

植物を使った地球環境浄化は可能か

森林圈遺伝子統御分野 矢崎一史

1. はじめに

20 世紀における人間活動の発展は、生活の豊かさの反面で地球環境の悪化をもたらした。悪化した環境は地球上広くに広がっており、大気中では NO_x、オゾン、CO₂ などが問題となっており、水質環境中ではハロゲン化炭化水素、富栄養化による汚濁、環境ホルモン類などが、また土壌環境中では内分泌かく乱物質やダイオキシンなどの有機化合物が大きな社会問題とされている。これら様々な汚染のうち、分解解毒することができないため非常に厄介とされている汚染物質に有害重金属がある。重金属による汚染は水や土壌環境中に存在し、比較的低濃度であっても非常に広範囲に拡散しているため、農作物などの食物中に吸収された後濃縮され、結果としてそれを食べる人間や家畜に甚大な被害を引き起こす。現在、全地球レベルで早急に解決すべき問題とされている環境汚染の一つである。特に、ここ日本では米が主食とされ、米は自給可能な唯一の穀物という認識が浸透しているところであるが、その日本産米に比較的高濃度のカドミウムが含まれているという大問題を聞いたことがある人も多いだろう。カドミウムなど重金属は、農薬のような有機化合物と異なり、それ以上分解して無毒な物質に変換することができない。一度広がってしまったこの分解不能な汚染物質を、どうやったら浄化することができるのだろうか。

2. 植物と重金属

カドミウムなどの重金属は、もちろん植物にとっても基本的には有害である。しかし、一口に「有害」とは言っても、問題となるのはその「程度」である。例えば、米にカドミウムが混入してしまうというのは、見方を変えればカドミウムがある程度存在していても、イネという植物は正常に実を付けてしまうということを意味している。もしイネが低濃度の重金属で障害を受けるとするならば、不健康なイネができるはずである。ところが、実際には少々カドミウムが入っていてもイネは見た目どうもない。どうもないから収穫され、基準値さえクリアしていれば売り物となる。しかし人間にとって米に混入したカドミウムは有毒である。つまり、植物は人間に比べてカドミウムに対する感受性が低い、言葉を変えると「カドミウムに強い」からこの様な問題が生じるのである。

因みに厚生労働省国立医薬品食品衛生研究所は、1977 年から 2001 年度にわたり日常食の汚染物質の摂取量調査を行っており、2001 年度の調査結果によれば、日本人の日常食からのカドミウムの摂取量は 1 日 29.3 mg で、この 10 年間ほとんど変わっていないということである。一方で、このカドミウムの摂取量を WHO などの合同食品添加物専門家会合で定めた暫定耐容摂取量と比較すると、カドミウムはヒトの体重 1 kg 当たり 1 週間 7 mg までと定められていることから、体重 50kg の人は 1 日 50mg が暫定耐容摂取量になる。つまり、日本人の食品からのカドミウム摂取量は、暫定耐容摂取量の約 6 割に当たる。なお日本では、主食であることから米からのカドミウム摂取は、食品からの全カドミウム摂取量の約 2 分の 1 にも相当する。

参考までに国際基準例がどうなっているかを見ると、予備的な段階では、米 1 kg 当たりに含まれるカドミウムの上限許容量を 0.2 mg (= 0.2ppm) とする案が提案されていた。しかし平成 16 年 3 月の食品添加物・汚染物質部会において、上限許容量を 0.4mg とする案に変更し、さらに検討が進められている。

3. 植物がカドミウムに強いなら・・・

カドミウム汚染土壌をきれいにする方法としてすぐ出てくるのが、「汚染土壌を削り落としてどこかに移動する」という解決策である。しかしそれでは、その汚染土壌をどこへやるのか、あるいは土をそのまま浄化したらいったい1トン当たりいくらのお金がかかるのか、といった諸問題が出てくる。狭い範囲で高濃度の汚染ならばそれも可能であろうが、現実の問題となる汚染は低濃度で広範囲であるから、結論としてやはりこれは実用的ではない。

この問題の解決法の一つとして、「植物がカドミウムに強いならば、いっそのこと植物を用いて環境浄化をしてしまおう」というアイデアが出てきた。これが、植物による環境浄化技術、「ファイトリメディエーション」である。図1にそのイメージ図を示す。ファイトリメディエーションは、植物の持つ本来の機能を利用した環境浄化法であり、実際にこの浄化プロセスを動かすのは太陽エネルギーである。基本的には水さえやってあげばいいので、経済的に安いというのがこの方法の一つのセールスポイントである。もちろんデメリットもあるが、これは講演で解説する。ここではファイトリメディエーションについてもう少し説明を加えたい。

琵琶湖の水質をきれいにしているものに、湖岸に生えている葦がある。このように、そこにあるがままの植物を使って環境がきれいになるならば言うことはない。しかし、自然の持つ浄化力にはおのずと限界があり、それを越えてしまったから現在の汚染が存在するのである。つまり汚染地区の多くでは、自然の自浄能力が既に越えられた状態にあると思われる。しかも今後さらに増え続ける人類とその経済活動の前で、環境汚染はその深刻さを深めこそすれ、天然の力をもってこれを軽減する方にはおそらく行かないだろう、というのが私の考えである。人口は増え続けても生存するための地球上のスペースは変わらない。しかも、人間誰しも高い質の暮らしをしたいのであり、それはそのまま環境に付加を与えることになる。

以上のような状況の中、現在の技術レベルをもって、重度のかつ複雑な汚染に対して植物を用いた浄化対策を考えるならば、やはり遺伝子操作技術の応用に頼らざるを得ない、というのが現実であろうと思う。植物の遺伝子操作に関しては、本講演会の後半で時間をとってできるだけ分かりやすく説明しようと思うが、環境汚染に対する遺伝子組換え植物を考える場合、まずどういった遺伝子を用いたらよいのかが問題となる。我々はその一つの方角性として、ABCトランスポータ遺伝子といわれる一群の遺伝子に着目した。

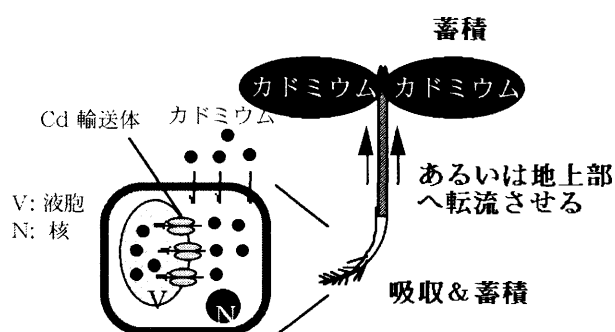


図1. カドミウム輸送体蛋白質を用いたファイトリメディエーション

4. ABC トランスポータとは

ABC トランスポータは、ATP の加水分解エネルギーを利用して、物質を膜を通して輸送する膜タンパク質の一大ファミリー (ABC スーパーファミリー) である。ABC とは、ATP-binding cassette の略で、分子内に ATP を結合するドメインを持っており、そのアミノ酸保存性が高いことからこのように呼ばれる。

図2の下には、その生体膜上の推定構造を示した。ここに表したように、ABC トランスポータの典型的なものは膜を10数回も貫通している蛋白質で、その一方に ABC の部分 (ヌクレオチド結合領域とも言われる) を有している。この構造において、左半分と右半分が互いに類似しているため、ちょうどユニットが2つタンデムに並んだようになっている。この膜貫通領域が束のように集まり、膜を通して物質を運ぶ役割を果たしていると考えられている。輸送のモデルを図2の上を示した。細胞の中にある物質 (星印で示した) が、このトランスポータ蛋白質に認識されると、その脇に結合して

いた ATP が加水分解され、そのエネルギーを使って、物質は膜の内側から外側に向かって運ばれる。ちょうど、ポンプがガチャガチャと、こちらから向こうへ物を運んでいるようなイメージをとらえてもらったら分かりやすいと思う。

因みに、ABC トランスポータは、バクテリアから人に至るまで、全ての生物に存在するとされ、様々な働きをしている。ヒトの例で有名なのは、癌細胞である種の ABC トランスポータが多く発現すると、細胞内に入ってくる抗癌剤をこれが全部外に汲み出してしまうため、薬が癌に効かなくなるといいう現象である。この場合の ABC トランスポータは癌治療を妨げる「悪役」になっているが、多くのヒト ABC トランスポータ分子は、生命活動が正常に働くように機能している。バクテリアなどでは、逆に栄養を細胞の中に取り込もうとするときにこの種のトランスポータが働くことが知られている。植物においては、ABC トランスポータの働きは未だ不明の部分が多いが、生体異物の解毒作用に加えて、生育や体の形を形成するプロセスに必須な植物ホルモンの輸送などに関与することが明らかにされつつある段階である（図 3）。今この領域は、植物研究の中でも最も競争が激しくなっている分野の一つでもある。

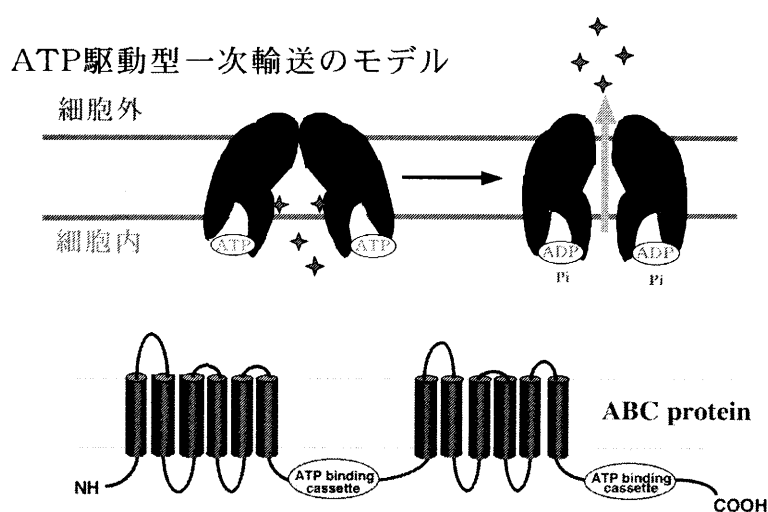


図 2. ABC タンパク質の構造と輸送のモデル

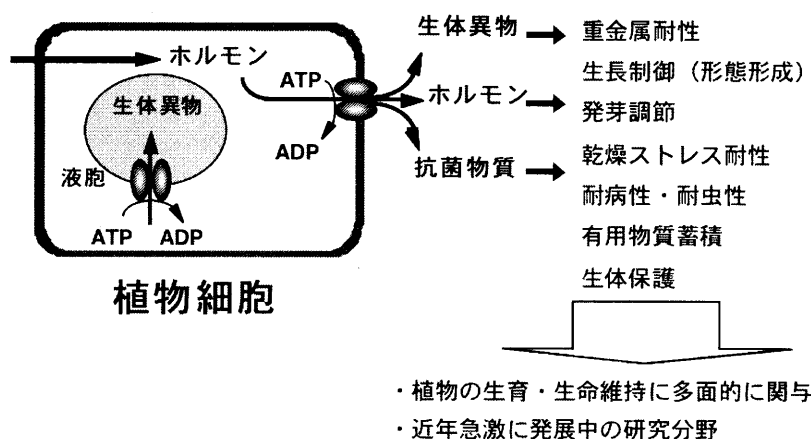


図 3. 植物における ABC トランスポータの役割

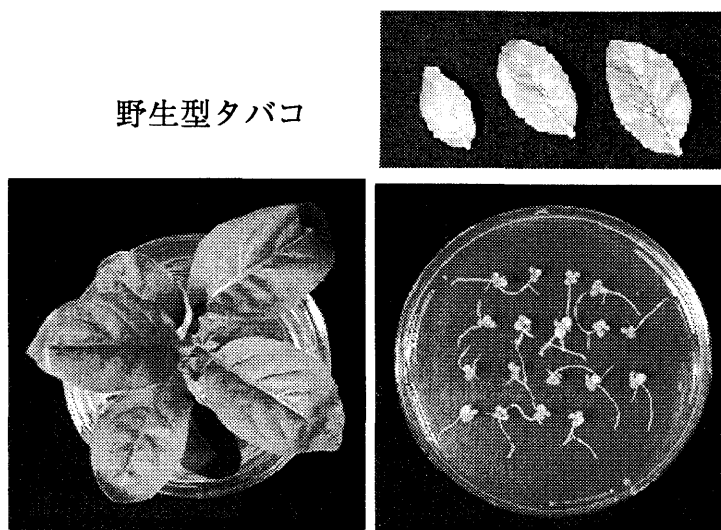
ABC トランスポータは種類が多く、その構造上の特徴からいくつかのグループに分けられている。我々は、ABC トランスポータの中に重金属を運ぶものがあることに注目した。これまでいくつかの分子で重金属の輸送が知られているが、最初我々が実験に用いたのは、MRP (multidrug resistance-associated protein) と呼ばれるグループに属する分子 hMRP1 である。このグループに属する ABC トランスポータは、グルタチオン依存的に有機物質だけでなくカドミウムも輸送することができるという特徴を持つ。グルタチオンは、体内に入ってきた異物を解毒するために、ヒトや植物が細胞内に普通に持っている化合物である。

5. ABC トランスポータを用いた環境浄化の試み

我々は、ABC トランスポータ遺伝子を用いて、植物で物質輸送を改変する技術「輸送工学」により、環境浄化ができないか試みた。つまり、重金属を運べる ABC トランスポータ蛋白を植物細胞で発現させれば、それがカドミウムの組み込をする「分子ポンプ」として機能し、水質および土壌環境中に存在するカドミウムを吸収除去する植物を作成することができるだろう、というのが基本的な概念である。しかも、この ABC トランスポータはカドミウム以外の重金属や有害有機物質をも輸送することができる。一般に遺伝子操作によるファイトリメディエーションでは、単一の汚染に対しては対応できても複合汚染には適さないという弱点が指摘されている。本研究ではこの特性を利用して、ABC トランスポータ遺伝子を用いたファイトリメディエーションにより、複合汚染を浄化できる植物の創出を試みた。うまく働けば、有機系有害物質である PCB やダイオキシンのような汚染物質に対しても、この形質転換植物は浄化能力があるかもしれないとの可能性も考えてのことである。

遺伝子を導入するに当たっては、どの植物を使うかを考えた。ホスト植物としては、最初の試みであるため、形質転換や膜分画の容易なタバコをモデルに選択し、hMRP1 遺伝子導入タバコを作出した。遺伝子レベルの解析をしたところ、実際にタバコに導入した hMRP1 遺伝子はきちんと発現していた。また哺乳類の hMRP1 蛋白質が期待通りタバコ細胞の液胞膜に存在することを確認した。そのタバコの様子を示した写真が図 4 である。

野生型タバコ



遺伝子組換えタバコ

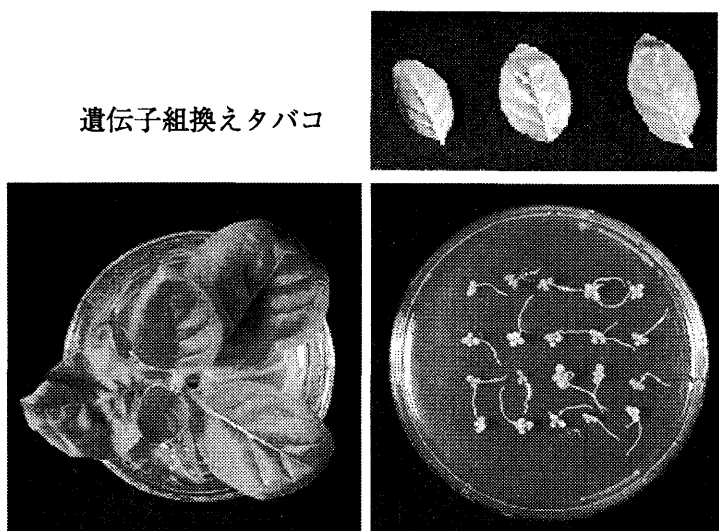


図 4. ABC トランスポータ遺伝子の導入されたタバコ

写真で示す通り、発芽の様子、植物体の形、葉の数、生長の度合いなど、外見的に野生型のタバコと全く変わらない組換えタバコができた。この hMRP1 を発現しているタバコの培養細胞を用いて、カドミウム耐性を調べた。すると、野生株に比べて、形質転換タバコはカドミウムに耐性があること、しかも細胞の中に野生株より効率良くカドミウムを蓄積できることが明らかとなった。

次いで、有機物質に対してはどうであろうかと考え、DNA の複製阻害をする薬剤であるダウノルビシンを与えてみた。すると、この hMRP1 発現タバコは、ダウノルビシンに対しても高い耐性を示し、やはりこの薬剤を細胞の中、特に液胞の中に蓄積することが認められた。図 5 は、ダウノルビシンがオレンジ色の蛍光を持つことを利用して、蛍光顕微鏡で観察したタバコ細胞の写真である。細胞の中にダウノルビシンの蛍光がたまっているのが認められる。

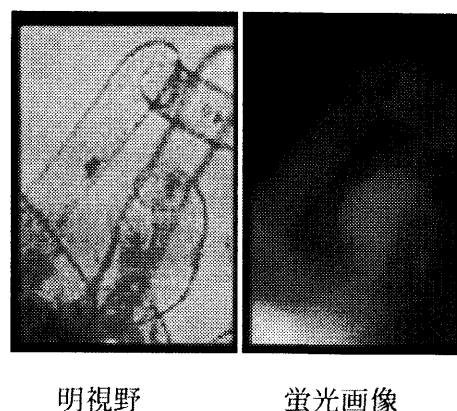


図 5. ダウノルビシンは hMRP1 発現タバコの液胞に貯まる

6. カドミウムを蓄積した植物をどうするか

以上のように、MRP1 発現タバコ培養細胞は、ダウノルビシン等の薬剤や重金属であるカドミウムに対して耐性を示したが、この時培地に残存するカドミウム含量を追跡したところ、培地のカドミウムをより効率良く吸収できることが示された。このことは hMRP1 が分子ポンプとして細胞外のカドミウムを液胞内に効率良く運んでいることを示している。今後は再分化植物個体を用い、モデル土壌におけるカドミウムの吸収効率を調べる予定であるが、これがうまく行ったらとして、ではカドミウムを吸収した植物をどうするのであろうか。

重金属は分解による解毒が不可能であるため、一度回収したら、酸などで安定化させて保管するか、再利用するしか方法がないと思われる。図 6 には、重金属を蓄積した植物を回収し、重金属の再利用化を想定した場合のスキームを示している。もちろんコスト面から考えれば、現時点では少なくとも、重金属の回収再利用にメリットはない。しかし、私は経済原理に反してでも、植物から重金属を回収する技術確立し、リサイクルする方向で研究は進められねばならないと考える。植物を利用した重金属の生体濃縮はコストがかからない。この様に植物は低濃度だが広範囲の汚染土壌から低コストで重金属を回収できる点で、環境浄化に資することができると期待している。

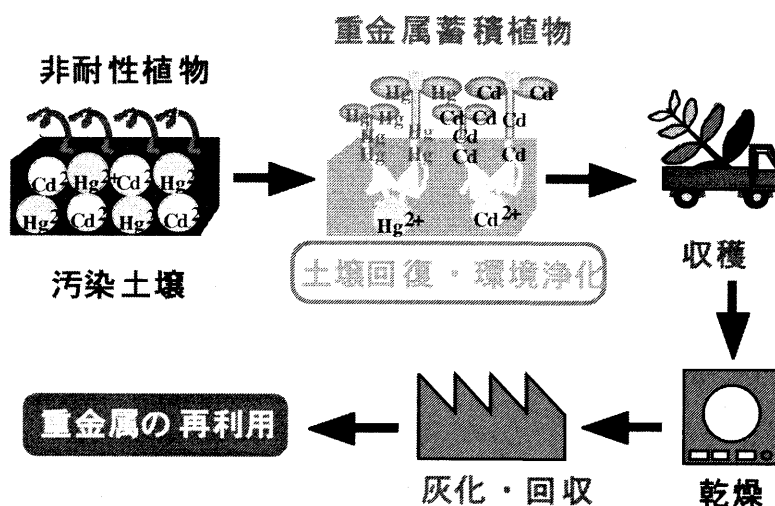
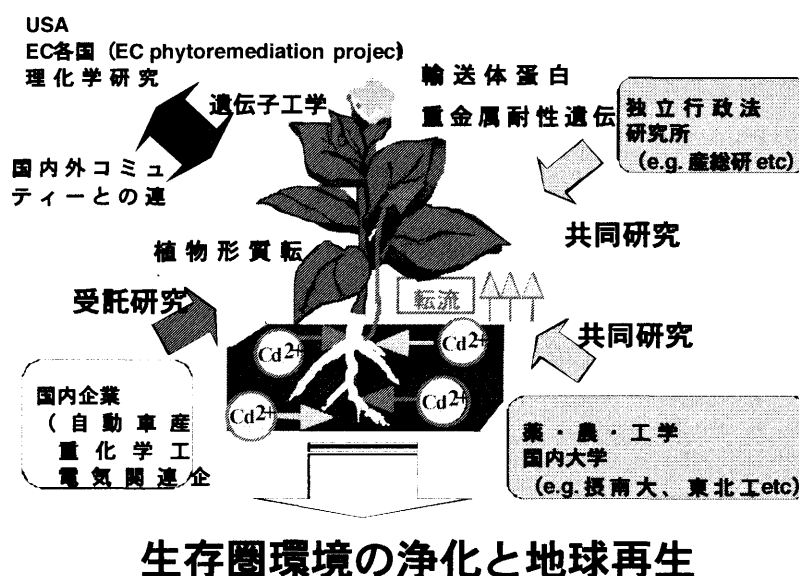


図 6. 環境浄化植物と金属のリサイクル

7. 人類と地球の共存に向けて

環境浄化型植物の作出研究は、まだその緒についたばかりである。実用化に即したファイトリメディエーションにおいては、さらに用いるトランスポーター遺伝子の種類、発現プロモータの改変やホスト植物の選択など様々な発展性があり、非常に大きな研究分野へと広がるポテンシャルを有している。ただし、植物を用いる限り、環境の浄化には、それなりの時間がかかることを理解してもらわねばならない。人間が100数十年かけて汚してきた地球である。その浄化に時間がかかるのはやむを得ないと考えるべきであろう。大切なのは浄化活動を継続することである。21世紀の生命科学研究において、環境問題は益々重要な位置を占めるようになると予想される。我々も本領域研究の更なる発展に寄与していきたい。



参考文献

- 1) 矢崎一史：高等植物におけるABC蛋白質スーパーファミリー：その多彩なメンバーと機能ポテンシャル バイオサイエンスとインダストリー, Vol. 60, p. 17-22 (2002).
- 2) 矢崎一史：ABCトランスポーター、「植物の膜輸送システム 植物細胞工学シリーズ18」（監修：加藤 潔、島崎研一郎、前島正義、三村徹郎）、秀潤社p. 119-128 (2003)
- 3) 土反伸和、矢崎一史：植物ABCタンパク質スーパーファミリーの多様性生化学, 印刷中
- 4) N. Shitan, I. Bazin, K. Dan, K. Obata, K. Kigawa, K. Ueda, F. Sato, C. Forestier and K. Yazaki: Involvement of CjMDR1, a plant MDR-type ABC protein, in alkaloid transport in *Coptis japonica*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Vol. 100, p. 751-756 (2003).
- 5) K. Terasaka, K. Sakai, F. Sato, H. Yamamoto and K. Yazaki: *Thalictrum minus* cell cultures and ABC-transporter. Phytochemistry, Vol. 62, p. 483-489 (2003).
- 6) K. Yazaki: Natural Products and Metabolites, The Handbook on Plant Biotechnology (Edited by Christou, P. and Klee, H), John Wiley & Sons, P. 811-857 (2004).