ヒマラヤにおける氷河湖の水溫構造再現の試み

AN APPROACH TO REPRODUCE WATER TEMPERATURE STRUCTURE IN A GLACIAL LAKE IN THE HIMALAYAS

大泉 伝¹・山敷 庸亮²・寶 馨³

Tsutao OIZUMI, Yosuke YAMASHIKI and Kaoru TAKARA

¹学生会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

²正会員 博(工) 京都大学防災研究所 准教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³フェロー会員 工博 京都大学防災研究所 教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

This study aims to reproduce the water temperature structure in the Imja glacial lake using the 3D-Hydrodynamic model “Imja-3D” and the hypothetical 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.

Key Words : *glacial lake outburst flood, Imja glacial lake, water temperature, Nepal*

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。氷河湖決壊洪水は、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、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、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。例えば1985年のDig Thso氷河湖決壊洪水では、氷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¹⁾²⁾。

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が有効である。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³⁾⁴⁾。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⁵⁾。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し、水吹流は湖上風を遮断するモレーンの地形効果が大きい事が数値実験によって明らかになっている⁶⁾⁷⁾。

Calvingが発生する条件は、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、水吹流がCalvingに大きな影響を与える事を示唆した⁸⁾。

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⁹⁾。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存在しない。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湖の水温構造の再現を試みた。

2. 研究対象地

研究対象地は図-1に示す、カトマンズから北東のSolukhumbu regionに位置しているImja氷河湖とした。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、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、川沿いを多くの外国人トレkkerが行き来し、トレkkerを相手にした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は特に人口が密集している。

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、詳細な調査の必要性が指摘されている⁵⁾。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、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、測線を図-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¹⁰⁾。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¹¹⁾。

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¹²⁾。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。

図-1 Solukhumbu地域、Imja湖とNamche Bazaar (Google mapを使用)

図-2 ALOSが2008年10月24日に撮影したImja湖

3. 計算

(1) 計算モデル

Imja湖の水温構造は、三次元流動解析モジュールBIWA-3D⁹⁾¹³⁾を基にしたImja-3Dを用いて計算を行った。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 Model¹⁴⁾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。

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

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

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

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⁹⁾に従った.

(2) 計算

a) 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.

b) 計算領域

Imja湖の湖盆は, 2002年に水深を測定した10m間隔の湖盆図¹⁰⁾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. 図-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 (図-3のアルファベット) に仮定した風速と風向を与えた (表-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¹⁵⁾を持っている. 図-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⁷⁾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表-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¹⁶⁾. 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. 図-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.

図-3 計算領域と仮想した風速観測点

表-1 仮定した湖面の風速

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

図-4 Imja湖の10月の気温と風速の変化

(2) 気温データセット

インターネット上で公開されている、(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¹⁷⁾¹⁸⁾。

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Himalaya 04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。

図-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¹⁹⁾。比較した結果を表-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無かった。

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。

図-5 Imja湖の10月の風速と風向の変化

図-6 Imjaの1時間平均した気温の観測値と仮定値

表-2 仮定したImja湖とPyramidの月平均気温

		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
Imja lake		2.3	2.2	1.3	-0.7	-2.4	-3.9
Pyramid		4.2	3.0	1.4	-1.9	-5.8	-6.8
		Year					
Imja lake		-2.4					
Pyramid		-1.7

図-7 Imja-3Dにて計算されたImja湖の水溫構造(2008年7月15日) (a) 表面水溫分布(a-a' 断面の位置を点線で記入) (b) a-a' 断面での (b) 6時から12時(c) 12時から18時の水溫構造 (d) 知北らの論文の結果を基に作成したImja湖で1997年に観測された断面水溫構造⁷⁾

図-8 Imja-3Dにて計算された3月から10月の月平均水溫の水溫構造

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を用いて水溫構造の再現を試みた。

(1) 水溫構造の再現性

2008年の仮定した気象データとImja-3Dを用いた計算結果を図-7に示す。水溫構造は(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時間平均水溫の構造を、(d)は1997年に観測された結果⁷⁾を基に作成した水溫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⁷⁾の比較を行った。観測結果と同様に表面の水溫が高く、水溫躍層の位置が水面から10m付近(図-7の(b)と(c)の丸点線は水面から10m付近を示す。)に存在し、水溫躍層より下に幅広く約2-3°C前後の水溫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為、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。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湖の特徴的な水溫構造を概ね再現できたと考えられる。

(2) 融解期の湖内の水溫構造

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溫の構造を図-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、はっきりとした水溫躍層が表れた。

中間層から低層では、6月から9月は観測された7月の水溫構造同様に、約2-3度の水溫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溫躍層は現れず、氷崖方向の湖底付近に低温水層が形成された。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ことで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

- 1) Vuichard, D. and Zimmermann, M.: The Langmoche Flash-Food, Khumbu Himal, Nepal, *Mountain Research and Development*, Vol.6, No.1, pp.90-94, 1986.
- 2) Vuichard, D. and Zimmermann, M.: The 1985 catastrophic drainage of a moraine-dammed lake, Khumbu Himal, Nepal: cause and consequences, *Mountain Research and Development*, Vol. 7, No.2, pp.91-110, 1987.
- 3) Mool, P. K., Bajracharya, S. R. and Joshi, S. P.: *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, 2001.
- 4) Bajracharya, S. R., Mool, P. K. and Shrestha, B. R.: *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, 2007.

- 5) Ives, J. D., Shrestha, R. B. and Mool, P. K.: *Formation of Glacial Lakes in the Hindu Kush-Himalayas and GLOF Risk Assessment*, ICIMOD., pp.10-11, 2010.
- 6) 知北 和久: 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, 2005.
- 7) 知北 和久: 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・ロルパ湖との比較—, 日本水文学会誌, Vol.37, No.3 pp.93-101, 2007.
- 8) Sakai, A., Nishimura, K., Kadota, T. and Takeuchi, N.: Onset of calving at supraglacial lakes on debris covered glaciers of the Nepal Himalayas, *J. Glaciol.*, Vol.55, No.193, 909-917, 2009.
- 9) Yamashiki, Y., Kato, M., Takara, K., Nakakita, E., Kumagai, M. and Jiao, C.: 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, 2010.
- 10) Sakai, A., Fujita, K. and Yamada, T.: Volume change of Imja Glacial Lake in the Nepal Himalayas, *International Symposium on Disaster Mitigation & Basin Wide Water Management*, pp.556-561, 2003.
- 11) Fujita, K., Sakai, A., Nuimura, T., Yamaguchi, S. and Sharma, R. R.: 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, 2009.
- 12) 森林 成生: 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, 1974.
- 13) 山敷庸亮, 松井三郎, 瀬津家久, 熊谷道夫: 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, 2000.
- 14) Yamashiki, Y., Kumagai, M., Jiao, C., Nezu, I. and Matsui, S.: Numerical simulation of thermally induced gyres in Lake Biwa, *Hydrol. Process.*, Vol. 17, issue 14, pp. 2947-2956, 2003.
- 15) 安成哲三, 藤井理行: 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, 1983.
- 16) Ohata, T., Higuchi, K. and Ikegami, K.: Mountain-valley wind system in the Khumbu Himal, East Nepal, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, Vol.59, No.5, 753-762, 1981.
- 17) 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
- 18) Fukui, H., Limlahapun, P. and Kameoka, T.: Real time monitoring for Imja Glacial Lake in Himalaya — global warming front monitoring system, *SICE Annual Conference*, 2008, pp.2578-2581, 2008.
- 19) Tartari, G., Verza, G. and Bertolami, L.: 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, 1998.

(2010. 9. 30受付)