

中央アジアキルギス天山山脈グリゴリア氷帽アイスコアから復元した雪氷藻類の経年変動

Reconstruction of snow algal variations from an ice core drilled on an ice cap in Kyrgyz Tien Shan

竹内 望^{1*}, 本多 愛実¹, 藤田 耕史², 岡本 祥子⁴, 直木 和弘³, Vladimir Aizen⁵

Nozomu Takeuchi^{1*}, Megumi Honda¹, Koji Fujita², Sachiko Okamoto⁴, Kazuhiro Naoki³, Vladimir Aizen⁵

¹ 千葉大学, ² 名古屋大学, ³ Jaxa, ⁴ 理化学研究所, ⁵ アイダホ大学

¹ Chiba University, ² Nagoya University, ³ Jaxa, ⁴ Riken, ⁵ University of Idaho

氷河の表面には、雪氷藻類と呼ばれる低温環境に適応した特殊な光合成微生物が生息している。雪氷藻類のバイオマスや群集構造は、氷河上の日射や融解量といった氷河の表面状態や雪氷藻類が栄養塩としているダスト粒子の供給といった栄養条件によって変化することが知られている。過去の環境や気候を明らかにする手段として氷河から掘削されるアイスコアにも、雪氷藻類が含まれていることが最近明らかになってきた。このアイスコア中の雪氷藻類のバイオマスや群集構造を調べることで、過去の藻類の繁殖量を復元できるだけでなく、藻類の繁殖に関わる環境条件を明らかにすることができるかもしれない。本研究では、中央アジア天山山脈のグリゴリア氷帽で掘削されたアイスコア中の雪氷藻類のバイオマスおよび群集構造の過去の経年変動を復元し、その繁殖に関わる要因を明らかにすることを目的とした。

蛍光顕微鏡による分析の結果、このアイスコアには、糸状シアノバクテリアが3種、単細胞シアノバクテリアが1種、緑藻が1種の計5種の藻類が保存されていることがわかった。分析を行った上部64mに相当する235年間の藻類の経年変動を求めた結果、藻類のバイオマスや群集構造は年によって変化していることがわかった。藻類バイオマスは、特に1960年以降はそれ以前に比べて顕著に高くなっていた。藻類の群集構造の経年変動から、単細胞シアノバクテリアと緑藻aが優占種であり、それぞれの割合は年により変化していたことがわかった。1770年代から1880年代前半までは単細胞シアノバクテリアが優占していたが、その後徐々に緑藻aの割合が増加し、1880年代後半から1950年代後半は、緑藻aが優占していた。1960年代前半から1980年代後半までは、単細胞シアノバクテリアの割合が増加し、単細胞シアノバクテリアが優占したが、1980年代後半以降は緑藻aの割合が増加し、1990年代後半以降は再び緑藻aが優占していた。藻類の繁殖に関わる要因を明らかにするために、藻類各種のバイオマスの経年変動とアイスコア中のダスト濃度や現地の気象データを比較した結果、藻類の繁殖に関わる要因は複数あり、種によって関係する要因も異なることがわかった。特に、酸素安定同位体比、 $2\ \mu\text{m}$ 以上のダスト粒子濃度および氷帽周辺の夏期の気温は、3種の藻類すべてと正の相関があることがわかった。このことは、藻類の経年変動は氷河上の融解期間の長さ、およびダスト由来の栄養条件に強く影響を受けていることを示唆している。完新世前期に相当するアイスコア底部の分析の結果、完新世前期では藻類のバイオマスは最近200年に比べて低いことがわかった。このことは、完新世前期は藻類の繁殖は限られていたこと、近年、特に1960年以降の藻類バイオマスの増加は、過去8000年間で唯一起きた現象であることを示している。この近年の藻類の繁殖量の増加は、20世紀以降の温暖化によるものだと考えられ、現在天山の氷河表面の微生物群集には大きな変化が起きていることを示唆している。

キーワード: アイスコア, 氷河, 雪氷藻類, 微生物, 温暖化

Keywords: ice core, glacier, snow algae, microbes, climate warming

キルギス・グレゴリア氷河のアイスコア試料を用いたメタゲノム解析による古環境復元

Reconstructions of past flora using DNA analysis from ice core samples on Gregoriev Glacier, Kyrgyz Tienshan

瀬川 高弘^{1*}, 近藤伸二², 竹内 望²
Takahiro Segawa^{1*}, Shinji Kondo², Nozomu Takeuchi²

¹ 国立極地研究所 新領域融合研究センター, ² 千葉大学

¹Transdisciplinary Research Integration Center, National Institute of Polar Research, ²Chiba University

Analyses of ice cores have often been used as a means to reconstruct past environments. The species composition of the organism such as microorganism and plant in the ice cores could reflect the environmental condition at that time. Thus, organisms in ice cores could be useful to reconstruct past environments. However, analysis of the biological contents in ice cores is still highly limited.

We report results of metagenomic analyses of genomic DNA collected from the ice core sample (about 8,000 and 12,500 years old) collected on Gregoriev Glacier, Kyrgyz Tienshan. The ice core samples were melted using a device that enabled us to obtain water only from the inner portion of the cores. Complete separation of the inner and outer cores is required to avoid contamination by bacteria that can adhere to the cores during drilling and storage. We carried out taxonomic and functional binning of the metagenomic DNA by utilizing sequences generated by the 454 FLX sequencer, and attempted to reconstruct the organisms and their interactions within the community and with the environment on the sampled sites. The results implied genomic information used as an environmental marker for past environmental studies.

キーワード: アイスコア, ゲノム解析, メタゲノム解析, 古環境, 微生物

Keywords: ice core, genome analysis, metagenome, past environmental study, microorganisms

シベリア・スントルハヤタ No.31 氷河で掘削した 2 m アイスコアの花粉, 化学成分,
酸素安定同位体比, 雪氷藻類分析
Variations in pollens, dissolved ions, Oxygen isotopes, and Snow algae in a shallow ice
core of No.31 Glacier, Suntar-Kh

宮入 匡矢^{1*}, 竹内 望¹, 田中 聡太¹, 門田 勤², 白川 龍生³, 日下 稜³, Alexander Fedorov⁵, Pavel Konstantinov⁵, 高橋 修平³, 大畑 哲夫², 矢吹 裕伯², 紺屋 恵子², 榎本 浩之⁴

Masaya miyairi^{1*}, Nozomu Takeuchi¹, Sota Tanaka¹, Tsutomu Kadota², Tatsuo Shirakawa³, Ryo KUSAKA³, Alexander Fedorov⁵, Pavel Konstantinov⁵, Shuhei Takahashi³, Tetsuo Ohata², Hironori Yabuki², Keiko Konya², Hiroyuki Enomoto⁴

¹ 千葉大学, ² 独立行政法人海洋研究開発機構, ³ 北見工業大学, ⁴ 国立極地研究所, ⁵ Melnikov Permafrost Institute

¹ Chiba University, ² Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ³ Kitami Institute of Technology, ⁴ National Institute of Polar Research, ⁵ Melnikov Permafrost Institute

2012年の7月から9月にかけて、GRENE プロジェクトの雪氷研究課題の1つとしてロシアのシベリアにあるスントルハヤタ地域にある氷河で観測を行った。この地域、東シベリアは北極域では研究の空白域になっており、特に氷河の化学成分や花粉、藻類といったものを扱った研究は行われていない。アイスコアでは、花粉や化学成分は周辺の環境を復元する指標となり、この地域でより長いコアを掘削すれば、森林の増減を復元できるかもしれない。そこで本研究では、シベリアはスントルハヤタ山脈にある No.31 氷河の花粉分析による年代決定及び周辺植生の復元の可能性を検討するため、同氷河の雪氷中に含まれる花粉の種類や構成比、また年層決定の補助及びその特性を調べるため化学成分や酸素安定同位体比などを分析した。

化学成分では化学成分間の関係性をみると、Cl, Na, NH₄, K, Mg 間と NO₃, SO₄ 間に正の有意な相関がみられた。この2つの間には有意な関係がみられないことからこれらは別々の供給源からもたらされたものと考えられる。

花粉分析を行った結果、カバノキ科、マツ科、ヨモギ属の花粉が観察された。これらの構成比だと、カバノキ科が59%と最も多くを占め、マツ科が39%、ヨモギ属が2%であった。これをほかの中央アジアの氷河と比較すると構成比が大きく異なるということがわかった。

酸素同位体比や雪氷藻類は発表当日に示す。

過去4000年のグリーンランド気温変動の原因と、北半球平均気温変動へのインプリケーション

Causes of Greenland temperature variability over the past 4000 years: Implications for Northern Hemispheric temperature

小端 拓郎^{1*}, 川村賢二¹, 東久美子¹, Jason Box², Chao-Chao Gao³, 仲江川敏之⁴

Takuro Kobashi^{1*}, Kenji Kawamura¹, Kumiko Azuma¹, Jason Box², Chao-Chao Gao³, Toshiyuki Nakaegawa⁴

¹ 国立極地研究所, ² バード極地研究所, ³ Zhejiang University, ⁴ 気象研究所

¹National Institute of Polar Research, ²Byrd Polar Research Center, ³Zhejiang University, ⁴Meteorological Research Institute

A new Greenland temperature record reconstructed from argon and nitrogen isotopes from trapped air in a GISP2 ice core, provides high resolution (less than 20 years) and precise annual average temperature estimates for the past 4000 years. Due to tight age controls and abundant paleoclimatic information from the ice core, the temperature record provides an exceptional opportunity to investigate the late Holocene climate in a multidecadal to millennial time scale. To investigate causes of Greenland temperature variability over the past 4000 years, we calculated high latitude (70 to 80N) temperature change using a one dimensional energy balance model with reconstructed climate forcings including orbital, solar, volcanic, and greenhouse gas forcings. Greenland temperature was calculated from the high latitude temperature, considering Greenland negative temperature responses to solar variability due to associated changes in atmospheric and oceanic circulations. The calculated Greenland temperature was significantly correlated with the ice core derived Greenland temperatures with the 97 percent confidence level. Therefore, the past variability of climate forcings can explain at least 10 percent of the multidecadal to millennial variability in Greenland temperature over the past 4000 years. An average temperature trend for the Northern Hemisphere (NH) over the past 4000 years was also inferred from the ice core derived Greenland temperatures. Lines of evidence indicate that the current decadal average temperature of NH is likely warmer than at any time over the past 4000 years. Sequential cooling events starting around 800 B.C.E. (the 2.8ka event), which were induced by several large volcanic eruptions as well as low solar activity, had similar magnitude with the Little Ice Age cooling.

キーワード: グリーンランド, 気温, 古気候, 気候変動, 氷床コア

Keywords: Greenland, Temperature, Paleoclimate, Climate change, Ice core

グリーンランド NEEM 氷床コアによる最終間氷期の環境復元 Climate and environment in north Greenland during the last interglacial reconstructed from the NEEM ice core

東 久美子^{1*}, 東信彦², 平林幹啓¹, 川村賢二¹, 倉元隆之³, 宮本淳⁴, 植竹淳¹

Kumiko Goto-Azuma^{1*}, Nobuhiko Azuma², Motohiro Hirabayashi¹, Kenji Kawamura¹, Takayuki Kuramoto³, Atsushi Miyamoto⁴, Jun Uetake¹

¹ 国立極地研究所, ² 長岡技術科学大学, ³ 信州大学, ⁴ 北海道大学

¹National Institute of Polar Research, ²Nagaoka University of Technology, ³Shinshu University, ⁴Hokkaido University

2008年～2012年にかけて実施された北グリーンランド氷床深層掘削計画 (North Greenland Eemian Ice Drilling: NEEM 計画) は、デンマークをリーダーとして14カ国が参加する国際共同計画で、岩盤まで達する2540mの氷床コアの掘削に成功した。NEEM計画開始時の予想に反し、NEEMでは岩盤付近で氷の層が褶曲していたため、現在から最終氷期に至るまでの連続した氷を得ることができなかった。そこで、NEEMコアの酸素同位体比や空気の成分の分析結果を、グリーンランドの他の地点や南極で掘削された氷床コアの分析結果と比較することにより、褶曲した氷の各層の年代を決定した。そのようにして、NEEMコアから得られたデータを年代順のデータとしてつなぎあわせた結果、エーム間氷期と呼ばれる最終間氷期(13万年前～11万5千年前)の大部分は連続した層として保存されていることが明らかになった。NEEMコアの分析により、最終間氷期の気候・環境をほぼ完全に復元することができ、以下の知見が得られた。

北グリーンランドでは、最終間氷期が始まったばかりの12万6千年前頃が最も温暖で、気温が現在よりも約 8 ± 4 高かったが、その後、気温は徐々に低下した。12万8千年前と12万2千年前の間の6千年間に北グリーンランドの氷床の厚さは 400 ± 250 m減少した。また、12万2千年前には氷床表面高度が現在よりも 130 ± 300 m低下していた。12万7千年前から11万8千年前には、現在では殆ど融雪が生じない北グリーンランド内陸部でも、2012年の7月と同様、夏に氷床表面で融解が生じていた。

日本は、現在、NEEMコアの気体分析、化学分析、物理分析、微生物分析を実施している。NEEMコアの分析により、現在から最終間氷期に至るまでの気候・環境変動の詳細が明らかになれば、地球温暖化に伴う将来のグリーンランドの気候や氷床の変動の予測に不可欠な情報を得ることができると期待される。

キーワード: グリーンランド, NEEM, 最終間氷期, 氷床コア, 気候・環境

Keywords: Greenland, NEEM, last interglacial, ice core, climate and environment

氷床コアに含まれる微量火山灰の磁気的手法による非破壊検出 Non-destructive magnetic detection of thin ash layers in ice cores

小田 啓邦^{1*}, 宮城 磯治¹, 河合 淳², 菅沼 悠介³, 船木 實³
Hirokuni Oda^{1*}, Isoji MIYAGI¹, Jun Kawai², Yusuke Suganuma³, Minoru Funaki³

¹ 産業技術総合研究所地質情報研究部門, ² 金沢工業大学先端電子技術応用研究所, ³ 国立極地研究所地圏研究グループ
¹Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, ²Applied Electronics Laboratory, Kanazawa Institute of Technology, ³Geoscience Group, National Institute of Polar Research

We will make a presentation on the results of non-destructive magnetic detection of ash layers in ice core samples with an LTS-SQUID gradiometer developed for non-destructive evaluation. The LTS-SQUID gradiometer have a planar pickup coil with 1.5 mm x 1.5 mm area and the baseline of 3 mm. Volcanic ash sample collected from 2008 eruption of Sakurajima volcano at Sakurajima and AT tephra sample collected in Hokkaido were used to imitate ash layers in ice cores. Both of the model ice core samples gave reasonable signals by artificial magnetization. Preliminary estimate of the detection limit for the current system and configuration is of the order of $\sim 1 \times 10^{-4}$ A/m. The sensitivity is very much enhanced when the magnetic sensor is lowered just above the model ice cores. High sensitivity non-destructive magnetic detection of ash layers will be an important method to identify stratigraphic horizons of volcanic activities combined with electrical conductivity signals related to sulfate supplied at the time of volcanic eruptions.

キーワード: 氷床コア, 火山灰, 非破壊測定, SQUID グラジオメータ, 磁性鉱物, 年代モデル
Keywords: ice core, tephra, nondestructive measurement, SQUID gradiometer, magnetic mineral, age model

二酸化硫黄光励起反応を用いて、気候変動に影響を与える火山噴火を特定する SO₂ photoexcitation mechanism links sulfur MIF in polar sulfate to climate-impacting volcanism

服部 祥平^{1*}, ヨハン シュミット², マシュー ジョンソン², ダニエラチェ セバスチアン³, 山田 明憲⁴, 上野 雄一郎⁵, 吉田 尚弘¹
Shohei Hattori^{1*}, Johan A. Schmidt², Matthew S. Johnson², Sebastian Danielache³, Akinori Yamada⁴, Yuichiro Ueno⁵, Naohiro Yoshida¹

¹ 東工大 総理工 化学環境, ² コペンハーゲン大学 化学科, ³ 上智大学, ⁴ 東京大学 地球惑星科学科専攻, ⁵ 東工大 理工 地球惑星

¹Department of Environmental Chemistry and Engineering, Tokyo Institute of Technology, ²University of Copenhagen, ³Sophia University, ⁴Department of Earth & Planetary Science, University of Tokyo, ⁵Department of Earth & Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

Natural climate variation such as that due to volcanoes is the basis for identifying anthropogenic climate change. However, knowledge of the history of volcanic activity is inadequate, in particular concerning the explosivity of specific events. Stable sulfur isotope abundances contain additional information and recent studies show a correlation between volcanic plumes that reach the stratosphere and mass-independent anomalies in sulfur isotopes in glacial sulfate. We describe a new mechanism, photoexcitation of SO₂, links the two yielding a useful metric of explosivity of historic volcanic events. A plume model of SO₂ to sulfate conversion was constructed including photochemistry, entrainment of background air and sulfate deposition. Isotopologue-specific photoexcitation rates were calculated based on the UV absorption cross sections of ³²SO₂, ³²SO₂, ³²SO₂ and ³²SO₂ from 250 to 320 nm. The model demonstrates that UV photoexcitation is enhanced by altitude while mass-dependent oxidation such as SO₂ + OH is suppressed by in situ plume chemistry, allowing the production and preservation of a mass-independent sulfur isotope anomaly in the sulfate product. The model accounts for the amplitude, phases and time development of Delta³³S / delta³⁴S and Delta³⁶S / Delta³³S found in glacial samples. For the first time we are able to identify the process controlling mass-independent sulfur isotope anomalies in the modern atmosphere. This mechanism is the basis of identifying the magnitude of historic volcanic events.

キーワード: 成層圏硫酸エアロゾル, 地球寒冷化, 大規模火山噴火, 硫黄同位対比, 質量非依存同位体分別, 大気化学

南極内陸における過去 30 万年の硫酸塩エアロゾルと気温のカップリング Sulfate-climate coupling over the past 300,000 years in inland Antarctica

飯塚 芳徳^{1*}, 植村 立², 本山秀明³, 鈴木利孝⁴, 三宅隆之⁵, 平林幹啓³, 本堂武夫¹

Yoshinori Iizuka^{1*}, Ryu Uemura², MOTOYAMA, Hideaki³, SUZUKI, Toshitaka⁴, MIYAKE, Takayuki⁵, HIRABAYASHI, Motohiro³, HONDOH, Takeo¹

¹ 北海道大学低温科学研究所, ² 琉球大学理学部, ³ 国立極地研究所, ⁴ 山形大学理学部, ⁵ 滋賀県立大学

¹Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, ²Department of Chemistry, Biology and Marine Science, Faculty of Science, University of the Ryukyus, ³National Institute of Polar Research, ⁴Department of Earth and Environmental Sciences, Faculty of Science, Yamagata University, ⁵School of Environmental Science, The University of Shiga Prefecture

吸湿性で比較的粒径の大きい硫酸塩粒子と硫酸が付着したダストなどの硫酸塩関連エアロゾルは、雲の凝結核として働き、太陽光散乱の増加をもたらすことで、地球の気候を寒冷化させる作用をもつ。氷期-間氷期気温変動における硫酸塩エアロゾルの証拠は極域の氷床コアに残されている可能性があるが、氷床コアを融解する従来の分析手法からは、硫酸イオンとしての証拠しか得られず、それは液体の硫酸と固体の硫酸塩の両者を含んでいる。本発表では、南極内陸のドームふじ氷床コアから得られた、過去 30 万年にわたる固体の硫酸塩および硫酸が付着したダストフラックスを復元した。その結果、最終氷期において全ダストのフラックスがかなり増加したにもかかわらず、氷期、間氷期を通じて、硫酸が付着したダストのフラックスはほとんど一定だったことがわかった。他方、硫酸塩のフラックスは気温と逆の相関をもち、硫酸塩粒子と気温の気候学的なカップリングの存在を示唆している。たとえば、最終氷期最盛期の硫酸塩のフラックスの平均は、1 年間で単位面積あたり 5.78mg となり、完新世の値のほぼ 2 倍である。近年の関係を過去の氷床コアの記録に適用するという相当な不確実性のある推算ではあるが、この解析から、氷期から間氷期にかけて起こった硫酸塩の減少が、雲の寿命とアルベドに対するエアロゾルの間接効果を減少させ、南極域における 0.1 から 5K の温暖化をもたらした可能性が示された。

キーワード: 硫酸塩エアロゾル, 雲凝結核, 極域アイスコア, 氷昇華装置

Keywords: sulphate aerosols, cloud condensation nuclei, polar ice core, ice sublimation method

南極ドームふじ氷床コア中の宇宙線生成核種 ^{10}Be を用いた Blake エクスカーションの復元

Reconstruction of Blake excursion using the cosmogenic radio nuclide Beryllium-10 in Antarctic Dome Fuji ice core

恒川 綸大^{1*}, 横山 祐典¹, 高橋 理美¹, 宮入 陽介¹, 阿瀬 貴博², 堀内 一穂³, 松崎 浩之¹, 本山 秀明⁴

Rindai TSUNEKAWA^{1*}, YOKOYAMA, Yusuke¹, TAKAHASHI, Satomi¹, MIYAIRI, Yousuke¹, AZE, Takahiro², HORIUCHI, Kazuho³, MATSUZAKI, Hiroyuki¹, MOTOYAMA, Hideaki⁴

¹ 東京大学, ² 東京工業大学, ³ 弘前大学, ⁴ 国立極地研究所

¹The University of Tokyo, ²Tokyo Institute of Technology, ³Hirosaki University, ⁴National Institute of Polar Research

An important development in the field of geomagnetism is the recognition of excursions that serve as chronostratigraphic tools for the dating and correlation of marine and lacustrine sediment cores. Here, we reconstruct the Blake excursion from 127ka to 101ka by analyzing ^{10}Be in the second Dome Fuji deep ice core. We focus attention on the Blake excursion because it occurs during Marine Isotope Stage (MIS) 5, during the last interglaciation, beyond the range of radiocarbon dating. ^{10}Be and other cosmogenic radionuclides, such as ^{14}C , ^{26}Al , and ^{36}Cl are good proxies for geomagnetic field intensity because atmospheric production increases during periods of low intensity during excursions, and ^{10}Be is particularly well suited due to its long half life, high production rate, and well understood fallout process. While the accumulation of ^{10}Be in sediments is complicated due to enrichment from sources other than direct atmospheric fallout, polar ice cores are remarkable archives of ^{10}Be , especially those from Antarctica, which is isolated from other continents. Ice cores drilled at Dome Fuji also have the advantage of a well dated chronology using the O_2/N_2 ratios (Kawamura, et al., 2007). Results indicate there are five discrete peaks in ^{10}Be flux during the Blake excursion that will allow export of the Dome Fuji chronology to the MIS5 intervals of sediment cores.

キーワード: 氷床コア, 宇宙線生成核種, Blake エクスカーション, ドームふじ

Keywords: ice core, cosmogenic radio nuclide, Blake excursion, Dome Fuji

南極ドームふじ南 10 km 地点掘削 (2010年) 浅層コアにおける 硝酸塩同位体比の測定

Measurement of nitrogen and oxygen isotope ratios of nitrate in a shallow ice core drilled in the vicinity of Dome Fuji

岡本 祥子^{1*}, 高橋 和也¹, 本山 秀明², 眞壁 明子³, 木庭 啓介³, 望月 優子¹

Sachiko Okamoto^{1*}, Kazuya Takahashi¹, Hedeaki Motoyama², Akiko Makabe³, Keisuke Koba³, Yuko Motizuki¹

¹ 理化学研究所仁科加速器研究センター, ² 国立極地研究所, ³ 東京農工大学農学部

¹RIKEN Nishina Center, ²National Institute of Polar Research, ³Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology

過去の太陽活動の変動の復元は、天文学的にも地球科学的にも重要である。アイスコアには、気候変動のようなさまざまな地球の歴史に加え、天文学的なイベントも保存されていると考えられる。これまでの研究によって、南極で掘削されたアイスコアの硝酸イオン濃度が太陽活動の指標となりうる事が報告されている (e.g. *Traversi et al.*, 2012)。そこで、我々は、成層圏での光化学反応による同位体分別効果が反映されていると考えられる硝酸塩の窒素・酸素安定同位体比に着目し、分析を行った。

本研究では、2010年に南極ドームふじ基地南 10 km の地点で掘削された浅層コアにおいて、硝酸イオン濃度のスパイクとその周辺部の窒素・酸素安定同位体比の測定を行った。化学物質が成層圏から直接輸送されるドームふじは、成層圏での大気反応研究には理想的な場所であると考えられている。測定には、脱窒菌 (*Pseudomonas aureofaciens*) を用いて硝酸を一酸化二窒素に還元し、これをパージ・アンド・トラップ方式で凝縮し、測定を行う脱窒菌法 (*Casciotti et al.*, 2002) を用いた。

窒素・酸素同位体比は、硝酸イオン濃度に比べ明瞭な変動を示した。窒素安定同位体比は、ドームC基地周辺のピットで観測された値と同じような幅を示し、窒素・酸素同位体比の挙動は、硝酸イオンスパイクによって異なっていた。先行研究によって、窒素同位体比は NO_x 起源、酸素同位体比は大気中で NO_x から硝酸が生成される経路に依存することがわかっており (e.g. *Hastings et al.*, 2003)、成層圏での化学反応を合わせて考えることで、硝酸イオンでは見えなかった太陽活動変動解明の可能性が示唆された。

References

Traversi, R., I. G. Usoskin, S. K. Solanki, S. Becagli, M. Frezzotti, M. Severi, B. Stenni, R. Udisti, Nitrate in Polar Ice: A New Tracer of Solar Variability, *Sol. Phys.*, 280(1), 237-254, 2012.

Casciotti, K. L., D. M. Sigman, M. G. Hastings, J. K. Bohlke, and A. Hilkert, Measurement of the oxygen isotopic composition of nitrate in seawater and freshwater using the denitrifier method, *Anal. Chem.*, 74(19), 4905-4912, 2002.

Hastings, M. G., D. M. Sigman, and F. Lipschultz, Isotopic evidence for source changes of nitrate in rain at Bermuda, *J. Geophys. Res.*, 108(D24), 2003.

キーワード: アイスコア, 硝酸塩同位体, 太陽活動

Keywords: ice core, nitrate isotopes, solar activity

データ同化手法を用いた南極ドームふじアイスコア年代決定モデルの開発 [A new dating method for Dome Fuji ice core using data assimilation]

鈴木 香寿恵^{1*}, 川村 賢二², 中野 慎也¹, 長尾 大道¹, 阿部 彩子³, 齋藤 冬樹⁴, 樋口 知之¹

Kazue Suzuki^{1*}, Kenji Kawamura², Shin'ya Nakano¹, Hiromichi Nagao¹, Ayako Abe-Ouchi³, Fuyuki SAITO⁴, Tomoyuki Higuchi¹

¹ 統計数理研究所, ² 国立極地研究所, ³ 東京大学大気海洋研究所, ⁴ 独立行政法人海洋研究開発機構

¹The Institute of Statistical Mathematics, ²National Institute of Polar Research, ³Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, ⁴Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

本研究では、これまで Parrenin et al. (2004, 2007) で用いられてきた氷床流動および圧密モデルと観測値にドームふじ第二期氷床コア中の O₂/N₂ より得られた高解像度の tie points データを用いて、新たなデータ同化手法を用いたアイスコア年代決定モデルの開発を試みた。今回はカルマンフィルターを用い、Parrenin et al. (2004, 2007) とは異なり、年代自体を直接補正する手法を取り入れたモデルを構築した。結果として、Parrenin et al. (2007) によって得られた連続的な年代およびそれを決定する最適化されたパラメータと、相違ない結果が得られたが、本手法では計算コストを大幅に削減出来た。今後は別のデータ同化手法を適用した、より詳細な年代補正を行うことが可能となるアイスコア年代決定モデルを構築する予定である。

キーワード: データ同化, アイスコア

Keywords: Data Assimilation, Ice Core

An updated chronology and inference of climate evolution for the GISP2 ice core from Summit, Greenland

An updated chronology and inference of climate evolution for the GISP2 ice core from Summit, Greenland

Jessica M. D. Lundin¹, Ralf Greve^{2*}, Sune O. Rasmussen³, Inger K. Seierstad³, Edwin D. Waddington¹

Jessica M. D. Lundin¹, Ralf Greve^{2*}, Sune O. Rasmussen³, Inger K. Seierstad³, Edwin D. Waddington¹

¹Department of Earth and Space Sciences, University of Washington, Seattle, USA, ²Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan, ³Centre for Ice and Climate, University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark

¹Department of Earth and Space Sciences, University of Washington, Seattle, USA, ²Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan, ³Centre for Ice and Climate, University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark

Accurate chronologies are paramount for properly assessing the timing of past climate events. The GISP2 ice core has been updated to the Greenland Ice Core Chronology (GICC05) for 840 sparse volcanic tie points. Using the thickness evolution for the GISP2 site from the three-dimensional dynamic/thermodynamic ice sheet model SICOPOLIS (sicopolis.greweb.net), we determine a more continuous GISP2 chronology. The associated accumulation-rate history is determined for a suite of thickness reconstructions. The implications of this work include aligning the GISP2 ice core chronology and climate record with other Greenland ice cores (NEEM, NGRIP, and GRIP), improving our understanding of the Arctic climate from a suite of deep ice cores. Improving the GISP2 Greenland chronology has implications for both polar regions. Antarctic ice cores (Byrd, Siple) have been dated from the GISP2 record through inflection points in the well-mixed methane record.

キーワード: Greenland, Ice sheet, Ice core, Climate change, Modeling

Keywords: Greenland, Ice sheet, Ice core, Climate change, Modeling

風応力に対して氷床の地形、アルベド効果を与える影響

The topographic and albedo effect of ice sheets on surface wind stress with implications for glacial ocean circulation

シェリフ多田野 サム^{1*}, 阿部彩子¹, 吉森正和¹, 陳 永利¹

Sam Sherrifftadano^{1*}, Abe-Ouchi, Ayako¹, Yoshimori, Masakazu¹, Chan, Wing-Le¹

¹ 東京大学大気海洋研究所, ² 海洋研究開発機構

¹ Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo, ² Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

In the previous presentation of Abe-Ouchi et al. (2012, JpGU), they pointed out that the Atlantic meridional overturning circulation (AMOC) was strongly controlled by the ice sheet and greenhouse gases (GHGs). By comparing the results from a coupled atmosphere ocean general circulation model (AOGCM) with and without glacial ice sheets, they showed that the ice sheets had a large influence on the glacial AMOC. The process behind this is not fully understood, but may be related to atmospheric circulation change due to the presence of huge ice sheets. Some studies have shown that during the Last Glacial Maximum (LGM), the atmospheric circulation was very different to that of today mainly due to the presence of the huge ice sheet, especially in the North Atlantic. These atmospheric circulation differences would cause some changes in wind stress and should therefore affect AMOC. Thus in this study, we investigate the potential/possible influence of the ice sheets on glacial AMOC through wind stress. Here we use an atmosphere general circulation model (AGCM), which is the atmospheric part of MIROC climate model for sensitivity experiments. As ice sheet has two effects (topography effect and albedo effect) on atmospheric circulation, we separate each effect as well. In the North Atlantic, consistent with previous studies, differences between the wind stresses of the modern climate and LGM were mainly explained by the presence of the LGM ice sheets, i.e., Laurentide and Fennoscandian ice sheets. Anomalies induced by the ice sheets were a southward wind stress anomaly in the Greenland Sea and the Baffin Bay, and anti-cyclonic wind stress anomaly at mid and low latitudes. It was also found that at high latitudes, the topography effect was dominant and the albedo effect played a secondary role. On the other hand, at mid-latitudes, the albedo effect was dominant and the topography effect played an opposite role compared to the total ice sheet effect. In the zonal mean, there were also net westward and eastward anomalies at mid and low latitudes, respectively.

Keywords: Ice sheet, LGM, wind stress, AMOC

接地線の後退に対する南極氷床の応答のシミュレーション modelled response of the volume and thickness of the Antarctic ice sheets to transient retreat of the grounding lines

小長谷 貴志^{1*}, 阿部彩子¹, 齋藤冬樹²
Takashi Obase^{1*}, ABE-OUCHI, Ayako¹, SAITO, Fuyuki²

¹ 東京大学大気海洋研究所, ² 海洋研究開発機構

¹AORI, University of Tokyo, ²JAMSTEC

The volume of Antarctic ice sheet is about 60 meters equivalent sea level.

besides of climate change, interaction between ice shelves and ocean may be significant to Antarctic ice sheet.

The grounding line shift is a important factor in considering interaction between ice shelf and ocean. The position of grounding line is thought to be governed by ice flow and mass balance between ice shelves and ocean. Last retreat of grounding line (20ka to present) is reconstructed from marine data.

To simulate evolution of Antarctic ice sheet, explicit treatment of grounding line movement also should be included. However, simulation of transient behavior of the grounding line is still difficult using a numerical large-area ice sheet model. Instead, grounding line is prescribed as a boundary condition.

According to Saito and Abe-Ouchi (2010), grounding line position is a most important factor of Antarctic Ice Volume while climate factor is relatively small.

In this study, Antarctic ice sheet volume at prescribed grounding line patterns and Antarctic ice sheet volume change since last glacial maximum by retreat of grounding line is tested. Results show that Antarctic ice sheet volume has high sensitivity to grounding line in a term of deglaciation.

キーワード: 南極, 氷床, 棚氷, 接地線, 海水準, 棚氷海洋間相互作用

Keywords: Antarctica, Ice sheet, Ice shelf, Grounding Line, Sea level, Ice shelf-Ocean Interaction

ドームふじ氷床コアにおける金属組成が示す気候変動 The relationship between metal composition and climate change derived from the Dome Fuji ice core

佐藤 弘康^{1*}, 鈴木 利孝², 本山 秀明³
Hironori Sato^{1*}, Toshitaka Suzuki², Hideaki Motoyama³

¹ 山形大学大学院理工学研究科, ² 山形大学理学部, ³ 国立極地研究所

¹Yamagata University Graduate School of Science and Engineering, ²Faculty of Science, Yamagata University, ³National Institute of Polar Research

南極氷床中には積雪と共に降下・堆積したエアロゾルが保存されている。エアロゾルは地球上の様々な場所から供給されたものであり、その化学組成は供給源の環境変化を反映するため、氷床コア中の粒状物は地球環境変動を評価するための重要な情報源となる。これまで、ドームふじ基地で掘削された3035mの深層氷コアについても、様々な物理・化学的特性に関する研究が進められてきた。また、粒状物に含まれる金属成分の多くは難溶性であり、その重要性が指摘されている。しかし、金属成分に関しては溶存成分の解析が中心に進められており、難溶性の粒子態金属成分に関する研究は十分に行われていない。そこで、本研究ではマイクロ波酸分解法を用いて粒状物を全分解した後、金属全濃度を測定し、環境変動を復元することを目的とした。

化学組成解析の結果、多くの金属成分の組成は氷期には平均地殻組成に近く、間氷期には平均海水組成に近くなるという結果が得られた。また、金属成分は(1)平均地殻組成と平均海水組成の間を安定して推移するグループ、(2)変動範囲が広く不安定な挙動を示すグループに分類でき、供給源の変遷や変質に対する応答が異なることが示唆された。さらに、SrとBaの組成は約34万年を境に変動パターンが大きく異なっていることが判明した。本報告ではこれら金属組成変動と環境変動の関係について議論する。

キーワード: 氷床コア, エアロゾル, 気候変動
Keywords: ice core, aerosol, climate change

SP2 を用いたグリーンランド NEEM における積雪中ブラックカーボンの測定 SP2 analysis of black carbon in snow at NEEM, Greenland

小川 佳美^{1*}, 東久美子¹, Remi Dallmayr¹, 近藤豊², 大畑祥², 茂木信宏², Martin Irwin², 平林幹啓¹, 榎本浩之¹, 本山秀明¹, J. P. Steffensen³, Dorthe Dahl-Jensen³
Yoshimi Ogawa^{1*}, GOTO-AZUMA, Kumiko¹, DALLMAYR, Remi¹, KONDO, Yutaka², Ohata, Sho², MOTEKI, Nobuhiro², IRWIN, Martin², HIRABAYASHI, Motohiro¹, ENOMOTO, Hiroyuki¹, MOTOYAMA, Hideaki¹, STEFFENESSEN, J.P.³, DAHL-JENSEN, Dorthe³

¹ 国立極地研究所, ² 東京大学大学院理学系研究科, ³ コペンハーゲン大学

¹National Institute of Polar Research, ²Graduate School of Science, University of Tokyo, ³University of Copenhagen

2010年にグリーンランド NEEM のピットで採取された積雪中のブラックカーボン (BC) の分析を行った。ピットの深さは 3.4m で 3-7cm 毎に 1 試料採取した。BC 濃度の分析には SP2(Single Particle Soot Photometer) を使い、Ohata et al. (2011) の方法を応用した。融かした雪試料中の BC 粒子は超音波ネブライザーで微小な液滴として噴霧され、その後加熱によって揮発せず残る BC 粒子が SP2 に導入される。SP2 はレーザー誘起白熱法を利用した BC 測定装置で、レーザーを照射して個々の BC 粒子が発する白熱光を検出し、その強度から各 BC 粒子の質量が測定される。白熱光シグナルのキャリブレーションには、fullerene soot を用いた。また、5 種類の粒径の異なる PSLs(polystyrene latex spheres) を使いネブライザー粒子化効率を測定し、ネブライザーでのエアロゾル化中の BC 粒子損失の影響を補正した。BC 濃度の季節変動を水安定同位体比との比較により評価し、またイオン成分の濃度変動との比較を行った。

キーワード: ブラックカーボン, NEEM, グリーンランド

Keywords: black carbon, NEEM, Greenland

極域フィロムにおける対流混合による気体の動的分別 Kinetic fractionation of gases by deep air convection in polar firn

川村 賢二^{1*}, Jeffrey P. Severinghaus²
Kenji Kawamura^{1*}, Jeffrey P. Severinghaus²

¹ 国立極地研究所, ² スクリップス海洋研究所

¹National Institute of Polar Research, ²Scripps Institution of Oceanography

A previously unrecognized type of gas fractionation occurs in firn air columns subjected to intense convection. It is a form of kinetic fractionation that depends on the fact that different gases have different molecular diffusivities. Convective mixing continually disturbs diffusive equilibrium, and gases diffuse back toward diffusive equilibrium under the influence of gravity and thermal gradients. In near-surface firn where convection and diffusion compete as gas transport mechanisms, slow-diffusing gases such as krypton and xenon are more heavily impacted by convection than fast diffusing gases such as nitrogen and argon, and the signals are preserved in deep firn and ice. We show a simple theory that predicts this kinetic effect, and the theory is confirmed by observations of stable gas isotopes from the Megadunes field site on the East Antarctic plateau. Numerical simulations confirm the effect's magnitude at this site. A main purpose of this work is to support the development of a proxy indicator of past convection in firn, for use in ice-core gas records. To this aim, we also show with the simulations that the magnitude of kinetic effect is fairly insensitive to the exact profile of convective strength, if the overall thickness of convective zone is kept constant.

NEEM フィルン中での氷と空隙の異方性構造の発達 Evolution of the anisotropic structure of ice and pore spaces in firn at NEEM

藤田 秀二^{1*}, 東 久美子¹, 平林 幹啓¹
Shuji Fujita^{1*}, Kumiko Goto-Azuma¹, Motohiro Hirabayashi¹

¹ 情報・システム研究機構 国立極地研究所

¹National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems

The evolution of the structure of firn core recovered at NEEM camp was investigated in order to improve our understanding of firn densification and bubble formation processes. The relative dielectric permittivities in both the vertical and horizontal planes were measured at ~35 GHz. The results were compared with those of firn at Dome Fuji in East Antarctica. Results are summarized as follows. Down to ~20 m, permittivity exhibited a positive correlation with the strength of dielectric anisotropy along the vertical. In contrast, the correlation is negative in deeper firn. This is a feature of the density crossover. We found that the crossover density is almost the same at NEEM and at Dome Fuji, confirming earlier studies of the polar firn. A remarkable difference between two sites is that strength of dielectric anisotropy at NEEM is only two thirds of that at Dome Fuji. In addition, negative correlation between permittivity and dielectric anisotropy is much more developed at NEEM. This fact suggests that the 3-D vertical anisotropic structure decreases rapidly in firn at NEEM and that limited layers deform rapidly by some factor. In contrast, at Dome Fuji, 3-D vertical anisotropic structure is preserved much longer period of time than NEEM. We speculate that at NEEM impurity plays a major role for selective deformation and that at Dome Fuji texture plays a major role for selective deformation.

キーワード: グリーンランド, フィルン, 変態, 厚密, NEEM, 氷床
Keywords: Greenland, ice sheet, firn, metamorphism, densification, NEEM

氷床の限界厚と氷底湖 Limit of the ice-sheet thickness and the subglacial lake

成田 豊^{1*}

Yutaka Narita^{1*}

¹ 応用地質株式会社

¹OYO Corporation

雪氷が累積すると氷床が発達し、自重によって次第に沈降して氷が塑性変形し流動する。厚い氷床の底部には水が存在し、そこでの氷は凍結・融解・再凍結という活動サイクルがあるといわれており、ここでは、氷床底部の高圧下での基本構造と氷床の限界厚さについて考察した。

1) 氷底湖の形成

NASAのICESat衛星の氷透過レーダーにより、東南極氷床下の広範囲にわたって氷底湖が多数発見され、水が存在していることが確認されている。氷底湖の水温は-2~-3程度と考えられ、氷床荷重による高圧のため液体を保っており、氷の圧力融解点と温度勾配が交わる場所の温度であると考えられる。

氷底湖で最も大きいポストーク湖は、氷床下約3,800mにあり、総面積は14,000km²(オンタリオ湖に匹敵する大きさ)で、湖の深度は平均125mである。ポストーク基地における氷床深層掘削においては、2012年に3,768mまで掘削し氷底湖に到達したと報告されている。

2) 氷の高圧下での転移

氷床は降雪による上載荷重により、積雪内部で圧力が徐々に増していき、この圧力は南極氷床の最下部では30MPa程度に達する。雪粒子は高い荷重(応力)のため塑性変形を起こして圧密し、粒子間の空隙を埋めるように変形する。この圧密の過程で地表の大気が雪粒子間に取り込まれ、深度200m前後で孤立気泡となる(Ice-Gas領域)。

これより深い深度領域では、この孤立気泡が圧力により徐々に収縮していき深度1,000m程度に達すると、この高圧の空気泡は氷と反応を起こし新しい結晶を構成するようになりクラスレート・ハイドレート(水和物)が発生する(Ice-Hydrate領域)。このクラスレート水和物は、水分子が作る籠型構造(クラスレート構造)の中に気体分子(ゲスト分子)を取り込んだ独特な構造をもつ結晶であり、気体と氷(水)の共存状態において、ある圧力(解離圧)を超えると相転移を起こし生成される(本堂・内田、1992)。

さらに氷床深度が増加して氷床内の圧力が高くなると氷温が徐々に上昇して、氷が融解して水ハイドレートが生成される領域に達する(Water-Hydrate領域)ことで、氷床底部が圧力融解の状態となり水が発生すると考えられる。

3) 氷の破壊強度と限界氷床厚

氷の圧力と歪の関係については、氷になんらかの力が加わって破壊現象が起こるとき、破壊が起こるまでの過程(歪速度)の違いによって脆性破壊・延性破壊に変化する。静水圧下での氷の加圧実験から、加圧静水圧を増大すると破壊強度は増大するが、30MPaと55MPaの静水圧を比べると30MPaの方が55MPaの破壊強度より大きくなり、静水圧と破壊強度に逆相関が生じて、破壊は延性的になり、みかけの破壊強度は小さくなる(水野、1993)。このことから、破壊強度の最大は35MPa程度(氷床厚で4,100m)であると見込まれ、4,000m程度を超えた氷床に積雪荷重がかかると氷床底部の高圧部では、降伏点をすぎても脆性破壊をせず塑性的な変形をつづけていく延性的破壊が生じることになる。また、氷床底部の高圧下では温度が高くなると氷が生成され流動性が増加するため、さらに強度が低下するといえる。

南極の氷床は、過去数十万年にわたって降り積もった雪が圧密されて氷化したものであり、氷床の最大厚さは4,000m程度であるといわれている。南極での氷床掘削深の最大はポストークの約3,800mであり、氷床下にある氷底湖の深さを加えても4,000m程度である。このことから、氷床の発達には現在の最大厚さが限界であり、これ以上に氷床は発達できないと推測する。すなわち、氷床の限界厚さは4,000m程度であり、限界厚さを超えると氷床下で塑性流動が生じて氷が生成され、その跡の空間が氷底湖になると考えられる。

文献

- ・本堂武夫、内田努(1992): 極地氷床における空気包接水和物の生成過程、低温科学 物理篇、第51号、197-212。
- ・水野悠紀子(1993): 多結晶氷の圧縮強度に対する静水圧の効果、低温科学 物理篇、第52号、1-13。

キーワード: 氷床厚, 氷底湖, 圧力融解

Keywords: Ice-sheet thickness, Subglacial lake, Pressure melting