

# 気候状態と気候の安定性

## Climate state and climate stability

関 幸\*

### 1. 気候システムとは

気候システムはいくつかの要素（大気・海洋・地表・植生・雪氷など）で構成されており，それらが互いに相互作用している複雑なシステムである<sup>1)</sup>（図1）．気候システムを駆動させるのは外部強制力（例えば太陽放射，地球の軌道要素，テクトニック運動など）である．それらの入力に変化がない場合は，気候システム内の要素の相互作用は平衡状態にあり，気候は変化せずに一定の状態を保つと考えられている．気候システムへの外部強制力の入力が増加したときに，その大きさや時間に応じてこれらの要素の相互作用が変化し，気候が変化する（図1）．

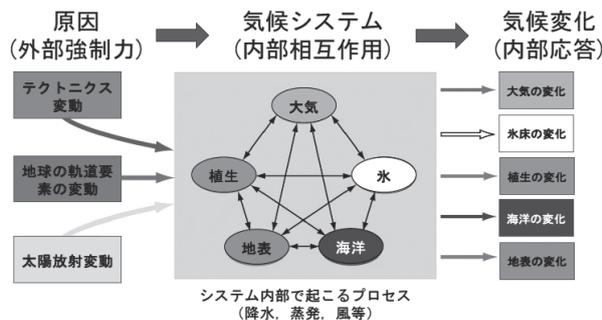


図1 地球の気候システムの概念図 (Ruddiman, 2013 の図を一部改訂)

外部強制力の変化によって引き起こされる長期的で大きな気候変動の代表的な例として，氷期—間氷期サイクルがあげられる．後期更新世（ここでは約過去80万年間の期間とする）においては，10万年周期の氷期—間氷期サイクルが卓越していたが，氷期の最盛期と間氷期の全球平均気温の差は6℃にも及んでいたと推定されている<sup>2)</sup>．この氷期—間氷期サイクルを駆動している外部強制力は地球の軌道要素（離心率，地軸の傾斜，歳差運動）であり，その周期的な変化に地球の気候システムが応答した結果

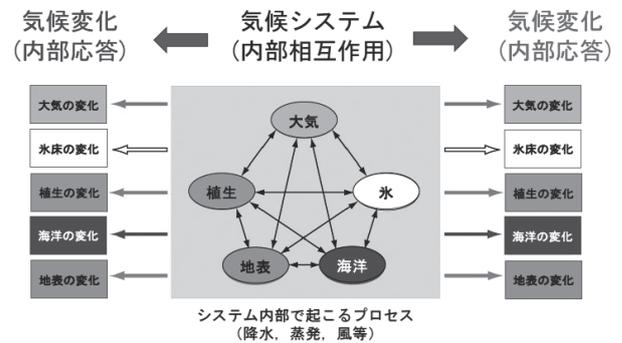


図2 気候の自励振動の概念図(参考文献<sup>1)</sup>の図を一部改訂)

と考えられている．

一方で特に外部強制力がなくても，ある気候状態から別の気候状態への移行が起きることが知られており，これは地球内部の自励振動といわれる（図2）．現在の気候状態においてはエルニーニョ南方振動や北極振動，太平洋十年規模振動などが確認されており，十年規模で振動している．

一方で，近年の気候変動（温暖化）は二酸化炭素やメタンなどの人為起源の温室効果ガス濃度の増大によるものと考えられており，気候システムへのこれらの入力に対して気候システム内部の各要

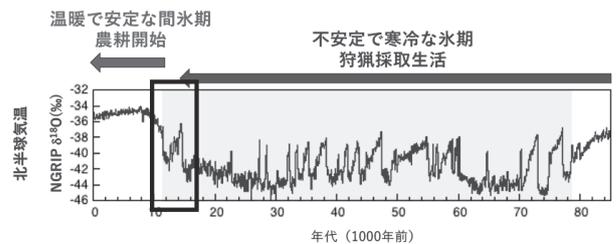


図3 過去8.5万年間におけるグリーンランド氷床コアの酸素同位体比 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) 記録 (文献<sup>3)</sup>) と人類の食料戦略の推移.  $\delta^{18}\text{O}$  は気温の指標を示し，高いほど温暖で，低いほど寒冷となる．

\* 北海道大学低温科学研究所 准教授

素がどのように相互作用し、どのくらいの速度で変化しうるのが問題となっているのが温暖化問題である。

## 2. 気候の安定性と農耕の発達

将来の気候の変化を考える上で重要な概念の一つが気候の安定性である。長期的な平均値が同じでも気候が頻繁に大きく変動するケースと、あまり変動しないケースが考えられるが、気候が不安定な場合のほうが生態系や文明に甚大な影響を与える。これは人類の食料戦略とも深く関係しており、過去の気候変動と農耕の発展の関係性からも見てとれる。図3にグリーンランド氷床コアの分析から得られた過去約12万年間の北半球高緯度の気候変動を示す<sup>3)</sup>。人類は長い間狩猟採取生活を営んできたが、約1万年前あたりから農耕を開始したことがわかっている。注目すべき点は、農耕が開始される以前の狩猟採取生活時代（最終氷期）は、気温が相対的に低かっただけでなく、気候が極めて不安定であったのに対し、農耕開始以降の気候（間氷期）は比較的温暖だけでなく、農耕に適した非常に安定していたことである（図3）。こうした気候の安定性と農耕の発達の関係は近年の詳細な研究によってさらに明確になってきている<sup>4)</sup>。

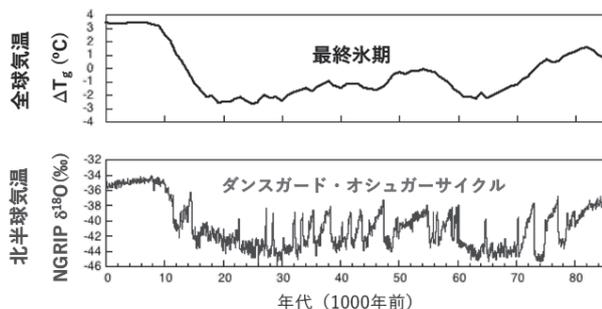


図4 過去8.5万年間における全球平均気温（文献<sup>2)</sup>）とグリーンランド氷床コアの酸素同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ ）記録（文献<sup>3)</sup>）。

## 3. 最終氷期に発生した急激な気候変動

最終氷期に繰り返し発生していた急激な気候変動は「ダンスガード・オシュガー・サイクル（DOサイクル）」と呼ばれ、その影響は全世界にわたっていたことが明らかになっている（図4）。DOサイクルの特徴として、1) 数年～数十年でグリーンランドの気温が8～16°Cの温度上昇、2) その後のゆっくりとした寒冷化の進行、3) 数十年程度で急激な寒冷化による東の間の温暖期の終焉、4) 一見周期性を持っているかのように見える、というのが挙げ

られる。また、寒冷な状態から温暖な状態への移行（ジャンプ）は、最速ではたったの数年以内で起こり<sup>5)</sup>、この気候ジャンプに伴うグリーンランドの気温変化は10°Cに及んでいたと推定されている。産業革命以降の北極圏の温暖化に伴う気温上昇が150年で2.5°C程度であることを考えると、その変化のスピードと大きさは桁違いである。

地球の気候は突然急激に大きく変わりうることを示したDOサイクルの発見により、地球の気候システムは、条件さえ揃えばこのような変動を引き起こしうる性質を備えていることが明らかになった。ではDOサイクルのような急激な気候変動はどのような条件、メカニズムで発動するのか？これまでにいくつかの仮説が提案されているが、DOサイクルは大西洋を南北方向に流れる子午面循環が突然切り替わることで引き起こされたとする説が有力である。この循環が表層は北向きに流れており、北大西洋高緯度域で沈み込んで、海の低層では南向きに流れを反転させる。この循環が活発な時は、表層流を通して低緯度の熱が効率的に北大西洋高緯度まで輸送されるため、欧州などの北半球高緯度域は温暖湿潤な気候となる。一方でこの循環が鈍化または停滞すると、低緯度から北半球への熱の輸送が大幅に減少し、北半球では寒冷化が、反対に南半球では温暖化が引き起こされる。DOサイクルではこの子午面循環の流れが急激に変化し、この海洋循環の変動が地球規模の大気循環に影響を及ぼし、その影響が全球に伝播したと考えられている。

では何が引き金となって子午面循環の流れが急激に変化するのか？それには海洋と氷床の相互作用が鍵を握るとされる。この子午面循環の原動力は表層海水の密度の変動である。表層の海水の密度は概ね水温と塩分によって決まる。北大西洋高緯度へ輸送される表層水の密度が十分に高い場合には、高緯度で沈み込みが起き、循環が維持される。しかし、大西洋へ大量の淡水が供給されるなどすると表層水の密度が低下する。それによる密度低下ある閾値を下回ると、沈み込むのに十分な密度を得られず、子午面循環が停止してしまうことがシミュレーションモデルの研究により示されている。

実は氷期には巨大な氷床が北米大陸に発達していたが、その氷床の部分的な崩壊と大西洋への流出が繰り返し発生していたことが知られている。DOサイクルは氷床崩壊などによる淡水の供給が引き起こす子午面循環の停止と突然の回復（時が経つにつれて次第に表層塩分が上昇していき、塩分の上昇が閾

値を超えると子午面循環が突然回復する) というメカニズムで発生したという仮説が有力である。

#### 4. DO サイクルの発生頻度と気候条件

さらに近年の研究により大西洋子午面循環の急激な変化が引き起こす条件が次第にわかってきた。上記のように、氷期に気候が不安定な状態に陥っていたのは、子午面循環を攪乱できるほどの量の淡水を供給可能な巨大な氷床が北半球に存在していたからという説が有力だが、子午面循環の流れが切り替わるかどうかは、ちょっとした条件の違いによることが最近の研究によって明らかになってきた<sup>6)</sup>。実は氷期でも最も寒い気候状態に達してしまえば、現在と同じように比較的安定な状態になる。DO サイクルは氷期の最も寒い時期と現在の温暖な間氷期のちょうど中間状態のときに発生頻度が増大していた(図5)。この中間的な気候状態で、大西洋子午面循環は海洋表層のわずかな塩分の攪乱に対して敏感に応答することがわかってきた。さらに、気候が安定か不安定かに影響を及ぼす要因として、全球平均気温と二酸化炭素濃度のレベルが重要であることがわかってきた<sup>6)</sup>。つまり気候状態と気候の安定性の関係性は、「氷期=不安定、間氷期=安定」といった単純なものではなく、「氷期最寒時期=安定(全球平均気温 -5℃前後、二酸化炭素濃度 200 ppm 以下)、中間状態=不安定(全球平均気温 -3℃前後、二酸化炭素濃度 220 ppm 前後)、間氷期=安定(全球平均気温現在と同等レベル、二酸化炭素濃度 260 ppm 前後)」と、気候状態に強く依存するのである(図6)。

#### 5. 将来の気候の安定性

気候の安定性は気候状態に依存し、全球平均気温と二酸化炭素濃度のレベルも重要な因子であるという発見は、未来の気候変動の予測においてある疑念を生じさせる。このまま全球平均気温と二酸化炭素濃度が上昇していった場合でも現在と同じような比較的安定した気候が維持されるのか、それとも不安定化するのかという懸念である(図2)。現在は、氷期のDO サイクルにおいて重要な働きをしたと考えられている北米大陸の巨大氷床は存在しないが、海洋表層の塩分を攪乱しうるほどの十分な淡水の塊(氷床)がグリーンランドや南極に存在している。これらの氷床は現在よりも温暖な気候状態で大規模に融解する可能性がある。実際に、産業革命前よりも+1℃温暖であった1つ前の間氷期(最終間氷期: 12-13万年前)では、西南極氷床の大部分やグリー

ンランド氷床の一部が融解していたとされ、海水準にして現在よりも数メートル以上高かったという推定がなされている<sup>7,8)</sup>(図7)。さらに、+3℃温暖であった鮮新世(300-450万年前)には、東南極氷床の一部も著しく後退し、海水準は現在よりも10-20

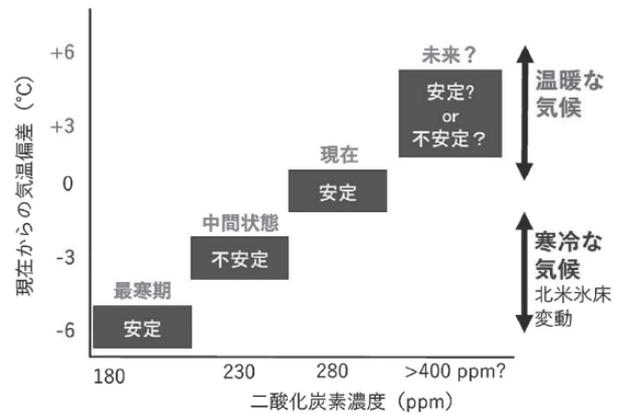


図5 現在より寒冷な気候状態(氷期など)からより温暖な気候状態にかけての全球平均気温(現在からの偏差)と二酸化炭素濃度、地球の気候の安定性との対応関係。図の右側には氷期より温暖な気候状態で変動する氷床を示してある。

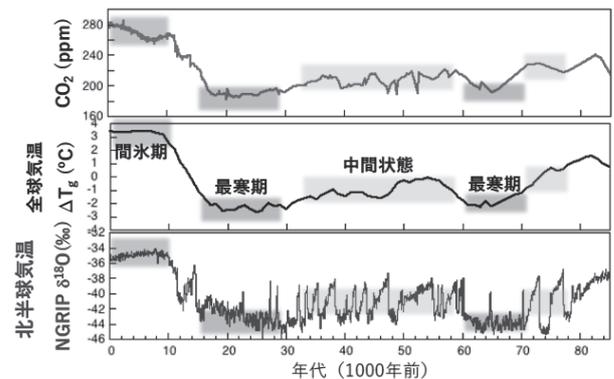


図6 過去8.5万年間における二酸化炭素濃度(文献<sup>17)</sup>、全球平均気温(文献<sup>2)</sup>)とグリーンランド氷床コアの酸素同位体比( $\delta^{18}O$ )記録(文献<sup>3)</sup>)。

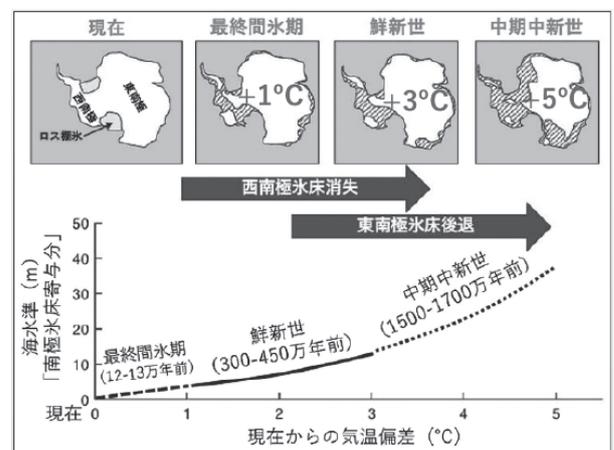


図7 過去の温暖期の南極氷床分布と全球平均気温(現在からの偏差)、海面上昇(南極氷床寄与分)の対応関係。

m 高かったと推定されている<sup>8,9)</sup> (図7). +5°C 温暖な中期中新世 (1500-1700 万年前) では東南極氷床がさらに著しく後退しており、海水準は 30 m 以上高かった可能性が指摘されている<sup>10)</sup> (図7). このように現在よりも寒冷な氷期は、北半球氷床が発達し、それがダイナミックに変動する世界であったのに対して、現在よりも温暖な気候状態では、南極氷床がダイナミックに変動する世界であった。

## 6. 南極氷床の融解

現在、グリーンランドや南極氷床の融解が加速していることが近年の観測によって明らかにされている<sup>11)</sup>. 温暖化の影響ではないかと考えられている。このうち全て融解すれば 50 m 以上海水準を上昇させるほどの淡水を保持する南極氷床に関しては、西南極氷床での融解が最も著しく進行している。また、より巨大な淡水を保持する東南極の一部 (ウイルクス海盆やオーロラ海盆など) でも近年の観測によって著しい融解が進行していることが明らかになってきた。このまま温暖化が進行した場合、南極氷床の融解がさらに加速して、海洋循環を攪乱させるほどの影響を及ぼす規模の氷床の崩壊が起きうるのか? その結果、DO サイクルに類似する急激で大きな気候ジャンプが起きうる可能性はあるのか? また、もし引き起こされるとしたら、その臨界点となる気温、二酸化炭素濃度レベルはどこにあるのか? これまでの研究により地球の気候システムが非線型性という特性を持つことが明らかになってきたことで、こうした懸念が浮かび上がってきている。

では、実際に、南極氷床の融解は、大西洋子午面循環に影響を及ぼすのだろうか。これについては、近年、南極氷床の融解が大西洋の子午面循環に影響を及ぼしていたことを示す研究が報告されている<sup>12)</sup>. この研究は氷期-間氷期サイクルに伴う大西洋子午面循環の変動に、南極氷床の変動が実質的な役割を果たしていたことを示した。また、シミュレーションモデルによる数値実験によれば、二酸化炭素濃度を増大させていった時に、やがて大西洋子午面循環が急激に鈍化するという結果が得られている<sup>13)</sup>. 一方で、南極氷床融解の将来予測シミュレーションでは、最も温暖化が進行するシナリオにおいて、300 年後に南極氷床が著しく融解し、海水準にして数メートル上昇する可能性が示されている<sup>14)</sup>. これらの研究結果は、今後、二酸化炭素濃度がさらに増大し、温暖化が進行して南極氷床が著しく融解

することで大西洋への淡水供給が増大すれば、大西洋子午面循環が突然鈍化する可能性があることを示している。従って、より温暖化した気候状態に移行すれば、DO サイクルに類維持した突然かつ急激な気候変動が起こりうる可能性は否定できない。

DO サイクルのような突然かつ急激な気候変動が起こったときに、危惧されるのは、農業生産に与える影響であると考えられる。人類は現在地上の盟主として君臨するまでに至ったが、その繁栄の基盤は「農業革命」と考えられている。現在に至る過程で文明が継続的に発展し、高度な科学文明を築けたのは、農業革命による生産効率の飛躍的な向上で得た余剰時間を、他の活動に使えたことが重要な要因であるとされる<sup>15)</sup>. しかし、現代の高度に発達した農業は安定な気候に最も適応したシステムであるため、気候の不安定化に対しては脆弱といえるだろう。従って、現在より温暖化した気候状態になった時に、気候の安定性が揺らぐ可能性があるかどうかを明らかにすることは、喫緊の課題と考えられる。

## 7. 過去の温暖期の研究

より温暖な気候状態に移行した時に気候が不安定化する可能性を検証する方法として、過去の温暖期の研究が有益である。過去の温暖な気候状態で実際に何が起こっていたのかを調べることで、温暖な気候状態で劇的な気候ジャンプが発動しうる可能性があるかどうかの知見を得ることができると期待される。過去の気候変動は、海底や湖沼堆積物、氷床などに記録されている。私はそうした柱状試料を採取し、その物性や化学的特徴を分析し、過去の環境変動を復元する研究をしている。これまでの研究によって、過去の環境を間接的に復元する様々な手法が提案されており、気候システムを構成する各要素や温度・海洋循環・氷床・二酸化炭素濃度などの変動を復元できるようになってきた。

しかしながら、DO サイクルに類する急激かつ短期間の気候変動を捉えることができるほど十分な時間解像度の気候変動の復元は、現在よりも温暖な時代ではそれほどなされていないのが現状である。それでも +1°C 温暖であった最終間氷期では太平洋子午面循環が現在の間氷期よりも不安定であり、ダイナミックに変動していた地質学的証拠が得られつつある<sup>16)</sup>. このことは、大西洋子午面循環がより温暖な気候状態では不安定化する可能性があることを示唆している。しかしながら、太平洋子午面循環を変動させた要因や、その全球的な波及効果などにつ

いてはまだよくわかっていない。さらに、より温暖な過去の温暖期における気候の安定性に関する知見はほとんどわかっていないのが現状である。特に、今より温暖な気候状態における気候の安定性を検証するうえで重要なのは、突然の気候ジャンプの要因となりうる氷床のダイナミクスの理解であると考えられる。よってグリーンランドや南極の氷床が過去の温暖期にどの程度、どのような速度で融解していたのかを詳細に明らかにすることが大事である。はたして温暖な気候状態で気候は比較的安定な状態を保つのか？それとも不安定化してしまうのか？その答えを導くため、過去の温暖期の高時間解像度の気候変動の研究が今後ますます重要となってくると思われる。

## 参考文献

- 1) W. F. Ruddiman, *Earth's Climate : Past and Future*, W. F. Ruddiman (eds.), W. F. Ruddiman Press (2013).
- 2) T. Friedrich, A. Timmermann, M. Tigchelaar, O. E. Timm, A. Ganopolski, Nonlinear climate sensitivity and its implications for future greenhouse warming, *Science Advances*, **2** (11), e1501923 (2016).
- 3) North Greenland Ice Core Project members, High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period, *Nature*, **431**, 147-151 (2004).
- 4) T. Nakagawa, P. Tarasov, R. Staff, C. B. Ramsey, M. Marshall, G. Scholaut, C. Bryant, A. Brauer, H. Lamb, T. Haraguchi, K. Gotanda, I. Kitaba, H. Kitagawa, J. van der Plicht, H. Yonenobu, T. Omori, Y. Yokoyama, R. Tada, Y. Yasuda, Suigetsu 2006 Project Members, The spatio-temporal structure of the Lateglacial to early Holocene transition reconstructed from the pollen record of Lake Suigetsu and its precise correlation with other key global archives : Implications for palaeoclimatology and archaeology, *Global and Planetary Change*, **202**, 103493, doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103493 (2021).
- 5) J. P. Steffensen, K. K. Andersen, M. Bigler, H. B. Clausen, D. Dahl-Jensen, H. Fischer, K. Goto-Azuma, M. Hansson, S. J. Johnsen, J. Jouzel, V. Masson-Delmotte, T. Popp, S. O. Rasmussen, R. Röthlisberger, U. Ruth, B. Stauffer, M.-L. Siggaard-Andersen, Á. E. Sveinbjörnsdóttir, A. Svensson, J. W. C. White, High-Resolution Greenland Ice Core Data Show Abrupt Climate Change Happens in Few Years, *Science*, **321**, 680-684, doi : 10.1126/science.1157707 (2008).
- 6) Dome Fuji Ice Core Project Members, State dependence of climatic instability over the past 720,000 years from Antarctic ice cores and climate modeling, *Science Advances*, **3** (2), e1600446, doi : 10.1126/sciadv.1600446 (2017).
- 7) M. J. O'Leary, P. J. Hearty, W. G. Thompson, M. E. Raymo, J. X. Mitrovica, J. M. Webster, Ice sheet collapse following a prolonged period of stable sea level during the last interglacial, *Nature Geoscience*, **6**, 796-800, doi : 10.1038/NGEO1890 (2013).
- 8) A. Dutton, A. E. Carlson, A. J. Long, G. A. Milne, P. U. Clark, R. DeConto, B. P. Horton, S. Rahmstorf, M. E. Raymo, Sea-level rise due to polar ice-sheet mass loss during past warm periods, *Science*, **349** (6244), aaa4019, doi : 10.1126/science.aaa4019 (2015).
- 9) E. J. Rohling, G. L. Foster, K. M. Grant, G. Marino, A. P. Roberts, M. E. Tamisiea, F. Williams, Sea-level and deep-sea-temperature variability over the past 5.3 million years, *Nature*, **508**, 477-482, doi : 10.1038/nature13230 (2014).
- 10) E. Gassona, R. M. DeConto, D. Pollard, R. H. Levy, Dynamic Antarctic ice sheet during the early to mid-Miocene, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **113**, 3459-3464, doi/10.1073/pnas.1516130113 (2016).
- 11) B. Smith, H. A. Fricker, A. S. Gardner, B. Medley, J. Nilsson, F. S. Paolo, N. Holschuh, S. Adusumilli, K. Brunt, B. Csatho, K. Harbeck, T. Markus, T. Neumann, M. R. Siegfried, H. J. Zwally, Pervasive ice sheet mass loss reflects competing ocean and atmosphere processes, *Science*, **368**, 1239-1242, doi : 10.1126/science.aaz5845 (2020).
- 12) A. Starr, I. R. Hall, S. Barker, T. Rackow, X. Zhang, S. R. Hemming, H. J. L. van der Lubbe,

- G. Knorr, M. A. Berke, G. R. Bigg, A. Cartagena-Sierra, F. J. Jiménez-Espejo, X. Gong, J. Gruetzner, N. Lathika, L. J. LeVay, R. S. Robinson, M. Ziegler, Expedition 361 Science Party, Antarctic icebergs reorganize ocean circulation during Pleistocene glacials, *Nature*, **589**, 236-241, doi.org/10.1038/s41586-020-03094-7 (2021).
- 13) W. Liu, S.-P. Xie, Z. Liu, J. Zhu, 2017, Overlooked possibility of a collapsed Atlantic Meridional Overturning Circulation in warming climate, *Science Advances*, **3** (1), e1601666, doi : 10.1126/sciadv.1601666 (2017).
- 14) IPCC, 2019 : Summary for Policymakers. In : IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. Weyer (eds.) (2019).
- 15) 中川毅, 人類と気候の10万年史 過去に何が起きたのか, これから何が起こるのか, ブルーボックス, 講談社 (2017).
- 16) E. V. Galaasen, U. S. Ninnemann, A. Kessler, N. Irvah, Y. Rosenthal, J. Tjiputra, N. Bouttes, D. M. Roche, H. (Kikki) F. Kleiven, D. A. Hodell, Interglacial instability of North Atlantic Deep Water ventilation, *Science*, **367**, 1485-1489, doi : 10.1126/science.aay6381 (2020).
- 17) U. Siegenthaler, E. Monnin, K. Kawamura, R. Spahni, J. Schwander, B. Stauffer, T. F. Stocker, J.-M. Barnola, H. Fischer, Supporting evidence from the EPICA Dronning Maud Land ice core for atmospheric CO<sub>2</sub> changes during the past millennium, *Tellus B*, **57**, 51-57 (2005).

### 著者略歴



関 宰 (セキ オサム)

2003年3月北海道大学大学院地球環境科学研究科博士(地球環境科学)取得。21世紀COE学術研究員,学振特別研究員を経て,2009年4月より現職。主に過去の気候変動の研究に関する研究に従事。