

北東アジア植生変遷域の水循環と 生物・大気圏の相互作用の解明

研究代表者
杉田 倫明

北東アジア植生変遷域の水循環と生物・大気圏の相互作用の解明

研究代表者 筑波大学大学院 生命環境科学研究科 杉田倫明

1. はじめに

モンゴル国を中心としてロシア、中国におよぶ地域には南北方向に明確な植生変遷域が形成され、北部のタイガ林からステップ、沙漠地帯が帯状に分布する。このような変遷域は一般的に外部条件変化の影響を受けやすい（例えば Pogue and Schnell, 2001）。ところが、この地域では過去 40 年程度の期間の気温、降水量の変化が報告され（例えば Yatagai and Yasunari, 1994; Endo et al., 2006）、またモンゴル国では 1990-1991 年に始まった市場経済導入に伴う放牧量の増加が起きている。このような変化の結果、水循環および生態系にどのような変化が予想されるのか、さらにその結果が大気圏にも影響を及ぼしうるのかを明らかにすることを目的として、本研究では観測に基づく気象、水文、生態、土壌の実態の解明、モデルによる再現と将来予測を行った。

2. 研究体制と方法

2.1 研究体制

本研究チームの目的を達成するために、以下の 6 研究グループを構成した。

- ① 広域地表面と大気間の熱・水蒸気の交換過程の解明と蒸発散量の推定
- ② 草原生態系の人間活動の關係の解明
- ③ 同位体を利用した水・物質循環プロセスの解明
- ④ メソスケールモデルの構築とモンスーン水循環
- ⑤ 分布型水文モデルによる流出解析

グループ①から③が主に観測に基づき地表—大気間、生態系、水循環の実態の解明を行うと同時にモデル作成やパラメータ決定に必要なデータの収集に努めた。グループ③から⑤は生態系モデル、領域気候モデル、分布型水文モデルの作成とモデルによる研究を担当した。この他に、グループ間にまたがる研究、全体の総括を行うためのグループ、主たる対象地域であるモンゴル国の調査、データ収集、解析を担当するグループを別途構成し

た。

2.2 方法

北東アジアの中に重点的に観測・データの収集を図る研究対象地域を設定した。モンゴル国北東部のヘルレン川流域とその周辺である（図 1）。研究を進める上で必要な詳細な観測を 2003 年 5 月から 10 月にかけて 4 回の集中観測（IOP）を中心を実施した。測定地点を図 2 に示す。また、得られたデータの概要は以下の通りである。

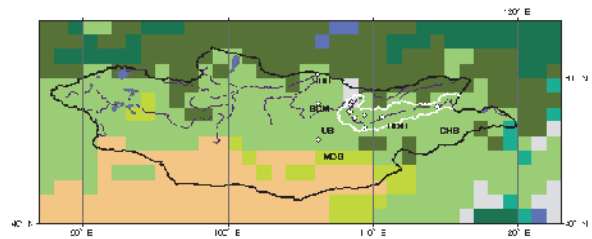


図 1 モンゴル国と北東部に位置するヘルレン川流域（白線の範囲；図 2 参照）。白丸が主たる観測点。植生は濃い緑系が森林、薄い緑系が草原、茶系が沙漠を表す。

2.2.1 森林植生

モンゴル国の北部山岳地を代表する、カラマツ、シラカバ混合樹林として、ヘルレン川流域上流部の森林（FOR）に測定ステーションが設置された。ステーションには高さ 30 m の観測タワーを設置し、観測を 2002 年 3 月より開始した。測定項目は熱・水・運動量・二酸化炭素フラックス、土壌水分、植生量、一般気象である。IOP 期間中にはこれらの自動測定項目に加えて、土壌水、降水、水蒸気、河川水のサンプリングを行い、その水質、安定同位体の分析に供した。また、植生の成長をとらえた。

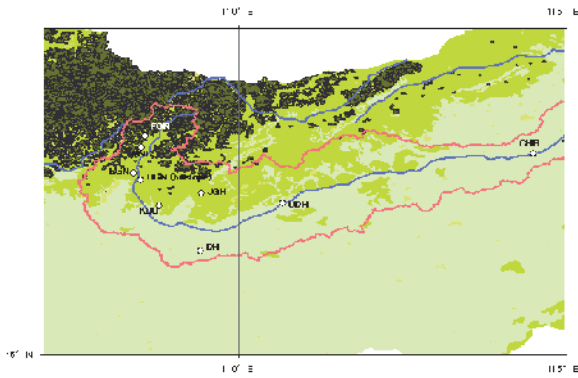


図2 ヘルレン川流域（白線）。白丸が主たる観測点。植生は濃い緑系が森林、薄い緑系が草原を表す。

2.2.2 草原

モンゴル国中部の草原を代表する地点として、ヘルレン川流域中部の Kherlen Bayan-Ulaan (KBU) に2セットの測定ステーションを設置した。1つのステーションは200 m x 170 mの保護策で囲むことで放牧圧の無い草原を作り出し、その測定を行った。もう一つのステーションは放牧の影響を受けた状態の草原の状態を測定した。測定項目は以下の通りである。熱・水・運動量・二酸化炭素フラックス、土壌水分、植生量、一般気象、土壌呼吸量、GPS。IOP 期間中にはこれらの自動測定項目に加えて、土壌水、降水、水蒸気、河川水のサンプリングを行い、その水質、安定同位体の分析に供した。また、植生の成長量、放牧圧を数値としてとらえた。

2.2.3. 斜面

山地斜面は土壌浸食の生じる場と考えられるため、そのデータ取得のために、流域中流部に位置する Baganuur と KBU に観測ステーションを設置した。前者は比較的降水量が多いため、山岳性ステップに属し、後者は降水量も少なく通常のステップである。両地点共に、50 m x 50 m の保護区と非保護区を設け、通常の放牧のある場合と無い場合の両方の場合について、土壌浸食量、水の流出量、降水量、および水の同位体組成を測定した。

2.2.4. 空間的な測定

空間的に広がる領域の情報をより正確に把握するために、草原地帯4地点（図2の JGH, BGN, UDG, DH 地点）において自動気象観測ステーション

(AWS) を設置し、観測ステーションの測定値を補完するデータを取得した。測定項目は、一般気象の他、土壌水分量などである。また植生量、放牧圧、土壌の調査を実施した。さらに、面的な広がり把握する手段として、航空機を4回の集中観測期間中にチャーターし、流域内の水・熱フラックス分布、分光反射特性、および水蒸気の同位体組成測定を実施した。また、自動車による移動観測により、流域内の地下水の水位、同位体組成を測定した。

2.2.5 ルーチンデータの取得

独自に行った詳細な観測に加えて、年々変化の把握、モデルのキャリブレーション等の目的のために、共同研究機関であるモンゴル国気象学・水文学研究所 (IMH) の観測ステーションでルーチン的に得られている気象データ、河川流量データ、植生フェノロジーデータを過去にさかのぼって取得した。また国立統計局のまとめている放牧家畜数に関する統計データを取得した。

3. 研究成果

以下に得られた結果をいくつかのテーマにまとめて述べる。

3.1 水循環

3.1.1 この地域になぜ少ししか雨が降らないのか

この問題に関しては、その原因に諸説があったが、今回領域気候モデルを用いた数値実験から、チベット高原の存在がその主たる原因であることが示された (Sato and Kimura, 2005)。チベット高原が加熱される一方、6月～8月にかけて対流圏上層の亜熱帯ジェットが北上し、チベット高原の北側に位置するようになる。その結果、チベット高原をはさんだ南北で東西風が北ほど強くなり、強いシアが生じる。この結果チベット高原の加熱の影響が北に波動伝搬するようになり、北東アジアの沈降流を生じることになる。この結果、夏でも降水が強く抑制され砂漠を形成するのである。

3.1.2 降水はどこからくるのか

モンゴル国内の雨水サンプリングネットワークからサンプルを集め、その同位体分析を行った結果、7月の降雨を除くとその（値はレイリー過程から説明できた。しかし降水量の多い7月については、それだけでは説明がつかず、蒸発した水の寄与が大きいことが示唆された。この様な多くの

蒸発が起こる地域としては中国南部の可能性がある (Yamanaka et al., 2006). 一方, 同位体循環モデル (Sato et al., 2006) を利用して降水の起源を解析した結果, モンゴル東部に夏季の降水をもたらす水蒸気のほとんどが北や西から流入しており, シベリアやモンゴル西部, 中央アジアが起源であると考えられる. 一方で, 観測サイトから 500km ほど南の中国内モンゴル自治区では, 北や西起源に匹敵する量の水蒸気が西太平洋や東南アジアなど低緯度の起源であることが分かった. このように, 内モンゴルを中心とした地域は, 夏季モンスーン気流と上述の総観規模擾乱の双方から影響を受けている地域であることが示された.

3.1.3 乾燥地域の恒常河川：河川水起源

乾燥地域の降水量と蒸発量はほぼ等しいので, 常に水が流れる河川を維持することは難しい. 流域内の河川水と降水の ^{18}O 測定から, ヘルレン川の場合, 河川水の起源が年降水量が 250-300 mm 程度ある源流部であることが示された (Tsuji-mura et al., 2006a). ヘルレン川を上, 中, 下流域に分けた水収支解析からも同様な結論が得られた (Kamimera et al., 2005). 一方, 教科書的には, 乾燥地の河川は失水河川であり, 流下と共に地下水を涵養し, また蒸発によりやがて流れが失われるとされる. しかし, 流域内の多数の地下水, 河川水, 泉の水質調査からは, 地下水と河川の交流が河川のごく近傍のみに限られることが示された (Tsuji-mura et al., 2006b). また, 電磁波

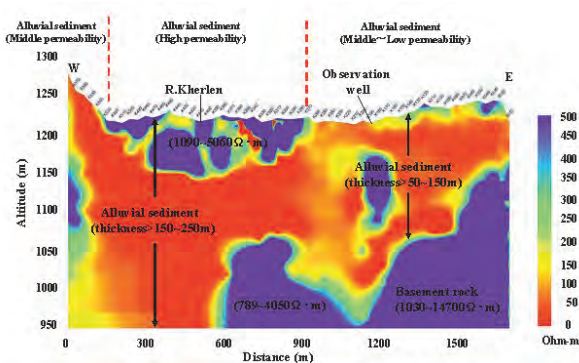


図3 草原地域 (KBU) における地中比抵抗探査の結果.

探査の結果, 永久凍土の存在は比較的小さく, 地下水流動には大きな影響を及ぼしていないことがわかった (図3). このことから, 草原で主に利用される浅層地下水の循環系が比較的狭い地域で

閉じており, 利用できる水が限られることがわかった. モデル地域の水収支の試算からは, 日量 20-100 m^3 程度の水なら持続的に利用可能であることが示された (表1).

表1 草原4地域における可能地下水揚水量の推定

| Well No. | Location | Area | P | Gout | U |
|----------|----------|------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | | (m^2) | (mm/y) | (m^3/y) | (m^3/d) |
| W32 | DH | 772,918 | 216 | 15,552 | 142 |
| W21 | JGH | 1,111,758 | 187 | 38,400 | 187 |
| W44 | JGH-UDH | 668,248 | 207 | — | 143 |
| W94 | UDH | 274,087 | 226 | 19,152 | 20 |

3.2 水循環と生態系

3.2.1 水とバイオマス

乾燥地域では, 降水の時期, 大小によって生態系が大きな影響を受ける. モンゴル国全土から選択した 97 のステーションデータと植生指標の解析から, 初夏の降水量が草原のバイオマス量を決める主たる要因であることが示された (Iwasaki, 2006). 一方, ヘルレン川流域内の植生と降水量, 放牧圧の季節変化の調査結果 (小島, 2004) と保護柵内外のバイオマス量の年々変化の調査結果からは放牧圧の大小もバイオマス量を決める大きな要因となっていることがわかった.

降水イベントは光合成と呼吸を増大させるが, 生態系の炭素収支には変化を及ぼさない可能性が草原地域での人工降水実験から示された (Mariko et al., 2006). これまで, 草原の純一次生産の 90% は降水量によって規定され NEP に対しても影響があると考えられてきた (Schlesinger, 1995) が, 本研究の結果は少なくとも半乾燥ステップ草原ではその可能性を否定する新しい知見である.

3.2.2 水と土壌

土壌は過去の長期間にわたる気候, 土地利用などを反映している. モンゴル国内の年平均降水量 130 mm から 200 mm を超す様々な地域での土壌プロファイル調査から, A 層の土色が南部のより乾燥した地点ほど黒色味が減少し, A 層深度が浅くなるとともに, 土壌構造の発達が弱くなる傾向を示すこと, 炭酸塩集積層は北部の比較的湿潤な森林サイトにおいては存在せず, 遡源でのみ存在すること, 炭酸塩集積層の出現深度が南部は

ど浅くなりこと、表層土壌の有機炭素および窒素含量は、森林サイトで最も高い値を示し、南部の調査地点ほど低い傾向を示した。同一の土壌分類名に分類される土壌であり、表層では土壌理化学性に違いが明らかでない草原土壌であっても、降水量の違いにより土壌中の塩類濃度が異なり、土壌荒廃プロセスに差異が生じることが示唆された。

3.3 大気と生態系の相互作用

3.3.1 森林と草原

二つの植生帯に設置したステーションデータの解析から、その差異が明らかにされた。例えば、森林、草原ステーションそれぞれの平均年降水量 282 mm, 181 mm に対して、2003 年の年間蒸発量は 225, 163 mm であった (Li et al., 2005a, b, c, 2006a, b)。また蒸発した水の 6 森林では 60-70% が蒸散であるのに対し草原では 30-60% に過ぎず残りは土壌からの蒸発である (Tsujimura et al., 2006a)。従って草原では地表面のごく近傍の水が蒸発するのに対し、森林では土壌の乾燥具合により 30 cm 程度までの層からさらに深い層の水が利用されている (Li et al., 2006b)。

3.3.2 地表面フラックスの水平分布

対象地域の草原は比較的一様な広がりをもっている。しかし、航空機、地上ステーション、シンチロメータのデータを用いた詳細な解析の結果、例えば日中 100 W/m² 程度の顕熱フラックスがある場合、数 km の範囲で 20-50% 程度のばらつきが生じることが確かめられた。瞬間値としては主に雲による日射の減少、平均値としては地表面条件のわずかな差異が影響していることがわかった (Asanuma, 2006; Sugita et al., 2005)。このような比較的一様な草原でのフラックスのばらつきあるいはその平均値を求める試みとして、大口径シンチロメータ (Asanuma, 2006)、航空機データによる境界層バルク法 (Kotani and Sugita, 2006)、衛星データと地表面熱収支モデル (Matsushima, 2006) が試みられ、それぞれの有用性が確かめられた。

3.4 放牧の土壌・生態系への影響

3.4.1 生態系の禁牧への反応

禁牧区内外の比較から放牧の影響を調査した。

設置後 3 年間にわたる調査から、放牧が短期的には地上バイオマスにとってはマイナス要因となっていること、しかし、禁牧によりリターの集積が起きる結果、地上バイオマスの成長阻害を引き起こすことがわかった。またバイオマス量のみならず、種の多様性、群落の機能が顕著に増加していることが確かめられた。一方、地下バイオマスおよび土壌構造については短期間では大きな差は生じない。またこのような生態系の変化の結果、大気と生態系の関係には大きな影響が生じた。バイオマス量が禁牧区内で増加した結果、直接的にはアルベドが減少し、また表面温度が減少するので正味放射量としては大きくなる。さらに地中熱流量は減少するので、禁牧状態の方が有効エネルギーが大きくなることがわかった。結果として顕熱フラックスも禁牧区内で大きくなったが、潜熱には大きな差が生じなかった。これは土壌水分が制限要因となっているためと考えられる。

3.4.2 土壌浸食への影響

過放牧は土壌浸食を促進すると考えられる。この点を放牧圧の異なる 2 斜面流域 (KBU, BGN 流域) での斜面土砂流出の測定から調査した。その結果、放牧圧が高く植生が少ない KBU 流域の方が同一規模の降水に対する流出量は小さいことがわかった。しかし、¹³⁷Cs と ²¹⁰Pb をトレーサーとして過去 40 年の積算浸食量を推定したところ KBU の方が大きい結果となった。このことは KBU では既に表面土壌の浸食が進み、新たな土砂流出が起きない段階まで達していると考えられる。したがって、現在の放牧圧のみならず過去の履歴が重要であることが示唆された (Onda et al., 2006, 西川ほか, 2005)。

3.5 将来予測

3.5.1 気温温暖化シナリオのダウンスケーリング

NCEP/NCAR 再解析データと MRI-CGCM2 の SRES-A2 シナリオランによる計算結果を利用した領域気候モデルによる擬似的な温暖化数値実験を行い、当地域の温暖化に伴う大気条件の予測を実施した。得られた 2070 年代の 10 年間の領域気候モデルにより再現された地上気温および降水量から 1994 年から 2003 年の 10 年間の現状の再現値を差し引いた気候変化の地域分布を図 4 に示す。

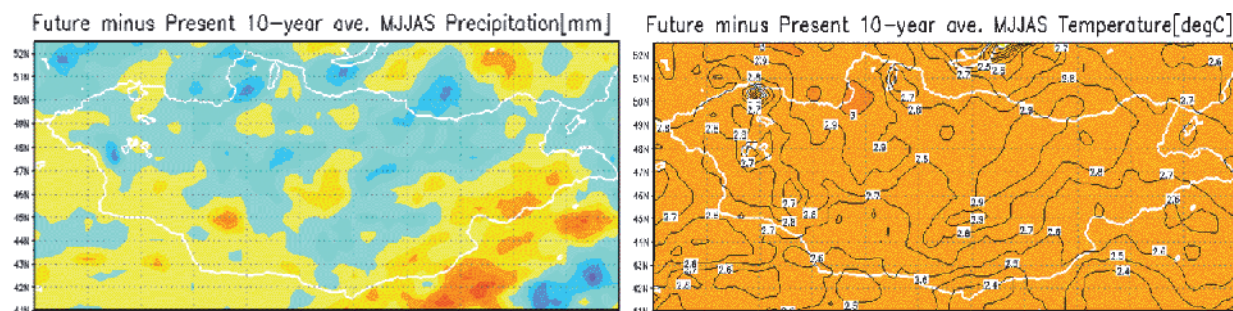


図4 2070年代と1990年代の降水量 (a:左) と気温 (b:右) の差

降水の変化 (図4a) は地域差が大きく、北部の山岳地など、もともと降水の多い地域で減少幅が大きく、40 mm を越える。しかし南の乾燥域では降水量は微増する。ただし、これらの地域では降水量が多少増えても、気温の増加による蒸発量の増大を補えず乾燥化が進む可能性がある。図4bの気温の変化をみると地域による差は小さく2-3度の範囲に概ね収まる。

図5に地球温暖化による6, 7, 8月の降水量および気温の変化の年々の値を示す。それぞれの値はモンゴルの大部分を覆う95-115E, 45-50Nの範

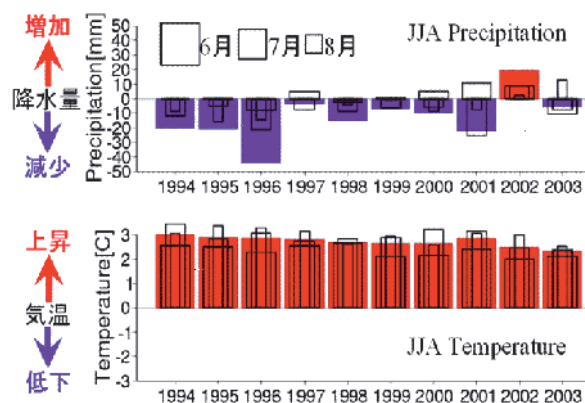


図5 地球温暖化に伴う夏季降水量・気温の変化

囲で領域平均したものである。地球温暖化の結果、対象としたすべての月について気温の上昇が認められ、10年間の平均として約2.5℃気温が上昇した。降水量に関してはほとんどの月で減少し、減少幅はおよそ10-20mmであることが分かった。ただし2002年は例外的に6, 7, 8月すべてで降水量が増加する結果となった。2002年はモンゴルにおける乾燥年であったことから、降水量の変化は一様ではなく、気象条件によっては符号が変わりうることを示唆している (Sato et al., 2006)。

3.5.2 温暖化に伴う生態系の変化

対象地域において温暖化が起きた場合に、草原生態系にどのような変化が起こりうるかの予測実験を生態モデルによって実施した。2003年以後100年間における気温上昇 (ST)、降水減少 (SP)、大気CO₂濃度増加 (SC)、これらすべての効果 (SALL) を想定した。その結果を表2に示す。降水減少と温度上昇は両方も炭素循環に負の影響を与えたが、その影響力は降水減少の方が大きかった。大気CO₂濃度増加は植物への水ストレスを軽減し、NPPやバイオマス成長を増加した。以上のような効果は他の半乾燥草原でも報告されている。蒸発と蒸散の動向は降水量と葉面積成長 (LAI) との関係によって決まることが明らかとなった。降水量は変化させず、気温上昇のみをシミュレーションした場合は植物成長が悪化し、蒸散の減少が顕著になった。一方、大気CO₂濃度増加を増加させると、水ストレス軽減による成長の増加のため蒸散速度は増加し、蒸発速度は減少する結果となった。

表2 KBU ステップ草原における100年後の炭素・水動態 (基準年 (2003年) の値に対する%)

| | Carbon Cycle | | | Water Cycle | | |
|------|--------------|-----|-----|-------------|-----|-----|
| | NPP | AB | BB | MSLW | EV | TR |
| ST | -32 | -31 | -28 | 27 | 3 | -47 |
| SP | -52 | -50 | -48 | -21 | -36 | -71 |
| SC | 55 | 53 | 50 | -12 | -1 | 22 |
| SALL | -18 | -15 | -15 | -30 | -36 | -57 |

3.5.3 放牧による生態系の変化

温暖化と独立して、放牧圧が将来変化した場合に起こりうる草原生態系の変化を生態モデルによ

り予測した。この結果を図6，図7に示す。放牧圧 S_i が 0.8 sheep/ha 程度を超すと地上部バイオマス (AB)，地下部バイオマス (BB) 共に減少し続け、草原が維持されなくなることがわかった。現在の対象地域の放牧圧が村単位の平均値として

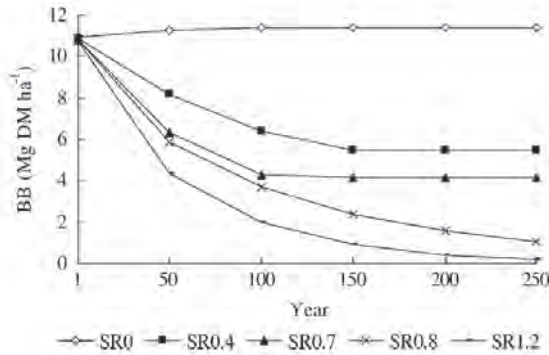


図6 異なる放牧圧下における地下部バイオマス量の変化予測。 S_i : haあたりの羊頭数換算の放牧圧

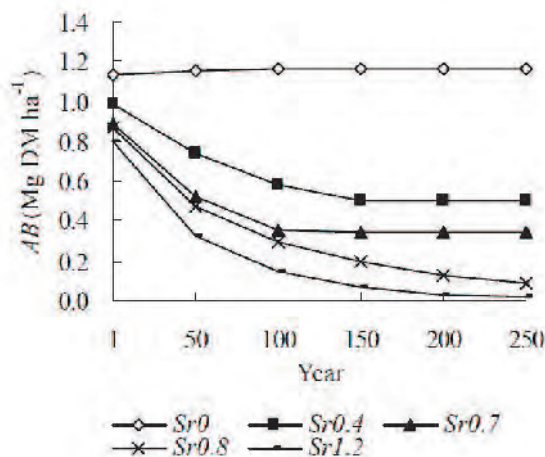


図7 異なる放牧圧下における地下部バイオマス量の変化予測。 S_i : haあたりの羊頭数換算の放牧圧

は 0.4-0.8 程度であり、局所的にはこの値を上回っているところがあると予想されることから、今回の結果は草原の利用管理の必要性を示している。

3.5.4 草原生態系の変化が気候に及ぼす影響

仮に、放牧圧がさらに高まるような傾向が続くと、対象地域の砂漠化が進むことになってしまう。このことが気候にどのような影響をもたらすのかを領域気候モデルの数値実験により調べた。6，7，

8月の再現実験を行い、また同様の期間について、対象地域における草原を半砂漠に、半砂漠を砂漠に置き換えた実験を行い地表面が砂漠化した状態における気候の再現を行った。図8には土地利用変化による6，7，8月の降水量および気温の変化を示す。気温はほとんどの月で上昇するが、上昇量は 0.5°C 未満であることが多い。降水量は $\pm 20\text{mm}$ 程度の範囲で増加する年と減少する年が出現する。大まかな特徴として、もともと降水量が多い年では裸地化により降水量が減少し、降水量の少ない年では増加する傾向があるようにみえるが、今後さらに詳しく調べる必要がある。夏季降水の増減量は、地球温暖化によるものおよび土地利用変化によるものの両方とも $20\text{mm}/3$ ヶ月と同程度であることが分かった。夏季平均気温は地球温暖化によって約 2.5°C 上昇するのに対して、土地利用変化では 0.5°C 程度しか上昇しないことが示された。

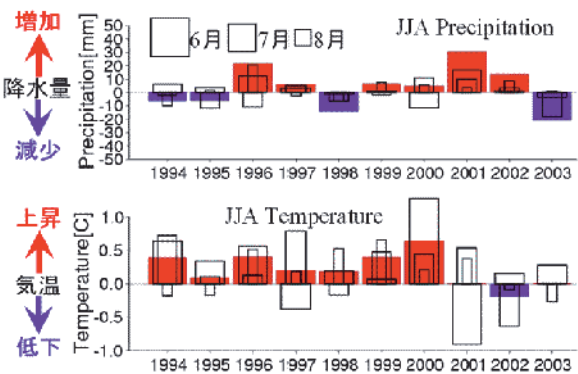


図8 地球温暖化に伴う夏季降水量・気温の変化

3.5.5 地球温暖化が水循環に及ぼす影響

モンゴル東部のヘルレン川流域を対象として、気候変化(温暖化)が流域の水文場に与える影響評価を行った。領域気候モデルで導出された現在と将来の10年間の気候場を外部強制力とし、分布型水文モデルによる流出解析を行った。さらに流域を上流・中流・下流の3部分流域に分割し、各流域平均の年降水量・流出量(河川流量)の平均と変動係数を算定した。上流部の結果を図9，図10に示す。将来の降水量・流出量は、流域全体で減少するが、減少率は下流ほど大きい。さらに、流出量の年々変動性も上、中流域で増加することがわかった。

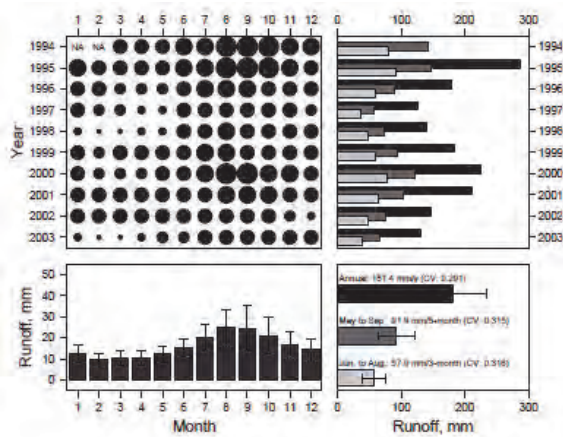


図9 上流域における現在の流況。左上：各年，各月の降水量 / 流出量を黒丸の大小で表現。左下：各月の長期平均降水量 / 流出量，右上：各年の年・暖候期（5-9月）・夏季（6-8月）の降水量 / 流出量，右下：年・暖候期（5-9月）・夏季（6-8月）の降水量 / 流出量の長期平均。

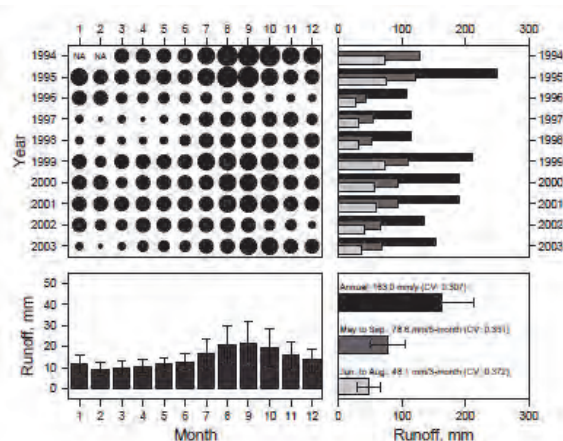


図10 上流域における温暖化予測下での流況予測。

4. 結論

モンゴル国を中心とした北東アジア地域の水循環の動態を明らかにすると共に，その大気圏，生物圏との相互作用を多面的に調査し実態の解明を行った。

水循環としては，降水→浸透→地下水→河川という液体系の循環が乾燥地である点を反映して非常に細いつながりとなっていることが特徴である。すなわち，降水の内浸透して地下水を涵養する割合は年間を平均すると草原部分では通常高々10%位しか無い。しかし，降水量が局所的に多い場所，年には40%近くが浸透する場合もあり得るという変動の大きさもまた重要である。一方，

年降水量にして100 mmほどしか異ならない上流域には森林植生が存在し，浸透する水も20%程度となる。この結果，主たる恒常河川であるヘルレン川の水は，基本的には源流部の水が中流部，下流部では河川ごく近傍の地下水との交流と蒸発のみによって影響を受けつつ流下していることになる。従って，放牧の際の主な水の取得先である浅層地下水は，比較的小さなスケールの循環系でのみ維持されていることになる。このことから利用できる水の量がそれほど多くなく，年々の降水量あるいは蒸発量変化によっては水涸れを容易に引き起こす状況にあることが明らかになった。

一方，このような水循環の実態を反映して生態系は基本的にはステップを形成している。しかし，放牧が行われており，1990年代に入ってから放牧圧の増加に伴いその影響が大きく現れていることが主に禁牧条件と放牧条件での長期観測からわかった。特に，バイオマス量の減少とそれに伴う大気と地表面の相互作用の様相の変化が顕著である。

このような，水循環と生態系，大気圏との相互作用がある程度明確になったことをふまえ，将来予測が行われた。本研究地域で問題となりうる外的な変化は温暖化と放牧圧変化である。これらを領域気候モデル，生態モデル，分布型水文モデルを本研究地域に合わせて改良しパラメータ等を決定することにより，数値実験を行った。得られた結果からは，MRI-CGCM2によるSRES-A2シナリオに基づいた予測であるという条件付きながら，温暖化によりモンゴル全体としては10-20 mmの降水量減少，約2.5℃気温の気温上昇が起こると予測された。しかし，地域別に見ると，北部ではより多くの降水量減少が起こる。これに対して，このような予測結果を水文モデルでの予測条件として利用して行った実験では，水源である北部上流域の降水量減少が河川水の減少に結びつくことが確かめられた。また生態系に対しても生態モデルの数値実験から降水減少と温度上昇が共に炭素循環に負の影響を与えることが示された。

一方，放牧の生態への影響も数値実験により明らかになり，現状より放牧圧が高くなると草原が維持できなくなり砂漠化が進行するおそれが高いことが示された。このような草原の砂漠化の大気に対する影響がさらに気候領域モデルで調べられた。その結果，夏期の気温は0.5℃未満程度の上昇が起きること，降水量は増加する月と減少する月が

現れ, さらに詳細な調査を行う必要が示唆された.

5. 主要な成果

1) 原著論文発表 (国内誌 6 件、国際誌 39 件)

2) その他の著作物 25 件

3) 学会発表

① 招待公演 (国内会議 6 件、国際会議 14 件)

② 口頭発表 (国内会議 55 件、国際会議 41 件)

③ ポスター発表 (国内会議 21 件、国際会議 25 件)

4) 新聞記事

(Mongolian daily newspaper: "Onoodor" (Today), 2002. 03. 18)

○主要な国際誌掲載論文

1. T. Sato and F. Kimura (2003): A two-dimensional numerical study on diurnal cycle of mountain lee precipitation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 60, 1992-2003.
2. T. Sato (2005): The TianShan rain-shadow influence on the arid climate formation in northwestern China. *SOLA (Scientific Online Letters on the Atmosphere)*, Vol. 1, pp. 13-16.
3. T. Sato and F. Kimura (2005): Impact of diabatic heating over Tibetan plateau on subsidence over northeast Asian arid region. *Geophysical Research Letters*, 32, L05809, doi: 10.1029/2004GL022089.
4. J. Liu, T. Urano, S. Mariko and T. Oikawa (2005): Influence of Grazing Pressures on Belowground Productivity and Biomass in Mongolia Steppe. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 25(1), 88-93.
5. S.-G. Li, J. Asanuma, A. Kotani, W. Eugster, G. Davaa, D. Oyunbaatar and M. Sugita (2005): Year-round measurements of net ecosystem CO₂ flux over a montane larch forest in Mongolia. *Journal of Geographic Research-Atmosphere*, 110, D09303, doi: 10.1029/2004JD005453.
6. T. Sato and F. Kimura (2005): Diurnal cycle of convective instability around the central mountains in Japan during the warm season. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62, No. 5, pp. 1626-1636.
7. S.-G. Li, M. Tsujimura, A. Sugimoto, L. Sasaki, T. Yamanaka, D. Matsushima, G. Davaa, D. Oyunbaatar and M. Sugita (2005): Seasonal variation in oxygen isotope composition of waters for a montane larch forest in Mongolia. *Trees-Structure and Function* 20, 122-130.
8. S.-G. Li, J. Asanuma, W. Eugster, A. Kotani, G. Davaa, D. Oyunbaatar and M. Sugita (2005): Net ecosystem carbon dioxide exchange over grazed steppe in central Mongolia. *Global Change Biology*, online:11, doi:10.1111/j.1365-2486.2005.01047.x
9. S.-G. Li, M. Tsujimura, A. Sugimoto, G. Davaa, D. Oyunbaatar and M. Sugita (2006): Natural recovery of steppe vegetation on vehicle tracks in central Mongolia. *Journal of Biosciences*, 31(1), 101-111.
10. S.-G. Li, W. Eugster, J. Asanuma, A. Kotani, G. Davaa, D. Oyunbaatar and M. Sugita (2006): Energy partitioning and its biophysical controls above a grazing steppe in central Mongolia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 137, 89-106.
11. Y. Chen, P. Lee, G. Lee, S. Mariko and T. Oikawa (2006): Simulating root responses to grazing of a Mongolian grassland ecosystem. *Plant Ecology*, 183, 265-275, doi: 10.1007/s11258-9038-7.
12. M. Sugita, 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.*, in press.
13. T. Yamanaka, M. Tsujimura, D. Oyunbaatar and G. Davaa (2006): Isotopic variation of precipitation over eastern Mongolia and its implication for atmospheric water cycle. *J. Hydrol.*, in press.
14. M. Tsujimura, L. Sasaki, T. Yamanaka, A. Sugimoto, S.-G. Li, D. Matsushima, A. Kotani and M. Saandar (2006): Vertical distribution

- of stable isotopic composition in atmospheric water vapor and subsurface water in grassland and forest sites, eastern Mongolia. *J. Hydrol.*, in press.
15. M. Tsujimura, Y. Abe, T. Tanaka, J. Shimada, S. Higuchi, T. Yamanaka, G. Davaa and D. Oyunbaatar (2006): Stable isotopic and geochemical characteristics of groundwater in Kherlen River basin, a semi-arid region in eastern Mongolia. *J. Hydrol.*, in press.
 16. J. Asanuma and K. Iemoto (2006): Measurements of regional sensible heat flux over Mongolian grassland using large aperture scintillometer. *J. Hydrol.*, in press.
 17. A. Kotani and M. Sugita (2006): Variance methods to estimate regional heat fluxes with aircraft measurements in the convective boundary layer. *J. Hydrol.*, in press.
 18. D. Matsushima (2006): Estimating regional distribution of surface heat fluxes by combining satellite data and a heat budget model over the Kherlen river basin, Mongolia. *J. Hydrol.*, in press.
 19. M. Asano, K. Tamura, K. Kawada and T. Higashi (2006): Morphological and physico-chemical characteristics of soils in a steppe region of the Kherlen River basin, Mongolia. *J. Hydrol.*, in press.
 20. S.-G. Li, R.-S. Hugo, M. Tsujimura, A. Sugimoto, L. Sasaki, G. Davaa and D. Oyunbaatar (2006): Plant water sources in the cold semiarid ecosystem of the upper Kherlen river catchment in Mongolia: A stable isotope approach. *J. Hydrol.*, in press.
 21. S. Mariko, T. Urano and J. Asanuma (2006): Effects of irrigation on CO₂ and CH₄ fluxes from a Mongolian steppe soil. *J. Hydrol.*, in press.
 22. Y. Onda, H. Kato, Y. Tanaka, M. Tsujimura, G. Davaa and D. Oyunbaatar (2006): Analysis of runoff generation and soil erosion processes by using environmental radionuclides in semiarid areas of Mongolia. *J. Hydrol.*, in press.
 23. S.-G. Li, J. Asanuma, A. Kotani, G. Davaa and D. Oyunbaatar (2006): Evapotranspiration from a Mongolian steppe under grazing and its environmental constraints. *J. Hydrol.*, in press.
 24. T. Sato, F. Kimura and A. Kitoh (2006): Projection of global warming onto regional precipitation over Mongolia using a regional climate model. *J. Hydrol.*, in press.
 25. Y. Chen, G. Lee, P. Lee and T. Oikawa (2006): Model analysis of grazing effect on above-ground biomass and above-ground net primary production of a Mongolian grassland ecosystem. *J. Hydrol.*, in press.
 26. H. Iwasaki, T. Nii (2006): The break in Mongolian rainy season and the relation with the stationary Rossby wave along the Asian jet. *Journal of Climate*, 19, P3394-3405.
 27. H. Iwasaki (2006): Impact of interannual variability of meteorological parameters on vegetation activity over Mongolia. *J. Meteor. Soc. Japan*, 84, P745-762.
 28. T. Sato, F. Kimura (2006): How does Tibetan Plateau affect transition of Indian monsoon rainfall?. *Monthly Weather Review*, in press.

引用文献

- Endo, N., Kadota, T., Matsumoto, J., Ailikun, B., Yasunari, T., 2006. Climatology and trends in summer precipitation characteristics in Mongolia for the period 1960-98. *J. Meteorol. Soc. Japan*
- Pogue, D. W., Schnell, G.D., 2001. Effects of agriculture on habitat complexity in a prairie-forest ecotone in the Southern Great Plains of North America. *Agricul. Ecosystems & Environ.*, 87, 287-298.
- Yatagai A., Yasunari, T. 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. Meteorol. Soc. Japan*, 72, 937-957.
(その他は成果の欄に記載)