



Title	雪氷コア解析に基づく北部北太平洋の数十年周期気候復元
Author(s)	白岩, 孝行; Shiraiwa, Takayuki
Description	1章 10年~100年スケールの気候変動の観測, 気候復元とモニタリング
Citation	低温科学, 65, 57-65
Issue Date	2007-03-23
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/20455">https://hdl.handle.net/2115/20455</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	SHIRAIWA.pdf





# 雪氷コア解析に基づく北部北太平洋の 数十年周期気候復元

白岩 孝行 総合地球環境学研究所/北海道大学

北部北太平洋の両岸にそびえる高山には寒冷氷河が発達し、過去数百年から千年程度 of 古気候・古環境情報が冷凍保存されている。カムチャツカ半島のウシュコフスキー山、アメリカ合衆国アラスカ州のランゲル山、カナダ・ユーコン準州のローガン山の3地点で全長200mを越す雪氷コアを掘削し、その物理特性を明らかにし、これらの3本のコアが有力な気候代替記録を有している可能性を示した。特にウシュコフスキー山のコアからは、過去170年間の気温と降水量に関する気候代替記録を得た。また、既存のローガン山の気候代替記録とウシュコフスキー山の記録を比較したところ、両者には負の相関が認められ、北太平洋十年振動(PDO)との関連が示唆された。

## 1. はじめに

環オホーツク地域はアジア大陸極東地域の雪氷圏南限に位置する。すなわち、氷河、永久凍土、季節海氷などの雪氷現象は、高所環境に起因する局所的な事例を除き、環オホーツク地域より南には存在しない。これらの雪氷現象は、水という極めて特異な物質の相変化に関連した自然現象であり、その相変化が生じやすい南限地域では、過去の気候変動に伴って雪氷現象が大きく変動してきたことが予想され、また未来においても同様であると考えられる。このため、環オホーツク地域のような雪氷圏南限における過去の気候と環境変動を詳細に復元することは、とりもなおさず現在危惧されている地球温暖化に際してこれらの地域がどのような応答をするかの予想についての格好な検証データとなる。

しかるに、環オホーツク地域の古気候・古環境の研究は、この地域が長い間にわたって東西冷戦の最前線であり続けたという政治的な理由によって地球上のその他の地域に比べて著しく遅れている現状がある。また、氷期において大陸氷床に覆われず、現在も氷河の発達が悪いという自然条件により、古気候・古環境復元の手法として既に確立された氷河地形に基づく復元や、氷河コア分析に基づく復元が難しいという地理的な条件もこの地域の古気候・古環境復元が遅れているひとつの要因である。

筆者らは、極東地域、とりわけカムチャツカ半島が諸外国の研究者に開放されて以降、おおよそ10年間にわたり国内およびロシア連邦の研究者と共同で同半島の氷河変動研究ならびに氷河コアを用いた古気候・古環境復元を推進してきた<sup>1)</sup>。この過程において、カムチャツカを含む極東地域の古気候・古環境の理解にあたっては、オホーツク海を含む北東アジア周辺の気候と、北部北太平洋から北米にかけての気候の両方を同時に見る必要性を痛感

し、並行してアメリカ合衆国アラスカ州やカナダ・ローガン準州の山岳地域においても氷河コア掘削による古環境復元を試みている<sup>2),3)</sup>。本稿では、主としてカムチャツカ半島で得られた成果を中心に、一部結果の出つつある北米での研究成果も交えながら、北東アジアから北米アラスカに至る地域の過去200年程度にわたる気候と大気環境の状況を概説する。

## 2. 氷河コア掘削地点の概要

西をオホーツク海、東を太平洋とベーリング海に画されるカムチャツカ半島は、北東ユーラシアの氷河の南限を形作っている。カムチャツカ半島には、並列する長大な二つの山脈が発達し、これらの山脈には総計448個の氷河が存在する<sup>4)</sup>。雪氷コアが古気候・古環境情報を精度よく保存するためには、掘削地点の氷河表面で融解が生じることが必要である。なぜならば、氷河表面における積雪の融解は、融解水の深部への浸透を引き起こし、これによって鉛直方向の物理・化学情報に乱れが生じるからである。このため、必然的に高所の氷河が対象になる。1996年から1997年にかけて我々が事前調査を行った結果、カムチャツカ半島には全く融解が生じない氷河は存在せず、ただ二つの氷河だけが、極めて少ない融解のみが生じるという点で掘削の候補地となり得ることが判明した。半島の中央部に位置するウシュコフスキー山(56°04'N, 160°28'E, 標高3903m)と、スレディニイ山脈に位置するイチンスキー山(55°46'N, 157°55'E, 標高3607m)である。このうち、ウシュコフスキー山は、巨大な楯状火山であり、山頂部には直径4kmの氷河によって完全に埋積されたカルデラを有する(図1)。カルデラの外輪山に発達するゴルシュコフ・クレーターも同様に氷河に完全に埋積されており、このクレーターを覆

う氷河の中心部よりやや下流、K2と名づけた氷厚240 mの地点で1998年に全長212 mの氷コアを掘削した(図1)<sup>5)</sup>。

一方、アメリカ合衆国アラスカ州とカナダ・ユーコン準州にはロッキー山脈が南北に連なり、標高4000 mから6000 mに達する高山が太平洋岸に沿って存在する。これらの高山には南米パタゴニアとほぼ同規模の世界最大級の氷河が発達する。掘削を実施したランゲル山(62°N 00', 144°01'W, 標高4317 m)は山頂を氷河に覆われた活火山、ローガン山(60°35'N, 140°36'W, 標高5959 m)は基盤岩からなる山であり、どちらも世界最大の山岳氷河帯を有するランゲル・セントエライアス国立公園の中に位置する(図1)。ランゲル山では山頂のカルデラを覆う厚さ約1000 mの氷河において2003年に全長50 m、2004年に全長216 mの氷コアを掘削した<sup>3)</sup>。ローガン山においては、ローガン山とキング・ピークの間に発達す

る標高4135 mのキング・コルにおいて2003年に全長221 mの氷コアを掘削した<sup>2)</sup>。

### 3. 掘削された氷コアの特徴

議論の対象とする3本の氷コアと掘削孔の物理計測からまとめられる特徴を表1に示す。カムチャツカ半島で1点、アラスカ・カナダ国境付近の2点から採取された3本のコアは、いずれも標高4000 m前後の地点で掘削された。付近の平均気温の実測値は存在しないが、氷河表面から10 m下の雪温がほぼ平均気温に等しいという経験から判断すると、3地点ともに-16度から-19度程度のほぼ同様な気温条件下にあると判断できる。しかし、年々の涵養量には大きな違いが認められ、ウシュコフスキー山では0.54 m(水当量)<sup>6)</sup>と少ないのに対し、ランゲル山とローガン山ではそれぞれ1.3~2.4 m<sup>7)</sup>、1.2 m<sup>8)</sup>と

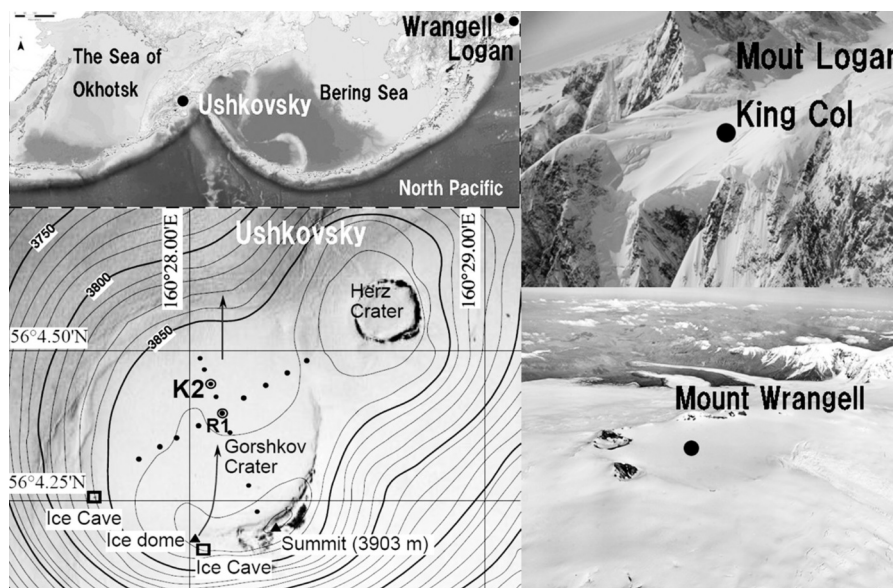


図1 3つの掘削地点の位置図および各地点の航空写真。

表1 3つの雪氷コア掘削点における雪氷学的特性の比較

	Wrangell	Logan King Col	Ushkovsky
Latitude	61°59'54"N	60°35'20"N	56°04'29"N
Longitude	144°02'30"W	140°36'15"W	160°28'04"E
Altitude (m)	4100	4135	3900
Annual accumulation rate (m a <sup>-1</sup> w.e.)	1.3~2.4	1.2	0.54
10-m depth snow temperature (°C)	-18.9	-18.0	-15.8
Snow temperature amplitude (°C)	n.a.	n.a.	16.0
Initial density (kg m <sup>-3</sup> )	370	420	450
Initial porosity <i>c</i>	0.63	0.58	0.55
Densification factor $\gamma$	0.028	0.031	0.038
Thickness of the glacier (m)	n.a.	ca 220	ca 240
Geothermal heat flux (Wm <sup>-2</sup> )	7.02	n.a.	0.12

ウシュコフスキー山に比べて涵養量が多いことが特徴である。

3地点の掘削孔の温度プロファイルを図2に示す。一見して明らかなことは、ウシュコフスキー山の温度プロファイルが他の2点に比べて急勾配であることである。これは、ウシュコフスキー山の地殻熱流量が通常の大陸地殻における地殻熱流量に比べて1桁程度大きいことと、ウシュコフスキー山ゴルシュコフクレーターの氷厚が240mと比較的薄いことに起因する。一方のランゲル山は地殻熱流量が大きいにも関わらず、氷厚が1000mときわめて厚いこと、ローガン山は大陸地殻に発達する深成岩の山地であるために地殻熱流量が小さなこと、がそれぞれ原因となり、温度プロファイルの勾配が小さくなっている。

温度プロファイルに見られる特徴としては、ランゲル山とローガン山の2地点で、表層50m付近の雪温がそれ以深よりも高くなっていることが挙げられる(図2)。通常、氷河の上端においては、雪温が季節変化する表層の15m程度を除くと、表層に近いほど温度が低くなる。ランゲル山もローガン山も地形から判断すると、深いところほど温度が高くなるべき条件にあるが、表層で温度が高くなっている。この原因としては、近年における温

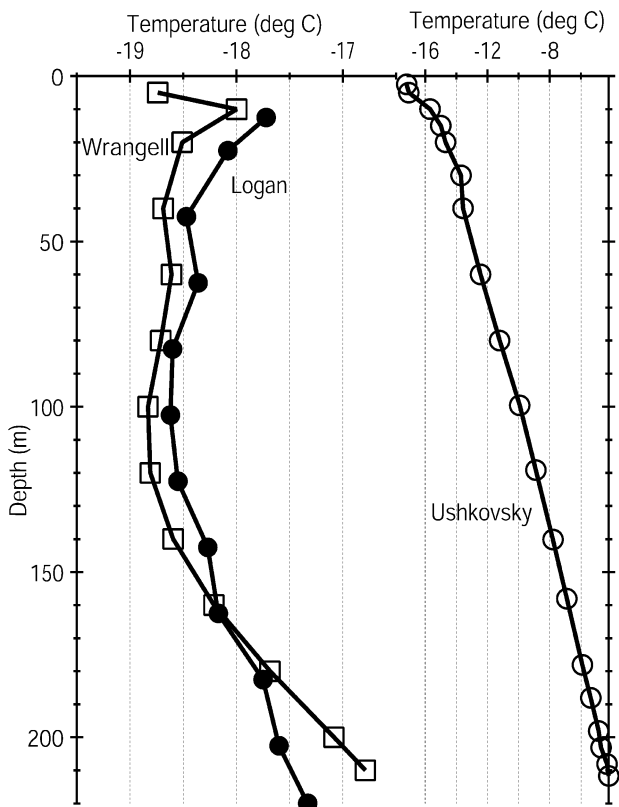


図2 3つの掘削孔の温度プロファイル。

度上昇が考えられる。ランゲル山もローガン山も比較的大きな涵養量を有する地域であり、表層の50mはおおよそ20-40年程度の気温上昇を表わしている可能性がある。ウシュコフスキー山においては、最近数十年の温度上昇がなかった点は、後述する酸素同位体比の記録でも確認されている。

図3は、3地点の密度の深度プロファイルである。氷河学上の定義でいえば、3地点とも若干の融解が生じ、それが流出しないで凍結する「浸透帯(percolation zone)」に位置する。氷コアの目視観測によれば、融解の程度はウシュコフスキー山>ローガン山>ランゲル山の順で大きく、最も融解が生じるウシュコフスキー山では、融解・再凍結の指標となる融解再凍結層割合(Melt Feature Percentage)<sup>9)</sup>はおおよそ20-30%であった<sup>5)</sup>。

融解・再凍結の影響は密度プロファイルにも良く表れており、ランゲル山でスムーズな圧密氷化が進むのに対し、ローガン山やウシュコフスキー山ではより高密度側で氷化が進行する。また、プロファイルにも大きな乱れが存在する。これらはフィルンと氷層の互層構造によって生じている。また、プロファイルの形に大きな屈曲点

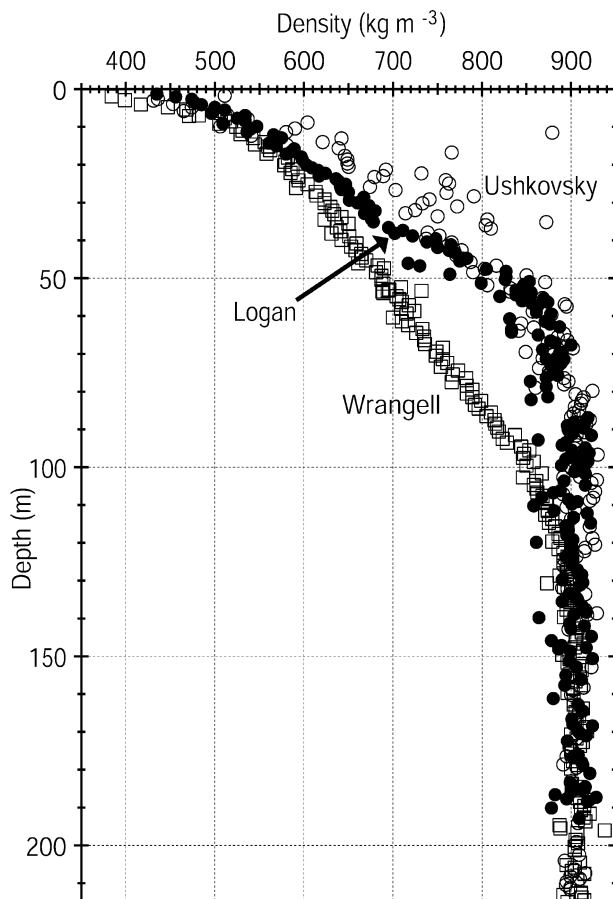


図3 3つの雪氷コアの密度プロファイル。

が存在することもローガン山とウシュコフスキー山の密度プロファイルの特徴である。これらの屈曲点については、気候変動の影響と流動による影響との二つが考えられるが、原因については未だ明らかとはなっていない。

鉛直方向への流動のみが卓越する平坦な氷河では、氷河内の氷の歪みは氷河の氷厚、年間涵養量、年間底面融解量によってほぼ決まる。3地点の氷厚は、ウシュコフスキー山が約  $240 \text{ m}^{10}$ 、ローガン山が  $220 \text{ m}^{2}$ 、ランゲル山が  $1000 \text{ m}^3$  と推定されている。底面の融解量についての実測値はないが、温度プロファイルの傾きから底面における地殻熱流量が推定でき、ランゲル山で  $7.02 \text{ Wm}^{-2 11}$ 、ウシュコフスキー山で  $0.12 \text{ Wm}^{-2 6}$  と計算される。ローガン山については底部に達する温度プロファイルが得られておらず、この値は算出できないが、ローガン山が深成岩から構成される非火山性山地であること、深度  $220 \text{ m}$  までの温度プロファイルの勾配が極めて小さいことなどから推定すると、ローガン山キングコルの地殻熱流量はランゲル山やウシュコフスキー山のそれに比べ1ない2桁小さいことが予想される。これらのデータから、氷河内の氷の歪み速度は、ローガン山キングコル>ウシュコフスキー山>ランゲル山の順で大きい。

#### 4. 雪氷コアによる気候・大気環境の変動

氷河の涵養域の1点において、氷コアを掘削し、表面から深部に向かって種々の物理化学シグナルを分析することによって、過去の気候情報を探る試みが古くからなされてきた。この方法のデメリットは、掘削地点の空間代表性が果たしてどの程度あるのかという点にある。一方、メリットは氷コアの分析から、気候の物理情報だけでなく、中に含まれている種々の固体ないし溶存物質から過去の大気情報についての情報が得られる点である。また、氷河によっても異なるが、気象の観測値に比べてはるかに古くまで遡る記録が復元できる点が氷コアによる気候復元の大きなメリットである。以下、カムチャツカのウシュコフスキー山において掘削された氷コア試料を例に、過去170年間の気候・大気環境の復元を行った過程について詳述する。

##### 4-1. 年代決定

氷コアが古気候・古環境復元のための時系列データとして生まれ変わるためには、その深度を年代に変換する作業、いわゆる年代決定が必要である。その方法は、1) 氷コア中の種々のシグナルの季節変動を利用して年数を計測する方法、2) 氷コア中に不連続的に含まれる年代

既知の物質を利用して計測する方法、3) 氷コア中に含まれる放射性同位体を利用して計算する方法、4) 氷河動力学に基づくモデル計算、の4つに大別される。1) では、酸素・水素同位体比が気温・降水量・降水の輸送経路によって決定されることから、季節的に異なる同位体比の周期変化を利用して、年数を計測する方法が良く用いられる。2) の代表的な物質としては、噴火年代の知られている火山灰や、人為的に放出されたトリチウム(水爆実験起源) やストロンチウム(チェルノブイリ原発事故) などがある。3) は鉛の同位体である Pb-210 の濃度変化の割合を利用して深度-年代曲線を作る方法や、局所的に存在する有機物の放射性炭素  $^{14}\text{C}$  を利用して年代を決める方法がある。そして、4) には様々なレベルのモデルがあり、対象とする氷河の性質によって用いべきモデルが決まることが多い。

ウシュコフスキー山の氷コアの年代決定は、酸素・水素同位体比の季節変動を利用した年数計測<sup>12)</sup> と、クレーター氷河に特化した熱・力学結合氷河モデル<sup>13)</sup> を解析的に解くことによって決定した。また、このように決定した深度-年代曲線は、噴出年代が知られている4つの火山灰層を用いてチェックした。その結果、ウシュコフスキー山の氷コアは、深度  $100 \text{ m}$ 、西暦1830年までは±2年の精度で年代を決定することに成功した(図4)。それ以深については、モデル計算により最深部の年代が西暦1169年~1359年と求められた(図5)。計算結果に幅があるのは、底面における氷の融解量  $\theta$  を二つの値で仮定したからである。現在のところ、最下部の年代値を検証するための情報が得られず、その精度を確かめることはできない<sup>6)</sup>。

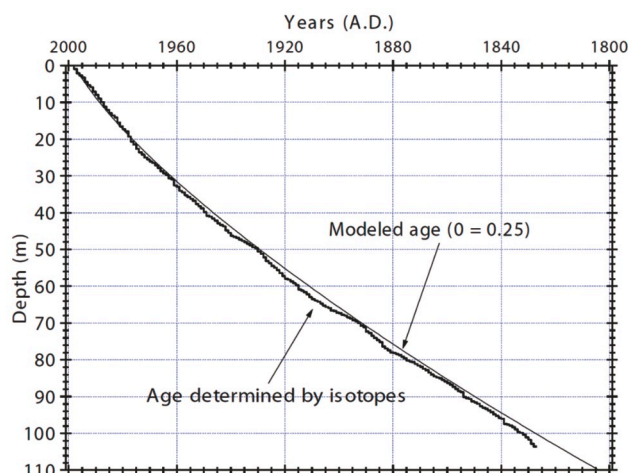


図4 ウシュコフスキー火山で掘削された氷コアの上部100mについての深度-年代曲線。一方はモデルに基づく計算結果であり、他方は  $\delta^{18}\text{O}$  に見られる季節サイクルに基づいて算出したもの<sup>12)</sup>。

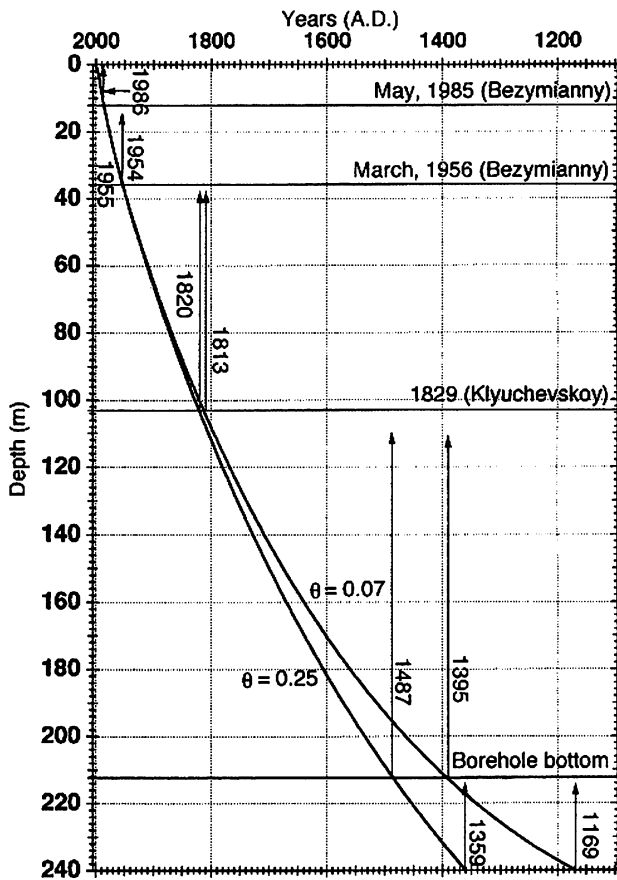


図5 ウシュコフスキー火山で掘削された氷コアの年代モデル計算<sup>6)</sup>。

#### 4-2. 酸素・水素同位体比

降水中の酸素・水素同位体比は、海面・陸面からの蒸発、輸送中の凝結の繰り返し、凝結時の温度などによって、様々な値をとる。降水の供給源が季節を通じて一定している極地では、酸素・水素同位体比と雲頂高度の気温との相関が良いことから、酸素・水素同位体比は気温の指標として氷コア研究では重要な役割を果たしている。一方、中・低緯度は季節によって降水の供給源が変化するため、酸素・水素同位体比は必ずしも気温と良い相関をとらず、場所によって様々な要因に支配されることが知られている。

図6は、表面から深度110 mまでの酸素同位体比、水素同位体比、および両者によって定義されるd-excess ( $= \delta D - 8 \times \delta^{18} O$ )の鉛直変化を示したものである<sup>14)</sup>。図から明らかなように、過去170年間にわたって、夏に重く、冬に軽いという酸素・水素安定同位体比の季節振幅が捉えられた。d-excessは、これらの酸素・水素同位体比と逆位相の季節変動を示し、夏に軽く、冬に重くなる。日本列島に降る降雪のd-excessの季節変化は、冬に値が

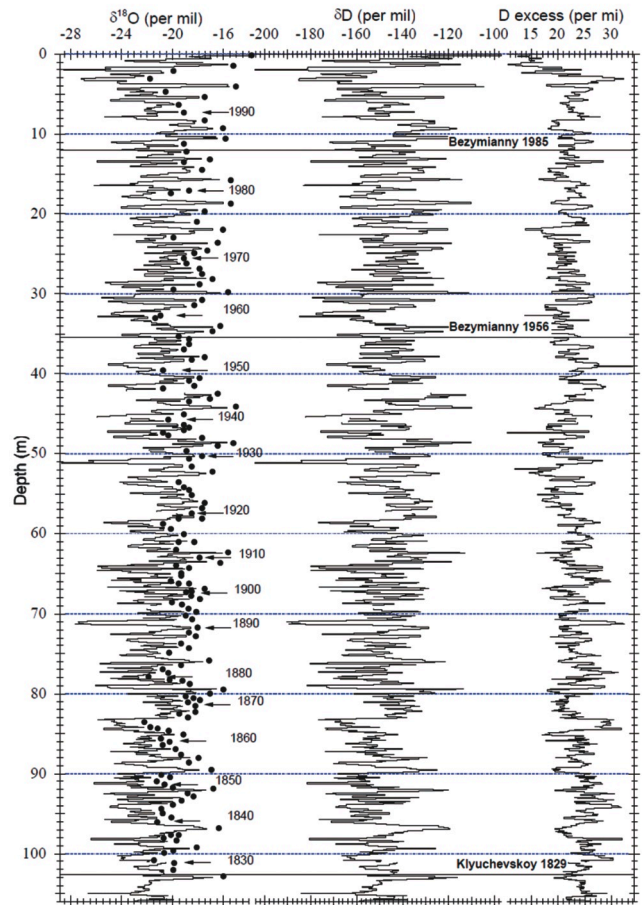


図6 ウシュコフスキー山氷コアの酸素同位体比、水素同位体比、d-excessの各プロフィール。

大きくなる<sup>15)</sup>。この原因として、冬期の乾燥した大陸性気団が日本海から急速な蒸発を促し、これがd-excess値を大きくすると考えられた。カムチャツカ半島では、冬期においても日本のような偏西風は吹かず、またオホーツク海は結氷するほど寒冷なので、急速な蒸発も考えられない。冬期の降雪が太平洋岸で多いという特徴を考慮すると、冬期にd-excessがカムチャツカ半島で重くなるのは、活発な低気圧活動によって太平洋の海水が急激に蒸発するためではないかと考えられる。

過去170年間の年々の酸素同位体比の変動を調べるため、酸素同位体比の季節変化を利用して1年間の平均値を求め、その170年間の変動を図示した(図7)。図では近年に向かって同位体比が重くなる長期的な傾向が見られる。19世紀の同位体比の平均値が $-22.0 \pm 1.1 \text{ ‰}$ であるのに対し、20世紀の平均値は $-21.2 \pm 1.3 \text{ ‰}$ であるので、この期間に0.8 ‰重くなったことがわかる。一方、この時系列データのスペクトルを見たところ、11.5年と5.0年のピークが認められた。

これまでのところ、この同位体比の値を気温に換算す

るための変換関数は確立できていないが、カムチャツカ半島の低地帯で調べられた樹木年輪に基づく夏期気温の変動史<sup>16),17)</sup>を参照すると、この同位体比の変化は気温の上昇を意味するものと考えられよう。

### 4-3. 降水量の復元

図4に示されるように、たとえ毎年同じ涵養量を過程して計算しても、深度に対する年代曲線は直線とはならない。これは氷河が流動しているためであり、ある深さにある氷は常に上載荷重によって鉛直方向に歪むことになる。裏を返せば、この歪みによって氷河は流動しているのである。このため、表面で堆積した積雪層は深度と共に薄くなる。このため、雪氷コア中のシグナルを利用して復元された年層は、氷の流動による歪みを補正することによって、初めて表面での涵養量と読み替えることが可能となる。

図7は、上述した氷河流動モデルを用いて、各深度の堆積層の厚さをもとと表面で堆積した際の値に補正し、その過去170年間の年涵養速度変動を示したものである。掘削地点ではたとえ融解が生じて、表面直下で再凍結して保存されるため、年涵養速度は年降水量と読み替えることも可能である。年間涵養速度の平均値は0.55 m/aと、1996年に掘削された別の雪氷コアより求めた0.57 m/a<sup>18)</sup>と一致する。変動の範囲は0.16 m/a (A.D.1900) から1.55 m/a (A.D.1839) とたいへん大きい。酸素・水素同位体比に見られたような長期的な増減傾向は認められなかった。しかし、変動のスペクトル

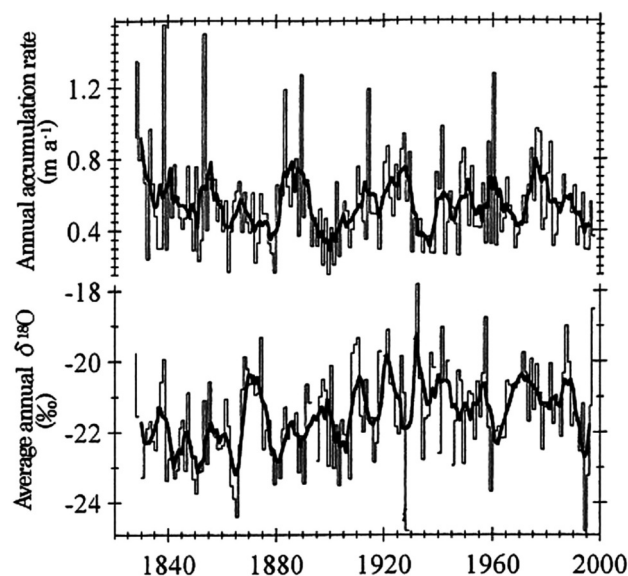


図7 ウシュコフスキー火山で掘削されたコアから復元された年間涵養速度 (m a<sup>-1</sup>) と年間平均の酸素同位体比 (‰) の時系列。それぞれの時系列の太線は5年間の移動平均<sup>12)</sup>。

を見ると、32.1年、12.2年、5.1年、3.7年という卓越周期が得られた。

### 4-4. 氷コアに記録される北米とカムチャツカに見られる気候のシーソー現象

カナダとアラスカの国境近くに位置するローガン山においては、これまで何度か氷コア掘削が行われ、その解析結果が報告されてきた<sup>2),8),19)</sup>。上述したランゲル山とローガン山キングコルのコアについては現在解析中なので、ここでは解析の終了している既存研究の結果<sup>19)</sup>を紹介し、上述したウシュコフスキー山の解析結果との比較を試みる。

図8はローガン山山頂で掘削されたコアの解析から明らかになった過去287年間の年涵養速度(a)と年間平均酸素同位体比(b)の時系列データを、ウシュコフスキー山の結果と比較して示したものである。ローガン山のデータ<sup>19)</sup>は、ウシュコフスキー山で得た結果とほぼ同様の手順で復元された結果であり、また、ローガン山とウシュコフスキー山は北部北太平洋を挟んで対峙する位置にあるため、これらの相互比較から、北部北太平洋における過去の気候変動の東西比較が可能となる。

ローガン山の涵養速度には解析した全期間にわたり、21年、11年、3.8年のスペクトルピークが存在し、1736-1860年の期間に限ってはこれらの周期に比べ、36年のスペクトルピークが検出された<sup>19)</sup>。一方、年平均酸素同位体比には12.5年と9.5年のスペクトルピークが見つかっている<sup>19)</sup>。これらの周期は、涵養速度にみられる21年という周期を除き、ウシュコフスキー山の氷コアからみつけた周期と類似している。図8を見ても、位相が若干ずれるものの、両地点の涵養速度と年間平均酸素同位体比の時系列データの間には負の関係が認められる。

1976/77年頃を境に北太平洋における海洋表面温度SSTと海面気圧SLPが以前と以降とで大きく変化したことがわかっている<sup>20),21)</sup>。その理由は、1977年以降、アリューシャン低気圧の中心が西偏し、その中心気圧が低下したためである。その結果、アラスカ湾に流入する低気圧の頻度が増加し、北米沿岸のSSTが上昇する一方、北太平洋上空は冷たい大気に覆われることになった。

この1976/77年を境に、アラスカでの冬期降水量が増加してウルバリン氷河の年間収支が正となる一方、発達した高気圧下に置かれたワシントン州やカナダ・ロッキー山脈では冬期気温が上昇し、氷河にもたらされる降水量のうち雨で降る確率が増えることになった<sup>22),23)</sup>。このため、南カスケード氷河の冬期収支が大きく減少した結果、年間収支が負となったらしい。このような気圧配

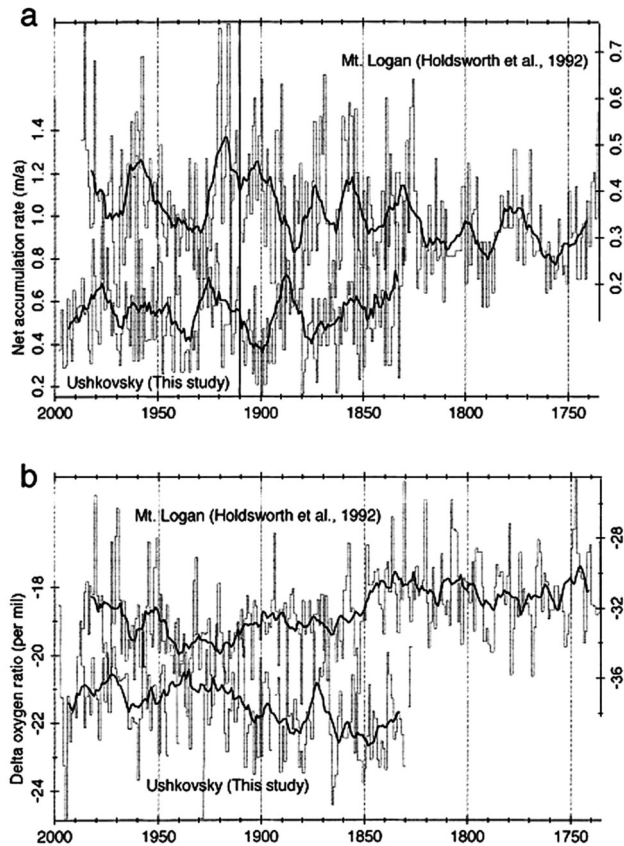


図8 年間涵養速度 (a:  $\text{m a}^{-1}$ ) と年間平均の酸素同位体比 (b: ‰) の時系列についての、カムチャツカ半島のウシュコフスキー山とカナダのローガン山の比較<sup>12),19)</sup>。それぞれの時系列の太線は11年間の移動平均。

置は1977年から1988年まで継続した<sup>21)</sup>。

気象・海洋データの解析から、1976/77年に生じたような「気候のレジームシフト」と呼ぶべき現象が北太平洋域では過去にも生じたことを明らかになった<sup>24)</sup>。そして、1920年代と1940年代にこのシフトが生じていることから、おおよそ20-30年毎にこのシフトが生じていると指摘されている<sup>24)</sup>。

図9にPacific (inter-) Decadal Oscillation (PDO) と呼ばれる気候インデックス<sup>25)</sup>と、ウシュコフスキー山の氷コアから復元された涵養速度と年間平均酸素同位体比とを過去100年間にわたって比較した結果を示す。PDOが正の時 (Warm Phase) は北米沿岸のSSTが高い時であり、反対の負の時 (Cool Phase) は北米沿岸のSSTが低い時である。PDOが正の時は、アラスカ方面に活発に低気圧が進入し、冬期に多量の降雪をもたらす一方、北太平洋の中心部からカムチャツカ沖にかけてのSSTは低く、北太平洋からカムチャツカへ進入する低気圧が減少する。逆にPDOが負の時は、北太平洋からカムチャツカ沖にかけてのSSTが高くなり、カムチャツカ方面に北太平洋から進入する低気圧が増加し、アラスカ沖は寒

冷化する。ウシュコフスキー山の氷コアの年代には±2年の誤差があるため、年々の比較は難しいものの、5年移動平均でコアとPDOを比較すると、涵養速度とPDOとの間には負の関係、すなわちWarm Phaseではカムチャツカ半島の涵養速度が減少し、Cool Phaseには増加する傾向があるように見える。

## 5. まとめ

ウシュコフスキー山で掘削した氷コアの涵養速度変動の時系列データには、北部北太平洋で報告されている十年～数十年周期の気候変動、いわゆるPDOが明瞭に記録されていることが判明した。太平洋の東岸である北米の氷コア記録にも、カムチャツカで発見された周期と類似しているが、位相が逆の気候変動が記録されていることがわかった。これより、北部北太平洋を取り囲む氷河には、過去のPDOの記録が保存されている可能性を見出すことができた。PDOの解明には気象観測データを超えた長い時系列データの存在が必要とされている。また、PDOは、北部北太平洋の海洋生態系のバイオマス変動と

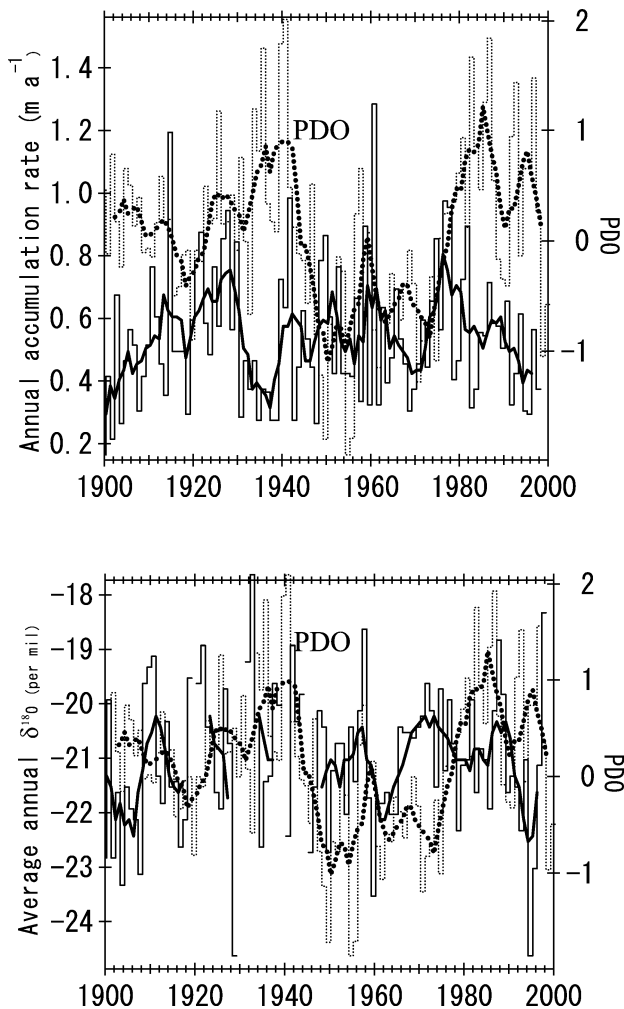


図9 Pacific Decadal Oscillation (PDO) インデックス<sup>25)</sup>とウシュコフスキー山の年間涵養速度 (a:  $\text{m a}^{-1}$ ) および年間平均の酸素同位体比 (b: ‰) との比較<sup>12)</sup>. それぞれの時系列の太線は5年間の移動平均.

も関係があることが指摘されており<sup>25)</sup>, PDOに伴ってアジア大陸から北太平洋に輸送される種々の陸起源物質のフラックス変化が, 気候変動と海洋生態系変動をつなぐ鍵となる可能性が出てきた. 今後は, カムチャツカ半島とアラスカ・カナダの氷河で掘削された氷コアの物理特性と化学特性をより古い時代まで分析することにより, PDOの時間的变化と, 同気候指標が物質循環に与える影響をより詳しく調べる必要があろう.

## 6. 参考文献

1) T. Shiraiwa and S. Tchoumitchev, *Global Environmental Research* **6** (2002) p.19.  
 2) T. Shiraiwa, K. Goto-Azuma, S. Matoba, T. Yamasaki, T. Segawa, S. Kanamori, K. Matsuoka

and Y. Fujii, *Bull. Glaciol. Res.* **20** (2003) p.57.  
 3) T. Shiraiwa, T., Kanamori, S., Benson, C. S., Solie, D. and Muravyev, Y. D. *Bull. Glaciol. Res.* **21** (2004) p.71.  
 4) Y.D.Muravyev, *Cryospheric Studies in Kamchatka II*, Institute of Low Temperature Science, Sapporo, (1999) p.1.  
 5) 白岩孝行, 西尾文彦, 亀田貴雄, 高橋昭好, 戸山陽子, Y. D. Muravyev, A. A. Ovsyannikov, 雪氷 **61** (1999) p.25.  
 6) T. Shiraiwa, Y. D. Muravyev, T. Kameda, F. Nishio, Y. Toyama, A. Takahashi, A. A. Ovsyannikov, A. N. Salamatina and K. Yamagata, *J. Glaciology* **47** (2001) p.423.  
 7) C. S. Benson and Motyka, R. J., *Geophysical Institute Annual Report* (1978) p.1.  
 8) K. Goto-Azuma, T. Shiraiwa, S. Matoba, T. Segawa, S. Kanamori, Y. Fujii and T. Yamasaki, *Bull. Glaciol. Res.* **20** (2003) p.65.  
 9) R. M. Koerner, *Science* **196** (1977) p.15.  
 10) E. V. Vasilenko, A. F. Glazovsky, Yu. Ya. Macheret, D. E. Miroshnichenko, Y. D. Murav'ev, and T. Shiraiwa, *Data of Glaciological Studies* **95** (2003) p.122.  
 11) G. K. C. Clarke, G. M. Gross and C. S. Benson, *Jour. Geophys. Res.* **94B** (1989) p.7237.  
 12) 白岩孝行, 山口悟, 地学雑誌 **111** (2002) p.476.  
 13) A. N. Salamatina, A. N., Y. D. Muravyev, T. Shiraiwa and K. Matsuoka, *J. Glaciology* **46** (2000) p.177.  
 14) T. Shiraiwa, T. Fujikawa, N. Tanaka, S. Matoba, Y. Toyama, F. Nishio and Y. D. Muravyev, *Proc. The Int. Symp. Atmosphere-Ocean-Cryosphere Interaction in the Sea of Okhotsk and the Surrounding Environment*, eds. Wakatsuchi, M. and Hara, T. (2001) p.142.  
 15) 早稲田周, 中井信之, 地球化学 **17** (1983) p.83.  
 16) M. Gostev, G. Wiles, R. D'Arrigo, G. Jacoby and P. Khomentovsky, *Can. J. For. Res.* **26** (1996) p.2048.  
 17) O. N. Solomina, Y. D. Muravyev, A. Braeuning, T. Shiraiwa and S. G. Shiyatov, *Proc. Int. Conf. Climate Change and Variability-Past, Present Future*, ed. Mikami (2000) p.133.  
 18) T. Shiraiwa, Y. D. Muravyev and S. Yamaguchi, *Arc. Alp. Res.* **29** (1997) p.414.

- 19) G. H. Holdsworth, R. Krouse and M. Nosal, *Climate Since A. D. 1500* eds. Bradley, R. S. and Jones, P. D. (1989) p.483.
- 20) T. Nitta, and S. Yamada, *J. Meteor. Soc. Japan* **67** (1989) p.375.
- 21) K. E. Trenberth, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* **71** (1990) p.988.
- 22) R. A. Walters and M. F. Meier, *Aspects of Climate Variability in the Pacific and Western Americas*, ed. D. H. Paterson (1989) p.365.
- 23) G. I. McCabe and A. G. Fountain, *Arc. Alp. Res.* **27** (1985) p.226.
- 24) S. Minobe, *Geophys. Res. Lett.* **24** (1997) p.683.
- 25) N. J. Mantua, S. R. Hare, Y. Zhang, J. M. Wallace and R. C. Francis, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* **78** (1997) p.1069.

(2006年11月21日 改訂受付)

### Past climate reconstruction by means of ice core analyses recovered from high-mountains in the northern North Pacific.

Takayuki Shiraiwa  
Research Institute for Humanity and Nature / Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

abstract:

Three independent ice cores were recently drilled at Ushkovky Volcano in Kamchatka, Russia, Mount Wrangell in Alaska, and Mount Logan King Col in Canada. Detailed analyses of the temperature and density profiles of the three cores suggest that the three sampled glaciers are cold glaciers and therefore store reliable paleo-climate information that spans the past several hundreds to a thousand years. A negative relation was found for the net accumulation time-series reconstructed for the past 170 years from the ice cores recovered from Ushkovsky Volcano and Mount Logan. As the oscillations in the net accumulation rate and the average annual  $\delta^{18}\text{O}$  reconstructed from the Ushkovsky ice core appear to be closely correlated with the so-called Pacific Decadal Oscillation (PDO) Index, it was suggested that the mass balances of the glaciers on both sides of the northern North Pacific were affected not only by a global warming trend since the Little Ice Age but also by inter-decadal climate variability that had occurred dominantly over the North Pacific.

### 白岩孝行

〒602-0816 京都市北区上賀茂本山 457 番地 4  
総合地球環境学研究所  
〒060-0819 札幌市北区北 19 条西 8 丁目  
北海道大学 低温科学研究所  
e-mail: shiraiwa@chikyu.ac.jp