

やまなし地球科学研究所だより

第13号 2022年8月

氷河地形と気候変動 — 現在は氷河時代です —



南アルプス仙丈ヶ岳山頂周辺の氷河地形（Google Earthに加筆）

迷子石

200年程前、ヨーロッパ各地の平原に周辺には分布しない岩種の巨礫が転がっていることから、どこから運ばれて来たか論争になっていました。そのため巨礫は迷子石と呼ばれ、聖書にあるノアの洪水で運ばれて来たなど様々な説が唱えられました。スイスの地質学者ルイス・アガシーは、迷子石には氷河周辺に転がっている礫と同じように氷河による擦り傷があることなどから、巨礫は氷河によって運ばれて来て氷河が溶けた後に取り残されたもので、過去には広い範囲が氷河に覆われた時代があった（氷河説）と提唱しました。

日本では1905年に地理学者の山崎直方が立山（富山県）で氷河によって作られた地形（氷河地形）を初めて発見しました。その後、日本アルプスや北海道・日高山地にも氷河地形が多数点在することが明らかとなり、過去には日本にも氷河が存在する寒冷な時代があったことがわかってきました。また、2012年には日本で初めて富山県の立山と劔岳で3ヶ所の雪渓が氷河であることが確認されました。氷河は、毎年消えずに残る積雪が圧縮されてできた氷が重力により下方に移動する雪氷の塊で、同じ積雪でも溶けずに残り移動しないものは雪渓や万年雪などと呼ばれています。立山と劔岳では雪渓内部の氷体をGPS（汎測位システム）で観測し、移動していることが確認されました。

氷河地形は、氷河が下方に移動しながら周辺斜面を削り、削り取った岩塊や土砂を下流に運び氷河の周りに堆積させることで出来た地形です。氷河地形の上流部にはお椀の内側のような球面状の斜面（カール）、下流では谷の横断形状がU字型のU字谷、氷河の

両岸や末端には運搬された岩塊や土砂が堆積した堤状の高まり（モレーン）などが形成されます（図-1）。この

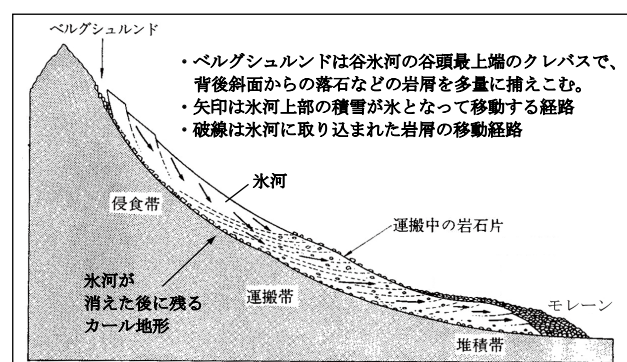
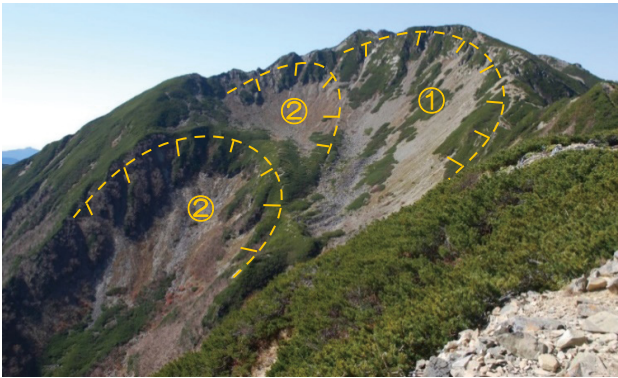


図-1 氷河によるカールとモレーンの形成（榎根勇・訳, 1970 を改変）

ような地形が存在すれば、現在は氷河がなくても過去に氷河が存在したことを示しています。山梨県内では南アルプスの仙丈ヶ岳や間ノ岳などの山頂周辺に氷河地形が残っていますが、北アルプスなどに比べて南に位置するため氷河の規模は小さくU字谷などは見られません（口絵、写真-1、2）。

また、寒冷地では氷河の侵食ではなく、地表面付近が冬期に凍結、夏期に融解する作用を繰り返すことで、寒冷地特有の地形を形成しています。岩盤の亀裂に浸透した地下水や雨水が凍結・融解を繰り返すと亀裂が開き、岩盤から岩塊や礫となって剥がれ落ちて堆



7万年前(①)と2万年前(②)の水期に形成されたカールからなる
写真-1 小仙丈沢カール



写真-2 藪沢カール(背後)とモレーン(手前)

積した岩塊斜面(写真-3)、表層が凍結すると土壌が縮んでできる多角形状の割れ目、霜柱で持ち上げられた土粒子や礫が霜柱が解けると下方に移動する作用の繰り返して、礫が縞模様状に配列する条線土(写真-4)などが作られます。



写真-3 岩塊斜面(甲斐駒ヶ岳南西の駒津峰南麓)



花崗岩が風化した真砂土が縞模様をなす
写真-4 条線土(鳳凰三山・薬師岳、小疇尚撮影)

氷河時代

46億年の地球史では現在より温暖な時代の方が長く、現在は寒冷な氷河時代(氷河期)に区分されます。氷河時代は大陸が2,000m以上の厚い氷(氷床)に覆われた時代で、大陸が氷床に覆われない無氷河時代と氷河時代が繰り返えされてきました(図-2)。ま

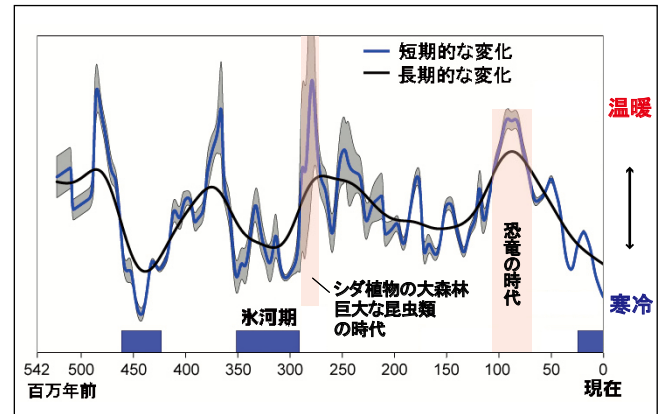


図-2 過去5億年の気候変動(Wikipediaを改変)

た、氷河時代は地球の中緯度から地球全体が氷床に広く覆われる極めて寒冷な「氷期」と、現在のように高緯度の南極大陸やグリーンランドの限られた地域(陸域の1割程度)だけが氷床に覆われる比較的温暖な「間氷期」に分けられ、氷期と間氷期も周期的に繰り返えしてきました。

現在の氷河時代は約260万年前に始まり、氷期と間氷期を繰り返しています(図-3)。最後の寒冷化のピーク(最終氷期)は約2万年前で、陸地の3割ほどが氷床に覆われました(図-4)。その後は徐々に温暖化

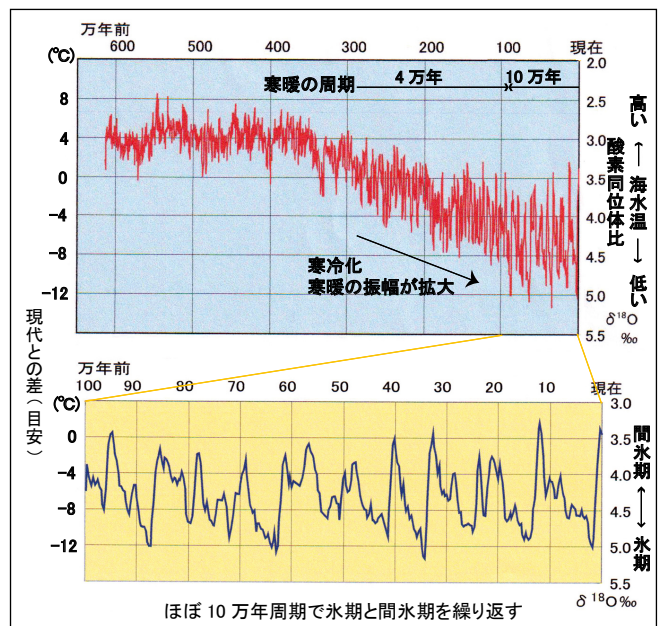


図-3 海水温の変化

(神奈川県立生命の星・地球博物館(2004)を改変)

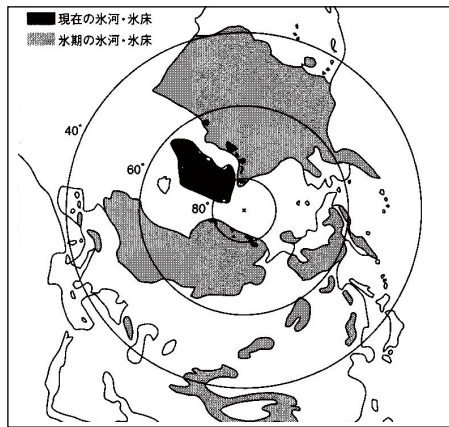


図-4 氷期と現在の氷河・氷床の分布 (Bloom, 1978)

が進み、大陸氷床が減少した1万年前以降は間氷期が続いています。2万年前の氷期には、海面より蒸発した水蒸気が雪となって降り積もり、溶けずに氷床として大陸に固定されたため、海面が現在より130mほど低下しました。その結果、陸続きとなったシベリヤ-樺太-北海道と狭くなった津軽海峡や対馬海峡を渡ってライチョウやチョウノスケソウなど多くの北方系の動植物が日本列島に南下してきました。しかし、今では氷期後の気温の上昇に伴って寒冷な高山帯に逃れた「氷期の貴重な贈物」です。

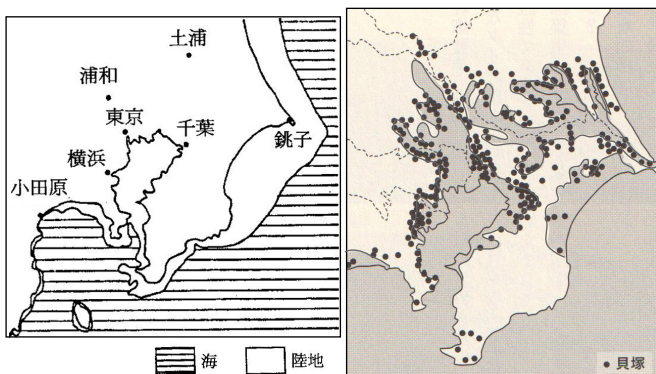


ライチョウ



チョウノスケソウ

また、氷期後の温暖化は、6,000年前（縄文時代）には現在より気温が5～6度も高く、氷床や氷河が解け海面が現在よりも上昇（縄文海進）しました。関東平野などでは海が内陸まで進入し、当時の海岸線付近には縄文人の貝塚が多数分布しています（図-5）。



約 20,000 年前（氷期）の海岸線
(松原彰子, 2008)

約 6,000 年前（縄文海進）の海岸線
と貝塚分布 (藤井一至, 2015)

図-5 関東地方における過去の海岸線復元

過去の気候変動を知る

a) 酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$ ‰)

水 (H_2O) は、構成する酸素原子 (O) が重さの異なる3つの同位体 ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O からなるため、3種類の水 (H_2^{16}O , H_2^{17}O , H_2^{18}O) が混ざり合って存在しています。このうち最も軽い ^{16}O と最も重い ^{18}O の比率 (酸素同位体比) が気温と相関関係があります。

海水が蒸発する時には軽い H_2^{16}O ほど蒸発しやすく、海水中には重い H_2^{18}O が多く残ります。氷床は、軽い水が多い水蒸気が積雪となって形成されるため、氷床が拡大する氷期の海水には重い水が多く残ります。一方、氷期から温暖化が進むと軽い水が多い氷床が溶けて海水中に戻るため、海水は氷期に比べて軽い水が多くなります。したがって、過去の海水中の ^{16}O と ^{18}O の酸素同位体比の変化から、過去の水温の変化を知ることができます。

しかし、過去の海水を入手することは不可能です。そこで海に生息する生物の石灰質の骨格や殻 (CaCO_3) は生息当時の海水から取り込んだ元素で作られるため、海底堆積物中のプランクトンの死骸 (化石) の酸素同位体比を計れば、生息当時の海水温を把握できます。特に陸から遠く離れた深海には陸域から土砂が流れ込むことはなく、主にプランクトンなどの死骸と空中飛来の火山灰や風塵などの微粒子からなる堆積物が、過去から現在まで途切れることなく連続的に堆積しています。しかもこれら堆積物の積もる速さは1,000年に数10mm程度以下と極めて遅く、1年間に0.05mmずつ積もったとすれば、10mの厚さは20万年分に相当します。

b) 地質年代と古地磁気、ミラコビッチサイクル

気候変動の年代を知るには海底堆積物が堆積した年代を知る必要があります。様々な年代の溶岩が冷え固まった時期の地球磁場の記録 (残留磁気) から、地球は過去にたびたびN極とS極が逆転してきました (6号コラム参照)。同様に海底堆積物も堆積するときに含まれる磁性鉱物が地球の磁場を記録していることから、年代がわかっている溶岩の残留磁気の記録と堆積物の残留磁気の記録を対比することから堆積物の年代を知ることができます。また、計算から求まるミラコビッチサイクル (9号コラム参照) の地球の10万年周期の公転軌道 (離心率)、4.1万年周期の地軸の傾き、2.3万年周期の歳差運動による地球が受ける日射量の周期的変化 (気温変化) と酸素同位体比の

変化を対比することから、より高い精度の気候変動の歴史が求められています(図-6)。

c) 南極大陸やグリーンランドの氷床の酸素同位体比

南極大陸やグリーンランドの氷床からボーリングにより連続して採取した氷の酸素同位体比からも気温の変化が求められています。氷床の年代は、氷の物性(密度・温度・pH等)や季節変化する溶存物質(重水素、硫化水素等)や飛来したエアロゾル粒子(火山灰、砂塵、核実験による核分裂物質等)を連続的に計ることなどから、1年ごとに形成される氷の層を数えて氷の年代が求められています。(小村寿夫)

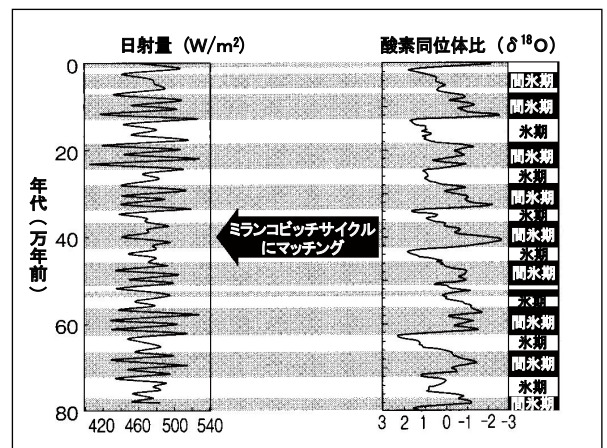


図-6 ミランコビッチ理論に基づく海底堆積物の年代決定(菅沼悠介, 2020)

コラム

全球凍結(スノーボールアース仮説)

世界の各地で約7億年前に氷河によって運ばれた堆積物(氷河堆積物)が確認されています。当時の大陸は移動し現在とは位置が異なりますが、岩石に記録された古地磁気の緯度の記録から当時の赤道付近にも氷河堆積物が分布していたことがわかりました(図-1)。赤道付近に氷河が存在すれば、地球全体が氷床に覆われ(全球凍結)、白い雪球(スノーボール)のようになった(地表の気温-50℃、海を覆う氷の厚さ1,000m)とされる仮説です。

全球凍結前の地球は火山活動によってCO₂(二酸化炭素・気体は炭酸ガス)が増加する温暖な気候で、河川の侵食により大陸の岩石のCaイオン(カルシウムイオン)が海水中に大量に溶け出しました。その結果、CaイオンとCO₂が結合したCaCO₃(炭酸カルシウム)が地中や海水中に取り込まれ、大気中のCO₂が減少すると共に寒冷化が進み地球全体が凍結しました。地球が一旦白い雪玉になれば太陽からの光を反射し雪玉は融けなくなりますが、その後の火山活動によりCO₂が供給されて再び温暖化し雪玉が融けました。同様の全球凍結は22億年と6億年前にも起こったと考えられています。

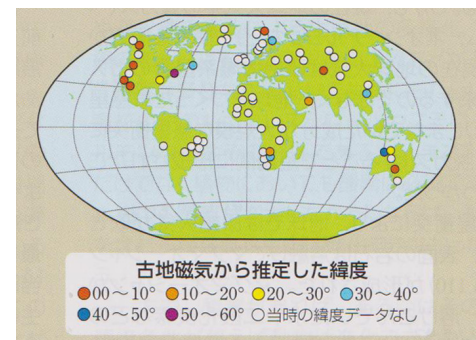


図-1 7億3000万～6億3500万年の氷河堆積物の分布と堆積当時の緯度(地学図録改訂版, 2020)

宮澤賢治『グスコブドリの伝記』(1932年発表)

「先生、気層のなかに炭酸瓦斯^{ガス}が増えて来れば暖くなるのですか。」「そりゃなるだらう。地球ができてからいままでの気温は、大抵空気中の炭酸瓦斯の量できまってゐたと云はれる位だからね。」「カルボナード火山島が、いま爆発したら、この気候を変える位の炭酸瓦斯を噴くでせうか。」「それは僕も計算した。あれがいま爆発すれば、瓦斯はすぐに大循環の上層の風にまじって地球全体を包むだらう。そして下層の空気や地表からの熱の放散^{あたたか}を防ぎ、地球全体を平均で五度位温にするだらうと思う。」

スウェーデンの化学者S・V・アレニウスは、1896年に炭酸ガスに温室効果があることを予見しましたが、理論だけで観測データがなくあまり注目されませんでした。しかし、宮澤賢治が90年も前に童話で温室効果ガスを語っていることに驚嘆します。