

2017 年度堀内賞の受賞者

受賞者：杉本伸夫（国立環境研究所）

研究業績：ライダーによる東アジア大気環境および気候研究の推進

選定理由：大気中に存在するエアロゾルは、日射の吸収や散乱などの大気放射過程に係わると共に雲核として雲・降水過程にも係わり、日々の天気現象のみならず気候プロセスにおいても重要な役割を演じている。しかしながら気候への影響に関しては、IPCC の第 5 次評価報告においても、その実態が複雑で不明な点も多く、地球温暖化予測における不確実性の高い因子の一つと考えられている。さらに、東アジアは、内陸部の黄砂など自然起源エアロゾルと大陸東岸の大都市圏からの人為起源エアロゾルの発生域を抱え、その生成、輸送途上の変質、長距離輸送の各過程はきわめて複雑であり、同地域におけるエアロゾルの実態解明が必要とされている。

杉本伸夫氏は、1996 年につくばの国立環境研においてライダーによる大気エアロゾルの連続自動観測を開始し、1999 年には偏光解消度測定機能を付加した。さらに、2001 年にはつくばに加え北京と長崎の三カ所で二波長のミー散乱ライダーによる長期自動観測を開始し、非球形のダスト粒子と球形粒子（硫酸塩などの人為起源エアロゾルなど）の分布を推定するアルゴリズムを開発することにより Aerosol Characterization Experiment in Asian Region（ACE-Asia）でも大きな貢献を行った [業績 1 , 2]。杉本氏は、その後もソウル・福江島などに順次観測拠点を拡大し、モンゴルを含む東アジアほぼ全域をカバーする約 20 地点におよぶライダーネットワーク（AD-Net: the Asian dust and aerosol lidar observation network）を構築すると共に、長期間にわたる連続観測を推進する中心的役割を担った [3]。

AD-Net の特徴は、主に対流圏下部のダスト（鉱物粒子）や人為起源エアロゾルなどエアロゾルコンポーネント毎の時空間分布を連続に高精度かつリアルタイムで測定できることにある。これにより、北東アジア内陸部の砂漠地域で発生したダストの発生状況、鉛直分布や長距離輸送過程を捉えるばかりでなく、大陸東岸部で発生する人為起源エアロゾルとの混合過程も明らかとなり、東アジアの黄砂予測モデルの精度向上に大きく寄与した [4]。さらに近年では、そのネットワーク化と連続観測という特長を生かして、消散係数などのライダー観測情報を用いたデータ同化手法を大気環境モデルに適用する事により、数値モデルの精度向上に大きな貢献を行った [5 , 6 , 7]。また、ライダー観測により捉えられたエアロゾル各種の分布と動態情報に基づき、東アジアにおけるエアロゾル放射強制力の定量的評価による実態解明を進展させた [8 , 9]。同氏を中心として運営されている AD-Net は、WMO 全球大気監視（GAW: Global Atmosphere Watch）の contributing network にも組み込まれ、今や東アジアの大気環境の監視ならびに研究推進に不可欠の存在となっている。

さらに杉本氏は、ライダーによるエアロゾル特性の解析の高度化を目指して、次世代のネットワークライダーとして、355nm の後方散乱（ σ_{back} ）・消散（ σ_{ext} ）・偏光解消度（ σ_{pol} ）、532nm の後方散乱・消散・偏光解消度、1064nm の後方散乱という 7 パラメータ（ $3 + 2 + 2$ ）を得ることが出来る多波長ラマンならびに高スペクトル分解能ライダーを開発した。そして、非球形粒子（ダスト）、光吸収の小さい微小粒子（硫酸塩など）、光

吸収の小さい粗大粒子（海塩）、光吸収の大きい微小粒子（ブラックカーボン）など光学的に判別可能な4つのエアロゾルコンポーネントについて光学モデルを仮定することにより、その時空間分布を判別するアルゴリズム開発を行った[10]。

こうした研究推進に加え、杉本氏はWMOが推進する砂塵嵐早期警戒評価計画（SDS-WAS）アジア地区運営委員会や日中韓環境大臣会合合意に基づく黄砂専門家会議（TEMM DSS-WG1）の中心メンバーとして、日中韓の黄砂モニタリングおよび予測の高度化のため、日中韓の専門家による調査研究活動の推進に長年にわたり大きな貢献を行っている[11, 12, 13]。また、GAWのエアロゾル科学諮問委員会（SAG）委員を務め、GAWの全球エアロゾルライダーネットワーク（GALION）に大きく貢献している。

以上のように杉本氏は、東アジアの大気エアロゾルの実態とプロセス解明のためにライダー装置の開発・改良ならびにエアロゾル判別アルゴリズムの開発を行うと共に、東アジアライダーネットワークによる長期自動観測体制を構築することにより、東アジアエアロゾル国際共同研究への貢献を行うなど、大気環境および気候研究において顕著な功績を挙げ、我が国および東アジアの大気科学研究の進展に多大な貢献をもたらした。

以上の理由により、日本気象学会は杉本伸夫氏に2017年度堀内賞を贈呈するものである。

主な論文リスト

1. Sugimoto, N., I. Uno, M. Nishikawa, A. Shimizu, I. Matsui, X. Dong, Y. Chen and H. Quan, 2003: Record heavy Asian dust in Beijing in 2002: Observations and model analysis of recent events. *Geophys. Res. Lett.*, 30, doi:10.1029/2002GL016349.
2. Shimizu, A., N. Sugimoto, I. Matsui, K. Arai, I. Uno, T. Murayama, N. Kagawa, K. Aoki, A. Uchiyama and A. Yamazaki, 2004: Continuous observations of Asian dust and other aerosols by polarization lidars in China and Japan during ACE-Asia. *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2002JD003253.
3. Sugimoto, N., A. Shimizu, I. Matsui, I. Uno, K. Arai, X. Dong, S. Zhao, J. Zhou and C.-H. Lee, 2005: Study of Asian dust phenomena in 2001-2003 using a network of continuously operated polarization lidars. *Water Air Soil Pollut. Focus*, 5, 145-157.
4. Sugimoto, N., I. Matsui, A. Shimizu, I. Uno, K. Asai, T. Endoh and T. Nakajima, 2002: Observation of dust and anthropogenic aerosol plumes in the Northwest Pacific with a two-wavelength polarization lidar on board the research vessel Mirai. *Geophys. Res. Lett.*, 29, doi:10.1029/2002GL015112.
5. Yumimoto, K., I. Uno, N. Sugimoto, A. Shimizu and S. Satake, 2007: Adjoint inverse modeling of dust emission and transport over East Asia. *Geophys. Res. Lett.*, 34, doi:10.1029/2006GL028551.
6. Yumimoto, K., I. Uno, N. Sugimoto, A. Shimizu, Z. Liu and D. M. Winker, 2008: Adjoint inversion modeling of Asian dust emission using lidar observations. *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 2869-2884.
7. Sugimoto, N., Y. Hara, K. Yumimoto, I. Uno, M. Nishikawa and J. Dulam, 2010: Dust emission estimated with an assimilated dust transport model using lidar network data and vegetation

- growth in the Gobi desert in Mongolia. SOLA, 6, 125-128.
8. Takemura, T., T. Nakajima, A. Higurashi, S. Ohta and N. Sugimoto, 2003: Aerosol distributions and radiative forcing over the Asian Pacific region simulated by Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species (SPRINTARS). *J. Geophys. Res.*, 108, doi:10.1029/2002JD003210.
 9. Nakajima, T., S.-C. Yoon, V. Ramanathan, G.-Y. Shi, T. Takemura, A. Higurashi, T. Takamura, K. Aoki, B.-J. Sohn, S.-W. Kim, H. Tsuruta, N. Sugimoto, A. Shimizu, H. Tanimoto, Y. Sawa, N.-H. Lin, C.-T. Lee, D. Goto and N. Schutgens, 2007: Overview of the Atmospheric Brown Cloud East Asian Regional Experiment 2005 and a study of the aerosol direct radiative forcing in east Asia. *J. Geophys. Res.*, 112, 10.1029/2007JD009009.
 10. Nishizawa, T., N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, Y. Hara, I. Uno, K. Yasunaga, R. Kudo, S.-W. Kim, 2017: Ground-based network observation using Mie–Raman lidars and multi-wavelength Raman lidars and algorithm to retrieve distributions of aerosol components. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, 188, 79–93.
 11. Sugimoto, N., Y. Hara, A. Shimizu, K. Yumimoto, I. Uno and M. Nishikawa, 2011: Comparison of surface observations and a regional dust transport model assimilated with lidar network data in Asian dust event of March 29 to April 2, 2007. SOLA, 7A, 13-16.
 12. Sugimoto, N., Y. Hara, A. Shimizu, T. Nishizawa, I. Matsui and M. Nishikawa, 2013: Analysis of dust events in 2008 and 2009 using the lidar network, surface observations and the CFORS model. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 49, 27-39.
 13. Sugimoto, N., A. Shimizu, I. Matsui and M. Nishikawa, 2016: A method for estimating the fraction of mineral dust in particulate matter using $PM_{2.5}$ -to- PM_{10} ratios. *Particuology*, 28, 114-120.

2017 年度堀内賞の受賞者

受賞者：青木 茂（北海道大学低温科学研究所）

研究業績：南大洋における大気・海洋結合系の長期変動に関する観測的研究

選定理由：南大洋は全球的な三次元海洋大循環の鍵となる海域であり，その変動と変化は地球の気候に対して直接的，間接的に影響を及ぼす．南大洋を特徴付ける南極周極流は南極大陸を周回し，大西洋・太平洋・インド洋の三大洋間の交換を促進する一方，極域と中・低緯度域間の南北交換を抑制する．鉛直方向には，深層水の湧昇を伴う上下に二つの子午面循環が形成され，海洋深底層と表層の間の熱や物質の輸送を担う．南大洋で形成される南極底層水は世界の海洋の底層に潜り込み，深層循環やその流量を規定する．南大洋は熱や二酸化炭素の巨大なりザーバーでもあることから，長期の気候変動には南大洋を起点とする深層循環が重要な役割を果たしていると考えられている．

青木 茂氏は，主として現場観測による実証的な研究に基づき，南大洋における海洋構造とその長期的な変動，水塊特性の変化の実態把握や原因解明において世界をリードする研究者の一人である．大気変動や淡水循環の変動が南大洋の海洋循環にもたらす影響について，精力的に研究を行っている．

青木氏の貢献として，まず南極周極流の長期的な変動に関する研究が挙げられる．南極周極流域の大西洋・太平洋・インド洋の各セクターにおいて，1970年代以降，海洋亜表層が顕著に暖水化していることを世界に先駆けて見出した [業績 1-3]．さらにこの暖水化が海上風の南北シアの長期的な変化に対する海洋の力学的応答として理解出来ることを示した [3]．これにより，同時期の南半球大気環状モード (SAM) の強化及び偏西風帯の極向き移動と対応した大気成層圏から海洋におよぶ鉛直結合変動が形成されることを示唆した．また南極大陸沿岸では，10-100日程度の季節内周期帯において，大気環状モードと同期して，沿岸水位がいつせいに上下する変動現象を見出した [4]．この変動は，強い西風偏差によって北向きのエクマンドリフトが生じ，南極周辺で表層水の発散をもたらすことと密接に関係している．

青木氏はまた海洋深層循環に関連して，南極海・オーストラリア南極海盆の南極底層水がここ 40 年以上にわたって淡水化傾向にあり，近年さらにそれが加速していることを世界で初めて見出した [5-7]．「南極底層水の低塩化」は，IPCC 第 5 次評価報告書でも大きく取り上げられている．原因として，西南極氷床の流出加速に伴うその融解水の増加が考えられ，長期データの解析から，上述の「外洋での亜表層の暖水化」とリンクして西南極沿岸海洋にも暖水化が生じ，氷床融解に対する熱的強制力が強まっていることを示した [8]．一方で，表層水塊の低塩化も捉え，氷床起源水の増加と降水量の増加という 2 要因が海洋淡水化に関係する可能性を示した [7]．このような淡水循環の変化の理解には，陸氷融解と降水の定量的分別が不可欠である．青木氏は，それに有効な海水および降水の酸素同位体データの全南極海からの収集分析センターの役割を担い，現在その解析を精力的に進めている [9]．

上記以外にも，南大洋インド洋セクターを中心として様々な時空間スケールでの海洋構造の解明に加え [10-16]，氷の存在のために現場観測が困難な氷海域において，それを克服するための新たな海洋観測技術の開発にも積極的に取り組んできた．GPS による

鉛直測位の海水位観測に対する応用 [17], 氷河下の海洋観測による氷河底海洋への熱や生物のアクセスの確認 [18], 係留型に改良した中層フロートによる定点プロフィール観測への活用 [19] など, 測地学や氷河氷床学など異分野を結びつけた新しい観測手法の開発に貢献してきた。

青木氏は iAnZONe (SCOR), CLIVAR (WCRP), AGCS (SCAR) といった南大洋に関する研究組織に参画して国際的な連携をはかりつつ, 日本の南大洋観測を積極的に推進してきた。上記の南大洋長期変動に関する業績に基づき, IPCC の第 5 次評価報告書では第一部会第 3 章 (観測 : 海洋) の全 14 名の統合・主執筆者の中で, 日本からただ一人の主執筆者を務めた [20]。現在は, 日本南極地域観測の第 9 期重点研究観測プロジェクト「氷床・海水縁辺域の総合観測から迫る大気-氷床-海洋の相互作用」の代表を務め, 南極沿岸域における海洋や大気, 海水, 氷河の分野横断観測研究を中心的に推進している。

このように, 青木氏は南大洋域における大気変動や水循環変動と密接に関連した海洋・気候変動の実態解明に大きく貢献するとともに, 研究コミュニティの確立に尽力してきた。

以上の理由により, 日本気象学会は青木 茂氏に 2017 年度堀内賞を贈呈するものである。

主な論文リスト

1. Aoki, S., 1997: Trends and interannual variability of surface layer temperature in the Indian sector of the Southern Ocean observed by Japanese Antarctic Research Expeditions. *J. Oceanogr.*, 53, 623-631.
2. Aoki, S., M. Yoritaka and A. Masuyama, 2003: Multidecadal warming of subsurface temperature in the Indian sector of the Southern Ocean. *J. Geophys. Res.*, 108, doi:10.1029/2000JC000307.
3. Aoki, S., G. Mizuta, H. Sasaki, Y. Sasai, S. R. Rintoul and N. L. Bindoff, 2015: Atlantic-Pacific asymmetry of subsurface temperature change and frontal response of the Antarctic Circumpolar Current for the recent three decades. *J. Oceanogr.*, 71, doi:10.1007/s10872-015-0284-6.
4. Aoki, S., 2002: Coherent sea level response to the Antarctic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, 29, doi:10.1029/2002GL015733.
5. Aoki, S., S. R. Rintoul, S. Ushio, S. Watanabe and N. L. Bindoff, 2005: Freshening of the Adelie Land Bottom Water near 140°E. *Geophys. Res. Lett.*, 32, doi:10.1029/2005GL024246.
6. Shimada, K., S. Aoki, K. I. Ohshima and S. R. Rintoul, 2012: Influence of Ross Sea Bottom Water changes on the warming and freshening of the Antarctic Bottom Water in the Australian-Antarctic Basin. *Ocean Sci.*, 8, doi:10.5194/os-8-419-2012.
7. Aoki, S., Y. Kitade, K. Shimada, K. I. Ohshima, T. Tamura, C. C. Bajish, M. Moteki and S. R. Rintoul, 2013: Widespread freshening in the seasonal ice zone near 140°E off the Adelie Land Coast, Antarctica, from 1994 to 2012. *J. Geophys. Res.*, 118, doi:10.1002/2013JC009009.
8. Schmidko, S., K. J. Heywood, A. F. Thompson and S. Aoki, 2014: Multi-decadal warming of Antarctic waters. *Science*, 346, 1227-1231.
9. Nakamura, K., S. Aoki, K. Yoshimura and N. Kurita, 2014: Distribution of oxygen isotope ratio

- of precipitation in the Atlantic-Indian sectors of the Southern Ocean. SOLA, 10, 154-157.
10. Aoki, S., N. L. Bindoff and J. A. Church, 2005: Interdecadal water mass changes in the Southern Ocean between 30°E and 160°E. *Geophys. Res. Lett.*, 32, doi:10.1029/2004GL022220.
 11. Aoki, S. and K. Akitomo, 2007: Observations of small-scale disturbances of the Subantarctic Front south of Australia. *Deep-Sea Res. I*, 54, 320-339.
 12. Aoki, S., D. Fukai, T. Hirawake, S. Ushio, S. R. Rintoul, H. Hasumoto, T. Ishimaru, H. Sasaki, T. Kagimoto, Y. Sasai and H. Mitsudera, 2007: A series of cyclonic eddies in the Antarctic Divergence off Adelie Coast. *J. Geophys. Res.*, 112, doi:10.1029/2006JC003712.
 13. Aoki, S., M. Hariyama, H. Mitsudera, H. Sasaki and Y. Sasai, 2007: Formation regions of Subantarctic Mode Water detected by OFES and Argo profiling floats. *Geophys. Res. Lett.*, 34, doi:10.1029/2007GL029828.
 14. Aoki, S., N. Fujii, S. Ushio, Y. Yoshikawa, S. Watanabe, G. Mizuta, Y. Fukamachi and M. Wakatsuchi, 2008: Deep western boundary current and southern frontal systems of the Antarctic Circumpolar Current southeast of the Kerguelen Plateau. *J. Geophys. Res.*, 113, doi:10.1029/2007JC004627.
 15. Fukamachi, Y., S. R. Rintoul, J. A. Church, S. Aoki, S. Sokolov, M. A. Rosenberg and M. Wakatsuchi, 2010: Strong export of Antarctic Bottom Water east of the Kerguelen Plateau. *Nat. Geosci.*, 3, 327-331.
 16. Ohshima, K. I., Y. Fukamachi, G. D. Williams, S. Nihashi, F. Roquet, Y. Kitade, T. Tamura, D. Hirano, L. Herraiz-Borreguero, I. Field, M. Hindell, S. Aoki and M. Wakatsuchi, 2013: Antarctic Bottom Water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley Polynya. *Nat. Geosci.*, 6, 235-240.
 17. Aoki, S., T. Ozawa, K. Doi and K. Shibuya, 2000: GPS observation of the sea level variation in Lutzow-Holm Bay, Antarctica. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 2285-2288.
 18. Sugiyama, S., T. Sawagaki, T. Fukuda and S. Aoki, 2014: Active water exchange and life near the grounding line of an Antarctic outlet glacier. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 399, 52-60.
 19. 伊藤進一, 有馬正和, 市川雅明, 青木 茂, 奥西 武, 笥 茂穂, 長谷川大介, 和川拓, 安田一郎, 田中雄大, 黒田 寛, 清水勇吾, 2016: 水中グライダーによる沿岸海洋観測の可能性 . *沿岸海洋研究*, 53, 125-133.
 20. Rhein, M., S. R. Rintoul, S. Aoki, E. Campos, D. Chambers, R. A. Feely, S. Gulev, G. C. Johnson, S. A. Josey, A. Kostianoy, C. Mauritzen, D. Roemmich, L. D. Talley and F. Wang, 2013: Observations: Ocean. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 1535pp.