

## 解 説

「地球温暖化」における不確定性と雪氷圏<sup>1)</sup>安成 哲三<sup>2)</sup>

## 要 旨

炭酸ガスなどの温室効果ガスの増加によって、地球の気候が温暖化するのではないかという「地球温暖化」問題には、気候システムにおける未解明な機構による大きな不確定性が伴っている。ここでは、その主要なひとつである雪氷圏に起因する不確定性に関する現在の認識と、今後の課題についてのべる。

## 1. はじめに

人間活動によるCO<sub>2</sub>をはじめとする温室効果ガスの増加が、地球の気候を温暖化し、ひいては人類の生存に深刻な影響を与えるのではないかという、いわゆる「地球温暖化」問題は、現在の地球環境問題の中心的課題となっている。確かに19世紀後半からの大気中のCO<sub>2</sub>濃度の顕著な増加と、北半球の地上気温の顕著な増加傾向(図1)は、両者のあいだに密接な因果関係のあることを示唆しているようにみえる。しかしながらこの問題は、温室効果ガスの増加に対し、複雑な地球の気候システムがどのように応答するかという大問題そのものであり、この両者を結びつけるには、多くの未解明・不確定な要素が含まれている。タイトルの「地球温暖化」は、それ故カッコつきなのである。この「地球温暖化」問題における不確定性に関連しては、例えば世界各国の関連研究者で組織されているIPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change; 気候変動に関する政府間パネル)の第一作業部会(Working Group I)では、総合的な科学的評価をおこない、問題点の指摘と解明に向けての勧告をおこなっている(IPCC, 1990; 1992)。

温室効果ガスの増加という状況に対し、雪氷圏が、気候システムの一部として、どのようなフィードバックを担い、どのような応答を示しつつあるのか、また今後示しうるのかという問題は、雲および水蒸気のフィードバックと共に、この不確定性の主要な部分を担っている

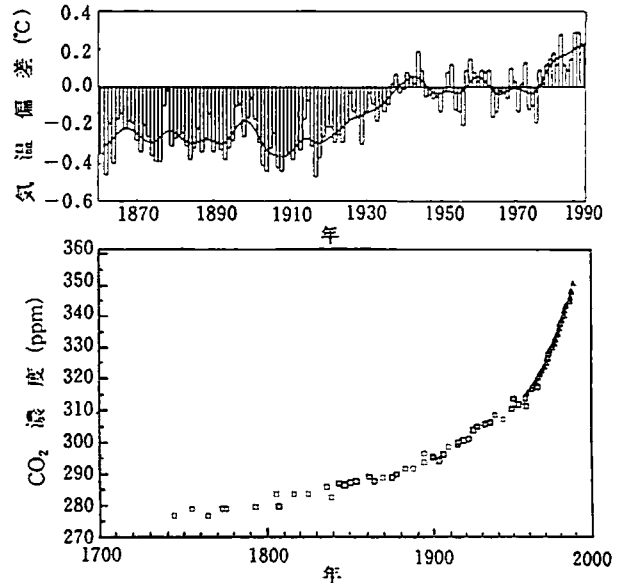


図1 北半球陸域上の平均地上気温の変動と炭酸ガス濃度の変動。気温は、1951-80の平均値からの偏差。炭酸ガス濃度は、南極氷床コア解析の結果と1958年以降の観測値をつないだものである。(IPCC, 1990, 1992より改変)

といえる。もちろん、「地球温暖化」による雪氷圏の変動そのものも、居住圏や水資源問題などのように、人間活動へのインパクトという視点から、重要な意味をもっていることは、いうまでもない。

さて、図2に示した最近約20年の北半球陸上における年平均気温偏差とNOAA衛星画像から求めた積雪面積偏差の長期傾向は、(逆符号で)よく合っているように見える。図3は、過去30年(1951-80)の平均値に対する最近10年(1981-90)の年平均気温偏差の分布である。この分布で顕著なことは、ユーラシア大陸と北米大陸の

1) Uncertainties in the global warming issue and the cryosphere.

2) 筑波大学地球科学系

〒305 つくば市天王台1-1-1

(Tetsuzo YASUNARI, Institute of Geoscience, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan)

高緯度側の内陸での非常に大きな正の気温偏差であり、この年平均の偏差は、特に冬と春の偏差の寄与が大きい。図1に示された最近の急激な気温の上昇は、実質的にこの地域の気温上昇で決まっていると考えてよい。これは、温室効果ガスの増加と、どのような関係にあるのだろうか。気温と積雪あるいは永久凍土との何らかのフィードバックの存在を示唆しているのであろうか。

本稿では、このような疑問を出発点として、「地球温暖化」機構における不確定な要素のうち、雪氷学あるいは雪氷気候学に関連した問題について、IPCC 報告などを参照しつつ、いくつかのコメントを試みる。なお、氷期問題も含めた大気・雪氷相互作用の全体に関する詳しい解説は、近々刊行される予定の気象研究ノート(安成編, 1992)を参照されたい。

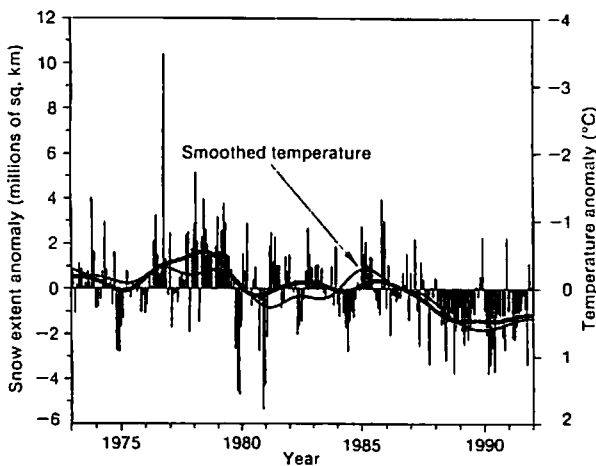


図2 平滑化した北半球積雪面積偏差(太実線)と陸域上の年平均気温偏差(細実線)。細いたて棒線は、月々の積雪面積偏差を示す。積雪は1973-91年の平均からの、気温は1951-80年(30N以北)の平均からの偏差を示す。(IPCC, 1992)

2. アルベード・フィードバックは本当にあるのか?

気温が下(上)がれば雪氷域が増加(減少)し、増加(減少)した雪氷域は日射に対するアルベード効果を強める(弱める)ことにより、さらに気温を下(上)げるというアルベード・フィードバックは、気候システムにおける典型的な正のフィードバック機構として、よく指摘される。Budyko (1969) や Sellers (1969) により提案された熱平衡気候モデルにおいて議論された「白い地球」パラドックス、すなわち、現在と同じ太陽放射量の条件下でも、全球凍結の平衡状態が有り得るという結果も、このアルベード・フィードバックのなせるわざである。

大気のCO<sub>2</sub>濃度が倍増した時の気候の平衡状態は、GCM (General Circulation Model: 大気大循環モデル) による数値実験で、数多くなされている。これらの実験結果は、程度や多少の分布の差はあっても、ほとんどのケースにおいて、コントロール実験(CO<sub>2</sub>濃度の現在値を用いた実験)結果に対する地上気温偏差は、極域の秋から冬にかけて最も大きくなっている(図4)。これは、CO<sub>2</sub>増加による相対的な気温上昇により、秋から冬にかけての海水の結氷期間が短くなると、アルベード・フィードバックのため極域がさらに暖まるという過程が、モデルの中で起こっているからである。

しかしながら、Barnett et al. (1989) や Yasunari et al. (1991) のGCM 実験は、アルベード・フィードバックだけでは、地表面付近の温度を下げて大気層全体を大きく冷却するには至らないという空間的限定性を示している。但し、暖候期のチベット高原のように、日射が強かつ大気層も薄いところでは、このフィードバックが効果的に大気を冷却することを、Yasunari et al. (1991) では、指摘している。

一方、Cohen and Rind (1991) は、地表面での熱フ

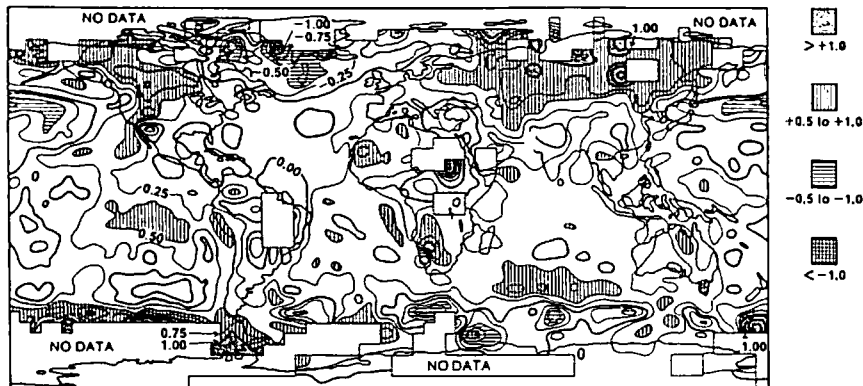


図3 1981-90の年平均地上気温偏差の全球分布。1951-80の30年平均からの偏差で示す。単位は°C。(IPCC, 1992)

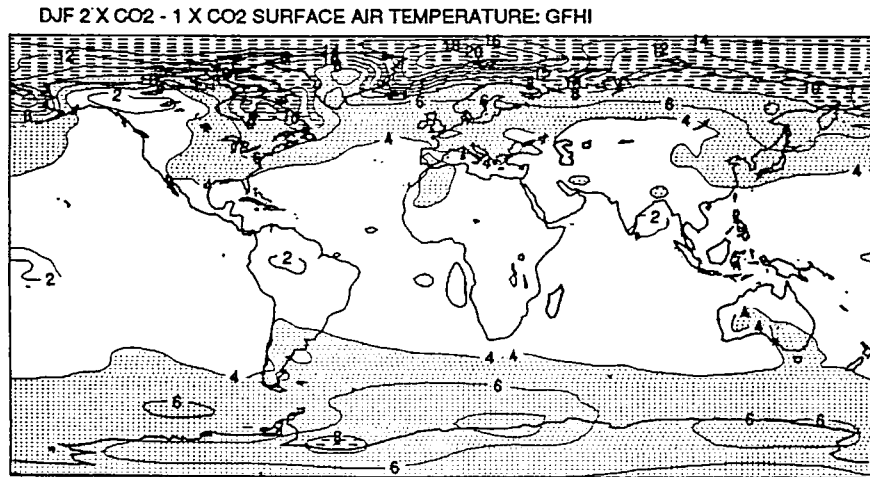


図4 大気中の濃度 CO<sub>2</sub>を倍増させた時のGCMによる平衡応答実験での冬季の地上気温偏差 (NOAA 地球流体力学研究所 (GFDL) モデルによる例). 現在値による実験結果との差で示されている. 単位は°C. (IPCC, 1992)

ラックスが大気の接地境界層の安定度に依存するようなパラメタリゼーションを地表面過程として組み込んだGCMにより、大陸内部で積雪の多い場合と少ない場合の比較実験をおこない、春(融雪期)の地表面熱収支を比較した。その結果、積雪の多い場合は(少ない場合に比べ)、アルベド増加によって短波放射は減少するが、これに対応して地表面からは、長波放射が減少するだけでなく、安定成層化した接地境界層のため、顕熱・潜熱フラックスとも大きく減少し、地表面冷却は抑えられる傾向になるという負のフィードバックを見だし、アルベド・フィードバックの大気に対する(冷源)効果の時間的限定性を主張している。

ちなみに、最近10-20年の現実の気温上昇は、図3のように、高緯度の内陸地域を中心として起こっており、北極周辺の海氷域は、グリーンランド付近を中心として、気温はむしろ下降傾向を示している。北極域の海水が長期傾向として薄くなったり、少なくなったりしているという決定的な証拠は、見られない (McLaren et al., 1990) が、1979年からの Nimbus-7 SMMR のマイクロ波による観測は、84年以降北半球の海氷面積が減少傾向にあることを示唆している (Gloersen and Campbell, 1991)。

### 3. 雲をいれると雪氷のフィードバックが変わる?

さらに、実際の気候システムでは、雪氷のフィードバックに関連して、大気の安定度や気温、水蒸気量も変化し、雲の生成、消滅が起こる。GCMでも、モデル毎に雲過程のさまざまなパラメータ化がなされている。この雲生成・消滅の過程を考慮した場合のアルベド・

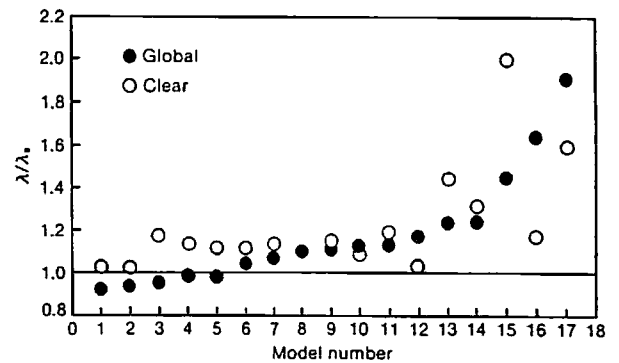


図5 17の大気大循環モデルでシミュレートされた雪氷フィードバックの強さ ( $\lambda/\lambda_s$ ).  $\lambda_s$  は、積雪を固定した場合の気候感度. 黒丸(白丸)は雲のフィードバックがある(ない)場合の感度 (Cess et al., 1991)

フィードバックはどうなるか。図5は、現在世界にある17の異なるGCMの中でのアルベド・フィードバックを、雲の効果を検討した場合としない場合に分けて示したものである (Cess et al., 1991)。ここで $\lambda$ は、CO<sub>2</sub>濃度を瞬間的に倍増した場合の地球・大気系の正味放射の変化  $\Delta Q$  が、地上気温の変化  $\Delta T_s$  にどの程度反映するかを示した一種の気候変化の感度指数で、

$$\lambda = \frac{1}{\Delta F / \Delta T_s - \Delta S / \Delta T_s}$$

で定義されている。 $\Delta F$ は地球・大気系からの外向き長波放射の変化量、 $\Delta S$ は地球・大気系に実質的に入射する短波放射の変化量である。 $\lambda_s$ は、モデルでの雪氷分布を固定した場合の $\lambda$ である。

この図から分かることは、まずモデル間のアルベド

ド・フィードバック自体に大きなばらつきがあること、雲の効果は、大部分の場合、雪氷のアルベード・フィードバックを弱める方向に働いているが、(図中、右寄りの)アルベード・フィードバックの大きなモデルでは、正にしる負にしる、雲の効果も大きいことを示唆させる。アルベード・フィードバックによる地表面付近の気温低下は、おそらく下層雲の増加を招き、この雲量の増加が地表の放射加熱を強め、モデルによっては(図中左寄りのケースのように)  $\lambda/\lambda_0$  が1以下、即ち雲・雪氷相互作用系が、温室効果などによる放射強制の変化に対し、弱いながら負のフィードバック効果を引き起こしていると考えられる。

#### 4. 海氷の変動は何で決まっているか?

前節までに述べたGCMにもとづく議論では、雪氷分布の変化、特に海氷分布の変化は、基本的には海面での熱収支と海面水温のみで表現されている。しかし、実際の海水は、さまざまな密接度の分布をもった集合体であり、それぞれの海氷域は、表面の風の応力場と海流の影響を受けて、その密接度(海水の面積密度)を変化させている。海氷片が密接につながって厚くなったところがある一方、リード(lead)とよばれる開水面が広がっていたりもする。このような海氷の力学的効果を考慮したモデルは、Hibler(1979)やFlato and Hibler(1990)によって作られた(詳しくは、大塚(1992)を参照)。

これらの力学効果を含んだ海水のモデル(Hibler, 1984; Lemke et al., 1990)では、熱力学のみを含んだモデルに比べ、温室効果ガス濃度の変化などによる正味の放射エネルギーの変化に対する気候感度は一般に小さくなっている。したがって、これらの海水モデルを組み込んだGCM実験では、図4で示したような極域での正の大きな気温偏差は、より小さくなる可能性がある。しかし一方で、力学効果を含むモデルは、地表付近の風の応力場の変化に敏感であり、この効果が、「地球温暖化」にともなうどう現れるか、興味深いところであるが、現在の大部分のGCMは、残念ながら極域の風の場をうまく再現しておらず、上記のより改良された海水モデルがGCMで活かされるのは、まだ先になりそうである。

海水のモデリングにおける重要な問題は、まだいくつか残されている。例えば、海氷の密接度とアルベードの関係である。海水の取りうるアルベードの変化により、グローバルな平均気温が1K程度変化するほか、CO<sub>2</sub>増加に対する感度も変化するという指摘(Meehl and Washington, 1990)がある。また、実際の海氷には、リード(lead)がさまざまな状態で入っているが、最近

このリードを通しての顕熱・潜熱のフラックスが、極域の気候に与える影響が注目されている。このリードの大气・海水間の熱交換に果たす効果を入れた海氷モデルをGCMに組み込んでCO<sub>2</sub>増加時の数値実験をおこなった結果、図4に見られるような極域の大きな感度がかなり弱められることを、Simmonds and Budd(1990)は明らかにしている。

さらに北極海域では、大陸からの河川や降水の真水の供給や、低緯度からの異なった塩分濃度の海水の流入の変化などによる水収支・塩分収支の変動が、年々の海水の成長と分布に大きな影響を与える可能性や、その海水の(真水としての)北大西洋への流出が、深層水循環に与える影響(Aagaard and Carmack, 1989)などが指摘されている。しかしこのような過程は、まだモデルでもほとんど考慮されていない。これらの北極域での大气・海洋・海水相互作用における未解決の問題を、観測とモデリングの両面から攻めようというACSYS(Arctic Climate System Study)というプロジェクトが、WCRPの一環として、立案されている(JSC Study Group on ACSYS, 1992)。

#### 5. 積雪水文学的フィードバックの重要性

CO<sub>2</sub>が増加した場合、アジア・モンスーンはどうなるのか、干ばつ傾向になるのか、多雨傾向になるのか、「地球温暖化」問題で、中・低緯度に住む多くの人々にとって最も重要なのは、気温よりもむしろ、このような降水量変化に関する情報であろう。この問題に関して、大陸スケールの積雪の水文学的フィードバックが議論されている。

積雪には、アルベード・フィードバックの他に、積雪が融雪の過程で融解の潜熱を吸収し、さらに融雪後は、融雪により水分が増加した土壌が蒸発の潜熱を増加させることにより大気への顕熱輸送を抑え、地表面近くの大気を冷却するという、積雪(融雪)水文学的フィードバック(図6)があると指摘されている(Yeh et al., 1983)。先に述べたように、アルベード・フィードバックには多くの疑問が現在投げかけられており、季節的な積雪(の偏差)が気候の年々変動に及ぼす影響としては、むしろこの水文学的フィードバックが最も重要と考えられる。Barnett et al.(1989)やYasunari et al.(1991)のGCMによる実験では、春先に与えた正の積雪偏差が、このフィードバックを通して、引き続き夏のモンスーンを弱めるという結果を得ている。Yamazaki(1989)は、アルベード・フィードバックによる融雪の遅れとこの水文学的フィードバックの相乗効果が、夏の気候に大きな

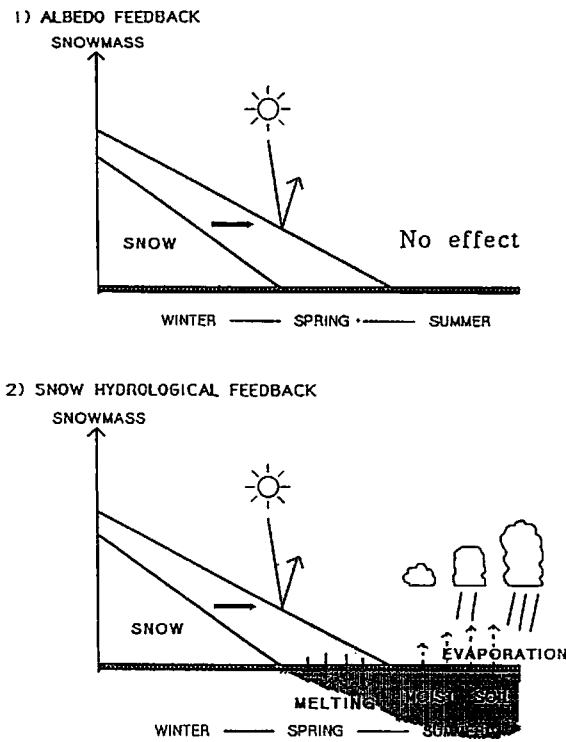


図6 1) アルベド・フィードバックと 2) 水文学フィードバックの模式図 (Yasunari et al., 1991)

影響を与えることも指摘している。

CO<sub>2</sub>倍増のGCM実験は、この過程が夏のアジアモンスーンにとって非常に重要であるが、同時に不確定な要素も大きいことを示唆している。例えば図7は、Manabe and Wetherald (1987) による結果である。CO<sub>2</sub>倍増時には、気温と水蒸気量の増加により、大陸上の中・高緯度における冬の積雪(降水)量は増加するが、春の融雪時に土壤水分が飽和に達していると、冬のあいだに増加した積雪水量もほとんど流出してしまう。そのため、夏の土壌は、強くなった放射エネルギーと気温上昇により、むしろ基準状態より乾いてしまい(図7(c))、陸面の加熱はむしろ強まり、モンスーンは基準よりも活発になるという。

しかし、この効果も、多くの不確定な要素を含んでいる。その第一は、土壌が融雪水をどのような過程で、どの程度保持し、そして蒸発させているかという、土壌水文学の基本的な問題である。融雪の水文学的フィードバックは、冬の積雪量だけではなく、融雪開始時期の土壤水分の飽和度にも関係している。ここに示したように、融雪開始時にすでに飽和状態に近いと、積雪が多くてもこのフィードバックは、ほとんど効かないが、十分に乾いた状態なら、このフィードバックは有効に働き、夏のモンスーンは弱くなるという結果も得られている。土壌

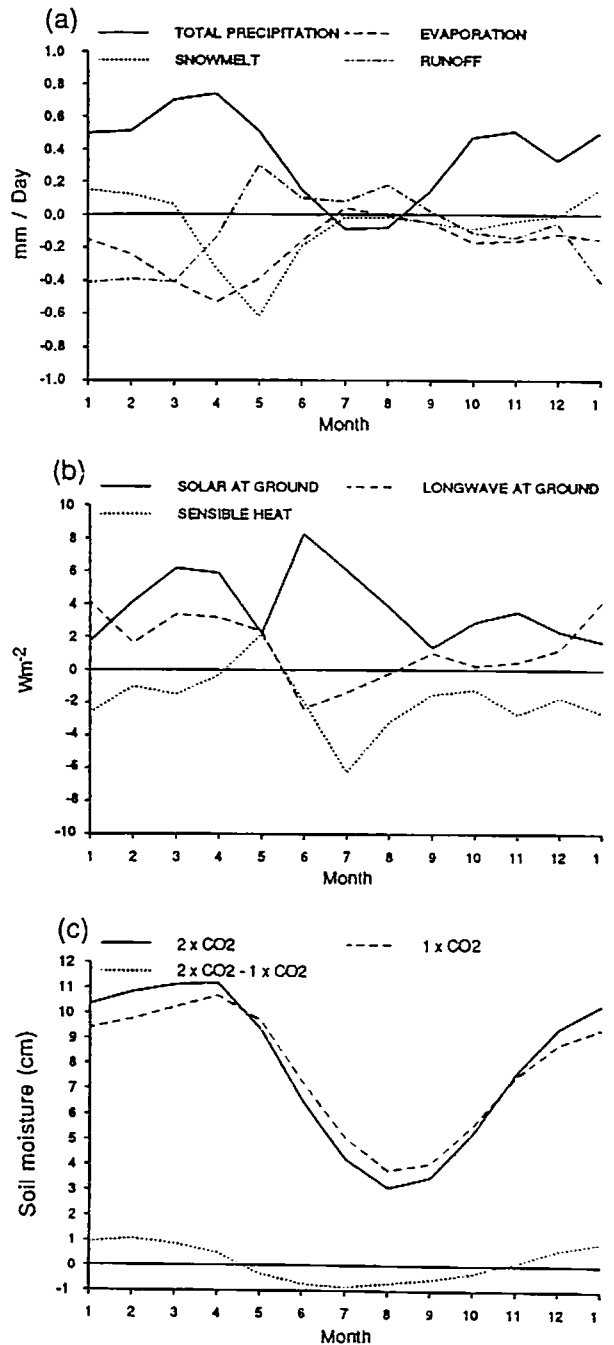


図7 CO<sub>2</sub>倍増による大陸上(35N-55N)の(a)水収支変化(mm day<sup>-1</sup>)、(b)熱収支変化(Wm<sup>-2</sup>)と(c)土壌水分変化(Manabe and Wetherald, 1987)

水分を決める地表面の水収支モデルの任意性も結果を大きく変えうる。地表面の水収支は、最も簡単な「バケツモデル」(Manabe, 1969)と呼ばれるものから、植生による蒸発散の効果も取り入れた「生物圏モデル」と呼ばれる複雑なもの(Sellers et al., 1986など)までさまざまである。この問題に関しては、しかし、モデルによる違いもさることながら、それを検証するための観測

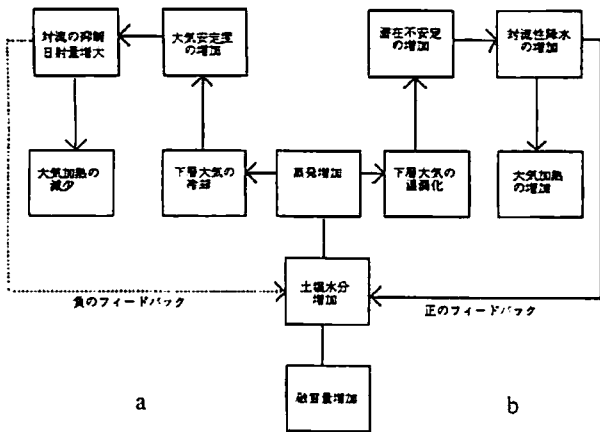


図8 融雪後の土壤水分変化による、蒸発、下層雲形成と降水、気温間の二つの可能なフィードバックの模式図

データの不足は決定的である。

水文学的フィードバックの強さは、さらに、図8に示すような土壤水分-蒸発-雲量(降水量)のあいだに、どのようなフィードバックが存在するかにも依存する。例えば、もし冬の積雪の正偏差が、aのように、融雪による土壤水分の増加→蒸発の増加による大気下層の冷却→大気の安定化→対流の抑制というフィードバックを引き起こせば、大気加熱に負に働く。しかし、bのように、土壤水分の増加→蒸発の増加→大気の潜在不安定度の増加→対流の強化と降水量増加、というフィードバックが卓越すれば、結果としての大気加熱にはむしろ正に働く可能性もある。ただし、aの過程では、晴天・日射量の増加が蒸発を早め土壤の乾燥化を促進させるという負のフィードバック効果を含み、bの過程では、降水量の増加がさらに蒸発を持続させるという正のフィードバック効果を含んでいる。どちらの効果も卓越するかは、季節・地域ごとの大気状態によっても大きく変わりうることを、Barnett et al. (1989) や Yasunari et al. (1991) の GCM による実験は示唆している。

温室効果ガスの増加が、降水量やモンスーンの強さにどう影響するかは、以上のように、大陸における積雪を含む陸面・大気系の水循環過程の不確定要素に大きく依存しており、今後の観測・モデリングの必要性は非常に大きい。

6. 永久凍土—もうひとつのフィードバック？—

北半球の大陸の北半分の高山域を覆っている永久凍土帯は、「地球温暖化」と共にその表層が解け、温室効果ガスのメタンやCO<sub>2</sub>を放出して、温暖化に正のフィードバックとして働いているのではないかと、注目さ

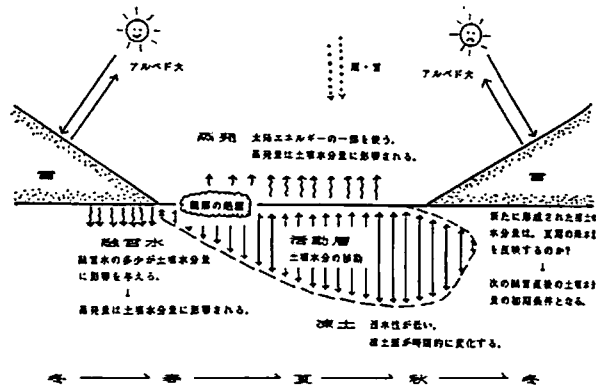


図9 季節変化の中での積雪・凍土層・土壤水分の水循環過程とフィードバックの概念図 (太田, 1992)

れている。永久凍土は、しかし、地表面の熱・水収支を通して、気候システムのフィードバックとして機能している可能性がある。

チベット高原のプレ・モンスーンからモンスーン期にかけての観測 (太田, 1992) によると、永久凍土の季節的な融解は、土壤中の水を解かして実質的に表層の土壤水分を増加させると共に、下の凍結面が止水層または不透水層として働くことによって、表層の水分貯留量または圃場水分量 (field capacity) を季節的に変化させる役割を果たしている (図9)。この効果が、シベリアなどの広域の永久凍土帯でも同様に起こっているとすると、活動層 (季節的な融解層) は、前年の (凍結前の) 水収支や冬の気温状態のメモリーとして機能しうることになる。70年代以降の北半球の急激な気温の上昇は、図3に示したように、主としてシベリアや北米大陸北部に中心があり、永久凍土の変動が積雪変動とも密接に関連しながら、気温の変動へフィードバックされている可能性は、十分にありそうである。しかしながら、このような永久凍土の役割については、まだほとんど未解明であり、今後の研究が待たれるところである。

7. 氷床・氷河の消耗による海面水位上昇はどの程度か？

海面水位の変動の検出は、観測点の偏在や測定精度、地殻運動の補正など、非常に多くの問題を抱えているが、19世紀末から現在までのグローバル平均の海面水位は、10-20cm 程度の上昇を示している (図10)。問題は、この水位の上昇を引き起こしている原因は何か、ということである。大きく分けて、以下の4つが考えられている (IPCC, 1990)。

- 1. 気温上昇に伴う海洋 (表層) の熱膨脹

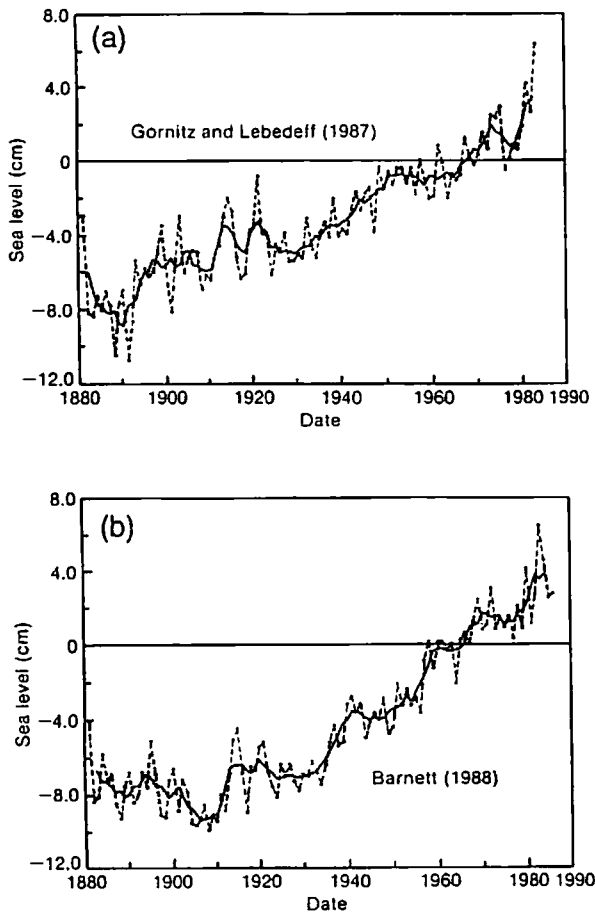


図10 過去1世紀における全球平均海面水位変動。1951-70の平均を基準とした偏差で示す。破線は年平均値、実線はその5年移動平均値。(a) Gornitz and Lebedeff (1987), (b) Barnett (1988) による。(IPCC, 1990)

2. 山岳氷河と小さな氷帽 (ice cap) の質量収支変動
3. グリーンランド氷床の質量収支変動
4. 南極氷床の質量収支変動

過去100年の気温上昇(図1参照)から推定された海洋の熱膨脹による部分は、そのうちの2-6cm程度で、あとは上記項目2, 3, 4の氷河、氷床の消耗に関係した変動であろうとされている。しかし問題は、図11に模式的に示されるように、気温変動に対する質量収支の応答が、氷河や氷床によって、微妙に、あるいは大きく異なることである。大部分の山岳氷河やグリーンランド氷床は、図中のb領域(高温領域)に存在し、南極氷床は、a領域(低温領域)に属している。したがって、現在考えられている程度の「温暖化」は、南極氷床の質量収支にはむしろプラスに働き、b領域の他の氷床・氷河には一般にマイナスに働くことになる。

確かにこの約100年、氷河の全般的な後退が、グロー

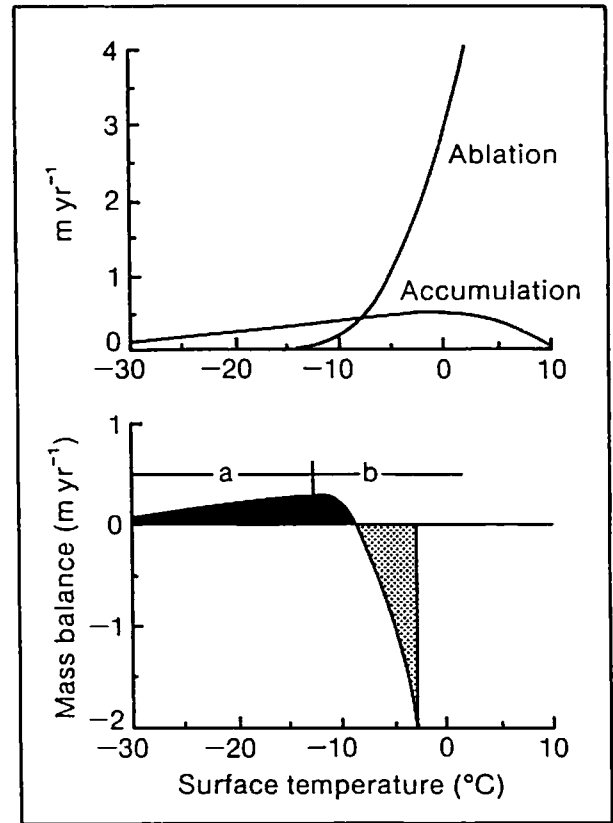


図11 氷河の年間質量収支と気温変動の関係の模式図(IPCC, 1990)

バルに認められている(Haerberli, 1990)。これは、第一次近似としては、小氷期からの「戻り」に対応するものであろうが、現実に長期的な変動が調べられているのは、地球上の氷河の1%以下であり、質量収支の観測がなされているのは、さらにその10分の1程度である(IPCC, 1992)。また、個々の氷河、あるいは氷河群の属する気候特性によって、かなり異なる質量収支-気温曲線を持っていることや、半球規模の「温暖化」と個々の山岳地域の気候(気温や降水量)の関係がほとんど未解明であることを考えると、「温暖化」と氷河の「後退」との関係はそう簡単ではない。

いっぽう南極においては、気温と質量収支の関係を観測から調べる研究はまだ非常に少ない。Bentley and Giovinetto (1990)は、最近約20年間で、大陸全体で、5-25%の質量収支(またはoutflow)の増加を見積っているが、結果の精度には大きな問題がある。Wilkes Landの氷床コア解析から、1960年代以降のこの地域の気温の上昇傾向と積雪量の増加傾向が対応しているという報告(Morgan et al., 1991)もある。

以上のように、現時点での非常に数少ない研究成果をもとに、各成因による過去の水位上昇に対する寄与(表

表1 過去100年における海面上昇に対する各過程の寄与と推定の幅。単位は cm. (ICPP, 1990)

	低い推定	最良の推定	高い推定
熱膨張	2	4	6
氷河/小規模氷帽	1.5	4	7
グリーンランド氷床	1	2.5	4
南極氷床	-5	0	5
総計	-0.5	10.5	22
観測	10	15	20

1) を IPCC はまとめたが、これらの値には、上に述べたような不確定性による大きな算定誤差がついており、みるべきであろう。

#### 8. まとめと今後の課題

ずばり言ってしまうと、要するに、気候システムにおける雪氷圏の役割は、まだよく分かっていない。雪氷学の歴史そのものは長いのに、グローバルな気候変動のメカニズムという視点からみた雪氷（気候）学は、まだほんの端緒についたばかりであるといつてよい。狭義の水文学と同様、雪氷学も、もともとローカルな、あるいはテクニカルな問題意識から出発した学であることを考えれば、現在のこのような状況もある意味では当然である。最近の「地球環境」問題に刺激されてか、雪氷学会などでも「温暖化」とか「気候変動」とか銘うったセッションやシンポジウムを開いたりしている。しかし、もともとローカルな問題意識でしか考えなかったことを、グローバルに関連づけることには、大きな注意を要する。全球スケールで議論されている気温上昇率を、そのまま個々の氷河の質量収支変動の計算に使い、「地球温暖化」による XX 氷河の質量収支への影響などということになってしまう。

しかし一方で、以上に紹介したように、グローバルな気候における雪氷圏の役割の研究は、実際の雪氷圏の過程をよく知らないコンピュータ・モデル屋によって主としてなされているのも現状である。ここで述べた不確定性をすこしでもなくしていくためには、やはり雪氷屋の働きが必要であろう。と、あっさり言うのは易しいが、雪氷学（水文学）におけるローカルとグローバルを結びつける指導原理がまだ無きに等しい現状では、これは大変な研究のフロンティアである。さらに加えて、この問題では、ここで紹介したように、積雪と雲、海水と雲、土壌水分・蒸発・雲・降水、積雪・凍土・土壌水分といった、いくつかの既成の学問、研究分野にまたがった

相互作用の研究が今後の重要な課題となろう。

フィールドでの観測・データ解析・モデルによる検証実験などを有機的に結びつけてトータルに地球を理解しようとする精神と、既存の研究の枠組みにこだわらない柔軟な頭を持った若い研究者達による、グローバル雪氷学の発展が今こそ望まれている。

#### 文 献

- Aagaard, K. and Carmack, E.C., 1989: The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation. *J. Geophys. Res.*, **94**, 14485-14498.
- Barnett, T.P., Dümenil, L., Schlese, U., Roeckner, E. and Latif, M., 1989: The effect of Eurasian snow cover on regional and global climate variations. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 661-685.
- Bentley, C.R. and Giovinetto, M.B., 1990: Mass balance of Antarctica and sea level change. In *Proc. Int. Conf. on the Role of Polar Regions in Global Change*, Fairbanks, Alaska, Arctic Research Consortium of the United States., 481-488.
- Budyko, M.I., 1969: The effect of solar radiation variations on the climate of the earth. *Tellus*, **21**, 611-619.
- Cess, R.D. et al., 1991: Interpretation of snow-climate feedback as produced by 17 general circulation models. *Science*, **253**, 888-892.
- Cohen, J. and Rind, D., 1991: The effect of snow cover on the climate. *J. Climate*, **4**, 689-706.
- Flato, G.M. and Hibler, W.D., 1990: On a simple sea-ice dynamics model for climate studies. *Ann. Glaciol.*, **14**, 72-77.
- Gloersen, P. and Campbell, W.J., 1991: Recent variations in Arctic and Antarctic sea-ice covers. *Nature*, **352**, 33-36.
- Haerberli, W., 1990: Glacier and permafrost signals of 20th-century warming. *Ann. Glaciol.*, **14**, 99-101.
- Hibler, W.D., 1979: A dynamic-thermodynamic sea-ice model. *J. Phys. Oceanogr.*, **9**, 815-846.
- Hibler, W.D., 1984: Sensitivity of sea-ice models to ice and ocean dynamics. WCP-77, WMO, Geneva.
- IPCC, 1990: *Climate change: The IPCC Scientific Assessment*. ed. J.T. Houghton, G.J. Jenkins and J.J. Ephraums, Cambridge, Cambridge University Press, UK, 365.
- IPCC, 1992: *Climate change: The IPCC Scientific Assessment*. ed. J.T. Houghton, B.A. Callander and S.K. Varney. Cambridge, Cambridge University Press, UK, 200.
- JSC Study Group on ACSYS, 1992: *Scientific concept of the Arctic Climate System study (ACSYS)*. WCRP-72, WMO/to No. 486, 89 pp.



- Lemke, P., Owens, W.B. and Hibler, W.D., 1990: A coupled sea-ice mixed-layer pycnocline model for the Weddell Sea. *J. Geophys. Res.*, 95, 9513-9525.
- Manabe, S., 1969: Climate and ocean circulation, Part 1, The atmospheric circulation and hydrology of the earth's surface. *Mon. Wea. Rev.*, 97, 739-774.
- Manabe, S. and Wetherald, R.T., 1987: Large-scale changes of soil wetness induced by an increase in atmospheric carbon dioxide. *J. Atmos. Sci.*, 44, 1211-1235.
- McLaren, A.S., Barry, R.G. and Bourke, R.H., 1990: Could arctic ice be thinning? *Nature*, 345, 762.
- Meehl, G.A. and Washington, W.M., 1990: CO<sub>2</sub> climate sensitivity and snow-sea-ice albedo parametrization in an atmospheric GCM coupled to a mixed-layer ocean model. *Climatic Change*, 16, 283-306.
- 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.
- 太田 岳史, 1992: CREQ において解決すべき具体的問題点とその方法, 凍土. 「チベット高原の雪氷圏と水循環」第3章, CREQ 研究グループ, 43-47.
- 大塚 清敏, 1992: 海水の数値モデリング. 気象研究ノート「大気雪氷相互作用」(安成哲三編) 第4章, 日本気象学会. (印刷中).
- Sellers, P.J., Mintz, Y., Sud, Y.C. and Dalcher, A., 1986: A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, 43, 505-531.
- Sellers, W.D., 1969: A climate model based on the energy balance of the earth-atmosphere system. *J. Appl. Meteorol.*, 8, 392-400.
- Simmonds, I. and Budd, W.F., 1990: A simple parametrization of ice leads in a general circulation model, and the sensitivity of climate to change in antarctic ice concentration. *Ann. Glaciol.*, 14, 266-269.
- Yamazaki, K., 1989: A study of the impact of soil moisture and surface albedo changes on global climate using the MRI-GCM-I. *J. Meteorol. Soc. Jap.*, 67, 123-146.
- 安成 哲三編, 1992: 気象研究ノート「大気雪氷相互作用」, 日本気象学会. (印刷中).
- 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. Meteorol. Soc. Jap.*, 69, 473-487.
- Yeh, T.C., Wetherald, R.T. and Manabe, S., 1983: A model study of the short-term climatic and hydrologic effects of sudden snow cover removal. *Mon. Wea. Rev.*, 111, 1013-1024.

(1992年7月23日受付)