



環境儀

NO.68 March 2018

国立環境研究所の研究情報誌

スモッグの正体を 追いかける VOCからエアロゾルまで



大気汚染物質には、
大気に直接排出されるもの以外に
大気中での化学変化によって
生成する物質があり、その対策には、
大気中での化学変化の理解が不可欠です。
私たちは、スモッグチャンバーを使って
化学変化の正体を調べています。





大気に排出された化学物質は、あるときは太陽光の降り注ぐ日中に、またあるときは夜間に起こる化学変化により別の物質に変化します。化学変化によって生じる二次汚染物質は、直接排出された汚染物質とともに、環境、人体および生態系に有害な影響を及ぼす恐れがあります。二次汚染物質に対する対策を講じるには、それがどのようなメカニズムで発生するかを知ることが必要です。大気中には様々な化学物質が混在しており、それらが異なる気象条件の下で、また風で別の場所に運ばれる途中で化学変化が進行するため、化学変化のメカニズムを大気の野外観測だけで理解することは困難です。そこで、大気中での化学変化を実験室で再現し、そのメカニズムを詳しく調べることが必要となります。

国立環境研究所には、大気中の化学変化を調べるための「スモッグチャンバー」と呼ばれる装置があります。私たちはこの装置を使って、光化学オキシダントや二次有機エアロゾル (PM_{2.5}の主要成分の一つ) の発生に関連する化学変化のメカニズムの解明に取り組んできました。

本号では、「スモッグチャンバー」の仕組みや、オキシダントと二次有機エアロゾルの発生プロセスについて解説します。また、最近の取り組みとして、国内におけるオキシダント増加の原因解明、PM_{2.5}予測の高精度化のための二次有機エアロゾル生成機構の解明、二酸化炭素回収貯留 (CCS) プラントなどに由来する、アミンの大気化学プロセスに関する研究について紹介します。

CONTENTS

スモッグの正体を追いかける

VOC からエアロゾルまで

- Interview 研究者に聞く
スモッグチャンバーで
大気中の化学反応を明らかに …… p4 ~ 9
- Summary
私たちをとりまく大気汚染問題を
スモッグチャンバーで探る …… p10 ~ 11
- 研究をめぐって
スモッグチャンバーを活用した
最新の大气化学研究 …… p12 ~ 13
- 国立環境研究所における
「スモッグチャンバーを活用した
化学反応プロセスの解明に関する研究」
のあゆみ …… p14

スモッグチャンバーで 大気中の化学反応を明らかに

地球をとりまく大気中には存在量は少ないもののたくさんの種類の物質（微量成分）が含まれています。それらの中には、人体や環境に好ましくない影響を及ぼすものがたくさん含まれています。これらの成分がやっかいなのは、大気に放出された汚染原因物質が大気中での化学反応によって次々と別の物質に変化し、時には自分たちが直接排出した覚えがない微小粒子などに形を変えて予想しなかった影響を及ぼすことです。環境計測研究センター長の今村隆史さんと地域環境研究センター広域大気環境研究室主任研究員の佐藤圭さんは、その反応過程やメカニズムをスモッグチャンバーという特殊な実験装置を用いた大気反応の模擬実験で明らかにしています。

チャンバーを使った微小粒子の研究

Q：スモッグチャンバーを使うと何ができますか。

今村：スモッグチャンバーは大気化学の研究をするための装置です。実験をするための反応容器と考えてください。大気中には様々な化学物質が混在していて、野外観測の結果だけから複雑な反応過程を理解することは難しいのです。そこで、目的の反応だけを切り離して研究するため、スモッグチャンバーを用いた室内実験が行われてきました。スモッグチャンバーはこうした反応機構の解明や生成物の収率評価、数値モデル計算に使う速度論的パラメータの決定に利用されます。また、チャンバーで生成した二次粒子の光学特性など物理化学特性の評価や汚染物質の曝露実験による

健康影響評価などにも利用されます。

Q：どんな物質を研究するのですか。

今村：スモッグチャンバーを使った大気化学の研究をスタートした契機は、20世紀中頃から問題になった光化学スモッグでした。光化学スモッグの原因である光化学オキシダント（光化学反応で生成するオゾンなどの酸化剤）は大気中の化学反応により生成したもので、観測だけではそのメカニズムの解明や効果的な対策立案の指針を立てることができませんでした。そこで、1974年に国立環境研究所の前身である国立公害研究所が開設するときに、スモッグチャンバーを設置し、光化学オキシダントの生成反応を再現することをめざしました。

コラム① 大気中でのオゾン生成プロセス

オゾン(O₃)は、大気中で酸素分子(O₂)から生成する酸素原子(O)とO₂の結合反応によって生成する酸化力の強い物質です。私たちの身の回りの大気にあるオゾンは、その強い酸化力による負の側面(例：健康被害や植物・作物被害)から、しばしば「悪いオゾン」と呼ばれています。一方で、高度約10~50kmにある成層圏オゾン層のオゾンは太陽光に含まれる有害紫外線を吸収するフィルターとしての役割があり、時として「良いオゾン」と呼ばれています。大気でのオゾン生成の鍵となるO₂からのO原子の生成のメカニズムは成層圏と対流圏(地表面~高度約10km)で異なります。成層圏では、短い波長(高いエネルギー)の紫外光によってO₂が直接光分解されてO原子が生成します(図1-a)。一方、オゾン層の紫外線フィルター効果のため、対流圏に到達する太陽光にはO₂を分解できる紫外光は含まれていません。

対流圏でのオゾンの生成で重要なのが、COやメタンな

どの反応性の有機化合物と窒素酸化物の存在です。大気中で反応性有機化合物が酸化される過程で、O₂は過酸化ラジカル(例えば、HOOラジカルやCH₃OOラジカル)と呼ばれる活性種に変換されます。この過酸化ラジカルの酸素原子間(O-O)の結合エネルギーはO₂の半分程度であり、O-Oの結合が弱まっていることが分かります。さらに過酸化ラジカルの適度な酸化力により、大気中の一酸化窒素(NO)を二酸化窒素(NO₂)に酸化できます。NO₂は対流圏に到達する太陽光中の近紫外光(UV-A, B)でも光分解して、O原子を放出し、同時にNOが再生されます。NO→NO₂変換は、対流圏に到達する太陽光を利用可能にし、NOが再生されることで、繰り返しNO→NO₂変換が可能になります。このように対流圏では、COや反応性有機物の酸化反応によるO-Oの結合力の低下と、NO→NO₂変換を通じた太陽光の利用によって、O₂からO₃が生成します(図1-b)。



環境計測研究センター
センター長 今村 隆史(いまむら たかし) (右)
地域環境研究センター(広域大気環境研究室)
主任研究員 佐藤 圭(さとう けい) (左)

Q：それ以来、40年以上もスモッグチャンバーを使った実験が行われているのですか。

佐藤：はい。でも対象となる物質は変わっています。

今村：1980年代に地球環境問題が大きな関心を集めたころには、フロンによる成層圏オゾン層の破壊のメカニズムを調べる研究もしました。1990年代になると、大気中の微粒子の研究がさかんになってきて、その研究が続いています。時代とともに研究テーマや扱う物質は変わっています。

Q：研究の目的は現象を理解するためですか。

今村：はい。現象を理解しないと対策はとれないですからね。

佐藤：私はチャンバーを使って、日本の大気中の微量

成分の現状を理解するための実験をしています。環境基準を新たに導入するときなどに、チャンバーで得られるような現象理解に関する基礎データから、どのような化学物質を規制するか、(複数の規制のオプションがある場合に)どのような規制を優先するのが効果的か、という方針が検討されます。

Q：チャンバーはどれくらいの頻度で使うのですか。

佐藤：研究テーマによって実験は違いますが、年間の約3分の1はチャンバーを使った実験をしています。

大気の状態を再現するチャンバー

Q：スモッグチャンバーとはどんな装置なのですか。

今村：大きな大気の実験容器です。大きな容器といっても色々なサイズのものであって、風呂桶のようなサイズのものから、小さなビルくらいあるような巨大なものまであります。

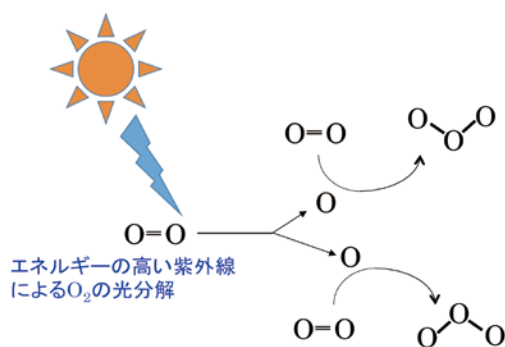
Q：そんな巨大な装置が日本にあるのですか。

佐藤：それはヨーロッパにあります。研究所のものは体積が6m³の中規模のもので、日本では最大のチャンバーです。私たちの中規模のチャンバーは、巨大なチャンバーに比べて実験条件の制御がしやすい、実験の数をこなしやすいなどのメリットがあります。

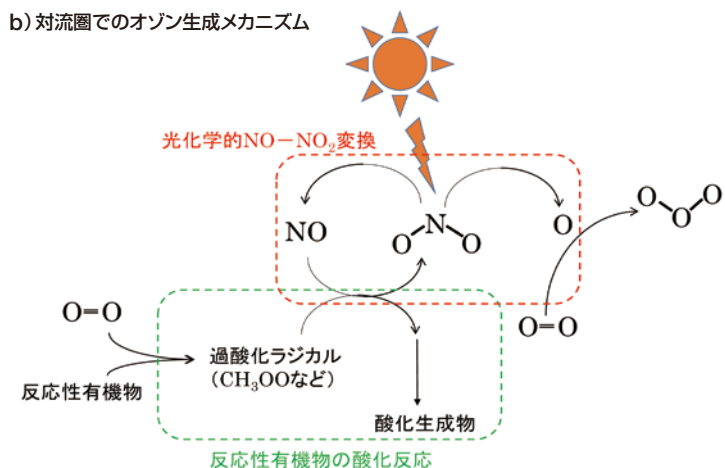
今村：ステンレス製の円筒型で大人が寝ると二人分の長さがあり、大人が立てるぐらいの直径です。気圧、気温、湿度、照射光スペクトルや光量などをコントロールできます。チャンバー内に目的の化学物質を注入し、人工の太陽光を当てて光化学反応のシミュレーション実験をします。

Q：そんなに強い光を当てることができるのですか。

a) 成層圏でのオゾン生成メカニズム



b) 対流圏でのオゾン生成メカニズム



■ 図1 大気中での光化学的なオゾンの生成

a) 成層圏では、エネルギーの高い紫外線によってO₂が光分解されることで生成するO原子とO₂分子の結合反応でオゾンが生成されます。
b) 対流圏では、成層圏とは異なる仕組みでオゾンが生成されます。まず、反応性有機物の大気酸化反応によってO₂が過酸化ラジカルに変換されることで、O-Oの結合力が低下します。続いて、過酸化ラジカルと窒素酸化物を介したNO-NO₂変換により、対流圏に到達する太陽光でも、O原子生成が可能になります。このようにして生成したO原子とO₂分子の結合反応でオゾンが生成されます。

佐藤：春秋の昼間に日本で見られる太陽と同程度の光を当てることができます。光の波長も太陽と同様です。放電によって発光するキセノンランプを使うと、太陽光に似た分光分布を示し、紫外域から赤外域にかけての連続スペクトルを与えることができます。

今村：空気精製器もついています。屋外から引き込んだ大気をほぼ窒素と酸素だけにできるのです。

Q：化学反応に影響を与える物質をとり除いたきれいな空気というわけですか。

佐藤：はい。チャンバーに精製した空気を導入後、試料ガス(サンプル)を封入し、光を当てて反応させ、サンプルである化学物質や反応生成物の時間変化を追いかけます。化学反応に影響を与える物質がないか、特定の物質の添加効果を調べることもあります。

Q：どうやって化学物質を分析するのですか。

佐藤：FTIRという装置で分析します。チャンバー内部に赤外光を導入し、試料空気を透過した光を測定します。分子の構造の情報をスペクトルから得ることができるので、物質の化学反応をとらえることができるのです。短いものでは1時間、長いものでは1日以上反応させます。その間、あまり目を離すことはできませんが、自動測定はできるようになっています。その他、チャンバー内の空気をサンプリングして、色々な分析装置で分析することも行っています。

Q：40年もち、装置や分析技術も進歩しましたか。

佐藤：そうですね。少しずつ装置も改良・更新されています。特に粒子の分析技術が進みました。40年前にはできなかった微小粒子の分析が今はできるようになり研究が進んでいます。



(A) 光学調整のためにスモッグチャンバー内部に入った今村さん



(B) 人工太陽光源
全部で19灯のキセノンランプを用いています。ランプ1つの消費電力が1キロワット、総消費電力は19キロワットです。写真では真ん中の一灯だけ点灯しています。

次々と姿を変える微小粒子

Q：微小粒子の分析はなぜ難しいのですか。

今村：大気中に浮遊する微小な液体や固体をエアロゾルといいます。気体の中ではこれらはコロイド状になって浮遊しています。霧やスモッグはエアロゾルが多数集まった状態です。エアロゾル粒子は、粒径や化学組成、光学特性などの性状が極めて複雑かつ時間的にも変化するため、研究するのは難しいのです。

例えば、二酸化炭素はいつ、どこで測定しても二酸化炭素ですが、エアロゾルは場所が変われば変わるし、同じ場所でも今日と明日では違います。

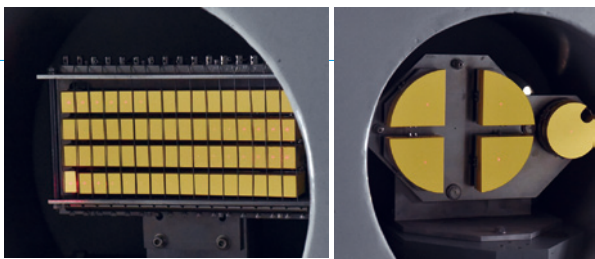
コラム② スモッグチャンバー

国立環境研究所のスモッグチャンバーは、研究所の設立と同じころにつくられました。これまでに改修を繰り返しながら40年以上稼働しています。この装置は、反応容器本体、人工太陽光源、真空排気システム、空気精製器、試料導入装置、温度制御系、長光路フーリエ変換赤外分光計(FTIR)ならびにその他の化学分析装置から構成されています。

反応容器本体の内容積は6m³で、人が入れる大きさです(上段A)。材質はステンレス製で、表面での化学反応を抑えるため内壁はフッ素樹脂で被覆されています。実験室では太陽光の代わりに、キセノンランプの光を使います(上段B)。地上での太陽光スペクトルを再現するために、珪ホウ酸ガラスフィルターを用い、不要な紫外線をカットします。温度や圧力の制御も可能です。かつては高度約20kmに相当する気圧(0.1気圧)下で、オゾン層に届くような紫外線を発生するランプを用いて、オゾン層破壊の模

擬実験を実施したこともあります。

多くの実験では、反応容器本体に精製空気を1気圧導入した後に試料ガスを加え、光を6~8時間照射します。光照射中の化学変化の追跡に用いる長光路FTIRは、多重反射鏡により赤外光を本体内で65往復させて、微量物質の吸収スペクトルを測定します(上段C、図2)。光路長は221mで、大気と同程度の低い濃度でも試料ガス中の成分を検出することができます。FTIRはチャンバー内の空気をサンプリングすることなく、時々刻々変化する試料ガス成分を測定できる点が特徴です。また反応容器内の空気を採取・化学分析して、微量物質の化学変化を追跡することもあります。



(C) 長光路FTIR用の多重反射鏡

赤外光を利用してスモッグチャンバー内に存在する微量物質を感度よく測定するため、White cellと呼ばれる多重反射ミラー系を採用しています。容器内で赤外光は1.7mの間隔で設置されたミラー間を65往復し、221mの総光路長が得られています。全てのミラーは、赤外光を効率よく反射するため、金コートが施されています。



(D) チャンバーの概要を説明する佐藤さん

Q：どうしてそんなに変わるのですか。

今村：微小粒子には、工場や自動車などの発生源から直接排出されて粒子として存在する一次粒子、揮発性の有機化合物(VOC)の大気反応により二次的に生成される二次粒子があります。また、ある場所で排出・生成された粒子は、地球上の色々なところに輸送されます。その過程で、周囲の別の粒子とぶつかったり、ガスや水蒸気などが表面に凝結したり、さらには粒子上での化学変化が起こったりすることによって粒子の組成や形態も複雑に変化します。つまり、たとえ発生

源から排出される化学物質が同じでも、その後の輸送経路や出会う化学物質の違いなどによって化学変化が異なるため、エアロゾル粒子の性状が時間的にも空間的にも変化するのです。

Q：エアロゾルは、様々な物質が組み合わさった結果できるというわけですか。

佐藤：はい。一次粒子、二次粒子にも様々な種類があります。一次粒子には、黄砂などの土壌粒子、海塩粒子、花粉、ススやディーゼル粒子などの燃焼粒子があります。また、二次粒子にも、大気中での化学反応で生成される有機物を多く含む粒子や、硝酸塩、硫酸塩、アンモニウムなどの無機イオンを多く含む粒子があります。一次粒子および二次粒子の組成は、大気中のVOC、窒素酸化物、硫黄酸化物、アンモニアなどの反応性物質の影響を受けて、さらに変化します。

私たちの研究では、特にVOCからの二次粒子の生成が、共存する様々な物質との相互作用によってどのように変化するかを解明しようとしています。VOCからの二次粒子の生成過程をチャンバー実験で再現し、二次粒子の生成収率や揮発特性などを決定します。さらに実験で決定したパラメータを取り入れた大気モデルを用いて、実大気中での二次粒子濃度のシミュレーションを行い、実際の大気観測での粒子濃度と比較して、実大気中での粒子の生成過程を解明します。

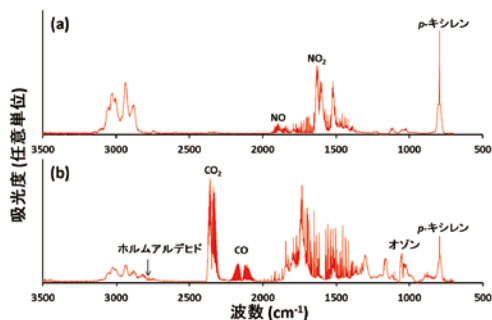
今村：大気反応モデルでは、色々な物質をいくつかのグループに分けて、それぞれのグループごとに、粒子生成などに関わる多数の化学反応を整理し、反応スキームの確立をめざします。関係するひとつひとつの反応がきちんとわかっているならば、正確に計算できるは

コラム③ CCSなどに由来するアミンの大気化学

化石燃料の利用で発生するCO₂を大気に放出することなく回収し、地中に貯留する技術をCCS(Carbon dioxide Capture and Storage)といいます(*)。その技術のうち、CO₂吸収剤を用いて排気ガスからCO₂を分離・回収する「化学吸収法」での、CO₂吸収剤の有力候補に有機アミンがあげられています。そのため、化学吸収法によるCCS技術実証と並行して、化学吸収剤として使用するアミン類やその劣化物の環境リスクについても十分に評価することが必要です。

私たちはスモッグチャンバーを利用し、大気中に放散した有機アミン類がどんな化学反応により除去されるか、大気反応によりニトロソアミン(発がん性が疑われている物質)のような健康に害を及ぼす可能性のある物質がどの程度生成されるのかを評価するための基礎データを取得しています。また、有機アミン共存下での光化学オゾンやエアロゾル生成など、大気質に及ぼす影響評価も研究しています。

*環境展望台：<http://tenbou.nies.go.jp/science/description/detail.php?id=27>を参照



■ 図2 FTIR赤外分光計で測定された吸収スペクトル
p-キシレン、NO、およびNO₂の混合物をスモッグチャンバーに導入して測定した(a) 照射前および(b) 3時間照射後のスペクトルです。照射後にはp-キシレンの吸収が減り、オゾン、COとCO₂の吸収が増えています。

ずですが、起こりもしない反応が含まれていたり、大事な反応がなかったりしたら計算結果はあてになりません。不正確なデータを入力しても、不正確な結果しか出力されません。実際にはデータが限られているので正確な結果を得るのは難しいですね。結果が偶然一致することもよくありますし、別の条件で化学変化を調べたら、つじつまが合わなくなることもあります。そのたびにまたもとに戻って実験をやり直す、の繰り返しです。

佐藤：PM_{2.5}は複雑な組成を持つ、様々な微小粒子の総称で濃度を予測することは困難でした。これまでのモデルでは計算しても、実測値のほうが高くなり、その理由が説明できませんでした。チャンバーの実験により、ガスの反応だけを計算していたことがその理由だと分かりました。半揮発性の有機物が凝集したのちに、粒子内の反応で、より揮発性の低い物質に変わっていたことが明らかになりました。

大気中の色々な役者たち

Q：かつて分かっていたと思っていたことが実はよく分かっていなかったという例もあるのですか。

佐藤：光化学オキシダントの例があります。チャンバー導入のきっかけにもなった光化学オキシダントはこれまでずいぶん研究されてきて、定性的には十分に形成過程が再現できています。光化学オキシダントの原因は大気中の窒素酸化物やVOCで、太陽光線により光化学反応が起こりオキシダントが発生します。現在の日本では原因物質の排出量は減っているのに、近年は国内のオキシダントの量が増えています。これで



大気エアロゾル粒子によって霞む新宿ビル街（2002年撮影）
どちらの写真も晴れていますが、下の写真はエアロゾルの散乱による視程の低下のため新宿のビルが霞んでいます。

は、つじつまが合わなくなってしまいます。そこで、チャンバーで光化学反応を実験したところ、VOCから生じた生成物がさらに反応してオキシダントを形成することが分かりました。この二次的な原因物質がどうして増加したのかはまだ分かりませんが、おそらく越境汚染の影響だと思います。

Q：こんな意外な結果になることはよくありますか。

佐藤：いつもそんなことばかりではありませんね。実験を繰り返し、それらの結果を解析し、反応のメカニズムを考えているときが研究の楽しいところです。

今村：実験でびっくりするような結果は頻繁には出ませんが、直感と違うことはあります。また、ある化学物質を単独でただ置いておくだけでは大して反応しませんが、大気中には色々な物質が含まれているので、思った以上に反応が進み、色々な物質ができます。化学反応を促す世話焼きな物質が大気中にはたくさんあるわけです。そんな物質を見つけると、こんなのがい

コラム④ 二次有機エアロゾルの生成プロセス

大気に浮遊する粒子をエアロゾル粒子と呼びますが、このうち粒径が2.5 μ m以下のものをPM_{2.5}と呼んでいます。エアロゾル粒子は、光を散乱・吸収したり雲の形成に関わったりすることで気候に影響を及ぼします。また、特にPM_{2.5}は肺の奥まで届くことから人間の健康に影響を及ぼします。エアロゾル粒子には、ススや花粉などのように排出源から直接排出される粒子（一次粒子）のほか、ガスとして排出された物質が大気中での化学変化によって揮発性の乏しい物質へと変化し、それらの凝縮によって生成する粒子があります（二次粒子）。揮発性有機化合物（VOC）の化学変化で生成する二次有機エアロゾル粒子はPM_{2.5}の主成分です。二次有機エアロゾル粒子は、複雑な化学プロセスを経て生成するため、とくに理解が遅れています。

図3は、研究所のスモッグチャンバーでVOCの一種であるトルエンを用いた実験の結果を示しています。トルエンと一酸化窒素はいずれも都市大気中に存在するガス状の

汚染物質です。化学反応によってトルエンの酸化が進むにつれ、一酸化窒素（NO）が二酸化窒素（NO₂）に変換され、その後オゾンや二次有機エアロゾルが生成していることが分かります。光化学反応により有機物は酸化あるいは分解されます。一般に、有機物の酸化が進むほど生成する有機物の揮発性は低下します。例えば、炭素を二つ持つ有機物を酸化が進む順に並べると、エタン（気体）、アセトアルデヒド（気体～液体）、そして酢酸（液体～固体）となります。トルエンの酸化によって生成する生成物は、その詳細については十分には分かっていませんが、エタンの例と同様にトルエンよりも低い揮発性をもつと考えられます。既存の粒子上に揮発性の低い酸化生成物が凝縮することで、粒子が成長すると考えられています。

研究所では、2005年ごろから液体クロマトグラフ質量分析計による二次有機エアロゾルの化学分析を開始しました。トルエンの酸化で生成するエアロゾル粒子をフィル



フィルターに採取された二次有機エアロゾル粒子
左は粒子採取前、右は採取後のフィルターです。芳香族炭化水素から生成するエアロゾルは光を吸収することを世界に先駆けて発見し、光吸収成分をニトロフェノール類と同定しました。

たのかと驚きがあります。それで、こんな役者は他にもいないのかと探すとまた見つかりおもしろいです。

Q：きれいな大気より、都市の汚れている大気のほうがそんな物質がたくさん見つかるのではないですか。

佐藤：それがそうでもないのです。きれいな大気では役者が違うんです。森林や海洋などの大気では、都市とは異なる様々な物質が反応に関わることが知られています。ですから、都市だけでなく森林や海洋の大気を研究することも重要です。

スモッグチャンバーは 大気化学の研究拠点

Q：大気の化学反応の研究者はたくさんいますか。

佐藤：少ないですね。日本で10人いるかないかといったところです。日本では、共同利用できる形でスモッグチャンバーを維持しているのはここだけです。ヨーロッパやアメリカには研究者が比較的多く、ス

ターに捕集すると、捕集された物質は黄色い色をしています(上段右の写真)。私たちの化学分析の結果、黄色い物質はニトロフェノール類であることが明らかになりました。さらに、名古屋大学との共同研究により粒子の光学特性の測定を行い、トルエン由来の二次有機エアロゾルが空気中に浮遊したままでも光吸収性がある(色がついている)ことを明らかにしました。

エアロゾル粒子が光吸収性をもつことは、太陽放射のエネルギー収支などを見積もる上で大切な情報であり、気候変動の研究とも密接に関わってきます。ニトロフェノール類は森林火災由来の二次有機エアロゾルの成分としても知られており、現在、光吸収性の粒子状物質(ブラウンカーボン)として世界的に注目を集めています。

モッグチャンバーを備えている施設もたくさんあります。最近では中国の研究者が増えています。

今村：一つ一つの単独の反応ならチャンバーを使わなくてもできますから、ここでなければ研究できないという訳ではありません。ただ、スモッグチャンバーがあれば、大気中で起こる複数の化学反応が同時に進む状況を再現できるのです。日本に一つくらいはそんな実験ができる場所があってもいいのではないのでしょうか。実験の結果を研究者でお互いにフィードバックして理解が進めばいいと思います。研究所はその拠点としての重要な役割を担っています。

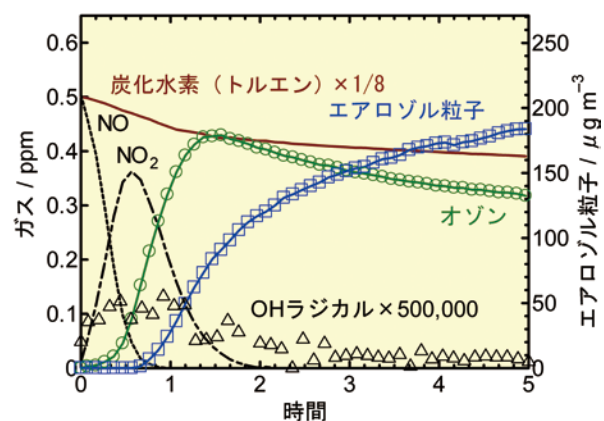
Q：スモッグチャンバーを維持するのは大変ですか。

佐藤：定期的なメンテナンスに関しては問題ありませんが、技術伝承は大きな問題です。進化しているパーツがたくさんある一方、寿命を迎えて、かつての質が保てなくなっているパーツもあります。技術力も変化していますが、以前のデータと比較する必要もあるので、どこまで装置の質を保つかが重要です。

今村：装置の自動化が進んでいますが、だからといって放っておいたら実験できるわけではありません。装置の性能の劣化の兆しはないかなど、原理に立ち返り、少しの状況の変化にも常に注意を払って、じっと様子を見ていくと分かることがあります。効率ばかり求めたら研究レベルを維持できないと思います。

Q：今後、どのように研究を進めていきたいですか。

佐藤：大気汚染の原因となった化石燃料をいつまでも使い続けることはできないので、違う方向に向かうでしょう。そのときに大気でどんなことが起こるか。将来を見据えて研究を続けていきたいです。



■ 図3 スモッグチャンバーで測定された二次有機エアロゾルの生成
都市の大気中の主要な汚染物質であるトルエンと窒素酸化物に光を当てるとオゾンと二次有機エアロゾルが生成します。

私たちをとりまく大気汚染問題を スモッグチャンバーで探る

わが国の大気汚染問題は、国内の問題から越境汚染を含む複合的な問題に変化してきました。さらに、単純な問題解決から大気質の維持管理や影響評価へと研究目的が移行しています。ここでは、最近の研究例として、まだ測定で捕らえきれていないオキシダントの原因物質（以下、「未把握な物質」）を探る研究、二次有機エアロゾルの揮発性の研究、およびアミンの大気化学に関する研究を紹介します。

まだ知られていないオキシダントの 原因物質はあるか

光化学オキシダントの全国年平均濃度は、1970年の大気汚染防止法改正によって減少したのち、1990年ころから増加に転じたことが問題となっています（『環境儀』33号参照）。他方、オキシダントの原因物質であるVOCおよび窒素酸化物の大気中の濃度は1970年から現在まで年々減少しています。原因物質が減少しているのにオキシダントが増加している理由として、(1)オキシダントの越境輸送の影響や(2)窒素酸化物の規制による反応スキームの変化のほか、私たちと京都大学のグループは、(3)原因物質として未把握のVOCの大気中濃度が増加しているという仮説を立てています。

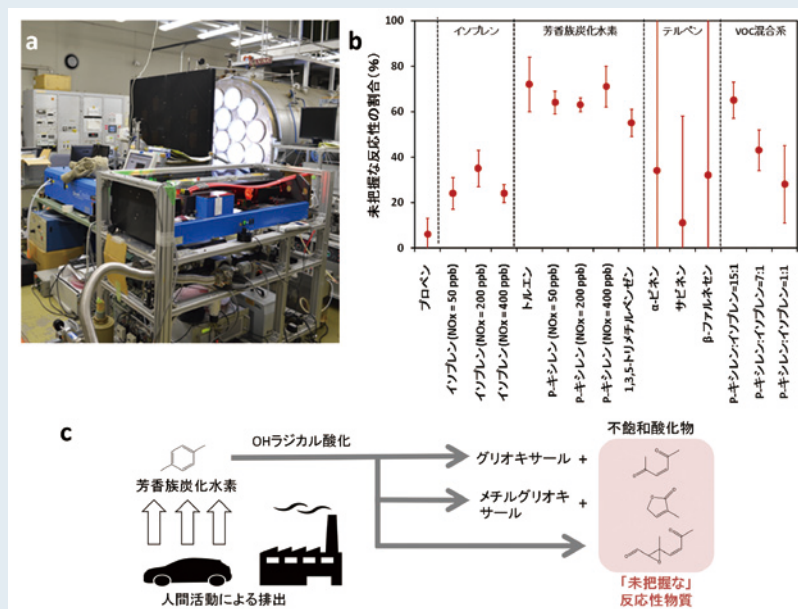
京都大学のグループは、大気の反応性を評価する装置を開発しました。この反応性測定装置では、人工的に発生したOHラジカルに実大気サンプルを加え、OHラジカル濃度の減少速度を評価します（図4a）。この反応性測定装置を使って実際の大気の反応性を評価したところ、同時に測定した既知反応性物質の濃度

から予想される反応性よりも大きく、大気中に把握できていない反応性物質があることが分かりました。さらに、季節ごとの観測から、未把握な物質は夏に増加することが明らかになりました。この未把握な物質は、生物由来の有機物が夏場の光化学反応による二次生成物だと予想されます。

そこで、光化学反応による二次生成物の反応性を、スモッグチャンバーと反応性測定装置を組み合わせで評価しました。二次生成物の前駆物質として、プロペン、イソブレン、芳香族炭化水素類、およびテルペン類を用いました。実験の結果、芳香族炭化水素の二次生成物が重要な未把握物質であることを明らかにしました（図4b）。また、実験結果は、環境省の光化学オキシダント調査検討会での検討資料を提供している日本環境衛生センター アジア大気汚染研究センターの領域モデルに反映され、モデルで行われたオキシダント生成への影響評価を通して、行政の施策に役立てられています。

PM_{2.5} モデルで使われている二次有機エアロゾルの揮発性は正しいか

2013年1~2月に在中国アメリカ大使館が中国国内のPM_{2.5}濃度が極めて高濃度であることを公表しました。これを契機に、日本国内でもPM_{2.5}への危機意識が高まり、各都道府県がPM_{2.5}

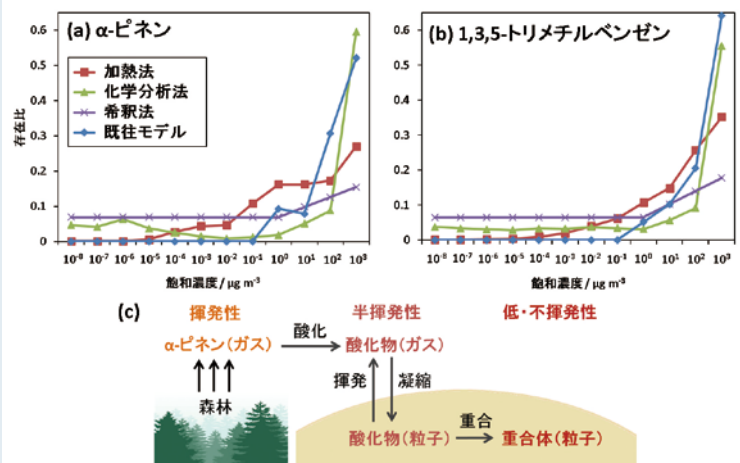


■ 図4 レーザー装置による未把握な反応性の評価結果

(a) スモッグチャンバー内の空気をOHラジカル反応性測定装置（写真手前のレーザー装置）に試料採取し、二次生成物の反応性を評価しました。(b) 二次生成物の反応性のうち未把握なもの割合を表しています。芳香族炭化水素類の二次生成物の反応性のうち未把握な割合は、プロペンやイソブレンよりも高いことを明らかにしました。(c) 芳香族炭化水素類は、二次生成物として、グリオキサール、メチルグリオキサール、および不飽和酸化物などを生成します。本研究により、主に不飽和酸化物が未把握な反応性物質であることを明らかにしました。

■ 図5 3種類の手法で評価した二次有機エアロゾルの揮発性分布と既存モデルで使用されているデータの比較

(a) α -ピネンおよび(b) 1,3,5-トリメチルベンゼンを前駆物質として生成した二次有機エアロゾルの揮発性分布を、加熱法、化学分析法、および希釈法で測定し、既存モデルで採用している揮発性分布と比較しました。本研究の結果から、モデルの分布にはない低揮発性成分が存在することが明らかになりました。(c) α -ピネン(森林由来のVOC)を例とした二次有機エアロゾルの生成機構を示しています。既存のモデルでは、VOCの酸化で生成する酸化物が凝縮して粒子を生成すると仮定しています。本研究の結果から、粒子内で酸化物同士が重合し低揮発性の重合体が生成すると考えられます。



の注意喚起を行うことが決まりました。現在はPM_{2.5}モデルの予測精度が低いと経験則に基づいて注意喚起を行っていますが、将来的には、モデル予測に基づいて注意喚起を行うことが望まれています。現時点で用いられているPM_{2.5}予測のための数値モデルでは、PM_{2.5}の主要成分のうち二次有機エアロゾルの予測精度が特に低いため、国立環境研究所では有機エアロゾルモデルの改良を行っています(『環境儀』64号参照)。

二次有機エアロゾルの生成では、気液平衡を決定する二次生成物の揮発性が重要な変数となります(コラム④)。実際には様々な二次生成物が混在するので、生成物の揮発性も分布を持って存在します。現在、モデルに使われている揮発性分布は、スモッグチャンバーを用いて測定した二次有機エアロゾルの生成収率を解析することにより間接的に推定しています。解析に用いるモデル関数では、粒子表面や粒子内で起こる不均一反応は無視できるものと仮定しています。

そこで、より直接的な粒子揮発性の測定として、加熱法、希釈法、および化学分析法による測定を行い、結果を相互に比較しました(図5)。モデルに採用されている分布では、 $10^{-1}\mu\text{g/m}^3$ 以下の低揮発性物質の存在比は全てゼロとなっています。本研究の直接測定の結果にはそれぞれ固有の誤差があるものの、いずれの測定結果にも飽和濃度が $10^{-1}\mu\text{g/m}^3$ 以下であるような低揮発性の生成物が存在すると分かりました。化学分析の結果から、本研究で見つかった低揮発性の物質は酸化有機物の重合体と同定されました。重合体生成の反応を組み込んだ大気化学輸送モデルで計算した有機エアロゾル濃度と、国内各地における有機エアロゾルの観測結果を比較したところ、重合体生成の反応を組み込むことで予測の精度の改善が見られました。

アミン類の大気中での化学変化を評価する

化学吸収法を用いた二酸化炭素(CO₂)の分離・回収と貯蔵(CCS)技術で利用される化学吸収液の候補

物質の一つとして、有機アミンがあります。今後、火力発電所から放出される排気ガス中のCO₂回収のように、開放系でのCCS技術の利用が進む場合、化学吸収液として使用する有機アミンやその劣化生成物の大気への放散による環境負荷・環境影響を評価する必要があります。そのためには有機アミン類は大気中での程度の時間滞留し、またどんな化学反応によってどんな物質に変換されるかについての基礎データの取得が不可欠です。

私たちは、基本的な有機アミンであるアルキルアミンを対象に、消失反応速度を測定しました。通常の炭化水素類と同じように、大気の掃除屋であるOHラジカルとの反応が有機アミンの主要な消失反応であることを示しました。OHラジカル反応を調べる中で、アルキルアミンは亜硝酸(HONO)とはあまり反応しませんが、一方で硝酸(HNO₃)とは反応が進行することを見いだしました。酸塩基反応としてエアロゾルの生成への寄与も今後検討する必要があります。また、OHラジカルと並んで大気中で重要な酸化開始剤の一つであるオゾンとの反応についても調べ、アルキルアミンは分子内にC=Cの二重結合が存在していないにもかかわらず、オゾンと適度に反応することを見いだしました。特に、3級アミン類についてはオゾンとの反応はOHラジカル反応などと競合し得る反応速度係数を有することを見出し、環境リスク・健康研究センターとの共同研究によって、量子化学計算を活用して3級アミンがオゾンと比較的効率よく反応する理由も明らかにしました。

2級のアルキルアミンの場合、OHラジカルとの反応から生成する活性種(アミノラジカル)は大気の主成分の一つである酸素分子との反応が遅いため、大気中に存在する微量の窒素酸化物(NO_x: NO、NO₂)との反応によって、ニトロソアミンやニトロアミンに変換されることを見いだしました。ニトロソアミンは発がん性の疑いのある物質で、アミノラジカルとNO_xの反応データは、ニトロソアミンなどの存在量推定の際の基礎データとして利用されます。

スモッグチャンバーを活用した最新の大気化学研究

大気化学の研究は、室内実験や野外実験によるプロセス解明、野外観測やモニタリングによる実態把握、およびモデリングによる現象の説明と知識の検証、からなる協力体制によって発展してきました。スモッグチャンバーを活用した研究もこのような協力体制が進められています。以下では、世界、日本、および国立環境研究所でのスモッグチャンバーを活用した最新の大気化学研究がどのような協力体制の下で進められているかを解説します。

世界では

大気環境問題に関わる化学過程（特に大気中での化学物質の除去、変質や生成、蓄積）には多数の化学反応が複雑に関わっています。その中で、例えば揮発性有機物から大気汚染問題と関わる物質（光化学オゾンやPM_{2.5}など）の生成に至る一連の化学変化が、様々な条件の変化（共存する汚染物質濃度、気温、湿度、光強度など）にどのように依存するかを明らかにする研究にスモッグチャンバーが利用されています。また、生成している大気中での化学変化（光化学オゾンやPM_{2.5}生成など）に関わって重要と思われる個々の化学反応の速度係数や、特徴的な生成物の同定とその生成収率といった基礎データの蓄積に関わる研究にもスモッグチャンバーは活用されています。スモッグチャンバーを用いて大気中で進行する化学変化を実験的に模擬し、その変化の様子を色々な化学反応の集合体として再現できる化学反応モデルの構築や反応モデルの妥当性を、フィールド観測と数値モデル計算を比較することで、実大気で進行するより複雑な化学変化の理解に繋げる研究が加速しています。

ヨーロッパでは、室内実験に基づく反応モデル構築

として、Master Chemical Mechanism (MCM) モデル (<http://mcm.leeds.ac.uk/MCM/>) の開発が進められています。MCMモデルは、大気中の化学物質の反応素過程を可能な限り詳細に記述したモデルです。これを背景として、ヨーロッパでは歴史的に実験研究室同士の連携が盛んに行われています。最近では、スモッグチャンバーに関する実験技術の蓄積と開発をめざした、EUROCHAMP ネットワーク (<http://www.eurochamp.org/>) が立ち上がっています。

アメリカでは、カリフォルニア工科大学、カーネギーメロン大学、およびカリフォルニア大学リバーサイド校などを研究拠点にして、それぞれ独立した研究グループが活動しています。各研究拠点で室内実験とモデリングが連携して大気化学モデルが開発されています。アメリカで開発されているモデルは、3次元大気輸送モデルに組み込んで計算することを目的としています。計算時間を短くするために化学物質のグルーピングやメカニズムの簡略化が図られています。代表的な大気化学モデルとして、カリフォルニア大学リバーサイド校で開発されたState-wide Air Pollution Research Center (SAPRC) モデル (<http://www.cert.ucr.edu/~carter/SAPRC/>) があります。

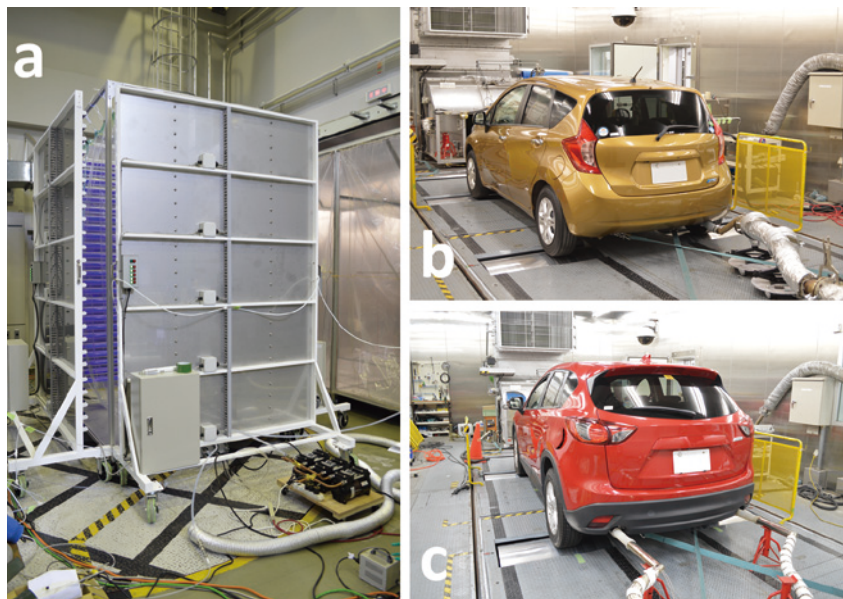


■ 図6 外部テフロンバッグによる二次有機エアロゾルの希釈測定

粒子の希釈測定は、国立環境研究所のディーゼルナノ粒子研究で培われた技術です。この技術とスモッグチャンバーを組み合わせると粒子の揮発性分布を測定しました。スモッグチャンバーで二次有機エアロゾルを生成したのち、粒子をきれいな空気で満たした外部テフロンバッグに移動します。半揮発性粒子の一部は希釈すると気液平衡によって揮発するため、外部テフロンバッグ内での粒子の質量濃度は希釈倍率以上に低下します。粒子から気体へ揮発する割合は粒子の揮発性によって決まります。希釈倍率を変えて測定することにより、粒子の揮発性分布を測定することができます。

■ 図7 自動車の排気ガスからの二次有機エアロゾル生成の測定

これまでに蓄積した実験技術を活用して、テフロンバッグ型スモッグチャンバーを作製し、自動車の排気ガスからの二次有機エアロゾル生成を研究しました。(a)テフロンバッグ(約6m³)には、四方から100本のブラックライト(主に紫外線のみを発生するライトで、中心波長は350nm、1本当たりの出力は40Wです)の光を当てることができます。(b)ガソリン自動車や(c)ディーゼル自動車など、燃料や車種を変えて二次有機エアロゾルの生成取率を評価しました。



日本では

日本では、国立環境研究所のほか自動車製造業関連の研究所にもスモッグチャンバーがあります。しかし、国立環境研究所が保有するスモッグチャンバーは温度、湿度、圧力、人工太陽光の強度・波長分布、といった様々な反応条件の制御が可能な唯一のチャンバーシステムであり、繰り返し実験や反応条件間での比較実験を可能にしています。その特長を生かし、国内の野外観測と室内実験の橋渡しをすることが、国立環境研究所のスモッグチャンバーの役割になっています。

- (1) 京都大学との共同研究では、同大学が開発した大気反応性を測定するための装置をスモッグチャンバー実験に使用しています(Summaryを参照)。装置の性能評価やスモッグチャンバー内で起こる化学反応プロセスの解析に利用しています。
- (2) 名古屋大学との共同研究では、同大学が開発したエアロゾル粒子の光学特性を測定するための装置をスモッグチャンバー実験に使用しています。スモッグチャンバーで発生させた二次有機エアロゾルの光学特性を測定し、二次有機エアロゾルの気候への影響を調べています(コラム④を参照)。
- (3) 北海道大学との共同研究では、同大学が採取した森林地帯の大気エアロゾル粒子の化学組成を、スモッグチャンバーで生成した二次有機エアロゾル粒子の化学組成と比較し、大気エアロゾルの生成プロセスを調べています。エアロゾルサンプルの分析には、液体クロマトグラフ質量分析計を用いています。

国立環境研究所では

国立環境研究所では、大気モデリングや毒性などに関する共同研究を所内研究者と実施することで、スモッグチャンバーで得られる基礎的なデータを環境行政に役立てようとしています。国立環境研究所は幅広い環境研究分野をカバーした国内研究拠点であり、その強みを生かして分野横断的な研究も行っています。

- (1) モデル研究者と共同で、スモッグチャンバー実験で得られる反応メカニズムや反応速度定数などの情報を大気モデルの改良に役立てています(Summaryを参照)。
- (2) スモッグチャンバーで生成した二次有機エアロゾルのサンプルを所内の毒性研究者に提供し、素性のわかった二次有機エアロゾルの毒性(酸化ストレス、遺伝毒性、および炎症)を研究しています。
- (3) ナノ粒子測定研究者と共同で、スモッグチャンバーと外部テフロンバッグを組み合わせることで二次有機エアロゾルの希釈測定を行っています(図6、Summaryを参照)。希釈によって粒子が揮発した後の粒子の残留率を測定することにより、二次有機エアロゾルの揮発性を調べています。
- (4) 自動車排気測定研究者と共同で、テフロンバッグ型スモッグチャンバーを低公害車実験施設に設置し、自動車排気からの二次有機エアロゾル生成を測定しています(図7)。テフロンバッグ型スモッグチャンバーの作製には、これまでに蓄積したスモッグチャンバーの実験技術を活用しています。

国立環境研究所における 「スモッグチャンバーを活用した化学反応プロセスの 解明に関する研究」のあゆみ

国立環境研究所では、大気中の光化学オキシダントや PM_{2.5} に関する研究を行っています。ここでは、その中から、スモッグチャンバーを活用した化学反応プロセスの解明に関するものについて、そのあゆみを紹介します。

年度	課題名
2001～2003	有機エアロゾル生成に係わる大気化学反応* ¹
2001～2003	大気中微量気体の循環機構解明のためのラジカル反応速度の精密化* ¹
2004	高速液体クロマトグラフー質量分析法を用いたトルエンからの光化学エアロゾル生成の反応メカニズムの検討
2005～2007	植物起源炭化水素の大気酸化機構がエアロゾル生成能や雲凝縮核特性に及ぼす影響* ¹
2006～2007	イソプレンを含むジアルケン炭化水素類の光酸化で生成する二次有機粒子組成* ¹
2009～2011	二次生成有機エアロゾルの環境動態と毒性に関する研究
2009～2011	芳香族炭化水素の光酸化で生じる二次有機エアロゾルのエイジングに関する室内研究* ¹
2009～2013	レーザー分光法による都市の大気質診断とオキシダント制御に関する研究* ¹
2012～2014	都市大気における粒子状物質削減のための動態解明と化学組成分析に基づく毒性・健康影響の評価
2013～2015	生物起源有機物の光酸化で生じる粒子状有機硝酸塩の水溶液相反応過程の解明* ¹
2013～2015	5-1301 光化学オキシダント生成に関わる未計測 VOC の探索* ²
2014～2016	5-1408 PM _{2.5} 予測精度向上のためのモデル・発生源データの改良とエアロゾル揮発特性の評価* ²
2015～2017	大気中に放散される有機アミン類の大気質影響評価のための大気反応モデルの構築* ¹
2016～2020	PM _{2.5} など大気汚染の実態解明と毒性・健康影響に関する研究プロジェクト
2016～2020	新規測定法による HO _x サイクルの精密解析とオキシダント・エアロゾル研究の新展開* ¹
2017～2019	大気中の有機粒子の各種毒性に対する発生源別寄与の解明
2017～2019	実時間分析法による植物起源二次有機エアロゾルの生成・変質過程の解明* ¹

*1 文部科学省(日本学術振興会)科学研究費補助金

*2 環境省 環境研究総合推進費

本号で紹介した研究は、以下の機関、スタッフにより実施されました(所属は当時、敬称略、順不同)。

〈研究担当者〉

国立環境研究所：今村隆史、佐藤圭、猪俣敏、藤谷雄二、森野悠、高見昭憲、伏見暁洋、田邊潔、古山昭子、畠山史郎、酒巻史郎、近藤美則、平野靖史郎、中島大介、伊藤智彦、鈴木剛、江波進一、邢嘉驊、磯崎輔、加藤吉康、瀬田孝将、内田里沙、

Sathiyamuruthi Ramasamy

京都大学：梶井克純、坂本陽介、河野七瀬、中川真秀

名古屋大学：松見豊、中山智喜、成川正広

首都大学東京：加藤俊吾

東京農工大学：中嶋吉弘

神戸大学：中川和道

北海道大学：宮崎雄三

● 過去の環境儀から ●

これまでの環境儀から、大気中の化学物質に関するものを紹介します。

No.64 PM_{2.5}の観測とシミュレーション

—天気予報のように信頼できる予測を目指して

国立環境研究所では1990年代から微小粒子状物質（直径2.5 μ m以下の粒子、PM_{2.5}）の健康影響についての研究を開始しました。さらに、2001年度からは新たに研究プロジェクトを立ち上げ、PM_{2.5}などの粒子状物質の観測による動態の解明、また、数値シミュレーションによる高濃度現象の理解や予測に取り組んでいます。本号では、その取り組みについて研究や観測の成果とともに紹介しています。

No.33 越境大気汚染の日本への影響 —光化学オキシダント増加の謎

国内の大気汚染物質の発生源対策が進み、窒素酸化物（NO_x）と揮発性有機化合物（VOC）は減少しているのに、光化学オキシダント（O_x）は増加しています。なぜ原因物質が減少しているのに光化学O_xが増加しているのか。なぜ発生源が近くでない地域でも光化学O_xが増加しているのか。本号では、これらの原因の一つとして考えられるアジア大陸からの越境汚染の影響を紹介しています。

No.29 ライダーネットワークの展開

—東アジア地域のエアロゾルの挙動解明を目指して

国立環境研究所では、環境への影響が懸念される東アジアのエアロゾルの動きについて、自動化したライダーネットワークにより空間分布をリアルタイムで捉え、発生・輸送のメカニズムを解明しています。本号では、ライダーネットワークのあゆみと現状、研究の方向性について紹介しています。

No.26 成層圏オゾン層の行方 —3次元化学モデルで見るオゾン層回復予測

1982年、世界で初めてオゾンホールが南極で観測されて以来、観測、理論、室内実験など多方面の研究が精力的に進められ、成層圏オゾン層破壊現象の詳細とそのメカニズムの解明が進みました。国立環境研究所では、東京大学気候システム研究センターと共同で3次元化学モデルを日本で初めて開発し、その研究成果は世界的にも評価されています。本号では、3次元化学モデル（化学輸送モデル、化学気候モデル）を使った成層圏オゾン層モデリング研究の概要と成果を紹介しています。

No.12 東アジアの広域大気汚染 —国境を越える酸性雨

日本の酸性雨の原因の一つとして、アジア大陸から大気汚染物質が飛来することが考えられます。本号では、国立環境研究所が取り組んできた東アジアの広域大気汚染の解明研究から、東アジア地域の正確な大気汚染物質発生量を提供する発生源インベントリーの構築と、中国での航空機観測によるエアロゾル性状の空間分布測定を中心に紹介しています。

環境儀 No.68

—国立環境研究所の研究情報誌—

2018年3月30日発行

編集 国立環境研究所編集分科会

（担当WG：遠嶋康徳、今村隆史、佐藤圭、山本裕史、藤井実、岩崎一弘、広兼克憲）

発行 国立研究開発法人 国立環境研究所

〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2

問合せ先 国立環境研究所情報企画室 pub@nies.go.jp

編集協力 有限会社サイテック・コミュニケーションズ

印刷製本 株式会社イセブ

無断転載を禁じます

「環境儀」既刊の紹介

No.22 2006年 10月	微小粒子の健康影響—アレルギーと循環機能	No.45 2012年 7月	干潟の生き物のはたらきを探る—浅海域の環境変動が生物に及ぼす影響
No.23 2007年 1月	地球規模の海洋汚染—観測と実態	No.46 2012年 10月	ナノ粒子・ナノマテリアルの生体への影響—分子サイズにまで小さくなった超微小粒子と生体との反応
No.24 2007年 4月	21世紀の廃棄物最終処分場—高規格最終処分システムの研究	No.47 2013年 1月	化学物質の形から毒性を予測する—計算化学によるアプローチ
No.25 2007年 7月	環境知覚研究の勧め—好ましい環境をめざして	No.48 2013年 4月	環境スペシメンバンキング—環境の今を封じ込め未来に伝えるパトナリレー
No.26 2007年 10月	成層圏オゾン層の行方—3次元化学モデルで見るオゾン層回復予測	No.49 2013年 7月	東日本大震災—環境研究者はいかに取り組むか
No.27 2008年 1月	アレルギー性疾患への環境化学物質の影響	No.50 2013年 10月	環境多媒体モデル—大気・水・土壌をめぐる有害化学物質の可視化
No.28 2008年 4月	森の息づかいを測る—森林生態系のCO ₂ フラックス観測研究	No.51 2014年 1月	旅客機を使って大気を測る—国際線で世界をカバー
No.29 2008年 7月	ライダーネットワークの展開—東アジア地域のエアロゾルの挙動解明を目指して	No.52 2014年 4月	アオコの有毒物質を探る—構造解析と分析法の開発
No.30 2008年 10月	河川生態系への人為的影響に関する評価—よりよい流域環境を未来に残す	No.53 2014年 6月	サンゴ礁の過去・現在・未来—環境変化との関わりから保全へ
No.31 2009年 1月	有害廃棄物の処理—アスベスト、PCB 処理の一翼を担う分析研究	No.54 2014年 9月	環境と人々の健康との関わりを探る—環境疫学
No.32 2009年 4月	熱中症の原因を探る—救急搬送データから見るその実態と将来予測	No.55 2014年 12月	未来につながる都市であるために—資源とエネルギーを有効利用するしくみ
No.33 2009年 7月	越境大気汚染の日本への影響—光化学オキシダント増加の謎	No.56 2015年 3月	大気環境中の化学物質の健康リスク評価—実験研究を環境行政につなげる
No.34 2010年 3月	セイリング型洋上風力発電システム構想—海を旅するウィンドファーム	No.57 2015年 6月	使用済み電気製品の国際資源循環—日本とアジアで目指す E-waste の適正管理
No.35 2010年 1月	環境負荷を低減する産業・生活排水の処理システム—低濃度有機性排水処理の「省」「創」エネ化—	No.58 2015年 9月	被災地の環境再生をめざして—放射性物質による環境汚染からの回復研究
No.36 2010年 4月	日本低炭素社会シナリオ研究—2050年温室効果ガス70%削減への道筋	No.59 2015年 12月	未来に続く健康を守るために—環境化学物質の継世代影響とエピジェネティクス
No.37 2010年 7月	科学の目で見える生物多様性—空の目とミクロの目	No.60 2016年 3月	災害からの復興が未来の環境創造につながるまちづくりを目指して—福島発の社会システムイノベーション
No.38 2010年 10月	バイオアッセイによって環境をはかる—持続可能な生態系を目指して	No.61 2016年 6月	「適応」で拓く新時代!—気候変動による影響に備える
No.39 2011年 1月	「シリカ欠損仮説」と海域生態系の変質—フェリールを利用してそれらの因果関係を探る	No.62 2016年 9月	地球環境100年モニタリング—波照間と落石岬での大気質監視
No.40 2011年 3月	VOCと地球環境—大気中揮発性有機化合物の実態解明を目指して	No.63 2016年 12月	「世界の屋根」から地球温暖化を探る—青海・チベット草原の炭素収支
No.41 2011年 7月	宇宙から地球の息吹を探る—炭素循環の解明を目指して	No.64 2017年 3月	PM _{2.5} の観測とシミュレーション—天気予報のように信頼できる予測を目指して
No.42 2011年 10月	環境研究 for Asia/in Asia/with Asia—持続可能なアジアに向けて	No.65 2017年 6月	化学物質の正確なヒト健康への影響評価を目指して—新しい発達神経毒性試験法の開発
No.43 2012年 1月	藻類の系統保存—微細藻類と絶滅が危惧される藻類	No.66 2017年 9月	土壌は温暖化を加速するのか?—アジアの森林土壌が握る膨大な炭素の将来
No.44 2012年 4月	試験管内生命で環境汚染を視る—環境毒性の <i>in vitro</i> バイオアッセイ	No.67 2017年 12月	遺伝子から植物のストレスにせまる—オゾンに対する植物の応答機構の解明

●環境儀のバックナンバーは、国立環境研究所のホームページでご覧になれます。
<http://www.nies.go.jp/kanko/kankyogi/index.html>

「環境儀」



地球儀が地球上の自分の位置を知るための道具であるように、「環境儀」という命名には、われわれを取り巻く多様な環境問題の中で、われわれは今どこに位置するのか、どこに向かおうとしているのか、それを明確に指し示すべしという意図が込められています。「環境儀」に正確な地図・行路を書き込んでいくことが、環境研究に携わる者の任務であると考えています。

2001年7月 合志 陽一
 (環境儀第1号「発刊に当たって」より抜粋)



このロゴマークは国立環境研究所の英語文字 N.I.E.S で構成されています。N=波(大気と水)、I=木(生命)、E.Sで構成される○で地球(世界)を表現しています。ロゴマーク全体が風を切った左側に進むようにする動きは、研究所の躍動性・進歩・向上・発展を表現しています。

リサイクル適性 (A)

この印刷物は、印刷用の紙へリサイクルできます。