

《総説》

食糧・環境の近未来と作物生産技術の 基本的な発展方向

堀 江 武*

1. はしがき

筆者の所属する大学の農学部の新入生に農学部を志望した動機を問うと、10年ほど前は10人中7、8人からバイオテクノロジーを学ぶためという答えが返ってきた。ところがこの5、6年来、様相が一変し、同じ質問に対して環境問題にチャレンジするためという趣旨の答えが大多数を占めるようになった。この学生の反応の急激な変化の中に、日本の社会全体の農業や農学をみる眼が大きくゆらいでいることが読みとれる。ついこの間までは、バイオテクノロジーが農業の未来のための夢の技術として喧伝されていた。ところが、地球の環境問題が大きくクローズアップされてくるにつれて、「緑の産業」としての農業や林業に対するエコロジー指向的な見方が強まってきた。そのことは、有機農業や「自然農業」といったことに対する社会全体の強い反応、あるいは近年登場してきた遺伝子組換え食品に対する拒絶反応の中にも読みとれる。

強いエコロジーないしは自然指向をもった農法はかなり以前より日本に存在していたが〔宇田川 1999〕、この10年来の社会現象ともいえるそれへの傾斜は、世界的な動き、それも特に食糧の生産過剰問題をかかえる多くの先進国のそれと連動しているように思える〔NRC 1989〕。筆者は、農業の技術開発研究のバイオテクノロジーへの過度の傾斜に対して強い危惧の念をもっているが、一方で、日本の農業技術の過度なエコロジーないしは自然指向に対しても、同様な

*ほりえ たけし、京都大学大学院農学研究科

念を禁じ得ない。

農業技術は食糧など有用な生物資源の合目的な生産のために、土地と作物の総体、すなわち圃場ないしは地域生態系に対する人間の働きかけの方法の体系である。ここで土地とは生産のための資源であると同時にまた環境でもある。作物とは人間の長い歴史の中で家畜化されてきた一群の植物であって、それぞれの種、品種に応じてその成り立ちを規定する設計図、すなわちDNAをもった存在である。圃場ないし地域生態系では、作物個体間、作物と物理的あるいは生物的環境との間で物質やエネルギーの流れを伴った、相互依存的で複雑な作用・反作用の動的関係が成立している。この系（システム）は、今日の言葉でいえば、すぐれて多様系あるいは複雑系といえることができる。このような系の中では、DNAの改変の効果は作物と環境の相互作用に打ち消されてしまうこともあるし、逆に環境に思わぬ大きな負荷を与えることもあり得る。作物の成り立ちや、その種や品種のもつ固有の形質を支配する設計図（DNA）を読み解き、それを操作する技術を開発していくことは科学の進歩の必然ともいえる帰結であるし、また人類の未来にとって必要である。しかし、それへの過度の傾斜が、圃場や地域を対象に土の中の成分や生物を調べたり、あるいは作物と環境との相互作用のつぶさな観察を通じて、複雑系としての農業生態系の仕組みを理解しようとする地道な研究を、あたかも泥臭い過去の科学であるかのようにみる風潮が、一般の人とはともかくも農学の研究者の中にまで驚くべき広がりをもたらしたことに對し、強い危惧の念を抱くのである。結論からいってしまえば、DNA操作技術が進歩すればするほど、農業生態系の仕組みをよりよく理解することが必要であり、その理解のもとにDNA組換え技術を適正に位置づけ、またその合理的な使用方法を明らかにしていくことが、これからの農業技術にとって重要である。

一方、今日みられる農業に対する強いエコロジーないしは環境指向的な見方の高まりは、人間の健康や環境を含めて本当の豊かさの追求の現れであり、また、肥料・農薬などの化学物質や外部エネルギーの過度の使用に依存した近代

農業に対する強い警告と受け取れる。このような考え方のもとに、有機農業や「自然農法」の実践、あるいはその生産物の消費へと向かっていくことは至極当然なことである。しかしながら、このような農法の発展が、日本の狭い国土で1億2000万人の人口を養う農業技術となり得るかについて慎重な検討が必要である。何故なら土地に賦存する資源には限りがあることは誰の目にも明白になってきているが、その資源に依存した生物生産も有限であるからである。

筆者は、有機農法や「自然農法」を含む多様な形態の農業の発展を決して否定するものではないが、この拙論では、これからの食糧と環境の近未来を見据えて、日本に住むすべての人々とその子孫の生命の保障と健康の維持に必要な作物生産技術とはどのようなものであるかについて考えてみたい。すなわち、グローバルな視点からの食糧・環境問題、作物生産技術の到達点とバイオテクノロジーを含めた将来の発展可能性、および有機農業や「自然農業」についての分析を踏まえて、わが国の作物生産技術の基本的な発展方向について論じたいと思う。

2. グローバルにみた食糧と環境の近未来

(1) 人口と食糧

まず日本の農業技術の将来方向を論ずる基点として、今後50年間ほどの世界の食糧と環境について展望してみよう。地球人口は、現在60億人を超したところであるが、年間約8000万人の驚くべき速度で増加し続けている。この8000万人/年という速度での人口増加は、日本の人口に匹敵する国が、1年半ごとに新しくこの地球上に誕生していることと同等である。国連は、この人口の増加傾向は発展途上国を中心に今後とも続き、今から50年後の地球人口は現在の50%以上増の90～100億に達すると予測している。この100億もの人口を、これ以上環境に負荷を与えないで無理なく扶養することができるか否かが、グローバルにみたときの近未来の農業技術を考える上での基点となる。

ここで100億人の地球人口を養うのに必要な穀物生産量について試算してみよう。成人1人が通常の生活を維持するのに最低限必要なエネルギー量は9.1MJ（メガジュール、ほぼ2200kcal）である。まず、このエネルギーを最も効率よく供給できる形態として、穀物のみから摂取する場合について考える。イネ、コムギ、トウモロコシの子実の乾物1kgに含まれるエネルギーは17MJである。作物収量として計量される穀物子実のうち、籾殻や胚の部分を取り除き、さらに輸送中のロスや次年度の種子として残す部分を考慮した、実際に消費される部分の割合、すなわち消費率は平均的にみて70%と見積もることもできる。さらに穀物の水分含量14%を考慮した、1人1日当たりの穀物必要量は $9.1 / (17 \times 0.7 \times 0.86) = 0.89\text{kg}$ となる。これに含まれるタンパク質含量は、コメ（精白米）の7%を用いて計算すると、38gとなり、それは成人1人が1日に必要なタンパク質質量30gより多い。従って、1日当たり0.89kgの穀物生産があれば、アミノ酸組成の問題を除けば基本的に人間は生存し、生活できることになる。これより1人当たりの年間の必要量は $0.89\text{kg} \times 365\text{日} = 325\text{kg}$ ということになる。現在の世界の穀物生産量は21億トンであるので、それで扶養できる人口は65億人ということが出来る。実際には、これにジャガイモ、サツマイモ、キャッサバなどのイモ類や砂糖キビなどからのエネルギーが加わるので、それらの地域間の配分問題を別にすれば、エネルギー的には現在の食糧生産は世界人口を養うに十分な量といえる。

しかし、上の計算は乳肉など動物性食品を一切摂取しないという極限状態での穀物必要量を示すもので現実的ではない。一定量のエネルギーを得るのに、穀物を直接摂取する場合に比べて、乳肉の場合、家畜の種類や飼養条件に応じて、3～5倍の穀物が必要となる。現在、各国の1人当たりの年間の肉の食卓への供給量は、アメリカ、日本、中国およびインドで、それぞれ120、43、21および2kgであって、その過剰摂取が問題となる国がある一方で、それがほとんど望めない国が存在する。加えて、サハラ以南のアフリカ諸国にみられるように、慢性的なエネルギー不足にある、8億人もの飢餓人口が存在し、食糧の地

域間配分は極めてアンバランスである。この状態が今後とも続くことを容認した場合でも、50年後の世界の穀物必要量は、現在の67%増の33億トンになる。実際、国際イネ研究所（1998）は、人口の増加のみでアジアのコメ生産量を2025年までに現在の40%以上高める必要があると見積もっている。

しかし、例えば今日の中国にみられるように、発展途上国の中には年率10%もの経済成長を続けている国があり、それらの国では経済の発展とともに動物性食品の需要が増加しつつある。これらを考慮した場合の世界の穀物必要量は、2050年には現在の約2倍、すなわち40億トンは必要ということになる。これを達成するには耕地面積を現在の2倍にするか、単位面積当たりの生産量すなわち収量を2倍に高めるか、あるいは両者の組み合わせによるか、以外に方法はないのである。

今後50年後に予測される現在の2倍もの穀物需要に見合う生産が果たして可能か否かに関して、大きく異なる二つの見解がある。その一つは、世界銀行やFAOなど、主として経済の視点に立った分析に基づくものである。それらの分析結果を要約すれば、人口の増加、経済発展に伴って食糧需要が増加すれば、穀物価格が上昇し、それに伴い灌漑設備、肥料・農薬などの生産設備や資材あるいは新品種開発など、農業への投資が促されて、生産が高まり、需要が賄えるということになる。このような楽観論に対し、L.ブラウンに代表される、食糧生産の未来に厳しい見方をする人達の見解は次のようである〔BROWN 1996〕。すなわち、食糧の生産は他の産業のように経済投資をすれば直に増えるといったものではなく、それは作物のもつ遺伝的な生産能力や環境資源の容量に強く規制されており、しかもこの両者とともに限界があるというものである。これに近い考えをもつ人達は、農業生態学者や農業環境学者に多い〔HOSSAIN 1999, EVANS 1999, SINCLAIR 1999〕。上掲のブラウンはさらに、世界の1人当たりの穀物生産量は1980年代半ばをピークに、その後下降線をたどっていることを示し、これはとりもなおさず、農業生産を規制する二つの要素、すなわち作物の遺伝的生産能力と水、肥沃な土壌などの環境資源の容量が限界に近

づきつつあることを示すものとしている。果たして、作物のもつ遺伝的な生産能力がその生物物理学的な限界に近づいているか否かについては次節でさらに詳しく分析することとし、ここでは作物生産をとりまく環境について若干ふれておこう。

(2) 食糧生産と環境

人口増加に伴う食糧など生物資源の生産の拡大が、砂漠化、土壌の塩類化、水資源の枯渇あるいは土壌侵食などの環境破壊をもたらしてきたことは多くの人の認めるところである。砂漠化は気候の乾燥による自然的なものに加え、アフリカなどにみられる焼き畑や家畜の過放牧など人為によるものが驚くほどの勢いで進行している。これらの地域では十分な休閑期間を設けて地力の回復を待って叢林を焼き払い、作物を植えつける農業が伝統的なものであり、生産力は低いながらもそれなりに安定していた。しかし人口圧の高まりとともに休閑期間が短くなるにつれ、植生が貧弱になり砂漠化するという〔久馬・高橋 1995〕。さらに乾燥地域のサバンナやステップでの家畜の過放牧も砂漠化の一因となっている。1984年の国連の調査では、このような原因で年々砂漠化によって荒廃していく面積は600万haに及ぶとされ、これは日本の全耕地面積より大きい。

食糧生産の増加圧力は乾燥・半乾燥地域での灌漑による農業を促してきた。乾燥・半乾燥地域は日射量が高く、水と養分が適切に供給されると非常に高い農業生産力を示すことが多い。しかし、一時的に成功したかに見えた、これらの地域の灌漑農業は時間の経過とともに様々な問題を露呈した。例えば、旧ソビエト領のカザフ、ウズベク両共和国にまたがる世界第4位の大きさをもっていたアラル海は、そこに注ぐアムダリア、シラダリアの両河の水をせきとめて灌漑を行った結果、その面積が半分以下に縮小してきている。加えて、灌漑農地でも塩が集積し、農業の継続が困難になってきている地域が相当な広がりを見せている。アスワンハイダムの建設によって灌漑が進んだエジプトでも農耕地の塩類化が深刻さを増してきている。さらに、黄河上流で灌漑農業が拡大し

た結果、下流の華北省や山東省では渇水期には黄河が干上がり、地下水を汲み上げての灌漑を余儀なくされ、地下水位の低下や塩害が問題になってきている。このような原因によって農業の継続が困難になって放棄される灌漑農地は年々100万haにも及ぶという〔ROSANOV 1990〕。

風食、水食などの土壌侵食も農業がもたらす環境破壊の一つである。森林や草地など、それまで安定していた生態系を切り開き、耕して作物を栽培するという行為には大なり小なり土壌の流亡を伴う。その量が岩石の風化によって生成する土壌の量、すなわち年間1mmの土層（約10t/ha）を上まわると、耕地は作物生産に不可欠な土を失うことになる。アメリカの穀倉地帯である大平原地域では1930年代に10年に及ぶ乾燥期が続き、ダストボウルと呼ばれる砂嵐の頻発によって土壌が激しい侵食を受けた時代があった。それを契機に全米の土壌侵食調査が行われ、「アメリカの短い歴史の中で、約4000万haの優良農地が侵食により寿命を終え、回復不可能になった」とアメリカ土壌保全局初代長官H.H. バネットが報告しているという〔三輪 1984〕。その後も同国の農業は土壌侵食に脅かされ続けてきたが、機械化、飼料作物を含む輪作からトウモロコシやダイズの単作農業への転換、および有機物に代わる化学肥料の多投など、経済性を重視した近代農業になってそれが一層激しさを増してきている。

他方、発展途上国では、高い人口圧のもとで急傾斜地にまで焼き畑や耕地化が及んでおり、激しい土壌侵食を受ける地域が相当な広がりを見せている。筆者らはタイ国東北部の天水田稲作地帯の調査を行っている。この地域はもともと森林であったが、この100年来、水田への開墾が進み、天水にのみ依存した稲作が行われており、その面積はタイの全水田面積の半分にも及んでいる。緩やかな起伏のある地形上に小さな棚田状の水田が広がっているが、上部の水田では粘土分や有機物が流れ去り、やせた微砂が大部分を占め、肥料を加えたとしてもそれを保持する力がなく生産がほとんど望めない状態になっている。筆者らの調査では、同地域の水田の20～30%程度がこのように荒廃していた。このような水田に加え、不安定な降雨のため東北タイの平均稲収量は日本の1/4

のヘクタール当り1.5トンと極めて低い水準にある。作物の生産に必要な栄養を供給できる土は、通常数10cmの厚さの表土に限られている。先進国の近代農業、発展途上国の在来農業を問わず、土壌侵食による肥沃な土壌の流亡は、農耕地の作物生産力を確実に低下させる要因である。

さらに農耕地への灌漑や肥料・農薬の多投、あるいは畜産廃棄物による水質汚染も農業生産の拡大と集約化に伴って増加した環境破壊である。農耕地を通過する水は、地下水あるいは河川水として生活や他の産業で利用される水とながっている。オランダ、イギリス、デンマーク、フランスなど西ヨーロッパ諸国では、肥料や厩肥の多投により作物生産性を高めてきたが、その見返りとして地下水の硝酸塩濃度がECの基準値50ppmを越す地域が相当に広がり、これら生産資材の投入が厳しく制限されるようになった。オーストラリア・ニューサウスウェルズ州のマレー川流域では灌漑による稲作が行われ、強い日射のもとでその収量は世界最高水準にあり、同州の重要な輸出産業となっている。灌漑による水質汚染を考慮して、同地域の稲作面積は全耕地の約10%に制限されている。それにもかかわらず、灌漑によって土壌中の塩が溶出して、マレー川の水を生活用水とする下流のアデレード市の水質悪化を招いており、稲作を含む灌漑農業にさらに厳しい制限が加えられようとしている。さらに、富栄養化や農薬による汚染が深刻さを増しているフィリッピン最大のラグナ湖など、農業による水質汚染が世界各地に広がってきている。

以上、農業に起因する環境問題の深刻さを訴えたいあまり、少し紙面を使いすぎたきらいがあるが、ここで強調したい点は次の3点である。その1つは、これから増加する人口を扶養する手段としての耕地面積の拡大はグローバルにみてほとんど望めないということである。乾燥・半乾燥地の灌漑や森林の耕地化は、さらなる環境破壊をもたらす危険度が高いばかりか、そこでの持続的な作物生産はほとんど期待薄である。実際のところ、塩類化、砂漠化あるいは侵食による耕地の不毛化、および都市化などによって優良な農地は減少しつつある。第2点は、近代社会における化石燃料の大量消費と、上に述べたような地域環

境の破壊とが重なって、地球全体の環境が急速に悪化しつつあり、その影響がやがて農業に及ぶことは避けられなくなってきていることである。すなわち、地球大気の温室効果ガスの濃度上昇に伴って予測される地球温暖化の農業への影響に関して、現在よりも生産性が高まると考えられる地域がある一方で、高温害や早ばつの多発あるいは海水面の上昇による沿岸地域の塩害など、深刻な影響が及ぶと考えられる地域が相当な広がりで見られる。その影響の全貌はいまだ計り知れないが、将来の食糧生産を不確かなものにする大きな要因であることは確かである。第3点は、以上のような環境問題を背景に、アメリカやヨーロッパ諸国など、これまで輸出支持金まで付けて農業生産力を伸ばしてきた国に、環境保護的な農業指向が強まってきたことである。すなわち、1990年のアメリカの農業法に代表されるような、輪作、不耕起あるいは最小耕起、肥料・農薬の使用削減などを含む、いわゆる低投入持続型農業（LISA）への転換の動きである。これらの国では、環境保護的な農業に奨励金を付けるようになってきている。これらの動きは、1982年のアメリカの土壤保全局長N. パークの弁「トウモロコシやダイズを1トン余計に収穫するために2トンの土が失われる。我々はトウモロコシだけではなく土も輸出しているのだ」、にみられるように、国内の環境や資源を失ってまでも食糧を輸出することに対してプレーキがかかるようになってきたことを意味する。このような主要穀物輸出国の農業の環境保護の強まりは、近未来の世界の食糧供給に対する黄色信号となっている。

(3) 日本の食糧と環境の展望

本節の最後に、日本の食糧と環境について少しふれておこう。わが国では、上に示したような農業に起因する土壌の塩類化、砂漠化、侵食あるいは地下水の硝酸汚染は、局所的にはともかくも、その広がりが問題視されていない。これは、全国平均の年雨量が1700mmと水に恵まれた気候、国土の66%も占める森林の存在に加え、耕地の主体が灌漑水田であることによる。日本に稲作が伝わって以来、永い年月をかけて造られた傾斜地上の水田が貯水機能や土壌侵

食防止機能をもっていることは、今では広く認められるところである。加えて、水田は富栄養化した水を浄化する機能を有している。わが国の農業は、世界で最もよく整備された用排水施設をもった水田が中心で、高い生産力と環境保全機能を有する基盤上に成立している。しかしながら、肥料・農薬を多投する近代農業、および海外からの輸入穀物に依存した集約的な畜産業に由来する水系の汚染はかなりの環境負荷を与えている。

環境破壊により農業の生産性や持続性が損なわれることは、一部の野菜連作地帯で発生している土壤病虫害や無機養分のアンバランスによる生理障害などを除き、さして問題となっていない。これも水田のもつ高い生産環境の保全機能のお陰である。わが国の食糧生産力を低下させる最も重大な問題は、都市化などに伴う優良農地の減少である。すなわち、かつて600万ヘクタールあった耕地が、1999年には水田270万、畑220万ヘクタールの合計490万ヘクタールになってしまった。この30年ほどで実に20%にも及ぶ耕地が減少したのである。現在の耕地面積でどの程度の人口が扶養できるかについて考えてみよう。先に示したように人間1人の生存と生活には年間に米が325kg必要であり、日本の現在の水稲単収はヘクタール当たり1.6トンであるので、これと現在の水田面積270万ヘクタールとから、日本の全水田の稲作による人口扶養力は4980万人となる。これはわが国の全人口の半分にも満たない。この稲作にさらに水田裏作としてムギ類、畑地にイモ類やマメ類の栽培などを加え、わが国の耕地を最大限に利用したときの人口扶養力は、農水省の試算でも現在の人口の80~90%となっている。つまり、乳肉や卵など動物性食品を一切摂取しないという極限状態においてさえ、日本農業はすでに全人口を扶養する力を失ってしまっていることになる。これまでの輸入食糧に依存した農業政策が、ここまで日本農業を弱体化させてしまったことは由々しき問題として重く受けとめねばならない。この、日本農業が極限状態を想定した場合においてすら、現在の全人口を養いきれなくなっているという事実は、これからの不確実な未来に向けて、わが国の農業技術のあり方を考える上で最も重視すべきことである。

3. 作物収量の生物物理学的な限界

耕地の拡大が望めないばかりか、環境破壊や都市化により世界の優良農地が失われている現状の下で、これから増加する人口を扶養するには単位面積当りの生産性、すなわち収量を高める以外に方法はない。ところが現在、集約的な栽培管理下にある作物収量は生物学および物理学の法則に規定される限界収量に近づきつつあるという見方がある〔BROWN 1996, SINCLAIR 1999〕。これについて分析を進める上で、まず、「緑の革命」と呼ばれる近代の作物生産力の向上がどのような生産技術に支えられていたかについて考えてみよう。

(1) 「緑の革命」の作物生産技術

1960年頃から工業化の進んだ先進国の穀物収量の増加が始まり、それより10年ほど遅れて多くの発展途上国のそれがスタートした。その傾向は1980年代半ばまで続き、その間に平均的にみた世界の穀物単収は2倍近く増加した。この収量増加に、1960年代に登場したコムギ、イネなどの半矮性品種の貢献のあることはまぎれもない事実であるが、そのことがあまりにも強く強調されて、「緑の革命」があたかも品種改良単独の成果であるかの如くとらえるのは誤りである。コムギ品種「農林10号」（昭和10年岩手県農業試験場で育成）や台湾在来のイネ品種「低脚烏尖」がもっている草丈を低くする遺伝子（半矮性遺伝子）を交配によって、既存の品種に導入することにより、草丈が低く、分げつ数が多くかつ葉が直立したコムギやイネ品種（短稈・多げつ・直立葉型品種）が1960年代に登場した。これら半矮性品種は、窒素肥料を多く与えると分げつ数は増えるが、それまでの品種のように背丈や葉身が伸びず、倒伏したりあるいは葉が湾曲することなく直立し、その窒素濃度を高く維持する性質をもっている。これら近代品種が多収となる理由は、次の4点に要約できる。

①肥料を多く与えても倒伏しない

②作物生長の原動力である光合成反応は一般に葉の窒素濃度に比例するので、

それが高いと生長も旺盛になる。

③多肥条件下では葉の量が多くなり、相互に遮へいし合うため光合成の効率が低下するが、葉が直立しているとその低下度合いが小さい。

④背丈が低いことは、稈の生長に必要な光合成産物が少なくてすみ、その分の光合成産物を子実生長に向けることができる。

上に示したことは④を除き、いずれも半矮性品種がその多収性を発揮するには多量の窒素を必要とすることに関係している。低窒素条件下では、これらの品種は、葉が伸びず、分げつが少なく生育が極めて貧弱となって収量が低い。さらに④と関係して、草丈が低いので雑草との競争力が極めて弱いことも半矮性品種の特徴の一つである。加えて、多窒素条件下ではイモチ病などの病気が発生し易く、また高タンパク質含量なので虫もつき易い。

それ故、「緑の革命」で登場した半矮性品種は、工業生産に支えられた合成アンモニア肥料、殺虫剤、殺菌剤あるいは除草剤などの投入とセットにして、はじめてその威力を発揮する品種といえることができる。さらに、これら資材の投入の前提として、灌漑が不可欠である。何故ならば、不安定な降雨に依存した天水栽培では、早ばつの危険度が高く、これら資材の投入に見合う収量増が不確実になるからである。このような半矮性品種は耐病虫性遺伝子の導入により、病虫害抵抗性が強化されてきているものの、総じてこの30～40年来の穀物収量の増加は、資源の多投による生産技術に支えられていたということになる。

以上は世界一般の傾向であるが、日本ではどうであったであろうか。日本の水稲収量は明治以降着実な増加が認められるが、その急速な増加の始まりは世界のそれよりも早く、1950年代半ばとみることができる。この頃からの約20年間で全国の水稲単収は、それ以前の40%以上増加した。わが国の歴史上、このように短期間で40%もの単収増が認められるのは唯一この期間で、日本の「緑の革命」期といえることができる。

長谷川・堀江はこの収量増をもたらした生産技術要因を探る目的で、近畿の主要稲作地域を対象に分析を試みた〔1995〕。まず、その間に登場した品種の

表1 近畿地方の主要な水稲品種の登録年と比較収量性 (DYA)。(長谷川・堀江、1995)

品 種	登録年	熟期 ^{a)}	n ^{b)}	DYA 値(標準偏差) kg/10 a
日本晴 ^{c)}	1963	早	—	—
ハウネンワセ	1955	極早	73	-63.0 (7.65) ** ^{e)}
ビワヒカリ	1972	極早	17	-47.7 (12.94) **
コシヒカリ	1956	早早	157	-42.8 (5.14) **
農林 22 号	1943	早	11	-30.8 (10.29) *
若葉 3 号	1950	早	16	-24.0 (12.86) *
ヤマビコ	1958	早	99	- 2.9 (2.71)
マンリョウ	1959	早	38	- 5.0 (4.43)
秋晴	1962	早	12	-19.6 (14.50)
キンバ	1965	早	86	0.8 (2.68)
ビワミノリ	1971	早	52	10.6 (4.11) *
旭 4 号	1935 ^{d)}	中	30	-104.7 (11.08) **
金南風	1948	中	64	- 2.9 (5.77)
中生新千本	1950	中	65	-18.6 (5.28) **

a) 熟期は主に滋賀県基準による。

b) 基準品種とのペア数。

c) 基準品種。

d) 京都府の奨励品種に登録された年度。

e) *および**はそれぞれ5%、1%レベルの有意性を示す(帰無仮説：DYA=0)。

生産力を評価するため、1960年頃からの近畿各県の奨励品種決定試験のデータを分析した。この試験は、各府県が新品種導入にあたり、同一条件下で品種比較を行っているものである。いずれの府県でも最も長期にわたり栽培されていた「日本晴」を基準に、他の品種との収量差を求め、それを全府県・全年度について平均し、品種の比較収量性 (DYA) を求めた (表1)。日本では、半矮性遺伝子が世界に注目されるよりもはるか昔の、大正10年に富山農試で選抜された「銀坊主」に由来する半矮性遺伝子が、多くの品種に導入されていた(京大の谷坂教授による)。表1に示した品種のうち、「旭4号」を除く品種はすべてこのような半矮性遺伝子をもっている。1960年代以降、近畿地方の奨励品種決定試験に登場した品種間の比較収量性の差異は「旭4号」を除くと、最大と最小の間でも約70kg/10 aと、小さいことがわかる。加えて、農家の品種選択では、

生産性のみならず食味、病虫害抵抗性なども重要な要素となる。このことを考慮して、表1に示した各品種のそれぞれの地域での作付面積割合を年度毎に求め、地域収量の増加への品種単独の効果を評価したところ、日本の「緑の革命」期における品種単独の効果は地域により異なるものの、最大でもわずか20%であることがわかった。それゆえ、収量増の80%以上がそれ以外の要因およびそれらと品種の相互作用の効果によることがわかった。この間に近畿地方の化学肥料・農薬の使用量は2倍以上増加しており、収量増加の主要な要因はこれら資材の投入量の増加、作期の早期化および肥料の精緻な分施や間断灌漑などの技術にあるとみることができる。このように日本の「緑の革命」期の稲作収量の増加は、わが国特有のきめ細やかな稲栽培技術の効果が認められるものの、資源の多投に負うところが大きく、世界一般の潮流と異なるものではない。むしろ、半矮性品種と資源多投をセットにした「緑の革命」の作物生産技術は日本の稲作から始まったとみるべきである。

ただし、ここで述べた「緑の革命」の生産技術は灌漑農業についていえることで、発展途上国の天水に依存した農業には当てはまらない。例えば、世界の全稲作面積の約半分を占める天水田の収量は、「緑の革命」以前の灌漑田のその半分程度の低水準でかつ極めて不安定なままであり、これら技術進歩の枠外に置かれてきている。

(2) 作物収量の限界

近代の作物収量の増加が肥料・農薬あるいは灌漑など資源の投入に支えられてきたことは上にみたとおりである。作物の遺伝的な生産力が最も高い品種に、これら投入資源を最適に管理することにより得られる収量は可能最大収量と定義される。この収量は作物の遺伝的能力と、自然条件下では制御不可能な気温と日射量に応じて決まってくる収量である。それに対して、地域の実際の収量は、栄養分の過不足、水ストレス、あるいは病虫害・雑草など生物的ストレスの影響の度合いに応じて決まるものであり、実収量と呼ばれる。「緑の革命」

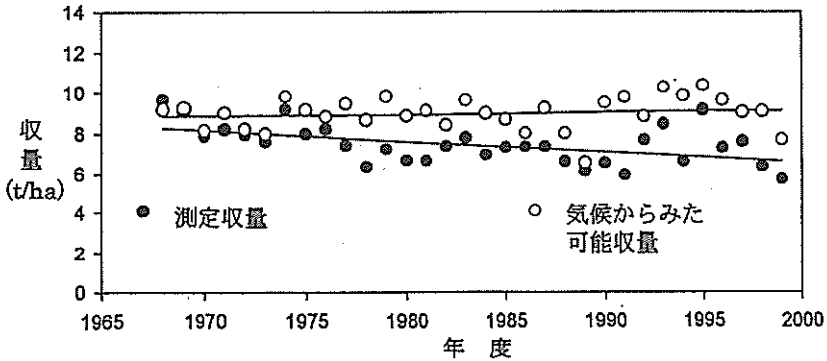


図1 各年代で最高収量を示した国際イネ研究所 (IRRI) の育成品種の収量と気候からみた可能収量の時系列変化 (Padilla, J.M. & Horie, Tら、未発表)。可能収量は最近の「IR72」の生理特性と各年の気象を基にモデルにより算出。

で登場した半矮性品種は、多肥にすることでこの可能最大収量を伸ばすことに貢献したことは確かである。その品種を用いた生産技術がひととおり普及した1980年代半ば以降、世界的に作物収量の伸びが鈍化し、その結果人口1人当りの穀物生産量は低下し続けてきた。その原因の一つとして、可能最大収量が生物物理学的な限界に達したとみる見方があることは前述した。

筆者らはこのことを調べる目的で、過去32年間にフィリピンに所在する国際イネ研究所 (IRRI) で育成された品種のうち、各年代で最も多収性を示した品種の生産力の推移について分析を試みた (図1)。IRRIで1960年代半ばに育成された「緑の革命」のシンボルともなっている「IR8」は、それまでの品種に比べ、多肥条件下で飛躍的に高い生産力を示したが、10年もたたずして病虫害に侵されるようになり、その生産力は激減した。その後、最近の「IR72」にいたるまで次々と新しい品種が育成されてきた。図1は「IR8」から最近の「IR72」まで、各年代で最も多収を示した品種を、十分な施肥と周到な病虫害・雑草管理のもとに栽培したときの収量の時系列的な推移を示すものである。その間の気候の変化の影響をみるため、「IR72」のもつ遺伝的な生産能力をもとに、各

年度の気温と日射量のデータを用いて、コンピュータモデルにより求めた可能最大収量の時系列データも図1に示されている。「IR72」をもとにした可能最大収量は32年間を通してほぼ一定であったことから、この間にイネ収量を上方あるいは下方にシフトさせるような気候変化はなかったとみられる。ところが栽培試験の収量は、1970年代前半までは可能最大収量に極めて近かったが、その後年度を経るにつれて両者の差異が広がってきていることが認められる。すなわち、この32年間にIRRIでは「IR8」以来、次々に新しい品種が開発されたが、それらを最適と考えられる条件下で栽培したときの収量は、年代とともに低下してきているのである。しかし、このことは新しい品種ほど生産力が低下していることを示すものではない。何故ならば、最も新しい「IR72」についてもとめた1970年前後の可能最大収量は、その当時栽培されていた「IR8」の収量にほぼ等しいからである。これより、図1に示される結果は、過去32年間にIRRIで育成された品種の生産能力には変化がなかったことを意味し、その収量が年々低下したのは灌漑による2期作を長年続けたことによる土地の生産力低下に起因するとみることができる。

IRRIで多収品種開発を目指して、過去32年間、懸命な研究が続けられてきたにもかかわらず、「IR8」より多収な品種はいまだ開発されていない。実際、新しい品種の開発は、それまでの品種が病虫害に侵されて生産力が低下するのを補う、いわば品種の生産力の「維持」に貢献したのみである。

品種の遺伝的な生産能力の向上が止まったようにみえる現象はトウモロコシでも認められる。アメリカでは、かつての米作日本一のような、トウモロコシの多収コンテストが行われている。そこに登場する品種は年々新しくなっているにもかかわらず、全米一位となるトウモロコシ収量はこの20年ほど、20t/haを少し上回ったレベルに留まっている。日本では他用途米と称して多収イネ品種の開発研究が活発に行われてきており、インド型品種に日本稲を交配して作られた「タカナリ」など、現在の日本型品種よりも生産力が30%程度高い品種が開発されている。試験場で、これら品種を用いた多収栽培試験でも収量は、

昭和35年の米作日本一の収量1052kg/10a（秋田県、工藤雄一氏）と同程度ないしはそれ以下である。

以上のように、可能最大収量の増加がこの数十年来止まったようにみえることから、作物収量の生物物理学的限界説が登場するのである。現在の作物の最多収品種のもつ生産力は果たして生物物理学的な限界に達したのであろうか。「緑の革命」期に登場した半矮性品種が多収となる機構は、上に示した4点に要約できるが、これらはいずれも作物の生育が進み茎葉繁茂が大きくなる生育後半、すなわち生殖器官が分化・発達する時期の生長を促進させるように作用し、それ以前の生長にはむしろマイナスに作用する。その結果、成熟期の植物体全体の重さに占める穂や籽などの収量部分の割合、すなわち、収穫指数の高い作物ができあがる。すなわち、半矮性品種が多収になるのは、収穫指数が大きいからであり、単位土地面積当りの植物体の全重（バイオマス収量）が増大するのではない。これまでの作物収量の向上は農耕の開始以来、今日まで専らこの収穫指数を高めることで達成されてきた。このことは、野生植物の収穫指数が10～20%であるのに対し、在来作物品種の多くが30%前後、そして近代改良品種の多くが40%以上になっていることから理解できよう。現在の最多収品種を最適に近い条件で栽培したときに得られる収量が、現時点での可能最大収量であるが、そのときの収穫指数は60%にも達している。これは作物の穂を人間の頭に例えるならば、頭の部分が全体重の60%も占めていることになる。それ以上頭の比率を高めると、それを物理的に支えることができなくなる限界値に近づいている。このことが作物収量の生物物理学的限界説の一つの拠りどころとなっている。つまり、品種の収穫指数をこれ以上高めて生産性を高めるこれまでの方法は限界にきているのである。

それゆえ、今後作物の可能最大収量を高めるには、作物体全体の生物学的な収量、すなわちバイオマス収量を高めてゆくことが必要になる。バイオマス収量がどのような要因に支配されているかについて考えてみよう。生物物理学的にみて、バイオマス収量は次の図式で表すことができる。

$$\text{バイオマス収量} = (\text{太陽エネルギー量}) \times (\text{エネルギーの受光率}) \times (\text{太陽エネルギーの有機物への変換効率})。$$

つまり、バイオマス収量は究極的には植物の同化する太陽エネルギーの量に規定されるのである。オーストラリア、カリフォルニア、あるいはエジプトなどで灌漑栽培される作物の収量が非常に高いのは、すべて上の図式の第1項、すなわち地上に到達するエネルギー量が多いことによる。この図式の第2項は、作物による太陽エネルギーの捕捉率であり、葉が速やかに繁茂し、高い繁茂度を持続することによって高まる。よく話題になる一代雑種、ハイブリッド品種が高い生産性を示すのは、主としてその旺盛な初期生長に基づく、太陽エネルギーの高い捕捉率に起因する。この捕捉率は葉の繁茂度に支配され、さらにそれは窒素吸収量に比例して大きくなる。第3項の太陽エネルギー変換効率は作物の光合成の効率に支配されており、これも葉の窒素濃度に比例的に高まる。それゆえ、与えられた日射条件下で、バイオマス収量を高めるには作物の窒素吸収量を高めなければならないことになる。しかしながら、耐肥性の強い半矮性品種を用いて、作物体の窒素吸収量を高めて、収穫指数を高く維持しつつ、上の図式の第2、第3項を大きくしてバイオマス収量を高める方法は限界に近づいてきている。

作物の可能最大収量を高める残された方法は、遺伝子操作技術を用いて、作物の光合成能力を改善し、太陽エネルギーの変換効率を高めることである。そのための研究が現在活発に行われている。しかし、後節で分析するように、それが近い将来に成功する可能性は決して高いとはいえない。

このように半矮性品種と資源の多投をセットして作物の可能最大収量を高める方法は次第に限界に近づいてきていることは確かである。現在のところ、遺伝子操作により光合成効率を高めるといふ、近い将来での実現の極めて困難な方法を除けば、それを高める有効な方法がみつかっていない。それゆえ、可能最大収量と農家の実収量の差は世界的に次第に小さくなってきている。それでも、可能最大収量と実収量の間にはなお50%以上の差異があり、栽培技術の改

善によって実収量を高めうる余地は残されている。それを実現するには、より集約的かつ周到な環境および作物の管理技術の適用が不可欠である。

4. 有機農業、「自然農法」をどうみるか

近代品種と資源多投に支えられた近代的農業技術に対し、有機農業、代替農業あるいは「自然農法」などの呼称をもった、別の考えに基づいた農業技術に対する社会的な関心が、食糧の供給過剰の問題を抱える先進国を中心に高まってきている。その背後には農薬に汚染されない食品などの健康指向、農業による環境破壊からの回避、農業の長期的な生産性の維持、あるいは自然崇拜など、様々な動機が認められている。その実態は、減農薬・省資源など比較的穏やかなものから、化学資材一切の使用を認めないもの、あるいは、播種と収穫を除いては一切の人為を加えない、自然放任のものまで、様々なものがあり、一律に論じきれない。耕地に有機物を投入し、土地の生産力や生産持続性を高めることは、伝統農法あるいは近代農法を問わず、農業の基本技術であって、ことさら特別視すべきではない。ここでは化学肥料・農薬の使用を認めるか否かで農法を区別し、それを認めないものを有機農法と位置づけて分析を行う。

外部資源の投入を拒む農業を実践してきた人達は、人間活動は植物の固定するエネルギーの範囲を逸脱すべきではないとするキリスト教アマン派などに、古くから認められる。例えば、アメリカのウィスコンシンやペンシルバニアにすむ厳格なアーミッシュ教徒は、農業内への外部資源の持ち込みをかたくなに拒み、今日でも肥料・農薬はおろか電力の供給すら受けず、馬に頼った有機農業を行っているという。わが国でもこれほどには極端ではないが、肥料・農薬の投入を拒む農法は岡田茂吉などに認められる〔宇田川 1999〕。このように、かなり以前から一部の人々によって実践されていた、有機農業や「自然農法」が1980年頃から社会的に強い関心を集めるようになったのは、上にあげたような動機によると受けとれる。

食糧・農業に関するこのような動きは、飽食の中にあつて農業を軽視してきた社会の眼を農業に向けさせたこと、および、外部資源に頼り、様々な環境負荷を与えてきた近代農業技術に対する警告という点で重要な意味をもっている。しかし、日本の場合、有機農業指向は生産者よりもむしろ消費者を中心に展開されており、それに過度に傾斜するあまり、近代農業技術の否定、さらには農業の誤った理解へとつながる危険性すらうかがえる。そこであえて、有機農業が、日本に住む大多数の人々とその子孫の生命と生活を永続的に保障する農業技術となり得るか、という点にしぼって筆者の考えを述べたいと思う。

コメの中には、窒素、リン、カリウムなどの無機物がそれぞれおよそ1、0.3、0.25%含まれる。これらはタンパク質の成分として、あるいは収量形成の代謝に不可能な物質であり、イネが土壌から吸収したものである。日本の水田からは平均的にみてコメ500kg/10a（アール）が毎年生産されるので、それに伴って持ち出される窒素、リン、カリウムの量は、それぞれ5、1.5および1.25kg/10aとなる。それに見合った量の無機物の補給がなければ、農地は次第に消耗し、ついには極めて低い生産しかできなくなる。いま、このうちの最も多量に必要とする窒素に着目して、有機農業によって、それに見合う量を供給するのにどれだけの有機物が必要であるかについて調べてみよう。

まず、話の順序として、あるグループの「自然農法」の推進者が説くように有機・無機を問わず、一切の外部からの資源を畑に持ち込まない完全無肥料栽培を長期間続けた場合、作物収量はどうなるかについてみてみよう。ヨーロッパやアメリカでは化学肥料が登場した頃から、無肥料状態で作物を育てる試験が長期にわたって続けられている。例えば、イギリスのローザムステッド農業試験場、アメリカのイリノイ大学あるいはドイツで19世紀から無肥料栽培試験が開始され、100年以上も続けられてきている。そのような試験結果をみると、最初のうちは無肥料でもコムギ、ライムギあるいはトウモロコシはかなりの収量があるが、年度とともに次第に低下し、3～40年後には100kg/10a前後の収量になり、以後その状態を保つようになる。この平衡状態での収量は土壌や降雨からの無機養分の

天然供給に支えられた収量とみることができる。現在のイギリス、ドイツ、オランダなどの施肥条件下でのコムギの収量は700kg/10aにもなっており、この養分の天然供給のみに依存した平衡状態での収量はほぼその1/7ということになる。化学肥料を全く使用しないで、現在の西ヨーロッパのコムギの収量700kg/10aを得るのに必要な有機物量は次のように試算される。コムギの窒素含量は平均的にみて2%であるので、無肥料下での子実収量を100kgから700kg/10aに高めるには $600 \times 0.02 = 12\text{kg}$ の窒素が必要になる。この12kgの窒素は畑から取り出されるので、それを施肥によって補わなければならない。そのために、別の畑にマメ科の牧草を栽培して緑肥として利用する場合を想定する。マメ科の牧草には平均2.5%の窒素が含まれるので、必要な草量は乾物にして $12 / 0.025 = 480\text{kg}$ となる。この量は10aの畑で生産されるマメ科牧草の平均的な収量に匹敵する。それ故、有機農業によって、現在の西ヨーロッパの高いコムギ収量を得るには、2倍の土地面積が必要ということになる。

上の計算では、その畑で生産されるコムギ茎葉は次年度の茎葉生産のためにすべて畑に還元し、かつ投入した有機物はすべて次年度の作物に完全に利用されることを前提にしたものである。しかし、投入した有機物由来の窒素がすべてコムギに吸収利用されるのではなく、有機物が分解する時期と作物の旺盛な窒素吸収の時期のずれなどにより脱窒、揮散あるいは溶脱によるロスおよび窒素の難分解性物質への取り込みなどによって、実際にコムギに吸収される量は半分程度になる。このような窒素の利用効率を考慮すると、現在の西ヨーロッパのコムギ収量を有機農法によって維持するには、化学肥料を用いた場合のおよそ3倍の土地面積が必要ということになる。実際、ヨーロッパでコムギの多収をあげている有機栽培農家では、1ヘクタールのコムギ作に対して、上の見積もりよりもさらに多い3ヘクタールの草地やマメ科飼料畑から回収された窒素が用いられているという〔BOERINGA 1980〕。しかも、マメ科作物を有機物源として栽培する場合、窒素は根粒菌による固定でまかなえるとしても、他の無機養分、例えばリンやカリウムは外部からの投入がなければ、持続的な生産は期待できない。それを、有機農

法では土壤改良性とされるリン鉱石や硫酸カリウム、もしくはそれらの純度をさらに高めた製品、すなわち化学肥料、のいずれかで補う必要がある。

次に同様な試算を日本の水稻について行ってみよう。水稻の場合は、灌漑水からの養分供給があるので、上のコムギの場合とは少し様相が異なる。滋賀県栗東町に、1951年以来水稻「ベニアサヒ」の完全無施肥無農薬栽培を50年にわたって続けてきている水田がある。この水田は岡田茂吉の農法の厳格な信奉者とされ、土を神聖視するグループの人々によって維持されており、有機物はおろかそこで育った稲わらや雑草さえもすべてきれいに取り除き、灌漑水を除いては資源無投入の稲作を続けてきている。この農法に切り替えてしばらくは収量が上下する不安定な時期が続いたが、25年目ごろから収量はほぼ一定の400kg/10aになり、今日までその状態が続いている。生育初期に胡麻葉枯の病徴がみられるものの、収量に重大な影響を与える病害や虫害はみられないという。全くの資源無投入にもかかわらず、400kgという高い収量が安定して得られることに興味をもった近畿大学のグループにより、この水田の調査が行われた。その一連の調査のうち、1979年に行われた調査〔奥村 1988〕から得られた窒素収支のデータをもとに、有機農法に必要な有機物量を試算してみよう。

この長期無施肥田の特徴は灌漑水の大量かけ流し栽培にあり、1作期に4,000mmもの水がかけ流される。このかけ流し灌漑の影響を調べるため、この水田の一部を枠で囲み、そこには減水量に応じた灌漑を行う試験区（湛水区）が設けられた。さらに、この水田に隣接して、通常の施肥により「日本晴」が栽培されている一般農家の水田についても比較対象として調査が行われた。これらの試験区の稲収量と窒素吸収量が表2に示されている。この長期無施肥田の400kg/10aを越す高い収量は、かけ流し灌漑によって供給される養分に支えられていることが読みとれる。このかけ流し灌漑が無いときの収量は274kgであって、わが国の平均単収の半分ということになる。しかし無施肥栽培を長期間続けて、土からの養分の天然供給のみに依存した平衡状態での収量は、先に示したヨーロッパの畑作収量より2倍以上高く、ここに水田のもつ高い生産機能が認められる。窒素の

表2 長期無施肥田のかけ流し区と湛水区および隣接する施肥田の水稻収量と窒素吸収量(奥村、1988より改写)。

試験区	収量 (kg/10a)	窒素吸収量 (kg/10a)
長期無施肥田		
かけ流し灌漑区	421	6.1
湛水区	274	4.1
平均	348	5.1
隣接する施肥田	608	13.2

天然供給源は奥村氏によれば水田に生息するラン藻や各種の有機栄養細菌の窒素固定と前年のイネの刈株に大部分が由来するという。

表2のデータをもとに、この水田に有機物を投入して、隣接する施肥水田の稲収量と同等な収量をあげようとするときに必要な有機物量は次のように試算される。この水田のかけ流し灌漑はかなり特殊なので、通常の灌漑下での水稻収量と窒素吸収量は表2のかけ流し区と湛水区の平均値と見積もることができる。そのときの窒素吸収量は5.1kgであり、それと施肥田のそれとの差8.1kg (13.2—5.1)が施肥必要窒素量となる。コムギの場合と同様に、これをマメ科牧草で補うとし、かつその利用効率を0.5とすると、マメ科牧草を栽培するのに必要な土地面積は、ほぼ水田面積に等しくなる。つまり、有機栽培によって現在の日本の水稻の収量水準を維持しようとする場合、有機物の生産のためにおよそ2倍の土地もしくは、土地利用を2倍に高める必要があることになる。なお、対象として用いた施肥田では合計14.8kgの窒素が施肥されている。つまり、有機栽培ではこの化学肥料の代わりに10aの緑肥の栽培が必要となる。そのための播種、除草、収穫には多量のエネルギーが必要なことはいうまでもない。

さらに付け加えたいことは、この無施肥田に灌漑水からの多量の窒素の流入があるが、そのかなりの部分が周辺の施肥農家の水田より流れ出たものとみられることである。周辺農家が施肥をする時期の灌漑水中のアンモニア態窒素濃度には2ppmを越す異常に高い値が測定されている。有機栽培の水稻収量にかなり高い値の報告がしばしばみられるが、それには、周辺の施肥農家からの養分の流入の

影響が無視できないと思われる。

上でみたように有機農法によって現在の作物収量レベルを維持しようとするれば、2~3倍の土地面積が必要になる。日本でこのような農法が成り立つ前提として、大部分の穀物の海外からの輸入が不可欠である。現在の日本の穀物自給率は27%である。輸入先の国の穀物単収を日本のその半分とみて単純に計算しても、日本の食糧消費のために使用される海外の耕地面積は日本のその5.4倍ということになる。このように広大な海外の耕地で肥料・農薬を使い、先に述べたように少なからぬ土壌侵食や環境汚染を引き起こして生産される穀物が家畜の飼料としてわが国に輸入されている。その穀物飼料で家畜を育て、そこから廃棄される有機物を肥料にして生産される「有機農産物」が果たして環境にやさしいといえるだろうか。

食糧、環境ともに不確実な世界へと進みつつある今日、食糧の大部分が国内で自給できる農業を中心に考えたとき、有機農業、「自然農法」は一部の人々の食糧生産のための技術とはなり得ても、大多数の国民を養う技術にはなり得ない。最も重要なことは化学肥料・農薬の拒否ではなく、その使い方の改善にある。有機農業あるいは「自然農法」が提起した、農業内部での物質循環や生態系機能の活用を高めながらも、これらの資材を効率的に使用していく技術こそ、不確実な未来に向かって日本の農業技術に求められる課題といえよう。

5. バイオテクノロジーの可能性

(1) 遺伝子組換え作物と社会の反応

生物の種・品種に固有な様々な形質を支配する遺伝子（DNA）を単離し、別の生物に導入する遺伝子組換え技術は急速な進歩をとげた。その技術は作物育種にも応用され、1990年代になって遺伝子組換え食品が市場に姿を現した。すなわち、ウイルス病耐性のタバコ、日持ちトマト、除草剤抵抗性のダイズ、ナタネ、トウモロコシやワタ、あるいは害虫抵抗性のトウモロコシなどである。ところが、それらに対する消費者の反応は厳しく、日本、ヨーロッパ諸国ある

いは発展途上国の多くで強い拒否を受けている。そのような社会の反応には次の5つの要因が働いているように思われる。

- ①遺伝子組換え食品の安全性への不安
- ②遺伝子組換え作物の生態系への影響についての不安
- ③多国籍企業の遺伝子組換え作物の独占的権益への反発
- ④政府・科学者に対する不信感
- ⑤生命操作に対する倫理的なとまどい

①の安全性に関しては次のようなことがある。害虫抵抗性のトウモロコシは、バチルス・チューリンゲンシス (Bt) という細菌の遺伝子を導入して作られたものである。その細菌はチョウやガの仲間のタンパク質分解酵素の働きを抑制する毒素をもっており、その毒素を作る遺伝子をトウモロコシに組み込むことにより、トウモロコシを食害するアワノメイガを駆除しようとするものである〔久住 1999〕。このようなトウモロコシ (Btコーン) を人間が食した場合、その毒素が人間に悪影響を与えないか、あるいは毒素を作る遺伝子が人間もしくは大腸菌などの腸内細菌に組み込まれはしないか、という不安である。さらに遺伝子を導入するときに、その遺伝子を標識する目的で抗生物質耐性遺伝子が付加されることが多く、それに対する不安もある。これまでの安全性試験の結果では、そのような危険性はすべて無いとされている。害虫を防除するのに農薬を使用するのとこの遺伝子を利用するのと、どちらが人間の健康へのリスクが小さいか、といった点について、説得力のある情報の提供が必要である。

②の生態系への影響に関しては、次のようなことが問題視されている。すなわち、遺伝子導入によって発現した毒素の害虫以外の他の近縁生物に対する害作用、および導入した遺伝子の他の植物への水平伝播の危険性である。この両者とも、圃場生態系内では十分に起こり得ることである。前者の例では、Btコーンの花粉がオオカバマダラというチョウに悪影響を与えるということが「ネイチャー」という学術雑誌に報告されている。後者に関しては、圃場生態系内では、作物と近縁野生種とはしばしば同居しており、両者は受精により遺伝子

を頻繁に交換している。そのような場所に、例えば除草剤抵抗性をもった作物が導入されると、雑草であるその野生型への遺伝子の浸透が起こり、除草剤のきかない雑草を作り上げることにもなる。

③の遺伝子組換え作物が、現在世界の農業・食糧の分野で巨大な影響力をもっている種苗会社、肥料・農薬メーカー、穀物メジャーなどの多国籍企業の農業支配の強化につながるのではないか、という懸念には払拭できないものがある。現在までのところ、実用的な遺伝子組換え作物のほとんどが、このような多国籍企業によって作られており、今後ともその優位は続くものと考えられる。現在のハイブリッド品種でもその栽培には、高い種子代をこれらの企業に支払わねばならず、その負担は発展途上国にとっては大きすぎる。除草剤抵抗性作物となると、種子代と農薬代をセットにした支払いが求められることになる。実際、そのような種苗会社の一つ、パイオニア・ハイブリッドの会長T.アーバンは、遺伝子組換え作物の種子供給と生産物の販売を介して、今後農業が企業系列に組込まれることは避けられない、という論旨の論文を発表している〔URBAN 1991〕。

④に関して、科学技術の安全性についての政府・科学者の見解に対する信頼性を低下させる事態がこのところしばしば発生している。わが国の薬害HIV事件や東海村での原子力臨界反応事件、あるいはイギリスの狂牛病問題などである。これらのことが遺伝子組換え食品についての政府・科学者の安全性宣言をすなおに受け難くしている要因の一つとなっている。⑤に関しては、このような生命操作がどこまで許容されるかという倫理上の社会的合意のないままに、技術のみが先行していることも、遺伝子組換え食品の受け入れをためらわせる要因となっている。

このように遺伝子組換え食品が社会に受け入れられないのはそれなりの理由があり、しかもそれは人間の倫理観や信頼感とといった、かなり深いところに根ざしている。それゆえこの問題は、遺伝子組換え食品が動物実験の結果、安全上何ら問題がなかったから、といったレベルを越えたものであるといえる。

しかも、これまでに登場した遺伝子組換え作物は、それがなければ生産できない、あるいは生産性が格段に高まるというのではなく、いくつかある生産技術の一つの選択肢にすぎないものである。加えて、その食品は消費者に不安感を与えることはあっても、メリットはほとんど無いものである。これは現在の遺伝子組換え技術がまだ初歩的段階にあり、今までに作られた遺伝子組換え作物は、1、2個の遺伝子操作に基づくものである。社会が農業分野で期待するのは、先に述べた現在の作物収量の生物物理学的限界を突破する作物の作出、あるいは低・高温もしくは水ストレスなどで作物生産が困難な地域でのその生産を可能にする作物の創出などである。バイオテクノロジーの発展によって、果たして近い将来そのようなことが可能になるか、について分析を進めよう。

(2) 遺伝子組換え技術の可能性

遺伝子組換え技術によって現在の作物の生物物理学的限界収量をうち破る作物が創出できるか否かは、先に示したバイオマス収量の決定要素の一つである太陽エネルギーの変換効率の改良にかかっている。この変換効率の改良は作物の光合成そのものの能力を高めることに他ならない。遺伝子組換えによって光合成能力を高めようとする場合、現在の作物よりその能力の高い植物を見出し、その遺伝子を作物に導入するという方法が用いられる。光合成能力の高い植物として、トウモロコシ、サトウキビ、あるいはヒエの仲間の植物 (C_4 植物) が、現在のところ最も有望な遺伝子の供給源として考えられている。この C_4 植物は石炭期以降に進んだ地球大気の低い CO_2 濃度環境に適応して進化させた特殊な光合成装置を備えている。イネ、ムギ、ダイズなどの植物 (C_3 植物) が大気 CO_2 を葉肉細胞にとりこみ、そこでの光合成によって炭素原子3個の有機物を作るのに対し、 C_4 植物は、大気中の CO_2 を葉肉細胞で炭素原子4個のリンゴ酸、アスパラギン酸などの有機酸に変換し、それを光合成の行われる維管束鞘細胞に送り込み、そこで再び CO_2 にもどして光合成を行うという、2段階の機構をもっている。この第一段階の有機酸合成は大気の低い濃度 (0.035%) の CO_2 を

濃縮して維管束鞘細胞に高濃度のCO₂を送り込む役割を果たしている。こうすることによって、維管束鞘細胞内でのO₂に対するCO₂の分圧が高まり、光呼吸（光の存在下で有機物の分解によるCO₂の放出）が抑制される結果、C₄植物の光合成能力はC₃植物よりも50%程度高い。

このC₄植物のもつ高い光合成能力の発現にかかわる遺伝子のイネ、ムギなどのC₃作物への導入が、現在最も有望視される光合成能力の向上戦略である。そのための研究が世界各国で活発に展開されており、現在までのところトウモロコシの、CO₂濃縮のための有機酸合成酵素（PEPC）の遺伝子のイネへの導入と発現に成功をみている [Ku et al. 1999]。しかし、これによってもイネの光合成能力を高めるにはいたらず、その実現にはなお光合成や糖代謝に関係するいくつかの酵素の遺伝子の導入が必要である。これらの酵素をコードするすべての遺伝子の導入に成功したとしても、それによってトウモロコシの高い光合成能力がイネで発現するかどうかは不確かである。何故ならば、トウモロコシの高い光合成能力は、CO₂を濃縮する葉肉細胞と、そのCO₂を固定する維管束鞘細胞の二つの役割分担のもとで発現しており、この二つをイネの葉肉細胞単独で行えるという保障はないからである。トウモロコシ葉の密な維管束分布、それを取り囲む葉緑体を備えた維管束鞘細胞のよく発達した組織、および維管束鞘細胞からのCO₂の漏れを防ぐ、細胞表面のスベリン層などの組織構造をイネに作り出すことは、まだほとんど手つかずの状態にある。

しかも皮肉なことに、これらのハードルを乗り越えてC₄光合成をイネで発現させたとしても、大気中のCO₂濃度が増加しつつある地球環境のもとでは、それによる生産性向上効果はほとんど期待薄である。C₄植物は低い大気中のCO₂濃度に適応して進化した植物であり、大気CO₂濃度が0.05%を越すことが確実視される、今から50年後頃にはC₄植物のC₃植物に対する光合成の有利性は消失してしまうからである。遺伝子操作技術が進歩したとはいえ、それを用いて作物の光合成、ひいては太陽エネルギーの変換効率を高め、生産ポテンシャルを向上させる方法はいまだ不確かである。

バイオテクノロジーの作物生産への貢献が期待される領域として、早ばつ、高・低温、塩類集積土壌など、不良環境下でも生育可能な作物の育成がある。いわゆる環境ストレス抵抗性作物の作出である。植物の中には、これら不良環境下でも生育可能な遺伝子をもったものが存在し、それらの遺伝子を作物に導入し、ストレス抵抗性を高めようとするものである。しかし多くの場合、これらの抵抗性は多数の形質に支配されており、それゆえその遺伝子の数は多い。例えば、よく話題になる早ばつ（水ストレス）抵抗性にかかわる形質を列挙すると次の主要なものがあげられる。

- ①開花期など最も危険な時期が水ストレスにかかわらないような発育特性をもつ
- ②根を地中深く張り、水ストレスを回避する
- ③葉を巻くことによって強光にさらされる面積を小さくする
- ④葉の表面にワックス層（クチクラ層）を発達させ水の損失を防ぐ
- ⑤速やかに気孔を閉じて水の損失を防ぐ
- ⑥葉の面積を小さくして水の損失を防ぐ
- ⑦植物体内の水の通導組織をよく発達させて、速やかに水分を供給する、
- ⑧細胞内の浸透圧を高めて膨圧を維持し、代謝を行う（浸透調節）
- ⑨細胞壁の弾性を高めて膨圧を維持し、代謝を行う
- ⑩原形質そのものの水ストレスに対する耐性

水ストレス抵抗性の強い植物は、これらの形質をうまく組合わせて使って水ストレス下での生存を可能にしている。この各々の形質の発現にはそれぞれ複数個の遺伝子の関与が考えられるが、その全体像はいまだ未解明である。現在、上に示した形質の、2、3についてそれらを支配する1、2の遺伝子の導入が試みられているところである。それゆえ、実用的価値のある水ストレス抵抗性品種の登場には、まだかなりの年数を要すると考えられる。しかも、水ストレス抵抗性品種の開発をみたとしても、それらの乾燥地・半乾燥地など水資源の乏しい地域での生産性は極めて低いであろう。これは作物のバイオマス収量は作物の蒸散量に比例し、大気飽差（その温度での飽和水蒸気圧力と実際の水蒸気

圧力の差)に反比例するという、厳然とした生物物理学の法則の支配下にあるためである。乾燥地・半乾燥地は蒸散に必要な水が乏しく、かつ飽差が大きいという、作物生産上極めて不利な条件下にある。そのようなところでは、水ストレス耐性作物は生存はできるかもしれないが、その生産性は極めて低いことになる。このことは、乾燥地・半乾燥地に生える植生の貧弱さからも、容易に想像できるであろう。水ストレス抵抗性品種は、どちらかといえば湿潤な地域の天水農業でより大きな貢献が考えられる。すなわち、不安定な降雨によって短期間の水ストレスがかかるような地域での生産の安定化に貢献が期待できる。

上と同様なことは、現在盛んに研究されている耐塩性作物についてもいえる。塩類土壌でも生育できる植物の遺伝子を作物に導入する研究が行われているが、これにも次のような限界がある。塩類化が進行する地域でこれらの作物(植物)を栽培した場合、それらはしばらくは生存できるかもしれないが、塩類化の原因をとめなければ、いずれは土壌の塩類濃度はそれらの耐性限界を越えてしまうことになる。しかも耐塩性植物といえどもその生育には水が必要であり、塩類土壌での水の使用は、塩類化の進行を加速する危険性が高い。

上の二つの例とは異なり、高温あるいは低温ストレスに対する耐性作物の開発は、作物生産への確実な貢献が期待される。例えば、わが国で最も深刻な気象災害である水稲冷害は、現在の品種のもつ約18℃の冷温耐性限界温度を1℃低くするだけでも、冷害年におけるその効果は極めて大きい。また、熱帯・亜熱帯のイネの乾期作では開花期の高温による不稔がしばしば発生して、収量を低下させている。イネの開花期高温耐性の向上はこれらの地域の稲作の安定化に確実に貢献すると考えられる。しかし、高・低温耐性の機構とその発現を支配する遺伝子については、まだ基礎研究の途上にある。

環境ストレス抵抗性作物には、その他に鉄など無機元素の過剰もしくは欠乏に対する耐性、あるいは先に示した病虫害抵抗性の遺伝子組換え作物があり、一部は実用に供されている。環境ストレス抵抗性を高めた組換え作物は、病虫害抵抗性など、限られた数の主働遺伝子に支配されている比較的単純なものか

ら順次複雑なものへと、次々に開発が進んでいくであろう。それらの作物の品種特性がそれを必要としている地域の環境への適合性の高い場合には、環境ストレスによる負の影響の軽減を通じて収量の向上と安定化に貢献すると思われる。しかし、水ストレスや塩類ストレス抵抗性に関して述べたように、品種単独でなし得ることには限界がある。作物生産に不可欠な水資源や土地資源の涵養と持続的管理が第1に考えられるべきであり、水・塩類ストレス耐性作物はそれら資源の過不足に対する適応手段の一つに過ぎない。

今後50年ほどで倍増する世界の穀物需要を見通した場合、作物の環境ストレス抵抗性の強化は重要であり、そのような作物の作出に遺伝子操作は大きく貢献するであろう。最も大切なことは、それらの作物がもたらす便益と人間の健康あるいは生態系への影響のリスクを明らかにしていくことである。この便益と生態系へのリスクはともに地域によって大きく異なる。遺伝子組換え作物の便益は、例えば水ストレス抵抗性についてみると、その作物の抵抗性の程度と対象とする地域でのストレスの強度と頻度によって決まってくる。一方、遺伝子組換え作物の生態系リスクは、近縁野生種や有用昆虫への影響などである。それゆえ、遺伝子組換え技術が進歩すればするほど、各地域の農業生態系の仕組みをよりよく理解することが必要であり、その理解のもとにその技術を適正に位置づけ、またその合理的な使用方法を明らかにしていくことが、これからの農業にとって極めて重要である。加えて、現在多国籍企業の権益のもとにある遺伝子組換え作物を、国・県などの公的な機関が開発のリーダーシップをとり、生産者・消費者のための技術としていくことが求められる。

6. わが国の作物生産技術の基本的方向

以上に述べてきたことを要約すると次のようになる。すなわち、地球人口の急速な増加の一方で、水、肥沃な土壌など食糧生産に不可欠な資源の確保は困難になってきつつある。さらに、予測される地球温暖化も人類の食糧の未来に

表3 世界の主要国の人口1人当りの耕地面積
(FAO, 1997)

国名	1人当り耕地面積(ha)
オーストラリア	2.71
カナダ	1.49
ロシア	0.90
アメリカ	0.65
イギリス	0.58
タイ	0.35
フランス	0.33
インド	0.17
ドイツ	0.15
中国	0.11
バングラディッシュ	0.07
日本	0.03

暗い影を投げかけている。その一方で、現在莫大な研究投資が行われているバイオテクノロジーをも含めて見渡しても、食糧生産性を飛躍的に高める技術はいまだ不確かである。加えて、主要な食糧輸出国はこれまでの生産第一主義から環境保護的農業に変わりつつある。それにもかかわらず、わが国の食料自給率は依然として低下の一途をたどってきており、穀物自給率にいたってはついに27%にまで低下した。また、都市化その他で耕地面積は最大時の20%近くが失われ、その結果、わが国農業は乳肉など一切の畜産物を摂取しないという極限状態においてすら、1億2000万人を養う力を失ってしまっている。食糧の大部分を国内で自給できる農業を確立しなければ、この国は滅亡への道をたどることになるだろう。

今日、消費者の高い関心を集めている有機農業、あるいは「自然農業」は海外からの大量の輸入食糧を前提に成り立つ作物生産技術である。これらの作物生産技術は同一量の食糧を生産するのに少なくとも2倍の土地面積を必要とし、国民1人当たりの耕地面積(表3)が極端に小さい日本では、一部の人の食糧は供給できても大多数の国民を扶養できる技術とはなり得ない。おそらく、完全

に近い有機農業で人口が扶養できる国は、この地球上では、オーストラリア、ブラジル、カナダなどごく少数の国の限られ、アメリカとてそれは不可能であろう。

作物生産技術の選択は、それぞれの地域の環境および社会・経済的条件のもとで、個々の生産者の自らの意志決定に基づいてなされる。それゆえ、その技術は極めて多様なものとなる。この多様な作物生産技術体系の一つのカテゴリーとして、有機農業や「自然農業」は今後とも存続するであろう。しかし、近未来の世界を見通したとき、中心的課題はこの日本の狭小な国土で、1億2000万人の生存と生活に必要な食糧の大部分が供給できる農業を支える作物生産技術の確立である。作物の遺伝子操作技術が格段に進歩した今日においても、それを可能にする生産技術は、土地利用の集約度を高め、肥料・農薬などの資源の合理的使用のもとで作物のもつ生産能力を最大限に引き出すことにより、土地生産性を高めていく以外に方法はないのである。しかし、このことは現在の多肥・薬づけと批判される農業のさらなる推進を意味するものではない。わが国には、これまで永々として先祖が培ってきた、世界最高といっても過言でない、高い生産機能と環境保全機能を併せもつ水田がある。水田のもつこれらの機能を活用した輪作と近年進歩の著しい情報処理技術の導入を柱とする新しい生産技術体系を創成することにより、高い生産性と環境調和性をもつ農業が可能になると考える。

(1) 水田輪作法の確立に向けて

これまで専ら水を張って水稻を栽培する圃場であった水田に、マメ類、ムギ類、飼料作物あるいは野菜を導入して、それらをローテーション（輪作）することにより、水田の利用率を高め、高い土地生産性を実現しようとするのが水田輪作のねらいである。これは何も新しいことではなく、かつては水田裏作としてオオムギ、ナタネ、レンゲあるいは野菜などが栽培されていたし、奈良県では、水不足から水稻の代わりに、ワタやスイカ、ダイズなどの作物が作られ

ていた。しかし、吉田武彦が指摘するように〔1978〕、これらは水稲が主で、その他の作物は従といった関係にとどまっており、輪作に導入されるすべての作物を対等視する見方は乏しかった。昭和50年以降、日本の恒常的な米余り対策として、水田転作、転換畑あるいは田畑輪換などの呼称のもとに水田に畑作物を組込んだ輪作が政策的に推進されてきた。しかし、それも米余りに対する緊急避難的な見方が強く、したがって田畑輪換も日本の農業に定着したとは言い難い。

筆者がここで再び水田輪作を持ち出すのは、次の二つの理由に基づいている。その一つは、現在の作物生産技術およびバイオテクノロジーを含む開発研究の途上にある技術の芽を見渡しても、21世紀のわが国の食糧の安全を保障する最も実現性の高い方策は、これ以外に見当たらないことである。第2は、水田輪作はうまく機能させれば十分に環境保全的な作物生産技術となり得ることである。この第1の点については、これまで再三述べてきたので、ここでは第2の点にしぼって、要点を述べよう。

イネは破生通気組織という葉から吸収した酸素を根に送り込む組織がよく発達しているので、湛水した田の還元的な土壤条件下でもよく育つ。それに対し、コムギ、ダイズ、トウモロコシなどの畑作物はその組織の発達が悪く、湛水条件下では根ぐされを起こし、枯死してしまう。水田でこれらの作物を輪作する場合、土壤は水稲期間中の湛水（還元的）状態と畑作物期間中の畑（酸化的）状態をくり返すことになる。土壤の酸化的および還元的状態を適当な間隔でくり返す（田畑輪換）と、まず第1に雑草の発生が激減する。これは雑草にも種により酸化的状態もしくは還元的状態を好むものがあるからである。高橋・飯田の調査では、水稲の連作田に比べ、2～3年畑状態にした後に水田に戻した場合の雑草の発生本数は20%程度になっている〔1955〕。水田から畑に転換した場合も、転換後2年間ぐらひは雑草の発生本数は常畑の60%程度に減少することが示されている。第2に、土壤病原菌にも酸化的（好氣的）状態と還元的（嫌氣的）状態のいずれかを好む種があり、田畑輪換は土壤病害の発生を低下

させることができる。第3に、常時湛水条件下にある土壌の有機物の分解は極めて緩やかである（これによって水田は有機物を蓄積し、肥沃になる）が、酸化的条件におかれるとその分解が促され、畑作物への養分が供給できるのみならず、再び湛水したとき多量の窒素を放出する（乾土効果）。この現象をうまく利用すれば、少ない窒素施肥量で収量を増加させることができる。第4に、マメ科作物を輪作体系に組込むことにより、作物の生長に最も多量に必要とする窒素を土壌に供給することができる。第5に、水田を畑状態にすることで土壌の団粒化などの物理性が改善される。第6に、水田に飼料作物を導入することにより、耕種農業と畜産の結合が促され、有機物の水田—家畜—水田という循環が図れる。

以上のように田畑輪換による水田輪作は、上述の機能をうまく活用すれば、除草剤、殺菌剤あるいは化学肥料などの資源投入を相当程度少なくすることができ、極めて環境保全的である。加えて、これらの機能により収量の増加も期待できる。実際、肥料を多量に必要とするトウモロコシやコムギは、この輪作により2割程度増収することが多くの事例として示されている。しかし、このような田畑輪換の機能を発揮させる前提条件として、圃場が稲作期間中は漏水が少なく湛水できること、畑作期間中は地下水位を低く保つことができ、かつ灌排水が容易な構造になっていることが不可欠である。これが不十分だと、稲作では漏水により水温が上がらず、水稻は生育が遅れ、冷害を受ける危険度が高まり、畑作では湿害により大きな減収を招くことになる。現在、水田を田としても畑としても使用できるように、灌排水設備の整った大区画の水田（汎用水田）を造成する国の事業が進められており、これまでに日本の全水田うち約60%が造成を終えている。

このように水田輪作はそれを可能にする基盤が整ってきているのに、いまだ日本農業に定着するには至っていない。筆者はそれには次のような原因が存在するとみている。すなわち、水田輪作は多労な割には収益があがらないこと、生産基盤整備が不十分で湿害や早ばつなどの問題のあること、あるいはコムギ

やダイズなどの販路が不安定なこと、などである。しかしそれ以上に、現在の日本の畑作物の収量水準が極めて低いことが、水田輪作の定着を防げる大きな原因となっているように思われる。わが国の水稲は、近年、収量性よりも食味に重きが置かれてきているものの、その収量は依然として世界最高水準にあるが、コムギは西ヨーロッパ諸国の半分程度の収量レベルにとどまっている。現在の日本農家の水稲の平均単収が約500kg/10aであるのに対し、コムギのそれは375kg/10a、そしてダイズにいたってはわずか178kg/10aである。このように低い収量水準にある畑作物を組込んで、水田輪作をしなさい、といっても無理な話である。実際、水田輪作で成功をみている農家はダイズやコムギで高い収量をあげる技術力をもつものがほとんどである。

わが国で畑作物の収量がこのように低いのは、長い間水稲が農業の中心に位置づけられ、他の作物は脇に置かれてきたことによるものである。つまり水稲が主で、他の作物を従とする根強い意識の表れとみることができる。このことは大学や国・県の研究者や技術者の数からも明白に読みとれる。すなわち、遺伝子操作や環境問題、あるいは水稲を専門にする研究者はあまた存在するが、圃場においてダイズ、コムギ、トウモロコシ、ソルガムあるいはオオムギを専門的に扱える研究者は全国を見わたしても数えるほどしかない。これらを背景に、水田輪作を米余りに対する緊急措置とみる見方には根強いものがある。水田輪作を21世紀の日本の食糧を託す技術に仕上げるためには、この意識を打ち破り、輪作に加わるすべての作物を対等視する見方を醸成することが重要である。そのためには畑作物の収量レベルを高めることが必要である。

農家の畑作物の収量レベルがどの程度向上可能かを測る尺度の一つは、試験場で作物を最適な技術のもとで管理したときの収量と、農家の平均収量との差異である。水稲では試験場収量は農家収量より20~30%高いに過ぎず、現在の品種で農家の収量レベルを更に向上させる余地は小さくなってきている。一方、ダイズではかつて東北地方の農業試験場で行われた多収穫試験のデータ(表4)にみられるように、試験場と農家の収量差は2~3倍もある。コムギでも両者の

表4 東北地方の農業試験場のダイズ多収穫栽培試験の収量と日本の平均収量
(藤井弘志、1985より改写)

場 所	収 量 (kg/10a)
青森農試	350-430
岩手農試	347-493
東北農試	337-652
秋田農試	258-409
宮城農センター	340-473
山形農試本場	374-487
山形農試最上支場	507-535
福島農試	303-466
日本の平均収量 (1998年)	178

間には2倍近い収量差がみられる。さらに、かつて日本でも麦作が盛んだった頃の昭和37年に、コムギで1011kg/10aという、現在の平均単収の3倍近い多収がそれぞれ岩手県と千葉県の高農家により得られている。問題は、それらの生産技術が、水稻のようにすべての農家に受け入れられるように普遍化されていないこと、技術の普及が不十分であること、および、畑作の衰退とともに農家の技術受け入れ意欲が減退したこと、などにある。

上に述べたことを裏返せば、水稻のみでわが国農業の生産力を更に向上させるには限りがあるが、コムギでは現在より50%程度そしてダイズでは2倍程度の生産性向上は達成可能とみることができる。このことは程度の差こそあれトウモロコシ、オオムギ、アズキなど他の作物についてもいえることである。畑作物の高い収量性に裏づけられた、水稻—ムギ類の1年2作、水稻—ムギ類—ダイズの2年3作、あるいはトウモロコシ、ソルガム、ジャガイモもしくは野菜などを組込んだ多様な輪作体系を地域の環境条件に応じて開発していくことにより、高い土地生産性と環境調和性を兼ね備えた農業が可能になると考える。そのためには収量性と品質性に優れた品種の育成、それらの栽培技術の開発と普及が必要なことは言うまでもない。この品種育成、特に品質の改良には遺伝子

操作など新しい育種技術の活用が必要である。さらにもっと遡って考えると、畑作が衰退した昭和40年代に激減した個別畑作物を専門とする研究者・技術者の養成、および水田輪作農法の担い手となる農業者の育成など、人作りから取り組まねばならない。時間をかけても21世紀の日本の食糧を託すことのできる作物生産技術の開発を着実に進めることが重要である。

(3) 情報活用型の作物生産技術—ハードな技術からソフトな技術へ—

これまでの作物生産技術は、新しい品種、機械、肥料あるいは農薬など「もの」すなわちハードウェアの開発を中心に進んできた。先に述べた新しい水田輪作農法の展開には、それに必要な品種などの「もの」の開発は依然として重要であるが、それ以上にそれらの「もの」をそれぞれの農業生態系の中で合理的に位置づけて使用・管理する「知」の技術体系の構築が重要である。すなわち、輪作体系の中での作目の組合せ、土地資源の管理、作物の生育診断に基づく栄養管理、病虫害・雑草管理、気象災害の予測と対応技術あるいは市場ニーズの予測と出荷計画などにかかわるソフトな技術の開発である。そのようなソフトな技術の開発が肥料・農薬の使用量の削減や、水田輪作で問題となる地力消耗の抑制などを通じて、環境の保全と高い土地生産性を兼ね備えた農業の創成に不可欠である。インターネットなど近年進歩の著しい情報処理技術と農学の知識・情報とを機能的に結合させることにより、そのようなソフトな農業技術すなわち農業技術情報システムの構築が可能になりつつある。研究段階にあるそのような技術の芽にも目を及ぼしながら、情報活用型の農業技術の可能性について論じてみたい。

ソフトな農業技術としての農業技術情報システムの基本となるものが環境情報システムである。農業生産の場は地域であり、気候、土壌などの生産環境はその地域を特徴づける基本的要素である。わが国の地形は極めて複雑であり、谷一つ越えれば気候や土壌は微妙に異なり、また農業の様相も異なるといったことがしばしばみられる。このような地域毎の気候や土壌の特徴を1km²位の区

画（ほぼ集落の大きさに相当）を基本単位としてデータベース化したメッシュの気候情報および土壌情報システムが国やいくつかの府県で整備されてきている。これらによって、それぞれのメッシュの毎日の気温、雨量、日射量などの平年値、あるいは土壌の物理的性質や肥沃度などの情報が得られる。さらに、気象情報システムではこれとアメダスや気象衛星「ひまわり」の情報をもとに、各メッシュ毎の1週間位先までの気象の予測もある程度は行えるようになってきつつある。

このようなメッシュ環境情報と、解像度が10～数平方メートルに向上した人工衛星からのリモートセンシング情報の活用によって、新しい農業技術の創出の機運が生まれてきている。例えば、これらの情報を作物の生長モデルに入力することにより、地域で生育途上にある作物の生育を動的に予測しながら、適時・適切な栽培管理を行う、といったことも近い将来可能になってくる。筆者らが開発を進めている水稻の生育予測モデルは、各地域の毎日の気象情報をもとに水稻の生育を予測しようとするものである。まだモデルは極めて初歩的なものであるが、それでもそれぞれの地域で生育途上にある水稻の生育の遅速、不稔の発生あるいは冷害の被害の早期予測などが相応の精度で行える。2図は、このモデルによって平成5年の札幌の水稻冷害を再現したものである。気象情報のみを頼りにしても、冷温による幼穂分化や出穂の遅れ、不稔の発生経過および最終収量などが、水稻の生育段階を追って、逐次予測されることが図より読みとれる。

環境情報をもとに、地力窒素の発現動態や病害虫の発生および被害を予測するモデルの開発研究もいくつかの大学および試験場で行われている。土壌窒素の無機化予測モデルは、土壌から供給される窒素量を知ることにより、無駄な施肥を抑えるのに役立つし、病害虫発生予測モデルは、病害虫の発生量と被害程度を予測することにより、不必要な農薬使用を抑えることに役立つであろう。今後は、これらのモデルと作物生育モデルおよびリモートセンシング情報を統合することにより、各地域で生育途上にある作物を対象にした生育診断と予測、

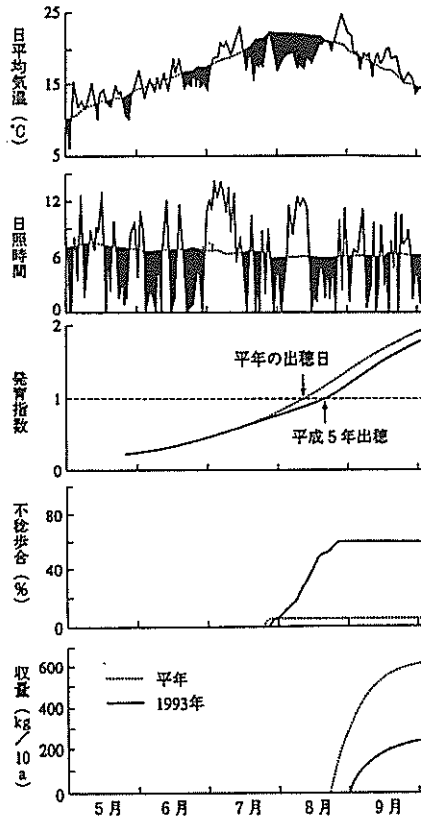


図2 平年（点線）と1993年（実線）の札幌の気象経過と、それを基に水稻の生育予測モデルによって推定した生育・収量の動態（堀江・1994）。

およびそれに基づく適時・適切な施肥、水管理、病害虫防除のための情報発信が可能になると考える。試験場あるいは普及所からインターネットを介して各農家に発信されるこのような情報は肥料・農薬などの資源使用の合理化および作物の生産性の向上と安定化に貢献するであろう。さらにこの作物の生育診断・予測モデルは、各地域の水田輪作における最適な作目の組合せと作付順序などについての事前評価にも適用できるようになるであろう。

さらに、次々と開発される新品種についての情報や生産物市場の情報も、これからの農業にとって重要である。特に、遺伝子操作により、今後、アミノ酸組成を大きく改変したり、あるいはアレギーたんぱく質を除去した作物などが登場してくる。それら作物の特性と市場についての情報は作目の選択に欠かせなくなるであろう。

水田輪作と情報の高度活用を軸とする、新しい作物生産技術体系を創成し、高い土地生産性と環境調和性を兼ね備えた農業を確立していくことが、食糧、環境ともに不確実な世界へと進みつつある今日、取り組むべき重要課題と考える。

引用文献

BOERINGA, R.

1980 "Alternative methods of agriculture" Elsevier, Amsterdam. 199p.

BROWN, L.

1996『食糧破局』（今村奈良臣訳）ダイヤモンド社，198p.

EVANS, L.T.

1999 In Horie et al. (eds.) "World food security and crop production technologies for tomorrow", Kyoto Univ. p.1-8.

藤井弘志

1985『土肥誌』56(2):153-155.

長谷川利拡・堀江武

1995『農業および園芸』70:223-238.

堀江 武

1994『農業および園芸』69:669-676.

HOSSAIN M.

1999 In Horie et al. (eds.) "World food security and crop production technologies for tomorrow", Kyoto Univ. p.31-40.

IRRI

1998 "Rice facts" IRRI, Philippines.

KU, M.S.B. et al.

1999 "Nature Biotechnology" 17:76-80.

久住高章

1999 山田・佐野編『遺伝子組換え植物の光と影』学会出版センター。 p.32-48.

久馬一剛・高橋正輝

1995 久馬・祖田編『農業と環境』。 富民協会 p.26-72.

三輪睿太郎

1984『農業構造問題研究』第3号 p.176-207.

NRC

1989 "Alternative agriculture". National Academy Press, Washington, DC. 448 p.

奥村俊勝

1988『水稻の窒素栄養の動態から見た無施肥田と施肥田の比較栽培学的研究』京都大学学位論文。 108 p.

PADILLA, J.L. and HORIE, T. et al.

2000 (in preparation)

ROSANOV, B.G.

1990 "Trans. 14th Int. Congr. Soil Sci., Plenary Papers" p.53-62.

SINCLAIR, T.R.

1999 In Horie et al. (eds.) "World food security and crop production technologies for tomorrow", Kyoto Univ. p.65-76.

高橋浩之, 飯田克美

1995『関東東山農試研報』第8号。

宇田川武俊

1999『農耕の技術と文化』第22号：24-57.

URBAN, T.

1991『農業の工業化は不可避である』（細川, 立川訳）『のびゆく農業』894:1-14. 農政調査委員会。

吉田武彦

1978『水田軽視は農業を亡ぼす』農文協。 224 p.