地球温暖化と雪氷圏への影響

中 尾 正 義*

Global Warming and the Impact on Cryosphere

Masayoshi NAKAWO*

I. はじめに

「地球温暖化によって極域の氷が融解し、世界の海面が急激に上昇する」といった過激な論調は、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の報告書 (IPCC-WG1-, 1990) が公表されて以来、いくぶん影を潜めてきたようである。一時の昂奮が醒めて、確実に状況を把握し、対応を検討するという時期にさしかかってきたものと見うけられる。

「地球規模の気候や環境の変化」といった膨大な不確定要素を抱える現象を予測する場合には、確実な事実や因果関係は何なのか、確かでない部分は何なのかをはっきりさせるとともに、どのような前提のもとに予測するのかを明確にした上で、結論を導き出すことが肝要である。例えば、大気中の二酸化炭素濃度が産業革命以降急速に増加してきたこと (Friedli *et al.*, 1986) や、氷期一週氷期の繰り返しの中で二酸化炭素濃度と気温とが強い相関を持って変動してきたこと (Barnola *et al.*, 1987) などほとんど疑う余地の無い事実と考えられるが、だからといって、最近の温暖化 (Jones, 1988) が二酸化炭素のせいだときめつけられないのは周知のことである。二酸化炭素以外にも種々の温室効果ガスが存在するし、ガス濃度の増加から気温上昇に至る因果関係が明確になっていないからである。予測につかうモデルでも、不確実なパラメータ化がなされていたり、組み込

まれていない多くの素過程があることを承知する必要がある。だからこそ、モデルの検証は常に重要であり、さらなるモデルの改良が必要になってくる。従って、ある種の仮定または前提の上に成立するシナリオあるいはお話を予測ととり違えてはならない。観測結果の解釈でも、都合の良いデータのみを取り上げ、あたかも全体像がそうであるかのような誤解を与えないよう注意しなければならない。さもないと、世間に誤った印象を与え、政策決定者などをいたずらに混乱に陥れることになりかねないからである (White, 1989)。

冒頭に述べた「温暖化により極域の氷が融け出し海面が急速に上昇する」というお話は、常識的に受け入れ易いものであるために、広く一般の人々に知れわたったものと思われるが、専門家の間では逆に「温暖化によって極域の氷が増加して海面を下げるセンスに働く」という方が常識的であり一般的である。しかしこの話にしても、未だ確実な予測とはいえない部分が残っている。

本稿では、地球温暖化によって雪氷圏がどのように影響されるのかという予測について述べるが、上に述べたように、いかに多くの不確実性の上に成立しているのかということを、御理解いただければ幸いである。その不確実性を減らし、より信頼性の高い予測を行なうためには、その前途にはまだまだ長い道程が横たわっている。

雪氷圏は本来、地球システムの一つの基本要素として、温暖化そのものにも深くかかわっている。つまり、雪氷圏の振舞いそのものが、温暖化を促進する作用や抑制する作用をその内部に含んでいるが、本稿では、温暖化という前提に立って、主

* 防災科学技術研究所長岡雪氷防災実験研究所

* Nagaoka Institute of Snow and Ice Studies,
National Research Institute for Earth Science and
Disaster Prevention

表 1 世界の陸氷 (IPCC-WG1- (1990) より)

	南 極 (接地している部分のみ)	グリーンランド	氷河と小氷帽
面積 (10 ⁶ km ²)	11.97	1.68	0.55
氷の体積 (10 ⁶ km ³)	29.33	2.95	0.11
平均氷厚 (m)	2,488	1,575	200
相当海水位 (m)	65	7	0.35
質量交換期間 (年)	~15,000	~5,000	50~1000

としてその受動的側面を中心に述べることをお断りしておきたい。能動的側面をも含めると、地球システム全体の予測ということにつながり、筆者の力不足ということでもあるし、不確定要素が莫大なものとなり、全く何もわかっていないという印象になることを恐れたためでもある。

II. 南極氷床

表1に示したのは、IPCC のレポート(IPCC-WG1-, 1990) に載っている世界の陸氷の分布状態である。南極氷床がその大部分を占めていることがわかる。ここで注意していただきたいのは、南極の体積や面積が通常知られている値よりもやや小さいことである。これは、表1では海に浮いている棚氷の部分を除いているせいである。海の上に浮いている棚氷は、融けようが融けまいが海面レベルの変動には影響を与えないため、海面変動予測の評価も行なうことになっていた IPCC の第1作業部会では、棚氷部分を除外する方が便利だったためであろう。

南極では、氷床上に積った雪は、さらにその上に積った雪の重みで圧縮されて氷になった後に、自重で変形・流動して海へと流下していく。氷床氷の減少は、融解して水になった後に流出するのではなく、そのほとんどは氷のままで海岸まで到達し、氷縁から冰山となって分離することによる(Oerlemans and Van der Veen, 1984)。従って、多少の温暖化が生じて流出量には変化がないだろうから、氷床の消長は、氷床上への降雪の量の変化に依存する、と考えるのである。

温暖化すれば大気中の水蒸気量が増加して南極域の降雪量が増えるだろうということは、数種類

の大循環モデル(GCM) による数値実験の結果から予想されている(Schresinger, 1986; IPCC-WG1-, 1990)。従って、南極氷床はその体積が増加する、つまり海面レベルを引き下げるというシナリオが成立するのである。はたしてそうだろうか。

気温が上昇すれば降雪量が増加しそうだということは、最近の温暖化問題が生じるより早くRobin (1977) によって指摘されている。これを受けて Lorius *et al.* (1985) は、ボストーク基地の氷床コアの年代を求めるために、降雪量の変化は温度変化に伴う飽和水蒸気圧の変化に比例すると仮定した。こうして求めた15万年にわたる降雪量(正確には表面収支だが、簡単のため特に断わらない限り以下降雪量という)の変化が ¹⁰Be の値から求めた降雪量の変化(Yiou *et al.*, 1985) とほぼ一致したということや、結果として得られた年代を基準としたボストークコアのデータが海底コアの解析結果等と大きく矛盾しなかったということは、気温の上昇によって降雪量が増加するという1つの傍証になりそうである。

南極氷床上の多点データの相関解析の結果(Fortuin and Oerlemans, 1990)でも、気温と降雪量との間に正の相関が見出されている。また、氷床コアデータより最近の降雪量変化を求めたMorgan *et al.* (1991)によれば、1960年代以降の急激な温暖化に同期するように、降雪量が急増してきているという(図1)。

このように見てくると、温暖化によって南極の降雪量が増加するということはほぼ間違いのないようだ。しかし量的に見てみるとそれぞれの結果はかなり異なっている。気温1°Cの上昇に対する降

図1 南極縁辺部の降雪量と気温の変動 (Morgan *et al.*, 1991)

表2 南極の気温上昇 (1°C) に対する降雪量の増加 (%)

GCMによる数値実験	3 ~ 4 %	IPCC-WG1- (1990)
飽和蒸気圧の温度依存性	~10%	Robin (1977)
南極氷床上の多点データの相関解析 (氷床中央部)	~ 7 %	Fortuin and Oerlemans (1990)
氷床コアデータと気温との相関	20~30%	Morgan <i>et al.</i> (1991)

雪量の増加の割合を比較したのが表2である。最後の Morgan *et al.* (1991) の値が極端に大きい値を示していることがわかる。用いたコアが南極縁辺部のものであることから、Morgan らは、この原因は南極周辺の低気圧活動のせいだろうと説明している。しかし低気圧活動については GCM でも当然考慮されている筈である。にもかかわらず、GCM の与える増加率は非常に小さい。

南極氷床表面の降雪量分布 (例えば Giovinetto and Bull, 1987) を見てみると、氷床縁辺部では中央部の10倍以上にも達しており、このことは、大陸周辺部で活発な低気圧降水によってもたらされているという考え方が一般的である。しかし Takahashi(1988) は、大陸斜面から風で運ばれて

きた雪が、地吹雪の収束によって大陸縁辺部に多量に堆積することを指摘した。Weertman(1961) の与えた大陸の断面形状に対応する Takahashi (1988) の計算結果を図2に示す。海岸付近では水当量にして 50 mm/年もの雪の堆積が地吹雪による雪の再分配の結果として生じていることがわかる。

地吹雪による雪の再配分に大きく影響するのは、氷床表面の傾斜と接地逆転の強さ (大気中の逆転層の上端と地表面との温度差) である。温暖化によって接地逆転の強さがどのように変化するかはよくわからないが、そのことによって、南極氷床上への雪の堆積が増加することも充分ありうる。しかし、地吹雪による雪の再配分過程は GCM の中には取り込まれていない。さらに、大気下層

図2 地吹雪による雪の収束・堆積 (Takahashi, 1988)

で形成される氷晶や雪面での霜の成長は、南極氷床の涵養源として無視できないと考えられるが、GCM ではこのような過程もまだ考慮されていない。表2に示した中で GCM によるものが最も小さい値を示しているのは、これらのせいではなかろうか。

南極氷床におけるもう1つの大きな問題は、温暖化による流出量の変化の予測である。本章のはじめに述べたように、南極氷床では融解水の流出は非常に少ないが、ここで問題にしたいのは、氷床の流動による氷としての流出量の変化である。氷山生産量の変化といっても良い。つまり、温暖化によって氷床の動力学特性に変化が生じ、従来よりも多量の氷が氷山となって海へと流出することになるかもしれないという懸念である。このことは別報 (中尾, 1989) で詳しく述べたのでここでは簡単に触れる。

温暖化によって海水温度が幾分上昇すれば、南極の棚氷の底面の融解が促進されるであろう。このことと、なにがしかの海水位上昇とが相俟って、上流からの氷の流動を下流域で支えている棚氷部の支持力が減少する。従って上流からの氷の流出量が増加する。すると海水位はますます上昇するため棚氷の支持力はますます減少するという正のフィードバック機構が働き、この現象はどんどん

加速されるというシナリオである。

この考えは、氷床底面が海面下にある西南極では氷床の崩壊につながる (Hughes, 1977) ということで広く注目を集め、多くの研究者が種々検討を重ねてきているが、まだはっきりとした結論は出ていない (IPCC-WG1-, 1990)。その後、この考え方は西南極に限らず、比較的安定だと考えられてきた東南極でも起きる可能性があることが指摘されたが (Nakawo *et al.*, 1991)、これもまだ単なるお話の域を出ていない。そこで、IPCC の第1作業部会では氷床の崩壊が近い将来に生じることはほとんどないとしているが、もし生じた時に引き起こす社会的経済的影響の大きさを考えると、観測や研究を注意深く継続しなければならない (IPCC-WG2-, 1990) ことはいうまでもない。

III. グリーンランド氷床

グリーンランド氷床は南極氷床と違って、その質量の消失のうちの約半分は氷の融解という形をとっている (Oerlemans and Van der Veen, 1984)。従って、温暖化によって融解量が増加し、そのぶん氷床の体積が減少して海面を引き上げるということは充分考えられる。与えられた氷床上の消耗域で、単純に気温だけが上昇した場合にど

図3 グリーンランド全域の夏の気温の変動 (IPCC-WG1-, 1990)

の程度融解量が増えるのかという試算は、何人かの研究者によって行なわれている（例えば、Braithwaite and Olesen, 1990）。しかし、その計算をグリーンランド氷床全体に拡大して適用して、温暖化が生じた時の全体予測を行なうにはいくつかの問題がある。

その1つは、温暖化した時に消耗域面積が従来よりどの程度拡大するかという見積りであるが、この問題はグリーンランドでは比較的詳しく調べられている (Ambach and Kuhn, 1985)。しかし、雪線よりやや上部にある浸透帯（表面で融解が生じてその融解水が下層の積雪に浸透して再凍結する領域。そこでは融解が生じて質量が減少する訳ではない。）での融解・再凍結過程の研究が非常に少なく、温暖化によって浸透帯がどのように影響されるかという見積りは全くなされていないともいえる現状である。

しかしさらに大きな問題は、温暖化とは単に気温が上昇するだけではないだろうということである。気温の上昇に伴って雲量も増加し、降水量が増えるであろうことは、前章でも述べたとおりである。雲量が増加すれば、氷床上に降りそそぐ太陽の放射量は減少し、そのぶん融解量は減少すると考えられる。極域では、融解の主たる熱源は太陽からの短波放射だからである (Braithwaite, 1981)。

グリーンランド氷床の質量損失の半分以上を占める氷山分離による流出も、温暖化によってどう影響

されるかということに関してはほとんど何もわかっていない。融解水と氷山形成速度との間の相関式が正しいと仮定すれば、流出量は増加しそうだ (Bindshadler (1985) は述べているが、IPCC-WG1-(1990) では、氷山の源となる氷床端はほとんど海に浮かんでいるから関係ないとしている。

以上述べてきたのは氷床の質量の支出に関してであるが、南極氷床の場合と同様に、収入項である降雪量が温暖化に伴ってどう変化するのが大きな問題である。一般的に降水量は増加するとはいえそうだが、南極と違ってグリーンランドは比較的暖かいため、降水がすべて降雪になるとはいい難い。つまり、降水量の増加が充分寒冷な場所あるいは充分寒冷な時期に生じる場合には降雪量が増加したことになるが、そうでない場合には降雨量が増えただけでかえって降雪量は減少することになる。従って、温暖化に伴って降水の地域分布や季節パターン等の変化につれて降雪量は非常に複雑に変化することになる。

図3に示したのは、グリーンランド全域で平均した最近100年間の夏の気温の変動である (IPCC-WG1-, 1990)。南極域で見られた1960年代後半以降の温暖化は見られず、1930年代をピークとして逆に気温の低下傾向が認められる。充分に寒冷だと考えられる氷床の頂部付近の降雪量（正確には表面収支）の変化 (図4: Clausen *et al.*, 1988) をこれと比較してみると、確かに気温の高い時期には降雪量が多いという相関がありそ

図4 グリーンランド氷床頂部での降雪量の変動 (Clausen *et al.*, 1988)

うだが、定量的議論はまだなされていない。

Zwally (1989) は、衛星による標高測定の結果から、1970年代半ばから1980年代半ばにかけてグリーンランド氷床南部の氷厚が増加しており、これは温暖化に伴う降雪量の増加によるものではないかと述べている。しかし、標高測定の精度が悪いことに加えて、衛星による観測期間が丁度氷床の消耗が比較的小さい時期に相当しているため、引きつづく消耗が激しい時期への過渡的現象にすぎないかもしれない (Braithwaite, 1991)。

グリーンランド氷床の氷厚変動を精度良く求めたのは、氷床の中央部をほぼ北緯70°線に沿って横断してレベル測量を繰り返したグリーンランド国際雪氷調査隊 (EGIG) のデータであろう。その結果によると (図5: Van der Veen, 1991), 1959年から1968年にかけて消耗域では氷厚の減少が、堆積域では逆に氷厚の増加 (約0.1m/年) が認められる。この観測期間は気温が低下傾向にはあるが全体的には高温期に相当しており (図3), 温暖期における氷床頂部付近における多雪と周辺部 (消耗域) における融解の増加を裏付けているようである。

もしそうだとすれば、温暖化によって氷床の中央部はどんどんその氷厚が増加し、周辺部では氷がどんどん薄くなるという現象が生じることになる。そうすると氷床の力学的バランスが崩れて流動量が急激に増加し、再び氷床はその中央部の氷厚を薄くしようとするであろう。この時、温暖化によって雪線高度が上昇していれば、グリーンランド氷床はその頂部も含めて全体が消耗域になってしまい、ただ衰退の一途をたどることになるかもしれない (Bindshadler, 1985), というお話も成立してくる。しかしながら、温暖化が生じた時に降雪量がどの程度変化するかという大前提となる問題についてすら定量的検討ができていない現状では、このシナリオをどの程度真剣に評価しなければならないかということさえ不明なのである。

IV. 氷帽と氷河

図6に示したのは、グリーンランドの西隣りにある南メルビルおよびメヒガン氷帽とを合わせた質量収支の観測結果である (Koerner *et al.*, 1989)。最近の温暖化といわれている1970年代後

図5 グリーンランドの氷厚変化 (Van der Veen, 1991)

図6 北極域の氷帽の収支の変動 (Koerner *et al.*, 1989)

半より、北極域の氷帽の質量収支はプラス、つまりその体積が増加してきている傾向がうかがわれる。ということは、温暖化による融解量の増加よりも、温暖化に伴う降雪量の増加効果の方が大きいということを物語っているようである。

しかし、北極域で最近最も温暖化が顕著であったのは1930年代をピークとして1960年代の前半に至る時期であり (図3)、図6で1960年代の前半に氷帽の収支が大きなマイナスの値を示していることは上の考え方と矛盾する。顕著な温暖期には融解量の増加が卓越すると読みとれるからである。温暖化が生じた時の予測のためには、さらに長期のデータが必要であると考えられるが、質量収支

の観測を長期間継続してきた氷河は非常に少ない。

そこで Meier (1984) は、約100年の観測がある3つの氷河が小氷期以後の温暖化傾向の中でほぼ一様にその体積が減少してきたことに着目して、そのデータから世界各地の多くの氷河の挙動を推定した。その時に用いた前提は、氷河の年間収支の変動は冬期の収支と夏期の収支 (ともに正の値として) の合計に比例するということである。この仮定は以下の2つの仮定を内包している。その1つは、氷河の収入のほとんどは冬期間の降雪であり、支出のほとんどは夏期の融解によるものである。もう1つは、収入・支出ともに大きい氷河は年間収支の変動も大きいというものである。

後者の仮定は定性的には納得しやすいものであるが、冬期・夏期収支の合計と年間収支の変動との間に比例関係があるかどうかの定量的裏付けは無い。前者の仮定は、冬期涵養型と呼ばれる欧米の氷河については成立するが、夏期涵養型と呼ばれるヒマラヤの氷河など (Ageta and Higuchi, 1984) では全く成立しない。夏期涵養型の氷河では、氷河上での雪の堆積と融解とが夏期に同時に生じているため、収入と支出とを季節的に分離できないからである。そこでの収入項と支出項それぞれをおおよそ見積るには、夏期における「高標高域収支」と「低標高域収支」のような概念を持

ち込む必要があろう。

本章のはじめに北極域の氷帽を例にとって述べたように、冬期涵養型氷河では、温暖化による影響は冬期の涵養量の増加と夏期の融解量の増加とのかねあいで決まる。つまり氷河が成長する場合と衰退する場合の両者があり得る。通常考えられているように温暖化に伴って冬期の降雪量が増加すればそれは氷河を大きくすることになり、同時に温暖化によって夏期の融解量が増えればそれは氷河を小さくする方向に働くからである。Meier (1984)の結果を見る限り、一般的には後者の効果の方が大きく、氷河が小さくなっていく方向へと進んでいきそうである。

しかしここで注目したいのは、夏期涵養型氷河の場合には、温暖化による融解量の増加に加えて、収入項も減少しそうだということである。降雪が夏期に生じるため、わずかの気温の上昇でも降雪が降雨へと変化することが考えられるからである。降雪が減るということは夏期の雪線も上昇して融解量がさらに増加するという効果も生み出す (Ageta and Higuchi, 1984)。つまり、夏期涵養型氷河は冬期涵養型氷河よりもはるかに敏感に温暖化の影響を受けることが予想されるが、Meier (1984)の見積りには、夏期涵養型氷河のことは全く考慮されていない。しかし、氷帽や氷河の変動に関する IPCC-WG1-(1990)の予測は、ほとんどこの Meier (1984)の推定を根拠にしているにすぎないのである。

V. 積 雪

地球規模の温暖化によって、季節的積雪も大きく影響されるであろうことは想像に難くない。春先の気温が上昇すれば、本来は雪として降っていたものが雨へと変化し、さらに、融解が促進されて積雪期間が減少するようになろう。しかし、前章までに述べてきたように、充分寒冷な時期に降水が生じる場所では、温暖化に伴う降水量の増加のために、積雪量の増加あるいは積雪期間の長期化となることもあり得る。つまり場所によっては全く逆の変化として現われることを頭に入れておく必要がある。

IPCC-WG2-(1990)によれば、ニュージーランドでは、 3°C の気温上昇があれば標高2,300mよりも低い場所では雪の涵養量が減少し、雪線が300mから400m上昇するという。このため、降水量が15%増加したとしても、季節的積雪の蓄積量が全体として半分近くまで減少するであろうとのことである。アメリカのモンタナ州での試算によれば (Cooley, 1990)、 2°C の気温上昇によって、積雪量の年最大値が標高1,700mの地点では現在の半分程度に減少する。これに対して、標高2,164m地点ではその減少量は小さく、わずか15%程度だろうとのこと。しかしこれらの試算はモデル計算による予測であって、最近の温暖化（それぞれの地域でも生じているとすれば）に伴った実証データではない。しかも、モデルの中には気温の上昇に伴う降水量の増加の効果は入っていないようである。

気温が上昇すれば降水量が増加するであろうことは全球モデルの予測の結果であるが、様々な地域における実証データは非常に少ない。わが国では、過去の寒候期と暖候期とを比較して、後者の場合の方が降水量が幾分多いという吉野ほか (1990)の報告がある程度であろう (図7)。地域によっては全く逆の関係が得られているところもある。図8に示したのは、新潟県長岡市における1月の積算降雪深、降水量および気温の年々変動である (清水, 1992)。降雪深と降水量の間には正の相関が、この両者と気温の間には負の相関が明瞭に見てとれる。つまり気温が高い年には降水量も降雪量も少ないということである。

日本海側日本の積雪は、基本的には極域寒気の吹き出しによってもたらされるものであるから、極域の気温が上昇するという最近の温暖化によって当然冬期の季節風は弱まり、わが国の積雪は減少すると考えられる。しかし、地球温暖化によってわが国は逆に寒冷化し、積雪量は増加するというシナリオ (安成・森永, 1990)もあり、今のところまだ確実なことはわかっていない。

ユーラシア大陸の積雪は、インドモンスーンとの間に強い相関を持っており (Hahn and Shukla, 1976)、またエルニーニョ・南方振動との密

図7 暖候期と寒候期の降水量の比較（吉野ほか，1990）

図8 長岡市の降雪深，降水量および気温の変動（清水，1992）

接な関係が指摘される（安成，1989）など，地球気候のダイナミズムの中でその重要性が認識されてきている。ユーラシアの積雪量が増加すると北アメリカの表面温度が低下して，氷期の引金になるかもしれないともいう（Yasunari *et al.*, 1991）。温暖化によってユーラシアの積雪はどう変化するのだろうか。

1960年代後半から1980年代後半にかけての温暖化の地域分布を示した Jones（1988）の図を見る

と（図9），極域とならんで，ユーラシア大陸全域が広く温暖化してきているようだ。この気温上昇が続くとすると，ユーラシアの積雪は次第に減少していくと考える方が自然であろう。中国西部の崑崙山脈中の氷河コア解析結果では，最近30年間で，積雪量は減少傾向にあるという結果もでている（中尾，未発表）。しかし，過去20年にわたる中国国内の雪データをコンパイルした Li（1987）は，地球規模の温暖化と連動するように，1970年

図9 北半球における最近の温暖化 (Jones, 1988)

図10 中国における降雪量と積雪深の変動 (Li, 1987)

代より降雪量、積雪量ともに増加してきたと報告している (図10)。このように、確かに温暖化が進行しているらしいユーラシア中央域でも、積雪の変化についてはよくわからない。

図11に示したのは、2°Cの温暖化が生じた時に、ユーラシア北部の永久凍土の面積がどの程度減少するかという IPCC-WG 2-(1990) の見積りである。約10%の永久凍土帯が消滅するという。温

暖化による永久凍土への影響は IPCC-WG2-の報告に詳しいので本稿では述べないが、1つだけ指摘しておきたいのは、永久凍土の盛衰に積雪の状態が大きく影響するということである。例えば Goodrich (1982) によれば、最大積雪深が増加すればその断熱効果によって地表面温度が急激に上昇するという。従って、極端な場合、温暖化によって積雪が減少すれば、冬の寒気が地中に浸透

図11 ユーラシア北部の永久凍土の衰退 (IPCC-WG2-, 1990)

し易くなり、凍土が発達することもあり得るのである。

海水の成長にも積雪は大きく影響する。一般的には、海水上に積雪があればその断熱効果によって、海水の成長速度は非常に遅くなる（例えば、Nakawo and Sinha, 1981）。ところが、南極のウエッデル海やリュツオ・ホルム湾では、積雪が多い所ほど海水が厚いことが報告されている (Eicken *et al.*, 1992; 河村ほか, 1992)。これは、積雪荷重によって海水が水面下に沈み込み、上部の雪に海水が浸透したり、あるいは、積雪表面融解水が積雪層内にしみ込んだりして、いわゆる「ゆきごおり」が形成されるためである。

このように、気候システムの中で大きな役割を果たす凍土や海水の変化にとっても積雪の影響は非常に大きい。つまり、温暖化によって積雪がどう変化するかということは、それ自身の変化に加

えて他の雪氷圏の変動予測のためにも非常に重要であるにもかかわらず、本章で述べてきたように、信頼性の高い予測を行なうにはほど遠い現状である。

VI. おわりに

地球温暖化による雪氷圏への影響について述べてきたが、影響評価がむずかしい1つの理由は、温暖化が世界中どこでも一様に生じるのではないからである。最近の温暖化を報告した Jones (1988) の例 (図9) でも、場所によっては逆に寒冷化が起きている。季節的にも、1年を通じて一様に温暖化が生じるとは考えられない (IPCC-WG1-, 1990)。温暖化に伴って大気の循環場が幾分変化することによって、気温や降水量の季節変化パターンにも影響が出るであろう。

前章までに何度か触れてきたように、雪氷圏へ

の影響評価で最も重要になると考えられるのは、温暖化に伴う降水量の変化である。これも、場所や季節によって様々の変化が生じるであろうが、現在のところ、これを予測するモデル計算に対する検証データが極端に限られている。

地球環境問題に対する認識の深まりにつれて、最近の議論の中心は「対策」へと移ってきた感がある。しかし、何を重点的に、また、何を優先して「対策」を立てるのか等を検討する場合には、その根拠として科学的知見は不可欠なものである。にもかかわらず、前章までに述べてきたように、「よくわからない」ことが非常に多い現状であり、早急に我々の「知見」を増やす努力が必要である。手遅れを防ぐためには、よくわからないまでもながしかの「対策」を行なうことは必要だと思うが、それにも増して、「知見」を増やすための「研究」を推進することが重要だと考える。通常、「研究」に要する費用は「対策」に要するものに比べて微々たるものであり、資金的人的資源の投入を期待したい。

文 献

- Ageta, Y. and Higuchi, K. (1984) : Estimation of mass balance components of a summer-accumulation type glacier in the Nepal Himalaya. *Geografiska Ann.*, **66A**, 249-255.
- Ambach, W. and Kuhn, M. (1985) : The shift of equilibrium-line altitude on the Greenland Ice Sheet following climatic change. *Glaciers, Ice Sheets, and Sea Level: Effect of a CO₂-induced Climatic Change*, 225-257.
- Barnola, J. M., Raynaud, D., Korotkevich, Y. S. and Lorius, C. (1987) : Vostok ice core provides 160,000-year record of atmospheric CO₂. *Nature*, **329**, 408-414.
- Bindschadler, R. A. (1985) : Contribution of the Greenland Ice Cap to changing sea level: Present and future. *Glaciers, Ice Sheets, and Sea Level: Effect of a CO₂-induced Climatic Change*, 258-266.
- Braithwaite, R. J. (1981) : On glacier energy balance, ablation and air temperature. *J. Glaciology*, **27**, 381-391.
- Braithwaite, R. J. (1991) : Sea level rise caused by increased melting of the Greenland Ice Sheet. *Proc. Intl Conference on Climatic Impacts on the Environment and Society*, **B**, 57-62.
- Braithwaite, R. J. and Olesen, O. B. (1990) : Increased ablation at the margin of the Greenland Ice Sheet under a greenhouse-effect climate. *Ann. Glaciology*, **14**, 20-22.
- Clausen, H. B., Gundestrup, H. B., Johnsen, S. J., Bindschadler, R. and Zwally, J. (1988) : Glaciological investigations in the Crete area, central Greenland: A search for a new deep drilling site. *Ann. Glaciology*, **10**, 10-15.
- Cooley, K. R. (1990) : Effects of CO₂-induced climatic changes on snowpack and streamflow. *Hydrological Sciences Journal*, **35**, 511-522.
- Eicken, H., Lange, M. A., Hubberten, H., Wadhams, P., Garrity, C. and Ackley, S. F. (1992) : Snow and meteoric ice in the Weddell Sea. *Preprint of the Symposium on Snow and Snow-related Problems*.
- Fortuin, J. P. and Oerlemans, J. (1990) : Parameterization of the annual surface temperature and mass balance of Antarctica. *Ann. Glaciology*, **14**, 78-84.
- Friedli, H., Lotscher, H., Oeschger, H., Siegenthaler, U. and Stauffer, B. (1986) : Ice core record of ¹³C/¹²C ratio of atmospheric CO₂ in the past two centuries. *Nature*, **324**, 237-238.
- Giovinetto, M. B. and Bull, C. (1987) : Summary and analyses of surface mass balance compilations for Antarctica, 1960-1985. *Byrd Polar Research Center, Report*, No. 1.
- Goodrich, L. E. (1982) : The influence of snow cover on the ground thermal regime. *Canadian Geotechnical Journal*, **19**, 421-432.
- Hahn, D. G. and Shukla, J. (1976) : An apparent relationship between Eurasian snow cover and Indian monsoon rainfall. *J. Atmospheric Sciences*, **33**, 2461-2462.
- Hughes, T. J. (1977) : West Antarctic ice streams. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **15**, 1-46.
- IPCC-WG1-(Intergovernmental Panel on Climate Change—Working Group 1—) (1990) : *Climate Change, The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press.
- IPCC-WG2-(Intergovernmental Panel on Climate Change—Working Group 2—) (1990) : *Climate Change, The IPCC Impact Assessment*. Australian Government Publishing Service. (邦訳 (1992) : 地球温暖化の影響予測 —IPCC 第2作業部会報告書—。中央法規出版)
- Jones, P. D. (1988) : Hemispheric surface air temperature variations: Recent trends and an update to 1987. *J. Climate*, **1**, 654-660.
- 河村俊行・大島慶一郎・牛尾収輝・滝沢隆俊 (1992) : リュツオ・ホルム湾の海氷成長。第15回極域気水圏シンポジウム、プログラム・講演要旨、p.13.
- Koerner, R., Dubey, R. and Parnandi, M. (1989) : Scientists monitor climate and pollution from ice

- caps and glaciers. *GEOS*, 18-3, 33-38.
- Li, P. (1987) : Seasonal snow resources and their fluctuations in China. *IAHS Publication*, **166**, 93-104.
- Lorius, C., Jouzel, J., Ritz, C., Merlivat, L., Barkov, N. I., Korotkevich, Y. S. and Kotlyakov, V. M. (1985) : A 150,000-year climatic record from Antarctic ice. *Nature*, **316**, 591-596.
- Meier, M. F. (1984) : Contribution of small glaciers to global sea level. *Science*, **226**, 1418-1421.
- Morgan, V. I., Goodwin, I. D., Etheridge, D. M. and Wookey, C. W. (1991) : Evidence from Antarctic ice cores for recent increases in snow accumulation. *Nature*, **354**, 58-60.
- 中尾正義 (1989) : 南極の崩壊と海面上昇. 地学雑誌, **98**, 562-575.
- Nakawo, M. and Sinha, N. K. (1981) : Growth rate and salinity profile of first-year sea ice in the high Arctic. *J. Glaciology*, **27**, 315-330.
- Nakawo, M., Shimizu, M., Kameda, T. and Watanabe, O. (1991) : Recent thinning of the ice sheet near Mizuho Station, East Antarctica. *Proc. Intl Conference on Climatic Impacts on the Environment and Society*, **B**, 63-68.
- Oerlemans, J. and Van der Veen, C. J. (1984) : *Ice Sheets and Climate*. D. Reidel Publishing company.
- Robin, G. de Q. (1977) : Ice cores and climate change. *Phil. Trans. R. Soc. London*, **B280**, 143-168.
- Schresinger, M. E. (1986) : General circulation model simulations of carbon—Induced equilibrium climate change. *Proc. Canadian Climate Program Workshop*, 15-51.
- 清水増治郎 (1992) : 長岡における年最大積雪深の変動と最近の小雪. 防災科学技術研究所ニュース, **65**, 1-3.
- Takahashi, S. (1988) : A preliminary estimation of drifting snow convergence along a flow line of Shirase Glacier, East Antarctica. *Bull. Glacier Res.*, **6**, 41-46.
- Van der Veen, C. J. (1991) : State of balance of the cryosphere. *Rev. Geophys.*, **29**, 433-455.
- Weertman, J. (1961) : Equilibrium profile of ice caps. *J. Glaciology*, **4**, 101-110.
- White, R. M. (1989) : Greenhouse policy and climate uncertainty. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **70**, 1123-1127.
- 安成哲三 (1989) : ユーラシア大陸の積雪と ENSO—雪氷・大気・海洋結合系の提唱—. 地学雑誌, **98**, 83-92.
- Yasunari, T., Kitoh, A. and Tokioka, T. (1991) : Local and remote responses to excessive snow mass over Eurasia appearing in the northern spring and summer climate—A study with the MRI GCM—. *J. Meteor. Soc. Japan*, **69**, 473-487.
- 安成哲三・森永由紀 (1990) : 地球温暖化により十日町の雪は減る? 雪氷北信越—'90特集号—, 27-33.
- Yiou, F., Raisbeck, G. M., Bourles, D., Lorius, C. and Barkov, N. I. (1985) : ^{10}Be in ice at Vostok Antarctica during the last climatic cycle. *Nature*, **316**, 616-617.
- 吉野文雄・丹羽 薫・石井典夫・盛谷明弘 (1990) : 寒冷な時期と温暖な時期との降雨特性の比較検討. 水文水資源学会 1990 年研究発表会要旨集, 128-131.
- Zwally, H. J. (1989) : Growth of Greenland Ice Sheet: Interpretation. *Science*, **246**, 1589-1591.