

モンゴルの土地被覆改変による気候応答の研究

佐藤 友徳

東京大学気候システム研究センター・日本学術振興会特別研究員

1. はじめに

モンゴルや中国北部に代表される北東アジアの乾燥・半乾燥地域は、近年年平均気温の上昇が顕著であり(Yatagai and Yasunari, 1994), 地球温暖化の影響を強く受けていると考えられる。しかし、冬季の気温は顕著な上昇傾向にあるにも関わらず、夏季の気温は 1990 年以前には有意な上昇は見られない。また、降水量の長期変動に関しても、年平均および夏季平均ともに顕著なトレンドは見られない。

図 1 にモンゴル南東部の Tooroi における月平均した 7 月の日平均気温, 日最低気温, 日最高気温の経年変化を示す。ただし, 1992 年以前は日最高最低気温計による観測であるのに対し, 1993 年以降は, 1 日 8 回の観測データの中から日最高・最低気温を求めている。日最高気温には長期的な変化は見られないが, 日最低気温は 1990 年付近から急激に上昇しており, その結果として, 日平均気温も上昇していることが分かる。同様の特徴はモンゴルの各地で見られ(Sato and Kimura, 2007), 1990 年から 1991 年にかけてのモンゴルにおける社会体制の変化と密接に関連している可能性がある。モンゴルや内モンゴルでは古くから放牧が営まれてきたが, 市場経済の導入や家畜の私有化により, 家畜頭数は都市部を中心として短期間で急激に増加している(Sugita et al., 2007). Eastman et al. (2001)で示されているように, 放牧活動は地域気候に影響を及ぼしうることから, 北東アジア地域における気候の変化は地球温暖化に代表される地球規模の気候変動のみならず, 放牧圧の増加

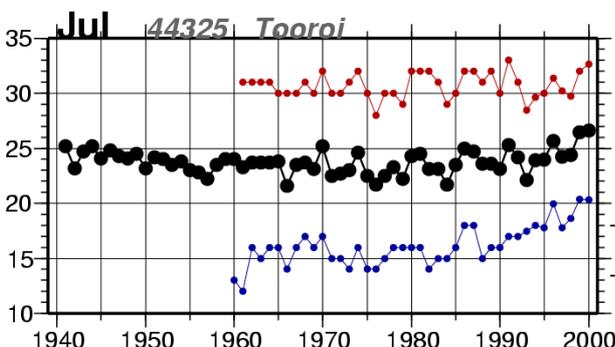


図 1: Tooroi (44.93°N, 96.77°E)における月平均した日平均・日最高・日最低気温の経年変化(7月)。

による地表面状態の変化という側面からも評価する必要がある。一般には, これらの影響が混在した状態が観測されるため, これらを分離することは困難である。本研究では, モンゴルを対象とした領域気候モデルの実験から, 特に土地利用変化の影響に着目し, 土地被覆の変化が地域気候にどのような影響を与えるのか調べることを主たる目的とする。

2. 方法

領域気候モデル TERC-RAMS(Sato and Kimura, 2005)を用いて 1994 年から 2003 年の 6, 7, 8 月を対象とした実験を行った。各年の 5 月 29 日 00Z から 9 月 1 日 00Z までを計算対象とし, 10 年分, 計 10 回の積分を行う。計算領域は 105°E, 40°N を中心とした 150km メッシュで格子数 80×60 の第一領域に, 104°E, 47°N を中心とし 30km メッシュで格子数 102×57 の第二領域を埋め込んだ。第一領域の側面境界および初期値には 6 時間毎の NCEP/NCAR 再解析データ(Kalnay et al., 1996)を用いる。今回の解析はモンゴルを中心とした 30km メッシュの第二領域について行った。積雲対流パラメタリゼーションには Arakawa-Schubert type を用いる(Arakawa and Schubert, 1974). TERC-RAMS によるモンゴルの降水量の再現性, 及び温暖化条件下における降水特性については, Sato et al. (2007)に詳しく述べられている。

ここでは, 土地被覆改変の影響を調べるために, 後に示す「標準実験」と「砂漠化実験」の 2 種類の感度実験を行う。標準実験では植生分布のデータとして, USGS による Global land cover characterization (Loveland et al., 2000)を使用した(図 2)。さらに土地被覆改変による影響を調べるための実験として, モンゴルにおける草原を半砂漠に, 半砂漠を砂漠に変更した計算を行う(以後, 砂

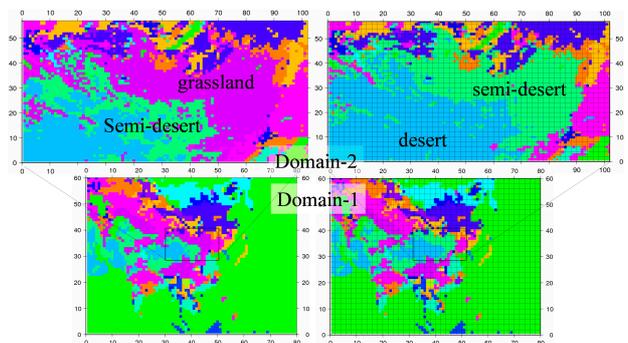


図 2: 標準実験(左)と砂漠化実験(右)における植生分布。

漠化実験). それぞれの実験における土壌水分の初期値は, USGS の植生を用いて, 水平一様な土壌水分分布から一ヶ月間の慣らし計算を行った後のものを用いることとした. 標準実験と砂漠化実験を比較することで, 地表面状態が変化したことによる気候への応答を調べる事が可能である. 現実的には, 草原や沙漠の分布は長い年月をかけて徐々に変化すると考えられるが, 植生を動的に扱った実験では現在の気候における草原の役割を評価することは困難である. Xue(1996)では, GCM の植生分布を変更した感度実験を行い, 降水分布の違いを評価しているが, 積分期間は一年であるため, 複雑な大気-陸面相互作用の一部を評価したにすぎない. それに対し, 本研究の実験では, 過去 10 年分の気象場をモデルの境界値として用いることにより, より多くの気象条件下において陸面と大気との相互作用を検討することが可能である.

3. 結果

図 3 に 6-8 月の気温及び降水量の差(砂漠化実験 - 標準実験)を示す. 平均気温はモンゴルの全域で上昇することが分かる. 温度上昇の程度は 0.4°C 未満であり, Eastman et al. (2001)や Xue(1996)の結果とおおよそ整合的である. ただし, 温度上昇は空間一様ではなく, 西部の山岳で 0.4°C と大きいのに対し, 北東部では温度上昇は非常に小さい.

降水量の変化はさらに複雑でモンゴルの中央

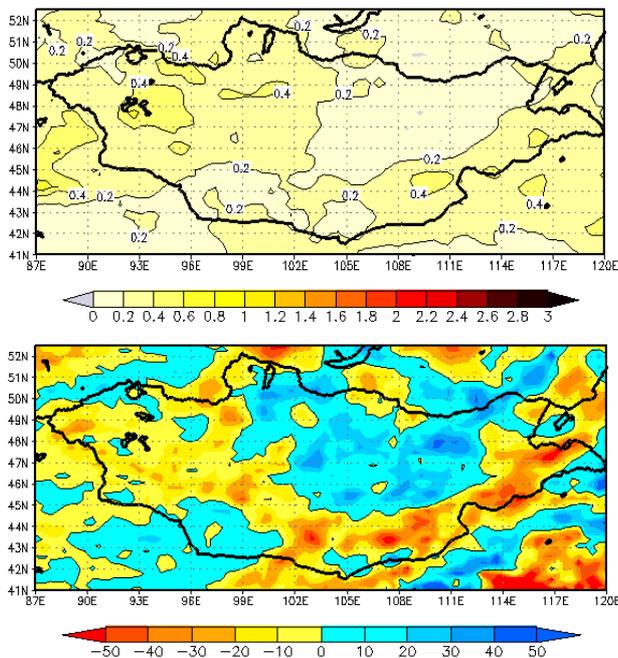


図 3: 土地被覆変化による 6, 7, 8 月の気温(上)および降水量(下)の変化. 1994 年から 2003 年の 10 年分の平均. 砂漠化実験 - 標準実験として表す.

から北部にかけては 6-8 月で 30mm 程度の降水増加が見られた. 西部や南東部ではこれとは逆に降水量の減少が見られる. 降水の変動パターンは Xue(1996)では沙漠に置き換えた領域全体で 10-20mm/月程度の減少を示しており, 今回の実験によるものとはかなり異なっている. 対象とした年の違いや, モデルの構成(パラメタリゼーションや力学フレーム)の違いによるところが大きいと考えられる.

次に年ごとの気温・降水量の差を図 4 に示す. ここではモンゴルの大部分を覆う $95-115^{\circ}\text{E}$, $45-50^{\circ}\text{N}$ の範囲で領域平均した値で評価を行った. 気温はほとんどの年の気象条件下において, 0.7°C 未満の上昇があることが分かった. しかし 2001 年~2003 年の気象条件下では気温の差は小さく, 2002 年では砂漠化実験の方がわずかに低い平均気温を示した.

領域平均した降水量の差は非常に複雑である. 1994, 1995, 1998, 2003 年では土地被覆変化によって 6, 7, 8 月の降水量が 10-20mm 減少するが, それ以外の年では, 草原を半砂漠に置き換えたにも関わらず, 降水量は 5-30mm 程度増加することが示された. 図は示さないが, 気温の差, 降水の差ともに, それぞれの年において図 3 とは異なる空間パターンを示しており, 土地被覆変化が降水に与える影響は非常に複雑であることが示唆される.

4. 考察

前述のように地球温暖化による北東アジア地域の気温上昇は IPCC 報告(Houghton et al., 2001)に使用されているすべてのモデルで予測されているのに対して, 降水量の変化は依然としてモデル

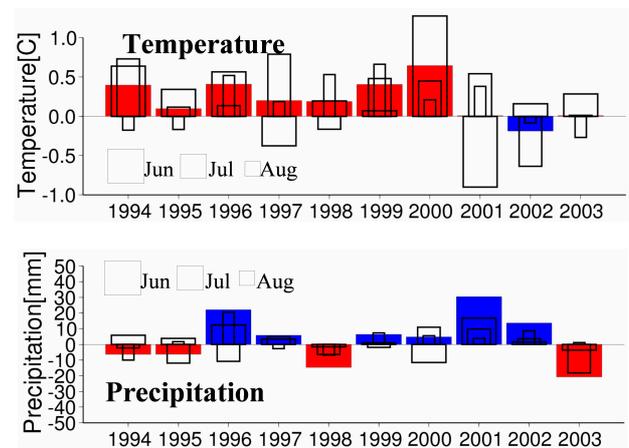


図 4: $95-115^{\circ}\text{E}$, $45-50^{\circ}\text{N}$ の領域で平均した月平均気温(上)および降水量(下)の土地被覆変化前後の差(砂漠化実験-標準実験). 影部は 6, 7, 8 月平均を表す.

間のばらつきが非常に大きいため、統一的な見解が得られていない。さらに Endo et al. (2006) による 1960 年から 1998 年の降水量データの解析からも、夏季降水量が増加している地点と減少している地点が混在することが示されている。Sato and Kimura (2006) では地球温暖化による気温や降水量の変化を気象研究所の GCM (Yukimoto et al., 2001) を境界値として領域気候モデルを用いた力学的ダウンスケーリング手法により調べた。それによると、2070 年代の 6-8 月の気温上昇は 1990 年代に対してモンゴル全域で 2.5°C 以上であることから、地球温暖化は土地被覆改変による気温上昇に比べてはるかに大きなインパクトがあると考えられる。このことから、近年の夏のモンゴルに見られる気温上昇の要因として地球温暖化による影響が支配的であると考えられる。しかしながら、図 1 に示したような急激な気温上昇に関しては、地球温暖化によるものだけでは説明が困難であり、都市化による影響等も含め、引き続き検討が必要である。

一方、Sato and Kimura (2006) や Sato et al. (2007) で示された地球温暖化に起因する降水量の変化量は、今回の実験による変化量とおよそ同程度であった。モンゴルにおける夏季の降水系は、総観規模擾乱や上空のトラフなどと関連していることが多い。土地被覆改変によって降水量が減少した年は、もともと降水量の多い年であることが多く、総観規模擾乱が活発であった可能性が高い。Perlin and Alpert (2001) は数値実験によって地表面が湿潤である場合のほうが、日中の CAPE (対流有効位置エネルギー) が増加することにより、擾乱の通過時に強い降水をもたらすことを示した。逆に乾燥した地表面条件では、擾乱に伴う対流性の降水が減少することが分かっている。今回の計算でも擾乱の通過時に、降水量が大きく減少することが確認でき(図 5)、砂漠化が陸面と総観規模擾乱の相互作用を弱めていることが示唆される。一方

で、標準実験で弱い降水が起こっている事例において、砂漠化実験では降水が強化されるという例もあることから、弱いトラフを伴った日変化する降水システム(Kawase et al., 2007)が砂漠化によって強化されるという可能性もある。これらについては引き続き調査する必要がある。

砂漠化後に気温がほとんど変化しないあるいは低下する年月(例えば、2001 年 6 月)では、対流活動が活発になることで、雲が太陽放射を遮断し地上気温が上昇するのを妨げている、あるいは、土壌が一時的に湿潤となり顕熱の増加を妨げていた可能性がある。土地被覆改変による大気への応答にはこのような正と負のフィードバックを考えることができ、有意なシグナルの検出を困難にしている要因の一つであると考えられる。

Kalnay and Cai (2003) は全球再解析データと地上観測データの両方を解析することにより、温暖化による気温変化と都市化に代表される局地的な土地利用変化による気温変化の分離が可能であることを指摘した。この手法の適用限界については様々な議論があるが(Vose et al., 2004; Trenberth, 2004), モンゴルについても同様の解析を行うことにより、観測・解析データからも、モンゴルの気温変化についての検討を行う必要があることは言うまでもない。

5. まとめ

モンゴルの草原を対象として、土地被覆の違いに起因する夏の気温・降水の違いを数値実験によって評価した。気温は砂漠化を想定した地域全体で 0.4°C 未満の上昇が見られた。これは地球温暖化による気温の上昇に比べてかなり小さく、この地域における近年の気温上昇として広域の土地被覆変化による影響は小さいと考えられる。降水の増減は、10 年分の平均でみると、モンゴル中央や北部で微増、西部や南東部で減少することが分

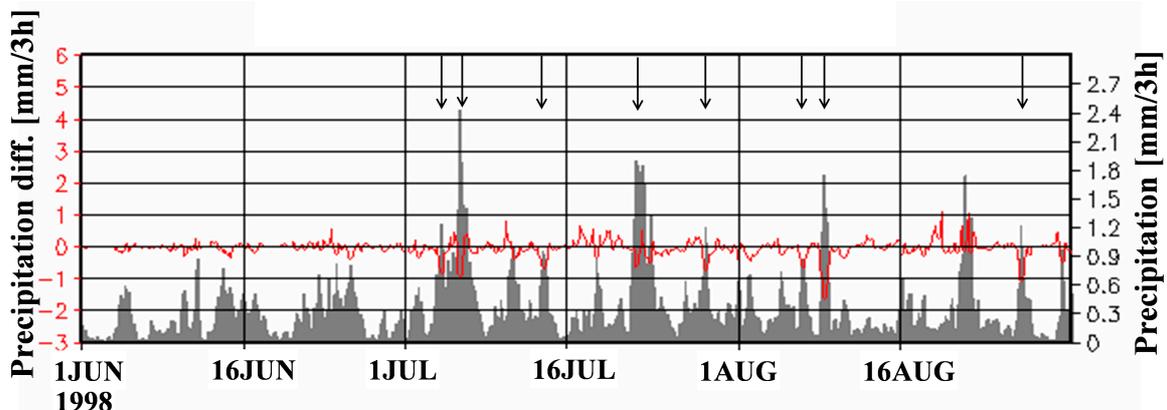


図 5: 95-115°E, 45-50°N の領域で平均した降水量の時系列(影棒, 右軸)と土地被覆改変前後の降水量の差(実線, 左軸). 降水量の差は砂漠化実験-標準実験として表す. 1998 年 6 月 1 日~8 月 31 日. 矢印は土地被覆改変後に降水量が 0.5mm/3h 以上減少した事例を表す.

かった。土地被覆変化が降水に与える影響は、対象とする年の気象条件と関連していることが示唆された。具体的には、擾乱通過時の降水量が大きく減少することにより、もともと擾乱通過が多い年には、夏の降水量が減少する傾向にあると思われる。このように、モンゴルにおける大気-陸面相互作用は複雑であり、より多くの事例を扱う必要があると考えられる。

参考文献

- Arakawa, A. and W. H. Schubert, 1974: Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 674-701.
- Eastman, J. L., M. B. Coughenour, and R. A. Pielke Sr., 2001: Does grazing affect regional climate? *J. Hydrometeor.*, **2**, 243-253.
- Endo, N., T. Kadota, J. Matsumoto, B. Ailikun, and T. Yasunari, 2006: Climatology and trends in summer precipitation characteristics in Mongolia for the period 1960-1988. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 543-551.
- Houghton, J. T. Ding, Y., Griggs D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A., 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, B. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, R. Jenne, and D. Joseph, 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-471.
- Kalnay, E. and M. Cai, 2003: Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, **423**, 528-531.
- Kawase, H., F. Kimura, and T. Sato, 2007: Diurnal cycle of summertime precipitation in Mongolia. *Mon. Wea. Rev.*, in revision.
- Loveland, T. R., B. C. Reed, J. F. Brown, D. O. Ohlen, J. Zhu, L. Yang, and J. W. Merchant, 2000: Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1-km AVHRR data. *Int. J. Remote Sensing* **21**, 1303-1330.
- Perlin, N. and P. Alpert, 2001: Effects of land-use modification on potential increase of convection: A numerical mesoscale study over south Israel. *J. Geophys. Res.*, **106**, 22621-22634.
- Sato, T. and F. Kimura, 2005: Diurnal cycle of convective instability around the central mountains in Japan during the warm season. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 1626-1636.
- Sato, T. and F. Kimura, 2006: Regional climate simulations to diagnose environmental changes in Mongolia. *Bulletin of the Terrestrial Environment Research Center, Univ. of Tsukuba*, **7**, 59-69.
- Sato T., F. Kimura, and A. Kitoh, 2007: Projection of global warming onto regional precipitation over Mongolia using a regional climate model. *J. Hydrol.*, **333**, 144-154, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.07.023.
- Sato, T. and F. Kimura, 2007: Comparative study on the land-cover change and global warming impacts on regional climate in Northeast Asia. *Proceedings of the 19th Conference on Climate Variability and Change*, San Antonio, TX.
- Sugita M., J. Asanuma, M. Tsujimura, S. Mariko, M. Lu, F. Kimura, D. Azzaya and Ts. Adyasuren, 2006: An overview of the Rangelands Atmosphere-Hydrosphere-Biosphere Interaction Study Experiment in northeastern Asia (RAISE). *J. Hydrol.*, **333**, 3-20.
- Trenberth, K., 2004: Rural land-use change and climate. *Nature*, **427**, 213.
- Vose, R. S., T. R. Karl, D. R. Easterling, C. N. Williams, and M. J. Menne, 2004: Impact of land-use change on climate. *Nature*, **427**, 213-214.
- Yatagai A. and T. Yasunari, 1994: Trends and decadal-scale fluctuations of surface air temperature and precipitation over China and Mongolia during the recent 40 year period (1951-1990). *J. Meteor. Soc. Japan*, **72**, 937-957.
- Yukimoto, S., A. Noda, A. Kitoh, M. Sugi, Y. Kitamura, M. Hosaka, K. Shibata, S. Maeda, T. Uchiyama, 2001: The new Meteorological Research Institute coupled GCM (MRI-CGCM2) – model climate and variability. *Pap. Meteorol. Geophys.*, **51**, 47-88.
- Xue, Y., 1996: The impact of desertification in the Mongolian and the Inner Mongolian grassland on the regional climate. *J. Climate*, **9**, 2173-2189.