

### 3. 対流圏の大規模な物質循環と水循環

山崎 孝治\*

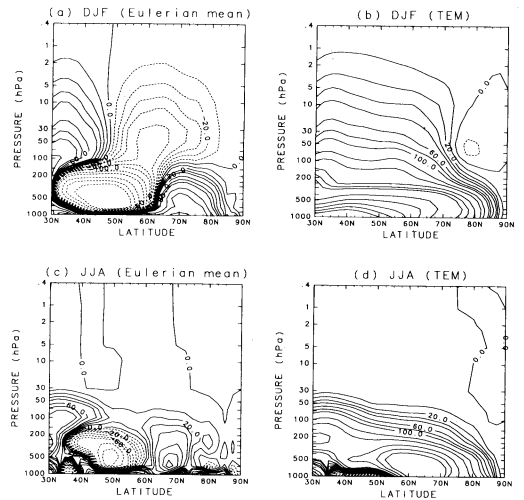
#### 1. はじめに

前2つの講演の対流圏の水と物質循環の話と次の講演の成層圏の微量物質の衛星観測の話の橋渡しとして、北極域の対流圏・下部成層圏の子午面循環と対流圏の水循環の2つの話題を提供する。

#### 2. 子午面循環

大気の流れを一定の緯度で東西に平均したオイラー的な子午面循環の描像と空気の流れに乗って考えるラグランジュ的描像が異なることは、成層圏循環の研究から明らかにされてきた。定常なプラネタリー波が例えばある緯度で(実際は60°N付近)振幅が大きいとすると、空気塊の軌跡は子午面上で楕円を描いて平均位置は移動しないのに、オイラー的に見ると振幅最大の緯度より高緯度で上昇流、低緯度で下降流となる(Matsuno, 1980)。物質輸送を考えるときは、ラグランジュ的描像の方が望ましいが、それを実際に求めるのは困難なので、波の効果による見かけの輸送を取り除く Transformed Eurlian-Mean 方程式系(TEM系)が提唱され(Andrews and McIntyre, 1976)、主に突然昇温など成層圏循環の解析の便利な道具として使われてきた。

ここでは、オイラー的記述と TEM 系での記述で北半球中高緯度対流圏の循環を比較してみる。第1図左は NMC 客観解析データから求めたオイラー的質量流線関数である。左上の冬の成層圏では、50°N 付近に下降流、北極圏に上昇流がある。対流圏では30-60°N に高緯度で上昇、低緯度で下降するいわゆるフェレル循環が冬でも夏でも存在する。極域では高緯度で下降する極循環が見える。赤道域のハドレー循環を加えて、



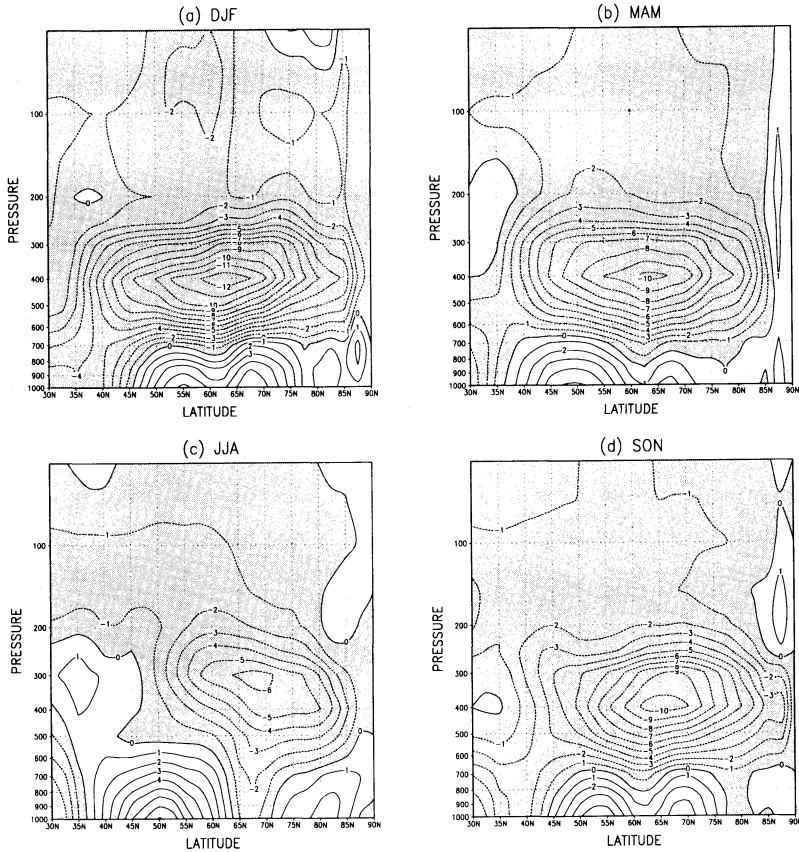
第1図 7年平均(1989-95年)質量流線関数。左はオイラー的循環。右はTEM系による残差循環。上は冬(12, 1, 2月), 下は夏(6, 7, 8月)。等値線は0, ±10, ±20, ±30, ±40, ±60, ±80, ±100, ±150, ±200, ±300, ±400, ±500, ±1000, ±1500, ±2000, ±2500, ±3000 kg/m/s。正(実線)は時計回り, 負(破線)は反時計回り。

3細胞循環を構成している。フェレル循環, 極循環とも夏には弱くなる。

一方, 第1図右はTEM系での質量流線関数で, オイラー的なものと大きく異なる。成層圏では中高緯度で下降する一つの循環のみである。対流圏でも, フェレル循環は姿を消し, 高緯度で下降する1つの循環となっている。この方が現実に近い。

北極域対流圏の空気塊がどこからやってきたかに着目してみよう。冬には, 対流圏上部(400 hPa付近)を極向きにまっすぐ輸送されるものが多い, その他, 中緯度の100 hPa以上の成層圏いわゆる“Overworld”

\* 北海道大学大学院地球環境科学研究科。



第2図 7年(1989—95年)平均 Wave Forcing. (a)冬(12, 1, 2月), (b)春(3, 4, 5月), (c)夏(6, 7, 8月), (d)秋(9, 10, 11月). 等値線間隔は1 m/s/day. 負の領域に点彩.

第1表 季節毎及び年平均の TEM 系による 60—90°N の下向き質量フラックス.

Mass Flux ( $\times 10^8$ kg/s), 60N-90N					
	DJF	MAM	JJA	SON	Mean
100 hPa	54.2	46.6	16.2	32.4	37.4
300 hPa	163.5	166.5	137.4	144.3	152.9

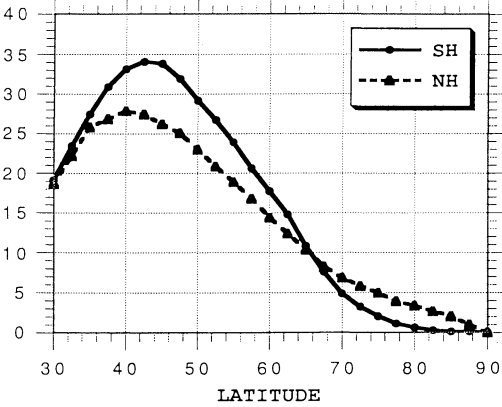
(等温位面がすべて成層圏にある領域, Holton *et al.*, 1995) から極向きに下方に輸送され, 60—70°N の下部成層圏で大きく下降した空気塊が北極域対流圏に輸送されているのがわかる. 成層圏からの輸送は極渦の中ではなく, 極渦の縁を下降してくるのがほとんどである. 冬の北極対流圏には“Overworld”からの物質輸送があるといえる.

夏には, 50—200 hPa 付近の中緯度から北極域へ輸送されている. 100—200 hPa の高度領域は熱帯では対

流圏であるが中高緯度では成層圏に属する “Lowermost stratosphere” (最下部成層圏: 等温位面が対流圏界面を横切る領域, Holton *et al.*, 1995) である. 夏の北極対流圏には最下部成層圏からの物質輸送が主である.

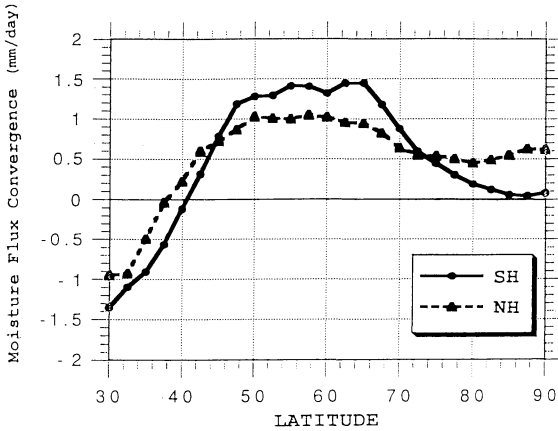
“Overworld” と “Lowermost stratosphere” の境として 100 hPa, 圏界面として 300 hPa をとって, 60—90°N の北極域における下向き質量フラックスを各季節毎に示したのが第1表である. どちらの面でも冬に大きく夏に小さいが, 100 hPa 面ではその変動が大きく冬と夏の比率は約3倍であるのに, 300 hPa 面では季節変動は小さい. また, 300 hPa 面と 100 hPa 面との差は 60°N を通して 100—300 hPa で低緯度から輸送される質量であるが, この量は大きな季節変化をしない. 従って, 北極対流圏に成層圏から輸送される質量 (300 hPa 面での値) は大きな季節変化をしない “Lower-

Poleward Moisture Flux ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ )



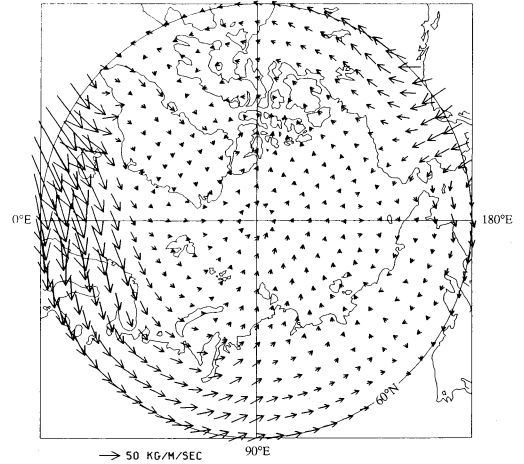
第3図 年平均・東西平均・極向き水蒸気フラックス. 黒丸に実線は南半球, 黒三角に破線は北半球. 1986~91年の6年間のNMCデータによる (山崎, 1997).

Moisture Flux Convergence (mm/day)



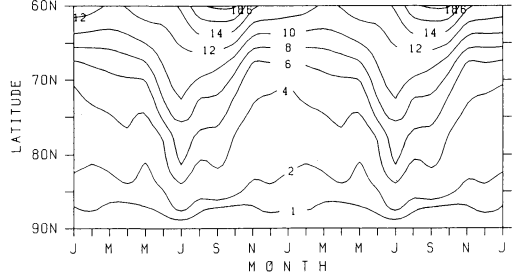
第4図 第3図と同じ. ただし, 水蒸気フラックス収束 (山崎, 1997).

NMC DATA 1986-91 ANNUAL MEAN MOISTURE FLUX



第5図 年平均水蒸気フラックスの水平分布. 1986~91年の6年間のNMCデータによる. 外側の円は60°N (Yamazaki, 1995).

POLEWARD MOISTURE FLUX ( $\text{KG/M/S}$ ) NMC DATA 1986-1991



第6図 6年 (1986~91年) 平均・東西平均・極向き水蒸気フラックスの季節変化. 2年分を繰り返して表示してある (Yamazaki, 1995).

most stratosphere” 領域を北向きに輸送される質量からの寄与に, 季節変化の大きい “Overworld” からの寄与が上乗せされるとい形になっている. しかし, “Overworld” からの寄与は冬で約30%, 夏は約10%と量的には少ない.

次に, 北極域の下降流の成因を TEM 的に説明してみる. プラネタリー波や総観規模の高低気圧波動などによって平均東西風を変化させる力 (Wave forcing) が働く. 普通は西風を減速させる力が働く. そうするとそれまで地衡風バランスにあった流れが減速されるのでコリオリ力が弱まり, 空気塊は極向きに移動する.

極に向かった空気はゆきどころがなく下降する. そのため, 北極対流圏で下降する循環ができる. それでは, 実際に Wave forcing を見てみよう (第2図). 1年を通して, 60~70°N, 対流圏上部を中心とした強い減速力があることがわかる. この減速をもたらしているのは, 主にプラネタリー波や総観規模の高低気圧波動である. 冬には図には示していないが成層圏中上部でプラネタリー波による強い forcing があり, 100 hPa での北極域下向き質量フラックスが冬に大きいことはこれから理解される.

対流圏上部での forcing のピークは冬に大きく夏の倍ほどであるが, 夏のピークは300 hPa にあるの対

し、他の季節は400 hPa にピークがある。これは、夏には圏界面が高く、総観規模波動が高い高度まで達するためであると推測される。夏のピークが高いので、300—100 hPa で見ると夏も冬も Wave forcing に大きな差はない。そのため、300 hPa 面での北極域下向き質量フラックスは前述したように大きな季節変化を示さないのである。ただし、400 hPa 以下の北極対流圏での下向き質量フラックスは夏は他の季節に比べて約半分になる。

熱の観点から考えてみる。波動によって北極域に熱が運ばれているので、北極域は放射対流平衡で期待される温度より高温に保たれている。したがって、北極域大気は放射による冷却を受け、凝結熱の放出を考慮しても非断熱加熱は一年を通して負となっている。この非断熱冷却により下降流が生成されるといえる。いずれにしても波動が循環を作りだしていると考えることができる。これまで平均的子午面循環を議論してきたが、対流圏では波動が卓越しているため、実際の物質輸送を考えるときは波による拡散的輸送を考慮しなければならない。

### 3. 水循環

北極域での水蒸気の輸送を考えてみる。平均子午面循環では水蒸気量の少ない対流圏上部で極向き、水蒸気量の多い下層で赤道向きである。そのため、平均子午面循環では赤道向きに水蒸気が運ばれる。しかし、渦の効果の方が卓越し実際には極向きに運ばれる。低気圧の前面の温暖領域では多量の水蒸気の極向き輸送があり、後面では冷たく水蒸気量の少ない空気の赤道向き輸送がある。飽和水蒸気量は温度とともに指数関数的に増大する。その結果、低気圧システムは効率的に水蒸気を極方向に輸送する。

第3図はNMC客観解析データによる東西平均極向き年平均水蒸気フラックスである(山崎, 1997)。フラックスは40°N にピークをもち、極にゆくにしたがって減少していることがわかる。このフラックスの収束(第4図)は「降水-蒸発」に対応し、40°N より北では正であることがわかる。60°N で1 mm/day で70°N 以北でも0.5 mm/day の値であり、中緯度の値に比べてそれほど小さくないのが特徴であろう。これは蒸発量が少ないためと思われる。

年平均水蒸気フラックスの空間パターンを第5図に示す(Yamazaki, 1995)。フラックスの大きい所はデ

ンマーク海峡から西シベリアにかけての地域とベーリング海からハドソン湾にかけての地域である。60—70°N で極向きフラックスの大きいところはデンマーク海峡からスカンジナビア半島にかけての大西洋北部、カラ海から西シベリア付近及びアラスカ付近である。これらは、それぞれアイスランド低気圧、カラ海低気圧、アリューシャン低気圧に対応している。

次に、東西平均水蒸気フラックスの季節変化を第6図に示す。極域では水蒸気の多さを反映して夏季に多いが60—65°N では9月を中心とする秋に多い。ラジオゾンデデータを解析した Serreze *et al.* (1995) の結果によると70°N での極向きフラックスは9月に最大である。2つの結果は概ね一致している。Serreze *et al.* (1995) は、この9月のピークの原因を7月に比較してカナダ多島海での赤道向きフラックスの減少によるとしているが、カラ海低気圧が秋に発達することも要因であると思われる。

北極域の対流圏の大気・水循環を調べてみると単純な季節変化をしていないことがわかったが、これらの構造や原因を探るのは今後の課題であろう。

### 謝 辞

2 節の内容は当研究科 D3 の薛東一君との共同研究の成果です。ここに感謝の意を表します。

### 参 考 文 献

- Andrews, D. G. and M. E. McIntyre, 1976: Planetary waves in horizontal and vertical shear: The generalized Eliassen-Palm relation and the mean zonal acceleration, *J. Atmos. Sci.*, **33**, 2031-2048.
- Holton, J. R., P. H. Haynes, M. E. McIntyre, A. R. Douglass, R. B. Rood and L. Pfister, 1995: Stratosphere-troposphere exchange, *Rev. Geophys.*, **33**, 403-439.
- Matsuno, T., 1980: Lagrangian motion of air parcels in the stratosphere in the presence of planetary waves, *Pure Appl. Geophys.*, **118**, 189-216.
- Serreze, M. C., R. G. Barry and J. E. Walsh, 1995: Atmospheric water vapor characteristics at 70 N, *J. Climate*, **8**, 719-731.
- Yamazaki, K., 1995: A comparison of water budget in the arctic and antarctic atmosphere, Preprint of Wadati Conference, 45-47.
- 山崎孝治, 1997: 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, 南極資料, **41**, 149-160.