

8/8：気温は将来どう変化するか？気温が変化するとどのようなことが起こるのか？

3-1 地球温暖化のしくみ

3-2 地球温暖化と海面変化

3-3 第四紀の氷河の変動と地形

3-4 第四紀の氷河の変動と海面変化

3-5 第四紀の気候変化の原因

3-1 地球温暖化のしくみ

- ・地球温暖化とは何か

地球温暖化について、次の問いに対して、知っていることを記す。

①地球温暖化はどのようにして生じるか？

②地球温暖化によって、温度はいつどのくらい上昇したか？

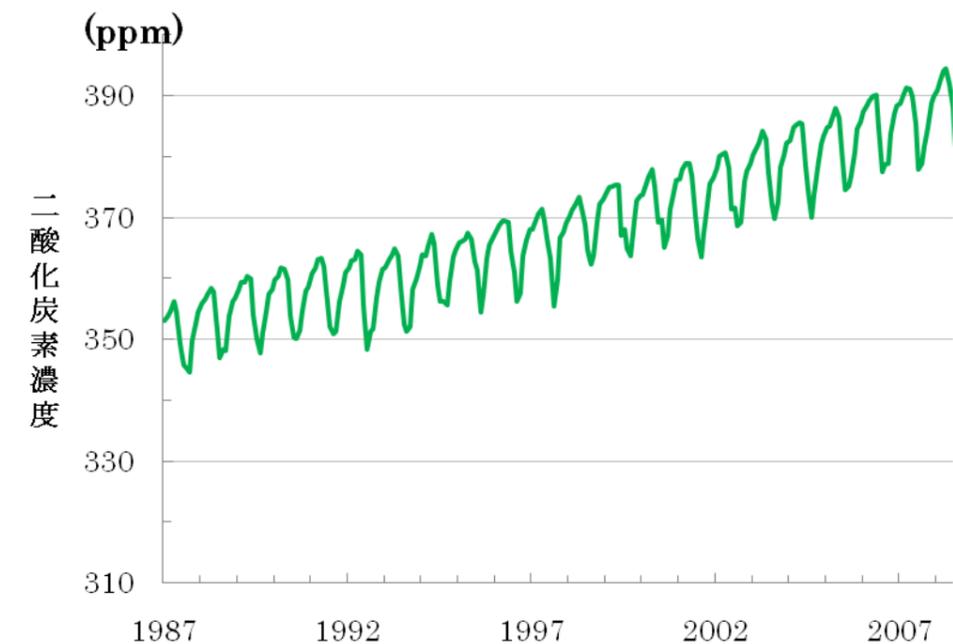
③地球温暖化によって、これまでにどのようなことがあったか？

④地球温暖化によって、これからどのようなことが起こると考えられているか？

- ・温室効果

地球温暖化は、二酸化炭素の温室効果によって起こると考えられているが、そのしくみは、ビニールハウスの温室効果とは異なる。ビニールハウスでは、日射によって地面が温まり、温まった空気が対流や拡散によって温室外に出るのを防ぐことによってビニールハウス内の気温が上昇する。これに対して、二酸化炭素による温室効果は、物理的な障壁によって滞留を抑制するものではなく、赤外線地球外への放射を二酸化炭素が抑制することによって起こる。太陽の日射によって地球が温まると、地球から赤外線が放射される。太陽放射は波長が短く（ $0.5\mu\text{m}$ 周辺）、短波放射と呼ばれ、地球からの放射は波長が長く（ $15\mu\text{m}$ 周辺）長波放射と呼ばれる。それらは大気によって吸収されて、再び地球を暖めたり、宇宙空間に出ていく。例えば、水は太陽放射も地球放射も吸収するので、曇りの日はあまり地表付近が温まらないし、夜はあまり温度が下がらない。一方、二酸化炭素は、太陽放射は吸収しないものの地球放射は吸収する。このため、二酸化炭素が大気中に増えると、増えた二酸化炭素の分だけ宇宙空間でいく地球放射が減り、再び地球へと放射される。以上によって地球がより暖かくなる。

- ・二酸化炭素濃度の変化



岩手県綾里での観測値。

ハワイでの1958年の観測値は約315ppm,1987年は約350ppm.

図 34 岩手県綾里における二酸化炭素濃度の推移

気象庁の資料により作成

二酸化炭素濃度は右肩上がりに上昇している。1987-2010の23年間で約350ppmから約380ppmへと約1割増えた。1958年には約315ppmだったので、52年間で約2割増えた。これは、化石燃料の使用によるもので、産業革命以前は、280ppmであった。1年周期の増減もみられるが、これは、生物の活動による二酸化炭素の消費によるもので、それは夏に多く冬に少ないため生じる。

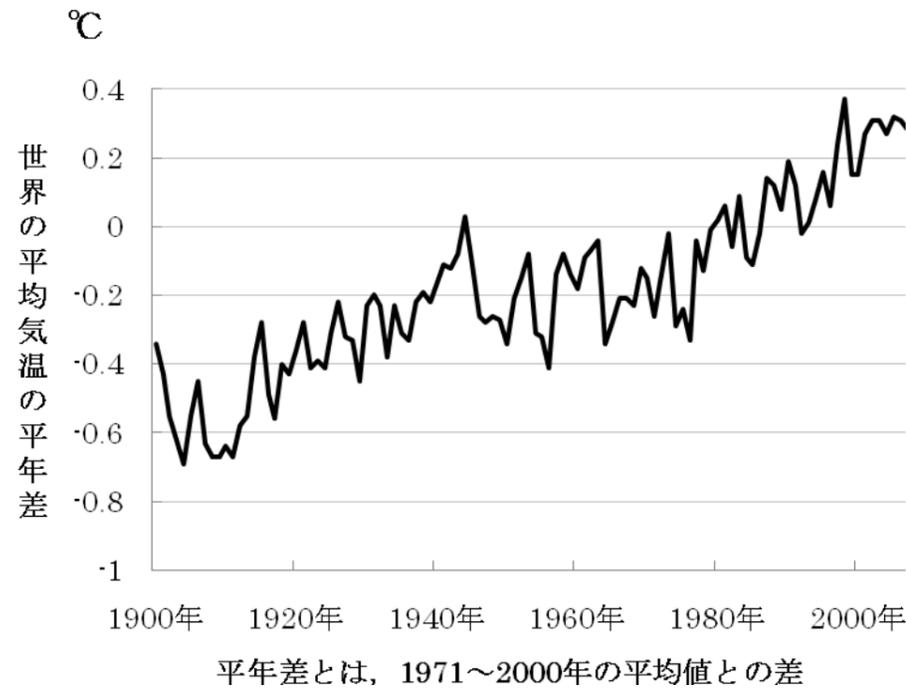


図 35 世界の平均気温の平年差の推移
気象庁の資料により作成

気温は、地球全体では上昇傾向で、平年差で見ると、1900年は-0.4℃であったのが2009年には+0.3℃となり、0.5～1℃上昇した。ただし、年ごとの上下変化も顕著で、それが約0.2℃ある。1900-1940年には、-0.6から-0.2へと0.4℃上昇し、1940-1980年まで変化がなく、1980-2009年に-0.2から0.3に0.5℃上昇した。

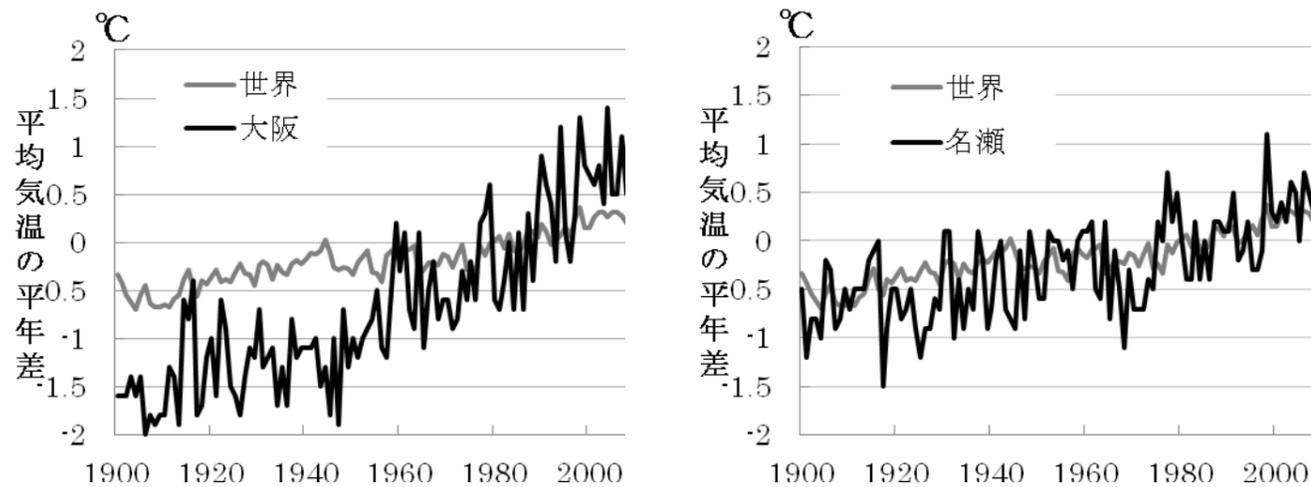


図 36 大阪および名瀬の平均気温の平年差の推移
気象庁の資料により作成

ただし、地域による気温変化の違いは大きい。大阪では世界の平均よりも振幅が大きく、気温上昇も大きく、1900-1940年に-1.5±0.5であったのが、その後上昇し2000年以降は+1℃前後と1940-2000年に約2.5℃上昇した。一方、奄美大島の名瀬では、振幅は大きいものの、気温上昇は世界平均とほぼ同じで、1900-1970年に-0.5℃±0.5であったのが、その後やや上昇し、約+0.3℃と1970-2000年に約0.8℃上昇した。大阪の気温上昇が大きいのは、都市化によるヒートアイランドの影響が大きいためである。

3-2 地球温暖化と海面変化

・氷河の質量収支

地球上の淡水の中で、氷河は70%を占めており、氷河の90%を南極が、9.9%をグリーンランドが、残りの0.1%をその他の山岳氷河が占めている。



図 37 山岳氷河の涵養域と消耗域

図中の点線よりも上流側が涵養域で下流側が消耗域

山岳氷河は、標高が高いところにある涵養域と標高が低いところにある消耗域とに分けられる。涵養域では、雪が融ける量を上回って積もるため、融け残った雪が重みで密度が増大し、 0.83 g/cm^3 以上になると氷になり下流に向かって流動する。下流側では、上流よりも気温が高いため、融ける量が降ってくる量を下回るが、上流から氷が供給されるので、氷河として存在しているが、それをあわせても融ける量が上回ると氷河の末端になる。融ける量が積もる量と等しくなる高さを平衡線高度と呼び、それよりも上流を涵養域、下流を消耗域と呼ぶ。消耗域では、温暖化している時も慣例化している時も、氷河は融けている。温暖化すると、平衡線高度が上昇し、消耗域が拡大すると、上流からの氷河の供給が追いつかなくなるため、氷河の末端位置は上流側に移動することによって氷河輪縮小する。地球上のすべての山岳氷河が消失すると、海面は0.45 m上昇する。

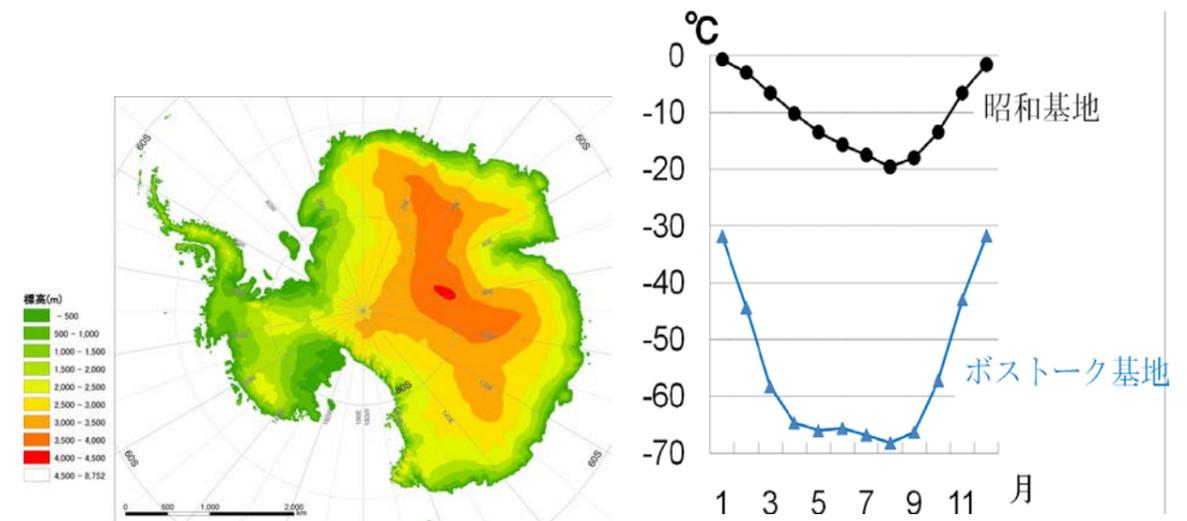


図 38 南極の標高分布と気温

一方、南極やグリーンランドの氷河は大陸氷床と呼ばれ、高緯度側に涵養域が、低緯度側に消耗域がある。南緯78度に位置するポストーク基地では、年平均気温 -55.3°C に達し、最暖月の平均気温でも -31.8°C にしかならない。南極の中では最も低緯度の南緯69度に位置する昭和基地でも、年平均気温 -10.5°C 、最暖月の平均気温が -0.7°C 、と気温の月平均値はプラスにならない。したがって、南極はほぼ全域が涵養域であり、消耗は海に棚氷となって分離することによって行われる。なお、南極の氷河がすべて消失すると、海面は64.06 m上昇することになるが、そのためには、南極の気温が 50°C 程度は上昇する必要がある。

・地球温暖化による海面上昇

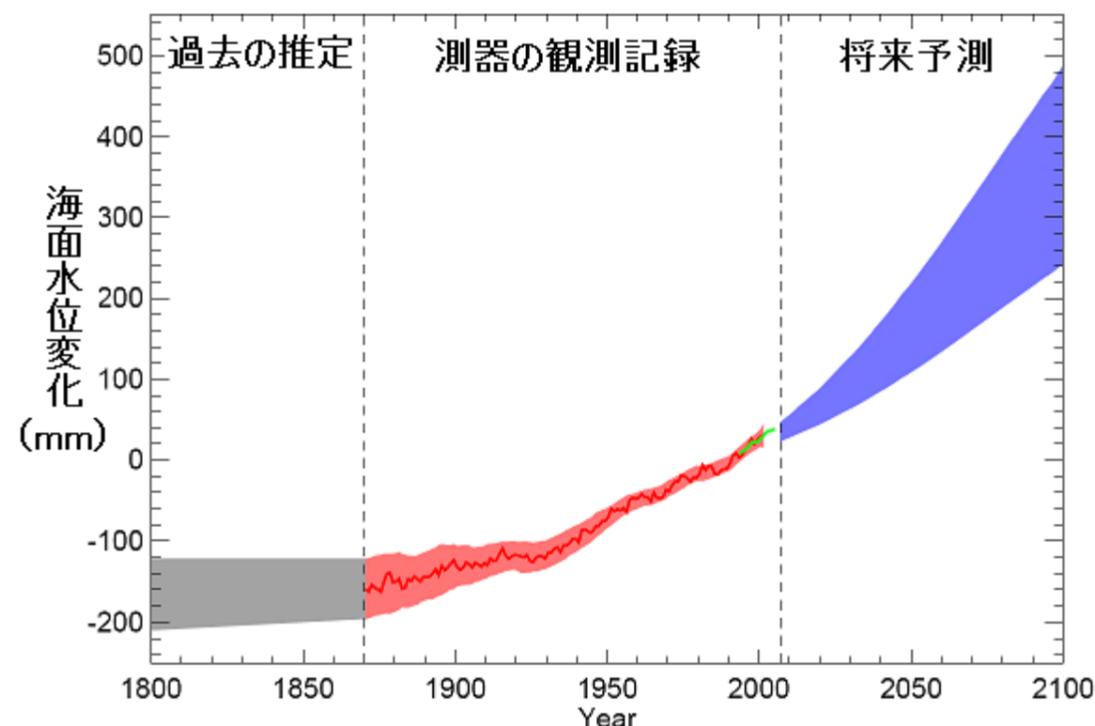


図 39 世界平均の海面水位の変化

IPCC 第四次報告書 (<http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc/ar4/index.html>) により作成

日本の沿岸では、最近100年間で $\pm 50\text{ mm}$ 程度の変動がみられるものの、明瞭な上昇傾向は認められないものの、世界平均では、最近140年間で 150 mm 程度の上昇が認められる。今後の100年間では、 $240\text{--}480\text{ mm}$ の上昇が予測されている。

これまでに起こった海面上昇については、海洋の熱膨張によるものが大きいと考えられており、1993年～2003年に $1.6\pm 0.5\text{ mm/年}$ の海面上昇に寄与したと考えられている。残りについては、氷河の融解と考えられており、1991年～2004年に $0.77\pm 0.22\text{ mm/年}$ の海面上昇に寄与したと考えられている。なお、氷河については、南極は1993年～2003年に $-0.14\sim 0.55\text{ mm/年}$ の海面上昇に寄与したと考えられており、海面低下（海面上昇がマイナス）に寄与したかもしれないと考えられている。今後100年間の海面変化予測に対して、海洋の熱膨張は70-75%寄与する。その残りが氷河の融解によるものであるが、南極氷床は降雪量の増大によって負の寄与があるかもしれないし、氷河流速の増大によって降雪量の増大と釣り合うかもしれないがよくわからない。

海洋の熱膨張は、温度に密度の変化によって引き起こされ、水温 3.98°C で密度は最大になり、それより温度が高くなると密度は減少する。このため、体積は増えることになり海面は上昇する。なお、南極の氷河がすべて消失するには 50°C 程度の気温上昇が必要であるが、海水温も 50°C 上昇したとすると、熱膨張によって海面は80 m上昇することになる。

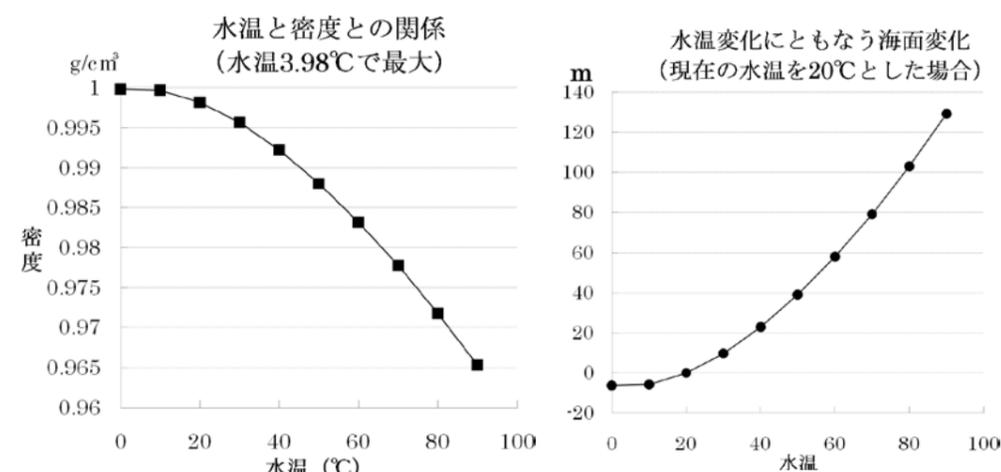


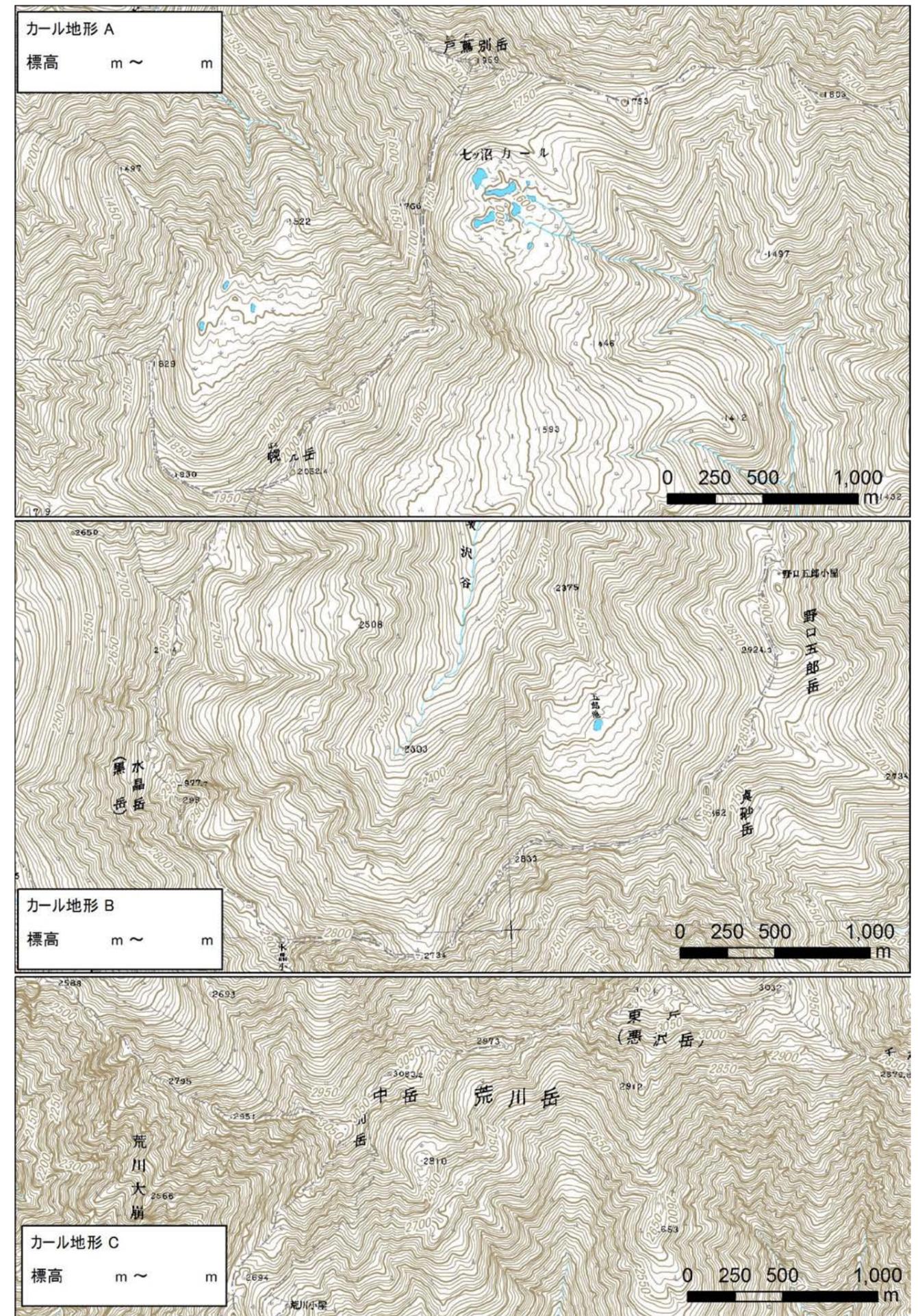
図 40 海水の水温と密度との関係および水温と海面水位との関係

3-3 第四紀の氷河の変動と地形

・日本のカール地形

右ページの地形図中からカール地形を読み取り、それぞれの地形図にカール地形がみられる範囲を線で示し、カール地形の標高をそれぞれの地形図中の欄に記入する。

カールとは、お椀を半分に割ったような地形で氷河の浸食によって形成される。現在の山岳氷河が無くなると、このような地形が氷の下から現れる。カールがあるということは、かつて氷河があった証拠になる。カールの下流側には、幅広い谷が形成されるが、これはU谷と呼ばれている。これに海水が侵入するとフィヨルドになる。氷河は水ほど粘性が低くなく、粘り気が大きいので、川の侵食のようにV字谷と呼ばれる細い谷にならず幅広い谷になるのが氷河による侵食地形の特徴である。



・日本の氷期と現在の平衡線高度

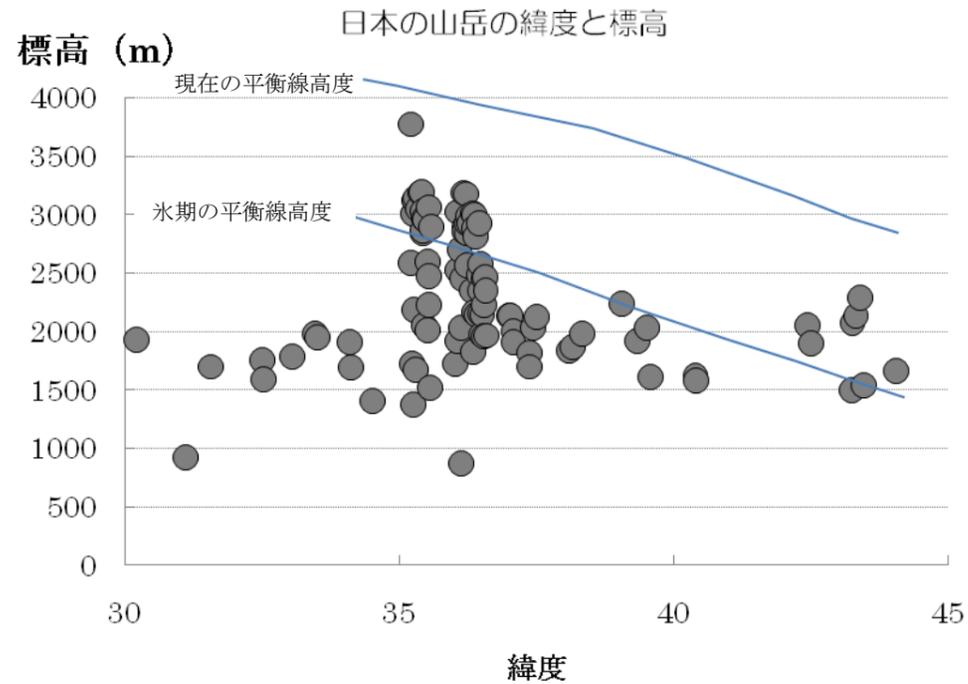


図 41 日本の主な山の山頂高度と緯度

現在の日本には氷河はないので正確な平衡線高度は分からないが、気候値からおおむね飛騨山脈では 4000m くらいにあると考えられている。一方、氷期の平衡線高度は、カール地形などから、日高山脈で約 1600m で南へ行くほど高くなり、飛騨山脈で約 2500m、赤石山脈で 2800m になる。これらから、氷期には、平衡線高度は 1500m 低下しており、これは現在よりも 9℃ 程度寒かったことになる。

3-4 第四紀の氷河の変動と海面変化

・氷期の世界の氷河

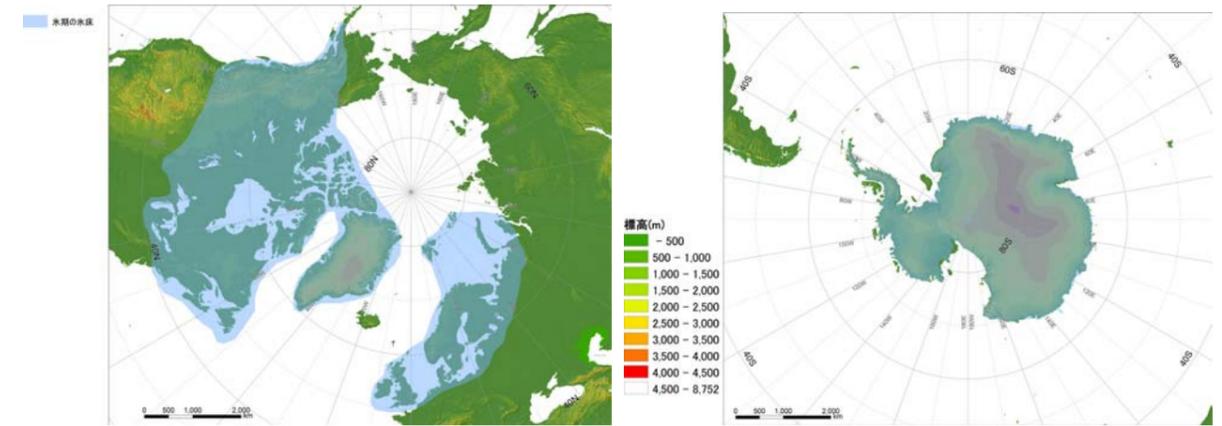


図 42 氷期の北半球で拡大した氷床と南極大陸

氷期には、北ヨーロッパと北アメリカ大陸北部に現在の南極と同程度の規模の大陸氷床が発達していた。約 2 万年前には、スカンジナビア半島を中心とした北ヨーロッパと、北アメリカ大陸北部に大陸氷床が発達しており、それぞれスカンジナビア氷床あるいは北ヨーロッパ氷床とローレンタイド氷床と呼ばれている。それらの体積は、約 2000 万 km³ で、現在の南極とほぼ同じであった。ローレンタイド氷床はカナダの大部分とアメリカ合衆国を含み、シアトル、シカゴ、ニューヨーク付近に末端があった。北ヨーロッパ氷床は、北欧諸国とイギリスを含み、ロシア、ドイツ北部に末端があった。



図 43 約 2 万年前の日本周辺の海岸線

約 2 万年前の氷河が拡大していた時代には、海面は現在より約 120m 海面が低下していた。瀬戸内海は陸化し、本州四国九州はひとつの島になっていた。北海道は樺太とともにユーラシア大陸と陸続きになり、半島になっていた。対馬海峡と津軽海峡は水深 130-140m と深いため、狭いながらも陸化していなかったが、過去の氷期にはつながっていたこともある。

・第四紀の氷河変動と海面変化

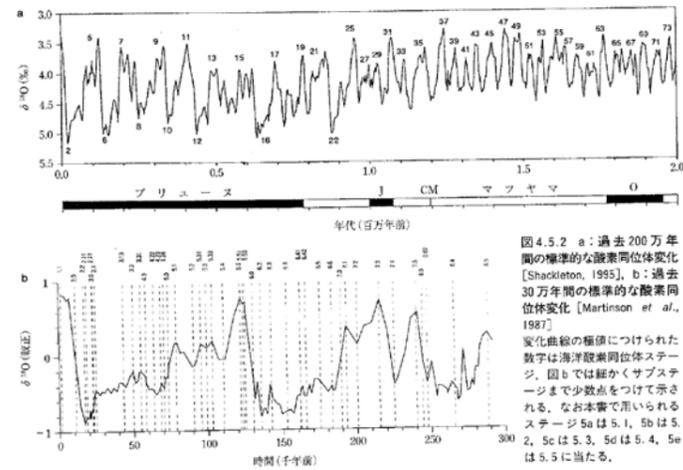


図 44 第四紀の氷河の変動

最近 200 万年間を第四紀と呼び、その間、ほぼ 10 万年周期で氷河の拡大と縮小が繰り返されてきた。おおむね 7 万年くらい氷期があり 3 万年くらい間氷期がある、というほぼ 10 万年の周期が繰り返されている。氷河の拡大はゆっくりと進行し、融けるのは速い、という特徴も繰り返されている。このような気候変動は第四紀の 200 万年間継続しており、それ以前はあまりよくわかっていないが、やや温暖ではあったものの変動があったようである。

現在は、相対的に氷河の規模が小さいので間氷期、約 1 万年前～8 万年前は氷河の規模が大きかったので氷期と呼ばれており、日本のカールはこのころ形成された。氷期の中でも、最も氷河が拡大していたのは約 2 万年前で、このころに、北米と北欧に氷床があった。この氷床は約 1 万 8 千年前から融け始め、6 千年前には完全に融けていた。この時の海面上昇の速さは単純に平均すると年間 1 cm になる。近年の海面上昇は年 1 mm 程度なので、それよりも 10 倍程度大きい 6 千年前から氷河はあまり大きな変動をしていないが、海面はやや低下した。6 千年前には現在よりも 3 m 程度海面が高かったとされ、縄文時代の貝塚が海岸ではなくやや内陸の標高 3m 程度のところにあることから縄文海進と呼ばれている。これは、海水量が増えたことで海底が海水の重みで沈下するというハイドロアイソスタシーによるものである。

・海面変化と海成段丘の形成

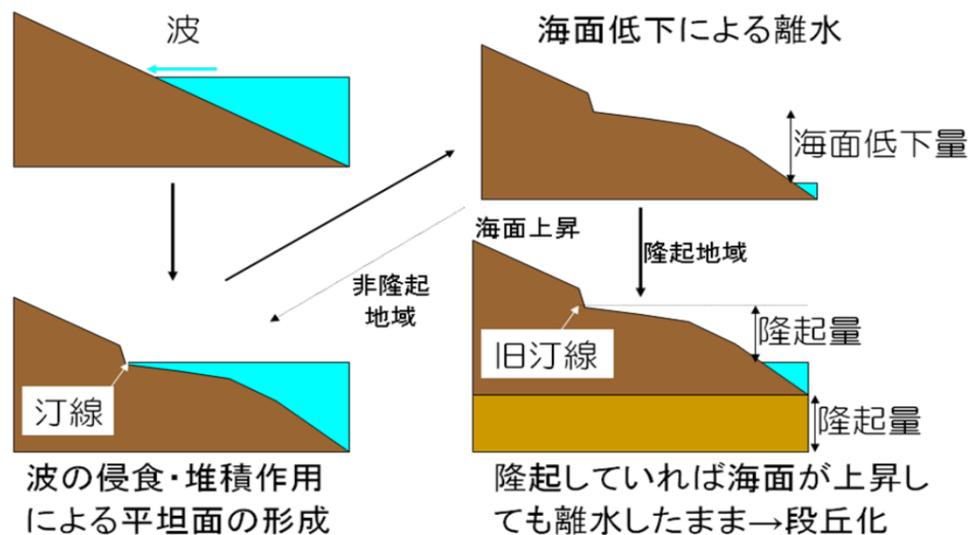


図 45 海成段丘の形成過程

海成段丘（海岸段丘とも呼ばれる）は海面変化と地盤の隆起とによって形成される。海成段丘の旧汀線高度が分かれば、その地域の隆起量を知ることができ、例えば、旧汀線高度が 200 m で、その海面上昇期が 10 万年前とすると、隆起量は 1000 年あたり 2 m、隆起速度は 2 mm/年になる。旧汀線高度は、地形図の等高線から読み取ることができる。

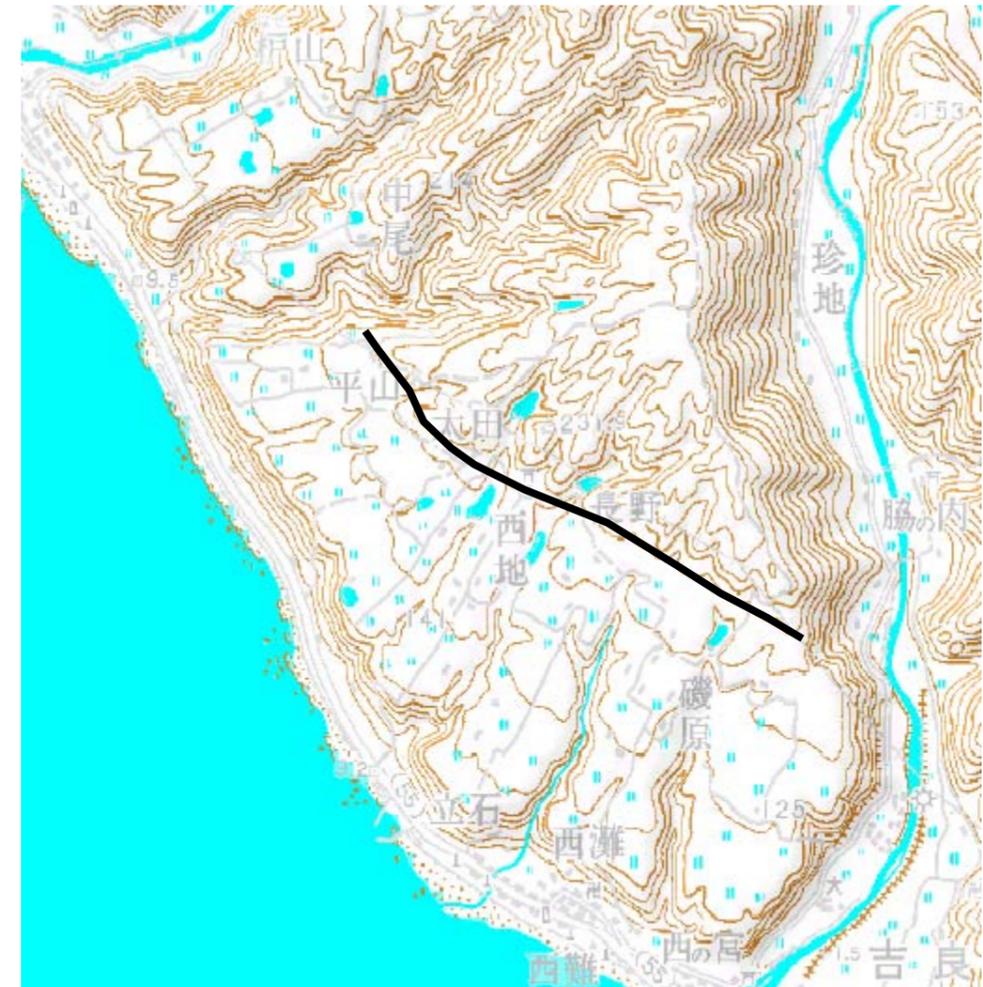


図 46 等高線から読み取った旧汀線

・海成段丘の判読

次ページの地形図から、海成段丘を判読して、旧汀線を赤で記入する。そして、その高度を読み取り、この地域の隆起速度を計算する。なお、この地域に最も広く分布する海成段丘面の形成年代は 10 万年前として計算する。



3-5 第四紀の気候変化の原因

・ミランコビッチフォーシング

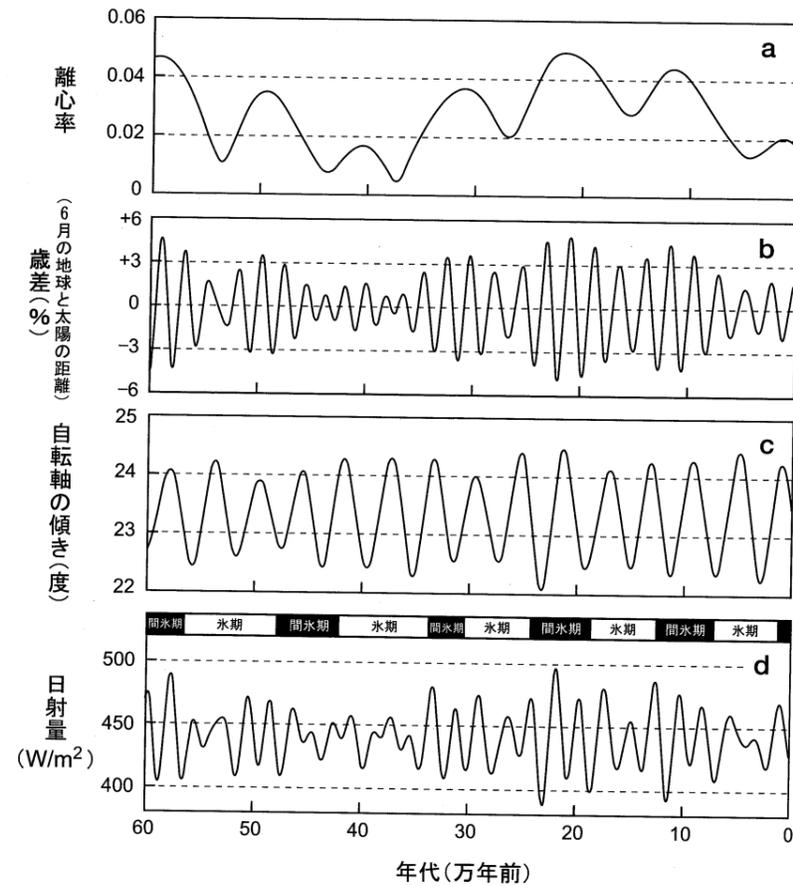


図4-3 過去60万年にわたる地球の、a)公転軌道の離心率の変化、b)歳差にともなう6月における地球-太陽間の距離の変化、c)自転軸の傾きの変化、d)北緯65°における7月中旬の日射量の変化。dの上には、氷期(白色)と間氷期(黒色)の期間を示した。Berger and Loutre(1991)を改変。

図 47 ミランコビッチフォーシング

出典：大河内直彦 (2008)「チェンジングブルー 気候変動の謎に迫る」岩波書店。

第四紀の氷河変動の原因は、ミランコビッチフォーシングと呼ばれる日射量の周期的な変化によるものと考えられている。それは、日射量の減少→消耗量の低下→積雪の増加→氷化→氷河の形成→氷河の拡大という過程による。

日射量の周期的な変化は、地球の公転軌道の離心率と自転軸の傾きの周期的変化、さらに自転軸の歳差運動という3つの要因により、引き起こされる。これらは、それぞれ約10万年、約4万年、約2万年の周期をもっている。それらが複合して日射量を周期的に変化させている。この周期と氷河変動の周期とは一致しないが、日射量の減少による氷河の拡大への時間差を考慮すると、過去の氷河変動をほぼ説明できる。日射量の周期的な変化は将来も変わらないであろうから、将来も氷河変動は起こる。ただし、日射量が減少して氷河が拡大する間には様々な現象が介在するため、これまでにないこと、たとえば二酸化炭素濃度の増加が起こればどうなるかは分からない。