

## 過去 6,500 万年間の大気 CO<sub>2</sub> 記録を更新

～未来の気候に対する過去からの警鐘～

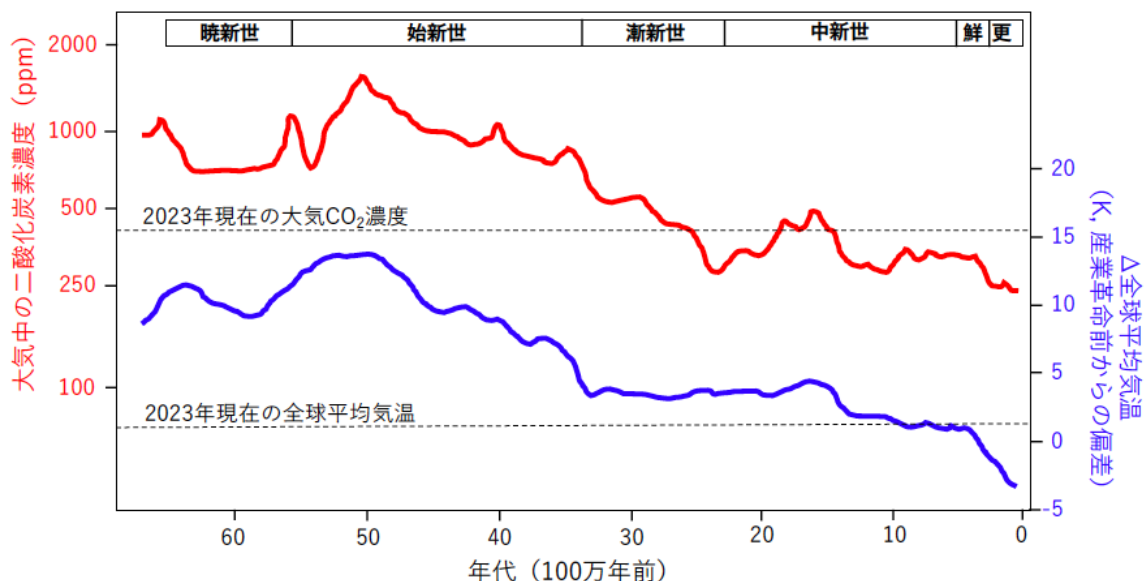
### ポイント

- ・ 新生代の大気 CO<sub>2</sub> 濃度と気温の復元記録を精査。
- ・ より信頼性の高い新生代の大気 CO<sub>2</sub> 濃度と気候の変動史を構築。
- ・ 将来の長期的な気候予測に対して鮮明な見通しを示す成果。

### 概要

世界 16 カ国の 80 人以上の研究者からなる「新生代 CO<sub>2</sub> プロキシ統合プロジェクト (CenCO<sub>2</sub>PIP)」コンソーシアム（日本からは北海道大学低温科学研究所の関 宰准教授が参加）は、これまでに報告されている新生代（過去 6,500 万年間）の気候と大気二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）濃度の復元記録を最新の知見に基づきあらゆる角度から再検証し、これまでより信頼性の高い気候と大気 CO<sub>2</sub> 濃度の変動史を描き出しました。CO<sub>2</sub> は温室効果ガスであり、現在進行中の地球温暖化の主因とされています。過去の温暖な時代における大気 CO<sub>2</sub> 濃度と気候の関係を知ることは、将来どの程度温暖化し得るのかを予測する上で重要な知見を与えてくれます。特に新生代は大部分の期間において現在よりも温暖であり、未来の温暖地球の類型とみなすことができます。この研究は、過去 6,500 万年にわたる地質学的記録を対象としていますが、現在の大気 CO<sub>2</sub> 濃度（約 420ppm）を過去の時代に照らし合わせた結果、大気 CO<sub>2</sub> 濃度が現在のレベルに達したのは、現在よりも 4～5°C 温暖であったとされる 1,400 万年前であり、従来の考えよりもはるかに昔の時代であったことが示されました。また、長期的な気候変動は温室効果ガスに非常に敏感であり、その影響は何千年にもわたって連鎖的に進行する可能性があることも明らかになりました。このように、更新された新生代の大気 CO<sub>2</sub> 濃度と気温変動記録は、地球の気候がこれからさらに温暖化する可能性を示唆する結果となりました。

なお、本研究成果は、2023 年 12 月 8 日（金）公開の Science 誌にオンライン掲載されました。



新生代（過去 6,500 万年間）の全球平均気温と大気中の二酸化炭素濃度の変化。

## 【背景】

現在進行している地球温暖化の主な原因は、産業革命以降の化石燃料の消費による大気 CO<sub>2</sub> 濃度の上昇であると考えられています。従って、今後地球の気温がどの程度変化するのは今後の大気 CO<sub>2</sub> 濃度の推移に大きく左右されると言えます。将来の気温の変化を予測する上で重要となってくるのが、「気候感度」と呼ばれる指標です。気候感度とは大気 CO<sub>2</sub> 濃度が倍増したときの気温の変化量のことです。この値が高ければ高いほど、CO<sub>2</sub> 濃度が変化した時の温度変化も大きくなります。気候科学の主流派によれば、数十年から数百年の時間スケールを考えた場合には、この値は 1.5~4.5°C と考えられています。しかし、最近のいくつかの研究は、この気候感度推定が過小評価されている可能性を示唆しています。また、気候感度は気候変化に伴い変わり得るものであることも分かってきました。気候感度は気候予測の鍵を握る指標であるため、その値を可能な限り制約することが予測精度の向上において決定的に重要です。気候感度を制約・検証する上では、実際に過去に起こった大きな気候変動における大気 CO<sub>2</sub> 濃度の変化量を調べるのが有益です。これまでも様々な手法を用いて将来の温暖地球の類型とされるような温暖な時代の大気 CO<sub>2</sub> 濃度の推定が試みられてきましたが、手法により推定値が大きく異なるなど、気候変動と大気 CO<sub>2</sub> 濃度との関係を議論するには不十分な状況でした。

## 【研究手法】

新生代の大気 CO<sub>2</sub> 濃度の記録は南極の氷床コア<sup>\*1</sup> から得られる過去 80 万年間を除いた、それ以前の大部分は地質記録となり、代理指標（プロキシ）<sup>\*2</sup> とよばれる間接的な手法を用いて復元がなされています。これまでも多種多様な手法が提案され、地質試料に適用されてきました。CenCO<sub>2</sub>PIP コンソーシアムのメンバーは、新しいデータを収集したのではなく、これまでに発表された様々な手法に基づく新生代の CO<sub>2</sub> 濃度復元記録を整理し、さらに新たに更新された知識に基づいて個々の復元記録の信頼性を3段階で評価しました。新しい知見に照らして、問題があると判断されたものを除外し、また最新の知見に基づき大気 CO<sub>2</sub> 濃度復元値の校正を行いました。

## 【研究成果】

まず研究グループは、今回更新した新生代の大気 CO<sub>2</sub> 濃度記録に基づいて、未解決の問題や定説の検証を行いました。最も古い時代である約 6,600 万年前から約 5,600 万年前までは、地球にはほとんど氷がなかったにもかかわらず、大気 CO<sub>2</sub> 濃度が比較的良かったとする推定もあったため、大気 CO<sub>2</sub> 濃度と気温の関係に疑義がありました。そこで、本研究で最も信頼性が低いと判断した推定値を除外したところ、大気 CO<sub>2</sub> 濃度は実際にはかなり高く、600~700ppm 程度であったことが示されました。

また、最も暑かった時代は約 5,000 万年前であり、その当時は大気 CO<sub>2</sub> 濃度が 1,600ppm にまで急増し、気温は現在より 12°C も高かったという、長年信じられてきた説を確認することができました。しかし、約 3,400 万年前までには、大気 CO<sub>2</sub> 濃度は十分に減少し、南極氷床が形成され始めます。その後、多少の浮き沈みはあったものの、さらに長期にわたって大気 CO<sub>2</sub> 濃度が減少し、その間には多くの現代の動植物の祖先が進化しました。このことは、大気 CO<sub>2</sub> 濃度の変動が気候だけでなく生態系にも影響を与えていることを示唆しています。

加えて、約 1,600 万年前が、大気 CO<sub>2</sub> 濃度が現在よりも常に高い約 480ppm だった最後の時期であり、1,400 万年前までには、現在の人為的なレベルである 420ppm まで下がったことが明らかになりました。大気 CO<sub>2</sub> 濃度はその後も減少を続け、約 250 万年前には約 280ppm に達し、北半球において大陸氷床の著しい発達が始まりました。40 万年前に現生人類が誕生したときには、そのレベルがそれ以下であり、250 年前に人類が大規模な大気汚染を始めるまで、その状態が続いていたことが明らかになりました。

さらに、6,600 万年間の大気 CO<sub>2</sub> 濃度と気温との関連に基づき「地球システム感度」\*<sup>3</sup>を推定したところ、大気 CO<sub>2</sub> 濃度が倍増すると、地球の気温はなんと 5~8°Cも温暖化すると見積もられました。これは 50~100 年後といった比較的近未来の気温がどうなるかを教えてくれるものではないですが、長期的にはさらに温暖化が進行し、緩慢で連鎖的な影響が何千年も続くことを意味します (図 1)。このように、今回更新された新生代の大気 CO<sub>2</sub> 濃度の記録は、地球の気候の将来に対して楽観的な見通しを与える材料とはなりません。今後も、温暖化の進行を防ぐため、何が正しい道なのかを考える必要があると言えます。

### 【今後への期待】

このプロジェクトのデータはすべてオープンなデータベースで利用可能であり、今後も随時更新されていきます。将来、研究がさらに進展することで大気 CO<sub>2</sub> 濃度の地質記録の校正が行われていけば、大気 CO<sub>2</sub> 濃度と気候の関係について、さらに信頼性の高い知見を得ることが期待されます。また、本研究結果は、今後数十年の間に何が起るかを予測しようとする気候モデル研究者にとっても有益なものであり、近未来の将来予測の精度向上にも貢献すると考えられます。

### 論文情報

論文名	Towards a Cenozoic History of Atmospheric CO <sub>2</sub> (新生代の大気中二酸化炭素濃度の変動史に向けて)
著者名	新生代 CO <sub>2</sub> プロキシ統合プロジェクト (CenCO2PIP) コンソーシアム (The Cenozoic CO <sub>2</sub> Proxy Integration Project (CenCO2PIP) Consortium) Bärbel Hönisch <sup>1</sup> , Dana L. Royer <sup>2</sup> , Daniel O. Breecker <sup>3</sup> , Pratiya J. Polissar <sup>4</sup> , Gabriel J. Bowen <sup>5</sup> , Michael J. Henehan <sup>6</sup> , Ying Cui <sup>7</sup> , Margret Steinthorsdottir <sup>8</sup> , Jennifer C. McElwain <sup>9</sup> , Matthew J. Kohn <sup>10</sup> , Ann Pearson <sup>11</sup> , Samuel R. Phelps <sup>12</sup> , Kevin T. Uno <sup>1</sup> , Andy Ridgwell <sup>13*</sup> , Eleni Anagnostou <sup>14</sup> , Jacqueline Austermann <sup>1</sup> , Marcus P. S. Badger <sup>15</sup> , Richard S. Barclay <sup>16</sup> , Peter K. Bijl <sup>17</sup> , Thomas B. Chalk <sup>18</sup> , Christopher R. Scotese <sup>19</sup> , Elwyn de la Vega <sup>20</sup> , Robert M. DeConto <sup>21</sup> , Kelsey A. Dyez <sup>22</sup> , Vicki Ferrini <sup>1</sup> , Peter J. Franks <sup>23</sup> , Claudia F. Giulivi <sup>1</sup> , Marcus Gutjahr <sup>14</sup> , Dustin T. Harper <sup>5</sup> , Laura L. Haynes <sup>24</sup> , Matthew Huber <sup>25</sup> , Kathryn E. Snell <sup>26</sup> , Benjamin A. Keisling <sup>27</sup> , Wilfried Konrad <sup>28</sup> , Tim K. Lowenstein <sup>29</sup> , Alberto Malinverno <sup>1</sup> , Maxence Guillermic <sup>30</sup> , Luz María Mejía <sup>31</sup> , Joseph N. Milligan <sup>16</sup> , John J. Morton <sup>1</sup> , Lee Nordt <sup>32</sup> , Ross Whiteford <sup>33</sup> , Anita Roth-Nebelsick <sup>34</sup> , Jeremy K. C. Rugenstein <sup>35</sup> , Morgan F. Schaller <sup>36</sup> , Nathan D. Sheldon <sup>22</sup> , Sindia Sosdian <sup>37</sup> , Elise B. Wilkes <sup>38</sup> , Caitlyn R. Witkowski <sup>6</sup> , Yi Ge Zhang <sup>39</sup> , Lloyd Anderson <sup>1</sup> , David J. Beerling <sup>40</sup> , Clara Bolton <sup>18</sup> , Thure E. Cerling <sup>5</sup> , Jennifer M. Cotton <sup>41</sup> , Jiawei Da <sup>3</sup> , Douglas D. Ekart <sup>42</sup> , Gavin L. Foster <sup>43</sup> , David R. Greenwood <sup>44</sup> , Ethan G. Hyland <sup>45</sup> , Elliot A. Jagniecki <sup>46</sup> , John P. Jasper <sup>47</sup> , Jennifer B. Kowalczyk <sup>48</sup> , Lutz Kunzmann <sup>49</sup> , Wolfram M. Kürschner <sup>50</sup> , Charles E. Lawrence <sup>48</sup> , Caroline H. Lear <sup>37</sup> , Miguel A. Martínez-Boti <sup>51</sup> , Daniel P. Maxbauer <sup>52</sup> , Paolo Montagna <sup>53</sup> , B. David A. Naafs <sup>6</sup> , James W. B. Rae <sup>33</sup> , Markus Raitzsch <sup>54</sup> , Gregory J. Retallack <sup>55</sup> , Simon J. Ring <sup>56</sup> , Osamu Seki <sup>57</sup> , Julio Sepúlveda <sup>26</sup> , Ashish Sinha <sup>58</sup> , Tekie F. Tesfamichael <sup>59</sup> , Aradhna Tripathi <sup>30</sup> , Johan van der Burgh <sup>60</sup> , Jimin Yu <sup>61</sup> , James C. Zachos <sup>62</sup> , Laiming Zhang <sup>63</sup> ( <sup>1</sup> Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University, Palisades, NY, USA. <sup>2</sup> Department of Earth and Environmental Sciences, Wesleyan University, Middletown, CT, USA. <sup>3</sup> Department of Earth And Planetary Sciences, Jackson School of Geosciences, The University of Texas at Austin, Austin, TX, USA. <sup>4</sup> Ocean Sciences

Department, University of California Santa Cruz, Santa Cruz, CA, USA. <sup>5</sup>Department of Geology and Geophysics, University of Utah, Salt Lake City, UT, USA. <sup>6</sup>School of Earth Sciences, University of Bristol, Bristol, UK. <sup>7</sup>Department of Earth and Environmental Studies, Montclair State University, Montclair, NJ, USA. <sup>8</sup>Swedish Museum of Natural History, Stockholm, Sweden. <sup>9</sup>Department of Botany, Trinity College Dublin, Dublin, Ireland. <sup>10</sup>Department of Geosciences, Boise State University, Boise, ID, USA. <sup>11</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Harvard University, Cambridge, MA, USA. <sup>12</sup>CIM Group, New York, NY, USA. <sup>13</sup>Earth and Planetary Sciences Department, University of California, Riverside, Riverside, CA, USA. <sup>14</sup>GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel, Kiel, Germany. <sup>15</sup>School of Environment, Earth and Ecosystem Sciences, The Open University, Milton Keynes, UK. <sup>16</sup>Smithsonian Institution, Washington, DC, USA. <sup>17</sup>Department of Earth Sciences, Utrecht University, Utrecht, Netherlands. <sup>18</sup>Aix Marseille University, CNRS, IRD, INRAE, CEREGE, Aix-en-Provence, France. <sup>19</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Northwestern University, Evanston, IL, USA. <sup>20</sup>Department of Geography, University of Galway, Galway, Ireland. <sup>21</sup>Department of Earth, Geographic, and Climate Sciences, University of Massachusetts, Amherst, MA, USA. <sup>22</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA. <sup>23</sup>School of Life and Environmental Sciences, The University of Sydney, Sydney, Australia. <sup>24</sup>Department of Earth Science and Geography, Vassar College, Poughkeepsie, NY, USA. <sup>25</sup>Department of Earth, Atmospheric, And Planetary Sciences, Purdue University, West Lafayette, IN, USA. <sup>26</sup>Department of Geological Sciences, University of Colorado Boulder, Boulder, CO, USA. <sup>27</sup>University of Texas Institute for Geophysics, Austin, TX, USA. <sup>28</sup>Department of Geosciences, University Of Tübingen, Tübingen, Germany. <sup>29</sup>Department of Earth Sciences, Binghamton University, Binghamton, NY, USA. <sup>30</sup>Department of Earth, Planetary, and Space Sciences, University Of California Los Angeles, Los Angeles, CA, USA. <sup>31</sup>MARUM, University of Bremen, Bremen, Germany. <sup>32</sup>Department of Geology, Baylor University, Waco, TX, USA. <sup>33</sup>School Of Earth and Environmental Sciences, University of St Andrews, St Andrews, UK. <sup>34</sup>State Museum of Natural History, Stuttgart, Germany. <sup>35</sup>Department of Geosciences, Colorado State University, Fort Collins, CO, USA. <sup>36</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, USA. <sup>37</sup>School of Earth and Ocean Sciences, Cardiff University, Cardiff, UK. <sup>38</sup>Ginkgo Bioworks, Boston, MA, USA. <sup>39</sup>Department of Oceanography, Texas A&M University, College Station, TX, USA. <sup>40</sup>Department of Animal and Plant Sciences, University of Sheffield, Sheffield, UK. <sup>41</sup>Department of Geological Science, California State University Northridge, Northridge, CA, USA. <sup>42</sup>Independent researcher, Salt Lake City, UT, USA. <sup>43</sup>School of Ocean and Earth Science, National Oceanography Centre, University of Southampton, Southampton, UK. <sup>44</sup>Department of Biology, Brandon University, Brandon, Canada. <sup>45</sup>Department of Marine, Earth, and Atmospheric Sciences, North Carolina State University, Raleigh, NC, USA. <sup>46</sup>Utah Geological Survey, Salt Lake City, UT, USA. <sup>47</sup>Molecular Isotope Technologies, LLC, Niantic, CT, USA. <sup>48</sup>Department of Earth, Environmental and Planetary Sciences, Brown University, Providence, RI, USA.

<sup>49</sup>Senckenberg Natural History Collections, Dresden, Germany. <sup>50</sup>Department of Geosciences, University of Oslo, Oslo, Norway. <sup>51</sup>EIT Urban Mobility, Barcelona, Spain. <sup>52</sup>Department of Geology, Carleton College, Northfield, MN, USA. <sup>53</sup>Institute of Polar Sciences –National Research Council, Bologna, Italy. <sup>54</sup>Dettmer Group KG, Bremen, Germany. <sup>55</sup>Department of Earth Sciences, University of Oregon, Eugene, OR, USA. <sup>56</sup>Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam, Germany. <sup>57</sup>Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan. <sup>58</sup>Department of Earth Science, California State University Dominguez Hills, Carson, CA, USA. <sup>59</sup>School of Earth Sciences, Addis Ababa University, Addis Ababa, Ethiopia. <sup>60</sup>Independent researcher, Rossum, Netherlands. <sup>61</sup>Laoshan Laboratory, Qingdao, China. <sup>62</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, University of California Santa Cruz, Santa Cruz, CA, USA. <sup>63</sup>School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing, China.)

雑誌名 Science (米科学誌)

DOI 10.1126/science.adi5177

公表日 2023年12月8日(金)(オンライン公開)

#### お問い合わせ先

北海道大学低温科学研究所 准教授 関 宰 (せきおさむ)

TEL 011-706-5504 FAX 011-706-7142 メール seki@lowtem.hokudai.ac.jp

URL [http://www.lowtem.hokudai.ac.jp/taikikankyo/seki/new%20homepage/index\\_JP.html](http://www.lowtem.hokudai.ac.jp/taikikankyo/seki/new%20homepage/index_JP.html)

#### 配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目)

TEL 011-706-2610 FAX 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

#### 【参考図】

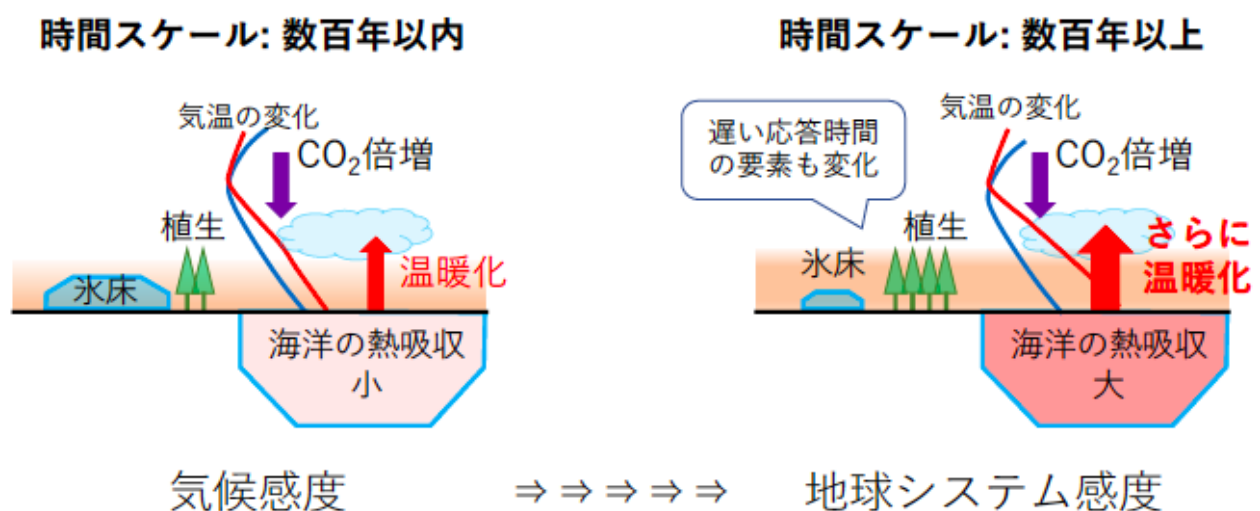


図1. 時間スケールの違いによる気候システムの応答の違い。より長期の時間スケールにおいては、遅い応答時間をもつ植生や氷床なども変化し、さらに温暖化が進行する。

**【用語解説】**

- \*1 コア … 海底や氷床から掘削された円柱状の試料。
- \*2 プロキシ … 昔の環境を復元するための間接的な指標。
- \*3 地球システム感度 … 長期的な応答時間をもつ植生や氷床などの応答まで考慮した気候感度のことで、数百年以上の時間スケールの気候変動を扱う時に重要となる指標。