



平成17年度（第14回）ブループラネット賞
受賞者記念講演会

財団法人 旭硝子財団

THE ASAHI GLASS FOUNDATION

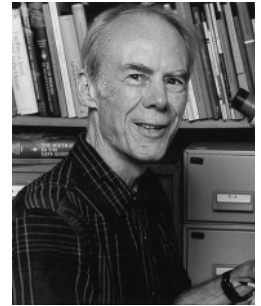
目次

受賞者紹介	
ニコラス・シャックルトン教授	1
記念講演	
「地質学的堆積物、地質学的時間と気候変動」.....	3
受賞者紹介	
ゴードン・ヒサシ・サトウ博士	15
記念講演	
「海水には窒素、リン、鉄が不足」.....	17
ブループラネット賞	29
旭硝子財団の概要	31
役員・評議員	32

受賞者紹介

ニコラス・シャックルトン教授（英国）

Professor Sir Nicholas Shackleton



ケンブリッジ大学地球科学科名誉教授 ゴッドウィン第四紀研究所前所長

受賞業績

『氷河期 間氷期の気候変動の周期、二酸化炭素の関わりとそれを引き起こす地球軌道の変化を明らかにし、古気候学に貢献、将来の気候変動予測に大きく寄与した業績』

略歴

1937	6月23日 英国ロンドン生まれ
1961	ケンブリッジ大学BA取得
1964	ケンブリッジ大学MA取得
1965-72	ケンブリッジ大学上席研究助手
1967	ケンブリッジ大学PhD取得
1972-87	ケンブリッジ大学・第四紀研究科・研究科長補佐
1974-75	米国コロンビア大学・Lamont-Doherty地質学研究所上席客員研究員
1975-2004	米国コロンビア大学・Lamont-Doherty地質学研究所上席研究員
1987-91	ケンブリッジ大学準教授
1988-94	ケンブリッジ大学・第四紀研究科・研究科長
1991-2004	ケンブリッジ大学 <i>Ad hominem</i> 教授
1995-2004	ケンブリッジ大学・第四紀研究・ゴッドウィン研究所長
2004-	ケンブリッジ大学名誉教授

主な受賞歴等

1985	Fellow of The Royal Society
1990	Fellow, American Geophysical Union
1995	Crafoord Prize, Royal Swedish Academy of Science
1998	Knighthood (for Service to the Earth Science)
2000	Foreign Associate, US National Academy of Science
2002	Ewing Medal, American Geophysical Union
2003	Urey Medal, European Association of Geochemistry
2003	Royal Medal (Royal Society of London)
2004	Vetlesen Prize, Columbia University
2005	Founder's Medal, Royal Geographical Society

地球の過去の気候変動を知ることは、今後の気候変動をより信頼できる形でシミュレーションする上でも大変重要です。

シャックルトン教授はケンブリッジ大学で物理学を修めた後、1967年に「第四紀の古温度（先史時代の海洋等の温度）の測定」というテーマの論文で博士号を取得し、以後、地球の歴史からするとごく最近である第四紀、その大部分は氷河時代である現代から約180万年前までに、着目し研究を続けています。

氷河時代には、北アメリカとスカンジナビア地方は厚さ3kmの氷床に覆われ、軽い酸素同位体¹⁶Oが氷に閉じ込められ、海洋の水には¹⁸Oがはっきり差がわかるほど濃縮されました。世界中の海洋から採取した海洋底堆積物掘削コア（柱状堆積物）中の微小な有孔虫化石の殻の酸素同位体比を高精度で分析する方法を開発し、その分析から、何度も繰り返された氷床の消長をより正確に解析する手法を編み出し、古気候学に大きく貢献しました。

1973年には、西熱帯太平洋から採取した、約78万年前に起こった最後の地球磁場逆転を示す層を含むコアを分析し、氷量変化の周期がおおよそ10万年であることを明らかにして、堆積物コア分析のための10万年周期に基づく年代尺度決定法を確立しました。

さらに、堆積物コアの周期性を研究することにより、1976年にはJ. D. Hays、J. Imbrie両博士と論文を発表して、主要な周期が地球軌道の離心率等の主要な変化に同期していることを明らかにして、地球軌道の離心率、自転軸の傾きおよび歳差運動の3要素の周期的変化が氷河作用を引き起こしたとするミランコビッチ仮説を立証しました。

1990年代には、フランスとスイスの科学者達が、南極の中央にあるヴォストーク基地の氷床コアサンプルに閉

じ込められていた空気の測定を行い、過去42万年の大気中の二酸化炭素濃度を明らかにしたのに対し、教授は海洋底堆積物コア中の有孔虫化石の炭素同位体比を使い、同時期の二酸化炭素濃度を測定しました。両測定結果は驚くほど似通っていました。その後の研究で、二酸化炭素が過去の地球における気候変動の主要な原因の一つであったことを示し、過去数百万年にわたる気候変化の主たる特徴は地球軌道変化と大気中の二酸化炭素濃度を考慮することで説明できることを示しました。

最近、直近の氷河期の詳細な記録について研究を行っており、氷床コアの研究で示されていた、30年弱で気温が10℃も変化するという急激な気候変化を北大西洋の堆積物コアの分析からも明らかにしました。

シャックルトン教授は、古海洋学・古気候学の発展に大きな影響を与え、多くの国際研究プロジェクトで中心的役割を果たし、これまでに特に著名なものを含めて200篇を超える学術論文を執筆したばかりでなく、多くの若手研究者を育成し、その積極性溢れる態度によりこの分野全般の進歩を牽引してきました。ケンブリッジ大学・第四紀研究ゴッドウィン研究所の所長を務める傍ら、国際第四紀学会の会長など多くの要職を兼務してきました。

教授は、地質学を研究することにより過去の地球気候をはじめとして地球環境の様子を知ることができれば、将来、地球環境に問題が起きそうなときに、それに対処する方法を見つけることができるので社会に貢献できるという考えを持っておられます。人類紀とも言われる第四紀の地球気候変化の解明に情熱を注いで来られた教授は、温室効果ガスの増大が、過去に起きた急激な気候変化を将来起こす引き金となる可能性があることを、私達が気づかねばならないと警鐘を鳴らし、人類が温室効果ガスの放出をコントロールする努力をしなければならぬと訴えています。

地質学的堆積物、地質学的時間と気候変動

ニコラス・シャックルトン教授

地質学的堆積物とは何か？

地質調査用のハンマーの助けを借りて何億年も前の試料を調べている地質学者は、「地質学的堆積物」という言い方と「岩石」とを同じ意味で用いるでしょう。しかし、もっと新しい時代の試料に関心を持つようになると、十分な時間・圧力・温度変化を経ていないためまだ岩石に変わっていない堆積物を調査しなければなりません。加えて、グリーンランド氷冠中の氷も、溶解するまでは地質学的堆積物と考えられます。私から見れば、こうした氷床中に取り込まれた気泡ですら地質学的堆積物です。年輪が刻まれた古代の樹木も、その樹木が現在生きているかどうかに関わらず地質学的堆積物と考えられます。

地質学的堆積物に関する2つの非常に重要なキーワードは、堆積速度と時間分解能です。たとえば樹木の横断面には1年毎の成長量が現れるため、時間分解能は1年とされ、堆積速度（あるいは半径方向成長量）はほぼ1mm/年程度となります。実際には春の成長量と夏の成長量を区別することができるかもしれませんが、毎月の成長量を知ることはできません。一方、貝類のような軟体動物も毎年ほぼ同じ割合で成長しますが、適切なサンプリング法を使えば週単位の分解能を得られます。また、河口の底泥堆積物も同様の速度で堆積しますが、海底に住む生物による攪乱（生物攪乱）と底層流による攪乱のため、百年～千年単位の分解能しか得られません。

資金と時間が許すなら、科学者は自分のプロジェクトにおいて、必要な時間分解能が得られるよう十分に細かい間隔で地質学的断面のサンプルを採取するか、あるいは分解能が許す限り細かい単位でサンプルを採取（いずれか間隔が小さい方を採用）すべきだと考えます。私はよく人に「成功の秘訣は何ですか？」と聞かれますが、そのひとつは、これまで常に状況が許す限りできるだけ緻密にサンプルを採取してきた点にあると思います。しかし、友人の多くは私とは対照的に、分解能を犠牲にしてできるだけ長期的なデータを集めようとしていました。確かに私のやり方には、純粋に審美的なメリットしかないのかもしれませんが、細かくサンプリングしたデータのほうが美しく見えるのは確かです。しかし間違いなく、緻密にデータを集めたほうが、読み手に対するデータの信頼性が増します。データが緻密であれば、測定結果がどの程度信頼できるものか、より容易に見てとれるからです。

私は何を測定したか？ 安定同位体比

シカゴの科学者ハロルド・ユーレーは、重い水素同位体、重水素を発見した功績により1934年にノーベル賞を受賞しました。1947年、ユーレーは様々な元素の安定同位体の分別に関する独創的な論文¹を発表しています。ここでは「分別」とは、重い同位体を比較的多く含有する物質を抽出する一方で、残る物質は軽い同位体を比較的多く含有するよう分離するプロセスを指します。たとえば自然界で水が蒸発するとき、水蒸気中には重い酸素同位体¹⁸Oが少なくなり、蒸発せずに残った水中では¹⁸O含量がわずかに多くなります。これは、気相で重い水分子を保持するには、いくらか多くのエネルギーが必要とされるからです。ユーレーは1947年の論文で、水が蒸発する場合とそれ以外の多くの相転移や化学反応に関して、この作用の程度を算出しています。その一例が水溶液からの方解石（炭酸カルシウム）の沈殿であり、ここでユーレーは水と方解石の間の¹⁸O分別を算出ただけでなく、この分別に対する温度の影響も算出しました。そして、地質学的に過去の時代に遡ってこの分別を測定できれば、沈殿が起きた時点の古温度を推定できるだろうと示唆しました。

ユーレーは優秀な同僚とともに、このアイデアを実用的なツールへ発展させようと企てました。そのためには、1) 同位体比を測定する正確な質量分析計を開発する、2) 余分な分別をもたらすことなく炭酸塩からCO₂を抽出する方法を開発する、3) 方解石の沈殿中に見られる分別が理論上予測される通りのものであることを証明する、4) 生体内の方解石が殻の成長過程において、無機的に合成した方解石と同じ¹⁸O分別を示すことを証明する、5) その手法を化石に適用して実際に妥当な結果が得られることを示すことが必要でした。1950年代初期に発表された一連の素晴らしい論文²の中で、これらすべてが達成されました。

私がこの研究分野に足を踏み入れる前に、もう一人の科学者が道を切り開いてくれました。チェザーレ・エミリアーニは、ボローニャ大学(イタリア)で微化石学(微小な化石を研究する学問)の博士号を取得した後、シカゴにやって来ました。ユーレーらが開発した技術を用いて、エミリアーニは一連の海洋底堆積物コアと露出した岩体の古温度の測定に着手しました。そして「第四紀更新世の古温度」と題した優れた論文を発表しました(1955年)³。この論文でエミリアーニは、カリブ海深部、赤道大西洋、北大西洋の堆積物コアの中でも50万年以上にわたる(と現在では判明している)コアの古温度を測定しました。

第二次大戦後、ゴッドウィン博士(のちのサー・ハリー・ゴッドウィン)は、ケンブリッジ大学植物学科内の小さな研究部門として第四紀研究室を設立しました。ゴッドウィンは幅広い知識を備えた植物学者で、イギリスにおける花粉分析学の創設者でした。彼は考古学者グレイム・クラークとともにイギリスの植生変化と先史時代の人類との関係を調べていたため、この研究室を立ち上げたのです。ゴッドウィンは1950年代、イギリス初の放射性炭素年代測定法の実験室を作ることで、人類および植生の変化を信頼できる年代尺度で捉えることをはじめて可能にしました。1960年頃、ブラード博士(のちのサー・エドワード・ブラード)はゴッドウィンに対し、資金を調達して安定同位体分析研究室を設立するよう提案しました。それはイングランド東部の海洋底堆積物には、海洋化石だけでなく近隣の大陸由来の花粉も含まれているのではないかと考えられたからでした。ブラードは、¹⁸Oを用いた古温度分析と花粉分析を組み合わせれば、面白い結果が得られるのではないかと提案しました。ゴッドウィンの助成金申請が受理され、色々な経緯があって私はこのプロジェクトの進行をまかされることになりました。

ユーレーらは比較的大きな化石を研究対象としていたため、標本サイズの面での制約はありませんでした。エミリアーニも同じ機器を研究に使用し、実際、マイアミ大学に移ってきたときもシカゴで使われていた質量分析計を携えてきました。分析に必要な5 mgの炭酸塩を作るためには、毎回400匹の有孔虫を集めることが必要でしたが、私は間もなく、アシスタントを何人も使わずに研究室を運営していくには、これより約10倍感度が高い質量分析計が必要だと悟りました。これをどうやって達成したかというのは、今ではさして面白くもない話です⁴。しかし、当時はこれが注目に値する業績であり、私はその後何年も、もっぱら「少量の有孔虫サンプル中の¹⁸O含量を分析できる人物」として有名になりました。私は大学4年のとき物理学の勉強に打ち込みましたが、自分の必要とする緻密なデータが得られるよう質量分析計を実用に向け改良することが最初の任務であったことを思えば、これが非常に重要な素養となったわけです。それから数年の間に、私は関連する様々な専門分野について多くを学ぶとともに、エミリアーニの研究に詳しくなりました。そうして私が(ケンブリッジ大学スコット極地研究所に助けられて)学んだ研究分野のひとつが、氷河学です。これをきっかけに、私はエミリアーニの素晴らしい論文の致命的な弱点に気づきました。エミリアーニは、北米とフェノスカンディアが厚い氷床に覆われていた時代の海洋の同位体比変化については、修正して考える必要があることを認めていました。同位体含量の少ない水によって氷床が作られれば、残った海水中の¹⁸O含量がわずかに多くなると考えられるからです。しかし、この影響を細かく計算してみた私は、エミリアーニが氷床の影響を著しく過小評価していたこと、実際、彼が分析したコアの多くにおいて、こうした

氷床の影響こそが¹⁸O含量の変化を引き起こした最大の原因であったことを突きとめました⁵。

一見すると、この発見によって私たちの研究分野の魅力が減るように思いましたが、これを別の角度から見ることで、私は2つの全く新たな利点を提示しました。第一に、全地球の氷床量の推移を知ることができれば非常に貴重な記録となるでしょう。温度変化が少ない地域のコアを選べば、氷床量に関して最適な値が得られます。第二に、各コアの条件にもよりますが、¹⁸O記録を用いてあらゆるコアを標準カーブと関連づけて捉えることができます。偶然にも、この第二の利点を通じて私は多くの優秀な仲間と出会い、それによって第一の課題を達成することが可能になりました。ジョン・インブリー、アンドリュウ・マッキンタイア、その他多くの研究者は、最終氷期最盛期の海面温度を地図にするCLIMAPという野心的なプロジェクトに着手していました。彼らは、この取組みに必要とされるひとつの課題をすでに達成していました。コアの上から下に向かって順に採取した各サンプルから得られた膨大な動物プランクトンの化石データを数学的に分析し、海面温度の変化を推定する手法を発見しました。しかし、彼らを妨げるもうひとつの問題がありました。最終氷期最盛期に当たる各コアの層位をどうやって特定するかという問題です。私の手法を使えば簡単に特定できると言うとならば驚嘆し、すぐに私をCLIMAPチームに加えてくれました（その時までチームは全員アメリカ人でした）。1976年にCLIMAPが発表した最終氷期最盛期⁶の海面温度地図は、とりわけ大気圏モデルを数学的に算出し氷河期の気候循環を復元するのに十分なデータを提供したという点で素晴らしい業績でした。第1回ブループラネット賞を受賞した真鍋淑郎氏も、この研究に刺激を受けた科学者のひとりです。

CLIMAPチームと研究を進めアメリカで何ヶ月も過ごすうちに、私は2つの途方もなく刺激的なプロジェクトに出会いました。当初、私は太平洋の長いコアを分析したいと思っていました。友人のジム・ヘイズが深海堆積物コアを見てはどうかと提案し、彼がニール・オブダイクらと研究していた東太平洋で採取したコアを見せてくれました。しかし、彼が調べていた周期的な炭酸塩の溶解パターンは私には不都合でした。私は、海底で溶解していない有孔虫の方解石を分析したかったのです。そこで西太平洋に目を転じ、ニール・オブダイクの協力を得て目指すもの　上から下まで均質と思われるコア　を見つけました。このコアの整理番号はV28-238、ヴェマ号が第28回航海で採集した238番目のコアという意味です。ニール・オブダイクはすでに、海底下12メートルの堆積物に地球磁場逆転を示す層を発見していました。最後の磁場逆転が起こったのは、約73万年前でした（現在では78万年前とされています）。これはブリュヌ・松山境界として知られています。マイク・ホールの助けを借りて、私たちはさらに下層のコアを着実に調査して行きました（マイク・ホールは駆け出しの技官の頃から40年にわたり一緒に仕事をしてきた仲間です）。私は毎日の測定値をグラフに記入し、必要に応じてさらに紙を糊付けして加えました。測定値が少しでも疑わしければ、さらに3回測定を繰り返しました。エミリアーニが発表したカリブ海のデータとまったく同じ特徴が現れ、続いて未知の領域が目の前に開けたことで、私たちは興奮しました。そのコアには何も問題がありませんでした（自分がその未知の領域まで測定した最初の人物になると思うと楽しみでしたが）。また、ブリュヌ・松山境界が海底下12メートル（同位体ステージ19）と特定されたおかげで、私は、エミリアーニが提唱した年代尺度は、コア上層のあまり信頼できない年代値から推定されたものであるため短すぎることに気づきました。多くの重要な結論が導き出され、私が執筆した論文⁷は非常に影響力の大きい文献として千回以上も引用されることになったのです。

その後すぐ、私は別の長いコアを分析するチャンスに出会いました。デビッド・パーキンというイギリス人が、サハラ砂漠から大西洋へと砂塵を運ぶ風の風力変化を推定する方法を考案したのです。パーキンはブリュヌ・松山境界を含む膨大な記録を保有し、データからコア上層部の風力が最も強かったことが示され

たため、氷河期は現在より風が弱かったという結論に達しました。私は自分が酸素同位体データを測定し、風力が強くなると¹⁸O含量が少なくなることを確認するまで、結論の発表を待ってくれるようパーキンを説得しました。その結果、パーキンは非常に短い完新世の時代を見落としており、一般に氷河期は現在より風が強かったことが分かりました。この研究⁸によって私が唱える酸素同位体層序の重要性が確認され、同時に、重要な古気候パラメーター（この場合は風力）の変動データを、年代尺度を伴う標準層序と直接関連づける方法が生まれました。この直後、ニール・オブダイクから、約200万年前まで遡るV28-239という別のコアを研究してみないかと誘われました。このコアは堆積速度がやや低かったのですが、10 cm間隔ではなく5 cm間隔で分析することにより、第四紀更新世⁹の全期間の良質なデータを入手できました。

同僚のジョン・インブリーに初めてV28-238のデータを見せた時、彼はすぐ長年の「ミランコビッチ仮説」を検証するため、データのスペクトル解析を実施しようとした。1920年代にミルティン・ミランコビッチは、地球の軌道や自転軸の傾きの変化によって地上への太陽エネルギーの日射量が増減し、これによって氷河期が引き起こされたという仮説を提唱しました。エミリアーニが¹⁸Oカーブを発表するまで気候変動を連続的に捉えたデータがなく、またこれは年代を正確に規定できずこのデータを活用できなかったため、ミランコビッチ仮説の検証はこれまで不可能でした。私たちがちょうどスペクトル解析を始めた頃、ジム・ヘイズが、いくつかの点で私のコアより利点が多いインド洋の亜南極圏のコアを調査していることが分かりました。最も重要なことに、南極圏のコアの堆積速度はV28-238の2倍でした。ジム・ヘイズは南半球の海面温度データを算出し、一方私は、変動する氷床が北半球の大陸上で見られることから、その¹⁸O測定から北半球の記録を描き出しました。私たちはミランコビッチ仮説の通り、データ中に3つの軌道周期性（10万年、4万年、2.1万年）すべてが検出されることを示しました¹⁰。

私たちは論文発表の過程で、天文学的理論によって算出される周期性を活用すれば、コアの年代尺度を微調整できることを発見しました。1980年代初期には、こうした周期性を考慮に入れてSPECMAPと呼ばれる¹¹平均化した安定同位体記録を作成しました。この記録は研究者にとって彼等のデータに極めて精密な共通の年代尺度を与えるテンプレートとして、非常に大切なものとなりました。1991年に私は新しいデータを用いてこれを改良し、ブリュンヌ・松山境界が生じた時期はそれまで考えられていた73万年前ではなく、78万年前であることを証明しました¹²。それ以前に何度か生じた磁場逆転についても、計算をし直しました。意外にもこれらの再計算した値は非常に早く受け入れられました。なぜなら、それは新しい実験室での測定からも、これまで公表されていた磁場逆転の時期を見直す必要があると示唆されていたからです。私はさらに時代を遡り、最終的には約3000万年前の地質年代尺度を再計算したのです¹³。

1975年、ハワイで開かれた二酸化炭素に関する学会に招かれたのを機に、私は炭素同位体の研究をしようと決意しました。私はいつも、¹⁸O含量だけでなく¹³C含量のデータも集めていましたが、その時まで、¹⁸O測定値を微修正するためにそのデータを使っていただけでした。自然界の¹³C含量を変化させる最も重要なプロセスは、光合成です。植物や植物由来の有機物に含まれる¹³Cの量は、それらを取り入れるCO₂中の¹³C含量より約2%少なくなっています。私が集めた¹³Cのデータを見ると海水中の¹³C含量は規則的な変化を示していたため、氷河期 間氷期のサイクルで地球上の有機物の量が変化したというのが唯一の妥当な説明と考えられました。私は文献を調べるうちに、氷河期は比較的乾燥していて、熱帯雨林に覆われた地域が減少していたことに気づきました。同時に、現在は植物が生えている地域の大部分が当時は氷床に覆われていたことも確認しました。私は偶然にも、大陸を覆う有機物量の変化を推定する手法を発見していました。大陸のバイオマス（土壌を含む）が減少して、大気中に放出された有機炭素は酸化され、最終的に海水に溶けこんだに違いありません¹⁴。

それからまもなく、南極氷床の氷に閉じ込められていた「化石」、すなわち気泡中の二酸化炭素濃度は、現代の空気中の二酸化炭素濃度より低いと主張するふたつの論文が発表されました。そのとき、幸運にも、私はウォーレス・ブロッカー（彼も以前にブループラネット賞を受賞しています）が論文として発表する前に行った講演を聞くことができました¹⁵。ブロッカーは、大気中の二酸化炭素濃度を280ppmから200ppmに削減できる唯一の方法は、二酸化炭素を深海に輸送することだと説明し、海洋表層の二酸化炭素の平衡圧をコントロールする「生物ポンプ」の仕組みについて述べました。海洋表層では、溶解した二酸化炭素（溶存二酸化炭素）の一部が光合成によって有機物に転化し、この有機物が深海に沈んで酸化します。光合成の規模は、海洋表層中の栄養分の濃度によって左右されます。このプロセスを通じて、残る溶存二酸化炭素中の¹³C含量が多くなり、有孔虫はこれを用いて方解石を作ります。一方、海底に住む希少な有孔虫類は同位体比が平均的な海洋二酸化炭素から殻を作るため、プランクトン有孔虫（浮遊性有孔虫）と海底で生活する有孔虫（底生有孔虫）の殻における¹³C含量の差を調べれば、「生物ポンプ」の活性度を測定できます。私は適切なコアを探し、最善のデータが得られるよう浮遊性と底生の有孔虫類を慎重に選びました。確かに、氷河期コアの海洋表層水と深海水の¹³C含量にはより大きな差があり、氷河期の気泡中の二酸化炭素濃度が現在の空気中より低いという発表済みのデータと一致しました。私は調査を続け、最後の間氷期の二酸化炭素濃度は現在とほぼ同じであったことを予測するデータを得ました。私の友人であるフランスの氷河学者達は、『ネイチャー』誌¹⁶に発表されたこのデータを見て衝撃を受けました。彼らはすでに南極ヴォストーク基地の氷床コアを分析しており、彼らが実際に測定した二酸化炭素濃度と私の再測定結果が酷似していることを、すぐさま見て取ったからです。

私がなぜこの素晴らしい賞を受賞したか皆さんに理解していただくため、これまで私の仕事の一部を振り返ってきました。私の論文はどれも多くの新たな分析データに基づくもので、実際、私が成功したのはもっぱら、私とアシスタントのマイク・ホールが、資金を提供してくれる方々の支援に応えるため研究室では絶えずデータを生み出すべきだという信念に従ってきたからです。しかし5年前、私は新しいデータを含まず、自分の研究室のデータとロバート・プティらフランスの氷河学者が発表したデータを組み合わせることで論文を執筆しました。これはある意味で、私が書いた最高の論文¹⁷だと考えていますが、もちろん難しすぎて一般の方に説明することはできません。とはいえ、要旨をかいつまんで説明したいと思います。重要なのは、ヴォストーク基地の氷床コアから、氷の中に閉じ込められた大気中の酸素同位体比の変化を示すデータが得られたことです。氷の上に積もった雪が圧縮され、空気が氷床の上を覆っている大気と接触できなくなると、気泡として氷の中に閉じ込められます（氷の表面下数10メートルでこの現象が起こります）。現在、大気中の酸素は多くの複雑な段階を伴う地球規模の光合成を通じて、海水との平衡を保っていますが、他のすべての条件が同じであれば、大気中酸素は約千年遅れで海水中の酸素同位体比の変化に伴って変化します。私はこの大気中酸素データと、深海の微化石中の炭酸塩に含まれる酸素同位体データの比較を通じて、それまで発表してきた多くの海洋底堆積物データについて、温度部分と氷床量部分を分けて算出するという、かつては不可能だったことを可能にしました。その結果、氷床量データは実際、二酸化炭素データよりも遅れて変化する（すなわち反応が遅い）ことを発見しました。氷床量の変化によって大気中の二酸化炭素濃度が変化したと主張する人もいますが、このデータを見る限り逆だと思えます。二酸化炭素こそが、氷河サイクルを引き起こす大きな要因でした。

私たちが古気候を説明できるのであれば、最終的には、二酸化炭素データと天文学的な軌道の変化から、結果としてどのような気候が生じるかモデルを作成し、このモデルを地質学的観察記録と比較できるはずで、実際、私は非常に単純なレベルでこうした比較を実施できると考えています。

氷河期には、大気中の二酸化炭素濃度に約80ppmの変化が見られました。この変化が、地球の気候に劇的な影響をもたらしました。過去100年以上の間に、人類の手によってすでにこれを上回る二酸化炭素濃度の変化が生じています。地質学的データは、地球温暖化をもたらす二酸化炭素放出を止めねばならないというメッセージを強く訴えるものとして、非常に重要な意味を持つのです。

参考文献

- 1 Urey, H.C. (1947) The thermodynamic properties of isotopic substances. *Jour. Chem. Soc.* 1947, pp 562-581
- 2 Epstein, S., Buchsbaum, R., Lowenstam, H.A., & Urey, H.C (1951) Carbonate-water isotopic temperature scale. *Geological Society of America Bulletin*, **vol 62**, pp 417-426
- 3 Emiliani, C. (1955) Pleistocene temperatures. *Journal of Geology*, **vol 63**, pp 538-578
- 4 Shackleton, N.J. (1965) The high-precision isotopic analysis of oxygen and carbon in carbon dioxide. *Journal of Scientific Instruments*, **vol 42**, pp 689-692
- 5 Shackleton, N.J. (1967) Oxygen isotope analyses and Pleistocene temperatures re-assessed. *Nature*, **vol 215**, pp 15-17
- 6 CLIMAP project members (1976) The surface of the ice-age Earth. *Science*, **vol 191**, pp 1131-1137
- 7 Shackleton, N.J.& Opdyke, N.D. (1973) Oxygen isotope and palaeomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific core V28-238: oxygen isotope temperatures and ice volumes on a 10^5 year and 10^6 year scale, *Quaternary Research*, **vol 3**, pp 39-55
- 8 Parkin, D.W.,& Shackleton, N.J. (1973) Trade wind and temperature correlations down a deep-sea core off the Saharan coast. *Nature*, **vol 245**, pp 455-457
- 9 Shackleton, N.J.& Opdyke, N.D. (1976) Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of Pacific core V28-239, Late Pliocene to Latest Pleistocene. *Geol. Soc. America Memoir* **vol 145**, pp 449-464.
- 10 Hays, J.D., Imbrie, J.& Shackleton, N.J. (1976) Variations in the earth's orbit: pacemaker of the ice ages. *Science*, **vol 194**, pp 1121-1131
- 11 Imbrie, J., Hays, J.D., Martinson, D.G., McIntyre, A., Mix, A., Morley, J.J., Pisias, N.G., Prell, W. & Shackleton, N.J. (1984) The orbital theory of Pleistocene climate: support from a revised chronology of the marine ^{18}O record
In: Berger, A., Imbrie, J., Hays, J., Kukla, G. & Saltzman, B. (eds) Milankovitch and Climate. Hingham, Mass: D. Reidel, pp 269-305
- 12 Shackleton, N.J., Berger, A. & Peltier, W.R. (1990) An alternative astronomical calibration of the Lower Pleistocene timescale based on ODP Site 677. *Transactions of The Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, **vol 81**, pp 251-261
- 13 Shackleton, N.J., Crowhurst, S.J., Weedon, G.P & Laskar, J. (1999) Astronomical calibration of Oligocene-Miocene time, *Philosophical Transactions of the Royal Society London*, **vol 357**, pp 1907-1929
- 14 Shackleton, N.J. (1977) Carbon-13 in Uvigerina: tropical rainforest history and the Equatorial Pacific carbonate dissolution cycles *In: N.R. Andersen and A. Malahoff the Fate of Fossil Fuel CO₂ in the Oceans. New York, Plenum Press*, pp. 401-427
- 15 Broecker, W.S. (1982) Glacial to interglacial changes in ocean chemistry. *Progr. Oceanogr.*, **vol 11**, pp 151-197
- 16 Shackleton, N.J., Hall, M.A., Line, J. & Ceng Shuxi (1983) Carbon isotope data in core V19-30 confirm reduced carbon dioxide concentration in the ice age atmosphere. *Nature*, **vol 306**, pp 319-322
- 17 Shackleton, N.J. (2000) The 100,000-Year Ice-Age Cycle Identified and Found to Lag Temperature, Carbon Dioxide, and Orbital Eccentricity. *Science*, **vol 289**, pp 1897-1902

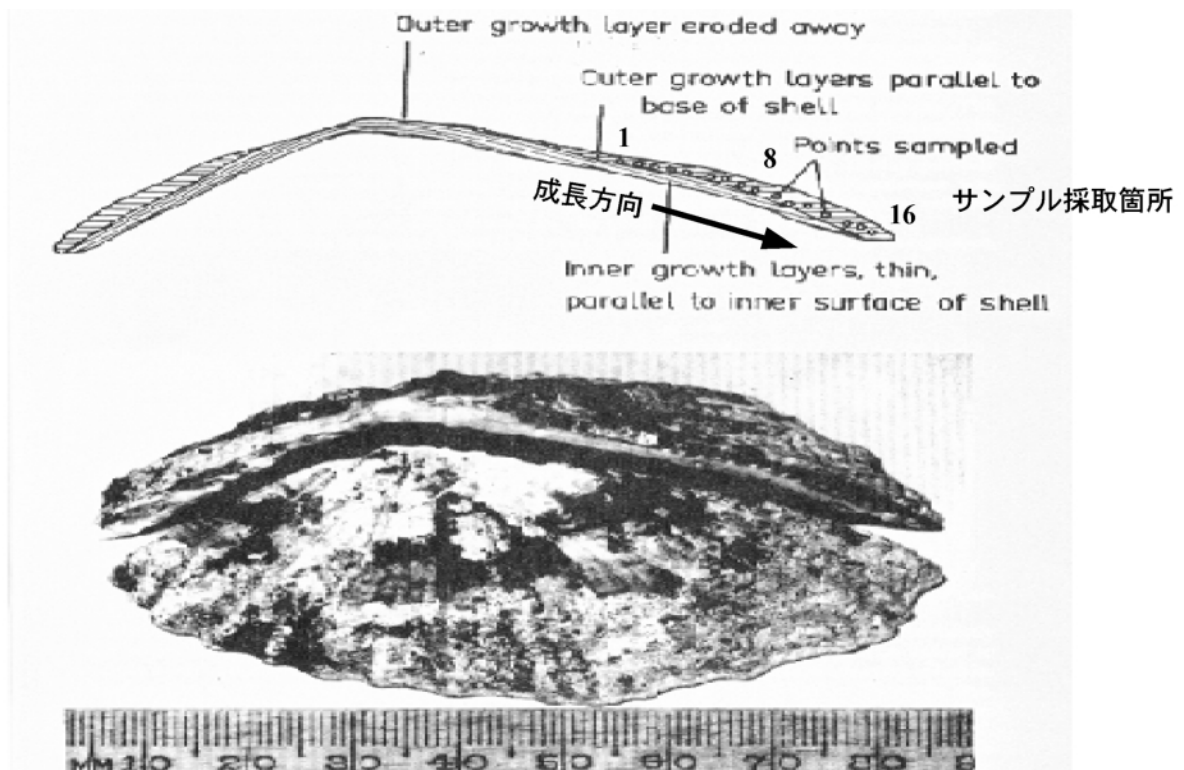


図1. 南アフリカの海岸で採集したカザガイの写真。酸素同位体分析のために半分に切断し、小さなドリルでサンプルを採取した。

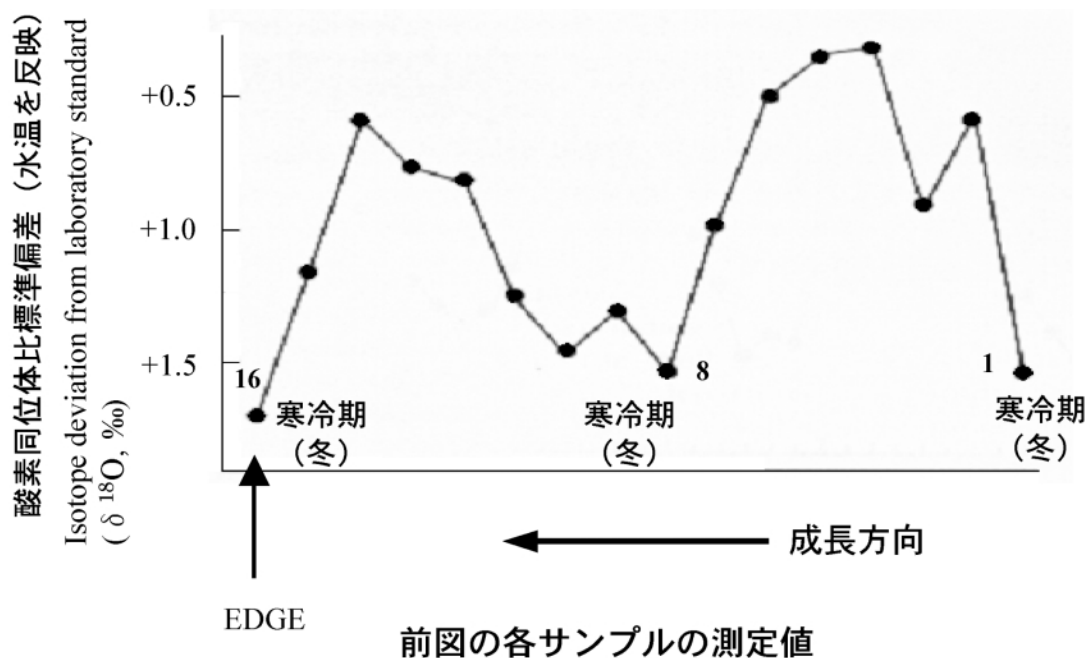


図2. 図1の貝殻の2年にわたる成長期間の酸素同位体記録。有史以前の人たちが貝類を食べていた季節（それは冬）の特定には、この程度のおおまかなサンプリングで十分である。しかし、最新の手法では一週間間隔でサンプルを採取することが技術的に可能である。これは、非常に細かい時間尺度で行われた地質学的測定の一例である。

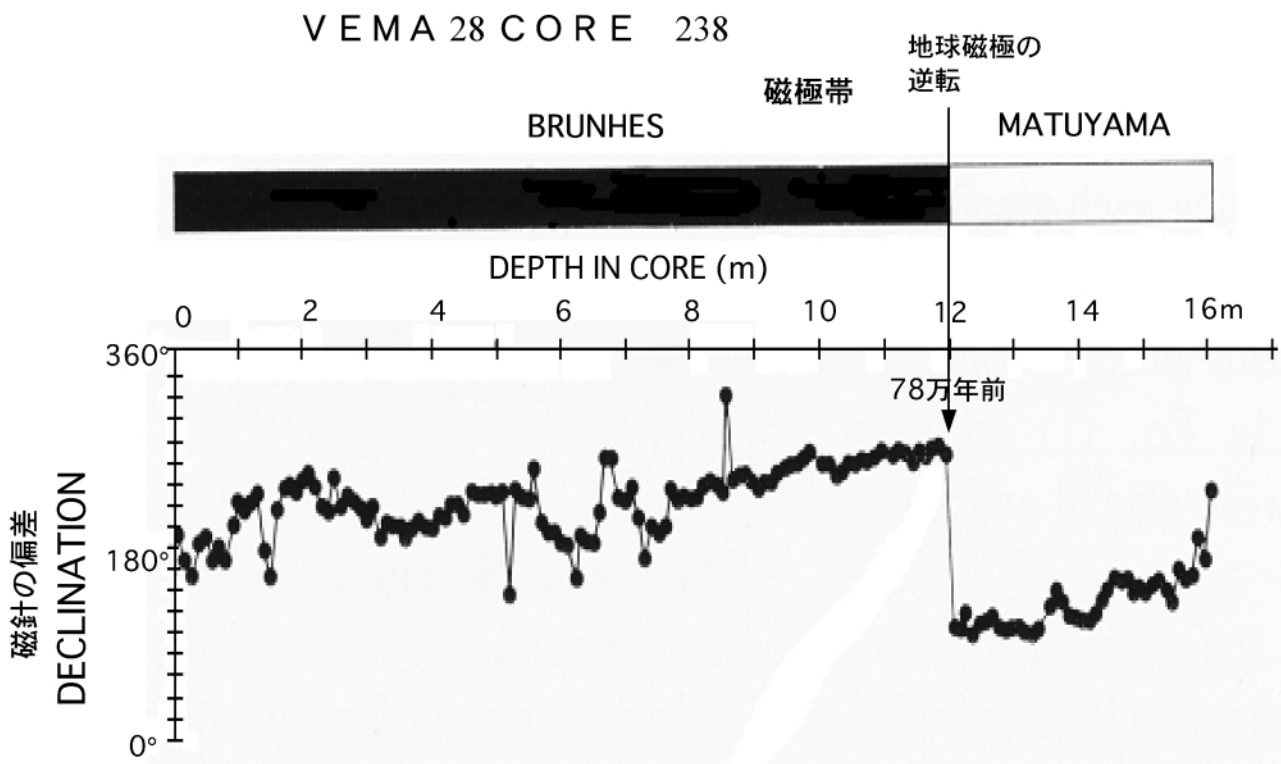


図3. コアV28-238の磁気測定。私がサンプルを採取する前に、ニール・オブダイクによって行われた。堆積物の磁化方向がコアの深さ12メートルのところで180度転換しているのが明らかである。地球上で最後に磁場が完全に逆転したのは約78万年前であることが分かる。

年代測定の基準となったコアV28-238の酸素同位体比測定(Shackleton and Opdyke)

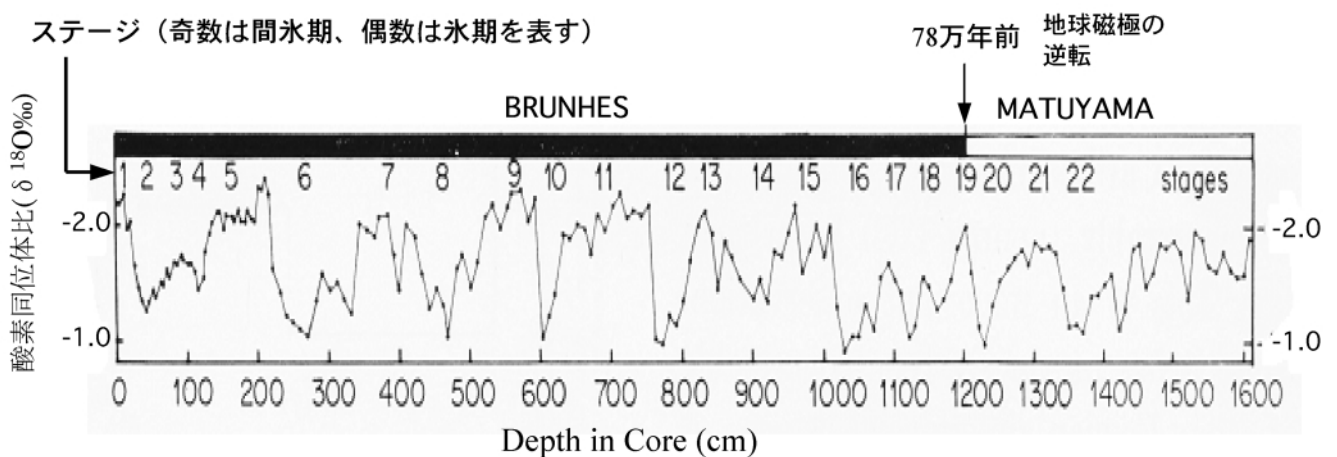


図4. コアV28-238の酸素同位体測定。1973年に発表されたこの図は、過去100万年の間に10万年周期の氷河作用が存在したことを初めて示し、氷河時代を知る上での「ロゼッタストーン」といわれている。

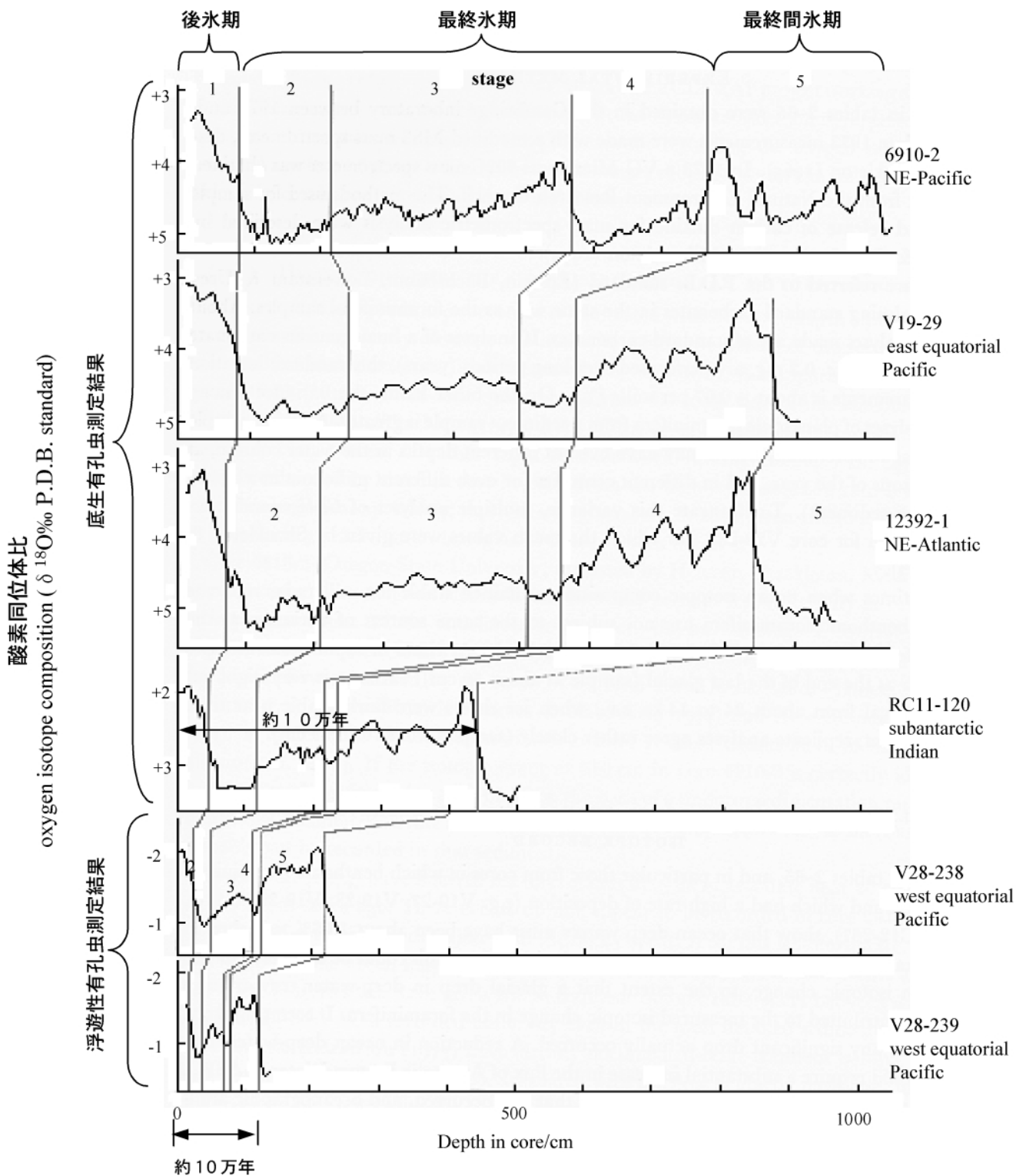


図5. この図は堆積速度が酸素同位体分析で得られる記録の質に与える影響を説明している。一番下では10万年が1メートルの堆積物に圧縮されていて、微細な記録が失われている。図中の上に向かってコア中の堆積速度が増加するに従い、その最後の10万年は4メートルから10メートルに対応し、最後の氷河期のサイクルの重要な細部は再現可能な形で示されている。

Core (V19-30)
Atmospheric CO₂ from C-13

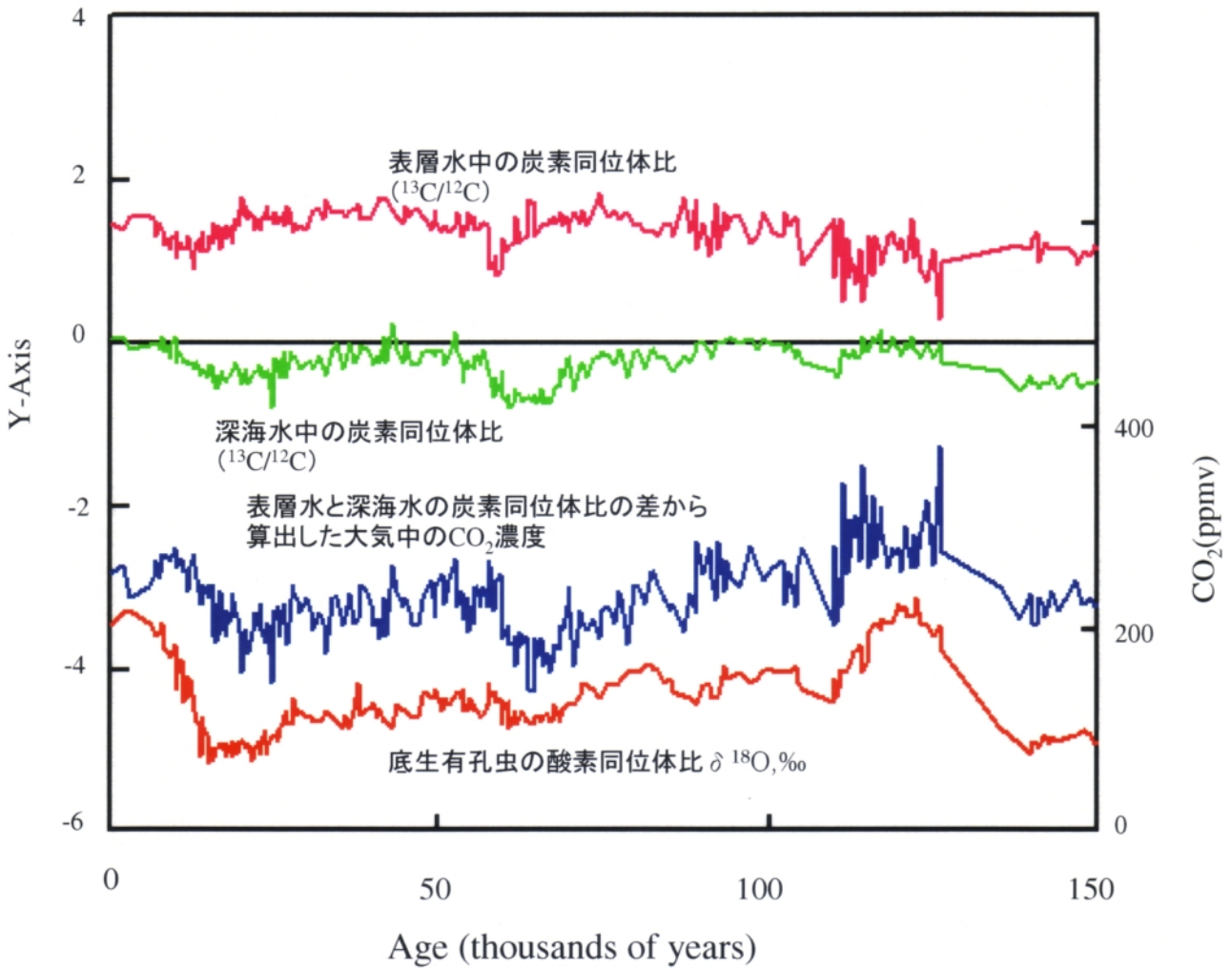


図6. この図の上の2つの記録は、東部赤道太平洋の表層水と深層水（海底上の海水）の炭素同位体の記録を示す。その次の記録は、時間軸に対する表層水と深層水間の炭素同位体勾配（一番目から二番目を差し引いたもの）を示す。近似的にこれは大気中の二酸化炭素濃度のおおよそその変化を示している。一番下の記録は、このコアの酸素同位体記録を示す。この結果から、間氷期には二酸化炭素濃度が高く、氷河期には低かったと結論づけられる。

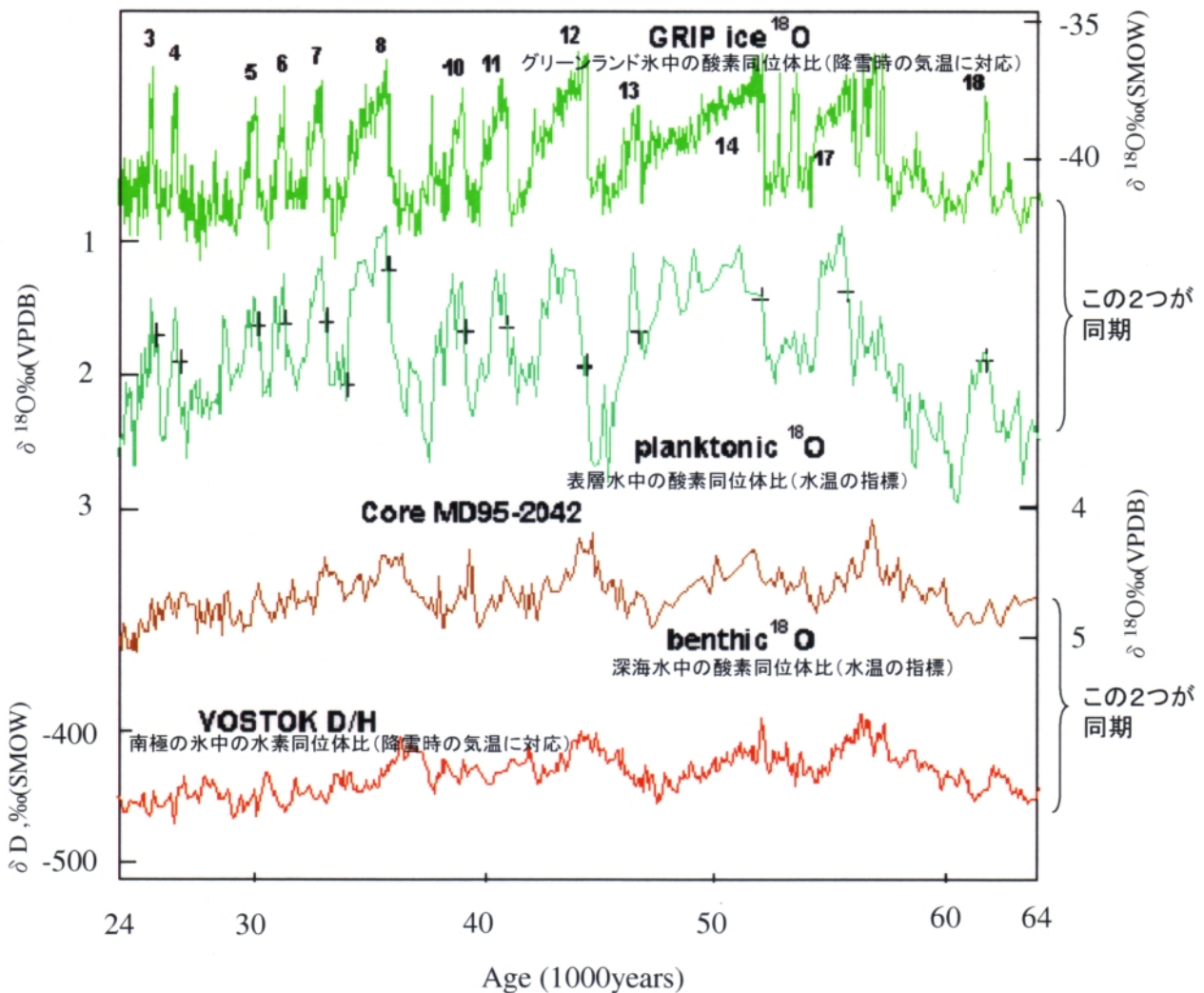


図7. この図の一番上はグリーンランドの氷床コア（コペンハーゲンのヨンセンらが測定）から、一番下は南極の氷床コア（グルノーブルのプティらが測定）から得られた（降雪時の気温にほぼ比例する）安定同位体記録を示す。真中の二つは、ポルトガル近海の表層水と深層水（水深3000m）について同じサンプルから測定した（水温の指標となる）安定同位体記録である。四つの記録はすべて最後の氷河期の2万5千年前から6万5千年前までの間について、ほぼ同じ時代尺度で表されている。

最後の氷河期中に起こった急激な変化の規模については、北大西洋の表面水温がグリーンランドと、深層水の水温は南半球の高緯度域と同期して変化したように見える。

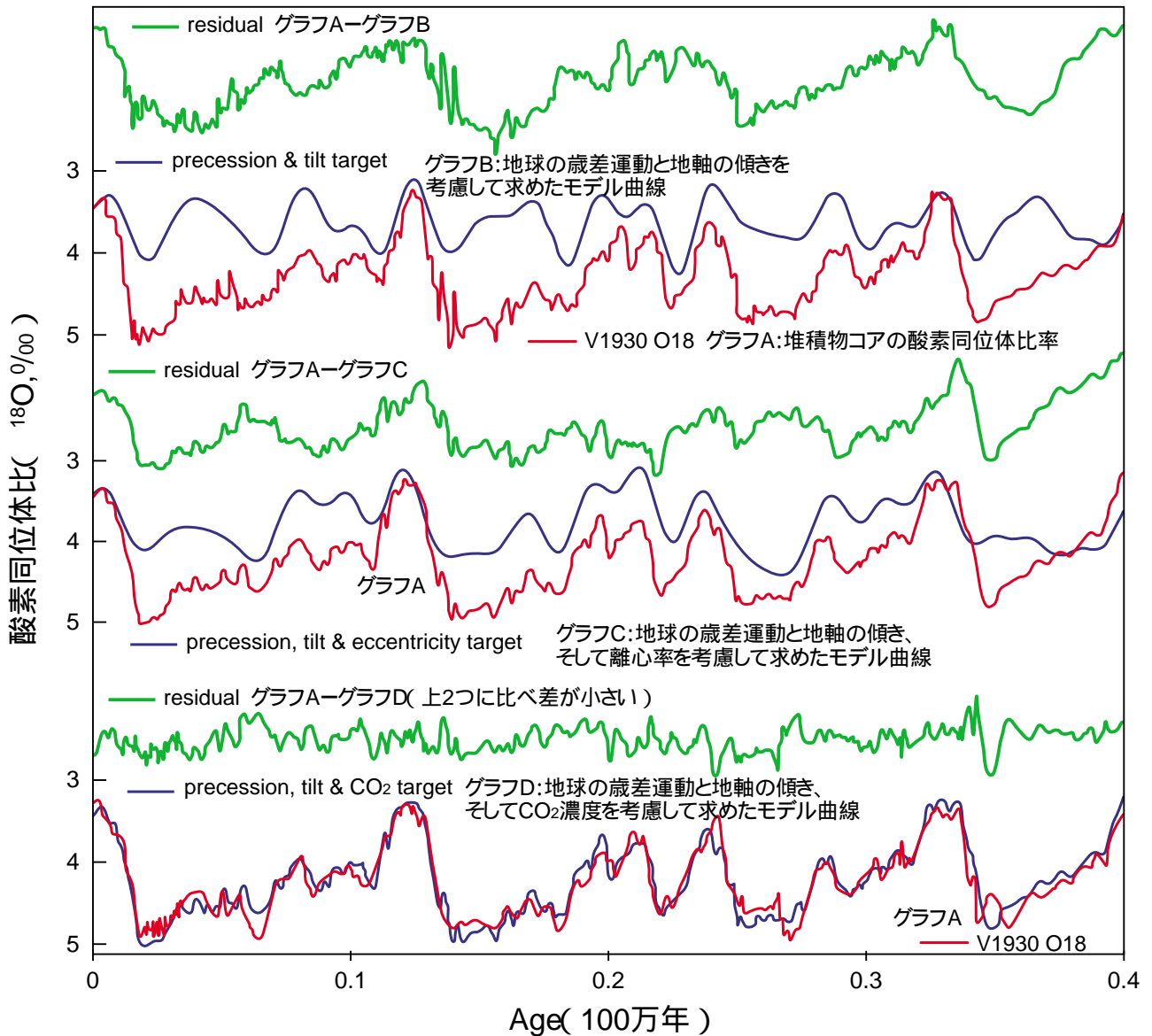


図8. 個々のパネルは過去40万年間について、ある深海底コアの酸素同位体記録と、その記録を部分的にシミュレートしたモデルとを重ね合わせ示している。それぞれのペアの上には(データからモデルを差し引いた)その差をプロットしたものを示す。上の二つのパネルは、地球軌道パラメーター内の変動についてのデータのみを使った、異なるバージョンのモデルを使っていて、非常に大きく増幅された差を示す。一番下のパネルに対するモデルは、南極ポストーク基地の氷床コアの気泡中の空気を測定して得られた大気中二酸化炭素の測定記録(プティらによる)を採用していて、その差ははるかに小さい。