

が、北側のタイガの針葉樹林にいくばくかの水を供給している可能性もある。

地球科学には二つの道がある。大気大循環モデル(GCM)の発達によって、ユーラシア大陸を砂漠の大陸にも、緑の大陸にも置き換え、場合によってはそれを除去して実験することも可能になった。このような実験によって、ユーラシア大陸が水循環に果たす役割を抽象的なレベルで把握することができよう。しかし、現場に足る踏み入れ、雪氷や凍土の厚さを計測し、蒸発量や降水量を観測し、オアシスの水源をたどるのも水循環の理解

へのもう一つの道である。この二つの道は、本来あざなえる縄のごとく、密接な関係にあるはずであるが、現実には両者はますます離れてゆく傾向にある。今回、アジアの水循環をネタに、抽象路線と現場路線の間の討論を行ってみようとする密かな意図があったのであるが、全体的な歩み寄り、何となく中間路線に収束してしまった感があり、いささか残念であった。GEWEX(全地球エネルギー・水循環観測計画)が終わったら、もう一度掘り下げてみたいテーマである。

205 (雪氷圏; 水循環; 氷河; チベット高原; ヒマラヤ; モンスーン)

1. アジア高山雪氷圏と水循環*

上 田 豊**

1. はじめに

アジアではその中緯度帯に、チベット高原を中心に高々度の山岳地域が東西につらなり、氷河・積雪・凍土からなる雪氷圏が形成されている。なかでもチベット高原には、永続的な多年性雪氷圏として、雪氷体である多量の氷河および土と氷の混合体である広範囲の凍土が分布する。それらのうえに、季節によって分布範囲が大きくかわる一時的な積雪が、季節性雪氷圏として加わり、多様で広大な雪氷圏をなしている。

氷河と凍土は、それぞれの表層において季節的な変動サイクルをもちながら年々の変化を累積し、それらを気候メモリーとしてとりこむ。そのようにしてこの多年性雪氷圏は、長いタイム・スケールの水と熱の貯留過程を水循環につけ加える。一方、季節的な積雪は、それ自体は年毎に更新され、高いアルベードや融解水の効果によって大気・陸面間の水・エネルギー交換の季節による変化を大きくする。さらに、年々の積雪分布量も年々の気象条件によって大きくかわり、チベット高原の水循環過程を変化に富んだものになっている。

このような水循環過程において、氷河・積雪・凍土が山岳および高原地形のもとにそれぞれどのような役割を果たし、相互にどのように関係しているのだろうか。ここでは、氷河を中心にこれまでの研究結果の要点を述

べ、今後の展望にもふれてみたい。

2. 大陸性と海洋性の雪氷圏水循環

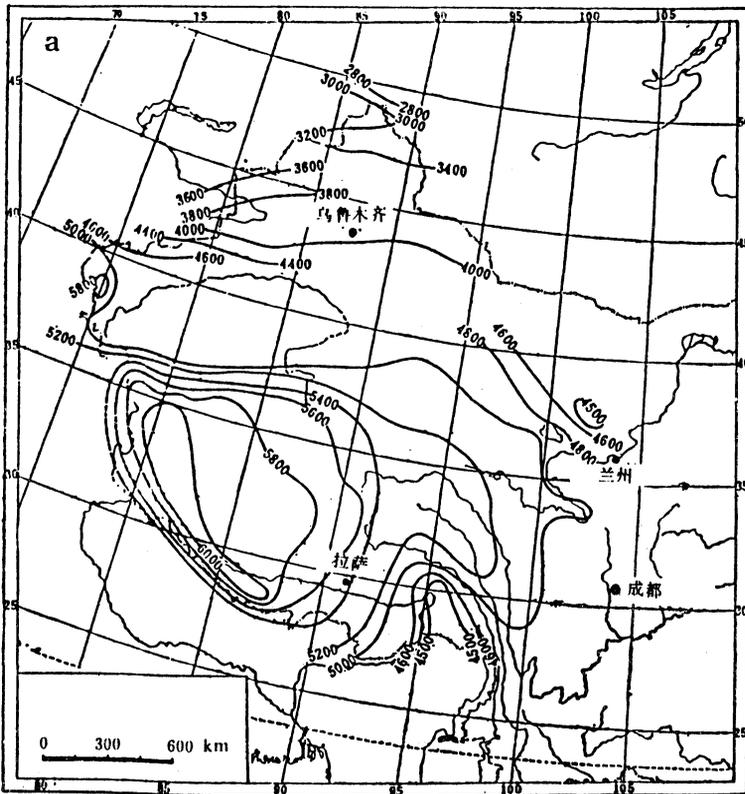
雪氷圏では、水の相変化は、潜熱のやりとりや水自体の循環様式、存在形態を規定するものとして特に重要である。チベット雪氷圏は、湿潤・温暖で水交換の活発な海洋性地域から、乾燥・寒冷で水交換の不活発な大陸性地域にわたる。そのため、氷河の消耗過程は前者が融解、後者が蒸発によって特徴づけられ、それぞれの地域特性に対応した相変化をみせ、同高原の水循環様式を多様なものになっている。

第1図に、チベット高原とその周辺の雪線高度分布(施ほか、1990)を示した。ここでの雪線とは、氷河上で年間の雪氷収支が平衡する位置(平衡線)をさす。通常、高緯度から低緯度にむかって雪線高度はおおむね高くなるが、この図では、チベット高原南東部やトランス・ヒマラヤ山脈の南側では、逆に南ほど低い。これは、アジア・モンスーンによる海洋からの水蒸気が南寄りの氷河域ほど多量の降雪をもたらしているからと考えられる。このように、雪線高度の分布傾向から、気候地理的に、海洋性の水循環が優勢な地域の境界の目安をつけることができる。

チベット高原の氷河には、南東部で数千ミリ、北西部で数百ミリの年降水があり、海洋性氷河と大陸性氷河が分布する。涵養量(降雪量)の多い氷河ほど消耗量(融解・蒸発・昇華量)も大きく流動は活発で、氷河を通し

* Cryosphere of Asian high mountains and water cycle.

** Yutaka Ageta, 名古屋大学水圏科学研究所.



第1図 中国西部の雪線高度 (m), (施ほか, 1990)

た水の交換量は、海洋性氷河の方が1桁大きい。両者のチベット高原とその周辺におけるこれまでの観測から、氷河の水循環へのかかわりにおいて、下記の特性が重要であることがわかってきている。

1) 大陸性氷河は山岳地形による局地的降水、海洋性氷河はモンスーンによる降水により、いずれも夏期を中心に涵養される。また、氷河上への降水は山岳地形によって強化され、周辺の平地の数倍になることが多い。

2) 大陸性氷河は日射の弱い北面に発達し、一方、海洋性氷河は水蒸気の流入する南面に発達する傾向がある。したがって、氷河の分布と変動は前者は消耗の条件に、後者は涵養の条件に強く依存すると考えられる。

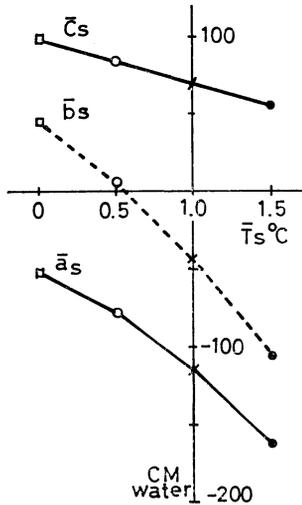
3) 寒冷な大陸性氷河では融解水の氷河内部での再凍結が雪氷収支に重要である。温暖な海洋性氷河では気温次第で降水が雨になり、涵養に寄与しない上に新雪の高アルビードによる消耗抑制効果を失う。したがって、氷河の消長の気温変動への依存性は、海洋性氷河の方が強いと考えられる。

4) 氷河の消耗には、大陸性氷河では蒸発・昇華による潜熱効果が大きく、海洋性氷河では表面の厚いモレーンによる断熱効果があり、いずれも消耗を抑制する効果がある。また、両方の氷河とも日射の強い夏期にしばしば新雪で覆われるため、その高アルビードによる消耗抑制効果も重要である。

このように、アジア高山雪氷圏における水循環過程は、氷河を介することによって、大陸性地域と海洋性地域で異なる影響をうけるが、それらを広域にわたって定量的に議論できるまでには、いたっていない。

3. モンスーン型の雪氷圏水循環

チベット・ヒマラヤ雪氷圏の水循環は、夏期に活発である。すなわち、大気から陸面への水の供給が夏期に集中し、同時に雪氷圏から河川への水の流出も夏期に集中する。これは、冬期の積雪が融雪期に流出する欧米・日本の雪氷圏や、夏期においても流出のとばしい極域の雪氷圏とは異なり、アジア・モンスーン気候下の特徴とい



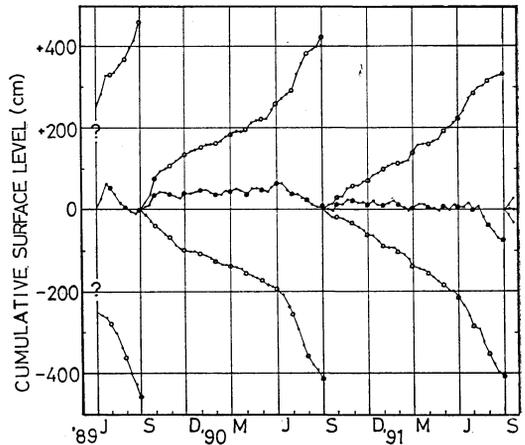
第2図 ネパール・ヒマラヤAX 010 氷河の夏期における雪氷収支要素の氷河面積による平均値 (\bar{c}_s : 涵養量, \bar{a}_s : 消耗量, \bar{b}_s : 収支 $\bar{c}_s + \bar{a}_s$) と夏期平均気温 (\bar{T}_s) との関係 (上田, 1983)

えよう。

なかでもヒマラヤは、その全域にわたってインド・モンスーンの支配下にあり、ネパール・ヒマラヤでは、年降水量の約8割が6～9月に集中する。水循環にとっては、それが雨で降るか雪で降るかが重要である。東ネパールの高度約 5,000 m の氷河末端での観測では、地上気温と降水のうち雪で降る頻度との間に0.3°Cで100%, 3.1°Cで0%, その間は直線的に変化する関係が見出され、6～9月の平均気温が 2.4°C だった観測地点では、この期間の降水量の1/4が雪であった。氷河上では、高度が上るにつれてこの雪の率が増えることになる。

前章でのべたように、氷河の消耗のはげしい夏に新雪が表面をおおうことは、消耗抑制の効果がある。したがって、気温が上昇すれば顕熱による消耗が増すうえに、降雪の割合が減って氷河表面のアルビードを低下させ、放射による消耗増加が重なる。また、氷河の涵養量も、気温が上昇すれば、降水が雨となって減る。第2図に、東ネパールの小型氷河において、降水量が一定として、気温の変化にともなって氷河全体の雪氷収支がどう変わるかを示した。このように、気温上昇は消耗量の増加を加速させ、涵養量の減少が加わってその収支は、さらに大きく負に傾く。

ここに述べたように、モンスーン型の氷河は、夏の気



第3図 チベット高原タングラ山城の小ドンケマディ氷河自記積雪深計 (高度5,570 m) による氷河表面位置の日々の変化を上昇(正)と下降(負)に分け、それぞれの旬別合計の氷河収支年毎の累計値。中央の折れ線(黒丸)は、それらの和 (CREQ 研究グループ, 1992)

温への依存性が高く、それがこの地域の雪氷圏における水循環過程を特徴づけている。ここで、モンスーン変動によって降水量が気温とどのような関係をもって変化するか、またそれが高度 8,000 m におよぶ高山域で、高さとどのようにかわるのか、さらに重要な消耗要因である放射収支がいかに変わるのか。これらを含めてモンスーン域の雪氷圏と水循環の変動を考えるには、多くの問題が残されている。

4. CREQ (チベット高原雪氷圏研究) のめざすもの

アジア高山雪氷圏を対象とした日本による現地観測は、名大水圏科学研究所などを中心に、ネパール・ヒマラヤ (1973～)、東部天山 (1981～)、チベット高原 (1985～) で氷河、気象、水文について行われている。チベット東部のタングラ山城では、1989年5月から気象と積雪の連続自記記録がとられており、第3図にこれまでの2年4カ月の積雪記録を示した。

これは、氷河の平衡線付近 (高度 5,570 m) での光ファイバー式積雪深計記録による氷河表面位置の日々の変化を上昇 (正) と下降 (負) に分け、それぞれの旬別合計を氷河収支年毎に累計していったものである。中央黒丸の折れ線はそれらの収支 (和) で、原データ (表面位置) の10日毎の記録を示す。積雪深計の記録は、積雪の

圧密による沈降その他、雪氷収支以外の影響も含むので注意を要するが、下記のことが推察できる。

1) 降雪量は夏を中心とした4ヶ月(6~9月)に多いが、月一旬別の貢献度は年によって異なる。

2) 消耗量も夏の3ヶ月(6~8月)が多く、7月を中心に最大となる。

3) 表面雪氷収支の収支年の終り(8月末)の結果は上記の3~4ヶ月の推移で支配され、他の時期は小さな昇降をくりかえす。

このタングラ山域は、準大陸性の気候で、チベット高原全体の気象・水文環境の中間的な位置をしめる。ここで、文部省国際学術研究「チベット高原の水循環における雪氷の役割」が1991年から始まっている。この研究は、氷河、積雪、凍土を雪氷圏として総体的にとらえ、雪氷、気象、水文の観測を一体化し、雪氷圏が水循環の維持と変動にはたす役割を明らかにすることをめざしている。この計画は、IHP や IGBP にも対応しており、この研究計画全体の名称を CREQ (Cryosphere Research on Qingzang Plateau) とした。

CREQ の研究内容は、①スケールの異なる流域単位での陸域水循環、②表面状態の異なる凍土域での大気・

陸面相互作用、③人工衛星データの地上検証とそれによる広域解析の3つに大別できる。研究の中心は、陸域水循環についての観測データの取得にあり、関連する要素の季節変化と重要な素過程を大気、地表面、凍土表層について、氷河・積雪・凍土の役割を重視して観測する(詳細は CREQ グループ、1992参照)。

種々の雪氷体を個別ではなく相互につながる雪氷圏としてとらえ、それが大気水圏システムの維持と変動にはたす役割を研究する雪氷圏科学の手法は、これから開発していかなければならない。チベットを舞台にした CREQ がローカルからグローバルへどれだけ迫ることができるかも、まさにこの点にかかっているであろう。

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, 2, 81-105.

CREQ 研究グループ, 1992: チベット高原の雪氷圏と水循環, pp. 63.

施雅風, 鄭本興, 李世杰, 1990: 青藏高原の末次氷期与最大氷期, 冰川凍土, 12, 1, 1-16.

103; 107: 306 (モンスーン; 気候システム; 準2年振動)

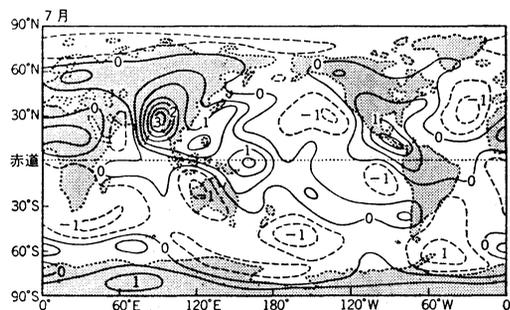
2. 地球気候システムにおけるアジアモンスーンの役割*

安 成 哲 三**

1. モンスーンと水循環

モンスーンは、アジア大陸東南部からインドネシア・熱帯西部太平洋、オーストラリア北部の地域で、世界的にも最も卓越している。モンスーン世界とは、熱帯アフリカの一部の地域を除けば、この地域のことをさすといっても過言ではない。なぜこの地域にモンスーンが卓越しているか、ひと言でいえば、低緯度にまで張り出した地球最大の大陸<ユーラシア大陸>と、まわりの海洋のあいだの季節的な加熱・冷却のされかたがきわめて大きいことに加え、ヒマラヤ・チベット山塊の存在が、この熱的コントラストをさらに強めていることによっている(安成, 1984)。この海陸・山岳分布に影響された大気

非断熱加熱率(実質的な加熱・冷却の割合)(第1図)は、アジアモンスーン地域を中心に、非常に顕著な海陸間の加熱と冷却のコントラストを形成している。



第1図 1979年7月の大気の加熱または冷却の割合(非断熱加熱率, K/日). 破線部は負の値, すなわち冷却域 (Johnson et al., 1987).

* Role of the Asian monsoon in the global climate system.

** Tetsuzo Yasunari, 筑波大学地球科学系.