

## 総説

# アジア高山域における氷河質量収支の特徴と気候変化への応答

藤田 耕史<sup>1)</sup>

### 要 旨

古くから研究が行われている欧米の氷河は冬期の降水によってその質量を得て（涵養されて）いるのに対し、アジア高山域の氷河は夏期の降水によって涵養されている。このため、降水による涵養と融解による消耗が同時期に生じ、質量収支の様相が欧米の氷河と異なると考えられていたが、降水の集中する時期の違いが氷河の質量収支に与える具体的な影響についてはよくわかっていなかった。しかしながら1970年代以降のヒマラヤ・チベットにおける観測・解析・モデル研究によって、1. 融解期の降雪が日射に対する反射率（アルベド）を高く維持し氷河の融解を抑制していること、2. その一方で気温上昇に対しては、降水が雪として降らなくなることによるアルベドの低下によって、冬期に降水が集中する氷河よりもより多くの融解がおこること、が明らかにされてきた。本稿では、夏期に降水が集中する気候が氷河の質量収支に与える影響について、これまでの研究を概説する。

キーワード：夏期涵養、氷河、質量収支、アルベド、気候変化、ヒマラヤ、チベット

Key words: summer accumulation, glacier, mass balance, albedo, climate change, Himalayas, Tibet

## 1. はじめに

過去および将来の海水面レベルを評価する際、世界各地の氷河が気候変化に対してどのように応答し、その体積を増加、または減少させるかを知ることはきわめて重要である。南極・グリーンランド氷床を除く世界中の氷河は、地球上に固体として存在している水のわずか0.6%を占めているに過ぎないが（IPCC, 1996）、Meier (1984) によれば、過去100年の海水の増加分のほとんどがこれらの氷河の縮小によってもたらされている。Meier (1984) は世界各地の氷河の長期の縮小量を推定する際、100年近い長期データのある13地域の氷河について図1のような直線関係を求め、データのない地域の氷河の長期の縮小傾向を推定した。図中の「年間質量収支振幅（訳は上田 (1997) による）」は、1年を通して雪や氷として氷河に供給される質量（涵養量）と融解によって氷河から失われる質量（消耗量）の平均で、概ねその地域の降水量に相当する。また、「長期質量

収支（図では負の値）」は氷河の厚さが1年あたりどれだけ薄くなっているかを示している（正の場合は厚くなる）。つまり、図1は降水量が多い地域ほど、氷河が縮小傾向にあることを意味している。ところで、Meier (1984) が論拠にしてい

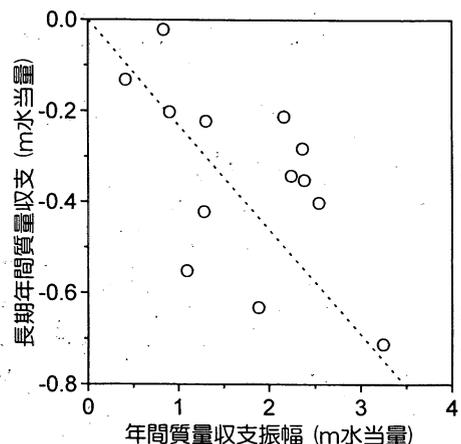


図1 Meier (1984) が示した長期（100年間）の質量収支データがある13地域についての年間質量収支振幅と長期質量収支との関係とその近似直線。

1) 名古屋大学大気水圏科学研究所  
〒464-8601 名古屋市千種区不老町

る長期データのある欧米の氷河の質量は、通常冬期の降雪によって増加し（涵養され）、夏期の融解によって減少（消耗）する（冬期涵養という）。その一方で、アジア高山域の氷河の縮小が海水の増加へ寄与する割合は20%にも達すると評価されているが（United States Department of Energy, 1985）、この地域は夏期モンスーンの影響を受けるために降水が夏期に集中し、氷河は夏期涵養となり、そのため涵養と消耗が夏期の同時期におき、質量収支の様相が欧米の氷河と異なると予想されていた（比較氷河研究会, 1973）。その実態については1970年代以降、日本人研究者を中心とするヒマラヤ・チベットにおける氷河研究によって明らかにされてきた。本稿では、夏期涵養氷河の質量収支に関する研究をたどりつつ、その特徴と気候変化に対する応答について概説する。

## 2. ヒマラヤにおける研究

### —気温と降水の雨・雪—

欧米に見られる冬期涵養氷河では、冬期の降雪が氷河への涵養量のほとんどを占めており、「年涵養量＝冬期降雪量」と考えられている。他方、

夏期涵養氷河の場合、夏期の降水は気温が0°C付近で降ることが多いため、ちょっとした気温の違いで降水が雪として降ったり雨として降ったりする。降水が固体（雪・霰など）の場合は氷河質量を増やす涵養となるが、液体（雨）の場合は氷河質量の増加には寄与しない。Higuchi (1977) は、ヒドゥンバレーのリッカサンバ氷河（図2中のRS）で1974年7-8月に得られた観測データを解析し、降水の60%が夜間に雪として降ることを見いだした。仮に夜間の降水が全て日中に降った場合、涵養量が減少することで氷河末端の位置がその当時（1974年）よりも70m高いところまで後退すると予想した。数値には不確かさが残るものの、降水の雨・雪の形態と氷河の質量収支を初めて関係づけて議論した研究といえる。

前述のヒドゥンバレーにおける観測は、期間が短かったことと、観測内容が充分でなかったため、夏期涵養と氷河質量収支の関係をさらに明らかにするために、1978年5-9月にかけてショロン山域のAX010氷河（図2中のAX）で集中的な観測がおこなわれた（Ageta *et al.*, 1980）。涵養量を推定するためには、降水が固体（雪）として降る確

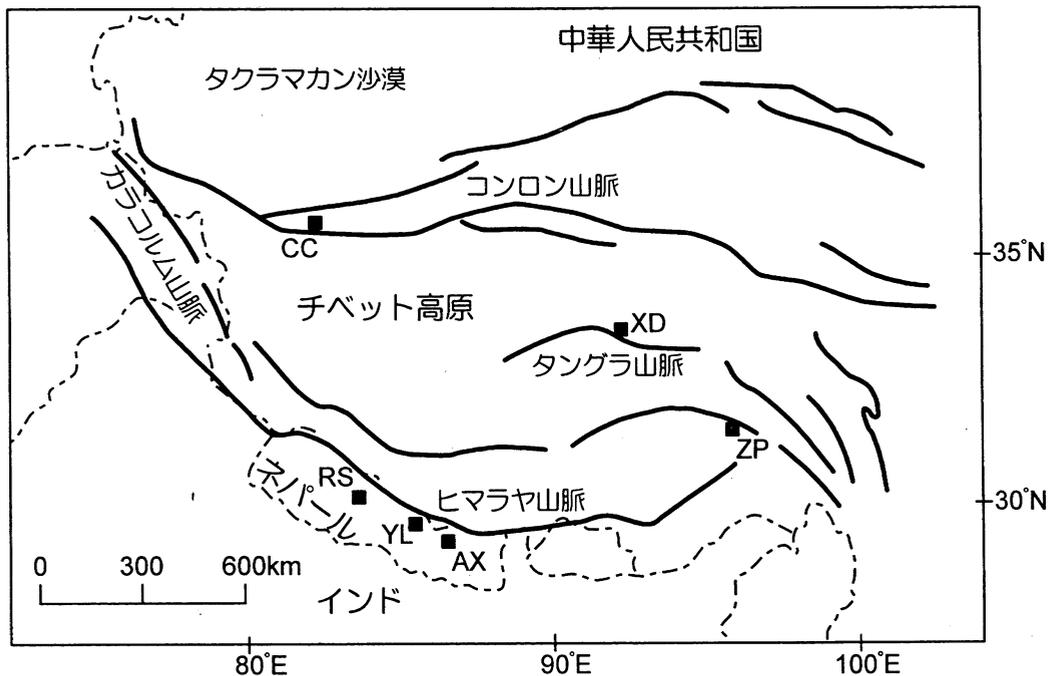


図2 チベット高原概略図。■は質量収支に関する研究が行われた氷河（AX010 (AX), ヤラ (YL), リッカサンバ (RS), ゼプ (ZP), 小ドンケマディ (XD), チョンス (CC)) の位置を示す。

率（固体降水確率という）を知り、気温の関数として示す必要がある。ヒドゥンバレーの観測では気温と固体降水確率の関係が分からなかったため、Higuchi (1977) は日本や旧ソ連でのデータを用いていたが、Ageta *et al.* (1980) はヒマラヤでの観測により気温—固体降水確率の関係式を初めて示した（図3）。これにより気温と降水量から「降雪量＝涵養量」を推定することが可能になった。図3には後述するチベット高原（図2中のXD）での観測結果（Ueno *et al.*, 1994）もあわせて示したが、一般に気温—固体降水確率の関係は降水をもたらす対流活動の活発さによって異なるため、地域ごとに観測をする必要がある。

Ageta *et al.* (1980) は気温—固体降水確率の他に、気温と融解量（＝消耗量）についても観測からその関係を明らかにした（図4）。雪や氷は表面での熱のやりとり（熱収支）の結果として融解するが、熱収支の要素を全て測定するのは難しいため、気温のみを測定し、融解量は気温の1次関数として表すことがある（ディグリー・デー法といわれる）。しかし、AX010氷河における関係式は気温の約3乗に比例し、気温が高くなると飛躍的に融解量が増える（図4）。これは、「気温の高い時は、日射に対する表面の反射率（アルベド）の低い氷が表面に出ることが多く、より多くの日

射を吸収することで更に融解量が増加する」というプロセスを反映している。

氷河上の質量の出入り（質量収支）は、収入としての涵養量（正の値）と消耗量（＝融解量，負の値）の和として標高別に求められる。したがって、これらに標高別の面積をかけて積算することで、氷河全体の涵養量・消耗量・質量収支を得る。この質量収支がゼロであれば氷河はその規模を維持し、正/負の傾向が続けば拡大/縮小していく。上田(1983)はこの気温—質量収支モデルを用い、1978年夏の状態から気温が変化した場合の涵養量・消耗量・質量収支の変化を氷河単位面積あたりの値で示した（図5）。このようなモデルは短期の質量収支の変化を知るのに適しているが、アルベドと降水の関係などに不十分な面が残されている。例えば気温は変わらずに降水量が減った場合、アルベドの高い降雪も減るために、アルベドの低下とそれに伴う融解量の増加が予想されるが、このモデルでは気温が変わらなければ融解量も変わらないため、降水量変化に対する質量収支の応答は議論できない。このような条件を議論するためには、熱収支をきちんと考慮した質量収支モデル（熱収支—質量収支モデル）が必要となってくる。

AX010氷河では同時期に様々な観測がおこな

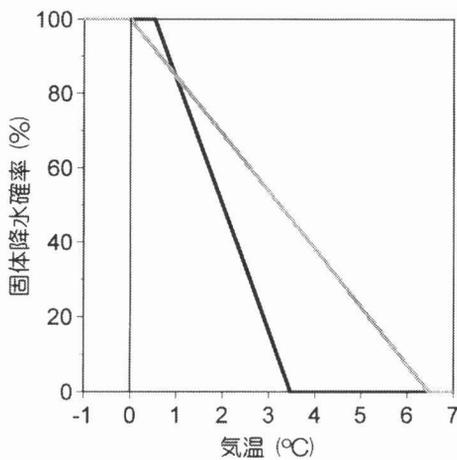


図3 ショロン山域 AX010 氷河（黒実線，Ageta *et al.*, 1980）とタングラ山脈小ドンケマディ氷河（灰色実線，Ueno *et al.*, 1994）における気温と個体降水確率の関係。

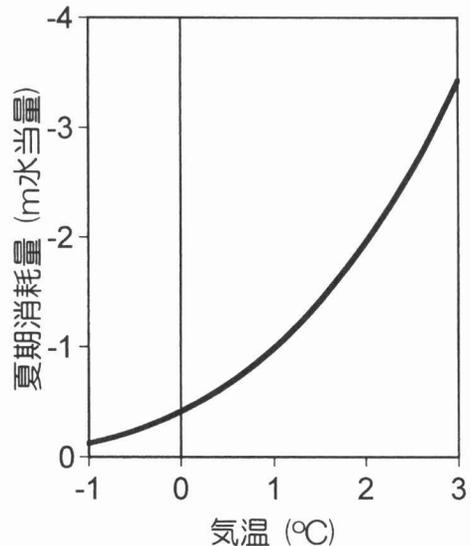


図4 ショロン山域 AX010 氷河における夏期平均気温と融解量の関係（上田，1983）。

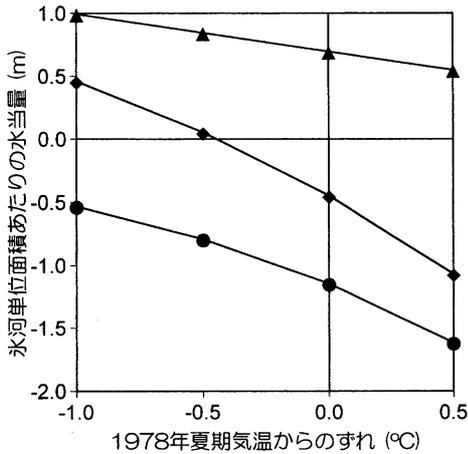


図5 ショロン山域 AX010 氷河の夏期における涵養 (▲)・収支 (◆)・消耗 (●) の氷河単位面積あたりの値と夏期平均気温との関係 (上田, 1983).

われ, この中で Ohata *et al.* (1980) は融解期間中の降雪がたとえ 3 cm 程度の僅かな厚さでも, アルベドが高く維持されることを明らかにした. このアルベドに関する解析と質量収支を関連付ける研究は長らくなかったが, 近年になって Kayastha *et al.* (1999) は, AX010 氷河での 1978 年の限られた観測データを元に熱収支—質量収支モデルを開発した. このモデルでは, 新雪・越年雪 (フィルム)・氷に対しそれぞれのアルベドを決め, 表面が薄く新雪に覆われたときのアルベドや, 周囲の地形による日射の遮蔽効果を考慮している. Kayastha *et al.* (1999) はこのモデルを用い, アルベドや日射の変化に対して融解が敏感に応答することを指摘している. また, 降雪の有無に伴うアルベドの変化が推定できるために, 降水量の変化に対する質量収支の応答についても議論している.

### 3. チベット高原における研究 —アルベドの効果—

ヒマラヤに比べて少降水環境であるチベット高原の氷河については 1980 年代後半になってようやく数例の観測がおこなわれたものの (Ageta *et al.*, 1989; 1991; 1994), その質量収支の特徴や気候変化に対する応答 (気候感度という) を取り扱った研究はほとんどなかった. 唯一の例は Ageta and Kadota (1992) によるもので, 彼らは AX010

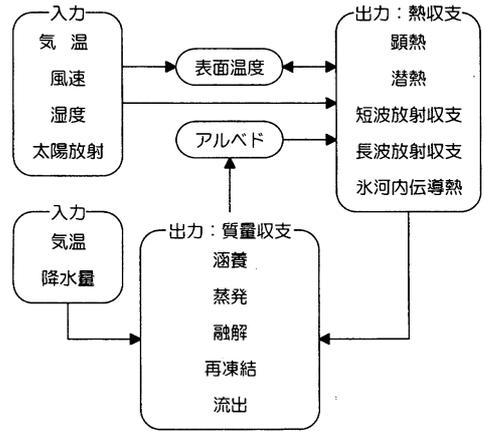


図6 Fujita and Ageta (2000) の質量収支モデルの概念図.

氷河に加えチベット高原の 2 つの氷河 (図 2 中, 西コンロン山脈・チョンス氷河 (CC) とニンチエンタングラ山脈・ゼブ氷河 (ZP)) について, AX010 氷河と同じ気温—質量収支モデルを用い, 降水が多い地域の氷河ほど気温の変化に対して質量収支が敏感に応答することを示している.

こういった状況の中, Fujita and Ageta (2000) は, チベット高原中央部・タングラ山脈の小ドンケマディ氷河 (図 2 中の XD) での観測データに基づいた熱収支—質量収支モデルを構築し, 高原上における氷河質量収支の特徴と気候感度について数値実験をおこなった. このモデルは氷河の表面における熱収支と質量収支の部分から成るが (図 6), 特筆すべき点はアルベドの値を入力データとせず, 表層の雪・氷の密度から求めたことである. アルベドが表面状態の変化に応じて変わること, 気温以外の気象要素の変化に対する氷河質量収支の応答についても議論できるようになった.

Fujita and Ageta (2000) はモデルを検証した後, 夏期涵養氷河の質量収支の特徴を明らかにするための数値実験をおこなった. 1992 年 10 月から 1993 年 9 月にかけて小ドンケマディ氷河で観測された降水量 (図 7 の黒棒) は夏期に集中しており, この氷河が夏期涵養氷河であることを示している. これに対し冬期に降水が集中する気候を仮想的に設定し (図 7 の灰色棒), 冬期涵養氷河の熱収支・質量収支を計算した. 降水が集中する時期以外は, 年間降水量・日射・気温・風速・湿

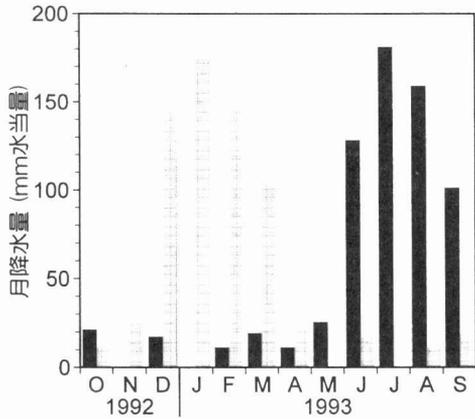


図7 1992年10月から1993年9月にかけての小ドンケマディ氷河における月別降水量と(黒棒)と対比のために仮想的に設定した冬期涵養気候の月別降水量(灰色棒)。

度などの入力データは同じである。夏期/冬期涵養氷河の質量収支の高度分布を求めたところ、降水の集中する時期の違いだけで質量収支の高度分布が大きく異なることが明らかになった(図8)。夏期涵養氷河(◆, 実際の小ドンケマディ氷河での観測値を+で示す。)では収支がゼロとなる平衡線高度が5550 mであったのに対し、同じ降水量が冬期に集中して降った場合(●), 平衡線高度は約200 mも高い5730 mとなる。収支が負となる消耗域の面積を比較すると、夏期涵養氷河では27%であるのに対し、冬期涵養氷河では85%と氷河の大部分で質量(氷体)が減ることになる。1992~1993年の小ドンケマディ氷河の高度別の面積分布と夏期/冬期涵養氷河の質量収支の高度分布から氷河全体の質量収支を計算すると、夏期涵養氷河では正(氷河単位面積あたりの値で+200 mm水当量)となり、氷河の規模は拡大していくのに対し、冬期涵養氷河では負(同-260 mm水当量)となるために、氷河の規模は縮小していくことになる。降水の集中する時期以外の気象条件は同じに関わらず、なぜこうも違った質量収支となるのかを詳細に検討するために、同じ標高(5600 m地点)における表面レベルとアルベドの季節変化を比較した(図9)。冬期涵養氷河(灰色実線)では降水のほとんどが寒冷な冬期に降るために、冬期の表面は大きく上昇する。ところが融解期になると表面は融解によって一方的に低下し続ける。一方、夏期涵養氷河

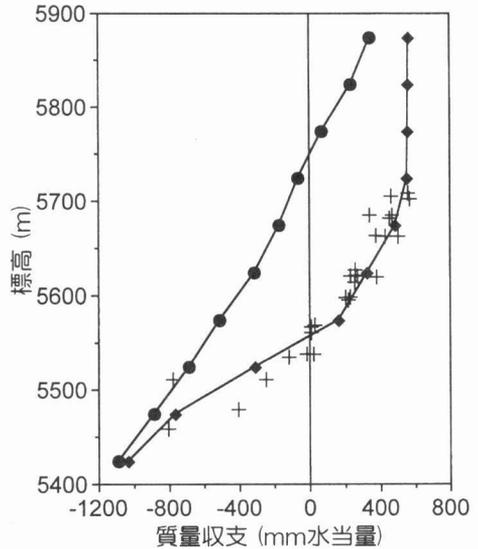


図8 小ドンケマディ氷河における観測(+ )と数値実験による夏期涵養氷河(◆)と冬期涵養氷河(●)の1992年10月から1993年9月にかけての年間質量収支の高度分布。

(黒実線, 小ドンケマディ氷河での観測値を+で示す。)の融解期ではたびたび降雪による表面レベルの上昇がみられ、融解が少ないことがわかる。融解期のアルベド変化(凡例は表面レベルに同じ)を見ると、冬期涵養氷河では6-7月にかけて表面レベルと共にアルベドが低下する一方であるのに対し、夏期涵養氷河では融解期を通じたたびたびもたらされる降雪によって高い値に維持されていることがわかる。これらのことから、夏期涵養による融解期中の降雪が表面アルベドを高い値に維持し、このため融解が抑制されていることがわかる。以上の結果から、チベット高原では夏期涵養であるがゆえに、現在の標高に氷河が存在していることが明らかにされた。このことは、同じ降水量が冬期に集中して降る場合、より寒冷な気候ないしはより高標高にしか氷河は存在できないことを意味している。

#### 4. 世界の氷河との比較

##### —夏期涵養氷河の脆さ—

ヒマラヤ山脈・チベット高原における氷河変動の実態は、1990年代に入ってようやく把握されるようになってきたが(ヒマラヤにおける氷河変動の概要は内藤(2001)にまとめられている),

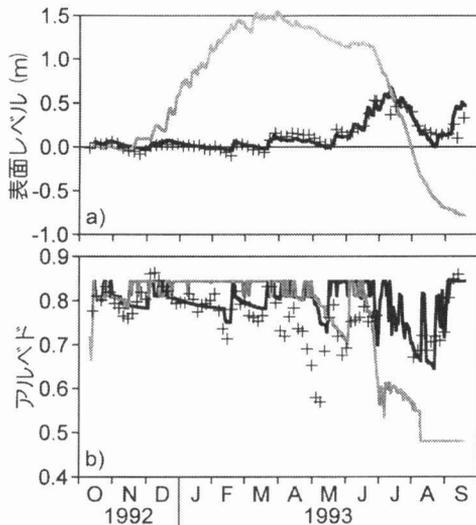


図9 数値実験による夏期涵養氷河（黒実線）と冬期涵養氷河（灰色実線）の同標高（5600 m）における1992年10月から1993年9月にかけての表面レベル（a）とアルベド（b）の変化。両図とも+は小ドンケマディ氷河における観測値を示す。

その多くは末端位置の変化を測ったにすぎず、氷河全体の質量変化を推定できるような観測はなかった。そんな中、Fujita *et al.* (1997) はヒドゥンバレーのリッカサンバ氷河について、1974年から1994年にかけての氷河全体の縮小量を推定し、1970年代から1990年代にかけての世界の他地域における氷河の縮小と比較した（図10）。図からは1970年代以降の全世界的な氷河の縮小傾向（図10の実線）が、Meier (1984) が対象とした1880年代からの100年間に比べ（図10及び図1の破線）、より強まっている様子が見て取れる。さらにFujita *et al.* (1997) はヒマラヤにおける氷河縮小が（リッカサンバ氷河、AX010氷河、ヤラ氷河（図2中のYL））、世界の他地域における氷河縮小に比べより進んでいることを指摘した。この結果からは、ヒマラヤ地域における温暖化が他地域より進んでいるといった見方もできるが、筆者は夏期涵養氷河の質量収支が冬期涵養氷河よりも気温上昇に対して敏感に応答するためと考察している。

上記のヒマラヤにおける氷河変動の原因を検討するため、Fujita and Ageta (2000) はヒマラヤと同様、夏期涵養の影響下にあるチベット高原の

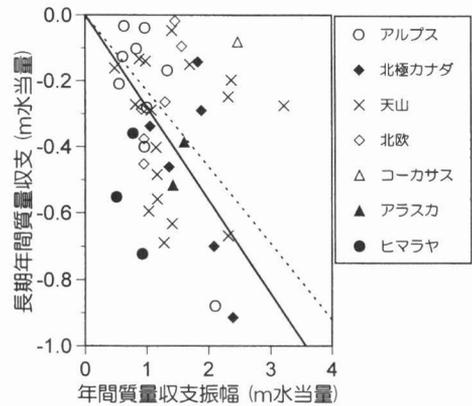


図10 1970年代を含む20年程度の期間における、質量交換量と長期質量収支との関係（Fujita *et al.*, 1997を加筆・改訂）。直線はそれぞれFujita *et al.* (1997)（実線）とMeier (1984)（破線、図1）による近似直線。

氷河における質量収支の気候感度について、世界の他地域の氷河との比較を試みた。Oerlemans and Fortuin (1992) は熱収支—質量収支モデルを用い、世界の12の氷河について気温・降水量の変化に対する氷河質量収支の感度を求め、比較検討をおこなっている。そこで、Fujita and Ageta (2000) は前節で示した夏期涵養氷河（現実の小ドンケマディ氷河）と冬期涵養氷河（仮想実験）について、Oerlemans and Fortuin (1992) と同様の条件（1°Cの気温上昇）で数値実験をおこなった（図11）。図中、冬期涵養氷河の気温上昇に対する気候感度はOerlemans and Fortuin (1992) が示した他地域の氷河の気候感度に対する近似曲線に一致しているが、夏期涵養氷河の気候感度は大きく下回っている。モデルのタイプが異なるものの、上田 (1983) によって示されたAX010氷河の気候感度も同様で、より大きな消耗の傾向を示した。このことは、夏期涵養氷河が他地域の冬期涵養氷河に比べ、同じだけの気温の上昇に対してより多くの質量を失ってしまうことを意味している。夏期涵養・冬期涵養のいずれの場合も、気温上昇は融解量（＝消耗量）の増加をもたらすが、夏期涵養氷河ではアルベドを高く維持していた降雪が気温上昇によって降雨になることでアルベドを高めることができなくなってしまうため、冬期涵養氷河の場合よりも急激に融解量が増加する。アジア高山域は氷河がある地域とし

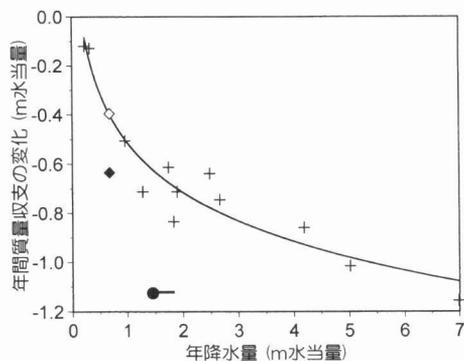


図 11 Oerlemans and Fortuin (1992) による世界の 12 の氷河 (+), Fujita and Ageta (2000) による夏期涵養氷河 (◆) と冬期涵養氷河 (◇), 上田 (1983) による AX010 氷河 (●) について、気温を 1°C 上昇させたときの質量収支の応答。実線は Oerlemans and Fortuin (1992) が示した 12 の氷河の気候感度に対しての対数近似曲線。AX010 氷河の横棒は年降水量の推定範囲を示す。

では、比較的低緯度に位置しているために日射が強く、融解に使われる熱に日射エネルギーが大きい割合を占めている。このため融解量の増加にとっては、気温上昇の影響よりもアルベド低下による影響の方が遙かに大きく、降雪のあるなしでアルベドが変化しやすい夏期涵養氷河の方が気温変化に対して敏感に反応する。

Meier (1984) によれば、アジア高山域に分布する氷河面積は南極・グリーンランド両氷床をのぞいた氷河全面積の約 14% を占めている。その大部分は夏期モンスーンの影響を受けており、年降水量のほとんどが夏期にもたらされる。このため、これまでの氷河の気候感度に関する知見や、それらを元にした氷河縮小による海水準上昇への寄与を見積もった研究では (Meier, 1984; Kuhn, 1993; Dyurgerov and Meier, 1997a; 1997b; Cogley and Adams, 1998), 夏期涵養氷河の気温変化に対する敏感さが認識されていなかったため、アジア高山域の氷河縮小による海水準上昇への寄与は過小に見積もられていた可能性がある。

### 5. おわりに

アジア高山域は比較的低緯度に位置しているために、強い日射が氷河の融解に大きく寄与している。一方で同地域は、夏期モンスーンの影響によ

って夏期の融解期に降水が集中し、しばしばもたらされる降雪によってアルベドが高く維持され、融解が押さえられている。その反面、僅かな気温上昇でも降雪の一部が降雨になり高いアルベドを維持できなくなるため、冬期涵養氷河に比べて融解が急激に増加する。このためアジア高山域の氷河は、夏期涵養であるが故に現在の規模で存在している一方で、夏期涵養であるが故に温暖化に対して脆いといえる。これらのことは、1970 年代の観測当初から定性的に指摘されていたが、1990 年代のモデルによる仮想的な冬期涵養氷河との比較研究から、降雪による高アルベド維持の効果がより明瞭に示されてきた。また、世界の他地域における氷河との比較も可能になり、夏期涵養が氷河質量収支に与えている影響を定量的に議論できるようになった。

アジア高山域全体の氷河縮小による海水増加への寄与率を正確に見積もることは重要な課題であるが、この地域における氷河の質量収支・長期変動・動力学に関する観測・研究は、欧米の氷河に比べると極めて少ない。現状把握のために必要な氷河台帳 (インベントリ) すら整備されていない。今後は広域での氷河規模の現状把握、過去からの氷河変動 (末端位置ではなく体積変化が重要) の算出が重要な課題である。将来予測の観点からは、全球気候モデル (GCM) などによるアジア高山域における気候変化の予測とその変化に対する氷河質量収支の応答を広域にわたって評価することが興味深い課題である。Oerlemans and Fortuin (1992), Kayastha *et al.* (1999), Fujita and Ageta (2000) などによる熱収支—質量収支モデルは、氷河の質量収支過程についてより現実に近い状態で再現でき、気候感度などの数値実験にも応用が利く反面、ヒマラヤ山脈・チベット高原ではモデルが必要とする入力データそのものがほとんどないために、モデルを利用できる氷河が極めて限られているのが現状である。上田 (1983) による気温—質量収支モデルのような少ない入力データで動くモデルについて、雨・雪の違いによるアルベドの変化を再現できるような改良を施せば、広域への応用の可能性が開けるだろう。

## 謝 辞

著者が氷河学に関わるきっかけとなった1989・1990年京都大学ヒマラヤ医学学術登山隊への参加の際に、後押しして下さった斉藤惇生氏に深く感謝いたします。名古屋大学の上田豊氏・中尾正義氏には大学院入学時より「チベット・ヒマラヤでの氷河研究」にたずさわるきっかけを与えていただいたほか、本研究を進めるに当たり、多くのご指導を賜りました。同大学の瀬古勝基氏には「調査・研究を楽しむこと」を教えていただきました。この他、現地観測を通じて多くの友人の協力を頂きました。記して感謝いたします。

チベット高原での観測は、文部省科学研究費による国際学術研究「チベット高原の水循環における雪氷圏の役割」(1991-93年)の一環としておこなわれました。続く国際学術研究「ヒマラヤ雪氷圏における地球温暖化による影響評価の基礎的研究」(1994-97年)、「夏雪型氷河の縮小加速の検証と将来予測」(1997-2000年)、基盤研究「ヒマラヤ雪氷圏の最近の衰退の原因解明に関する研究」(1997-2000年)では、熱収支-質量収支モデル研究を進めました。

## 文 献

- 上田 豊, 1983: ネパール・ヒマラヤの夏期涵養型氷河における質量収支の特性. 雪氷, **45**, 81-105.
- 上田 豊, 1997: 氷河の形成. 基礎雪氷学講座「氷河」, 古今書院, 11-31.
- Ageta, Y. and Kadota, T., 1992: Predictions of changes of glacier mass balance in the Nepal Himalaya and Tibetan Plateau: a case study of air temperature increase for three glaciers. *Annals of Glaciology*, **16**, 89-94.
- Ageta, Y., Ohata, T., Tanaka, Y., Ikegami, K. and Higuchi, K., 1980: Mass balance of Glacier AX010 in Shorong Himal, east Nepal during summer monsoon season. *Seppyo*, **41** (Part IV), Special Issue, 34-41.
- Ageta, Y., Yao, T., Jiao, K., Pu, J., Shao, W., Iwata, S., Ohno, H. and Furukawa, T., 1991: Glaciological studies on Qingzang Plateau, 1989 Part 2. *Glaciology and geomorphology. Bulletin Glacier Research*, **9**, 27-32.
- Ageta, Y., Yao, T. and Ohata, T., 1994: Outline of the study project on the role of snow and ice in the water cycle on Qingzang Plateau, 1990-93. *Bulletin Glacier Research*, **12**, 87-94.
- Ageta, Y., Zhang, W. and Nakawo, M., 1989: Mass balance

- studies on Chongce Ice Cap in the West Kunlun Mountains. *Bulletin Glacier Research*, **7**, 43-50.
- Cogley, J. G. and Adams, W. P., 1998: Mass balance of glaciers other than the ice sheets. *Journal of Glaciology*, **44**, 315-325.
- Dyrurgerov, M. B. and Meier, M. F., 1997a: Mass balance of mountain and subpolar glaciers: a new global assessment for 1961-1990. *Arctic and Alpine Research*, **29**, 379-391.
- Dyrurgerov, M. B. and Meier, M. F., 1997b: Year-to-year fluctuations of global mass balance of small glaciers and their contribution to sea-level change. *Arctic and Alpine Research*, **29**, 392-401.
- Fujita, K. and Ageta, Y., 2000: Effect of summer accumulation on glacier mass balance on the Tibetan Plateau revealed by mass-balance model. *Journal of Glaciology*, **46**, 244-252.
- Fujita, K., Nakawo, M., Fujii, Y. and Paudyal, P., 1997: Changes in glaciers in Hidden Valley, Mukut Himal, Nepal Himalayas, from 1974 to 1994. *Journal of Glaciology*, **43**, 583-588.
- Higuchi, K., 1977: Effect of nocturnal precipitation on the mass balance of the Rikha Samba Glacier, Hidden Valley, Nepal. *Seppyo*, **39** (Part II), Special Issue, 43-49.
- 比較氷河研究会, 1973: ヒマラヤ山脈, 特にネパール・ヒマラヤの氷河研究における諸問題. 日本雪氷学会氷河情報センター, 100 pp.
- Intergovernmental Panel of Climate Change, 1996: Climate change 1995 - the science of climate change: changes in sea level. WMO/UNEP, Cambridge University Press, 359-405.
- Kayastha, R. B., Ohata, T. and Ageta, Y., 1999: Application of a mass-balance model to a Himalayan glacier. *Journal of Glaciology*, **45**, 559-567.
- Kuhn, M., 1993: Possible future contributions to sea level change from small glaciers. In Warrick, R. A., Barrow, E. M. and Wigley, T. M. L., eds., *Climate and sea level change: observations, projections and implications*. Cambridge, Cambridge University Press, 134-143.
- Meier, M. F., 1984: Contribution of small glaciers to global sea level. *Science*, **226**, 1418-1421.
- 内藤 望, 2001: ネパール・ヒマラヤにおける近年の氷河縮小. 雪氷, **63**, 207-221.
- Oerlemans, J. and Fortuin, J. P. P., 1992: Sensitivity of glaciers and small ice caps to greenhouse warming. *Science*, **258**, 115-117.
- Ohata, T., Ikegami, K. and Higuchi, K., 1980: Albedo of Glacier AX010 during the summer season in Shorong Himal, east Nepal. *Seppyo*, **41** (Part IV), Special Issue, 48-54.
- Ueno, K., Endoh, N., Ohata, T., Yabuki, H., Koike, T., Koike, M., Ohta, T. and Zhang, Y., 1994: Characteristics of precipitation distribution in Tanggula, Monsoon, 1993. *Bulletin Glacier Research*, **12**, 39-47.
- United States Department of Energy, 1985: *Glaciers, ice sheets and sea level: effect of a CO<sub>2</sub>-induced climatic*

change. Washington, DC, U.S. Department of Energy,  
Office of Energy Research. (Report of a Workshop

held in Seattle, Washington, September 13-15, 1984  
Report DOE/ER/60235-1.)

## **Characteristics and climatic sensitivities of glacier mass balance on the Asian highland**

Koji FUJITA

*Institute for Hydrospheric-Atmospheric Sciences, Nagoya University, Nagoya 464-8601*

**Abstract:** The characteristics and climatic sensitivities of glaciers in the Nepal Himalayas and on the Tibetan Plateau, where glaciers are accumulated by the summer monsoon, have been observed, analyzed and discussed since 1970s. Studies clarified that glaciers could maintain their mass since the monsoon provided precipitation during the melting season. Snowfall in summer keeps surface albedo high and largely restrains ablation. Nevertheless, it was also clarified that glaciers would respond to temperature change more sensitively than the winter-accumulation type glaciers. Under the monsoon climate, warming would cause a drastic increase in ablation in combination with surface albedo lowering. Therefore, although glaciers on/around the Asian highland can be sustained by summer accumulation, they are more vulnerable to warming than winter-accumulation type glaciers in other regions.

(2000年11月22日受付, 2001年1月30日改稿受付, 2001年2月3日受理, 討論期限2001年9月15日)