

# 夏季北東アジア乾燥域における降水分布とその経年変動

東大気候システム研究センター 岩尾航希 (IWAO Koki)

高橋正明 (TAKAHASHI Masaaki)

夏季北東アジアの降水量は、モンゴルの南西、砂漠域で最も少なく、モンゴル北部には国境付近を中心に多雨帯が存在する。この地域における 7 月降水量の経年変動に EOF 解析をおこなった結果、多雨帯を境に北東アジア・シベリア間で振動するパターンが第 1 モードとして現れ、上部対流圏まで達する子午面循環を伴っていた。またこの振動モードの変動は 7 月のみでなく夏季平均降水量の経年変動に強い影響を与えていた。夏季における降水分布の決定、およびこの南北振動モードに対する、モンゴル北部国境付近の山脈による寄与を調べるため、局域気候モデルを用いた数値実験を行った。この山脈を平地とした 7 月の降水量分布を調べた結果、多雨帯はなくなりモンゴル南部では降水量が増えた。また南北振動に関しては、変化の兆候は見えただが未だ不確定である。

## 1. はじめに

北東アジア乾燥域では、年間のほとんどの降水が夏季に集中しており、植生など地表面の環境に与える影響は大きい。近年この地域は、干魃・温暖化・砂漠化[UNEP, 1997]など厳しい気候変化にさらされており、夏季降水量の変化が影響していることが考えられる。本研究ではまず、北東アジア乾燥域の平均的な夏季降水量分布を決定する気候的な特徴を捉える。その上で、夏季降水量の経年変動について解析を行う。

## 2. データ・解析手法

降水量としては NCDC により提供された定点観測データを用い、モンゴル・内モンゴルを含む領域(85-125E, 38-50N)、の 68 点を使用した。解析期間は 1979 年から 2004 年までで、1999 年は明らかに異常と分かるデータを含んでいたため欠損値とした。また他の地点の降水量も補うため、定点観測・衛星観測・客観解析データを組み合わせた CMAP の月平均格子データも用いている。大気場の解析には ECMWF 客観解析データ ERA40 の月平均値を用いた。水蒸気フラックスに関しては 6 時間間隔データを鉛直積分し、月平均して求めている。本研究で用いた気象モデルについては 3.2 章で述べる。

## 3. 結果

図 1 は北東アジア(85-125E, 38-50N)における夏季降水量の経年変化を示している。CMAP の格子データを領域平均したもの(折れ線グラフ)と、68 点の定点観測データを面積の重み付きで平均したもの(棒グラフ)の 2 種類、それぞれ 6-8 月の総降水量(白抜き)と、7 月降水量(黒塗り)について示している。6-8 月降水量を見ると、2 つのデータセットで多少値が異なるものの、どちらのデータでも 1980 年から少なくとも 1990 年代半ばまでは緩やかに増加しており、その後 1999 年から 2002 年まで非常に降水量が少ない年が続いたことが分かる。モンゴルでは 1999/2000 年の冬季から 3 年連

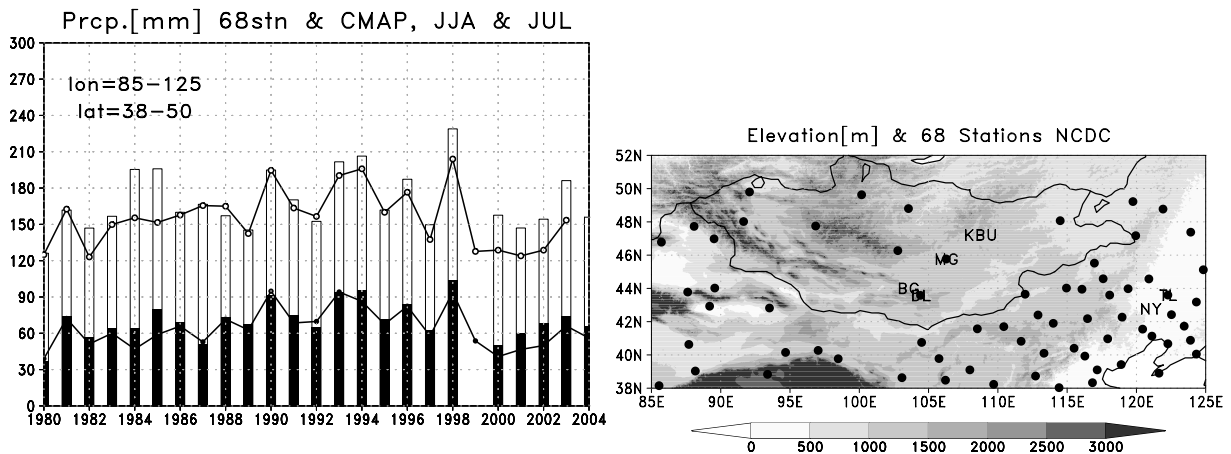


図 1. [左] 北東アジア(85-125E, 38-50N)における降水量の経年変動。棒グラフは[右]に示す 68 点の観測データ平均値で、白抜きが 6-8 月降水量、黒塗りが 7 月のみの降水量。折れ線グラフは CMAP 月平均降水量の領域平均値で、6-8 月、7 月のものを示している。下図の陰影は標高(m)。

続で家畜の大量死(ゾド)が報告されており、この図に見られる夏季の少雨が影響したことがわかる。また同様の傾向は 7 月降水量にも見て取れるが、一方で 6,8 月降水量には鮮明に見られなかった。そこで以降は 7 月降水量に注目して解析を行う。

### 3.1 解析： 夏季降水量の分布と経年変化

まず、北東アジアの 7 月降水量分布を決める気候場を見つめる。降水量(図 2[左上])はモンゴルの南西タクラマカン砂漠方面で最小となっており、逆にモンゴル北部ではロシアとの国境に沿って降水量の多い地域が見られる。この多雨帯は夏季にのみ見られ、7 月に最も顕著になる傾向があった(図省略)。更に 7 月の水蒸気フラックス(図 2[右上])を見ると、この地域には北西方向からの水蒸気の流入が顕著であることが分かり、それがモンゴル北部の多雨帯では収束、南西の砂漠域では発散しているのが分かる。また 500hPa における鉛直流(図 2[左下])は、この多雨帯で上昇、砂漠域で顕著な下降を示しており、このうち下降流についてはチベット高原での太陽放射による非断熱加熱 [Sato and Kimura, 2005] が影響していると考えられている。しかし一方で、この領域にはモンゴル北部にアルタイ・ハンガイ、ロシア南部にサヤン・ヤプロノイ等山脈が連なっており、これらの山脈が多雨帯、さらに乾燥帯の形成に影響している可能性がある。この地域(90-120E)の大気循環を子午面断面図(図 2[右下])で見ると、多雨帯(~50N)においては対流圏下層で空気が南北から収束しており、上昇流が対流圏上層まで達し、そこで発散して南北で下降しているのが分かる。

次に 7 月降水量の経年変化を調べるために、北東アジアを含む広い領域(70-140E, 30-70N)における降水量の経年変動(1979-2004 年)に主成分(EOF)解析を適用し、変動の主要モードを抽出した。図 3[左上]に示すのが EOF 第一主成分のパターン分布で、モンゴルの北部国境を境に南北で逆符号のパターンが見られる。これは 7 月降水量が、多雨帯を境に北東アジア・シベリア間で振動していることを表している。またこのパターンは多雨帯で符号を鋭く変えていることから、多雨帯の存在が

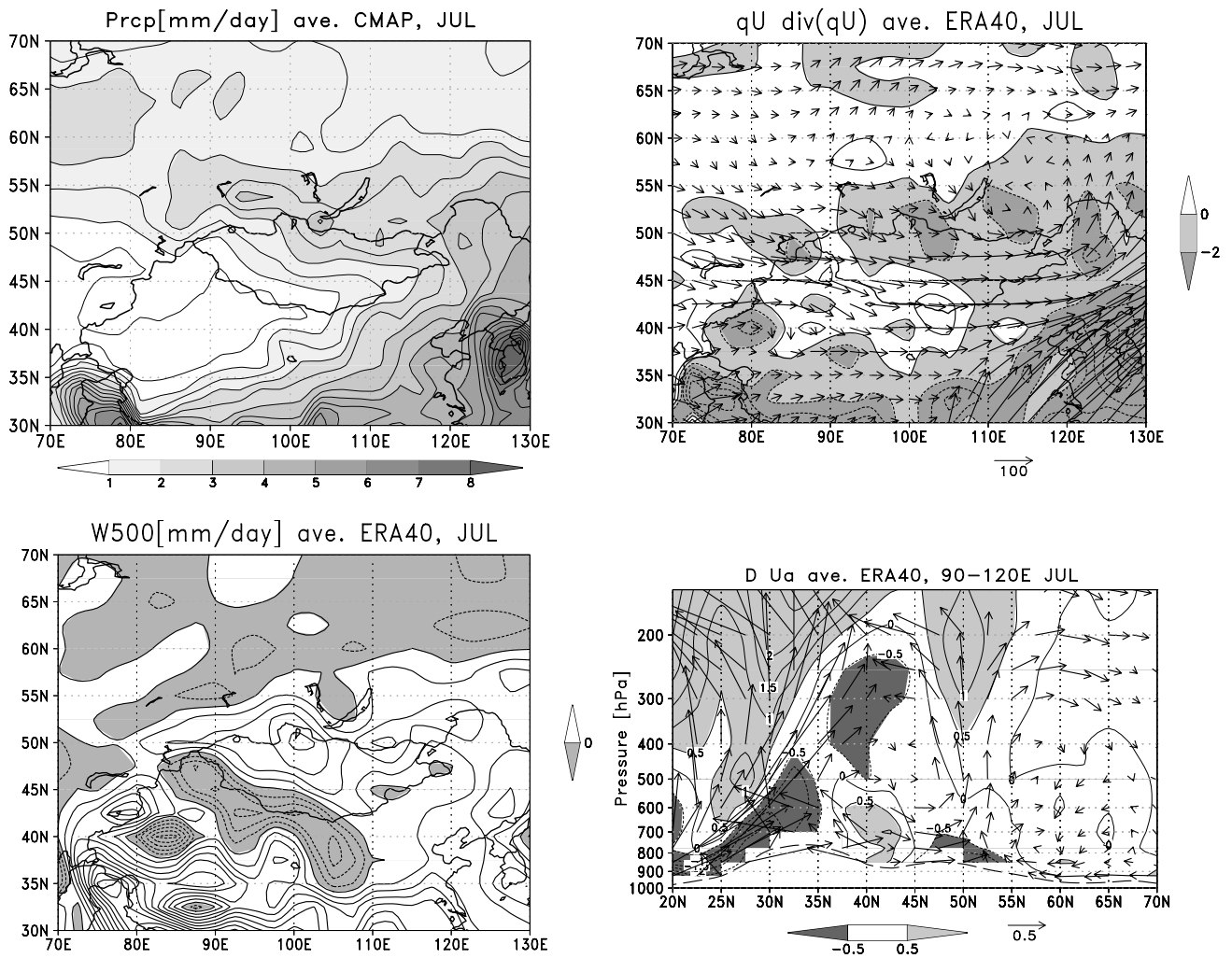


図 2. 7 月における平均的な[左上] 降水量分布(0.5mm/day 間隔)、[左下]500hPa における鉛直風速 (2mm/s 間隔; 下降流の領域に陰影)、[右上] 鉛直積分した水蒸気フラックス(kg/s)とその発散 (2mm/day 間隔; 収束の領域に陰影)、[右下]90-120E で東西平均した子午面流(m/s; 鉛直流は 100 倍してある; 南北流は非地衡風成分)と水平発散( $0.5 \times 10^6/s$  間隔)。

この振動パターンに関与している可能性が示唆される。このパターンの時間係数(図 3[左下])は図 1 に示した降水量の経年変動をよく表現しており、1980 年から 1990 年代半ばまで増加、その後減少といった特徴を捉えている。また夏季平均降水量の経年変動に対して EOF 解析を行っても、同様の振動パターンが第一成分として現れた(図省略)。従って、7 月の降水量に見られるこの南北振動パターンの変動が、北東アジアにおける夏季降水量の経年変動に強い影響を及ぼしていることが分かる。

この時系列と、7 月の大気循環場との相関・回帰を解析することにより、この南北振動パターンが何により形成されるか調べた。図 3[右上]はこの時系列への回帰を計算することにより得られた、北東アジアで降水量が多い(シベリアで少ない)ときの水蒸気フラックスと、500hPa 高度偏差の分布

を示している。500hPa 高度場はおおむね降水量のパターンと対応した偏差を示しており、北東アジアで低気圧、シベリアで高気圧となっている。この気圧偏差はユーラシア大陸西部まで波列状に連なっており、夏季ユーラシア大陸上を伝播する大気波動 [e.g. Enomoto et al., 2003; Nakamura and Fukamachi, 2004; Sato and Takahashi, 2004] が降水量の南北振動パターンに影響していることが示された。また水蒸気フラックスに注目すると、北東アジアで降水量が多いときには、南からのフラックスが北東アジアの東で向きを変えて流入してきているのが分かる。図 3[右下]は同様に計算した 90-120E における子午面流と水平発散の分布を示している。多雨帯を境に逆パターンの収束・発散と鉛直流が見られ、それが高度の高い 1 細胞の子午面循環を形成しているのが分かる。即ち、降水量の南北振動にはこの循環が関与しており、その向きにより多雨・少雨の振動パターンが形成されることを意味している。

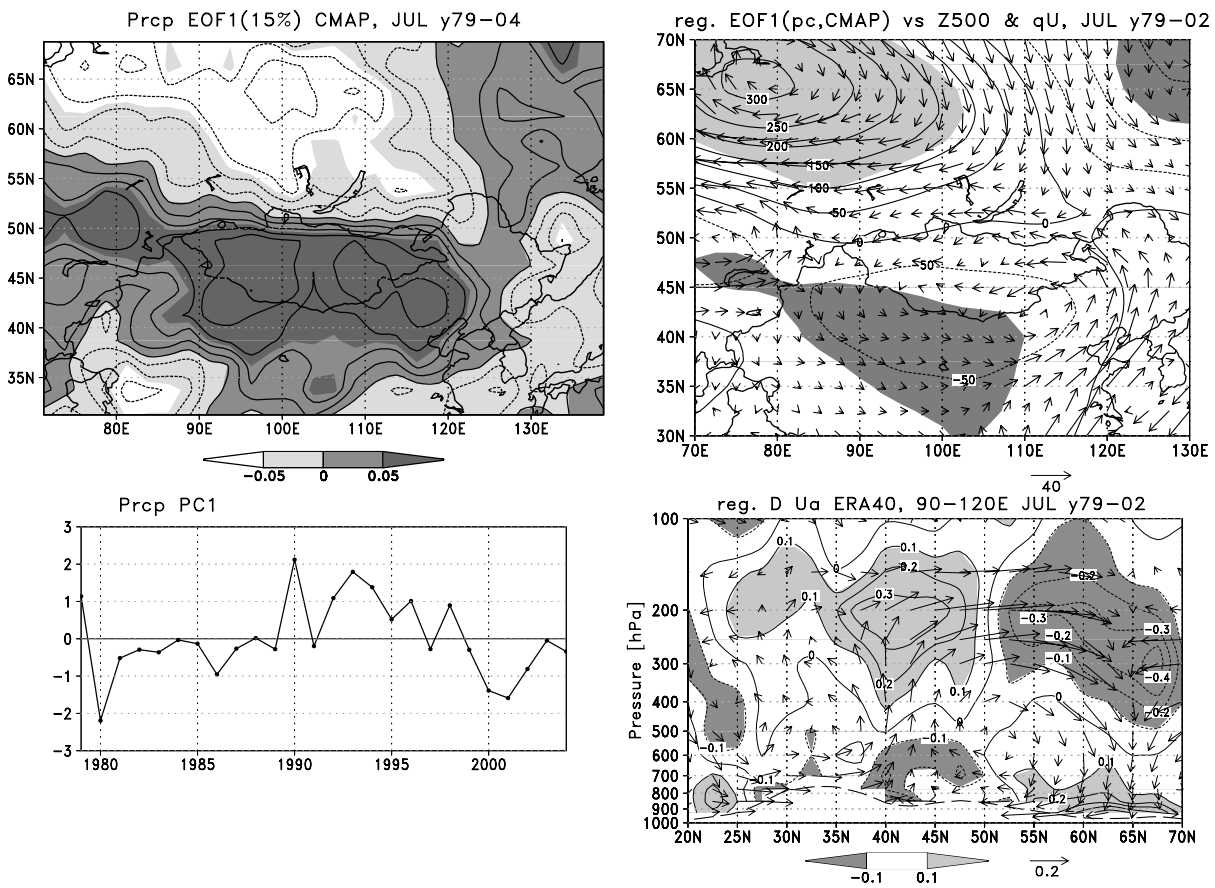


図 3. 北東アジアにおける 7 月降水量の経年変動(1979-2004 年)に対する、EOF 第一主成分の[左上]パターン分布と[左下]時間係数。時間係数との相関・回帰を計算することにより得られた、[右上]500hPa 高度場偏差(m、95%以上有意な偏差に陰影)と水蒸気フラックス(kg/s)、[右下]90-120E で東西平均した子午面流(m/s; 鉛直流は 100 倍してある、南北流は非地衡風成分)と水平発散( $0.1 \times 10^{-6}/s$  間隔)。

### 3.2 数値実験： モンゴル北部山脈の降水量への影響

ここまで、夏季モンゴル北部国境付近に多雨帯が存在することにモンゴル北部・ロシア南部の山脈が寄与している可能性を述べた。従ってこの山脈は、多雨帯を挟む降水量の南北振動にも影響することが考えられる。ここでは数値モデルを用いてこれらのことを検証する。

用いたモデルは PSU/NCAR の MM5 version3.5.0 で、水平格子間隔 120km、鉛直には 10hPa までを 29 層に分け、100 秒の時間ステップで積分した。サブグリッドスケールの現象についてはパラメタリゼーションを用いることで表現している。積分した領域は図 4[左上]に示されており、側面境界で ERA40 のデータを与えている。行った実験の内容としては、まず EOF の時系列(図 3[左下])から北東アジアで多雨(1990, 1993, 1994 年)・少雨(1980, 2000, 2001 年)の年をそれぞれ上位 3 年選び、それぞれの 7 月に対して「標準実験」と、モンゴル北部・ロシア南部に山脈がない「山なし実験」とを行った。山なし実験ではこれら山脈を広い領域(70-125E, 45-60N; 図 4[左上]の四角で囲った領域)で 400m の平地にし、その境界をならしている。そして、標準実験と山なし実験において、それぞれの平均を比較することにより多雨帯形成への山脈の寄与を、多雨年と少雨年の差を比較することにより南北振動への寄与を評価する。

まず、標準実験においてシミュレートされた降水量がどれだけ観測を再現するか、2000 年 7 月を例に図 4[右]に示す。モデルで再現された月平均の降水量分布(図 4[右上])は、CMAP の降水量分布(図 4[右下])に見られる、モンゴル北の多雨帯や、更に北 65N 付近の降雨を表現しており、定性的な分

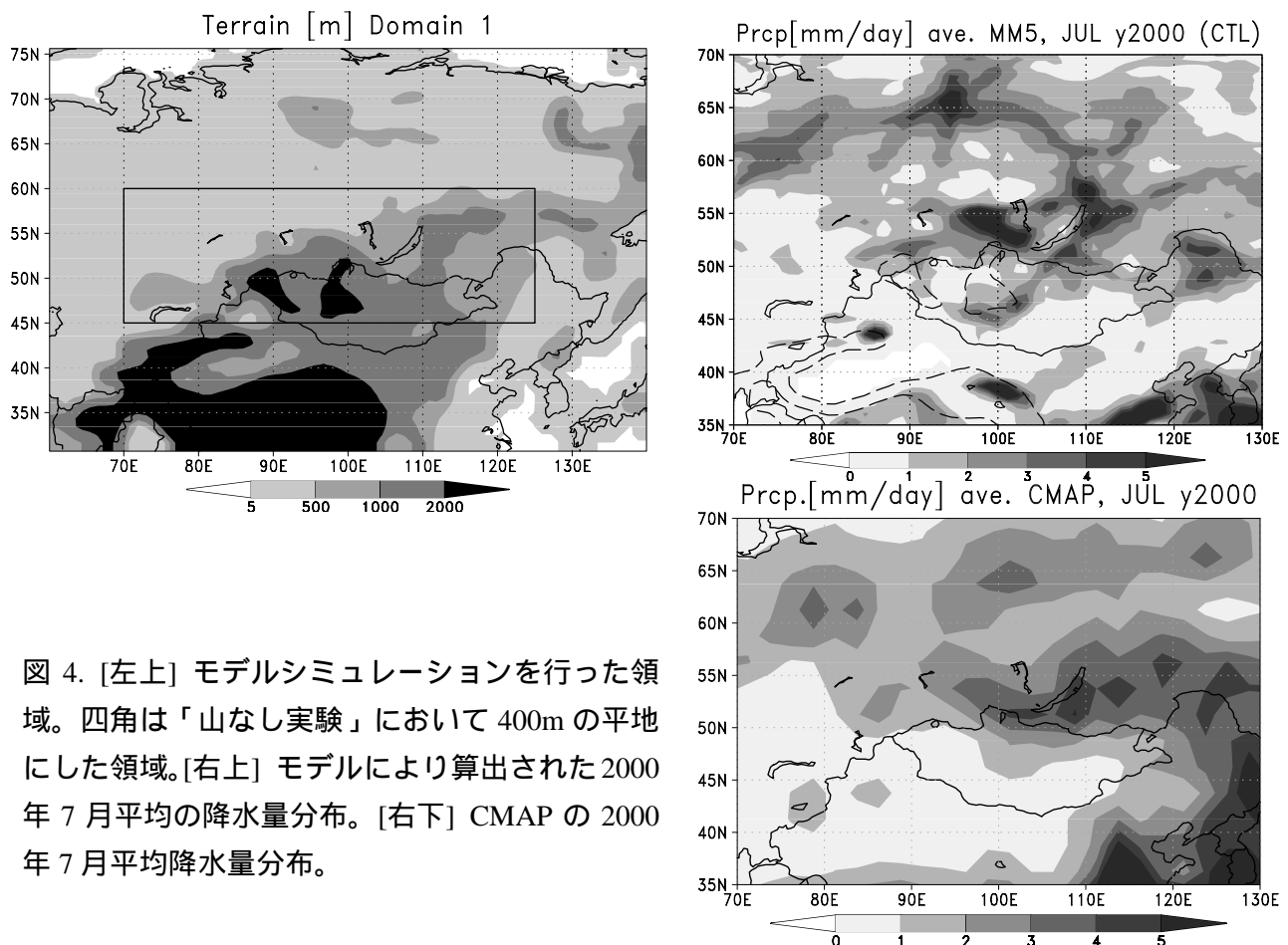


図 4. [左上] モデルシミュレーションを行った領域。四角は「山なし実験」において 400m の平地にした領域。[右上] モデルにより算出された 2000 年 7 月平均の降水量分布。[右下] CMAP の 2000 年 7 月平均降水量分布。

布は捉えているのが見て取れる。異なる点を挙げると、数値モデルでは降水量が細かく分布しており地形性の降雨を強く捉えていること、また朝鮮半島の北方での降水量を再現していないことが挙げられる。これらの特徴は他の年のシミュレーション結果にも同様に見られたので、結果を考察する上で注意する必要がある。

図5にモデル計算の結果を示す。標準実験における6年平均の7月降水量(図5[左上])には、モンゴルの北50-55N付近に2mm/day以上の多雨帯が見られ、観測(図2[左上])と良い一致を示している。しかし、山なし実験(図5[右上])ではこの多雨帯がみられなくなっており、モンゴル北部・ロシア南部の山脈が多雨帯の形成に強く寄与していることが分かる。また山なし実験からの標準実験の偏差(図省略)には、多雨帯での降水量の増加と共に、モンゴル南部に顕著な減少が見られ、この山脈は乾燥帯の形成にも寄与している可能性を示唆した。次に北東アジアで少雨であった3年平均の、多雨であった3年平均からの差を、標準実験と山なし実験において図5[下]に示す。標準実験(図5[左

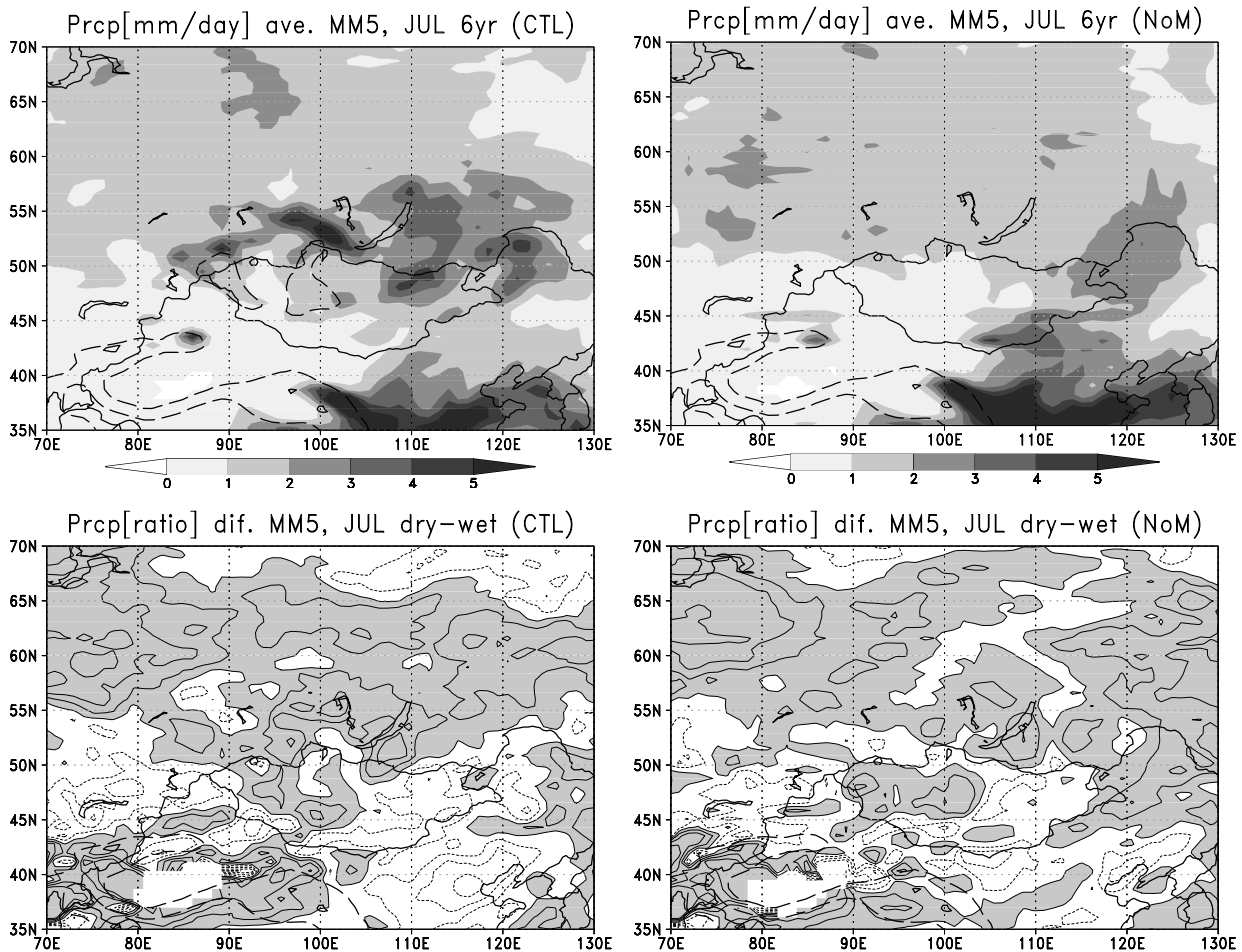


図5. 標準実験と山なし実験における、7月降水量の6年平均([左上]と[右上]; mm/day)と、北東アジアで少雨であった3年と多雨であった3年からの差([左下]と[右下]; 平均に対する変化率で0.5間隔; 正の領域に陰影)。

下))において見られるモンゴル北部国境を境とした南北の逆偏差パターンが、山なし実験(図 5[右下])においては不明瞭になっているものの、依然存在しているのが見て取れる。従って、山脈の存在は南北振動パターンの形成に決定的な役割を果たしていないことが示唆される。しかし、今回の実験においては標準実験においてもこのパターンが十分に再現されていないので、今後モデル降水量の再現性を高める必要がある。

#### 4. まとめ

夏季北東アジアには、モンゴルの南西に砂漠域、モンゴル北部国境付近には多雨帯が存在する。水蒸気フラックスを解析した結果、北西から輸送されてきた水蒸気が多雨帯において収束、乾燥帯で発散していることが確認された。また、この領域における子午面流から、この多雨帯において上昇した空気が乾燥帯で下降することにより降水を抑制していることが示唆された。

北東アジアにおける夏季降水量は、1980年から1990年代半ばにかけて増加傾向、その後1999年以降4年連続で少雨偏差を示しており、これらの経年変化は7月降水量の変化が牽引していることが分かった。そこで7月降水量の経年変化にEOF解析を適応した結果、多雨帯を境に北東アジアとシベリアで南北に振動するパターンが第一モードとして現れ、このモードは上述の経年変動を表現していた。さらに、このモードの時系列に対する大気場の回帰から、このモードの形成にはユーラシア大陸上を西から伝播してくる大気波動が関与していること、さらに、北東アジア・シベリア間での対流圏界面にまで達する子午面循環が関与することがわかった。

モンゴル北部・ロシア南部には山脈が連なっており、北東アジアにおける降水分布や、その経年変動に見られる振動パターンに影響している可能性がある。夏季におけるこれらの寄与を調べるため、局域気候モデルを用いた数値実験を行った。この山脈を平地とした7月の降水量分布を調べた結果、多雨帯はなくなりモンゴル南部では降水量が増えた。また南北振動に関しては、変化の兆候は見えただが未だ不確定である。

#### 参考文献

- Enomoto, T., B.J. Hoskins, and M. Matsuda (2003), The formation mechanism of the Bonin high in August, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 129, 157-178.
- Nakamura, H., and T. Fukamachi (2004), Evolution and dynamics of summertime blocking over the Far East and the associated surface Okhotsk high, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 130, 1,213-1,233.
- Sato, T., and F. Kimura (2005), Impact of diabatic heating over the Tibetan Plateau on subsidence over northeast Asian arid region, *Geophys. Res. Lett.*, 32, doi:10.1029/2004GL022089.
- Sato, N. and M. Takahashi (2004), Internal dynamics related to the appearance of the Okhotsk High in midsummer. *Theor. Appl. Mechanics Japan*, 53, 189-196.
- UNEP (1997), World atlas of desertification. Second Edition, Anold, 182 pp.