



Title	パタゴニアの氷河における流動速度分布の特性
Author(s)	成瀬, 廉二; NARUSE, Renji
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 49, 211-219
Issue Date	1987-03-30
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.49.211
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14169
Type	departmental bulletin paper
File Information	49_p211-219.pdf



パタゴニアの氷河における流動速度分布の特性

成瀬 廉 二

北海道大学低温科学研究所

(昭和61年11月25日受理)

Characteristics of Velocity Distribution in Patagonian Glaciers

By Renji NARUSE

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

(Received November 25, 1986)

Measurements of glacial flow were made on Soler and San Rafael Glaciers in Patagonia, southern part of South America, during November to December, 1983, and October to November, 1985. Soler Glacier is located at the eastern side of the Northern Patagonia Icefield (Hielo Patagónico Norte); the ablation area of the glacier forms a valley-type glacier about 8 km in length and 1.5 km in mean width. Ice is supplied from the icefield through a big icefall and also from the southeastern face of Mt. (Cerro) Hyades (3,078 m) by ice avalanchings. The right half of the valley glacier is composed of clean ice, whereas the left half is covered with debris. San Rafael Glacier discharges from the Northern Icefield toward the west and calves finally into Lake (Laguna) San Rafael which connects to the Pacific Ocean through the fjord.

Surface flow velocities of both glaciers were measured by triangulation surveys with an electronic distance meter and a Wild T2 theodolite. Velocities obtained on Soler Glacier indicated 1.5 m/d at the upper reach of the ablation area and 0.2 m/d near the terminus of the glacier. Such velocity distribution as the decrease with the distance down-glacier was discussed on the basis of the continuity condition with the surface and bedrock profiles, and the surface ablation data. The result showed that an equilibrium of the mass balance held during the observation period (October-November, 1985), namely the thinning rate was approximately equal to 0, in the middle part of the ablation area.

Near the calving front of San Rafael Glacier, the surface velocity increased with the distance down-glacier being from 13 m/d to 17 m/d. Continuity consideration suggested that the increasing velocity should be resulted mainly from the decrease of ice thickness along the flow direction and also the increase in number and width of crevasses toward the glacier front.

Thinning of ice as 5.2 m/a was observed during a period from the austral summer in 1983 to the summer in 1985 at the middle reach of the ablation area of Soler Glacier. Also recent retreats of the glacial fronts were measured at both Soler and San Rafael Glaciers. Brief discussion on the obvious fluctuation of a calving glacier is given.

I. は じ め に

南アメリカ大陸の南部、南緯42度から55度へかけて南北にのびるパタゴニア地域は、一年中強い偏西風をうけ、四季を問わず多量の降水と降雪がもたらされている。そのため、パタゴニア・アンデスの主脈上には、南北二つの氷原 (Hielo Patagónico Sur; Norte) が存在し、両者を合わせると、現在の地球上では南極、グリーンランド両氷床に次ぐ第三の規模である。氷原の一般的な表面高度は海拔1,000~2,000

mであり、そこから東西南北へ数多くの氷河が谷氷河の形態を示しつつ流出している (Fig. 1)。氷河の末端は、西側の太平洋岸ではフィヨルドへ、東側の内陸域では氷河湖へ流出しているものが多い。

北氷原西側の氷河の末端付近 (海拔 ~ 0 m) における、最寒月7月の月平均気温は約 $+3^{\circ}\text{C}$ 、年平均気温は $+8^{\circ}\text{C}$ (I. N. I. R. N., 1981) と、地球上の他の氷河地域に比べて非常に高い。一方、北氷原上の年間降雪量は $5,000\sim 7,000$ mm (Kondo and Yamada, 1987)、年正味堆積量は約 $3,500$ mm (Yamada, 1987) と見積もられた。このように、パタゴニア氷河は多量の降雪により涵養され、多量の融解により消耗している最も典型的な温暖氷河である。また、氷河内部の温度は年間を通じ 0°C に保たれているため、氷河の塑性流動速度は大きく、さらに多量の降水と融解水の作用により氷河の底面すべり速度が非常に大きいことが指摘された (Naruse, 1987)。

1983年11月から12月にかけて、および1985年10月から12月にかけて、パタゴニア北氷原のソレール氷河、サン・ラファエル氷河、および南氷原のティンダル氷河等において、気象学的、水文学的、氷河学的調査が行われた。本稿は、得られた成果の内、氷河の流動観測結果 (Naruse, 1985; 1987) をもとに、パタゴニア・ソレール氷河およびサン・ラファエル氷河の流動速度分布の特徴と近年の氷河変動について述べる。

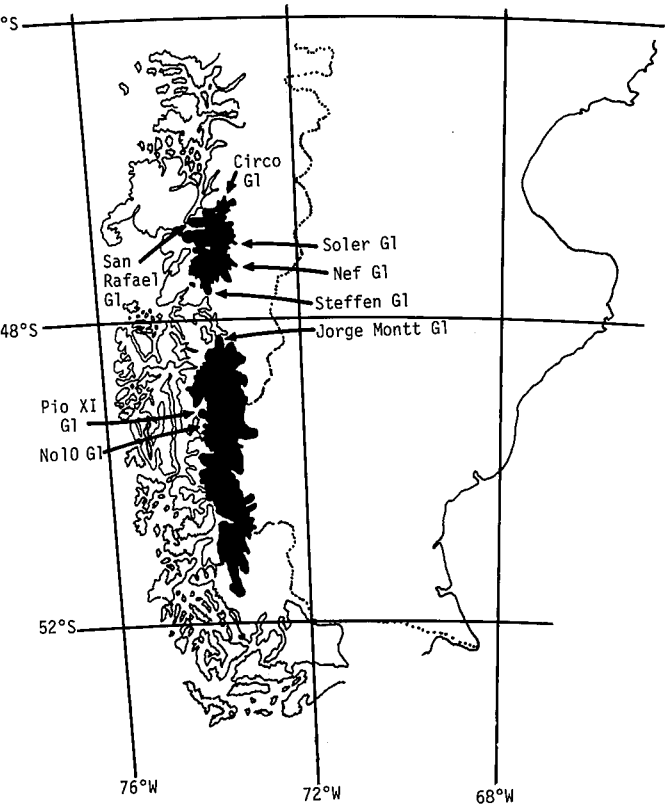


Fig. 1. Map of the Northern and Southern Patagonia Icefields (Hielo Patagónico Norte y Sur).

II. 観 測 結 果

1. ソレール氷河の流動速度

ソレール氷河は、パタゴニア北氷原東側のやや乾燥地域へ流出する氷河である。その消耗域は、長さ 8 km、平均幅 1.5 kmの谷氷河の形態を示している。同氷河の右岸半分は氷原から氷瀑を経て涵養された裸氷帯で、左岸半分はHyades山 ($3,078$ m)の南斜面から氷なだれと氷瀑により供給された水体で全域デブリにおおわれている (Aniya and Naruse, 1987)。また、氷河末端からはCacho河が流出し、点在するモレーン丘の横を流れ下っている。

氷河下流部両岸の露岩上およびエンドモレーン上に測量基準点 α_1 , α_2 , β , M_2 を設置した。光波測距儀とWild T₂経緯儀を用いた三角測量により、氷河上の標識(竹竿または岩)の位置と高度を測定した。1985年10月から11月にかけて得られた、表面流動速度の水平成分の分布を、Fig. 2に矢印で示す。いずれも5日 \sim 16日間の、2回ないし5回の測定の平均値である。破線の矢印は、1983年12月の観測結果を示す。

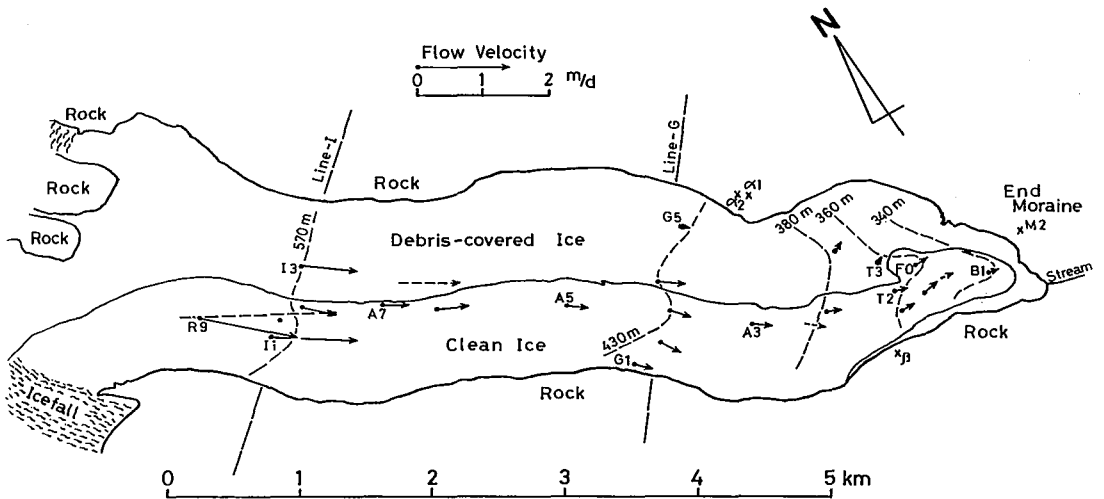


Fig. 2. Distribution of horizontal component of the surface flow velocity over the ablation area of Soler Glacier.

Solid arrows indicate velocity vectors obtained in October-November, 1985 ; broken arrows in December, 1983. Contours of the surface elevation (m, a.s.l.) were drawn by broken lines with arbitrary intervals.

流動速度の最大値は、氷瀑直下の裸水域で認められる。全般的には、裸水域の方がデブリ域に比べやや速度が大きい、デブリ氷体が沈滞的 (stagnant) というわけではない。

氷河の中央線 (裸水域とデブリ域とのほぼ境界) に沿う、流動速度の縦断分布を Fig. 3 に示す。図の下には、同縦断線に沿う表面地形と、重力法により得られた基盤地形 (Casassa, 1987) をあわせて示した。流動速度は、上流域 (R 9) では1.5 m/d, 中流域 (A 5) では0.30 m/d, 末端付近 (B 1) では0.18 m/d と、下流に向かうほど減少していることが特徴的である。

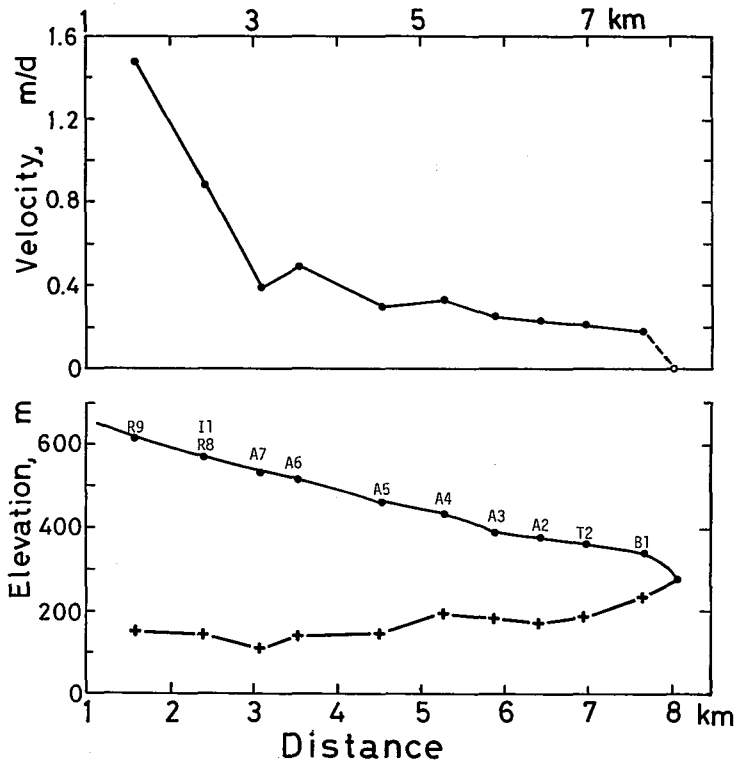


Fig. 3. Longitudinal profiles of the surface flow velocity, the glacier surface and the bedrock surface, along the approximate center line of Soler Glacier.

Horizontal distance is measured downglacier from the foot of icefalls.

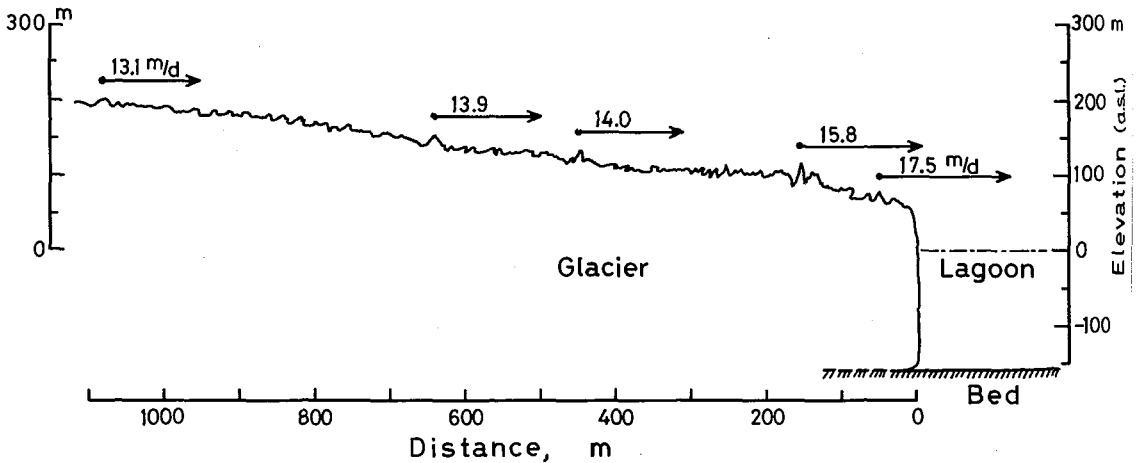


Fig. 4. Horizontal components of the surface flow velocity and the surface profile of San Rafael Glacier, measured in November 1983.

2. サン・ラファエル氷河の流動速度

サン・ラファエル氷河は、北氷原から西側へ溢流し、その末端はフィオルドへ連結する湖へ流出している。氷河下流部は全域クレバスと高さ 10 m 以上のセラックス地帯である。氷河末端付近の露岩上の基準点から、顕著な形態を示すセラックスの先端を目標として、三角測量により流動速度を測定した。

1983 年 11 月下旬に得られた、表面流動速度の水平成分の分布を、Fig. 4 に矢印で示す。いずれも 3 日間、3 回の測定の平均値である。図には、表面地形および湖底の深さ (Nakajima et al., 1987 を参考) をも示した。

流動速度は、末端から 1 km 上流で 13 m/d、しばしば崩壊しつつある末端付近で 17 m/d と、同氷河では下流に向かうほど増加していることが特徴的である。

なお、この速度は、他の地域の氷河の標準的な流動速度に比べると数倍から 100 倍程度大きい。

III. 考 察

前章で示した両氷河の流動速度の縦断分布を、連続の条件をもとに考察する(1, 2, 3)。さらに、両氷河における近年の変動の特徴について述べる(4)。

1. 連続の条件

氷河の横断面の形状は、一般には下方に凸の U 字形を示すことが多いが、これを両側岸が鉛直な平面で近似する。この二面と、氷河表面、底面に囲まれ、流動方向に微小距離 Δx をもつ四角柱を考える (Fig. 5 参照)。氷河上のある一点を通る鉛直横断面内の平均流動速度を u とおき、その方向に x 軸を、 x 軸に直角上方に y 軸を、氷河横断方向に z 軸をとる。

いま、歪速度 $\dot{\epsilon}_x$ および $\dot{\epsilon}_z$ は深さによらないと仮定する。これは、氷河の幅、傾斜等が大きく変化しない地域においては近似的に成り立つ仮定である。

連続の条件は、

$$\rho u W h = (u + \Delta u) (W + \Delta W) (h + \Delta h) (\rho + \Delta \rho) + [A + (\rho + \Delta \rho) \dot{h}] (W + \Delta W / 2) \Delta x, \quad (1)$$

で表わされる。ただし、 h は氷河の厚さ、 W は幅、 ρ は氷の平均密度、 A は氷河表面に平行な単位面積あたりの融解速度 (表面にて雪の堆積が起こるときは A はマイナス) を示す。なお、ここでは、氷河側面およ

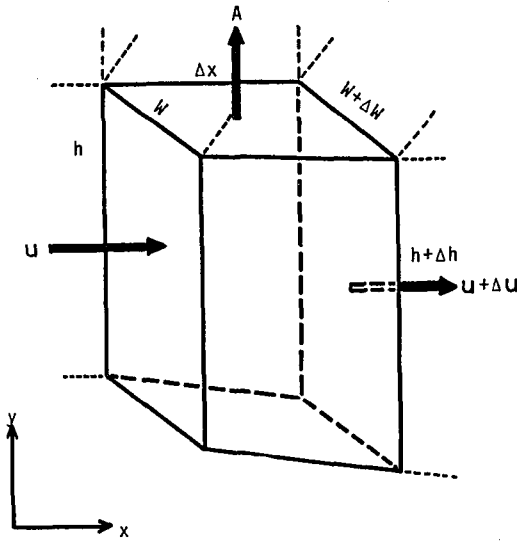


Fig. 5. A portion of a glacier surrounded by the top and bottom surfaces, and vertical side-walls of a glacier.

A : melting rate of ice expressed by mass per unit area per unit time at the top surface of the glacier ; h and W : the thickness and the width of the glacier ; u : the flow velocity averaged over the depth and the width.

び底面における融解量は表面融解量に比べれば無視し得るほど少ないとし、また、氷河内に含まれる水の質量は考慮に入れていない。

一般には、氷河内の氷は非圧縮性としてとり扱われるが、クレバス、セラックスの著しい氷河では氷体の「かさ密度」が変化するので、ここでは ρ は x の変数とみなす。(1)式にて高次の微小項を消去して整理すると、

$$-\rho \dot{h} = \rho u \frac{\partial h}{\partial x} + hu \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho h \frac{\partial u}{\partial x} + \rho h \frac{u}{W} \frac{\partial W}{\partial x} + A, \tag{2}$$

を得る。ここで、 \dot{h} は氷河上の一横断線に沿う平均氷厚変化率を、 $\partial u / \partial x$ は流動方向の歪速度 $\dot{\epsilon}_x$ を、 $(u/W) \partial W / \partial x$ は横断方向の歪速度 $\dot{\epsilon}_z$ を表わす。

2. ソレール氷河の速度分布

(2)式を、ソレール氷河消耗域の中流部、Line-I と Line-G の区間に適用する (Fig. 2 参照)。同地域は、クレバスは激しくないで、 $\partial \rho / \partial x = 0$ と見なし得る。表面の氷は気泡を多く含んでいるので、深さ平均の密度 $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$ と仮定する。同氷河の流動には底面すべりの寄与が大きいため、深さ平均の速度は表面流動速度の 90% と仮定する (Naruse, 1987)。Line-I、-G を含む二つの横断面について、幅 W 、平均氷厚 h 、平均速度 u を Table 1 にまとめた。

1985 年 10 月下旬から 12 月上旬にいたる約 50 日の観測期間中、雪尺測定により得られた日平均融解速度は、裸氷上で (氷の厚さにして) 3.0 cm/d、テプリにおおわれた氷河上で 6.0 cm/d であった (Fukami and Naruse, 1987)。したがって、両者の占める面積を考慮すると、二断面間の平均融解速度 A は $38.7 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{d}$ となる。

以上の値のもとづく、二断面間の平均量として、(2)式の各項は次のように見積もられる。

右辺第一項 : $-16.9 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{d}$

第二項 : 0

第三項 : -22.5

第四項 : $+1.1$

第五項 : $+38.7$

Table 1. Mean values through the vertical cross sections at Line-I and Line-G in the middle reach of Soler Glacier.

	Line-I	Line-G
Width, W	1560m	1620m
Thickness, h	341m	191m
Velocity, u	0.50m/d	0.23m/d

したがって、 $\rho \dot{h} = -0.4 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{d}$ が得られ、これは他の項に比べて小さいので $\dot{h} = 0$ 、すなわち氷河の氷厚は本観測期間中はほとんど不変であることを示した。つまり、表面融解による氷厚減少分は、流動速度の表面直上向き成分 (emergence flow) により相殺され、同氷河の同地域、同期間中の局所的質量収支は均衡していた、と言える。

ただし、この結果から、ソレール氷河は定常状態にあるとは言えない。流動速度に季節変動があることは明らかだが、もしこの影響が小さいと仮定すれば、表面融解の少ない冬季には $\dot{h} > 0$ 、融解の多い夏季 (12月～2月頃) には $\dot{h} < 0$ となることが予想される。

3. サン・ラファエル氷河の速度分布

サン・ラファエル氷河の末端付近では、氷河幅は一定とみなし、 $\partial W / \partial x = 0$ とおく。ソレール氷河の考察より、観測期間中は $\dot{h} \approx 0$ と仮定する。観測結果から、 $\partial u / \partial x > 0$ 、 $A > 0$ であるので、(2)式から

$$\rho \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial \rho}{\partial x} < 0, \quad (3)$$

を得る。すなわち、サン・ラファエル氷河にて末端に向かうほど速度が増加しているのは、氷河が下流ほど薄くなること、および (または) 下流ほどクレバス、セラックスが増すため「かき密度」が減少していることに起因していると考えられる。いずれの寄与が大きいかは、観測データが不足のため明らかではない。

4. 両氷河の近年の変動

両氷河とも、近年氷河の後退傾向を示している。ソレール氷河では、1944年と1984年に撮影された航空写真の解析から、氷河末端は200mから350m (5～9 m/year) の後退、下流域の氷河表面は40mから70m (1～2 m/year) の低下と見積もられた (Aniya and Enomoto, 1986)。

1983年12月と1985年11月における、測量により得られたソレール氷河中流域の縦断表面形態を Fig. 6 に示す。両測量が、同一地点を視準していない場合に生ずる測定誤差の範囲を、斜線にて示した。この地域を平均すると、5.2 m/year の表面低下となる。

一方、サン・ラファエル氷河は、パタゴニア地域の中では比較的古くからその挙動が知られ、著しい前進・後退の記録が報告されている (例えば、Mercer, 1962)。近年では、航空写真解析から、1945～1983年間に2.6 km (70 m/year) の後退が見積もられ (Aniya and Enomoto, 1986)、現地観察から1967～1984年間に約1.5 km (100 m/year) の後退 (Naruse, 1985)、および1984～1986年間に110～190 m (50～90 m/year) の後退が認められた (Kondo and Yamada, 1987)。

南氷原でも、フィオールドに流出するピオ XI 世氷河では顕著な前進、後退の繰り返しが知られている (Lliboutry, 1956; Iwata, 1983)。

さて、このように湖やフィオールドに流出する calving 型氷河では、その末端の変動が、気候変化にもとづく氷河の質量収支変化を直接には反映しないこともあり得る、ということを以下に述べる。

Fig. 7 に、calving 型氷河末端付近の模式図を示す。現在のサン・ラファエル氷河は後退時にある。水面からの高さは約80m、末端付近の水深は平均160m (Nakajima et al., 1987) であり、同氷河の末端は明らかに座礁していると考えられる (末端部の推定氷厚、約240m)。氷河上流から末端へ向かう氷の流出量は、末端における崩壊 (calving) によって消費されている。

湖やフィオールドの水温は、プラス数度Cである (Nakajima et al., 1985)。したがって、もし氷河が少し前進したとき、氷河底面に水が入り込むと、底面における融解量は著しく多くなる。表面融解および底面融解の進行のため、氷河の前進時には、末端部分が棚氷状となることは充分考え得ることである (Fig. 7 参照)。航空写真や現地観察のみでは、氷河末端が座礁しているか棚氷となっているか容易には分らない。

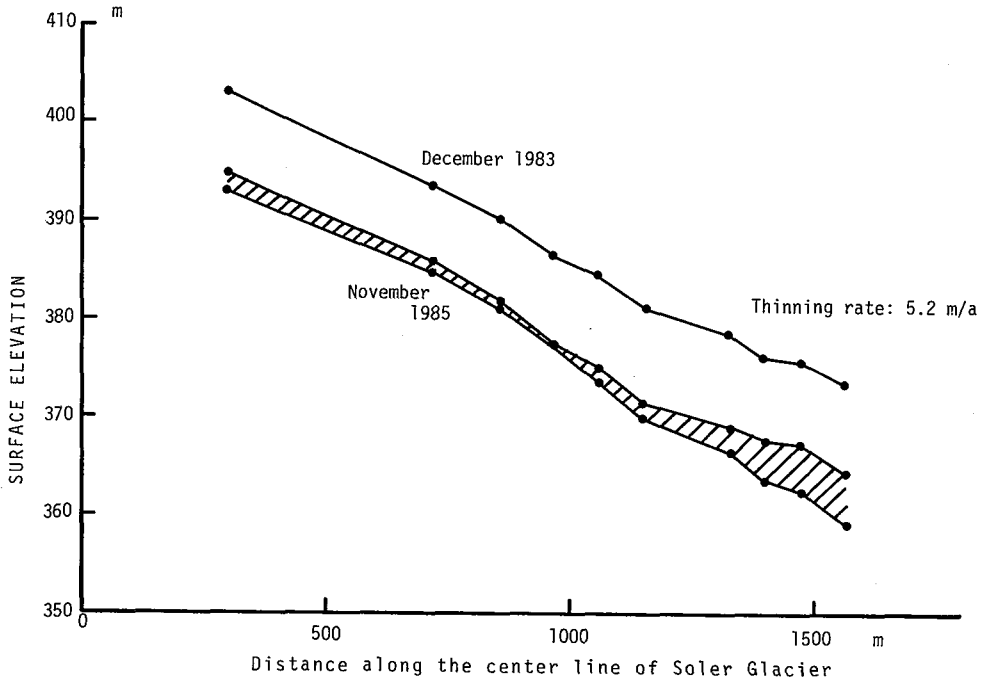


Fig. 6. Longitudinal surface profiles along the center line in the middle reach of the ablation area of Soler Glacier, measured in December 1983 and in November 1985. Shaded area indicates the range of errors in surveys.

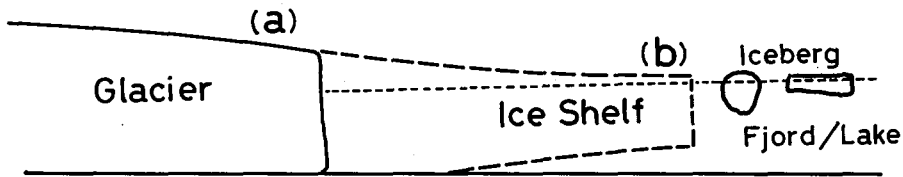


Fig. 7. A schematic figure showing fluctuation of the front of a calving glacier into a fjord or a lake. (a) represents a stage of retreat of the glacier front which is grounding at the bed; (b) a stage of advance of the front which forms an ice shelf.

棚氷先端部の崩壊量を支配する要素は、上流からの流出量と気象条件のみではなく、フィヨルドや湖の水温、塩分、潮流等、およびクレバスの規模等の氷の性質が考えられる。そのため、もし何らかの原因で、棚氷から大氷塊が崩壊、分離すると、氷河は後退として観測されるであろう。逆に、崩壊量が減少すれば、氷河は急速に前進する。

このように、calving型氷河の前・後進を気候変化と関連づけて考察するときには、充分なる吟味が必要である。

IV. お わ り に

パタゴニア地域、ソレール氷河の流動速度分布は、下流に向かうにつれて速度が減少するという谷氷河消耗域の一般的特性を示した。同氷河中流部の長さ約3 kmの区間において、氷河の形、氷厚、流動速度、表面融解量の観測値を用い、連続の条件のもとに考察を行った結果、質量収支の均衡が成り立ち、この観測期間中では氷厚変化率が0であると見積もられた。

一方、湖に流出しているサン・ラファエル氷河では、末端に近いほど速度が増大するというやや特異な

分布を示した。同様に連続の条件の考察により、末端ほど氷厚が減少しているため、および（または）クレバス、セラックスの増加による氷河の「かさ密度」の減少の結果であろう、と推察された。

ソレール、サン・ラファエル氷河とも、近年顕著な氷河末端の後退、および氷厚減少を起こしていることを示した。しかし、これらの現象が、どのような気候要素の、どのような時間スケールの変化の反映であるかについては、現在のところ明らかにできない。ただし、湖やフィオルドに流出する calving 型氷河の末端変動は、広域の気候変動とは直接には結びつかないことを述べた。

ソレール氷河では、約1週間にわたり、3時間から数時間間隔の氷河流動短時間変動を観測した。その結果、最大速度は最小速度の約4倍に達し、さらに、氷河流速と流出河川の流量との間に良い相関関係が認められた (Naruse, 1987)。氷河の塑性流動速度が短期変動を生ずることは考え難いので、この結果は、氷河流動において底面すべりが大きな寄与を占めていること、さらに底面すべり速度には氷河底面に存在する水の量が重要な影響を与えていることが明らかとなった。

このような、氷河流動におよぼす水の作用、あるいは底面すべり機構に関する一層の調査、研究は、氷河変動、サージ現象の解明にとって大きく貢献するに違いない。

謝辞 現地の氷河調査にあたっては、アラスカ・スキー指導員 Bonnie Schwahn 氏、チリー・サンチャゴ山岳会員 Rodrigo Mujica 氏、チリー・コヤイケ山岳会員 Juan Vargas 氏、北大低温科学研究所研究生 Gino Casassa 氏、北海道地下資源調査所深見浩司氏、および筑波大学安仁屋政武氏から支援ならびに協力を得た。以上の方々に、感謝の意を表します。

なお、本研究の現地調査は、昭和58年度および60年度文部省科学研究費補助金(海外学術調査)「パタゴニア地域における水文・気象学的研究(代表者:中島暢太郎京都大学名誉教授)」により行われた。

文 献

- ANIYA, M., and H. ENOMOTO, 1986. Glacier variations and their causes in the Northern Patagonia Icefield, Chile, since 1944. *Arctic and Alpine Research*, 18, No. 3, 307-316.
- ANIYA, M., and R. NARUSE, 1987. Structural and morphological characteristics of Soler Glacier, Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, No. 4, Japanese Society of Snow and Ice (in printing).
- CASASSA, G., 1987. Ice thickness deduced from gravity measurements at Soler Glacier, Nef Glacier and the Northern Patagonia Icefield. *ibid.*
- FUKAMI, H., and R. NARUSE, 1987. Ablation of ice and heat balance on Soler Glacier, Patagonia. *ibid.*
- I. N. I. R. N. (Instituto Nacional de Investigación de Recursos Naturales), 1981. Perspectiva de desarrollo de los recursos de la XI Región: Caracterización Climática.
- IWATA, S., 1983. Further advance of Pio XI Glacier. *Glaciological and Meteorological Studies in Patagonia, Chile, by Japanese Research Expeditions in 1967-1982. Research Committee on Patagonian Glacier, Japanese Society of Snow and Ice, 14-17.*
- KONDO, H., and T. YAMADA, 1987. Surface mass balance of San Rafael Glacier, Patagonia (in preparation).
- LLIBOUTRY, L., 1956. Nieves y Glaciares de Chile, Ediciones de la Universidad de Chile, Santiago, 471pp.
- MERCER, J.H., 1962. Glacier variations in the Andes. *Glaciological Notes*, No. 12, New York, 9-31.
- NAKAJIMA, C., S. KOBAYASHI, T. SAITO and A. ZAMA, 1985. Limnological observations at Lagoon San Rafael and Elefantas Fjord. *Glaciological Studies in Patagonia Northern Icefield, 1983-1984. Data Center for Glacier Research, Japanese Society of Snow and Ice, 100-106.*
- NAKAJIMA, C., J. INOUE, Y. FUJIYOSHI and I. NAGAO, 1987. Water depth of Lagoon San Rafael, Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, No. 4, Japanese Society of Snow and Ice (in printing).
- NARUSE, R., 1985. Flow of Soler Glacier and San Rafael Glacier. *Glaciological Studies in Patagonia Northern Icefield, 1983-1984. Data Center for Glacier Research, Japanese Society of Snow and Ice, 64-69.*

- NARUSE, R., 1987. Characteristics of ice flow of Soler Glacier, Patagonia. *Bulletin of Glacier Research*, No. 4, Japanese Society of Snow and Ice (in printing).
- 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. *ibid.*