

食糧生産と環境

Food Production and Environment

内 嶋 善 兵 衛

Zenbei Uchijima

1. はし が き

古い伝承や碑文などが物語っているように、古い時代の人類の生活は、物に溢れた現在の豊かな生活からは想像もできないような空腹で貧しいものであった。そして、一度不作・凶作に見舞われると、多くの人々が飢餓におち入り、死にいたることも枚挙にいとまのないほど生じている。これは、洋の東西を問わず、また過去と現在を問わず、広く地球上で見られ、現在も生じていることである。

これらの飢餓の多くが、食糧生産をとりまく周辺環境、なかでも気象・気候条件の変動に際して起きたこと、現実には起きていることを過去の歴史およびアフリカでの大旱魃は教えている。人類は古くから“適地適作”という基本的なプリンシプルに則って農業を営み、それぞれの地域条件に適合した作目をえらび、管理法を採用して食糧生産を行ってきた。しかし、各地域における自然環境条件の変動は、多くの作物がそなえている適応環境域の範囲を大きく上回ることがある。そのような時には、いろんな手段をつくしても、作物の生育はうまくいかず収量が得られない。また、作物が優れた能力をそなえていても、周辺環境と作物の環境要求度とがマッチしない時には、その能力は十分発揮されず、月並みの収量しかえられない。

このように、食糧生産と環境とは密接な関係にあり、その重要性はいくら強調しても、し過ぎることはない。特に最近のように、人口爆発に伴う耕地の拡大、異常気象の頻発および人間の生産活動による環境汚染の進行が問題になっている条件下では、食糧生産における耕地の生産環境の重要性はますます大きくなっている。ただ単に、作物のもつ能力を十分発揮させるという意味だけではなく、農業の使命である“安全な食糧を安定的に供給する”という意味でも重要な意味を持って

きている。

そこで、本小文では、まず食糧生産における環境の意義を、そのあと環境と食糧生産との関係を説明し、最後に近い将来における気象・気候条件の変化の食糧生産に対する影響について触れたいと思う。

2. 食糧生産と環境

2.1 生産環境の役割と意義

食糧や飼料を生産する作物類は、芽生えから太陽光と水と土の温もりの中で青々と成長し、収量を形成する。この過程で、すべての作物葉は太陽光の力をかりて二酸化炭素と水とから炭水化物を合成している。炭水化物の原料である二酸化炭素は、葉面の小孔一気孔を通して空気中から吸収される。一方、水は土壌中に張った根系を通じて吸収されるが、その時一諸に多くの無機栄養分も吸収する。

では、作物は一生（芽生えから収穫まで）の間でどれ位のエネルギーと物質とを吸収して、生長し収量を形成しているのだろうか。その一例が図-1に示されている。5月初めの田植時から9月初めの収穫時までの約4カ月間に水田上へ入射する日射は、47.2億kcal/haに達する。そのほとんどは葉面や水面から水を蒸

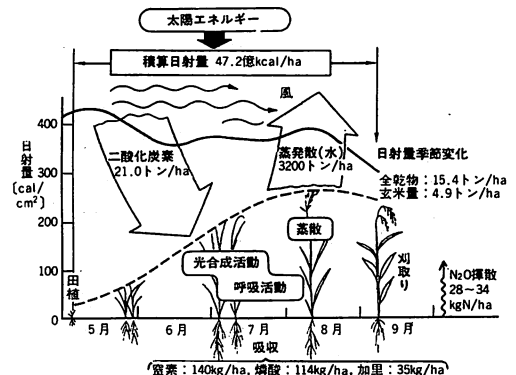


図-1 水稻栽培期間（鴻巣）におけるエネルギーと物質のやりとり（内嶋，1985）

* 農水省農業環境技術研究所 気象管理科 科長
〒305 茨城県筑波郡谷田部町観音台3-1-1

発させる熱源として使用される。わずかな部分が葉内での光合成過程で固定される。光合成過程で21トンの二酸化炭素が吸収される。そして、全乾物として15.4トン/haが生産されるが、玄米は4.9トン/haにすぎない。それゆえ、入射した日射エネルギーのなかで、稲の体内に貯えられるエネルギー量はわずかに1.3%にすぎない。玄米に貯えられるのは0.42%である。

このようなわずかな日射エネルギーをその体内に貯えるため、作物はその生育期間を通じて、周辺空間との間でエネルギーと物質を非常に活発に交換している。ある時は吸収し、ある時は老廃物を排出している。生長と収量形成の根元であるエネルギー・物質の交換の立場から、作物の周辺空間の機能を簡単に要約すると次のようになる。

- i, 作物が生き生きと生命活動を行い、食糧生産活動を展開する場であり、
- ii, 生命活動の維持・発展に必要なエネルギーと物質とが一時的または半永久的に貯えられる貯蔵庫であり、
- iii, 生命活動に必要なエネルギーと物質とが、貯蔵庫から作物体へと流れる、また各種老廃物が作物から周辺空間へ、流出する径路である。

この三つの重要な機能をもった作物周辺の空間を、作物の生産環境とよぶことにしよう。これら三つの機能が十分に発揮される条件下でのみ、作物は自らの能力に応じて生長し、収量を形成することが可能である。多くの農業技術は、そのような条件を作出することを目的にしているといえる。

2.2 生産環境のなりたち

作物の生育する環境は、地下1mから地上数mまで

の間に限定されている。この空間層は気象の分野ではよく接地気層とよばれている。接地気層内では1日を通じて、また1年を通じて、温度、湿度、風速などの気象要素が非常に激しく変化している。それに応じて、各種ガス類の濃度や水分含量、また小さな生物の動きなども大幅に変化する。このような変化の激しい生産環境はどのように構成されているだろうか。それを理解するために表1を引用しよう。

気層・土層・水層の三つからなり、それぞれに物理的・化学的・生物的因子が作用して、生産環境は構成されている。それらの間にはエネルギーと物質の流れを通じて、シームレスな回路が無数に往来している。これらを通してのエネルギーと物質の流れによって、生産環境は能動的に、または受動的に機能しており、

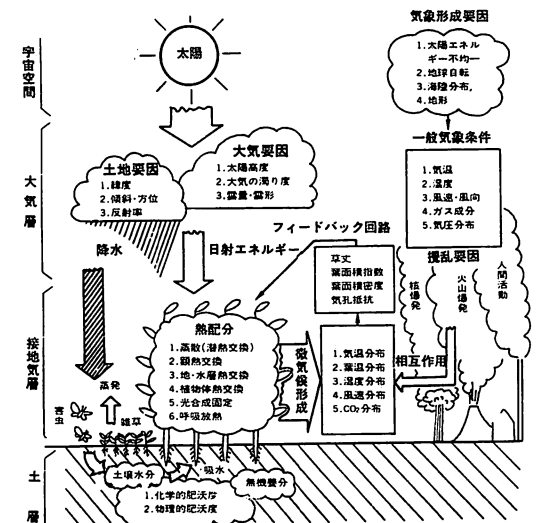


図-2 耕地生産環境をとりまく諸要因と相互作用 (内嶋, 1985)

表1 耕地生産環境のなりたち

		物理的因子	化学的因子	生物的因子
耕地生産環境	気層内環境	放射条件(強さ, 変化の幅, 波長組成, 日長) 温度条件(平均値, 変化の幅) 湿度条件(平均値, 変化の幅) 風(絶対値, 乱れ, 風向)	大気の化学的組成(NO ₂ , CO ₂ , CH ₄ など) 大気汚染物質の濃度	植被の茂り 害虫・病害菌類の密度 雑草の茂り
	水層内環境	放射(強さ, 変化の幅) 水温(平均値, 変化の幅) 流れ(流速, 深さ)	溶存ガス濃度(O ₂ など) 汚染物質濃度 溶存無機物質濃度	水体内微生物相 水体内雑草の茂り
	土層内環境	地温(平均値, 変化の幅) 水分条件(絶対値, 変化の幅, 鉛直分布) 通気条件(孔隙率) 土壌構造(拡散係数)	含有無機養分濃度 含有土壌汚染物質 土壌有機物質質量 土壌空気組成 土壌の鉱物的組成	微生物相とバイオマス 根系分布

食糧生産の担手である作物がこの流れのなかに位置しているのはいうまでもない。表1をより動的に、より広い空間的に表わしたのが図-2である。

図-2に見られるように、耕地の生産環境は地表近くにおける日射エネルギーの配分(熱配分)、それに伴う物質の流れ・循環を通じて形成されている。それらの配分・循環には一般気象条件が大きな影響を与えており、これが地球上の各緯度帯でそれぞれ異なる生産環境の見出される原因である。一方、地表近くの環境と一般気象条件との相互作用(これが気候形成作用である)を大きく攪乱する要因が、地球上には存在している。これらの攪乱要因の作用のため、若干長い時間をとると、意外に気候が変動していることがわかる。気候変動に応じて耕地生産環境、したがって作物の生長・収量も大なり小なりに変化する。

3. 生産環境の変化と食糧生産

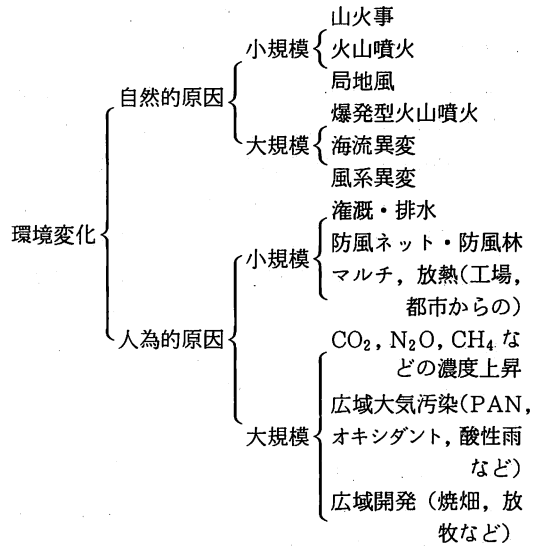
3.1 環境変化

図-2に示したように、生産環境は地球上にくり広げられている日射エネルギーと物質の流れ・循環のシームレスな網目のなかから、人工的に切り出して対象にしたものなので、本来的に変化・変動する性質を備えている。それゆえ、目前の生産環境が一見不変のように見えても、それはエネルギー・物質の動的平衡状態にあるにすぎない。このため、人為の加わらない場合でも、環境は変化する。耕地にして食糧生産を営むということは、いかにそれが一見合理的に見えても、地表近くでのエネルギー・物質の流れにインパクトをもたらす。それゆえ、農業技術は食糧生産の上昇・安定と同時に、農業の実践によって生産環境の上に予想されるインパクトをミニマイズして、生産環境をより長く維持するということも目標にしなければならない。

このような方向に沿って農業を営んでも、生産環境は常にある平均状態の上下に変動しており、その変動の大きさがある範囲を超える時は、農作物の生長・収量はかなりの影響を受ける。それは、わが国の稲作収量の年次変動を見れば明らかである。表1に示した生産環境構成要素のなかで、土層内環境と水層内環境は比較的に人為的に制御しやすいが、気層内環境は、一部ハウス・ガラス室内を除いて、非常に制御が困難である。気層内環境の変化・変動の主な原因を分類すると表2のようなになる。

これから判るように、大規模な環境変化をひき起こす原因としては、1982年前半のエルチジョンのような

表2 生産環境変化の原因



爆発型火山噴火、1983年のペルー沖のエルニーニョのような海流異変、また季節風・貿易風の異常がある。小規模な人為的原因としてあげた多くのものは、耕地環境の改善や気象災害の防止のために技術的手段として利用されている。一方、大規模な人為的原因は、現在人類が生存のために行っている各種の生産活動によって非意図的に地球環境に加えているインパクトで、これらは近い将来において大規模な気候条件の変化をひき起こし、生産環境に大きな変化をもたらす危険性をはらんでいる。

では実際に地球上の環境はどのように変動しているのだろうか。その一例が図-3に示されている。これはここ約100年間を通じて、北半球の平均気温と大気層の汚染度がどのように変化したかを示している。一般に平均化する空間の面積の広がりによって、変動幅は小さくなるが、北半球全体をとってもここ100年間に

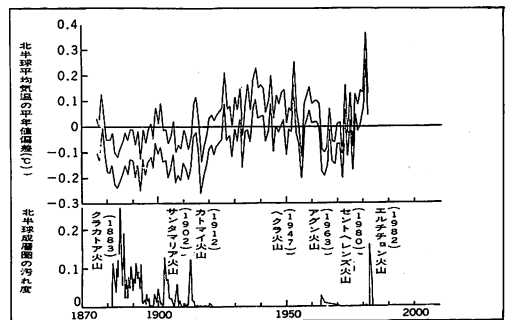


図-3 北半球の年平均気温、主な火山爆発、成層圏の汚れの経年変化

-0.2~+0.3℃の間に大きく変動したことがわかる。もう一つの重要なことは、爆発型噴火が続いた1920年以前の約40年間は平均より低く、火山噴火のなかった1920~1960年は平均より高いことである。これは、爆発型火山噴火による大気層（特に成層圏）の汚れが入射する太陽エネルギー量を減衰させ、気温低下をもたらすという古くからの提案を実証しているように思われる。1963年のアグン火山噴火後、平均気温は急ピッチで上昇し、1981年には過去100年間の最高を記録したが、1982年はエルチジョンの影響のためにかなり低下した。1963年からの気温上昇は、あとで説明するように大気中のCO₂濃度上昇の影響でないかと心配されている。

3.2 気候変化と食糧生産

いま、ここ約100年間における我が国の水稲収量の変動を冷害発生年と一諸に示すと図-4のようになる。約100年間に、1880年代の約2トン/haから最近の5トン/haまで2.5倍に増大している。その上昇はスムーズではなく、かなり上下に変動しているが、変動の激しい時期（1910年以前、1930~1955年期間、1970年以降）と比較的に穏やかな時期（1910~1930年期間、1955~1970年期間）とが交互に訪れている。変動の激しい

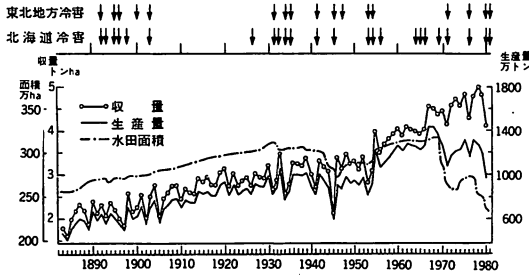


図-4 我が国の水田面積・収量・生産量の経年変化及び冷害年（内嶋，1984）

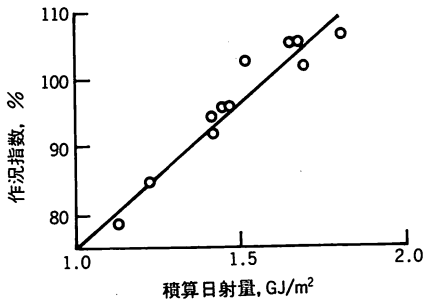


図-5 九州地方における7~9月期間の積算日射量とイネ作況指数との関係（小林・大場，1985）

時期においては、我が国稲作の最大の気象災害である冷害（1980年夏のような冷夏による）の発生頻度が高く、北海道・東北地方の稲作はかなり被害を受けている。これは熱帯・亜熱帯の多湿気候地を原産地とする稲の生長・収量が、特に北海道・東北地方で温度条件に極めて敏感なことを示している。片方、南西日本においては、温度条件以上に日射エネルギーの多少が、収量に著しい影響を与える。その一例が図-5に示されている。7~9月の積算日射量が1.0~2.0GJ/㎡の間では、作況指数はほぼ直線的に上昇しており、九州地域の稲作にとって日射量がいかに重要かがわかる。

一方、世界の耕地の80%強を占める畑地の作物は、温度条件もさることながら、耕地の水分条件に非常に大きく影響される。このことはソ連・アメリカの不作の主因が熱波であることを考えると、容易に理解できる。世界の穀類生産16~17億トンのうち、コメはわずかに4億トンにすぎない。それゆえ、畑作地帯の気候変化（主に降雨変化）は、世界の食糧需給にとって重要な意味をもっている。

一般に、気候条件のよい土地ほど気候変動の幅が小さく、気候条件の悪い土地—気候的辺地ほど変動が著しい。人口増につれて、耕地は次第に気候的辺地へと拡大される傾向にあるが、これは地域、国、または世界の食糧生産の変動を増幅させるといわれている。気候の豊かさの指標として、水稲栽培にとって重要な7・8月期間の平均気温およびコムギ栽培のため1~9月間

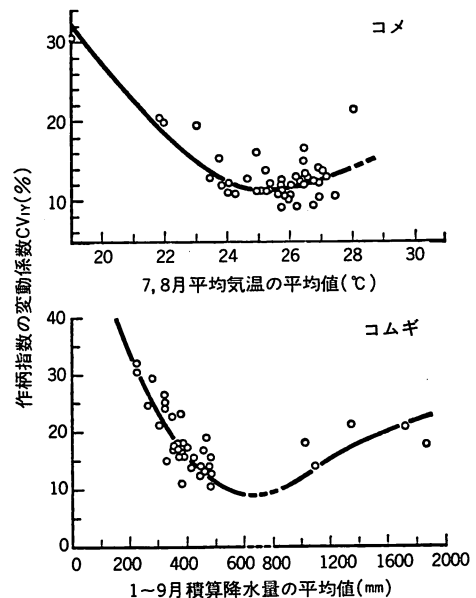


図-6 収量変動と気候条件との関係（内嶋，1981）

の降水量をとって、水稻とコムギの収量の変動との関係を見ると、図-6のようになる。水稻・コムギとも、収量変動は、不良気候条件下での30%台から気候環境の好適化に伴って直線的に低下し、水稻では7・8月平均気温25~26℃で、コムギでは初半年間雨量が600~800mmで最低(約10%)になる。この好適域以上に気候条件が豊かになると、逆に増大する傾向がうかがわれる。これは、一つの気候要因の制限がなくなると他の気候要因の影響が現われてくることと、一つの気候要因が過度に豊かになるとマイナスの影響が現われることに関係している。水稻は前者(台風害など)に、コムギは後者(多雨→倒伏、穂発芽、病害発生など)に対応している。

4. 近い将来における環境変化と食糧生産

4.1 近い将来の環境変化

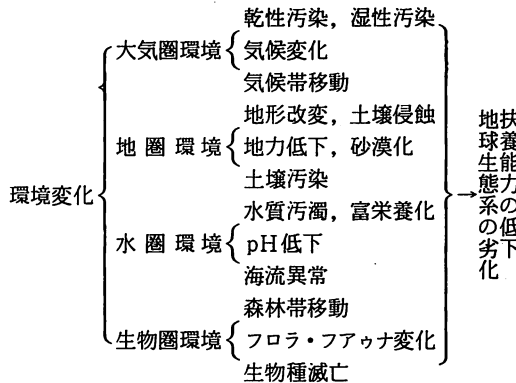
1972年のソ連・インドの大旱魃発生を契機として、地球上の気候は、約20年近く続いた安定期から異常気象の出現の多い変動期に入ったといわれている。そのためか、1972年以降、世界の多くの地域で多雨・少雨、高温・低温といった異常気象現象が多く現われ、食糧生産に大きなインパクトを与えている。10年来のアフリカのサヘリ地帯の大旱魃はその最たるものである。これらの現在までの異常気象を含む気候変動が主として自然的誘因に基づいていたのに反して、近い将来(21世紀初頭以降)の気候変動は主として人為的誘因に関係するだろうといわれている。

それは、産業革命以来、拡張・深化を続ける科学と技術によって人類の管理するエネルギー量と各種資源量とは指数関数的に肥大し、いまや何十億年と地球上に展開されてきた気候形成過程にまで影響を及ぼし得る程にまでなっているためである。また、科学技術を

背景に進行し続ける人口爆発と資源消費欲望とは、地球の空間的規模を相対的に縮小させ、いまや地球そのものが箱庭的存在になろうとしている。また、生産活動と生生活動の結果として、莫大な量の廃棄物と排泄物とを人類は環境に放出しており、これらによる汚染・環境破壊は更に深刻になるものと思われる。いま、その模様を示すと図-7のようになる。これらの排棄物・排泄物は様々なルートを通して耕地周辺の生産環境に流入し、その化学組成に大きな変化を生じさせている。その現われが、大気汚染、土壌汚染、水質汚濁である。このため、本来安全な食糧を生産するという農業の使命がそなわれることも多く見られるようになってきている。

以上説明したような原因に基づく近い将来における環境変化を要約すると、表3のようになる。記されている各環境変化は、現在までも我々の周辺で発生し、

表3 人間活動による環境変化



大なり小なり食糧生産や自然生態系または我々自身の生活に影響を与えている。しかし、今後予想される環境変化の特徴は、それがグローバルで同時多発的に発生するという点である。それゆえ、そのインパクトは小規模なものとも量的にも質的にも違ってくるものと思われるが、それらを予想できるような方法はまだない。しかし、大気中のCO₂濃度上昇→温室効果増大からも予想されるように、その影響は計り知れないものになると思われる。

4.2 食糧生産に対する影響

図-7に示した廃棄物の他に、人類は年間200億トンに近い二酸化炭素を大気中に放出している。その約半分は海洋・植生によって吸収されるが、残りは大気圏内に止まり、CO₂濃度を毎年1~1.5ppm上昇させている。現在の生活様式・生存様式の変更のない限り、大気圏

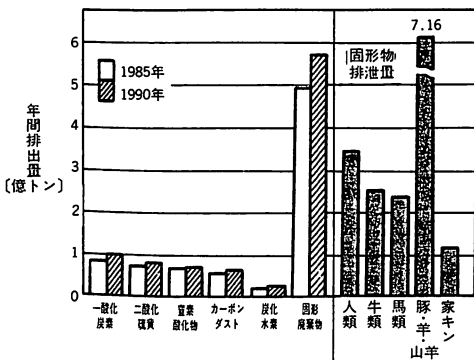


図-7 世界中の主な産業廃棄物と排泄物 (内嶋, 1985)

内へのCO₂放出は止まることなく続けられるだろう。最近の予想によると、2050～2070年には600ppmに近くなるといわれている（現在は340ppm）。その後も上昇は続き、23世紀には300×7倍のレベルに接近するというシナリオも発表されている。

このようにCO₂濃度が上昇すると、かなり大幅な気候変化を引き起こし、植生帯したがって主要農業帯の移動をもたらすと心配されている。現在それらの変化を食糧生産の予想に必要な確度で予測する方法は提示されていない。そこで、CO₂濃度上昇の食糧生産への影響を定性的に評価すると、図-8のようになる。CO₂

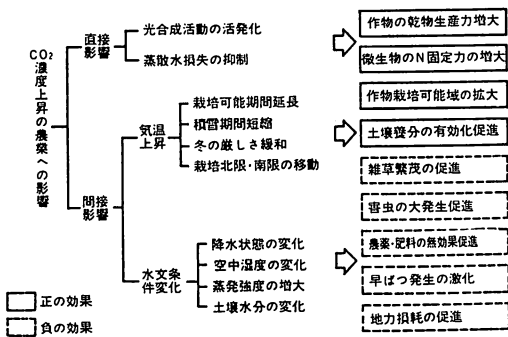


図-8 大気中の炭酸ガス濃度上昇の農業への影響 (内嶋, 1984)

の影響は直接と間接の二つに分けられ、前者はプラスの効果が予想され、後者はプラスとマイナスの効果の項からなっている。各々の項の影響の総和として評価しなければならないが、その総合影響が果たしてプラスになるのか、マイナスになるのか判断できない。現実には、ある地域ではプラスに、他の地域ではマイナスになるものと思われるが、それを具体的にするには、現在の研究手法はまだ不確実である。

しかし、今後20～30年のうちに、かなりの気候変化が生じ、世界の食糧生産がインパクトを受けることが心配されるので、この問題の研究は非常に重要な意義をもっている。このため、現在世界中で若干のグループがこの問題に注目し研究を進めているが、まだ非常に不十分である。

5. むすび

農業は各地域のもつポテンシャルな植物生産力を、作物の力をかりて食糧・飼料などに変換する産業といえることができる。このポテンシャルな植物生産力は、地域の環境条件によって決まる。ごく最近まで、環境条件—エネルギー・物質の流れの状態は自然的要因に

よって左右されてきたが、人間の生産活動の地球規模への増大に伴って、環境条件のほとんどは人間活動の影響下に入ってきた。この傾向は今後ますます強化されることはあっても弱まることはないだろう。

それゆえ、現在すでに地球は人間活動のために、多くの面で軋しみを発しており、大気汚染・土壌汚染・水質汚濁・生態系破壊などがその現われである。そのインパクトは、シームレスな回路を通じて食糧生産環境へ音もなく波及してきている。そして、単に生産力が低下するだけでなく、食糧の安全性が損われる場合も生じている。これらのことは、西暦21世紀に60億へ爆発しようとする世界人口を前に極めて危険なことである。この状況は、肥大する人間活動の前に戦っている食糧生産環境をいかにして保全し、発展させることが非常に重要で、かつ困難かを物語っている。この問題の解決には、人口—資源—環境—食糧というテトラレンマに対決しなければならない。

これに正しくアプローチするには、寄せ集めの学際的な研究ではなく、自然生態系と人類との共生的な発展を目標にした真の意味でシステムテックな農業生産環境科学の確立と、それに基づく生産環境制御技術の開発が必要である。また、地球や各地域の生物扶養能力の評価と、それに見合った生存様式の追求とが大切になってくる。

参 考 文 献

- 1) 奥野忠一, 内嶋善兵衛; 食糧生産と環境, SUT, 2巻, 5号 (1985), 35～46.
- 2) 内嶋善兵衛; 気候変動と農業, 科学, 54巻, 6号(1984), 341～350.
- 3) 内嶋善兵衛; 風土と農業, SUT, 2巻, 5号(1985), 4～9.
- 4) 朝倉, 内嶋, 久保木, 長坂; 異常気象時代, ブルーバック, 580 (1985), 講談社.