

れらの観測で得られたデータは気象、積雪構造に関する基礎情報を網羅しており、積雪構造モデルの検証など、弱層の研究以外にも有効に活用することができました。

この2冬季にわたる積雪断面観測中に、しもざらめ雪、あられ、降雪結晶の弱層が形成されました。特に、観測1冬季目の1997年1月には、札幌では形成されることが非常に稀な、しもざらめ雪の弱層が形成されました。このしもざらめ雪弱層のSFIの経時変化を観測した結果、せん断強度が小さい状態を長期間にわたって維持する様子を確認できました。この観測結果は、積雪表面で形成されたしもざらめ雪弱層が、埋没後も長期間雪崩発生要因となることを示唆するものと考えられます。あられ、降雪結晶のSFI観測結果も含め、本論文での報告内容が今後の積雪・雪崩研究に何かしら貢献することができれば、大変嬉しく

思います。

本論文に記載した観測結果は1997年の日本雪氷学会鶴岡大会にてポスター発表しております。しかし、諸先輩方の再三再四の要請にもかかわらず、これまで論文化することができませんでした。大変時間がかかってしまったことをこの場を借りてお詫び申し上げます。この塩漬けになっていた研究成果を、10年以上の歳月を経て雪氷に掲載いただけたことは、ひとえに共著者である八久保先生、尾関俊浩先生（現北海道教育大学）、西村先生、秋田谷先生の多大なご助力のおかげであり、本当に感謝の念に堪えません。また、論文が掲載されただけでも大変有難いところ、論文賞まで受賞させていただいたことは望外の喜びです。先生方には改めて心より御礼申し上げます。今後ともご指導ご鞭撻のほど、よろしくお願い申し上げます。

論文賞を受賞して

杉山 慎、内藤 望、榎本 浩之、
刀根 賢太、安仁屋政武



このたびは私たちの論文を、論文賞に選んでいただきありがとうございました。受賞論文は、パタゴニアにおける氷河の熱水掘削について報告したものです。パタゴニアでは初めてとなる、先駆的なフィールドワークを評価していただいたものと理解しています。おおがかりな機器の開発、困難な機材輸送、厳しい自然環境下での活動、そういった苦勞を認めていただいたことに喜びを感じます。

氷河・氷床の熱水掘削は、20世紀の中頃から欧米で開発が始まり、氷河の流動や底面環境の観測に大きな成果を挙げてきました（e.g. Iken and others, 1977）。熱水ジェットで水を融かして掘削するこの手法は、他の掘削手法と比較して桁違いに速い掘削速度がその特徴で、毎時100m程度の高速掘削が可能です。私が熱水掘削を初めて経験

したのは2001年の夏、スイス連邦工科大学の観測に参加した時でした。氷河底面での現象に興味を持っていた私にとって、数100mの氷の下での観測は衝撃的でした。その後2007年に自分の手で熱水掘削装置を開発し、スイスの氷河で数年間の観測を実現。その次のステップとして、ほとんど手がつけられていないカービング氷河の底面観測に取り組みました。

湖や海に流入するカービング氷河は流動が速く、流速変化に起因した氷河の後退が各地で報告されています。たとえばグリーンランドや南極では、カービング氷河の加速で氷流出量が増加し、氷床質量に大きな影響を与えています。しかしながら、なぜ流動速度が変化するのか、そもそもカービング氷河の流動がなぜ速いのか、観測に基

づいた証拠は得られていません。なぜならば、速い氷河の流れには底面流動が重要であり、氷河底面の現象を観測するのは困難だからです。特にカービング氷河はクレバスに覆われていることが多く、氷河上での観測活動は容易ではありません。わたしたちは、カービング氷河の底面に高い水圧が発生して流動を促進し、その水圧変化によって氷河が加速する、という仮説を立てました。そしてその検証を目的に、パタゴニア、ペリート・モレノ氷河での掘削を計画したのです。

過去に報告されている山岳域でのカービング氷河掘削は、アラスカ、コロンビア氷河における 1987 年の事例のみです。この掘削を伝える論文を見て、私は気持ちを奮い立たせなくてはなりませんでした。論文にはコロンビア氷河での掘削風景を示す一枚の写真が含まれており、そこには、深いクレバスに囲まれて、猫の額ほどの氷の上に設置された掘削機材と、深いクレバスを渡って移動するための鉄板が写っていました (Meier and others, 1994)。観測地がこんな状態だったらいったいどうやって機材を運ぶのか、どこにキャンプを置くのか、掘削に必要な水をいかに手に入れるのか、そして安全は確保できるのか。カービング氷河の研究が遅れているのにはそれなりの理由があるのです。

観測の実施にあたって一番の問題になったのは、1 トンを超える観測機材の輸送です。日本からアルゼンチンへの海上輸送、ブエノスアイレスでの通関とパタゴニアまでの陸上輸送、そして氷河上へのヘリコプター輸送、全てが困難なものでした。中でもヘリコプターの手配と、風の強いパタゴニアでのオペレーションは、現地の共同研究者 Pedro Skvarca 氏の粘り強い努力によって実現したものです。幸い氷河上には絶好の観測地が見つかり、キャンプまで片道 2 時間の苦労を除けば理想的な環境で掘削活動を開始しました。その後の作業でも様々なトラブルがあったものの、最終的には 515 m の厚さを持つ氷河に 2 本の縦孔を掘削することに成功しました。

掘削孔内で測定した底面水圧を、流動速度、表面融解量と比較した結果、(1) 氷河の底面に高い

水圧 (氷の上載荷重の 90% 以上) が発生しており、(2) その水圧がわずかに数% 変化することで流動速度が最大 40% 加速し、(3) 水圧変動は氷河の融解量にコントロールされていることが明らかになりました。これらの結果は、カービング氷河の底面環境に関する新しい知見を与え、「気温上昇⇒融解量増加⇒底面水圧上昇⇒氷河の加速」というメカニズムでカービング氷河が加速することを示唆するものです。もしこのメカニズムが働くと、気候の温暖化によって海や湖への氷流出量が増加し、カービング氷河の急激な縮小をもたらす可能性があります。以上の観測結果は、受賞論文に続く別の論文にて報告しました (Sugiyama *et al.*, 2011)。

ペリート・モレノ氷河での観測にあたっては、掘削装置の開発、機材の輸送、観測に関する協定の締結、現地での観測サポートなど、たくさんの方々にご協力いただきました。また受賞論文の査読者と編集担当者からは有益なコメントをいただきました。この場を借りてみなさまにお礼申し上げます。受賞論文は、科学研究費補助金 (課題番号 18251002, 23403006) の助成を受けて、北海道大学、筑波大学、広島工業大学、北見工業大学、アルゼンチン南極研究所が共同で実施した研究の成果です。

文 献

- Iken, A., H. Röthlisberger and K. Hutter. 1977. Deep drilling with a hot water jet. *Z. Gletscherkd. Glazialgeol.*, **12** (2), 143-156.
- Meier, M., S. Lundstrom, D. Stone, B. Kamb, H. Engelhardt, N. Humphrey, W. Dunlap, M. Fahnestock, R. Krimmel and R. Walters. 1994. Mechanical and hydrologic basis for the rapid motion of a large tidewater glacier I. Observations. *J. Geophys. Res.*, **99** (B8), 15219-15229.
- Sugiyama, S., P. Skvarca, N. Naito, H. Enomoto, S. Tsutaki, K. Tone, S. Marinsek and M. Aniya. 2011. Ice speed of a calving glacier modulated by small fluctuations in basal water pressure. *Nature Geoscience*, **4**, 597-600.