

1. 南極の氷からみた地球環境

北海道大学大学院工学研究科 教授 前 晋 爾

1. はじめに

最近、地球の温暖化が地球的規模の重大な問題として、浮上してきた。と同時に、地球温暖化は、単なる学術上の研究の範囲を越えて、国際的な政治や産業の重要課題に拡大し、さらに深刻さと解決のための緊急性が増大しつつある。近年、テレビ、新聞等の報道を見ても、炭酸ガス排出の削減とかメタンガスの増大といった話題が取り上げられていることを、しばしば目にする。

炭酸ガス、メタンガス、その他数多くのガスは、赤外線を吸収し放出する。地球の大気圏には、炭酸ガス、メタンガスその他の赤外線吸収物質が存在しており、地球から放出される赤外線を吸収、その一部を地球に向かって放射していることは、研究者には良く知られた事実であった。炭酸ガス、メタンガスなどの物質が地球温暖化物質になりうる可能性は、現在のように地球温暖化が大問題になるずっと以前から研究者の間では、重要な問題として取り上げられてきた。

ただ、大気圏（対流圏と成層圏）に含まれる炭酸ガスやメタンガス等の地球温暖化ガスの濃度測定が大変困難であること、赤外線の吸収や放射による地球の温度の計算が容易でないこと、のため地球温暖化は緊急の課題として重要視されることはなかった。むしろ、氷期-間氷期の気温のサイクルからみて、そろそろ現在の温暖な時期すなわち間氷期が終わり、次の氷期すなわち寒冷な時期に入っていくものと考えられていた。

約13-14万年前に、氷期が終わり、気温の高い間氷期に入った。この間氷期は、現在の間氷期の前の間氷期である。この温暖な時期の前後に、現生人類

が登場したと考えられており、我々人類にとって重要な時期である。しかし、この最終間氷期は極めて短く、南極の氷の分析からは、おおまかにみて5千年程度の時間しか続かなかった。

その後、長い氷期が続き、およそ1万年前に氷期は終わり、現間氷期が始まった。前間氷期の後の最終氷期では、気温は時間とともに下がり、最終氷期の終了直前に気温は一番低くなった。この最終氷期の終了時期に、ネアンデルタール人が絶滅している。また、マンモスのような動物も絶滅している。

このように、間氷期-氷期の変化の時期には、地球上の環境は大きな変動を経験する。さらに、氷期に比べ、間氷期は極めて短いこともわかる。もちろん、氷期の期間中も、時間とともに単調に気温が下がっていくわけではなく、気温の変動がある。しかし、やはり間氷期-氷期の気温の変動は大きい。したがって、現間氷期が何時終了するかは、人類の将来のみならず諸生物にとっても重大な問題なのである。

前間氷期は、およそにみて5千年しか続かなかった。一方、現間氷期は、およそ1万年も継続している。したがって、約20年程前には、現間氷期は終わりを告げ、氷期が始まるだろうといわれていた。新聞紙上に、地球が氷に覆われている広告が掲載されることもあったほどである。当時は、近々気温が急激に下がり、氷期がくるものと考えられていたのである。

しかし、よく知られているように、近い将来地球はより温暖化すると警告されている。温暖化の原因は、大気圏で増加し続けている炭酸ガスやメタンガスであるとされている。このため、炭酸ガスの排出規制を国際的に取り決めたり、炭素税を導入したり、

温暖化の原因となる物質の抑制に努力しなければならぬ事態となっている。

このような20年前の考えと180度変わる正反対の状況になったのは、何故なのだろうか。まことに不思議なこの状況の変化は、南極の氷の分析からもたらされたのである。各国の南極観測は、20年ほどまえに探検的要素の強い観測から科学的研究の要素の強い観測に変わっていった。

2、ドームふじ氷とポストーク氷

南極大陸氷（以下大陸氷を氷床と呼ぶ）の表面温度は極めて低い。したがって、南極氷床内陸部では、年間を通じ氷床表面が融解することはない。気温が上昇しても、 -20°C を越えることはないからである。このため、氷床上に融解することなく堆積する。その結果、毎年堆積する雪がそのまま氷床に蓄積されることになる。

南極氷床に蓄積された雪は、その上にさらに蓄積される雪の重力のため、次第に圧縮される。この圧密により、ある深さで通気性を失い、氷となる。水には気泡（空気のかたまり）が沢山含まれるが、その大きさは深さとともに減少し、一定の深さでこの気泡も消失する。雪がつつぎつつぎと蓄積するため、氷床表面から深度を増すとともに年代の古い氷になる。したがって、氷床表面から氷を掘削しながら氷を採取していくと、現在から過去にさかのぼって氷を年代順に取得することができる。南極表面に堆積する年間の積雪量は5 cm以上になるので、圧密化された深い部分の氷でも、年代の精度の良い分析ができる。

さらに重要なことは、南極表面の気温があまりにも低いので、表面に降り積もる雪とともに、空気をも捕捉されてしまう。捕捉された空気は、低温のため変質せず、氷の中にふくまれてしまう。ということは、氷のなかの空気成分、例えば炭酸ガスやメタンガスの含有量を測定すると、過去の大気のこれらの気体成分の含有量がはっきりと分かることになる。勿論、硫酸や硝酸といった大気汚染物質の濃度の変化も測定できることになる。

一方、氷の重力によって氷は流動する。氷床の頂点では、理想的には流動はほぼ垂直になる。しかし、頂点からの距離が大きい場所では、垂直からずれた横向きの流動が生じる。したがって、頂点で掘削採

取した氷の分析は、頂点から離れた地点で掘削採取された氷の分析よりはるかに容易である。

日本南極観測隊は南極氷床の頂点の1つであるドームふじ基地（図1）で氷床掘削を行い、1997年2500mの掘削に成功した。2500m深の氷の計算された年代は30万年を越える。現在、鋭意氷の分析が実施されている。重要な結果が、いずれ近いうちに発表されるであろう。

ソ連南極観測隊は、おおよそ20年前からポストーク基地（図1）で氷床掘削を行ってきた。現在、4000m深までの氷床掘削に成功している。ポストーク氷は、掘削のちフランス、グルノーブルにある雪氷地球物理環境研究所に送られ、随時分析されてきた。ポストーク基地は、氷床の頂点には位置せず、横向きの流動が存在する。このため、ポストーク氷は、ドームふじ氷ほど分析には適してはいない。しかしながら、ポストーク氷の分析結果は、重要かつ貴重な成果をもたらした。

グルノーブル（フランス）の研究所では、氷の ^{18}O （酸素原子の同位体）の含有量を測定し、氷が形成された時の気温を明らかにした。次に、氷に含まれている炭酸ガスとメタンガスの量を測定した。この測定結果を図2に示すが、驚くべき結果が出てきたのである。すなわち、過去の気温の変化と空気中の炭酸ガスやメタンガスの濃度の変化が一致したのである。炭酸ガスやメタンガスは大気温暖化物質であるから、炭酸ガスやメタンガスの増加が気温を上昇させ、あるいは炭酸ガスやメタンガスの減少が気温を低下させたといえるのである。

現在（産業革命以後）、炭酸ガスもメタンガスもどんどん増加している。ポストーク氷の測定結果をそのまま信じるならば、気温はどんどん上昇し、現在世界で重大な環境問題となっている地球温暖化の科学的根拠を、ポストーク氷の分析結果は与えるものとなる。事実、この研究結果が発表されたのち、それまでの地球は寒冷化するという考えは影を潜め、地球は温暖化するという良く知られた地球環境の大問題へと発展していったのである。

講演では、未発表の成果も含め、ドームふじ氷とポストーク氷の分析から得られた成果の主な成果を説明したい。

3、氷のなかの空気

(1) 空気包接水和物結晶

氷のなかの空気はどのように存在しているか、といった研究は極最近始まったといってよい。明らかになったことは、おおよそ500m深まで、空気は空気泡（空気の塊）として存在する。しかし、500m深からは、しだいに空気分子と水分子でつくる結晶、空気包接水和物結晶となる（図3）。誤解を恐れずに簡単にいってしまうと、空気の化石となる。この空気の化石結晶を精密に研究するならば、炭酸ガスやメタンガスの増加が気温の上昇を引き起こしたのか（現在、大多数の気候学者がそう考えている）、あるいは気温の上昇が炭酸ガスやメタンガスの増加を引き起こしたのか、明らかになるのではないかと期待して研究を進めている。

まず、我々の研究室とフランス雪氷地球物理環境研究所とポストーク氷に含まれる空気包接水和物の共同研究を行った。ドームふじ氷でも同じ結果が得られたが、ポストーク氷ではおおよそ500m深で氷に含まれている空気包が消失する。顕微鏡解析で詳しく観察すると、空気泡は空気包接水和物結晶（サイズは300ミクロン）に変化していることが明らかとなった。

空気包接水和物結晶はガスハイドレートの一つである。ガスハイドレートは気体分子を水分子が取り囲み、それぞれの分子が規則正しく配列し、結晶を形成する（図4）。空気包接水和物結晶（以後、エア－ハイドレートと呼ぶ）は、窒素分子、酸素分子、炭酸ガス分子、メタンガス分子などの気体分子を水分子が包接する結晶である。しかも、放射光を使った精密X線構造解析から、氷床中のエア－ハイドレートは単結晶であることが分かった。

以上のような研究は、北海道大学および北海道大学の出身者によってなされたものである。この研究成果を評価されて、ポストーク氷を管理しかつその分析で重要な成果を挙げたフランス雪氷地球物理研究所とポストーク氷のエア－ハイドレートに関する共同研究を行うこととなった。

現在までの主な研究テーマは、

- 1) エア－ハイドレートの形態の観測
 - 2) 気体分子の氷中の移動とエア－ハイドレートの形成と変化の関連
- である。

1) については、研究目的を達成した。エア－ハイドレートは500m以深で観測され、500mから1000mまでの深さでは空気泡とエア－ハイドレートとが共存する、一方、1000m深で空気泡は完全に消失し、エア－ハイドレートのみが存在する。観測結果から、1000m以深ではエア－ハイドレートのサイズと数密度は深さによって変化することが明らかとなった。さらに詳細な研究の結果、エア－ハイドレートのサイズの変化は、氷が氷床表面で積雪として存在している時の温度に依存していることが分かった（図5）。すなわち、気温の高い間氷期に形成された氷のなかのエア－ハイドレートは大きく、氷期に形成された氷のなかのエア－ハイドレートのサイズは小さい。数密度はこの逆になっている。

2) については、主としてエア－ハイドレートのラマン分光測定によって行った。ラマン分光から、エア－ハイドレート中の窒素分子と酸素分子濃度比が解る。その結果、500m深から1000m深の間では、空気泡とエア－ハイドレートの窒素分子酸素分子濃度比は、空気の平均的濃度比から大きくずれる。また、1000m以深では、エア－ハイドレートの窒素分子酸素分子濃度比は、ほぼ平均的濃度比となるが、深さとともに変化する。これらの結果は、予想外の結果であり、ドームふじ氷についての測定も進めている。

1) 2) の結果は、氷の中で窒素分子、酸素分子、それに炭酸ガス分子、メタン分子の移動、すなわち拡散が生じていること、エア－ハイドレートの形成時にエア－ハイドレートに取り込まれる気体分子の分別が生じていることを示している。

(2) 気候と炭酸ガスおよびメタンガス濃度との関係

フランスの研究者達は、ポストーク氷を分析し、過去の気温と炭酸ガスおよびメタンガス濃度との密接な関係を明らかにした。その結果、現在の炭酸ガスおよびメタンガス濃度の急激な増加傾向から見て、地球が温暖化するとの警告がなされるに至った事情は先に説明した。しかしながら、私達

の研究結果は、3、(1)で記述したように、気体分子（温暖化物質分子を含む）は氷のなかで移動する（エア−ハイドレートのサイズと気候の関係も拡散現象からも説明できる）のであるから、氷の中で測定された濃度がそのまま氷床表面にあったときの気体分子の濃度とはならない。この観点から見ると、ポストーク氷は流動の影響が大きく、したがって気体分子の移動が大きく、かつ移動の過程が複雑である。

以上、ポストーク氷の分析結果だけから、炭酸ガスやメタンガスの増加が気温上昇の原因になっていると、結論づけることはできないのである。気温の上昇が先にあり、その結果、炭酸ガスやメタンガスの濃度が増加し、さらに気温の増加を招くとも考えることもできる。後者では、気温の上昇の起因として、温暖化物質の増加以外の原因を考え実証していかなければならないが。

4、今後の展開

地球の将来の気候を予測することは、地球温暖化物質の増加との関連から、大変重要である。しかも、南極氷床を掘削し採取した氷を分析することは、なかでも貴重な研究であることは言を俟たない。

しかし、ポストーク氷の分析には限界がある。氷の流動の影響を除くことができないからである。いっぽう、あらたに掘削されたドームふじ氷は、南極では最も流動のない理想的な氷である。

したがって、ポストーク氷で行った研究をドームふじ氷にも実施し、かつ実験的研究（気体分子の拡散やハイドレートの形成）を平行して行うことにより、真の気温と炭酸ガスおよびメタンガスの濃度の関係を明らかにしていかなければならない。

現在まで、主としてフランスとの共同研究を行ってきた。今後は、フランスの研究者との共同研究を継続するとともに、ヨーロッパやアメリカの研究者との共同研究を作り出していきたいと考えている。と同時に、硫酸、硝酸といった化学物質との関係も明らかにしていかなければならないであろう。

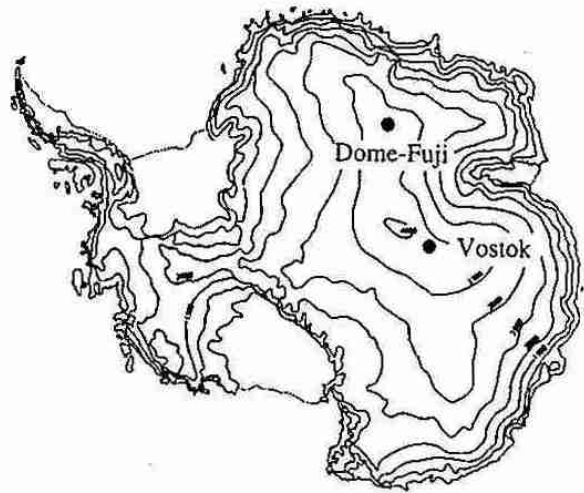


図1：南極全図。黒丸は氷床深層掘削地点を示す

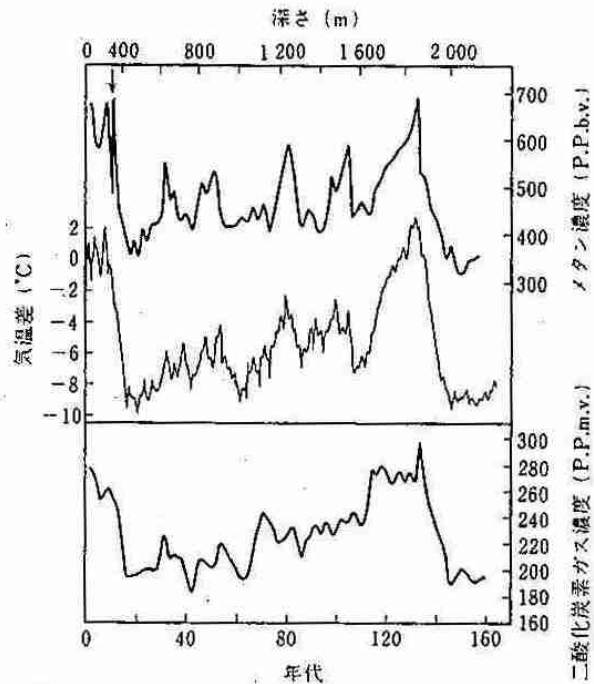


図2：炭酸ガスやメタンガスの濃度と気温の関係（ポストーク氷）

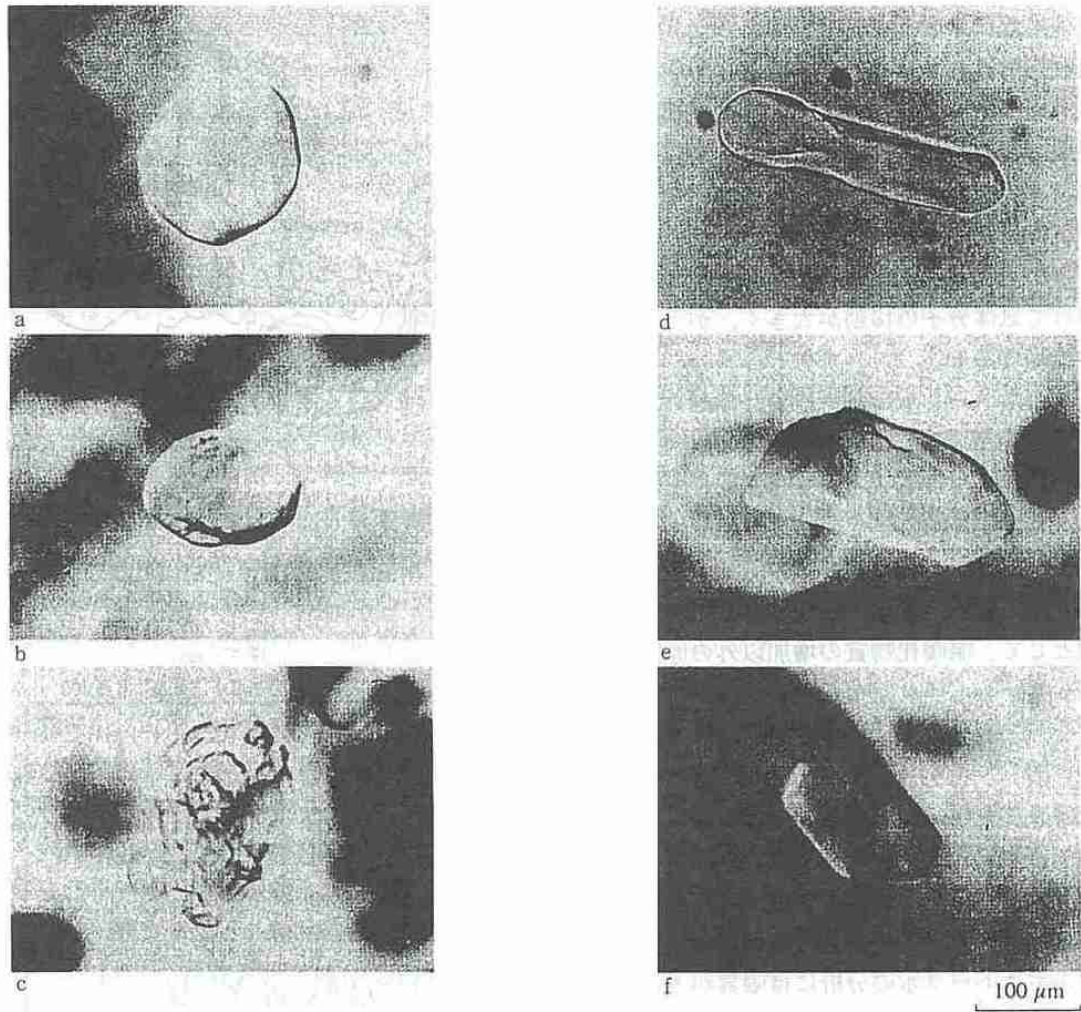


図3：南極ポストーク氷中に存在する空気包接水和物結晶。多様な形態を示す。

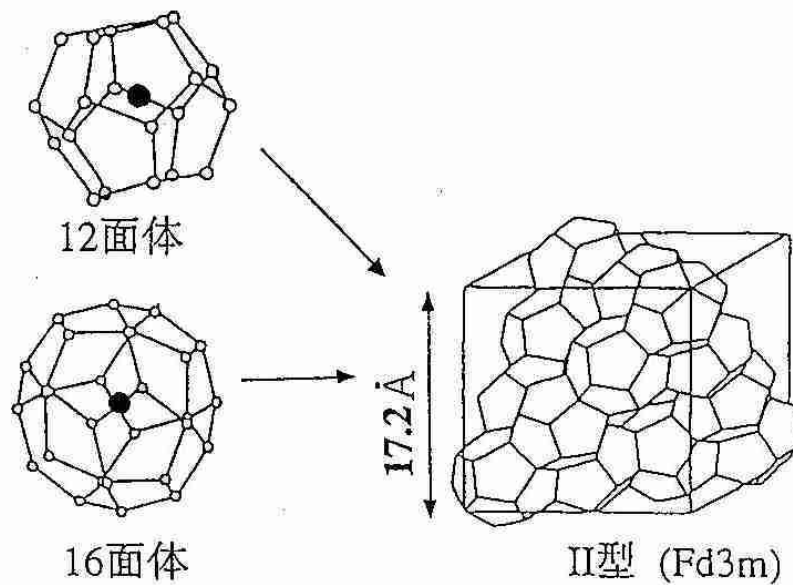


図4：空気包接水和物結晶の構造。白丸は水分子、黒丸は気体分子を表す。精密X線構造解析によって得られた。12面体と16面体の水分子の籠が複雑に配列している（右側の図）。

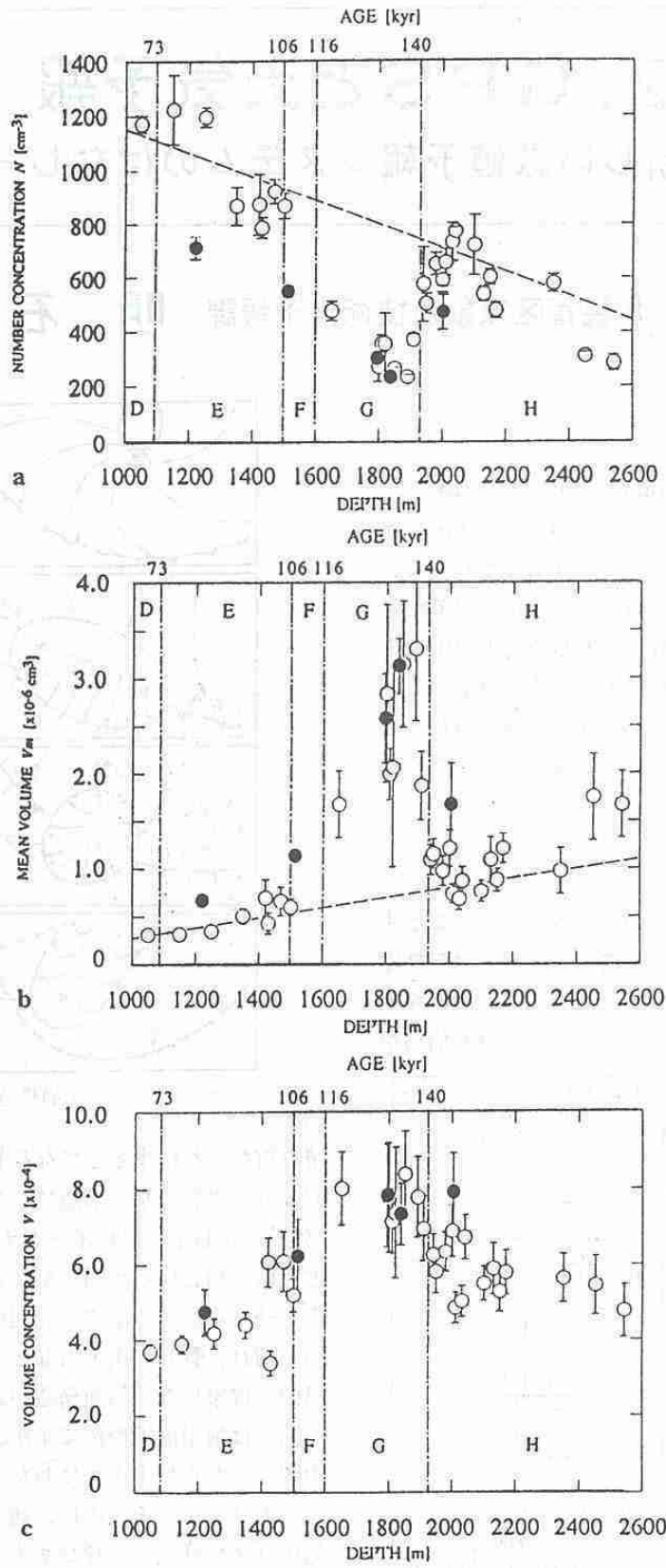


図5：空気包接水和物結晶の数密度(a)、平均サイズ（平均体積）(b)、体積密度(c)の深さ分布。深さ1600mから1900mまでは前間氷期（サーガモン間氷期）に相当する。