健康と長寿への挑戦 --- 食品栄養科学からのアプローチ
木苗直秀 編著, 南山堂, pp. 7-11 (2006)

第1部　植物の科学と遺伝子組換え食品

植物を基盤にした新規維持型社会への回帰

小林裕和
静岡県立大学 大学院生活健康科学研究科 食糧(植物)細胞工学研究室

世界人口は100年間で4倍に増大した．その結果，人類は有史以来最大規模の食糧不足および環境破壊に直面し，地球はその包容力に限界があることを示した．この危機を乗り越えられるかは，人類に課せられた試練といえる．

統計学的数字を紹介しよう．世界人口は西暦元年が約3億人と推定され，1900年に5倍の約15億人，2000年にその4倍の約60億人に増大し，さらに，2050年には100億人に達する勢いである．過去1900年までの人口増加率に換算すると，ここ100年で6,000年間分の増加を示したことになる．まさに人類として未知の事態に突入した．人口増加と相まって，世界的な食糧枯渇は深刻化しており，餓死者は，28人（うち子供21人）/分であり，餓死人口は1,500万人/年になる．これらの地域を含めて，世界の2/3以上の人々は，空腹を満たされていない．わが国は，残りの1/3を占める先進諸国に属するが，これらの国々では，皮肉なことに，栄養過多や不適切な食物摂取による肥満，それに起因する生活習慣病が社会問題となってきた．さらに，高齢化が進み，わが国の老年人口（65歳以上）は約20年間で倍増して2,300万人となり，この勢いは今後20年間は止まるところを知らないと推定される（筆者自身もこの一人として増大に貢献することになる）．それに付随する老人医療費は，すでに12兆円/年にも膨らんでおり，この負担は，年金として社会の若年層に託されることになる．

地球環境に目を転じると，伐採などにより，熱帯雨林は13万km^2/年（北海道と九州を合わせた面積）ずつ減少し，不毛乾燥地帯は6万km^2/年（九州と四国を合わせて面積）ずつ増大している．さらに，過度な地下水くみ上げなどにより，農耕地の塩分集積は進み，農作物が育たない塩分析出地帯の総計は，955万km^2（米国国土面積に匹敵）になる．一方，人類が放出する炭酸ガス（CO_2）は約180億t/年（50億t炭素/年）と推定され，大気中CO_2濃度は100年の間に約30％増加し，現在380ppm（0.0380％）となった．大気中CO_2は，地球からの放熱を妨げ，地球温暖化をもたらす．現に，毎年のように夏季の最高気温は記録を更新し，その亜熱帯化に伴い，日本を襲う台風も増えてきた．大気中CO_2濃度の増加は，不幸にも加速度的であり，50年後には現在の2倍にまで増加すると予測されている．その結果，地球上の平均気温は2℃以上上昇し，南米アマゾンの熱帯雨林は消失し，不毛地帯と化すとの試算もある．このように，人類は今世紀に至り，地球規模での「環境問題」に直面し，われわれが自然の一員であること，そして地球の恒常性維持能力に限界があることを悟った．したがって，環境と調和した維持的な社会の成熟が望まれる．

食糧とは，ごく少数の肉食民族を除き，多くは，主食としての穀類や根菜類であり，「食糧枯渇」に対して，農作物の増産が望まれる．「生活習慣病」としては，肥満，糖尿

病，高血圧，癌などがあげられるが，これらの改善が期待される機能性成分の多くは，植物に由来する（後述）.「環境問題」として，地球温暖化の原因となっているCO_2の大気中濃度の増大は，産業活動において地下エネルギー資源の燃焼により放出されるCO_2に起因している．このCO_2を生物的に固定するのは植物の営む光合成のみであり，固定CO_2を生物圏から隔離することにより，CO_2による地球温暖化の軽減に寄与できる．また，植物は，土壌中に蓄積した重金属などを集積して除去する能力も有する（ファイトリメディエーション）．このように，「食糧枯渇」,「生活習慣病」，および「環境問題」の解決に向けた共通のキーワードとして，「植物」が浮上する．わが国において，祖先が有史以来蓄積してきた英知は，自然をいかにうまく活用し，その一員として付き合って行くかということであった．西洋の文明は傲慢かつ破壊的に見える．それは産業革命をもたらし，世界中がその恩恵を享受したが，その結果，人類の生存基盤である地球環境の破壊という大きなつけを負ってしまった．新規維持型社会への回帰の術が，21世紀のわれわれに課せられた最大の課題といえる．

1　植物の積極的な改良と安全な技術

植物も動物も（微生物も），生命の設計図は遺伝情報としてDNAと呼ばれる物質に保存され，それは子孫に受け継がれる．このDNAを操作することにより，植物や動物の性質を変えることが可能になる．これを「遺伝子操作」，そしてでき上がったものを「遺伝子組換え」生物［植物，農作物，動物（genetically-modified organism : GMO）］あるいは食品（genetically-modified food: GM food）などという．厚生労働省によって輸入が認可されている遺伝子組換え農作物は，現時点で75品目に及び，現在でも害虫抵抗性と除草剤耐性農作物は代表的なものである．害虫抵抗性や除草剤耐性の遺伝子は，ともに細菌に由来する．これらの遺伝子に加えて，遺伝子組換え操作には，遺伝子組換え体を選抜するために，「選択マーカー」と呼ばれる遺伝子が不可欠である．選択マーカーとしては，抗生物質耐性遺伝子や除草剤耐性遺伝子が使われるが，これらもまた主たるものは細菌由来である．抗生物質耐性遺伝子は，薬剤耐性菌の出現につながる危険性もあり，歓迎されない．遺伝子組換え農作物の作出に必要な「選択マーカー」を本来食に供している生物から提供できないかと考える．一方，遺伝子組換え農作物は，研究目的以外の国内での栽培は未だ認められていないが，この研究圃場栽培は，2004年2月より法令化された．この際，遺伝子組換え農作物からの花粉を介した外来遺伝子の飛散が懸念され，北海道，茨城県，滋賀県などで反対運動が激化した．

植物の細胞には，太陽光を受けて酸素を発生し空気中のCO_2から糖を生産（光合成）する工場が存在し，これを「葉緑体」と呼ぶ．この葉緑体にある遺伝情報は，通常の植物では花粉に入らないため，花粉を介した「遺伝子汚染」の可能性が回避できる．筆者の研究室では，分岐鎖アミノ酸の合成を司るアセト乳酸合成酵素（別称，アセトヒドロキシ酸合成酵素）に注目し，植物由来（したがって食べて安全）で遺伝子汚染を伴わない（花粉を介して外来遺伝子が飛散しない）新規「選択マーカー」を開発している．

2 食べて健康になる薬効野菜・機能ジュース

われわれが日常的に摂取する機能性成分の多くは，植物由来である．成分含量の増強や新規成分を蓄積させるうえで，植物遺伝子操作の貢献はきわめて大きいが，遺伝子組換え農作物に対する消費者の忌避意識が高いのが現状である．とくに，前述の通り，輸入が認可されている遺伝子組換え農作物は，害虫抵抗性と除草剤耐性が中心であり，生産者に歓迎こそされ，消費者には利点が見えない．これらは，「第一世代遺伝子組換え農作物」と呼びうるものである．一方，生活習慣病を予防し，健康で長寿を全うさせるような機能性成分に富んだ農作物なら，市場は歓迎するはずである．筆者の研究室では，前述の安全な選択マーカーを活用し，機能性成分の生産のための研究を開始した．

生まれたばかりの赤ん坊は，外から来る病原菌に対して，自分自身での免疫系は完成していないが，母乳を介して，母親から免疫成分（免疫グロブリンA：IgA）をもらう．レタスやキャベツなどの野菜に，免疫グロブリンAを生産させることは，遺伝子操作を使えば可能である（図1）．この種の野菜は，免疫系が弱った病人や高齢者に対して，疾病予防としてその有用性はきわめて高い．「みのもんた」のテレビ番組に代表されるように，近年，人々の健康への関心は高く，機能性食品はもてはやされる．茶のカテキン，ブドウ酒のポリフェノール，ブルーベリーの成分などは，抗癌，抗酸化効果などを有する．これら一群の成分は，フラボノイド類から派生しており，さらに抗アレルギー，抗炎症作用，

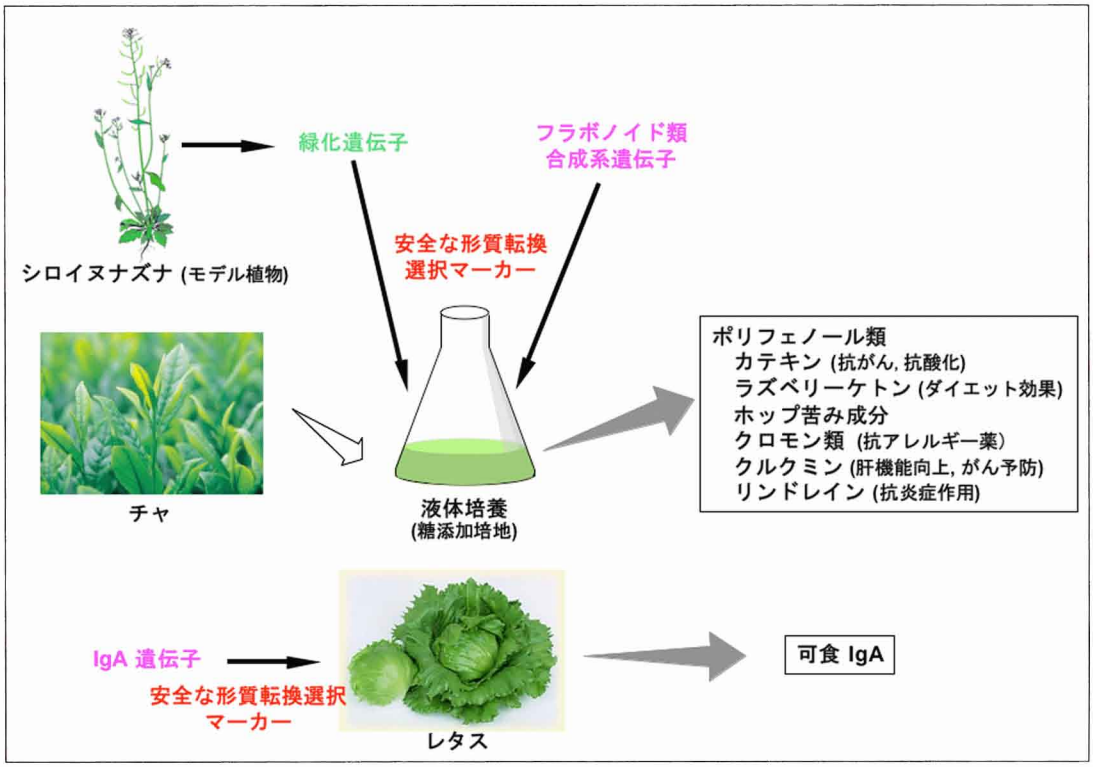

図1　機能性・薬効成分の生産性を増強した植物の作出　補稿: 詳細は H. Kobayashi, 2006

ダイエット効果なども期待される（図1）．これらの成分を高蓄積するようにした野菜自体あるいは培養細胞から作ったジュースの市場性は高い．もちろん，厚生労働省の安全評価を満たしたうえで，商品化されることになる．

3　地球規模での貢献

前述のように，人類が放出するCO_2は地球温暖化をもたらし，これにより，世界規模での自然環境破壊，さらに農作物の減収が懸念される．この解決の糸口を植物の活用に見いだしたいと考える．樹木は，植樹20年後に，樹高10m，胸高直径約30cm，枝幅6mへの成長が見込まれ，これによる大気中CO_2固定量は約45kg CO_2/本/年と見積もられる．これが森林に成長した場合，約3.5万t CO_2/km^2/年の固定が見込まれる．芝の場合，約4.7万t CO_2/km^2/年が期待されるが，芝は炭素保持期間（光合成により大気中CO_2を固定してから腐敗によりCO_2を放出するまでの期間）が短いため，植林に先立ち，不毛地域土壌の扶養化に適する．人類が放出する約180億t CO_2/年をすべて樹木により固定するには，少なくとも51万km^2（日本の国土面積の1.3倍）以上の森林が必要となる．地球上陸地に新規森林の創成に必要な51万km^2以上の面積を見いだすとすると，植物の生育には過酷な塩集積土壌，乾燥地域，あるいは寒冷地域のみが残されている．したがって，大気中CO_2の削減に資すため，これらの地域において生育が可能な環境ストレス耐性芝および樹木の創製の見通しをつけたい．また，地球規模での環境悪化のため，農耕地は減少し，残された地域において現在以上の農作物収量を得ることは困難である．筆者らの研究成果を農作物に活用することにより，劣悪条件下でも生育可能な農作物の作出（分子育種）が可能になる．

耐塩植物としては，熱帯･亜熱帯の汽水地域に生育するマングローブがよく知られており，海水（約3％のNaClを含む）の1/4～1/2の塩濃度において生育が良好であり，海水の濃度でも生存できる．一方，塩に比較的強い栽培植物としては，大麦，甜菜，および綿があげられ，これらは0.5％ NaClでも減収を伴わないことが知られている．しかしながら，これらの性質を支配する遺伝子についてはよくわかっていない．植物の耐塩機構としては，まず，浸透圧調節物質の蓄積があげられる．たとえば，ナメクジに塩を振りかけるとナメクジは体内から水分を奪われ死に至る．同様に植物も塩にさらされると水分を吸収できず枯死する．これを回避するには，細胞のなかに外部の塩に相当する濃度の無害な成分を蓄積しておく必要がある．そのほか，高塩土壌からの能動的水分吸収，体内中NaClの積極的除去，および植物細胞の機能自身が塩に阻害されにくいなどが考えられる．これらのうち，浸透圧調節物質の蓄積あるいは乾燥誘導性遺伝子の発現を人為的に制御することにより，植物への環境ストレス耐性の付与の成功例がある．筆者らは，遺伝学的解析に適したモデル実験シロイヌナズナを用い，生育が耐塩性になった突然変異系統を選抜することを通して，その新規の耐塩機構を解明したいと考えた．

野生系統が完全に枯死する条件下［1.2～1.5％（200～250mM）NaCl，海水の約半分あるいは生理的食塩水の2倍弱の塩濃度］で生存することを指標に，変異原処理したモデ

図2　シロイヌナズナ耐塩性突然変異系統　補稿: 詳細は K. Tsugane *et al.*, 1999
a：野生系統（コロンビア），b：耐塩性変異体（右側）
通常培地で3週間生育後，200mM NaCl（海水の1/2弱の濃度）含有培地に移し3週間培養．

ル植物シロイヌナズナの実生から，耐塩性突然変異体を選抜した．約15万個体から耐塩性突然変異体を2系統得た（図2）．塩ストレスによって，植物細胞中には活性酸素（有害）が生じるが，2系統のうちの一つの耐塩性突然体は，活性酸素消去系として知られているスーパーオキシドジスムターゼ（SOD）およびアスコルビン酸ペルオキシダーゼという酵素の活性が顕著に増大していた．もう一方の突然変異系統においては，遺伝子発現を制御する遺伝子の発現があがっており，この遺伝子を強制発現させることにより，75 mM NaCl含有培地において，野生系統は枯死するにもかかわらず，遺伝子導入系統はすべての個体が生存し，成長した．さらに，この遺伝子を強制発現させたシロイヌナズナは，野生系統が生育できない低温環境下（4℃で4週間）においても成長し，開花した．この遺伝子を樹木や農作物に導入することにより，塩集積地や寒冷地の緑化や作物栽培が可能になる．

ここで紹介した筆者らの研究は，安全な植物遺伝子操作技術を基盤にして，食べて健康な野菜の開発，さらに地球規模での緑化や食糧供給への貢献を目指すものである．遺伝子組換え農作物の国内での商用栽培は行われておらず，本技術もまずは閉鎖系での培養細胞を用いた物質生産が指向される．精製成分は，遺伝子組換え農作物としては扱われないため，現行制度下で商品化は可能である．遺伝子組換え農作物あるいはその粗抽出物は，安全性評価に課せられる．この種の洗礼を受けて，世に送ることになる．これらは，「第二世代遺伝子組換え農作物」であり，安全であり消費者は恩恵を享受するはずである．一方，食糧・環境問題の解決に向けて，政治的かつ経済的な努力は不可欠であるが，よりよい生活と子孫の繁栄を願う個人の思いが集約され，世論として遺伝子組換え植物の重要性が顧みられれば，人類の将来は悲観的ではないはずである．

なお，ここで紹介した研究について詳しく知りたい方は，URL（http://sfns.u-shizuoka-ken.ac.jp/pctech/pdf/）を参照されたい．　補稿: 現在のホームページ