

ヒマラヤの氷河湖の水温構造再現

—イムジャ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

ヒマラヤでは氷河湖の拡大が大きな問題になっている。氷河湖の拡大は、湖水に接する氷崖の底部が融解し、氷崖上部の重さを支えきれず崩落することにより発生する。その為、湖の水温構造を明らかにする事が重要であるが、観測することは困難である。そこで三次元流動解析モジュール”Imja-3D”に、仮定したImja湖周辺の2008年の気象条件を入力し、水温構造の再現を試みた。計算の結果、1997年に観測された水温構造と同様に表層付近に温度躍層が現れ、中間層から低層では広く2-3度の温度層が再現された。

キーワード: 氷河湖, イムジャ氷河湖, 水温構造, ヒマラヤ

1. はじめに

ヒマラヤ周辺国では、氷河の成長と後退過程で形成された不安定なモレーンによって堰き止められた氷河湖の急速な拡大と氷河湖が決壊して発生する氷河湖決壊洪水が大きな問題になっている。例えば Vuichard and Zimmermann (1986; 1987)は 1985 年の Dig Thso 氷河湖決壊洪水を調査し、冰雪崩が氷河湖に崩落し、大量の湖水が流下し、家屋やインフラ施設を破壊した事を報告した。氷河湖決壊洪水は、(1) 湖水を堰き止める不安定な構造を持つモレーンの崩壊による湖水の流出、(2) 大容量の雪崩や氷河湖に接する氷河が湖に崩落して発生する津波による段波、(3) 湖の水位上昇による溢流などが原因でモレーンが浸食され、湖水が下流に一気に流れ出す土石災害である。

氷河湖決壊洪水の有効な防災対策の一つに湖の水位を下げる方法である。ネパールの Thso Rolpa 氷河湖では、湖面とモレーン天端の高さがほぼ等しく、溢流によるモレーンの決壊の危険性が指摘されていた。そこで湖面の水位を下げるための排水路の工事が行われ水位を下げる事に成功した(Mool et al., 2001; Bajrachrya et al., 2007)。しかしリモートセンシングを用いた調査の結果、1,466 の氷河湖がネパールにあり、そのうち 21 の氷河湖は決壊の危険性が指摘

されている(Ives et al., 2010)。そのほとんどは人里離れた標高 4,500m 以上に位置している。そのため人里離れた高山域における工事の独特の難しさと危険性、費用の問題から全ての氷河湖に十分な防災対策を施すことは極めて難しい。

そこで対策の優先順位をつけるためにも、危険度の評価が必要であるが、評価基準は未だに決定されていない。例えば先に述べた Thso Rolpa 湖などは、湖面とモレーンの天端がほぼ等しかったので、決壊の可能性が高く危険性が高い事は明白であるが、本研究が対象とする Imja 氷河湖（以下、Imja 湖）は、拡大の速度が速く、ネパールの氷河湖では最大級の貯水容量をもつ氷河湖であり、そのために危険性が指摘されている。しかし拡大が早い氷河湖が危険とされているにもかかわらず、氷河湖の拡大の原因のそのものの完全な特定には至っていない。

急速な拡大の原因として、Calving（氷塊分離）の可能性が指摘されている。Calving は氷河湖に接する氷崖の基部が吹送流によって運ばれる温かい水により湖面付近の氷河が融解し、上部の重みに基部が耐えられず崩落する現象である。Calving に影響を与える湖の熱循環は、湖上風によって発生する水吹流が大きく影響する。水吹流は湖上風によって発生するが、エンドモレーンから湖上に向かって吹く風の湖面での風速分布は、モレーンの地形によって変化する

ることが知北 (2005, 2007) の数値実験によって明らかになっている。

Calving が発生する条件を Sakai et al. (2009) は単純な地形を仮定した計算結果から、水温が 2-4 度でフェッチが 30m を超えると水面下の氷の融解が水面上の氷融解速度を超え、氷崖がえぐれることで氷分離が起こる事を示し、氷吹流が Calving に大きな影響を与える事を示唆した。

このように、Calving が氷河湖拡大の原因であり、そして吹送流が大きな役割を果たすが、氷河湖の水温構造の再現に着目した研究はほとんどなされていない。

湖沼などの閉鎖性水域の水温の数値計算は、例えば琵琶湖では既に行なわれている (山敷ら, 2010)。しかし、標高 5000m を超える高山域に存在する氷河湖での水温構造の再現計算を行なった例はあまりない。その理由として高山域では水温計算の基本的な入力値となる気温、風速、風向や湖の水温、湖への流入する氷河からの融解水などの長期観測記録がほとんど存在しない為である。

そこで本研究では、ネパールの氷河湖の中でも比較的研究が進んでいる Imja 氷河湖を研究対象地とした。筆者らが 2009 年に行った現地観測と公開されている近隣地域の観測結果、先行研究を参考にして、長期間の気温と風速・風向データセットを作成し、三次元流動解析モジュール Imja-3D を用いて Imja 氷河湖の水温構造の再現を試みた。

2. 研究対象地

Fig. 1 は Imja 湖の位置を示す。Imja 湖はカトマンズから北東の Solukhumbu region に位置している。Solukhumbu region には Mt. Everest などの世界的な 8000m 級の山が連なっており、Imja 湖から流れ出す Imja 川 (Imja Khola) の川沿いは、Mt. Everest 等の名山を目指す旅行者が多いネパール屈指の人気トレッキングコースである。そのため、川沿には多くの外国人旅行者を相手にした地元住民が営む多数のロッジやレストランが点在しており、Imja 川沿いはこの地域の中でも特に人口が密集している。その為、Imja 湖で氷河湖決壊洪水が発生した場合は甚大な被害が予測される為、Imja 湖はネパールで危険性が指摘されている 21 の氷河湖の 1 つであり、詳細な調査の必要性が指摘されている。Imja 湖の南西約 21km には、この地域の中心的な町 Namche Bazaar (3440m) があり、本研究で用いた Imja 湖の長期気温の作成には、Namche Bazaar で観測された 2008 年の気温データを用いた。

Imja 湖は海拔 5010m に位置し、湖はほぼ東西に

横たわる形をしており、南北より東西の方が長い。湖の形状が Calving により年々変化するので、2008 年の 10 月 24 日に陸域観測技術衛星 (ALOS) が撮影した画像を用い、測線を Fig. 2 のように決定し、湖の長さを計測した結果、東西に約 2000m、南北に約 554m であった。湖の体積は 1992 年から 2002 年にかけて約 30% 拡大した (Sakai et al., 2003)。拡大速度に関しては 2000 年を境に拡大速度の低下が報告されている (Fujita et al., 2009)。

Imja 湖の上流には、Imja 氷河、Amphulapcha 氷河、Lhotse Shar 氷河がある。これらの氷河は砂と礫、石が混じった灰色のデブリで覆われており、典型的な D 型氷河と考えられる (森林, 1974)。湖の東側は切り立った氷崖が Imja 氷河湖に接している。湖の北側のモレーンは高さ約 40m ほどであり、南側は Amphulapcha 山があり、西側には Imja 湖を堰きとめるモレーンと湖水の流出口がある。



Fig. 1 Imja Lake and Namche Bazaar at Solukhumbu region (Refer Google map)

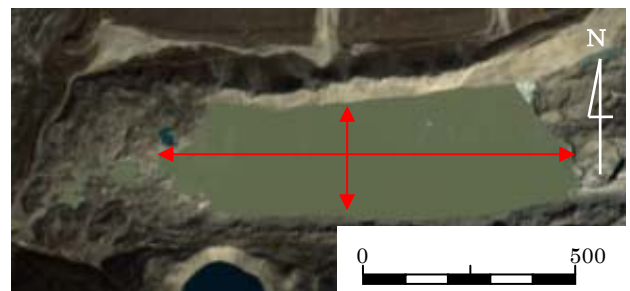


Fig. 2 Satellite image of Imja Lake taken by ALOS on 24 October 2008

3. 計算

3.1 計算モデル

水温構造の再現計算は、Yamashiki et al. (2003, 2010) が開発した三次元流動解析モジュール BIWA-3D を基にした Imja-3D を用いた。

BIWA-3D は大きく分けて流動解析モジュールと富栄養化モジュールからなっており、本研究では水

温構造の解析に流動解析モジュール” Imja-3D”を用いた。Imja-3D は湖盆図の数値標高図と気温、風速、風向から水温構造を計算できるモデルであり、流動モジュールに非静水圧の N-S 式、CIP を用いて離散化し、乱流スキームには Mixed Scaling Formulation Model を用いて成層・非成層の影響を考慮した。湖面での熱収支は太陽光の短波放射の影響と気温・風速の影響を組み入れた。今回は氷崖や周辺の地形からの熱収支と氷河の融解水の流入は観測結果が無いので考慮していない。支配方程式は連続の式 (1)、格子平均操作を行った回転系における非圧縮性 NS 方程式 (2)、とスカラー方程式 (3) である。

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j - \lambda_{ij})}{\partial x_j} \\ &= \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial P}{\partial x_i} \\ &+ \bar{\rho} F \frac{\partial x_3}{\partial x_i} + f \bar{\rho} \left(\bar{u}_2 \frac{\partial x_1}{\partial x_i} + \bar{u}_1 \frac{\partial x_2}{\partial x_i} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\bar{\beta})}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\beta}_i \bar{u}_j - \chi_j)}{\partial x_j} \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K \frac{\partial \bar{\beta}}{\partial x_j} \right) + P_s \end{aligned} \quad (3)$$

ここに x_i は東方向 ($i=1$)、北方向 ($i=2$)、そして上方向 ($i=3$) を示す。 f はコリオリパラメータ、 u_i ($i=1,2,3$) はそれぞれの方向の水の流速、 β はスカラー量、 μ は水の粘性係数、 $K=k/\rho_0$: k は水の分子拡散係数、 ρ_0 は水の標準比重、 F は重力、 P_s は生成項を示す。subgrid-scale (SGS) 応力 λ_{ij} と SGS フラックス χ_j については過去の研究 (Yamashiki et al., 2010) に従った。

3.2 計算条件

(1) 計算期間

計算は 2 年間行い、1 年目をスピニングアップとし、2 年目の計算結果を採用した。1 年目も 2 年目も、同じ作成した 2008 年のデータセット (時間平均した気温・風速・風向) を使用した。風向と風速はランダム関数で与えてあり、1 年目と 2 年目で変化するようにした。気温、風速、風向のデータセットの詳細は 4 章の(1)節以降で述べる。

(2) 計算領域

Imja 湖の湖盆は、Sakai et al., (2003) が 2002 年に水深を測定した 10m 間隔の湖盆図を GIS ソフト Arc GIS を用いてデジタル化し、数値標高図を作成した。各グリッドの水平分解能は 18m とし、X, Y 方向に (106, 44) に分け、鉛直分解能は 2m で計算を行った。Fig.3 に計算領域と仮想した観測点を示す。

4. 気象データ

Imja 湖周辺では長期的な気象観測は行なわれてはおらず、計算を行うために時間平均した気温・風速・風向の長期的なデータセットを作成する必要がある。近隣地域の観測結果等を用いて、気温と風速・風向を仮定した。

風速は地形や標高の影響を受けやすく計算に必要な時間平均風速の仮定が困難なので、時間変動と季節性の変動は考慮せず、年間通して平均的な風速のみと仮定した。

風向は、年間通して安定しているこの地域の特性と筆者らが 2009 年 10 月 23 日から同月 27 日に Imja 氷河上で行った現地観測結果を基に仮定した。

気温は、Imja 湖の気温と Imja 湖の下流に位置する Namche Bazaar の気温差は年間通して一定であると仮定し、Namche Bazaar の気温から気温差を引き、Imja 湖の気温として仮定をした。詳細は後に述べる。

(1) 風速と風向

仮想した湖上の観測点 (Fig. 3 のアルファベット) に仮定した風速と風向を与えた (Table 1 参照)。計算領域への分布には、各点間で逆距離加重法を用いて内挿を行った。

(a) 風速

Imja 湖の風速の観測記録はあまり多くない、そこで現地観測結果と地域の風速の特性を考慮しながら Imja 湖周辺の 1 年間の仮定的なデータセットを作成した。この地域の風速の日周期は日が昇り気温の上昇に伴って、風速が速くなる特性 (安成・藤井, 1983) を持っている。Fig. 4 に示す筆者らが 2009 年 10 月に行った短期的な観測結果も気温の変動に伴い風速が変動した傾向を示した。

風速分布は数値実験結果 (知北, 2007) を参考にモレーンと氷崖周辺の風速は遮蔽物の影響などを考慮して弱めにして、湖上の風速は強いと仮定した。日中の最大風速は、モレーンによる遮蔽効果を考慮し、観測結果より低めの 6 (m/s) の風速を仮定し、夜間の最大風速は日中の 1/3 程度とし分布させた。年間通して日中を 6 時から 17 時、夜間をそれ以外の

時間と仮定し、日中と夜間毎に仮定した風速の幅の中でランダム関数を用いて風速に変化を与えた計算に用いた日中と夜間の湖上の風速幅を Table 1 に示す。

(b) 風向

この地域は年間通して日中は谷風が卓越し、夜間は山風が卓越する特性がある (Ohata et al., 1981)。Imja湖の場合、西側に谷があり、地域の特性に従えば日中はこの谷からの西風が卓越すると考えられる。Fig. 5に2009年に行った風速と風向の観測結果を示す。風速は3日間の観測値を平均して日周期を示し、風向は3日分の時間平均値である。日中は強い風が一方方向から吹き、夜間は発散しランダムな方向から風が吹く傾向が見てとれる。しかし、観測結果は谷からの西風を示してはいない。そこで日中の風向に関しては地域特性に従い、西風中心の集中的な風向を与えて夜間には西風と山からの東風をランダムに与えた。

(2) 気温データセット

Fujii et al. (2008) が Imja 湖周辺に導入した Field server の観測結果が Imja 氷河湖決壊洪水モニタリング(WEB サイト)で公開されている。本研究では(1) 2008 年 5 月 7 日から同年 6 月 1 日の Imja 湖周辺の気温データセットと(2) 2008 年 1 月 1 日から同年 12 月 31 日の Namche Bazaar の気温データセットを用いた。

Imja 湖周辺では異なる 2 地点で気温が観測されておりそれぞれ Himalaya 05 と Himalaya 06 という名前でデータセットが公開されている。Himalaya 05 は 40 度を超える気温が観測されるなど、信頼性に疑問があったので、極端な気温変動が無い Himalaya 06 を採用した。

Namche Bazaar の気温データセットの作成には異なる場所で観測されている Himalaya 01 と Himalaya 04 というデータセットを用いた。Himalaya 01 は 2008 年の 1 月 1 日から同年 10 月 29 日まで 5 分間隔で観測が行われており Himalaya 04 は 2008 年 5 月から同年 12 月まで 10 分間隔で観測が行われている。まず Himalaya 01 と Himalaya 04 の各時刻の観測値から 1 時間平均気温をそれぞれ求めた。

(3) 気温データセットの欠測期間の補完

Imja 湖の 1 年間の気温データセットを作るために Namche Bazaar で観測された気温データセットを用いた。1 月から 10 月までは Himalaya 01 のデ

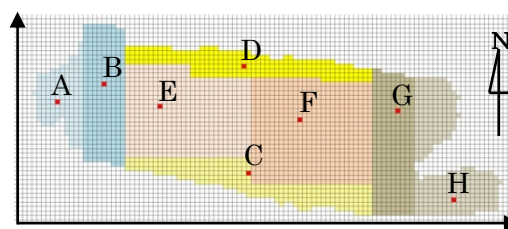


Fig. 3 A cells of the calculating area and assumed observation points on Imja Lake

Table 1 Hypothesis wind speed at the assumed points

Point	Distance from the original		Hypothesis wind speeds	
	X(m)	Y(m)	6:00 - 17:00	18:00 - 0:00 - 5:00
A	176	416	0.5 - 1.5 (m/s)	0 - 0.5 (m/s)
B	336	480	1.0 - 3.0 (m/s)	0 - 1 (m/s)
C	832	160	1.0 - 6.0 (m/s)	0 - 2 (m/s)
D	816	544	1.0 - 6.0 (m/s)	0 - 2 (m/s)
E	528	400	1.0 - 5.0 (m/s)	0 - 2 (m/s)
F	1008	352	1.0 - 5.0 (m/s)	0 - 2 (m/s)
G	1344	384	1.0 - 3.0 (m/s)	0 - 1 (m/s)
H	1536	64	0.5 - 1.5 (m/s)	0 - 0.5 (m/s)

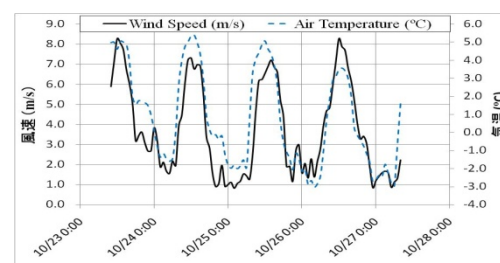


Fig. 4 Diurnal pattern of air temperature and wind speed at Imja Lake on 23-27 October 2009

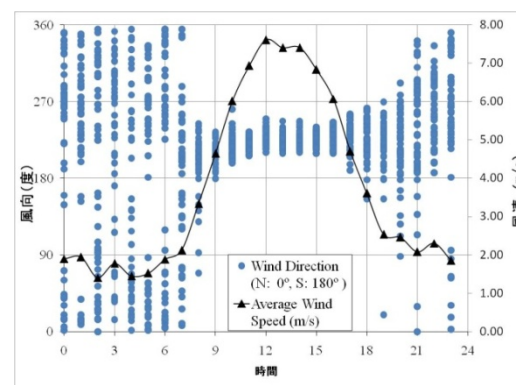


Fig. 5 Diurnal pattern of wind speed and wind direction at Imja Lake on 23-27 October 2009

ータセットを用いHimalaya 01が欠測している11月と12月は、Himalaya 04のデータを用いてHimalaya 01の欠測期間の補完を行った。

Himalaya 01は1月1日から10月31日の間で累計883時間分の欠測があった。Himalaya 04では11月1日から12月31日の間に累計65時間分の欠測があった。そこで欠測期間を補完する方法として、欠測期間が24時間以内の場合は、前後の日付の同時刻の気温から内挿し、24時間以上の欠測の場合は月毎の時刻平均気温

で補完した。

11月と12月はHimalaya 04の観測結果から、Himalaya 01の気温を仮定して補完を行った。6月から10月の各月の平均気温差はHimalaya 04が3.9度、Himalaya 01より高かったため、11月と12月はHimalaya04の各時刻の気温から3.9度引いた値をHimalaya 01の気温として、Himalaya 01の1年間の気温のデータセットを作成した。

(4) Imja湖の気温の仮定

Imja 湖の長期気温データセットを作成する為にHimalaya 06と補完したHimalaya 01を用いた。まず両地点で同時期に観測が行われていた6月のHimalaya 01とHimalaya 06の気温を比較した結果、平均気温はHimalaya 01が10度高かった。そこでHimalaya 01とHimalaya 06の気温差は年間通して10度であると仮定し、作成した1年分のHimalaya 01の気温データセットの各時刻の時間平均気温から10度引いた値を、Imja湖の気温とした。

Fig. 6に仮定したImja湖の6月の気温変動を示す。気温の変動パターンは概ね再現できたが、作成した気温データセットでは最低気温が観測値より高めに出る傾向が見られ、最高気温は仮定値が観測値を上回る場合やその逆の場合も見られた。気温差を求めるのに用いた観測気温は約10日分しか無く、さらにImja湖の気温の作成に用いたHimalaya 01も欠測期間の補完を行って作成しており、1時間平均気温の再現性は十分でないと考えられる。

作成したデータセットの年間の評価を行なう為にImja湖と同じSolukhumbu地域にあり、Imja湖から西に約10kmに設置され、標高も近い気候観測所“Pyramid”(標高5050m)で1994年から1999年にかけて行われた月平均気温と比較を行った(Tartari et al., 1998)。比較した結果をTable 2に示す。

Pyramidで観測された2月の平均気温が最も低く、7月の平均気温が最も高い傾向は一致した。またPyramidで5月から10月(Imja湖では4月から10月)の各月の平均気温が年平均気温より高い傾向も概ね再現できた。しかし、モンスーン移行期の4月と5月、10月と11月ではPyramidでは平均気温に大きな変化が見られるが、Imja湖ではそれほど大きな変化はなかった。

気温データセットは、年間を通しての季節変動の傾向は概ね再現できたと評価した。

5. 結果と考察

本研究では、ネパール・ヒマラヤのImja氷河湖を研究対象地域とし、気象観測結果と既往の研究成果を

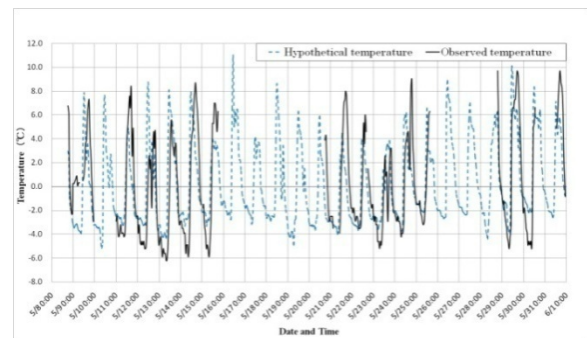


Fig. 6 Comparison result: the observed value and the hypothesis value of temperature which were hourly.

Table 2 Hypothesis monthly mean temperature at Imja Lake and Pyramid

Air temperature (°C)							
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	
Imja lake	-7.1	-7.7	-4.2	-1.2	0.1	1.7	
Pyramid	-8.6	-9.2	-4.9	-4.3	-0.5	3.8	
	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
Imja lake	2.3	2.2	1.3	-0.7	-2.4	-3.9	-2.4
Pyramid	4.2	3.0	1.4	-1.9	-5.8	-6.8	-1.7

用いてImja湖の2008年の気象を仮定し、三次元流動解析モジュールImja-3Dを用いて水温構造の再現を試みた。

(1) 水温構造の再現性

2008年の仮定した気象データとImja-3Dを用いた計算結果をFig. 7に示す。水温構造は(a)の点線(a-a')で示す測線の断面図である。(b)と(c)はそれぞれ6-12時から12-18時の6時間平均水温の構造を、(d)は1997年に観測された結果(知北, 2007)を基に作成した水温構造図の概略図を示す。

計算結果と1997年7月15日の観測結果の比較を行った。観測結果と同様に表面の水温が高く、水温躍層の位置が水面から10m付近(Fig. 7の(b)と(c)の丸点線は水面から10m付近を示す。)に存在し、水温躍層より下に幅広く約2-3°C前後の水温が分布している構造を示した。これは、Imja湖ではモレーンが谷風を遮蔽すること考慮し風速を弱めに仮定したため、吹送流による鉛直循環があまり促進されない傾向が再現された。午前と午後を比較すると、午後に温度躍層が顕著になる傾向が現れた。湖面に吹く風応力が弱いために暖められた表層の水が、十分に鉛直混合せず滞留しているのではないかと考えられる。

低層氷崖付近の箇所に観測結果では見られなかった低温水塊が現れている。3月以前の冬期に底部に滞留した水塊が残った可能性がある。

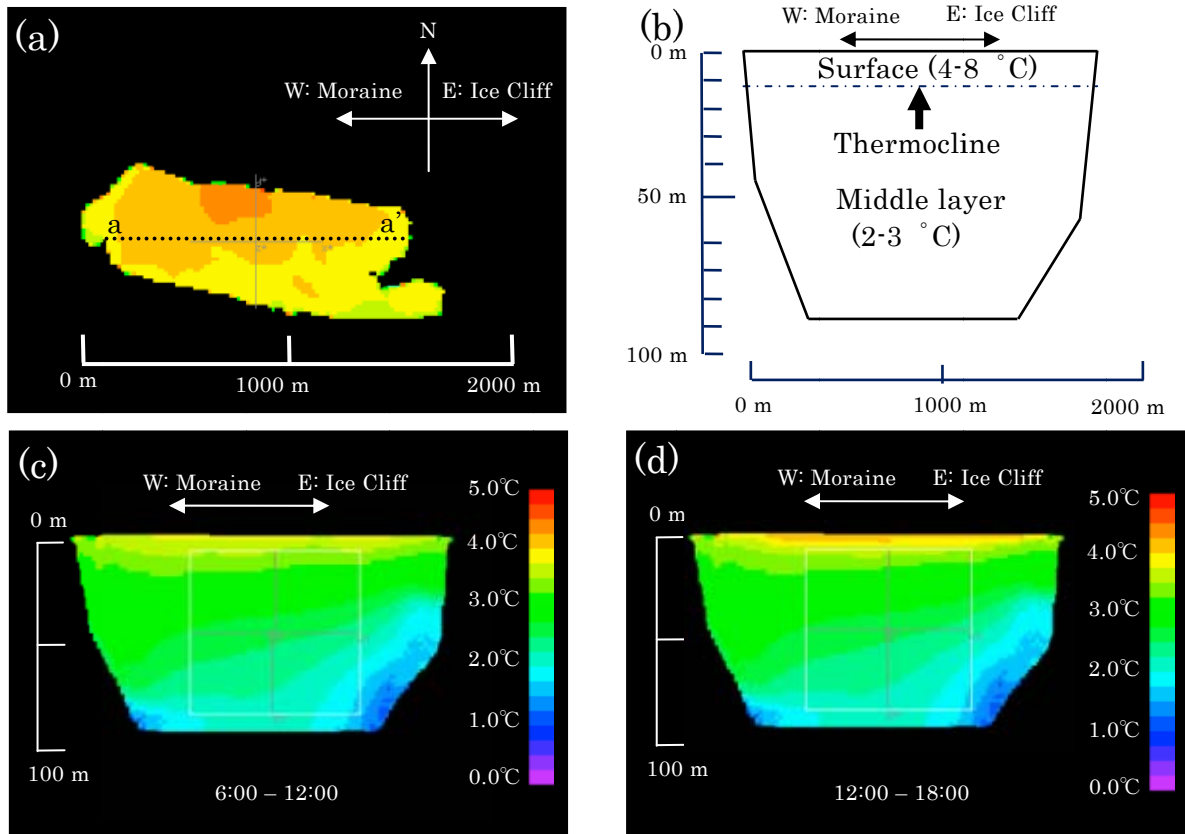


Fig. 7 Water temperature structure of Imja Lake on 15 July 2008: (a) Cross-section (a-a' dot line), (b) Observed water temperature structure on July 1997, (c) Calculated water temperature structure at the cross-section on 06:00-12:00, 15 July 2008, (d) Calculated water temperature structure at the cross-section on 12:00-18:00, 15 July 2008

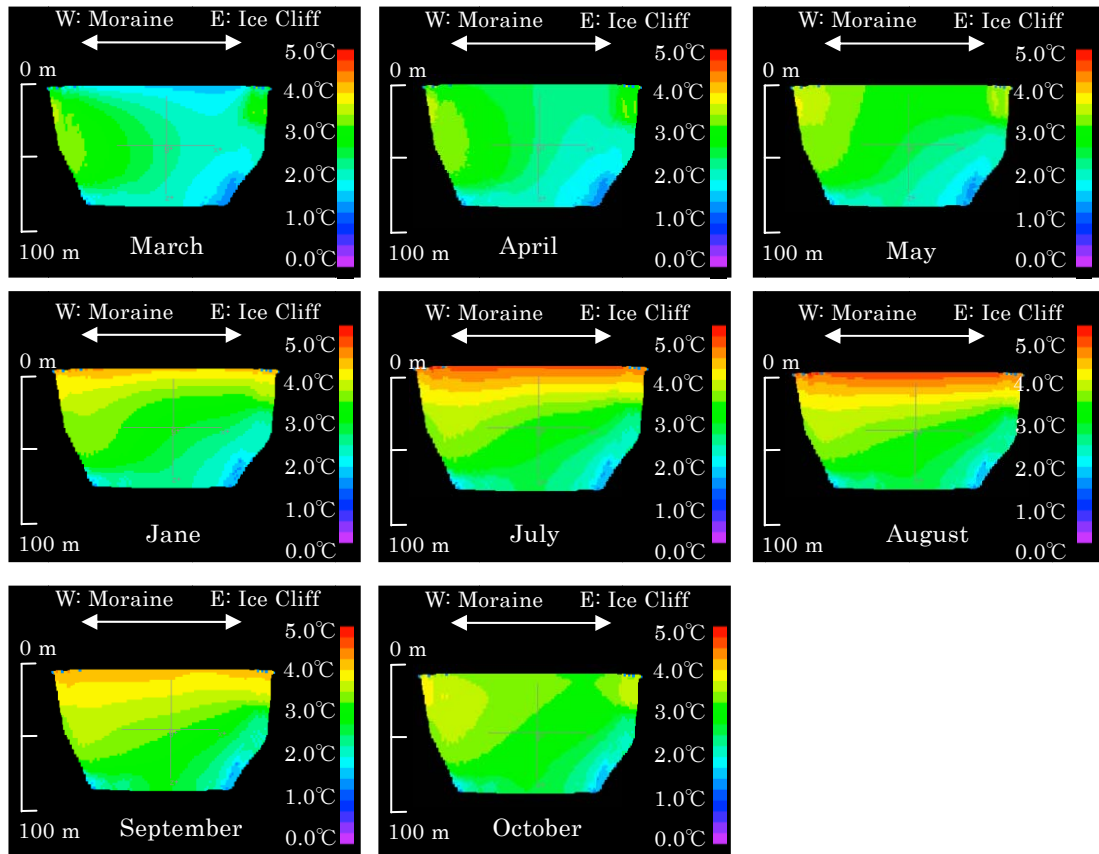


Fig. 8 Monthly mean water temperature structure at the cross-section shown in Fig. 7 (a)

この水塊は気温の上昇する 8 月でも弱まりながらも存在しており、仮定した風速が弱かった為に十分に湖内で混合しなかった可能性がある。

作成した気象データセットと Imja-3D を用いて、Imja 湖の特徴的な水温構造を概ね再現できたと考えられる。

(2) 融解期の湖内の水温構造

湖面を凍結した氷の融解が始まる 3 月から、湖面の凍結が始まる 10 月融解期の各月の平均水温の構造を Fig. 8 に示す。表層の温度は月平均気温の上昇に伴い高くなっていく傾向が現れている。6 月から 9 月にかけてこの時期は平均気温が 0 度を上回り、特に 7 月と 8 月は最も気温が高い時期には、はっきりとした水温躍層が表れた。

中間層から低層では、6 月から 9 月は観測された 7 月の水温構造同様に、約 2-3 度の水温層が幅広く分布している傾向が現れた。逆にそれ以外の月では水温躍層は現れず、氷崖方向の湖底付近に低水温層が形成された。さらに 3 月のように平均気温が氷点下を下回る場合においては、表面の冷たい水が湖底に沈下する鉛直循環の様子が再現された。氷崖から湖底にかけて部分的な低い水温の水塊が 3 月から 10 月まで現れている。考えられる原因としては、モデルに与えた風速と風向が年間通して一定であるために、湖内循環が単調になった可能性がある。

6. 結論

Imja 湖の水温構造の再現を仮定した 1 年間の気象データセットと Imja-3D を用いて行った。結果は過去の観測結果と似た水温構造を再現した。融解期の再現では、気温が高くなると水温躍層が現れ、水温躍層より下に広い水温帯が再現された。しかし、湖内の循環が弱かったため湖底に低水温水塊が残っており、循環に影響を与える風速の仮定が適切でなかった可能性がある。

本研究では、7 月における水温構造は概ね再現できた。今後の課題として、水温の値の検証を行うためには、少なくとも融解期である 4 月から 10 月の長期気象観測と、定期的な水温観測が不可欠である。しかし、人里離れた Imja 湖で長期的に安定した観測は非常に困難であるのでまずは衛星画像を用いて水面の温度分布を解析し、計算結果と比較する方法を試み、続いて将来には、拡大速度が異なる氷河湖で水温構造の再現を試み、水温構造が氷河湖の拡大に与える影響を研究する予定である。

謝 辞

本研究に対して（財）防災研究協会の助成をいただいた。ネパールでの観測は、Department of Hydrology and Meteorologyから観測許可をいただいて実施した。用いたALOSの衛星画像は、ALOS研究公募の枠組みでJAXA EORCで作成した高次成果物を使用したものでJAXA及びALOS PIの京都大学防災研究所・田中賢治准教授にご提供いただいた。ここに記して篤く御礼申し上げる次第である。

参考文献

- Imja 氷河湖決壊洪水モニタリング：WEB サイト、
http://de04.gsec.keio.ac.jp:9080/glacier/sensordata_ja.html（2011年6月8日参照）。
- 知北 和久（2005）：ヒマラヤにおけるモレーン堰止型氷河湖の拡大機構について：湖水流動系の観点から、雪氷 67巻1号, pp.39-49.
- 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—, 日本水文学会誌, Vol.37, No.3 pp.93-101.
- 森林 成生（1974）：ネパール・ヒマラヤの氷河について その特性と最近の変動, 雪氷, Vol.36. No.01, pp.11-21.
- 安成哲三・藤井理行（1983）：ヒマラヤの気候と氷河-大気と雪氷件の相互作用-, 東京堂出版, pp.90-96.
- 山敷庸亮・松井三郎・瀬津家久・熊谷道夫（2000）：琵琶湖環流の数値シミュレーション, 水工学論文集, 第44巻, pp.975-980.
- Bajracharya, S. R., Mool, P. K. and Shrestha, B. R. (2007): Impact of Climate Change on Himalayan Glaciers and Glacial Lakes Case Studies on GLOF and Associated Hazards in Nepal and Bhutan, ICIMOD., pp.104-106.
- Fujita, K., Sakai, A., Nuimura, T., Yamaguchi, S. and Sharma, R. (2009): Recent changes in Imja Glacial Lake and its damming moraine in the Nepal Himalaya revealed by in-situ surveys and multi-temporal ASTER imagery, *Envir. Res. Lett.*, Volume 4, Number 4, pp.1-7.
- 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, pp.2578-2581.
- Ives, J. D., Shrestha, R. B., and Mool, P. K. (2010): Formation of Glacial Lakes in the Hindu

- Kush-Himalayas and GLOF Risk Assessment, ICIMOD., pp.10-11.
- Mool, P. K., 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. pp.183-185.
- Ohata, T., Higuchi, K. and Ikegami, K. (1981): Mountain-valley wind system in the Khumbu Himal, East Nepal, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, Vol.59, No.5, 753-762.
- Sakai, A., Fujita, K. and Yamada, T. (2003): Volume change of Imja Glacial Lake in the Nepal Himalayas, *International Symposium on Disaster Mitigation & Basin Wide Water Management*, pp.556-561.
- Sakai, A., Nishimura, K., Kadota, T. and Takeuchi, N. (2009): Onset of calving at supraglacial lakes on debris covered glaciers of the Nepal Himalayas, *J. Glaciol.*, Vol.55, No.193, 909-917.
- Tartari, G., Verza, G. and Bertolami, L. (1998): Meteorological data at the Pyramid Observatory Laboratory (Khumbu Valley, Sagarmatha National Park, Nepal), *Limnology of high Altitude lakes in the Mt Everest regions (Himalaya, Nepal)*. *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.*, 57: 23-40.
- Vuichard, D. and Zimmermann, M. (1986): The Langmoche Flash-Food, Khumbu Himal, Nepal, *Mt. Res.Dev.*, Vol.6, No.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, *Mt. Res.Dev.*, Vol. 7, No.2, pp.91-110.
- Yamashiki, Y., Kumagai, M., Jiao, C., Nezu, I. and Matsui, S. (2003): Numerical simulation of thermally induced gyres in Lake Biwa, *Hydrol. Process.*, Vol. 17, issue 14, pp. 2947-2956.
- Yamashiki, Y., Kato, M., Takara, K., Nakakita, E., Kumagai, M. and Jiao, C. (2010): Sensitivity Analysis on Lake Biwa under the A1B SRES climate change scenario using Biwa-3D Integrated Assessment Model, *Hydrol. Res. Lett.*, Vol. 4, pp.45-49.

An Approach to Reproduce Water Temperature Structure in a Glacier Lake –A Case Study of Imja Glacier Lake–

Tsutao OIZUMI*, Yosuke YAMASHIKI and Kaoru TAKARA

* Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

A glacier lake expansion is significant issue in Himalayan countries. A glacier lake expansion is due to glacier melting and ice cliff curving. An ice cliff calving is one of a glacier melting process underwater part of a glacier lake. When temperature of glacier lake water is warmer than glacier temperature, melting speed of underwater part is faster than above water surface. Then the above water surface part breaks up caused by unstable weight balance. This study aims to reproduce the water temperature structure in the Imja glacial lake using the 3D-Hydrodynamic model “Imja-3D” and the hypothetic meteorological datasets at the Imja glacial lake. The one-year datasets of hourly average air temperature were hypothesized using the temperature datasets at Namche Bazaar in 2008. The datasets of the wind speeds and the wind directions were considered diurnal pattern of the regional climate features in the Solukhumbu region. The model reproduced the water temperature structure of the lake in July 2008. The thermocline appeared near the lake water surface. The water temperature (2-3 degree) distribution was shown in mid layer. These results showed the similar water temperature structure on the observed one in the Imja glacial lake in 1997.

Keywords: glacier lake, Imja Glacier Lake, water temperature structure, Himalaya