



Title	氷河変動とは何か : メカニズムと調査方法に関する復習
Author(s)	岩田, 修二
Description	平成25年度北海道大学低温科学研究所共同利用研究集会『氷河変動の地域性に関する地理的検討』. 2013年6月17日-18日. 北海道大学低温科学研究所, 札幌市.
Relation	朝日克彦編, 平成25年度北海道大学低温科学研究所共同利用研究集会『氷河変動の地域性に関する地理的検討』報告書. 北海道大学低温科学研究所, 2014, iii, 46p.
Citation	平成25年度北海道大学低温科学研究所共同利用研究集会『氷河変動の地域性に関する地理的検討』報告書, 1-6
Issue Date	2014-05
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/56263
Type	conference paper
File Information	1.iwata.pdf



氷河変動とは何か：メカニズムと調査方法に関する復習

Methods of glacier variation research: an review

岩田修二（東京都立大学名誉教授）

Shuji IWATA (Professor emeritus, Tokyo Metropolitan University)

キーワード：気候メーター，地球環境変動，野外調査技術，衛星観測

key words: Climate mater, Global change, Field techniques, Satellite observations

I はじめに

ここに記したのは、2013年6月17日（月）北海道大学低温科学研究所研究棟2F講義室で開催された低温科学研究所研究集会「氷河変動の地域性に関する地理的検討」でのべた講義風の解説を文章化したものである。なお図・表は文末においた。

1 氷河変動研究と地理学

氷河変動研究を始めたのは、雪氷学者ではなく地理学者である。氷河変動に関するほとんど最初のまとまった著作『氷河変化と気候変動』（Ahlmann, 1953）を岩田は学部4年生の冬（1970-71）、小疇尚先生に勧められて読んだ。そのまえがきには次のように書かれている。『氷河変化と気候変動』は、人文・自然地理学者、地形学者、気候学者、さらには歴史学者の発見の集積である。アールマン博士はストックホルム大学の地理学の教授であり、1948年から1951年まで国際水文学協会雪氷委員会（IUGG）の会長を務めた。現在、母国スウェーデンの駐ノルウェー大使を務めているアールマン博士は、この20年間、氷河変化と気候変動との関係の研究のリーダーである。多分野の協力—調査隊方式—と氷河収支のくわしい観測の開始が必要であるという彼の考えは氷河研究の全体の枠組みをかえた」（W.O. Field, Jr. による。岩田訳）。アールマンは、Geografiska Annalerの1巻1号全ページを費やしてノルウェー地誌を書いた地理学者である。アールマンに象徴されるように、氷河変動の研究は、科学諸分野にまたがるので、総合的におこなわねばならず、しかも、地域的個性を無視できない、きわめて地理学的な課題である。

2 氷河変動研究の問題点

氷河変動とは、氷河の末端変動であると思っていると人が少なくない。しかし、氷河変動とは氷河の量（大きさ・氷河質量）の変動であり、したがって、氷河質量の変化に影響す

る諸要素と、それらの変化のメカニズム、相互の関係の理解が重要である。気候変動から氷河末端変動との因果を示す模式図が1969年にPatersonの”Physics of Glacier”に掲載されて以来、多くの変形（バリエーション）ができています。しかし、細部のメカニズムには不明の点が多い。

氷河変動理解の意義（何のために氷河変動を調べるのか）にも注意する必要がある。氷河変動は気候変動理解のためと、思っていると人が多い。しかし、次の2点に注意すべきである。① 氷河変動と気候変動とは別ものである。しかし、気候変動をかなり正確に示す proxy（代替指標）になりうる。それには、どんな氷河が気候変動を反映するのかに注意すべきである。② 氷河変動そのものが地球環境変動の大きな要素である。つまり、氷河変動それ自身が、気候変動・海水面変動・水資源変動に影響を与える。

したがって、目的に応じた氷河変動の理解が必要である。

① 気候変動のための氷河変動理解のためには、気候変動を正確に反映する少数の氷河の把握で事足りる。しかし、② 地球環境変動のための氷河変動理解のためには別の観点が必要である。グローバルな海水面変動のためには、地球上の全氷河量の調査、とくに大規模氷河の大きさ（面積と厚さ）の変動の把握が重要である。これに対してローカルな水資源変動には、流域内のすべての氷河量の変化の把握が必要である。

II 氷河変動が示すもの

1 気候メーターとしての氷河

氷河変動と気候変動とは密接な関係があり、氷河変動から気候変動を知ることができるというのは古くから知られている。そこで氷河を気候メーターと呼ぶこともある。気候メーターのメカニズムをもっとも単純化すると

氷河気候変化→氷河質量収支→氷河形態変動

という関係がある。その核心をなすのが氷河質量収支である。

氷河質量は、氷河涵養量（プラス）と氷河消耗量（マイナ

ス) とのバランスで決まる。涵養域でプラスされる雪水量は氷河流動によって消耗域に移動し、消耗域でマイナスされる。つまり、プラスされマイナスされる雪水量は氷河流動による移動（通過量）と等しい。この関係（プラスとマイナスの出入り）が質量収支であり、これは観測可能である。しかし、質量収支の観測結果と気象観測結果とが一致するとは限らない。気象観測値・気候要素と質量収支との間には複雑な関係がある。

気候変化を氷河変動から把握するためには、気候変化に敏感な氷河に注目する必要がある。気候変化に敏感な氷河とは、上記の気候メーターのメカニズム：氷河気候変化→氷河質量収支→氷河形態変動の反応が早い氷河ということである。それは、スウェーデンのスト Stor 氷河のような、・小規模、・降雪によって涵養され、・岩屑のような被覆物がなく、・氷河末端が自然状態である氷河である。つまり末端が裸氷からなる小規模な谷氷河や圏谷（カール）氷河である。

逆に、長大な氷河、なだれなどで涵養される氷河、岩屑被覆氷河、地形的強制末端をもつ氷河、海面流入氷河などは気候変動を示す氷河ではない。

長年の氷河変動観測実績があるのにもかかわらず、氷河変動は気候変化を示すのかという疑問がでることがある。疑問点を列挙すると、① 気温変動と降水量変動のどちらを示すのか？ ② 氷河の個別的特徴（個性）による差異は？ ③ 質量変化を知る方法による違い（解像度の問題）は？ ④ モレーンは氷河変動を示すのか？ などである。

これらに対する経験的回答は、① 最近の細かな気候変動を反映するためには、気候変動をよく示す氷河をえらぶこと、② 気候と氷河との複雑な関係にもかかわらず、過去の気候変

化を知る手段としての氷河変動の研究は有効である、ということになる。

2 地球環境変動としての氷河変動

氷河変動そのものが地球環境変動の大きな要素ということが、20 世紀後半になってよく理解されるようになった。その基本は、① 氷河変動は気候変動によって発生するが、氷河変動も地球気候をコントロールする。たとえば、95 万年周期の氷期・間氷期サイクルは氷床拡大そのものにコントロールされている。② 氷河変動の結果が、大規模には海水面変動を生み、流域の水資源変動・環境変動を生む。

i 地球の氷河量変動と海水量変動

第四紀を通じて周期的に発生した氷期・間氷期サイクルにおける陸上氷河量変動は、世界の気候を変化させ、世界的な氷河性海水準変動を引き起こした。氷河変動が地球環境変化そのものであるとも言える。

ii 流域の水環境への影響

氷河変動はローカルな気候環境や水資源の環境を大きく変化させる。報告者は、カラコラム、パヌー氷河の後退によって放棄された集落の跡、そこに残された小麦を貯蔵した穴の跡を見たことがある。

III 氷河変動を知る方法

氷河変動の調査方法を表 1（岩田 2011）にしめす。これらを

1. 氷河質量の測定
2. 氷河全体の形態と大きさの測量（氷河の輪郭、氷河の表

表 1 氷河変動の調査方法

時代と対象	観測・調査方法
最近から将来の質量変動	質量収支観測（ステーク法など）
	氷河体積測定（測量・リモートセンシングなど）
	氷河平衡線観測
	氷河末端観測
過去の氷河末端位置	歴史記録（聴き取り・文献・絵画など）
	モレーンなどの氷河縁辺地形の分布
	氷河縁辺・氷河前面の堆積物の分布
	氷河侵食地形の新旧の境界（氷食基盤岩の風化度など）
過去の地球規模氷河量変化	IRD (ice rafted debris) 氷山起源岩屑の分布
	海洋底堆積物の酸素同位体比の変化

面高度測量など)

3. 部分的な形の変化の測定 (氷河縁辺・末端変動など)

4. 氷河平衡線: フィルン限界の変動観測

5. 海底掘削コア

の順に述べる.

1. 氷河質量の測定

氷河学の基礎になった伝統的な i. 氷河質量収支観測と, 最近始まった ii. 重力測定人工衛星による測定 (GRACE: Gravity Recovery and Climatic Experiment など) に分けて説明する.

i. 氷河の質量収支観測

i-i. ポールによる観測

氷河表面にセットした標識 (ポールや旗) の高さの変動を毎年観測する. 表面高度の変化がわかる. 標識の位置は三角測量で測定すると氷河流動量もわかる.

i-ii. GPS (Global Positioning System) による測量

1995 年以降は氷河の表面高度と位置の測量に, 人工衛星からの電波を受信して測量する GPS (全地球測位システム) が使われるようになった.

世界の氷河質量収支観測結果のデータは WGMS (世界氷河監視センター) から数年おきに刊行されている. ダウンロードが可能で, 最新のものは 2012 年 12 月に出た. それによると, 2005-2010 に質量収支が観測された氷河は世界で 87 にすぎない.

ii. 重力測定人工衛星による測定 (GRACE など)

GRACE (Gravity Recovery and Climatic Experiment) 衛星は, 地球スケールでの重力異常によって地球上の水 (氷) の変化, 地殻の変化などを知る目的で打ち上げられた. 2 機セットの衛星の相互の距離を精密に測定することで重力の分布を検知する. 極を通る軌道を採用しているので極地氷床の質量の検証に有効である.

南極での測定結果の例 (Chen et al., 2009) では, 2002 年 4 月~2009 年 1 月での南極氷床の質量は $190 \pm 77 \text{ Gt yr}^{-1}$ の減少であることが明らかにされた.

2. 氷河全体の形態と大きさの測量

次の i~iv に示したようなさまざまな方法がある. 順に述べる.

i 地上測量

地形図が再測されると氷河の形や大きさの変化がわかる. 小型の氷河では, 独自に測量して縮尺地図をつくる必要が

ある. 岩屑被覆氷河の複雑な形や氷河表面高度の変化 (1978-1995) を地上測量によって明らかにしたネパールクンブ氷河の例もある (Iwata et al., 2000).

ii 空中写真による地図化

異なる時期に撮影された空中写真から図化された地形図の比較は, 精度が高い氷河全体の大きさや形の変化の情報をもたらす. たとえば南極半島 James Ross 島の Whisky Glacier の 1979-2006 の変化の研究 (Engel et al., 2012) などがある.

iii 人工衛星情報からの数値標高モデル

2000 年代に入ると, 人工衛星からえられた数値標高モデル DEM による氷河表面高度の比較がおこなわれるようになった. たとえばネパールヒマラヤのクンブ地域の氷河の 1992-2008 の比較研究がある (Nuimura et al., 2012).

iv 人工衛星による表面高度測定

ICESat (アイスサット: Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite) はレーザー高度計 (ライダー LIDAR) を搭載して極地における氷床と海水の厚さの経年変化を計測し, 気候変動の将来予測に寄与する目的で打ち上げられた. 緯度 82 度以上の極点付近はカバーできないが, グリーンランドや南極の氷床の表面高度変化をくわしく把握することができる. Davies et al. (2005) によると, 1992 年-2003 年の南極氷床 (とくに東南極氷床沿岸部) は表面が上昇傾向にあり, 全体でも氷は増加傾向であることが明らかにされた. その後, Flament and Rémy (2012) は, 2002 年-2010 年には東南極氷床でも減少傾向に変化してきたと結論した.

3. 部分的な形の変化 (氷河縁辺・末端変動) の測定

1970 年代までは, 氷河変動というと, 氷河末端 (前面) や縁辺の位置の変化を指すことが多かった. 次のようなさまざまな方法がある.

i 現地での観察や実測

ニュージーランドのフランツ・ジョセフ氷河のように, 古くからの観察記録や末端位置の測定記録が残された氷河は, アルプスや北欧に少なくない.

ii 各種記録による復元

地図・空中写真・衛星画像・映像データ・文献・絵画・写真・証言などさまざまな記録媒体によって過去の氷河末端位置が復元されている. スイスの「小氷期」の氷河拡大の詳細は, グリンデルヴァルト氷河などの絵画と写真に残された記録によって明らかにされた.

iii 地形・地質学的情報

歴史時代より古い過去, あるいは人間による情報がない氷

河の縁辺の位置は、縁辺モレーンのような氷河堆積地形やティル (till 氷成堆積物) などの分布からわかる。しかし、地形や堆積物の時代を決めなければならない。さまざまな相対年代・数値年代・絶対年代を決める方法がある。その場合、末端・縁辺の平面位置によるか、側方モレーンの高度のような表面位置 (厚さ) によるかによって得られる結果が異なってくる。

4. 氷河平衡線=フィルン限界の高度変化 (上下変動) 観測

氷河の涵養域と消耗域の境である氷河平衡線 equilibrium line (EL) は氷河にとって重要な線である。その高度 (ELA) の変動は質量収支の変化を示しているとされている。平衡線は目には見えない線なので、現実にはフィルン限界 (firm limit 夏の終わりのフィルンの上限) で代用される。過去の空中写真などで、過去のフィルン限界を知ることができる。氷河消滅後の氷河平衡線の位置を地形などから推定する方法も多数考案されている。氷期など、過去の氷河平衡線の復元に利用されている。ネパールでの変動研究の実例には Asahi (2010) がある。

5. 海底掘削コア

i 酸素同位体変動

1960 年代から盛んになった深海底堆積物中の酸素同位対比 ($\delta^{18}\text{O}$) の変動は、陸上の全氷河量の変動である。これによって現在では、第三紀から現在までの氷期・間氷期の全地球の陸上氷量の変動 (氷床変動) がくわしく明らかになった。たとえばスタック LR04 は鮮新世の 3.5 Ma 以降の氷床変動をカバーする (Lisiecki and Raymo, 2005)。

ii IRD (ice-rafted debris 氷山岩屑) の分布

南極海や北極海・北大西洋の海底堆積物には氷山の流出・融解を示す氷山岩屑 IRD (ice-rafted debris) が含まれる。これに注目することで氷床の拡大、もしくは氷床の崩壊 (サージ) がわかる。北大西洋の最終氷期の氷山岩屑からハドソン湾氷床の周期的なサージが推定されている (Heinrich, 1988)。

VI 氷河変動に関するいくつかの問題

これまで氷河変動を把握する方法をいろいろ述べてきたが、最後に、これまで触れなかった氷河変動に関する問題をいくつか取り上げよう。それらはつぎの 1~3 である。

1 氷河末端の前進・停滞・後退の意味するもの

- 2 縁辺・末端モレーンは、氷河縁辺・末端位置を示すのか
- 3 今後の氷河末端調査のゆえ

1 氷河末端の前進・停滞・後退の意味するもの

老婆心ながら、氷河末端の前進・停滞・後退とはどういうことかについて、正確な理解を復習しよう。

① 氷河前進: 氷河が前進している状態とは、涵養域からの氷河流動によって、氷河前面 (末端) まで氷河 (氷体) が移動している状態である。その場合でも、氷河前面での氷河の消耗は起こっているから、氷河前面での氷河流動量が氷河消耗量より大きいということである。

② 氷河停滞: 氷河が停滞している状態とは、氷河前面 (末端) 位置が変わらないことである。氷河前面は常に (冬季を除いて) 消耗しているから、消耗による後退量を補うだけの氷河流動が必要である。つまり、停滞している状態とは、氷河前面での氷河流動量と氷河消耗量とが等しいということである。

③ 氷河後退: 氷河が後退している状態とは、氷河前面 (末端) で氷河水が停止、または流動量がきわめて小さいため、氷河の消耗によって氷河前面位置の後退が起こるのである。氷河前進とちがって氷体自体が動いて退いているのではないことはいうまでもない。氷河前面での氷河流動量が 0 の場合 (停滞氷河またはデッドアイス) には、氷河消耗量と氷河後退量とが等しくなる。

①②③を図 1 に示した。

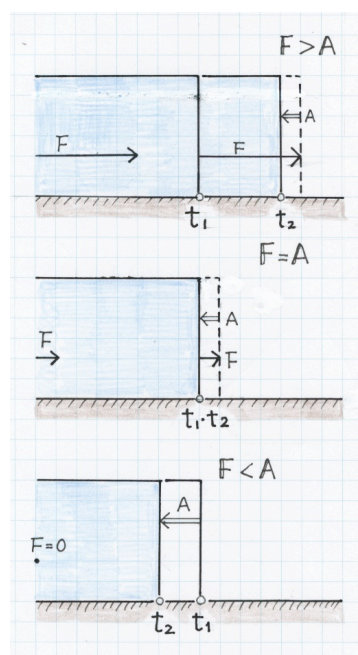


図 1 氷河末端変動の模式図。上: 前進状態, 中: 停滞状態, 下: 後退状態。F: 氷河流動量, A: 氷河消耗量, t_1 , t_2 は時間の経過, 岩田原図。

このような微妙なバランスによって氷河前面の動きは決まる。氷河が停滞しているときに、たとえば表面岩屑層が形成されることによって、氷河消耗が抑制されると氷河は前進をはじめ。天山山脈ウルプト氷河右岸側の円錐状氷河の末端の1983年と2003年の状態を比較すると、岩屑に覆われたことで右岸側の斜面氷河が前進した (Iwata et al., 2005)。

2 縁辺・末端モレーンは、氷河縁辺・末端位置を示すのか

雪氷学者から地形学者へしばしば投げかけられる質問がある。それは、「モレーンは、氷河縁辺が同じ場所に停滞しているときに形成される」という地形学の常識に対するものである。次のような疑問がだされる。

① 氷河末端変動は縁辺モレーンに反映されるのか？ 〈モレーンをつくらない氷河もある〉〈後の氷河前進で侵食・破壊されるモレーンもある〉。

② 定常的な氷河末端位置は、ほんとうに縁辺モレーンに反映されるのか？ 〈氷河が前進するときに形成されるモレーンもある〉。

これらの疑問に正面から答えられる地形学的研究はまだないといえるだろう。ただし、雪氷学者も、

③ 定常的な気候状態は、定常的な氷河状態（とくに縁辺位置の）をうむのか？

④ 平衡線高度変動は末端変動に反映するのか？
のような疑問に答えているとは言い難い。

このような状況であるにもかかわらず、たとえば、氷床コアから得られた気候変動や海底コアから得られた氷床変動と、モレーンから得られた氷河変動は（とくに氷河の後退期には）よく一致するという事実がある、と多くの地形学者は信じている。

3 今後の氷河末端調査のゆくえ

GEN（ネパールヒマラヤ氷河学術調査）がネパールヒマラヤの氷河変動調査をはじめてから、われわれの氷河変動調査はアジア内陸の氷河域に広がっている。しかしながら、氷河変動の調査結果を積み上げても、学会で評価されるような論文（修士論文や学位論文も）は書けないという事実には多くの研究者が気づいている。学術的に評価される論文にするためには、氷河変動だけではなく何らかの（気候や氷河や地形に関する新知見）を付け加えなければならない。

氷河変動の調査は、リモセン調査にしる、現地調査にしる、時間がかかる根気のいる仕事である。氷河を水資源に利用し

ている国々には、氷河変動調査は行政機関や研究機関のルーチンの業務であり、報告書として定期的に刊行される。氷河変動の調査は研究者がおこなうものか？ という疑問が生じる。

現在では、衛星画像を使って比較的容易に衛星画像にアクセスできる。精度に難があるとはいえ、地形図（たとえば旧ソ連の25万分の1地形図）やDEMも入手可能である。比較的大型の氷河の関しては、リモセンによって氷河末端変動の調査は比較的容易である。小型氷河の末端変動は、現地の調査に頼るほかないが、トレッキングによって接近できる地域の氷河末端位置の記録はとくに難しい技術を要しない。これからは、氷河変動の調査は、研究者の手を離れて、登山家（現地調査）や自然愛好家・地図愛好家（衛星画像利用）の活躍の場になるのではないだろうか。産業や疾病と関係あるものを除いて、昆虫の分布や生態の研究がアマチュアの手に移ったように。

それでは、氷河末端変動調査の結果をどのようにして学術的に価値ある論文に仕上げるのか。ここでは、Fujita and Nuimura (2011) の例を示そう。

まず、ネパールの、くわしい質量収支調査があるわずかな3氷河のデータと気象観測値を解析して、ELA変動を気温と降水量に読み替えるモデルを構築した。つぎにリモセン調査で得たアジア高山域の広域の末端変動を、先行研究も参考にして、ELA変動値に読み替えた。そして、先のモデルを用いて広域のELA値を広域地域の気温・降水量変動に読み替えた。結論として、氷河変動からアジア高山域の1988年～2007年の気温・降水量変動が明らかになった。つまり、分布氷河変動の分布を気温・降水量変動の分布に読み替えたことによって国際誌に掲載される論文になったのであった。このような細工というか科学的な装いが重要なのである。

引用文献

- Ahlmann, H.W:son 1953. "Glacier Variations and Climatic Fluctuations" New York, The American Geographical Society.
- Asahi, K. 2010. Equilibrium-line altitudes of the present and Last Glacial Maximum in the eastern Nepal Himalayas and their implications for SW monsoon climate. *Quaternary International*, **212**, 26-34
- Chen, J.L., Wilson, C.R., Blankenship, D. and Tapley, B.D. 2009. Accelerated Antarctic ice loss from satellite

- gravity measurements. *Nature Geoscience*, **2**, 859-862.
- Davis, C.H., Li Yonghong, McConnell, J.R., Frey, M.M., and Hanna, E. 2005. Snowfall-driven growth in East Antarctic Ice Sheet mitigates recent sea-level rise. *Science*, **308**, 1898–1901. DOI: 10.1126/science.1110662.
- Engel, Z., Nyvlt, D., and Laska, K. 2012. Ice thickness, areal and volumetric changes of Davies Dome and Whisky Glacier (James Ross Island, Antarctic Peninsula) in 1979-2006. *Journal of Glaciology*, **58**, 904-914.
- Flament, T. and Rémy, F. 2012. Dynamic thinning of Antarctic glaciers from along-track repeat radar altimetry. *Journal of Glaciology*, **211**, 830-840.
- Fujita, K. and Nuimura, T. 2011. Spatially heterogeneous wastage of Himalayan glaciers, *PNAS*, **108**, 14011-14.
- Heinrich, H. 1988. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years. *Quaternary Research*, **29**, 142-152.
- Iwata, S., Aoki, T., Kadota, T., Seko, K., and Yamaguchi, S. 2000. Morphological evolution of the debris cover on Khumbu Glacier, Nepal, between 1978 and 1995. in Nakawo, M., Raymond, C. F., and Fountain, A. (eds.): *Debris-Covered Glaciers* (Proceedings of a workshop held at Seattle, Washington, USA, September 2000). IAHS Publ. no. 246, 3-11.
- Iwata, S., Kuroda, S., and Kadar, K. 2005. Debris-mantle formation of Wrpote Glacier, the Tianshan Mountains, China. *Bulletin of Glaciological Research*, **22**, 99-107.
- Lisiecki, L. E. and Raymo, M. 2005. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, **20**, PA1003, doi:10.1029/2004PA001017.
- Nuimura, T., Fujita, K., Yamaguchi, S., and Sharma, R.R. 2012. Elevation changes of glaciers revealed by multitemporal digital elevation models calibrated by GPS survey in the Khumbu region, Nepal Himalaya, 1992-2008. *Journal of Glaciology*, **58**, 648-656.
- WGMS (世界氷河監視センター) : <http://www.wgms.ch/>