総 説

地球生態系のなかでの食糧生産†

吉 良 竜 夫
滋賀県琵琶湖研究所

Food Production in the Global Ecosystem

Tatuo KIRA

Lake Biwa Research Institute, Otsu, Siga 520

1. はじめに

世界の人口は、1986年のうちに50億人に達したと推定されている(図1)。世紀末には、たぶん60億を超えるだろう。国連の予測は、62億人である。

世界人口が25億人だったのは1925年ころだから、2倍に増えるのに40年足らずしかかからなかったことになる。その前の倍増期間は80年前後、もう一つ前の倍増には300年ちかくかかったと推定されるので、倍増に要する年数が非常に勢いで短縮したことがわかる。いったい、どこまで増えるのか。1970年ころの人口増加率は、2.1%/年であった。およそ33年で倍増する速さである。しかし、開発途上国で家族計画が推進されるようになって、人口増加率はしだいに下がってきたようで、上記の予測人口の値にはそれが反映している。それでも、よほどのことがないかぎり、2050年までに100億人を超えることは避けがたいだろう。

そうなったとき、地球の食糧生産力はそれだけの数の人間を支えてゆけるだろうか。食糧の面からみた地球の人口収容力の限界は、どのくらいだろうか。近い将来に、食糧不足によって人口増加が直接抑制されるような事態が起こるだろうか。

どんな種類の将来予測も同じことだが、これらの疑問に確実な解答を与えることは不可能に近い。食糧の生産と分配の現状については、専門家の間でさえ大きな認識の違いがある。世界の食糧生産量の統計も、一部の国々については、手に入らなかつたり正確さに欠けていたりする。栄養不足ないし飢餓状態にある人口の見積りに

も、意見の差がある。21世紀の食糧問題についてよくまとまった本¹⁾を書いたクラッスマンは、いろんな印刷物に出てくる「飢えて年々5,000万人が死ぬ」という数字が、いかに根拠のないものかを指摘している。食糧生産の技術的改良の可能性にいたっては、極端な楽観論から悲観論まで、応接にいとまがない。ある人は、そもそも地球の人口収容力に限界があることを認めようとしないし、別の人は現状でもすでに人口過剰だという。

筆者にできることは限られている。生態学と環境学に携わってきた者の一人として、その立場からみて何が問題であり、どんな限界条件が考えられるかを指摘できるにすぎない。筆者の立場は保全主義者(conservationist)であり環境主義者(environmentalist)なので、どうしても見かたは保守的に傾きがちになることを、初めにお断りしたうえで、いくらか考えを述べてみたい。

2. 単純化したモデル

20年くらい前、まだ世界人口が36億人くらいだったころ、単純なモデル計算をしてみたことがある²⁾。きわめて非現実的なモデルで、人間が穀物だけで必要カロリー量をまかなって生きてゆくとすれば、地球には何人が住めるかという計算である。その結果をいくらか修正したもの³⁾を、次に紹介する。基礎仮定としては、

- 1) 穀物生産により化学エネルギーとして固定されるエネルギー量は、耕地に落ちる年間太陽エネルギー量の0.1%だとする。日本の稲作の平均玄米収量を10アール当たり500kgとしたときのエネルギー効率の計算は、表1に示してある。裏作なしで年1作の場合、全年の日射エネルギー量の0.38%がイネの植物体に取り込まれ、そのうち白米のカロリーに

† 第42回日本栄養・食糧学会総会で特別講演として発表したものを文章化したものである。

〒520 滋賀県大津市打出浜 1-10

図 1. 17 世紀以後の世界人口の増加

表 1. 日射エネルギーに対する日本の稲作（平均収量の場合）のエネルギー効率

I) 玄米の平均収量（風乾重）	500 kg/10 a
I)' I のエネルギー換算	17.8×10^8 cal/10 a
I)'' 利用率を考慮した食物エネルギー量	17.2×10^8 cal/10 a
II) I に応対する全植物体収量（乾重）	1,112 kg/10 a
II)' II のエネルギー換算	45.4×10^8 cal/10 a
III) 全植物体中の玄米の比率	
重量比	0.38
カロリー比	0.39
IV) 南西日本の平均日射量	
全 年	120×10^{10} cal/10 a
稲作期間（5～10 月）	71×10^{10} cal/10 a
V) 全植物体生産のエネルギー効率	
全 年	$45.4/12000 = 0.0038$ (0.38%)
稲作期間	$45.4/7100 = 0.0064$ (0.64%)
VI) 食物生産のエネルギー効率	
全 年	$17.2/12000 = 0.0014$ (0.14%)
稲作期間	$17.2/7100 = 0.0024$ (0.24%)

なるのは 0.14% にすぎないことがわかる。0.1% の値を採用するということは、全世界の農業技術の平均レベルが日本の現状にかなり近づくことを意味する。

- 2) 世界の耕作可能な土地面積を全陸地面積の 25% (37 億 ha) とする。いまの世界の全耕地面積は 14 ～14.5 億 ha で、陸地面積の 9～10% にすぎない

表 2. 穀物だけをエネルギー源とする食生活を仮定したときの地球の人口収容力の計算

(1) 地球表面の受ける全日射量	5×10^{23} cal/年
(2) 陸地面の受ける全日射量 (1) $\times 0.3$	1.5×10^{23} cal/年
(3) 可耕地の総面積（陸地の 25%）*	37×10^8 ha
(4) 可耕地 1 ha が受ける日射量 (2) $\times 0.25/(3)$	10^{13} cal/ha・年
(5) 穀物生産のエネルギー効率を 0.1% とすると、 耕地 1 ha 当たりの穀物生産量は	10^{10} cal/ha・年
(6) 大人 1 人の 1 年間の必要カロリー量	10^9 cal/人・年
(7) 大人 1 人が必要とする耕地面積 (6)/(5)	10^{-1} ha
(8) 全可耕地の人口収容力 (3)/(7)	370×10^8 人

* 現在は陸地の 9.4% (14×10^8 ha)

表 3. 地球の人口収容力の修正例

	1 人当たり 必要土 地面積 (ha)	人 口 収 容 力 (10^8 人)
穀物だけを食べる	0.100	370
ブタ肉 40 g/人・日を余分に食べる	0.124	298
居住地面積 0.05 ha/人を加える*	0.174	213

* 人口 1 人当たり土地面積：東京都 0.019 ha/人、大阪 0.008 ha/人、アメリカ東部メカロポリス 0.075 ha/人

から、この見積りは非現実的なものである。いろいろな推定のうち、最高に近い値を採用したにすぎない。

- 3) 1 人の年間必要食物エネルギー量を、 10^9 cal (= 2,700 kcal/人・日) とする。

4) 日射量の緯度分布は考慮せず、全地球の平均日射量がすべての耕地に一樣にふりそそぐと仮定する。の四つを設定した。そうすると、表 2 に示すように、耕地 1 ha から生産される穀物のエネルギー量は 10^{10} cal/ha・年となり、ちょうど 10 人を養えることになる。したがって、37 億 ha の耕地は 370 億人の人口を収容できる。これが、この仮定のもとでの地球の人口収容限界である。この仮定では、われわれは 1 日およそ 800 g の米だけを食べて生きてゆくことになるが、それでもいまの地球人口の 7.5 倍くらいが限界ということである。

もちろん、こんなばかなことはありえない。しかし現在でも、穀物は世界の食物エネルギーの約 50% を供給

表 4. アメリカ人の標準生活水準を維持するために必要な土地面積の試算 (ジョージア・モデル; Odum, 1970⁴⁾)

	エーカー (ha)
食糧生産用農地	1.5 (0.61)
繊維生産用農地	1.0 (0.40)
自然系地域 (集水域, 大気浄化域, 緑地帯, レクリエーション地域, 廃棄物処理用地など)	2.0 (0.81)
人工系地域 (都市, 工場用地, 道路, 廃棄物処理施設など)	0.5 (0.20)
計	5.0 (2.02)

しており, タンパク食品の多くは穀物が姿を変えたものだから, この数字も一つの目安としては意味があるだろう。かりに穀物の一部をブタの飼料にまわし, 1人1日40gのブタ肉を最低必要タンパク量として食べるとすれば, そのためにさらに2.4アールの土地がいる(表3)。それによって, 人口収容力は300億人程度に減る。また, 可耕地と居住適地とはほぼ一致するので, 居住のために1人5アールの土地がいるとすれば, 人口収容力はさらに200億人くらいまで低くなる。ただし東京都や大阪市では, 人口1人当たりの土地面積は1~2アールしかないが, そんな状態が全地球にひろがってはたまらない。

仮定2)の可耕地の見積りは, とくに甘い。農地の開発と維持に必要な経費, 森林破壊による気候への好ましくない影響, 都市化による農地の減少などの要因を考えると, 今後の農地拡大の可能性はせいぜい数億ha程度にすぎないだろうと, クラッツマンは述べている。これは, 上記の人口収容力が一挙に半分になることを意味する。野菜, 果物, 繊維などの生産に必要な土地面積をも考慮にいれると, たとえ農地開発と農業技術の進歩が順調に進行したとしても, あと数十年のちに100億人の世界人口を支えることは, きわめてむずかしいといわねばなるまい。

タンパク源としての水産物を無視したことについては, 異論があるかもしれない。しかし, 現在の水産タンパクの平均摂取量は3~4g/人・日にすぎないから, あまり多くは期待できない。水産資源が底をつきつつあることも, よく知られている。もちろん, これは大局論であって, 水産資源の合理的利用に大きな努力を払うべきことはいうまでもない。

このモデルは, いかにも過密国日本らしいせちがらいものだが, 生活様式の違う国ではすっかり話が変わることを示しているのが, 表4のいわゆるジョージア・モデルである。これは, アメリカの生態学者 E.P. Odum と彼の大学院生たちが計算したもので, アメリカ南部の生活水準で1人が暮らしてゆくために必要な土地面積を推

図 2. ローマ・クラブの世界モデル (メドウズほか, 1972⁵⁾)

1970年以前の曲線はすでに実現した数値で, その部分での因果関係にもとづいて構成したモデルを1971年以後に外挿したシミュレーションの結果である。

計したものである⁴⁾。簡単な報告しか見ていないので詳しい計算基礎はよくわからないが, 人工施設や緑地, レクリエーション地域などを算定しているのが特徴である。そのうち農地だけを取り上げても, 必要面積は約1haで, 筆者のモデルの10倍だから, この基準でいえば地球はとっくに満員ということになる。日本人がアメリカの土地を買いにゆくのは, マネーゲームとしてのほかに, なにか本能的な衝動があるのかもしれない。

この種のモデルでもっとも本格的なものは, MITのメドウズたちによって, ローマクラブの世界モデルとして1972年に発表されたのが最初である。「成長の限界」を示したこの著名なシミュレーションでは, 人口, 天然資源, 食糧生産, 工業生産, 環境汚染の五つの変数を取り, 1970年以前に見られた各変数間の相互関係を関数化して, 現実起こった経過を忠実に再現するようなシステムを組み立て, それを西暦2100年まで外挿して今後の経過を予測している。その結果は, 世界人口は2050

年ころ 100 億人に達して最大となり、そののち急激に減少して 21 世紀末には 50 億前後になるというショッキングなものであった (図 2)。複合モデルだから、この人口減少の原因を食糧不足だけに帰することはできないが、図 2 からわかるように、1 人当たりの食糧生産高は、21 世紀初頭に最大 (現在より十数%増) になるが、その後は激減して現在の 6 分の 1 くらいに落ち着いていることに注意する必要がある。

これらのモデルはみな完全に仮想的なもので、もちろん現実の世界システムはそんなに単純なものではない。しかし、少なくとも生態学的な論理の帰結を表わしている点では、食糧問題の未来を考えるとときのわく組みとして役にたつ。

3. 農地開発に対する環境の制約

いまの食生活が続くかぎり、食糧生産を増やす道は、耕地面積を増やすか、土地面積当たりの作物収量を増やすかの二つしかない。新しく耕地開発のできる地域として現実性があるのは、乾燥地帯か熱帯の森林地帯にはば限られてくる。

人工灌がいによる乾燥地帯での農地開発は、第二次大戦以後の食糧大增産の原動力の筆頭であった。しかし、それは、多くの環境悪化を伴った。たとえばアメリカ合衆国の中西部は、くりかえし過度の農業開発と、その反動としての環境の荒廃に見まわれてきた。乾燥年が続いた悲劇の 1930 年代のことは、当時の学術論文のなかにも生々しく残っている。ブラック・サンデーとよばれた 1934 年 4 月の日曜日の大砂嵐にはじまった風蝕は、本来の草原の被覆をはがして作った農地のなかに凹地を掘りこみ、砂漠化を進行させて、いったん西に向かって前進していた農業開拓前線を東に押し戻した。気候の回復と、防風林帯の整備、適当な休閑期間をおく乾燥地農法の導入などのおかげで、危機はいったん去ったが、最近また再燃しはじめたという⁶⁾。

1970 年代に入ると穀物価格が暴騰して、アメリカの乾燥地帯農業はふたたび非常に勢いで高度化しはじめ、世界の食糧事情の緩和に大きく貢献した。地下水をくみあげる井戸を中心に、長大な灌漑用のアームを回転させて円形の畑をつくる“pivot irrigation”は、最も著しい新技術であった。いまアメリカ内陸部の上空を飛ぶと、緑の円盤を並べたような pivot irrigation の畑を、いたるところに見ることができる (写真 1)。しかし、乾燥地帯で利用できる地下水は、みな地中深くにあり、長い地質時代を通じて形成されたものだから、汲みつくせば枯渇する非更新性 (non-renewable) の資源である。アメリカの pivot irrigation 農地には、すでに地下水が枯れて放棄されたところが出はじめている。おそらく、その大

写真 1. 空からみた pivot irrigation (USA ミズーリ州, Oahe ダム湖岸, 1985 年 7 月)

写真 2. 農地造成のための熱帯雨林の焼きはらい (マレーシア, ネグリセンビラン州, パソー国有林. 1972 年 5 月)

写真 3. ハイボニカ栽培でできたトマトの「巨木」 (野沢, 1985¹⁰⁾ からとる)

部分は、いずれ同じ運命をたどることになるだろう。大規模な地下水灌がいにはアフリカなどにも導入されはじめているが、非更新性の水資源をこのような形で浪費してもよいのかどうか、強い疑いがある⁷⁾。

ここ数年、アメリカでは高温・乾燥の年が多く、内陸部で砂漠化が再発している。穀物増産のために防風林を切り、休閒の期間を短くしたり休閒面積を減らしたりしたことが、風蝕と表土の浸蝕を激化しているという⁸⁾。乾燥地帯では、湿潤気候地帯にくらべて気候変動の影響が大きいので、雨の多い期間に土地利用をあやまると、乾燥期間に入ったときしばしば不可逆的な環境の荒廃を招く。

ソビエト領中央アジアでも、同様な事態が起こった。1950年代のソビエトは、アラル海にそそぐアム河やシル河の上流地帯で、灌がい用の大規模な運河を掘り、わずか数年で日本の全土に匹敵する面積の農地を造成した。しかし60年代には、早くも風蝕や農地の塩性化が起りはじめ、この開発が必ずしも成功ではなかったことが明らかになった。乾燥地帯の土は多量の塩類を含んでいるが、灌がいを続けると、土にしみこんだ水が地面から蒸発するとき溶かした塩類を地表に残してゆくので、表土の塩類濃度が高まり作物が育たなくなるのである。この開発事業が環境に及ぼした影響のうち、最もドラスチックなものは、アラル海の水位低下となって現われた。二つの川は上流で水を取られて流量が減り、アラル海までとどかないことが多くなった。その結果、世界第4位の大湖アラル海の水位は16 m も下がり、湖面面積は半減した。豊かであった魚や多くの固有生物は、湖水の塩分濃度が高まったため絶滅にひんしている。上流の農業をとるか下流の湖をとるか、これはきびしい選択だと、モスクワのアカデミシアンの一人名はもらしていた。中央アジアの灌がいのために、北に流れるシベリアの大河を南へ逆流させるといった計画も、北極海沿岸の気候を寒冷化させるといった反対があって長い間懸案になっていたが、ゴルバチョフ政権になってから公式に放棄された。これも、乾燥地帯開発の失敗の経験から得た教訓であろう。

熱帯林地帯の開拓にも、環境破壊の心配がつきまとっている(写真2)。密生した森林は、絶えず大量の水を根から吸いあげて大気中へ蒸散しているが、それを伐採して完全なはだかの土地にすると、地中から蒸発する水の量はおよそ半分に減ってしまう。蒸発量の減少分だけの水は河川に流れ出してくるので、川の流量は増え、とくに大雨の際の洪水の頻度を高める。アマゾンのような大森林地帯になると、降る雨の50%は森林の樹木が蒸散した水が再循環しているのだという。したがって、広大な地域の森林を一斉に伐採すれば、雨量にも当然変化が起こるだろう。また、日射エネルギーのうち蒸発熱と

しての消費が少なくなるので、地表付近はそれだけ余分にあたためられて高温になり、伐採面積が大きければ気候への影響は無視できないはずである。中国の中・南部のように、かつての大森林がほとんど消滅した地域では、国土の3分の2が森林である日本に比べて、気候や水文がより不安定なように思われるのは、おそらく森林破壊の影響も関係しているであろう。

いま熱帯の森林面積は、年に0.62%ずつ減少しているという(UNEP/FAOによる推定)。実面積では750万ha、ほとんど北海道に匹敵する広さである。1分間に14ha強の森林が消えつつあるという勘定になる。破壊の最大の原因は、焼きはらいによる農地と牧場の造成であるが、その際に発生する二酸化炭素の量は、化石燃料の消費から発生する量に比べて無視できない大きさ(少なくとも数分の1程度)になるはずだ。大気中の二酸化炭素の増加が地球の気温を高める危険が大きいことは、すでに常識になっているが、熱帯林の破壊は、この問題とも深くかかわっているのである⁹⁾。

しかも、破壊された熱帯林の大半は永続的な農地ないし牧場になるのではなく、いわゆる焼き畑のように短期間で放棄され、森林を浪費しているのが現状である。これは、一般に熱帯林の土が肥料分に乏しく、地力を維持するのがむずかしいからである。この自然条件によく適応した農業形態は、水田とゴムノキ・アブラヤシ・コーヒー・チャなどの樹木園だけである。食糧増産の立場からも環境保全の面からも、いま急がれるのは、浪費的な森林破壊をとめるために、永続的な熱帯畑作技術確立することであろう。

砂漠化と熱帯林破壊は、地球規模の環境問題のなかでも、最も緊急度の高いものと考えられているが、そのどちらもが食糧生産の未来と密接にかかわっている。とくに、地球環境の安定性を保つためには、十分な森林面積を確保することがきわめて必要である。たとえ地理的・地形的には開拓可能な地域であっても、森林や乾燥地帯の農地化には、慎重すぎるほど慎重でなければならない。環境問題を考慮にいれるならば、食糧生産を増やすために農地面積の飛躍的な拡大を期待することは無理で、いまある農地の生産力を高める方向で努力することが要求される。

4. 農業技術の進歩の限界

人口爆発に伴う食糧危機の可能性が心配されはじめてから、すでに長い年月が経過している。しかし、少なくとも現在までは、世界全体の食糧生産の絶対量に大きな不足は起こらなかった。「余剰食糧」ということばさえできた。もちろん、アフリカのかんばつや政争によって大量の餓死者が出たり、十分な栄養のとれない無数の人

人がいることは事実だが、それは、食糧の絶対量の不足というよりむしろ政治的・社会的な分配の問題のようである。これだけの飛躍的な食糧増産を可能にしたのは、すでにふれたように、技術の進歩を伴った農地の開発であった。余剰食糧を生み出しているのが、開発途上の農業国ではなくて、アメリカを筆頭とする先進諸国であることが、農業技術の進歩の重要性を物語っている。だから、どんなに人口が増えようと、技術の進歩は無限だから、必ず何とかなるはずだというのが、食糧問題の未来についての典型的な楽観論である。

さきに述べたモデルでは、世界の平均穀物収量が現在の日本のレベルに近づくことを仮定した。それは、いまある技術の原理を押しすすめ普及するだけで達成可能な目標だから、実現の可能性は十分ある。ただし、現実の問題として、それにはまだまだ時間がかかりそうで、たぶん急場の間にはあわないだろうから、やはり先進国でのいっそうの技術革新による増産が必要となるにちがいない。

増産への最もオーソドックスな道は、多収穫品種の育成（品種改良）である。コムギやイネの多収穫品種は、いわゆる「緑の革命」を引き起こし、いくつかの穀物輸入国を輸出国に変えた⁹⁾。さらに最近のバイオテクノロジーの進歩は、さまざまな夢を未来に描いている。たとえば、普通の植物（C3 植物）より光合成能力の高い C4 植物の作物化、窒素固定微生物を共生させて窒素肥料の必要をなくした作物や、遺伝子組替えによる多収穫性・病虫害抵抗性など好ましい性質を兼ねそなえた作物の創造などなど。

栽培方法についても、さまざまな提案がある。たとえば筑波の科学博覧会では、温室のなかに育てた、1 本に 1 万個もの実をつけたトマトの「木」が注目をひいた（写真 3）¹⁰⁾。ハイポニカとよばれるこの栽培方法は、発明者によれば、水耕液のなかに空気を吹き込むことによって、デリケートな水耕液濃度の調節の必要がなくなり、葉や根の機能が飛躍的に高まるばかりかそれが長く持続し、非常な増収をもたらす。収穫物の味もよく、高値で売れるという。技術的なノウハウは公開されていないので、まともに検討することはできないが、いずれにせよこの栽培法も、すでに広く実用化されている通常の水耕法や礫耕法と同じ工学的栽培の一種で、当然生産費はかさみ、付加価値の大きい作物以外には使えないだろう。

この例は、品種や栽培法の改良の結果を評価するときに、注意しなければならない教訓を含んでいる。トマトの木にはだれもがびっくりするが、実は、絶えず好適な環境条件を与えると多年生になっていつまでも成長するのはトマトの本性であって、むかし北海道大学の温室にも土に植えたトマトの「大木」があって、絶えずたくさ

んの実をつけていたということを聞いた（故 並河功教授による）ことがある。だから、それはハイポニカ栽培によってはじめて可能になったわけではない。また、1 本に 1 万個の実というのはたしかに驚異的だが、写真で見ると 1 本で少なくとも 50 m² くらいの面積に枝を広げているようだから、1 m² 当たりによれば 200 個以下となり、確かに多いがとても不可能というほどの数ではない。実用のハイポニカ栽培では、こんなことはしないで、1 m² に数本くらい植えているので、1 本から 30 個前後の収穫に相当する。本当の意味での植物の増産というのは、つねに土地面積当たりの収穫の増加であることを忘れてはならない。

新しい品種ができたときのニュースは、鉢に数本植えた状態で在来の品種と比較栽培した結果として発表される場合が多い。しかし、鉢で独立状態で育てたときと、同じ植物を集団として畑の全面に栽培したときとは、パフォーマンスは非常に違う。前者では、植物は自由に枝を伸ばし、いくらでも葉をつけることができるが、後者の場合は、一定の土地面積の上にはほぼ決まった量の葉しかつかない。その限界は種類により違うが、葉の面積の合計にして、土地面積の 5~10 倍くらいが目いっぱいである。それ以上の葉がでて、下のほうの葉は光不足で光合成ができず、やがて枯れ落ちてしまうからである。だから、鉢で育てると非常に能力の高い品種も、畑での実用栽培ではそれほど画期的な増収をもたらすことはできない。土地面積当たりの収量を一挙に倍にするといった話は、おおむねまよつばものである。現実の農業技術の改良は、もっと遅々とした小さな進歩の積み重ねでしかない。たとえバイオテクノロジーの飛躍的な進歩があっても、この事情に変わりはないだろう。

5. 農業の工学化の限界

緑の革命をもたらした熱帯諸国用の多収穫品種は、一部で大きな成功をおさめはしたが、同時に成功のための条件のきびしさを明らかにした。多収穫品種は、必然的に多量の肥料と適切な水の供給を必要とし、また病害や虫害に弱くて、農薬がなくてはまともな収穫はあげられない。だから、灌がい施設の整備や肥料・農薬の輸入ができない国々は、緑の革命の恩恵に浴することはできなかった。

増収のためには、莫大な量の肥料や農薬を必要とする。図 3 の曲線は、DDT や BHC などが最も盛んに使われていたころ（1963 年）の、各国の平均穀物収量と肥料・農薬の平均施用量との関係で、収量を 2 倍にするためには数倍から 10 倍の肥料・農薬が必要を示す。いわゆる「収量逡減の法則」の現われである。農業機械の使用量についても、ほぼ同様な関係がある。近年の農業生

表 5. 日本の水稲栽培につきこまれている補助エネルギー（太陽エネルギー以外のエネルギー）量と、生産される食品としての化学エネルギー量の推移（宇田川，1977）

（単位 10^6 cal/ha）

	1950	1955	1960	1965	1970	1974
人力・畜力	1,390	1,180	1,030	740	590	440
機 械	1,370	2,380	3,830	8,100	13,830	15,950
肥 料	2,400	3,750	6,070	7,380	9,820	9,820
農 薬	60	490	960	1,560	1,320	1,860
燃料・電力	360	520	810	1,590	2,500	2,430
資材・建物	1,820	2,030	2,390	2,560	3,120	5,000
水 利	1,550	1,870	2,850	3,460	2,400	2,720
その他	190	1,130	1,480	2,260	3,380	8,790
計〔A〕	9,140	13,350	19,420	27,650	36,960	47,010
生産エネルギー量〔B/A〕	11,600	14,800	15,900	15,900	17,300	17,700
B/A	1.27	1.11	0.82	0.58	0.47	0.38

産の急激な伸びは、多収穫品種の育成と、それと表裏一体をなす肥料・農薬・機械力の投入とによって、初めて達成できたのである。農業は、太陽のめぐみだけで成立しているのではなくて、実は大量の工業エネルギーの投入がなければ成り立たなくなっている。もちろん、そのエネルギーの大部分は、石油エネルギーである。先進国の農業は、すでに 20 世紀石油工業文明の一部なのである。

農業生産のエネルギー分析は、驚くべき事実を明らかにした。表 5 は、宇田川武俊教授¹¹⁾が計算した日本の稲作のエネルギー分析の結果である。1974 年の時点で、日本の水田 1 ha には、太陽エネルギー以外に、470 億カロリーの人工エネルギーがつけこまれており、その量は米として収穫される食品エネルギー 177 億カロリーの 2.7 倍に達している。かつては、収穫物の化学エネルギーのほうが人工エネルギーの投入量より多かったが、高度経済成長の始まった 1960 年ころから、両者の関係は逆転した。表が示すように、人工エネルギーのうち圧倒的に多いのは農業機械と肥料の製造に要するエネルギーで、この 25 年間に前者は 12 倍、後者は 4 倍になっている。なお、農業製造のエネルギー量の増加率は 31 倍である。このような現象は先進国農業に共通のものだが、収穫エネルギーに対する投入人工エネルギーの比は日本で異常に高く、いまの日本農業の危機の大きな原因がここにあることを示している。

日本の場合は極端だとしても、これからの食糧増産が莫大なエネルギー消費を伴うことは、避けがたい。われわれが、いまのエネルギー多消費型の文明生活をいつまでも続けられるかどうか、将来のエネルギー需給の見通

図 3. 国別の平均穀物収量と肥料および農薬施用量との関係（1963 年度の FAO のデータによる）

しはまだ立っていないが、限られたエネルギーを工業産物に投入するか農産物に投入するかを選択せまられる可能性は高い。ローマ・クラブの世界モデルにも、このトレード・オフが組みこまれている。

また、ローマ・クラブのモデルは、農業生産の増加が工業エネルギーの消費をなかだちとして、環境汚染をふやすという回路を想定している。それは、もう現実起こっていることである。水銀農業による環境汚染は、スウェーデンでは水俣病を起こす一歩手前までいった。いま北アメリカの五大湖は、人工毒物による汚染が、魚を食べるのを禁止ないし制限するところまで進行している。たとえばミシガン州政府は、ミシガン湖の特定の場所で釣った特定の種類の魚を、妊婦や幼児が食べることを禁じている。汚染物質のおもなものは、有機塩素農薬と PCB である。おそらく開発途上国では、まったく気づかれていないか、もしくは無視されているだけで、同じ程度の汚染があちこちで起こっているのではないかと想像される。

一方、農地からの肥料の流出は、水の汚濁のおもな原因の一つである。図3が示すように、肥料を多くやればやるほど、それが作物に吸収される率は低くなり、そのまま流出する量が多くなる。とくに肥料の主成分であるリンと窒素の化合物は、田畑から川に流れこみ、さらに湖や内海にそそいで、その水域を富栄養化によって汚濁させる。現在の世界の陸水や浅海域は、非常に勢いで富栄養化しつつあり、貴重な淡水資源や沿岸漁場を損なっている。欧米では、下水道の整備が進んで、これまで富栄養化の最大の要因であった工業排水と都市人口からの生活排水とが浄化処理されるようになり、下水道では処理できない農業排水が悩みの種となりはじめている。琵琶湖などでも、いま進行中の下水道建設が一段落すれば、同じような事態が起こるだろう。先進国なみの多肥農業が開発途上国のすみずみにまでゆきわたったときの水質汚濁のひどさを想像すると、ぞっとする。農業の工業化と環境悪化との必然的な因果関係は、今後ますます重大となるだろう。

6. むすび

以上の話は、すべて、新石器時代以来続いてきた、高等植物を基礎とする食糧生産を前提にしているが、石油タンパク、クロレラ、スピルリナのような微生物の食糧化や光合成過程の工業化などによって、合成食糧の時代がくる可能性もないわけではない。しかし、合成に必要な大量のエネルギーの給源をどこに求めるか、太陽エネルギーを利用するならどうしてそれを集めるかなどの技術的問題は、まだまったくめどが立っていない。在来のエネルギー源に頼るかぎり、合成食糧は農業生産物の補助以上の役割は果たせないだろう。われわれの食生活が全面的に合成食糧に適応できるかどうかにも、大きな疑問がある。

欧米の食糧問題専門家たちには、比較的楽観論者が多い。たとえば、スクリムショウ¹²⁾は、「食糧生産や科学技術、必要な天然資源に限界があるわけではない」といいきっているし、クラッツマン¹⁾は、世界の各地域別に細かく食糧生産改良の可能性を検討して、現存する技術の活用だけでいまの2.5倍の食糧生産は可能だとしてい

る。これは、100億人に十分な食事を提供できる量だという。

クラッツマンの結論は常識的で穏当な結論だが、それを達成するには、技術の普及のほかには人口制御、産業構造の改革、意識変革、国際政治の変化などが組み合わさった、きわめて複雑な過程が必要となるだろう。人間は、生きてゆくためにはいかなる努力や工夫もするが、一方で、頭をぶつけるまではなかなか従来の生活を変えないという弱点をもつことも、また事実である。ローマ・クラブのモデルに現われた人口の激減といったカタストロフは回避できても、各所で悲劇的な事件がおこる可能性はけっして低くない。環境保全主義者としては、100億人が食っていける時代がきたとき、この地球の環境がどんな姿になっているか、楽観的ではいられないのである。

文 献

- 1) Klatzmann, J. (小倉武一訳)：百億人を養えるか—21世紀の食料問題(人間選書 91), 284 (1986), (社) 農山漁村文化協会 (東京)
- 2) 加藤 迥：地球管理計画, 223 (1969), (財) 日本生産性本部 (東京)
- 3) 吉良竜夫：食の文化シンポジウム '82, 地球時代の食の文化 (石毛直道編), 129 (1982), 平凡社 (東京)
- 4) Odum, E.P. : *Current History*, 58, 355 (1970)
- 5) Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J. and Behrens, W.W., III, (大来佐武郎監訳)：成長の限界—ローマ・クラブ人類の危機レポート, 203 (1972), ダイアモンド社 (東京)
- 6) 石 弘之：グリーンパワー (朝日森林文化協会), 110, 38 (1988); 112, 38 (1988)
- 7) Margat, J. and Saad, K.F. : *Nature and Resources (UNESCO)*, 20 (2), 7 (1984)
- 8) 只木良也, 吉良竜夫 (編)：ヒトと森林—森林の環境調節作用, 323 (1982), 共立出版 (東京)
- 9) Bickel, L. (仙名 紀訳)：飢餓への挑戦—ノーマン・ボーローグと緑の革命, 314 (1975), TBS 出版会 (東京)
- 10) 野沢重雄 (編著)：トマトの巨木は何を語りたいか—ハイポニカの科学・水気耕世界, 73 (1985), 協和株式会社 (高槻)
- 11) 宇田川武俊：世界 (岩波), 377, 354 (1977)
- 12) Scrimshaw, N.S. : 食の文化シンポジウム '82, 地球時代の食の文化 (石毛直道編), 152 (1982), 平凡社 (東京)

(1988年5月20日受理)