



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	雲を観る
Author(s)	山形, 定; 荻原, 研二; 住吉, 力 他
Description	第3回衛生工学シンポジウム (平成7年11月9日 (木) -10日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 4 都市・水・室内等の環境 . P4-7
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 3, 208-213
Issue Date	1995-11-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/7911
Type	departmental bulletin paper
File Information	3-4-7_p208-213.pdf



4-7

雲を観る

山形 定、荻原研二、住吉 力、太田幸雄、村尾直人（北大工）、山田 正（中央大学）、藤吉康志（名古屋大学）、播磨屋敏生（北大理）、福山 力、内山政弘（国立環境研）、稲毛正昭（三井建設）

はじめに

私たちが空に雲をみるとき、その関心の多くは、「今日は傘を持っていこうか、それともいらないか」ということであったり、「明日の遠足は天気が良いければいいが・・・」ということである。そのために空を見上げ、あるいは宇宙から空を見下げ（もちろん人工衛星とテレビという科学技術の恩恵に依ってであるが）たデータを使った天気予報の助けを借りる。雨が私たちの日々の活動に大きな影響を与えるはもちろんである。しかし、その影響は、個人レベルにとどまらず、洪水などのように地域的被害をもたらすものや、酸性雨のような人類を取りまく環境に影響する地球規模のものまで多岐にわたっている。

雲と人間の生活

雨は昔も今も「自然の恵み」であると同時に「脅威」でもある。その脅威は洪水などの物理的な被害をもたらす豪雨、長雨という雨の量的なものであり、現代においては、これに加え、人類を取り囲む環境を化学的に蝕む「酸性雨」という質的なものが切実な問題になってきている。このような雨による物理的・化学的な脅威を減らすためには、雨を降らすもとである雲がどのようにでき、そこから雨がどのように降るのかを把握しなければならない。

また、雲は雨を降らせることで大きな影響を与えるが、雲が雨にならないで与える影響も実は大きなものである。雲が光をよく反射することは飛行機に乗って雲の上に出た時の、眩いばかりの太陽光の反射で実感できる。このことは、雲が太陽光を反射し、太陽エネルギーが地面に到達するのを妨げることを意味する。したがって、雲の量が増加すれば地球の寒冷化が進むことが考えられる。この効果がCO₂などの温室効果ガスの増加によってもたらされる地球温暖化をどの程度抑制するかというような雲の研究は、どのような要因が雲の生成に影響を与えるか、また雲が太陽エネルギーや地球の出す熱エネルギーの収支にどう影響するかというフィードバックの機構を明らかにすることなどがその中心課題となる。

雲物理と雲化学、そして雲科学

従来の雲の研究は「雲物理」という分野でなされてきた。「雲物理は雲の形成に必要なエアロゾル、雲の中での降水粒子の成長過程、種々の雲の系での降雨・降雪機構、および雲の内部で起こる物理現象をその研究対象とする。」¹⁾ 空気の塊（気塊）が大気中で上昇すると上空は気圧が低いため、その気塊は膨張する。このとき周囲から気塊への熱の供給が十分にはおこなわれないため膨張は断熱的に起き、気塊は冷やされる。気温が下がると水蒸気の飽和蒸気圧が下がるため、気塊中に含まれていた水蒸気が過飽和状態になる。そのような状況下で水蒸気が凝縮する核となるエアロゾル（雲核）が存在すれば雲が生成するのである。このエアロゾル上への水蒸気の凝縮過程については、基本的に解明されており、現在では、集中豪雨などの大量の雨がどのような機構でもたらされるのかというような問題に関心が移っていった。²⁾

一方、酸性雨に関わった雲の化学的側面を明らかにする研究は、雲と大気中微量成分（窒素、

酸素ガス以外のガスや液体・固体粒子であるエアロゾル)がどのように関連しているかという問題が課題となる。つまり、酸性物質が雲核になったり、雲粒にガス成分が溶けこんだり、雲粒中で反応が起きたりすることなどが興味の対象となるわけである。

実際の雲をサンプリングしてみると、いくつかの種類のエアロゾルが核としてはたらくことを反映して、個々の雲粒の化学的特性が異なっており、雲粒全体を均質なものとして観測することができないということがわかってきている。³⁾そして、このことは雲を大気中の反応の場として化学的にとらえる場合ばかりでなく、雲の生成・消滅という従来の雲物理過程を考える時にも重要な影響を与える。

現在進んでいる雲科学は、実際の雲生成にどのような要因が関わっており、雲が生成した結果どのようなことが起きるのかというシナリオを物理的にだけでなく化学的にも明らかにすることにある。

雲研究の現状

現在、いくつかのグループが、雲の化学成分に注目した観測をおこなっている。ヨーロッパでは EUROTRAC というプロジェクトの1つとして Ground-based cloud experiments(GCE) という霧の観測がイタリア、ドイツ、イギリスで3度おこなわれ、報告がなされている。⁴⁾ここでは、雲という気相、液相、固相を含む系内で、大気中の微量成分が各相とどう関わっているかについての情報を得ることが目的となっている。アメリカでもカルフォルニア工科大の Hoffmann, M. R やその共同研究者などが、雲や霧の観測をおこない、また雲粒内で起こる化学反応についての実験をおこなっている。⁵⁾国内でも石坂らが酸性霧の化学組成の研究をおこなっている。⁶⁾

現在、われわれは、雲が大気中で果たしている役割についての知見を得るために、航空機を用いた雲の観測および、釜石鉱山の立坑に生成する雲の観測・実験をおこなっている。航空機観測での主な目的は、雲によって SO_2 が SO_4^{2-} に酸化される過程、雲によって物質が上空に輸送される過程、などを明らかにすることである。

航空機観測や地上での霧の観測など実際の雲を対象とした場合、雲には生成、発達、消滅のサイクルがあるため、そのサイクルに要する時間内に観測をしなければ一つの雲に関するデータは得られない。また、風が雲を押し流す、観測中に異なった気塊が入ってくる、同じ条件でのデータは二度と取れない、など多くの難しさがある。これらの問題点を克服するためには、実験的に雲を生成することが必要である。しかし、実験室レベルの雲では、雲生成器の大きさや壁などの問題があり、フィールドと同じ条件を再現することが難しい。このようなフィールドと実験室の中間的な実験系として鉱山の立坑を利用した雲観測・実験を岩手県の釜石鉱山でおこなっている。立坑では、鉱山内部に導入された空気が排出される際に、上昇流が生じ実際に空に雲ができる場合と同様のことが起きている。この研究は北海道上砂川の三井炭坑の立坑ではじまったものであり、すでにいくつかの報告が出されている。⁷⁾ 鉱山の立坑は、外部とは遮断されているため、途中からの空気の取り込みがない、地中に掘られた穴であるため真っ暗である、などの条件がそろっており、実験をおこなう際には大きなメリットを持っている。これに似たものとして、イギリスのマンチェスター大学のグループが Great Dun Fell という丘陵地帯でおこなっている観測がある。⁸⁾ そこでは、自然にできる定常的な霧を一つの反応系と見なし、いくつかの地点での観測をおこない、 SO_2 の酸化過程を検討している。

以下、航空機観測、立坑観測・実験について、その観測・実験の概要とこれまでに得られた結果を簡単に紹介する。

航空機観測

航空機観測は、数100 km以下のメソγ~βスケールと呼ばれる雲群を対象とし、雲システムによる水・物質の鉛直および水平輸送量を求める「メソスケールの水・物質循環と大気水圏環境との関わり」の研究（名古屋大学大気水圏研、共同利用研究）の一環としておこなわれている。ビーチクラフト（中日本航空）とMU2（ダイヤモンドエアサービス）の2機の航空機に、風向・風速計、気温・湿度計、各種放射計、各種雲物理センサー、NO_x計、エアロゾルカウンターなどを搭載し観測をおこなった。北大工学部グループのエアロゾル・SO₂ガスサンプリング装置はMU2に搭載されている。エアロゾルおよびSO₂ガス観測の目的は図1に示すように、雲の上下でこれらの成分を測定し、雲底下から取り込まれ、雲によって輸送されるSO₂量や、そのうちSO₄²⁻に酸化される量を推定することが主な目的である。サンプリング期間および場所は、1994年10月3、4、9日、紀伊半島沖合、および1995年7月18~21日、名古屋~種子島間、種子島西側の洋上である。

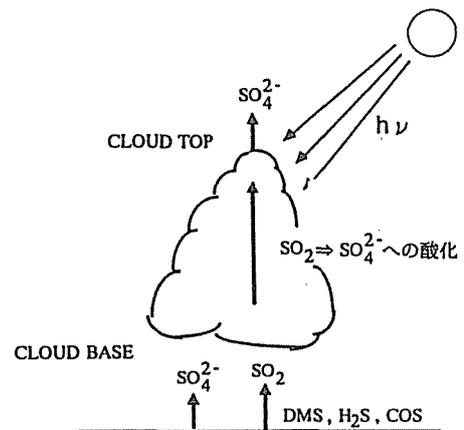


図1 航空機による雲観測の概念図
雲の存在による大気中のS（硫黄）の鉛直輸送、化学的変質などを明らかにする。DMSはジメチルサルファイド、海洋から発生しH₂S、COSなどととも大気中のSO₂前駆体と考えられている。

1994年⁹⁾

観測方法—われわれはこれまで、地上でエアロゾル、ガスを半月、1ヶ月程度の期間でサンプリングし分析している。¹⁰⁾ 航空機観測ではサンプリングに関して、電源、機材重量、気圧変化、などさまざまな制約があるが、サンプリング時間も限られたものになる。そこで、第1回目の観測は、従来の方法が航空機観測でも有効かどうかを明らかにすることを主たる目的とした。われわれがおこなっているSO₂サンプリング

法はフィルターパック法とよばれるものである。サンプリング装置の概要を図2に示す。外気は航空機内のデフューザー、バルブを経てエアロゾル用のテフロンフィルター、SO₂ガス用の炭酸ナトリウム含浸濾紙を通過する。各成分をそれぞれのフィルターで捕集した後、実験室で抽出し、イオンクロマトグラフィーでSO₄²⁻を分析した。イオンクロマトグラフィーによるSO₄²⁻の分析は、濃縮カラムを用いると溶液濃度で、ppbオーダーまで可能である。ただし、SO₂ガスの場合には濾紙などに含まれている微量のSO₄²⁻が影響するため、前処理で濾紙からどれだけSO₄²⁻を除去できるかがSO₂ガス測定の鍵となる。FerekらはいくつかのSO₂分析法を比較検討し、フィルターパック法が航空機観測に使える可能性を報告している。¹¹⁾

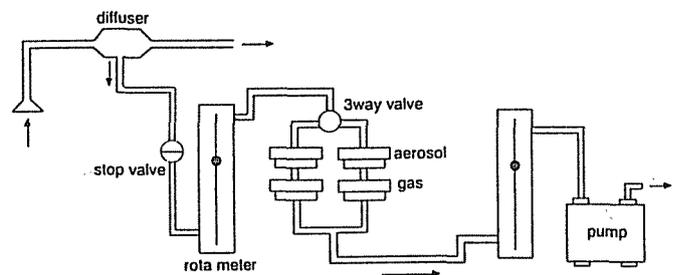


図2 サンプリング装置の概要

フィルター上流のロータメータは流量補正用で、サンプリング時には外してある。

観測結果 - 表 1 に結果を示す。10 / 3、4 は濃度が低くて観測できない可能性を考慮して、高度 4 km 以上、以下でサンプリングをおこなっている。得られた SO_4^{2-} -エアロゾル、 SO_2 ガス濃度はこれまで海洋上で観測されている値と同じオーダーであった。今後フィルターの前処理法を確立すれば、われわれのサンプリング-分析系で航空機観測による SO_4^{2-} -エアロゾル、 SO_2 ガスの観測が可能であることがわかった。

表 1 海洋上大気中の SO_4^{2-} 、 SO_2 濃度

date	height		atmospheric conc.
10 / 3	高度 4 km 以下	SO_4^{2-}	2.1 [$\mu\text{g so}_4^{2-} / \text{m}^3$]
		SO_2	165 [pptv]
	高度 4 km 以上	SO_4^{2-}	0.3 [$\mu\text{g so}_4^{2-} / \text{m}^3$]
		SO_2	10 [pptv]
10/4	高度 4 km 以上	SO_2	10 [pptv]
10 / 9	雲底より下	SO_4^{2-}	5.8 [$\mu\text{g so}_4^{2-} / \text{m}^3$]
		SO_2	35 [pptv]
	雲頂より上	SO_4^{2-}	0.3 [$\mu\text{g so}_4^{2-} / \text{m}^3$]
		SO_2	40 [pptv]

1995年

観測方法 - 1994年の SO_4^{2-} -エアロゾル、 SO_2 ガスの測定に加え、 SO_2 の酸化に関わっていると考えられる H_2O_2 ガス、および地表面にのみ発生源を持ち、大気中での垂直輸送を推定するのに有効と考えられる炭化水素の予備的な測定をおこなった。 SO_4^{2-} -エアロゾル、 SO_2 ガスサンプリングでは、一度のフライトで多くのサンプルを捕集するため、フィルターホルダー部分をカプラー接続にし、航空機内で取り替え可能にした。 H_2O_2 のサンプリングはドライアイスを用いたコールドトラップ法でおこない、サンプリング終了後、速やかにTi 錯体を用いた比色法で分析した。炭化水素は捕集管内の捕集剤に吸着させ、サンプルを冷凍宅配便で輸送し、熱脱離-再捕集後ガスクロマトグラフィー (FID) で分析した。

観測結果 - 図 3 に SO_4^{2-} -エアロゾル、 SO_2 ガスの観測結果を示す。横軸は大気中の SO_2 と SO_4^{2-} の比較が容易なように 1 リットル大気中の S (硫黄) のモル数で表している。この図より両化学種の濃度はほぼ同じであることがわかった。さまざまな条件での観測値を同じ図にのせていることもあり、雲の役割を論ずるところまではまだいっていないが、今後他の観測データとあわせて検討する予定である。

H_2O_2 の濃度は、3度の測定をおこない、いずれも 1ppbv 程度であった。炭化水素についても濃度測定が可能であることがわかった。

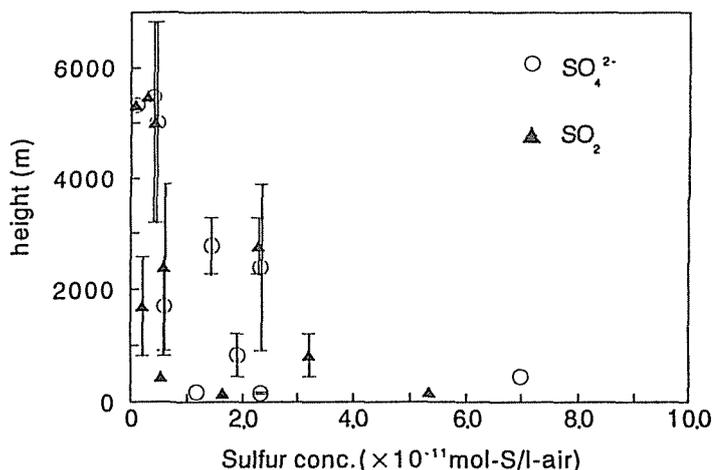


図 3 海洋上での SO_2 、 SO_4^{2-} 濃度の高度分布
 $1 \times 10^{-11} \text{ mol-S/l-air}$ は、 SO_2 では 0.224 ppbv、 SO_4^{2-} では $0.96 \mu\text{g/m}^3$ に相当する。

立坑観測

観測方法 - 立坑観測は、岩手県遠野市上郷町にある釜石鉱山日峰中央立坑を利用している。この立坑は海拔 250 m ~ 680 m で、180 m ~ 250 m 部分は水没している。立坑の断面は図 4 に示すように 5.5 m x 2.8 m で、その内部は階段部、観測用ケージ部、そして空気の

上昇に対する障害物のない吹き抜け部からなる。

観測は1995年4月5、6日におこなった。雲は、立坑下部から数10m以内の高度で発生し、そこから立坑上部まで続いている。観測用ケージに温度計、湿度計、気圧計、風速計、雲粒観測用CCDカメラ、パーティクルカウンター、水滴粒径分布計、SO₂濃度計、露点計、雨滴径計、粉塵計、照度計を搭載し、各高度での測定をおこなった。また、立坑上・下端には温度計、湿度計、気圧計、風速計、SO₂濃度計、露点計、凝縮核計、などを設置してある。北大工学部のグループは、立坑の下部、上部において、雲粒中のエアロゾル、雲粒間のエアロゾル、SO₂ガスのサンプリング、および雲粒の粒径分布測定をおこなった。サンプリング系は、雲粒を分離するサイクロンが最上流部にあることを除けば図2とほぼ同じである。立坑下部では雲は発生していないため、エアロゾルはテフロンフィルターに、ガスはその下のガスフィルターに捕集される。一方、立坑上部では、サンプリング系はプラスチック容器内に設置しているため、ポンプの発熱により容器内の温度が上昇している。吸引された雲粒はサイクロンに捕集されるが、温度が高いため水分は蒸発する。したがって、サイクロン内には雲粒内に存在していたエアロゾルが蓄積される。サイクロン、エアロゾル用フィルター、ガスフィルター中の硫黄を抽出し、イオンクロマトグラフィーでSO₄²⁻を分析した。

雲粒の粒径は、ウォーターブルー（色素）をOHPシートに塗り、乾燥後スライドガラス上に固定したものの上に雲粒をサンプリングし、顕微鏡観察した。また、カスケードインパクターによる雲粒のサンプリングでも粒径に関する情報が得られた。

観測結果—図5に1995年4月6日の午前と午後に観測した、雲粒中に存在するS（硫黄）、SO₄²⁻エアロゾルとして存在するS、SO₂として存在するSの収支を示す。立坑底部では10時47分から13時までSO₂ガス（9%）を1ℓ/minで放出した。立坑底部でのサンプリング時間は10時30分～12時30分、14時～16時の2回で、立坑上部でのサンプリング時間は10時21分～12時44分+14時8分～15時58分である。この図より立坑下部と立坑上部でS量はほぼ一致していることがわかる。このことは立坑が閉鎖空間で、立坑内を上昇する気塊の中でS量が保存されていることを示唆している。ま

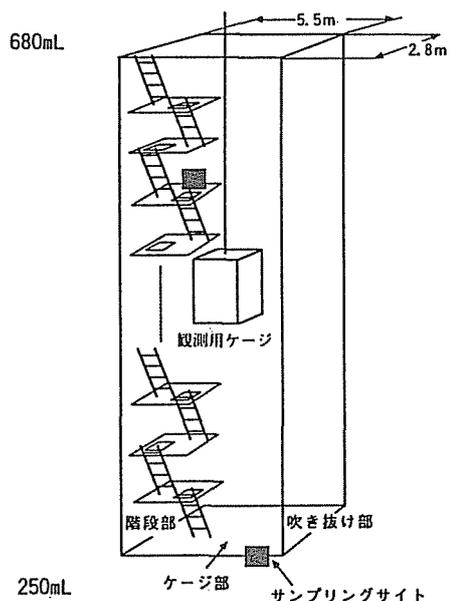


図4 立坑概略図

SO₂ガスとSO₄²⁻エアロゾルのサンプリングは雲の生成していない250mLと雲の生成している680mLから10m程度降りたところでおこなった。

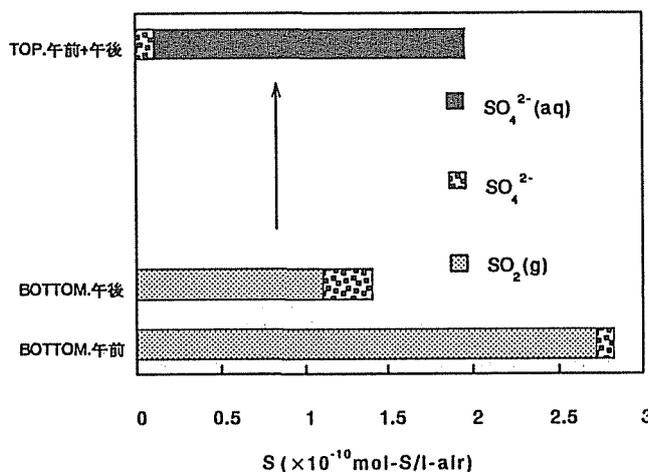


図5 立坑内の大気中S（硫黄）濃度

S(aq)：雲粒内、SO₄²⁻：（雲粒間）エアロゾル
SO₂(g)：ガス。TOPは立坑上部、BOTTOMは下部を表す。

た、立坑下部では、Sのほとんどは SO_2 で、 SO_4^{2-} が数%から20%程度占めているのに対し、雲が存在している立坑上部では90%以上が雲粒内に存在していることがわかる。雲粒内に存在するS、 SO_2 が雲粒に溶け込んだ SO_3^{2-} などとして存在するのか、あるいは酸化されて SO_4^{2-} になっているのかなどについては次の観測で明らかにする予定である。

雲粒の粒径は、顕微鏡観察でも、カスケードインパクトからの計算でも $10\ \mu\text{m}$ 程度で、粒径もそろっていることがわかった。

まとめ

地球は水が気体、液体、固体すべてをとりうる惑星として宇宙の中でも特別な環境、つまり生物が発生、進化し人類が誕生するという環境を維持してきた。地球という、ほとんど閉じた系のなかで生きてゆかなければならない人類にとって、限られた量の水が地球上でどのようにめぐっているかを明らかにすることは治水、用水という点からも不可欠であった。雲は気体として存在する水、すなわち水蒸気が液体や固体に相変化する場であり、これまで降る・降らないという次元での問いが「どれくらいの」という問いになり、さらに「どのような雨が」という問いになった。さらに地上にまで到達しない雨や雲そのものの果たす役割が私たち人類に大きな影響を与えることがわかってきたのが現在である。このような時点に、航空機、立坑、実験室などで「雲を観る」ことを通じ、「雲をつかむ」というのがわれわれの大きな目標である。

参考文献

- 1)高橋 劭,「雲の物理」,東京堂出版,(1987).
- 2)高橋 劭,科学,64,779(1994).
- 3)Noone, K. J., Ogren, J. A., and Heintzenberg, J., *J. Geophys. Res.*, 93, 9477-9482(1988).
- 4)*Tellus*, 44B, 5(1992), *J. Atmos. Chem.*, 19, 1-2(1994), *Transp. Transform. Pollut. Troposphere, Proc. EUROTRAC Symp.*, 3rd(1994).
- 5)例えば Munger, J. W., Collett, J. Jr, Daube, B. Jr, Hoffmann, M. R., *Atmos. Environ*, 23, 2305-2320(1989), この4人と Faust, B. C. はそれぞれ雲に関わった観測をおこなっている。
- 6)Qian, G. W., Ishizaka, Y., Minami, Y., Kurahashi, Y., Thandradewi, B. I., Tadenaka, C., *J. Meteor. Soc. Japan*, 70, 711-722(1992).
- 7)上砂川の立坑研究については、藤吉康志、播磨屋敏生、若濱五郎、*天気*、40、213-216(1993)、山田正、他、*土木学会論文集*、509/II-30、1-13、1995. 2.、福山力、*エアロゾル研究*、10、54-59(1995)、*マジックモンキ-プロジェクト論文集・講演集*(1990)、など参照。
- 8)Chandler, A. S., et al., *Atmos. Environ.*, 22, 683-694(1988).
- 9)この観測については、名古屋大学大気水圏科学研究所特別事業研究成果報告書(平成7年3月)に報告がまとめられている。
- 10)Ohta, S and Okita, T., *Atmos. Environ.*, 24A, 815-822(1990).
- 11)Ferek, R. J., Hegg, D. A., Herring, J. A., and Hobbs, P. V., *J. Geophys. Res.*, 96, 22373-22378.