

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25850163

研究課題名(和文) 過放牧により劣化した乾燥地草原の水循環回復過程の解明

研究課題名(英文) Study on recovery of water cycle in arid rangeland deteriorated by overgrazing

研究代表者

西田 和弘 (NISHIDA, Kazuhiro)

東京大学・農学生命科学研究科・助教

研究者番号：90554494

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：過放牧により劣化した乾燥地草原の水循環、および、放牧を禁止することによる草原の水循環の回復過程を明らかにするために、モンゴル草原において水・熱収支・土壌水分の観測・浸透能の測定を行った。その結果、乾燥地草原では、降雨の大部分は蒸発散で失われ、下方への浸透はほとんど生じず、土壌水分変化は表層のみで生じること、また、遊牧の禁止は、土壌面蒸発の抑制、浸透能の回復に伴う不均一な浸潤の防止によって、植物が利用可能な水分量を増加させる効果を持つことが明らかになった。また、土壌-植物-大気連続体の水移動理論に基づく、乾燥地草原の水循環を表現する数値モデルを作成した。

研究成果の概要(英文)：Water and heat balances in Mongolian rangeland and infiltration capacities under the conditions of overgrazing and no grazing were measured to understand water balances in arid grassland under overgrazing and processes of recovery of water balance under the conditions of no grazing. Our results showed that almost all precipitation in the grass land was consumed by evapotranspiration and thus less percolation into deep soil was observed; consequently changes in water content there were mainly observed at shallow depth; prohibiting grazing reduced soil evaporation by plant cover and prevented non-uniform infiltration by increase in infiltration rate, thus increased plant available water in surface soil. In addition we developed a numerical model that represents water balance in arid grass land based on theories of water flows in soil plant and atmosphere continuum.

研究分野：農地環境工学

キーワード：乾燥地草原 水収支 熱収支 蒸発散 土壌水分 浸透能 過放牧 モンゴル

1. 研究開始当初の背景

過放牧により劣化した草原は、世界の全砂漠化面積の93%を占める。草原の劣化は今なお拡大し続けており、これらの草原を回復させることは乾燥地問題の重大な課題である。

草原の劣化とは、植生バイオマスの減少・植生種の変化のみを意味するのではなく、植物の生育環境である土壌の劣化も含む。土壌の劣化は、必然的にその土地の水循環を改変し、これが植生の再生を阻害する。したがって、劣化した草原を回復させるには、単なる緑化の実施ではなく、草原の水循環を支配する土壌の物理性の回復によって、草原を元の適切な水循環に戻すことが不可欠である。これには、劣化状態にある草原と適切な状態にある草原の水循環の違いを把握するとともに、禁牧などの対策が水循環に与える影響、すなわち、水循環の回復過程を明らかにすることが必要となる。しかしながら、乾燥地草原における水循環の測定は未だ少なく、また、水循環の回復過程およびそのメカニズムは十分に明らかではない。

2. 研究の目的

そこで本研究では、過放牧により劣化した草原、放牧の禁止により水循環が回復過程にある草原、それぞれの、水・熱収支・土壌の物理性の測定、および、土壌-植物-大気連続体の水移動理論に基づく数値計算により、乾燥地草原の水循環の把握、水循環回復過程の解明を目的とした。

3. 研究の方法

本研究は、モンゴル国中央部（ウランバートルから南西約100 km）に位置するフスタイ国立公園北部を対象に実施した。この草原では、遊牧は、冬季（11月頃～4月頃）に行われているが、植生の生育期を含むそれ以外の期間には行われていない。遊牧直後（4月）の地表はほぼ裸地状態である。降水量は年平均230 mm程度、雨季は5月～8月であり、この期間に植生は生育する。

(1) 乾燥地草原の水収支・熱収支の把握

遊牧が行われており劣化状態にある乾燥地草原の水循環の基礎データ取得を目的として、各種水・熱収支項目（土壌水分量変化、蒸発散、降雨、浸透）の連続観測を実施した。

上述の草原（以後、放牧地）に、土壌水分計を5深度に挿入し、深さごとの体積含水率変化を30分間隔で測定した。また、各種気象項目（温湿度（1, 3 m）、純放射、風速、日射、降雨）および、地中熱フラックスと地温を30秒間隔で測定（30分平均を記録）し、各種熱収支フラックスおよび蒸発散量の算定を行った。蒸発散量は、ボーエン比-熱収支法により、可能蒸発散量は、FAO-Penman Monteith式により算出した。また、深さ90 cmより下方への浸透量を、降雨量、蒸発散量、土壌水分変化（0～90 cm）の測定値より、水

収支の残差として計算した。

(2) 放牧地と禁牧地の土壌水分変化の比較

上述の放牧地に隣接する、柵で覆われ遊牧が禁止された区域（以後、禁牧地）において、同様の土壌水分量の測定を行い、水循環の回復過程にある草原の土壌水分変化を調べた。これと放牧地の土壌水分変化を比較することで、禁牧が土壌水分量変化に与える影響を調べた。

(3) 放牧地と禁牧地の土壌の物理性（浸透能）の違いの比較

上述の放牧地と禁牧地において土壌の浸透能を測定し、禁牧が浸透能に与える影響を調べた。浸透能は、定水頭のインテグレート試験で測定し、浸透速度がほぼ定常となった30分経過時の値で評価した。また、放牧地の浸透能を上回る豪雨時の土壌水分変化より、浸透能の大小が、土壌水分および植物が利用可能な水分量に与える影響を検討した。

(4) 乾燥地草原の水循環予測モデルの作成と検討

乾燥地草原の水循環を表現可能な数値モデルを、土壌-植物-大気間の水移動理論に基づき作成した。このモデルと、別途測定した土壌の物理性を用いた数値実験により、放牧の有無、土性の違いが土壌水分に与える影響を検討した。

4. 研究成果

(1) 乾燥地草原の水収支・熱収支の把握

図1に、2014年5～9月の日降水量と深さごとの体積含水率変化を示す。この間の最大日降水量は29 mmであり、表面流出を発生させるような強い降雨強度の降雨（(3)で後述）は観測されなかった。降雨に対する体積含水率の応答（上昇）は、深さ0～12, 0～30 cmでは、ほぼ全ての降雨に対して見られたが、30 cmより下方では、5月中旬から下旬にかけて30～60 cmで0.03程度の上昇が見られるものの、わずかな変化しか見られなかった。この結果より、降雨量が少ない乾燥地草原の植生は、深さ30 cm程度までの表層の土壌水分を利用して生育していることがわかった。

この間の日蒸発散量変化を図2に示す。日蒸発散量は、降雨直後では3～3.5 mm/d程度であったが、降雨後、1から数日で大幅に低下した。また、日蒸発散比（日実蒸発散量/日可能蒸発散量）も同様の傾向を示した。測定期間（5/1～10/7）の積算蒸発散量は209 mm（1.3 mm/d）であり、積算可能蒸発散量526 mm（3.3 mm/d）の約4割であった。

水収支各項目の積算値の図3に推移を示す。積算蒸発散量は、積算降雨量とほぼ同じ大きさで推移した。測定期間（2014/5/1～10/7）の積算蒸発散量、および、水収支の残差として計算した積算浸透量は、それぞれ209 mm, 53 mmであり積算降雨量（243 mm）

の85%, 22%であった. このように, 乾燥地の草原では, 降雨の大部分は蒸発散で失われ, 下方への浸透はわずかししか生じないことがわかった.

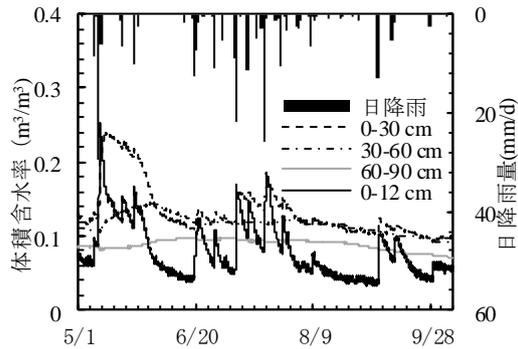


図1 放牧地の日降水量と土壌水分変化

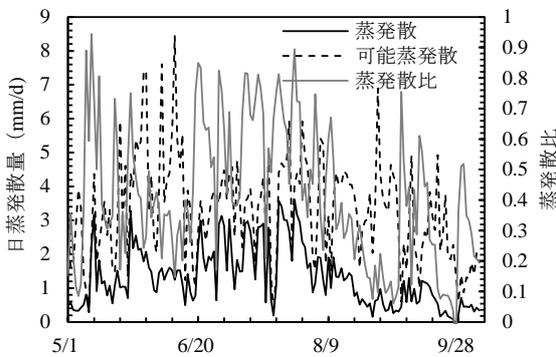


図2 日蒸発散量変化

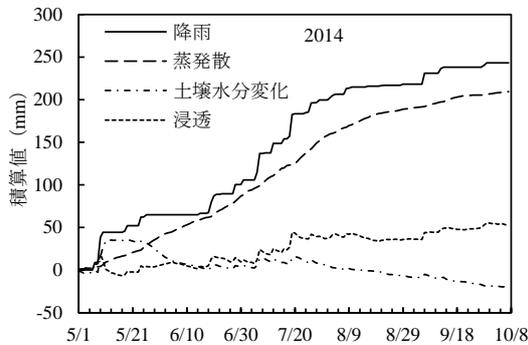


図3 水収支項目の積算値の推移

(2) 放牧地と禁牧地の土壌水分変化の比較

(1)の結果より, 乾燥地草原の植生の生育には, 表層の水分量が重要であることがわかった. この表層の土壌水分に対する禁牧の影響を, 放牧地と禁牧地の土壌水分変化の比較することで検討した(図4). その結果, 禁牧地の土壌水分は, 4月中旬から7月下旬にかけて, 放牧地の土壌水分よりも高く推移し, 特に, 植生の生育初期にあたる春先の水分量が大きく増加した. このことは, 禁牧により, 植物が利用可能な水分量が増加したことを示している.

この水分量の増加は, 枯れ草の残存による

土壌面蒸発の抑制, 冬季の土壌水の融解の遅延が原因だと考えられる. 放牧地では, 春先の地表面の状態は, 前述の通り, 冬季の遊牧により裸地状態であるが, 禁牧地では, 遊牧を禁止しているため, それ以前の植生の枯れ草により土壌表面が被覆された状態にある. この土壌表面の被覆は, 地表面に到達する日射を減少させるため, 冬季の土壌水の融解を遅延させるとともに土壌面からの蒸発を抑制したと考えられる. その結果, 禁牧地では, 放牧地よりも多くの土壌水分量が保持されたのだと考えられる. このことは, 禁牧は, 植物が利用可能な水分量を増加させる効果を持つことを示唆している.

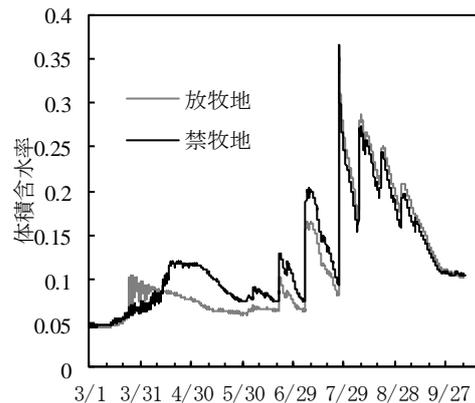


図4 放牧地と禁牧地の土壌水分量の比較

(3) 放牧地と禁牧地の土壌の物理性(浸透能)の違いの比較

図5に放牧地と禁牧地の浸透能の測定結果を示す. 放牧地と禁牧地では浸透能に差が見られ, 放牧地の浸透能は, 55 mm/h であるのに対し, 禁牧地では, 184 mm/h と放牧地の3倍以上となり, 浸透能の回復が見られた. これは, 根の発達によりマクロポアの形成や乾燥密度の低下, 植生の葉による雨滴の衝撃の軽減(クラスト形成の防止)によるものだと考えられる.

一方で, 両地点の浸透能は, 共に, 50 mm/d 以上であり, モンゴルで通常観測される日降雨量(50 mm/d 以下)を1時間で流しうる値であった. したがって, 本研究地では, 通常の降雨は十分に浸透可能であると考えられる. しかしながら, こうした禁牧による浸透能の回復は, 豪雨時の土壌表面への湛水の発生, および, それに伴う土壌水分への影響を軽減させる効果を持つと考えられる.

幸いなことに, 本研究の現場調査時に, 放牧地の浸透能を上回る降雨(総降雨量77 mm, 最大降雨強度15 mm/10min)が生じ, これに伴う土壌水分変化の測定, および表面湛水の発生の有無を観察することが出来た. この時の放牧地の地表面の写真が図6である. 浸透能から予測される通り, 放牧地では表面湛水が発生したが, 禁牧地では発生しなかったことが, 実際に確認出来た.

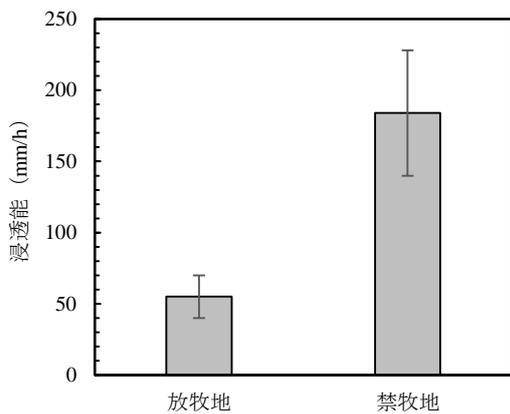


図5 禁牧地と放牧地の浸透能の比較



図6 豪雨時の放牧地における表面湛水の発生

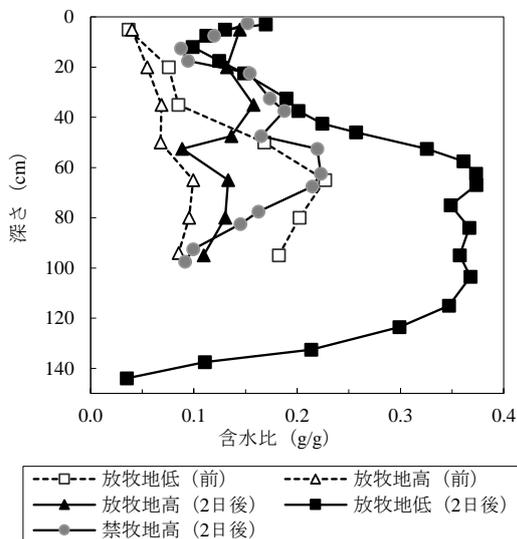


図7 豪雨前後の土壌水分分布の比較

この時の土壌水分分布を、降雨前後・表面湛水が発生した放牧地の標高の違い・遊牧の有無で比較した結果が図7である。放牧地の土壌水分分布は、数 cm 程度のわずかな標高の違いにより大きく異なった。標高が周囲より高い地点では、総降雨量 77 mm に対し、浸潤前線は 50 cm、降雨による水分増加は、おおよそ 65 mm であり、降雨量よりも少ない水分増加であったが、低い地点では、浸潤前線

は 130cm より下方、水分増加は 200 mm 以上と降雨量を上回る水分増加が見られた。一方、禁牧地では、先述の通り、浸透能が高く、表面流出が発生しなかったため、降雨量と同程度の水分増加となった。これらの結果は、浸透能を上回る豪雨による表面湛水の発生は、土壌水分の著しい不均一性を発生させることを示している。

この水分分布の不均一性は、表面湛水の移動に伴う、浸透量の不均一性が原因で生じたものである。すなわち、表面湛水の発生は、表面の起伏に沿った表面流を生じさせるため、土壌に浸透できなかった水は、周囲よりも低い場所へと移動する。実際、降雨終了時点においても、周囲より標高が低い場所において湛水の継続が観察された。このような表面湛水の不均一性は、浸透量に差を生じさせるため、周囲より標高が高い地点では総降雨量以下の水分増加、低い地点では総降雨量以上の水分増加（下方への浸透量の増加）となったと考えられる。このようにして、根圏より下方へと浸透した水は、植物に利用されることは無い。一方、浸透能が高ければ、このような不均一な浸潤が生じにくく、下方へと損失される水は少ないはずである。したがって、禁牧や放牧頭数を減少させることで透水性を高く維持する、あるいは回復させれば、豪雨時の不均一な浸潤に伴う下方への水損失を軽減でき、植物が利用可能な水分量を増やすことができると考えられる。

(4) 乾燥地草原の水循環予測モデルの作成と検討

草原の水循環は、同じ降雨条件の下でも植生条件・土壌特性によって異なり、これは植生の回復や劣化の程度を左右すると考えられる。そこで、土壌-植物-大気間の水移動理論に基づき、乾燥地草原の水循環を予測可能な数値モデルを作成した。また、これによる計算値と実測値を比較することでモデルの精度を調べた。その結果の一例として、2014年5~9月の土壌水分の計算結果を図8に示す。モデルによる計算値は実測土壌水分の変化(図1)を良く再現した。このように、本研究のモデルによって、異なる土性、気象条件下における水循環が検討可能になった。

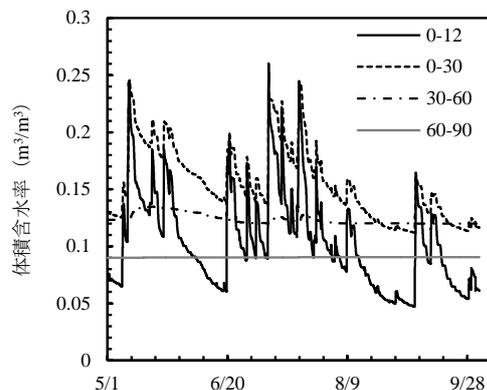


図8 数値モデルによる土壌水分の計算値

以上のように、本研究により、乾燥地草原の水循環および水循環の回復過程に関する貴重なデータを得ることができた。これにより、乾燥地草原では、下方への浸透はほとんど生じず、土壌水分変化は表層のみで生じること、また、遊牧の禁止は、土壌面蒸発の抑制、浸透能の回復に伴う不均一な浸潤の防止によって、植物が利用可能な水分量を増加させる効果を持つことを示した。また、乾燥地草原の水循環を表現する数値モデルを作成することが出来た。一方で、土性や気象条件の違いによって、禁牧の効果や、水循環の回復過程に違いをもたらすことが予測された。今後、条件の異なる様々な地域において、同様の研究を行うことで、さらなるデータの蓄積を図ることが必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① 西田和弘, 宇尾卓也, 吉田修一郎, 塚口直史: 冷水掛流し灌漑時の灌漑水量・水深・時間帯が水田の水温形成に及ぼす影響, 農業農村工学会論文集, 査読有, 2015, 300, 185-194.
- ② 西田和弘, 宇尾卓也, 吉田修一郎, 塚口直史: 登熟期の冷水掛流し灌漑による稲体温度・群落内気温・地温の低下効果, 農業農村工学会論文集, 査読有, 2014, 294, 25-33.
- ③ Katori Miyasaka, Sho Shiozawa, Kazuhiro Nishida, Shuichiro Yoshida: Solute electrical charge effects on molecular diffusion coefficients in unsaturated soils, Soil Science Society of America, 査読有, 2014, 78, 1852-1858.
doi:10.2136/sssaj2014.05.0201.

[学会発表] (計4件)

1. 西田和弘, 宮坂加理, 塩沢昌, Siilegmaa Batsukh, Undarmaa Jamsran, 吉田修一郎, モンゴル草原の水収支と蒸発散, 平成28年度農業農村工学会全国大会, 2016年(発表確定), 仙台市.
2. 宮坂加理, 塩沢昌, 西田和弘: 低水分領域における土壌中の溶質拡散係数と電気伝導度, 平成27年度農業農村工学会全国大会, 2015年9月3日, 岡山市.
3. 宮坂加理, 塩沢昌, 西田和弘, Undarmaa Jamsran, Siilegmaa Batsukh, 吉田修一郎, モンゴルにおけるステップ草原と砂丘地の土壌水分環境, 平成26年度農業農村工学会全国大会, 2014年8月26日, 新潟市.
4. 宮坂加理, 塩沢昌, 西田和弘, Undarmaa Jamsran, Siilegmaa Batsukh, 吉田修一郎, 放牧がモンゴル草原の土壌水分環境に与える影響, 平成25年度農業農村工学会全国大会, 2013年9月4日, 東京, 世田谷区.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西田 和弘 (NISHIDA Kazuhiro)

東京大学・大学院農学生命科学研究科・助教

研究者番号: 90554494