

ヒマラヤのImja氷河湖周辺の現地観測結果

大泉 伝*・山敷 庸亮・寶 馨

*京都大学大学院工学研究科

要 旨

ヒマラヤの高山域では、氷河湖決壊洪水が大きな問題になっている。しかし多くの氷河湖では十分な気象観測が行われておらず、氷河湖の水収支が明らかでない。そこで氷河湖の水収支モデルを開発する為に、ネパールのImja氷河湖周辺で気象観測を行った。観測の結果から、気温と風速は類似した日周変化を示し、日中の氷河上の風向は南南西から南西の風が卓越していた。氷河を覆うデブリ（土砂混じりの岩屑）のデブリ層中温度は、デブリが厚くなるほど気温の変動を受けにくくなる結果が得られた。アルベドの観測では、デブリが混じった湖水のアルベドが、氷河上のデブリのアルベドより低くなる結果が得られた。

キーワード：氷河湖，氷河，ヒマラヤ，氷河湖決壊洪水，Imja氷河湖

1. はじめに

ヒマラヤの周辺国では、氷河の融解が大きな問題になっている（内藤，2001；Bajracharya and Mool, 2009.）。ヒマラヤの高山域の氷河上にできた小さな池が、徐々に池の容量を拡大し、数十年かけてモレーン（氷河の堆積物によって作られた天然の堤体）でせき止められた天然ダムのような巨大な氷河湖に成長している（Sakai et al., 2005, 2009）。そして、氷河湖の湖水をせき止めているモレーンが様々な要因で決壊し、大量の湖水が急激に流れ出して、下流域に甚大な被害を与える氷河湖決壊洪水が大きな問題になっている。例えば1985年に発生したDig Thso氷河湖決壊洪水では、決壊した氷河湖の下流域で人命が奪われ、資産や環境、水力発電所を破壊した事が報告されている（Vuichard and Zimmermann, 1987；山田，2000）。

氷河湖決壊洪水の有効な防災対策の一つは、湖水を抜くことであり、既にネパールのTsho Rolpa氷河湖では、排水路の建設が行われ、湖の水位を下げる事に成功している。

氷河湖の水収支を明らかにし、排水路等を設計して湖水を抜く事が、氷河湖決壊洪水に対して有効である事は明らかだが、多くの氷河湖では気象や流入出量等の観測が十分に行われていない。決壊の危険性が高いとされている氷河湖においても、氷河湖の拡大速度や湖の形状を基に定性的に危険性が指摘される事が多く、湖の水収支を考慮した定量的な危険度評価や防災対策の議論は十分に行われていない。

本研究の対象地はネパール・ヒマラヤで最大級の氷河湖の一つであるImja氷河湖（以下、Imja湖）である。本研究はImja湖で観測を行い、氷河湖の水収支を明らかにするモデルの構築を目的としている。Imja湖では湖水をせき止めているモレーン上での観測（知北，2007）や測量（Sakai et al., 2007）が行われた。Imja湖周辺やImja湖下流のNamche Bazaarでは、Fukui et al. (2008) が自動気象観測機“Field Server”を設置し、観測結果をインターネットで公開（Outburst Flood Monitoring Imja Glacier Lake）している。しかし、氷崖が湖に接し、湖の集水域であるImja氷河上で観測した事例はほとんど存在しない。そこで Imja氷河上とモレーン上で気象観測と層内温度の観測、

氷河湖の流出口付近での流出量の観測を2009年の10月23日から10月30日にかけて観測を行った。

2. 研究対象地

(1) Imja湖とその流域

Imja湖はネパール国の首都カトマンズの北東のクンブ地域 (Fig. 1) に位置している。この地域はエベレストベースキャンプやIsland peakがあり、多くの外国人観光客がトレッキングや登山に訪れている。Imja湖から流れ出すImja Khola (Imja川) の流域はそのトレッキングコースに沿って流れている。

(2) Imja湖概要

Imja湖は、ほぼ東西に横たわる形で標高約5000 mに位置している。Imja湖の西側はImja氷河と接し、東側は、Imja氷河の成長に伴って形成されたモレーンに接し、そして、南北はサイドモレーンに接している。2009年4月26日に陸域観測衛星だいちのAVNIR2 (10m 解像度) が撮影した画像と ERDAS 社のImagine9.3を用いて、おおよその東西と南北の距離を測ったFig. 2 (矢印)。東西方向に約2.03 km, 南北方向に約0.58 km, 面積は約1.0 km²であった。

3. 観測

3.1 観測項目

今回の調査では、気象観測 (気温、湿度、風向、風速、アルベド) と氷河を覆うデブリ (氷河を覆う土砂混じりの岩屑) の層内温度の観測を行った。流出部にて簡易な方法で流量と流速の観測を行った。

3.2 観測点と観測日時

(1) 気象観測

Imja湖東側のImja氷河上 (標高5046 m) の遮蔽物が少ないFig. 2 (a) で10月23日から10月27日まで観測を行った。観測の様子をPhoto 1 (a) に示す。

Imja湖西側のモレーン (標高5011 m) と湖面の境界付近のFig. 2 (b) で、10月27日から10月30日まで観測を行った。観測の様子をPhoto 1 (b) に示す。

(2) デブリ層内温度の観測

Imja氷河上のFig. 2 (c) で10月27日から10月30日に観測を行った。

(3) 流量観測

湖の流出口の約20 m下に位置するFig. 2 (d) の橋 (橋長2.5 m) の直下の河床横断面積と、表面流速の観測を10月30日に行った。



Fig. 1 Imja glacial lake at the Khumbu Region (Star is Kathmandu, square is location of the Imja lake.)

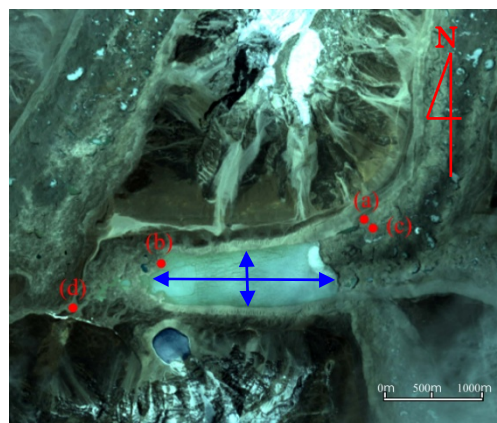


Fig. 2 Meteorological observation points: (a) at the Imja glacier, (b) at the moraine, (c) Observation point of debris subsurface temperature at the Imja glacier, (d) Discharge observation point at the outlet. Arrows are length of the lake east-west and north-south.



Photo 1 Meteorological observation points: (a) at the Imja glacier, (b) at the Moraine

3.3 観測条件

(1) 気象観測

気象観測器はONSET社の観測機器を用いた。観測条件をTable 1 に示す。

(2) デブリ層内温度の観測

層内温度の観測にはONSET社の小型温度ロガーTIDBITを用いた。観測は氷河上のデブリを掘り起こし、氷河を露出させて、温度ロガーを置き、異なる厚さのデブリを被せ、締め固めて観測を行った。観

測条件をTable 2に示す。温度ロガーのNo. 2は、層内に間隙がある場合と無い場合を比較するために温度ロガーの上に氷河の欠片を置き、欠片が融解した後に層内に間隙ができるようにした。

(3) Imja湖からの流出量の計測

Imja湖の流出口から約20 m下流に位置する橋（橋長2.5 m）の上から、ポールに巻尺を巻き付けた簡易水深計で水深を計測した。橋長は約2.5 mで、橋長間を 0.5 m毎に水深計で、河床から水面までの水深を計測した様子をPhoto 2 (a) に示す。

表面流速は、橋から5 m上流の位置で14インチの自転車用チューブ（Photo 2 (b) 男性が持っているチューブ）を川の同じ場所に落とし、橋の下を通過する時間をストップウォッチで10回計測した。最大値と最小値を除いた8回の平均値を表面流速とした。表面流速から平均流速を求める為に浮子法で用いる補正係数の0.9を表面流速に掛けた。計測の様子をPhoto 2 (b) に示す。

4. 観測結果

4.1 気温と風速・風向

(1) 氷河上での観測結果

Fig. 3 (a) から氷河上では気温と風速の間で類似した日周変化が見られた。最高気温に達する12時前後に風速も日最大値になる事が確認された。Imja湖近隣のハージェ（海拔4500 m, Imja湖から約10 km下流）で1975年にOhata et al. (1981) が行った観測では、地域の特性として年間を通して谷風が卓越しており、最も風速が強い季節は日射の極大時期とほぼ一致すると報告している。また乾季は気温の日変化が大きく、その日周変化も風速の日変化とほぼ一致している事が報告されている。このことから、ハージェの上流に位置するImja湖でも概ね同じ傾向を示したものと考えられる。

(2) モレーン上での観測結果

Fig. 3 (b) が示すように、氷河上での観測結果と同じく、気温と風速の間で類似した日周変化が見られた。日中の最大風速は約3.5 (m/s) であり、氷河上の最大風速約8.0 (m/s) と比較すると半分以下であった。18時から6時の風速に関しては、25日を除くとほぼ1.5 (m/s) 以下であった。ただし、モレーン上の観測点は、Imja湖の水際にあり、観測点から西に3 mの位置に、高さ5 mのモレーンがあるので、風速は地形的な影響を受けている可能性がある。

Table 1 Conditions of the meteorological observation

Observation items	Height from ground	Observation interval
• Temperature	70 cm	Record five minutes average. (Observe every minutes)
• Humidity		
• Wind speed	170 cm	
• Wind direction		
• Albedo	150 cm	Record one minutes

Table 2 Conditions of the subsurface debris temperature observation

Temperature logger No.	The debris covered thickness
2	10 cm and ice on the TIDBID
3	10 cm
4	No debris, air temperature observation
5	5 cm
6	20 cm



Photo 2 (a) Water depth measurement, (b) Surface water velocity measurement with 14 inch tire tube

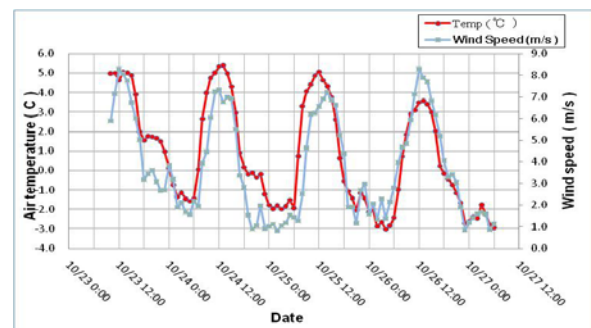


Fig. 3 (a) Wind speed and temperature at the Imja glacier

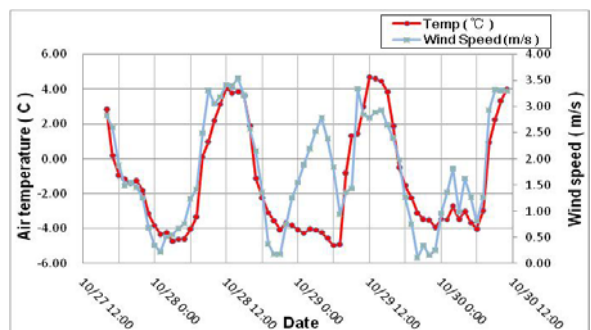


Fig. 3 (b) Wind speed and temperature at the Moraine

(3) Imja湖の凍結

29日の午前中にImja湖のモレーン側から湖の中心に向かって全湖面の約30%が氷で覆われ、水際には厚さ約1 cmの氷が張っていた。27日に氷は無く、28日は観測を行っていないので不明であり、29日の午前中に湖を覆う氷が観測され、翌30日の午前にはこの氷のほとんどが融解していた。

(4) 時間毎の風速と風向の分布

時間毎のImja氷河上とモレーン上の平均風速と平均風向の分布をそれぞれFig. 4 (a) と (b) に示す。氷河上の8時から18時の風向 (北を0度として、時計回りに風向を示す)は、南西から南南西の卓越風が観測された。モレーン上の8時から16時の風向は、南から南南西の卓越風が観測された。ただし前項で前述のように観測機器の側にモレーンがあるので、風向も地形的な影響を受けている可能性がある。

夜間は氷河上、モレーン上、共に風速が弱まり、その結果、風向が発散する様子が観測された。上述したハージェでの観測例でも日中は谷風が卓越し、夜間はランダムな風向になる事が観測されている。

4.2 アルベド

(1) 氷河上のデブリのアルベド

Imja氷河の上はPhoto 3 (a) のように石と砂に覆われている。また周囲を高い山脈に囲まれており、山影の影響が出やすい地形である。観測の結果をFig. 5 (a) に示す。最小値は12時頃の約0.3であった。

(2) 湖水のアルベド

アルベド計は湖岸から1 mほど湖面に突き出す形で設置した。観測器から西側に3 mの位置に、高さ5 m程度のモレーンが存在している。

氷河湖は氷河が融解する際に、Photo 3 (b) のように融解水にデブリが混入し、湖に流れ込むので灰色に濁っている。観測の結果をFig. 5 (b) に示す。最小値は12時前後の約0.15であった。

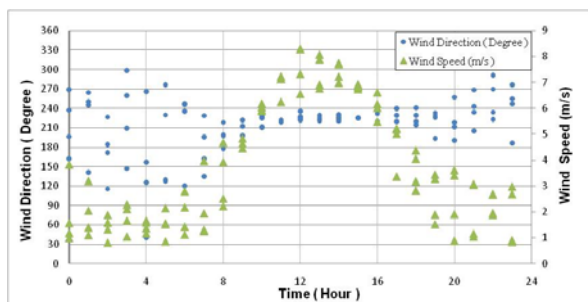


Fig. 4 (a) Wind speed and wind direction at the Imja glacier

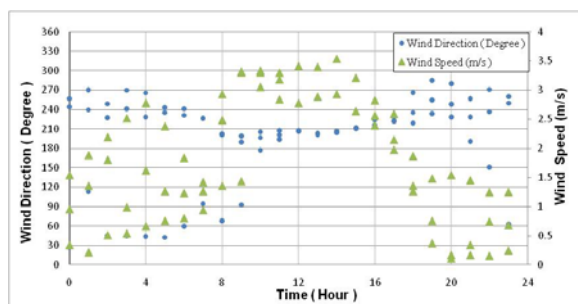


Fig. 4 (b) Wind speed and wind direction at the moraine



Photo 3 Albedo measurements of (a) Debris at the Imja glacier, (b) The glacial lake water

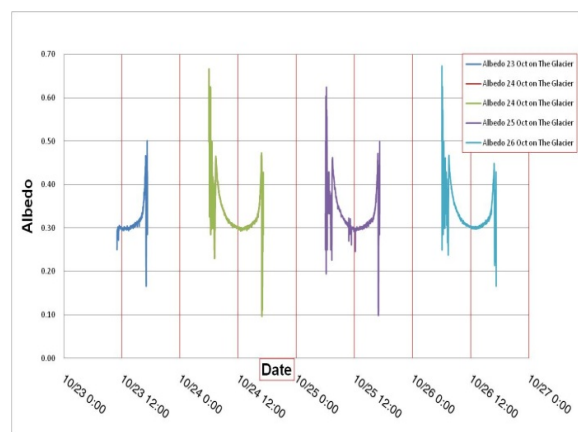


Fig. 5 (a) Debris albedo at the Imja glacier

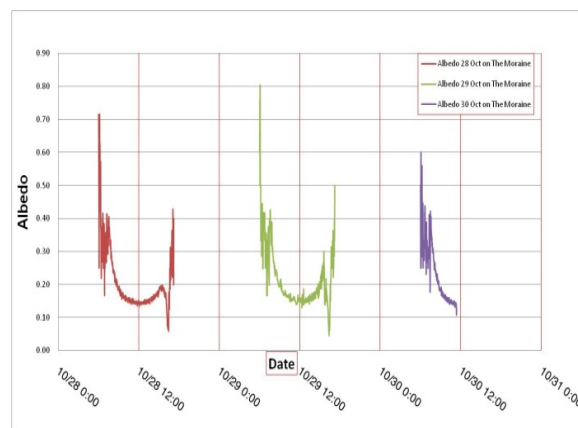


Fig. 5 (b) Albedo of the lake water

4.3 デブリ層内温度の観測結果

Imja氷河上でデブリを掘って氷河を露出させ、小型温度ロガーを置き、デブリの厚さを変えて埋め戻し、層内温度の観測を行った。

デブリに覆われている場合、デブリの厚さが10~15 mmの時が最も氷河の融解速度が速い(Mattson et al., 1993 ; 坂井, 2001)。Fig. 6 が示すように、デブリの厚さと層内温度の関係では、デブリの厚さが厚いほど層内温度の変動が小さくなる事が観測された。厚さ5 cmのデブリを被せた場合と、厚さ10 cmと20 cmのデブリを被せた場合を比較すると、5 cmの場合は気温が0度を超えると、層内温度も0度を超えるが、10 cmと20 cmのデブリを被せた場合は、日中でも0度に保たれた。

厚さ10 cmのデブリと厚さ20 cmのデブリを比較すると、共に気温が0度を超えても層内温度は0度に保たれているが、夜間の温度変動幅は20 cmの方が小さい事が観測された。また温度ロガーの上に氷河の欠片を乗せ、厚さ10 cmのデブリを被せた場合は、氷河の欠片の融解に従って、層内に間隙ができるために気温の影響を受けやすくなる様子が見て取れる。このことから、29日に厚さ20 cmのデブリが、時間が進むにつれて気温の影響を受け始めたのは、埋め戻した際の締め固めが十分で無かったためと推測される。

なお、Imja氷河で露出している自然の状態のデブリの厚さを2か所で測った結果、30 cmから40 cm程度の良く締め固まったデブリであった。

4.4 流出量の計測結果

水深の計測から得られた河床横断面図をFig. 7に示す。表面流速に浮子法の補正係数の0.9をかけて求めた平均流速と平均流量をTable 4 に示す。

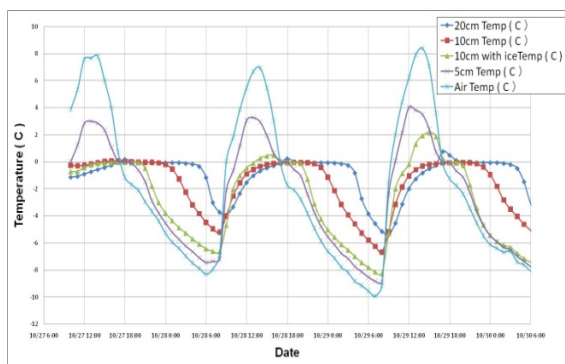


Fig. 6 Relationship between covered-debris thickness and subsurface temperature

Table 4 The minimum water depth, maximum water depth, average water depth, area of the cross-section, water velocity and discharge at the outlet of the Imja glacial lake

Minimum water depth (m)	0.13
Maximum water depth (m)	0.53
Average water depth (m)	0.31
Area of the cross-section (m ²)	3.86
Average water velocity (m/s)	1.36
Average water discharge (m ³ /s)	5.25

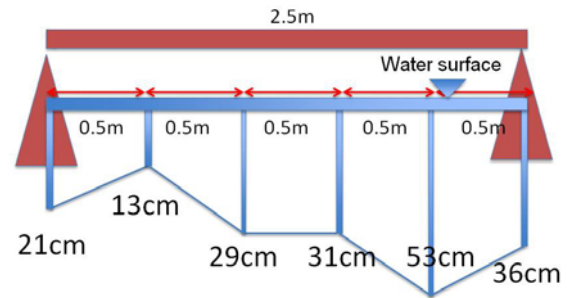


Fig. 7 The cross-section of under the bridge

5. 考察

Imja湖周辺で観測を行った。気温と風速の間では類似した日周変化が見られた。日中の風向はImja氷河上では、南南西から南西の卓越風になり、モレーン上では、南から南南西の卓越風になる事が観測された。夜間は、気温が下がり風速が弱まるので氷河上、モレーン上共にランダムな風向であった。気温と風速の観測結果は、Imja湖下流のハージェでの過去の長期観測結果とほぼ一致した。しかし、日中の風向に関しては、過去の観測結果とはあまり一致しなかった。知北 (2007) がモンスーン期に行った観測結果では、Imja湖の西にある谷方向から吹く西風が卓越している。また、この地域では局地循環を反映した谷風が吹く事が報告されており (安成哲三・藤井理行, 1983), 今回の観測結果では、風向と谷の位置が一致せず、過去の観測結果とは異なる傾向を示した。今後はImja湖周辺の風速場のモデリングなどを行い検証する必要がある。

デブリの厚さを変えて測った層内温度と気温の比較から、日中はデブリの厚さが10 cmを超えると、気温の上昇に関わらず、層内温度は0度に保たれた。気温が大きく下がる夜間に着目しても、デブリが厚いほど層内温度の変動が小さくなることが観測された。しかし、夜間には気温の低下に従って層内温度が低下し、日中の気温上昇にもかかわらず層内温度が0度に保たれるのは、温度ロガーを直接氷河の上に置

いたため、氷河の温度の影響を受けた可能性があり、今後は別途実験を行い、再度の検討が必要である。

湖面のアルベドの最小値はImja氷河上のデブリのアルベドより低い値を示した。今回の観測で測定された氷河上のデブリのアルベドは約0.3であり、湖面のアルベドの最小値は約0.15であった。

今回の調査では、過去にあまり観測されていないImja氷河上やポストモンスーン期のImja湖周辺の貴重な観測結果を得ることができた。しかし、課題として氷河湖の水収支という年スケールの解析を行うには、観測期間が短く、今後の課題としては、長期的な観測を行い、観測結果を蓄積する必要がある。

謝辞

防災研究協会から若手研究者研究助成金をいただいた。用いたALOSの衛星画像は、ALOS研究公募(RA)の枠組みでJAXA EORCで作成した高次成果物を使用した。衛星画像はJAXA及びALOS PIの田中賢治准教授にご提供いただいた。ネパール政府の水文気象局からは観測の許可証を発行いただいた。現地ではガイドのサンカル氏とポーターのエカ氏に観測の補助など、ネパールの方々にアドバイスや助力を得た。本研究の一部は、グローバルCOEプログラム「アジア・メガシティの人間安全保障工学」のアドバンスド・キャップストーンプロジェクトとして行われ、助成をいただいた。また、グローバルCOEプログラム「極端気象と適応社会の生存科学」から助成を得た。関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

坂井 亜規子 (2001) : デブリで覆われた氷河の融解過程, 雪氷, 63巻2号, pp.191-200.
内藤 望 (2001) : ネパール・ヒマラヤにおける近年の氷河縮小, 雪氷, 63巻2号, pp.207-221.
知北 和久 (2007) : モレーン堰止型氷河湖の熱循環に与える地形の影響 : -ヒマラヤのイムジャ湖とツォー・ロールパ湖との比較-, 日本水文科学会誌, 37, pp.93-101.
安成 哲三, 藤井理行 (1983) : ヒマラヤの気候と氷河—大気圏と雪氷圏の相互作用—, 東京堂出版, pp.45-50, 90-96.
山田 知充 (2000) : ネパールの氷河湖決壊洪水, 雪氷, 62巻2号, pp.137-147.
Fukui, H., Limlahapun, P. and Kameoka, T. (2008): Real time monitoring for Imja glacial lake in Himalaya ---

Global warming front monitoring system, SICE Annual Conference 2008, pp.2578-2581.
Outburst Flood Monitoring Imja Glacier Lake
<http://de04.gsec.keio.ac.jp:9080/glacier/sensordata.html>
Ohata, T., Higuchi, K. and Ikegami, K. (1981): Mountain-valley wind system in the Khumbu Himal, East Nepal, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol.59, No.5, pp.753-762.
Vuichard, D. and Zimmermann, M. (1987): The 1985 catastrophic, drainage of a moraine-dammed lake, Khumbu Himal, Nepal: cause and consequences, Mountain Research and Development, Vol.7, No.2., 7 (2) , pp.91-110.
Sakai, A., Fujita, K., and Yamada, T. (2005): Expansion of the Imja glacier lake in the East Nepal Himalayas, glacier caves and glacial karst in high mountains and polar regions. Ed. B.R. Mavlyudov, Institute of geography of the Russian Academy of Sciences, pp. 74-79.
Sakai, A, Nishimura, K., Kadota, T. and Takeuchi, N. (2009): Onset of calving at supraglacial lake on debris-covered glaciers of the Nepal Himalaya, Journal of Glaciology, Vol. 55, No. 193, pp. 909-917.
Sakai, A., Saito, M., Nishimura, K., Yamada, T., Iizuka, Y., Harada, K., Kobayashi, S., Fujita, K. and C. B. Gurung (2007): Topographical survey of end-moraine and dead ice area at the Imja glacial lake in 2001 and 2002, Bulletin of Glaciological Research, 24, pp. 29-36.
Bajracharya. S. R, and Mool. P., (2009): Glaciers, lakes and glacial lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal, Annals of Glaciology, 50 (53), pp. 81-86.
Mattson. L. E., Gardner. J. S., and YOUNG. G. J. (1993): Ablation on debris covered glaciers: an example from the Rakhiot Glacier, Punjab, Himalaya, Snow and Glacier Hydrology, IAHS Publ, No 218, pp. 289-296.

Field Observation around the Imja Glacial Lake

Tsutao OIZUMI*, Yosuke YAMASHIKI and Kaoru TAKARA

* Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

The glacial lake outburst flood is a critical issue at the high mountain region of Himalaya. However, available meteorological observation data are still limited in clarifying the water budget mechanism of the glacial lake. This study has carried out field investigation around the Imja glacial lake in Nepal with the objective of development of a glacial lake hydrological model. The meteorological observation results showed that air temperature had strong relationship with wind speed. These results showed that, during the field observation period, averaged wind direction was south-west at the Imja glacier in the day time. The fluctuation of subsurface temperature of debris was influenced by the covered-debris thickness. It was found that when the thickness of the debris exceeds 10 cm, the subsurface temperature of the debris kept at zero degree in the day time. The observation of albedo indicated that the albedo of glacial water was lower than that of the debris.

Keywords: Glacial lake, Glacier, Himalaya, Glacial lake outburst floods, Imja glacial lake