高い熱帯常緑林は多くの生物種を養っており、逆に生産力の非常に低い砂漠地域の生物相は極めて貧弱である。

一見、科学技術の急激な進歩によって、緑のアトラスへの人類の依存度は低下したように見受けられるが、実際は逆であることを文明の歴史は教えている [例えば、大場 1979, Goudie 1981, Meyer 1996]。しかも、科学技術の異常な発達によって解き放たれた人類の欲望は、緑のアトラス自身の生存さえも脅かすほどになっている。最近の調査では、生物多様性の宝庫であり、物質の生物地球化学的な循環で大きな役割を果たしている熱帯常緑林も風前の灯火である [Soares-Filho et al. 2006]。

このような異常な現象は、緑のアトラスのカー純一次生産力とバイオマスが人類によって過剰に利用されるためである。すでに一部の研究者は純一次生産量の人類による利用が、最大生産量の 20-30% に達していると報告している [Vitousek et al. 1986, Seino and Uchijima 1992]。最近の世界の動きをみると、食料資源の増産や代替燃料の原料確保のために、人類によるバイオマス資源の利用はさらに拡大すると予想される。

人類によるバイオマス資源の利用の急激な拡大は、バイオマス資源を生存エネルギーとして、またその場を安全な生息場所として利用しながら、人類よりはるかに長い進化の歴史を築いてきた野生生物群にとっては脅威である。この脅威の実態を知り対策を考えるには、緑のアトラスのカー純一次生産力とバイオマス量の特徴、人類による利用の実態と将来に関する情報

が必要である。

そこで、本小論では緑色植物の生産力および農業生産力に関する多くの資料を用いて、緑のアトラスを中心にしてのエネルギーの流れ、陸上植物群の光合成生産の特徴、農業生産力の特徴そしてバイオマス利用の実態と近未来の予想等を説明する。

II 太陽-地球-生物圏でのエネルギーの流れ

過去、約 50 億年間を通じて、太陽の出力は 1 億年間に地球表面付近の温度を約 10℃ 上昇させる速度で増大している。しかし、1-2 世紀という短期間の地球環境を対象とすると、太陽出力は一定と考えることが出来る。また宇宙空間は真空中で、太陽からの光エネルギーは減衰することなく空間へ伝播される。それゆえ、1 年間に太陽が宇宙空間に放出するエネルギー総量 (L_0) は次式で与えられる。

$$L_0 = T S_d 4 \pi d^2 \approx 12.18 \times 10^{23} \text{ GJyr}^{-1}$$

ここで S_d は地球大気上端での光エネルギー流束-太陽定数 ($= 1367 \text{ W m}^{-2} = 1.96 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$)、 d は太陽-地球間の距離 ($\approx 1.5 \times 10^8 \text{ km}$)、 T は年間の長さ。

一方、 S_d なる光エネルギー流束は地球断面 ($= \pi r^2$, r は地球の半径 $= 6380 \text{ km}$) で受け止められると考えると、地球大気上端での入射太陽エネルギー量 (L_e) は下のように表される。

$$L_e = T S_d \pi r^2 \approx 55.7 \times 10^{14} \text{ GJyr}^{-1}$$

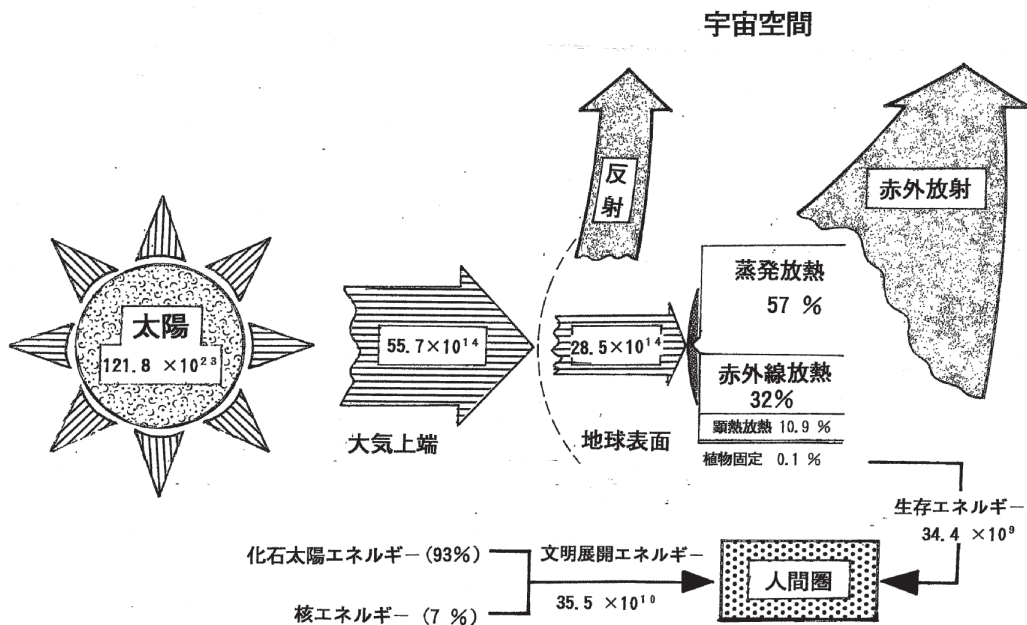


図1 太陽-地球-生物圏(人間圏)での太陽エネルギーの流れ(内嶋 2005 を改変)
(単位、 GJyr^{-1})

大気中へ入射した太陽エネルギーは、大気成分・雲粒・汚染微粒子によって吸収・反射され減衰する。それゆえ、地球表面へ入射する太陽エネルギー量は、大気上端での入射量の約 1/2 である。その様子が図 1 に示されている。

図から分かるように、太陽から 1.5 億 km の距離にある地球へ入射する太陽エネルギー総量は、太陽が宇宙空間へ放出するエネルギー量 (L_0) の約 22 億分の 1 にすぎない。このわずかな

太陽エネルギーが、生物の生存と活動に適した地球気候を形成させ、緑のアトラスに全生命を支える力を与えていることは、不思議であり偉大なことである。

地球大気内に入射し地球表面で吸収された太陽エネルギーは、大気内と地表面で多くの気象現象を誘起したあと、赤外放射として静かに宇宙空間へ去ってゆく。その過程で、水の惑星—地球の表面から水を蒸発させるのに 56.5%、赤外線放熱として 32.6%、暖まった地球表面からより低温な大気中へ顕熱放熱（乱流交換による）として 10.9%が配分されている。

地表付近の気象環境が植物群の生長・繁茂に適しているか否かを判断するのに、次のボーエン比（Bowen ratio）が一般に使用される。

$$\text{ボーエン比} = \text{顕熱放熱量} / \text{蒸発放熱量} = 0.19$$

図 1 に示されている地球表面での太陽エネルギー配分割合を利用すると、ボーエン比は約 0.2 になる。多くの観測によると、作物・樹木の茂る地域では、ボーエン比は 1.0 以下である。それゆえ、地球平均として地表付近の気象環境は、緑のアトラスの繁茂に適しているといえることができる。

次に、陸上植物群および海洋植物群（植物プランクトン類・海藻類）によって吸収・固定される太陽エネルギー量を評価するために、いくつかの資料を参照した [Whittaker and Likens 1973, Kobak 1991, Seino and Uchijima 1992, Efimova 1993, Kucharik et al. 2000]。それらから次のような数値を採用した。

陸上植物群の純一次生産量： 1300 億 t DM yr⁻¹

海洋植物群の純一次生産量： 600 億 t DM yr⁻¹

植物性乾物の発熱量： 16.74MJ tDM⁻¹

これらの条件では、地球上の光合成生物群によって吸収・固定される太陽エネルギー量は下のようなになる。

$$31.81 \times 10^{11} \text{GJ yr}^{-1}$$

それゆえ、地球上の光合成植物群の太陽エネルギー固定率は次のように、地球表面へ入射する量のわずか 0.11% にすぎない。人類を含めて地球上の全生物群は、このわずかな太陽エネルギーの流れによって生かされている。

$$31.81 \times 10^{11} \text{GJ yr}^{-1} / 28.5 \times 10^{14} \text{GJ yr}^{-1} \doteq 0.11\%$$

60 億人を超える人類は、その優れた科学技術を駆使して、地球上に他の圏（大気圏・地圏・水圏・生物圏）とは異なる特殊な圏—人間圏（Noosphere）を創造し、かつて経験したことのない科学技術文明を享受している。人間圏は次の二つのエネルギーを利用して、創造されて活動し発展している。

① 生存エネルギー（新鮮太陽エネルギー）

② 文明展開エネルギー（化石太陽エネルギー、核エネルギー）

生存エネルギーの獲得は、1-2 万年前までは地球生態系の恵みにすぎるといえる、いわゆる採取・狩猟であった。しかし、約 1 万年前、地球気候の自然的な温暖化を背景に、人類は農耕を発明した。この発明によって、人類は自らの労働と知恵を食料（生存エネルギー）の獲得に意識的に利用する術を学び覚えた。この発明は現在の高度な科学技術文明への歩みの始まりであった。現在、農業は科学技術で支援された高収性農業へと様変わりしているが、その本質には変わり

はない。すなわち、農業は「作物群と家畜・家禽群との生理機能を利用して、太陽エネルギーを生存エネルギーに変換して収穫する営み」である。

現在、太陽エネルギーをより効率的に生存エネルギーに変換し収穫するため、人類は自然的な進化と科学技術で促進した進化との協同産物である優良品種を育成し、利用している。20世紀末における農産物に関する統計資料から、人類の生存エネルギー量を求めると、図1に示されているように、 $34.4 \times 10^9 \text{GJyr}^{-1}$ になる。これは陸上植物群が固定した太陽エネルギー量 ($31.81 \times 10^{11} \text{GJyr}^{-1}$) の1.08%に過ぎない。この結果は、人間圏を創造し地球を人類だけの惑星にしたかに見える、人類の生存エネルギーの糸がいかにか細いかを示している。

他方、人間圏を人間圏らしく活動させているのは、文明展開エネルギーである。第一次産業革命（西暦1760年頃）以前は、風力・水力・薪炭・筋力が、社会を動かす主なエネルギー源であった。それらの源は、各時点で入射する太陽エネルギーである。それゆえ、この時代は新鮮太陽エネルギー時代と呼ぶことができる。その後、主エネルギー源は、エネルギー密度のより高い石炭へと移った。とくに第二次産業革命とも呼べる20世紀半ば以降は、石油・天然ガスへと転換した。石炭・石油・天然ガスは、地質時代に入射した太陽エネルギーに起源している。それゆえ、1760年以降は化石太陽エネルギー時代と呼ぶことができる。20世紀後半には、エネルギー密度の非常に高い核エネルギーも実用化されている。

図1にみられるように、20世紀末の時点における文明展開エネルギー量は $33.5 \times 10^{10} \text{GJyr}^{-1}$ で、その93%を化石太陽エネルギーが、残り7%を核エネルギーが担っている。図上のエネルギー量の比較から、約60億の人類は、生存エネルギー量の約10倍の文明展開エネルギー量を使用して、豊かで便利な文明生活を享受していることが分かる。

しかしながら、膨大な文明展開エネルギーの使用は、地球上で深刻な環境破壊そして生態系の劣化を引き起こしている。また、石油などの有限資源の枯渇が視野の中に入りようになり、価格高騰も日常的な出来事になってきた。これらに対応するため、エネルギー源の転換や省エネルギー技術の開発が急がれている。そのなかには、植物資源（バイオマス）のエネルギー化技術も含まれており、緑のアトラスに生存エネルギーの生産の他に、文明展開エネルギーの生産までも求め始めている。この過大な人類の要求に、緑のアトラスが快く対応してくれるか否かを判断するには、食料供給のみならず自然環境と自然生態系の立場からの影響評価が必要である。

Ⅲ 自然植生の生産力

自然植生とくに陸上植物群の生産力は各地域の生物扶養能力（Carrying Capacity）を決める最も重要な要素である。すなわち、植物群の生産力は『緑のアトラスの力』を決めている。しかし、植物群の生産力の重要さが広く認められ、多くの研究が行われるようになったのは20世紀に入ってからである。とくに1960年代始めから約10年間にわたって展開された世界生物学研究計画（IBP, International Biological Program）によって、各生物群の生産力に関する多くの正確な資料が整えられた。

これらの情報および経験は、人類の多くの活動の地球環境と地球生態系への影響の評価に広く利用されている。とくに農林業や水産業への地球温暖化の影響の評価および環境保全技術の

開発に役立っている。

1 植物生産力の評価

植物生産物の収穫を目標とする作物学や造林学および生産生態学では、狭い土地の植物生産力の評価が古くから行われてきた。しかし、地球環境問題の広がりにつれ、研究対象域は、地域→大陸→地球へと拡大してきた。また、気候変化との関係で、最終氷期最盛期（約 2.1 万年前）、現在、そして近未来（約 100-200 年後）と、長い時間軸上での陸上植物群の生産力変化が研究されるようになってきた [Beerling and Woodward 2003]。

これらの研究のなかで研究・開発されている生産力の評価法は次のように纏めることができる [内嶋 1993]。

- ① 収穫法（積み上げ法）
- ② 相対成長法（アロメトリー法）
- ③ 群落光合成法
- ④ 気候－生産力相関モデル法
- ⑤ リモートセンシング法
- ⑥ 植物生態系モデル法

①-③は比較的狭い植生地や耕地を対象として、作物学・造林学・生産生態学などで研究利用されている。植生地・耕地の生物生産量の具体的な実測資料を準備し、その後の各評価法の発展の基礎となった。とくに群落光合成法は群落内での太陽光分布と個葉の光－光合成関数とから、植物生産力を評価する手法を確立した。これは、現在地球環境の研究で主流となっている、植物生態系モデル法の出発点となった。

各植物群落（または植生タイプ）の純一生産力が IBP を通じて明らかになり、これらと地域の気候因子とを組み合わせる気候－生産力相関モデルが数多く開発された。これらは各地域や大陸そして全大陸の植物生産力の評価に利用され、大きな成果を挙げた [Lieth and Whittaker 1975, Efimova 1977, Uchijima and Seino 1985]。気候因子としては年間雨量・年平均温度・実蒸発散量・放射乾燥度などが利用されている。

人工衛星の観測精度が高まり、また情報処理技術の向上により、衛星データから正規化植生指標（NDVI, Normalized Difference Vegetation Index）と植生の生産力との関係が研究されるようになってきた [Box et al. 1989]。この方法は全大陸上の植物生産力の定期的なモニタリングに適している。電算機の処理能力の向上と植物生態系の素過程の理解の進みにより、植物群落内での諸現象を高い精度で予測する、生態系モデル法が開発された [Melillo et al. 1993, Kucharik et al. 2000, Ito and Oikawa 2004]。これらの生態系モデルは、人為的な気候変化の植物生産力への影響の評価に、また未来の地球気候の予測モデルのなかで陸面モデルとして広く利用されている。

2 植物生産力と気候環境

前世紀 30 年代に、Köppen は、年平均気温と年間雨量およびそれらの季節変化を指標として、世界を 11 気候区に区分した。彼の気候区分は、各地の植生タイプは地域の気候を反映すると

して組み立てられている。それゆえ、彼の気候区分は、植物生産の地域的な変化を研究する時の一つの基礎となる。Köppen の気候区分を単純な形で示すと表 1 のようになる。気候条件の適否により、世界の気候は樹木気候と無樹木気候とに大別される。

表 1 Köppen の気候区分 (吉野 1978, Bailey 1995 より作成)

気候区	記号	樹木気候	気候条件	面積率 (%)
熱帯雨林気候	A r	○	月平均気温>18℃, 乾燥季無し	9.8
サバンナ気候	A w	○	月平均気温>18℃, 冬2ヶ月乾燥	10.9
ステップ気候	B w		月平均気温>0℃, 蒸発量>降水量	14.9
砂漠気候	B s		月平均気温>0℃の月11ヶ月, 1ヶ月0℃以下, 蒸発量>降水量	12.5
温帯夏雨気候	C w	○	月平均気温>10℃の月8ヶ月, 最寒月気温<18℃, 冬乾燥	7.8
温帯冬雨気候	C s	○	月平均気温>10℃の月8ヶ月, 最寒月気温<18℃, 夏乾燥	1.8
温帯多雨気候	C f	○	月平均気温>10℃の月8ヶ月, 最寒月気温<18℃, 乾季無し	6.5
冷帯多雨気候	D w	○	最暖月気温>10℃, 最寒月気温<-3℃, 冬乾燥	13.0
冷帯夏雨気候	D f	○	最暖月気温>10℃, 最寒月気温<-3℃, 乾季無し	5.0
ツンドラ気候	F t		月平均気温<10℃	6.7
永久凍結気候	F i		月平均気温<0℃	11.1

面積率は陸地面積 (148.9億ha) への割合を示す。○は樹木の成立可能な気候区を示す。

表に見られるように、温度資源と水分資源とが樹木の発達を可能にする条件では樹木気候区となり、その総面積は陸地の全面積 (約 148.9 億 ha) の 54.8%になる。一方、二つの資源が十分でなく、樹木の発達が抑制される無樹木気候区は 45.2%の広さになる。これから、広い地球上の大陸で高い植物生産力の予想される地域は、全陸地面積のほぼ半分に過ぎないことがわかる。

温度資源と水分資源との充足程度に応じて、各地域にはそれぞれ異なるタイプの植生が繁茂している。各植生は異なる植物生産力とバイオマス量とを持っている。IBP 以来の研究蓄積により、各気候区を代表する植生の純一次生産力 (NPP) およびバイオマス量 (B) の実測値およびモデル予想値が整ってきた。両者はかなりよく一致することが報告されている [Kucharik et al. 2000]。

Köppen の気候区分にほぼ対応する植生タイプの純一次生産力 (NPP) がそれらの専有陸地面積率と一緒に図 2 に示されている。図に見られるように、平均純一次生産力は熱帯常緑林での 24 tDM ha⁻¹yr⁻¹から寒冷荒地での 1.5t DM ha⁻¹yr⁻¹までと、非常に広い範囲に変化している。これは各地域の生物扶養能力 (緑のアトラスの力) が、気候条件に強く支配されていることを示している。Kucharik et al. (2000) も実測データとモデル予想から図 2 とほぼ同様な結果を得ている。

陸上植生の生物扶養能力を規定する陸上植物群の全純一次生産量 (TNP) は次式で与えられる。

$$TNP = \sum A_i NPP_i$$

ここで A_i と NPP_i は i 番目の植生タイプの専有陸地面積 (ha) と平均純一次生産力 (t DM ha⁻¹yr⁻¹) である。専有陸地面積と平均純一次生産力の評価において、人間による土地利用の影響を無視すると、陸地上の潜在植生 (Potential Vegetation) の全純一次生産力 (TNP₀) を評価できる。

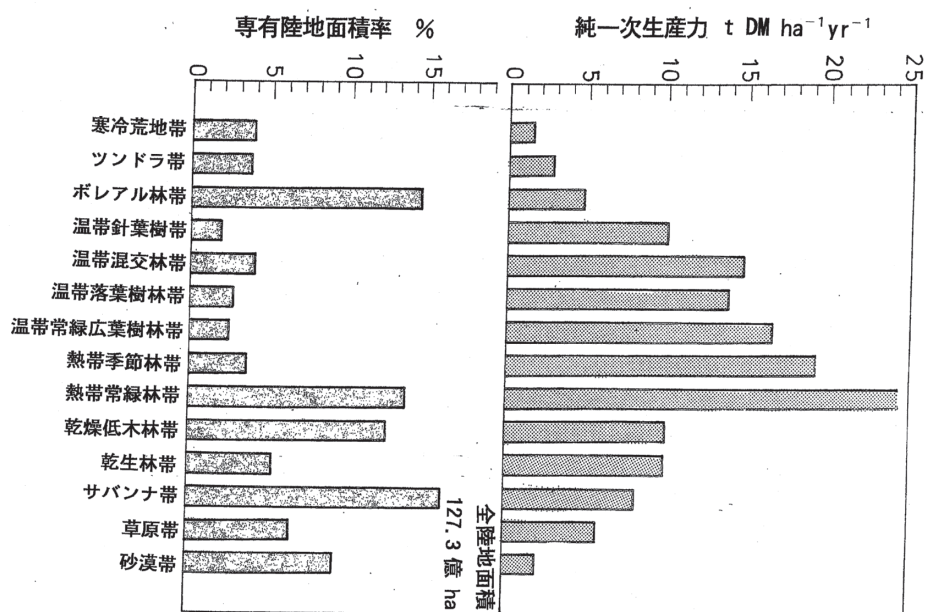


図2 代表的な植生タイプの平均純一次生産力（モデル予想値）と専有陸地面積率（Melillo et al. 1993 より作成）

一方、土地利用の変化による専有面積と平均純一次生産力の変化を考慮すると、実際条件下での全純一次生産量（ TNP_a ）が求まる。

陸上植物群の全純一次生産量の評価は、ドイツの Ebermayer (1885) が試験的に行ってから数多くの発表がなされている。とくに 1960 年代の IBP 活動以降、評価の精度は次第に高くなってきている。それらは表 2 のように纏められる。若干の違いはあるが、IBP 研究の進みにつれて、陸上植生群の全純一次生産量（ TNP_0 ）は 1200-1300 億 t DM yr⁻¹ に収斂してきている。しかし、人類の土地利用が進むに従って、自然植生は破壊され農地・放牧地・民生地などへ転用されている。これらの活動の全純一次生産量への影響評価も試みられている [Vitousek et al. 1986, Seino and Uchijima 1992]。

表 2 陸上植生群の全純一次生産量（ TNP_0 , 億 t DM yr⁻¹）

発表者	評価法	TNP_0 億 t DM / yr
Olson (1963)	気候-生産力相関モデル	1000~2000
Efimova (1977)	気候-生産力相関モデル	1410
Lieth (1978)	気候-生産力相関モデル	1300
Ajtyら (1979)	気候-生産力相関モデル	1318
Seino・Uchijima (1992)	気候-生産力相関モデル	1360
Melilloら (1993)	生態系モデル法	1170
Cramerら (1999)	生態系モデル法	1232
Kucharikら (2000)	生態系モデル法	1195
Saugierら (2001)	生態系モデル法	1377
Ito・Oikawa (2004)	生態系モデル法	1247
平均値		1270.9 ± 99.4

±は標準偏差を示す

気候環境の植物生産力への影響を明らかにするため、各10度幅の緯度帯の平均総一次生産力・平均純一次生産力・総一次生産力への純一次生産力の比・陸地面積・陸地ボーエン比が図3に示されている。図のように、両一次生産力とも赤道を挟む北緯20度から南緯20度までの範囲で著しく高く、その両側のより高い緯度帯で急減している。この突出緯度帯は、温度資源と水分資源とが豊かな熱帯常緑林域に対応している。この緯度帯では陸地ボーエン比は約0.3と非常に小さく、植生の発達に適した気候環境が形成されていることが分かる。

両半球とも、生産力の突出域から少し高い緯度帯へと移動すると、総・純一次生産力とも急減し、ピーク値の半分以下になる。これは両半球のこの緯度帯で亜熱帯高気圧が優勢になり、少雨・乾燥気候が卓越するためである。少雨・乾燥気候の発達には、陸地ボーエン比の緯度変化によく反映されている。南北両半球とも、20-30度帯では陸地ボーエン比は1.0以上になっている。とくに、北半球では2.0以上で、この緯度帯の陸地は著しく乾燥し、植生の発達が抑制されている。より高い緯度帯へ移動すると、両半球とも陸地ボーエン比は減少し続け、水分環境は改善される。しかし、温度資源が急激に減少するので、植生の発達は抑制され生産力は低下している。図3のもう一つの重要な点は、総一次生産力への純一次生産力の比が、温度の高い低緯度域で小さく、低温の高緯度域で大きいことである。これは植物群の呼吸活動による光合成産物の消耗が、温暖さとその持続期間の長さに関係しているためである。

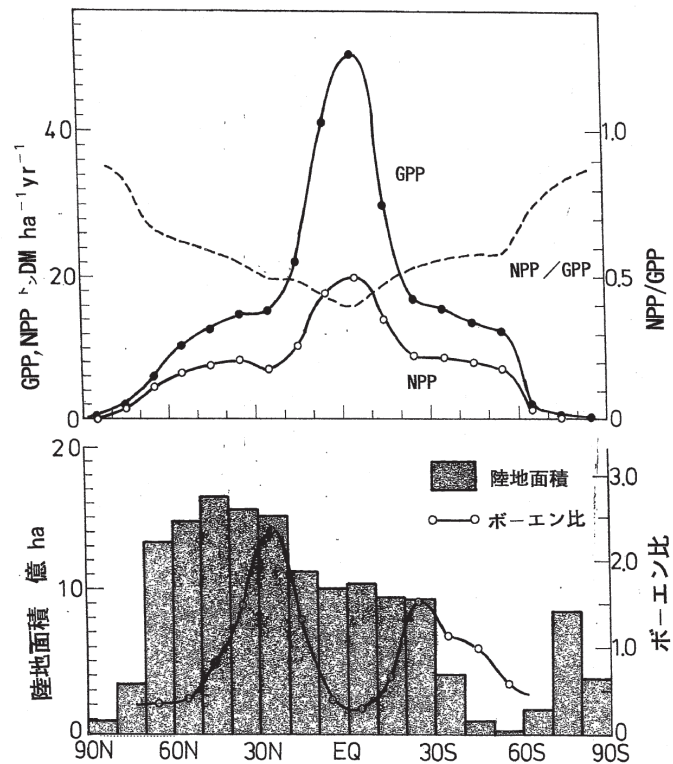


図3 陸上植生の総一次生産力・純一次生産力・両生産力比・陸地面積および陸地ボーエン比の緯度変化 (Leith 1978 .Budyko 1984 より作成)

IV 農業による生存エネルギーの獲得

すでに説明したように、約1万年前に自然的な地球温暖化を背景に、世界のいくつかの場所で、人類は農耕という生存エネルギー（食料）獲得の新しい方法を発明した。これにより、人類は新しい文明の発展階段を登り始め、いまや地球の全て（空間・現象・動植物・地下資源など）を、自分たちだけのために利用し尽くす地球資源化技術を完成させようとしている。

しかし、いかに科学技術が進歩発展しても、人類は生物の枠から離脱することは出来ない。それは人類のすべての活動が、食料として摂取する生存エネルギーに基づいているからである。それゆえ、農業は人類の生存および人間圏の発展と維持にとって最も重要な産業である。

すでに指摘したように、農業は作物と家畜・家禽を利用して、地球へ入射する太陽エネルギーを生存エネルギー（食料）として収穫している。

1 作物は植物界の超エリート

農耕の始めにおいては、人類は住居（洞窟や掘っ建て小屋など）周辺の野生植物の中から食べられる植物を選んで、ごく原始的な管理をしていたと思われる。それゆえ、農耕は世界各地でほぼ同時期に生まれたにも係わらず、利用した原始作物は非常に違っていたことが知られている [星川 1980、中尾 1966]。より食味の良い食料をより多く収穫しようという努力と工夫との積み重ねによって、現在のような高収性農業が確立された。これにより、少なくとも先進国の住民は、長年にわたって苦しめられてきた飢えと病から開放された。

20 世紀に入って多くの人々に豊かな食生活を可能にした、いわゆる高収性農業は次の四つの資源を、必要に応じて、比較的安く、セットで利用することで展開されている。

- ① 環境資源（肥沃な土壌・十分な水・汚染されない大気・豊かな太陽エネルギー）
- ② 生物資源（改良された高収性の作物品種と多産多収性の家畜・家禽品種）
- ③ 技術資源（効果的な肥料と農薬の開発・高い効率の農業機械の開発・灌漑排水システムの整備・使い勝手のよい農業情報システムの整備など）
- ④ エネルギー資源（安価な化石エネルギー・核エネルギーの供給）

これらの中で、技術資源とエネルギー資源とは、生物資源と人間労働の生産効率の向上に大きな成果をあげている。

先進国の高収性農業および発展途上国の農業の中で、多くの作物種が栽培利用されている。多くの調査から、星川（1980）は栽培作物種として次のような概数を出している。

食料作物	900 種
工芸作物	1000 種
飼料・緑肥作物	400 種

総計で 2300 種に達するが、普通目にするのは上記概数の 10%内外である。一方、学界に知られている植物種数は 20 万種とも 30 万種ともいわれている。それゆえ、1 万年の長きにわたって、さらに未来にかけて人類を扶養し続ける作物類、なかでも食料作物類は植物界の超エリートで、偉大なる力の所有者といえることができる。

2 作物の生産力とその発展

現在、約 65 億の世界人口は多種多様な食事を摂取しているが、それを支えている主要作物種は意外に少ない。これは地球規模での作物種の交換・導入が行われ、さらに農産物の世界貿易が盛んな為である。世界食糧農業機関（FAO, Food and Agriculture Organization）の資料から、2004 年度の主要作物の年間生産量を示すと図 4 のようになる。図に見られるように、穀類（イネ科植物）が最も生産量が多く、生存エネルギーの大部分を供給している。穀類の年間生産量は 22.3 億トンに達するが、上位 3 作物（トウモロコシ・コムギ・イネ）で 87%を占めている。これらは食料・飼料として人類と家畜・家禽類の生存を支えている。食生活の向上に不可欠なタンパク質と油脂分の供給源として重要な豆類（マメ科植物）の需要は急激に増大し

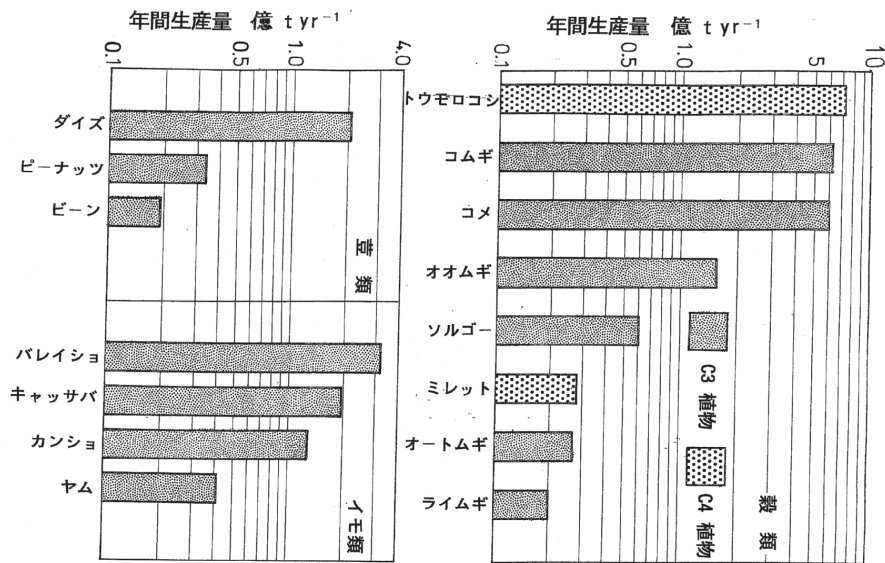


図4 2004年度における主な作物種の年間生産量 (億 t yr⁻¹) (FAO 統計データベースより作成)

ている。最近では、南北両アメリカ大陸で栽培が拡大している。マメ科植物ではないが、西洋ナタネ（アブラナ科）とヒマワリ（キク科）の種実（約0.7億トン）も油脂および濃厚飼料の原料として重要である。イモ類の上より3位までのパレイシヨ（ナス科）・カンシヨ（ヒルガオ科）・ヤム（ヤマノイモ科）は南米大陸の原産であるが、現在では食料・飼料として広く世界中で栽培されている。この他、約1.5億トンの粗糖がサトウキビ（イネ科、約13.2億トン）とビート（アカザ科、約0.24億トン）から生産されている。図4に示したように、いま現在、世界農業は膨大な農産物を生産し、増加しつづける世界の人々と家畜・家禽を扶養している。これは、先進諸国と発展途上諸国の農業関係者の非常な努力と工夫、そして工業部門

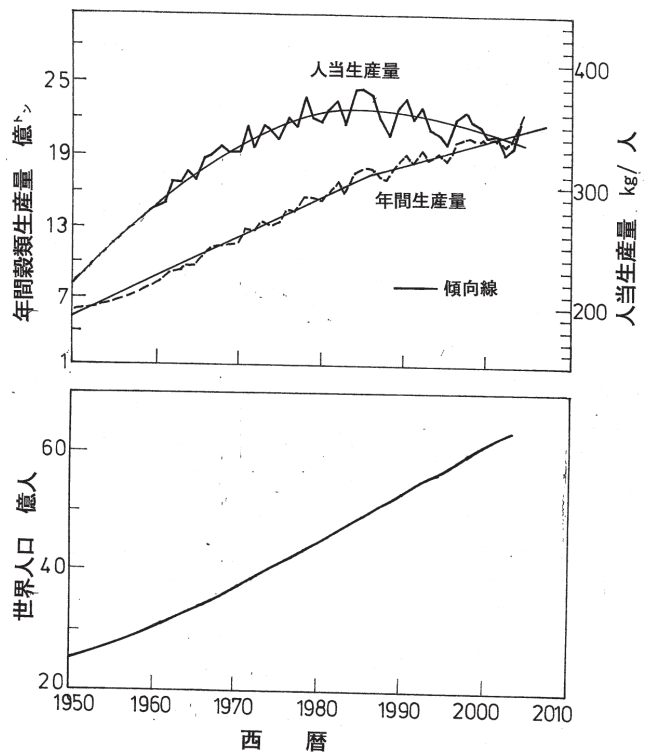


図5 1950年以降における世界人口・穀類生産量・人当穀類生産量の推移 (FAO 統計データベースより作成)

からの優れた農業資材の投入によって達成されている。20 世紀半ば以降における世界の穀類生産量・人口・人当穀類生産量の時代的な変化が図 5 に示されている。

世界が第二次世界大戦（1939-1945）の混乱からほぼ脱した 1950 年以降、世界の穀類生産は順調に拡大してきた。すなわち、1950 年の約 5.6 億トンから 2004 年の約 22 億トンと、50 年間に 4 倍も増大している。このような穀類増産を可能にしたのは、先に説明した高収性農業技術の確立と普及である。これらの優れた農業技術は、先進諸国だけでなく多くの発展途上国にも国際援助を通じて広がった。これによりいくつかの発展途上国では穀類生産が劇的に伸び、栄養改善と疾病予防に大きく貢献した。

図下半分に示されているように、この約 50 年間に世界人口は、1950 年の 25 億人から 2004 年の 63 億人へと増加した。しかし、穀類生産の順調な増大により、人当穀類生産量は 1980 年代半ばまでは増加傾向が続いた。そして 1985 年頃にピーク（360 kg/人）に達した後、現在までゆるやかな減少傾向が続いている。

このような人当穀類生産量の変化には、世界の穀類生産量の増加傾向の鈍化が関係している。いま図に示されている世界穀類生産量の傾向直線を利用すると、1987 年以前と以降における世界穀類生産量の年間増加速度は下のようになる。

1950 - 1987 期間 0.37 億 tyr^{-1}

1987 - 2004 期間 0.19 億 tyr^{-1}

この結果は、1980 年代半ばから生産増加速度が、それ以前の速度の約 1/2 に減少したことを示している。すでに 20 世紀末に、Kendall and Pimentel (1994) は、①高収性農業技術の進歩の頭打ち、②地球環境の劣化の広がり、③優良農地の減少などのために、21 世紀の世界穀類生産の増加速度は、20 世紀のそれより半減すると予想していた。図 5 の結果は、彼らの予想が 1980 年代後半から現実化して、現在も続いていることを示している。現在の推定によると、世界人口の増加は今後もさらに続き、今世紀半ばには 90 億人に達する。しかも、多くの中進国での経済発展は著しく、それにともない食生活は、さらに向上改善され続けるだろう。それゆえ、穀類を中心とする食料、とくに畜産物への需要は増加の一途を辿ると思われる。これらの需要増およびバイオマス燃料用の農産物増産などに応えるには、現在まで以上に生産効率が高く、しかも環境への負荷の少ない、新しい高収性農業技術の開発と普及が急務である。

V 人類によるバイオマス資源の利用

すでに説明したように、人類は農業・林業・漁業を通じて莫大な食料・木材・水産物を自然から取得し、その生存エネルギーおよび社会の維持に使用している。これらは自然生態系で生産されるバイオマス資源の一部である。多くの野生生物群も自然生態系で生産されるバイオマス資源から、彼らの生存エネルギーを獲得している。人口の増加と科学技術の発展により、人類の取得する生物生産量（HANPP, Human Appropriation of Net Primary Production）は増加し続けている。このような人類によるバイオマス資源の過剰な利用は、当然野生生物群の利用量の減少を招き、それらの生存を脅かしている。

1 食料の生産・収穫と土地資源の利用

バイオマス資源はある土地上の植物群の光合成産物そのものであるもので、それは土地資源と密接に結びついている。多くの統計資料（世界の統計 2005、ポケット農林水産統計 2005）を用いて、西暦 2000 年における地球上での土地資源とバイオマス資源（植物生産物）との人類による利用実態が、図 6 に示されている。

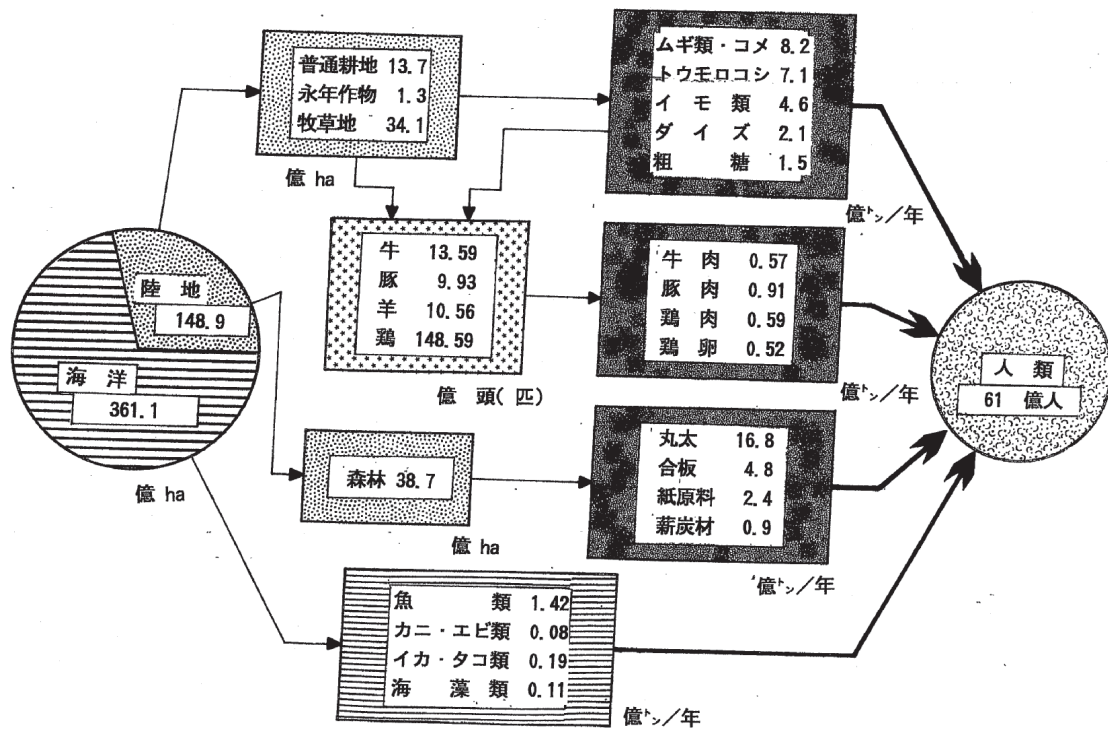


図 6 西暦 2000 年における人類による食料の生産取得と土地資源の利用（内嶋 2005 を改変）

半径 6380km の地球の表面積は約 520 億 ha で、その 29.2% (148.9 億 ha) は陸地、そして残り 70.8% (361.1 億 ha) が海洋である。陸上には植物群の生産力を土台に陸上生態系が築かれている。他方、海洋内には植物プランクトン類と海藻類の生産力を基礎に海洋生態系が組み立てられている。

植物生産物の生産・獲得のために約 62 億人の人類が利用する陸地面積は、それぞれ次のようになる。

- 農用地 : 49.1 億 ha
- 森林用地 : 38.7 億 ha
- 民生用地 : 3.0 億 ha

植物生産物の生産取得の他に、居住地・工場用地・交通用地として広大な土地を利用している。これらの土地では自然植生が取り除かれ、必要な構造物が構築されている。Vitousek et al. (1986) は、これらの土地を約 2 億 ha として、人類による純一次生産力の利用量を評価している。彼らの研究以後の世界人口と実質 GDP (Gross Domestic Production) の伸びは次の

ようになる [Maddison 2001]。

	1985	1998
世界人口（億人）	48.2	59.1
GDP 総計（兆\$）	22.98	33.73

このような世界人口と GDP 総計の急激な増加は、土地需要（居住地・工場用地・交通用地のため）の増大をもたらしている。これらのことを考慮して、農用地以外の土地利用面積を 3 億 ha と推定した。

以上の推定値と図 6 の結果を参照すると、20 世紀末における食料と木材資源の獲得および人間活動に利用される土地面積の総計は、90.8 億 ha になる。この土地面積は、表 1 に示した陸地の気候区分で、環境条件が森林・灌木（LAI \geq 3.0, LAI は Leaf Area Index、葉面積指数）の生育可能な森林気候域の面積（81.6 億 ha）を若干上回っている。すなわち、20 世紀末の時点において、人類は地球上で森林・灌木植生が良く発達する陸地をすべて利用し尽くしていることになる。

一方、これらの土地を利用して生産・収穫する植物生産物は、図 6 のように 3 ルートを通じて人間圏へと流入し、人類の生存および圏の活動と維持に使用されている。第一ルートは、耕地の作物群からの食料で、61 億の世界人口の生存エネルギーの大部分を担っている。

第二ルートは、高い栄養価の食料を得るための家畜・家禽類を通しての、生存エネルギーの迂回生産回路である。このルートには、34.1 億 ha の草地からの牧草資源（干し草約 60 億 t）と耕地からの粗粒穀物（トウモロコシ・オオムギ・エンバクなど）が流入している。これらの植物資源は家畜・家禽類の生理活動を通じて、人類の生存エネルギー（肉類・卵・ミルク）に変換される。

第三ルートでは、広大な海洋の植物生産力を基礎として、栄養に富んだ魚類・甲殻類・軟体動物類約 1.7 億トンと海藻類 0.11 億トンが毎年収穫され、食用などに供されている。陸地からの収穫生物量に比較して、広大な海洋からの収穫生物量が非常に少ないのは、次の二つの要因に関係している。

- ① 広大な海洋の大部分は貧栄養（無機栄養塩類の濃度が低い）で、植物プランクトン類の生物生産力が陸上植生に比べて非常に低い。
- ② 漁獲する魚類は、海洋内の食物連鎖の高位にあるために、その固体群の大きさが一次生産を担っている低位の生物個体群より著しく小さい。

2 陸上バイオマスの利用

すでに説明したように、緑のアトラスの生物扶養能力は、その純一次生産力（NPP）またはバイオマス量（B）で評価される。図 6 に示した農産物や林産物および水産物を必要生産物量（W）に変換するには、次の関係が利用できる。

$$W_i = Y_i (1 - w_i) h_i^{-1}$$

ここで Y_i と W_i は i 番目の収穫物量（t）と必要生産物量（t DM）， w_i と h_i は i 番目の収穫物

の水分含量と収穫指数（または収穫係数）で、収穫指数は次式で求まる。

$$h_i = Y_i (1 - w_i) / W_i$$

生産物量 (W) の算定のために、各生産物の水分含量 (w_i) として表 3 を利用した。

表 3 種々な生産物の水分含量
(5訂日本食品標準表より)

生産物	水分含量	生産物	水分含量
穀物	0.15~0.20	魚類	0.60
イモ類	0.66~0.80	タコ・イカ類	0.80
マメ類	0.10~0.15	エビ・カニ類	0.80
野菜類	0.80~0.85	卵	0.75
果実類	0.85	ミルク	0.87
牛肉	0.60	木材	0.45
豚肉	0.65		

表 4 種々な作物の収穫指数

収穫物	収穫指数	収穫物	収穫指数
穀物	0.4~0.5	果実類	0.5
マメ類	0.4	牧草類	0.8
イモ類	0.5~0.6	木材	0.5
野菜類	0.7~0.8	薪炭類	0.8

イネの生産過程の分析から分かるように、ある初量を得るにはそれに倍する葉・茎・根を生産しなければならない。これらの全てが、イネの生育期間を通じて生産された生産物量 ($W, t DM ha^{-1} period^{-1}$) である。品種の改良や栽培技術の改善により、多くの作物で収穫指数は増加している [Murata 1978, Duckham et al., 1978, 堀江 2004]。それらの研究結果を参照して、表 4 の値を各作物の収穫指数として利用した。

上に説明した数値を利用すると、人類の生存エネルギー収穫および木材資源の獲得のために、人類によって直接・間接に利用される陸上植生の生産物量 (億 $t DM yr^{-1}$) は次のように評価できる。総計は 140 億 $t DM yr^{-1}$ になる。この生産物利用量を使用すると、

- 農耕地ルート : 55.6 億 $t DM yr^{-1}$
- 牧草地ルート : 47.7 億 $t DM yr^{-1}$
- 森林地ルート : 36.9 億 $t DM yr^{-1}$

西暦 2000 年での人類による陸上植生の生産物の利用率は次のようになる。

$$140.3 \times 10^8 / 1300 \times 10^8 = 10.8\%$$

Vitousek et al. (1986) は、農耕地・牧草地・森林地での全純一次生産量と収穫量、植生の生産力への焼畑の影響、土地利用パターン変化の森林生産力への影響、環境変化(砂漠化・土壌流亡・酸性雨など)の生産力への影響などを考慮して、次の3段階について人類の生産物利用率を求めている。

- 低位利用率 : $52 \times 10^8 / 1321 \times 10^8 = 3.9\%$
- 中位利用率 : $406 \times 10^8 / 1321 \times 10^8 = 30.7\%$
- 高位利用率 : $581 \times 10^8 / 1498 \times 10^8 = 38.8\%$

彼らの低位利用率の計算では、耕地・牧草地・森林地から直接取得した生物生産量のみを対象としているが、収穫指数は考慮されていないように見受けられる。中位利用率の算定では、低位評価に収穫係数の影響、焼き畑農業と都市開発の影響を加えて考慮している。高位利用率の算定では、さらに砂漠化の影響・農耕地への転用による植物生産力の低下などが加味されている。

Seino and Uchijima (1992) は、岩城 (1981) が提出した土地利用による植物生産力の低下

係数 (E) (林地=1.0 , 樹園地=0.80, 耕地=0.81, 草地=0.63, 民生用地=0.0) と土地利用データ (FAO 資料) および筑後モデル (Uchijima and Seino 1985) から求めた潜在植生の純一次生産力の世界分布図 (内嶋・清野 1987) を利用して、全大陸の潜在植生の全純一次生産量 (TNP₀) への人間活動の影響を評価している。それによると、1980 年代の世界の陸上植生の全純一次生産量は次のように評価された。

$$TNP_0 = 1360 \times 10^8 \text{ tDMyr}^{-1} \quad TNP_a = 820 \times 10^8 \text{ tDMyr}^{-1}$$

それゆえ、1980 年代における陸上植生の生産物量の直接・間接利用率は次のようになる。

$$(1360 - 820) / 1360 = 39.7\%$$

この植生生産物の利用率は、Vitousek et al. (1986) の高位利用率 (38.8%) と非常に良く一致している。

以上の説明から分かるように、耕地・牧草地・森林地の光合成産物の利用だけでも、西暦 2000 年時点で、陸上植生の全純一次生産量 (TNP₀) の約 11% を、人類は自らの生存と社会の活動のために利用している。これに土地利用パターンの変化による生産力の低下、森林破壊・砂漠化・酸性雨・温暖化などの影響を考えると、現在すでに人類による陸上植生の生産物の直接・間接利用率は 30% に達している可能性がある。

今世紀中における世界人口の更なる増加と経済成長の加速を考えると、人類による土地資源の利用および植物群の全純一次生産量 (TNP) とバイオマス (B) の収穫利用は更に増大するものと予想される。とくに原油高騰に伴うバイオマス燃料 (穀類や雑木・廃材からのエタノール生産、作物・食物残渣からの燃料ガスの生産) の増産は、単に食料資源との競合を拡大・強化するばかりでなく、植物資源と土地資源のさらなる使用、そして劣化をもたらす可能性が高い。

以上説明した陸上植生の生産物の人類による利用状況の実態と未来予想とは、図 7 のようにモデル化できる。

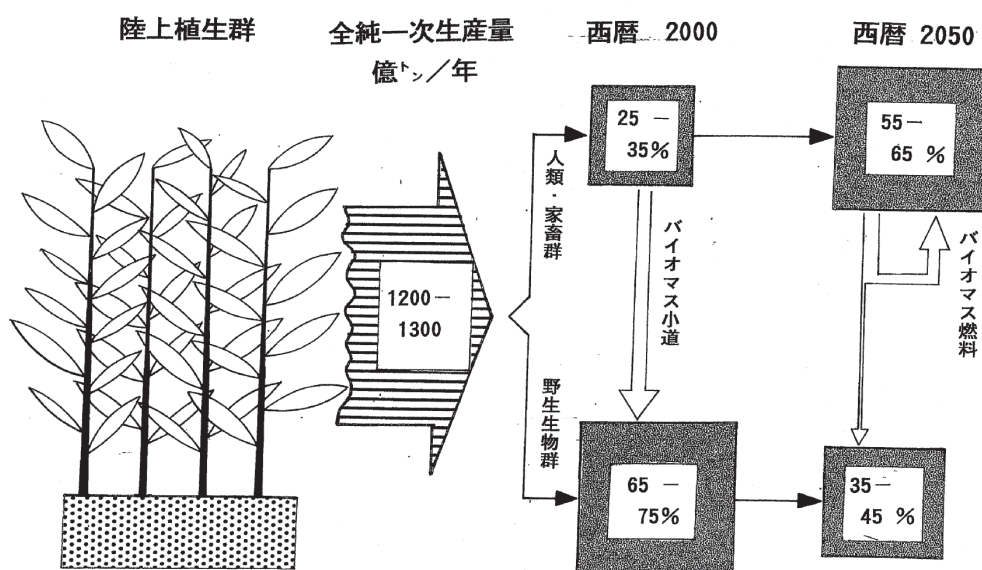


図 7 陸上植生の全純一次生産量の人類・家畜類と野生生物群との間における配分・利用の現況と未来予想 (内嶋 2005 を改変)

図に見られるように、陸上植生の全純一次生産量 (TNP₀) は、西暦 2000 年時点で 1200-1300 億 t DM yr⁻¹ と推定される。その 25-35% を直接・間接に人類が利用し、61 億人と多くの家畜・家禽類が生きている。残り 65-75% の生産物が多くの野生生物群に分配されている。これを利用して、野生生物群は生存エネルギーと安全な生息場所を獲得している。

ここで重要なことは、人類利用の部分と野生生物利用の部分との間に、植物生産物すなわちバイオマス小道が形成され、人類利用部分の約 30% (≒ 43 億 t DMyr⁻¹) に近い植物生産物が野生生物域へと流れていることである。この小道は複雑な食物連鎖そのもので、人類・家畜群の利用する植物生産物の残渣・残滓が、小動物・微生物の作用を受けながら野生生物群へと流れている。このバイオマス (生存エネルギー) の流れは小動物・微生物を生かしながら、土壤に有機物・腐植をもたらし、地力の維持・増進や土質改善に、したがって植物群・作物群の光合成生産力の向上・維持に役立っている。

一方、世界人口 90 億人、GDP 50 兆ドル (西暦 2000 年の 1.5 倍) が予想される西暦 2050 年には、陸上植物群の生産物の人類利用率は低く見積もっても、全純一次生産量の 55-65% に達するだろう。しかも、人類の生産活動の肥大による環境破壊 (とくに地球温暖化) により、西暦 2000 年時点で、1200-1300 億 t DM yr⁻¹ と推定した陸上植生の全純一次生産量は、これより更に減少する可能性が高い。

もう一つの重要なことは、現在人類利用部分と野生生物の利用部分との間に形成されているバイオマス小道が寸断・破壊される危険性である。これは、石油危機の解決のために、植物残渣や穀類・糖類などをバイオマス燃料・プラスチック原料に変換して利用することに原因している。この方法が広範に採用されると、多くの小動物・微生物群を介して形成されているバイオマス小道は寸断され、野生生物群へ流れていた有機物は回路途中でバイオマス燃料の生産原料に振り向けられるだろう。これらは山野や耕地への有機物・腐植の供給を減少又はストップさせ、地力の急激な減退や土質の劣化を促進し、作物生産力の低下を招く可能性が高い [Pimentel and Hall, 1984; 内嶋 2004]。それゆえ、今世紀半ばに予想される人類による植物群の全純一次生産量およびバイオマス資源のさらなる利用拡大は、図 7 に示されている植物生産物量の利用配分の割合の変化以上のインパクトを大小様々の野生生物群そして耕地・山野の生産力へ与えるだろう。それ以外に、野生生物群の生存エネルギー源の著しい減少と安全な生息場所の大幅な縮小をもたらし、野生生物群の壮大な絶滅 (約 6500 万年前の白亜紀/第三紀境界での生物群の大絶滅を上回るような) へ導く可能性も心配されている。

VI おわりに

地球上の全生物群の生命を支える緑色植物群は『緑のアトラス』ともよばれ、その力は①純一次生産力、②バイオマス量で計量される。これらは地球上へ入射する太陽エネルギーが植物群によって吸収・固定されたものである。太陽-地球-生物圏 (人間圏) でのエネルギー流の分析 (図 1) から、植物群 (陸上と海洋) が吸収・固定するエネルギー量は、地球上へ入射する太陽エネルギー量のわずか 0.11% と推定された。作物群や家畜・家禽類を通じて人類が収穫する生存エネルギー量は 34.4×10^9 GJ yr⁻¹ と評価された。これの約 10 倍の文明展開エネルギー (化石エネルギー・核エネルギー) を、人間圏の発展と維持に使用していることが分かった。

人類および家畜・家禽類は、多くの作物によって吸収・固定された生存エネルギー（食料）に依存している。

現在広く栽培されている作物種は 100 種内外で、20 万とも 30 万ともいわれる植物種のなかの超エリートで、植物の自然的な進化と人類による加速的な進化との協同によって作り上げられた植物種である。現在、これらの作物群を用いて、年間に穀類 21 億トン、イモ類 6.8 億トン、マメ類 2.1 億トン等を生産している。生存エネルギーの大部分を担う穀類は、ここ 50 年間を通じて順調に増産され、増大する世界人口にかなりの食料を供給してきた（図 5）。しかし、人当生産量は 1980 年代後半から緩やかに下降し始めている。これは穀類の増産を支えてきた高収性農業技術の発展の鈍化、優良農地の減少、地球環境の劣化などによると考えられる。

人類が利用している土地は 90.8 億 ha（農用地 54%、林地 43%、民生地 3%）で、生産に利用している土地の植物生産物量を評価するため、農地・牧草地・林地からの収穫生産物量と各生産物の水分率と収穫指数（表 3、4）とを利用した。単純な計算から、人類の植物生産物の年間の直接・間接利用量は 140 億トン（耕地 40%、牧草地 34%、林地 26%）と評価された。これは陸上植生の全純一次生産量（ TNP_0 ）の約 11%に相当することが分かった。これ以外の土地利用の変化、環境破壊、焼き畑などの植物生産力・バイオマス量への影響を考えると、人類による植物生産物の利用率は、全純一次生産量（ TNP_0 ）の 25-35%に近いと推定された（この結果は、Vitousek et al., 1986 ; Seino and Uchijima 1992 の結果と良く一致した）。

人類以外の野生生物群も、緑色植物群の光合成産物にその生存を委ねている。すなわち、緑のアトラスは生存エネルギーの生産供給者であり、安全な生息場所そのものである。西暦 2000 年には、陸上植生の全純一次生産量の 25-35%が人類に、残り 65-75%が野生生物群へ分配されていると推定された（図 7）。世界人口が 90 億人へ、年間経済規模が 50 兆ドルへと拡大する 2050 年には、全純一次生産量の人類利用量は 55-65%、残り 35-45%が野生生物群の取り分へと、逆転する可能性が予想された。

もう一つの重要な点は、現在人類利用部分と野生生物利用部分との間に、小動物・微生物群の働きで形成維持されているバイオマス（生存エネルギー）小道が、今後バイオマス燃料等の生産への農産・林産物の残渣・残滓の転用が進むと、寸断・破壊される可能性の高いことである。残渣・残滓は無用な有機物資源ではなく、多くの野生生物（とくに小動物群と微生物群）の生存エネルギーの源であり、また土壌への有機質・腐植の供給を通じて地力の向上・維持、そして作物・林木の生産力の向上に大きく寄与している。それゆえ、人類利用部分と野生生物利用部分との間のバイオマス小道は、地球上での人類と野生生物群との持続的な共生を維持するためには不可欠な自然の仕組みの一つである。

以上の討論から、陸上の潜在植物群の全純一次生産量は 1200-1300 億トン／年と評価され、これを生存エネルギー源として人類および野生生物群は生きている。人類が直接・間接に収穫利用する生物量は、現時点で全純一次生産量の 25-35%で、2050 年には 55-65%に増大すると予想された。これは当然野生生物群の利用分の減少を伴い、野生生物群は生存エネルギー量の著しい減少と安全な生息場所の大幅な縮小に襲われると推測された。その他に、バイオマス燃料への植物の残渣・残滓の転用は、野山・耕地の地力の向上と維持、したがって植物生産力の向上に著しい貢献をしている、人類利用部分と野生生物利用部分の間のバイオマス小道を寸

断・破壊する可能性が高いことが指摘された。

それゆえ、人類と地球生態系との持続的な共生を考えるならば、人類による植物生産物の収穫利用は、すでに限界に近いか、すでにそれを凌駕していると結論できる。生態系への影響を軽減しながら、増大する植物生産物への需要を満たすには、現在の農地・林地の生産力を飛躍的に向上させる環境保全型の新しい高収性農業技術と高収性林業技術の確立と普及が不可欠である。また、植物生産物（農産物・畜産物・林産物など）を大切に利用し、無駄な浪費を抑制する生活習慣（勿体ない精神）を身に付け守り続けなければならない。

引用文献

- 堀江 武 編著 2004. 『作物』農文協
- 星川清親 1980. 『栽培植物の起原と伝播』 二宮書店
- 岩城英夫 1981. 「わが国におけるバイオマスの地理的分布について」『環境情報科学』 10 (1) 54-60
- 中尾佐助 1966. 『栽培植物と農業の起源』 岩波書店
- 農林水産省統計部編 2005. 『ポケット農林水産統計 2005』 農林統計協会
- 大場英樹 1979. 『環境問題と世界史』 公害対策同友会
- 総理府統計研修所編 2005. 『世界の統計 2005』 日本統計協会
- 内嶋善兵衛 1993. 「気候と植生」『地学雑誌』 102 (6) 745-762
- 内嶋善兵衛 2004. 「バイオマスと光」『農林統計調査』 54 (8) 38-49
- 内嶋善兵衛 2005. 『<新>地球温暖化とその影響』 裳華房
- 内嶋善兵衛・清野 裕 1987. 『世界における自然植生の純一次生産の分布』 農業環境技術研究所
- 吉野正敏 1978. 『気候学』 大明堂
- Ajtay, G.L., Ketner, P., and Durvingneau, P. 1979. "Terrestrial primary production and phytomass. "In *The Global Carbon Cycle*. SCOPE-13. 129-181. New York: John Wiley & Sons.
- Bailey, R.G. 1995. *Ecosystem Geography*. 1st ed., New York: Springer-Verlag.
- Berling, D.J., and Woodward, F.I. 2001. *Vegetation and the Terrestrial Carbon Cycle*. 1st ed., Cambridge: Cambridge Univ. Press (邦訳は及川武久監訳『植生と大気の4億年』 京都大学学術出版会 2003)
- Box, F.O., Holben, B.N., and Kalb, V. 1989. "Accuracy of the AVHRR vegetation index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO₂ flux." *Vegetatio*, 80 (1) : 71-89.
- Budyko, M.I. 1984. *Evolution of Biosphere*. 1st ed., Leningrad: Hydrometeorological Publishing Office (邦訳は内嶋善兵衛訳『生物圏の進化』 農林水産技術会議事務局 1987)
- Cramer, W., Kicklighter, M.J., Bondeu, A., Moore, B.I., Churkina, C., Nemry, B., Ruimy, A., Schloss, A.L., and Potsdam NPP Intercomparison Participation. 1999. "Comparing global NPP models of terrestrial net primary productivity (NPP) : Overview and key results. *Global Change Biol.* 5 (suppl.1) , 1-15.
- Duckham, A.N., Jones, J.G.W., and Roberts, E.H. (ed.) 1978. *Food Production and Consumption*. 1st ed., Amsterdam: Elsevier (邦訳は八度雄一郎・田村真八郎・内嶋善兵衛監訳『人類の食糧・農業システム 上・下』 農林統計協会 1981)
- Efimova, N.A. 1977. *Radiation Factor and Productivity of Plant Canopy*. 1st ed., Leningrad: Hydrometeorological Publishing Office (邦訳は内嶋善兵衛訳『日射エネルギーと植物生産力』 国際農林業協力協会 1993)
- Imhoff, M.L., Bounoua, L., Ricketts, T., Louck, C., Harriss, R., and Lawrence, W. 2004. "Global patterns in human consumption of net primary production." *Nature*, 429:870-873.
- Ito, A., and Oikawa, T. 2004. "Global mapping of terrestrial primary productivity and light-use efficiency with a process based model." In *Global Environmental Change in the Ocean and on Land*. ed. M. Shiyomi et al., 343-358. Tokyo: TERRAPUB.
- Kendall, H.W., and Pimentel, D. 1994. "Constraints on the expansion of the global food supply." *Ambio*, 23 (2) :198-205.
- Kobak, K.I. 1988. *Carbon Cycle and Biological Element*. 1st ed., Leningrad: Hydrometeorological Publishing Office (邦訳は内嶋善兵衛訳『地球上の炭素サイクルと生物』 農林水産技術会議 1991)

-
- Kucharik, C.J., Foley, J.A., Delire, C., Fisher, V.A., Coe, M.T., Lenters, J.D., Young - Molling, N., Ramankutty, N., Norman, J.M., and Grower, S. 2000. "Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: water balance, carbon balance and vegetation structure." *Global Biogeochem. Cycles*, 14:795-826.
- Leith, H. 1978. "Vegetation and CO₂ Changes." In *Carbon Dioxide, Climate and Society*. ed. Jill Williams. 103-109. Oxford: Pergamon Press.
- Leith, H., and Whittaker, R.H. (ed.) 1975. *Primary Productivity of the Biosphere.*, New York: Springer-Verlag.
- Lockerets, W. (ed.) 1977. *Agriculture and Energy*. 1st ed., New York: Academic Press (邦訳は高橋保夫監訳『食糧生産とエネルギー』農林統計協会 1980)
- Maddison, A. 2001, *The World Economy: A Millennial Perspective*. 1st ed., Paris: OECD (邦訳は金森久雄監訳『経済統計で見る世界経済 2000 年史』柏書房 2004)
- Melillo, J.M., McGuire, A.D., Kicklighter, D.W., III, B.M., Vorosmarty, C.J., and Schloss, A.L. 1993. "Global climate change and terrestrial net primary production." *Nature*, 363 (May) :234-240.
- Meyer, B. 1996. *Human Impact on The Earth*. 1st ed., Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- Murata, Y. 1978. "Studies on production processes." In *JIBP Synthesis Vol. 20*. ed. Tamiya, H., 57-62. Tokyo: Tokyo Univ. Press
- Pimentel, D., and Hall, C.W. (ed.) 1984. *Food and Energy Resources*. 1st ed., Orlando: Academic Press (邦訳は内嶋善兵衛・宇田川武俊・田中洋介監訳『グリーンな地球—新時代の食糧生産システム』農林統計協会 1987)
- Seino, H., and Uchijima, Z. 1992. "Global distribution of net primary productivity of terrestrial vegetation." *J. Agr. Met.*, 48 (4) :39-48.
- Shulgin, A.I. 1970. *Plant and Sun*. 1st ed., Leningrad: Hydrometeorological Publishing Office (邦訳は内嶋善兵衛訳『植物と太陽』農林水産技術会議事務局 1978)
- Soares-Filho, B.S., Nepstad, D.C., Curran, L.M., Cerqueira, G.C., Carcia, R.A., Romas, C.A., Voll, E., McDonald, A., Lefebvre, P., and Schlensinger, P. 2006. "Modelling conservation in the Amazon basin." *Nature*, 440:520-523.
- Uchijima, Z., and Seino, H. 1985. "Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetation (1) Chikugo model." *J. Agr. Met.* 40 (4) :343-352.
- Vitousek, P.M., Ehrlich, P.K., Ehrlich, A.H., and Matson, P.A. 1986. "Human appropriation of the products of photosynthesis." *Bioscience* 36 (6) :368-373.
- Whittaker, R.H., and Likens, G.E. "Primary production: the biosphere and man." *Human Ecol.* (1) : 357-369.