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 II *

——ネパールの小型氷河の質量収支モデル——

上 田 豊**

要 旨

第1報で、夏期涵養型である（涵養量が冬半年より夏半年に多い）東ネパールのAX 010 氷河での観測結果から、半月毎の平均気温(T_h)と降水量(P_h)をもちいて同期の涵養量、消耗量、収支の算定式をえた。この論文では、これらの式に通年の T_h と P_h の値を、いろいろな年平均気温と年降水量の場合についてあてはめ、収支各要素の通年の値を算出した。そして、ネパールではモンスーンの影響に地域差が大きいので、年降水量のちがう各地の氷河における質量収支の高度分布を高度による気温差を指標にして示した。その結果、次のことがわかった。1) 涵養量は、夏期平均気温が約 -1°C 以下の高所では降水量と等しく、約 3°C 以上の低所までは夏期降水量にしめる固体降水量の比率が気温に依存してほぼ直線的に減少する。2) 消耗量は高温な低所ほど急増し、収支の高度分布も主に消耗量の変化を反映して低所ほど大きく変化する。3) 平衡線の高度は、年降水量が少ない場合ほど急な上昇をみせる。

さらに、ネパールの氷河を地球上の他地域の氷河と比較し、夏期涵養型氷河は比較的交流量が少なく低温域に位置するが、平衡線付近での年間収支の高度による変化率 (activity index) は海洋性氷河の傾向に近づくことがわかった。また、氷河全体の質量、年間交換量、年間収支をくみあわせた‘活動度’をもちいて、地球上各地における氷河と気候の関係、変動の傾向などを表現できることをしめした。

1. ま え が き

本論文 I (上田, 1983) で、ヒマラヤ、チベット高原、中国内陸部などに広く分布している、涵養量が冬半年より夏半年に多い氷河を夏期涵養型氷河とし、その代表例として夏期モンスーンの強い影響をうける東ネパール、シロン地域のAX 010 氷河（論文 I・図1）を選び、その質量収支の特性を調べた。

この氷河の1978年夏期の観測結果(Ageta et al. 1980)をもとに、論文 I では半月毎の平均気温 ($T_h^{\circ}\text{C}$) と降水量 ($P_h \text{ cm}$) から、同期の涵養量 ($c_h \text{ cm}$)、消耗量 ($a_h \text{ cm}$)、収支 ($b_h \text{ cm}$) を算定する以下の式を得た。

$$\begin{aligned} c_h &= P_h(0.85 - 0.24 T_h) \\ \text{ただし } T_h &< -0.6 \text{ のとき } c_h = P_h \\ T_h &> 3.5 \text{ のとき } c_h &= 0 \end{aligned} \quad \dots\dots(1)$$

$$a_h = -0.15(T_h + 3.0)^{3.2}$$

$$\text{ただし } T_h \leq -3.0 \text{ のとき } a_h = 0 \quad \dots\dots(2)$$

$$b_h = c_h + a_h \quad \dots\dots(3)$$

そして、主に東ネパールの高地の気象データをもとに気温と降水量の典型的な年変化パターンをあたえて、通年の T_h と P_h の値をえた。こうして算出された通年の c_h , a_h , b_h から、質量収支の年変化の様子を知ることができた。そこでは、降水量はシロン地域で一般的な値に固定し、収支に影響力の強い気温条件のみのちがいがもたらす効果を検討した。

ネパール・ヒマラヤは東南東-西北西の方向に約800 km の長さでのびており、南東からの夏期モンスーンによる降水は、西部が東部より少なく、またヒマラヤ山脈の北面は、シロン地域のある南面より少ない。このことが、氷河の質量収支の地域による差異をもたらしている。本論文 II では、このような異なった降水量を上記の

* ネパール・ヒマラヤ氷河学術調査隊業績 No. 84

** 山口大学 教育学部

式にあてて、質量収支の年変化、ついでその高度分布をしめし、夏期涵養型氷河の特性をネパール・ヒマラヤ全体について検討してみる。最後に、ネパールの氷河の質量収支を世界の氷河と比較する。

なお、本論文Ⅱでは、Ⅰとおなじく質量収支にかかわる用語は、原則として UNESCO/IASH (1970b) の定義にもとづき、用語の和訳は樋口他(1970)にしたがう。

2. 質量収支の年変化

論文Ⅰ(5章)では、夏期涵養型の氷河において、気温のわずかな変化が、氷河全域平均の収支各要素の年変

化に敏感に反映されることをA X 010 氷河の例でみた。これは、年々の気温の変化が氷河全体の収支におよぼす影響をしめたものであるが、氷河上のある1点の収支に対する気候条件の影響を前章の式(1), (2), (3)を使って検討してみる。

図1に、ネパール・ヒマラヤで一般におこりうる3段階の年降水量(P_a)について、年平均気温(T_a)が 0.5°C または 1.0°C ずつ異なった場合の収支各要素の累計値の年変化をしめた。いろいろな P_a における半月降水量 P_h は、論文Ⅰ(5章)でえた典型的な降水量の年変化パターン(論文Ⅰ・図8b)にある各期の P_h の P_a に対する比が P_a の値にかかわらず一定として求めた。また気温は、各々の T_h がおなじく論文Ⅰ(図8a)でえた気温の年変化と平行に推移するとして求めた。また、A X 010 氷河でみられた冬の飛雪による消耗は、他の氷河へも一般化しうるかどうかが疑問なので、ここでは考慮されていない。こうしてえられた各々のカーブは、収支(破線)が減少から増加に移る時、すなわち収支年(balance year)のかわりめで区切って示されている。

年間の気温や降水量は、同一地点でも年により異なるし、同一年では地点により異なる。図1はいろいろな見方ができるが、たとえば 1°C の T_a の差は論文Ⅰ(3章)でえた気温減率 $0.6^\circ\text{C}/100\text{m}$ では高度差約170mにあたるので、ここでは降水量の異なる3個の氷河において、収支の平衡線付近をはさんで高さがちがう2~3点における収支の年変化のちがいをみることもできる。

いずれにせよ図1では、いかなる P_a , T_a 条件においても、収支の最大は5月末にあるが、さほど顕著なピークをしめていない。冬の飛雪などによる消耗がある氷河の場合は、5月末の収支はもっと低い値をしめすことになる。ショロン地域の北に隣接するクンプ地域では、ギャジョ氷河(A X 010 氷河の北北東23 km)の1970年の例(Fushimi, 1978)やコンマ氷河(A X 010 氷河の北東36 km)の1974年の例(Ikegami and Inoue, 1978)にみられるように、モンスーン後半の低温による固体降水のため、9, 10月頃最大になる場合も多いであろう。

なお5月は、モンスーン前の好天と強い日射のため、式(2)では算定できない融解がおこりうるが、寒候期の後のため氷河の内部温度が低くて融解水の再凍結がおこりやすく、融解による質量損失は多くないであろう。

また図1より、収支年の区切りは気温、降水量に大きく左右され、 1°C の差で2, 3ヵ月ずれることがわかる。この収支が減少から増加へ立ちあがる時期は、A X 010 氷河と同規模のクンプ地域やショロン地域にあるい

図1 いろいろな年降水量(P_a)と年平均気温(T_a)のもとでの、1点における質量収支各要素の累計値の「収支年」における変化。
実線: 正值—涵養量, 負値—消耗量,
破線: 収支

Fig. 1 Calculated variation of mass balance elements at a point in 'balance year' under various annual precipitation (P_a) and annual mean air temperature (T_a).
solid line: positive value—accumulation,
negative value—ablation,
dashed line: balance

くつかの氷河でも、測定地点の高度によってかなりずれることが観測されており (Ageta and Satow, 1978; Ikegami and Inoue, 1978; 上田・佐藤, 未発表), 夏期の収支が気温に大きく依存していることがあらわれている。

論文 I (5 章) では、特定氷河の全域平均値でみた収支年の区切りが、気温の経年変化によって年々大きく変りうることから、夏期涵養型氷河には、収支年よりも測定年 (measurement year) を適用した方がよいとした。ここでみたように、おなじ年に同一の氷河上で、場所によって収支年の区切りが大きく異なることから、やはり収支年は不適当といえる。

なお、 P_a が小さい場合は比較的好天が多くなるだろうから、気温の年変化パターンが論文 I でえたものと同じがってくる可能性があり、それが収支各要素をかえることが考えられる。これについては次章でふれる。

3. 質量収支の高度分布

以下の記述では、質量収支にかかわる年が収支年か測定年かは重要ではないので、論文 I や前章で考察したように夏期涵養型氷河にも適用できる確定日付システム (fixed-date system) にそった用語に統一する。すなわち、1 測定年の年間収支 (annual balance: b_a) は年間涵養量 (annual accumulation: c_a) と年間消耗量 (annual ablation: a_a) の代数和となる。

(1) 涵養量, 消耗量, 収支の高度分布

ネパール・ヒマラヤの氷河の涵養量, 消耗量, 収支の各々が、気温と降水量にどのように依存しているかを、論文 I で述べたシュロン地域の AX 010 氷河の場合を一般化する形で、それぞれ図 2, 図 3, 図 4 に示した。これらの結果は、論文 I でえた気温, 降水量の年変化パターンの場合について、式(1), (2), (3) をもちいて前章と同様の方法で計算したもので、年間 (添字 a) と夏期 (6 月～9 月, 添字 s) とに分けて図にした。気温と降水量の両方の関数である涵養量 (図 2) と収支 (図 4) は、降水量を 5 段階にして計算した結果を、いっしょに図示してある。

年平均気温 T_a と夏期平均気温 T_s の関係は、論文 I の気温年変化パターンにもとづき、 5.0°C の差をもつとした。また、縦軸に気温とともに高度が参考のため記してある。これは、論文 I (3 章) でえた東ネパールの高地の標準的な気温減率 $0.6^\circ\text{C}/100\text{m}$ に気温と高度のスケールを合わせ、絶対値の対応は、AX 010 氷河の末端観測点 (高度 4958m) での 1978 年の T_s より、 0.5°C 低温の所にその観測点の高度がくるようにしてある。これは、論文 I (4 章) で述べたように、例年は 1978 年の結果よ

り 0.5°C ほど低温と考えられたからである。そうすると、高度 5000 m は T_a が -3.4°C , T_s が 1.6°C の所にくる。このように、図 2, 3, 4 に示された気温に対応する高度は、シュロン地域の一般例をあてはめてある。

この高度軸をネパール・ヒマラヤ全体に適用する場合の問題は次節でふれる。なお、7000～8000m 級の高峰から流下する大型氷河の場合、その下流部は一般に深い U 字谷の底にあるが、そこは同高度の稜線付近にくらべて昇温しやすい。これは日中の雲が稜線付近に集中しやすいため (Ageta, 1976), ここに示した気温と高度との関係は、大型氷河への適用には問題がある。

このように、ネパール・ヒマラヤのすべての氷河で気温と高度の対応が同一とはいえないが、各図の気温軸は対象とする場所に応じた高度軸におきかえることができるはずである。すなわち、これらの図から、縦軸の気温を指標にして、各収支要素の高度分布をみることができる。そして、各図に示めされたいろいろな降水量 (P_a : 40～200 cm) は、ネパールで一般におこりうる範囲の値をとってあるので、これらから、降水量の異なるネパール各地の収支状態を知ることができる。あるいはまた、いろいろな降水量での収支状態は、おなじ氷河で P_a や P_s が年々変化した場合をあらわしているとみることも可能である。

図 2 の涵養プロファイルを見ると、 T_s が -1.2°C (高度 5500m 付近) より低温部では、降水はすべて固体となることがわかる。1974 年 8 月 21—31 日、クンプ地域 EB 050 氷河上の高度 5360 m 地点で観測した全降水量 107 mm に対する固体降水量の比率は、85% であった (Ageta, 1976)。これは最暖期に近い頃の結果であり、図 2 では同高度で c_a/P_a , c_s/P_s ともに 90% であることとくらべて、ほぼ妥当といえる。

そして、 T_s が約 -1°C から 3°C にかけて、固体降水量がほぼ直線的に減少する。 T_s が 4°C (高度 4600 m 付近) より高温部では、6 月～9 月の降水がすべて雨となる。これは、クンプ地域のハジュン (4420m) での観測結果からもうらづけられる。図 2 で T_a が -2°C の付近より高温域で涵養量の高度による差が急減しているが、これは、モンスーンの多量の降水のほとんどが雨となっている気温域なので、冬期の少量の降水に対してしか気温差が反映されないからである。

図 3 の消耗プロファイルでは、 T_s が -3°C (高度 5800m 付近) より低温部では、消耗がなくなることになる。実際には、強い日射により、チョモランマ峰 (8848 m) の山頂にいたるまで融解はおこりうるが、高所の低温のため再凍結し (中国科学院, 1974), 質量損失は無

視できるであろう。また昇華による消耗も、夏期は多湿のため、冬期は低温の氷雪が熱をうばうため、わずかと考えられる。なお a_a と a_s の差は、ここでは飛雪などは考慮されていないから、5月と10月の消耗によるもののみで、わずかである。プロファイルは、高温な低所で

の消耗量の急増をしめしている。

図4の収支プロファイルは、図2と図3の結果からみちびかれるもので、その特徴は消耗プロファイルの影響を強くうけ、高温な低所で、固体降水量の減少とあいまって、夏の収支が急増する。そのため低所では、降水量のちがいは、収支の差としてあまりでてこなくなる。

図4において b_a が0、すなわち平衡線 (equilibrium line) の付近では、収支の高度プロファイルの勾配が降水量によってことなる。このタテ軸に対する勾配 (収支差 mm/高度差 m) は、'activity index' (Meier, 1961) や 'energy of glacierization' (Shumskii, 1947) とよばれ、降水量の多い海洋性の氷河ほど大きい値をもつとされている。図4においても、 P_a が大きいほど $b_a=0$ におけるカーブの勾配が縦軸に対して大きくなっているこ

図2 異なった降水量 P_a , P_s のもとでの涵養量の気温 T_a , T_s (または高度) に対するプロファイル。
 P_a : 年降水量, P_s : 6月～9月の降水量,
 T_a : 年平均気温, T_s : 6月～9月の平均気温
 a) 年間涵養量 (c_a)
 b) 6月～9月の涵養量 (c_s)

Fig. 2 Profile of accumulation against air temperature T_a , T_s (or altitude) under the different precipitation P_a , P_s .
 P_a : annual precipitation,
 P_s : precipitation from June to September,
 T_a : annual mean air temperature,
 T_s : mean air temperature from June to September
 a) annual accumulation (c_a)
 b) accumulation from June to September (c_s)

図4 異なった降水量 P_a , P_s のもとでの収支の気温 T_a , T_s (または高度) に対するプロファイル。

a) 年間収支 (b_a)
 b) 6月～9月の収支 (b_s)

Fig. 4 Profile of balance against air temperature T_a , T_s (or altitude) under the different precipitation P_a , P_s .

a) annual balance (b_a)
 b) balance from June to September (b_s)

図3 異なった降水量 P_a , P_s のもとでの消耗量の気温 T_a , T_s (または高度) に対するプロファイル。

a_a : 年間消耗量, a_s : 6月～9月の消耗量

Fig. 3 Profile of ablation against air temperature T_a , T_s (or altitude) under the different precipitation P_a , P_s .

a_a : annual ablation,
 a_s : ablation from June to September

とがわかる。AX 010 氷河については、1978年9月から翌年9月までの観測結果(論文I・図2)が約10であり、図4ではAX 010 氷河にあたる P_a が160 cm の場合で7~8となり、両者に大差はない。

また、夏期収支の平衡線付近での高さによる変化‘ablation gradient’ (mm/m) は、Schytt (1967) によると北半球ではおおそ極地で1、温暖な海洋地域で10かそれ以上である。2季節依存型氷河の夏期収支の勾配を1季節依存型氷河と同列に比較するのは問題が残るが、同様に $P_a=160$ cm, $b_a=0$ の高度での6月~9月の収支 b_s の勾配を図4からよみると約7となる。このように1季節依存型の氷河でも、その ablation gradientは、2季節依存型と同様に冬の収支の高度による差が小さいため、activity index と似た値となる。AX 010 氷河での、1978年6月~9月の観測結果(論文I・図2)は約6で、計算値とはほぼ一致している。

このようにやや内陸でありながら activity index や ablation gradient が大きめになりうるのは、モンスーンによる海洋の影響も考えられるが、さらに内陸にあってモンスーンと無関係の天山山脈東部でも、activity index は7前後の値を示している(施・謝, 1964)。ネパール・ヒマラヤとおなじく天山山脈東部の氷河は夏期涵養型であり、そのため、これまでのべてきたように収支が気温のちがいで大きくかわり、高度差による気温差にともなって b_a , b_s が高度に対して大きな勾配をもつことになると考えられる。すなわち、夏期涵養型の氷河は、その収支特性が activity index や ablation gradient にも影響して大きめの値をとり、海洋性氷河の傾向に近づくことになる。

(2) 平衡線の高度と気温

図4より、 P_a が少なくなれば、 b_a が0となる平衡線での T_a が低くなる傾向がわかるので、平衡線での年平均気温と年降水量の関係を同図からよとり、図5に実線のカーブでしめた。同様に、夏期の収支0の位置での T_s と P_s の関係を破線でしめた。高度軸の気温軸への対応は、図2~4とおなじである。これより、1季節に涵養と消耗が集中するネパールでは、夏期の収支0の高度と平衡線高度との差は、50mたらずであることがわかる。

また図5より、降水量が少なくなればなるほど、平衡線高度が急上昇することがわかる。それは、図3でみたように、高所の低温域ほど、低所と同じ消耗量の差を得るためには大きな気温差を要するからである。平衡線の位置の変化は Accumulation Area Ratio (AAR) の変化をもたらすので、上記のように、降水量が少ない地域

図5 平衡線高度での年降水量 (P_a) と年平均気温 (T_a) との関係 (実線), および6月~9月の収支 (b_s) 0の高度での同期の降水量 (P_s) と平均気温 (T_s) との関係 (破線).

黒丸: $b_s=0$ の高度, 白丸: $b_s=0$ の気温

Fig. 5 Relation between annual precipitation (P_a) and annual mean air temperature (T_a) at the equilibrium line altitude—solid line, and relation between P_s and T_s at the altitude of $b_s=0$ from June to September—dashed line.

solid circle: altitude of $b_s=0$,

open circle: air temperature of $b_s=0$

では、わずかな降水量の変化で、平衡線高度とともに、AARも急変すると推察できる。ここで、図5のカーブが降水量のちがうネパール各地の氷河状態に合致するかどうか検討してみる。

ネパールでの氷河の質量収支に関する観測はモンスーン期に集中しており、冬の収支は不明の点も多いので、図5には $b_a=0$ と大差ない $b_s=0$ となる高度がわかった、3地域計5個の氷河における結果を示した。ただし、その高度での T_s の実測値はないので、高度軸の値にあわせた位置を黒丸で記入してある。ショロン地域のAX 010 氷河は、そのなかでも最も南部に位置しており、論文Iの図6から、1978年の T_s より 0.5°C 低くて氷河全体の収支 $\bar{b}_s$ が平衡になる場合の結果をよみとった。クンプ地域については、ギャジョ氷河が1976年7月~9月 (Ageta and Satow, 1978), EB 050 氷河 (AX 010 氷河の北東33 km) が1976年6月~9月、コンマ氷河が1974年6月~9月の結果である。また、リッカ・サンパ氷河は西ネパールのドウラギリ・ヒマール北面のムクト・ヒマールにあり、1974年7、8月の結果 (Fujii et al. 1976) である。この氷河は、AX 010 氷河から西北

西に約 320 km 離れている。

図 5 に記入された観測結果は、測定期間や観測方法に不完全さが残されているが、全体に、 P_s が少ないほど、 $b_s=0$ の図上の位置(黒丸)が計算値より上にずれる傾向がみられる。そこで、そのちがいの原因のひとつと考えられることとして、2章の最後でふれたように、前節でのべた高度と気温の関係が、より乾燥した地域でも成りたつかどうか検討してみる。

前記のネパール・ヒマラヤ氷河学術調査隊により、1976年7月と8月には、ショロン地域の高度4850m地点で、クンプ地域のハジュン(高度4420m)との同時気象観測が実施された。その結果、えられた同期の平均気温の2点間の差は 3.2°C であり、ショロン地域の平均値 3.1°C から $0.6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ の減率で計算した値よりもハジュンは 0.6°C 高い。同期の降水量は、ショロン地域814 mm, ハジュン178 mmであり、ハジュンが気温減率で計算した値よりも高温なのは、比較的ショロン地域にくらべて好天であるからと考えられる。このような場合、図5のクンプ地域の氷河の $b_s=0$ になる高度にショロ

ン地域の気温で決められている高度をもちいたため 0.6°C 分、すなわち100m分の差異が生じたと考えられる。

同様にして、1974年7月と8月にハジュンと同時に観測された、リッカ・サンパ氷河のあるヒドン・バレ(高度5055m)の結果をみると、ハジュンの平均気温から $0.6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ の減率で計算した値よりもヒドン・バレは 1.2°C 高い。同期の降水量は、ハジュン328 mm, ヒドン・バレ200 mmであり、やはりヒドン・バレが好天のため200m分の差異が生じたと考えられる。すなわち、クンプ地域の高度軸は図5より100m分下へスライドさせ、リッカ・サンパ氷河はさらに200 m, 計300 mスライドさせたものがより実際の状態に近いと考えられる。すると、図5の白丸でしめしたような結果となり、実測された $b_s=0$ の高度で推定される各氷河の気温が計算によるカーブとよい一致をみることがわかる。

論文Iで述べたように、夏の気温は夏期涵養型氷河の涵養量と消耗量の両方に強く影響をあたえ、その結果は収支に鋭敏に作用する。したがって、論文Iでもとめた収支各要素の算定式から他地域の氷河分布高度を検討するには、各々の地域における気温、降水量の年変化パターン、とくに夏の気温と高度の関係を十分吟味したうえでなければならない。

Loewe (1971) は、地球上各地の氷河について、質量収支の平衡線での夏期平均気温と涵養量(=消耗量)との関係をもとめて、図6をえた。そこに、図2~5よりえられるネパール・ヒマラヤに一般にある降水量範囲(P_a : 40~200 cm)での計算結果を、NEPALと記した太いカーブで示した。この図の左下の涵養・消耗量が少ない低温部には北極圏の氷河、氷帽がかたまり、中央部は主にヨーロッパの氷河がしめ、右上の涵養・消耗量が多い高温部には北米大陸の氷河が増えてくる。Loeweはこの図で、ノルウェーの氷河調査からえた Ahlmann (1948) のカーブが海洋性気候によるもので、その下側に離れて位置する氷河ほど海洋性気候の影響が弱いとしている。

ネパールの場合は、平衡線での気温の高まりとともに消耗量が急増し、涵養量の少ない低温の極地的氷河から多降水のノルウェー的氷河まで、比較的多様な氷河が分布することがあらわれている。これは、涵養量についてはベンガル湾からのモンスーンの侵入がヒマラヤ山脈の地形的効果でさまたげられ、モンスーンに対する山脈の前面から後面にかけて急な差が生じること、消耗量については再三のべてきた夏期の気温への強い依存性のため大きく変化することによると考えられる。すなわち、比較的せまい地域内のわずかな気温差で、涵養量、消耗量

図 6 ネパール・ヒマラヤの平衡線での夏期気温と涵養量(=消耗量)との関係ならびに地球上各地の氷河(Loewe, 1971による)との比較。
Fig. 6 Calculated relation between summer temperature and accumulation(=ablation) at the equilibrium line in the Nepal Himalaya, and comparison with those of glaciers in the world after Loewe (1971).

とも大きくかわって平衡をたもちうるものが、図6にみられるネパール・ヒマラヤの特徴といえよう。

また図6より、ネパール・ヒマラヤでの涵養量、消耗量は、他地域の氷河にくらべてさほど大きい値をとらないことがよみとれる。それは、ネパールが海岸から600 km 以上離れていることのほかに、年降水量が夏に集中するため雨となって涵養にかかわらない降水が多いこと、また消耗がはげしいはずの夏に多降水ということは、悪天がつづいて日射や昇温をさまたげ、消耗量を減らすということなど、夏期涵養型氷河の特性を反映しているといえよう。たとえば、AX 010 氷河の降水の場合、1978年夏期に氷河全域平均値で128 cmのうち58cm (45%) が雨で流出していると算定された(論文I・4章)。また、消耗については、アルペードの大きい新雪が融解を抑制する効果(Ageta et al. 1980)も無視できない。

また、図6から、平衡線での夏期気温も北米大陸やヨーロッパにくらべて低く、北極圏の氷河、氷帽の気温に近いことがわかる。これは、わずかな涵養量に対して、少ない消耗量によって平衡をとるため、ネパールの氷河が極地に近い低温の高所にしか存在できないことを意味する。そのためネパールの氷河の氷温は低く、これまでの観測例(Mae et al. 1975; Ageta and Satow, 1978; Tanaka et al. 1980)では、Ahlmann (1948)の分類による‘polar glacier’に属するとされている。

4. 交換量と氷河の活動性

(1) 地球上各地の氷河の交換量

前節でのべたように、夏期涵養型氷河は冬期涵養型にくらべ、その場所の年降水量や気温などから期待されるよりも涵養量と消耗量が小さい。すなわち、両者の絶対値の和である交換量(exchange: e)が少なめになる特

徴をもつ。そこで本章では、夏期涵養型氷河の質量収支が地球上各地の氷河のなかでどのような位置をしめるか、さらに比較検討してみる。また、質量収支に関する値を、氷河の存在状態や変動過程にどのように結びつけて検討できるか、今後の課題も含めて考察してみる。

図7と表1に、本章でとりあげる地球上各地の氷河をしめした。これらは、これからのべるような質量収支のデータのえられる氷河のうちから、各地にほぼ均等に分散するよう、かつそれぞれの場所であるべく平均的と考えられるもの33個を選んだ。これらには、南極氷床の一部をなす流域や日本の雪渓なども、参考のために含まれている。

また図7には、いろいろな文献や各地の降水量データから、夏期涵養型氷河が分布すると考えられるチベット高原とその周辺、天山山脈およびアルタイ山脈の一部、アンデス中部、メキシコを斜線でしめしたが、ここで必要な質量収支のデータがえられたのは、ヒマラヤと天山山脈の一部のみである。なお、本章でも前章とおなじく、収支年で測定された結果も含めて確定日付システムの用語を使う。また、収支に関する量(b, c, a, e)の、ある氷河全体での総量は大文字(B, C, A, E)であらわす。

表1には、それぞれの氷河の交換量の算定方法をG, S, Zの3種類にわけて記してある。年間交換量(annual exchange: E_a)は年間涵養量(C_a)と年間消耗量(A_a)の絶対値の和(G値)であり、両者の総量を別個に測定または推定しないと算出できない。しかし冬期涵養型氷河では、涵養が卓越する時期の収支(冬期収支: B_w)と消耗が卓越する時期の収支(夏期収支: B_s)の絶対値の和(S値)で求められる場合が多く、また、涵養域の年間収支と消耗域の年間収支の絶対値の和(Z値)で求め

図7 表1と図8, 9でとりあげる氷河の分布図。氷河が夏期涵養型である地域は、影で示す。

Fig. 7 The index map of the glaciers indicated in Table 1, Figs. 8 and 9. The regions where the glaciers are the summer-accumulation type are indicated with shadings.

表 1 図 7~9 に示した氷河の目録
Table 1. Catalog of glaciers indicated in Figs. 7-9.

No.	Name	Location	Classification of the glacier*	Volume** (m ³ water)	Meth- od***	Year	Source
1	Antarctica	Antarctica	continental ice sheet	2.1×10^{16}	Z	(50-65)	上田, 1971
2	Lambert	Antarctica	(drainage basin, ice stream)	1.9×10^{15}	Z	(-70)	Allison, 1979
3	Shirase	Antarctica	(drainage basin, ice stream)	3.2×10^{14}	Z	(65-75)	Shimizu et al. 1978. Fujii, 1981
4	Meserve	Dry Valley, Antarctica	valley glacier, simple basin	(7.6×10^8)	Z	65.11-66.11	Bull·Carnein, 1970
5	Anvers (SW part)	Anvers Is., Antarctica	a part of ice cap	9.0×10^{10}	Z	(65.11-68.1)	Rundle, 1970
6	Ivory	New Zealand	cirque	(1.3×10^7)		69/70-74/75	Anderton·Chinn, 1978
7	Carstensz	Naussau Mts., New Guinea	valley glacier, simple basin	2.7×10^7	Z	1972	Allison, 1974
8	Meren	Naussau Mts., New Guinea	valley glacier, simple basin	6.2×10^7	Z	1972	Allison, 1974
9	AX010	Shorong, Nepal	mountain glacier, simple basin	(9.1×10^6)	G&Z	78.6-79.9	上田 (this work)
10	Kongma	Khumbu, Nepal	mountain glacier, simple basin	(3.0×10^6)	G&Z	74.6-75.5	上田 (unpublished)
11	Rikha Samba	Mukut, Nepal	valley glacier, simple basin	(2.6×10^8)	Z	74.7-8	Fujii et al. 1976
12	Urumchi River No. 1	east Tianshan, China	valley glacier, compound basins	(4.7×10^7)	G&Z	58/59-73/74	張, 1981
13	Bolshoy Berel	Altay, USSR	valley glacier	(6.0×10^8)		62-67	IAHS-UNESCO, 1973
14	Molodezhnyy	Tianshan, USSR	mountain glacier, ice apron	(2.9×10^7)		64/65-73/74	IAHS-UNESCO, 1977
15	Tsentrallyy Tuyuksu	Tianshan, USSR	valley glacier	(1.0×10^8)		64/65-73/74	IAHS-UNESCO, 1977
16	Dzhankuat	Caucasus	valley glacier	2.5×10^8		67/68-70/71	IAHS-UNESCO, 1973
17	Hintereisferner	Alps, Austria	valley glacier, compound basins	(5.2×10^8)	Z	52/53-69/70	Hoinkes·Rudolph, 1962
18	Hellstugubreen	Norway	valley glacier, compound basins	(1.1×10^8)	S	70/71-74/75	IAHS-UNESCO, 1977
19	Storglaciaeren	Sweden	valley glacier, compound basin	(7.3×10^7)	S	45/46-74/75	Schytt, 1962. Paterson, 1981
20	Hoffel	Iceland	ice cap-outlet gl.	7.0×10^{10}	S	35/36-37/38	Ahlmann, 1948
21	Igan	Polar Ural, USSR	mountain glacier	(1.3×10^7)	S	70/71-73/74	IAHS-UNESCO, 1977
22	14th of July	Spitsbergen	valley glacier, compound basins	(8.3×10^9)	S	33/34	Ahlmann, 1948
23	Greenland	Greenland	continental ice sheet	2.4×10^{15}	Z		Bader, 1961
24	Decade	Baffin Is.	valley glacier, simple basin	(6.2×10^8)	S	65/66-69/70	IAHS-UNESCO, 1973
25	Meighen	Queen Elizabeth Is.	ice cap	1.8×10^9	S	59/60-61/62	Arnold, 1965
26	Gulkana	Alaska Range	valley glacier, compound basin	(2.1×10^9)	S	65/66-69/70	IAHS-UNESCO, 1973
27	South Cascade	North Cascade, USA	valley glacier, simple basin	2.0×10^8	G&S	64/65-65/66	Meier et al. 1971
28	Peyto	Alberta, Canada	valley glacier, compound basin	(9.0×10^8)	S	70/71-74/75	IAHS-UNESCO, 1977
29	Maclure	Yosemite, USA	cirque	(2.7×10^6)	S	66/67-68/69	IAHS-UNESCO, 1973
30	Arikaree	Colorado, USA	cirque	(1.5×10^7)	S	68/69-72/73	IAHS-UNESCO, 1977
31	Koryto	Kamchatka, USSR	valley glacier	(5.5×10^8)	S	64/65-70/71	IAHS-UNESCO, 1977

(表 1 つづき)

No.	Name	Location	Classification of the glacier*	Volume** (m ³ water)	Meth- od***	Year	Source
32	Yukikabe	Daisetsu Mts., Japan	(perennial snow patch)	2.4×10^3	S	64/65-70/71	井上・松田, 1973
33	Hamaguri Yuki	Tateyama Mts., Japan	(perennial snow patch)	7.2×10^3	S	67/68-75/76	樋口他, 1979

* mainly according to the instructions given in UNESCO/IASH (1970a).

** Volumes in the parentheses were calculated with estimated mean depths of glaciers, mainly on the basis of the relations between areas and depths by Müller (1970). Average densities were assumed as 0.9 g/cm³ for the glaciers more than 50 m in the mean depth and 0.8 g/cm³ for thinner glaciers.*** Methods for the measurement or the estimation of the amounts of annual or total exchange (E_a or E_t).

G: gross total of annual or total accumulation and |annual or total ablation|,

S: seasons' total of |summer balance| and winter balance,

Z: zones' total of annual or net balance in the accumulation area and |that in the ablation area|.

(| |: the absolute value)

図 8 地球上各地の氷河 (表 1) の年間交換量 ($\bar{e}_a$) と年間収支 ($\bar{b}_a$) — 面積による平均。

白印: 正の収支, 黒印: 負の収支

丸: 緯度 $0^\circ \sim 30^\circ$, 四角: $30^\circ \sim 60^\circ$,

三角: $60^\circ \sim 90^\circ$

G, S, Z: 表 1 で説明した方法

Fig. 8 Annual exchange ($\bar{e}_a$) and annual balance ($\bar{b}_a$) in the area-average for the glaciers in the world (Table 1).

open mark: positive balance, solid mark: negative balance, circle: $0^\circ \sim 30^\circ$ Latitude, square: $30^\circ \sim 60^\circ$ Lat., triangle: $60^\circ \sim 90^\circ$ Lat., G, S, Z: methods explained in Table 1

られる場合もある。前者の場合、涵養期の消耗や消耗期の涵養があると、また後者の場合、涵養域での消耗や消耗域での涵養があると、年間交換量を低めにみることになる。冬期涵養型氷河では冬期収支と年間涵養量、夏期収支と年間消耗量の間には大差はないと考えられてきたが、夏期涵養型氷河の場合は、これまで述べてきたこと

図 9 地球上各地の氷河 (表 1) の交換度 (ED), 変動度 (VD), 比活動度 (SRD).

記号: 図 8 とおなじ

Fig. 9 Exchange Degree (ED), Variation Degree (VD) and Specific Regimen Degree (SRD) of the glaciers in the world (Table 1).

$$ED = \frac{E_a}{M}, \quad VD = \frac{B_a}{M}, \quad SRD = \frac{VD}{ED},$$

M : mass of the whole glacier,

E_a : annual exchange for the whole glacier,

B_a : annual balance for the whole glacier,

symbols: same as Fig. 8

から大きな問題があるので、検討してみる。

図 8 に、地球上各地の氷河の交換量の大小が収支の違いにどのようにかかわっているかを調べるため、それぞれの氷河の年間交換量と年間収支を面積による平均値でしめた。図中の太字 (No. 9~12) は、表 1 にある夏

期涵養型氷河の番号である。縦軸、横軸とも表1に記してある年度の平均値であるが、それは氷河によって時期および年数にちがいがあ。また、縦軸は各年度の収支の代数和の平均を絶対値で示しているの、年間収支の正(白印)または負(黒印)どちらかへの偏りをあらわし、収支が年によって正負交代している氷河の場合、小さな値となる。日本の雪渓(No. 32, 33)およびアイボリー氷河(No. 6)は、図の範囲から大きくはみだすので除いた。

同一の氷河で交換量を別々の方法で算出できるものは、それらの結果を横線でつなぎ、表1にある算定法の記号を示してある。冬期涵養型では、アメリカ北西部のサウス・カスケード氷河(No. 27, 涵養期11月~5月)の2測定年分の資料しかえられていないが、季節別の収支からえた交換量(S値)は、真の年間交換量(G値)の93%にのぼる。一方、ネパールの夏期涵養型では、コンマ氷河(No. 10, 涵養期8, 9月)が46%, AX010氷河(No. 9, 涵養期9月~5月)が25%と、S値が非常に小さくなることわかる。すなわちS値で年間交換量を近似することは、冬期涵養型氷河では、ここであげた例でみるかぎり、あまり問題はないようであるが、夏期涵養型氷河では、不適当といえる。

図8から、年間交換量は、アメリカの氷河(No. 27, 29, 30)とソビエトの海岸寄りの氷河(No. 21, 31)が多く、ヨーロッパ北部の氷河(No. 18, 19, 20)がつづく。アジアの夏期涵養型氷河の年間交換量(No. 9~12のG値)は、南極大陸の内部(No. 1~4)ほどわずかではないが、ソビエトの内陸部(No. 13, 14, 15)や北極圏の氷河(No. 22~25)と同様で、200cm程度かそれ以下と少ない。なお、ニューギニアの氷河(No. 7, 8)の値(Z値)も小さいが、このような、赤道付近にあるため明瞭な涵養期と消耗期をもたない氷河では、真の値(G値)とは差が大きいことが十分考えられ、さらに研究が必要である。

交換量の少ない氷河では、涵養量や消耗量が小さいわけだから、確率としては、両者の代数和である収支の絶対値も一般に小さくなる傾向があると考えられる。しかし図8より、交換量が少なくともAX010氷河(No. 9)のように、収支の絶対値がかなり大きくなる氷河もあることがわかる。このようなことは、夏期涵養型氷河の場合、論文Iでものべたように、夏期気温のわずかの違いで収支が平衡状態から大きくはずれる傾向があるので、十分おこりうることである。そしてネパールの氷河について比較すると、AX010氷河からコンマ氷河(No. 10)、リッカ・サンパ氷河(No. 11)へと、夏期モンスーンの

影響が弱くなる氷河ほど収支の絶対値が小さくなる。これは夏期涵養量の大小関係、すなわち夏期涵養型氷河としての特徴の強弱関係と一致している。

これだけのデータではまだ不十分であるが、以上のように、交換量と収支との関係には、単に数値の大小による数学的確率だけでなく、それぞれの氷河における気候条件と涵養、消耗との関係にみられる特性が反映される場合もあると考えられる。これは、いろいろな交換量のもとにおける氷河の変動の程度、すなわち気候の変化に対する氷河質量の安定・不安定性にもかかわることであり、次節でさらに検討してみる。

(2) 氷河の活動性

氷河の交換量や収支は、氷河をとりまく環境条件、主に気候に規定されてくる量である。気候が涵養や消耗をとおして氷河にどのような作用をおよぼし、その結果氷体がどう応答するかは、氷河自身の活動を考えるうえで欠くことができない。すなわち気候システムと氷体システムの関係をとらえる必要がある。

氷河の交換量は、氷河を通じた水循環の速さや流動量にかかわり、収支は氷河の変動量(拡大・縮小、末端の前進・後退)と気候の変化への応答時間にかかわってくる。そして、ここにあげたいろいろな量はいずれも、氷河の全質量に対して年間の交換量や収支がどれくらいの比率をしめているかで、その程度が決まってくる。すなわち、氷河の活動にとって主要な物理量として、交換量、収支、氷河質量の3要素があげられよう。そこで著者は、それらを組みあわせて氷河の活動性を表現するために、下記の3個の指標を提案した(比較氷河研究会, 1973)。

$$1) \text{ 交換度(Exchange Degree)} = \frac{\text{年間交換量}(C_a - A_a)}{\text{氷河質量}}$$

$$2) \text{ 変動度(Variation Degree)} = \frac{\text{年間収支}(C_a + A_a)}{\text{氷河質量}}$$

$$3) \text{ 比活動度(Specific Regimen Degree)}$$

$$= \frac{\text{変動度}}{\text{交換度}} = \frac{\text{年間収支}(B_a)}{\text{年間交換量}(E_a)}$$

ここで年間収支が平衡の場合、 $C_a = |A_a| = 1/2 E_a$ なので、交換度の1/2の逆数は、氷河質量全部がいかわる年数をしめす。また変動度の逆数は、氷河質量が、年間収支が正の場合2倍、負の場合0となる年数を示す。いいかえれば、1個の氷河全体に対して、交換度は代謝の速さ、すなわち質量交換の活発さを、変動度は変化の速さ、すなわち質量変動の活発さをあらわす。前者は氷河の一定時期の存在状態をしめし、後者はその結果が後に繰りこされていく変動過程をしめす。したがって、上

記の比活動度とは、ある時期の存在状態の活発さのうちの何割が変動の活発さとして、のちのちまで顕在し、残されていくかをしめす。すなわち、その氷河が変動期にあるか平衡期にあるかの目安となり、その値は $-1(C_a=0$ の場合) から $+1(A_a=0$ の場合) の範囲にある。

以上の3個の指標は、性格がちがうものの、たがいに関連した氷河の活動性を表現するものとして組みあわせてもちいることができ、これらを総称して活動度 (Regimen Degrees) とよぶ。なお、正負の値をもつ変動度と比活動度は、上記のような性質を表現しているから、それらの大小とは、ここではその絶対値の大小をさし、正負のちがいは言及しない。

図9は、この3個の活動度を一覧するためのものである。縦軸と横軸は対数目盛にしてあるが、値はそれぞれ図8の縦軸と横軸の値を氷河の平均の厚さで割ったものになる。氷河の質量には、氷床から雪渓状の小型氷河まで桁に大差があるので、変動度と交換度は対数目盛であらわれ、比活動度は図中に平行して引かれた斜線で示される。

図上で、一般には大質量の氷河ほど左下部に寄り、左下から右上にむかって、おおむね氷床、谷氷河、山腹氷河 (mountain glacier: 圏谷氷河、ニチ氷河など)、雪渓の順にならぶ。また、縦軸にそって上部ほど質量変動が大きい氷河が位置し、横軸にそって、右に寄るほど物質代謝の活発な、すなわち一般には消耗のはげしい温暖地か水蒸気補給源に近くて涵養量の多い海洋性地域にある氷河が位置することになる。

図9より、ネパールの氷河は、夏期モンスーンの影響の少ない西ネパールのリッカ・サンパ氷河 (No. 11) にくらべて東ネパールのAX 010氷河 (No. 9) とコンマ氷河 (No. 10) の変動度の高いことが目立つ。一方、真の交換度 (G値) は図8でみたように交換量が少ないながらも、東ネパールの2個の氷河は氷河質量が小さいため、大きめとなる。このふたつの氷河は比活動度も高めで、結局、3個の活動度指標のすべてについて西ネパールの例より大きめの値をもつ。なお、おなじ夏期涵養型の天山山脈の氷河 (No. 12) は、東ネパールと西ネパールの氷河の間に位置している。夏期涵養型氷河にもいろいろな質量の氷河があるので、図上でそれらの氷河のプロットが1ヶ所に集中する傾向はとくにみとめられない。

活動度の3個の指標は、年々個々の値を氷河ごとにもつが、目的の時間スケールに応じて適當年数の平均値を使う方法や、対象とする何年間かのばらつきの特性を統計的に比較検討する方法、あるいは地域や地形によ

て平均的な傾向をみたりばらつきの幅を求めたりなど、さまざまな応用が可能である。図9では図8とおなじく目的を厳密に限定せず、ほぼ同一時期における世界各地の氷河の総観的な比較をしたが、特定の氷河について気候条件と氷体量の長い年代にわたる変化があきらかになった場合は、その氷河の変動の軌跡をしるすこともできる。

現在、ネパール・ヒマラヤの夏期涵養型氷河については、それぞれ1~2年分の観測結果しかない。しかし、多年にわたる活動度のデータを得るための一例として、各種の方法をもちいてまず過去数十年、数100年の気候状態 (気温、降水量など) を復元できれば、本論文でしめたような方法によってその間の涵養量、消耗量、収支を推定することも可能であろう。このようになんらかの方法で今後、多年のデータが得られた場合、この活動度の図は、以下にのべるようなことを明らかにするためにも有用であろう。

特定の氷河について年々の活動度を示すことができるようになった場合、夏期涵養型の氷河は、冬期涵養型氷河にくらべ図上で横の変化に対する縦の変化の割合が大きいという特徴をしめすであろう。なぜなら、論文I (4章) でのべたように、夏期気温のわずかな変化で収支が大きくかわるので、変動度の年々変化が激しいであろう。それに対して交換度の方は、やはり論文I (4章) でみたように、気温が低下して涵養量が増えれば消耗量が減り、逆に前者が減れば後者が増える関係にあったので、変化にとぼしいと考えられるからである。そうすると比較的交換量の少ない夏期涵養型氷河の比活動度は、年によってはかなり大きい値 (±1に近い値) をとりうるであろう。

また、第4紀のタイム・スケールでみた場合、渡辺他 (1967) が指摘しているように、氷期には、同程度の雪線低下があっても、急傾斜で温暖な低地にいたるヒマラヤ南面にくらべ、平坦な高地がつづくヒマラヤ北面のチベット高原では氷河規模が大幅に拡大しえたことが、氷河地形からもよみとれる。すなわち、氷河質量の変動の様相が、ヒマラヤの北面と南面で大きく異なっていたと考えられる。このような場合、ヒマラヤの北面の氷河の活動度を示す図上の位置は、現在の氷河がその大小によっておおむね左下~右上の方向にならんでいるように、ななめ方向により広範囲に変化しうる。

また、郭 (1974) は、中期更新世以前のヒマラヤの平均高度は4500m以下でヒマラヤの北面でも海洋性気候であったのが、晩期更新世以後、山脈の上昇による障壁効果によって大陸性にかわったとしている。すなわち、交

換量の変動の様相も、ヒマラヤの北面と南面でかなりちがっていた可能性が高い。さらに、安成(1980)や伏見(1980)ものべているように、ヒマラヤには現在のような夏期モンスーンの大気循環系のみでなく、降水時期が通年あるいは冬期の時代があったことも十分考えられる。このことは、ヒマラヤの氷河が冬期涵養型から現在の夏期涵養型へ変換した可能性をしめす。以上のようなことは、すべて氷河の活動度に反映されるので、本論文でのべてきた、現在夏期涵養型の典型であるヒマラヤの氷河の変動の軌跡を復元し、南面と北面あわせて活動度の図上にしるしてみることは、今後の課題として興味深い。

5. む す び

本論文Ⅰ、Ⅱを通して、収支要素の算定式よりえられたネパール・ヒマラヤの夏期涵養型氷河の一般的な質量収支特性は、次のようにまとめられる。

〔夏期の質量収支〕

- 1) 年間収支は、冬期の涵養、消耗が不活発なため、夏期の収支で代表される。
- 2) 夏期気温の上昇は、涵養量の減少、消耗量の増加をもたらす。これらが相加的にはたらいて収支はさらに大きく減少する。夏期気温の下降はその逆の変化をもたらす。収支要素は夏の気温に大きな影響をうける。
- 3) 夏期気温の変化に対して涵養量より消耗量の変化が大きく、それは高温域ほど大である。その傾向は、収支の変化に反映される。

〔質量収支の年変化パターン〕

- 1) 冬の気温の変化は収支にほとんど影響しないが、夏はわずかな気温変化で、収支の正負が左右される。
- 2) 収支の累計値の年変化パターンは気温の変化に対して不安定で、その極大・極小期が一定せず、収支年を収支累計値の増加期と減少期に区切りにくい。そのため、確定日付システムの方が合理的である。

〔質量収支の高度分布〕

- 1) 涵養量は、夏期平均気温が約 -1°C 以下の高所では降水量と等しく、約 3°C 以上の低所までは夏期降水量にしめる固体降水量の比が気温に依存してほぼ直線的に減少する。
- 2) 消耗量は高温な低所ほど急増し、収支の高度分布も主に消耗量の変化を反映して低所ほど大きく変化する。
- 3) 平衡線の高度は、年降水量が少ない場合ほど急な上昇をみせる。

このような結果より全体を通していえることは、夏期涵養型氷河の定常的な性質および変動特性は、夏の気温

条件に大きく依存しているということである。

また、収支の高度プロファイルから‘activity index’、‘ablation gradient’および平衡線での気温、涵養量(=消耗量)などを求めることができ、それらを地球上の他地域の氷河と比較した。その結果、ネパール・ヒマラヤの氷河は夏期涵養型であるため上記の両示数が大きくなること、一方涵養量と消耗量は小さくなることがわかった。そして、交換量、収支、氷河質量をくみあわせた活動度により、ヒマラヤの夏期涵養型氷河の変動過程を地球上各地の氷河と比較しうる可能性をしめた。

論文Ⅰ、Ⅱを通じ、シヨロン地域の一つの氷河観測結果から出発して、ネパールの夏期涵養型氷河における質量収支の一般的特性を検討したが、ここでもちいた算定式をもとに、地域的な気候特性を考慮すれば、ネパール・ヒマラヤ全域の氷河についてさまざまなシミュレーションができる可能性をもしめた。その場合、計算値と個々の氷河における現実の状態との間に偏差が生じてくるであろうが、それはもちいた算定式に考慮されていない個々の氷河の特性として、一般的性質と区別しうであろう。また、本論文の算定式は、高度差の小さい小規模な氷河における、主に1夏のみの結果からみちびかれたものであり、高度差の大きい大規模な氷河スケールや小氷期クラスをこえる気候変動スケールの議論にもちいるには、限界があろう。しかしながら、氷河質量収支のシミュレーションの一方法をしめたものとして、意味があるとおもわれる。

謝 辞

この研究のもととなった現地調査を共同で実施したネパール・ヒマラヤ氷河学術調査隊の諸氏、ならびに解析途上で数々の有益なご意見をいただいた比較氷河研究会の諸氏、また本論文に貴重な助言をいただいた樋口敬二教授と大畑哲夫氏(名古屋大学水圏科学研究所)には終始負うところ多く、深く感謝いたします。

文 献

- 上田 豊, 1971: 南極の質量収支と今後の課題. 雪氷, 33, 205-214.
- Ageta, Y., 1976: Characteristics of precipitation during monsoon season in Khumbu Himal. Seppyo, 38, spec. issue, 84-88.
- 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 I——東ネパール A X010

- 氷河の質量収支. 雪氷, **45**, 81-91.
- Ageta, Y., Ohata, T., Tanaka, Y., Ikegami, K. and Higuchi, K., 1980: Mass balance of Glacier AX010 in Shorong Himal, east Nepal during the summer monsoon season. *Seppyo*, **41**, spec. issue, 34-41.
- Ageta, Y. and Satow, K., 1978: Study of the mass balance of small glaciers in Khumbu Himal during the summer monsoon season. *Seppyo*, **40**, spec. issue, 4-11.
- Ahlmann, H. W., 1948: Glaciological research on the North Atlantic Coasts. R.G.S. Res. Ser.; No. 1, R. Geogr. Soc., London, 83 pp.
- Allison, I., 1974: Morphology and dynamics of the tropical glaciers of Irian Jaya. *Z. Gletscherkd und Glazialgeol.*, **10**, 129-152.
- Allison, I., 1979: The mass budget of the Lambert Glacier Drainage Basin, Antarctica. *J. Glaciol.*, **22**, 223-235.
- Anderton, P. W. and Chinn, T. J., 1978: Ivory Glacier, New Zealand, an I.H.D. representative basin study. *J. Glaciol.*, **20**, 67-84.
- Arnold, K. C., 1965: Aspects of the glaciology of Meighen Island, Northwest Territories, Canada. *J. Glaciol.*, **5**, 399-410.
- Bader, H., 1961: The Greenland Ice Sheet. Cold Regions Science and Engineering, part I-B2, CRREL, 18 pp.
- Bull, C. and Carnein, C. R., 1970: The mass balance of a cold glacier; Meserve Glacier, South Victoria Land, Antarctica. International Symposium on Antarctic Glaciological Expedition (ISAGE), Hanover, Sep. 1968, IASH and SCAR, pub. no. 86, 429-446.
- 中国科学院兰州冰川冻土沙漠研究所冰川研究室, 1974: 我国西藏南部珠穆朗玛峰地区冰川的基本特征. 中国科学, 1974年4期, 383-400.
- Fujii, Y., 1981: Aerophotographic interpretation of surface features and an estimation of ice discharge at the outlet of the Shirase Drainage Basin, Antarctica. *Antarct. Rec.*, **72**, 1-15.
- Fujii, Y., Nakawo, M. and Shrestha, M. L., 1976: Mass balance studies of the glaciers in Hidden Valley, Mukut Himal. *Seppyo*, **38**, spec. issue, 17-21.
- Fushimi, H., 1978: Stratigraphic studies of the Gyajo Glacier, Khumbu Himal. *Seppyo*, **40**, spec. issue, 17-20.
- 伏見碩二, 1980: 内陸アジアの氷河群. 地球, **2**, 201-210.
- 郭 旭东, 1974: 中国西藏南部珠穆朗玛峰地区第四纪气候的变迁. 地质科学, 1974年第1期, 59-80.
- 樋口敬二・大畑哲夫・渡辺興亜, 1979: 剣沢圏谷, 多年性雪渓はまぐり雪の規模の変動. 雪氷, **41**, 77-84.
- 樋口敬二・渡辺興亜・牛木久雄・奥平文雄・上田 豊, 1970: 剣沢における多年性雪渓の研究(I). 雪氷, **32**, 129-146.
- 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.
- Hoinkes, H. and Rudolph, R., 1962: Mass balance studies on the Hintereisferner, Ötztal Alps, 1952-1961. *J. Glaciol.*, **4**, 266-280.
- IAHS-UNESCO, 1973: Fluctuations of glaciers 1965-1970. A contribution to the International Hydrological Decade, compiled by P. Kasser, Paris, 357 pp.
- IAHS-UNESCO, 1977: Fluctuations of glaciers 1970-1975. A contribution to the International Hydrological Programme, compiled by F. Müller, Paris, 269 pp.
- Ikegami, K. and Inoue, J., 1978: Mass balance studies on Kongma Glacier, Khumbu Himal. *Seppyo*, **40**, spec. issue, 12-16.
- 井上雅之・松田益義, 1973: 大雪山雪壁雪渓における質量収支の研究. 雪氷, **35**, 180-191.
- Loewe, F., 1971: Considerations on the origin of the Quaternary ice sheet of North America. *Arct. and Alp. Res.*, **3**, 331-344.
- Mae, S., Wushiki, H., Ageta, Y. and Higuchi, K., 1975: Thermal drilling and temperature measurements in Khumbu Glacier, Nepal Himalayas. *Seppyo*, **37**, 161-169.
- Meier, M. F., 1961: Mass budget of South Cascade Glacier, 1957-60. *US Geol. Surv. Prof. Pap.* 424-B, 206-211.
- Meier, M. F., Tangborn, W. V., Mayo, L. R. and Post, A., 1971: Combined ice and water balances of Gulkana and Wolverine Glaciers, Alaska, and South Cascade Glacier, Washington, 1965 and 1966 hydrologic years. Ice and water balances at

- selected glaciers in the United States. US Geol. Surv. Prof. Pap. 715-A, 23 pp.
- Müller, F., 1970: A pilot study for an inventory of the glaciers in the Eastern Himalayas. Perennial ice and snow masses. A contribution to the International Hydrological Decade. UNESCO/IASH, Paris, 47-59.
- Paterson, W. S. B., 1981: The physics of glaciers. 2nd ed. Oxford, Pergamon Press, 380 pp.
- Rundle, A. S., 1970: Snow accumulation and ice movement on the Anvers Island ice cap, Antarctica; a study of mass balance. International Symposium on Antarctic Glaciological Exploration (ISAGE), Hanover, Sep. 1968, IASH and SCAR, pub. no. 86, 377-390.
- Schytt, V., 1962: Mass balance studies in Kebnekajse. J. Glaciol. 4, 281-288.
- Schytt, V., 1967: A study of 'ablation gradient'. Geogr. Ann., 49A, 327-332.
- 施 雅風・謝 自楚, 1964: 中国現代冰川の基本特徴. 地理学報, 30, 183-208.
- Shimizu, H., Watanabe, O., Kobayashi, S., Yamada, T., Naruse, R. and Ageta, Y., 1978: Glaciological aspects and mass budget of the ice sheet in Mizuho Plateau. Glaciological studies in Mizuho Plateau, East Antarctica, 1969-1975, ed. T. Ishida, Mem. Natl. Inst. Polar Res., spec. issue no. 7, Tokyo, 264-274.
- Shumskii, P. A., 1947: Energiia oledeneniia i zhizn' lednikov (The energy of glaciation and the life of glaciers). Moscow, Geografiz., 58 pp.
- Tanaka, Y., Ageta, Y. and Higuchi, K., 1980: Ice temperature near the surface of Glacier AX010 in Shorong Himal, east Nepal. Seppyo, 41, spec. issue, 55-61.
- UNESCO/IASH, 1970a: Ice and snow on the surface (glacier inventory). Perennial ice and snow masses. A contribution to the International Hydrological Decade. UNESCO, Paris, 11-19.
- UNESCO/IASH, 1970b: Mass balance terms. Combined heat, ice and water balances at selected glacier basins. A contribution to the International Hydrological Decade. UNESCO, Paris, 18-20.
- 渡辺興亜・遠藤八十一・石田隆雄, 1967: ヒマラヤの氷河について I. 低温科学物理篇, 25, 197-217.
- 安成哲三, 1980: 大気循環系と氷河系. 地球, 2, 180-188.
- 張 金華, 1981: 天山烏魯木齊河源 1 号冰川物質平衡研究. 冰川凍土, 3, 2, 32-40.

**Characteristics of mass balance
of the summer-accumulation type glacier in the Nepal Himalaya (II)
— Mass balance of Glacier AX010 in east Nepal —**

Yutaka AGETA

Faculty of Education, Yamaguchi University, Yamaguchi 753

In a previous report, glaciers which have more accumulation in summer than winter were called the 'summer-accumulation type'. The mass balance of Glacier AX010 in east Nepal was studied as a model case of such a type. In that study, accumulation, ablation and balance during each half month were calculated from mean air temperature (T_h) and precipitation (P_h) during the same period. By the use of the above formulas, various annual values of mass balance elements are calculated in the present study, giving values of T_h and P_h through the year for various cases of annual mean air temperature and annual precipitation. The altitudinal profiles of mass balance of glaciers in various places in Nepal, where summer precipitation decreases

from east to west, are shown from the calculated results. It can be seen in those profiles that the increase of annual ablation is more at the lower warmer part and annual balance shows larger altitudinal difference than annual ablation due to the decrease of accumulation in solid precipitation on the lower part. The amounts of annual exchange of the glaciers in Nepal are compared with those of glaciers elsewhere in the world and relatively small amounts are obtained for the summer-accumulation type. However, their 'activity indexes' are relatively high, since the dependence of balance on air temperature, which changes with altitude, is high. By the use of 'Regimen Degrees' which are defined with the combinations of total mass, annual exchange and annual balance of a whole glacier, the glaciers of the summer-accumulation type are compared with glaciers elsewhere in the world.

(1982年 8 月 23 日 受付, 1983年 5 月 9 日 改稿 受理)