

日本気象学会 2015 年度堀内賞

受賞者：川村賢二（国立極地研究所）

研究業績：極域氷床コア及びフィルン空気を基にした過去の大気組成・気候の復元と変動メカニズムの研究

選定理由：古気候・古環境を復元し解釈することは地球システムの理解にとって不可欠であり、氷床コアを用いた研究は国際的に大きな注目を集めている。川村賢二氏は、極域で採取された氷床コアや氷床上部のフィルン層に含まれる空気を分析することにより、過去の大気組成や気候変動に関して広範な研究を実施してきた。まず、高度な計測法を確立し、南極のドームふじ深層氷床コアやドーム C 深層氷床コア、グリーンランドのノースグリッップ深層氷床コアなど多くのコアについて分析を行った。これらの分析を基にして数十年前から 80 万年前にわたる温室効果気体の濃度や同位体比、 N_2 の $\delta^{15}N$ 、 O_2/N_2 比、空気含有量等の変動を復元するとともに、気候変動と温室効果気体との関連を明らかにし、新たな解釈を与えた [業績 8,13,14,15,17]。

川村氏は、得られたデータを詳細に解析して古気候学や古海洋学、雪氷学等に関する新たな提案や仮説検証を行うなど、学際的研究も推進した。例えば、ドームふじ氷床コアの O_2/N_2 比と掘削現場での日射量変動との比較からコアの年代が決定できることを新たに提案し、大きな困難となっていた深層コアの年代決定の精度を飛躍的に向上させた [9]。これにより氷期-間氷期サイクルに関するミランコビッチ理論の検証が可能となり、同理論を支持する結果を得て氷期-間氷期研究の潮流を大きく変えた。その後、この成果を基に気候・氷床モデルとの連携研究を進展させ、氷期-間氷期サイクルのシミュレーションに大きく貢献した [4]。

さらに、川村氏は N_2 や希ガスの同位体比を利用してフィルンにおける気体の分別や氷床への取り込み過程を明らかにし、大気組成復元を高度化する研究を行った。例えば、氷床中の空気は周囲の氷よりも新しく、その年代差はフィルンの厚さによって変化することが知られているが、フィルン圧密モデルが予測する氷期におけるフィルンの厚さは、フィルン内での重力分離を表す N_2 の $\delta^{15}N$ から期待される値と大きく異なることを見いだした [11]。また、分子拡散係数が異なる N_2 、Ar、Kr、Xe の重力分離の差がフィルン内の対流の深さによって変化することを理論的に示し、手法によるフィルンの厚さの違いがフィルン内の深い対流によるものであれば、その証拠を氷床コア中の気体成分から得られることを明らかにした。同時に、実際に Kr と Xe の同位体比の精密測定法を確立し、現在のフィルン空気を分析して理論を検証した後 [3]、ドームふじコアの分析を実施し、ドームふじ地点では氷期に深い対流混合が発達していなかったことを確認した。さらに、多くの地点で採取されたフィルン空気を分析し、対流の深さと風速や密度等の気象・雪氷学的要素との関連を調べるとともに、過去数十年の大気組成の復元を行った [10, 12, 16]。

上記の一連の研究と並行して、過去の Kr と Xe の大気中濃度を復元するという新たな課題にも取り組み、南極やグリーンランドの深層氷床コアを分析し、両要素の海水への

溶解度の温度依存性を利用して最終氷期最盛期から現在までの 2 万年以上にわたる平均海水温を推定した。また、Kr/Ar 比や Xe/Ar 比を分析し、グリーンランド氷床の表面融解が最終間氷期に頻繁に生じていたという事実を明らかにした [1, 5]。川村氏はさらに、氷床コア研究分野の国際連携や海水準研究、古海洋学、古地磁気学、地球化学などの周辺分野との連携も重視し、多様な共同研究を推進してきた [2, 6, 7]。

以上で述べたように、川村氏は氷床コアとフィルンの気体解析に軸足を置き、古気候学、古海洋学、雪氷学、第四紀学を含む学際的領域において最先端レベルの研究を遂行し、国際的に高く評価される優れた業績を数多く上げている。

以上の理由により、日本気象学会は川村賢二氏に 2015 年度堀内賞を贈呈するものである。

主な論文リスト

1. Orsi, A. J., K. Kawamura, J. M. Fegyveresi, M. A. Headly, R. B. Alley and J. P. Severinghaus, 2015: Differentiating bubble-free layers from melt layers in ice cores using noble gases. *J. Glaciol.*, **61**, 585-594.
2. Sigl, M., J. R. McConnell, M. Toohey, M. Curran, S. B. Das, R. Edwards, E. Isaksson, K. Kawamura, S. Kipfstuhl, K. Krüger, L. Layman, O. J. Maselli, Y. Motizuki, H. Motoyama, D. R. Pasteris and M. Severi, 2014: Insights from Antarctica on volcanic forcing during the common era. *Nature Clim. Change*, **4**, 693-697.
3. Kawamura, K., J. P. Severinghaus, M. R. Albert, Z. R. Courville, M. A. Fahnestock, T. Scambos, E. Shields and C. A. Shuman, 2013: Kinetic fractionation of gases by deep air convection in polar firn. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 11141-11155.
4. Abe-Ouchi, A., F. Saito, K. Kawamura, M. E. Raymo, J. Okuno, K. Takahashi and H. Blatter, 2013: Insolation-driven 100,000-year glacial cycles and hysteresis of ice-sheet volume. *Nature*, **500**, 190-193.
5. NEEM Community Members (133 authors in alphabetical order including K. Kawamura), 2013: Eemian interglacial reconstructed from a Greenland folded ice core. *Nature*, **493**, 489-494.
6. Suganuma, Y., Y. Yokoyama, T. Yamazaki, K. Kawamura, C. S. Horng and H. Matsuzaki, 2010: Be-10 evidence for delayed acquisition of remanent magnetization in marine sediments: Implication for a new age for the Matuyama-Brunhes boundary. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **296**, 443-450.
7. PALeo SEA level working group (PALSEA) (32 authors in alphabetical order including K. Kawamura), 2010: The sea-level conundrum: Case studies from palaeo-archives. *J. Quat. Sci.*, **25**, 19-25.
8. Lüthi, D., M. Le Floch, B. Bereiter, T. Blunier, J. M. Barnola, U. Siegenthaler, D. Raynaud, J. Jouzel, H. Fischer, K. Kawamura and T. F. Stocker, 2008: High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present. *Nature*, **453**, 379-382.
9. Kawamura, K., F. Parrenin, L. Lisiecki, R. Uemura, F. Vimeux, J. P. Severinghaus, M. A.

- Hutterli, T. Nakazawa, S. Aoki, J. Jouzel, M. E. Raymo, K. Matsumoto, H. Nakata, H. Motoyama, S. Fujita, K. Goto-Azuma, Y. Fujii and O. Watanabe, 2007: Northern Hemisphere forcing of climatic cycles in Antarctica over the past 360,000 years. *Nature*, **448**, 912-916.
10. Ishijima, K., S. Sugawara, K. Kawamura, G. Hashida, S. Morimoto, S. Murayama, S. Aoki and T. Nakazawa, 2007: Temporal variations of the atmospheric nitrous oxide concentration and its $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ for the latter half of the 20th century reconstructed from firn air analyses. *J. Geophys. Res.*, **112**, D03305, doi:10.1029/2006JD007208.
 11. Landais, A., J. M. Barnola, K. Kawamura, N. Caillon, M. Delmotte, T. Van Ommen, G. Dreyfus, J. Jouzel, V. Masson-Delmotte, B. Minster, J. Freitag, M. Leuenberger, J. Schwander, C. Huber, D. Etheridge and V. Morgan, 2006: Firn-air delta N-15 in modern polar sites and glacial-interglacial ice: a model-data mismatch during glacial periods in Antarctica?. *Quat. Sci. Rev.*, **25**, 49-62.
 12. Kawamura, K., J. P. Severinghaus, S. Ishidoya, S. Sugawara, G. Hashida, H. Motoyama, Y. Fujii, S. Aoki and T. Nakazawa, 2006: Convective mixing of air in firn at four polar sites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **244**, 672-682.
 13. Spahni, R., J. Chappellaz, T. F. Stocker, L. Loulergue, G. Hausammann, K. Kawamura, J. Fluckiger, J. Schwander, D. Raynaud, V. Masson-Delmotte and J. Jouzel, 2005: Atmospheric methane and nitrous oxide of the late Pleistocene from Antarctic ice cores. *Science*, **310**, 1317-1321.
 14. Siegenthaler, U., E. Monnin, K. Kawamura, R. Spahni, J. Schwander, B. Stauffer, T. F. Stocker, J. M. Barnola and H. Fischer, 2005: Supporting evidence from the EPICA Dronning Maud Land ice core for atmospheric CO_2 changes during the past millennium. *Tellus*, **57B**, 51-57.
 15. Kawamura, K., T. Nakazawa, S. Aoki, S. Sugawara, Y. Fujii and O. Watanabe, 2003: Atmospheric CO_2 variations over the last three glacial-interglacial climatic cycles deduced from the Dome Fuji deep ice core, Antarctica using a wet extraction technique. *Tellus*, **55B**, 126-137.
 16. Sugawara, S., K. Kawamura, S. Aoki, T. Nakazawa and G. Hashida, 2003: Reconstruction of past variations of delta ^{13}C in atmospheric CO_2 from its vertical distribution observed in the firn at Dome Fuji, Antarctica. *Tellus*, **55B**, 159-169.
 17. Kawamura, K., T. Nakazawa, T. Machida, S. Morimoto, S. Aoki, M. Ishizawa, Y. Fujii and O. Watanabe, 2000: Variations of the carbon isotopic ratio in atmospheric CO_2 over the last 250 years recorded in an ice core from H15, Antarctica. *Polar Meteor. Glaciol.*, **14**, 47-57.

日本気象学会 2015 年度堀内賞

受賞者：井口俊夫（情報通信研究機構）

研究業績：衛星搭載降雨レーダによる降雨観測手法の開拓

選定理由：衛星による雲・降雨観測は、1960 年代に衛星搭載カメラを用いて地球規模の雲パターンが観測されたことをきっかけとして可視・赤外放射計による観測手法が開発され、現在は静止軌道上の気象衛星として実用運用されている。一方で降水については、降水粒子に感度のあるマイクロ波電波による観測が必要とされてきた。1978 年に打ち上げられ、衛星搭載マイクロ波センサの大きなステップアップをなした SEASAT にはマイクロ波放射計(ESMR)が搭載され、マイクロ波電波での降雨分布観測の可能性が実証された。しかし、マイクロ波放射計では特に海上での降雨分布はわかるものの量的な不確定性が大きく、そのために衛星搭載の降雨レーダが必須であるとされ、それが熱帯降雨観測衛星(Tropical Rainfall Measuring Mission: TRMM)につながった。

井口俊夫氏は TRMM の計画に関わり衛星搭載の降雨レーダによる降雨観測手法の開発に大きな寄与をした。衛星からの降雨観測では降雨レーダが必須のセンサと認識されてきたが、センサとしての制約の一つに周波数の問題があった。地上降雨レーダでは 2GHz 帯や 5GHz 帯、10GHz 帯の電波が使用されるが、TRMM の降雨レーダ(PR)では必要なピクセルサイズを実現するために 14GHz という周波数が採用されている。この周波数を利用した場合、強い降雨では降雨減衰が顕著となり散乱電波の受信強度の降雨減衰補正が必要となる。井口氏の顕著な成果の一つはこの降雨減衰補正法の開発にある。

降雨減衰補正にはいくつかの方法があるが、TRMM PR で特に開発された方法に表面参照法(SRT)がある [業績 2]。衛星搭載降雨レーダでは上空から降雨を観測するため、地面または海面からの強い散乱波が入ってきて、これは降雨観測という観点からは地面クラッタとして邪魔となる一方、降雨域においてその強度は降雨減衰があるため小さくなる。この降雨減衰量は降雨域内での総降雨減衰量を与えることになり、PR による降雨強度推定の向上に大きく寄与する。井口氏は TRMM PR の降雨強度推定アルゴリズムの開発・向上に一貫して努力し、従来知られていた降雨減衰補正法や SRT の混合、また Bayesian 的考えを取り入れより誤差の少ないアルゴリズムを開発した [1, 6]。さらに PR の直下点と走査端では電波入射角が異なることの影響、対流性降雨と層状性降雨との差異による雨滴粒径分布と降雨強度推定の差異の検討、観測ピクセル内での降雨の非一様性の影響 [4]、2001 年の TRMM 衛星の高度変更の影響 [3, 5]、など搭載降雨レーダに特有の様々な問題にアタックし解決に導いた。

このような努力により、現在、PR のデータは降雨に関する標準データとして使用され、他のマイクロ波放射計の降雨推定においても PR のデータは参照データとして重要な役割を果たしている。井口氏の成果は PR による降雨鉛直構造観測の信頼性を向上させる基礎となり、これにより、降水システムの 3 次元構造が全球規模で把握することが可能となって世界の降水システムの理解が大きく進んだ。TRMM PR のデータが使われる時には常に井口氏の研究業績が参照され、PR のアルゴリズムに関する井口氏の最初

の論文が決まって引用されている。2014 年 2 月には全球降水観測計画(Global Precipitation Measurement: GPM)の主衛星が種子島宇宙センターから打ち上げられたが、この主衛星には我が国が開発した二周波降水レーダ(DPR)が搭載されている。井口氏はこの DPR による降水推定アルゴリズムの開発を主導し [7, 8, 9], さらに日米共同開発チームの主査として活躍している。

以上の理由により、日本気象学会は井口俊夫氏に 2015 年度堀内賞を贈呈するものである。

主な論文リスト

1. Iguchi, T., T. Kozu, R. Meneghini, J. Awaka and K. Okamoto, 2000: Rain-profiling algorithm for the TRMM precipitation radar. *J. Appl. Meteor.*, **39**, 2038-2052.
2. Meneghini, R., T. Iguchi, T. Kozu, L. Liao, K. Okamoto, J. A. Jones and J. Kwiatkowski, 2000: Use of the surface reference technique for path attenuation estimation from the TRMM Precipitation radar. *J. Appl. Meteor.*, **39**, 2053-2070.
3. Takahashi, N. and T. Iguchi, 2004: Estimation and correction of beam mismatch of the precipitation radar after an orbit boost of the Tropical Rainfall Measuring Mission satellite. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **42**, 2362-2369.
4. Takahashi, N., H. Hanado and T. Iguchi, 2006: Estimation of path-integrated attenuation and its nonuniformity from TRMM/PR range profile data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **44**, 3276-3283.
5. Shimizu, S., R. Oki, T. Tagawa, T. Iguchi and M. Hirose, 2009: Evaluation of the effects of the orbit boost of the TRMM satellite on PR rain estimates. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87**, 83-92.
6. Iguchi, T., T. Kozu, J. Kwiatkowski, R. Meneghini, J. Awaka and K. Okamoto, 2009: Uncertainties in the rain profiling algorithm for the TRMM precipitation radar. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87**, 1-30.
7. Seto, S. and T. Iguchi, 2011: Applicability of the iterative backward retrieval method for the GPM dual-frequency precipitation radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **49**, 1827-1838.
8. Seto, S., T. Iguchi and T. Oki, 2013: The basic performance of a precipitation retrieval algorithm for the Global Precipitation Measurement Mission's single/dual-frequency radar measurements. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **12**, 5239-5251.
9. Seto, S. and T. Iguchi, 2015: Intercomparison of attenuation correction methods for the GPM dual-frequency precipitation radar. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **32**, 915-926.