

これからの食糧確保

新名 悅彦

目前に迫った世界人口90億人

20世紀の世界人口は増加という表現ではなく爆発と言われる。1900年の16億人が1950年に25億人、2000年に61億人、そして2012年には70億人になった。2050年には93億人に達し、以後斬滅するというのが一般的な推計である¹⁾。これまでの人口爆発は食糧増産にささえられていた。たとえば1970年（世界人口37億人）の世界の穀物（米、とうもろこし、小麦、大麦など）の生産量は11億トンであったが、2012年には22.5億トンと2倍になった。

穀物増産に大きく寄与したのは「緑の革命」といわれる農業技術である。特に背丈が低く高収量のメキシコ矮性小麦と稲のIR8は単位面積当たりの収量をそれぞれ2.5倍～4倍（メキシコ、インド、パキスタンなど）、4～6倍（インドネシア、フィリピン）に押し上げた。これには化学肥料の多投入、農薬の使用、灌漑設備も含まれているので、増収の幅は国により異なっている²⁾。しかし、2008年から2012年の5年間を見ると、世界の穀物生産量は2008年：22.4億トン、2009年：22.4億トン、2010年：22億トン（最低）、2011年：23.2億トン（最大）、2012年：22.5億トンと微増減を繰り返しており着実には伸びていない。2000年には30%あった期末在庫率が2012年には19%に落ち込んでいる³⁾。

20世紀の人口爆発を支えたのは品種改良のみならず、石油資源の大量利用が大きく貢献している。窒素肥料の生産は窒素ガスを水素で還元するエネルギー消費型の反応であり、年間石油消費量の2%がこれに回っている。アメリカ大陸やオーストラリアの大規模農業には石油を消費する大型機械が動いているし、飛行機からの農薬散布も行われている。

単純計算では2050年の93億人を支えるには30億トンの穀類が必要（22.5億トン×93億人/70億人）であるが、果たしてさらなる増産が可能であろうか。化学肥料と農薬の多用は農地の荒廃を招き、灌漑用水も各地で限界にきている。地球温暖化が顕在化してきたが、温暖化は地球全体で均一ではなく、世界各地で異常気象を起こしている。日本列島上空のCO₂濃度は400 ppmに達した。地球大気中のCO₂濃度分布は均一ではない。中国

沿岸部が414 ppmともっとも高く、米国東部、ヨーロッパ東部、ロシアでは400 ppmを越えているのに対し、南半球は390 ppmである（2011年12月時点）⁴⁾。

これが世界各地に天候不順、干ばつなどを引き起こしているのだろう。今年の日本の夏は異常な猛暑であった。7月から高温が続き、各地で最高気温40°Cが観測され、局所的豪雨も頻発している。米国では大規模な竜巻が発生するが、起伏に富んだ日本列島でも最近は竜巻が起こる。このように激しい雨と風は表土を流失させ農地は疲弊する。

生物工学者は誰でも知っている。微生物の回分培養での増殖は制限基質の枯渇により停止する。制限基質のグルコースが枯渇して増殖が停止する場合、それを補っても他の基質（たとえば窒素源）が枯渇すれば、その時点で増殖は停止する。また、各種基質が十分あっても乳酸や酢酸の蓄積や培地のpH変化で増殖が止まることもよくある。つまり閉鎖系の地球は微生物の回分培養と同じで、人口の増加にはバランスの取れたさまざまな資源が必要であり、環境も整っていなければならない。

限りある地球の資源は、石油だけではない。鉱物、水資源が逼迫している。金・銀・鉛の可採年数は20年、銅が30年、リン鉱石が50年である。水資源はさらに深刻である。もっとも使いやすい河川水は年間7兆トンあるが、2000年にはすでに6兆トンを使っている。人口が2倍になると水の消費量（農業、工業、生活用水）は6倍になるという経験則がある。したがって2050年の水需要量は28兆トンと河川水の供給量をはるかに超える⁵⁾。

人類活動の量的拡大により、さまざまな要素が限界に達してきた。ただ言えることは、鉱物資源は使うと地球上に拡散し、しばしば環境汚染をもたらすが、少ないエネルギー消費で回収できれば資源に戻すことができる。水資源も浄化すれば再び使えるし、海水の淡水化技術も進んでいる。これらは生物工学が活躍する場面であり、いかにエネルギー消費を抑えて資源のリサイクルを図るかがポイントである。40億年以上やってくる太陽エネルギーを直接・間接的に使うことが基本であろう。

食糧増産の戦略

2050年に向けて食糧、特に穀物生産量を現在の年間

表1. 2050年の世界の人口¹⁾

	人口（億人）	年平均 増加率（%）	15歳未満 人口（%）
世界	93.0	0.5	20.5
先進国	13.1	0.0	16.6
開発途上国	79.9	0.6	21.1
日本	1.0	-1.0	9.7
中国	13.0	-0.5	13.5
インド	16.9	0.4	19.0
エジプト	1.2	0.6	19.7
スーダン	0.9	1.4	27.6
エチオピア	1.5	0.8	22.1
ナイジェリア	3.9	2.0	34.5
ウガンダ	0.9	2.1	35.6
ケニア	1.0	1.8	32.3
コンゴ	1.5	1.5	30.9
タンザニア	1.4	2.5	38.0

24億トンから30億トンに増やすことが最低限必要である。最低限と言う意味は、飽食を謳歌している先進国に対し、現在でも途上国では飢えに苦しんでいる人々が約9億人、途上国人口の15%を占めているのである⁶⁾。2050年の世界人口93億人の推定値には食糧増産の裏づけはされていない。おそらく、各国の人口と出生率の変遷からの推計である。したがって93億人になっても乳幼児が健康で成長していく保証はない。

表1に2050年の世界の各地域・国の推定人口、年平均増加率、15歳未満人口比率の推計値¹⁾を示す。先進国では15歳未満人口が16.6%（日本は9.7%）であるのに対し、開発途上国では21.1%である。一人っ子政策を取っている中国（最近、夫婦のどちらかが一人っ子の場合は、子供は二人まで、に修正された）では、この値は13.5%であるが、人口増加が大きいと予測されているインドでは19.0%である。問題は年平均増加率が高いアフリカ中南部の諸国である。現在でも多産多死のアフリカ諸国では、この問題は続くのだろう。乳幼児の食糧と安全な水の確保、医療の支援が求められる。

食糧増産の戦略は単純に、1) 耕地面積の拡大、2) 面積当たりの収量増大、3) 作物の育種であろう。

1) 耕地面積の拡大 地球上の全陸地面積130億ha（水域を除く）の10.6%の13.8億haが牧草地を含む耕地である。しかし、その多くが疲弊している。42%が酸性土壌、35%がアルカリ性土壌、塩類集積地も増えつ

つある。過放牧により牧草が根こそぎ取奪され砂漠化も進んでいる。物理的・化学的にこれを改良することはコスト的にも困難である。かつて世界各地で焼き畑農業が行われていたが、陸地の31%を占める40.3億haの森林を破壊して耕地に換えるのにも抵抗がある。途上国においても都市化が進み、農地を拡大することは難しい。耕地面積の2.5倍もある34.3億haの乾燥地を利用することが残された道であるが、灌漑用水の確保など条件は厳しい。

2) 面積当たりの収量増大 上述の緑の革命により小麦、稻の面積当たりの収量は大幅に増大したが、その舞台はラテンアメリカ、アジアであった。ここでは品種改良に加え農業技術の進展も伴っており、これ以上の増産は容易ではない。緑の革命に取り残されたアフリカの重要な食糧であるイモ類、豆類には緑の革命は及んでいない。アフリカに小麦、稻を持ち込むか、イモ類、豆類に緑の革命を起こすかが課題である。しかし、これには品種改良とともにインフラの整備が必須で政府、国際機関の農業投資がなくてはならない。アフリカの小規模農業生産者の生活改善を目的とする非営利組織、アフリカ農業技術基金は、今春、遺伝子組換えによる乾燥耐性トウモロコシの開発について、官民パートナーシップを結ぶと発表した。干ばつによる深刻な被害に直面しているアフリカの小規模農家生産者の収穫を守ることが期待されている⁷⁾。

農業技術改良にも新しい試みが始まっている。農地の気温、地温、水分、土壤の栄養素・金属塩、光の量と質、風など、作物の生育に関連する要素を連続的に監視し、最適な栽培条件を実現しようとの試みである。葉の光合成活性をセンシングする技術もある。ポストゲノム時代に入り、メタゲノム技術を使い、土壤微生物を網羅的に監視することも可能である。有用・有害微生物群が明らかになれば、作物の収量増大につながるだろう。特に開発途上国での生産拡大をもたらすことが重要である。

3) 作物の育種 植物は環境からさまざまな生物的、非生物的ストレスを受け、遺伝的に備えている生産力が激減している。従来型の突然変異体の取得と交配育種は十年から数十年単位の年月を要し、穀物生産量を2050年までに30億トン以上の増やすことは不可能に近いが、本特集の焦点である遺伝子組換え技術による育種こそが残された道であろう。

1996年に除草剤耐性、害虫抵抗性の遺伝子組換え作物の商業栽培が開始されたが、2012年には遺伝子組換え作物の栽培面積は、世界で1億7030万haになり、耕地面積の12.3%に達している。内訳をみると、発展途上

国における栽培が全面積の52%を占め、初めて先進国たるそれを上回った。主たる作物は除草剤耐性、害虫抵抗性の大麦、トウモロコシ、ワタ、カノーラで、全世界の作付面積のそれぞれ81%、35%、81%、30%である。これにより生産性は数十%から多いもので50%増大した⁸⁾。

現在、耐病性、耐塩性、低温・高温耐性、乾燥耐性、アルカリ・酸性土壌耐性など、ストレス耐性の作物の開発が進んでいる。

これらはストレスによる生産力の低下を防ぐとともに、栽培に適さない土地の利用を可能にし、栽培面積の拡大をもたらす。ストレス耐性のみならず、炭酸固定量の増大によりバイオマス量が数十%増加したものや、高成長性、種子・イモの生産性が向上した作物の開発が進んでおり、その成果が期待される。植物の炭酸固定はribulose 1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase (RuBisco) によるCO₂固定から始まるが、RuBiscoのCO₂への親和性がきわめて低い。そのため植物は葉の気孔を目いっぱい広げてCO₂を取り込んでいる。そのために気孔から大量の水を失う。RuBiscoのCO₂への親和性を高める研究も活発である。これが成功すれば栽培に必要な水が少なくなり、乾燥地でも生育が可能になる。

新戦略：セルロース系バイオマスを食糧に

最近、米国ではオイルシェール（oil shale）に湧きたっている。シェールは頁岩といわれる泥岩の一種で、油分（液状もしくはガス状炭化水素）を多く含む。この油分の埋蔵量は世界で2兆8000億～3兆3000億バレルと原油埋蔵量の2.1～2.5倍もあり、米国が世界の62%を占めるという。米国では、すでにオイルシェールから液化天然ガス生産が具体化し、わが国の商社、電力・ガス企業が2017年にわが国の液化天然ガスの年間輸入量の20%弱を米国から輸入する契約を結んだ。米国産は輸入価格が3割以上安く、今後のエネルギー状況が一変するといわれている⁹⁾。

セルロース系バイオマスからのエタノール生産も、オイルシェールがエネルギー源の主役になれば、臨機応変に対応しなければならない。農産廃棄物のセルロース系バイオマスは稲わら、麦わら、トウモロコシの茎・芯など

大量にあり、ネピアグラスのように高生長のバイオマスも含め、セルロース系バイオマスの前処理技術、安価なセルラーゼ・ヘミセルラーゼの生産研究、C6・C5混合糖の同時発酵の代謝工学はわが国でもずいぶん進んでいる。セルロース系バイオマスの輸送用燃料・ファインケミカルへの変換に加えて、糖質の発酵原料への利用、高付加価値微生物たんぱく質の生産など、食糧・飼料生産も絡めると、実用化が一歩前進するのではと思う。

オイルシェールはやはり化石資源であり、これが石油にとって代わるだけでは地球温暖化に拍車がかかるだけである。いかに大気中のCO₂を削減するか、難問が立ちはだかっている。これには森林の育成を提案したい。地球大気中のCO₂の炭素は約7000億トンである。一方、地球上の陸上植物が固定している炭素は地上部に6500億トン、地下部に1兆5000億トン、併せて2兆1500億トンと、大気中のCO₂の3倍である。これら植物の90%は樹木である¹⁰⁾。

人類の活動で化石資源から排出されるCO₂の炭素は年間86億トン（2012年）なので、地球上の森林を年間0.4%増やせばすべて吸収することになる。また、残存石油の燃焼から発生するCO₂の炭素は1400億トンであり、植物を6.5%増産すればこれもすべて吸収できることになる。食糧増産のみならず、さまざまな環境で高成長する精銳樹の探索、乾燥地で育つ樹木、ストレス耐性樹木の分子育種は人類の未来に大きな希望を与える。

文 献

- 1) 総務省統計局「世界の統計2013」, p. 16, (財)日本統計協会(2013).
- 2) 岩本純明：第29回東京大学農学部公開セミナー(2005).
- 3) http://www.maff.go.jp/j/zyukyu/jki/j_zyukyu_kakaku/
- 4) <http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/CO2map/CO2pmappolt.html>
- 5) 新名惇彦：新潮選書「植物力」, p. 30, 新潮社(2006).
- 6) <http://www.fao.or.jp/index.html>
- 7) <http://www.monsanto.co.jp/news/release/080402.shtml>
- 8) <http://www.monsanto.co.jp/data/benefit/110517.html>
- 9) 藤田和男：化学と工業, 66, 633 (2013).
- 10) 山地憲治ら：バイオエネルギー, ミオシン出版(2000).