



地球大気環境科学
近藤 豊

Global Atmospheric Environment
Professor KONDO, Yutaka

エアロゾルがもたらす 大気汚染と気候変動

インタビュー：教授 伊福部 達

大気汚染物質エアロゾルの濃度を どのようにコントロールすべきか

—— 先生のご専門である地球大気環境科学の分野は世界的に大きなテーマに発展していますが、先生の具体的なご関心はどこにありますか。

私どもは大気中の微粒子、即ちエアロゾルの研究を行っています。計測技術を開発し、実際に大気の観測を行い、そのデータを丹念に解析し、大気環境の現状がどうなっているかを調べています。エアロゾルは大気汚染物質ですから、人間がそれを吸うと肺がんになったり、血液・血管障害を起こしたりします。だから、それをいかに抑えるかはどこの国でも重要課題になっているわけです。

例えば東京都のディーゼル車問題ですと、我々先端研でもディーゼル粒子を5年間測って、1年くらい前から大きく減ってきていることを実証しました。そういう実証データが非常に大事で、正確な計測によって、ディーゼル車の規制効果を示せたことはひとつの社会貢献だと考えています。

—— エアロゾル、大気粒子についてもう少し説明していただけますか。

典型的には1ミクロン以下の大きさのものです。黄砂のような1ミクロンより大きなエアロゾルは、「大きい粒子」と呼ばれます。大きい粒子は自然起源なのに対して、1ミクロン以下の「小さい粒子」の多くは人為起源、つまり人間活動によってできると考えられます。特に物を燃やすことで気体が発生して、それが酸化凝縮して粒子になるような場合です。黄砂がなくても、東京で水平線が霞って見えることがあります。それが「小さい粒子」の層です。

中国に行くとき空全体が霞って見えますが、それは粒子濃度が非常に高くなるからです。特に中国の場合は、SO₂の放出が非常に高くそれが酸化した硫酸は水を吸いやすいので余計に霞るんですね。日本の場合は規制があって脱硫装置などのお陰で、SO₂は少ない。他方、有機成分

が多いんですね、有機成分の方がより水を吸いにくいという性質があります。

化石燃料や薪などのバイオマスを燃やすと有機成分や硫黄成分が排出されます。それが、大気中で、飽和蒸気圧の低い気体に酸化されると、気体でいらなくなり、凝縮して微粒子になります。このエアロゾルを含んだ空気が、低気圧活動などによって上昇して、温度が下がり湿度が高くなると、エアロゾルが水を吸って雲粒をつくるんですね。だから雲をつくる核という意味ではエアロゾルは非常に大切な成分でもある。エアロゾルが増えると雲の性質が変わるといのはかなり前から理解されていますが、その効果がどのくらい重要かという点は、実はよく分かっていません。

—— つまり、雲ができることでちょうど地球がシャツを一枚着たように感じて暖められるということでしょうか。

それが実は逆なんです。というのも、エアロゾルで空気が霞って見えるというのは光が遮られているからで、同じように太陽の光が地面に到達するのをブロックしているんです。先ほど雲が出来るお話をしました。雲ができる時に水蒸気量が同じであればエアロゾルがたくさんあればある程、雲粒の数は多くなりますが、1粒1粒の大きさは小さくなります。というのは、一つのエアロゾル当たりの水蒸気量が少なくなりますから。そうすると、結果的に雲の断面積が大きくなるので、より太陽の光を反射しやすくなる。また、雨というのはその雲を構成する粒がぶつかることによって大きくなり、落ちるんですが、最初の雲粒が小さいと、雨粒になりにくく、浮かんでいる雲の量は多くなります。このようにエアロゾルが増えると、雲により太陽光が反射されやすくなり、地球を冷却するという複雑な「間接的な効果」と言われる現象が起きるのです。その効果が結構大きくて、これを計算すると産業革命以降のCO₂増による温室効果をエアロゾル粒子がかなり相殺していると考えられていて、第4次IPCC（気候変動に関する政府間パネル）レポートでもそのように述べられています。

地球の温度はどのように決まるか。太陽の可視光線は雲あるいはエア

ロゾルによる反射を除けば地面に到達して地面、あるいは海を暖める。そのまま地球は限りなく温度が上がってしまうので、同じ分だけエネルギーを逆に宇宙に返さないといけない。いわゆるブランクの法則という法則です。地球の場合は温度が低いから可視光線ではなくて赤外線という形で放出します。その赤外線を吸収する物質の中で特に多いものが地球の場合はCO₂や水蒸気で、CO₂や水蒸気がないと地球の温度は-18℃になってしまいます。ところがそれが適正レベルを越えて増え続けているので温暖化が進んでしまう。つまり、CO₂による地球温暖化の効果は物理的に非常に明確で、そのものを疑う必要性は全くありません。実際、それが無いと地球は冷たい惑星になっているはずですよ。

——ということは、むしろエアロゾルを増やすような燃焼をすれば温暖化と冷却で相殺できるのですか。

実はそれが問題で、冒頭でも申し上げたようにエアロゾルは大気汚染物質で人体に悪影響がある。例えば中国もエアロゾル濃度が非常に高いことはよく認識していて、減らす努力もしています。そのことは確かに人間の健康にはいいんですが、エアロゾルによる冷却効果が急速に減ると温暖化が加速されるかもしれないという皮肉な懸念もあるのです。

地球温暖化対策のため まずブラックカーボンの削減を

エアロゾルには硫酸のように光を反射する効果のあるものと、ブラックカーボン(すす)のように光を吸収するエアロゾルがあるんですね。煤は太陽の光を直接吸収して暖める温暖化物質なので、大気汚染対策としてはブラックカーボンを優先的に減らすことが大事だと考えられるようになってきました。技術的には比較的楽で、フィルターをつけたり燃焼形態を変えたりといったことで短期的に発生量を抑えることができる可能性がある。しかも、ブラックカーボンには発がん性などの有害な物質が付着しているので、ブラックカーボンの発生を抑えることは、このようなリスクを低減できるという大気汚染対策にもなります。

——最近では、ブラックカーボン粒子の計測とそれをどうコントロールするかが大きなテーマになっていますよね。

そうですね。ブラックカーボンは本来、大気汚染物質なので、その低減が政策目標にあがっていてもいいのですが今のところ、ブラックカーボンを直接ターゲットにした動きはありません。もっとこちらから提言をしていった方がいいと思います。

——先生は、温暖化の今後の方向性を予測するためにはブラックカーボンを計測したほうがいいというお考えなのでしょうか。

我々の第一の研究目標はブラックカーボンが地球を今どれだけ暖めているのか、またエアロゾル全体が地球の気候にどれだけの影響を与えているのかということを精密化することです。そして、最終的には単なる測定や現状の理解だけではなくて、ブラックカーボンの温暖化への寄与を明確にした上でその削減に向けた働きかけをする必要があるのではないかと考えています。

ブラックカーボンは放出をやめると恐らく、ひと月後に低減の効果が現れます。CO₂の方は寿命が非常に長いので、今日エネルギーを止めてもその効果が現れるまでには、百年近くかかる。短期的には、CO₂の削減技術が成熟するまでの温暖化防止のため、CO₂の削減の一層の努力と共に、ブラックカーボンの削減にも取り組むことが有効であると思います。

環境問題は世界各国、他分野との連携が必要

——環境問題は日本だけで議論していても駄目で、中国や最近ではイン

ドなどと協力して研究を進める必要があると思うのですが、そのような体制は考えていらっしゃいますか。

中国とは3、4年ほど前から現地調査などを共同で行っています。東アジアで今後日本がどのような役割を担っていくのか、という意味でも環境問題での交流は非常に大事だと思っています。

——環境が人体に与える影響についても言及されていました。そうすると今後は医学系との連携も必要になってきますよね。

おっしゃるとおりです。日本では残念ながらそういうことを研究されている方は少ない。むしろ中国は問題がより深刻であることもあって、最近、積極的に研究を進めています。一番進んでいるのはアメリカで、大気汚染の度合いによる発がん率や死亡率といった病院の様々なデータを持っています。日本は実証データが極めて少ない。

——お話を伺っていると、先生の研究は基礎的なサイエンスだけでは解決できない問題に広がっていますよね。今の医学の話もそうですし、提言していくという意味では政策のことも考えなくてはならない。そういう意味では、先端研というのは非常によい環境のような気がするんですが。

そうですね、最近先端研にこられた山口光恒特任教授や、澤昭裕教授がCO₂の削減という政策課題の研究を中心に研究をされておられます。しかし、エアロゾルやブラックカーボンなどは、その重要性にもかかわらず、社会的にもまだ理解が十分ではありません。でも今後は先端研という場や機会を利用して、皆さんにまだあまり馴染みの無いことを先端研から発信していくというのは大事なことだと思います。

二酸化炭素が増え続けると 地球はどう変わっていくのか

——ところで、先生はこの分野に地球物理から入られていますよね。今のような事態は予想されていましたか。

私はそれまではオゾン層の破壊を研究して北極に行ったりしていたのですが、オゾンホールが解明を経て研究は一段落したわけです。その後、地球温暖化の問題がグロースアップされる前にどちらかと言うと、冷やす側のエアロゾルに注目して研究を行ってきました。ただ、最先端の計測技術の開発も含め、現在のような研究成果を出すまでに5年ぐらいかかってしまったんです。今回の第5次IPCCレポートには客観的データを含めた論文が掲載されて、我々としてさらに貢献が出来ればと思っています。

——先生は今後、これらの研究成果をどのように発展させていかれるのでしょうか。

そうですね、我々はCO₂が増えた時に、地球のシステムがどう応答するかは知らない。知っているかと思っているかもしれませんが、知らないんです。そのシステムが本当に大きく変わるかもしれない。雪氷圏が変わる、海が変わる、大気が変わるとかですよ。海や森林によるCO₂の吸収が変わるかもしれないし、我々が想定しているシナリオ通りに自然界が動くかどうかそこまでは誰も知らない。将来を知っていると思うのは傲慢すぎる。だから私としては、そこは1つ1つの重要な要素をきちっと定量的に押さえていきたい。あまり大きなことは言わなくてもいいけれども、鍵となるような詳細を一その詳細が非常に大事だと思っているんですけれども、しっかり押さえていくことが、将来を予測する上で、一番大事な知見ですね。

——少し視点が変わりますが、物理などの自然科学は実験室で再現して、実証できますよね。実証して理論を打ち立てて次に進んでいくところが、今日のお話は社会科学的な要素、一回しか起きないような現象を扱っているようなところがありますよね。そうすると、どのように実証するのでしょうか。大量のデータを入れた大きな計算機使ってシミュレーションし、その予測どおりになったというような方法ですか。

この分野の研究の一つの手段としてラボの実験があります。ミクロな過程をまず詳細に調べて、化学反応がどのくらい進むか、光がどのように分子やエアロゾルで吸収されるかという測定はラボで行います。それが現実の大気中ではどうなっているか、地球はどうなっているかといった時には、ラボや野外の観測で得られたデータを入れてモデル計算をします。その時に、複雑なシステムを全部入れることはできなくて、一部重要だと思われるものを切り取って計算しますから、そこには人間の恣意が加わるんですね。

全ての過程が含まれているわけではないので、モデルが間違っているかもしれない。あるいは、自然界では我々がまだ知らない様々なことが起きているかもしれない。そこには逆に観測者として発見の喜びがありますね。もちろんモデルで過去の気候変化を再現できたらそれはそれで素晴らしいですよ、100年間に気温が地球平均で0.8℃上がったとか。でもそれは結果であって、その結果を出すための中間の過程を理解することがサイエンスとしては非常に大事です。今のモデルでは、地球平均の上昇はそれなりに再現できても、気候を変化させる各要素を十分に再現している訳ではありません。各要素を再現することは、答えの分かっていない将来予測を行う場合、さらに大切になってきます。不十分なモデルを改良するためには自然のメカニズムをより深く理解しなければならないと思うんですね。

——そういう意味では社会科学や歴史学と近いんじゃないかとも思うんですが、地球の歴史は何十億年と変動していますよね。この変動に規則はあるんですか。

一番わかりやすい例は、10万年単位で周期的に訪れる氷河期と間氷期です。いわゆるミランコビッチ説というのがあって、地球の自転軸の傾きが4万年位の周期で変化します。あるいは太陽の周りを回る地球軌道が楕円率（離心率）が他の惑星の影響で、10万年周期で変わるんです。ミランコビッチによると、自転軸の傾きが小さくなると夏の期間は北極に、陽があたりにくくなる。夏が涼しくなると、前の冬に積もった雪が溶けにくくなるので氷床は前進する。氷床による反射率が高くなって北極が冷え、氷床が更に発達するというフィードバック効果で氷河期に入るということなんですね。CO₂も同じ周期で変動していて、このフィードバックを更に強めたかも知れませんが、詳しい点については、まだ良く分かっていません。

地球はこれまでも気候変動を繰り返しているので、将来、二酸化炭素がさらに増加した場合のことを考えると、過去の歴史を見ることが結構役に立つ。伊福部先生が言われたシミュレーションモデルの実証のために、過去の気候を再現しようという努力は実は行われつつあるんです。

地球の未来は人間の行動によって決まる

——それでは10万年後、あるいは地球の最後はどうなるんでしょう？ 温暖化を繰り返しながら、結局、星と同じ運命をたどるのでしょうか。

今後、太陽は熱核融合反応により、さらに多くのエネルギーを生み出すようになって、遠い未来、地球の温度は温室効果どころか灼熱地獄になることは間違いない。その時は、残念ながら、海水も蒸発し、人類や地球の生命は全て滅びる。そこまでは人間は知的に文明を楽しんで、その行く末を見極めた上でモデスト (modest) に生きたいんじゃないかな。

いかな。

その一方で、地球温暖化に話を戻すと、人間や地球の未来は人間が変えられるはずなんです。だって人間が起こしている現象なんだから、人間の行動によって変えられるわけでしょう。行動を起こすときに、地球とは何か、自然とは何か、我々とは何か、ということ深く考えた方がより明確な動機のもとに行動できるんじゃないかと思います。

——地球をどうするかというのは人間が行動して決めるということですよ。

そうですね。研究者としてその一端を担っていることが私自身の重要なポイントですし、先端研としても役に立てるとすごくいいと思います。先端研は科学や技術を含めて人間の生き方を考える場でもあるんじゃないでしょうか？ 環境や福祉、いろんなことに役立っているわけです。

——盛り上がってしまいました(笑)。地球は10万年周期で変化していて最後にはなくなってしまう、という知識では知っていたことを専門家から聞くと、説得力が違います。だからこそ逆に、今この地球をどうしたらいいかを考えるという、そういう大局観を持つことはとても大事ですよ。ありがとうございました。

(2008年1月25日)

略歴

1977年4月
東京大学理学博士

1979～1980年
環境科学研究所(ドイツ) 研究員

1989年4月
名古屋大学太陽地球環境研究所助教授

1992年4月
名古屋大学太陽地球環境研究所教授

1995年4月
名古屋大学太陽地球環境研究所・附属母子観測所長(兼任)

2000年4月
東京大学先端科学技術研究センター教授

関連情報

近藤研究室のサイト
<http://www.atmos.rcast.u-tokyo.ac.jp/>
東京大学先端科学技術研究センター
<http://www.rcast.u-tokyo.ac.jp/ja/>