

滞在記

南パタゴニア氷原，ペリート・モレノ氷河での熱水掘削

杉山 慎¹⁾

1. つくばにて

冬らしく乾燥した2月の午後，待ち合わせたつくば駅前のホテルに安仁屋政武さんが自転車で行ってきた。前年に筑波大学を退職してからは山スキーやアイスクライミングに精を出しており，颯爽としたものである。私の方はアルゼンチン入国のビザを手に入れたものの，来週から始まるパタゴニア初の氷河熱水掘削プロジェクトには悲観的だった。まず，機材を氷河へ運ぶヘリコプターの手配がはっきりしない。手配できたとしても予算不足の恐れがあり，運ぶべき掘削機材はブエノスアイレスの税関で足止めを喰っている。それでも何とかベストを尽くすために私が日本を先発することにして，その前に研究代表者の安仁屋さんとの打ち合わせにやってきた。状況を二人で確認して，ヘリが使えなかったらどうするか，予算がオーバーしたらどうするか，そんなことを簡単に相談。あとは「行ってこい」という感じで，気持ちよく送り出してもらった。

2. ペリート・モレノ氷河熱水掘削プロジェクト

その一年前になる2008年の暮れ，安仁屋さんと広島工大の内藤 望さんの誘いを受けて，南パタゴニア氷原を代表するカービング氷河，ペリート・モレノ氷河(図1)での観測に参加した。熱水掘削の予察，という目的もあったが，機材や輸送の準備がままならないことが予想できて，「掘削はとても無理」という心境だった。それでもGPSで氷の流動を測定してみると，顕著な日周期変動を示す良いデータがとれた。掘削して底面水圧を測定したら面白いだろう。そんな科学的な興味に加えて，アルゼンチンの共同研究者 Pedro Skv-



図1 ペリート・モレノ氷河。カービング端から約5 km，写真のほぼ中央で掘削を行った。撮影は Pedro Skvarca による。

arca が私の気持ちを後押しした。Pedro は安仁屋さんと同じ年で，元北大の成瀬廉二さんらとパタゴニアでの氷河研究に道をつけてきた。往年の名クライマーで，パタゴニアでは山岳ガイドの信望が厚く，彼がいれば現場の助けが得られることがすぐにわかった。その Pedro が「ペリート・モレノを掘削するのが夢だった」というようなことを言う。彼の前向きな姿勢が決め手になって，翌シーズンの掘削準備に取りかかることになった。

2001年にスイスで熱水掘削の技術をはじめて見た。高圧の熱水で氷を融かして孔をあけ，氷河の底面を調べる，そんな単刀直入な観測手法が気に入った。その後見よう見まねで自前のシステムを構築し，スイスの氷河で150 mの掘削ができるようになったところである。「パタゴニア初の熱水掘削」，「ほとんど前例のないカービング氷河の底面水圧測定」と心は躍るが，実現までの道のりは険しい。まずは熱水掘削の能力を500 m以上に上げねばならず，この費用が安くない。民間企業の研究助成にいくつか応募するが，なかなか採択されない。最終的に所属先の北大低温研から助成を得て，必要最低限の機材を購入した。500 mの掘削には高圧ホースを操作するウィンチが必要に

1) 北海道大学低温科学研究所

なるが、そんなものは売っていない。これには同僚の白岩孝行さんが、氷コア掘削用のウィンチを貸してくれた。これをホース用に改造してくれたのが職場の技術者、新堀邦夫さんである。スイスから送ってもらった古い図面を参考に、ホースを操作するための部品を製作した。何とか機材を揃えて船便でアルゼンチンに送り出したのが2009年の10月、当初予定していた年末に掘削を行うにはギリギリのタイミングであった。

12月に日本を出発するフライトを手配して機材到着の報せを待つ。届いたのは悪い報せだった。台風による貨物船の遅れで、機材のブエノスアイレス到着は我々の現地入りとはほぼ同じ。通関を待っていると滞在中に何もできない可能性がある。その上、通関手配を依頼していた現地大使館との折衝が進まず、輸送機材を受け取るにはビザが必要と判明した。とても間に合いそうにない。3月で終了する科研費プロジェクト、という事実はとりあえず忘れて、観測活動を2010年2月末に延期することにした。航空券をキャンセルしてメンバーのスケジュールを再調整。書類を整えて申請したビザはようやく発行された。そんなこんなで何とか出発の態勢を整えたのが、冒頭で記したつくばでの打ち合わせ時の状況である。私が二週間早く現地に入って通関を行い、ヘリ輸送にメドをつけようという計画になっていた。

3. ブエノスアイレス、そしてカラファテへ

蒸し暑いブエノスアイレスで会ったPedroは、ヘリ輸送の手配がいかに難しく、その段取りでいかに苦労しているか、力強く語り始めた。いつものことである。悲観的で細かくて、他人のやる事が信用ならない彼は、現地協力者としてはある意味信頼できる。氷河への輸送は、辺境警備隊のヘリに協力を要請するしかないのだが、研究機関から省庁を通した交渉が必要で、その根回しに奔走しているらしい。ヘリ輸送の方は彼にまかせて、私は通関と国内輸送を依頼している日系の輸送会社を訪ねる。応接室に現れた担当のシルビア井上さんは、電話とメールでの印象どおり、有能な若い女性だった。荷物は港に届いていること、荷物の中身が雑多すぎて通関は一筋縄でいかないこと、国内輸送のトラックは手配できたこと、な



図2 湖畔に運び込まれた観測機材。この木製コンテナ2個を日本から輸送した。左で見守るのは共同研究者のPedro Skvarca。

どをテキパキと説明してくれた。彼女の笑顔が、何とかかなりそうな様子を伝えていた。いずれにしても、ヘリコプターも通関も私にできることはほとんどない。現地で揃える観測機材を調達しながら、彼らからの報せを待つことになった。

アルゼンチンワインの味がわかるようになったころ、機材の通関が完了した。Pedroは相変わらず悲観的なことしか言わないが、2月24日にヘリが飛ぶつもりで準備しろ、という。トラックによる国内輸送の段取りも整い、私も航空券をアレンジしてパタゴニア・カラファテへ向かった。安仁屋さん、内藤さんら、本隊の到着2日前のことである。一年ぶりのカラファテは相変わらず風が強いが、抜けるような青空が広がっていた。一日遅れでやってきたPedroと合流し、ブエノスアイレスから届いた機材を、ペリート・モレノ氷河を対岸に臨む湖まで移動する。Pedroが近くのホテルに頼んで手配したフォークリフトで荷を降ろすと、パタゴニアの広い空の下では木製コンテナが小さく見える(図2)。あとはヘリで湖を越えられるかどうか。2月22日には日本からの本隊がカラファテに到着。その翌日に氷河へ移動して、24日にヘリ輸送とのスケジュールが固まった。Pedroは「ヘリは飛ぶと思う。(これまでの俺の苦労に見合うよう)入念に準備しろ」と言う。何より大事なのは輸送先となる掘削地点の決定で、その責任がある私は緊張した。

4. ペリート・モレノ氷河

カラファテから湖まで車で2時間、そこから対岸

のペリート・モレノ氷河にわたる船は、氷河見物の観光船である。この船を運航する会社は Pedro の旧友が経営しており、氷河上のトレッキングも含めた氷河観光に世界中からの客を集めている。ペリート・モレノ氷河での観測には、この会社と、氷河に常駐するガイドの協力が欠かせない。朝早くカラファテを出発したものの、移動に使った車が途中で故障。観光船の最終便で氷河脇のキャンプに入ったのはもう午後遅い時間だった。今日中に掘削地点を決定しなくてはならない。現場を良く知る内藤さんと共に氷河上へと急ぐ。クレバスが無く、平坦で、掘削に使う水が得られる、そんな場所が理想的だ。限られた時間の中で、幸運にも適当な場所が見つかった。ここならヘリの着陸も可能だろう。氷河のほぼ中央で氷厚は 500 m を超えるかもしれない。GPS で座標を記録して急いでキャンプに戻ると日が暮れていた。

翌朝、高曇りの空の下キャンプを出て掘削地点へ向かう (図 3)。片道 2 時間の道のり半ばでヘリコプターの音が聞こえてきた。偵察のために上空を旋回する機体が見える。急ぎ足で現場につくと、無線機から Pedro の声が飛び込んできて、予定どおり輸送が始まることが伝えられた。やがてゆっくりと爆音が近づいてきて、荷物をネットにぶら下げたヘリコプターが低空飛行で向かってきた (図 4)。あまり慣れていないのか、ぎこちなくが慎重な動きで氷の上にネットを降ろす。機体は上空で反転して次の荷物のために引き返していった。このオペレーションが 3 度繰り返されて、掘削装置、燃料、観測装置など約 1 トンの機材輸送が完了。まずは懸案がひとつ解決した。この輸送

が実現しなくては何もできないが、輸送しただけでは何もしないのと同じこと。大量の物資が散らばった氷河の上、何とか成果を出さねば、という緊張感を感じる。一緒に荷を受けた内藤さんと機材を開梱して、掘削システムの構築を開始した。やがて北大の大学院生刀根賢太君が、安仁屋さんと氷河に上がってきて合流。その日の夕方には掘削の準備が整った。

氷河上に溜まった融け水をポンプで引き上げてヒーターへ送り、550 m のホースを通して高圧の熱水ジェットを噴射する (図 5)。シンプルなシステムだが、ガソリン燃料のエンジンポンプと、軽油燃料のコイルヒーターからなる高圧熱水装置の



図 4 ヘリコプターによる氷河への機材輸送。約 1 トンの機材と燃料を輸送した。



図 3 掘削地に至る氷河上のルート。キャンプから片道 2 時間を毎日往復した。

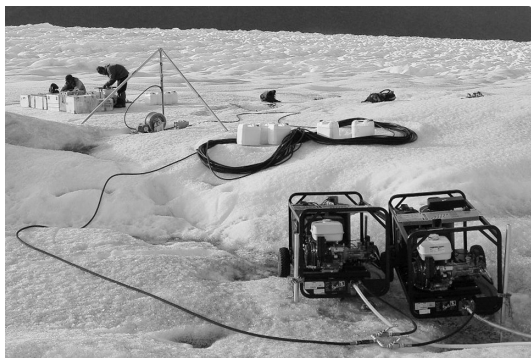


図 5 氷河上の熱水掘削システム。右下の 2 台が高圧熱水装置。

調子がとても重要となる。案の定、2台のうち1台の圧力が上がらず、どこかで空気を嚙んでいるらしい。初めてのトラブルでおろおろしていると、氷河への観光客を案内しているガイドが様子を見に来てくれた。機械に強くて、ポンプを扱った経験もあるらしい。慣れた手つきでポンプのシリンダーヘッドを外して、ピストンの気密用ゴム部品が傷んでいるのを見つけてくれる。やれやれ、手元に交換部品はない。適当なOリングを組み合わせて修理を試みるが、少し動かすとまた圧力が下がってしまう。その後数日間はこの故障修理に時間を費やした。遅々として進まない様子を見かねた Pedro が電話であちこち確認したところ、ブエノスアイレスでこの部品を調達できるらしい。通関を依頼した輸送会社に依頼して、部品を氷河に送ってもらうことになった。ブエノスアイレスから航空便で発送された部品を Pedro の友人が空港で受け取り、カラファテの街でガイド仲間に手渡す。そこからバスと船を経由して、何と依頼した翌々日には部品が氷河に届けられた。Pedro の人脈と人望に感謝するばかりである。部品が届くまでの間、安仁屋さんが腕を振るうコルデーロ（仔羊の丸焼）とワインで英気を養い、気持ちを新たに氷河に向かったのは3月1日だった。

5. 熱水掘削

問題の部品を交換して掘削システムが息を吹き返した。2台の装置からの熱水を合わせて、毎時50mの速度で掘削を進める。初めて使うウィンチも快調だ。掘削速度を一定に保って、時々ホースの重量を測定する。その重量がホースの長さに比例して増えていけば掘削は順調なはずである。340mでその日は時間切れ。翌日への持ち越しを決めて一度キャンプに引き上げる。朝8時にキャンプを出て戻るのは夜9時近くという日が続いているが、メンバーは弱音を吐かず作業にあたっている。数日遅れて到着した北見工大の榎本浩之さんが加わり、氷河上は4人での作業となった。予想している500mは私にとっても初めての深さで、ドリルが底面に達したことを判断するのが難しい。500mを超えて、測定を続けていたホースの重量に変化が起きた。重量が突然減少し、その後はホースを送り出すにつれて重量が減る。ドリル

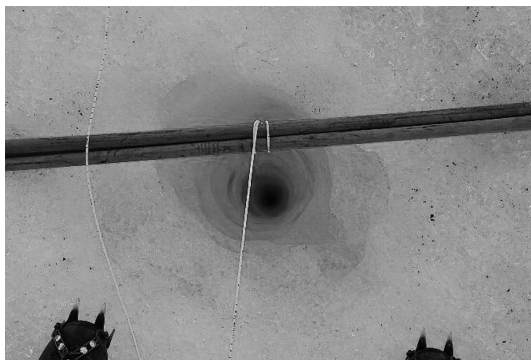


図6 水圧センサのケーブルが挿入された515m深の掘削孔。

の先端が氷河底面に到達したサインだ。何度かホースを上げ下げして、深さ515mで重量が減少することを確認。全層掘削完了と判断した。掘削装置が復調してから丸二日間の掘削で、ついにペリート・モレノ氷河を掘り抜いた。ホースを回収して撤収作業を終えるとあたりは夕焼けに包まれたが、キャンプへと戻る間ずっと気持ちは高揚していた。明日この掘削孔に水圧センサを挿入して、氷河流動と底面水圧との関係が明らかになる。

翌日はパタゴニアでは珍しく雲一つない青空が広がった。水圧センサのケーブルを伸ばして、昨日掘ったばかりの縦孔にゆっくりと降ろしていく(図6)。孔に上がってきている水面より下にセンサを沈めればそれで完了、簡単な作業のはずだった。楽な気持ちでケーブルを降ろしていた時、孔の中からカラカラッと音が響いて、手元のケーブルに衝撃が伝わった。まずいな、と思ってケーブルを手繰ると、センサがスタックした。孔の途中に引っかかっていたセンサが滑り落ちて、たるんだケーブルに絡まったに違いない。明らかに私のミスだ。ケーブルはびくともしない。センサは水面に達する前にどこかで止まっている。苦勞して掘り抜いた掘削孔と、貴重なセンサを同時に失った。周りで様子をうかがっていたメンバーにどう説明したか良く覚えていない。とにかく今日できることはない、キャンプで次のことを相談したい、と伝えて帰路についた。キャンプで成功を信じて待っていた Pedro に状況を説明した。怒鳴られるかと思ったが、相に反して食事の準備をしてやるから休めという。とても休む気持ちにはなれな

かったが、とにかくテントに戻って腰を据え、残った燃料と撤収までの日程を計算した。準備した燃料の2/3を使い切り、残りで500mの掘削は微妙なところだ。予定していた撤収のオペレーションまであと3日、トラブルがなければ丸2日間掘削できる。水圧センサも予備が一台ある。一週間経って何も得られていない現状を詫びた上で、もう一度掘削したいという希望をメンバーに伝えた。

翌日はいつもより早くキャンプを出て掘削地へ。ホースをつなぎ、装置の燃料を補給して皆の到着を待つ。予定どおりの時間に掘削を開始した。熱水装置は好調で、そんな時は水の上に腰を下ろして、一定のペースでウィンチのハンドルを廻すだけだ(図7)。午後になって、前日スタックしたケーブルを触っていた榎本さんが、「あれっ」という声をあげる。センサが落ちていった気配があるとのこと。データを見てもらうと水面下20mほどの圧力を示しており、センサが水に浸かったようだ。水圧の変化を測定できるかもしれない。詳しく様子を見てみたいが、掘削の手を休めるわけにはいかない。280mまで順調に掘削を進めてその日の作業を終えた。幸い天候は安定しており、翌日も順調に作業を続ける。これなら大丈夫と思った頃、榎本さんが今度は熱水装置の前で声をあげる。装置が蒸気で包まれており、明らかに異常な状態だ。急いでシステムを停止して確認すると、振動で金属フレームと干渉した高圧配管が損傷して熱水が漏れている。思いつく処置を試したがほとんど効果がない。時間が限られていることもあり、熱水を漏らしながら掘削を続けるこ



図7 ウィンチを使って掘削を進める内藤望さん。背後は榎本浩之さん。

とにした。傷が広がらないことを祈るばかりだ。もうこれ以上のトラブルには対応できないだろう。燃料の残量から掘削可能時間を計算して、全層掘削できる速度を定めて掘削を続ける。一本目の掘削孔と同じ深さに達したとき、ホースの重量が変化した。ホースを降ろすと重量が減り、明らかに底面だ。掘削終了を周囲に告げてホースを巻き上げ始めると、その途中で燃料が尽きて熱水が冷水になった。配管から漏れた熱水が氷を融かして穴があき、今にも倒れそうな高圧熱水装置を、榎本さんが工夫をこらして支えてくれていた。もう数時間はもたなかっただろう。日没が迫っていたが、翌日の撤収ヘリオペレーションに備えて機材をまとめる。そして今度は慎重に、水圧センサを新しい掘削孔に降ろした。やれることは全てやって、考えられる最良の経過をたどった。掘削の意義はこれから得られるデータ次第で、それは今憂えても仕方のないことだ。そんなことを考えながら、前に行くメンバーから遅れてキャンプへの帰路をたどった。その日は私の41回目の誕生日で、それを知ったPedroが夕食の後に良い声で歌ってくれた。

6. おわりに

二本目の掘削を終えた翌3月6日、満身創痍の熱水装置と空になった大量の燃料容器をヘリコプターが運び去っていった。それから約10日間、二本の掘削孔で測定したデータは素晴らしいものであった。わずか数%の底面水圧変化が、50%近い流動速度の変化と同期している。とても美しい相関関係が得られた。観測を終えて日本に戻り一年半、プロジェクトの成果を論文として公表することに注力してきた。幸いにも、掘削装置とペリート・モレノ氷河掘削の詳細をまとめた論文は2011年度の雪氷学会論文賞を頂き、観測結果は国際専門誌に掲載された。ようやくそれらのことが一段落して、プロジェクトの経緯と掘削に関する記録をここに報告させていただく次第である。本文中に名前が挙がった方々に加えて、アルゼンチンとの共同研究協定の締結にご協力いただいた北大低温研の菅原さん、機材の出荷にご協力いただいた北大低温研の的場さんと津滝さん(当時)、ペリート・モレノ氷河観測メンバーに心から感謝致します。

(2011年12月1日受付)