

# 長岡雪氷防災実験研究所における 雪氷コア研究への取組み

山田隆二\*・小島隆志\*・Guanhong Tao\*・神田尚子\*・東浦將夫\*

## Polar region ice core research at the Nagaoka Institute of Snow and Ice Studies

By

Ryuji Yamada\*, Ryuji Kojima\*, Guanhong Tao\*, Hisako Kanda\* and Masao Higashiura\*

*\*Nagaoka Institute of Snow and Ice Studies,*

*National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan*

### Abstract

Paleoclimatic research using ice cores collected at the polar regions is in progress at the Nagaoka Institute of Snow and Ice Studies, with the objective of making contributions to the prediction of environmental changes and the prevention of future weather disasters. Polar region ice cores are the unique undisturbed archives of the past environmental and climatic changes on our planet. They have revealed the fact that the temperature in the polar regions has changed suddenly and rapidly with an amplitude of around 10 °C within a few decades in the past. We reviewed the information derived from ice core analysis, the analytical methodology, and the present state of ice core research.

Here we express our attitude towards conducting ice core research in the next few years. Our tentative objective is to establish the updated procedures for high quality analyses, prior to collecting samples from various locations. It should be possible to reduce the volume of samples required to yield highly precise data, with the analytical techniques developed recently in this institute and our cooperative laboratories. Analytical resolution in terms of time scale may be improved from *decadal* to *annual* or *seasonal*. Our advanced techniques will enable us to reveal more detailed environmental and climatic variations in the past, their causes, and the precursory phenomena. The acquired knowledge will assist us in predicting the future and preventing disasters.

**Key words:** Ice core, Weather disaster, Palaeoclimatology, High precision analysis

### 1. はじめに

21世紀を目前とした現在においても、いまだに大きな水災害の脅威から逃れられていない。1998年の夏には集中豪雨によって激甚災害に指定されるほどの大きな被害が出て、さらにその後の農産物の高騰など経済的混乱が尾を引いた。近隣の中国における被害は更に大きかった。長江の氾濫による被害は、98年10月現在、死者3600名、住宅被害560万戸、被害者2億3000万人、経済損失3兆円にのぼる。我が国の総人口の倍近い人々が被害を受けたという極めて大きな災害であった。これらの災害に

も、産業発展優先の乱開発など、人災の側面が見られる。言い換えれば、適切な策を施せば防げた部分も大きい災害であったともいえる。

災害対策のみならず、減反政策、水資源開発などに対して、適切な策を講じるためにはその判断材料となる情報が必要である。それには、ある程度の時間的・空間的精度の降水予測が前もって行えることが望ましい。しかしながら、何らかの手段によって将来を予測した場合、それが正しいのかどうかは最終的にはその時点にならなければ分からない。これは、将来予測全般にかかわる共通

\* 防災科学技術研究所 長岡雪氷防災実験研究所

の問題である。これでは判断材料とはなり得ないので、予測の「信頼度」を何らかの手段で測って、それによって判断せねばならない。現在、防災科学技術研究所の「全球水文過程における災害予測に関する研究」で行われているモデリングによるアプローチは、短期・中長期的予測の有効な手段の一つである。今後も計算機の能力向上が見込める中、その信頼度は徐々に向上していくであろう。最終的には確度の高い予測手段として利用できることが期待される。

では、そのモデリングの「信頼度」とはどのように測るべきであろうか。あるモデルを立てて、例えば100年前から90年前を、90年前から80年前を計算により「予測」し、その結果を実際のデータとつきあわせて検証してみる。これを繰り返し行い、現時点まで「予測」した結果と、実データとで高い整合が取れたならば、そのモデルによる将来予測の信頼度は高いと言える。言い換えると、各時点における予測データと実データとのずれの大小によって「信頼度」を測れば良い。このように信頼度を測る場合、大切なのは正確な過去のデータである。降水予測のためには、主として降水量、気温などの気象データが必要である。同時に、気候変動の原因物質の変化も重要な要素である。つまり、温暖化をもたらす二酸化炭素や、大気乾湿・風速に係る大気微粒子濃度などである。地理的に見た場合、気候変動は全球的な相互作用によって起こる現象であるので、データは空間的には全球にまんべんなく分布することが望ましい。データに望まれる時間的解像度は、予測・検証すべき時間精度に依存する。

最近数世紀のこのような記録は人類によって残されてきた。昨今では人工衛星なども用いて質の高い記録が得られているが、その以前では文明地域に偏って残されている。特に、海洋域、砂漠地域、寒冷地域では十分な密度での記録はほとんどない。しかしながら、寒冷地域、特に極域においては、近年注目を集める極或の氷床試料から、例えば酸素安定同位体比分析によって過去の気温が分かるなど、新たな分析手法を用いることで先述した種類の記録を読み出すことができる。しかも降雪が融解しないなどの地理的条件を満たせば、時間的に連続した記録を読み出すことが可能である。極地氷床から採取するコア試料は、古文書、木の年輪、花粉、湖底堆積物、海底堆積物に較べて、記録されている大気環境情報の内容が多様でかつ詳細であるという点に大きな特徴がある。

以上のような背景のもと、長岡雪氷防災実験研究所では、極域から採取した雪氷コア試料を解析することで、環境の変遷を復元するという研究が行われている。これは、水害発生予測に向けて有用なデータを得ることを目的としているが、一方で、過去に起こった全球規模の気象災害の記録という側面も持つ。ここでは、雪氷コアから得られる情報の種類、分析・解析方法、雪氷コア研究分野の現状についてまとめた。この研究における我々の方針と現状にも触れる。

## 2. 雪氷コアから何が分かるか

南極大陸やグリーンランドを厚く覆う氷床は、過去に降り積もった雪が溶けずに自身の重みで圧縮されて氷となったものである。その中には雪が降った当時の大気や風で運ばれてきた塵も取り込まれている。それらの塵の中に当時の気候の情報が封印されている。こうした氷床からボーリング掘削を行い、柱状の氷試料を得る。これを雪氷コア (ice core) と呼ぶ。掘削する深度によって得られる情報の時間スケールが決まる。グリーンランドにおける数1000 mに及ぶ大深度ボーリングコアから、驚くべき気候変動が見つかった (図1)。従来数万年のスケールでの気候変動は知られていたが、より短い数100年から数1000年周期の気候変動が見いだされた (Grootes et al., 1993)。しかもその変化は穏やかではなく、激変するものであった (Dansgaard et al., 1993; Johnsen et al., 1997; Taylor et al., 1993)。中には、ほんの数10年の間に10℃以上の気温変動を示すものもあった。このような気候の激変を有史人類はいまだ体験していない。

この急激な気候変化は北極だけのものだろうか、それとも全球的に起こったものであろうか。果たしてこのような変化は前兆現象を伴うのであろうか。これらの問いに対する答えは将来の気候変動を予測する上で重要な手がかりとなる。気候変動予測においては、人類の活動に伴うCO<sub>2</sub>などの影響が重要である。それと同時に、人類による影響が小さかった時期に現実に起こった気候の激変についても目を向けないわけには行かない。気温の変化とともにコアに残された塵や気泡の分析によって、これらの手がかりが得られる。ここにコア研究のもう一つの大きな意味がある。すなわち、気温データの記録媒体としてだけでなく、気候変動を起こした原因物質の記録媒体でもあるということである。両者の因果関係を見出すことは、モデル研究と相まって、災害予測研究の鍵となる。

## 3. 分析要素と手法

雪氷コアの中に記録されている環境要素と、それを担う氷床シグナルの対応を表1に示す (安成・柏谷 (1992) より引用)。極めて多くの環境要素が記録されていることが分かる。これらのシグナルのほとんどは研究室での分析作業によって得ることができる。ここに示されたものは既に解読方法が確立された環境要素であって、現在もその種類は日々増加している。気候を語る上で最も基本的な要素である気温は、酸素や水素などの安定同位体が、各々の質量の差が原因となって気温に応じて異なる挙動を利用する。これは水試料の動態を知るために古くから用いられている (Clark and Fritztz, 1997)。

雪氷コアを採取する地域のほとんどは極域に集中している。これらの地域では長期間にわたって氷河が溶けないまま残っているためである。極域にはほとんど大気汚染源は存在しないという地理的な条件から、ここで検出される物質は、地域的な分布をするものというよりは、たとえば大規模火山噴火に伴う火山灰など地球全体を巡

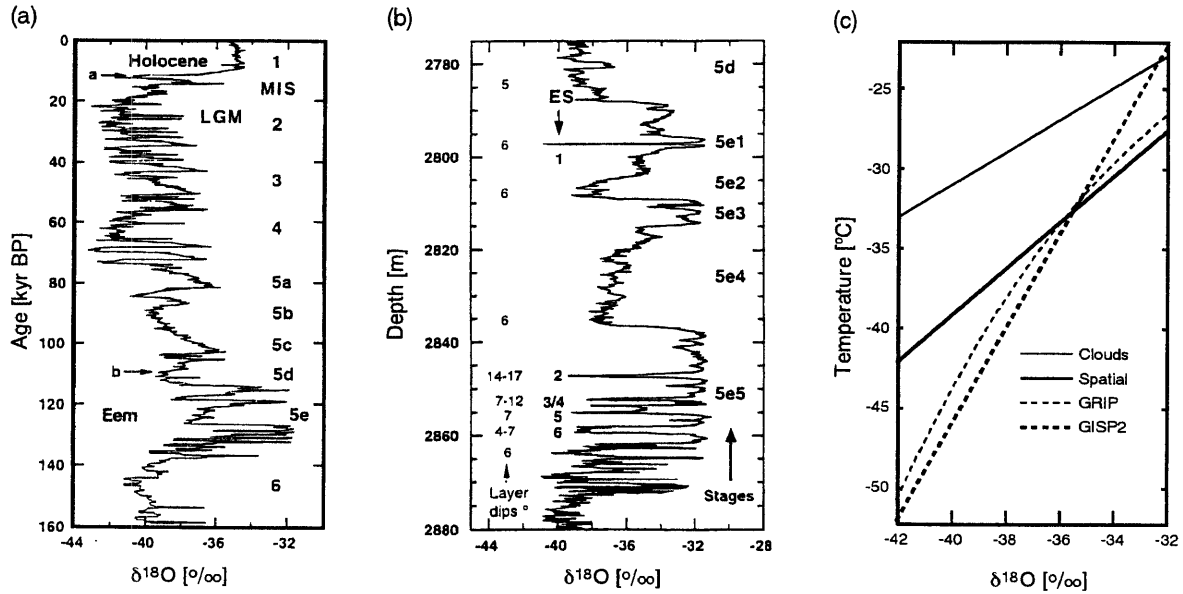


図 1 Greenland Ice Core Project (GRIP) で得られた酸素同位体比の記録 (Johnsen et al. (1997) からの引用)  
 (a) 時間軸に沿った過去 16 万年前までの酸素同位体比プロファイル。最近 1 万年間 (完新世: Holocene) の気候が極めて安定していたことが分かる。  
 (b) Eemian 期の高解像度同位体比プロファイル。縦軸はコアの深度。短い時間間隔で大きく酸素同位体比が変動していた時期 (たとえば深度 2870 m 付近) が見られる。  
 (c) 酸素同位体比と気温の関係。条件によって、相関関数が異なる。GRIP の関係を用いると、(b) で見られる変動幅は 15 °C 程度になる。

Fig. 1 The  $\delta^{18}\text{O}$  record obtained from the Greenland Ice Core Project (GRIP) (after Johnsen et al., 1997)

- (a) The GRIP  $\delta^{18}\text{O}$  profile plotted on a timescale, from 160 kyr to the present. It shows that the climate was very stable during the latest 10 kyr (Holocene).  
 (b) High-resolution  $\delta^{18}\text{O}$  profile spanning the Eemian ice. The vertical axis represents the depth from the surface. Some large oscillations in  $\delta^{18}\text{O}$  over a short duration are recognized (e.g., around 2870 m depth).  
 (c) The relationship between temperatures and  $\delta^{18}\text{O}$  in Greenland. The functional forms of calibration curves are different depend on the sample conditions. According to the relationship of GRIP, the amplitude shown in (b) corresponds to around 15 °C.

ったものであるといえる。つまり、第一次近似的には過去の地球の代表的な姿をとどめていると言ってよい。

雪氷コアの分析を進める上で最も重要なのは、氷床を構成する各層の形成年代の決定である。氷の年代が正確に求められなければ過去の気候に関する他のデータとの突き合わせが出来ず、系統的な気候変動史はつくれない。氷の年代を決めるには、放射性同位体の壊変現象を利用した放射年代測定法と、層序から相対的な年代を求める方法がある。前者には、 $^{210}\text{Pb}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ などを用いるが、一般に極域ではこれらの成分濃度が低く、測定値を中心とした誤差範囲がかなり大きくなってしまいうため、有効なデータを得ることは難しい。一方、後者では、層序を示す様々な指標を用いることができるため、雪氷コアの年代決定には有効であることが多い。

雪氷コアにあらわれる縞模様 (年層と呼ぶ) から比較的容易に年代が求められることがある。グリーンランド中央部のような雪がとぎれることなく降り続く場所の場合、夏に降る雪は冬の雪に比較して結晶粒が大きいので、樹木の年輪のように 1 年単位で年層が形成される。この年層を数えることで氷床の年代が分かる。氷に含まれる

各種の成分の濃度変化によってより正確に年代を知ることできる。理由ははっきりしないが、夏と冬では酸性度が異なることが利用できる。また、微粒子の濃度変化からも年層が識別できる。春は強い風が吹くので、その時期に形成された表層には他の季節よりも微粒子の量が多くなる。これらの方法による年代測定精度はかなり高い。火山灰が混じった年層もあるが、その分析から、その灰が歴史的に知られたいつの時代のどの火山の噴火によるものであるかを同定できるほどである。逆に、火山灰を鍵層として、その年層の正確な年代を確定する事もできる。毎年層が確実に追いかけるには限らないため、鍵層の導入は年代決定精度をより向上させると同時に、地理的に離れた地点での同時間面を示す。最近では、全球的に用いられる有用な鍵層として、人工放射性物質を用いることがある。これはいうまでもなく大気中核爆発によるものである。

#### 4. 最近の雪氷コア研究

雪氷コアに関する最近の研究を簡単にレビューする。より詳細なレビューは Yamada et al. (1999a) を参照され

表1 雪氷コア分析から得られる環境要素とそれに対応するシグナル  
 Table 1 Environmental information obtainable from ice core analysis and the corresponding signals

環境要素	氷床シグナル
<自然起源>	
気温	$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ , D/H, 掘削孔内温度
氷の年代	放射性同位体, 季節変動シグナルによる年層, 火山シグナル, 氷期氷シグナル, 流動モデル
季節変動シグナル	$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ , Cl, Na, $\text{NO}_3^-$ , $\text{SO}_4^{2-}$ , Al, $\text{H}_2\text{O}_2$ , 電氣的性質, 固体微粒子, 物理層位
火山活動	$\text{SO}_4^{2-}$ , Cl $^-$ , pH, Zn, Cd, 電氣的性質, 固体微粒子
大気組成	気泡・水和物内空気: $\text{N}_2$ , $\text{O}_2$ , Ar, $\text{CO}_2$ , $\text{CH}_4$
涵養量	季節変動シグナルによる年層, $^3\text{H}$ , $^{210}\text{Pb}$ , $^{10}\text{Be}$ , 流動モデル
生物の生産性	有機物, 花粉
森林生産	無機炭素
砂漠化	固体微粒子, Al, Si, Ca
湿度	過剰重水素
氷床表面温度	空気含有量
氷床流動	力學的性質, 掘削孔変形速度, アイスレーダー
海氷拡大	Cl, Na
太陽活動	$^{14}\text{C}$ , $^{10}\text{Be}$ , $^{36}\text{Cl}$
地球外物質	Ni, Fe, Mg, Ir
夏期表面温度	氷板含有量
<人工起源>	
大気汚染・公害	Cd, Cu, Hg, Ag, Pb, Zn, $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{NO}_3^-$ , pH, 殺虫剤, 殺菌剤, PCB
核爆発	$^{90}\text{Sr}$ , $^{137}\text{Cs}$ , $^3\text{H}$ , Pu・Am同位体
温室効果ガス	気泡内空気: $\text{CO}_2$ , $\text{CH}_4$
化石燃料起源ガス	$^{14}\text{C}$ , $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$

たい。

雪氷コアを掘削し、そこから過去の環境に関する情報を得ようとする試みはここ20年ほどの間に盛んになった。雪氷コア試料は南極 (Jouzel et al., 1993), グリーンランド (Boulton, 1993), 北極圏カナダ (Koerner and Fisher, 1990), そのほかの地域 (Vincent et al., 1997; Dibb et al., 1993) から掘削されている。

最近の微量分析技術の進歩によって様々な物質を検出できるようになり、表1に示したような気候シグナルが利用されるようになってきた。過去の気温を表す指標として、雪氷コア試料中の安定同位体比分析が行われ、氷期-間氷期サイクルが明らかにされた (Grootes et al., 1993; Dansgaard et al., 1993; Johnsen et al., 1997)。氷中の気泡から気体成分を抽出し、二酸化炭素、メタンなど温暖化原因物質と呼ばれる気体成分を分析する。この分析にはガスクロマトグラフが用いられる (Güllük et al., 1998; Chappellaz, et al., 1997)。放射性核種の分析によって年代測定や積雪速度の見積もり (Bartarya et al., 1993)、全球的な物質循環過程の研究 (Kudo et al., 1998) が可能である。雪氷コア中の重金属イオンの濃度分析には誘導結合プラ

ズマ質量分析法 (Sturgeon et al., 1993; Townsend and Edwards, 1998), レーザー励起原子蛍光分析法 (Candelone et al., 1995), 差分パルス陽極ストリッピングボルタンメトリー (Goerlach and Boutron; 1990) などが用いられた例がある。

先述したように、雪氷コア研究においては年代測定が基本である。降雪量の多い地域では、直接眼視によって1年に相当する層を観察することによって (Alley et al., 1997), あるいは安定同位体比の季節変動によって (Dansgaard, 1964) 年代測定が行われた。これは樹木の年輪を数えることに相当する。コア全体にわたり連続的にシグナルを分析し、パルス状の強度変化から特定の年代を同定する方法がある。これには、電気伝導度 (Zheng et al., 1998; Hammer et al., 1994), レーザー光分散による埃の粒度 (Ram et al., 1995; Ram et al., 1997), 主要元素イオン (Herron, 1982; Whitlow et al., 1992), 過酸化水素水 ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) (Sigg and Neftel, 1991), 放射性炭素 ( $^{14}\text{C}$ ) (Lal et al., 1997) などのシグナルを分析するが、雪氷の動態モデリング (Schøtt et al., 1992) も合わせて考えねばならない。実際に用いられる特定の年代指標としては、最近数10年

間の積雪層中の放射能強度から、大気中核実験の時期が同定された (Kudo et al., 1998; Picciotto and Wilgain, 1963). また、硫黄酸化物 (SO<sub>2</sub>) の濃度により 1815 年の Tambora 火山, 1783 年の Laki 火山噴火などが多くの雪氷コアで同定されている (Devine et al., 1984; Legrand and Kirchner, 1987). これらのシグナルは、複数を合わせて考察することで、年代測定や降雪量の変化などの見積り精度を飛躍的に向上させる。

雪氷コア掘削研究による最も重要な成果は、ヨーロッパのグループが中心となって行われた Greenland Ice Core Project (GRIP II) とアメリカのグループが中心に行った Greenland Ice Sheet Project (GISP2) という共同プロジェクトによって得られた (Boulton, 1993; Legrand and Kirchner, 1987). およそ 28 km 離れた場所で掘られた 2 本の 3000 m コアから、11 万年間までの気候変動の記録が得られた (Grootes et al., 1993; Taylor et al., 1993). これらの研究から判明したことは以下の通りである。

- ・完新世 (最近約 10000 年間) のグリーンランドの気候は安定していた。
- ・約 11500 年前に終わった最終氷期の間に、突然かつ急激な一連の気候変動があった。
- ・わずかに数十年あるいは数年間に 5 ~ 10 °C の突然の気温変化が起こっていた。

これらの成果によって雪氷コアによる気候変動研究が注目を集めることとなった。なぜなら、昨今、毎年のように異常気象が叫ばれているが、実は永い地球の歴史の中においては、現代は極めて安定した気候であり、過去には我々には想像もつかないほどの速度で急激な気候変化が起こっていたことが分かったからである (図 1 参照)。もし、今このような気候変動が起こった場合、地球の環境・生態、さらには現代文明にどのような影響が及ぼされるのかは想像できない。

また、いくつかのコアを用いた時間分解能の高い分析から、地球温暖化をもたらすと考えられる物質 (Greenhouse gas) の増加と気温を表す安定同位体比との相関があることも明らかになっている (Chappellaz et al., 1997; Schwander et al., 1997; Anklin et al., 1997). これらが我々の文明起源であり、急激かつ突然な気候変動を起こす原因となる可能性も指摘されている (Smith et al., 1997).

## 5. 今後の展望と現状

今後長岡雪氷防災実験研究所では、以下のような観点で雪氷コア研究を進めていく方針である。

### (1) 雪氷コア研究の今後の方向性：分析・測定技術の向上

今後の雪氷コア研究が発展していく方向性としては、①分析能力の向上、②試料採取地点の増加、の 2 点が重要である。①では、時間分解能の向上、環境要素を示すシグナルの種類増加およびノイズの低減、などの質的向上と見なされる。②は、気候や気候変動の原因物質の地域的な偏りを知るための量的向上と見なされる。

コスト対効果については、現時点において①と②は対照的である。先にも示したとおり、コア掘削自体が危険を伴い多大な費用が必要であるため、研究には困難が多い。一方、分析能力の向上に関しては、分析化学の領域における、電子機器のすさまじいばかりの進歩も手伝って、DNA 鑑定で髪の毛の主を特定したり、ヒ素の極微量分析が事件解決の手がかりになるなど、分析機器の能力向上とその応用の成果はめざましいものがある。当然これらの成果は雪氷コア分析にも生かされて行くべきものであって、表 1 に示した以外のシグナルの発見や、時間分解能の向上はまだ望める段階である。すなわち、この研究領域の現状では、コア採取地点数という量的な充実も大切ではあるが、当面は、より良質のデータを得ることを目的とした分析手法の拡充を目指すべきであろう。

要するに、コア試料は貴重なものであるという前提に立ち、1 本のコアからより多くの情報を引き出すという基本姿勢である。ここから、後ほど (4) に示す、最近 100 年間における 1 年単位の気温変化や、年層決定精度の向上による降水量変化といった良質な基本データが期待できる。

具体的な研究サブテーマを以下に列挙する。

- ・水溶性主要化学成分分析に必要な試料量の低減化
- ・風速との関連が考えられている固体粒子分析の高度化
- ・非破壊で行う電気伝導度測定と各種含有元素との相関
- ・気温の指標となる酸素同位体比分析に必要な試料量の低減化
- ・高精度誘導結合プラズマ質量分析器による雪氷コア中の極微量元素の測定

はじめの 3 つは既に行ってきたものである。あとの 2 つについて、以下のような新たな研究に着手した。

### (2) 誘導結合プラズマ質量分析法による主要元素イオン濃度測定

従来、当研究所ではイオンクロマトグラフによる分析によって 10 億分の 1 (ppb) オーダーの濃度測定に取り組んできた (たとえば Goto-Azuma et al., 1997; Koerner, et al., 1999). 一般的な水質汚染を語る場合には 100 万分の 1 (ppm) オーダーの分析を行うことを考えれば、ppb オーダーの分析精度は非常に高いと言える。しかしながら、極域の雪氷水の場合、蒸留水にほぼ近い程度の物質濃度であるため、この能力の分析器を持ってしても濃縮作業が必要であった。その作業過程で発生する汚染が問題となる。

汚染の原因となる作業過程を減らすべく、濃縮を行わずに少量の試料によって分析を行えるよう、1 兆分の 1 (ppt) オーダーの分析が可能である特別な工夫を加えた誘導結合プラズマ質量分析法 (Tao et al., 1999) を適用することを試みた。その結果、濃縮することなく十分な精度で極域の積雪試料が分析可能であろうとの感触を得た (表 2)。これは、市販の分析機器をそのまま利用しても得られない分析精度であり、高いレベルの技術知識を持つグループ (京都大学原子炉実験所バックエンド工学部

表2 改良した誘導結合プラズマ質量分析法による積雪中の主要元素分析 (Tao et al. (1999) からの引用)

Table 2 Determination of major metals in arctic snow by improved inductively coupled plasma mass spectrometry (after Tao et al., 1999).

Element	BEC (ppb)	RSD (%)	LOD (ppb)	Snow sample (ppb, 1σ)
Na	0.017	1.3	0.001	8.38 ± 0.03
Mg	0.015	1.0	0.001	4.08 ± 0.02
Al	0.081	1.1	0.002	3.84 ± 0.04
K	0.016	1.5	0.007	2.17 ± 0.04
Ca	0.012	1.8	0.006	10.3 ± 0.01
Fe	0.022	1.3	0.003	6.49 ± 0.03

BEC: バックグラウンド等量濃度; RSD: 濃度 1 ppbの標準溶液を 10回 繰り返し測定して計算した相対標準偏差; LOD: 分析限界 (3σ); 雪試料は北極域カナダの深度 1 m から採取された。

BEC: Background equivalent concentration; RSD: Relative standard deviation, calculated from 10 replicate measurements of 1 ppb standard solution; LOD: Limit of detection (3σ); Snow samples were taken from 1 m depth in the Canadian Arctic.

門)との共同作業によって初めて実現する上質なデータである。現在は、次のステップとして、汚染の少ない試料調整方法の検討を始めている。

### (3) 質量分析器による安定同位体比分析

我々は、新潟大学積雪地域災害研究センターに最近導入された質量分析器の共同利用を検討している。この質量分析器では、一回の測定に 0.2 ml の水試料しか必要とせず、分析精度は 0.1 パーミルである (渡部ほか, 1998)。本来、この分析器は、地下水の起源などを同定するために導入されたものである。もし、極域のような低温環境から得た水試料の分析においてもこの能力が発揮されれば、我々の目的とする雪氷コアの古気温解析にも利用することが可能である。この可能性を、新潟大学積雪地域災害研究センターと、同タイプの質量分析器を保有する富山大学理学部の協力を得て調査した (小島ほか, 1999)。また、酸素同様、水素の安定同位体比も気温に対応して変化する。水素と酸素を合わせて分析することでより多くの情報が引き出せる可能性がある。そこで、その分野の関連文献の調査を行った (Yamada et al., 1999b)。

我々が安定同位体比分析を行うに際して、具体的な検討項目は以下の 3 点である。①極域のように極めて気温が低い地域の試料分析の場合、日本のような中緯度地域の標準試料が用いられないため、低温度水試料用の標準試料を用意する。②より多くの気温に関する情報を得るため水素の同位体比を測定するための手法を開発する。③酸素同位体比を測定する分析器に手を加えることで水素も同様に測定可能になるため、その改造方法を調査する。当初は、上記の分析器が所望する分析能力を持つかどうかを実証できていないため、能力の高い分析器を持つ機関に分析を委託する意向であるが、将来的には我々のユニークな手法を共同で開発・利用できる目途をつけ

たい。

### (4) 全球水文過程モデリングの検証データの提供

「全球水文過程における災害予測に関する研究」の一環として行われる雪氷コア研究においては、モデルの検証データを提供する役割が大きい。そこで、極域の複数地点にて過去数 100 年間の気温変化のデータを得ることを目的とする。年代を決定するために年層の決定を行うので、同時に年間降水量の変化を捕らえることも可能である。年層決定のために行う微粒子の粒径、濃度の分布から、風の強弱に関する情報が得られる可能性もある。

試料採取地点の選定にはいろいろな考え方があがるが、長期間に渡る準備が必要な場所ではなく、当面は、採取がしやすい場所 (北極域カナダ) において、地域間のローカルな記録のばらつきを見るために、初めは互いに大きく離れていない地点を選定する予定である。初期に行われた南極やグリーンランドなどにおけるコア採取は、掘削自体が遠くて極めて厳しい地理的条件の中で行われる危険を伴った冒険的な挑戦であった。そこからは、様々な重要な情報が得られる代わりに、多大な輸送コスト、および工学・技術的な問題のため、実際の研究には困難が多い。北極域カナダでの作業は、それらの地域と比較すると費用は少なく済み、その割には多くの情報が得られるので、最近 20 年間ではカナダ領エルズミア島アガシキャップ (Agassiz Icecap) などでの研究が盛んになってきている (たとえば Goto-Azuma et al., 1997)。時間的、予算的な余裕が生じた場合、採取地点を増やす。

### (5) 災害につながる可能性がある気候変動の前兆現象の捕捉

気候変動には、人類の活動に伴って発生する CO<sub>2</sub> が原因となる温暖化などの比較的「緩やかな」変化と、隕石の衝突や火山の大噴火などを原因とする「激しい」変化が

あると考えられる。前者はモデル計算によってかなり高い精度での予測が可能であるが、後者の突発的な現象は過去の記録を丹念に調べて手がかりをつかむ以外に方法はない。火山の噴火そのものが気候を変化させるのではなく、そこから発生した灰や気体成分が原因となって、日射量・大気成分の変化をもたらす、いくらかのタイムラグを伴って気温の変化があらわれる。どの成分のどのような変化が気候変動の前兆として用いられるかが分かれば、将来の防災対策にも貢献が期待できる。これは、(4)における年層決定のために行う各種の成分分析の精度が向上することで可能になると見込まれる。

以上のような雪氷コア研究に対する取り組みによって、従来よりも上質なデータを得ることが可能である。それを利用して、気候変動史を従来以上の時間精度で復元することで、防災科学分野のみならず、自然科学分野における進展にも貢献できるものと確信している。

#### 参考文献

- Alley, R. B., C. A. Shuman, D. A. Meese, A. J. Gow, K. C. Taylor, K. M. Cuffey, J. J. Fitzpatrick, P. M. Grootes, G. A. Zielinski, M. Ram, G. Spinelli and B. Elder (1997): Visual-stratigraphic dating of the GISP2 ice core: Basis, reproducibility, and application. *J. Geophys. Res., Part C*, **102**, 26367-26381.
- Anklin, M., J. Schwander, B. Stauffer, J. Tschumi and A. Fuchs (1997): CO<sub>2</sub> record between 40 and 8 kyr B.P. from the Greenland Ice Core Project ice core. *J. Geophys. Res., Part C*, **102**, 26539-26545.
- Bartarya, S. K., M. Pourchet and J. F. Pinglot (1993): Environmental Radioactivity in the Arctic and Antarctic, pp. 350, Strand and Holm.
- Boulton, G. S. (1993): Two cores are better than one. *Nature*, **366**, 507-508.
- Candelone, J. P., S. Hong, C. F. Boutron, M. A. Bolshov and S. N. Rudnev (1995): Bismuth in recent snow from Central Greenland: Preliminary results. *Atmos. Environ.*, **29**, 1843-1848.
- Chappellaz, J., E. Brook, T. Blunier and B. Malaize (1997): CH<sub>4</sub> and δ<sup>18</sup>O of O<sub>2</sub> records from Antarctic and Greenland ice: A clue for stratigraphic disturbance in the bottom part of the Greenland Ice Core Project and the Greenland Ice Sheet Project 2 ice cores. *J. Geophys. Res., Part C*, **102**, 26547-26557.
- Clark, I. and P. Fritz (1997): Environmental Isotopes in Hydrogeology, pp. 328, Lewis Pub.
- Dansgaard, W. (1964): Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, **16**, 436.
- Dansgaard, W., S. J. Johnsen, H. B. Clausen, D. Dahl-Jensen, N. S. Gaudesstrup, C. U. Hammer, C. S. Hvidberg, J. P. Steffensen, A. E. Sveinbjörnsdottir, J. Jouzel and G. Bond (1993): Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, **364**, 218-220.
- Devine, J. D., H. Sigurdsson, A. N. Davis and S. Self (1984): Estimates of sulfur and chlorine yield to the atmosphere from volcanic eruptions and potential climatic effects. *J. Geophys. Res.*, **89**, 6309-6325.
- Dibb, J. E., R. A. Rasmussen, P. A. Mayewski and Holdsworth (1993): Northern hemisphere concentration of methane and nitrous oxide since 1800: Results from the Mt. Logan and 20D ice cores. *Chemosphere*, **27**, 2413-2423.
- Goerlach, U. and C. F. Boutron (1990): Preconcentration of lead, cadmium, copper and zinc in water at the pgg-1 level by non-boiling evaporation. *Anal. Chim. Acta*, **236**, 391-398.
- Goto-Azuma, K., R. M. Koerner, M. Nakawo and A. Kudo (1997): Snow chemistry of Agassiz Ice Cap, Ellesmere Island, Northwest Territories, Canada. *J. Glaciol.*, **43**, 199-206.
- Grootes, P. M., M. Stuiver, J. W. C. White, S. Johnsen and J. Jouzel (1993): Comparison of oxygen isotope records from the GRIP2 and GRIP Greenland ice cores. *Nature*, **366**, 552-554.
- Güllük, T., F. Slemr and B. Stauffer (1998): Simultaneous measurements of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O in air extracted by sublimation from Antarctica ice cores: Confirmation of the data obtained using other extraction techniques. *J. Geophys. Res., Part D*, **103**, 15971-15978.
- Hammer, C., H. B. Clausen and C. C. Langway-Jr. (1994): Electric conductivity method (ECM) stratigraphic dating of the Byrd Station ice core, Antarctica. *Ann. Glaciol.*, **20**, 115-120.
- Herron, M., J. (1982): Impurity sources of F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> in Greenland and Antarctic precipitation. *Geophys. Res., Part D*, **87**, 3052-3060.
- Johnsen, S. J., H. B. Clausen, W. Dansgaard, N. S. Gundestrup, C. U. Hammer, U. Andersen, K. K. Andersen, C. S. Hvidberg, D. Dahl-Jensen, J. P. Steffensen, H. Shoji, Á. E. Sveinbjörnsdóttir, J. White, J. Jouzel and D. Fisher (1997): The δ<sup>18</sup>O record along the Greenland Ice Core Project deep ice core and the problem of possible Eemian climate instability. *J. Geophys. Res., Part C*, **102**, 26397-26410.
- Jouzel, J., N. I. Barkov, J. M. Barnola, M. Bender, J. Chappellaz, C. Genthon, V. M. Kotlyakov, V. Lipenkov, C. Lorius, J. R. Petit, D. Raynaud, G. Raisbeck, C. Ritz, T. Sowers, M. Steivenard, F. Yiou and P. Yiou (1993): Extending the Vostok ice-core record of palaeoclimate to the penultimate glacial period. *Nature*, **364**, 407-412.
- Koerner, R. M. and D. A. Fisher (1990): A record of Holocene summer climate from a Canadian high-Arctic ice core. *Nature*, **343**, 630-631.
- Koerner, R. M., D. A. Fisher and K. Goto-Azuma (1999): A 100 years record of ion chemistry from Agassiz Ice Cap Northern Ellesmere Island NWT, Canada. *Atmos. Environ.*, **33**, 347-57.
- 小島隆志, 山田隆二, 陶冠紅, 神田尚子, 東浦將夫 (1999): 降雪・降雨中の水素・酸素同位体比の動的変動: 雪氷防災への分析化学的アプローチ, 日本水環境学会誌, 投稿中.
- Kudo, A., J. Zheng, R. M. Koerner, D. A. Fisher, D. C. Santry, Y. Mahara and M. Sugahara (1998): Global transport rates of <sup>137</sup>Cs and <sup>239+240</sup>Pu originating from the Nagasaki a-bomb in

- 1945 as determined from analysis of Canadian Arctic Ice Cores. *J. Environ. Radioactivity*, **40**, 289-298.
- Lal, D., A. J. T. Jull, G. S. Burr and D. J. Donahue (1997): Measurements of in situ  $^{14}\text{C}$  concentrations in Greenland Ice Sheet Project 2 ice covering a 17-kys time span: Implications to ice flow dynamics. *J. Geophys. Res., Part C*, **102**, 26505-26510.
- Legrand, M. and C. Kirchner (1987): A 220-year continuous record of volcanic  $\text{H}_2\text{SO}_4$  in the Antarctic ice sheet. *Nature*, **327**, 671-676.
- Picciotto, E. E. and S. Wilgain (1963): Fission products in Antarctic snow, a reference level for measuring accumulation. *J. Geophys. Res., Part D*, **68**, 5965-5972.
- Ram, M., M. Illing, P. Weber, G. Koenig and M. Kaplan (1995): Polar ice stratigraphy from laser-light scattering: Scattering from ice. *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 3525-3527.
- Ram, M. and G. Koenig (1997): Continuous dust concentration profile of pre-Holocene ice from the Greenland Ice Sheet Project 2 ice core: Dust stadials, interstadials, and the Eemian. *J. Geophys. Res., Part C*, **102**, 26641-26648.
- Schøtt, C., E. D. Waddington and C. F. Raymond (1992): Predicted time-scales for GISP2 and GRIP boreholes at Summit, Greenland. *J. Glaciol.*, **38**, 162-168.
- Schwander, J., T. Sowers, J. M. Barnola, T. Blunier, A. Fuchs and B. Malaizé (1997): Age scale of the air in the summit ice: Implication for glacial-interglacial temperature change. *J. Geophys. Res., Part D*, **102**, 19483-19493.
- Sigg, A. and A. Neftel (1991): Evidence for a 50% increase in  $\text{H}_2\text{O}_2$  over the past 200 years from a Greenland ice core. *Nature*, **351**, 557-559.
- Smith, H. J., M. Wahlen and D. Mastroianni (1997): The  $\text{CO}_2$  concentration of air trapped in Greenland Ice Sheet Project 2 ice formed during periods of rapid climate change. *J. Geophys. Res., Part C*, **102**, 26577-26582.
- Sturgeon, R. E., S. N. Willie, J. Zheng and A. Kudo (1993): Determination of ultratrace levels of heavy metals in Arctic snow by electrothermal vaporization induced coupled plasma mass spectrometry. *J. Anal. At. Spectrom.*, **8**, 1053-1058.
- Tao, G., Y. Fujikawa, R. Yamada, R. Kojima, J. Zheng, D. A. Fisher and A. Kudo (1999): Determination of major metals in arctic snow by induced coupled plasma mass spectrometry with cold plasma and microcentric nebulization techniques. *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, *accepted*.
- Taylor, K. C., C. U. Hammer, R. B. Alley, H. B. Clausen, D. Dahl-Jensen, A. J. Gow, N. S. Gundestrup, J. Kipfstahl, J. C. Moor and E. D. Waddington (1993): Electric conductivity measurements from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores. *Nature*, **366**, 549-552.
- Townsend, A. T. and R. Edwards (1998): Ultratrace analysis of Antarctic snow and ice samples using high resolution inductively coupled plasma mass spectrometry. *J. Anal. At. Spectrom.*, **13**, 463-468.
- Vincent, C., M. Vallon, J. F. Pinglot, M. Funk and L. Reynaud (1997): Snow accumulation and ice flow at Dôme du Goûter (4300m), Mont Blanc, French Alps. *J. Glaciol.*, **43**, 513-521.
- 渡部直喜, 柚原雅樹, 佐藤修 (1998): 新潟大学積雪地域災害研究センターにおける水試料の酸素同位体比測定. 新潟大災害研年報, **20**, 109-114.
- Whitlow, S., P. A. Mayewski and J. E. Dibb (1992): A comparison of major chemical species seasonal concentration and accumulation at the South Pole and Summit, Greenland. *Atmos. Environ.*, **26**, 2045-2054.
- Yamada, R., G. Tao, J. Zheng, Y. Fujikawa, R. Kojima and A. Kudo (1999a): Ice cores: Record of past environment (climate) and future prediction. 環境技術, 印刷中.
- Yamada, R., G. Tao, J. Zheng, Y. Fujikawa, R. Kojima and A. Kudo (1999b): The relationship between  $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  in polar ice cores and its application in predicting precipitation pattern and verifying global water circulation model. 環境技術, 印刷中.
- 安成哲三, 柏谷健二編 (1992): 地球環境変動とミランコヴィッチ・サイクル, pp.174, 古今書院.
- Zheng, J., A. Kudo, D. A. Fisher, E. W. Blake and M. Gerasimoff (1998): Solid electrical conductivity (ECM) from four Agassiz ice cores, Ellesmere Island NWT, Canada: High-resolution signal and noise over the last millennium and low resolution over the Holocene. *The Holocene*, **8**, 413-421.



## 要 旨

長岡雪氷防災実験研究所では、極域から採取した雪氷コア試料を解析することで、将来の気候変動予測と水災害防止に向けて、環境の変遷を復元するという研究が行われている。極域の雪氷コアは、全球的な気候に関する多様な情報を乱されることなく記録しているユニークな媒体である。雪氷コアの解析から、極域ではかつて数10年で10℃以上という急激かつ突然な気温の変化があったことが見つかった。このような雪氷コアから得られる情報の種類、分析・解析方法、雪氷コア研究分野の現状についてまとめた。

また、当研究所における雪氷コア研究に対する姿勢を示した。その要点は、多地点の分析を行う以前に、得られるデータの質を上げることである。当研究所及び協力関係にある研究機関が最近開発した分析手法を用いることで、より少ない試料で高精度なデータを得ることが可能になる。これにより、解析の時間解像度は従来の10年単位の変動から、年変動、さらには季節変動レベルに改善される。我々の進んだ技術により質が向上したデータを用いれば、詳細な気候変動とその原因物質の変動、予兆現象を知ることが可能となり、将来予測や災害防止に資するであろう。

**キーワード：**雪氷コア, 気象災害, 古環境復元, 高精度分析