

地球規模課題対応国際科学技術協力

(環境・エネルギー研究分野「気候変動の適応又は緩和に資する研究」領域)

氷河減少に対する水資源管理適応策モデルの開発

(ボリビア多民族国)

平成 21 年度実施報告書

代表者：田中 仁

東北大学・大学院工学研究科・教授

<平成 21 年度採択>

1. プロジェクト全体の実施の概要

本研究は、気候変動に伴う氷河後退と水資源不足への適応策が迫られているボリビア国において、水資源政策の立案・検証を支援するための水資源管理適応策モデルの開発をサンアンドレス大学と共同して実施する。水資源の継続監視のための水文・水質観測網を整備し、水資源統合モデルを開発して将来の水資源について展望する。最終的に政府水関連機関に科学的知見を提示することによりボリビア国の水資源政策に資することを目的とする。

平成21年度は共同研究契約締結のための暫定契約期間として、(1) 共同研究推進のための研究内容の協議、(2) ボリビア国における氷河・水資源研究のための情報収集を実施した。

(1) 共同研究に関する研究計画の協議

R/D 締結に向けて国内ミーティング4回、サンアンドレス大学水理研究所における研究内容の協議と現地調査を2回実施した。暫定計画開始時は日本側とボリビア側のプロジェクトに対する見解の違いが見られたが、徐々に共通認識を深め、9月にM/M (Minutes of Meeting)、1月にR/D (Record of Discussion)、2月にMOU (Memorandum of Understanding) を締結し、4月1日から共同研究開始の見込みとなった。さらに、1月にはボリビア側研究者3名を東北大に招聘してワークショップを実施し、日本側研究者がボリビア国の水資源問題に対する理解とプロジェクトの共通認識を深め、一方で日本側でこれまでに開発されてきた積雪・流出・水質の各モデルについてボリビア側研究者に解説し両国間の情報共有を進めた。今年度末まで暫定期間の範囲となったが、現在は共同研究の正式スタートに向けて研究推進体制の整備、詳細計画の協議、水文・水質データの観測体制について検討している段階である。しかしながら、依然ボリビア側研究者とプロジェクトに対する見解が異なっており、プロジェクトを効率的に進めるためにも今後も継続して協議を続けることが必要である。

(2) ボリビア国における氷河・水資源研究のための情報収集およびサブモデル開発

本年度は、水資源統合モデルを構成するサブモデルを現地流域に適用するための基礎的検討を行った。しかしながら、本年度は暫定契約期間であったためボリビア側研究機関から観測データの提供を受けることができず、対象流域である Tuni 湖ではなく、データ取得が可能な地域を対象としてモデルの検討をすることとした。また、水質グループに関しては、モデルに組み込むべき構成要素を検討するための現地視察を行い、土砂グループに関しては衛星画像から現地の環境変動をモニタリングする手法について検討した。

次年度以降、日本側研究者が対象地域である Tuni 湖流域の視察ならびにラパス・エルアルト市内の水利用状況の調査を行い、モデルの現地適用と現地の水資源問題について検討する。さらに、水文・水質観測体制の確立のため機材の購入と投入の準備を進める予定である。

2. 研究グループ別の実施内容

(1) 雪氷グループ

①研究のねらい

雪氷グループは、HuyanaPotosi 西氷河および Tuni-Condoriri 氷河における気象観測システムの設置および航空写真や3次元測量による氷河質量バランスの把握を行うことによりモニタリング体制の強化を目指す。モニタリングによって得られた研究成果を基に日本で開発された積雪多層モデルを氷河域に適用できるように改良する。最終的に、全球気候モデルのアウトプットを氷河融解モデルの入力値として将来的な氷河の融解量と質量バランスについて展望する。本年度は積雪域において開発された融雪流出モデルを氷河域に適用し、さらに衛星画像から抽出された氷河域のデータモデルに組み込む手法について検討した。

②研究実施方法

本年度は積雪域を対象として開発された3種類の積雪モデルの特性について検討し、来年度以降の氷河融解モデル開発に備える。使用するモデルは積雪多層モデル、簡易積雪モデル、融雪流出モデルである。融雪流出モデルについてはボリビア国の Zongo 氷河に適用し、衛星画像から抽出された雪氷域のデータをモデルに組み込む。来年度以降、詳細な積雪多層モデルを氷河域の気象観測データ地点に適用し、氷河全域に適用できる簡易的な氷河融解モデル開発の方向性について検討する。

③当初の計画（全体計画）に対する現在の進捗状況

本年度は暫定契約期間となったため、IHH が所有している氷河観測データの提供を受けることができず、積雪多層モデル・簡易積雪モデルは積雪域に、融雪流出モデルは本案件で対象とする Tuni-Condoriri、HuaynaPotosi 西氷河の近隣に位置する Zongo 氷河に適用した。積雪多層モデルは融雪量推定に熱収支法、簡易積雪モデルと融雪流出モデルは degree-day 法を用いている。また、積雪多層モデルと簡易積雪モデルは降水形態判別や堆積後の厚密過程も考慮されている。融解流出モデルは SRM(Snowmelt Runoff Model)を使用し、必要なパラメータは流量データを用いて最適化し、モデルのフォーシングデータはエルアルトの観測データを外挿して作成した。衛星画像には Landsat を使用し、氷河の有無と積雪の有無の4種類の組み合わせをモデルの条件として組み込んでいる。モデルの再現性を示す Nash 係数は 0.55、相対体積誤差は $0.217\text{m}^3/\text{s}$ となり、十分な再現性は得られなかった。次年度以降、積雪域で開発されたモデルを氷河域に適用するための改良点について検討して行く予定である。

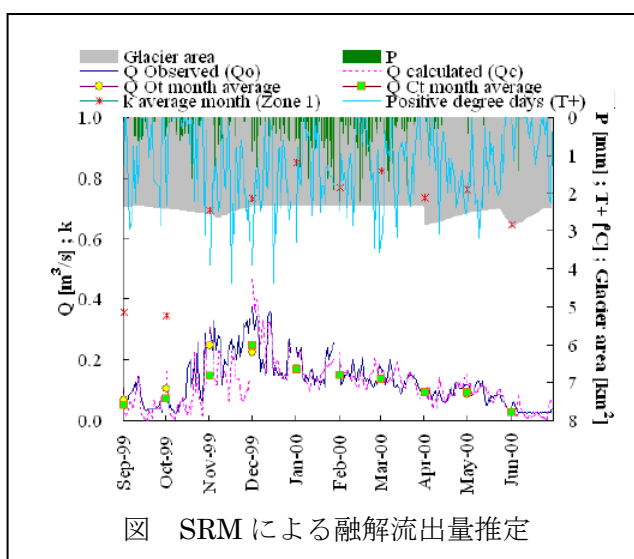


図 SRM による融解流出量推定

④カウンターパートへの技術移転の状況（日本側および相手国側と相互に交換された技術情報を含む）

2010年1月27日にサンアンドレス大学水理研究所 Edson Ramirez 博士、Andres Callizaya 氏、サンアンドレス大学化学調査研究所の Marcelo Gorritty 氏の3名を東北大に迎え「1st GRANDE Workshop」を開催し、参加者はプロジェクトに属さない研究者も含めて50名に達した。Edson Ramirez 氏から熱帯氷河の長期変動、Andres Callizaya 氏からラパス・エルアルト両市の水資源マネジメント、Marcelo Gorritty 氏からラパス市内の水質研究について紹介され、一方で東北大側から積雪多層モデル、観測デ

一タの乏しい地域における流出モデル、貯水池における流動水質予測モデルについて解説した。総合討議ではボリビア側研究者から水資源管理適応策としてダム開発の検討が挙げられたが、本案件ではダム開発のような具体的な適応策を提案するという方向性はとらず、氷河後退の影響評価を水政策関連機関に提示し、適応策を議論するというスタンスで研究を進めるという共通認識を確認した。

表 1st GRANDE Workshop プログラム

日時：平成 22 年 1 月 27 日、場所：東北大学工学部総合研究棟 11F セミナー室		
Time	Title	Speaker
14:00	Opening remarks and introduction of GRANDE	TANAKA Hitoshi, Tohoku University
14:15	Climate change, glacier retreat and water resources availability in high mountain cities: case of Bolivia	Edson Ramirez, Mayor de San Andres University
14:45	Water Supply System of La Paz and El Alto Cities	Andres Callizaya, Mayor de San Andres University
15:15	Studies of Water Quality in the Basin of La Paz city, Bolivia	Marcelo Gorritty, Mayor de San Andres University
15:45	Break	
16:05	Snow models based on heat balance	YAMAZAKI Takeshi, Tohoku University
16:35	The Newest Technology on Short-Term Flood Forecast	Do Nam Hoai, Tohoku University
17:05	Environmental Hydrodynamics in Lakes and Reservoirs, -Measurements and Computations-	UMEDA Makoto, Tohoku University
17:35	Discussion	KAZAMA So, Tohoku University
18:05	Closing remarks	



写真 ワークショップ集合写真



写真 Prof. Tanaka (Project Leader)



写真 Dr. Edson Ramirez



写真 Mr. Andres Callizaya



写真 Mr. Andres Callizaya



写真 Dr. Yamazaki



写真 Mr. Do Nam Hoai



写真 Dr. Umeda

⑤当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況（あれば）
特になし

（２）流出グループ

①研究のねらい

流出グループは既に開発されている流出モデルを Tuni 流域と Chacaltalya 集水域に適用し、長期流出計算を実施して、氷河の後退・消失に伴う長期的な水資源・水循環変動について議論することを目的としている。しかしながら、現地対象地域には雨量観測点が不足しており、将来展望を行う際にも気候モデルの出力データをダウンスケーリングして流出モデルのフォーシングとする必要がある。そこで本年度は気象庁の全球規模数値予報データのアーカイブから抽出した降雨データを統計的ダウンスケーリングし、さらに分布型流出モデルに組み込む手法について検討する。

②研究実施方法

本年度は暫定契約期間となり、IHH が所有している対象流域の気象・流量データの提供を受けられなかったため、特に氷河域を対象とせず、既に流出モデルが適用されている途上国流域を対象とした。全球数値予報データは気象庁で運用されている GSM(Global Spectral Model、全球数値予報モデル)の GPV(Grid Point Value)を、統計的ダウンスケーリングには MOS(Model Output Statistics、モデル出力統計)を採用した。

③当初の計画（全体計画）に対する現在の進捗状況

気象庁 GSM の GPV の雨量データは 6 時間雨量が出力されるため、詳細なハイドログラフを作成するためにはより時間分解能の高いデータを作成する必要がある。本研究では観測雨量計の時間単位データを用いて、MOS により GPV 6 時間データを時間単位データに変換した。MOS の説明変数には表面降水量、700hPa と 850hPa 面における南北流の風速、700hPa と 850hPa 面における東西流の風速、700hPa と 850hPa 面における鉛直流の風速を使用

した。誤差評価関数の 1 つである Nash 係数は Q_{dmo} が 0.51、 Q_{mos} が 0.85 となり短時雨量の予測に MOS の効果が表れていることが示唆された。本年度は対象地域の雨量データを取得できなかったため、開発したダウンスケーリング手法を現地の Tuni 湖流域や Chacaltalya 集水域に適用することはできなかったが、次年度以降、流域内に雨量計の設置と現地機関の雨量観測データ収集を進め、MOS によるダウンスケーリングと流出モデルの現地適用について検討する意向である。

④カウンターパートへの技術移転の状況（日本側および相手国側と相互に交換された技術情報を含む）

1 月に実施したワークショップにおいて、東北大学で開発された気候データの統計的ダウンスケーリング手法と流出モデルに関する研究成果を紹介した。これらの手法は氷河域に適用できるように改良される予定である。ボリビア側研究者も日本で運用されている全球数値予報データとダウンスケーリング手法には高い関心を示し、ボリビア国の複数の流域で本手法を導入する方針となった。

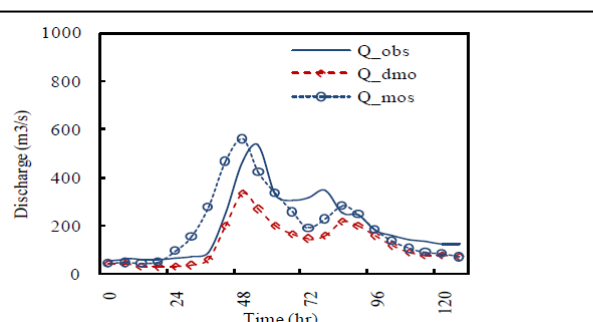


図 MOS 処理の有無による洪水流量の比較
 Q_{obs} は観測流量、 Q_{dmo} は GPV を直接入力した推定流量、 Q_{mos} は GPV を MOS 処理して入力した推定流量

- ⑤当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況（あれば）
特になし

（3）土砂グループ

①研究のねらい

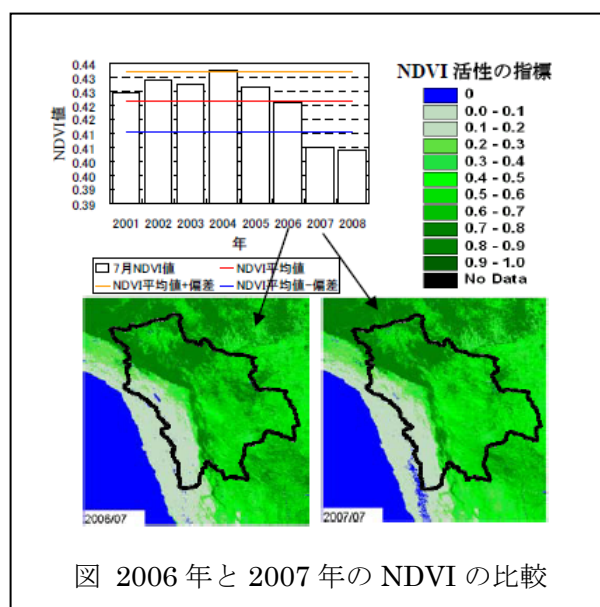
本研究で開発する土砂生産モデルは斜面崩壊および侵食による生産量を推定する、土砂流出モデルのサブモデルである。Tuni 湖流域に適用予定の土砂生産モデルは日本の山岳域を対象に開発されており、気象・地質条件が大きく異なる現地流域に適用するためには、斜面崩壊・侵食の影響因子を予め把握し、適切なモデル構造とパラメータを精査しておく必要がある。次年度以降に衛星画像と航空写真から斜面崩壊・侵食地域を抽出する予定であり、特に斜面崩壊は典型的な環境変化の1要因として挙げることができる。そのため本年度は予備調査としてMODIS画像を用いたボリビア国における環境変化の抽出方法について検討する。

②研究実施方法

人工衛星TERRAのMODISセンサのデータからNDVI(Normalized Difference Vegetation Index: 正規化植生指標)を算出し、ボリビア全域の平均NDVIの月単位データを作成し、時系列変化から変動の大きい月を抽出する。さらに抽出した月とその前年のNDVIの空間分布を比較して環境変化の大きい地域を抽出する。本年度は暫定契約期間となり、IHHが所有している対象流域のデータの提供を受けることができなかったため、利用可能な衛星データを用いてボリビア全域を対象として研究を進めた。

③当初の計画（全体計画）に対する現在の進捗状況

2001年～2008年までの平均NDVIの時系列を比較した結果、2007年の6月、7月、8月とNDVIが低下する傾向を示し、2006年7月と2007年7月のNDVI分布を比較した結果、トリニダ地域において集中的なNDVIの低下が確認された。現地の気象データと比較したところ、2007年2月16日に155.5mm/dayの異常多雨が記録され、洪水により植生流出が進み、6月から8月の乾季に植生が繁茂しない条件になったNDVIが低下したものと推察される。使用したMODIS画像の解像度は250mであり、洪水のような環境変化の抽出は可能であることが示唆されたが、斜面崩壊のような局所的なスケールを抽出することは困難であり、より高分解能なデータを用いた解析が必要と考えられる。次年度以降に高分解能衛星画像や航空写真を導入し、さらには土地被覆や地質構造の観点も加えて流域内の斜面崩壊の抽出方法について精査する意向である。



- ④カウンターパートへの技術移転の状況（日本側および相手国側と相互に交換された技術情報を含む）
特になし

- ⑤当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況（あれば）
特になし

（４）水質グループ

①研究のねらい

水質グループは Tuni 湖流域の水質を評価するモデルを開発して、気候変動下における Tuni 湖における水質変動の展望を目的としている。日本側研究グループにとって水質研究に必要な情報が完全に不足しており、対象とする貯水池の形状、流域の水質特性、流出形態、土地利用について把握しておく必要がある。また、対象地域に隣接する廃鉱山では極端な重金属の流出が報告されており、対象流域内にも廃鉱山が存在するため重金属の影響を調査しておく必要がある。そのため、本年度は共同研究開始後のモデル開発と水質モニタリングに関する予備調査として現地視察と基礎的な水質調査を実施した。

②研究実施方法

当該研究において対象となる Tuni ダム湖およびその流域について、予備調査として現地踏査を 2009 年 12 月 2～3 日に実施した。調査内容は、流域の概要などを現地の共同研究者（サンアンドレアス大学水理研究所）と協力機関（EPSAS、上下水道公社）などに聞き取りを行うことに加え、簡易方式による水質計測を実施した。測定事項は、水温、pH、電気伝導度の計器測定に加えて、参考としてパックテストを用いた栄養塩濃度等の測定も行った。調査地点は、図-1 に示す 5 地点（[1]～[5]）である。Tuni 湖及び主要な流入河川で測定した。

③当初の計画（全体計画）に対する現在の進捗状況

水質の測定結果（2009 年 12 月 2 日実施）を表-1、2 に示す。氷河からの流出水であるということに加え、標高が高いため、水温は 10℃程度と概ね低い。パックテストの測定結果はあくまで参考値であるが、どの地点も概ね清澄な水質であると言えそうである。ただし、Tuni 川と HuaynaPotosi 川の河川水は、目視では土砂による濁りがやや目立っていた。その影響か、Huayna Potosi の水路において COD がやや高めにでている。HuaynaPotosi 川の廃鉱山に関しては、下流の HuaynaPotosi 流量堰での pH 測定結果が 7.6 であったことから、重金属類の流出のような影響は、ほとんど無いものと考えられる。今後より詳細な調査、検討を進め、熱帯氷河を持つ流域に関する知見を増やすとともに、ボリビアの水資源管理に寄与する成果を出していく予定である。

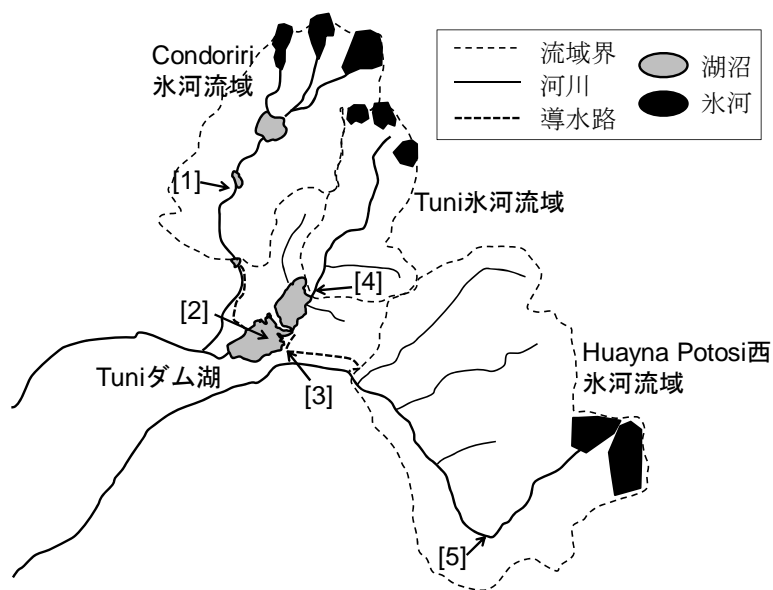


図-1 Tuni ダム湖流域の概略と調査地点

表-1 水質測定結果 (計器測定)

地点	測定時刻	水温	pH	EC
		[°C]	[-]	[mS/m]
[1] Condoriri 川	10:37	10.3	7.79	9.46
[2] Tuni 湖左岸	11:55	11.9	7.51	9.94
[3] Huayna 水路	12:24	10.8	7.79	9.94
[4] Tuni 川	14:53	11.5	7.64	4.77
[5] HP 西氷河下流	17:39	8.3	7.73	9.66

表-2 水質測定結果 (パックテストの簡易測定)

地点	測定時刻	COD	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	PO ₄ -P
		[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]
[1] Condoriri 川	10:35	0.5	<0.2	<0.005	<0.2	<0.02
[2] Tuni 湖左岸	11:55	2	0.2	0.005	0.2	0.03
[3] Huayna 水路	12:20	4	0.3	<0.005	<0.2	0.03
[4] Tuni 川	14:45	2	0.2	0.005	0	0.02

- ④カウンターパートへの技術移転の状況 (日本側および相手国側と相互に交換された技術情報を含む)
1月に実施したワークショップにおいて、日本の貯水池における流動・水質観測と数値計算に関する

研究例を紹介し情報共有を進めた。

- ⑤当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況（あれば）
特になし

（5）マネジメントグループ

①研究のねらい

マネジメントグループはラパス・エルアルト両市内の水資源システム、水利用状況、社会情勢を分析して、将来的な水需給バランス、水資源マネジメントの評価を目的としている。次年度以降に実施するデータ取得、水資源問題の構造把握、水資源・社会情勢の傾向分析の予備調査として、本年度はサンアンドレス大学の水資源マネジメント分野の研究者からラパス・エルアルト市内の水管理システムに関する聞き取り調査を実施した。

②研究実施方法

本年度はサンアンドレス大の研究者らと打ち合わせを行うことにより、ラパス・エルアルト市内における水資源問題・社会間・データ所在の整理に着手する。また、次年度以降のマネジメント班の研究計画、および最終的な水資源の適応策の方向性について検討する。

③当初の計画（全体計画）に対する現在の進捗状況

平成 21 年度においては、ボリビア国ラパス・エルアルト市における地理的条件、人口および水資源の概要に関して、来日専門家より説明を受けると共に、基本的な地理情報、統計データの所在、整備状況に関する情報収集を行った。当該地域は多量の水を需要する産業利用は限定されているが、人口集中の継続により水需給のバランスが逼迫する方向に変化してきており、下水道のない周辺部への人口の増加が河川水質の悪化をもたらしているなどの問題を抱えている。これに対し、ボリビア国では近代的な水資源マネジメントの必要性が認識されつつあるが、将来の水需給においても人口動向などの不確実性が大きく、現時点で最適なマネジメント案を提案できる状況にはない。日本側としては、このようなマネジメントに不可欠な情報を整理し、データの整理と基本的な分析を担当することを確認した。

- ④カウンターパートへの技術移転の状況（日本側および相手国側と相互に交換された技術情報を含む）
特になし

- ⑤当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況（あれば）
特になし

3. 成果発表等

（1）原著論文：国内 6 件、国際 5 件

1. 山崎剛，飯島慈裕，石川守 2009：東シベリアタイガ林の土壌水分・温度と積雪の長期推定．東北の雪と生活，24，44-47．

2. Takeshi YAMAZAKI and Yoshihiro IJIMA, 2009: Model study of recent situation at Spasskaya Pad. *Proceedings of 4th International WS on C/H₂O/Energy balance and climate over boreal regions*, pp. 101-104.
3. 朝岡良浩, 豊田康嗣, 竹内由香里, 2010: 降水形態判別手法が冬季の河川流量推定に及ぼす影響, 水工学論文集, 第 54 巻, pp. 421-426.
4. Freddy Soria and So Kazama, 2010: EVALUATION OF CLIMATE CHANGE EFFECTS ON DISCHARGE GENERATION IN A HETEROGENEOUS WATERSHED, *Proceedings of 17th Congress of the Asia and Pacific Division of the International Association of Hydraulic Engineering and Research*, Session5, 2b002.
5. Freddy Soria and So KAZAMA, 2010: EVALUATION OF THE EFFECTS OF AN EL NINO EVENT ON GLACIER MELTING RATE, *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol. 54, pp.25-30.
6. Do Hoai NAM, Keiko UDO and Akira MANO, 2009: Examination of Flood Runoff Reproductivity for Different Rainfall Sources in Central Vietnam, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol 59, pp. 103-108.
7. Do Hoai NAM, Keiko UDO and Akira MANO, 2010: Development of Short-Term Flood Forecast Model - A Case Study for Central Vietnam, *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol. 54, pp. 163-168.
8. Mohammad Farid, Akira Mano, and Keiko Udo, 2009: 2D Flood Runoff Model Coupled with Super Tank in Upper Ciliwung River Basin, Indonesia, *Proceeding of the 11th International Summer Symposium*, JSCE, pp. 77- 80.
9. Mohammad Farid, Akira Mano and Keiko Udo, 2010: Effects of Urbanization on Flood Intensification in a River Basin, *Proceedings of International Conference on Environmental Science and Development*, in press.
10. Mohammad FARID, Akira MANO and Keiko UDO 2010: Flood Runoff Characteristics due to Land Cover Change in Upper Ciliwung River Basin Indonesia Using 2D Distributed Model Coupled with NCF Tank Model, *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, JSCE, pp.157-162.
11. Ana Rodriguez, Freddy Soria 2010: EFFECT OF LEACHETE FROM SANITARY LANDFILLS IN THE POLLUTION OF LAKES AND RIVERS, *Proceedings of 17th Congress of the Asia and Pacific Division of the International Association of Hydraulic Engineering and Research*, Session3, Biological + Water Quality, 2c001.

(2) 特許出願 : 0 件

4. プロジェクト実施体制

(1) 「雪氷」グループ

① 研究グループリーダー : 山崎 剛 (東北大学大学院理学研究科・准教授)

② 研究項目

気候変動下における氷河融解モデルの構築

(2) 「流出」グループ

①研究グループリーダー： 真野 明 (東北大学大学院工学研究科・教授)

②研究項目

気候変動と氷河後退に伴う流出モデルの構築

(3) 「土砂」グループ

①研究グループリーダー：田中 仁 (東北大学大学院工学研究科・教授)

②研究項目

気候変動に伴う土砂流出モデルの構築

(4) 「水質」グループ

①研究グループリーダー：中野 和典 (東北大学大学院工学研究科・准教授)

②研究項目

気候変動と流域負荷を考慮した水質モデルの構築

(5) 「マネジメント」グループ

①研究グループリーダー：奥村 誠 (東北大学東北アジア研究センター・教授)

②研究項目

水資源管理適応策モデルを用いた将来水資源の展望と適応策の検討

以上