

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2007～2010

課題番号：19253001

研究課題名（和文）

ヒマラヤにおける氷河縮小が海水準上昇に与える影響の評価

研究課題名（英文）

Impact of shrinking Himalayan glaciers on sea-level rise

研究代表者

藤田 耕史 (FUJITA KOJI)

名古屋大学・環境学研究科・准教授

研究者番号：80303593

研究成果の概要（和文）：ヒマラヤにおける氷河変動の実態を観測的に明らかにすると共に、GPS観測、デジタル標高データ、質量収支モデルを利用し、気候変化に対する氷河の応答の特徴を明らかにし、衛星データによる氷河変動の見積をより高精度化した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we performed ground-based observations to obtain volumetric changes in Himalayan glaciers. We clarify features of sensitivity of glacier mass balance to climate change by an energy-mass balance model. We improve a method to obtain changes in glacier surface elevation from digital elevation models using GPS survey data.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	15,200,000	4,560,000	19,760,000
2008年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
2009年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2010年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
総計	33,600,000	10,080,000	43,680,000

研究分野：氷河学

科研費の分科・細目：環境動態解析

キーワード：ヒマラヤ・氷河・気候変動

## 1. 研究開始当初の背景

近年問題となっている「地球温暖化」の影響として山岳氷河の縮小は、海水の熱膨張に次いで海水準を上昇させる要因として注目されている。我々によるこれまでの観測によって20世紀後半のヒマラヤにおける氷河縮小については、世界のよその地域と比較して顕著に氷河縮小が進んでいることが明らかになっていった。しかしながら、ヒマラヤにおける氷河縮小がグローバルな海水準上昇にどの程度寄与しているかについては未だ確たる数字は示されておらず、全球的な氷河縮小と海水準変動を論じた研究でも、ヒマラヤ地域は大きな不確実性をもたらす原因となっていた。

## 2. 研究の目的

本研究は、我々がこれまでに積み重ねてきた現地観測のデータと衛星データに基づくデジタル標高データを多面的に利用し、広域における氷河変動を量的にとらえ、ヒマラヤにおける氷河変動の実態を明らかにすることを第一の目的とする。さらに、質量収支モデルを用い、気候変動に対するヒマラヤの氷河の応答特性を明らかにすることで、全球的な氷河縮小が海水準に与える影響を見積もる研究に対し、よりヒマラヤの気候に即した氷河縮小を見積もるための知見を確立することを旨とする。

### 3. 研究の方法

#### 現地観測

2007年：ネパールクンブ地域にて、広域におけるGPS観測を実施した。また、ネパールヒマラヤ全域において、朝日新聞との共同空撮を実施し、1970年代からの氷河・氷河湖の変動を一般向けに紹介した。

2008年：ネパールランタン地域およびシヨロン地域にて氷河観測を実施した。また、チベットにて、氷河観測を実施すると共に、南東チベットにて、氷河上の土砂堆積物と氷河融解の関係に関する観測を実施した。

2009年：ネパールダウラギリ地域にて氷河観測の実施を試みたが、現地の積雪のため氷河にたどり着くことができず、急遽調査対象を変更し、ランタン地域にて氷河観測を実施した。さらに、南東チベットにて、氷河上の土砂堆積物と氷河融解の関係に関する観測を実施した。

2010年：前年に完遂できなかった、ネパールダウラギリ地域における氷河観測を実施すると共に、ネパールロールワリン地域における氷河観測を実施した。

2011年：ブータンルナナ地域における氷河観測を実施した。

**観測データ解析** 全期間を通じて実施したGPS観測によって得られた測量データを、過去に得られている測量データと重ね合わせ、氷河変動量を観測的に明らかにした。

**衛星データ解析** ネパール、ブータン、チベット各地で実施したGPS観測によって得たデータを元に、衛星データから生成されるデジタル標高データの精度評価をおこなった。

ネパールクンブ地域を対象に、1980年代以降のリモートセンシングデータから生成されるデジタル標高データを収集し、2007年に現地観測を実施したGPSデータによってそれぞれの精度評価をおこない、この精度を考慮に入れて氷河変動量の算出をおこなった。

**質量収支モデル解析** 質量収支モデルをもちい、氷河質量収支および質量収支の気候変化への応答に対する、気候パターンの影響について解析を進めた。

一方で、様々な気候条件下で観測された氷河や雪渓の質量収支を再現することで、開発した質量収支モデルの有効性を確認した。

以上の検証的研究を踏まえつつ、ヒマラヤ各地で観測された氷河変動量がどのような空間的広がりを持っているかについて、広域における数値計算を実施した。

ヒマラヤ地域で多く見られるデブリ氷河の融解に関して、衛星から得られるデブリの熱的特性を質量収支モデルに組み込んだ。

### 4. 研究成果

#### 降水の季節パターンと氷河の質量収支

これまでの研究で、夏季モンスーンの影響下にある「夏雪型氷河」は、そうでない「冬雪型氷河」に比べ、気温変化に対する反応が顕著であることが示されていた。この影響について、仮想的な気候パターンを設定し、詳細なモデル研究をおこなった(Fujita, 2008a, 2008b)。この結果、夏に降水が多くもたらされるほど、同じ温暖化に対して氷河の負の程度が大きく、冬と夏の差は、降水の集中度が高まるほど顕著になることがわかった(図1)。その原因としては、温暖化の程度にかかわらず、冬の降水は雪として降り、氷河を涵養するのに対し、夏降水の一部は温暖化の際に雪として降っていた降水が雨として降ることで、涵養量そのものが減ることと、雪の高いアルベド(日射に対する反射率)によって抑制されていた融解が、急激に増えることが明らかになった。さらに全球の客観解析データを解析し、夏雪型氷河はヒマラヤとアンデスに分布していることを示した。

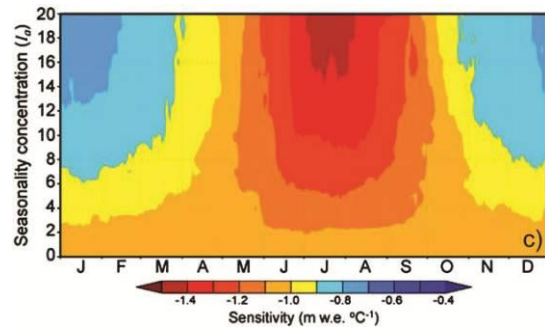


図1 降水のピークがくる季節(横軸)と降水の集中度(縦軸)に対する、1°Cの温暖化に対する氷河の応答(カラースケール)(Fujita, 2008b)。

#### ヒマラヤの氷河変動

研究期間を通じてネパールヒマラヤ各地にて実施した、氷河観測をまとめ上げ、この地における氷河変動の実態を明らかにした(Fujita & Nuimura, 2011)。

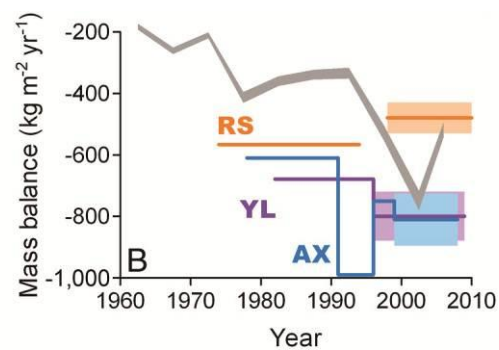


図2 ネパールヒマラヤにおける近年の氷河変動の実態。灰色は世界の氷河質量収支の平均(Fujita & Nuimura, 2011)。

1990年代にかけての20年間においては、ヒマラヤの氷河は世界平均の傾向に比べ、顕著に大きな負の質量収支(速い縮小傾向)を示していたが、最近の10年においては、世界平均と同程度の変動傾向であることを明らかにした(図2)。また、乾燥域の氷河は負の傾向が抑制されつつある一方で、湿潤域の氷河は負の傾向が加速されていることがわかった。

さらに、限られた観測事例がヒマラヤ全体の氷河変動をどこまで代表しているかを議論するために、アジア高山域全域を対象に、質量収支モデルを用いて平衡線高度の傾向を計算した(図3)。その結果、氷河の応答の傾向は、温暖化の傾向と一対一で対応していないことが明らかになった。この原因として、先に挙げた質量収支に影響を与える降水パターンがアジア高山域の中で異なっていることが考えられた。

折しもIPCC第四次報告書に記載されていたヒマラヤの氷河に関する記述が誤りであることが明らかになり、ヒマラヤの氷河変動の実態については大きな関心が寄せられていたが、現地観測を元にした報告が皆無であったため、この論文は大きな注目を集めた。

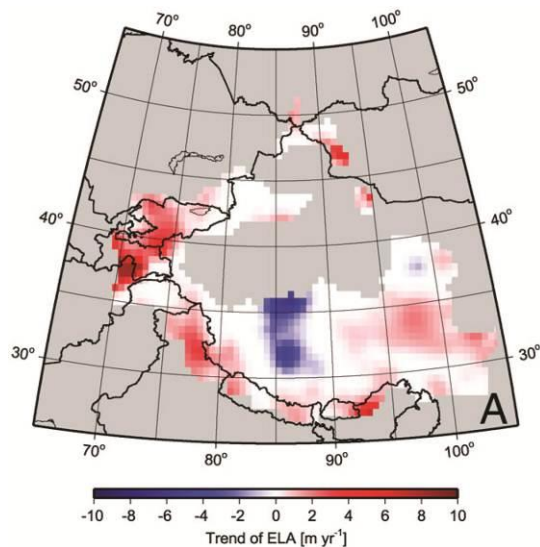


図3 最近20年間(1988-2007)の氷河の平衡線高度の傾向(Fujita & Nuimura, 2011)。

### 衛星データ解析

現地観測の際に実施したGPS測量で得られたデータを元に、衛星データから生成されるデジタル標高データの検証をおこなった(Fujita et al., 2008)。現地観測の際に記録した地形毎に分類し(図4)、デジタル標高データの精度を評価したところ、比較的傾斜の緩い地形(池、河床、氷河)においては精度が一般に言われていた者よりも良く、比較的傾斜の急な地形(斜面およびモレーンリッ

ジ)では、非常に悪いことが明らかとなった。特にモレーンリッジでは、デジタル標高データの空間分解能の制約から、実際の標高よりも明らかに低めに見積もるといった問題点が明らかになった。氷河縮小に伴って形成が進む氷河湖の決壊洪水は、近年ヒマラヤ諸国における深刻な問題となっているが、本研究によって、リモートセンシングデータを氷河湖の監視に応用する際の限界を示すことができたと言える。

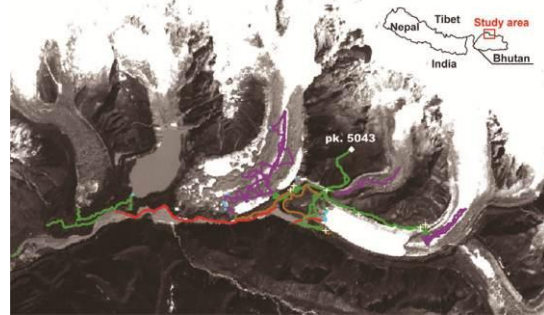


図4 ブータンルナナ地域におけるGPS測量の軌跡。地形分類によって色分けしてある(Fujita et al., 2008)。

デジタル標高データを利用して氷河変動を広域的に明らかにする研究は、近年盛んにおこなわれつつあるが、デジタル標高データを現地測量データで検証する研究は、特にヒマラヤのような遠隔地においては皆無といってよく、本研究は頻繁に引用されている。

これらの結果を踏まえ、ヒマラヤクムブ地域のイムジャ氷河湖においてGPS観測をおこない、氷河湖前面のモレーンダムが安定していることなどを明らかにした(Fujita et al., 2009)。

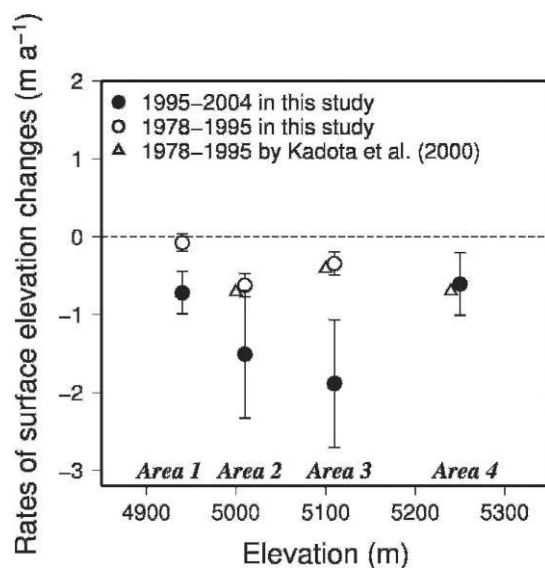


図5 クムブ氷河下流域における表面標高の変化速度(Nuimura et al., 2011)。

また、ネパールクンブ地域のクンブ氷河において実施した GPS 観測と、GPS データを元に補正したデジタル標高データを利用して、クンブ氷河下流域の表面標高の低下量を明らかにした (Nuimura et al., 2011)。この結果、1970 年代後半から 1990 年代中頃にかけての表面低下速度に比べ、近年低下速度が加速しつつある領域があることが明らかになった (図 5)。

さらに、ネパールクンブ地域において広域に実施した GPS 観測により、異なる時期に取得されたデジタル標高データの精度検証をおこなった (Nuimura et al., in press)。類似の研究では、対象領域にて不動であることが期待される地形にて、シーン間のデータを比較することで誤差としているが、先のブータンでの結果が示すように、地形の形状によって誤差の程度は大きく異なるため、得られた氷河表面標高の変化のデータの個々の確度は評価するすべがなかった。我々はシーン毎の誤差を利用して、重み付け最小自乗法により氷河表面標高の変化を算出した (図 6a)。この手法により、氷河表面標高の変化とともに、その信頼度をピクセル毎に算出することが可能となった (図 6b)。

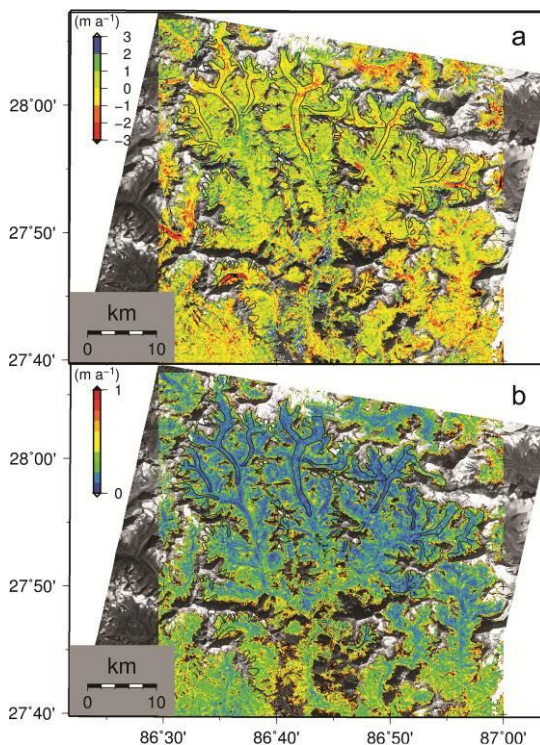


図 6 ネパールクンブ地域における氷河表面標高の変化速度 (a) とその信頼度 (b) (Nuimura et al., in press)。

#### その他の成果

この他、質量収支モデルを利用して、日本の雪渓の長期変動を明らかにした研究 (Fujita et al., 2010)、ダスト降下が氷河

質量収支に与える影響を定量的に評価した研究 (Fujita, 2007; Yasunari et al., 2010; Fujita et al., 2011)、氷河の融解水が乾燥域の河川においてどのような役割を果たしているかについて見積もった研究 (Fujita et al., 2007; Sakai et al., 2009, 2010)、氷河湖の形成過程を統計的に明らかにした研究 (Sakai & Fujita, 2010)、南東チベットの氷河において GPS 観測と衛星データ、質量収支モデルを融合し、デブリに覆われた氷河の変動過程を観測、モデルの両面から明らかにした研究 (Zhang et al., 2010, 2011) などを実施し、多くの成果を上げることができた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

- [雑誌論文] (計 27 件) 全て査読有り  
Fujita K, Nuimura T (2011) Spatially heterogeneous wastage of Himalayan glaciers. *P Natl A Sci USA* 108 14011-14014  
Fujita K, Takeuchi N, Nikitin SA, Surazakov AB, Okamoto S, Aizen VB, Kubota J (2011) Favorable climatic regime for maintaining the present-day geometry of the Gregoriev Glacier, Inner Tien Shan. *Cryosphere* 5 539-549  
 Nuimura T, Fujita K, Fukui K, Asahi K, Aryal R, Ageta Y (2011) Temporal changes in elevation of the debris-covered ablation area of Khumbu Glacier in the Nepal Himalaya since 1978. *Arct Antarct Alp Res* 43 246-255  
 Ukita J, Narama C, Tadono T, Yamanokuchi T, Tomiyama N, Kawamoto S, Abe C, Uda T, Yabuki H, Fujita K, Nishimura K (2011) Glacial lake inventory of Bhutan using ALOS data: Part I. Methods and preliminary results. *Ann Glaciol* 52 65-71  
 Zhang Y, Fujita K, Liu SY, Liu Q, Nuimura T (2011) Distribution of debris thickness and its effect on ice melt at Hailuoguo glacier, southeastern Tibetan Plateau, using in situ surveys and ASTER imagery. *J Glaciol* 57 1147-1157  
Fujita K, Hiyama K, Iida H, Ageta Y (2010) Self-regulated fluctuations in the ablation of a snow patch over four decades. *Water Resour Res* 46 W11541  
 Sakai A, Fujita K (2010) Formation conditions of supraglacial lakes on debris-covered glaciers in the Himalayas. *J Glaciol* 56 177-181

- Sakai A, Fujita K, Narama C, Kubota J, Nakawo M, Yao TD (2010) Reconstructions of annual discharge and equilibrium line altitude of glaciers at Qilian Shan, northwest China, from 1978 to 2002. *Hydrol Process* 24 2798–2806
- Yasunari TJ, Bonasoni P, Laj P, Fujita K, Vuillermoz E, Marinoni A, Cristofanelli P, Duchi R, Tartari G, Lau KM (2010) Estimated impact of black carbon deposition during pre-monsoon season from Nepal Climate Observatory – Pyramid data and snow albedo changes over Himalayan glaciers. *Atmos Chem Phys* 10 6603–6615
- Zhang Y, Fujita K, Liu SY, Liu Q, Wang X (2010) Multi-decadal ice-velocity and elevation changes of a monsoonal maritime glacier: Hailuoguo glacier, China. *J Glaciol* 56 65–74
- Fujita K, Sakai A, Nuimura T, Yamaguchi S, Sharma RR (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. *Environ Res Lett* 4 045205
- Sakai A, Fujita K, Nakawo M, Yao T (2009) Simplification of heat balance calculation and its application to the glacier runoff from the July 1st Glacier in northwest China since the 1930s. *Hydrol Process* 23 585–596
- Takeuchi N, Fujita K, Nakazawa F, Matoba S, Nakawo M, Rana B (2009) A snow algal community on the surface and in an ice core of Rikha-Samba Glacier in Western Nepali Himalayas. *Bull Glaciol Res* 27 25–35
- Takeuchi N, Miyake T, Nakazawa F, Narita H, Fujita K, Sakai A, Nakawo M, Fujii Y, Duan KQ, Yao TD (2009) A shallow ice core re-drilled on the Dundee Ice Cap, western China: recent changes in the Asian high mountains. *Environ Res Lett* 4 045207
- Fujita K (2008a) Influence of precipitation seasonality on glacier mass balance and its sensitivity to climate change. *Ann Glaciol* 48 88–92
- Fujita K (2008b) Effect of precipitation seasonality on climatic sensitivity of glacier mass balance. *Earth Planet Sc Lett* 276 14–19
- Fujita K, Suzuki R, Nuimura T, Sakai A (2008) Performance of ASTER and SRTM DEMs, and their potential for assessing glacial lakes in the Lunana region, Bhutan Himalayas. *J Glaciol* 54 220–228
- Pu JC, Yao TD, Yang MX, Tian LD, Wang NL, Ageta Y, Fujita K (2008) Rapid decrease of mass balance observed in the Xiao (Lesser) Dongkemadi Glacier, in the central Tibetan Plateau. *Hydrol Process* 22 2953–2958
- Fujita K (2007) Effect of dust event timing on glacier runoff: sensitivity analysis for a Tibetan glacier. *Hydrol Process* 21 2892–2896
- Fujita K, Ohta T, Ageta Y (2007) Characteristics and climatic sensitivities of runoff from a cold-type glacier on the Tibetan Plateau. *Hydrol Process* 21 2882–2891
- [学会発表] (計 27 件) 招待発表のみ記載
- Fujita K. Spatially heterogeneous wastage of Himalayan glaciers. Glacier Mass Balance Working Group Meeting for Third Pole Environment, Guangzhou, China, Feb 20–21, 2012.
- Fujita K. Integrated model for a Himalayan debris-covered glacier. Glacier Mass Balance Working Group Meeting for Third Pole Environment, Guangzhou, China, Feb 20–21, 2012.
- Fujita K. Recent changes in Himalayan glaciers and glacial lakes. Workshop on Integrated Studies of Environmental Changes and Climate Adaptation Responses in the Tibet-Himalayan Region, Kathmandu, Nepal, Sep 13–15, 2010.
- Fujita K. Glacier monitoring activities in Japan, Nepal and Bhutan. WGMS General Assembly of the National Correspondents, Zermatt, Switzerland, Sep 1–4, 2010.
- Fujita K. Changes in cryosphere in the Asian highland. PAGES 1st Asia 2k Workshop in Japna, Nagoya, Aug 26–27, 2010.
- Fujita K. Recent changes in Himalayan glaciers and ice core studies in the Asian highland. 2010 PAGES Regional Workshop in Japan, Nagoya, Japan, Jun 5–6, 2010.
- Fujita K. Glacial lake outburst floods in the Himalayas. The 5th ICG Meeting GEOS-AWCI, Tokyo, Dec 15–17, 2009.
- Fujita K et al. Recent changes in benchmark glaciers in Nepal Himalaya. International Workshop on the Northern Eurasia Mountain Ecosystems, NEESPI/NASA and CEOP HE, Bishkek, Kyrgyzstan, Sep 8–15, 2009.
- Fujita K. A Rapid Shrinkage of glaciers in the Nepal Himalayas. International

Workshop on Recent Change of Climate and Cryosphere in Nepal Himalayas, Kathmandu, Nepal, Nov 25, 2007.

Fujita K. Ice core, tree ring and human lives. Dirty, but Warm: Energy and Environment in Slavic Eurasia and Its Neighborhood, Sapporo, Japan, Jul 2007.

Fujita K. Glaciers probing 11-year solar cycle. Japan Geoscience Union, Makuhari, May 2007.

[図書] (計3件) 省略

[その他]

ホームページ

<http://www.cryoscience.net/>

<http://researchmap.jp/cozy/>

### 報道関連情報

2007/10/7 朝日新聞 共同調査初報

2007/10/19 朝日新聞 調査開始報道

2007/10/19 朝日新聞 ひと

2007/11/25 朝日新聞 空撮初報

2007/11/26 朝日新聞 氷河湖調査

2007/12/3 朝日新聞夕刊 「高地の暮らしーヒマラヤの人々」

2007/12/25 朝日新聞 調査風景

2007/12/25 朝日新聞 氷河湖比較

2008/1/1 朝日新聞 アンナプルナ夕景

2008/2/4 Asia Sentinel

2008/4/20 新聞赤旗 「科学のひろば」

2008/4/21 朝日新聞 「環境フォーラム開催」

2008/5/18 朝日新聞 「環境フォーラム詳細とヒマラヤ特集」

2008/6/2 論座 インタビュー

2008/6/23 NHK クローズアップ現代 インタビュー

2008/7/1 新聞赤旗 ひと

2009/5/17-19 信濃毎日新聞

2009/10/21 Nature, News Feature

2009/11/30 Environmentalresearchweb, Research Highlights

2009/12/15 Scientific American, News

2010/1/22 日経エコロミー

2010/2/2 日経エコロミー

2010/3/5 Nature Digest Japanese Author

2010/3/7 日本経済新聞 サイエンス欄

### アウトリーチ活動

2012/3/3 ヒマラヤの氷河の現状とその将来像。国際シンポジウム「アジアの山岳氷河ー地球環境変動のセンサーとしてー」。信州大学, 松本

2011/2/21 氷河や雪渓を測り続けてわかる

こと。第9回 spcafe. 名古屋大学 Craig's Café, 名古屋

2010/1/29 アジアの氷河・氷河湖と温暖化。地球観測連携拠点(温暖化分野)平成21年度ワークショップ「統合された地球温暖化観測を目指してー雪氷圏における観測の最前線ー」。千代田放送会館ホール, 千代田区

2009/1/30 アジアの氷河変動が意味するもの。一宮高校スーパーサイエンスハイスクール講演会。一宮勤労福祉会館, 一宮

2008/12/20 アジアの氷河変動が意味するもの。名古屋大学地球水循環研究センター公開講演会「水と地球環境」。名古屋大学シンポジオンホール, 名古屋

2008/11/3 気候変化とヒマラヤの氷河。チョゴリザ初登頂五十周年記念シンポジウム「パイオニアワークとしての登山・探検・フィールドサイエンス」。京都大学芝蘭会館, 京都

2008/4/20 アジアの氷河変動が意味するもの。名古屋大学・朝日新聞社・環境フォーラム・ヒマラヤ写真展「若者よ、地球を歩けーヒマラヤ氷河が発信する明日へのメッセージー」。名古屋大学豊田講堂, 名古屋

2007/7/22 ヒマラヤの氷河の縮小。名古屋大学21世紀COEプログラム・公開講演会「雪と氷の世界を通してみる「不都合な真実」」。名古屋市科学館, 名古屋

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

藤田 耕史 (FUJITA KOJI)

名古屋大学・環境学研究科・准教授

研究者番号: 80303593

#### (2) 研究分担者 (H21 全員連携研究者に変更)

#### (3) 連携研究者

岩田 修二 (IWATA SHUJI)

立教大学・観光学部・教授

研究者番号: 60117695

(H21→H22: 研究分担者)

山口 靖 (YAMAGUCHI YASUSHI)

名古屋大学・環境学研究科・教授

研究者番号: 80283472

(H21→H22: 研究分担者)

山口 悟 (YAMAGUCHI SATORU)

(独)防災科学技術研究所・雪氷防災研究センター・主任研究員

研究者番号: 70425510

(H21→H22: 研究分担者)