
ERAプロジェクト調査報告

August 2013

バイオテクノロジー研究部会



特定非営利活動法人

国際生命科学研究機構

International Life Sciences Institute Japan

International Life Sciences Institute, ILSI は、1978年にアメリカで設立された非営利の団体です。

ILSI は、科学的な視点で、健康・栄養・安全・環境に関わる問題の解決および正しい理解を目指すとともに、今後発生する恐れのある問題を事前に予測して対応していくなど、活発な活動を行っています。現在、世界中の400社以上の企業が会員となって、その活動を支えています。

多くの人々にとって重大な関心事であるこれらの問題の解決には、しっかりとした科学的アプローチが不可欠です。ILSI はこれらに関連する科学研究を行い、あるいは支援し、その成果を会合や出版物を通じて公表しています。そしてその活動の内容は世界の各方面から高く評価されています。

また、ILSI は、非政府機関（NGO）の一つとして、世界保健機関（WHO）とも密接な関係にあり、国連食糧農業機関（FAO）に対しては特別アドバイザーの立場にあります。アメリカ、ヨーロッパをはじめ各国で、国際協調を目指した政策を決定する際には、科学的データの提供者としても国際的に高い信頼を得ています。

特定非営利活動法人国際生命科学研究機構（ILSI Japan）は、ILSI の日本支部として1981年に設立されました。ILSI の一員として世界的な活動の一翼を担うとともに、日本独自の問題にも積極的に取り組んでいます。

まえがき

2013. 8

バイオテクノロジー研究部会

2013年の調査報告書第4号（通算第11号）になります。

今回は、ミネラル強化作物やバイオ燃料といった遺伝子組み換え作物の様々な可能性の視点からの論文をいくつかご紹介しております。バイオ燃料に関する論文が3報あり、バイオ燃料と環境汚染との関係、アワのバイオ燃料としての可能性、そして遺伝子組換えトウモロコシによるバイオ燃料の生産性の向上に関するものです。また、害虫抵抗性の遺伝子組換え作物と収量の間を調べた興味深い論文もご紹介しております。

遺伝子組換え関連の研究では聞きなれないリター（litter：落葉落枝）の分解に関する論文が3報あり、*Bt*タンパク質の分解に関する論文も含んでおります。

目次

No.101	遺伝子組換えによる害虫抵抗性形質に基づくトウモロコシ収量の増加と安定性の向上 Transgenic insect resistance traits increase corn yield and yield stability	1
No.102	葉の生物分解ダイナミクス及び植物体構成成分において <i>Bt</i> トウモロコシと対照の慣行交雑種は相異しない Decomposition dynamics and structural plant components of genetically modified <i>Bt</i> maize leaves do not differ from leaves of conventional hybrids.	2
No.103	捕食の恐怖は植物リターの分解を減速する Fear of predation slows plant-litter decomposition	3
No.104	河川生態系機能に与える大陸規模の栄養分変動の影響 Continental-scale effects of nutrient pollution on stream ecosystem functioning	4
No.105	主要食用作物のミネラル強化戦略の重要な進化 Critical evolution of strategies for mineral fortification of staple food crops	5
No.106	遺伝子組換えかそうでないか？ To be or not to be transgenic	6
No.107	ドイツ政府による MON810 トウモロコシ栽培禁止令の科学的正当性への疑問 Is the German suspension of MON810 maize cultivation scientifically justified ?	7
No.108	バイオ燃料と都市の大気：限定的影響 Biofuels and city air : A marginal effect	8
No.109	アワ (<i>Setaria italica</i>) のゲノム配列からイネ科植物の進化とバイオ燃料の 可能性に関する洞察が得られた Genome sequence of foxtail millet (<i>Setaria italica</i>) provides insights into grass evolution and biofuel potential	9
No.110	出力形質 (output trait) 酵素を産生する遺伝子組換え作物の環境リスク評価 Environmental risk assessments for transgenic crops producing output trait enzymes	10

No.101

遺伝子組換えによる害虫抵抗性形質に基づくトウモロコシ収量の増加と安定性の向上

Transgenic insect resistance traits increase corn yield and yield stability

Edgerton MD, *et al.*

Nature Biotechnology 30 : 493-496, 2012

米国の開発企業・大学の研究グループによる論説である。トウモロコシの大害虫であるチョウ目及びコウチュウ目害虫抵抗性並びに除草剤耐性の3重スタックトウモロコシ品種の作付けは、2010年に1,780万 ha（全米トウモロコシ作付け面積の50%）に達した。しかし、圃場試験では栽培された年や場所によって収量が大幅に増加したという報告や、全く変化しないという報告があり、喰害と天候などの諸要因の相互作用が示唆された。そこで、3重スタック系統（Cry 1 Ab・Cry 2 Ab 2/Cry 3 Bb 1/CP 4 EPSPS）とその対照の CP 4 EPSPS のみ導入された系統とが同時・同圃場で栽培された736の収量調査を解析した。その結果、特性効果（両系統平均値の差）では、3重スタック系統が対照よりも 0.55 ± 0.81 トン/ha の増収を示した。環境変動の影響が少なく比較的収量が安定している特性安定性（対照区収量とスタック区収量あるいは特性効果との対比図より判定）でも、スタック区の安定性が高かった。また試験した9つの総平均（2005-2009年）でも、スタック区が 0.51 ± 0.95 トン/ha の増収を示した。登熟期において、65,652の3重スタックとコントロールの対から選んだ15,216対の平均収量は 12.1 ± 2.4 トン/ha であった。スタック系統と対照系統の収量の差が大きかった地域は、イリノイ、アイオワ、インディアナ、ミネソタ州であった。増収効果には他の実益もある。農薬使用量の減少、収穫物の品質向上、周辺圃場の喰害低下、他作物の圃場増加などである。これらの経済と環境への実益を維持するためには、抵抗性害虫の発現を最低限に抑えるための栽培管理の維持・継続が極めて重要である。

No.102

**葉の生物分解ダイナミクス及び植物体構成成分において
Bt トウモロコシと対照の慣行交雑種は相異しない**

Decomposition dynamics and structural plant components of genetically modified *Bt* maize leaves do not differ from leaves of conventional hybrids.

Zurbrügg C, *et al.*
Transgenic Res. 19 : 257-267, 2010

スイスの研究グループが表題の研究論文を報告した。供試材料は *Bt* トウモロコシ 3 系統 (Cry 1 Ab が 2 系統、Cry 3 Bb 1 が 1 系統)、対応する準同質遺伝子 3 系統 (対照系統)、慣行 3 品種である。地上部材料はポット栽培個体から、土壌中材料は農家 10 圃場の深度 5 cm に設置したリターバッグ (落葉落枝を回収する袋) から採取した。土壌中の葉残渣 (乾物重量) は各区とも収穫期 (10 月) から翌年 6 月の間に 3.5 g からの 0.5 g へと漸減した。*Bt* 系統と対照系統、慣行品種との間には有意差はなかった。植物体構成成分である C : N 比、セルロース、ヘミセルロース、リグニンの含量には、*Bt* 系統と対照系統との間には有意差はなかった。しかし、慣行品種間には有意差があった。土壌中での分解速度には 2 種類の *Bt* タンパク質の間で異なっていた。Cry 3 Bb 1 は収穫期の濃度は高い (70 $\mu\text{g/g}$) が、3 週間で 48%、6 週間で 95% が分解された。Cry 1 Ab は収穫期濃度は低く (10~15 $\mu\text{g/g}$)、3 週間で 0%~40%、6 週間で 20%~50% の分解にとどまっていた。しかし翌年 6 月には、すべての *Bt* タンパク質の 99% が分解された。以上から Cry 3 Bb 1 は初期濃度は高いが、分解速度も速いことが示された。標的害虫に対する *Bt* タンパク質を人工餌に混ぜての生物検定では、両タンパク質とも 12 月までは殺虫効果を示したが、翌年 2 月に採取した *Bt* 葉は殺虫効果が消失していた。以上の *Bt* タンパク質の分解速度は、慣行品種の範囲内であり、*Bt* トウモロコシが土壌分解系 (decomposing community) に障害を与えることはない と総括された。

捕食の恐怖は植物リターの分解を減速する

Fear of predation slows plant-litter decomposition

Hawlena D, *et al.*
Science 336 : 1434-1438, 2012

米国及びイスラエルの大学研究者グループが表題の研究成果を報告した。地下土壤生態系に大きく影響するとされていた植物リター（落葉落枝）に対して、筆者らは捕食の恐怖（ストレス）をうけた被食虫の体内成分の変化に由来するより直接的な影響を実証した。捕食者としてクモ、被食虫としてバッタを供試し、実験室及び圃場試験により次の結果をえた。i) 捕食恐怖（ストレス）の有無によるストレスバッタと非ストレスバッタの土壤中の分解速度には差がなかったが、虫体 C:N 比率は前者が後者より高かった、ii) i) の土壤に加えた草本植物リターの118日後の分解量は、ストレスバッタ区のほうが62% 低かった、iii) 炭素含量及びタンパク質含量に大差をつけて人工飼育されたバッタの40日間の土壤中分解量は2倍の変異を示し、C:N 比率と正の、タンパク質量と負の相関を示した、iv) iii) の土壤に加えた草本植物リターの96日後の分解量には6倍の区間差があった、v) ストレスバッタあるいは非ストレスバッタが加えられた自然圃場土壤における草本植物リター分解量は、前者区が後者区より19% 低かった、vi) 一世代を経過した両種類のバッタ死骸を分解させた土壤中の93日間における草本植物リターの分解総量は、ストレスバッタ区が非ストレスバッタ区より200% 低かった。以上の結果により、捕食によるストレス（恐怖）に基づく被食虫の体内成分の変化が、土壤エコシステムの植物リター分解機能に直接的な影響を与えることが実証された。その主因は、土壤に加えられる動物タンパク質（バッタ死骸）のストレスによる相対的增加（C:N 比率の増加）によるものと考えられる。最近、この事象を支持する関連文献が増えている。

河川生態系機能に与える大陸規模の栄養分変動の影響

Continental-scale effects of nutrient pollution on stream ecosystem functioning

Woodward G, *et al.*
Science 336 : 1438-1440, 2012

EU圏10ヶ国・米国の23名の研究グループによる広域調査・研究の報告である。河川の富栄養化や汚染が問題視されている中で、河川生態系の鍵となる生態系の動態—樹木リターの分解や他の栄養分のサイクルを含む—の解明に生物化学的アプローチが重視されつつある。そこで、栄養分濃度に1,000倍の差異がある欧州の100の河川について、共通的な2樹種（易分解性のカシ及び難分解性のペンノキ）からのリター分解速度を、2,400のリターバッグにより調査した。リター分解は、可溶性有効態リン及び溶出無機窒素の総合作用により、中程度の栄養分濃度で最高値となるこぶ型の関係を示した。リター分解速度は栄養分濃度の高低両極端で急落した。この結果をもたらしリター分解無脊椎動物（微小虫類）について、上記と同程度の栄養分濃度の差異があるアイルランドの10の河川を調査した。どの河川においても、中程度の栄養分濃度の地点においてリター分解速度も最も高く、その地点に優越する分解虫類の大きい集団が存在していた。河川生態系の健康度の判定は、既往の手法（水分化学、水分形態、魚・小虫類・藻などの計量値）では不十分であり、上述のリター分解及び他の機能解析などを加えた河川生態系に対する総合的アプローチが必要であると考えられる。

主要食用作物のミネラル強化戦略の重要な進化

Critical evolution of strategies for mineral fortification of staple food crops

Gómez-Gelera S, *et al.*

Transgenic Res. 19 : 165-180, 2010

スペイン・インドの研究グループが表題のレビューを行った。人間の必須ミネラル16種類のうち、ヨウ素、鉄、亜鉛、カルシウム、セレンの5種類は食用作物中の含量が低く、単純な穀類依存度の高い食生活をする人々、とくに途上国貧困者はこれらミネラルの欠乏症をおこしやすい。欠乏症には、クレチン病・甲状腺肥大（ヨウ素）、貧血（鉄）、感染症・皮膚病・下痢（亜鉛）、くる病・骨粗鬆症（カルシウム）、疲労・発育不全（セレン）、などがある。これらのミネラル欠乏症を緩和するために、以下の三方策がとられている。i) 栄養素強化食品：ヨウ素添加塩、鉄添加パン・ミルクなどの強化食品は最も安価で持続性も高いが、先進国に比べて途上国での普及は低い。ii) 栄養補助食品（サプリメント）：錠剤や飲料による直接的補完であり、短期間に速効的効果は大きいですが、資金不足や流通網の欠如といった理由から、長期間の持続的な効果は低く、途上国では普及しにくい。iii) 生物的栄養素強化：施肥の改良、あるいは育種（慣行あるいはバイオテック）によるミネラル強化であり、完成されれば、安価で、環境への影響がなく、持続性の高い方策である。慣行育種（突然変異誘発を含む）では、低フィチン酸のトウモロコシ、オオムギ、イネ、ダイズが作出されている。国際農業研究協議グループ（CGIAR）は、傘下のIRRI、CIMMYT、CIAT、IITAの協力により、幅広い遺伝資源の利用によるHarvest Plus計画を推進中であり、特にヨウ素強化作物の育種に注力している。GM手法では、低フィチン酸穀類、鉄高含量のコムギ、イネ、トウモロコシが作出されている。その他亜鉛やカルシウム強化のGM作物の例もある。これらミネラル強化GM作物の市場化を実現するためには、特に途上国で強力な栄養改善政策が必要であり、貿易上の規制制度の整備も肝要である。このため政府、社会、個人を含む全体的なアプローチが重要である。

遺伝子組換えかそうでないか？

To be or not to be transgenic

Parrott W A, Jez J M and Hannah L C
Nature Biotechnology 30 : 825-826, 2012

米国の大学研究者が、Walts (2012) (ERA 調査報告番号93) に続いて、植物バイオテクノロジー技術における single nucleotide polymorphisms (SNPs) の規制の在り方について論点を深めた。SNPs とは、ゲノム塩基配列中の1つのヌクレオチド置換により1つの塩基対が変異した多様性のことである。シロイヌナズナの1世代において1塩基対当たりの突然変異率は10億塩基分の7塩基対と推定されており、1億2,500万塩基対を有する2倍体シロイヌナズナでは、1世代当たり1.75個の新しいSNPs 突然変異が発生すると見込まれる。全ての植物で同じ確率で変異が起こるが、より大きいゲノムの作物ではより多い変異が見られる。例えばダイズは、1haに栽培されている24万個体中には180万の新しいSNPs が含有されていると推定される。標準的な突然変異率は1遺伝子あるいは1塩基対当たりでは極めて低い率であるが、新規の突然変異は例外というよりむしろ習慣と言える位に十分高い確率で起こっている。加えて人為突然変異の利用（放射線・化学物質による変異）により、育種家は安全・有用なSNPs を長期にわたり創出してきている。突然変異誘発による2,543の実用品種が登録されている（FAO・IAEA）。この方法では、変異はランダムに発生し、遺伝的構成や表現型へのSNPs の関与の程度も不明であるが、作出された植物体は安全とみなされ規制の対象外となっている。今日のSNPs 作出手法は、標的遺伝子を特定し、目標特性に特化した突然変異体の作出が可能である。当然規制の対象外となるべきである。別報によれば、ダイズはコード領域の0.05%、非コード領域の0.5%、トウモロコシは全塩基対の1.3%の塩基対にSNPs を含有している。栽培化や育種の過程で作物に蓄積された変異は大規模であるが、この大規模な変異に比べれば、SNPs は全くマイナーな変異である。数千年にわたる作物品種改良の歴史において、育種または人為突然変異を原因とする環境や健康への悪影響は報告されていない。以上から、SNPs を含めた変異及びDNA挿入等の他の突然変異による最終産物は、環境や人畜に無視できないようなリスクを与えることはない結論される。

No.107

ドイツ政府による MON810 トウモロコシ栽培禁止令の 科学的正当性への疑問

Is the German suspension of MON810 maize cultivation
scientifically justified ?

Ricroch A, Bergé JB and Kuntz M
Transgenic Res. 19 : 1-12, 2010

フランスの大学・国研の研究グループによる論文である。2009年4月にドイツ政府は、害虫抵抗性トウモロコシ品種 MON810 (Cry 1 Ab) の国内栽培禁止令を出した。著者らは禁止令が根拠とした情報・文献 (ソース A) 及びその後の他の広範囲なレビュー文献 (ソース B) を精査・検討した。ソース A では、ミジンコ及びテントウムシ (Cry 1 Ab 非標的昆虫) の強制給餌室内実験、河川及び土壌での実験などにおいて、MON810の非標的生物に対する負の影響の科学的根拠は確認されないと判断された。ソース B では、2008~2009年からキーワード検索 (“Maize or Corn” および “Insect and Resistance”) でヒットした査読された文献171報の中で、MON810あるいは Cry 1 に関する23文献中21文献、1996-2009年のテントウムシを用いた27文献中21文献が負の影響が検出されないとしている。また、その他の非標的生物を用いた376文献中368文献においても、いずれも負の影響が検出されないことを報告している。加えて近年の広範囲な複数の圃場テストの結果でも、負の影響は報告されていない。上記中での負の影響の報告は、不適当な対照区、不貫性データ、被食昆虫の減少による間接的影響、他の農薬散布による影響などの不備があった。以上から、「ドイツの禁止令には、意図的・政治的な文献の選択、case-by-case 原則の無視など、公正な文献に基づく科学的根拠が存在していない」と結論される。(注：著者らはフランス研究者であるが、2008年のフランス政府による MON810栽培禁止令も、中立的ではなく、政治的に偏した決定であると付記している)。

バイオ燃料と都市の大気：限定的影響

Biofuels and city air : A marginal effect

Service R F

Science 336 : 292-293, 2012

米国化学学会春李大会からの短報である。米国イリノイ大学の研究グループが、ブラジル最大の都市サンパウロで実地研究を行った。同市の自動車のうち26%に当たる150万台は、ガソリンと100%エタノールの両方を燃料に利用できるフレックス燃料車であり、運転者はより安価な燃料を選択している。通常はガソリンの方が高価だが、1リットル当たりのエネルギーは30%多い。価格統制が厳しいガソリンと異なり、エタノール価格はサトウキビ価格に伴って大きく変動するが、多くの年でエタノールの方が割安であった。しかし過去3年間のうち、2年の冬季において世界的に砂糖が高騰し、ガソリンが割安となった。このためフレックス燃料車の運転者は、数ヶ月間エタノールからガソリンへと切り替えた。研究グループはこの切り替えによる大気清浄度への影響（NO、N₂O、SO₂、O₃、その他）を、市内22ヵ所で経時的に追跡したが、予想に反して大気清浄度の変化は検出されず、他の変動要因を除外した統計的解析でも、変化は検出されなかった。この結果から研究グループは、「識別できる程度の変化には、より大規模あるいは完全なバイオ燃料へのシフトが要求されるであろう。しかし、旧式の大気汚染車の代替により、長期的には大気清浄度は改良されると予測される。本研究は、その将来傾向を追跡するための重要なベースラインを与えるものである」と結論している。

アワ (*Setaria italica*) のゲノム配列からイネ科植物の進化と バイオ燃料の可能性に関する洞察が得られた

Genome sequence of foxtail millet (*Setaria italica*) provides
insights into grass evolution and biofuel potential

Zhang G, *et al.*

Nature Biotechnology Vol. 30 No.6, 549-556, 2012

37人の中国研究グループ（一部は米国及びデンマークに所在）が表題の論文を報告した。アワ（foxtail millet）は8,700年以前の新石器時代に栽培化されたイネ科植物である。アワは、スイッチグラス、ネピアグラス、トウジンビエなどのバイオ燃料草本種と関係が深いことが知られている。イネ科のなかではアワはゲノムサイズが小さく、自家受粉であり、遺伝的多様性が大きく、遺伝資源のコレクションが充実している。更にハイスループットの組換え技術が確立しているなど、ゲノム配列解析モデルとしての最適の植物である。著者らは全ゲノムショットガン法及び次世代シーケンサー技術との組合せにより、9本の染色体に対応する423 Mbの暫定ゲノムを解読し、38,801の遺伝子を推定した。アワの染色体の進化の過程を、イネ科の祖先種と同数（12）の染色体を有するイネと対比して調査し、重要な染色体再編成事象が見いだされた。その結果、アワの第2及び第9染色体は、イネの第7と第9染色体及び第3と第10染色体の2回のリシャッフリングにより、またアワの第3染色体はイネの第5と第12染色体の1回のリシャッフリングにより形成されたことがわかった。進化系統樹と対比して、前者の融合はアワとイネの枝分かれの以後に、また後者の融合はアワとソルガムとの枝分かれ以後にそれぞれ起こったと推定された。C₄植物特有の炭酸ガス濃縮過程の重要な酵素である炭酸脱水酵素について解析を行い、その3大要素であるCA α 、CA β 、CA γ のすべての酵素をアワは所有しており、C₄植物であることが確認された。また除草剤耐性に関する交配試験により、アワは除草剤 sethoxydim に対する抵抗性優性核遺伝子を有することが分かった。以上の知見と今後の組換え技術の進歩により、アワの研究と改良の効率向上が期待されると結語されている。

**出力形質 (output trait) 酵素を産生する
遺伝子組換え作物の環境リスク評価**

Environmental risk assessments for transgenic crops
producing output trait enzymes

Raybould A, *et al.*
Transgenic Res. 19 : 595-609, 2010

シンジェンタ研究グループ（在英国研究所・在米国研究所）による原著論文である。シンジェンタ作出の Event3272は、耐熱性 α -アミラーゼ（AMY797E）を穀粒中に産生する組換えトウモロコシである。この特性により、通常のエタノール生産ではトウモロコシ粒を粉砕する工程で必要である耐熱性 α -アミラーゼの添加が不必要となる。本論文の前半はプロブレム・フォーミュレーションの一般的記述であるので（本報告 No.26, 27, 28, 29で報告済み）、ここでは α -アミラーゼ産生の出力形質（output trait）の環境リスク評価に特化した後半について記述する。まず最終目標である保護目標として、大量、高品質、多種類の食料の安定的確保及び地球環境の保存が設定された。ついで試験データ及び既存文献に基づいて、次の3項目のリスク評価がなされた1) 野生生物への影響：生態毒物学的特性、穀粒成分分析、小動物を使用した給餌試験における対照区との有意差の有無などの Event3272 自体の相対的安全性、AMY797E の毒性（急性毒性を含む）の有無など、2) 雑草性及び侵入性：米国コーンベルト25ヶ所で、2003~2004年に表現型を調べた農業特性試験、実験室での休眠性試験、出芽性・低温（5℃）耐性などにおける有意差の有無、3) 土壌への影響：土壌中の α -アミラーゼ含量は、植物材料分解の限定要因ではない、土壌への α -アミラーゼの添加は、土壌の植物材料分解率を変化させない。以上、1)、2)、3) における結果から、バイオ燃料エタノール生産効率を向上させる α -アミラーゼを産生する出力形質組換え作物の環境へのリスクは非常に低いと結論される。また出力形質に対して害虫抵抗性と同様な安全性評価手法の適用が可能であると付記されている（注：本イベントは米国において食品・飼料の認可が2010年になされている）。

ERA プロジェクト調査報告

2013年 8 月 印刷発行

特定非営利活動法人
国際生命科学研究機構 (ILSI JAPAN)
理事長 西山徹

〒102-0083東京都千代田区麹町 3-5-19

にしかわビル 5F

TEL 03-5215-3535

FAX 03-5215-3537

[http:// www.ilsijapan.org](http://www.ilsijapan.org)

