エッセー

目からウロコのドリル開発（2）
サーマルドリルはお湯で掘る

藤 井 理 行[1]

雪氷コアドリル開発の「目からウロコ」第 2 回目は，南極みずほ基地での中層掘削で用いたサーマルドリルに関することである．

南極観測の第二期計画（1981–1987）の東クイーンモードランド地域雪氷地学研究計画の雪氷分野では，内陸の広域トラバース調査とともに，みずほ基地での中層コア掘削を，計画の柱としていた．みずほ基地での中層コア掘削は，第 24 次越冬隊（雪氷担当：成田英器，中尾正義，中山芳樹各氏）と 25 次越冬隊（雪氷担当：川田邦夫，吉田稔，松本慎一各氏と筆者）により，深さ 500 m までのアイスコアの掘削が目的であった．

日本の雪氷掘削は，南極観測のエンダービーランド計画（第 10 次隊から第 15 次隊;1968 年から 1973 年の 6 年計画）で，みずほ基地深層掘削として深度 800 m の掘削を計画したが，深さ 147 m を超える事はなかった．その後，地学グループの人工地震による南極氷床下の大陸地殻の構造探査計画に協力して実施された掘削は，深度 150 m 以浅の掘削であった．こうしたことから，東クイーンモードランド地域雪氷地学研究計画で目標とした掘削深度 500 m は，実績のない雪氷分野にとって，南極観測事業の計画として受け入れられる精一杯の目標であった．将来の深層掘削を考えると，この中層掘削の成功は至上命題であった．

私達第 25 次隊は，1984 年 1 月，みずほ基地で 24 次隊の雪氷グループの 3N 氏から深度 411 m で掘削を引き継いだ．24 次隊の雪氷グループの 3 名はいずれも N のイニシャルだったので 3N と呼ばれていた．3N 氏は，雪面下，トンネルで繋がれたみずほ基地の施設の南端に立派な掘削場を作り，日本として経験のない深さの掘削を行っていた．今回の目標深度 500 m の 8 割にも達していたので，第一年度としては大成功であった．

この中層コア掘削は，孔に液を入れないドライ掘削だったので，掘削孔は収縮した．24 次隊は，1983 年 4 月 11 日に掘削を開始，順調に経過し 7 月 18 日に 400 m を超えたが，この頃から孔の収縮で，ドリルは上げ下げの時に頻発に孔壁に接触するようになった．ドリルがスタックされる危険を強く感じ，7 月 22 日，深度 411 m に達した段階で，これ以上の掘削を断念した．

最深部の孔径は，掘削終了直後には 172 mm だったが，私達が引き継いだ 5ヶ月後の 1 月末には，153 mm に縮小していた．3 月末には，さらに 142 mm にまで縮小し，切り札として持ち込んだ小孔径ドリル（直径 145 mm）の利用も不可能になっていた．また，掘削孔の拡幅用に持ち込んだメカニカルドリルもうまく機能しなかった．

こうしたことから，24 次隊が掘った深さ 411 m の孔の底から掘り進むことは，不可能であった．残る選択肢は，ただ一つ．ドリルの接地圧を小さくし，既存の孔を気にせずに，鉛直に掘り進むことである．しかし，掘削孔の収縮との競争は，掘削成功の絶対条件となった．

私達が考えた方針は，1）1 日の掘削時間を，1 交代の 8 時間から 2 交代の 16 時間にする．そのため，機械や医療担当の隊員の協力を仰ぐ，2）掘削孔の孔径をより大きくする，の 2 点である．機械と医療担当の隊員は快諾してくれたので，ドリルの改良に全力を上げる事になった．時は，すでに 4 月に入っていた．

大孔径の掘削孔を実現するには，実験が必要で

1 情報・システム研究機構　国立極地研究所

図 1　みずほ基地で掘削孔の収縮の問題に直面しその対策を検討する雪氷担当隊員，左から松本慎一さん（背中），川田邦夫さん（奥），筆者（右）

あった．ドリルのヒータヘッドは直径 168 mm だが，実際には 172 mm 程度の孔があいた．吉田さんが氷の流動則とこれまでの孔径変化を基に，掘削孔の縮小シミュレーションをしてくれた．500 m の深度の掘削孔の縮小速度は，7 mm/ 月なので，孔径を 7 mm 程大きくできれば，500 m 掘削後 1ヶ月程はドリルが引っかかることはなく，掘削をさらに進めることが出来る．ドリルが引っかかるようになった段階で，新たに持ち込んだ小孔径ドリル（外径 145 mm）に切り替え，さらに掘り進むという作戦である．問題は，現在のドリルで，どのようにして 7 mm も大孔径の孔を掘れるようにするか，であった．

掘削場とその入り口附近の雪洞が，実験室になった．実験に必要な氷は，ポリ袋を張りつけた段ボール箱で水を凍らせて作った．雪面下の実験場の気温はマイナス 30℃程なので，氷作りは簡単だったが，雪から多量の水を作るのに時間がかかった．

雪氷担当の 4 人は，掘削孔径をより大きくする方法をいろいろと検討した（図 1）．私達が使ったサーマルドリルは，ドリルの先端から，次のような構成になっていた（図 2 ; Narita *et al.*, 1994）．1.25 kW のヒータを 2 つ埋め込んであるアルミ製のヒータヘッド，コアを切断するコアキャッチャー，コアを貯蔵するコアバレル，ヒータヘッドで融かした水を溜める水タンク，水タンクを減圧する真空ポンプ，電気的な制御とデータ通信機能のコンピュータ部である．

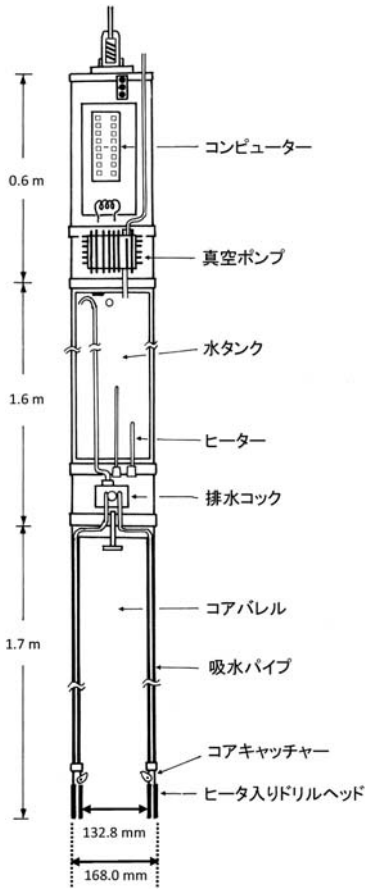

図 2　サーマルドリルの概念図（Narita *et al.*, 1995 を改編）．全体を分かり易く示すため，横と縦の縮小率を変えてある．

先ずはヒータヘッドを大きくすることを考えた．ヒータヘッドの外径が 7 mm ほど大きくなるように熱伝導の良いアルミの板を取り付ける方法を考えた．こうした工作は，松本さんの得意とするところであった（図 3）．しかし，結果は散々だった．取り付けたアルミ板にほとんど熱が伝わらず，ヒータヘッドが空焚き状態になってしまうのである．ほとんど何もない現地の状況を考えると，このアイディアには改良の余地はなかった．たとえ熱がうまく伝わっても，ドリルの上げ下げ時に孔壁に接触しての脱落，あるいはスタックの危険が大きく，採用は事実上無理であった．

次に，ヒータヘッドの氷への接触を改良する方策を考えた．ヒータで融けた水は，ヘッドの底付近の吸水孔から吸い上げられていた（図 4 右）．

図 3 ヒータヘッドの改良作業（松本慎一さん）.

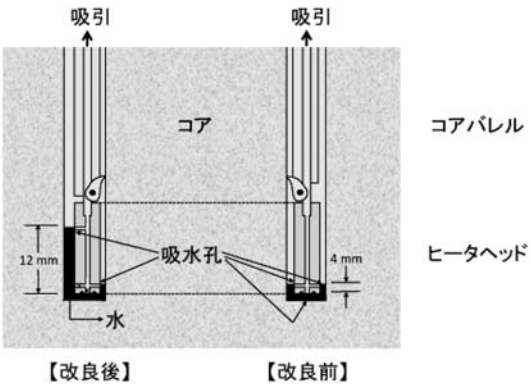

図 4 ヒータヘッドの概念図．右が改良前，左が改良後．吸水孔の位置と黒で示した融解水のレベルが変わっているのに注意.

吸水の仕組みを改良し，水の量を減らすことで，効率よく熱が氷に伝えられると考えたのである．そこで，吸水孔をヘッドの底のみにするとか，逆に底の孔を塞ぎヘッドの外と内の孔のみにするなど，試行錯誤で掘削実験を行った．結果は，芳しくなかった．孔径はほとんど変化しなかったのである.

何とかなるとの楽観論も次第にトーンダウンしていった．決定打が見つからぬまま，時間が経っていった．ある日，昼食後に実験場に行き，午前の実験で使った氷を片付けようとして驚いた．実験であけた深さ 50 cm 程の穴の底が大きくなっていたのである．穴の底に溜まった水は，まだ凍り切っていなかった．昼休み中に穴の底が大きくなったのは，吸い切れずに残った水が氷を融かしたからに間違いない．氷の穴の中の「水」ながら，氷を融かす能力のある 0℃以上の「水」であったに違いない.

図 5 改良ヘッドによる掘削実験．段ボール箱に作った氷で実験を繰り返し，より大きな掘削孔となる吸水孔の改良を探った.

目からウロコが落ちた思いであった．サーマルドリリングでは，ヒータが氷に孔をあけるのではなく，ヒータ周辺の「お湯」が孔を掘るのである．事の本質が見えると，応用は簡単であった．ヒータヘッド周辺のお湯の量を制御すれば良い．図 4 の左側のように，掘削孔径を大きくするため，ヘッド外側のお湯の量を増やし，コアを痩せさせないためヘッド内側のお湯の量を減らせば良い．吸水孔の位置や大きさを変えた 30 通りもの実験をした（図 5）．その結果，外側の吸水孔の位置はヘッド底から 12 mm，内側の位置は 4 mm のまま，また，ヘッド底の吸水孔は塞ぐのが最適であることが分かった（図 4 左）．改良型のヒータヘッドで，掘削孔の孔径は，8 mm 程大きくなった．ようやく，深さ 500 m 以上の掘削のメドがたった．越冬明けの内陸トラバース調査の準備で，8 月中旬にはみずほ基地を離れ昭和基地に向かうことを考えると，掘削に当てられる時間は 3ヶ月程しかなかった.

さらに，伏兵が潜んでいた．深度 125 m 附近から，掘削孔が曲がっていたのである．掘削を中断していた 8ヶ月間，目に見えぬところで状況は悪化していた．大きな誤算であった．孔の傾きのため，ドリルがスムースに掘削孔に入らない．何とか，元の孔にドリルが入って行かないものかと試行錯誤をしたが，時間だけが経過していった．第 15，16 次隊のみずほ基地での夏期の合同掘削の時にも，深度 110 m から 120 m 附近で，15 次隊が越

図 6　中層掘削，700 m 深到達を祝う．右から，鈴木ドクター，吉田稔さん，松本慎一さん，川田邦夫さんと筆者．1984 年 8 月 1 日，みずほ基地．

冬中に掘削した元の孔からずれてしまったことがある．氷床内部のずり応力によるひとつの剪断面がこの附近にあるのかも知れない．曲がった掘削孔の利用は，断念する事にした．ドリルの接地圧を小さくし，元の孔を気にせずに鉛直に掘って行く事にした．時は，すでに 6 月に入っていた．

休日日課の後，6 月 3 日，掘削を開始した．深さ 125 m から元の孔からずれ始め，最初に上がって来たのは三日月型の断面を持つコアであった．11 日からは，鈴木ドクター，機械の原さんにも加わってもらい，朝 7 時から夜 23 時までの 2 交代，1 日 16 時間の体制で掘削を進めた．途中，モータとウィンチドラムを繋ぐチェーンの切断によるドリルの落下や，ドリルに使っていたボルトの切損落下による掘削不能などのトラブルに見舞われたが，一つ一つ乗り越えていった．7 月 13 日，プロジェクトの目標，深さ 500 m に達した．得られたコアには，明瞭な火山灰層が見つかるという嬉しいサプライズがあった．深さ 600 m を超える頃から，掘削孔の収縮により 400 m 附近でドリルが孔壁に頻繁に接触するようになった．7 月 25 日，深さ 625 m に達した所で，小孔径ドリルに切り替えた．最終日は徹夜で掘削をし，基地の全住民が立ち会う中，ケーブルを目一杯に繰り出し，掘削を行った．深さは，目標の 500 m を大きく超えて 700.63 m に達し（図 6），足掛け 2 年に及ぶ中層掘削計画を終える事が出来た．

文　献

藤井理行（1985）：みずほ基地 700 m 氷床掘削．極地，**41**，29–34.

藤井理行（2012）：目からウロコのドリル開発（1）なぜか掘れないメカニカルドリル．雪氷，**74**，176–178.

国立極地研究所（1985）：日本南極地域観測隊第 25 次隊報告（1983–1985）．340 pp.

Narita, H., Fujii, Y., Nakayama, Y., Kawada, K. and Takahashi, A. (1994) : Thermal ice core drilling to 700 m depth at Mizuho Station, east Antarctica. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **49**, 172–183.

（2012 年 8 月 8 日受付）