

第1部 遺伝子組換え樹木に関する諸動向

第1章 遺伝子組換え樹木をめぐる情勢

藤岡典夫

1. 諸外国における GM 樹木の試験栽培の現状

遺伝子組換え樹木（以下「GM 樹木」）の野外試験その他研究開発や栽培への応用に関する世界の現状を網羅的に把握した文書や記録，データベース等は存在しないものの，比較的良くまとまっているのが FAO (2004)である。これは，2004 年 1 月現在で各国の GM 樹木の野外試験に関する情報を公開のデータベースから収集・整理している。ただ，これらの試験の状況の詳細（実際に植栽されたのか，あるいは認可されたもののまだ植栽されていないのか）は判別できていない。以下この文書の主な内容を紹介する。

（1）国別の野外試験数

第1表は，国別の野外試験数が，「林木」と「観賞樹木及び果樹」の2つのカテゴリー別に整理されている。

このうち，林木についてみると，アメリカが 103 件と大多数を占めている。次は中国の 9 件で，そのうち 2 つは世界初の商業栽培である。ヨーロッパは併せて計 23 件（英国 6 件，フィンランド 5 件，フランス 4 件，ドイツ 4 件等）となっている。

観賞樹木及び果樹では，アメリカが 47 件，次いでイタリアが 8 件である。なお，この FAO (2004)には記述されていないが，第2章で紹介するように，アメリカでは GM パパイアの商業栽培が開始されている。

（2）対象樹種

第2表は，樹種別の野外試験数が，「林木」と「観賞樹木及び果樹」の2つのカテゴリー別に整理されている。

林木では，ヤマナラシ属（ポプラ）がもっとも多く（82 件），ユーカリ属とマツ属が続く（各 34 件と 31 件）。果樹/観賞樹木では，リンゴ属がもっとも多く（33 件），パパイアとサクラ属が続く（各 18 件と 13 件）

（3）関係する形質

第3表は野外試験のデータベースから，遺伝子と形質に関する包括的な情報を整理したものであるが，かなりの部分推測が含まれている。

この表から分かることは，1 つには，野外試験の多くの GMOs が抗生物質耐性遺伝子を持っていることである。次に，導入される形質についてみると，林木においては，除草剤

第1表 GM 樹木の国別の野外試験数

国名	林木	果樹・観賞樹木
米国	103	47
中国	9	0
イタリア	0	8
英国	6	2
カナダ	7	0
ニュージーランド	3	3
フィンランド	5	0
ドイツ	4	1
フランス	4	0
オーストラリア	1	2
ブラジル	2	1
チリ	3	0
オランダ	0	3
ベルギー	0	2
タイ	0	2
ウルグアイ	2	0
インド	1	0
インドネシア	1	0
アイルランド	1	0
イスラエル	1	0
日本	0	1
メキシコ	0	1
ノルウェー	1	0
ポルトガル	1	0
南アフリカ	1	0
スペイン	1	0
スウェーデン	0	1

資料 : FAO (2004).

第2表 樹種別の野外試験数

分類	樹種	野外試験数
林木	<i>Populus</i> ヤマナラシ属	82
	<i>Eucalyptus</i> ニューカリ属	34
	<i>Pinus</i> マツ属	31
	<i>Picea</i> トウヒ属	6
	<i>Betula</i> カバノキ属	3
	計	156
果樹・観賞樹木	<i>Malus</i> リンゴ属	33
	<i>Carica papaya</i> パパイヤ	18
	<i>Prunus</i> サクラ属	13
	<i>Olea</i> オリーブ属	2
	<i>Juglans</i> オオカミナスビ	2
	<i>Cyphomandra</i>	1
	<i>Belladonna</i> クルミ属	1
	<i>Citrus</i> ミカン属	1
	<i>Persea</i> アボカド属	1
	<i>Castanea</i> クリ属	1
	計	73

資料 : FAO (2004).

耐性をもっとも多く（41件），害虫抵抗性（21件）とリグニン抑制（15件）が続く。果樹/観賞樹木では大いに異なり，微生物（ウイルス，菌，バクテリア）に対する抵抗性をもっとも多い（35件）ことが明らかであり，害虫抵抗性（11件）が続いている。

第3表 野外試験に関係する遺伝子と形質

形質	果樹・観賞樹木	林木	遺伝子
リポーター及びマーカ-遺伝子	2	43	<i>npt II</i> ; <i>uid A</i> ; <i>aph IV</i>
果実成熟	7	0	
ウイルス抵抗性	15	0	coat protein; PRSV replicase; <i>TaMV</i> coat protein
菌類抵抗性	17	2	cecropin; chitinase; defensin; <i>npr 1</i> ; STS; oxalate oxidase; osmotin; attacin
除草剤耐性	1	41	
リグニン量の変化	0	15	4coumarate CoA ligase; CAD;
硝酸還元酵素合成代謝産物	0	4	
重金属の植物による除去	0	3	
細菌抵抗性	0	5	mercuric ion reductase
耐塩性	3	3	antimicrobial peptide; lysozyme
発根	0	1	
エチレン生成	5	0	<i>rol</i>
植物の発達	0	0	ACC synthase
糖・アルコールレベルの変化	2	9	
ハロゲン化炭化水素の代謝	4	0	sorbitol dehydrogenase
不稔	0	1	P450
果実熟成の変化	0	3	diphtheria toxin A
遺伝子発現の変化	7	0	<i>S</i> -adenosylmethionine transferase
ポリフェノールオキシダーゼ量の変化	0	1	
繁殖の変化（不稔以外）	3	0	polyphenoloxidase
害虫抵抗性	0	5	
	11	21	<i>cry 1Ac</i> ; <i>cry 3A</i> ; hyoscamine 6•-hydroxylase; agglutinin; chitinase; chitobiosydase
糖含量	1	0	

資料：FAO (2004).

2. GM 樹木の環境等への影響に関する論議

CBD (2007) (遺伝子組換え樹木が環境，文化，社会経済に及ぼす潜在的影響—森林行動プログラム詳細レビューの背景文書) は，生物多様性条約締約国会議事務局が GM 樹木の潜在的影響に関する情報を様々な文献から収集しまとめている。ここでは，この文書の内容を紹介する。

穀物種のために開発された遺伝子組換えは、樹木のために開発された技術と類似しているから、GM 穀物に付随する環境影響その他の問題の多くは、GM 樹木にも当てはまる。しかしながら、異なる点もいくつか存在し、GM 樹木のもたらす影響に関する研究はまだまだ不十分な状況とされているようである。以下、環境、社会経済、文化という3点に分けてGM 樹木の潜在的影響（プラス面とマイナス面とがある）をめぐる様々な議論を概観する。

（1）環境への影響

GM による環境への影響についての議論を、導入される形質の種類ごとに紹介していくことにする。

1) リグニン含量の増減

リグニン含量を減らすことによるメリットとしてまず挙げられている点は、セルロースを加工するために必要な化学薬品やエネルギーの量が削減されるため、樹木が紙に加工しやすくなることである。その結果、工場から排出される汚染物質の量も減少する可能性がある。

逆に、リグニン含量を増やした樹木はカロリー値が高いため、燃料としての効率が良い。リグニン含量が増えるほど木材の強度は高まるので、理論的には、より丈夫な建設資材が開発できる。従って、リグニン含量を変化させることで、材木需要の充足が容易になり、天然の森林への圧力が軽減される可能性があるとされている。

一方で、樹木のリグニン含量の変更による悪影響の懸念も指摘されている。リグニン含量の減少による懸念の1つは、樹木の健全性が損なわれる恐れである。リグニン含量が減少すれば、害虫が植物を食べやすくなり、さらに樹木がウィルス性の病気に罹りやすくなる恐れがあるともいわれている。さらに、リグニン含量を減らすことによって分解が加速され、土壌の組成と化学的性質に影響が及ぶ可能性もあるとされている。（CBD, 2007, パラ 11-12）

2) 害虫抵抗性

害虫抵抗性の付与は、農作物と同様のアプローチで、Bt（バチルスチューリンゲンシス）菌がもつ害虫にとって毒性のある化学物質を生成する形質を樹木に与えるものであるが、そのメリットとしては、まず植林地の広い範囲に殺虫剤を散布する必要性が低下することである。Btの殺虫成分のターゲットは、特に樹木組織を栄養源とする生物に絞られるため、非害虫への曝露は減少するので、在来型殺虫剤を無差別に散布する場合と比べて、昆虫の多様性保全に役立つ可能性がある。また、絶滅の危機に瀕した（または絶滅が危惧される）樹木種に害虫抵抗性を付与し、森林の回復や保護を後押しすることができる。さらに、たとえばアオナガタムシなどの木に穴を開ける昆虫に対しては、殺虫剤を外側から散布しても効果が上がらないが、このような場合には樹木自体の細胞に耐性を持たせる遺伝子組

換えが有効な解決策となりうる。

一方で、懸念される点としては、殺虫剤耐性を持つ種の発達を促す可能性がある。また、森林に生息する植食性昆虫や受粉仲介者となる昆虫の数が減少し、昆虫数の減少は食物連鎖全体に大きな影響を及ぼし、捕食者－被食者の関係と生物学的多様性をさらに広範にわたって変化させる可能性がある。非標的草食生物（マイナーな害虫種）への影響、さらに草食生物の組織を餌にする食虫類肉食類への影響も懸念材料としてあげられる。

害虫抵抗性は、一種類の害虫を抑制する一方で、二次的害虫の増加を促す可能性があるという点も指摘されている。また、昆虫は土壌の構成や分解において重要な役割を果たすため、腐食した植物に昆虫への毒性が残っていた場合には、土壌の構成や昆虫による分解に影響が及ぶ可能性がある。害虫抵抗性を持つ樹木から排出された毒性物質が根系を通じて森林の土壌に浸出する恐れも懸念されている。（同上パラ 13-15）

3) 除草剤耐性

作物と類似の議論がある。環境的メリットとしては、特に除草剤耐性によって、植樹林に比較的無害な広域スペクトル（広範囲の種類に有効）の除草剤の散布が可能になり、複数の除草剤処理を行う必要がなくなることが考えられる。農業システムと比べた森林システム特有のメリットは、除草剤散布を毎年継続して行わず、森林確立の最初の数年のみに限定できるという点である。

除草剤耐性樹木の環境リスクとしては、特定の除草剤の使用を促進し、除草剤抵抗性を示す雑草のバイオタイプの淘汰圧を高めるだけでなく、広域スペクトルの除草剤の使用に拍車をかける可能性がある。害虫抵抗性を有する樹木と同様に、広域スペクトルの除草剤を使用することによって最終的に除草剤への抵抗性を示す植物のバイオタイプが発達する可能性があることも指摘される。（同上パラ 16-17）

4) 環境ストレス耐性、高生産性

非生物的ストレス耐性の高い樹木は、生存可能性を高めることができ、汚染土壌の修復に使用することが可能になるというメリットがある。また、生産力を高めるように樹木の遺伝子を組換えることによって収穫率の高い植林地が形成されるため、原生林を伐採する必要性が低下し、これらの場所で生物学的多様性が維持されると推定される。

一方、いくつかの懸念も指摘されている。樹木の環境ストレス適応力を高めることによって、競合において優位性を高める樹木が現れ、生物学的多様性が失われる恐れがある。その上、高い回復力を与える遺伝子が遺伝子の水平的移動または他の媒介動物を通じて抜け出し、影響を受けた野生種が競合において優位性を高める恐れもあるとされる。（同上パラ 18-19）

5) 遺伝子移動の懸念

新規の遺伝物質が野生遺伝子プールに抜け出す可能性が懸念されている。これは、受粉

または遺伝子組換え有機体と野生類縁種との交配を通じた導入遺伝子の移動などの形で起こりうる。樹木の場合、種子や花粉は移動性が非常に高く、また異形交配可能な野生類縁種が至近距離にあるために、GM 樹木が一旦繁殖能力をもつと、高レベルの遺伝子封じ込めはほとんど不可能になると指摘される。交雑する植物の遺伝子プール全体における当該単一遺伝子の持続性にもよるが、回復力または昆虫／除草剤耐性の強化といった導入遺伝子形質が野生遺伝子プールに入り込んだ場合には、多大な潜在的環境影響が生じる可能性があるという指摘もある。

組換え遺伝子の拡散を防止するため、花粉の生成を阻害するか、または樹木の開花を防止することが提案されている。また、花粉が生成される前に樹木を伐採することができるように、ライフサイクルの中で成熟期に達する時期を遅らせるように樹木を設計する方法もある。

ただし、これらの方法にも次のような問題が指摘される。花粉と花をなくすことで果実や堅果の生成が抑制されるため、食物網のかなりの部分が阻害されるという指摘がなされている。たとえば、テーダマツなどのマツの木の実が食べられなくなれば、チャガシラヒメゴジュウカラなどの種は、重要な食物源を奪われることになる。さらに、計画的不稔や再生前の樹木伐採は、栄養生殖など、無性生殖による組換え物質の移転には効果がない。ヤナギ科ヤマナラシ属(ポプラ)は、折れた枝、小枝からでも再生可能である。もっとも懸念されているのは、計画的不稔の対象となる遺伝子（いわゆるターミネーター遺伝子）が野生の遺伝子プールに抜け出した場合、環境への潜在的影響は深刻になりうるという点である。さらに、現在の GM 樹木に対する理解、実施されたゲノム研究、技術的研究のレベルから見て、GM 樹木のもっとも効果的な封じ込め方法を判断することも、これまでに開発された方法の信頼性を判断することも現状では不可能であるとされる。(同上パラ 21-23)

6) 全般的な不確実性

体細胞変異が樹木異常の発現を引き起こす恐れがあること、生態系に新しい遺伝子形質が入り込むことによって、これらの形質を受け入れた生態系に影響が及ぶ可能性があることも指摘されている。

以上の様々な環境影響について見てきたが、これらの懸念を打ち消すような研究成果も発表されている。

いずれにせよ、農作物とは違い、樹木は寿命が長く、繁殖サイクルを完了するまでには長い時間が必要である。従って、GM 樹木の研究は、数年間にわたるモニタリングが必要であり、農作物より長期間、樹木を環境の中に置かなければならない。しかしながら、農作物と比べて GM 樹木の影響を判断するための実験はかなり少なく、さらに、森林樹木とその環境との相互関係は一般に、農作物と環境の関係ほどよく知られておらず、広範囲にわたる不確実性がつきまとっているのが現状である。(同上パラ 24)

(2) 文化への影響

GM 樹木の文化への影響に関して、プラス影響として挙げられるのは、たとえば病気によって減少したアメリカンチェストナット (*Castanea dentata*) やアメリカンエルク (*Ulmus americana*) などの文化的に重要な樹木種の保護と保全である。樹木は寿命が長いこと、農作物の耐病性及び害虫抵抗性を高めるために用いられる伝統的な育種方法を森林に適用することは難しいことが背景にある。

マイナス影響としては、遺伝子組換え体と非組換え体の競合が高まった結果、文化的に重要な種の消失が起きることが考えられる。

いずれにせよ、この分野においてはほとんど研究が行われておらず、また、何がプラス影響で何がマイナス影響かの判断はしばしば主観的な問題であることから、GM 樹木の文化的影響は定量化が難しいとされている。(同上パラ 25-26)

(3) 社会経済的影響

1) リグニン含量の変化

まず、リグニン含量を抑えることによるプラス影響は、加工に必要なインプット(化学薬品とエネルギー)は削減され、パルプ化効率が高まる結果、経済的利益につながる。逆に、リグニン含量を増やすことにより、材木の密度が高まり、最終的に高品質、高価値の木製品が得られる。一方、マイナス影響として挙げられるのは、樹木のリグニンを操作することが樹木の健全性に悪影響を及ぼし、生産性の低下を招くことがありうるとされる。(同上パラ 28-29)

2) 害虫抵抗性・除草剤耐性・耐病性・環境ストレス耐性

害虫抵抗性を持つ樹木は、樹木の生存能力を高め、殺虫剤の必要量を減少させることにより、樹木生産に伴うインプットコストの削減をもたらす可能性がある。除草剤耐性を持つ樹木の利用により、生産者は、幾度もの除草剤散布や耕起といった費用のかかる在来型除草法を採用せずに済むようになる。耐病性樹木も、生産性の向上と、賞味期限が長く、より安全で、栄養価の高い食品の開発につながる可能性がある。

環境ストレス耐性の付与により、これまでは生育不可能だった土壌で樹木を栽培できるようになる。汚染土壌のファイトレメディエーションに樹木を利用できるようになり、本来なら利用できなかった土地を、費用効率の高い方法で再生できるようになる。さらに、大気汚染、土壌汚染に対して耐性を示す樹木を用い、特に都市環境において投資利益を約束するとも指摘される。加えて、経済的に価値の高い種の遺伝子を組換え、従来の生育地以外の場所で生育できるようにすることによって、生産面積を広げることができる。

一方、耐性の強い害虫種の進化が促され、害虫の大発生を抑えるためのコストが増大する可能性が、経済的懸念の1つとして指摘される。(同上パラ 30-32)

3) 改良に要する期間の短縮

標準的な交雑育種は、長い期間を必要とするが、遺伝子工学を利用することによって、

品種改良の結果がより早く出現できるようになり、生育時間が短縮されるという面で経済的メリットをもたらす可能性がある。（同上パラ 33）

4) その他の問題点

以上の他、GM 樹木の利用に関する経済面での一般的問題点として、たとえば、生産性の高い植林地の利用が、非 GM 樹木または天然林の社会的、経済的価値を低下させ、天然林から GM 樹木への転換を活発化させる可能性が指摘される。もう 1 つ、GM 樹木はかなり高コストであるため、GM 樹木が民間部門の特定の関係者に利益をもたらす一方で、貧困層はますます社会的に取り残されるという懸念が指摘される。（同上パラ 34）

(4) まとめ

CBD (2007)は、次のように結論づけている。GM 樹木の潜在的影響を評価するためには、たとえば大規模な野外試験により長距離に亘るモニタリング調査が必要である（たとえばマツの花粉は平均 50～100 メートル移動するが、最長移動距離は 600 キロメートルに達する）が、現時点でそのような調査は行われていないうえに、多くの国では、こうした調査は許可されていない。このように、必要な科学的データが現在のところは入手不能であることから、GM 樹木の利用に付随する環境、文化、社会経済への潜在的影響について明確な結論を下すことは不可能である。多くの専門家が、GM 樹木の利用を取り巻く科学的不確実性を考慮した上で、GM 樹木の利用を検討する際には慎重なアプローチをとるべきだと指摘している（同上パラ 44, 45）。

このように、GM 樹木に付随する多くの問題は、今後の取組と調査が待たれるところとなっている。

[引用文献]

CBD (2007), *The potential environmental, cultural and socio-economic impacts of GMnetically modified trees, Background document to the in-depth review of the forest programme of work*, UNEP/CBD/SBSTTA/13/INF/6, 5 December 2007

FAO (2004). *Preliminary review of biotechnology in forestry, including GMnetic modification*. Forest GMnetic Resources Working Paper FGR/59E. Forest5 Resources Development Service, Forest Resource Division. Rome, Italy.

[謝辞]

本章の 1 で紹介した FAO(2004)の内容の把握・整理に当たっては、大江馨さん（筑波大学大学院人文社会科学研究科博士課程）にお世話になった。御礼申し上げます。