観測時代の氷河・氷床の質量収支と 気候変化について

大 村 纂*

Mass Balance of Glaciers and Ice Sheets during the Observational Period and Climate Change

Atsumu OHMURA*

Abstract

Glacier mass balance and secular changes in mountain glaciers and ice caps are evaluated from the annual net balance of 161 glaciers from 17 glacierized regions of the world. Further, the annual net balance is split into winter and summer balances for 35 glaciers of 11 glacierized regions. The global means are calculated by weighting glacier and regional surface areas. The area-weighted global mean net balance for the period 1960 to 2000 is $-250 \text{ mma}^{-1} \text{ w.e.}$ ($-138 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1} \text{ w.e.}$), with seasonal components of $1470 \text{ mma}^{-1} \text{ w.e.}$ ($810 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1} \text{ w.e.}$) for winter and $-1725 \text{ mma}^{-1} \text{ w.e.}$ ($-950 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1} \text{ w.e.}$) for summer balances. The linear-fitted global net balance is accelerating at a rate of -11 mma^{-2} . The main driving force behind this change is the summer balance with a rate of -12 mma^{-2} . The decadal balance, however, shows significant fluctuations: melt reached its peak around 1945, followed by a decrease. The annual net balance, although negative for the global mean, approached equilibrium from the 1960s to 1980s. Some regions experienced a period of positive balance during this time, for example, Europe. The balance has become strongly negative since the early 1990s. These decadal changes correspond to periods of global dimming (for smaller melt) and global brightening (for larger melt). The total radiation at the surface changed as a result of an imbalance between steadily increasing greenhouse gases and fluctuating aerosol emissions.

The mass balance of the Greenland ice sheet and the surrounding smaller glaciers is negative at -74 mma^{-1} with an accumulation of $297 \text{ mma}^{-1} \text{ w.e.}$ ($519 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1} \text{ w.e.}$), melt ablation $-169 \text{ mma}^{-1} \text{ w.e.}$ ($-296 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1} \text{ w.e.}$), calving ablation $-181 \text{ mma}^{-1} \text{ w.e.}$ ($-316 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1} \text{ w.e.}$) and the bottom melt $-21 \text{ mma}^{-1} \text{ w.e.}$ ($-35 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1} \text{ w.e.}$). At present, it is difficult to detect any statistically significant trends for these components. The total mass balance of the Antarctic ice sheet is considered to be too premature to evaluate.

The estimated sea-level contributions in the 20th Century are 3.7 cm by mountain glaciers and ice caps, 3.5 cm by Greenland, 2 cm by ocean thermal expansion. The difference of 8 cm between these components and the estimated value with tide-gage networks (17 cm) must be caused by the mass balance of Antarctica and other sources that were not considered in the present work, for example, the melt of permafrost.

Key words : glacier, ice sheet, mass balance, climate change, radiation

キーワード : 氷河, 氷床, 質量収支, 気候変化, 放射

* スイス国立工科大学大気気候研究室

* Institute for Atmospheric and Climate Research, Swiss Federal Institute of Technology (E.T.H.), Zurich, Switzerland

I. 序 論

氷河に関する科学的な考察がはじめて記載されて200年余になる(Kuhn, 1787)。氷河の形成と変化は降雪を主とする涵養と融雪融水(極地ではさらにCalvingが加わる)を主とする消耗の上に成り立つ質量収支の結果である。したがって気候と氷河の間にはきわめて密接な関係があり、この問題が定量的に論じはじめられてから1世紀がたとうとしている(Mercanton, 1915)。そして質量収支とそれを決める過程の研究が全球にわたって行われるに至ったのは国際地球観測年(IGY, 1957～1958)以後であり、わずか半世紀の観測結果と理論計算の経験しか持ち合わせていない。しかし、20世紀後半の半世紀は気候変化と氷河変動のきわめて顕著でまた特異な期間でもあり、両者間の関係を学ぶのに適した期間でもあった。本論文の目的はまず全球で氷河の現状をつかみ、さらに、われわれが現在もちあわせている質量収支の観測結果をもとに観測時代の氷河質量変化を明らかにすることである。そして本論文では気候変化との関係を踏まえて氷河質量収支変動の原因を解明すると同時にその海水準への影響を推定する。

II. 世界の氷河の現状

現在、地球上にある氷河の総面積は1,616万 km^2 、その全容積は2,843万 km^3 と推定されている(Ohmura, 2004; 藤井, 2005)。現時点での氷河の分布を表1に掲げる。グリーンランドと南極大陸以外の氷河容積は世界氷河台帳の情報を使いChen and Ohmura (1990)の方法で計算された結果である。氷河の全球総面積はロシア連邦の国土面積にほぼ匹敵し、容積は海面を67 m上昇させうる。氷河は地球上に存在する最大の淡水貯水池といえる。便宜上、氷河に覆われている地域を南極大陸、グリーンランド、そしてその他の地域としよう。ここでいうその他の地域に存在する氷河は南極大陸とグリーンランド以外に存在するすべての氷河を意味し、地理学的地域では23地域、個々の氷河数では約20万(面積0.01

km^2 以上のもの)ほどにのぼり、ほとんどは山岳氷河と小規模な氷冠である。この第3の範疇に属する山岳氷河および氷冠は面積では全球氷河の3.5%、容積で0.3%ときわめて小さい。しかし、小規模の氷河ほど気候の変化に敏速に反応するため、現在進行中の急速な温暖化のもとでは重要な役目を果たすと考えられる。これらの氷河は高度が低いものでは北極海および南極大陸周辺の島嶼でみられるようにその末端が海面に達しているものから、最も高所にみられるものはアタカマ砂漠の東方のアンデス山脈で標高6,000 mを越す所に末端をもつものまでである。南極大陸とグリーンランドのほかの23地域にある氷河の面積および体積を図1に示す。南極大陸とグリーンランド以外で最も多くの氷河が存在するのはカナダの北極諸島であり、面積、容積ともに28%を占める。北米大陸がそれに次ぎ25%を占めている。したがって、山岳氷河と氷冠の半分以上は北米に存在するといつてよい。なお、北極カナダに現存する数多くの氷冠は比較的低地に存在するものが多くローレnciaイド氷床の生き残りともみられている。バフィン島西部にあるバーンズ氷冠のようにかなり広い涵養域を有してまさにミニ氷床のような振る舞いをみせているものもあるが、多くは消耗域のみからなる特異な氷河であり、明らかに過去の寒冷期の名残である。このような氷冠は将来の温暖化を待たずに消滅する運命にあるものと予想される。これら山岳氷河と氷冠は以前思われていたほど厚くなく、平均の厚さ(全容積/表面積)が200 mに達していないことがわかった(Ohmura, 2009b)。平均の深さが180 mで全容積約10万 km^3 ということは海水準に換算して26 cmである。こうした事実がわかるようになったのはレーダーによる探査の結果である。レーダーが氷河に応用される以前の深度測定はもっぱら地震探査か手間のかかるボーリングによる直接測定であり、どうしても深くなりがちな中央線に沿って行われる傾向があった。また、面積の広い涵養域で測定されることはきわめてまれであった。レーダーによってはじめて氷舌の横断面の形状が正確に把握できるようになっただけでなく、

表 1 世界各地の氷河の面積，体積，平均深度および氷河台帳の完成度（南極は藤井, 2005 による）.

Table 1 Glacier area, ice volume, mean thickness and World Glacier Inventory completion rate (Antarctica is due to Fujii, 2005).

Region	Surface area 10 ³ km ²	Ice volume 10 ³ km ³	Mean Thickness m	WGI completion rate in %
Greenland	1,748	2,931	1677	NA
Iceland	11.2	3.65	326	100
Scandinavia	3.1	0.167	53.9	100
Alps	3.1	0.146	47.1	100
Pyrenees and Cordillera Cantabrica	0.011	10⁻⁴		100
Jan Mayen	0.116	10 ⁻²	25	0
Svalbard	33.7	7.66	227.3	100
Zemlya Frantsa Yosifa	13.759	1.907	138.6	100
Novaya Zemlya	23.645	11.133	470.8	100
Severnaya Zemlya & Ostrov Ushakova	19.366	6.603	341	100
Ostrava de Longa, Novosibirskiye Ostrova	0.081	0.007	86.4	100
Ostrov Vrangelya	0.004	0.000033	8.3	100
Caucasus	1.39	0.066	47.5	100
Severniiy Ural	0.018	0.00037	20.6	100
Ex-SU in Asia	23.855	4.217	176.8	100
Canadian Arctic Islands	151.758	27.56906	181.8	17.3
North America (continental, excl. Alaska)	49.609	4.5825	92.3	21.3
Alaska	74.722	20.45017	273.6	16.4
Mexico	0.011			0
Afganistan, Iran, Turkey	4.044	0.14569	36	11.7
India, Pakistan	40	3.07622	76.9	4.7
Bhutan, Nepal	7.34	0.74046	100.9	40.7
China	59.425	5.6	94.2	100
Indonesia	0.007			0
Africa	0.011	10⁻⁴		0
New Zealand	1.158	0.062	53.5	100
South America	25.855	1.9432	75.2	17.9
Sub-Antarctic islands	7	1.2	171.4	0
Antarctica	13,860	25,400	1,833	NA
Total	16,158	28,432	1,760	
of which outside Antarctica & Greenland	550.241	100.926	183	

Bold figures are based on completed WGI, while regular figures are due to partially done WGI.

比較的浅いが面積の大きな涵養域が広範囲にわたって多くの氷河で探査されるようになったのである。氷河の深さ（容積）を正確に把握することは、今後の氷河存続，消滅を予測するためのみならず氷河の海水準への影響を正確に理解するために最も重要なことである。

III. 氷河質量収支の観測とデータ

1) 質量収支測定方法と誤差

氷河の質量収支を最も正確に把握するには、氷河の表面において出入りする質量束を直接測定することが重要である。頻繁に使われる方法は、氷河の表面に垂直に固定した杭に対する氷河表面の

図 1 地域別氷河面積、容積および平均の深さ。表 1 に掲げた 28 地域のうちアラスカ、北米、メキシコおよびインド、パキスタン、ブータン、ネパールおよびコーカサス、アフガニスタン、イラン、トルコはそれぞれ一地域としてグルーピングされている。それぞれの地域の氷河の総面積は円柱の底面の面積に、容積は円柱の容積に、氷河の深さは円柱の高さに比例して表現されている。

Fig. 1 Regional surface area, volume, and mean depth of glaciers. Of 28 glacierized regions, the following regions are categorized each into one group: Alaska, North America, and Mexico; India, Pakistan, Bhutan, and Nepal; Caucasus, Afghanistan, Iran, and Turkey. The base and height of the column are scaled proportional to the area and mean depth of the glaciers, hence the column volume indicates the total regional ice volume.

位置変化から単位面積についての質量の増減を決める方法であり、Stake Method と呼ばれている。この方法の精度は設定される杭の密度に依存するが、中緯度および高緯度の谷氷河の場合 1 km^2 に 1 本くらいが望ましい。測定の時期は涵養期の終わりと消耗期の終わりであり、後者の測定時はできれば水文収支年の終わりである秋、9 月の末（南半球では 3 月末）にあわせるよう努力されるが、実際には天候やロジスティックスの都合に支配され多少の変動は致し方ない。測定誤差は冬季の降雪と地吹雪の堆積の場所による不均一さに最も大きく影響されるが、熟練した測定であれば、±水柱 5 cm には収まろう。チューリッヒにある世界氷河モニターサービス（World Glacier Monitoring Service）に現在報告されてくる質量収支のデータはほとんどこの方法による。Stake Method は精度は高いが、大変手間がかかるため大きな氷河になると、1 時期を期するべき短時間

内（長くて 1 週間）の測定が難しくなる。

こうした場合には、Hydrological Balance Method が用いられる。これは対象の氷河を含む分水界全体の水文収支の貯蔵項を除いた全項を測定し、収支の未決算としてでてくる貯蔵項を質量収支として仮定するものである。そのため、流出量測定の施設など多額の投資が必要であり、その割には Stake Method に比べて誤差が大きく ±10 cm は覚悟せねばならない。アルプス最大のアレッチ氷河はクラリーデンフィルン（1914/15 年）について世界で 2 番目に長い観測歴（1922/23 年）をもつが、この方法で行われてきている。表面積 82 km^2 、全長 25 km もあり、Stake Method は事実上不可能であるから致し方ない。

第 3 の方法として測地学的方法というのがある。これはある期間で隔てられた 2 時点における氷河全体の高度を比べることにより求まる相対体積変化から氷河全体の質量収支を計算する方法

である。2 時点の比較に必要な時間的間隔は高度測定 of 誤差と年質量収支の比に比例するが、ヨーロッパの氷河では 5 ～ 10 年の間隔がとられる。現在では衛星に搭載されている高度計も使えるようになった。しかし測地学的方法の原理から自明のごとく、この方法は氷河全体を扱わないと意味をなさない。それは氷河上の 1 点ないし 1 部分の高度変化はそこでの質量収支に氷河の流動の垂直成分が加わった量であり両者の分離が難しいからである。この方法は氷河の全表面を積分することによって流動垂直成分が消去され質量束が残る性質を利用するものである。このようなきわめて基本的なことをここで繰り返すのは、とくにリモートセンシングの専門家の間ではこのことがいまだに理解されておらず、後に述べるようにグリーンランドや南極氷床の 1 部 1 地域の標高差を即質量収支とする論文が昨今乱造されているためである。

質量収支の正確な把握は理想的には、上記の 3 方法が同時に併用されることである。しかしこれは限られた手段で研究を進めなければならない現状では困難であり、世界で唯一 3 つの方法を併用して 30 年以上測定が継続されているのは、オーストリアにあるフェルナグトフェルナーのみである。

2) 質量収支観測データの現状

質量収支は氷河の大きさを決める最も重要な要素である。したがって、その観測は氷河の長さや面積の測定などに比べて本質的な意味をもつ。しかし、質量収支の測定は長さや面積などの観測と比べて、桁違いの時間、労力、経験、資金が必要である。このため本論文に使用されたデータは World Glacier Monitoring Service に保存されているもののほか、長年それぞれの氷河の観測を続けている研究者から直にいただいたものである。現在、世界中で 1 ～ 2 年というごく短期の測定を含めて質量収支が測られたのは 400 程の氷河である。氷河の現気候下における特性としての平均質量収支を得るには少なくとも 5 年から 10 年の観測が必要であるが、この条件に合う氷河は 161 である。さらに年質量収支の永年変化をみる

には最低で 30 年の観測は必要であり、これに合う氷河は全世界で 50 強しかない。また氷河の質量収支変化と気候の関係を理解するには年収支だけでは不可能である。それは、年収支は冬季収支と夏季収支の和であり、冬季収支と夏季収支の観測時期はおおの、年涵養量と年消耗量をできるだけ近似できるように設定されている。年涵養量は多くの場合、冬季の降雪量で決まる。夏季消耗量はほとんど年融雪融水量で決まる（ただし、数は少ないが赤道地域、乾燥地域の高山、南極ドライヴァレーの氷河はこの傾向から外れる）。降雪と融雪はまったく異なった過程であり、両者の和を理解するにはそれぞれの過程の結果である冬と夏の収支が必要となる。現時点において冬季収支と夏季収支が 30 年以上にわたって連続観測されている氷河は 35 存在する。

これら 35 の氷河は北半球だけに存在するため、地理的に非常に不均一な分布を示す。もう 1 つ重要なバイアスがある。質量収支の測定対象とされる氷河はどちらかというと涵養量の少ない氷河である。とくに冬季収支が計られる氷河では、積雪の大きさが障害となり事実上長期にわたる測定活動を維持することは難しい。現在連続観測されている 35 の氷河のうち、冬季収支が水柱 3,000 mm を超える氷河はカナダのセンチネル氷河、ノルウェー西岸に面するアルフォトブレンとエンガブレンの 3 氷河に過ぎない。水柱 3,000 mm の積雪というとフィールドでの状態では 7 ～ 8 m の厚さになる。こんなに深いピットを短時間で少なくとも数カ所掘って雪の密度を計り、作業の後にはピットを埋めてまた元どおりにすることは困難であろう。また多雪域は概して雪崩の危険が多い所でもある。したがって、こうした地域での質量収支の測定にはリモートセンシングが最も適している。

IV. 山岳氷河および氷冠の年質量収支の永年変化

1) 年質量収支の変動

まず短期の測定を含めて、比較的質の高いデータがある 161 の氷河の年質量収支を世界の 17 の

図 2 世界の 17 地域の過去 45 年にわたる年質量収支。これらの地域は北極カナダ、北米西海岸、アラスカ、スヴァールバル、スカンディナヴィア、アイスランド、アルプス、パミール、ウラル山脈、セヴェルナヤゼムリ、コーカサス、カムチャッカ半島、アルタイ山地、天山山脈/ズンガリア山地、アフリカ、ヒマラヤ山脈、アンデス山脈である。太線は地域の面積でウェイトを掛けた世界平均を示す（口絵 2-図 1 参照; 大村, 2010）。

Fig. 2 Annual mean net balance over 45 years for the following 17 regions: Arctic Canada, North American Cordillera, Alaska, Svalbard, Scandinavia, Iceland, Alps, Pamir, Urals, Severnaya Zemlya, Caucasus, Kamchatka, Altaishan, Tienshan/Dzungaria, Africa, the Himalayas, and the Andes. The bold line indicates the area-weighted global mean (see to Pictorial 2-Fig. 1; Ohmura, 2010).

氷河地域に分けて図 2 に示す。重要な特徴は、比較的大きな地域別の年々の変化に重ねて、全地域が驚くほど類似した永年傾向を示していることにある。この 17 の氷河地域の氷河面積のウェイトを掛けた世界平均をみると 1950 年代の終わり頃から 60 年代のはじめの頃は年 500 mm 程の負の収支である。これより以前の状況は後ほどデータの豊富なヨーロッパの氷河で検討しよう。その後 1980 年代の後半までの 25 年間負ではあるが絶対値の比較的小さな、したがって平衡状態に近い期間がある。この間の平均収支は -215 mm である。その後、1990 年代に入ってから大きく

な負の収支に転じ、しかも負の傾向は加速されており、2000 年以降は年 -500 mm を超す大きな負の収支になっている。この間の事情を正確を期するために 5 年ごとの平均値にして表 2 に掲げる。このように過去の 45 年間は概して負の収支であった。負の収支のうちにも顕著な変動がありその変動範囲はおおよそ年 800 mm である。

このように 1960 ~ 2000 年代に至る比較的小さい期間に、氷河質量収支の世界平均値はほぼ均衡に近い収支から、現在の大きな負の収支に移行している。それでは 1960 年以前はどうであったのだろう。この問いに対して答えうるのは観測歴の

表 2 1960 年以降の特定氷河における 5 年ごとの質量収支の変動。図 2 に掲げた 17 の氷河地域 161 氷河の面積のウェイトを掛けた世界平均。1961 年以後の 5 年ごとの平均値。単位は水柱 mm。

Table 2 Area-weighted global mean mass balance of 161 glaciers from 17 glacier-covered regions arranged for pentade means. Unit is mm w.e.

Pentade period	Annual mass balance
1960/61-1964/65	-131
1965/66-1969/70	-132
1970/71-1974/75	-140
1975/76-1979/80	-247
1980/81-1984/85	-232
1985/86-1989/90	-332
1990/91-1994/95	-317
1995/96-1999/00	-426
2000/01-2004/05	-444

長いヨーロッパの氷河においてのみである。アルプスにある 19 の氷河とピレネーの 1 氷河の年平均収支とその経年変化を図 3 に掲げる。1960 年以前には 1948 年を中心になんて顕著な負の収支の期間があった。図 2 に示した 1950 年代末～60 年代初頭の大きな負の収支世界平均はやはり偶然ではなく、この大きな負の時期の終わりに近い所を捉えていたのである。1965 年から 70 年まではほぼ均衡状態の 5 年間がある。その後 1980 年まで、10 年間、収支が正に転じた期間があった。この期間にはヨーロッパでは 60% 以上の氷河が前進する。1980 年代のはじめ以降現在までは急速に負に転じている。正の頂点から負の谷底までの変動範囲は大きく、何と年 1300 mm に達する。アルプスとピレネーにおける氷河の質量収支は 1960 年から 2005 年の 45 年間に就いては図 2 に掲げた世界平均と比べることができる。アルプス氷河の変動の振幅は大きいが一旬単位で現れる増減のトレンドは実によく一致している。それではどのようにしてこのような変動が起こったのであろうか。年質量収支は 2 つの成分である涵養と消耗または冬季収支と夏季収支から成り立っている。したがって、この 2 成分を個々にみなければならない。

図 3 アルプスとピレネーにある 20 の氷河の年質量収支の平均値。11 年の経年平均は太線で示される。単位は水柱 mm/年。

Fig. 3 Mean annual net balance of 20 glaciers in the Alps and the Pyrenees. The bold line indicates an 11-year running mean. Unit in mm w.e./a.

2) 冬季収支および夏季収支の変動

III 章 2) 節 で述べたように、冬季、夏季収支を長期間観測している氷河は 35 ある。図 4 はこれら 35 の氷河の冬季、夏季および年収支をそれぞれの地域の氷河面積のウェイトを掛けた平均値で 1961～2005 年までを集計したもので、本論文で最も重要な図である。これらの氷河は図 4 の説明に掲げる 11 の地域に分布する。アンデス、ヒマラヤ、アイスランドにはこうした計算に使える氷河が 1 つもないのが悔やまれてしかたがない。氷河の数も地域も限られたサンプルになるので、まず図 4 の中程の年正味質量収支（灰色の線）がどのくらい最大の氷河数（161 氷河）と地域数（17）で計算された正味質量収支に近いテストする。後者は図 2 に表されているようにすでに計算済みであり、図 4 では中程の黒線で表されている。両者はほとんど同一とみなしてよいであろう。とくに 11 年移動平均と 45 年トレンドは区別が難しいくらい近い。この事実は氷河の長期変動はグローバルの気候変化に強く影響されていることを意味する。そして、今扱われているわずか 35 の氷河の変遷がグローバルな現象をかなり捉えているといえる。

まず 1960 年代の前半は質量収支がゼロに近く地球全体としてみると氷河は気候と程よく釣り

図 4 世界の 11 地域 35 氷河の面積ウェイトを掛けた冬季, 夏季, および年平均質量収支. 図の上方の線は冬季収支 (実線とダイヤモンドはその年の冬季収支, 点線は 11 年の移動平均, 長い線分は 45 年のトレンドを意味する). 図中程の灰色の線は年収支 (正味収支), 図下方の線は夏季収支を意味する. さらに図中程の黒線は図 2 で説明された 17 地域 161 の氷河に基づく世界平均質量収支である. 灰色線がこの黒線にきわめて近いことは, 35 と数では少なく, 地域でも 11 と限られているが, ここで扱われた季節別の質量収支はかなりよく世界平均を近似していることを示す. これらの地域は北極カナダ, 北米西海岸, アラスカ, スヴァールバル, スカンディナヴィア, アルプス, パミール, コーカサス, カムチャッカ半島, アルタイ山地, および天山山脈/ズンガリア山地である. 単位は水柱 mm/年.

Fig. 4 Area-weighted global mean annual mass balance, based on 35 glaciers in 11 regions. Three groups of lines are from the top the winter balance; middle the annual net balance; and bottom the summer balance. Each group is made of three lines, a solid line with diamonds (annual balance), a broken line (11-year running mean) and a definite straight line (linear trend). The grey line in the middle representing the global area-weighted mean annual net balance of 161 glaciers from 17 regions is given for comparison. The closeness between the grey and black lines supports the global significance of the 35 glaciers in 11 regions, for which winter and summer balances are observed. These 11 regions are Arctic Canada, North American Cordillera, Alaska, Svalbard, Scandinavia, Alps, Pamir, Caucasus, Kamchatka, Altaishan, and Tianshan/Dzungaria. Unit in mm w.e./a.

合った均衡状態にあったといえる。時代をさかのぼって観測データのあるヨーロッパの氷河（アルプスでは 1920 年代, スカンディナヴィアでは 1940 年代から）をみると地域によるフェイズの相違はあっても, 1940 年代半ばを中心に質量収支の負の時代があり, 60 年代か 70 年代に収支ゼロないし正の時期を認識することができる。気候温暖化の 20 世紀といわれるなかで, 少なくとも消耗の止まった時があったということは重要である。そして 1990 年頃からはかなり加速気味の質量喪失状況を示している。この 45 年間の平均質量収支は年水柱で -250 mm , 加速率は -11 mma^{-2} となる。またこの年収支トレンドは夏季収支の変化の結果であることがわかる。45 年間の平均夏季質量収支は -1690 mm で, その傾向は負の加速で -12 mma^{-2} であり, 永年にわたる

年収支のトレンドはほとんどすべて夏の融雪融氷の結果といってよい。これにひきかえ, 冬季収支は 45 年間を通じてほとんど一定であったといえる。

ヨーロッパの氷河地域の気温の歴史をみよう。図 5 はアルプスとスカンディナヴィアからそれぞれ氷河に近い 6 高山測候所を選び夏の 6 月, 7 月, 8 月の平均気温を示した。これによると, 比較的寒冷な 1920 年代から約 1°C 昇温して 1940 年を中心に 15 年間ほど温暖期を迎える。その後 1950 年より 1980 年まで 30 年間の寒冷期がくる。1980 年以降 1°C 強増加している。これらの温度変化のフェイズは上記の 1940 年代の負収支, 1960 ~ 70 年代のゼロ収支そして最近の加速的な負の期間に一致する。さらに詳細に比べるとフェイズは一致しても振幅にちがいがあ

図 5 ヨーロッパ氷河地域夏の平均気温。ノルウェーのアビヨルスブラテン (601 m a.s.l.), キョレムスグレンデ (626 m a.s.l.), フォクストグ (972 m a.s.l.), スイスのサンクト-ベルナルド峠 (1639 m a.s.l.) およびセンチス (2490 m a.s.l.), オーストリアのゾンブリック (3105 m a.s.l.) の 6 月, 7 月, 8 月の平均気温 (細線) とその 11 年移動平均 (太線)。

Fig. 5 Summer air temperature for glacierized region of Europe. The thin line represents the mean values of six stations, Abjorsbraten, Kjoremsgrenda, and Fokstugu of Norway, St. Bernardo of Switzerland, and Sonnblick of Austria. The bold line is the 11-year running mean.

1940 年代の温暖期は 21 世紀に比べると 0.5℃ 程低温であった。しかし、質量収支の負の度合いは 21 世紀に勝るとも劣らない。それは、後に述べる大気透過度の永年変化の影響であり、1950 年代以前には大気透過度が現在より高く太陽放射が多かったためである。

もう少し詳細にみてみよう。冬季収支は 1990 年まではわずかに温度に比例して増加した。この傾向はほとんどの地域で見いだされている。これは温暖化による全球的な蒸発散量の増加による。この傾向は、全球的にみた降水量によくうかがえて今でも増加傾向にある。ところが、多くの地域で 1980 年代の後半から昇温のため降雪になる割合が減少している。この冬季の降雪の減少が涵養量の減少となって現れなおも進行中である。一方、夏季収支に現れている融雪融氷は 1970 年代にいったん底をうちアルプスで経験されたように地域によっては減少した所も多い。融雪融氷は 1990 年代に入ってから再び増加に転じている。最近の 10 年間は涵養の減少と消耗の増加によ

て正味収支は観測開始以来最大の消耗率を示すようになった。この間の収支状態を 5 年ごとに集計して表 3 に示す。2000 年代に入ってから平均正味収支は水柱で年約 45 cm の負であり IHD (International Hydrological Decade, 1965 ~ 1974) の 10 年間の頃の 3 倍にもなっている。この融氷は海水準を年 0.7 mm 上昇させることになり、雪氷圏の海水準変化への最も重要な役割のひとつといえよう。

小氷期を脱した 20 世紀全体をみてみよう。現在まで継続されている質量収支の長期観測はほとんど第二次大戦以後に開始されたのであるが、数はきわめて少ないがアルプスのローヌ氷河、クラリーデンフィルンやアレッチ氷河のように 19 世紀の終わりに近い第一次国際極地観測年 (1882 ~ 1883) または 20 世紀のはじめから観測されている (Chen and Funk, 1990; Aellen, 1995; Ohmura, 2006) 氷河の 20 世紀前半と後半を比べると、両半世紀は量的にきわめて近い年収支よりなっていることがわかる。もしこの傾向がすべての氷河地域で同様であったと仮定すれば、20 世紀全体の海水準への影響は約 4 cm となる。

ここで気候変動と氷河質量収支の関係で重要な問題は、温室効果ガスの増加による温暖化が進行中であった 20 世紀の中に 1960 年代から 1980 年代の 30 年間にもわたって何が原因で負の収支が伸び悩んだのかという問題である。この伸び悩みは夏季収支、すなわち融氷の停滞によるものであり、事実この間、温暖化は停止して、わずかながらも寒冷化に移行したのである。これは先の図 5 でヨーロッパの氷河地域で指摘された現象であり、また観測値に基づく全球気温をそれぞれ個別に計算している NOAA, NASA, ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) や CRU (Climate Research Unit, University of East Anglia) などの結果にも共通に現れている現象で、温暖化の原因を正しく理解するにはこの寒冷化をも理解しなければならない。20 世紀の後半に起こったこの寒冷化は第二次大戦後の復興と経済成長期につくられたエアロゾルによるもので、工業国がまずは大気汚染を抑制する目

表 3 冬季, 夏季質量収支が長期にわたって行われている 35 の氷河における 5 年ごとの平均季節および年収支. 5 列目は年正味収支のみ計られている 161 の氷河での結果を比較のために掲載. 単位は水柱 mm.

Table 3 Area-weighted global mean winter (Bw), summer (Bs), and annual (Bn) mass balances of 35 glaciers from 11 regions arranged for pentade means. The last column contains the pentade means of the annual balance including glaciers with only annual balance observations. Unit is mm w.e.

Pentade period	Bw	Bs	Bn	Bn 161 glaciers
1960/61-1964/65	685	-848	-163	-131
1965/66-1969/70	835	-1068	-233	-132
1970/71-1974/75	881	-1048	-167	-140
1975/76-1979/80	944	-1166	-222	-247
1980/81-1984/85	1003	-1144	-141	-232
1985/86-1989/90	914	-1260	-346	-332
1990/91-1994/95	885	-1353	-468	-317
1995/96-1999/00	984	-1374	-389	-426
2000/01-2004/05	892	-1292	-400	-444

的で大気の浄化に乗り出すまで続く (Ohmura and Lang, 1989)。図 6 はこの期間に起こった全球平均で 8 Wm^{-2} におよぶ太陽放射の減少を示し, この現象は Global dimming と呼ばれている。大気浄化の効果は 1990 年以降の大気の透過度の改善 (増加) となって現れ, そのため太陽放射も増加することになり, 進行中の温室効果と相まって, 観測史上最大の昇温率を示すことになる (Wild *et al.*, 2003, 2005)。この時期の太陽放射の増加はやはり 8 Wm^{-2} であり Global brightening と呼ばれている。現在進行中の温暖化は, 実は大気長波放射の強化を引き起こす温室効果ガスの増加と太陽放射を遮蔽するエアロゾルの変化の間のバランスのわずかな崩れによって成り立っていることがわかる (Ohmura, 2009a)。したがって, 近い将来, 人間活動が人為的な温室効果を上回るエアロゾルをつくる方向に動けば, 寒冷化が起こる可能性は十分あることになる。もし, そうなったとしても, 温室効果を過小評価してはならない。温室効果ガスとエアロゾルは大気中での滞留期間に大きな差があり, 滞留期間の短いエアロゾルの大気中での濃度は早い時期に頭打ちになるのに対して, 温室効果ガスは何百年と蓄積す

図 6 年平均全天太陽放射. 世界で最も長い観測実績を有するストックホルム, ヴァゲニンゲン, ダヴォス, ポツダムおよびロカルノ-モンティの平均値. 太線はその 11 年移動平均値.

Fig. 6 Mean annual global solar radiation for 5 European sites (Stockholm, Wageningen, Davos, Potsdam, and Locarno-Monti) with the longest observation records. Thin line indicates annual means, while the bold line is the 11-year running mean.

る。長い将来を考慮するほど, 温室効果ガスの重要性は増すのである。

V. 氷床の質量収支

1) 概況と資料

現在、地球上には南極氷床とグリーンランド氷床という2つの氷床がある。この2氷床はそれぞれ全氷河面積の86および11%を占める。一義的には氷河の質量収支は表面積に比例した影響力をもっているといわれる。しかしながら全球的氷河の質量収支のなかでの重要さは、単に面積だけでは比例せず、質量フラックスの大きさにも比例するので、収支率の比較的小さな極地の氷河は面積の割には全球への影響は限られている。これまでの質量収支の研究からこの2つの氷床を比べると、グリーンランド氷床研究はかなり精度の高い領域に達しており、ここに重点を置いて議論を進める。

まずグリーンランド氷床の質量収支研究の歴史を概観し、続く節で氷床質量収支にかかわる研究から必要な資料を選ぼう。グリーンランド氷床の質量収支研究はおよそ1世紀の歴史をもつ。まず1912年にスイス-グリーンランド横断探検隊はグリーンランド西岸北緯70°からほぼ南東に向け700 km、アンマサリクまで横断し、その行程で28地点の涵養量を測定したのがはじまりである(Quervain and Mercanton, 1920)。その後も第二次大戦までの間に、第二次国際極地観測年などがあったのだが、グリーンランドでは単発的な現地調査しか行われなかった。体系だった涵養量に関する調査はIGYの時にはじめて行われた(Benson, 1962)。これらはピットにおける積雪層序学によるもので、試料の長さに関りがあり、10年以上のデータはほとんど得られなかった。消耗量を全グリーンランドにわたって求めるためには氷河学的直接質量収支の測定と気温の季節変動の資料が必要なため、1980年代まで先送りされた(Ohmura, 1987)。さらに極地氷河に特有のCalvingによる消耗量の推定には海面付近での流速と氷河断面の情報が必要であり、これが広い範囲に扱われたのは1990年代になってからであった。しかしその後の進歩は速く、現在では質量収支の各項はかなり信頼性をおいてよいまでに

解明されている。

2) グリーンランド氷床の質量収支

Benson (1962) 以後の涵養量に関する情報の蓄積には目覚ましいものがある。その第1の原因はとくにこの40年程の間に多くの氷のコアがとられ、ピットからの試料とは比べものにならない長い期間が扱えるようになったことである。第2はコアの年代測定法の進歩である。コアにしる深いピットにしる、このように直接氷河上で涵養量が量れるのは融雪によって質量の失われな高度帯であり、Benson (1961) と Müller (1962) の定義による Upper percolation zone 以上の地帯になる。したがって、Lower percolation zone 以下の涵養域と消耗域全体の涵養量は Upper percolation zone 低部の涵養量と氷河の外にある測候所で計られた積雪量とで内挿される。Benson 以後グリーンランド全域にわたって涵養量の正確な把握に寄与した論文には Reeh and Olesen (1986), Ohmura and Reeh (1991), Calanca *et al.* (2000), Ohmura *et al.* (1999), Bales *et al.* (2009), Box *et al.* (2006) などがある。これらを総合することによって現時点での最も正確な涵養量が求められる(図7)。

融氷および融雪の消耗量の実測は1982年にグリーンランド地質調査所によってはじめられた。このプロジェクトは元来、グリーンランド氷床の水力発電の可能性を探るために行われたもので、氷床西側斜面の海拔200 mの最低部から1100 mの均衡線付近までを対象とた。8年間夏季および冬季収支を氷床南部から中部の北緯70°まで測定しており、その後行われることとなった氷床全域の消耗量の計算に最も重要な基礎資料を提供した(H.H. Thomsen, personal communication)。消耗量を求めるには大別して Stake Method のような氷河学的方法と気象学的方法とがある。氷床全体のような大きな対象には気象学的方法が適しており、熱収支測定による場合と夏の気温による実験式で求める場合があるが、現段階では後者の方が氷床全体の消耗量を求めるには適している。消耗のほとんどは表面勾配の急な氷床縁辺部で起こるため、できるだけ解像度の高い地形モデルが必

図 7 グリーンランド氷床の年涵養量。Upper percolation zone 以上の約 350 地点で測られた年涵養量と氷床周辺の 40 点における年総計積雪量を Ekholm 2 km グリッドで内挿した結果である。Ohmura *et al.* (1999) にその後のデータを加えて作成 (口絵 2-図 2 参照; 大村, 2010)。

Fig. 7 Annual accumulation on Greenland ice sheet. Unit in mma^{-1} . The distribution map is based on the accumulation determined from about 350 pits and ice cores and meteorological snowfall and wind speed observed at 40 stations outside the ice sheet. The accumulation in the region below the upper percolation zone of the ice sheet was interpolated from the 2 km grid on the Ekholm digital topographic model. Original glaciological and meteorological data are from Ohmura *et al.* (1999), supplemented by ice core and meteorological data obtained in subsequent years (see to Pictorial 2-Fig. 2; Ohmura, 2010).

要である。この計算は Ekholm (1996) による 2 km のグリッドの デジタル地形モデル上で Ohmura の方法 (Ohmura *et al.*, 1996) で計算された消耗量である。

Calving による消耗量は氷河末端が海まで達している氷河について個別に計算する以外に方法はなく、大変な労力と経験を必要とする。こうした計算はまず南西部の氷河に関して Weidick (1995), 北部では Higgins (1991), 東岸中部では Reeh

(1994) 等の仕事がある。これらを総合した Reeh *et al.* (1999) の計算結果が現在のところ最も信頼性が高く氷河底面での融水をも考慮している。これらの結果を総合して筆者が現在最も妥当と考えるグリーンランドの氷河の質量収支を表 4 に示す。なおグリーンランドには氷床のほかに面積で $54,000 \text{ km}^2$ の氷床外の小氷河群がありこれらの氷河の質量収支もあわせて掲げてある。この結果、最も重要な結論はグリーンランドでは氷床もその他の小氷河群も現気候下ですでに負の収支を示していることである。年間の収支 $-128 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1}$ は海水準にして 0.35 mma^{-1} の上昇に相当する。この半分は氷床外の小型氷河からの流入である。ここで問題になるのは、この負の収支が一定であるのか、それとも加速しているのかという点である。これについては、グリーンランドの負の収支の絶対値が増加していると主張する論文がでている (例えば, Box *et al.*, 2006)。これらの仕事はすべてリモートセンシングによるもので、誤差を考慮すると、グリーンランドの質量収支が最近の 20 ~ 30 年という比較的短い間に有意に変化しているかは不明である。直接に質量収支に結びかねるが、1990 年代より氷床上の融雪融氷面積が拡大しており (Abdalati and Steffen, 2001), 氷床の中央部が高度を増したのに対して、縁辺部では表面が低下しているとの報告がある (Krabill *et al.*, 2000)。

3) 南極氷床質量収支の現状

本来ならここで南極氷床の質量収支が扱われるべきである。しかし、現在ある情報をすべて総合しても南極氷床および南極に存在するその他の氷河の質量収支は、正負の符号すらも明らかに提示できないのが現状である。最も確かな収支項は表面の涵養量であるが、その値すら大陸平均で 120 mma^{-1} (Giovinette *et al.*, 1990) から 185 mma^{-1} (Giovinetto and Zwally, 2000) まで分散している。しかし、南極氷床の質量収支を求めるにあたって最も困難な問題は大陸全体の Calving が解明できていないことと、氷床の Grounding line 付近と氷棚の下面における質量収支の測定がきわめて難しいことにある。とくに近年わか

表 4 グリーンランド氷床およびその周辺の山岳氷河、氷冠の年質量収支。

Table 4 Annual mass budget of Greenland ice sheet and its marginal mountain glaciers and ice caps.

Greenland glaciers mass balance (Total ice covered area: $2,164 \times 10^3 \text{ km}^2$)							Source
	Ice sheet ($1,694 \times 10^3 \text{ km}^2$)		Glaciers and ice caps ($53.725 \times 10^3 \text{ km}^2$)		Total ($1,747.7 \times 10^3 \text{ km}^2$)		
	km^3a^{-1} w.e.	mma^{-1} w.e.	km^3a^{-1} w.e.	mma^{-1} w.e.	km^3a^{-1} w.e.	mma^{-1} w.e.	
Accumulation	487	288	32	600	519	297	Weidick (1995); Bamber and Payne (2004); Ohmura (2009b)
Melt ablation	257	152	39	723	296	169	Ohmura <i>et al.</i> (1999); Wild <i>et al.</i> (2003)
Calving	263	154	53	987	316	181	Calanca <i>et al.</i> (2000); Wild <i>et al.</i> (2003)
Bottom melt	35	21	0	0	35	21	Reeh (1994); Reeh <i>et al.</i> (1999)
Mass budget	− 68	− 39	− 60	− 1,110	− 128	− 74	this study

りつつあることは Grounding line 付近での融水がかなり大きな量に達していることである。こうした状況下で氷床の質量収支はもっぱら衛星からの高度測定によっている。III 章 1) 節で述べた測地学的方法である。高度測定による質量収支の方法は氷河全体を扱わなければ意味をなさない。氷床の一部分の高度をどんなに正確に換算しても、氷河の質量収支にはならないのである。この方法による論文は近年数多く出版されているが（例えば, Thomas *et al.*, 2004; Zwally *et al.*, 2005), 質量収支という目的に適ったものは今のところ皆無である。また、氷床以外の小氷河群の質量収支も永年にわたる測定例はきわめて乏しい (Fountain *et al.*, 2006)。したがって本論文では、南極大陸の質量収支を直接には扱わないことにする。

VI. 氷河質量収支と海水準の関係

氷河の質量収支は直接その流域の水収支に影響するが、影響の仕方は気候と地形に大きく左右される。しかしすべての氷河が共通して終局的に影響するのは海水準であろう。すべての氷河のなかには氷棚のように海水と静水圧的な均衡状態にある氷河も含める。氷棚は質量収支の結果、崩壊することによってその背後の氷河の流れが促進され

直接海へ流入して海水準に変化をきたすことは南極半島東岸のルールセン氷棚 A および B の崩壊の後続現象で観察された。また、氷河以外にも海水準に変化をきたす現象も多々あり（例えば永久凍土）、これらを包括して 20 世紀に起こった海水準変化の内訳を表 5 に整理してみる。ここで重要なことは面積では全球氷河水の 3.5%, 容積ではわずかに 0.3% しかない山岳氷河と氷冠が最も大きな役割を果たしていることである。このタイプの氷河が、3 倍以上の面積をもつグリーンランド氷床と同じ量の水を海洋に貢献していることは、小型の氷河がいかに敏感に気候変化に反応するかを物語っている。次に海洋の熱膨張も無視はできない。地球表面での温暖化は、海洋ですでに 3,000 m 以深に達しており、海洋学のデータも比較的豊富なこともあって、この項が最も正確に計算できる数値である (Levitus *et al.*, 2005)。世界に数多く存在する潮汐計から観測期間が長く、データの質もよくまた地殻の安定している地域のものを選んで海面上昇を直接推定した結果 (J. Church, personal communication) は表の最下部に 17 cm と与えられてある。潮汐計によるこれまでの仕事もほとんど 15 ~ 17 cm までの間に入っているから、100 年間の海面上昇としては

表 5 20 世紀における海面上昇量とその内訳.

Table 5 20th Century sea-level change and its components.

Component	unit in cm	Source
Mountain glaciers and ice caps	3.7	This study
Greenland (ice sheet, glaciers and ice caps)	3.5	This study
Thermal expansion of ocean	2	based on Levitus <i>et al.</i> (2005)
Antarctic ice sheet, glaciers and ice caps, and other sources	8	This study
Tide gauge interpretation	17	J. Church (personal communication)

これはかなり信頼してよい。したがって、海面上昇量総計の 17 cm とこれまでに説明のついた 9.2 cm の間に約 8 cm という説明のついていない上昇があったことになる。この説明のつかない 8 cm の部分は南極大陸の氷床・氷河と融解しつつある永久凍土からの質量の流入によると推定されている。

VII. 結 論

全球の小型の山岳氷河および氷冠とグリーンランド氷床の質量収支をできるだけ実測値に基づいて求めた。小型の氷河については 161 の氷河で実測された年収支量を使った。そのうち 35 の氷河では冬季と夏季収支測定が 30 年以上継続されている。20 世紀後半の平均質量収支およびトレンドを求めた。1960 年から 2000 年の平均年収支は $-250 \text{ mma}^{-1} \text{ w.e.}$ ($-138 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1} \text{ w.e.}$) で、その内訳は涵養量 1470 mma^{-1} ($810 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1}$)、消耗量 -1725 mma^{-1} ($-950 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1}$) である。この 40 年間の質量収支は負の加速をしており、その率は -11 mma^{-2} で、原因は融氷を主とする消耗量の増加にある。この間の質量収支の変化は、厳密にはこのように線形でなく、1945 年を中心とする消耗量の多かった時期とそれに続く 1960 年から 1980 年代の終わりまでの消耗量の減少した時期、さらに 1990 年以降現在まで続いている消耗量の増大期からなる変化をしてきたことがわかる。これらの時期はエアロゾルの増減によって起こる太陽放射の変動、すなわち Global dimming と Global brightening の時期に一致しており、20 世紀の氷河質量変化は温室効果ガスとエアロゾルの微妙な均衡の崩れの影響であるこ

とがわかる。

グリーンランド氷床と周辺部の氷河は現段階ですでに負の質量収支を担っており、平均年正味収支は -74 mma^{-1} (総計で $-128 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1}$)、内訳は涵養量 297 mma^{-1} ($519 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1}$)、融氷による消耗量 -169 mma^{-1} ($-296 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1}$)、Calving による消耗量 -181 mma^{-1} ($-316 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1}$)、底の融解 -21 mma^{-1} ($-35 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1}$) である。現段階ではこの収支と各項の永年変化を求めることは難しい。定性的ではあるが氷床上での融解面積がこの 10 年間で拡大したとの報告がある。南極氷床の収支は現段階では論じることが不可能である。

総括して 20 世紀における海水準の増昇のうち、山岳氷河および氷冠は 3.7 cm、グリーンランドは 3.5 cm、海水の熱膨張 2 cm で総計して 9.2 cm であり、潮汐計から求められた 17 cm との間に約 8 cm の差がある。この差の少なくとも一部はおもに南極大陸からの氷床と氷河の質量流入に起因すると思われる。

謝 辞

この論文を完成するにあたって、多くの研究者のご好意によって、出版前の質量収支に関するデータをいただいた。とくにマンチェスター大学の Roger Braithwaite、ストックホルム大学の Peter Jansson、カナダ地質調査所の Mike Demuth、コロラド大学の Mark Dyurgerov、グルノーブル大学の Christian Vincent、バイエルン科学アカデミーの Ludwig Braun、ノルウェー極地研究所の Jack Kohler、E.T.H. の Andreas Bauder、および World Glacier Monitoring Service の Wilfried Haeberli、Michael Zemp の諸氏に心から感謝の意を表します。

文 献

- Abdalati, W. and Steffen, K. (2001): Greenland ice sheet melt extent: 1979–1999. *Journal of Geophysical Research*, **106** (D24), 33983–33988.
- Aellen, M. (1995): Glacier mass balance studies in the Swiss Alps. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, **31**, 159–168.
- Bales, R.C., Guo, Q., Shen, D., McConnell, J.R., Du, G., Burkhart, J.F., Spikes, V.B., Hanna, E. and Cappel, J. (2009): Annual accumulation for Greenland updated using ice core data developed during 2000–2006 and analysis of daily coastal meteorological data. *Journal of Geophysical Research*, **114**, D06116, doi:10.1029/2008JD011208.
- Bamber, J.A. and Payne, A.J. eds. (2004): *Mass Balance of the Cryosphere*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Benson, C.S. (1961): Stratigraphic studies in the snow and firn of the Greenland Ice Sheet. *Folia Geographica Danica*, **9**, 13–37.
- Benson, C.S. (1962): Stratigraphic studies in the snow and firn of the Greenland Ice sheet. *Research Report, No.70, Snow, Ice, and Permafrost Research Establishment (SIPRE)*, 93p.
- Box, J.E., Bromwich, D.H., Veenhuis, Bai, L., Stroeve, J.C., Rogers, J.C., Steffen, K., Haran, T. and Wang, S. (2006): Greenland ice sheet surface mass balance variability (1988–2004) from calibrated Polar MM5 output. *Journal of Climate*, **19**, 2783–2800.
- Calanca, P., Gilgen, H., Ekholm, S. and Ohmura, A. (2000): Gridded temperature and accumulation distributions for use in cryospheric models. *Annals of Glaciology*, **31**, 118–120.
- Chen, J. and Funk, M. (1990): Mass balance of Rhonegletscher during 1882/83–1986/87. *Journal of Glaciology*, **36**, 199–209.
- Chen, J. and Ohmura, A. (1990): Estimation of Alpine glacier water resources and their change since 1870s. in *Hydrology in Mountainous Regions I* edited by Lang, H. and Musy, A., *IAHS Publication*, **193**, 127–135.
- Ekholm, S. (1996): A full coverage, high resolution, topographic model of Greenland computed from a variety of digital elevation data. *Journal of Geophysical Research*, **101** (B10), 21961–21972.
- Fountain, A.G., Nylen, T.H., MacClune, K.L. and Gayle, L. (2006): Glacier mass balances (1993–2001), Taylor Valley, McMurdo Dry Valleys. *Journal of Glaciology*, **52**, 451–462.
- 藤井理行 (2005): 氷床, 氷流, 棚氷, 氷山. 日本雪氷学会監: 雪と氷の辞典, 第9章 極地氷床, 9.2.1 (1) 節. 330–335.
- Giovinetto, M.B. and Zwally, H.J. (2000): Spatial distribution net surface accumulation on the Antarctic ice sheet. *Annals of Glaciology*, **31**, 171–178.
- Giovinetto, M.B., Waters, N.M. and Bentley, C.R. (1990): Dependence of Antarctic surface mass balance on temperature, elevation, and distance from open ocean. *Journal of Geophysical Research*, **95** (D4), 3517–3531.
- Higgins, A.K. (1991): North Greenland glacier velocities and calf ice production. *Polarforschung*, **60** (1), 1990, 1–23.
- Krabill, W., Abdalati, W., Frederick, E., Manizade, S., Martin, C., Sonntag, J., Swift, R., Thomas, R., Wright, W. and Yungel, J. (2000): Greenland ice sheet: High-elevation balance and peripheral thinning. *Science*, **289**, 428–430.
- Kuhn, B.F. (1787): *Versuch über den Mechanismus der Gletscher*. Magazin Naturkunde Helvetians, Nr.1.
- Levitus, S., Antonov, J. and Boyer, T. (2005): Warming of the world ocean. *Geophysical Research Letters*, **32**, L02604, doi:10.1029/2004GL021592.
- Mercanton, P.-L. (1915): Le glacier du Rhone. in *Vermessungen am Rhone Gletscher 1874–1915* edited by Mercanton, P.-L., Gletscher Kommission der schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft Kommissions Verlag, Basel, 37–190.
- Müller, F. (1962): Zonation in the accumulation area of the glaciers of Axel Heiberg Island, N.W.T., Canada. *Journal of Glaciology*, **4**, 302–313.
- Ohmura, A. (1987): New temperature distribution maps for Greenland. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, **23**, 1–45.
- Ohmura, A. (2004): Cryosphere during the twentieth century. in *The State of the Planet: Frontiers and Challenges in Geophysics* edited by Sparks, R.S.J. and Hawkesworth, C.J., *Geophysical Monograph*, **150**, American Geophysical Union, 239–257.
- Ohmura, A. (2006): Changes in mountain glaciers and ice caps during the 20th century. *Annals of Glaciology*, **43**, 361–368.
- Ohmura, A. (2009a): Observed decadal variations in surface solar radiation and their causes. *Journal of Geophysical Research*, **114**, D00D13, doi:10.1029/2008JD011290.
- Ohmura, A. (2009b): Completing the World Glacier Inventory. *Annals of Glaciology*, **53**, 1–5.
- 大村 纂 (2010): 世界 17 氷河域の年質量収支の長期変動およびグリーンランド氷床の年涵養量. 地学雑誌, **119**, iv.
- Ohmura, A. and Lang, H. (1989): Secular variation of global radiation in Europe. in *IRS'88: Current Problems in Atmospheric Radiation* edited by Lenoble, J. and Geleyn, J.-F., A. Deepak Publ., Hampton, VA, 298–301.
- Ohmura, A. and Reeh, N. (1991): New precipitation and accumulation distribution maps for Greenland. *Journal of Glaciology*, **37**, 140–148.
- Ohmura, A., Wild, M. and Bengtsson, L. (1996): A possible change in mass balance of Greenland and Antarctic ice sheets in the coming century. *Journal*

- of *Climate*, **9**, 2124–2135.
- Ohmura, A., Calanca, P., Wild, M. and Anklin, M. (1999): Precipitation, accumulation and mass balance of the Greenland ice sheet. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, **35**, 1–20.
- Quervain, A. de and Mercanton, P.-L. (1920): Ergebnisse der schweizerischen Grönlandexpedition 1912–1913. *Denkschrift der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft*, **53**, 145–151.
- Reeh, N. (1994): Calving from Greenland glaciers: Observations, balance estimates of calving rates, calving laws. in *Workshop on the Calving Rate of West Greenland Glaciers in Response to Climate Change, 13–15 September 1993, Copenhagen, Danish Polar Center* edited by Reeh, N., 85–102.
- Reeh, N. and Olesen, O.B. (1986): Velocity measurements on Daugaard-Jensen Gletscher, Scoresby Sund. *East Greenland. Annals of Glaciology*, **8**, 146–150.
- Reeh, N., Mayer, Christoph, Miller, H., Thomsen, H.H. and Weidick, A. (1999): Present and past climate control on fjord glaciations in Greenland: Implications for IRD-deposition in the sea. *Geophysical Research Letters*, **26**, 1039–1042.
- Thomas, R., Rignot, E., Casassa, G., Kanagaratnam, P., Acuña, C., Akins, T., Brecher, H., Frederick, E., Gogineni, P., Krabill, W., Manizade, S., Ramamoorthy, H., Rivera, A., Russell, R., Sonntag, J., Swift, R., Yungel, J. and Zwally, J. (2004): Accelerated sea level rise from West Antarctica. *Science*, **306**, 255–258.
- Weidick, A. (1995): *Greenland: Satellite Image Atlas of the World. Professional Paper, 1386-C*, U.S. Geological Survey, US Government Printing Office, Washington, D.C., 141p.
- Wild, M., Calanca, P., Scherrer, S.C. and Ohmura, A. (2003): Effects of polar ice sheets on global sea level in high-resolution greenhouse scenarios. *Journal of Geophysical Research*, **108**(D5), 4165, ACL 5-1-10.
- Wild, M., Gilgen, H., Roesch, A. and Ohmura, A. (2005): From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at the Earth's surface. *Science*, **308**, 847–850.
- Zwally, H.J., Giovinetto, M.B., Li, J., Cornejo, H.G., Beckley, M.A., Brenner, A.C., Saba, J.L. and Yi, D. (2005): Mass changes of the Greenland and Antarctic ice sheets and shelves and contributions to sea-level rise: 1992–2002. *Journal of Glaciology*, **51**, 509–527.

(2010 年 1 月 22 日受付, 2010 年 3 月 8 日受理)