

## 最終氷期における日高山脈の氷河の質量収支と流動の復元

劉大力・小野有五(北大地環研)・成瀬廉二(北大低温研)

### 1. はじめに

氷河地形は古気候復元のよい指標となりうる。筆者らは、空中写真にもとづき、解析図化機によって、日高山脈の氷河地形を7つのステージに区分し、それぞれのステージの氷河の復元と、流量を最大にする横断面の位置から雪線(均衡線、平衡線、equilibrium line)高度の推定を試みた(劉・小野、1996)。例として、最終氷期のステージ4(約1.8万年前)の札内川十の沢カールの氷河と雪線高度(equilibrium line altitude・ELA)を図1に示す。次にステージ4の年平均気温が現在より6℃低下していたと仮定して、氷河の質量収支の復元を行った(劉ほか、1996)。図2に示すように、十の沢カールの氷河の面積高度分布と質量収支について、流量を最大にする横断面の位置から求めたELAは標高1450mであり、質量収支を0にするELAは標高1479mとなって、その差は29mであった。日高山脈の18個の氷河について調べた結果、この差は-5~37m(平均値:15m)の範囲におさまった。

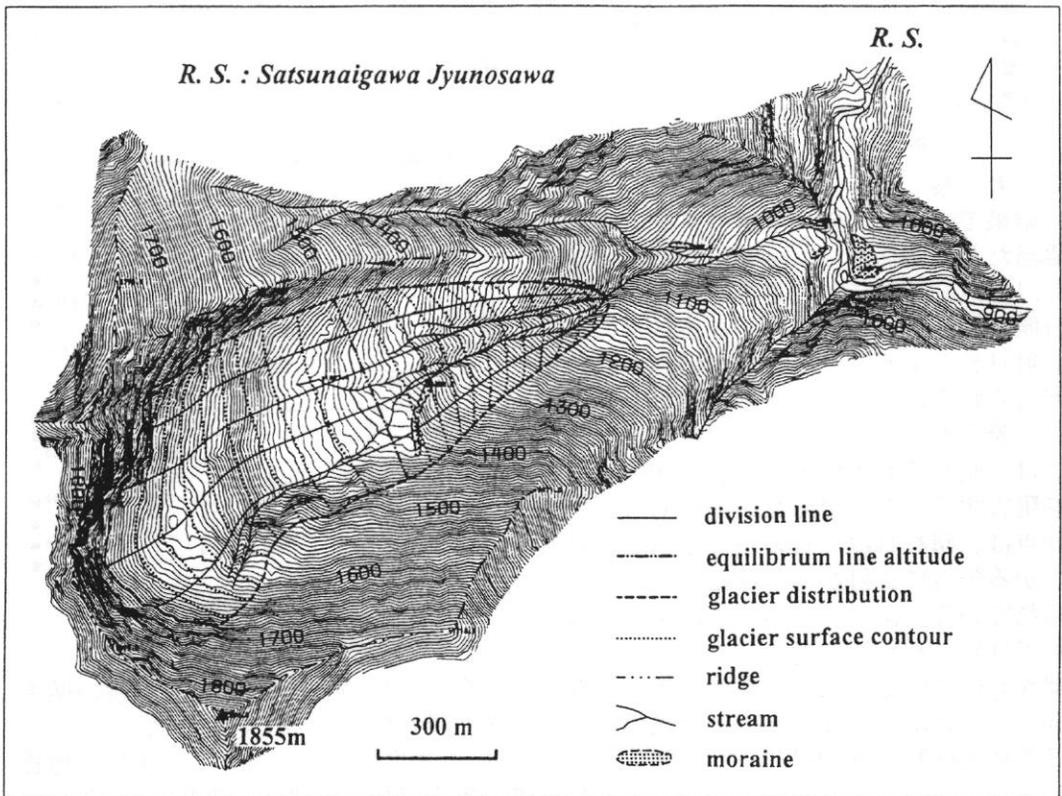


図1 解析図化機で作った札内川十の沢の5mコンターの地形図およびプロットしたモレーンと復元したステージ4の氷河と雪線高度

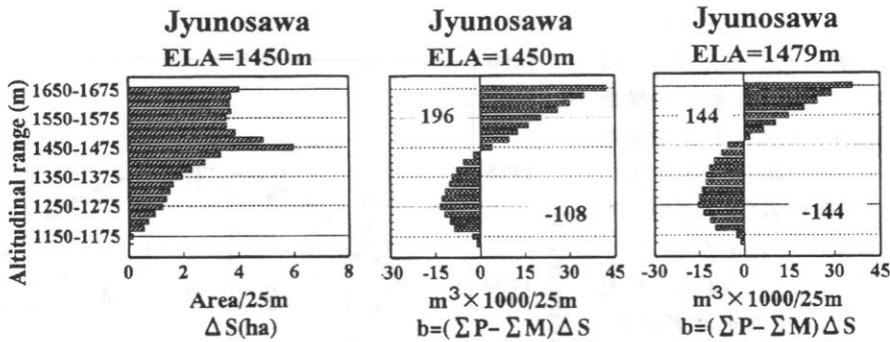


図 2 復元した札内川十の沢の氷河の面積高度分布と質量収支

本報告では、復元したステージ4の札内川十の沢カールの氷河を例として、氷河の横断面を5分割し、層流と仮定した氷河の流動則から、各高度の氷河の塑性流動速度と流動量を計算し、その流動を復元した。

## 2. 氷河の流動速度と流動量の計算法

### (1) 氷河の平均流動速度の計算

氷河の流動機構として、塑性流動と底面すべりを考えると、氷河表面で観測される流動速度( $u_s$ )は、塑性流動速度( $u_p$ )と底面すべり速度( $u_b$ )の和( $u_p+u_b$ )で表される。氷河の流動則から、深さ $Z$ の氷の歪速度は自重による剪断応力( $\rho g Z \sin \alpha$ )の $n$ 乗に比例するので、傾斜が $\alpha$ の層流の氷河では、塑性流動量は歪速度を氷河底面から表面まで積分して与えられる。さらに、氷河の深さについての平均流速 $u$ は塑性流動速度の分布から次式で表わされる(Paterson, 1994)。

$$u-u_b = 2A(\rho g \sin \alpha)^n h^{n+1} / (n+2) \quad \dots (1)$$

ここで、 $h$ :氷河氷の厚さ(m)、 $\alpha$ :氷河の流動方向の表面傾斜、 $g$ :重力加速度( $9.8\text{m/s}^2$ )、 $\rho$ :氷の密度( $900\text{kg/m}^3$ )、 $n$ :氷河の流動則のべき指数、 $A$ :氷の温度に依存する流動パラメーターである。 $n$ の値は、約1.5~4.0に変化することが知られているが、一般にはその平均的な $n=3$ として扱われることが多いので、ここでは $n=3$ とした。 $A$ の値は、日高山脈の過去の氷河は温暖性氷河にあったと考え、ここでは氷の温度 $0\sim-1^\circ\text{C}$ の時の $A=5 \times 10^{-24} [(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})^{-3}/\text{s}]$ の値(Paterson, 1994)を使用した。

式(1)に見られるように、氷河の平均流速( $u$ )は底面すべり速度( $u_b$ )と塑性変形による平均流速の和であるが、本論文では $u_b=0$ と仮定し、塑性変形だけによる平均流速をみつかった。

### (2) 氷河の流動量の計算

単位時間あたり横断面を通過する全流動量( $F$ )は、図3に示すように、氷河の横断面を5分割し、それぞれの横断面での流量の総和としてもとめた。5分割した横断面の1と5番をサイド、2と4番をハーフ、3番をセンターと呼ぶ。すなわち、

$$F = \sum F_i \quad (i=1, 2, \dots, 5) \quad \dots (2)$$

$$F_i = u_i \cdot S_i \dots (3)$$

によって計算した。ここで、 $i$ は横断面の番号、 $u_i$ は $i$ 番目の横断面の平均流速、 $S_i$ は $i$ 番目の横断面面積である。 $i$ 番目の氷河氷の厚さ( $h$ )と表面傾斜( $\alpha$ )については以下の方法でもとめた。

図1に示すように、復元した札内川十の沢カールの氷河表面の25mコンターに対して氷河表面を5分割し、5分割した分界線と氷河表面の25mコンターの交差点の位置から現在の谷底まで氷河氷の厚さを読み取る。しかし図3のBed 1に示したように、現在の谷底には、氷河の形成期にはまだなかった堆積物がたまっている。このような堆積物を除去するため、氷河の形成期の谷の横断形が放物線であったと仮定し、氷河の側岸から谷壁の形を放物線にしたがい谷底に延長し、堆積物を除去した基盤地形(Bed 2)の横断面を復元した。本研究では、このようにして、堆積物を除去した基盤から氷河表面まで厚さ( $h$ )を氷河の厚さとした。5分割した氷河流動方向の表面傾斜( $\alpha$ )は氷河表面のコンターの間隔50m(上方25mと下方25m)の範囲の水平距離を測定することにより計算した。

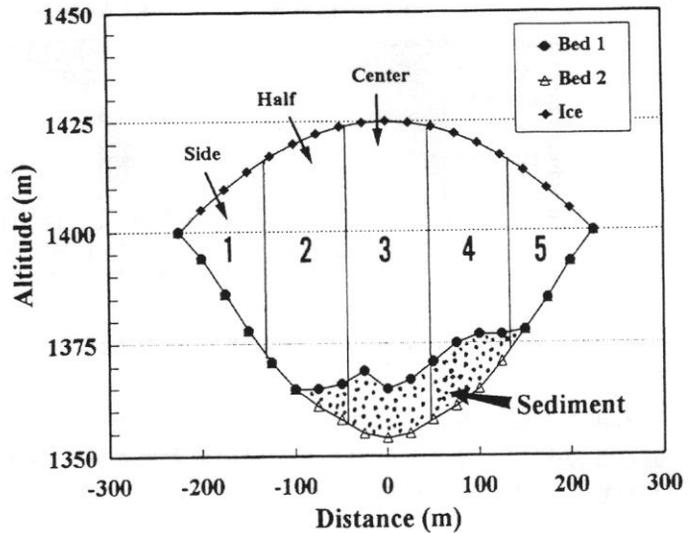


図3 復元した札内川十の沢の  
標高1400mにおける横断面

### 3. 計算結果

図4の右側のグラフは、札内川十の沢カールの氷河の中心に沿う高度25mごとの表面傾斜( $\alpha$ )と氷河氷の厚さ( $h$ )を示す。氷河氷が一番深い地点および表面傾斜が緩やかな位置は劉・小野(1996)によって得られた雪線高度(1450m)である。

図4の左側のグラフは、札内川十の沢カールの氷河の全域にわたって計算されたサイド、ハーフ、センターの平均流速とその横断面の平均流速を示す。氷河の横断方向の流速分布は、センターが最大、次いでハーフ、サイドが最小となっている。一方、氷河の縦断方向の流速分布は、上流部から次第に増加し、平衡線高度で最大となり、氷舌端に向かうにつれて減少する。このような流動パターンは典型的な谷氷河の流速分布を示している。

図4の中央のグラフは、氷河全域にわたる高度25mごとの横断面の年間平均流動速度と年間全流動量を示す。典型的な谷氷河に相当する札内川十の沢カールでは、平衡線高度で、横断面の平均流動速度と全流動量が最大となる。これらが最大となるピークは、図4の右側のグラフに示した氷の厚さのピークに対応し、表面傾斜は最小となる。

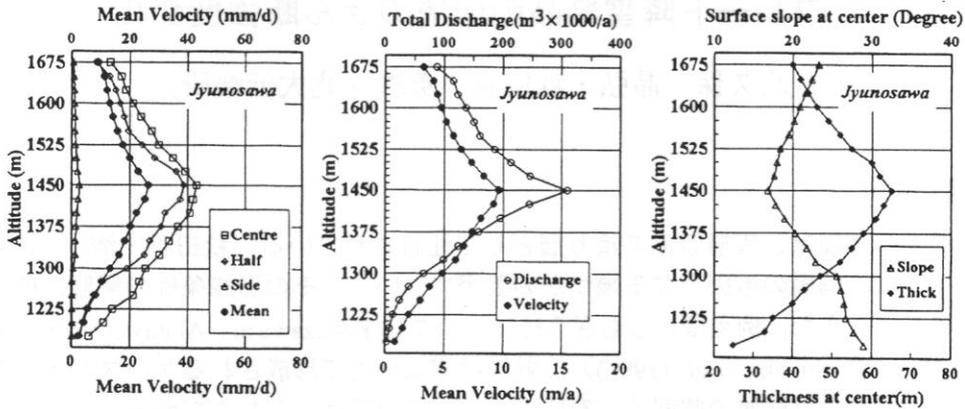


図 4 復元した十の沢の氷河の表面傾斜と氷河氷の厚さから求めた塑性流動速度と流動量

4. まとめ

本研究では、劉・小野(1996)が空中写真判読にもとずき、解析図化機によって、日高山脈の氷河地形から復元した最終氷期の氷河と雪線高度のうち、ステージ4(約1.8万年前)にあたる時期の18個の氷河について、氷河の質量収支の検討を行った(劉ほか、1996)。流量の最大の位置から求めたELAと質量収支を0にするELAとの差は-5~37m(平均値:15m)の範囲におさまった。従って、流量を最大にする横断面の位置から過去の雪線高度を推定する方法は、雪線高度を復元するうえで十分な精度をもった方法といえよう。

このように復元した札内川十の沢カールの氷河の流動は以下のようにまとめられる。

- 1)平衡線高度では、氷河の中央部での氷の厚さは65m、表面傾斜は約17°、塑性変形による日平均流速は44mm/dであった。
- 2)平衡線高度の横断面では、塑性変形による年平均流速は10m/aであり、塑性変形による年間全流動量は $31 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{water/a}$ であった。
- 3)劉ほか(1996)が求めた氷河の年間全消耗量(degree-day factor =  $9 \text{ mm} \cdot \text{water}/^\circ\text{C} \cdot \text{day}$ )は $125 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{water/a}$ であり、年間全涵養量(precipitation gradient =  $1 \text{ m} \cdot \text{water}/\text{km}$ )は $134 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{water/a}$ であったため、本論のような仮定によって計算した塑性変形による年間全流動量は年間全消耗量のわずか25%にすぎない。

引用文献

Paterson, W. S. B. 1994: The physics of Glacier. 3rd ed., 480p..  
 劉 大力・小野有五 1996 解析図化機による氷河地形と雪線高度の復元—日高山脈の事例。地形投稿中  
 劉 大力・小野有五・成瀬廉二 1996 最終氷期における日高山脈の氷河復元—解析図化機に基づく質量収支の検討。地形投稿中