

総説論文

ファイトレメディエーションによる環境修復の新展開 New progress in Environmental Biotechnology using phytoremediation

森川 弘道*, 高橋 美佐, 河村 義史

HIROMICHI MORIKAWA, MISA TAKAHASHI and YOSHIFUMI KAWAMURA

広島大学大学院理学研究科, 数理分子生命理学専攻 〒739-8526 広島県東広島市鏡山1-3-1

* TEL: 0824-24-7449 FAX: 0824-24-0749

* E-mail: hmorikaw@sci.hiroshima-u.ac.jp

Department of Mathematical and Life Sciences, Graduate School of Science, Hiroshima University,
1-3-1 Kagamiyama Higashi-Hiroshima 739-8526, Japan

キーワード: 植物, 大気汚染, 土壌汚染, 水汚染, ファイトレメディエーション

Key words: Plants, air pollution, soil pollution, water pollution, phytoremediation

はじめに

ファイトレメディエーションとは、英語で、phytoremediation¹⁾である。phyto はギリシャ語で植物を意味し、remediation はラテン語で修復を意味する。つまり、植物利用による環境修復である。このコンセプト自体は、目新しいものではない。すなわち、わが国には、甲子園のツタで大気を浄化したり、ヨシ林で琵琶湖の水を浄化するなどの概念が古くから存在しているからである。現代ファイトレメディエーションは、このような植物の環境修復作用の仕組みや遺伝子や微生物などの相互作用についての理解を深め、この考えを深化・発展させ、多様な環境汚染問題解決のためのサイエンスと技術の発展を図ることである。

ファイトレメを巡る世界の動きは、活発である。昨年京都で環境バイオテクノロジーに関する国際会議 (ISEB 2000) が開かれ、それと前後してファイトレメディエーションに関する国際シンポジウムがいくつか行われた。EU/COST ACTION 主催の“Phytoremediation 2000-State of the Art in Europe” (クレタ島, 2000年4月), 国際土壌部学会主催の“SOILREM 2000” (中国杭州, 2000年10月), “ISEB2001 Phytoremediation” (ライプツィヒ, 本年5月) などである。来年には、ISEB2002 がメキシコ・ベラクルス市で開かれる。ファイトレメ研究は、米国, EU を中心に、中国, タイ, ベトナムなどアジア諸国でも精力的にすすめられている。

環境汚染問題の問題点

環境汚染問題で重要なのは、汚染物質を出さない技術の開発や法的規制の強化である。また、環境中にでてしまった汚染物質の除去問題も大きな問題である。我々が本稿で問題とする課題は後者である。この「でてしまった」ものについて対処するには、少なくとも以下に述べ

る2つの課題がある。つまり、「出てしまったものをどう処理するか」と「汚染物は移動する」ことである。

たとえば、東京の大気環境の再生を図る最も端的な方法は、そっくり大気を入れ換えることであろう。N. de Nevers²⁾ は、ロスアンジェルス盆地の空気を風速 10 m/秒 (小型の台風なみの速度) で毎日 80 km 離れたパームスプリング市に換気 (排気) する (ただしパームスプリング市の住民が苦情を言わないと仮定!) には、直径 3000 m の換気パイプが 80 km にわたって必要であると「試算」している。このような巨大パイプは人類が建築可能な最大建造物の大きさの6倍以上であり、その建設は現代の工学技術では無理であり、環境問題解決には、エミッション自体を無くさねばならないと de Nevers 結んでいる。

この試算を私なりに解釈すると、「でてしまった汚染」つまり大きなエントロピーを持つ汚染物の問題解決を図るには、エネルギー的/コスト的/また技術的にこの「巨大パイプ」と等価な「何か」を作らなければならないことを de Nevers は教えていると思う。同時に、環境中に広く拡散した汚染の集中処理は、このような「巨大パイプ」の建設を図るのと同じで不可能であるということを de Nevers の試算は教えている。

このような環境中にでてしまった汚染の解決には、太陽エネルギーを利用して環境浄化する能力を備え、また自己増殖する性質も備えている植物を利用するのが最も実現性のある考えであろうと我々は考えている。この植物は、まず環境汚染に強くなければならないが、耐性であるだけでは不十分で、汚染物質を効率よく分解し、できればそれを吸って栄養源として生育するような植物、つまり汚染物質が“好きな”植物が望ましいと考えている (図1)³⁾。

環境汚染は移動・拡散することも環境汚染問題の問題点である。ある土地が重金属や TCE で汚染されていたとすると、その所有者だけの問題だけにとどまらない。

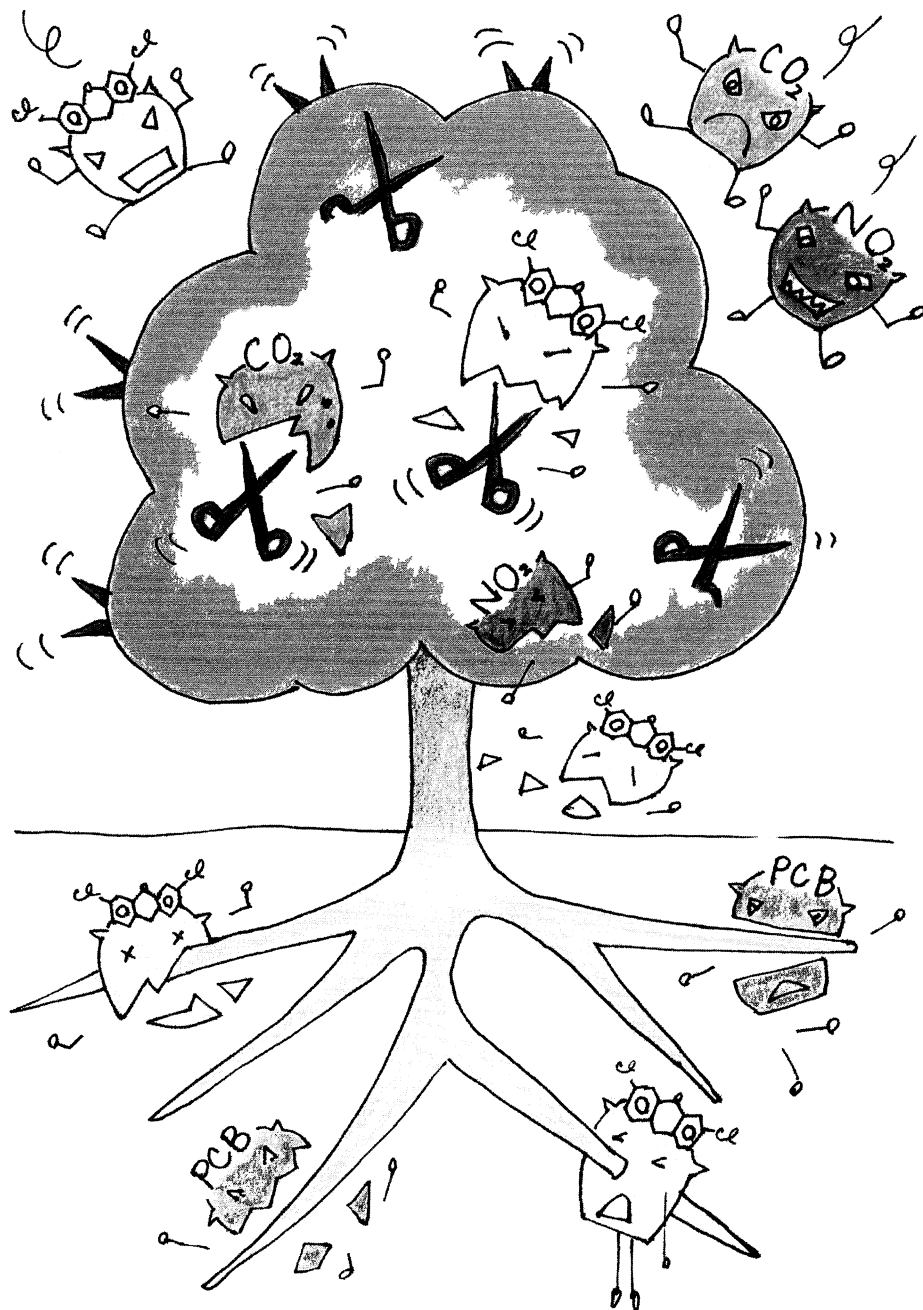


図1. 環境汚染を好む植物を育成しよう.

何故なら、その汚染物質はいずれ地下に浸透し地下水脈に達し、地下水の下流域全体にその汚染が広がることになるからである。また、ディーゼル車の微粒子や窒素酸化物、あるいは焼却炉や野焼きから発生したダイオキシンは当然発生源の周囲一体に拡散する。また、都市部の重金属や有機物汚染は河川に流れ込みいずれ海洋に流れ、港の汚泥に沈積する。大都会ニューヨーク市の過去百年間の単位面積当たりの鉛（おそらくペンキ由来）の沈着量は周辺部に比べ50倍も高いといわれる。また、ニューヨーク港堆積物中の鉛は非汚染土に比べ5-7倍高い。さらに、同市の水路と大気には、PCB 等有機塩素化合物が異常に多いといわれる⁴⁾。かかる状況は世界の大都会に共通の課題である。

ファイトレメは面白い

高速道路を車で走ると、排気ガスにまみれた植物が真っ黒になりながら「元気」に生育しているのをよく見かける。植物が排気ガスを「好き」なのか、辟易しているかは定かではない。正直なところ、植物の大半は困っていると思う。排気ガスに含まれる NOx や SOx, 揮発性有機炭化水素 (volatile organic compounds VOC) やそれに付随して生成するオゾンなどの光化学オキシダントなどは、ヒトや動物と同じように植物にとっても大い被害である。また、浮遊粒子 (SPM) によって、植物の呼吸器である気孔が塞がれるなどの害も蒙っていることであろう。しかし、他方、植物ゲノムは長い進化の歴史を持っており、植物は環境に対する大きな適応性と進化能

力を備えており、極悪環境に対応してその状況を克服するにふさわしい遺伝子を発現させ、生き延び作戦を果敢に展開しているものと我々は考えている。事実、植物の二酸化窒素同化能を多くの植物で調べると、後に述べるように、三桁も異なった⁹⁾。この結果から考えると、植物の中には、「排ガスを好む植物」もいると考えてもおかしくない^{6,7)}。その様な植物は、排ガス処理や大気環境修復に大いに役立つであろう。「大切なのは世界を解釈することではなく、変革することである」との信念のもとに、我々は、過去十年ほど植物の環境修復能とそれを決める遺伝子について、研究を重ねてきた。ここでは、まず現段階でのファイトレメディエーション技術にはどんなものがあるか、どんなに面白いのか、どこが面白いのかについて、どんな夢があるかなどについて紹介する。

ファイトレメの概要

物理化学的または工学的な環境修復技術と比べて、ファイトレメの利点は、修復に必要なエネルギーを太陽光から取り入れること、修復装置（修復素子）たる植物の根や葉や茎は植物自体の遺伝子発現の繰り返しにより、自己再生可能であることである。世界の人口は六十億をすでに越えており、今世紀は、環境汚染はもとより資源不足、エネルギー不足となることは必至である。植物による地球環境の修復は、今世紀における環境修復の切り札となることは間違いない。また、社会に受け入れられやすい、すなわちパブリックアクセプタンス（PA）を得やすいことも植物利用の利点であろう。環境修復事業は技術面もさることながら、PA が得られなければ、技術開発自身難しいわけで、PA 問題は重要である。さらに大気や、広範囲に渡る（また長期間に渡る）土や水環境の「修復・保全・維持」には植物利用は有効である。また、微生物を用いるバイオレメディエーションでは汚染サイトに導入した有用微生物が、土着の微生物にキックアウトされやすいとの課題がある。植物根圏の微生物フローラは、植物が規定するといわれる⁸⁾。故に、この

点においても、植物（植物根圏とマイコライザの共生関係を利用する方法を含む）は優れている。他方、ファイトレメの欠点としては、効果が出るまでに一般に時間がかかり即効型ではないこと、集中的な処理には適さないことなどである。

ファイトレメのターゲットは、土、水、空気であるが、目下のファイトレメのホットなターゲットは、石油による汚染 [polyaromatic hydrocarbon (PAH) や total petroleum hydrocarbon (TPH)] や TCE (trichloroethylene) と重金属による土壌汚染や地下水汚染である。米国において軍事基地や工場（跡地）における土壌汚染や地下水汚染の実状が公表され、その修復が積極的に試みられている。他方、大気汚染の主な課題としては、窒素酸化物、オゾン、ダイオキシンなどがあるが、大気環境修復の対象の範囲は広く、空間的範囲の特定が難しいこと、効果を評価することが難しいことなどのために、ベンチャービジネスの対象にはなりにくいと言う問題がある。しかし、大気汚染問題の深刻さは土壌や地下水汚染と同じくらいまたそれ以上であり、大気環境のファイトレメは大切な課題である。

植物利用による環境汚染問題解決策について、環境汚染が拡散しないようにとじこめる技術と汚染物質を積極的に分解/除去する技術とに区別する考えがだされている。その場合、前者は、ファイトテクノロジー⁹⁾と呼ばれ、後者は、ファイトレメディエーション¹⁾と呼ばれる。

ファイトレメの基礎となる植物の作用

表1にファイトレメやファイトテクノロジーの基礎となる植物の生理機能についてまとめる⁹⁾。

- 1) ファイトスタビライゼーション (Phytostabilization): 根ゾーン、根細胞表面、根細胞内に無機、有機物コンタミナントを沈殿・吸収・固定化する作用。環境への拡散を防ぐことが目的で利用される、汚染物質の除去・分解が目的ではない。
- 2) ライゾデグラデーション (Rhizodegradation): 根圏

表1. ファイトレメ/ファイトテクで機能する植物の様々な作用と能力⁹⁾.

ファイトスタビライゼーション (Phytostabilization)	根ゾーン、根細胞表面、根細胞内に無機、有機物コンタミナントを沈殿・吸収・固定化する方法。環境への拡散を防ぐことが目的で、汚染物質の除去・分解が目的ではない。
ライゾデグラデーション (Rhizodegradation)	根圏植物体外における TPH, PAH, PCB などの分解。植物の分泌する酵素と根圏微生物の作用。植物とマイコライザとの共生関係が重要。
ファイトアキュミュレーション (Phytoaccumulation)	Phytoextraction ともいわれる。無機、有機コンタミナントを植物体内へ蓄積。hyperaccumulator や好塩性植物による地上部への重金属や塩類の濃縮。根圏のマイコライザとの共生関係が重要。
ファイトデグラデーション (Phytodegradation)	Phytotransformation ともいわれる。無機、有機コンタミナントの植物による吸収分解。大気中の NO ₂ の吸収分解。デハロゲナーゼ、酸化酵素、ニトロゲナーゼ、ペルオキシダーゼなどが鍵酵素となる。
ファイトボラタイゼーション (Phytovolatilization)	植物が無機、有機コンタミナントを吸収、大気中に気化させる。セレン、水銀、TCE 等の浄化について報告例。
エバポトランスピレーション (Evapotranspiration)	蒸散流によって土壌中の水がポンプアップされる。水溶性の無機、有機汚染物質の除去。

植物体外における TPH, PAH, PCB などの分解。植物の分泌する酵素と根圏微生物の作用。植物とマイコライザとの共生関係が鍵を握る。

- 3) ファイトアキュミュレーション (Phytoaccumulation): Phytoextraction ともいわれる。無機, 有機コンタミネントを植物体内へ蓄積。hyperaccumulator や好塩性植物による地上部への重金属や塩類の濃縮。根圏のマイコライザとの共生関係が重要。
- 4) ファイトデグラデーション (Phytodegradation): Phytotransformation ともいわれる。無機, 有機コンタミネント (汚染物質) の植物による吸収分解。大気中の NO_2 の吸収分解。デハロゲナーゼ, 酸化酵素, ニトロゲナーゼ, ペルオキシダーゼなどが鍵酵素となる。
- 5) ファイトボラタイゼーション (Phytovolatilization): 植物が無機, 有機コンタミネントを吸収, 大気中に気化させる。セレン, 水銀, TCE 等の浄化について報告例。
- 6) エバポトランスピレーション (Evapotranspiration): 蒸散流によって土壤中の水がポンプアップされる。水溶性の無機, 有機コンタミネントの除去。

環境汚染物質を「好む」植物

植物を用いた環境修復を考える場合, 最も大きな特色は, 植物は環境汚染物質を「栄養源」として利用して生育する可能性があることである。大気汚染物質や環境ホルモンなどの化学物質は, ヒトや動物にとって有害この上ない物質であるが, 植物はヒトや動物とは異なる分解代謝機構を持っている場合がある。そのような植物の作用を使うと, 環境汚染物質の単なる除去にとどまらず, 汚染化学物質を積極的に利用した能動的な環境修復が可能となる。後に述べるように, 我々は, 窒素酸化物を唯一の窒素源として生育する「窒素酸化物を好む植物」の育成について, 研究を進めてきた。植物は, 窒素, 燐酸, カリを必須主要栄養素とするが, このうちの窒素分を植物は根から硝酸態窒素の形で吸収している。植物体内へ取りこまれた硝酸は硝酸還元酵素の作用で亜硝酸イオンとなり, 亜硝酸イオンは, 亜硝酸還元酵素の働きで, アンモニアに還元される。アンモニアは, グルタミン合成酵素とグルタミン酸合成酵素やその他のアミノ酸合成酵素の働きで, 種々のアミノ酸のアミノ基となる。ヒトも含めてすべての動物は, 基本的には, この植物が合成するアミノ酸を食物の形で取りこみ利用している。ところで, 植物の硝酸還元酵素を弱めたり, 欠損させると, 当然のことながら, 植物は硝酸還元ができなくなり, 根から吸収した硝酸を利用できなくなる。このとき, 葉から二酸化窒素を吸収すると二酸化窒素はかなりの部分が亜硝酸イオンとなる (植物体内に取りこまれた二酸化窒素は不均化反応で硝酸イオンと亜硝酸イオンを等量生成するとも言われるが, 我々の予備的な実験から大半が亜硝酸イオンに変換されると予想される)。植物は硝酸還元酵素を欠くが, 亜硝酸イオン還元酵素は持っているので, 二酸化窒素由来の亜硝酸イオンを窒素源として生育するはずである。我々は, この様な「二酸化窒素を好む植物」の育成を試みている^{6,7)}。

同様な考えは, 当然のことながら他の環境汚染物質についても考えられる。たとえば, 亜硫酸ガスを硫黄源とする「 SO_x を好む植物」の育成も大いに考えられる。また, 植物がダイオキシンや PCB を分解する機構については, ほとんど解明されていないのが現状だが, 将来, 植物における有機塩素化合物の脱塩素機構や芳香環の分解機構の理解が進むことは大いに予測される。そのような理解が進むにつれて, ダイオキシンや PCB を炭素源として「好む」植物, 「環境ホルモン物質を好む植物」の育成も大いに可能性がある。また, 重金属については, 重金属を大量に溜むような「重金属を好む植物」の育成は俄かには考えられないが, 後に述べる *Thlaspi goesingense* の如く植物乾燥重量の 1% にも達するニッケルを溜め込む植物も知られている。この種の植物の重金属蓄積/解毒機構や溜め込まれた重金属の生理作用は, ほとんど分かっていない。将来, これらの機構や作用の理解を目指した研究が急速に進められるだろう。そのような研究により, たとえば今まで知られていなかった植物細胞における重金属の新しい生理作用が発見されるかもしれない。また, そのような研究の展開の中で, 新しい「重金属を好む植物」の誕生もありえると思う。

ビル表面や高速道路壁面を緑化しよう (図 2)^{6,7)}

「必要は発明の母である」と言われるが, メトロポリタンシティにとって, もっとも必要なもののひとつは, ビルの表面で安全に生育し, CO_2 , NO_x , SO_x , 石油微粒子などを含む排気ガスを吸収浄化する植物の開発であろう。そのような技術開発を成功させるには, 植物サイドの研究とビルの材料や建築工学の立場からの研究の合流が不可欠であることは言うまでもない。「コンクリートの緑化」は近い将来の土木工学研究開発のターゲットであると言われる。また「壁面緑化」に関する実用的な開発研究がいくつか報告されている。しかし, どのような植物でコンクリートや壁面を緑化するかは, 植物サイドからの積極的なアプローチが強く望まれていると考える。そして, そのような技術にふさわしい植物遺伝子資源の開発, 遺伝子の開発を考える必要がある。

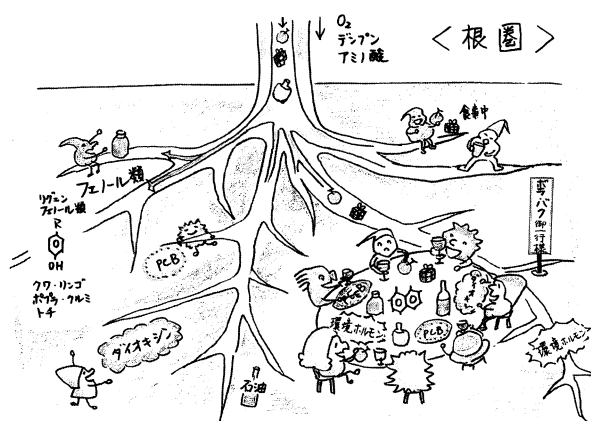


図 2. 植物根圏における微生物との共生。植物は微生物が安定に生活できる環境と生育に必要な酸素, 炭水化物, アミノ酸など栄養を提供し, 微生物は環境ホルモンなど難分解性物質を共代謝すると考えられている。

今世紀、食糧、エネルギー、環境危機のいわゆるトリレンマはますます深刻になるであろう。この中で、食糧については、たとえば、植物遺伝子操作技術を使った組み換え作物による食糧増産の研究は実用段階にある。また、エネルギーについては、デンブンの増産、アルコール化、十字科植物による重油代替油などいわゆる biofuel の研究が進んでいる。これらに対し、環境修復については、研究はそれほど進んでいないのが現状である。「宇宙船地球号」にはある程度の環境自浄能力がある。地表を被っている植物はその自浄機能を決める「素子」の一つであるが、この機能についてのトータルな理解が深まることは、この素子の能力の向上、ひいては、「地球号」の自浄能力を高めることにつながる。上述のようにファイトレメやファイトテクと言うことばが生まれ、これらの技術の実用的な利用が海外を中心に進められていることは、環境修復を考えるものを大いに勇気づける動きである。

ファイトレメ/ファイトテクで活躍する植物たち

(1) PCB や石油汚染を浄化する植物

オクラホマ大の J. Fletcher¹⁰⁾ は、約20年間放置されていたユニオンカーバイド社の産廃処理場の植生を調査した。この産廃処理場は、PAH（トータルで 20,000 ppm）や BTEX（ベンゼン、トルエン、エチルベンゼン、キシレン類）などで汚染している。この処理場内の植生は、周囲から進入・飛来した植物によりできたと考えられる。産廃処理場と周囲の植物を比べると処理場にはクワやバーミューダグラスが特徴的に多かった。また、クワの木直下の地表 60 cm の PAH 量は10-20%に減少していた。さらに、PAH 分解菌が根圏から単離された。Fletcher らは、クワ、ニセアカシア、リンゴなどは、根からフラボノイドなどフェノール化合物を分泌すること¹¹⁾、また、PCB 分解菌である *Alcaligenes eutrophus*, *Pseudomonas putida*, *Corynebacterium* sp. は、クワなどのつくるフェノール化合物を与えると成長が促進されること¹²⁾ を見出している。従って、これら PCB 分解菌がクワなどの根圏に集まり、難分解性環境ホルモンの一つである PCB をボランティア的に分解 (co-

metabolism) すると考えている^{13,14)}。この様に、植物の根の周囲（根圏という）には植物の分泌する炭水化物、有機酸、アミノ酸あるいは、酸素を「食べる」微生物が集まっている。根圏微生物は、その「お返し」として植物による水分やリン酸吸収を助けている。このような「持ちつ持たれつ」の関係を共生という。この共生関係が根圏での汚染物処理に重要である（図3）。

(2) 重金属/放射性元素を吸い上げる植物¹⁵⁾

鉛、銅、カドミウム、亜鉛、ニッケル、クロム、水銀など重金属による環境汚染は、世界各国で深刻な問題である。チェルノブイリ原発事故の後、¹³⁷Cs や ⁹⁰Sr など放射性元素をヒマワリに吸収させるプロジェクトが米国のファイトテック社（1999年エデンスペース・システムズ社に買収された、後述参照）により取り組みくまれている¹⁶⁾。メルボルン大植物学教授の Baker は世界中の重金属をよく吸収する植物を調査している。被子植物の約0.2%に相当する80科400種以上が、重金属を高濃度（乾燥重量の0.01-1%の金属）にため込む植物（hyperaccumulator と呼ばれる）である（表2）¹⁵⁾。アブラナ科の *Thlaspi goesingense* や *Thlaspi caerulescens* も hyperaccumulator である。*Thlaspi goesingense* は、乾燥植物体の約1%ものニッケルを蓄積するといわれる¹⁷⁾。また、ゼラニウムにはレモンなどの香りを放つものがあるが、よい香りのするゼラニウムは、鉛やカドミウムを沢山ため込むとのことである¹⁸⁾。また、ごく最近シダの一種が砒素を大量に蓄積することが報告された¹⁹⁾。シダ植物にも鉛やカドミウムなどを沢山ため込む植物が知られている。これらの植物がなぜ重金属に耐性でかつ高度に吸収するのか、その吸収、解毒、蓄積のメカニズムはほとんど分かっていない。取り込まれた重金属イオンが細胞内のファイトキレチン、リンゴ酸、クエン酸、ヒスチジンなどとキレート化合物を形成し、液胞内に貯蔵 (sequestering) されると考えられている。近年、hyperaccumulator のトランスポーターが精力的に研究されている。ニッケルの高度蓄積種である *T. goesingense* と非蓄積種の *T. arvense* を比べると、根におけるニッケルの取り込みには両者には差はなく、両方ともよく取り込むが、後者はニッケル耐性がないので、成長が抑制され死滅する。*T. goesingense* では、細胞内に取り込まれたニッケルイオン細胞質ではヒスチジンとの複合体を形成し、さらにクエン酸複合体に組み換えられて、液胞へ輸送され解毒されていると言われる¹⁷⁾。

表2. 重金属を高度にためる植物 (hyperaccumulator) のリスト¹⁵⁾.

金属名	基準値 葉の乾燥重量当たりの%	タクサ数	科の数
Cd	>0.01	1	1
Co	>0.1	28	11
Cu	>0.1	37	15
Pb	>0.1	14	6
Mn	>1.0	9	5
Ni	>0.1	317	37
Zn	>1.0	11	5

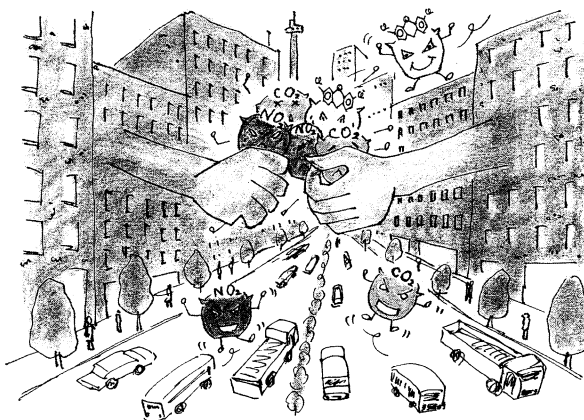


図3. NOx など大気汚染を好む植物でビルの表面を緑化しよう。

アブラナ科の仲間のインドカラシナ (*Brassica juncea*) やキク科のヒマワリが鉛汚染やウランの汚染の除去によく用いられる。これらの植物は、hyperaccumulator ではないが、大量のバイオマスを生産し、また、比較的沢山の重金属をため込むので、植物当りに吸収される金属の量が多いといわれる。インドカラシナは、ファイトテック社で多数の植物種 (2000種) から選抜されたものである。Baker らは、ニッケルを沢山ため込む植物 (木本植物が多い) を用いた「植物鉱山」を構想している。今後重金属をため込んだ植物の収穫後の処理法 (廃鉱に保存するなどが考案されている) や処理区での食物連鎖による生物濃縮の回避などが問題となる。重度の汚染土壌の場合や汚染物質が放射性同位元素である場合にはとにかく土壌から吸い上げることに大きな意味がある。

(3) 重金属を結合する植物ペプチド

真核生物における重金属耐性や恒常性の維持には、メタロチオネイン (MT), グルタチオン (GS), ファイトキレチン (PC) などの含硫ペプチドが関与していることが分かっている。MT は、(Cys-Xaa-Cys) モチーフを多く含むポリペプチド (4-8 kDa) で、その遺伝子はクローニングされている。GS は、トリペプチド (Glu-Cys-Gly) である。PC は、(Glu-Cys) $_n$ -Gly($n=2-8$) からなるオリゴペプチドで、ファイトキレチン合成酵素 (PCS) により作られる。PC をコードする遺伝子は存在せず、翻訳後 (posttranslationally) に生成するとされる。植物の PCS 酵素 (γ -glutamylcysteine dipeptidyl transpeptidase) は、ナデシコ科マンテマ属植物 (*Silene cucubalus*) の懸濁培養細胞から精製されていた²⁰⁾。遺伝子は yeast, *C. elegans* で知られていたが、植物遺伝子は、ごく最近シロイヌナズナ、コムギからクローニングされた²¹⁾。PCS を過剰発現させると植物が重金属耐性になるかどうかは、未知だが、植物への硫黄施肥を増やすと重金属耐性が高まることが指摘されているので、その可能性は高いと言えよう^{21,22,23)}。

(4) 水や揮発性有機物をポンプアップする植物

植物の蒸散 (evapotranspiration) 能力は、土壌からの水や有機化合物を除去する強力かつ安価な「ポンプ」として、実用的なファイトテックとして、注目されている。廃棄物を埋めた盛り土の上層部一面を被うように植物 (樹木または草本植物) を栽植し、雨水の廃棄物相への浸透防止、汚染物の拡散の防止を図るのである。ポプラ、ユーカリ、ヤナギなどは、1日当たり約 200 kg の水を蒸散するが、1トン以上の水を蒸散する場合もあるといわれる。これらの木は、地下 3-4 m まで根を張るが、10 m 近くまで根を伸ばす場合もあるとのことである⁹⁾。植物は太陽エネルギーを使った天然のポンプである。これだけの水を電気や機械を使ってポンプアップすると、何10倍ものコストや運転費がかかる。この方法は、単純ではあるが、数十年間あるいは百年単位で廃棄物の地下水への拡散を防止するには最も安価かつ長期間使用可能な確実な方法として注目されている⁹⁾。

methyl tertiary butyl ether (MTBE) は、オクタン価を上げるガソリン添加物として広範に使用されてきたが、

米国では MTBE は水溶性で、地下水汚染が深刻な問題であると言われる (我が国では分からない)。ユーカリなどの植物が MTBE をポンプアップ→大気へ放出することが研究されている²⁴⁾。植物ポンプの作用で土壌中の水分量が減ると、有機物や重金属など汚染物質の濃度が高まり、沈殿したり、拡散しにくくなるなどの効果があることが分かっている。先に述べた TCE 汚染をポプラなどを使って蒸散流に乗せて地下部から吸い出し、大気中へくみ出すこともおこなわれている。このとき、植物体内に取り込まれた TCE の一部は、植物の酵素のはたらきで分解される²⁵⁾。

(5) 水銀やセレンを気化する植物

有機水銀は水俣病などの悲劇を生み出した物質である。有機水銀を金属水銀に還元する遺伝子導入植物 (ユリノキ) が報告されている²⁶⁾。大腸菌由来の *merA* 遺伝子が植物で高発現するように改変されている。この植物では、体内に取りこまれた有機水銀が金属水銀にまで、還元される。無機水銀の沸点は低いので、大気中に気化する。遺伝子導入により植物の能力は約10倍高まったと報告されている。セレンは、毒性の高い元素であるが、北米ではセレンの蓄積が大きな問題となっていると言われる。インドカラシナは、セレンを無機化して、大気中に気化する能力があることが報告されている。インドカラシナのこの能力には、根圏での微生物が大きく関与していることが示唆されている²⁷⁾。

(6) その他の有機/無機汚染物を分解する植物

先に述べたように、米国において、有機物汚染の浄化プロジェクトがフィールドレベルで実施されている¹⁰⁾。汚染サイトは、地下水、爆薬基地、石油産廃土壌。木材保存剤廃液、農業廃水などである。また、汚染物質は、トリクロロエチレン (TCE), 2,4,6-トリニトロトルエン (TCE), ヘキサヒドロ-1,3,5-トリニトロ-1,3,5-トリアジン (RDX), ベンゼン, トルエン, エチルベンゼン, キシレン (BTEX) 全石油炭化水素 (TPH), ペンタクロロフェノール (PCP), 多環芳香族炭化水素 (PAH), アトラジ (除草剤) や硝酸などである。用いられている植物としては、ハイブリッドポプラが主で、その他、カナダモ、アシ、クサヨシ、ヒルムシロ、クーンテイル、クズウコンなどが用いられている。ハイブリッドポプラは、成長が早く、ファイトレメの実施例が多い。他の植物はローカルバラエティーなどと思われるが、用いられる根拠は、定かではない。トリクロロエチレン (TCE) は機械部品の脱脂 (degrease), ドライクリーニングをはじめとして多くの工場で溶剤として使われている揮発性で水に溶ける物質で、この汚染は我が国でも大きな問題となっている。TCE は、ハイブリッドポプラにより、トリクロロエタノール、トリクロロ酢酸、ジクロロ酢酸に分解される。CO₂ にまで無機化されるのはわずかである²⁵⁾。また、ポプラが、除草剤アトラジンをアメリンに変換するが、無機化されることはほとんどされないといわれる²⁸⁾。硝酸で汚染した地下水を五年間かけて、従来法 (ポンプアップ→逆浸透システム) とハイブリッドポプラによるファイトレメの処理コストを比較すると、前者は \$ 660,000 かかり、後者の1.5から2倍かかるといわ

れる²⁹⁾。窒素酸化物も植物体内に取り込まれ、還元されアミノ酸となる（後述）。植物による有機/無機汚染物の分解に関与する酵素としては、dehalogenase, oxygenase, nitroreductase, peroxidase, nitrite reductase などが注目されている。

(7) 大気汚染を浄化する植物^{6,7)}

わが国の都市部の大気中の窒素酸化物の50%は車の排気ガス由来であるといわれる³⁰⁾。またその75%は、ディーゼル車由来である。わが国の車の保有数約7000万台のうち、ディーゼル車は約18%を占めるに過ぎないが、大気汚染の主要原因となっている。エンジン内部での燃焼に伴い、空気中の窒素が酸化され、まず NO が生成・大気に放出される。ついで、大気中のオゾンによりさらに酸化されて、NO₂ になる。NO₂ は紫外線により分解され、NO と O を生成する。NO はオゾンで酸化され、NO₂ に戻り、O は O₂ と反応してオゾンに戻る、このような反応サイクルが完結する（図4左）^{31,32)}。空気中には、人工的（車）または天然（植物）由来の揮発性有機炭素化合物 (VOC volatile organic compounds) があり、このサイクルは自己完結することができず、オゾンがたまる。すなわち、VOC は紫外線により、分解されヒドロキシラジカル・OH を生成する。このラジカルは反応性が高く、大気中の NO を酸化して NO₂ が生成される。このようにして、大気中に窒素酸化物と VOC が共存すると、大気中にはオゾンや peroxyacetyl nitrate (PAN) などの光化学オキシダントが蓄積される（図4右）。二酸化窒素や一酸化窒素自体ヒトや動物に毒性があることが知られているが、オゾンは、呼吸器障害を引き起こす毒物であり、また、植物の光合成システムを破

壊する強力な酸化作用を持つ物質である^{31,32)}。

植物は二酸化窒素を葉の気孔から吸収して、葉細胞内でアンモニアへ還元し、さらにアミノ酸などの有機アミノ基に同化する。この様に、植物は、大気汚染物質である二酸化窒素を根から吸収した硝酸イオンと同じように代謝する能力を持っている。つまり、植物は二酸化窒素を窒素肥料として利用する能力を持つことになる^{6,7,33)}。

我々は、200種以上の植物の二酸化窒素吸収分解能力を調査した²⁰⁾。トヨタ自動車や広島市植物公園の皆さんの協力を得て、道路端から採取した雑草（草本）50種、公園の植栽などに使われる栽培草本60種と街路樹など樹木107種の合計217タクサの植物について、重窒素トレーサー法を用いて二酸化窒素同化能力（一定時間当たりの二酸化窒素由来のケールダール窒素蓄積速度）を調査した（表3）³⁾。

その結果、ユーカリノキの仲間（ユーカリプタス・ヴィミナリス）、タバコ、ダンドボロギクなどが高い二酸化窒素同化能力を示した。この能力が最大だったユーカリプタス・ヴィミナリスと、最小（エアープラントの一種の多肉植物のイオナンタ）との差は実に600倍以上あった。ユーカリの仲間を10種ほど調べたが、ユーカリはどれも高いというわけではなかった。この他、能力の高いのは、コブシ、クちなシ、イタリアポプラ、ナンキンハゼ、ユーカリプタス・シネラ（以上木本）、ボラジ（草本）などであった。ダンドボロギクはキク科北米原産の雑草で、山火事後に最初に出てくる好窒素性植物である。野生草本、園芸草本、木本植物いずれも高いものも低いものも多かれ少なかれ均等に分布していた。一般に、キク科には二酸化窒素同化能力の高い植物が多く含まれていた。また、面白いことに、同じ種内で個体によ

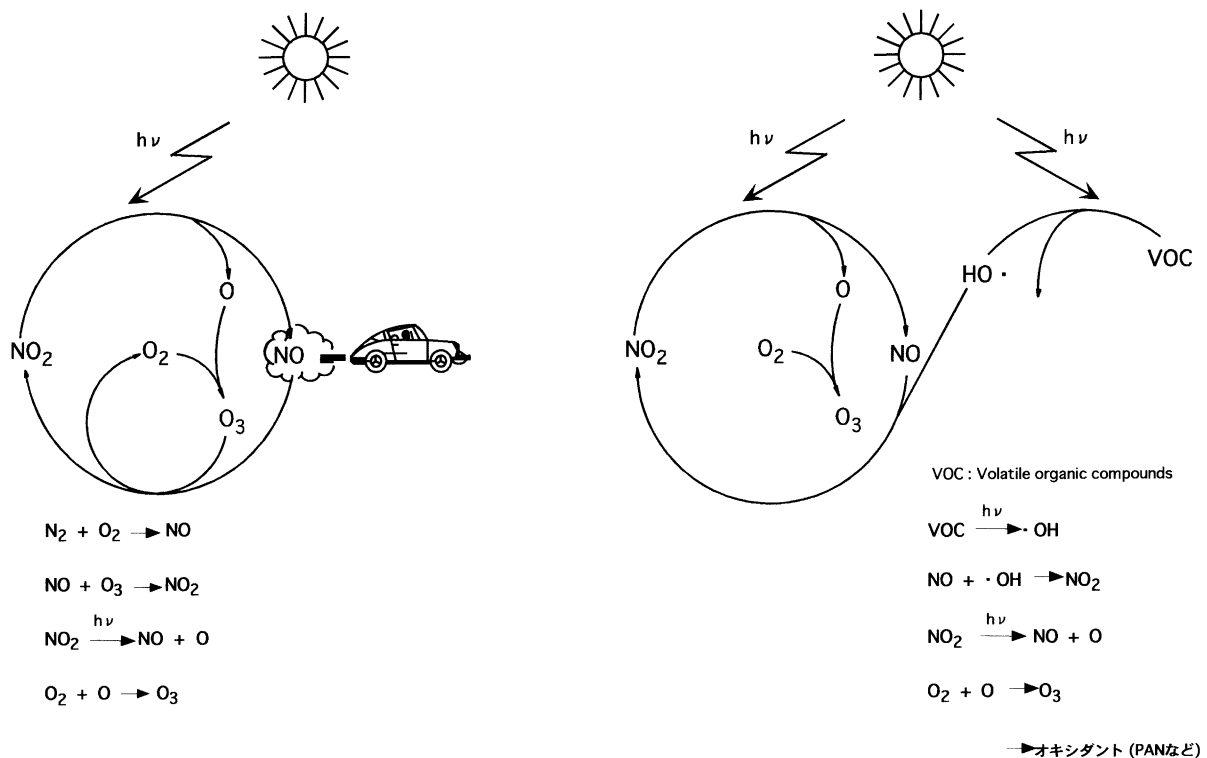


図4. NOx, VOC（揮発性有機化合物）やオゾンなどの大気汚染物質の生成（本文参照）。

表3. 樹木 (107タクサ) の二酸化窒素同化能力⁹⁾.

タクサ名	科名	NO ₂ -N*	タクサ名	科名	NO ₂ -N*
樹木					
ユーカリプタス・ヴィミナリス	フトモモ科	6.57	アクアティカ	バンヤ科	0.88
イタリアポプラ	ヤナギ科	5.14	シイノキ	ブナ科	0.85
コブシ	モクレン科	4.92	アカマツ	マツ科	0.84
ニセアカシア	マメ科	4.73	カツラ	カツラ科	0.82
ユーカリプタス・グランディス	フトモモ科	4.57	クロガネモチ	モチノキ科	0.75
ユーカリプタス・グロブルス	フトモモ科	4.08	ベニシタン	バラ科	0.70
ポプラ sp	ヤナギ科	3.80	キシマツツジ	ツツジ科	0.69
エンジュ	マメ科	3.26	クスノキ	クスノキ科	0.67
ヒマヤザクラ	バラ科	3.23	スギ	スギ科	0.66
ナンキンハゼ	トウダイグサ科	2.85	イスノキ	マンサク科	0.65
フサアカシア	マメ科	2.82	オオムラサキ	ツツジ科	0.65
エニシダ	マメ科	2.76	トベラ	トベラ科	0.64
プラタナス	スズカケノキ科	2.75	ヤブツバキ	ツバキ科	0.63
ユーカリプタス・カムフォラ	フトモモ科	2.58	トウネズミモチ	モクセイ科	0.59
ナツツバキ	ツバキ科	2.49	カナリーキヅタ	ウコギ科	0.59
オオシマザクラ	バラ科	2.34	ハイビスカスの一種	アオイ科	0.59
クチナシ	アカネ科	2.27	シャリンバイ	バラ科	0.58
アジサイ	ユキノシタ科	2.27	ソメイヨシノ	バラ科	0.57
キョウチクトウ	キョウチクトウ科	2.09	サンゴジュ	スイカズラ科	0.55
ギンマルバユウカリ	フトモモ科	2.03	ネズミモチ	モクセイ科	0.53
ユーカリプタス・ラディアタ	フトモモ科	1.93	アセビ	ツツジ科	0.51
ラクウショウ	スギ科	1.86	ホルトノキ	ホルトノキ科	0.50
ユーカリプタス・マイデニー	フトモモ科	1.85	モクセイ	モクセイ科	0.48
ユーカリプタス・アンドレナ	フトモモ科	1.70	ヒノキ	ヒノキ科	0.47
カクレミノ	ウコギ科	1.62	マテバシ	ブナ科	0.47
ミヤマビャクシン	ヒノキ科	1.61	モッコク	ツバキ科	0.41
ユーカリプタス・ガンニー	フトモモ科	1.60	マルバシャリンバイ	バラ科	0.41
マサキ	ニシキギ科	1.56	カラタチバナ	ヤブコウジ科	0.41
メタセコイア	スギ科	1.56	クロマツ	マツ科	0.40
ミズナラ	ブナ科	1.48	ハナツクバネウツギ	スイカズラ科	0.39
ハマヒサカキ	ツバキ科	1.46	カイヅカイブキ	ヒノキ科	0.37
コナラ	ブナ科	1.45	ドイツトウヒ	マツ科	0.37
シダレヤナギ	ヤナギ科	1.42	ババシア	ババシア科	0.37
トウカエデ	カエデ科	1.38	ハインズ	ヒノキ科	0.36
ケヤキ	ニレ科	1.35	モントロイサイプレス	ヒノキ科	0.32
ヒサカキ	ツバキ科	1.30	コノテガシワ	ヒノキ科	0.28
ユーカリプタス・ピコスタータ	フトモモ科	1.27	イチイ	イチイ科	0.27
ユズリハ	トウダイグサ科	1.22	イスガヤ	イスガヤ科	0.27
ヤマモモ	ヤマモモ科	1.16	ムベ	アケビ科	0.26
クスギ	ブナ科	1.12	ギンヨウセンネンボク	リュウゼツラン科	0.26
ジャスミン	モクセイ科	1.10	セイヨウバラ	バラ科	0.23
イヌマキ	マキ科	1.08	ヒイラギ	モクセイ科	0.22
ウツギ	ユキノシタ科	1.02	タイワンツバキ	ツバキ科	0.21
ニシキギ	ニシキギ科	1.01	フッキソウ	ツゲ科	0.19
ヒロハヘビノボラズ	メギ科	1.00	ニッポンタチバナ	ミカン科	0.18
ウバメガシ	ブナ科	0.98	アオキ	ミズキ科	0.15
シラカシ	ブナ科	0.97	イカダカズラ	オンロイバナ科	0.15
イヌツゲ	モチノキ科	0.93	ヤドリフカノキ	ウコギ科	0.14
ソヨゴ 1	モチノキ科	0.92	アザレアの一種	ツツジ科ツツジ属	0.14
ヒラドツツジ	ツツジ科	0.91	ハイビャクシン	ヒノキ科	0.12
イチョウ	イチョウ科	0.88	ヤシの一種	ヤシ科	0.10
カンツバキ	ツバキ科	0.88	チャ	ツバキ科	0.09
ナギ	マキ科	0.88	ツバキ	ツバキ科	0.04
			ヘンヨウボク	トウダイグサ科	0.04

* NO₂ 由来の還元態窒素量 (mgN/gDW)

表3 (つづき) 園芸草本 (60タクサ) と道路端雑草 (50タクサ) の二酸化窒素同化能力.

タ ク サ 名	科 名	NO ₂ -N*	タ ク サ 名	科 名	NO ₂ -N*
園芸草本			セントポーリア・コンフサ	イワタバコ科	0.06
タバコ	ナス科	5.72	シュンランの一種	ラン科	0.04
ベニバナ	キク科	3.41	ウスネオイデアス	アナナス科	0.02
キク	キク科	3.15	イオナンタ	アナナス科	0.01
シロイヌナズナ	アブラナ科	3.03	カブツメドウサエ	アナナス科	0.01
ロベージ	セリ科	3.02	道路端雑草 (草本)		
インパチエンス	ツリフネソウ科	2.80	ダンドボロギク	キク科	5.72
ペチュニア	ナス科	2.72	ベニバナボロギク	キク科	5.07
ストック	アブラナ科	2.70	アメリカセンダングサ	キク科	2.98
コスモス	キク科	2.63	アキノノゲシ	キク科	2.96
カモマイル	キク科	2.26	メマツヨイグサ	アカバナ科	2.77
エゾモミギク	キク科	2.18	ヒメジョオン	キク科	2.73
ペパーミント	シソ科	2.17	ヨモギ	キク科	2.53
オオムギ	イネ科	2.08	ヘラオオバコ	オオバコ科	2.24
イネ	イネ科	1.85	アカザ	アカザ科	2.24
エフェンツス	キク科	1.76	ナズナ	アブラナ科	2.10
シクラメン	サクラソウ科	1.67	ノゲシ	キク科	2.10
ディル	セリ科	1.48	ホウキギク	キク科	2.02
ボラジ・オフィキナリス	ムラサキ科	1.45	マメカミツレ	キク科	2.00
トウモロコシ	イネ科	1.45	タカサブロウ	キク科	1.95
ジュリアナハイブリッド	サクラソウ科	1.07	ハコベ	ナデシコ科	1.80
シキザキベゴニア	シュウカイドウ科	1.04	オニノゲシ	キク科	1.71
モクシュンギク	キク科	0.96	セイタカアワダチソウ	キク科	1.70
エゾノヘビイチゴ	バラ科	0.93	オオアレチノギク	キク科	1.64
メリッサ・オフィキナリス	シソ科	0.92	ノボロギク	キク科	1.60
マリティマ	アブラナ科	0.81	ヒメクグ	カヤツリグサ科	1.57
ニチニチソウ	キョウチクトウ科	0.80	イヌビユ	ヒユ科	1.55
ペラルゴニウム・ゾナレ	サトイモ科	0.77	スイバ	タデ科	1.53
スキンドプススの一種	フウロソウ科	0.77	ヒメスイバ	タデ科	1.46
オリヅルランの一種	ユリ科	0.76	オオオナモミ	キク科	1.45
ラベンダー	シソ科	0.76	ホオコグサ	キク科	1.36
タチジャコウソウ	シソ科	0.73	イシミカワ	タデ科	1.34
パセリ	セリ科	0.71	オオバコ	オオバコ科	1.30
ダリア	キク科	0.66	ハルジオン	キク科	1.20
サンジキスミレ	スミレ科	0.64	ケナシムカシヨモギ	キク科	1.20
ランプランツスの一種	ツルナ科	0.63	ツユクサ	ツユクサ科	1.17
メボウキ	シソ科	0.62	チガヤ	イネ科	0.94
ハボタン	アブラナ科	0.58	タチチチコグサ	キク科	0.88
クジャクソウの一種	ウラボシ科	0.41	シロツメクサ	マメ科	0.87
トレニアフルニエリ	ゴマノハグサ科	0.40	チカラシバ	ユリ科	0.86
センニチソウ	ヒユ科	0.38	ノカンゾウ	ユリ科	0.75
アサガオ	ヒルガオ科	0.38	カタバミ	カタバミ科	0.73
アキノタムラソウの一種	シソ科	0.37	ヤハズソウ	マメ科	0.68
ハウセンカ	ツリフネソウ科	0.35	スズメノカタビラ	イネ科	0.67
ノラナの種類	ノラナ科	0.34	イヌビエ	イネ科	0.65
タマシダの種類	シノブ科	0.29	ヒナタイノコズチ	ヒユ科	0.63
スズラン	ユリ科	0.28	ジュズダマ	イネ科	0.63
スイセン	ヒガンバナ科	0.24	カンサイタンポポ	キク科	0.63
オモト	ユリ科	0.22	ノコンギク	キク科	0.61
スパッチヒルムの一種	サトイモ科	0.22	カゼクサ	イネ科	0.59
カランコエ・プロスフェルディアナ	ベンケイソウ科	0.19	メヒシバ	イネ科	0.46
ハラン	ユリ科	0.14	ススキ	イネ科	0.46
ディーファンバギアの一種	サトイモ科	0.13	イヌムギ	イネ科	0.33
クリスマスカクタス	サボテン科	0.13	シマズメノヒエ	イネ科	0.26
ゲミニフロラ	アナナス科	0.12	アキノキリンソウ	キク科	0.26
ショウジョウボク	トウダイグサ科	0.07	スベリヒユ	スベリヒユ科	0.25

 * NO₂ 由来の還元態窒素量 (mgN/gDW)

って、二酸化窒素同化能力には最大26倍の差異があった。詳細は、我々の研究室のホームページ (<http://www.mls.sci.hiroshima-u.ac.jp/mpb/Home.html>) に発表している。

窒素酸化物の代謝能がけた違いに異なるのはいろいろなことが原因であろう。例えば、窒素酸化物の取込の違い（気孔の開度や抵抗，トランスポーターの効率），取り込んだ窒素酸化物の代謝の効率の差異などである。硝酸還元能のような一次代謝能が植物種でけた違いに違うことは想像しがたい。C₃植物とC₄植物との間では主な炭酸固定関連酵素の活性は確かにけた違いに異なる。それに似たことが窒素酸化物代謝や硝酸代謝についても植物種間であるのだろうか。我々は，上記の能力の高い植物を窒素酸化物を“好む”植物だと考えている。広く世界的に調査すれば，さらに能力の高い植物があると考えられる。この結果は，植物の排気ガス（二酸化窒素）処理能力には無限の可能性が秘められていることを示すものである。植物の科学が基礎的にもっと進めば，なぜ植物間でこんなに違うのかそれを制御する遺伝子が分かるようになり，また，遺伝子操作でもっと高い能力を持った植物を創り出すことができるだろう。我々は，遺伝子操作による植物の二酸化窒素分解能力の改良の基礎研究を進めている。これまでに，亜硝酸還元酵素のキメラ遺伝子を過剰発現させて，酵素活性が約80%高まり，二酸化窒素同化能力が40%アップした植物を作り，発表した³⁴⁾。

植物を植えるとどれくらい NO_x が減るか

ビルの屋上や高速道路の壁面に植物を植えて，どれくらいの二酸化窒素が除かれるか，各方面からの批判は覚悟の上で，我々の試算を述べる。まず，植える植物としては，二酸化窒素同化能力が少し高めの植物（たとえばペチュニア）を植える。一平方メートルに草丈二十センチのものを300本植えるとする。我が国の東京，大阪，名古屋など主要十一都市の緑化可能な屋上やビル壁面の総面積は，市街化区域面積の18.1% (46,389 ha) と見積もられている³⁵⁾。これは，公園などの緑地面積の合計 (30,996 ha) よりも大きい。これを全て先ほどのペチュニアで被うとすると，年間約2,900トンの二酸化窒素を除くことができるはずである。また，全国的高速道路の壁面をペチュニアで被うと，大まかに年間，6,600トンを除くことができる。都市高速道路の壁面をペチュニアで被うと，年間，6,000トンを除くことができる。あわせて，年間15,500トンの二酸化窒素をこの「グリーン・ウォール」で除くことができることになる。これは，わが国の二酸化窒素の車による年間放出量（50万トンと仮定）の約3.1%に相当する。遺伝子操作により，植物の能力を10倍高めると，車による二酸化窒素放出量の30%以上を特殊緑化空間や高速道路の壁面を被った植物で除去できることになる³⁶⁾。

米国におけるファイトレメ・プライベート セクターの活動

現在アメリカ国内には217,000箇所の汚染サイトがあ

るといわれる。これを物理化学的な従来の方法で修復するには22兆4,400億円の費用がかかるといわれる。2000年においてファイトレメディエーション・ビジネスの商業規模は60億円程度であったが，2005年までに5倍に拡大すると言われている。米国ではすでに10数社のファイトレメディエーションを専門とする企業が出現している。以下にいくつかの例を紹介する。詳細は，次のアドレスにアクセスして見られたい。

<http://www.mobot.org/jwcross/phytoremediation/phyto-orem sponsorscorp.htm>

CH2M ヒル/ポプラトリートメントシステムズ社（オレゴン州ポートランド）：1989年以来，ポプラによる環境処理と修復プロジェクトに携わってきた。過去7年間に全米で30のプロジェクトを成功させた。汚染土壌や地下水のファイトレメ，都市排水や工業廃水処理・再利用，灌漑排水システムデザイン，埋め立て地用植物カバー（キャップ）などを実施している。家畜の糞尿による地下水の窒素汚染を除くため，畜舎と地下水脈の間にポプラやヤナギを栽植した。地下水の窒素をこれら樹木により吸収させるためである。3.5エーカーに広がる地下水脈に垂直に8,500本のポプラとヤナギを栽植した。また，石油精製所跡地の汚染処理のため，ハイブリッドポプラを用いてテストプロットを実施している。ポプラは根圏に石油分解菌の生育に適した環境をつくりだし，石油分解を助ける。ポプラによる強力な蒸散作用は，土壌からの水分除去にも効果的である。また，ある製紙工場のディーゼル汚染サイトでは汚染濃度が高いので，汚染土壌に家畜の糞尿を混ぜ，種々の草とクローバーを栽植して *ex situ* 処理している。また，100年以上にもわたって鉄道用枕木に木材防腐剤を塗る工場（140エーカー）での枕木防腐剤産業廃棄物汚染の処理を進めている。汚染の実体は，1.7 million gallons の非水液状物（PAH や PCP など）である。在来のハコヤナギ，ヤナギ，アルファルファなどの数種の草を利用した分解を目指している。また，トラック修理工場跡地で土壌が BTEX や TPH で汚染している。種々の検討結果，窒素リン肥料を添加して土壌を改良した。ハンノキ，ハイブリッドポプラを用いている。

エコロツリー社（アイオワ州アイオワ）：全米に55のサイトおよびスロベニアに1のサイトで修復を行っている。エコロツリーキャップ (ECap) とエコロツリーバッファー (EBuffer) と呼ばれるポプラなどの樹木や他の植物 (phytostabilization) を使う。1999年にイリノイ州の肥料/除草剤汚染サイトに EBuffer を設けた。地下4-6フィートの地表近くを流れる地下水から窒素と除草剤を除くためと地下水の流速を低下させるためである。窒素濃度が 20-200 mg/L で 0.3-3 mg/L の alachlor が含まれている。12-18フィート長のハイブリッドポプラを440本6フィートの深さで植えた。17月で15フィートまで成長した。測定ポイント当たりの地下水量が当初（1996-1999）は，年間16,000から23,000ガロンであったが，2000年には6000ガロンに低下していた。

エデンスペースシステムズ社（バージニア州レストン）：1999年にファイトテック社を合併した。汚染土壌や水中の無機物（鉛，ウラン，砒素，放射性金属）を独自の品種と改良材を用いて，除去する phytoextraction

の世界的リーダーと称している。現在、射撃場や工業サイトにおける鉛やウランの除去、上下水からのトレース元素の抽出、廃鉱からのタングステンの回収などに取り組んでいる。最近、ヒ素を大量に吸収するシダ“エデンシダ”の水耕栽培による飲料水からヒ素の除去の研究を始めている。ダイムラークライスラー社の汚染サイトで75-3,490 mg/kg の鉛を含む土壌を65,000平方フィートの ex-situ 修復場に移し、ヒマワリ→カラシナを植え、1年間処理した。その結果、鉛量は 1,100 ppm から 850 ppm に低下した。その後土をもとのサイトに戻した。他の方法に比べて1億円以上節約したことになるという。

ヒマワリは、ウランも効率よく吸収する。ウラン濃縮率は30,000倍である。米国内のあるウラン汚染サイトでの連続ライゾフィルトレーション処理により、入口濃度450 ppb の U が、出口濃度で 5 ppb にまで減少した。オハイオ州 Ashtabula ウラン工場跡地のウラン処理では、21-874 µgU/L のウランを含む水の処理をライゾフィルトレーション処理した。パイロットスケールでの処理により、EPA 準値である 20 µgU/L 以下まで低下した。200 µg/L のウランを含む水を8週間連続処理させた場合、出口濃度は 20 µgU/L 以下であった。このほか、ボストン市における高濃度鉛を含む土壌汚染や古くはウクライナチェルノブイリ原発事故跡の放射性 Sr や Ce 除去処理をヒマワリなどを用いて行った。

ファイトキネティックス社（ユタ州ノースローガン）：BTEx, PCP, TNT, TPH, 有機塩素化合物 (TCE), 殺虫剤 (DDT), 硝酸性窒素など汚染した地下水などの処理を実施している。プロジェクトのサイトは、全米各地に多数ある。植物としては、ハイブリッドポプラ、ユーカリ、ソールトシーダー、湿地植物を含む草類、アルファルファなど多様。フィールドプロジェクトの例は次の通り。Bofors-Nobel Superfund Site: 4年プロジェクトである。このサイトは、dichlorobenzidine (発ガン剤) を含む種々の有機物汚染があり地下水に漏れている。在来植物種、ヤナギ、ポプラの混植法によるパイロットスケールの植栽（20エーカーに13,000本）を開始した。New England Superfund Site: このサイトは、揮発性有機塩素化合物で汚染している。1998年以来、1,000本のポプラとヤナギを植えた。“ポンプ/分解処理”システムとして働かせるためである。McCormick and Baxter (M&B) Superfund Site: このサイトの表土は、PCP, PAH などの木材防腐剤で汚染されている。8種の PAH 化合物（4から6員環）の処理が目的である。多年草ライグラス (*Lolium perenne*) を用い、グリーンハウス内およびフィールドでの分解テストが実施されている。

将来のファイトレメディエーションの課題と期待

(1) 遺伝子組換えとファイトレメディエーション²³⁾

遺伝子組換えは、ファイトレメディエーションの技術的な革新を図る上で必須の技術であり、将来の植物利用による環境修復は、遺伝子組換え植物ぬきには語れない。昨今、遺伝子組換え食品は、国内外で大きな議論を呼んでいる。環境修復のための遺伝子導入植物を環境に出すことも大きな議論を呼ぶであろう。また、既存の

生態系との相互作用についても徹底的な基礎研究が必要であろう。将来のファイトレメディエーションにおいて、遺伝子操作は限りない可能性を持っている。遺伝子操作による植物自身の「汚染物質処理能力」を高めることがまず考えられる。例えば後に述べるように脱ハロゲンや芳香環開裂や重金属耐性や蓄積/無毒化 (sequestering) に関与する遺伝子やその産物の作用メカニズムが解明されれば、環境浄化に有用な遺伝子が発掘される可能性が大いにある。また、前述の排気ガス（二酸化窒素）処理能力の鍵を握る遺伝子が解明されると、その遺伝子の導入により街路樹などの排気ガス処理浄化能の大幅な向上が期待できるだろう。さらに、微生物由来や動物由来の関連遺伝子の導入・発現による植物の「処理能力」の向上も大いに可能性がある。

植物が環境と接触する場合は根圏、茎圏、葉圏であるが、これらの場において植物は程度の差はあるが、外生または内生微生物との「共生」関係にある。そこで、植物の「化学物質処理能力」を高めるためには、植物に共生している微生物の同能力を高めることや、さらに高い能力を持った微生物との新たな共生関係を作るなどの戦略も考えられる。「植物に共生している微生物の同能力を高める」には、例えば、根圏で芳香族化合物や有機塩素化合物の分解に関与している微生物を単離・同定し、その微生物の遺伝子操作により、強力な根圏微生物を開発することも可能である。また、遺伝子操作をしなくても、能力の高い関連した種の野生株を供給することも有力な実用的な方法である。

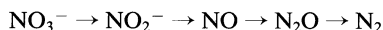
(2) 窒素酸化物を好む植物

窒素酸化物を唯一の窒素源として生育する窒素酸化物を好む植物の育成は、特に高速道路沿いの壁や大都会のビルの表面の緑化にとり、必須である。我々は、目下シロイヌナズナを用いて、予備的な研究を進めている。植物体内に取り込まれた、二酸化窒素の窒素は確かに硝酸の窒素と同じように還元、アミノ有機化されるが、二酸化窒素を資源として植物に利用させるには、いくつかの基礎的に解明すべき問題があることが分かり、現在その解決に全力を挙げている。たとえば、根から吸収された硝酸の窒素は40-60%は、（おそらく液胞内に）硝酸のまま貯蔵される。他方、二酸化窒素の窒素は硝酸のままとどまるのは、ごくわずか（4-6%）で、20-30%の未同定の窒素化合物（ニトロ、ニトロソ化合物などケルダール分解で回収できない化合物）になること、また、二酸化窒素は植物体内ではそのほとんどはおそらく亜硝酸イオンの形で存在する（硝酸と亜硝酸イオンを等量生成するのではなく）ことを示唆する実験結果がある³⁷⁾。二酸化窒素由来の未同定窒素化合物は、植物に毒性を持つとも考えられ、また多量の亜硝酸イオンも毒性があり、「窒素酸化物を好む植物の育成」には、この当たりの基礎的な問題を一つ一つ解決することから始まると我々は考えている。未同定窒素化合物の同定は目下研究中だが、その同定や生理作用の解明、生成機構の解明が進めば、その抑制も可能となろう。また、亜硝酸イオンの量が分かれば、遺伝子操作や最近開発されているイオンビーム照射などによる突然変異体の育成により、亜硝酸イオンを効率よく処理する植物の育成は、それほど難

しいことではないだろう。仮にそのような植物が育成し、自然界の中で、例えば高速道路の壁面やビルの表面を被い、維持するには、様々な植物生理学、栄養学、園芸学的な課題を解決して行かねばならない。この意味でも「窒素酸化物を好む植物」は、いろいろな学問分野にインパクトを与える興味ある課題であると我々は考えている。

(3) 窒素酸化物を窒素ガスに変換する植物

微生物では硝酸は



の順に異化的に還元され、脱窒(素)される^{38,39)}。この代謝系をそっくり植物で発現できれば、窒素酸化物を直接窒素と酸素にガス変換する「ガス→ガス変換植物」の育成が可能となるはずである。窒素酸化物問題は、富栄養化問題でもあり、人間活動で生産される窒素酸化物を植物の力で窒素ガスと酸素に戻すことができれば、意義は大きいと思う。

$\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}$ の反応や $\text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O}$ の反応を触媒する酵素は、それぞれ異化的 NiR (nitrite reductase) および NOR (nitric reductase) と呼ばれる。また、 $\text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$ の反応を触媒する酵素は N_2OR (nitrous oxide reductase) と呼ばれる。脱窒(素)系をそっくり植物で発現させるには、これらの酵素の遺伝子をまとめて導入する必要があるが、他方これらの酵素へ電子を供給する電子供与体の供給システムを確保することも必須の条件である。そのためには、これら酵素を細胞内のどのコンパートメント(プラスチド、細胞質基質、膜結合型など)で発現させるかが重要な検討課題である。

植物における亜酸化窒素や一酸化窒素の放出生成は、約10年前に研究されている⁴⁰⁾。ダイズやシカクマメの硝酸還元酵素(NR)が、硝酸を亜硝酸に還元すると同時に亜酸化窒素や一酸化窒素に還元すると考えられている。しかし、その反応系(植物外食片を浮かべた酵素反応系)へのバクテリアのコンタミの可能性は完全には拭き切れなかった。最近我々は、無菌培養した遺伝子導入植物を用いて、植物に硝酸イオン、亜硝酸イオン、二酸化窒素を与えると、亜酸化窒素を生成することを証明した⁴¹⁾。この反応は、光依存で還元作用には、光エネルギーが不可欠であると思われる。亜酸化窒素ガスはオゾン層を破壊する「悪者」とされており、このこと自体はファイトレメディエーションの立場からは、直ちに応用することはできないが、先に述べた、亜酸化窒素還元酵素(N_2OR)の遺伝子を植物へ導入して発現させることができれば、植物は二酸化窒素ガスを窒素ガスに変換する機能を持つようになるはずである。少なくとも理論的には可能である。

植物において、硝酸や亜硝酸イオンから NR などの作用で、NO が生成すると仮定して、では NO から N_2O はどのようにして作られるのか。植物も微生物やカビと同じような NO 還元酵素を持つのだろうか。NR による亜硝酸イオンから NO の生成には、光は必須ではないが、硝酸イオンや亜硝酸イオンから N_2O の生成には、上述のように、光が必要なので、光が必要なのは、NO から N_2O 生成のステップかもしれない。これらの点は、

植物の窒素酸化物代謝を考える上で重要な課題であると考えている。NO は寿命の短いシグナル物質として注目され、哺乳類など動物細胞では、アルギニンを基質とする NOS (nitric oxide synthase) により合成される。植物が NOS を持つかどうかは、はっきりしない。Yamasaki ら⁴²⁾ は、NR が NOS としての作用を持つことを指摘した。

最近、Wildt ら⁴³⁾ は、ヒマワリ、タバコ、トウモロコシ、ダイズ、スプリース、サトウキビ、ナタネ、ホウレンソウが NO を発生することを報告している。彼らは、地球上の植物は年当たり、 $2.3 \times 10^{11} \text{ g N year}^{-1}$ に相当する NO を大気に放出していると試算している。さらに、ごく最近 Smart and Bloom⁴⁴⁾ は、コムギ葉から多量の NO が放出されると報告した。コムギ葉の葉緑体における亜硝酸イオンの光同化の過程で N_2O が生成するとしている。彼らは、地球上の植物が生成する N_2O は、全地球での NO 生成量の12%に相当すると見積もっている。これらの結果をみると、NO や N_2O の生成は、バクテリアやカビだけに限られたものではなさそうである。

(4) 植物による環境ホルモンの分解

難分解性で環境中に広がった PCB, DDT, ダイオキシンなどの有機塩素芳香族化合物やノニルフェノールなどの芳香族化合物は、ヒトや動物の体内に取り込まれると、女性ホルモンとそっくりの作用をもち、ヒトや動物の内分泌ホルモン作用を攪乱し、雄の雌化などを引き起こす(図5)⁴⁵⁾。このような環境ホルモンとして疑わしい物質は沢山あり、広範囲の環境中に放出されている。

植物は一般にダイオキシンを吸収分解する能力はないとされている。マタタビ科マタタビ属のキウイやセリ科ニンジン属のニンジンは、ダイオキシンを吸収するといわれる。また、表面に油を分泌するマツの葉はダイオキシンをトラップするという⁴⁶⁾。キノコの仲間のヒラタケ、カワラタケ、エリンギ、シイタケは、木材を腐朽さ

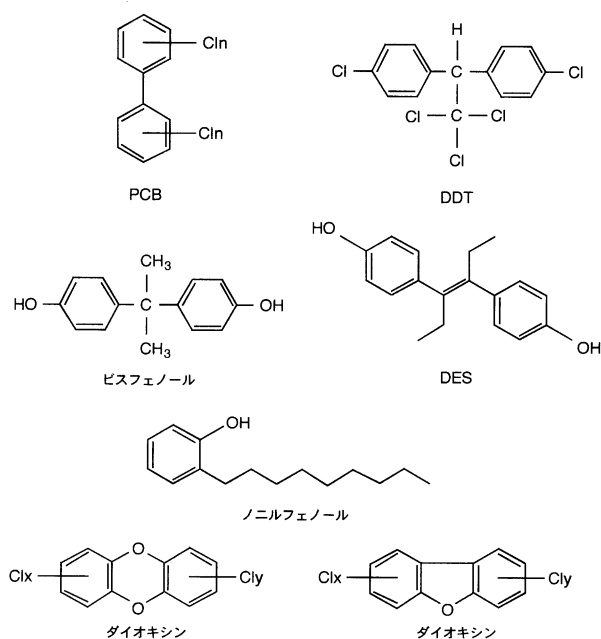


図5. 環境ホルモン(内分泌攪乱物質)の例。

せ白色の残渣を残すので白色腐朽菌と呼ばれる。これらキノコが、木材中のリグニン（フラボノイドやタンニンなどフェノール物質の仲間）を分解・資化するためである。これらキノコは、ダイオキシンを分解することが知られている^{47,48)}。そのカギは、キノコが分泌するリグニンペルオキシダーゼ、マンガンペルオキシダーゼ、ラッカーゼというリグニン分解酵素にある。リグニンとダイオキシンの化学構造が類似しているため、この酵素がダイオキシンを分解すると考えられている。また、好気性プロテオバクテリア (*Sphingomonas* sp.) のオキシゲナーゼによるダイオキシンの好氣的分解⁴⁹⁾ や、メタン菌を含む複合微生物群の嫌氣的分解によるダイオキシンの還元的脱塩素反応⁵⁰⁾ も報告されている。将来、遺伝子操作でキノコや微生物の遺伝子をもつ植物⁵¹⁾ をつくることにより、植物によるダイオキシン、PCB、DDT、DESなどの環境ホルモン分解が実現できるであろう。

(5) 動・植物由来の脱ハロゲン酵素の意義

PCB 分解の一つのネックは、脱塩素過程にあると言われる。また、ダイオキシンも塩素の数や位置でその毒性には大きな違いがあり、これら有機塩素化合物を脱塩素する脱ハロゲン酵素は、有力な環境汚染修復遺伝子である。高等生物の脱ハロゲン化酵素はチトクローム P-450 以外あまり知られていない。この P-450 は動・植物や微生物など広範な植物に含まれ嫌気条件下で還元的に作用する。

海泥には有機（芳香族）ハロゲン化合物が多く含まれるが、これらは産業排水や農業廃水由来のもののみならず、生物学的に生成されるものもある。海泥に生息するゴカイの仲間は *halogenase* をもっておりブロムフェノールなど揮発性のハロゲン化合物を生成し、生物間での生存競争を展開していると言われる。サウスカロライナ大学の Chen らはゴカイの一種 (*Amphitrite ornata*) は、*halogenase* を持っていないが、ハロゲン化合物耐性であるので、何らかの解毒機構、例えば *dehalogenase* を持っているとして推定し、ついにこのゴカイは *dehaloperoxidase* (DHP) を持っていることを突き止め、酵素を精製した⁵²⁾。その後、このDHPは、グロブリンの一種であることが、タンパク質の一次構造と三次構造の解析から示された⁵³⁾。最近、サウスカロライナ大学のグループは、イネ科の塩性植物 (*Spartina alterniflora*) の培養細胞培養液には、高い *dehalogenase* 酵素活性（芳香族ハロゲン化合物や TCE を脱ハロゲン化する）や芳香環分解活性が含まれることを見だし、その活性を有する酵素タンパクを精製し、両活性は同じ酵素タンパク質 (*peroxidase*) に起因することを明らかにした。生植物ではこの活性は根で最も高いと言われる⁵⁴⁾。これらの酵素遺伝子は、将来におけるPCBやダイオキシンなどの有機塩素化合物、環境ホルモンの分解除去の有力な遺伝子として活用されよう。

終わりに

以上述べたように、植物には環境汚染を解決する素晴らしい力がある。しかも植物を用いれば、他の生物の生活や生態系をあまり壊さずに環境修復することが可能で

ある。また、太陽エネルギーを利用するので、エネルギー補給の必要はない。しかし、植物を用いる環境修復法の難点は時間がかかることである。土地を焼いたり、溶媒抽出などによる従来型の環境修復法は、早い、ニーズ即応型であるなどの理由で“日本好み”の方法である。河川護岸工事で水生生物が激減しても「見た目にきれい」が、日本人好みである。様々な人工的な処理を加える方法は、環境修復というよりは、別のタイプの環境破壊でもあるわけである。経済効果と同時に自然の大切さと将来を考えて、どちらの方法を採用するかは、単に土地の所有者と利用者だけの判断にまかされるのではなく、社会全体として選択されるべき問題でもある。ファイトレメは技術としても、その基礎学問の面においても未だ“揺籃期”にある。ここに紹介した植物の計り知れない力を活用した環境修復が進められることは、世界的な流れであり、今後ますます広がるものと確信している。

文 献

- 1) Cunningham SD, Shann JR, Crowley DE and Anderson TA. In E.L. Kruger, T.A. Anderson and J.R. Coats (eds.) "Pytoremediation of Soil and Water Contaminants", ACS symposium series 664 pp. 2-17 (1997).
- 2) de Nevers, N. Air pollution control engineering, McGraw-Hill (1995).
- 3) 森川, 高橋, 河村. 「環境科学会誌」, **12**: 421-432 (1999).
- 4) <http://beneson.niehs.nih.gov/sbrp/RB2000/RB.cfs>
- 5) H. Morikawa, A. Higaki, M. Nohno, M. Takahashi, M. Kamada, M. Nakata, G. Toyohara, Y. Okamura, K. Matsui, S. Kitani, K. Fujita, K. Irifune, and N. Goshima. Plant, Cell & Environment **21**: 180-190 (1998).
- 6) 森川. 排気ガスを好む植物を創る「遺伝」 **51**: 23- (1997).
- 7) 森川, 入船: 「植物工学概論」コロナ社 (1996).
- 8) Crowley DE, Alvey S and Gilbert ES. In E.L. Kruger, T.A. Anderson and J.R. Coats (eds.) "Pytoremediation of Soil and Water Contaminants", ACS symposium series 664 pp. 20-36 (1997).
- 9) <http://www.itrcweb.org> Interstate Technology and Regulatory Cooperation (ITRC) Work Group.
- 10) <http://www.hawaii.edu/abrp/Technologies/phytran.html>.
- 11) J.S. Fletcher and R.S. Hedge. Chemosphere **31**: 3009-3016 (1995).
- 12) P.K. Donnelly, R.S. Hedge and J.S. Fletcher. Chemosphere **28**: 981-988 (1994).
- 13) P.K. Donnelly and J.S. Fletcher. Bull. Environ. Contam. Toxicol. **53**: 507-513 (1994).
- 14) R.S. Hedge and J.S. Fletcher. Chemosphere **32**: 2471-2479 (1996).
- 15) Baker AJM, McGrath SP, Reeves RD and Smith JAC. In Terry N, Banuelos GS (eds) "Phytoremediation of Contaminated Soils and Water", CRC Press Inc., FL pp. 85-107 (2000).
- 16) A.P. Dobson, A.D. Bradshaw and A.J.M. Baker. Science, **277**: 515-522 (1997).
- 17) D. Salt. Towards a molecular understanding of the mechanism of Ni hyperaccumulation in *Thlaspi*. Abstract of the Annual Meeting of the American Society of Plant Physiologists, July 24-28, 1999, Baltimore, p. 16.
- 18) KrishnaRaj S., Dan T. and Saxena P.K.: Int. J. Phytoremediation, **2**: 91 (2000); <http://www.uoguelph.ca/research/spark/newtech/saxena.html>.
- 19) Ma LQ, Komar KM, Tu C, Zhang WH, Cai Y and Kennelly ED. Nature **409**: 579 (2001).
- 20) E. Grill, S. Löffler, E.-L. Winnacker and M.H. Zenk. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, **86**: 6838-6842 (1989).

- 21) O.K. Vatamaniuk, S.Mari, Y.-P. Lu and P.A. Rea. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **96**: 7110-7115 (1999).
- 22) S.-B. Ha, A.P. Smith, R. Howden, W.M. Dietrich, S. Bugg, M.J. O'Connell, P.B. Goldsbrough and C.S. Cobbett. *Plant Cell*, **11**: 1153-1163 (1999).
- 23) S. Clemens, E.J. Kim, D. Neumann and J.I. Schroeder. *EMBO J.*, **18**: 3325-3333 (1999).
- 24) L. Newman, M.P. Gordon, P. Heilman, D.L. Cannon, E. Lory, K. Miller, J. Osgood and S.E. Strand. *Soil & Groundwater Cleanup Feb/Mar.*, 42-45 (1999).
- 25) Newman, L.A., S.E. Strand, N. Choe, J. Duffy, G. Ekuan, M. Ruszaj, B.B. Shurtleff, J. Wilmoth, P. Heilman, and M.P. Gordon. *Environmental Science and Technology*, **31**: 1062-1067 (1997).
- 26) C. Rugh, J.F. Senecoff, R.B. Meagher and S.A. Merkle. *Nature Biotechnol.*, **16**: 925-928 (1998).
- 27) M.P. de Souza, D. Chu, M. Zhao, A.M. Zayed, S.E. Ruzin, D. Schichnes and N. Terry. *Plant Physiol.*, **119**: 565-573 (1999).
- 28) Burken, J.G. and J.L. Schnoor. *Environmental Science and Technology*, **31**: 1399-1406 (1997).
- 29) Schnoor JL, Licht LA, McCutcheon SC, Wolfe NL and Carreira LH. *Environ. Sci. Technol.*, **29**: 318A-323A (1995).
- 30) 日本学術振興会 未来開拓学術研究推進事業「エネルギー利用の高効率化と環境影響低減化」研究推進委員会：<http://soukei.net.che.tohoku.ac.jp/pollution.htm>.
- 31) A.R. Wellburn. *Air Pollution and Climate Change: The Biological Impact*, 2nd ed., Longman Scientific Technical, ISBN 0-582-09285-X (1994).
- 32) A.R. Wellburn, J.D. Barnes, P.W. Lucas, A.R. McLeod and T.A. Mansfield. In "Forest Decline and Ozone", H. Sander-mann, A.R. Wellburn and R.L. Heath (eds), Springer, ISSN 0770-8356, pp. 201-248 (1997).
- 33) 森川. 環境修復. 「遺伝子組換え植物の光と影」(山田康之, 佐野浩編著) 学会出版センター, 1999年, pp. 182-190.
- 34) M. Takahashi, Y. Sasaki, S. Ida and H. Morikawa. *Plant Physiol.*, **126**: 731-741 (2001).
- 35) 建設省都市局公園緑地課推薦/財団法人都市緑化技術開発機構編集, "環境共生時代の都市緑化技術 屋上・壁面緑化技術のてびき".
- 36) 森川, 植物利用による環境修復-ファイトレメディエーション, "植物による環境負荷低減技術" (株) エス・ティエ・エス, pp. 49-94 (2000).
- 37) 森川ら, 未発表.
- 38) W.G. Zumft. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.*, **61**: 533-616 (1997).
- 39) 祥雲. 蛋白質, 核酸, 酵素, **39(3)**: 241-251 (1994).
- 40) J.V. Dean and J.E. Harper. *Plant Physiol.*, **88**: 389-395 (1988).
- 41) N. Goshima, T. Mukai, M. Suemori, M. Takahashi, M. Caboche and H. Morikawa. *Plant J.*, **19(1)**: 75-80 (1999).
- 42) H. Yamasaki, Y. Sakihama and S. Takahashi. *Tren. Plant Sci.*, **4**: 128-129 (1999).
- 43) Wildt, J., Kley, D., Rockel, A., Rockel, P. and Segschneider, H.J. (1997). Emission of NO from several higher plant species. *J. Geophys. Res.*, **102**: 5919-5927.
- 44) Smart, D.R. and Bloom, A.J. (2001). Wheat leaves emit nitrous oxide during nitrate assimilation. *Proc Natl. Acad. Sci. USA*, **98**: 7875-7878.
- 45) T. Colborn, D. Dumanoski and J.P. Meyers. *Our Stolen Future, A Plume Book* (1997).
- 46) A. Reischl, H. Thoma, M. Reissinger and O. Hutzinger. *Biomed. Environ. Sci.*, **1**: 304-307 (1988).
- 47) S. Takada, M. Nakamura, T. Matsueda, R. Kondo and K. Sakai. *Appl. Environ. Microbiol.*, **62(12)**: 4323-4328 (1996).
- 48) E. Rodriguez, M.A. Pickard and R. Vazquez-Duhalt. *Curr. Microbiol.*, **38**: 27-32 (1999).
- 49) R.-M. Wittich, H. Wilkes, V. Sinnwell, W. Francke and P. Fortnagel. *Appl. Environ. Microbiol.*, **58(3)**: 1005-1010 (1992).
- 50) A.L. Barkovskii and P. Adriaens. *Appl. Environ. Microbiol.*, **62**: 4556-4562 (1996).
- 51) M. Takahashi, A. Tanimura, Y. Sasaki, A. Kawaguchi, Y. Honda, M. Kuwahara and H. Morikawa. *Proc. of SOIREM 2000, October 15-19, 2000, Hangzhou, China*. ed. by Y. Luo et al., (2000).
- 52) Y.P. Chen, S.A. Woodin, D.E. Lincoln and C.R. Lovell. *J. Biol. Chem.*, **271**: 4609-4612 (1996).
- 53) L. Lebioda, M.W. LaCount, E. Zhang, Y.P. Chen, K. Han, M.M. Whitton, D.E. Lincoln and S.A. Woodin. *Nature*, **401**: 445 (1999).
- 54) L. Marton (私信).