

# 南米・パタゴニア地域における 完新世の氷河変動と 近年の氷河変動機構の解明

課題番号 国 10041105

平成 10 年度～平成 11 年度科学研究費補助金（基盤研究(A)(2)）  
研究成果報告書

平成 12 年 3 月

研究代表者 安仁屋 政 武  
(筑波大学地球科学系)

南米・パタゴニア地域における  
完新世の氷河変動と  
近年の氷河変動機構の解明

課題番号 国 10041105

平成 10 年度～平成 11 年度  
科学研究費補助金（基盤研究(A)(2)）  
研究成果報告書

平成 12 年 3 月

研究代表者 安仁屋政武  
(筑波大学地球科学系)

寄	贈
安 仁 屋 政 武 氏	平 成 年 月 日

00613765

## 目次

はしがき	v
研究組織、研究経費、研究発表	vi
パタゴニア地域概念図	ix
パタゴニア・ソレール河谷の完新世の環境変動－氷期を中心として	
安仁屋政武	1
北パタゴニア氷原溢流氷河の1995/96－1998/99の変動	
安仁屋政武	21
北パタゴニア氷原の空撮	安仁屋政武 31
パタゴニア・ソレール氷河の表面プロファイルの測量	成瀬廉二 41
パタゴニア・ソレール氷河における流動観測結果	山口 悟 47
パタゴニア・ソレール氷河における歪速度観測結果	
山口 悟・大野 浩	55
氷河モデルにおける底面すべりの重要性	山口 悟 60
1998年夏季のソレール氷河における気象条件と熱収支の特徴	
松元高峰	64
北パタゴニア氷原・ソレール氷河の水文特性	松元高峰 75
パタゴニア・ソレール氷河における冰雪崩の観測	和泉 薫 82
1998年ソレール氷河調査行動表	90
南パタゴニア氷原ティンダル氷河における氷河調査の概要	
幸島司郎・白岩孝行・竹内 望・久保田敬二・成瀬廉二・ Maria Angelica Godoi・Marcelo G. Arevalo・Jorge Quinteros・ Gino Casassa・Andrés Rivera	93
南パタゴニア氷原ティンダル氷河涵養域における雪氷コア掘削	
白岩孝行・幸島司郎・久保田敬二・竹内 望・新堀邦夫・ 福士博樹・成瀬廉二・Maria Angelica Godoi・Marcelo G. Arevalo・ Jorge Quinteros・Gino Casassa・Andrés Rivera	106
南パタゴニア氷原ティンダル氷河における気象観測	
久保田敬二・白岩孝行・幸島司郎・竹内望・Arevalo, M. G., Godoi, M. A., and Quinteros, J.	139
南パタゴニア氷原ティンダル氷河消耗域の雪氷生物調査	
竹内 望・幸島司郎・白岩孝行・久保田敬二・成瀬廉二・ Gino Casassa	168

パタゴニア・ペリートモレノ氷河の表面プロファイルの測量および 氷河末端の流動とカービングの観測 . . . . . 成瀬廉二 . . . . .	191
Perito Moreno 氷河からの calving (冰山分離) 観測報告 小林俊一・成瀬廉二・Pedro Skvarca . . . . .	195
パンタグラフ型アンチトルク機構の試作 . . . . . 新堀邦夫 . . . . .	207

## はしがき

地球温暖化が大きな環境問題となって久しい。この実態を掴むべく、世界で様々な研究が行われているが、氷河を対象とした研究は実態を解明する有力な手段の一つである。南米の南端に位置するパタゴニア氷原は南パタゴニア氷原 (13000 km<sup>2</sup>) と北パタゴニア氷原 (4200 km<sup>2</sup>) からなる、世界でも有数の大きな規模を持つ氷体である。しかし、パタゴニア氷原の氷河に関する研究は他の氷河地域に比べると圧倒的に少ない。

我々のグループは 1983 年以来、GRPP (Glaciological Research Project in Patagonia) の呼称のもとに、国際学術研究で 1983-84, 1986-86, 1990, 1993 に現地調査を行ってきた。さらに、この間国内科研等でリモートセンシング・データを利用したパタゴニアの氷河研究を行い、数々のパイオニア的業績を挙げってきた。

今回の 1998-2000 年の国際学術研究はこのような実績の上に立つもので、これまでの研究から明らかになった課題に迫ろう、というものである。テーマは大きく 2 つで、(1) 完新世 (過去 1 万年) の氷期を明かにすること、(2) 近年の氷河変動を明らかにしてそのメカニズムを探る、ことである。(1) では、今回は主に北氷原のソレール氷河とソレール河谷のモレイン分布を調べ、年代測定資料を採集して氷期を明かにすることである。(2) の研究では、南氷原のティンダール氷河、ペリート・モレーノ氷河、そしてウプサラ氷河を対象とした。パタゴニア氷原の氷河収支を明らかにして、末端変動との関係を探るべく、今回、ティンダール氷河では 100 m のボーリングをする予定であった。しかし、1999 年 12 月は稀に見る悪天であったため 46 m でストップせざるを得なかった。パタゴニア氷原には南北合わせて 70 以上の溢流氷河があるが、そのほとんどはカービング氷河である。これらの氷河の変動はカービングしている水域の地形や水深などの影響を強く受けるので、気候変動とは直接に関係していない例が多く、複雑である。カービングのメカニズムの実態解明と定量的把握のために、ペリート・モレーノ氷河でカービングの観測を行った。また、ウプサラ氷河ではカービングの条件となる水深の測定を行った。

現地調査が南半球の夏に当たる 11 月、12 月であるため、多くの調査では得られたデータの分析・解析はこれからである。従って、今回の報告書は 1998 年に調査を行ったソレール氷河を除き調査の目的、内容等の概要が主である。

ティンダール氷河のボーリング調査の際には、チリの日本大使である成田右文氏に大変お世話になりました。ここに記して感謝致します。

## 研究組織

平成10年度

研究代表者：

安仁屋政武（筑波大学・地球科学系・教授）

研究分担者：

成瀬廉二（北海道大学・低温科学研究所・助教授）

和泉 薫（新潟大学・積雪地域災害研究センター・助教授）

幸島司郎（東京工業大学・生命理工学部・助教授）

澤柿教伸（北海道大学・低温科学研究所・COE 研究員）

研究協力者：

山口 悟（北海道大学・大学院地球環境科学研究科・博士課程2年）

松元高峰（北海道大学・大学院地球環境科学研究科・博士課程2年）

大野 浩（北海道大学・大学院地球環境科学研究科・修士課程1年）

Casassa, Gino（チリ・マガジャーネス大学・助教授・

南極研究プログラム主幹）

Rivera, Andres（チリ大学・地理学科・助手）

del Valle, Rodolfo（アルゼンチン南極研究所・副所長）

平成11年度

研究代表者：

安仁屋政武（筑波大学・地球科学系・教授）

研究分担者：

成瀬廉二（北海道大学・低温科学研究所・助教授）

小林俊一（新潟大学・積雪地域災害研究センター・教授）

幸島司郎（東京工業大学・生命理工学部・助教授）

白岩孝行（北海道大学・低温科学研究所・助手）

研究協力者：

竹内 望（東京工業大学・生命理工学部・基礎生物講座・研究生）

久保田敬二（北海道大学・大学院地球環境科学研究科・修士課程1年）

Casassa, Gino (チリ・マガジャーネス大学・助教授・

南極研究プログラム主幹)

Rivera, Andrés (チリ大学・地理学科・助手)

Skvarca, Pedro (アルゼンチン南極研究所・氷河部長)

del Valle, Rodolfo (アルゼンチン南極研究所・副所長)

### 研究経費3

平成10年度 6100千円

平成11年度 4900千円

計 11000千円

### 研究発表

#### (1) 学会誌等

Aniya, M. and Naruse, R. (1999) Late-Holocene glacial advances at Glaciar Soler, Hielo Patagonico Norte, South America: *Transaction, Japanese Geomorphological Union*, **20**: 69-83.

Aniya, M., Naruse, R., Casassa, G., and Rivera, A. (1999) Variations of Patagonian glaciers, South America, utilizing RADARSAT images. Proceedings of the International Symposium on RADARSAT Application Development and Research Opportunity (ADRO), Montreal, Canada, October 13-15, 1998. CD-ROM.

Warren, C. and Aniya, M. (1999) The calving glaciers of southern South America. *Global and Planetary Changes*, **22**: 59-77.

Takeuchi, Y., Naruse, R., Satow, K., and Ishikawa, N. (1999) Comparison of heat balance characteristics at five glaciers in the Southern Hemisphere. *Global and Planetary Changes*, **22**: 201-208.

Aniya, M., Park, S., Dhakal, A. S., and Naruse, R. (2000) Variations of some Patagonian glaciers, South America, using RADARSAT and Landsat images. *Science Reports, Institute of Geoscience, University of Tsukuba, Section A*, **21**: 23-38.

Aniya, M., Dhakal, A. S., Park, S., and Naruse, R. (2000) Variations of Patagonian glaciers, South America, using Radarsat and Landsat images. *Canadian Journal of Remote Sensing* (in press)

(2) 口頭発表

Aniya, M., Naruse, R., Casassa, G., and Rivera, A. (1998) Variations of Patagonian glaciers, South America, utilizing RADARSAT images. *Abstract, Symposium RADARSAT ADRO, October 13,14,15, Montreal, Canada, p.107.*

Aniya, M. (1998) Variations of several major outlet glaciers of the Hielo Patagónico Sur between 1986 and 1997, using Landsat TM and RADARSAT Data. *Abstract, 2nd International Symposium on Arctic and Antarctic Issues, Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Chile, 1-5 November 1998.*

安仁屋政武・成瀬廉二・朴舜燦・アモド S ダカール (1998) レイダーサット映像によるパタゴニア氷原の最近の変動。1998 年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集 p. 156. 1998 年 10 月 11 日～15 日 新潟県塩沢町・六分区民コミュニティセンター。

山口 悟・大野 浩・松本高峰・成瀬廉二・和泉 薫 (1999) パタゴニア Soler 氷河における流動観測結果 (1998 年)。1999 年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集 p. 26. 1999 年 10 月 16～20 日 鳥取県米子市・米子コンベンションセンター

安仁屋政武 (1999) 南米・北パタゴニア氷原のカービング氷河の最近の変動。1999 年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集 p. 27. 1999 年 10 月 16～20 日 鳥取県米子市・米子コンベンションセンター

成瀬廉二・山口 悟・松本高峰・大野 浩・安仁屋政武 (1999) パタゴニア・ソレル氷河の近年の氷厚減少。1999 年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集 p. 28. 1999 年 10 月 16～20 日 鳥取県米子市・米子コンベンションセンター

安仁屋政武・柴田康行・米田譲・廣田正史 (2000) 南米チリ北パタゴニア氷原ソレル氷河の完新世の氷期。日本地形学連合 2000 年春季大会。2000 年 3 月 30 日 茨城県つくば市筑波大学



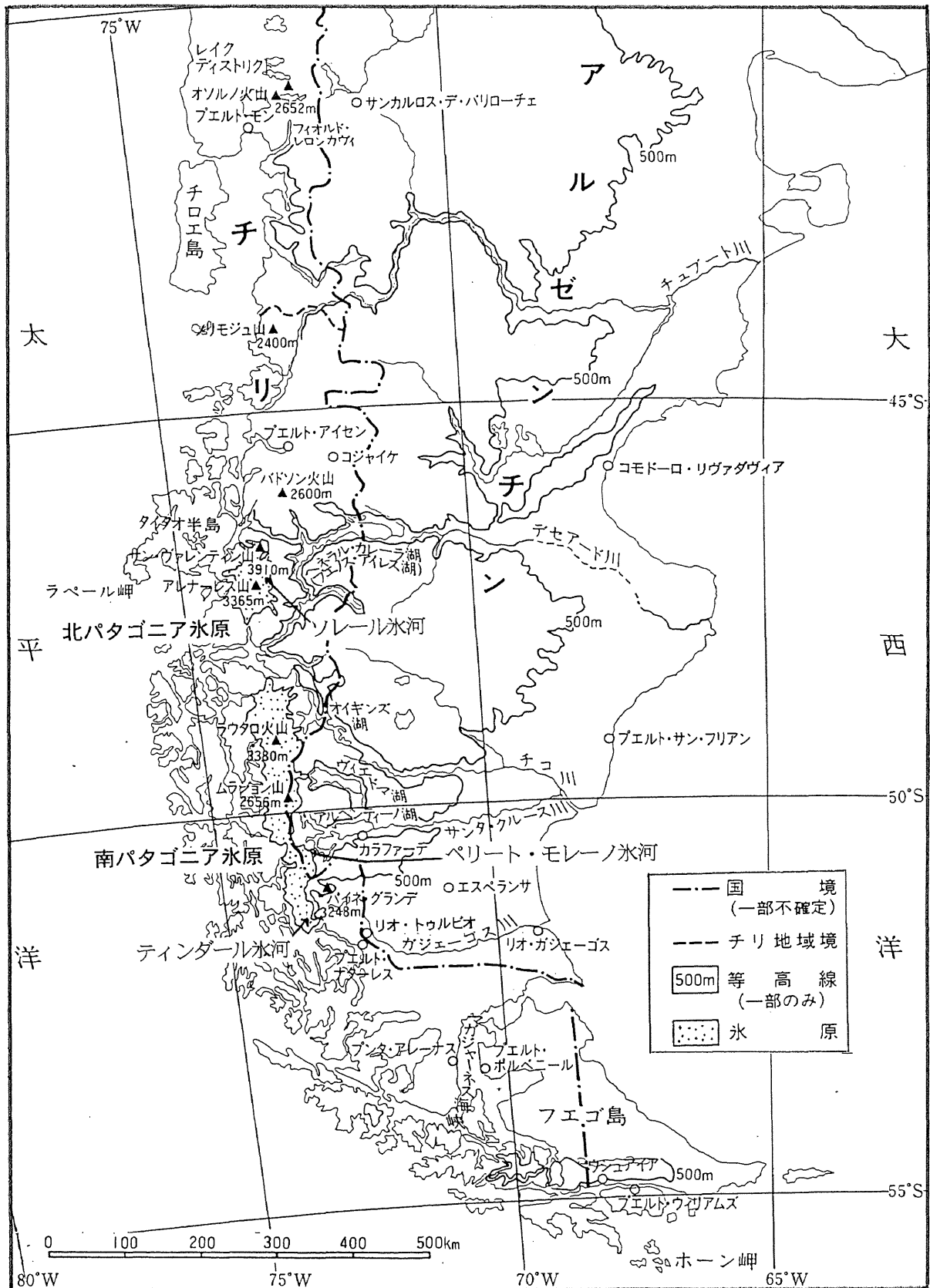


図. パタゴニア地域の概略と研究対象氷河 (安仁屋, 1998 を一部改)

# パタゴニア・ソレール河谷の完新世の環境変動－ 氷期を中心として

安仁屋政武

筑波大学地球科学系

## 1. はじめに

近年の地球温暖化は人為の影響が大きいことが指摘されているが、後氷期にある現在、自然の変動も当然あることが考えられる。しかし、このことはただか100年程度の記録しかない現在の環境だけを調べていても解明は不可能である。これを解く鍵の一つが、過去の環境変動を細かく解明することである。このような観点から、完新世の環境（気候）変動をできるだけ細かく（high resolution）明らかにすることが必要である。

南米の南端に位置するパタゴニア氷原は南パタゴニア氷原（13000 km<sup>2</sup>）と北パタゴニア氷原（4200 km<sup>2</sup>）からなる、世界でも有数の大きな規模を持つ氷体である。特に陸地の少ない南半球にあって、南極を除くと最大であり、パタゴニアの氷河の消長は南アメリカ大陸のみならず、海水面変動などで世界規模の環境変化に影響を持つ（Aniya, 1999）。しかし、パタゴニアの完新世の環境変動－氷期の問題－の研究は他の地域に比べると圧倒的に少ない。最初の研究はスエーデンのカルデニアスによるもので、1920年代に馬車と馬でアルゼンチン・パタゴニアを踏査して、更新世の氷期は4回あったと結論した（Caldenius, 1932）。その後、氷期の問題に正面から取り組んだのはアメリカのマーサーである。彼は主に南氷原の溢流氷河でモレインの調査と年代測定を行い、1964年にウプサラ氷河とその周辺で2回ないし3回の完新世の氷河前進期を認めた（Mercer, 1965）。その後、調査地域を拡大し、パタゴニアの完新世の氷期は3回という定説を築いた（Mercer, 1968, 1970, 1982）。安仁屋は1990年代に南氷原のウプサラ氷河とティンダール氷河およびアメギーノ氷河でモレインの分布と<sup>14</sup>Cによる年代測定から、3回ではなく4回（Neoglaciation I, ca.3600BP; II, 2400-2200 BP; III, 1600-900BP; IV, 16c-19c）あったことを報告した（Aniya, 1995, 1996）。

一方、北氷原での完新世の氷期の研究は 1999 年までは、1958 年にアメリカ地理学協会 (American Geographical Society) が派遣した調査隊による、氷原西側に位置するサン・ラファエル氷河の前進が約 4000~5000BP にあった (Heusser, 1960) という報告のみであった。安仁屋は 1995 年、氷原の東側に位置するソレール氷河の氷期を明らかにするべく、1985 年撮影の垂直写真 (Aniya, 1987b) から作成したソレール氷河前面のモレイン分布図 (Aniya, 1987a) を参考にして年代資料を採集した。これによって氷河前進が 1300 BP 頃と 300 BP (小氷期、Little Ice Age - LIA) 頃にあったことを明らかにした (Aniya and Naruse, 1999)。これは南氷原の完新世の氷期、新氷期 III と IV にそれぞれ相当する。

このような背景から、1998 年 11 月にソレール氷河前面の谷と、すぐ南に位置するネフ氷河が拡大期に溢流したソレール河谷の本流および支流でモレインの分布調査と、その年代測定資料の収集を行った (図 1)。現在、年代測定を国立環境研究所に共同研究で依頼中である。ここでは調査したモレインの分布とその特徴、および年代の推定、そして年代測定資料収集について報告する。なお地形面の標高は、湖水面の高さをチリの IGM (Institute Geográfico Militar) 発行の 5 万分の 1 の地形図 (等高線間隔 50 m) から 201 m と仮定して高度計をそれに合わせて現場で計ったものであり、当然誤差を含む。

## 2. ソレール河谷のモレイン分布と年代測定資料の収集

### 2-1. プロモ湖東縁

調査はプロモ湖をベルトラン湖から限っている、両腕を前に延ばして半円形にしたような形態を持つターミナル・モレインから始めた (図 2)。これまでの予察では、このモレインから 35 km 上流のソレール氷河前面 2 km まで、谷底にモレインはない。ベルトラン湖が続いているヘネラル・カレーラ湖 (アルゼンチン名、ブエノスアイレス湖) は最終氷期のモレインで堰き止められて形成された (Caldenius, 1932)。このような位置関係から、このプロモ湖のモレインはヤンガー・ドライアス期 (Younger Dryas, 10,500 BP 前後) の氷河前進によって形成されたのではないかと推測して調査した。因みに、パタゴニアではヤンガー・ドライアス期に氷河の前進があったかどうかは、現在大きな論

争となっている（安仁屋、1998）。

プローモ湖右岸側のターミナル・モレインは長さ約 1150 m、湖面から高さ 24 m、幅約 150～250 m である。一方、左岸側は長さ約 600 m、最大比高約 50 m、最大幅が 500 m で、プローモ湖とベルトラン湖は幅 300 m の細い水路でつながっている。右岸側の斜面には標高 275, 320, 335 m の所にラテラル・モレインが認められる。これらのラテラル・モレインは、後退する過程で停滞時期があったことを示す。一方、左岸側は標高 360 m のラテラル・モレインが最高位である。これより下の斜面はハンモック状 (hummocky topography) で、顕著なモレイン・リッジはなく、厚いデブリ（ティル）に覆われた氷河が徐々に融けて行ったことを示す。右岸側のモレインの礫は花崗岩と変成岩からなるのに対して、左岸側は花崗岩のみである。従って、右岸側はソレール河谷を流れてきた氷河（ネフ氷河が溢流したもの）、左岸側はソレール氷河による堆積が考えられる。また、プローモ湖を挟んで、右岸側の基盤は変成岩 (granulite)、左岸側の基岩は花崗岩、と全く異なり、断層の存在が推測できる。この付近は 1920 年代の入植によりナンキョクブナ (*Nothofagus*) の大森林 (DBH>1 m) が伐採されて羊・牛の放牧地として使われたが、最近放棄されたので森が復活しつつある。ターミナル・モレインは厚さ 10～40cm の火山灰で覆われ、その上に A 層の土壌が厚さ 10～20 cm 程度で発達しているが、水路が切っているところは砂で覆われている。ベルトラン湖側 (distal side) の湖岸には、長径数メートルの花崗岩質の巨礫が堆積しており、長径数センチから数十センチの礫は円摩されているものが分布している。このことは、ターミナル・モレインが ice-cored であったことを示す。また、砂・シルトの堆積物はハンマーでなければ崩せないほど固結しており、堆積してからかなりの時間が経過したことを示唆する。一方、プローモ湖側 (proximal side) には砂浜、小礫浜が発達している。ここから <sup>14</sup>C 年代測定資料を 4 点（資料番号：98111003, 98111101, 98111202, 98111203、表 1）、宇宙線照射 (cosmic ray) による年代測定用の岩石片（花崗岩）をモレインの背陵付近のエラティック (erratic) から 3 点（資料番号：98111001, 98111004, 98111201）採集した（図 2 参照）。

## 2-2. プローモ湖西縁

プロモ湖の西岸、ソレール川の河口から 1 km 上流の左岸に、谷を横断するような尾根状の地形が存在する（図 2、A で表示）。湖から遠望するとターミナル・モレインのようであるが、現場での調査から大半が基岩からなり、薄くティル・エラティックが載っているに過ぎないことが判明した。その上を所によっては厚さ 40 cm 以上の火山灰が覆っている。この高まりを川が横断する個所は岸壁が切り立ったゴルジュとなっている。プロモ湖西岸に北から流入してるピーニャ川（Estero Piña）の河口から 1.2–1.5 km 上流の左岸、標高 334 m の所に頂部が平坦なモレインが分布している（図 2、B で表示）。堆積物の淘汰が悪く、円礫・角礫が混在しているので、モレインと判断した。このすぐ下、ピーニャ河沿いに細長いモレインが川に平行に位置しているが（図 2、C で表示）、これは形態と堆積物からピーニャ河を流れた氷河が堆積したラテラル・モレインであると判断できる。同様に標高 334 m のモレインもピーニャ河を流れた氷河によって形成された可能性もある。頂部が平らなのは高水面の湖水に洗われた結果である。ピーニャ川のゴルジュの出口のすぐ左岸の約標高 350 m の所に小さな平坦面がある（図 2、D で表示）。望見した範囲では表面に小さな起伏があるので、モレインと判断した。ピーニャ川の右岸にはほぼ同じ標高に隆起デルタ（emerged delta）またはデルタ段丘（delta terrace）が分布している（図 2、E で表示）。この両者（デルタとモレイン）は標高と形態がほぼ同じで、しかも川がゴルジュから出た所の左岸と右岸という位置から、一見すると同じ成因の地形であるとの印象を受けるが、構成している堆積物が全く異なる。ここからは年代測定用のサンプルは採集できなかった。

## 2-3. ソレール氷河周辺（図 3）

ソレール氷河前面の詳しいモレイン分布図はすでに作られている（Aniya, 1985, 1987）。さらに最近、一部のモレインの年代測定が行われて 1300BP（AD695）と AD1650 の 2 回の氷河前進期があったことが提唱された（Aniya and Naruse, 1999）。

今回、年代測定資料を採集したのは、2 回の氷期の仮説を検証するのと、それ以前の氷期の可能性を探るためである。氷河前面のモレイン・フィールドでは、

1300BP と推測されたターミナル・モレインから 1 点（資料番号：98112001）と、1300BP と AD1650 のモレインの間に位置する比高 40 m のこの地域では最大のモレインから 2 点（資料番号：98112002, 98112003）採集した。また、ソレール氷河とソレール湖の間に分布するラテラル・モレインから 3 点（資料番号：98112101, 98112102, 98112103）の年代測定資料を採集した。資料 98112101 はこのモレインの形成が 1300BP 頃であることを検証するためのものである。一方、後者 2 点を採集したモレインは、1300BP と考えられているモレインより上位に位置しており、なおかつ植生が全くことなる（直径 1 m 以上の大木が倒壊している）ので、1300BP 以前の氷期があったかどうかを検証するためのものである。

#### 2-4. ソレール川中・上流（カチヨ谷合流点より上流）

ソレール川はカチヨ谷合流点より約 7 km 上流で 2 つの河川に別れるが、合流点から上の河川の呼び名は、チリ発行の 5 万分の 1 の地形図に記されているものと、現地に住む人のものが異なる。すなわち、現地では左岸から合流する河をトゥルビオ川（Río Turbio）と呼び、右岸から合流する河をロメロ川（Río Romero）と呼ぶ。一方、地形図はロメロ川をソレール川と呼び、左岸から合流する河川は無名である。ここでは現地名に従って記述する。

##### 2-4-1. トゥルビオ川

トゥルビオ川の源流は合流点から約 4.5 - 5 km 上流に位置している 2 つのモレイン堰止湖からなる（図 4）。5 万分の 1 の地形図は、西側の丸みを帯びた形の湖をラルゴ山湖（Laguna del Co. Largo）と記しているが、東側の細長い湖は無名である。ラルゴ山湖は標高 1500 m 前後の北氷原から 2000 m 強の無名峰の南斜面に発達した氷河が寒冷期に流出して形成したモレインによって、無名の湖はラルゴ山（Co. Largo, 1945m）の南斜面と 2164 m 峰の東斜面に発達した氷河によって形成されたモレインに堰き止められている。ラルゴ山との位置関係からは、細長い無名の湖を Laguna del Co. Largo と呼ぶほうが適切に思える。川の名称と同様、このような地形図の地名の付け方に使う側からすれば問題があると考えられる例はパタゴニアには多く見られる。

ラルゴ山湖から流れ出ている河川は、地形図には左岸のラテラル・モレインの外側から流れ出ているかのように、誤って描かれている。実際にはモレインを切って流れ出しているのが、地形図作成の基となった空中写真でも認められるので、なぜこのような誤りが生じたか不明である。ラルゴ山湖は1987年（または1989年、現地の人によって違う）にモレインが大決壊して大洪水（M(G)LOF - Moraine (Glacier)-dammed Lake Outburst Flood）を引き起こした（図5）。これにより、今回の現地調査で水位が約97 m低下したことが判明した（図5F）。湖の面積が1.82 km<sup>2</sup>なので流出した水量は約0.176 km<sup>3</sup>となる。大決壊の理由は不明であるが、周囲の状況から湖の北にある1904 m峰の南斜面にある氷河が崩壊して湖になだれ込み、water jumping を起こしてモレインを侵食した、と推測している。モレインの断面を現地で目測・推測して求めた侵食量は概算で325 x 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>である。大洪水により下流約2 kmのロメロ川の合流点付近まで花崗岩の長径5~10mの巨礫を多数含む大量の砂礫が堆積して、一面真っ白な河原と化した（図5D, E）。洪水流はロメロ川の合流点より下流の河原に分布していた林をなぎ倒し、砂礫はカチヨ谷の合流点付近まで堆積して、景観を一変させた（図5C）。カチヨ谷の合流点付近より下流は砂礫の堆積はなく、洪水流のみがゆっくりと流れたと推測される。約20 km下流のソレール川河口に住む現地人の話によると、普段より8~10 mも水位が上がって、家の軒下まで来たという。いずれにしてもとてつもない大洪水であったが、家が破壊されなかったのは流速が遅かったからであろう。

ラルゴ山湖を堰止めているモレインは、7万分の1の空中写真判読では小さすぎて分からなかったが、現地調査で2列あることが判明した。この2列は重なりあっており、頂部はわずかに300 m前後離れているに過ぎない。これらのモレインには植生が進出して林を形成している。ソレール氷河の完新世の氷期の研究から（Aniya and Naruse, 1999）、外側のモレインが1300 BP、その内側にあり現在湖を堰き止めているモレインが17世紀に形成された、と推測している。外側のモレインから年代測定資料（98111703）を採集した。

細長い無名の湖を堰き止めているラテラル・モレインは3列認められた。ここからは川の流出口のところから年代測定の資料（98111802）を採集した。

これらの湖に行く途中のトゥルビオ川左岸、ロメロ川合流点から1.7 kmの

所にターミナル・モレインが認められ、年代測定資料（98111701）を採取した。上流にあるモレイン堰止湖との位置関係から、このモレインは新氷期 II（2200 BP 前後）の可能性がある。

#### 2-4-2. ロメロ川

この川とソレール河の合流点のすぐ上流に、谷を横断するような高まりが存在する（図 4, X で表示）。これも一見するとターミナル・モレインと判断するような位置と形態で、空中写真上でも同じ印象を受ける程である。しかし、現地を歩いて初めてそうではないことが判明する。ここは堅い岩盤からなり、滝と釜の連続したゴルジュを形成している rock sill である。この部分は標高差約 40 m でこれより上流の侵食基準面（local base level）となっている。このゴルジュより上流の谷は開けており、流れも緩やかで、両岸の所々に湿地が広がっている。Rock sill より 2.8 km 上流、右岸の湿地帯が終わる付近で右岸から小さな支流が入る。これは現在のネフ氷河（Glaciar Nef）の側縁湖から北に流出している河川である（便宜状 N 川と呼ぶ）。

##### A. ロメロ川本流

N 川との合流点から 800 m 上流の右岸、標高約 313 m の所にモレインが認められる。モレインの表面のかなりの部分はスポンジのような厚いコケに覆われているが、構成している花崗岩礫が露出している個所はかなり風化を受けていて、表面はボロボロになっている。露岩・コケの合間に所々に厚さ 5 cm 程度の A 層が発達していて、その下のマトリックスである砂は褐色に変色している。また、モレイン内部の花崗岩の礫は手で崩せるぐらい風化しており、斜長石は黄色化している。これらのことは、このモレインがかなり古いことを示唆する。これより上流のモレインと植生線から、このモレインは新氷期 II に相当するのではないかと推測している。ここからは、砂層のすぐ上に載っている有機物を年代測定資料（98111601）として採集した。

ここからさらに 1.8 km 上流の両岸、標高約 345 m のところにモレイン・リッジが分布する。このモレインはさらに上流の谷壁の植生線につながる（図 4, V で表示）、ソレール氷河での研究（Aniya and Naruse, 1999）から、1300BP



ではないか、と推定している。ここでは、地表から 25 cm のところにある長径 10 cm 程度の「垂角礫からなる層のすぐ上に発達した有機物を年代測定資料 (98111602) として採集した。

このモレイン・リッジのすぐ上流はハンモック状の地形となっていて、顕著なモレイン・リッジやマウンドはみられない。ここより上流にはモレインと認められるような地形がないこと、そして谷壁の植生にも顕著な線状の違いがないこと、などからこのハンモック状の地形が LIA のモレインではないかと推測している。ソレール氷河でも LIA のモレインはハンモック状である。この地形は氷河の末端が厚いティルに覆われ、徐々に融けていったことを示す。

LIA のモレインからさらに 800 m 上流の左岸には谷を横切る顕著なリッジが存在する (図 4, Y で表示)。下から見上げると、その位置や形態からターミナル・モレインのような印象を受けるが、磨かれた岩盤の所々に薄く堆積物が載っているに過ぎない。ソレール川河口、トゥルピオ川とロメロ川の合流点にある rock sill と同じものである。

## B. 支流 N 川

この川に沿ってロメロ川との合流点付近に細かくは数列、大きくは 2 列のターミナル・モレインが認められ、2 列の間隔はわずかに 100 m 足らずである。下位のものを a、上位のものを b と呼ぶ。両者の位置は非常に近いが、モレインの堆積物の風化程度、植生が大きく異なる。すなわち、a のエラティックにはコケ (lichen) がたくさん見られ、砂質土壌も赤っぽく風化している。植生 (ナンキョクブナ) は大きく、斜面には倒木や腐ったものが散乱している。これに対し、b には新鮮な粗砂が載っており、植生も高さ 2 m 程度、DBH (胸高直径) 10 cm 程度で貧弱である。このような状況とソレール氷河での氷期の研究から (Aniya and Naruse, 1999)、a は 1300BP、b は LIA (AD 1650 頃) に形成されたと推測している。

源流左岸の 992 m ピークの斜面に 3 列の顕著なラテラル・モレインが分布しているが、その最上位のラテラル・モレインの内側から年代測定資料 (98111801) を採集した。ここの植生は大きく (DBH、数十センチ)、林床は腐った倒木と厚い腐葉土で覆われていて、森が形成されてからかなりの時間

が経っていることを示している。現場では、このような状況と顕著な植生線との位置関係からモレインの形成は1300BP頃ではないかと推測したが、現地のガイドに「この様な森はできてからどのくらい経っているだろうか」と聞いたところ、即座に「1000年ぐらい」と答えた。彼にはモレイン形成年代に関する知識・情報は全くないので、この答えには驚いた。

### 3. 標高 340 m テラス

ソレール河河口の南側（右岸）には平坦な面が標高 340 m と 270 m の 2 段に分布している（図 2, F で表示）。これは堆積物の調査の結果、モレインではなくデルタ段丘（emerged delta, 砂が主、礫、シルト、粘土混じり）であることが判明した。これと対比できる段丘が北側（左岸）の岸壁にも張り付いている（図 2, G で表示）。その後の調査でこの 340 m の標高に（デルタ）段丘が広く分布していることが判明した。これは過去の湖面の水位を示している。その後の調査で、ソレール河谷ほぼ全域にわたって大きな支流が入る所には、頂部が平らで緩やかにソレール川のほうへ傾斜している台形の地形があることが認められた。ソレール川河口付近のものに次いで顕著なのは、カチョ谷の対面から流入する河川がソレール河に合流する所に分布するものである（図 3, A で表示）。この谷はハンギング・ヴァレイ（hanging valley）となって合流しているが、谷壁の上、流入河川の両側に台形の地形が認められる。これらは、一見するとモレインのような印象を与えるが、いくつかの調査の結果、これらは全て支流が形成したデルタであることが判明した。すなわち、堆積物がほとんど砂、小礫、シルトで層構造をなしていること、多くの場合川の両岸に対になってほぼ同じ標高に分布していること、階段状（2 段 - 湖水面の変化）のものがあること、などが判断の根拠である。さらに、岸壁沿いにも所々同じ標高で植生が微妙に異なったり、平坦面として追える。

これらの広域の分布から、かつてこの地域では湖水面が標高約 340 m（現在 201 m）に比較的長いことあったことが推測できる。この高水面の年代が判れば、この地域の完新世の環境変化を解く大きな鍵となるが、残念ながら今回は年代測定資料を採集することができなかった。

## 謝辞

チリ大学地理学科の学生 Cesar Acuña 君と筑波大学大学院修士課程環境科学研究科の院生 Gregory Kay 君には現地でのサンプル採集を手伝ってもらった。

## 引用文献

- Aniya, M., 1987a: Moraine formation at Soler Glacier Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, **4**: 107-117.
- Aniya, M., 1987b: Aerial surveys over the Patagonia Icefields. *Bulletin of Glacier Research*, **4**: 157-161.
- Aniya, M., 1995: Holocene glacial chronology in Patagonia: Tyndall and Upsala Glaciers. *Arctic and Alpine Research*, **27**: 311-322.
- Aniya, M., 1996: Holocene variations of Ameghino Glacier, Southern Patagonia. *The Holocene*, **6**: 247-252.
- Aniya, M., 1999: Recent glacier variations of the Hielos Patagónicos, South America, and their contribution to sea-level change. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, **31**: 144-152.
- Aniya, M. and Naruse, R., 1999: Late-Holocene glacial advances at Glaciar Soler, Hielo Patagónico Norte, South America: *Transaction, Japanese Geomorphological Union*, **20**: 69-83.
- Caldenius, C., 1932: Las glaciaciones cuaternarias en la Patagonia y Tierra del Fuego. *Geografiska Annaler*, **14**: 1-164.
- Heusser, C. J., 1960: Late-Pleistocene environments of the Laguna de San Rafael area, Chile. *Geographical Review*, **50**: 555-577.
- Mercer, J. H., 1965: Glacier variations in southern Patagonia. *Geographical Review*, **55**, 390-413.
- Mercer, J. H., 1968: Variations of some Patagonian glaciers since the Late-glacial, *American Journal of Science*, **266**: 91-109.
- Mercer, J. H., 1970. Variations of some Patagonian glaciers since the Late-Glacial: II, *American Journal of Science*, **269**: 1-25.
- Mercer, J. H., 1982: Holocene glacier variations in Southern South America. *Striae*, **18**: 35-40
- 安仁屋政武 (1998) 『パタゴニア—氷河・氷河地形・旅・町・人』、古今書院、東京、349p.

表 1 Samples from Río Soler Valley, November 1998

Sample ID	material	Site (GPS)	Significance
98111001	Rock (erratic)	Lago Plomo south Moraine (47°58.582'S, 72°52.366'W, Elev. 220m)	Age of Terminal moraine Younger Dryas (YD)?
98111002	Soil (tephra)	Lago Plomo south Moraine (47°58.570'S, 72°52.478'W, Elev. 224m)	
98111003	root	Southern flank of Lago Plomo S. Moraine (47°58.695'S, 72°52.476'W, Elev. 216m)	Minimum age of Moraine YD?
98111004	Rock (erratic)	Northern flank of Lago Plomo Moraine (47°58.628'S, 72°52.362'W, Elev. 224 m)	Minimum age of Moraine YD?
98111005	Organic	South of the Lowest part of L. Plomo M. (46°59.159'S, 72°51.786'W, Elev. 274m) 40 cm below the surface, above gravel	Min. age of L. M. YD?
98111101	Organic (vegetation)	Lake side of L.M. Lago Plomo (46°59.002'S, 72°51.773'W, Elev. 203m) (40 cm below the surface)	age of tephra
98111102	Organic (vegetation)	Just N of the lowest area, Lago Plomo (46°58.871'S, 72°51.753'W, Elev. 207 m) Organic layer (1 mm) between moraine deposits and tephra. Vegetation was killed by falling tephra. 40 cm below the surface.	age of tephra and moraine
98111201	Rock (erratic)	Lago Plomo north shore moraine (46°58.692'S, 72°53.031'W, Elev. 226 m)	age of Terminal M. YD?
98111202	Organic	Lago Plomo north shore moraine (Plomo side) (46°58.542'S, 72°53.875'W, Elev. 217 m) edge of the slope exposure, 60 cm below the surface	Min. age of M. YD?

表1 続き 1

98111203	Organic (vegetation)	Lago Plomo north shore moraine (Plomo side) (46°58.580'S, 72°52.856'W, Elev. 207 m) Only 50 m from 02 sampling site. Vegetation was killed by tephra.	age of tephra and moraine YD?
98111601	Organic	Moraine, side valley from Gl. Nef to Rio Romero (47°00.242'S, 73°14.373'W, Elev. 315m)	Moraine older han 1300 BP?
98111602	Organic	Rio Romero TM (depression) (46°59.957'S, 73°16.065'W, Elev. 345m)	Age of Moraine 1300BP?
98111701	Organic	Rio Soler (Two lakes) (46°58.563'S, 73°12.075'W, Elev. 274 m) Covered by 80 cm of tephra (above gravel)	Age of Moraine 2300BP?
98111702	Organic	Moraine damming Laguna Largo (46°57.332'S, 73°13.905'W, Elev. 445m) Organic matter on top of damming M.	Age of Moraine LIA?
98111703	Organic	Moraine damming outburst Laguna (Laguna del Co. Largo on Map) (46°57.437'S, 73°14.324'W, Elev. 476m)	Age of Moraine 1300BP
98111801	Organic	Gl. Nef Lateral Moraine (47°01.376'S, 73°14.496'W, Elev. 771 m) Depression formed between the hillslope and LM Gomez estimated the age of forest here about 1000yrs	Age of L. Moraine 1300BP?
98112001	Wood (Organic as well)	Soler TM V, left, outermost (46°55.391'S, 73°07.679'W, Elev. 267m) Piece of wood embedded in fine sand	Age of TM V 1300BP?
98112002	Organic	near Top of Soler TM IV (largest) (46°55.193'S, 73°08.485'W, Elev. 339m) Top 8 cm organic layer of TM	Age of TM IV 270-1300BP?

表1 続き 2

98112003	Organic	Soler TM IV, shallow depression in the flat area (46°55.159'S, 73°08.215'W, Elev. 312m) Top 5 cm of organic layer on top of M deposits	Age of TM IV 270-1300BP?
98112101	Organic	Saddle of the Left LM (46°53.901'S, 73°10.408'W, Elev. 503m) depression between Gl. Soler and Cacho.	Age of LM 1300BP?
98112102	Organic	depression between Gl. Soler and Hillslope (close to 46°53.460'S, 73°11.066'W, Elev. 576m)	Age of LM Older than 1300BP?
98112103	Organic	Depression formed by LMs of Soler and Cacho and Hill slope (46°53.454'S, 73°10.927'W, Elev. 551m)	Age of LM Older than 1300BP?
98112401	Organic	Soler Moraine IV spearhead (depression) (46°54.786'S, 73°08.228'W, Elev. 301m)	Age of TM 1300BP?

サンプルの場所は図 2～4 に示す。

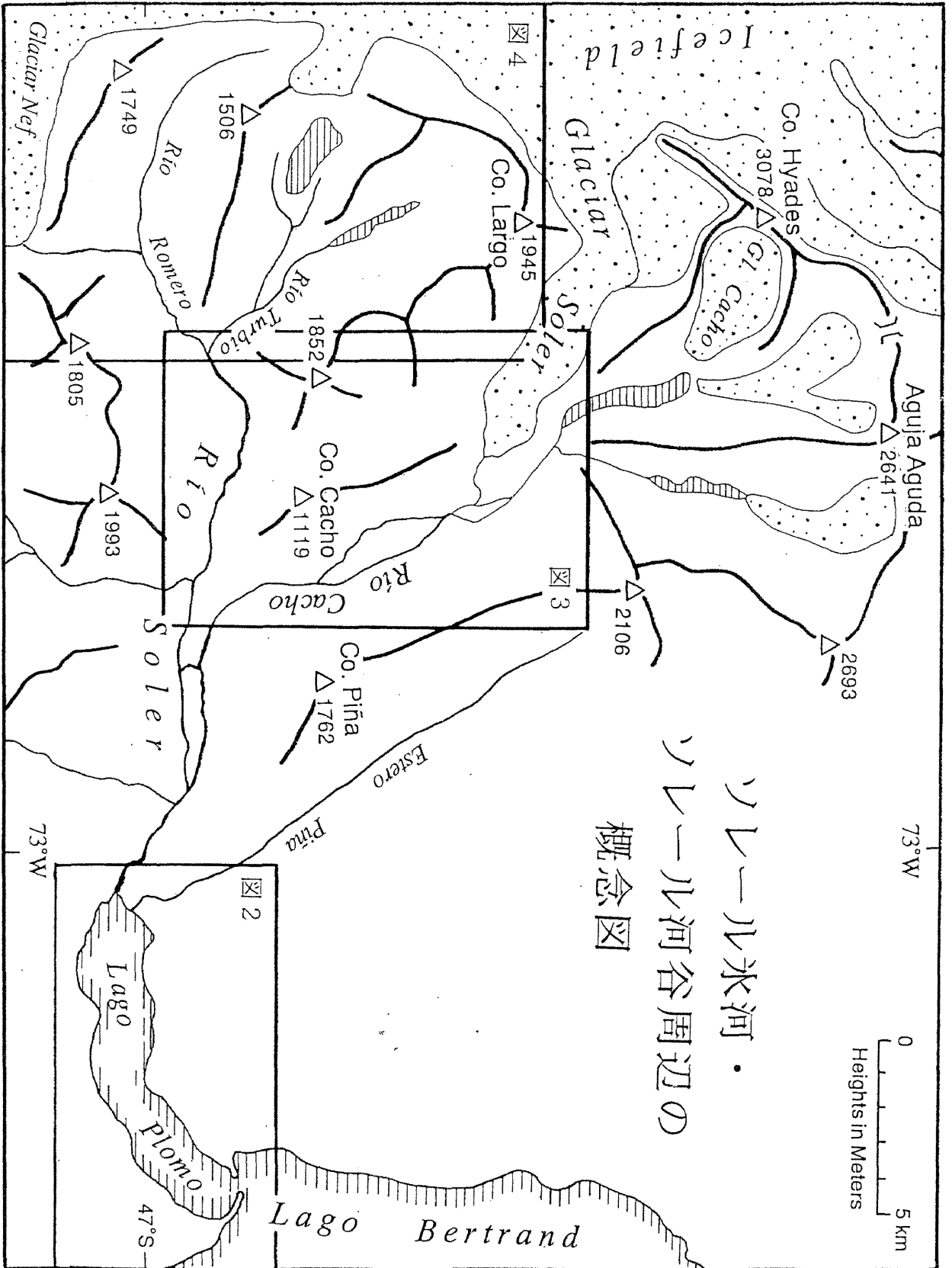


図1. 研究対象地域：ソレール氷河とソレール河谷． 図2～4の範囲を示す．

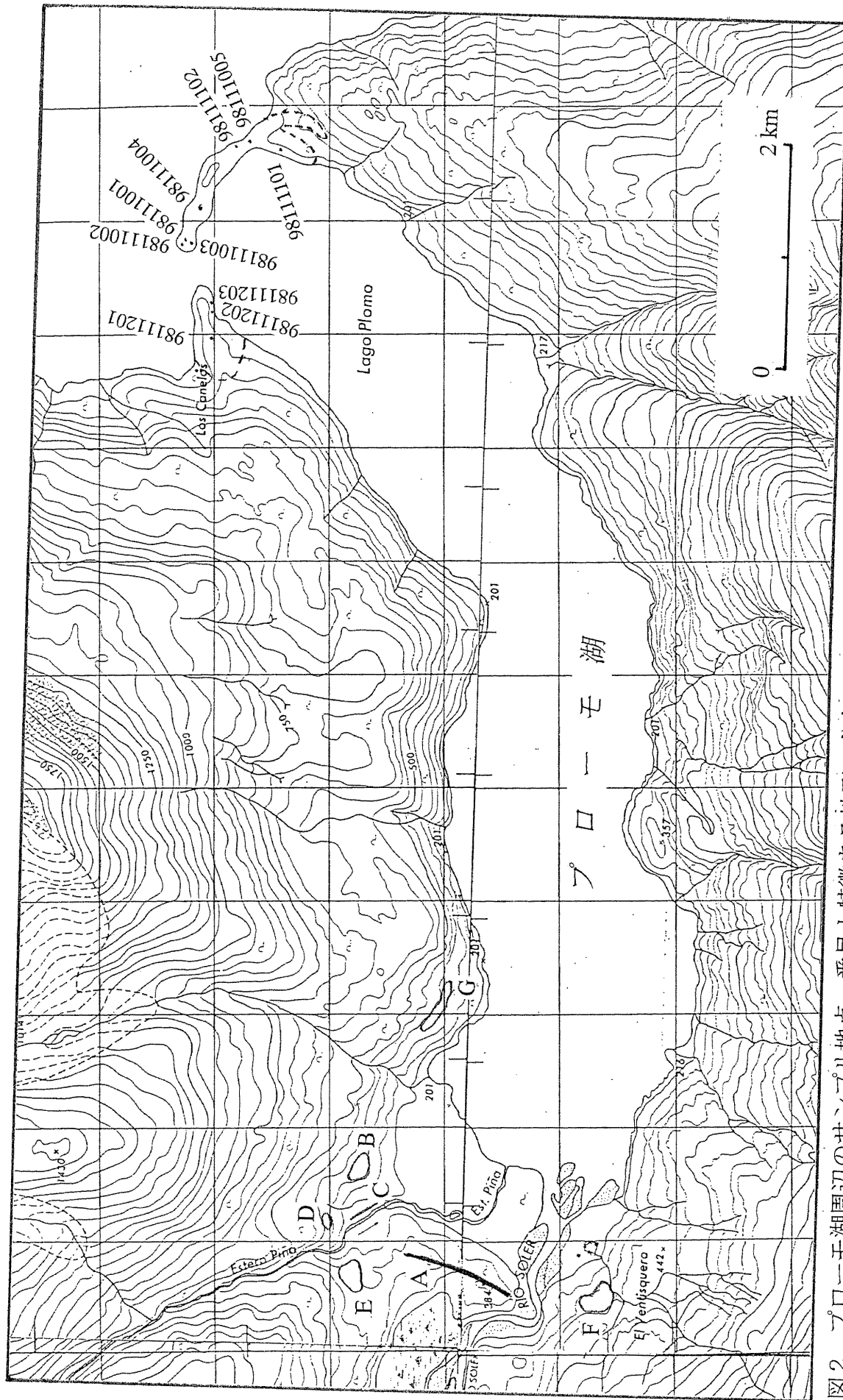


図2. プロローモ湖周辺のサンプル地点・番号と特徴ある地形の分布. A-基盤岩リッジ; B, C, D-モレイン; E, F, G-隆起デルタ  
詳しくは本文を参照.



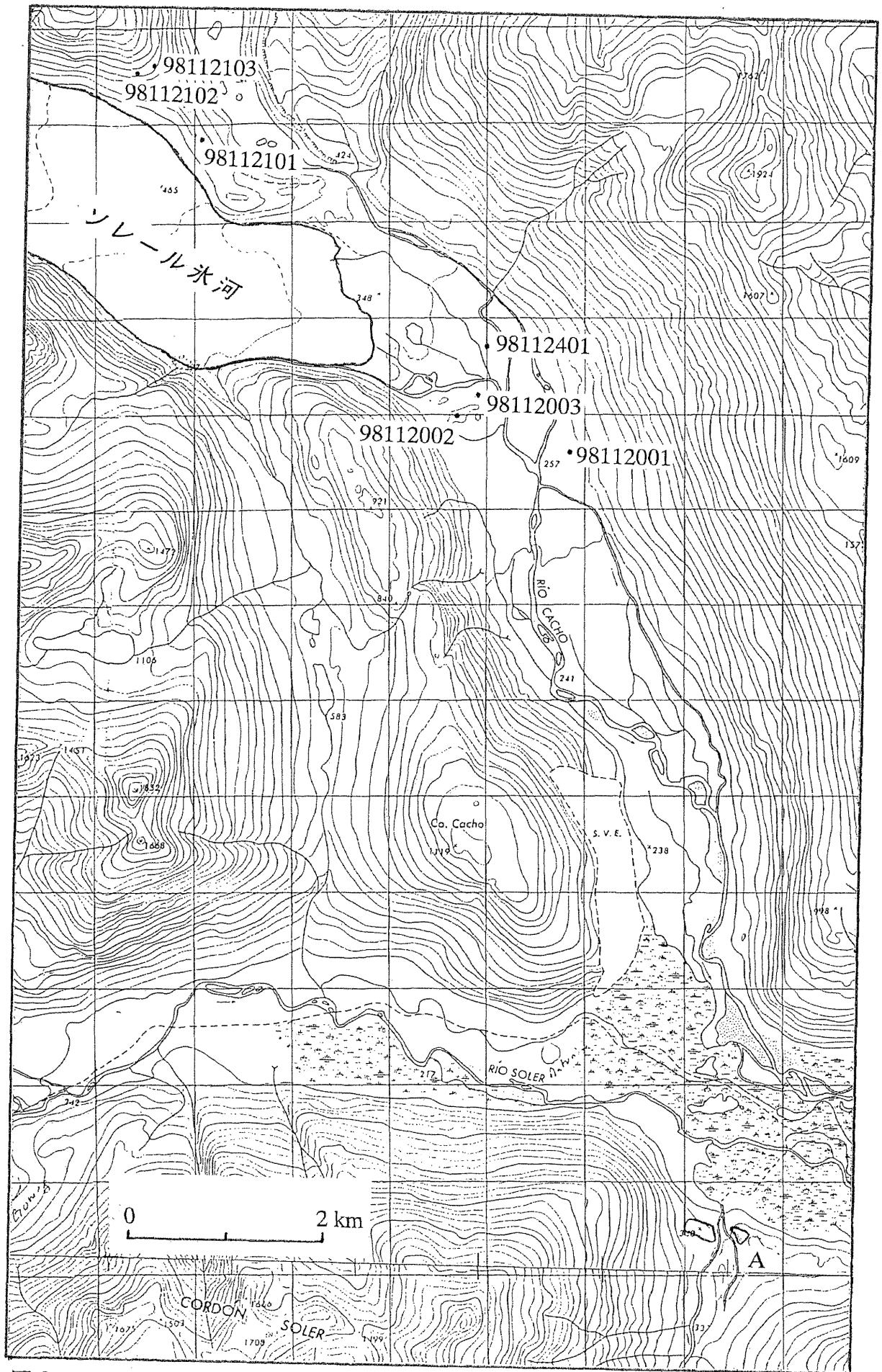


図3. ソレル氷河、カチョ川周辺のサンプル地点・番号と特徴ある地形の分布。  
A-隆起デルタ。詳しくは本文を参照。

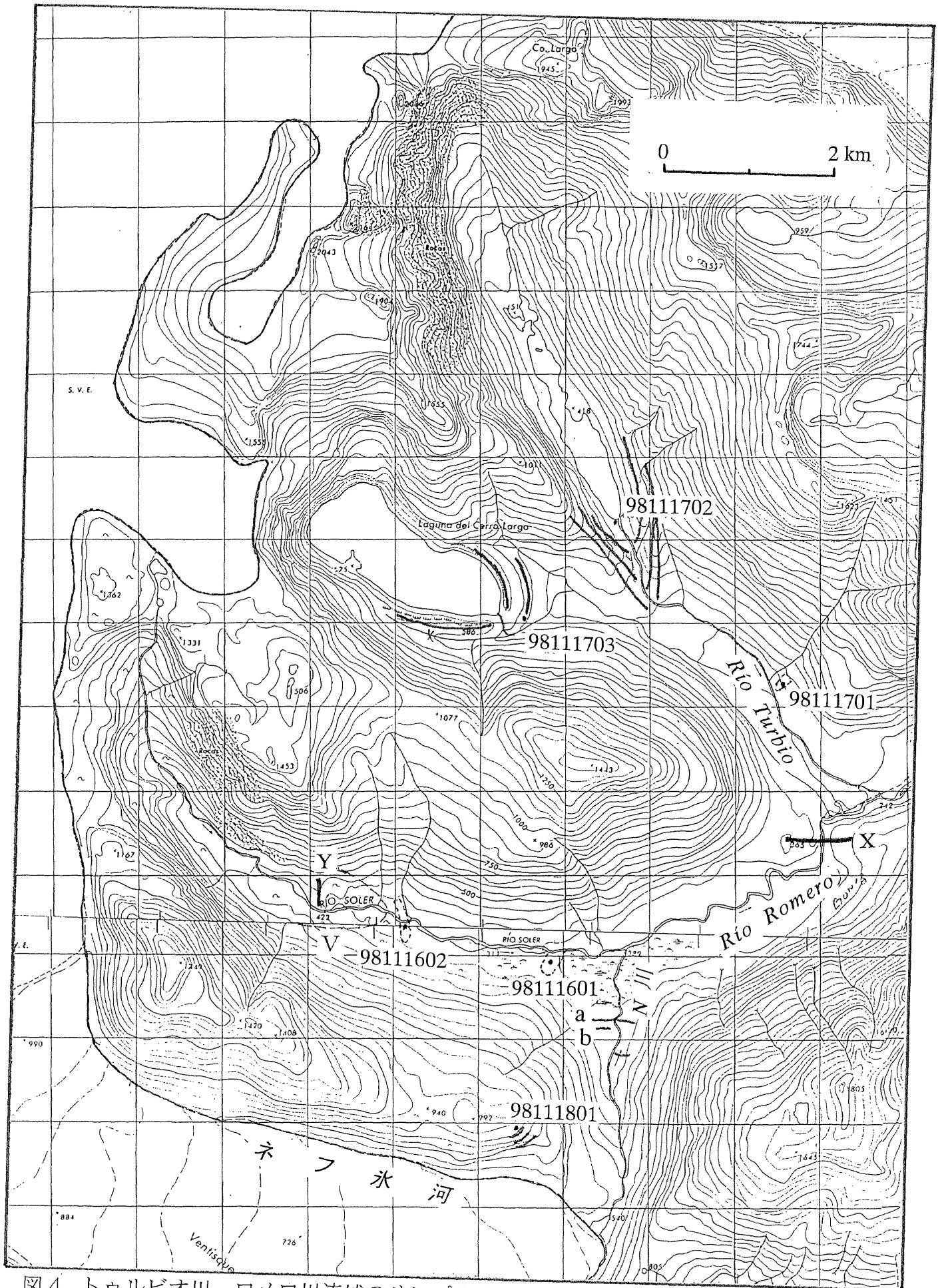


図4. トウルビオ川、ロメロ川流域のサンプル地点・番号と特徴ある地形の分布。X, Y, - Rock Sill; ---- V は植生線; —— はモレイン・リッジ。詳しくは本文を参照。



A. MLOF を起した Laguna del Co. Largo と Catastrophic な土石流により荒廃したトゥルピオ川。



B. ソレール川とカチヨ川の合流点付近より上流を見る。一面の砂礫原である。左がロメロ川。



C. トゥルピオ川の合流点付近から下流を見る。泥流（土石流）の先端はカチヨ谷（左から合流）との合流点手前で止まっている。



D. ソレール川との合流点よりトゥルピオ川の源流を見る。一面の巨礫原である。



E. 湖より約 4 km 下流の河原の様子。礫のサイズに注目。花崗岩なので眩しいくらい白い。



F. Laguna del Co. Largo のダム崩壊跡。水位が約 97 m 下がった。1300 BP と LIA のモレインによって堰き止められている。

図 5. MLOF (Moraine-dammed Lake Outburst Flood) による河川の荒廃。

# 北パタゴニア氷原溢流氷河の 1995/96 – 1998/99 の変動

安仁屋政武

筑波大学地球科学系

## はじめに

北パタゴニア氷原の面積は 4200km<sup>2</sup> で 28 の溢流氷河がある (Aniya, 1988, 図 1)。このうち主な 21 の溢流氷河を対象として、手持ちカメラによる斜め空中写真を含むさまざまなリモートセンシング・データを使って、1944/45 年以降の氷河変動を明らかにしてきたが (Aniya and Enomoto, 1986a, 1986b; Aniya, 1988, 1992; Wada and Aniya, 1995; Aniya and Wakao, 1997)、これはその継続研究である。

今回のプロジェクトでは、1998 年 11 月 30 日と 1999 年 11 月 30 日に北氷原の溢流氷河の末端付近の斜め空中写真撮影を行った。1999 年撮影の写真に関しては、現在作業中なので、ここでは 1998 年の結果とその考察を主に、そしてこれに 1999 年の観察結果を加える形で報告する。

## 方法

空撮に関する詳しいことは、この報告書の別稿 (北パタゴニア氷原の空撮) を参照されたい。1998 年は継続調査している 21 の氷河のうち、4 氷河 (Benito, HPN1, HPN2, HPN3) の末端は雲のため全く撮影できなかった。サン・キンティン氷河 (Glaciar San Quintin) は雲のため、広大な末端の一部しか撮影できなかったため、面積変動は出せなかった。また、撮れた写真もかなりの低角度なので末端の位置を正確に決めることができず、距離も出せなかった。

手持ちの 35 mm のカメラで撮影した斜め写真上の氷河末端の位置は、最初に 1975 年撮影の縮尺約 1:70,000 の垂直空中写真に周辺の地形を参考にして落とした。次に、この垂直写真から作られた縮尺 1:50,000 の地形図にこの位置を移写して、前の図と比較し、変化した面積や距離を計測した。斜め写真からの末端位置の同定なので、見る角度 (例えば正面から) により誤差が大きくなる可能性があることは否めない。

## 結果

1995/96-98/99 の面積変動を表 1 に、距離変動を表 2 に示す。いずれもトレンドを示すために 1944/45 年以降の変動を併記しているが (Aniya and Wakao, 1997)、コロニア氷河 (Glaciar Colonia) の 1981-91, 1991-94, 1994-96 のデータは、その後レイダーサット画像などを参考にして判読し直した結果、改変されている (Aniya *et al.*, 2000)。また、カシエット氷河 (Glaciar Cachet) は 1991-94 のデータが同様に改変されている。図 2 は 1945 年以降の変動を図示したものである。

1995/96-98/99 の変動で一番特異なのは、やはり サン・ラファエル氷河 (Glaciar San Rafael) である。他の氷河が後退を続けている中、3 年間で約 320 m も前進した。しかも幅約 4 km にわたる calving front 全域にわたって一様に前進したので、面積は約 0.86 km<sup>2</sup> 増加した。これ以前の 1992 年頃から 1995 年までの前進は calving front の一部で生じたため、面積にすると小さい。一方、この氷河のすぐ南に位置し、涵養域を同じ気象・地形条件のところに持ち、面積もほぼ同じサン・キンティン氷河の変動は全く対象的である。悪天候のため、数字が出せる写真の撮影はできなかったが、観察では氷河南縁の氷縁湖の拡大と氷河表面池の増大が印象的で、末端の後退は僅かであるが表面低下が継続していることは明らかであった。

末端が後退した氷河では、シュテフェン氷河 (Glaciar Steffen) の面積で 2.39 km<sup>2</sup> の減少、距離にして約 1600 m の後退が圧倒的に大きい。氷縁湖には大きなテーブル状の氷山が多数浮いており、1991 年から始まった末端崩壊 (distintegration) が今も続いていて、まだ安定状態に達していないことを示す。次に大きいのが Nef 氷河である。面積で 0.93 km<sup>2</sup> の減少、距離にして 890 m 後退した。1995 年と比べると氷山の数はかなり減ったが、この氷河も 1994 年に始まった末端崩壊が継続している。グアラス氷河 (Glaciar Gualas) は北 (N) 末端は後退したが、南 (S) 末端は見かけでは前進している。しかし、その表面には 1995 年よりも多くの氷河表面池が発達しており、湖に浮いている末端が延びたため、という印象を空からの観察で受けた (因に、1999 年のデータでは氷縁湖を北と南に分けていた部分が後退して、末端は一つになっていた。従って、この印象は正しかったと考えられる)。レイチエル氷河 (Glaciar Reicher) の南

西（SW）末端は、1991-94に大崩壊を起した後1994-96は停滞していたが、1996年以降再び若干ではあるが後退を始めた。一方、北東（NE）末端はほとんど変化していない。この後退によりほぼ一つの末端と見なせる姿となった。

カシエット氷河（Glaciar Cachet）は末端のすぐ上部で2つに分かれ、流動方向に向かって右が debris-free、左が debris-cover の氷体である。1996-99の期間では右側の debris-free の部分が約220 m後退した。左側はデブリに覆われているので後退が鈍化している。現在の気象条件が続けば、いずれ2つの氷河に分れるであろう。コロニア氷河（Glaciar Colonia）は、1991-96は Ic-cored のスラスト・モレインがゆっくりと融けたので末端位置の実質的な変化は見られなかったと判定した。1996-99では中の氷がほとんど融けたように見受けられ、実際の末端は僅かに後退したと判断した。ソレール氷河の末端は1991年から2つの氷縁湖でカービングするようになった。1994-96はほとんど変化していないが、96-99は若干後退した。末端では表面低下が顕著である。

パタゴニアの最高峰ヴァレンティン山（Monte San Valentin、3910 m）の北側に位置し、斜面からのデブリの供給が多いグロッセ氷河（Glaciar Grosse）とエクスプロラドール氷河（Glaciar Exploradores）は厚いデブリに覆われているので、みかけの末端位置に変化はない。しかし、表面低下は著しく、氷河表面池が多数形成されている。特に、グロッセ氷河では小さな池がくっついて大きな池に成長しているのが特徴的である。

## 1999年の空撮による観察

1年後の1999年11月30日の空撮で特に印象に残った氷河がいくつかあるが、その代表的なのはサン・ラファエル氷河である。この氷河は1980年代にはパタゴニアで1、2を争う早さで後退したが、1990頃にストップして1992年頃から前進し始め、北パタゴニア氷原では唯一の前進している氷河であった。特に1995/6年から1998/9年までに320 m前進した。ところが、1999年11月には後退していたのである。空撮中、パイロットのロベルト・レオンがなんとなく最近後退しているようだ、と言っていたが、その通りであった。1990年代に前進した理由として、氷原の西に位置する気象観測所、ラペール岬（Cabo Raper）の記録から推定された1970年代前半の降水量増加が挙げられていた

(Warren, 1994; 安仁屋・佐藤、1996; Winchester and Harrison, 1997)。しかし、1998年11月の空撮写真ではサン・ラファエル氷河を除く他の氷河は依然として後退を続けていた。しかも、サン・ラファエル氷河と似たような条件の所に涵養域をもつ北隣のレイチェル氷河、グアラス氷河は大きく後退しており、さらに南隣のサン・キンティン氷河は表面低下が著しく氷河表面池の面積が大幅に増加していた。このような事実に基づいて、Aniya *et al.* (2000) はサン・ラファエル氷河の前進は、フィヨルドの地形に起因している可能性があることを指摘した。すなわち、フィヨルドの湾口の幅が変化する周辺で、後退から前進（狭まる）、前進から後退（広がる）にスイッチしているからである。湾口の幅が変われば calving front の幅が変わり、カービング量が変わる。これにより末端の前進と後退がコントロールされる (Mercer, 1960)。

その他、サン・キンティン氷河の表面状態が衝撃的であった。放射状のクレバスの幅は広がり、その多くに水が浸入していて、広げた指の間に水が充填しているかのような印象を与えている。現在の気象が継続すれば、ますます加速的に表面低下が生じ、ある時（数年から十数年？）表面が大崩壊を起こして急激な後退と、巨大な氷縁湖の形成、そしてテーブル状の大きな氷山の出現が予測できる。グアラス氷河も同じような末端大崩壊が起きる可能性が高い。北パタゴニア氷原では過去に1990年代初めにレイチェル氷河、シュテフェン氷河、ネフ氷河で大規模な末端崩壊が起きている。これらの氷河では現在でも活発なカービングにより後退していて、安定状態にはいまだ達していない。

ソレール氷河の末端の後退は顕著ではなかったが、表面低下が続いており、1～2年後には2つの氷縁湖がつながり、末端はぐるりと氷縁湖に囲まれることが予測される。

## 引用文献

- Aniya, M., 1988. Glacier inventory for the Northern Patagonia Icefield, Chile, and variations 1944/45 to 1985/86. *Arctic and Alpine Research*, **20**: 179-187.
- Aniya, M., 1992: Glacier variation in the Northern Patagonia Icefield, Chile, between 1985/86 and 1990/91. *Bulletin of Glacier Research*, **10**: 83-90.
- Aniya, M. and Enomoto, H., 1986a: Glacier variations and their causes in the Northern Patagonia Icefield, Chile, since 1944. *Arctic and Alpine Research*, **18**: 307-316.

- Aniya, M. and Enomoto, H., 1986b: Recent glacier variations in the Patagonia Northern Icefield. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **7**: 41-56.
- Aniya, M. (1999) Recent glacier variations of the Hielos Patagónicos, South America, and their contribution to sea-level change. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, **31** : 144-152.
- Aniya, M. and Wakao, Y., 1997: Glacier variations of Hielo Patagónico Norte, Chile, between 1944/45 and 1995/96. *Bulletin of Glacier Research*, **15**: 1-8.
- Aniya, M., Park, S., Dhakal, A. S., and Naruse, R. (2000) Variations of some Patagonian glaciers, South America, using RADARSAT and Landsat images. *Science Reports, Institute of Geoscience, University of Tsukuba, Section A*, **21**: 23-38.
- Wada, Y. and Aniya, M., 1995: Glacier variations in the Northern Patagonia Icefield between 1990/91 and 1993/94. *Bulletin of Glacier Research*, **13**: 111-119.



表 1 北パタゴニア氷原の氷河末端変動 1 (後退面積 [km<sup>2</sup>], カッコ内は年平均)

Glacier	Period						
	1945-99	1945-75	1975-86	1986-91	1991-94	1994-96	1996-99
Northern Side							
Grosche	1.04 (0.019)	0.39 (0.013)	0.22 (0.020)	0	0.13 (0.042)	0.28 (0.140)	0.02 (0.007)
Western Side							
Reicher: NE	2.39 (0.047)	0.61 (0.020)	1.18 (0.107)	0.47 (0.094)	0.07 (0.025)	0.05 (0.025)	0.01 (0.003)
: SW	4.29 (0.084)	0.36 (0.012)	0.64 (0.058)	0.94 (0.188)	2.02 (0.673)	0.01 (0.005)	0.32 (0.107)
Gualas: N	1.19 (0.023)	0.13 (0.0004)	0.19 (0.017)	0.14 (0.003)	0.17 (0.056)	0.25 (0.125)	0.31 (0.103)
: S	0.58 (0.011)	0.17 (0.0006)	0.35 (0.032)	0	0.13 (0.043)	#	a0.07 (0.023)
San Rafael	11.14 (0.218)	3.56 (0.119)	4.83 (0.439)	3.60 (0.720)	0.0006	0.01 (0.007)	a0.86 (0.287)
San Quintin	12.45 (0.244)*	7.50 (0.250)	1.20 (0.109)	3.30 (0.660)	0.16 (0.052)	0.29 (0.145)	no data
Benito	1.59 (0.031)*	0.66 (0.022)	0.07 (0.006)	0.58 (0.116)	0.05 (0.016)	0.23 (0.115)	no data
HPN1	3.17 (0.062)*	1.75 (0.058)	0.37 (0.034)	0.91 (0.182)	0.06 (0.019)	0.08 (0.042)	no data
HPN2	2.89 (0.057)*	1.41 (0.042)	??	1.45 (0.290)	no data	0.03 (0.016)	no data
HPN3	1.47 (0.032)**	0.22 (0.0007)	0.41 (0.037)	0.84 (0.168)	no data	no data	no data
Southern Side							
Steffen	7.45 (0.146)	2.42 (0.081)	0.39 (0.035)	0.88 (0.176)†	uncertain	1.37 (0.274)***	2.39 (0.797)
Eastern Side							
Piscis	0.52 (0.010)	0.49 (0.016)	0.02 (0.002)	0	0.01 (0.003)	a0.01 (-0.005)	0.01 (0.003)
Parced Sur	1.69 (0.033)	1.42 (0.047)	0.27 (0.025)	0	0	0	0
Parced Norte	1.32 (0.026)	0.97 (0.032)	0.04 (0.004)	0.27 (0.054)	0.007 (0.002)	0.003 (0.001)	0.03 (0.01)
Arco	0.48 (0.009)	??	??	??	??	0.48 (0.240)##	0
Colonia	1.81 (0.034)	0.97 (0.032)	0.12 (0.011)	0.39 (0.078)	0.09 (0.030)	0.08 (0.040)	0.16 (0.503)
Cachet	4.25 (0.079)	2.68 (0.089)	0.44 (0.040)	0.64 (0.128)	0.20 (0.066)	0.05 (0.023)	0.24 (0.08)
Nef	5.17 (0.096)	1.46 (0.049)	1.12 (0.102)	0.56 (0.112)	0.45 (0.149)	0.65 (0.325)	0.93 (0.31)
Soler	1.50 (0.029)	0.38 (0.013)	0.16 (0.015)	0.43 (0.086)	0.16 (0.054)	0	0.37 (0.123)
Leon	0.34 (0.007)	0.02 (0.00007)	0.19 (0.017)	0.19 (0.038)	uncertain	a0.06 (-0.012)***	0
Fiero	0.41 (0.008)	0.15 (0.0005)	0	0.12 (0.024)	uncertain	0.12 (0.024)***	0.02 (0.007)
Exploradores	0.81 (0.016)	0.16 (0.0005)	0.65 (0.059)	0	0	0	0
Total	46.36 (0.048)###	27.88 (0.040)	12.86 (0.051)	15.71 (0.137)	3.71 (0.069)	3.91 (0.109)	3.88 (0.216)

Data for 1945-1996: modified after Aniya and Wakao (1997). Colonia slightly modified for 1986-91 and 1991-94, and Cachet for 1991-94.

#: combined.      ##: active front was newly inferred, reflecting the recession since 1945.  
 ###: excluding those glaciers with \* and \*\*.  
 \*: for 1945-96.      \*\*: for 1945-91.      \*\*\*: for 1991-96.  
 a: advance.

表2 北パタゴニア氷原の水河末端変動2 (後退距離 [km], カッコ内は年平均)

Glacier	Period						
	1945-99*	1945-75	1975-86	1986-91	1991-94	1994-96	1996-99
<b>Northern Side</b>							
Grosse	900	500 (17)	250 (23)	No substantial change, but thinning 70 (23)	90 (30)	ca. 180 (90)	no substantial change
<b>Western Side</b>							
Reicher: NE	2700	0	2150 (195)	300-500 (60-100)	3550 (1183), due to	60 (20) part	0
: SW	4460	but narrowed by 200 (7)	280 (25)	and snout narrowed by 300 (60)	snout disintegration	no substantial change	180 (60)
Gualas: N	1080	100 (3)	250 (23)	100-150 (20-30)	200 (67)	ca. 100 (50)	280 (73) (uncertain)
: S	420	250 (8)	350 (32)	no substantial change	100 (33)	ca. 70 (35) part	a310 (103) part (uncertain)
San Rafael	ca. 3600	400-900 (13-30)	2200 (200)	900-1500 (190-300)	60 (20), left (small part)	no substantial change	a320 (107)
San Quintin: front	ca. 500	200 (7)	300 (27) small part, and considerable thinning	200-400 (40-80), and considerable thinning	a50 (a17), right (small part)	no substantial change, but considerable thinning	no data for frontal change (probably no change but thinning)
: N side	ca. 600	400 (13)	0	200 (40)	retreat?	slight retreat?	no data (probably slight retreat?)
: S side	ca. 1400	1000 (33)	no substantial change	300 (60)	190 (63) small part	ca. 300 (15) small part	slight retreat
Benito	840 (for 45-96)	550 (17) left; 0 right	0, left; 200 (18) right	450 (90)	160 (53) tip of snout	105 (53)	no data
HPN1	2300 (for 45-96)	1400 (47)	300 (27)	600-1200 (120-240)	50 (17) left; right side, slightly lowered	40 (20)	no data
HPN2	2400 (for 45-96)	1000 (33)	slight retreat	1250 (2500)	no data	60 (30) tip of snout	no data
HPN3	1650 (for 45-91)	600 (20) left; 0 right	100 (9) left; 850 (27) right	750-950 (150-190)	no data	no data	no data
<b>Southern Side</b>							
Steffen: front	3400	900 (30)	250 (23)	350 (70)	no data	ca. 1000 (200) for 91-96	ca. 1600 (533)
: E side	1000	500 (17)	300 (27)	400 (80)	180 (60)	no substantial change	no substantial change
<b>Eastern Side</b>							
Piscis	850	760 (25)	100 (9)	no substantial change	40 (13)	a30 (15) right side	30 (10) right side
Parcd Sur	1250	1000 (33)	250 (23)	no substantial change	no substantial change	no substantial change	no substantial change
Parcd Norte	1800	1300 (43)	slight retreat	400 (80)	20 (7)	35 (17) left side	50 (17) left side
Arco	1430	no substantial change	no substantial change	no substantial change	no substantial change	1430#	no substantial change
Colonia	1000	500 (17)	200 (18)	330 (66)	no substantial change	no substantial change	70 (23)
Cachet	3500	2000 (67)	250-750 (27-83)	400-950 (80-190)	90-350 (30-117)	70 (35) tip of snout	ca. 220 (73) debris-free part
Nef	3700	0, but narrowed by 400-700 (13-23)	350 (32), and narrowed by 300-600 (27-55)	no substantial frontal change, but narrowed by ca. 600 (120) and calving front is breaking away	30 (10), and narrowed by 40-350 (13-117)	2570 (1285), due to snout disintegration	890 (297)
Soler	ca. 600	80-300 (3-10)	60-160 (5-15)	130-240 (26-48)	20-180 (7-60)	no substantial change	ca. 50 (17)
Leon	ca. 200	100 (3)	200 (18)	120-200 (24-40)	no data	a140 (70) part for 91-96	0
Fiero	670	300 (10)	0	200 (40)	no data	ca. 180 (90) for 91-96	50 (17) tip of snout
Exploradores	ca. 550	200 (7) apparent	350 (32) apparent	no substantial frontal change, but considerable thinning	no substantial change, but thinning	no substantial change, but thinning	no substantial change, but thinning
	?	0, real?	150 (14), real?				

Data for 1945-1996: modified after Aniya and Wakao (1997). Colonia slightly modified for 1986-91 and 1991-94.

\*: does not necessarily agree with the sum of each period, because the fluctuated part may be different for different period.

#: active front was newly inferred, reflecting the recession since 1945.

a: advance.

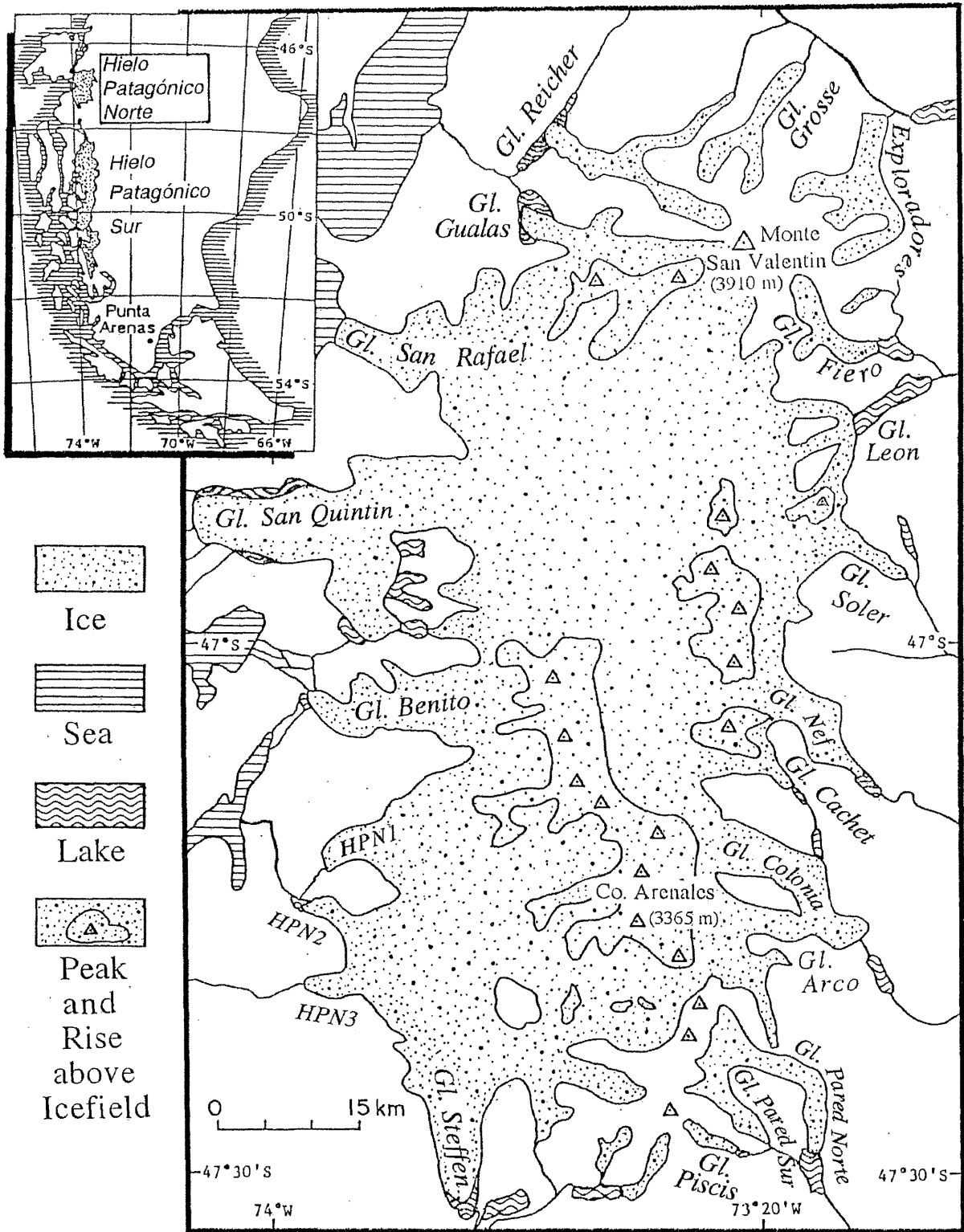


図1 北パタゴニア氷原の溢流氷河

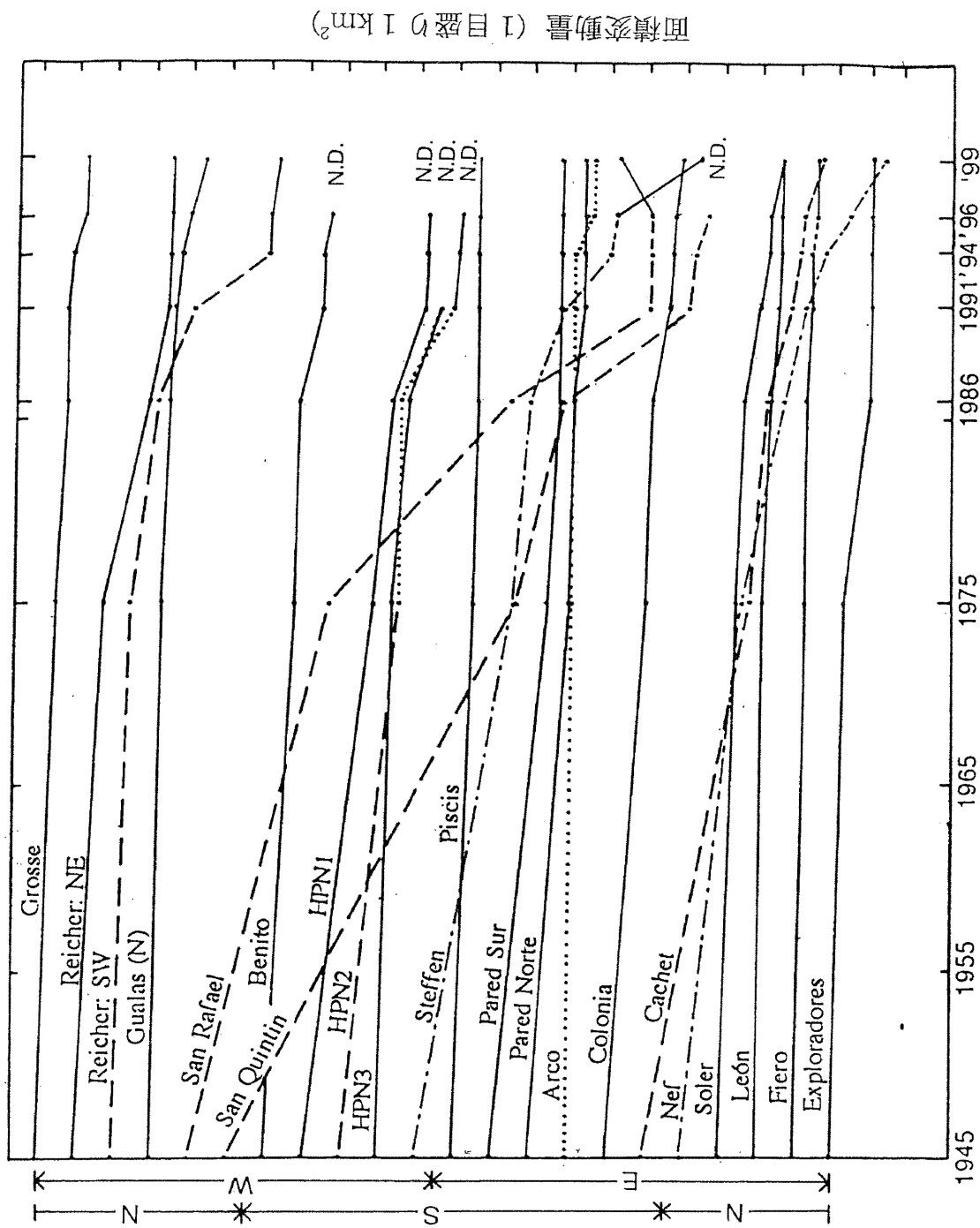


図2 北パタゴニア氷原の溢流水河の経年変動 (データの出典等については表1を参照)。  
 Y軸左は氷原での氷河の位置 (南北、東西) を、Y軸右は氷河末端面積変動量を示す。  
 N.D. - no data.

# 北パタゴニア氷原の空撮

安仁屋政武

筑波大学地球科学系

## はじめに

南米の南端に位置するパタゴニア氷原は北パタゴニア氷原（面積 4200 km<sup>2</sup>）、と南パタゴニア氷原（面積 13000 km<sup>2</sup>）、からなる世界でも有数の規模を持つ氷体である（Aniya, 1988; Aniya *et al.*, 1996）。氷河は気温と降水量によってその存在および前進・後退といった変動が決まるので、氷河の消長はその地域の気候変動の指標の一つとなる。パタゴニア氷原は、特に陸地の少ない南半球にあっては、南極大陸に次ぐ規模で、温暖氷河としては最大である。従って、その氷河の変動をモニターすることは、世界規模の環境変動を把握し、理解することに欠かすことのできない研究である。

北パタゴニア氷原は南北約 100 km、幅約 40 km、溢流水河の数が 28（Aniya, 1988）で、小型機による空撮に適した規模である（図 1）。そのため 1983 年以来、筆者は手持ちカメラによるソレール氷河の（準）垂直写真（1984, 1986）、および溢流水河末端の斜め写真（1983, 1984, 1990, 1993, 1995, 1998）空撮を行ってきた。ソレール氷河では 1983 年および 1985 年に現地観測を行っており、このデータと垂直写真のモザイク（Aniya, 1985, 1987）から氷河の表面の研究（Aniya and Naruse, 1985, 1986, 1987）さらに氷河流動速度の推定（Aniya *et al.*, 1988）を行った。一方、斜め空中写真と他のリモートセンシング・データ（航測カメラによる垂直・斜め空中写真、衛星画像など）と組み合わせることによって、28 のうち 22 の溢流水河の 1945 年から 1995 年までの変動を明らかにしてきた（Aniya and Enomoto, 1986a, 1986b; Aniya, 1988, 1992; Wada and Aniya, 1995; Aniya and Wakao, 1998）。

今回のプロジェクトでは、手持ちカメラにより 1998 年 11 月に氷原周回飛行による氷河末端の斜め空中写真撮影、1999 年 11 月に同じく氷河末端の斜め空中写真撮影、およびソレール氷河とその周辺の谷の（準）垂直空中写真を撮影した。ここでは撮影について報告する。今回ソレール河谷で実体視の可能な垂直写真を撮影したのは、1998 年 11 月にここの地形を調査していくつかのモレ

インを認めたが、その分布を判読したり、形状を地図に落とすためである。地形調査と環境変動（氷期の問題）に関しては別に報告する。

## 斜め空中写真

(1) 1998年11月30日

ソレール河谷とソレール氷河で3週間現地調査を行い、コジャイケ(Coyhaique)の町に戻り4日間天気待ちをした11月30日に斜め空中写真の空撮を行った。当日の朝、コジャイケの町は快晴であったが、風が吹いていた。ドン・カルロス空輸(Don Carlos Transportes Aereos)のパイロット、ロベルト・レオンは、風があるので北氷原には雲があるかもしれない、と天候の予測をした。使用した航空機はBeechcraft Baron twin engineでカメラはPentax LX、レンズは28-200mmのズームである。使用したフィルムはコダック・エクタクロームDyna 400、リバーサルである。1995年まではASA64または100を使っていたが、天候が悪いときはシャッター速度が遅く、シャープな写真が撮れなかったことと、ASA400の画質が良くなりASA100とほとんど変わらなくなったことから、今回はASA400を全面的に使用した。結果的には氷原の西側の天気が悪く、ASA400のフィルムでなかったら、いくつかの氷河の写真は撮れていなかった。飛行高度15000mから2000mで巡航速度150ノット前後である。撮影した時刻は10時から2時前の太陽高度が一番高い時であった。他に2人が同乗した。今までは助手席に座っていたが、今回はパイロットの、同じ側に座った方が飛行機をターゲットにもって行きやすい、という提案でパイロットのすぐ後ろの座席に初めて座った。真っ正面の対象は撮影できないが、必要に応じて右側にも移動できるので、結果的には撮影範囲が広がった。

1992年に大爆発をしたハドソン火山と火山灰に覆われてうす黒くなっているウエムル氷河(GlaciAr Huemul)を右手に見て、北から氷原へアプローチした。パタゴニアの最高峰のヴァレンティン山(Monte San Valentin, 3910m)の北壁を正面に見ながらエクスプロアドーレス氷河(GlaciAr Exploradores), グロッセ氷河(GlaciAr Grosse)を最初に撮影して氷原の西側へ回り込んだ。回り込むあたりから雲が出だし、パイロットの予想通りエレファンテス水道(Golfo Elefantos)の海の上はどんよりと曇っていた。雲底は2000mぐらいであったが、

暗くガスがかかっている対象物のコントラストは低く、写真撮影には悪条件であった。特にサン・ラファエル氷河 (Glaciar San Rafael) の前面のラグーナ・サン・ラファエル (Laguna San Rafael) は視程が悪く、サン・ラファエル氷河の末端のはっきりした写真は撮れなかった。その南のサン・キンティン氷河 (Glaciar San Quintin) は視程が悪く、北側の氷縁湖のフロントは撮影できず、離れて飛行したので南側の写真は低角度の斜め写真となった。さらに、南下するに従い雲底は低くなり、岸壁の尾根、鞍部等が雲に隠れてしまい、氷原から出ている溢流氷河の谷へ入るのが危険になった。その結果、ベニート氷河 (Glaciar Benito)、HPN1, HPN2, HPN3 の氷河の撮影はできなかった。南端のシュテフェン氷河 (Glaciar Steffen) も条件は悪かった。雲底は 1500~1600 m で、やはり視程が悪く、コントラストも低いのではっきりした写真は撮影できなかった。ベニート氷河からシュテフェン氷河にかけては、他の地域の天気がよくても、天候が悪い時が経験的に多い。この日は、東側へ回り込んでも風が強く、雲はなかったものの、航空機はかなり揺れた。東側は北上するのでピスシス (Piscis)、パレド・スール (Pared Sur)、パレド・ノルテ (Pared Norte)、コロニア (Colonia)、アルコ (Arco)、カシエット (Cachet)、ネフ (Nef)、ソレール (Soler)、レオン (León)、フィエロ (Fiero) 氷河の順で撮影した。このように、今回は、氷原の西側は雲と風のため溢流氷河の谷深く入ることができなかったため、末端はかなり低角度の斜め空中写真になった。東側は晴れてはいたものの風が強かったので岸壁近くは飛ばず、思うような角度からの撮影が困難で、前の空撮と同じアングルの撮影ができなかった氷河もあった。

## (2) 1999年11月30日

この年のパタゴニアの天候は悪く 8 日間の天気待ちをした後、前日 (垂直写真撮影) とこの日によく晴れた。この日は前日にも増して良い天気の雲一つない快晴で、奇しくも昨年と同じ 11 月 30 日である。ソレール氷河地域の垂直写真撮影に絶好の天気であったが、もちろんこのような天気予測はパタゴニアでは不可能であるので、前日に priority の高い垂直写真を撮影した (後述)。使用した航空機は Beechcraft Baron twin engine でカメラは Pentax LX, レンズは 28-200 mm のズームである。使用したフィルムはフジ Super G Ace ASA400

のカラープリントである。飛行高度 1200 m から 1800 m で巡航速度 150 ノット前後である。撮影した時刻は 2 時から 6 時前であった。飛行経路は氷原の北に位置するエクプロラドーレス氷河とグロッセ氷河を撮影してから、西側に回り込みレイチェル (Reicher)、グアラス (Gualas)、サン・ラファエル、サン・キンティン、ベニート、HPN1、HPN2、HPN3、そしてシュテフェンを撮り、東側へ回り込んだ。ここから北上してピスシス、パレド・スール、パレド・ノルテ、コロニア、アルコ、カシェット、ネフ、ソレール、レオン、フィエロ氷河を撮影して戻った。このように全ての氷河の写真が撮れたのは 1990 年以降である (しかし、1990 年はカメラの露出計が壊れてしまい、写真自体は露出オーバーでかろうじて研究に使える程度であった)。撮影時刻がパイロットの都合で遅かったため、氷原の東側へ回り込んだ時は、太陽高度がやや低くなり、山は逆光になった。パイロットからこの可能性を指摘されていたが、パイロットの席が左側なので反時計回りだと常に氷河側になり、目標の氷河が撮影しやすいように飛べるからである。以前は助手席から撮影していたが、98 年からはパイロットの後ろに座り撮影するようになった。これはパイロットと私が同じ景色を見るので、飛行経路を指示するのに都合が良いからである。撮影時刻が早ければこの座席配置で反時計回りで空撮するのが一番よい。事実、今回は天候にも恵まれたこともあり、15 年間で一番いい末端の斜め写真が撮影できた。このような天候は 1990 年以降で、雲・雨のないサン・ラファエル氷河も 1990 年以降であった。また、天気が悪く 95 年から撮影できなかった HPN1、HPN2、HPN3 も今回はきれいに撮ることができた。シュテフェン氷河も然りで、今回 1993 年以降のはっきりした写真がとれた。また、パイロットが 1983 年以降一緒に空撮に飛んでいて、撮影対象の氷河についての知識が蓄積していたことも、今回の成功につながった。

### 垂直写真撮影 (1999 年 11 月 29 日)

垂直写真撮影は 11 月 29 日午後 1:37 から 4:45 分の間に行われた。航空機は Piper Seneca twin engine である。助手パイロットの座席の後ろの床に直径 9 cm の穴を開け、そこにカメラをセットして垂直写真を撮影した。使用したカメラはブロニカ SQ-Ai の 6 x 6 版で、レンズは 110 mm である。フィルムはコダック



の EPN220 (ASA100) を使用し、露出を F8-11 に設定して自動シャッターにした。因みにシャッタースピードは 125 から 350 分の 1 秒であった。空撮の場合、航空機のボディで散乱した光も入ってくるので、実際の地面からの光の量より多くなり、すべて自動の場合は暗く写る場合が多い。このため、プロニカのフィルムバックの露出補正を、1.5~2 倍に設定した。その結果、14 本のフィルムの露出はほぼ適性であった。しかし、撮影場所が日本とは全く異なるので、1986 年の経験から現像調整用として 1 本のテストフィルムを撮影した (Aniya, 1987)。現場では予想に反して、積雲が 2500 m 前後にあったため、計画飛行高度 3000 m ではなく、2400 m から 2700 m の間を約 140 ノットで飛行した。そのため、予定していた写真縮尺よりも大きくなり、氷河の一部で欠落が生じた。このような事態に備えて、焦点距離の短いレンズも用意するべきであった。

撮影対象はソレル氷河とその全面に広がるモレイン・フィールド、さらにカチョ川 (Río Cacho) およびソレル川 (Río Soler) の本流、ロメロ川 (Río Romero)、トゥルビオ川 (Río Turbio) の谷である。ネフ氷河 (Glaciar Nef) の脇にある氷縁湖から流出しソレル川の上流に合流している河川、1989 年に氷河湖決壊により大土石流を発生させたラルゴ山湖 (Laguna del Co. Largo) とその東隣にある無名の湖も撮影した (図 2)。これらの場所は 1998 年 11 月に 3 週間現地でモレインの分布等の調査と年代測定の資料採取を行った地域である (この報告書の別稿「ソレル河谷の完新世の環境変動 - 氷期を中心として」の図 3, 4 を参照)。土石流が流れて砂地になった河原を撮影した写真では、周りの植生はほとんど真っ黒に写っていた。このようにコントラストが非常に異なる場所の撮影は自動では不可能で、露出補正も経験を積まなければ難しい。

この日のパイロットはこのような垂直写真撮影は初めてなので、北パタゴニア氷原の氷河撮影ではいつも一緒に飛んでいるロベルト・レオンがナビゲーターとして助手席に座った。しかし、雲と風があったことも影響して思うようなコースには飛べなかった。この結果、図 2 に見るように、飛行コースはかなりジグザグになっており、写真は Drift や Crab を含むものが多く、また傾きが大きなものも多い。しかし、図 3 に示したステレオグラムのように、実体視による判読やモザイク作成など実用には問題ない。実体視により明白なことは、110 mm レンズにはかなりの歪みがあることである。

## 引用文献

- Aniya, M., 1985: Aerial photographic surveys over Soler, Nef and San Rafael Glaciers. In Nakajima, C. (ed.), *Glaciological Studies in Patagonia Northern Icefield, 1983-1984*. Data Center for Glacier Research, Japanese Society of Snow and Ice, 88-93.
- Aniya, M., 1987: Aerial surveys over the Patagonia Icefield. *Bulletin of Glacier Research*, **4**: 157-161.
- Aniya, M., 1988. Glacier inventory for the Northern Patagonia Icefield, Chile, and variations 1944/45 to 1985/86. *Arctic and Alpine Research*, **20**: 179-187.
- Aniya, M., 1992: Glacier variation in the Northern Patagonia Icefield, Chile, between 1985/86 and 1990/91. *Bulletin of Glacier Research*, **10**: 83-90.
- Aniya, M. and Naruse, R., 1985: Structure and morphology of Soler Glacier. In C. Nakajima (ed.), *Glaciological Studies in Patagonia Northern Icefield, 1983-1984*. Data Center for Glacier Research, Japanese Society of Snow and Ice, 70-79.
- Aniya, M. and Enomoto, H., 1986a: Glacier variations and their causes in the Northern Patagonia Icefield, Chile, since 1944. *Arctic and Alpine Research*, **18**: 307-316.
- Aniya, M. and Enomoto, H., 1986b: Recent glacier variations in the Patagonia Northern Icefield. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **7**: 41-56.
- Aniya, M. and Naruse, R., 1986: Mapping structure and morphology of Soler Glacier, in Northern Patagonia, Chile, using near-vertical, aerial photographs, taken with a non-metric, 6x6 cm-format camera. *Annals of Glaciology*, **8**: 8-10.
- Aniya, M. and Naruse, R., 1987: Structural and morphological characteristics of Soler Glacier, Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, **4**: 69-77.
- Aniya, M., Casassa, G., and Naruse, R., 1988: Morphology, surface characteristics, and flow velocity of Soler Glacier, Patagonia. *Arctic and Alpine Research*, **20**: 414-421.
- Aniya, M., Sato, H., Naruse, R., Skvarca, P., and Casassa, G., 1996: Remote sensing application to inventorying glaciers in a large, remote area - Southern Patagonia Icefield. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **62**: 1361-1369.
- Aniya, M. and Wakao, Y., 1997: Glacier variations of Hielo Patagónico Norte, Chile, between 1944/45 and 1995/96. *Bulletin of Glacier Research*, **15**: 1-8.
- Wada, Y. and Aniya, M., 1995: Glacier variations in the Northern Patagonia Icefield between 1990/91 and 1993/94. *Bulletin of Glacier Research*, **13**: 111-119.

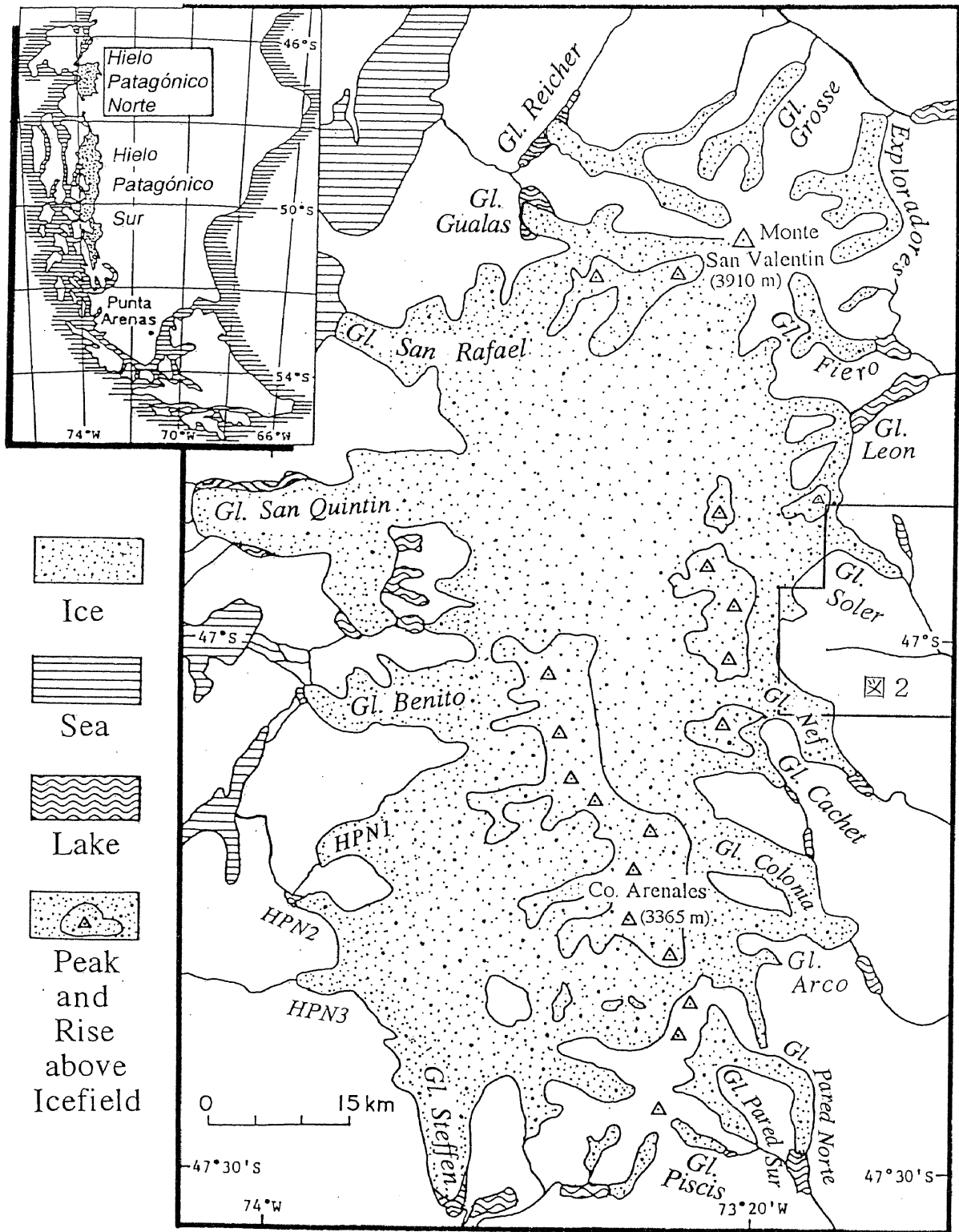


図1 北パタゴニア氷原。 図2の範囲を示す。

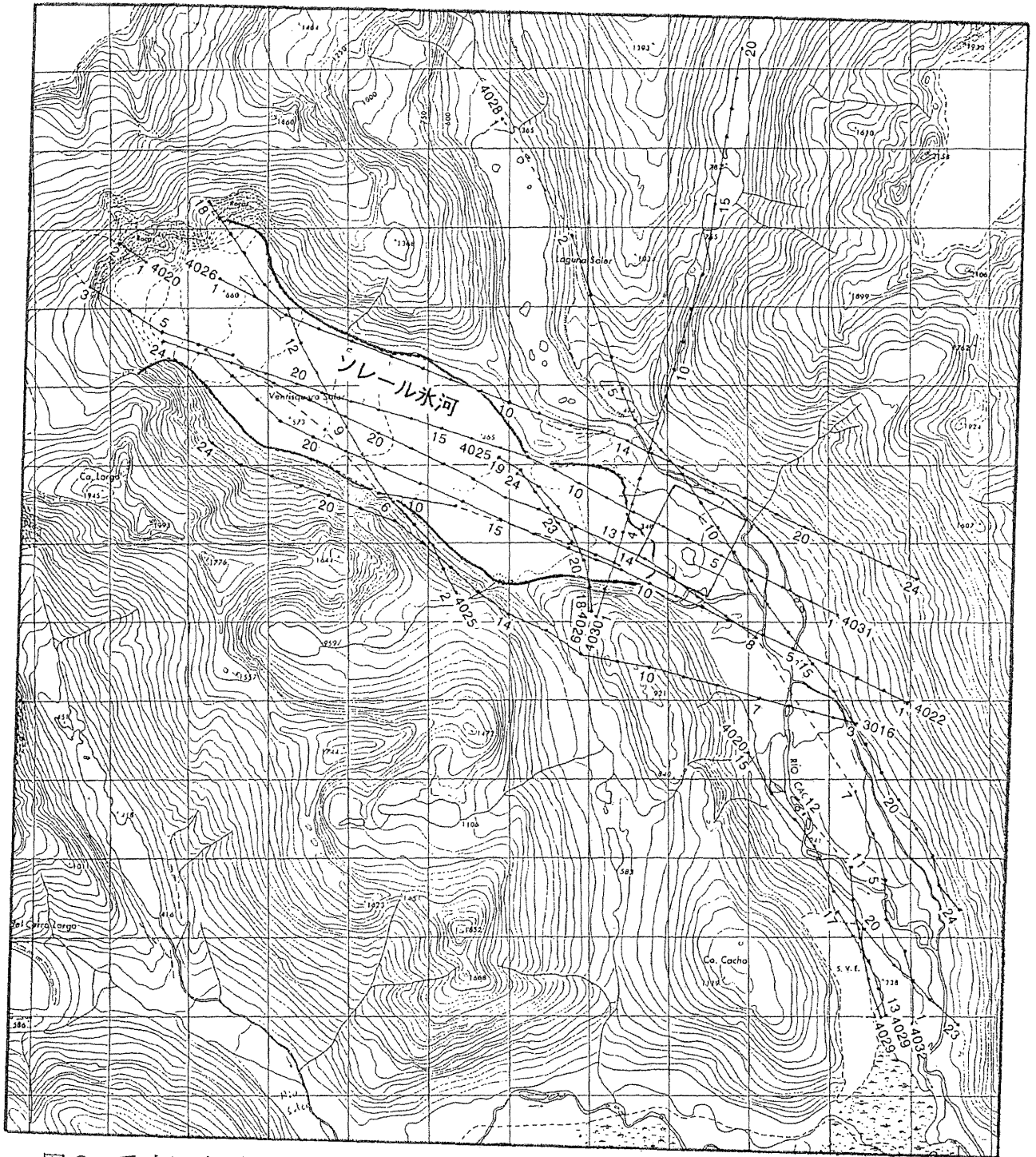
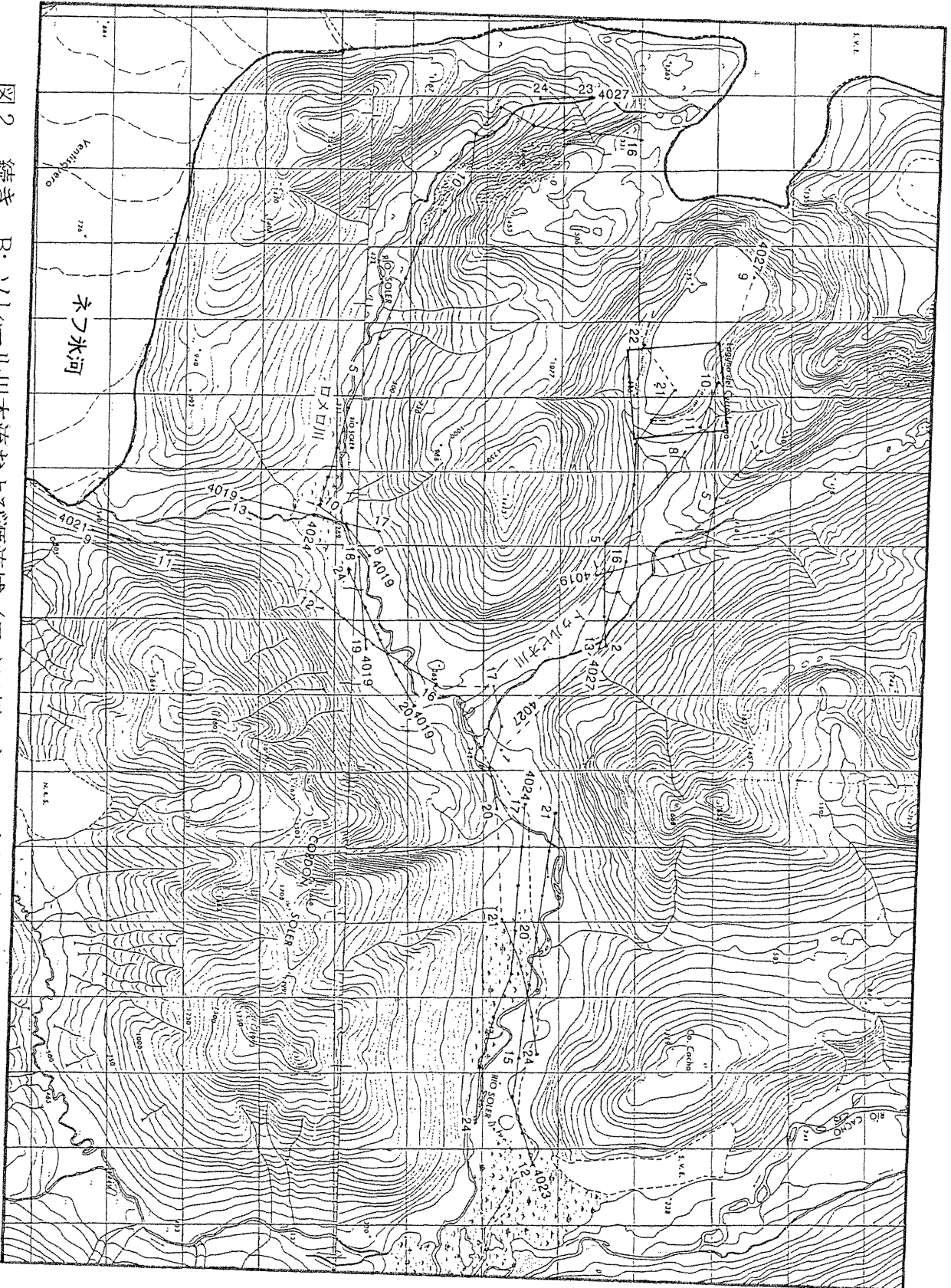


図2 垂直写真標定図. A: ソレル氷河とカチョ谷. 1グリッドは1 km.  
 フィルムのロール番号で示す. 四角の枠は一枚の写真の範囲.  
 ----- は写真が連続していないことを示す.

図2 続き. B: ソレール川本流および源流域 (ロマロ川、トサルピオ川) . 1グリッドは1 km.



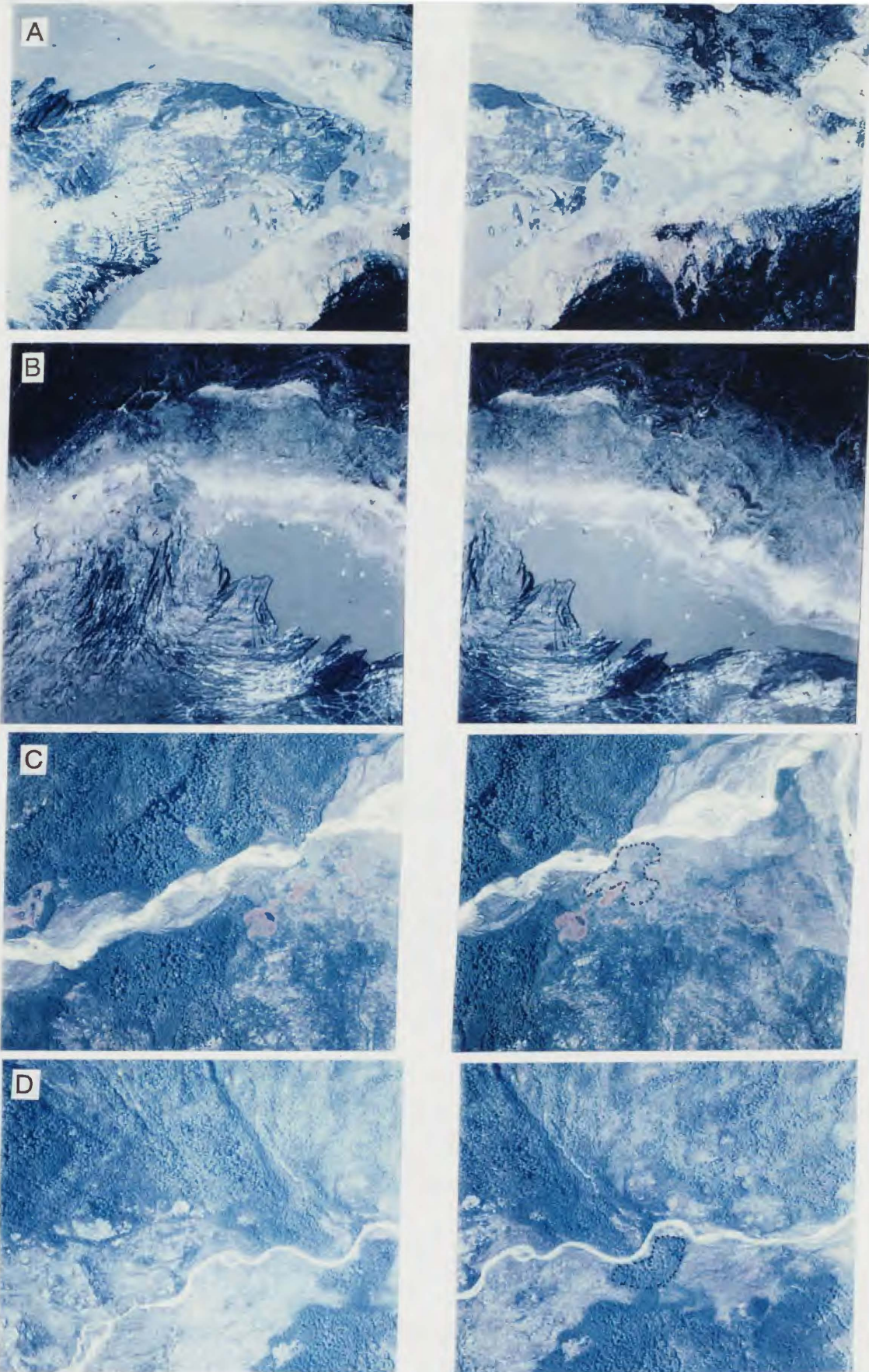


図3 ステレオグラム. A: ソレール氷河末端、辛うじて末端とモレインが繋がっている.  
 B: 末端左側の氷縁湖. C, D: ロメロ川のモレイン (資料98111601 (C), 98111602 (D) 採  
 集地点 - 「ソレール河谷の完新世の環境変動 - 氷期を中心として」の図4を参照) .

# パタゴニア・ソレール氷河の表面プロファイルの測量

成瀬 廉二（北大低温科学研究所）

## 1. ソレール氷河の動力学的調査の概要

パタゴニア北氷原から東側へ溢流するソレール氷河の消耗域（標高 350-600 m）において、1998年11月9日から12月11日にかけて氷河の動力学的調査を実施した。調査メンバーは、成瀬廉二（北大低温科学研究所：前半リーダー）、和泉薫（新潟大学積雪地域災害研究センター：後半リーダー）、山口悟、松元高峰、大野浩（以上、北大低温科学研究所）であった。調査活動の概要は、表「ソレール氷河調査行動表」にまとめた。

調査・観測項目は次の通りである。

- 1) 氷河表面プロファイル測量
- 2) 氷河流動速度の測定
- 3) 氷河の歪速度の測定
- 4) 氷河融解量分布測定
- 5) 気象および熱収支観測
- 6) 流出河川の水文学的観測
- 7) 氷雪崩の観測

本報告書では、次章以下にこれらの項目毎に調査・観測の目的、方法、結果の概要と、一部の項目は考察を含めて述べる。なお、「融解量分布測定」は「気象および熱収支観測」に含め、「歪速度の測定」の次に「氷河モデルの考察」を載せる。多くの調査項目は複数名の共同研究であるが、本報告書では題目の後に主担当者の名前のみ記す。

## 2. 氷河プロファイル測量の目的

ソレール氷河消耗域の中央線に沿う約4km区間の表面プロファイルが、1983年12月および1985年11月に測距測角法により測定されている（写真参照）。これと同じ区間の表面高度を測量することにより、この期間の表面高度変化、すなわち氷厚変化を求める。このデータは、氷河末端変動、面積変動に加えて、氷河の質量変動を考察する際に重要な情報となる。

## 3. 測量方法

1998年11月18日、ソレール氷河消耗域左岸の測量基点 $\alpha$ （「流動速度」の報告の図1参照）に光波測距儀（Guppy）を設置し、氷河消耗域の中央線に沿う移動班は測距儀の反射プリズムを携行する。氷河末端から、Y1, Y2, …… Y7まで、数十m毎に氷河表面にプリズムを置き、基点 $\alpha$ との斜距離と高度角を測定するとともに、基点 $\alpha$ から視準した氷河右岸目標点とプリズム間の挟角を測定する。この測量により、基点を基準にし

た氷河表面の三次元座標が得られる。

なお本測量法では、前回（1983年、1985年）と全く同一地点にて高度を測定することは不可能に近いが、水平位置のずれによる高度の差は、測定結果の氷厚変化値の観測誤差の主な成分となる。

#### 4. 測量結果

測距測角法による氷河表面高度と、Y1, Y2, …… Y7におけるGPS干渉測位の結果「流動速度」の報告参照）とを合成して得られた氷河表面プロファイルを図に示す。また、図には1983年および1985年に測距測角法により得られた縦断面プロファイルも示す。

1998年のプロファイルは1985年に比べて、ほぼ一様に40mから45m程度低下したことが明らかとなった。高度の誤差はおおよそ±5mと考えられる。平均高度低下(氷厚減少)として、1983-85年は $9.9\text{m} \pm 3\text{m}$  ( $5.2 \pm 1.5 \text{ m/yr}$ )、1985-98年は $42\text{m} \pm 5\text{m}$  ( $3.2 \pm 0.5 \text{ m/yr}$ )の大きな値が得られた。なお最近の13年間で氷河末端は200～500m ( $15 \sim 38 \text{ m/yr}$ )後退し、末端には小さな湖が形成された（写真参照）。

#### 5. 考察

氷河上の各地点にて成り立つ連続の式を、calving（冰山産出）による消耗が融解に比べて十分少ないと仮定できる場合は、全消耗域にわたり積分して  $Q + b \cdot S = (\partial h / \partial t) \cdot S$  が得られる。ここで、 $Q$  は涵養域から氷瀑や氷雪崩を経て消耗域へ供給される氷流量、 $S$  は消耗域面積、 $b$  は消耗域の平均表面質量収支(負)、 $\partial h / \partial t$  は消耗域の平均氷厚変化率を表す。

ソレール氷河では過去15年間 $\partial h / \partial t$ が大きく負なので、 $Q < -b \cdot S$ 、すなわち近年涵養域からの氷供給量が減少したか、又は(および)消耗量が増加したことを示す。現場観察によると、1998年の氷瀑には基盤岩が多く露出し、氷瀑の幅と氷厚（従って $Q$ ）が減少したことは間違いない（写真参照）。 $b$  は観測期間内の気候に直接支配されるが、 $Q$  は過去の気候変遷を積分した効果を示す。天見（未発表）のソレール氷河を想定した数値実験によると、気温が $1^\circ\text{C}$ 上昇した場合新たな氷河の定常形へ達するまでには50-100年、年降水量が1m減少した場合は100-200年を要する。この様に、温暖氷河の氷厚変動現象は、100年前後の近年と10年前後の現在の気候を複合して反映している。



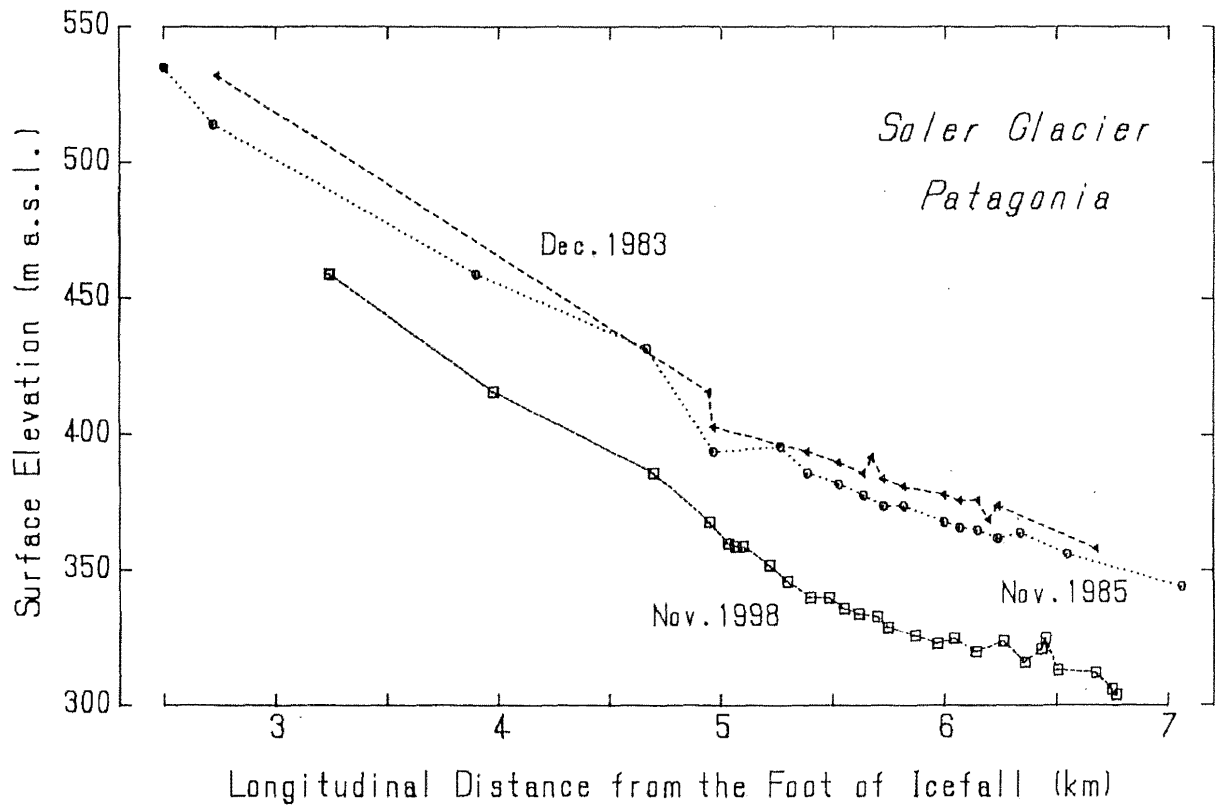


図. ソレール氷河消耗域の縦断面プロファイル  
(上から1983年12月、1985年11月、1998年11月)



写真．ソレール氷河（上：1985年10月、下：1998年11月）  
撮影地点が異なることに注意。

# パタゴニア・ソレール氷河における流動観測結果

山口 悟

北海道大学大学院地球環境科学研究科博士課程

## 1. 始めに

南米・パタゴニアに分布している氷河は、気候変動に対する応答が速いとされている温暖氷河である。それに加えて、この地域は大陸の少ない南半球に分布していること、涵養域である氷原が世界でも有数の規模であることなどから世界的な氷河変動の傾向をみる上で非常に重要な地域である。しかしながら1年を通して天候が悪い、氷河までのアクセス等の問題により継続的に観測が行われているものは少ない。

## 2. 観測地域

観測対象としたソレール氷河は、北パタゴニア氷原から溢流している氷河の一つであり  $46^{\circ} 56' S, 73^{\circ} 11' W$  に位置する (図 1)。全流域面積は  $50.9 \text{ km}^2$ 、氷河の全長は  $16.6 \text{ km}$  で標高  $3000 \text{ m}$  から  $350 \text{ m}$  に存在する (Aniya and Naruse, 1999)。消耗域は、Ice field より氷が供給される部分 (表面が debris に覆われていない部分) と Cerro Hyades ( $3078 \text{ m}$ ) からの雪崩によって氷が供給される部分 (表面が debris によって覆われている部分) とに分けられる (Aniya *et al.*, 1988)。

## 3. 観測方法

流動速度観測期間は、1998年11月15日から12月10日までの約1ヶ月である。観測はGPS (Global Positioning System) を用い “high-speed statics” と呼ばれる方法で行った。今回用いたGPS というものは従来から使われている方法に比べて天候に左右されずに測定ができるという特徴がある。

氷河上に流線に沿って7点 (Y1、Y2、Y3、Y4、Y5、Y6、Y7) 並びに表面が debris に覆われている1点 (Z2) と比較の為の1点 (X3) の計9点を設置し (図 1)、2日～4日おきにGPS を用いて測量を行った。その結果より各地点の日平均流動速度を計算した。

## 4. 観測結果

### 4.1 長期流動観測結果

各地点の観測期間の日平均流動速度をベクトルにしたものを図 2 に載せる。また 1985 年に行われた観測結果との比較を図 3 に示す (Naruse, 1987; Naruse *et al.*, 1992; Aniya and Naruse, 1987; Casassa, 1987)。なお、今回比較を行ったのは流線方向の日平均流動速度 (図 3-a)、ひずみ (図 3-b) 並びに表面高度 profile (図 3-c) である。

図 3-a は今回の流動観測結果が 1985 年と等しい傾向 (末端から上流に向かうにつれて増加する) であることを示している。また、各地点の流動速度を比較するとすべての点で 1985 年に比べて流動速度が速くなっている。それに対し図 3-c が示すように氷厚は 1998 年のほうが薄くなっている。温暖氷河においては、表面流動速度というものは氷内部の塑性変形と氷河底面における底面すべりの和である。氷内部の塑性変形は、氷厚の 4 乗の関数として表すことができる (Paterson, 1994)。従って図 4-c より、氷内部の塑性変形は 1998 年の方が 1985 年に比べて小さかったと推定できる。それにもかかわらず、表面流動速度が 1985 年と比べて 1998 年の方が早いのは、底面すべりの増加によるものであると考えられる。

図 3-b において 1985 年と 1998 年のひずみの大きさは同じオーダーであり、多くの場所で負の値を示している。一般的な氷河の消耗域においては、流れは圧縮流になるためにひずみの符号は負となる。しかしながら今回の観測においては、2500~3000 m の付近と氷河末端付近でひずみは正という結果があられた。2500~3000 m 付近においては、1985 年の観測結果についても同様な傾向が得られた。従ってひずみが正になるのはその周辺の基盤地形の影響によるものであると考えられる。一方 1985 年には末端付近のひずみは負であった。それが今回、なぜ符号が正に変わったのかについてはわからない。

### 4.2 短期流動観測結果

図 4-a、4-b 並びに 4-c は期間中の各地点における日平均流動速度の変化を表している。また図 4-d には日平均流動速度変化に影響を与えると思われる気温並びに降水量を示している。

振幅の大きさは各地点で異なるが、日平均流動速度は2つの大きなピーク（11/18～11/20 並びに 12/1 付近）を持つという点で同じ傾向を示している。観測期間中の気温と流動速度変化との間により相関が見られた。先に述べた2つのピークは共に気温が高い期間（11/18～11/20 並びに 12/1～12/3）と一致している。また、気温が低い期間（11/22～11/23）は、流動速度も減少するという傾向も見られた。

一方、降水量と流動速度変化の間には関係が見られなかった。その理由としては、流動速度の測定間隔が降水の起こっていた期間と比べて長いこと、並びに降水量自体が気温変化に伴う融解量の変化と比べると小さい為影響が現れなかったのではないかと推定される。

底面すべりと氷河底面における水圧との関係がさまざまな氷河において指摘されている（e.g. Boulton and Hindmarsh, 1987; Iken and Bindshadler, 1989; Hook *et al.*, 1989; Jansson, 1995; Iken and Truffer, 1997）。Soler 氷河においては掘削孔などによる氷河底面の水圧の直接観測は行われていない。しかし、氷河底面の水圧と密接な関係にあると思われる“氷河より流れ出す川の水量”と流動速度変化の間に良い相関があるということが Naruse *et al.* (1992) によって指摘されている。

今回の観測においては、掘削孔による氷河底面の水圧の直接測定ならびに氷河より流れ出す川の流量測定は行われていない。そこで、氷河底面の水圧に影響を与えられる表面融解量と流動速度変化との関係を図5に示す。

図5をみればわかるように、各地点において傾きは異なる（0.0105（Y2）～0.0236（Y4））が、融解量と流動速度の間には良い一次の関係が見られる。

ある地点の氷河底面の水圧はその地点の融解量だけではなく上流部の融解量の影響も受けると考えられる。そこで下流の2点（Y2、Y3）において上流部の融解量も考慮した場合を考えてみるとより良い相関が得られた。

これらの結果は、将来氷河モデルに底面すべりをいれる場合に、底面すべりを融解量でパラメータ化できる可能性を示している。

## 5. まとめ

流動観測によって、氷厚が減少しているにもかかわらず1985年よりも1998年のほうが表面流動速度が増加しているということが明らかになった。これは

1985年と比較して底面すべりの量が増加しているためであると推定される。また短期流動速度変化と表面融解量との間には非常に良い相関が見られた。このことは将来氷河モデルを構築する際に、底面すべりを融解量でパラメータ化できる可能性を示している。

## 参考文献

- Aniya, M. and Naruse, R., 1987: Structural and morphological characteristics of Soler Glacier, Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, **4**: 69-77.
- Aniya, M., G. Casassa and Naruse R., 1988: Morphology, surface characteristics, and flow velocity of Soler glacier, Patagonia. *Arctic and Alpine research*, **20** (4): 414-421.
- Aniya M. and Naruse R., 1999: Late-Holocene Glacial Advances at Glaciar Soler, Hielo Patagónico Norte, South America. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **20** (2): 69-83.
- Boulton, G. S. and Hindmarch, R. C. A., 1987: Sediment deformation beneath glaciers : rheology and geological consequences. *Journal of Geophysical Research*, **92** (B9): 9059-9082.
- Casassa, G., 1987: Ice thickness deduced from gravity anomalies on Soler Glacier, Nef Glacier and the Northern Patagonia Icefield. *Bulletin of Glacier Research*, **4**: 43-57.
- Hooke, R. LeB., Calla, P., Holmlund, P., Nilsson, M., and Stroeven, A., 1989: A 3 year record of seasonal variations in surface velocity, Storlaciaren, Sweden. *Journal of Glaciology*, **35** (120): 235-247.
- Iken A. and Truffer M., 1997: The relationship between subglacial water pressure and velocity of Findelenglatscher, Switzerland, during its advance and retreat. *Journal of Glaciology*, **43** (144): 328-338.
- Iken, A. and Bindschadler, R. A., 1989: Combined measurements of subglacial water pressure and surface velocity at Findelengletscher, Switzerland : conclusions about drainage system and sliding mechanism. *Journal of Glaciology*, **32** (110): 101-119.
- Jansson, P., 1995: Water pressure and basal sliding on Storglaciaren, northern Sweden. *Journal of Glaciology*, **41** (138): 232-240.
- Naruse, R., 1987: Characteristics of ice flow of Soler Glacier, Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, **4**: 79-85.
- Naruse, R., Fukami H. and Aniya, M., 1992: Short-term variations in flow velocity of Glacier Soler, Patagonia, Chile. *Journal of Glaciology*, **38** (128): 152-156.
- Paterson, W. S. B., 1994: *The physics of glaciers, 3rd Ed.* Now York: Pergaman. 480 p.

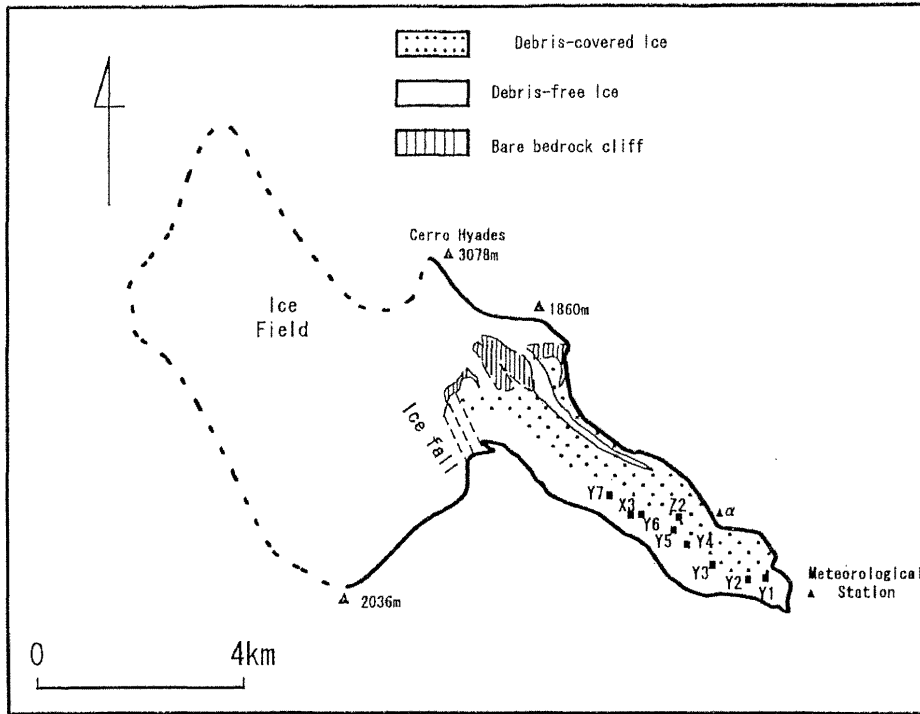


図 1. パタゴニア Soler 氷河における各観測地点

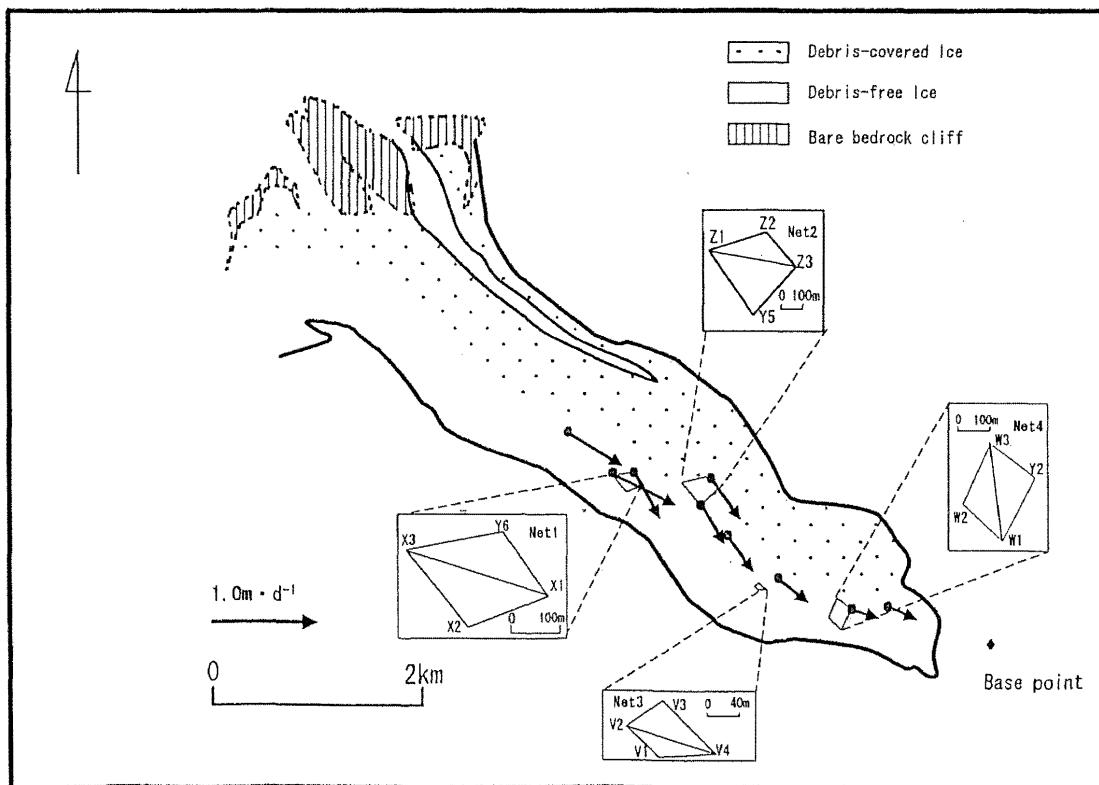


図 2. 流動観測結果ならびに Strain grid の位置

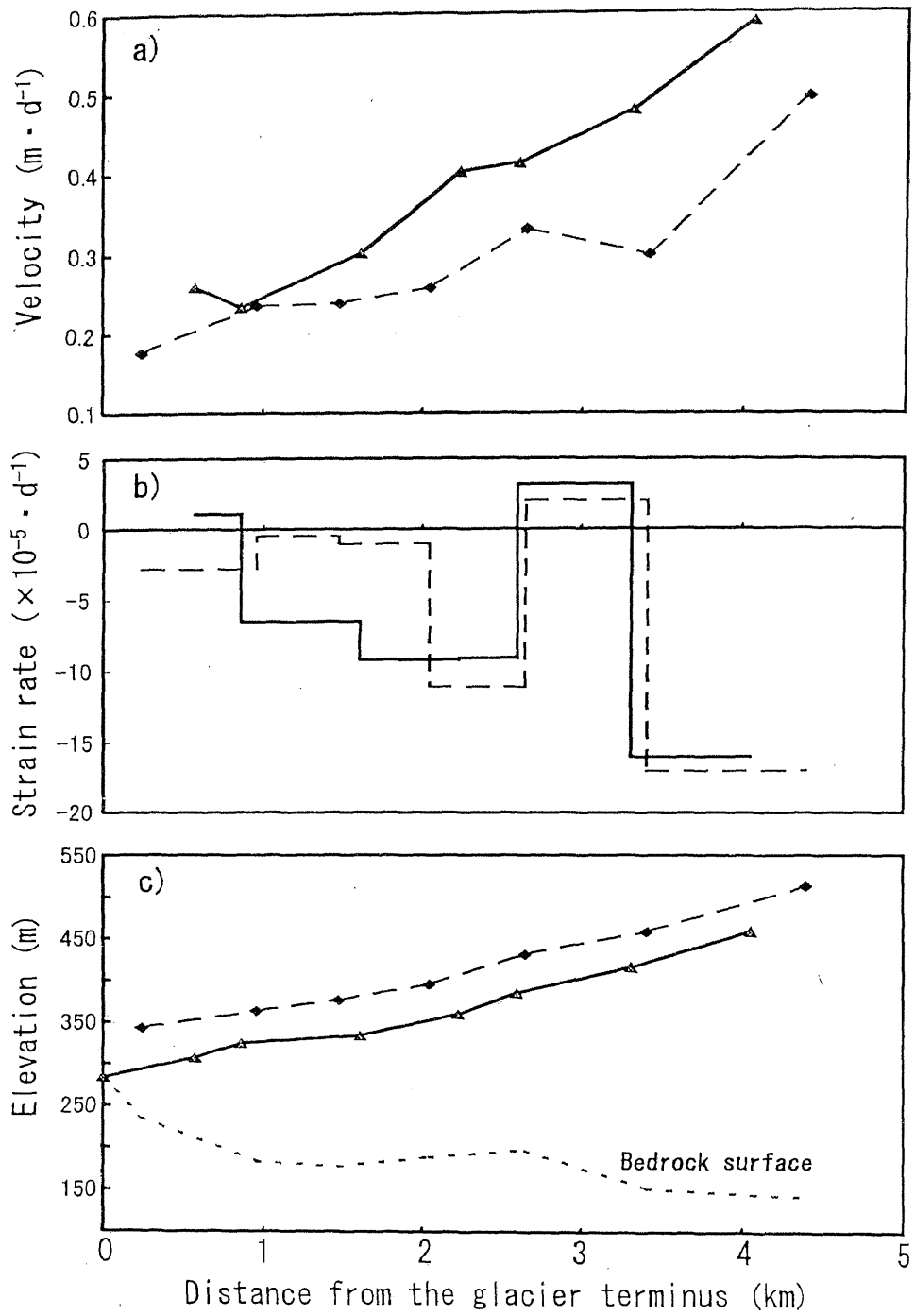


図3 1985年の観測結果との比較

Distance from the glacier terminus は1998年の氷河末端位置からの距離を表す。直線：1998年、破線：1985年

- a) 日平均速度
- b) Strain rate
- c) 表面高度



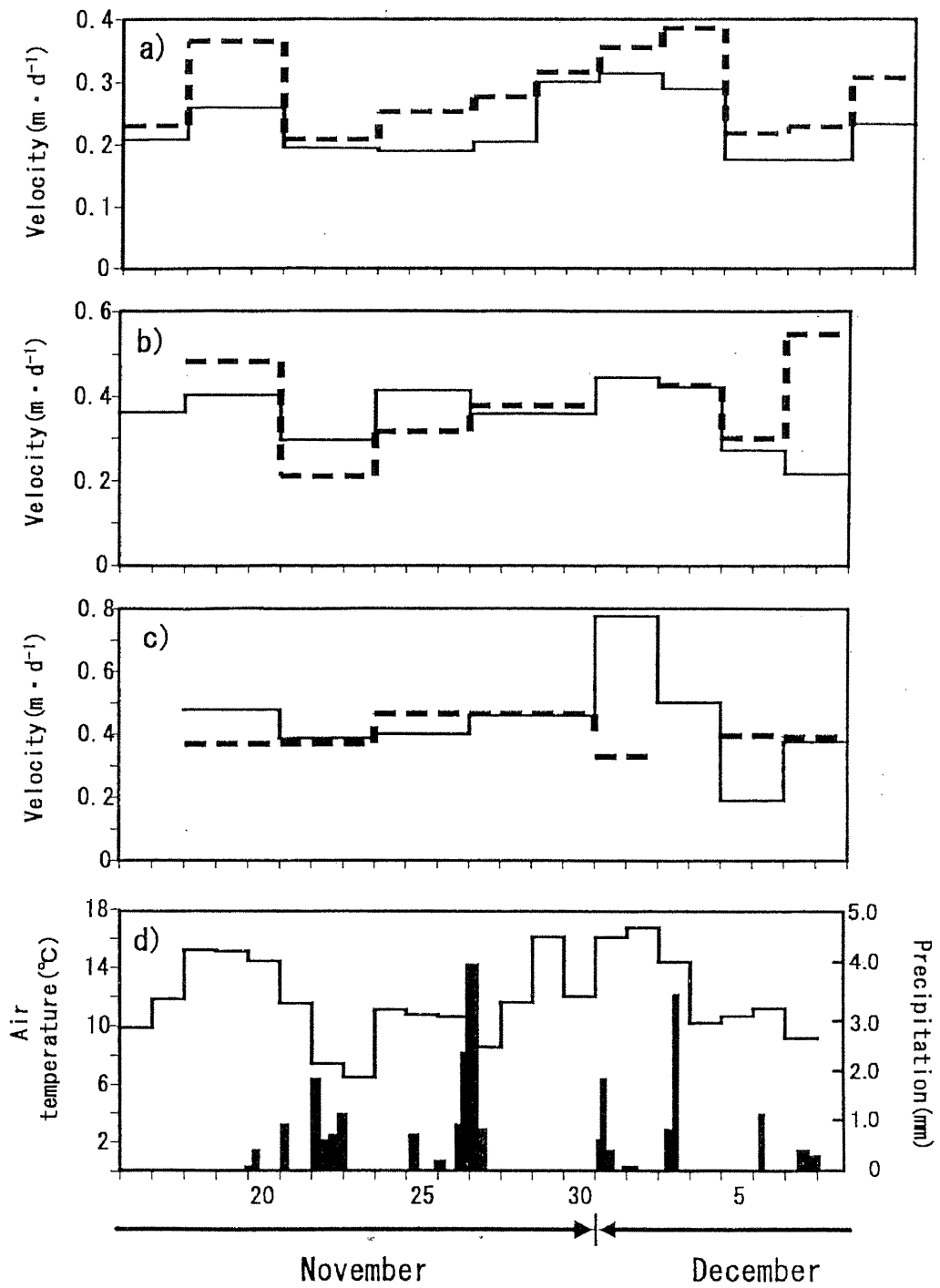


図4 短期流動観測結果並びに気象要素

a) 短期流動観測結果(直線：Y2、破線：Y3)

b) 短期流動観測結果(直線：Y4、破線：Z2)

c) 短期流動観測結果(直線：Y6、破線：X3)

d) 気象条件 (折れ線グラフ：日平均気温、棒グラフ：降水量)

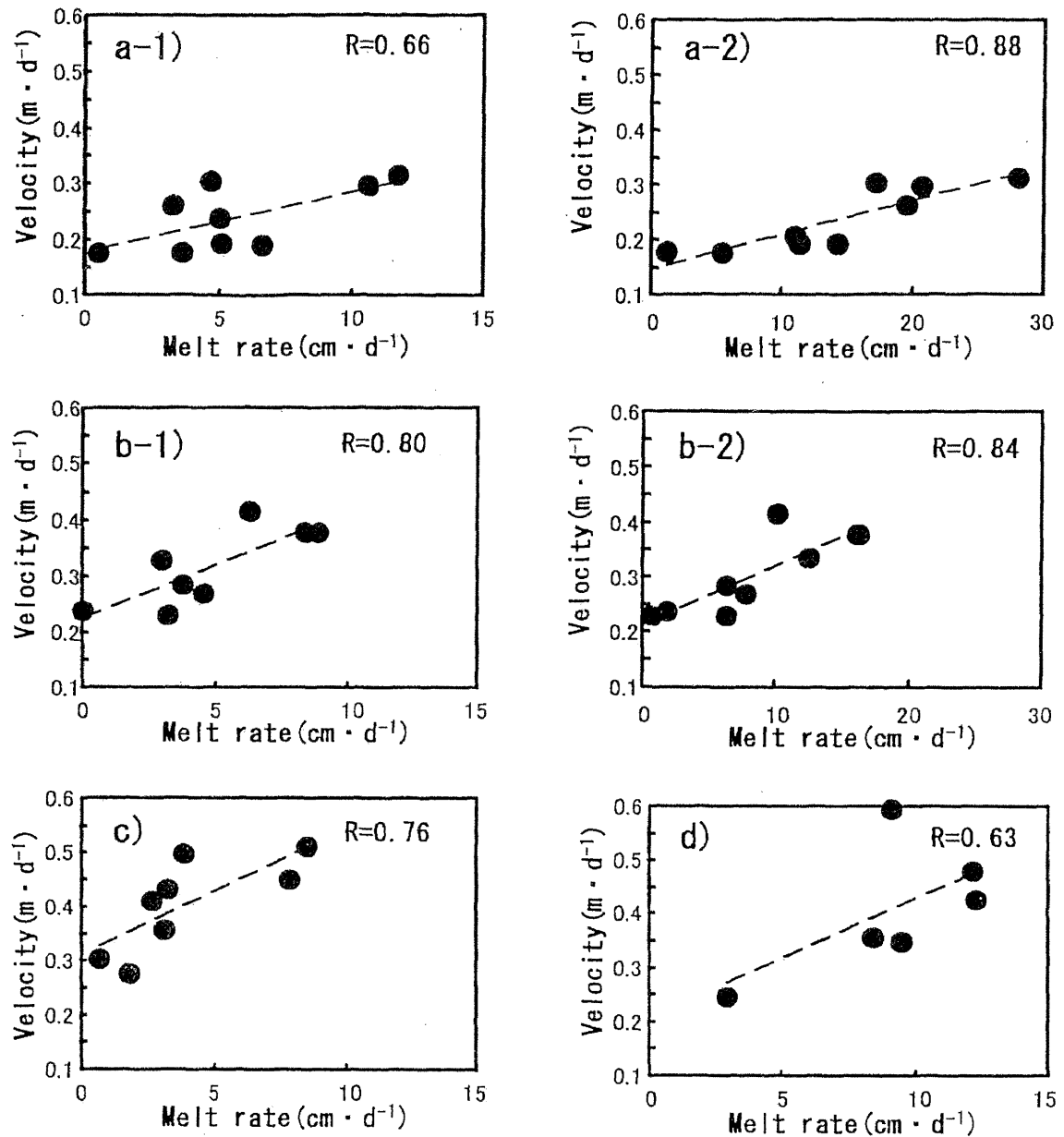


図5 融解量と短期流動速度変化との関係

a-1) Y2における融解量 (Y2の融解量のみ) と短期流動速度変化との関係

a-2) Y2における融解量 (上流: Y3およびY4も考慮) と短期流動速度変化との関係

b-1) Y3における融解量 (Y3の融解量のみ) と短期流動速度変化との関係

b-2) Y3における融解量 (上流: Y4も考慮) と短期流動速度変化との関係

c) Y4における融解量 (Y4の融解量のみ) と短期流動速度変化との関係

d) Z2における融解量 (Z2の融解量のみ) と短期流動速度変化との関係

# パタゴニア・ソレール氷河における歪速度観測結果

山口 悟<sup>1</sup>・大野 浩<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北海道大学大学院地球環境科学研究科博士課程

<sup>2</sup>北海道大学大学院地球環境科学研究科修士課程

## 1. はじめに

パタゴニアの氷河は、涵養域である氷原の大きさが世界でも有数の面積を誇ることに並びに比較的中緯度に近いところに存在することなどから、近年の地球温暖化に対しどのような振る舞いをするかが注目されている。しかしながら天候条件等の問題からなかなか継続的な調査は行われてこなかった。その中で今回調査を行った Soler 氷河は 80 年代から継続的に調査が行われてきた。

氷河の動力学的特性を調べる手段として、一般的には流動観測が行われる。流動観測は氷河全体の動力学的傾向を知るのには有効な手段ではあるが、局所的な力学的場を知るのにはあまり適さない。それに対し歪速度の諸成分は、そのままでは流動速度の絶対値は与えないが、氷河の流動機構に関して非常に多くの情報を提供する。

今回はより細かい力学場を知るために 4 点で歪の観測を行った。

## 2. 観測方法

氷河上に 4 点からなる strain Net (歪格子) を 4 ヶ所 (上流から Net 1、Net 2、Net 3、Net 4) 設置した (図 1)。Net 1 は表面状態の変化がないところ、Net 2 並びに Net 3 はクレバス帯、Net 4 はクレバス帯ではないが表面に起伏が見られる場所をそれぞれ選んだ。

Strain grid の一辺の長さは、Net 3 を除き氷厚と等しいと思われる 100~200 m とした。Net 3 に関しては Strain grid における一辺の長さの影響を比較するために、他より短い一辺の長さを取った。各 Strain grid の長さは光波測距儀を用い、測量間隔 5~8 日間で測定を行った。

### 3. 観測結果

表 1 に各 Net に置ける Strain Net の測定結果を示す。

E1、E2 はそれぞれ最大並びに最小の歪速度（E1 と E2 は理論より直交する）、 $\alpha$  は E1 の方向（主歪の方向）であり、真北から時計回りの角度で示している。Rotation（回転）は、歪の主軸の方向（E1 の方向）が歪前から後への変化するかを示している。Rotation が 0 の時にはこの歪は非回転であるという。

4 点からなる Strain Net において三角形の組は 2 組できるが、今回は流線で 2 つに分かれる三角形の組を用いて歪の計算を行った。その理由は、側岩に近い部分と氷河中央に近い部分における歪の違いを知りたかったためである。

最大歪の大きさは、Net 1、Net 3 並びに Net 4 では 10 の  $-3 \sim 4$  乗であるのに対し、Net 2 においては、10 の  $-1 \sim 0$  乗と 100 倍以上の違いが見られた。これは Net 2 がクレバス帯に設置されたためであると思われる。また rotation も他の Net においてはほとんど無視できるくらい小さいが、Net 2 においては非常に大きい値となっている。なお、同じクレバス帯に位置する Net 3 において rotation が小さいのは、strain grid の一辺の長さが短かったために Net 全体が一つの力学的場内にあったためであると思われる。

Net 内において力学的場が変化しない場合には、2 つの三角形における主歪の方向は一致する。Net 2 並びに Net 3 においては、2 つの三角形における主歪の方向はほぼ等しくなっている。従ってこの 2 つについては、Net 内部における力学的場は場所によってそれほど変化していないと思われる。一方 Net 1 においては、11/16-21 の期間は 2 つの三角形における主歪の方向はほぼ等しいのに対し、11/21-29 の期間に関しては主歪の方向が二つの三角形では 10 度以上の違いが見られる。これに関しては、11/16-21 の期間では  $\Delta X1X3Y6$  は縮む傾向にあったのに対し、11/21-29 の期間では  $\Delta X1X3Y6$  は伸びる傾向というようにその地域の力学的場が観測期間中に変化した影響ではないかと考えられる。Net 1 に関しては、2 回の測定結果において 2 つの三角形における主歪の方向は大きく異なっていた。この原因に関してははっきりしないが、この地域は側岩に近くまた近くに氷河表面が陥没したことによってできた池が存在するなど複雑な力学的場に置かれていると思われる。その影響によるものかも知れない。

#### 4. まとめ

Strain grid の観測を行った結果、場所によって歪の傾向が異なるということがわかった。今後より詳しい解析をするためには、広範囲に Net を展開し観測を行うとともに航空測量の結果と合わせて議論する必要があるであろう。

表 1 Net 1

		E1	E2	$\alpha$ (度)	Rotation (度)
16th to 21st Nov.	$\Delta X1X3Y6$	-8.00E-05	-5.16E-03	119.6	0.0
	$\Delta X1X2X3$	9.70E-04	0.00E+00	121.2	0.0
21st to 29th Nov.	$\Delta X1X3Y6$	1.70E-03	2.40E-04	116.9	0.1
	$\Delta X1X2X3$	4.20E-03	6.00E-04	98.0	-0.1

表 1 Net 2

		E1	E2	$\alpha$ (度)	Rotation (度)
16 to 21 Nov.	$\Delta Z1Z2Z3$	-2.80E-04	-4.33E-03	76.9	0.2
	$\Delta Z1Z3Y5$	2.15E+00	-5.42E-01	72.3	47.5
21 to 29 Nov.	$\Delta Z1Z2Z3$	1.44E-01	-1.72E-01	77.6	-4.0
	$\Delta Z1Z3Y5$	2.11E+00	-5.38E-01	72.1	47.2

表 1 Net 3

		E1	E2	$\alpha$ (度)	Rotation (度)
29 Nov. to 5 Dec.	$\Delta V1V2V4$	5.30E-04	-4.82E-03	89.7	0.5
	$\Delta V2V3V4$	3.60E-04	-5.70E-04	83.4	0.5

表 1 Net 4

		E1	E2	$\alpha$ (度)	Rotation (度)
21 to 29 Nov.	$\Delta W1W2Y2$	3.21E-03	-2.40E-04	72.9	0.1
	$\Delta W2W3Y2$	-6.60E-04	-4.31E-03	126.7	0.1
29 Nov. to 5 Dec.	$\Delta W1W2Y2$	-6.00E-04	-4.55E-03	63.9	0.1
	$\Delta W2W3Y2$	4.97E-03	-2.00E-05	72.6	0.2

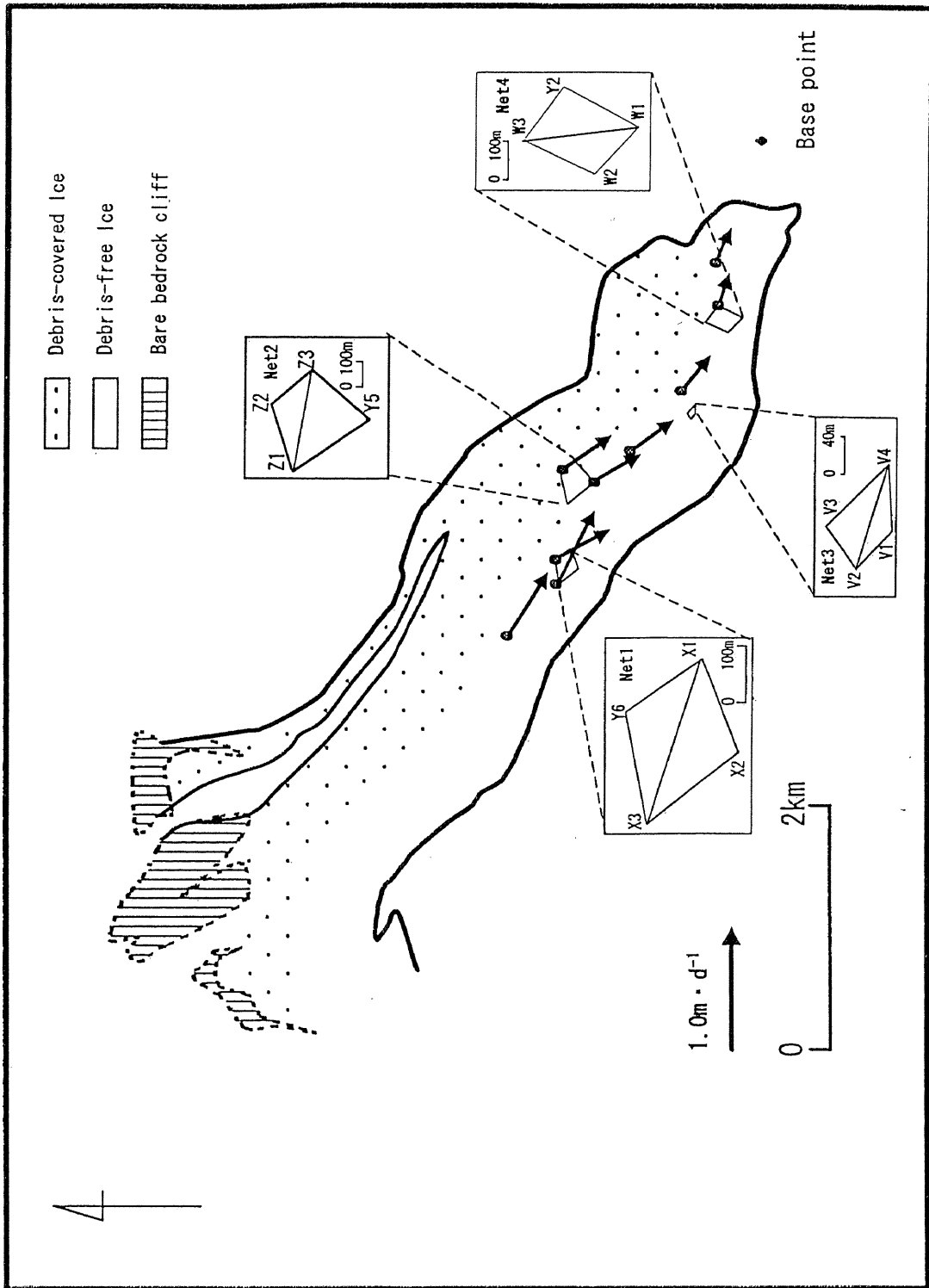


図1. Strain Grid の位置と流動観測結果

# 氷河モデルにおける底面すべりの重要性

山口 悟

北海道大学大学院地球環境科学研究科博士課程

## 1. はじめに

近年の地球温暖化のよい指標になると氷河は注目されている。しかしながら、気候変動に対し氷河はある応答時間をもって反応する為に、近年の後退が実際の地球温暖化の影響なのかを明らかにするためには、現地観測だけではなく氷河モデルを構築し数値実験をする必要がある。また将来予測にも氷河モデルの構築は不可欠である。

ソレール氷河においては、天見 (unpublished) によって簡単な数値実験が行われ、応答時間が200~300年であるという結果が得られている。そのモデルにおいては、流動は氷内部の塑性変形のみを考えている。しかしながら実際のソレール氷河の観測結果は、流動の大部分を氷内部の塑性変形ではなく底面すべりが占めているということを表している。したがって彼の計算結果は実際の氷河とは異なっている可能性がある。

また、近年急速な後退が報告されている山岳氷河の多くは“温暖氷河”であり、流動においては底面すべりが無視できない。そこで今回は、現実的な温暖氷河モデルを作成する第一歩として、底面すべりを考慮したモデルと考慮に入っていないモデルとでは、計算結果がどのように変わるかの思考実験を行う。

## 2. モデルについて

モデルは一次元モデルである。以下に簡単に概念をまとめる。

水平方向に  $X$  軸、鉛直方向に  $Z$  軸をとる。氷厚を  $H$ 、表面高度を  $h$ 、表面における質量収支を  $b$ 、氷内部の塑性変形によって生じる速度を氷厚全体で平均したものを  $V_d$ 、底面すべりによって生じる速度を  $V_s$ 、氷厚全体の平均流動速度を  $V$  とする。  $V_d$ 、 $V_s$  並びに  $V$  はそれぞれ以下の式で書き表すことができる (Oerlemans, 1998)。



$$V_d = f_d HS_d^3 \quad \text{①}$$

$$V_s = f_s \frac{S_d^3}{H} \quad \text{②}$$

$$V = V_d + V_s \quad \text{③}$$

ここで  $f_d$ 、 $f_s$  は、それぞれ塑性変形ならびに底面すべりの係数である。また  $S_d$  は driving stress で以下のように表記される ( $\rho$ : 氷の密度 ( $900 \text{ kg/m}^3$ )、 $g$ : 重力加速度 ( $9.8 \text{ m/s}^2$ ) )。

$$S_d = \rho g \frac{\partial h}{\partial x} \quad \text{④}$$

質量保存則より、氷厚変化は以下の式を用いることによって計算できる。

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(VH) + b \quad \text{⑤}$$

### 3. モデルに用いた条件

今回は、理想基盤(上端: 1200 m、下端: 0 m)を用いた。また与える質量収支  $b$  (m/a) は高度と共に増加するものとし、以下の式であらわせられるものとする。なお、式⑥はソレール氷河と同じ質量収支特性であるカムチャツカ半島の Koryto 氷河における観測結果を参考に決定した。

$$b = 0.017 \times h - 14.45 \quad \text{⑥}$$

各係数  $f_d$ 、 $f_s$  の値は、それぞれ  $2.14 \times 10^{-16} (\text{a}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-3})$ 、 $1.39 \times 10^{-4} (\text{a}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-3})$  を用いた (Koryto 氷河における値を参考に決定した)。

以上の条件下において、底面すべりを考慮に入れない場合と入れた場合につ

いて以下の2つについて比較を行う。

#### I. 氷河の形

#### II. 応答時間

応答時間の定義としては、天見がソレール氷河の数値計算で用いた定義と同じく“モデルの計算結果上、変化が見られなくなるまでの時間”と定める。

実際の計算においては、⑥の条件下で定常状態の氷河において平衡線高度が+50 m 上昇した場合の応答時間を計算し比較を行う。

### 4. 計算結果ならびに考察

図1に、底面すべりを考慮した場合としない場合について定常状態における氷河の縦断プロファイルを示す。

底面すべりの有無によって末端位置が1000 m 近く異なる事がわかる。底面すべりのあるほうがないものに比べて氷河が短くなるのは、流れやすいために全体的に薄い氷厚となるためである。

図2に、平衡線高度が上昇した以降の氷河末端の年変動を示す。

底面すべりのない場合には定常状態に達するのに400年近くかかっているのに対し、底面すべりがある場合には150年より短い時間で定常状態に達している。また末端位置の後退量は、底面すべりがある場合には1500 m であるのに対し底面すべりがない場合には1700 m 以上である。応答時間の違いは末端の後退量の差から生じたものであると考えられる。

### 5. まとめ

今回行った計算により、底面すべりを考慮するかしないかでモデルの計算結果が大きく異なる事がわかった。従って今後ソレール氷河における氷河モデルを構築する際には底面すべりを考慮する必要がある。そのためにも今後底面すべりに注目したより細かい流動観測を行う必要がある。

### 参考文献

Oerlemans, J., 1998 : Modelling glacier fluctuations. Into the second century of worldwide glacier monitoring : prospects and strategies. *Studies and Reports in Hydrology*, 26, UNSECO, 85-96.

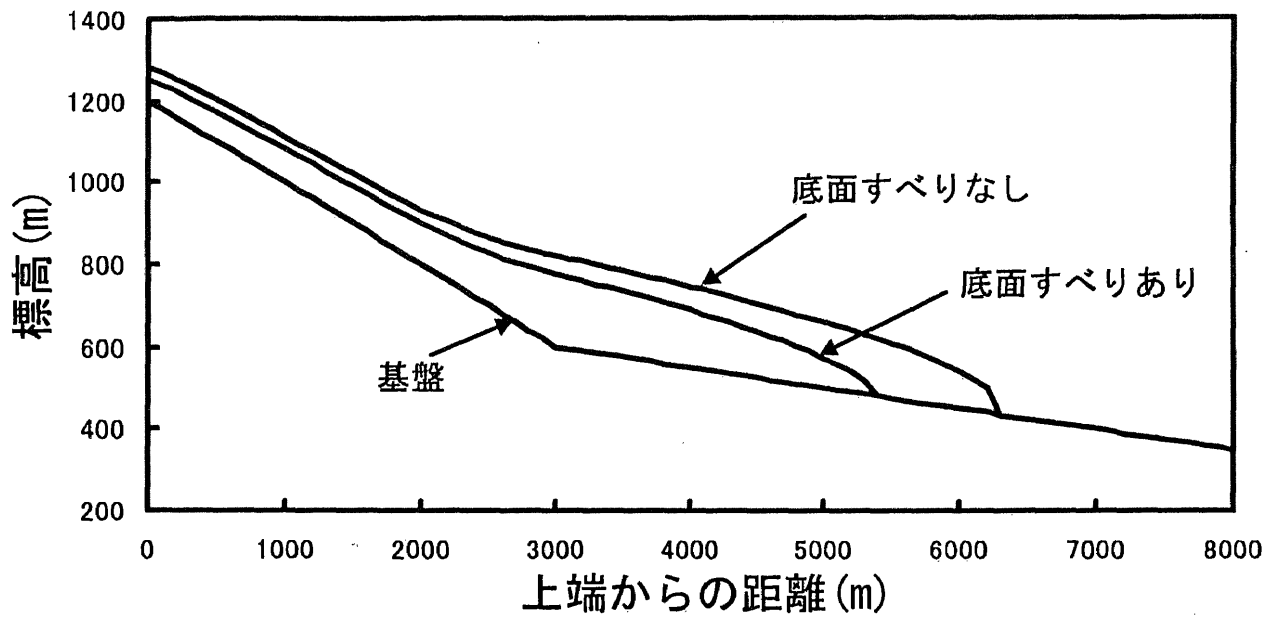


図 1 氷河の形の比較

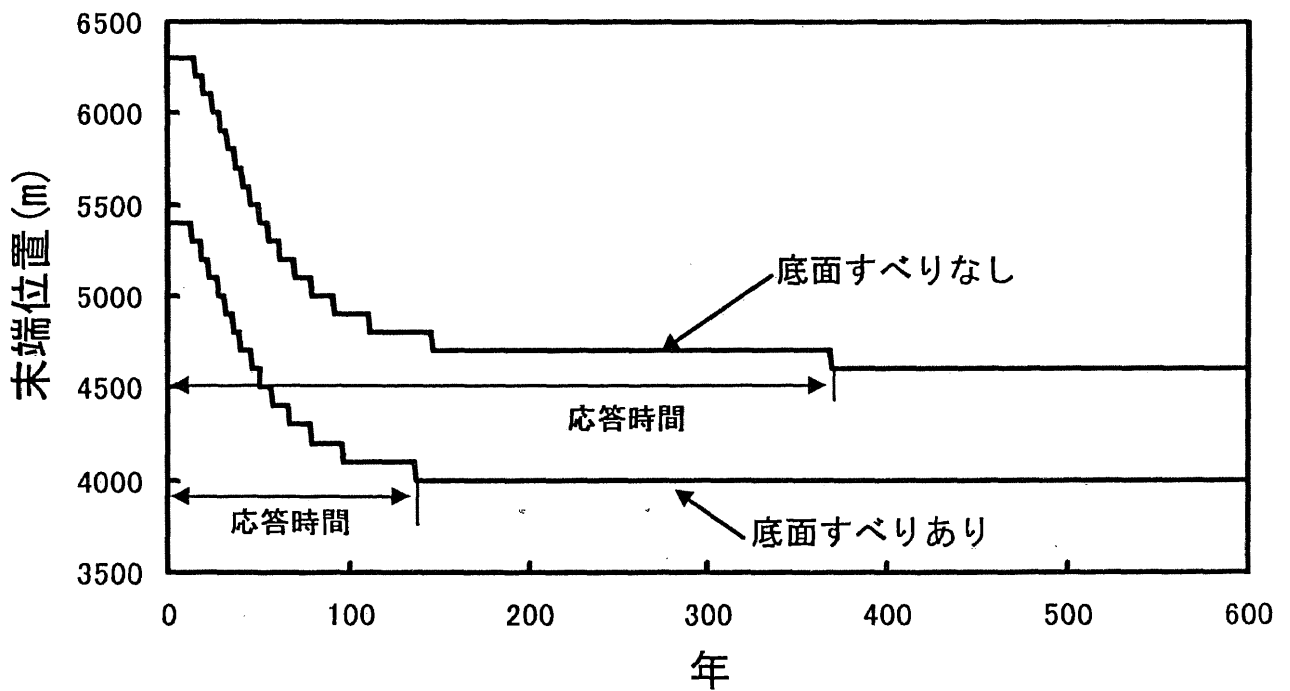


図 2 応答時間の比較

# 1998年夏季のソレール氷河における 気象条件と熱収支の特徴

松元 高峰

北海道大学大学院地球環境科学研究科博士課程

## 1. はじめに

パタゴニアの氷河を質量収支の観点からみると、多涵養・多消耗という条件によって特徴づけられる。氷原から溢流する各氷河の消耗域で夏季に著しい融解が起こることは、これまでのパタゴニアにおける氷河調査（たとえば Fukami and Naruse, 1987; Takeuchi *et al.*, 1995）によって明らかになってきている。

本研究ではパタゴニア北氷原の東側に位置するソレール氷河において気象観測を行ない、氷河表面の熱収支を求めることを目的とした。熱収支計算によって得られる融解量は氷河表面からの水のインプットに相当するので、河川の水文特性に関する研究に基本的な情報を与えることができる。また、今回の研究結果を過去の研究と比較することによって、この地域の気候条件と氷河の消耗過程をより詳細に明らかにすることが可能になると考える。

## 2. 調査方法

1998年11月16日～12月7日の期間に、ソレール氷河末端ベースキャンプ付近と氷河上4地点とに測器を設置して気象観測を実施した。ベースキャンプ観測点（以下BC）は、現在の氷河末端から約400m下流側のターミナルモレーンのリッジ上にあり、BCから氷河末端までの間にはさらに数列のモレーンが分布する。氷河上には、裸氷域とdebrisに覆われた領域にそれぞれ2つずつ観測点を設定した。裸氷域の観測地はY2とY7地点、debrisに覆われた領域の観測地はDLとZ2地点である（図1）。

今回はメンテナンスの関係から、主要な気象測器はBCに設置し、氷河上の各地点には気温・湿度センサー、もしくは気温センサーのみを設置した。各地点における観測項目を表1に示す。また気象観測地点を含む氷河上8地点において、雪尺を用いて融解量を測定した。

### 3. 観測期間中における気象の特徴

#### 3.1. BCでの気象状況

観測期間中のBCでの気象要素の変化を図2に示す。観測期間の初期、11月20日までは晴天が続いたものの、それ以降はバルマセーダ (Balmaceda) の気圧変化などから分かるように4～6日周期で天候が変化し、降雨のある期間と晴天の期間が交互に現れた。降雨を記録した日は16日に達し、総降雨量は約110 mmとなった。氷河周辺の斜面上方で降雪となった場合もあったが、BCで降雪はみられなかった。大まかな気象条件の推移を1985年観測時 (Fukami *et al.*, 1987) と比べると、11月後半～12月ではなく、むしろ11月前半の気象条件に近い。

気温は観測期間中の日平均値で7～17℃の間を推移した。最低気温は2.1℃と氷点下に下がることはなく、氷河表面はほとんど常に融解している状態にあるものと予想される。観測期間の最初と最後には、晴天日に対応して明瞭な気温の日周期変化が見られるが、中間の期間での変化は不明瞭である。これに対して、1985年の同じ期間 (Fukami *et al.*, 1987) の場合は明瞭な気温変化を示す期間が長く続いている。相対湿度は、降水が多い地域であるにも関わらず全体的に小さい。期間中は4～92%の間を推移し、100%には達することがなかった。相対湿度も気温と同様に、期間の中頃では日周変化が不明瞭である。

全天日射量は日平均値で102～378 W/m<sup>2</sup>の間を推移した。降雨日であってもとくにピーク時の値は著しく小さくはならないことが多い。これは降雨が断続的であること、また氷原からの強風と共に雨が吹き付けられてくることに対応しているものと予想される。また大気外放射量と全天日射量の比であるclearness indexは0.76～0.21の間をとった。0.76という値は完全晴天日(11月18日)に観測されており、雲の影響のない状態での日射の透過率を示している。正味放射量はピーク時で全天日射量よりも200 W/m<sup>2</sup>程度小さい値を示した。夜間の正味放射量は総ての日で負の値を記録した。

風速の変化からは、日最大風速が10 m/s以上になるような強風の期間と、2 m/s程度で推移する弱風の期間とが交互に現れることが分かる。それぞれ2～4日、1～3日ほど持続する。期間初期と後期の晴天日には風速が小さいこと

が多いものの、期間中ごろの晴天日には風速が大きく、天候と風速の間には一般的な傾向はみられない。

### 3.2. 氷河上での気象状況

氷河上の Y2 地点と Y7 地点、および BC での気温の変化を図 3 に示す。氷河上と BC との気温変化の間には良い相関が見られる。一般に気温が低いときには気温差が小さくなる傾向がみられる。また、氷河上 2 地点の気温差は 1 ~ 2 °C 程度で比較的小さい。

Y2 地点の相対湿度は BC よりも高いが、両者の間には良い相関が見られる。氷河上では期間中に数回、相対湿度が 100% に達した。

## 4. 氷河表面熱収支

### 4.1. 熱収支式

氷河末端付近の裸氷域に位置する Y2 地点の表面熱収支を算出する。Y2 で実測している気象要素は気温・相対湿度・アルベド (0.42) ・融解量に限られるので、他の要素については以下のように推定した。全天日射量と風速は BC と同じと仮定する。氷河表面温度は常に 0 °C とする。気圧はバルマセーダの値を高度補正したものをを用いる。また、期間の後半に欠測した気温と相対湿度については、BC の値を回帰式で補正して用いた。

融解している氷河表面の熱収支は次式のように表される。

$$Q_M = Q_R + Q_H + Q_E \quad (1)$$

ここで  $Q_M$  は融解熱量を、 $Q_R$ 、 $Q_H$ 、 $Q_E$  はそれぞれ正味放射量、顕熱伝達量、潜熱伝達量を示す。雨が氷に与える熱量については、一般的に小さいと考えられるために無視した。右辺の各項はそれぞれ以下のように表される。正味放射量は短波長放射量 ( $S$ ) と長波長放射量 ( $L$ ) それぞれの収支の和であり、

$$Q_R = S_d - S_u + L_d - L_u = (1 - \alpha)S_d + L_d - \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (2)$$

で表される。ここで  $\alpha$  はアルベド、 $\varepsilon$  は射出率、 $\sigma$  はステファン・ボルツマン定数、 $T_s$  は氷河の表面温度を示す。また添字 d と u はそれぞれ下向きと上向きの放射成分であることを示す。式 (2) の項のうち、大気放射量 ( $L_d$ ) を推定する経験式として、今回はいわゆる Brunt 式を用いた。

$$L_d = \varepsilon \sigma T_a^4 (a + 0.066\sqrt{E_a})(1 + c(1 - C_c)) \quad (3)$$

ここで  $T_a$  は地上付近の気温を、 $E_a$  は水蒸気圧を示す。また雲量の指標となる係数  $C_c$  は

$$C_c = (S_d/R_{ext}) / (S_d/R_{ext})_{\text{clear day}} \quad (4)$$

と与える。 $R_{ext}$  は大気外放射量であり、快晴日における大気外放射量と全天日射量の比 (clearness index) は 3 章に示した結果から 0.76 とした。式 (3) の係数  $a$  と  $c$  については、BC での観測値を用いて、放射収支量の再現性が最も良くなるように試行錯誤的に決定した。得られた値は  $a$  と  $c$  がそれぞれ 0.67 と 0.10 である。

顕熱伝達量と潜熱伝達量はバルク法を用いて求めた。

$$Q_H = \rho C_p K_H U (T_a - T_s) \quad (5)$$

$$Q_E = l \rho K_E U (E_a - E_s) 0.622/P \quad (6)$$

ここで  $\rho$  と  $C_p$  は空気の密度と定圧比熱、 $U$  は風速、 $E_s$  は氷河表面での水蒸気圧、 $P$  は気圧を示す。また顕熱伝達量と潜熱伝達量のバルク係数 ( $K_H$  と  $K_E$ ) は、氷河表面近傍の大気が常に安定・中立と仮定し、 $K_H = K_E$  であるとして、Y2 での融解量実測値の再現性が最も良くなるよう、試行錯誤的に以下に決定した。

$$K_H = K_E = 1.6 \times 10^{-3} \quad (7)$$

この値は、同じ季節に観測が行われた Fukami and Naruse (1987) によって得られた  $2.5 \times 10^{-3}$  という値より小さいが、その理由は現在のところ不明である。また、融解量の計算値と雪尺による融解量実測値との最小自乗誤差が最小になるようにバルク係数をチューニングしたにも関わらず、2日間の融解熱量で  $10 \text{ MJ/m}^2$  以上の誤差が出るなど、現在の段階での再現性はあまり良くない。

#### 4.2. Y2 地点における表面熱収支

図4にY2地点における11月16日～12月7日の期間の表面熱収支を日積算値で示す。また表2には、全期間平均の各熱フラックス成分とその構成比、さらにソレール氷河におけるこれまでの熱収支観測結果 (Kobayashi and Saito, 1985; Fukami and Naruse, 1987) の概要を示した。

日融解熱量は平均で  $23 \text{ MJ/m}^2\text{d}$  となり、期間中は  $12 \sim 34 \text{ MJ/m}^2\text{d}$  の間を推移した。氷河の融解に最も寄与する成分は正味放射量であり、構成比は平均で55%に相当する。顕熱伝達量の寄与がそれに次いで大きい (42%) のに対して、潜熱はほとんど寄与していない (3%) ことが明らかになった。ただし日積算値で潜熱が蒸発の形をとった日数は8日間で、全体の1/3以下である。潜熱伝達量が小さいのは、Fukami and Naruse (1987) が述べているように相対湿度が小さく、水蒸気圧が氷河表面の水蒸気圧 (6.11 hPa) に近い状態にあることが原因であると考えられる。パタゴニア北氷原の西側に位置するサン・ラファエル (San Rafael) 氷河の場合、潜熱伝達熱の構成比は10%を越えており (Ohata *et al.*, 1985)、氷原の東西における気候条件の違いが表面熱収支にも現れている。平均融解熱量と3成分の構成比を過去のソレール氷河での観測結果と比較してみると、今回の観測期間と同時期である、Fukami and Naruse (1987) による11月後半の5日間の平均値に近い。またパタゴニア氷原の他の氷河と比べると、Takeuchi *et al.* (1995) によるチンダル (Tyndall) 氷河での表面熱収支が今回の観測結果に非常に近い。

## 5. 今後の解析予定・課題



前章で触れたように、今の段階での熱収支計算結果は、実測値を良く再現できているとは言えない。今回は Y2 地点でのいくつかの気象要素を BC と同一と仮定して計算しているが、とくに風速に関して、実際はかなり差があるためと予想される。今後は Fukami and Naruse (1987) のデータなどと詳細に比較して、推定方法を改良する予定である。また、debris に覆われた領域の気象特性や熱収支についても検討していく。

## 6. 文献

- Fukami, H., Escobar, F., Quinteros, J., Cassasa, G. and Naruse, R. (1987): Meteorological measurements at Soler Glacier, Patagonia, in 1985. *Bulletin of Glacier Research*, **4**: 31-36.
- Fukami, H. and Naruse, R. (1987): Ablation of ice and heat balance on Soler Glacier, Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, **4**: 37-42.
- Kobayashi, S. and Saito, T. (1985): Heat balance on Soler Glacier. In Nakajima, C. (ed.), *Glaciological Studies in Patagonia Northern Icefield, 1983-1984*. Data Center for Glacier Research, Japanese Society of Snow and Ice, 46-51.
- Ohata, T., Enomoto, H. and Kondo, H. (1985): Characteristics of ablation at San Rafael Glacier. In Nakajima, C. (ed.), *Glaciological Studies in Patagonia Northern Icefield, 1983-1984*. Data Center for Glacier Research, Japanese Society of Snow and Ice, 37-45.
- Takeuchi, Y., Naruse, R. and Satow, K. (1995): Characteristics of heat balance and ablation on Moreno and Tyndall glaciers, Patagonia, in the summer 1993/94. *Bulletin of Glacier Research*, **13**: 45-56.

表1 ソレール氷河における観測項目

観測地点	項目		センサー	測定間隔	設置高 (m)
ベースキャンプ	気温	自記	ヴァイサラ	1時間	1.5
	相対湿度	自記	ヴァイサラ	1時間	1.5
	全天日射量	自記	ソーラーミニ	1時間	1.5
	正味放射量	自記	CN-11	1時間	1.5
	風速	自記	マイクロアネモ	1時間	1.5
	地表面温度	自記	HORIBA	1時間	0.5
	降水量	マニュアル		数時間	0.5
Y2	気温	自記	おんどとり	1時間	1.0
	相対湿度	自記	おんどとり	1時間	1.0
Y7	気温	自記	おんどとり	1時間	1.0
DL	気温	自記	おんどとり	1時間	1.0
Z2	気温	自記	おんどとり	1時間	1.0
移動観測	アルベド	マニュアル			
	開空率	マニュアル			

表2 期間平均熱収支と成分構成比

期間平均熱量 (MJ/m <sup>2</sup> d)	正味放射量	顕熱伝達量	潜熱伝達量	
1998年11月16日～12月7日	12.6	9.5	0.7	
1983年12月15～29日	7.0	11.9	7.1	Kobayshi and Saito (1985)
1985年11月1～5日	5.3	5.5	-0.8	Fukami and Naruse (1987)
1985年11月25～29日	14.3	7.6	-0.3	Fukami and Naruse (1987)

熱収支構成比 (%)	正味放射量	顕熱伝達量	潜熱伝達量	
1998年11月16日～12月7日	55	42	3	
1983年12月15～29日	27	46	27	Kobayshi and Saito (1985)
1985年11月1～5日	49	51	-1	Fukami and Naruse (1987)
1985年11月25～29日	65	35	-1	Fukami and Naruse (1987)

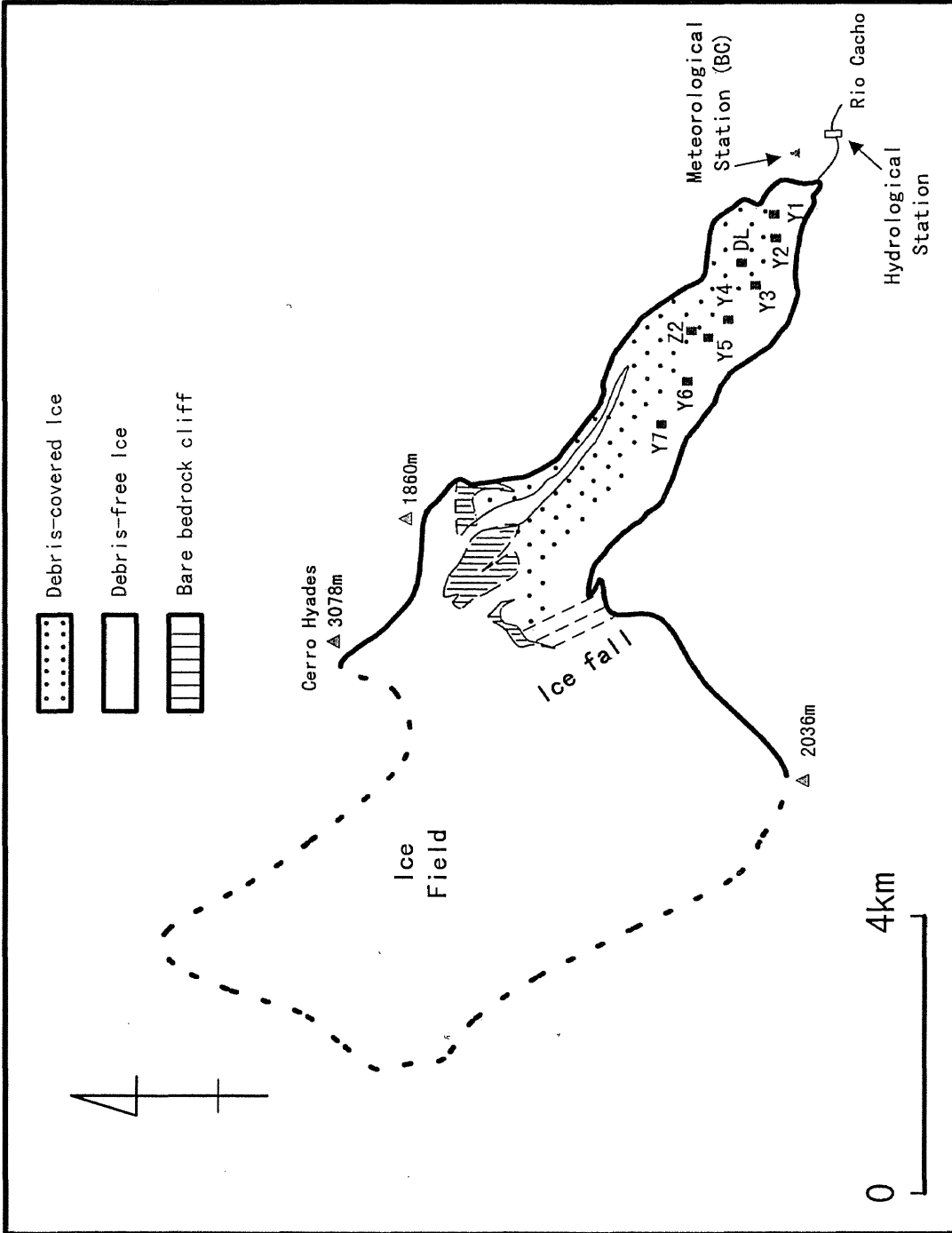


図1 ソレール氷河における各観測地点

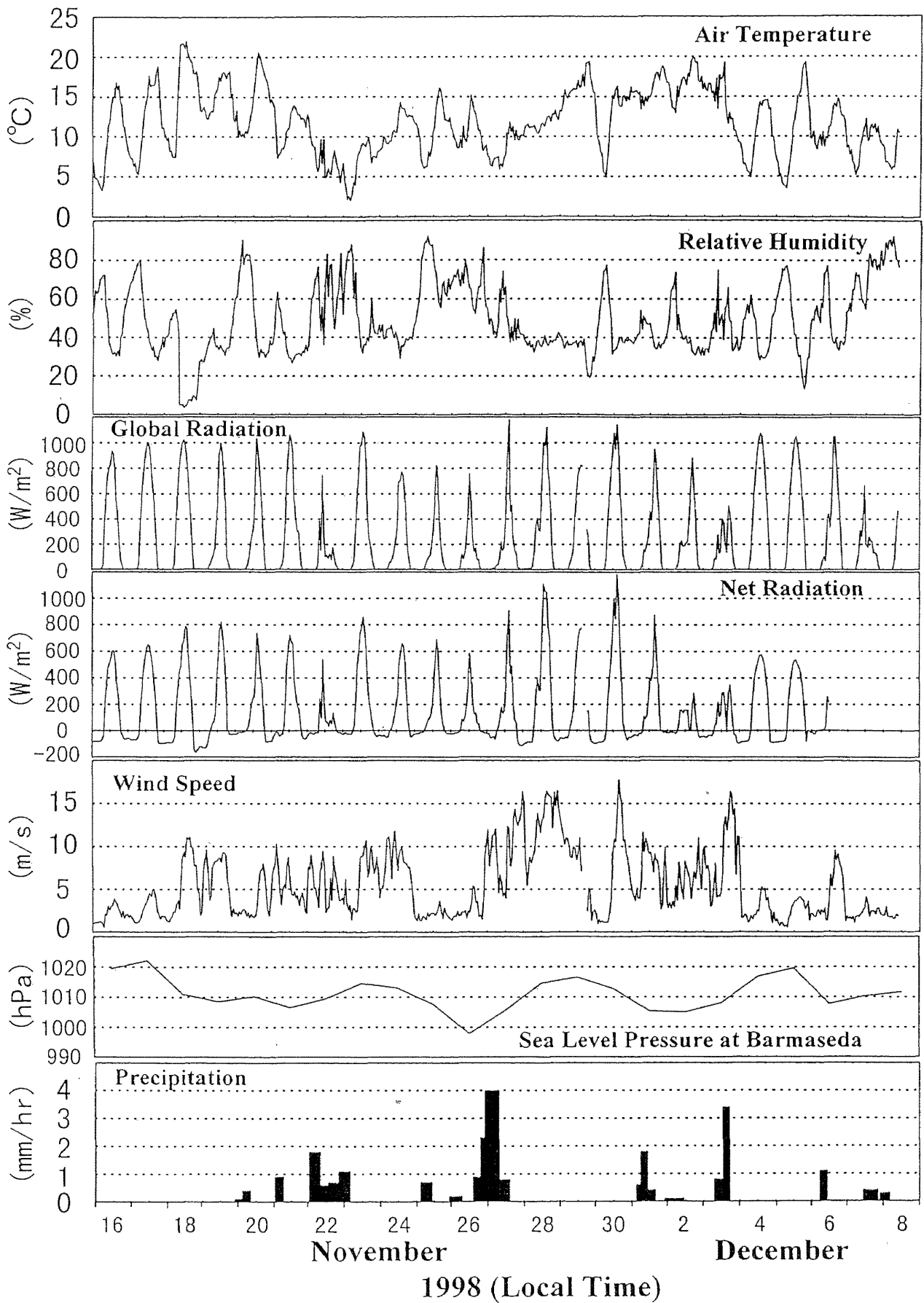


図2 BCにおける観測期間中の気象要素の変化 (気圧はNOAA/NCDCによる値)

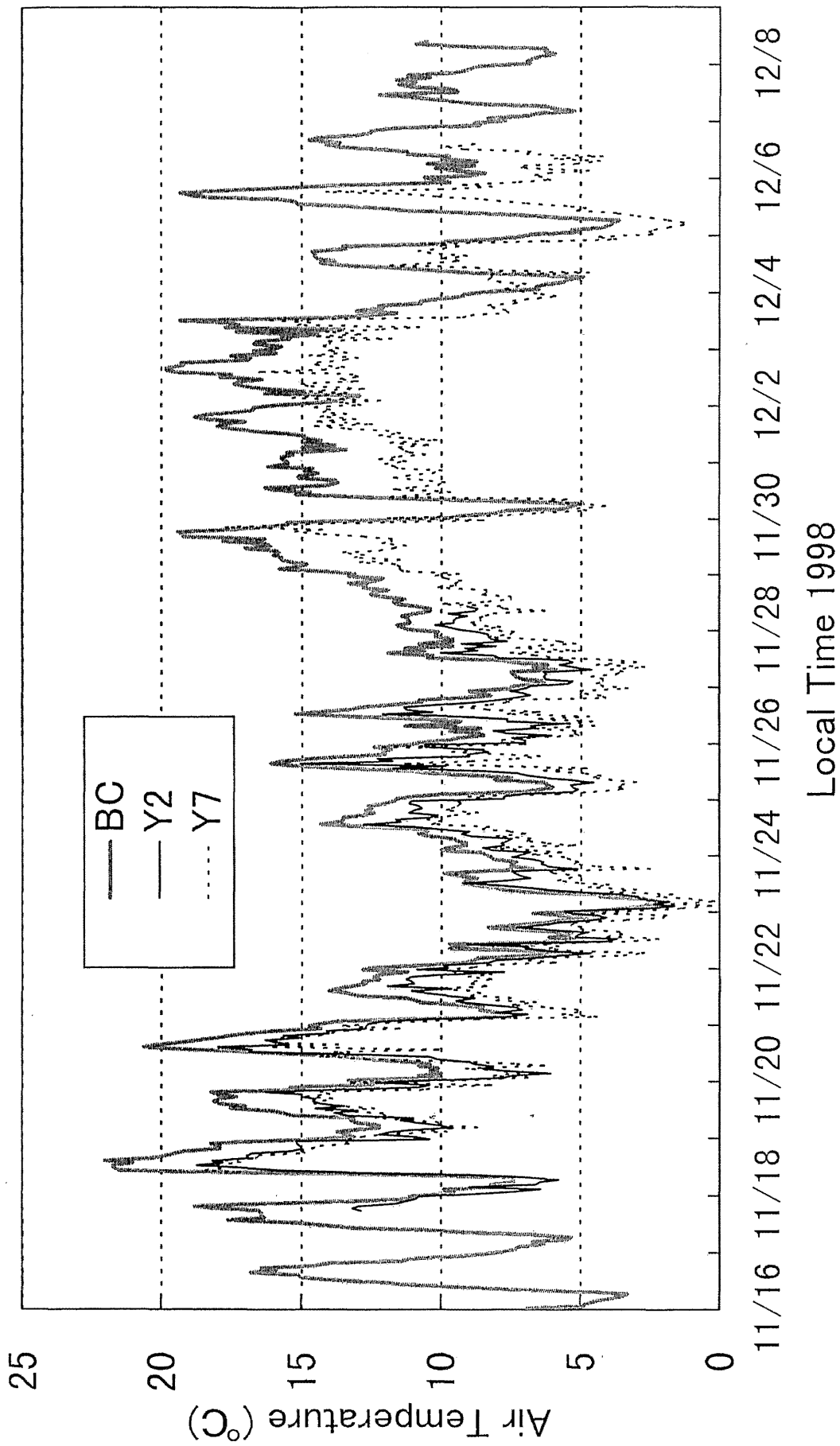


図3 ベースキャンプと氷河上2地点における気温変化

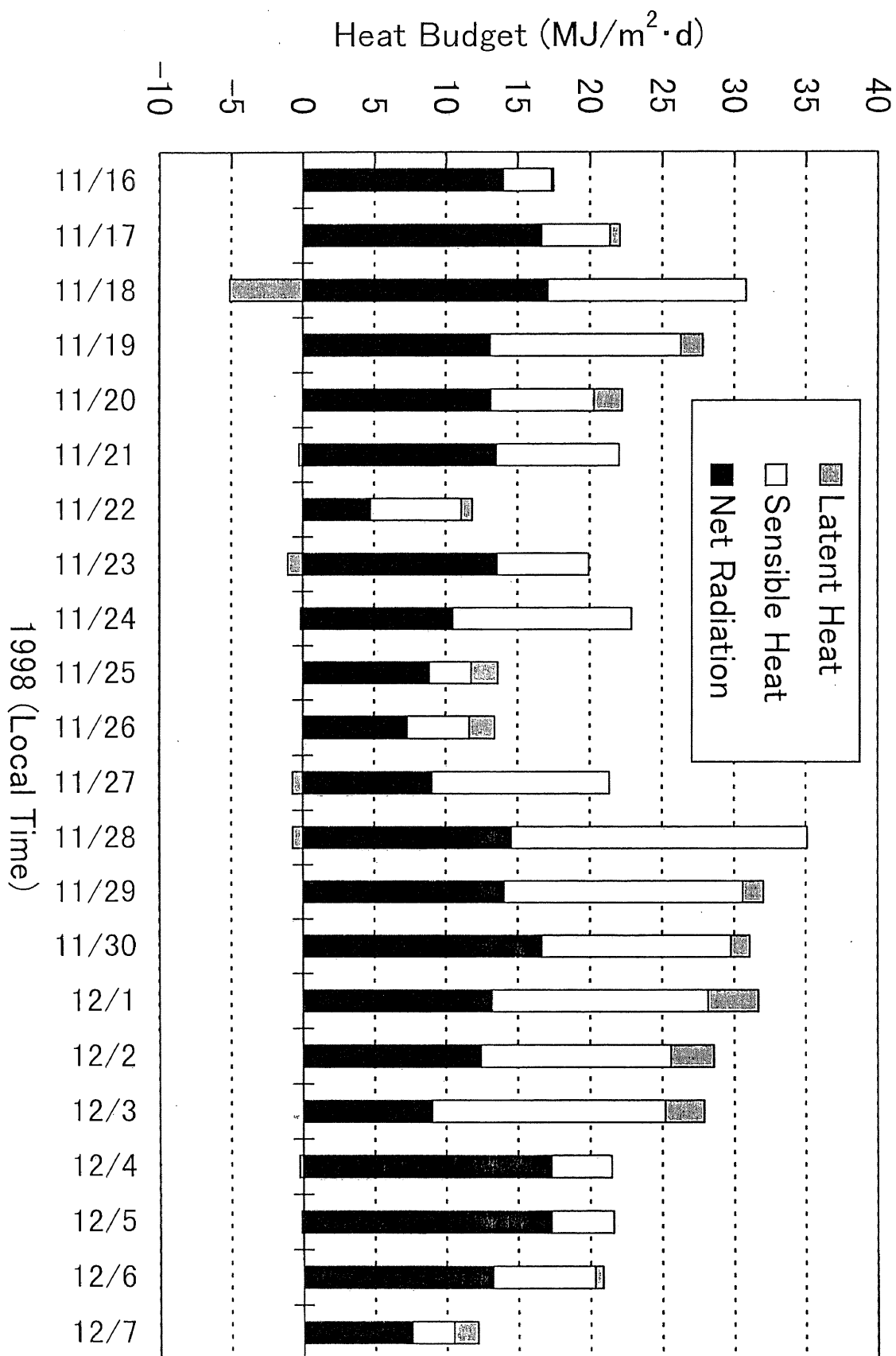


図4 Y2地点における氷河表面熱収支

# 北パタゴニア氷原・ソレール氷河の水文特性

松元 高峰

北海道大学大学院地球環境科学研究科博士課程

## 1. はじめに

氷河およびその流出河川の水文過程は氷河地域の水循環の主要な構成要素であるだけでなく、とくに氷底流出システム (subglacial drainage system) などを通じて氷河の動力的性質や質量収支にも大きな影響を及ぼす。とくにパタゴニア地域のような多涵養・多消耗の気候環境下では、激しい融解によって大きな融解水フラックスが生じるために、流出システムの発達と変化が著しいと推測される。近年、山岳氷河の水文過程に関する様々な手法での研究が増加しており、アルプスや北欧、スバルバルなどの氷河については詳細な知見が得られている (たとえば *Tranter et al.*, 1996 など)。しかし多涵養・多消耗の氷河については研究例が決して十分とはいえず、こういった気候環境下ではどのような水文過程が特徴的であるか、まだ明らかになっていないといえるであろう。

今回の研究の目的は、ソレール氷河における観測結果にもとづいて多涵養・多消耗の氷河の流出特性、とくに氷底流出システムの性質とその変化を明らかにすることにある。本報告では、そのうちの基礎的な情報である流量変化と水質 (電気伝導度) の特徴について、明らかになった点を述べる。

## 2. ソレール氷河の水文環境概観

ソレール氷河からの流出河川 (Río Cacho) は氷河末端中央部からほぼ東方に流下している。Saito and Kobayashi (1985) や Fukami and Escobar (1987) の調査が行われた段階では末端付近に前縁湖は存在しなかったが、今回の調査の時点では末端の右岸側と左岸側双方に大きな前縁湖が形成されていた (図 1)。左岸側前縁湖の長径は約 1.3 km であった。また今回の調査で末端から約 1 km ほど上流部の右岸側にも湖がみられた。周囲の氷の状況から、この湖は氷底湖を覆っていた氷河氷が崩落した状態と推測される。

氷河上には多くの氷河上河川 (supraglacial channel) や水たまりがみられ、日中には氷河上からムーランなどによって氷河底面にかなりの水量が供給されて

いるものと考えられる。また下流部の氷河氷にはしばしば氷河内河川 (englacial channel) の残がいであるトンネル上の空洞が観察された。これらのこと、また、気温が高く融解量が多いことなどを考えると、ソレール氷河においては氷河上・内、また氷河底面には顕著な水系が発達するものと予想される。

### 3. 調査方法

1998年11月16日～12月7日の期間に、氷河末端から約400m下流の Río Cacho に水文観測点を設けて調査を実施した (観測点の位置については本報告書別稿を参照)。自記水位計と自記水温・電気伝導度計を設置して、10分間隔での測定・記録を行なった。また水位標を設置して1日に数回、目視での水位観測と水温・伝導度測定も行なった。水位計にトラブルが生じたため、水位の自記記録は11月28日までしか得られなかった。

水質分析のための採水、および懸濁物質濃度測定を1～2時間間隔で行なうために、11月30日～12月1日と12月4日～5日の期間に集中観測を実施した。サンプリングの回数はそれぞれ20回と27回である。なお採水と懸濁物質濃度測定は集中観測期間の前後にも1日の数回の頻度で行なった。さらに、流出河川水に寄与する可能性のある氷河上の融解水や前縁湖水、また氷河氷などのサンプリングも期間中に数回実施した。

自記測定した水位を流量に変化するために、期間中5回の流量観測を実施した。流量、流速ともに大きいため、直接川に入って断面積や流速分布を測定するのは不可能であった。そこで測定可能な深さまでを実測し、流心付近は两岸の斜面形を延長して断面積を推定した。また平均流速はウキを流して表面流速を求め、そこに係数0.8をかけて推定し、この両者から流量を算出した。図2にこの観測で得た水位－流量曲線を示す。

このほか、前縁湖が Río Cacho の水質に与える影響を知るために、12月7日に左岸側前縁湖の水温・伝導度鉛直分布を観測した。測定は氷河上と湖岸の間にロープを張り、カラビナを滑車がわりにして自記水温・電気伝導度計のセンサーを湖水に沈めて上下させるという方法を用いた。

### 4. 観測結果および考察

図3に観測期間中の Río Cacho の流量、伝導度・水温 (ともに自記観測の値)



と、ベースキャンプでの気温、熱収支法によって求めた氷河表面での日融解熱量（本報告書「1998年夏季のソレール氷河における気象条件と熱収支の特徴」を参照）の変化を示す。11月28日までの流量は自記水位計によって、それ以降は目視観測によって得られた水位データから換算した。12月2日の流量が50 m<sup>3</sup>/sを越えているが、この部分は水位－流量曲線を外挿した部分であるので、実際の流量よりもかなり過大評価になっていると考えられる。そのほかの期間においては、流量は13～31 m<sup>3</sup>/sの間を日周期変動しながら推移している。この結果は同じ季節に観測を実施した Fukami and Escobar (1987) の結果とよく一致する。流量のピークは17～19時に出現することが多く、1985年の場合（Fukami and Escobar, 1987）よりもやや早い。観測時期は両者で変わらないと考えてよいので、このことが季節的な氷河内水系の発達状況の違いによるとは考えにくい。前縁湖や氷底湖の存在、あるいは氷厚の大きな減少（本報告書「パタゴニア・ソレール氷河の表面プロファイルの測量」を参照）が影響している可能性がある。

熱収支法によって求めた融解量は、ソレール氷河消耗域における氷河表面からの水のインプットに相当する。その変動と流量を比較すると、前半期においては両者のトレンドがよく対応していることが明らかである。この期間において融解量のピークに対する流量ピークの遅れは約1日である。また、11月28日以降の融解量の増加と12月4日以降の減少という変化にも流量変化は対応しているように見える。しかし、12月2日ころのピーク流量（今回の流量推定が過大評価であるとしても、水位は確かに上昇していること、伝導度がこの日に急に低下していることとから、流量がかなり増加したことは確実である）に対応するような融解量の変化はみられない。現在のところこの現象を説明できてはいないが、前縁湖もしくは氷底の水系と Rio Cacho とのつながりが急激に変化したことに起因するのではないかと予想される。

集中観測期間とその前後における流量と伝導度（マニュアル観測の値）の関係を図4に示す。黒太線は11月30日～12月1日の集中観測期間の、灰太線は12月4日～5日の集中観測期間の変化を表している。流量と伝導度の関係を大きなトレンドで見ると、一般的な氷河流出河川でみられるような逆相関の関係にある。しかし、日周期の変動を追うと、伝導度変化の振幅は小さいものの正相関の関係がみられる。測定間隔が長いためにはっきりはしないが、Fukami and

Escobar (1987) の結果にはこのような現象はみられないようである。この現象の説明もまだできていない。前縁湖の存在がここでも影響している可能性があり、化学分析や懸濁物質分析の結果にもとづいて解析を行なう予定である。

上記のように、流量や水質の変動に前縁湖の存在が影響している可能性が考えられるために、左岸側湖水の水温・伝導度の鉛直分布観測を実施した。しかし、観測を行なった 12 月 7 日は観測開始直後から弱い降水があるという不順な天候で、融解量も蒸発量も少ないと予想される。したがって湖の影響を考えるための観測には適していない条件であった。そのためかどうか不明であるが、湖水の水温、伝導度ともに 10 m 深まで明瞭な変化は見られなかった。

## 5. 今後の解析予定・課題

前章で触れたように、Rio Cacho の流量、水質変動には前縁湖や氷底湖の存在が影響している可能性がある。それらの問題を含めて、ソレール氷河における流出システムや水質形成の特徴を明らかにするために、現在、サンプリングした水試料の化学分析と懸濁物質濃度測定（秤量）を実施中である。また懸濁物質については粒径分布などの質的な特徴に関しても分析を行なう予定である。現在までに終了した化学分析の結果からは、主要イオンのうちで最も卓越している成分は  $\text{Ca}^{2+}$  であることが予想される。

さらに融解量と流量の関係などを含めて、ソレール氷河の流出モデルを構築していく予定である。また測器のトラブルなどで欠測になっている部分などについて、データの補間・補正・推定作業も必要に応じて行なう。

## 6. 文献

Fukami, H. and Escobar, F. (1987): Hydrological characteristics of Soler Glacier drainage, Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, **4**: 91-96.

Saito, T. and Kobayashi, S. (1985): Hydrological investigations at Soler Glacier. In Nakajima, C. (ed.), *Glaciological Studies in Patagonia Northern Icefield, 1983-1984*. Data Center for Glacier Research, Japanese Society of Snow and Ice, 167-176.

Tranter, M., Brown, G. H., Hodson, A. J. and Gurnell, A. M. (1996): Hydrochemistry as an indicator of subglacial drainage system structure: a comparison of Alpine and sub-Polar environments. *Hydrological Processes*, **10**: 541-556.

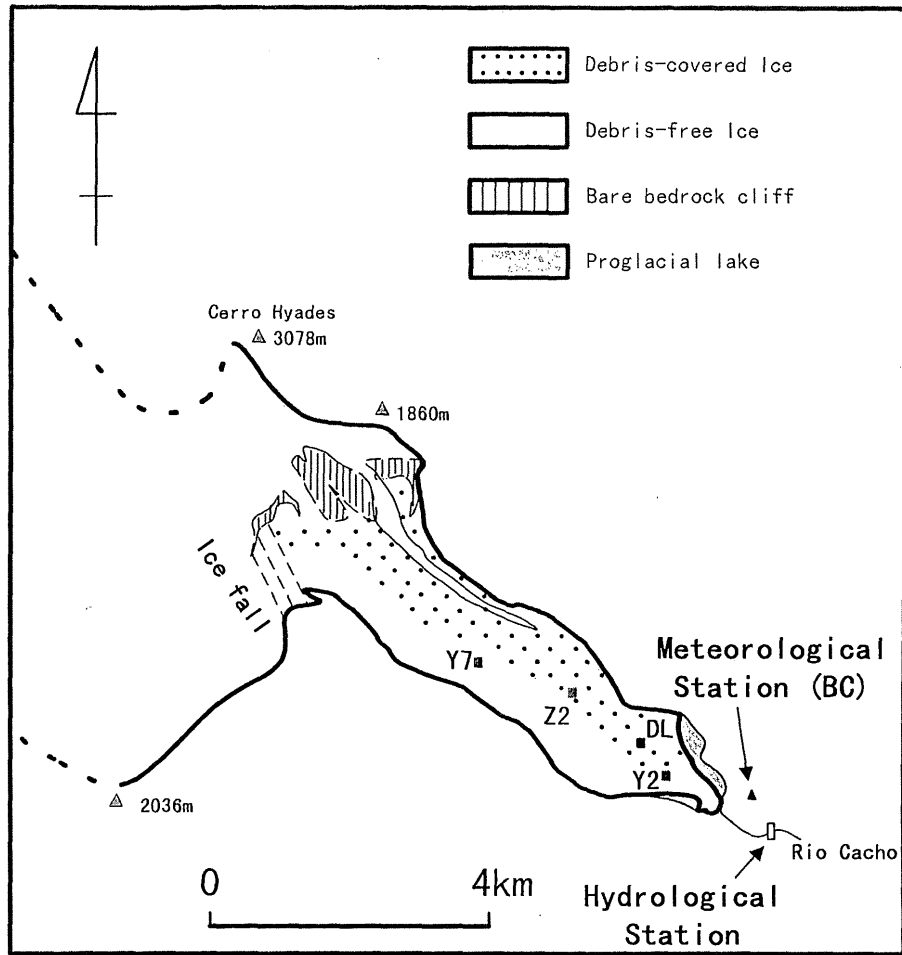


図1 観測地点および流出河川・前縁湖の分布

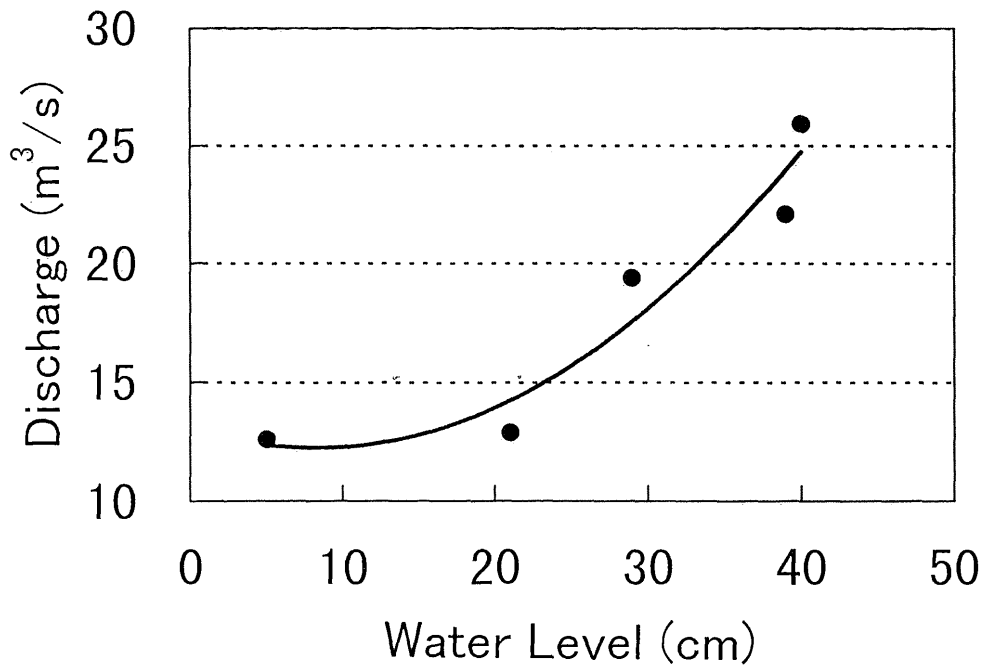


図2 水文観測点における水位と流量との関係

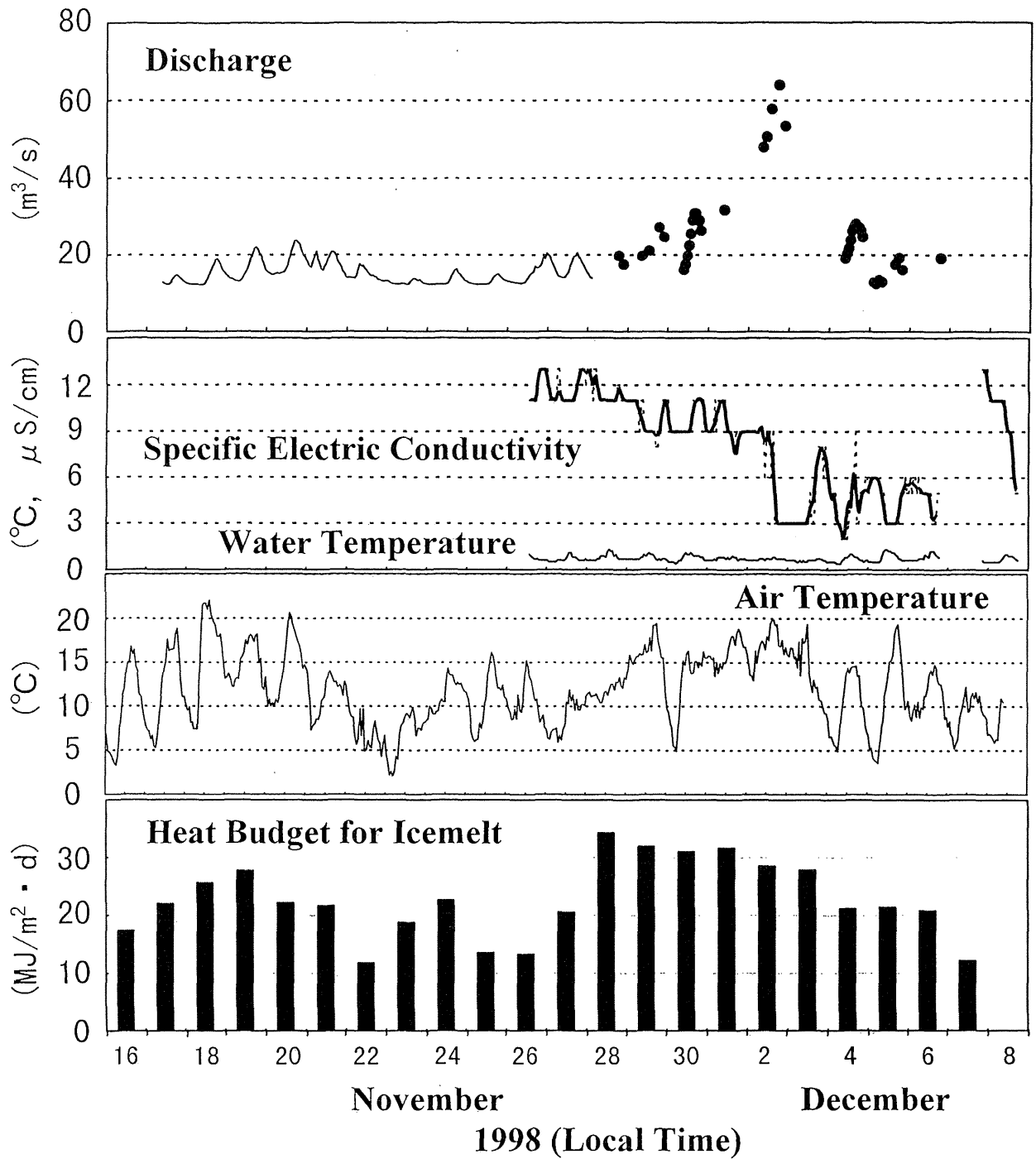


図3 Rio Cacho の流量, 水温, 電気伝導度と BC における気温, Y2 における融解熱量の時間変化

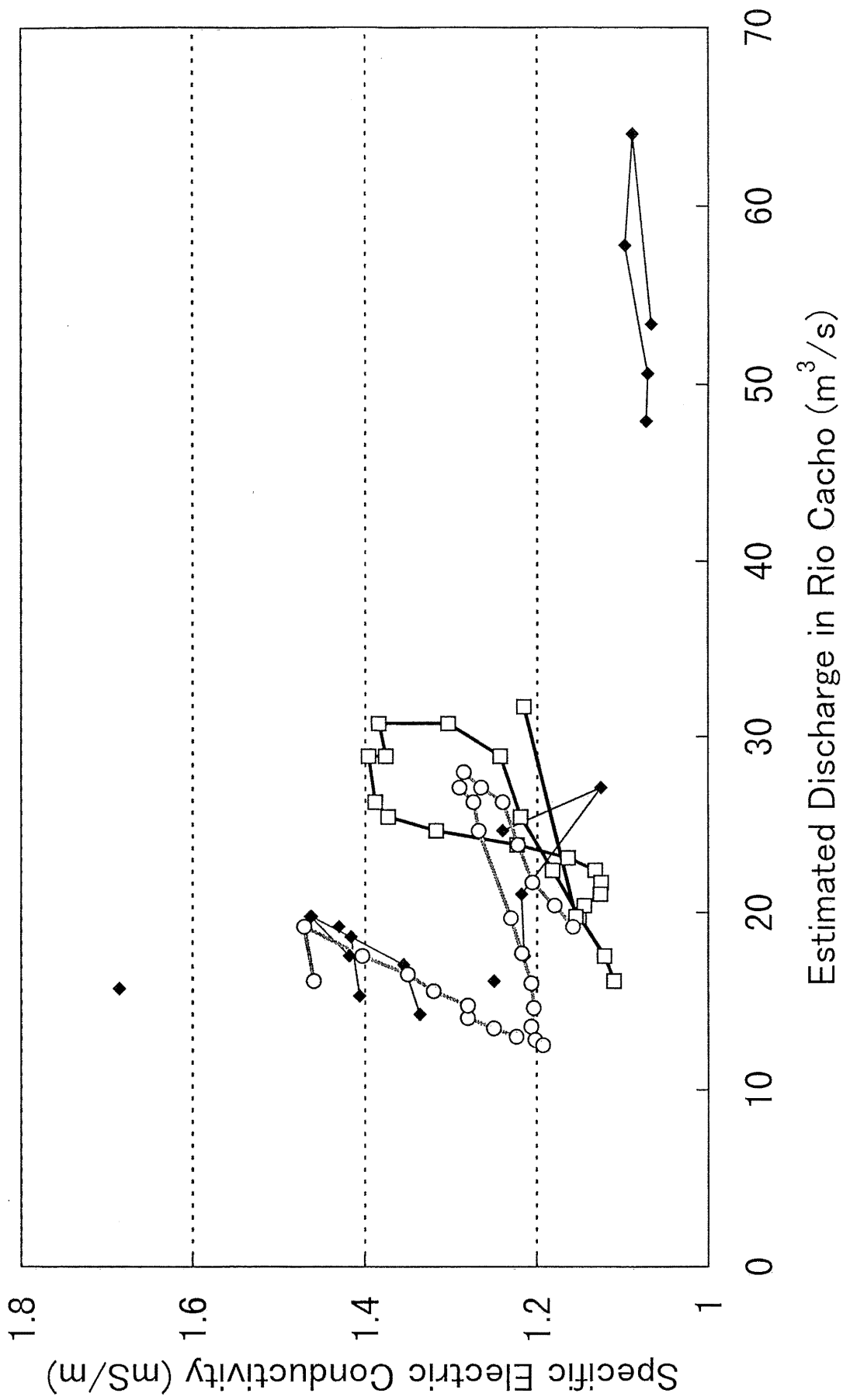


図4 Rio Cachoにおける流量と電気伝導度との関係

# パタゴニア・ソレール氷河における冰雪崩の観測

和泉 薫

新潟大学積雪地域災害研究センター

## 1. はじめに

ソレール氷河は、南米・チリ共和国のパタゴニア北氷原の東端に位置し、消耗域が長さ約 7 km、幅約 2 km の溢流水河である。消耗域の北半分は表面がデブリに覆われ、南半分はクリアーアイスが露出している。北半分の氷体は、ハーデス山（標高 3078 m）の東斜面上の氷河の端が露岩の急崖から冰雪崩となって落下することによって供給され、冰雪崩が侵食したたくさんの石や岩塊が融雪で表面に露出するため表面がデブリに覆われている（安仁屋, 1998）。従ってソレール氷河では、堆積域から消耗域への氷の供給の主な形式の一つが冰雪崩である。しかしこれまでこれまでソレール氷河での冰雪崩の活動度を観測した例はほとんどない。唯一、Kobayashi and Naruse（1987）が 8 mm フィルムによるインターバル撮影によって、全部で 4 日間、間欠的に観測しただけである。そこで、1998 年 11 月 26 日から 12 月 9 日まで、8 mm ビデオ撮影によって冰雪崩の発生状況の日中連続観測を行ったので、その結果を報告する。

## 2. 8 mm ビデオによる観測

ベースキャンプ近くのモレーン上に設置した気象観測点において、露岩の急崖上の氷河から発生する冰雪崩を 8 mm ビデオカメラにより全部で 13 日間撮影した。撮影地点から見た、ハーデス山の東斜面上の氷河と、冰雪崩を観測した露岩の急崖（実線内の黒い部分）を図 1 に示す。観測対象とした範囲は Kobayashi and Naruse（1987）とほとんど同じである。冰雪崩はその多くが実線内の左側にある菱形状露岩で観測された。撮影地点から露岩の急崖までの距離は約 8 km である。ビデオは長時間録画モードにしたため解像度は低下したが、180 分テープによって 6 時間の連続撮影が可能であった。映像によるため夜間は観測できないが、条件がよい場合には、朝は 5 時頃から、夜は 22 時頃まで冰雪崩の発生を撮影することができた。もちろん明るさはあっても、雨天やガ

スのかかっている際の撮影は出来ない。こうした視程の悪い場合のほかに、ビデオカメラの動作不良等によっても観測を時々中止したため、13日間平均の日撮影時間は約10時間であった。

### 3. 映像の解析結果と考察

長時間録画モードによる撮影と、視程が十分でないことが多かったため、氷河のどの地点から冰雪崩が発生したのかをすべての冰雪崩について把握する事はできなかった。そこで冰雪崩が露岩の急崖に飛び出した瞬間を発生時間とした。また、急崖における落下経路によって冰雪崩の流動が観測される時間は大きく異なることがわかったので、氷河末端と急崖の境界付近を冰雪崩が通過している時間を、冰雪崩の継続時間とした。なお、急崖の勾配は50-60度程度で、その上の氷河表面の勾配は30-40度程度である (Kobayashi and Naruse, 1987)。

観測された659個の冰雪崩についての継続時間の頻度分布を図2に示す。継続時間6-10秒の冰雪崩の頻度が最も多く、それより長くても短くても頻度は減少している。最大の継続時間は42秒で、1分を超えるようなものはなかった。この分布型はKobayashi and Naruse (1987)の結果と似ている。ただし彼らは急崖を冰雪崩が流動している間すべてを継続時間としているため、全体的に継続時間は長くなっている。

継続時間が長いほど、傾向としては冰雪崩の規模は大きくなるが、調べてみると必ずしも対応はしていない。氷河の末端が幅広く一度に崩落したような場合には、自由落下状になるため継続時間は規模の割には短い。そこで、氷河雪崩の規模を、急崖上部での幅、急崖下部での拡散状況、雪煙の舞い上がり状況、継続時間などから相対的に判断してaからeまでの5段階に分類した。aは非常に小規模で、本体は薄く急崖の途中で拡散して見えなくなってしまうような冰雪崩である。ごく小さな雪氷ブロックが欠けて落ちた場合がこのaにあたる。一方、eは非常に大規模で、急崖上で幅数百mにも広がり小尾根も覆い尽くし、落下した後、雪煙を高く舞い上げる冰雪崩である。氷河の末端が幅広く一度に崩落したような巨大な冰雪崩の場合がこのeにあたる。これらの中間をb, c, dに分類した。従ってaからeまでの規模は、極小、小、中、大、巨大に対応す

る。

観測された659個の冰雪崩についての規模の頻度分布を図3に示す。bに分類される小規模の冰雪崩の頻度が最も多く、それより大きくなっても小さくなっても頻度は減少している。実際にはaの規模の冰雪崩はもっと数多く発生していて、分布は規模が大きくなるにつれて指数関数的に減少する形になるのが自然である。観測結果がそれと異なるのは、aの極小の冰雪崩は、視程がかなりよくないと映像からは識別できないためと考えられる。

次に、冰雪崩の時間別発生数を13日分まとめた結果を図4に示す。時間は現地時間で、時間軸を縦線で区切った間が観測できた時間である。観測の途中で欠測が生じた場合は、その間をNo Data（又はND）と記載してある。棒グラフが冰雪崩の発生数を示し、そのうち白抜きが規模a,bの観測個数を、黒塗りが規模c,d,eの観測個数を示している。

図4を見ると発生数の時間による変動が大きいことがわかる。1時間に60回近くも発生することもあるれば、全く発生しないこともある。そこでこれらの変動を、松元他がベースキャンプ近くのモレーン上で行った気象観測の結果を参考にして考えてみた。

全体的に見て、強い日射が氷河に当たり始めると、小規模（規模a,b）な冰雪崩が多発する傾向にあった。晴天で日の出を迎えると、11月29、30日のように6、7時台から多発するし、天候が雨や曇りから晴れに回復し、日射が強くなるとその時点から多発していた。一方19、20時台も、小規模な冰雪崩が多い時間帯である。これは、冰雪崩の発生源の氷河は大半が東向きであるが、ほんの一部には夕日に照射される場所があり、そこからこの時間帯に日射による小規模な冰雪崩が発生するためである。もちろん、すべての小規模の冰雪崩の発生が日射と関連しているわけではない。

一方、規模の大きな（規模c,d,e）冰雪崩は、11月28日から30日午前まで比較的多く発生した。その理由は以下のように推定されよう。11月26から27日にかけては観測期間中でもっともまとまった降水（最大4 mm/h）があった。27日朝には、露岩の急崖付近も雪で白くなっていたことから、標高の高いところでは降水の多くが雪で堆積したものと考えられる。この後、気温は29日まで上昇を続けベースキャンプ近くの気象観測点で19℃にまで達し



た。このため氷河上でも融雪が進行し、氷河底面に融水が多量に供給されたと考えられる。実際、急崖では氷河から流れ出た水流の白い筋が、沢状部分に何本も見られた。こうした多量の融水は氷河の底面滑りを加速する (Naruse, 1987) ので、氷河末端での規模の大きな冰雪崩の発生につながったものと考えられる。

このような冰雪崩の発生は、融解の進行に対して時間の遅れを伴っている。実際、放射冷却で気温が低下し融解が停止したと思われる30日朝にはまだ冰雪崩が発生しているし、その影響が現れ冰雪崩がほとんど発生しなくなるのは30日午後である。日中晴れて融解が進んだ日の20時前後に、規模の大きな冰雪崩が発生しているのも、この遅れによる影響と考えられる。融解のピークに対する規模の大きな冰雪崩発生の遅れは、概略6-8時間位であろう。

12月3日以降は、再び気温が低下し朝の放射冷却による気温低下も数日あったため規模の大きな冰雪崩の発生は活発でない。実際、この期間には急崖における水流の白い筋は、ほとんど見られなかった。

このほか、冰雪崩の発生状況を詳細に観察すると、発生の仕方に特徴のあることもわかった。一つは、大規模な冰雪崩が発生する前後に、同じ場所から小規模な冰雪崩が発生することが多いことである。これは、大規模な雪崩の発生に先行して小規模な崩落が発生したり、崩れ残った部分が後で小規模な雪崩となることで、一般的な雪なだれの発生と類似している。先行する小規模な冰雪崩により、その後の大規模冰雪崩の発生を予測することも場合によっては可能かもしれない。もう一つは、冰雪崩の発生が活発な時には、ほぼ同じ場所で続けて何回も冰雪崩が発生しており、しかも、ある場所で集中して発生した後、時間をおいて今度は別の場所だと、集中して発生する場所が移動することである。これは同じ急崖上にせり出している氷河末端でも、場所によって流動状態が異なり、流動速度も時間的に変化することを示唆しているのではないだろうか。

#### 4. おわりに

ソレール氷河において冰雪崩の発生状況を8mmビデオ撮影によって13日間にわたり観測した結果、いくつかの新しい知見が得られた。ここでの解析は、冰雪崩の時間別・規模別発生状況と、それらの現地気象観測データとの対応を

調べたものである。その結果、氷雪崩の発生は氷河からの融水の流出や氷河の流動変化とも関連していることがわかった。そこで、水文観測結果や氷河流動速度の観測結果との詳しい比較も行うつもりである。また、氷雪崩の発生位置の特定や発生様式の違いなどについても詳しく調べたいと考えている。

## 参考文献

安仁屋政武(1998)：パタゴニア．古今書院、.349p.

Kobayashi, S. and Naruse, R.(1987): Ice avalanche on Soler Glacier, Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, **4**: 87-90.

Naruse, R.(1987): Characteristics of ice flow of Soler Glacier, Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, **4**: 79-85.



図-1 気象観測点から見たヒャーデス山東斜面の氷河と  
氷雪崩を観測した露岩の急崖（黒線で囲まれた範囲）

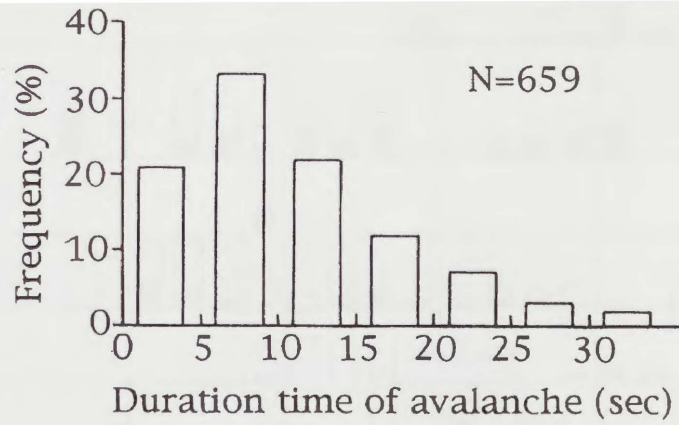


図-2 氷雪崩の継続時間の頻度分布

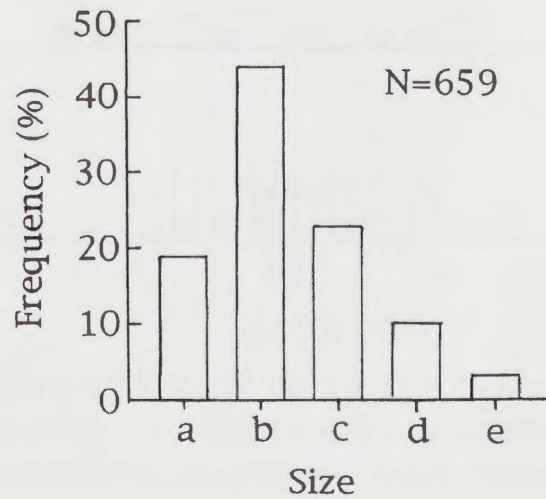


図-3 氷雪崩の規模別頻度分布

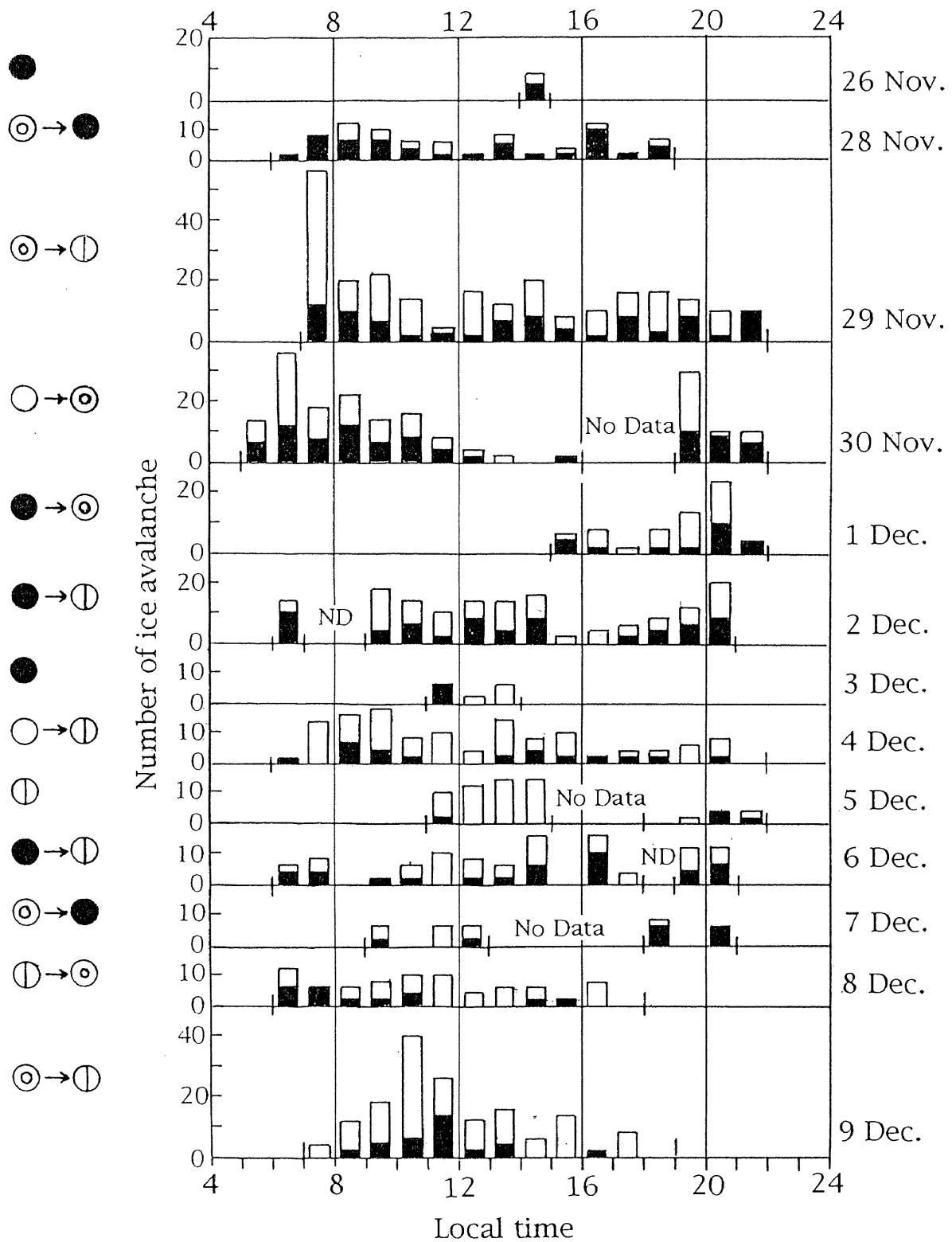


図-4 氷雪崩の時間別発生数 (1998年11月26日-12月9日)  
 白抜きが規模 a, b、黒塗りが規模 c, d, e の個数を示す  
 時間軸の縦線の間が観測時間で、欠測は No Data (ND) で示した  
 日中の天気変化の概略を、図の左に天気図記号で示した

# 1998年 ソレール氷河調査行動表

成:成瀬、山:山口、松:松元、大:大野、和:和泉

Santiagoからソレール氷河到着まで

- 11月5日 山+松+大: Santiago到着、DGAにて調査装備の準備
- 11月6日 山+松+大: Universidad de Chileにて調査準備、Santiago出発
- 11月7日 山+松+大: Pto. Montt到着、成+山+松+大: Coyhaique到着
- 11月8日 成+山+松+大: 食糧等買い出し、調査準備
- 11月9日 成+山+松+大: Coyhaique→Pto. Bertrand→Lago Plomo
- 11月10日 成+山+松+大: Lago Plomo→ソレール氷河下流(Cacho川上流)

## ソレール氷河における行動

	氷河上				氷河末端			ベース キャンプ	メモ
	天気	GPS	Strain grid	表面測量	気象関連	流量観測	ビデオ		
11月11日	晴								ソレール氷河BC到着、ベースキャンプ設置、基点の偵察
11月12日	晴のち雨							全員	休日
11月13日	晴								氷河末端付近偵察
11月14日	晴								氷河下流部ルート偵察
11月15日	晴	山+大						成	山+大: GPS観測点の設置、松: 気象測器(BC)の設置
11月16日	晴	成+山+大						松	松: 電気伝導度計の設置
11月17日	快晴	山+大			松			成	松: 水位計の設置、Y2・Y7・Z2・DLに気温ロガー設置
11月18日	快晴(強 風)			成+山+松+ 大	松				山+大: 基点α、成+松: 氷河表面
11月19日	雨のち曇 (強風)				松			山+大+ 成	
11月20日	雨のち曇	山+大						成	安仁屋班到着
11月21日	曇		成+山+大		松				松: アルベド測定
11月22日	雨							山+大+ 松+成	
11月23日	雨	山+大						成	
11月24日	雨のち曇 (強風)				松			山+大+ 成	松+成+山+大: 流量観測地点の断面測量

11月25日	雨のち曇							山+大+ 松	成+安仁屋班: ベースキャンブ発、和: ベースキャンブ到着
11月26日	雨	山+大				和	松		和: デオ設置
11月27日	雨(強風)						和+松	山+大	和: 温度ロガー設置
11月28日	曇/雨 (強風)	山+大				和	和+松		和: Y2に気温・湿度ロガー設置、松: Y2の気温ロガー撤収
11月29日	曇		和+山+大			和	和+松	山+大	和: Y7に気温・湿度ロガー設置、松: 気象測器データ回収、DLの気温ロガー撤収
11月30日	晴のち曇 /雨(強 風)	山+大				和	松		松: 集中サンプリング
12月1日	雨のち曇					和	松	山+大	松+山: 集中サンプリング(計19時間)
12月2日	雨のち晴	山+大				和	松		松: 氷河末端付近の水・氷サンプリング
12月3日	雨のち曇 (強風)					和		山+大+ 松	
12月4日	快晴	山+大				和	松		松+山: 集中サンプリング
12月5日	晴	山	山+大	山+大		和	松		山: 周辺地形測量、和+松+山: 集中サンプリング(計35時間)、山 十丈: αより基線の再測
12月6日	雨のち晴	山+大				和	松		松: 電気伝導度計の撤収、山: Y7・Z2の気温ロガー撤収
12月7日	晴のち雨				和	和	松	山+大	和: 気温(湿度)の垂直分布観測(Y2)、松: 氷河末端湖の水温・伝 導度鉛直分布観測
12月8日	晴のち曇	山+大				和	松		和: 気温(湿度)の垂直分布観測(Y2)並びにビデオ撤収、松: アル ベド測定、気象測器(BC)撤収
12月9日	晴					和		山+大+ 松	和: 気温(湿度)の垂直分布観測(Y2)
12月10日	晴のち雨	山+大				和	松		和: 気温・湿度ロガー回収、松: 水位計撤収
12月11日									ベースキャンブ撤収、Lago Plomo到着

ソレル氷河からSantiago到着まで

- 12月12日 和+山+松+大: Lago Plomo→Pto. Bertrand
- 12月13日 和+山+松+大: Pto. Bertrand→Coyhaique
- 12月14日 和+山+松+大: 装備・サンブル等の発送作業
- 12月15日 和: Coyhaique→Santiago、山+松+大: Coyhaique→Pto. Montt
- 12月16日 山+松+大: Santiago到着、DGAにてデポ品整理等の作業、Universidad de Chile訪問

# 南パタゴニア氷原ティンダル氷河における 氷河調査の概要

幸島司郎<sup>1</sup>・白岩孝行<sup>2</sup>・竹内 望<sup>1</sup>・久保田敬二<sup>2</sup>・成瀬廉二<sup>2</sup>  
Maria Angelica Godoi<sup>3</sup>・Marcelo G. Arevalo<sup>3</sup>・Jorge Quinteros<sup>4</sup>・  
Gino Casassa<sup>3</sup>・Andrés Rivera<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学 生命理工学部

<sup>2</sup> 北海道大学 低温科学研究所

<sup>3</sup> Universidad de Magallanes

<sup>4</sup> Dirección General de Aguas

<sup>5</sup> Universidad de Chile

## はじめに

南米大陸南端に位置するパタゴニア氷原は、面積 4,200 km<sup>2</sup> の北氷原と面積 13,000 km<sup>2</sup> の北氷原からなり、合計 70 以上の溢流水河をもつ、世界でも最大級の氷体である。パタゴニア氷原は中緯度域に発達する温暖氷河であるため、環境変化に敏感に反応すると考えられること、また、近年、これらから溢流する氷河の多くで顕著な末端の後退や氷厚の減少が観測されていることから (Naruse *et al.*, 1995; Aniya *et al.*, 1997 等)、地球温暖化による海面上昇への寄与が大きい氷河として注目されている (IPCC, 1996; Aniya, 1999)。特に、南パタゴニア氷原は、南極氷床、グリーンランド氷床について大きい世界第三位の規模を誇る氷河であるため、その特性や変動を明らかにすることは、海面上昇など、地球温暖化による今後の環境変動を予測する上で非常に重要である。しかし、その規模の大きさや、とてつもない強風と大量降雪など、世界最悪とも言われる厳しい気象条件のため、パタゴニア氷原の氷河学的調査、特に涵養域での調査はまだ非常に少ない。たとえば質量収支に関する情報も、まだたいへん限られており、北氷原の標高 1300 - 1500 m 付近で採取された 37.6 m と 14.5 m の雪氷コアから推定された正味収支 +3.45 m、+2.2 m (Yamada, 1987; Matsuoka and Naruse, 1999)、南氷原の標高 2680 m で掘削した 13.17 m のコアから推定された +1.2m (Aristarain

and Delmas, 1993)、流域水収支から推定されたパタゴニア氷原の総降水量 6 m (Escobar *et al.*, 1991) など、研究によって大きく異なった推定値が得られている。また、比較的調査の進んでいる消耗域においても、雪氷微生物の高度変化など、基礎的な雪氷生物学的情報がまだ得られていない。

そこで本研究では、南パタゴニア氷原涵養域の質量収支を浅層雪氷コアの解析、特に生物学的解析によって求めることを主な目的として、1999年11-12月にティンダル氷河涵養域(1756 m a.s.l.)において約46 m深の浅層掘削を行った。従来の雪氷コア解析では、酸素や水素の同位体比および主要イオン濃度を年層マーカーとして質量収支が推定されてきたが、パタゴニア氷原のように融解の激しい温暖氷河では、同位体比やイオン濃度は融解水による混合の影響を受けやすい。そこで、本研究では、ヒマラヤの氷河等で有効性が確認されている雪氷藻類等 (Yoshimura *et al.*, 1997; Yoshimura *et al.*, in press; Takeuchi *et al.*, 1998)、氷河上で繁殖する雪氷微生物を年層マーカーとして利用することを試みることにした。そのために、氷河の末端付近(350 m a.s.l.)から浅層掘削地点(1756 m a.s.l.)に至る高度範囲での雪氷微生物の高度変化など、コア解析のための基礎情報となる雪氷生物学的調査もあわせて行った。また、今回の掘削では、輸送能力に限界があること、温暖氷河であるため帯水層の出現が予想されたことから、通常の浅層掘削ドリル(例えば高橋, 1996)の使用はためらわれた。このため、本計画のために北大低温科学研究所技術部の新堀邦夫氏らが新たに開発・製作した軽量で耐水構造の新型ドリルを使用した(白岩ほか、本報告書)。

浅層掘削の概要(白岩ほか、本報告書)や消耗域での雪氷生物学的調査の概要(竹内ほか、本報告書)に関しては別報で詳しく述べる。また、コアの解析結果については、様々な分析を行った後に別途報告する予定なので、本報告では調査活動の概要、特に涵養域での調査活動の概要と問題点、反省点等を報告する。本調査隊は、予想をはるかに越えるの悪天候のため、チリ空軍のヘリコプターとスノーモービルを利用した救援隊によって涵養域から救出される結果に終わった。したがって、本報告は、今後のパタゴニアでの調査、特に涵養域での調査活動を計画する上で、貴重な情報となると考える。



## 調査活動の概要

ティンダル氷河での調査活動は、消耗域での雪氷生物学的調査と涵養域での浅層掘削の2つに分けられる。各調査に参加した隊員名と所属、担当を表1に、調査隊の行動概要を表2にそれぞれ示す。

### 日程とメンバーの変更

当初の計画では、まず涵養域での浅層掘削を行い、掘削終了後に消耗域での雪氷生物学的調査を行う予定であった。ところが出発直前になって、ヘリコプター・オペレーションに協力してくれるチリ空軍の演習の都合で、当初11月1日から予定していた涵養域調査が突然11月12日以降に延期されたため、急遽、消耗域での調査を先に行うこととなった。

この日程変更のために、涵養域での調査に全期間参加する予定だった Gino Casassa と Andres Rivera は一部期間のみの参加に予定変更する。彼等は12月はじめからディクソン氷河でチリ-アルゼンチンの合同調査を予定していたからである。さらに、11月12日以降も悪天候が続き、11月22日になっても出発できなかったため、結局2人は参加を中止することになった。また、涵養域での調査に参加すると帰国日程が遅れる可能性が高くなったため、帰国日程を変更できない東京工業大学の竹内も参加できなくなった。

そこで、Gino Casassa と Andrés Rivera、竹内の代わりに、Maria A. Godoi と Marcelo G. Arevalo が掘削に参加することになった。

### 消耗域での調査

11月1日、プンタアレナスでの調査準備を終え、幸島、白岩、竹内、久保田、Gino Casassa は、車でパイン国立公園へ。国立公園管理事務所 (Paine H.Q.) の近くにある避難小屋を、ティンダル氷河調査のベース・ハウスとして利用することにする。翌11月2日、馬4頭で荷物を運び、ティンダル氷河消耗域のベースキャンプ (Tyndall B.C.) へ。Gino Casassa は Tyndall B.C の場所と氷河までのルートを日本側隊員に教えた後、翌日プンタアレナスに戻る。

11月3日から消耗域での調査開始。消耗域では、カワゲラ類 (*Andiperla*

*willinki*) やトビムシ類などの氷河昆虫の生態調査、標高 500 m、700 m、900 m の 3 高度での雪氷微生物試料採取、アルベド測定、氷河上の汚れ物質採取などを行った。氷河昆虫の調査では、氷河融水系に生息するカワゲラ類の幼虫が夜行性であり、夜間に表が表面付近に現れて活動すること、少なくとも 3 種のトビムシ類が生息し、そのうちの一種はトビムシ類としては例外的な水中生活を送る新種であることなど、興味深い事実が明らかになった。また、これらの氷河昆虫の食物であり、雪氷コア中に含まれている可能性がある雪氷藻類も、消耗域表面の雪氷中から検出された（竹内ら、本報告書）。

11 月 10 日に消耗域での調査を終え、Tyndall B.C. から Paine H.Q. にもどる。

### 涵養域へ

11 月 12 日から、ヘリコプターによる掘削地点への移動に備えて Paine H.Q. で待機開始。ところが Gino Casassa から電話があり、ヘリコプターは週末にしか飛ばせられないと空軍から連絡があったとのこと。本当かどうか分からないが、ウィークデーは民間機の事故に備えて待機せねばならないからだと言う。ただでさえフライトチャンスが少ない上に、土日しかヘリコプターを使えないとなると、涵養域での調査はほとんど不可能である。日本大使館を通じて空軍と交渉し、11 月 16 日になってやっと、天候が良ければ曜日を問わず飛ぶとの確約を得る。

11 月 18 日に Jorge Quinteros 氏が、チリ側の調査機材とともに Paine H.Q. に到着。11 月 20 日には他のチリ側隊員も合流し、本格的なヘリ待ち体制に入る。しかし天候が悪く、しばらくフライトチャンスは訪れそうにないため、翌 11 月 21 日には Gino Casassa と Andrés Rivera、Maria A. Godoi はいったんプンタアレナスに戻ることになる。ところが予想に反して、翌 11 月 22 日はほぼ無風の好天となった。高曇りだが氷床上の視界は良好で、始めて Paine H.Q. から氷床涵養域を望見することができた。早速、プンタアレナスに電話してフライトを要請するが、前線が接近しているとの理由で断られる。作業途中で天候が悪化することを恐れたらしい。また、プンタアレナスから Paine H.Q. までは 1 時間半かかるため、失敗して再度飛来すると 3 時間以上のフライト経費が無駄になるため、慎重にならざるをえないようだ。しかし、結局この日は 1 日中ほぼ無風の好条

件が続き、結果的にはやっと巡ってきた絶好のフライトチャンスをしたことになる。

このままでは涵養域での調査は不可能と判断し、翌 11 月 23 日、幸島が急遽プンタアレナスに戻り、チリ側隊員をとおして空軍と交渉。飛行するか否かの最終判断は幸島が行うとの了解をとりつけた。その後幸島は、プンタアレナスで空港の気象予報官や Paine H. Q. の白岩と連絡を取りながらフライトチャンスを待つ。そしてヘリ待ち 15 日目の 11 月 27 日、ついに快晴弱風のフライトチャンスが訪れた。幸島と Maria, Marcelo は早朝にヘリで Paine H. Q. に飛び、白岩、久保田, Jorge と合流。掘削予定地点 (Tyndall D. C.) への荷揚げが始まった。ところがこの日のフライトは、Paine H.Q. - Tyndall D.C.間を 2 往復して、白岩、久保田, Jorge の 3 隊員と機材の約半分を D.C. にあげたところで突然打ち切れ、ヘリコプターはプンタアレナスに帰ってしまった。氷床上で風が強まり、視界も悪くなったからとの説明だったが、どうも納得がいかない。空軍はかなり慎重なようだ。幸島と Maria, Marcelo は D. C. と無線連絡しながら避難小屋で待機。D. C. に燃料が十分に荷揚げされていなかったことから、一時は涵養域での調査中止を考えたが、幸運にも翌々日の 11 月 29 日は無風快晴の絶好のフライト日和となり、残りの機材と人員を全て D.C. に輸送することができた。

## 掘削

ティンダル氷河涵養域最上流部、アマリア氷河涵養域との分水嶺から約 500m ほど下った地点 (1756 m a.s.l.) に、居住テント (3 - 4 人用) 4 張、キッチン用大型ドームテント (10 - 12 人用) 1 張を張り、掘削キャンプ (Tyndall D. C.) とした。テントや機材類は飛雪で埋まらないように、それぞれ 10 m 以上離して主要風向と垂直に配置した。また、ブリザードに備えてテント間にはライフロープを張った。掘削キャンプ滞在中は、ほとんど毎日ブリザードだったので、このライフロープは本当に役にたった。掘削は悪天に備え、居住用テントの近くに深さ 4 m の大きなトレンチを掘って掘削場とし、作業は全てトレンチ内で行うことにした (白岩ら、本報告書)。幸い、全員が掘削キャンプに集結した 11 月 29 日と翌日の 30 日は無風快晴の好天だったため、天候が崩れだした 30 日夕刻までには、全員が中で作業できる程トレンチを大きくすることができた。

30日夜には猛烈な強風が吹きだし、早くも大型ドームテントが潰されかける。また、翌12月1日から2日にかけて、激しいブリザードが続いたため、居住テントが全て埋まり、3日は1日中テントの移設に費やす。気温が高く雪が重いため、除雪を怠るとすぐにテントが潰される。以後、埋没したテントをブリザードの中で掘り出して移設する重労働を何度もくり返すことになる。しかし、掘削の準備や掘削作業はトレンチ内で行ったため、悪天の中でも順調に進み、いくつかのトラブルはあったものの、ほぼ予定どおり12月9日に終了した。掘削期間を短縮したため予定の100mには至らなかったが、45.97mの深度まで掘削することができた。

12月10日には掘削機材を撤収し下山準備を完了する。しかし、12月6日から続いている激しいブリザードがおさまらず、下山することができない。また、何度も埋められたため、このころからテントが次々に壊れて使用不能となった。その後も天候はいっこうに回復せず、12月17日にはついに全てのテントが使用不能となり、それ以降、全員が旧掘削場トレンチを改造した雪洞内で生活することになった。雪洞内では風の影響がないので、激しいブリザード下でも快適に暮らせたが、一度濡れると物が乾かないため、滞在が長引くにつれて寒さが体にこたえるようになった。また多量の降雪によって雪洞の入り口は日毎に埋積されるため、入り口を確保するために、毎日斜め上に向かって掘り進み、入り口と通路の整備をせねばならなかった（白岩ら、本報告書）。雪面は滞在校期间中に合計3.5m上昇した。

## 救出

12月6日から始まった激しいブリザードは、12月20日を過ぎてもおさまる気配はなかった。この日、Gino CasassaとAndrés Riveraがディクソン氷河の調査からPaine H. Q.に戻ってきた。彼等もディクソン氷河で異常な悪天に悩まされたと言う。無線で今後の行動について協議する。掘削キャンプの食料や燃料は、作業2週間+予備日2週間を想定して、計1ヶ月分用意してあったので、計算上は12月26日で無くなるはずである。しかし、かなり多めに持ってきたので、残量を点検した結果、実際には12月26日以降さらに約2週間は滞在できることがわかった。したがって、まだしばらく好天を待つことも可能であった。

しかし、体力の消耗やクリスマスや新年にヘリコプターを利用することの困難さを考慮して、12月22日の時点で、空軍のヘリコプターに救援を要請することにした。

翌12月22日は、運良く風の弱い好天となった。しかし、掘削キャンプ周辺は雲におおわれて視界は50mほどしかなかった。早朝、Gino CasassaとAndrés Riveraが同乗した空軍のヘリコプターは掘削キャンプ上空に接近するが、視界が悪く着陸を断念。積み込んでいたスノーモービルを着陸可能な標高1,100m地点に下ろし、GPSを使って掘削キャンプまでスノーモービルで往復する作戦に切り替える。昼過ぎ、スノーモービルに乗ったGino CasassaとAndrés Riveraが掘削キャンプに到達。ソリ4台を連結したスノーモービルに計8人が乗って標高1,100m地点まで下り、全員がヘリコプターに収容されて無事Paine H. Q.に戻った。しかし、ドリルやウインチなどの掘削機材やほとんどの装備、採取したコアの3/4割は掘削キャンプに残置され、その後雪に埋もれて回収不能となった。また、天候が悪化したため、救援に使用したスノーモービルやソリも標高1,100m地点に残置され回収不能となった。

## 問題点と反省点

### 天候に関する研究不足

このように、涵養域での我々の調査隊は、チリ空軍のヘリコプターとスノーモービルを利用した救援隊によって救出される結果に終わった。このような事態になった第一の原因は、掘削地点の天候が予想をはるかに越えるほど悪かったためである。この期間にはパイネ周辺だけでなく、パタゴニア各地で異常気象が観測されているため、異常な悪天だったことは確かなようだ。ディクソン氷河の調査隊も異常な強風等、悪天に悩まされたと言う。また、掘削地点周辺は特異的に天候が悪い場所でもあるようだ。氷床でも標高1300mより下の部分は、Paine H. Q.から数日に1度は望見できたが、掘削地点(1756 m a.s.l.)付近にあるヌナタクの岩峰が望見できた日は、2ヶ月の滞在中たった3-4回しかなかった。ティンダル氷河涵養域での浅層掘削計画は、北海道大学低温科学研究所の成瀬が、1997年にチリ側の共同研究者と協議して立案したものであり、掘削時

期の選定もチリ側共同研究者の意見に基づいて決定された。それによると天候は常に悪く、季節による差はないとのことであった。しかし今回、彼等や国立公園スタッフの話を知ると、一般に南部氷床では夏に天気が悪く（久保田ら、本報告書）、特にラニーニャの年には南氷床の天候は非常に悪いらしい。

#### ヘリコプター・オペレーションと調査中の安全確保の問題

調査の具体的な実施計画は、東京工業大学の幸島が日本側の責任者となり、チリ側の責任者であるマガジャネス大学の Gino Casassa と協議しながら作成した。実施計画の作成段階で最も問題となったのは、厳しい気象条件下でのヘリコプター・オペレーションと調査中の安全確保の問題である。涵養域での浅層掘削にはヘリコプターによる機材輸送が不可欠であるが、日本側隊員にはパタゴニア氷原でのヘリコプター・オペレーションの経験はなかった。したがって、予備日の設定等はチリ側共同研究者の「2週間に1回はフライトチャンスがある」という経験則にもとづいて行われた。しかし、結果的にはこの経験則は今回あてはまらなかったことになる。また不測の事態に備えて、掘削予定地点からの地上ルートを事前に確保するため、当初の計画では、1998年に掘削予定地の偵察を予定していた。しかし、この予備調査は日本側隊員の事情により中止となったため、地上ルートの確定は、チリ側共同研究者が1998年に撮影した航空写真と今回の消耗域調査時に行った平衡線付近までの偵察にもとづいて行なった。今回の救出では、これらの情報が役立った。今後も、パタゴニア氷床上で長期調査を計画する場合は、ヘリコプターに頼りきるのではなく、不測の事態に備えて、地上ルートを事前に確保すべきである。

#### 装備・設営法の研究不足

今回の涵養域での調査中、最も問題となったのは、豪雪と強風によってテントや機材が埋没してしまうため、頻りに掘り起こし移設せねばならなかったことである。しかも、何度も埋没、掘りだし、移設をくり返すとテントが痛み、急速に劣化して強風にたえられなくなる。常に強風が吹き荒れる氷原涵養域でテントが崩壊すれば、非常な困難に見舞われることは明らかである。今回の調査では、氷原での調査経験の豊かなチリ側隊員が用意した既成の登攀用テント

利用したが、それらは短期間の調査では実績があるものの、今回のような氷原上での長期滞在型調査に耐えるものではなかった。今後、雪氷コア掘削等、氷原上での長期滞在を必要とする調査を計画する場合は、埋没、掘りだし、移設のくり返しに耐えうる頑丈なテント、またはテントや機材の掘りだし、移設を簡単にする特別な工夫、雪洞の入り口の保守を簡単にする工夫等、装備や設営法のさらなる研究が必要だと考える。

## 謝辞

今回の調査を行うにあたって、チリ空軍、特にヘリコプターのパイロットの皆さんには、危険なフライトを省みず全面的に支援していただいた。チリ共和国駐在特命全権大使 成田右文さん、および同二等書記官 日下部英紀さんには、チリ空軍との交渉にあたり、多大な援助を賜った。パイネ国立公園管理事務所の皆さんには、調査期間中、無線支援など数々のお世話になった。Hotel Explora のクラウディア・ペーニャさんにも無線支援で助けていただいた。以上の方々に心より感謝申し上げます。

本研究にあたっては、科学研究費補助金基盤研究 (A)(2)「南米・パタゴニア地域における完新世の氷河変動と近年の氷河変動機構の解明（代表 安仁屋政武）（課題番号 国 10041105）」、科学研究費補助金基盤研究 (C)(2)「地球温暖化にともなう大規模な温暖氷河の後退が海水面変動におよぼす影響評価（代表 成瀬廉二）（課題番号 11640422）」を使用した。

## 参考文献

- Aniya, M. (1999): Recent glacier variations of the Hielos Patagónicos, South America, and their contribution to sea-level change. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, **31** (2): 165-173.
- Aniya, M., Sato, H., Naruse, R., Skvārca, P. and Casassa, G. (1997): Recent glacier variations in the Southern Patagonia Icefield, South America. *Arctic and Alpine Research*, **29** (1): 1-12.
- Aristarain, J.A. and Delmas, R.J. (1993): Firm-core study from the southern Patagonia ice cap, South America. *Journal of Glaciology*, **39** (132): 249-254.
- Escobar, F., Vidal, F. and Garin, C. (1992): Water balance in the Patagonia Icefield. In Naruse, R. and Aniya, M. (eds.), "Glacier Researches in Patagonia 1990", Spporo, 109-119.

- IPCC (1996): *Climate change 1995: the science of climate change*. Houghton, J.T. et al. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, 572p.
- Matsuoka, K. and Naruse, R. (1999): Mass balance features derived from a firm core at Hielo Patagónico Norte, South America. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, **31** (4): 333-340.
- Naruse, R., Aniya, M., Skvarca, P. and Casassa, G. (1995): Recent variations of calving glaciers in Patagonia, South America, revealed by ground surveys, satellite-data analysis and numerical experiments. *Annals of Glaciology*, **21**: 297-303.
- 高橋昭好 (1996): 新型雪氷浅層コアドリルの開発, 雪氷、58 (1): 29-37.
- Takeuchi, N., Kohshima, S., and Fujita, K. (1998) Snow Algae Community on a Himalayan Glacier, Glacier AX010 East Nepal : Relationship with Glacier Summer Mass Balance. *Bulletin of Glacier Research*, **16**: 43-50.
- Yamada, T. (1987): Glaciological characteristics revealed by 37.6 m deep core drilled at the accumulation area of San Rafael glacier, the Northern Patagonia Icefield. *Bulletin of Glacier Research*, **4**: 59-67.
- Yamada, T., Kondo, H. and Fukuzawa, T. (1987): Ice core drilling operations in the Northern Patagonia Icefield. *Bulletin of Glacier Research*, **4**: 151-155.
- Yoshimura, Y., Kohshima, S., and Ohtani, S. (1997): A community of snow algae on a Himalayan glacier: change of algal biomass and community structure with altitude. *Arctic and Alpine Research*, **29** (1): 128-139.
- Yoshimura, Y., Kohshima, S., Takeuchi, N., Seko, K., and Fujita, K., Dating a Himalayan ice core using snow algae. *Journal of Glaciology*, in press.



表 1a：ティンダル氷河消耗域調査隊員

名前	所属	担当
幸島 司郎	東京工業大学 生命理工学部	雪氷生物調査、生物学的コア解析
竹内 望	東京工業大学 生命理工学部	雪氷生物調査、生物学的コア解析
白岩 孝行	北海道大学 低温科学研究所	掘削、コア解析
久保田敬二	北海道大学 低温科学研究所	掘削、コア解析
Gino Cassasa	Universidad de Magallanes	積雪調査、GPS 観測

表 1b：ティンダル氷河涵養域調査隊員

名前	所属	担当
幸島 司郎	東京工業大学 生命理工学部	雪氷生物調査、 生物学的コア解析
白岩 孝行	北海道大学 低温科学研究所	掘削、コア解析
久保田 敬二	北海道大学 低温科学研究所	掘削、コア解析
Maria A. Godoi	Universidad de Magallanes	コア中の化学成分解析
Marcelo G. Arevalo	Universidad de Magallanes	掘削、設営
Jorge Quinteros	Direccion General de Aguas	設営、積雪調査
Gino Cassasa	Universidad de Magallanes	積雪調査、GPS 観測
Andrés Rivera	Universidad de Chile	GPS 観測、 アイスレーダ観測

表 2：ティンダル氷河における調査活動の概要

10月25日	成田発	
10月26日	サンチャゴ（STG）着	機材 350kg 発送、大使公邸訪問
10月27日		
10月28日	調査準備：食料、機材買い出し	
10月29日	PA マガジャネス大（UMAG）	ボーリング機材点検
10月30日	ドリルバレル修理	
	Dikson Gl.調査のため、Gino と Andre は一部のみの参加に予定変更	
10月31日		
11月1日	PA → Paine H.Q.	（Gino、幸島、白岩、竹内、久保田）
11月2日	Paine H.Q. → Tyndall B.C.	馬 4 頭
11月3日	B.C. → Pine H.Q.	（Gino） 消耗域調査
11月4日	B.C. < - >	700m
11月5日	B.C. < - >	900m 涵養域のヌナタクが始めて見える
11月6日	B.C. - >	500m
11月7日	500m - >	900m - > B.C.
11月8日	B.C.	
11月9日	B.C. < - >	700m
11月10日	Tyndall B.C. - >	Pine H.Q. 馬 3 頭
11月11日		
11月12日	ヘリ待ち開始	
11月13日	空軍が週末しか飛ばないと言い出す。 - >	大使にお願いする。
11月14日		
11月15日		
11月16日	ヘリ待ちの日々	
11月17日		
11月18日	Jorge、Franco 合流	
11月19日	Dikson Gl.調査のため、Gino と Andre は不参加、代わりに Maria	
11月20日	Gino, Andre, Maria, 合流	
11月21日	Gino, Andre, Maria. - >	PA
11月22日	無風、高曇り	フライトチャンスのがす
11月23日	- >	PA（幸島） 日本側の判断で飛ぶように交渉
11月24日		
11月25日	竹内は下部調査、代わりに Marcelo	
11月26日	空港で待機するが飛ばず	
11月27日	PA - >	Paine H.Q. (幸島, Maria, Marcelo)

H.Q. ->Tyndall D.C.(白岩, 久保田, Jorge) 2 フライト  
H.Q. ->Tyndall Gl. 消耗域 標高 300m (竹内, Franco)  
11 月 28 日  
11 月 29 日 Paine H.Q. ->Tyndall D.C.(幸島, Maria, Marcelo) 2 フライト  
11 月 30 日 掘削準備  
12 月 1 日 掘削準備 悪天開始  
12 月 2 日 掘削準備  
12 月 3 日 掘削 Tyndall B.C. ->H.Q. (竹内, Franco)  
12 月 4 日 掘削  
12 月 5 日 掘削  
12 月 6 日 掘削  
12 月 7 日 掘削  
12 月 8 日 掘削機材撤収 掘削終了 47m  
12 月 9 日 ヘリ待ち開始 テント次々に埋められ破られる  
12 月 10 日 大テントこわれる  
12 月 11 日  
12 月 12 日 H.Q->PA (竹内)  
12 月 13 日  
12 月 14 日 竹内帰国  
12 月 15 日  
12 月 16 日 日本隊員雪洞生活に  
12 月 17 日 全員雪洞生活に  
12 月 18 日  
12 月 19 日  
12 月 20 日 Dikson Gl ->Paine H.Q. (Gino,Andre)  
12 月 21 日  
12 月 22 日  
12 月 23 日 D.C.->1,100m ->Paine H.Q.  
ヘリコプターで 1,100m 地点にスノーモービル輸送 (Gino,Andre),  
スノモとヘリで D.C.隊員救出 1,100m 地点にスノモ残置  
12 月 24 日 Paine H.Q ->PA  
12 月 25 日 PA ->STG  
12 月 26 日 STG ->  
12 月 28 日 成田着

# 南パタゴニア氷原ティンダル氷河涵養域における 雪氷コア掘削

白岩孝行<sup>1</sup>・幸島司郎<sup>2</sup>・久保田敬二<sup>3</sup>・竹内 望<sup>2</sup>・新堀邦夫<sup>1</sup>・  
福士博樹<sup>1</sup>・成瀬廉二<sup>1</sup>・Maria Angelica Godoi<sup>4</sup>・Marcelo G. Arevalo<sup>4</sup>・  
Jorge Quinteros<sup>5</sup>・Gino Casassa<sup>4</sup>・Andrés Rivera<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学 低温科学研究所

<sup>2</sup> 東京工業大学 生命理工学部

<sup>3</sup> 北海道大学大学院 地球環境科学研究科修士課程

<sup>4</sup> Universidad de Magallanes

<sup>5</sup> Dirección General de Aguas

<sup>6</sup> Universidad de Chile

## はじめに

総面積 17,200 km<sup>2</sup> を有するパタゴニア南北氷原は、極域氷床を除くと世界でも有数の規模を誇る氷河である。近年、これらの氷原から溢流する氷河の末端部における観測および空中写真・衛星画像解析から、氷原の多くの氷河で顕著な後退が生じていることが報告されている(たとえば Naruse *et al.*, 1995; Aniya *et al.*, 1997)。これらの後退は世界的にみても大変顕著であり、かつ氷河の規模が大きいため、アラスカと共に地球温暖化による海面上昇に最も寄与する地域として注目されている(IPCC, 1996)。最近の Aniya (1999) のまとめによると、過去 51 年間 (1945 - 1996) のパタゴニア南北氷原の縮小は、海面を  $1.93 \pm 0.75$  mm 上昇させ、海面上昇に果たした寄与率は 3.6% と見積もられる。

一方、パタゴニア氷原の涵養域に目を転じると、氷河の質量収支に着目した研究はたいへん限られている。Yamada (1987) および Matsuoka and Naruse (1999) はパタゴニア北氷原の標高 1300-1500 m 付近でそれぞれ 37.6 m と 14.5 m の雪氷コアを掘削し、酸素同位体比と気象学的に推定した質量収支を組み合わせ、正味収支を +3.45 m、+2.2 m と推定した。また、Aristarain and Delmas (1993) は、南パタゴニア氷原の標高 2680 m で掘削した 13.17 m のコアの水素同位体比および主要イオン濃度から、1981-1986 年の平均質量収支が +1.2 m であることを見いだした。しかし、これらの値は、流域の水収支から推定されるパタゴニア氷原

の総降水量 6 m (Escobar *et al.*, 1991) とは異なる。この原因として、相対的に高度の低い Yamada (1987) および Matsuoka and Naruse (1999) の場合は融解・流出が、高度が高い Aristarain and Delmas (1993) の場合は剝削が、質量収支の違いをもたらす原因と考えられる。このため、さらに多点での質量収支の計測が求められている。

本研究は、パタゴニア氷原涵養域の質量収支を求めることを目的として 1999 年 11-12 月に実施した、南パタゴニア氷原ティンダル氷河涵養域における浅層掘削の概要である。コアの解析結果については、様々な分析を行った後に別途報告する予定であるので、本報告では簡単な記載にとどめる。

### 掘削地点の概要

ティンダル氷河は南パタゴニア氷原の最南部に位置し南南東に溢流する面積 331 km<sup>2</sup> の氷河である。その涵養域最上流部は、西流するアマリア氷河涵養域と接し、南北に延びる南パタゴニア氷原の分水嶺となっている。掘削地点は、この分水嶺より約 500 m ほどティンダル氷河側に下った地点に位置する (50°59'05.29"S; 73°31'11.91"W; 1756 m a.s.l. ; 図 1)。表面は東方に約 1° 程度傾斜しており、南方約 2 km にはヌナタック状の岩峰が存在する (図 2)。この地点の氷厚についての実測データはないが、深度 600 m までは計測可能なアイスレーダーによっても実測不能であったことから、600 m を越す氷厚が予想される (Gino Casassa による私信)。

掘削キャンプ周辺の雪面はほぼ平坦であったが、飛雪による小さなシュカブラが発達していた。1999 年 11 月 27 日に掘削キャンプを設営した際には表面積雪はしまり雪であり、融解は観察されなかった。その後、しばしば低気圧の通過に伴う湿雪に見舞われたが、積雪表面における顕著な融解は観察できなかった。ただし、低気圧通過に伴う温度上昇によって、後述するトレンチ内において融雪水が観察されたので、積雪層内で融解が生じ、部分的に水みちが形成されて融解水が積雪層内に流下したのは間違いない。

滞在中の気象に関する報告は別報 (久保田ほか、本報告書) に譲る。我々が滞在した 11 月 27 日から 12 月 23 日にかけて、数日の好天を除き、常時西風が吹いた。頻発するブリザードによって降雪・飛雪が発生し、雪面は滞在期間中に

合計 3.5 m 上昇した。好天時の特徴としては、風が南寄りとなり、放射冷却により低温となった。

## 浅層ドリルの概要

今回の掘削は、1) 山岳地域であり輸送能力に限界があること、2) 温暖氷河で帯水層の出現が予定されていたこと、の2点により通常使用している浅層掘削ドリル（例えば高橋, 1996）の使用はためらわれた。このため、以下の条件を満たすドリルを開発する必要があった。

- 1) 掘削深度 100 m に対応可能
- 2) システム重量は 100 kg 以下であること
- 3) 長さ 50 - 60 cm、径 70 - 75 mm のコアが採取できること
- 4) 9 - 10 気圧の耐水構造であること
- 5) アーマードケーブルを用いて、検層装置が接続可能であること

以上の条件のもと、1998 年秋より著者のひとりである新堀を中心に、低温科学研究所技術部において、上記ドリルの開発が開始された。結果的には、図 3・表 1、表 2 に掲げるようなドリルが完成し、「どこでもドリル第一号」として本掘削に使用することができた。

本ドリルは、上部よりスリップリング、アンチトルク機構、駆動部、チップチャンバー、コアバレルより構成される（図 4）。ドリルの特徴としては、乾雪氷（ドライ）と湿雪氷（液封）に対応可能な 2 つのチップチャンバーを準備したことである。ドライ掘削用チャンバーは、チップをスパイラルによって上昇させ、チャンバー上部の空隙からチャンバー内に落下させる構造となっている。一方、液封掘削用のチャンバーは、チップブースターにより、強制的にチップと融雪水を上部に上昇させ、バレル軸の周囲にチップを保持する仕組みとなっている。このようにして上方に輸送された融雪水は、ドリルの駆動部およびアンチトルク機構を外側から通過して、ドリル上方へと輸送される。その結果、ドリルはたとえ帯水層が存在しても、掘削を継続できる構造となっている。

今回、新規に開発したアンチトルク部については、別報（新堀、本報告書）で詳細に論じたのでここでは繰り返さない。

可倒式マストは輸送時はコアバレルとチップチャンバーの収納ケースを兼ね

るため、FRP製の円筒を用いた（図5）。先端に半円のプーリーを接続し、3ヶ所にドリルを支持するサポーターを接続する。下端はウィンチの上部へ接続し、この部分が後方に可倒する（図6）。

ウィンチは直流モーターを用いた軽量タイプである。今回は120mのアーマードケーブルを巻き、深度100mまで掘削できるよう準備した。

ドリルとウィンチのモーターは、それぞれコントロールボックスを作成して、電圧を変化させることで制御した（図7）。

### 掘削トレンチの概要

パタゴニア氷原は常時強風が予想されたため、掘削作業は通常使用する掘削テントではなく、雪中に掘り込んだトレンチ内にて実施した。また、掘削テントに比べ、常時低温を維持できる雪中トレンチは、比較的湿度が高いパタゴニア氷原において、掘削したコアの保存という点でも有効であると考えられる。このような形式はYamada *et al.* (1987)によってパタゴニア北氷原で有効であることが確認されている。今回は、この報告を参考にし、ヘリコプターによる輸送の恩恵を受け、新たに次の点を改良した。

- 1) 屋根部の骨組には多量の降雪による荷重にも耐えられるように木材を使用（図8）
- 2) チェーンソーを用いて迅速にトレンチを作成する
- 3) トレンチの入口にドリフト除けの風防を作成する（図9）

トレンチの作成は、11月29日から12月3日の5日間、6人の人員によって行われた。幸い、この期間は、掘削キャンプに滞在した期間の中では最も良い天気遭遇し、結果的には満足できるものが完成した（図10）。トレンチは主として掘削場、コア処理場、コア貯蔵庫の3つから構成されている。掘削場では2名、コア処理場では3名が狭いながらも行動できる広さである。掘削場は、ドリルが3.13mと長いため、トレンチの基底よりも更に1.25m掘り込んだ。掘削作業に用いる発動発電機（Honda EP2500R; AC 1phase 220V, 9.1A, 50Hz, DC12V, 8.3A; 使用燃料はガソリン）は野外に置き、風防カバーで覆った。しかし、この風防カバーはオーバーヒートの原因となり、しばしば発電機を停止させたため、以降、イグルー形式の風防を作成した。しかし、どのような風防を作っ

ても、発電機への着雪は防げず、しばしば雪とり作業を要した。

図10に示すように、悪天による多量の降雪により、トレンチは日毎に埋積されていった。このため、積雪表面からトレンチ底部に至る通路は、ほぼ毎日除雪・整備する必要が生じた。掘削終了後、極度の悪天により居住テント・食堂テントが全てつぶされたため、最終的にはトレンチが食住の場となった。本トレンチの作成は今回の掘削を成功に導いたのみならず、生命を保証する切り札でもあった。

## コア掘削

雪氷コアは、トレンチの基部から掘削した。掘削深度の基準としては、掘削中、Base line を仮に設置し、各深度との対応を求めた。継続する降雪で雪面が上昇し続けたため、以後の議論では、表層コアを採取した12月9日の雪面を0mとし、これを基準として掘削深度を正の値で示す。各深度の関係を図11に示す。

「どこでもドリル」による掘削は、12月4日20:35に開始し、12月9日12:53に終了した。正味掘削時間は約42時間。掘削深度は45.97mである。また、掘削開始深度から雪面までのサンプルを採取する目的で、12月9日に積雪表面から手掘ドリルを使用して深度5.47mの表層コアを採取した。

掘削の経過をログ形式で示す(表3)。掘削したコアは、毎回掘削深度を50cmに抑えたため、平均して $50\text{ cm} \pm 10\text{ cm}$ 、ほぼ1ピースからなる質の良いコアであった(図12)。

掘削に関わる大きなトラブルは、深度21.73mと深度42.55mの2ヶ所で発生した。深度21.73mでは、突然掘削が進まなくなった。ケーブルの揺れやドリルモーターのコントローラーの電流値から判断して、カッターのスリップとアンチトルクのスリップの二つの原因が考えられたため、2種類のカッター(幅広と幅狭)と3種類のシュー(3, 4, 5mm)に変更したが、掘削はできなかった。次いでアンチトルクのスリップを疑い、アンチトルクの強度を変化させたが、これも効果はなかった。掘削中のケーブルのブレ具合から、アンチトルクが滑っていることは明瞭になったので、次にアンチトルクの外径を変化させることを考えた。今回のアンチトルクは構造上外径を変化させることができなかったの



で、1) ブレードの接続箇所に針金を挟み、2 mm 程度外径を大きくする (図 1 3)、2) ブレードを裏返し、内側についていた羽を外側に出して抵抗を大きくする (図 1 4)、3) ブレードに曲率をつけて、外径を大きくする (図 1 5)、の 3 つの方法を用いてスリップの停止を試みた。しかし、上記の過程を経るうちに、特定の深度の掘削孔径が大きくなってしまったものと思われ、スリップを止めることができなかった。このため、一度、掘削孔に雪を投げ込み、ある程度埋積してから再度掘削を開始した。その結果、問題の 21.73 m は突破することができた。このトラブルの解決には、12 月 6 日のほぼ全日を要した。

次に 42.55 m で再度スリップが発生した。コアは、この深度まで濡れておらず、

この深度から濡れはじめたので、この地点のスリップは濡れに起因することが明らかである。ここで生じたスリップは、21.73 m のものとは異なり、コア長にして 10~15 cm 掘るとスリップし始めるという性格を持っていた。ここで、それまで使用していたドライ掘削用チップチャンバーから、液封掘削用チップチャンバーへと交換した。しかし、結果は変わらず、短いコアをとる掘削が続いた。結局、42.55 m で濡れはじめてから、長いコアを掘ることは叶わず、12 月 9 日 12:53、掘削を終了した。

## コアの概要

掘削した雪氷コアは、表面~42.55 m までは所々氷板を含む乾いたフィルムから成る。42.55 m 以深は濡れた氷層であった (表 4、図 1 6)。表面から最深部までのコアの長さは 46.29 m であり、掘削深度より 32 cm 長い。これは掘削深度の測定誤差とコアロギングの測定誤差に起因する。

密度の深さプロファイルを見ると、表面付近でやや高密度層が見られるが、全体的には表面の  $400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  から 42.55 m 深の含水層直前における  $650 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  まで漸増する傾向が得られた。42.55 m 以深は含水して急速に氷化密度に近づいている。

密度を考慮して、掘削深度毎の水当量 (m) も図 1 6 に示した。今回掘削した 45.97 m は、水当量にして 25.97 m に相当する。

コアの層序についてはまだ解析が終了していない。ここでは、氷板の分布について、Koerner (1977) に基づいて Melt feature percentage (%) の値として示す。

Melt feature は、コア中において相対的に気泡含有量が少なく、かつ透明に見える箇所を指し、融解・再凍結過程によって形成されると考えられる。このため、主として夏期の暖かさの指標として各地のコア解析で求められる値である。MFP は、以下の式で算出する；

$$MFP = \frac{0.9S_i}{0.9S_i + \rho_f S_f} \times 100 \quad \text{----- (1)}$$

ここで、 $S_i$  と  $S_f$  は、それぞれコアの縦断面における Melt feature とフィルン層の面積である。0.9 は Melt feature の密度 ( $\text{Mgm}^{-3}$ )、 $\rho_f$  はフィルンの密度 ( $\text{Mgm}^{-3}$ ) である。MFP を求めた単位長さは、便宜上、1 m とした。

図 17 は、表面から深度 45 m までの MFP の分布プロファイルである。深度 5m, 13-27m, 39m 付近の 3 ヶ所に MFP が相対的に大きな深度が見られる。コアの年代決定については、今後解析を予定している種々の分析を待つて行う予定であるが、MFP で見る限り、これらの 3 ヶ所が相対的に温暖な夏を示している可能性が指摘できる。

## 解析計画

別報（幸島、本報告書）で述べたように、12月9日に掘削を終了し、その後下山予定であった本掘削隊は、引き続き悪天のため、12月23日になってヘリコプターとスノーモービルを利用した救援隊によって救助されるという結末を迎えた。これにより、掘削システムの大部分とコアの4分の3は、現地に残置せざるを得なかった。幸い持ち帰ることのできた4分の1のコアは、現在（2000年3月12日）、プンタアレナスから日本へ冷凍輸送の最中である。このコアの到着を待つて、以下の解析・分析が実施される予定である；

- 1) 酸素・水素安定同位体比（北海道大学）
- 2) 主要イオン（北海道大学）
- 3) バクテリア（東京工業大学）
- 4) 花粉（東京工業大学）

これらのシグナルはいずれも季節変動を示すことが期待され、この季節変動に基づき、本掘削地点の年間質量収支の復元を試みる予定である。

## 謝辞

本掘削を進めるにあたり、先行してパタゴニア北氷原において掘削を実施した山田知充さん（北海道大学低温科学研究所）、松岡健一さん（北海道大学大学院地球環境科学研究科博士課程）のお2人には種々のアドバイスを賜った。低温科学研究所の技術部の皆さんには、掘削システムの作成にあたり、休日返上の作業で対応していただいた。チリ空軍のパイロットの皆さんには、危険なフライトを省みず、今回の掘削オペレーションを全面的に支援していただいた。チリ共和国駐在特命全権大使 成田右文さん、および同二等書記官 日下部英紀さんには、チリ空軍との交渉にあたり、多大な援助を賜った。パイネ国立公園管理事務所の皆さんには、掘削オペレーション期間中、無線支援でお世話になった。Hotel Explora のクラウディア・ペーニャさんにも無線支援で助けていただいた。以上の方々に感謝申し上げます。

本研究にあたっては、科学研究費補助金基盤研究(A)(2)「南米・パタゴニア地域における完新世の氷河変動と近年の氷河変動機構の解明（代表 安仁屋政武）（課題番号 国 10041105）」、科学研究費補助金基盤研究(C)(2)「地球温暖化にともなう大規模な温暖氷河の後退が海水面変動におよぼす影響評価（代表 成瀬廉二）（課題番号 11640422）」、低温科学研究所平成11年度リーダーシップ経費を使用した。記してお礼申し上げます。

## 参考文献

- Aniya, M. (1999): Recent glacier variations of the Hielos Patagónicos, South America, and their contribution to sea-level change. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, **31** (2): 165-173.
- Aniya, M., Sato, H., Naruse, R., Skvarca, P. and Casassa, G. (1997): Recent glacier variations in the Southern Patagonia Icefield, South America. *Arctic and Alpine Research*, **29** (1): 1-12.
- Aristarain, J.A. and Delmas, R.J. (1993): Firm-core study from the southern Patagonia ice cap, South America. *Journal of Glaciology*, **39** (132): 249-254.
- Escobar, F., Vidal, F. and Garin, C. (1992): Water balance in the Patagonia Icefield. In Naruse, R. and Aniya, M. (eds.), "Glacier Researches in Patagonia 1990", Spporo, 109-119.

- IPCC (1996): *Climate change 1995: the science of climate change*. Houghton, J.T. et al. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, 572p.
- Koerner, R. M. (1977): Devon Island ice cap: core stratigraphy and paleoclimate. *Science*, **196** (4285): 15-18.
- 幸島司郎 (2000): GRPP1999 ティンダル氷河調査概要、本報告書.
- 久保田敬二・白岩孝行・幸島司郎・竹内望・Arevalo, M.G., Godoi, M.A. and Quinteros, J. (2000): 南パタゴニア氷原ティンダル氷河における気象観測、本報告書.
- Matsuoka, K. and Naruse, R. (1999): Mass balance features derived from a firm core at Hielo Patagónico Norte, South America. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, **31** (4): 333-340.
- Naruse, R., Aniya, M., Skvarca, P. and Casassa, G. (1995): Recent variations of calving glaciers in Patagonia, South America, revealed by ground surveys, satellite-data analysis and numerical experiments. *Annals of Glaciology*, **21**: 297-303.
- 新堀邦夫 (2000): パンタグラフ型アンチトルク機構の試作、本報告書.
- 高橋昭好 (1996): 新型雪氷浅層コアドリルの開発, 雪氷, 58 (1): 29-37.
- Yamada, T. (1987): Glaciological characteristics revealed by 37.6 m deep core drilled at the accumulation area of San Rafael glacier, the Northern Patagonia Icefield. *Bulletin of Glacier Research*, **4**: 59-67.
- Yamada, T., Kondo, H. and Fukuzawa, T. (1987): Ice core drilling operations in the Northern Patagonia Icefield. *Bulletin of Glacier Research*, **4**: 151-155.

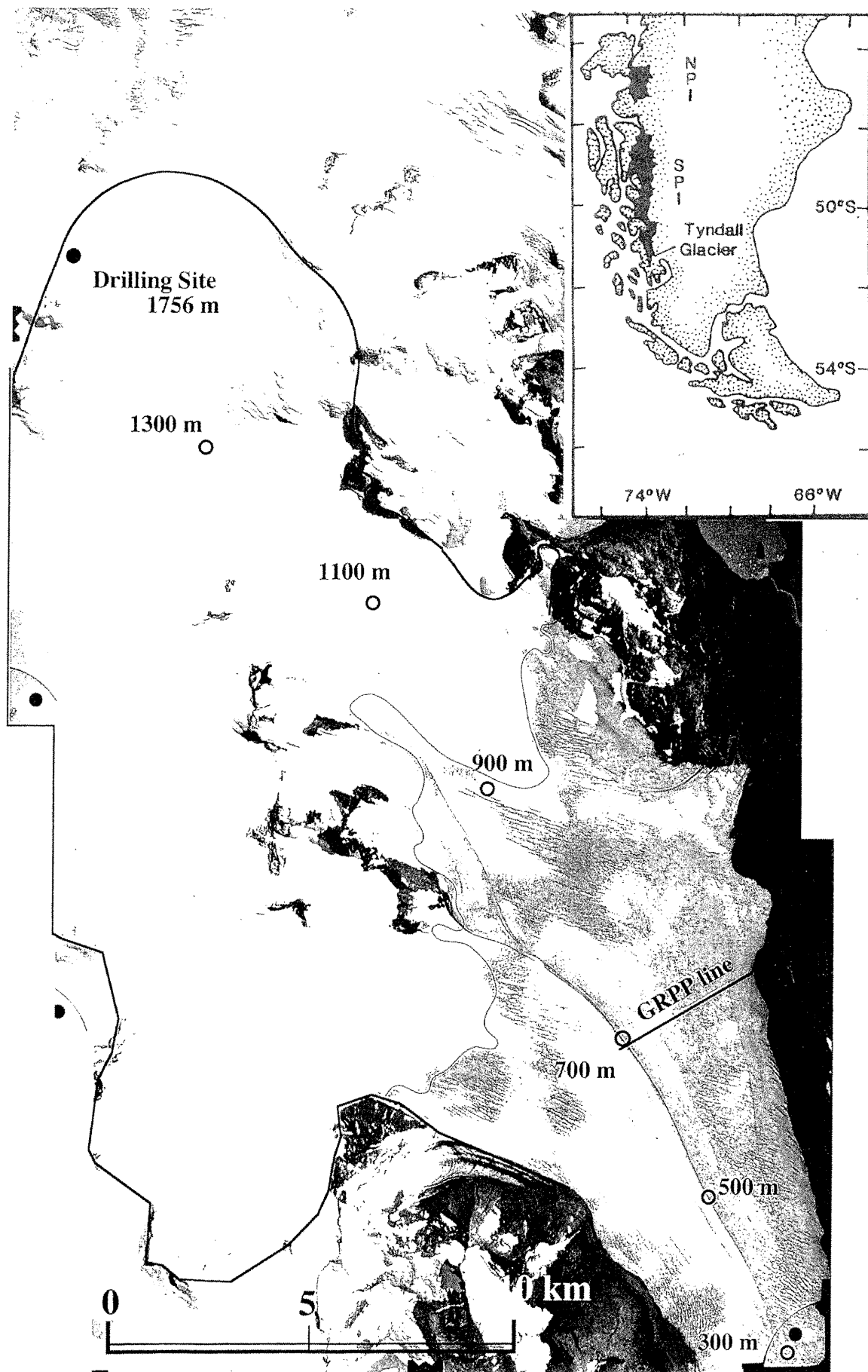


Figure 1. Location of the drilling site



Figure 2. Drilling camp at the accumulation area of Tyndall Glacier Southern Patagonia Icefield. Looking southward from the drilling site.

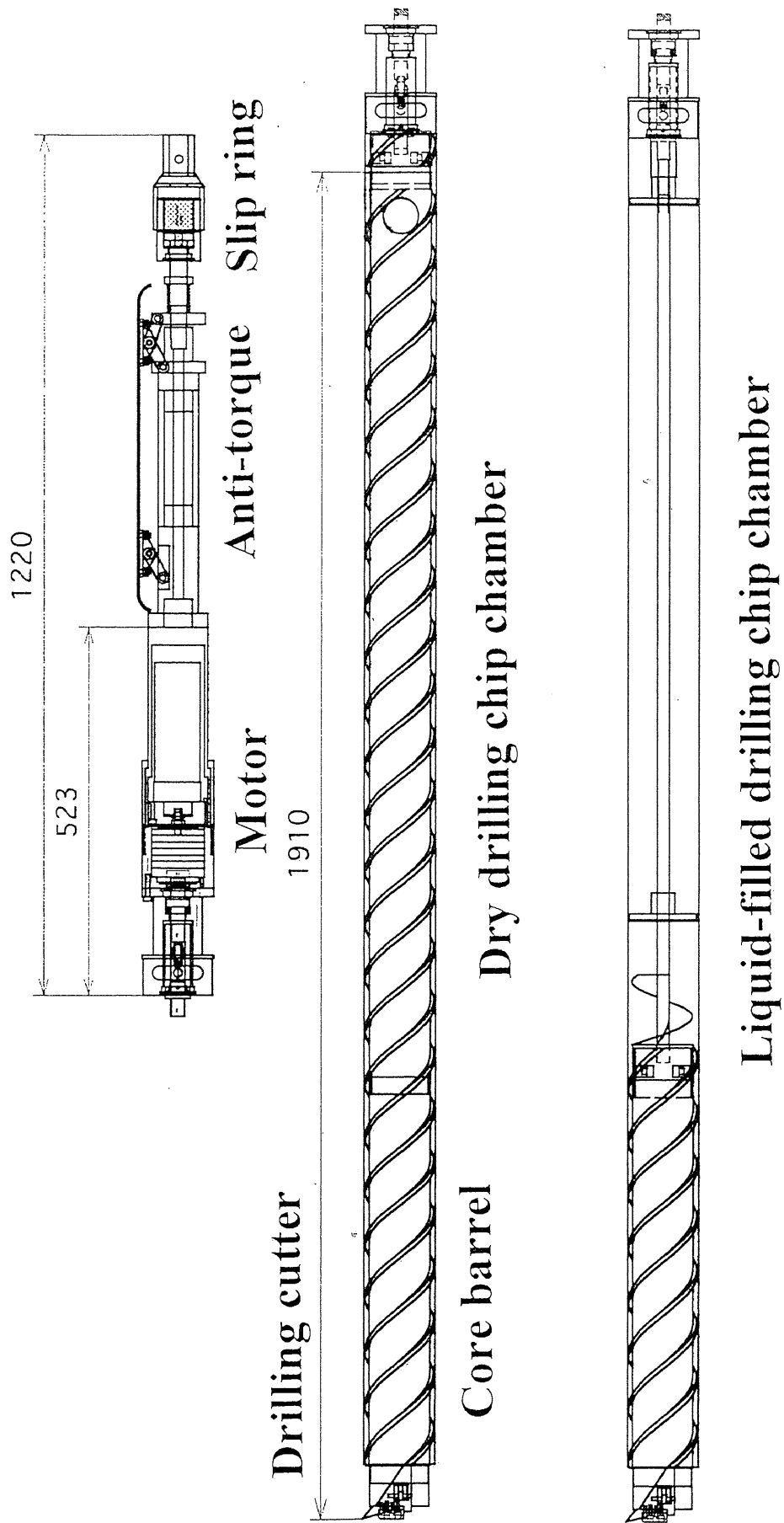


Figure 3. Components of the "Dokodemo-drill No.1".

Table 1 Drill system (Dokodemo-drill type 1)

Type	Electro-mechanical drill
Core diameter	74 mm
Core length	Firn: 80 cm Ice: 65 cm
Drilling speed	20-40 $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ : variable by replacing cutters and heels
Size of drill	110 mm x 3130 mm; 38 kg
Type of anti-torque	Newly designed pantographic type
Motor	AC 200 V, 360W
Barrel specification	Dry chip chamber type Liquid-filled chip chamber type
Controlling system	Variable by voltage controller
Remarks	Water proof

Table 2 Mast and winch system

Type	Tilting tower type
Size of mast	200 mm x 2300 mm; 8 kg
Size of winch	500 mm x 500 mm x 400 mm; 35 kg
Winch speed	15 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ in average
Maximum load	80 kg
Motor	DC 100 V, 300W
Controlling system	Variable by voltage controller
Cable	Armored cable: diameter 5.7 mm; length 120 m; drilling depth 100 m; conductor 4 lines



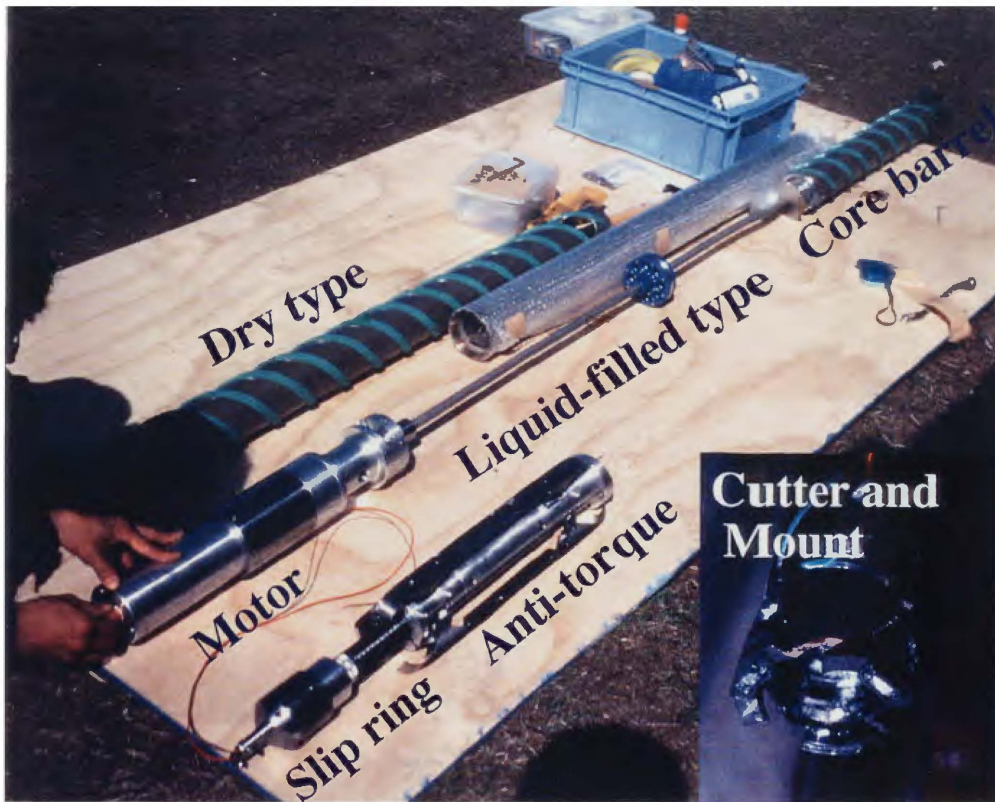


Figure 4. A newly designed electro-mechanical drill "Dokodemo drill No.1."

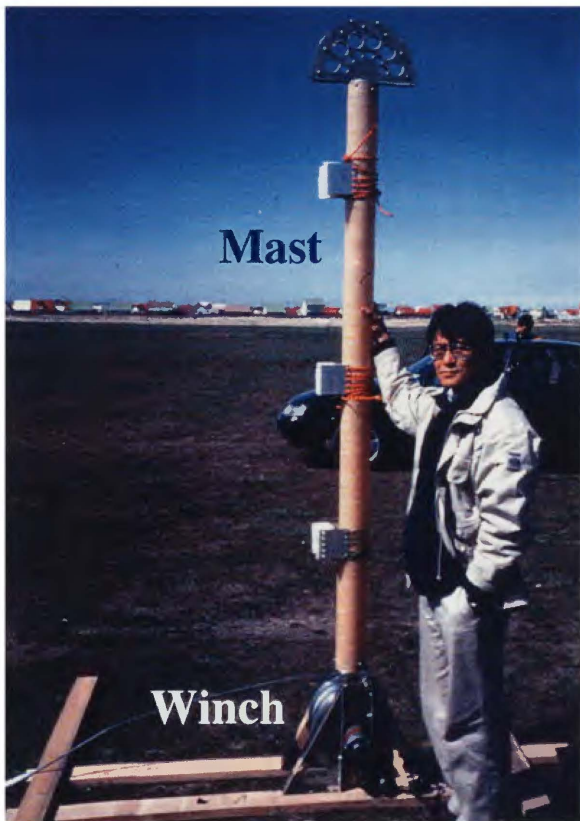


Figure 5. Mast and winch system for "Dokodemo drill No. 1".



Figure 6. Tilted position of "Dokodemo drill No.1".

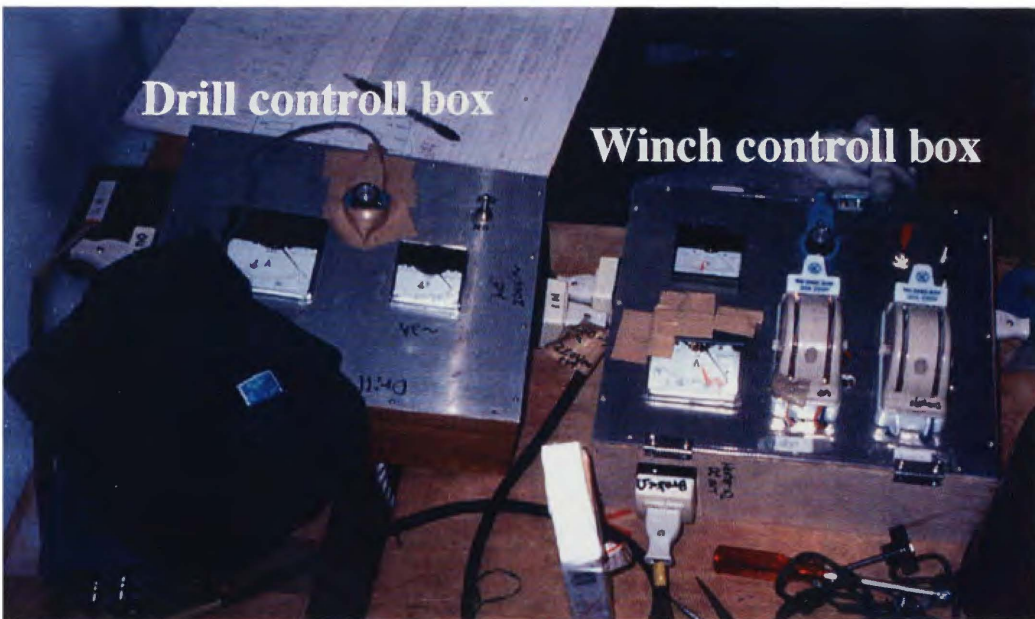


Figure 7. Controll boxes for drill (left) and winch (right),



Figure 8. Roof of the drilling trench. The roof was made by wood and bamboo poles and covered with plastic canvas.



Figure 9. Entrance of the drilling trench. The bamboo structure was later covered with plastic canvas.

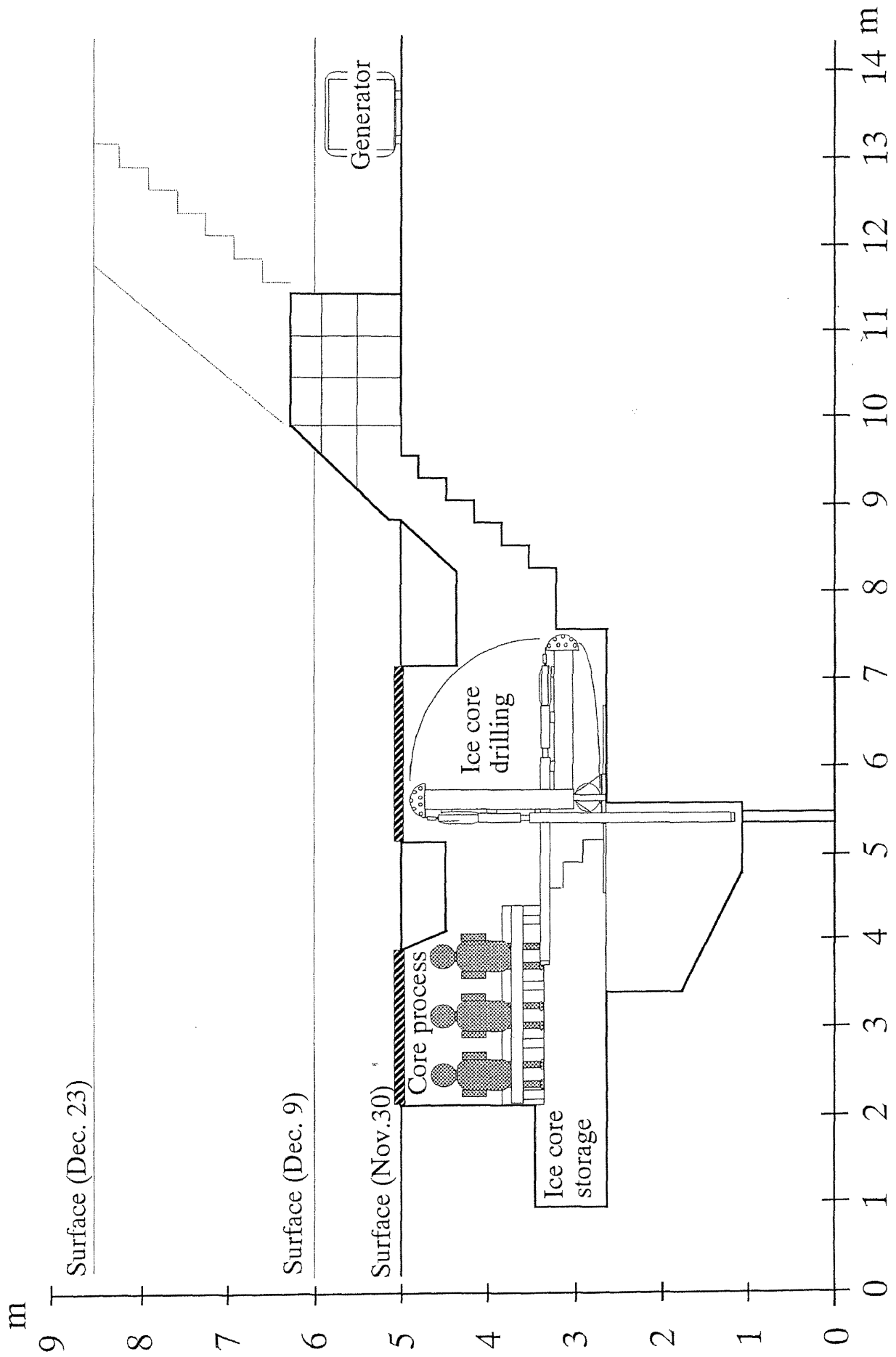


Figure 10. Cross profile of the drilling trench.

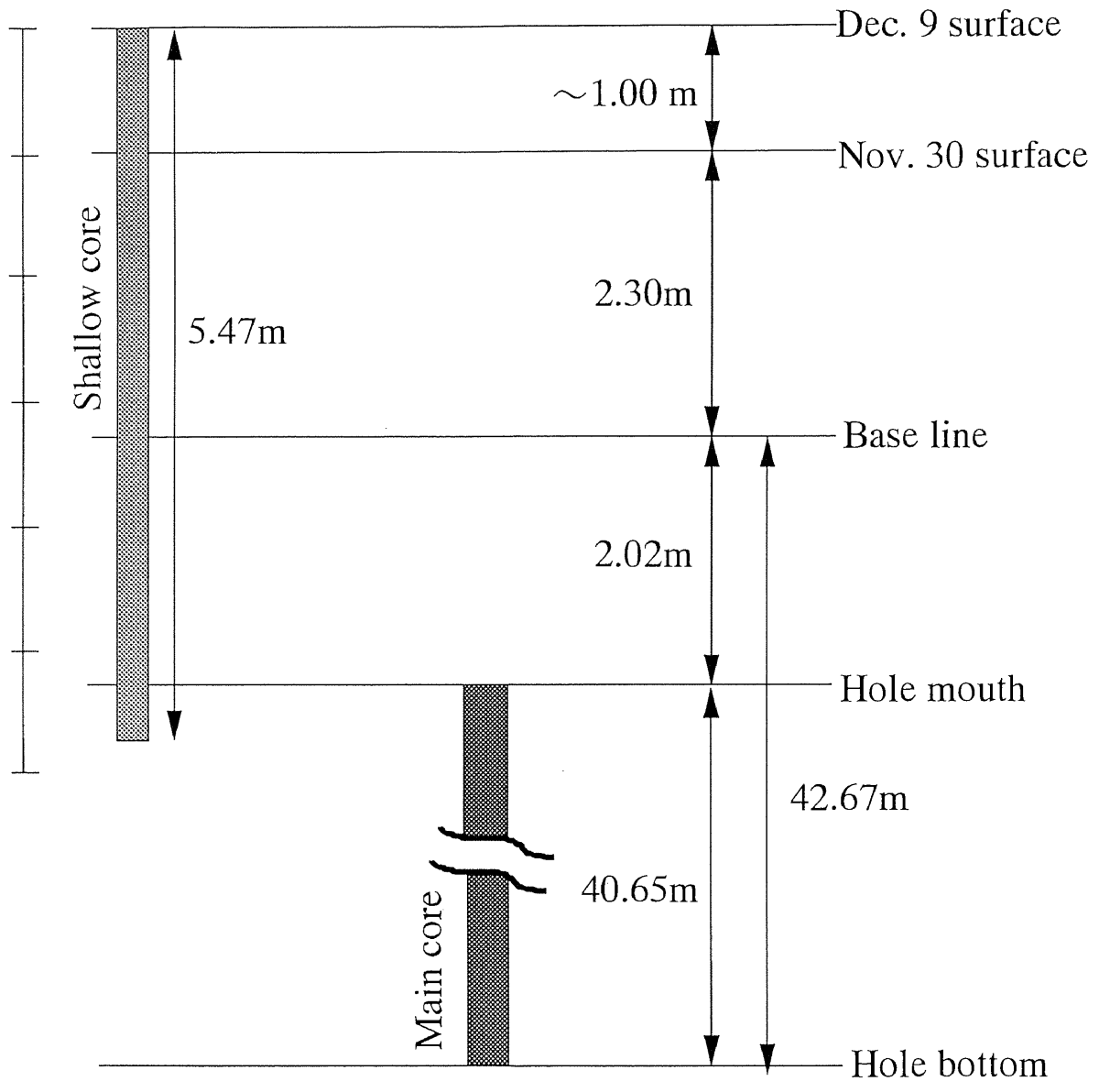


Figure 11. Schematic figure of the drilling levels

Table 3 Drilling log at Tyndall Glacier 1999

Date	Run No.	Start time	Stop time	From (m)	To (m)	Drilling depth (m)	Core length (m)	Pieces	Remarks
4.Dec	1	20:35	20:43	5.32	5.86	0.54	0.56	1	
	2		21:13	5.86	6.36	0.50	0.51	2	
	3		21:28	6.36	6.78	0.42	0.30	1	
5.Dec	4	10:15	10:20	6.78	7.26	0.48	0.58	2	
	5	10:28	10:35	7.26	7.66	0.40	0.42	2	
	6	10:45	10:50	7.66	8.07	0.41	0.60	1	
	7	11:10	11:13	8.07	8.57	0.50	0.42	1	
	8	11:26	11:30	8.57	9.07	0.50	0.51	1	
	9	11:39	11:43	9.07	9.57	0.50	0.50	1	
	10	11:52	11:55	9.57	10.07	0.50	0.50	1	
	11	12:06	12:08	10.07	10.57	0.50	0.50	1	
	12	12:20	12:22	10.57	11.07	0.50	0.50	1	
	13	12:34	12:50	11.07	11.07	0.00	0.03	0	Slipping occurred
	14	13:15	13:17	11.07	11.57	0.50	0.61	1	
	15	15:43	15:45	11.57	12.08	0.51	0.31	1	
	16	15:55	15:57	12.08	12.58	0.50	0.00	0	
	17	16:07	16:08	12.58	12.68	0.10	0.61	1	
	18	16:16	16:18	12.68	13.18	0.50	0.54	1	
	19	16:28	16:29	13.18	13.68	0.50	0.50	1	
	20	16:39	16:41	13.68	14.18	0.50	0.52	1	
	21	16:49	16:51	14.18	14.68	0.50	0.50	1	
	22	17:02	17:05	14.68	15.18	0.50	0.52	1	
	23	17:14	17:17	15.18	15.68	0.50	0.00	0	
24	17:25	17:28	15.68	15.78	0.10	0.58	1		
25	17:38	17:41	15.78	16.28	0.50	0.41	1		
26	17:50	17:53	16.28	16.78	0.50	0.61	1		
27	18:07	18:09	16.78	17.28	0.50	0.46	1		
28	18:18	18:23	17.28	17.73	0.45	0.53	1		
29	18:51	18:53	17.73	18.23	0.50	0.49	1		
30	19:01	19:08	18.23	18.73	0.50	0.60	2		
31	19:17	19:21	18.73	19.23	0.50	0.47	1		
32	19:30	19:33	19.23	19.73	0.50	0.44	1		
33	19:43	19:47	19.73	20.23	0.50	0.58	1		
34	19:59	20:00	20.23	20.73	0.50	0.43	1		
35	20:10	20:12	20.73	21.23	0.50	0.45	1		
6.Dec	36	9:56	9:59	21.23	21.73	0.50	0.56	1	
	37	10:10	10:15	21.73	21.73	0.00	0.00	0	Slipping occurred
	38	10:29	10:34	21.73	21.73	0.00	0.00	0	Slipping occurred
	39	10:44	10:48	21.73	21.73	0.00	0.00	0	Slipping occurred
	40	11:07	11:11	21.73	21.73	0.00	0.00	0	Slipping occurred
	41	11:25	11:32	21.73	21.73	0.00	0.00	0	Slipping occurred
	42	11:46		21.73	21.73	0.00	0.00	0	Slipping occurred
	43			21.73	21.73	0.00	0.00	0	Slipping occurred
	44			21.73	21.73	0.00	0.00	0	Slipping occurred
	45			21.73	21.73	0.00	0.00	0	Slipping occurred
	46			21.73	21.73	0.00	0.00	0	Slipping occurred
	47			21.73	21.73	0.00	0.00	0	Slipping occurred
	48	13:55	14:00	21.73	21.73	0.00	0.02	1	Slipping occurred
	49	16:20	16:30	21.73	21.73	0.00	0.00	0	Slipping occurred
50	17:00	17:10	21.73	21.73	0.00	0.00	0	Slipping occurred	
51	20:00	20:05	21.73	22.19	0.46	0.37	2		
52	20:06		22.19	22.30	0.11	0.00	1		
7.Dec	53	10:25	10:30	22.30	22.81	0.51	0.56	2	
	54	10:39	10:42	22.81	23.31	0.50	0.51	1	
	55	10:58	11:13	23.31	23.81	0.50	0.58	1	
	56	11:20	11:24	23.81	24.31	0.50	0.45	1	
	57	11:42	11:45	24.31	24.81	0.50	0.49	1	

Table 3 Drilling log at Tyndall Glacier 1999

Date	Run No.	Start time	Stop time	From (m)	To (m)	Drilling depth (m)	Core length (m)	Pieces	Remarks
	58	12:04	12:07	24.81	25.31	0.50	0.62	1	
	59	12:22	12:25	25.31	25.81	0.50	0.38	1	
	60	12:32	12:36	25.81	26.31	0.50	0.58	1	
	61	12:45	12:48	26.31	26.81	0.50	0.41	1	
	62	13:01	13:03	26.81	27.31	0.50	0.54	1	
	63	13:11	13:13	27.31	27.81	0.50	0.47	1	
	64	13:22	13:24	27.81	28.31	0.50	0.52	1	
	65	15:47	15:49	28.31	28.81	0.50	0.60	1	
	66	15:59	16:01	28.81	29.31	0.50	0.47	1	
	67	16:12	16:14	29.31	29.81	0.50	0.50	1	
	68	16:35	16:36	29.81	30.31	0.50	0.45	1	
	69	16:44	16:47	30.31	30.81	0.50	0.51	1	
	70	16:56	16:58	30.81	31.31	0.50	0.60	1	
	71	17:07	17:09	31.31	31.81	0.50	0.42	1	
	72	17:18	17:21	31.81	32.31	0.50	0.52	1	
	73	17:29	17:32	32.31	32.81	0.50	0.50	1	
	74	17:41	17:43	32.81	33.31	0.50	0.61	1	
	75	18:06	18:08	33.31	33.81	0.50	0.41	1	
	76	18:27	18:19	33.81	34.31	0.50	0.50	1	
	77	18:28	18:30	34.31	34.81	0.50	0.49	1	
	78	18:38	18:41	34.81	35.31	0.50	0.50	2	
	79	18:52	18:53	35.31	35.81	0.50	0.45	1	
	80	19:01	19:03	35.81	36.31	0.50	0.59	1	
	81	19:11	19:14	36.31	36.81	0.50	0.49	1	
	82	19:23	19:26	36.81	37.31	0.50	0.42	1	
	83	19:34	19:37	37.31	37.81	0.50	0.60	1	
	84	19:47	19:49	37.81	38.31	0.50	0.40	1	
	85	19:57	20:00	38.31	38.68	0.37	0.35	1	
	86	20:13	20:15	38.68	38.77	0.09	0.00	0	Slipping occurred
8.Dec	87	11:30	11:33	38.77	39.12	0.35	0.44	1	
	88	11:47	11:49	39.12	39.62	0.50	0.64	1	
	89	12:10	12:13	39.62	39.80	0.18	0.09	1	Slipping occurred
	90		12:39	39.80	39.88	0.08	0.20	1	Slipping occurred
	91	13:01	13:04	39.88	40.23	0.35	0.28	1	
	92		13:18	40.23	40.23	0.00	0.00	0	Slipping occurred
	93	13:36	13:38	40.23	40.73	0.50	0.51	2	
	94	13:50	13:52	40.73	40.86	0.13	0.18	1	
	95	15:47	15:51	40.86	41.36	0.50	0.55	1	
	96	16:02	16:07	41.36	41.76	0.40	0.40	1	
	97	16:28	16:38	41.76	42.21	0.45	0.45	2	
	98	16:44	16:48	42.21	42.55	0.34	0.00	0	Core getting wet
	99	16:54	17:00	42.55	42.75	0.20	0.51	1	Water soaked core
	100	17:14	17:17	42.75	42.97	0.22	0.23	1	Water soaked core
	101	17:51	17:54	42.97	43.11	0.14	0.07	1	Water soaked core
	102	18:06	18:08	43.11	43.41	0.30	0.35	1	Water soaked core
	103	18:22	18:25	43.41	43.58	0.17	0.19	1	Water soaked core
	104	18:30	18:39	43.58	43.80	0.22	0.20	1	Water soaked core
	105	19:30	19:33	43.80	43.98	0.18	0.15	1	Water soaked core
	106	19:46	19:48	43.98	44.15	0.17	0.15	1	Water soaked core
	107		20:26	44.15	44.45	0.30	0.36	1	Water soaked core
	108	20:56	20:58	44.45	44.55	0.10	0.08	1	Water soaked core
9.Dec	109	11:07	11:20	44.55	44.83	0.28	0.37	1	Water soaked core
	110		11:33	44.83	44.98	0.15	0.08	1	Water soaked core
	111	11:39	11:43	44.98	45.20	0.22	0.20	1	Water soaked core
	112	12:56	12:01	45.20	45.46	0.26	0.27	1	Water soaked core
	113			45.46	45.49	0.03	0.10	1	Water soaked core
	114	12:20	12:24	45.49	45.67	0.18	0.13	1	Water soaked core
	115		12:35	45.67	45.75	0.08	0.11	1	Water soaked core
	116		12:53	45.75	45.97	0.22	0.21	1	Water soaked core

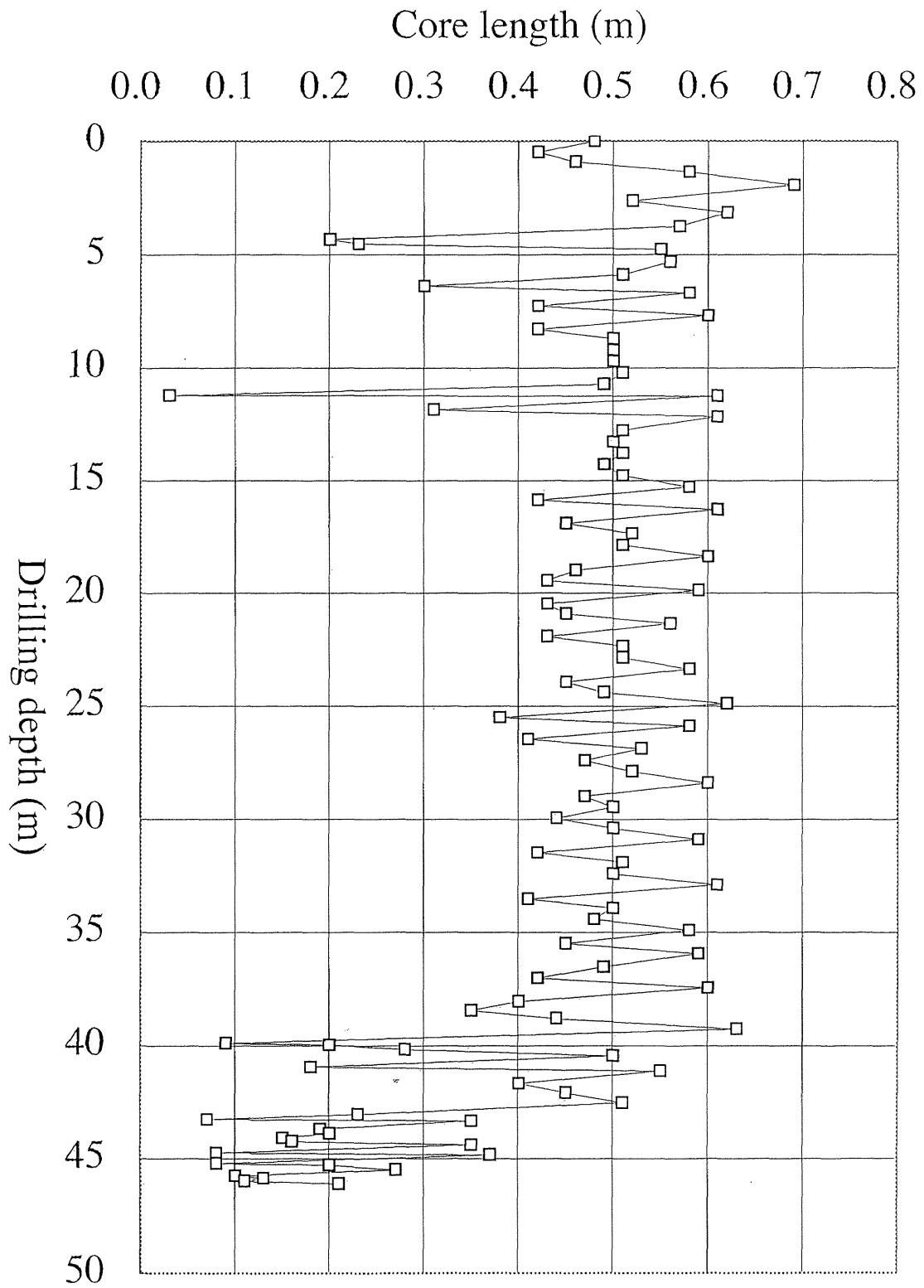


Figure 12. Length of ice cores at each drilling run.





Figure 13.  
Expansion of blade by  
inserting a ring wire.

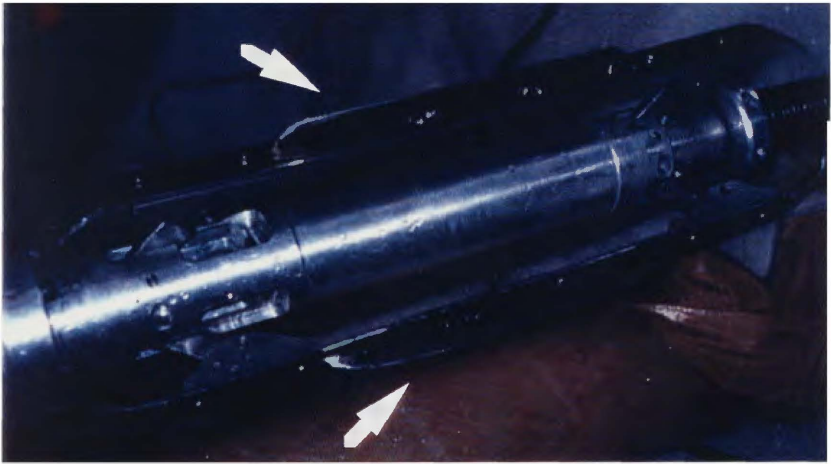


Figure 14.  
Expansion of blade by  
turning the blade out.

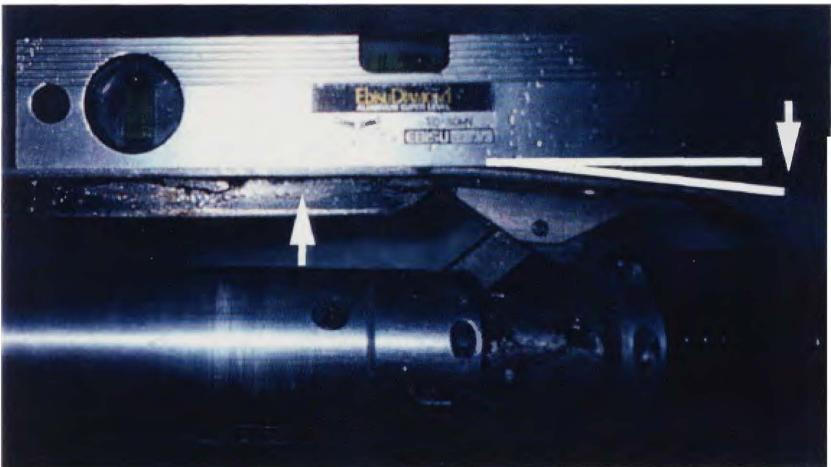


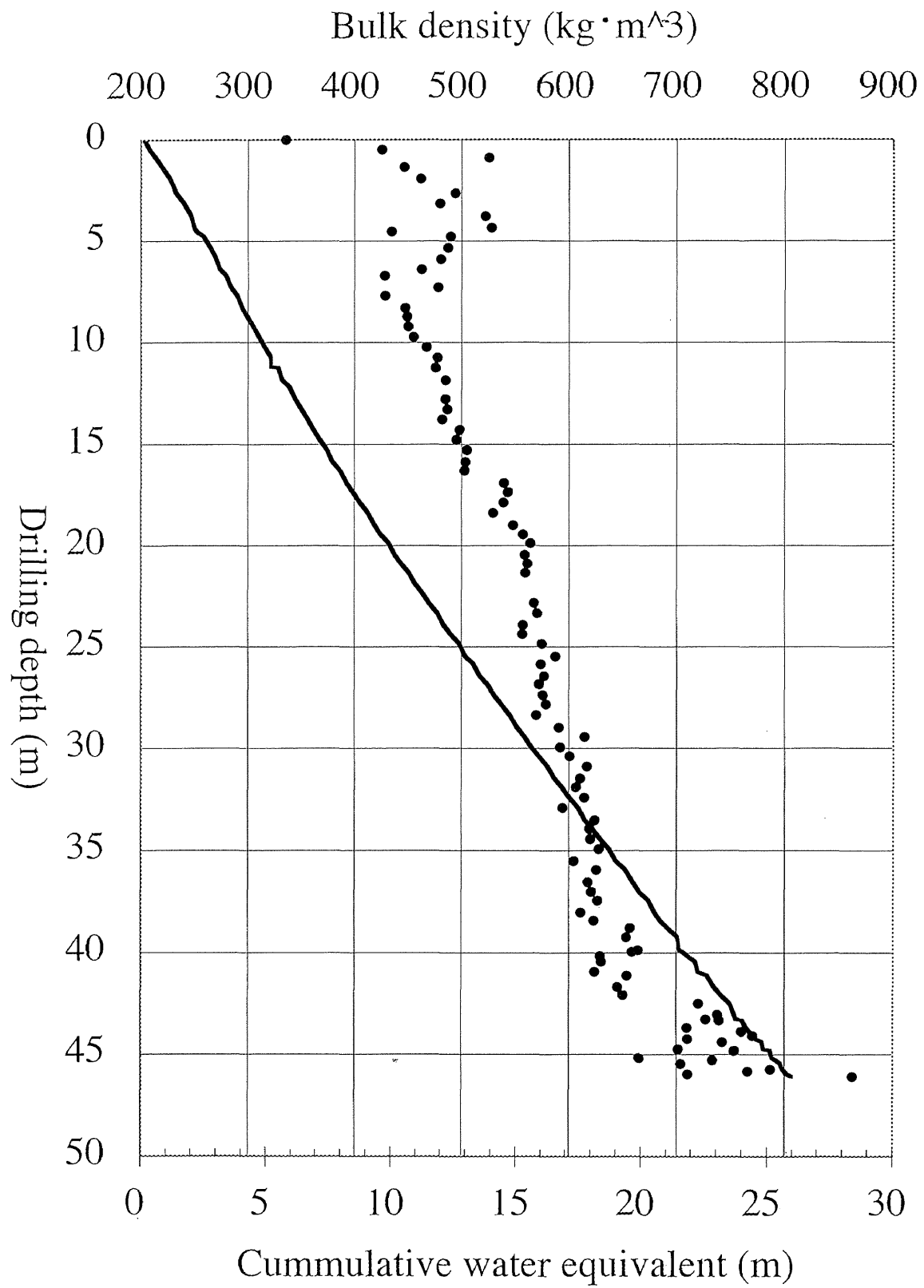
Figure 15.  
Expansion of blade by  
bending the blade.

Table 4 Properties of ice cores recovered

From (m)	To (m)	Length (m)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Water eq (m)	Cummulative w.e (m)
0.00	0.48	0.48	336	0.16	0.16
0.48	0.90	0.42	425	0.18	0.34
0.90	1.36	0.46	525	0.24	0.58
1.36	1.94	0.58	446	0.26	0.84
1.94	2.63	0.69	462	0.32	1.16
2.63	3.15	0.52	494	0.26	1.42
3.15	3.77	0.62	480	0.30	1.71
3.77	4.34	0.57	522	0.30	2.01
4.34	4.54	0.20	528	0.11	2.12
4.54	4.77	0.23	434	0.10	2.22
4.77	5.32	0.55	489	0.27	2.48
5.32	5.88	0.56	487	0.27	2.76
5.88	6.39	0.51	480	0.24	3.00
6.39	6.69	0.30	462	0.14	3.14
6.69	7.27	0.58	428	0.25	3.39
7.27	7.69	0.42	478	0.20	3.59
7.69	8.29	0.60	429	0.26	3.85
8.29	8.71	0.42	447	0.19	4.03
8.71	9.21	0.50	449	0.22	4.26
9.21	9.71	0.50	450	0.23	4.48
9.71	10.21	0.50	455	0.23	4.71
10.21	10.72	0.51	467	0.24	4.95
10.72	11.21	0.49	477	0.23	5.18
11.21	11.24	0.03	476	0.01	5.20
11.24	11.85	0.61	475	0.29	5.49
11.85	12.16	0.31	485	0.15	5.64
12.16	12.77	0.61	485	0.30	5.93
12.77	13.28	0.51	485	0.25	6.18
13.28	13.78	0.50	486	0.24	6.43
13.78	14.29	0.51	482	0.25	6.67
14.29	14.78	0.49	498	0.24	6.91
14.78	15.29	0.51	495	0.25	7.17
15.29	15.87	0.58	504	0.29	7.46
15.87	16.29	0.42	503	0.21	7.67
16.29	16.90	0.61	502	0.31	7.98
16.90	17.35	0.45	539	0.24	8.22
17.35	17.87	0.52	543	0.28	8.50
17.87	18.38	0.51	539	0.27	8.78
18.38	18.98	0.60	529	0.32	9.09
18.98	19.44	0.46	548	0.25	9.35
19.44	19.87	0.43	557	0.24	9.59
19.87	20.46	0.59	564	0.33	9.92
20.46	20.89	0.43	558	0.24	10.16
20.89	21.34	0.45	561	0.25	10.41
21.34	21.90	0.56	559	0.31	10.72
21.90	22.33	0.43	563	0.24	10.97
22.33	22.84	0.51	563	0.29	11.25
22.84	23.35	0.51	567	0.29	11.54
23.35	23.93	0.58	570	0.33	11.87
23.93	24.38	0.45	557	0.25	12.12
24.38	24.87	0.49	556	0.27	12.40
24.87	25.49	0.62	575	0.36	12.75
25.49	25.87	0.38	587	0.22	12.98

Table 4 Properties of ice cores recovered

From (m)	To (m)	Length (m)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Water eq (m)	Cummulative w.e (m)
25.87	26.45	0.58	574	0.33	13.31
26.45	26.86	0.41	576	0.24	13.54
26.86	27.39	0.53	572	0.30	13.85
27.39	27.86	0.47	575	0.27	14.12
27.86	28.38	0.52	578	0.30	14.42
28.38	28.98	0.60	569	0.34	14.76
28.98	29.45	0.47	590	0.28	15.04
29.45	29.95	0.50	615	0.31	15.34
29.95	30.39	0.44	591	0.26	15.61
30.39	30.89	0.50	600	0.30	15.91
30.89	31.48	0.59	617	0.36	16.27
31.48	31.90	0.42	610	0.26	16.53
31.90	32.41	0.51	606	0.31	16.83
32.41	32.91	0.50	614	0.31	17.14
32.91	33.52	0.61	594	0.36	17.50
33.52	33.93	0.41	624	0.26	17.76
33.93	34.43	0.50	619	0.31	18.07
34.43	34.91	0.48	620	0.30	18.37
34.91	35.49	0.58	628	0.36	18.73
35.49	35.94	0.45	604	0.27	19.00
35.94	36.53	0.59	625	0.37	19.37
36.53	37.02	0.49	617	0.30	19.67
37.02	37.44	0.42	621	0.26	19.93
37.44	38.04	0.60	627	0.38	20.31
38.04	38.44	0.40	611	0.24	20.56
38.44	38.79	0.35	623	0.22	20.77
38.79	39.23	0.44	657	0.29	21.06
39.25	39.88	0.63	653	0.41	21.47
39.88	39.97	0.09	664	0.06	21.53
39.97	40.17	0.20	659	0.13	21.67
40.17	40.45	0.28	629	0.18	21.84
40.45	40.95	0.50	630	0.32	22.16
40.95	41.13	0.18	624	0.11	22.27
41.13	41.68	0.55	654	0.36	22.63
41.68	42.08	0.40	645	0.26	22.89
42.08	42.53	0.45	651	0.29	23.18
42.53	43.04	0.51	721	0.37	23.55
43.04	43.27	0.23	738	0.17	23.72
43.27	43.34	0.07	728	0.05	23.77
43.34	43.69	0.35	740	0.26	24.03
43.69	43.88	0.19	710	0.13	24.16
43.88	44.08	0.20	760	0.15	24.31
44.08	44.23	0.15	770	0.12	24.43
44.23	44.39	0.16	710	0.11	24.54
44.39	44.74	0.35	742	0.26	24.80
44.74	44.82	0.08	702	0.06	24.86
44.82	45.19	0.37	753	0.28	25.14
45.19	45.27	0.08	666	0.05	25.19
45.27	45.47	0.20	733	0.15	25.34
45.47	45.74	0.27	704	0.19	25.53
45.74	45.84	0.10	787	0.08	25.61
45.84	45.97	0.13	766	0.10	25.71
45.97	46.08	0.11	710	0.08	25.78
46.08	46.29	0.21	863	0.18	25.97



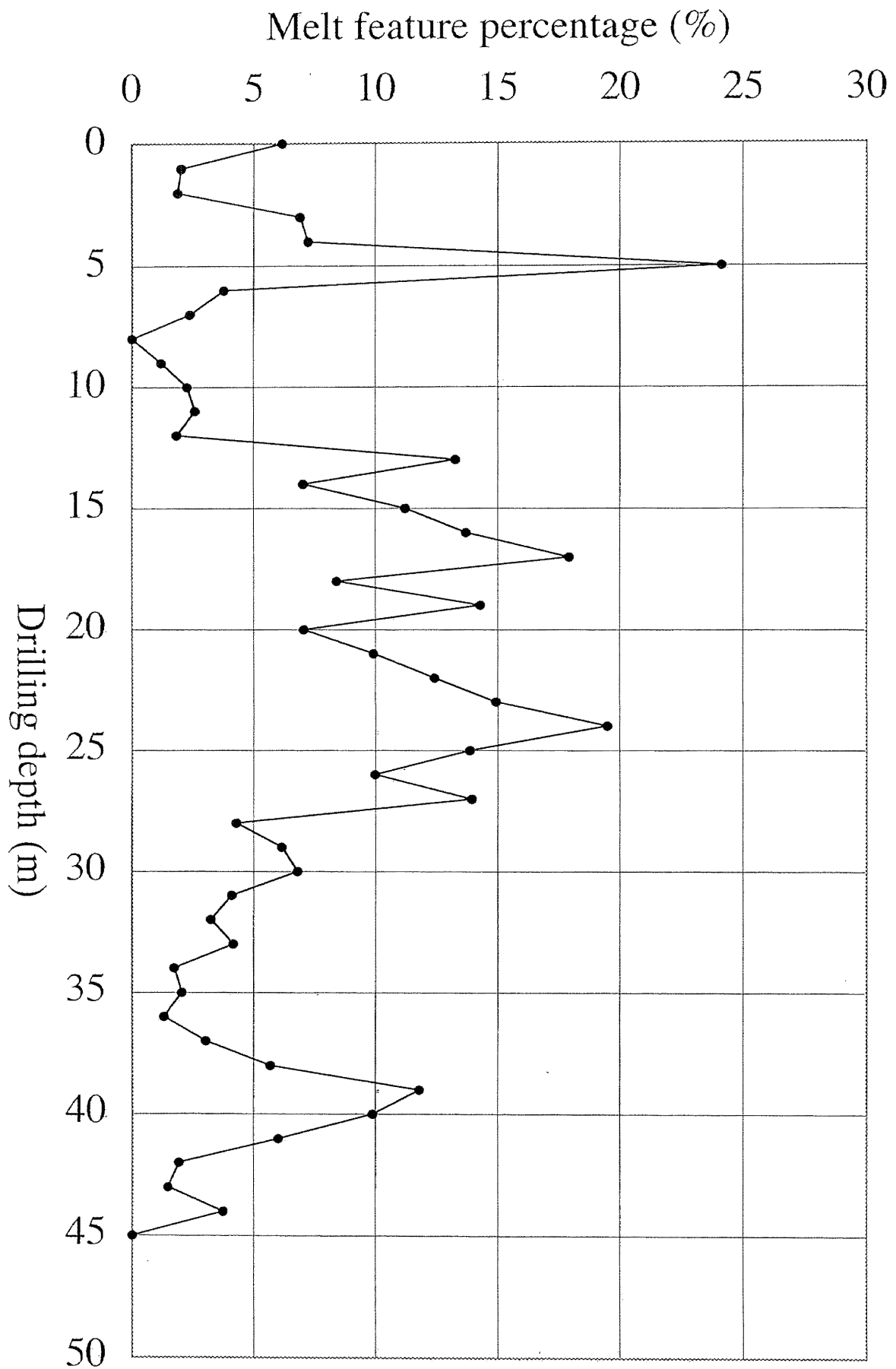


Figure 17. Melt feature percentage (MFP) in the 45.97 m-ice core.

# 南パタゴニア氷原ティンダル氷河における気象観測

久保田敬二<sup>1</sup>・白岩孝行<sup>2</sup>・幸島司郎<sup>3</sup>・竹内望<sup>3</sup>・

Arevalo, M. G.<sup>4</sup>, Godoi, M. A.<sup>4</sup>, and Quinteros, J.<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学 大学院地球環境科学研究科博士課程

<sup>2</sup> 北海道大学 低温科学研究所

<sup>3</sup> 東京工業大学 生命理工学部

<sup>4</sup> Universidad de Magallanes

<sup>5</sup> Dirección General de Aguas

## はじめに

パタゴニア地方とは南米大陸の南緯 40 度以南の地域の総称である。地理学的な特徴として大陸中央を南北にアンデス山脈（パタゴニアアンデスと呼ばれる）が連なる。アンデス山脈を境に東と西では全く違う地形をみせている。西側の太平洋岸は氷河によって削られてできたフィヨルドが発達している。一方、東側にはパタゴニアパンパと呼ばれる乾燥した大平原が広がる。そしてアンデス山脈上には極域を除くと世界最大規模の氷原が広がる。その氷原は北氷原と南氷原に分かれて存在している。

気候学的にはパタゴニア地方は南緯 40 度から 50 度にあり、偏西風帯に位置するため一年を通してパタゴニアでは西風が卓越している。その西風がアンデス山脈に衝突し、雲を発生させ、西側の太平洋岸と(中央)のアンデス山脈に大きな降水をもたらす。このときアンデス山脈では殆どの降水が雪として降り、涵養し、巨大な氷床ができたと考えられている。そして東側に、乾いた空気として吹き降ろす。ケッペン気候区分では西側の太平洋岸では西岸海洋性気候、東側のパタゴニアパンパではステップ気候、中央部のアンデス山脈上では氷雪気候である。

パタゴニアの降水量は水収支の計算によると、北氷原で年降水量 6700 mm、南氷原で 7000 mm であると見積もられている (Escobar *et al.*, 1992)。北氷原にあり、太平洋岸に流出している San Rafael Glacier (46° 41' S, 73° 51' W) の氷河末端の年降水量は 3700 mm である (チリ空軍による観測)。この氷河上での降水量

の観測から氷原中央部では 10,000 mm を超えると見積もられている (Fujiyoshi, 1987)。

また気温は南氷原東側の Torres del Pine (51° 11' S, 72° 58' W) で年平均気温が 6.2 °C (1964~1990) である。最暖月の 2 月の月平均気温が約 10 °C、最寒月の 7 月の月平均気温が約 2 °C であり、年較差が非常に小さいのが特徴である。パタゴニア北氷原で観測の結果、氷河上の気温減率は約 0.53 (°C/100 m) であった (Inoue, 1987)。したがって年平均気温から見積もられた 0 °C 線高度は年平均で約 1200 m 付近であると考えられる (Nakajima, 1987)。

これまでにパタゴニア氷原の消耗域で気象観測が行われたことはあったが涵養域においては、限られた期間の気象観測が断片的に存在するのみである。

本研究では南氷原ティンダル氷河の涵養域 (50° 59' 05" S, 73° 31' 91" W; 1756 m a.s.l) と同氷河の消耗域 (700 m) において気象観測を行った。前者については気温、湿度、風向・風速、日射を観測し、後者については気温を観測した。ただし、日射計は積雪のため回収不可能であったためデータはない。

また湿度については常時 100% であり、変化が見られなかった為、本報告書では省略した。

## 観測地点と測器の概要

ティンダル氷河涵養域の観測地点は分水嶺より 500 m ほど下流側に下った地点 (標高 1756 m ; 以後 D.S と呼ぶ) である。表面は東方に約 1° 傾斜しており、南方約 2 km にはヌナタック状の岩峰があるが、西方には分水嶺まで続く殆ど平らな雪原が広がり、卓越する西風に対しては遮るものはない。西風が卓越すると予想されたため観測測器はテントサイトの西方約 30 m に設置した (写真 1)。気温と湿度については抵抗温湿度計 (自然通風、高さ 1.5 m)、風向と風速については風車型風向風速計 (高さ 2 m)、全天日射量については全天日射量計 (ソーラーミニ、高さ 1.5 m) を用い、測定間隔 1 時間で測定を行った。観測値はデータロガーとして自記記録させた (写真 1)。前述したように全天日射量計は積雪による埋没のため、湿度は殆ど変化がなかったため本報告書では省いた。

ティンダル氷河消耗域の観測はティンダル氷河中流部左岸の基盤岩上の測量基準点 (β 地点 : 標高 700 m) に観測測器を設置して行った。氷河表面からは約

100 m 程高く、風の通り道となっている（写真 2）。消耗域では気温についてのみ観測を行った。「温度とり」を地上から高さ 1.5 m に設置し気温の測定を行った。測定間隔は 1 時間とし、観測値はデータロガーとして自記記録させた（写真 2）。

また地上の気温と氷河上の気温の関係を知るためパイン国立公園管理事務所（H. Q）の近くにある、チリの水文局（D.G.A）の気象観測所の百葉箱に「温度とり」を設置して測定間隔 1 時間で気温を測定した（写真 3）。また風車型風速計を地上 3 m に設置し、風速を 1 時間間隔で測定した（写真 4）。

### 観測期間の概要

観測地点	観測期間
ティンダル氷河涵養域 (1756m)	1999.11.29~1999.12.23 (風向、風速、全天日射) 1999.12.4~1999.12.23 (気温、湿度)
ティンダル氷河消耗域 (700m)	1999.11.3~1999.11.9 (気温)
パイン国立公園管理事務所 (80m)	1999.11.2~1999.12.23 (気温) 1999.11.20~1999.11.25 (風向、風速)

### 天気概要

#### ・ ティンダル氷河涵養域

ティンダル氷河涵養域には 11 月 27 日から 12 月 23 日まで 27 日間滞在した。しかし、晴れた日は 11 月 27 日と 29 日、30 日だけであった。12 月の 4 日から 5 日にかけては薄日は差すものの氷河上は強風により地吹雪が起き視界はない。その他の日はあられ・降雪を伴う地吹雪であった。気温が高く、雨が降る時もあった（表 1）。気温が低いときは地吹雪が激しく、吹き溜まりのためテントが 1 時間のうちに埋没することもあった。滞在期間中に約 3.5 m 程の積雪があった。



風は期間中、数日を除いて風向が西または西南西の強風が吹いていた。

・ ティンダル氷河消耗域

ティンダル氷河消耗域には11月3日から11月9日まで滞在した。11月4日と11月8日から9日の早朝にかけて、雨が降った。快晴の日は11月5日だけであった。それ以外の日については午前中は曇りか小雨であっても、午後から晴れてくるといった天気のリズムであり、天気は非常に変わりやすいのが特徴的であった(表2)。

また、たとえ消耗域が晴れていても氷河上部(約1200 m以上)の涵養域は雲がかかっていることが多く時折強風に乗って雨粒が飛んでくる。涵養域の岩峰まで見えた日は11月6日だけで、それもほんの数時間だけであった。氷河上では期間中、殆どは氷河上流からの吹き降ろしの強風が吹いていたが、このときは弱い南風が吹いていた。

・ パイネ国立公園 (H. Q) (11.02~12.23)

パイネ国立公園管理事務所には11月11日から11月27日までヘリコプターを待つため16日間滞在した。その間、H. Qでは晴れの日が多いが風が強い(表3)。11月20日から25日までの風速の観測では最大風速で12 m/s、期間平均平均では5.0 m/s吹いていた。

またH. Q付近からパイネグランド付近までは晴れていてもティンダル氷河上、特に涵養域には雲がかかっていることが多かった。特に涵養域最上流部の岩峰まで眺められる日は、この間11月22日と27日の2日しかなかった。この2日間はともに風が弱く南風であった。

## 観測結果

・ ティンダル氷河涵養域 (1756 m)

図1はティンダル氷河涵養域の掘削地点(D. S)とパイネ国立公園管理事務所(H. Q)の12月3日から18日までの気温のグラフである。

i 気温

観測期間中のD.Sの平均気温は $-3.5^{\circ}\text{C}$ 、最高気温は $3.3^{\circ}\text{C}$ 、最低気温は $-8.2$

℃であった。(表4)。またH. Qではこの期間中平均気温が10.2℃、最高気温が20.9℃、最低気温は3.3℃であった(表5)。図1をみると1日の気温の変化はH. Qでは大きく、また周期性が比較的是っきりみられるのに対して、D. Sでは1日の気温の変化が小さく、また周期性もはっきりしていない。

次にH. QとD. Sの気温にはどのくらいの相関あるのかをしらべてみた。図2はH. QとD. Sの相関を表したグラフである。このグラフではH. Qの気温が高くなるとD. Sの気温も高くなる傾向はみられ、決定係数は0.66とかなり大きな相関があることがわかった。したがって2地点間の気温減率を調べることによる程度、H. Qの気温からD. Sの気温が見積もることができると考えられる。

そこでH. QとD. Sの気温差から観測期間中の気温減率を調べてみた(図3)。すると、日中に値が大きくなり、気温減率は0.9(℃/100 m)から1.1(℃/100 m)程度であった。一方、夜間は値が小さく気温減率は0.6(℃/100 m)から0.8(℃/100 m)程度であった。期間の平均の気温減率は0.81(℃/100 m)であった。

## ii 風向・風速

風速の観測は11月29日から12月18日まで20日間行った。この期間中の平均風速は13.6 m/sであり、10分間の平均風速が20 mを超える日もあり、最大瞬間風速は30 mを超えることもあった(表6)。図4は観測期間中のD. Sの平均風速と最大瞬間風速のグラフである。全期間を通して風は強いが、1日から1日半の間隔で強弱をくりかえしていることがわかる。また極端に風の弱い日が12月2日早朝、4日、9日から10日の午前にかけて見られた。

では、この風が弱い日はどんな天気であったかという、2日早朝と9日から10日の午前にかけて、気温が高く雨または曇が降っていた。そして特徴的なのは2日の午後と10日の午後、伴に突然風が強くなったことである。特に10日は風の止み間を使ってテントの移動をしていたが、移動中に突然風が強くなり、テントが破損してしまった。このことから、考えられることは南氷原が大きな気圧の谷の中心にはいり、中心が通過するとともに風が強まったのではないかとということである。

また12月4日は、薄日が差す比較的天気の良い日であった。図5は観測期間中の風向(16方位)と風速の変化を表したグラフであるが、期間中、殆どは西

から西南西の風が吹いていたのに、12月4日は弱い南または南南東の風が吹いていたのが特徴的である。

そこで風向と風速の大きさの関係を調べてみみた。図6は風向（16方位）と風速の大きさの関係を表したグラフである。このグラフから、風向が南南東（方位8）から南南西（方位10）のときは15 m/s を超える風は吹いていないことがわかった。またそれ以外にも風が弱かった日が何日かあった。快晴であった11月27日、29日、30日は風は西風であったが3日間とも弱かった。このときの気圧配置をまだみていないのでわからないが、南氷原が大きな高気圧に覆われていたのではないかと考えている。

そして18日に風速計が0 m/s になっているが、これは猛烈な地吹雪の為に、風速計が埋まったためである。なお、記録から再現すると、この風速計は18日の午前5時までは雪面上に出ていたことがわかった。同じ日の午後5時に掘り出したときは、測器が雪面下約2 m にあった。わずか12時間で2 m も積もったということになる。殆どは地吹雪による吹き溜まりによるものと考えられる。この吹き溜まりにより滞在期間中（11月27日～12月23日）に雪面が3.5 m 上昇した。

無線によりH.Qと交信をしてわかったことは、H.Qは晴れていても涵養域は地吹雪であることが多いことである。このことからこのような悪天は涵養域だけに限られることがわかった。また上空に雲がないときでも氷床上のみが地吹雪で視界がないときもあった。このようにD.Sが悪天のためヘリコプターによる回収作業は行えず、スノーモービルとヘリコプターの併用によって救助された。

#### ・ティンダル氷河消耗域（700 m）

ティンダル氷河の消耗域では11月3日から9日まで7日間にわたり、気温の観測を行った。期間中のティンダル氷河消耗域の平均気温は5.5℃、最高気温は10.1℃、最低気温は2.3℃であった（表7）。一方、この期間中のH.Qの平均気温は11.6℃、最高気温は20℃、最低気温は3.7℃であった（表8）。図7はこの期間中の消耗域（700 m）とH.Qの気温のグラフである。両地点ともに似たような気温の変化をしていることがわかる。ただ、1日の気温の変化の大きさ

は消耗域（700 m）では H. Q に比べ小さい。特に天気の良かった 5 日と 7 日の日中にかけて、この傾向が顕著であった。7 日についてしてみると、H. Q ではこの日最低気温が 5.9 °C、最高気温が 15.3 °C で日較差は 9.4 °C あるが、消耗域（700 m）では最低気温が 3.3 °C、最高気温が 6.3 °C で日較差は僅か 3 °C しかない。一方、夜間は両地点の気温差が小さくなっていた。

これは H. Q では放射冷却が強く起こり地面付近が冷え、また日中、日射量の増加と共に地面が暖められ、気温の変化が大きくなるが、一方、氷河上では常に風が強くまた夜間は雲に覆われるため、放射冷却が起こりにくく、日中も表面が 0 °C であるため気温が上がりにくいいためこのような傾向が見られたと考えられる。

H. Q の気温と消耗域（700 m）の気温の間にはどのような関係があるのかを調べてみた。図 8 は期間中の H. Q の気温と消耗域（700 m）の気温の関係を表したグラフである。決定係数は 0.53 と H. Q と D. S の気温の相関にくらべて小さい。この数値から H. Q と消耗域（700 m）の間の気温減率を求めて H. Q の気温から消耗域の気温がある程度、推定ができるのではないかと考えられる。

そしてこの 2 地点間の気温減率について調べてみたところ図 9 のようになった。日中は、気温の上がり方が H. Q の方が消耗域（700 m）に比べて大きいため、気温減率も大きくなる。また夜間や天気の悪い 4 日や 8 日は気温減率は小さかった。観測期間平均の気温減率は 0.79 (°C/100 m) であった。

また風に関しては測定は行わなかったが氷河上では氷河上流からの西または西北西の風が吹いていることが多かった。

## 総括

ティンダル氷河涵養域は当初の予想よりもはるかに悪い天気であった。涵養域に特徴的なことは次のことである。

1. 気温が高く、0 °C をこえ、雨が降ることもあったこと。
2. 最大瞬間風速が 30 m を越える日もあり風が非常に強いこと。
3. 積雪量が観測期間中に約 3.5 m あり、その殆どは降雪を伴う地吹雪によるものであった。
4. H. Q は晴れていても涵養域だけは局地的に雲がかかり、地吹雪が起きてい

ること。

5. 風が吹くときや、風が弱いときは比較的天気がいいこと。
6. H. Q と D. S の気温の相関が大きく (0.66)、涵養域における観測期間中の平均の気温減率は  $0.81$  ( $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ) であった。

また 消耗域の天気の特徴は

1. 涵養域に比べ、晴れる日が多い。
2. 風は氷河の上流からの吹き降ろしの西または西北西の風が強い。
3. 南風が吹くときは天気がいい傾向がみられた。
4. H. Q と涵養域の気温の相関が大きく (0.53)、消耗域における観測期間中の平均の気温減率は  $0.79$  ( $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ) であった。

## 謝辞

本観測を進めるにあたり、松元高峰さん（北海道大学低温科学研究所）には気象測器の取り扱いについて指導していただいた。パイネ国立公園の皆さんには、気象観測所の利用、及び無線支援で大変お世話になった。特にアレグンドラさん、ミセッタさん、モニカさんには、滞在中、精神的な援助を賜った。チリの空軍のパイロットの皆さんには危険なフライトを省みず、物資運搬、及び救助活動に全面的に支援していただいた。チリ共和国駐在特命全権大使 成田右文さん、および、同二等書記官 日下部英紀さんにはチリ空軍との交渉にあたり、多大な 援助を賜った。以上の皆様方に感謝申し上げます。

本研究にあたっては、科学研究費補助金基礎研究 (A) (2) 「南米パタゴニア地域における完新世の氷河変動と近年の氷河変動機構の解明 (代表 安仁屋政武) (課題番号 国 10041105)」、科学研究費補助金基礎研究 (c) (2) 「地球温暖化に伴う大規模な温暖氷河の後退が海水面変動におよぼす影響評価 (代表 成瀬簾二) (課題番号 11640422)」を使用した。

## 参考文献

Fujiyoshi, Y., Kondo, H., Inoue, J. and Yamada, T. (1987): Characteristics of precipitation and vertical structure of air temperature in the northern Patagonia, *Bulletin of Glacier Research*, **4**:15-23.

- Inoue, J., Kondo, H., Fujiyoshi, Y., Yamada, T., Fukami, H., and Nakajima, C. (1987) :  
Summer climate of the Northern Patagonia Icefield , *Bulletin of Glacier Research*, **4**:  
7-14.
- Nakajima, C. (1987): Outline of the Glaciological Research Project in Patagonia,  
1985-1986. *Bulletin of Glacier Research*, **4**: 1-6.
- Escobar, F., Vidal, F. and Garin, C. (1992): Water balance in the Patagonia Icefield. *In*  
Naruse, R. and Aniya, M (eds), *Glacier Researches in Patagonia 1990*, Sapporo,  
109-119.



写真1



写真2



写真3



写真4

Table1 目視観測結果(ティンダル氷河涵養域、D.S)

日付	時間	天気	気温	備考
11月27日	22:00	快晴	-6.8	パイネまで見える
11月28日	8:00	吹雪	-6.5	高い地吹雪
	10:30	吹雪	-5.3	15m/s
	13:30	吹雪	-1.9	西風
	16:30	吹雪	-4	
11月29日	7:00	快晴	-5.6	
	9:30	快晴	-2.6	風も穏やか
	11:00	快晴	-0.5	
	14:30	快晴	0	
	17:00	快晴	0	
	21:00	快晴	-2.6	
	23:00	快晴	-4.6	
11月30日	9:00	快晴	-1.5	
	12:00	快晴	-0.8	
	15:00	晴れ	1.5	レンズ曇現れる
	18:00	晴れ	0.8	風が強まりだす
	21:00	曇多し	-0.2	西から雲が湧いてくる
12月1日	9:00	吹雪	-2.3	
	12:00	吹雪	-1.4	湿雪に変わる
	15:00	吹雪	-0.7	
	18:00	吹雪	-0.2	湿雪のため視界はいい
12月2日	9:00	曇	-0.4	ほとんど雨のような雪質
	12:00	雨	0.5	雨になる
	15:00	雨	1.3	
	18:00	曇	-0.3	
	21:00	吹雪	-2.3	乾いた雪質に変わる
12月3日	9:00	吹雪	-5.8	
	12:00	吹雪	-6.1	
	15:00	吹雪	-4.7	
	18:00	曇り	-6.7	薄日も差す
	21:00	吹雪	-8.1	霰
12月4日	9:00	薄日	-7	風弱し
	15:00	薄日	-5.4	テント埋没のため移設
	21:00	快晴	-7.7	空一面星空
12月5日	9:00	薄日	-3	上空は晴れている
	15:00	晴れ	-0.9	
	21:00	曇り	-3	
12月6日	9:00	地吹雪	-5.2	薄日が差している
	15:00	吹雪	-3	雪も降り出した模様
12月7日	15:00	地吹雪	-4.8	テント埋まりだす
	21:00	地吹雪	-5.3	上空に青空が見える
12月8日	9:00	地吹雪	-5.3	二度目のテント移設
	15:00	地吹雪	-2.8	風も強い
	21:00	地吹雪	-2.3	
12月9日	15:00	地吹雪	-0.2	湿雪のためテント一つ壊れる
	21:00	地吹雪	-2.2	雪質変わりテントが埋まり崩壊
12月10日		ガス		キッチンテント崩壊
12月11日		地吹雪		強風で湿雪
12月12日	18:30	地吹雪	-3.5	気圧の底をつくとともに気温急降下
	21:00	地吹雪	-5.5	
12月13日	19:00	地吹雪	-5.4	これまでになく激しい
12月14日	17:00	地吹雪	-6.2	風は弱い
12月15日	8:00	猛烈な地吹雪	-5	立ってられないほどの強風
	22:00	地吹雪	-8.4	夜中吹き溜まりのため雪かきをする
12月16日		地吹雪		補修テント埋没
12月17日	19:00	地吹雪	-6.9	テント二つ埋没
12月18日		地吹雪		全員が雪洞へ
12月19日		地吹雪		
12月20日	17:00	曇	-0.2	気温高いため視界がきく
12月21日	19:00	雨	-0.2	
12月22日	16:30	地吹雪	-0.2	湿雪
12月23日	7:00	雪		風弱く視界は良い。



Table2 目視観測結果(氷河消耗域;700m)

日付	時間	気温	風向	雲量	天気	場所	備考
11月3日	9:30	9.5				B.C(300m)	
	14:00					B.C(300m)	
	17:20					β地点(700m)	
11月4日	9:30	5.2			雨	B.C(300m)	
	16:00	11.8			曇	B.C(300m)	
	19:40	10.2			曇	B.C(300m)	
11月5日	8:00	5.7	S	9	曇	B.C(300m)	
	9:00	7.3	S	7	曇	氷河横基盤岩上(550m)	
	10:00	3.6	W	6	曇	氷河上(600m)	
	11:00	2.8	W	5	晴れ	氷河上(600m)	氷河涵養域はガス
	13:00	2.9	WSW	5	晴れ	氷河上(600m)	氷河涵養域はガス
	15:30	4	W	2	晴れ	氷河上(600m)	
	16:40	3.3	W	2	晴れ	氷河上(600m)	
	17:00	4.8	N	4	晴れ	氷河上(600m)	上層雲が消える
	19:00	9.4	S	2	晴れ	B.C(300m)	
	22:00				小雨	B.C(300m)	低い雲が覆う
	11月6日	9:00	6.6	S	10	雨	B.C(300m)
11:00		2.5	S	10	曇	氷河横基盤岩上(550m)	
12:15		2.1	S	10	小雨	氷河上(600m)	雲低は約800m
14:00		2.8	S	10	曇	氷河横のテント場(600m)	風は殆どない
14:45		4.3	NW	9	曇	氷河上(550m)	
17:00		5.2	NW	1	晴れ	氷河上(500m)	南から雲が消える。
18:30		3	S	1	快晴	氷河上(550m)	涵養域の岩峰見える。
19:15		5.3	NW	4	晴れ	氷河横のテント場(600m)	涵養域西半分はガス
11月7日	9:20	4.3	NW	1	快晴	氷河横のテント場(600m)	パイングランデにも雲なし
	10:45	2.3	W	1	快晴	氷河上(700m)	涵養域の岩峰の西側はガス
	12:00	3.5	W	1	快晴	氷河上(750m)	1590峰まで見える。
	13:30	4.7	W	3	晴れ	氷河上(900m)	
	14:45	4.7	W	3	晴れ	氷河上	
	18:00	5.8	W	4	晴れ	氷河横基盤岩上(550m)	高層雲が現れる
11月8日	12:00	10.8	SE	10	曇	B.C(300m)	
	13:00	11	SE	9	曇	B.C(300m)	比較的高い雲
	14:00	10.5	NW	10	小雨	B.C(300m)	所々に青空が見える。
	15:00	12.3	0	10	小雨	B.C(300m)	風が止み暖かい
	16:00	11	0	10	小雨	B.C(300m)	
	17:00	10.9	0	10	小雨	B.C(300m)	
	18:00	10.8	NNW	10	小雨	B.C(300m)	風が強まる。
	19:00	11.5	S	10	小雨	B.C(300m)	
11月9日	20:00	9.7	NNW	10	雨	B.C(300m)	層雲がかかる
	9:00	11.2	NNW	7	小雨	B.C(300m)	氷河上には青空が見える
	10:30	8.9	WNW	10	曇	氷河横基盤岩上(550m)	
	11:00	9.6	W	9	小雨	β地点(700m)	氷河からの風が強い
	11:45	9.4	W	10	小雨	β地点(700m)	
	13:00	9.7	W	8	曇	氷河横基盤岩上(550m)	ものすごい突風が吹く
	14:00	13.3	W	10	曇	B.Cへの下り	薄日が差す
	15:00	13.5	W	10	曇	B.Cへの下り	
	18:00	14.4	W	10	曇	B.C(300m)	風があるが暖かい
	19:00	14.6	W	10	曇	B.C(300m)	
	20:00	13.7	W	10	曇	B.C(300m)	
21:00	13.5	N	10	曇	B.C(300m)		

B.C : 氷河と平行に走る谷の中; 標高は300m

β地点 氷河左岸の基盤岩上の測量基準点; 標高は700m

Table3 Mean Wind Speed of H.Q.(Mean=5.0m/s)

Time	November									
	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
8:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9:00	-	7.2	1	6.2	-	-	-	-	-	-
10:00	-	6.4	0.9	9.1	-	5.1	-	-	-	-
11:00	-	5.8	1.8	9.6	4.8	3.2	-	-	-	-
12:00	4.7	4.8	3	6.6	5.9	3.6	-	-	-	-
13:00	4.5	4.8	2.5	9	4.7	2.2	-	-	-	-
14:00	5.4	6	2.4	5.8	7.2	4.8	-	-	-	-
15:00	2.9	5.4	2.4	5.7	5.5	5	-	-	-	-
16:00	4.9	5.9	2.1	5.1	6.5	6.3	-	-	-	-
17:00	7.8	4.6	0.4	6.6	5.7	6.1	-	-	-	-
18:00	7.5	3	0.6	6.4	7.3	-	-	-	-	-
19:00	9.4	0.7	0.7	6.5	7.9	-	-	-	-	-
20:00	8.6	1.3	2.1	6.5	7.3	-	-	-	-	-
21:00	7.8	1.7	7.9	8.8	7.8	-	-	-	-	-
22:00	7.5	1	6.8	12	5.2	-	-	-	-	-
23:00	7	0.9	8.5		6.1	-	-	-	-	-
0:00	3	1.9	-	-	-	-	-	-	-	-
Average	6.2	3.8	2.9	7.4	6.3	4.5	5.0			

Table4 Temperature of D.S(1756m)

(Mean temperature=-3.3°C)

Time	December																	
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18			
0:00	—	-7.5	-4.1	-4.4	-5.5	-2.6	-1	2.5	0.9	-5.8	-4.7	-7	-8.2	-7	-6			
1:00	—	-7.9	-4.1	-4.4	-5.9	-2.6	-0.1	2.1	1	-5.7	-4.7	-7.1	-8.2	-6.9	-6			
2:00	—	-7.8	-4	-4.3	-5.7	-2.8	0	2.1	0.9	-5.8	-5.1	-7	-8.1	-7.1	-6			
3:00	—	-7.2	-4.2	-4.3	-5.7	-2.8	0	2.2	1	-5.4	-5.1	-7.2	-7.8	-7.4	-6			
4:00	—	-7.6	-4.6	-5.3	-6.1	-2.7	0	2.3	1.1	-5.3	-4.7	-7.1	-7.5	-7.3	-6			
5:00	—	-7.1	-4.7	-5.1	-6.1	-2.8	0	1.7	1.2	-5.4	-4.8	-6.7	-7.3	-7.3	-6			
6:00	—	-4.1	-4.9	-5.1	-6.1	-2.5	0	1.5	1.1	-5.4	-4.8	-6.3	-7.2	-7.4	-6			
7:00	—	-3.7	-5	-5.1	-6.1	-2.1	0	1.4	1.6	-5.3	-4.9	-6.1	-6.9	-7.3	-6			
8:00	—	-3.2	-5.1	-5.1	-5.7	-2	0.1	0.8	1.8	-5	-4.6	-5.8	-6.5	-7.2	-6			
9:00	—	-2.5	-5.2	-5	-5.6	-1.2	0.6	0.8	2.3	-4.8	-4.3	-5.6	-5.9	-7.1	-6			
10:00	—	-2	-4.7	-4.7	-4.9	-0.8	1.4	0.6	1.7	-4.6	-4.3	-5.1	-5.2	-6.8	-6			
11:00	—	-3.3	-3.4	-3.8	-4.3	-0.2	1.5	0.6	0.9	-4.3	-4.3	-4.9	-4.3	-6.6	-6			
12:00	-6.2	-3	-4.5	-3.7	-4.2	-0.1	1.6	0.5	1.3	-3.4	-4	-4.5	-3.5	-6.4	-5.9			
13:00	-5.8	-1.9	-2	-3.1	-3.7	0	1.9	0.3	1.1	-2.7	-4.3	-4.3	-3.1	-6.2	-5.9			
14:00	-5.9	-1.7	-1.8	-2.5	-2.5	0	2.3	0.3	-0.1	-3.8	-3.9	-4.2	-2.5	-6	-5.9			
15:00	-6.1	-1.8	-3.2	-2.3	-2.1	0	3.4	0.5	-0.7	-3.1	-3.8	-4.1	-2.1	-5.8	-5.8			
16:00	-6	-2.1	-3.3	-2.2	-2.3	0	3.5	0.7	-0.4	-3.4	-4.1	-4.7	-2.5	-5.7	-5.8			
17:00	-5.6	-1.7	-3	-2.7	-1.2	-1.1	3.4	0.8	-0.7	-3	-4.2	-5.4	-2.6	-5.7	-4.9			
18:00	-6.3	0.2	-3.3	-3	-1.3	-1.2	3.3	1	-3.2	-3.4	-5.7	-6.1	-2.8	-5.7	—			
19:00	-6.8	-3.5	-3.8	-3.9	-1.6	-1.4	3.1	1.1	-3.9	-3.9	-6.1	-6.3	-3.8	-5.8	—			
20:00	-7.3	-3.5	-4.2	-4.8	-1.8	-1.7	2.9	0.8	-3.7	-4.6	-6.4	-6.7	-4.9	-5.8	—			
21:00	-7	-3.6	-4.2	-4.9	-2.3	-1.9	2.7	0.8	-3.9	-4.9	-6.6	-7	-5.2	-5.9	—			
22:00	-7.3	-3.6	-4.4	-4.7	-2.4	-1.9	2.3	1	-5.1	-4.8	-6.6	-8.2	-5.9	-5.9	—			
23:00	-7.4	-3.8	-4.4	-5.6	-2.6	-1.6	2.3	0.8	-5.4	-4.8	-6.8	-8.1	-6.7	-6	—			
Average	-6.5	-3.9	-4.0	-4.2	-4.0	-1.5	1.5	1.1	-0.4	-4.5	-5.0	-6.1	-5.4	-6.5	-5.9			

Table 5 Temperature of H.Q.(12.1-12.23)

Time	December																						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
0:00	16.4	14.6	10.8	5.6	5.3	7.5	10.4	9.4	12.4	12.5	19.5	16.8	8.4	8	6.1	3.6	5.9	6.5	4.1	10.9	8.6	14.1	13.7
1:00	15.6	14.2	9.8	2.7	5.2	7.3	10.2	9.4	12.3	12.5	19.5	16.7	8.8	9.6	6.8	4.3	5.5	6.2	5.3	11.1	8.1	13.7	13.8
2:00	15.7	13.4	8.6	3.6	4.1	8	10.5	8.9	12	12.1	18.4	17.6	8.6	8	6	5.3	4.7	6	4.1	10.7	8.4	14.5	11.6
3:00	15.6	13	7.8	5.3	3.2	8.5	8.7	8.3	12.5	10.2	17.5	14.7	8.7	8.5	6	4.3	4.6	6.3	6.5	10.6	9.1	14.4	9.6
4:00	16.5	11.6	7.1	3.3	4.4	6.7	8.6	8.4	12.4	9.1	15.9	14.4	9.3	8.2	7.2	4.5	5.1	5.4	6.5	10.7	9.6	14.1	9.4
5:00	16	12.2	5.9	5.2	5.7	7.3	8.3	8.2	12.5	8.9	15.7	13.3	8.7	7.1	7.7	5.2	4.1	6	6	11	10	14.7	8.6
6:00	15.6	12.7	7.3	6	5.3	7.1	8.2	8.2	13.4	8.6	16.9	11.1	9.4	6.8	8.7	5.3	4.7	6.5	5.8	11.2	10.4	14.2	8.4
7:00	15.2	12.3	7.4	5	4.4	7.8	8.6	9.3	14	8.6	16.7	11	8.8	6.4	8.8	5.4	4.7	6.4	8.2	11.4	10.2	14.9	9.2
8:00	14.4	13.7	7.7	7.3	7.2	9.5	9.2	9.4	15	8.5	17.8	13.4	9.8	8.1	9.7	6	4.6	6.1	8.6	12.6	10.5	15.2	—
9:00	13.6	15.2	7.4	7.1	8.6	10.6	10	10.2	15.1	8.9	18.4	11.8	10.7	8.5	9.9	6	4.1	7.1	9.6	12.4	10.8	16	—
10:00	14.6	16.2	6.6	8.4	10.7	12.3	10.6	11.2	16.8	8.7	18.7	13.2	9	7.8	9.5	7.3	5.9	7.3	10.5	12.4	12	15.3	—
11:00	15	15.9	10.2	9.2	10.8	13.9	11.6	12.1	17.4	8.7	18.9	13.8	10.1	7.2	11.3	8.7	6.7	7.7	12.2	12.8	13.3	16.3	—
12:00	15.7	17.9	8.3	9.5	10.6	14.1	12.4	12.9	17.5	8.9	19.6	14.1	10.1	7.7	11.6	10.7	9.6	7.9	12.8	11.2	14.8	17.3	—
13:00	17	18.7	10.6	10.8	10.7	13.6	12	13.3	17	9.3	19.6	20.4	10.5	7.3	10.6	11.4	8.7	8.6	13.3	10.1	15.9	18.6	—
14:00	18.1	19.2	7.8	10.6	13.1	14.5	13.2	13.1	17	8.8	19.5	19.2	7.1	9.7	8.4	12.2	10.5	7.5	12.5	9.5	14.6	18.4	—
15:00	19.2	19.1	7.4	10.8	13.7	13.7	13.5	12.6	17.2	10.3	19.8	17.6	7	10.3	7.5	13.2	10	6.8	12.3	10.3	15	17.8	—
16:00	18.3	19.1	9.5	11	14.6	14.8	11.7	12.6	16.6	18.5	20.1	18.7	10.2	8.3	4.9	11.5	6	6.5	12.7	11.6	16.1	17.8	—
17:00	18	14.9	9.5	11.3	15	15.8	12.5	13.2	13.2	19.4	20.2	17.8	10.5	7.5	4.8	10	8.6	6.4	13	12	16.2	18	—
18:00	17.7	17.7	8	10.5	14.9	15.2	12.4	13.3	13	20.2	18.9	11.8	9	5.6	5.7	9.3	7.8	6.7	13.3	13.3	16.8	19	—
19:00	17.4	15.5	5.8	11.2	14.6	14.3	12.2	13.5	13.2	20.5	18.8	10	9.6	6.2	6.1	8.1	5.7	7.6	9.8	11.9	16.5	16.6	—
20:00	15.8	14.9	7.8	9.9	13.3	14.6	11.2	13.7	14.4	20.5	18.1	10	10.4	6	6.5	7.3	5.3	6.1	9.5	10.2	16.2	15.4	—
21:00	16	13.7	7.5	9.4	12.4	12.6	10.7	13.1	13.3	20.9	17.8	9.7	10.3	7.9	4.2	7	6.8	5.9	10.4	10.2	15	14.4	—
22:00	15.4	12.1	7.1	8.3	10.6	10.8	10.8	13	13.3	19.8	17.3	8.7	9.2	5.8	4	6.6	6.7	5.6	10.4	10.1	14.1	14.4	—
23:00	15.3	11.4	4.5	6.6	9.7	10.2	9.5	12.7	12.7	20.4	17.3	7.6	8.9	5.6	3.8	6.6	6.7	5.3	10.8	8.6	13	13.8	—
Average	16.2	15.0	7.9	7.9	9.5	11.3	10.7	11.3	14.3	13.1	18.4	13.9	9.3	7.6	7.3	7.5	6.4	6.6	9.5	11.1	12.7	15.8	—

Table 6 Mean Wind Speed of D.S(1756m) Mean=13.9m/s

Time	November										December										Average
	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
0:00	-	6.2	15.6	1.1	13.7	8.2	8.1	8.5	15.7	14.6	17	7	18.1	13.9	19.4	15.9	15.8	17	12.1	10.3	
1:00	-	6.1	16.6	1.3	10.9	9.7	7.4	8.6	17.6	12.4	17.2	10.5	17.1	14.4	18.3	16.8	17.3	19	12.7	9.4	
2:00	-	7	18.6	1.3	12	8	6.7	9.7	16.9	11.6	15.5	11.8	17.5	13.8	18.4	16.7	17.3	19.1	12.8	9.6	
3:00	-	8.3	18.4	1.3	12.2	9.7	5	10	14.5	11.7	17.5	12.3	17.3	14.9	18.5	17.1	18.6	19.7	11.5	8.3	
4:00	-	7.7	18	1.7	12.2	9.5	4.7	9.7	15.6	10.3	18.4	13.4	20.3	13.4	18.9	15.2	17.2	22.4	12.1	7.3	
5:00	-	9.4	18.7	1.3	12.1	9	5	9.3	14.7	10	17.6	12.1	21.7	14	20.8	15.4	19.9	21.1	12.2	6.3	
6:00	-	10.3	18.3	0.8	11	8	11.3	9.2	14.8	10.1	19.6	11.3	19.1	13.5	19.8	16.5	18	19.5	12.6	4.9	
7:00	-	11.7	17.5	0.9	8.3	8.3	11.8	9.5	15.1	12.8	18.1	11	20.7	12.5	21	15.7	16.2	20.2	13.1	2.3	
8:00	-	12.3	17.8	6.5	12.6	7.9	11.8	9.2	15.6	14.2	17.8	10.7	19.4	15.8	19	15.9	18	20	12	0	
9:00	-	11.5	15.8	10.9	12.2	7.5	13.1	9.9	16.7	16	17.9	10.5	17.7	15.7	20.6	11.5	18.3	20	11.5	0	
10:00	-	10.8	14.9	11.5	9.2	7.9	13.3	9.5	15.6	16	18.5	12.4	16.3	13.6	21.4	11.8	17	19.5	12.3	0	
11:00	-	11	15.9	11.5	9.9	8.2	12.9	11.3	16.7	16.2	17.2	13	16.3	12.7	21.6	12.6	18.8	18.6	12.4	0	
12:00	-	12	15.9	11.5	11.5	6	12.5	12.4	17.6	15.2	17.3	13.5	15.9	13.5	22.5	11.7	18.9	18.9	12.6	0	
13:00	-	13.3	15.9	12.1	12.2	6	11	12.2	14.9	14.9	17.3	13.5	17.1	16.3	22.4	12.8	18.9	18	12.5	0	
14:00	-	14.4	15.1	15.3	11.8	7.2	10.4	13.2	14.5	15.2	16.5	16.1	17.2	18.8	17.3	11	19.6	18.2	13.5	0	
15:00	-	14.9	15.4	16.1	11.9	7.5	11	13.9	14.1	15.1	16.3	17.6	16.7	17.9	17	10.3	18.9	17.7	12.5	0	
16:00	-	14.8	14.8	17	11.6	10.8	13	14.2	14.6	15.3	16.2	18	16.2	16.6	17.3	10.8	17.2	16.8	11.7	0.6	
17:00	-	13.9	14.7	17.9	9.6	8.6	13.2	14.9	14.8	14.9	12.9	18.8	16.4	18.9	17.5	11.2	16	15.9	12.3	0.1	
18:00	-	14.3	13.6	17.9	8.8	9.5	11.6	14.1	13.6	13.5	11.2	19.3	17.5	15.8	16.5	12.4	16.7	16.7	11.6	-	
19:00	5.8	15.1	12.6	15.3	5.7	8.5	11.6	15.4	13	13.1	12.1	18.8	17.1	16.5	17.4	12.3	17.8	15.4	11.9	-	
20:00	6.7	15	12.9	15	7.5	7.7	11	15.5	13.1	13.9	12.2	16.3	15.3	16	16.4	13	15.5	15.5	10.6	-	
21:00	6.7	14.1	5.3	15.2	9.2	7.7	9.9	15.3	13.3	14.1	10.8	17	15.2	16.1	16.3	13.8	17.8	14	11.5	-	
22:00	6.2	15	2.2	15.3	8.2	8.8	8.7	15.1	14.3	15	10.6	20	14	16.8	15.6	15.4	15	14	11.8	-	
23:00	6.4	16.2	1.3	1.3	8.9	8.4	8.2	15	16.1	16.4	9.4	19.3	13.8	19.4	16.6	15.7	15.8	12.7	11.5	-	
Average	6.4	11.9	14.4	9.2	10.6	8.3	10.1	11.9	15.1	13.9	15.6	14.3	17.2	15.5	18.8	13.8	17.5	17.9	12.1	3.1	

Table7      Temperature of  $\beta$  point(700m)      Mean temperature=5.5°C

Time	November								
	3	4	5	6	7	8	9		
0:00	—	5.5	5.5	3.5	4.5	4.2	10.1		
1:00	—	6.1	5.5	4.3	3.4	3.8	9.5		
2:00	—	6.1	5.1	3.4	4.6	4	7.9		
3:00	—	6.6	4.2	3.8	3.9	4.2	9.3		
4:00	—	5.9	4.2	3.4	3.3	4.2	8.5		
5:00	—	6	3.9	3.7	3.8	3.4	8.1		
6:00	—	5.3	3.5	3.4	4.2	3.6	8.4		
7:00	—	4.5	3.9	3.5	3.9	4	8.5		
8:00	—	4.4	3.8	4.1	3.4	4.8	7.7		
9:00	—	2.8	3.4	3.9	3.8	4.7	9.1		
10:00	—	2.3	3.7	3.2	4	5.9	8.5		
11:00	—	2.7	3.8	3.7	4	5.7	9		
12:00	—	3.5	4.1	3.5	4.8	5.7	—		
13:00	—	3	6.5	3.7	6	7.6	—		
14:00	—	5.6	5.2	3.8	5.5	6.2	—		
15:00	—	9	6.3	5.3	5.8	7.5	—		
16:00	—	7.8	6.1	5.4	5.6	7	—		
17:00	—	8	7.8	5.3	5.6	6.5	—		
18:00	7.4	7	7.4	6	6.3	6.8	—		
19:00	6.8	7	7	7.1	5.8	7.7	—		
20:00	6.2	7	6.2	5.6	5.7	7.3	—		
21:00	6.8	6.1	6.7	6.1	4.9	9.6	—		
22:00	6.4	5.9	6.2	5.9	5	7.8	—		
23:00	5.9	5.7	6.2	4.3	4.5	8.6	—		
Average	6.6	5.6	5.3	4.4	4.7	5.9	8.7		

Table 8 Air Temperature of HQ

Time	November																													
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
0000	11.2	12.2	11.9	10	8.1	9.9	15.2	16.3	8.8	12.2	13.7	10.7	7.4	10.4	13.7	9.2	13.2	10.7	12.8	10.7	15.7	10.5	15.3	7.8	8.8	6.4	7.6	9.7		
1000	11.1	11.4	11.8	9.1	6.7	9.4	16.2	15.7	9.5	12.3	13.7	11	7.4	10.7	13.5	8.9	13	10.6	12.9	9.6	13.6	10.7	15.4	7.5	9.2	7	7.4	7.1		
2000	10.9	9.2	11.1	9	6.1	9.5	15.8	15.4	10	12.2	13.7	9.5	7.6	11.3	13.5	9.4	13.1	10.8	11.7	8.8	13.6	10.4	15.6	7.3	8.7	5.2	8	5.4		
3000	10.8	9.1	10.5	8.9	6.1	8	16.1	15.6	10.1	12.9	11.6	8.4	8.3	10.3	13.5	7.1	12.4	11	12.7	9	14.1	10.2	15.1	7.2	8.8	4.7	8.1	3.1		
4000	10.6	8.5	10.3	7.8	6.7	7.6	16.1	14.7	7.6	12.9	11.5	8.3	8	9.7	13.2	5.9	13	10.9	11.7	7	14.3	10.1	14	6.5	8.6	2.4	6.7	2.2		
5000	10.8	8.5	9.9	6.6	5.9	7	16.8	14.4	7.4	12.9	10.7	7.6	7.8	9	9.5	5.4	12.9	10.7	12.4	6.5	14.2	9.8	14.1	6.1	8.2	-0.2	6.5	0		
6000	10.7	8.3	9.7	5.6	6.5	3.7	16.5	15.3	6.7	12.6	9.6	7.8	6.7	9.4	8.4	10.4	12.7	11.4	12.2	5.1	13.4	9.6	13.8	5.2	7.9	4.5	5.3	-0.6		
7000	10.4	9.1	10.1	6.1	8.9	4.1	16.3	14.9	6.2	12.1	10.3	8	8.3	7.6	8.5	10.5	12.5	10.9	12.2	5.5	13.3	10.3	12.7	4.3	7.4	6.3	7.6	-0.4		
8000	11.1	8.1	10.5	7	10.7	8.2	16.3	14.3	6.8	12.2	10.4	8.7	9.3	10.1	8.5	10.6	12.4	12	12.5	6.4	13.6	11	12.4	6.2	7.6	8.3	8.2	1.9		
9000	14.3	11.3	8.3	11.9	7.7	11.9	7.9	17.6	15.1	8.1	13.3	12.9	9.7	9.3	11.2	8	12	13.2	11.7	14.1	9.6	14.2	12.5	12.9	8.2	7.4	8.8	9.8	6.4	
10000	11.4	12.5	8.7	11.6	9.4	12.3	9.7	17.1	15.9	8.5	13.8	15.3	8.3	8.7	11.9	8.5	12.2	13.7	13.1	14.7	11.1	13.8	13.5	13.7	9.3	7.4	9.2	11	8.3	
11000	11.7	13.4	8.8	12	9.1	12.8	9	17.7	16.5	7.7	14.4	15.9	7.3	10	13.6	8.5	13.9	13.1	14.7	12.3	12.7	13.9	14.4	13.3	11	8.3	10.4	12.2	8.9	
12000	12	13	8.8	11.9	8.1	14	9.5	18.1	17	10	14.4	17	5.9	10.3	14.7	8.5	14.9	14.5	15	13.2	11.2	13.5	13.7	13	11.1	9.9	12	13.9	10	
13000	14	13.7	8.7	14.1	7.7	14.4	10	19.4	16.8	8	16.4	18.2	7	11.7	16.4	10.1	15.1	13.7	16.8	14.4	11.6	14.2	14.2	11.2	10.1	11.5	11.5	15	15	
14000	15	13.7	10.8	15.1	8.1	14.7	10		16.5	10.3	16.4	19.4	8.3	13.4	17	10.9	15.2	15.2	16.9	13.4	11.5	14.9	15.5	11.2	11.9	12.2	12.3	16.9	20.3	
15000	15.2	13.4	13.6	14.8	8.1	16	11.4	19.5	15.6	12.2	15.5	18.3	8.6	13.7	17.7	11.5	15.8	14.2	17.3	15.5	12.6	12.9	15.8	11.6	12.6	12.2	12.5	17.5	21.5	
16000	15.1	15.8	12.5	15	8.9	15.3	13.5	19.2	16	11.2	16.1	20.4	8.3	14.1	17.9	11.2	16.4	13.8	18.1	16.7	13.1	13.6	16.2	11.9	12.8	12.4	12.7	18	22.1	
17000	14.4	14.7	12.5	15.3	10	14.8	15.6	20	15.1	11.2	16.8	17.7	8.7	14	17	11.6	15.8	13.3	18.1	14.5	14	12.9	18.8	12.7	12.6	13.4	12.8	18.4	21.4	
18000	14.1	14.1	11.7	14.9	12.5	14.8	15	18.1	14.5	11.7	17.5	18.8	9.9	13.8	16.7	12.4	15.9	14.7	16.6	14	15.6	13.5	16.7	12	13.1	13.2	13.3	18	21	
19000	13.4	14	11.9	14.3	11.9	14.1	14.9	18.3	14.8	11.9	16.4	18.5	7.5	12.2	17.8	13.5	14.3	13.4	16.8	14.1	17.2	11.7	16.9	11.3	12.5	13.6	12.6	17.1	18.5	
20000	12.7	13.9	10.1	11.9	11.8	12.9	14.7	18.6	12.6	12.2	16.8	17.4	8.4	12.2	17.1	12.7	14.4	13.3	17	13.8	18.8	11.9	15.8	10.6	11.4	12.3	12.6	16.2	17.9	
21000	11.1	13.3	9.7	10.8	9.8	11.2	14	18	10.9	11.6	16.3	16.3	4.5	12.4	15.2	12	14.6	11.6	15.7	13.1	18.4	11.9	14.7	9.8	11	11.3	12.3	15.3	17.4	
22000	10.1	12.9	9.8	9.7	8.4	9.9	14.3	17.8	9.6	11.3	14.8	14.9	6	11.2	14	9.3	13.2	11.4	14.5	11.9	17.3	10.9	14.4	9	9.2	9.7	10.4	13.8	17	
23000	11	12.3	12.2	9.2	7.3	9.6	13.9	16.8	9	11.7	14.4	13.8	7.5	10.3	13.8	9.9	13	11.3	13.9	11.6	15.4	10.8	14.6	8.3	9.1	7.5	9.1	10.7	16.9	
Average	13.0	12.5	10.1	12.0	8.7	11.0	10.5	16.7	14.7	9.6	14.4	15.0	8.2	10.3	13.4	10.9	12.3	13.2	14.0	13.3	11.6	13.4	13.3	12.5	9.3	9.9	9.0	12.1	11.3	

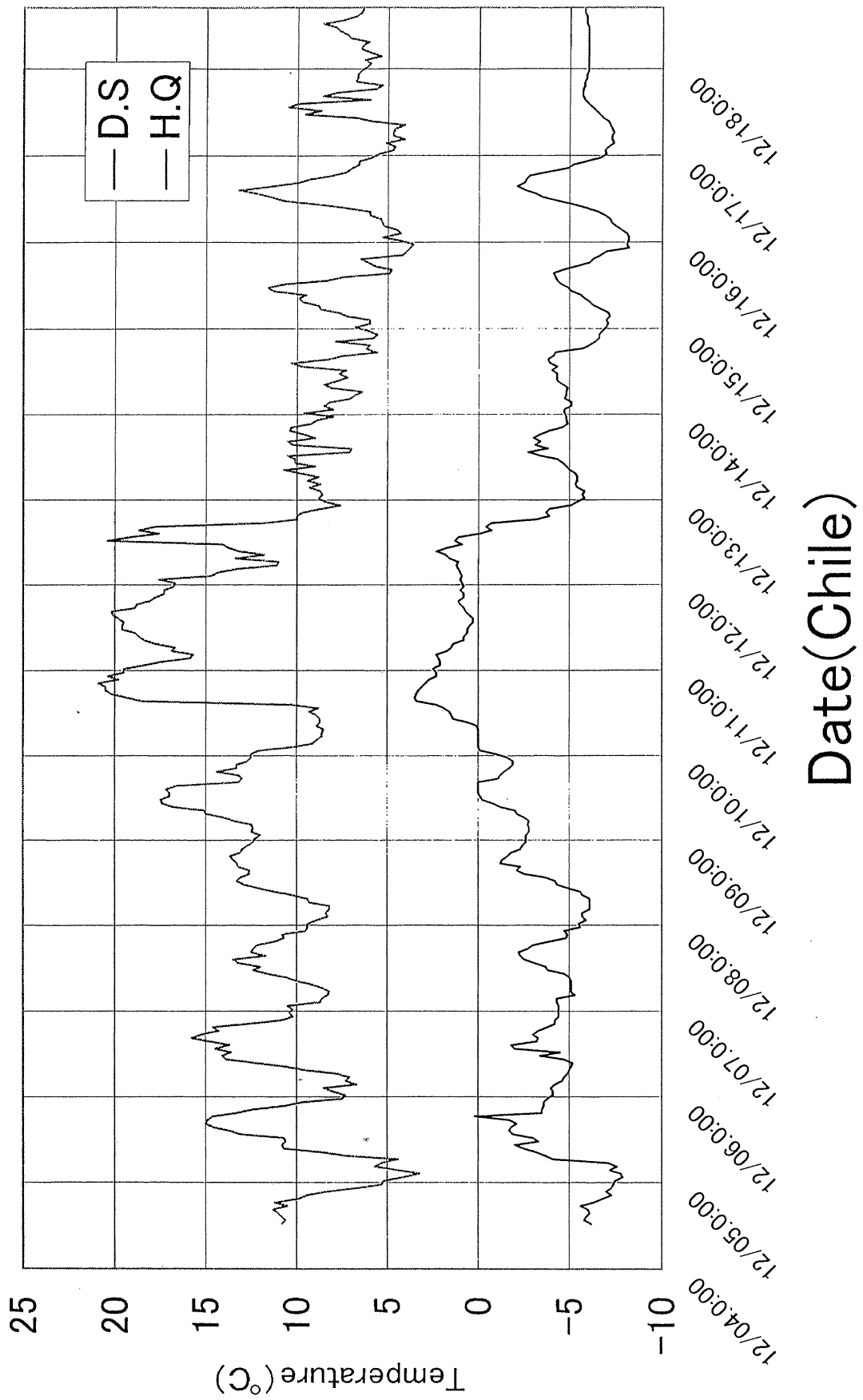


Figure1 Air temperature of D.S and H.Q from 12.04 to 12.18.



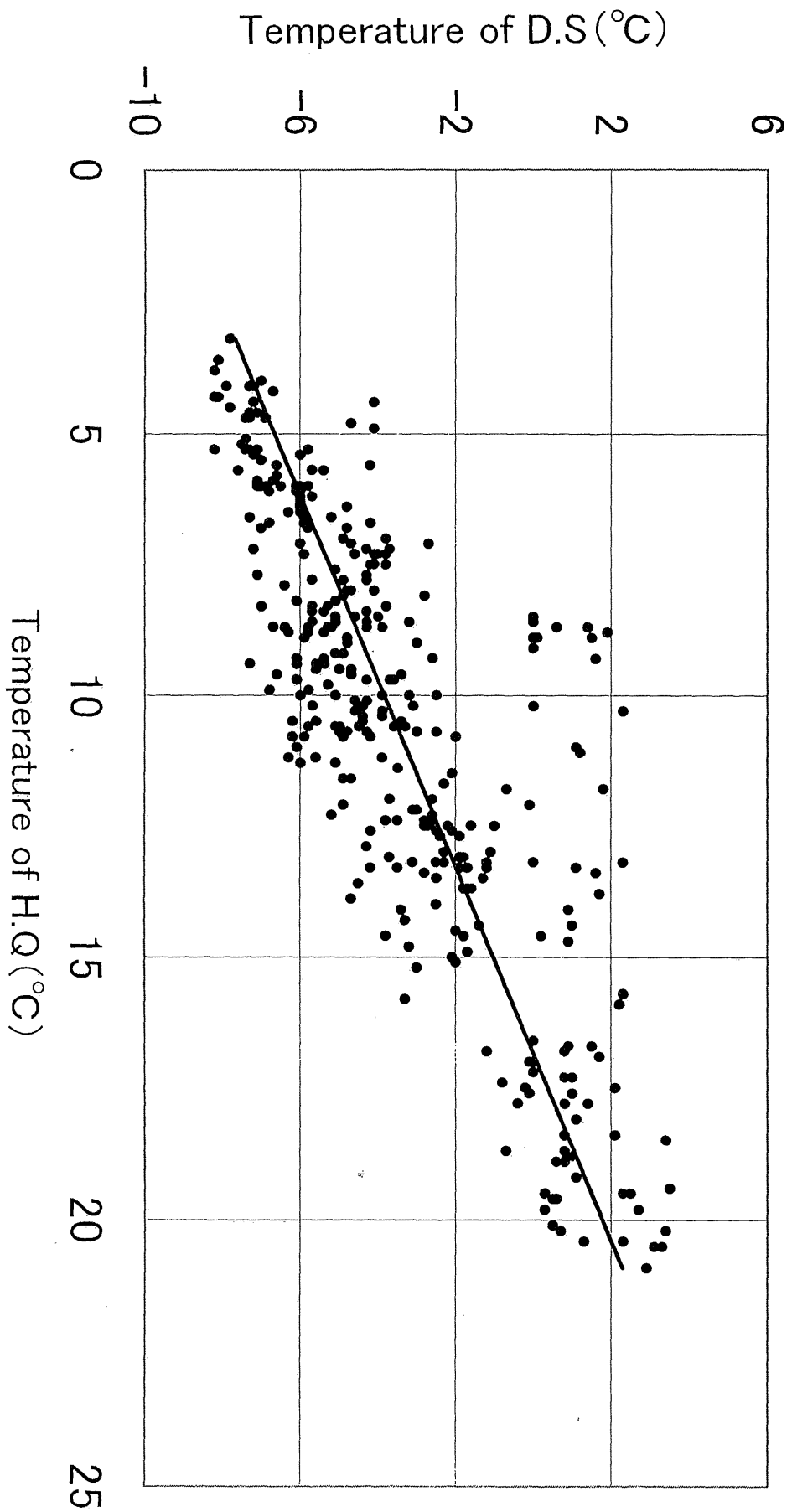


Figure2 Relation between air temperature of H.Q and air temperature of D.S

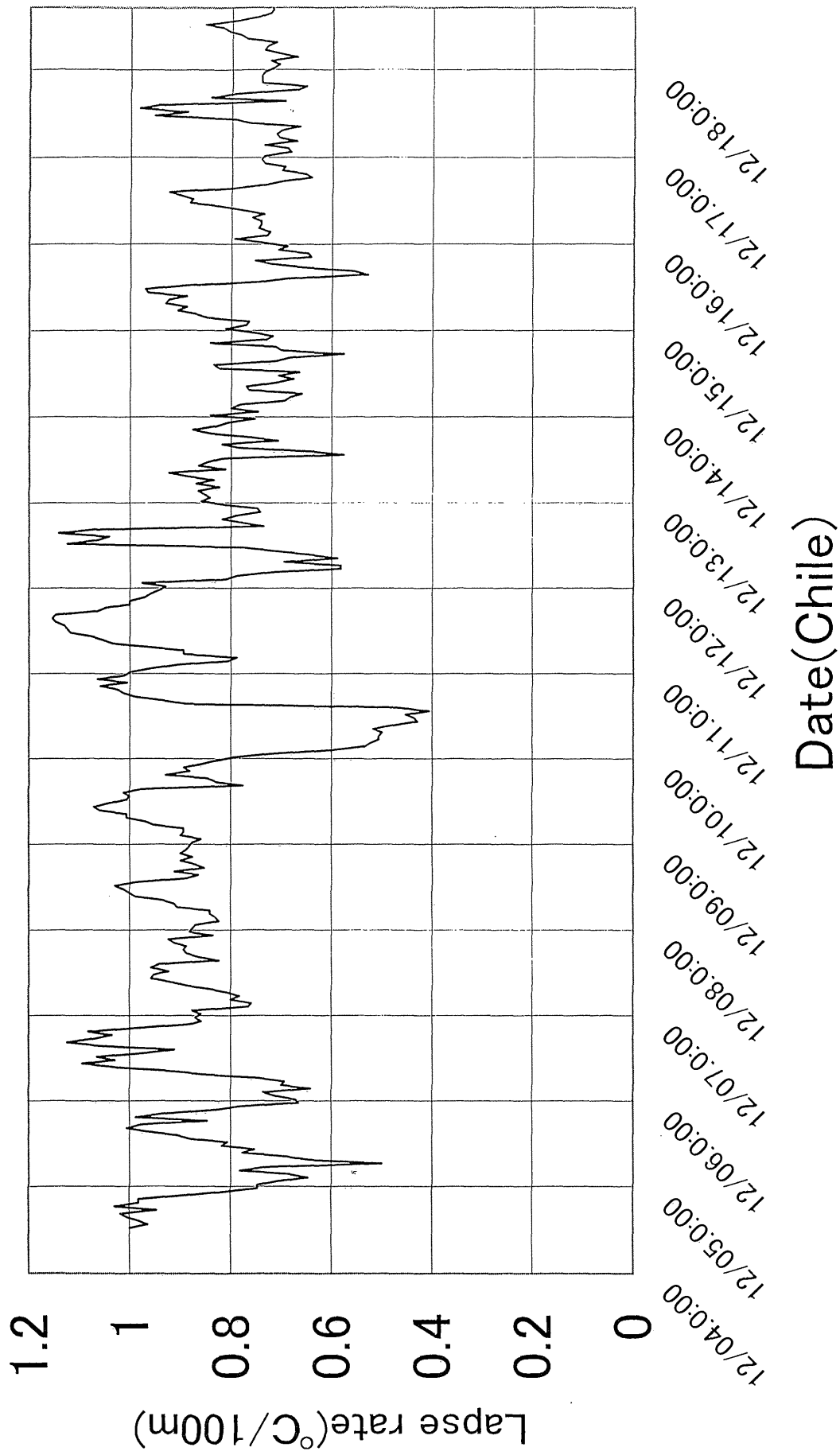


Figure3 Lapse rate between H.Q and D.S.

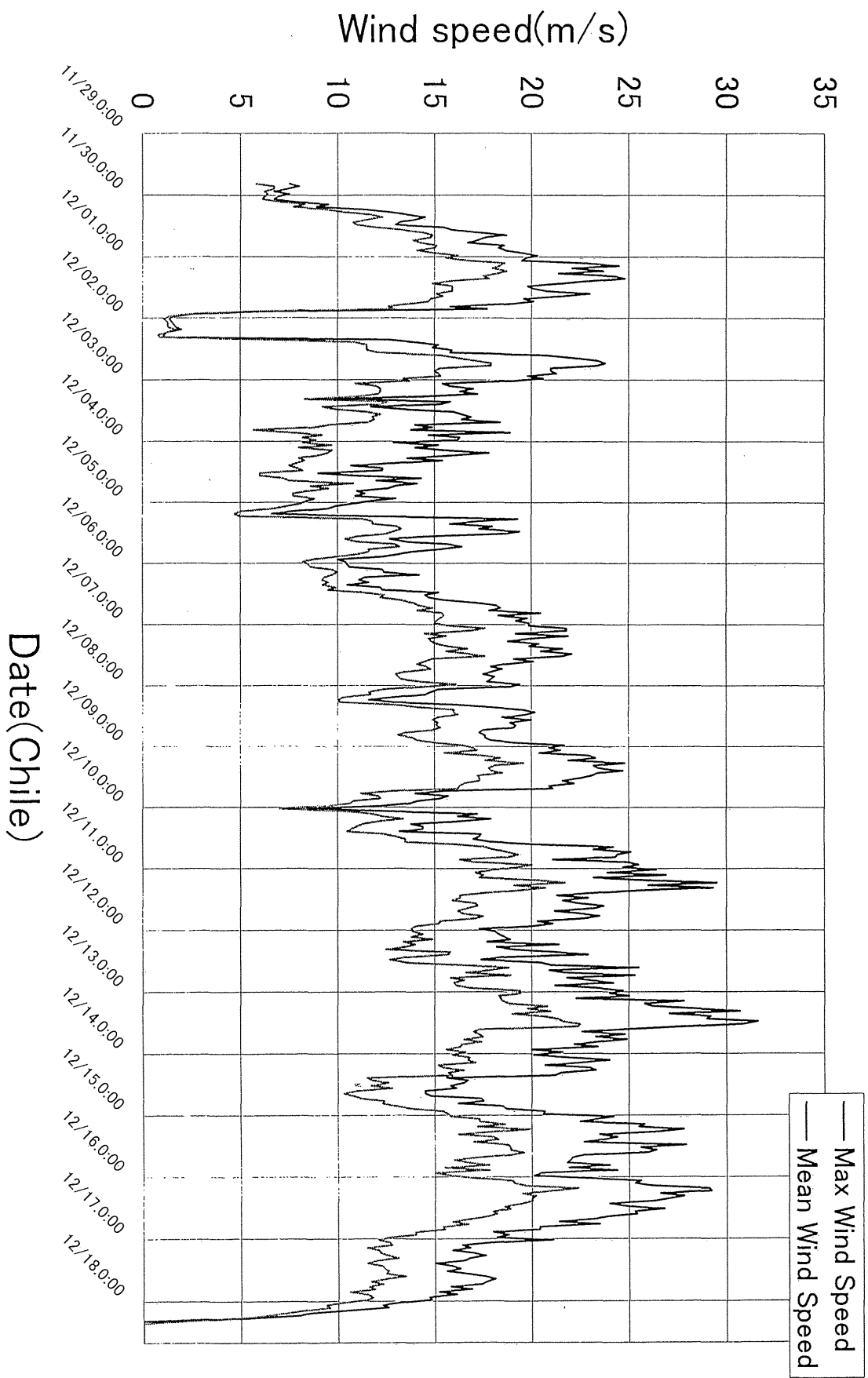


Figure4 Max wind speed and Mean wind speed at D.S.(Mean wind speed is 13.6m/s.

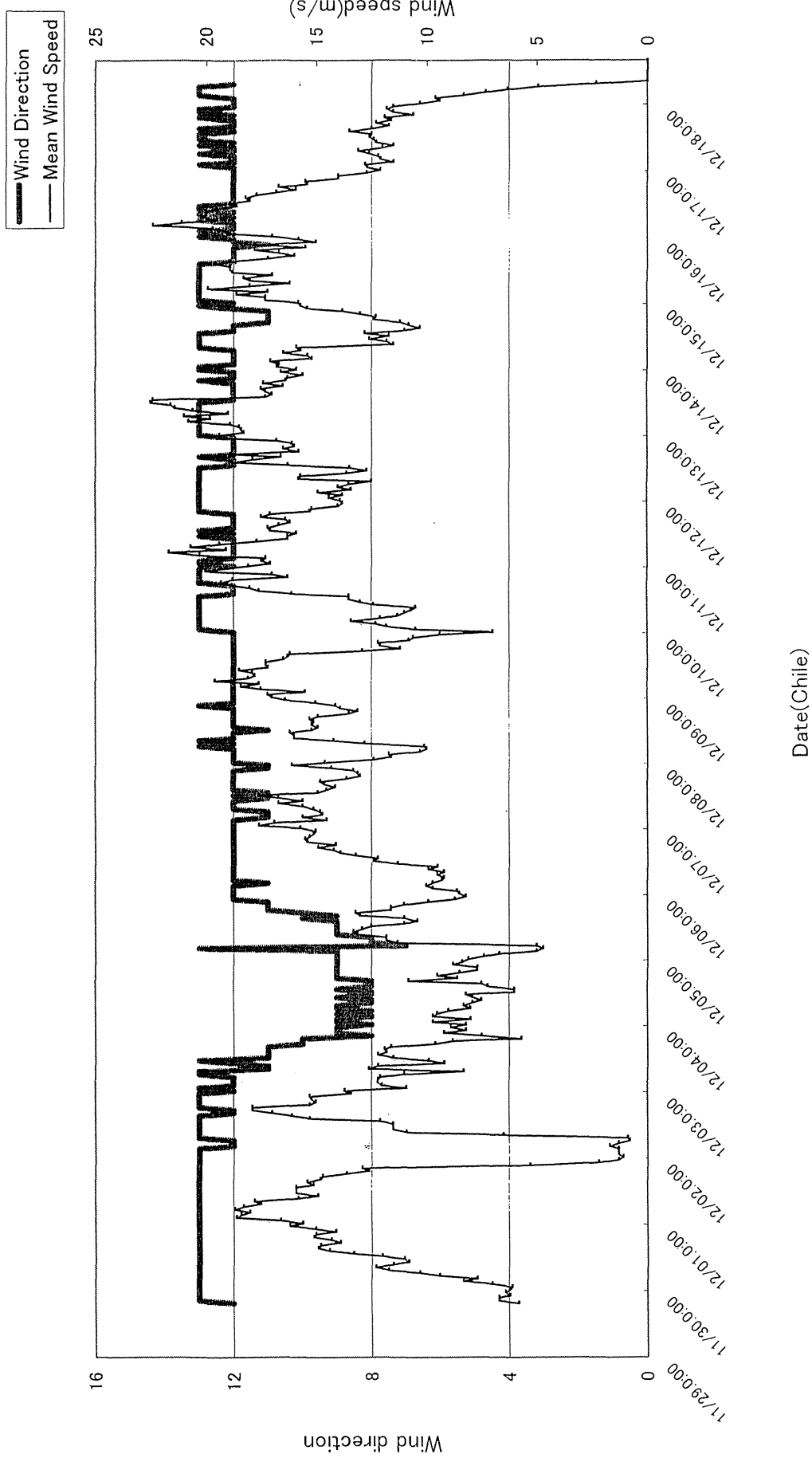


Figure5 Wind speed and wind direction.

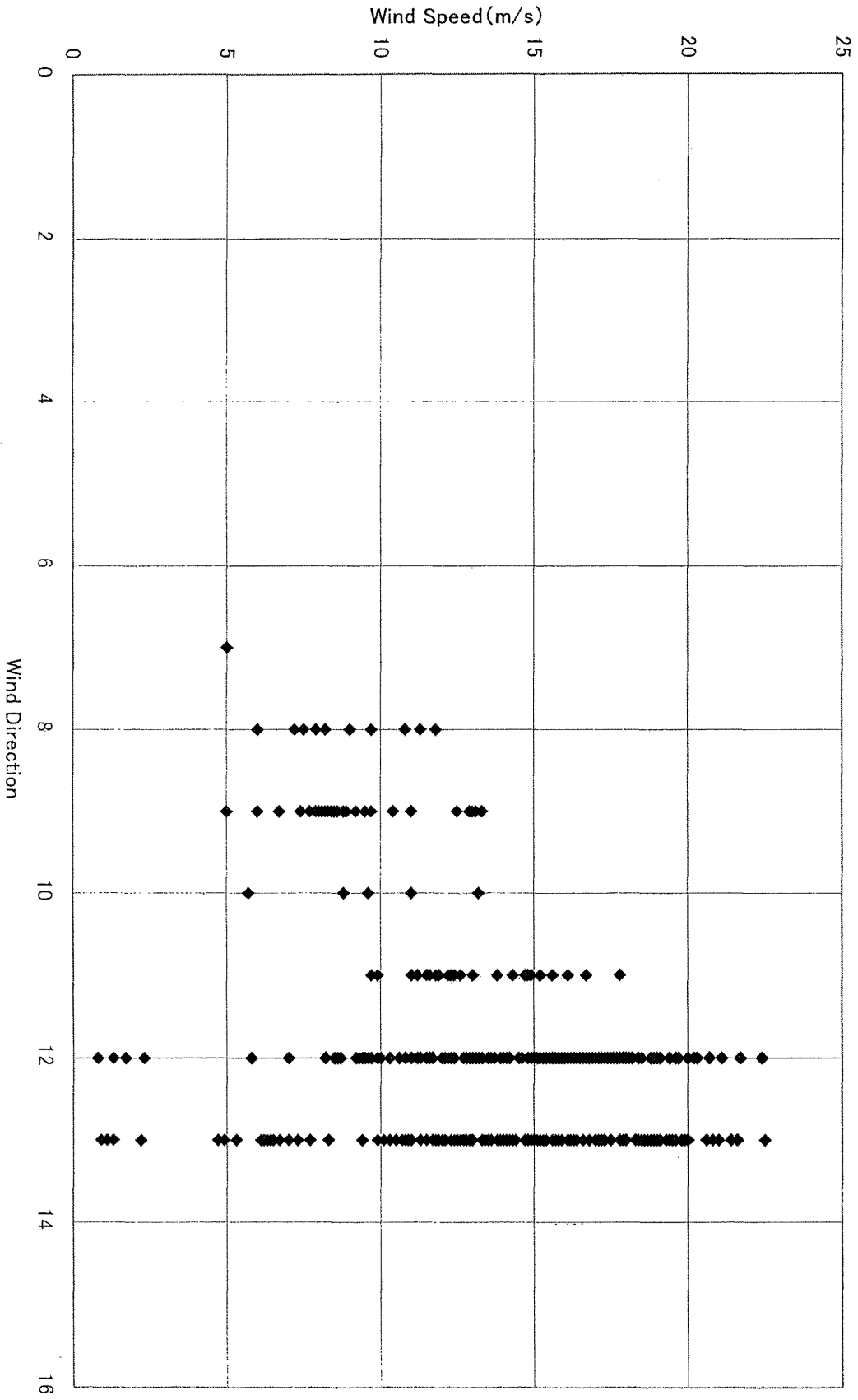


Figure 6 Relation between wind speed and wind direction at D.S.

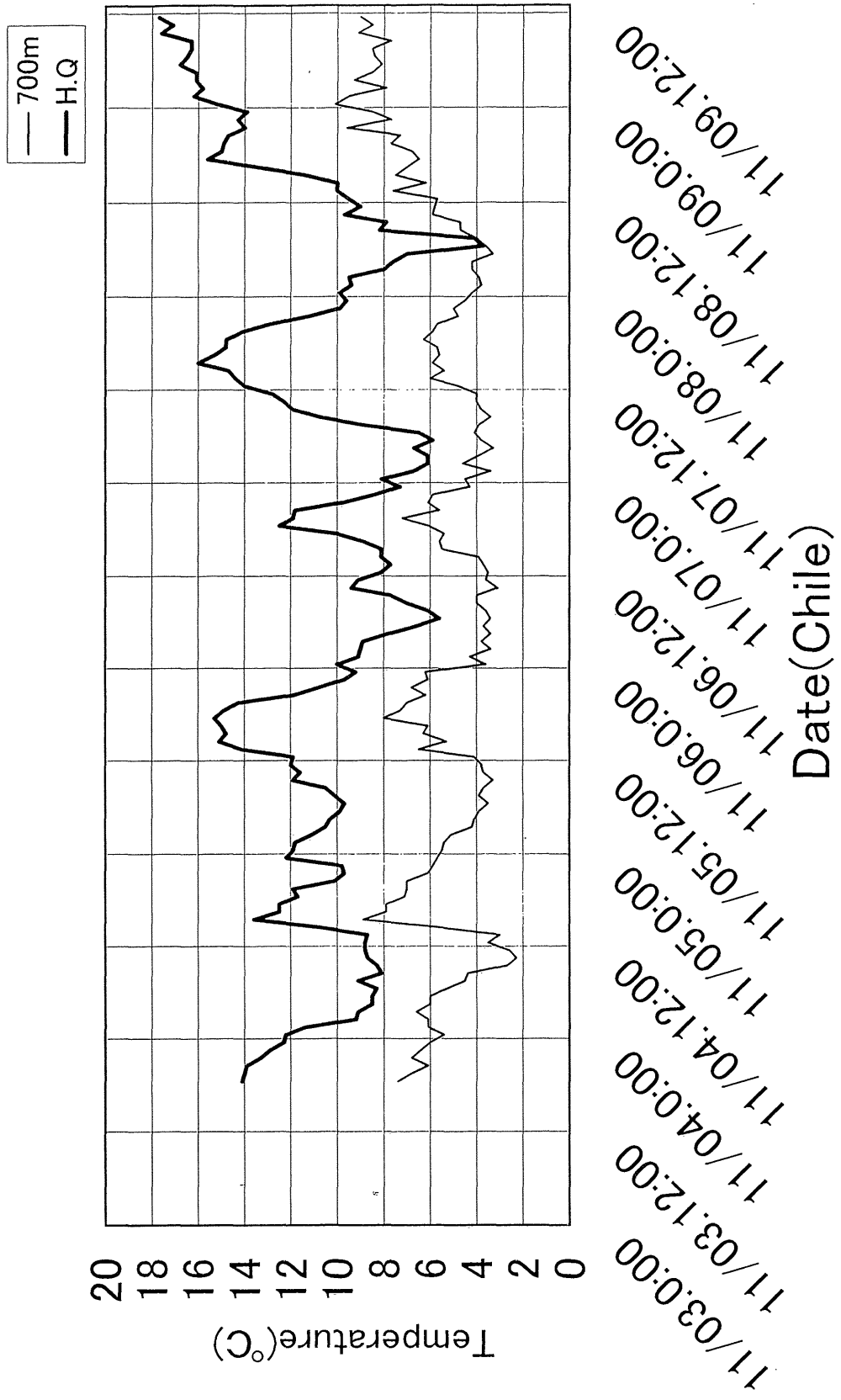


Figure 7 Air temperature of ablation area (700m) and H.Q.

$$y = 0.4122x + 0.951$$
$$R^2 = 0.5379$$

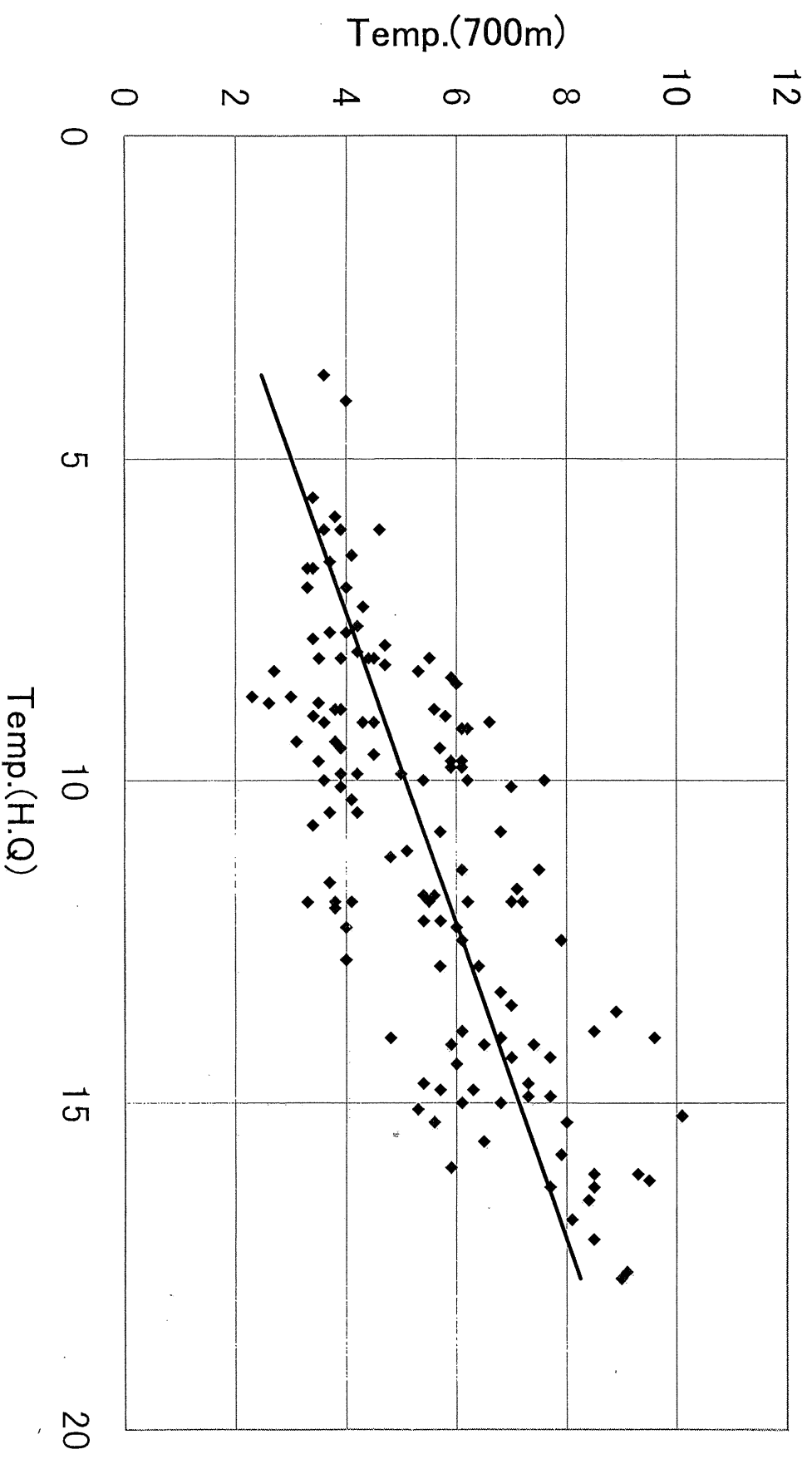


Figure 8 Relation between temperature of H.Q and temperature of 700m.

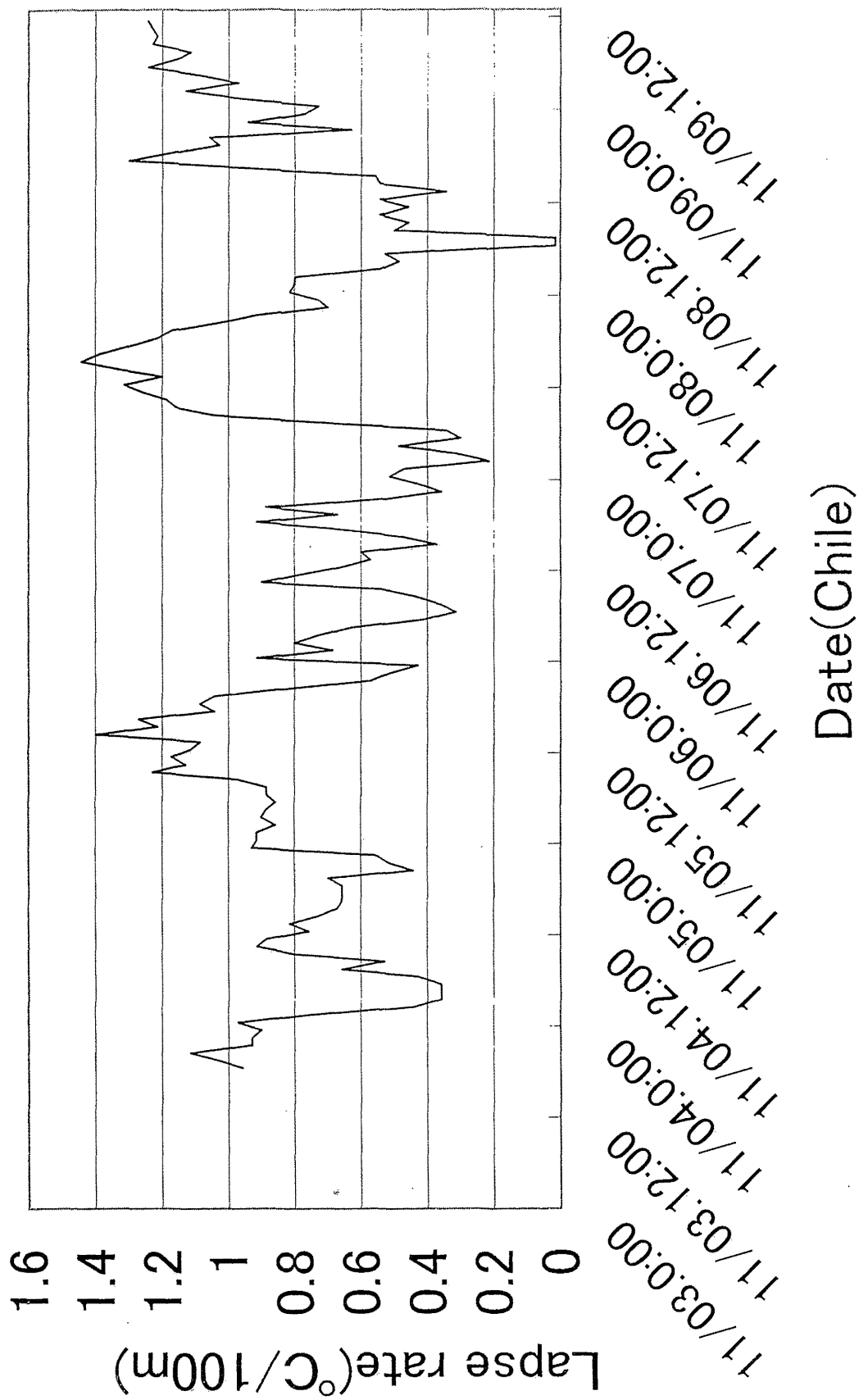


Figure 9 Lapse rate between H.Q and 700m.



# 南パタゴニア氷原ティンダル氷河消耗域の 雪氷生物調査

竹内 望<sup>1</sup>・幸島司郎<sup>1</sup>・白岩孝行<sup>2</sup>・久保田敬二<sup>3</sup>・成瀬廉二<sup>2</sup>・  
Gino Casassa<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学 生命理工学部

<sup>2</sup> 北海道大学 低温科学研究所

<sup>3</sup> 北海道大学 大学院地球環境科学研究科修士課程

<sup>4</sup> Universidad de Magallanes

## はじめに

極地や高山に分布する氷河や氷床は、決して無生物的環境ではなく、雪と氷の世界に特殊化した生物群集を含む特異な生態系である (Kohshima, 1987a)。近年の氷河や雪渓での調査の結果、寒冷な雪氷環境に適応した、雪氷藻類などの生産者、昆虫や甲殻類などの消費者、バクテリアなどの分解者が生息し、これらの生物が氷河上に閉鎖的な生態系をつくり上げていることが明らかになってきた (Kohshima 1984a, 1984b, 1987a, 1987b)。さらにこれらの雪氷生物に関して、生物学的にだけでなく、地球物理学的にも興味深い事実があることが明らかになってきた。たとえば、氷河表面での雪氷微生物の繁殖は、黒い有機物を生産して氷河のアルベド低下させ、氷河の融解を加速して、氷河質量収支に影響を与える可能性があることが明らかになっている (Kohshima *et al.*, 1993)。さらに、氷河や氷床より得られるアイスコアには雪氷微生物が含まれており、この微生物の分析が新たな過去の環境変動を復元する手段として利用できる可能性があることが明らかになってきた (Yoshimura *et al.*, 1997; Yoshimura *et al.*, in press; Takeuchi *et al.*, 1998)。しかし、このような氷河生物に関する研究はまだ少なく、ヒマラヤ地方などの限られた氷河でしか行われていない。そこで今回は、南パタゴニア氷原のティンダル氷河で、氷河生物に関する調査を行った。パタゴニアの氷河生物に関しては、Kohshima (1985) による北氷原での生物群集に関する報告があり、カワゲラ類、トビムシ類などの氷河昆虫や、数種の雪氷藻類の生息が確認されている。しかし、これらの生物の量的な評価、詳しい生態が

まだ明らかになっておらず，特に南氷原についてはほとんど報告がない．以上のことを踏まえて，今回は主に以下の3つを目的として，調査，分析を行った．

1. チンダル氷河の氷河生物による表面アルベド低下効果を評価するため，表面アルベド，汚れの分布，汚れの光学的性質，汚れ中の生物の量と質，汚れへの生物の寄与を明らかにする．

2. アイスコアの生物分析のための基礎情報を得るために，チンダル氷河の雪氷生物群集（藻類，バクテリア），特にバイオマスと群集構造の高度分布を明らかにする．

3. チンダル氷河の生物群集の生態学的特性を明らかにするため，氷河に生息する植物，動物，バクテリアの種，生態を明らかにする．

現在はまだサンプルの分析途中であることから，本報告では，消耗域での調査の概要と，分析結果の一部を示し，現時点までに明らかになったチンダル氷河の生物学的特性について簡単に述べる．

## **調査地と調査の概要**

調査は，1999年の11月から12月にかけて，南パタゴニア氷原のチンダル氷河（チリ）の消耗域で行った．チンダル氷河は，総面積17200 km<sup>2</sup>の南部氷床の最南部から南南東の方角へ長さ40 kmにわたり流れでる氷河である．涵養域上部の標高は約1700 m，平衡線は約1200 m，末端は標高約50 mの湖Lago Geikieに流れでて，カービングしている．消耗域は，幅3.5 - 10 km，長さ16 - 22 kmになり，徒歩による調査をするには非常に広い氷河である．

調査は，1999.11.1-11.10と1999.11.27-12.4の2回行った．2回に分けたのは，涵養域でのアイスコアボーリングオペレーションの都合による（幸島ほか，本報告）．前半の調査は，幸島，白岩，竹内，久保田の4名で行い，後半の調査は竹内，Franco (Magallanes Univ.)の2名で行った．期間中，それぞれ2 - 3日は激しい風雨の日があったが，それ以外は晴れ，または調査に差し障りのない程度の天気の日に恵まれた．

前半のキャンプは，以前より使われているチンダル氷河左岸，Southern lobe近くのキャンプ地にベースキャンプ（BC1，360 m，図1）を設営した．BC1よりチンダル氷河取り付き（Southern lobe）まで，標高差約180 m，歩行時間は約50

分である。BC1よりチンダル氷河取り付きまでの途中、BCのすぐ上の壁をトラバースする箇所がある。ここでは幅1m長さ3mほどの傾いたスラブをトラバースしなければならない。雨でスラブがぬれている場合はスリップの危険があるため、この地点にはロープを固定した。スリップした場合、高さ約50mがけを転落することになる。ロープの固定にはハーケンと灌木を用いた。ここから、氷河に取り付きまでのルートには氷河より流れ出る川の左岸側に行くルートと右岸側（測量起点側）に行くルートがある。右岸側の方が距離は近いが、このルートは幅1.5mほどの水流を飛び越えなくてはならない。日中、氷河融解水によってこの水流はかなり増水し、万が一水流に落ちた場合はかなり危険である。このため、今回は左岸側のルートを利用した。左岸側のルートを利用したため、測量起点（ $\alpha$ 、 $\beta$ ）に行くためには一度氷河上へ上がらなければならない不便が生じた。氷河取り付き地点の標高は約550m、この地点での氷河の平均横断表面レベルは約780mである。氷河の取り付きは平坦で、容易に氷河上に上がることができる。

前半の調査中、一度だけ前進キャンプを使った。チンダル氷河下流部（BCより約12km）の調査の時に距離が長いために前進キャンプを使った。キャンプの場所は氷河左岸の測量起点（ $\alpha$ 、 $\beta$ ）の直下の氷河の外である（C1、図1）。この地点は氷河より容易に下りることができ、かつ平地の砂地で池もあり、風もさほど当たることなくキャンプ地としては最適であった。しかし、氷河下流部への前進キャンプとしてはあまり距離を稼いでおらず、適切ではない。

後半の調査では、人数が二名と少なく荷物も少なかったため、ベースキャンプは、トラバース壁を越えた氷河取り付きにより近い場所に作った（BC2、図1）。さらに氷河下流部の調査では標高400m付近の氷河上にキャンプをした（C2）。この付近では左岸側モレーンが壁となり氷河外へ下りることが不可能であったため、やむ終えず氷河上にキャンプした。風よけのためアイスクリフの下にキャンプしたが、運良くこの夜はそれほど強い風はふかなかつた。さらに氷河上部の調査の際、左岸側標高850m付近のNorthern lobeの北側にキャンプした（C3）。ここは、砂地で池もありキャンプ地としては適していた。しかし、この場所もあまり上部へ距離を稼いでおらず、実際氷河上部でのゆっくりと調査を行うためにはもっとMt. Zapataよりの地を選ぶべきである。

パイネ国立公園事務所からキャンプ地までの荷物の輸送は、馬を用いた。馬は1日1頭60USDで、一頭約40-50kgほどの荷物をはこんだ。前半の調査では荷物だけで往路4頭、復路3頭、後半の調査では荷物に往復路1頭を用いた。キャンプ中の食事は、主に白米、パン、パスタ、スープである。燃料は前半の調査ではプンタアレナスで購入したキャンピング用ガスボンベの燃料を用いた。しかし、このガスは低温（10℃以下）に弱く、キャンプ中、火力が上がらずに不便を生じた。後半の調査ではFrancoが所有していたホワイトガソリンを燃料とするMSR（南米では一般的らしい）を用いた。これは弱火ができない欠点があるが、順調に機能した。食器はプンタアレナスで、プラスチック製のものを購入し、ナベ等はGino Casassaに借りた。テントは一般登山用のドーム型テント（Dunlop, Northface製）をGino Casassaに借りて用いた。

## 調査、分析の方法

### 生物のアルベド低下効果調査

表面アルベドの測定、表面汚れ物質のサンプリングを、氷河上6地点で行った（図1）。各場所ではランダムに選んだ5箇所表面で測定、サンプリングを行った。

測定は、簡易スペクトルメータ（Portable photometer 2703, Abe Sekkei Co.）をもちいた。400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 850, 950, 1050 nmの各波長で、このスペクトルメータ出力（電圧）をテスターで測定し記録した。測定面から鉛直上向きに約30cm離れた所から、視野角10度で測定した。同時にホワイトリファレンスの太陽光反射光度も測定した。各測定面におけるアルベドは、測定面の反射光度の合計を、ホワイトリファレンスの反射光度の合計で割ることによって求めた。

各測定面のアルベドと汚れ物質量との関係を求めるために、各測定面で単位面積当りの汚れ物質量（汚れ密度、 $\text{g m}^{-2}$ ）を測定した。反射光度の測定の後、測定面の氷を長方形型にピッケルでけずり、氷ごと汚れ物質をビニールにとった。汚れ物質を取った面は、面積を記録した。ビニールにとった氷と汚れ物質は、氷を融かして汚れ物質を沈殿させ、余分な上澄みの水をすてて、汚れ物質をプラスチックボトル（50cc）移し、ホルマリンで固定し、日本へ持ち帰った。

日本についたあと東京工業大学の実験室で、各サンプルを乾燥させ（乾燥機 60 °C, 48 hour）, 汚れ物質の乾燥重量を測定した。単位面積当りの汚れ物質の量は、この乾燥重量を汚れ物質のサンプルした面積で割ることにより求めた。

汚れ物質に含まれる有機物量は、燃焼法で測定した。各汚れ物質をそれぞれあらかじめ重量を量ったルツボに取り、乾燥させ酌量した後、マッフル炉 1000 度で 1 時間～2 時間燃焼させた。燃焼後、ルツボを十分室温まで冷やした後、重量をはかった。汚れ物質を乾燥させた後に測った重量から、ルツボの重量を引くと、汚れ物質の乾燥重量が求まる。燃焼後に測定した重量から、ルツボの重量を引くと汚れ物質に含まれていた鉍物粒子の重量がもとまる。有機物重量は、汚れ物質の乾燥重量から、鉍物粒子の重量を引くことによって求め、汚れ物質の乾燥重量に対する割合（%）をもとめた。

### アイスコア分析のための生物調査

氷河表面の藻類種、バクテリア、バイオマス、群集構造を明らかにするため、アルベドの調査同様氷河上 6 地点で、氷河表面の氷のサンプリングを行った。ピッケルを使って氷河表面の汚れ物質を含む氷を砕き、その砕かれた細かい氷を 50 ml のプラスチックボトルにとった。氷は融かした後ホルマリンで固定し、日本へ持ち帰った。日本についたあと東京工業大学の実験室で、顕微鏡によって微生物の分析を行った。

藻類、バクテリアのバイオマスの測定は、顕微鏡による藻類の細胞数を計数することによって行った。まず、計数するサンプルをスピッツ管に約 1 ml とった。スピッツ管中のサンプルは、超音波洗浄機で 10 分間ほぐした。よく振ったそのスピッツ管から、サンプルを 100 ml とり、ミリポアフィルター（Pore size: 0.45  $\mu\text{m}$ , Filter size: 10 mm in diameter, Milipore JHWP047XX）に、フィルターホルダー（Milipore: SX0001300）およびシリンジ（20 ml）を使ってろ過した。藻類の計数は、200 倍対物レンズを用いて、フィルターの直径の一系列の範囲で細胞数を数えた。糸状藍藻については、糸状細胞の細胞体の長さ 15  $\mu\text{m}$  単位（接眼レンズのメモリ）で、計数した。この計数面積とろ過面積から、藻類細胞数濃度（cells liter<sup>-1</sup>）を求めた。藻類細胞数濃度から、さらに藻類バイオマス濃度を求めた。藻類バイオマスは各細胞の大きさの計測値から、一細胞当りの体積を計

算して求めた。円柱形の藻類のバイオマスは、長さ  $l$ 、幅  $w$  から、球形の藻類は直径  $d$  から、それぞれ細胞の体積を求めた。この一細胞当りのバイオマスに藻類細胞数濃度をかけてバイオマス濃度を求めた。さらに、単位汚れ物質重量当たりのバイオマスを、汚れ物質濃度から求めた。

## 生物群集調査

雪氷藻類、バクテリア群集については前述の通りにサンプリング、分析を行った。

氷河昆虫などの動物群集については、氷河表面の融解水流、ブルーホール、クリオコナイトホールなどで、目視による観察、サンプリングをおこなった。

## 結果

### 生物のアルベド低下効果

#### 表面反射率（アルベド）測定

図 2 にチンダル氷河消耗域表面で測定したスペクトルアルベドを示した。スペクトルアルベドは、波長の短いほうほど反射率が高い傾向があった。図 3 に各サンプル場所の高度と測定したアルベドの関係を示した。消耗域のアルベドは全体的に高い値（mean 47%）であった。標高による違いは、900 m 付近が他の場所より高かった（65%）ほかは、大きな違いはなかった（45 - 48%）。氷河の端（左岸から 500 m くらいまで）は、低い値を示した（30 - 40%）。

#### 汚れ量、有機物量の高度分布

図 4 にチンダル氷河消耗域の汚れ物質の量の分布を示す。チンダル氷河の消耗域の汚れ量は全体的に少なかった（mean: 38 g m<sup>-2</sup>）。汚れ量の高度分布は特になかった。氷河の端は、汚れ量が比較的多かった（66-71 g m<sup>-2</sup>）。図 5 は表面アルベドと汚れ量の関係を示したものである。両者には相関があり、この事実は場所によるアルベドの違いは汚れ量の違いによるものであること示している。

図 6 は、各場所の汚れ物質に含まれていた有機物量（乾重量比）を示した。有機物は平均で 1.8% で、どの地点でも低い値であった。700 m 付近の 2 点では、0.6% で他の地点より低い値を示した。これは、この付近の鉱物の供給が多いためと考えられる。

## 汚れ（クリオコナイト粒）の観察

汚れのほとんどは鉱物粒子で、まれに有機物の黒いかたまりが観察された。そのかたまりは黒い不定形の有機物で、糸状藍藻が含まれていることもまれにあった。しかし、ヒマラヤや北極の氷河で見つかったようなクリオコナイト粒は、観察されなかった。

## アイスコア分析のための生物調査

### 確認された藻類

消耗域表面から、以下の緑藻5種、糸状ランソウ2種観察された（図7）。

Chlorophyta:

*Mesotaenium* sp.

*Cylindrocystis* sp.

*Chlamydomonas* sp.

*Closterium* sp.

*Ancylonema* sp.

Cyanophyta:

Oscillatoriacean alga. 1

Oscillatoriacean alga. 2

氷河上の残雪でみられた赤雪には、赤雪の構成種として世界中でも一般的な *Chlamydomonas* sp. がみられた。

### 藻類バイオマス、種の高度分布

藻類バイオマスのほとんどは緑藻が占めていた (*Mesotaenium* sp., *Cylindrocystis* sp.: 90%以上)。図8に藻類バイオマスの高度分布を示す。藻類バイオマスは、標高が低いところほど大きくなった。しかし、ヒマラヤの氷河と比べると (Yoshimura *et al.*, 1997, Takeuchi *et al.*, 1998), 約 1/10 で、少ない値だった。図9には各藻類の高度別の出現頻度を示した。ほとんどの藻類種は標高が低い所ほどよく見られ、高いところでは数が少なくなった。消耗域内では、藻類群集構造の大きな変化は見られなかった。

## 生物群集調査

## 氷河動物の観察

カワゲラが消耗域表面を歩く姿がよく観察された。ブルーホール内でもよく観察された。交尾している個体も頻繁に観察された。トビムシは、ブルーホール内で3-4種類観察された。ほとんどは、ブルーホールの水面に浮いていた。観察のために顔を近づけると、瞬く間に飛び散っていった。トビムシの内一種は、比較的小さく、クリオコナイトホールの沈殿物の内部に（水中）生息していた。沈殿物でも、直径5 mm程に固まった団子のようなものの中のみ、このトビムシが含まれていた。この団子をくずすと、水中の泥の表面に活発に歩き回るトビムシが観察することができた。カワゲラの解剖の結果、腹内に小さなトビムシが含まれていたこと（幸島未発表）などから、カワゲラは沈殿物の中のこの小さなトビムシを補食しているものと考えられる。カワゲラの幼虫が日中、沈殿物の内部にすることが何度も観察されたことも、このことを支持している。

## クリオコナイトホール

クリオコナイトホールは、氷河端から離れた中流部で多く見られた。大きさは直径3 - 20cm、深さは20 - 40 cmであった。

## 結論

### **生物のアルベド低下効果**

チンダル氷河消耗域は、全体的にアルベドは高く、汚れの量も少なかった。汚れの成分は、ほとんどが鉱物で、有機物、藻類は少なかった。以上の事実は、この氷河では生物活動による汚れ物質の形成がほとんど行われず、アルベド低下効果は小さいことを示している。この氷河で生物によって汚れが形成されないのは、汚れ物質の形成に関わっていると考えられる藍藻が、この氷河ではほとんど生息していないためと考えられる。

### **アイスコア分析のための生物調査**

チンダル氷河消耗域表面には、緑藻が5種、糸状ランソウが2種の雪氷藻類が生息していることが明らかになった。平衡線付近、及び涵養域ではまだ藻類の存在を確認していないが、これらの藻類が涵養域の雪にも含まれていることは十分考えられる。したがって、これらの藻類を使ってアイスコア分析は十分



可能であると考えられる。

### **生物群集調査**

チンダル氷河には、カワゲラ、トビムシが大量に生息していた。今回新たに発見された融解水中に生息する小型のトビムシは、水中で暮らす特殊なタイプのトビムシで、カワゲラの餌になっていると考えられる。

### **これからの分析**

生物のアルベド低下効果：汚れ物質中に含まれる、腐植物質やクロロフィル量など、化学的な分析を進める。さらに詳しい構造なども明らかにし、チンダル氷河ではなぜ汚れ物質ができないのか？を明らかにしていく。

アイスコア分析のための生物調査：藻類のバイオマス、群集構造の高度分布の顕微鏡による分析を進める。さらに、今回チンダル氷河涵養域で得られた深さ 46 m のアイスコア（白岩ら、本報告）の分析を行い、得られた高度分布の結果を用いて、アイスコアの結果の解釈をする。

生物群集調査：カワゲラ、トビムシの同定、解剖などから、氷河上の食物連鎖を明らかにする。

### **チンダル氷河消耗域の氷河上歩行ルートについて**

最後に今回の調査で歩いたルート、気付いた危険箇所を今後の参考のために示しておく（図 10）。氷河上の調査では、クレバスやムーランなど危険箇所を避け、慎重にルートを選んで歩行する必要がある。今回の調査では、消耗域の広大な範囲を歩行したので、消耗域の広い範囲の氷河上の情報が得られた。また今回は消耗域表面に雪がかぶっていなかったため、ヒドゥンクレバスに用心する必要がなく、歩きやすかった。下流域、上流域へは（350 m - 1000 m）基本的に左岸沿いにそって歩けば特に危険なクレバスもなく、容易にいくことができる。しかし、歩行距離が長いのでゆっくりと調査がしたい場合は途中キャンプが必要であろう。左岸から少しでも離れるとクレバス帯が出現する。しかし、770 m、650 m、450 m 付近にはクレバスの少ない地帯が存在する。Medial Moraine に行くには 770 m 付近（GRPP 測線）をトラバースするのが容易である。

さらに涵養域へむけて歩いていく場合、または涵養域からのエスケープを考える場合、この Medial Moraine とその上流に位置するヌナタクの脇を通るルートが、もっとも安全と考えられる。今回は下流部から、標高 900 m 付近まで実際に歩いた。しかし、このルートでも、標高 1000 m 以上は雪に覆われているためにクレバスに用心しなくてはならないだろう。また、ヌナタク上部からの雪崩にも用心が必要である。

## 謝辞

今回の調査を行うにあたって、パイネ国立公園管理事務所の皆さんには、調査期間中、無線支援など数々のお世話になった。Universidad de Magallanes の Franco さんには、後半の調査に同行していただき、さまざまなサポートをしてくださった。

本研究にあたっては、科学研究費補助金基盤研究 (A)(2)「南米・パタゴニア地域における完新世の氷河変動と近年の氷河変動機構の解明（代表 安仁屋政武）（課題番号 国 10041105）」、科学研究費補助金基盤研究 (C)(2)「地球温暖化にともなう大規模な温暖氷河の後退が海水面変動におよぼす影響評価（代表 成瀬廉二）（課題番号 11640422）」を使用した。

## 参考文献

- Kohshima, S. (1984a) A novel cold-tolerant insect found in a Himalayan Glacier. *Nature* **310**: 225-227,
- Kohshima, S. (1984b) Living micro-plants in the dirt layer dust of Yala glacier. In K. Higuchi (ed.), *Glacial studies in Langtang Valley*. Data Center for Glacier Research, Japanese Society of Snow and Ice, 91- 97.
- Kohshima, S. (1985) Patagonian glaciers as insect habitats. In Nakajima, C. (ed.), *Glaciological studies in Patagonia Northern Icefield 1983-1984*. Data Center for Glacier Research, Japanese Society of Snow and Ice, 94-99.
- Kohshima, S. (1987a) Glacial biology and biotic communities. In S. Kawano, J. H. Connell, & T. Hidaka (eds.), *Evolution and coadaptation in biotic communities*. Faculty of Science, Kyoto University, 77-92.
- Kohshima, S. (1987b) Formation of dirt layers and surface dust by micro-plant growth in Yala (Dakpatsen) Glacier, Nepal Himalayas. *Bulletin of Glacier Research*, **5**: 63-68.
- Kohshima, S., Seko, K., and Yoshimura Y. (1993) Biotic acceleration of glacier melting

in Yala Glacier, Langtang region, Nepal Himalaya. *Snow and Glacier Hydrology (Proceeding of the Kathumandu Symposium, November 1992) IAHS Publ. 218:* 309-316

Takeuchi, N., Kohshima, S., Fujita, K. (1998) Snow Algae Community on a Himalayan Glacier, Glacier AX010 East Nepal : Relationship with Glacier Summer Mass Balance. *Bulletin of Glacier Research*, **16**: 43-50.

Yoshimura, Y., S. Kohshima, and S. Ohtani (1997) A community of snow algae on a Himalayan glacier: change of algal biomass and community structure with altitude. *Arctic and Alpine Research*, **29** (1): 128-139.

Yoshimura, Y., S. Kohshima, N. Takeuchi, K. Seko, and K. Fujita, Dating a Himalayan ice core using snow algae. *Journal of Glaciology*, in press

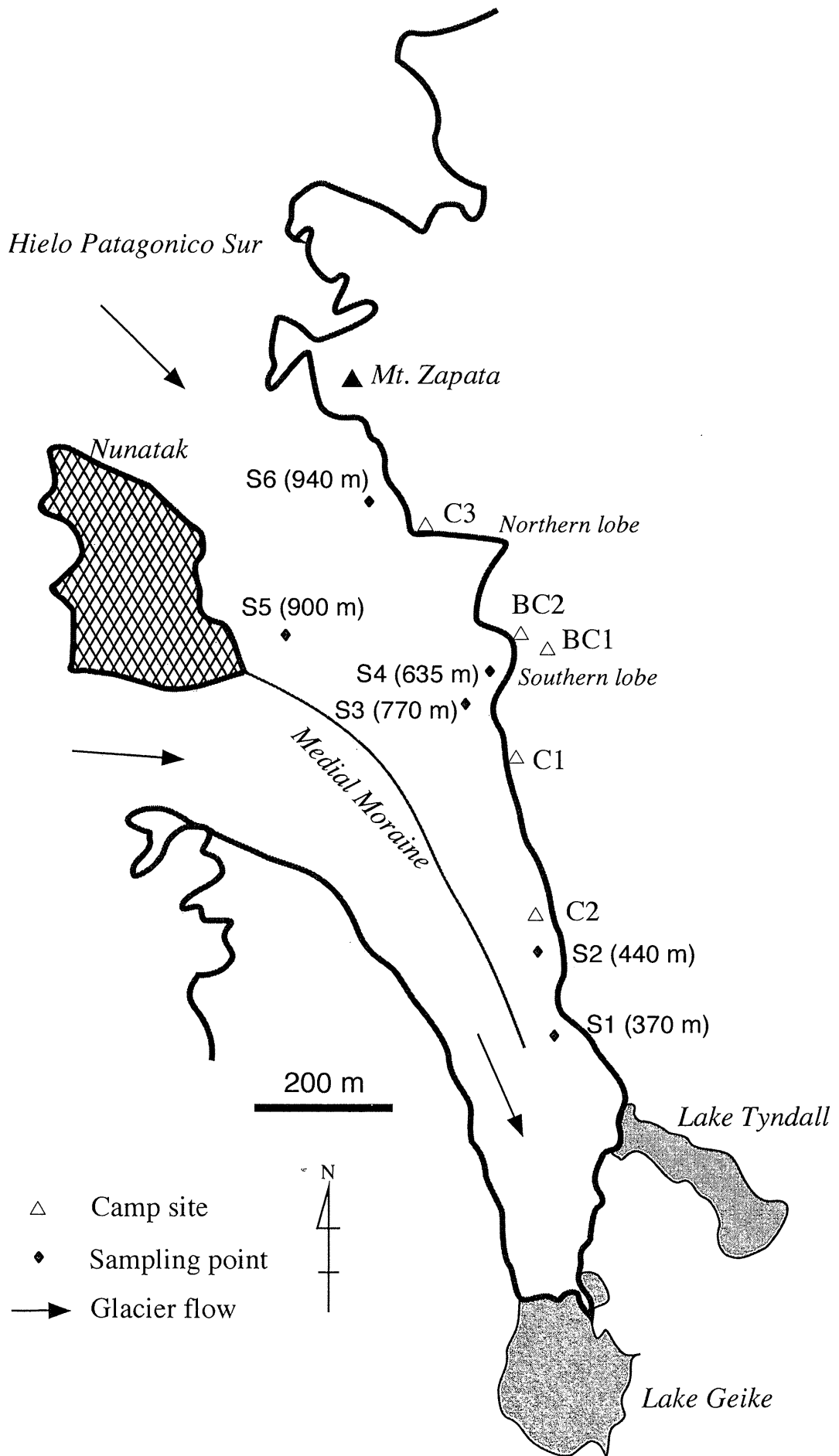


图 1 A map of Tyndall Glacier in Southern Patagonia ice field.

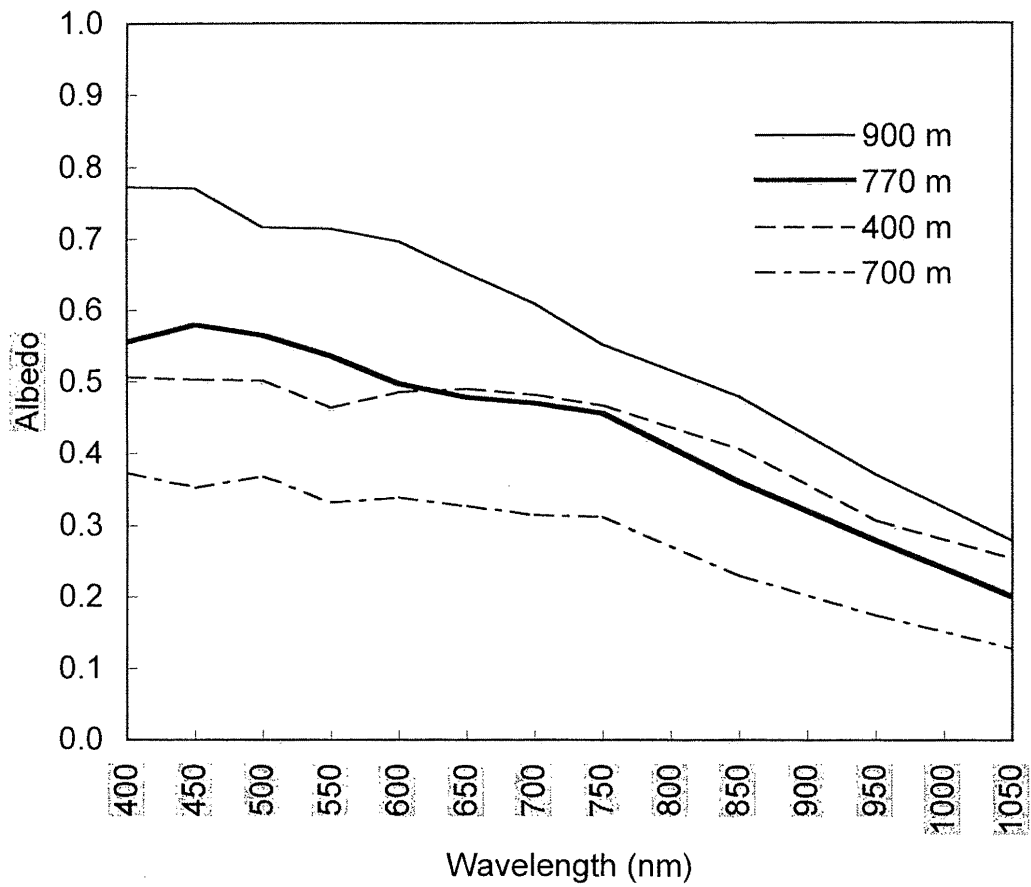


Fig. 2 Spectral albedo of glacier surface in ablation area in Tyndall Glacier, Patagonia.

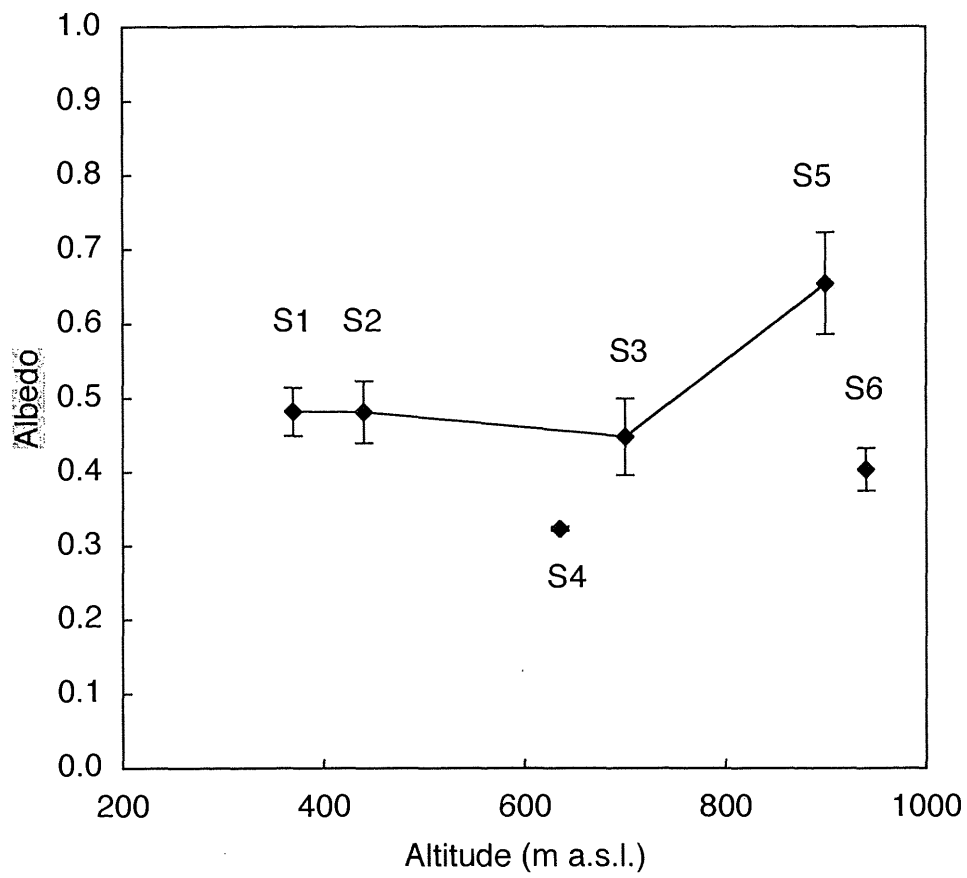


图3 Altitudinal change of surface albedo in Tyndall Glacier, Patagonia.

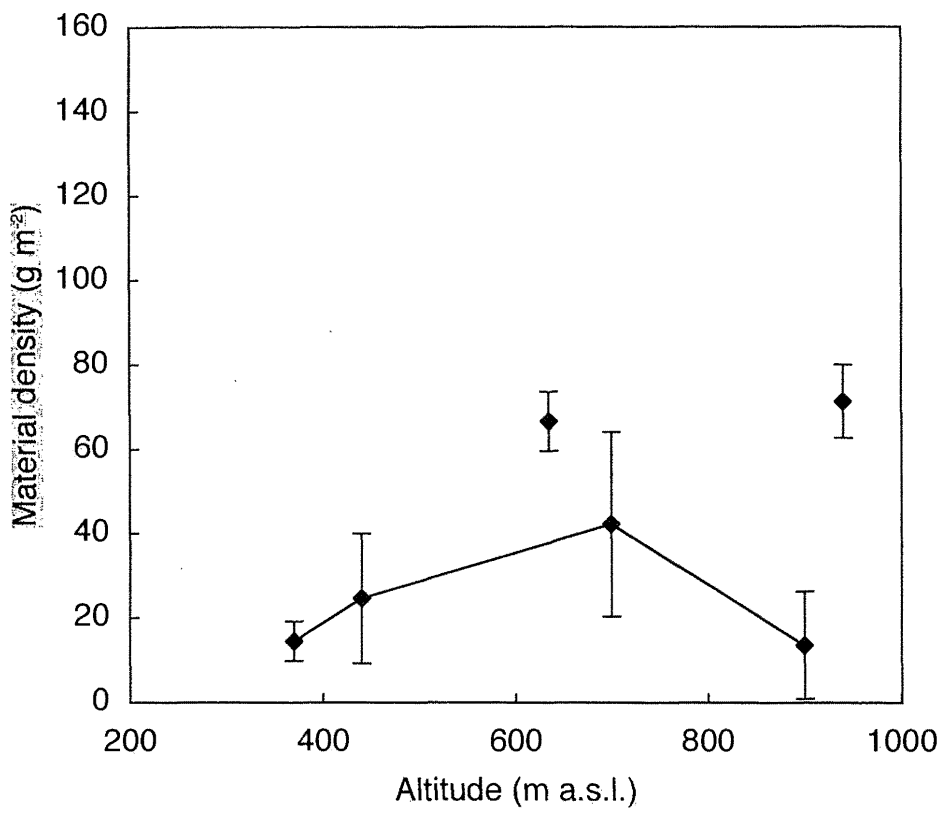


Fig. 4 Altitudinal change of material density in Tyndall Glacier, Patagonia. Error bar = SE (n=5)

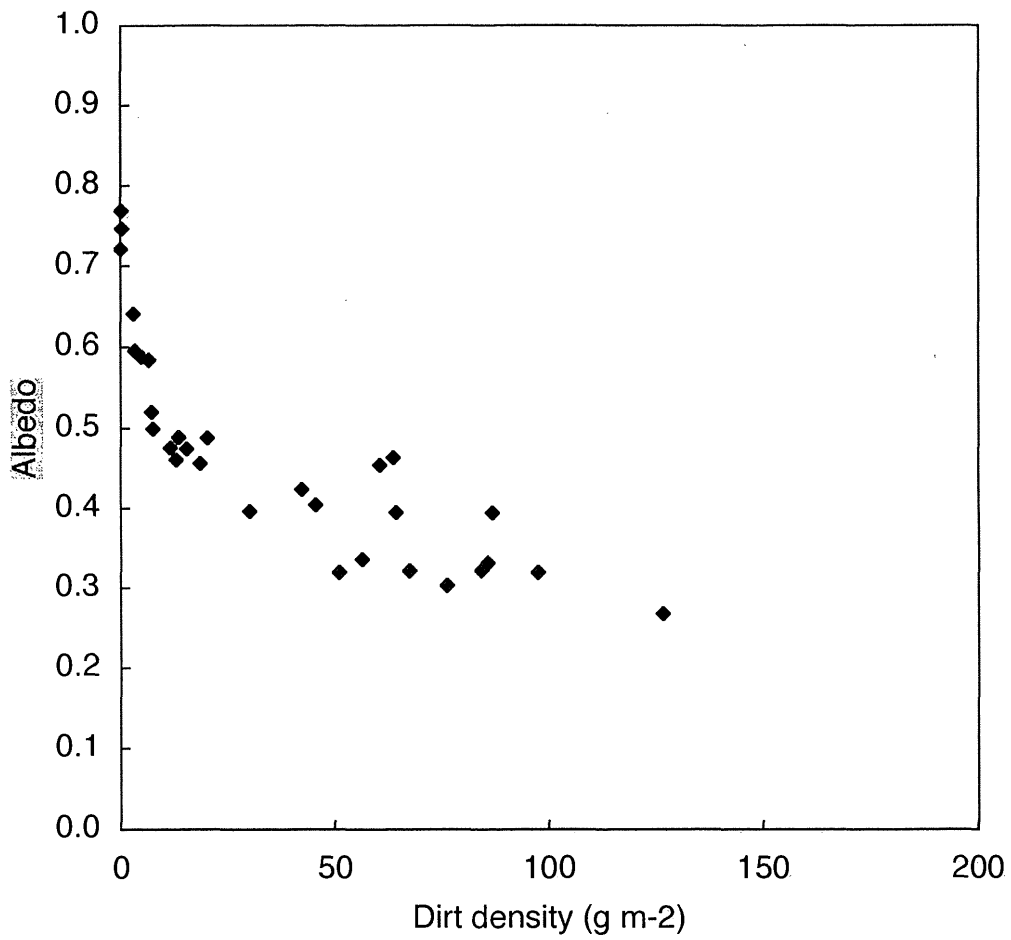


Fig 5 Relationship between dirt density and surface albedo in Tyndall glacier, Patagonia



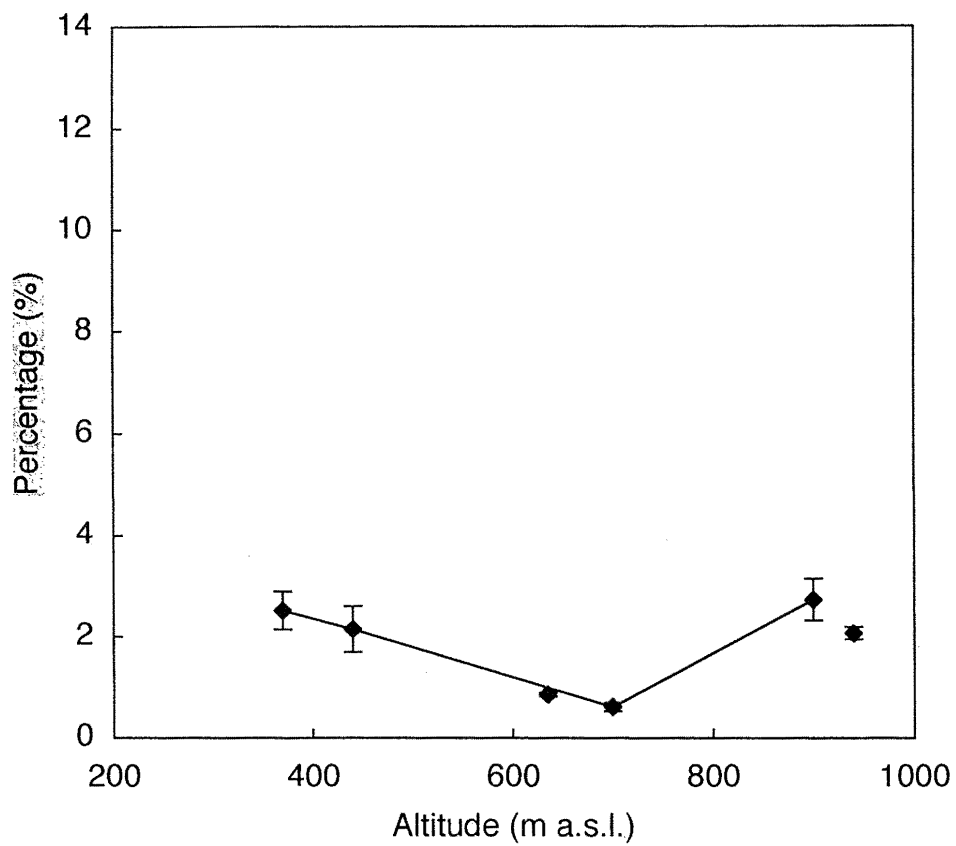
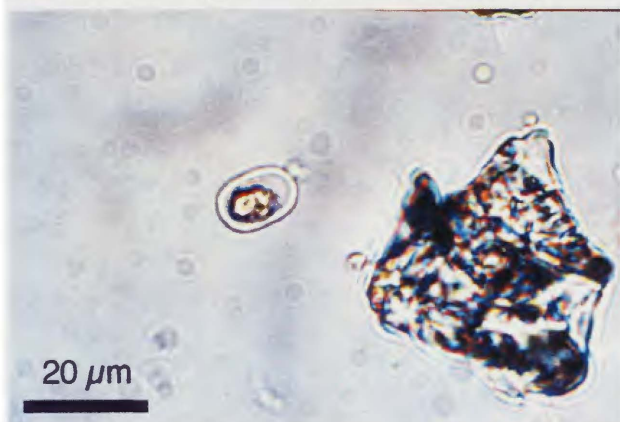
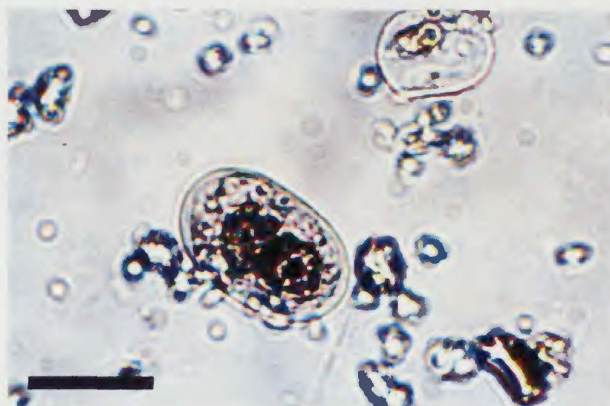


Fig. 6 Altitudinal change of ratio of organic matter in Tyndall Glacier, Patagonia. Error bar = SE (n=5)

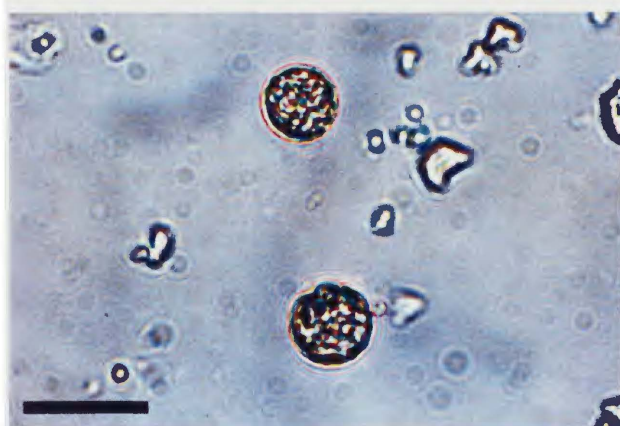
## Green algae (Chlorophyta)



*Mesotaenium* sp.



*Cyliandrocytis* sp.



*Chlamydomonas* sp.

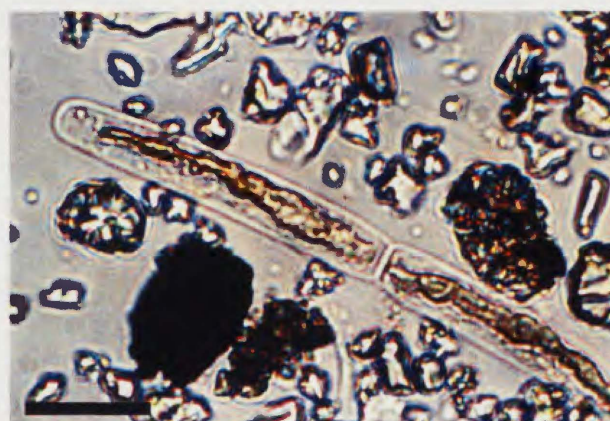


*Closterium* sp.

## Blue-green alga (Cyanophyta)



Oscillatoriacean alga



*Ancydonema* sp.

図7 パタゴニア，チンダル氷河消耗域表面で観察された雪氷藻類。

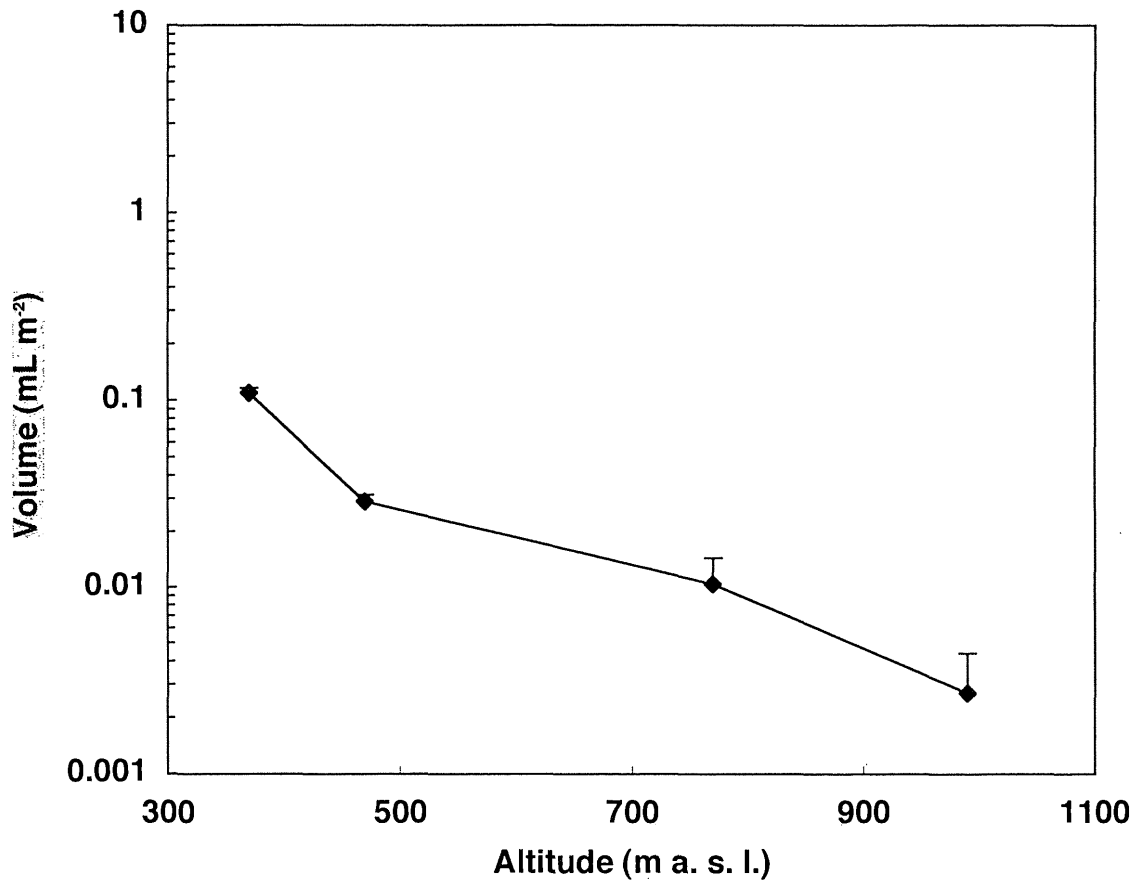


图8 Altitudinal change of algal biomass for Tyndall Glacier in Patagonia

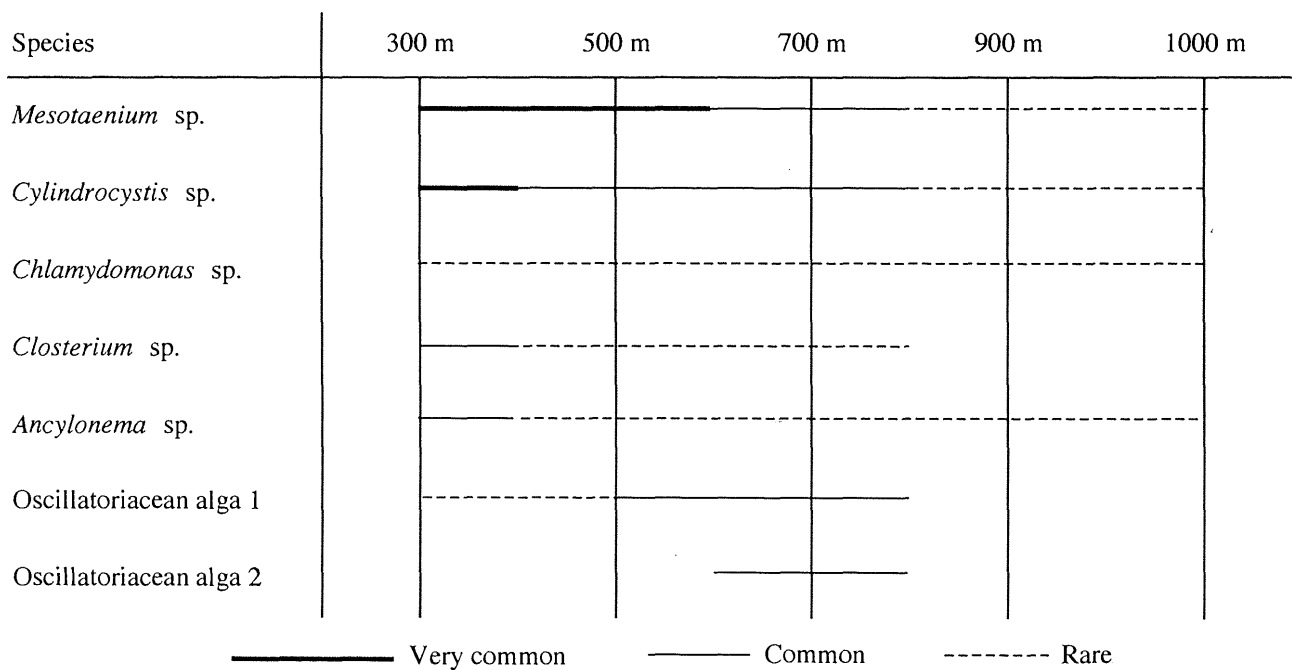
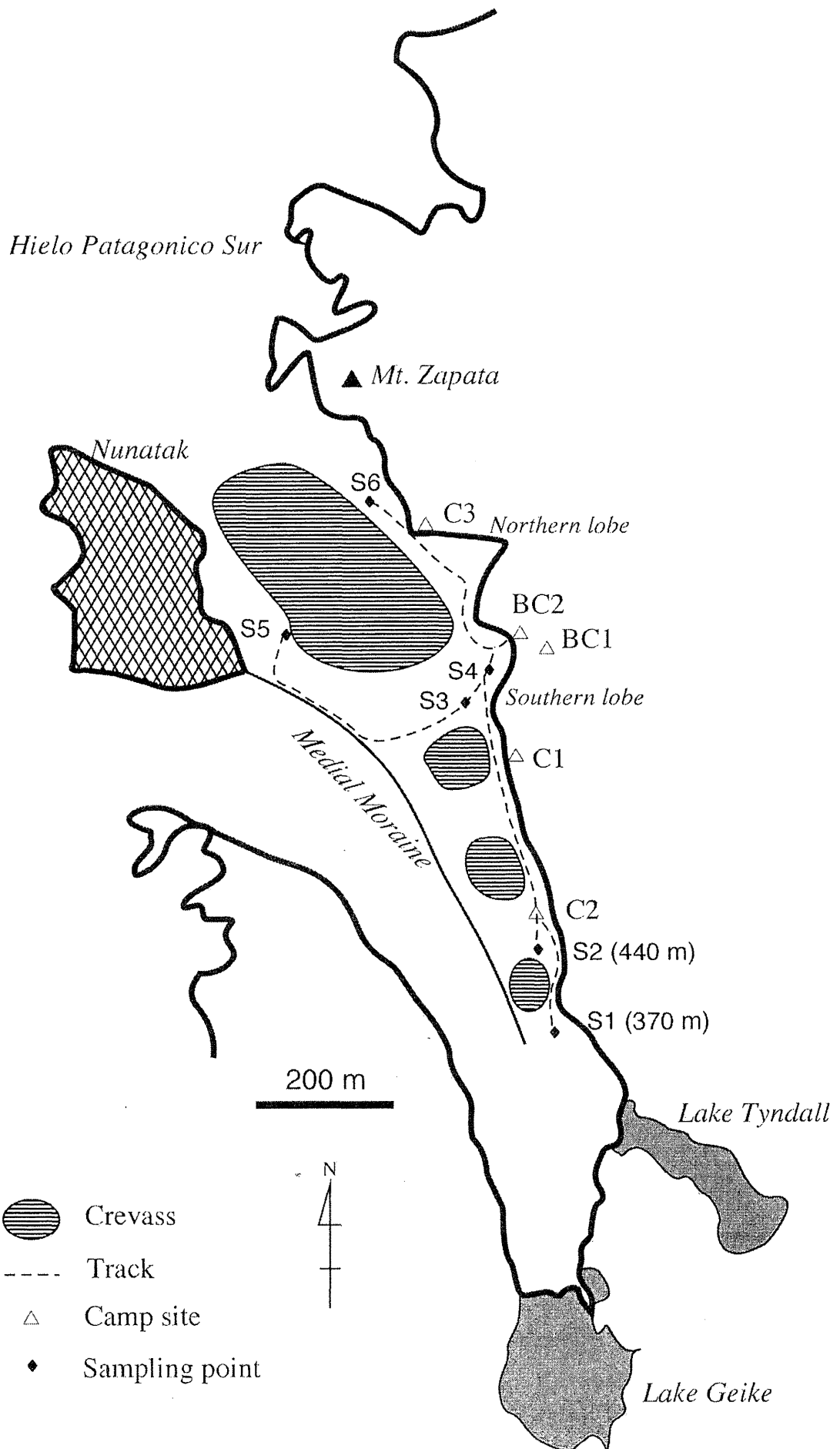


Fig 9 Algal distribution range and relative frequency of occurrence on Tyndall Glacier in Patagonia



☒ 10 Tracks on Tyndall Glacier in Southern Patagonia ice field.

# パタゴニア・ペリートモレノ氷河の表面プロファイルの測量 および氷河末端の流動とカービングの観測

成瀬 廉二 (北大低温科学研究所)

## 1. はじめに

パタゴニア南氷原から東側(アルゼンチン)へ流出するペリート・モレノ氷河において、1999年12月1日から8日までの期間、氷河消耗域の表面プロファイルの測量、および氷河末端部の流動速度の測定とカービング(calving、冰山産出)の観測を行った。調査メンバーは、成瀬廉二の他に、ペドロ・スクワルチャ(Pedro Skvarca, アルゼンチン南極研究所)、小林俊一(新潟大学)、テオドロ・トコナス(Teodoro Toconas, アルゼンチン憲兵隊)、ミグエル・ブリズエラ(Miguel Brizuela, アルゼンチン水文局)であった。

## 2. 氷河プロファイルの測量

ペリートモレノ氷河消耗域中流の半横断線および中央線に沿い氷河表面プロファイルが、1990年11月および1993年11月に測距測角法により測定されている(図参照)。これと同じ線上の表面高度を測量することにより、この期間の表面高度変化、すなわち氷厚変化を求める。これらの情報は、氷河末端変動、面積変動データとともに、氷河の質量変動を考察する際に重要となる。

1999年12月3、4日、ペリートモレノ氷河消耗域中流の右岸の測量基点CS(図参照)に光波測距儀(Wild)を設置し、氷河消耗域上の移動班は測距儀の反射プリズムを携行する。1993年の測量生データを用い、基点から移動班をトランシーバーで誘導し、図に示したNo.1からNo.11と同一座標地点に到達する。その距離の誤差は、20-30cmである。その地点の氷河表面にプリズムを置き、基点CSとの斜距離と高度角を測定するとともに、基点CSから視準した右岸目標点とプリズム間の挟角を測定する。この測量により、基点を基準にした氷河表面の三次元座標が得られる。

なお前回(1993年)と同一座標地点が、クレバスや氷河上池の中となることもある。その場合は、その周辺にて測量するが、高度の観測誤差は $\pm 1$ m程度と考えられる。

測量結果の詳細な解析は今後行うが、概算によると、1993年からの氷厚変化は場所により $\pm 1$ mから2m程度であり、その大きさは観測誤差および氷河表面の起伏のオーダーに等しい。したがって、ペリートモレノ氷河の消耗域は、過去10年間ほぼ平衡状態にあった、と結論できよう。氷河末端位置もほとんど変化がない。

### 3. 氷河末端部の流動速度の測定

1999年12月2、5、6日、ペリートモレノ氷河末端付近のBC（図参照）およびその東約100m地点に測量基点を設け、光波測距儀を用い、氷河末端部の表面の顕著なセラックスの先端（約10箇所）を測量した。この測定によりセラックス頂部の湖面からの高さが得られるとともに、同一セラックスを2回測量できた場合は、氷河の流動速度が求められる。

### 4. 氷河末端のカービング観測

ペリートモレノ氷河のBC（図参照）の東約100-500m付近の2つの場所（180m a.s.l.）から、氷河末端部のステレオ写真を撮影した。1つの場所は、約50m離れた2つの基点からなり、両基点から35mmカメラにて光軸を平行となるようにし、同じアングルにて1日2、3回撮影を行った。写真には、距離を測定した基準長さ（2つのケルン、岩と樹など）を写し込んだ。その一例の写真を以下に示す。

今後は、氷河末端の氷崖の位置や高さの測量結果を基準値とし、撮影された写真の画像解析を行い（ADIMS計測名人による）、日々の氷河の流動速度、氷山分離体積の算出を試みる。

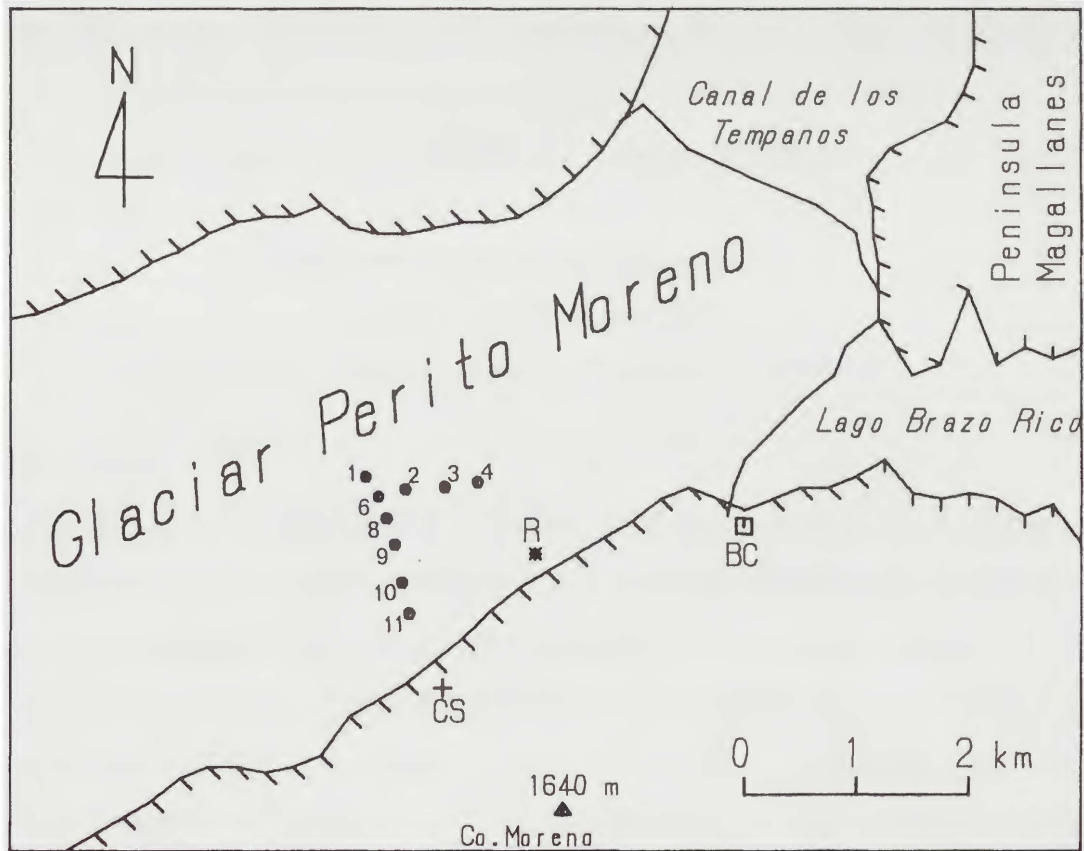


図. ペリートモレノ氷河下流部の地図



写真. ペリートモレノ氷河末端部 (1999年12月5日)



# Perito Moreno 氷河からの calving(冰山分離) 観測報告

小林俊一<sup>1</sup>・成瀬廉二<sup>2</sup>・Pedro Skvarca<sup>3</sup>

<sup>1</sup>新潟大学積雪地域災害研究センター

<sup>2</sup>北海道大学低温科学研究所

<sup>3</sup>Instituto Antártico, Dirección Nacional del Antártico

## 1. はじめに

氷河の質量収支の中の消耗量を考える場合、山岳地の谷氷河については表面の融解が主な消耗であるが、氷河末端が湖やフィヨルドや海に直接流出している氷河では、氷河全体の消耗量のかなりの部分が氷河末端からの冰山分離 (calving, カービング) によって占められる。このような氷河をカービング型氷河といい、地球上の氷河の中で最も多く占めている (成瀬、1997)。しかし、南極氷床のように棚氷からの冰山分離がテーブル状になっている場合を除いて、一般の氷河からの分離は形状が複雑なため定量的評価が困難であるのが現状であるので報告例が非常に少ない。そこで南米パタゴニアの Perito Moreno (ペリート・モレーノ) 氷河末端で氷崩落により誘起される小津波を圧力式水位計を用いて観測し、冰山分離の変動を明らかにすることを試みた。現在、解析の途中なので概要をここに報告する。

## 2. 観測氷河の概要と観測方法

ペリート・モレーノ氷河は面積 257 km<sup>2</sup>、長さ 30 km のカービング型氷河でパタゴニア南氷原の東側の中ほどに位置する。消耗域の下流 15 km は幅 4 km の谷氷河となり、氷河末端は鈍角の V 字型で長さ 5 km にわたって標高 175 m のアルヘンテイーノ湖でカービングしている (安仁屋、1998)。この氷河は、1990年と1993年に気象観測、氷河消耗量測定、氷河流動測定、表面高度変化の測定が GRPP によって行われているが、系統的なカービング観測はまだ行われていない。当初の計画では、Upsala (ウプサラ) 氷河 (図・1) での観測を考えていたが、現地の検分により科学的観測の能率性や確実性を考慮して、ペリート・モレーノ氷河で集中することに変更した。この氷河の末端の高さは 55~75 m、末端付近の水深は平均 175 m (最大 221 m) との報告がある (Warren, 1994)。また、

成瀬により、氷河末端の高さが今回測定され、水深も Skavarca により測定されているので、ここで集中して観測する科学的メリットは十分であると判断した。

観測は、1999年12月2日～20日まで行われた。測定場所は氷河右岸の砂浜で（図・2）、水深約1mの2つの岩がある陰のところ（写真・1）である。用いた水位計は、コーナシステム株式会社のKADEC-MIZUの水圧式水位計で、記録は同社のデータロガーを用い、サンプリング間隔は前半には5秒、後半は電池の消耗が激しかったため20秒毎で行った。現地では交流電源がないためデータは3日毎にデータ回収器によりICメモリカードに収録し日本に帰国後パソコンで処理を行った。その他、日中は努めて氷河の崩落状態を写真に収めて記録した。あとで水位計の津波データと対応させて解析し、夜間に発生した津波データの解析にも応用するためである。

### 3. 観測結果の概要

得られた津波の全期間の圧縮したデータを図・3（A～F）に掲げた。これらのデータの解析はまだ終わっていないが、冰山分離の頻度分布がまず明らかにされるだろう。次に、日中において目視観測されている代表的な冰山分離の時の津波による水位を拡大したものが、図・4である。そのときの氷河崩落の瞬間状況の例を写真・2に示した。津波の湖面伝播の様子を写真・3に、岸に打ち寄せる波の様子を写真・4に掲げた。詳細な検討は今後行うが、波のエネルギーから氷河崩落の質量が推定できればと願っている。また、写真・5に掲げた粉碎された氷による波紋の大きさも崩落の規模を分類する手がかりになると期待している。

### 4. 今後の課題

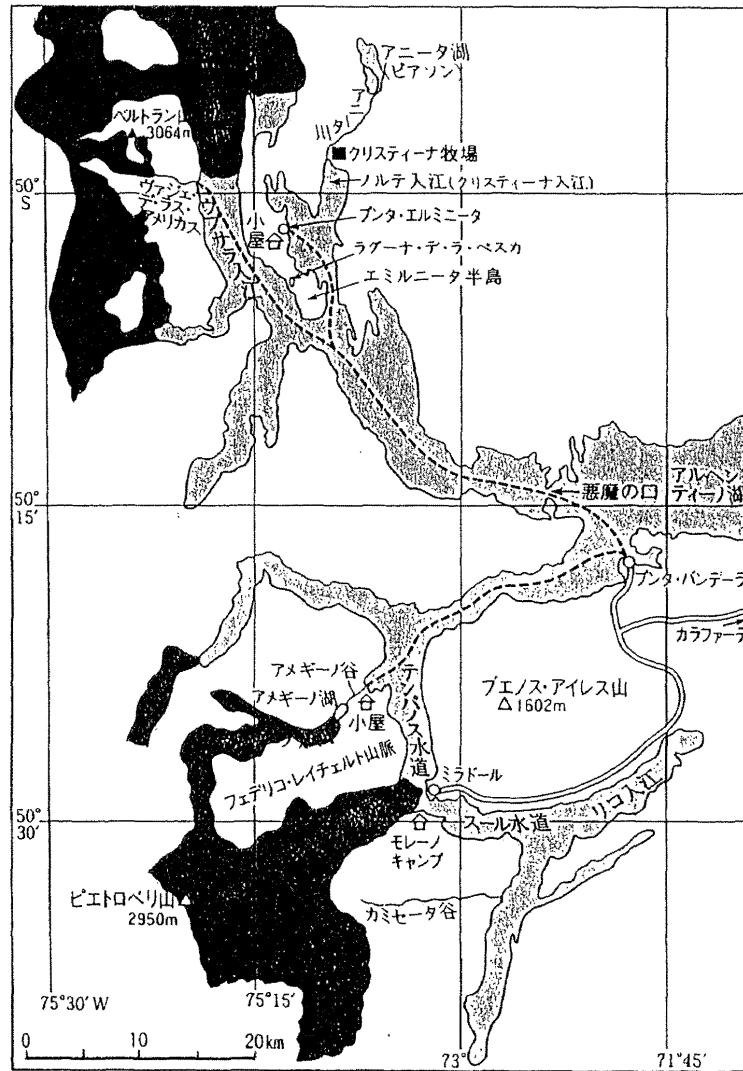
今後精密な観測を展開するためには、崩落の発生地点の同定と津波の全エネルギー量の推定のために、水位計による多点観測と1秒間隔毎のサンプリングが是非必要である。またそれに呼応して、氷河末端の高さの測定および湖の水深分布のデータが必要である。

### 参考文献

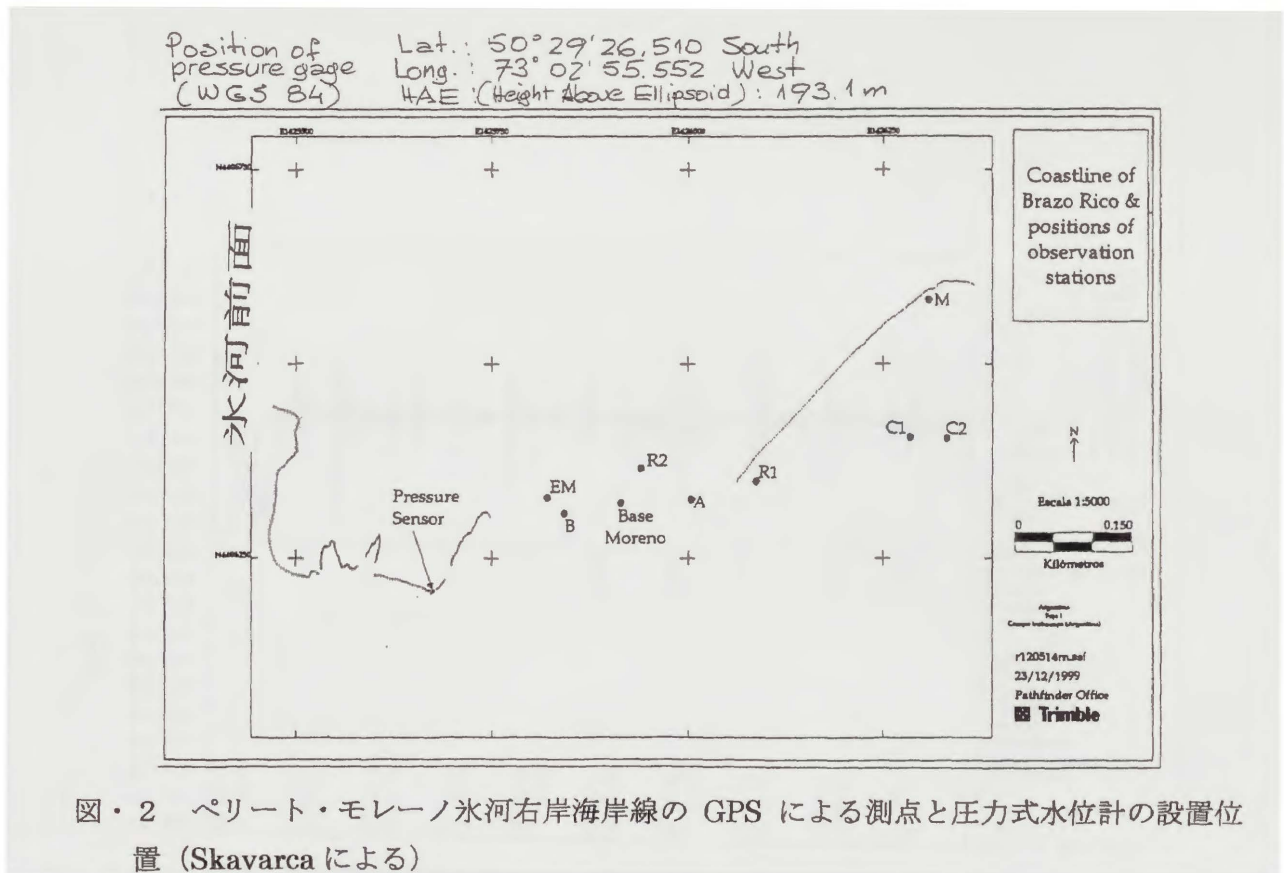
安仁屋政武（1998）：パタゴニア。古今書院、349p.

成瀬廉二（1997）：氷河の流動. 基礎雪氷学講座IV（氷河）第3章、古今書院、33-81.

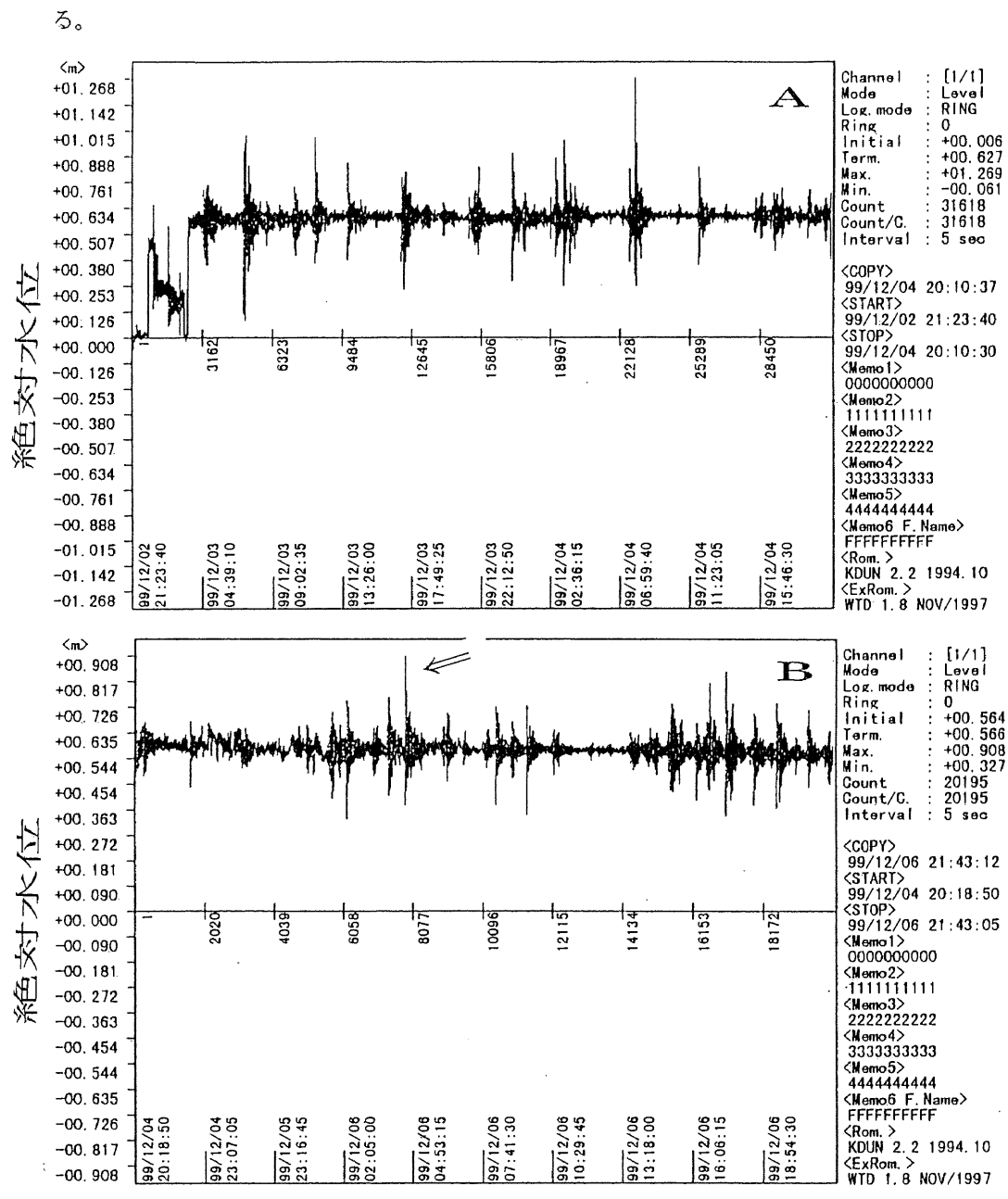
Warren, C. R. (1992): Iceberg calving and the glacioclimatic record. *Progress in Physical Geography*, **16**: 253-282.



図・1 南米パタゴニアの調査氷河付近図 (安仁屋、1998)



写真・1 水位計設置の様子。2つ岩の中央に鉄アングルに添えて垂直に立ててある。そのアングルの上部に約30kgの石2つを重しとして載せてある。



図・3 (A~F) 氷山分離に伴う津波の水位記録 (絶対水位)  
 横軸の日付は日本時間 (現地時間: -12時間)、A~Dはサンプリング時間: 5秒、E, Fは20秒である。

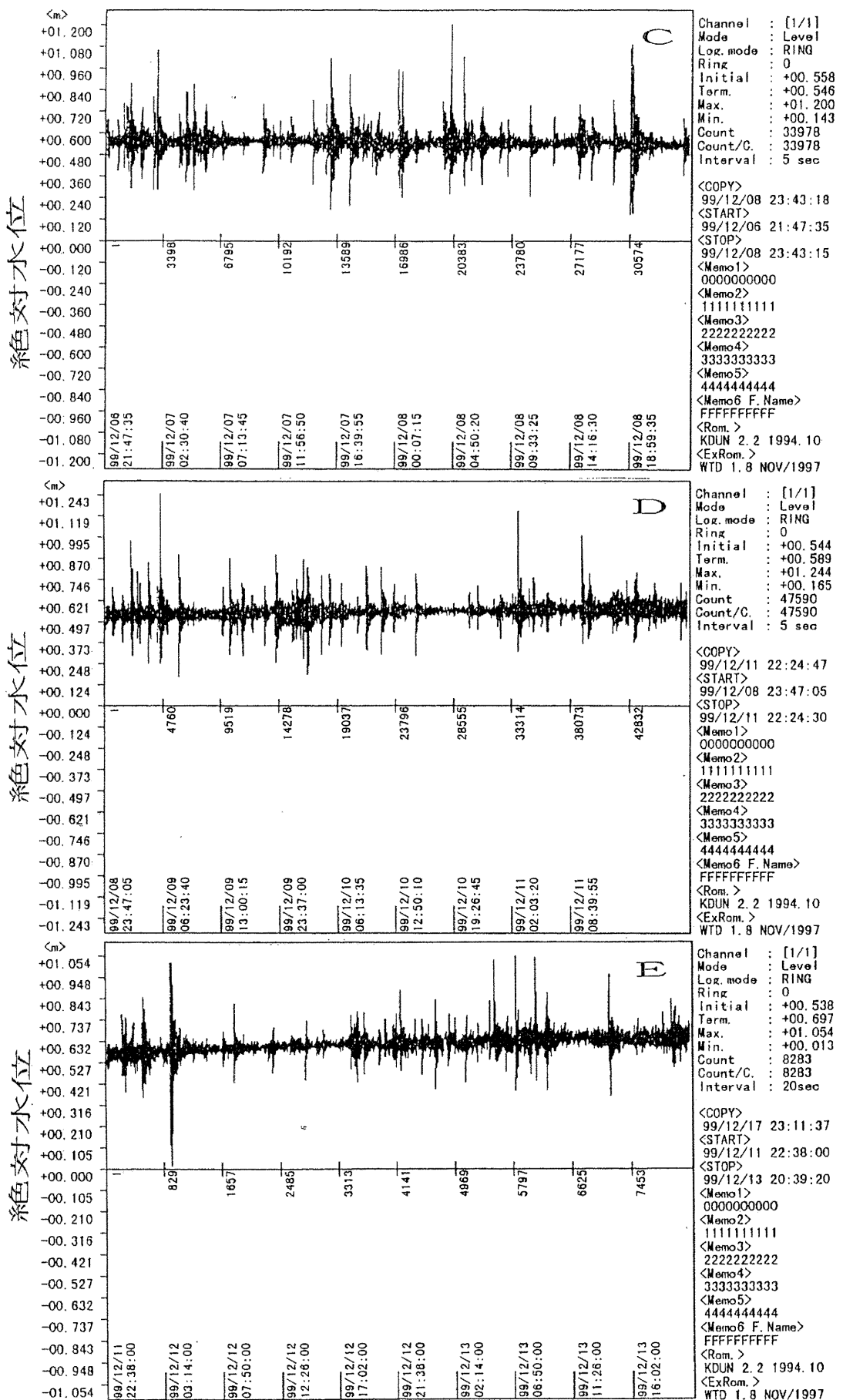
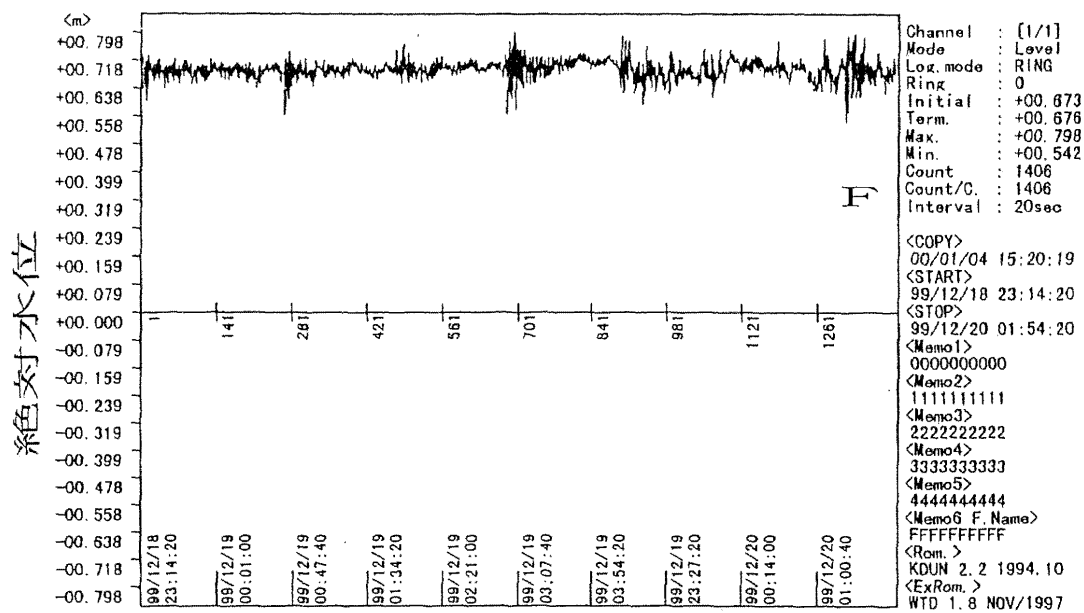
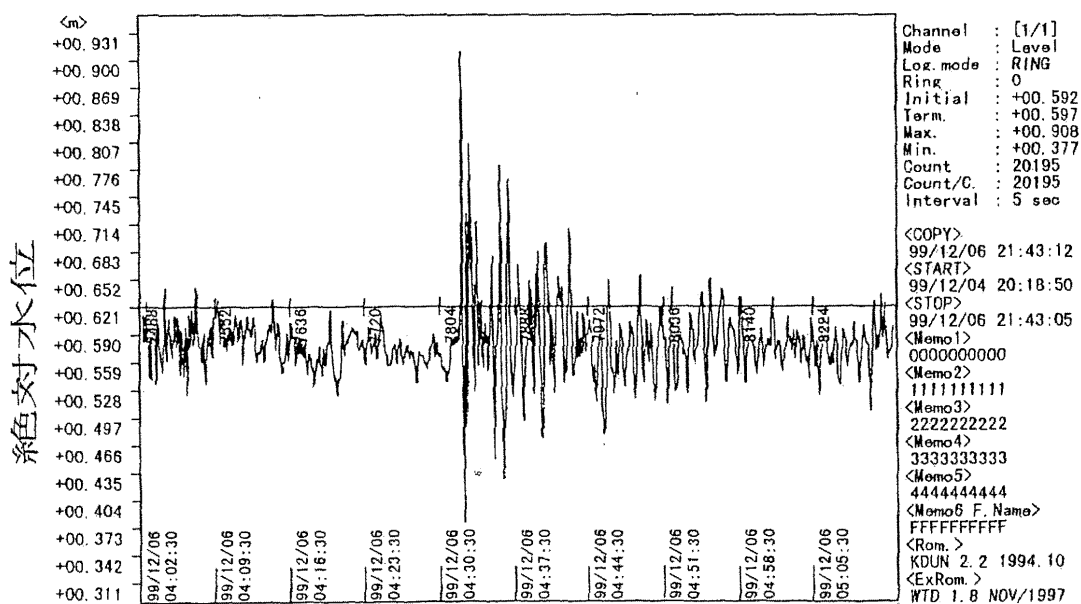


図 3 続表 1



図・3 続き2



図・4 図・3Bの矢印部分の拡大図（最大ピークは現地時間：12月5日16：34）





写真・2 12月5日現地時間16:34の氷河崩落の瞬間



写真・3 氷山分離による小津波の湖面伝播



写真・4 小津波が右岸砂浜に打ち寄せた様子



写真・5 氷河崩落により氷塊群が作るサークル（崩落の規模の規模の目安となる）

# パンタグラフ型アンチトルク機構の試作

新堀邦夫

北海道大学 低温科学研究所

## はじめに

モータを手を持って電気を流すと回転軸が回る。逆に回転軸を持って電気を流すとモータケースは回転軸が回転しようとする方向と逆方向に回る。すなわち、回転軸に力がかかると逆方向のトルクがモータケースにかかったと言える。この逆方向の力をアンチトルクと言ひ、その働きをする部品をアンチトルク機構と呼ぶこととする。

試料採集用に用いられているドリルには、駆動部が地上にあってロットを継ぎ足して刃先に回転を伝えて掘削を行うもの（主に地質調査等用）と、駆動部の付いたドリルをワイヤーで吊り下げ、地上から電力を供給し掘削を行うもの（主に雪氷用コアドリル）の2つのタイプがある。前者は地上にアンチトルク機構を設置する事ができるが、後者は掘削時に発生するアンチトルクにうち勝って駆動部の回転を掘削孔内で確実に止めるドリル一体型のアンチトルク機構を必要とする。

## 現状

現在雪氷用コアードリルに使用されているアンチトルク機構は、ヨーロッパのドリルチームが開発した板バネ型（リーフスプリング型）と、低温科学研究所（故鈴木義男教授）が開発した掘削時にサイドカッターが削った溝の中をスケートが下降するスケート型がある。どちらにも一長一短があるが、現在の主流はリーフスプリング型で、南極ドーム基地（ドームF）における2500 m掘削にも使用された。

ドームFで行った掘削では、掘削している刃先に強い力がかかった時、アンチトルク機構と孔壁との間が滑り（掘削トルクに負ける）、アンチトルク機構が働かない事態が頻繁に発生した。調整機能は付いていたが、試行錯誤の結果リーフスプリング型では現場で調整できないことがわかった。

氷河や氷床は表層の積雪は深くなるにつれて氷になるため、深さによって硬度が大きく変化する。また掘削現場の環境温度によっても、雪氷の硬度は変化する。このような掘削トルクの変化が激しい雪氷掘削においては、掘削現場でのアンチトルクの調整は不可欠である。掘削トルクの変化に応じて調整することが可能で、確実に機能するアンチトルク機構の開発が望まれているので今回試作を試みた。

## アンチトルク機構の試作と問題点

試作に当たって、以下の3点を満足するアンチトルク機構の開発を目指した。

- 1) 掘削トルクに応じて調整が可能
- 2) 軽量
- 3) 構造が簡単

上記の条件を満たすアンチトルク機構としてパンタグラフ型（図1）を採用した。軽量化のためブレード部は幅30mm厚さ3mmの板バネを用い、バネの効果で中心部の強度を出すようアールをつけた（図2）。

この試作品をテストしたところ、以下の2つの問題点が出た。

- 1.アールの付いたブレードは、掘削孔壁にピタリと合わず滑ってしまった。これは孔壁に合う曲率に製作する事が困難なためである。そこで板バネのアールをとり平らにして、そこに背骨のようなリブを溶接して強度を高め、ブレードが孔壁にピタリと合うようにした（図3）。
- 2.しかし、このブレードを孔壁に強く押しつけても、滑ってアンチトルク機構としての働きが出来なかった。また切削加工して、ブレードにエッジを付けても同様であった。

ブレードを孔壁に押しつけると、図4の様にブレードは孔壁にA点とB点の2点で接している。当初アンチトルクはブレードの2点と孔壁との摩擦力で発生すると考えていたが、この考えは間違いであることがわかった。

## 試作品の改良

アンチトルクはA点の切削力で得られるのではないかと考え、B点が孔壁に当たらないように削って実験を継続したところ、アンチトルク機構が機能する

ことが明らかになった（図5）。このことからアンチトルク機構の働きはA点で孔壁を切削しようとする力にあることが判明した（図7）。A点で孔壁に接しているブレードを刃の付いた掘削刃と考えると、図8のように表わされる。

（図8は、図6に示す通りA点より掘削孔の中心に線を引き、掘削孔との接線を描き、接線が水平になるように全体を回転した。）

## 今後の課題

孔壁に食いつきやすく切削抵抗の大きな刃先形状を見つけない。そのためには、逃げ角を大きくする方法と、すくい角を大きくする方法があり、どの角度が有効か今後試作し検討する予定である。アンチトルクはブレードが孔壁を切削しようとする時に発生する力と考えると、孔壁に接するブレードの長さを現在より短く改良できる可能性がある。そうすれば、同じ長さの掘削ドリルでもコアバレルの長さを長くする事ができるため、一回の掘削で長いコアが得られ、掘削効率を上げることができると考えられる。

図1 パンタグラフ型アンチトルク機構

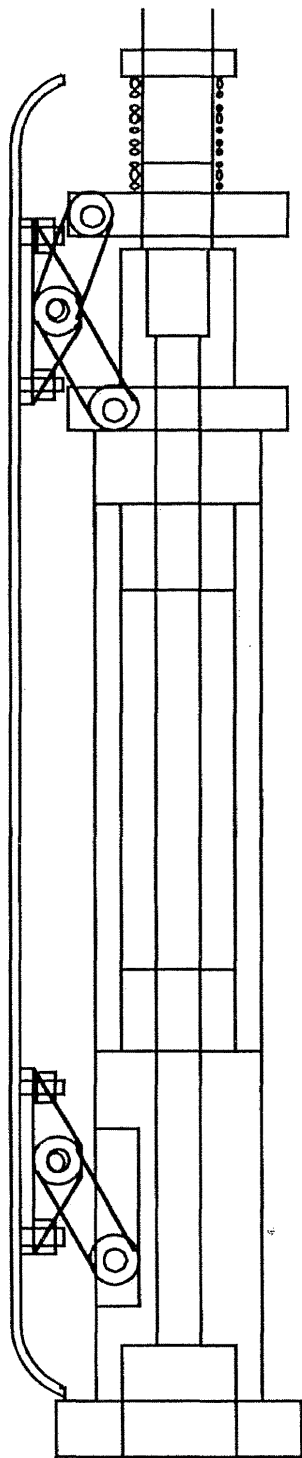


図2



図3

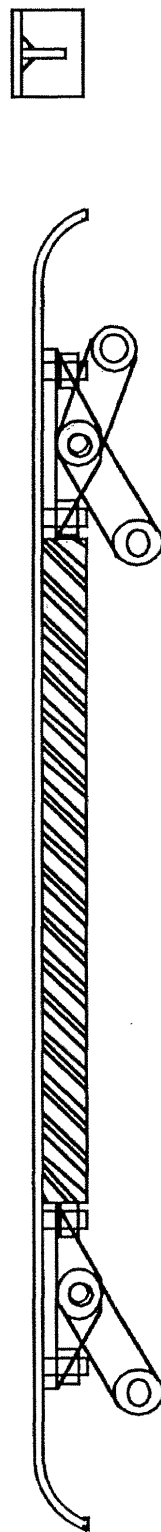


図 4

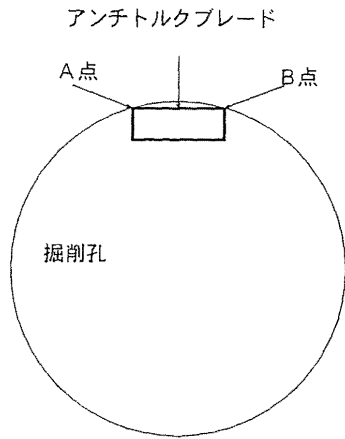


図 5

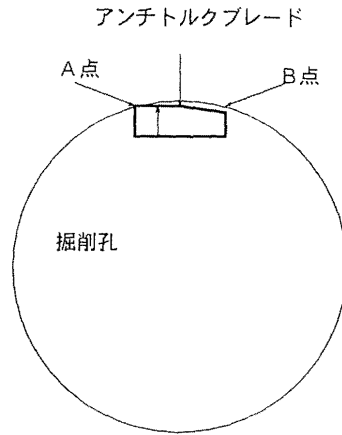


図 6

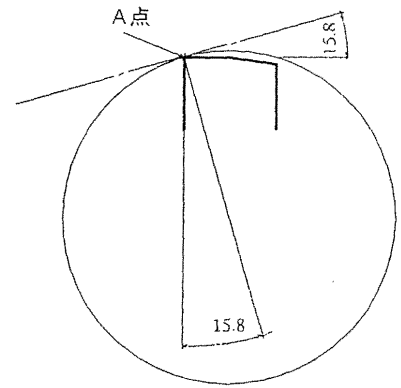


図 7

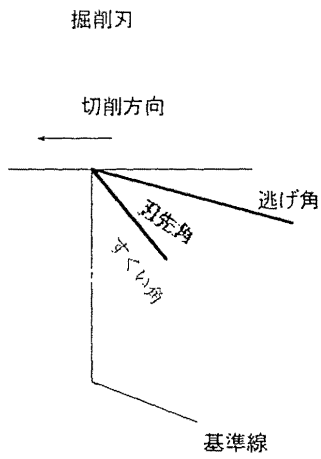


図 8

