最近の氷河学

—わが国の研究を中心にして—

樋口 敬 二*

Recent Studies on Glaciers by Japanese Glaciologists

Keiji HIGUCHI

I. ま え が き

まず、最初にひとこと注釈を加えておいた方がよいと思われるのは、氷河学という言葉である。氷河 (Glacier) と似ているために、Glaciology が氷河学を意味すると考えている人もあるが、Glaciology は、ラテン語の Glacies (氷) を語源としおり、ひろく雪と氷を研究する雪氷学を意味している。

氷河学に対応する言葉は、英語にはなく、ドイツ語の Gletscherkunde がこれに当る。

さて、そのような雪氷学、氷河学の歴史はずいぶん古いが、これらが地球科学の一環としてめざましい発展をとげたのは、ここ20年ばかりのことであり、その発展には次のような要因が働いていたと考えられる。

第一は、国際地球観測年 (IGY) 以来、とみに活発になった国際観測事業の推進である。氷河についていえば、1965年にはじまった国際水文学十年計画 (IHD)，およびそれにつづいて現在も実施されている国際水文学計画 (IHP) が、観測、研究に大きな貢献をした。

第二は、人工衛星の利用である。広域にわたる雪氷の分布や、高山における氷河の存在は、人工衛星の映像によって、その全体像がはじめて把握されるようになった。

第三は、コンピュータの使用によって、氷河の流動、形態に関する数値シミュレーションが可能となり、大気・海洋・陸水系、なかでも、気候変動や環境変化にかかわる大気・海洋・雪氷圏 (Cryosphere) 系に関する数値モデルに雪氷が組みこまれるようになった。

第四は、グリーンランド、南極に存在する大陸氷床の深層掘削によって得られる氷試料の分析によって、古気候、古環境の復元が可能となり、気候変動の研究に貢献するところが大きくなった。

このような要因によって、雪氷学、なかでも氷河学は、地球科学、特に大気・海洋・陸水系の科学において重要な部分をしめるようになった。また、一方、地球以外の天体における雪氷体の状態が宇宙探査機によって観測され、宇宙雪氷学という視点が生れたのに対応して、地球上における雪氷についても地球雪氷学という視点が成立し、両者が相互に影響を与え合いながら発展してゆくことが期待されている (樋口 1980: 前野 1980, 1981)。

以上のような展開をみせている氷河学の最近の動向を、わが国の研究者によっておこなわれた調査、観測、研究の成果を中心にして述べてみたい。

II. 氷河の分布

氷河の観測は、スイスなどでは前世紀から実施されてきたが、地球全域にわたる氷河の分布が観測され

* 名古屋大学水圏科学研究所 Water Research Institute, Nagoya University, Nagoya.

ようになったのは、1965年からはじまった国際水文学十年計画（IHD）以来のことである。この計画の一環として、国際測地学地球物理学連合（IUGG）の国際水文学協会（IAHS）の国際雪氷専門委員会（ICSI）がつくったガイドブック（IHAS 1970）にしたがって、各国が共通の分類、方法で氷河を記載する「氷河台帳」（Glacier Inventory）を作成し、これらを集積して世界氷河台帳をつくるという計画が提唱された。その結果、1979年には18ヶ国において、32地域について氷河台帳が作成されたが（IAHS 1979）、これを世界全体としてまとめるには至っていない。

日本では、文部省海外学術調査「ネパール・ヒマラヤ氷河学術調査」の一環として、エベレスト周辺のドウド・コシ（Dudh Kosi）地域の氷河台帳を作成した（HIGUCHI *et al.* 1978, 1979）。これは、調査の

第1図 東ネパールのエベレスト周辺のドウド・コシ地域の氷河台帳の一部
 （点が打っているのは、消耗域が岩屑でおおわれている氷河である。原図は英語であるが、日本語に書き換えてある。HIGUCHI *et al.* 1978）

一環として撮影した同地域の氷河の航空写真と地上観測の結果を、Schneider の 5 万分 1 地図「Khumbu Himal」(1965)、「Shorong Himal」(1974) と対比して、氷河の位置、方向、長さ、面積、上端高度、末端高度、傾斜、分類、記載事項などをまとめ、Royal Geographic Society の 10 万分 1 地図「Mount Everest Region」に記入して作成したものである。第 1 図は、その一部である。

この氷河台帳は、航空写真撮影を実施した 1974~76 年の氷河の状態を記録したものであるが、その前に 1955~63 年に撮影された航空写真にもとづいて作った MÜLLER による同地域の氷河台帳 (I A H S 1970) と比較すると、岩屑 (debris) におおわれていない氷河では、大部分が縮少している。

一方、氷河ではないが、それに近い多年性雪氷体である日本の北アルプスの雪溪についても、I H D の一環として、航空写真の撮影をおこない、それと地図にもとづく雪溪台帳が作成されている (HIGUCHI *et al.* 1980)。ただし、多年性雪溪の場合、年による変動がはげしいので、年ごとに台帳をつくる必要がある。

ところで、近年、人工衛星、なかでもアメリカの Landsat によって地表の鮮明な映像が得られるようになって、地形図がない地域の氷河についても詳細な情報が得られるようになった。そこで、アメリカの地質調査所 (U S G S) の水資源部の提唱によって、Landsat の映像にもとづく『氷河の人工衛星映像地図』の作成が 1978 年からはじめられた。

対象は、南極を含む世界全地域にわたり、ソ連、中国を含む 20 ケ国の研究者が協力して、U S G S の提供する映像を解析して、世界の氷河地図を作成した。その成果は、U S G S の出版物として近く刊行される予定であり、日本は、このうちネパール・ヒマラヤとカラコラムを担当した (HIGUCHI, WATANABE *et al.* 未発表)。

III. 氷河の変動

さきに述べたように、同じ地域について異なった期間に作られた氷河台帳を比較することによって、氷河末端の前進、後退の広域にわたる傾向を知ることができるが、氷河台帳の作成は、手間がかかるため、数年間隔になってしまい、年による変動を把握することがむづかしい。

そこで、I H D 計画では、氷河台帳の作成に平行して、氷河変動の観測を事業の一つとして推進し、やはり国際雪氷専門委員会がガイドブックを作成して、観測方法の統一をはかった。

もっとも、氷河変動の観測は、それ以前から国際学術連合 (I C S U) の永続観測 (Permanent Service on the Fluctuation of Glaciers) として、断続的に実施され、報告書も刊行されてきたので、これに I H D、I H P の一環としての意味を持たせて、両者の共同事業として進められている。日本からも、国内の多年性雪溪、ネパール・ヒマラヤの氷河の変動について報告をおこなっている。

たとえば、さきに紹介した氷河台帳を作成した東ネパールのドウド・コシ地域において 14 の小さな氷河の末端位置を観測した結果、1970~78 年の期間では、縮少している氷河が 8 で半分以上であり、あとは定常状態にあるもの 3、拡大しているもの 3 で、氷河台帳の比較によってわかったのと同じように、後退が主な傾向であった (FUSHIMI *et al.* 1981)。

IV. 氷河の質量収支と熱収支

前節で述べたように、気候条件の変動に応答して氷河は拡大、縮少の変動をしているが、これにしたがって氷河末端位置が低くなったり、高くなったりする。これを氷河末端の前進 (advance)、後退 (retreat) というが、これは末端位置の変化をさすものであり、氷河の流動をさすものではない。いうまでもないことだが、氷河の流動は、高所から低所へ、すなわち前進、または停止で、後退はない。

このように氷河末端の変動が起るのは、氷河の質量の増加 (涵養—accumulation) と減少 (消耗—ablation) との間の収支 (balance) に依存している。涵養とは、降雪、なだれ、吹きだまりなどによって

起る質量の増加であり、消耗とは、融解、蒸発、破壊などによってもたらされる質量の減少である。

一年で集計した結果、涵養が消耗を上廻る区域を涵養域といい、主として氷河の上流部がこれにあたる。逆に、消耗が涵養を上廻る区域を消耗域といい、主として氷河の下流部がこれにあたる。

だから、氷河とは、涵養域で蓄積された雪氷が流動によって消耗域へ運ばれ、失われてゆく過程といつてよい。したがって、氷河全体にわたる涵養の総計が、消耗の総計を上廻る、すなわち質量収支 (mass balance) がプラスの年がつづく、涵養域から流動によって送りこまれる質量が、消耗域で失われてゆく質量を上廻るようになり、消耗域が拡大し末端の高度が低くなる。これが氷河末端の前進である。後退は、これと逆の過程で起される。

そこで、氷河変動の機構を理解するには、氷河の涵養、消耗、流動、質量収支、および消耗と関係の深い雪氷面上の熱収支などを支配する要因を知る必要がある。

まず、涵養であるが、その主な過程が何であるかは、地域によって異なる。多くの場合、降雪が主であるが、ヒマラヤの大きな氷河では急峻な岩壁で起る雪崩も涵養に貢献するし、日本の雪渓では、降雪より吹きだまりの寄与が大きい場合がある。

また、消耗についても、主な熱源が何であるかは、地域によって異なる。南極のように日射が主要である場合もあるが、多くは、日射と空気からの熱伝達とが主な熱源である。ただし、日本の雪渓やノルウェー南部の氷河のように、海岸に近い場合には、雪氷面に対する水蒸気の凝結に伴って放出される潜熱が、大きな寄与をすることもある。

そこで、氷河の質量収支、熱収支の地域特性を明らかにすることも、IHDおよびIHP計画の一つにとりあげられ、やはり国際雪氷専門委員会がガイドブックをつくり、各地域の氷河の特性を比較できるように、世界各地を結ぶつぎのような三つのチェーンに沿う氷河の観測を国際協力によって実施した。

南北チェーンは、南北アメリカ大陸を縦断して、北のアラスカから南の南極半島までを結ぶ線上にならぶ氷河である。東西チェーンの第一は、 35°N ～ 55°N の範囲にあって、天山、パミール、コーカサス、アルプス、ロッキーとつづく一連の山域にある氷河である。東西チェーンの第二は、ほぼ 65°N の線に沿って、ウラル北部、スカンジナビア、アイスランド、カナダ北部、アラスカといった北極圏の氷河である。

これらの観測の成果は、1979年に取りまとめがおこなわれたが、当初の目的を達成したとはいいいがたく、今後の継続観測がのぞまれる。しかし、IHP計画においては、組織的な観測は、おこなわれていない。

日本の研究者による氷河調査においても、質量収支、熱収支にかかわる観測は、南極、アラスカ、ヒマラヤ、カラコラム、パタゴニア、中国などの地域の氷河において実施されているが、それらについては、巻末にあげる調査報告、総合報告を参照していただきたい。

ただ、質量収支、熱収支の地域特性の例として、ネパール・ヒマラヤの氷河の場合をあげておく。

ヨーロッパ、北アメリカの氷河では、主要な涵養は降雪であるため、冬期に起り、主要な消耗は融解であるため、夏期に起る。したがって、このような氷河では、質量収支が二季節に依存している。

これに対して、ヒマラヤの氷河は、モンスーン地帯にあるため、夏期に涵養域では降雪、雪崩が起り、消耗域では融解が起っており、質量収支は、夏季の一季節に依存している。

このように、ヒマラヤの氷河の質量収支は、IHDのガイドブックの基本になっているヨーロッパ・アメリカの氷河の場合とは、たいへん異なっており、しかも、観測、研究がほとんどおこなわれていなかった。そこで、上田 (1983) は、これを夏季涵養型氷河とよび、ネパール・ヒマラヤ氷河学術調査の観測結果にもとづいて、その特性を明らかにし、国際的に高い評価を得ている。

一方、熱収支に関して、ネパール・ヒマラヤの氷河の特徴をあげると、エベレスト地域の長大な氷河では、第1図に示したように、消耗域が岩屑 (debris) によっておおわれ、それによって熱収支が支配されている。このような氷河は、ヒマラヤだけではなく、パミール、アンデス、ロッキーなどの地域にも存在

しているが、くわしい調査と解析はおこなわれていなかった。

そこで、渡辺らは、クンプ氷河において詳細な観測をおこない (WATANABE *et al.* 1980), 岩屑の分

1) granitic rocks, 2) schistose rocks, 3) supraglacial granitic debris, 4) supraglacial schistose debris, 5) debris-free part, 6) snow cover, 7) side- and end-moraines and 8) ponds and lakes.

第2図 東ネパールのエベレスト付近のクンプ氷河における氷河上岩屑と岩石型の分布 (FUSHIMI *et al.* 1980)

布、起源、熱収支への影響を明らかにした。第2図は、クンプ氷河における氷河上岩屑と周辺の岩石型の分布図である。

V. 氷河の流動と数値モデル

氷河の変動過程において流動がしめる役割りが大きいことはいうまでもないので、これまで多くの調査観測や理論解析がおこなわれている。

しかし、氷河の表面流速の観測は比易的容易で、観測例は多いが、氷河内部における流速分布、底面滑りとなると、観測例があまり多くない。そこで、これらの結果と理論的研究とにもとづいて、氷河の数値モデルをつくり、コンピューターの利用によって、数値シミュレーションをおこない、流動過程を理解しようとする研究が最近大いに進んでいる。しかし、わが国は、この方面の研究でやや立ちおくれているので、今後の推進がのぞまれる。

一般に氷河の流動速度は、ゆっくりしたもので、Budd らが世界各地の氷河における観測結果をまとめて、氷河の氷厚、表面傾斜、表面流速の関係を示したように（第3図）、表面流速は年間数10m から数100mでいどであり、ネパール・ヒマラヤの氷河における観測結果も、その程度である。

第3図 世界の氷河における氷厚、表面傾斜、表面流速の関係 (BUDD and ALLISON 1975) Z: 氷厚(m). ϕ : 単位幅あたりの年間流量, S_1 : 表面傾斜, α : 氷河の形によってきまる補正係数.

ところが、文部省海外学術調査「パタゴニア地域氷河学術調査」において、成瀬ら(1985)がサン・ラファエル氷河において測定したところによると、表面流速は上流部で13m/日、末端部で17.5m/日という大きな値が得られた。このように早い流動が起っている原因としては、融解量が大きいために氷河底面と基盤との間に水が豊富で潤滑的作用をしているためと考えられている。

また、南極の昭和基地に近い白瀬氷河でも、年間2500mという大きな表面流速が観測されており (NAKAWO *et al.* 1978; FUJII 1981), 南極氷床でももっとも早く流動している部分であろうといわれている。そして、それに関連して、白瀬氷河、およびその背後に広がるみずは高原氷床の不

安定性 (instability) が論じられている (MAE 1979; 成瀬 1980)。

このような氷河の不安定性に関連して、氷河現象の中でも注目されているのは、氷河サージとよばれる現象である。さきに述べたように、氷河の流速は、10m/日くらいになると異常に早い氷河とされるのだが、氷河サージは、100m/日というような流動が突如として起る、いわば、氷河の雪崩のような破壊的現象である。

氷河サージの発生については、アラスカで組織的調査がおこなわれ、数多くの氷河で過去に起ったことがわかっているが、現象そのものを観測した例はごく少なく、パミール高原のメドベズ氷河で Dolgoushin ら (1975) が観測した結果が貴重な記録となっている。この氷河は、12~14年の周期性をもってサージを起すため、現象の実態をとらえるように観測の準備をしておいたので、サージ前後の氷河の状態について詳細なデータが得られている。

そして、それらのデータにもとづいて、BUDD と JENSSEN (1975) は、数値モデルをつくり、氷河サージの周期的発生を説明した。

このような山岳氷河のサージは、付近の地域に災害を与えるが、その影響は局所的である。ところが、最

近話題になっているのは、南極氷床におけるサージの発生である。BUDD ら (1976) は、東南極氷域境界からミルヌーイ基地に至る断面について氷河サージが起った場合と起らない場合の二つについて数値シミュレーションをおこない、第4図のように現在の表面形態はサージが起った場合に近いことを示した。そこで、前たち (1979) は、白瀬氷河について上にあげたような異常に大きい流速から氷河サージ発生の可能性を論じている。

一方、西南極氷床については、基盤の大部分が海面下にあるため、海水面の影響による不安定性が論じられている。大気中の CO_2 の増加などによって気候が温暖化すると、海水温が上昇して、融解が進む結果、西南極氷床は分裂して、100年以内に消失し、そのために海水面は7 m 上昇をひきおこすという計算がある (THOMAS and BENTLEY 1978)。

このような海水面の上昇は、海岸線付近に密集している都市に大きな影響を与えるため、西南極氷床の不安性は、“雪氷学において最大の未解決課題”といわれている。

第4図 南極氷床の東南極氷域境界からミルヌーイ基地に至る氷床の表面形態に関する計算(実線)と実測(破線)との比較(上がサージのない定常状態の場合, 下がサージのある場合, BUDD and MC INNES 1976)

VI. おわりに

以上のほか、気候変動における南極氷床の役割、南極、グリーンランドの大陸氷床の深層掘削によって得られた氷試料の分析による古環境の復元などが、最近の水河学における重要な研究課題であるが、日本では南極関係の研究者によって進められているので、これについては、国立極地研究所『南極の科学 4 氷と雪』(1983)を参照していただきたい。

一方、最近の水河学の重要な研究課題として、氷河の水資源的利用がある。チベット高原の河川のように、乾燥地域の河川にあっては流量の半分以上が氷河からの融解水である場合も多いからである。そのために、調査研究が活発に進められており、特に国際雪氷専門委員会 (ICSII) では、「氷河流域の流出予測に関する作業委員会」を組織して、さきに紹介した IHD, IHP 計画において蓄積された氷河台帳、氷河変動、質量収支、熱収支などに関する観測結果を水資源の利用に生かす応用的研究をおこなっている。その成果については、最近、刊行されたので (IAHS Publication No. 149, 1985), 参照していただきたい。

このように、ヒマラヤ、チベット高原、天山山脈など、中央アジアの高地に存在する氷河は、気候の違いを反映して、その形態、質量収支、熱収支、気候変動に対する応答などの特性が多様であり、地球科学的に興味ある研究対象であるとともに、水資源として地域社会に密接な関係をもっている。そこで、日本の研究者も、ネパールのトリビューバン大学、灌漑水文気象局、中国の中国科学院氷河凍土研究所の研究

者と協力して、調査研究を進めている。特に、1985年からは、ヒマラヤ、チベット高原、天山山脈の氷河の地域特性を明らかにする文部省海外学術調査「アジア高山地域における比較氷河研究」が開始され、研究の一層の発展が期待されている。

引用文献

- 上田豊 (1983) : ネパール・ヒマラヤの夏季涵養型氷河における質量収支の特性 I, II. 雪氷, 45, 2, 81-105.
- BUDD, W. F. and I. F. ALLISON (1975) : An empirical scheme for estimating the dynamics of unmeasured glaciers. *IAHS Publ.*, No. 104, 246-256.
- BUDD, W. F. and D. JENSSEN (1975) : Numerical modelling of glacier systems. *IAHS Publ.*, No. 104, 257-291.
- BUDD, W. F. and B. J. MC INNES (1970) : A movie film illustrating the numerical modelling of periodically surging ice masses. *Meteorology Department, Univ. Melbourne, Publ.*, No. 21.
- DOLGOUSHIN, L. D. and G. B. OSIPOVA (1975) : Glacier swrges and the problem of their forecasting *IAHS Publ.* No. 104, 292-304.
- FUJII, Y. (1981) : Aerophotographic interpretation of surface features and an estimation of ice discharge at the outlet of the Shirase drainage basin, Antarctica, *Nankyoku Shiryo* (Antarct. Rec.), 72, 1-15.
- FUSHIMI, H. *et al.* (1980) : Distributions and grain sizes of supraglacial debris in the Khumbu glacier, Khumbu region, East Nepal. *Seppyo*, 41, Special issue, 18-25.
- FUSHIMI, H. *et al.* (1981) : Recent fluctuations of glaciers in the eastern part of Nepal Himalayas, *IAHS Publ.*, No. 131, 21-28.
- 樋口敬二 (1980) : 地球雪氷学. 地球, 2 (3), 175-179.
- HIGUCHI, K. *et al.* (1978) : Preliminary report on glacier inventory in the Dudh Kosi region. *Seppyo*, 40, Special Issue, 78-83.
- HIGUCHI, K. *et al.* (1979) : Glacier inventory in the Dudh Kosi region, East Nepal. *IAHS Publ.*, No. 126, 95-103.
- HIGUCHI, K. *et al.* (1980) : Inventory of perennial snow patches in Central Japan. *Geo Journal*, 4 (4), 303-311.
- MAE, S. (1979) : The recent variation of ice sheet, Mizuho Plateau, East Antarctica. *J. Glaciol.*, 24, 53-61.
- 前野紀一 (1980) : 宇宙雪氷学. 地球, 2 (3) 250-256.
- 前野紀一 (1981) : 氷の科学. 北海道大学図書刊行会, 187-213.
- NAKAWO, M. *et al.* (1978) : Discharge of ice across the Sôya Coast. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, 7, 235-244.
- 成瀬廉二 (1980) : 南極氷床の不安定性. 地球, 2 (3) 237-242.
- NARUSE, R. (1985) : Flow of Soler glacier and San Rafael glacier. *Glaciological Studies in Patagonia Northern Icefield*. Data Center for Glacier Research, Japanese Society of Snow and Ice, 64-69.
- THOMAS, R. H., and C. R. BENTLEY (1978) : A model for Holocene retreat of the west Antarctic Ice Sheet. *Quatern. Res.*, 10 (2), 150-170.
- WATANABE, O. *et al.* (1980) : Outline of studies on supraglacial debris of the Khumbu glacier, Khumbu region. *Seppyo*, 41, *Spec. Issue*, 5-8.

参考文献

前述の引用文献に加えて、総合報告、学術書などの主なものを順不同にあげておく。

- 1) "Glaciers and Climates of Nepal Himalayas —Report of the Glaciological Expedition of Nepal—", Part I (1976) ~Part IV (1980), 日本雪氷学会氷河情報センター.

- 2) 安成哲三・藤井理行著, (1983) : 『ヒマラヤの氷河と気候』, 東京堂出版.
- 3) "Glaciological Studies in Patagonia Northern Icefield, 1983-1984", (1985) 日本雪氷学会氷河情報センター.
- 4) 国立極地研究所 (1983) : 『南極の科学 4 氷と雪』.
- 5) 『雪氷の研究展望と文献目録 1969~1978』 (1982), 雪氷の研究 № 6, 日本雪氷学会の氷河. 雪溪の項.
- 6) IAHS Publication No. 126 (1980) : "World Glacier Inventory".
- 7) IAHS Publication No. 138 (1982) : "Hydrological Aspects of Alpine and High-Mountain Areas".
- 8) IAHS Publication No. 149 (1985) : "Techniques for Prediction of Runoff from Glacierized Areas".
- 9) RADOK, U. (1978) : "Climatic Roles of Ice", UNESCO, Paris.
- 10) MEIER, M. F. (1983) : Snow and Ice in a Changing Hydrological World, *Hydrological Sciences*, 28, 1, 3-22.