

## ヒマラヤにおける氷河湖決壊洪水の防災のための 氷河湖成長拡大機構のモデル化に関する研究 --Imja氷河湖を対象として--

大泉伝\*・山敷庸亮・寶 馨

\* 京都大学大学院工学研究科

### 要 旨

近年ヒマラヤ周辺国で大きな問題になっている氷河湖決壊洪水の防災のために、氷河湖の成長拡大機構をモデル化し、周辺国地域における防災計画の一助となる事を目的としている。ネパールでは氷河湖決壊洪水は、同国で最も懸念される災害である。しかし氷河湖の拡大成長機構はまだまだ明らかでなく、防災対策や決壊時期の予測に必要な水位の将来予測が出来ていないのが現状である。本研究では危険性が指摘されているネパールのImja氷河湖を対象として氷河湖の成長拡大機構のモデル化を試みた。氷河湖が拡大する原因の一つである氷河湖に接する氷河のCalving（氷塊分離）に着目し、その原因である氷河湖内の水温分布の予測を三次元非静水圧流動解析モジュールBiwa-3Dを元に改良をしたImja-3Dを用いて計算を行った。結果、氷河に接する面で比較的高い水温分布が観測され、氷河湖の形状がCalvingを引き起こしている可能性を示した。

**キーワード：** 氷河湖決壊洪水，氷河，ヒマラヤ，水温分布，Biwa-3D

### 1. はじめに

本研究は近年ヒマラヤ周辺国で大きな問題になっている氷河湖決壊洪水（Glacier Lake Outburst Floods: 以下GLOFs）の防災のために、氷河湖の成長拡大機構をモデル化し、周辺国地域における防災計画の一助となる事を目的としている。GLOFsが特に注目され始めたのは、1985年にネパールで大きな被害をもたらしたDig Tsho氷河湖が決壊し発生したGLOFsである。Vuichard・Zimmermann（1987,1987）はその下流で人命やその資産が失われ、そして一基の水力発電所、橋などのインフラ施設の破壊を報告した。

その後、過去に起こった洪水の原因調査でネパールでは平均するとGLOFsが3年に1度の頻度の発生している事が分かった。

近年、様々な研究によってヒマラヤの氷河の質量収支は少しずつ明らかになってきている。例えば藤田（2000）はチベット高原で氷河が存在できるのは、降水が融解期である夏季に集中しており、夏季の降水の一部が降雪として降り、表面のアルベドが高く

維持されている事により、融解が制限されているある事を明らかにした。松田（2008）はヒマラヤの氷河の融解量が他地域の氷河より多い原因は、温暖化による降雪量の減少が特に大きな原因である事を明らかにした。

近年、危険度が高い氷河湖であるImja湖や下流地点であるNamche Bazaarの気象観測データがリアルタイムに手に入るようになった。“Monitoring Imja Glacier Lake”というプロジェクトでは、Imja湖周辺と下流のNamche BazaarにField severを設置し、観測した気温や湿度、日射量など観測結果がインターネット通してリアルタイムに遠隔地で取得できる取り組みが始まっており、そのデータの一部が一般にも公開されている。データは観測点によって異なるが、最も早いものは2007年の11月から公開されており、観測時間は概ね5分間隔である。

この様に氷河を中心とした研究は広く行われているが、防災の観点からのヒマラヤのGLOFsの研究例はほとんどない。これはヒマラヤの現地観測データを取得するのが難しいこと、氷河湖のモレーンの内部構

造が明らかでない事等が原因ではないかと考えられる。GLOFsは天然ダムの決壊と比較されることが多い。どちらも自然に構築された堤体がある日突然決壊し、鋭いピーク流量を描く点は似ている。しかし堤体が氷河の成長に合わせて数百年規模で構築される点と、発生する土石流が氷の塊含む「氷石流」である点が大きく異なる。

現在GLOFsを防ぐ最も有効な手段は、水位を下げることであり、ヒマラヤ最大の氷河湖Tsho Rolpa氷河湖では水門を建設し水位を約5m下げる事に成功した。しかし標高4580mでの水門の建設には約1億円が必要と言われており、危険度が高い全ての氷河湖で工事を行う事は難しい。また水位を低下させるために氷河湖への流入量を明らかにする事が非常に重要であるが、観測データの入手が非常に困難であるために、この分野の研究はまだほとんど行われていない。その為氷河湖への流入量が明らかでないために、正確な水位の将来予測ができず、決壊予測は困難である。氷河湖決壊洪水を防ぐ最も有効な手段は水位を下げることであり、防災計画の観点からも氷河湖の成長拡大速度機構を明らかにする事は非常に重要である。

そこで、本研究は流入量を推定し、氷河湖の成長拡大機構をモデル化し、将来の水位を予測する事を試みる。

## 2. 目的

本研究では決壊の危険性が最も強く懸念されているネパールのImja氷河湖（以下Imja湖とする）周辺を研究対象地域とし、三次元非静水圧流動解析モジュールBiwa-3Dを元に改良を行なったImja-3Dをベースとして、氷河湖成長拡大モデルを開発し、水位の将来予測を行う。モデルを開発するために、(1)リアルタイム観測データを基にImja-3DでImja湖の水温分布の解析を行い、水温の上昇による氷河湖に接する氷河からの融解量を推定する。(2)過去の衛星画像から氷河湖の表面積と外周の長さを計測し、形状の経年変化のモデル化を行う。(3)ネパールとインド政府がImja湖下流やヒマラヤで観測している気象データを基にImja湖上流部の気象データを推定し、上流部の氷河の水文モデルの構築を行い、氷河からのImja湖への流入量を計算する。以上3つのアプローチから氷河湖成長拡大モデルの開発を行う。

本稿では最初のアプローチとしてリアルタイム観測データとImja-3Dを用いて水温分布を解析し、氷河湖拡大の関連を明らかにする事を目的としている。

## 3. 研究対象地域

本研究の研究対象地域は、ネパール国のヒマラヤに位置するImja氷河湖である。東経86°56'57"、北緯27°53'93"に位置している。標高は5010mである。Imja湖は1962年ごろ、最初は小さな池として観測されている。その後急速な成長を続け、現在ではGLOFsの危険性が非常に高い氷河湖として注目を集めている。Imja湖の下流には、ヒマラヤ登山やトレッキングの中心地であるNamche Bazaarがあり、この地域の中心的な町として機能している。地球陸域観測衛星（以下：ALOS）より得られた画像で研究対象地をPhoto.1に示す。

ALOSで観測された2006年12月のImja湖の画像をPhoto.2に、2008年10月に観測された画像をPhoto.3に示す。それぞれの画像には位置情報が与えられており、ERDAS社のImagine9.3を用いて湖面の最長距離の計測を行った。最長距離は目視判読で兩岸の最も離れている点を結んだ距離とした。計測の結果はともに2047mであった。しかし湖の氷面積が拡大した事は明らかである。



Photo.1 研究対象地域，2008年10月24日観測

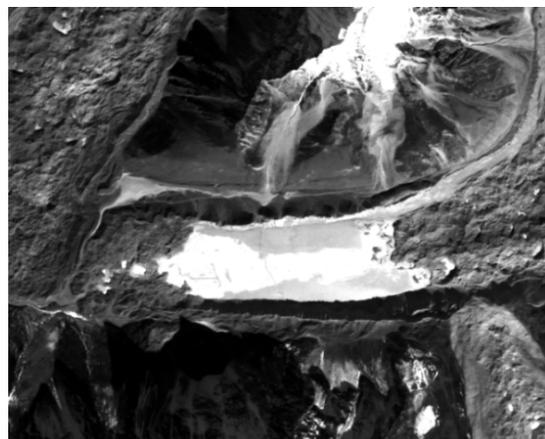


Photo.2 Imja氷河湖，2006年12月4日観測

#### 4. 手法

本研究では、三次元非静水圧流動解析モジュールImja-3Dと現地の観測データを基に仮想した気温と風速、風向データを用いてImja湖の水温分布の再現を試みた。

##### 4.1 水温分布の解析

三次元非静水圧流動解析モジュールBiwa-3Dを元に改良を行なったImja-3Dをベースとして、水温分布の解析を行った。Biwa-3Dは山敷ら（2000）により京都大学環境質制御研究センターにて開発された後、国交省琵琶湖工事事務所にて改良がおこなわれた三次元三次元非静水圧流動解析モジュールである。

本研究ではImja湖の湖盆図からデジタル化したDEMとImja湖周辺の気温、風速、風向を入力し水温分布を解析した。

##### 4.2 入力データ

###### (1) 湖盆図

Sakai et al. (2007) の10m間隔の頭深線を持つ湖図を基にGISソフトArc GISを用いてデジタル化し、DEMを作成した結果をFig.1に示す。

湖盆図は18mグリッドを作成し、それぞれX,Y方向に(106, 44)グリッドに分けて計算を行った。

###### (2) 気温データ

近年のMonitoring Imja Glacier Lake というImja湖周辺と下流のNamche BazaarでField severを用いて気温や湿度などを観測した結果がインターネットを通じて公開される取り組みが始まっている。一部のデータが公開されている。データは観測点によって異なるが、最も早いものは2007年の11月から公開されており、観測時間は概ね5分間隔である。

本研究では、Namche Bazaarで観測しているField Sever Himalaya01のデータを基に、Imja湖の仮想気温データを作成した。あえてImja湖周辺ではなくhimalaya 01のデータを用いたのは、(1) Imja湖周辺の観測データは2008年の5月から6月に限られており、モデルで計算するのに十分なデータ量を得る事が出来ない為。(2) Namche BazaarとImja湖の2008年5月の1カ月間の気温の変化を比較するとFig.2のような概ね似ている外形を示したことにより、Namche BazaarとImja湖では気温が変化するパターンは近似していると仮定し、Namche BazaarとImja湖の平均気温差10℃を引いた値を仮想的なImja湖周辺のデータとした。

欠測期間に関しては、1時間のデータのみが欠けている場合は前後の気温の平均値を欠測期間の気温と仮定した。2時間以上の長期間の欠測期間では、同一

時刻の過去二日分、もしくは翌2日分の平均気温を観測気温と仮定した。1時間平均気温は5分間隔のデータを1時間分積分し、その値の平均値を1時間の平均気温と仮定した。2008年5月にImja湖で観測された気温と仮想気温の比較結果をFig.3に示す。Imja湖で観測されたデータの欠測箇所はNamche Bazaarの気温データと同様に前後のデータを用いて補正を行った。



Photo.3 Imja氷河湖, 2008年10月24日観測

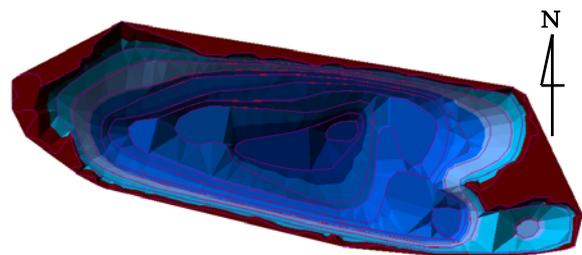


Fig. 1 Imja湖の湖盆図

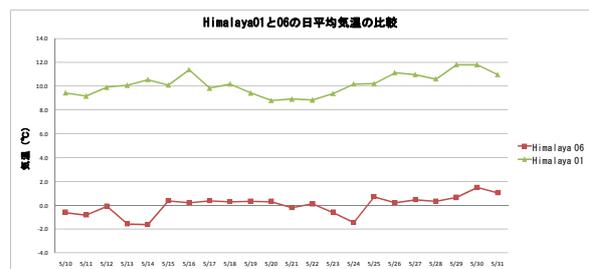


Fig.2 Imja湖とNamche Bazaarの観測気温の日平均気温の比較

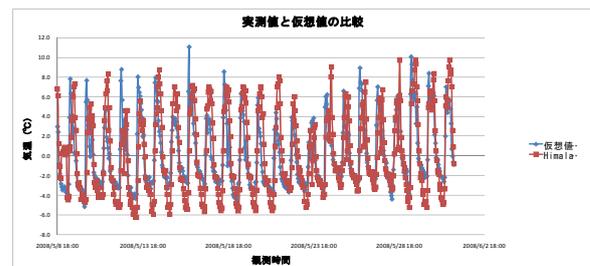


Fig.3 2008年5月のImja湖の現地観測気温と仮想気温の比較

外形からは概ね一致する様子がうかがえるのでこのデータを仮想気温として用いる。

### (3) 風速

Imja湖の湖面、もしくは周辺で常時風速は観測されておらず、データを入手する事は極めて困難である。知北（2007）は1996年6月と1997年7月に現地観測を行った結果、Imja湖の水温観測データが表面付近の温度躍層が存在する事に注目し、Imja湖における風に対する遮蔽効果を検証するため、周辺の地形を考慮した気流に関する3次元数値実験を行った。Imja湖では風速5.06 (m/s) の風速を与えた時に、湖面上では平均 (2.98m/s) になるという結果を得ている。本研究ではこの結果を参考に仮想的な風速を与えた。なお通年通して風速は得られないので、年間通して一定の風速があるものと仮定した。仮定した風速の観測点をそれぞれFig.4に示す。また各観測点の位置と仮定した風速の範囲をTable.1に示す。

### (4) 風向データ

風速データ同様、風向データも定期的に観測されていない。Chikita et al. (2000) が1997年7月にImja湖のエンド・モレーンで観測した結果によれば、ほぼ湖長軸に沿う東向きの風で、時々反対の西向きの風が吹くことが観測されている。

本研究では風向は主に東東北、東、東南東の風向をランダムで与え、夜間2、3時間に一回ずつ、南南西から北北西の風をランダムで与えた。また7月以外の観測データがないので、年間を通して同一の条件で計算を行った。

## 5. 結果

本研究はImja湖周辺を研究対象地域とし、三次元非静水圧流動解析モジュールBiwa-3Dを元に改良を行なったImja-3Dをベースとして、氷河湖成長拡大モデルを開発し、水位の将来予測を行う事を目的としている。氷河湖成長拡大モデルを開発するために、まずリアルタイム観測データを基にImja-3Dで水温分布の解析手法の開発を行った。

Imja湖周辺で定期的な、気温、風速、風向そして水温分布の観測はなされていないので、下流で定期的な観測がなされているNamche Bazaarの気温データから10℃引いた値を仮想的なImja湖の仮想気温とした。

風速と風向は既往の研究で行われた観測結果と研究成果を基に仮想的な風速と風向を与えた。

仮想的な気温、風速、風向と18mグリッドの湖盆図を入力データとしてImja-3Dで計算を行った。計算期間は2008年1月1日から5月31日である。

18mグリッドでの計算結果をFig.4に示す。Imja湖の水温分布を6時間で1stepとした時の、50step目から50stem毎に増加していった時の湖の北側からとらえた水温分布の図をFig.5に、南側からとらえた図をFig.6に示す。

初期の水温を湖面で約11℃と湖底で約7.5℃と比較的高く設定したために、混合に時間がかかったが、100日前後の4月に突然湖西の方を中心に混合が始まった。知北ら（2000）が1997年7月15日と18日の午前に行った水温観測では湖面に温度躍層が確認されている。本研究結果でも4月上旬に急激な混合が現れるまでの期間は、湖面に温度躍層が確認されていた。

水温分布は湖の東西の両岸で高い値を示した。この結果から氷河に接する面（図では緑色に表示）の水温が高い事が示されている。これは両岸に接するモレーンと氷崖の高さが湖面から約25mあり、あまり風の影響を受けないからではないかと考えられる。山田（2000）は氷河湖の長さ方向の拡大は湖に接する末端の氷河の下部が融解し、上部の重さに耐えられなくなるCalving（氷塊分離）に起こっているとおり、本研究結果で得られた東西の両岸の特に東部の低層では水温が高く、ALOSより得られたPhoto.2とPhoto3の比較からも湖面の変化も東部が変化しており、水温が比較的高く維持されることによりCalvingしたと推測できる。

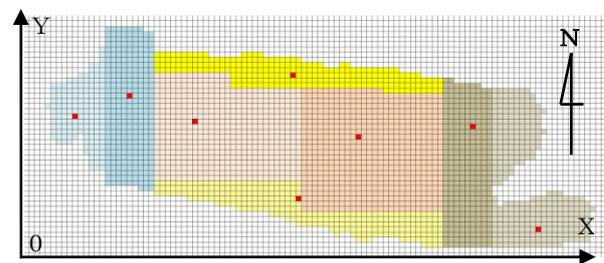


Fig.4 18mメッシュのImja湖の湖盆図と風速観測点

Table1. 観測点の位置と仮想風速（18mグリッド）

	原点からの距離 (m)		仮想風速 (m/s)	
	X (m)	Y (m)	(6時から17時)	(18時から5時)
A	176	416	0.5から1.5 (m/s)	0から0.5 (m/s)
B	336	480	1から3 (m/s)	0から1 (m/s)
C	832	160	1から6 (m/s)	0から2 (m/s)
D	816	544	1から6 (m/s)	0から2 (m/s)
E	528	400	1から5 (m/s)	0から2 (m/s)
F	1008	352	1から5 (m/s)	0から2 (m/s)
G	1344	384	1から3 (m/s)	0から1 (m/s)
H	1536	64	0.5から1.5 (m/s)	0から0.5 (m/s)

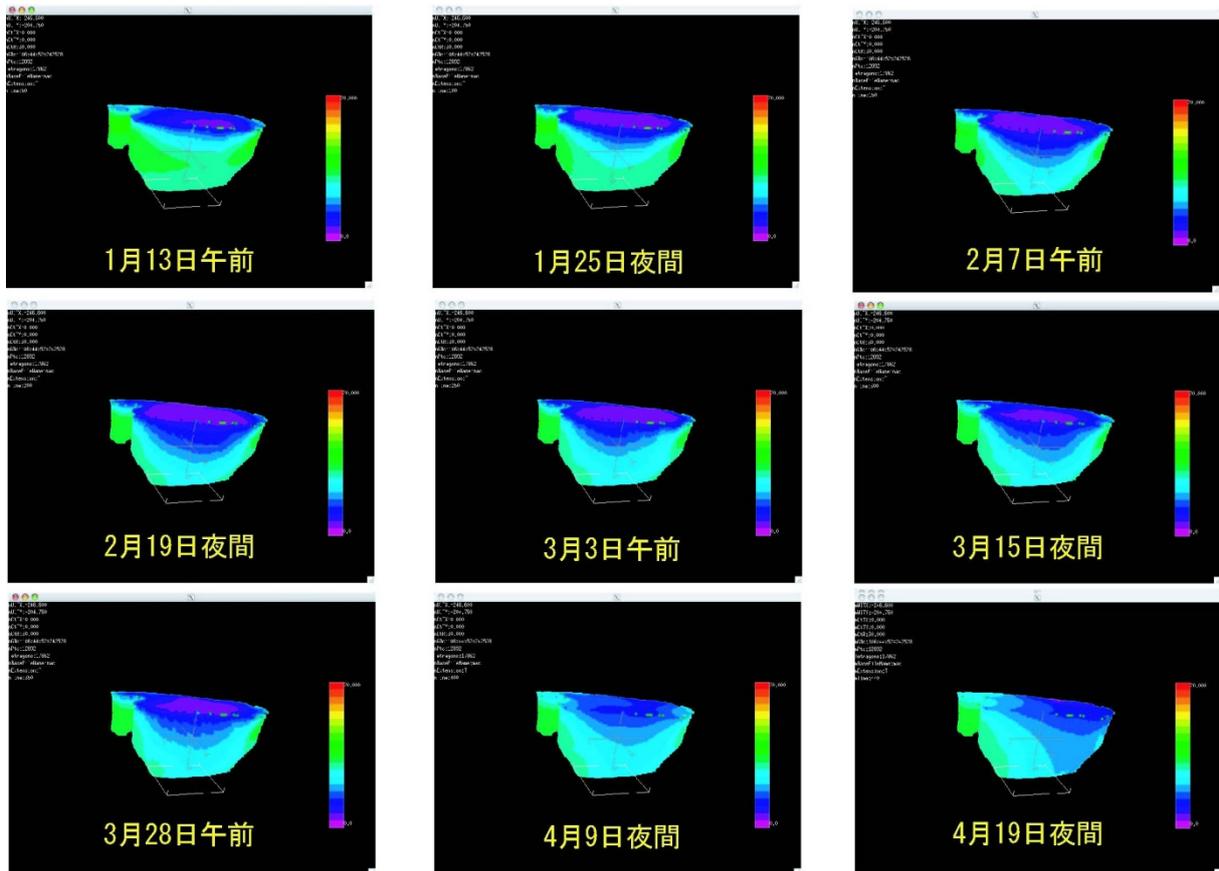


Fig.5 計算結果。Imja 湖北側から見た水温分布

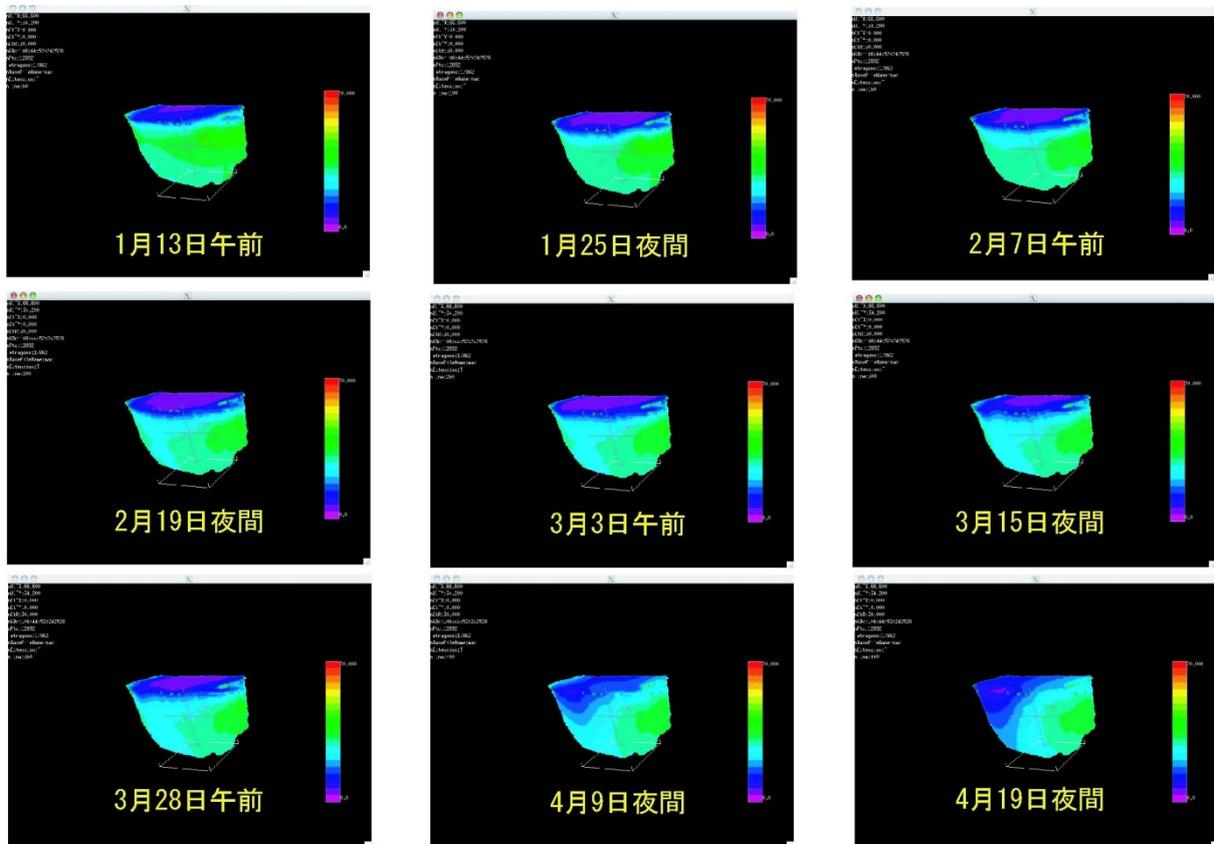


Fig.6 計算結果。Imja湖北側から見た水温分布

## 6. 結論と今後

本研究ではImja-3Dを用いて水温分布の再現を試みた。結果既往の研究で示されたように表面の温度躍層は表現された。しかし、混合が始まった後は、観測データがなく仮定として与えた初期水温が約10度と1月にしては高かった可能性があり、今後は現在得られている既往の研究で得られている6月の水温を初期水温に用いて計算をしていく必要がある。

水温分布では両岸に高い水温分布層が存在する事が確認できた。特に東岸の形状は衛星画像が示すように変化が激しく、その原因は接する氷河のCalvingと推測されており、本研究の結果からも同様の傾向が得られた。

今後は解像度が高い7.5mグリッドの湖盆図を用いて、初期水温と風速のパターンや観測位置を変えて観測結果と近い結果が得られるよう改良していく。

7.5mグリッドの湖盆図と、観測位置をFig.7とTable.2に示す。

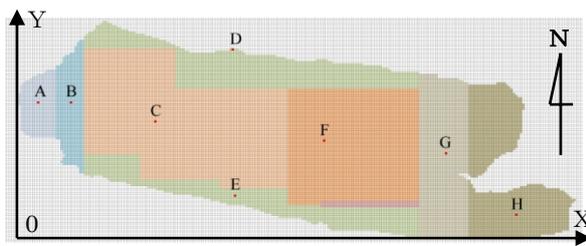


Fig.7 7.5mメッシュのImja湖の湖盆図と風速観測点

Table.2 観測点の位置と仮想風速 (7.5mグリッド)

	原点からの距離 (m)		仮想風速 (m/s)	
	X (m)	Y (m)	(6時から17時)	(18時から5時)
A	136	414	0.5から1.5 (m/s)	0から0.5 (m/s)
B	231	414	1から3 (m/s)	0から1 (m/s)
C	707	115	1から6 (m/s)	0から2 (m/s)
D	700	584	1から6 (m/s)	0から2 (m/s)
E	476	353	1から5 (m/s)	0から2 (m/s)
F	966	292	1から5 (m/s)	0から2 (m/s)
G	1319	251	1から3 (m/s)	0から1 (m/s)
H	1516	54	0.5から1.5 (m/s)	0から0.5 (m/s)

## 謝 辞

本研究で用いた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ました。衛星画像を提供していただいたJAXA及びALOS PIの田中賢治准教授に篤く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 松田好弘 (2008) : 名古屋大学大学院博士論文 pp.52-54,
- 藤田耕史 (2000) : チベット高原における大陸性寒冷氷河の質量収支に関する研究, 名古屋大学大学院博士論文, pp.56-58,
- 山敷庸亮・松井三郎・禰津家久・熊谷道夫 : 琵琶湖還流の数値シミュレーション (2000) : 水工学論文集, 第44巻, pp.975-980,
- Chikita, K., Joshi, S. P., Jha, J. and Hasegawa, H., (2000): Hydrological and thermal regimes in a supra-glacial lake: Imja, Khumbu, Nepal Himalaya, Hydrological Sciences Journal, 45, 507-521
- Monitoring Imja Glacier Lake : [http://www.rsgis.ait.ac.th/~honda/FS\\_Himalaya.htm](http://www.rsgis.ait.ac.th/~honda/FS_Himalaya.htm)
- SAKAI, A., SAITO, M., ISHIMURA, K., YAMADA, T., IIZUKA, Y., HARADA, K., KOBAYASHI, S., FUJIT, K., C.B. GURUNG, (2007) : Topographical survey of end moraine and dead ice area at Imja Glacial Lake in 2001 and 2002, Bulletin of glaciological research, Vol, 24, pp.29-36.
- Vuichard, D., and Zimmermann, M., (1986): The Langmoche flash-flood, Khumbu Himal, Nepal, Mountain Research and Development, Vol. 6(1), pp.90-94.
- Vuichard, D., and Zimmermann, M., (1987): The 1985 catastrophic drainage of a moraine-dammed lake, Khumbu Himal, Nepal: cause and consequences. Mountain Research and Develop, Vol. 7, pp. 91-110.

## **Development of Glacial Lake Grows and Expansion Model for Disaster Prevention of Glacial Lake Outburst Floods in Himalaya**

Tsutaio OIZUMI\*, Yosuke YAMASHIKI and Kaoru TAKARA

\*Department of Urban and Environmental Engineering, Kyoto University

### **Synopsis**

The glacial lake outburst floods is one of the most concerned disaster in the NEPAL. However the mechanism of glacial lake growth and expansion is not well understood, therefore it is very difficult to predict the water level in future for the disaster mitigation plan and the disaster prediction. This study targets the Imja Glacial Lake in NEPAL and tries to develop the model of glacial lake growth and expansion in the Imja Glacial Lake. This study also focused on the glacial carving which is one of the causes of glacial lake expansion. The carving is occurred by water temperature increase. The water temperature distribution analysis in the lake is the one of the most important factor for predicting carving. In this study we use Imja-3D, based on Biwa-3D. The results indicate, the temperature of the part of touch the terminal glacial is higher than the other part. From this result, it is expected that the form of glacial lake contribute to the occurrence of the carving.

**Keywords:** Glacial Lake, Glacial, Himalaya, water temperature distribution, Biwa-3D