

南米チリ・北パタゴニア氷原の溢流水河の 1944/45-2004/05 年の変動とその要因

安仁屋政武

筑波大学大学院生命環境科学研究科

北氷原に分布する 21 の溢流水河の 1944/45-2004/05 年の 60 年間の変動を、各種のリモート・センシング・データを使って明らかにした。それによると過去 60 年間は全般的に後退傾向にあり、面積約 101km² が減少した。氷原の西側（偏西風帯の風上側）に分布する氷河の平均後退量は約 8.1km² で東側に分布する氷河の 4 倍強である。氷原最大の氷河サン・キンティン氷河の後退量は約 29km² で突出して大きく、全体の 1/3 弱に当たる。距離ではレイチェル氷河の約 6km が最大である。21 の溢流水河のうち 17 がカービング氷河で、いくつかの水河では氷河前縁湖での末端崩壊による短期間の大規模な後退が起きている。一方、60 年間でほとんど変動していない氷河が氷原の東側（偏西風帯の風下側）に見られる。このような大規模な後退は一般に地球温暖化による気温の上昇の結果と考えられるが、サン・ラファエル氷河で見られた停滞/前進/後退・前進という変動はフィヨルドの地形の影響（主に幅、深さも一部関係？）と解釈される。

1 はじめに

最近、近年の地球環境問題、特に温暖化とその影響に対する関心が高まってきている。温暖化による直接的・間接的な影響はさまざまであるが、氷河の変動は重要な直接的影響の一つである。氷河の後退・縮小は地域によっては水資源の枯渇や観光資源の消滅などによって人間生活に直接影響を及ぼすが、氷河の融解による海面上昇は地球規模の影響となる。海拔 1m 以下に約 10 億人が住むといわれ (Hambrey and Alean, 2004)、世界の主要な大都市の多くは海岸沿いに発達しているため、海面上昇によって大きな影響がでることが避けられない。

このような背景から、世界の氷河の変動を明かにすることは、これからの地球環境を考え、それに対処する上で非常に重要である。南米南端、アルゼンチンとチリにまたがるパタゴニア氷原は南北併せて面積約 17,200km² を持ち、南半球では最大の温暖氷河（氷河の中に水が存在している氷河）の水体で、世界でも 5 指に入る規模である (図 1)。海面上昇に対する寄与という面からは、南極・グリーンランドとは規模が 2～3 桁違うが (Aniya, 1999; Rignot *et al.*, 2003)、南半球は陸地が少なく大きな温暖氷河は他にないので、パタゴニア氷原の氷河変動を明かにすることは、世界規模での氷

河変動を理解する上で重要で欠くことのできない研究である。

今までパタゴニア氷原ではアニヤの一連の研究によって、1944/45 年以降の北氷原の変動が (Aniya and Enomoto, 1986; Aniya, 1988; Aniya, 1992; Wada and Aniya, 1995; Aniya and Wakao, 1997; Aniya, 2001)、および南氷原の変動 (Aniya *et al.*, 1997; Aniya, 1999; Aniya *et al.*, 2000) が明らかになっている。

本論文の目的は、パタゴニア氷原のうち、北パタゴニア氷原を対象として、そこから溢流する氷河の 1944/45 (南半球の夏の意味) から 2004/05 までの過去 60 年間の変動をリモート・センシング・データによって明らかにし、その要因を考察することである。北氷原では 28 の溢流水河のうち 21 の氷河で (図 2) トライメトロゴン空中写真、垂直空中写真、斜め空撮写真、衛星画像などさまざまなリモート・センシング・データを使って 1944/45-1999/2000 年の変動が明らかになっている (Aniya, 2001)。今回は 2001 年、2003 年、2004 年のデータを新たに加えて、1944/45 から 2004/05 年の変動を総合的に解析し考察して、その要因についても議論する。

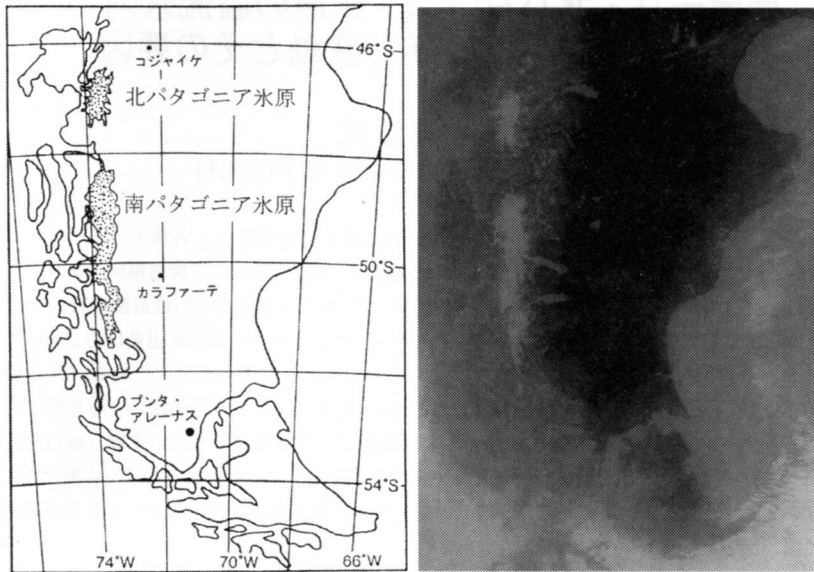


図1 パタゴニア氷原の位置(左)とNOAAの画像(1990年2月17日)。白く写っているのが氷原。北パタゴニア氷原の面積は約4200km²、南パタゴニア氷原の面積は約13,000km²である。

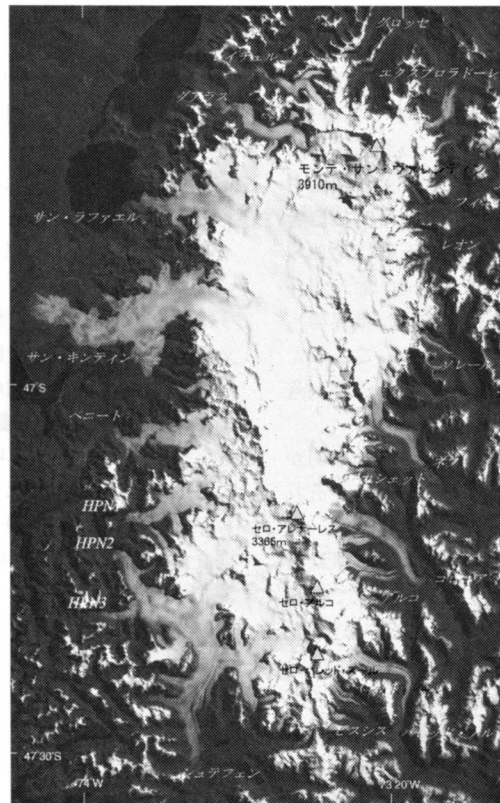


図2 北パタゴニア氷原のランドサット衛星画像(2001年3月11日)。変動がモニターされている溢流水河と主な山を示す。

2 研究対象地域—北パタゴニア氷原

パタゴニア氷原は南米アンデス山脈の南端に発達した細長い氷体で、ほぼ西経73°30'に沿って南緯46°25'から51°30'まで南北約500kmの長さを持ち、幅は最大で約60km、最も狭い所では僅か8kmである。現在は南緯47°40'付近のフィヨルドによって南北に分けられている。北パタゴニア氷原は面積約4200km²で28の溢流水河を持ち（Aniya, 1988）、南パタゴニア氷原は面積約13000km²で約48の溢流水河を持つ（Aniya *et al.*, 1996）。

北パタゴニア氷原の大体の高度は1000-1500mであるが、北東角にパタゴニアの最高峰モンテ・サン・ヴァレンティン（Monte San Valentin, 3910m）が聳えている（図3）。この他、氷原の中央付近にはセロ・アレナーレス（Cerro Arenales, 3365m）があり、ここから南東方向へ3000m級の

山がいくつか連なっている。因みにセロ・アレナーレスは1958年に日本—チリ合同登山隊（隊長：田中薫）が初登頂している。図4は衛星画像とデジタル標高データを使って氷原を立体的に示したもので、起伏と流域が良く分かる。

北パタゴニア氷原では、モニターされている21の氷河のうち17はカービング氷河（calving glacier, 末端が氷河前縁湖や海にあり氷山分離をしている氷河）である。カービング氷河の一つ、サン・ラファエル氷河（Glaciar San Rafael）は海に末端があるタイドウォーター氷河（tidewater glacier）で、世界で一番赤道に近い緯度（46°41'）に位置している。氷原最大の氷河は面積765km²のサン・キンティン氷河（Glaciar San Quintin）、次が面積760km²のサン・ラファエル氷河（Glaciar San Rafael）で、南北併せたパタゴニア全体でもそれぞれ第5位と6位である。



図3 冬のパタゴニアの最高峰、モンテ・サン・ヴァレンティン（3910m）と北氷原（サン・ラファエル氷河の涵養域）。2005年8月15日南西方向から撮影。手前の氷原の標高は1000m強。

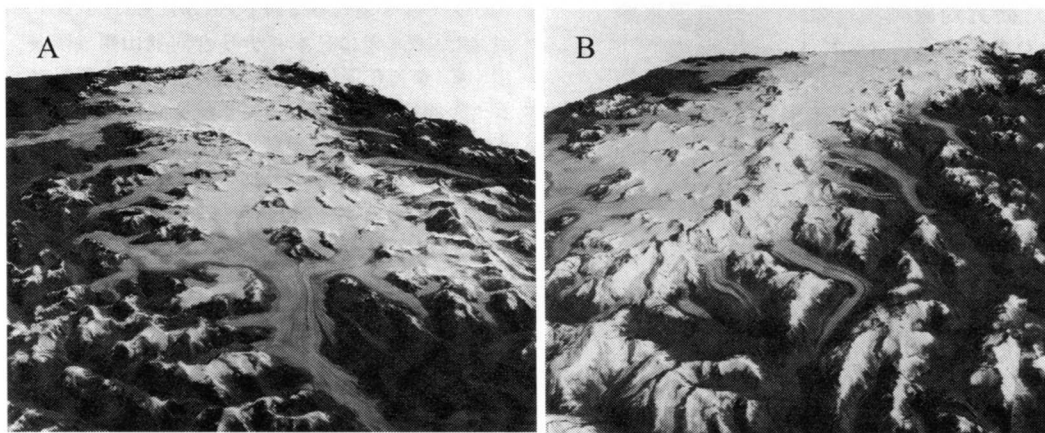


図4 北パタゴニア氷原の3D衛星画像。1987年2月撮像のランドサットMSS画像を、5万分の1の地形図を基にした250mの等高線を使って生成したデジタル標高データに被せて作成。Aは南西から見たもの。手前はシュテフェン氷河、一番奥の高い山が、パタゴニアの最高峰モンテ・サン・ヴァレンティン(3910m)。Bは南東から見たもの。氷原の中央を山脈が西から東へ斜めに横断しているのがよく分かる。手前の氷河はパレット・ノルテで、右奥の高い山がモンテ・サン・ヴァレンティン。氷原の西側に分布する溢流水河の面積が一般に広いのが見て取れる。

3 データと方法

北パタゴニア氷原では1944/45年の南半球の夏に、アメリカ陸軍航空部隊によって撮影されたトライメトロゴン空中写真(Trimetrogon Aerial Photography、垂直空中写真に加えて、左右両方の斜め空中写真も撮ったもの)が一番古いリモート・センシング・データである。その後、1974/75年にチリ軍地理局(Instituto Geográfico Militar de Chile)が縮尺約6万分の1の白黒垂直空中写真を撮り、これを基に等高線間隔50mの5万分の1の地形図を1980年代に作成した。これに氷河の輪郭や末端が描かれているが、その後の現地調査や元の空中写真の判読により誤りがいくつかあるのが判明した。

1984年からアニヤが空撮を始め、その後、1986年、1990年、1993年、1995年、1998年、1999年と続け、前述のように21の溢流水河の変動を明らかにしている。斜め写真に写っている氷河末端を地形図に直接書き入れるのは非常に難しいので、最初に1974/75年の垂直空中写真に移写し、次に垂直空中写真と地形図を比べて氷河末端を地形図に書き込んだ。変動は異なった年度の地図を重ね合わせて抽出し、その距離と面積を測

定した。しかし、1980年代から1990年代にかけて氷河の後退は著しく、氷河末端付近の斜め空撮写真と1974/75年の垂直空中写真との比定が困難になり、精度が落ちるようになった。その後、1997/98年にチリ空軍空中写真測量局(Servicio Aerofotogramétrico Chileno, FACH)が縮尺約7万分の1の白黒空中写真を撮影したので、この空中写真を使い、1986、1991、1995、1996、1999、2000年撮影の空撮写真の再判読を行い、いくつかの氷河の末端位置を修正した。そして後退距離、面積を再計測した。従って、いくつかの氷河では以前に発表した論文の数値と変わっているものがある。当然、本論文に示されている数値が最新で正しいが、以前の議論が根本から覆るような数値の変更はない。

斜め空撮写真の末端は撮影年度が同じ垂直のリモート・センシング・データのほうが比定しやすいので、2001年11月の空撮写真は2000年3月のランドサット画像を使い、2003年12月と2004年12月の空撮写真は2003年4月のランドサット画像を使って、末端位置を同定した。ランドサットデータの分解能は30mと粗く、影などの影響もあるので、デジタル解析による末端識別など

には利用していない。

4 結果

表1に60年間の末端後退距離を一括して示す。しかし、氷河末端の後退は一様ではなく部分部分で起きるのが普通なので、距離に加えて後退面積を表2に示す。60年間の後退傾向を詳しく見るために、表2は計測年度毎に細かく変動を示している。感覚的には1次元の距離の方が分かりやすいが、これは氷河の幅に影響されやすい。従って、基本的には変動の実体をより反映している面積で以下の議論を行なう。末端変動により、末端が2つに分かれていたのが一つになったり、一つが2つに分かれたりする。最近ではレイチェル氷河 (Glaciar Reicher) とグアラス氷河 (Glaciar Gualas) の末端が一つになり、カシエット氷河 (Glaciar Cachet) が北末端と西末端の2つに分かれた。図5は21の氷河の1944/45年(以後1945と表記する。他の年代も同様) から2004/05年の面積変動を示す。過去60年間の一般的な傾向は後退であるが、サン・ラファエル氷河の1990年代の顕著な停滞・前進を含め、いくつかの氷河で前進がある。しかし、ピスシス氷河 (Glaciar Piscis)、HPN3氷河 (Glaciar Hielo Patagónico Norte 3)、レオン氷河 (Glaciar León) といった小さな氷河の前進は写真を撮影したタイミングによる一時的な見かけの可能性が高い。一方、1991-94年のネフ氷河 (Glaciar Nef、表2では減少しているが、これは末端は伸びているが幅が狭くなり、面積としては減少しているためである)、およびグアラス氷河の1996-99年(南末端)と2000-02年の前進は、大規模な後退の前に起きたもので、おそらくクレバスが開いた結果と解釈される。グアラス氷河では1994年に現地調査で北末端が前進したことが報告されている (Harrison and Winchester, 1998)。2005年の時点で21のうち17の氷河がカービングしており、大きな後退をしたのはカービング氷河である。

図5で顕著に目立つのは氷原の西側に位置するサン・キンティン氷河、サン・ラファエル氷河、レイチェル氷河の変動である。特にサン・キンティン氷河の面積減少は約29km²と群を抜いており(図6)、北氷原全体の面積減少の30%弱を占める。2000年代に入ってから末端の崩壊が続いており、面積減少と氷河前縁湖の拡大はますます加速され

るものと予測される。次いで、サン・ラファエル氷河の減少が目につくが(図7)、同時に1991年以降の停滞・前進・後退・停滞が特徴的で、このような変動は北氷原の他の氷河には見られない。

レイチェル氷河の南西末端は約6kmも後退したが、1945-1975年は約400m前進している(細くなったので面積は減ったが)、実質的には30年間での後退である。これは北氷原でもっとも距離の長い後退である(図8)。2000年ぐらいまで末端が北東と南西の2つに分かれて、それぞれ氷河前縁湖でカービングしていたが、両末端、特に長がかった南西末端の1990年代の崩壊を伴う大規模な後退により、2つに分かれていた末端は一つになり、氷河前縁湖も一つにつながった。2番目に長い距離を後退したのはカシエット氷河で約5kmである。現在は2つの末端に分かれ、北末端は陸に上がり西末端のみが氷河前縁湖に突っ込んでいる。

表1 北パタゴニア氷原溢流氷河の後退距離 (m)。括弧内は年平均。

Glacier	Period
	1945-2005*
Western Side	
Grosse	2600 (43)
Reicher: NE	3800 (63)
: SW	6000 (100)
Gualas: N	2950 (49)
: S	2600 (43)
San Rafael	ca. 4150 (69)
San Quintin: front	1500-2900 (25-48)
: N side	ca 400 (7)
: S side	ca. 2450 (41)
Benito	1950 (33)
HPN1	3100 (52)
HPN2	3050 (51)
HPN3	2900 (48)
Steffen: front	3100 (52)
: E side	1500 (25)
Eastern Side	
Piscis	1050 (18)
Pared Sur	1150 (19)
Pared Norte	2050 (34)
Arco	1300 (22)
Colonia	1150 (19)
Cachet	N 4850 (81)
	W 3750 (63)
Nef	3400 (57)
Soler	ca. 850 (14)
Leon	ca. 250 (4)
Fiero	1050 (18)
Exploradores	ca. 550 (9)

* 1945は1944/45の南半球の夏を意味する

表2 北パタゴニア氷原の1945-2005の面積変動（後退 km²）

Glacier	Period										
	1945-2005	1945-75	1975-86	1986-91	1991-94	1994-96	1996-99	1999-00	2000-02	2002-04	2004-05
Western Side											
Grosse	2.71 (0.045)	0.39	0.22	0	0.25	0.28	0.19	0.16	0.11	0.63	0
Reicher: NE	8.83 (0.147)#	0.61	1.31	0.15	0.11	0.14	0.06	0.21	0.79#	0.67#	0.04
: SW	#	0.36	0.64	0.94	2.21	0?	0.16	0.20	#	#	
Gualas: N	4.91 (0.082)#	0.13	0.19	0.14	0.17	0.25#	0.31	0.06	0.36	2.00#	0
: S	#	0.17	0.35	0	0.13	#	a0.07	0.40	a0.26	#	
San Rafael	12.64 (0.211)	3.56	4.83	3.6	0.0006	0.01	a0.86	0.68	0.39	a0.07	-0
San Quintin	28.85 (0.464)	8.18	0.87	4.74	2.36	0.82	3.23	2.21	3.33	0.81	2.30
Benito	2.51 (0.042)	0.66	0.07	0.19	0.12	0.28	no data	0.25*	0.21	0.29	0.08
HPN1	4.39 (0.073)	1.75	0.37	1.2	0.11	0.02	no data	0.20*	0.2	0.09	-0
HPN2	4.05 (0.068)	1.41	0?	1.32*	0.02	0.04	no data	0.31*	0.14	0.35	0.44
HPN3	3.38 (0.056)	0.22	0.41	0.11	no data	no data	no data	1.05*	1	a0.05	0.14
Steffen	8.43 (0.141)	2.42	0.39	1.06	0.71	0.38	0.57	0.58	0.81	0.45	0.64
Eastern Side											
Piscis	0.82 (0.014)	0.49	0.02	0	0.01	a0.01	0.01	0.06	0.11	0.02	0
Pared Sur	2.04 (0.034)	1.42	0.27	0	0	0	0	0?	0.16	0	0
Pared Norte	1.46 (0.024)	0.97	0.04	0.27	0	0.04	0.06	no data	0.06*	0.02	0
Arco	0.46 (0.008)	0?	0?	0.16 *	0?	0.25*	0	0	0	0	0
Colonia	2.09 (0.035)	0.97	0.09	0.28	0.06	0	0.15	0	0.04	0.1	0.40
Cachet	5.15 (0.086)	2.68	0.83	0.14	0.2	0.02	0.33	0.1	0.23	0.26	0.01
Nef	5.03 (0.084)	1.46	1.12	0.31	0.08	1.21	0.77	0.15	0.03	a0.16	0.06
Soler	1.72 (0.029)	0.40	0.24	0.2	0.08	0	0.21	0.05	0.05	0.35	0
Leon	0.55 (0.009)	0.02	0.19	0.36	a0.03	0	0	0	0.06	a0.05	0
Fiero	0.90 (0.015)	0.15	0	0.12	uncertain	0.12*	0.02	0.16	0.18	0.07	0.08
Exploradores	1.44 (0.024)	0.85	0.13	0?	0?	0?	0.37*	0	0	0	0
Total##	101.36 (0.080)	29.27	12.58	13.81	6.59	3.48	5.14	5.02	7.74	6.00	4.19

#末端を一つにまとめた(NE and SW for Reicher: N and S for Gualas)

合計(但し2時期以上のデータを除く)。従って、総計はそれぞれの時期の合計とは異なる。括弧内は1氷河当たりの年平均後退量。

1945-2005には末端付近の幅減少も含まれるので、個々の氷河の1945-2005の変動は必ずしもそれぞれの時期の変動量の合計と一致しない。

*: 前の0?, no data or uncertain時期も含まれている

a: 前進

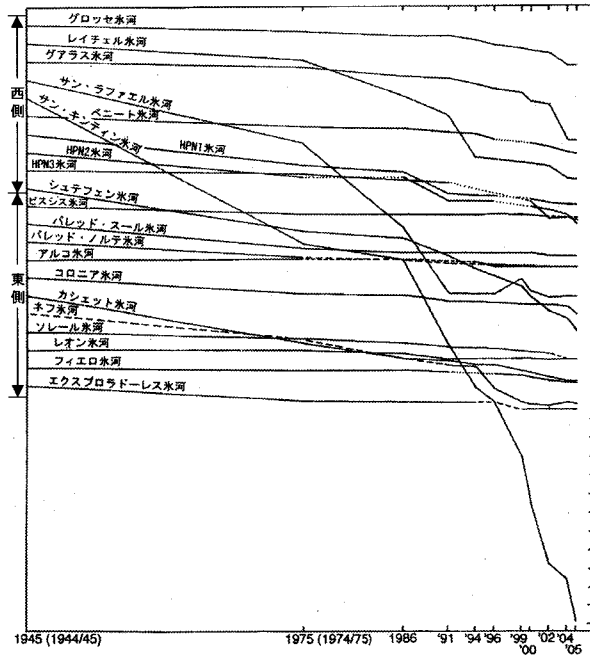


図5 北パタゴニア氷原の21の溢流水河の1944/45年から2004/05年の面積変動。1944/45年を基準にその後の末端変動による面積の増減を示す。右側のY軸の目盛り1つが1km²の変動を示す。下がれば後退、上がれば前進である。

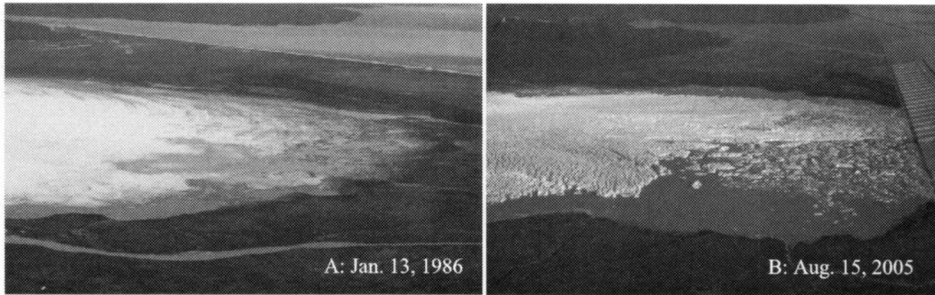


図6 サン・キンティン氷河の後退。氷河前縁湖の直径は約6kmである。背景の水は太平洋。
1986-2005年で約20km²の面積減少。

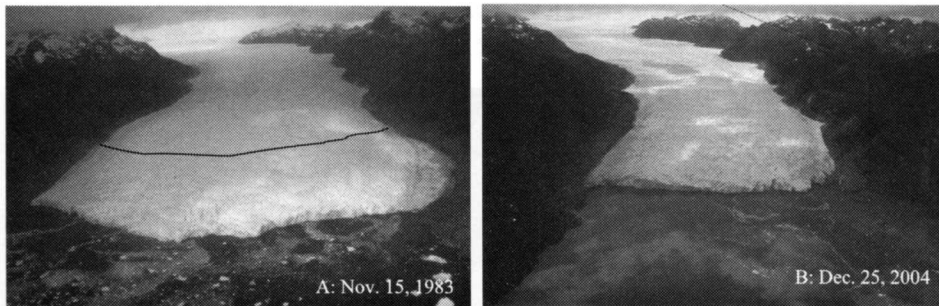


図7 サン・ラファエル氷河の後退。フィヨルドの幅が狭くなるまで後退している。1983年から2004年まで約1500mの後退である。Aの氷河上の線は2004年のおおよその末端位置。世界で最も赤道に近い所に位置しているタイドウォーター氷河。

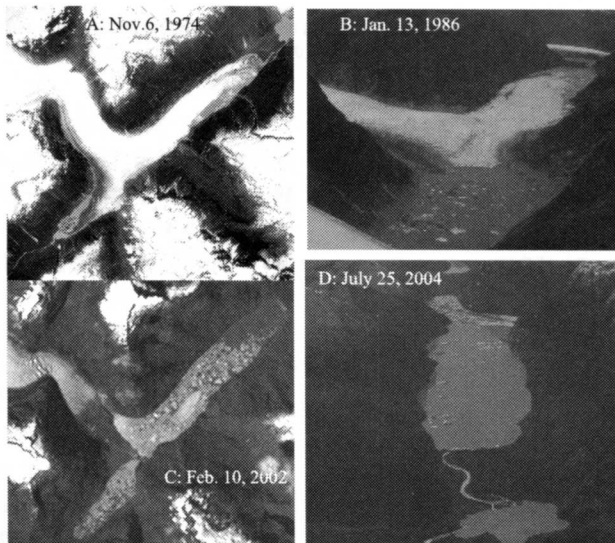


図8 レイチェル氷河の1974年から2004年の変動。A:チリ軍地理局撮影の空中写真。下が北。氷河はまだ前縁湖を埋めていた。B:北東末端はほぼ後退したが、南西末端(約6km)はまだ湖を埋めていた。C:衛星アスター画像。下が北。南西末端もなくなり末端が一つになった。たくさんの氷山が浮いているが、大きいのは長さ約1100m、幅約370mである。D:(南西より撮影)氷山もほとんど無くなった。湖の幅は約1kmである。1974/75年から2004/05年の30年間で約6400m後退した(1945-1975年はクレバス伸開により約400m前進した)。

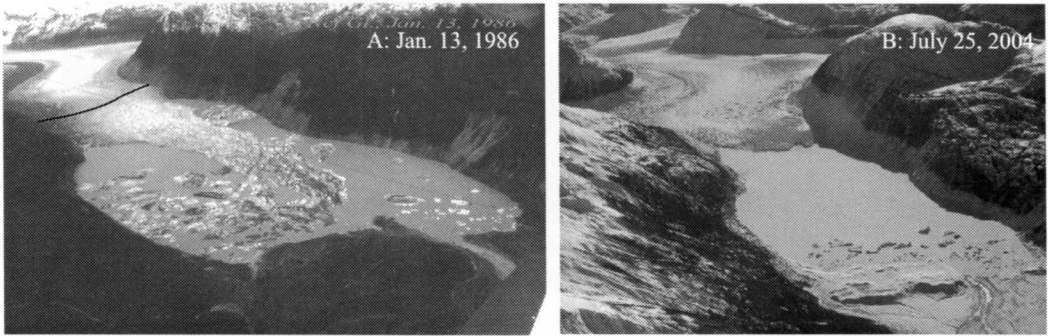


図9 ネフ氷河の後退。氷原の東側に位置している氷河で1994年末に末端大崩壊を起こした。崩壊前に末端が湾曲していたので、浮いていたと解釈される。1986-2005年で約4000mの後退。Bの写真は冬で、うっすらと雪が積もり、氷河前縁湖には薄氷が張っている。湖岸が黒いのは森林に覆われているため。

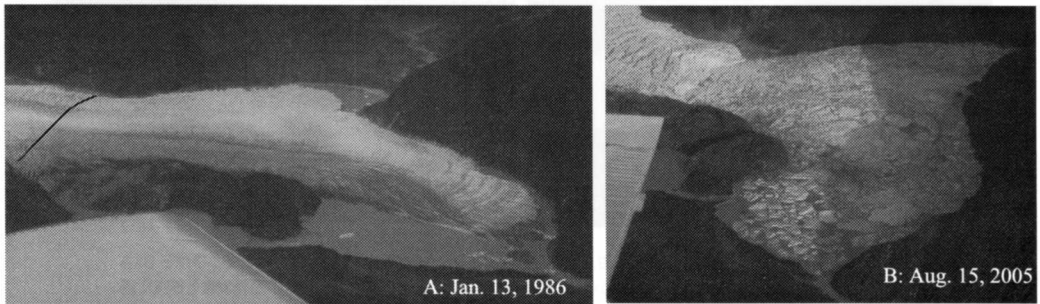


図10 グラス氷河の後退。2002-04年の間に末端大崩壊が起き、氷河前縁湖は氷山で一杯となっている。1986-2005年で約2000mの後退である。Aの氷河上の線は2004年のおおよその末端位置。

末端大崩壊は氷原東側に分布するネフ氷河でも1994年に起きており（図9）、最近ではレイチエル氷河のすぐ南に位置するグラス氷河でも2002-04年に発生している（図10）。シュテフェン氷河（Glaciar Steffen）は1986年から活発に末端が崩壊しているが、特に1999年以降は加速され、この傾向はしばらく続くと予測される。

5 議論・考察

パタゴニア氷原は偏西風帯に位置し、背稜山脈が南北に走っているため、氷原の東西で気象・気候が全く異なる（Warren and Sugden, 1993）。また、山脈は氷原の東縁近くに分布しているため、一般に氷原の西側に位置する氷河の涵養面積が広く、東側は狭い。また、東側には氷瀑をもつ氷河が多い。このような特徴からここでは東西に分けて変

動の特徴を議論・考察する。次に隣り合いながら異なった変動をしているサン・ラファエル氷河とサン・キンティン氷河について、そしてデブリ・カバー氷河について議論・考察する。

5-1 氷原東西の変動

1) 氷原の西側に分布する氷河の変動

このグループには北から、グロッセ氷河（Glaciar Grosse）、レイチエル氷河、グラス氷河、サン・ラファエル氷河、サン・キンティン氷河、ベニート氷河（Glaciar Benito）、HPN1氷河（Glaciar Hielo Patagónico Norte 1）、HPN2氷河、HPN3氷河、シュテフェン氷河が含まれる。図5から顕著に読み取れるのは、全体として西側に分布する氷河の後退が東側よりかなり大きいことである。氷河当たりの60年間の平均後退面積は約8.1km²で東側

の約 2km^2 と比べると 4 倍強である。これは南パタゴニア氷原では東側の後退が大きいのと非常に対照的である (Aniya *et al.*, 1997)。特に前述のサン・キンティン氷河、サン・ラファエル氷河、レイチェル氷河が目立つが、HPN1 氷河、HPN2 氷河も 1986-1991 年に大きく後退している。一方、HPN3 氷河は 1990 年代の終わりに末端がかなり崩壊し、氷河前縁湖は氷山で埋まった。ベニート氷河は北氷原で数少ない陸地に末端がある氷河で、後退は緩慢である。

レイチェル氷河では 2000 年から 2004 年にかけて興味ある変動が空撮と衛星データから捕らえられた。末端が 3 つに割れ (2001 年 3 月)、左端のものは前進してからカービングし (2001 年 9 月)、長さ約 1100m、幅約 370m の巨大な氷山となった (図 8C 参照)。末端が氷河前縁湖のなかで 3 つに分かれ、左端が左側へカーブしたことは、この末端が浮いていたことを示している。この巨大な氷山はその後、氷河前縁湖の中を漂い (流出水路が北東と南西の 2 箇所にあるので、強い風によって漂うと理解できる)、氷河末端付近に再度漂い戻った時は (2004 年 7 月)、湖流によって時計回りに約 150 度回転した。これは氷河から排出される水と湖流が複雑に絡み合った結果と解釈できる。この時までには小さな氷山はほぼ全部溶解 / 流出している (図 8D 参照)。

2) 氷原の東側に分布する氷河の変動

このグループには、北からエクスピロラドール氷河 (Glaciar Exploradores)、フィエロ氷河 (Glaciar Fiero)、レオン氷河、ソレル氷河 (Glaciar Soler)、ネフ氷河、カシエット氷河、コロニア氷河 (Glaciar Colonia)、アルコ氷河 (Glaciar Arco)、パレド・ノルテ氷河 (Glaciar Pared Norte)、パレド・スール氷河 (Glaciar Pared Sur)、ピスシス氷河が含まれる。

このグループではカシエット氷河とネフ氷河が大きな後退をしたが、他の氷河は非常に緩慢な後退を続けているのが特徴である。東側のグループの氷河当たりの平均後退量は小さく、約 2km^2 弱である。ネフ氷河は 1993 年 12 月の空撮では氷河前縁湖の中の末端が湾曲しているのが認められ、1994 年の初めに大崩壊を起こしている。末端が湾曲したのは浮いている証拠で、温暖氷河は一般

に浮かないという定説 (e.g., Van der Veen, 1996) を覆すものである (Warren *et al.*, 2001)。コロニア氷河は陸地に末端があり安定していたが、1980 年代に左側に氷河前縁湖が形成され、後退が活発化している。2000 年代には陸地の部分が大きく後退した。アルコ氷河は表 1 の後退距離では 1.3km と長い幅が非常に狭く、面積にすると 60 年間でほとんど変化がなく、変動量は北氷原で最小である。

エクスピロラドール氷河、アルコ氷河、パレド・スール氷河は末端が厚いデブリに覆われている。フィエロ氷河もデブリに覆われている。末端が厚いデブリに覆われている氷河は多くの場合、表面低下の結果である。つまり、表面が融けることにより、水体内に取り込まれていたデブリが表面に露出して集積することにより、デブリ・カバーになる。しかし、エクスピロラドール氷河での流動観測結果によると、デブリの厚い末端付近も活発に動いており (青木・澤柿, 2006)、これがこの氷河の変動が小さい理由である。このことからパレド・スール氷河、アルコ氷河で変動が小さいのもデブリによる太陽光の遮断効果に加えて、活発な流動がある可能性も考えられる。

5-2 サン・ラファエル氷河とサン・キンティン氷河

南北に隣り合うサン・ラファエル氷河 (北側) とサン・キンティン氷河 (南側) の変動は非常に対照的で興味深い。サン・キンティン氷河は 1945 年以降、1975 年から 1986 年までは速度が若干遅くなったが、かなり早い速度で面積が減少した。1990 年代始め、末端の一部で前進が報告されたが (Winchester and Harrison, 1996)、これは末端崩壊前の見かけの前進であった (Aniya, 2001)。現在氷河前縁湖にはテーブル状の氷山がたくさん浮いており、活発なカービングで後退を続けている (図 6 参照)。この調子では 10-20 年後には直径数キロメートルの大きな湖となることが予測される。

一方、サン・ラファエル氷河は 1945 年以降大きく後退したが、その変動はユニークである (表 2, 図 5 参照)。1975 年から 1991 年の間は、1975-86 年で 2.2km 後退 (200m/年)、1986-91 年で 1500m (300m/年) とパタゴニアでも 1, 2 を

争うスピードで末端が後退したが、その後変動パターンは大きく変化した。すなわち、1991-96年は停滞、その後の1996-99年、2002-04年は前進した。1999-2000年は最大で450m、2000-02年は末端の部分は異なるが、やはり最大で450m後退している。このスピードは1980年代後半と比べられるぐらいの早さである。サン・ラファエル氷河はカービングが活発で(Warren *et al.*, 1995)、小さい氷山を多量に生産するのが特徴的である。

このようなサン・ラファエル氷河の後退速度から、Venteris (1999) は氷河末端がほぼ浮いていたのではないかと示唆している。もしそうだとすると、1990年代からの氷河の停滞・前進・後退のサイクルは以前言われていた1970年代の降雨量増加によるもの(Warren, 1993; Winchester and Harrison, 1996; 安仁屋・佐藤, 1996)ではなく、フィヨルドの地形によるコントロールの可能性が高い(Aniya, 2001)。1991年頃に氷河後退はフィヨルドの幅が狭まる場所でストップした。その後、フィヨルドの幅が変わるところ付近を境に、停滞・前進・後退を繰り返しているからである。

両氷河の涵養域は氷原の西側にあり、お互いの流域界もはっきりしないくらい、同じような地形条件のところに位置している。サン・ラファエル氷河は塩分濃度は薄い海に、一方サン・キンティン氷河は淡水湖にカービングしている。二つの変動の違いが特に顕著になったのは、サン・ラファエル氷河の末端が後退によりラグーナからフィヨルド内に引っ込んで来た1980年代からである。したがって、涵養域の条件に違いがないのに末端変動が異なるのは、サン・ラファエル氷河がフィヨルドに末端があるからと解釈できる。

すなわち、末端の後退はフィヨルドの幅が狭くなると止まり氷河は停滞した。停滞している間に氷河は成長し前進した。前進によりフィヨルドの幅が広くなると氷河が広がり薄くなって浮きやすくなり、カービングがより活発になる。その結果後退が始まり、幅が狭くなる所付近まで後退する。

5-3 デブリ・カバー氷河

北氷原には末端付近がデブリに厚く覆われた氷河が5つある。サン・ヴァレンティン山の北に位置しているグロッセ氷河とエクスプロラドーレス

氷河、東側にあるフィエロ氷河(デブリは比較的薄い)、そして氷原の南東縁にあるパレド・スール氷河とアルコ氷河である。グロッセ氷河以外は氷原の東側に分布している。通常、末端のデブリが厚い氷河は停滞しているか後退していることが多い。現在は氷河前縁湖が形成されているグロッセ氷河を除き、4つの氷河の末端は陸地にある。

この中でもグロッセ氷河は消耗域では白い氷が全く見えない程、全体が厚いデブリに覆われていて、氷河による侵食の大きさを物語っている。一般的にデブリの厚さが数センチを越えると太陽光線の遮断効果が大きくなり、下の氷は融け難くなる(*e.g.*, Mattson *et al.*, 1993)。そのため1991年頃までは後退はゆっくりであった。しかし1986年頃に氷河前縁湖が形成され、氷河表面は凹地や池が多く形成されアバタのような地形となった。小さな池は拡大してくつき大きな池へと成長し、やがて氷河前縁湖とつながり、前縁湖は拡大していった。湖の拡大は最近加速されている。一方、同じような地形的位置にあり東西に隣り合っているエクスプロラドーレス氷河は1996-99年で少し後退したが、1975年からその末端位置に顕著な変化が見られない(表2)。この氷河は末端のデブリが厚いにも関わらず、流動が活発であることが、最近の観測から判明した(青木・澤柿, 2006; Aniya *et al.*, 2007)。このため、末端の位置はほとんど変化していないと解釈される。しかし、2000-03年の現地調査では氷河がかなりの速度で融け始めていることが観察されたので(Aniya *et al.*, 2005)、いずれは後退すると判断される。

このような隣り合った氷河の変動がかなり異なっている理由の一つとして、冬の降雪パターンが考えられる。2004年7月と2005年の8月(南半球の冬)に行なった空撮の際、氷原の東側の方が降雪が多かった。またいくつかの冬のランドサット衛星画像を見ると(例えば、1999年7月12日、2003年7月25日など)、氷原の東側の方が白い。つまり西側にあるグロッセ氷河の方が東側にあるエクスプロラドーレス氷河よりも冬の降雪が少ないことが推測される。夏の降水は西側の方が多いが、雪になるのは限られている。

フィエロ氷河、パレド・スール氷河、アルコ氷河の変動は非常に少ないが、カービング氷河であるフィエロ氷河は1999年以降緩慢な後退傾向

にある。アルコ氷河は距離にすると長い、面積では北氷原で変動が一番小さな氷河である。

6 氷河後退の要因

氷原上はもちろん、その近くでも長期の気象観測データ（気温、降水量）がないので、直接変動の要因を気候との関係で考察するのは困難である。北氷原の氷河上・末端付近での気象観測はGRPP (Glaciological Research Project in Patagonia) による1983年、1985年、1998年のソレル氷河 (Kobayashi and Saito, 1985; Fukami *et al.*, 1987; Matsumoto *et al.*, 2001) と1983年、1985年のサン・ラファエル氷河 (Ohata *et al.*, 1985; Inoue *et al.*, 1987; Fujiyoshi *et al.*, 1987) のデータしかない。これらはいずれも夏の3-4週間に限られているので、年々の変動を見ることはできないのは勿論、通年の気象を論じることすらできないのが現状であった。しかし、最近、松元・佐藤 (2006) によりエクプロラドレーレス氷河の末端 (標高182m) での通年観測に成功した。それによると2005年の年平均気温は7.5℃、夏は7~16℃、冬は-1~7℃、雨量は約3000mmで、この付近が予想していた以上はかなり温和であることが判明した。このデータが周りとのどのような関係にあるか、あるいは長期の傾向の中でどのような位置を占めるかは不明である。

南半球では過去100年間で約0.5℃の温度上昇が報告されている (Jones *et al.*, 1986)。ローゼンブルート他 (Rosenblüth *et al.*, 1995) はパタゴニア地方の南緯41°から55°の間で太平洋岸から大西洋岸にまたがる17の気象観測所の過去50~100年のデータを使って気候変動の解析を行なった。それによると南緯46°以南では温度が0.4~1.4℃上昇しており、氷原の東側 (風下) では南へ行く程、温度上昇が大きくなる。しかし、この気温変動では北氷原の西側に分布する氷河の後退の方が東側よりもかなり大きいことを説明できない。偏西風帯が南へ移動して西風が弱くなり降水量が減少した結果であろうか。

北氷原の風上側、西約100kmのところにかボ・ラペール (Cabo Raper) 測候所がある。この雨量記録では、降水量が1970年代に1960年代の倍近くに増えている (Warren, 1993)。これが1994年のグアラス氷河の前進に理由と考

えられた (Harrison and Winchester, 1998)。また、1990年代のサン・ラファエル氷河の停滞・前進の要因もこの雨量増加と考えられ (e.g., Warren, 1993; Winchester and Harrison, 1996; 安仁屋・佐藤、1996)、氷河の応答時間が20年程度と見積もられた (Aniya and Wakao, 1997)。しかし、この1970年代からの雨量データが誤りである可能性がチリ大学気象学教室のフエンサリダ教授に指摘された (Fuenzalida, 私信、1999年11月, Santiago, Chile)。その後、サン・ラファエル氷河の変動から、雨量ではなくフィヨルドの地形である可能性が示唆され (Aniya, 2001)、今回の変動でそれが有力な要因であることが判明した。

7 おわりに

北パタゴニア氷原に分布する21の溢流水河の1944/45-2004/05年の変動を明らかにした。その結果、過去60年間の変動は、一般的な後退であるが一律ではなく、氷河による強弱が大きいことが判明した。特に後退が大きい氷河では末端が大崩壊を起こしたケースが認められた。また一部の氷河では一時的な小前進も見られた。全般的に後退は1990年代以降に大きくなっている。この間の面積減少は約101km²で、この1/3弱が北氷原最大の氷河であるサン・キンティン氷河の後退によるものである。一方、サン・キンティン氷河のすぐ北に位置する同規模のサン・ラファエル氷河の変動はユニークであった。すなわち、1991年ごろまでは北氷原で1, 2を争うスピードで後退したが、1990年代から2000年代にかけて停滞・前進・後退・前進という北氷原でも特異な変動をした。この大きな理由として考えられるのは、気象・気候よりもフィヨルドの地形 (主に幅、深さも関係?) である。

全体の後退傾向は気候変動、すなわち温暖化への応答と解釈できるので、今後もパタゴニア氷河の後退は続き、加速されるものと予測される。特にサン・キンティン氷河やシュテフェン氷河は大規模な末端崩壊がいつ起きても不思議ではない状態にある。

謝辞

1984年以來のパタゴニア調査の空撮にはチリ・パタゴニアの玄関の町コジャイケ (Coyhaique)

にあるドン・カルロス航空会社 (Transportes Aereos "Don Carlos", LTD) にお世話になっている。とくにパイロットのロベルト・レオン氏 (Roberto León) には危険なパタゴニアの風の中を何回も空撮に飛んでもらっている。

引用文献

- 青木賢人・澤柿教伸 (2006) : D-GPS による Exploradores 氷河の流動観測。「南米パタゴニア氷原における完新世の環境変動の解明」平成15年度～平成17年度科学研究費補助金 (基盤研究 (A)) 研究成果報告。30-53。
- 安仁屋政武・佐藤宏昭 (1996) : 南米・パタゴニア氷原における最近の氷河変動。雪氷, 58 (1): 43-52。
- 松元高峰・佐藤軌文 (2006) : 北パタゴニア氷原 エクスプロラドール氷河流域における年間水文・気象観測。「南米パタゴニア氷原における完新世の環境変動の解明」平成15年度～平成17年度科学研究費補助金 (基盤研究 (A)) 研究成果報告。68-78。
- 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. (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. (2001): Glacier variations of Hielo Patagónico Norte, Chilean Patagonia, since 1944/45, with special reference to variations between 1995/96 and 1999/2000. *Bulletin of Glaciological Research*, 18: 55-63.
- Aniya, M. and Enomoto, H. (1986): Glacier variations and their causes in the Northern Patagonia Icefield, Chile, since 1944. *Arctic and Alpine Research*, 18, 307-316.
- Aniya, M., Sato, H., Naruse, R., Skvarca, P. and Casassa, G. (1996): The use of satellite and airborne imagery to inventory outlet glaciers of the Southern Patagonia Icefield, South America. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62: 1361-1369.
- 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: 1-12.
- 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., 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* 26 (6): 501-511.
- Aniya, M., Satow, K., Skvarca, P., Anma, R., Aoki, T., Sawagaki, T., Tanikawa, T., Naruse, R., Glasser, N. and Harrison, S. (2005): Overview of Glaciological Research Project in Patagonia 2003. *Bulletin of Glaciological Research*, 22: 109-119.
- Aniya, M., Enomoto, H., Aoki, T., Matsumoto, T., Skvarca, P., Barcaza, G., Suzuki, R., Sawagaki, T., Sato, N., Isenko, E., Iwasaki, S., Sala, H., Fukuda, A., Satow, K. and Naruse, R. (2007): Glaciological and Geomorphological Studies at Glaciar Exploradores, Hielo Patagónico Norte, and Glaciar Perito Moreno, Hielo Patagónico Sur, South America, during 2003-2005 (GRPP03-05). *Bulletin of Glaciological Research*, 24:95-107.
- 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.
- Fukami, H., Escobar, F., Quinteros, J., Casassa, G. and Naruse, R. (1987): Meteorological measurements at Soler Glacier, Patagonia, in 1985. *Bulletin of Glacier Research*, 4: 31-36.
- Harrison, S. and Winchester, V. (1998): Historical fluctuations of the Gualas and Reicher glaciers, North Patagonian Icefield, Chile. *The Holocene*, 8, 481-485.
- Hambrey, M. and Alean, J. (2004): *Glaciers*, 2nd ed., Cambridge University Press.
- Inoue, J., Kondo, H., Fujiyoshi, Y., Yamada, T. Fukami, H. (1987): Summer climate of the Northern

- Patagonia Icefield. *Bulletin of Glacier Research*, 4: 7-14.
- Jones, P. D., Raper S. C. B. and Wigley, T. M. L. (1986): Southern Hemisphere surface air temperature variations: 1851-1984. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25: 1213-1230.
- Kobayashi, S. and Saito, T. (1985): Meteorological observations on 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, 32-36.
- Mattson, L. E., Gardner, J. S. and Young, G. J. (1993): Ablation on debris-covered glaciers: an example from the Rikhlot Glacier, Panjab, Himalaya. *IAHS Publication*, 218, 289-296.
- Matsumoto, T., Yamaguchi, S., Ohno, H., Naruse, R. and Izumi, K. (2001): Hydrometeorological features at Soler Glacier, northern Patagonia, in the summer of 1998. In Aniya, M. and Naruse, R. (eds.) *Glaciological and Geomorphological Studies in Patagonia, 1998 and 1999*. Rapid Printing Center, Sapporo, 25-39.
- Ohata, T., Kondo, H. and Enomoto, H. (1985): Meteorological observations at San Rafael Glacier. In C. Nakajima (ed.), *Glaciological Studies in Patagonia Northern Icefield, 1983-1984*. Data Center for Glacier Research, Japanese Society of Snow and Ice, 22-31.
- Rignot, E., Rivera, A. and Casassa, G. (2003): Contribution of the Patagonia Icefields of South America to sea level rise. *Science*, 302 (October 17): 434-437.
- Rosenblüth, B., Casassa, G. and Fuenzalida, H. (1995): Recent climatic changes in western Patagonia. *Bulletin of Glaciological Research*, 13: 127-132.
- Van der Veen, C. J. (1996): Tidewater calving. *Journal of Glaciology*, 42 (141): 375-385.
- Venteris, E. R. (1999): Rapid tidewater glacier retreat: a comparison between Columbia Glacier, Alaska and Patagonian calving glaciers. *Global and Planetary Change*, 22, 131-138.
- 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.
- Warren, C. R. (1993): Rapid recent fluctuations of the calving San Rafael Glacier, Chilean Patagonia: Climatic or non-climatic? *Geografiska Annaler*, 75A (3): 111-125.
- Warren, C. R. and Sugden, D. E. (1993): The Patagonian Icefields: A glaciological review. *Arctic and Alpine Research*, 25 (4): 316-331.
- Warren, C. R., Glasser, N. F., Harrison, S., Winchester, V., Kerr, A. R. and Rivera, A. (1995): Characteristics of tide-water calving at Glaciar San Rafael, Chile. *Journal of Glaciology*, 41 (138): 273-289.
- Warren, C. R., Benn, D., Winchester, V. and Harrison, S. (2001): Buoyancy-driven lacustrine calving, Glaciar Nef, Chilean Patagonia. *Journal of Glaciology*, 47 (156): 135-146.
- Winchester, V. and Harrison, S. (1996): Recent oscillations of the San Quintin and San Rafael glaciers, Patagonian Chile. *Geografiska Annaler*, 78A: 35-49.

Summary

Variations of Outlet Glaciers, Hielo Patagónico Norte, Chile from 1944/45 to 2004/05 and Their Possible Causes

Masamu Aniya

Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

Variations of 21 outlet glaciers of Hielo Patagónico Norte (HPN: northern Patagonia Icefield), Chile, were elucidated for a period 1944/45-2004/05, using various sources of remote sensing data. Over the last 60 years, the icefield lost an area of ca. 101 km². Those glaciers that are located on the west side of the icefield (windward side of the Westerlies) have retreated with an average of 8.1 km² per glacier, which is more than four times larger than that of those located on the east side (leeward). The largest glacier of the HPN, Glaciar San Quintin lost an area of ca. 29 km², which is by far the largest and close to a third of the total. In terms of the distance, Glacier Reicher retreated most with ca. 6 km. Of the 21 monitored glaciers, 17 are currently calving glaciers, some of which retreated extensively in a short period of time due to snout disintegration in the proglacial lake. On the other hand, on the east side of the icefield, there are some glaciers that have varied very little. The general trend of the retreat over the past 60 years is considered to be the result of response to temperature rising due to global warming. However, there is another factor such as fjord topography (primary width; secondary, depth), with which to account for a unique variation (stagnation/advance/retreat) of Glaciar San Rafael since the 1990s.