

世界の食料生産とバイオマスエネルギー — 2050年の展望

東京大学 大学院農学生命科学研究科・農学国際専攻 准教授 川島博之

地球環境の変化や人口爆発で、世界の食料生産は深刻な危機に直面すると言われて久しい。だが川島准教授は、「世界は食糧危機に陥らない」と言う。地球には現在の5倍、360億人も人口を扶養できるポテンシャルがあるというのだ。これは根拠のない楽観論ではない。肥料の効率化や品種改良によってグリーン革命が進めば、収穫量の改善と環境負荷の軽減が実現するという。むしろ、食料資源をバイオマスエネルギーに転換する風潮に警鐘を鳴らす。

(編集部)



Hiroyuki Kawashima

2008年5月に東京大学出版会より出版した『世界の食料生産とバイオマスエネルギー—2050年の展望』を基に講演します。

私がこの分野の研究を始めたのは約2年前です。それまで過去約20年にわたり、主にアジア地域の食料生産が環境に与える影響について研究してきました。私自身は世界の食料生産の専門家ではありません。しかし、日本には世界の食料生産を専門とした研究者はほとんどいませんので、日本で最も詳しい人間ではないかと思っています。特に2007年頃から世界の食料生産とバイオマスエネルギーの共存が問題になってきていますが、日本には専門の研究者がいないため、実現の見通しが立ちにくい状態だと感じています。

世界の食料生産とバイオマスエネルギーというテーマに関しては、「マクロに見る」ことにこだわっています。このテーマが抱える問題は、複数の学問分野にまたがっています。例えば、植物の成長に関しては作物学、気象の変化に関しては気象学、土壌に関しては土壌学、全体を統合すれば経済学や農業経済学となります。これらを一つの立ち位置から広く総合的に俯瞰し、客観的に考える必要があります。パソコンとインターネットなどを使えば、自分でも幅広く十分な量の情報を容易に収集できます。

分野の利害を乗り越え、感情的な判断を避け、客観的に分析することも、マクロに見る際には欠かせないことです。

21世紀、世界が食料危機に陥ることはない

「何が食料生産量を決めるのか」——。これが今回の講演の一番のエッセンスです。2年間の調査・研究による結論は、次の3つの条件が複雑に絡み合った巨大な複雑系だということです。

- (1) 環境(農地面積、降水量、気温、土壌)
- (2) 経済(人口、需要、世界所得分布)
- (3) 技術(単収の改善、栽培適地の拡大)

(1) 環境に関しては、地球温暖化などが最も議論されているところです。例えば、農地を開拓するために森林が伐採されているなど、森林危機がよく話題になりますし、気温が上昇して土壌がボロボロになり、世界の農業生産が破壊されるとも言われています。また(2)の経済に関しては、食料サミットなどで「先進国は開発途上国に対して何をすべきか」といったことが頻繁に取り上げられています。(3)の技術に関しては、農業分野で技術革新は極めて速く、目を見張るものがあります。我々は「地球環境の変化や人口爆発で今後、世界の食料生産は

深刻な危機に直面する」ということをプロトタイプのように聞かされますが、技術の進化と拡大が非常に速いため、21世紀に世界が食料危機に陥ることはない、私は確信しています。

今回の講演の最も基本的な情報として、世界の土地利用と最大扶養人口というものがあります。最大扶養人口とは、地球が支えられる人口の最大値です。地球には約30億ヘクタールの陸地があり、その陸地の中で約15億ヘクタールを農地として使っています。実はそのうちの約3億ヘクタールが、現在休耕地です。3億ヘクタールは日本の農地の約100倍という広さです。また、森林伐採には抵触しますが、拡張可能面積は推定11億ヘクタールです。推定ですので20億~7億ヘクタールの範囲内で変動すると思われます。要するに現在、人類は農地として15億-3億=12億ヘクタールしか使っていませんが、15億+11億=26億ヘクタールが農地として使える面積であり、これは現在使っている面積の2倍以上という値です。

単位面積当たりの収穫量を単収と言いますが、現在の単収は8トン/ヘクタールで、10トン/ヘクタールも難しくありません。江戸時代の単収は1.5トン/ヘクタールで、終戦直後は3トン/ヘクタールでした。単

収が向上したのは、遺伝子操作などではなく、単なる遺伝子の掛け合わせによるものです。要するに、8トン/ヘクタール×26億ヘクタール=208億トンの生産量が可能ですが、そのうち野菜や果実を除き、穀物を栽培する割合を6割とした場合、穀物の生産量は208億トン×0.6=約125億トンということになります。穀物は米、トウモロコシ、小麦を指しています。現在、穀物の生産量は22億トンですから、今後、5倍以上増やすことが可能だと考えられます。

1人当たりの穀物消費量は平均350kg/年で、日本並みとします。これは1日約1kgという値になりますが、我々自身が直接食べている量はもちろんずっと少なく、かなりの量が牛や豚のえさになっています。

これらの値から地球の最大扶養人口を算出すると、約360億人という値が出てきます。現在、地球の人口は約67億人で、今後、増加しても91億~92億人が最高値であると考えれば、地球の扶養人口のポテンシャルは極めて高いということが言えます。

バイオマスエネルギーはビジネスとして成立しない

さて、化石エネルギーの代替として、バイオマスエネルギーに注目が集まっていますが、結論を先に言えば、バイオマスエネルギーはビジネスとして成立しないというのが私の考えです。先ほど「森林を伐採すれば穀物を年間125億トン生産することは可能だ」と述べましたが、そのうち食料を除き、残り約100億トンをバイオマスエネルギーに回すとします。しかしながら、これを石油に換算すると約30億トンになって

しまいます。現在、石油消費量は35億トンで、これに石炭や原子力を加えて石油に換算すると、世界規模で合計100億トンものエネルギーを消費しているというのが現状です。食料に回せば約300億人を養える量の穀物をバイオマスエネルギーにしたとしても、現在の石油消費量にも満たないというわけです。しかも、その前提条件として森林伐採がありますから、今後、森林保護との競合という問題が発生することになるでしょう。

また、現在の穀物生産量は22億トンで、世界規模でこの奪い合いが起こっているわけですが、これらをすべてバイオマスエネルギーに回したところで、石油換算で3分の1の約7億トンです。実際には転換ロスがありますから、約3~4億トンにしかならないと思われる。つまり全人類が食料として消費している穀物をすべてバイオエタノールにしたところで、エネルギー消費量の3%程度にしかならないということです。

そこで、食料と競合しないセルロース系の研究が始まっています。日本では、経済産業省の研究所であるRIETI(経済産業研究所)などが企業と共同研究を進めていますが、私自身はセルロース系が実用化されることもないと考えています。現在、農業残渣が世界には約22億トンあります。日本ではエネルギーにしようという考えですが、インドなどの発展途上国では牛などの飼料になっています。私も有機肥料にした方がよいと思います。日本や欧州でも、つい最近まで堆肥という形で有機肥料にしていましたが、化学肥料を使うようになり、使われなくなってしまいました。1トンの化

学肥料ナイトロジェンを作るのに1トンの石油が必要ですが、有機肥料にすれば窒素固定菌が植物中の窒素を固定してくれるので、化学肥料よりもはるかに環境に優しいと言われています。しかし、日本の農業は高齢化が進み、堆肥を作って土にすき込むという作業は面倒で負担が大きいので、現在はあまり行われていません。

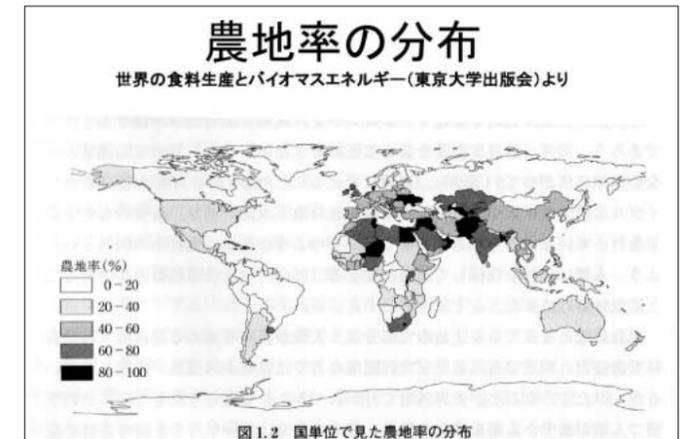
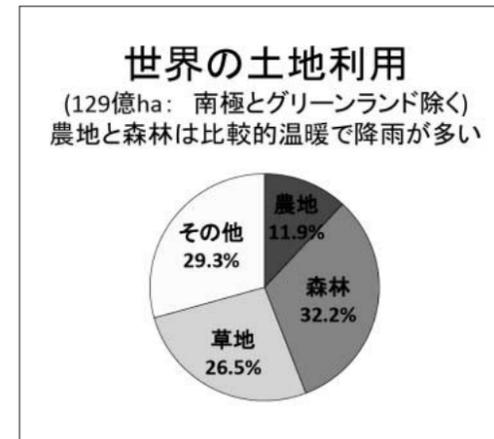
「それならば、新たにバイオマスエネルギー専用の土地を確保すれば良いのではないか」と言われる方がいますが、世界の土地利用は、全陸地30億ヘクタールのうち、11.9%が農地、32.2%が森林、26.5%が草地、29.3%がその他となっております。もし降水量の少ない草地でセルロースを作れば、生態系が非常に脆弱ですので、すぐに砂漠化してしまいます。要するに地球上にはセルロースを作るための土地は余っていないのです。

最近、食料と競合しないバイオ燃料として、劣悪な環境でも育つヤトロファというものがあることが話題になることがあります。しかし、ヤトロファは成長速度が非常に遅いため、商業化は難しいでしょう。

今、アマゾンでは森林を伐採して農地を作っているため、環境破壊ということで大きな問題になっていますが、日本は約2000年、欧州は約1000年、米国は約100年というオーダーで同様に農地を作ってきたことを認識すべきではないでしょうか。

次に説明する「農地率の分布」とは、私が作った概念です。農地はそのまま放置しておく森林に戻るということから、森林に対する農地の割合を示しています。

農地率100%とは森林をすべて伐採して



農地にしたという意味で、農地率0%とはすべて森林という意味です。世界の192カ国について農地率を計算して表しています。これを見て明瞭に分かることは、ユーラシア大陸の南側とアフリカ大陸の北側の農地率が高いということです。要するに、人類は過去4000～5000年にわたり、この地域で農業を営んできたのです。一般に、農業を始めたのはシリアで、その後、ナイル川、チグリス・ユーフラテス川、インダス川、黄河に広がり、栄えていったと言われており、実際その近辺の農地率が高くなっています。欧州も農地率は40～50%です。一方、日本は比較的森林を大切にしています。世界的に見ると日本はかなり変わった民族で、森林をよく残しており自然との調和を重んじてきたと解釈できます。

以下は「世界の農地」を表したグラフです。

例えば、米国の農務省が調査したところによると、約5割が休耕地となっています。東欧でも休耕地が広がりつつあります。このように、世界中で食料が余っているのです。ここ何十年、ケネディラウンド、GATT(関税および貿易に関する一般協定)ウルグアイラウンド、WTO(世界貿易機関)で農業交渉が行われていますが、それぞれ「食料が余っているので買ってこれ」ということで、食料の押付け合いでもめている状況です。その押付け合いを緩和するため、欧米では休耕という政策を取っているということです。また、全農地の約6割が穀物ですが、残りの部分で比較的多いのが

油用作物です。大豆も油用作物として使われるので、大豆も合わせると全農地の約4分の1が油用作物に使われているということになります。その割合は1961年に比べて増えてきています。

我々の食生活は豊かになりましたが、肉の量が増え米の量が減ったということは直感的に分かるでしょう。実はカロリーベースで見ると、油を摂る量も非常に増えています。日本人の食料需給表を見ても、約2200～2300キロカロリーのうち約4分の1の600キロカロリーを油から摂っています。言い換えれば、油用作物が増えている中、バイオディーゼルに回せる油などないということです。バングラデシュの人たちはマレーシアからパームオイルを買ってきて揚げドーナツを作って食べているのですが、もし日本がインドネシアから大量にパームオイルを買い付けてバイオディーゼルに使うとなれば価格が上がってしまい、バングラデシュからかなりひんしゅくを買うことになるでしょう。食料としての需要が伸びている間、油用作物を食料でないものを使うというのは、世界の非難を浴びるだけですから、バイオディーゼルの可能性はないと思います。

世界の穀物生産量

次に、世界の大きなトレンドについて簡単に紹介します。次のグラフ「世界の穀物生産量と人口」は、20世紀後半における人口の伸びと穀物生産の伸びを示したものです。

これは私が作ったものですが、この分野の研究で有名なレスター・ブラウン氏も似たようなプロットを行っています。1995年に出された『誰が中国を養うのか?』という本があるのですが、その中には、「穀物の生産量は1980年頃までは順調に伸びてきているが1995年からはずっと横ばい。一方、人口は伸び続けているので、21世紀には人口に対し、穀物の生産量が追いつかなくなる」と書かれています。レスター・ブラウン氏はここで食料危機を強く主張しているわけですが、あれから13年経ち、確かに穀物の生産量は横ばいです。しかし、食料危機が訪れることは決してないと考えられます。

次の「驚異的な単収の増加」というグラフは、19世紀の初め頃からのフランスにおける小麦の単位面積当たりの収穫量を表したものです。

1950年頃までは、単収は1.5トン/ヘクタールでほぼ横ばいですが、1950年を境に急速に伸びています。最大の要因はバイオテクノロジーではなく、窒素肥料です。窒素肥料を大量に入れることができるようになったことで、極めて明確に単収を伸ばせるようになりました。要するに、1950年の第1次世界大戦直前の頃、ハーバー・ボッシュ法が開発され、空中窒素を固定できるようになりました。第2次世界大戦の後、工業化され急激に普及したことで1950年頃に単収が急増しているのです。これはいわゆる『グリーン・レボリューション(緑の革命)』と呼ばれています。グリーン・レボリューションというとマーチン・ボローと

いう人がノーベル平和賞をもらったことから、開発途上国で行われたといったイメージがありますが、実は、先進国が先に実現させました。その一部を開発途上国に持っていくのをマーチン・ボローが後押ししたのでノーベル平和賞をもらったのです。日本の戦後の飢えを救ったのもこのグリーン・レボリューションだと聞いています。

よく「バイオテクノロジーで品種改良することで単収はどれくらい伸びますか」という質問を受けることがあります。簡単に言うと品種改良でできる作物というのは都会のもやしっ子のようなものです。光合成は葉で行われています。植物は利口なもので、何億年にも及ぶ成長戦略の中、太陽により多く当たるよう、実にさまざまな戦略を取ってきました。そのため、葉の生え方といったものは品種改良でもあまり変わりません。では、品種改良で何を行っているかというと、果実が多く実るようにしているのです。言い換えれば、「頭でっかちにして、なるべく下を細らせる」というのが品種改良です。日本のお米の場合、実の部分を増やすということになります。実が3分の1、わらが3分の1、根が3分の1という割合です。

ところが、野生種の場合、実の部分が5～10%と非常に少なく、逆に根が深く張るという性質を持っています。それは、干ばつに備えた成長戦略です。また肥料を吸収するのにも根を深く張っておいた方が有利です。一方、実の方は簡単に食べられてしまうので最低限で良いというわけです。種

の保存のためには「実よりも根」という戦略なのです。その比率を変えたのが品種改良ということです。ですから、品種改良した品種は水や肥料を吸収する力が非常に弱いのです。そのため、灌漑と化学肥料が不可欠なのです。小麦の場合、水はあまり必要ありません。逆に水をかけ過ぎると根腐れを起こしてしまいますので、フランスでは肥料で育てているという状況です。

しかしながら、穀物の生産量は横ばいです。

なぜ穀物の生産量が横ばいなのかというと、実は、大豆の飼料としての需要が非常に伸びているということがあります。我々日本人にとっては納豆、豆腐、枝豆など大豆は食生活に欠かせないもので、1人当たりで見れば、世界で最も大豆を食べているのが日本人で、次に韓国、そして中国と続きます。しかしそれ以外の国には大豆を食べる習慣がなく、油を絞るために作られています。米国では、油を絞った後の大豆カスは捨てられていました。しかし、大豆カスは40%程度のタンパク質を含んでおり、それを家畜に食べさせてみたところ、非常によく太ることが分かり、トウモロコシなどと混ぜて豚や牛の飼料にしたのです。その傾向は畜産革命が起こった1970年頃から顕著になりました。以前、牛は放牧していましたが、運動させると筋肉が発達して肉が硬くなってしまいますので、運動しないよう牛舎の中で配合飼料を与えて育てることにしたのです。穀物はタンパク質の含有量が大豆に比べて低く、米などは

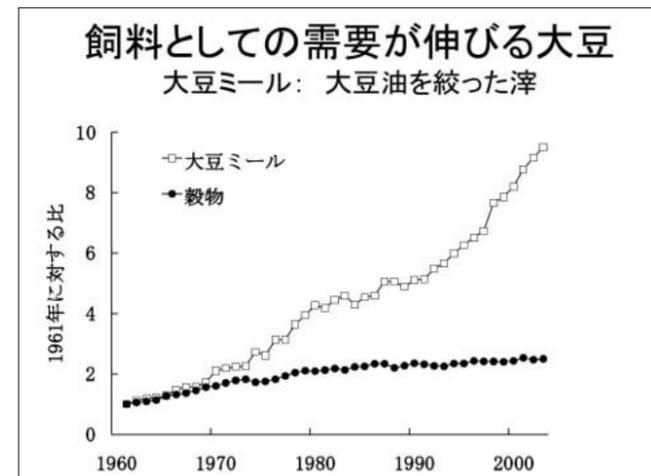
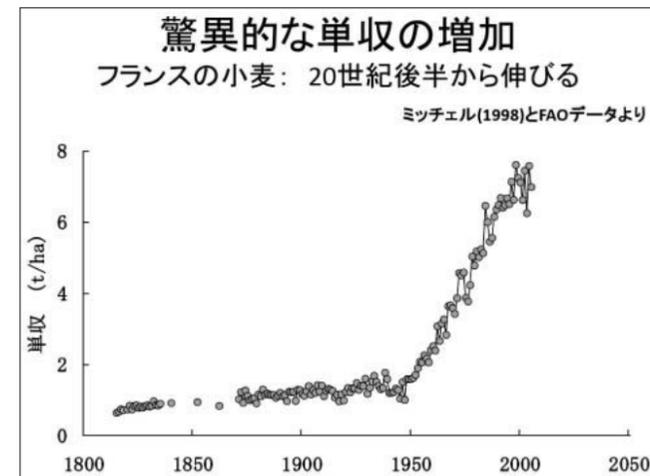
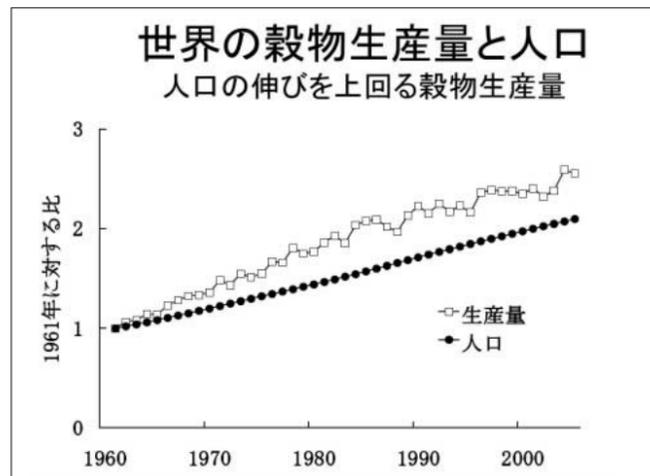
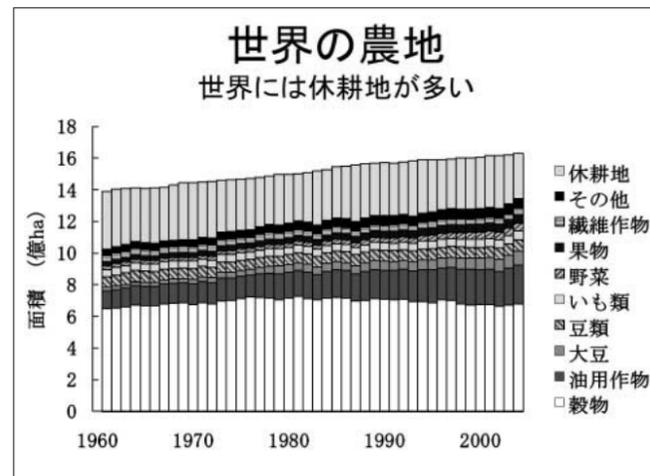
7～8%ですから、大豆ミールはその6倍程度のタンパク質を含んでいるという計算になります。

この大豆ミールが家畜飼料として伸びたため、穀物飼料の需要が減り、穀物の生産量が伸びなかったのです。

レスター・ブラウン氏の『誰が中国を養うのか?』という著書は日本でも有名ですが、その中で同氏は「1キログラムの牛肉を作るのに8キログラムの穀物、1キログラムの豚肉を作るのに4キログラムの穀物が必要であり、21世紀、中国だけでなく東南アジア、インド、アフリカなどで人口が増加し、発展途上国の経済が発展すれば、必ず肉を大量に食べるようになる。しかし肉を作るためには大量の穀物が飼料として必要になるので、食料危機が訪れる」と言っています。それに対し、日本は食料自給率が低いので、大変なことになるとというのが一般的に言われることです。しかし、それは真っ赤なウソです。次ページのグラフ「意外に増えない穀物飼料消費量」は穀物飼料の世界の消費量を示したものです。

世界では22億トンの穀物が作られていますが、家畜飼料となっているのは約7億トンで、その伸びは止まっています。また、飼料として多く使っているのは西洋で、欧州、米国、ギリシャ正教圏です。この人たちの食性は極めて似ています。

それに比べ、東洋も爆発的には伸びていません。西欧は人口が増加していないため、横ばいか減少傾向にあるのは当然のことですが、人口が増加している東洋でも伸びて



いないのです。理由の一つに、欧米では肉をよく食べているが、東洋は欧米ほど肉を食べないということや、そのほかさまざまな理由があります。穀物飼料というのは、実は肉のためだけに使われているわけではありません。西洋では半分くらいは乳を採るために使われているのです。保存食であるチーズを作るためです。昔からタンパク質の補給源として家畜の乳を使ってきたのです。

しかしながら、東洋では牛乳の消費量は増えていません。欧州平均の数分の1で、日本人1人当たりの牛乳の消費量は減少傾向にあります。これが穀物飼料の消費量が東洋で横ばいの要因の1つになっているのです。

次のグラフは20世紀後半から21世紀にかけての食肉生産量と人口増加量の1961年に対する比率の推移を表したものです。

食肉生産量は、畜産技術の改良により指数関数的に伸びており、衰えは見られません。一方、人口は今後横ばいになっていきますので、両者の差は大きくなるばかりです。人類にとって肉を食べる食事が豊かな食事だと考えれば、人類は1960年代に比べ、現在1人当たり約2倍の肉を食べている計算になります。特に我々日本人は現在、年間平均約40キログラム食べていますから、1961年に比べ約10倍の量の肉を食べるようになってきたということになります。現在、日本人のほとんどは飢餓よりもメタボリックシンドロームやコレステロール値を気にしているわけで、もう十分な食生活になっているということです。

しかし、ここで1つの疑問が湧きます。それは、食肉生産量が増えているにもかかわらず穀物飼料消費量が増えていないことです。そこには大きな秘密があります。先

ほど、牛肉1キログラムを作るには8キログラムの穀物、豚肉1キログラム作るには4キログラムの穀物が必要だと言いましたが、鶏肉1キログラムを作るには2キログラムの穀物で十分で、非常に効率が良いのです。そして今後、鶏肉の消費量が増えていくと考えられます。その理由は、宗教的忌避です。ヒンズー教の人たちは牛肉を食べません。イスラムの人たちは牛肉も豚肉も食べません。中国人は豚肉が好きですから消費量は増えますが、今後、人口が増えていくイスラム圏では、鶏肉の消費量は増えても牛肉や豚肉の消費量は増えません。それが穀物飼料の消費量が爆発的に増えない要因の1つになっているのです。

海洋よりの漁獲量については年間700万トンで横ばいです。養殖量も増加傾向にあり、特に中国の養殖量が非常に増えていきますから、21世紀は漁獲に関する心配はないでしょう。

採算が合うバイオエタノールはブラジルのサトウキビだけ

サトウキビの生産に対する余力はブラジルを中心にあると考えています。1950年代、日本では砂糖はご馳走でしたが、社会が豊かになり、世界的に見て砂糖の消費量は伸びていません。世界の砂糖作付面積の割合は非常に少ない状況です。ですから、サトウキビをバイオエタノールに転換して採算が合うのは、世界でもブラジルぐらいでしょう。

それに対しオイルパームによるバイオディーゼルは非現実的です。このグラフは

マレーシアとインドネシアのオイルパームの生産量です。急速に増加しています。

急増の理由は人口急増地帯である中近東から南アジアの諸国でオイルパームを使った揚げパンを好んで食べているからです。オイルパームについては熱帯雨林を壊すという議論もある中、食用としての需要を賄うだけで手一杯のマレーシアやインドネシアでパームオイルを使ってバイオディーゼルを作るというのは難しいと思います。

次のグラフは、窒素肥料を投入することで単収が増えることを示したものです。

穀物や食肉が簡単かつ大量に生産できるというのは人類にとって良いことです。しかし、2050年頃には、農業はアジア全域で深刻な事態に直面していると考えられます。日本では、昭和初期、農業は労働力を必要とし効率も悪かったため、非常に大変な職

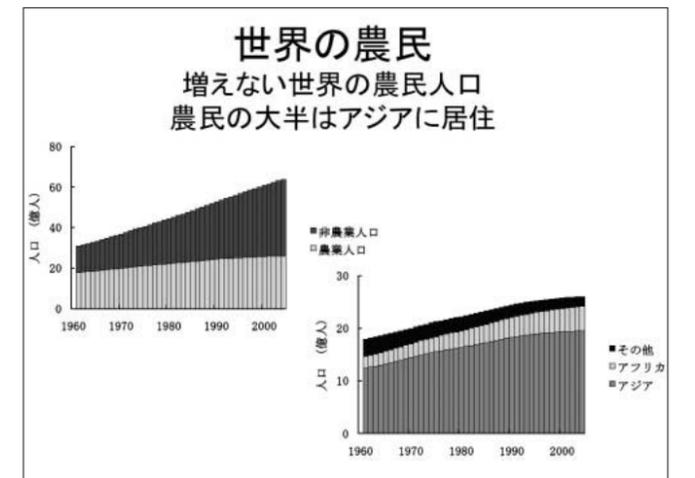
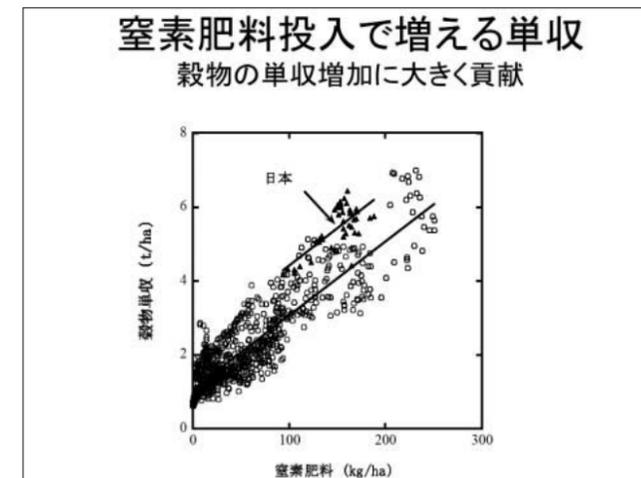
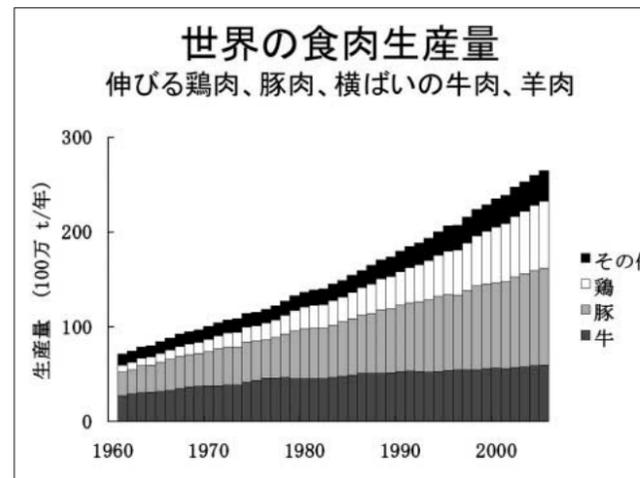
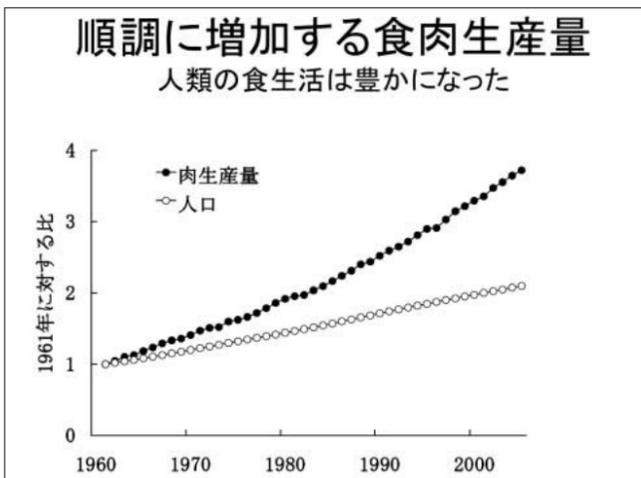
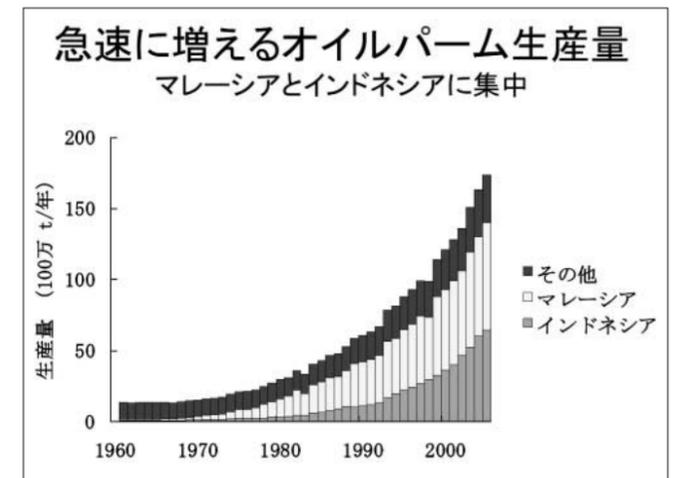
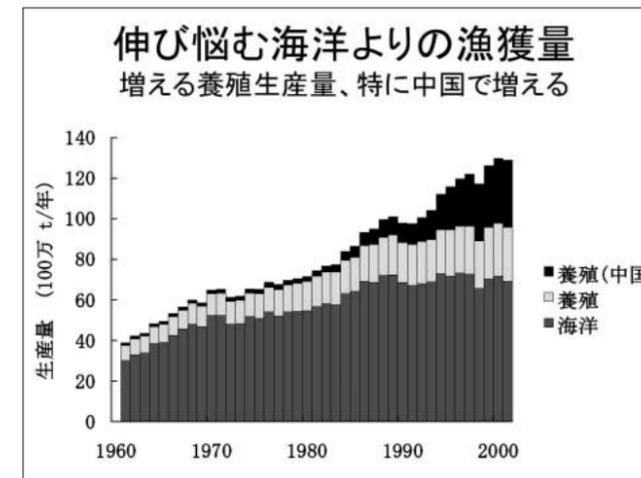
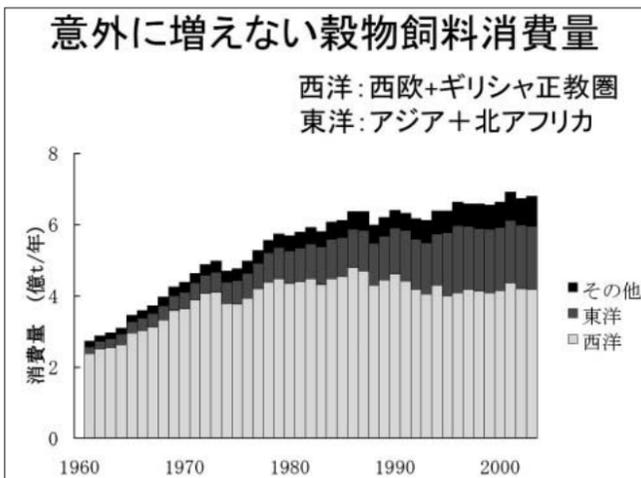
業であるとされていました。江戸時代、100人中80~85人が農民でした。昭和に入り100人中50人に減りました。さらに現在100人中3人にまで減少しています。このように、日本では農業人口の減少、地方の過疎化、農家の担い手不足といったことが言われていますが、これは世界的な傾向であって、日本だけの現象ではありません。

また、日本には国民全員が信じているウソがあります。それは「日本は第2次世界大戦後、農業を軽視し工業を重視することで国を復興させたが、長年にわたる農業軽視がたまって日本の農業は崩壊寸前にまで追い込まれ、地方では過疎化が進んでいる」というものです。しかしながらそれは、別に日本だけに起こった現象ではなく、先進国すべてで過去100年を駆け起っている現象です。実際、英国は100人に1人、米

国は100人に2人の割合で、農民の大半は中国やインドなどのアジアに居住しています。ですから、21世紀は長い目で見れば農業のデフレの時代だと思っています。

「衰退する農業」というグラフは、1人当たりのGDPと農業生産額割合の関係を示しています。

1人当たりのGDPが増えることで、農業生産額割合は右肩下がりで減っています。これは国家規模で見たエンゲル係数で、豊かな国になれば、農業生産額割合は0.01すなわち約1%程度です。「ドイツや英国では食料自給率が100%で、きちんと農政が行われている。日本ももっと見習うべきだ」といったことがよく言われますが、実はドイツや英国の農業生産額割合は日本よりも低いのです。日本がドイツや英国よりも高いのは、これらの国よりも数倍も高い食料を



食べさせられているからです。日本政府は高いものを食べさせることによって生産額を上げているのです。こういったこともきちんと知った上で、今後、日本の農政をどうするかについて考えてほしいと思います。すぐに「補助金を出す」といった議論に発展しがちですが、世界は決してそういう方向には動いていません。

次のグラフは穀物貿易と食肉貿易の推移を表したものです。

穀物貿易量は停滞傾向にあります。これは飼料を買うのではなく、直接食肉を買う時代になっていることを意味しています。よく「日本は将来、海外から飼料を輸入できなくなるのではないか」といった議論がされますが、現在は肉を食べたいのであれば、直接肉を運んでくるというように、世界のトレンドは大きく変わっています。

次は、世界の食肉生産量予測です。食料需要が増加傾向にあるのは確かですが、21世紀は食料需要爆発の時代ではありません。それには、「文明」というものが非常に効いていると思います。レスター・ブラウン氏は、自分が米国人なので、世界が豊かになればすべて自分と同じになると考えましたが、我々日本人の肉の消費量は米国の3分の1から2分の1、牛乳も数分の1です。我々が米国人並みに肉や牛乳を消費すれば、メタボリックシンドロームで大変なことになるでしょう。欧米のような食生活を好む人種の人口は10億人程度で、増え80億人になるということですから、6億トン程度で横ばいになると考えられます。現在、4億トンまで行っていますから、山に例えれば、6合目まで登ってしまったというイメージで、今後、危機的な状況にはならないと思われ

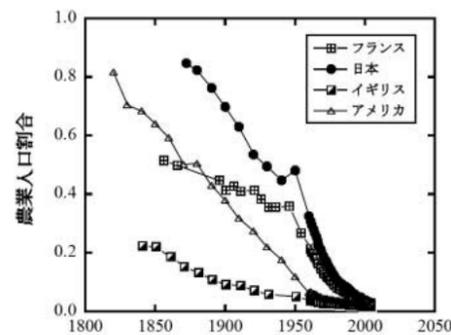
れます。

次のグラフは、バイオマスエネルギーとなる原料の価格です。

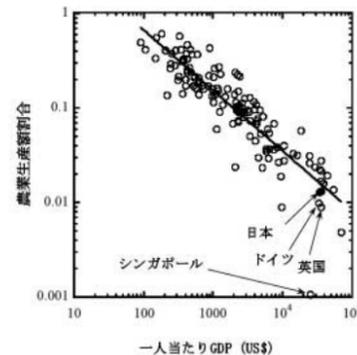
どれも非常に高く、商品として生産するのは難しいと思われ

ます。第1次石油ショックのときの原油1トン当たりの価格に相当するエネルギーを、バイオマスエネルギーで賄う場合の価格だと解釈して下さい。1トン当たりの石油価格が10ドルと非常に安かった時代、穀物の価格はエネルギーに換算すれば約200ドルでした。1973年の第1次石油ショックのときに穀物価格が高騰しました。

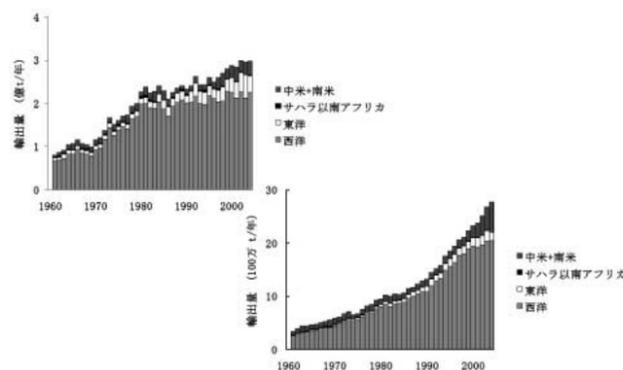
先進国で急減する農民人口 農村過疎化は日本だけではない



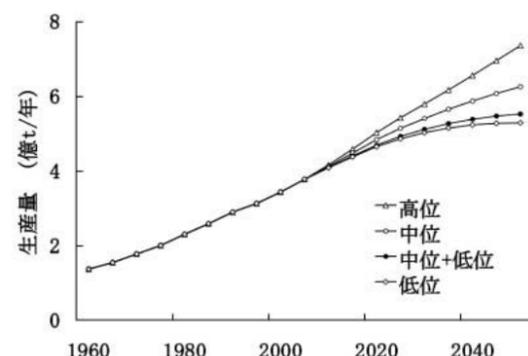
衰退する農業 農業の衰退は日本だけの現象ではない



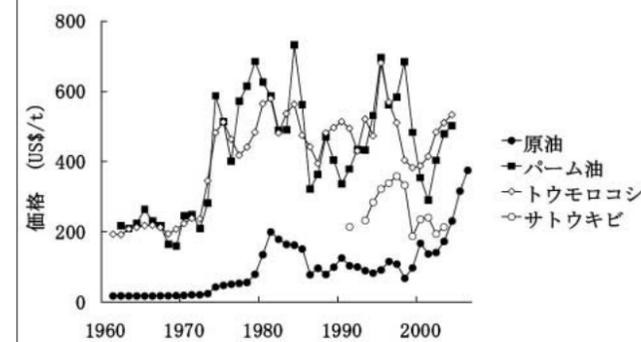
停滞する穀物貿易、増える食肉貿易 飼料を買う時代から食肉を買う時代へ



世界の食肉生産量予測 21世紀は食料需要爆発の時代ではない



バイオマスエネルギー：高い原料代 商品として生産することの難しさ



まざまな製品を生産しています。今回は当社のバイオ関係の事業について紹介します。

まずは技術的な解説をします。デュボンが現在、研究開発を手掛けているバイオテクノロジーは、主に3分野です。1つ目は農業の生産性向上や高付加価値の食物を作るための研究です。種子の事業から始まり農業、除草剤などの研究開発を行っています。2つ目は化石原料に頼らない、つまり非枯渇原料から作る繊維や樹脂の製品の研究開発です。そして3つ目は植物をベースとした燃料の研究開発です。

当社がこの分野の研究開発を始めたのは約20年前です。今のように、地球温暖化など環境破壊や食料問題などは話題に上っていませんでした。ではなぜ当社がこの分野の研究開発を始めたかという、農業資材や繊維も含めほとんどすべての化学製品が石油に依存しているという状況を、化学メーカーとして非常に危惧していたのです。やはりベースとなる原料は何種類か用意しておく必要があります。「石油の代替原料としてバイオマス」というのが当時の一番の問題意識だったのです。

植物原料はトウモロコシやサトウキビ、その副産物として得られるセルロース。これらの糖への変換を経て得られたものをベースに、バイオ燃料やバイオケミカルを作っていく考えです。バイオ燃料はバイオエタノール、バイオケミカル資材はプロパンジオールです。

バイオテクノロジーを使えば、上流側の農業関連の事業と下流側の化学工業関連の

事業がうまく連結していきます。再生可能資源であるバイオマスを原料とする新規産業技術「バイオリファイナリー」のアイデアに結びついていくというわけです。

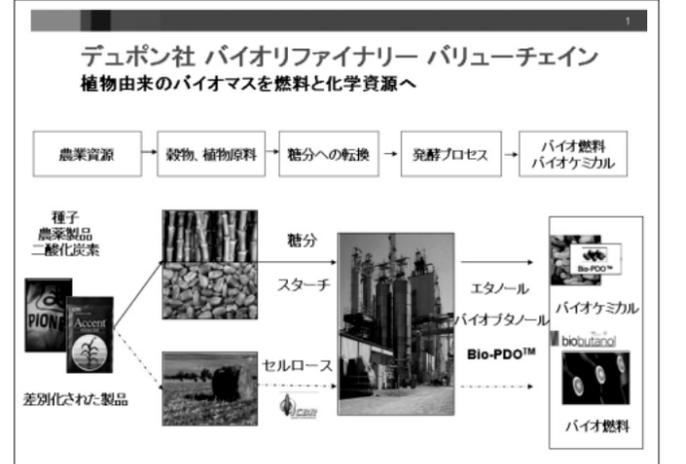
以下は大腸菌のゲノムです。どの部分がバイオテクノロジーかと言えば、プロパンジオールを作るために100カ所程度、遺伝子操作で改質しているところ

です。大腸菌というバクテリアを使うと、プロパンジオールを非常に高純度で経済的に作ることができるようになります。先ほど川島先生が講演の中で「品種改良は植物を非常にアンバランスにするものだ」との説明がありました。先生の説明とまったく同じことが、この開発工程で見受けられます。

現在、稼働している工場は米国のテネシー州ラウドンというところにあります。隣にはコーンスターチを大量に作っている米国有数の企業ティト・アンド・ライル社の工場があり、そことパイプラインでつなぎ、コーンスターチからプロパンジオールを製造しています。プロパンジオールに転換する際にバクテリアを使っているのです。

2006年に稼働し、現在、生産能力は4万5000トンです。稼働率は100%には至っていませんが、石油ベースでプロパンジオールを作るよりも約40%のエネルギーの節約ができています。二酸化炭素排出量も石油よりも有利ですから、商業化の可能性としては今、非常にうまくいっている領域です。

プロパンジオールはテレフタル酸と合わせるとポリエステルになります。ソロナと



いうポリマーです。一旦ポリマーができれば繊維ができます。繊維ができればアパレル用繊維、カーペット用繊維、プラスチックフィルム、樹脂などができます。樹脂に

なれば、身の回りのさまざまな成形品ができるようになります。

また、プロパンジオールそのものは化粧品や不凍液に使えます。現在、不凍液とい

うと多少毒性のあるエチレングリコールが使われていますが、プロパンジオールの場合、毒性がなく自然の中で分解されます。そのため、例えば、現在、冬に空港で融雪剤として大量に使われているエチレングリコールをプロパンジオールに換えることで、環境負荷が軽減されます。2008年冬から実用化される予定です。さらに、ジオールを適当に重合すれば、エラストマーの原料やコーティング剤、弾性繊維、ポリウレタンの原料になります。要するに上流側が一旦バイオになってしまえば、バイオ関連の製品が多岐にわたってできるようになるとい

うわけです。燃料に関しては、バイオからリファイナリーを通り、既存の石油系の設備を通して、一般のガソリンスタンドに販売されることになりま

す。例えば、トウモロコシからバイオ燃料を作る場合、将来的に2通りの可能性が出てくると考えています。トウモロコシの一部をエタノールにするわけですが、当然トウ

モロコシの果皮や胚乳の部分からでもできますし、セルロースからもできます。全部セルロースを使ってしまうと土が駄目になると考えています。だいたい半分を使い、半分は土に返すという方法を想定し、経済的な試算を行っています。

これはいろいろと議論の起こるところですが、日本をベースにした場合と米国をベースにした場合では議論の内容がかなり異なります。米国の論理をそのまま日本に持ってくるとうまくいかないということです。米国ではトウモロコシをベースにしたバイオ燃料に対し補助金が出されていますが、事業として軌道に乗るか否かは、いかに安く生産できるかによります。ブラジルはすでに実現しています。

モロコシの果皮や胚乳の部分からでもできますし、セルロースからもできます。全部セルロースを使ってしまうと土が駄目になると考えています。だいたい半分を使い、半分は土に返すという方法を想定し、経済的な試算を行っています。

ステップごとにこのような構成をとっていきます。

セルロースの場合、前処理の部分がノウハウとして重要な部分になります。ここさえうまくできれば、ここから後の糖化発酵が非常にスムーズです。

当社では、エタノールの部分に関しては非常に特殊な酵素を開発しそれを使って発酵しています。副生成物が時間と共に減ってくる過程でエタノールに転換されるという酵素です。

エタノール以外にブタノールも使ってい

ます。それは、石油関係のプラントやガソリンスタンドを使う場合、ブタノールによるものの方がガソリンとうまく混ざるからです。エタノールの場合、分離しやすく水を取り込むためエンジンの腐食という問題が発生します。しかしブタノールではそういった問題は起きません。今後は経済性を見定めながら取り組んでいく計画です。

穀物関連に関しては、川島先生が指摘したように、食料危機という状況にはないと考えています。しかし、需要が増加傾向にあるのは確かですから、企業として、どれだけ経済的にうまく増加させていくかということに注力しています。穀物の作付面積は4%しか増えていませんので、効率性をいかに高め、増加傾向にある需要を賄うかが企業としての技術的なチャレンジになります。

より良いバイオプロセスの開発

可能化技術-細胞情報 "Software" の解明と応用

Metabolic Engineering
(生物代謝経路のエンジニアリング技術)

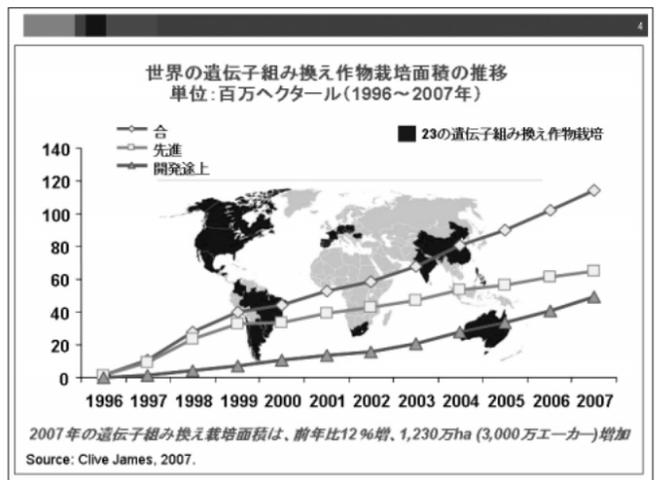
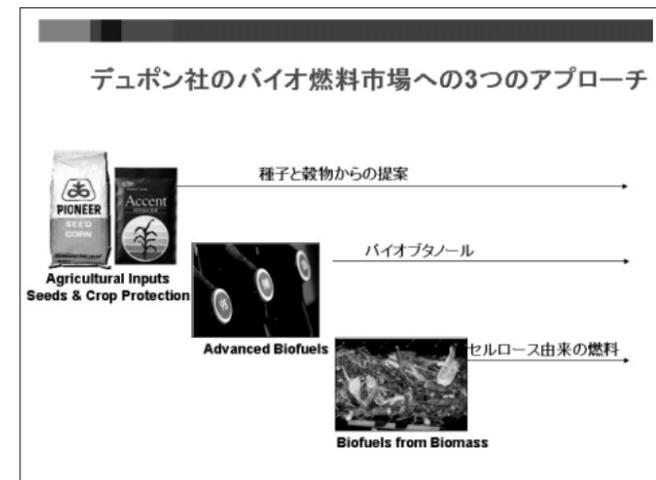
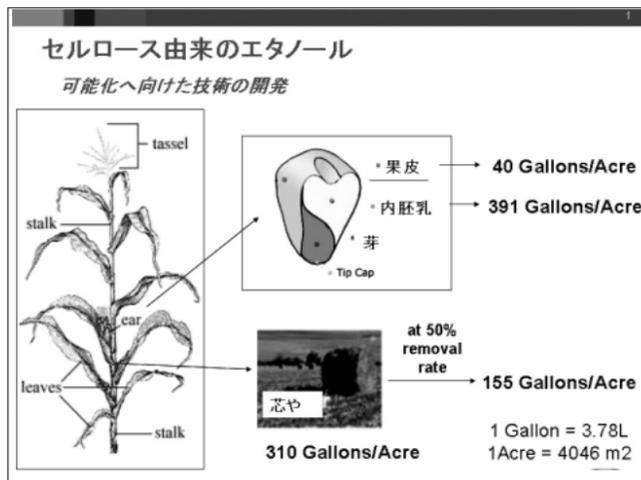
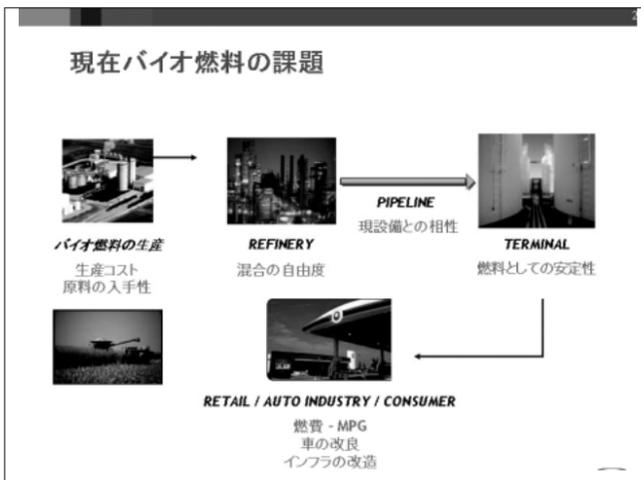
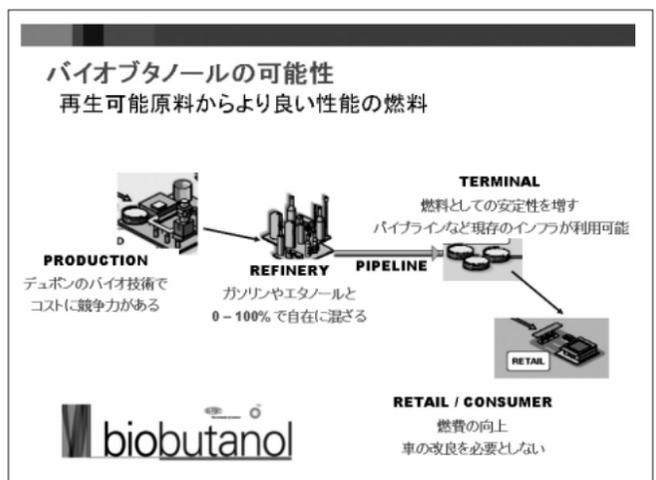
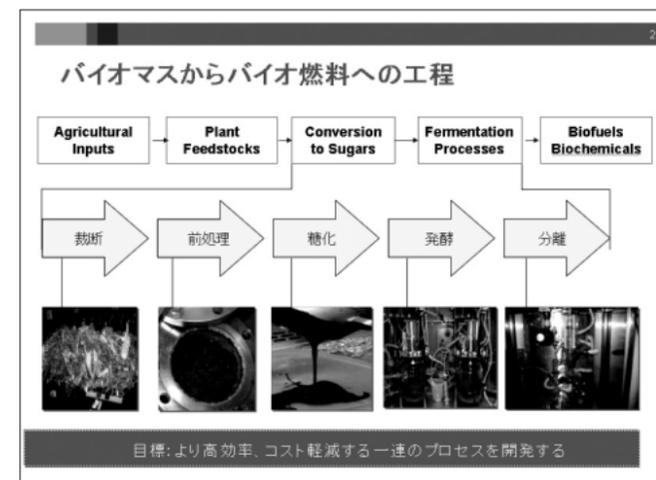
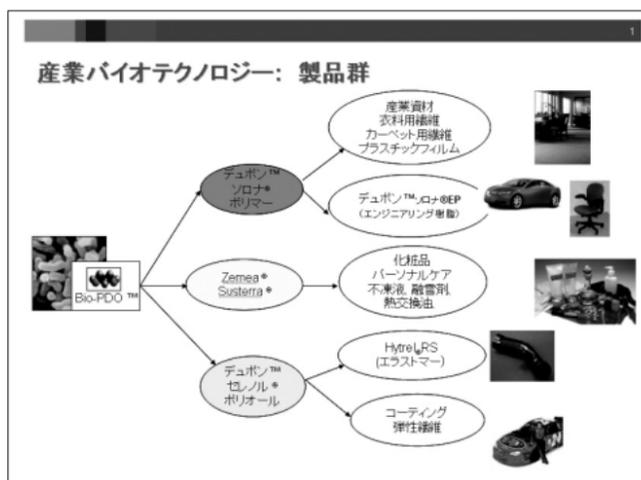
- デュボンの技術が世界をリード
- Bio-PDO™ の成功と基礎
- 目標とする化合物を経済的な方法で変換する細胞エンジニアリングする技術を所有

DuPont and Tate & Lyle Bio-Products 合併会社

新会社は 石油の代わりに再生可能な資源を利用

DuPont社とTate & Lyle PLC社は、とうもろこしを原料として1,3PDOを生産し、その誘導体を含めて繊維、エンジニアリングプラスチック、フィルム、パーソナルケア等の幅広い分野に使用が期待されています。

- 年間生産能力: 45,000 トン Bio-PDO™
- 40% 消費エネルギーの低減 (年間37,500,000 リットルのガソリンに相当)
- 商業生産開始 2006年11月

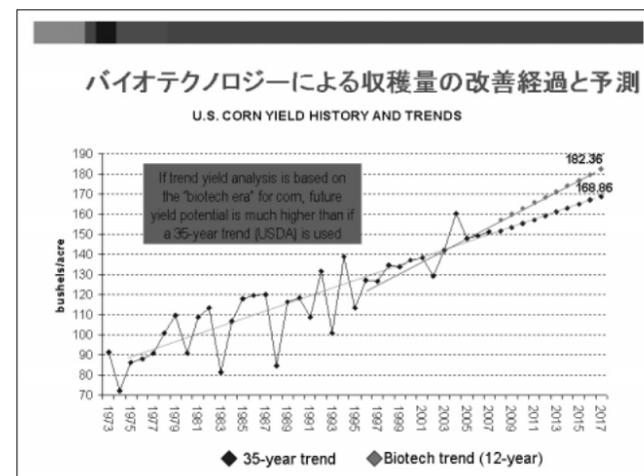
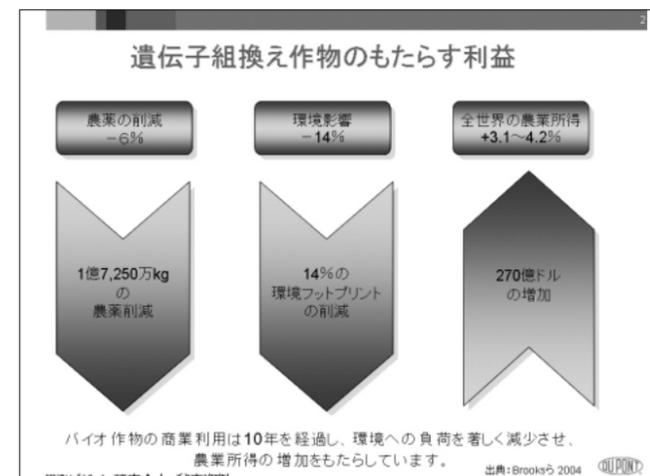


これまで遺伝子組み換え作物がどのように浸透してきたかを紹介します。これは開発と努力の浸透率、先進国の浸透率のトータルです。

色が変わっているのは、遺伝子組み換えの作物を作っている国々で、かなり多くの国が認めつつあります。除草剤や農薬の影響を受けにくい作物です。害虫抵抗性の強い作物を作るということであって、決して遺伝子操作によってトウモロコシを巨大化しているわけではありません。結果的に農薬の量が減り、環境負荷が軽減され、農民の所得が増えることにつながります。

次は肥料の効率化と品種改良によって遺伝子組み換え作物が10年間でもたらしてきた成果です。まさにグリーン革命です。

次は「バイオテクノロジーによる収穫量の改善経過と予測」です。遺伝子操作によって勾配の傾きが多少きつくなる、つまり効率性が多少高まりますが劇的に増えるわけではありません。ただし、この効率化こそが耕地面積をあまり増やさず、環境負荷を増やさず、いかに世界中の人たちの需要を満たすかということにつながるわけです。



A氏：このようなデータを使ったお話は初めてで、非常に説得力があり驚きました。日本の食料自給率は30～40%と言われているようですが、この数値を上げる必要があるという発想を捨てさえすれば、世界規模で見た食料の行く末はそれほど悲観する必要がないということなのでしょう。しかしながら、政治的な要因から欲しいものを適正な値段で輸入できるかどうかは分からないと思います。先生はどのようにお考えですか。

川島：よく質問されることですが、自給率についてどのような判断を下すかは政治、国民だと思います。私は一介の研究者、学者であり、現在、世界がどのような状態にあるかを正しく伝えることが私の仕事だと思っています。これまでは「世界に食料危機が訪れるので、日本は食料自給率を高めおいた方が良い」という議論だったと思います。しかしこれは間違った考え方だということです。これからも食費の所得に占める割合は減っていくと予想されます。

また、他国から意地悪をされて食料が輸入できなくなるという事態は起こらないと思います。そのためには、しっかりと外貨を稼いでおく必要があるでしょう。北朝鮮が食料を売ってもらえないのは他国が意地悪をしているからではなく、北朝鮮がお金を持っていないからです。

第2次大戦後、意地悪で食料を売らないという政策が採られたことは一度しかありません。1976年12月に米国のジミー・カーター元大統領が、旧ソ連軍がアフガニスタンに侵攻した際に採った穀物戦略です。しかし見事に失敗しました。当時、旧ソ連に輸出していた約4000万トンの穀物をストップすると発表したのですが、たちまち米国内で供給過多となり、穀物の価格が暴落してしまっただけです。そこで、米国国内の農民がデモ行進を行い、カーター大統領は翌年3月に撤回しました。ですから、普通に付き合っている限り米国が日本への食料の輸入を禁止することはないでしょう。

A氏：では、今後、日本の農業はどうするべきでしょう。日本の人口は減少していくわけですし、作付面積を増やすこともなさそうです。そうなる日本は農業には頑張らずに、工業で頑張るという割り切りが必要でしょうか。

川島：それも国民が判断することだと思います。これまで採ってきた政策は「輸入するよりも数倍高くても自給する」というものでした。私は、今後、食料価格は世界的に低迷すると思っています。そのとき、日本は世界に比べて10倍も高くても、国産品を愛用するか否かを判断することになるでしょう。

日本は高付加価値の食料を作り、中国などの富裕層に販売するという考え方もあると思います。高付加価値のものを作るときにバイオテクノロジーを適切に使用すると、いうのも企業にとってビジネスチャンスが膨らむ話ではないでしょうか。日本の農業の再生のポイントはそこにあると思っています。要するに、牛や豚の飼料になるものは人件費の安いところに任せて、日本はブランド米やブランド牛など世界の富裕層相手に日本の安心・安全で美味しいものを売っていくことが賢明なのではないかということです。

B氏：グリーン革命によって窒素肥料を導入したことで単収が増えたという説明がありました。例えばトラクターなど機械化によっても、様相はかなり変わってきたのではないかと思います。今後、発展途上国などで機械化が進まなければ、将来的な作物の推計は変わってくると思われますが、いかがでしょう。

川島：窒素肥料は単位面積当たりの収穫量を上げるのに貢献しました。一方、機械化は省力化につながりました。機械を使うことで、人手が非常に少なくて済むようになりました。言い換えれば、農民が兼業しやすくなりました。ですから、今後、農民人口が激減しても、食料の生産量は下がらないと思います。また、農業機械はハイテク機器に比べ仕組みがやさしく、比較的どこでも作れますから、農業機械に関するビジネスチャンスはあまり期待できないと思います。

B氏：農業機械に関する技術開発に注力するよりは、政策的に機械が使いやすいように農地を整備する方が大きいということですね。

川島：そう思います。アジアの農民は稲作中心でしたが、今後、アジアの農民が簡単に土地を手放すとは思えません。これまで農民は1000年以上にわたり、貧しく虐げら

れながら土地にしがみついて生きてきたわけです。その記憶が遺伝子の中に脈々と受け継がれてきていると思います。ですから、余程の好条件を提示しない限り、農民が土地を手放すということはなく、農地を集約し整備するのは難しいでしょう。しかし、農業機械の発達により兼業農家が増えると思います。関東周辺の稲作農家の1年間の実質労働時間は1カ月もなく、残りの11カ月は出稼ぎに行けばよいわけですから。

B氏：気候変動という要因によって穀物にどのような影響があるのでしょうか。また、水田が地球環境に与える影響についてお聞かせ下さい。

川島：気候変動が農業に与える影響については1990年代からかなりの研究がされています。これまでの研究結果によれば、プラスとマイナスの両面があるということです。例えば、地球温暖化によりフィンランドやノルウェーでもワインが出来るようになると言われていています。現にフランスの北部のボルドー地方などはワインの生産性がかなり高まっているようです。

日本については、九州から四国にかけてはマイナス要因が出てくると思います。しかし、古くから冷害に見舞われていた北海道や東北地方、特に現在、日本最大の食料生産量を上げている北海道では、非常に有利に働くと思います。北海道でコシヒカリが出来るようになるというシミュレーション結果も出ています。日本にとって地球温暖化はマイナスが3割、プラスが7割といったイメージです。

水田が環境に与える影響についても、プラスとマイナスの両面があると思います。プラス面は水田の持つ溜池機能だと思います。

C氏：農業人口の割合がどんどん減っていくことですが、これは確かペティ・クラークの法則ではないでしょうか。

川島：その通りです。ペティ・クラークの法則というのが大きな題目で、農業経済学の教科書にはよく書いてあることです。これは、国家の中で農業人口の割合が減っていくことをマクロ的に示した法則です。要するに、農業の機械化が進むので、農業人口が減っても生産量に影響はありません。農業はかなり単純な作業なため、産業用ロボットなどと違って機械化が極めて容易な

のです。

また、GDP(国内総生産)に対する農業生産額の割合が減少していったのは1960年代です。農業生産物というのは基本的には品質はほとんど変わっていません。一方で、1960年代は、一般的だったラジオは真空管式ですし、真空管の白黒テレビが出始めた頃です。それが今や液晶カラーテレビが主流ですし、パソコンや携帯電話も広く普及して、情報技術の分野というのは目まぐるしく変わっています。その利便さを1カ月くらいという形で手に入れているわけです。それに対して食料は品質も食べる量もほとんど変わっていません。つまり、生活が豊かになることによって食費以外の欲望におカネを使うようになることを、国レベルで表すとペティ・クラークの法則そのものになり、例外は1つもないということです。

C氏：農業生産割合は減少しているけれども、生産量は伸びているので、労働力も制約にならないということでしょうか。

川島：そうです。

C氏：では、もう1つの制約として、農業生産のため、あるいは農業機械を動かすために大量の石油が必要になります。このエネルギーに対する生産性について危惧しています。先生のお考えを聞かせて下さい。

川島：大変もったもなご指摘で、極めて心配です。エネルギーがなくなれば、日本では何も生産することができなくなります。北朝鮮は我々にとって極めて重要な食料安全保障の教科書です。北朝鮮の1人当たりの所有面積は日本の5倍です。ですから、日本で食料の安全保障を保つために、休耕地を農地として復活させたところで、北朝鮮の半分にも及びません。日本の生産量がかろうじて安定している理由は、化学肥料を大量に投入しているからです。北朝鮮は1990年まで旧ソ連からエネルギーをほとんど無料で供給されていましたが、ソ連が崩壊したことでエネルギーの供給が途絶えてしまったのです。

このようなときどうすればよいでしょう。現在の日本であれば、おカネを出して化学肥料を買ってあげればよいわけです。昔、三菱化成(現・三菱化学)や三井東圧化学(現・三井化学)は化学肥料を作る会社だったのですが、今、日本で化学肥料を作って

いるところはほとんどありません。簡単にできてしまうので、中国から安価で購入しているのです。

北朝鮮に外貨があれば化学肥料を買ってくれば良かったわけですが、北朝鮮が食料危機に陥った最大の原因は、農業を大切にできなかったからではなく、おカネがなくエネルギーを買うことができなかったからです。

もし世界的に見て、石油も石炭も原子力も枯渇して次世代エネルギーもうまくいかないとしたら、世界はパニックに陥るでしょう。要するに、食料を守る、備蓄するといってもエネルギーが止められてしまえば、日本の食料生産は全く止まってしまうということです。

A氏：先生の講演の中で、最後のグラフ「バイオマスエネルギー：高い原料代 商品として生産することの難しさ」を見ると石油の価格がどんどん上がっていますよね。バイオマスエネルギーの価格はどのように見ればよろしいのでしょうか。

川島：これは原油1トン当たりの値段ですが、2004年頃までのデータで、最近の高騰は入っていません。また、バイオマスエネルギーの値段は、石油1トンと同じだけのエネルギーを持ったバイオエタノールを作ろうとした時にかかる金額です。ですから、サトウキビの場合、2004年頃の段階では原油よりも下がっているのです。ブラジルは作れば儲かるというわけです。

A氏：一方でエネルギーが一番大事だとすると、化学肥料もさることながら、日本はバイオマスエネルギーをもっと大々的に普及させていくというか、日本のエネルギー自給率に影響が出るほどにバイオマスエネルギーを作ることが必要かと思いますが、果たしてできるでしょうか。

川島：サトウキビの場合、デュボンハイテクを入れたことによって、米国ではうまくいけば1ヘクタール当たり3トン程度のバイオエタノールができそうな状況です。例えば、日本には休耕地だけで約100万ヘクタールありますから、ここで穀物を作りバイオエタノールに変えれば、1ヘクタール当たり3～4トンは可能だと思います。100万ヘクタールということは300万～400万トンということになります。日本では、石油だけで1億トンというオーダーでエネル

ギーを使っていますから、全体の3～4%にしかありません。ですから、バイオエネルギーで現在の生活を維持するのは難しいと思います。

A氏：陸上は不可能だとしても、海洋はどうでしょう。

川島：可能性はほとんどないと思います。要するに藻類を生やしてしまうと、それをろ過するのが大変なのです。そこで大量のエネルギーを消費することになりますので、実用化の可能性は極めて低いでしょう。

米国ではいろいろな戦略が考えられています。実は、有機肥料が農地の持続可能性に有効だと米国では予測しています。米国は農業大国で農業残渣もたくさん出ますから、有機肥料をたくさん作れます。

また、サトウキビは糖をエタノールに変えており、トウモロコシはデンプンを糖化しエタノールに換えているわけです。セルロースの場合、セルロースを糖化する際にかなりのエネルギーが要するため、効率が悪いのです。ですから、糖化する必要のないサトウキビが一番、楽なのです。

D氏：川島先生の著書に書かれた日本経済新聞の書評を読みました。ミクロ的には飢餓の恐れもあるし、森林伐採のリスクもあると指摘されています。マクロ的にはあまり悲観することはないということ、今後の大きな課題は、食料分配システムをいかに適切にドライブするかだと指摘されています。その点について、先生のお考えをお聞かせ下さい。

川島：著書では「マクロ的に見れば大丈夫だ」ということを強調していると同時に、「食料不足が食料問題を起こしているのではなく、社会システムがうまくいっていないことが食料問題を起こしている」と言っているわけです。

例えば、昨今よく耳にするジンバブエの話は、システムが整っていないから起こっている問題です。私は、サハラ砂漠以南のアフリカの問題などはきちんとした経済、政治のシステムを確立すれば、食料の安定供給が可能になると思っています。

また、日本はほぼ単一の民族構成なので国内では社会システムが整っていると思います。一方、世界の多くの国、特にサハラ以南の国は多民族なので、民族問題が非常に深刻です。そういった中、アフリカで典

型的に起こっていることは、強い民族が平地の一番良いところを取り、負けた民族が端に追いやられるということです。そのため、彼らは不法に伐採をしたり、焼き畑農業をしたりします。多くの発展途上国では山林は国家管理になっている場合が多いので、不法伐採と呼ばれます。食料の問題と森林伐採の問題は極めて強くリンクしています。

今、スーダンのダルフルでは飢餓の問題が極めて深刻で、欧州では「スーダンで100万人が餓死した」と報道しています。それを農業の問題として捉えるのは違うということです。書評を書かれた慶應義塾大学の細田衛士教授は環境経済学がご専門なので、著書を超えた課題として、環境経済学の観点からどのようにシステムをビルトしていけば良いかを考えたいと言われたのだと私は理解しています。

E氏：マクロ的な視点から見れば、バイオテクノロジーで改変した食料や製品があります。しかし、国ごとで改変した生産物に対する受け入れ方に差があります。欧州の国々でも違いますし、特に日本では違いますよね。将来、このあたりはどのように変わっていくのでしょうか。

川島：バイオテクノロジーで改変した食料とは遺伝子組換のことだと思います。例えば、我々はハワイや北米旅行に行きます。現地では、遺伝子組換トウモロコシで育った牛のステーキなどを喜んで食べています。でも、日本に戻ってくるとBSE(牛海綿状脳症)問題も含め米国産の牛肉に異常なほど神経質です。

私自身は、米国は遺伝子組み換えに関して非常に研究を重ねていますから有害であるとは考えていません。しかし、遺伝子組み換え食物は今後20～30年の間は食べられないのではないかと考えています。最大の原因は日本人の所得の高さにあります。1人当たりのGDPは3万ドルで、それに対する食料の値段は安いですから、食費で苦勞している日本人などほとんどいません。ですから、遺伝子組換食物に対する拒絶反応は日本人のわがままではないかと思っています。

E氏：農地としての拡張可能面積は11億ヘクタールで、その場合の地球の最大扶養人口は360億人ということですが、休耕地が3

億ヘクタールもあるのには何か意味があるのですか。

川島：まず、11億ヘクタールは私が出した数字ではなく、FAO(国際連合食糧農業機関)とIIASA(イアサ)という国際的な研究所が出した数字です。IIASAはウィーンの少し上のラクセンバークというところにあります。FAOでは30～40年間にわたり農地の研究をしています。最近は人工衛星がすごく発達しかなりデータの精度を上げることができるようになりました。そこで、IIASAと組んで調査したところ、最近は、20億ヘクタール近くまで拡張可能だという報告もされています。

また、ブラジルのルラ大統領が洞爺湖サミットに来て強く発言したことに「我々はアマゾンを壊してない。これまでトウモロコシや大豆を作るべき場所でサトウキビを作っているわけだから、アマゾン壊しているように言われるのは心外だ」というものがありました。ルラ大統領の主張は真実です。要するに、熱帯雨林とは全く関係ない場所に、今まで使っていなかった莫大な耕地があり、そこでサトウキビを作っているわけです。

休耕地がある最大の理由は小麦の輪作です。水田は極めてサステナビリティが高く、連作できるのですが、これまで小麦は連作障害を起こしていたため、欧州では三圃式農業と言って、3年ごとの輪作を行ってきたのです。その伝統がずっと残ってきたのです。しかしながら、1950年頃から急速に窒素肥料が発達し、輪作しなくてよくなりました。そのため、農地はこれまでの3分の1の面積で済むようになってしまったというのが主な理由です。

寛：東京大学産学連携本部の寛です。日本では既に人口の7割が第3次産業に就業をしているわけですが、世界規模で見ると、50年、100年のオーダーで今後世界の60億人だか100億人だかの人たちが徐々にこのような方向に向かっていった場合、日本は外貨収入を稼げるだけの力を付けておく必要があるというか、危機感を持っておいた方が良いということでしょうか。

川島：その通りです。資源のない日本で我々が豊かに生きてこられたのは、やはりよく働き外貨を稼いだからです。食料問題も要するにシステムの問題です。現在の穀

物生産量である22億トンがどのように配分されているかと言えば、カネを持っているところに一番行っているわけです。金持ちは貧乏人のことなんて考えていません。アフリカの飢餓も休耕地を使って生産すれば、たちどころに解決されてしまうはずですが、しかしながら、現在7000万～8000万トンのトウモロコシを売っている米国などは決してそういったことはしません。アフリカはおカネを持っていないので売るということも決してしません。寄付してもせいぜい100万トンです。

寛：エネルギーがボトルネックになるという点で、農業においてはエネルギーに対する労働生産性が大切だと思いました。

川島：その通りです。化学肥料を1トン作るのに石油が1トン必要だと言われてます。肥料がなければ農業生産はできませんから、石油がなければおしまいです。要するにエネルギーがないところに、現代の農業は成り立たないのです。本日はどうもありがとうございました。