

長期観測データに基づく 土壌水分の季節変動メカニズムの検討

STUDY ON SEASONAL CYCLE OF SOIL MOISTURE IN THE TIBETAN
PLATEAU BASED ON THE LONG TERM FIELD OBSERVATION

広瀬望¹・小池俊雄²

Nozomu HIROSE and Toshio KOIKE

¹正会員 工博 松江工業高等専門学校 環境・建設工学科 (〒609-8518 島根県松江市西生馬町14-4)

²正会員 工博 東京大学大学院 社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

To understand the role of land surface hydrological process (soil moisture, permafrost and snow cover) over the Tibetan Plateau (TP), which affects the Asian monsoon variability, the spatial and temporal variability of soil moisture (SM) along with north-south transect of the central TP has been observed since 1997, supported by the International Projects, GAME-Tibet and CEOP.

In this paper, the recent research results associated with land surface process in TP are firstly reviewed. The characteristics of soil moisture and soil temperature variability are secondary studied by using the long term observed data. Two key issues are discussed. One is permafrost degradation and the other is SM memory in TP. Soil temperature at the deeper depth is obviously increasing from 1997 to 2007 due to the global warming. Deeper soil moisture becomes decreasing at the north part of TP. On the other hand, it is increasing at the south part of TP. These phenomena indicate that global warming strongly affects the water cycle in TP because soil moisture change is coupled with permafrost degradation. SM in spring is closely related with that in previous fall though the freezing process of permafrost. One the other hand, the relationship between SM in spring and summer is not clear. This indicates that soil moisture-precipitation feedback is weak in TP. Finally, we describe the next target of the land surface process study over TP.

Key Words : *Permafrost, Soil moisture, Tibetan Plateau, long term field observation*

1. はじめに

陸面過程における土壌水分は気候システムに対し、二つの大きな役割を果たす。一つは太陽からの放射エネルギーの配分比を決定し、陸面から大気へ水分を供給する蒸発速度を支配する。もう一つは降水から蒸発量を超える水分を土壌に保持する能力を左右する。両者に着目し、気候システムに対する土壌水分の影響評価が行われてきた。まず、土壌水分が陸面から大気への蒸発量を通じて、降水量を左右する、“土壌水分-降水フィードバック”は正のフィードバック¹⁾²⁾(土壌水分の増加が蒸発量を増加させ、降水を増加させる)だけでなく、負のフィードバック³⁾(土壌水分の増加が蒸発量を増加させ、地表面加熱を抑制する。その結果、対流活動が不活発となり、降水が減少する)も指摘されている。また、土壌水分は降水の多寡などの気候状態と記憶するメモリー機能を有する。

土壌水分のメモリー機能が気候システムに与える影響を明らかにするため、GCM⁴⁾⁵⁾や陸面データ同化手法⁶⁾を用いた研究が行われている。しかし、モデル研究はモデル自体の違いや、各物理プロセスのパラメータの違いにより、モデルの振る舞いが大きく異なるため、観測データによる検証が不可欠である。

グローバルな土壌水分変動把握、大気陸面相互作用における土壌水分の役割解明、モデルの妥当性評価を目的として、広域の土壌水分の観測データをアーカイブする、Soil Moisture Data Bankプロジェクト⁷⁾が進行中である。この観測データを用いて、土壌水分のメモリー機能の解明や、植生や冬期水文プロセスが土壌水分変動に与える影響が検討されている⁸⁾。最近では、CEOP (Coordinated Enhanced Observing Period)⁹⁾プロジェクトが進行中である。このプロジェクトは各国の衛星機関や気象局と協力し、世界各国にある気象・水文観測地点の観測データだけでなく、衛星観測データやモデルの出力結果をアーカ

イブシ、統合化したデータセットを作成し、Webを通じて公開している。このデータを用いて、より最新の研究成果が報告されている¹⁰⁾。その中で、データの空白域であるとともに、気象・水文学的に重要な領域であるチベット高原では、国際的な観測計画によって、観測網の整備が進んだ。

標高5000mを越え、対流圏中央に位置する、チベット高原の地表面は太陽放射で効率よく加熱され、世界有数の大気加熱域を形成し、南インド洋との間で南北の熱的コントラストが強化されることによって、モンスーン循環が維持・強化される。アジアモンスーンの年々変動や季節変動が日本を含むアジア域の降水変動を大きく左右するため、チベット高原の水・エネルギー循環の理解はアジア地域における降水予測の精度向上と、降水予測に基づく水災害の防御や水資源の長期管理のための基礎研究と位置づけられる。

既往の研究より、チベット高原の陸面水文過程がモンスーン変動に影響を及ぼすことが指摘されている¹¹⁾。特に、高原域は氷河、積雪、凍土に広く覆われ、複雑な陸面水文過程を有している。更に、近年の温暖化の進行により、氷河や積雪域の減少、永久凍土域の季節凍土化、季節凍土域の消滅など、寒冷圏の水文現象に対する顕著な影響が報告されている。特に、高原域を広く覆う凍土はその凍結過程によって、夏期降水量を土壤中に保存する機能を有する。そのため、温暖化による永久凍土域の減少と季節凍土化の進行は高原域の水循環過程を大きく変化させ、大気陸面相互作用を通じて、大気に影響を与えると予想される。

最近の研究で、チベット高原の温暖化傾向は北半球全体より大きいことがわかった¹²⁾。Frauenfeldra¹³⁾はヨーロッパ中期気象予報センターの再解析データ(ERA-40)を用いて、チベット高原の地上2m気温データの特徴を検討した。その結果、チベット高原域に展開される多数の気象観測点データと比較し、ERA-40は気温の経年変動をよく捉えているものの、全体として小評価であると報告した。また、広瀬ら¹⁴⁾はERA-40の再解析データを用いて、陸面過程モデルによるチベット高原の凍土融解の長期シミュレーションを行い、凍土の長期変動が陸面水文過程に与える影響を検討した。モデルの再現性は十分であった。しかし、ERA-40は観測結果と異なり、温暖化の傾向が明瞭でないため、モデルでは、凍土融解が土壌水分に与える影響は十分解明されなかった。

また、Oku et al¹⁵⁾はGMS-5とNOAA/AVHRRの観測データを用いて、チベット高原域における地表面温度の推定手法を提案した。そして、1996年から2002年の衛星観測データに適用することによって、その特徴を検討した。その結果、地表面温度は上昇傾向を示し、その日周変化の幅が小さくなっていることを指摘し、最近の温暖化傾向を明らかにした¹⁶⁾。

このように、チベット高原の温暖化傾向は顕著である

ものの、観測データが不十分であるため、高原域の水循環への影響評価は行われていない。そこで、本研究はGAME-Tibet、CEOPプロジェクトで取得した最近10年間の土壌水分・地温の観測データを用いて、高原域の凍土の長期変動の特徴理解と、それに伴う土壌水分の季節変動メカニズムを検討することとした。

本論文の内容は次の通りである。まず、チベット高原観測の成果を包括的にレビューし、土壌水分・地温観測の概略を記述した。次に、土壌水分・地温の長期変動特性、土壌水分の季節変動メカニズムを検討し、温暖化が凍土の物理過程を通じて、土壌水分に及ぼす影響を考察し、本研究のまとめと今後の課題を述べた。

2. チベット高原における野外観測

(1) チベット高原における土壌水分・地温観測の概略

チベット高原における水・エネルギー循環解明を目的として、日本人研究者が中国人研究者と共同で、GAME-Tibet、CEOP-Tibetなどの統合的な観測計画を立案・実施してきた。その中で、ポイントスケールの現地観測と高原スケールの衛星観測を組み合わせ、土壌水分の広域モニタリングを目的に、多地点で同時に集中観測を行うとともに、長期で定常的な観測データ取得のために、高原の南北方向に密な観測網を構築した。その中で、土壌中の鉛直一次元水・熱移動観測はチベット高原中央部の南北方向に観測サイト(図-1)を設け、土壌水分・地温観測システム(Soil Moisture and Temperature observing System, SMTMS)を設置し、深さ4cmの表層から深さ3m程度の深層までの土壌水分と地温の鉛直プロファイルを計測した。

土壌水分はTDR法に基づく設置型土壌水分計(TRIME-MUX:IMKO社(独))を、地温は白金温度センサーをそれぞれ用いた。また、土壌水分の観測深度は深さ4cmの表層から深さ3m程度までに6深度であり、地温の観測深度は同様の深さで10深度である。

(2) これまでに得られた陸面水文過程の知見

観測結果に基づいて、石平ら¹⁷⁾はチベット高原の典型的な斜面を対象に、詳細な現地観測に基づく土壌水分移動メカニズムの理解と数値モデルの開発を行った。一方、地形起伏のほとんどない平坦地での観測結果に基づいて、広瀬ら¹⁸⁾は凍土融解過程が土壌水分の不均一性形成プロセスに重要な役割を果たすことを明らかにした。具体的には次の通りである。平坦地における土壌水分分布形成は領域内に存在する微小な地形のうねり、つまり微地形起伏が形成する土壌水分の乾湿偏差が端緒である。微地形起伏による凹凸が春期の融雪水や降水による水分を分配し、凹地では水分が貯留することによって、土壌水分が相対的に大きくなる。一方、凸地では水分が貯留せず、相対的に低い土壌水分となり、微地形起伏に応じた

土壌水分の乾湿偏差が形成される。さらに凍土の融解過程と土壌水分との相互作用により、乾湿偏差が助長される。このような土壌水分の不均一性は陸面からの大気への水・熱フラックス算定に大きな影響を与えることが示された¹⁹⁾。このように、高原域の土壌水分変動把握には、凍土の物理過程の理解が不可欠である。

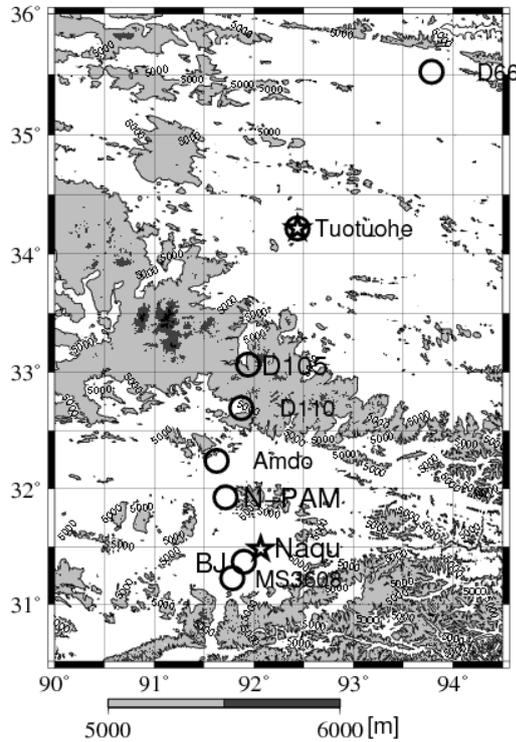


図-1 チベット高原中央部における観測対象領域。丸印(O)でSMTMSの観測地点を、星印(☆)で二つのLocal Meteorological Bureauを示した

永久凍土帯の南限で、この周辺域で永久凍土帯と季節凍土帯が混在することであり、もう一つは近年のAmdo周辺部の観測結果で、深層で凍結面がみられず、永久凍土が消滅していることである。その結果、温暖化の進行により、永久凍土帯と季節凍土帯の境界が北上している。

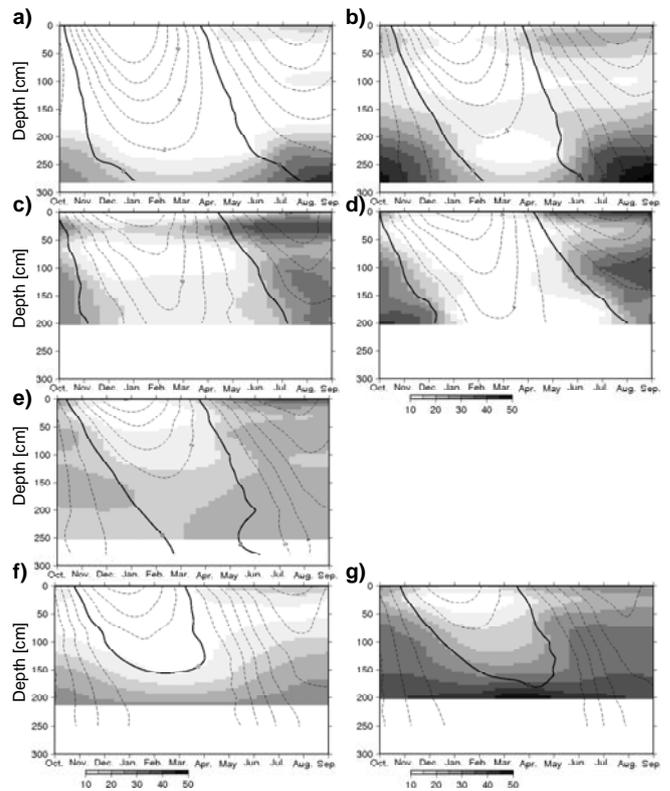


図-2 SMTMS観測地点(a)D66, b)Touuohe, c)D105, d)D110, e)AMDO, f)BJ, g)MS3608)における土壌水分・地温の平年の季節変化。土壌水分は10%から50%まで10%刻みの濃淡で示し、太実線は0°Cの等温線を、点線は-5°Cの等温線をそれぞれ示した。

3. 長期観測結果に基づく水文過程の検討

(1) 南北方向の土壌水分・地温変動の特徴の違い

1997年から2007年までの10年間の観測データを用いて、高原域における土壌水分・地温の特徴を検討する。図-2に、各観測地点(図-1)の土壌水分と地温の平年値(月平均)を求め、その季節変化を示した。

まず、地温の季節変化は次のような共通した特徴がある。10月から11月において、表層地温が0°C以下となり、表層から土壌が凍結を開始する。その後、3月から4月にかけて、表層地温が0°C以上になり、表層から凍土が融解し始める。

次に、地温0°Cの等温線(実線)に着目すると、Amdoより以北では、200cmより深い層が凍結する。一方、Amdoより以南に位置するBJ, MS3608では、0°Cの等温線が2月付近で深さ150cmから200cm程度に達するものの、より深層では、0°C以下にならない。この付近で凍土の特徴が変化する可能性がある。既往の研究では、中国の観測結果から同様の指摘²⁰⁾がある。一つはAmdo付近が

次に、土壌水分の特徴は6月から10月まで表層(深さ4cm-20cm)と下層(深さ200-250cm)の土壌水分が全地点で比較的大きいものの、中層(深さ20cmから100-150cmの間)では、各地点で異なる傾向がある。

D66, Toutouhe, BJでは、比較的小さく、D105, D110, Amdo, MS3608では、比較的乾燥した中層の領域が小さく、湿潤である。特に、MS3608では、150cmより深層の地温が年間通じて0°Cより低下せず、下層の土壌水分は常に30%以上である。一方、ほぼ同じ地域に位置するBJでは、全層にわたって、土壌水分が比較的小さく、土壌水分の季節変化の傾向がD66と同様である。このように、凍土の特徴は南北方向で分類できるものの、土壌水分の特徴は異なることがわかった。この要因として、土壌の物理特性や土地被覆状態の違いが考えられる。

(2) 土壌水分・地温の長期変動傾向

次に1997年から2007年までの10年間の観測データより、土壌水分・地温の長期的な変動の傾向を明らかにする。

まず、全地点で共通した特徴は-5°Cの等温線(点線)の

到達する深さが年々浅くなっていることである(図-3)。これは近年の気温の上昇と対応する。特に、Toutouheでは、その傾向が明瞭である。具体的には、1997年冬期に、 -5°C の等温線が150cmに到達したが、2007年冬期には、90cm程度であった。 0°C の等温線も同傾向であり、温暖化によって、凍結深が年々浅くなる様子が明瞭である。この傾向は前述の永久凍土と季節凍土の境界が北上すること²⁰⁾と一致し、温暖化の進行がチベット高原の地温の年々変動に大きな影響を及ぼしていることがわかる。

次に、土壌水分の特徴を検討する。まず、深さ20cm付近までの土壌水分は降水の影響を直接受け、年々変動が大きいため、長期的な傾向は明瞭でない。これは全地点で同様である。一方、下層(深さ200cm付近)の土壌水分は対象期間において、Toutouhe、MS3608で上昇傾向であり、D66、Amdo、BJで減少傾向であった。D105、D110では、その傾向が明瞭でない。

土壌水分が上昇傾向を示した地点(Toutouhe、MS3608)では、次の物理プロセスが考えられる。下層における地温も上昇傾向であることから、凍土融解の進行に伴い、下層の土壌水分が増加し、土壌の熱容量が大きくなるため、地温の低下が抑制される。その結果、凍結深が浅くなる。このような地球温暖化による気温上昇と凍土融解の進行による土壌水分上昇による正のフィードバックが凍土の凍結深さを年々浅くし、明瞭な温暖化傾向を示したと考えられる。

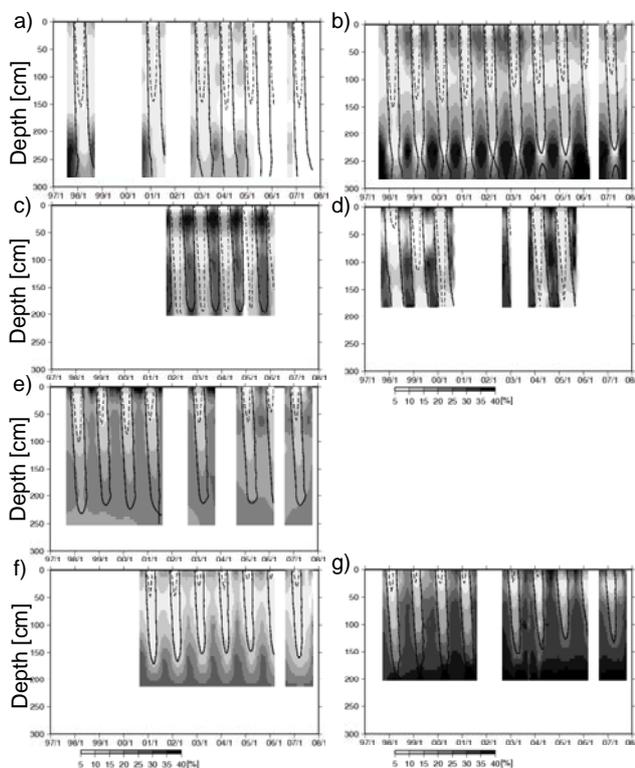


図-3 1997年から2007年までの各観測地点(図-2と同様)における土壌水分、地温の土壌水分変動土壌水分は5%から40%まで5%刻みの濃淡で示した。また、実線は 0°C の等温線を、点線は -5°C の等温線をそれぞれ示した。

一方、土壌水分が減少傾向を示した地点(D66、Amdo、BJ)では、凍土融解の進行に伴い、下層の土壌水分が減少し、土壌の熱容量が小さくなるため、地温の低下が容易になる。そのため、気温上昇による地温の低下は抑制されるものの、下層では、地温が低下しやすくなるため、地温の温暖化傾向は明瞭でなかったと考えられる。

以上より、温暖化の進行が凍土の物理プロセスを通じて、土壌水分に影響を及ぼし、各地点の土壌の物理特性によって、その影響は異なることがわかった。

4. 土壌水分の季節変動メカニズムの検討

チベット高原では、温暖化が土壌水分の季節変化に影響を及ぼすと予想される。これは凍土の凍結過程が前年秋期の土壌水分状態を、春先まで保存する役割を果たすためである。加えて、土壌水分-降水フィードバックによって、春期の土壌水分は引き続き夏期の土壌水分を左右する可能性がある。そこで、二つのメカニズムに着目し、温暖化が土壌水分の季節変化に及ぼす影響を明らかにする。

(1) 凍土の物理過程による土壌水分のメモリー機能

まず、凍土の凍結過程による土壌水分のメモリー機能を検討するため、前年秋期(10月)と春期(4月)における表層土壌水分を比較した(図-4)。全地点で見ると、両者は正の相関を示し、相関係数は0.89と高い。この結果、秋期の土壌水分状態が冬期の凍結過程によって、春先まで保存されるため、前年秋期の土壌水分が高い場合、春期の土壌水分が高くなる。

次に、各地点で両者の相関係数を求め、その地域的な特徴を検討した。Toutouhe、D105、D110、MS3608は相関係数が0.6より大きく、凍土による土壌水分のメモリー機能が確認できる(図-5)。しかしながら、D66、AMDO、BJでは、相関係数が0.3より小さく、凍土のメモリー機能が明瞭でなかった。この理由は三つ考えられる。一つは温暖化による影響である。二つ目は土壌物理特性の違いである。温暖化の影響に関しては3節で議論したとおりである。また、土壌物理特性に関しては、当該地点の土壌が砂質を多く含み、飽和体積含水率が小さく、気温や降水のインパクトに敏感である。そのため、冬期でも、強い太陽放射を受け、日中の表層付近が融解するため、土壌水分が変化し、両者の相関が低くなったと予想される。また、三つ目として、冬期のチベット高原は積雪の影響も考えられる。しかし、積雪の観測データがほとんどないことや、Terra/MODISなどの積雪データと、春期の土壌水分を比較しても、両者に明瞭な関係はみられないことから、本研究では、積雪の影響を論じることができなかった。

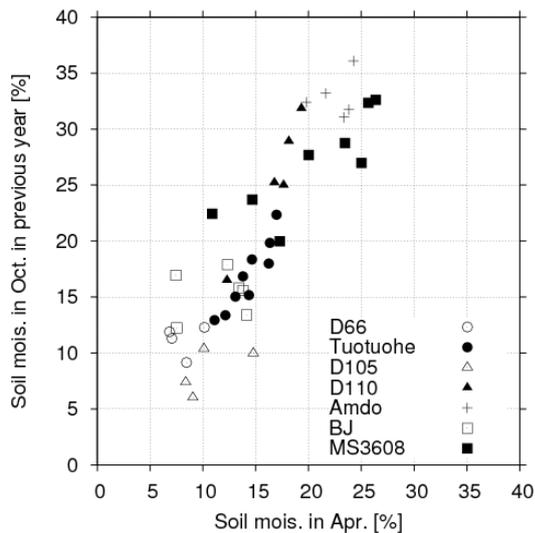


図-4 前年秋季(10月)と春期(4月)の表層土壌水分の関係

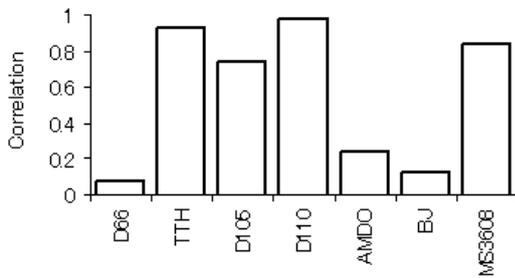


図-5 前年秋季と春期の表層土壌水分の相関係数の比較

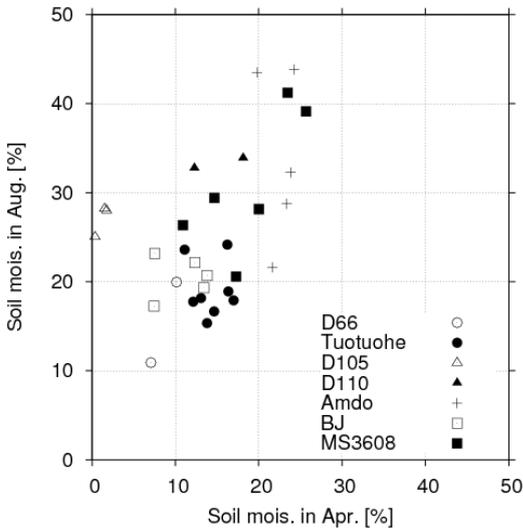


図-6 春期(4月)と夏期(7月)の表層土壌水分の関係

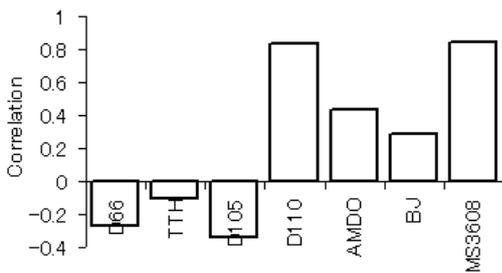


図-7 春期と夏期の表層土壌水分の相関係数の比較

(2) 春期と夏期における土壌水分の関係

次に、春期と夏期の土壌水分の相関関係を検討し、土壌水分-降水のフィードバックの関係の検討を試みた。

その結果、春期(4月)と夏期(7月)の土壌水分(図-6)はバラツキが大きいものの、全地点では、両者の相関(相関係数0.63)は高い。次に、各地点で両者の相関係数を比較した。図-7のように、土壌水分が比較的大きい、D110, AMDO, MS3608で相関係数が0.4を超え、D110, MS3608で両者に強い正の相関が見られた。

次に、春期土壌水分と夏期降水量との関係を検討した。両者の相関が高ければ、観測結果より、正の土壌水分-降水フィードバック(春期土壌水分量が高いと、陸面から大気への蒸発量が大きくなり、降水量の多寡を左右する)があると示唆される。

図-8に、TuotuoheとMS3608における春期土壌水分量と夏期降水量との関係を示した。Tuotuoheでは、両者の年々変動は異なっているものの、MS3608では、両者の年々変化が比較的一致し、ローカルなエリアでは、そのフィードバックが影響を及ぼす可能性がある。

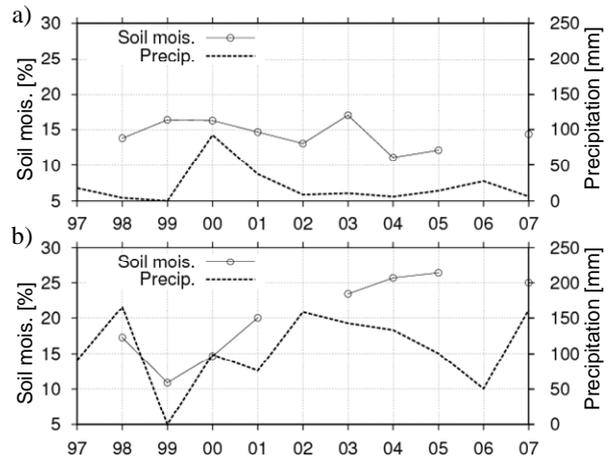


図-8 a) Tuotuohe, b) MS3608における春期表層土壌水分(4月)と夏期積算降水量(7月)の年々変動

5. まとめと今後の課題

本研究では、チベット高原における土壌水分・地温の長期観測データを用いて、1)土壌水分・地温の長期変動の特徴、2)温暖化が土壌水分変動に与える影響、3)土壌水分の季節変動メカニズムの3点を検討した。

その結果、温暖化の進行が下層の土壌水分に影響を与えることによって、凍土の融解深を大きく左右することがわかった。具体的には、下層の土壌水分が上昇する地点では、下層地温の低下が抑制される。一方、下層の土壌水分が減少する地点では、温暖化が進行するものの、下層土壌の熱容量が減少し、下層の地温は低下しやすくなるため、凍結深は前年とあまり変化しなかったと推論できる。この知見を踏まえると、温暖化が凍土の融解・

凍結過程を通じて、土壌水分状態が影響を与え、チベット高原域の水・エネルギー循環を大きく変える可能性が大きい。

また、高原域における土壌水分の季節変化は凍土の凍結・融解過程の影響を強く受けるものの、春期から夏期に引き続く土壌水分のメモリー機能は明瞭でなかった。これは積雪の影響も考えられるため、数値モデルを使用した解析が不可欠である。

チベット高原における大気陸面相互作用に着目して、Yamada and Ueda, Yamada^{21),22)}は領域気候モデルCRESSを用いて、陸面過程が高原域の降水変動に与える影響を検討し、植生が大気に与える影響を示した。本研究においても、植生状態に異なる観測点では、土壌水分状態が異なる。したがって、春期から夏期における大気陸面相互作用を統合的に把握するためには、土壌水分と凍土の物理過程だけでなく、植生の物理メカニズムや積雪の影響を明らかにする必要がある。さらに、野外観測結果の知見と、陸面過程モデルや領域気候モデルの知見を統合した研究を推進することによって、高原域の大気陸面相互作用を統一的に理解し、大気加熱に対する陸面水文過程の役割を明らかにする予定である。

謝辞：本研究は科学技術振興事業団戦略的創造研究(JST-CREST, 水循環系の物理的ダウンスケーリング手法の開発)、地球観測システム構築推進プラン(JEPP-Tibet)、統合地球水循環強化観測期間プロジェクト(CEOP)の研究成果の一部である。記して深く謝意を表す。

参考文献

- 1) Shukla, J., and Y. Mintz: The influence of land-surface evapotranspiration on the Earth's climate, *Science*, 214, 1498–1501, 1982.
- 2) Fennessy, M. J., and J. Shukla (1999), Impact of initial soil wetness on seasonal atmospheric prediction, *J. Clim.*, 12, 3167–3180.
- 3) Giorgi, F., and M. R. Marinucci: An investigation of the sensitivity of simulated precipitation to model resolution and its implications for climate studies, *Mon. Weather Rev.*, 124, 148–166, 1996.
- 4) Koster, R. D., and M. J. Suarez: Soil moisture memory in climate models, *J. Hydrometeorol.*, 2, 558–570, 2001.
- 5) Delworth, T. L., and S. Manabe: The influence of potential evaporation on variabilities of simulated soil wetness and climate, *J. Clim.*, 1, 23–547, 1998.
- 6) Zhang, J., W.-C. Wang, and J. Wei (2008), Assessing land-atmosphere coupling using soil moisture from the Global Land Data Assimilation System and observational precipitation, *J. Geophys. Res.*, 113, D17119, 2008.
- 7) Robock, A., K. Y. Vinnikov, G. Srinivasan, J. K. Entin, S. E. Hollinger, N. A. Sperankaya, S. Liu, and A. Namkhai : The global soil moisture data bank, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 81(6), 1281–1299, 2000.
- 8) Dong, J., W. Ni-Meister, and P. R. Houser : Impacts of vegetation and cold season processes on soil moisture and climate relationships over Eurasia, *J. Geophys. Res.*, 112, D09106, doi:10.1029/2006JD007774, 2007.
- 9) Koike, T., 2004: The coordinated enhanced observing period, an initial step for integrated global water cycle observation. *WMO Bulletin*, 53(2): 2–8.
- 10) Koike, T., Special Issue on Coordinated Enhanced Observing Period (CEOP), *JMSJ*, 85A, 2007.
- 11) Tetsuzo YASUNARI, Role of Land-Atmosphere Interaction on Asian Monsoon Climate, *JMSJ*, 85B, 55–75, 2007.
- 12) Wang SL, Jin HJ, Li SX, Zhao L: Permafrost degradation on the Qinghai-Tibet Plateau and its environmental impacts, *PERMAFROST AND PERIGLACIAL PROCESSES*, 11(1), 43–53, 2000.
- 13) Frauenfeld OW, Zhang TJ, Serreze MC: Climate change and variability using European Centre for Medium-Range Weather Forecasts reanalysis (ERA-40) temperatures on the Tibetan Plateau, *J. Geophys. Res.*, 110, D02101, 2005.
- 14) 広瀬望, 小池俊雄 : チベット高原における凍土融解過程の長期変動, *水工学論文集*, Vol.50, pp415–420, 2006.
- 15) Oku, Y., H. Ishikawa, S. Haginoya and Y. Ma: Recent Trends in Land Surface Temperature on the Tibetan Plateau, *J. Climate*, Vol. 19, No. 12, 2995–3003, 2006.
- 16) Oku, Y. and H. Ishikawa: Estimation of Land Surface Temperature over the Tibetan Plateau using GMS Data, *J. Appl. Meteorol.*, Vol.43, No.4, pp.548–561, 2004.
- 17) Ishidaira H, Koike T, Lu M, Hirose N. : Development of a 2-D soil model for heat and water transfer in permafrost regions. *Annual J. Hydraulic Engineering, JSCE* 42: 133–138, 1998.
- 18) 広瀬望, 小池俊雄 : チベット高原における土壌水分分布の微地形依存性, *水工学論文集*, Vol.48, pp205–210, 2004.
- 19) Hirose N., Koike T. and Ishidaira H.: Study on Spatially Averaged Evaporation under Soil Moisture Heterogeneity Affected by Permafrost Micro-topography, *JMSJ*, Vol.80, pp191–203, 2002.
- 20) Cheng, G., and T. Wu: Responses of permafrost to climate change and their environmental significance, Qinghai-Tibet Plateau, *J. Geophys. Res.*, 112, F02S03, doi:10.1029/2006JF000631, 2007.
- 21) Yamada H and Uyeda H: Transition of the Rainfall Characteristics Related to the Moistening of the Land Surface over the Central Tibetan Plateau during the Summer of 1998, *Monthly Weather Review* 134(11), 3230, 2006.
- 22) Yamada, H.: Numerical Simulations of the Role of Land Surface Conditions in the Evolution and Structure of Summertime Thunderstorms over a Flat Highland. *Monthly Weather Review* 136(1), 173, 2008.

(2009. 9. 30受付)