

22. 地球温暖化による熱帯氷河域の水資源解析

渡邊 恵¹・川越 清樹^{2*}・朝岡 良浩³

¹東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

²福島大学大学院共生システム理工学研究科 (〒960-1296 福島県福島市金谷川1)

³東北大学大学院工学研究科土木専攻 (〒980-8570 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-06)

* E-mail: kawagoe@sss.fukushima-u.ac.jp

温暖化による赤道付近、かつ標高4000m超級の山岳地に位置する熱帯氷河の融解の加速が推測されている。全球における熱帯氷河の約99%は南米大陸に存在し、さらに約95%がアンデス山系に存在している。この氷河を水源に農業、生活、産業、エネルギー創出が成立されており、特に灌漑やエネルギーの分野で融解水の果たす役割は大きいことが知られている。しかしながら、氷河を取られるべく観測データも不足し、将来への水資源の影響を定量的に推計できない状況となっている。こうした背景を踏まえ、本研究では、衛星画像と限られた気象データを基に過去10年間におよぶ氷河面積を求め、その変化のトレンドを定量化することにより、将来の水資源量予測に取り組んだ。また、農業水資源のインパクト量を推計した。

Key Words : South america, glacier melt, agricultural production, water footprint

1. はじめに

多くの数値気候モデルの出力結果より見積もられる気候システムの温暖化に起因する水循環の変化、途上国の人口増加による水資源不足が危惧され¹⁾、気候変動と将来の社会発展に適応できる水マネジメントを講じていくことが切望されている。水循環の変化に関しては、極端な降水事象だけにとどまらず氷河融解の影響も指摘されており、IPCC第4次評価報告書では、人間による消費、農業、エネルギー生産のための水の利可能性に重大な影響を与えると記載している²⁾。氷河融解を考慮した場合、顕著な変動の推測される地域が低緯度でありながら高標高に分布する「熱帯氷河」である。全球における熱帯氷河の99%は南米のアンデス山脈に存在し、既に流域等の地域単位の評価ではあるもののアンデス山脈内の幾つかの氷河融解の報告がなされている³⁾。この周辺は人口増加の著しい地域でもあり、現状でも水資源が切迫している問題を有している。そのため、早急の水マネジメントを必要とする地域である。本研究では、アンデス山脈に分布する氷河を広範領域で把握できる衛星画像を基に、近年の氷河減少傾向と将来の展望を求めた。また、アンデス山脈の主要産業である農畜産業に着目し、食糧生産に対する氷河減少のインパクト量の影響を明らかにする



図-1 研究対象領域位置図

ことを試みた。

これらの氷河減少、および減少に対する食料生産に対するインパクト量は、技術的、経済的に水マネジメントを講じることを困難とするアンデス山脈周辺の諸国を対象に解析する。以上より、Central Intelligence Agencyによるthe world factbook⁴⁾を参考に技術的、経済的に水マネジメントを講じることを困難である国を抽出し、ペルー

表-1 平均農畜産業生産量品目別収量

RANK	PERU			ECUADOR			BOLIVIA		
	Commodity	Prod(GT)	WFP (m3/T)	Commodity	Prod(GT)	WFP (m3/T)	Commodity	Prod(GT)	WFP (m3/T)
1	Sugar cane	7857	175	Bananas	7007	859	Sugar cane	5400	175
2	Potatoes	3217	255	Sugar cane	6408	175	Soybeans	1271	1789
3	Rice, paddy	2192	2291	Cow milk, whole, fresh	4017	970	Potatoes	735	255
4	Plantains	1590	2478	Rice, paddy	1503	2291	Maize	676	909
5	Cow milk, whole, fresh	1283	970	Maize	697	909	Plantains	415	2478
6	Maize	1246	909	Plantains	633	2478	Cassava	351	605
7	Cassava	1007	605	Potatoes	414	255	Rice, paddy	309	2291
8	Indigenous Chicken Meat	650	3900	Fruit Fresh Nes	258	1404	Cow milk, whole, fresh	266	970
9	Onions, dry	508	349	Palm oil	245	1053	Sorghum	239	2853
10	Maize, green	367	909	Indigenous Chicken Meat	230	3900	Indigenous Cattle Meat	192	15500
11	Oranges	322	457	Indigenous Cattle Meat	206	15500	Bananas	173	859
12	Mangoes, mangosteens, guavas	264	1583	Indigenous Pigmeat	161	4800	Wheat	135	1334
13	Roots and Tubers, nes	238	78	Mangoes, mangosteens, guavas	125	1583	Sunflower seed	148	3069
14	Asparagus	232	1473	Cocoa beans	93	27218	Indigenous Chicken Meat	138	3900
15	Lemons and limes	228	559	Cassava	90	605	Tomatoes	113	184
16	Coffee, green	224	17373	Oranges	82	457	Indigenous Pigmeat	99	4800
17	Sweet potatoes	143	303	Coffee, green	73	17373	Oranges	95	457
18	Tomatoes	131	184	Soybeans	61	1789	Pumpkins, squash and gourds	74	234
19	Papayas	122	662	Pineapples	61	253	Barley	71	1388
20	Barley	116	1388	Onions (inc. shallots), green	57	214	Roots and Tubers, nes	23	78

※ Prod: Agricultural production, WFP: water footprint

(47位), エクアドル(65位), ボリビア(91位)を対象に検討を行った(図-1 位置図参照)。

2. アンデス山脈諸国の農業

アンデス山脈の農業は基幹産業であり、農業従事人口は全体人口20～40%を占める国が多く認められる。Food and Agriculture Organization of the United Nationsより集計された³⁾1999年から2008年までの平均農畜産業生産量品目別収量上位20位を表-1にまとめる。研究対象となるこれら諸国の全体的傾向としては砂糖の生産が多いことが認められる。

ペルーに関すれば、砂糖、ジャガイモ、米の生産量が多く認められている。1990年代に進められた経済自由化の進展とともに米、ジャガイモ以外にもコーヒー、メイズ、コムギ、大豆も生産量が増加している。また、近年は、穀物以外にアスパラガス、マンゴを中心とする果物、野菜の生産量増大が認められている。アスパラガスは1980年代に導入された点滴式灌漑を用いることにより栽培面積が拡大した。

エクアドルに関すれば、バナナ、砂糖、牛乳の生産量が多く認められている。なお、エクアドルは、バナナ、カカオ、コーヒーの農産物が輸出総額の9割以上を占める農業輸出国である。バナナに関しては、世界第一の輸出国を示す。

ボリビアに関すれば、砂糖、大豆、ジャガイモの生産量が多く認められている。なお、ボリビアの農産物輸出は、主にトロピコ、ウメドで営まれている大規模生産者または農業企業による輸出向けの近代的な農業生産が支えている。1990年代後半から調整飼料が急激に伸びているほか、大豆をはじめとする油糧種子とその派生品が大きな割合を占めている。

3. 解析方法

本研究では以下の2つの解析を試みた。

- ① 熱帯氷河変動解析：アンデス山脈に分布する氷河を広範領域で把握できる衛星画像を基に、近年の氷河減少傾向と将来の展望を求める。
- ② 食糧生産に対する水資源インパクト解析：食糧生産状況、および食糧作物に対するウォーターフットプリントを踏まえて氷河減少に対する水資源の影響を求める。

ウォーターフットプリントとは、製品、およびサービスの算出や消費に伴い直接的、および間接的に使用される水の総量⁹⁾と定義されている。以下、2つの解析の方法について説明する。

1) 熱帯氷河変動解析

1998年から2008年の計11年の氷河に関するアンデス山脈広範領域の面的な情報を衛星画像より取得し、時系列情報として氷河面積を求めた。また、11年間の氷河面積の変動状況を定式化し、氷河消失の時期を見積もることに取り組んだ。

氷河面積を求めるために衛星画像分析に利用した手法はS3指標による雪氷分類手法である⁷⁾。積雪の分光反射特性では、波長1.0 μm以下で反射率が高く、波長が長くなるとともに反射率が減少し、波長1.4 μm以上で反射率が極端に短くなる特徴を有する。また、植生の分光反射特性では、波長0.7 μm付近と波長1.4 μm付近を境に反射率に大きなギャップがある。このような積雪と植生の分光反射特性を利用してS3指標は開発された。以下にS3指標の式を示す。

$$S3 = \frac{Nir1(Vis - Nir2)}{(Nir1 + Vis)(Nir1 + Nir2)} \quad (1)$$

ここで Vis :可視域の反射率, $Nir1$:近赤外の反射率(近赤外), $Nir2$:近赤外の反射率(中間赤外)である。この指標は衛星画像ADEOS-II/GLIより開発されたものであるが、他の衛星画像で活用実績が多々ある。本研究では、広範領域を対象としたいこと、既に活用実績がある⁸⁾ことを踏まえて、Center National d'Etudes Spatialesの運営する地球衛星探査機SPOTのVEGETATIONセンサー(以下SPOT/VEGETATION)を利用した。衛星の回帰日数は約1日、空間解像度は約1km×1kmである。なお、S3指標による雪氷分類の空間情報のクロスチェックとして、衛星画像から正規化植生指標(Normalized Difference Vegetation Index; 以下NDVI)と千葉大学環境リモートセンシング研究センターより提供されている地理情報の地球地図—グローバル土地被覆データ(GLCNMO)を利用し、雪氷域の空間的な判別の精読した。また、本研究の取り組みは氷河領域を明らかにすることであり、雪氷全般を総合的に評価することではない。以上より、積雪量と融解量の等しい高度を示すフィルライン高度⁹⁾を考慮して、氷河領域を把握することを試みた。アンデス山脈のフィルライン高度を数値地理情報の標高データに反映して、氷河分布領域の分類に取り組んだ。なお、本研究の対象国となるペルー、エクアドル、ボリビア付近のフィルライン高度は標高4,000m以上となる。

SPOT/VEGETATIONの衛星画像の解析データより求められた氷河領域の面積は月毎のデータとして整理する。これらを時間軸に応じた時系列情報に示すこととする。この時系列情報から将来への氷河減少傾向を定式化し、減少量と消失を求める。

2) 水資源インパクト解析

水資源インパクト解析では、氷河減少量に対する農畜産業より生産される食糧のウォーターフットプリントから、食糧生産量の減少量を求める検討を行った。

食糧のウォーターフットプリントには、ペルー、エクアドル、ボリビアの1999年から2008年の各年の農畜産物収量品目のウォーターフットプリントの総和を整理し、11年間で上位20位の年平均値を用いた(表-1 参照)。平均農畜産業生産量品目別収量上位20位平均値の経年の面積1t当たりのウォーターフットプリントの推移をまとめたものが図-2である。この図から、年々、農畜産に対するウォーターフットプリントの増加が示されている。本研究では今後の水利用の改善を期待して過去の平均値によりウォーターフットプリントを利用しているものの、水資源不足が懸念される中で、水の使用を制限して農畜産を進めることが課題になることを示唆している。また、備考として、これらのウォーターフットプリントの値に

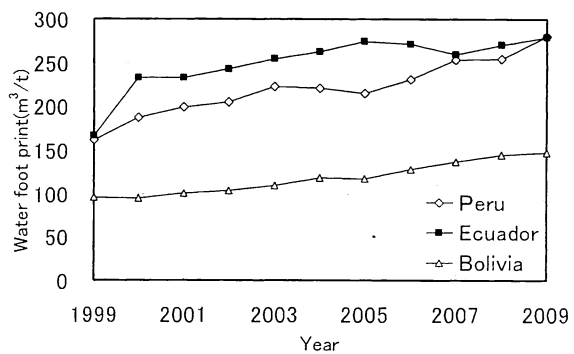


図-2 対象国のウォーターフットプリントの推移

影響しているものは鶏、牛に関わる畜産の値であることも特徴の一つである。なお、11年間で上位20位の年平均値は食料品1tを生産するに当たるウォーターフットプリントは、ペルーで220m³、エクアドル249 m³、ボリビア118 m³である。これらにより求められたウォーターフットプリントと氷河減少量の収支から、試行的に食糧生産量の減少量を求めることとしている。

ウォーターフットプリントの定義は製品、およびサービスの算出や消費に伴い直接的、および間接的に使用される水の総量であるが、以下の式によりHoekstraらにより求められている⁶⁾。

$$WF_{PROC} = WF_{GREEN} + WF_{BLUE} + WF_{GRAY} \quad (2)$$

$$WF_{GRAY} = \frac{L}{C_{max} - C_{ini}} \quad (3)$$

ここで、 WF_{PROC} : 食糧を生産する過程で使用される水の総量, WF_{GREEN} : 蒸散と植物中の水分, WF_{BLUE} : 蒸発と貯留と流出の量, WF_{GRAY} : 汚濁負荷水量, L : 汚染物質負荷, C_{max} : 最大許容濃度, C_{ini} : 水塊での通常時の濃度である。

水資源インパクト量を解析するにあたり、氷河については体積に換算しなければならない。氷河の面積については衛星画像により概ね把握することができるものの、現時点では氷雪に関わる観測データが不足した状態であるため氷河の層厚に関しては情報が不足する。本研究では、Edosonら³⁾の調査結果に基づくアンデス山脈諸地域の平均的な層厚である100mを層厚と仮定して体積に換算した。

4. 解析結果と考察

熱帯氷河変動解析と水資源インパクト解析の結果を以下に説明する。

1) 熱帯氷河変動解析

図-3に衛星画像データによる解析より求めた1999年から2009年までの8月の氷河の分布図を示す。また、図-4

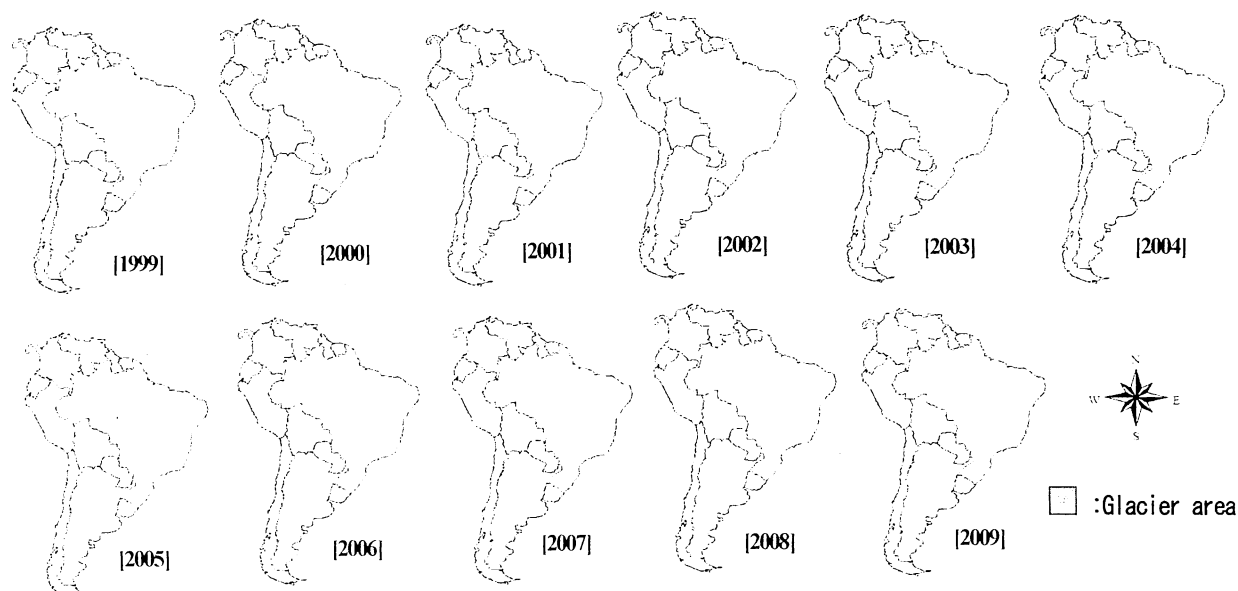


図-3 衛星画像データより求めた1999年から2009年までの8月の氷河分布図

に1999年と2009年の月毎の氷河面積の変動図を示す。図-4より氷河と推測される雪氷面積の年間変化を把握できる。全体的な傾向として、5月から9月は比較的に雪氷面積に変化が乏しいこと、その一方で1月から4月、10月から12月は変化量が多いことが理解できる。研究対象となるペルー、エクアドル、ボリビアにおいて、5月から9月は乾季、それ以外は雨季に相当する。以上より乾季は変化の少ない永続的な雪氷面を示していること、フィッライン高度により標高の影響を除去しているものの雨季に降雪の影響による積雪が認められることが明らかにされた。これらの特徴を考慮し、乾季に示される雪氷面、つまり氷河を対象に時系列的な解析を勧めることとする。

図-5は、各年の氷河面積の時系列変化と近似式をまとめた図である。図より1999年から2009年の氷河面積が毎年変動を繰り返していることが読み取れる。特に雪氷面積の多い年は、2000年、2002年、2004年である。これらの年の気象状況を検証すると、寒波もしくは大雪が記録されている¹⁰⁾。よって乾季であるものの積雪による影響が認められている可能性が高い。全体的な傾向として、いずれの国とも、年々、氷河は減少傾向が認められていることが明らかにされた。これらの結果からも着実に気候システムの温暖化による兆候が認められている。氷河減少傾向を定式化した結果は図4に示すとおりである。式の係数より年当りの氷河消失量を見積もることができ、ペルーが $5.979 \text{ km}^2/\text{year}$ 、エクアドルが $0.3531 \text{ km}^2/\text{year}$ 、ボリビアが $4.1993 \text{ km}^2/\text{year}$ になることが推測される。また、この式から見積もられる氷河消失時期は、ペルーが2073年、エクアドルが2048年、ボリビアが2039年となる。これらの予測結果を統合すると、ペルーに関すれば、氷河融解速度が速いものの、氷河面積が大きいいため氷河の消失する期間が比較的に長くなることを示している。エク

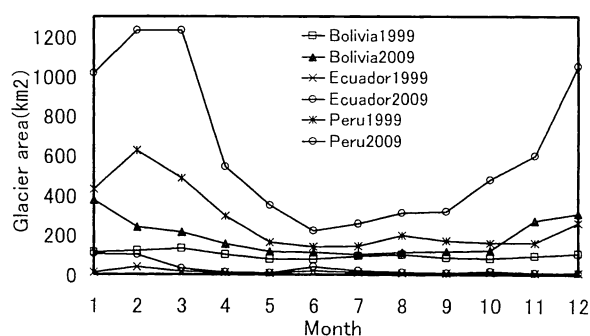


図-4 1999年と2009年の月毎の氷河面積の変動

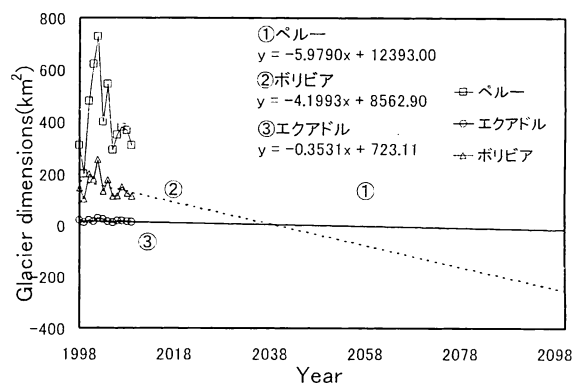


図-5 各年の氷河面積の時系列変化と近似式

アドルに関すれば、現況の氷河面積が小さいものの、氷河融解速度の遅さが示されている。ボリビアに関すれば、氷河融解速度が速く、氷河消失する期間が比較的に短くなるため、早期の水マネジメント実施が望まれる。ただし、これらの値は各国の平均的な目安を示すものであり、実際には微地形や土地被覆に由来する空間的な微気候の影響も含まれると解釈できる。

2) 水資源インパクト解析

氷河減少量に対して、各国の農畜産業に伴う食糧の平均的なウォーターフットプリントを除することにより、食糧に着目した氷河減少量のインパクト量を求めた。なお、氷河減少予測より最も氷河消失の早いボリビアを基準に2015年から2030年までの氷河減少量のインパクト量を見積もった。

図-6は、氷河のみを考慮した各国における食糧生産量の推移予測をまとめたものである。いずれも2015年を基準とする食畜産業に関わる生産量変化量を求めている。2020年には、ペルーで-8.7%、エクアドルで-15.2%、ボリビアで-20.7%の変化を示す。2025年には、ペルーで-17.3%、エクアドルで-30.4%、ボリビアで-41.4%の変化を示し、2030年には、ペルーで-26.0%、エクアドルで-45.6%、ボリビアで-62.2%の変化になることが明らかにされた。これらの解析結果に示されるとおり、すべての国で大幅に食畜産業の大幅な減少が見込まれる。特にボリビアの減少量は大きくなると推測され、氷河融解速度が速く、氷河消失する期間が短くなる影響が反映されている。地球温暖化によるインパクトが敏感に示されている。エクアドルに関すれば、氷河融解速度の遅いと思込まれているものの、食畜産業の大幅な減少が見込まれることが解析結果より明らかにされた。この結果は、ウォーターフットプリントを踏まえて作物生産の転換を検討すべくことを示唆している。

総じて、ボリビアに関しては、地球温暖化による水資源インパクト量が大きいと思込まれることから、水資源を確保するための抜本的な手法や、水量負荷の少ない作物、畜産に展開する等の早急の水マネジメントの確立が必要といえる。また、エクアドルに関しては、氷河減少量が遅くとも農畜産に対する影響度が高いと思込まれることから、水量負荷の少ない作物、畜産への転換が提案される。ペルーに関しては、氷河減少速度が速いものの氷河面積が大きく、2030年までは相対的に氷河によるインパクト量が小さく見積もられた。

5. まとめ

アンデス山脈に分布する熱帯氷河を対象に、近年の氷河減少傾向と将来の展望を求めた。また、アンデス山脈の主要産業である農畜産業に着目し、食糧生産に対する氷河減少のインパクト量の影響を明らかにした。その結果を以下に列挙する。

- ① 近年の傾向より、ペルーが $5.979\text{km}^2/\text{year}$ 、エクアドルが $0.3531\text{km}^2/\text{year}$ 、ボリビアが $4.1993\text{km}^2/\text{year}$ の氷河面積減少が見込まれることを明らかにした。

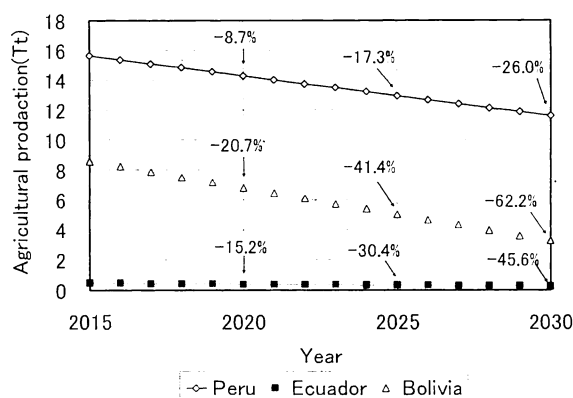


図-6 各国の氷河による食糧生産変化の予測

- ② 近年の氷河減少傾向を近似式で示すと氷河消失時期は、ペルーが2073年、エクアドルが2048年、ボリビアが2039年となることが明らかにされた。
- ③ 2015年基準より、2020年にペルーで-8.7%、エクアドルで-15.2%、ボリビアで-20.7%、2025年にペルーで-17.3%、エクアドルで-30.4%、ボリビアで-41.4%、2030年にペルーで-26.0%、エクアドルで-45.6%、ボリビアで-62.2%の農畜産業の食糧生産低下が変化になることが明らかにされた。
- ④ 本解析より、ボリビアに関しては、地球温暖化による水資源インパクト量が大きいと思込まれることから、水資源を確保するための抜本的な手法や、水量負荷の少ない作物、畜産に展開する等の早急の水マネジメントの確立が必要と評価される。
- ⑤ 本解析より、エクアドルに関しては、氷河減少量が遅くとも農畜産に対する影響度が高いと思込まれることから、水量負荷の少ない作物、畜産への転換が提案される。

謝辞：本研究は地球規模課題対応国際科学技術協力事業 (SATREPS)「氷河減少に対する水資源管理適応策モデルの開発（研究代表者：田中仁）」の支援を受けました。ここに謝辞を表す。

参考文献

- 1) 例えば沖 大幹、鼎 信次郎：地球表層の水循環・水収支と世界の淡水資源の現状および今世紀の展望，地学雑誌，Vol.116, No.1, pp.31-42, 2007.
- 2) 文部科学省，経済産業省，気象庁：環境省(2007) IPCC 第4次評価報告書統合報告書政策決定者向け要約，<http://www.env.go.jp/earth/ipcc/4th/interim-j.pdf>(Cited 2011/05/31).
- 3) Bernard Francou, Edson Ramirez, Bolivar Caceres, and Javier Mendoza : Glacier Evolution in the Tropical Andes during the Last Decades of the 20th Century, *A Journal of the Human Environment* Vol.29, Issue.7, pp.416-422, 2000.

- 4) Central Intelligence Agency : The world fact book ,
<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/> (Cited 2011/05/31).
- 5) Hoekstra,A.Y.and Chapagain,A.K. : Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources, Blackwell Publishing, Oxford, UK., 2008.
- 6) A.Y. Hoekstra : Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis. Ecological Economics, Vol. 68, Issue 7, pp. 1963-1974, 2009.
- 7) 斎藤篤思, 山崎剛 : 積雪のある森林域における分光反射特性と植生・積雪指標, 水文・水資源学会誌, Vol.12, No.1, pp.28-38, 1999.
- 8) 朝岡良浩, 小南裕志, 竹内由香里, 大丸裕武, 田中 信行 : 衛星観測に基づく積雪水量の広域推定と融雪係数の地域特性, 水文・水資源学会誌, Vol.20, No.6, pp.519-529, 2007.
- 9) Coudrain, A., Francou, B. and Kundzewicz, Z.W., Glacier shrinkage in the Andes and consequences for water resources – Editorial. Hydrological Sciences Journal, Vol.50, Issue.6, pp.925-932. 2005.
- 10) 気象庁 : 異常気象レポート 2005 ,
http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/climate_change/2005/pdf/2005_all.pdf(Cited 2011/05/31).