

地球環境汚染の時系列変化を探る

— 環境汚染のタイムカプセル樹木入皮 —

Historical Monitoring of Environmental Pollution Using Bark Pockets as Pollution Time Capsules

佐 竹 研 一*

Kenichi Satake

1. はじめに

人類の発展と環境汚染物質の排出の関係にはそれなりの歴史がある。その中で酸性雨問題や重金属汚染問題は約250年前に始まった産業革命と歴史的に関係が深い。鉱物資源に恵まれた英国で1750年頃から始まった産業革命は化石燃料大量消費、鉱物資源大量消費の扉を開いた。やがてそれはヨーロッパや北アメリカをはじめとして世界各地に拡大し、当時鎖国を続けていた日本や中国についても（鎖国期間 日本：1639～1858年、中国：1757～1842年）、その開国後、地下資源の大量消費と環境汚染が広がってゆく。現在、欧米、東アジア、南アメリカ等の国々では一方で様々な規制や対策が行われているにもかかわらず今後さらに広い意味での大気汚染問題、環境汚染問題が深刻化する様相を呈している。

英国やノルウェーでは依然として有鉛ガソリンが用いられ鉛汚染を引き起こしている。バルカン半島を含む東欧では亜硫酸ガスを含む排煙が山岳地帯に広がる森林に被害を与えている。ロシア西部では重金属や亜硫酸ガスが大ニッケル製錬所から大量に放出され、汚染はフィンランドやノルウェー等の国々に国境を越えて広がっている。南米チリでは銅鉱山から流れだす重金属や硫化銅の精練過程で発生する亜硫酸ガスが環境を汚染しその対策が問題となっている。山岳地帯に囲まれ酸性汚染ガスが滞留しやすい中国重慶近郊では酸性汚染物質の排出は年々増加し、健康被害や森林被害が深刻である。中国をめぐる環境問題は今後更に深刻化することが懸念されている。

このように酸性汚染物質のもたらす汚染と被害は国によって、地域によって事情は異なるがいずれにせよ大気汚染のモニタリング、生態系影響のモニタリング、

汚染の移流拡散や過去から現在に至る汚染の時系列変化を調査することが大きな課題となっている。

本稿では従来行われてきた環境汚染の時系列変化の調査手法について、特にこのために利用されているいくつかの環境試料について若干の解説を行うと共に、最近私達の研究所で開発された過去の汚染を知るための新しい手法“環境汚染のタイムカプセル樹木入皮”について紹介する。環境汚染を調査する場合、現在の汚染データを得るだけでなく汚染の歴史を判断し現状を評価することが重要であり、過去を検証する技術を開発し発展させることは一つの重要な課題となっているからである。

2. 過去の汚染を探るための従来の試料

環境汚染の時系列変化を内蔵する試料を大別すると、生物試料と堆積物試料に分けることが出来る。

生物試料には（1）博物館等の動植物標本、（2）貝試料、（3）珊瑚礁試料、（4）樹木年輪試料、（5）骨・歯試料等がある。堆積物試料には（6）湖底堆積物（湖底・内湾・海底堆積物等）試料、（7）雪氷試料（南極、北極、グリーンランド等の雪氷試料、アルプス等の氷河試料）等がある。

これらの環境試料が“環境汚染のタイムカプセル”として有効であるためには、

- 「1」汚染物質を含む試料の年代が明確であること、
- 「2」汚染物質が良く保存され拡散していないこと、
- 「3」試料形成後の汚染を受けていないこと

等の基本的条件を満たすことが求められる。しかし、多くの場合これらの三条件を完全に満たすことは困難であり、様々な分析手段を駆使し、或いは他のデータと組み合わせてデータを解析し、過去の汚染の検証を行う。従来用いられているこれらの生物試料、堆積物試料の概要・特色は以下のである。

（1）博物館の動植物標本の場合

博物館保存試料の例としてコケ植物標本を用いた研

* 国立環境研究所 地球環境研究グループ総合研究官
〒305-0053 つくば市小野川16-2

究例を見てみよう¹⁾ (コケ植物は重金属をよく蓄積し、試料の保存や化学分析のための前処理も容易なので環境汚染のモニタリングによく用いられている)。この研究はヨーロッパ各地の博物館に保存されているコケ植物標本に含まれる砒素やカドミウムやクロムや鉛等の汚染元素をを分析し、汚染の時系列変化を調べたものである。調査の結果、1845年から1901年にかけて採取されたコケ植物標本の汚染元素の量が最も低く、時と共にその量が増加し、最近になってその量の減少傾向が見られることが明らかとなった。このような博物館標本試料の多くは採取された年月日や採取場所が明確に記載されていて適切に分析項目を選べばそれなりの興味深い情報が得られるのである。しかし、次のような問題点も含んでいることを考慮する必要がある。それは、古い標本試料を得ることが難しいこと、特に古い試料は貴重で化学分析等の破壊分析に供することが難しいこと、又、試料は古くてもその試料が現在に至る大気に触れていること、つまり、試料の採取や保存は化学分析を配慮して行われていないので後から汚染されている可能性を含んでいること、汚染状況調査の必要な地域の過去の標本が必ずしも存在しているとは限らない事などである。

(2) 貝試料の場合

淡水或いは海水中に生息する貝の殻が年と共に成長し層状構造を形成することから、この層状構造にそって、つまり時系列にそって貝殻を分析し過去環境の解析を行うことがしばしば行われる。スウェーデンの湖沼に分布する二枚貝を試料として、含まれる重金属の分布をPIXE (Puroton induced X-ray emission) 等を用いて分析し、湖沼の酸性化に伴うイオウ含量の変化や重金属汚染の関係を調査した研究はその一例である²⁾。貝試料の場合、貝がその成長の過程で吸収蓄積した汚染物質に対象が限られ、しかも試料の前処理及び分析は容易でない等が問題点として上げられるが蓄積された汚染物質の保存性はよいと考えられる。

(3) 珊瑚礁試料の場合

海洋の物質循環や汚染は最近特に注目されている研究領域の一つである。又珊瑚礁は多くの生物の生息する場所でのその保全がしばしば問題となる。このような背景から年々成長する珊瑚礁のサンゴを採取し、環境の変動や汚染の時系列変化を探る事が行われている。又核実験で放出された放射性同位元素のサンゴによる蓄積も注目されている。しかし珊瑚礁試料に含まれる汚染物質の量は多くの場合微量で分析上の課題は多い。

今後サンゴを用いた過去の汚染並びに地球環境変動を探る研究の検討開発が期待される。

(4) 樹木年輪の場合

世界各地に分布する様々な樹種の年輪を用いて環境汚染を探る研究が行われている。中緯度地域に分布する樹木の場合、特に年輪の形成が明瞭で、年輪幅は、光、水、気温、栄養、大気汚染等、樹木成長を支配する環境条件を経過的に反映している。しかも年輪には樹木の汚染を反映して重金属や放射性物質等が含まれておりこれに関して多くの研究成果が得られている³⁾。しかしそれにもかかわらず、分析データのない遠い過去の樹木環境の汚染を年輪の汚染を指標にして知るのは易しくはない。それは年輪に蓄積している汚染物質の年輪への到達経路に問題が含まれているからである。大気汚染物質はまず樹木の葉や樹皮や樹木周囲の土壤に沈着する。葉や樹皮に沈着した汚染物質の一部は林内雨や樹幹流に含まれて土壤に到達する。そして、土壤に到達した汚染物質のうち、水溶性の成分が土壤中を移動拡散し、樹木の根によって吸収され年輪に達する。その際、樹木内では汚染物質の鉛直方向への移動だけでなく水平方向への移動拡散がみられる。

このような汚染物質の移動蓄積、大気-土壤-根-年輪への蓄積過程を考えると、各年輪に蓄積されている汚染物質は、必ずしも年輪形成時の大気汚染物質を直接反映しているものではないことがわかる。年輪は正確に一年一年形成されているので各年輪に蓄積している汚染物質が一見年輪の形成に対応していると錯覚しやすいが、年輪に含まれる汚染物質は主として土壤汚染に由来し、大気汚染については間接的なデータしか得られない点に注意する必要がある。

(5) 骨・歯試料の場合

遺跡や墳墓から発掘された人骨や歯、或いは現在生存している人間から採取した歯の分析が人間の汚染を調べる目的でしばしば行われている⁴⁻⁵⁾。人骨の場合特に注意すべき点は、埋葬された後に土壤や水に含まれる汚染物質によって汚染を受けた試料が多い点である。歯試料の場合、胎児が母親の胎内にいるときから歯の成長が始まるので、形成初期の歯には母親の汚染が反映し、生まれた後形成された歯に含まれる汚染が生後の汚染を反映している点が最近注目されている。

(6) 湖底堆積物の場合

湖底堆積物は過去の汚染を知るための試料として最も広く利用されている。湖に流入した汚染物質が動物プランクトン或いは様々な粒子の中に蓄積し、次に

これらの生物遺骸や鉱物粒子が季節変化や年変化に従って順序よく堆積し、層状構造を持つ堆積物が形成される。この層状堆積物に含まれる汚染物質の量を調べて汚染の時系列変化を知ることが出来るのである。このような研究によって多くの重要な情報が得られている。湖底堆積物試料の場合、まず大切なことは堆積物の層状構造を乱さないようなサンプリングを行うことである。このためには堆積物の物理的性質に対応したコアサンプラーを用いることが必要になる。次に生物による層状構造の攪乱 (bioturbation) についての配慮が必要である。一般に湖底堆積物の表層約10cmまでの部分には数多くの小動物が生息している。これらの動物は堆積物に穴をあけ層状構造を乱す。このほか風波による表面堆積物の攪乱や漁業による堆積物の攪乱にも注意が必要である。次に重要な点は層状構造の年代の特定である。通常は特定のイベント (特定の年の火山灰の降下や放射性同位元素の降下等) に注目したり、鉛210法や堆積物の中に含まれる木片等の試料に注目して炭素14法によって年代を決めることも多い。その際、鉛210法によって測定できる年代の限界がほぼ過去百数十年までであること、炭素14法によって測定できる年代の限界はほぼ2000年～3万年までの範囲であることに配慮する必要がある⁶⁾。

(7) 雪氷試料の場合 (南極や北極・グリーンランドの雪氷, アルプス氷河の場合)

近年地球環境そのものの汚染の進行に伴い南極や北極の雪氷にも汚染物質が検出されるようになってきた。その中で、1960年代当時、グリーンランド及び南極の雪氷に含まれる鉛の微量分析を行い、雪氷の鉛汚染が1940年代以後急速に増加したことを明らかにした室蘭工大室澄教授の先駆的研究は有名である⁷⁾。

南極や北極の雪氷の場合は発生源から遠く離れているため含まれる汚染物質の濃度が薄く、汚染物質を含む氷層の年代の特定も容易ではないが、地球規模の大気汚染や気候変動を反映し大変興味深く、最近では日本や欧米各国の国際共同研究も精力的に行われている。

雪氷試料で興味深いデータを提供している例として他にアルプスの氷河試料等がある。最近ヨーロッパでは窒素化合物による汚染が進んでいるが中でもアンモニアは最近注目されている化学種の一つで、沈着量の時系列変化の調査等が行われている⁸⁾。

3. 環境汚染のタイムカプセル “入皮” の発見

私達は産業革命以前から現在に至る環境汚染の歴史

を科学的に検証する手法を模索していたが、これに関する科学的なデータ、特に大気汚染に関するデータは極めて限られ、生物試料にしても堆積物試料にしても一長一短で過去の大気汚染を知る上で役立ちそうな “大気汚染のタイムカプセル” はなかなか得難いのが現状であった。

私達が産業革命以前から現代に至る大気汚染の時系列変化を内蔵する環境試料を模索していたとき、ある日その可能性を持っている試料があることに気がついた。それは樹木に内蔵されている樹皮 “入皮” (いりかわ) である⁹⁾。

入皮とは樹木の内部に年輪に挟まれて存在している外樹皮のことである。入皮は大気汚染の時系列変化を探る上で重要である。本来樹木の一番外側にある外樹皮に蓄積された汚染物質は大気汚染を直接反映しているからである。

3.1 入皮の形成機構

本来樹木の一番外側にある外樹皮がなぜ樹木の内部に存在するのだろうか。入皮の代表的な形成機構は次のようである。図-1に示すように、まず、何らかの理由で樹幹の一部が損傷を受け、樹皮がはぎ取られた状

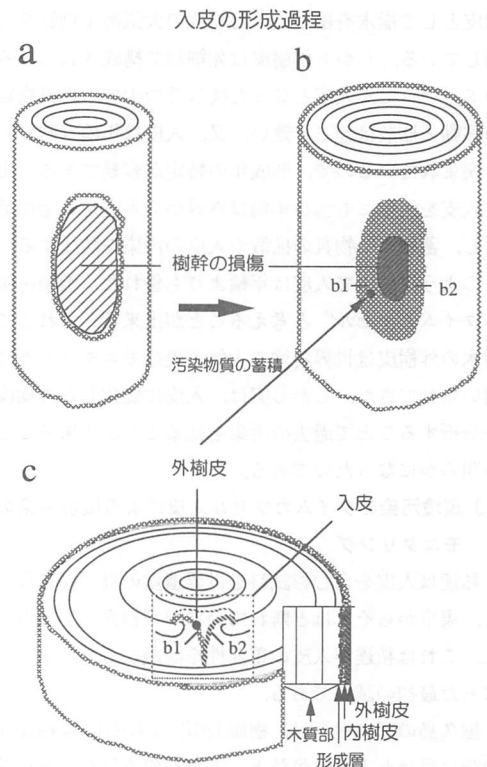


図-1 樹木入皮の形成機構

態になる。次に樹木の生長に伴い傷の周囲から樹皮と木質部が序々に傷を被ってくる。最初に受けた傷の大きさにもよるが、数年から数十年経ると樹皮と木質部は傷口を被いつくし、樹皮と樹皮が接触するようになる。この過程を経てやがて樹木に成長を担う形成層が合体し、形成層の外側には連続した樹皮が、そして内側には年輪が形成される。つまり形成層によって毎年形成される年輪の内側に樹木の傷口を包んだ樹皮が入皮として保存されるのである。

入皮の形成機構には他に樹幹が合体する過程で生じるものもある。はじめは別々に分かれていた幹が成長に伴い接触、接触部分が序々に増加し、やがて全体が一つの幹として合体し入皮が形成される場合である。

このほか入皮の形成機構には枝の包含過程で生じるものもある。植林地の樹木や公園などに植栽された樹木は枝打ちされ、その傷口を包み込むように周囲から樹皮と木質部が生長し、そして傷口が完全に包まれた段階で入皮が形成される。このような入皮の形成過程は街路樹等の場合にもごく普通に見かけることが出来る。

3.2 入皮の重要性

入皮は本来樹木の一番外側にある外樹皮であり、外樹皮として樹木を覆っていた時代の大气汚染物質を蓄積している。しかも外樹皮は死細胞で構成されているので、いったん入皮となった後はその中の汚染物質の移動・拡散は起こり難い。又、入皮は年輪(時計)に挟まれているので、形成年の特定が容易である。更に入皮を何重にも包む年輪は外界から入皮を完全に遮断し、蓄積汚染物質の拡散や入皮の汚染を防護する。このような理由で入皮は年輪よりも優れた“環境汚染のタイムカプセル”と考えることが出来る。これまで樹木の外樹皮は世界各地で大气汚染のモニタリングに用いられてきた。しかし実は、入皮に変化した外樹皮を分析することで過去の汚染も知ることが出来る事が明らかになったのである。

3.3 環境汚染のタイムカプセル入皮による環境汚染のモニタリング

私達は入皮を含む杉試料を世界遺産の島“屋久島”と、東京からそれほど離れていない“日光”で採取した。これは私達が入皮の重要性を認識するきっかけとなった最初の試料である。

屋久島の杉の場合は、樹齢226年のものに樹齢20年の時に受けた大きな傷跡と、それを包み込むように分布している入皮が残されていた(図-2)。年輪を数え

てみると、樹齢20年の時に受けた傷を樹皮が完全に包み込むためには更に23年を要していた。43年経た後に包み込まれた傷の外側には新たな年輪が年毎に形成され、傷と傷を被う樹皮は外部から完全にとぎされ入皮が形成されていたのである。

杉の外樹皮が現在の汚染の状況を反映しているとするれば、この183年前に入皮となった樹皮は183年前の汚染の状況を、すなわち江戸時代(1810年頃)の汚染を反映していたはずである。アジアの産業化以前の現代から見ればバックグラウンドと云ってよい時代の大气汚染レベルを反映する試料が手に入ったのである。

入皮を含む日光の杉は有名な日光杉並木から得られた。台風のため途中から折れた樹齢350~360年の杉の中に入皮が眠っていたのである。

屋久島と日光から得られた杉の入皮について、環境汚染元素である鉛に注目して分析した結果は極めて興味深いものであった。

現代の日光杉の外樹皮の鉛濃度が40~150ppmであったのに対し、約200年前の日光杉の鉛の濃度はわずか0.1ppmであった。一方、現代の屋久島に分布する屋久島産の杉の外樹皮の鉛濃度は約1.5ppmで日光の約100分の1の値を示し、更に屋久島の183年前の入皮の鉛濃度は0.2ppmを示していたのである。この結果は屋久島が日光(今市)よりも汚染度が低いことを明確に示すと同時に江戸時代の日光や屋久島の大气がいかに清浄なものであったかを明確に示している。

人類は古くから鉛を用いてきた。例えば江戸時代には酸化鉛は焼物や瓦の釉薬として絵画の顔料として、或いは化粧品として用いてきた。又青銅の中にも不純物として多くの鉛が含まれ鉱石の精錬過程で鉛が大气中に放出された事をうかがい知ることが出来る。しかし、これらの総使用量は近代のそれに比較すると微々たるものである。何と言っても多量の鉛が用いられる

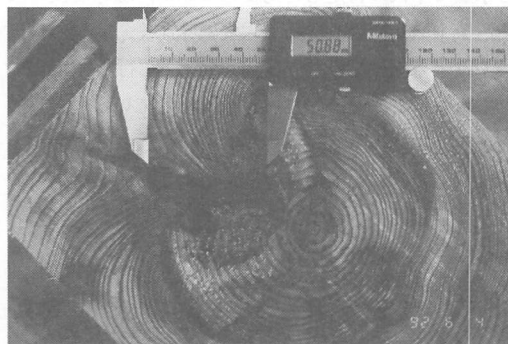


図-2 屋久島で採取した杉に含まれていた入皮

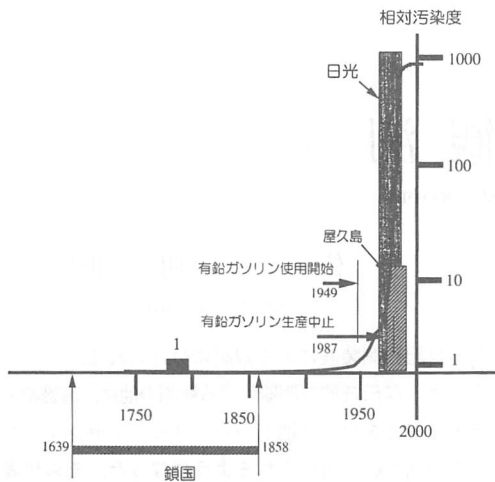


図-3 江戸時代と現代の鉛汚染レベルの比較（入皮に含まれていた鉛と外樹皮に含まれていた鉛濃度の比較）

ようになったのは、自動車のガソリンのアンチノック剤として加えられた有機鉛である。これが近代の鉛汚染の主原因である。我が国でアンチノック剤として有機鉛が最初に用いられたのは戦時中のことで、航空機燃料に添加されたようであるが詳細は軍の機密のペールに包まれて明らかでない。ガソリンの添加剤として本格的な使用が始まったのは1949年以降のことである。以後その使用量は増大し1960年代にはピークに達した（西川輝彦私信）。しかしその後、鉛による環境汚染を防止するため製造が中止され1987年には市場から姿を消すに至っている（図-3）。しかしすでに述べたように英国やノルウェー等のヨーロッパの国々でも依然として有機鉛ガソリンは使用されており世界的に見ると鉛による汚染問題は重要な環境問題の一つである。

3.4 入皮を用いた環境分析の可能性

樹木の入皮に注目した過去の汚染を探る手法は全く新しい方法であり、地球環境汚染のモニタリング手法として今注目されている。しかし環境汚染のタイムカプセル“入皮”に注目した研究は今始まったばかりである。従って、その評価については今後の研究の成果を待たなければならないが、過去を探るための樹木の“入皮”と現在の汚染を明確に反映している樹木の“外樹皮”を用いることで地球環境の汚染のモニタリングを世界各地に広げて行うことが出来ることは確かである。本稿で述べた鉛等の重金属汚染だけでなく、硫黄や窒素やリンや炭素等の化合物、放射性物質、安定同位体等、種々様々な化学物質のモニタリングにも

使えそうである。もちろん入皮や外樹皮を用いる環境モニタリング手法はあくまで一つの技術であり、地球生態系に与えた人類活動の影響を正しく把握するためには他の多くの研究手法と組み合わせ、より総合的な解析を行うことが必要である。環境汚染や自然破壊が地球規模の広がりを見せ21世紀の地球生態系についての懸念が広がっている現在、人々の活動が自然環境・地球環境に与えてきた歴史を客観的に考察することが必要となっている。その中で入皮から得られる情報が役立てば幸いである。

引用文献

- 1) Herpin, U., B. Markert, V. Weckert, J. Berlekamp, K. Friese, U. Siewers and H. Lieth; Retrospective analysis of heavy metal concentrations at selected locations in the Federal Republic of Germany using moss material from a herbarium, the Science of Total Environment 205 : 1-12 (1997).
- 2) Carell, B., S. Forberg, E. Grundelis, L. Henriksen, A. Johnes, U. Lindth, H. Mutvel, M. Olsson, K. Svardstrom and T. Westermark; Can mussel shells reveal environmental history, Ambio 16 : 2-10(1987).
- 3) Lewis, T.E.; Tree rings as indicators of ecosystem health, CRC Press, pp210 (1995).
- 4) Drash, G.A.; Lead burden in prehistorical and modern human bones, The Science of Total Environment 24 : 199-231(1982).
- 5) Patterson, C. C., H. Shirahata and J. E. Ericson (1987) Lead in ancient human bones and its relevance to historical developments of social problems with lead, The Science of the Total Environment 61 : 167-200.
- 6) 松本英二 (1981) 堆積年代測定法 (1) : 鉛-210法, 地質ニュース 320 : 47-51.
- 7) Murozumi, M., T. J. Chow and C. Patterson; Chemical concentrations of pollutant lead aerosols, terrestrial dusts and sea salts in Greenland and Antarctic snow strata, Geochimica et Cosmochimica Acta 33 : 1247-1294 (1969).
- 8) Doscher, A., H. W. Gaggeler, U. Schotterer and M. Schwikowski; A historical record of ammonium concentrations from a grazer in the Alps, Geophys. Res. Lett. 23 : 2741-2744 (1996).
- 9) Satake, K., A. Tanaka and K. Kimura; Accumulation of lead in tree trunk bark pockets as pollution time capsules, The Science of the Total Environment 181 : 25-30 (1996).