

解説・総説

氷河変動と海水準に関する最近の研究

藤田耕史¹⁾

要旨

地球温暖化のもっとも象徴的な話題ともいえる、氷河縮小と海水準変動について、関連する研究をインベントリー、観測、モデルなどのアプローチ別に紹介し、それぞれの研究の位置づけと問題点、今後の課題を提示する。

キーワード：海水準、氷河変動、インベントリー、質量収支、モデル

Key words: sea level, glacier fluctuation, inventory, mass balance, model

1. はじめに

「近年、地球温暖化に伴う氷河縮小と海水準（海面）上昇が問題となっている。」というフレーズは、おそらく多くの氷河変動を扱っている論文の書き出しで利用されているだろう。しかしながら、枕詞としてではなく実際に「氷河縮小と海水準変動」に取り組んでいる論文は意外に少ない。本稿では、Meier (1984) を嚆矢とするこの領域の研究について、それぞれの論文がどのようなアプローチ・手法で氷河と海水準を結びつけているかについて紹介するとともに、その問題点と今後の課題を提示する。なお、本稿では過去の再現と将来予測を含む百年程度の時間スケールを扱う。また、グリーンランドや南極の変動と海水準への影響に関する報告がごく最近の Science 誌上をにぎわしているが（例えば Ekstrom *et al.*, 2006; Monaghan *et al.*, 2006; Rignot and Kanagaratnam, 2006; Velicogna and Wahr, 2006），本稿ではこれらを除く「氷河・氷帽」に関する研究のみに絞って紹介する。

2. 氷河量の推定—どこにどれだけあるのか？

温暖化にともなう氷河縮小を量的に評価する場

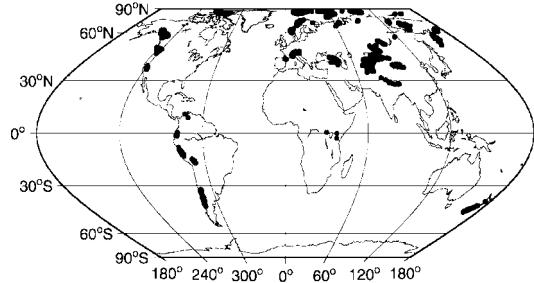


図 1 NSIDC の氷河インベントリーに登録されている 69480 の氷河の分布。

合、最も重要なのが「氷河がどこにどれだけ存在しているか？」という基本情報である。Haeberli *et al.* (1989) は、1988 年時点での世界の氷河インベントリー（台帳）をまとめており、本稿で紹介する多くの研究がこのインベントリーを元にしている。その後に追加・改訂された情報については、National Snow and Ice Data Center (NSIDC) のウェブサイトに公開されており (NSIDC, 1999)，現在 69480 の氷河が登録されている（図 1）。しかし、NSIDC の氷河インベントリーに登録されている全氷河は、後述する Meier and Bahr (1996) に対し、数にして約 40%，面積にして $34\% (182 \times 10^3 \text{ km}^2)$ と遠く及ばず、彼らが独自のデータベースを有していることは明らかである。その Meier and Bahr (1996) は、南極・グリーンランド氷床を除く氷河・氷帽の数を 160000，全面

1) 名古屋大学大学院環境学研究科

〒464-8601 名古屋市千種区不老町

名古屋大学地球水循環研究センター気付

積を $680 \times 10^3 \text{ km}^2$ としている。同じデータベースから Dyurgerov and Meier (1997b) によって地域ごとにまとめられた氷河面積を表 1 に示す。また, Dyurgerov and Meier (2005) は 2004 年のスナップショットと称し, 主に南極・グリーンランド氷床周辺の氷河について改訂された地域ごとの氷河面積を詳細な表にし, 他のデータベースとの比較を可能にしている。ただし, Meier and Bahr (1996), Dyurgerov and Meier (1997b; 2005) に含まれる氷床周辺の氷河は NSIDC のデータベースには含まれていない。また, 他の研究でも氷床周辺の氷河は含まれておらず, これらの氷河を除いた氷河面積は $540 \times 10^3 \text{ km}^2$ となる(表 2)。一方, Zuo and Oerlemans (1997) は 100 地域ごとに氷河面積を整理し, 全面積を $528 \times 10^3 \text{ km}^2$ としており, 後述する Oerlemans らによる一連のモデル研究に利用されている。Cogley (2003) は少し変わったまとめ方をしており, 氷河分布を緯度経度の 1° グリッドにしめる氷河占有率(ice coverage)として, 合計 885 グリッドについてのデータセットをウェブ上に公開している。Raper and Braithwaite (2005a) は, この Cogley (2003) のデータベースのうち, 氷帽に関する部分を Kotlyakov *et al.*

(1997) から読みとったデータを使って改訂し, $522 \times 10^3 \text{ km}^2$ という氷河面積を提示している(表 2)。

これらのデータベースは, 地域ないしグリッド毎の氷河面積を示しているが, 海水準変動との関連を議論するには体積の情報が必要となる。しかしながら, 氷河体積に関する観測データの蓄積はインベントリーとして示すにはほど遠い状況である。Meier and Bahr (1996) は, それまでに得られている観測データを Chen and Ohmura (1990)

表 2 Dyurgerov and Meier (2005a) がまとめた, これまでの研究による氷河面積と体積。Zuo and Oerlemans (1997) は著者が加えた。

文献	面積 ($\times 10^3 \text{ km}^2$)		体積 ($\times 10^3 \text{ km}^3$)
	氷床周辺の氷河 を除いた氷河	氷床周辺の氷河	
Meier and Bahr (1996)	540	140	-
Zuo and Oerlemans (1997)	528	-	-
Raper and Braithwaite (2005)	522	-	87
Dyurgerov and Meier (2005)	540 ± 30	245 ± 100	133 ± 20

表 1 Dyurgerov and Meier (1997b) がまとめた氷床以外の氷河の面積分布。最後の列のみ, 著者が付け加えた。

地域	面積 ($\times 10^3 \text{ km}^2$)	面積率 (%)	質量収支 (m w.e./yr)	寄与率 (%)
北極海の島々	244	35	-0.067	20
アラスカ	75	11	-0.101	9
アジア	119	18	-0.339	48
ヨーロッパ	18	3	-0.153	-3
アメリカ／カナダ	49	7	-0.323	19
グリーンランド・南極氷 床周辺の氷河	140	21	-0.046	8
南アメリカ／ニュージー ランド／亜南極地域の 島々	35	5	-	0
合計	680	100	-0.130	100

が提案した面積 (a) と体積 (v) の指数関係

$$v = ca^\gamma \quad (1)$$

を利用して整理し、氷河については $\gamma=1.36$ (144 の氷河) を、面積 200 km^2 以上の氷帽については $\gamma=1.22$ (明示されていないが、彼らの図から 23 の氷帽と読みとれる) を与えている。ただし、係数 c に関する情報は提供されていないが、氷河の図から読みとったところ、 $c=3.88$ であった。この指数関係のため、例えば同じ氷河面積 (100 km^2) を有する地域でも、小さな氷河がたくさんある場合 ($1 \text{ km}^2 \times 100$) と、一つの大きな氷河がある場合 ($100 \text{ km}^2 \times 1$) とでは、体積が大きく違ってくる ($\gamma=1.36$ の場合は後者が前者の 5.2 倍、 $\gamma=1.22$ の場合は後者が前者の 2.8 倍)。このように、式(1)を用いて氷河体積を算出するためには、氷河の規模毎の個数に関する情報が必要となってくる。Meier and Bahr (1996) は、氷河面積を 2^n km^2 で表現したときの n によって区分した氷河の規模別の個数分布を示し、最終的に氷床以外の氷河の体積を求めている(表 3)。彼らの表では、氷河と氷帽が区別して示されているものの、氷床周辺の氷河とそれ以外が分けて示されていないために、相互比較できないのが難点となっていた。その後、Dyurgerov and Meier (2005) でこの点は改善されている。NSIDC の氷河インベントリーに面積が記載されている 66291 の氷河について、個数および規模別の面積を集計したものを図 2 に示すが、Meier and Bahr (1996) で示されている図に似てはいるものの、その値はほぼ一桁少ない。

その後、式(1)の面積と体積の指数関係について、Bahr *et al.* (1997) が流動則から導かれる式によって検討をおこない、氷河の幅、傾斜、谷の形状(による側面ずり応力の影響)、質量収支の勾配の影響などが係数 γ に与える影響を検討している。また、Bahr (1997)において、同様の手法で氷河の長さと幅に関する考察を加えている。

Raper and Braithwaite (2005a) は、異なるアプローチから氷河面積と体積の問題に取り組んでいる。彼女らは Cogley (2003) のデータセットを元に、面積規模別の氷河が一つのセル内の氷河面積に占める割合を地域ごとに求め、氷河占有率の

表 3 Meier and Bahr (1996) による、氷河・氷帽の個数、面積、体積および海水準相当量。

	氷帽	氷河	合計
個数 ($\times 10^3$)	0.07	160	160
面積 ($\times 10^3 \text{ km}^2$)	240	430	680
体積 ($\times 10^3 \text{ km}^3$)	100	80	180
海水準相当量 (m)	0.27	0.24	0.50

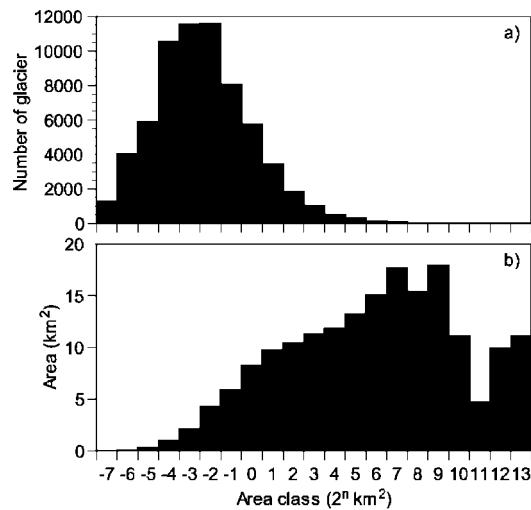


図 2 NSIDC の氷河インベントリーに登録されている氷河規模別の個数 (a) と面積 (b)。

傾きとして定義した。さらに、アメリカ地質調査所 (USGS) 発行の解像度 $30''$ のデジタル標高データ (GTOPO30) を利用して地形起伏の指標を求め、先の氷河占有率の傾向と関連づけていく。具体的には、一つのグリッドセル ($30'' \times 30'' \sim 1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$) に対し、隣接する 8 つのセルをあわせた 9 つのデータの標準偏差を求め、 1° グリッド (約 $120 \text{ km} \times 120 \text{ km}$) 内に含まれるセル (120×120) の平均を求める。この標準偏差の平均と地域の氷河占有率の傾きとがよい負の相関にあるとしている。たとえば、標準偏差が小さいことは起伏が小さいことを意味し、そのような地域 (スピッツベルゲンやノバヤゼムリナなど) では面積の大きな氷河が地域内の氷河面積に占める割合が大きく、氷河占有率の傾きは正となる(図 3)。一方、標準偏差が大きく、起伏の激しい地域 (アル

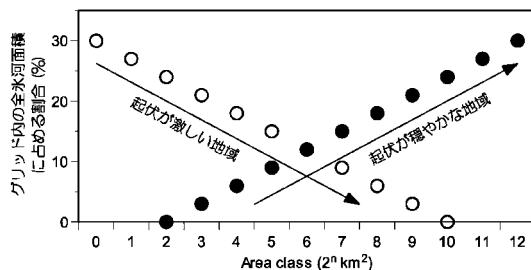


図 3 Raper and Braithwaite (2005a) による、氷河占有率の傾きに関する概念図。

表 4 Raper and Braithwaite (2005a) による、氷河・氷帽の個数、面積、体積および海水準相当量。

	氷帽	氷河	合計
個数 ($\times 10^3$)	0.116	209 ± 38	209 ± 38
面積 ($\times 10^3 \text{ km}^2$)	121	401	522
体積 ($\times 10^3 \text{ km}^3$)	52 ± 4	36 ± 8	87 ± 10
海水準相当量 (m)	0.142 ± 0.012	0.099 ± 0.023	0.241 ± 0.026

ス、コーカサス、ニュージーランド)では、たくさんある小さな氷河がその地域の氷河面積の多くを占めていることになり、氷河占有率の傾きは負となる(図3)。このようにして、地形起伏の指標を使ってグリッド毎に氷河を面積毎に割り振り、Meier and Bahr (1996)と同じ方法(式(1))で氷河の体積を求めていている(表4)。ここで氷河の個数が大きく変化しているのは、起伏指標と氷河占有率の傾きの関係式で使われる係数に幅を持たせているためである。Meier and Bahr (1996)が示した氷河体積のほぼ半分しかないのは、氷床周辺の氷河を含めていないことが原因と思われるが、氷床周辺の氷河を除いた値を示してあるDyurgerov and Meier (2005)と比べても、35%も少ない見積りとなっている(表2)。

このRaper and Braithwaite (2005a)のやり方に対し、Meier *et al.* (2005)は半年を置かずコメントを表明した(投稿自体は一月半後という素早さ)。あるまとまった氷河地域を扱うのではなく、1°グリッド毎という、気象要素のような扱いをしていることを問題にしており、特に、アラスカに見られるような1°グリッドを越える氷河(Malaspina氷河とBering氷河を例に挙げている)

が1°に分割されることによってその体積が過小評価されてしまうと指摘している。また、地形起伏の指標と氷河占有率の傾きの関係がたった7地域のデータで作られていることも大きな誤差をもたらす要因であるとしている。さらに、Cogley (2003)のデータセットには、グリーンランドや南極氷床周辺の低標高、多涵養な環境にあり、気温変化に敏感であるとされる氷河が含まれていないことも、全球的な現象である海水準上昇を扱うには不十分であるとのクレームをつけています。しかし、後者の指摘である氷床周辺の氷河については先にも述べたように、Haeberli *et al.* (1989)のインベントリーを始めとしてきちんとした形ではまとめられておらず、後述するOerlemansらの研究でも扱われていない。また、先にも触れたように、Meier and Bahr (1996)やDyurgerov and Meier (1997b)では氷床周辺の氷河を除いた分についての体積を分けて示しておらず、最新版であるDyurgerov and Meier (2005)でも規模別個数分布は明らかでない。このため、データベース間の数・面積・体積の不一致の原因がどこにあるのかがわからなくなっている、彼女らだけにこの問題を要求するのは少々酷といえよう。

このMeier *et al.* (2005)の指摘に対してRaper and Braithwaite (2005b)は、彼女らが計算で用いている ϕ パラメータの調整によって、この問題が解消できると主張している。パラメータ ϕ はグリッド内の最大の氷河(2^n km のnが12~13に相当)が1°に占める割合の下限を示している。いいかえると、「 $(1-\phi) \times \text{氷河全面積}$ 」が最大の氷河の面積となり、残りの氷河で「 $\phi \times \text{氷河全面積}$ 」を分け合っていることになる。1°グリッドに占める氷河面積の割合(Cogley, 2003)と氷河占有率の傾き(Raper and Braithwaite, 2005a)は決まっているので、 ϕ を変えると残りの(nが小さい)小さな氷河の面積分布が大きく影響を受け、ひいては体積分布にも影響が及ぶ。Raper and Braithwaite (2005a)では ϕ を0.25~0.5で変化させて分布の変化を論じていたが、Meier *et al.* (2005)の指摘を受け、0.15が知られている氷河の面積・体積分布をよく表現しているとしている。

3. 観測による変動量把握—どこがどれだけ融けているか？

現状を把握する上で必要なインベントリーの次に大事になってくるのは、氷河がどこでどのように変動しているかという観測データである。Dyurgerov and Meier (1997a) は 1961 年から 1990 年の期間中で、International Association of Hydrological Sciences (IAHS) 発行の Fluctuations of Glaciers や Glacier Mass Balance Bulletins をはじめとするデータベースや論文などで公開されている（氷床を除いた）氷河・氷帽の質量収支データを整理している。地球上の氷河・氷帽 160000 のうち、わずか一年でも質量収支が観測された氷河はわずかに 257 にとどまる。その後、Dyurgerov (2002) が追加情報が増え、計 286 の氷河のデータがウェブ上に公開されている（図 4）。Dyurgerov and Meier (1997a), Dyurgerov (2002) はこれらのデータについて、国、緯度経度、面積、観測年、平均の年間質量収支（氷河全体・全期間の平均）を表にまとめている。Dyurgerov (2002) を元に規模別および観測年数で整理した氷河数のヒストグラムから（図 5），1950 年代以降に 30 年以上の観測データがある氷河は約 40 しかなく、長期間測られている氷河が如何に少ないかがわかる。また彼らは、観測されている氷河の大きさには非常に偏りがあることを指摘しており、特に 30 年以上のデータがある氷河をその規模で整理すると、 2^{-3} km^2 以下、 2^7 から 2^9 km^2 、 2^{11} km^2 以上のサイズの氷河に観測データが全くないことになり、このクラスの氷河の面積が全氷河面積に占める割合は、実に 30% に達すると指摘している（図 5a）。同じ雑誌に続いて掲載されている Dyurgerov and Meier (1997b) では、この質量収支のデータセットを使い、1961 年から 1990 年の期間の氷河変動について検討している。全データの単純平均ないし長期データのある 37 氷河の単純平均の質量収支はいずれも全球平均気温の変動とよい相関 (0.90) を示している。一方、地域ごとの氷河面積によって重み付けをした平均収支を求め（表 1）、1961 年から 1990 年の 30 年間で -3.9 m 水当量の氷が世界の氷河から失われたとしている。これは年あたりの海水準上昇速度に換算すると 0.25 mm/yr になり、過去百年間の海水準上昇速度の 14 から 18% に相当

すると結論づけている。なお、ヨーロッパ地域の質量収支が正になっているのは、この地域の氷河の大部分を占めるスカンジナビア地方の氷河が 1961～1990 年の間に正の傾向にあったことに起因している。彼ら自身、測られている氷河がごくわずかであること、たとえ測られているとしても地域、規模に大きく偏りがあることなど、このデータセットを元に海水準への影響を算出するこ

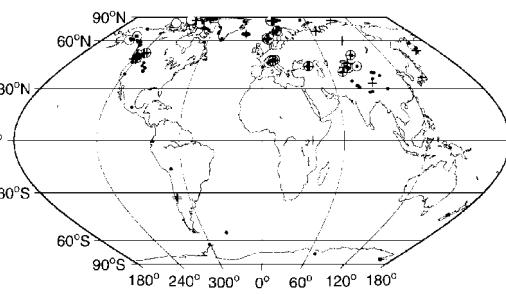


図 4 Dyurgerov and Meier (1997a) にまとめられ、Dyurgerov (2002) で改訂された、質量収支の観測データがある氷河の分布（観測期間 30 年以上：○、10～29 年：+、9 年以下：・）。

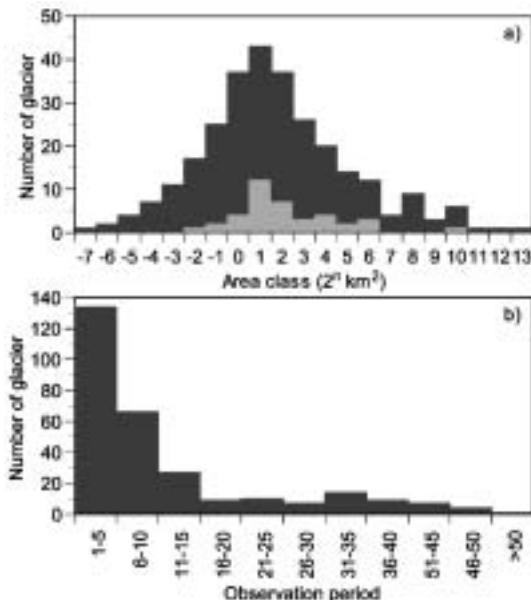


図 5 Dyurgerov and Meier (1997a) にまとめられ、Dyurgerov (2002) で改訂された、質量収支の観測データがある氷河の規模別（a）および観測期間別（b）の個数。30 年以上観測されている氷河を灰色で示す（a）。

とには問題があることを認めているが、それでも観測データを元に海水準への寄与を示した最初の論文であり、その意義は大きい。

一方、翌年出版された Cogley and Adams (1998) は、Dyurgerov and Meier (1997a; 1997b) と同じ質量収支のデータベースを利用しているにもかかわらず、氷河縮小は海水準上昇にほとんど影響していないという正反対ともいえる結論を主張している。彼らはこれまでのデータベースにある質量収支の観測結果は、内部涵養（表面で生じた融解水が氷体内部で再凍結すること）を考慮していないので過小評価（過大に融けすぎていると評価）していると指摘している。さらに、よく測られている規模の小さい氷河の方が、近年の収支が大きな負の傾向を示しているために、こちらも全体の収支を過小評価していると指摘し、これらの効果を補正することで上記の結論を導き出している。「影響がない」という結論はよほど魅力がないのか、2006年8月時点での Dyurgerov and Meier (1997a; 1997b) と Cogley and Adams (1998) の被引用回数を論文検索サイトの web of science, scopus, google scholar などで調べたところ、前者が2本併せて76~97回、後者が27~35回であった。以上が質量収支の観測データを統計解析した研究であるが、Dyurgerov による2回の改訂版を除くと (Dyurgerov, 2002; Dyurgerov and Meier, 2005)，観測に基づいて全球の氷河変動を評価したような研究は今までのところ見あたらない。これは、この3本の論文の筆者らが認めているように、限られた観測によって全球の氷河変動を見積もることに限界があるためであろう。

そんな中、全球規模ではないものの、リモートセンシングを利用した力業ともいえる研究が登場する。Arendt *et al.* (2002) は、レーザー高度計と航空機搭載 GPS のシステムを開発し、1993~96年にかけ、アラスカの67の氷河にて流線沿いの高度を計測した。線のデータとして得られる氷河表面の高度を、1950~70年代にアメリカ・カナダで作られた地図と比較し、各高度帯における表面低下量と面積をかけ、1950~70年代と1993~96年の氷河全体の平均面積で割ることで個々の氷河における低下量としている。さらに、観測データを元に各氷河における低下量の高度に対する曲線

を7地域ごとに決め、観測されていない氷河の標高別面積分布にかけてことで、全山域における平均表面低下量を求めている。その結果、1950/70年代から1993/96年にかけての低下量 (-0.7 m/yr) がこれまでの質量収支の観測結果 (-0.1 m/yr) よりも遙かに大きいことを示した。さらに1999年に28の氷河について再測をおこない、1993/96年から1999年にかけての低下速度が加速していること (-1.8 m/yr) を示した。どちらの期間においても、全体積変化の75%はカービング氷河ないしサージ氷河などの「ダイナミックな氷河」の変化によってもたらされており、気候変動がそのまま氷河変動に反映されているわけではないことを指摘しており、氷河の質量変化を明らかにするためには流動過程を考慮する必要があると主張している。

上記のアラスカにおける報告の一年後、Rignot *et al.* (2003) は2000年のスペースシャトルのミッションによって作成されたデジタル標高データ (SRTM) (Rabus *et al.*, 2003; Gesch *et al.*, 2006) と1950/60年代に作られた非公開の地図からおこしたデジタル標高データを比較することにより、パタゴニア氷原における氷河低下量を明らかにした。涵養域は過去の地図の精度が悪いため、下流域で得られた標高に対する表面低下のプロファイルを三次曲線で近似し、最高点で低下量が0となるように涵養域に外挿することで氷原全体の氷損失量 (-1.0 m/yr) を求めている。涵養域における低下量と末端後退に伴う損失量の寄与を比較し、低下量の影響が大きいと結論づけているが、広大な涵養域における表面低下量の推定方法はこれらの結果を大きく変える可能性があると思われる。パタゴニアでも、氷損失に大きく寄与しているのは流動過程の関与がある「ダイナミックな氷河」であると指摘している。上記2つの論文は、それまでにおこなわれていた「個々の氷河の低下量を山域全体に適用する」手法ではなく、山域全体の変化量を示した点で重要である。また、表1に見られる質量収支の傾向を大きく塗り替えていく点にも注目したい。氷河を対象としたリモートセンシングを利用した研究としては、Global Land Ice Measurement from Space (GLIMS) が、ASTER や Landsat7 などの高解像度の衛星

データを利用し、現代の氷河インベントリーを作成するべく活発に活動を続けており、氷河面積に関する精度が向上することが期待される (Kargel *et al.*, 2005). しかしながら、「量」の変化を求める上で重要な高さ方向の精度については、ASTER のデジタル標高データといえども十分ではなく (標高の公称誤差は 15 m), 氷河を対象とする検証はほとんどおこなわれていない。なお、デジタル標高データ (SRTM) については数例の検証研究がある (Rignot *et al.* 2003; Berthier *et al.*, 2006). 一方、レーザー高度計を搭載した ICESat は鉛直方向の誤差が数 cm という凄まじさだが (Schutz *et al.*, 2005), 水平方向の分解能が 100 km × 100 km と、南極・グリーンランドの氷床やパタゴニアやアラスカなどの氷原以外への適用は難しいと思われる。

4. 質量収支モデルと氷河の気候感度—氷河をどう融かすか?

このように、近年リモートセンシングによる広域観測の可能性が高まりつつあるとはいえ、高度方向の計測誤差の問題と、比較の元になる地図が不確かな地域が多いこともあり、前述のような研究は未だ限られた地域 (アラスカ・パタゴニア) でしかおこなわれていない。現地観測においてはさらに限られた氷河についてのみおこなわれており、ある一つの氷河の観測データをそのまま「地域の代表値」として当てはめることは統計的に無理があることは明らかである。このため、「全球の見積もり」については数値モデルを利用した研究が多くなされている。

この分野の研究は Meier (1984) をもって嚆矢とする。彼は 1900 年から 1960 年の観測データがある 13 地域 25 氷河について、60 年間の縮小傾向と質量収支振幅を関連づけた。質量収支振幅とは、一般に涵養として認識されている「冬収支」と消耗として認識されている「夏収支」の絶対値の平均として定義され、年間の氷河の質量交換の度合いを示す指標といえる。氷河が定常状態であれば、収支振幅は年間降雪量に等しくなる。この収支振幅と縮小傾向の関係を、世界の 31 地域で得られた収支振幅に適用し、海水準上昇への寄与を求めた。さらに 1880 年から 100 年間の変動に

ついて、記録のある 3 つの氷河の平均を基本の変動パターンとし、面積で重み付けした縮小量をかけることで海水量の変動とした。この変化を過去に得られている海水準変化から熱膨張分を差し引いた海水増加量と比べ、南極やグリーンランド氷床の変化を考慮せずとも、山岳氷河や氷帽の縮小によって過去百年間の海水増加が説明できることを示した。わずか 13 地域、25 の氷河という非常に偏ったデータには基づいているものの、収支振幅が大きければ近年の縮小量も大きいという関係を作り上げることで、測られていない地域の氷河を予測するアイデアはモデルのあり方としては非常に示唆に富むものであり、以後続くモデルを利用した研究は、様々な改良を重ねているとはいえばそのアイデアを踏襲している。

Meier (1984) が観測データを元に縮小傾向と収支振幅を関連づけたのに対し、Oerlemans and Fortuin (1992) は熱・質量収支モデルを元に、気温が 1°C 升温した際に減少する収支を気候感度と定義した。熱・質量収支モデルが気象データと質量収支によって検証されている世界の 13 の氷河についてそれぞれ気候感度を求め、気候感度が年降水量の関数として表現できることを示した。つまり、ある地域の降水量がわかれば、その地域の氷河が 1°C の温暖化に対してどれだけ縮小するかがわかることになる (計算では平地の降水を 1.25 倍したものを山手の降水としている)。この方法で各地の氷河の気候感度を求め、1900 年から 1961 年にかけての全球の升温傾向 (0.35 K を採用している) と各地の氷河面積をかけることで、氷河縮小量を、さらに海水準相当量を求めている。続いて Zuo and Oerlemans (1997) は、同様の手法で 100 地域における氷河の気候感度と 34 地域において推定した升温傾向を利用し (図 6), 1865 年から 1990 年までの全球の氷河縮小量および海水準相当量を求めている。彼らのモデルの改良点は夏期と夏期以外の升温に対する気候感度をそれぞれ求めているところである。夏期の升温は直接的に氷河融解量の増加をもたらすが、夏期以外の季節の升温が氷河に影響するかどうかは、降水量によって変わってくる。つまり、降水量の多い地域の氷河は流動によって暖かい低い標高まで氷河が降りてきているため、夏期以外でも融解が生じ

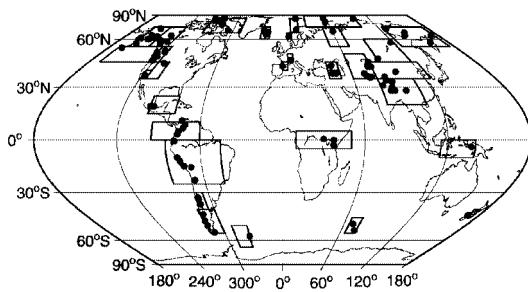


図 6 Zuo and Oerlemans (1997) の Appendix に整理されている、氷河のある 100 地域 (●) と気象要素の算出に利用した 34 領域 (□)。

ており、昇温は相当量の融解増加をもたらすが、降水量が少ない地域の氷河では夏期以外に氷河が融解することではなく、夏期以外の季節の昇温はほとんど影響しない。また、季節別の気候感度を求めてることで、20世紀における実際の昇温が季節的、地域的に偏っていることを考慮して氷河縮小を求めることが可能となる。翌年、Gregory and Oerlemans (1998) は、大気大循環モデル (GCM) の気温出力を上記 Zuo and Oerlemans (1997) の季節別モデルに入力し、予測される「一様でない温暖化」に対する各地の氷河の応答と、海水準上昇への影響を見積もっている。

以上の研究は、氷河縮小を扱っているにもかかわらず、実際には氷河の規模が縮小する効果を考慮していない。このため、モデルの中で 10 年、20 年と氷河縮小が進行した場合、本来氷が失われたところからも水が出てくるというおかしな状態になる。この矛盾を解消するために、Van de Wal and Wild (2001) は氷河の規模別分布 (Bahr *et al.* 1997) を考慮し、以下の式によって氷河を縮小させる効果を取り込んだ。

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{m_n} \left\{ A \left(\Delta T_s \frac{dB_P}{dT_s} + \Delta T_{ns} \frac{dB_P}{dT_{ns}} + \Delta P \right) \right\} \quad (2)$$

この式はこれまでに紹介した Oerlemans らによる一連の研究で使われているモデルの最新版といえるもので、ある年における世界の氷河の体積変化 (dV/dt) を地域ごと (n)、氷河のサイズ毎 (m) に計算する。その際、夏 (s) と夏以外 (ns) の季節それぞれの昇温 (ΔT : ここでは GCM の出

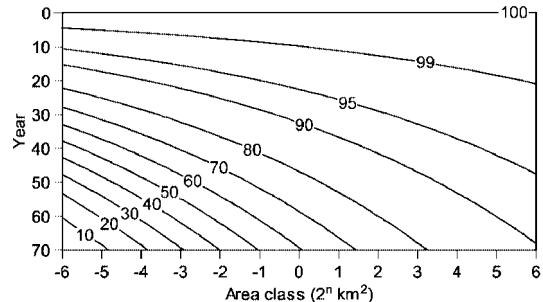


図 7 Oerlemans and Fortuin (1992) と Van de Wal and Wild (2001) のモデルを用いて著者が試算した、温暖化 (+0.02K/yr) に対する氷河規模別の応答。初期 (0 年目) の氷河面積を 100% とし、初期状態に対する面積割合 (%) で示してある。

力を使っている) に対するそれぞれの気候感度 (dB_P/dT) を考慮して氷河の変化量を求め、氷河面積にかけている。さらに、氷河の体積と面積との関係式 (式 (1)) を用い、変化した氷河体積から翌年の氷河面積を求め、次の時間ステップで式 (2) の面積 (A) を変化させ、この繰り返し計算によって氷河縮小に伴ってそのサイズが小さくなっていく効果を表現している。この効果を視覚的に示すため、ある一定の気候感度 (-0.05 m/yr) と昇温傾向 ($+0.02 \text{ K/yr}$) に対する氷河の面積変化 ($c = 1.35$, $\gamma = 3.88$) を試算し図 7 に示した。規模の小さい氷河ほど面積縮小が速く進行する一方で、規模の大きな氷河はほとんど応答せず、元の面積から変化していないことがわかる (ただし、失われた面積は大きいことに注意)。式 (1) における係数 c は調整のために使われており、彼らのインベントリー (Zuo and Oerlemans, 1997) の氷河面積から推定される体積が Meier and Bahr (1996) の氷河全体積 (表 3) に等しくなるように設定している。ところが、Zuo and Oerlemans (1997) のインベントリーには氷床周辺の氷河が含まれていないにも関わらず (図 6)，それらを含んだ見積もりである Meier and Bahr (1996) の値に合わせているという矛盾を Raper and Braithwaite (2006) に指摘されている。Van de Wal and Wild (2001) の計算のためには氷河の規模別の個数が地域ごとに既知である必要があるが、Haeberli *et al.* (1989) でこの規模別分布が報告されているのは、Zuo and Oerlemans (1997) のインベントリー 100 地

域に対して 41 地域のみで、氷河面積にして 38% しかない。そこで、未知の地域の氷河規模別個数分布は既知の地域における平均的分布を与えてい る。氷河の気候感度については先にも述べたよう に、Zuo and Oerlemans (1997) や Gregory and Oerlemans (1998) と同じモデルを用いているが、氷河の気候感度は年降水量に依存するため (dB_P/dT の P)、大気大循環モデル (GCM) で得られた降水量の変動 (ΔP) を気候感度を求める式にフィードバックさせて氷河を融かしている (Gregory and Oerlemans (1998) では降水量は現状のままとしていた)。具体的には、GCM で得られる降水量の値そのものは信頼性に欠けるため、GCM で得られる地域ごとの現在気候の降水量に対する予測年の降水量の比に観測データをかけている。以上のように氷河規模の縮小を考慮した結果、これまでの面積を変化させない場合の結果よりも 16% ほど海水準への影響が少ないとい う結果となった。こうして、体積変化を面積にフィードバックすることで氷河縮小の効果を取り込み、「氷が失われたところからは水は出てこない」というより現実的な表現が可能となっ た。しかし、実際の氷河は平衡線が氷河の領域内にある限り、新しい平衡線（とその質量収支分布）で安定して存在できる「定常状態」に向かって落ち着いていくが、彼らのモデルでは、ある昇温状態を与え続ける限り、氷河は融け続けることになる。

この点を考慮したのが最新の研究となる Raper and Braithwaite (2006) で、菱形の氷河を仮定した氷河変動モデルを利用することで、氷河が縮小して新たな気候状態に落ち着くに従い縮小速度が鈍る効果を考慮している。この変動モデルの元となっ ている Raper et al. (2000) でも、面積(A)と体積(V)の関係は式(1)に基づき、

$$(V_t/V_R) = (A_t/A_R)^q \quad (3)$$

としている。彼女らはさらに、幾何的な形の氷河を想定し、幅 (W) と長さ (L) の関係を Bahr (1997) による以下の式

$$\begin{aligned} (W_t/W_R) &= (L_t/L_R)^q \\ (A_t/A_R) &= (L_t/L_R)^{1+q} \end{aligned} \quad (4)$$

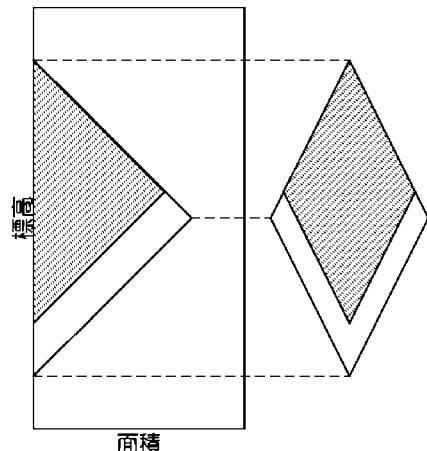


図 8 Raper et al. (2000), Raper and Braithwaite (2006) による氷河変動モデルの概念図。氷河の相似形を維持したまま、末端標高が変化するこ とで面積とその高度分布を変化させている。

で表した。 t はある年の状態を示し、 R は基準となる年を意味する (Raper et al. (2000) では $R=1990$ 年)。 q は氷河の形に依存する係数である。彼女らは Van de Wal and Wild (2001) と同様に、質量収支モデルにて体積の変化を求め、上記の式で面積にフィードバックさせている。ここでポイントとなるのが、氷河の長さ（最高点は変化させず、末端位置を動かす）を変化させ、さらには高度別の面積分布にフィードバックしていること で、このことにより新たな気候に対して平衡状態となる質量収支と氷河の規模を求めることが可能となる (図 8)。彼女らは、図 8 のような菱形だけでなく、平行や三角形 (\triangle/∇) など、氷河の形状に対する感度実験もおこなっている。Oerlemans らのモデルが氷河全体を一つのものとして気候感度などを扱っているのに対し、彼女らのモデルは、より現実的な氷河の応答を再現できるメリットがある反面、標高毎の面積分布という、より複雑な情報が必要になってくる。この点については、Raper and Braithwaite (2005a) で提案した、地形データ (GTOPO30) から求めた地形の起伏度と氷河の面積占有率の関係をつかい、高い標高から氷河を分布させていると述べているが、初期条件として必要な氷河の最低・最高点をどのように設定したかという、肝心の氷河の高度分布のさせ

方に関する記述は曖昧である。なお、氷河質量収支については、デグリーデイ法 (Braithwaite and Raper, 2002) から求めた涵養域と消耗域の収支勾配を降水量と夏気温の回帰式で表現している。彼女らはこの「変動モデル」を GTOPO30 による氷河の規模別分布を初期値とし、GCM の結果を使って氷河を縮小させ、これまでの見積よりも海水準上昇への寄与は少ないと見積もっている。ただ、彼女らのまとめた氷河体積 (Raper and Braithwaite, 2005a) がそもそも Meier and Bahr (1996) や Dyurgerov and Meier (2005) による見積よりも 50~65% となっていることから、氷河が落ち着く効果がどの程度この結果に効いているのかは疑問であるが、この点については詳しくは論じられていない。また、彼女らは使用したデグリーデイ法のモデルの妥当性を、氷河感度がアラスカとパタゴニアで大きくでたことで、Arendt *et al.* (2002) や Rignot *et al.* (2003) らの観測結果によって裏付けられているとしているが、先にも述べたように、両方の地域とも、大きな表面低下をもたらしているのは流動の影響を強く受けている氷河であり、気温上昇とは無関係な振る舞いをしていることから、モデルの妥当性の根拠とすることには問題がある。とはいえ、平衡線が氷河の領域内にある限りは、新しい定常状態に向かって落ちしていくという氷河本来の振る舞いを取り込んでいる点は（その効果のほどはともかく）多いに評価できる。

数値モデルを用いて氷河縮小の海水準への寄与を評価する研究は、以上のOerlemans らと Raper and Braithwaite によるものしかない。GCM による将来の温暖化予測の研究が盛んに行われ、かつ温暖化の影響として誰もが海水準上昇を真っ先にあげる昨今にあっても、ある。GCM の相互比較プロジェクト (AMIP) のように、同じ初期条件、同じ昇温を与えてモデルの感度比較をおこなうなどの研究があつてもよいと思うのだが、2 グループしか取り組んでいない現状では難しいようである。

5. 終わりに—今後の課題

ここまで、氷河変動と海水準上昇に関する研究について俯瞰してきたが、実際にこのテーマに関

わっている研究者は GCM 研究者などに比べると実に少ない。特に、新規参入者にとっての大きな障壁となっているのが不完全な氷河インベントリーであろう。現時点で最も多くの情報を把握しているのはコロラド大学 Institute of Arctic and Alpine Research (INSTAAR) の Dyurgerov と Meier と思われるが、Cogley や Raper らのデータベースとの不一致がどこに起因しているのかについての詳細な検討と、各地域の規模別氷河の個数および体積換算のための係数などの情報公開が期待される。モデル研究の中で触れたように、より現実に近い氷河変動を考慮するためには、前述の面積別氷河の個数分布とともに高度別面積分布の情報も必要となってくる。記述が曖昧なため、Raper and Braithwaite (2006) が具体的にどのように氷河面積を高度別に割り振っていたのかは不明だが、今後の氷河インベントリーに高度別面積分布についての情報が加わっていくことが期待される。SRTM や ASTER-DEM などの衛星デジタル標高データは、氷河の高度変化を求めるにはその精度は不十分であるが、現状の高度別面積分布を把握するためには有効であると思われる。膨大なデータ処理のための人的資源とデータ整理に関する仕組みを構築することが課題であろう。

インベントリーの問題とは別に、チベット高原を中心とするアジア高山域における氷河の情報がきわめて限られていることは、海水準の推定において大きな不確定要因となっている。近年の中国における活発な氷河研究は、アイスコア掘削にとどまらず衛星データを利用した氷河変動の検出などにも及んでおり、ごく最近 GLIMS に登録された氷河個数のほとんどが中国によるものであり、今後もその貢献が期待される。一方で、中国以外のチベット高原を取り巻く周辺国における氷河研究は、お世辞にも活発とは言えない。これは、ソ連崩壊に伴う中央アジア諸国における氷河モニタリング体制の崩壊と中央アジア諸国のみならずパキスタン、インド、ネパールなどにおける政情不安定が原因であると思われる。質量収支のモニタリングという、研究とは異なるモチベーションを要する仕事にどのように資金と人材を導くかが大きな課題といえよう。また、アラスカやパタゴニアでおこなわれたような「山塊全体における氷河

縮小量」を求めるような研究が、このアジア高山域でも期待されるが、政情不安定な国々でどのように航空機観測をおこなうか、主にインド測量局がオリジナルを握っている1950年代の地図にどのようにアクセスするかなど、政治力を試されるような障壁がある。

観測データのない地域の氷河縮小を推定するために、モデル研究では、氷河の「融け方」を経験式(Meier, 1984)、熱収支モデル(Oerlemans and Fortuin, 1992)、デグリーデイモデル(Braithwaite and Raper, 2002)によって求め、年降水量の関数として表現している。定常状態を考えれば、降水量が多ければそれだけ多くの雪を融かす必要があるために、氷河はより暖かい環境に存在することになる。そのため、同じだけ温暖化が生じた場合、元々暖かい(多降水な)ところほど全期間を通して正の気温となる状態が長く続くことになり、このことが氷河の気候感度が降水量に依存することの根拠となっている。一方で、モンスーンの影響によって夏季に降水が集中するアジア高山域では、氷河の気候感度が欧米の氷河よりも敏感であるとの指摘がなされている(Fujita and Ageta, 2000)。また、このような夏雪型の気候では、Van de Wal and Wild (2001)のように降水の変化分(ΔP)がそのまま氷河質量収支の変化(ΔB)につながらないことは明らかである。このことは、夏の降水が仮に全て雨であった場合、降水がどう変化しても質量収支には影響しないことを考えればわかりやすい。しかし、モデルの章で紹介したように、全球の推定をおこなうような研究に降水の季節性が氷河に及ぼす影響を考慮した例はなく、今後強くアピールしていく必要がある。近年の日本人研究者による氷河観測は、アジア地域をはじめとして世界各地でおこなわれているが、グローバルな課題である「海水準」に切り込んだ研究は残念ながら見あたらない。先に挙げた山脈全体を把握するような観測も重要だが、これまでの観測によって得ている独特な知見を元に新たなアイデアを発信していくことが必要である。

では今後、どのような方針でモデル研究を進めればよいだろうか?これまで見てきたとおり、氷河縮小に伴う効果(失われたところからは水は出てこない)

についてはVan de Wal and Wild (2001)によるスキームがあるので、Raper and Braithwaite (2006)で提案されている氷河が新たな気候状態に向かって安定していく効果をどのように表現するかが今後の課題といえる。彼女らは独自の方法で氷河面積の高度分布を決めており、インベントリーの高度化(文字通り、高度別の面積分布が付加されること)によって予測精度が向上することが望まれる。しかし、この作業は相当な人的資源と時間を要すると思われるため、すでにあるインベントリーを利用しつつ氷河の安定化を表現できるような新たなアイデアが期待される。また、これまで見てきたモデルには、氷河を氷河たらしめている「流動」の効果がいっさい含まれていない(Van de Wal and Wild (2001)は流動モデルとの比較を三つの氷河についておこなっている)。これは氷河流動を計算するために必要な氷河の厚さ分布をすべての氷河について測定することが不可能であることと、そのような状況で、「よく考慮された流動モデル」を介在させても、全氷河に適用した際に生じる誤差があまりにも大きすぎるために現実的でないことによる(Oerlemans et al., 1998; Van de Wal and Wild, 2001)。その一方で、アラスカやパタゴニアからの報告が示すとおり、海水準変動に大きく寄与しているのは実のところ流動の影響を強く受けているカービング氷河やサージ氷河である。モデル研究と現実との間のこの矛盾をどのように解消するかが今後の課題といえる。流動現象を得意とする研究者による、「現実的だがシンプルな」新たな変動モデルの提案を期待したい。

文 献

- Arendt, A.A., Echelmeyer, K.A., Harrison, W.D., Lingle, C.S. and Valentine, V.B., 2002: Rapid wastage of Alaska glaciers and their contribution to rising sea level. *Science*, **297**, 382–386.
- Bahr, D.B., 1997: Width and length scaling of glaciers. *J. Glaciol.*, **43**, 557–562.
- Bahr, D.B., Meier, M.F. and Peckham, S.D., 1997: The physical basis of glacier volume-area scaling. *J. Geophys. Res.*, **102**, 20355–20362, doi: 10.1029/97JB01696.
- Berthier, E., Arnaud, Y., Vincent, C. and Remy, F.,

- 2006: Biases of SRTM in high-mountain areas: Implications for the monitoring of glacier volume changes. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L08502, doi: 10.1029/2006GL025862.
- Braithwaite, R.J. and Raper, S.C.B., 2002: Glaciers and their contribution to sea level change. *Phys. Chem. Earth*, **27**, 1445–1454.
- Chen, J. and Ohumra, A., 1990: Estimation of alpine glacier water resources and their change since the 1870s. *IAHS Publ.*, **193**, 127–135.
- Cogley, J.G., 2003: GGHYDRO: Global hydrographic data, release 2.3, Trent Tech. Note 2003-1, Dep. Of Geogr., Trent Univ., Peterborough, Ontario, Canada.
- Cogley, J.G. and Adams, W.P., 1998: Mass balance of glaciers other than the ice sheets. *J. Glaciol.*, **44**, 315–325.
- Dyurgerov, M.B., 2002: Glacier mass balance and regime: Data of measurements and analysis. IN-STAAR Occasional Paper No. **55**, Boulder, Colorado, 268 pp.
- Dyurgerov, M.B. and Meier, M.F., 1997a: Mass balance of mountain and subpolar glaciers: A new global assessment for 1961–1990. *Arct. Alp. Res.*, **29**, 379–391.
- Dyurgerov, M.B. and Meier, M.F., 1997b: Year-to-year fluctuations of global mass balance of small glaciers and their contribution to sea-level changes. *Arct. Alp. Res.*, **29**, 392–402.
- Dyurgerov, M.B. and Meier, M.F., 2005: Glaciers and the changing earth system: A 2004 snapshot. IN-STAAR Occasional Paper No. **58**, Boulder, Colorado, 117 pp.
- Ekstrom, G., Nettles, M. and Tsai, V.C., 2006: Seasonality and increasing frequency of Greenland glacial earthquakes. *Science*, **311**, 1756–1758.
- Fujita, K. and Ageta, Y., 2000: Effect of summer accumulation on glacier mass balance on the Tibetan Plateau revealed by mass-balance model. *J. Glaciol.*, **46**, 244–252.
- Gesch, D., Farr, T., Slater, J., Muller, J. P. and Cook, S., 2006: New products from the Shuttle Radar Topography Mission. *Eos Trans. AGU*, **87**, 174. doi: 10.1029/2006EO180003.
- Gregory, J.M. and Oerlemans, J., 1998: Simulated future sea-level rise due to glacier melt based on regionally and seasonally resolved temperature changes. *Nature*, **391**, 474–476.
- Haeberli, W., Bösch, H., Scherler, K., Østrem, G. and Wallén, C.C., 1989: World glacier inventory. Status 1988. International Association of Hydrological Sciences, Paris, 290 pp.
- Kargel, J.S., Abrams, M.J., Bishop, M.P., Bush, A., Hamilton, G., Jiskoot, H., Kääb, A., Kieffer, H.H., Lee, E.M., Paul, F., Rau, F., Raup, B., Shrader, J.F., Soltesz, D., Stainforth, D., Stearns, L. and Wessels, R., 2005: Multispectral imaging contributions to global land ice measurements from space. *Remote Sens. Environ.*, **99**, 187–219. doi: 10.1016/j.rse.2005.07.004
- Kotlyakov, V.M., et al., 1997: World Atlas of Snow and Ice Resources. Inst. Geogr., Russ. Acad. Sci., Moscow, 392 pp.
- Meier, M.F., 1984: Contribution of small glaciers to global sea level. *Science*, **226**, 1418–1421.
- Meier, M.F. and Bahr, D.B., 1996: Counting glaciers: Use of scaling methods to estimate the number and size distribution of the glaciers of the world, in *Glaciers, Ice Sheets and Volcanoes: A Tribute to Mark F. Meier*, edited by S.C. Colbeck, Special Report, **96–27**, Cold Reg. Res. Eng. Lab., Hanover, New Hampshire, 89–94.
- Meier M.F., Bahr, D.B., Dyurgerov, M.B. and Pfeffer, W.T., 2005: Comment on “The potential for sea level rise: New estimates from glacier and ice cap area and volume distribution” by S.C.B. Raper and R.J. Braithwaite. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L17501, doi: 10.1029/2005GL023319.
- Monaghan, A.J., Bromwich, D.H., Fogt, R.L., Wang, S. H., Mayewski, P.A., Dixon, D.A., Ekaykin, A., Frezzotti, M., Goodwin, I., Isaksson, E., Kaspari, S.D., Morgan, V.I., Oerter, H., Van Ommen, T.D., Van der Veen, C.J. and Wen, J., 2006: Insignificant change in Antarctic snowfall since the international geophysical year. *Science*, **313**, 827–831.
- National Snow and Ice Data Center (NSIDC), 1999: World glacier inventory, Boulder, Colorado.
- Oerlemans, J., Anderson, B., Hubbard, A., Huybrechts, P., Johannesson, T., Knap, W.H., Schmeits, M., Stroeven, A.P., Van de Wal, R.S.W., Wallinga, J. and Zuo, Z., 1998: Modelling the response of glaciers to climate warming. *Clim. Dyn.*, **14**, 267–274.
- Oerlemans, J. and Fortuin, J.P.F., 1992: Sensitivity of glaciers and small ice caps to greenhouse warming. *Science*, **258**, 115–117.
- Rabus, B., Eineder, M., Roth, A. and Bamler, R. 2003: The shuttle radar topography mission- a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *Photogramm. Remote Sens.*, **57**, 241–262.

- Raper, S.C.B. and Braithwaite, R.J., 2005a: The potential for sea level rise: New estimates from glacier and ice cap area and volume distributions. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L05502, doi: 10.1029/2004GL021981.
- Raper, S.C.B. and Braithwaite, R.J., 2005b: Reply to comment by M.F. Meier *et al.* on "The potential for sea level rise: New estimates from glacier and ice cap area and volume distributions", *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L17502, doi: 10.1029/2005GL023460.
- Raper, S.C.B. and Braithwaite, R.J., 2006: Low sea level rise projections from mountain glaciers and icecaps under global warming. *Nature*, **439**, 311–313, doi: 10.1038/nature04448.
- Raper, S.C.B., Brown, O. and Braithwaite, R.J., 2000: A geometric glacier model for sea-level change calculations. *J. Glaciol.*, **46**, 357–368.
- Rignot, E. and Kanagaratnam, P., 2006: Changes in the velocity structure of the Greenland ice sheet. *Science*, **311**, 986–990.
- Rignot, E., Rivera, A. and Casassa, G., 2003: Contribution of the Patagonia icefields of South America to sea level rise. *Science*, **302**, 434–437.
- Schutz, B.E., Zwally, H.J., Shuman, C.A., Hancock, D. and DiMarzio, J.P. 2005: Overview of the ICESat Mission. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L21S01, doi: 10.1029/2005GL024009.
- Van de Wal, R.S.W. and Wild, M., 2001: Modeling the response of glaciers to climate change by applying volume-area scaling in combination with a high resolution GCM. *Clim. Dyn.*, **18**, 359–366.
- Velicogna, I. and Wahr, J., 2006: Measurements of time-variable gravity show mass loss in Antarctica. *Science*, **311**, 1754–1756.
- Zuo, J. and Oerlemans, J., 1997: Contribution of glacier melt to sea-level rise since AD 1865: a regionally differentiated calculation. *Clim. Dyn.*, **13**, 835–845.

関連するウェブサイト

Cogley (2003) のデータベース

<http://www.trentu.ca/geography/glaciology/glaciolgy.htm>

Dyurgerov らのレポート

http://instaar.colorado.edu/other/occ_papers.html

GTOPO30

<http://edc.usgs.gov/products/elevation/gtopo30/gtopo30.html>

NSIDC のデータベース

http://nsidc.org/data/glacier_inventory/SRTM

<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

Recent studies on fluctuations of glaciers and sea-level

Koji FUJITA¹⁾

1) Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University,
Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601

(2006年8月17日受付, 2006年9月23日改稿受付, 2006年9月26日再改稿受付, 2006年9月28日受理)