



東京大学農学部公開セミナー  
第29回

# どこまで食糧増産は可能か？

(講演要旨集)

## 「『緑の革命』から学ぶもの」

農業・資源経済学専攻 教授 岩本 純明

## 「耕地創生に向けて」

生物・環境工学専攻 教授 宮崎 毅

## 「遺伝子組換え作物の可能性」

生産・環境生物学専攻 教授 大杉 立

## パネルディスカッション「食糧増産と農学の役割」

日	時	2005年11月26日(土)13:30~16:30
場	所	東京大学農学部 弥生講堂一条ホール
主	催	東京大学大学院農学生命科学研究科・農学部
共	催	(財)農学会



# 目 次

「緑の革命」から学ぶもの .....	1
--------------------	---

農業・資源経済学専攻 教授 岩本 純明

1960年代半ば以降に展開した「緑の革命」は、開発途上国の穀物生産水準を引き上げ、食料事情の緩和に大きく寄与しました。しかしながら世界には、今なお食料不足に苦しんでいる人々が沢山います。また今後も世界人口は増え続け、所得の増加に伴って穀物需要はさらに増加すると予想されています。「緑の革命」の経験を整理し、今後の技術開発の可能性と問題点について考えてみます。

耕地創生に向けて .....	10
----------------	----

生物・環境工学専攻 教授 宮崎 毅

地球の人口は確実に増え、2005年現在、63億人を超えました。これだけの人間が充分食べていくために必要な農耕地面積は確保されているのか、地球1個で足りるのか、疑問です。こうした問題を新しい視点、すなわち、世界の農耕地面積はどれくらいあるか、農耕地はどれだけ必要か、どこでなぜ減少しているのか、何をすればよいのか、何をしてはいけないのか、人類の未来、地球の未来、といった視点から掘り下げてみたいと思います。

遺伝子組換え作物の可能性 .....	17
--------------------	----

生産・環境生物学専攻 教授 大杉 立

2004年の世界における遺伝子組換え作物の栽培面積は8100万haに達しており、今後は先進国に加えて開発途上国での一層の拡大が予想されます。また、作物の生産性向上に関わる新たな遺伝子組換え作物の研究開発も進んでいます。一方で、遺伝子組換え作物に対する不安もまだ根強いものがあります。生産性向上に関わる遺伝子組換え作物の実用および研究段階の実例を紹介するとともに、遺伝子組換え作物に対する理解を深める方策について考察します。

パネルディスカッション - 食糧増産と農学の役割 .....	24
--------------------------------	----

# 「緑の革命」から学ぶもの

農業・資源経済学専攻 教授 岩本 純明

## 1. 「飢餓」と「飽食」－現代世界の食料問題－

2000年には、世界全体で約20億トンの穀物が生産されています。世界人口1人当たりでは339キログラムとなり、とりあえず1人が1年間生活していくのに十分な量は確保されていることとなります。にもかかわらず、アフリカやアジア諸国の食料不足や飢餓問題は、しばしば新聞やテレビなどで報道されます。実際、途上国に住む人々の食料事情は、依然として深刻です。表1(P.5)によれば、先進国の人々は1日1人当たり3000キロカロリー以上の熱量を摂取しているのに対し、途上国では2680キロカロリー、食料事情が最も厳しいサハラ以南アフリカでは2260キロカロリーと成人1人が必要とする熱量に達していません。また、先進国では直接穀物を消費するのではなく、畜産物に飼料として与えた後に肉や乳などの形で消費していますから、動物性の熱量供給割合が高く、タンパク質や脂質の摂取量も格段に多くなっています。これに対し食料事情の厳しい途上国、とりわけアフリカ諸国では、動物性食品の割合は極端に低く、タンパク質や脂質の消費水準も低い水準にとどまっています。

世界全体では一応十分な量の穀物が生産されているにもかかわらず、生存に必要な食料すら十分に入手できない人々が多数存在するのは、いうまでもなく穀物の配分に大きな不平等があるからです。図1(P.6)は人口1人当たりの穀物生産量を地域別に示したのですが、先進国では1人当たり700キログラムもの穀物が生産されているのに対して、途上国では250キログラム、アフリカでは140キログラムに過ぎません。貿易による穀物の地域間移動がありますから、生産量がただちに消費量を意味するわけではありませんが、途上国は外貨に乏しいですから、生産の不足を輸入によって補うことは困難です。食料生産力の低いことが、消費水準の低さに直結せざるを得ないのです。

食料問題を論じる際にしばしば言及されるのが、イギリスの経済学者ロバート・マルサスです。1798年に初版の出た『人口論』の著者としてよく知られています。彼はその著書で、食料生産の増加率は人口の増加率に結局追いつけず、遅かれ早かれ食料不足による深刻な社会問題が発生すると予言しました。人類の未来について悲観的な予言をしたのです。マルサスが強調したように、経済発展とともに人口は急増しました。彼が『人口論』を刊行した頃(1800年)の世界人口は9億人でしたが、200年後の2000年には58億人と6倍以上に増えています。しかしながら少なくとも現在までのところ、マルサスの悲観

的命題はそのままの形では実現していません。食料生産の水準も高い水準で増加し続けたからです。肥料・農薬などをふんだんに利用する先進国の農業生産力がこの間大きく発展したことは容易に予想されますが、食料事情の厳しかった途上国でも、1960年頃から穀物生産は大きな伸びを示しました。この背後にある技術革新が、今日のテーマである「緑の革命」です。

## 2. 「緑の革命」－成果と要因－

### (1) 1960年以降の穀物生産

図2(P.6)によると、世界の人口は1961年(30億人)から2000年(61億人)へと2倍に増えました(年率1.7%)。一方穀物生産量は、1961年の約9億トンから2000年には20億トンへ(年率2.1%)と人口増加率を上回る伸びを示しました。とりあえずは、マルサスの状況を回避できたのです。その結果、1人当たり穀物生産量は1961年の285キログラムから2000年の339キログラム(ピークは1985年の377キログラム)へと増大しました。またこの生産量の増大が、主として単収(単位面積当りの収穫量)の伸びによってもたらされたことが明らかです。この40年間に単収は2倍以上に上昇しているのです。こうした単収上昇の背後には、この間に急進展した農業技術の革新があったのです。

ところで注目すべき点は、1960年代以降の穀物生産量の伸びが、先進国よりも途上国において、より顕著であったということです。図3(P.7)によると、1961年から2000年にかけて、途上国の穀物生産は3倍増を果たし、人口増加率(2.3倍)を大きく上回ったのです。その結果、人口1人当たり穀物生産量は、189キログラムの低水準から250キログラムへと増加し、途上国の食料事情は大幅に改善されました。

### (2) 「緑の革命」の技術要素

途上国の穀物生産量の増大、とりわけ単収水準の大幅な引き上げは、まさに「奇跡」ともいうべきものでした。この間の農業技術発展を「緑の革命」と呼ぶのも肯げるところです。

「緑の革命」は、以下の技術要素から成り立っていました。すなわち、高収量品種(High Yielding Varieties, Modern Varieties)、化学肥料増投、農薬による病虫害防除、灌漑施設の整備(水のコントロール)、の4要素です。以下、具体的に説明しておきましょう。

「緑の革命」を先導したのが、小麦と稲の高収量品種の開発・普及でした。

小麦はメキシコシティに設置された「国際トウモロコシ・小麦改良センター(CIMMYT)」で開発されました。日本の「農林10号」とメキシコの在来種を交配させ、草丈が低く肥料によく反応する高収量品種(メキシコ矮性小麦)が開発されました。この高収量小麦は、まずはメキシコで急速に普及し、食料不足国であったメキシコに大幅な食糧増産をもたらしました(小麦生産量は3

倍)。その後、このメキシコ矮性小麦は世界各地の現地品種と交配され、インドやパキスタンの食料自給達成の原動力となったのです。メキシコ矮性小麦の開発に貢献したボーローグ博士 (Norman E. Borlaug) には、1970 年にノーベル平和賞が授与されました。

稲でも画期的な品種が開発されました。フィリピンに設置された「国際稲研究所 (IRRI)」で、草丈が低く倒伏しにくい品種 IR8 (miracle rice) が 1966 年に育成されました。この品種は、試験圃場では 1 ヘクタール当り雨期に約 6 トン、乾期では約 9 トン (籾重) の収量が期待できるといわれました。当時の熱帯アジアの平均籾収量は 1 ヘクタール当り 1 ~ 1.5 トンと低水準にありましたから、新品种の収量がいかに高いものであったかがわかります。

IR8 は倒伏抵抗性を備えていたため、肥料を増頭するとそれが高単収に直結しました。また感光性 (日長が 12 時間以下にならないと開花しない) の強い在来品種と異なり、日長の長短を問わず一定の期間が過ぎると開花する性質をもっていました。生育期間も在来種 (180 日程度) よりも短く、125 ~ 135 日と短縮されました。非感光性と生育期間の短縮は、水稲作付の自由度を高め土地利用率の向上をもたらしました (二期作・三期作)。単収の増大に土地利用率の向上が結びついて、飛躍的な増収が実現したのです。

「緑の革命」による穀物生産の増加は、途上国、とりわけアジア諸国の食料事情の改善に大きく貢献しました。インド・インドネシア・フィリピンなどでは、念願の食料自給を達成することができたのです。また「緑の革命」の技術は、労働集約的な要素をもっていたから、その普及は追加的な労働投入を要請することになり、農村過剰人口を吸収し所得分配の改善にも貢献したのです。

図4 (P.7) は改良品種の普及率を示しています。フィリピン・スリランカ・インドネシア・インド・パキスタンなどの諸国で急速に改良品種が普及したのとは対照的に、ビルマ (ミャンマー) ・バングラディシュ・タイなどでは普及が遅れていることが印象的です。

このような改良品種の普及度の違いをもたらす原因は、灌漑施設の普及度 (水のコントロールの難易) です。この点は、灌漑率と改良品種の普及度を相関させた図5 (P.8) に明らかです。「緑の革命」は、それを構成する技術要素がうまく結合して始めてその効果を発揮するものだったのです。

### 3. 第2の「緑の革命」は可能か？

「緑の革命」によって、マルサスの命題をこれまでは回避できてきました。しかし今後はどうでしょうか。将来の食料需給をめぐっては、国際機関による推計値が公表されています。予測しやすいのは需要の方なので、まずそれを見ておきましょう。

食料需要の増加率は、人口増加率と 1 人当り食料需要増加率の和で求められ

ます。

アメリカのある研究機関（IFPRI）は、世界の人口が 1995 年から 2020 年にかけて、年率 1.13%（先進国 0.15%、途上国 1.35%、アフリカ 2.15%）で増加すると予測しています。一方、1 人当り食料需要量は、所得上昇に伴う畜産物消費の増加によって、その飼料となる穀物消費が飛躍的に増えることとなります。その結果世界の穀物需要は、1995 年の 18 億トンから、2020 年には 25 億へと増加すると予測されます。またこの需要増加の 85%が途上国で発生するとみられています。

このように増加する穀物需要を満たすには、1995 年から 2020 年にかけてさらに 40%（年率 1.32%）の穀物増産が必要となります。第 2 の「緑の革命」が期待される理由がここにあります。

第 2 の「緑の革命」の可能性をめぐることは、楽観論から悲観論まで様々な意見がありますが、ここでは、私が重要だと考える点をいくつか取り上げることにします。

(1) 持続的技術の開発：化学肥料・農薬の大量投入に支えられた「近代農業」は、環境に大きな負荷を与えています。第 1 の「緑の革命」には、化学肥料・農薬の多投を促す要素が含まれていましたし、食料増産を国家目標とした政府は、補助金付きの安い化学肥料を農家に提供してきました。しかし第 2 の「緑の革命」では、農業の持続性や環境保全にも十分な配慮が必要となります。このことは、単位面積当りの収量を低めることにもなりかねないわけで、穀物需要の増大に応えるという点では大きな限界をもつこととなります。

(2) アフリカを重視：第 1 の「緑の革命」の舞台はラテンアメリカとアジアでした。しかし食料事情の最も厳しいアフリカは、「緑の革命」から取り残されてしまいました。その理由の一つは、アフリカで重要な食料であった雑穀・いも類・豆類などに、「緑の革命」の品種改良が及んでいなかったことです。その意味で、品種改良の対象を小麦・稲から他の作物にも広げていくことが必要となります。

(3) 農業部門のインフラストラクチャの整備：第 1 の「緑の革命」では、灌漑整備が要の位置を占めました。この点は第 2 の「緑の革命」でも同じです。しかし農家の力だけで灌漑施設を建設・整備することは不可能です。政府による農業投資、とりわけ農民の生産意欲を高め、それを支援していく投資が重要です。

(4) 技術開発成果の社会還元：第 1 の「緑の革命」を担った高収量品種の開発成果は、それを必要とする国々に無償で提供されました。しかし近年の農業分野の技術開発は、公的研究機関だけでなく、民間企業（種子・農薬メーカーなど）がビジネスの一環として行っています。そのために膨大な資金を投入しているわけですから、その成果を無償で社会に還元することはできません。そうすると、技術開発の成果を最も必要とする人々に、それが行き渡らない恐れ

があります。知的財産の保護は、今後の国際貿易問題の重要な争点となりますが、知的財産の保護と研究成果の社会還元とをどう両立させていくかという難問があります。第2の「緑の革命」にとって不可欠な技術については国際機関が買い取り、必要とする国にそれを安価に提供するというのも、一つのアイデアとして検討に値すると思います。

#### 参考文献

生源寺眞一他『人口と食糧』朝倉書店、1998年

荏開津典生『「飢餓」と「飽食」-食料問題の十二章』講談社、1994年

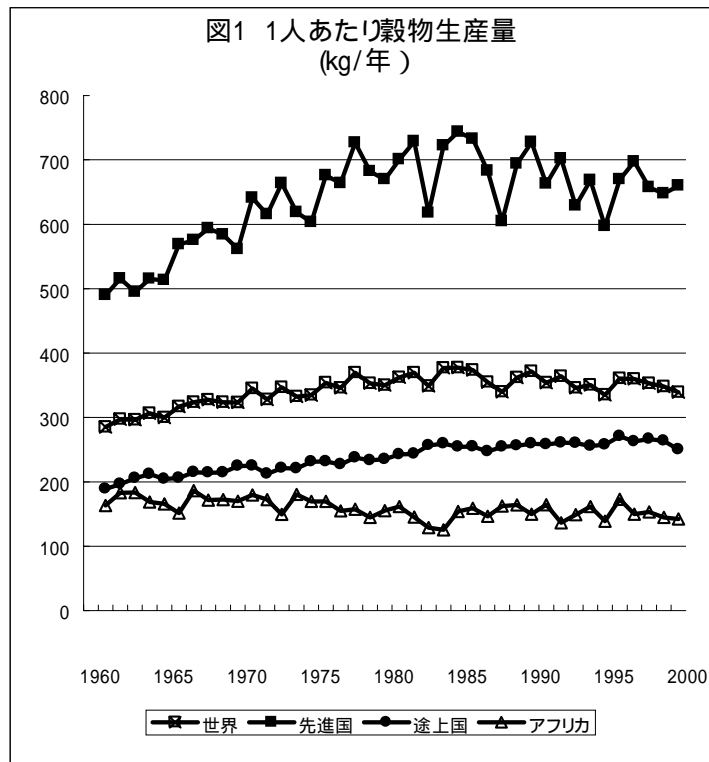
日本大学農獣医学部国際地域研究所

『グリーンレボリューションの20年』龍溪書舎、1987年

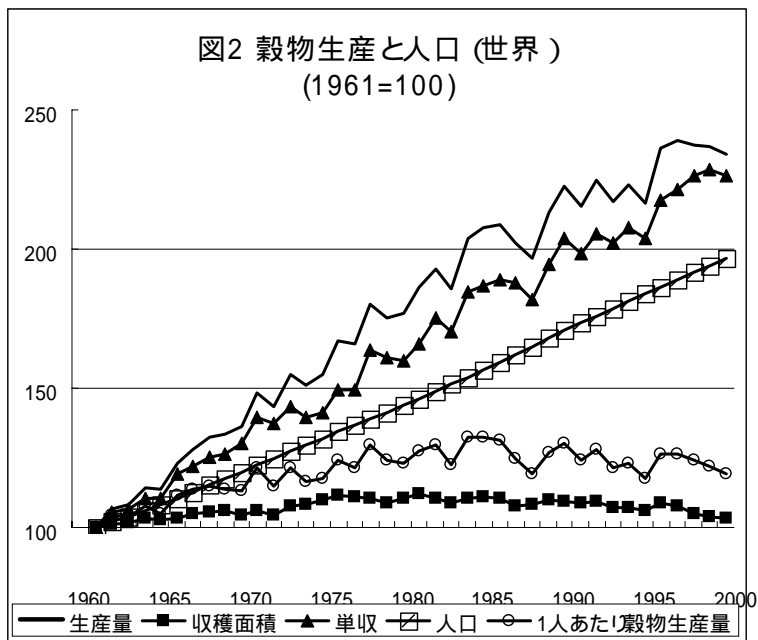
表1 栄養摂取の水準 (2000年)

	先進国	途上国	アジア	アフリカ	サハラ以南 アフリカ
1人1日当り供給熱量(Cal)	3 260	2 679	2 713	2 434	2 226
植物性 (%)	73.7	87.0	86.4	92.8	93.8
動物性 (%)	26.3	13.0	13.6	7.2	6.2
蛋白質(グラム)	98.6	69.2	71.0	61.3	54.2
脂質(グラム)	119.5	62.8	63.9	49.8	44.4

出典 FAO STAT Database



出典：FAOSTAT Database ( 図 2 , 3 も同様 )





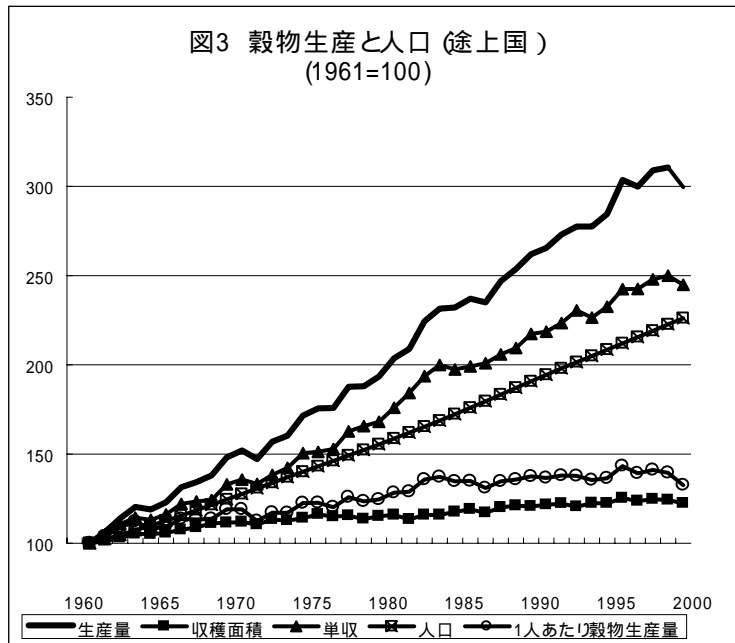
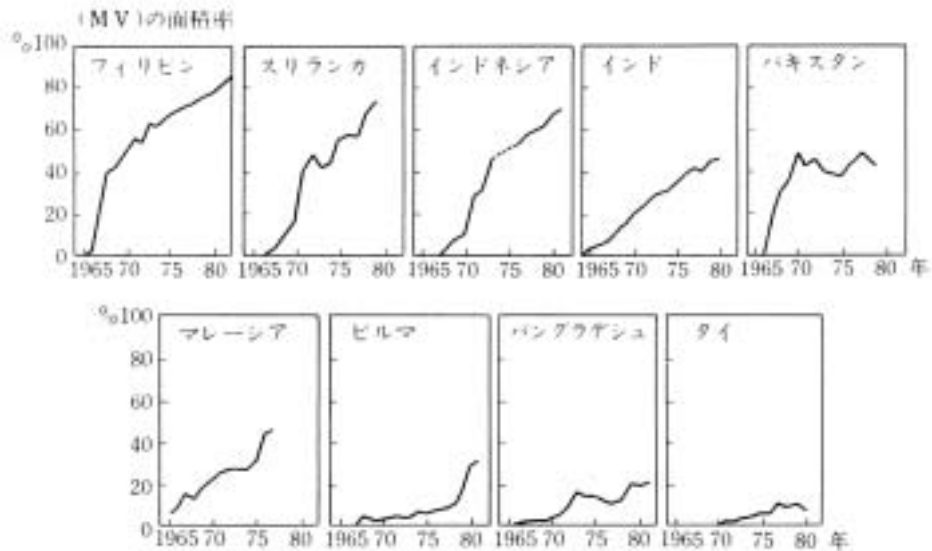


図 4

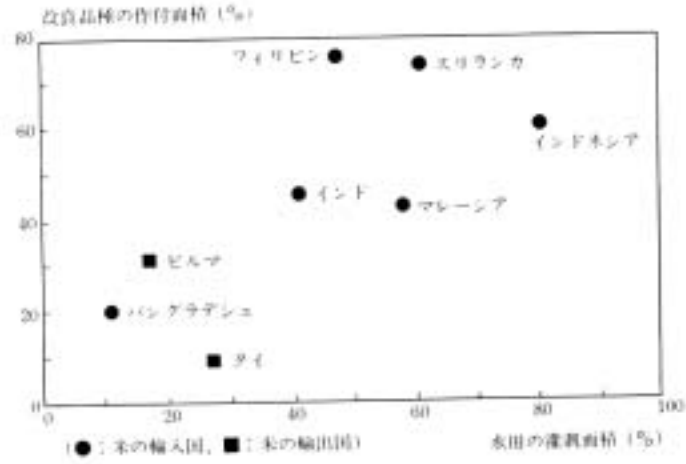
5. アジア9ヶ国における改良品種 (MV) の普及率



出典：日本大学農獣医学部国際地域研究所 『グリーンレボリューションの20年』  
龍溪書舎、1987年、172頁

図 5

6. 灌漑率と改良品種 (MV) 普及率の関係



出典：図 4 と同じ。

## プロフィール

いわもと のりあき  
岩本 純明

所 属

農業・資源経済学専攻 農業史研究室

略 歴

1971年 東京大学農学部農業経済学科卒業

1976年 東京大学大学院農学系研究科農業経済学専門課程単位取得退学

1978年 鹿児島大学農学部講師

1982年 同助教授

1994年 東京大学農学部助教授

1999年 東京大学大学院農学生命科学研究科教授

主な研究活動

近代日本の農業・農村史を対象に、主として土地制度の変遷を研究してきた。またこれとの関連で、イギリスの環境保護運動史、とりわけ田園アクセス権の歴史を追跡する作業も行っている。近年は、拠点大学交流事業の一環としてインドネシアを訪問する機会が増えた。中部ジャワ農村の「定点観測」を継続している。

主な著書

Social Capital and Sustainable Rural Development

Noriaki Iwamoto and Subejo

Proceedings of International Seminar on "Toward Rural and Urban Sustainable Communities: Restructuring Human-Nature Interaction" held in Bandung (Indonesia) on 6-7 January 2004

「農家経済の特質とその持続可能性 - 中部ジャワ農村での“定点観測”」

岩本純明・S.ハルトノ・福井清一 共著

『科学』Vol.73 No.7 (2003年7月号)、pp.780-788、岩波書店 2003年

「アジアの農村開発と持続可能性 - インドネシアからの発信」

『科学』Vol.73 No.7 (2003年7月号)、pp.752-754、岩波書店 2003年

「緑の革命 その成果と課題」 ARDEC、第23号、pp.8-12 2002年

# 耕地創生に向けて

生物・環境工学専攻 教授 宮崎 毅

私は、学生時代に農業土木学という分野を学び、その後、土壌物理学という専門分野で研究をしてきた農学者です。農業土木学は、耕地を創生し、それを整備する工学であり、土壌物理学はその基礎となる土壌の科学です。長年この分野を担当してきて、最近、やっと両者が結びつくようになって来ました。今回は、その話を中心にまとめてみたいと思います。

## 1. はじめに

地球の人口は確実に増え、2005年現在、63億人を超えた。これだけの人間が充分食べていくためには、どうしても農耕地が必要である。しかし、世界にどれだけの農耕地があるのだろうか、また、それは現在と未来の必要を満たしているのだろうか。この疑問にすぐに答えられる人は少ない。逆に、そのような数値を挙げるのできる人が、必ずしも日常的な感覚の中でそれを捉えているとは言えない。

そこで、まず地球の広さを億単位で眺めることにしよう。1億円に直接触れたり、それを見たことのある人は、宝くじにあたった人だけであろうから、通常、億単位でものを感じ取る能力は、我々には備わっていない。それを、あえて億単位で議論してみるところに、非日常的でありながら実はきわめて切実な課題を知る手がかりがあるかもしれない。

ここでは、以下の視点を設ける。

- ・ 世界の農耕地面積はどれくらいあるか
- ・ 農耕地はどれだけ必要か
- ・ どこでなぜ減少しているのか
- ・ 何をすればよいのか、何をしてはいけないのか
- ・ 人類の未来、地球の未来

議論したいテーマは、「どこまで食糧増産は可能か？」であるが、まず始めに、食糧はどれほど生産されているか、それはどう変化しているかを知ることしよう。どのような条件の下で議論するか、その「置かれている条件」を知り、その上で可能性の「夢」を掲げることにはしたい。

## 2. 世界の農耕地面積はどれくらいあるか

地球の広さはおよそ500億haである。そのうち149億haが陸地、残りは海洋である。耕地15億haと牧草地35億haを足した約50億haが世界の農

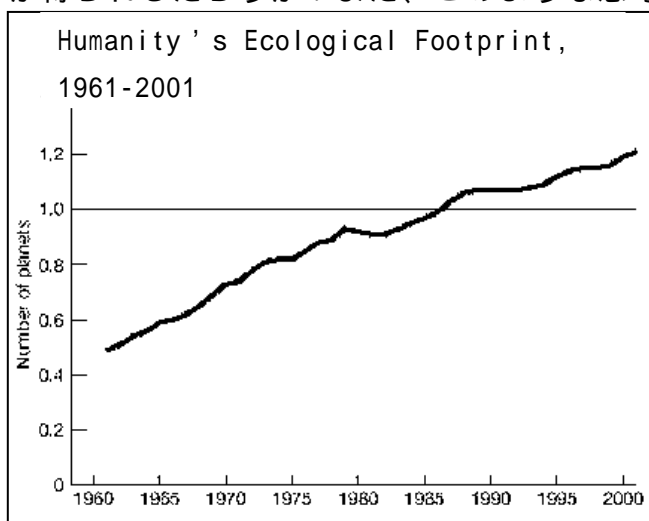
用地である。日本の水田やアメリカのスプリンクラーに見られるような灌漑農業を実施しているのは約 2.7 億 ha に過ぎない。これらを砂漠面積 36 億 ha、森林面積 33 億 ha と比較すると、人間が地球をどう扱っているかを大づかみにすることができる。

### 3 . 農耕地はどれだけ必要か

では、人類 63 億人が生きていくために、農耕地はどれだけ必要だろう？まず、人口の推移を見ると、私たちが生まれた 1950 年ごろは、たったの 25 億人であったのが、2005 年には 63 億人に増えたのだから、2050 年ごろには 90 億人を越えるだろうという予測は、とても嘘とは思えない。仮に耕地 15 億 ha を 63 億人で分け合うとすると、1 人分は約 0.24ha であるが、これが充分なのか不足なのか決めかねる。

そこで、最近、エコロジカル・フットプリントという考え方が登場した。これは、ある人間集団が、現在の経済活動の規模（資源消費と廃棄物排出）を維持するために必要な面積のことである。試算によると、世界平均は 1.8 ha/1 人、アメリカは 5.1~9.5 ha/1 人、日本は 3.8~4.3 ha/1 人、東京では 5.0 ha/1 人であるという。では、どのような手順と根拠で計算するか、簡単に紹介する。まず、あるエリアの経済活動の規模を、土地や海洋の面積（ヘクタール）に換算する。その面積には、食糧のための農牧地・海、木材・紙供給や CO<sub>2</sub> 吸収のための森林、エリア外からの輸入物の生産に要する面積なども全て含む。この面積 = そのエリアで人間が自然環境を踏みつけている面積 = エコロジカル・フットプリント (Footprint) と定義する。その面積をエリア内人口で割って、1 人あたりのエコロジカル・フットプリント (ha/人) を指標化する。エリアの適正規模（環境収容力）をどれくらい超えた経済活動をしているかが一目でわかる。

以上の手順でエコロジカル・フットプリントを計算すると、どのような結果が得られるだろうか？また、このような思考法と計算手順は科学的な根拠がある



だろうか？議論は現在も継続中である。しかし、多くの書物や白書のような報告書類でも取り上げることが多くなってきた。ちなみに、ウェブ検索をかけてみたところ、日本国内で 9320 件、アメリカの yahoo からの検索では 65 万件のヒットがあった。NPO 法人など、非政府系の民間組織が好んで取り上げているように見受けられる。左の図は、

人間のエコロジカル・フットプリントの合計と地球上で生産可能な面積との比を表したグラフである。1885年ごろに、地球1個分を超えてしまったようである。つまり、現状を維持するためには、どうしても生産可能面積（農耕地）を増やさなければならない。ところが、世界の生産可能面積はどうやら不足傾向にあるらしい。

#### 4. どこでなぜ減少しているのか。

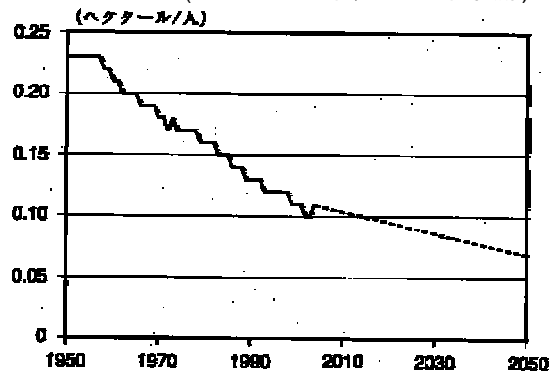
世界では、農耕地の総面積はそれほどの変化が見られず、おおよそ15億haを維持しているが、総人口が着実に増加しているため、当然、1人当たり耕地面積は減少することになる。穀物作付面積で見ると、1950年に5.9億ha、1981年に7.3億haでピークとなり、2001年には6.7億haに減少した。一人当たり穀物作付面積も、人口増加と穀物作付面積減少とにより、図のように急速に減少している。穀物の収量不足を補うには単位面積あたりの収量を

増加させることが考えられるが、近年の技術開発の結果を投入してもそれほど大きな増加は期待できないようである。穀物作付面積の減少傾向を総合すると、中国、韓国、台湾、インド、インドネシア、バングラディシュ、パキスタン、エジプト、メキシコで減少または減少の可能性が指摘されている。これらの穀物作付面積減少の理由

として、ジャパン・シンドロームが挙げられている。それは、所得の上昇に伴う穀物消費量の拡大、穀物を作付ける耕地面積の減少、穀物生産量の減少、という経済発展に伴う症状であるという（レスター・ブラウン 2005）。

1人当たりの穀物作付面積

(1950-2004年、2050年予測)



出所：USDA（アメリカ農務省）。

#### 5. 何をすればよいのか、何をしてはいけないのか。

限られた地球の面積を利用して、人類が持続的に生き続けるためには、エコロジカル・フットプリント論者言うところの環境収容力を越えない方策と同時に、環境収容力の質的向上の方策も必要であろう。ところが、人類は地球を、とりわけ生産可能地を劣化させる原因を作り出している。UNEP(United Nations Environment Programme) 代表の ISRIC(International Soil Reference and Information Center)の調査報告によれば、最近20年間に、人間の行為によって20億haの土地の土壌が劣化したという。

土壌劣化の主な項目内容を見ると、土壌侵食（風食 4.3億ha、水食 4.7億ha）、土壌の酸性化（酸性雨の影響も）、土壌の塩類化、土壌の湛水化（ウォー

ターロギング)、土壤汚染(重金属、農薬、ダイオキシンなど)、土壤からの溶脱や有機物損失、土壤圧縮、土壤の目詰まり、などがある。土壤侵食は、特にアジア地域(3.11 億 ha)とアフリカ地域(2.79 億 ha)で多く発生している。これらの土壤侵食は、主として過耕起、過放牧が原因とされる。アメリカ中西部の小麦過耕作による風食が「ダストボール」と呼ばれて恐れられたことは、スタインベックの小説「怒りの葡萄」の中でも克明に描かれている。

過耕作や過放牧は、環境を劣化させ、土壤を劣化させるが、増加する人口とそれを支える食糧の増産のためには「必要悪」といわざるを得ない。過耕作や過放牧を止めたり制限したりすることには、大きな困難が伴うだろう。

モンゴルでは大草原が広がり、豊かな自然を感じさせるが、1歩その草原に足を踏み込むと、足元の至る所に羊など家畜の糞が残されていることに驚く。「放牧庄とはこれを言うのか」と、実感が湧く。

中国黒龍江省ハルビンの郊外にはアルカリ土壤と呼ばれる劣悪な土壤が広く分布している。それ自体は自然の地質や地形がもたらしたものであるが、耐塩性の牧草が分布しており、適度な放牧には適しているようである。しかし、ここでも放牧は増加傾向にあり、家畜が牧草を根こそぎ食べつくし、その後には白い塩性クラスト(皮膜)がパッチ状に分布する。試みに家畜が入り込めない保護地区を設けて数年を経てみると、耐塩性植物の植生範囲が広がり、白い塩性クラスト範囲が狭まっているという観察結果が得られている。やはり過放牧が塩類集積を促進しているといえる。

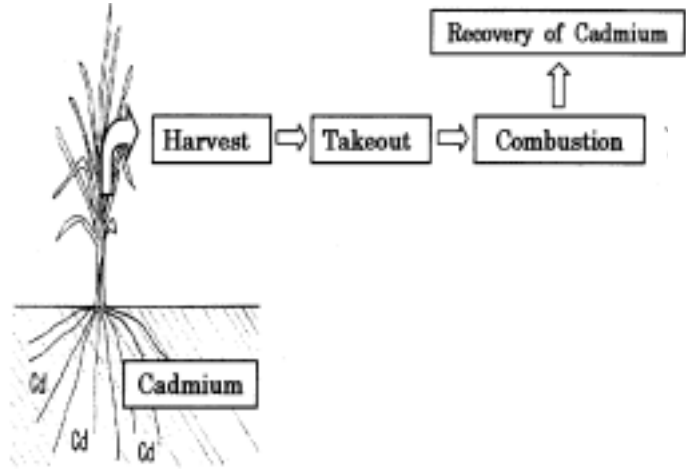
インドネシア、カリマンタン州(ボルネオ島)では熱帯雨林の森林火災が続いている。著しい森林火災のあと、熱帯の土壤は真っ白な色に変わり、10年たってももとの色に戻らない。この白い土は撥水性(水をはじく性質)があり、撥水性は土壤劣化の1種である。そして、熱帯雨林の森林火災は今も減っていない。現地専門家は「伐採後の枝葉を現地に放置することで、乾燥した木質部が残り、火災が起こりやすくなるため」と指摘しているが、これも人為的な影響の元に起きていることを思い知らされる。

以上見てきた事例は、してはいけないことを人類が積み重ねてきたことの実例となっているが、それでは何をすればよいのだろうか。結論から言えば、まず、劣化した環境を修復すること、次に、環境と調和した農業を行うこと、という単純な答えに行き着かざるを得ない。人口の増加、耕地の減少は、食の安全と安心を脅かしている。食を生産する耕地、牧草地、林地では環境が犠牲になり、土壤劣化が起きている。エコロジカル・フットプリントは、地球1個分では足りないことを主張している。人類は、まず劣化させた環境や土壤を修復する責任があるのではないだろうか？

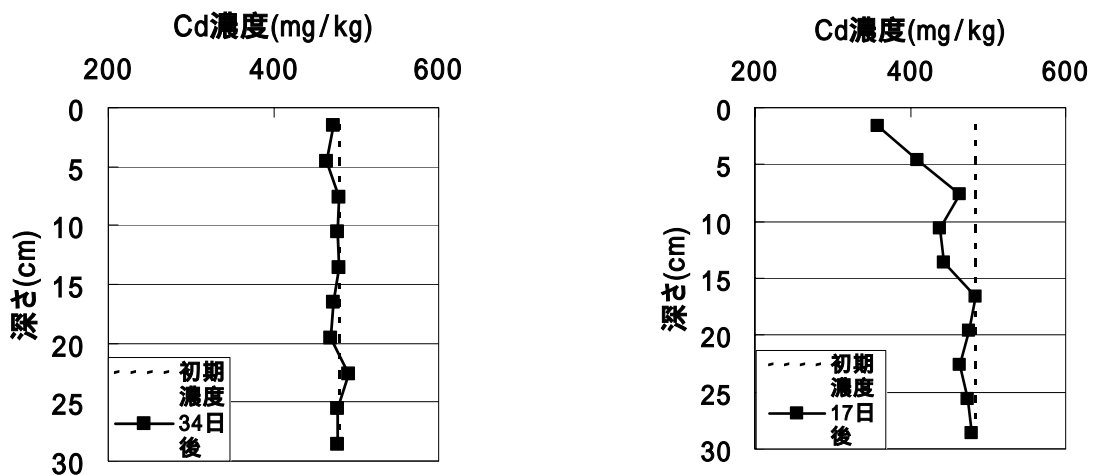
## 6. 人類の未来、地球の未来

人為的に劣化した土壤を修復するためには、科学、技術、政策などを総合し

た計画設計が必要となる。たとえば、過耕作、過放牧には規制と計画性が必要であろう。塩類集積問題とリーチング効果、土壌固化問題と機械化農業との関連性、土壌侵食防止のための等高線栽培・不耕起栽培の効果、重金属汚染土壌のファイトリメディエーションや排土客土法、洗浄法の効果、油汚染土壌へのバイオリメディエーション効果、など科学的説明が待たれる事項も少なくない。



最近の研究から、ファイトリメディエーションとバイオリメディエーションを紹介する。ファイトリメディエーションは、植物に有な重金属を吸収させて土壌から除去する技術である。植物に集積した重金属回収して再利用することが望まれる。



2つのグラフの左側は、カドミウム(490ppm)を含む土壌にヒマワリを植えない場合の34日経過後カドミウム分布であり、変化は全く見られない。右側は、同量のカドミウムを含む土壌にヒマワリを移植して17日後のカドミウム分布であり、表面付近では350ppmまで濃度が減少したことがわかる。土壌中に吸着されているカドミウムがどのようにして引き剥がされ、植物根中へ取り込まれるのか、現在も研究が進められている。

バイオリメディエーションでは、土壌中の微生物が汚染物質を栄養源として増殖成長することを利用する。このとき、汚染物質は分解浄化されるが、10日ぐらい経過すると、微生物の増殖・成長が著しくなる一方、汚染物質が食べつくされて減衰するので、およそ10日程度が汚染浄化率のピークとなることが経験的に知られている。しかし、その内実はいまだ未解明である。



## 7. 結論

世界の1人当り農耕地面積と穀物作付総面積は減少しつつあり、既往の農耕地の土壌は劣化しつつある。人類は、豊かさの公平な配分を考えると同時に、地球1個で足りるような存在様式を見出すべきではないか。その重要な使命として、まず土壌環境の修復と保全が必要と考えられる。そのために、「土壌圏の科学」が果たすべき役割は大きい。

### 参考資料：

エコロジカル・フットプリント、マティース・ワケナゲル、ウィリアムス・リース著  
(和田、池田訳)合同出版、2004

フードセキュリティー、レスター・ブラウン著、(福岡訳)ワールドウォッチジャパン、  
2005

NHK 地球白書、古川潤編著、家の光協会、2001

## プロフィール

みやざき つよし  
宮崎 毅

### 所 属

生物・環境工学専攻 環境地水学研究室

### 略 歴

1971年 東京大学農学部農業工学科卒業  
1976年 東京大学大学院農学系研究科農業工学専門課程博士課程修了  
1977年 農林省四国農業試験場研究員  
1981年 カリフォルニア大学デービス校客員研究員  
1986年 農林省農業土木試験場農地整備部室長  
1987年 東京大学農学部助教授  
1996年 東京大学大学院農学生命科学研究科助教授  
1998年 東京大学大学院農学生命科学研究科教授

### 専門分野

土壌物理学、環境地水学、地域環境工学

特に、地球環境に関わる土壌中の熱・ガス状物質・液状物質・固体状物質の移動現象について、フィールド研究、実験的研究、理論的研究。

### 主な著書

「Water Flow in Soils」(共著)	Marcel Dekker, Inc.	1993
「土壌物理環境測定法」(共著)	東京大学出版会	1995
「土壌圏の科学」(共著)	朝倉書店	1997
「豊かな土づくりをめざして 環境土壌学」(共著)	農業土木学会	1998
「環境地水学」	東京大学出版会	2000
「東大教師が新入生にすすめる本」(分担執筆)	文藝春秋	2004
「土壌物理学」(共著)	朝倉書店	2005
「Water Flow in Soils, Second Edition」	CRC Press	2005

# 遺伝子組換え作物の可能性

生産・環境生物学専攻 教授 大杉 立

## 1. はじめに

2050年には90億人に達すると予想される地球人口を養うためには食料生産の増大が急務の課題である。これまでの食料増産は作物の生産性の向上と栽培面積の拡大によって実現されてきた。しかし、環境保全、工業用地・住宅地の増大などの面から栽培面積の拡大は頭打ちになってきており、食料生産の増大は作物の生産性の向上に更に大きく依存せざるを得ない。

最近の遺伝子・ゲノム研究の進展によって、作物の生産性に関する研究も遺伝子との関連で多数行われており、遺伝子組換え作物の開発も進んでいる。本講演では、遺伝子組換え作物の利用の面から作物の生産性向上の現状と今後の可能性について述べる。

## 2. 遺伝子組換え作物の栽培状況

まず、現在の世界における遺伝子組換え作物の生産状況について概観する。遺伝子組換え作物は1996年から栽培が開始された。当時の栽培面積は170万haであったが、その後急速に増大して2004年には8100万haに達し、9年間で約50倍に増大した(図1; p.21)。2004年には17カ国で栽培され、そのうち、5万ha以上の栽培面積を持っている国は14カ国(アメリカ、カナダ、オーストラリア、ルーマニア、スペインの先進国5カ国とアルゼンチン、ブラジル、中国、パラグアイ、インド、南アフリカ、ウルグアイ、メキシコ、フィリピンの開発途上国9カ国)である。また、栽培に関わっている825万の農家の約90%は開発途上国の農家である。栽培面積でみると、遺伝子組換え作物の約1/3は開発途上国で栽培されており、国の数では先進国の約2倍、2003年から2004年の1年間の面積増加(720万ha)は先進国(610万ha)を上回っている。特に、中国(32%)、インド(40%)、アルゼンチン(17%)、ブラジル(66%)及び南アフリカ25%)の5カ国の増加が大きく、遺伝子組換え作物の今後の栽培の動向に大きく影響すると見られる(James、2005)。

2004年に栽培されている主要な遺伝子組換え作物は除草剤耐性作物、害虫抵抗性作物及び除草剤/害虫複合抵抗性作物である(表1; p.22)。このうち、除草剤耐性ダイズが60%と最も多く、害虫抵抗性トウモロコシが14%、同ワタが6%と続いている。また、作物としては、ダイズ、トウモロコシ、ワタ、ナタネ(カノーラ)に集中している。各作物の全栽培面積に占める遺伝子組

換え作物の割合は、ダイズでは 56%、ワタでは 28%、ナタネ（カノーラ）では 19%、トウモロコシでは 14%である。これらの遺伝子組換え作物は食用、飼料、油、繊維等に利用されている。

### 3．作物の生産性に関わる遺伝子組換え作物

作物の生産性は作物自身の潜在的生産能力（ポテンシャル）の高さと高・低温、乾燥、塩類、雑草等の環境ストレスに対する抵抗力で決定される。実際の栽培現場では、様々な環境ストレスによって作物のポテンシャルは十分には発揮出来ず、それを補うために水管理、農薬等による栽培管理が行われている。今後の生産性向上のためには、（1）作物のポテンシャルの向上と（2）環境ストレス（病気、害虫、雑草などの生物的ストレスと高・低温、乾燥などの非生物的ストレス）に対する耐性の向上が重要である（図2；p.22）。

上述したように、現在栽培されている遺伝子組換え作物は雑草害も含めた環境ストレスに対する耐性を付与したものがその大半となっている。これらは、農薬（殺虫剤、除草剤）低減や不耕起栽培を可能にして環境保全型農業の推進に貢献するとともに生産者の労力・コスト軽減にも役立っている。

また、この他の環境ストレスに耐性を示す遺伝子や作物のポテンシャル向上に関わる遺伝子の研究も行われており、遺伝子組換え作物としての開発も進んでいる。ここで現在開発中のものも含めていくつかの遺伝子組換え作物を紹介する。

#### （1）環境ストレスに耐性を示す遺伝子組換え作物

##### 1）除草剤耐性作物

どのような植物でも枯らす非選択性の除草剤（グリフォサート剤、グリフォシネート剤）に耐性を示す遺伝子を導入することで、目的とする作物以外の雑草等を枯らしてしまふことが出来る。ダイズ、ナタネ、ワタ、トウモロコシ等で商品化されている。

グリフォサートは一部のアミノ酸を合成する酵素の働きを阻害するが、土壌中のアグロバクテリウムから見つかったグリフォサートで阻害を受けない酵素の遺伝子がダイズ等に導入された。また、グリフォシネートはグルタミン合成を阻害し、そのために植物体にアンモニアが蓄積し、枯死する。放線菌から見つかったグリフォシネートを無毒化する酵素の遺伝子がトウモロコシ等に導入された。これらの除草剤耐性作物はアメリカ、アルゼンチン、ブラジル、パラグアイ、カナダ、ウルグアイ、ルーマニア、南アフリカ等で栽培されている。除草剤耐性ダイズの場合、収量が平均約 5% 増大し、除草作業が 4~5 回から 1~2 回へ減り、除草剤の使用量が約 70%に減少した。

## 2) 害虫抵抗性作物

土壌微生物のバチルス・チューリングェンシス (Bt) は害虫に抵抗性を示す物質を生産している。この物質はガなどの鱗翅目昆虫の消化管で毒性の物質にかわり、消化作用を阻害して死に至らしめる。この物質は他の昆虫やほ乳類には全く毒性を示さない。これまでに、アワノメイガに抵抗性を示す Bt トウモロコシ、オオタバコガに抵抗性を示す Bt ワタ、コロラドハムシに抵抗性を示す Bt バレイショ等が栽培されている。また最近ではネキリムシに抵抗性を示す Bt トウモロコシも実用化されている。Bt トウモロコシはアメリカ、アルゼンチン、カナダなどで、Bt ワタは中国、インド、オーストラリアなどで栽培されている。アワノメイガ防除のための薬剤散布がほぼ不要になり、トウモロコシでは約 7%の増収が認められている。

## 3) 病害抵抗性作物

病害（糸状菌、細菌、ウイルス）に抵抗性を示す作物のうち、既に実用化されているものはウイルス抵抗性作物である。キュウリモザイクウイルス等の農作物に被害をもたらすウイルスは遺伝子本体の回りに外皮タンパクを持っているが、この外皮タンパクの遺伝子を作物に導入し、外皮タンパクを多量に蓄積させることで感染後のウイルスの増殖を押さえることが出来る。この作用を利用してアメリカでウイルス抵抗性のスクワッシュ、パパイアが栽培されている。

また、我が国ではイネいもち病菌（糸状菌）、イネ白葉枯病（細菌病）等に対して同時に抵抗性を示す抗菌性タンパク質（ディフェンシン）遺伝子を導入したイネの開発が進められており、本年（独）農業・生物系特定産業技術研究機構北陸農業研究センターで隔離圃場試験が実施された。

## 4) 高・低温、乾燥、塩類に耐性を示す作物

作物に影響を及ぼす温度、水分、塩類等に耐性を示す遺伝子組換え作物の開発も積極的に進められているが、実用化にはまだ時間が必要である。我が国で特に問題となる低温については、グルタチオン S トランスフェラーゼ遺伝子をイネに導入して耐冷性を強化する試みが隔離圃場レベルで進められている。また、乾燥・低温耐性に関するいくつかの遺伝子の制御を同時に行っている転写因子（DREB1A）が見出され、イネなどの作物での有効性の検討も進められている。

## 5) 窒素を効率的に利用する作物

今後の環境保全型農業を目指すためには、農薬の低減と同時に施肥の効率化が重要である。そのために、重要な肥料である窒素を効率的に利用する遺伝子組換え作物の開発も進められている。例えば、グルタミンデヒドロゲナーゼ遺伝子やDof1遺伝子をジャガイモやシロイヌナズナに導入した場合、低窒素条件

での生育が非組換え植物に比べて良好であることが温室でのポット実験で示されている。これらの遺伝子を導入したイネなどの作物について、その圃場レベルでの有効性の検討が計画されている。

#### (2) ポテンシャルを高めた作物

一方、作物自身のポテンシャルを高めて収量を向上させる方向での研究開発も盛んに行われている。我が国では、イネの草丈を適切に調節する遺伝子や葉の角度を直立に近くする遺伝子を導入して草型の面から生産性のポテンシャルを向上させる試みがなされ、既に隔離圃場試験が実施されている。

また、基本的な代謝を制御する遺伝子を導入した組換え作物として、ショ糖の合成に関わる重要な酵素であるショ糖リン酸合成酵素(SPS)を導入したトマト、バレイショ、イネ等が作出され、果実の新鮮重、塊茎重の増加等が認められている。また、光合成のカルビンサイクルの一員である酵素(FBPase/SBPase)遺伝子を過剰発現したタバコでは、葉の成長が促進されている。これらの一部は隔離圃場実験が行われているが、温室でのポット実験の段階のものが多い。

#### 4. 今後の展望

このように、作物の生産性の向上に関する遺伝子組換え作物は、既に実用化されたものに加えて、隔離圃場や温室を使って研究開発が進められている。特に、ゲノム研究の進展によって遺伝子に関する情報は膨大に蓄積されてきており、今後もそれらの成果をもとに遺伝子組換え植物を用いた研究が盛んに進められていくものと考えられる。しかし、これまでの多くの研究はまだ温室実験の段階にある。温室実験では通常外界と遮断された人工気象室や自然光温室でポットを用いて実験を行っているため、その結果を自然条件下の水田や畑で栽培したときの生産性や環境との相互作用等に直接結びつけることはできない。生産性に関わる遺伝子の有効性の評価は圃場(隔離圃場)で行うことが必要である。

また、世界における遺伝子組換え作物の栽培面積が増大しているにもかかわらず、我が国やヨーロッパの一般市民の間では強い抵抗感がある。その大きな要因は、食品としての安全性、生態系への影響について不安が持たれているためである。生態系への影響については、「生物の多様性に関する条約のバイオセーフティーに関するカルタヘナ議定書」が昨年9月に国際的に発効し、これを受けて我が国でもいわゆるカルタヘナ国内法が本年2月に施行された。これにより、遺伝子組換え作物の及ぼす周辺生物に対する影響評価が法律によって義務づけられることになり、生態系における競合の優位性、有害物質の産生、近縁野生種との交雑、の3つによる影響を検討することになった。また、最近、同種の非組換え作物との交雑による組換え遺伝子の混入に関心が高まっている。これは、消費者の不安だけでなく、一般作物や有機栽培作物との共存

のあり方とも関わっている。これらの生態系への影響については、まだまだ科学的知見が不足しており、今後、生産者・消費者の理解を得ながら遺伝子組換え作物の一般圃場での栽培を実施してモニタリングを行い、一層の情報収集を図るとともに、それらをわかりやすく提供していくことが必要である。

## 5. おわりに

遺伝子組換え作物を利用して作物の生産性の向上を図ることは、今後の食料問題の解決に向けて大きな可能性をもっている。それは、食料の確保と同時に農薬・肥料の低減などを通じた環境保全型農業の発展にも寄与すると考える。

一方、遺伝子組換え作物の栽培や食品としての利用に関しては、不安を示す人々が少なくない。このような不安を取り除く努力が開発者・研究者に求められている。特に、自然環境下での生理・生態的特徴、生態系への影響等に関する情報が未だ十分でない。このため、これまで遺伝子組換え作物の研究・開発に直接関わってこなかった作物栽培等に関わる研究者が遺伝子組換え作物を一つの研究素材としてとらえて、生理・生態的特徴、生態系への影響等を圃場レベルで検討することができれば、遺伝子組換え作物に関する理解を深めるために貴重な情報を提供することになるであろう。

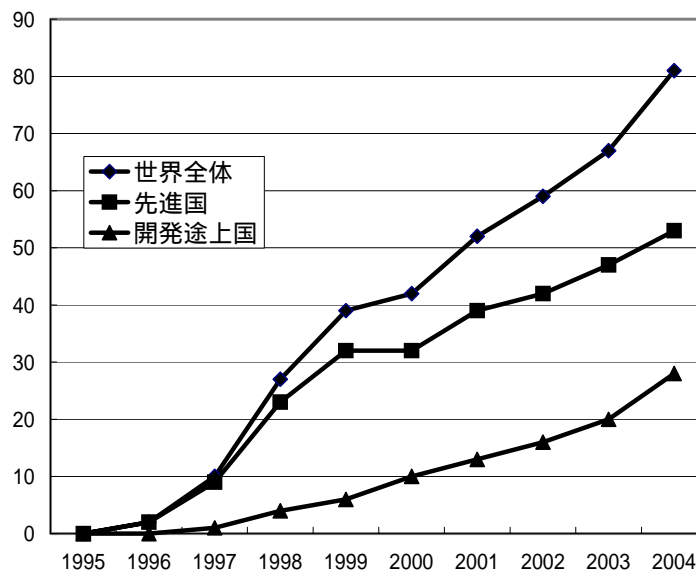
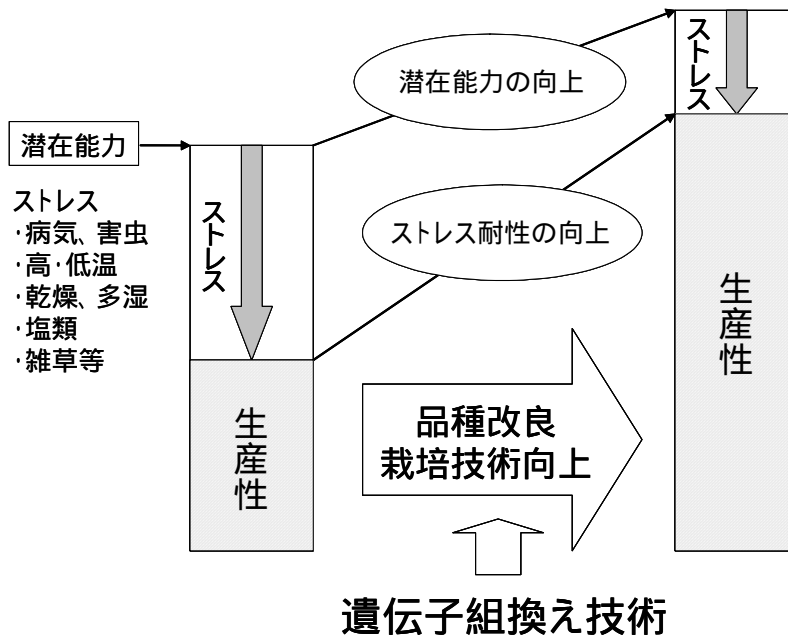


図1 遺伝子組換え作物の栽培面積の推移(百万ha) ( James, 2004)

表1 商業栽培されている組換え作物（2004年）

	（百万 ha）（全体に占める割合）	
除草剤耐性ダイズ	48.4	60
害虫抵抗性トウモロコシ	11.2	14
害虫抵抗性ワタ	4.5	6
除草剤耐性トウモロコシ	4.3	5
除草剤耐性ナタネ（カノーラ）	4.3	5
害虫抵抗性/除草剤耐性トウモロコシ	3.8	4
害虫抵抗性/除草剤耐性ワタ	3.0	4
除草剤耐性ワタ	1.5	2
全体	81.0	100

（ James, 2004 ）



（新名、1999を改変）

図2 生産性の向上に関する模式図



## プロフィール

おおすぎ りゅう  
大杉 立

### 所 属

生産・環境生物学専攻 作物学研究室 / 附属農場

### 略 歴

1976年 東京大学農学部農業生物学科卒業  
1976年 農林省草地試験場研究員  
1989年 農林水産技術会議事務局研究調査官  
1991年 農業生物資源研究所光合成研究室長  
1997年 同企画調整部企画科長  
1998年 農林水産技術会議事務局研究開発官  
2001年 東京大学大学院農学生命科学研究科教授

### 専門分野

作物生理学

### 主な著書

「栽培学」(共著) 朝倉書店(印刷中)  
「植物育種学辞典」(共著) 培風館 2005年  
「シンク・ソースの分子機構から作物の収量向上を考える」  
化学と生物 学会出版センター pp366-373 2003年  
「作物学事典」(共著) 朝倉書店 2002年

パネルディスカッション  
- 食糧増産と農学の役割 -

< パネリスト >

農業・資源経済学専攻	教授	岩本純明
生物・環境工学専攻	教授	宮崎毅
生産・環境生物学専攻	教授	大杉立