

まったくなく、1990年代の初めに氷床コアの掘削・解析を基盤として特に大気モデル関係者に認知させ、彼らを含めて古気候の復元研究を世界的規模でオーガナイズした功績は大きいし、今後もその分野での中心的役割を果たすであろうことは想像に難くない。少なくとも雪氷コア解析にかかわる研究者は、無視することなくその動向を注視

する必要があると思う。そのためにも、数多くの国際学会が開催される昨今ではあるが、今回のPAGES科学会議への日本からの出席者の少なさ（正確に数えたわけではないが10名以下だと思う。しかも雪氷関係者は皆無）には警鐘を鳴らしたいと思って、本報告を書いた次第である。

(2005年8月16日受付)

IGS 国際シンポジウム「High-Elevation Glaciers and Climate Records」参加報告

カ石 國男, 三宅 隆之, 内藤 望, 藤田 耕史, 竹内 望
中澤 文男, 的場 澄人

1. はじめに

IGS (International Glaciological Society) 主催の国際シンポジウム「International Symposium on High-Elevation Glaciers and Climate Records」が2005年9月5日から9日にかけて、中華人民共和国甘肅省蘭州市において開催された。このシンポジウムのトピックは高山の氷河と氷河周辺地域の、氷河の変動とその影響、積雪に関連するプロセス、氷河から復元される気候である。参加者は87名で、そのうち地元中華人民共和国からが約半数の43名、次いで日本から13名、アメリカ合衆国8名、英国6名、オーストラリア5名、スイス4名、カナダ2名、オーストラリア、チリ、ドイツ、ノルウェー、フランス、ロシア各1名だった。発表件数は110件で、口頭発表が63件、ポスター発表が47件だった。蘭州大学からの発表が多くあり、若く活気にみちた議論が交わされた。発表された研究の内、論文として投稿され受理されたものは、Annals of Glaciology, Vol. 44として2006年に出版される。

以下に日本からの参加者のシンポジウムや印象に残った講演や議論についてのコメントを記す。

(的場澄人)

2. 参加者のシンポジウムに関するコメント カ石國男 (弘前大学)

今回のシンポジウムでは、各地の氷河の後退や熱収支に関する研究発表が多かったが、そのなかで、20世紀後半における世界の山岳氷河（アイスクャップを含む）のマスマランスの変化を集計した大村教授（スイス連邦工科大）の研究が興味深かった。これは、すでに発表された各地の山岳氷河のマスマランスから、地域性を考慮し、信頼性の高い30か所（面積比で68%をカバー）のデータを選んで議論したものである。それによれば、全地域において山岳氷河のマスマランスは負であり、しかも減少率が次第に増加している。現在のペースで減少し続けると、21世紀半ばにアルプス氷河の大部分が消失し、21世紀末～22世紀半ばにかけて地上から山岳氷河が消え去るといふ。この結論に対し、マンチェスター大学のBraithwaite博士は、元データの信頼性・代表性・選択の恣意性などについて触れ、査読者の理解を得るのが難しいのではないかとコメントした。大村教授は、新たな重要な知見でも初めはなかなか認められなかった例を挙げて、上の研究結果もやがて受け入れられるだろうとの自信を示した。おりし

も、EOS (米国地球物理学連合の機関誌) の 8 月 23 日号に、年々減少している北極海の海水領域が、今後も同じペースで減少し続ければ、100 年以内に、夏期には消失するようになる可能性があるという記事が掲載された。私たちは地球規模の雪氷圏の変化から目を離せない状況になってきている。

一方、氷河の後退や、氷河の流動、氷河のマスバランスなどの研究において、氷床上固定点の高度変化・水平位置変化を GPS で観測する方法や、SAR (合成開口レーダー) の干渉縞から氷河流動を観測する方法など、衛星を利用した新しい観測手法が注目を集めている。今回のシンポジウムでも、Jay Zwally (NASA) ほかにによるグリーンランド氷床の平衡線付近の氷河流動についての発表があった。これは、それまでの研究を観測期間・観測距離をのぼして補強したものであり、氷河の移動速度は夏期の方が冬期より早く、氷河平衡線の上部より下部の方が早いことを再確認している。また、氷河表面での融解水が氷河底まで到達して、底面の滑りを誘発していると推測している。そのほか、G. Casassa ほか、Xiao Cheng and Xu Guanhua, C. Mayer ほかが山岳氷河の流動やマスバランスについて研究発表を行った。しかし私は 3 日目からシンポジウムに参加したため、それらの発表を聞くことができなかった。

最近の氷河の後退や氷水面積・積雪面積の減少は、とかく温暖化と関連づけて議論されることが多い。しかし、季節積雪の減衰率がチベット高原・コーカサス山脈・ロッキー山脈などの砂漠周辺で大きい (Rikiishi *et al.*, 2004) ことは、温暖化のみでは説明できない。砂漠起源のダストによる雪面アルベドの減少効果が重要であることが示唆される。最近は大気中の Black Carbon も雪面アルベドを減少させると報告されているので、人間活動による大気汚染も雪氷圏の変化を助長している可能性が高い。人間活動に起因する温暖化が砂漠化と雪氷面のアルベド減少を誘発し、それが雪氷圏の変化を加速しているというシナリオが考えられる。その意味で、今回多くの発表があった積雪中の化学成分・ダスト・微生物も、地球規模の雪氷圏変化に密接に関連していると思われる。

三宅隆之 (国立極地研究所)

“Elemental carbon and organic carbon measurements with a two-step heating-GC system in the snow samples from Tibetan plateau” by Xu *et al.*

大気中には元素状炭素 (Elemental carbon) またはすす (Soot) と呼ばれる、主に化石燃料やバイオマスの燃焼による燃焼生成物が存在する。本発表では、元素状炭素と有機態炭素 (Organic carbon) について、二段階加熱による前処理とガスクロマトグラフを組合せた高感度分析法を開発し、チベット高原の雪氷試料に応用したというものである。これらは沈着した氷河・氷帽のアルベドを改変することで、水循環にも影響を与えると考えられ、その重要性が指摘されて来たが、従来元素状炭素自体の感度不足等から雪氷試料で測定された例はあまり多くない。本法は、試料を 340°C と 650°C の二段階で加熱し、生成した炭素分を CO₂ に変換し、吸着トラップとガスクロマトグラフにより、高感度で検出するという方法である。本方法によると、測定に必要な試料量は 60~80 g 程度であり、元素状、有機態炭素いずれも数百 ng 程度から測定が可能とのことであった。この方法で、元素状炭素濃度が高かった北東地域に当たる祁連山脈において新雪を調べた結果、2 日間という期間でも、元素状、有機態炭素がそれぞれ約 8 倍、約 2 倍に増加していることがわかった。このような主に人為活動起源の物質によっても、雪のアルベドが減少すると考えられた。特に近年化石燃料の消費が拡大している中国では、その影響が氷河や氷帽にも現れてきており、元素状炭素の測定はその指標となるものである。今後、人為活動の水循環への影響、水資源の確保といった観点からも、進められていく研究であると言える。

今回、シンポジウムが中国で開催されたということで、中国の修士から博士課程の学生が多数参加し、発表を行っていた。人数だけでなく、中国の学生は、興味を持ってこちらに話をしてくるなど、積極的な姿勢が目立った。また中国国内の雪氷研究も新規分野への研究が積極的に進められており、ICP-MS を使った氷河試料の微量金属元素の測定、また雪氷生物に関する発表もあった。特

に Urumuqi, No. 1 氷河に関しては、氷河変動から物質循環に至るまで、集中的な観測が行われ、シンポジウムで 10 件以上の発表があった。中国の雪氷研究が、質、量ともに進んでいることを実感したシンポジウムでもあった。

内藤 望 (広島工業大学)

(1) “Glaciological characteristics of the ablation zone of Baltoro Glacier, Karakoram” by C. Mayer *et al.* は長さ 60 km 以上もの長大なバルトロ氷河において 2004 年夏に実施されたイタリアードイツ氷河調査隊の成果発表である。関連発表として、同じ講演者 (C. Mayer) によるポスター発表 “Ice ablation and meteorological conditions on the debris covered area of Baltoro Glacier (Karakoram, Pakistan)” by C. Mihalcea *et al.* もあったが、こちらはデブリ域における融解量とデブリ厚との関係等、ヒマラヤのデブリ氷河に馴染んだ日本人研究者にとってはさほど目新しいといえる内容とは思われなかった。かたや前者の発表では、消耗域での GPS 流動観測をさりげなく紹介していたが、その調査範囲の広さから察せられる現地調査の労力には敬服の念を抱いた。また流量計算に基づいてバルトロ氷河の下流部は定常状態に近いとの考察も興味深かった。一夏の調査でここまで言及できることは素晴らしいが、その妥当性を今後検証していく必要もあるだろう。

(2) “Modeling the response of glacier system to climate warming in China” by Xie Zi-chu *et al.* は中国内の氷河を流域ごとの氷河系 (system) に分類し、温暖化に対するその氷河系の応答を計算した研究である。個々の氷河ではなく広域における氷河縮小量を見積もるという点では、全球的な氷河縮小傾向の定量化という命題や、氷河流出水への依存度が高い流域における水資源問題といった観点から重要であり、中国に限らず氷河変動を研究する上で今後ますます注目されていく課題であると思う。ただし残念ながら本研究では、温暖化に伴う融解量の増大にのみ主眼をおき、氷河流動の効果は考慮されていないようであった。対象とする時間スケールが数年間程度ならさほど問題にはならないだろうが、今世紀末までの氷河

縮小量の見積を提示していたことには難があると感じた。

今回のシンポジウム全体を通じて、地元中国の氷河研究者のマン・パワーはかなり充実してきているように感じた。個別の発表タイトルは挙げないが、リモセンを活用した氷河変動研究の発表も目立った。この分野では日本はやや後れをとりつつあるという危惧も抱かされた。ただしコア研究をはじめリモセンによる研究や氷河質量収支他の研究にみられた活気に比べ、氷河動力学を考慮した研究例は乏しいと感じた。これは地元中国の研究分野の偏りにも起因すると思われるが、日本の氷河研究にも相通じる傾向ではなからうか。

藤田耕史 (名古屋大学)

今回の学会における中国の研究グループは、大別して「チベット高原のアイスコア」、「氷河変動」に分けられ、それぞれの活発な活動が印象的であった。チベット高原のアイスコアに関する研究は、アメリカとの共同掘削のほか、中国独自の掘削も数カ所で進められており、チベット高原では既に 10 箇所以上でアイスコアが取得されている。現段階ではこれらの膨大なアイスコアデータを並べ、その地域的特徴を記述する研究がほとんどであるが、今後、高原縁辺部で得られつつある年輪や高原上の湖沼堆積物なども含めた広範囲に及ぶプロキシーデータをもとに、面的な広がりをもった古環境復元の試みが期待される。

この中で、アイスコアの解釈にもっとも利用される水の安定同位体について気になる点の一つ。降水の安定同位体は高原南部で気温との逆相関があり、北部に行くにつれ正相関となるのだが、そこからアイスコアの年々変動の解釈へもっていくところの論理が極めて曖昧であると感じた。これは大御所 Thompson についても当てはまる。「同位体と降水量との相関が同位体と気温との相関よりも悪い=気温の指標として使える」という論法はどう聞いても根拠薄弱なのだが、ほとんどの発表が目をつぶって「気温の指標」として使っているのは研究としての停滞を意味するのではないだろうか？客観解析データとの相関から、「気温の変動よりもモンスーンの強弱を表している」という研究が 2 件あったが、「水の安定同位体=

気温」という固定観念に皆が如何に縛られているかを目の当たりにし、この問題を解明するための「長期的観測 (サンプリング)」と観測データを元にした解析が必要であると強く感じた。

氷河変動については、Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) の一環として、1960 年代からの氷河変動を面的に明らかにするための研究が進められている。衛星データを利用した研究という聞こえはいいが、氷河の輪郭をピクセル単位で決定する極めて根気の要る作業である。が、そこは人的資源の豊富な中国、一山塊に一学生という感じで担当し、着実に領域を広げつつあり、成果が期待できる。古い地図と衛星データを重ね合わせる方法や後々の再検証のためのデータ公開などについてまだまだ問題と感ずるところもあるが、圧倒的な成果はやはりインパクトがある。

竹内 望 (総合地球環境学研究所)

“Bacterial community profile in Puruogangri ice core and its relation to climatic and environmental fluctuation” by Zhang X., Yao T., A. Lishe, Tian L. and X. Hujian

今回のシンポジウムでは、雪氷生物関連の発表が中国から 2 件、日本から 4 件の計 6 件あった。そのうちの 4 件は口頭発表であったこともあり、雪氷生物研究の存在感が示された会であった。近年、雪氷中の微生物研究が盛んになってきた。アメリカでは南極ドライバレーおよびボストーク湖、ヨーロッパ諸国ではスピッツベルゲンの氷河で大きなプロジェクトが走り始めている。中国では、数年前からチベットのアイスコア中の微生物分析を始めている。微生物を過去環境のバイオマーカーとして利用することを試みているのである。今回の中国による 2 件の発表も、アイスコア中の微生物についての研究で、表記の Zhang らによるポスター発表とプログラムには入ってなかった Xiang らによる飛び入りの口頭発表であった。Zhang らは 2000 年にチベット高原の Puruogangri Ice cap で掘削されたアイスコア、Xiang らは 2002 年に Mustag Ata 氷河で掘削されたアイスコアをもちいて、培養および DNA 分析によってバクテリアを調べた結果を示した。両

研究とも、どんな種類のバクテリアがどれくらいアイスコアに含まれているかという基本的な情報を示したものである。DNA 分析によって確認されたバクテリアの種類は、両者とも百種以上で、その結果と DNA データベースとの比較によって、南極や北極の海水や氷河から報告されている種などが含まれていることが明らかになった。両結果ともバクテリアの量や種類は、南極や北極の氷河の結果と比べて格段に多く、チベットの氷河ではバクテリアが豊富で多様であることが改めて示された。両研究ともアイスコア中の各深さによるバクテリアの量や種類の違いも示し、過去環境との関係を議論していたが、残念ながらバクテリアから環境条件を推定するにはまだまだ不確定なことが多く証拠も不十分で、すぐに単純な因果関係をもとにした結論に走ってしまうことに、聞いていて不安が残った。Xiang らの口頭発表後、検出されたバクテリアのうちどれくらいが氷河上で増殖したもので、どれくらいが飛んできてそのまま保存されたものなのか？ という質問がでたのに対し、ほとんどは飛んできたものと考えていると回答したが、この点も今後ははっきりさせなくてはいけない重要なことである。ちなみに、日本からは東工大の瀬川さんが、バクテリアが氷河上どのように分布しているか、という発表をおこない、東工大の植竹さん、玉川大の吉村さんが藻類を使ったアイスコア分析について、私、竹内が藻類の世界地理分布についての発表をおこなった。

中澤文男 (信州大学)

山岳氷河でのアイスコア研究は、アメリカの Thompson グループが圧倒的にリードしてきたが、今回の学会に参加して、中国とスイスのグループが勢いを増してきている感じを受けた。中国科学院寒区旱区環境与工程研究所は Thompson グループとの共同研究で、これまでチベット高原やヒマラヤでのアイスコア掘削を成功させている。今回の学会は、中国での開催ということもあり、中国人研究者によるコア解析の発表も多かった。アイスコア研究に関わっている研究者が思いの外多いこと、そして解析が組織的に行われている印象を受けた。また休憩時間には、中国科学院寒区旱区環境与工程研究所が最近、コアを自

動で融解し、決められた深さ毎に連続的にサンプリングする装置を導入したと聞いた。今後、様々なテストを経て実用化されるようである。我が日本での山岳氷河コア研究は規模も小さく、人手不足なのが実情である。このような装置を導入することによって、少しでも人手不足を解消できたらと思った。また、スイスは、Paul Scherrer Institute の研究者がアルゼンチンでおこなったアイスコア試掘の結果を 2 件報告していた。1 件はパタゴニア氷原 (Margit Schwikowski *et al.*, A potential high-elevation ice core site at the Southern Patagonia Icefield), もう一件は、アンデス山脈 (D. Bolius *et al.*, A first shallow firn core record from La Ollada Glacier on Cerro Mercedario in the Central Argentinian Andes) のものであった。来年度は本掘削を行うそうである。彼らは、2003 年にロシア・アルタイ山脈でのアイスコア解析の速報を出したばかりである。こちらは、人間活動による大気汚染の評価が目的であったが、彼らの次の関心はアイスコアから ENSO の変動を復元することにあるようだ。Thompson グループは、世界を飛び回って、様々な氷河でコア掘削を成功させてきたが、スイスグループは、第二の Thompson グループのような存在になるのかも知れない。そのほか、氷河に関しては、Han Tianding *et al.* の “Characteristics of mass balance of Glacier No. 1 at the headwaters of the Urumqi River, Tianshan mountains” に興味をもった。中国のウルムチ No. 1 氷河の年間質量収支の変動が、夏季平均気温の変動と良い逆相関を示すとのことであった。中央アジアに分布する夏季涵養型氷河は、夏期に氷河を涵養する降水と、氷河を消耗する融解が同時に起こるのが特徴である。そして、その年間収支は融解量、すなわち夏期の気温により大きく依存すると考えられている。中央アジアの山岳地域は、気象データや氷河の質量収支データが限られているため、長期間のデータを用いた比較はとて興味深い。ちなみに、同様の結果が、ロシアのアルタイ山脈にある Aktru 氷河においても得られている。

的場澄人 (北海道大学低温科学研究所)

“An Andean ice core record of a Middle Holocene mega-drought in North Africa and the Middle East” by Davis, M.E., and Thompson, L.G.

ペルー北部の Huascarán 氷河で掘削されたコアに含まれる、最終氷期の終わりから現在までの詳細なダスト濃度と粒径分布が解析された。その結果、約 4500 年前の層に多量の不溶性ダストが含まれていることが発見された。口頭発表では、このダストイベントの要因については粒径の大きなダストが増加したことからローカルな起源の可能性があると他の地域からの長距離輸送の可能性に簡単に言及しただけで、その後は、このコアの安定同位体プロファイルや水蒸気の起源などの議論が展開された。自分自身の興味はダストイベントだったので、口頭発表内容だけでは物足りず、発表後に発表者を捕まえ、このダストイベント中のダストの中心粒径は数 μm であり北アフリカを主な起源としていること、イベントがこの時期だけに生じた原因や、ダスト増加の直接的な要因が乾燥域面積の増加なのか輸送過程の変化なのかなどについては未だ不明であることなどを議論した。

この発表に限らず、今回のシンポジウムではアイスコアシグナル自体を十分に議論するような発表は少なく、アイスコアシグナルと気象要素や客観解析データとの比較に重きを置いた発表が多かった。気候復元がアイスコア解析の主目的なので気象条件との比較が重要なのは当然なのだが、アイスコアシグナルが何の指標であるかという点を重要視して、ぐじぐじ解析するのが個人的には好きなので、そのような議論ももう少し聞きたかった。

雪氷化学に関わる研究については、中国の研究が大変精力的に行われていることを感じた。古典的な分析方法だけでなく、環境化学や地球化学の最新の分析が広く導入されている。日本の雪氷化学分野は、他の地球化学分野に比べて、他分野の分析化学技術の導入が遅れている。研究フィールドを他の分野にも公開し、横断的な研究を進めていく必要性を痛感した。

(2005 年 10 月 6 日受付)