

20 世紀の中央アジアの氷河変動

奈良 間 千 之*

Glacier Variations in Central Asia during the 20th Century

Chiyuki NARAMA *

Abstract

Observational records of the locations of glacier termini, glacier mass balance, temperature, and precipitation, and field observations indicate recent glacier variations in the Pamir-Alai, central Asia. Glacier advances occurred at the beginning of the 1900s, and from 1960 to 1975. Small glaciers responded quickly after negative temperature anomalies. Glaciers in the Pamir-Alai and West Tien Shan advanced or stagnated, and those in the North Tien Shan retreated from 1960 to 1975. Then, these glaciers retreated markedly after 1975. The mass balance records of eight glaciers in the Pamir-Alai, North Tien Shan, and East Tien Shan since the 1950s show the same tendency. They were stable from 1960 to 1975, and decreased largely from the late 1970s. The variations of glacier termini from 1960 to 1990 in the Pamir-Alai and West Tien Shan coincide with the mass balance records, while the variations of glacier termini in the North Tien Shan do not coincide with the mass balance records. The differences in glacier variations since the 1960s between the Pamir-Alai and West Tien Shan, and North Tien Shan are due to differences in precipitation pattern.

Key words : glacier terminal variations, glacier mass balance, 20th century, Pamir-Alai, Tien Shan

キーワード : 氷河末端変動, 氷河質量収支, 20 世紀, パミールアライ, 天山山脈

I. はじめに

中央アジアの旧ソ連・中国領のパミールと天山山脈には, 多くの山岳氷河が存在する。中央アジアの乾燥地域で生活する人々は, 古代から天水よりもこれら氷河の融氷水を水源とする外来河川の水を生活用水として利用してきた。中央アジアにおいて近年の気温上昇が報告され (Yao and Thompson, 1992; Thompson *et al.*, 1995; Yao *et al.*, 1997; Wang *et al.*, 2001), それを原因とす

ると考えられる氷河の縮小も報告されはじめた (Dyurgerov *et al.*, 1996)。急激な温暖化によって将来的に予想される氷河の縮小や消滅は, この地域に住む人々にとって深刻な問題となっている。しかし, この地域の貴重な水資源である氷河の最近の変動は十分に捉えられておらず, 水利用や水管理の面でもその対策についての明確な答えが出されていない (福 嶌, 1995; 松 山 ほか, 1997; Nakawo, 2001)。

パミールと天山山脈では, 氷河の質量収支の観

* 東京都立大学大学院理学研究科

* Graduate School of Science, Tokyo Metropolitan University

測は1950年代から始まったが、氷河の末端変動の観測は古くからおこなわれている。なかでも、パミールアライでは20世紀初頭から旧ソ連が崩壊する1991年までの長期の観測記録がある。Narama (2001) は、この記録をもとに20世紀の氷河変動を明らかにした。また、Narama (2002) は、現地調査によって観測した氷河前面のモレーンの分布から氷河変動を示した。一方、天山山脈では、1960年代から氷河の末端変動の観測がおこなわれており、最近の氷河は後退傾向にあると報告されている (Shi and Ren, 1990; Liu and Han, 1992; 上田, 1995)。これらの報告では、天山山脈を旧ソ連領の西天山と中国領の東天山に分類して、広範囲な地域の氷河変動をひとまとめにして議論しているため、氷河変動の細かな地域的差異を論じるには至っていない。中央アジアの降水機構には違いがあるので (Aizen *et al.*, 1995, 1997, 2001: 章3) 節参照), 中央アジアの氷河変動を明らかにするには、降水機構の違う地域ごとに氷河変動を比較し、氷河の質量収支変

動も含め議論する必要がある。そこで本論文では、パミールアライ、西天山、北天山の氷河変動の比較を試みた。

II. 地域概要

本研究で対象とする地域は、中央アジアの旧ソ連・中国領のパミールと天山山脈の山岳地域である (図1)。パミールアライ、中央パミール、西天山、北天山、東天山の各地域では、氷河の質量収支や末端変動の観測がおこなわれている。

1) パミール

パミールアライは、中央パミールから北西にのびる中央アジア山岳地域の西端外縁部に位置する。そこは、タジキスタン共和国北西部とキルギス共和国南西部の国境周辺のいくつかの山脈からなる高度6000mの山岳地域である。パミールアライの氷河は、小規模な谷氷河が多く、面積1km²以内の氷河が全体の80%を占める (Glazirin and Escher-Vetter, 1998)。中央パミールは、タジキスタン共和国中央部～東部に位置する高度7000

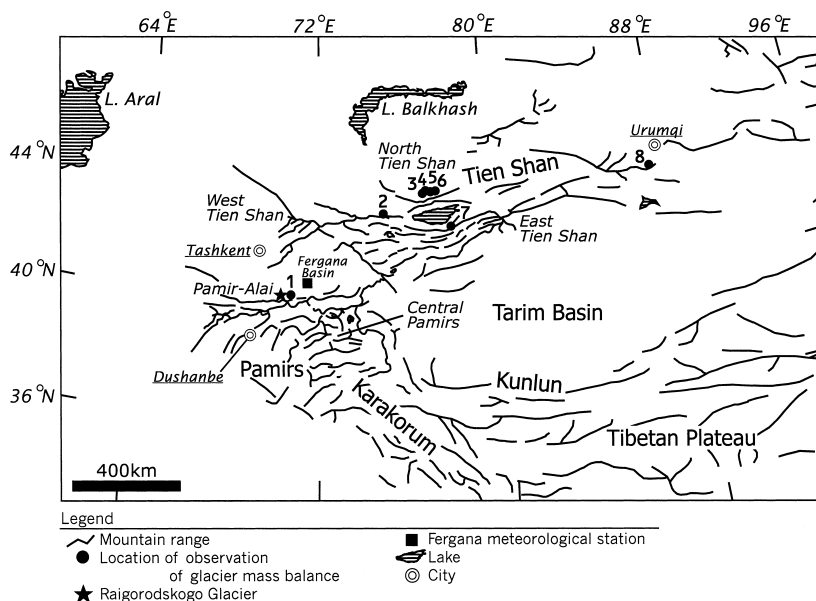


図1 中央アジアの山岳地域図。図中の番号は図6の氷河番号と一致する。

Fig. 1 Central Asian mountains of the study area.
The numbers correspond to the glacier numbers in Fig. 6.

～ 6000 m の山岳地域であり、地質構造の影響を受けて急峻な東西にのびる山脈が南北に並列に形成されている (Burtman and Molnar, 1993)。Fedchenko 氷河など大規模な谷氷河が多い。

2) 天山山脈

西天山は、天山山脈西端のウズベキスタン・カザフスタン・キルギス共和国の国境周辺 (首都タシケントから北東 100 ～ 150 km) の主要な四つの山脈からなる高度 4000 m の山岳地域である (図 1)。北天山は、カザフスタン共和国南東部 (旧首都アルマトイから南側) とキルギス共和国北部 (首都ピシュケクから南側) の高度 4000 m の山岳地域である (図 1)。東天山は、旧ソ連と中国の国境付近から東部の天山山脈である。

3) 中央アジアの気候

中央アジアの気候は、冬季に発達するシベリア高気圧と偏西風による低気圧擾乱の相互作用によって大枠が決められ、山岳地形の配列によって生じる局地的な降水の違いによって特徴づけられる (Aizen *et al.*, 1995, 1997, 2001)。

パミールアライと西天山は、中央アジア山岳地域の西端外縁部に位置しているため、シベリア高気圧の影響は小さく偏西風の影響を最も長い間受ける。年降水量のピークはシベリア高気圧の影響が徐々に弱くなる冬季から春季で、氷河はこの時期に涵養される。一方、シベリア高気圧の影響を遅くまで受ける北天山や東天山の年降水量のピークは、西天山やパミールアライより少し遅い時期 (春季から夏季) に出現する。偏西風擾乱によりもたらされる西からの水蒸気は山岳外縁部のパミールアライや西天山で遮られるため、東天山の年降水量は少なく、夏季の水蒸気はおもに西からもたらされる (Yatagai and Yasunari, 1995; Aizen *et al.*, 2001)。

III . 20 世紀のパミールアライの氷河変動

1) 氷河の末端変動の観測記録

パミールアライには 1906 ～ 1995 年の約 90 年間にわたる長期の氷河の末端変動の観測記録がある (Petrov and Schetinnikov, 1974; IAHS (ICSI)-UNESCO, 1973 1998)。Narama (2001)

はこの観測記録を用いて、パミールアライと西天山の氷河変動を明らかにした。ただし、気候が変化した後に氷河末端が変動するまで大きいタイムラグをもつ面積の大きな氷河と、サージを生じた氷河は対象にしていない。また、Narama (2002) は、末端変動の観測記録が存在するパミールアライ、トルキスタン山脈北面の Riagorodskogo 氷河前面で現地調査をおこない、観測記録の欠損によりこれまで知られていなかった氷河前進をモレーンの分布から確認し、20 世紀に 3 回の氷河前進が生じたことを示した。これらの報告にもとづき、フェルガナ盆地で観測された過去 100 年間の気温と降水量の記録を用いて、氷河変動と気候変化の関係からパミールアライの 20 世紀の氷河前進期について以下に述べる。

図 2a は、パミールアライにおいて 1950 年以前に観測された氷河の末端変動を示す。観測は 1906 年から開始されたが、20 世紀初頭の観測記録があるのは四つの氷河のみ (Tamingen, Minteke, Raigorodskogo, Shurovskogo 氷河) である。四つの氷河の中で、Shurovskogo 氷河を除く三つの氷河は 1906 ～ 1911 年に前進し、1911 ～ 1934 年に後退している。一方、Shurovskogo 氷河は他の三つの氷河とは異なる変動を示し、1906 ～ 1911 年に後退し、1911 ～ 1934 年に前進した。1911 ～ 1934 年に Tamingen 氷河は 83.3 m/yr の速さで急速に後退した。Tamingen 氷河の下流には、サージによる新鮮な地形が確認されており (G. Glazirin 氏による私信)、この急速な後退は気候変化によるものでなく、サージを生じた氷河がその後平衡状態に戻る過程でおこる急激な後退 (山田・白岩, 1995) であると考えられる。

1930 ～ 40 年代には Klyueva, Kizilgorum, Karakazik 氷河の末端変動の観測が始まり、1934 ～ 1960 年にほとんどの氷河は小規模な前進と後退を繰り返した。1960 年代にはさらに多くの氷河の観測が開始された。図 2b は、1950 年代後半以降に観測が始まった氷河の末端変動を示す。観測された氷河は、1960 ～ 1975 年に前進、1975 ～ 1990 年に後退し、ほぼ同様の変動傾向を示している。しかし、多くの氷河が 1960 年代に前進する

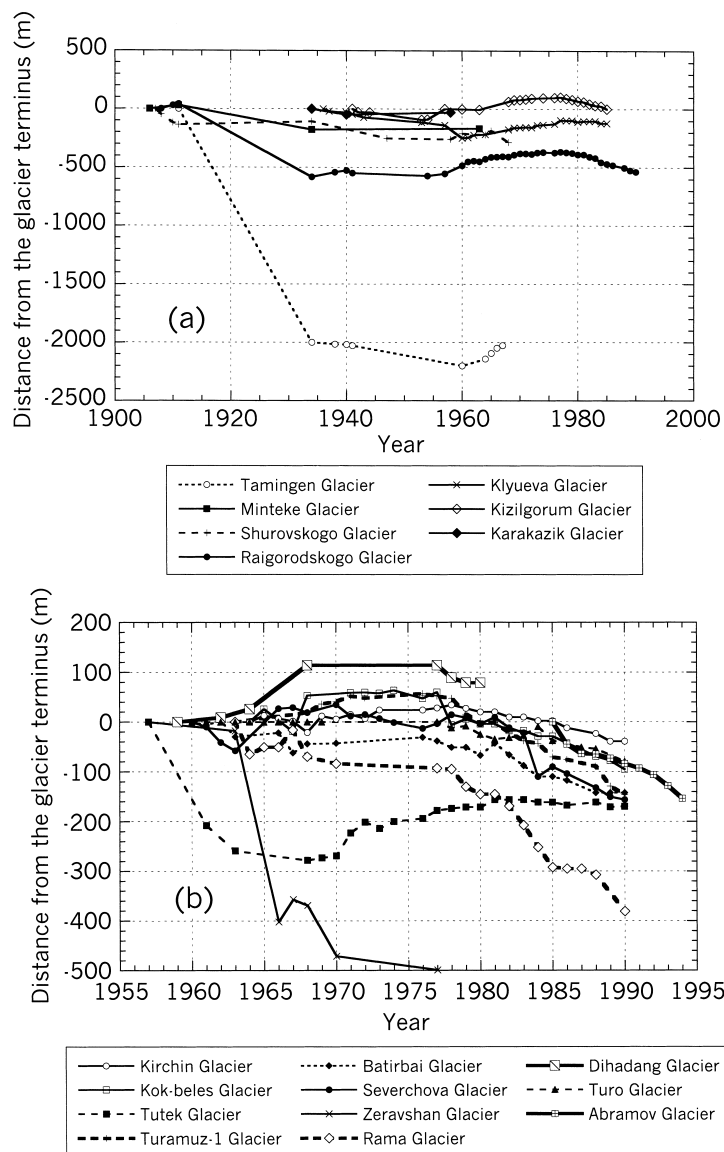


図 2 パミールアライにおける (a) 1906 ~ 1990 年 , および (b) 1960 ~ 1995 年の氷河の末端変動図 .
 マークは観測年を示す . 1977 ~ 1990 年の Zeravshan 氷河の後退は大きい , 図では省略した . 0 m は各氷河の最初の観測年次の氷河末端の位置を示す . Petrov and Schetinnikov (1974) および IAHS (ICSI)-UNESCO (1973 1998) より作成 .

Fig. 2 Terminal variations of the glaciers in the Pamir-Alai from (a) 1906 to 1990 and from (b) 1960 to 1995 .
 The observed years are indicated with symbols . The retreat of the Zeravshan Glacier from 1977 to 1990 is large and is not shown in this figure . 0 m shows glacier positions in the initial years of observations for each glacier . Data source : Petrov and Schetinnikov (1974) and IAHS (ICSI)-UNESCO (1973 1998) .

中, Zeravshan 氷河は 1963 ~ 1966 年と 1977 ~ 1990 年に急激に後退し他の氷河と異なる変動を示した。

図 3 はフェルガナ盆地のフェルガナ測候所 (高度 580 m : 図 1) で観測された 20 世紀の夏季 (5 ~ 9 月) の平均気温と年降水量の偏差を示す。気温と降水量のトレンドは, Mann-Kendall rank statistic (たとえば, Press *et al.*, 1989) を用いて検定した。その結果, 1919 年以降の気温のトレンドは危険率 1 % で上昇しているが, 降水量は 5 % でも有意なトレンドを示さない。気候変化と氷河変動の関係をみると, 20 世紀初頭に気温低下と同時に降水量の増加がみられ, 1906 ~ 1911 年に氷河は前進している。また, 1960 ~ 1975 年にも気温低下と降水量の増加がみられ, 氷河は前進している。1975 年以降は気温上昇がみられ, 降

水量も増加しており, 氷河は後退しつづけている。これは, 気温上昇による消耗量の増加が涵養量の増加を上回った結果と考えられる。言い換えれば, 最近の氷河は気候変化を反映した変動を示しており, 降水量変化よりも気温変化の影響を強く受けているといえよう。

一般的に言って, 氷河の末端変動は年間の質量収支の変化を反映しており, 気候に対する応答時間の遅れ (タイムラグ) は氷河の大きさに関係している (Kuhn *et al.*, 1985; Shi and Ren, 1990; 上田, 1995)。そのため, 面積の大きい氷河は, 気候変化に対し氷河末端が応答するまでに大きいタイムラグをもつ。多くの氷河と異なる変動を示した Shurovskogo 氷河 (21.4 km²) と Zeravshan 氷河 (38.7 km²) は面積の大きな谷氷河である。この二つは, 大きな面積をもつことから末端変動

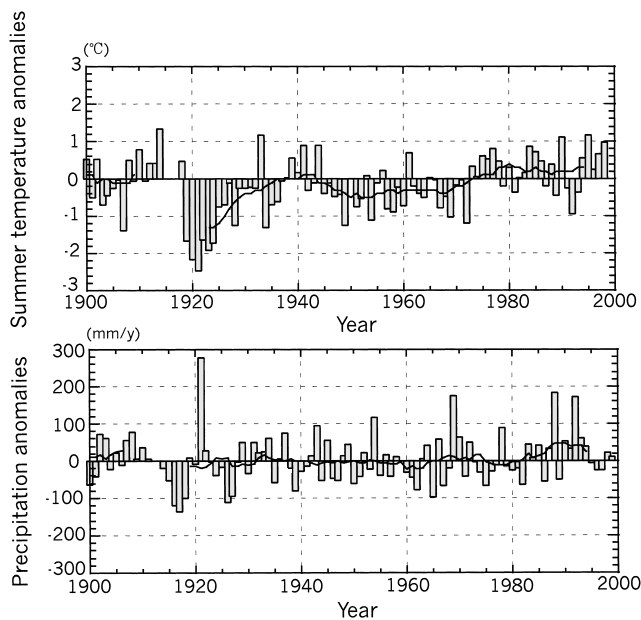


図 3 ウズベキスタン共和国のフェルガナ測候所 (図 1) における夏季平均の気温 (5 ~ 9 月) と年降水量の偏差。基準としたのは 1900 ~ 1990 年の平均値である。11 年移動平均も示す。Narama (2001) の Fig.7 より引用。

Fig. 3 Summer temperature (May-September) and annual precipitation anomalies relative to 1900–1990 at Fergana Meteorological Station (Fig. 1), located in Fergana, Republic of Uzbekistan (Narama, 2001). Eleven-year running means are also plotted.

へのタイムラグも大きくなり、他の氷河と異なる変動を示したと考えられる。一方、同じ変動傾向を示した氷河は面積 7 km^2 以内の小規模な氷河であり、これらの氷河は気候変化に対し敏感に反応しているといえよう。つまり、気候変化を考える時には、面積の大きい氷河は局地的な気候変化を反映していないので対象とすべきではないといえる。氷河の末端変動の観測記録から、気候変化に対応しないサージ氷河と、大面積の氷河を除くと、パミールアライのほとんどの氷河は、1906 ~ 1911 年に前進、1911 ~ 1934 年に後退、1934 ~ 1960 年に後退または停滞、1960 ~ 1975 年に前進、1975 ~ 1990 年に後退という変動傾向を示した (Narama, 2001)。

2) 氷河末端変動、質量収支と気象観測記録との関係

Narama (2002) は、上記の Raigorodskogo 氷河の前面に分布するモレーンを調査し、モレーン分布から氷河末端変動位置の観測欠損期間に生じた氷河前進を明らかにした。図 4 は Raigorodskogo 氷河前面の写真と Raigorodskogo 氷河とその両側に位置する Kirchin 氷河、Kokbeles 氷河で観測された末端変動を示す。Raigorodskogo 氷河前面では、三つのモレーン Ra 1 ~ Ra 3 が観察できる (図 4)。1968 年に撮影された写真 (D. Stepanovich 氏提供) と 1960 年代に撮影された米国の偵察衛星 CORONA の衛星写真から、この時期の氷河はモレーン Ra 1 の位置に存在していたことが確認された。Raigorodskogo 氷河の末端変動の記録 (図 4) をみると 1960 ~ 1977 年に氷河は前進しており、この前進期間に形成されたのがモレーン Ra 1 である。現在の氷河末端はモレーン Ra 1 から 340 m 上流に位置している。1908 ~ 1911 年の前進時の氷河は、現在の氷河末端から 700 m ほど下流に位置しており、そこに位置するモレーン Ra 3 はこの前進期に形成されたことがわかった。

モレーン Ra 1 と Ra 3 の間にはモレーン Ra 2 が存在するが、観測記録からこの前進は確認できない。モレーン Ra 2 の位置は、長期の観測欠損期間である 1911 ~ 1934 年にあたり、この時期に

モレーン Ra 2 が形成された可能性がある (Narama, 2002)。上述したように、20 世紀のパミールアライの小規模な氷河は、気温変化の影響を強く受けている。観測の欠損期間の気温変化 (図 3) をみると、1910 年代に気温の上昇と同時に降水量は減少しているが、1920 年前半には顕著な気温低下がみられ、降水量は増加している。観測記録から確認された 1908 ~ 1911 年、1960 ~ 1977 年の氷河前進は、いずれも気温低下期からわずかなタイムラグで生じていた。これらの結果から、Raigorodskogo 氷河は気温の低下した 1920 年代に前進し、この前進によってモレーン Ra 2 が形成されたと考えられる。

図 5 にはフェルガナ測候所の気温偏差、Abramov 氷河の質量収支変動、Raigorodskogo 氷河の末端変動の曲線を示す。Glazirin *et al.* (1993) は、フェルガナ測候所で観測された気温と降水量の記録を用いて、Abramov 氷河の質量収支変動曲線を 1880 年まで復元した。Abramov 氷河の質量収支は、1900 年代初頭、1920 年代に増加しており (Mikhaleenko and Solomina, 1996)、Raigorodskogo 氷河の末端変動とほぼ一致する。前節で述べたように、パミールアライで観測されたほとんどの氷河は、気候変化を反映した変動を示している。パミールアライの氷河前進は 1900 年代初頭と 1960 ~ 1975 年に生じていたと考えられる。1900 年代初頭においては、ヨーロッパアルプスやコーカサスなど他の山岳地域でも氷河前進や復元された質量収支の正の傾向が報告されており (Grove and Gellatly, 1995; McGregor *et al.*, 1995; Popovin, 1996)、この時期はより広域で同じタイミングで氷河前進する気候環境にあったと考えられる。

IV. 中央アジアの氷河変動

中央アジアにおけるその他の地域の氷河変動はどうなっているのだろうか。西天山、北天山、東天山、中央パミールにおける氷河の末端変動の観測記録は、Petrov and Schetinnikov (1974)、Pritokov and Ujeriya (1969)、IAHS (ICSU)-UNESCO (1973-1998) に掲載されている。パ

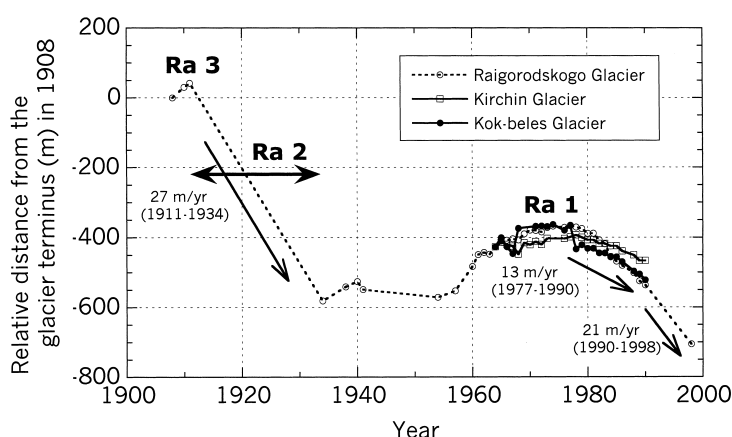


図 4 Raigorodskogo 氷河前面のモレーン Ra 1-Ra 3 の写真(上)と Raigorodskogo 氷河 (1908 ~ 1998 年), Kirchin 氷河, Kor-beles 氷河 (1960 ~ 1990 年) の末端変動図(下). マークは観測年を示す. Petrov and Schetinnikov (1974) および IAHS (ICSI) - UNESCO (1973-1993) により作成.

Fig. 4 Photograph of moraines Ra 1-Ra 3 at the Raigorodskogo Glacier front, and terminal variations of the Raigorodskogo Glacier from 1908 to 1998, the Kirchin and Kok-beles Glaciers from 1960 to 1990. The observed years are indicated with symbols. Data source : Petrov and Schetinnikov (1974) and IAHS (ICSI) - UNESCO (1973-1993).

ミールアライの小規模な氷河の末端変動は気温変化に敏感に応答し、いずれも同じような傾向を示した (Narama, 2001)。この結果をもとに、他の地域でもより局地的な気候変化に敏感に応答する氷河の変動傾向を明らかにするため、パミールアライで同じような変動を示した面積 7 km^2 以内の小規模な氷河を対象にその変動をまとめた。長期

的に観測記録がある氷河は、北天山の四つ (面積 7 km^2 以内) のみであり、その他のほとんどの氷河は 1960 年代以降に観測が始まった。長期的に観測記録がある四つの氷河は 1920 年代から観測が始まっているが、欠損期間が多い。これらの氷河は 1920 年代に前進し、1930 ~ 1965 年に後退している (Pritokov and Ujeriya 1969) とされる

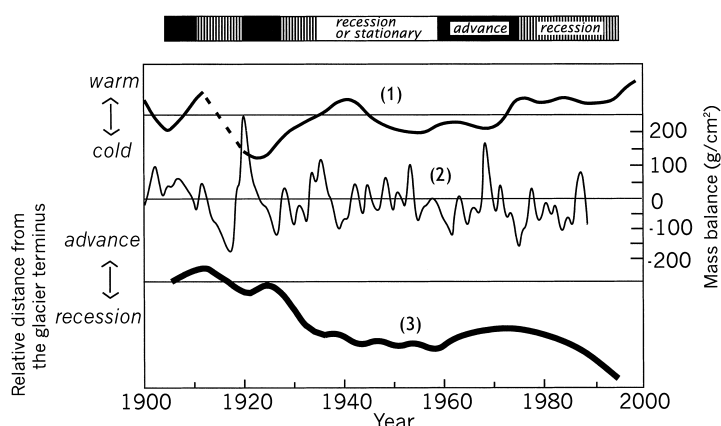


図 5 パミールアライにおける 20 世紀の変動曲線。
(1) フェルガナ測候所の相対的な夏季の気温変化, (2) 気象観測データから復元された Abramov 氷河の質量収支変動曲線 (Glazirin *et al.*, 1993), (3) Raigorodskogo 氷河の末端変動曲線。

Fig. 5 Schematic diagram of some variation curves in the 20th century in the Pamir-Alai.

(1) Relative variations of temperature at Fergana Meteorological Station. (2) Reconstructed mass balance variations of the Abramov Glacier (Glazirin *et al.*, 1993). (3) Terminal variations of the Raigorodskogo Glacier.

が, その詳細な変動は明らかでない。

1960 年代以降の氷河変動では, 中国領の東天山において 10 年間の氷河の末端変動の観測記録をまとめた報告がある (Ren, 1988)。この記録は様々な面積の氷河を対象としており, 氷河面積の大きさによって異なる氷河の気候変化に対するタイムラグが考慮されていない。また, IAHQ (ICSI) UNESCO (1973 1998) に掲載されている東天山の氷河の末端変動の観測記録は, 欠損期間が多くその変動を連続的に把握することができない。中央パミールでは, 観測記録がある氷河は面積 20 km^2 以上の大きな氷河であるため, その観測記録はその地域を代表する氷河変動を示すとはいいがたい。以上の理由から, この二つの地域の氷河の末端変動の観測結果を除外した。

表 1 は, 上記の最近 40 年間の氷河末端の観測記録を用いて 5 年間ごとに氷河末端の前進, 停滞, 後退の氷河数を示したものである。氷河面積 7 km^2 以内で, 5 年間のうち 3 年以上観測記録がある氷河を対象とした。5 年間の末端変動距離が

10 m 以上前進あるいは後退した氷河をそれぞれ前進と後退とし, 末端変動が 10 m 未満の氷河を停滞とした。表 1 から, パミールアライと西天山の氷河では 1960 ~ 1975 年に前進 ~ 停滞が優勢で, 1975 年以降は後退傾向にあることがわかる。一方, 北天山では 1961 ~ 1965 年と 1971 ~ 1975 年に氷河が後退, 1966 ~ 1970 年に停滞しており, 1975 年以降は徐々に後退している。つまり, 1960 ~ 1975 年における氷河変動はパミールアライ・西天山と北天山で違いが生じている。

図 6 は, 1950 年代以降に観測されたパミールアライ, 北天山, 東天山の八つの氷河の質量収支変動を示す。多くの氷河は 1960 年から 1970 年代半ばまでほぼ均衡の状態を保ち, 1975 年以降に急速に負の傾向が加速している。変動量に差はあるものの, これらの氷河の質量収支変動の傾向はほとんど同じである。ただし, 乾燥し降水量が少ない東天山の Urumqi No.1 氷河では変動量は小さい。

図 6 に示したように, パミールアライの

Abramov 氷河と北天山の六つの氷河の質量収支の変動傾向は同じである。パミールアライと西天山の氷河末端変動（表 1）はこれらの質量収支変動と同じ傾向を示している。しかし、北天山の末端変動は 1960 ~ 1975 年に後退し（表 1）、この時期にほぼ均衡状態であった質量収支変動と異なっている。これは、北天山の氷河では質量収支変動と末端変動に違いが生じていることを意味する。中央アジアでは、大陸性気候になる東部山岳地域ほど降水による涵養量が少ないので、氷河の活動度が小さく、質量収支変動と氷河末端変動のタイムラグが大きくなる（Liu and Han, 1992）。また、年間の最大降水量の時期の違いという季節依存性の相違により氷河変動も異なってくる（藤井・安成, 1983; Dyurgerov *et al.*, 1994）。これらの降水特性の違いが地域による氷河の前進後退の

タイミングの相違をもたらしたのであろう。

パミールアライと西天山における氷河の末端変動と質量収支の変動傾向は同じであり、20 世紀は数回の小規模な前進があったものの、後退の激しい期間であった。1975 年以降では、中央アジアの氷河末端は後退し、氷河の質量収支も負の傾向が急速に加速した。図 4 でも示されたように Rai-gorodskogo 氷河の後退速度は 1977 ~ 1990 年に 13m/yr であったのが、1990 ~ 1998 年には 21 m/yr となってさらに加速しており（Narama, 2002）、氷河は現在も急速に後退している。1960 年以降に天山全域の氷河は後退傾向にあるとされたが（Ren, 1988; Wang, 1989; Shi and Ren, 1990; 上田, 1995）、本研究では、最近のパミールや天山山脈の氷河には、地域ごとにわずかな変動の違いがみられることが明らかになった。

表 1 中央アジアのパミールアライ、西天山、北天山における 1960 ~ 1995 年の氷河変動
数字は報告された氷河の数。灰色部分は 1960 ~ 1975 年の期間を示す。+ : 前進 ; = : 停滞 ; - : 後退。
Petrov and Schetinnikov (1974) および IAHS (ICSI)-UNESCO (1973-1998) より作成。

Table 1 Glacier variations from 1960 to 1995 in the Pamir-Alai, West Tien Shan, and North Tien Shan, central Asia.
Gray zone indicates the period from 1960 to 1975. Data source : Petrov and Schetinnikov (1974), IAHS (ICSI)-UNESCO (1973-1998). + : advance ; = : stationary ; - : recession.

	1961	1965	1966	1970	1971	1975	1976	1980	1981	1985	1986	1990	1991	1995
Pamir-Alai	9		13		8		13		14		12		1	
+	4		7		6		2		0		0		0	
=	3		5		1		3		1		1		0	
-	2		1		1		8		13		11		1	
West Tien Shan	7		8		7		9		9		8		-	
+	5		4		1		0		1		0		-	
=	0		0		3		2		0		1		-	
-	2		4		3		7		8		7		-	
North Tien Shan	8		7		7		7		12		16		3	
+	1		2		0		3		3		0		0	
=	1		4		0		0		2		4		1	
-	6		1		7		4		7		12		2	
Total	24		28		22		29		35		36		4	
+	10		13		7		5		4		0		0	
=	4		9		4		5		3		6		1	
-	10		6		11		19		28		30		3	

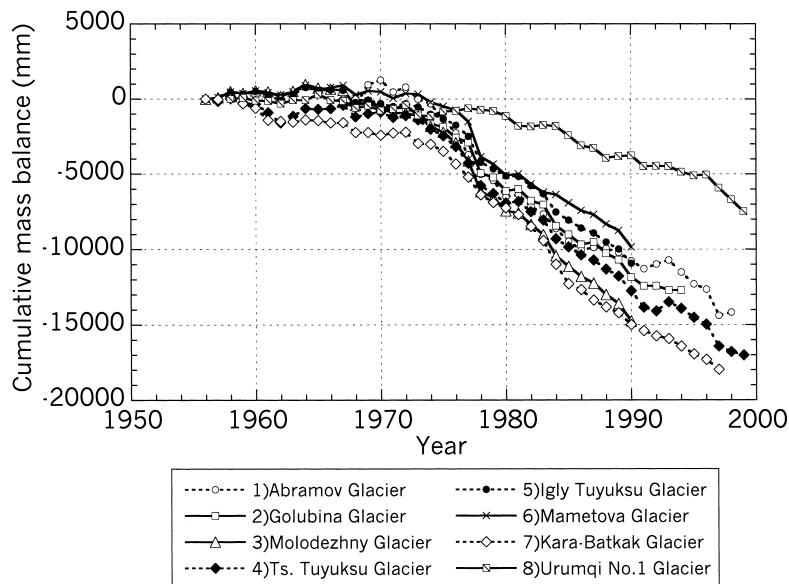


図 6 中央アジアのパミールアライ，北天山，東天山で観測された 8 つの氷河の質量収支変動図．
氷河の番号は図 1 の番号と一致する．パミールアライ：1；北天山：2～7；東天山：8．Petrov and Schetinnikov (1974)，IAHS (ICSI)-UNESCO (1973-1998) および Dyurgerov (2002) より作成．

Fig. 6 The cumulative mass balance curve of nine glaciers in the Pamir-Alai, North Tien Shan, and East Tien Shan.
The glacier numbers coincide with the location numbers in Fig. 1. Pamir-Alai : 1; North Tien Shan : 2-7; East Tien Shan : 8. Data source : Petrov and Schetinnikov (1974), IAHS (ICSI)-UNESCO (1973-1998) and Dyurgerov (2002).

V. ま と め

パミールアライにおける 20 世紀の氷河前進は，1900 年代初頭と 1960～1975 年に生じた。小さい面積の氷河は気候変化に対する応答時間の遅れが小さく，観測された氷河はほぼ同様の変動傾向を示した。1960～1975 年には，氷河の末端変動はパミールアライと西天山で前進～停滞，北天山で後退，1975 年以降にすべての地域の氷河は後退した。1950 年以降に観測されたパミールアライ，北天山，東天山の氷河の質量収支変動は 1960～1970 年代にはほぼ均衡の状態を示し，1975 年以降に急速に負の傾向を示した。氷河末端変動と質量収支変動の傾向は，パミールアライと西天山と

では一致し，北天山では異なっている。これは，年降水量の違いや降水の季節の違いをもたらし降水特性の違いによって氷河の応答に違いが生じたためと考えられる。しかしながら，中央アジアの氷河は，すべての地域で 1970 年代以降急速に後退している。

謝 辞

本論文の執筆にあたり，東京都立大学地理学教室の岩田修二教授，福澤仁之教授，松山 洋助教授，塚本すみ子助手には適切なご助言をいただいた。北海道大学低温科学研究所の G. Glazirin 教授には資料提供などの面で多大な便宜を図っていただき，白岩孝行助手には有益な情報を寄せていただいた。ロシア科学アカデミーの

O. Solomina 博士には多くの文献をいただき、適切な助言をいただいた。タシケント在住の V. Korotkov 家には 1995 年以來の滞在中いつもお世話になり、様々な面でご協力いただいた。キルギスの遊牧民には野外調査でお世話になった。記して感謝申し上げます。また本研究の実施の一部には、日本雪氷学会の井上フィールド基金を使用した。

文 献

- 上田 豊 (1995) 内陸アジアにおける近年の氷河変動・雪氷, **57**, 35-40.
- Aizen, V.B., Aizen, E.M. and Melack, J.M. (1995) Climate, snow cover, glaciers, and runoff in the Tien Shan, central Asia. *Water Res. Bull.*, **31**, 1113-1129.
- Aizen, V.B., Aizen, E.M., Melack, J.M. and Dozier, J. (1997) Climatic and hydrologic changes in the Tien Shan, central Asia. *J. Climate*, **10**, 1393-1404.
- Aizen, E.M., Aizen, V.B., Melack, J.M., Nakamura, T. and Ohta, T. (2001) Precipitation and atmospheric circulation patterns at mid-latitudes of Asia. *Int. J. Climatololgy*, **21**, 535-556.
- Burtman, V.S. and Molnar, P. (1993) *Geological and Geophysical Evidence for Deep Subduction of Continental Crust Beneath the Pamir*: The Geological Society of America.
- Dyrgerov, M. (2002) *Glacier Mass Balance and Regime: Data of Measurements and Analysis*. Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado.
- Dyrgerov, M.B., Mikhaleenko, V.N., Kunakhovitch, M.G. and Ushnurtsev, S.N. (1994) On the cause of glacier mass balance variations in the Tien Shan mountains. *GeoJournal*, **33**, 311-317.
- Dyrgerov, M.B., Uvarov, V.N. and Kostjashkina, T.E. (1996) Mass balance and runoff of Tuyuksu Glacier and the northern slope of the Zailiyskiy Alatau Range, Tien Shan. *Z. Gletscherk. Glazialgeol.*, **32**, 41-54.
- 福嶋義宏 (1995) 中央アジアと気候変動・福嶋義宏監修, 水文・水資源学会編集出版委員会編: 地球水環境と国際紛争の光と影. 信山社, 123-129.
- 藤井理行・安成哲三 (1983) ヒマラヤの気候と氷河. 東京堂出版.
- Glazirin, G. and Escher-Vetter, H. (1998) The existence of glaciers in Bavaria, demonstrating climatic limitations of mountain glaciation. *Z. Gletscherk. Glazialgeol.*, **34**, 47-56.
- Glazirin, G., Kanyanski, G. and Pertsiger, F. (1993) *Regime of Abramov Glacier*. Gidrometeoizdat. (in Russian)
- Grove, J.M. and Gellatly, A.F. (1995) Little Ice Age glacier fluctuations in the Pyrenees. *Z. Gletscherk. Glazialgeol.*, **31**, 119-206.
- IAHS (ICS) - UNESCO (1973-1998) *Fluctuations of Glaciers 1965-1970*. UNESCO. など, 5 年ごとに刊行されている.
- Kuhn, M., Markl, G., Kaser, G., Nickus, U., Obleitner, F. and Schneider, H. (1985) Fluctuations of climate and mass balance: Different responses of two adjacent glaciers. *Z. Gletscherk. Glazialgeol.*, **21**, 409-416.
- Liu, C. and Han, T. (1992) Relation between recent glacier variations and climate in the Tien Shan mountains, central Asia. *Ann. Glaciol.*, **16**, 11-16.
- 松山 洋・カダル・森永由紀・篠田雅人 (1997) 環境水文学・水文地質学に関する第 3 回米国・独立国家共同会議に出席して. 天気, **44**, 29-33.
- McGregor, G., Gellatly, A.F., Bücher, A. and Grove, J.M. (1995) Climate and glacier response in the Pyrenees, 1878-1994. *Z. Gletscherk. Glazialgeol.*, **31**, 207-214.
- Mikhaleenko, V. and Solomina, O. (1996) Long-term variations of mountain glaciers in the former USSR (FUS). *Z. Gletscherk. Glazialgeol.*, **32**, 159-166.
- Nakawo, M. (2001) Water in arid terrain research. *Abstracts of Symposium Water in Arid Terrain Research (WATER)*, 15-16 March 2000, Nagoya, Japan. Institute for Hydrospheric-Atmospheric Sciences, Nagoya University.
- Narama, C. (2001) Glacier variations in the Pamir-Alai and West Tien Shan Mountains, central Asia over the last ninety years. *Geogr. Repts. Tokyo Metropol. Univ.*, **36**, 37-48.
- Narama, C. (2002) Late Holocene variation of the Raigorodskogo Glacier and climate change in the Pamir-Alai, central Asia. *Catena*, **48**, 21-37.
- Petrov, N.B. and Schetinnikov, A.S. (1974) *Inventory of Glaciers of the USSR 14-1-10*. Gidrometeoizdat. (in Russian)
- Popovnin, V. (1996) Modern evolution of the Djankuat Glacier in the Caucasus. *Z. Gletscherk. Glazialgeol.*, **32**, 15-23.
- Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A. and Vetterling, W.T. (1989) *Numerical Recipes, the Arts of Scientific Computing Fortran Version*. Cambridge University Press.
- Pritokov, B. and Ujeriya, T. (1969) *Inventory of Glaciers of the USSR 14-2-4*. Gidrometeoizdat. (in Russian)
- Ren, B. (1988) Recent fluctuation of glaciers in China. In Shi, Y. ed.: *An Introduction of Glaciers in China*. Science Press, 171-186. (in Chinese)
- Shi, Y. and Ren, J. (1990) Glacier recession and lake shrinkage indicating a climatic warming and drying trend in central Asia. *Ann. Glaciol.*, **14**, 261-265.
- Thompson, L.G., Thompson, E.M., Davis, M.E., Lin, P.N., Dai, J. and Bolzan, J.F. (1995) A 1000 year climate ice-core record from the Guliya ice cap,

- China: Its relationship to global climate variability. *Ann. Glaciol.*, **21**, 175-181.
- Wang, S., Gong, D. and Zhu, J. (2001) Twentieth-century climatic warming in China in the context of the Holocene. *The Holocene*, **11**, 313-321.
- Wang, Z. (1989) Recent variations of glaciers and the influence of climate and glacier fluctuations on runoff in China. *Proceedings of the Baltimore Symposium, IAHS Publication*, **183**, 45-52.
- 山田知充・白岩孝行 (1995) ヒマラヤ・カラコルム地域における近年の氷河変動・雪氷, **57**, 257-267.
- Yao, T. and Thompson, L.G. (1992) Trends and features of climatic changes in the past 5000 years recorded by the Dunde ice core. *Ann. Glaciol.*, **16**, 21-24.
- Yao, T., Shi, Y. and Thompson, L.G. (1997) High resolution record of paleoclimate since the Little Ice Age from the Tibetan ice cores. *Quat. Int.*, **37**, 19-23.
- Yatagai, A. and Yasunari, T. (1995) Interannual variations of summer precipitation in the arid/semi-arid regions in China and Mongolia: Their regionality and relation to the Asian summer monsoon. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **73**, 909-923.
- (2002年4月25日受付, 2002年6月17日受理)