

南極の海と淡水循環

北海道大学低温科学研究所 青木 茂

1 はじめに

南極大陸を取り囲む海には、細氷ならぬ巨大氷がひしめきあっています。こうした氷は、降雪・大陸氷床からの氷山の剥離・海氷の生成や移動などからなる大きな淡水循環の一部を担っています。南極を中心とする淡水循環の収支とその変動は地球物理学全体の中でも大きな課題ですが、現在では、人為的な温暖化に伴う氷床の消長とそれが海水位に与える影響の問題と絡んで、もっとも重要な課題のひとつとなっています。海洋の循環に目を向けてみると、南極大陸沿岸では世界中の海水で最も冷たくて重い南極底層水が生成し、世界中の大洋の最深部へ流れ出ています。また表面付近の南極表層水は、中・低緯度の海洋中層に沈み込んで広い範囲に広がっていきます。南極底層水や表層・中層水の生成と流動は、海洋全体で見た鉛直循環の主要な部分を占めています。南極を中心とした淡水循環は、こうした南極表層水や底層水の特質に影響を与えるため、その変化は全海洋の鉛直大循環にも影響を与えることとなります。ここでは、南極の氷と淡水循環、そしてそれが海洋に与える影響について考えていきたいと思えます。

2 南極の淡水循環 — 氷床と棚氷と氷山

南極の海を特徴付けているのは、氷、つまり海氷と氷山の存在です。海氷は、冬のオホーツク海にもみられるように、海水が大気による冷却をうけて凍ることによって生成されます。南半球での海氷面積は、最盛期には南極大陸と同程度の広さにまで広がりますが、夏期にはほとんど融解して極端に減少するといった大きな変化を繰り返しています。海氷が生成すると母海水中の塩分が吐き出されます（ブラインの排出）。塩分の増加した冷たい水が沈み込み、沖側のより高塩な海水と混合して南極底層水が生まれます。一方で、海氷の融解は表層水の低塩分化につながります。また、海氷が形成されると大気と海洋の間の熱交換を阻害するため、海氷の存在は大気にも大きな影響を与えます。このように海氷の消長は淡水循環だけでなく大気-海洋間のエネルギー収支にとっても非常に重要な要素なのですが、ここでは深く立ち入らないことにします。

海に浮かぶもう一方の氷、氷山は、もとは南極大陸上にあった陸氷、氷床です。南極氷床には、全海洋の水位に換算して65メートルに相当する膨大な氷が存在しています。地球

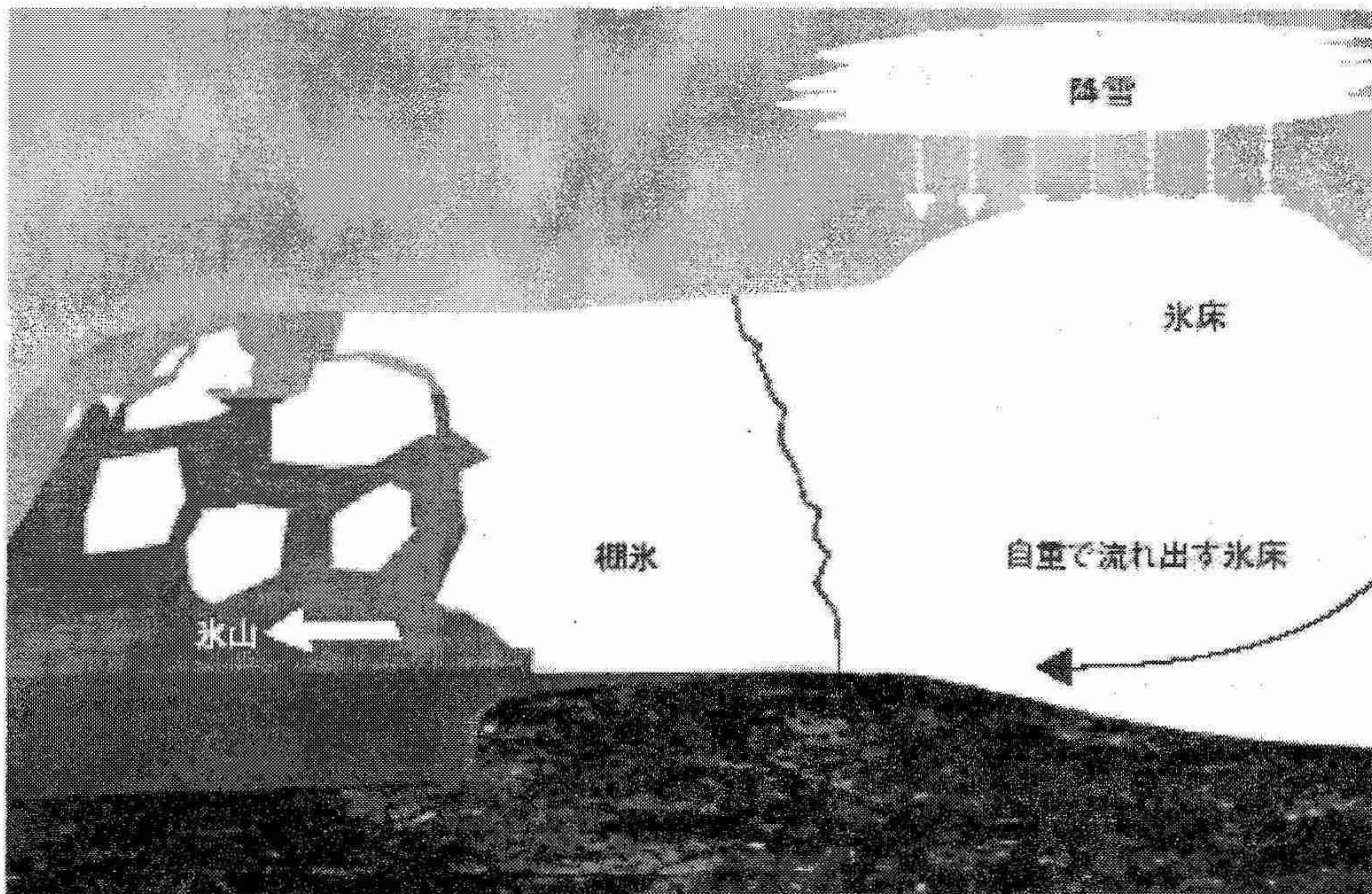


図 1: 南極氷床を中心とした淡水循環の模式図。氷床上への降雪から氷山の剥離に至るおおよかな淡水の流動を示す。

表面の水の約 2% は雪や氷として存在していますが、このうちの約 9 割が南極に存在しています。

氷床は大陸上への降雪によって形成されます。氷床は長い年月をかけて自らの重さで水飴のように外に向かって流出します。そして基盤から離れて海に浮かんだ部分が棚氷となります。この棚氷の末端が海へと流出して氷山となります (図 1)。

南極海で見られる典型的な氷山は、上面が平らな形状をした卓状氷山と呼ばれるものです。この形状は、もとをたどればそれが広大な棚氷や浮氷舌であったことを示しています。氷山は、ときどき着底しながらも沿岸の流れに乗って西へ移動し、主にウェッデル海・ロス海で低緯度側へ流れ出していきます (図 2)。

南極氷床を中心とする淡水循環のバランスでは、雪として大気から受け取った淡水を氷山として海洋に返すという項が主だと見積もられています (例えば Jacobs et al., 1992)。しかしながら、この収支が実際にどの程度バランスしているのか (あるいはしていないのか) については、まだよく分かっていません。気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC) の第 3 次評価報告書によれば、棚氷を含む氷床上への降雪量は $2246 \pm 86 \text{ Gt/yr}$ となっており、その見積もりは相互に比較的良い一致を示しています (表 1)。なお、ここではこの評価誤差は研究相互の差という形で定義されていま

表 1: 南極氷床の淡水収支に関する現状評価 (単位は Gt/yr)。Climate Change 2001: The Scientific Basis (IPCC 第 3 次評価報告書) より抜粋。

出典	降雪 (接地域)	降雪 (含棚氷)	棚氷融解	流出	氷山生成	接地線 収支
Kotlyakov et al.(1978)		2000	320	60	2400	
Budd and Smith (1985)	1800	2000			1800	1620
Jacobs et al.(1992)	1528	2144	544	53	2016	
Giovinetto and Zwally (1995)	1752	2279				
Budd et al. (1995)		2190				
Jacobs et al.(1996)			756			
Bromwich et al. (1998)		2190				
Turner et al. (1999)		2106				
Vaughan et al. (1999)	1811	2288				
Huybrechts et al. (2000)	1924	2344				
Giovinetto and Zwally (2000)	1883	2326				
Mean	1843	2246	540	10	2072	
Standard deviation	± 76	± 86	± 218	± 10	± 304	

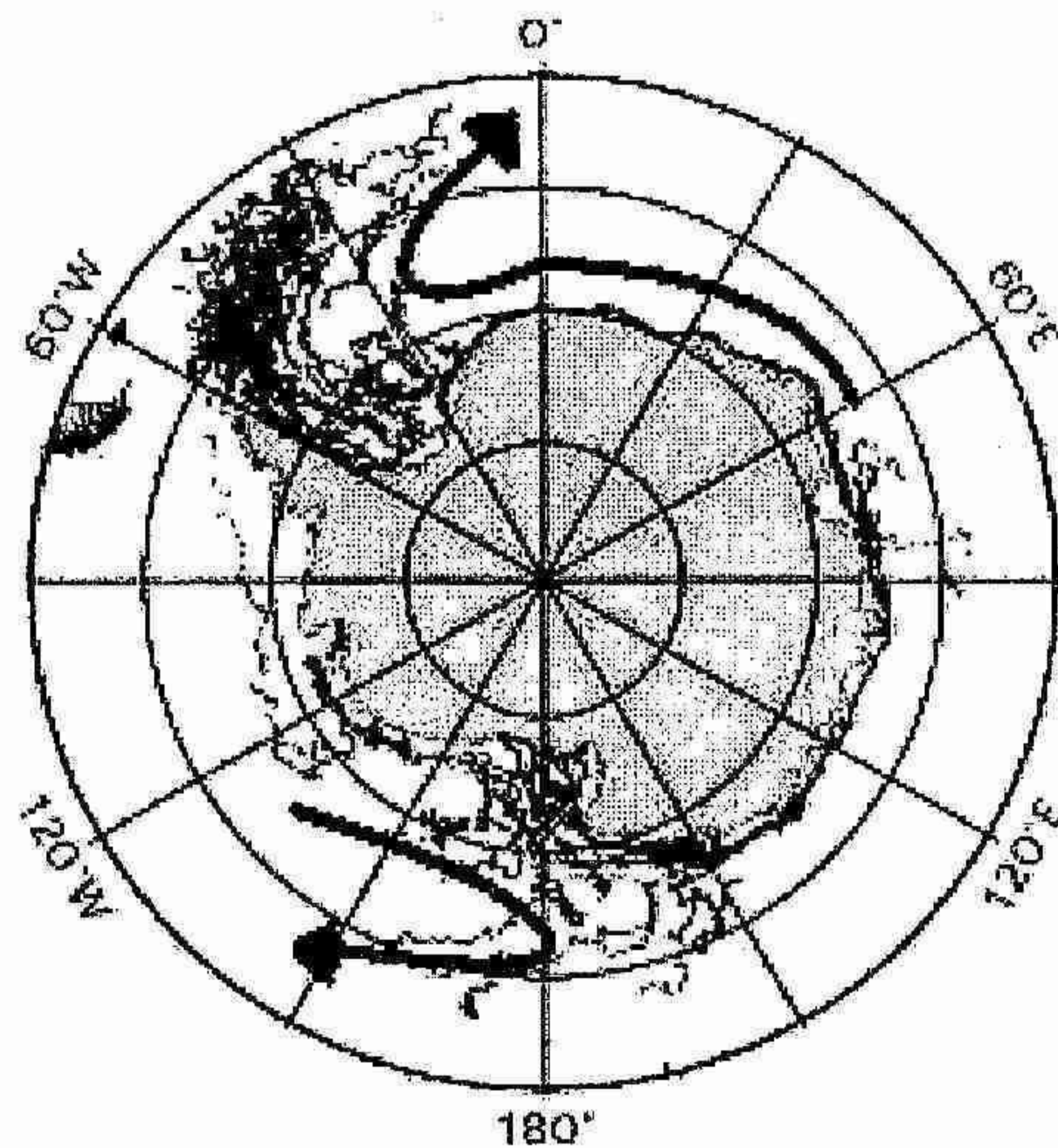


図 2: 人工衛星マイクロ波散乱計により求めた南極沿岸域における氷山の移動経路。

す。ただし、比較的良いとはいえども、グリーンランド氷床に関する平均的なフラックス量 44Gt/yr の二倍近い値です)。ところが、氷山の生成量については $2072 \pm 304 \text{ Gt/yr}$ と、降雪量の見積もり誤差に対して 3.5 倍の誤差があります。しかも、この氷山の生成量を見積もる過程にも、大きな不確実性があります。例えば Jacobs et al.(1992) では、まず数 km 程度の分解能の衛星画像でも分解可能な大きいスケールの氷山の面積を求め、それに代表的な氷山の厚さを乗じる、それより小さいスケールの氷山の総量はそれとほぼ等量であると仮定し、先に求めた値を二倍にする、という方法で導出しています。時間スケールの長い現象を数年間の観測だけから評価しなければならないという本質的な困難もあります。また、氷山の生成の次に大きいと考えられる棚氷底面での融解の見積もりについても $540 \pm 218 \text{ Gt/yr}$ と相互に大きな隔たりがあります。南極氷床に関する現実の収支を明らかにするためには、特に評価の隔たりが大きいこれらの寄与をより正確に見積もることが必要です。

3 急速に崩壊するラルセン棚氷

人為的な温暖化に対しては、気温の上昇にともなって大気中に含まれる水蒸気が増加し、それによって降雪量が増えるため、南極氷床はしばらくは厚くなるセンスだろうという予測が支配的です。この場合、地球全体の海水位へおよぼす影響としては、低下方向に作用することになります。しかし、氷床末端で海への流出を抑えている棚氷が急速に流出すれば、支えを失った背後の氷河の流動が加速し、基盤地形の大部分が海面下にある西南極では氷床の崩壊が急激に進む可能性があると考えられる研究者もいます。また海水温が上がれば、棚氷の底面での融解が促進され、これが海洋表層の塩分を薄めて海洋鉛直循環が弱まる可能性も指摘されています。

現在、南極の気温は実際にどのように変化し、棚氷はどのように変わりつつあるのでしょうか。東南極をはじめとする多くの地域では、ここ数十年、気温の上昇傾向は観測されていません。しかし、低緯度まで大陸が張り出している西南極の南極半島では、観測が開始された 1940 年代から気温の顕著な上昇が確認されています。そして、南極半島にある棚氷、特に東側のウェッデル海側に張り出したラルセン棚氷は、劇的な変化を示しています。

1995 年には、ラルセン棚氷のもっとも北部に位置していたラルセン A と呼ばれていた部分が、二ヶ月も立たないうちに粉々に砕けてウェッデル海に流れ出しました。2002 年には、その南側のラルセン B の北部も崩壊してしまいました。およそ一ヶ月で 3250 平方キロメートル（東京都の面積の 1.5 倍）の棚氷が失われたのです（図 3）。

ラルセン棚氷の急激な崩壊の原因として、夏期の気温が上昇し、摂氏零度の等温線が年々南に下がっていることが関係していると考えられる研究者もいます。夏期に表面での融解が進んで、その融解水がクレバスなどの氷の割れ目に流れ込んでひび割れを促進させ、棚氷の崩壊を加速させるというシナリオです。

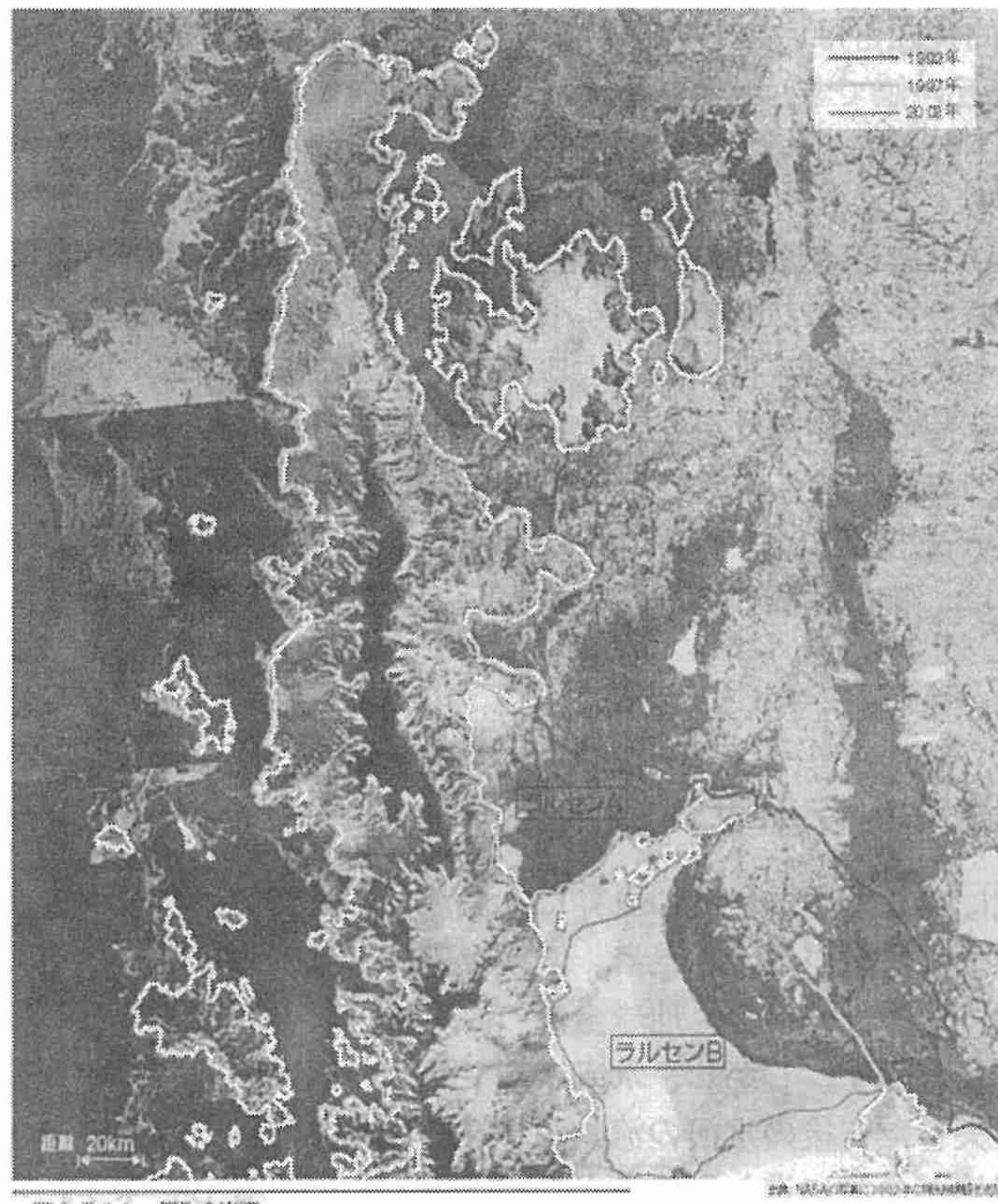


図 3: 1990年代以降のラルセン棚氷の崩壊の様子。2002年にはラルセンB北部も崩壊した。

またラルセン棚氷については、その面積が減っているだけでなく、厚さも急速に薄くなっているという報告があります (Shepherd et al., 2003)。人工衛星海面高度計で棚氷表面の高度を観測したところ、ここ十年程急速な低下がみられています。そして観測されている棚氷の薄まり度合いは、表面からの融解が進んでいることだけでは説明できないというのです。南極海の暖水化 (例えば Robertson et al., 2002) によって棚氷底面での融解が加速しているのではないかという見方もあります。これが本当だとすれば、海洋表層の塩分の低下にもつながる可能性もあります。海洋の塩分に与える影響を正確に評価するという観点からも、棚氷や氷床の消長をこれからも注意深く監視していく必要があります。

4 南極海の淡水化？

南極海では、水温だけでなく塩分を考えることが重要です。海水の密度は、低温下においては温度よりも塩分に依存するからです。しかしながら、水温の観測に比べると、塩分の精密な測定は難しく手間がかかるので、信頼に足る観測データは過去にさかのぼればさかのぼるほど限られてきます。そのような中で、ロス海の沿岸域では、1960年代くらいから海水の塩分が 0.003 psu/yr 程度の割合で減少しつつあるという報告がされています (Jacobs et al., 2002)。半世紀ほど前の塩分測定の技術でも 0.02 psu 程の精度が考えられているので (Emery and Thompson, 1997)、30年で 0.1 psu という値は、極域という悪条件を差し引いても、誤差の範囲を逸脱しているように思います。

日本の南極地域観測では、昭和基地周辺の定着海氷下の海を、越冬期間中これまでに数回観測してきました。厳冬期にもデータをとっている世界でも数少ない貴重な試みです。その観測から、海氷下の海洋環境は年によって大きく変化していることが分かってきました。80年代の観測は二回しかないのですが、このときは90年代以降の五回の観測時に比べて塩分の高い状態でした。この変化が長期的な変化傾向を捉えたものか、経年変化の一部をたまたま抜き出しているのか、詳しいことはまだ分かりません。これからも推移を継続的に見守っていく必要があります。

南極底層水の生成には、大陸棚上の冷たい水にブラインの排出や氷床底面での冷却が加わる過程が重要な役割を果たしているため、南極沿岸における水塊の密度変化は底層水の性質や生成量に大きな影響を与えます。現在では、主な南極底層水の生成場所として、ウェッデル海、ロス海、アデリーランド沖、アメリー棚氷付近といった海域が知られています。最近では底層水も淡水化しているのではないかと指摘されています (Gordon, 1998)。信頼できる塩分のデータがそろいはじめてまだまもなく、引き続き塩分を注視していくことが重要です。日本を含めた幾つかの国々によって、これらの海域で直接的な底層水の流速観測や水温・塩分観測が積み上げられつつあります。

5 酸素同位体比の観測による学際的な取り組み

こうした海洋の塩分変化は何に起因しているのでしょうか。海洋上への降雪、冰山・棚氷底面での融解、海氷生成の増減などが原因として考えられますが、いまのところその効果についても十分に正確な見積もりはなされていません。このような南極海における塩分変化の原因を知る上では、海水の塩分と同時に酸素の安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) を調べるのが有益です (同位体の応用については例えば沼口 (1999) を参照してください)。同位体の分別効果によって、氷床中の $\delta^{18}\text{O}$ の値は一般的に極めて低くなり、海洋上・沿岸域での降雪に含まれる $\delta^{18}\text{O}$ の値は相対的に高くなります。観測された塩分 S と $\delta^{18}\text{O}$ との関係の時間変化を追っていくことで、その淡水分の起源が推測できます。例えば、 $S - \delta^{18}\text{O}$ 図上で2つの観測点を結んで、その線を海水と混合する前の状態 ($S=0$) にまで外挿したとき、

その切片が -30 パーミル程度の低い値であれば、この変化は $\delta^{18}\text{O}$ の低い氷床や棚氷の影響を強く受けていると考えられます。

今までの $\delta^{18}\text{O}$ の観測から、南極表層水には氷床起源の淡水の影響がみられることなど基本的な傾向は分かっています。しかし、それらの効果の時間的な変化を正確に評価する場合には、降雪中、氷床・氷山中の $\delta^{18}\text{O}$ の場所や時期による違いなどまで正確に把握していく必要があります。

酸素同位体比を用いた南極における淡水循環と海洋のかかわりの研究は、まさに学際領域にあると言えます。ここには、地球規模の気候変動を理解する鍵のひとつが隠されているように思います。気象・雪氷・海洋あるいは物理・化学といった分野の垣根を越えて取り組んでいくべき課題だと考えるのです。

6 おわりに

今回駆け足で取り上げたテーマは非常に大きく、関連するところを網羅することはとてもできませんし、もとより筆者にはその能力もありません。それをも省みずあえて取り上げさせていただいたのは、来る第4回国際極年 (The 4th International Polar Year: 2007-08) やさらにその先を見据えて、既存の分野の枠を越えた取り組みが不可欠だと考えるからです。このたび執筆の機会を与えていただき、好き勝手な提言を快く許していただいた藤原正智さんはじめ細氷編集委員の方々に感謝いたします。

参考文献

- Emery, W.J., and R.E. Thomson 1997 : *Data analysis methods in physical oceanography. Second and revised edition* , pp. 638, Elsevier.
- Gordon, A.L., 1998 : Western Weddell Sea thermohaline stratification. in *Ocean, Ice and Atmosphere: Interactions at Antarctic Continental Margin, Antarc. Res. Ser.*, vol. 75, edited by S.S. Jacobs and R. Weiss, 215-240, AGU, Washington, D.C.
- Huybrechts, P., M. Kuhn, K. Lambeck, M.T. Nhuan, D. Qin, P. L. Woodworth, Changes in sea level. in *Climate Change 2001: The Scientific Basis - Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* , edited by J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden and D. Xiaosu, 641-693, Cambridge University Press, UK.
- Jacobs, S.S., H.H. Helmer, C.S.M. Doake, A. Jenkins and R.M. Frolich, 1992 : Melting of ice shelves and the mass balance of Antarctica. *J. Glaciol.*, 38, 375- 387.

Jacobs, S.S., C. F. Giulivi and P.A. Mele, 2002 : Freshening of the Ross Sea during the late 20th century. *Science*, 297, 386-389.

Robertson, R., M. Visbeck, A.L. Gordon, and E. Fahrbach, 2002 : Long-term temperature trends in the deep waters of the Weddell Sea. *Deep Sea Res. II*, 49, 4791-4806.

Shepherd, A., D. Wingham, T. Payne, P. Skvarca, 2003 : Larsen Ice Shelf Has Progressively Thinned. *Science*, 302, 856-859.

沼口敦, 1999 : 水の安定同位体の気候研究への応用, 細氷, 45, 2 - 12.