

客観解析データによる南極域における
大気中の水循環の季節変化

山崎 孝治*

Seasonal Variation of Atmospheric Water Circulation in the
Antarctic Region Derived from Objective Analysis Data

Koji YAMAZAKI*

Abstract: Precipitable water, total moisture flux and its convergence are calculated based on the 6-year (1986-1991) twice-daily U.S. NMC data to investigate the atmospheric water circulation in the Antarctic region. The precipitable water becomes large in summer, but the zonal mean poleward moisture flux and its convergence, which corresponds to "precipitation minus evaporation", become large in winter and they also exhibit semi-annual variation. This is because the seasonal variation of moisture flux and its convergence is mainly controlled by the cyclonic activity in the Antarctic region. The westward moisture flux, which does not exist in the Arctic region, is seen poleward of 70° along the Antarctic continent and it is significant in summer. It is found that the atmospheric water circulation in the Antarctic region is very active compared with the global mean, especially in winter.

要旨: 地球上で最も水蒸気の少ない南極域の大気中の水循環を調べる目的で、6年間(1986-1991年)の1日2回の米国NMCの客観解析データから可降水量、全水蒸気フラックス及びその収束量を計算した。可降水量は夏に多いが、帯状平均極向き水蒸気フラックス及びその収束(「降水量-蒸発量」に対応する)は冬に多く、半年振動も見られる。これは水蒸気フラックス及びその収束の季節変化は、南極域では主に低気圧活動に支配されていることの反映である。南緯70度より極側では北極域では見られない西向き水蒸気フラックスが大陸沿岸を中心に見られ、特に夏に顕著である。また、南極域の水循環は、全球平均と比べて活発で、特に冬には顕著であることもわかった。

1. はじめに

南極域は非常に低温であるため、大気中に含まれる水蒸気量は少なく、観測も難しい。ここでは、客観解析データを用いて南極域の大気中の水循環の様子を北極域との比較を交えて記述する。特に、季節変化に着目して解析する。客観解析データは、いわば観測量を数値予報モデルによって内挿したもので、観測値そのものではないが、グローバルに均一なデータが得られ

* 北海道大学大学院地球環境科学研究科, Graduate School of Environmental Earth Science, Hokkaido University, Sapporo 060.

る利点がある。最近では、予報モデルやデータ同化技術の進歩により、客観解析データの信頼性が向上しており、以下に述べるような解析ができるようになってきた。1987年位までの観測に基づく南極域の水蒸気分布や水循環については、和田(1988)を参考にしてもらいたい。

2. データと解析方法

この研究で使用したデータは米国気象庁(NMC)の客観解析データである。1日2回、1986年から1991年までの6年間のデータで、水平分解能は緯度・経度とも2.5度である。NMCデータには標準気圧面6層(1000, 850, 700, 500, 400, 300 hPa)に相対湿度データがあり、それと温度データから水蒸気混合比を求めた。この水蒸気混合比を鉛直積分して可降水量を求め、風ベクトルとの積を鉛直積分することにより気柱全体の水蒸気フラックスを求めた。鉛直積分する際は、氷床高度データを用いて地上から300 hPaまで積分した。300 hPaより上層の水蒸気は少なく、このような解析では無視できる。詳細についてはYAMAZAKI(1992)を参照されたい。

3. 水蒸気量

大気中の水蒸気量を鉛直に積分した水蒸気全量(可降水量)は、西部熱帯太平洋のような対流の活発な所では50 mm以上になるが、南極域ではおおよそ5 mm以下であり、冬の南極大陸内部では0.5 mm以下となり、地球上で最も水蒸気が少ないところである。因にサハラ砂漠のような乾燥した地域でも10 mm程度の可降水量はある。

年平均の可降水量の分布を図1に示す。等値線は海岸線や等高度線とほぼ平行に走っており、内陸部では1 mm以下である。沿岸部では沖合いに向かい急激に増加している。海上では同心円に近いが、90°-180°Wの太平洋域で多い。このように観測がほとんどない海上でもデータが得られるのが客観解析データの強みである。

さて、NMCデータと観測はどの程度一致するか、昭和基地(69°00'S, 39°35'E)のデータと比較してみた(図2)。図中、白い柱はNMCデータの格子点値から昭和基地の位置に内挿したものである。黒い柱はラジオゾンデによる観測値であり、多少NMCデータのほうが少ないようであるが、大陸沿岸域は図1でわかるように、南北に可降水量が急激に変わる所であり、昭和基地の位置への内挿による誤差も大きい。また、昭和基地の1点観測が領域平均を代表しているかどうかということもあるので、この程度の一致があれば十分であろう。もう一度、図を見ても面白いことに気づく。可降水量は夏(1月)に最大で5 mm程度、冬に小さく2 mm弱であるが、冬季の極小は5月と9月であり、季節変化曲線はW型をしていることがわかる。この年(1989年)の昭和基地の地上気温も5月と9月に極小であり、気温の変化とよく対応している。ただし、他の年は必ずしもこのようではなく、年々変動が大きい。平均的には、気温の季節変化はコアレス・ウィンター(なべ底型気温変化)といわれるように初秋に急激に下降し、冬季徐々に下降し8月に極小となり、春に急激に上昇する。水蒸気量もほぼ気温と平行的

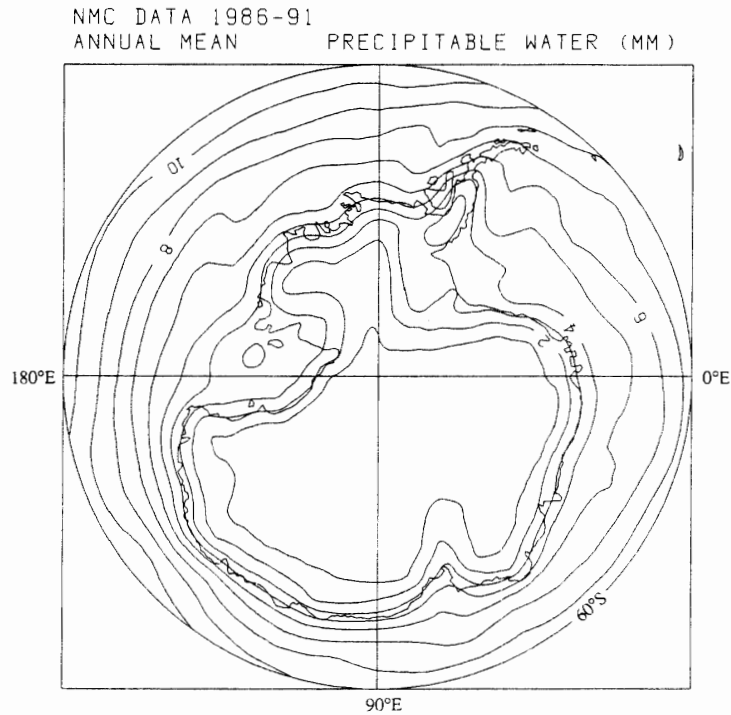


図1 年平均可降水量。等値線間隔は1 mm。1986-1991年の6年間のNMCデータによる。
 Fig. 1. Annual mean precipitable water. Contour interval is 1 mm. Based on 6-year (1986-1991) NMC data.

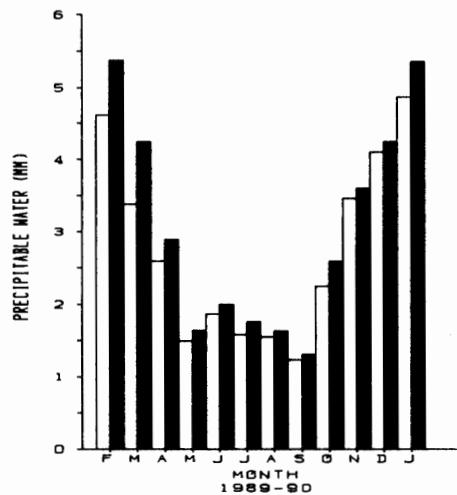


図2 昭和基地における1989年2月から1990年1月までの月平均可降水量。白い柱はNMCデータ。黒い柱はゾンデ観測。
 Fig. 2. Monthly mean precipitable water at Syowa Station from February 1989 through January 1990. White column denotes NMC data and black one denotes zonde observation.

に変化する。図3は東西平均可降水量の季節変化を示している。見やすいように6年平均量を2年分示してある。短い夏と長い冬といった季節変化パターンである。北極域と比べれば(図省略)季節変化の振幅は小さい。

東西平均した可降水量の極域での年平均の緯度分布を図4に示す。南極域は北極域に比べ、1/3程度であるが、60度付近では北半球の値にかなり近づく。南極海で南北傾度が急である。南

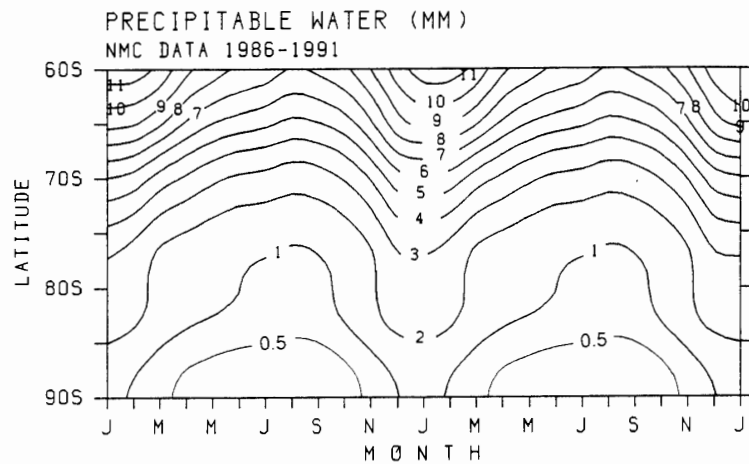


図3 東西平均可降水量の緯度・時間変化図。縦軸は緯度、横軸は月(1月から1月まで)、2年分を表示してある。等値線間隔は1 mm, 0.5 mm も描いてある。1986-1991年の6年間のNMCデータによる。

Fig. 3. Latitude-time plot of zonal mean precipitable water. Contour interval is 1 mm. A contour of 0.5 mm is also drawn. Based on 6-year (1986-1991) NMC data.

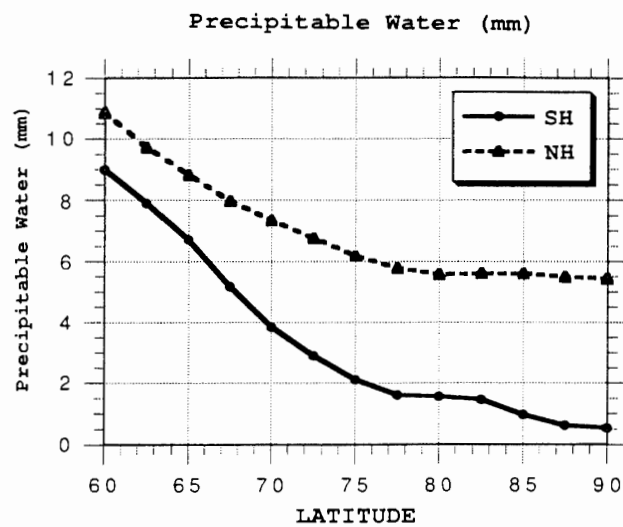


図4 年平均・東西平均可降水量の緯度分布。黒丸に実線は南半球、黒三角に破線は北半球。1986-1991年の6年間のNMCデータによる。

Fig. 4. Annual and zonal mean precipitable water. Closed circles denote values in the Southern Hemisphere and closed triangles denote those in the Northern Hemisphere. Based on 6-year (1986-1991) NMC data.

極・北極の差は、南極では大陸の周りを海が取り囲み、北極では海の周りを大陸が取り囲んでいるといった海陸分布の差によっている。南極氷床は高度が高く、大気の厚さが薄いことも寄与している。

4. 水蒸気フラックス

水循環の指標として水蒸気フラックス（輸送量）について述べる。年平均の水平パターンを図5に示した。矢印の長さはフラックスの絶対値に比例しているが、絶対値があまり小さいものは方向のみを示す。海上の60°Sの緯度円では強い東向きのフラックスがある。特に、図の左側、インド洋から太平洋南方領域で強く、極向き成分が顕著である。南極大陸への水蒸気の主な流入経路は南極半島西側、ロス海西側、東南極沖合いの90°E-140°E、40°E-50°E付近であり、いずれも定常的な低気圧の東側である。昭和基地の沖合いも極向き水蒸気の輸送経路上にある。また、大陸沿岸部では西向きのフラックスが卓越している。この描像はBROMWICH (1979) が0°-120°Eの沿岸域のゾンデ観測データから得たものと一致している。南極大陸内部は非常に小さいが、ほぼ等高線に沿った高気圧性の流れになっている。また、ウェッデル海東部から南極点付近を通り、ロス海東部へ抜ける流れも存在する。

年平均の極向き水蒸気フラックスの緯度分布を図6に示す。極向きフラックスは42.5°Sで最大であり、このピーク値は $35 \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$ ほどであり、北半球のピーク値より大きい。極にゆくに従い急速に減少し、65°Sより極よりでは北半球より小さくなる。70°Sでの値は $4.9 \pm 0.6 \text{ kg}$

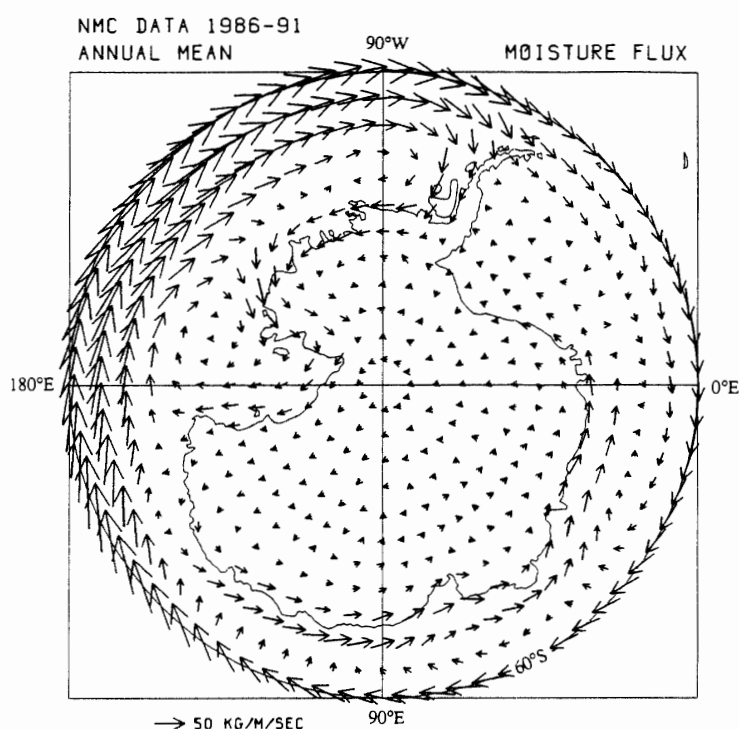


図5 年平均水蒸気フラックス分布。左下に基準の大きさを表示。1986-1991年の6年間のNMCデータによる。

Fig. 5. Annual mean moisture flux. A scale is shown at the left bottom. Based on 6-year (1986-1991) NMC data.

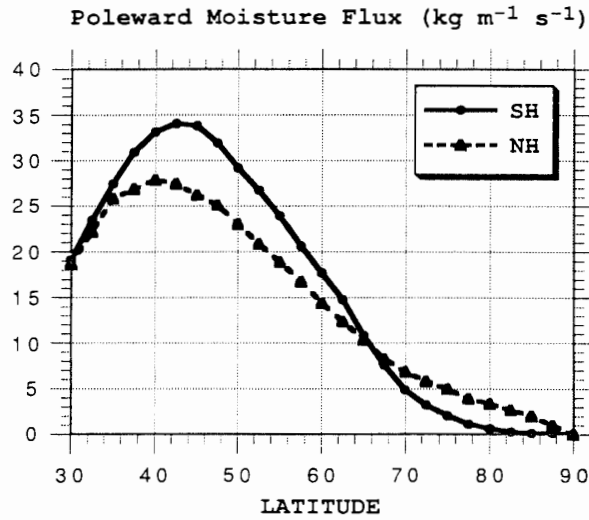


図6 図4と同じ。ただし、極向き水蒸気フラックス
 Fig. 6. Same as in Fig. 4 except for poleward moisture flux.

表1 年平均の70°Sを横切る正味の水蒸気フラックスの各研究者の見積もり
 左の欄は文献，中はデータの期間，右がフラックス値。フラックス値は赤道向きが正。上5行は大気データに基づくもので，下4行は雪氷面の表面収支観測によるもの。今回の研究は5行目に太字で示してある。GIOVINETTO *et al.* (1992) によって作成。

Table 1. Estimates of mean annual net water vapor transport across 70°S (V^*).

	Data base, period or number of years	V^* kg m ⁻¹ s ⁻¹
Based on atmospheric data		
STAR <i>et al.</i> (1969)	1958	(+) 0.73
PEIXOTO and OORT (1983)	1963-1973	(-) 3.0
HOWARTH (1983); HOWARTH and RAYNER (1986)	1973-78 and 1980-84	(-) 3.7
MASUDA (1990)	1979	(-) 5.3
This study	1986-1991	(-) 4.9 ± 0.6
Based on surface data		
RUBIN (1962)	multiyear	(-) 5.6 to 7.2
BAUMGARTNER and REICHEL (1975)	multiyear	(-) 5.4
BROMWICH (1990)	multiyear	(-) 5.8 to 6.0
GIOVINETTO <i>et al.</i> (1992)	multiyear	(-) 6.6 to 1.3

After GIOVINETTO *et al.* (1992)

m⁻¹s⁻¹である。誤差範囲は6年間のデータの標準偏差を示している。70°Sにおけるフラックスは大気データからだけでなく南極大陸氷床上の表面収支(涵養量)及び地吹雪による再配分と流出からも見積もることができる(例えば, BROMWICH, 1990)。地吹雪と流出の寄与は広い領域で考えれば小さい。表1にこれまでの多くの研究結果をまとめた(GIOVINETTO *et al.*, 1992

に基づく)。古い大気データからの推定は符号が逆であったり、小さすぎたりする。MASUDA (1990) は 1979 年の ECMWF の客観解析データを用いて解析しており、今回の結果と近い。表面収支観測ではおおよそ $5-6 \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$ の値である。これらから見て、今回の結果は妥当なものであると考えられる。NMC データは可降水量が多少、少な目になっているため少し過小評価の可能性もあるが、誤差範囲も大きい。また、NMC データでは雲中の氷・水の輸送は考えていないので全水分のフラックスとしては過小評価の可能性もあるが誤差範囲以下であろうと想像される。

極向き水蒸気フラックスの季節変化を図 7 に示す。面白いことに可降水量は夏季に大きいのに、極向きフラックスは冬季のほうが夏季より大きくなる。北極域では夏季にフラックスも大きく南極域とは異なる。この南極域の特異な季節変化は南極大陸周辺の低気圧活動の季節変化によると思われる。環南極低気圧帯は冬季のほうが深く活発である。さらに、フラックスは春と秋に大きくなる半年周期変動もみられる。これも低気圧活動の半年周期と対応していると思われる。水蒸気フラックスは大部分トランジェントな擾乱によっている (MASUDA, 1990) ので、低気圧活動とよい相関があるのは納得できる。

東西方向の水蒸気フラックスにも南極域の特異性が見られる (図 8)。南極では 70°S 以極で小さいながら西向きのフラックスである。これは海岸線沿いに西向きフラックスがあり、内陸部で高気圧性のフラックスがあることの反映である。この西向きフラックスはロス海、ウィルクスランド沖、昭和基地沖など低気圧が頻繁に存在する所の極側で特に強い (図 5)。 70°S より赤道側では東向きフラックスが急速に増大する。南極大陸の周りに帯状に低圧帯が取り囲みその赤道より強い西風が吹いていることを反映している。これは北極域では大きな緯度変化

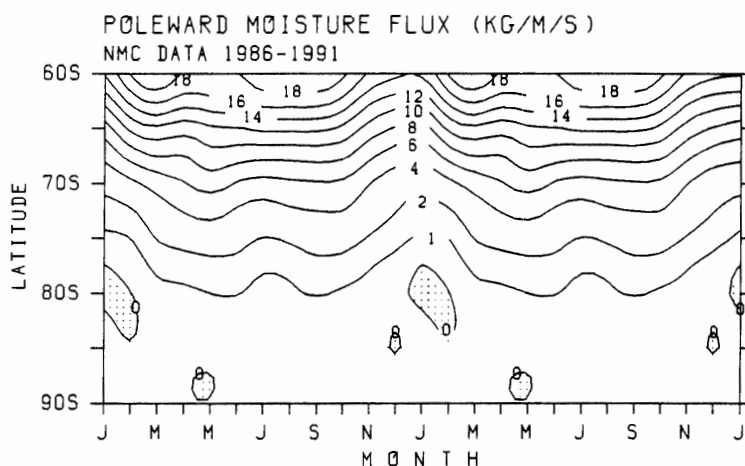


図 7 図 3 と同じ。ただし、極向き水蒸気フラックス。等値線間隔は 2 kg/m/s 。 1 kg/m/s の等値線も描いてある。

Fig. 7. Same as in Fig. 3 except for poleward moisture flux. Contour interval is 2 kg/m/s . A contour of 1 kg/m/s is also drawn.

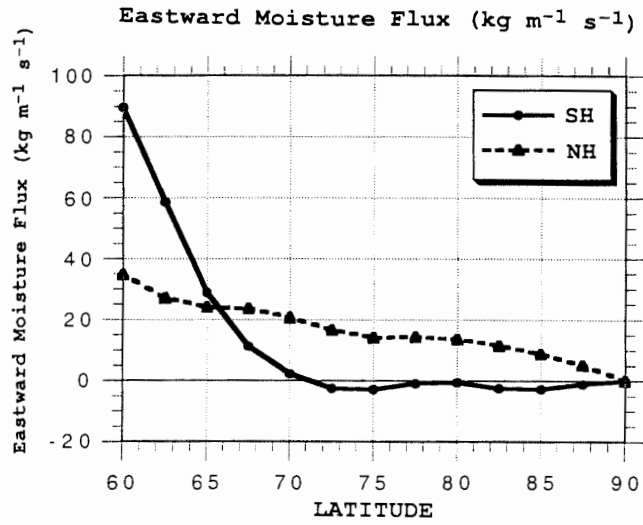


図8 図4と同じ。ただし、東向き水蒸気フラックス
 Fig. 8. Same as in Fig. 4 except for eastward moisture flux.

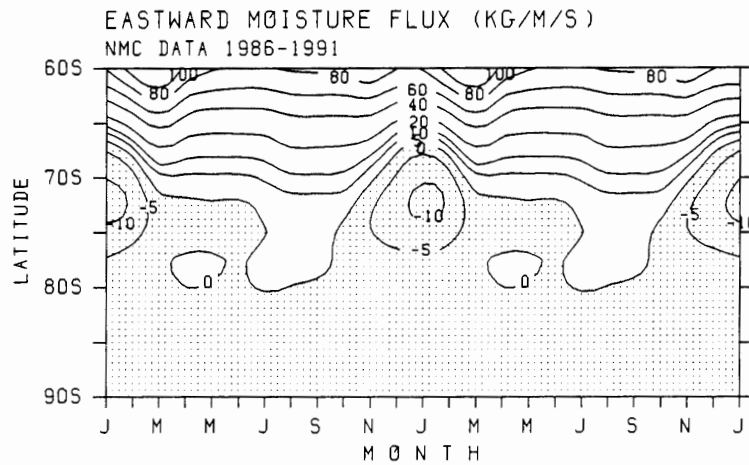


図9 図3と同じ。ただし、東向き水蒸気フラックス。等値線間隔は 20 kg/m/s, ± 5 , ± 10 の等値線も描いてある。

Fig. 9. Same as in Fig. 3 except for eastward moisture flux. Contour interval is 20 kg/m/s. Contours of ± 5 , ± 10 are also drawn.

がないことと対照的である。東向きフラックスの季節変化 (図9) をみると、1月を中心とした夏季の 70°-75°S で西向きフラックスが強いことがわかる。可降水量の季節変化と対応した変化である。

5. 水蒸気フラックスの収束

大気中の水収支を考えると、水蒸気フラックスの収束量と蒸発または昇華で地表面から供給された水蒸気量の和は、大気中の水蒸気量の増加と凝結して落ちる降水量の和に等しい (固体

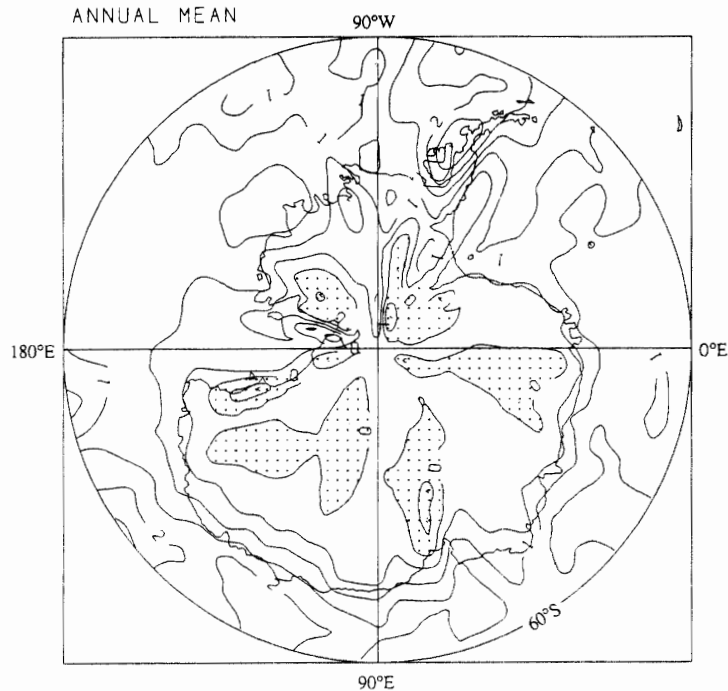


図 10 年平均水蒸気フラックス収束. 等値線間隔は 0.5 mm/day

Fig. 10. Annual mean moisture flux convergence. Contour interval is 0.5 mm/day.

及び液体の水の大気中のフラックスは考えない). 大気中の水蒸気量の変化は長期間では他の項に比べて小さいので, 水蒸気フラックスの収束量は, ほぼ降水量と蒸発量の差に等しい. そこで, 水蒸気フラックスの年平均収束量の水平パターンを図 10 に示した. 単位は降水・蒸発量に換算して mm/day で表示してある. 収束は海洋上ではどこでも正であり, 降水量が蒸発量より多く, 1-2 mm/day 程度である. 南極大陸上では沿岸部で大きく, 特に南極半島西部で 2.5 mm/day 以上の極値が見られる. 内陸では小さく, 所々, 負の領域もある. 南極点近くは微分計算をするための誤差のために細かい構造があるがこれは信用できない. 大陸上の分布は雪面上の観測で求めたものと余りよく一致していないが, 沿岸部で大きいといった大まかな傾向は一致する. 80°E 付近には細長く伸びた 0.5 mm/day ほどの負の領域があるが, 積雪表面観測による質量収支 (涵養量) の図にも (図 11, GIOVINETTO and BULL (1987) の図 30) にも対応した所に負の値があるので, 図 10 の負の値がすべて非現実的とは思われない. この地域では夏に負の値が大きくなるので, 実際にも夏季に雪面からの昇華量が降水量より多く, 氷床が消耗している可能性も高いと思われる.

年平均・東西平均のフラックス収束量の緯度分布を図 12 に示す. 南半球では 40°S より極側では正 (降水が蒸発より多い) であり, 45°-70°S の緯度帯では北半球より大きい, 70°S より極側では北極より小さい. 南極域では負の場所もあるが, 年平均・東西平均では正である. 70°S より極側の領域平均では年降水・蒸発の差として約 160 mm となる.

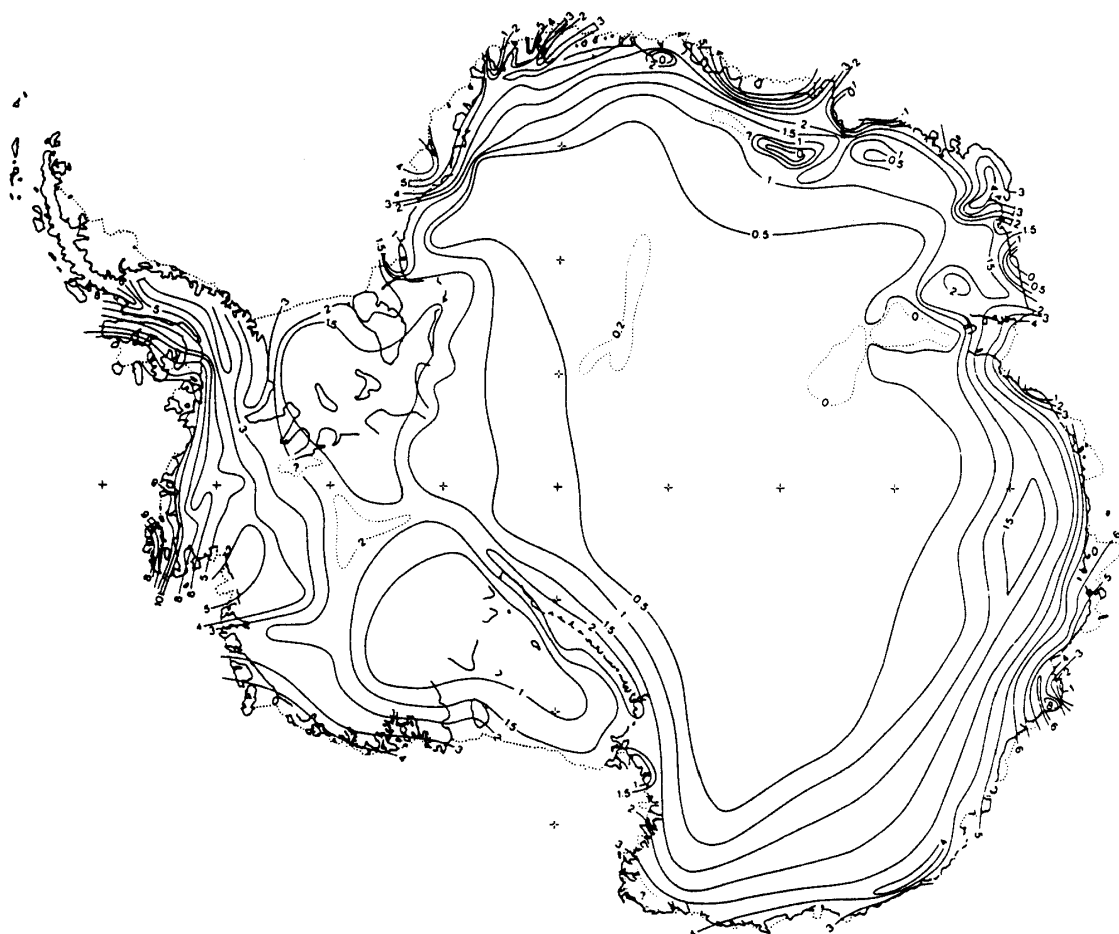


図 11 南極氷床の平均年間表面質量収支。単位は 10 g/cm^2 (GIOVINETTO and BULL, 1987 より)
 Fig. 11. Annual mean surface mass budget of the Antarctic ice sheet. Unit is 10 g/cm^2 .
 From GIOVINETTO and BULL (1987).

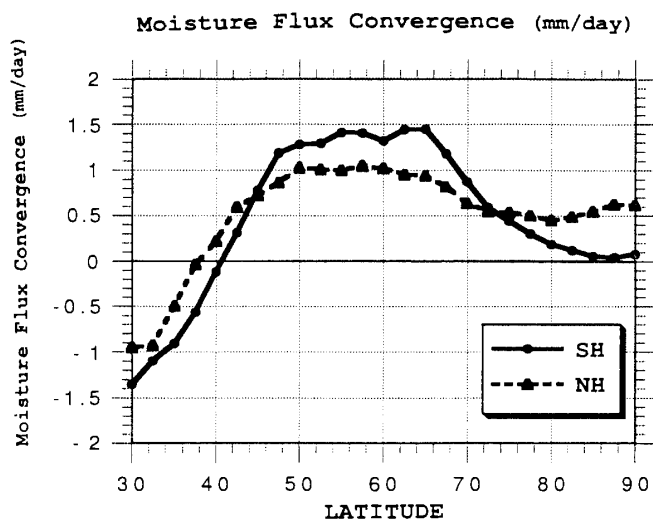


図 12 図 4 と同じ。ただし、水蒸気フラックス収束
 Fig. 12. Same as in Fig. 4 except for moisture flux convergence.

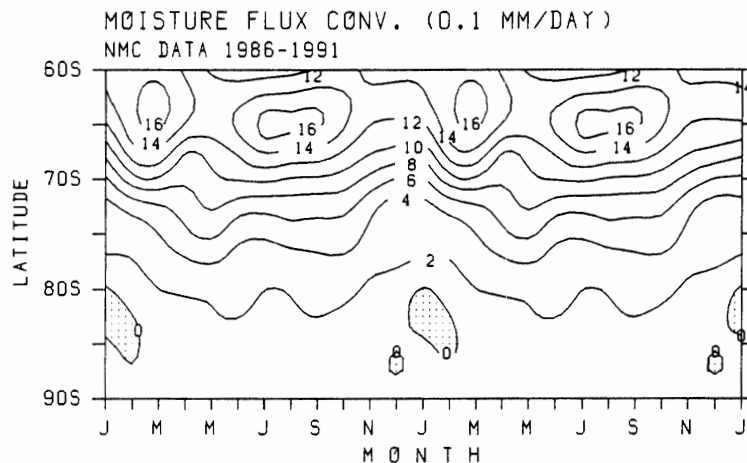


図13 図3と同じ。ただし、水蒸気フラックス収束。等値線間隔は0.2 mm/day
 Fig. 13. Same as in Fig. 3 except for moisture flux convergence. Contour interval is 0.2 mm/day.

フラックス収束量の季節変化を図13に示す。おおまかに見ると、冬に大きく夏に小さい。地上観測による降水量データ (JAEGER, 1976) にも70°Sより極側で同様の季節変動がみられる(60-70°Sでは異なる)。極大である65°S付近では、2月と8月頃に最大値を持つ半年変動が見られる。70°-80°S帯では冬季に大きい1年周期変動と4月頃と9月頃に最大となる半年変動が重なっている。この季節変動パターンは南極大陸平均でも見られる (YAMAZAKI, 1992)。これらの変動は低気圧活動の変動と対応していると考えられる。一方、南極氷床上の高度の高いところのみの平均では気温の変化に対応して、夏に大きく冬に小さくなる (YAMAZAKI, 1992)。

南極大陸上では水蒸気は少ないが、周りの南極海では大きく、極向き水蒸気輸送も南極海の大きな値から大陸内部へ急激に減少する。従って、水蒸気収束は南極海及び大陸沿岸部ではかなり大きな値となる。北極と比べて緯度変化が大きいのが特徴である。季節変化でいえば、水蒸気量は夏季に大きいのは北極と同じであるがその程度は小さく、極向きフラックス及び収束量は北極と逆に冬季に大きく、さらに春秋に大きくなる半年周期変化がある。夏に大陸沿岸部に西向きフラックスが現れることも特徴である。水蒸気輸送は低気圧活動に支配されていることの反映である。

6. まとめと議論

NMC客観解析データを用いて、南極域の大気中の水循環の季節変化を解析した。可降水量は気温の年変化を反映して夏に多いが、極向き水蒸気フラックス及びその収束は冬の方がやや多い。また、半年振動成分も見られ、南極沿岸で顕著である。水蒸気フラックス及びその収束は可降水量のみならず低気圧活動の活発さによることから理解される。この点は北極域と逆である。北極域でも低気圧活動は冬に活発であるが、気温の効果の方が大きく季節変動を支配しているためである。

水蒸気フラックスの収束量は、降水量と蒸発量の差に等しい。南極のように寒冷ですべての降水が雪であるとすれば、これは氷床の涵養量に等しい。この研究で得られた水蒸気収束の季節変化は、温暖化したときに氷床が発達するか消費するかを考えるときに示唆を与える。温暖化した場合、大気中の水蒸気量が増え、降雪量が増加し、南極氷床の涵養量が増大するといった議論があるが、それほど簡単ではない。もし仮に、温暖化して夏の状態が長くなり冬の状態が短くなれば、冬の方が涵養量が大きいのだから氷床は消費するという逆の推論も可能である。温暖化によって低気圧活動がどうなるかが鍵となるであろう。

大気中の水循環の早さという観点から考察してみる。NMC データによる全球平均年平均可降水量は 28 mm である。全球平均降水量は研究者によって異なるが、2.6-3 mm/day であるから、平均的には 10 日で大気中の水が入れ替わるといった勘定になる。大気中の平均滞留時間が 10 日といってもよい。70°S の格子点以極の年平均可降水量は 2.4 mm と少ない。降水量の見積りは難しいが、70° 以極では水蒸気フラックスの収束量の平均は 0.46 mm/day であるが、蒸発量は降水量に比べて小さいとすればこの程度であろう。また、JAEGER (1976) の降水量データで 70°S 以極の年降水量を求めてみると 200 mm で、0.56 mm/day となる。従って、水蒸気の平均滞留時間は 4-5 日ということになり、全球平均より短い。すなわち、水循環は活発であるといえよう。特に、冬は活発であり、70°S 以極の 8 月の可降水量は 1.34 mm でフラックス収束は 0.52 mm/day であるので平均滞留時間は 2.6 日となる。冬は蒸発量は少ないのでこの見積りは妥当と思われる。南極域は意外にも水循環が非常に活発な場所といえよう。

文 献

- BROMWICH, D.H. (1979): Precipitation and accumulation estimates for East Antarctica, derived from rawinsonde information. Research Report, Dept. Meteorology, Univ. Wisconsin, 142 p.
- BROMWICH, D.H. (1990): Estimates of Antarctic precipitation. *Nature*, **343**, 627-629.
- 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, 90 p.
- GIOVINETTO, M.B., BROMWICH, D.H. and WENDLER, G. (1992): Atmospheric net transport of water vapor and latent heat across 70°S. *J. Geophys. Res.*, **97**, 917-930.
- JAEGER, L. (1976): Monatskarten des Niederschlags für die ganze Erde. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, **139**, 38 p.
- MASUDA, K. (1990): Atmospheric heat and water budgets of polar regions: Analysis of FGGE data. *Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol.*, **3**, 79-88.
- 和田 誠 (1988): 雲. 南極の科学, 3. 気象. 国立極地研究所編. 東京, 古今書院, 191-202.
- YAMAZAKI, K. (1992): Moisture budget in the Antarctic atmosphere. *Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol.*, **6**, 36-45.

(1996年9月17日受付; 1996年10月11日改訂稿受理)