



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	山岳における大気化学観測, その動向と課題 : 小レビュー
Author(s)	五十嵐, 康人; Igarashi, Yasuhito; 直江, 寛明 他
Relation	大気圏と生物圏の相互利用. 北海道大学低温科学研究所編
Citation	低温科学, 68, 69-78
Issue Date	2010-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/45166
Type	departmental bulletin paper
File Information	LTS68_012.pdf



山岳における大気化学観測，その動向と課題

— 小レビュー —

五十嵐康人¹⁾，直江 寛明¹⁾，高橋 宙¹⁾，猪股 弥生^{1)*}

2009年12月22日受付，2010年1月29日受理

大気エアロゾルおよび関連する前駆気体，微量気体の鉛直構造や，それらの自由対流圏での挙動を知る目的で高所山岳を利用した観測研究に興味をもたれる．我が国における研究の進展に資するため，最近の世界の高所山岳における大気化学観測研究の動向についてごく簡単な概観を試みた．観測ロジスティクスや維持の困難性にもかかわらず，山岳を利用した研究の数は増えているように思われる．多くの研究では，気候変動に関わる大気化学の変動に興味の焦点がおかれ，長期変動データを取得する上で，どのようにバックグラウンドデータを取得するかという観点から，山岳に特有な気象現象による変動が扱われている．そこで，山谷風という局地気象による大気質の変動や，「山岳ポンプ」による境界層汚染空気自由対流圏への輸送について取り扱った研究を主に紹介した．後者は，人為汚染気塊を風下域へ拡散させる（長距離輸送）実質的な役割を担っている可能性もある．

Observation of atmospheric chemistry by using mountains, research trends and its challenges-a mini review

Yasuhito Igarashi¹, Hiroaki Naoe¹, Hiroshi Takahashi¹, Yayoi Inomata¹

Atmospheric chemistry and aerosol observations at mountainous platforms are interested as a way to obtain vertical profiles or free tropospheric information of the concerned aerosols and chemical trace species. In order to facilitate such researches in Japan, recent research trends in atmospheric chemistry at high altitude sites over the world are reviewed. In spite of the difficulties in logistics and maintenance, the utilization of mountain platforms in the atmospheric research seems growing. Concerns are mostly placed on the global atmospheric change in relation to the climate study thus the temporal changes of atmospheric species along with those of meteorological dynamics are reported in many studies. Effects by the local wind circulation, which is characteristic meteorology to the mountain range, on the time series of atmospheric chemistry are described. Also, the venting of polluted boundary layer air into the free troposphere by the thermally induced air flow is discussed. Such venting occurring at mountains beside the industrial region may play a substantial role in a large-scale pollution outflow into the far down-wind regions.

1. はじめに

我が国においても大陸における産業活動の活発化に伴い，エアロゾルやその前駆気体等の越境汚染が問題化しつつある．最近話題となっているのは，光化学汚染やPM2.5汚染であろう．我が国における汚染物質やその前駆物質の排出規制を実施しても，越境してくる汚染物質の量が相当なものとなれば，国内での規制のみでは，基準値の達成は困難となる．ところで，過去のライダー観測 (Iwasaka et al., 1988)，航空機観測 (Matsuki et al., 2003)，黄砂の観測研究 (Tsai et al., 2008) や最近

のアジア大陸上の観測研究 (Chen et al., 2009) でも明らかにされつつあるが，アジア大陸から長距離を輸送される黄砂や汚染気塊は鉛直的な構造をもち，その高度に依存して輸送距離や影響を及ぼし得る拡がり（空間的なスケール）も異なると予想される (e.g. VanCurren et al., 2002)．また，黄砂と汚染気塊の混合についても，3次元的な構造があると指摘されている (Uematsu et al., 2002; Zhang et al., 2005)．こうした分布情報（特に高度分布）等を取得するプラットフォームのひとつとして，高所山岳サイトを利用した大気エアロゾルやその前駆気体の物理・化学観測には依然として期待がもたれる．著者らは1990年代から富士山頂での大気化学観測に取り組んできた経緯があり (e.g. Tsutsumi et al., 1998; Igarashi et al. 2004; 2006)，その問題点は五十嵐 (2009)

1) 気象研究所 *現所属：酸性雨研究センター

¹ Meteorological Research Institute, Tsukuba, Japan

で述べた。また、我が国での山岳での大気化学観測は、この総説を含む日本エアロゾル学会誌の特集でまとめられている。本稿では、さらに世界へ目を転じて最近の研究報告を中心に紹介し、その課題につき議論する。

2. 世界における大気化学観測に利用されている山岳拠点

図1に世界気象機関(WMO)の全球大気監視計画(GAW)での山岳拠点とバックグラウンド観測に利用されている主要な地点を描いた。同計画は、全球の気候変動に関わる温室効果気体、エアロゾルおよびその前駆気体、関連する微量気体の全球監視を行うことを目的としている。同計画は、1990年代に、バックグラウンド大気質モニタリングの間隙を埋める目的で、新たな観測拠点を設置した。そのうちのいくつかは、局所および領域的な排出・除去の影響を受けにくいという制約条件から、高所山岳に設置され、観測が続けられている(中国のWaliguan山(観測地点3816 m msl)(Kivekäs et al., 2009; Zhu et al., 2004)), ケニアのKenya山(3678 m msl)(Henne et al., 2008a; 2008b), アルジェリア・サハラのアセクレム(2710 m msl)(Zellweger et al., 2003); http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/documents/Mimouni_algeria_GAW2009May09.pdf)。ただし、HPのGAWSIS上ではアセクレムの情報が2009年12月現在見られないため、何らかの理由で観測が中止された可能性もある。GAWの他の高所山岳観測地点としては、有名なハワイのMauna Loa(e.g. Weber & McMurry, 1996)やスイスのJungfrauoch(Cozic et

al., 2008), アフリカ北西沖に位置するカナリア諸島の山岳Izaña(Cuevas, 2009)がある。山岳地点ではないが、高所という点では、南極点も当てはまる。

高所山岳のバックグラウンド観測を意識して、台湾の鹿林(Lulin)山(Sheu et al., 2009), 北大西洋アゾレス諸島のPico島の山岳(Kleissl et al., 2007)でも大気化学観測が行われている。欧州の山岳観測地点(Mousala, Bulgaria; 2971 m msl, Mt. Cimone, Italy; 2165 m msl, Puy de Dome, France; 1465 m msl ほか)と観測項目は, Philippin et al. (2009)にまとめられている。さらに、より高高度のエアロゾルデータの取得を目的に、近年ブラックカーボンをはじめとする人為汚染の重大な発生源であるインドに近いヒマラヤ域(ネパール)にも観測点が設営され(2006年3月), 大気化学観測が実施されている(ABC-Pyramid Atmospheric Research Observatory, 5079 m msl, 27.95° N, 86.82° E)。この設営には, Cimone山やPuy de Domeでの大気化学観測に関わる欧州勢が携わった。O₃, BCなど(Bonasoni et al., 2008)に加えて、走査型粒径分析装置(SMPS)やイオンスペクトロメーターを用いた、ナノサイズ粒子や大気イオンの個数濃度観測も活発に行われている。後者の観測は、気候変動研究にとって重要なプロセスである新粒子(二次粒子)生成に関わる観測である(Venzac et al., 2008)。雲粒子の個数濃度は雲凝結核(CCN)個数濃度に依存し、またCCN数濃度は新粒子生成に依存すると考えられるので、雲による間接効果を精度よく評価するためには、極めて重要な研究である。我が国では, Nishita et al. (2008)や三浦ほか(日本気象学会2008年度春季大会)により山岳での観測が行われている。これ以

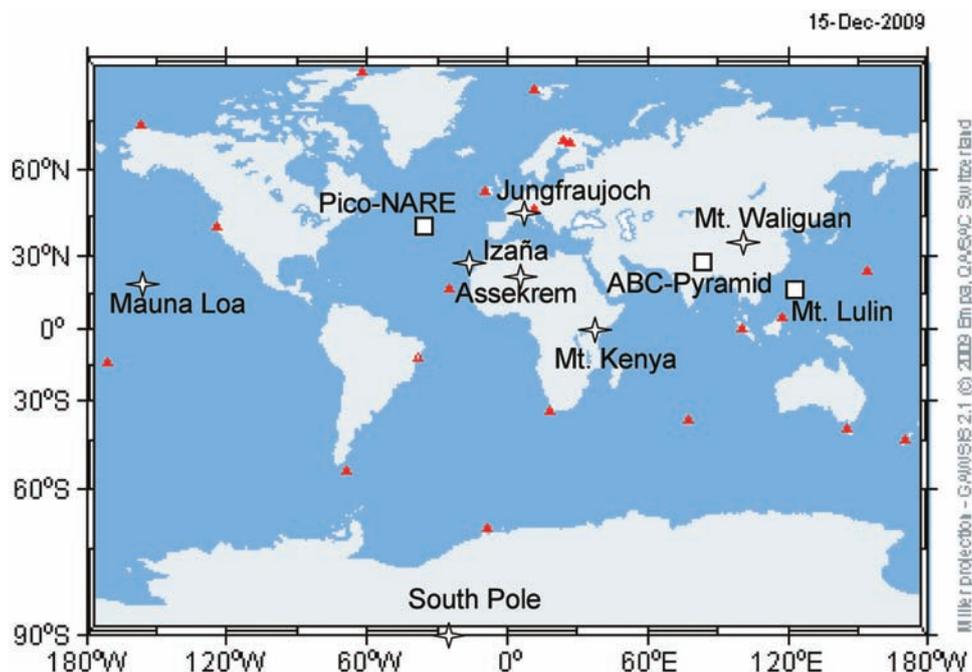


図1: 世界気象機関(WMO)の全球大気監視計画(GAW)によるグローバル観測地点(赤三角)と同高所山岳観測地点(星印), その他の主な山岳観測地点(四角) GAWのホームページGAWSISに基づく作図。

外にも、中国の山岳を活用した研究 (e.g. Fu et al., 2008; Ren et al., 2009; Wang et al., 2009) が増えつつある。このように高所山岳での観測は、その維持の困難性にも拘わらず徐々に広がりつつある。観測項目も温室効果気体、反応性気体だけでなく、エアロゾルとその前駆気体のより詳細な観測を含むようになりつつある。

すぐ間近に見える富士山での観測でも相当の苦労があるが、途上国の人里離れた高所山岳への観測点の設営と維持には、それを遙かに超える労力や資金と尋常ならざる決意が必要であろう。東アフリカの Kenya 山 (最高地点 5199 m msl) を例にしてみよう (Henne et al., 2008b)。Kenya 山は、火山性の孤立峰で (アフリカではキリマンジャロに次ぐ高峰) コニーデ型をしている。裾野 (直径としておよそ 60 km) には農業地帯が広がる。山の周囲自体は森林帯が 2000~2500 m 付近まで延び、その上は竹林や灌木、草地となっている。同地域は国立公園で、1997 年には世界遺産となった。ケニヤは政治情勢が安定していて赤道直下に位置することから、その大気化学観測での利用の検討は古く、1970 年代の後半にフィジビリティ観測が行われたようだ。文献に筆者も馴染みがある Schnell 博士の名前がある。この予備観測では、Kenya 山、Kulal 山 (ケニヤ北西部に位置) 等で気象観測、凝結核エアロゾル (CN) および CO₂ 観測が行われた。この時すでにエアロゾルと CO₂ 観測データには日周変動が見られることが分かったが、長期トレンドの観測には大きな問題とはならないだろうと結論された。中でも北側は日周変動の幅が小さく、孤立した峰が観測地点の候補に挙がったが、通行の利便性から、現在の地点 (0.062°S, 37.297°E, 3678 m msl) に定められた。観測ステーションの設置は、結果として当初の調査より 20 年ほど遅れ、1998 年にコンテナ建設資材がドイツとスイスの研究機関から現地に送られ、1999 年 10 月に開所を迎えた。電源がこの観測基地の最大の泣きどころであるらしく、26 km の電線が熱帯雨林の中を通じている。開所当初は、安定的な電源確保をいかに達成するか、大きな問題だったようだ。現状では、10 kVA の UPS が 4 時間の停電までバックアップが可能とある。山岳は一種の極地であり、事前の準備、経験に加え、充分なロジスティクスなしには運営できない。

Kenya 山は熱帯収束帯 (ITCZ) が季節に応じて南北に遷移する下に位置し、3 月中旬~6 月初旬と 10 月中旬~12 月の 2 回の雨季を経験する。北半球夏季 (ITCZ は 15~20°N まで北上) には南-南東風が、冬季 (ITCZ は 10~15°S まで南下) には北東のモンスーン風が支配的となる。この地域の特徴として東アフリカ低層ジェットがある。この流れは、5 月から夏季に向け次第に強まってくる。最盛時にはその末端はインドまで到達し、高度 1.0~1.6 km 付近でおよそ 20 m/s の風速を示す。このような総観場の季節変動に伴う大気化学の変動を捉えら

れるか否かが、この観測地点の維持にとって重要であろう (Henne et al., 2008b)。観測項目は、気象要素、日射、O₃、CO、BC などであり、微量気体のフラスコサンプリングも実施されている。

3. 局地風と自由対流圏データの取得

大気境界層から自由対流圏への汚染空気の鉛直輸送は、主として低気圧擾乱に伴う大規模な 1) 寒冷前線面近辺の積雲対流 (Oshima et al., 2004) と 2) 温暖前線面への帯状のゆっくりとした上昇 (Warm Conveyor Belt: WCB) (Cooper et al., 2004) があり、これに加えて 3) 大気境界層の日周変動 (日照による昼間の混合層高度上昇 (Tsumumi and Matsueda, 2000) や、より局所的な 4) 山体の輻射に起因する谷風と山風 (Mendonca, 1969) に支配され易い (e.g. Osada et al., 2003)。場合によっては、5) 強風による強制上昇 (Kleissl et al., 2007) も検討する必要がある。このうち特に山谷風という局地風によって、山岳における前駆気体や微量気体の観測値は、濃度が変動する。

谷風は日中に日射によって山体面が温まり、接する空気塊に浮力が生じて誘起される風で、総観規模での気象が穏やかで日射が大という条件下で効率的に駆動する。他方、山風は放射冷却した山体面のため誘起される大気沈降による風であり、夜間に駆動する (Mendonca, 1969)。谷風はごく麓から高所へ向けて吹き上がったときには、大気境界層の汚染した空気塊を高所に向けて輸送する。山風は上層の空気塊を下層に向け輸送するので、山岳の高度によっては、下部自由対流圏空気を下層に引きずり込む役割を果たす。従って、山岳での大気化学観測値は変動し、その振幅は、山谷風の強度と大気境界層、その上層の濃度勾配に依存することになる。

一例として、Kenya 山での変動につき述べる (図 2 は、Henne et al., 2008b より引用した観測にもとづく概念図)。図 3 に一部気象要素の月別平均日周変動を示す。ほぼ赤道直下に位置するため、一年を通じて全天日射は大だが、対流雲が昼間にかかることで日照時間は減少する。日没直前に雲散霧消して日照時間はやや増大する。境界層の空気が上昇することで水蒸気量 (比湿) が上昇する。こうした変動をもたらす主要な要因である山谷風は、図 4 の風配図に表現されるように、はっきりとした傾向を示す。図 5 に Kenya 山における O₃ と CO の日周変動を示す (Henne et al., 2008a)。Kenya 山では局地風の影響を受ける日は全体の 86% に及び、そのために、夜間の時間帯だけのデータを選択して (「夜間窓」と呼ばれる) 解析することが推奨されている。一般に、高所山岳での観測データは、こうしたデータ選択を経た上で、自由対流圏大気下のデータとして解析されることが多い (e.g. Keeling et al., 1976)。

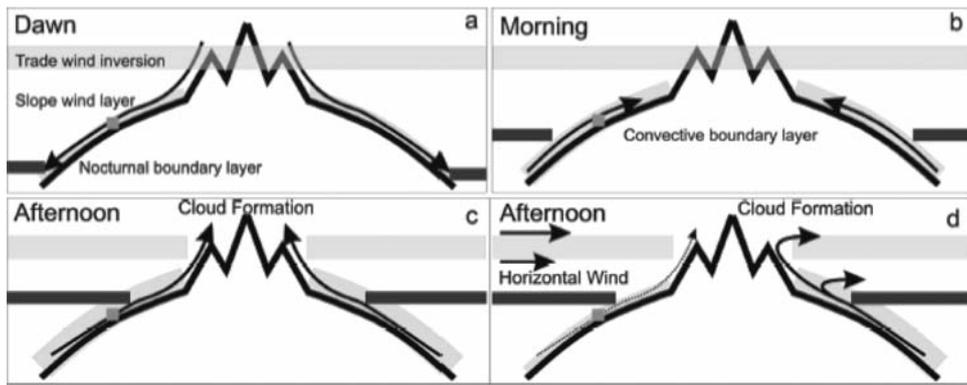


図2: Kenya 山における輻射によって誘起される斜面風と大気鉛直構造の模式図

図の左側が北を表し、灰色の四角が観測地点の位置を示す。(a)–(c)は、弱い水平風(総観場の風)条件下での日周変動。(d)は、強い水平風条件下での午後の風系。Henne et al. (2008b) より引用

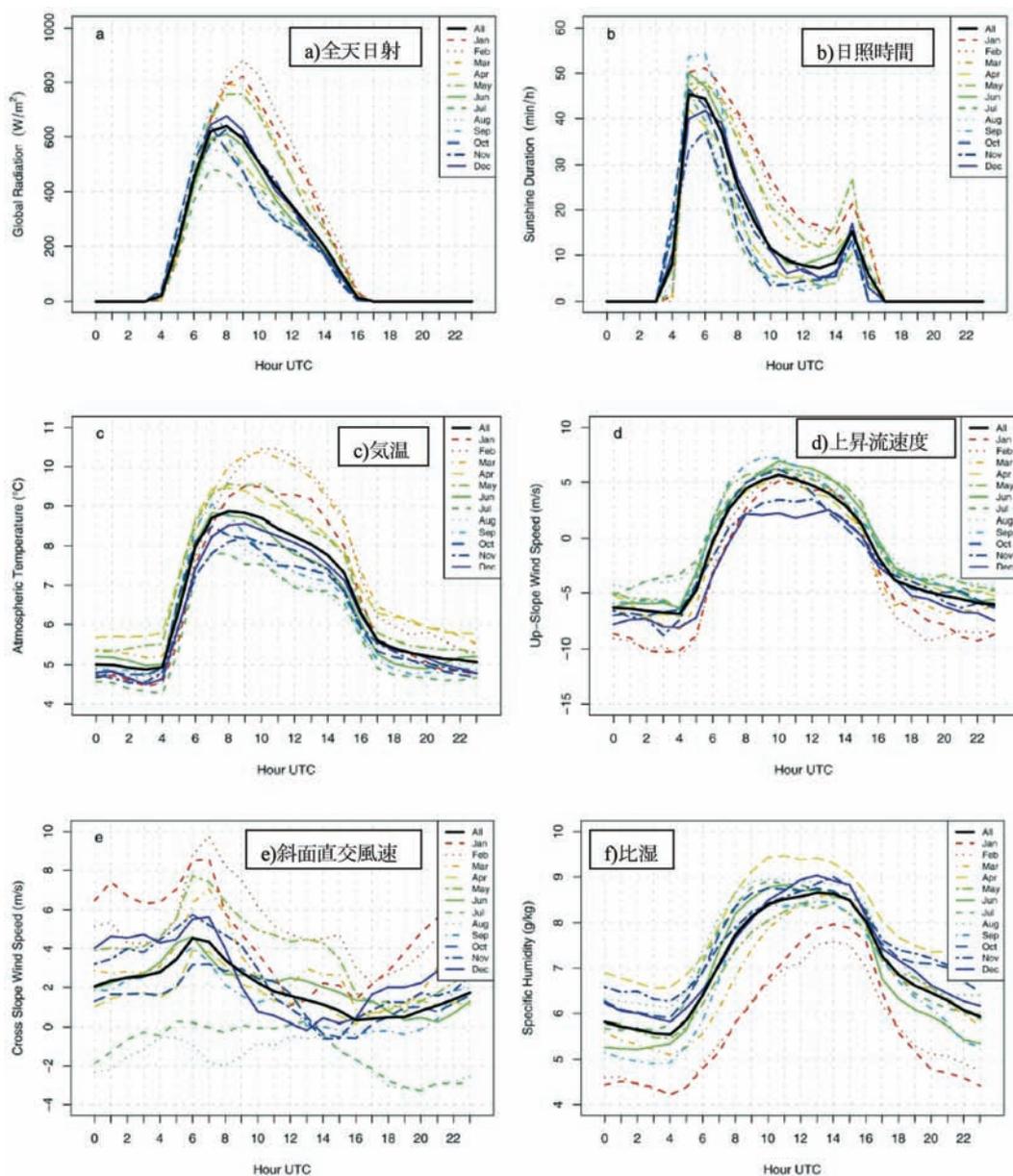


図3: Kenya 山における各月平均の、b) 日照時間、c) 気温、d) 上昇流速度、e) 斜面直交風速、f) 比湿の日周変動。日中の日射とそれが駆動力となって気象要素が変動する様子が見られる。Henne et al. (2008b) より引用

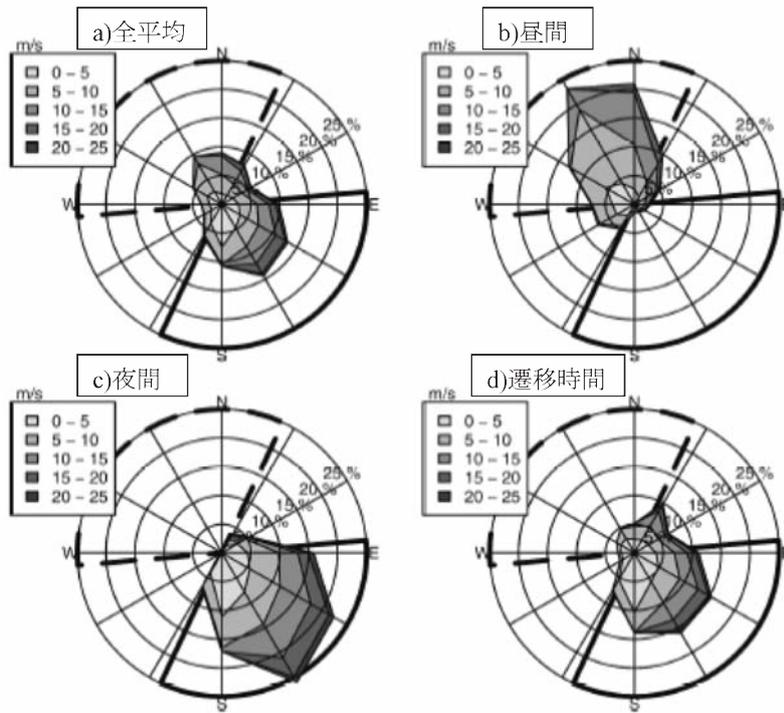


図4：Kenya 山における風配図

a) 全平均, b) 昼間 (08-15 UTC), c) 夜間 (20-03 UTC), d) 遷移時間帯 (16-19 および 04-07 UTC) 上昇風区分は点線, 下降風区分は実線で示した. パーセンテージは 12 の風向区分の積算確率. 昼間と夜間で全く反対の風向になることがわかる. Henne et al. (2008b) より引用

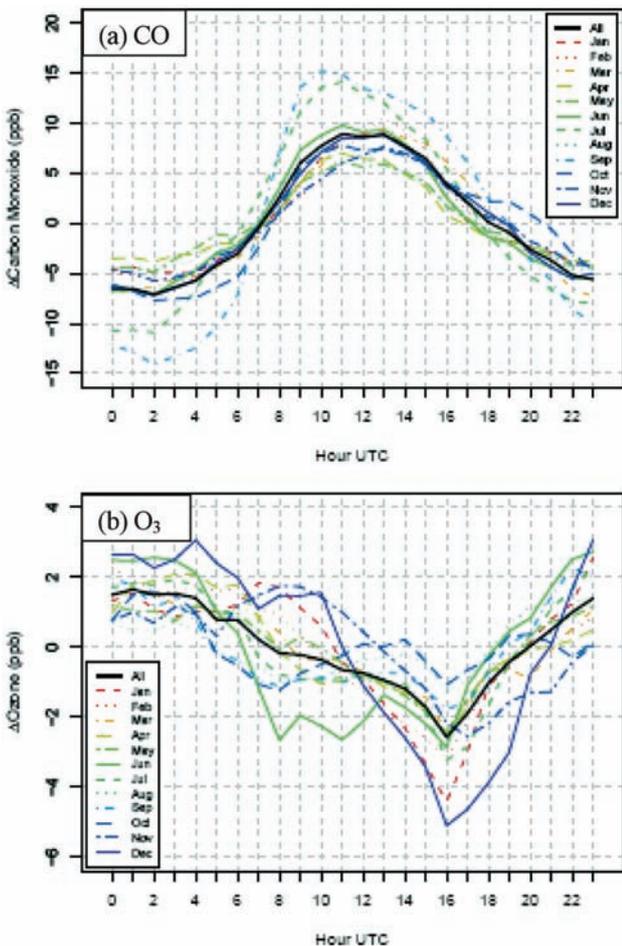


図5：Kenya 山における (a)CO と (b)O₃ の日周変動

黒線は年平均値. O₃ 濃度は大気境界層内部の方が自由対流圏に比べ低く, かつ NO_x 濃度が低いいため光化学的に O₃ の破壊が生じて濃度が低下すると考えられる. Henne et al. (2008a) より引用

Kleissl et al. (2007) は, ポルトガル領アゾレス諸島 (ポルトガル沖約 1000 km 北大西洋上) で 2 番目に大きい Pico 島にある PICO-NARE と呼ばれる観測地点 (38.47°N, 28.40°W, 2225 m msl) でのデータを解析した. 本観測地点は, 北大西洋上の大気化学研究プロジェクトの The North Atlantic Regional Experiment で 2001 年に設置された. 洋上の孤島では強風が吹くことから, 彼らはまず, 海洋境界層大気を持ち上がりは, 浮力による上昇と強風による強制的な上昇のどちらにも依存するとして解析した. 強制上昇については, 上昇により獲得される位置エネルギーと運動エネルギーとの釣り合いを考え, Sheppard の式 (辰野ほか, 2005) を用いた. このとき, dividing-streamline height (流線の分岐が起きる高さ) z_t より低い位置の流体塊は, 山の頂上を越えるだけの運動エネルギーをもたず, 山の脇を周回することになり, 他方, z_t より高い位置の流体塊は山の頂上を越えることとなる. この z_t を空気塊の凝結過程も考慮して湿潤浮力振動を含めて計算し, 図 6 を得た. この図では海洋境界層 (MBL) 高度と比較し, 強制上昇による MBL 空気塊の観測地点への輸送は, 10~4 月にかけて重要 (35~60% の日数) だが, 5~9 月には影響は小さい (20% 以下) ことを確認した. 次に, 日射による気塊の浮力上昇につき検討した. 浮力上昇単独, および浮力と強制上昇の両者の影響を受ける日数は, 夏季ではおよそ 40% となり, ほぼ全日影響を受ける Mauna Loa 観測所や Izaña とは異なる傾向を示した.

PICO-NARE では 2004 年秋以降, C₂-C₆ の NMHC

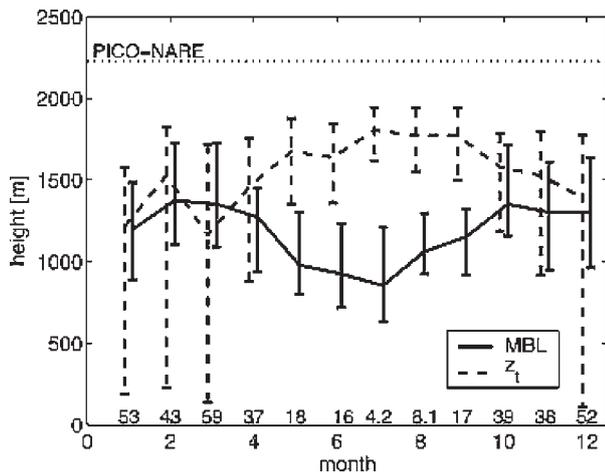


図6: Pico島における各月の平均海洋大気境界層高度 (MBL) と dividing streamline height (z_i) ひげの上下が25-75%値を表す。図底部の数字は $z_i < \text{MBL}$ 条件 (MBL 気塊が観測地点へ到達する) の時間帯の割合 (%). Kleissl et al. (2007) より引用

の観測を行っており、植物起源のイソプレンや人為起源の n -ブタンの時間変動からも谷風による観測点への大気境界層からの輸送を調べている。イソプレンは寿命が短く (夏季では 1h 以下)、また発生源である植生は 1500 m 以下にしか分布しないため、イソプレンが検出された場合、1500 m 以下の地点からの空気塊の輸送を検知したと見做せる。他方、Pico 島では n -ブタン (夏季の寿命 ~44 h) は熱源や調理など日常生活に広く使用されており、局所的な人為汚染の影響の指標となり得る。観測結果では、夏季の 12-18 時の谷風が卓越する時間帯にイソプレンが検出されて濃度上昇を示すが (1~26 pptv)、同時に観測された人為起源の n -ブタンは平均 10 pptv 前後の濃度を示し、日周変動をほとんど呈さなかった。すなわち、谷風による空気塊の上昇がある条件下でも、島内の地表付近の人為起源汚染大気の直接的な輸送は生じていないと推定された。

五十嵐 (2009) は、富士山での化学データの日周変動についてまとめた。富士山頂では全般に、エアロゾル前駆気体や微量気体については、マウナロアなど他の山岳地点に比べてその振幅がごく小さいことが大きな特徴である。実際に ^{222}Rn の事例では、日周変動を平滑化して平均濃度をとると、化学輸送モデルの計算値と非常に一致を見た。データを含め詳細は五十嵐 (2009) とここで引用されている原論文に当たりたいが、このことは、 O_3 を含め数日以上寿命をもつエアロゾル前駆気体、より長寿命の CO などの微量気体については、極東上空の自由対流圏の広域代表性のある観測値が富士山頂で得られるだろうことを示す。他方、エアロゾルの重量・個数濃度は明確な日周変動を呈し、その変動幅は数桁におよぶ場合もある。エアロゾル濃度の高度分布は気体に比べ大きな勾配をもつ可能性があり、山谷風の影響を顕著に受けている。

以上述べたいくつかの事例から、大気化学観測に影響する局地的な風や季節風による気塊の強制上昇などは、それぞれの高所山岳の緯度、高度、形状等の条件に依存するため、それぞれの観測地点において独自に調査・研究を進めるべきことがわかる。

4. 大気境界層からの汚染気塊の自由対流圏への輸送 (venting)

上述のように山岳は、日射のため昼間に生成する上昇流によって、自由対流圏へ下層の汚染された気塊を注入する役割を担っている。このような「Mountain Chimney Effect (山岳煙突効果)」、「山岳ポンプ」と呼ばれるプロセスについては、我が国では長田 (2000) の指摘がある。この効果は、全球スケールの化学輸送モデル (GCTM) ではその空間分解能が粗いことから、記述されずに埋もれてしまうと考えられる。そのため、現状の GCTM を用いた研究では、「山岳ポンプ」の果たす役割は過小評価されている可能性がある。特に欧州では低気圧の通過が北米や東アジア域ほど見られないため、低気圧の温暖前線面に位置する WCB や寒冷前線付近の積雲対流による上昇が果たす役割に対し、山岳ポンプの役割が相対的に大きいと考えられる。しかしながら、山岳ポンプが局所的な汚染に果たすその役割は、早くから十分に認識されており、1990 年代初期には Lu & Turco (1994) が山岳煙突効果を Los Angeles 盆地に適用して 3 次元モデルによる汚染気塊の輸送シミュレーションを行っている。彼らの論文に示された模式図は、航空機観測により描かれた像 (Collins et al., 2000) とよく一致している。

基本的な構図は Los Angeles 盆地とほぼ同じとも言えるが、Chen et al. (2009) は、夏季の航空機による観測と非静水圧 3 次元化学輸送モデル (WRF-TRACER) を用いて、北京で観測される二重の大気汚染層へ考察を加えた。北京は広大な中国北部平原の中に位置する都市と見なされがちであるが、実際には、北京郊外を北に数十 km 行くと丘陵域となる。万里の長城で有名な八達嶺を思い起こしていただきたい。このため、総観場の風が弱い夏季の日射の強い条件下では、谷風が発生して北京の汚染大気を北へ輸送し、それが山岳域で上昇後に逆流として (総観場の風に乗り) 再度北京上空へ輸送されることが明らかにされた。この状況を図 7 に WRF-TRACER で計算された流線と航空機による O_3 観測の結果で示す。上部の汚染層は高度 2500-3500 m に存在し、 SO_2 , NO_x , O_3 , エアロゾル個数濃度などは、ほぼ下層の境界層内での濃度に等しい。これまでも大陸の沿岸部大都市の上層に汚染層があるとの報告を学会等で聞いたが、この山岳ポンプによるとの報告は、こうした観測事実に対して納得のいく説明となっている。山岳ポン

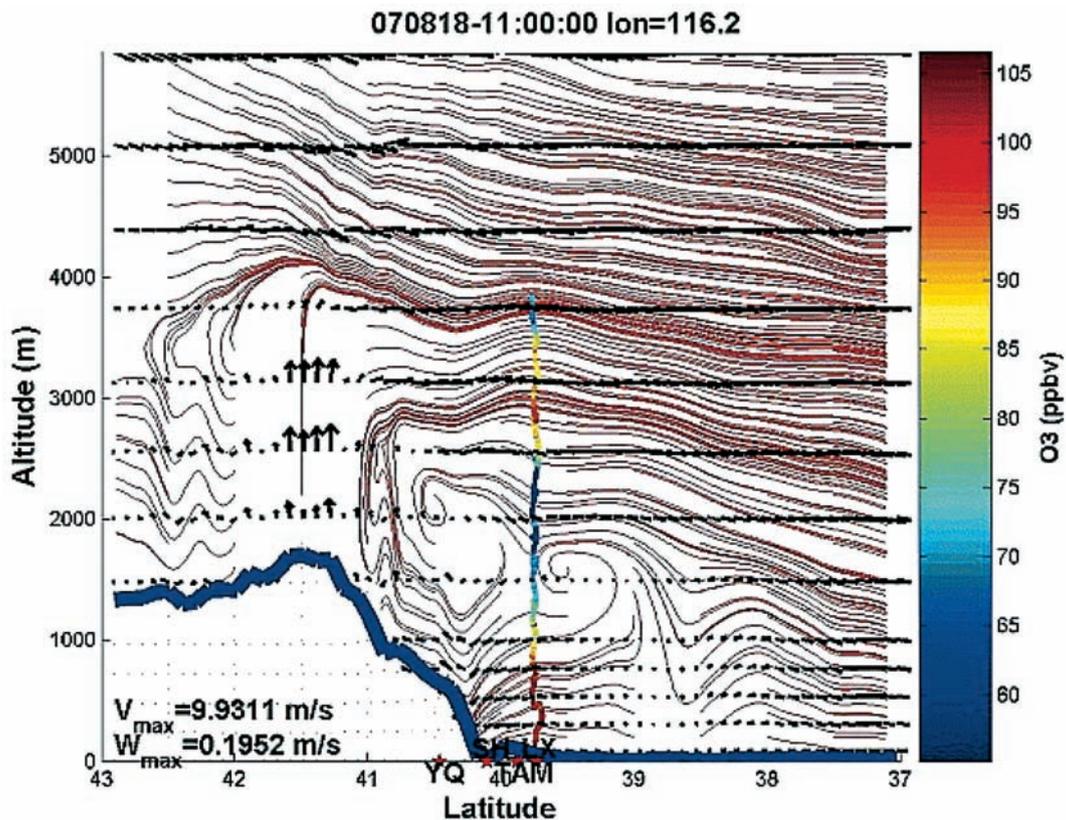


図7：2007年8月17日11時（現地時間）の北京近傍における116.2°E南北面での流線と風（WRF-TRACERによる計算値）流線はモデルの w から図化。アルファベットは地点名(LX, LiangXiang; YQ, YanQing; SH, ShaHe; TAM, TianAnMen Square)。カラーバーは航空機による O_3 観測値(ppbv) 2500-3500 m付近で高濃度層のあることがわかる。Chen et al. (2009)より引用

により形成されるこの汚染層は、上空の総観場の風により移流することで長距離輸送されると考えられるので、我が国の大気質へも間違いなく影響していると推測される。

最後に、欧州アルプスにおける山岳ポンプに関する報告について触れておきたい。欧州アルプスでは、地上のみならず航空機にライダー等の鉛直プロファイル取得が可能なりモートセンサーを搭載して観測を行い (e.g. Nyeki et al., 2002), 領域化学輸送モデルによる再現計算と併せて解析する試み (e.g. Furger et al., 2000; Grell et al., 2000) が1990年代後半から行われている。ドイツアルプスの北側 (Weissmann et al., 2005), 中欧アルプスの南側 (Henne et al., 2004) の両方向からアプローチが行われている。このうち, Henne et al. (2004) は, 北イタリアPo盆地に面する南スイスの山岳峡谷で, 航空機による物理・化学観測, 搭載ライダーによるプロファイリング, ラジオゾンデ, 地表のサウンダーを組み合わせ, さらに流跡線解析を用いて山岳ポンプの質量フラックスの評価と上層へ輸送された気塊の行方について検討した。図8にLeventina峡谷におけるライダー観測結果とラジオゾンデによる温位と比湿を示す。斜面風（境界層汚染気塊）が, 下部自由対流圏の遷移層へ流入していく様子がよく見てとれる。この遷移層は高度4000 mに達し, その上層は層流となっている。総合解析から得

られた概念図を図9に示す。大気下層は, 単純な境界層+自由対流圏という構造ではなく, より複雑な構造をとる。谷を滑昇する気流条件は夏季の晴天時には7~9時間継続し, 気塊の質量収支計算では, 1日当たり谷を滑昇する気塊の最大3倍量が, 自由対流圏下部に流入すると見積もられた。自由対流圏に流入した汚染気塊は, その後, 北へ流れた場合, 高度を上げて総観場の風によりアジアへ輸送される (欧州アウトフローと呼べよう)。他方, 南へ流れた場合, 高度を下げて地中海とその周辺部へ拡がる。山岳ポンプが, 人為汚染気塊の長距離輸送に果たす役割が重要であることが改めてわかった。

5. おわりに

以上ごく簡単に概観したように, 高所山岳を活用したエアロゾルを含む大気化学の観測はさらに拡がりを見せている。我が国における山岳観測に, 諸外国でのさまざまな実践をより大胆に取り入れるの必要を感じる。今後は, ドップラーライダーなどのプロファイラーや最新の乱流観測手法, 微小スケールの計算が可能な化学輸送モデル (LESがより適切か?) も援用して種々の規模の大気の物理構造を解明しつつ, その構造に伴うエアロゾル, 汚染気塊の輸送・混合や気候変動に関連する観測研究が待たれる。また同時に, 高所山岳拠点が一層有効に

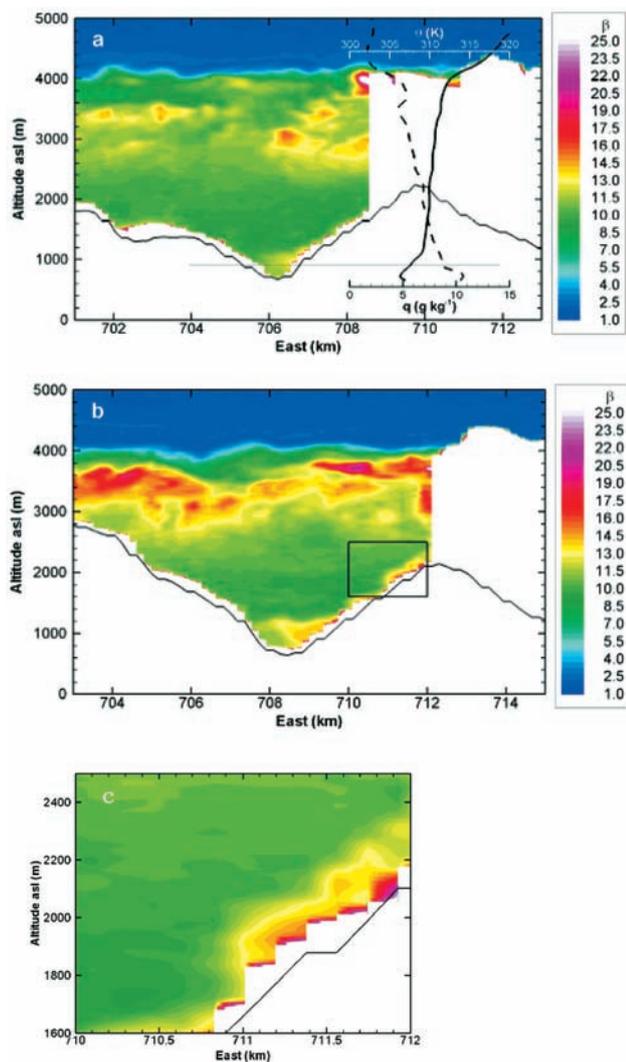


図8：Leventina 峡谷における2001年8月28日昼間のライダー後方散乱比 β （波長1064 nm）観測結果（a, bとも）とラジオゾンデによる温度と比湿観測結果。bでは斜面を昇汚染気塊が見える。これを拡大したものがc。Henne et al. (2004) より引用

活用されることが望まれる。なお、本研究会での口頭発表は五十嵐（2009）とほぼ同一内容であったため、本稿は直江を著者に加え、新規に小レビューとして執筆した。また、文献が網羅的ではないが、併せてご容赦願いたい。

謝辞

研究会での発表と本稿執筆の機会を与えてくださった、北海道大学低温科学研究所の河村公隆教授に感謝する。また、本研究は、科学研究費補助金新学術領域「粒子人間植物影響」（計画研究A02-P05「ライダーおよび地上モニタリングネットワークによるエアロゾル動態解明」と気象研究所の経常研究に関わることを付記する。藤井路子さんには、改訂原稿編集のお手伝いをいただいた。記して感謝する。

参考文献

- Bonasoni P, P. Laj, F. Angelini, J. Arduini, U. Bonafe, F. Calzolari, P. Cristofanelli, S. Decesari, M. C. Facchini, S. Fuzzi, G. P. Gobbi, M. Maione, A. Marinoni, A. Petzold, F. Roccatò, J. C. Roger, K. Sellegri, M. Sprenger, H. Venzac, G. P. Verza, P. Villani, and E. Vuillermoz (2008) The ABC-Pyramid Atmospheric Research Observatory in Himalaya for aerosol, ozone and halocarbon measurements, *Sci. Total Environ.* **391**(2-3), 252-261.
- Chen, Y., C. Zhao, Q. Zhang, Z. Deng, M. Huang, and X. Ma (2009) Aircraft study of Mountain Chimney Effect of Beijing, China, *J. Geophys. Res.* **114**, D08306, doi: 10.1029/2008JD010610, 2009.
- Collins, D. R., H. H. Jonsson, H. Liao, R. C. Flagan, J. H. Seinfeld, K. J. Noone, and S. V. Hering (2000) Airborne analysis of the Los Angeles aerosol, *Atmos. Environ.* **34**, 4155-4173.
- Cooper, O. R., C. Forster, D. Parrish, E. Dunlea, T. Ryerson, G. Hübler, F. Fehsenfeld, D. Nicks, J. Holloway, J. de Gouw, C. Warneke, J. M. Roberts, F. Flocke, and J. Moody (2004) A case study of transpacific warm conveyor belt transport: Influence of merging airstreams on trace gas import to North America, *J. Geophys. Res.* **109**, D23S08, doi: 10.1029/2003JD003624.
- Cozic, J., B. Verheggen, E. Weingartner, J. Crosier, K. N. Bower, M. Flynn, H. Coe, S. Henning, M. Steinbacher, S. Henne, M. C. Coen, A. Petzold, and U. Baltensperger (2008) Chemical composition of free tropospheric aerosol for PM1 and coarse mode at the high alpine site Jungfraujoch, *Atmos. Chem. Phys.* **8**, 407-423.
- Cuevas, E. (2009) The Izaña GAW Report 2009 (www.izana.org/publications/The_Izana_GAW_Report_2009.pdf)
- Fu, P., K. Kawamura, K. Okuzawa, S. G. Aggarwal, G. Wang, Y. Kanaya, and Z. Wang (2008) Organic molecular compositions and temporal variations of summertime mountain aerosols over Mt. Tai, North China Plain, *J. Geophys. Res.* **113**, D19107, doi: 10.1029/2008JD009900.
- Furger, M., J. Dommen, W. K. Graber, L. Poggio, A. S. H. Prévôt, S. Emeis, G. Grell, T. Trickl, B. Gomiscek, B. Neiningner, and G. Wotawa (2000) The VOTALP Mesolcina Valley Campaign 1996 - concept, background and some highlights, *Atmos. Environ.* **34**, 1395-1412.
- Grell, G. A., S. Emeis, W. R. Stockwell, T. Schoenemeyer, R. Forkel, J. Michalakes, R. Knoche, and W. Seidl (2000) Application of a multiscale, coupled MM5/chemistry model to the complex terrain of the VOTALP valley campaign, *Atmos. Environ.* **34**, 1435-1453.
- Henne, S., J. Klausen, W. Junkermann, J. M. Kariuki, J. O. Aseyo, and B. Buchmann (2008a) Representativeness and climatology of carbon monoxide and ozone at the global GAW station Mt. Kenya in equatorial Africa, *Atmos. Chem. Phys.* **8**, 3119-3139.
- Henne, S., W. Junkermann, J. M. Kariuki, J. Aseyo, and J.

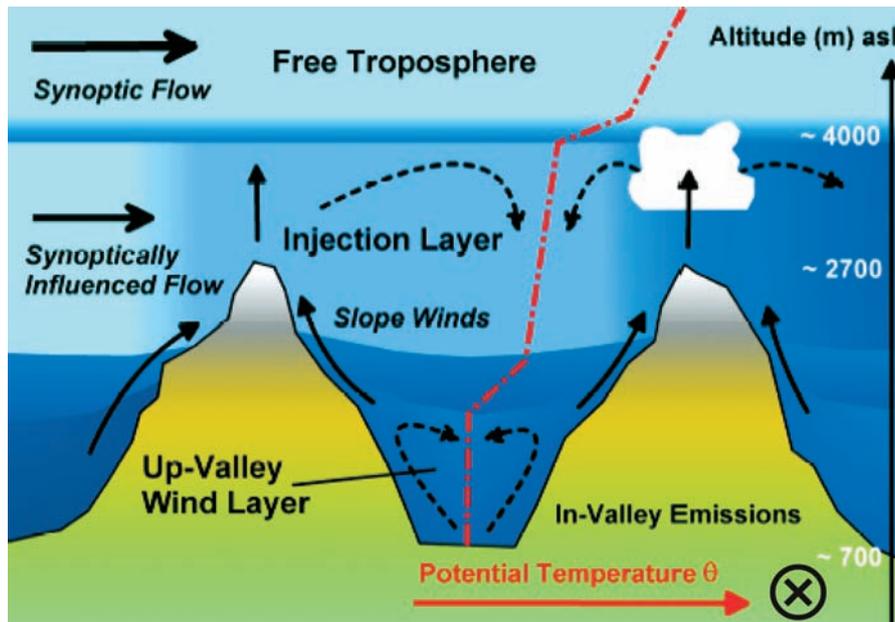


図9：欧州アルプスの峡谷における昼間の大気構造概念図

紙面から見た方向が北。北方向へ谷を上昇する流れと斜面上昇流があり、峡谷には対流境界層が形成されている。斜面上昇流により山麓から流入した汚染気塊が自由大気へ入って行く。この遷移層の上部に雲があり、前日の残余層も見られる。Henne et al. (2004) より引用

- Klausen (2008b) Mount Kenya Global Atmosphere Watch Station (MKN): Installation and meteorological characterization, *J. Appl. Meteorol. Climatol.* **47**, 2946-2962.
- Henne, S., M. Furger, S. Nyeki, M. Steinbacher, B. Neininger, S. F. J. de Wekker, J. Dommen, N. Spichtinger, A. Stohl, and A. S. H. Prevôt (2004) Quantification of topographic venting of boundary layer air to the free troposphere, *Atmos. Chem. Phys.* **4**, 497-509.
- Igarashi, Y., Y. Sawa, K. Yoshioka, H. Matsueda, K. Fujii, and Y. Dokiya (2004) Monitoring the SO₂ concentration at the summit of Mt. Fuji and a comparison with other trace gases during winter, *J. Geophys. Res.* **109**, doi: 10.1029/2003JD004428.
- Igarashi, Y., Y. Sawa, K. Yoshioka, H. Takahashi, H. Matsueda, and Y. Dokiya (2006) Seasonal variations in SO₂ plume transport over Japan: Observations at the summit of Mt. Fuji from winter to summer, *Atmos. Environ.* **40(36)**, 7018-7033.
- Iwasaka, Y., M. Yamato, R. Imasu, and A. Ono (1988) Transport of Asian dust (KOSA) particles; importance of weak KOSA events on the geochemical cycle of soil particles, *Tellus, Ser. B* **40**, 494-503.
- Keeling, C. D., R. B. Bacastow, A. E. Bainbridge, C. A. Ekdahl, Jr., P. R. Guenther, and L. S. Waterman (1976) Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii, *Tellus*, **28**, 538-551.
- Kivekäs, N., J. Sun, M. Zhan, V.-M. Kerminen, A. Hyvärinen, M. Komppula, Y. Viisanen, N. Hong, Y. Zhang, M. Kulmala, X.-C. Zhang, Deli-Geer, and H. Lihavainen (2009) Long term particle size distribution measurements at Mount Waliguan, a high-altitude site in inland China, *Atmos. Chem. Phys.* **9**, 5461-5474.
- Kleissl, J., R. E. Honrath, M. P. Dziobak, D. Tanner, M. Val Martín, R. C. Owen, and D. Helmig (2007) Occurrence of upslope flows at the Pico mountaintop observatory: A case study of orographic flows on a small, volcanic island, *J. Geophys. Res.* **112**, D10S35, doi: 10.1029/2006JD007565
- Lu, R. and R. P. Turco (1994) Air pollutant transport in a coastal environment. Part 1: Two-dimensional simulations of sea-breeze and mountain effects, *J. Atmos. Sci.* **51**, 2285-2308.
- Matsuki, A., Y. Iwasaka, K. Osada, K. Matsunaga, M. Kido, Y. Inomata, D. Trochkin, C. Nishita, T. Nezuka, T. Sakai, D. Zhang, and S.-A. Kwon (2003) Seasonal dependence of the long-range transport and vertical distribution of free tropospheric aerosols over east Asia: On the basis of aircraft and lidar measurements and isentropic trajectory analysis, *J. Geophys. Res.* **108(D23)**, 8663, doi: 10.1029/2002JD003266.
- Mendonça, B. G. (1969) Local wind circulation on the slopes of Mouna Loa, *Journal of Applied Meteorology*, **8**, 533-541.
- Nishita, C., K. Osada, M. Kido, K. Matsunaga, and Y. Iwasaka (2008) Nucleation mode particles in upslope valley winds at Mount Norikura, Japan: Implications for the vertical extent of new particles formation events in the lower troposphere, *J. Geophys. Res.* **113**, D06202, doi: 10.1029/2007JD009302
- Nyeki, S., K. Eleftheriadis, U. Baltensperger, I. Colbeck, M. Fiebig, A. Fix, C. Kiemle, M. Lazaridis, and A. Petzold (2002) Airborne Lidar and in-situ aerosol observations of an elevated layer, Leeward of the European Alps and Apennines, *Geophys. Res. Lett.*, **29(17)**, 1852, doi: 10.1029/2002GL014897.
- Osada, K., M. Kido, H. Iida, K. Matsunaga, Y. Iwasaka, M.

- Nagatani, and H. Nakada (2003) Seasonal variation of free tropospheric aerosol particles at Mt. Tateyama, central Japan, *J. Geophys. Res.* **108(D23)**, 8667, doi: 10.1029/2003JD003544.
- Oshima, N., M. Koike, H. Nakamura, Y. Kondo, N. Takegawa, Y. Miyazaki, D. R. Blake, T. Shirai, K. Kita, S. Kawakami, and T. Ogawa (2004) Asian chemical outflow to the Pacific in late spring observed during the PEACE-B aircraft mission, *J. Geophys. Res.* **109**, D23S05 doi: 10.1029/2004JD004976.
- Philippin, S., P. Laj, J.-P. Putaud, A. Wiedensohler, G. De Leeuw, A. M. Fjaeraa, U. Platt, U. Baltensperger and M. Fiebig (2009) EUSAAR-An unprecedented network of aerosol observation in Europe, *Eurozoru Kenkyu* **24**, 78-83.
- Ren, Y., A. Ding, T. Wang, X. Shen, J. Guo, J. Zhang, Y. Wang, P. Xu, X. Wang, J. Gao, and J. L. Collett, Jr. (2009) Measurement of gas-phase total peroxides at the summit of Mount Tai in China, *Atmos. Environ.* **43**, 1702-1711.
- Sheu, G.-R., N.-H. Lin, J.-L. Wang and C.-T. Lee (2009) Lulin Atmospheric Background Station: A new high-elevation baseline station in Taiwan, *Eurozoru Kenkyu* **24**, 84-89.
- Tsai, F., G. T.-J. Chen, T.-H. Liu, W.-D. Lin, and J.-Y. Tu (2008) Characterizing the transport pathways of Asian dust, *J. Geophys. Res.* **113**, D17311, doi: 10.1029/2007JD009674.
- Tsutsumi, Y. and H. Matsueda (2000) Relationship of ozone and CO at the summit of Mt. Fuji (35.35°N, 138.73° E, 3776m above sea level) in summer 1997, *Atmos. Environ.* **34(4)**, 553-561.
- Tsutsumi, Y., Y. Igarashi, Y. Zaizen and Y. Makino (1998) Case studies of tropospheric ozone events observed at the summit of Mount Fuji, *J. Geophys. Res.* **103**, 16935-16951.
- Uematsu, M., A. Yoshikawa, H. Muraki, K. Arao and I. Uno (2002) Transport of mineral and anthropogenic aerosols during a Kosa event over East Asia, *J. Geophysical. Res.* **107(D7)**, 4059, doi: 10.1029/2001JD000333.
- VanCuren, R., and T. Cahill (2002) Asian aerosols in North America: Frequency and concentration of fine dust, *J. Geophys. Res.* **107(D24)**, 4804, doi: 10.1029/2002JD002204.
- Venzac, H., K. Sellegri, P. Laj, P. Villani, P. Bonasoni, A. Marinoni, P. Cristfanelli, F. Calzolari, S. Fuzzi, S. Decesari, M.-C. Facchini, E. Vuillermoz, and G. P. Verza (2008) High frequency new particle formation in the Himalayas, *P. Natl. Acad. Sci. USA* **105**, 15666-15671.
- Wang, G., K. Kawamura, N. Umemoto, M. Xie, S. Hu, and Z. Wang (2009) Water-soluble organic compounds in PM2.5 and size-segregated aerosols over Mount Tai in North China Plain, *J. Geophys. Res.* **114**, D19208, doi: 10.1029/2008JD011390.
- Weber, R. J., and P. H. McMurry (1996) Fine particle size distributions at the Mouna Loa Observatory, Hawaii, *J. Geophys. Res.* **101(D9)**, 14767-14775.
- Weissmann, M., F. J. Braun, L. Gantner, G. J. Mayr, S. Rahm, and O. Reitebuch (2005) The Alpine mountain-plain circulation: Airborne Doppler lidar measurements and numerical simulations, *Mon. Weather Rev.* **133**, 3095-3109.
- Zellweger, C., J. Klausen, and B. Buchmann (2003) WCC-EMPA REPORT 03/1, System and Performance Audit for Surface Ozone Global GAW Station Tamarrasset/Assekrem (http://www.empa.ch/gaw/audits/ASK_2003.pdf)
- Zhang, D., Y. Iwasaka, G. Shi, J. Zang, M. Hu and C. Li (2005) Separated status of the natural dust plume and polluted air masses in an Asian dust storm event at coastal areas of China, *J. Geophys. Res.* **110**, D06302, doi: 10.1029/2004JD005305.
- Zhu, B., H. Akimoto, Z. Wang, K. Sudo, J. Tang, and I. Uno (2004) Why does surface ozone peak in summertime at Waliguan?, *Geophys. Res. Lett.* **31**, L17104, doi: 10.1029/2004GL020609.
- 五十嵐康人(2009)「富士山におけるエアロゾル観測とその課題」, *エアロゾル研究* **24**, 90-96.
- 長田和雄(2000)「航空機と山岳大気観測から見た自由対流圏エアロゾル」, *エアロゾル研究* **15**, 335-342.
- 辰野正和, 荏原伸二, 石井幸治(2005)「三次元尾根を越える安定成層流の構造」, *九州大学応用力学研究所所報*第 **128**号, 1-13.