

論文

ネパールクンブ地方イムジャ氷河湖堤体のデッドアイス —二次元比抵抗探査による分布の推定—

竹中修平¹⁾, 藪田卓哉²⁾, 福井弘道³⁾

要 旨

2008年5月, イムジャ氷河湖の堤体の内部構造の把握を目的として, 二次元比抵抗探査および地表面踏査による調査を行った. 本論文ではその結果をもとに, 堤体内のデッドアイスの分布の推定を試みた. その結果, 1) デッドアイスは堤体の湖岸付近の地下で, 両岸のラテラルモレーンの間に連続的に存在し, 2) その下面は少なくとも堤体基部で最も標高の低い部分まで達していると見られることが分かった. 水流や堤体表面からの融解によってデッドアイスの表面が徐々に低下し, 湖水位は最終的に氷河湖決壊洪水 (GLOF) の危険のないレベルにまで下がる可能性が高い.

キーワード: イムジャ氷河湖, 氷河湖決壊洪水, デッドアイス, 二次元比抵抗探査

Key words: Imja Glacial Lake, GLOF, dead ice, electrical resistivity tomography

1. はじめに

近年, ネパールヒマラヤはじめ世界の山岳地帯で, 氷河の縮小と氷河湖の拡大が報告されている. 特にネパール東部クンブ地方のイムジャ氷河湖は, ICIMOD (国際山地総合開発センター) によって氷河湖決壊洪水 (GLOF) 発生の危険性が高い氷河湖とされている (Mool *et al.*, 2001; Bajracharya *et al.*, 2007).

イムジャ氷河湖はネパール東部クンブ地方のサガルマータ国立公園にあり, エベレスト (ネパール名サガルマータ, 中国名チョモランマ) の南約 6 km, 標高約 5000 m に位置し, ローツェシャー氷河と合流したイムジャ氷河の末端に形成された氷河湖である (図 1). 1960 年代まではイムジャ氷河の末端部表面には小さな池が存在するだけだったが, 1970 年代から池が相互につながって急

速に拡大し (Watanabe *et al.*, 1994), 2008 年現在長さ約 1.5 km, 幅 0.5 km に達する氷河湖となっている (図 2). なお坂井 (2002) によれば, 2001 年現在の氷河湖の最大深度は約 100 m であり, 湖底は氷河水とされている.

同氷河湖の上流側では, イムジャ氷河の氷河水が直接氷河湖に流れ込んでいる. 左右両岸はラテラルモレーンに, 下流側はデッドアイスを含むターミナルモレーンに堰き止められており, モレーン堰止め湖 (moraine dammed lake) に分類されている (Yamada, 1998). 本論文では, 氷河湖を下流側で堰き止めている, デッドアイスを含むターミナルモレーンの全体を堤体と呼ぶ. その規模は氷河の流動方向に長さ 500 m~700 m, 幅約 500 m, 末端付近での周囲の地面との比高は 40 m~50 m で, 全体の表面をデブリに覆われている. 現在の湖面は両ラテラルモレーンの基部よりも低くなっているため (Sakai *et al.*, 2007; 渡辺, 2008), GLOF の発生の原因となる決壊が危惧されるのは堤体である.

氷河湖の湖水はデッドアイスに直接堰き止められている, とされているが (Sakai *et al.*, 2007),

1) (株) ジオシステムズ

〒183-0012 東京都府中市押立町 4-11-20

2) (株) 地球システム科学

〒160-0022 東京都新宿区新宿 1-28-3

3) 慶應義塾大学総合政策学部

〒252-8520 神奈川県藤沢市遠藤 5322

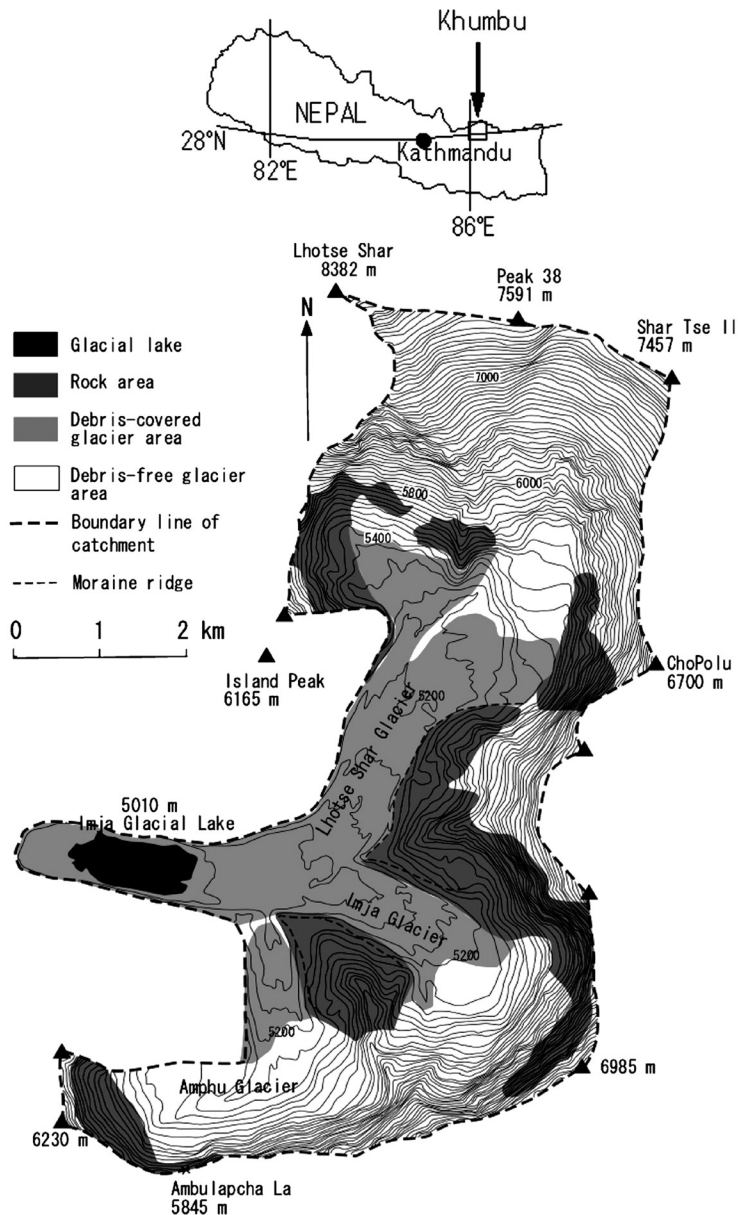


図 1 イムジャ氷河湖の位置 (Sakai *et al.*, 2007 より引用). ネパール, クンブ地方の位置 (上) とイムジャ氷河湖と周辺の地形 (下).

その分布は明確になっていない。デブリの固結度は高くないため、デッドアイスは堤体の強度に大きく寄与すると同時に、水を効果的に堰き止める止水面としても働いていると考えられる。そのためデッドアイスの空間的な分布を調べることは、同氷河湖の GLOF 発生の危険度を評価する上で重要である。

原田 (2002) は同氷河湖の堤体で時間領域電磁探査法によって堤体の内部構造の推定を試み、排水路の左岸 (図 3 参照) において、デッドアイス上面は地表下約 20 m~30 m, 下面は同 50 m~130 m に分布し、上流側ほど (イムジャ氷河湖に近いほど) 厚くなっている、としている。

Sakai *et al.* (2007) の測量結果によれば、イム



図 2 イムジャ氷河湖の堤体上の池 (手前), 氷崖 (池の対岸上), 氷河湖と氷河 (背景). 氷河湖の大部分はまだ氷に覆われており, 遠景の水面には氷河からカービングした氷塊が浮いている. 測線 C-C' (図 3 参照) の C は画面右方向の湖岸であり, 測線は氷崖の基部を通過して画面左方向の C' に伸びている.

ジャ氷河湖の堤体基部で最も標高の低い西端の標高は約 4980 m, イムジャ氷河湖の湖水位は 5009 m, イムジャ氷河湖付近における堤体表面の標高は約 5000 m~5030 m である. 従って原田 (2002) の推定によれば, 左岸のデッドアイス上面の標高は湖岸付近において約 4970 m~5010 m となる. これは湖水面と同じか, それより数 10 m 下の標高であり, 堤体が湖水を堰き止めるのに, 少なくとも部分的には寄与していることになる.

一方, 斎藤 (2002) は, 原田 (2002) と同時期に行った重力探査によって, 堤体のデッドアイスは「イムジャ氷河湖付近では地表下約 110 m~250 m 付近に存在し, 厚さは最大で 150 m 程度」, 水平方向には「およそ 400 m×400 m の範囲に分布すると予想される」としている. これによれば, デッドアイス上面の標高は約 4890 m~4920 m となり, 堤体の西側基部よりも更に数 10 m 低いことになり, 湖水の堰き止めには一切寄与していないことになる.

筆者らは 2008 年 5 月, GLOF の早期警戒システム構築のケーススタディとしてイムジャ氷河湖を訪れ, 現地での活動の一部として二次元比抵抗探査および地表面踏査による調査を行った. 本論

文ではこの調査結果から堤体内のデッドアイスの分布の推定を試みる.

2. 調査の概要

調査期間は 2008 年 4 月 29 日から 5 月 7 日までで, イムジャ氷河湖の堤体上において, 二次元比抵抗探査および地表面踏査による調査を行った.

二次元比抵抗探査の測線は 3 本で, 全て堤体の排水路の右岸側である (図 3). 二次元比抵抗探査の様子は下記の通りである.

- ・探査方法: 二極法 (ポール・ポール法)
- ・探査測線: 測線 A-A' (測線長 630 m),
測線 B-B' (測線長 410 m),
測線 C-C' (測線長 150 m)
- ・探査深度: 160 m (A-A' および B-B'),
150 m (C-C')
- ・電極間隔: 10 m
- ・探査機器: McOHM-21 Model-2116
(応用地質製)
- ・解析ソフトウェア: ElecImager2D
(応用地質製)

堤体はほぼ全面をデブリに覆われているが, 地表面には崖や池や段差など, 様々な微地形が観察

できる。これらの微地形や植生に着目して踏査を行った。

3. 調査結果

3.1 地表面踏査

堤体の地表面踏査で観察された氷崖、池、段差の位置を図3に示す。

堤体は全面をデブリで覆われているが、デブリの粒度は粘土～シルトから直径数 m の巨礫に至るまで様々である。微地形の点から見ると、堤体の表面にはおびただしい数の直径数 m ～数 10 m のすり鉢様の凹地が存在する。これらの凹地の一部には水がたまっていて池となっている。堤体上に存在する最大の池は測線 C-C' の C 付近のもので、直径は約 50 m である。直径数 10 cm の小さなものまで含めると、堤体上には大小合わせて 10 ほどの池が見つかった。

氷崖は水が露出した崖で、堤体上の 3 か所で観察された。図2の池の対岸の氷崖はその一つである。氷崖に露出している氷は気泡が少なく透明で、直径数 cm の大きな氷の単結晶が多く見られる。氷のフォリエイションは概ね東向きの傾斜であるが、一部水平～西向きの部分も見られた。ま

た地質で言う斜交不整合のような構造が見られた。氷の中に直径数 cm ～数 10 cm の岩片が取り込まれているのが見られた。これらのことから、氷崖は降水や湖水が凍結したものではなく、地下のデッドアイスの一部が地表に現れているもの、つまりデッドアイスの露頭であると考えられる。

氷崖では氷の上に載っているデブリの断面も観察できる。これによるとデブリの厚さは 1 m ～数 m である。デブリは主として直径数 cm ～数 10 cm の礫よりなるが、一部に厚さ数 cm ～50 cm ほどの、葉理構造を持つ細粒層（シルト～砂）が含まれる。

地面が階段状に沈降した段差は、不明瞭なものも含めると、随所に見られた。堤体左岸で見られた明瞭な段差は、その南にある左岸側ラテラルモレーンとほぼ平行で 4 ～5 段あり、ひとつの段差の高さは数 10 cm ～1 m、幅 50 cm ～1.5 m である（図4）。

堤体を取り巻くラテラルモレーンとターミナルモレーン上では樹高数 10 cm 程度の小灌木が散見される。しかしこれらに囲まれた堤体の内側部分では植生は相対的に貧弱で、小灌木はよりまばらで樹高も低い。

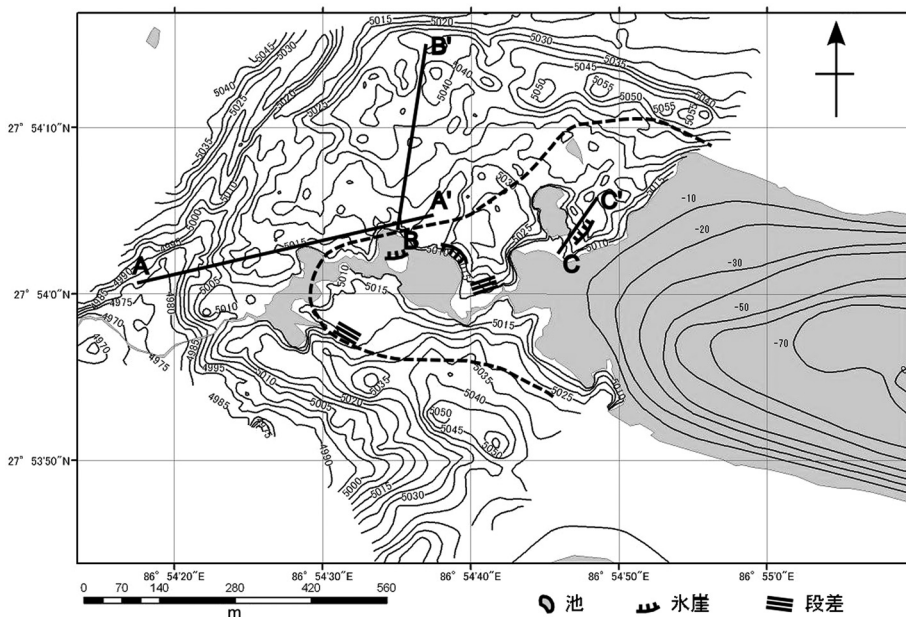


図3 イムジャ氷河湖堤体周辺地形図 (Sakai *et al.*, 2007 を改変)。3本の測線と主な池、氷崖、段差の位置。デッドアイスは破線で示した位置より上流側に存在すると推定される。



図 4 堤体の排水路左岸側で見られる段差。
ポールの長さは 115 cm.

3.2 二次元比抵抗探査

二次元比抵抗探査の解析結果を図 5 に示す。測線長の関係から測線 A-A'、測線 B-B' においては探査深度をより深く設定することも可能であったが、現地調査時の電極の接地抵抗が高く、流せる電流の値が小さかったため、測定データの信頼性を考慮して探査深度を 160 m とした。

測線 A-A' は、イムジャ氷河の西側に隣接するロツェ氷河のラテラルモレーンの基部 A から、ほぼ東西方向に、イムジャ氷河のターミナルモレーンとの間の沢地形を越えて、イムジャ氷河湖の堤体の中央付近までである。A の地下 30 m 付近には $4 \text{ k}\Omega \text{ m}$ 以下と、極めて低比抵抗の部分がある。他にも A から 280 m と 400 m 付近の地下 20 m ~ 30 m に比抵抗値 $4 \text{ k}\Omega \text{ m}$ 以下の部分がある。また、地表が巨礫に覆われた斜面である A から 140 m ~ 280 m の地表付近の厚さ 20 m ~ 30 m は比抵抗値は $10 \text{ k}\Omega \text{ m}$ 以上と高い。同様に $10 \text{ k}\Omega \text{ m}$ 以上の部分は A' 周辺にも存在し、こちらは地下 160 m 以上の深さまで及んでいる。

測線 B-B' は堤体の右岸中央部を排水路付近から、ほぼ南北方向に、北側ラテラルモレーンの頂上までである。地表付近の厚さ数 m ~ 40 m はほ

ぼ $10 \text{ k}\Omega \text{ m}$ 以上の比抵抗値の高い部分に覆われている。

測線 C-C' は堤体東端をほぼ湖岸線に沿っており、C は湖岸である。測線 C-C' の西側には大きな池が 2 つあり、また測線は池の畔の氷崖を横切っている (図 2, 図 3)。地表から深さ 40 m ~ 100 m には $100 \text{ k}\Omega \text{ m}$ 以上、最大 $800 \text{ k}\Omega \text{ m}$ と、極めて比抵抗値が高い部分が存在する。測線 C-C' では今回の探査で解析可能な地下 140 m に至るまで、全体に高比抵抗値であるが、C の地下 40 m 付近には $4 \text{ k}\Omega \text{ m}$ 以下と、比抵抗値が非常に低い部分がある。

4. 考 察

4.1 二次元比抵抗探査の解析結果の解釈

一般に、同じ種類の地盤の構成物でも、成分や含水率などの違いによって異なった比抵抗値を示すことが知られており、比抵抗値だけから構成物を一意に決定することは困難である。地下構造の調査のために二次元比抵抗探査を行う場合、ボーリング調査や露頭の観察等によって得た比抵抗値のリファレンスを用い、結果の解釈を行うのが一般的である。

今回の二次元比抵抗探査で得られた比抵抗値と構成物の対比については踏査結果を考慮し、Gibas *et al.* (2005) を参考に、以下のゾーン①~③とその他の 4 つに分類した。図 5 にゾーン①~③を示す。

以下、各ゾーンについて、比抵抗値の範囲、測線上の分布範囲、構成物とその対比理由を述べる。

・ゾーン①

比抵抗値 $100 \text{ k}\Omega \text{ m}$ 以上の部分で、測線 C-C' の全長にわたって地表付近から深さ約 40 m ~ 100 m に分布する (C の標高を 0 m とする)。構成物はデッドアイスである。

測線 C-C' 上にはデッドアイスの露頭であると考えられる氷崖が存在する (図 3)。

Reynolds and Paren (1980) は温暖氷河の水の比抵抗値を $100 \text{ M}\Omega \text{ m}$ としており、ゾーン①の $100 \text{ k}\Omega \text{ m}$ 以上という値はこれと比べると著しく低い。しかし Reynolds は「二次元比抵抗探査において、測線上の物質の比抵抗値の上下の差が極端に大きい場合、測定値は高い値がより低く、低

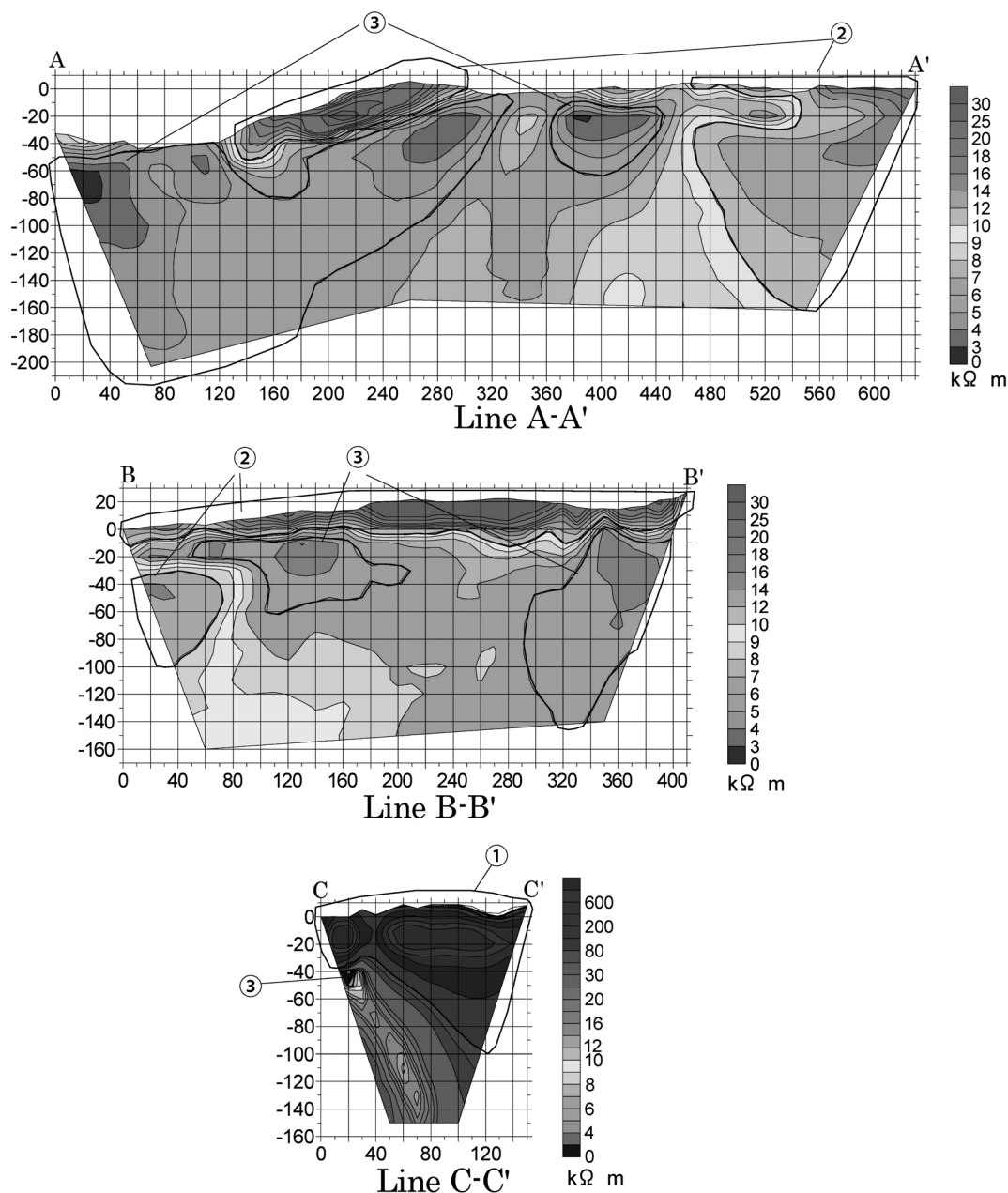


図 5 二次元比抵抗探査結果とゾーン①, ゾーン②, ゾーン③の分布. 縦軸, 横軸はそれぞれ垂直, 水平距離 (単位 m). 各ゾーンの構成物は, ゾーン①がデッドアイス, ゾーン②が巨礫を含む礫間の充填状態の悪いデブリ, ゾーン③が礫間が細粒物で充填された含水率の高いデブリであると推察される.

い値がより高くなる傾向がある」と述べている (私信). Hambrey *et al.* (2008) はイムジャ氷河湖で行った同様な調査でおよそ 100 kΩ m 以上をデッドアイスと解釈している. また Ikeda (2006) は, 岩石氷河において, 100 kΩ m 以上の比抵抗

値を岩石に対して非常に氷の割合が高い層に対応づけている. 以上を勘案し, 比抵抗値 100 kΩ m 以上の部分をゾーン①とし, その構成物をデッドアイスとした.

・ゾーン②

比抵抗値 $10\text{ k}\Omega\text{ m}$ ~ $100\text{ k}\Omega\text{ m}$ の部分で、測線 A-A' の A 側の斜面と測線 B-B' 全ての地表面に分布する。構成物は直径 1 m 以上の巨礫を含む、礫間の充填状態の悪いデブリである。

この対比の理由はゾーン②に分類された測線上の場所の、地表での観察結果である。Gibas *et al.* (2005) は永久凍土帯のダイアミクトン(氷河作用等により堆積したデブリ)の比抵抗値を $7\text{ k}\Omega\text{ m}$ ~ $15\text{ k}\Omega\text{ m}$ 、凍結していないダイアミクトンの比抵抗値を $0.13\text{ k}\Omega\text{ m}$ ~ $1.2\text{ k}\Omega\text{ m}$ としており、ゾーン②の比抵抗値は全体にこれより高めである。しかし測線 A-A' の A' 付近、測線 B-B' の B 付近にはデッドアイスの存在が推定され(後述)、それが正しいければ、再び Reynolds の説明が適用できる。すなわちデッドアイスの存在によって、本来はもっと低い比抵抗値を示すはずのデブリが、より高い測定値を示している可能性がある。

・ゾーン③

比抵抗値 $6\text{ k}\Omega\text{ m}$ 以下の部分で、測線 A-A'、B-B'、C-C' にそれぞれ分布する。測線 A-A' の A 付近では地表に現れている。また測線 C-C' の C の地下約 40 m にははるかに比抵抗値が高いゾーン①の直下にスポット的にゾーン③の部分が存在する。構成物は、礫間が細粒物(粘土、シルト、砂)で充填され、含水率が高いデブリである。

この対比は次の理由による。A 付近は谷が集まった地形になっており、地表は礫間が細粒物で充填されたデブリで覆われている。沢部では流水も見られることから、地下水位は高く、デブリの含水率も高いと考えられる。

特に測線 C-C' のゾーン①の直下のゾーン③は、氷河湖の湖水がデッドアイスの下から漏れている地下水脈の可能性がある。

・上記以外の部分

比抵抗値が $6\text{ k}\Omega\text{ m}$ ~ $10\text{ k}\Omega\text{ m}$ の部分で、地表での観察結果から、礫間が細粒物で充填されたデブリと考えられるが、地下深部の一部は基盤岩である可能性がある。

イムジャ氷河周辺の基盤岩は、堤体表面のデブリの岩質から、花崗岩や片麻岩と推察され、これらの比抵抗値は数 $100\text{ }\Omega\text{ m}$ ~数 $10\text{ k}\Omega\text{ m}$ である(島ら, 1995)。また、イムジャ氷河湖の最大深度が約 100 m で湖底は氷河水とされている(坂井,

2002) ことから、基盤岩の深度はそれより深いものと想定される。測線 A-A' と測線 B-B' には該当する部分があるが、これらを基盤岩と判断する根拠は得られなかった。そのため、今回の調査結果からは、基盤岩とその上の堤体を含む堆積物とを区別することはできなかった。

4.2 デッドアイスの分布の推定

測線 C-C' におけるゾーン①の C 付近の分布状態から、デッドアイスは、少なくとも C のすぐ南にある排水路の入り口付近までは分布していると考えられる。また、測線 C-C' の北側に関しても、ゾーン①は測線 C-C' の中央から C' に向かって厚くなっていることから、デッドアイスは氷河湖の北側ラテラルモレーン付近まで分布していると考えられる。一方、測線 A-A'、測線 B-B' ではゾーン①は見られないことから、堤体の西側ではデッドアイスは存在しない可能性が高い。

地表面踏査で観察された氷崖や池や段差は、主として B 付近より東側の、図 3 に破線で示した範囲に分布している。地表面踏査で確認された氷崖は、測線 C-C' 上のもの、排水路右岸沿いのもの、排水路上の島に露出したものの 3 箇所である。この内、後 2 者は、デッドアイスが排水路の下にあって止水面となっていることを示唆している。

池は、少なくとも測線 C-C' の西側に存在する二つの大きな池に関しては、地下にデッドアイスがあり、その融氷水がデッドアイス自体を止水面として貯まっていると考えられる。現地の冬~春の降水量は少なく、池の集水域への直接の降水がたまってこのような大きな池となっているとは考えられない。また、二つの池の水面は氷河湖の水面よりも数 m 以上高く、氷河湖の湖水が地下水脈を通して池の水を涵養しているとも考えられない。さらに堤体を構成するデブリは主として粗い礫からなるので、止水面として有効に働くとは考えにくい。以上から、これらの池の底の地下にはデッドアイスが存在すると推定される。

段差は、地下のデッドアイスに融解が起こり、地面が不均一に沈降した結果できたものと考えられる。特に図 4 に示した堤体左岸で見られた段差は、南側にある左岸側ラテラルモレーンとはほぼ平行である。これは段差の北側の堤体地下にデッドアイスが存在し、それを覆っているデブリの厚さ

が薄いために融解が起こり、デッドアイスが存在しないラテラルモレーンとの間に沈降量の差が生じたことを示していると考えられる。

堤体を取り巻くラテラルモレーンとターミナルモレーンでは、堤体の内側部分と比較して植生が豊かである。これは地下にデッドアイスが存在しないために、地表面が安定していることを反映していると考えられる。

以上を総合的に勘案すると、デッドアイスは図 3 に破線で示した範囲よりも上流側に分布し、堤体上では上面を 1 m ～数 m のデブリに覆われていると推定される。デッドアイスの下面の深さは測線 C-C' 上では地表から 40 m ～100 m であるが、他の部分では不明である。

名古屋大学の藤田耕史准教授は 2001 年から 2007 年までの複数回の測量によって堤体の表面低下量を測定した (図 6, 私信)。堤体の表面が低下している部分は、地下にデッドアイスが存在し、それを覆っているデブリがそれほど厚くないために融解が起こり、表面が低下していると考えられる。逆に表面が低下していない部分は地下にデッドアイスが存在しないか、存在しても覆っているデブリが十分に厚いため、測定の誤差の範囲内でしか融解が起こっていないと考えられる。藤田の得た結果では、最大の表面低下量 7 m を含む

顕著な表面低下が測定された領域は、図 3 の破線の範囲とほぼ一致する。

今回の調査では、排水路左岸にデッドアイスが存在する積極的な証拠は得られていないが、前述の通り、原田 (2002) は排水路左岸で行った時間領域電磁探査によって、デッドアイスの上面は地表下約 20 ～30 m, 下面は同 50 ～130 m でイムジャ氷河湖に近いほど厚くなっている、としている。

これらのことから、堤体のイムジャ氷河湖岸付近の地下にはデッドアイスが南北のラテラルモレーンの間に連続的に存在する可能性が高い。その下面の深さは測線 C-C' では湖水位から少なくとも 40 m 下であり、これは堤体基部で最も標高の低い西端の標高約 4980 m より更に低い。従って、氷河湖の湖水はこのデッドアイスの「堤防」によって効果的に堰止められていると見ることができる。またデッドアイスは排水路の下にあって、測線 B-B' の B 付近まで伸びていると考えられる。ただし、デッドアイスのより正確な分布、特に三次元的な形状を求めるには更なる調査が必要である。

4.3 「堤防」としてのデッドアイス

Hambrey *et al.* (2008) が指摘しているように、イムジャ氷河湖の堤体は氷河の流動方向に 500 m ～700 m の長さがあり、堤体の末端付近での周囲の

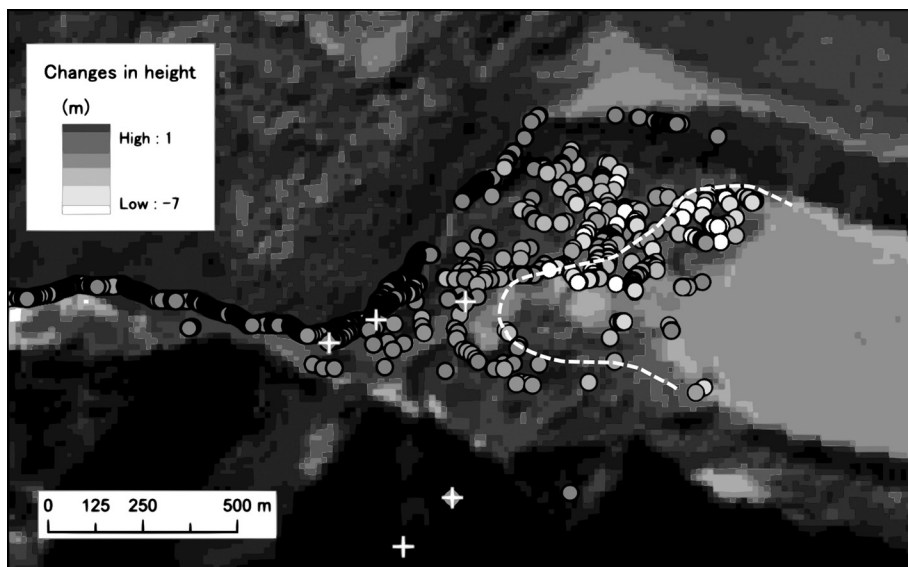


図 6 名古屋大学の藤田耕史准教授が得た 2001 年から 2007 年までの堤体の表面低下量。破線は図 3 の破線と同じ位置。原図はカラーで、破線は著者による。

湖面との比高が 40 m~50 m に過ぎないことを考慮すると、同氷河湖に GLOF の差し迫った危険があるとは考えにくい。

先に述べたように、堤体の上流側の 200 m~300 m にデッドアイスが存在し、堤防として直接湖水を堰き止めていると考えられる。湖水はデッドアイス上に形成された排水路を通して堤体の外部へと流れ出しており、上流の氷河から氷河湖に十分な量の水の供給が続く限り、湖水位はデッドアイスの上面の高さによって規定されていることになる。そうだとすると、水流によって運ばれる熱や、表面を覆うデブリから伝わる熱はデッドアイスの上面を融解させ、結果的に湖水位を低下させるであろう。実際、渡辺 (2008) は 1984 年以降、イムジャ氷河湖の水位が低下し続けていることを指摘している。これが続けば湖水面は徐々に低下し続け、最終的に GLOF の危険のないレベルに至る可能性が高い。デッドアイスが融け去った後にもなお、ターミナルモレーンの排水路以外の部分は、氷河の流動方向に 200 m~300 m の規模で残ることになる。

一方、渡辺 (2008) はまた、氷河湖からデッドアイス内部を通しての浸漏 (seepage, 水の浸み出し) が GLOF 発生の危険性を増大させることを指摘している。今回の調査では堤体に浸漏は見られなかったが、測線 C-C' のデッドアイスの下、地下 40 m 付近には地下水脈が存在する可能性が示された。例えば地下水脈が存在しても、この深さは堤体基部の標高より低いため、直ちに堤体を崩壊させるとは考えにくい。ただし、デッドアイスの底面からの融解を促進する可能性がある。また地下水脈が他にも存在する可能性もある。地下水脈が拡大したり数が増えれば、地表面付近にはデッドアイスが存在したままで堤体の強度を低下させる可能性がある。

5. 結 論

イムジャ氷河湖の堤体の二次元比抵抗探査と地表面踏査によって、湖岸付近の地下にはデッドアイスが南北のラテラルモレーンの間に連続的に存在する可能性が高いことが分かった。その上面は地表面付近、下面は堤体基部で最も標高の低い西端の標高に達しており、「堤防」として湖水を堰き

止めていると見ることができる。

水流によって運ばれる熱や、表面を覆うデブリから伝わる熱はデッドアイスの上面を徐々に低下させ、それに伴って湖水面も低下し、最終的に GLOF の危険のないレベルに至る可能性が高い。

一方、今回の調査によってデッドアイスの下に地下水脈の存在する可能性が示された。地下水脈が底面からデッドアイスの融解を促進することによって堤体の強度を低下させる可能性がある。継続的な監視が望まれる。

謝 辞

北海道大学の知北和久准教授には著者らの調査のきっかけとなった、イムジャ氷河湖に関する様々な情報を提供していただきました。北海道大学の渡辺悌二准教授と筑波大学 (当時) の池田敦博士には、我々の調査結果について有益なコメントをいただきました。名古屋大学の藤田耕史准教授にはイムジャ氷河湖の堤体の表面低下量データの使用を、名古屋大学の坂井亜規子博士には同氷河湖の位置図と周辺地形図の使用を快諾していただきました。両氏および立教大学の岩田修二教授にはフィールド経験に基づく貴重なご意見をいただきました。Reynolds International Ltd の John Reynolds 博士には二次元比抵抗探査の結果の解釈について貴重なご意見をいただきました。中部大学の渡部展也准教授には同氷河湖堤体の周辺地形図を作成していただきました。ここに記して感謝申し上げます。なお、現地調査の費用は文部科学省学術フロンティア推進事業「デジタルアジア地域戦略構想研究センター (慶應義塾大学)」から支出されました。

文 献

- Bajracharya, S.R., Mool, P. and Shrestha, B., 2007: Impact of climate change on Himalayan glaciers and glacial lakes: case studies on GLOF and associated hazards in Nepal and Bhutan. ICIMOD and UNEP/ROAP, 127pp.
- Gibas, J., Rachlewicz, G. and Szczucinski, W., 2005: Application of DC resistivity soundings and geomorphological surveys in studies of modern Arctic glacier marginal zones, Petuniabukta, Spitsbergen. Polish Polar Research 26 (4), 239-258.

- Hambrey, M.J., Quincey, D.J., Glasser, N.F., Reynolds, J.M., Richardson, S.J. and Clemmens, S., 2008: Sedimentological, geomorphological and dynamic context of debris-mantled glaciers, Mount Everest (Sagarmatha) region, Nepal. *Quaternary Science Reviews* **27**, 2361–2389.
- 原田 敏一郎, 2002: 時間領域電磁探査 (TEM) 法によるモレーンと岩屑被覆氷河の内部構造の探査. 平成 13 年度低温科学研究所共同研究集会報告書, 15–17.
- Ikeda, A., 2006: Combination of conventional geophysical methods for sounding the composition of rock glaciers in the Swiss Alps. *Permafrost and Periglacial Processes*, **17**, 35–48.
- Mool, P., Bajracharya, S.R. and Joshi, S.P., 2001: Inventory of glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods: monitoring and early warning systems in the Hindu Kush-Himalayan Region — Nepal. ICIMOD and UNEP/RRC-AP, 254pp.
- Reynolds, J.M. and Paren, J.G., 1980: Recrystallisation and electrical behaviour of glacier ice. *Nature*, **283**, 63–64.
- 斎藤光義, 2002: モレーンと氷河湖エンドモレーン間の岩屑被覆氷河の内部構造. 平成 13 年度低温科学研究所共同研究集会報告書, 9–14.
- 坂井亜規子, 2002: 2001 年 post Imja 氷河湖測深報告. 平成 13 年度低温科学研究所共同研究集会報告書, 36–42.
- Sakai, A., Saito, M., Nishimura, K., Yamada, T., Iizuka, Y., Harada, K., Kobayashi, S., Fujita, K. and Gurung C.B., 2007: Topographical survey of end moraine and dead ice area at Imja Glacier Lake in 2001 and 2002. *Bulletin of Glaciological Research* **24**, 29–36.
- 島 裕雅・梶間和彦・神谷英樹, 1995: 建設・防災・環境のための新しい電気探査法. 東京, 古今書院, 206 pp.
- 渡辺 梯二, 2008: 地球温暖化と世界自然遺産の危機: ヒマラヤ, サガルマータ (エベレスト山) 国立公園の事例. *地球環境*, **13** (1), 113–122.
- Watanabe, T., Ives, J.D. and Hammond, J.E., 1994: Rapid growth of a glacial lake in Khumbu Himal, Nepal Himalaya: prospects for a catastrophic flood. *Mountain Research and Development*, **14** (4), 329–340.
- Yamada, T., 1998: Glacier lake and its outburst flood in the Nepal Himalayas. Monograph No.1, Tokyo, Data Center for Glacier Research, Japanese Society of Snow and Ice, 96pp.

Distribution of dead ice inside moraine dam body of Imja Glacial Lake, Khumbu region, Nepal — internal structure of moraine dam of Imja Glacial Lake —

Shuhei TAKENAKA¹⁾, Takuya YABUTA²⁾ and Hiromichi FUKUI³⁾

1) Geosystems Inc., 4-11-20 Oshidate-cho, Fuchu, Tokyo 183-0012

2) Earth System Science Co., LTD., 1-28-3 Shinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo 160-0022

3) Faculty of Policy Management, Keio University, 5322 Endo, Fujisawa, Kanagawa 252-8520

Abstract: To determine the internal structure of the dam body of Imja Glacial Lake, authors carried out electrical resistivity tomography and field observation in May 2008. The purpose of this paper is to estimate the spatial distribution of dead ice in the dam body. The result of analyses indicates that a) dead ice appears to exist along the lake shore connecting both lateral moraines, and b) the base of dead ice reaches the deepest point of the underground portion of the dam body. Authors conclude that the dead ice currently dams the lake water effectively. The heat conduction from water flow and the surface of the dam could result in gradual melting of dead ice from the top part. The melting may allow for the gradual drainage of lake water from the spillway. This process may continue until the lake water level becomes low enough to avoid the danger of a GLOF event.

(2009 年 7 月 2 日受付, 2009 年 8 月 21 日改稿受付, 2009 年 10 月 26 日受理,
討論期限 2010 年 7 月 15 日)