大気の環境変動と森林の関わり*

髙橋 けんし**

1. はじめに

初めに簡単に自己紹介をさせて頂きます。私の現在の専門分野は大気環境科学です。地球温暖化、大気汚染、成層圏オゾン破壊といった、空間的・時間的に様々なスケールで生起する地球環境問題を研究しています。研究の武器は、レーザーです。レーザー技術に立脚した超高感度計測装置の開発を行い、それを地球環境問題の研究に応用しています。京都府や滋賀県にある自然林や人工林にあるフィールドステーションへ出かけて行き、多数の共同研究者らと一緒に研究を進めています。なぜならば、森林は地球温暖化や大気汚染といった環境問題において重要かつ多彩な役割を担っており、それらの理解なしには環境問題の解決は成し得ないからです。草木が芽吹く春、蚊や虻の飛び交う夏、紅葉が美しい秋、小雪の舞うこともある冬。自然の息吹を体で実感しながら、観測装置を持ち込み（ときには背負って山道を登ります！）、泥んこ遊び（？）をしています。

2. 『森林と大気は、目に見えない物質の交換を通じて、互いにつながっている』

2.1 大気の「少数派」

私たちが日ごろ何気なく吸っている空気（大気）は、そのおよそ99%が窒素と酸素から構成されています。しかし、大気には、窒素と酸素以外の物質も含まれています。政治の世界に例えて言えば、「多数派」を占める窒素・酸素に対して、「少数派」が居るわけです。少数派の代表格が、二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素、オゾンなどです。これらの少数派をまとめて“大気微量成分”と呼んでいます。政治の世界のように多数派と少数派が取引をしたり…、などということはありませんが、少数派である大気微量成分は、地球の大気の化学的性質を特徴づけるとともに、環境問題において中心的な役割を担います。約46億年と言われている地球の長い歴史の中で、生命が誕生し進化してきた背景にも、大気微量成分の活躍は不可欠でした。

大気微量成分の発生源は、自然および人間活動の両方からの寄与を含んでいます。質的には非常に多彩なのですが、量的にはすべてを足し合わせても大気の 1%にも達しません。ということは、地球温暖化などの大気環境問題は、大気の中でたったの 1%にも満たない成分が、ほんの僅かだけ増減するだけで引き起こされるという、極めて繊細な問題であるということが要点です。つまり、地球の大気環境は非常に微妙なバランスの上に維持されてきたわけです。それゆえ、「大気微量成分を構成する分子がどこからやってきて、どこへ消えていくのか？」、「大気微量成分の循環や変動のプロセスはどのようなメカニズムによって決まっているのか？」といった問題を解明することは、地球の表層環境がどのように維持され、また、そこに人間社会の影響がどのように及びうるか、という問いを考える上で極めて重要な知見を与えます。

2.2 森林と大気のつながり

---

* 本稿は第 9 回生存圏研究所公開講演会（2012 年 10 月 21 日開催）講演要旨に加筆・修正を行ったものである。

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所大気圏環境情報分野.
E-mail: tkenshi@rish.kyoto-u.ac.jp

大気微量成分の例の一つとして、二酸化炭素があります。二酸化炭素が増加すると、グローバルな温暖化を誘因することは疑う余地はありません。二酸化炭素の収支、つまり、大気中にある二酸化炭素がどこから、どのくらいやってきて、どこへどのくらいの割合ずつで消えていくのか？を知ることは、自然科学はもとより、社会的にも喫緊の問題です。二酸化炭素は、人間活動に伴って大気中へ放出される一方、海洋や森林へと取り込まれます。森林を構成する樹木は、昼間に太陽光のエネルギーを借りて光合成反応を行います。捕捉された二酸化炭素は、幹や根へ移動する他、一部は呼吸に伴って大気中へと戻ります。樹木は、一方的に炭素を吸収しているのではなく、光合成と呼吸の差し引き分を、炭素として樹体に蓄積しています。また、落葉樹は秋になれば葉を落としますし、強風によって枝葉が落ちてしまうこともあるでしょう。地面に落ちた葉や枝は、森林土壌に生息する微生物によって分解されますが、その過程では二酸化炭素が大気中へと放出されます。このように、森林から大気へ、大気から森林へ、炭素はぐるぐると循環しているわけです。我が国は、国土の67%を森林に覆われた森林国と言われていますが、山間部の大規模開発や林業の荒廃、森林管理不足によって二酸化炭素の吸収効率の低下が懸念されています。森林樹木の炭素固定能およびその蓄積メカニズムを正しく評価することが求められています。

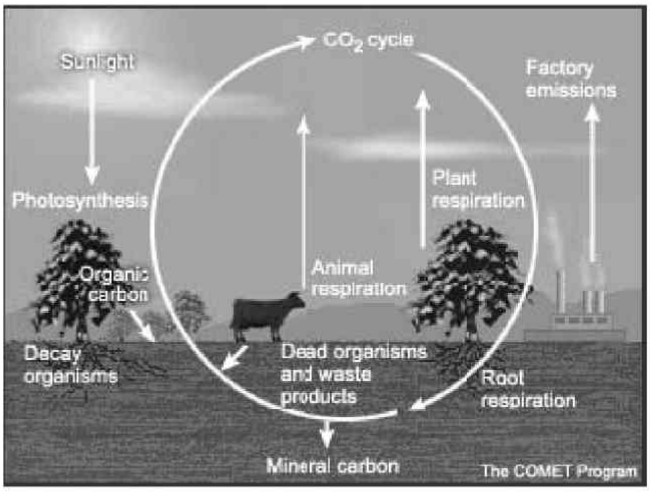

図１：炭素の循環を示した模式図。

樹木と大気との間を行き来する微量成分には、二酸化炭素以外の物質もあります。例えばコナラ属の一部は、イソプレン（2-メチル-1,3-ブタジエン）という化合物を大気中へ放出していることが知られています。いったいなぜ樹木がイソプレンを合成し、それを大気中に放出しているのか、その生理学的な理由は完全には解明されていません。樹木からのイソプレン放出量は非常に小さいため、それを正確に測定することはごく最近までは困難でした。イソプレンにまつわる有名なエピソードがあります。

今から 30 年ほど前、大気汚染の一つである“光化学スモッグ”に悩んでいたアメリカは、その対策に乗り出します。当時、大気環境科学を研究している人たちは、スモッグの原因が自動車や工場から排出した窒素酸化物(NOx と呼んでいます)と炭化水素にあることに気が付いていました。ですから、NOx や炭化水素が大気中へ放出されないような技術的対策を取り始めました。その結果、1980 年から 1995 年の間、アメリカ国内で人為的に排出された炭化水素は 12%減少し、NOx の排出量はほぼ一定でした。NOx の排出量が一定であったことは、アメリカの人口が 1.2 倍に増加し、自動車の使用が 1.6 倍に増加したことを考慮すると、決して規制に失敗したわけではなく、むしろ成功したと見なしてもよいかもしれません。さて、こうした抑制策がスモッグの減少へと結実したのでしょうか？過去 30 年ほどの長期的な観測によって、一部の都市地域ではスモッグが減ったものの、特に改善の見られない地域も多数あることが判りました。この成否入り混じった結果により、アメリカは大気環境の改善策の練り直しを必要とされることになりました。いったい、抑制策の何が間違っていたのでしょうか？

大気環境科学の研究が進んできた現在、その間違いの原因が分かってきました。30 年前に行われた研究では、人間活動に伴って排出される炭化水素のみが着目され、樹木や農作物から大気へと放出される生物起源の炭化水素量を考慮していなかったのです。その重要な化学成分がイソプレンです。今では、アメリカでのイソプレン放出量は、すべての人為起源炭化水素の排出量の合計よりも多いこと

が明らかにされています。極端な話をすれば、人為的に炭化水素を排出しなくても、植生からのイソプレンがスモッグの発生を誘因しうるということです。もちろん、人間が炭化水素や NOx の排出を続けてよいということを意味するものではありませんが、この例のように、木と大気の間を行き来する非常に微量な物質が、地球表層における大気の化学的特性を特徴づける重要な役割を担っていることが分かってきたのは、ごく最近のことです。

図２：科学論文誌に掲載された、とある論文のタイトル。green とは、直訳すると「緑」ですが、ここでは「環境にやさしい」という意味です。森の空気は人をリラックスさせたりすることが知られていますが、「果たして、森の空気は、本当に環境にやさしいだけなのか？」という機知に富んだタイトルです。

2.3 木と大気を行き来する物質を正しく測ることは、かなり難しい

前節でご紹介したように、樹木と大気との間では、様々な物質が行き来しています。そして、行き来する物質の種類、速さ、量などの特徴を知ることは、地球温暖化や光化学スモッグといった大気環境問題の正しい解決策を導き出すために大変重要です。また、木と大気を行き来する物質の速さや量は、樹木の生育する気象条件に依存することも分かってきています。まさに、木から大気へ、大気から木へ、人間の眼には見えない物質の循環を「観る」ことによって、地球環境を「診る」ことへと繋がっていくのです。

私たちの研究チームでは、植生・土壌から大気へ、またその逆に、大気から植生・土壌へ、微量成分が行き来する様子を調べる研究を行っています。この研究により、例えば、森林と大気との間で交換される炭素量や、微量成分が森林圏における大気環境に与える影響などを探っています。そのような着眼点を持った研究者が過去に居なかったのかというと、そうでもありません。しかしながら、そのような研究を進めるための技術は未熟でした。

二酸化炭素を例にして、それを「観る」のが如何に大変かということを説明します。二酸化炭素が、木から大気へ、あるいは大気から木へと行き交う様子を探るためには、二酸化炭素をどうにかして直接測定し、その動きを追尾してあげればよいだろう、という発想は誰もが持ちうると思います。果たして、そんなことが可能なのでしょうか？

大気に含まれる二酸化炭素はおよそ 380 ppm です。ppm という数字は 100 万分の 1 を表します。皆さんがよく使うと思われる“パーセント”に換算すると、0.038%です。冒頭でご紹介したとおり、大気の 99%は窒素と酸素で、その残り 1%の中のさらにそのまた極わずかが二酸化炭素なのです。0.038%という濃度を直感でイメージしてもらうため、福引きを思い出してみてください。福引きのガラガラの中には大気を模した球が入っています。窒素と酸素は白球、二酸化炭素は赤球（当たり？）です。ガラガラの中には、赤球が 0.038%しか入っていません。ほとんど白球なのです。赤球を引き当てるには、いったい何回ガラガラを回したらよいでしょう？これは確率の問題です。およそ 10000 回ガラガラを回すと 38 回赤球が出てくる計算になりますから、大雑把には 250 回ガラガラを回して 1 回赤球が出てくるくらいの確率ということになります。

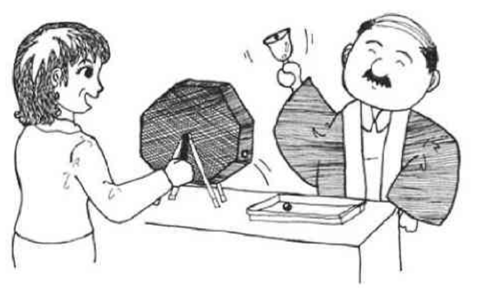

図３：大気環境問題の研究は、福引きで一等賞を引き当てるよりも難しい？？？

話が脱線しましたが、大気から一つずつ分子を取り出して数えることができたとして、250 回に 1 回くらいは二酸化炭素に当たるということになります。なんだ、250 回に 1 回くらいの確率なら、それほど大したことないぞ！と思った方いませんか？　それなら、前出のイソプレンならどうでしょう？　大気中のイソプレン濃度は、とある森林を例にすると 10 ppb くらいです。ppb は 10 億分の 1 を表します。パーセントに換算すると、0.000001%です。イソプレンを青球に例えると、ガラガラから青球を引き当てる確率は…？　これは簡単な算数の問題ですから計算して頂ければ分かりますが、この福引きはびっくりするほど当選確率が低いですね。

このような例え話を通して直感的に理解して頂きたいのは、大気微量成分は非常に濃度が低く、それを直接測定することが如何に難しいかということです。そこで私たちの研究チームでは、最先端のレーザー技術を応用して、二酸化炭素などの大気微量成分を瞬時に検出・定量する新しい方法を開発しています。レーザーは、世界的に有名な物理学者アインシュタイン(Albert Einstein, 1879—1955) によってその基礎的な理論が確立され、1950 年代後半になって実際の開発が進められるようになりました。トランジスタ、超伝導と並んで 20 世紀の三大発明の一つであるという人もいます。レーザーにも様々な種類がありますが、私たちは、半導体レーザーと呼ばれる小型で長寿命な素子を使っています。レーザーを使った方法では、福引のガラガラのように、大気の分子を一つずつ取り出しては二酸化炭素なのかどうかをチェックしているわけではありません。二酸化炭素は、赤外線と呼ばれる電磁波を吸収する性質があります。大気に含まれる二酸化炭素が多いと、レーザー光が多く吸収されます。二酸化炭素が少ないと、レーザー光はあまり吸収されません。すなわち、二酸化炭素の存在量に応じて、レーザー光の吸収量が変化します。こうして、大気中に隠れている二酸化炭素の濃度を分析することができます。この分析に掛る時間はほんの 0.1 秒程度です。あっという間に、二酸化炭素の濃度を測定してしまいます。私たちは、二酸化炭素に限らず、メタンや亜酸化窒素など、地球温暖化をもたらす物質であり、かつ、森林と大気の間で行き来する物質を測定するために、レーザーを用いた先進的な超高感度技術を創出しています。そして、開発した装置を持って、森林にあるフィールドステーションへ乗り込んでいくのです。

2.3 レーザーの基本的特徴

レーザーとはどういったものなのか、手短に説明します。レーザーは今や、研究や産業、家庭まで幅広く活用されており、身近なものにはレーザープリンタや CD/DVD プレーヤーがあります。では、どうしてレーザーが、大気中の微量な物質を追跡する研究に応用されるようになったのでしょうか。それは、レーザーが通常の光には無い三つの大きな特徴を持っているからです。

1) 一方向に直線状に進み、遠方まで届く

蛍光灯や白熱灯など、通常私たちが日常生活で利用する光は、四方八方に広がります。これは、部屋全体を明るくするには都合がいいのですが、ある一部分だけをよく見るには不都合です。人は知恵を絞り、懐中電灯やレンズという便利な道具を生み出して、光をなるべく狭い領域に集める工夫をしています。しかし、そうした方法をもってしても、広がる光を集めることはできますが、遠方までは届きません。ある種のレーザーは、数十キロメートル先までも広がらずに届きます。レーザーはレンズなどを使うことなくはじめからほとんど広がらずに、しかも直線状に遠方まで届きます。

2) 波長の決まった強い光の束である

太陽や蛍光灯の光には種々の波長が混じっており、全体として白っぽく見えます。しかし、空の虹に代表されるように、太陽の光には、赤、橙、黄、緑、青、紫といった、様々な色の光が混じっています。色によって、光の波長が異なっています。虹を待たなくても、小学校の理科では、プリズムを使った実験をしますね。プリズムを通した太陽の光は、虹のように様々な色の光に分離します。こうして取り出した色々な波長の光は、もともとは白色だった光から取り出したほんの一部の光なので、

強度は非常に弱くなってしまいます。レーザーは初めから特定の波長の光だけを射出できます。パワーが特定の波長に集中しているため、非常に強い光になります。この性質は、極微量の分子や原子を高感度に検出しようという場合に役立ちます。

3) 非常に短い時間で放出できる

レーザー光は非常に短い時間内にいっきに放出させることもできます。瞬間的に発振するレーザーがパルスレーザーであり、私たちが実験に用いているレーザーの中には、発光時間が一億分の一秒以下のものもあります。カメラのストロボの発光時間が千分の一秒程度ですから、レーザーパルスがいかに短時間の発光であるかが分かると思います。短時間に圧縮された光は瞬間的な光子密度が大きく、今回ご紹介するような大気中の微量成分の検出だけでなく、化学や工学の分野でも広く応用されています。

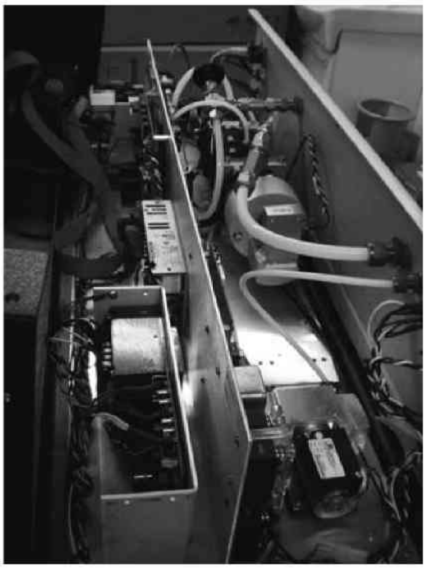

図４：私たちが観測に用いているレーザー装置の写真。

2.4 大気環境変動の正しい理解へ向けて

私たちがレーザーを用いた装置を森林へ持ち込んで、実際に行っている研究例 [1,2] をご紹介します。

私たちの研究チームは、京都大学農学研究科、大阪府立大学、森林総合研究所などの研究チームとの共同で、滋賀県大津市にあるヒノキ林や、京都府南部にある混合林で研究を行っています [1,2]。観測サイトでは、二酸化炭素やメタンといった地球温暖化に関わる微量物質を測定している他、気温や湿度、降水量、日射量といった気象要素の観測も同時に行っています。具体的には、林床およびヒノキの葉や幹が､大気との間で交換する二酸化炭素やメタンの量と速度をリアルタイムで測定しています。こうしたレーザーを用いた計測は、私たちの共同研究チームが世界に先駆けて実施している研究であり、観測サイトではおよそ4年近くに及ぶレーザー測定のデータが蓄積しつつあります。このような長期にわたる観測は、「気象条件によって樹木に出入りする微量物質の量が、年ごとに違うのかどうか？」を明らかにするためにも重要です。

最近は、人工衛星による観測技術が発展し、二酸化炭素やメタンが全地球的にどのような濃度分布をしているかを、宇宙から測定できる時代になってきました。例えば、若田さんや古川さんの滞在で有名な国際宇宙ステーションにも、地球の大気環境を調べる最先端の観測機器が搭載されています。しかし、二酸化炭素やメタンの全球的な“収支”、すなわち、『二酸化炭素やメタンは、どこからどのくらいの量が大気中へ放出され、大気からどこへ消えていくのか？』という極めて基本的な問いに対して、研究者たちはまだ明確な答えを持ち合わせていません。温暖化をもたらす微量物質の全球的収支の理解不足は、IPCC（Intergovernmential Panel on Climate Change; 気候変動に関する政府間パネル）の報告書でも指摘されています。私たちが始めた小さな研究が、その答えを導き出すのに重要な貢献をしうるに違いないと信じて、春夏秋冬、観測に勤しんでいます。

3. まとめに代えて

ここまでご紹介してきたように、木から大気へ、大気から木へ、目には見えない微量な物質を「観る」ことは、今の地球環境を「診る」ことにつながります。人口が増え続け、地球の表層環境は確かに人間の影響を受けています。地球温暖化や大気汚染、成層圏オゾンの破壊などの大気環境問題は、その影響の現れです。決して容易には解決しないこれらの問題を解決するためには、工学、農学、理

学の様々な研究者がスクラムを組んで、複眼的かつ多角的に地球環境の今を診る必要があります。今回の講演会を通じて、私たちの研究の重要性をご理解いただければ望外の喜びです。

参考文献

1) K. Takahashi, Y. Kosugi, A. Kanazawa, and A. Sakabe, Automated closed chamber measurements of methane fluxes from intact leaves and trunk of Japanese cypress, Atmos. Environ., **51**, 329-332, 2012.
2) A. Sakabe, K. Hamotani, Y. Kosugi, M. Ueyama, K. Takahashi, A. Kanazawa, and M. Ito, Measurement of methane flux over an evergreen coniferous forest canopy using a relaxed eddy accumulation system with tuneable diode laser spectroscopy detection, Theor. Appl. Climatol., **109**, 39-49, 2012.