

地磁気の減少による寒冷化

北場 育子
Kitaba Ikuko

地球の磁場（地磁気）が地球の気候を変えるかもしれない——半世紀以上も前に提唱された仮説が現実味を帯びたのは、1990年代後半のことだった¹⁾。H. Svensmark と E. Friis-Christensen によって、宇宙のはるか彼方からやってくる銀河宇宙線が低層雲の量を変えるとという観測結果が示されたのだ²⁾。この発見は、当時の気候変動の最大の懸念事項であった地球温暖化論に疑問を投げかけ、以後、議論的になってきた。地球内部に起源を持つ地球の磁場が宇宙のはるか彼方からやってくる銀河宇宙線の量を変え、私たちの住む地球表層の気候を変える——そんなことが本当に起こりうるのだろうか。まるでサイエンス・フィクションのように壮大な話だが、これが実際に起こるかもしれない。それを示す証拠が大阪湾の海底に眠っていた³⁾。

1. 地球の磁気シールドと宇宙線

地球には、磁場がある。現在の地球磁場は、地球の中心にS極を北、N極を南に向けて棒磁石を置いたものに例えられる（図1）。方位磁石のN極が北、S極が南を向くのは、そのためである。しかし、地球磁場は、いつもずっと同じ状態であるわけではなく、時々刻々と変化してきた。地球に磁場が誕生してから、現在に至るまで、数十億年にもわたって——。地磁気は目に見えないが、宇宙からやってくる有害な紫外線や宇宙線から私たちを守るバリアの役目をしている。しかし、このバリアの働きが弱まる時がある。地球磁場の逆転だ。過去の地

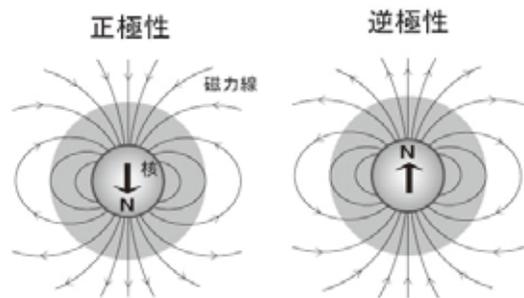


図1 地球磁場
地球磁場は、2つの極性をとる。現在は正極性期である

球には、方位磁石のN極が今とは逆の南を向いた時期が何度もあったのだ。

地球の磁場が弱まると、いったい何が起こるのだろうか。近年、観測されている宇宙線と雲の相関²⁾がいつの時代も普遍的に起こるなら、地球の磁場が気候を変える可能性は高いだろう。なぜなら、地球の長い歴史の中で、最も大きく宇宙線量を変化させてきたのは、地球磁場だからである⁴⁾。これまでの研究で、地球の磁場が逆転する時代には、地磁気強度が現在の約10～20%まで弱まったことが明らかにされていて⁵⁾、この時、地球に到達する宇宙線の量は、現在の約2倍に増加したと予想される⁶⁾。地球磁場の逆転には、通常、数千年を要するので、宇宙線量の増加によってできた雲が、長期間にわたって太陽の光を遮ることで（日傘効果）、地球は寒くなりそうである。今後の観測に大いに期待したいところだが、数千年後か、はたまた数万年後か。次にいつ起こるかもわからない

地磁気の逆転を待つてはいられない。ここでは、地磁気が逆転した時、気候に何が起こったのか、過去にさかのぼって検証してみよう。

2. 微化石は語る

最後に地球の磁場が逆転したのは、78万年前。マツヤマブリュンヌ地磁気逆転期と呼ばれている。温度計や古文書さえも残っていない大昔の気候をどのようにして知ることができるだろう。実は、古文書は私たちの目の届かないところにある。海や湖の底で何千、何百万年も静かに眠り続けている堆積物は、地球の歴史を記録しているのだ。この堆積物は、鉱物の粒だけで構成されているわけではない。肉眼では見えない小さな小さな化石をたくさん含んでいるのである。陸上の気候を復元するのに最もよいのは、花粉の化石である。花粉の形は種によって違うので、堆積物中の花粉を分類することで、当時の森の姿を描き出せるというわけだ。人類の影響が及ばなかったはるか昔の森の姿は、主に気候によって決まっている。一度、思い浮かべてみてほしい。沖縄と東北の森を。おそらく、ほぼすべての人が、まったく違った森の姿を想像したのではないだろうか。

私たちが調べたのは、大阪湾で掘削された1,700 mにも及ぶコアである(図2)。このコアは、過去320万年間の歴史を私たちに教えてくれる。地球は、これまで何度も寒冷な時期(氷河期)と現在のような暖かい時期(間氷期)を繰り返してきた。大阪湾の堆積物は、これを詳細に記録しているのだ。その秘密は、大阪湾の特殊な地形にある。大阪湾はちょうどお椀のような形をしている。それゆえ、大阪湾南端に位置する紀淡海峡の水深よりも海面が高くなると、海水が流入し、大阪湾は海になる(図2)。一方、海面が低くなると、海は大阪湾から退き、湾に注ぐ淀川の豊富な淡水によって大阪湾は湖になる。こうした変動は、地層と、堆積物に含まれる珪藻けいそうの化石を調べることで詳細にわかる。珪藻というのは小さな藻類で、淡水に棲



図2 研究対象地域
中央図の太い点線は、大阪湾の間氷期に最も海が高くなった時の海岸線を示し、右下図の太線は、最終氷期極大期の海岸線を示す¹⁷⁾

んだり、海水に棲んだり、水中に浮いていたり、水底にくっついていたり、種類によって生きている環境が違うのだ。私たちは、2つの地磁気逆転を含む過去110万~70万年前の5つの間氷期を中心に、花粉や珪藻の化石を使って気候や海の変化を詳細に復元した。

3. 最高海面期と同時に起こった奇妙な寒冷化

地球の気候変化には、リズムがある。地球は太陽の周りを回る軌道や、自転軸の傾きなどを周期的に変化させることで、地球にやってくる日射量を緯度や季節によって変えている。そしてこれが、極域の氷(氷床)を成長させたり、融かしたりを繰り返す。氷床が成長すると海面は下がり、氷床が融けると海面は上がる。つまり、極域の氷の量、もしくは海水準の変化を調べることで、本来、地球が持っている大きな気候の変動リズムを知ることができる。

約100万年前の5つの間氷期に、地球のリズムと大阪湾の気候がどのように変化したのか見てみよう。図3に示したのは、大阪湾で産出し

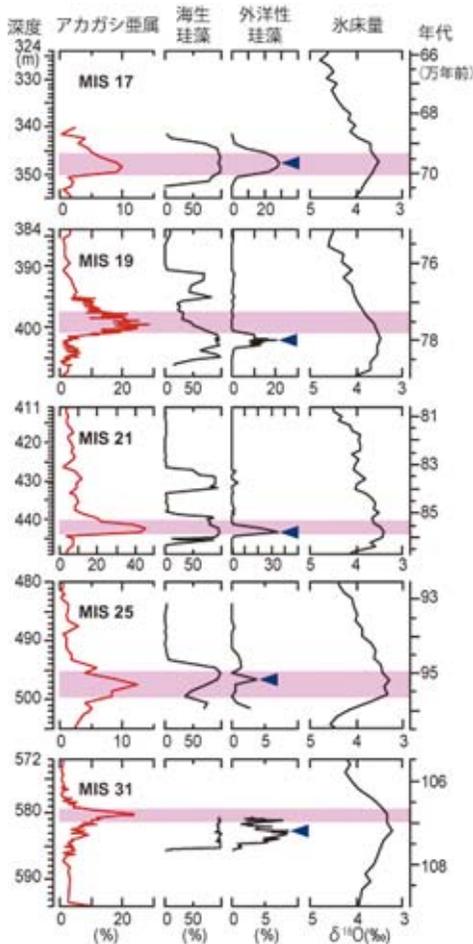


図3 5つの間氷期における気候と海の指標の比較
 左から、コナラ属アカガシ亜属花粉（温暖の指標）産出割合、海生珪藻（海の指標）産出割合、外洋性珪藻（海の高さの指標）産出割合、及び氷床量の指標¹⁸⁾。赤い影で示した部分が最温暖期で、三角の矢印が海面ピークを示す。氷床量の指標は、海洋酸素同位体比である（酸素の同位体は、重い¹⁸Oよりも軽い¹⁶Oが選択的に蒸発する。氷期にはこれが陸上に氷床として保存されるので、海水は相対的に重くなる（ $\delta^{18}\text{O}$ の値が大きくなる）。逆に、氷が融けると海水は相対的に軽くなる（ $\delta^{18}\text{O}$ の値が小さくなる。）。ステージ（MIS）25と31のデータを示していない部分は、化石が含まれていなかった部分である。また、ステージ17では侵食が見られたため、それより上部のデータは示していない

た温暖な場所に生育する常緑広葉樹のアカガシ亜属の割合と、海の珪藻と海が高い時だけ紀淡海峡を通じて大阪湾に入ってくる外洋性珪藻の

割合、そして、地球上の氷床量の指標である。ステージ（MIS）17, 21, 25と番号付けされた3つの間氷期には、海水準のピークと同時に温暖化が起きている。これは、至極当然のことのようだ。なぜなら、私たちは、通常、気候が温暖になると氷が融けて、海水準が上がると考えるからである。しかし、ステージ19と31では、海水準のピークから遅れて温暖化が起きている。しかも、その遅れは数年程度ではなく、約4,000年にも及ぶのだ。

4. 地磁気の逆転と寒冷化

この原因は、いったいどこにあるのだろうか。お察しの通り、その鍵は、地球磁場が握っているようである。最高海面期と最温暖期が同時に起こった3つのステージでは、地球磁場の逆転は起こっていないが、最温暖期が4,000年も遅れた2つの間氷期には、地球の磁場が逆転している。つまり、地球の磁場が逆転した時代には、本来起こるべきところで温暖化が起ころず、地球が本来持っているはずの気候のリズムが乱れていたのである。

次に、この2つの奇妙な間氷期の気候変化と地磁気の変化を詳細に見てみよう（図4）。ステージ19では、間氷期に向かって暖温帯性のアカガシ亜属が増加し、冷温帯性の落葉広葉樹ブナ属が減少している。どうやら、気候のリズムにあわせて温暖化が起っていたようである。しかし、その後、海水準は上昇を続けるにもかかわらず、アカガシ亜属は急に減少し始め、それと同時にブナ属は急増している。寒冷化だ。この寒冷化は、海水準のピークと同時に起っていて、約5,000年間も続いている。森林全体を見てみると⁷⁾、この時、いったん成立した暖温帯性の常緑広葉樹林は後退し、再び冷温帯性の落葉広葉樹林が繁栄している。

ここで、同じコアの磁性鉱物（堆積物が固まるとき、当時の地磁気の方向に並んで固定される）を調べることでわかった地磁気強度の変化を見てみよう⁸⁾。図4のグラフでは、現在の地

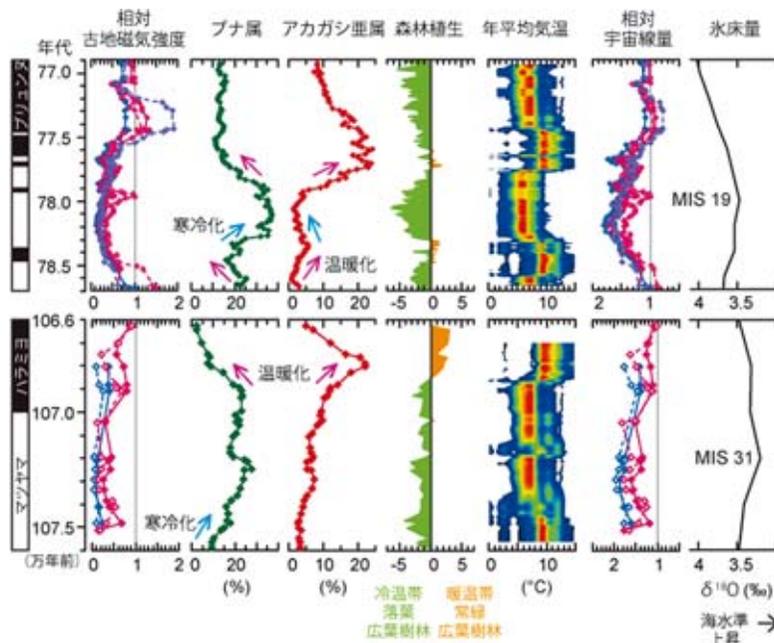


図4 地球磁場と気候の比較

左から、地磁気極性、相対古地磁気強度^{3,8)}、ブナ属(冷涼の指標)とコナラ属アカガシ亜属(温暖の指標)の花粉産出割合、森林植生、年平均気温、相対宇宙線量、氷床量の指標¹⁸⁾。地磁気極性は、黒が現在と同じ正極性、白が逆極性を示す。相対古地磁気強度は、4つの指標を示しており、現在の強さを1で表している。森林植生と年平均気温は、森林を構成する主要な花粉化石をすべて用いて定量的に復元した^{7,9)}。年平均気温の復元値は確率分布で示しており、赤い部分ほど信頼度が高い。宇宙線量の指標は、相対古地磁気強度から計算した宇宙線生成核種の生成率である⁶⁾。氷床量は、図3に同じ

磁気の強さを1として、相対的な地磁気強度の変化を示した。本来、温暖であるはずの時期に起こった冷涼な植生の発達は、地球磁場がおよそ40%以下に減少した時期のみ起こっている。このときの宇宙線量を地磁気の強さから計算すると⁶⁾、今よりも40%以上増加している。この寒冷期に、地球の磁場は最大10%まで弱まり、宇宙線量は現在のほぼ2倍に増えている。そしてこの後、地磁気強度の回復に伴う宇宙線量の減少にあわせて温暖化が起こっている。

地球磁場の減少とともに、いったい何℃気温が下がったのだろうか。表層堆積物中に含まれている現在の花粉の組成と、観測された気温の対応関係を元にして、過去の花粉の組成から気温

を推定してみると⁹⁾、この寒冷期には、約9℃あった気温が約6℃まで、急激に低下している。気温の低下と回復のタイミングを見てみると、宇宙線の量が増加・減少するタイミングによく一致している。

それでは、107万年前(ステージ31)に起こったもう1つの地磁気の逆転(ハラミヨサブクロン開始期)については、どうだろうか。ここでは、海水準の増加に伴い、アカガシ亜属もわずかに増加傾向を示す(図4)。しかし、海水準の上昇と同時に繁栄しているのは、ブナ属を主体とする冷涼な植生である。ステージ31では、全体として地磁気が弱い時代が続いているが、ここでも、マツヤマーブリュンヌ地磁気逆転期

と同様に、寒冷化は地磁気強度が40%以下に減少し、宇宙線量が40%以上増加したときにのみ起こっている。そして、地磁気強度の回復に伴う宇宙線量の減少とともに温暖な植生が急速に拡大している。花粉化石から見積もった気温の低下量はおよそ2℃で、宇宙線量と気候変化のトレンドは、ここでも非常によく似ている。

5. 地球寒冷化!?

地球の磁場が弱まると、大阪湾周辺はどうやら寒くなるらしい。ほかの地域はどうだろう。地磁気逆転期の寒冷化は、どれくらいの規模で起こったのだろうか。これを検証するには、様々な地域から得られた気候のデータが必要である。しかし、100万年も昔の記録はそう簡単には見つからない。そんな中でも、ほぼ同じ時期に寒冷化のシグナルが見られた地域がある(図5)。これら中・低緯度域では、マツヤマブリュンヌ地磁気逆転期や、ハラミヨサブクロン開始期に比較的寒冷なところに生息する植物や動物が生きていた¹⁰⁻¹⁴⁾。少なくとも、中・低緯度域のある程度広い範囲で地磁気の効果が気候に現れるらしい。

その一方で、南極から得られた78万年前の地磁気逆転期のデータには、この寒冷化は見られない¹⁵⁾。大阪湾でも、寒冷化と同時に海面が上昇するという奇妙なことが起きていた。これらの現象は、地磁気が気候に与える影響に地域差がある、ということで説明できそうだ。つまり、中・低緯度域で寒冷化が起こっていたにもかかわらず、極域では、氷が融け続けられる程度に温暖だったのだ。このことは、中緯度・低緯度域で宇宙線と雲の相関が顕著であるとする観測を裏づけている¹⁶⁾。

6. おわりに

現在、地球の磁場は、100年あたり約6%の割合で減少し続けている。このまま磁場が減り続けたら、地球の気候はいったいどうなっ

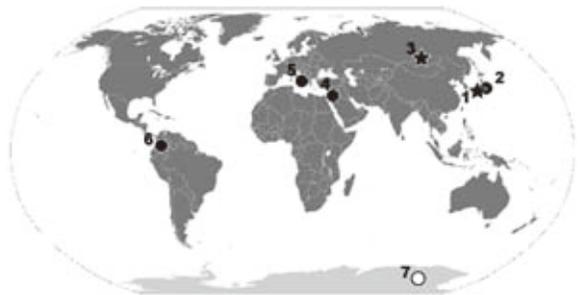


図5 地磁気逆転期における古気候学的証拠が得られた地域
マツヤマブリュンヌ地磁気逆転期の記録(丸)とマツヤマブリュンヌ境界とハラミヨサブクロン開始期両方の記録(星)。中・低緯度域では、寒冷化が見られた。1. 大阪湾、2. 房総半島¹⁰⁾、3. バイカル湖¹⁴⁾、4. ヨルダン¹¹⁾、5. イタリア¹²⁾、6. コロンビア¹³⁾。南極(7)では、寒冷化が見られなかった¹⁵⁾

まうのだろうか。地球は寒くなってしまふのだろうか。今回得られた結果からは、現在の40%まで地球磁場が減少すると、寒冷化が起こりそうである。しかし、ことはそう単純ではない。気候は、いつの時代も日射量や大気・海洋循環、温室効果ガスなど様々な要因が複雑に絡みあうことで決まっており、これが未来の気候予測を難しくしている。日射量も温室効果ガス濃度も大気循環もそのほかの要因も、何ひとつとして変化しないものではなく、時代によってその様相が異なる。つまり、何がどの程度気候に影響するかも時代によって違うということだ。ある時には日射量が地球の気候に大きく寄与し、またある時には地球磁場が日射量やほかの効果を凌いで気候に影響を与えるのだろう。その証拠に、ステージ31の寒冷期には、海のピークと同時に少しだけ、温暖化のシグナルが見えている。ここでは、日射量の強さもピークに達していて、一時的に、地球磁場による寒冷化の効果よりも、日射量による温暖化の効果が大きくなったことを示している。私たちは、つい、1つの事柄で事象を説明したくなってしまふ。しかし、それは無理なのだ。これからは、地球の内部から表層、宇宙までを1つの気候システムととらえ、複雑な気候変化を理解していかな

ればならないようだ。

参考文献

- 1) Courtillot, V., Gallet, Y., Le Mouél, J-L., Fluteau, F., Genevey, A., Are there connections between the Earth's magnetic field and climate? *Earth Planet Sci Lett*, **253**, 328–339 (2007)
- 2) Svensmark, H., Friis-Christensen, E., Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage — A missing link in solar-climate relationships, *J Atmos Solar-Terrest Phys*, **59**, 1225–1232 (1997)
- 3) Kitaba, I., Hyodo, M., Katoh, S., Dettman, D.L., Sato, H., Mid-latitude cooling caused by geomagnetic field minimum during polarity reversal, *Proc Natl Acad Sci USA*, **110**, 1215–1220 (2013)
- 4) Frank, M., Comparison of cosmogenic radionuclide production and geomagnetic field intensity over the last 200000 year, *Phil Trans R Soc Lond A*, **358**, 1089–1107 (2000)
- 5) Valet, J-P., Meynadier, L., Guyodo, Y., Geomagnetic field strength and reversal rate over the past 2 Million years, *Nature*, **435**, 802–805 (2005)
- 6) Wagner, G., *et al.*, Reconstruction of the geomagnetic field between 20 and 60 kyr BP from cosmogenic radionuclides in the GRIP ice core, *Nucl Inst Met Phys Res*, **172**, 597–604 (2000)
- 7) Gotanda, K., *et al.*, Biome classification from Japanese pollen data: application to modern-day and Late Quaternary samples, *Quat Sci Rev*, **21**, 647–657 (2002)
- 8) Hyodo, M., *et al.*, Millennial- to submillennial-scale features of the Matuyama-Brunhes geomagnetic polarity transition from Osaka Bay, southwestern Japan, *J Geophys Res*, **111**, B02103 (2006)
- 9) Nakagawa, T., Tarasov, P.E., Nishida, K., Gotanda, K., Yasuda, Y., Quantitative pollen-based climate reconstruction in central Japan: application to surface and Late Quaternary spectra, *Quat Sci Rev*, **21**, 2099–2113 (2002)
- 10) Okuda, M., *et al.*, MIS11-19 pollen stratigraphy from the 250-m Choshi core, northeast Boso Peninsula, central Japan: Implication for the early/mid-Brunhes (400-780 ka) climate signals, *Isl Arc*, **15**, 338–354 (2006)
- 11) Spiro, B., *et al.*, Climate variability in the Upper Jordan Valley around 0.78 Ma, inferences from time-series stable isotopes of Viviparidae, supported by mollusk and plant palaeoecology, *Palaeogeograph Palaeoclim Palaeoecol*, **282**, 32–44 (2009)
- 12) Capraro, L., *et al.*, Climatic patterns revealed by pollen and oxygen isotope records across the Matuyama-Brunhes Boundary in the central Mediterranean (southern Italy), *Geol Soc Lond Spec Publ*, **247**, 159–182 (2005)
- 13) Hooghiemstra, H., Ran, E.T.H., Late Pliocene-Pleistocene high resolution pollen sequence of Colombia: an overview of climate change, *Quat Int*, **21**, 63–80 (1994)
- 14) Prokopenko, A.A., Hinnov, L.A., Williams, D.F., Kuzmin, M.I., Orbital forcing of continental climate during the Pleistocene: a complete astronomically-tuned climatic record from Lake Baikal, SE Siberia, *Quat Sci Rev*, **25**, 3431–3457 (2006)
- 15) Jouzel, J., *et al.*, Orbital and Millennium Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years, *Science*, **317**, 793–796 (2007)
- 16) Marsh, N., Svensmark, H., Solar Influence on Earth's Climate, *Space Sci Rev*, **107**, 317–325 (2003)
- 17) Kitaba, I., *et al.*, MIS 21 and the Mid-Pleistocene climate transition: Climate and sea-level variation from a sediment core in Osaka Bay, Japan, *Palaeogeograph Palaeoclim Palaeoecol*, **299**, 227–239 (2011)
- 18) Lisiecki, L.E., Raymo, M.E., A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records, *Paleoceanography*, **20**, PA1003 (2005)

(神戸大学 内海域環境教育研究センター)