

学 位 論 文 題 名

Reconstruction of alpine glaciers of the Last Glacial age in the Hidaka Range,
central Hokkaido, by photogrammetric workstation

(最終氷期における日高山脈の山岳氷河の解析図化機による復元)

学位論文内容の要旨

Alpine glaciers in the Last Glacial age in the Hidaka Range, central Hokkaido, was reconstructed by using Leica Photogrammetric Workstation SD2000. First, the past glacial distribution was reconstructed on a topographical map with 5 m contour interval, on the basis of DTM (Digital Terrain Model); second, the relative flow flux (F) of the glacier was calculated at several cross sections by the following formula, under the assumption of the glacier flow condition:

$$F = W \cdot V$$

where, W: area of cross section of glacier (m^2), V: relative mean velocity of cross section. Cross sections were sited on a glacier, each 25 m interval, at the point where the AAR (Accumulation Area Ratio) of glacier ranges between 0.50 and 0.80.

The equilibrium line altitude (ELA) was determined at the point where the velocity and flow flux become maximum. The results show (1) that this method is valuable for the past ELA estimation, and (2) that AAR of each stage decreases with the shrinkage of the glacier, while THAR (Toe-to-Headwall Altitude Ratio) of each stage generally increases.

The glacier extent was divided into three stages: stage I, representing the earlier glacial stades of Last Glacial time (Marine Isotope stages 2 and 3, about 60,000 to 40,000 y. B. P.), stage II, LGM (Last Glacial Maximum, about 18,000 y. B. P.), and stage III, LG (Late Glacial, between about 15,000 and 10,000 y. B. P.). The ELA was always lower in the east (Tokachi) side of the Range than in the west (Hidaka) side: it was between 1300m and 1425m in stage I, between 1425m and 1500m in stage II, and between 1600m and 1650m in stage III in the Tokachi side, while it was between 1325m and 1500m in stage I, between 1400m and 1725m in stage II, and between 1600m and 1800m in stage III in the Hidaka side.

The surface contour of glacier was reconstruction by a parabolic approximation of glacial cross section. The mass balance of glacier at stage II (LGM) was reconstructed under the following assumptions: the depression of the mean air temperature is $6^{\circ}C$,

the lapse rate is $5.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$, and the total ablation (T_{ab}) at each altitude is approximated by the equation: $T_{ab}=k \sum T$, where k is the degree day factor for which $9\text{ (mm}\cdot\text{water}/^{\circ}\text{C) day}$ is used. The total accumulation (T_{ac}) at each altitude is expressed by the equation: $T_{ac}=M_{eq}+Pg(Z-ELA)$, where, ELA corresponds to a position of maximum flow flux of the reconstructed glacier, Z : altitude, Pg : precipitation gradient for which $1.0\text{ (m}\cdot\text{water}/\text{km})$ is used, M_{eq} : total ablation of ELA .

The result shows that the mass balance is mostly a little bit plus, where the error rate ($|T_{ac}-T_{ab}|/(T_{ac}+T_{ab})/2$) ranges from 1% to 9% (mean: 4%). When the ELA is adjusted to the height in which the mass balance becomes 0, the altitudinal change of ELA ranges from -5 m to 37 m (mean: 15 m). Since the estimation of ELA by a position of the maximum flow flux of reconstructed glacier is attempted with the reconstructed surface contour of 25 m interval, the range of this error (15 m at mean) is small enough. This reveals that the method of ELA reconstruction by the maximum flow flux is valid for the past glacier.

The glacier flow is reconstructed for 18 glaciers at stage II, under the assumption of laminar flow. The calculation revealed that the flow velocity at ELA , without basal sliding, ranges between 13 ± 4 and $211 \pm 50\text{ (mm/day)}$, depending on the surface slope and ice thickness. Comparison of these values with the flow velocity of the present glaciers, without basal sliding, the glaciers of the Hidaka Range in stage II were similar to small cirque and valley glaciers in the world. This flow flux corresponds 24% to 89% (mean: 65%) of the total accumulation (ablation) of the glacier, for 7 glaciers at area is bigger than 48 hectare in stage II. This suggests that the plastic flow of glacier without basal sliding, explains roughly 65% of the annual flow flux.

Discussion was devoted to examine the various factors which may cause the error for the reconstruction of glaciers in the past: (1) error of glacier extent reconstruction by the photo-interpretation, (2) effect of difference of air temperature depression in the past, (3) effect of difference of a lapse rate and degree day factor (k), (4) effect of difference of albedo of the ablation area to the mass balance, (5) effect of drift snow and snow avalanches for the accumulation.

Finally, the thickness of snowfall (with air temperature depression of $8\text{ }^{\circ}\text{C}$) was compared to the present one. The result suggests that it decreased of 40% and 50% respectively than the present, when degree day factor was 7 and 9 ($\text{mm}\cdot\text{water}/^{\circ}\text{C day}$).

学位論文審査の要旨

主査	教授	小野	有	五
副査	教授	平川	一	臣
副査	助教授	成瀬	廉	二
副査	助教授	渡辺	悌	二

学位論文題名

Reconstruction of alpine glaciers of the Last Glacial age in the Hidaka Range,
central Hokkaido, by photogrammetric workstation

(最終氷期における日高山脈の山岳氷河の解析図化機による復元)

氷河地形は古気候復元のよい指標となりうる。本研究は、解析図化機を用いて氷河地形から過去の雪線高度を復元する手法を検討したものである。

本論文は、全9章からなる。第1章では、研究対象地域の地理や気候などの概要を説明し、第2章では、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デジタル地形図として詳細に図化した。

第3章では、空中写真判読による氷河地形の範囲を、解析図化機にかけたステレオモデルの画像上でデジタル地形図上にプロットすることにより、日高山脈の氷河地形をⅠ～Ⅲのステージに区分した。ステージⅠ(氷河最拡大期)はほぼ6万～4万年前ごろのポロシリ亜氷期に、ステージⅡは約1.8万年前ごろのトッタベツ亜氷期の前半に、ステージⅢは約1万年前ごろのトッタベツ亜氷期の後半(晩氷期)にあたる。それぞれのステージの氷河の復元を行った。

第4章では、復元した各ステージの氷河の流量を最大にする横断面の位置から平衡線高度(Equilibrium Line Altitude: ELA)を復元した。また、この研究で用いたELAの復元方法を現在の氷河で検討した。その結果、ステージⅠのELAは十勝側では1300m～1425m、日高側では1325m～1500mであり、ステージⅡのELAは十勝側では1375m～1500m、日高側では1400m～1725mであり、ステージⅢのELAは十勝側では1600m～1650m、日高側では1600m～1800mであった。

第5章では、ステージⅡにあたる時期の氷河、18例について、氷河の質量収支の復元を行った。温度条件としては、根室、釧路、帯広、広尾、浦河の1941年～1970年の30年間の日平均気温を平均し、現在の日高山脈地域の平地の気温とした。最終氷期の年平均気温は現在より6℃低下していたものと仮定し、高度による気温減率を5.5℃/kmと仮定した。年間消耗量(ΣM)と年間の積算温度(ΣT)との関係式 $\Sigma M = k \Sigma T$ を用いて、 $k = 9(\text{mm} \cdot \text{water} / ^\circ\text{C day})$ の時の各高度帯の年間消耗量を計算した。各高度帯の年間涵養量 $\Sigma P = \text{Meq} + \text{Pg}(Z - \text{ELA})$ から求め、積雪増加率($\text{Pg} = 1.0 \text{m} \cdot \text{water} / \text{km}$)により各高度帯の年間涵養量を算出した。その結果、流量を最大にする横断面の位置から得られたELAと氷河の質量収支を0にするELAとの差の範囲は-5～37m(平均値:15m)の範囲におさまった。ELAをもとめるために選んだ氷河の表面の等高線間隔は25mごとであるので、この差(平均値:15m)は、その半分にすぎない。従って、氷河の表面高度25mご

との測定にもとづいて流量を最大にする横断面の位置から過去のELAを推定する方法は、十分な精度をもっていることを明らかにした。

第6章では、この18例のステージⅡの氷河について、氷河の流れを層流と仮定して、氷の流動則を用い、復元された氷河の各高度の氷厚と表面傾斜の値から、塑性変形による流速と流量を計算した。これらの氷河のELAの中心部では、塑性変形による日平均流速は $13 \pm 4 \text{ mm/d} \sim 211 \pm 50 \text{ mm/d}$ であり、ELAの横断面では、塑性変形による年平均流速は $3 \pm 1 \text{ m/a} \sim 38 \pm 10 \text{ m/a}$ であり、年間流量は $3 \pm 1 \times 10^4 \sim 247 \pm 82 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{water/a}$ であった。これらの値は現在の世界の小規模なカール氷河・谷氷河での計測値に近かった。

第7章では、ステージⅡ、Ⅱ'とⅢの氷河について、復元したELA、質量収支と流動の比較を行った。

第8章では、3章～7章で得られた結果をもとに、空中写真判読の精度や条件を変えたときに復元される質量収支・流動量の変化および氷期の気候条件について考察している。その結果、(1)研究者による氷河地形の範囲の認定の違いはELAの決定に影響を与えていないが、AAR (Accumulation Area Ratio) の値には大きなちがいを与えることが明らかになり、従って、単にAARによって過去の氷河のELAを決定することは問題であることがわかった。(2)気温低下量が 8°C および 10°C 時、年間消耗量は気温低下量が 6°C の時の約42%および8%であった。(3)気温減率、degree-day factor (k)と積雪増加率(Pg)の値の変化が与える影響は、気温減率が 0.5°C/km 増えた時の年間消耗量の減少は約24%、degree-day factor (k)が $2 \text{ mm} \cdot \text{water}/^\circ\text{C day}$ 増えた時の年間消耗量の増加は約22%、積雪増加率(Pg)の値が $0.5 \text{ m} \cdot \text{water/km}$ 増えた時の年間涵養量の増加は約1%であった。(4)degree-day factor (k)を消耗域で $11 \text{ mm} \cdot \text{water}/^\circ\text{C day}$ とした場合、主な7個の氷河の質量収支はほぼ0になることを明らかにした。(5)氷温 $-2^\circ\text{C} \sim -3^\circ\text{C}$ の時の塑性流量は、氷温が $0^\circ\text{C} \sim -1^\circ\text{C}$ の時の46%であった。(6)日本アルプス内蔵助カールの積雪調査データから氷河の涵養に関する雪崩や飛雪の寄与を検討すると、カール内の氷河範囲では、雪崩や飛雪による涵養量の増加は23%で、飛雪により減る割合は21%であった。また(7)日高山脈で得られている積雪観測データと、本研究で復元できた日高山脈の最終氷期の降雪量の比較をした結果、気温低下量が 8°C のとき、日高山脈の降雪量は現在の約50%であったことが明らかになった。

第9章では、本研究で得られた成果をまとめ、以下の結論を述べている。(1)解析図化機から過去の氷河の表面形状や氷河上の任意の地点での横断面をとり、そこでの相対的な流速や流量を最大にする横断面の位置からELAを復元する方法は有効であることを明らかにした。(2)最終氷期の日高山脈のELAを復元することができた。(3)最終氷期のステージⅡの日高山脈の氷河の流動は世界の小規模なカール氷河・谷氷河での計測値に近く、主な7個の氷河の年間消耗量と年間涵養量の平均値に占める塑性変形の割合は、気温低下量が 6°C のとき約65%、 8°C のとき約71%であったと推定できた。

この研究では、解析図化機をもちいて氷河地形を詳細に図化しただけでなく、図化機のソフトウェア機能を用いてさまざまな地形計測を行い、氷河の流速と流量を考慮して氷期の雪線を復元する手法を確立したものであり、これは古環境の復元にとってきわめて大きな貢献である。とくにELAの正確な復元は古気候の復元にとって重要で、過去のELAを氷河地形だけから $\pm 15 \text{ m}$ の精度で復元できた本研究のもつ意義はきわめて大きい。またPaterson(1994)のモデルを用いて過去の氷河の流速や流量を復元したことは、過去の氷河を具体的に復元するための有効な手がかりを与えたものといえる。

よって審査員一同は、これらの成果を高く評価し、また申請者が研究者として誠実かつ熱心であり、大学院課程における研鑽や取得単位なども充分であることから、申請者が博士(地球環境科学)の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。