

大気エアロゾル ～大気中を浮遊する微粒子～

～日本気象学会関西支部第36回夏季大学テキスト～

2014年8月23日(土)
京都リサーチパーク(株)

大気エアロゾルが地球環境に与える役割を“化学する”

高橋 けんし(京都大学生存圏研究所)

..... 3～13

風が運んでくるエアロゾル;浮遊化学工場

岩坂 泰信(滋賀県立大学)

..... 14～27

PM2.5は増えているのか?心配なのか?

菅田 誠治((独)国立環境研究所)

..... 28～39

主催：日本気象学会関西支部

後援：大阪管区気象台、日本気象協会関西支社

講師プロフィール

高橋 けんし(たかはし けんし; 京都大学生存圏研究所 准教授)



1998年 名古屋大学理学研究科博士後期課程修了(博士(理学))
1998年 名古屋大学太陽地球環境研究所 助教
2006年 京都大学次世代開拓研究ユニット 特定助教
2009年 京都大学生存圏研究所 准教授

岩坂 泰信(いわさか やすのぶ; 滋賀県立大学 理事)



1971年 東京大学大学院理学系研究科修了(理学博士)
名古屋大学理学部水質科学研究施設 助手
その後、名古屋大学水圏科学研究所助教授、同太陽地球環境研究所
教授、同大学院環境学研究科教授を歴任
2004年 金沢大学環日本海域環境研究センター教授
同フロンティサイエンス機構特任教授
2012年 滋賀県立大学 理事

菅田 誠治(すがた せいじ; (独)国立環境研究所 主任研究員)



1993年 京都大学大学院理学研究科博士後期課程地球物理学専攻単位取得退学
国立環境研究所研究員
博士(理学)取得
1998年 国立環境研究所主任研究員

大気エアロゾルが地球環境に与える役割を“化学する”

京都大学・生存圏研究所 高橋 けんし

わたしと〇〇と△△と

金子みすずさんの詩「わたしと小鳥とすずと」に、“みんなちがって、みんないい”という一節がある。人によって様々な解釈があると思うが、エアロゾルを研究する人々は、様々なバックグラウンドを持った人が集まっており、その意味では“みんなちがって、みんないい”世界であるように感じられる。私の講演の後にお話をされる岩坂先生と菅田先生は、エアロゾルの研究で有名な先生方で、私はエアロゾルの研究者としては初心者になる。「わたしと岩坂先生と菅田先生」を並べてしまうと、どうにも自分の非力さが目立って仕方がないのだが、私はもともと物理化学という学問分野の出身なので、(なるべく高校程度の化学の知識も交えながら)物理化学の視点でエアロゾルの世界を眺めてみようと思う。特に、エアロゾルと地球環境との関わり合いを意識しながらお話ししようと思う。

身近なところにあるエアロゾル

気相中に固体や液体の粒子が分散した状態で安定な状態にある系をエアロゾルと呼んでいる[1]。エアロゾルという言葉は、多くの方々に一般的に受け入れられている言葉ではないように思う。しかしながら、私たちはエアロゾルに囲まれて生きているといっても間違いではない。本来ごく身近な存在である。岩坂先生が取り上げられる黄砂はもちろん、火山の噴煙、ディーゼル排ガスに含まれる黒色炭素粒子、タバコの煙、海の波しぶき、花粉など、すべてエアロゾルである。また、布団や畳の中に潜むダニの死骸や、ペットの糞が乾燥すると、風によって飛散することがある。これらもまたエアロゾルである。

エアロゾルの特徴を科学的に詳しく研究するためには、大きさや密度などの物理的性質、構成する化学物質や生成プロセスなどの化学的性質、太陽光の散乱や吸収などの光学的性質など、様々な視点が必要となる。例えば、大気を漂うエアロゾルの大きさは、10 nm から 10 μm のオーダーまで分布している。仮にこれを読んでくださっているあなたが、10 nm の身長だったとしたら、あなたの周辺には、あなたの身長よりも最大で約 1000 倍も背の高い人が立っている(漂っている)かもしれないということになる。エアロゾルが漂う世界というのは、大きさ一つとってもにわかにはイメージしづらい。

日頃、私たちが日常生活を送っていて、エアロゾルの存在を実感するとしたら、京都タワーや大文字山がかすんで見えるとか、花粉症に悩まされてティッシュペーパーが手放せない、といったところかもしれない。しかし、地球環境の進化を理解し、将来にわたっての環境変動を予

測するためには、エアロゾルの役割の理解は不可欠である。まず最初に、エアロゾルと気象学との関わりから紹介する。

物質の状態変化とエネルギー

私たちの住む地球の上空には雲が浮かび、時に雨(雪)が降ってくる。これをミクロな視点でみれば、水分子(H₂O)が気体-液体-固体と状態変化(相転移)することで、雲や雨(雪)の形成に関わっていることは容易に理解できると思う。高校の化学では、H₂O の相図あるいは状態図と呼ばれるダイアグラムについて学習したと思う(図1)。H₂O の取りうる状態は、温度と圧力によって決まる。それならば、いま水蒸気が地上から上空へと運ばれたとき、どういったことが起こると予想されるだろうか?—上空では、水蒸気が凝結して液体になるのではないか・・・果たして、この予想は正しいだろうか?

少し遠回りになるが、物質が化学変化するときの、エネルギーの変化について考察する。

ある物質系に、一定圧力 p のもとで熱エネルギー q を与えたとしよう(図2)。q の一部は系の温度を上げて分子の内部エネルギーの増加 ΔU をもたらし、体積変化したぶん(ΔV)が系の外部に仕事をする。よって、エネルギーのつり合いの式として

$$q = \Delta U + p\Delta V \quad (1)$$

と書ける。物質系の持つ熱エネルギーをエンタルピー H で定義する。エンタルピーの変化量 ΔH は、系の受け取る熱エネルギー q に等しいので、

$$\Delta H = \Delta U + p\Delta V \quad (2)$$

と表すことができる。高校の化学では、化学反応の反応熱を記述する熱化学方程式を学習する。反応熱がプラスのときに発熱反応、マイナスのときに吸熱反応と定義した。エンタルピー変化は、系の持つエネルギーなので、発熱反応は ΔH < 0 であり(つまり、発熱するので物質系の持つエネルギーは減ることになる)、吸熱反応は ΔH > 0 である(つまり、吸熱するので物質系の持つエネルギーは増えることになる)。例えば、高校で学習する熱化学方程式と、大学で学習するエンタルピー変化を並べて書くと、以下のようなになる。

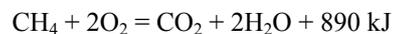


図3には、図を使って示してある。なお、 ΔH° のOは標準状態を意味する。

他方、ビーカーに水を用意し、そこへ硝酸アンモニウム(NH_4NO_3)を溶かす実験を行ったとしよう。この化学反応は吸熱反応なのだが、外部からエネルギーを加えなくても、水に入れた硝酸アンモニウムは時間が経てば溶けている。つまり、固体から液体に変化している。これは、化学変化の向きが ΔH° の正負だけで決まるものではないことを示している。このような現象を説明するには、エントロピーとギブスエネルギーという状態量を使って考える必要がある。エントロピーSは物質の乱雑さを示す状態量である[2]。エントロピーの単位はJ/Kであり、絶対温度との積TSがエネルギーの次元となる。そこで、先に説明したエントロピーHとともに、化学変化の向きを決める状態量Gを導入する。

$$G \equiv H - TS \quad (3)$$

これにより、化学変化の向きは、 $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ の符号で決まる(温度が一定の場合)。Hの符号が正を基準とし、TSの符号が負を基準としているのは、Hは減る方向に、Sは増える方向に、反応が進もうとすることを意味するからである。Gはギブスエネルギー、 ΔG はギブスエネルギー変化とよぶ。物質系がエネルギーを失う方向、つまり $\Delta G < 0$ となる方向へと、反応は自発的に進む。

以上の説明は難解に感じられる方が多いかもしれないが、そういった方に向けて端的に説明すると、次のようになる。「なぜ相転移が起こるか?」という問いに答えるためには、相の安定度を表すギブスエネルギーというものを導入する必要がある。ギブスエネルギーは、簡単に言えば、化学変化の向きを決める状態量である。一般に、化学変化は、物質の集まり(物質系)がギブスエネルギーを小さくする向きに進もうとする。系の温度や圧力を変えたとき、別の相のギブスエネルギーの方が低くなれば、その相が実現される。つまり、相転移が起こる。

過飽和な水蒸気だけの空間に、液滴は自発的に生成するか?

ミクロな視点で、過飽和水蒸気の中に小さな水滴が生成するかどうかを考えよう。過飽和水蒸気の中に水滴が生まれるといっても、自由に飛びまわっている水分子の誰(どれ?)かが、「この指とまれ!」と合図した直後から、その水分子をめがけて別の水分子がよってたり、結果的に、いきなりある大きさの水滴が生まれる・・・などということは、確率的に考えられない。“たまたま”二個の分子が衝突して二分子が緩やかに結合した分子クラスター[3]とよばれる会合体ができ(図4)、そこへまた一分子が衝突して三分子のクラスターを形成し、・・・という凝縮を繰り返して、次第に大きな水滴が形成されていくだろうと想像するのが自然である。

空気中の水蒸気が凝結して水滴になるためには、相変化に伴うギブスエネルギー変化のほかに、「水滴の球

を維持するための表面張力による表面エネルギーを考慮しなければならない(図5)。つまり、

$$\Delta G = G_{\text{droplet}} - G_{\text{pure vapor}} \quad (4)$$

を考えることになる。

いま、全部でN個の H_2O 分子が存在している空間を考え、そのうち N_V 個が気体で、残りの N_L 個が液体になっているとする。また、液体の水は球形の水滴であり、ここでは簡単のためにそれが1個だけできたと仮定する。 H_2O 分子1個あたりの気相と液相におけるギブスエネルギーをそれぞれ g_V 、 g_L とし、形成された水滴がバラバラの H_2O 分子にならないように働く表面張力を σ とすると、式(4)における水蒸気と水滴のそれぞれのギブスエネルギー変化は、

$$\Delta G = g_L N_L + 4\pi r^2 \sigma - (N - N_V)g_V \quad (5)$$

と書ける。ここで、rは形成された水滴の半径である。この式は、

$$\Delta G = 4\pi r^2 \sigma + (g_L - g_V)N_L \quad (6)$$

と変形できる。液滴に含まれる H_2O 分子の数 N_L は、液滴の密度を ρ として

$$N_L = \frac{4\pi}{3} r^3 \rho \quad (7)$$

であることを考慮すると、

$$\Delta G = \frac{4\pi}{3} r^3 \rho (g_L - g_V) + 4\pi r^2 \sigma \quad (8)$$

と書ける。ここで、 H_2O 分子一個あたりの気体のギブスエネルギーと液体のギブスエネルギーの差を表す $g_L - g_V$ について考えてみよう。いま、温度Tの空気中に含まれる水蒸気の圧力が P_A であったとする。1モルの水蒸気を含む空気を、温度一定のままで圧縮(または膨張)させて、蒸気圧 P_A を平坦な表面を持つ純水の飽和蒸気圧 P_S に近づけていったとき、ギブスエネルギーの変化 $g_L - g_V$ は、

$$\int_{P_A}^{P_S} V dP \quad (9)$$

で与えられる。水蒸気を理想気体と仮定すると、気体の状態方程式 $V = kT/P$ (kはボルツマン定数)を利用して、この積分を

$$kT \int_{P_A}^{P_S} \frac{dP}{P} = -kT \ln \left(\frac{P_A}{P_S} \right) \quad (10)$$

と求めることができる(なお、 P_A / P_S は飽和度と呼ばれ、これを百分率で表せば相対湿度を意味する)。これにより、

$$\Delta G = -\frac{4\pi}{3} r^3 \rho kT \ln \left(\frac{P_A}{P_S} \right) + 4\pi r^2 \sigma \quad (11)$$

と書けることになる。この式を図に示した(図6)。図6は、水滴の大きさ r に対して ΔG がどのような振る舞いをするかが描かれてある。 $P_A / P_S < 1$ のとき、すなわち、相対湿度が 100%に満たない場合、式(11)の右辺は必ず正值となり、 r が大きいほど ΔG は単調増加する(図6)。他方、 $P_A / P_S > 1$ のとき、すなわち、相対湿度が 100%を超える(過飽和状態)とき、式(11)の右辺第一項は r^3 の係数が負になるので、図6に示したように、ある r において極大値を示す。これは、水滴の半径が小さいときには表面張力が優勢となるため $P_A / P_S < 1$ の状況に近づくものの、半径がある程度大きくなると、式(11)の右辺第一項が優勢となって極大値を与えることを意味する。極大値を ΔG^* と書き、そのときの水滴の半径を r^* と書くと、高校の数学で学習した微積分を思い出せば、

$$r^* = \frac{2\sigma}{kT\rho \ln(P_A/P_S)} \quad (12)$$

$$\Delta G^* = \frac{16\pi\sigma^3}{3(kT\rho \ln(P_A/P_S))^2} \quad (13)$$

を得る。 r^* のことを臨界半径と呼ぶ。水滴が生成したとき、その大きさが r^* よりも小さければ、液滴は消滅しようとし、 r^* よりも大きければもっと成長してギブスエネルギーを低下させようとする。臨界半径 r^* を持つ水滴の数密度 N^* は、

$$N^* = N \exp(-\Delta G^* / kT) \quad (14)$$

で与えられる。この式は、 ΔG^* が小さければ小さいほど、 N^* が大きくなることを示唆する。

さて、式(12)を変形すると、

$$\frac{P_A}{P_S} = \exp\left(\frac{2\sigma}{kT\rho} \frac{1}{r^*}\right) \quad (15)$$

となり、これは Kelvin の式とも呼ばれている。数学の展開公式 $e^x \sim 1 + x$ ($-1 \leq x \leq 1$) を利用すると、式(15)は、

$$\frac{P_A}{P_S} = 1 + \frac{A}{r^*} \quad (16)$$

と書くことができる(係数 A は、 $2\sigma/kT\rho$ なる定数)。この式を図に書き表すと、図7のようになる。図7は式(16)から計算した、飽和度 P_A / P_S と r^* の関係を示したものである。つまり、ある飽和度にある水蒸気を含む空気中に、飽和度と釣り合うように水滴が生成した場合の、水滴の大きさを示してある。例えば、 $P_A / P_S = 2$ (つまり、相対湿度 200% !!) のとき、臨界半径は約 $0.002 \mu\text{m}$ となる。しかし、そのような過飽和な状態は、現実の大気中ではありえない。地球の大気においてありうる飽和度の限度として、 $P_A / P_S = 1.03$ (相対湿度 103%) とすると、臨界半径は約 $0.1 \mu\text{m}$ となる。それでも、このような“巨大”な水滴が存在する確率はゼロに近い。したがって、我々を取り囲む自然界

では、水蒸気を過飽和にただけでは、水滴を作ることは非常に困難であるということになる。それでも、実際には、雲が存在し、雨だって降る。雲粒(雲を構成する水滴)が生成するには、どういうメカニズムが働いているのかを考える必要がある。

純粋な水ではなく、水溶液の液滴の話:ラウールの法則

ここまでは、水蒸気が液滴へ相変化することを考えた。一方で、水溶液、すなわち、溶媒としての水に、例えば溶質として塩化ナトリウム(NaCl)が溶けているような場合は、事情が変わってくる。水溶液の平衡蒸気圧 P_{solution} は、純粋な水の平衡蒸気圧 P_A よりも小さくなる。この現象は蒸気圧降下と呼ばれており、高校の化学でも学習したと思う。

蒸気圧降下が起こる原因を“直感的”に説明すると次のようになる(図8を合わせて参照されたい)。密閉容器に純粋な水を入れて、温度を一定に保ったまま放置すると、水が容器の中で蒸発する。しかし、だからといって水が一方向的に無くなることはない。これは、蒸発した H_2O 分子の一部が、水面にぶつかって分子間力に捕らえられ、液体の水に戻るからである。このように蒸発する H_2O 分子と凝縮する H_2O 分子がバランスしている状態を気液平衡とよび、その時に水蒸気が示す圧力が平衡蒸気圧である。この水に、例えば NaCl を溶かすと、水溶液の表面に存在する H_2O 分子の数が減るため、蒸発できる分子の数が目減りしてしまい、容器の中の蒸気圧は下がる。これが、蒸気圧降下の“直感的”な説明である。

溶液の蒸気圧 P_{solution} は、次のラウールの法則(Raoult's law)により決まる。

$$P_{\text{solution}} = x P_A \quad (17)$$

ここで、 x は溶媒(つまり水)のモル分率(塩の量も含めた溶液全体のモル数のうち、溶媒が何モルあるか)である。溶質の質量を m 、溶質の分子量を M_S 、水の分子量を M_W 、溶液滴の密度を ρ_{solution} 、ファンツホッフ(van't Hoff)係数を i とすると、半径 r の溶液滴に含まれる溶質のモル数は $i m / M_S$ 、水のモル数は $(\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{\text{solution}} - m) / M_W$ と与えられるので、

$$\begin{aligned} \chi &= \frac{(\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{\text{solution}} - m) / M_W}{(\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{\text{solution}} - m) / M_W + i \frac{m}{M_S}} \\ &\approx 1 - \frac{3imM_W / M_S}{4\pi r^3 \rho_{\text{solution}}} = 1 - \frac{B}{r^3} \end{aligned} \quad (18)$$

と書ける(B は定数)。飽和度 $P_{\text{solution}} / P_S$ は、

$$\begin{aligned} \frac{P_{\text{solution}}}{P_S} &= \frac{P_A}{P_S} \frac{P_{\text{solution}}}{P_A} \\ &= \left(1 + \frac{A}{r}\right) \left(1 - \frac{B}{r^3}\right) \approx 1 + \frac{A}{r} - \frac{B}{r^3} \end{aligned} \quad (19)$$

となる。図9に、不揮発性物質として塩化ナトリウム(NaCl)をごく少量溶かした液滴の直径 r と飽和度(相対湿度)の関係を描いた。この曲線は、ケーラーの曲線(Köhler curve)と呼ばれている。式(19)において、右辺の第二項は、水滴の半径に反比例しており、水滴の半径が減少すると平衡蒸気圧が上昇するという水の表面張力の効果を表している。右辺の第三項は、水滴の半径の3乗に反比例しており、かつ、負号がついていることから、水滴の半径が減少するほど水滴中に溶け込んでいる溶質の効果が顕在化し、平衡蒸気圧が減少することを意味する(これを溶質効果という)。純粋な水の場合と比べて、水の蒸発が起こりにくくなることを意味する。臨界半径 r^* と臨界飽和度 S^* は、ケーラー曲線の極大値を与える点なので、高校で習った数学を使えば、

$$r^* = \sqrt{3B/A} \quad (20)$$

$$S^* = 1 + \sqrt{4A^3/27B} \quad (21)$$

であることが分かる。自然界で起こりうる程度の飽和度でも、粒子が存在できる臨界半径が存在している。このことは、純水では限りなく不可能に近かった過飽和条件での雲粒の発生が、ある種の水溶液からは可能であることをいみする示唆している。

溶質効果をもたらす物質

最初に述べたように、空気中には、10 nm から 10 μ m 程度までの様々な大きさのエアロゾル粒子が漂っており、その化学的および物理的な性状もまた様々である。それらの中には、溶質効果を示す粒子もある。とりわけ重要なのは、吸湿性の高いエアロゾル粒子である。吸湿性とは、文字どおり湿気(水分)を吸収する性質のことである。大気中に吸湿性の高いエアロゾル粒子が在ると、 H_2O 分子を補足することで、エアロゾル粒子はその表面が水の衣をまとったごとくなる。また化学物質や気象条件次第では、自発的に水溶液になる(例えば、高校の化学では、水酸化ナトリウムを空気中に放置すると、やがて水溶液になる現象を、“潮解”として学習したと思う)。話が少し脇道に逸れるが、吸湿性の高い化学物質は、実は我々の日常生活でも活躍している。湿気を嫌うせんべいをパリっとした状態に維持するために、塩化カルシウムなどの乾燥材が使われる。今や子育ての必需品となった紙おむつも、吸水性の高い高分子化合物(ポリマー)で作られている。

話を元に戻すと、吸湿性の高いエアロゾルとして現実の地球大気中存在する化学物質には、NaCl, $(NH_4)_2SO_4$ や NH_4NO_3 、硫酸水素アンモニウム(NH_4HSO_4)などがある。これらの無機塩は低湿度下では固体として存在するが、湿度が増加すると大気中の水蒸気を吸収して、微小な液滴として存在するようになる。その様子を、図10に示した。図10は、硫酸塩の粒子の大きさが、相対湿度に対して、どのように依存するかを描いたグラフである。

図10において最も理解しやすいと思われるのは硫酸(H_2SO_4)である。常温常圧で液体の硫酸は、水との強い親和性により、相対湿度が増大すると硫酸液滴は水をどんどん吸着して太っていく。一方、 $(NH_4)_2SO_4$ や NH_4HSO_4 は、相対湿度が低い条件では固体である。相対湿度が高くなっても、80%に達するまでは固体の状態を保つ。そして、80%に達した瞬間に液滴となり、乾燥粒径(相対湿度が0%のときの粒径)の約1.45倍の大きさになる。固体から液体へ相変化を起こすときの湿度は、潮解湿度(Deliquescence Relative Humidity: DRH)とよばれている。潮解湿度を超えてもさらに相対湿度を高めると、気液平衡を保ちつつ水がさらに吸着されて液滴は太る。次に、相対湿度を100%近いところから徐々に下げていく操作をしよう。液滴の表面から H_2O 分子が脱離していき、徐々に液滴は痩せていく。そして、潮解湿度に達した瞬間、固体に戻る!・・・かと思いきや、今度は固体に戻らないまま過飽和溶液を維持し、相対湿度が約40%まで低下してきたところで瞬間的に結晶化が起こる。潮解と逆のこの現象は、風解とよばれる。

こうした振る舞いから、ということが推察されるだろうか? それは、相対湿度40-80%の大気中に浮かぶ $(NH_4)_2SO_4$ や NH_4HSO_4 は、固体または液体のいずれかの状態にあるということになる。例えば、いったん潮解湿度を超えるような高い相対湿度の大気に囲まれた経験を持つ $(NH_4)_2SO_4$ や NH_4HSO_4 は、相対湿度が40-80%の大気中では、液滴として漂っているということである。

先に、 H_2O を例として相変化を理解するために、ギブスエネルギー変化を知ることが必要であることを説明した。ここでは、硫酸塩が相変化する様子をギブスエネルギーの視点で定性的に考えておく。図11に、硫酸塩の固体と水溶液のギブスエネルギーが相対湿度に応じてどのように依存するかを描いた。潮解湿度よりも低い相対湿度では、固体のギブスエネルギーは水溶液のそれよりも小さいので、固体の状態にある。相対湿度が大きくなると、徐々に水溶液のギブスエネルギーが低下してきて、潮解湿度に達した時点で、固体のギブスエネルギーに等しくなる。潮解湿度を超えると、溶液のギブスエネルギーはますます低くなるので、硫酸塩は水を吸収して硫酸塩溶液となって安定化する。逆に、100%近い相対湿度から下げると、水が脱離してギブスエネルギーが高くなっていく。やがて潮解湿度に達した時点で、硫酸塩は固体となった方がエネルギー的に安定であるのだが、それは物理化学的に非常に難しい。なぜならば、水に囲まれた状態で、硫酸塩の核(固体の種)が生成し、その結晶成長が起こらねばならないからである。そして、 H_2O の衣をすべて脱ぎ捨てなければならぬ。結局、過飽和水溶液から H_2O が脱離し続け、風解湿度に達したところで固体に戻る。

吸湿性のエアロゾルは、潮解湿度を超える相対湿度環境では液滴になる。しかし、その液滴が雲粒にまで成長できるかどうかは、固体のときの大きさと水蒸気の過飽和度に依る。図12には、 $(NH_4)_2SO_4$ の粒子の大きさと水蒸気飽和度との関係を示した。これは、図9に示した絵を

(NH₄)₂SO₄ について描いたものである。図12において、いま、固体のときの大きさが 0.04 μm である(NH₄)₂SO₄ 粒子があるとして、その粒子を水蒸気飽和度が 1.002 の大気の中に置いたとしよう。固体のときの大きさが 0.04 μm である(NH₄)₂SO₄ 粒子の臨界飽和度 S*はおおよそ 1.002 であるから、そのくらいの大きさの (NH₄)₂SO₄ 粒子は、現実の大気で起こり得る程度の過飽和な状態において、雲粒にまで成長できることを示唆している。しかし、例えば固体のときの大きさが 0.02 μm だとすれば、粒子を取り囲む大気の水蒸気飽和度 1.002 に相当する 0.08 μm くらいまでは成長するけれども、それより成長しようとしても取り込んだ水がすぐに蒸発してしまって 0.08 μm くらいまで戻ってしまう。

水蒸気だけの凝集だけでは、水滴が生成しなくても、初めに粒子が存在していれば、水滴が生成される。こうして、雲が作られ、雨が降る。雲の「芯」として寄与するエアロゾル粒子は、(雲)凝結核と呼ばれている。他方、エアロゾル粒子が雲凝結核として機能するという状況は、エアロゾルからしてみれば、大気中からエアロゾルが除去されるということも意味している。雲の中で起こるエアロゾルの除去は、雲内洗浄(in-cloud scavenging, rainout)と呼ばれている。また、エアロゾルが降水粒子に取り込まれて除去される過程は、雲底下洗浄(below-cloud scavenging, washout)と呼ばれている。

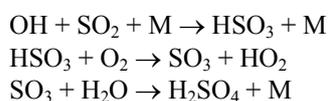
なお、ここでは、(NH₄)₂SO₄ や NaCl など、大気エアロゾル中に見つかる重要な物質を題材として、溶質効果の重要性を説明してきたが、現実の地球大気に浮遊するエアロゾル粒子は、単一の塩から成るとは限らない。複数の化学物質が混合している場合、エアロゾル粒子の潮解・風解特性は単一の化学物質のものよりも複雑な挙動を示すということをつけ加えておく。

硫酸エアロゾルのでき方

地上の様々な発生源から、硫酸エアロゾルの材料となる物質が放出される(図13)。例えば、火山活動は二酸化硫黄(SO₂)の発生源として重要である。また、火力発電所からも SO₂ は放出される。海洋プランクトンからは硫化ジメチル((CH₃)₂S)が大量に発生し、大気中での化学反応により SO₂ やメタンスルホン酸(CH₃SO₃H)などを生成する。

SO₂ は常温・常圧において刺激臭のある気体である。大気中で気体の SO₂ から硫酸エアロゾルができる道筋には、気体の状態で進行する化学反応(気相反応; gas-phase reaction)、雲粒などの水に溶けて進行する化学反応(液相反応; liquid-phase reaction)、既存のエアロゾル粒子の表面に吸着して進行する不均一系化学反応(heterogeneous reaction)の三通りが考えられる。

気相反応は以下のような過程により進行する。

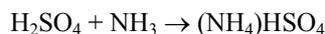
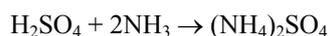


OH はヒドロキシラジカルという。ラジカルは、不対電子を持つ原子や分子のことを指す。M は、通常は N₂ および O₂ を指す。対流圏における OH ラジカルの代表的な数濃度は、10⁶ cm⁻³ 程度である。生成する H₂SO₄ は平衡蒸気圧が極めて低い(99% wt, 3.3 × 10⁻⁵ hPa @ 296 K) ので、粒子化しやすい。

液相反応は、気相反応に比べると複雑であるが、地球規模で見たときに非常に重要な過程である。大気中の SO₂ が雲粒に溶解すると、その一部は亜硫酸水素イオン(HSO₃⁻)や亜硫酸イオン(SO₃²⁻)に解離する。これらのイオンはいずれも S 原子の酸化数がプラス 4 の化合物であるので、S(IV)と書くことにする。一方、H₂SO₄ 分子における S 原子の酸化数はプラス 6 であるので S(VI)と書くことにする。この S(IV) → S(VI)の酸化反応を促進するのが、液相中に含まれる過酸化水素(H₂O₂)やオゾン(O₃)である。これらの他にも、鉄イオン(Fe³⁺)やマンガンイオン(Mn²⁺)などの金属イオンが雲粒に溶け込んでいると、金属イオンが触媒となって溶存酸素が HSO₃⁻ や SO₃²⁻ を酸化する。

不均一反応では、例えばすす粒子などの表面に SO₂ 分子が吸着すると、SO₂ はすす粒子と弱く結合することによって、大気中に SO₂ として孤立した分子で存在する場合に比べると、酸化されやすくなる。この状態で吸着している O₂ により酸化され、H₂SO₄ が生成する。また、粒子が吸湿性のエアロゾルであれば、エアロゾルの表面が濡れているため、濡れた表面特有の液相反応も考えなければならなくなる。

以上のように、様々な化学反応過程を経て生成する H₂SO₄ であるが、強酸である H₂SO₄ を中和する塩基性の物質も大気中には存在する。とりわけ重要なのがアンモニア(NH₃)である。酸と塩基の化学反応は、高校の化学でも中和反応として学習する。こうして地球大気では、(NH₄)₂SO₄ や(NH₄)HSO₄ が生成される。



大気中に存在する、硫酸を含むエアロゾルには、硫酸エアロゾルと硫酸塩エアロゾルが混在している。

硝酸エアロゾルのでき方

硫酸エアロゾルと並んで重要なのが、硝酸エアロゾルである。ただし、硫酸と硝酸(HNO₃)には大きく異なる性質がある。それは、硫酸の平衡蒸気圧が極めて低いのに対して、硝酸のそれは比較的高いということである(14 hPa @ 273K, 75 hPa @ 298K)。そのため、HNO₃ 分子は下層大気中では気体として数 ppb 程度存在している(ppb は 10 億分の 1 を表す)。対流圏における HNO₃ は、人為起源あるいは自然起源で放出された窒素酸化物が、OH ラジカルとの化学反応を起こして生成される。



こうして生成された気体の HNO_3 は、気体の NH_3 と反応し、硝酸アンモニウム(NH_4NO_3)となって粒子化する。



NH_4NO_3 は相対湿度に応じて固体または液滴として存在する。

有機エアロゾルのできかた方

大気中に浮遊するエアロゾルを分析すると、数～数十%の重量比率で炭素の存在が確認できる。炭素の成分は、元素炭素と有機物とに大別される。このうち、有機物に富む粒子は有機エアロゾルという[4]。有機エアロゾルは、自然あるいは人間活動に由来して直接粒子として大気中に放出される一次有機エアロゾルと、大気中に気体として放出された炭化水素が、化学反応を起こして粒子となって生成する二次有機エアロゾル(secondary organic aerosol; SOA)とに大別できる。

SOA は、都市域では光化学スモッグの原因物質の一つである。その理由は、SOA が太陽光を散乱したり吸収したりすることによって、視程障害の一因となるからである。光化学スモッグについては、小学校の社会科(理科ではなく)で学習した方も多いと思う。光化学スモッグを「理科(化学)」の側面で見ると、その原因となる物質は、SOA および SOA を作る材料となる物質全般(これを前駆物質と呼んでいる)である。SOA は、トルエンやキシレンといった平衡蒸気圧の高い高揮発性の有機化合物が、窒素酸化物やオゾンとの共存下で太陽光に曝されたときに、化学反応によって比較的平衡蒸気圧の低い物質へと変化し、それらが粒子化したり既存の粒子に取り込まれたりして生成される。大気中に浮遊する有機エアロゾルを化学分析して同定された物質の一部を、図14に示した[5]。アルコールと脂肪酸は、偶数個の炭素原子数からなるものが多く見つかっており、陸上植物では C_{20} 以上の成分が、植物プランクトンでは C_{16} および C_{18} のものが優勢であることが知られている。脂肪酸とは、高校の化学でも学習したことと思うが、示性式で $\text{CH}_3\text{-R-COOH}$ と書かれる一価のカルボン酸である。ここで、R はアルカンやアルケンなどから誘導される二価の置換基である。ピレン、ベンゾ(a)ピレンなどはその分子内にベンゼン環が複数くっついていることから、多環芳香族炭化水素と呼ばれている。化石燃料の燃焼過程で生成するので、都市の大気エアロゾル中で見つかることが多い。また SOA 中には、 HOOC-R-COOH の構造を持つ有機化合物が見つかることが多い。二つのカルボキシル基を持つこうした物質は、高校の化学で学習したように、ジカルボン酸と呼ばれる。ジカルボン酸には、シュウ酸(HOOC-COOH)、マロン酸($\text{HOOC-CH}_2\text{-COOH}$)、コハク酸($\text{HOOC-(CH}_2)_2\text{-COOH}$)などがある。

SOA の生成過程については、未だによく分かっていない部分が多く、現在も大気化学の研究分野における重要

な研究課題の一つである。例えば、硫酸エアロゾルの生成過程において、液相における化学反応の重要性を指摘したが、SOA の生成過程においてもまた、液相での化学反応の重要性は指摘されている[6]。

SOA に含まれる例として挙げたシュウ酸などの低級ジカルボン酸には、非常に水に溶けやすいという性質がある[7]。例えば、東京都心で測定された有機エアロゾルの総量は、水溶性のエアロゾルの総量とほぼ等しいという報告もあり[8]、有機エアロゾルの水に対する親和性を調べることは重要といえる。なぜなら、「水に溶けやすい」という化学的特徴は、有機エアロゾルが硫酸エアロゾルや硝酸エアロゾルなどと並んで、雲の形成に関わりうることを示唆しているからである。実際、雲粒の核となるエアロゾル粒子のうち、有機エアロゾルが 6 割程度を占めるといふ報告もある。

さて、ここまでは都市大気を例にして SOA 生成の話を紹介したが、自然起源の物質による SOA 生成を見逃すわけにはいかない。我々が住む陸域には、広大な森林が広がっているエリアがある。森林を構成する植生からは、様々な生理学的過程を経て合成された揮発性有機化合物が大気中へと放出されている(図15)。先に述べた都市大気中に存在する揮発性有機物と区別して、植物由来であることを強調する意図で、生物由来揮発性有機化合物(BVOCs)と呼ぶことがある。BVOCs の種類は多岐に及ぶが、イソプレン(2-メチル-1,3-ブタジエン; C_5H_8) および、イソプレンを基本骨格とするモノテルペン類($\text{C}_{10}\text{H}_{16}$)およびセスキテルペン類($\text{C}_{15}\text{H}_{24}$)は、大気中の SOA の材料として特に重要である。植物がこうした物質を大気中へ放出している様子は、人間の目では直接見えないので、俄かにはイメージしがたい人がほとんどであろう。しかし、スギ、ヒノキ、マツといった身の回りで比較的良好に見える樹木が、独特の香りを持っているのはご存じだと思ふ。それらの香りは樹木から放出されるテルペン類に起因している。樹木によって香りが異なるのは、そこから放出されるテルペン類の組成が違うこと、そして、テルペン類が分子ごとに独特な芳香を有していることに関連がある。植物からの BVOC 放出を発見したのは、1960 年の Went による報告[9]によるものが最初であろう。最近では、様々な植物からの BVOC の放出特性(例えば、気温や日射と、BVOC 放出量との関係性)なども詳細に調べられている。その結果、全地球的に見て、人為的に排出される有機化合物の総量を上回る量が、陸域の植生から大気中へと放出されていることが分かってきている。

近年の研究から、イソプレン、モノテルペン類、セスキテルペン類のいずれも、大気中に放出されたあとでオゾンや OH ラジカルと化学反応を起こし、SOA を生成することが知られているが(例えば、イソプレンが大気中で化学反応を起こし、SOA の生成に至る過程を図16に示してある)、その生成収量(生成収量とは、一定量の反応物から得られる生成物の割合)は、セスキテルペン類 > モノテルペン類 > イソプレンの順に並ぶことが分かってきている。これは分子内の炭素数が多いほど、化学反応によって、より大きな分子量、より蒸気圧の低い生成物(=

よりエアロゾルを形成しやすい)を与えることに一因がある。一方で、代表的な BVOC とオゾン、OH ラジカルとの反応速度係数はデータベース[10]があるが、そのデータには大きな不確実性を伴っている例が少なくない。筆者らのグループは、時間分解レーザー分光法や質量分析法といった最先端の手法を駆使して、BVOC の大気反応過程を解明する室内実験研究を行っているほか、野外環境で SOA の生成・成長過程を調べる観測研究を進めている。

エアロゾルと気候との関わり

本稿では、水蒸気が高い飽和度で存在していてもなかなか雲粒が発生しないこと、そして、雲粒の効率的な形成にはエアロゾルが不可欠であることを紹介してきた。そして、大気中に浮遊するエアロゾルの生成機構についても紹介した。本稿の締めくくりとして、エアロゾルが雲の形成に関わっているという事実を、全地球的な気候変動との関わりという角度から眺めてみる(図17)。

大気中に浮遊するエアロゾルは、太陽光を散乱したり吸収したりすることによって、地球の放射収支に作用する。これは、“直接効果”と呼ばれている。とりわけ、産業革命以後の急速な経済発展に伴って増えたエアロゾルによって、太陽光の入射量が減少したことが知られている。別の言い方をすると、地球大気の上端では、平均して地球が放射エネルギーを失う傾向にあると言える。分かりやすいイメージとしては、ゴーヤやアサガオなどのグリーンカーテンが日射を遮り、室内の温度上昇を抑える効果があることを想像して頂くとよい。このようなエアロゾルの作用は、地球規模の温暖化を抑制する方向に働くと考えられている。ただし、どの程度の抑制力を持っているかについては議論の余地がある。その理由として、コンピュータを使ったシミュレーション計算の中ではエアロゾルの取り扱いが簡略化されていること、また、大気中でのエアロゾルの生成・成長・消滅について十分に理解されていない点が多いことが挙げられる。

さて、鋭い方なら、“直接効果”があるのなら、“間接効果”というのがあるのでは？と勘繰る方もいらっしゃると思う。事実、エアロゾルから形成される雲が太陽光を遮ったり、降水や雲の寿命に与える影響を“間接効果”と呼んでいる。間接効果として、第一種間接効果あるいは Twomey 効果として分類される効果がある。この効果は、雲として含まれる水の総量が変化しないという仮定のもとに、エアロゾルが雲の核として働いた場合に起こる雲粒の数の増加と、雲粒の大きさの減少によって生じる雲の光学的な厚さ、および雲による太陽光の反射率の増加を指す。また、雲粒の粒子の大きさの減少に伴って降水の効率が減少するために、雲の寿命が伸び、雲として含まれる水の総量が増える方向に働く効果は、第二種間接効果、あるいは雲寿命効果と呼ばれている[11]。エアロゾルと気候との関わりを探ることは、気象学を含む大気科学全般の研究分野において、ホットなトピックスの一つである[12]。

まとめに代えて

夏季“大学”ということで、一般的なお話というよりは、高校から大学基礎教養程度の化学の知識をベースにして大気エアロゾルの話をまとめてみた。決して分かりやすい内容ばかりだとは思わないが、その点は筆者の能力の限界なのでご勘弁願いたい。私の後でご講演をされる岩坂先生と菅田先生が取り上げられる話題は、マスコミをも賑わすような内容も含んでおり、多くの方にとって親しみやすい問題設定になっているであろうと推察するが、私の話の中で暗に主張したかったのは、エアロゾルの研究が決して世間が騒ぐようになってから重要となったのではないということである。今回の夏季大学のポスターをみると、エアロゾルのネガティブキャンペーンかと思うようなデザインになっている。それはそれでエアロゾルの特徴かもしれないが、それは一つの側面に過ぎない。地球の長い歴史の中でエアロゾルは普遍的に存在し、その結果、地球環境の維持や変動に不可欠な要素として、その役割が「脈々と」続いてきたといえる。ひょっとしたら、生命が誕生し、人類が生まれたのも、エアロゾルあってのことかもしれない。

参考文献および注釈

[1] 岩坂泰信, 気象の ABC—エアロゾル—, 天気, 59(12), 29-32 (2012).

[2] 一般に物質が気体の状態にあれば、分子どおしの距離が十分大きいと、各々の分子は独立した運動をしているが、液体の分子は分子間の距離が短いので分子間に引力(分子間力)が働き、互いに束縛しあっている。そして、分子の各々が、束縛状態下での平衡位置を中心として熱運動している。固体内になると、原子は互いに強く結合しており、規則的な幾何学的格子状に並ぶ場合(結晶)と、不規則に並ぶ場合(アモルファス)がある。物質のある状態における無秩序の程度を表す指標 W (微視的にみた状態数)は、エントロピー S という概念と結びつけることができる。子細の説明は省略するが、無秩序の程度が大きくなるにしたがって、エントロピー S は対数的に大きくなる。

$$S = k \ln W$$

ここで、 k はボルツマン定数と呼ばれる定数である。

[3] n 個の H_2O 分子からなる 1 個の $(H_2O)_n$ なる集合体を考える。 n が十分に大きければ液体の水である。一般に、 n が数~数十個のとき、分子どおしが分子間力により緩やかに結合して生成した会合体を分子クラスターという。 H_2O に限らず、一般の分子について分子クラスターという言葉は用いられる。

[4] 個人的には、有機物エアロゾルという表現が正しいよ

うな気もするが、世の中には有機化学という学術用語があり、これは有機物を化学的に研究する学問分野のことなのだが、有機物化学とは言わない。そうした用語(用法)から派生して、有機物のエアロゾル粒子という意味で、有機エアロゾルという略語的な言葉が使われるようになったのであろうと理解している。

[5] エアロゾル用語集、日本エアロゾル学会編集、京都大学学術出版会 (2004).

[6] Ervens, B., Turpin, B. J., and Weber, R. J.: Secondary organic aerosol formation in cloud droplets and aqueous particles: A review of laboratory, field and model studies, *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 11069-11102 (2011).

[7] 水に溶けやすい・溶けにくい の線引きは曖昧だが、Saxena, P. and Hildemann, L. M., *J. Atmos. Chem.*, **24**, 57-109 (1996) によれば、水 100 g への溶解度が 1 g より大きい有機化合物を「水溶性物質」と定義している。

[8] Miyazaki, Y., Y. Kondo, N. Takegawa, Y. Komazaki, M. Fukuda, K. Kawamura, M. Mochida, K. Okuzawa, R., J. Weber, Time-resolved measurements of water-soluble organic carbon in Tokyo. *J. Geophys. Res.*, **111**, D23206, doi:10.1029/2006JD007125 (2006).

[9] Went, W., Blue hazes in the atmosphere, *Nature*, **187**, 641-643 (1960).

[10] International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) Subcommittee for Gas Kinetic Data Evaluation, <http://www.iupac-kinetic.ch.cam.ac.uk/>

[11] 中島映至、気候問題にかかわるエアロゾルの直接・間接のシグナルについて、*天気* **58**(6), 26-30, (2011).

[12] 例えば、Riccobono, F. et al., Oxidation products of biogenic emissions contribute to nucleation of atmospheric particles, *Science*, **344**, 717-721 (2014).

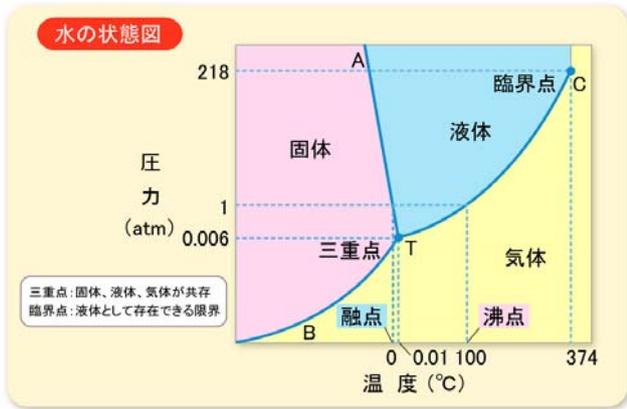


図5 水滴にはできるだけその表面積を小さくしようとする力が働いているので球形となる。

図1 H₂O分子の状態図

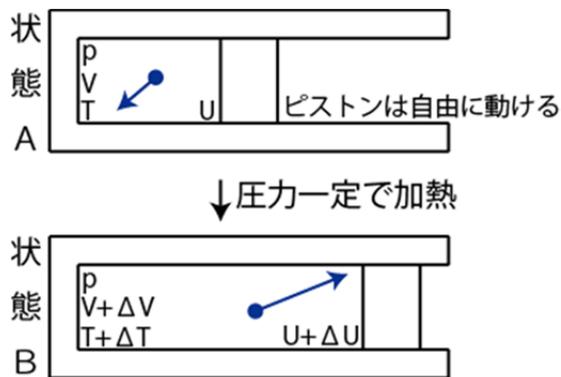


図2 定圧過程における内部エネルギー変化と系の外部への仕事

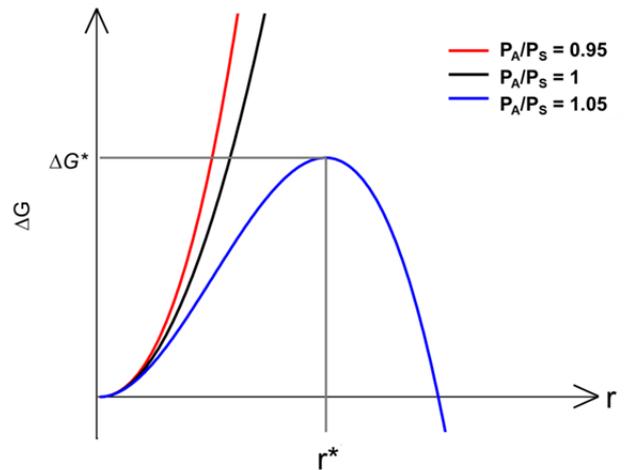


図6 水滴の大きさ r とギブスエネルギー変化との関係。

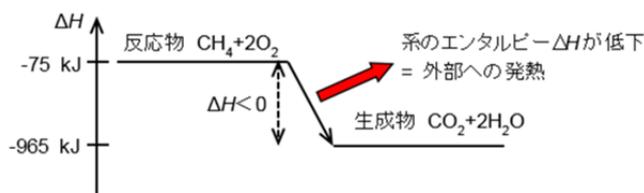


図3 メタンガスの燃焼を例として、エンタルピーの概念を示した。

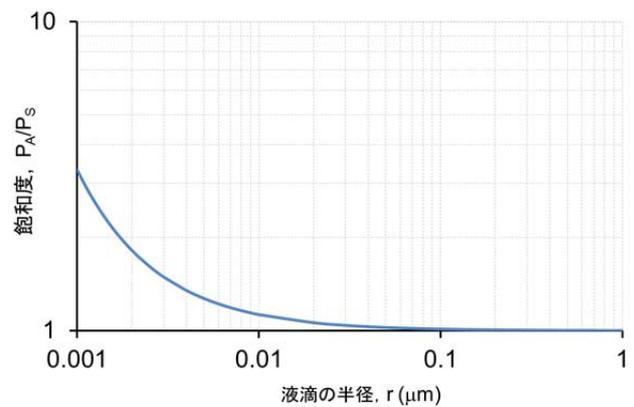


図7 与えられた飽和度とつりあうように形成される純粋な水の水滴の半径。温度は 0°C。

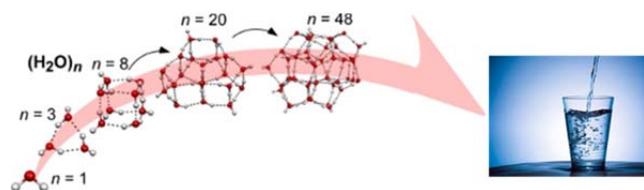


図4 H₂O分子が n 個くっついたときのクラスターの構造。n が非常に大きければ液体の水となる。

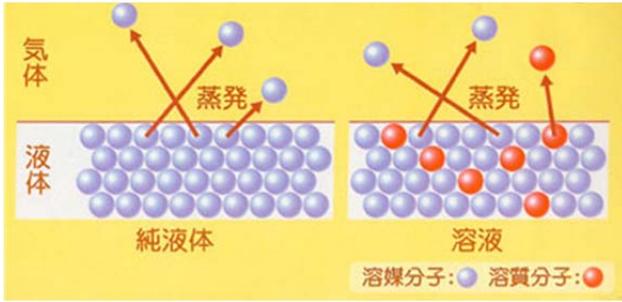


図8 純物質の気液平衡と溶液の気液平衡の違いを示す概念図。

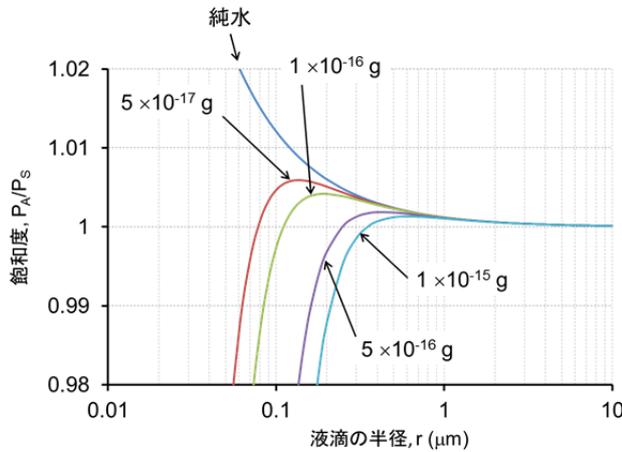


図9 与えられた飽和度とつりあうように形成される、塩化ナトリウム水溶液の液滴の半径。温度は0°C。

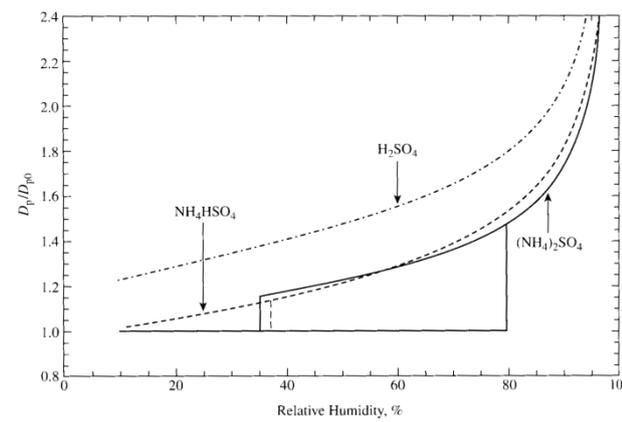


図10 相対湿度の関数として表した硫酸および硫酸塩の大きさの変化。縦軸は、相対湿度 0%のときの粒子の大きさに対する比を表す。

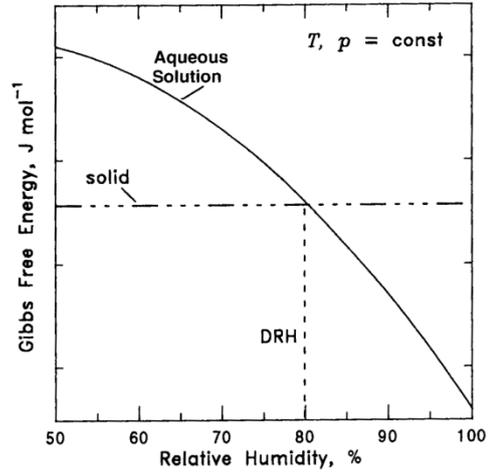


図11 固体の塩(えん)とその水溶液のギブスエネルギーが相対湿度によって変化する様子をプロットした図。温度と圧力は一定。DRH は、潮解湿度を意味する(潮解湿度について本稿テキストを参照)。

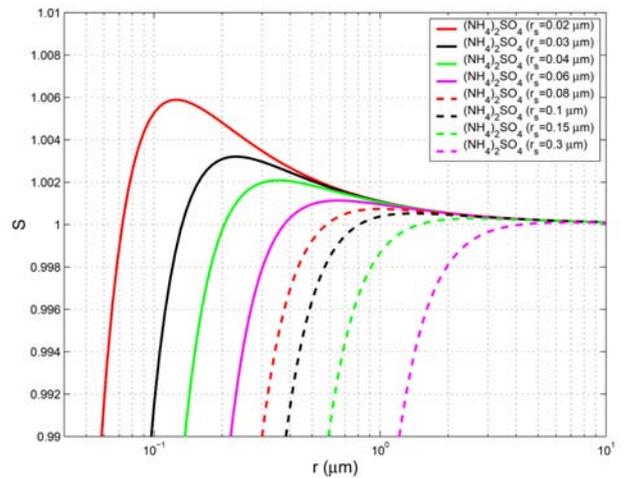


図12 与えられた飽和度とつりあうように形成される、硫酸ナトリウムの液滴の半径。

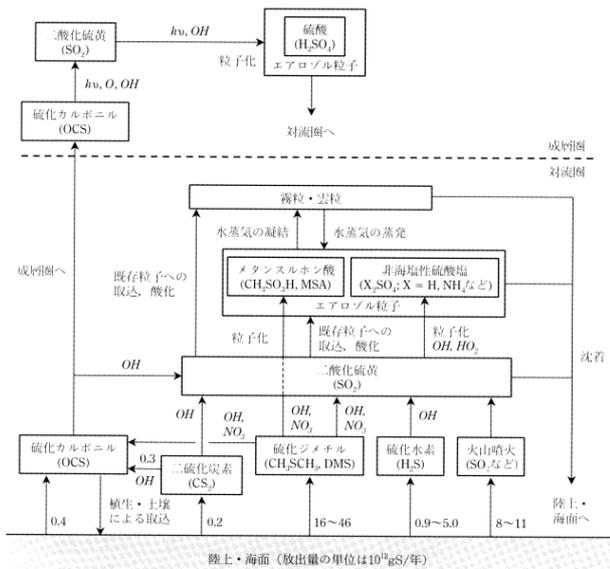
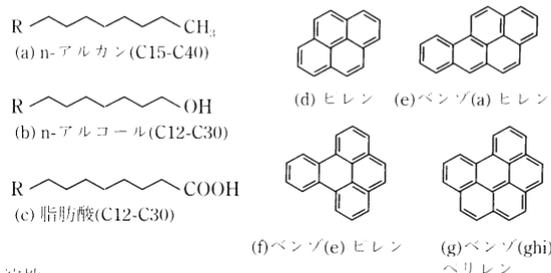


図1 自然起源硫黄化合物の主要な酸化経路

図13 硫黄化合物とそれらの主な酸化経路(文献[5])。

有機溶媒可溶



水溶性

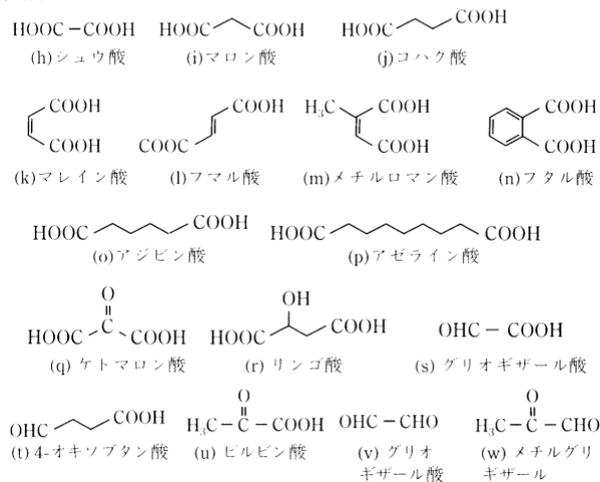


図14 大気エアロゾル中に存在が確認されている有機化合物(文献[5])

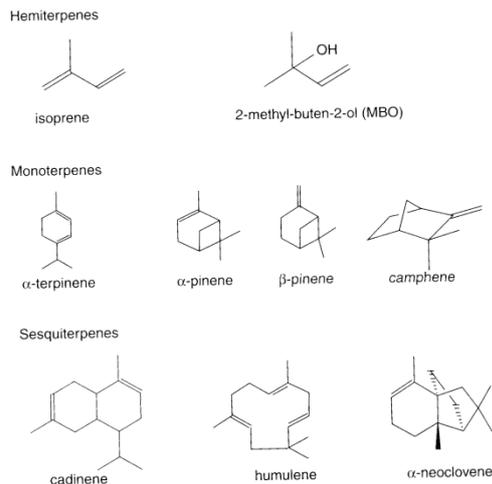


図15 植物から大気中へと放出される揮発性有機化合物の例。

イソプレンからのSOA生成

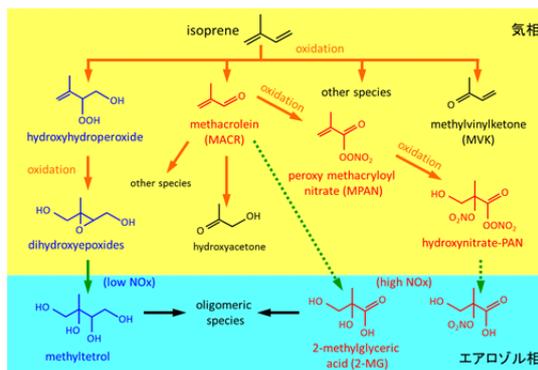


図16 イソプレンからの SOA 生成過程をまとめた模式図。実のところ、ここに描かれていない様々な過程が存在していることが示唆されており、植物由来揮発性有機物から SOA が生成される過程には未解明な問題が山積みである。

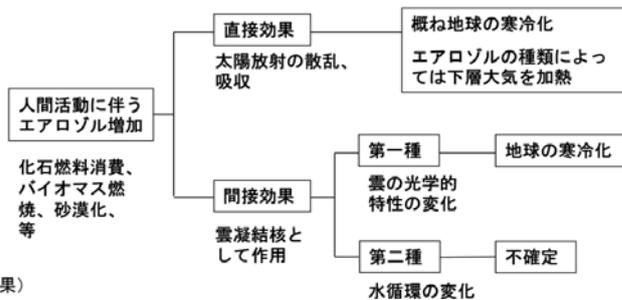


図17 エアロゾルが地球の気候に及ぼす役割を分類したダイアグラム。

風が運んでくるエアロゾル;浮遊化学工場

岩坂泰信 (滋賀県立大学)

要旨

大気中に浮遊しているエアロゾルは、浮遊しつつ周辺の気組成と様々な化学反応を起こしています。この化学反応は、オゾンホールや日常的に目にする雲の発生など、時によってとんでもなく激しい大気現象を引き起こします。また、我が国では、中国大陸起源の黄砂等も雲の発生に寄与しています。このような激しい現象に加えて長期にわたって徐々に環境に影響する反応も見逃せません。黄砂と大気汚染物質との反応、日本海で供給された水蒸気に関与する反応、黄砂の上に存在する微生物が関わる反応など興味深いものがいくつも存在します。

1. はじめに

大気中に微小な粒子状の物質が浮遊していることが、科学的に知られるようになったのはそれほど昔ではない。ただ、目には見えないが「何者か」が食べ物を腐敗させたりすることなどの身の回りの出来事や「もや」がかかったような見通しの悪い天候などの存在を通して、きれいな空気のなかに極めて微小な物質の存在を想定していた人は多い。

社会が急速に近代化し始めると作業空間の悪化とともに、「空間に微小な粒子が浮遊していて体に悪い」などが意識されることが多くなった。

スライド; 1, 2, 3

2. 水との反応

「黄砂が氷晶核としての能力を持っている」ことを発見したのは、日本の気象学者である。実際の気中でそのような働きが発揮されているかどうかを知るには、雲が発生する高度で、十分な水蒸気があるのか黄砂が適度な濃度で存在するか等を知る必要があるが、とにもかくにも「黄砂が水と反応する物質と想定された」のである。

スライド; 4, 5

3. 遠くまで浮遊するエアロゾル・黄砂

1970年代から1980年代は、大気中の物質の広域拡散に強い関心が生まれた時代であった。他方、公害問題や大気汚染問題がクローズアップされ、多くの人が黄砂が遠くまで(時には太平洋の真ん中まで)風に乗って拡散する様子などにも強い関心を寄せる

ようになってきた。当然のことだが、黄砂の大きさなどにも強い関心が集まった。

スライド; 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14

4. 汚れた黄砂

公害問題や大気汚染問題が話題になるにつれて、急速に重工業を発展させている中国沿岸部から放出される(石炭使用に伴う)多量の硫酸化物などの動向に注目する日本人研究者が増えてきた。汚れた黄砂の発見は、黄砂(その他のエアロゾル粒子)の表面反応に研究者の関心を向けさせるきっかけになったが、同時に越境する汚染物質という新たな問題が起きつつあることを世に知らせることにもなった。

現実の大気中で起きていることや黄砂の発生源地での黄砂粒子表面の状態を知ることが必要とされ、たくさんの研究者が中国大陸の乾燥地域に入った。また、世界各国、とりわけアメリカ、日本、韓国、中国、の研究者の協力が急速に広がり、いまでは、KOSAという言葉も日本以外でもしばしば聞かれるようになっている。

スライド; 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22

5. エアロゾルの放射影響

地球環境の時代を迎えて、「地球の温暖化」は大きな話題となり、増加の一途を続ける大気中の二酸化炭素(CO₂)の濃度は多くの人の関心を集めた。CO₂の濃度増加は化石燃料の使用量増加と関係している。この問題の解決は、現代人が生活する上で不可欠としているエネルギーの存在が背景にあるために根の深い難しい課題と言われてきた。対策に必要な温暖化予測には、手法の開発や必

要情報の収集整備が求められ、その中で「大気エアロゾルの放射効果」の重要性が浮かび上がってきた。このためにも、微小粒子の形状や物質に関する知見が強く求められた。

スライド； 2 3, 2 4

6. 健康という関心事

20 世紀後半は、先進諸国はいずれも高齢者人口の増加や総人口の停滞や減少に伴って生じる種々の問題が顕在化してきた。そのなかでも、「人の健康」は重要性とともに「よき環境」[安心で安全な社会] などとの多様な結びつきにも強い関心が寄せられるようになった。大気中の物質に対しても、「病原性物質の存在」等の視点からの研究も活発になってきた。

スライド； 5, 2 6, 2 7, 2 8, 2 9, 3 0

7. 空中微生物の環境影響

健康に敏感な地域や国々では、「砂塵濃度の増加時に見られる空中微生物濃度の増加」に大きな関心が寄せられ、今ではダスト粒子と微生物の混合状態や(広い意味での)反応にも本格的な調査・研究が行われるようになってきている。反応相手に微生物も登場と言うことにもなったのである。

スライド； 3 1, 3 2, 3 3, 3 4, 3 5, 3 6, 3 7, 3 8, 3 9, 4 0

8. まとめ

エアロゾルに関する気象学的な見方は、社会的な要請や関心の変化に対応するように変わってきており、「反応という面」からだけでなく



のように、拡大深化してきているのである。このような科学のトレンドに加えていろいろな物質が地域や国境を越えて流れるという社会文化的な面をどのように考えたらよいか、賢い対応の仕方が求められているのではなからうか。

スライド； 4 1, 4 2

参考文献 (講演資料等は以下の文献に拠る。ABC 順)

Hong, S. C., K.-H. Lee, Y. J. Kim, S.-W. Kim, J.-G. Won, S.-C. Yoon, Y. Iwasaka (2003): The International Society for

Optical Engineering, Proc. SPIE, 5154.

Hua, N.-P., F. Kobayashi, Y. Iwasaka, G.-Y. Shi, T. Naganuma (2007): *Aerobiologia*, 23, 291–298, DOI10.1007/s10453-007-9076-9.

Iwasaka, Y., H. Minoura, and K. Nagaya (1983): *Tellus*, 35B, 189-196.

Iwasaka, Y., G.-Y. Shi, M. Yamada, F. Kobayashi, M. Kakikawa, T. Maki, T. Naganuma, B. Chen, Y. Tobo, C. S. Hong (2009): *Air Quality, Atmosphere and Health* DOI10.1007/s11869-009-0031-5.

Iwasaka, Y., G.-Y. Shi, Z. Shen, Y.S.Kim, D. Trochkin, A. Matsuki, D. Zhang, T. Shibata, M. Nagatani, and H. Nakata (2002): *J. Arid Land Studies*, 11, 347-353.

Iwasaka, Y., T. Shibata, T. Nagatani, G.-Y. Shi, Y. S. Kim, A. Matsuki, D. Trochkin, D. Zhang, M. Yamada, M. Nagatani, H. Nakata, Z. Shen, G. Li, B. Chen, K. Kawahira (2003): *J. Geophys. Res.*, 108, No. D23, 8652, doi:10.1029/2002JD003267, ACC20 1-8.

Iwasaka, Y., G.-Y. Shi, M. Yamada, A. Matsuki, D. Trochkin, Y. S. Kim, D. Zhang, T. Nagatani, T. Shibata, M. Nagatani, H. Nakata, Z. Shen, G. Li, B. Chen (2003): *J. Geophys. Res.*, 108, No. D23, 8644, doi:10.1029/2002JD003270, ACC12 1-10.

Iwasaka, Y., M. Yamato, R. Imasu and A. Ono (1988): *Tellus*, 40B, 494-503.

Kakikawa, M., F. Kobayashi, T. Maki, M. Yamada, T. Higashi, B. Chen, G.-Y. Shi, C. S. Hong, Y. Tobo, Y. Iwasaka (2008): *Air Quality, Atmosphere and Health*, DOI 10.1007/s11869-008-0024-9.

Kellogg, C. A. and Griffin, D. W. (2006): *Trends Ecol. Evol.*, 21, 638-644.

Kojima, T., P.R. Buseck, Y. Iwasaka, A. Matsuki, D. Trochkin (2006): *Atmos. Res.*, 82, 698-708.

Maki, T., M. Kakikawa, F. Kobayashi, M. Yamada, A. Matsuki, H. Hasegawa, Y. Iwasaka (2013): *Atmos. Environ.*, 74, 73-82.

Maki, T., F. Puspitasari, K. Hara, M. Yamada, F. Kobayashi, H. Hasegawa, Y. Iwasaka (2014): *Science of the Total*

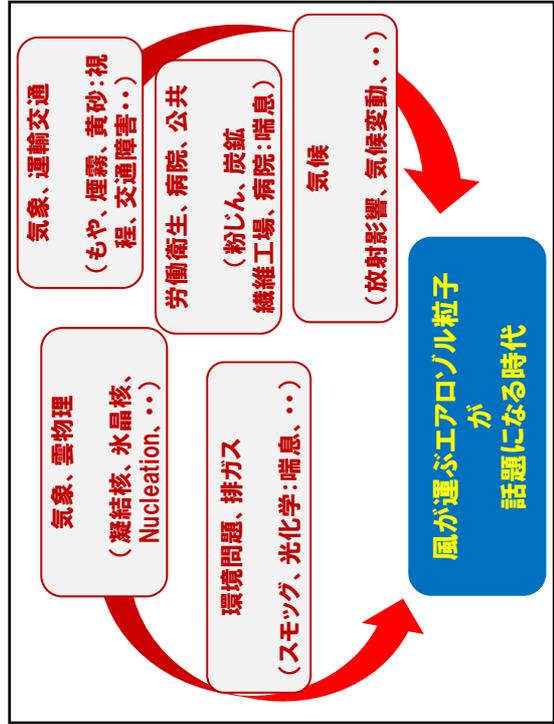
- Environment, 75-84, 488-489.
- Matsuki, A., Y. Iwasaka, G.-Y. Shi, D. Zhang, D. Trochkin, M. Yamada, Y. S. Kim, B. Chen, T. Nagatani, T. Miyazawa, M. Nagatani, and H. Nakata (2005): *Geophys. Res. Lett.*, 32, L22806, doi:10.1029/2005GL024176.
- Matsuki, A., Y. Iwasaka, G.-Y. Shi, H.-B. Chen, K. Osada, D. Zhang, M. Kido, Y. Inomata, Y. S. Kim, D. Trochkin, C. Nishita, M. Yamada, M. Nagatani, and H. Nakata (2005): *Water, Air, and Soil Pollution, Focus*, 5, 101-132.
- Matsuki, A., Y. Iwasaka, K. Osada, K. Matsunaga, M. Kido, Y. Inomata, D. Trochkin, Nishita, C., T. Nezuka, T. Sakai, D. Zhang, S. A. Kwon (2003): *J. Geophys. Res.*, 108, No. D23, 8663, doi:10.1029/2002JD003266, ACC31 1-12.
- Matsuki, A., Iwasaka, Y., D. Trochkin, , D. Zhang, K. Osada, and T. Sakai (2002): *J. Arid Land Studies*, 11, 337-345.
- Mikami, M., O. Abe, M. Du, O. Chiba, K. Fujita, M. Hayashi, Y. Iwasaka, K. Kai, K. Masuda, T. Nagai, T. Ootomo, J. Suzuki, A. Uchiyama, S. Yabuki, Y. Yamada, M. Yasui, G. Shi, X. Zhang, Z. Chen, W. Wei, J. Zhou (2002): *J. Arid Land Studies*, 11, 211-222.
- Mikami, M., G. Y. Shi, I. Uno, S. Yabuki, Y. Iwasaka, M. Yasui, T. Aoki, T. Y. Tanaka, Y. Krosaki, K. Masuda, A. Uchiyama, A. Matsuki, T. Sakai, T. Takemi, M. Nakawo, N. Seino, M. Ishizuka, S. Satake, K. Fujita, Y. Hara, K. Kai, S. Kanayama, M. Hayashi, M. Du, Y. Kanai, Y. Yamada, X. Y. Zhang, Z. Shen, H. Zhou, O. Abe, T. Nagai, Y. Tsutsumi, M. Chiba, and J. Suzuki (2006): *Global and Planetary Change*, 52, 142-172.
- Okada, K., A. Kobayashi, Y. Iwasaka, H. Naruse, T. Tanaka, and O. Nemoto (1987): *J. Meteorol. Soc. Japan*, 65, 515-529.
- Osada, K., M. Kido, H. Iida, Y. Iwasaka, M. Nagatani, H. Nakada (2003): *J. Geophys. Res.*, 108, No. D23, 8667, doi:10.1029/2002JD003544, ACE35 1-9.
- Osada, K., M. Kido, C. Nishita, K. Matsunaga, Y. Iwasaka (2007): *Tellus*, 59, 742-758.
- Trochkin, D., Y. Iwasaka, A. Matsuki, M. Yamada, Y. S. Kim, T. Nagatani, D. Zhang, G.-Y. Shi, Z. Shen (2003): *J. Geophys. Res.*, 108, No. D23, 8642, doi:10.1029/2002JD003268, ACC10 1-11.
- Osada, K., M. Kido, C. Nishita, K. Matsunaga, Y. Iwasaka, N. Nagatani, and H. Nakada (2002): *Atmos. Environ.*, 36, 5469-5477.
- Trochkin, D., Y. Iwasaka, A. Matsuki, D. Zhang, K. Osada (2002): *J. Arid Land Studies*, 11, 327-335.
- Yamada, M., Y. Iwasaka, A. Matsuki, D. Trochkin, Y. S. Kim, D. Zhang, T. Nagatani, G.-Y. Shi, M. Nagatani, H. Nakata, Z. Shen, B. Chen, and G. Li (2005): *Water, Air, and Soil Pollution, Focus*, 5, 231-250.
- Zhang, D. and Y. Iwasaka (2000): *Atmos. Environ.*, 34, 2669-2679.
- Zhang, D., and Y. Iwasaka (2006): *J. Meteorol. Soc. Japan*, 84, 939-947.
- Zhang, D., Y. Iwasaka, and G. Shi (2005): *EOS Transactions, American Geophysical Union*, 86, 532.
- Zhang, D., Y. Iwasaka, G.-y. Shi, J. Zang, A. Matsuki, D. Trochkin (2003): *J. Geophys. Res.*, 108, No. D24, 4760, doi:10.1029/2003JD003869.
- 岩坂泰信、小林史尚、皆巳幸也 (2010) : エアロゾル研究、25、4-12.
- 岩坂泰信、金 潤ソク、D トロシキン、松木 篤、山田 丸、柴田 隆、長谷徹志、石 廣玉 (2002) : 地球環境、7、159-170.
- 牧 輝弥、小林史尚、鈴木振二、長谷川 浩、柿川真紀子、當房 豊、松木 篤、洪 天祥、岩坂泰信、山田 丸 (2010) : エアロゾル研究、25、35-42.
- 岩坂泰信 (2012) : 空飛ぶ納豆菌 黄砂に乗る微生物たち、PHP 研究所
- 岩坂泰信 (2006) : 黄砂その謎を追う、紀伊国屋書店

風が運んでくるエアロゾル：浮遊化学工場

岩坂泰信
滋賀県立大学理事
名古屋大学名誉教授
iwasaka@mti.biglobe.ne.jp

**「風に運ばれる」
をよくよく考えてみると
私たちの生活と
いろいろな面で
繋がっていることが
考えられます**

- ◆ 運ばれる方向や高さが変わると遭遇する相手物質もいろいろ変わります
- ◆ 運ばれる時間が長いとより広い範囲に拡散する可能性が増えます
- ◆ 気象の世界では長い間相手物質は水でした
- ◆ 水が運ばれたのは雲や降水現象の理解のため
- ◆ 1990年ごろからは水以外の物質が登場
- ◆ このため「運ばれる」で生じる影響も増えました

**気象の世界では
第2次大戦後
氷晶核や雲凝結核
の研究が急速に発展
「種になる何か」が必要**

やがて、そのような物質が
大気中に「常に存在している」
と考えられるようになった
今は、それらは「エアロゾル粒子」と呼ばれる
水力発電がエネルギー源として重視されていた



ライダーによる黄砂の高度分布観測

Table (1983), 126, 189-196

The transport and spatial scale of Asian dust-storm clouds: a case study of the dust-storm event of April 1979

By YASUNORI IWASAKA, HIROAKI MINOBU, and KATSUHIRO NAGAYA, *Weater Research Institute, Nagoya University, Chikusa-ku, Nagoya 464, Japan*
(Manuscript received April 26, in final form November 29, 1982)

ABSTRACT

A dust storm which originated in the China desert area covered the Japan Islands on April 1979. The spatial structure and transport path of the dust storm cloud has been investigated. The dust storm cloud was observed from Nagoya, Japan, on April 1979. The dust storm cloud had a horizontal scale of $1.45 \times 10^4 \text{ km} \times 1.7 \times 10^4 \text{ km}$. The dust storm cloud consisted of 2 distinct layers, one at 6 km height and the other at 2 km. The transport path of the dust storm cloud was investigated from the 7-km-Moran desert and that in the lower layer from the Gobi desert and the Huang He basin.

2層になって名古屋上空を流れて行った4月末の黄砂

先程のお話の続きです

Fig. 5. The backscatter coefficient of particulate matter at wavelength 0.6943 μm measured by laser light on the night of April 14, 1979. The dust storm cloud has two peaks at 400 mb (potential temperature, $\theta = 216.4 \text{ K}$) and 850 mb (potential temperature, $\theta = 292.9 \text{ K}$).

**偶然とはいえビックリ
岩坂がライダーで黄砂を観測
したのと同じ黄砂でした**

Duce et al., Science, 209, 1980

Long-Range Atmospheric Transport of Soil Dust from Asia to the Tropical North Pacific: Temporal Variability

Abstract. The concentration of airborne soil dust at Enewetak Atoll (11°N , 162°E) in April 1979 was 2.3 micrograms per cubic meter but decreased steadily to 0.02 microgram per cubic meter over the next 5 months. The spring dust is probably derived from China; its deposition rate (~ 0.3 millimeter per 1000 years) suggests that it may be a significant contributor to the deep-sea sediments of the North Pacific.

Fig. 2. The identified trajectory of the dust storm from the surface between 5 and 12 May, 1979. The dust storm cloud was observed from a 3-km elevation to the surface between 5 and 12 May. The trajectory is shown by the dot symbol. It shows by the dot for each day in the period.

Fig. 3. Atmospheric concentrations of Na and Al at Enewetak Atoll. STP, standard temperature and pressure.

大洋の真ん中にも生き物がいる！

彼らの飯のタネはどこからやってくる？
(フランクトンが必要な栄養素はどのように供給されてるか？)
(当然、黄砂の落下の仕方にも大関心)

ハワイ沖までやってくる黄砂が見つかった1979年春の黄砂「影響」と言うものをより広く考える流れ

アメリカだけでなく中国でもこの黄砂を取り上げていた

文化革命の混乱後、中国の学術界は少しずつ近代的な姿に変わりつつあった。1984年9月、筆者が中国を訪れた頃開催された気象学会で北京大学の教授たちが取り上げたのも1979年の黄砂でした。

日本の人工衛星、ひまわり、の画像を解析し黄砂の移動や拡散状態と光学的厚さを議論

礫野等の研究は、
黄砂粒子の中には
相当に暖かい温度で
氷晶核として働くものが
存在することを示した。

その後、黄砂が雲高度を
頻繁に拡散していること判明

数ミクロンの黄砂も、大気中の上下
の運動にうまく乗ると太平洋を越え
てアメリカ大陸にも到達する
「長距離輸送」が大きな関心事に
同時に「影響」も多様化
汚染物質として放射

氷物粒子

— 13 ~ -20°C
(Isono et al., 1959)



粒子を大きさ別に
個数濃度で測るか？
表面積濃度で測るか？
重量(体積)濃度で測るか？
には、それぞれ意味がある

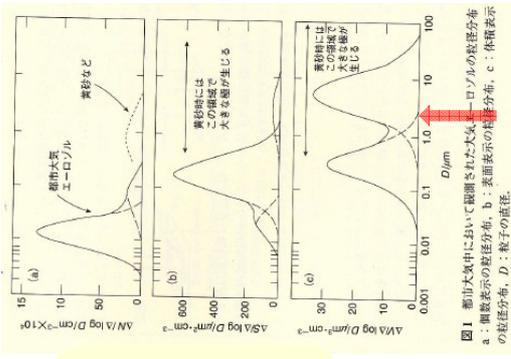


図1 都市大気中において観測された大気エアロゾルの粒径分布
a: 個数表示の粒径分布, b: 表面表示の粒径分布, c: 体積表示
の粒径分布, D: 粒子の直径.

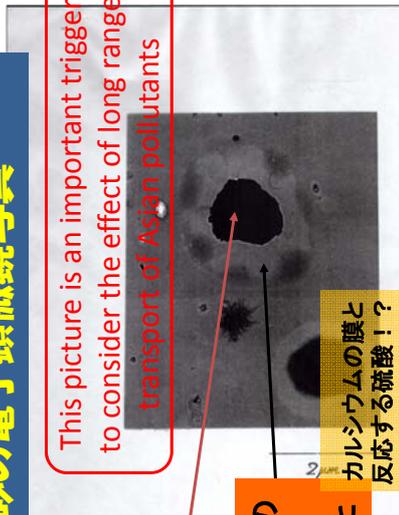
やがて、黄砂粒子の性状を直接採集して調べようとする
日本上空でつかまった
黄砂の電子顕微鏡写真

This picture is an important trigger
to consider the effect of long range
transport of Asian pollutants

黄砂

黄砂表面の
溶液が
染み出した

カルシウムの膜と
反応する硫酸！？

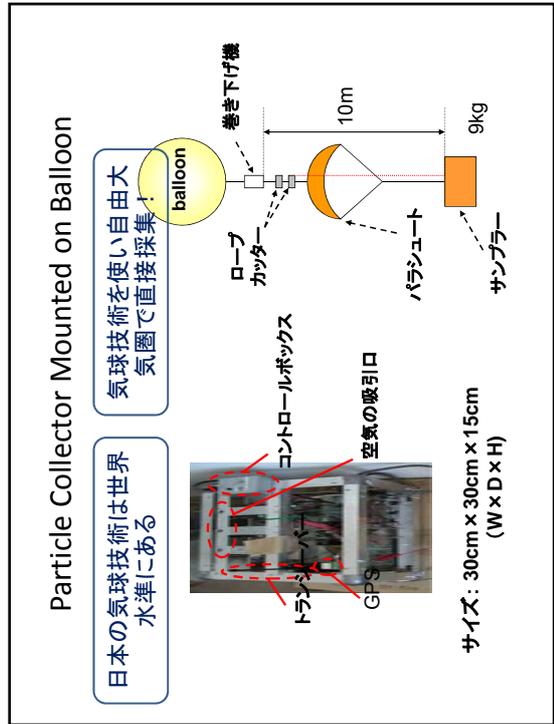
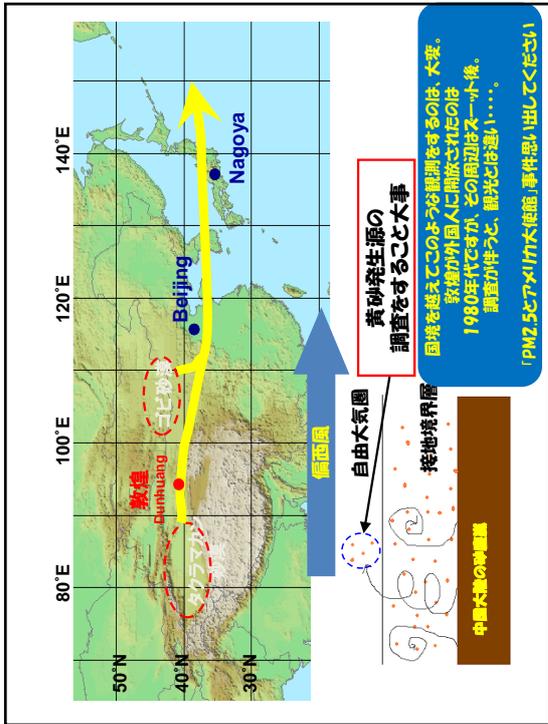


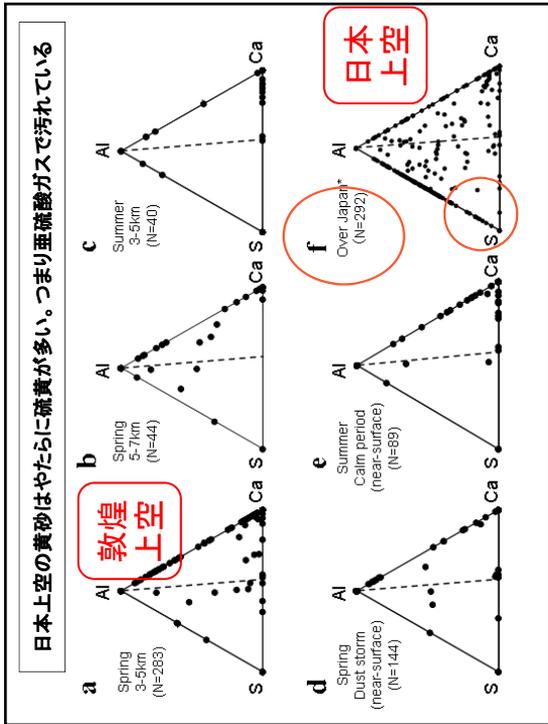
この硫酸塩の意味するところ
は「黄砂粒子がどこかで
硫黄化合物と遭遇した」
のではないかと、であったが
これを詰めるのは
簡単ではない

砂漠と言っても、きれいばわけではないでしょう
日本の上空で汚されたのでは？
サンフラワーが汚れているのでは？
...

発生源地での黄砂観測が重要

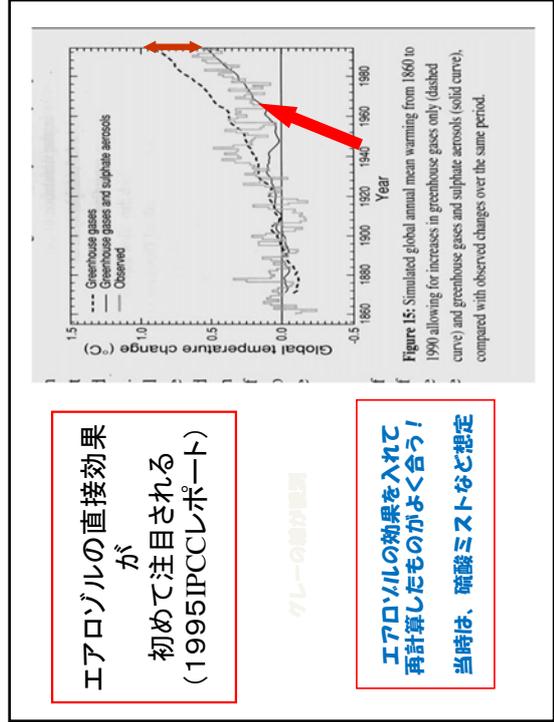






「放射」への影響は CO2濃度のトレンドが地球温暖化傾向が調和しないことから

IPCCレポートにも取り上げられ 気候研究、温暖化予測などに多くの分野から研究者が関わるきっかけに



1990年代は、越境汚染問題、気候変化への影響評価、健康影響への関心高まる

黄砂など中国からの影響
汚染物質で汚れた黄砂！

硫酸酸化物など中国から
オキシダント、窒素酸化物も

中国の大都市や沿岸部の
急発展、大気汚染状態悪化

ハーヴァード大の報告
が出てPM2.5に
大きな関心（1990）
当時日本はPM10で規制



生物由来のものにも関心が
寄せられている（病原性の有無など）

황사경보

황사로 인해 1시간 평균

미세먼지 농도 500µg/m³(이하) 2시간 이상

지속될 것으로 예상될 때

- 노약자, 어린이, 호흡기 질환자, 심의환자 자제
- 유치원, 초등학교, 심의활동 자제
- 일반인: 과격한 심의운동 자제



황사주의보

황사로 인해 1시간 평균

미세먼지 농도 600µg/m³(이하) 2시간 이상

지속될 것으로 예상될 때

- 노약자, 어린이, 호흡기 질환자, 심의환자 등 공지
- 유치원, 초등학교, 심의활동 (공지)
- 운동, 심의활동 (공지)
- 일반인: 과격한 심의운동 금지 및 심의활동 자제



황사경보

황사로 인해 1시간 평균

미세먼지 농도 1,000µg/m³(이하) 2시간 이상

지속될 것으로 예상될 때

- 노약자, 어린이, 호흡기 질환자, 외출금지
- 유치원, 초등학교, 심의활동 금지 및 수업일수록, 휴일 등의 학생 보호조치 강구
- 일반인의 심의활동 금지 및 외출 자제
- 심의운동은 참가 금지 및 연기



Asian Dust

Forecast · Warning
systems

by KMA

(2002. 4. 10.~)

ハーバード6都市研究

- 目的: 喫煙習慣、性別、年齢、その他のリスク要因を考慮に入れた上で、大気汚染の死亡率に及ぼす影響を評価すること。
- 24~74歳の白人約8000人
- 1974年~1991年健康状態、死亡原因を追跡調査(拡張研究で1998年まで延長)
- 大気汚染調査: 各地域の測定局で実施
- 性別、年齢、喫煙、職業暴露、教育レベル、肥満度で調整し、生存時間解析を行った。

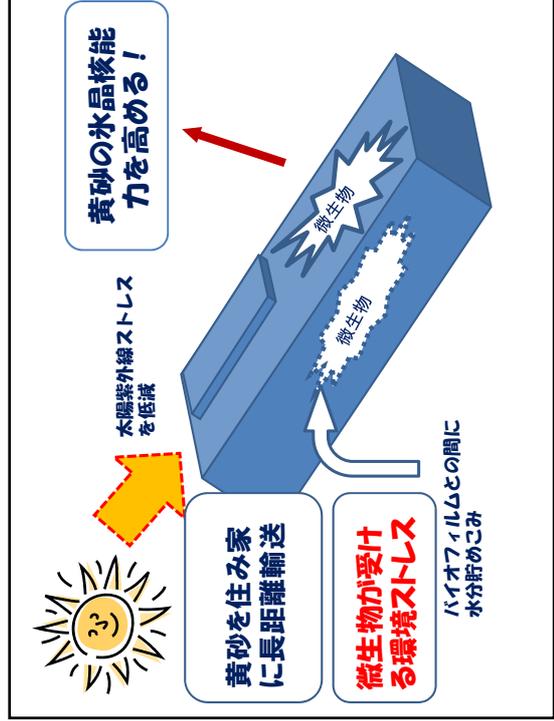
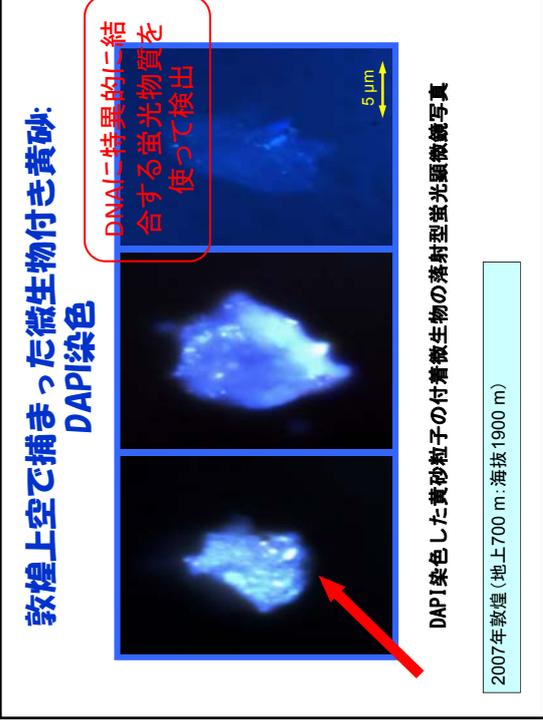
硫酸塩で汚れた黄砂は、
川崎や四日市の公害
(喘息など)を思いださせる

そんな汚れた黄砂が
太平洋を渡って...!

アメリカ等では、そのような観点からの
疫学的な調査も試みられている

6都市調査結果シミュレーション(2.5ミクロン以下危険!)
PM2.5という流行語を生みましたが
「長距離輸送」研究では、サイズや表面積は常に開心事

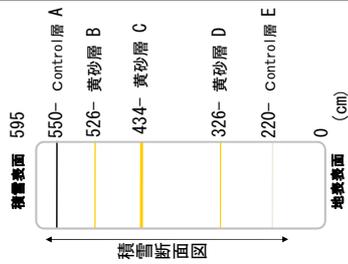




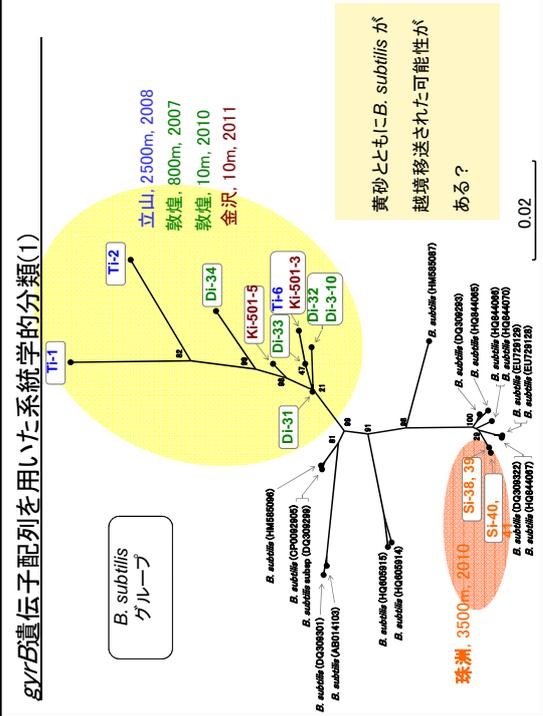
積雪を使った観測 (富山県立山室堂平: 2450m)



積雪深 5m以上
2002年秋(10月)から
2009年春(4月)までの積雪
期間



「砂粒子を含む積雪層(黄砂層)」から積雪試料100mlを採取する。



バイオエアロゾルの対流圏広域拡散による影響

微生物生態系への影響、動植物に対する病原性
(e.g., Griffin et al., 2001; Prospero, 2005; Kellogg and Griffin, 2006)

氷晶核としての能力

バイオエアロゾル
-7~-11°C (Möhler et al., 2007)
-2~-4°C (Shenell and Valli, 1972)

細菌粒子
-13~-20°C (sono et al., 1959)

読賣新聞 THE YOMIURI SHIMBUN 2013年11月25日 3月21日

黄砂に乗る微生物

「黄砂に乗る微生物」の記事の抜粋。黄砂が遠くまで飛ぶ際に、そこに付着した微生物も一緒に運ばれていく。これにより、遠く離れた地域にも微生物が侵入する可能性がある。記事は、黄砂の成分や、それに付着した微生物の種類について詳しく説明している。

まとめ

- ・ 大気中に浮遊している粒子は、時には広範囲に拡散している。
- ・ 曇や降水、放射、人の健康、食(おそらく文化)などに影響している。
- ・ 曇や降水の問題は「エアロソル粒子と水」時には「エアロソル粒子と酸性原因物質」の粒子表面での反応が関わっている。
- ・ 黄砂とともに、大気汚染物質や細菌が移動していることは確かで、最近に関しては大部分がグラム陽性細菌に属し、*Bacillus*属の細菌群であることが分かった。細菌が黄砂に付着することで、黄砂の性質が大きく変化する。
- ・ 我が国のPM2.5問題は、ハーヴァード大の「6都市調査」から人の健康との関係で大きくクローズアップされるようになった。

このように、上空に吹いている風に乗った黄砂は
よく見ると実にいろいろなところに関係しています
単に良い悪いを越えて……

お城とえーざーいしました

PM_{2.5}は増えているのか？ 心配なのか？

すがた
菅田誠治
sugatas@nies.go.jp

独立行政法人 国立環境研究所
地域環境研究センター 都市大気環境研究室

本講義の目標：

- ・聞いて頂いたあと、PM_{2.5}について「増えているのか？心配なのか？」との問いかけに、自信を持って「増えていない！心配ない！」と答えられるようになって頂くこと。

2

PM_{2.5}について

- ・過去はどうだったのか
- ・現在（最近）はどうなのか
- ・現状は健康面で心配なのか
- ・今日や明日の濃度は
- ・今後どうなるか、どうするか

3

PM_{2.5}について

- ・過去はどうだったのか
- ・現在（最近）はどうなのか
- ・現状は健康面で心配なのか
- ・今日や明日の濃度は
- ・今後どうなるか、どうするか

4

PM_{2.5}とは
 Particulate Matter
 粒子状物質
 関連語=エアロゾル

粒子の直径が**2.5μm以下**
 μm(マイクロメートル、10⁻⁶m)は
 mm(10⁻³m)の1000分の1

PM_{2.5}の関連語
 ・SPM(≒PM₁₀)
 ・PM₁₀

2.5は下付きで
 書くのが本来だが
 PM2.5も可

主な影響は3種：
 ①人体等への影響
 ②太陽放射の吸収・反射
 ③雲粒の核となる

US EPA 出版

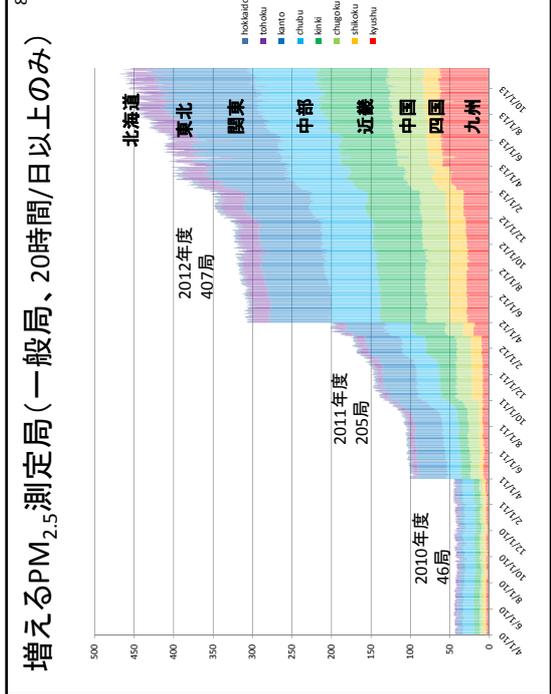
日本の大気汚染問題

- 1950～ 高度成長期 公害問題(四大公害病等) 60年代
 - ばい煙規制法(1962)
 - 公害対策基本法(1967)
 - 大気汚染防止法(1968)
- 公害国会(1970)
 - SPM環境基準(1973)
 - 環境基本法(1993)
- 1997年 ダイオキシン問題
- 2005年 アスベスト問題
- 2013年 PM_{2.5}問題

大気汚染関係の法律等と環境基準・常時監視の義務

- 環境基準に係る**環境基準**を規定
- 大気汚染防止法**
- 大気汚染の常時監視を義務付け⇒ 都道府県・政令市

- 事務の処理基準
- 測定対象、測定局の数・配置等を規定
- 環境大気常時監視マニュアル
- 測定機、測定法、常時監視システムを規定



9 大気汚染に係る環境基準(環境基本法の定めに従い告示される)

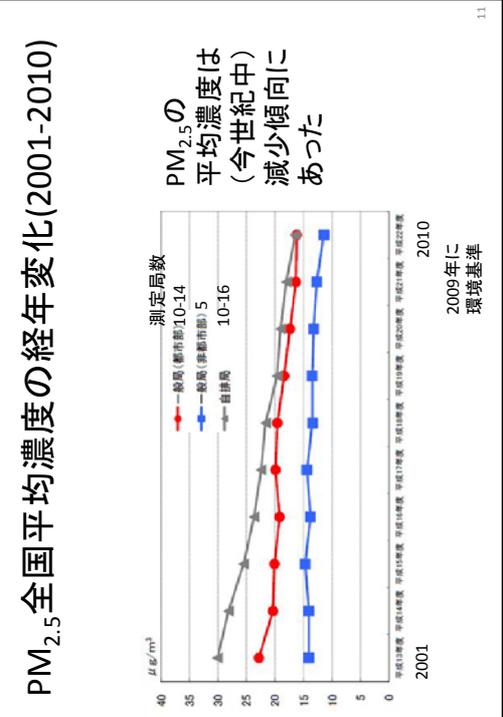
物質	条件	告示年
二酸化硫黄(SO ₂)	1時間値の1日平均値が0.04ppm以下 1時間値が0.1ppm以下	1973年
一酸化炭素(CO)	1時間値の1日平均値が10ppm以下 1時間値の8時間平均値が20ppm以下	1973年
浮遊粒子状物質(SPM)	1時間値の1日平均値が0.10mg/m ³ 以下 1時間値が0.20mg/m ³ 以下	1973年
二酸化窒素(NO ₂)	1時間値の1日平均値が0.04ppm- 0.06ppmのゾーン内又はそれ以下	1978年
光化学オキシダント(O ₃)	1時間値が0.06ppm以下	1973年
微小粒子状物質(PM _{2.5})	1年平均値が15μg/m ³ 以下 1日平均値が35μg/m ³ 以下	2009年

他にベンゼン、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレン、ジクロロメタン、ダイオキシン類

10 PM_{2.5}問題を振り返る

1990年代前半 80年代の疫学調査の結果公表
(米国、「ハーバード6都市研究」等)
1997年 米国環境基準
3年平均値 15μg/m³ ⇒12(2013年)
24時間平均値 65μg/m³ ⇒35(2006年)
2009年 日本環境基準
1年平均値 15μg/m³
1日平均値 35μg/m³
2013年1月中頃 北京で高濃度(約900μg/m³)
1月下旬以降 日本で大きな話題に
2013年2月 環境省PM_{2.5}専門家会合
注意喚起
日平均値 70μg/m³を超えると予想されるとき

11 PM_{2.5} 全国平均濃度の経年変化(2001-2010)

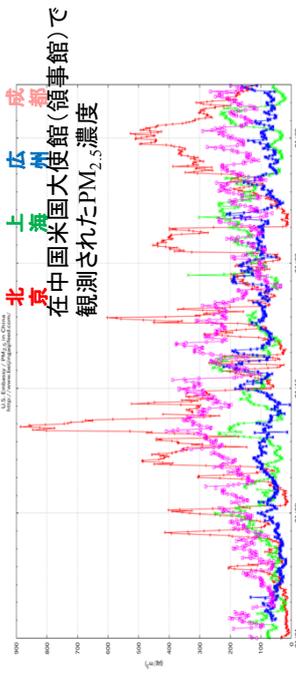


12 PM_{2.5}について

- 過去はどうだったのか
- 現在(最近)はどうか
- 現状は健康面で心配なのか
- 今日や明日の濃度は
- 今後どうなるか、どうするか

2013年初頭のPM_{2.5}高濃度

- ・1月中旬、北京で900 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 近いPM_{2.5}を観測。
- ・1月から2月上旬に日本でもPM_{2.5}の高濃度を観測
⇒大きな関心を呼ぶ。(環境基準値35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 超過)



環境省PM_{2.5} 専門家会合:

【2013年2月時】

- ・暫定的な指針となる値を設定
⇒PM_{2.5}濃度日平均値70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ に加え
70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ という
目安の登場
- これを超えると予想される場合に注意喚起
- ①当日5-7時の平均が85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えた場合
- ・今後の検証と改良が必要

【2013年11月時】

- ・日中の濃度上昇への対応を検討
- ②当日5-12時の平均が80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えた場合
を追加

⇒日平均値70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ が各自治体に非常に重要な目安に

環境基準の最新達成状況

「平成24年度 大気汚染状況について」(環境省 2014/3/28)

100%なら全地点で環境基準を
↓超過していない

物質	環境基準 達成率(%)		備考
	一般局	自排局	
一酸化炭素(CO)	100.0	100.0	全地点で達成
二酸化窒素(NO ₂)	100.0	99.3	ほぼ全地点で達成
二酸化硫黄(SO ₂)	99.7	100.0	ほぼ全地点で達成
浮遊粒子状物質(SPM)	99.7	99.7	黄砂の影響
PM _{2.5}	43.3	33.3	達成状況が悪い2物質
光化学オキシダント	0.4	0.0	

PM_{2.5}環境基準の達成状況の水平分布

環境基準達成率
【2012年(H24)度】

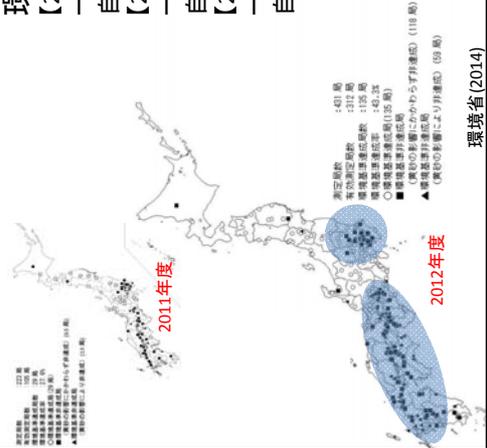
一般局: 43.3% (135/312局)
自排局: 33.3% (41/123局)

【2011年度】
一般局: 27.6% (29/105局)
自排局: 29.4% (15/ 51局)

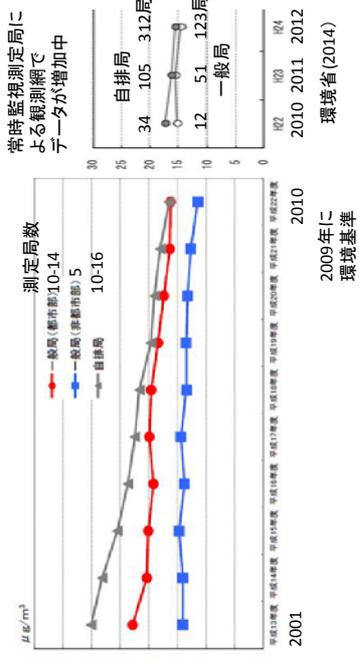
【2010年度】
一般局: 32.4% (11/34局)
自排局: 8.3% (1/12局)

非達成局■▲は、
西日本と関東に多い
⇒

非達成原因を別々に
考える必要を示す



PM_{2.5} 全国平均濃度の経年変化(2001-2012)



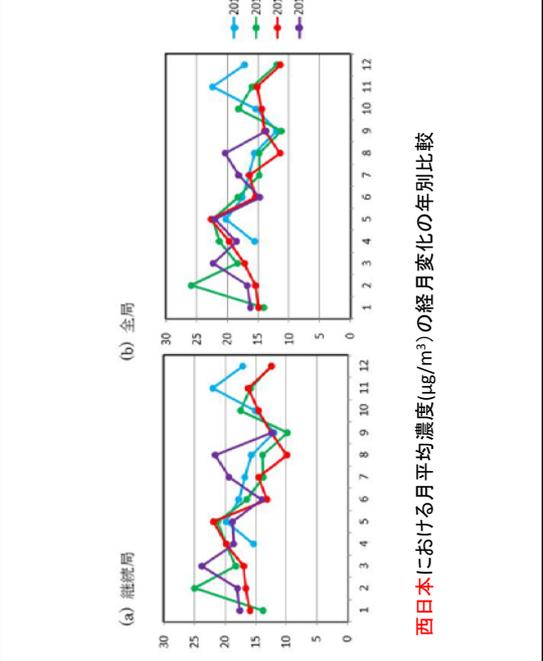
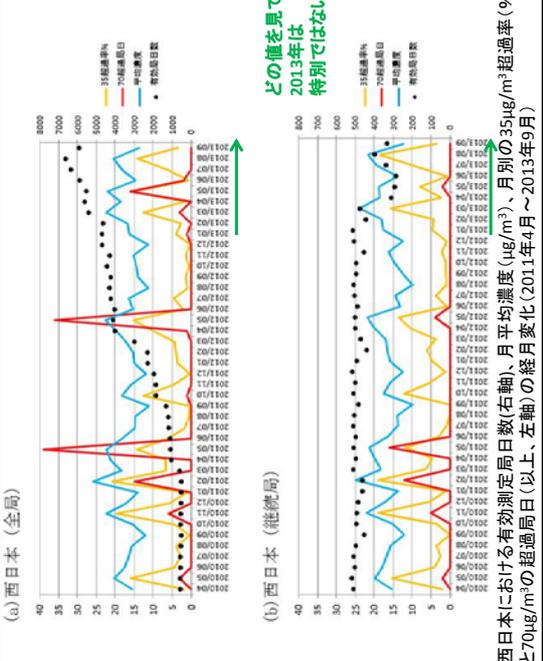
環境省PM_{2.5} 専門家会合第4回資料1-2 より

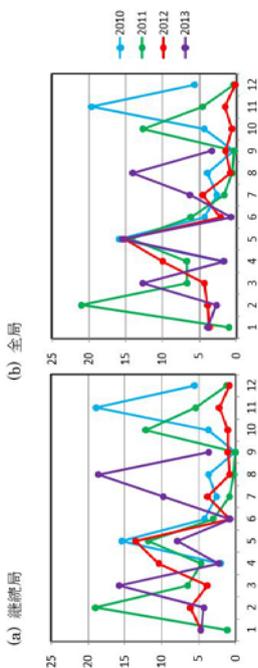
対象データ:

- ①常時監視測定局(一般局)の時間値データ(確定値)
2010年4月～2013年3月
- ②常時監視測定局(一般局)の時間値データ(そろりまめ速報値)
2013年4月～9月

データ処理:

- ①地域的に東西日本(中部以東、近畿以西)で分割
- ②有効測定日が20時間/日の場合、有効測定日とし、有効測定日が250日/年以上であった局が有効測定局
- ③2010～12年度全てで有効である局を継続局とする
(東日本:20局、西日本:17局)





西日本における日平均濃度35µg/m³超過率(%)の経月変化の年別比較

35µg/m³超過率ランキング(一般局)括弧内は70超

日本全域		西日本		東日本	
1位	2013年 8月 13.2% (0%)	2011年 2月 20.9% (2.8%)	2013年 8月 12.6% (0%)		
2位	2011年 2月 12.7% (1.2%)	2010年11月 19.2% (0.7%)	2011年11月 11.1% (0.15%)		
3位	2010年11月 11.5% (0.31%)	2010年 5月 16.2% (0.66%)	2013年 7月 7.6% (0%)		
4位	2010年 5月 11.1% (0.29%)	2012年 5月 15.0% (0.84%)	2010年 5月 6.9% (0%)		
5位	2011年11月 9.1% (0.09%)	2013年 5月 14.5% (0.27%)	2011年10月 6.3% (0%)		
6位	2011年10月 8.9% (0%)	2011年 5月 13.9% (3.6%)	2011年 2月 6.2% (0%)		
7位	2012年 5月 8.6% (0.39%)	2013年 8月 13.9% (0%)	2011年 5月 5.4% (0.19%)		
8位	2013年 3月 8.6% (0.03%)	2011年10月 13.4% (0%)	2010年11月 5.2% (0%)		
9位	2011年 5月 8.4% (1.4%)	2013年 3月 13.3% (0.07%)	2013年 3月 4.8% (0%)		
10位	2013年 5月 7.3% (0.13%)	2012年 4月 9.8% (0.02%)	2012年 5月 3.4% (0.02%)		
(11位)	2013年 7月 7.0% (0%)	2011年 4月 6.6% (0%)	2012年 7月 3.3% (0%)		

2010年5月、11月、
2012年5月、

2011年2月、5月、10月、11月
2013年3月、5月、8月

2013年のPM_{2.5}状況のまとめ

- ・月平均濃度、月別の35µg/m³超過率、70µg/m³の超過局日のいずれも、2013年前半のPM_{2.5}濃度が過去に比べて高いレベルであった傾向はない
- ・上記は、東西日本で同様である。
- ・全局を対象とした場合も、継続局のみを対象とした場合も傾向は変わらない

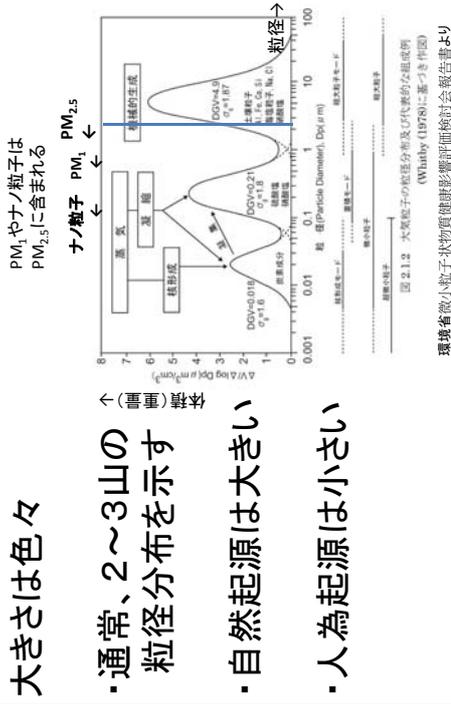
- ⇒要するにPM_{2.5}は
- ・年々増えている訳で無い(減っている)
 - ・話題になった時に多かつた訳でもない

PM2.5について

- ・過去はどうだったのか
- ・現在(最近)はどうなのか
- ・現状は健康面で心配なのか
- ・今日や明日の濃度は
- ・今後どうなるか、どうするか

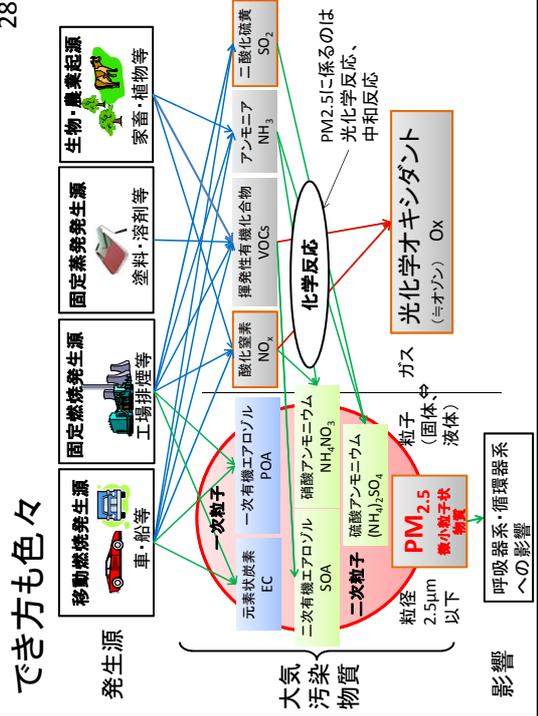
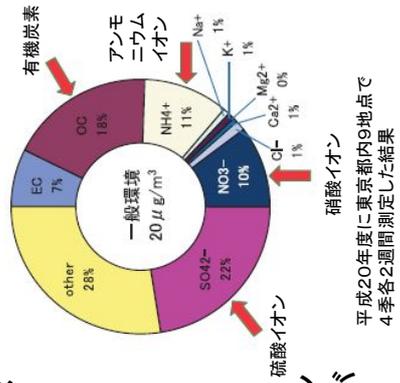
そもそもPM_{2.5}とはどんな特徴だったか？

- ・大きさが色々
- ・成分(物質)が色々
- ・でき方が色々

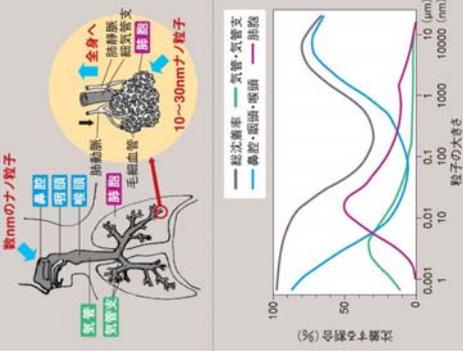


成分(物質種)も色々

- ・多いのは、有機炭素、元素状炭素、硫酸イオン、硝酸イオン、アンモニウムイオン
- ・全国的にもこれらが主成分



人体への影響：
 肺から取り込まれる
 ことにより影響する
 が、その程度は、
 おそらく成分により
 千差万別
 ⇒
 まだ解明されていない
 成分問わず総量で
 考えている段階



環境省NO.22より

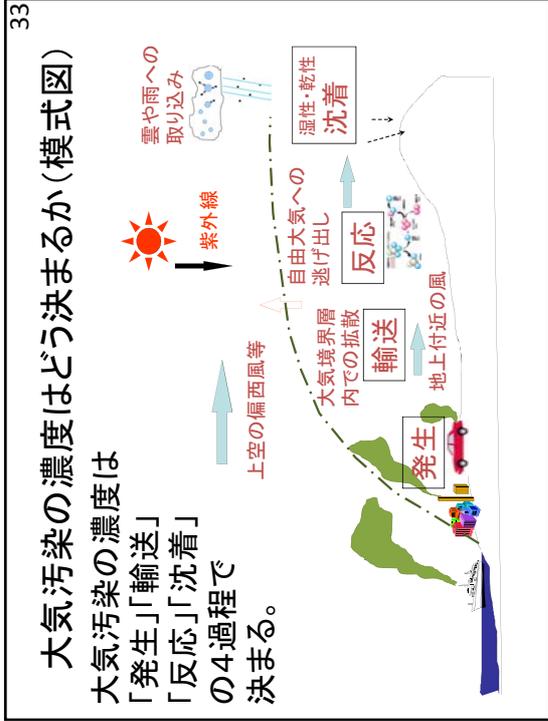
PM_{2.5} の健康影響について、
 専門家合報告書はこれまでの国内外の
 研究の知見として：
 ・呼吸器疾患や循環器疾患による入院・
 受診等について、高感受性者(呼吸器系や
 循環器系疾患のある者、小児、高齢者等)に
 PM_{2.5} の日平均値^(98%パーセンタイル値)が69μg/m³以下
 での影響が確認されている
 ・一方で、健康な成人で平均濃度127μg/m³
 への2時間曝露で血圧、心拍、等に変化無しと
 する知見もあり

専門家合報告書曰く

環境基準 (35μg/m³) :
**健康を保護する上で維持されることが
 望ましい水準**
 暫定的指針値 (70μg/m³、注意喚起)
 現在の知見で、**健康影響の可能性が
 予測される水準**
 ⇒今後必要に応じて見直し

PM2.5について

- ・過去はどうだったのか
- ・現在(最近)はどうか
- ・現状は健康面で心配なのか
- ・今日や明日の濃度は
- ・今後どうなるか、どうするか



34

大気汚染物質の濃度が高くなるには

⇒ローカル
⇒越境輸送

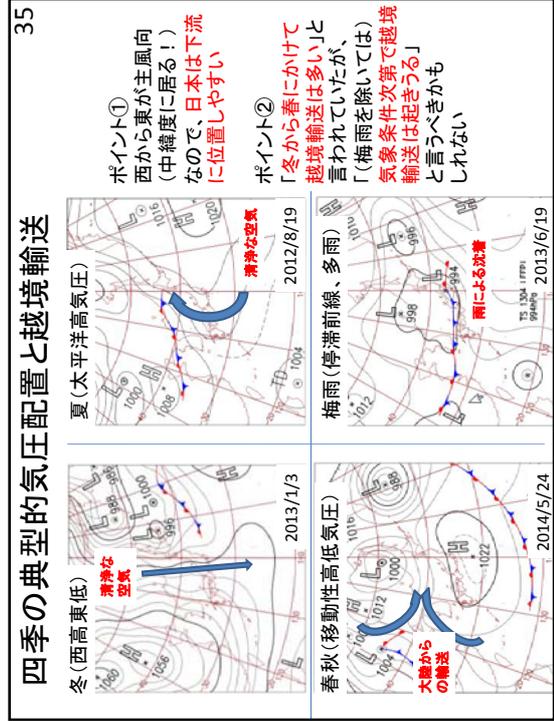
① 近傍での物質そのものの発生や原因物質の発生・反応による生成

② 近傍以外からの汚染物質もしくは原因物質の流入

大事なポイント＝長距離輸送で濃度は低減

高濃度＝ **越境汚染による底上げ** + **ローカルな上乘せ**

どちらか一方で高濃度になる場合もある
どちらかが大きい場合はケース毎



36

PM_{2.5}の濃度に影響を与える要因

高濃度に成り得る要因

- ・気温が高い、日射が強い
- ・大陸で高濃度
- ・大陸から日本に向かう風向き
- ・弱風
- ・高気圧が居座る

低濃度に成り得る要因

- ・雨が降る
- ・風が強い
- ・北から、もしくは太平洋からの風

今日や明日のPM_{2.5}濃度が気になったら

観測データを確認する⇒
「そらまめ君」

数値予測を確認する
⇒ 複数のサイト

モデルの名称	VENUS	SPRINTARS	tenki.jp
発表機関	国立環境研究所 (環境省)	九州大学	日本気象協会
対象領域 (水圏マシス)	東アジア、日本 (100km、5km)	全球 (約0.56度 = 約50km)	東アジア (60km)
予報期間 (公開期間)	翌日24時まで	6日後の21時まで	3日後の9時まで
サイトURL	http://venus5.nies.go.jp/os/enyosoku/	http://sprintars.net/	http://guide.tenki.jp/guide/particulate_matter/

今日明日のPM_{2.5}の濃度が気になったら

- ①まず、「そらまめ君」で自分の地域の観測値が高くないか、濃度上昇中で無いかを見る。
風上の隣県も確認するとさらに良くわかる。
- ②複数の数値予測システムを確認し、過半数のシステムが上昇傾向を示していなければ濃度上昇の可能性は低いと考えられる。

例えば、「現在の観測値が高くない、複数の数値予測システムが濃度上昇傾向を示していない」ならば、その後の高濃度出現の見込みは小さいと考えることができる。

現在のシミュレーションモデルの精度

現在のシミュレーションモデルは、東アジアスケールの越境大気汚染をおおまかに(定性的に)予測する精度はあるが、都市スケールの精度や定量的な精度は不十分。

現在のモデルで確認できること

- ① 今日にはアジア大陸からの越境汚染の影響が強くなりそうか。
- ② PM_{2.5}濃度が、これから高くなる傾向にあるのか、低くなる傾向にあるのか。

現在のモデルでは難しいこと

- ① 濃度がどの程度まで高くなるのか。
- ② 地域の中で、どこかの濃度が高く、どこかの濃度が低いのか。

例えて言えば、**一昔前の信頼度**に欠ける**数値天気予報の精度**
⇒ それでも上手く使えば利用価値あり

PM_{2.5}について

- ・過去はどうだったのか
- ・現在(最近)はどうなのか
- ・現状は健康面で心配なのか
- ・今日や明日の濃度は
- ・今後どうなるか、どうするか

PM_{2.5}: 現在の中国と過去の日本の濃度比較

- ・北京の2010年の平均PM_{2.5}濃度は**70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$**
- ・昭和40年代の浮遊粉塵(粒径問われない粒子状物質)濃度は約200~400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ だった。
- ・浮遊粉塵の約半分がPM_{2.5}と仮定すると、当時のPM_{2.5}濃度は**100~200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** 。

大雑把に言って同程度

昭和48年環境白書

項目	単位	濃度
浮遊粉塵	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	200~400
PM _{2.5}	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	100~200
PM ₁₀	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	200~400
PM _{2.5} とPM ₁₀ の比		約0.5

PM_{2.5}の今後がどうなるかは、

- ・越境輸送の流入
 - ・国内起源
- がそれぞれどうなるかに依存

- ・越境輸送は主に
中国の動向
- ・国内起源は
これ以上何を対策すべきかの判断

個人的な予想

- ・中国のPM_{2.5}濃度は頭打ちから減少へ
- ← 自国民のために対策必須
 - ・対策は進んでいる
(火力発電所での脱硫装置は2010年末に90%超)
- ・国内対策は観測・研究等が必要
 - 最適かつ正確な観測網
 - ・成分別も含めた詳細な観測研究
 - ・発生源寄与の正確な推定
 - ・成分別に見た健康影響研究

今後の対策について

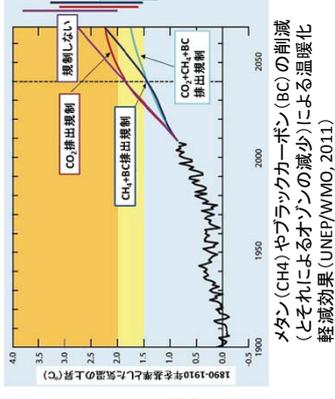
- ・PM_{2.5}(エアロゾル)等の大気中物質の影響
 - ① 人体等への影響
 - ② 太陽放射の吸収・反射
 - ③ 雲粒の核となる
- ① 人体影響があり、② 太陽放射を**吸収**する物質
例えば、PM_{2.5}の一部(**スス**=黒色炭素粒子)、
光化学**オキシダント**(対流圏**オゾン**)、**メタン**
が注目されている。
これらの物質は今、「短寿命気候汚染物質」
(**SLCPs**, Short-lived Climate Pollutants)
と呼ばれて注目されている。

気候と大気汚染をつなぐ新しい概念

- ・大気汚染物質の一部は、気候変動にも影響。
- ・SLCPs＝大気中の化学的寿命が数日から数十年程度と比較的短く、温暖化する作用を持つ物質。
光化学オキシダント(対流圏オゾン)
PM_{2.5}の一部(スス＝黒色炭素粒子)
メタン

・SLCPsを減らすのは地球温暖化の緩和と大気汚染の抑制の一石二鳥なので、二酸化炭素に比べて世界各国の合意を得やすい。

- ・SLCPの排出削減でCO₂削減と同程度の温暖化軽減効果(しかも、より即効的)があるのではと、研究されている(注：予測の不確実性大きく、引き続き研究が必要)



本講義のまとめ

- ・PM_{2.5} はここ十年規模で増えてません
- ・ここ数年だけ見ても増えてません
- ・現在の日本の濃度は、ごく一部の方を除き心配の必要ないレベルです。
- ・他の環境リスクと比べて検討して下さい
- ・今後もおそらく増え続けるような心配は薄いでしょう。

以上です、お疲れ様でした
遠慮なく質問等どうぞ

大気エアロゾル ～大気中を浮遊する微粒子～

日本気象学会関西支部第36回夏季大学テキスト

発行日 2014年8月18日

発行 日本気象学会関西支部
大阪市中央区大手前4-1-76
大阪合同庁舎第4号館 大阪管区气象台内
TEL 06-6949-6143
HP <http://kansai.metsoc.or.jp/>