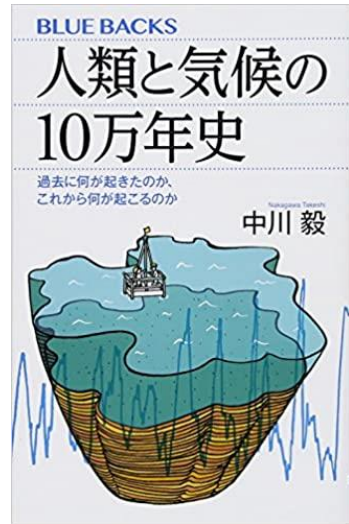


人類と気候の10万年史・紹介



福井県・水月湖に堆積する「年縞」。何万年も前の出来事を年輪のように1年刻みで記録した地層で、現在、年代測定の世界標準となっている。その年縞が明らかにしたのが、現代の温暖化を遥かにしのぐ「激変する気候」だった。人類は誕生から20万年、そのほとんどを現代とはまるで似ていない、気候激変の時代を生き延びてきたのだった。過去の詳細な記録から気候変動のメカニズムに迫り、人類史のスケールで現代を見つめ直します。(Amazon広告から)

TBSテレビ「世界ふしぎ発見！」4月15日（土）21：00～21:52にて放映
この番組を見ました。中川毅先生の代わりに准教授が出演しました。
放送内容は約2分位で、若狭湾水月湖でのボーリング筒50cm位が映されただけ。放送レベル内容が低い。

《第33回講談社科学出版賞 受賞作品》

杉浦使用の紹介の本書

2017.02.20 第1刷発行

2021.03.12 第14刷発行

2023.06.20 杉浦 右蔵

プロローグ — — — 「想定」の限界

2011年3月11日、日本列島北東部を巨大な地震と津波が襲った。町が丸ごと水に呑み込まれて流されていく様子はデジタル家電とインターネットを通して多くの人の目にリアルタイムで刻まれ、自然災害と人間の生活について、災響慣れしているはずの日本人の価値観まで揺さぶる議論を巻き起こした。

この地震には「前例」があったらしいことが、その後の報道によって一般にも知られるようになった。**西暦869年の夏に、おなじく東北地方を襲った貞観地震(ジョウガン)である。津波は、海から大量の土砂を運びあげて陸上に特殊な地層を残す。貞観地震の津波の地層は、記録に残るいかなる津波よりも内陸にまで分布していた。つまり、現代人が忘れてしまった規模の津波が、今から1150年ほど前にはじっさいに起こっていたのである。**このことをきっかけに、東日本大震災ほどの災害であっても、事前に「想定」できたはずだという議論が沸き起こった。

誰が悪かったのか、あるいは悪くなかったのかの話は本書では取り上げない。自然科学は、最悪の判断に対しては本質的に無力である。その代わりに本書で考えたいのは、長い時間を視野に入れることで、世界はまったく違う顔を見せるという事実についてである。

10年に1回の頻度で起こる災害なら、対策を立てることの必要性は明らかだろう。100年に1回の災害でも、人間の平均寿命をたとえば80年とするなら、人生の中でそれを経験する人のうが多い。あるいは自分で経験しなかったとしても、事件は生々しい記憶として語り継がれている可能性が高い。

だが1000年はどうだろう。日本で1000年前といえば平安時代である。平安時代に起こった事件について切実な教訓を受け継いでいる人はおそらくいない。同様に1000年後の未来は、今の私たちにとっては無縁とも思える彼方にある。

出典:人類と気候の10万年史



なかがわ・たけし

1968年、東京都生まれ。1992年、京都大学理学部卒業。1998年、エクスマルセイユ第三大学(フランス)博士課程修了。Doctor at Sciences(理学博士)。国際日本文化研究センター助手、ニューカッスル大学(英国)教授などを経て、現在は立命館大学古気候学研究中心長。専攻は古気候学、地質年代学。趣味はオリジナル実験機器の発明。主に年縞堆積物の花粉分析を通して、過去の気候変動の「タイミング」と「スピード」を解明することをめざしている。

次に起こるのは1000年後かもしれない災害のために、税金から巨額の対策費を支出し続けることに、999年間いちども文句を言わない覚悟がある人はおそらくいない。

さらに視点を変えると、**1000年は人間にとっては非常に長い時間だが、地球の歴史の中では一瞬にすぎない。1万年に1回の災害は、1000年に1回の災害よりも甚大である。10万年や100万年に目を広げれば、それこそ「とんでもない」ことが起こる。そうした可能性のすべてを「想定」し、「対策」を立てることは現実的ではない。**極端な例では、今からおよそ6600万年前、地球に巨大な隕石が落下し、恐竜を含む大半の陸上動物が絶滅した。そのような事件が近い将来ふたたび起こる可能性は非常に低いですが、仮に起こると分かったとしても、有効と言える対策はほとんど存在しない。

地質学的な時間を視野に入れば、「想定」と「対策」に限界があることは明らかである。10年と数千万年の間のどこかに私たちは現実的な線を引かなくてはならない。それをどこにするかは、究極的には哲学の問題であって科学の問題ではない。だが考察のための材料としての材料として、過去の地球でどのような「事件」が起こっていたのか、またそれらの事件が予測可能な性質のものだったのかどうか、知っておくことは重要である。

地球の過去には、現代とまるで似ていない時代があった。現代の基準では「災害」としか表現できない出来事が、日常的に繰り返していたような時代もあった。じつは現代は、地球の歴史の中では比較的めずらしい、おだやかで暮らしやすい時代なのである。本書では、現代からはイメージしにくい地球のもうひとつの素顔、激しく変動する惑星としての表情について、最新の地質学的な証拠を元に紹介する。

災害にはさまざまな種類があるが、**本書ではとくに気候変動を取り上げる。中でも、今後100年でゆるやかに進行する温暖化といった話ではなく、もっと激しく暴れ回る「やっかいな」気候変動については、ページをやや多めに使って紹介しようと思う。**

地震や津波は、一瞬で何万人もの命を奪って人々に衝撃を与える。気候変動にはそのような激烈さはない。だが、たとえば1980年代にアフリカで起きた干ばつでは、数年の間に300万人以上が犠牲になった。少なくとも死者の総数で見ると、その規模は東日本大震災の100倍を超える。

飛行機は1回の墜落で数百人を犠牲にしてニュースになるが、自動車の事故で亡くなる人の数が、全世界の合計だと3日で1万人に達することはそれほど注目されない。ニュースとしてのインパクトの大きさは、出来事の深刻さを正確に反映するとは限らない。そういう意味では、気候変動は飛行機よりもおそらく自動車の事故に似ている。本書では、あまり認撤されていない気候変動の本当の脅威について、新しい知見を元に考察する。

有史以前の気候変動を解明する研究は古気候学と呼ばれ、基本的には地質学の一分野である。地質学は従来、数万年や数億年といった長大な時間を対象にすることが多かった。それだけ昔のことになると、年代の推定にも普通は大きな誤差がともなう。たとえば恐竜の大絶滅は、最近の研究ではおよそ6604万年前と推定されているようである。以前よりはだいぶ絞り込まれてきた印象だが、それでもこの推定にはまだプラスマイナス3万年の誤差が残っている。人間の視点で見れば、3万年と永遠の間にそれほど大きな違いはない。

もちろん、人間の時間とかけ離れているからといって、その学問分野の価値が下がるわけでは決してない。大昔の出来事や生命進化の道筋を理解することで、人間はそれ以前よりもはるかに健全な世界観を手に入れた。このことは、突き詰めれば世界の平等や平和にまで貢献しており、その意義はどれだけ強調されてもされすぎることはない。

だがいつぼうで、それほど長い時間の話に壮大なロマンや深遠な哲学はあるものの、本当の意味でのリアリティーに乏しいことは紛れもない事実であろう。だからこそ、10年の物語なら小説になりえるが、1000年の話は原則として教科書にしかない。伝統的な地質学は、人間にとって馴染みの深い、数年から数十年の時間を扱うことをどちらかといえば苦手にしてきた。このことはたとえば地球温暖化などの現代的な問題に貢献しようとするとき、古気候学の大きな足かせになっていた。

年縞(ねんこう)と呼ばれる特殊な堆積物は、このような状況に風穴を開けることで脚光を浴びた。年縞とは、1年に1枚ずつ形成される薄い地層のことである。そのような地層を1枚ずつ削り取るように分析していけば、何万年も前に起こった出来事であっても、その推移を1年ごとに詳細に復元することができる。言い換えるなら、当時の人が幼年期、青年期、壮年期、老年期にそれぞれどんな変化を感じながら生きていたか年縞を通して知ることができるのである。年縞研究の発展により、地質学は人間の時間との接点を手に入れた。これをプレークスルーと表現したとしても、決して誇張にはならないと個人的には思っている。

年縞堆積物は世界の各地で見つかり、年縞研究者の国際的なネットワークも存在する。だが、もっとも長く連続した年縞堆積物、いわば年縞のチャンピオンが日本にあることは、一般にはあまり知られていない。

1991年の春、福井県の若狭湾岸にある水月湖という湖で、良質の年縞堆積物の存在が確認された。さらに1993年の調査では、地下の硬い岩盤に達する大深度の掘削がおこなわれた。その結果、**水月湖の年縞は45メートルもの厚さを持ち、7万年以上もの時間をカバーしていることが明らかになった。**日本の年縞研究は、この発見をきっかけにして本格的に幕を開けた。

2006年の夏、私たちの研究グループは水月湖から最高品質の年縞堆積物試料を採取し、詳細な分析をおこなった。**2012年には、水月湖の年縞に基づいた「年代の目盛り」が地質年代の世界標準に認定され、翌2013年からはじっさいに目盛りの運用が始まった。**それまで日本ですら有名とは言えなかった福井県の湖は、「レイク・スイゲツ」として世界中の研究者にその名を知られるようになった日本国内でも、水月湖は2016年の春から中学校の理科、社会、数学、国語の教科書に掲載され、さらに2018年9月には、福井県若狭町の現地に、水月湖の年縞を展示する専用の博物館（年縞博物館）がオープンしている。

こうして水月湖の年縞は、「**世界一正確な年代が分かる堆積物**」としての地位を確立した。だが、じっさいに研究をおこなう私たちは、同時にあるもどかしさを感じていた。年代の目盛りを作ることは、私たちにとって目標の半分ではなかったのである。

年代の目盛りは、長さを測る「ものさし」に似ている。ものさし自体は単に長さを測る道具にすぎず、即座に何かの価値を生み出すわけではない。正確なものさしが真価を発揮するのは、そのものさしで作った精密な機械が稼働を始めるときであり、正確な測量に基づいた地図が宝のありかを示すときである。私たちも、せつかく正確な目盛りを作ったからには、その「ものさし」を使って宝探しの旅に出てみたかった。

私たちが探したかった宝物とは、過去の気候変動の証拠である。年縞堆積物の中にはいろいろな化石や鉱物が含まれていて、過去に起きた気候変動について知るための有力な手がかりになる。私たちはそれらの証拠をていねいに読み解き、水月湖の周辺で起こった気候変動の歴史を解明することをめざして研究を続けている。

水月湖では、地質時代に「何が」起きたかだけでなく、それが「いつ」だったのかを世界最高の精度で知ることができる。 タイミングが正確に分かるということは、変化のスピードや伝播の経路が正確に分かるということでもある。スピードと経路が分かれば、気候変動のメカニズムにまで切り込んで考察することができる。メカニズムが分かれば、より正確な将来予測にもつながっていく。水月湖研究の裾野は広い。

水月湖の年縞堆積物から気候変動を読み解くプロジェクトはまだ進行中であり、今も続々と新しい知見が得られつつある。本書ではそれらの新しい発見のうち、とくに私たち自身の未来と関連の深いものについて、なるべく分かりやすく紹介してみようと思う。

地質学的な過去の話なので、そこで展開される景色や変動の大きさは私たちの日常の感覚とはかけ離れている。いくつかの発見は、古気候の研究者である私たちの予測すら上回っていた。いっぽう、現在はまぎれもなく過去の延長線に存在している。過去にじっさいに起こったことであれば、いつかふたたび起こる可能性は常にある。

気候変動の影響は私たち全員におよぶ。地球上でどんなことが起こりえるのかについて、より多くの人に知っていただくことは有意義だろうと思う。本書は、気候の面から未来について考察するための、具体的なヒントを提供することを目的としている。もし本書を読まれた後で、皆さんの目に世界が少しでも以前と違って見えるなら、本書の目的は達せられたことになる。

プロローグ — — — 「想定」の限界

目次

第1章 気候の歴史をさかのぼる

いま起こっている変化
未来予測はどこまで信じられるか
5億年の気候史
10万年ごとにくり返す氷期
二度あることは三度ある

第2章 気候変動に法則性はあるのか

グリーンランドに残された6万年の記録
ミランコビッチ理論の限界
気まぐれな振り子
気候変動とカオスの遍歴
くり返す変動とその前触れ
気候変動の3つの周期
本物らしさの数学
予測できる変化とできない変化

第3章 気候学のタイムマシン

縞模様の地層「年縞」
わずか数年で7°Cの上昇
古気候学者は湖底を目指す
理想的な湖とは
タイムマシンの発見
水月湖はなぜ埋まらないのか

第4章 日本から生まれた世界標準

奇跡の堆積物を手に入れる
パーフェクトな試料を目指せ
地質学の「標準時計」
放射性炭素年代測定の限界
「ものさし」を伸ばす
水月湖が世界標準に

第5章 15万年前から現代へ 解明された太古の景色

気候を分類する
花粉を通じて見る過去の風景
地道な作業の先にあるもの
水月湖15万年の旅
2万3000年の「短い」周期

第6章 過去の気候変動を再現する

過去と現在を結びつける花粉データ
景色を気候に換算する
水月湖15万年の気候変動
人間が氷期の到来を遅らせている？
細かい変動が示す謎
氷期の終わり

第7章 激動の気候史を生き抜いた人類

1993年の冷夏
「異常」年を生き抜く
カリブ海の年縞
マヤ文明の崩壊
農耕が始まらなかった理由
狩猟採集は非効率だったのか
先行き不透明な時代の生き残り戦略

エピローグ----次に来る時代
あとがき

第1章 気候の歴史をさかのぼる

・いま起こっている変化

「子供の頃はもっと雪が降った」「昔の夏はこんなに暑くなかった」などの会話にみられる温度変化は、日々の変化の中の温度変化と、年平均の1°C温度変化とは意味が違う。

・未来予測はどこまで信じられるか

日本は気候モデリングの分野において、世界を牽引してきた実績を持っている。スパコンのお蔭。経験則を持っていない。

・5億年の気候史

過去の地球の歴史を気候という視点から振り返る必要がある。温暖な気候には限度がある。しかし寒冷化は暴走することが知られている(東大田近英一)。

・10万年ごとにくり返す氷期

寒冷化進行時期の特徴は気候振幅が増大し、不安定も増す。人間の80万年は「大昔」が、地質学的には「最近」である。氷期と温暖期にはリズムがある。

・二度あることは三度ある

地球と太陽の位置関係について「ミランコビッチ理論」の軌道要素は、殆どの研究家が影響を受けている。地質学的に水の底に溜まった水石物や氷河の消長を復元するを手掛かりに過去の出来事を読み解く、研究は1970年代の後半に入ってからだ。

ミランコビッチの理論 (38頁から転写) (詳しくはWikipedia参照・セルビアの地球物理学者)

ミランコビッチの理論が人々を魅了するのには、おそらく2つの理由がある。

1つ目

地球の公転軌道や地軸の向きが気候を支配するという、原因と結果の意外性である。「そんなことがあるのか」と唸りたくなるだけのインパクトがそこにはある。

もう1つの理由

そしてもう一つの理由は、リズムカルな現象が強力に示唆する「予測可能性」である。人間には、「過去に繰り返したことは今後も繰り返す」と考える癖がある。「二度あることは三度ある」と言い換えてもいいだろう。氷期はリズムカルに何度も到来した。ということは、次の氷期もいつかはやってきそうに思える。現代は暖かく快適な時代である。このおだやかな暮らしは、あとどれくらい続けることができるだろう。

研究者たちはそのような視点から過去の氷期がどのように始まったかを検討した。新たに判明したパターンに当てはめると、現代はすでに温暖期のピークを過ぎているように見えた。それが本当なら、次の氷期はすでに目前に迫っていることになる。・・・

・・・人間にはおそらくもう一つの癖がある。それは、しばらく続いた傾向を将来にまで延長したがる傾向、つまり「これまで続いたことは今後も続く」と考えたがる傾向、つまり「これまで続いたことは今後も続く」と考えたがる傾向である。・・・

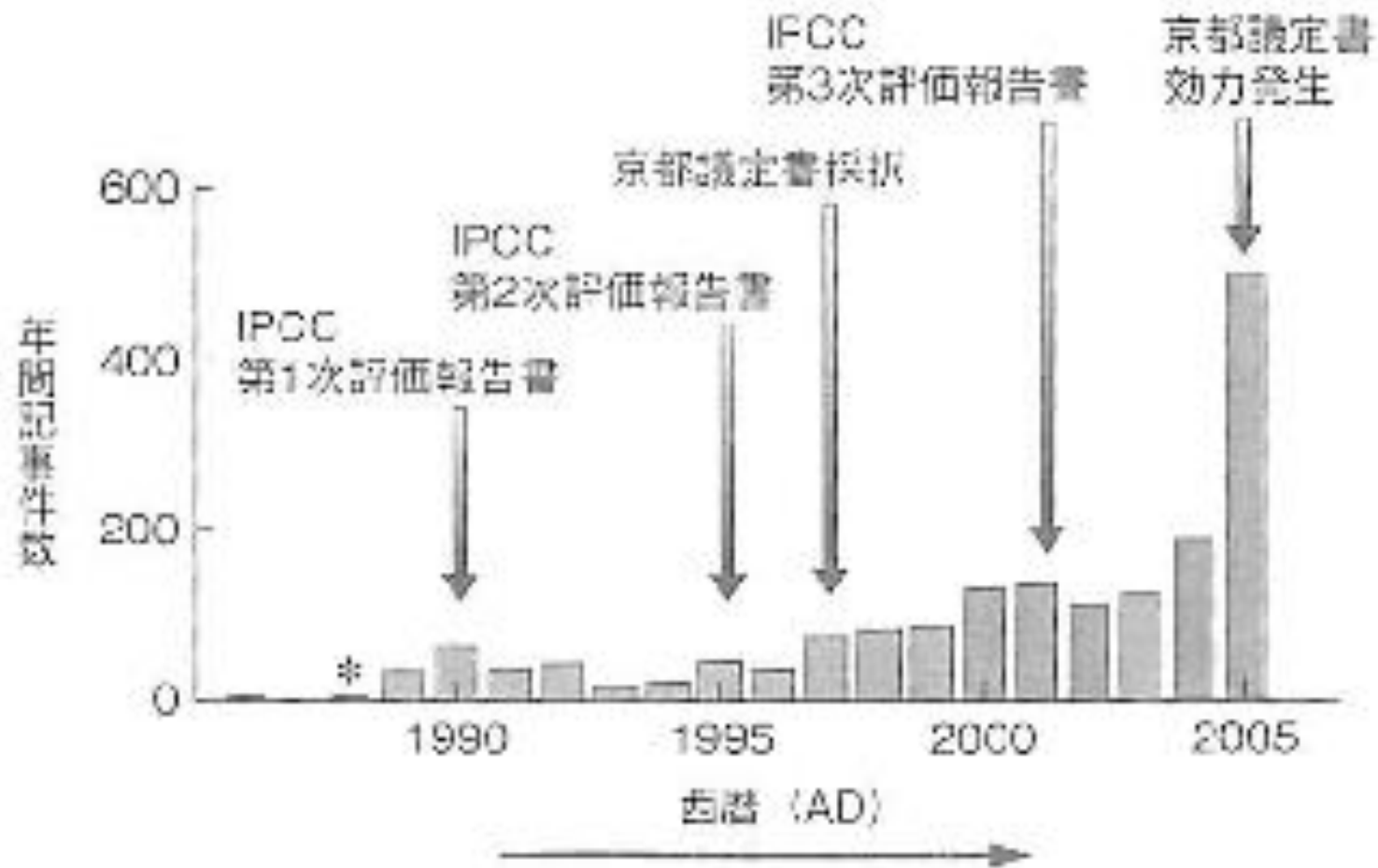


図1.1 英語の新聞記事に「Climate change (気候変動)」が登場した回数

1990年頃から話題になりはじめ、2005年からは毎日どこかで見かけるトピックになった。

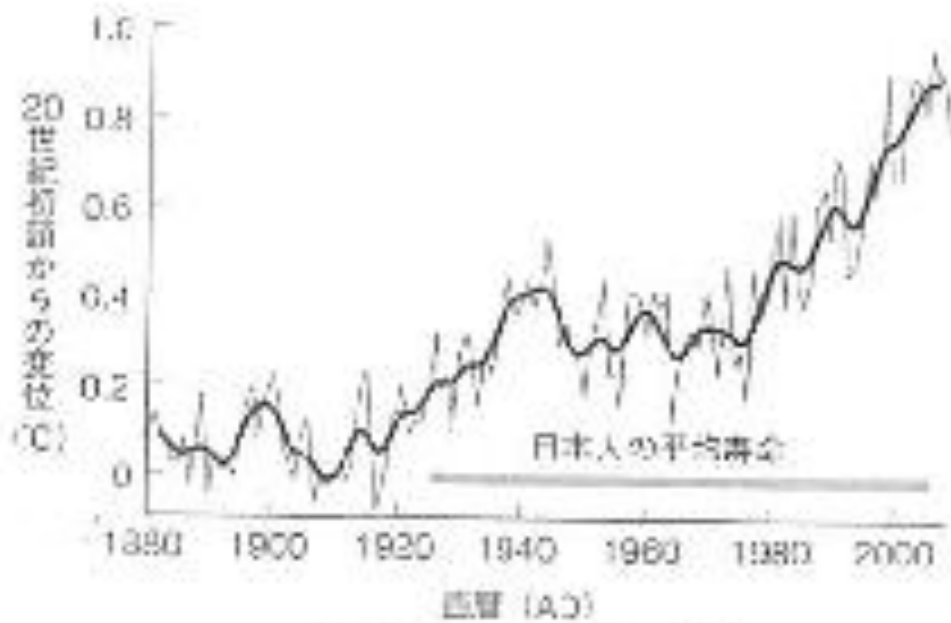


図1.2 過去130年間の気温変化
一世代の中で実感できるほどの温暖化が進行している。

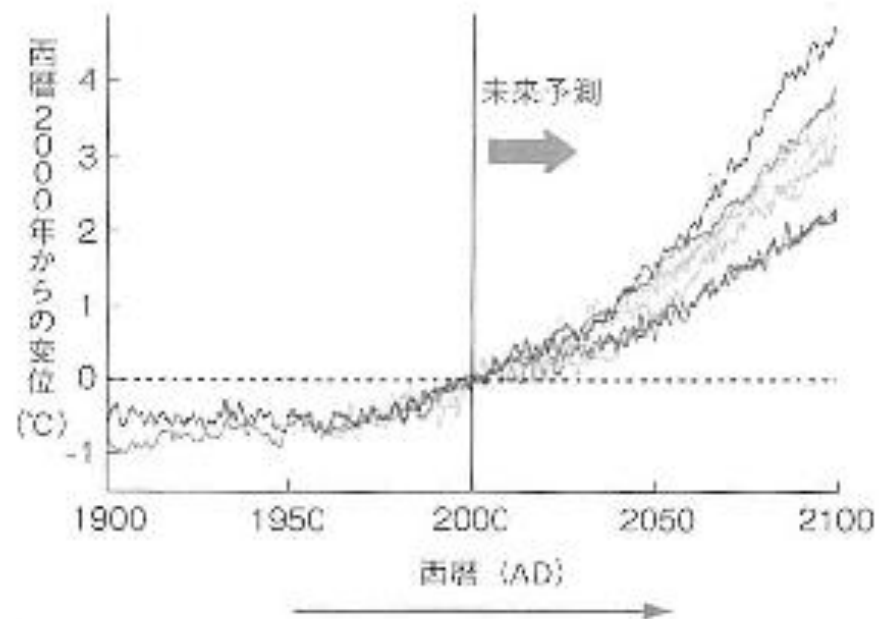


図1.3 スーパーコンピューターを使って計算した、過去100年間と今後の100年間の気温変化
使用するモデルによってばらつきはあるが、いずれも過去の温暖化を再現することに成功しており、しかも何らかの対策を講じなければ、今後は温暖化が加速すると予測している。

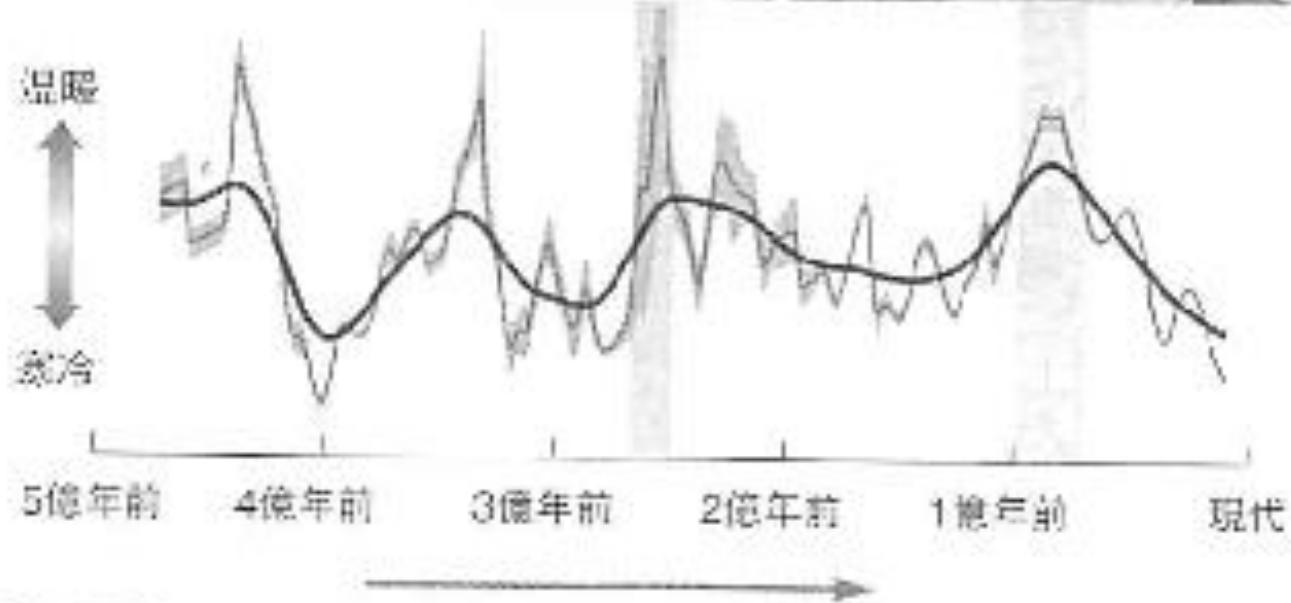


図1.4 世界各地の岩石に含まれる酸素の同位体比から復元した、過去5億年の気候変動

さわめて温暖な時代があったいっぽうで、ある限度以上の温暖化はいちども起こっていない。

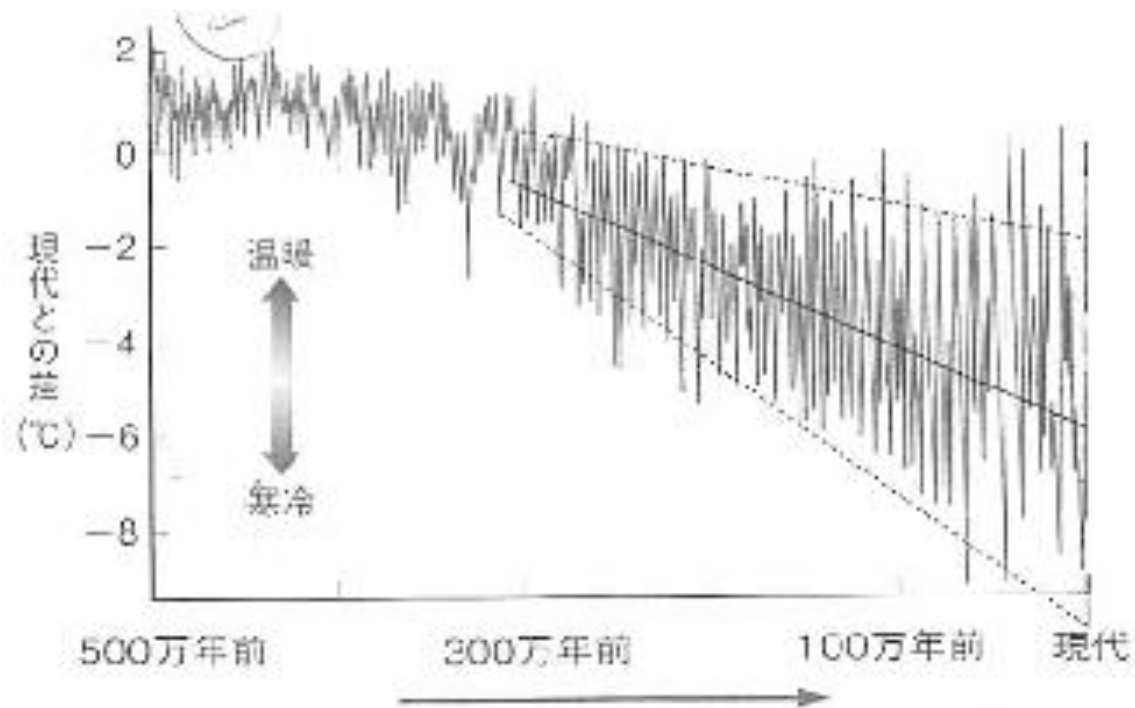


図1.5 世界各地の海底の泥に含まれる酸素の同位体比から復元した、過去500万年の気候変動

この300万年ほどは、大きく見ると寒冷化が進行している。また、温暖な時代と寒冷な時代の振幅がだいに大きくなってきている。

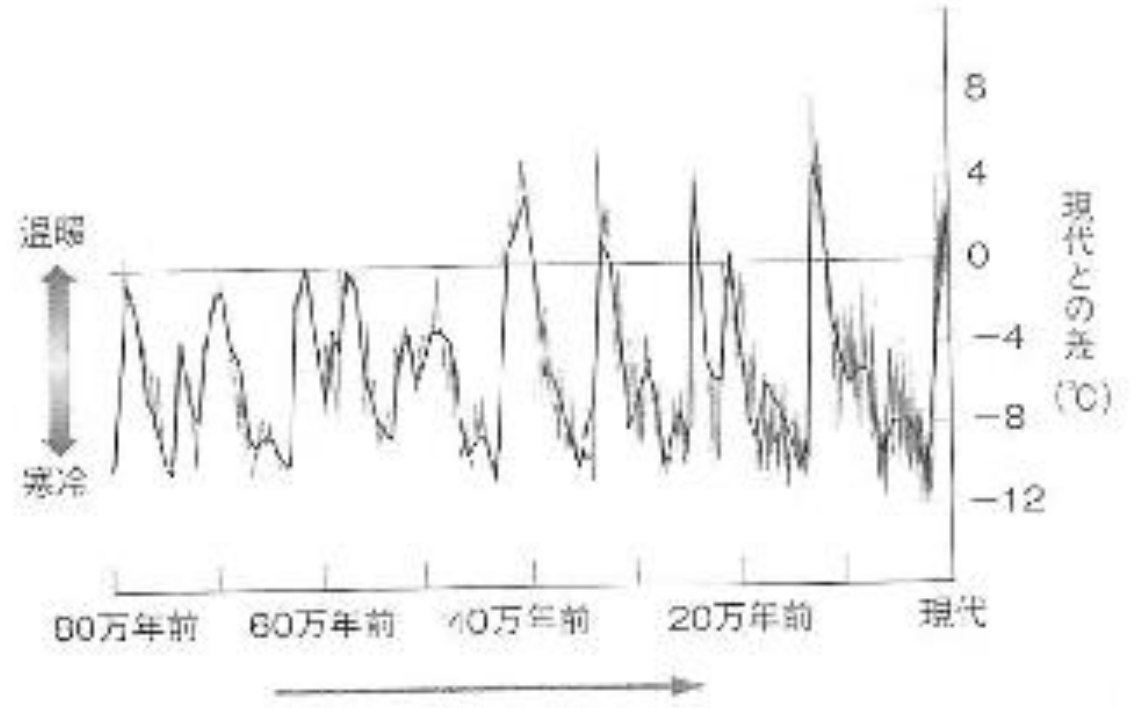


図1.6 南極の氷に含まれる酸素と水素の同位体比から復元した、過去80万年の気候変動

氷期と温暖期（間氷期）がリズムカルにくり返している。

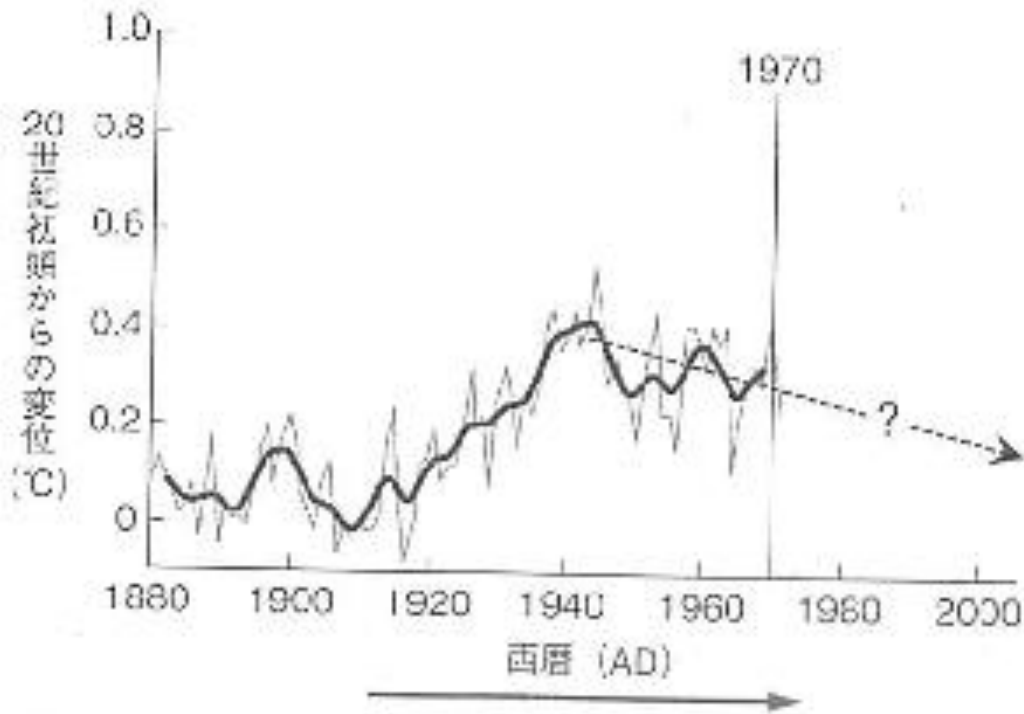


図1.8 1970年の時点で観測されていた気候変動
寒冷化が進行しているように見えていた。

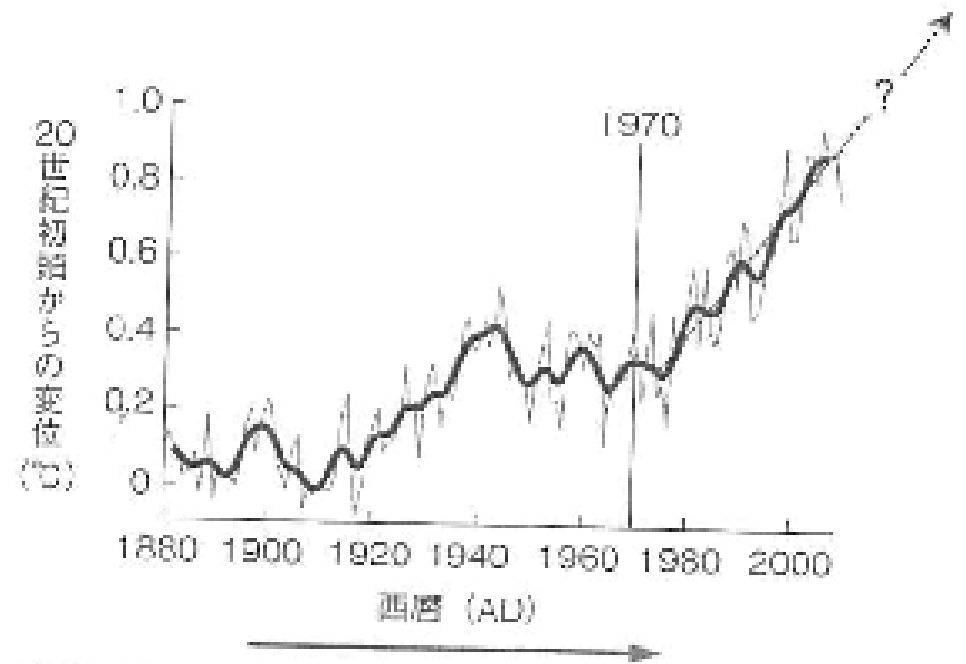


図1.9 2015年の時点で観測されている気候変動
温暖化が進行しているように見える。

筆者の記:39~40頁 しばらく続いた傾向を将来にまで延長したがる傾向・・・予測に対する「答え合わせ」の結果は、上図の通りである。・・・現在の温暖化予測も70年代の寒冷化予測と同様に信頼できないと主張しているのではない。(ただし、信頼できると主張しているのでもない)。・・・天気予報に対するときの信頼感と距離感のバランス。それと同じものを気候の将来予測について養っておく必要がある。・・・

読者・杉浦のメモ 先生も分からないのでは?明快な記述は無い。しかし、図1.6右端の現代を見ればもう少しの期間上昇しそうな感じを受ける。

第2章 気候変動に法則性はあるのか

・・・過去の変動に隠された規則を理解することは、未来について考えるためには欠かせないステップである。・・・

・グリーンランドに残された6万年の記録

グリーンランドや南極にみられる氷の大地を「氷床」と呼ぶ。雪が毎年降ることにより、今でも上に向けて成長を続けている。氷そのものの化学組成や氷に混じり込んでいる微量の不純物などを分析すれば、年体位で復元できる。1960年代に着想され洗練されながら現在も続けられている。

デンマークのニールス・ボーア研究所を中心に過去6万年の気候変動が実際に復元された。古気候学の分野で最も引用される偉大な研究成果である。5億年から見るとかなり短い、短い時間の中に膨大なデータを含んでおり、「解像度」が高い。

・ミランコビッチ理論の限界

砂時計はガラス瓶と砂と重力だけからなる非常に単純な系である。砂の高さは時間とともに極めて規則的に一定方向に変化していく。文字通り「時計」として利用できる。振り子も同様に「時計」の心臓部分に採用されるのは、圧倒的な予測可能性のためである。ミランコビッチ理論は時計として成り立つ本質的な理由がある。

・気まぐれな振り子

二重振り子とは、単純振り子の先に、もうひとつだけ錘を付け足したものである。挙動は単純振り子と全く異質なものとなる。インターネットで「二重振り子」で検索して、動画を見てください。数学的な予測が不可能なのです。二重振り子が描く奇跡は実験を繰り返すたびに違う形になる。二重振り子ある種の考え方のきっかけは与えてくれるが、それ自体が気候システムのアナロジーにはならない。

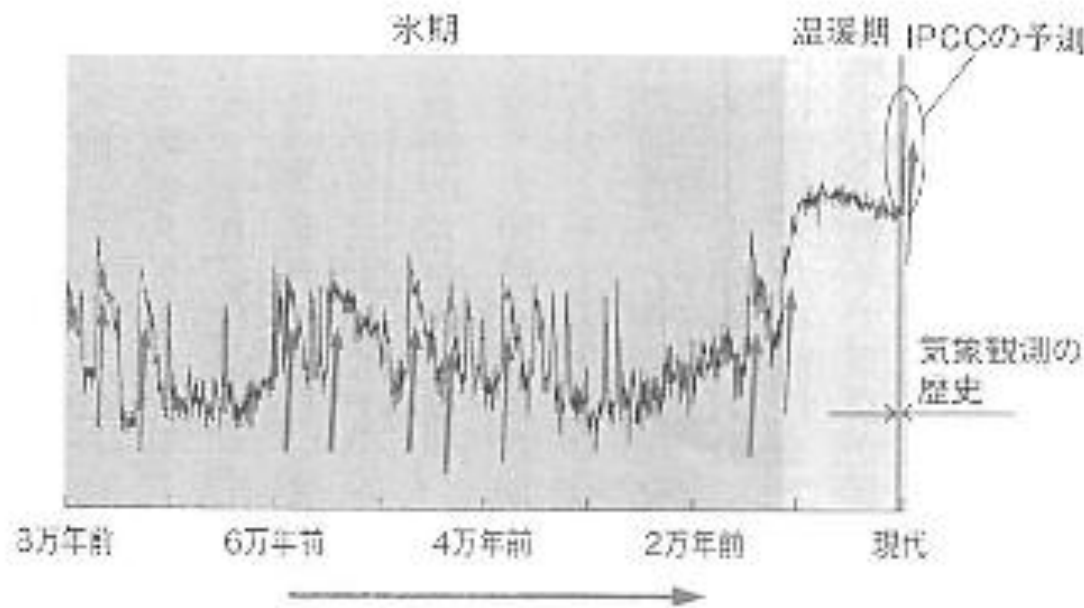
- **気候変動とカオスの遍歴** 安定した状態と乱雑な状態が繰り返す。このような現象は数学の言葉で「カオスの遍歴」と呼ばれる。直観的レベルで、グリーンランドで復元された気候変動は、氷期は乱雑で、間氷期は安定で、その境界はあまりにも急激であった。今から11,600年前のことである。
- **くり返す変動とその前触れ** 地球の公転軌道が示す離心率の値と南極の氷床で復元された気温の変動は実に良く一致している。「離心率変動」が氷期のタイミングを決めていることは確かなようだ。近年の地球温暖化にともなって、集中豪雨などの「極端事象」の頻度が上昇していることは、多くの研究者が指摘している。何かの前触れなら大きな転換点に近づいている。。
- **気候変動の3つの周期** ミランコビッチ理論の10万年サイクルだが、その他に、地軸の傾きが発生する41,000年の周期、さらに地軸の向きが円運動する23,000年周期などが知られている。要約すると気候は全てに対して共鳴現象を起こす。興味深いのは、安定相・周期相・乱雑相の順番は一定ではない。
- **本物らしさの数学** ポーランド生まれの数学者ブノワ・ワンデルは、従来の数学が現実の世界を必ずしも適切に表現していない説。フランス式庭園、英国式庭園の例、楕円と直線の葉っぱ。フラクタル幾何学で表現した葉っぱ。
- **予測できる変化とできない変化** 相転移を含む変動パターンが部分において単純な線形相(安定相)や周期相を含んでいるという事実は興味深い。これを日常の置き換えるなら「本質的には不可知である」と言うことになる。

第3章 気候学のタイムマシン 縞模様の地層「年縞」

地質学は数万年や数億年といった、極めて長い時間を扱うことを得意としてきた。一方、人間が「実感」できる時間は長くても数十年から100年だろう。福井県の水月湖から見つかった縞模様の堆積物は、そのような研究を行うのに最適な「奇跡の泥」だった。

・わずか数年で7°Cの上昇

気候の未来予測に使われる中心的ツールはスパコンである。近代的な装置による気象観測の歴史は、黎明期の断片的な記録まで合わせても400年に満たない。過去の400年は全て氷期が終わった後の「安定した」時代に属する。IPCCが描く未来と比べることができるような大きな変動は存在



しない。しかし、グリーンランドの研究によれば、11,600年前、全世界で氷期が突然終わった。温暖化の振幅は、5°Cから7°Cにもおよび、変動に要した時間は長くても数十年と見積もられた。最近の研究では、実際の変化はもっと急激で、わずか数年以内で完結した可能性まで示唆されている。また、今から14,700年前にも更に大規模な温暖化事件があったことが分かっている。

図3.1 IPCC予測と過去の気候変動の比較

これからの地球は、今までとは「まったく違った状態」に突入するのだ

出典:人類と気候の10万年史

- **古気候学者は湖底を目指す** グリーンランドの研究は、気候が時として本当に激変することを教えてくれた。・・・気候変動は、いろいろな地域が複雑に作用し合った結果として起こる。・・・グリーンランドには8万年分の雪が連続して積もっていたことから古気候を研究するための理想的な試料となった。海の底にも、ゆっくりと積もる泥が何十万年溜まっている。・・・人間の生活空間の近くには、そのように連続して物がたまる場所は多くない。
- **理想的な湖とは** 研究に適した湖を慎重に選ぶ必要がある。長い時間をかけて静かに途切れなく溜まった湖底の土である。・・・古気候学者の日常は地味である。採取して来た堆積物を時代ごとに切り刻み、ひとかけらずつ分析していく。薬品や放射線、顕微鏡などを駆使した分析には相当な時間がかかる。筆者の場合だと、朝から晩まで大量の試験管をかき混ぜ続ける。・・・がっかりする幾つかのパターンがある。洪水、山崩れ、鉄砲水、など厚く見えてもカバーする時間は一瞬に過ぎない。・・・どんな上質な堆積物でも過去50年分くらいしかなかった。怖いのは人間の浚渫である。
- **奇跡の湖「水月湖」** 水月湖は若狭湾の景勝地、三方五湖の一つであり、五湖の中では最大の面積と水深を誇る。周囲を山に囲まれ、湖岸に大規模な集落もない。驚くほど自然に守られた美しい湖である。この湖にはいくつかの珍しい特徴がある。

第1の特徴

水月湖には流れ込む川がない。三方五湖の水は海に直接つながっている日向湖(ヒルガコ)を別にすれば、はす川というたった1本の川によって供給されている。

第2の特徴

湖底に酸素がないことである。酸素があれば動物が棲みついて有機物に富んだ土を食べたり巣穴を掘ったりする。湖の堆積物は動物による破壊を免れている。

水月湖の底にはなぜ酸素が無いのだろう

湖面の酸素が湖底に運ばれるメカニズムには大きく分けて2つ有る。1つは、嵐などが起こす大波によって水が直接かき混ぜられる場合である。しかし、かき混ぜは湖面から数メートルである。水月湖の水深は34メートルである。周囲は高い丘に囲まれているため強い海風が直接吹き付けない。・・・水月湖の底の水は大気から切り離され、酸欠のままいつまでも湖底に止まり続けた。・・・水は4°Cの時に一番重くなる。水月湖は4°Cの水が湖底に定着している。

・タイムマシンの発見

湖底には酸素が無く、しかも流れ込む川が無いことによって、水月湖には理想的な堆積物がたまる素地が整った。・・・湖底の酸素濃度を測る必要も周辺の地形を見る必要もない。・・・この縞模様の正体は、1年に1枚ずつ溜まる薄い地層である。・・・季節ごとの層は破壊されずに保存されて、美しい縞模様を作り出す。・・・川を経由せずに直接流れ込む土は、三方湖という天然の砂防ダムを経由する必要が無いいため、他の季節の堆積物に比べてやや粒が荒い。・・・この層は、偏光フィルターを通して観察すると特徴的な暗色に見えるため、後述する縞数えの際に有力な手掛かりになる。・・・1年に1枚ずつたまる地層は「年縞」と呼ばれる。・・・世界でも水月湖の他に例がない。

・水月湖はなぜ埋まらないのか

じつは、水月湖の年縞が世界で一番美しいかと言うと必ずしもそうとは限らない。・・・北欧などで水月湖以上に鮮やかな年縞が見つかることがある。しかし水月湖のように7万年も連続してたまった年縞は他に例がない。・・・水月湖の例だと、地層の厚さは平均しておよそ0.7ミリメートルである。1,000で70cm、1万年で7メートル、3万年で20メートル・・・水月湖には既に7万年分の年縞があり、おそらくは今後も溜まり続ける可能性が高い。・・・三方断層の西側の地面は、平均すると1年におよそ1ミリメートルの速度で沈降し続けている。・・・にもかかわらずむしろ深くなってきている。・・・当時の堆積物も残されていてボーリングによって採取することができる。・・・15万年分の採取により近代7万年分が恒常的に酸欠になり美しい縞模様が出来ている。それは7万ページに及ぶ長大な年代記である。

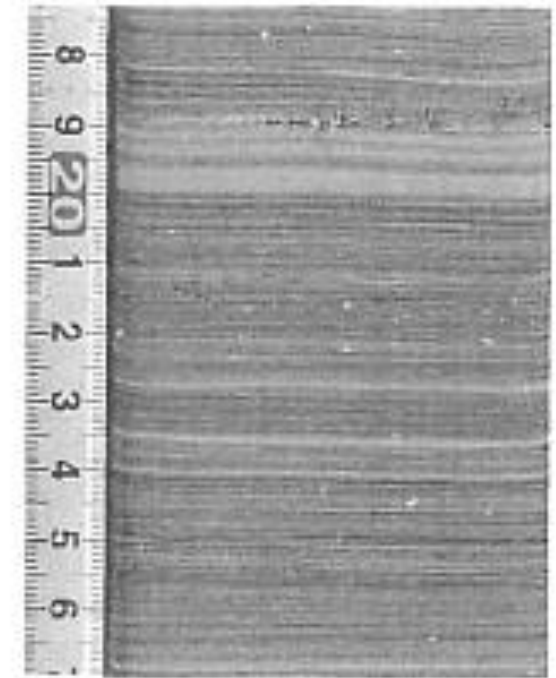
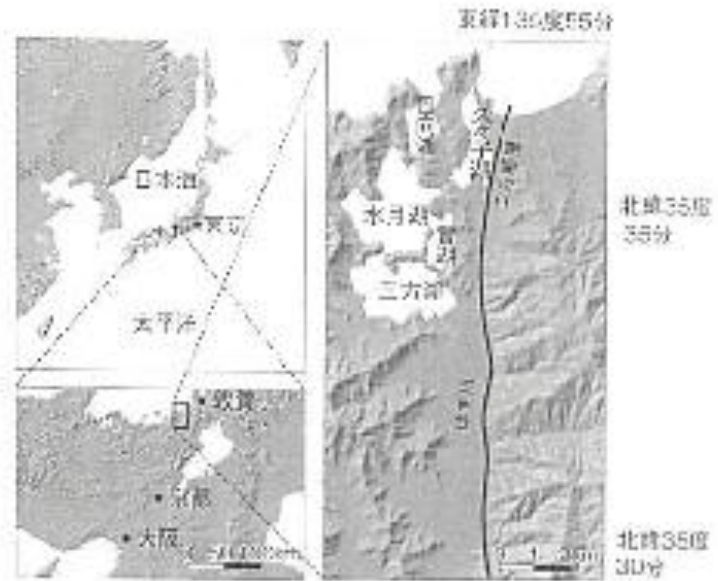


図3.3 水月湖の年縞堆積物
1年に1枚の細かい縞模様が発達している。

参考



地理

福井県の西部、嶺南地域や若狭地方に位置する。海岸は若狭湾のリアス式海岸の一部を成している。南に滋賀県との県境には800m級と比較的低い山々が連なり、高島トトレイルのルートでハイキング感覚で登山が探訪できる。美浜町との境界にはラムサール条約登録湿地の三方五湖がある。滋賀県に抜ける鯖街道の一つでも知られる。倉見峠を分水嶺とし、はす川が三方五湖に注ぎ三十三間山を源流とする北川が水坂峠周辺の溪流がおよび鳥羽川と合流しそれらの流域に平地が開ける。

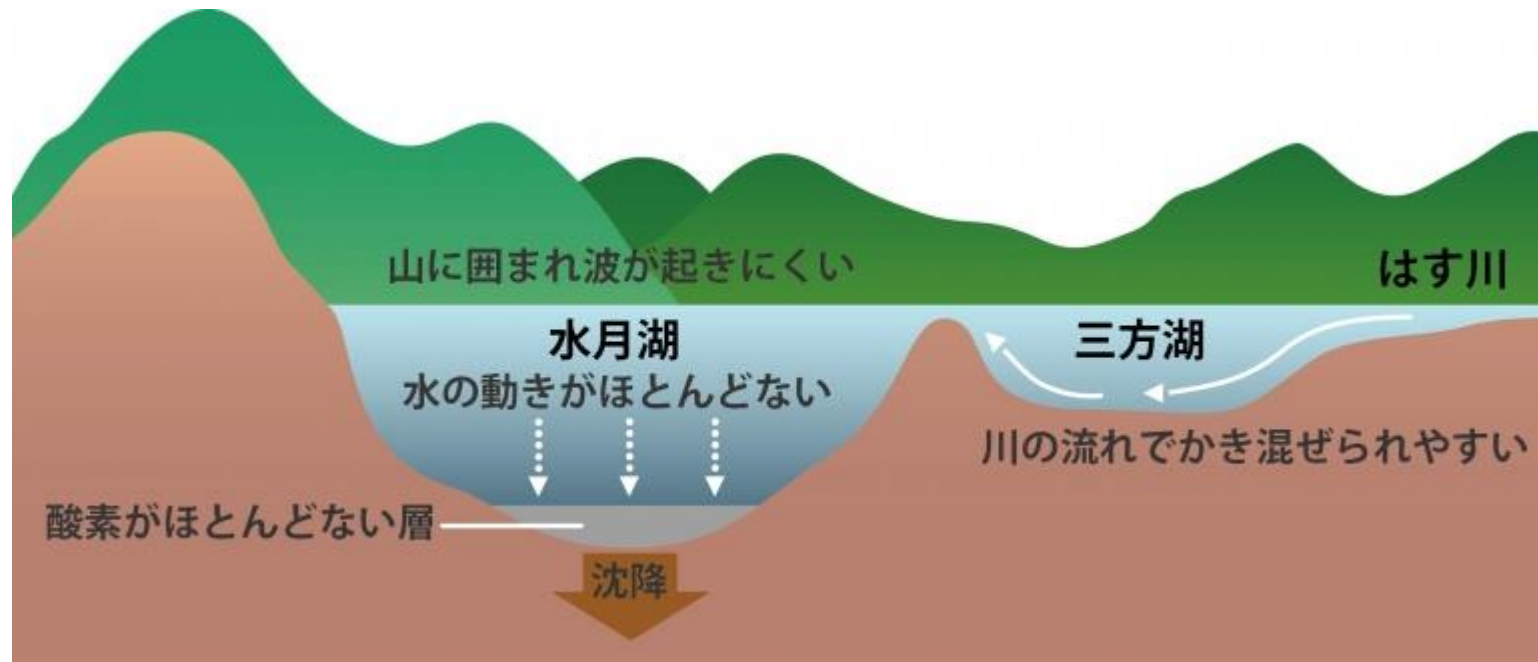


図3.2 福井県の水月湖
合流の湖と呼ばれる。

参考

- ①流れ込む大きな河川のない地形
- ②山々に囲まれた地形
- ③生物のいない湖底
- ④埋まらない湖

このような、4つの条件が偶然に重なり、長い間年縞が形成されてきました。年縞は日本では8つの湖で確認されていますが、水月湖のように7万年もの連続性をもったものはありません。年縞形成におけるこのような条件が揃った湖は世界的にも珍しく、まさに「奇跡」の湖と言えます。



参考

年縞から分かること

年縞の研究は年代測定だけではありません。年縞は木の年輪のように1年で明暗1対の縞が出来ていくので、縞模様を数えることでその縞が何年前にできたものかが分かります。そして、その縞の中には湖周辺から飛来した木の葉や花粉などが含まれています。それらを調べることで、その当時に生息していた植物の種類やその移り変わり、また、その植生から当時の気候や環境も分かってきます。その他にも、火山灰からは火山噴火活動や黄砂からは偏西風の風向きの変化、また、堆積層の変化からも洪水や地震の履歴を知ることが出来ます。

こうした研究は、地球温暖化の解明や自然災害のメカニズム、人類史の解明など、今後の研究成果に期待が寄せられています。

福井県では、「年縞」の学術的価値をさらに高め、教育や観光資源などにも活かすため、2014年7月1日から約2カ月をかけて円柱状の年縞を採取しました。採取には年縞研究の第一人者である立命館大学古気候学研究センターの中川毅教授の協力を得て実施しました。

採取した年縞は展示用に加工し、今後、国立科学博物館など県内外の博物館等で広く紹介していきます。また、年縞の価値を国内外にアピールし、研究、教育観光の拠点となる新たな施設整備の基本計画の策定を進めています。

また、採取した年縞は里山里海湖研究所にて研究も行います。年縞を基に、過去の気候と人の暮らしの関わりを解明し、これからの生活に活用していきます。

出典:福井県里山里海湖研究所

【水月湖の年縞】



写真提供/中川毅教授



参考

世界の年縞

ドイツ	アイフェル地方
ベネズエラ	カリアコ海盆（英語版） [2]
グリーンランド	GRIP氷床コア
イタリア	モンテ・ヴルトゥレ
日本での年縞	水月湖の年縞



グリーンランド
ドリル掘削機で得られた氷床コア
氷床コアはここ80万年の地球規模の気候変化の分析において重視されている[2]



ドイツ
ラーハ湖 (英語版)、フルカナイフェルの湖の一つ

ベネズエラ
「カリアコ海盆」を作成中



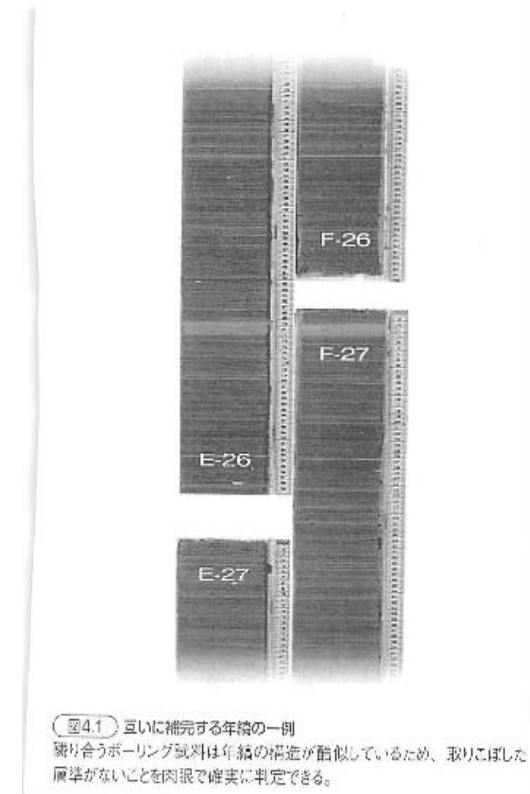
イタリア南部
モンテ・ヴルトゥレ

第4章 日本から生まれた世界標準

然が最高の材料を提供してくれてる以上、人間がそれをぞんざいに扱って台無しにするわけにはいかない。水月湖の研究は、最初から完成されたレールの上を走って来たわけではない。多くの失敗を繰り返しながら、時間をかけて少しずつ目標に肉薄していった。

- ・ **奇跡の堆積物を手に入れる** 挑戦の第一歩は、縞模様の土を完全な形で回収し、実験室に持ってくることであった。本格的な掘削が行われたのは、1993年夏、掘削を指揮したのは、設立直後の「国際日本文化センター」安田喜憲助教授(当時)だった。2年前の1991年水月湖の年縞堆積物を発見された張本人である。私は大学院生で指導教官でもあった。・・・通常は1本の長大なパイプの中に回収するが、何十メートルの回収は出来ない。・・・問題は1メートルのパイプの繰り返しだが、1メートルのパイプの間に数センチ残ってしまう。水月湖は予想をはるかに越して45メートルもあった。後で分かったが、93年の回収率は93%を下回た。・・・本格的なボーリングの予算が無かった。・・・研究グループは2006年イギリスの政府系学術助成機関資金を獲得することに成功、ついに再掘削に取り込めた。この掘削は失敗すれば悔いを残すことになる。

- ・ **パーフェクトな試料を目指せ** グリーンランドのように氷の場合は固いので掘削しやすい。水月湖の場合は泥であるため難しい。幾つかの工夫を重ねることで「乱れ」はかなり軽度に抑えられるようになってきた(工夫記述は膨大なので省略)。幸い年縞には細かい縞模様があり、肉眼でもそれとわかる。・・・こうして2006年の資料は得られた。「完全連続」な年縞堆積試料となった。図4.2。



14C年代測定は、炭素の放射性同位体である14Cの性質を利用して有機物を含む物体の年代測定を行う手法である。

出典:ウィキペディア (Wikipedia)

• **地質学の「標準時計」** 途切れない試料を採取することには成功した。研究の次のステップは、このボーリング資料に正確な年代を与えることである。年代記のページに番号を振る作業と表現してもいいだろう。・・・年輪は地質学につきものの「誤差」ない決定法・年輪年代学以外に存在しない。・・・2000年代になって、サンゴの体内に取り込まれたウランは放射線を出して崩壊しながら他の物質に変わっていく。ウラン系列から生じたトリウムと言う元素は、水に溶けにくい。トリウムにも崩壊のスピードが異なる複数の同位体が生ずる。それらの比を測定すれば何年前の物が計算から求められる。・・・もう一つの有力な候補は、タケノコように成長する鍾乳洞の「石筍」に含まれるウランからのトリウムも有力だ。

• **放射性炭素年代測定の限界** 年輪の計数とウラン・トリウム法はいずれも、最も信頼度の高い年代決定法として現代でも研究の最前線を牽引している。問題は、これらの方法には試料の種類が極めて限られていることである。・・・およそ5万年前まで測る方法として現在最も広く使われているのは、放射性炭素(^{14}C)年代測定と呼ばれる手法である。 ^{12}C ^{13}C もあるが ^{14}C だけが放射能を持ち年代を推定できる。・・・ ^{14}C は年代測定の原理であって標準時計として見なされていない。 ^{14}C が独り立ち出来ない運命にある。

出典:人類と気候の10万年史

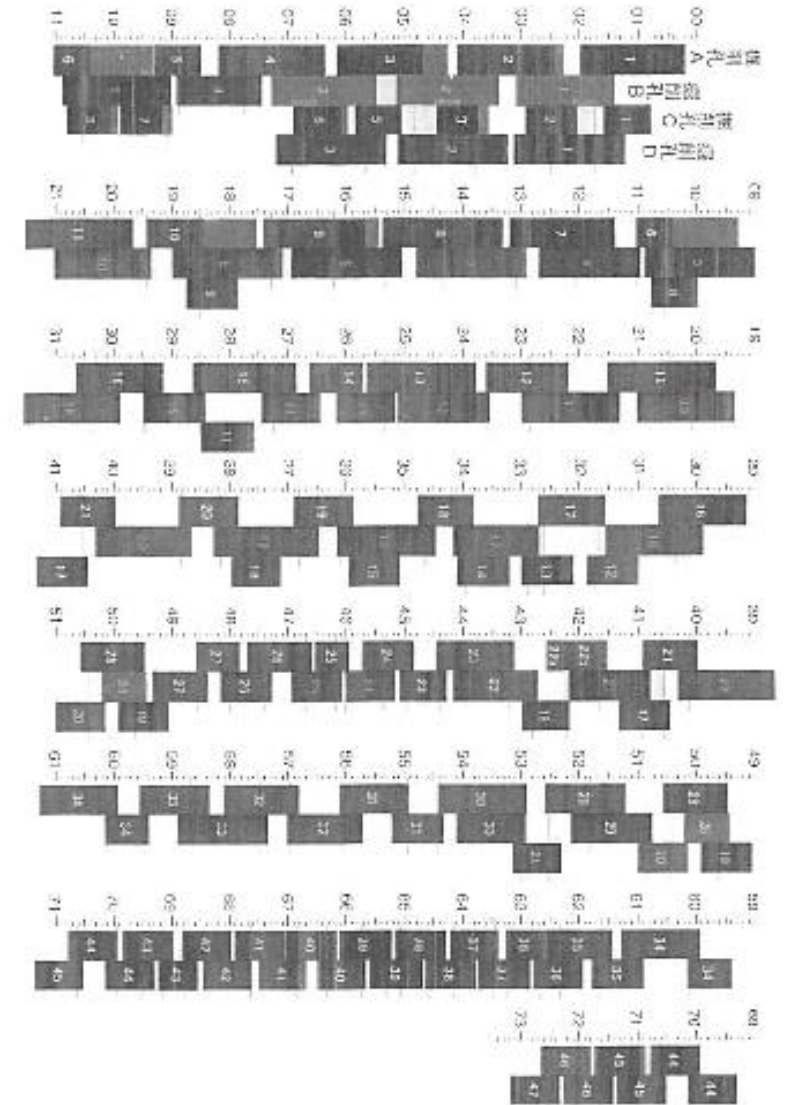


図4.2 2006年に採取された水月湖の年輪堆積物のボーリング試料振割を4回くり返すことで、まったく欠落のない15万年分の試料を手に入れることに成功した。

- 「ものさし」を伸ばす . . . 水月湖の縞堆積物の中には樹木の葉っぱの化石が含まれていて、14C年代を測定するにも極めて適している。年縞を数えて正確な年縞を年代を決定し、同時に葉っぱの14C年代も測定すれば、14C年代が成り立つために必要な「換算表」を作ることができる。 . . . 重要なのは、**1998年に米国の「サイエンス」誌に安田先生の研究室助手20代の北川浩之さんのデータが公開され、当時としては世界が目を剥ぐほどの高品質だったことと、それなのに北川のデータはライバルとの競争に敗れ世界標準に採用されなかったことの2点である。原因は1993年ボーリング試料が不完全であったことが判明する。 . . . 北川の縞数えは驚くほど正確だったことが判明する。北川が当時の測定装置が新品に近く現在の目で見ても感嘆するほどの安定度を持っていた。北川が行き当たった壁は北川自身の努力では越えようのない非情な壁だった。**
- **水月湖が世界標準に** 私達の2006年掘削は、そのような文脈の中で立案された。 . . . ひたすら縞の数を数え、大量の14C年代を測ることだ。 . . . あとはパイオニア北川が一人でやったため孤独だったが、今度はプロジェクトとして「ものさし」を作ることを目指した。 . . . 四年の歳月をかけて「年代目盛り」を完成させた。もう一つの柱は14Cの年代測定である。こちらはオックスフォード大学とグラスゴー大学に協力をお願いした。 . . . 細心の注意をはらって数えあげた縞の枚数が狙ったほど正確なものにならなかった。 . . . ベイズ統計モデルと呼ばれる手法を応用した計算の方法を考案し、ソフトウェアを開発して計算を実行したのはオックスフォード大学の年代測定研究室を率いるクリストファー・ブロンク・ラムジー教授だった。水月湖のデータは膨大で大学のサーバーを2週間も独占した。最終的に得られた年代目盛りの誤差は5万年で±169年まで改善していた。全世界に誇れる品質である。14C年代を正確な年代に読み替える換算表は、**現在ではIntCal(イントカル)と呼ばれる標準換算表に統一されている。ラムジー教授の計算が成功したのは2012年2月で、2012年7月13日のパリのユネスコ本部の国際放射性炭素会議の総会で全会一致で、水月湖のデータを新しいIntCalに採用する、ことに支持されて「世界標準時計」となった。**

第5章 15万年前から現代へ

--解明された太古の景色--

2006年に始まったプロジェクトで目指したものは、まず完全連続の試料を手に入れる。次にその試料に最高品質の年代目盛りを与えることだった。・・・本当の目標は過去に起こった変動を復元し、理解することだった。

- **気候を分類する** 過去の気候変動の様子は、どうすれば復元できるのだろうか。図5.1は高校の地理の教科書に必ず載っている。この地図をつくったのは、ロシア生まれのドイツ人ケッペンである。彼は世界の気候を分かり易く分類することに生涯をその研究に捧げた。第一義的には気候を降水量と気温で定義した。ケッペンは植生景観に基づいて分類し「ケッペンの気候分布図」を作り現代まで引き継がれている。余談だが大陸移動説で有名なアルフレッド・ウェゲナーの義父でもある。

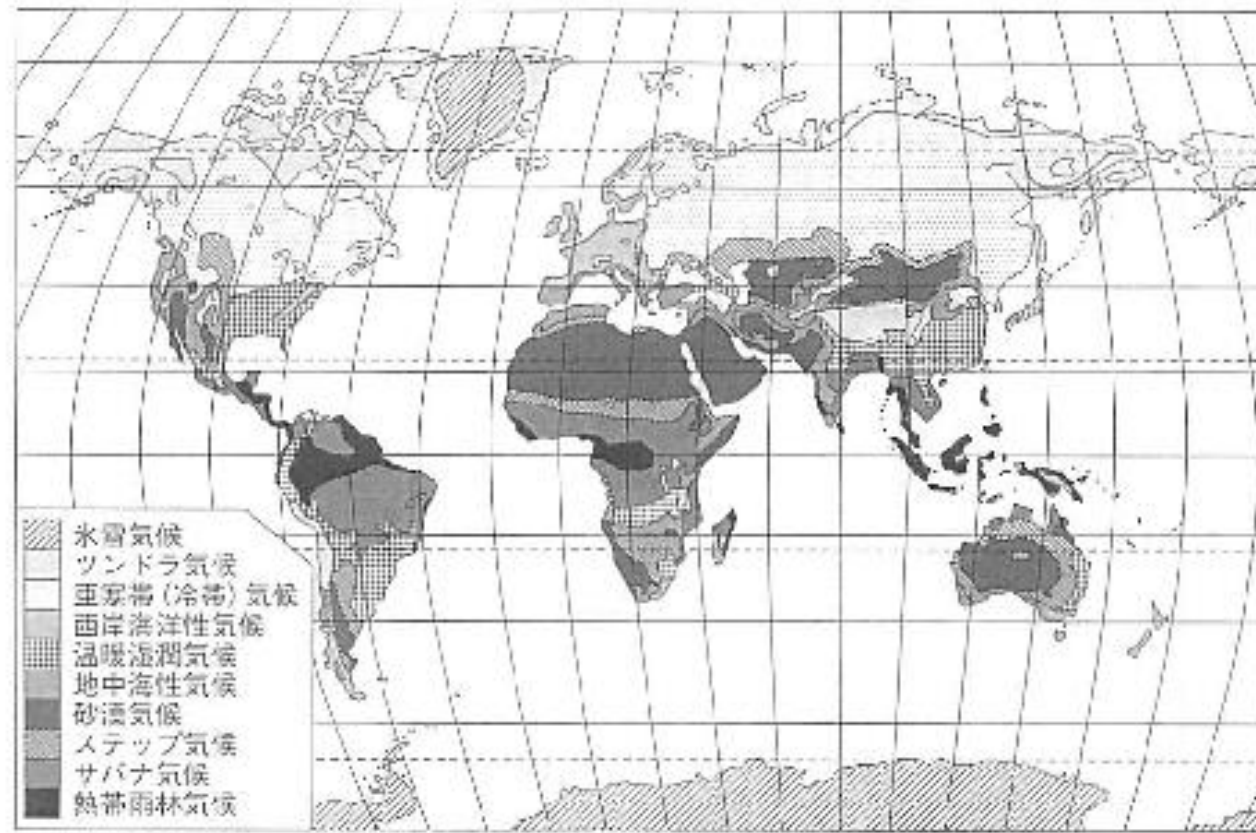


図5.1 有名なケッペンの気候区分図 世界の気候を「景色」にもとづいて分類している。

- **花粉を通じて見る過去の風景** 温度計や降水量計を使わず何か別の指標を使って気候を「復元」する必要がある。植生景観は気候を直接反映する。つまりそこに生えていた植物の種類や構成はどうすれば復元出来るのだろうか。・・・生物や植物の化石である。・・・この問題に画期的な解決をもたらしたのが花粉分析する手法である。花粉は植物にとって雄の生殖細胞である。つまり遺伝情報を担うDNAを雌に届ける。DNAは乾燥や紫外線によって容易に損傷を受けるが、植物はDNAを安全に包み込む堅牢なカプセルを発達させた。・・・花粉は堆積物の中で化石としてよく保存される。シダ植物の胞子も花粉と同じ物質で恐竜の骨のように珪酸質の岩石に変化していない。水月湖から抽出した花粉を顕微鏡で観察すると様々な花粉の数を数えることにより割合が計算でき、樹種の構成割合の景観が分かる。

・ **地道な作業の先にあるもの** 花粉の化石を通して過去の景色を見ようとする手法は20世紀の初頭にスエーデンのフォン・ポストラによって創始された。スエーデンには花粉の化石を多く含む泥炭地が豊富に有ったから。・・・筆者も安田喜憲も水月湖年縞の花粉分析の専門家である。花粉化石を1粒ずつ観察して数え上げていくプロセスで地味で時間もかかる。花粉分析は1粒1回の分析が1時間以上、縞数えは蛍光X線分析だと1回数秒から数十秒である。100倍の差がある。フランスやニュージーランドで、画像認識技術を応用して花粉分析自動化する研究グループもある。しかしプレパラートに残るゴミとの識別が困難で、まだ手動分析が必要のようだ。

・ **水月湖15万年の旅** 私が先ず行ったのは水月湖から得られた堆積物試料を深度50cm毎に分析することだった。蛍光X線スキャナによる分析密度は60 μmだったのでそれと比べると実に1万倍近い粗さである。目標分析速度は1cmである。分析結果を図5.2に示す。・・・水月湖の年縞のうち年縞が有るのは湖底から45mだけだが、その下に年縞の無い通常の堆積物が続いており、全体の厚さは73mを超える。時代に直すと実に15万年に達する。図5.2の中に、15万年の「景色」の歴史が詰め込まれている。グラフはどの樹種の花粉が何%位含まれているかという割合の変遷を表現している。・・・12万～11万年前の三方五湖周辺は平野も山地も鬱蒼とした森に囲まれていた。・・・5000年前頃の当時の三方五湖周辺は低湿地に杉の巨木が生い茂り、斜面にカシやシイなどの常緑樹林が広がる。生物多様に富んだ鬱蒼とした景観に囲まれていたのだろう。

出典:人類と気候の10万年史

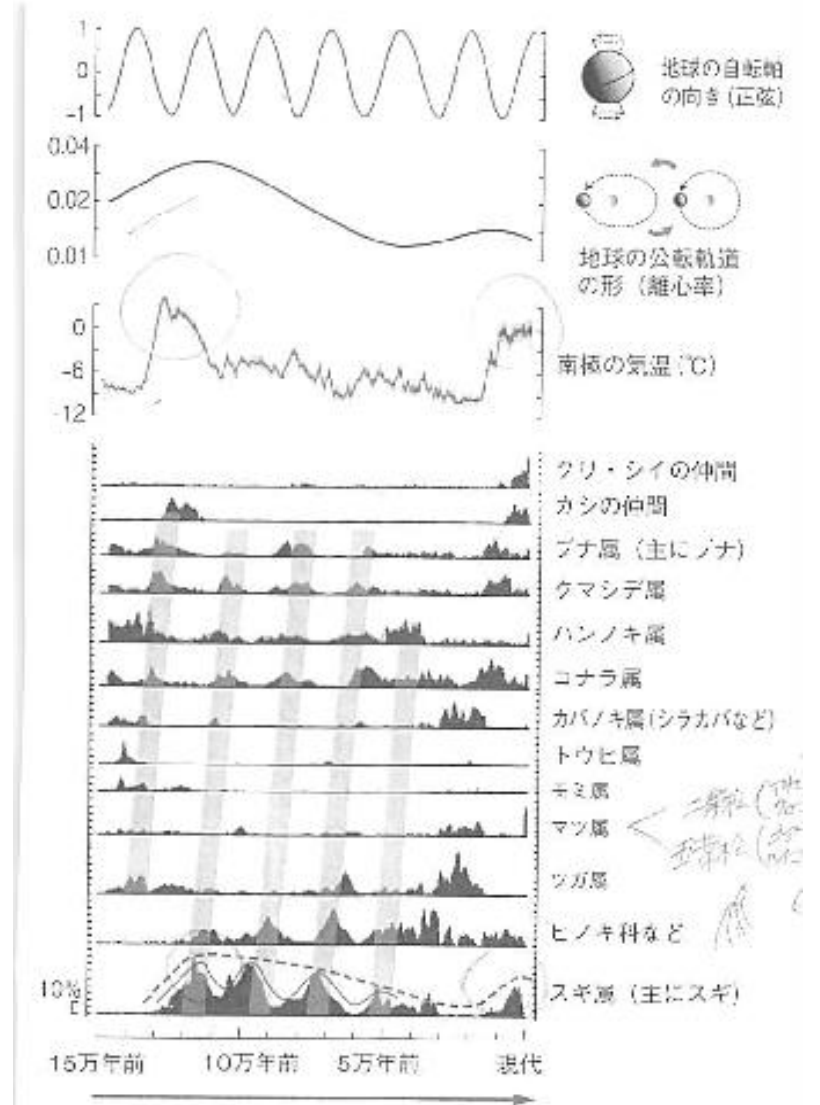


図5.2 水月湖15万年の植生の変遷
時代によってまったく違う森が広がっていた。植物が交代することの直接の理由は気候変動だが、その背景には天文学的なメカニズムが作用している。

・ **2万3000年の「短い」周期** 10万年の大きなサイクルの次に目に付くのは図5.2の中に細い実線で強調したリズムカルな変動である。およそ14万年前から5万年前にかけて、スギは何回も増減を繰り返す。スギが減ると、その代わりにヒノキ科などの針葉樹、続いてコナラ属、ブナ属などの花粉が順番に増えて、再びスギが多い時代に戻っていく。・・・1回のサイクルに要する時間は、おおよそ2万3000年である。これはミランコビッチ理論で「歳差運動周期」と呼ばれる地軸の向きが変動する周期と驚くほど良く一致している。・・・地球ほどの大きいコマだと、図5.7参照、1回の円運動だけで2万3000年もの時間がかかる。・・・現在の温暖化周期と12万年前の温暖期を比べると、現在の方が地球に届く太陽エネルギーの変動が小さい。言い換えるなら安定している。・・・琵琶湖の記録は水月湖より長く、およそ45万年前までの連続した記録を入手できる。それによれば、現在と似たシイの森

はおよそ40万年前の温暖期にも成立していた。やや込み入った話になるが、40年前は最近の数万年と同様に地球公転軌道が楕円よりも円に近かった。もしここで述べたように、「太陽から近い時と遠い時の差がなくなる」ことがシイの生育を助けたと考えると、琵琶湖のデータも同じ理論で説明がつく。しかし40万年前のことをし詳細に知ることのできる記録は少なく日本ではほとんど琵琶湖だけに限定されてしまう。そのため、今のところこの仮説にはサポートが乏しく、まだ定説となるには至っていない。

おおよそ2万3000年で
1回転（歳差運動）

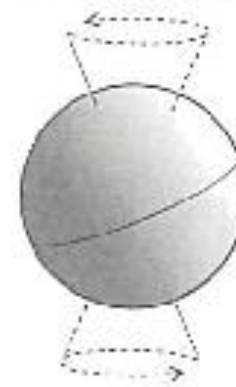


図5.7 歳差運動

地球の自転軸は、倒れかけたコマのように「みそすり運動」（歳差運動）をしている。地軸の向きは、2万3000年かけて1回転し、もとの位置に戻ってくる。

第6章 過去の気候変動を再現する

水月湖の堆積物に含まれる花粉を分析することで過去の景色を眺めることには成功した。だが、それすらも私達の最終目標ではなかった。最後に知りたかったのは水月湖の周辺で気候がどのように変わったかである。

- ・ **過去と現在を結びつける花粉データ** ここまで、水月湖の周辺で「景色」がどのように変わったかを見てきた。・・・花粉から気候をふくげするために、現在の日本で最もよく使われているのがモダンアナログ法と呼ばれる手法である。・・・日本は先進工業国である上に気象災害も多いことから気象観測ネットワークは世界的に見ても極めて充実している。そのため例えば「旭川あたりの気候」と言った場合に、それが平均気温であれば何°Cなのか、降水量では何ミリメートルのことを意味するのか、観測結果を元に数字で表現することができる。これがモダンアナログ法である。・・・実は日本の花粉学は、モダンアナログ法を用いた気候の復元を得意にしている。基礎を築いたのは、モスクワ大学准教授パヴェル・タラソフ博士と、現千葉商科大学の五反田克也教授だった。

・・・安田先生が集めた1000件を超える文献をすべて調べ上げるために、五反田さんが費やした時間は合計で1年以上におよんだ。その結果、日本全国から285地点の表層花粉データを集めることができた。図6.1。しかも日本は南北に長いうえに山も多いため、一つの国の中に多様な植生を含んでいる。統計的な手法で検証したところ、五反田さんのデータベースは量だけでなく、質においても世界最高水準のものであることが確認された。最後のゴールに向けて、準備が着実に整いつつあった。

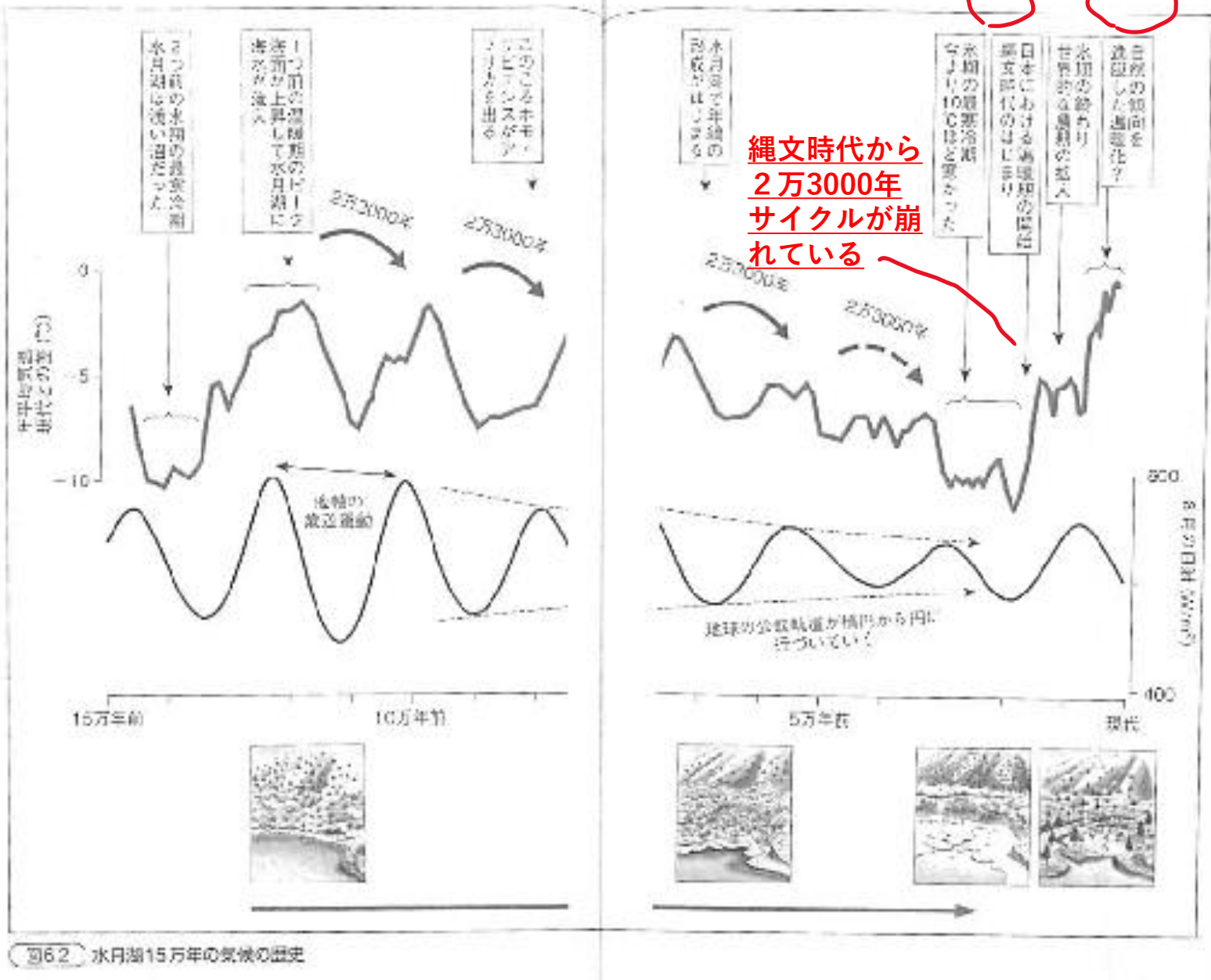


図6.1 現在の地表の花粉データが得られた地点
これでも世界有数の高密度だが、地点を増やす努力は今でも続いている。

・ 景色を気候に換算する 最後に残ったパズルピースは気候だった。気象庁から文字通り膨大なCD-ROMの提供を受けた。観測データは24時間観測データだが、保守点検・停電の場合が空白で、月別平均にするには注意が必要だった。必要とした1961年～1990年までの30年分データを得るのに2日の予想が1ヵ月かかった。・・・日本の古気象学を支える表層花粉と気象のデータセットが整備完了した。ソフトウェアはフランスの旧式ソフトでなく復元誤差を評価できる新ソフトを使用した。余談だが、この新ソフトはWebで公開し、現在、世界の20カ国で利用されている。

・ 水月湖15万年の気候変動 図5.2に示した水月湖の化石花粉データをモダンアナログ法によって気候に変換したところ図6.2のような結果が得られた。・・・復元された気候のグラフを見れば、植生変換

出典:人類と気候の10万年史



の背後で何が起こっていたかは一目瞭然である。すなわち、最近の1万年および12万～11万年前あたりに温暖のピークがある。反対に今からおよそ2万年前は氷期の一番寒い時代だった。氷期と温暖な時代の間で、温度の振幅はじつに10°Cにもおよんだ。これはグリーンランドや南極などで、氷床のボーリング試料の分析から推定されている気候変動の振幅とおおむね一致する。・・・ミランコビッチ・サイクルの地球の公転軌道は10万年の時間をかけて真円に近づいたり楕円になったりしている。公転軌道がわずかに細長い時、世界は一様に温暖だった。一方公転軌道が真円に近くなると世界は氷期に突入した。水月湖の堆積物は、この大きなサイクルを見事に記録していた。・・・このような視点から水月湖周辺で8月の日射量がどのように変動したかを、図6.2の下のほうに示した。・・・力学的な計算によれば、地球の公転軌道はこれから数万年にわたって真円に近い状態が続く。だとするとスギ林とブナ林が2万3000年おきに交代するダイナミックな変動は、今後しばらくは見ることはできないのかも知れない。

- ・ **人間が氷期の到来を遅らせている？** 夏の日射量が、中緯度の気候を左右する決定的な要因の一つであることは分かった。だがこの話にはひとつの重要な例外があると主張する研究者もいる。それはおよそ8000年前から現代にかけてである。確かに水月湖の気候復元結果を見ても、最近の数前年は夏の日射が極小近くまで低下して来ているのに対し、温度は逆に上昇して居る様に見える。日射の変動と気温の変動の間に、多少の時代のずれが生じるのはむしろ普通のことだが、これほど明瞭なコントラストが見られぬ時代は、過去15万の中では他に存在しない。日射と気温のこのような乖離が、なぜ最近の8000年だけにみられるのかについては、まだ議論が続いている状態である。だが、一つの有力な説が人間活動に原因を求めていることは、ここで紹介しておく価値があるように思う。

氷期と氷期の中の温暖期、いわゆる間氷期はこれまでに何度も到来しているが、現在の温暖期がすでに例外的に長く続いていることは、多くの研究者が指摘した居た。そんな中でバージニア大学のウィリアム・ラジマン教授は、最近の数前年に限っては、いわゆる温室効果ガスの濃度に異状がみられることに注目した。南極の氷をウイスキーグラスに入れると、水に閉じ込められた昔の空気がパチパチとはじけるような音を立てる。氷の中には、過去の大気がそのまま保存されている。だとすると、氷床のボーリング試料を溶かし出てきた空気を集めて分析することで、大気中の温室効果ガスの濃度がどのように変動したかを直接測定できることになる。実際に分析を行っ

た結果、主要な温室効果ガスであるメタンと二酸化炭素の濃度の変動パターンは過去何十万年にも渡って、ミランコビッチ理論によって極めてよく説明できることが判明した。・・・だが実際のデータを見ると、メタンは5000年前、二酸化炭素は8000年前頃から、ミランコビッチ理論で予測される傾向を大きく外れて増加していた。(図6.3)。・・・ラジマン教授の仮説の骨子は、アジアにおける水田農耕の普及、ヨーロッパ人による大規模な森林破壊に有ると主張して学会に衝撃を与えた。・・・ラジマン教授の主張は100年前でなく8000年前に遡るということを意味していた。

・細かい変動が示す謎

最後に、もっと短い時間のスケールの変動についても見ておこう。すでに述べたように、グリーンランドの氷期にはD-Oイベントと呼ばれる急激な温暖化事件が頻繁に起っていた(図2.1参照)。D-Oイベントは規模に大小のばらつきがあるが、大きい場合の温度の振幅は10°C近くにもなった。つまりグリーンランドにおいては、氷期の最中でもあるにかかわらず、気温が現在の水準に肉薄するような時代があったのである。だが、これまでの分析結果では、水月湖の氷期の記録からは、そのように短期的で激しい変動は見つかっていない。水月湖で見られる気候変動は、グリーンランドに比べると一概になだらかであり、ミランコビッチ理論に素直に従っているように見える。

出典:人類と気候の10万年史

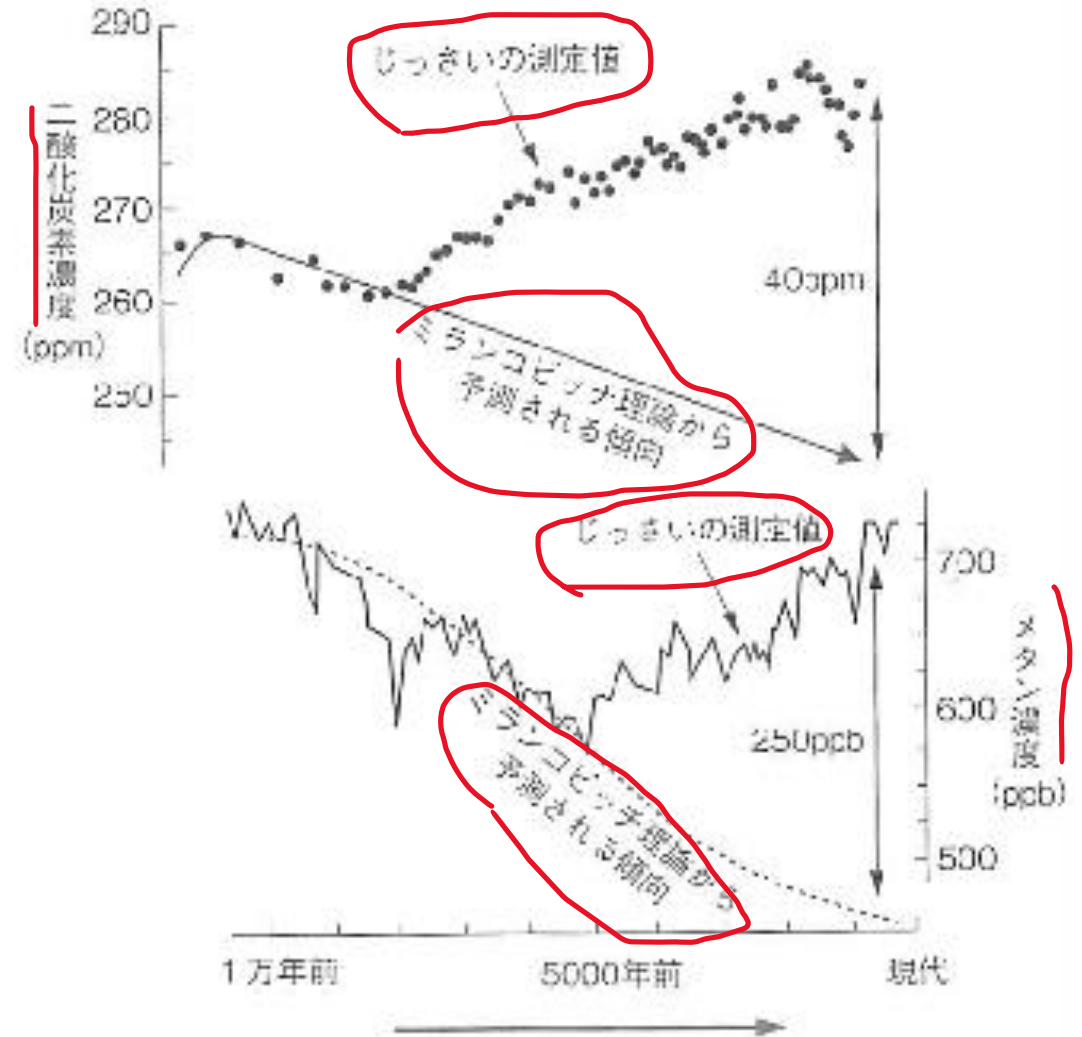
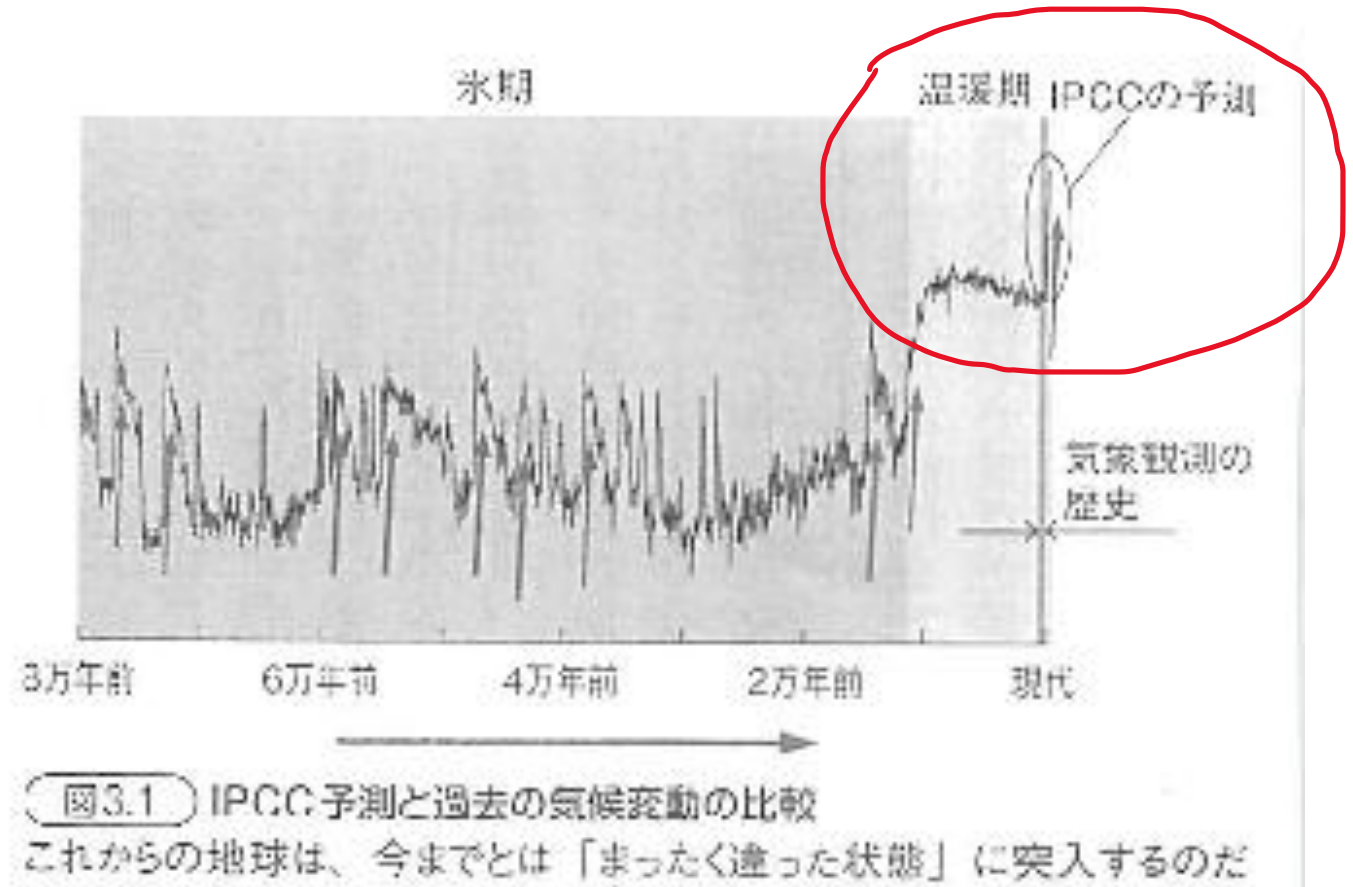


図6.3 水床のボーリング試料に記録された、過去の温室効果ガス濃度。ミランコビッチ理論に従うならば減少しているはずの二酸化炭素とメタンが、産業革命よりもはるか以前から上昇に転じている。

D-Oイベントが発生するメカニズムは、まだ本当には解明されていないため、その影響が日本ではそれほど強く見られないことの理由も現時点では断定が難しい。これから世界各地で試料の分析を進め、より多くの情報を集めてくる必要がある。実は水月湖でも、分析の密度を50倍に上げることを目標にした努力が続いている。作業はまだ完了していないが、最新のデータによれば、D-Oイベントに相当する時代に日本でも小規模の変動はあったようである。さらに水月湖とグリーンランドの年代目盛りを両方とも信じるなら、変動が始まるタイミングは水月湖の方が数百年ほど早かったらしい。・・・水月湖とグリーンランドそれぞれの年代目盛りを、特に換算などを行わずにそのままつかっているのかどうか若干の不安が残っており、今後の研究の課題となっている。



D-Oイベント

ダンスガード・オシュガー・サイクル (Dansgaard-Oeschger cycle) は、最終氷期に起こった急激な気候変動である。数十年間で最大10°Cの急激な温暖化と急激な寒冷化を繰り返したことがウィリ・ダンスガード (英語版) とハンス・オシュガー (英語版) によってグリーンランドの氷床コアの研究により提唱された。

・ **氷期の終わり** ここまで、水月湖で過去15万年間に起こった気候の変動を概観してきた。・・・そこで私たちが注目したのが、氷期の終わりである。氷期は全世界に寒い時代であり、その後には暖かい時代が来た。・・・最後の氷期は、今からおよそ1万1600年前に終わった。それから現在に至るまで、地球はそれほど大規模な気候変動には見舞われていない。・・・私たちはそのような観点から、水月湖の年縞堆積ぶつで氷期の終わりに相当する部分の花粉分析を重点的に実施した。15万年全体を把握するためには、試料を深度50cmおきにしか分析しなかったが、今度は1cmで切り刻んで連続データを取った。この時代の水月湖の1cmは、時間にするとおよそ10年である。10年なら当時の人間の平均寿命よりもかなり短い。これだけのデータが有れば、人間が肌で感じる気候変動を検出できる。

分析の結果は非常に興味深いものだった。事前の予想通り、最終氷期末期の水月湖周辺はまだ寒く、氷期が終わると同時に暖かくなった。図6.4。気温が最も低かったのは、ここで示した時代よりずっと以前の2万年前頃であり、それ以降はすでに温暖化が始まっていた。つまの、図で示している変化は「最後のとどめ」であって、氷期からその後の温暖な時代に至る移行の全体像でない。・・・

もうひとつ注目したいのは、気候の安定性である。・・・そのような不安定な時代は、しかし、あるときを境に突然終わった。花粉のデータは1cmでしか得られていないため、残念ながら変化のスピードを花粉から正確に読み取る事は出来ない。だが、その部分の堆積物をよく見てみると、氷期の年縞は薄くて黒っぽいのに対し、暖かくなった後の年縞は厚みが倍近くあり、色も白っぽいことが分かる。このような厚みの違いがどのような要因によるものかは、解明されていない。・・・

出典:人類と気候の10万年史

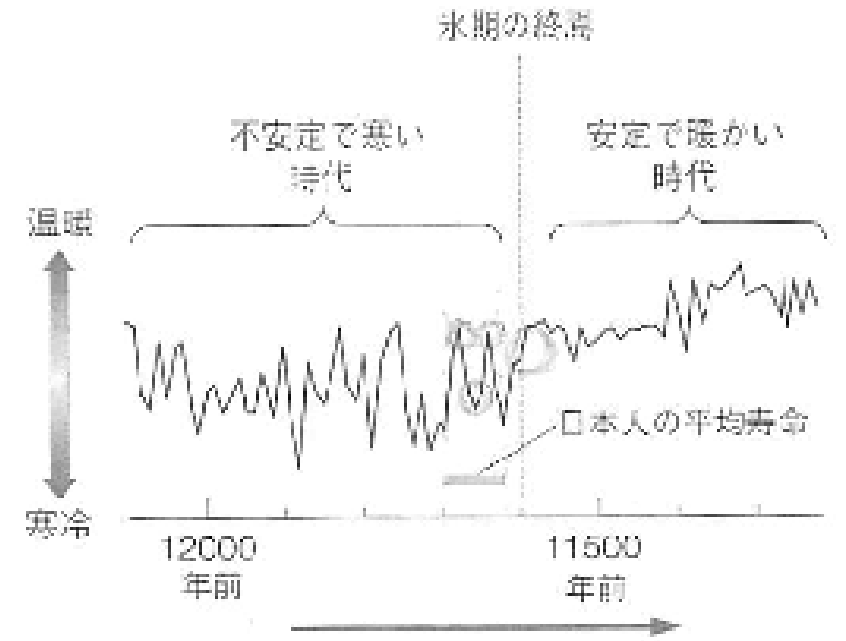


図6.4 氷期が終わって温暖な時代に移行したときの気候変化
単に気温が上昇しただけでなく、それまで不安定だった気候が安定した。

第7章 激動の気候史を生き抜いた人類

私達と同じ人類、ホモ・サピエンスが進化の歴史に登場したのは、少なくとも20万年前のことであるらしい。・・・本書の最終章では、気候変動と人類の関係について、最新の成果を踏まえながら考えてみる。

- ・ **1993年の冷夏** 1993年の夏、日本列島を記録的冷夏が襲った。最初のうち話題になったのは、温度よりもむしろ梅雨明けのタイミングの方だった。7月上旬から中旬にかけて、わずかに夏らしい青空が広がった時期があり、気象庁は各地で梅雨明けを発表していった。だがその直後、いくつもの台風が日本に上陸し、日本列島は再び雨雲に襲われた。台風が去った後も、梅雨前線は日本列島の近くに留まり続け、気象庁は一旦発表した梅雨明けを撤回、結局1993年は梅雨が明けないまま秋を迎えるという異常事態になった。・・・1年後の1994年の夏は前年より出来事が嘘のような猛暑になった。・・・1991.6.12にフィリピンで起ったピナツボ火山の大噴火だというのが学会では定説になってる。・・・

- ・ **「異常」年を生き抜く** 地球の気候は基本的には安定しているが、時折やってくる異常気象と完全に無縁ではられない。それなりの年月を生きた人であれば、そのことは感覚的に理解している。・・・初期のインカ帝国は租税の一部を食料の備蓄に回し、必要な時に惜しみなく放出することで急速に勢力を拡大した。また古代ローマの初代皇帝アウグストは、個人で大規模な食糧備蓄を行って市民の安全を担保することで、「皇帝」という耳慣れない職位が持つ道徳的な意味を周知した。中国においても、遅くとも隋の時代には「義倉」と呼ばれる備蓄システムが構築され、その後の王朝にも引き継がれていった。食べることは生きることの基本であり、食の不安を抱えた市民が本当の為政者を信頼することはない。・・・歴史的にみると不作が2年続いても耐えられる文明は少ない。・・・230年前の天明の大飢饉の犠牲者は当時の人口比率からして東日本大震災のおよそ50倍の巨大災害である。・・・



噴火するピナトゥボ山（1991年6月12日）

噴火の影響は世界中に及んだ。[19世紀](#)最大であった[1883年のクラカタウの噴火](#)以来の大量の[大気エアロゾル粒子](#)が成層圏に放出され、全球規模の[硫酸エアロゾル](#)（[英語版](#)）層を形成し何か月も残留した^[3]。それにより地球の気温が約0.5℃下がり、[オゾン層](#)の破壊も著しく進んだ。

- ・ **カリブ海の年縞** もう一つの示唆に富んだ事例に、カリブ海の年縞堆積物の研究が有る。・・・ベネズエラの沿岸にあるカリアコ海盆という小さな沿海は、年縞研究の黎明期を支えてその名を世界に轟かせた「名門」である。・・・本書第4章で述べた水月湖の年代目盛りは早くも1998年に発表されていたが、そのライバルがカリアコ海盆だった。それから15年もの間、IntCalの中心を担い続けた。・・・ドイツにあるボッダム地質研究所のドラルド・ハウグ教授は蛍光X線スキャナを使って、年縞を数えるためでなく堆積物の中に含まれる元素と量を短時間で測定することが出来ることを考えた。・・・カリアコ海盆の年縞に含まれるチタンの量に注目した。チタンの量から雨量を復元出来ると考えた。・・・人工衛星から地球を撮影した映像を見ると、熱帯収束帯は季節によって南北に移動している。雲の帯が到来した地域は雨期、去った後には乾季となる。飲み水や農業用水をもたらす生命線でもある。・・・
- ・ **マヤ文明の崩壊** マヤ文明はその特徴によって、先古典期、古典期、後古典期という3つの大きな時代に分けられ、その移り変わりの時期には大きな断絶を経験している。ハウグ教授はカリアコ海盆の堆積物を分析することで、あれほど洗練された文明が衰亡に追い込まれた理由を解明しようと試みた。

分析結果は極めて興味深いものだった。古典期のマヤ文明は9世紀頃から衰退を始めるのだが、丁度その時代にカリアコ海盆では、堆積物中のチタンの量が減少していたのである。このことは同じ時代にマヤ地方が乾燥化していたことを意味する。さらに重要なのは、年ごとの変動パターンだった。もし乾燥化が長い時間をかけてゆっくりと進行していたなら、マヤの人々は灌漑設備を次第に充実させるなどの方法で危機を乗り切ることが出来たかもしれない。だがこの時期にカリアコ海盆の周辺で起こった気候変動は、それよりも少し複雑な構造を持っていた。

悲劇の第一段階は、8世紀の後半からおおよそ40年にわたって緩やかに続いた乾燥化だった。だが、この時点ではまだ集落の大規模な放棄などは起こっていない。事態が一気に暗転するのは西暦810年頃である。考古学的な記録によれば、この時期にマヤ文明の衰退が目立って進行するのだが、カリアコ海盆の記録では丁度その頃、わずか9年の間に6回もの干ばつが襲う時期があったことを示している。9年と言えば、人間にとって「ひと昔」と表現されるほどの長い時間である。その間にまともな収穫を期待できる年が半分もなかったとしたら、それが多くの人に移住を決意させるほどの試練だったことは容易に想像できる。この時の危機は9年で一旦収束し比較的穏やかな時代が42年続いた。だがその後の3年は再び連続して少雨だった。マヤの暦は完全に解読されている上に非常に正確であるため、マヤ考古学は極めて精密な編年を強みにしている。この時の干ばつは、西暦860年頃に再び集落の放棄が進んだ時期と極めて良く一致していた。・・・だが西暦910年頃、今度は6年の間に3回も干ばつが襲う時期が到来した。・・・

- **農耕が始まらなかった理由** 現在最も広く受け入れられている説によれば、人類史上初めて農耕を行ったのは、シリアの内陸遺跡アブ・フレイラを証拠としている場合が多い。・・・自然でないコムギの種が見つかり農耕の証拠だと・・・この説にはそれほど強い説得力が無いような気がしている。地表からの発掘採取はごくわずかであり、大半の重要情報は今でも地下に埋まっている。・・・海面近く生息のサンゴが60m地下の海底にある。・・・葉発掘作業を行う技術を現代考古学は持っていない。・・・氷期に農耕が発達しなかったのは人口の少なさ説が強い。・・・
直観的には氷期は相対的に寒い時代であり、食料の確保はその後の温暖な時代以上に死活問題だったように思える。しかもグリーンランドの氷床の分析結果によれば、氷期には短い温暖期(いわゆるD-Oイベント)が何度も繰り返していた。温暖期に一時的に増加した人口が、その後の寒冷化によって危機に瀕するといったことは現実的に起っていそうである。(アブ・フレイラにおける栽培化の開始は、実際そのようなメカニズムで説明されることが多い)。にもかかわらず、氷期には農耕を模索した形跡がなく、氷期が終わると一転して世界各地で農耕が始まった理由とは、いったい何だったのだろうか。
こうした施策のの一つの帰結として、氷期の人類はまだ知性の発展途上だったとする考え方を、現代を生きる多くの人は無意識的に共有していないだろうか。・・・「農耕革命」や「定住革命」と言った言葉には、そうした隠微な自意識が極めて巧妙に埋め込まれている。・・・
- **狩猟採集は非効率だったのか** 農耕と狩猟の違いを理解する手掛かりとして、植生景観は興味深い視点を提供してくれる。・・・だが技術としての農耕が、世界各地で発明された後も、少なくない人々が数千年にわたって狩猟採集生活を維持し、その一部は現代にいたるまで近代化を拒否しているという事実には恐らく意味はある。
- **先行き不透明な時代の生き残り戦略** 気候が安定している場合、狩猟採集民と農耕民はそれぞれの価値観で生活を維持することが出来た。では全く同じ思考実験を、気候が暴れていた時代に当てはめるとどうなるだろう。・・・私達は愚か者の子孫ではない。これは、古気候学の研究から導かれる結論としては型破りかもしれない。だが、思いがけない結論にたどり着くのは科学の醍醐味でもある。さいわい水月湖には、まだ分析が完了してしていない試料が何十メートルも残っている。試料を分析し、そこに刻まれているメッセージを読み解くのは科学者の仕事である。水月湖はきっと、これからも私たちに驚かせ続けてくれるに違いない。

エピローグ-----次に来る時代

私の専門は過去の気候変動について調べることであり、本書の目的も第一義的には過去について語ることである。だが幸か不幸か、現代の古気候学は未来の気候変動を視野に入れることを強く求められている。現代を生きる私たちにとって、二酸化炭素の放出にともなう気候の温暖化はすでに現在のものだし、たとえ人間の関与がなかったとしても、地球が太陽のまありを公転し続ける限り、気候変動は永久に停止することが無い。つまり私たちが暮らす世界は、これから確実にその姿を変えていく。・・・

氷期が終わって気候が安定してから、今まで既に11,600年もの月日が流れている。古気候学の知見によれば、過去3回の温暖な時代はいずれも、長くても数千年しか持続せずに終わりを迎えた。つまり今の温暖期は、すでに例外的に長く続いているのである。・・・

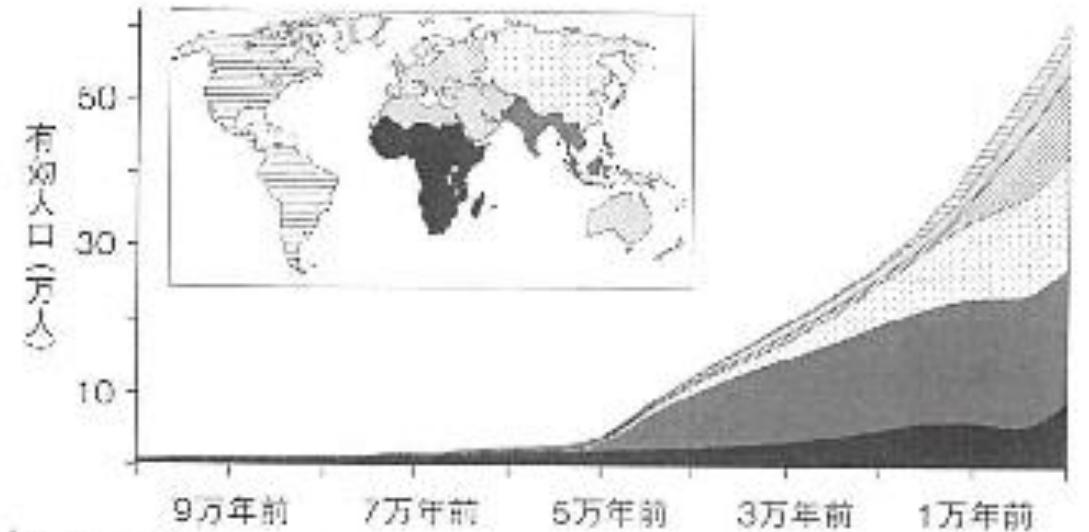


図8.1 遺伝子系統から推定された世界人口の推移
気候変動がくり返す中、人類は着実に勢力範囲を拡大してきた。なおこの図では、文明が引き起こす激しい人口爆発の影響は加味されていない。

・・・ただし最新のデータによると、今から4回前の温暖な時代は、人間の影響が無くても2万年ほど続いたらしいので、「長くても数千年」という温暖期の寿命に例外が無いわけではない。

もおひとつの可能性として、人間が激変の引き掛けを引くケースについても考えなくてはならない。IPCCは、今後の100年で最大5°C程度の温暖化を予測しているが、氷期の終わりに起こった大激変を知ってしまった後では、これはむしろ穏やかな変化に見える。100年かけて進行する変化であれば、人類は傷を負いながらも何とか対応できるだろう。だが現在の人間活動が相転移の引き金を引いてしまい、気候が氷期と同様に暴れ始めるとしたら、事態は全く別問題になる。・・・

現在の分子遺伝学の発達により、考古遺物や化石が出土しない時代や地域についても、かなり正確な人口推定が出来るようになってきた。図8.1はそのような手法の代表的応用例である。・・・

私の祖父は、中国の内陸で小隊を率いる下級将校だった。祖父が言うには、戦場で素晴らしい気転と才覚を發揮し、僚友の命を何度も救ったような人材の多くが、復員後の平和な社会では驚くほど頭角を現さなかったそうである。私も阪神淡路大震災の避難所で目撃したことが有る。待ちわびた支援物資が到着したとき、避難者が殺到して体育館が大混乱に陥りかけた。その時ただ一人、入り口と反対側のステージに駆け上がり、鋭い声で避難者を諫めて鮮やかに秩序を取り戻したのは、見るからに薄汚く風采が上がらない、恐れくは要職についてはいないと思われる初老の男性であった。

不測の事態を生き延びる知恵とは、時間をかけて想定し対策することではない。・・・社会のレベルでは思いがけない才能を何時でも活躍させる事のできる多様性と包容力である。・・・

エピローグも全文素晴らしい—杉浦
機会あれば全文お読みください。

あとがき

2006年に水月湖の研究プロジェクトをスタートさせてから、早いもので10年が過ぎた。本書でも一端を紹介した、あの暑かった夏の掘削は、いわゆる「ひと昔」も前のことになってしまった。

プロジェクトを開始したとき、必要な準備がすべて整っていたとはとても言えない。それまで年縞堆積物を本格的に扱ったことはなかったし、想定される技術的な問題のすべてに解決のめどが立っているわけでもなかった。そもそも資金が決定的に不足していた。私はよく言えば臨機応変、悪く言えば泥縄式に、次々と降りかかる問題に対処していかなくてはならなかった。その様子はまるで、仮免許のままニューデリーの中心に放り出されたドライバーのようなものだった。路上を生き延びる技術は、それから実践と痛みを通して体で学んだ。

年縞を妥協なく扱いきるといのが実感としてどういうことか、もし最初から分かっていたとしたら、水月湖と本気で向き合う決断など恐ろしくてできなかったかもしれない。そう考えると、あのときの私がまだ経験の浅い初心者だったことにも、何らかの必然性とか肯定的な意味はあったのだろう。

そんな未熟なリーダーを、とても心おだやかに見ていられたのだと思う。水月湖プロジェクトは、じつに多くの人の献身的な助けに支えられてきた。本書はその性質上、あまり多くの個人の活躍にスポットライトを当てることができなかった。だが、たとえば水月湖の縞模様を根気よく数え上げたのは私自身ではない。ポツダム大学の学生だったゴードン・シユロラウト君と、ウェールズ大学の若い研究員だったマイケル・マーシャル君の2人が、4年の時間をかけてその偉業をなした。また1000点近いサンプルの¹⁴C年代測定をやりとげたのも、オックスフォード大学の学生だったリチャード・スタップ君である。

この3人の活躍については、拙著「時を刻む湖」(岩波科学ライブラリー)で紹介しているのでも、もし興味があったら手に取ってみてほしい。彼らがこれから20年は研究の前線に立ち続けるのであれば、少なくともこの分野はしばらく安泰だと思えることができる、それほど才気にあふれた若者たちだった。

本書で紹介した研究成果の主要部分は、イギリスの自然環境研究協会(Natural Environment Research Council)とドイツ研究振興協会(Deutsch Forschungsgemeinschaft)から獲得した資金で達成されたものである。念のため補足しておく、この時点で日本の資金が系統的に投入されていなかったのは、単に当時の私の研究拠点がイギリスだったために、日本の資金に応募する資格がなかったというだけのこと過ぎない。決して一部で誤解されているように、基礎研究を重視する文化とか見識の面で、日本がヨーロッパに劣っていたわけではない。むしろイギリス

の資金は、政権が労働党から保守党に変わってからのもの、すっかり獲得が難しくなってしまった。私が帰国した後の水月湖研究は、日本の科学研究費補助金（いわゆる科研費）による支援を中心に進められている。そちらの成果も、また何年か後に一般向けの書籍で紹介できたらと思う。

本文でも強調したが、最初に上質の試料を手に入れることはプロジェクト全体の生命線だった。2006年の掘削を指揮してくださったのは、長崎県の株式会社西部試錐工業（当時は有限会社）の北村篤実社長である。どこの誰とも分からない、資金すらまともに持っていない若僧のくせに無理難題ばかり持ちかける当時の私に、文句も言わずに最後までつきあってくださった恩は忘れない。年編掘削には独特の難しさがあり、回収されるサンプルの質はエンジニアの腕によって驚くほど左右される。北村社長は2006年の後も年編掘削技術の改良を続け、今では日本の年編研究コミュニティ全体にとって、欠かすことのできないパートナーになっている。

もう一人のキーパーソンは、大阪市立大学の原口強博士である。原口博士がいなかったら、限られた資金と時間の中で最高品質の試料を手に入れることは不可能だった。北村社長を紹介してくださったのも、条件に合った機材を設計してくださったのも、湖底の様子を調査して掘削地点の選定を手伝ってくださったのも、すべて原口博士である。

鳴門教育大学の米延仁志教授に対する感謝を、言葉で表しきることは難しい。掘削のときから折に触れて余った資材を提供していただいたことは、お金のないプロジェクトにとっては本当に有り難かった。また続々と更新されるデータを、常に最新の状態で共有するためのシステムを一から構築していただいた。最初は「公式DVD」を定期的に作ってメンバーに郵送していた。写真などのデータファイルがDVDの容量を超えるようになってからは、米延研究室のサーバーに厳重なセキュリティのかかったウェブサイトを構築していただき、そこで情報の一元的な管理をお願いした。こうした運営方法はすべて、米延教授の技術と義侠心に甘えることで成り立っていたが、ミリメートル単位の正確さをプロジェクトの隅々まで行き渡らせるためには、絶対に必要なものだった。

地元の若狭町から受けてきたサポートもまた、語り始めたらきりがなくなってしまう。作業場所や資材といった面での協力だけではない。地元として応援するという明確な姿勢を、示すことで、まだ成果が出る前のプロジェクトを精神的に支えてくださった。中でも若狭三方縄文博物館の小島秀彰学芸員、若狭町の千田千代和前町長と森下裕現町長、海山漁協の吉田善信組合長には、この場を借りてお礼を申し上げたい。

末筆だが、講談社ブルーバックスの篠木和久さんによる粘り強い励ましがなかったら、本書を書き上げることはできなかったと思う。記して心からのお礼を申し上げます。なお、私を篠木さんに紹介してくださったのは、ノンフィクション作家の山根一眞さんだった。山根さんは、もっとも早い段階で年編研究に注目してくださったジャーナリストの一人である。水月湖が日本で多少なりとも注目されるようになったのは、山根さんの熱い語り口によるところがきわめて大きい。本書を執筆したのはまちがいなく私本人だが、本書を産み出した陰の立役者は山根さんである。こちらにも、記して心からのお礼を申し上げます。