

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「水の循環系モデリングと利用システム」
研究課題「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」

研究終了報告書

研究期間 平成13年12月～平成19年3月

研究代表者：杉田 倫明
(筑波大学大学院生命環境科学研究科 教授)

1 研究実施の概要

(1) 研究の背景と目的

モンゴルや中国北東部を中心とするアジア東北部は、比較的狭い範囲において、湿潤域が乾燥域へと変化しており、それに伴った森林ー草原ー砂漠という地表面の明確な植生の変遷域が形成されている(図 1.1). この様な場合は、外部条件のわずかな変化に対しても影響を受けやすいと考えられている. 一方、この地域では、外部条件の変化がすでに指摘されている、一つは、過去40年程度の間の冬季から春期にかけての気温の上昇と降水量の減少である. この様な大気温暖化、乾燥化が、水循環の変化を通して、植物生産量の劇的な変化や植生の分布の変化を引き起こす懸念が指摘されてきた. また、モンゴル国では、1990年に始まった市場経済の導入により草原域での過放牧と管理されていない水利利用の増加が進行し、その影響が懸念された. しかしながら、このような説明は、一般論的な大筋では間違っていないと考えられるが、実際には、何が、どのようなプロセスでおこることで、どのような問題が顕在化してくるのかは、必ずしも明確ではなかった. また、これが明確にならなければ、根本的な解決策、保全技術の開発を行うことは不可能である. そこで、本研究では、温暖化に代表される大気圏の変化や人間活動が、植生変遷域における水循環にどのような影響を及ぼし、またそのことがどのような生物圏の変化を引き起こしているのか、その逆方向のプロセスをも含めて解明し、モデル化することを第一の目的としている. その上で、将来予測シナリオに基づいた草原生態系の維持管理システム手法、土地、水利利用システムの構築の提案を行うこととした.

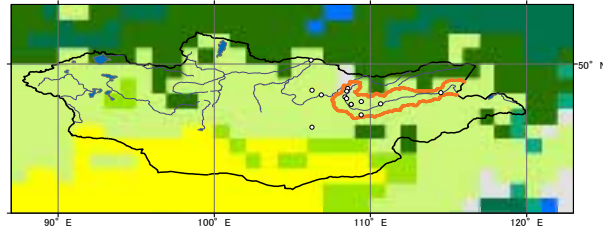


図 1.1 モンゴル国と北東部に位置するヘルレン川流域 (赤線の範囲; 図 3 参照). 濃い緑が森林, 薄い緑が草原, 黄色が沙漠.

(2) 研究の方法

研究の進め方として、(i) 観測による現状の把握とモデル化に必要な情報の取得、(ii) モデル化による将来予測の二つをほぼ同時進行的に行うこととした(図 1.2). 詳細なデータの取得のために観測を重点的に行う地域としてモンゴル東北部に位置する流域面積 122,500 km² を有するヘルレン川流域を設定した(図 1.1,1.3). ヘルレン川は、ウランバートルの北東部を源流域とし、東方へと流れるに従い年流出高が山岳・森林域からなる西部源流部での 100~200mm から草原が主体の流域中央から末端部の 25mm と減少し湿潤から乾燥域へと変化する.

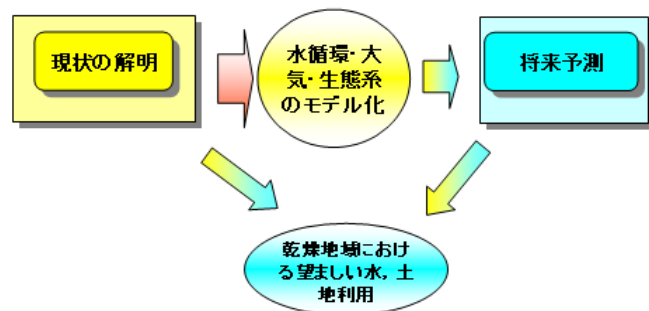


図 1.2 研究の流れ

観測の実施

このような流域において、観測を集中的に行うサイトを森林・山岳域と草原域に設け 2003 年より気象、水文、植生要素の自動観測を行った. さらに 2003 年度には集中観測期間(IOP 期間)を各季節に 10 日程度設定し、この期間中には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、植生の成長に従って植生パラメータの測定を行った.

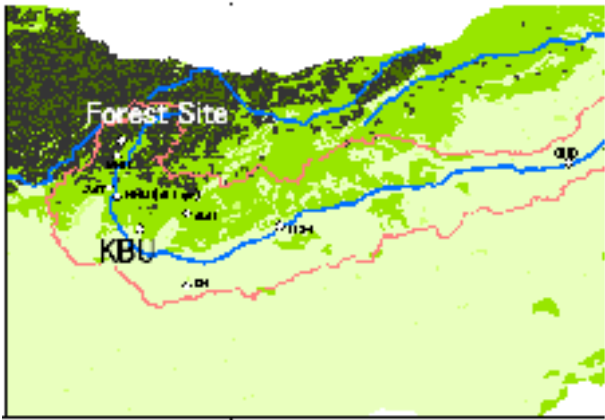
ルーチンデータの取得

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。

モデル化

将来予測のための対象地域のモデル化を行った。現状では 1 つのモデルとして大気、生態系、水循環系をまとめて扱うのは技術的および研究実施体制から考えて得策ではないので、領域気候モデル、陸域生態系炭素循環モデル、分布型水文モデルを個々に作成、最適化し、相互に重なる変数、結果を参照しあうことで、水循環と大気、生物圏が有機的かつ密接につながった形の将来予測につなげることとした。



スケジュール

これらの研究を以下のスケジュールに従って実施した。

図 1.3 ヘルレン川流域。主たる観測地点として流域最上流部の森林地帯(Forest site)と流域中部の草原地域(KBU、ヘルレン-バヤン-ウラン村)に観測ステーションを設置した。

		2001	2002	2003	2004	2005	2006
準備研究	予備調査		↔				
	観測準備	↔	↔				
観測	集中観測			↔	↔		
	継続観測			↔	↔	↔	↔
解析・モデル化	データ解析			↔	↔	↔	↔
	モデル化とモデル研究		↔	↔	↔	↔	↔
将来予測	将来予測と取りまとめ				↔	↔	↔

(3) 成果

現状の把握

中間評価までの 3 年間に、観測の準備、集中観測の実施、解析をほぼ終了し、これらの結果から、当該地域の気候場、水循環プロセス、生態系との関係、人間活動の影響等に関する概要が判明した。その後の 2 年間で、長期間の観測からしか得られないような現象、年々変化などをとらえるための観測を継続し、新たな知見が蓄積された。一方、モデルを用いた数値実験による解析も進められた、特に領域気候モデルは中間評価までにほぼ対象地域への最適化を終了し、モデルを利用した研究成果を出すことができた。その後の 2 年間においてもいくつかの実験がおこなわれ、貴重な成果が得られた。一方、生態モデルと水文モデルに関しては、観測・解析と同時進行としたため、中間評価の段階では、モデルパラメータの決定とデータ収集、そして予備的なモデル構築が完了するにとどまったため、現状の把握のための再現実験は後半 2 年間で実施された。

将来予測

将来予測として、気候モデルからは GCM の温暖化予測シナリオを当地域にダウンスケールした予測データセットおよび砂漠化シナリオでの将来予測データセットを作成した。前者の結果を水文モデルの入力として用いることで、温暖化シナリオ下での水循環予測が行われた。一方、生態モデルでは、温暖化予測と放牧圧増加シナリオに基づく、草原生態系の将来予測を行った(図 1.4)。

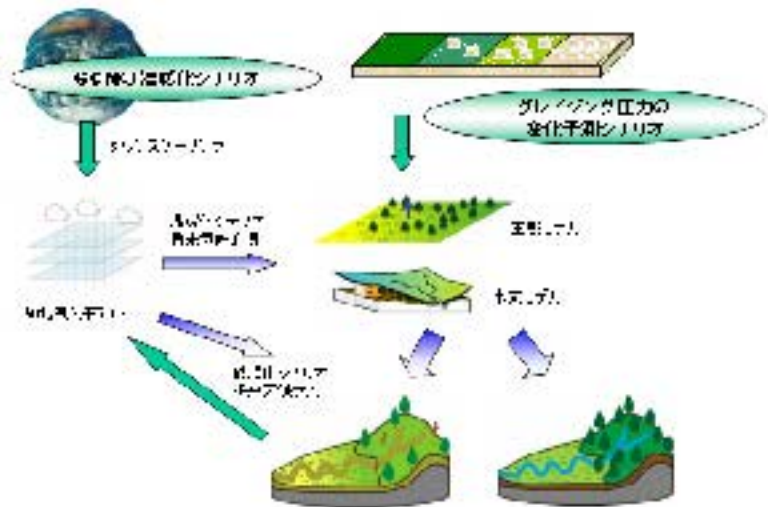


図 1.4 モデルによる将来予測の概要

土地利用、水利用に関する提言

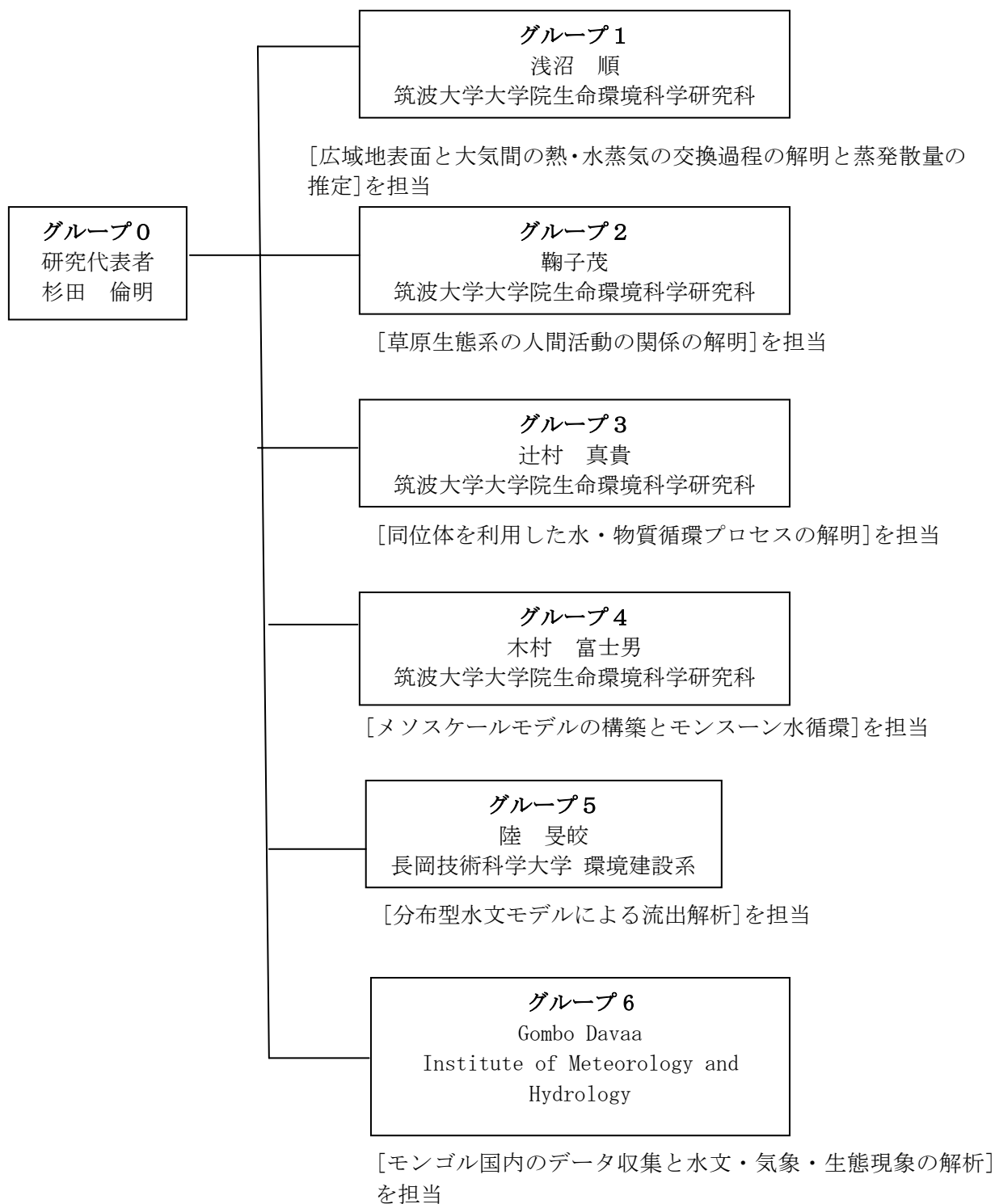
これまでに得られた解析結果から、予測される温暖条件下で、主に草原生態系を維持しつつ、持続的な利用が可能になるような土地利用、水利用方法に関する提言をまとめた。

2 研究構想及び実施体制

(1) 研究構想

本研究では、全体としては、現状の把握を観測中心に進めるとともに、領域気候モデル、陸域生態系炭素循環モデル、分布型水文モデルによる将来予測を行うことで、乾燥、半乾燥地域における草原系を保全した水利用方法の提言を行う計画とした。このような計画の実行のために、7 つのグループを形成した。現状の解明のために主に 3 つのグループ(グループ 1-3)が観測を担当し、それぞれ大気-地表面の相互作用、草原生態系、水循環の諸プロセスを明らかにした。一方、将来予測は 3 グループ(グループ 2, 4, 5)が担当し、生態モデル、気候モデル、水文モデルを対象地域について最適化し、それを利用した予測を実施した。グループ 0 は総括を担当し、ワークショップの企画やプロジェクトホームページなどを通じたグループ間、メンバー間の情報の共有、グループ間にまたがる研究(たとえば、グループ 3 の同位体解析の結果とグループ 4 の領域気候モデルを統合した同位体循環モデルによる降水起源の研究、グループ 4 の将来予測データをグループ 2, 5 のモデルに統一的に入力値として利用する調整)を進める共に、得られた結果を取りまとめ、より良い土地、水利用の提言をとりまとめた。さらに、グループ 6 では主たる観測対象であるモンゴル国内の観測の実施、過去から現在にわたる長期観測データの提供などを行った。

(2)実施体制



3 研究実施内容及び成果

3.0 総括(グループ0)

(1)研究実施内容及び成果

i) グループの役割

研究の調整

本グループは、複数グループにまたがる観測、解析のサポート、データのアーカイブ・配布、モデルによる将来予測研究方法の調整、ホームページによる情報公開を通して、研究全体の統括を行った。また、8 件の公開ワークショップ、シンポジウムを企画、開催し、メンバー間、グループ間のみならず、一般の研究者、モンゴル国の研究者との討論を通じた研究成果の還元、研究方向の調整などに役立てた。

研究成果の公表

最終年度の研究成果の公表のため、水循環研究分野で Water Resources Research 誌と世界 1, 2 位を争ってきた Journal of Hydrology に本研究グループの成果を特集号として掲載することができた(図 3.0.1)。これまでに、乾燥地域を扱った水循環を中心とするプロジェクトの特集号はアメリカとメキシコ国境地帯を扱った SALSA と呼ばれるプロジェクトのものがあり、今回の我々の研究成果と比較すると、乾燥地で共通な現象(蒸発過程、草原生態系と水の関係など)が見られるものの、明らかに異なる点(主たる植生、問題となる人間活動)や我々の研究で始めた明らかになった点(大気との関係、降水の起源、地下水と河川水の交流関係)などが見られ、今後同種の研究が世界の他の乾燥地域で行われることで、乾燥地一般の水循環過程、その他のシステムとの相互作用が明らかにできる可能性が出てきたと言える。成果の報告の 1 つとして、モンゴル国内の研究者のみならず、モンゴル国内の一般大衆にも研究成果を還元する試みを実施予定である。主な研究成果をトピックとしてまとめた小冊子をモンゴル語で作成し、年度末までに配布予定である。さらに、本研究プロジェクトにより収集した貴重なデータを研究者コミュニティに将来にわたって利用してもらうため、データのデータベース化を進めてきた。この部分は、本プロジェクトが終了した段階での全てのデータを取り込むため、平成 18 年度から 3 年間の計画で、別途日本学術振興会のデータベース科研を申請、採択され作業を進めている。



図 3.0.1 Journal of Hydrology 特集号。現在印刷中

望ましい水と土地利用方法の提言

様々な方法で行われた本研究の成果のまとめとして、主にこの地域の草原生態系を対象に、その望ましい水と取り利用方法についての提言を取りまとめ、11 月末に予定される 2006 International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia において報告する。モンゴルより参加するグループ 6 の共同研究者、その他の招へい研究者、国内研究者との討論の上で、モンゴル国側に文面として報告書を含めて提出予定である。

(2)研究成果の今後期待される効果

これまでに乾燥地域を対象に水循環と大気圏、生態系を総合的に扱った研究は世界的にも無く、今後世界の乾燥地域の中でこの種の研究成果が出てくることで、本地域の特殊性、あるいは乾燥地としての一般性が明確になってくることが期待できる。一方、本研究では主に草原生態系に焦点を当てて研究を進めたが、より広い範囲に目を向けると、北のタイガ林、ツンドラ、南の砂漠とより大きな植生の変化、それを引き起こしているはずの気候、水循環が存在するはずである。今後、この地域とより広い地域での研究の連携を進めることで、アジア・ユーラシア大陸の水循環と大気圏、生物圏の相互作用の理解につながっていくと

考えられる。そのことが、今後の気候温暖化、あるいは依然として不透明なアジア地域の社会体制の変化に対する水循環系や生態系への影響を事前に予測するための研究者ができる重要な寄与となりうる、

3.1 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(グループ1)

(1)研究実施内容及び成果

i) 概要

本グループの目的は、ヘルレン川流域を対象として、その広域代表性を持つ蒸発散量および地表面熱収支を求め、流域水収支の解明に資することである。このような目的の達成するため、以下のような研究を実施した。

モニタリング観測

流域の代表的な土地被覆として、流域源流部の森林（以下森林サイト）と中下流の半乾燥草原（KBU）の2地点に、自動フラックス観測サイトを設置し、長期間の観測を行った(Sugita et al, 2006 参照)。ここで得られた蒸発散量、雨量、二酸化炭素交換量を用いて、森林、草原の水収支、炭素収支の年々変動、年内変動を明らかにする。

領域代表フラックス

領域代表フラックス計測手法の適用することによって、上記の森林および草原での水・熱・炭素収支観測が、それぞれの土地被覆をどの程度代表するか、またヘルレン川流域において、それぞれの観測値がどの程度代表性を持つかを検証する。以下の3つの領域代表フラックス計測手法を用いた。

- ・シンチロメータを用いた顕熱フラックスの計測
- ・航空機観測と分散法を用いた顕熱フラックスの計測
- ・衛星データと陸面モデルを用いた地表面熱収支の推定

以下、まず各手法の説明とその検証について説明し、その後、広域代表蒸発散量および地表面熱収支に関する結果を報告する。

ii) 手法とその検証

モニタリング観測

森林、および草原2サイトにおいて渦相関法で計測された顕熱、潜熱および二酸化炭素フラックスの30分値を以下のプロセスを経て、精度の良い日、月、年平均(積算)値を計算した(Li et al, 2005a, 2005b 参照)。まず、様々な効果による計測値の過小評価を、経験的な関係や理論式をもとに補正する(補正)。観測値から、センサー誤動作や降水・メンテナンス・停電・キャリブレーション時の観測値を削除する(品質管理)。これらによって生じたデータの空白を、2時間以内の空白は線形内挿、それより長い空白は他の変数との経験的な関係を構築することによって埋める(Gap-filling)。これらのデータ処理は、フラックスネット(FluxNet)プロジェクトにおいて指定されている手法と同じであり、世界中の同様の観測サイトとの比較が可能である。このようにして得られたデータから、水・熱・炭素収支各項目の日・月・年平均(積算)値を求める。

領域代表フラックス

当グループが用いた領域代表フラックス算定手法は、いずれも開発途上であり、他に余り

適用例を見ない手法である。これらの手法の検証・高精度化を含めた研究も兼ねて、ヘルレン川流域に適用した。

○シンチロメーター

大口径シンチロメータを用いた広域平均顕熱フラックスの計測を行った(Asanum and Iemoto, 2006)。シンチロメータは、送信機から発した赤外線が大気を透過した後の光の強度変動(“揺らぎ”)を受信機で計測する。光の揺らぎは、大気中の密度の空間変動によるので、これを計測することによって、パス平均の顕熱フラックスを計測することができる。KBU付近において、受信機と送信機を1000m、1600m、3000m、4500mのパス距離で設置し、顕熱フラックスを計測した。

図 3.1.1 は、シンチロメータと渦相関法による顕熱フラックスの比較である。青点は、パス長さが4500mの時で、明らかに過小評価となっている。これは、蜃気楼と同じく地表面付近の強い温度差で光軸が大きく歪んでいることによるものと考え、この長さのパスは、解析には適さない。これ以外のパス距離については、渦相関法と同じ程度の値となっており以降の議論に適すと考えられる。

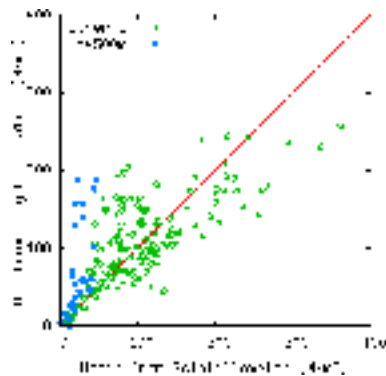


図 3.1.1 シンチロメーター(横軸)と渦相関法(縦軸)による顕熱フラックスの比較。パス長さ4500mのみ青点でプロットしている。

シンチロメータの出力から顕熱フラックスの計算を行う過程で必要となる計測値や経験関数に、計算された顕熱フラックスがどの程度の感度を持つかを調べたところ、最大で 100W/m^2 程度の不確実性が見込まれることがわかった。

・ 航空機分散法

航空機観測(Sugita et al, 2006)において観測された、地上200–1000mの大気境界層(主に混合層)内の気温、湿度を使用して、混合層分散法による地表面の顕熱フラックスの推定を行った(Kotani and Sugita, 2006)。これは、気温分散の鉛直プロファイル式(相似則式)を用いて、地表面フラックスを推定する方法である。まず、既往のプロファイル式を用いてフラックス推定を行いKBUでの観測値と比較した(図3.1.2(A))。次に、プロファイル式に含まれる経験定数をKBU値に対して最適化し(図3.1.2(B))、さらに、気象再解析データ(NCEP/NCAR)から算出した100kmスケールの水平方向の温度移流や温度勾配(傾圧性)、大気安定度などのパラメータをプロファイル式に追加して分散法に適用した(図3.1.2(C))。この中で特に、水平温度移流と温度勾配をパラメータとして追加した場合に、推定誤差の改善があった。しかし個々のパラメータの効果は不明瞭で、観測期間中の大気場の変化が小さかったことやパラメータ相互が独立でないことがその原因と考えられる。既往のプロファイル式を用いた場合には、推定値と地上測定値との差異は $40\text{--}100\text{Wm}^{-2}$ であったが、プロファイル式に含まれる経験定数の最適化、パラメータの追加により 30Wm^{-2} の誤差で推定可能となり、有意な誤差減少となった。また、測定高度と大気境界層高度、風速から推定した混合層内での分散測定値のソースエリアは $10^0\text{--}10^1\text{ km}$ スケールである。

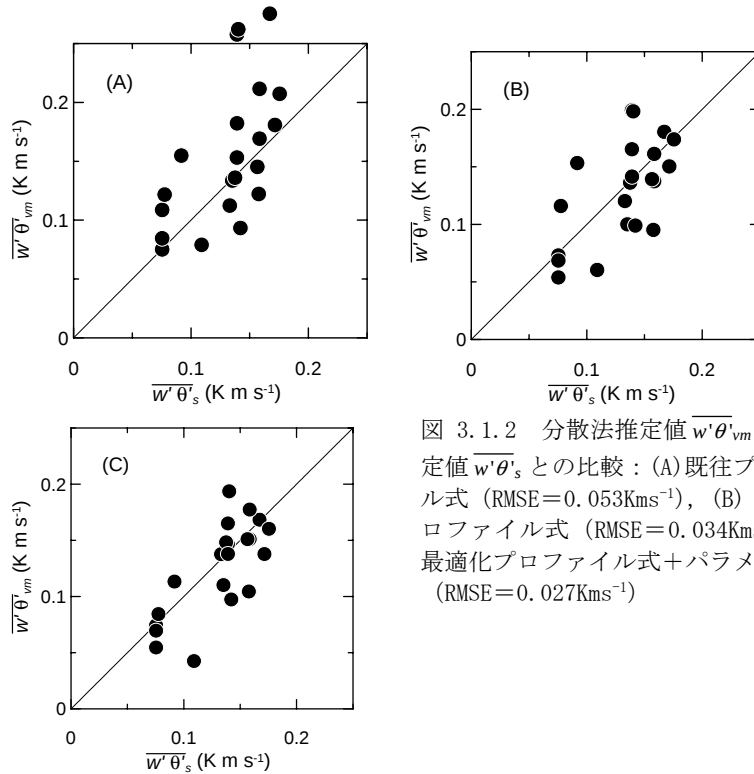


図 3.1.2 分散法推定値 $\overline{w'\theta'_{vm}}$ と地上測定値 $\overline{w'\theta'_s}$ との比較：(A) 既往プロファイル式 (RMSE=0.053Kms⁻¹)，(B) 最適化プロファイル式 (RMSE=0.034Kms⁻¹)，(C) 最適化プロファイル式+パラメータ追加 (RMSE=0.027Kms⁻¹)

・ 衛星と陸面モデルによる熱収支推定

衛星データと数値モデルを併用して、ヘルレン川上・中流域の熱収支及び関連するパラメータ分布の推定を行った(Matsushima, 2006)。衛星データには、MODIS (地表面輝度温度・葉面積指数推定)、GOES-9 (日射量推定) を用い、数値モデルには、force-restore 法とバルク法を組合せ、日射量や地上気象データを入力し、二層 (植生キャノピー・土壌) の地表面温度を予報するモデルを用いた。対象期間及び範囲は 2003 年 6~9 月、北緯 46.5-49 度と東経 107.5-112.5 度で囲まれる範囲内である。なお、推定値の空間解像度はフラックスが 4km、パラメータが 12km である。図 3.1.3 には KBU サイト (半乾燥草原)・森林サイトの観測値とともに、それぞれのサイトを含むグリッドにおける推定値と、対象範囲内の草原・森林それぞれの領域平均値を同時に示している。観測値とグリッド推定値との比較から、本方法による日平均値ベースのフラックス推定精度は、KBU サイトで顕熱 26Wm⁻²、潜熱 28Wm⁻²。森林サイトで顕熱 70Wm⁻²、潜熱 40Wm⁻² であった。また、KBU サイトにおける観測値及びグリッド推定値は草原の領域平均値近傍に分布した。一方、森林サイトにおいては、グリッド推定値は森林の領域平均値近傍に分布したが、観測値はグリッド推定値及び領域平均値のいずれとも差が大きかった。森林サイトにおいて差が大きくなったのは、森林サイトが森林の縁辺部に存在したため、森林サイトを含むグリッドに草原も部分的に含んでしまったためである。

本方法では、フラックスとともにバルク係数などの熱フラックスに密接に関わるパラメータのグリッド推定値を導出することができるが、これらのパラメータ推定値と、別の独立したパラメータの観測値との間に興味深い関係を見出すことができた。このうち、土壌の熱慣性 (熱容量と熱伝導率の積の平方根) と植生キャノピーの蒸発効率の推定値が、浅い層の土壌水分 (体積含水率) 観測値と正の相関を示した (図 3.1.4)。土壌の熱慣性は物理的に土壌水分が多いほど大きくなるが、予備的な情報無しに、土壌水分量と相関が高い情報が抽出されたことは、マイクロ波計測によるよりも高空間分解能で土壌水分量を計測できる可能性を示唆している。また、植生キャノピーの顕熱に対するバルク係数の推定値が、特に森林で正規化植生指数

(NDVI) と季節変化に応じた正の相関を示すことが示された (図 3.1.5)。

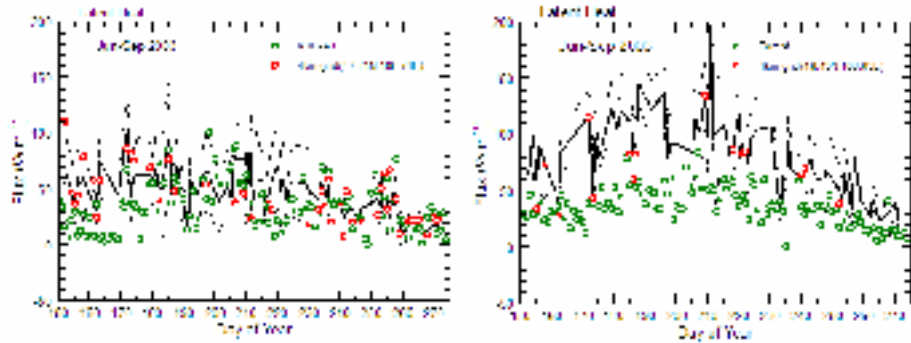


図 3.1.3 各サイトにおける日平均潜熱フラックスの観測データ(緑)、モデル推定値(赤)、領域
 平均値(黒)の比較。黒点線は標準偏差。(左) KBU-A1 サイト、(右) Forest サイト。

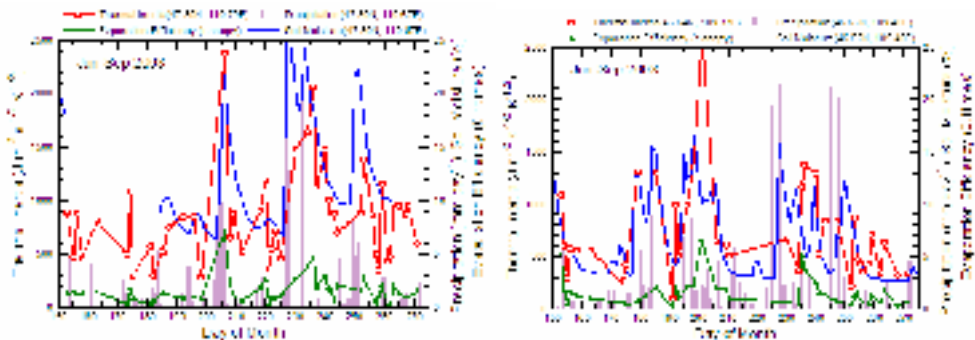


図 3.1.4 モデル計算により抽出された土壌熱慣性(赤)・キャノピーの蒸発効率(緑)と土壌水分(青)・
 降水量(紫)観測値との比較。(左) Underhaan サイト、(右) Darhan サイト。

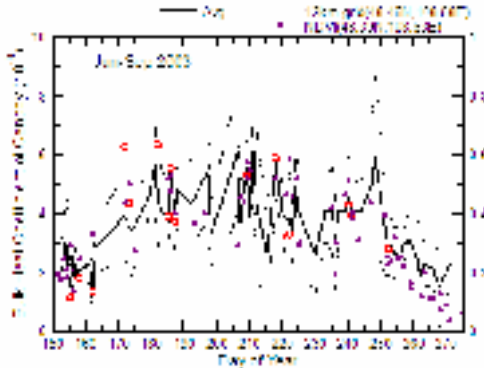


図 3.1.5 モデル計算により抽出された
 森林におけるキャノピーのバルク係数
 と NDVI の季節変化。領域平均値は黒実
 線(点線は標準偏差)、モデル推定値は
 赤点、NDVI は紫点。

iii)ヘルレン川流域の熱・水収支

モニタリング観測

森林と草原における3年間の年間水収支を図 3.1.6 に示す(Li et al, 2006a, 2006b)。森林は、草原に比べて降水量・蒸発散量が多く、より活発な水循環過程が存在することを示す。草原に比べて、森林での蒸発散量が大きいのは、森林の植生量が大きいこと、根系が深いため土壌の乾燥過程でも蒸散を維持できることによるものである。これは、降水量の変動に対して、蒸発散量の変動が追従することからもわかる。また森林において、わずかに降水量よりも蒸発散量が少ないことから、ヘルレン川の源流域の森林地帯がこの流域の主要な涵養域になる。その一方で、草原においては、降水量の変動にもかかわらず、蒸発散量の年々変動は小さく、降水量の多い年においても、土壌水分の減少による蒸発抑制が支配要因になっていることを示す。2003 年のように降水量の多い年には、草原も涵養域になることを示す。

さらに、年間の降水・蒸発散のほとんどが暖候期に起こっている（図 3.1.7）。

以上から、森林が安定した地下水・河川水への涵養域になっているのに対し、草原地域の水収支の年々変動は大きく、草原における植生の変動がこの地域の水循環変動を大きく支配する可能性がある。

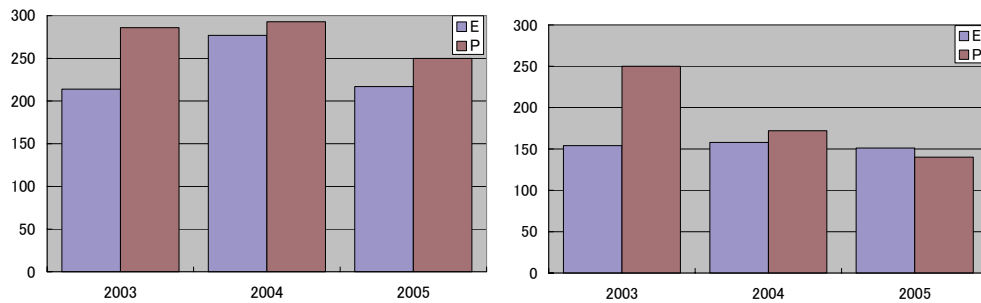


図 3.1.6 森林（左）、草原（KBU）の 2003～2005 年の年間水収支。ただし 2003 年は 3 月末からの積算。P は降水量，E は蒸発散量。

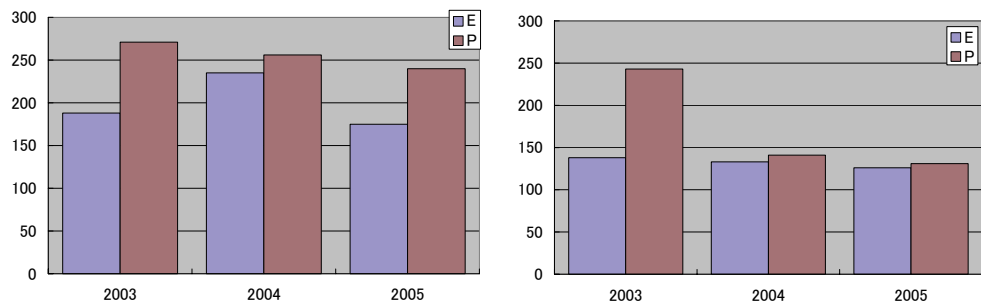


図 3.1.7 森林（左）、草原（KBU）の 2003～2005 年の暖候期（5～9 月）水収支。P は降水量，E は蒸発散量。

図 3.1.8 は、森林および KBU における 2003 年の月別水収支である (Li et al, 2006a, 2006b)。森林において降水の少ない月においても安定して蒸散が行われていること、草原においては降水の多い月でも土壌水分の蒸発抑制が支配的になっていることを示す。

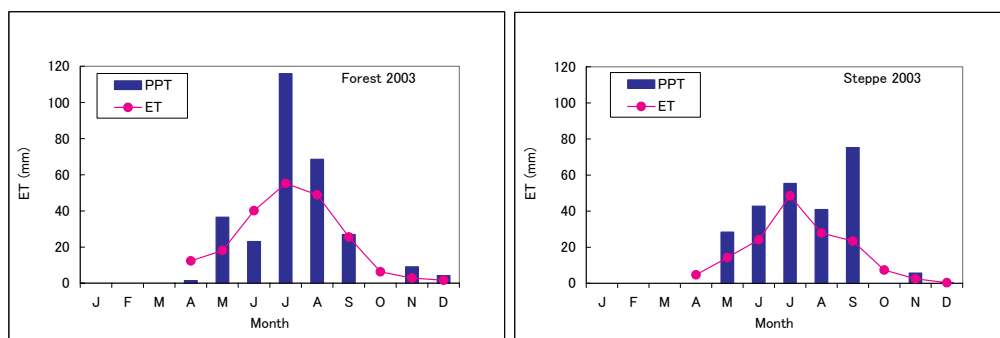


図 3.1.8 森林（左）、草原（KBU）の 2003 年の水収支。PPT は降水量，ET は蒸発散量。

また、図 3.1.9 は、2003 年の 1 年間の純生態系二酸化炭素交換量（光合成+呼吸）を積算量を示したものである (Li et al, 2005, GCB)。森林、草原ともに二酸化炭素の吸収源となっていることを示す。これは、いずれの生態系も炭素同化を行って、生態系を維持していることを示している。2003 年は降水量の多い年であり、二酸化炭素交換量が降水量にどのように依存するかは、2004, 2005 年の解析を待つ必要がある。

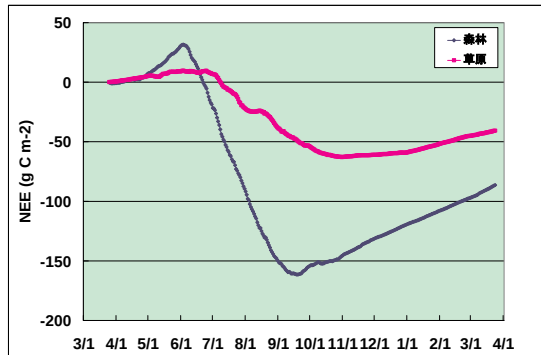


図 3.1.9 2003 年 3 月末からの森林（青）と草原（赤線）における純生態系二酸化炭素交換量の積算量の変動.

北東アジアから中央アジアの半乾燥域の中で、このように精度の良い水・熱・炭素収支の計測が、しかも多年に渡って行われたのは、初めてである。様々な国際プロジェクトによって、地球上の陸面におけるこのような計測が開始されて、すでに 10 年あまりを数えるが、この地域は観測空白域であった。ここに紹介する研究は、当該地域における水・熱・炭素収支観測研究のパイオニアワークとして位置づけられる。

KBU 近郊における保護区内外での熱・水収支を比較することによって、放牧圧の熱・水収支への影響を調べた (Kato et al, 2006)。図 3.1.10 は、保護枠内外の植生量（バイオマス）の差である。2002 年秋に保護枠を設置した後、翌年から内外でのバイオマスの差が顕著になっていることを示している。ただし、このバイオマスの差は、放牧のみでなく降水量にも依存し、降水量の少ない 2005 年はその差が前年よりも小さいことに注意が必要である。図 3.1.11 は、保護枠内外での熱収支各項目の差を示しているが、特に顕熱フラックスが保護枠内で大きいことが明確である。その一方で、蒸発散量への影響は明確ではなかった。このように、数年間という短期間ながらも、放牧圧が植生量を通じて熱収支に影響を及ぼすメカニズムがわかり始めている。

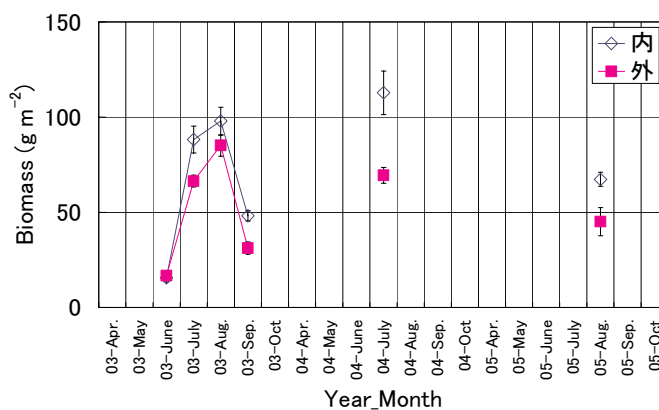


図 3.1.10 保護枠内外でのバイオマス時系列変化

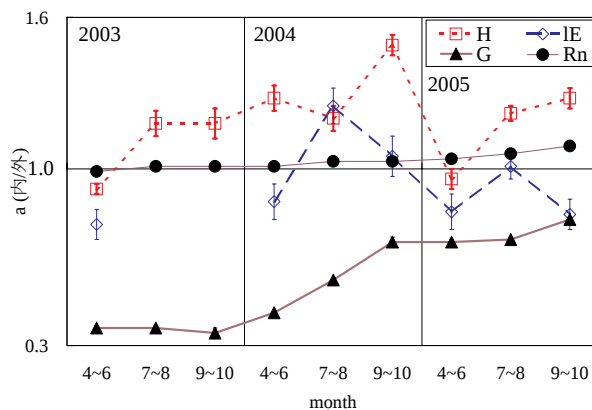


図 3.1.11 熱収支各項目の（保護枠内÷保護枠外）の季節平均値の変化

広域フラックス分布

・シンチロメータを用いた顕熱フラックスの計測

渦相関法を基準として、シンチロメータによって計測された顕熱フラックス同士を相互に比較する (Asanuma and Iemoto, 2006) と、パス長さが 3000m の時に、他よりも 2 - 3 割程度小さくなる (図 3.1.12). これは、3000m の時の受信機が旧耕作地 (図 3.1.13 緑色) 内に設置された事によるものである. この旧耕作地は、1990 年代初頭まで耕作実験が行われており、現在でも植生高が周囲より高い. よって、ここでは蒸散が活発で顕熱フラックスが小さいことが予想される. 図 3.1.13 下に示すようにアルベドは周囲と余り変化が無く、また周囲よりも地表面温度が低いことから、推定できる.

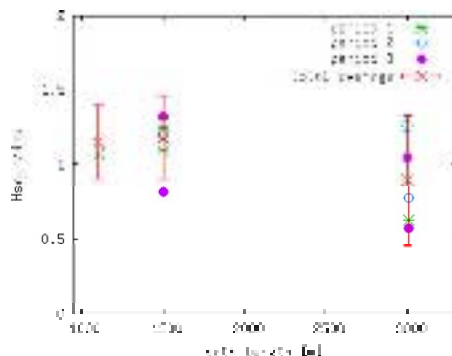


図 3.1.12 シンチロメータと渦相関法による顕熱フラックスの比較とパス長さ（受信機位置）との関係. 縦軸は（シンチロメータによる顕熱フラックス／渦相関法による顕熱フラックス）の全観測値平均（赤×とエラーバー）と季節平均. 横軸はパス長さ.

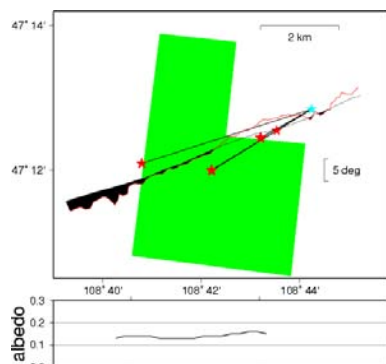


図 3.1.13 シンチロメータの送受信機の配置（青星が送信機、赤星が受信機）と農耕地（緑色）. 地図上の赤い線および下のパネルは、それぞれ航空機より計測した地表面温度とアルベド.

このような耕作地帯はヘルレン川流域ではまれであるため、農耕地の蒸発散は無視できる. しかしながら、ヘルレン川流域の草原地帯において、上に示すような放牧の影響や、水分条件の違いによって、植生量に大きな地域的な違いがある可能性はあり得る. 本成果は、植生量やその活性度に応じて、数割程度の変化が有る可能

性を示しており、草原地帯の熱・水・炭素収支においては、植生量の変動が重要であることを示している。

ここに紹介する研究のような、大口径シンチロメータを用いた領域代表顕熱フラックスの計測手法は、約10年ほど前に計測器が実用化されてから行われるようになった手法であるが、未だ実用例が少ない。この中で本成果は、大口径シンチロメータの観測から、数キロスケールの顕熱フラックスの広域分布を類推できた数少ない応用例である。

- ・ 航空機観測と分散法を用いた顕熱フラックスの計測

前述のように最適化された混合層分散法(Kotani and Sugita, 2006)を、水平飛行における測定データに適用し、10–15kmの水平解像度で100kmスケールでの顕熱フラックスの空間分布を計算した(図3.1.14)。温度変動および顕熱フラックスは湿潤期には河川近傍、草原地域、森林地域の順に大きい傾向がみられたが、乾燥期には傾向は不明瞭だった。湿潤期には地表面乾湿が時間・空間に非一様になりやすく、乾燥期には比較的一様になることを反映していると考えられ、妥当な結果である。草原地域においては、乾燥期(植生衰退期)よりも湿潤期(植生繁茂期)に顕熱フラックスの空間変動が大きくなり、日射や風速変動などに対して地表面熱収支の分配がより敏感になると考えられる。

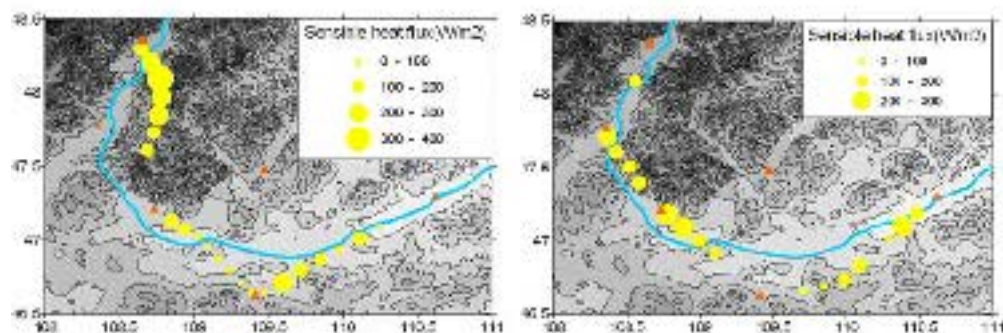


図3.1.14 混合層分散法を用いて推定された顕熱フラックスの空間分布(右:2003年8月22日, 左:10月3日)

分散法による地表面フラックス推定はこれまで主に地表面付近での測定値を用いた方法が検証されてきた。本研究では大気境界層全層(地上1kmまで)に拡張することで、通常用いられる渦相関法と比較して、簡易な観測体制でのフラックス推定方法を提案した。一方で渦相関法と異なり複数のパラメータが必要となるが、大気モデルや広域データを用いて適切に与えられれば、広域の航空機観測や地上リモートセンシング観測により広域な空間を代表する地表面フラックス推定が可能となる。とくに、本観測地域のような水平方向に異なる地表面状態(河畔域、草原、森林)が分布する地域でのフラックス空間分布を把握することで、広域熱収支、水循環の解明に寄与することが期待される。

- ・ 衛星データと陸面モデルを用いた地表面熱収支の推定

上記において示された方法により、地表面熱フラックスの広域分布を推定した(Matsushima, 2006)。図3.1.15には2003年6~9月の代表的な日における顕熱・潜熱フラックス(蒸発散量)の日平均値を示す。顕熱フラックスは概ね森林で小さく、草原で逆になっており、潜熱フラックスは逆の傾向を示している。また、図示していないが、特に草原において日々の蒸発散量が前日から当日にかけての降水量分布と相関があることも見出された。9月になると正味放射量が小さくなるため

顕熱・潜熱フラックスの和が6～8月に比べて小さくなっている。

KBU サイトを含むグリッドのフラックス値は草原の領域平均値に近い値を取っており、KBU サイトでの観測値も概ね領域平均値±標準偏差以内に収まっている。このため、KBU サイトの観測値は概ね草原を代表するフラックスと考えて差し支えない。一方、森林サイトについては観測値が領域平均値やサイトを含むグリッド値から外れている。ただし、先述のように森林サイトを含むグリッドには草原が混じっていることもあり、これを以て直ちに森林サイトの観測値に代表性がないと判断することはできない。

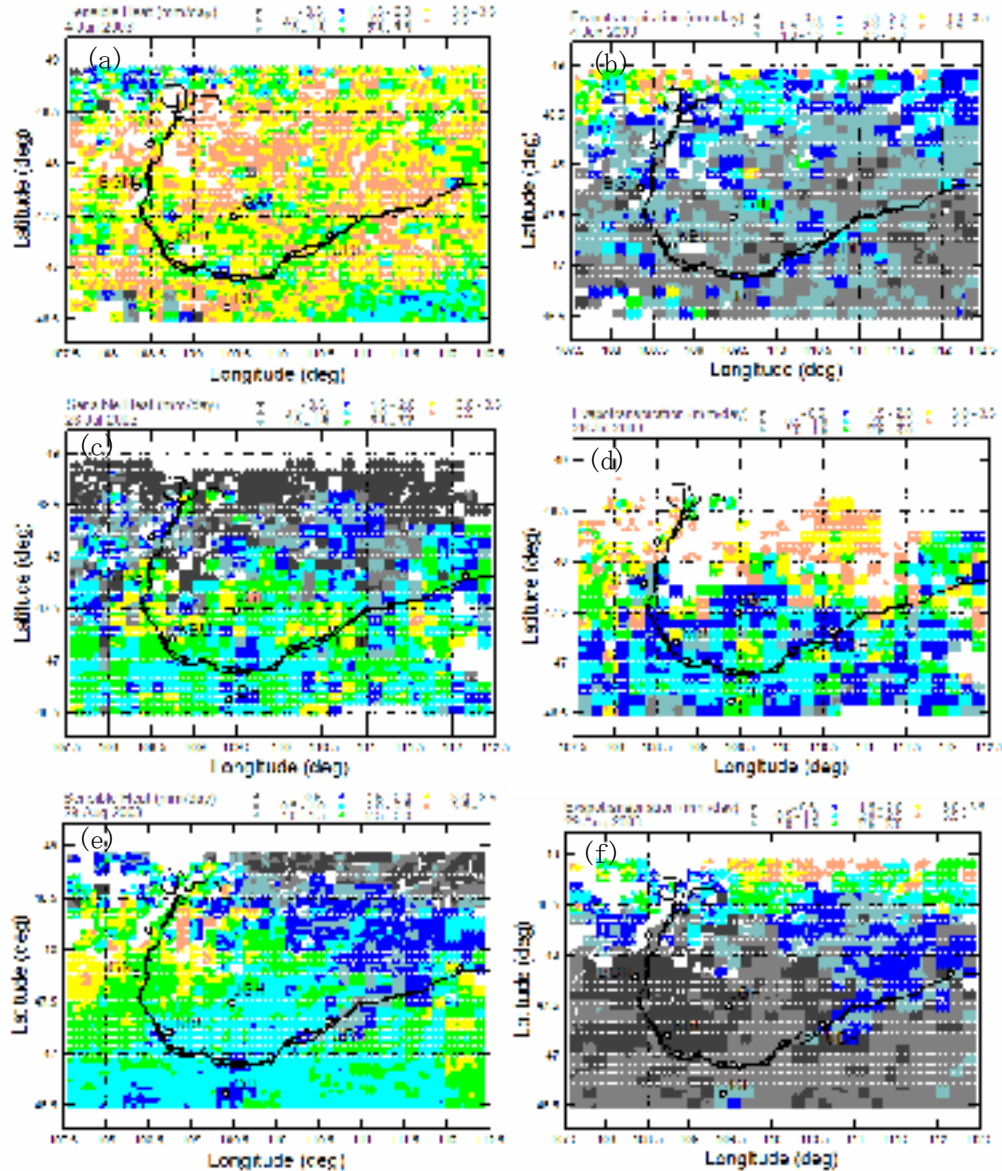


図 3.1.15 顕熱フラックスと潜熱フラックス(蒸発散量)日平均推定値の空間分布。(a) 2003 年 6 月 4 日の顕熱、(b) 同日の潜熱、(c) 2003 年 7 月 28 日の顕熱、(d) 同日の潜熱、(e) 2003 年 8 月 29 日の顕熱、(f) 同日の潜熱。単位は mm/day で $28.2\text{W/m}^2 = 1\text{mm/day}$ で換算した。空白部分は雲のために衛星画像が得られなかった部分。

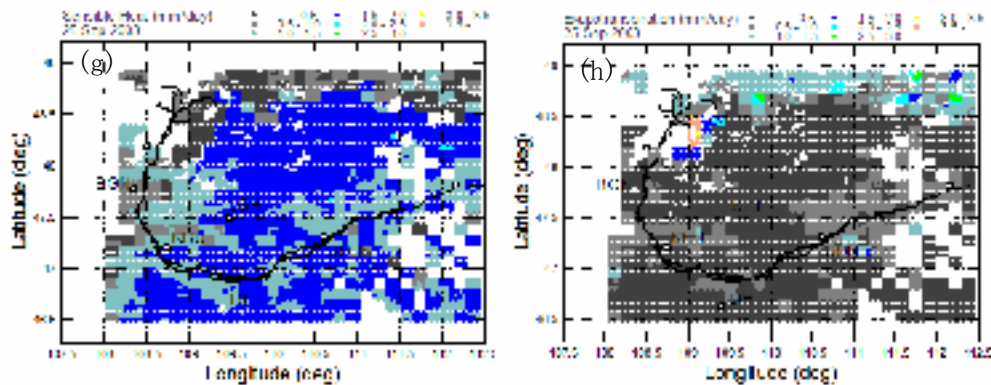


図 3.1.15 (つづき) 顕熱フラックスと潜熱フラックス(蒸発散量)日平均推定値の空間分布。(g) 2003 年 9 月 25 日の顕熱、(h) 同日の潜熱。単位は mm/day で $28.2\text{W/m}^2 = 1\text{mm/day}$ で換算した。空白部分は雲のために衛星画像が得られなかった部分。

このような衛星データと数値モデルを組み合わせる手法は、いわゆるデータ同化手法として、特に数値予報モデルで一般的に使われている。しかしながら、本成果で示すような地表面フラックスやそれに関連するバルクパラメータの推定については、多くが今後の課題として残されている。また、モデル計算によって抽出された土壌熱慣性の変化が表層土壌水分量と相関が高いことが示されたことは、本成果のユニークな点である。

(2)研究成果の今後期待される効果

前述したように本研究成果は、北東アジアから中央アジアに続く乾燥・半乾燥気候帯において、始めて精度の高い地表面水・熱・炭素の地表面収支を観測から明らかにしたものである。観測結果から、熱・水収支は 3 年間、炭素収支は 1 年間の積算結果がこれまでに算出されている。これらの結果は、この地域のグローバル気候システムにおける役割を論ずるとき、また、この地域の水資源を論ずるときに、重要な観測指標となると考えられる。一方で、降水の年々変動の激しいこの地域において、気候値およびそこからの変動を論ずるにはこの観測期間では明らかに不十分である。5 年あるいは 10 年以上の観測期間が必要であり、今後の研究の継続から得られる成果が期待される。

本グループが用いた 3 つの領域代表水・熱フラックス計測手法は、いずれも開発あるいは検証段階にあるものであり、これらの手法の検証や感度実験を行った本成果は、これらの手法の高精度化、実用化への効果は大きい。

3.2 草地生態系と人間活動の関係の解明(グループ2)

(1) 研究実施内容及び成果

i) 研究目的

生態系グループでは、過放牧による草原生態系の変化のプロセスを解明し、適切な草原維持管理システムの開発に向けた知見を得ることを目的として、以下の 3 つの研究を行った。

植生および炭素循環プロセスの解明

モンゴルステップ草原における生態系プロセスを解明することを目的として、植生構造や炭素フラックスについて研究を行った。とくに、乾燥地域であること、他のグループとの連携を考慮して植生構造や炭素フラックスに対する水分の影響を考慮した研究を行った。また、過放牧の影響を明らかにするために、保護区を設け、保護しないところとの比較を行った。

植生変遷域における土壌の特性および放牧の影響

北東アジアに存在する森林から草原への植生移行帯は、地球温暖化に伴う気候変動の影響を受けやすく、乾燥草原地域においては降水量の減少による砂漠化問題が問題とされる。また、近年モンゴル国では、家畜数の増加や耕地化に伴う草原の裸地化や植物種数の変化、それに伴う土壌の荒廃が問題となっている。そこで、モンゴル国北東部の森林から砂漠ステップまでの各植生帯における土壌特性の把握および、放牧および耕作が土壌構造に及ぼす影響評価をおこなうことを目的とした。

炭素循環モデルの構築と水・炭素フラックスのシミュレーション

環境変化によるステップ草原の生産力低下とこれによる砂漠の拡大は地域経済及び、気候変化前半にかける大きな問題と認識されている。そのため、ステップ草原を評価しその変化様子を予測することは大変重要な課題であるが、モンゴルステップ草原に対する研究は現段階ではかなり不足している。このような状況から、本研究では半乾燥ステップ草原の炭素・水動態及び、これらの潜在的な変化可能性を把握する。

ii) 研究方法

植生および炭素循環プロセスの解明

KBU(Kherlenbayan-Ulaan)のステップ草原に設置された保護柵内外で、2002－2005年に生育期間中の植生構造、地上部・地下部バイオマス、LAI(葉面積指数)、炭素フラックス(生態系純生産:NEP;総一次生産:GPP;生態系呼吸:Re;土壌呼吸:SR)を測定した。炭素フラックスは密閉法により測定した。また、土壌CH₄酸化速度やリター分解量についても測定した。これらの測定とともに、気温、土壌温度、土壌水分についても測定を行った。

植生変遷域における土壌の特性および放牧の影響

森林(FS)、森林ステップサイト(BGN)ステップサイト(JGH・KBU)、より乾燥したステップサイト(UDH・DH)、ゴビステップサイト(MDG・BG)の8地点において土壌断面調査を行った。表層土壌の土壌有機炭素量および全窒素量の測定を行った。上記調査地点のうち、同一の土壌型(Kastanozems)に分類されたBGN、JGH、KBU、UDH、DHにおいて、降水量の違いが土壌に及ぼす影響を明らかにするため一般理化学性の分析⁵⁾を行った。モンゴル国のステップに存在する土壌を対象として、炭酸塩集積層の集積速度を、¹⁴C年代測定法を用いて算出した。

KBUにおいて2002年に柵を設置し、放牧圧を排除した保護柵内(Site 1 2002年設置)、放牧を行っている自然草原(Site 2)、1962年から1992年まで灌漑により牧草や小麦を生産し、その後、放棄された耕作放棄地(Site 3)、さらに、耕作放棄地に隣接した耕作地(Site 4)の4地点を調査地とし、土壌物理性測定および、土壌微細形態観察に供試した。

炭素循環モデルの構築と水・炭素フラックスのシミュレーション

全球を対象とする陸域生態系炭素循環モデルSim-CYCLE(Ito and Oikawa, 2002)を改良し、KBUにおける半乾燥ステップ草原の炭素・水動態をシミュレーションした。得られた結果は、2003年同じ地域で得られた植物成長、土壌水分、蒸発散などの観測データと検証を行った。また、モンゴル地域の最近の気温・降水・CO₂濃度変化など環境変化要因を適用させ、対象地域生態系の100年間の変化様子を予測した。さらに、放牧圧(家畜密度)と降水量を変えたときの草原のバイオマスと生産量に与える影響についてもシミュレーションした。

iii) 研究成果

植生および炭素循環プロセスの解明

植生調査から、KBUステップ草原の優占種はC3植物である2種のヨモギ属であった。この他に、乾燥に強いC4植物を含むカヤツリグサ科やイネ科の種も高い被度を示した。これ

らの種からなる植生のバイオマスはほとんど地下部が占め、葉面積とともに8月に最大となることが明らかとなった。C4植物の地上部バイオマスは全体の地上部バイオマスの約10%を占めたが、この比率は8月を過ぎると急激に減少した。これは一般のC4植物が寒さに弱いために減少したためと考えられた。これらの植生に関するデータは他のグループが草原を様々な視点から解析するときの基礎データとなるものである。また、当初の予定通り、植生調査は保護区内外で2002年から2006年まで行われた。その結果、放牧は植生に対して大きなマイナス影響を与えることが明らかとなった。この地域の草原では、生産者である植物を植食する動物(グレイザー)としてバッタ類の存在が確認されたが、観察されることのできる被食痕は少なかった。したがって、主要なグレイザーはヒツジ、ヤギ、ウシ、ウマなどの家畜であり、草原を荒廃させないためには家畜の適正な管理が求められる。この点については、モデルシミュレーションのセクションでも言及する。

生態系の炭素循環の重要なパラメータである生態系炭素動態の結果の一部を図3.2.1に示す。最も重要な結果として、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示唆されたことである。また、当初の研究計画には含まれていなかった人工的な降水実験を行って、その結果を実験的に裏付けることができた(Mariko et al., 印刷中)。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ていると言われていた(Schlesinger, 1995)。そのため、NEPに対しても影響があると考えられていたが、本調査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ものである。これは草原での炭素循環研究に対して新たな展開をもたらす重要な発見である。生態系グループが実測した炭素フラックス、葉面積、気象データからフラックスの環境依存性をモデル化した。そのモデルに地表面と大気の交換過程のグループが観測した日射量、気温、土壌温度、土壌水分を入力し、2003-2004年の生態系炭素収支、光合成、生態系呼吸を推定した(図3.2.2)。その結果、光合成よりも生態系呼吸の方が長期にわたってアクティブであることが分かり、顕著な生態系による炭素の取り込みが見られるのは7月から9月にかけての数ヶ月であることが明らかとなった。年間のNEP、GPP、Reは4.1、249.6、245.5 g C m⁻²と推定された。同草原において同期間中に微気象学的手法で測定された値(Li et al.,

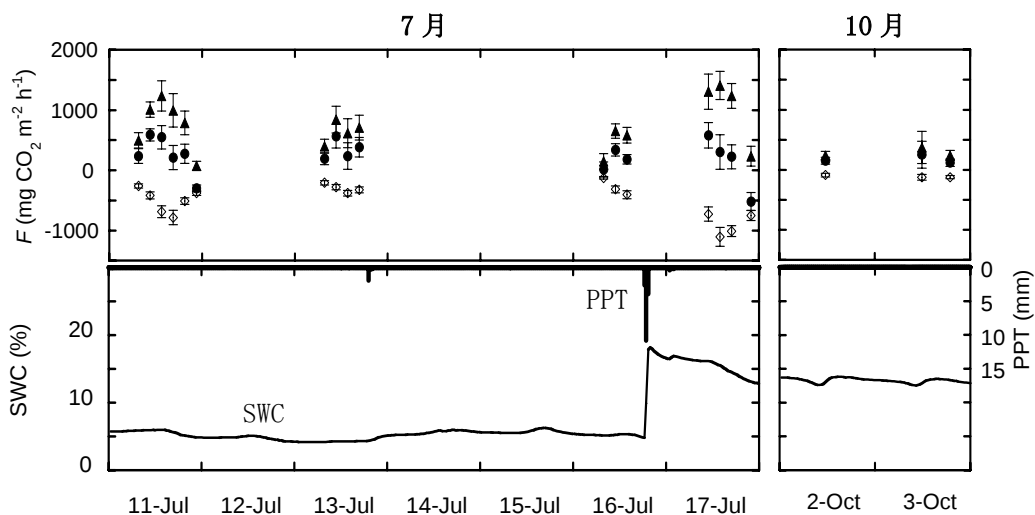


図 3.2.1 2003 年 7 月と 10 月における炭素フラックス(F)、土壌水分(SWC)、降水量(PPT)の日変化

▲:総一次生産(GPP); ●:生態系純生産(NEP); ◇:生態系呼吸(Re)

2005)と比較すると、NEPは10分の1、GPPは1.4倍、Reは1.8倍である。これらの差異は、プロセス法と微気象学的手法の違いによるものと考えられる。たとえば、本研究で得られたフラックスモデルは降水イベントの影響を過大評価している可能性がある。今後は、降水イベントの影響がどの程度の期間続くのかを明らかにする必要があり、それを考慮した上でモデルを再構築し、炭素フラックスのクロスチェックをすべきであろう。

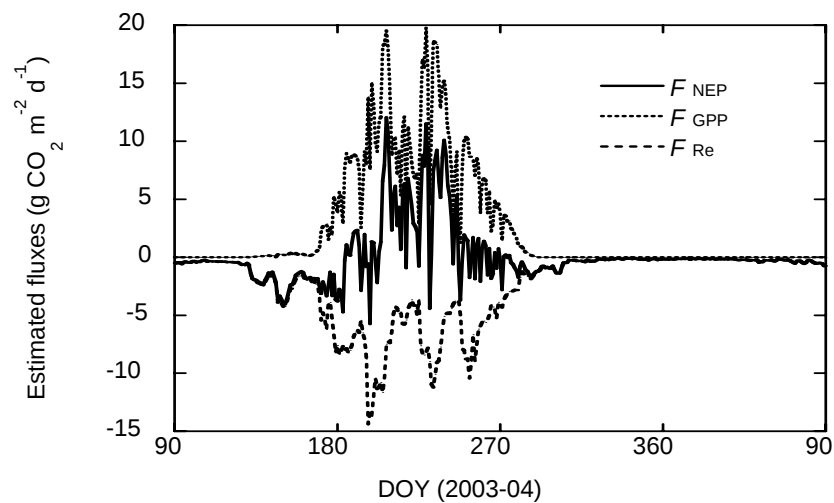


図 3.2.2 KBU ステップ草原における NEP(生態系純生産)、GPP(総一次生産)、Re(生態系呼吸)の推定値

植生変遷域における土壌の特性および放牧の影響

各調査地点の土壌断面形態観察の結果、A 層の土色は南部の調査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した。また、炭酸塩集積層は森林サイトにおいては存在せず、ステップサイトでのみ存在した。炭酸塩集積層の出現深度は南部の調査地点ほど浅くなり、最も南部の BG では表層から炭酸塩が存在していた。土壌有機炭素含量および全窒素含量の結果を図 3.2.3 に示す。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。森林サイトの表層土壌は砂漠草原の表層土壌の約 7 倍の有機炭素量を示した。各植生帯において、気象条件の違いによる土壌水分環境および、植被の違いに起因する土壌への炭素供給量の差異により、以上の結果が示されたと考えられる。

降水量が少ない地点において pH・EC の上昇、水溶性イオン量の増加、有機炭素含量の低下が示された。無機炭素量、窒素量、CEC、物理性には大きな差異は認められなかった。炭酸塩集積層の存在する深さが表層に近くなるだけでなく、降水量が減少するに従って、より溶解度の大きな塩類が炭酸塩集積層に増加することが明らかとなった。同一の土壌分類名に分類される土壌であり、表層の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。

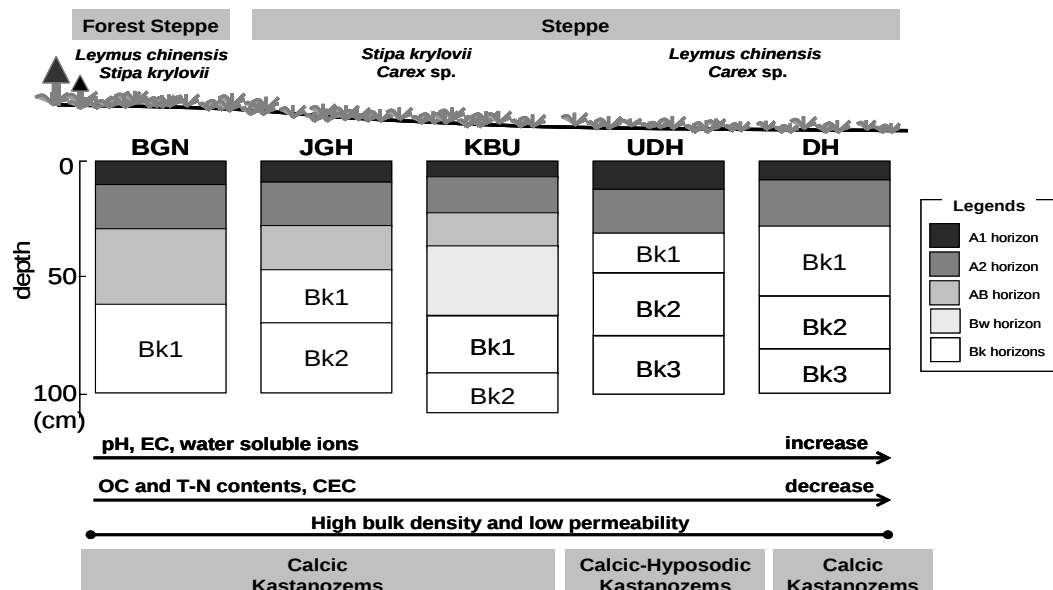


図 3.2.3 降水量が Kastanozems の土壌理化学性に及ぼす影響

AMS 法によって得られた炭酸塩の ^{14}C 年代と集積層の炭酸塩存在量の関係から、調査地域における炭酸塩集積層の集積速度は $0.8 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ であると算出された。土壌生成作用による炭酸塩集積速度は、カルシウムイオンの供給量の差異、降水量や気温の差異によって変化することから、炭酸塩集積層の平均集積速度と考えられる。また、 $\delta^{13}\text{C}$ 値から、各植生帯における調査地では、炭酸塩集積層の生成過程が異なることが示唆された。

水分移動特性の測定結果から算出した有効水分量は、Site 2 が最も多く、次いで、Site 1、3、4 の順に大きな値を示し、Site 1 および 2 において孔隙径 $1\text{--}100 \mu\text{m}$ の孔隙が Site 3 および 4 よりも多かった。微細形態の観察結果から、Site 1 および 2 では草原植生下で土壌構造が維持されているが、Site 3 および 4 では耕作による土壌の攪乱の影響を反映していると考えられた。耕作放棄後 12 年経過した Site 3 は、Site 4 と比較して土壌構造の回復が起こっていることが示唆された。また、Site 1 において、植生調査より、禁牧による植被率の増加、種組成の変化は確認されたが、土壌構造において、Site 2 と比較して顕著な違いは確認されなかった。

適切な草原管理のための植生指標として、種組成、拡張指数(群落の機能)及び重要値指数(群落の構造)が有効であることが確認された。禁牧区では放牧区と比較して群落の地上部現存量、種多様性指数、拡張指数が顕著に増加し、草原植物の科組成と生活型の変化を組み合わせることにより、草原の回復段階を評価できることが示唆された。立地ごとに土壌諸性質の把握をしたに基づき、禁牧と耕作放棄地における土壌肥沃性評価には、土壌酵素 β -グルコシダーゼ活性が有効であると思われる。

家畜の過放牧および耕作などにより土地荒廃が進んでいる実態を把握するため、衛星リモート・センシングを利用して、Landsat-TM データを活用することにより、各分類の面積および赤と近赤外バンドの反射率から与えられた植生指数 NDVI に基づいて、草地の生産力および過放牧や農地化など人間活動による土地荒廃現状を評価した。その結果、解析対象地では、植生量分布が地形と関係があることが明らかとなった。土地利用型は放牧地が主とし(草本群落は面積の 35%を占めていた)、植生と土地荒廃の面積が 28%に達していた。密林タイプの NDVI が 0.55 であり、低木群落ほかの草原群落は 0.18 から 0.03 にかけて変化していた。調査地域において、単時点の衛星データ解析のみでは、見かけ土地表被覆状態が似ているため誤って分類されることがあるので、現地調査地点との検証が必要である。脆弱な草原生態系の保全と持続的家畜生産を両立させるためには、リアルタイムの草原植生を監視する必要がある。従って、広大な草原の現存量や植生タイプの時・空間

的变化を正確に把握するため、多時期の衛星データを用いる土地利用と土地被覆の解析が望まれる。

炭素循環モデルの構築と水・炭素フラックスのシミュレーション

KBU半乾燥ステップ草原における2003年のモデル推定値と実測値を比較した結果を図3.2.4に示す。その結果、地上部・地下部バイオマス、蒸発散速度、土壌水分の季節変化が十分な精度で再現できたことが確認された。観測値と推定値との相関係数 R^2 はそれぞれ、地上部バイオマス(AB)は0.93, 地下部バイオマス(BB)は0.58, 蒸発散速度(ET)は0.94、そして土壌水分(MS_{LW})は0.81と計算された。

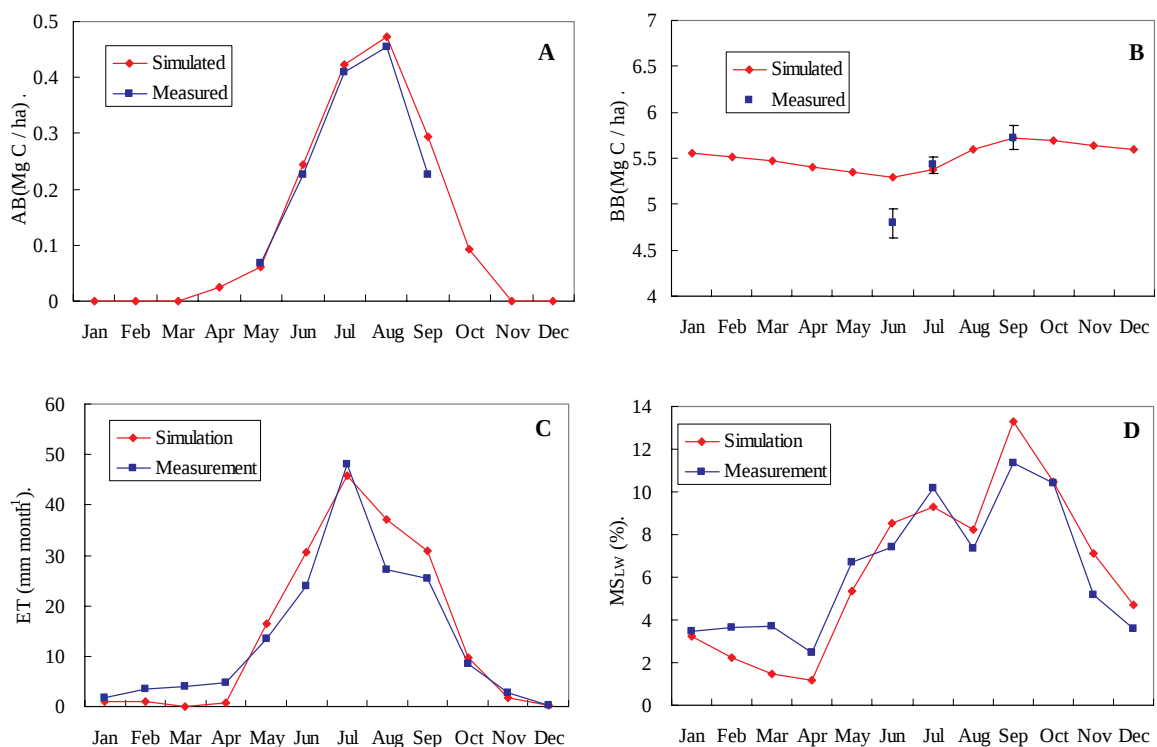


図3.2.4 KBUステップ草原における地上部バイオマス(A)、地下部バイオマス(B)、蒸発散量(C)、土壌水分含量(D)の実測値とモデル推定値(2003年)

AB:aboveground biomass, BB:belowground biomass, ET:evapotranspiration、 MS_{LW} : soil water content.

2003年KBU地域の炭素・水フラックスをシミュレートした結果を表3.4.1に示す。半乾燥ステップ草原の純一次生産(NPP)に対する地上部純一次生産(ANPP)の比(ANPP/NPP)は0.35と低く、同様の値は他の半乾燥草原でも観察されている(Sims and Singh, 1978)。また、実測値では地下部バイオマスが地上部バイオマスよりかなり多かったにもかかわらず、地下部呼吸は植物全体の呼吸の48%にしかなかった。このことは根の維持呼吸がかなり低かったことが原因であり、乾燥草原ではよく知られている現象である(Bachelet, 1989)。植物の葉の気孔からの蒸散速度(TR)は土壌表面からの蒸発速度(EV)に対して約30%程度であった。KBUの降水量は200 mmをわずかに超える程度であるが、これは草原が成立するぎりぎりの降水量である。降水量が少ないとLAIも小さくなり(実測値は1以下)、低いTR/EVをもたらす。同様の結果は他の半乾燥草原でも見られる(Nouvellon et al., 2000)。

表3.4.1 KBUステップ草原における炭素・水収支のモデル推定値 (2003年)

Item	Units	Simulation
GPP	Mg C ha ⁻¹ year ⁻¹	2.33
EP	Mg C ha ⁻¹ year ⁻¹	2.08
NPP	Mg C ha ⁻¹ year ⁻¹	1.31
AR	Mg C ha ⁻¹ year ⁻¹	1.01
ARM	Mg C ha ⁻¹ year ⁻¹	0.24
ARG	Mg C ha ⁻¹ year ⁻¹	0.77
Aboveground respiration	Mg C ha ⁻¹ year ⁻¹	0.53
Belowground respiration	Mg C ha ⁻¹ year ⁻¹	0.48
NEP	Mg C ha ⁻¹ year ⁻¹	0.09
Allocation to roots	Mg C ha ⁻¹ year ⁻¹	1.22
EV	mm year ⁻¹	133
TR	mm year ⁻¹	42

GPP, gross primary productivity; EP, effective photosynthate for biomass growth [=GPP - ARM]; NPP, net primary productivity; AR, autotrophic respiration; ARM, autotrophic maintenance respiration; ARG, autotrophic growth respiration, NEP, net ecosystem productivity; EV, evaporation rate; TR, transpiration rate.

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)がKBU半乾燥ステップ草原における炭素・水循環に及ぼす影響をシミュレートした(表3.4.2)。その結果、降水減少と温度上昇は両方と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(Gao and Zhang, 1997; Wand et al., 1999; Christensen et al., 2004)。蒸発と蒸散の動向は降水量と陽面積成長(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3.4.2 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)

	Carbon Cycle			Water Cycle		
	NPP	AB	BB	MS _{LW}	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

Unit: % relative to the values of the first year (2003).

ST: Increase in temperature from 0.3°C to 2.8°C; SP: Decrease in precipitation from 245 to 150 mm; SC: Increase in CO₂ concentration from 378 to 698 ppm; SALL: Integrated effects of increased temperature, decreased precipitation, and increased CO₂ concentration.

Sim-CYCLE を用いて、放牧が草原のバイオマスと生産量に与える影響をシミュレーション

ョンした結果、草原を衰退させないための家畜密度の上限は0.7 sheep ha⁻¹であることが明らかとなった。これを上回る放牧圧を加えると、地上部、地下部を問わずバイオマスと生産量は減少し続け、いずれ砂漠化してしまうと予測された。放牧の影響は降水量によって影響を受けることもシミュレーションの結果から明らかとなった。降水量が今よりも10%増加すると0.8 sheep ha⁻¹の家畜密度で草原を維持できるが、逆に15%減少すると0.6 sheep ha⁻¹しか維持できなくなった。これより、適切な放牧管理を行うには降水量の動向を考慮しなければならない。ただし、シミュレーションは、草原生態系の水収支に対して家畜密度が影響を与えることはないという結果を示した。

iv) 研究成果の総括

生態系グループは、生態系プロセスや土壌の物理化学性の解明や炭素・水循環シミュレーション予測などを目的として研究を展開させた。得られた成果は、概ね当初の計画通りであったと自己評価している。また、その研究を遂行するに当たって必要な機器類の購入など、予算の執行も適切に行われたと考えている。しかし、グループ内およびグループ間での連携が不十分であったと反省している。その原因は、グループ内外で連携し、相互に成果をフィードバックさせる取り組みを本来行われるべきほどには行なえなかった点にある。今後はその点を反省し、互いにデータを持ち寄って成果の融合を図って行きたい。

(2) 研究成果の今後期待される効果

研究対象地域において、立地ごとに土壌特性の違いを明らかにした研究例は極めて少なく、土地管理手法の確立に対し、不可欠な知見である。また、半乾燥草原における放牧の影響がそのため、本研究の結果は、モンゴル国における今後の自然環境変動を踏まえ、持続的可能な土地利用形態への提言にむけての第一歩を踏み出す結果であるといえる。

農耕の歴史が浅いモンゴル国において、近年の耕地拡大の影響予測は不十分である。既存研究では、耕作による土壌アルカリ化により植生回復が阻害されることが示されてきたが、本研究結果では、耕作による土壌の攪乱が土壌物理性を破壊することの重要性および、その回復に必要な時間が長期にわたるといふ、問題の新たな側面を明らかにした。この結果は、今後モンゴル国で農耕地拡大に伴う土地利用技術の確立に対し貢献するものと期待される。

半乾燥地における無機炭素蓄積速度から得られた結果は、炭酸塩集積層の生成過程解明という基礎的知見を提供するだけでなく、炭素循環および炭素貯留機能の解明という観点から、生態学、気象学、水文学、地形学といった陸上生態系のシステムを研究対象とする関連分野においても非常に意義深い。また、土壌生成作用によって蓄積した炭酸塩は、莫大な貯蔵量があるにも関わらず見過ごされてきたが、本研究は、陸上生態系のシステムにおける土壌中の炭酸塩の重要性を提示することで、陸上生態系の物質循環に、新たな視点を加えるものと確信する。

放牧圧を排除した保護柵の表層土壌への効果は、プロジェクト遂行期間中に変化を生じなかった。今後、持続的な土地利用という問題に対し、短期的な変動のみを対象とするのではなく、長期的な変動に関する研究の進展が望まれる。この結果より、土壌の回復には、植生の回復よりもきわめて長い時間が必要であるといえ、土壌荒廃対策の重要性を示した。

中長期の環境変化を予測したシミュレーションからは炭素循環だけでなく水循環も負の影響を受けると予測された。とくに、わずかな降水量の変動はバイオマスや生産に大きな影響を与えることも明らかとなった。また、過放牧による砂漠化はこの予想を上回る負の影響をもたらすことも懸念される。こうしたシミュレーション結果から、水と放牧を中心とした適切な土地管理のあり方を探る試みが必要であり、本研究はそのための基礎的な知見を与えるものである。

3.3 同位体を利用した水・物質循環プロセスの解明 (グループ3)

(1) 研究実施内容及び成果

i) 研究目的及び概要

本グループは、対象地域の水循環の量のみならず水の起源や流動時間、すなわち、ある水体が、どのような水を起源とし、いかなる経路をどの位の時間を経て来たかを解明することを目的とした。水すなわち H_2O に含まれる、重水素 (2H or D)、トリチウム (3H)、および酸素 $18(^{18}O)$ などの同位体のほか、塩素 (Cl^-)、硝酸 (NO_3^-)、硫酸 (SO_4^{2-})、重炭酸 (HCO_3^-)、ナトリウム (Na^+)、カリウム (K^+)、マグネシウム (Mg^{2+})、カルシウム (Ca^{2+})、シリカ (SiO_2) などの無機溶存成分を環境トレーサーとして用いた。さらに、降雨時に発生する表面流出に注目し、流出土砂中に含まれるセシウム $137(^{137}Cs)$ 、ベリリウム $7(^7Be)$ 、鉛 $210(^{210}Pb)$ などの放射性同位体を用い、土壌面における侵食・堆積域の特定を行った。

本研究における最大の特徴は、マルチ時空間スケールにける3圏(水圏・気圏・地圏)の各種サンプリングである。森林域(Forest site:FOR)および草原域(Kherlenbayan-Ulaan:KBU)を中心に、2003年6月中旬から10月初旬にかけ約2週間の集中観測・サンプリングを計4回実施した。航空機観測と地上観測とを同期させ、水平スケール約4000 km²、高度約1000 m、地中深度数約50 mまでを対象に、水蒸気、降水、地中水、河川水等の一斉サンプリングを行った。降水については、季節変動をみるため、2002年10月から2004年9月の間サンプルを採取した。地下水、河川水、湧水などの陸水については、ヘルレン川上流の森林域(FOR)から中下流の草原域(KBU, Jargalthaan:JGH, Delgerhaan: DGH, Darhan:DH, Underhaan:UDH)に至る広域を対象に、2002年8月、2003年7月、同年10月、2004年6月に各々10日間程度の踏査を行い、水サンプルを採取した。また放牧状態が異なる面積約400 m²の試験区を複数設定し、流出土砂のサンプリングを行った。さらに地中水流動場の物理特性解析を目的とし、上流のMongonmorit(MNG)と中流のKBU周辺において、ヘルレン川を交差する測線(水平距離約20 km)を対象に比抵抗物理探査(地中電磁波探査:TDEM法)を実施した。

こうして得られた各種データを解析するとともに、実測データをもとに、地下水流動モデルを構築しフィールドにおける現象を再現した。また、グループ4と共同で、領域気候モデルを基礎とした同位体循環モデルを構築し、対象地域における水蒸気・降水の起源を推定した。

ii) 水蒸気・降水の起源—どこから来るのか—

図3.3.1に、2002年10月から2003年9月の森林サイト(FOR)と草原サイト(KBU)における、月降水量、月平均気温、降水および水蒸気の酸素安定同位体比($\delta^{18}O$)変動を示す。降水の $\delta^{18}O$ は、両サイトとも冬季に低く夏季に高くなる季節変動を示し、水蒸気におけるそれも同様の变化傾向を示した。このことは、観測地点における降水と水蒸気が、同位体的に平衡状態であることを示唆している。この特徴は、モデルによって大気水蒸気中の安定同位体比を再現した研究(たとえば、Yoshimura et al., 2003)においても示されていたが、従来水蒸気の実測データが不足していた。本研究により、従来の研究が実測データをもって裏付けられたことになる。図3.3.2に森林サイトと草原サイトにおける、大気水蒸気中の $\delta^{18}O$ の高度0.5 mから1000 mにおける鉛直プロファイルを示す。図中の波線は、観測日における大気混合層上端の推定高度を示しており、 $\delta^{18}O$ データは地表面の影響を受ける混合層中から自由大気下端までの状況を網羅しているものと思われる。ユーラシア大陸に降

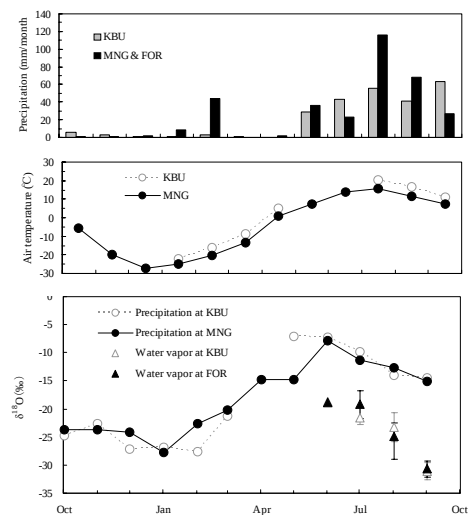


図3.3.1 森林サイト、草原サイトにおける降水量、平均気温、降水・水蒸気の $\delta^{18}O$ の変化。水蒸気の横棒は、最大・最小値を示す(Tsujimura et al., 2006)。

水をもたらす水蒸気の起源を特定する上で、水蒸気中の安定同位体情報はきわめて重要であるが (Kurita et al., 2003), 北東ユーラシアの内陸部において、水蒸気中の $\delta^{18}\text{O}$ が混合層から自由大気に至る高度で実測された例は従来ほとんど無く、本データの存在はきわめて重要である。水蒸気中の $\delta^{18}\text{O}$ は、地表面近くで高く、上空ほど低いという大まかな傾向を示す。従来の研究では、水蒸気中の δ 値は混合層中では均一であり、混合層より高い高度で低下するとされていた。本研究の結果は、混合層中において地表面近くの水蒸気が、植生や土壌面からの蒸発散水の影響を強く受けることを示している。また、観測日が1日違うことにより、 $\delta^{18}\text{O}$ プロファイルが顕著に異なる場合 (8/21 と 8/22) とほとんど変化しない場合 (8/22 と 8/23) とがみられる。これは、8/21 から8/22 にかけて、対象地域一帯における大気が入れ替わったことによるもので、このことは両日の気温や相対湿度の鉛直分布データからも示唆される。このように、水蒸気の安定同位体比は、地表面からの局地的な水蒸気プロセスだけでなく、総観スケールの大気場も反映することが示された。

水蒸気、土壌水、植生における $\delta^{18}\text{O}$ の実測データから、大気水蒸気に対する土壌水起源水、および自由大気水蒸気の寄与率、また蒸発散における蒸発と蒸散の割合を求めることが可能である (Moreira, et al., 1997)。これによれば、混合層大気水蒸気中に占める地表面起源の水蒸気

(蒸発散により大気中に付加される水蒸気)の割合は、森林サイトにおいて30~46%, 草原サイトにおいて25~44%であった(2003年7~8月)。また、蒸発散に占める蒸散の割合は、森林サイトにおいて60~73%, 草原サイトにおいて35~59%であった。大気中の水蒸気において、地表面起源の水蒸気の占める割合が半分以下であるという解析結果は、モンゴル草原において、大気水蒸気は一度降水として地表面に浸透した水(いわゆる再循環水)によって主に形成されるという考え方(安成, 2003)とは相容れない。この考え方は、大気水収支解析に基づいたものであり、安定同位体情報など水そのものの特性を考慮したものではなかった。本研究により、実測データに基づき、モンゴル草原における水蒸気が必ずしも草原からの蒸発散水のみによって形成されているのではないことが示された。図3.3.3は、以

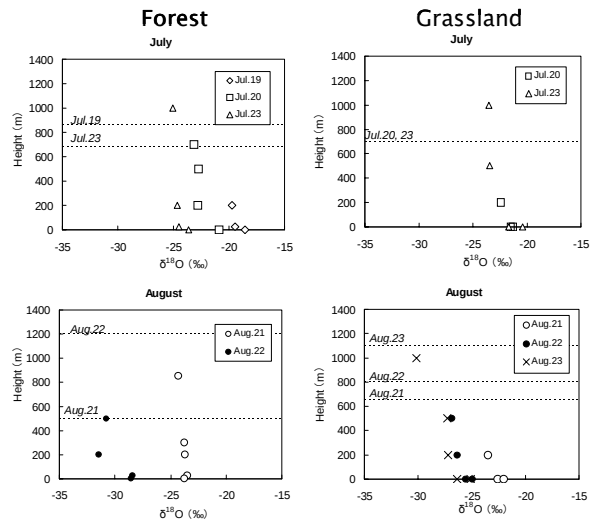


図3.3.2 森林サイト、草原サイトにおける大気水蒸気の $\delta^{18}\text{O}$ の鉛直プロファイル (Tsujiura et al., 2006). 波線は、観測日における大気混合層上端高度を示す。

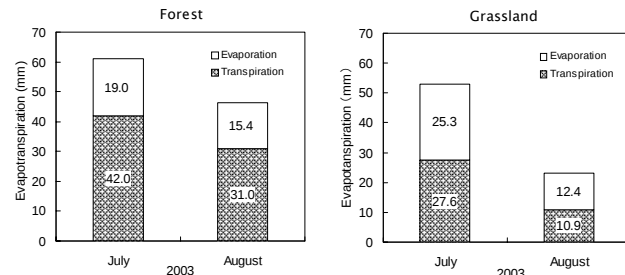


図3.3.3 森林サイト、草原サイトにおける7~8月の月蒸発・蒸散量。

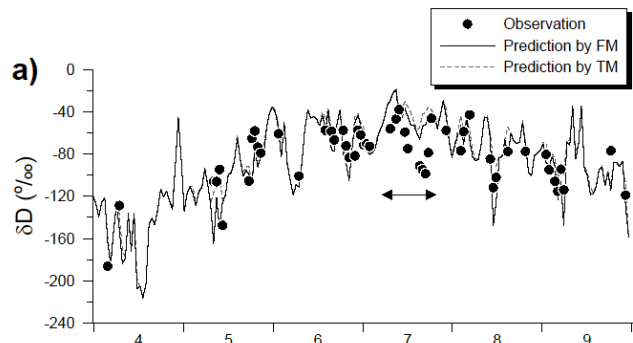


図3.3.4 2003年4月から9月における日単位降水の安定同位体比実測値と、Rayleigh過程によるモデルによって再現した推定値 (Yamanaka et al., 2006). FM: 温度考慮; TM: 雨量考慮。

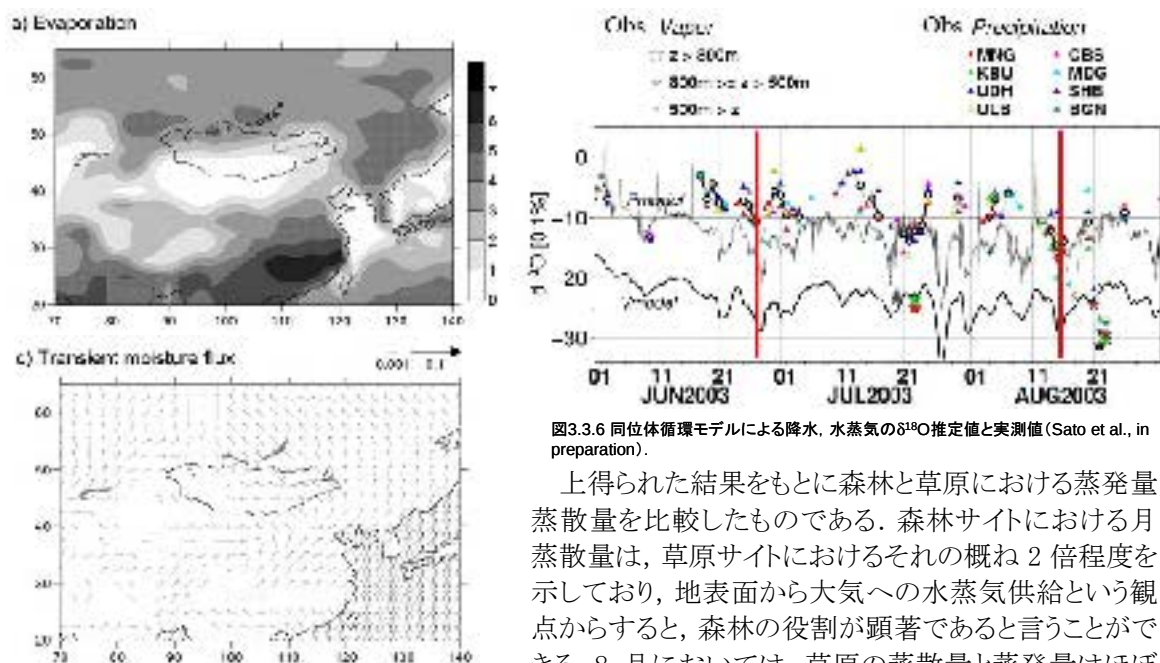


図3.3.5 2003年7月における a) 日蒸発量分布 (mm/d), c) 700 hPa ($\text{kg kg}^{-1} \text{m s}^{-1}$) における水蒸気フラックス (Yamanaka et al., 2006).

図3.3.6 同位体循環モデルによる降水、水蒸気の $\delta^{18}\text{O}$ 推定値と実測値 (Sato et al., in preparation).

上得られた結果をもとに森林と草原における蒸発量、蒸散量を比較したものである。森林サイトにおける月蒸散量は、草原サイトにおけるその概ね2倍程度を示しており、地表面から大気への水蒸気供給という観点からすると、森林の役割が顕著であると言える。8月においては、草原の蒸散量と蒸発量はほぼ同程度である。大気水蒸気に対するモンゴル草原の役割を一般化するには、月単位のデータをより増やすなどの必要があるが、従来言われていたように、大気の再循環に対する草原の役割を過剰に期待することは

は慎むべきであることを、本データは示唆している。

図3.3.4は2003年4月から9月における日単位降水の安定同位体比(δD)の実測値と、Rayleigh過程に温度と雨量の効果を考慮したモデルによって再現した推定値である (Yamanaka et al., 2006)。両者は概ね良く一致しており、モンゴル東部における降水の安定同位体比が、単一の水蒸気塊からの凝結過程によってほぼ説明されることが示された。

しかし、7月においては明らかに推定値が実測値を顕著に上回り、別の水蒸気起源、すなわちモンゴル草原以外からもたらされる水蒸気が降水の安定同位体比を低下させている可能性が示唆された。降水の δD 値が顕著に低くなるときに、モンゴル上空において南東風が卓越すること、中国南東部の

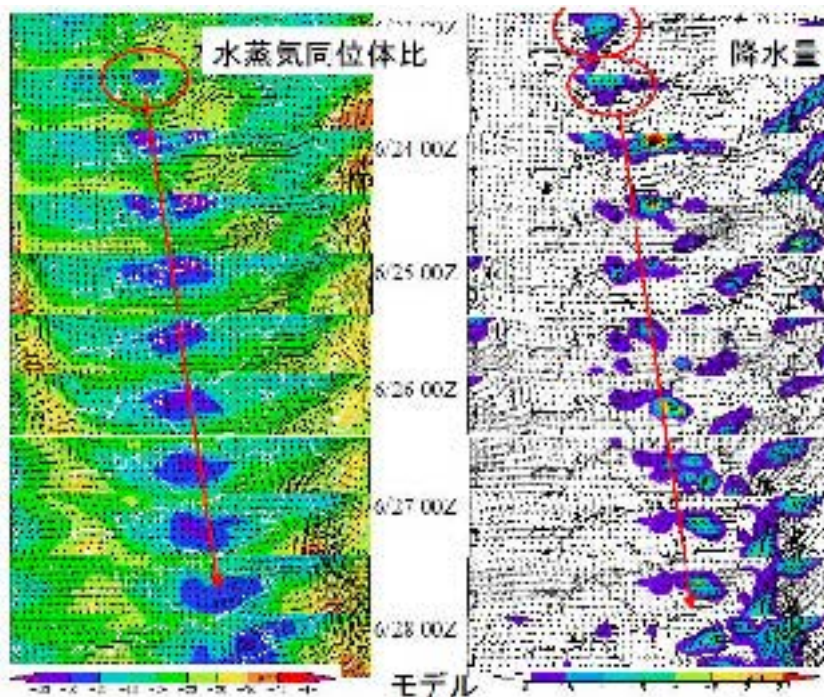


図3.3.7 同位体循環モデルによる水蒸気同位体比および降水量の時空間変動 (Sato et al., in preparation).

水田地域において 7 月の蒸発量が顕著に高いこと、また水蒸気フラックス分布が中国南東部からモンゴルに向かう流線を示すこと(図 3.3.5)などから、降水の δD 値を低下させる水蒸気の供給源として、中国南東部の水田地域からの蒸発水の可能性が挙げられた。

一方、領域気候モデルを基本とした同位体循環モデルによっても、夏季における降水の同位体比を低下させる要因として、モンゴル以外からの水蒸気の流入の可能性が示された (Sato et al., in preparation). 図 3.3.6 は、

降水および水蒸気の $\delta^{18}O$ における、実測値と推定値の時系列変化である。同位体循環モデルによる $\delta^{18}O$ 推定値は、実測値における顕著な低下も良好に再現しているように思われる。モデルによれば、降水の δ 値が低下するのは、モンゴル西部の山岳域から降水を降らせながら東部に移動してくる水蒸気によってもたらされるものと考えられる(図 3.3.7)。さらに同位体循環モデルを基本に、各地域で蒸発した水をトレーサーとするマルチ・トレーサーモデルを構築し、モンゴルにおける水蒸気起源の特定を行った(図 3.3.8)。その結果、モンゴルにおいては夏季にもたらされる降水の起源として、シベリア域および中央アジア域からの水蒸気が卓越していることが示された。

Yamanaka et al. (2006)による解析結果も、Sato et al. (in preparation)によるモデルも、モンゴルにおいて降水をもたらす水蒸気は、モンゴル以外の地域(中国南東部、中央アジア、シベリア)からもたらされる部分が多いことを示した。この結果は、Tsuji-mura et al. (2006)が水蒸気の成分を、同位体を用いて地表面起源成分と自由大気起源成分とに分離した結果とも整合している。すなわち、北東ユーラシア内陸部における降水が、大陸スケールの水蒸気循環プロセスと、ローカル・スケールの地表面プロセスによってもたらされていることが示された。従来まったくのブラックボックスであった、北東ユーラシア内陸部の水蒸気起源について、本研究のもたらした知見は、きわめて重要である。

iii) 地下水・河川水の起源と交流—どこで供給されるのか—

対象地域であるヘルレン川上流域は、不連続永久凍土の南限地域に相当すると言われており(Sharkhuu, 2001)、凍土の存在が地下水涵養や流動に影響を及ぼすことが予想さ

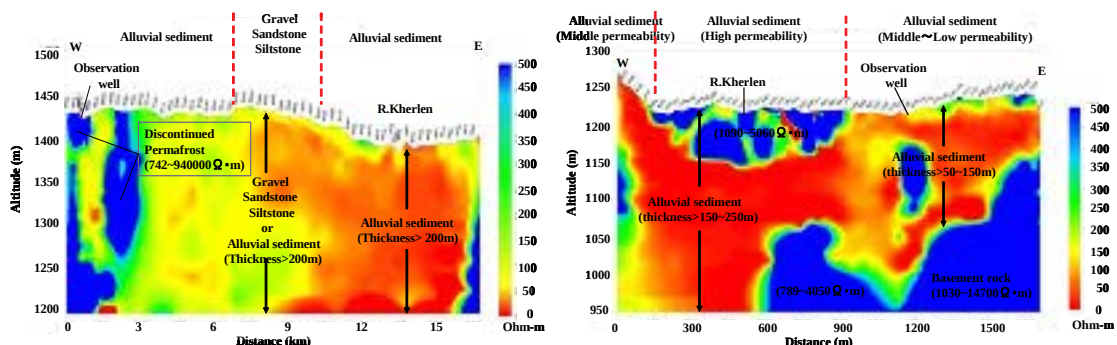


図3.3.9 上流域MNG付近における地中比抵抗探査(TDEM法)の結果(樋口, 2005)。ヘルレン川に交差する断面、下流から上流をみる。

図3.3.10 中流域KBU付近における地中比抵抗探査(TDEM法)の結果(樋口, 2005)。ヘルレン川に交差する断面、下流から上流をみる。

れた。すなわち、地下水の起源としての永久凍土融解水と、不透水層としての永久凍土の存在である。図 3.3.9, 3.3.10 に、MNG と KBU 付近において実施した地中比抵抗物理探査(電磁波探査:TDEM 法)の結果を示す。これらをみると、不連続永久凍土はヘルレン川上流の MNG 付近において若干みられるのみで、中流の KBU 付近では全く確認されなかった。MNG において深度 50 m の観測井掘削時(2003 年 6 月下旬)に測定した地中温度は、深度 7 m 以深においてマイナス値を示したが、一方 KBU では深度 50 m まで 2~3 °C を示し、電磁波探査の結果と調和的であった。以上のことから、当対象地域において不連続永久凍土の存在は、地下水流動に対し大きな影響を及ぼしていないことが推察された。

図 3.3.11 に、ヘルレン川流域における河川水および地下水の無機溶存成分特性の空間分布を示した。地下水の溶存成分濃度は、河川水のそれに比較し顕著に高い傾向が認められる。また、河川水は Ca^{2+} と HCO_3^- が主要構成成分であるのに対し、地下水は空間変動がきわめて顕著であり、水質特性がヘルレン川本流ときわめて異なる。このことから本流域においては、河川水と地下水の交流は顕著ではないという特徴を指摘することができる。上流の MNG から下流の UDH に至るヘルレン川流域において、本流・支流河川の悉皆流量観測を行った結果を基に(2004 年 6 月)、河川水における区間水同位体収支モデルを構築し(図 3.3.12)、地下水と河川水の流量を推定した。その結果、上流の MNG から中流の BGN 間(水平距離 58 km)における河川への地下水流出量は $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ($1.7 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}$)、BGN から下流の UDH 間(水平距離 247 km)におけるそれは $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$ ($1.1 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}$) と見積もられた。MNG, BGN, UDH の各地点における河川放流の流量が各々、 $10.8 \text{ m}^3/\text{s}$, $12.1 \text{ m}^3/\text{s}$, $12.6 \text{ m}^3/\text{s}$ であることを考慮すると、地下水から河川へ供給される量は河川流量の約 10 %に過ぎない、言い換えれば、河川から蒸発で失われる分に相当する量が地下水から補填され、上流から下流までの流量がほぼ維持されているとすることができる。これは、地下水と河川水の水質特性から示唆されることとも、調和的である。

図 3.3.13 は、降水、本流河川水、地下水の $\delta^{18}\text{O}$ と標高の関係を示したものである。

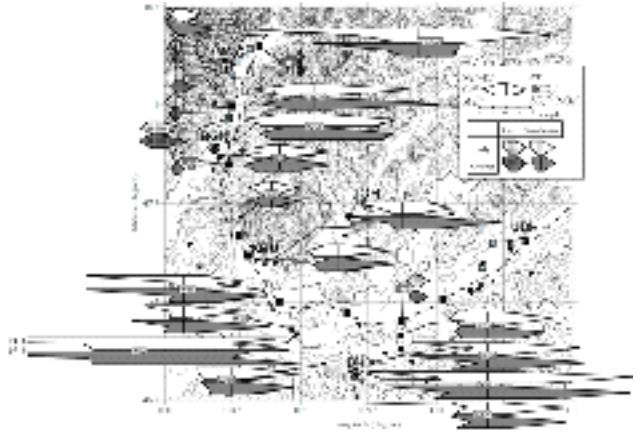


図3.3.11 ヘルレン川流域における河川水、地下水の水質特性の空間分布 (Tsujimura et al., 2006)。

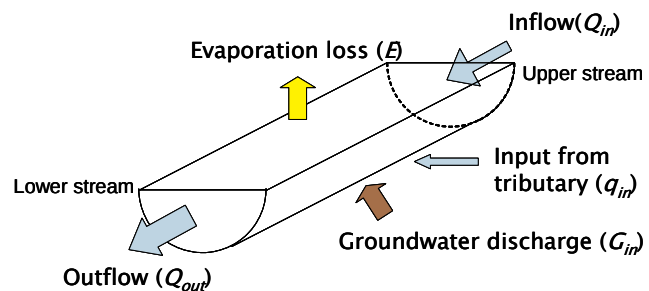


図3.3.12 ヘルレン川における区間水・同位体収支モデル。

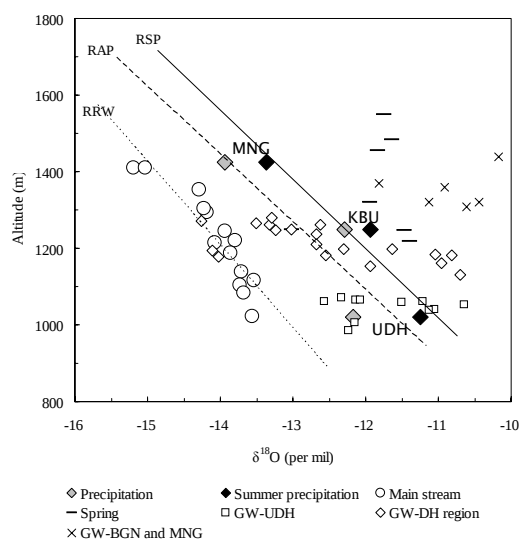


図3.3.13 降水、河川水、地下水における $\delta^{18}\text{O}$ と標高の関係 (Tsujimura et al., 2006)。

河川水の $\delta^{18}\text{O}$ は、降水および地下水のそれに比較し顕著に低い値をとる。一般的に降水の $\delta^{18}\text{O}$ と標高の間に線型関係があることを考慮すると、最上流の河川水は標高1650 m以上にもたらされた降水によって涵養されているものと考えられる。ヘルレン川流域の最高標高は2500 mであるので、本流の河川水は最源流域の降水を起源とし、途中蒸発によって失われた分を地下水から補填されながら下流のUDHまで流下しているものと思われる。このことは、乾燥・半乾燥地域の恒常河川は周辺地下水によって維持される、というような単純な河川-地下水交流関係の図式が成り立たないことを示しており、乾燥・半乾燥地水文学に新たな知見を加えたと言える。

図3.3.14は、地下水の $\delta^{18}\text{O}$ とd-excessの関係を示したものである。d-excessは水体に対する蒸発の影響の強度を示すパラメータであり、d-excessが低いほどその水は蒸発の影響を強く受けていることを示す。また $\delta^{18}\text{O}$ も、蒸発の影響を受けると高くなる傾向がある。しかしながらこの図からは、乾燥度合が高い地域の地下水(より下流、あるいはより低緯度; DH, UDH など)の方が、蒸発の影響をより強く受けているという傾向は認められない。むしろ上流域で比較的湿潤な条件下にあるMNGとBGN地域の地下水に、最も蒸発のシグナルが強く現れている。このことは、地表面に浸透した水はすべて最終的に地下水を涵養するという湿潤地域における一般則が、半乾燥地域において成立しないことによるものと考えられる。すなわち、蒸発の影響をきわめて強く受けた水は、その大部分が蒸発によって失われ、結果的にその痕跡(シグナル)が地下水に伝達されない。こうした現象は、近年いくつかの乾燥域において報告があるが、本研究においても見いだされた。

図3.3.15に地下水中における、トリチウム(^3H)濃度の空間分布を示す。地下水の ^3H は、上流域で比較的高く40 TU程度を示す(Type A)、下流域では10 TU未満と顕著に低い値を示す(Type C)。中流域では、 ^3H の高い地下水と低い地下水とが混在する。モンゴルを中心とした北東ユーラシア地域における降水の ^3H 濃度は、図3.3.16に示されるように、核実験に伴う1960年代前半をピークとした時間変動を示す。この変動を利用し、 ^3H の放射壊変

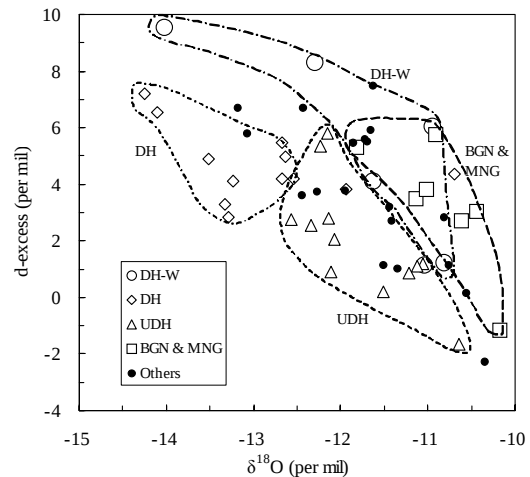


図3.3.14 各地域における地下水の $\delta^{18}\text{O}$ とd-excessの関係 (Tsujiura et al., 2006).

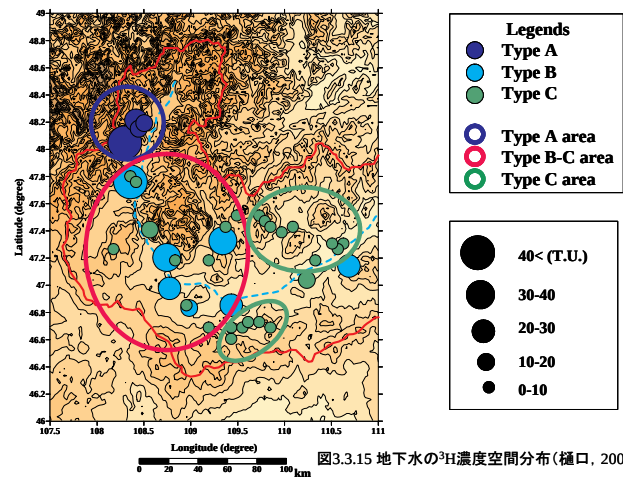


図3.3.15 地下水の ^3H 濃度空間分布(樋口, 2005).

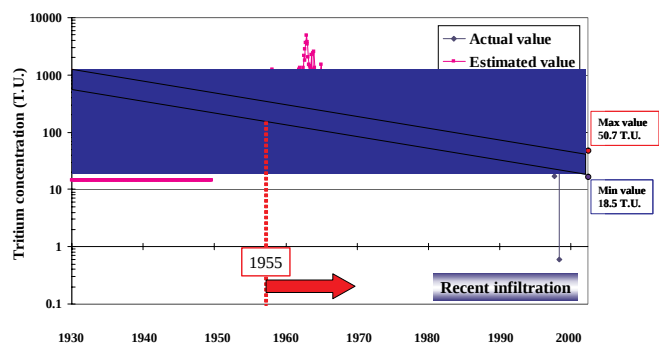


図3.3.16 降水の ^3H 濃度時系列変化と、放射壊変を考慮した地下水の滞留時間推定結果(樋口, 2005).

を考慮することによって、地下水あるいは河川水の滞留時間(入替時間)を推定することが可能である. Type A に属する上流域の地下水は 1955 年以降, 主として 1970 年以降に涵養された比較的新しい地下水であるものと推定される. 一方, Type C に属する下流域の地下水は 1955 年以前, 主として 1900 年以前に涵養された比較的古い地下水であると見積もられる.

^3H を用いた地下水の滞留時間推定結果を再現する目的で, 3 次元地下水シミュレーションを行った(樋口, 2005). ダルシーの式と連続の式を基本とし, 定常 3 次元の地下水流動基本方程式(1)を用いて解析を行った.

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

ここで, K : 飽和透水係数, h : 水理水頭である. 上流部および中流部に各々試験流域を設定し, 実際に水サンプリングを行った井戸を終点とする流動経路を再現し, 滞留時間を求めた. その結果, 上

流部および下流部の地下水は共に地形に規定される局地流動系からなり, 上流部の滞留時間は 6~30 年と比較的短いのにに対し, 中流部のそれは 30~190 年と長いことが示された(図 3.3.17). これらの推定滞留時間は,

トリチウム濃度より求めた滞留時間とほぼ整合する. ところで, 中下流の草原地域で観測された井戸は, 深度 2~5 m 程度の人力で掘られたと思われるものが多くあった. またいずれの井戸も, 微地形の凹地に設けられていた. 一つの井戸で, どの程度の間人々や家畜が維持されるのか, 言い換えれば, 一つの井戸はどれだけの水量を供給できるのかという問題は, モンゴル草原の地下水循環を考える上で, きわめて根本的な問題である. そこで, 現地において集水域(地形的な流域界)が比較的容易に特定できる井戸について, ポータブル GPS を用い簡易な測量を行い, 集水面積を求めた. ある井戸における水収支は, 以下のように表される.

$$A(P - E) - G_{out} - U = \Delta S \quad (2)$$

ここで, A : 集水面積, P : 降水量, E : 蒸発散量, G_{out} : 地下水流出量, U : 揚水量, ΔS : 貯留変化量(水位変化量)である(図 3.3.18). いま定常状態を仮定し, 井戸の水位変化を一定に保つためには $\Delta S = 0$ となるように U を決めてやればよい. こうして, ある井戸を持続的に利用するための, 可能揚水量を求めることが可能である. 表

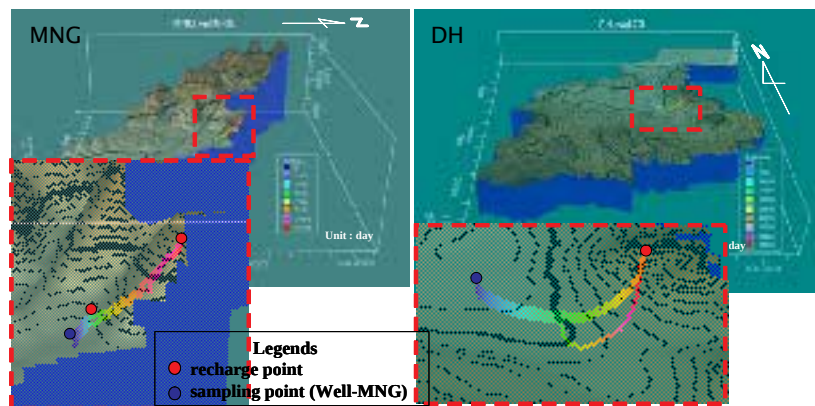


図3.3.17 上流域(左:MNG)と中流域(右:DH)を対象に行った地下水シミュレーションの結果(樋口, 2005).

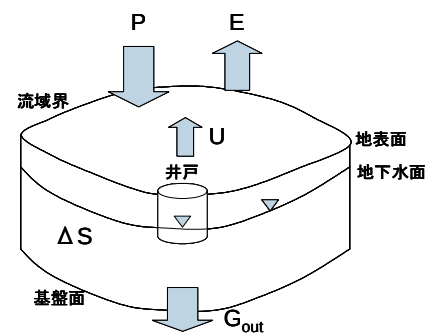


図3.3.18 任意の井戸における水収支模式図.

表3.3.1 各井戸における可能地下水揚水量の試算結果.

Well No.	Location	Area (m^2)	P (mm/y)	G_{out} (m^3/y)	U (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

3.3.1 に、中下流域 4 ヶ所の井戸における計算結果を示した。W94 は集水面積がほかに比べ狭いため、可能揚水量が 20 m³/day と少ないが、他の 3 つは 100~200 m³/day のオーダーである。いま仮に、遊牧民一人当たりの平均水消費量を日本人のその 10 %程度 (30 L/day) と仮定すると、一つの井戸における利用可能人口は、670~6230 人と見積もられる。また、家畜一頭当たりの水消費量を 100 L/day と仮定すると、井戸当たりの利用可能頭数は 200~1870 頭と見積もられる。一見十分な量であるようにも思えるが、モンゴルにおける年降水量変動率(標準偏差/年平均降水量)が 20 %を超える(新居, 2006)ことを考慮すれば、これらは脆弱な量であると言わざるを得ない。もちろん一般化するには、より多くのデータを必要とするが、草原の水供給が微妙なバランスの上に成り立っていることを指摘しておきたい。

iv) 植物の水利用

森林サイトの丘陵地尾根部からヘルレン川河岸にかけ、植生、河川水、降水の安定同位体比を測定し、植物が利用している水の種類を特定した(表 3.3.2)。その結果、尾根から斜面にかけての植物は、主に夏季の降水を利用しており、河岸域の植物は河川水を利用してゐるものと判断された。ただし河岸の植物には、河川水型と夏季降水型の両方がみられる。この違いが何によって生じるのかは、現在のところ不明である。

v) 広域の土壌侵食・堆積域分布の推定

BGN 近傍の試験流域において、土壌コアサンプルを採取し ¹³⁷Cs 存在量の空間分布を明らかにした。各土壌サンプル採取地点の存在量データをもとに 15 m グリッドを作成し、各グリッドについて、リファレンス・インベントリー(この地域の積算 ¹³⁷Cs 降下量)に対する ¹³⁷Cs 存在量の増減率を調べ、Profile Distribution Model を用いて土壌侵食量の空間分布を算出した。次に、各々のグリッドについて、ASTER 画像から推定した NDVI の推定値と土壌侵食量の関係を調べた(Kato et al., in preparation)。斜面の傾斜区分を行い、それぞれの区分について NDVI と土壌侵食量の相関を調べた。この結果を用い、試験流域の範囲を含む ASTER 画像と相対 DEM を用いて、NDVI と斜面の傾斜角を推定し、土壌侵食量の推定を行った。図 3.3.19 は、放射性同位体の分析から得られた土壌侵食量と、NDVI と斜面の傾斜角を用いて推定した土壌侵食量の関係を調べたものである。こうして得られた結果を基に、広域における土壌侵

表3.3.2 森林サイト(尾根)からヘルレン川に至る斜面に生育する植物の樹幹水における $\delta^{18}\text{O}$ (Li et al., 2006)。

Species	Position	Elevation (m asl)	Distance from the river (m)	June (DOY)	July (DOY)	August (DOY)	September (DOY)
Larch	Flux tower	1630	6810	-13.8 ± 0.6 (167)	-10.6 ± 0.9 (200)	-13.2 ± 0.2 (231)	-10.5 ± 0.5 (273)
Cinquefoil	Flux tower	1630	6810			-12.7 ± 0.4 (231)	-10.4 ± 1.2 (273)
Larch	Top of the slope	1560	5940	-11.4 ± 0.4 (167)	-8.6 (202)	-10.6 ± 0.5 (231)	
Cinquefoil	Top of the slope	1560	5940			-12.3 ± 0.3 (231)	
Cinquefoil	Middle of the slope	1490	2230			-11.7 ± 0.1 (231)	
Cinquefoil	Foot of the slope	1430	1340			-10.1 ± 0.2 (231)	
Cinquefoil	River side	1410	6			-11.4 ± 0.2 (231)	
Poplar	River side	1410	3			-13.8 ± 0.2 (231)	
Willow	River side	1410	3			-14.4 ± 0.1 (231)	
River water	River	1410	0		-15.3 (202)	-14.1 (231)	-15.0 (273)
Precipitation water	Mongonmorit	1450	25000	-13.7 (134-154)	-9.4 (170-198)	-12.1 (203-228)	-13.5 (232-272)

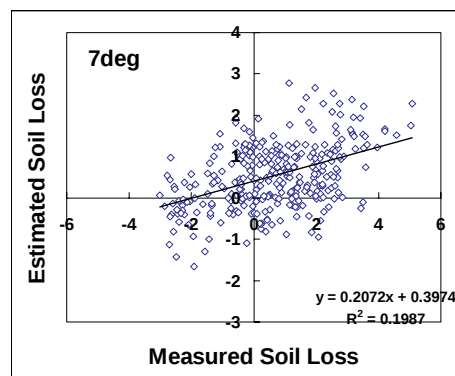


図3.3.19 放射性同位体の分析から得られた土壌侵食量と、NDVIと斜面の傾斜角を用いて推定した土壌侵食量の関係(Kato et al., in preparation)。単位は ton/ha/y。

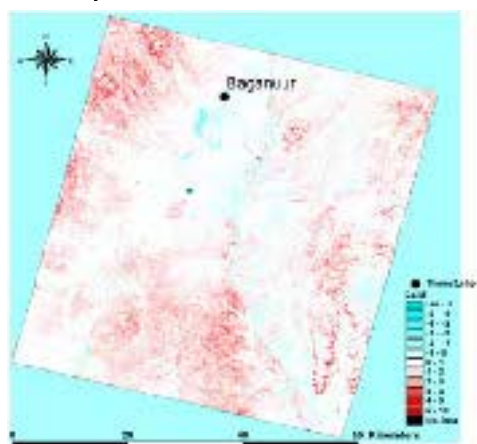


図3.3.20 推定された広域土壌侵食量の空間分布(単位: ton/ha/y) (Kato et al., in preparation)。

食量の推定を行った結果が、図 3. 3. 20 である。斜面尾根部において侵食量が多い傾向が認められた。今後は、モンゴル全域における土壌侵食の実態把握が可能になるものと期待される。

(2) 研究成果の今後期待される効果

本研究では、各種の環境トレーサーをマルチに駆使し、対象地域の水・物質循環プロセスを明らかにすることを目的としたが、実態解明およびモデル化も含め、5 年間というプロジェクト期間においては、基本的にほぼ達成されたと考えている。とくに水および土砂を対象とし、これだけ多種多様な環境トレーサーを一つの対象流域に投入し、地上観測から航空機観測に及ぶ時空間スケールでプロセス解明を行った研究は、国内組織による研究プロジェクトとしては従来例をみないものであった。それだけに研究期間中多くの困難も存在したが、最終的にプロセス解明にとどまらず、実測データやそれを基にした現状理解に基礎をおき、空間的なアップスケール、およびモデル化への道筋をつけられたことは、従来行われてきた同種の研究プロジェクトと比較しても特筆すべき点であろう。今後は、本研究で得られた scientific な理解を基に、より応用的な側面、すなわち、あるべき水利用システムや過放牧に対する土壌保全施策の提言などにつなげていくことが必要であろう。本研究において、試行的に単一井戸の可能揚水量推定や、土壌侵食量の広域推定を行っているが、これらは今後さらに発展させるべき研究課題であるものと考えられる。

3.4 メソスケールモデルの構築とモンスーン水循環と北東アジア半乾燥域間の水蒸気輸送プロセスの解明（グループ4）

(1) 研究実施内容及び成果

このグループの目的は、モンゴルを代表とする北東アジア半乾燥域の乾燥気候域の形成メカニズム・降水気候学の実態・気候変動に影響する要因を、データ解析と領域気候モデルを用いて明らかにすることである。研究成果は、1) 観測データや再解析データを基に乾燥域としてのモンゴルの降水気候学を明らかにする研究と、2) 乾燥域を扱えるように改良した領域気候モデルを使った乾燥域の形成メカニズム、及び将来予測の研究に分類される。

降水気候学の研究においては、モンゴルの雨期には7月中旬に「雨期中休み」が存在することを始めて指摘し、そのメカニズムも解明した(3-4-iii)。また、モンゴルにおける降水の日変化の実態を詳細に記述するとともに、土壌水分や低気圧に伴う雲分布が降水の日変化に大きな影響を及ぼすことを、データ解析と数値実験を併用して、明らかにした(3-4-iと3-4-iii)。

領域気候モデルを使った研究の成果で特筆すべきことは、北東アジアの乾燥域の形成・年々変動には、チベット高原の対流活動とジェット気流の位置の変動が重要な要素であるということを明らかにしたことである。領域規模の降水システムの力学・熱力学を再現できる領域気候モデルならではの研究成果である(3-4-ii)。また、領域気候モデルを使った温暖化実験と砂漠化実験により、モンゴルでは地球温暖化・砂漠化に伴い降水量は20mm/3ヶ月ほどの変動が起これと考えられ、気温は地球温暖化に伴い約2.5℃増加するが、砂漠化が起きても0.5℃程度しか上昇しないと結論された。そして、砂漠化に伴う降水・気温の変動は年々変動が大きいという将来予測にとって重要な知見が得られた。(3-4-ii)。

また、気候変動が植生に及ぼす影響を考察する立場から、現在のモンゴルの気候状態における気象要素の年々変動と植生変動の関係を調べた。7-8月の植生活動は6-7月の降水量の他に、冬期の気温とも統計的に有意なラグ相関を示す地点が多いことを明らかにした。それらの知見を基に、1ヶ月前までの気象データから、7-8月の植生活動度が予測できる可能性を指摘した(3-4-iv)。

i) 北東アジアの乾燥域の地表面過程と水蒸気・雲・降水過程との相互作用

地表面過程と雲の発生頻度 (Sato et al. 2006b の抜粋)

数値モデルを用いた研究により、乾燥地域における植林や農業灌漑など、人為的な地表面状態の改変は領域規模の気候や雲分布を変化させることがあることが指摘されている(e.g. Xue and Shukla, 1993, 1996; Lee and Kimura, 2001)。一方、土地利用のコントラストの大きな地域では降水や雲の出現頻度が大きくなるとの実証的な研究は、ごく少数であるが、これまで米国で報告されている。また、数値モデルにより、より湿潤な地域で降水が降りやすくなるとの報告もある。しかし、ここで報告するような大規模に灌漑され周辺の乾燥地側で雲や降水が多くなる事例があることは知られていなかった。

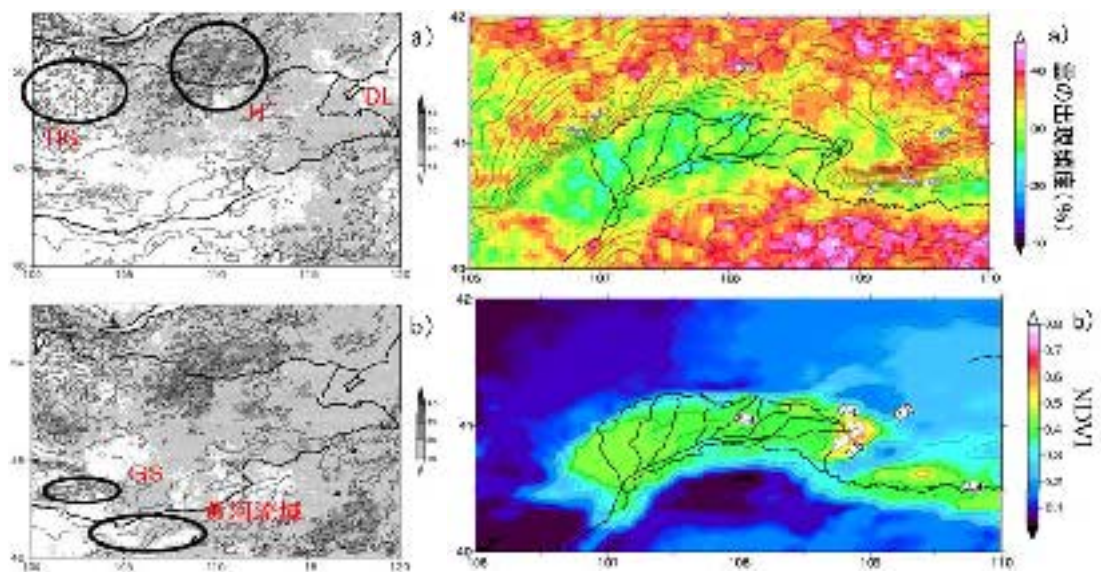
ここでは雲の出現頻度に着目して、北東アジア乾燥域を対象として、地形と植生が地域の気候に及ぼしている実態を調査する。まず、モンゴル周辺における雲の出現パターンの特徴を調べるため1998年から2001年の4年分の8月のGMS雲画像データを解析した。可視画像による反射率が閾値0.5を超えたグリッドを雲に覆われているグリッドと仮定し、各画素毎に雲の出現頻度を解析し、高解像度のMODISを利用して雲の事例を調査した。

雲の発生頻度と起伏： 図3.4.1aに11時における雲の頻度分布図を示す。モンゴル北部のヘンティ山脈(図中のHT)に対応して雲の頻度の高い領域(影の濃い領域)

が見られる．一方，西部のハンガイ山脈（HG）では頻度が相対的に低いことが分かる．ヘンティ山脈では朝 8 時において既に周囲に比べて頻度が高くなっていることから，谷風循環だけではなく，斜面による強制上昇の結果生じた雲も含まれると考えられる．モンゴルの南部の乾燥地帯では雲の出現頻度は 15%以下と低い，それでも山脈に対応して相対的に頻度の高い領域が確認できる．

図 3. 4. 1b に 15 時における雲の頻度分布を示す．ヘンティ山脈だけでなく，ハンガイ山脈の南部やモンゴル南部の山脈（GS）においても頻度が高くなる．モンゴル中央に広がる半乾燥の草原においても午前中に比べて雲の出現頻度が高くなり，20%前後に達する．しかし，モンゴル南部や中国の北部のゴビ砂漠周辺では依然として 15%以下と低い．このことは乾燥地域では雲が生成され難く，外部から移動してきた雲も維持されないことを示している．一方，たとえ乾燥地域であっても地形起伏は雲の発生に非常に大きな影響を及ぼしていることが示された．

雲の発生頻度と地表面状態： 図 3. 4. 1 によるとバイカル湖やモンゴル北部のフブスグル湖，中国のダライ湖（DL）では周囲より頻度が低い．一般に，植生分布や土壌水分量などの地表面状態の違いが，雲の出現分布に影響を与える．図 3. 4. 1b によると乾燥地域においても日中の湖面上では雲が形成され難いことが分かる．ただし，バイカル湖やフブスグル湖は周囲を山岳に囲まれているため山谷風循環の発散場による積雲の抑制効果も大きいと思われる．



3. 4. 1(左)：モンゴル東部における雲の出現頻度分布．単位は％．等値線は標高を表す(間隔は 500m)．
(a) 11 時， (b) 15 時

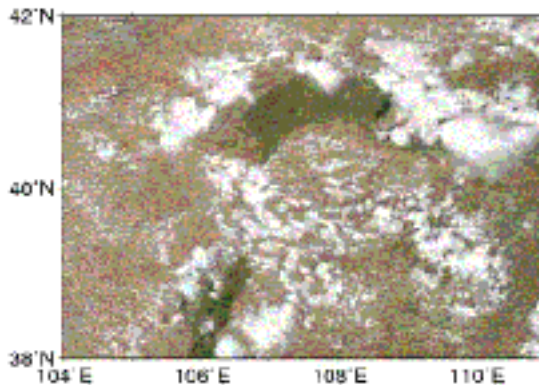
図 3. 4. 2 (右)：黄河中流域における 16 時の雲の出現頻度 (a) と NDVI (b)

モンゴルは北から南に向かって急激に植生活動が減少している地域でもある．図 3. 4. 1 から分かるように，モンゴル南部の乾燥地域では雲の出現頻度が極めて小さい．この結果は一見すると地表面からの蒸発散量の違いが雲の形成パターンに影響を及ぼしているように見える．しかし Sato and Kimura(2005b)で示されているように，乾燥地域では大規模場の強制によって雲の形成が抑制される効果もあるため，地表面被覆と雲の形成との関係を直結することは危険である．

図 3. 4. 2a は 16 時における黄河の中流域の雲の出現分布である．乾燥地域に取り囲まれているものの，この付近の黄河流域では広範囲にわたり灌漑農業が行われている．図 3. 4. 2b に示す NDVI をみても，流域の平野部で植生活動は非常に高く，周囲の乾燥地とのコントラストは明瞭である．また川に沿った地域では標高差はほとんど

どない。

現地時間の 09, 11, 13 時では雲の出現頻度はほぼ一様に 20%以下で低い。15 時になると右側の山岳域でのみ頻度が上昇する。しかし 17 時には全域で頻度が上昇する。とりわけ左岸（北側）で急激に雲の発生頻度が上昇する。左岸の雲活動は水蒸気の移流によるものとは考え難く、平らな地表面上の植生と乾燥地のコントラストによる熱的循環が雲を形成したと思われる。



MODIS/AQUA の高解像度の画像による観測事例でも黄河の周辺部に雲の発生が確認されるが、黄河沿岸の灌漑地域ではほとんど雲が発生しておらず、地表面を直接みることができる。図 3.4.3 は 2005 年 8 月 4 日の現地時間 14.10 の MODIS による雲画像である。この時間には黄河の左岸の灌漑域の外側では雲はかなり大きく発達しており、植生コントラストに起因する降水が生じていることが示唆される。

図 3.4.3：2005 年 8 月 4 日の現地時間 14.10 の MODIS による雲画像

これらの結果から、植生被覆のコントラストは北東アジアの乾燥地域においても、雲や降水システムに影響を与えていると考えられる。ただし、緑地があるからといって、水蒸気のソースとして雲や降水量を増加させるのではなく、むしろ雲や降水は緑地の直上では減少する傾向にあり、逆に、乾燥域側で増加する傾向にある。これは今まで報告されていなかった現象である。

地形と降水の日周期

降水の日変化とトラフ： 湿潤域の降水の日変化の実態やメカニズムに関しては多くの研究がある（e. g. Astling 1984; Iwasaki 2004, Sato and Kimura, 2005a）。しかし、モンゴルを含めて乾燥域の降水の日変化については、細かな時間分解能で観測された降水データがないことから、詳しい研究は皆無に近かった。モンゴル東部については、静止気象衛星データを用いた雲クラスターの日変化の研究があるが（Takeda and Iwasaki, 1987; Kato et al, 1995）、時間分解能は 6 時間と粗く、衛星画像は積乱雲のアンビルを観測しているため、降水の日変化の実態さえ不明であった。

そこで、日変化の実態を把握するために、1997 年から 2002 年までの 1 日 2 回の降水量観測データにより、夏（6, 7, 8 月）の降水の日変化を調べた。現地時間で 9 時から 21 時を昼、21 時から翌日 9 時までを夜として、降水の日変化の大

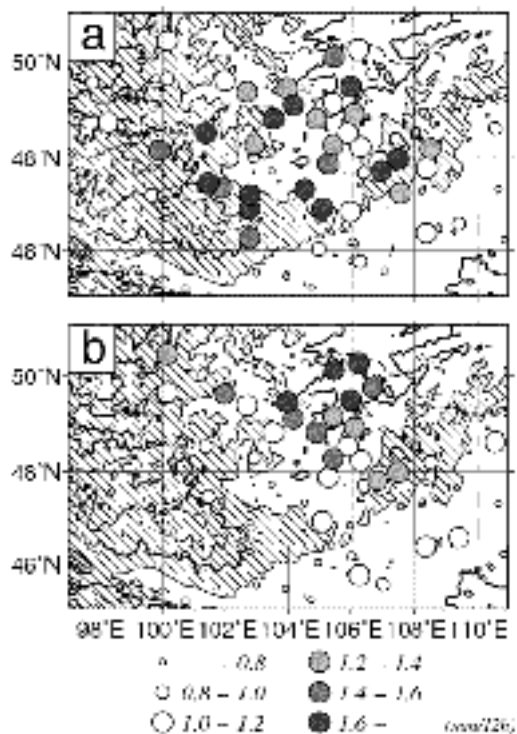


図 3.4.4：1997 年から 2002 年までの夏期の昼の降水量（a）と夜の降水量（b）

きさと地形との関係を把握し、地形や地表面過程の降水に及ぼす役割を明確にすることが目的である。降水量は1日2回しか観測されていないので、これだけで日変動を議論することはできない。そこで静止衛星の赤外面像から推定した降水をもたらし可能性のある対流活動も合わせて解析した。

先ず、雲画像による対流活動の日変化により、降水日を日変化の明確な日(D-case)と不明確な日(0-case)に分類した。図3.4.4はD-CASEの昼(a)と夜(b)の各観測点における平均降水量を丸の大きさと色の濃さで示す。日中は山岳地域で降水が多く、盆地で相対的に少ない。これに対し、夜(図3.4.4b)では山岳では降水はあまり見られず、盆地で相対的に降水量が高い。このような日変化は日本の中部山岳地域と関東平野の夏の対流性降水の地域コントラストとしてよく見られる。また、インドネシアやマレーシアなど熱帯の島々や半島では一年を通してよく見られる現象である。

D-caseと0-Caseについて、平均的な気圧配置を調べて見ると、どちらも低気圧性の気圧分布、すなわちトラフがモンゴルに接近していることが多い。これに対し、日本の夏において日変化を伴う対流性降水が見られるときには、太平洋高気圧に覆われていることが多く、モンゴルの日変化卓越日とは対照的である。日本で日変化を伴わない降水が見られるときの平均的な気圧配置は低気圧・トラフ型であり、この場合はモンゴルの0-caseと一致している。

数値実験による日変化のメカニズム： 領域気象モデルを用いて、D-caseおよび0-caseの典型事例について、数値実験により日変化のメカニズムを調べた。この結果、D-case、0-caseともトラフの移動に伴って降水が発生するが、その強さは0-caseでは太陽周期にはほとんど依存しないことが示された。これは0-caseでは降水量と雲が多く、地表に到達する日射が弱いためと思われる。一方、D-caseでは降水の強さはトラフの位置と太陽周期の両方が関係する。数値モデルで太陽の日周期だけをずらした実験をすると、トラフの進行に伴って降水が現れるが、その強さの変動は太陽周期に同期している。同じトラフでも、午後から夕方に相当する太陽高度のときにトラフが通過すると、降水が最も強化される。

第3-4-iii章でも述べるように、緯度が比較的高く偏西風が強いモンゴルでは、日本の夏や熱帯の島々とは異なり、局地循環による水蒸気輸送は降水の発生頻度の日変化に直接的には寄与しない。ただ、トラフ通過により引き起こされる降水は、雲が比較的小さい場合に限り、太陽周期の影響を強く受け、雨量に日周期変調が加わると見ることができる。さらに詳しい統計的な解析によると、降水の日変化はトラフが浅く南からの水蒸気輸送が比較的小さいときによく見られることが示されている。

ii) 北東アジアの乾燥域の気候変動要因と将来予測

北東アジアの乾燥域の形成要因 (Sato and Kimura, 2005b; Sato 2005; Sato and Kimura 2006 の抜粋)

中国の北部にはタクラマカン砂漠、ゴビ砂漠といった世界でも有数の砂漠地帯が広がっている。これらはアラビア半島-中央アジア-モンゴルへと伸びる広大な乾燥・半乾燥地域の一部としてみることもできる。しかしながら、これらはハドレーセルによる亜熱帯高圧帯にできる砂漠に比べて高緯度に位置する。この北東アジアの乾燥地の形成要因については、冬季については大気大循環モデルなどによりチベット高原の力学効果であるとの説があるが(Broccoli and Manabe, 1992)、この説では夏期の乾燥を説明できない大きな弱点があった。ここでは、領域気候モデルを用いて、夏期の乾燥化のメカニズムを解明する。

数値モデル： 領域気候モデルはGCMに比べて、解像度を高くとれるので、地域規模の降水システムの力学を再現しやすい。モデルの解像度は150kmでチベット高原

を含む広い領域をカバーする。気候形成のプロセスを単純化するため緯度帯平均した NCEP 再解析をモデルの初期値と境界値に用いる。これにより、初期値には擾乱は存在せず、モデルで再現される気候システムは地表面の境界と内部の力学により形成されることになる。

さらにモデルでは陸面粗度や土壌水分を水平一様にしている。これにより、地表状態の違いによる複雑な効果を考える必要はなくなり、シンプルに大気中のプロセスのみを考えることができる。

再現実験： 現実的な初期条件・境界条件による数値実験の結果、チベット高原東～朝鮮や日本にかけての梅雨前線帯の降水がよく再現される (Yoshikane et al. 2001)。また近年 TRMM などにより観測可能になったヒマラヤの降水も再現されている。モデルの結果では中国北部の乾燥地への水蒸気流入は主に北西からであり、天山山脈の北西で水蒸気 Flux の収束が大きい。従って天山山脈が水蒸気流入の障害となっている可能性は否定できない。しかしこの効果については筆者らによる別の研究でタクラマカン砂漠の降水の抑制にはつながらないことがわかっている (Sato 2005)。

带状平均場による数値実験： 带状平均場による数値実験の降水量分布を見るとチベット高原から東に伸びる梅雨前線に相当する降水帯が再現されている。またアジア

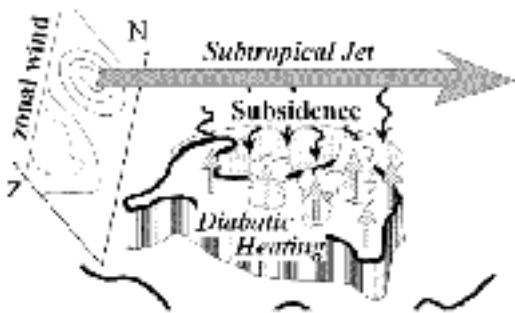


図 3.4.5 北東アジア乾燥域形成要因のメカニズム

アモンスーンによる水蒸気 Flux の大きな東向きの流れが高原の南を通っている。一方、タクラマカンやゴビ砂漠に相当する場所(チベット高原の北)で降水量が少なくなっている。この結果は、砂漠に相当する乾燥域が 6 月平均の陸面からの非断熱加熱と偏西風などの带状平均成分のみで形成されることを示している。

チベット高原上の顕熱・潜熱加熱の影響

は、大規模な大気の流れと相互作用して、チベット高原の周囲に波動的に伝搬する。西への波動伝搬により高原の西側で降水

が抑制されることは以前から知られていた (Manabe and Broccoli, 1990)。

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、強いシアが生じるため、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 (図 3.4.5)。北東アジアの乾燥域の気候変動には対流圏上層のジェットの位置とその季節変化、およびチベット高原の対流活動の変動が重要な要素であると結論づけられる。

土地利用変化と地球温暖化が北東アジアの気候に及ぼす影響の予測比較研究 (Sato et al. 2006; Sato 2006 の抜粋)

北東アジアにおける気温の長期変動： 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、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、夏季の気温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有意なトレンドは見られない (e.g. Yatagai and Yasunari, 1998; Endo et al. 2006)。IPCC3 次報告書および過去の論文から判断すると、モンゴルを含む北東アジアでは、1990

年以降に夏季の気温が上昇していると推察される。モンゴルにおける 7 月の日平均気温、日最低気温、日最高気温の長期変化を調べると、日最高および日平均気温には大き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いる。日最低気温の上昇は、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もある。

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、家畜頭数は短期間で急激に増加している。過去の数値実験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すことから、北東アジア地域における気候の変化は地球温暖化のみならず、放牧圧の増加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と思われる。そこで本研究では、モンゴルを対象とした気候のダウンスケール実験から、地球温暖化および土地利用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。

気候のダウンスケールとは、GCM の予測値を地域の詳細な気候変化の予測へ利用する手法である。その研究の数は少なく、モンゴルを対象にした研究はない。また、温暖化影響と土地利用の変化による地域の気候変化を同じ手法で評価したことは、これまでのダウンスケールの研究にはない特徴であり、これにより気候変動に及ぼす両者の役割を初めて定量的に評価できる。

領域気候モデルによる気候変化実験： 領域気候モデルを用いて、1994 年から 2003 年の 6, 7, 8 月を対象とした 2 種類(計 4 ラン)の実験を行う。今回の解析はモンゴルを中心とした 30km メッシュのネストグリッドについて行った。

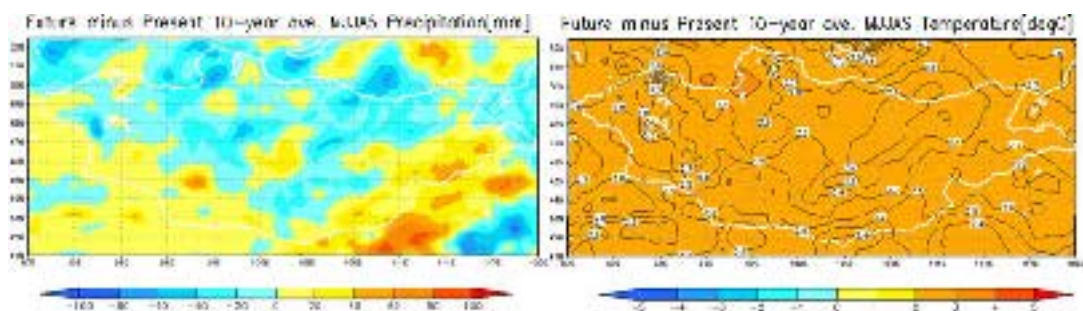


図 3.4.6：2070 年代と 1990 年代の降水量 (a：左) と気温 (b：右) の差

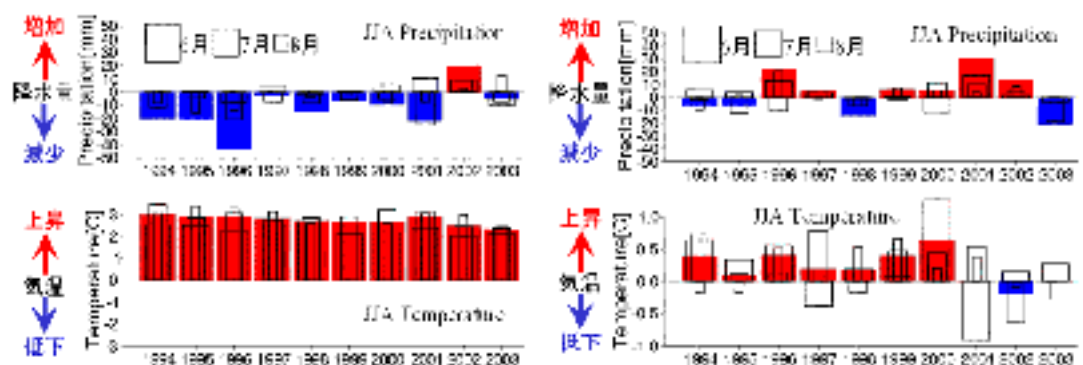


図 3.4.7 (左)：地球温暖化に伴う夏季降水量・気温の変化

図 3.4.8 (右)：土地利用変化(砂漠化)に伴う夏季降水量・気温の変化

地球温暖化実験： 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擬似的な温暖化実験を行う。この手法の詳しい説明や長短所および GCM を用いた力学的ダウンスケールによる温暖化予測との差異については

Sato et al. (2006)で詳しく述べている。

土地利用変化実験： 植生分布のデータとして、USGS による Global land cover characterization を用いて、NCEP/NCAR 再解析データを初期値および境界値とした、6, 7, 8 月の再現実験を行う。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う。

気候変化実験の結果と考察： 図 3.4.6 は 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（簡単のためここでは 1990 年代とよぶ）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示す。図 3.4.6a に示す降水の変化は地域差が大きく、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、40mm 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 3.4.6b 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 3.4.7 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 の範囲で領域平均したものである。地球温暖化実験の結果では、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。図 3.4.8 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℃未満であることが多い。降水量は±20mm 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見えるが、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 20mm/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℃上昇するのに対して、土地利用変化では 0.5℃程度しか上昇しないことが示された。また一般的な提言として、土地利用変化が気候へ及ぼす影響を調べるためには、気象条件の異なる複数の年について実験する必要があることが示された。

iii) モンゴルの降水気候学

モンゴルの降水の季節進行 --- 雨期の中休みの発見 --- (Iwasaki and Nii 2006 の抜粋)

研究の開始当時には、モンゴルの降水気候学について十分な研究が行われておらず、最も詳しい降水の季節変動とその年々変動が記述されているのは植物生態学の教科書であった (Hilbig 1995; Peter et al. 1999)。そこで、RAISE で整備した 9 年間 (1993-2001 年) の

モンゴル地上気象デー

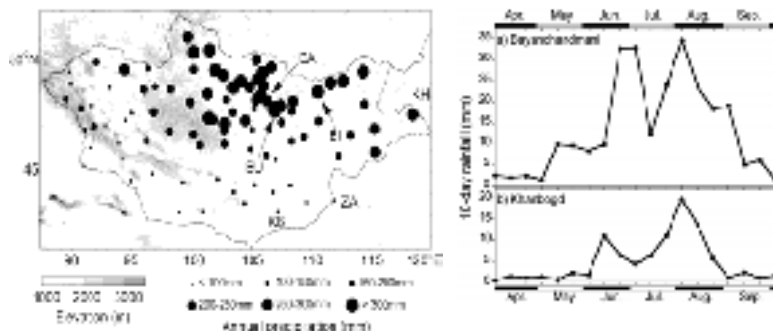


図 3.4.9 (左) : モンゴルの年降水量分布
図 3.4.10 (右) : 年降水量が大きく異なる Byanchandanim (BA) と Khanbodg (KB) 地点の月降水量の季節変化

タを用いて、基本的な降水の季節変化の特徴、および、季節変化を決める要因について解析を行った。

図 3.4.9 は年降水量分布である。モンゴルは北部で降水量が多く(200-300mm)、南に向かうにつれて降水量は減少し、南部の乾燥域では 100mm 未満になる。年降水量が 250mm の BA と 100mm の KB を例に、9 年平均した旬降水量の季節変化の特徴を調べる(図 3.4.10) 年間降水量に関わりなく旬降水量は 6 月上旬から増加し、9 月下旬には急激に減少する。この期間を「モンゴルの雨期」と呼ぶことにする。そして、7 月中旬には 2 地点とも降水量が減少し、この降水量の極小は 45%の観測点で認められる。この降水量の極小を「雨期中休み」と呼ぶことにす。図 3.4.11 は、各年の平均 10 日間降水量の季節変化を西・東モンゴルに分けて示している。「↓」で示した期間が雨期中休みに対応し、雨期中休みは 9 年間のうちの 5 年間(1994・1996・1999-2001)で認められる。中休みは 7 月中旬に集中して起こり、かつ、モンゴル全土で降水量が同時に減少していることから、中休みは季節進行に対して位相固定されており、1000km 以上の空間スケールを持つことが分かる。なお、このモンゴルの雨期中休みは、モンゴルの気象・気候研究者も気付いていなかった現象で、この研究によって初めて指摘されたものである。

次に、雨期中休みが起きる原因を考える。図 3.4.12a は、中休み年の 7 月中旬の 500hPa 高度のコンポジットである。中休み年には、カスピ海の西側で気圧の峰、東側で気圧の谷が発達して、モンゴル周辺は弱い気圧の峰に覆われている。この特徴を明瞭にするために、500hPa 高度の偏差分布(図 3.4.12b)を見ると、東経 30-140 度の中緯度帯に偏差高気圧と偏差低気圧が交互に列状に分布しているのが分かる。200hPa の南北風成分の時間/経度変化から考えて、図 3.4.12b の正負の偏差分布は、アジアジェットに補足された定在 Rossby 波に対応していると言える。1979-2003 年までの NCEP 再解析データを使って定在 Rossby 波を気候学的に見ると、定在 Rossby 波は経度方向にも季節進行にも位相固定されており、その振幅は 7 月中旬頃に最大に達している。つまり、中休み年の 7 月中旬には、定在 Rossby 波の振幅が大きくなり、モンゴル周辺は偏差高気圧に覆われることになり、大気が安定化するため、降水量が低下すると考えられる。これがモンゴルの「雨期中休み」が発現するメカニズムである。

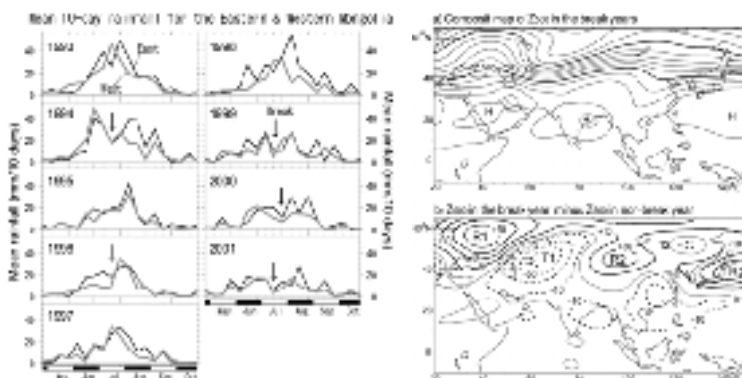


図 3.4.11 (左): 各年の西・東モンゴルの平均旬降水量の季節変化。黒線と灰線は、それぞれ東・西モンゴルの降水量を示す。

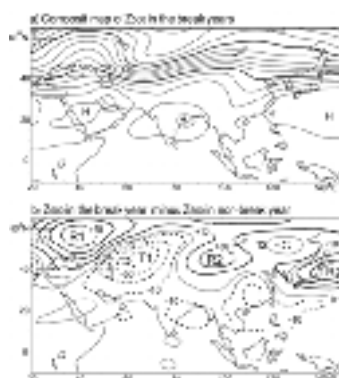


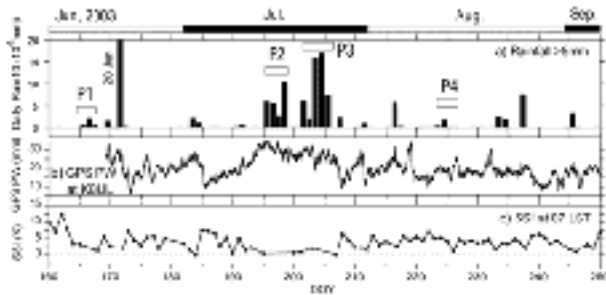
図 3.4.12 (右): 中休み年の 7 月上旬についての 500hPa 高度のコンポジット(a)と、500hPa 高度の偏差分布(b)。

また、定在 Rossby 波の位相が 10 日遅れていた 2000 年には、雨期中休みも 10 日遅れた 7 月下旬に起きていた。定在 Rossby 波の位相が逆転していた 1995・1997 年の 7 月中旬には、モンゴルは偏差低気圧に覆われ、図 3.4.11 に示すように、7 月中旬にはモンゴル全土で降水量が増加していた。この定在 Rossby 波の位相の年々変動が、モンゴルの降水量の季節進行を本質的に決めている可能性がある。

モンゴルにおける積乱雲活動と水蒸気変動 (Iwasaki et al. 2006 の抜粋)

モンゴルの降水変動が水蒸気変動とどのような関係にあるのかを、季節内変化と日変化の二つの時間スケールについて、ウランバートル (UB) 空港レーダーで観測された降水量と GPS (Global Positioning System) 可降水量を利用して調べる。

季節変化： 図 3.4.13 は、レーダ探査範囲の対流活動度 (a)，KBU での GPS 可降水量 (b) と UB における SSI (c) の時系列である。GPS 観測期間の 7-8 月については、GPS 可降水量の値が高い期間に積乱雲に伴う降水が集中している。また、GPS 可降水量と SSI には逆相関があることから、積乱雲が発達した期間は、境界層の水蒸気量が増加することで、大気が対流不安定になっていたことが推測される。2004 年にも同じ傾向が見られた。



2003 年では気圧の谷の通過と積乱雲活動が活発になる期間が対応していたが、2004 年では気圧の峰が通過する期間でも積乱雲活動が活発になった。

図 3.4.13: レーダ探査範囲の対流活動度 (a)，KBU での GPS 可降水量 (b) と UB での SSI (Showalter Stability Index) の時系列. P1 から P4 は、3 日連続で積乱雲活動が観測された期間である。

降水の日変化の特徴： モンゴルを始め乾燥域の積乱雲活動の日変化については、短い時間間隔での降水観測が行われていないことから、ほとんど解析は行われていない。ここでは、時間分解能が細かいレーダー降水量を用いて UB 周辺の日変化の特徴を記述し、数値モデルを使って土壌水分量が積乱雲活動の日変化に及ぼす影響について考察する。

解析には、UB 空港レーダで 10 分毎に得られた高度 5km の降水量データを用いた。図 3.4.14 は、6-9 月の 5mm/hr と 20mm/hr 以上の降水量をレーダ探査範囲で積算したの総降水量の日変化である。積乱雲活動は、2003 年と 2004 年ともに、日射による地面加熱が強い 14 時に極大に達し、18 時以降には急激に弱まるという明瞭な日変化を示す。

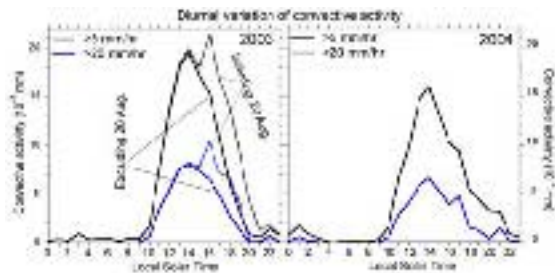


図 3.4.14 (左)：レーダ探査範囲の対流活動の日変化. 左が 2003 年、右が 2004 年の結果. 2003 年に関しては、記録的な降水量をもたらした 8 月 20 日の事例を除いてある。

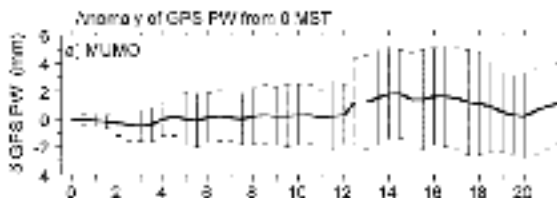


図 3.4.15 (右)：14-16 時に山岳域で積乱雲活動が活発だった 13 日間についての、GPS 可降水量の日変化. GPS 可降水量の日変化は 0 時からの偏差で表している。エラーバーは、 $\pm \sigma$ で示している。

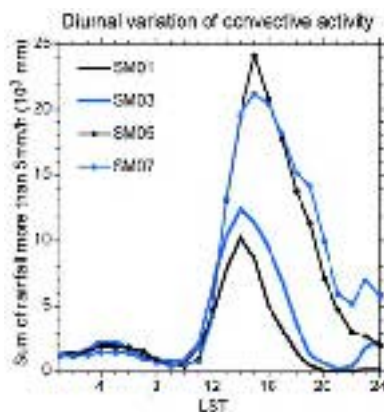
また、13-14 時に山岳域で積乱雲が山岳域で発達し、16-18 時には活発な積乱雲活動が標高の低い領域へ移動する特徴がある (図略)。これは北関東や北米などの研究でも指摘されている特徴であり、熱的局地循環に伴う水蒸気輸送が関係していると考えられている。しかし、UB 周辺では、日中に山岳で積乱雲活動が活発だった期間であっても、有意な GPS 可降水量の日変化は認められない (図 3.4.15)。UB 周辺における積乱雲活動の日変化は、水蒸気変動とは関係がなく、湿潤域の積乱雲活動の

日変化とは異なる特徴を有すると考えられる。

これまで積乱雲活動の日変化が詳しく研究されている湿潤域（北関東・インドシナ・タイ）では、夕方から夜間に積乱雲活動が極大に達する傾向があるが、UB 周辺では夕方には積乱雲活動が既に衰えている。夕方～夜間にかけての積乱雲が不活発であることが、UB 周辺の特徴でもある。

積乱雲の日変化と土壌水分量の関係： 次に、UB 周辺で夕方～夜間に積乱雲が不活発な原因について、領域気候モデルを使った数値実験の結果を基に、土壌水分に注目して考察を行う。積乱雲活動が活発であった 2003 年 7 月 21-25 日について、NCEP 再解析データを初期値・境界条件として、1 日単位で計算を行った。最小格子の領域は、レーダ探査範囲を含み、格子間隔は 4km とした。但し、土壌水分(飽和土壌水分に対する比)を 0.1-0.7 まで変化させた。RAISE の観測サイトである KBU の土壌水分の連続観測と断面観測の結果によると、モンゴルの乾燥域では土壌水分 0.1~0.3 の範囲で変動しているため、土壌水分 0.1 と 0.3 は乾燥域を想定した数値実験である（乾燥ケース）。土壌水分 0.5 と 0.7 は湿潤域を想定した数値実験になる（湿潤ケース）。

図 3.4.16 は、領域気候モデルで得られた 5mm/h 以上の降水の日変化を、土壌水分毎に示してある。乾燥ケースでは、対流活動が 12 時から活発化し始め、14 時に最大になり、18 時には非常に弱くなっている。これはレーダ観測の結果と一致しており、モンゴルの積乱雲活動の日変化の特徴が再現されている。一方、湿潤ケースでは、降水量が 2-3 倍に増加し、18 時以降も積乱雲に伴う強い降水が観測されている。この湿潤ケースの夜間の降水は、日中の積乱雲が夜間まで長続きする効果よりも、夜間に積乱雲が発生したことが重要であった。夜間の積乱雲の形成過程を詳しく調べると、日中の蒸発散により境界層の水蒸気が増加して、大気の対流不安定が強まる。蒸発散は日没頃まで続いたため、夕方から夜間にかけても、対流不安定な大気が維持される。そこで、一般風の地形収束により対流不安定が解消されて、積乱雲が形成されていた。



一方、乾燥ケースでも夜間に地形収束は起きるので、大気の不安定を解消するためのトリガーは存在している。しかし、土壌水分が少ないため、日中に境界層が湿潤化することはないので、対流不安定は強まり難い。更に、夕方には気温が下がるため大気は安定化するので、夜間に積乱雲が発生することはない。つまり、UB 周辺の土壌は乾燥しているため蒸発散が少ない。このことが、日没後の積乱雲活動が不活発な原因の一つであると言える。

図 3.4.16: 領域気候モデルで得られた 5mm/h 以上の総降水量の日変化。土壌水分を 0.1 から 0.7 まで変化させてある。

iv) 気象要素の年々変動が植生活動度に与える影響（Iwasaki 2006a ; Iwasaki 2006b の抜粋）

気象要素の年々変動と植生活動度の年々変動の関係

モンゴルのような乾燥域について大気圏と生物圏の相互作用を研究するための基礎知識として、気象要素の年々変動が植生活動度に与える影響を定量的に評価しておくことが重要になる。この視点からの研究は多くの研究があり、モンゴルについての記述もある（e.g. Schultz and Halpert, 1995; Shinoda and Gamo, 2000; Miyazaki et al. 2004）。しかし、それらのデータは全球データを用いているため精度が低いものや、1-2 点の限られた地上観測点についての解析結果である。ここでは、モンゴル全域についての気象要素の年々変動が植生活動度の詳細な関係を、より高精度で、

明らかにすることを目的とする．そのために，RAISE で整備されたモンゴル地上気象データ（1993–2001 年の気温・降水量・積雪深）と NOAA データから計算された発達期（6–7 月）と繁茂期（7–8 月）の NDVI との関係調べた．

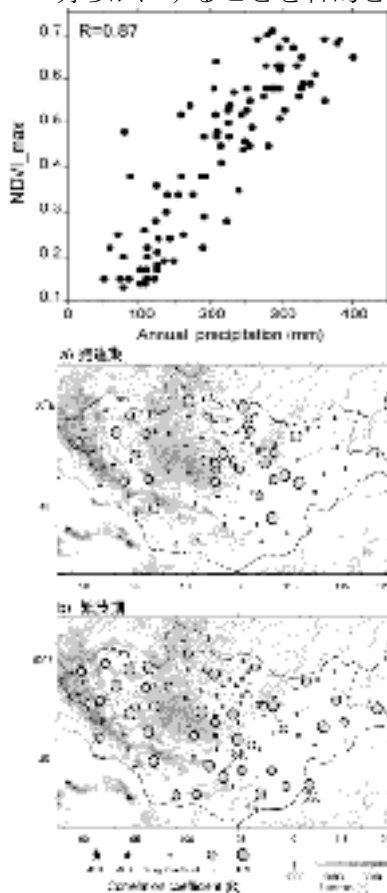


図 3.4.17：モンゴルの 97 地上気象観測点についての 9 年間最大 NDVI と年間降水量の関係．

図 3.4.17 は，地上観測点における，9 年間平均した NDVI の最大値と年間降水量の関係である．先ず，気候学的にみると，図から明らかなようにモンゴルの植生活動度を決定する最大の要因は降水量である．次に，どの季節の降水量の年々変動が植生活動度に強く影響するのかを，前年 10 月から該当年の 9 月までの月降水量と発達期・繁茂期の植生活動度のラグ相関係数を調べてみる．図 3.4.18 は，発達期(a)・繁茂期(b)の植生活動度と月降水量の最大ラグ相関係数の分布である．発達期の植生活動度（NDVI の積算値）は 29%の地点，繁茂期では 42%の地点で，降水量との間に有意水準 99%の正の相関関係が認められる．二つの発達段階の植生活動度に対して 6 月と 7 月の降水量の影響が大きく，この時期の降水が植生活動の制限要因になっていることが分かる．

図 3.4.18：発達期と繁茂期の植生指標と降水量の最大ラグ相関係数の分布図．有意水準 99%の地点のみを表示．

また，52%の地点で繁茂期の植生活動度は夏の気温と負の相関関係にあった（有意水準 95%）．そして，約 40%の地点では，冬期（11 月～3 月）の気温と繁茂期の植生活動度に相関が認められた（有意水準 95%）．冬期の気温が夏期の植生活動に影響することは興味深い事実である．この長い時間差から考えて，凍土や土壤水分を介した間接的な影響であろうが，メカニズムを考察するには絶対的にデータ不足である．しかし，この特徴は，冬期の気温を用いた植生活動度の季節予測の可能性を示唆している．

また，空港レーダーを用いて，メソスケールの降水量分布と NDVI 分布調べると，より乾燥したステップ植生域で，このラグ相関の関係は明瞭であった．一方，降水量の比較的多い森林ステップでは不明瞭であることが示されている．

植生活動度の 1 ヶ月前予測の可能性の検討

解析で得られた知見を基に重回帰分析の手法を用いて，二つの発達段階について植生活動度の予測可能性を検討する．発達期と繁茂期の 1 ヶ月前までの月平均気温と月降水量を独立変数，植生活動度を従属変数とする重回帰式を地点毎に計算した．解析期間の 9 年間について重回帰式を使って推定した植生活動度と観測された植生活動度の相関係数の分布を図 3.4.19 に示

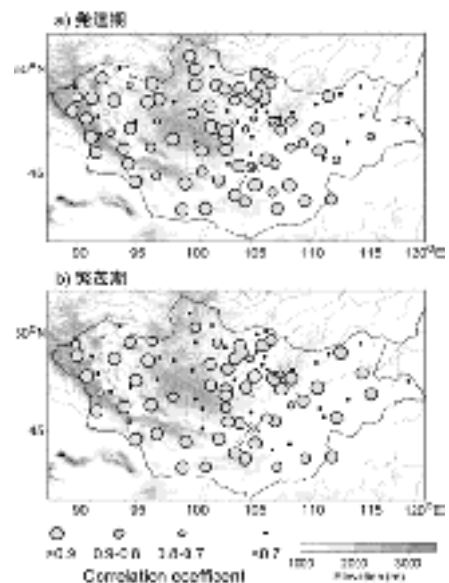


図 3.4.19 回帰式を使って求めた植生指標と観測された指標の相関係数の分布．有意水準 95%

す。発達期で 65%、繁茂期で 53%の地点で相関係数が 0.8 を越え、特に、モンゴル南部の乾燥域で発達期・繁茂期とも相関係数が高い。つまり、モンゴルの約半数以上の地上観測点について、1 ヶ月前までの観測データを用いれば、植生活動度が予測できる可能性が示された。

(2) 研究成果の今後期待される効果

i) 北東アジアの乾燥域の地表面過程と水蒸気・雲・降水過程との相互作用

植生や灌漑農業などの熱コントラストが雲や降水の発生に及ぼす効果については、今後の地表面状態の改変が地域の気候へ及ぼす効果を予測する上で直接的に役立つ。また、地形と降水の日変化の関係については、将来の気候変動に対するこの地域の降水・水循環の変動を予測する上で多いに役立つ。さらにこれらの研究により、この地域の気候形成に及ぼす、土地利用分布と地形効果の重要性と相互の役割分担がより明らかになり、地域の気候や水循環を再現するモデルの精度向上に寄与すると期待される。

また、モンゴルの降水の日変化の調査から、山岳で積乱雲が日中に発達するにも拘わらず熱的局地循環に伴う水蒸気輸送の効果が弱いことが明らかになった。これまで知られている湿潤域におけるメカニズムとは異なる。つまり、モンゴルの降水の日変化を解明することで、湿潤域と乾燥域における積乱雲活動の日変化の比較研究という分野を創造することができる。

ii) 北東アジアの乾燥域の気候変動要因と将来予測

北東アジアの乾燥地の形成要因の研究で提唱されたメカニズムは、インド側のモンスーンの開始とも密接に関連していることも指摘されており、チベット高原が周囲の気候形成に及ぼす影響に関するこれまでの知見を大きく塗り替える理論に発展する可能性がある。ダウンスケールによるモンゴルの温暖化予測および土地利用変化による気候変化予測では、土地利用変化の詳細なシナリオを構築することにより、また他の GCM の予測結果も同様な手法でダウンスケールをすることにより、この地方の将来の気候変化予測の信頼性を高めることが期待される。

iii) アジアモンスーンと中緯度定在 Rossby 波の相互作用の可能性

モンゴルの降水の季節進行にはアジアジェットに沿った定在 Rossby 波の振舞の影響を直接的に受けていた。この定在 Rossby 波が励起される過程として、インドモンスーンの対流活動に伴い Rossby 型応答の結果として、カスピ海西方に作られる高気圧偏差 (図 3.4.12b の R1 に対応) が作られることが重要であるとの研究が多い (例えば、Rodwell and Hoskins, 2001; Enomoto et al. 2000)。

1979-2004 年について定在 Rossby 波の振幅が大きな年を対象として、500hPa 高度場のラグ相関係数の分布を図 3.4.20 に示す。雨期中休みが起きる 7 月中旬のモンゴルを参照点 (図中の☆) とした。Lag=+1 から 0 では、Tibet 高原東に負の偏差域

がみられ、Lag=+1~+2 にかけて負の偏差域が東南アジアからインド北部に移動する。天気図でみると、Tibet 高原東部で気圧の谷が深まり、

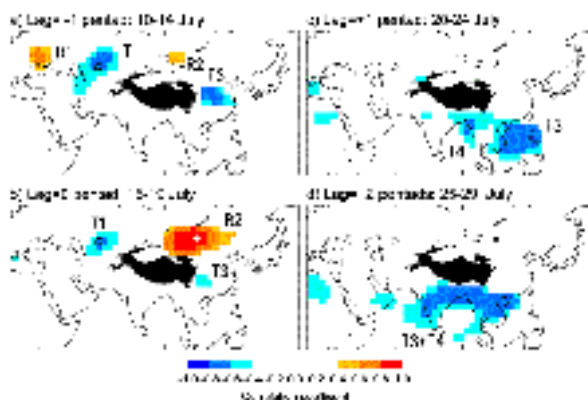


図 3.4.20 : Rossby 波の振幅が大きな年について、モンゴルを参照点 (☆) とした 500hPa 高度場のラグ相関の分布図。記号は図 3.4.12b の正負の偏差域に対応している。R は正偏差、T は負の偏差域である。信頼水準 99% 以上の相関係数のみ示している

その5日後に、インド北部-東南アジアの気圧が低下する。この季節では東経120度付近から偏西風の風速が弱まるため、定在 Rossby 波が破碎して気圧の谷が作られ、それに対応した負の偏差域が作られる可能性がある。この作業仮説の妥当性を今後検討する訳であるが、定在 Rossby 波はインドモンスーンの対流活動により励起されるだけでなく、東南アジア～インドに掛けてのアジアモンスーンの季節進行にも影響を及ぼしている可能性を示すものである。今後は、アジアモンスーンと中緯度定在 Rossby 波の「相互作用」の視点からも解析を進める必要がある。

iv) 全球規模の夏雨型乾燥域を対象とした植生活動の予測可能性

図3.4.19に示したように、モンゴルの気象観測点については、植生活動度の予測可能性を示したが、気象観測点の数が少なく、モンゴル全土をくまなく予測するには不十分である。また、植生活動度の予測の直接的な恩恵を受ける放牧民は、モンゴルに隣接する中国内モンゴル自治区でも行われている。実用的な面を重視するならば、2次元的な予測が求められよう。そのためには、広域にわたる降水量分布と気温分布が必要となるが、TRMM 複合 product 3B43 の全球降水分布（将来的には GPM）と気象庁客観解析データの気温データとを用いることで問題は解決するであろう。今後、北東アジア乾燥域全域の植生活動度を予測する重回帰式が作成し、どの程度の精度で予測が行えるのか検討する予定である。

この重回帰式は、モンゴルのように夏に多くの降水がもたらされる夏雨型乾燥域であるから有効な手法である。全球的に見れば、夏雨型乾燥域は他の大陸にも分布するため、全球規模で夏雨型乾燥域の植生活動を予測できる可能性がある。

3.5 ヘルレン川の水循環と温暖化実験(グループ5)

(1)研究実施内容及び成果

i)はじめに

本研究ではまず分布型水文モデルを用いてヘルレン川の水循環解析を行い、当流域の水文レジームの時空間特性を明らかにし、その上で領域大気モデルから得られた温暖化前後の気象データを用いて水文学的、水資源的特性の変化を調べヘルレン川の水循環に与える温暖化影響の傾向を示した。

ii)対象流域とデータ

対象流域はモンゴル東部のヘルレン川流域である。流域内とその近隣には約 40 地点の気象観測所があり、本川に沿って 4 つの水文観測所がある。気象観測所は Meteostation と Meteopost に分類され、前者は 1 日 8 回、後者は 1 日 4 回の頻度で、気温・湿度・気圧・風速風向・降水量・地表面温度が観測されている。ただし降水量は 1 日 2 回である。Meteostation のデータと比べて Meteopost のデータは、欠損率が非常に高く、観測頻度が小さく、観測のタイミングも一致しない。データの扱い易さと均質性を考慮して、本解析では Meteostation 12 地点のデータのみを利用する。水文観測所のうち最上流の Mongenmoryt は最近設置されたばかりの観測所で河川水位・流量データの蓄積がない。このため本解析では残りの 3 地点のデータを利用する。この流域では、おおよそ 10 月末から翌年 4 月はじめの寒候期に河川結氷するため、河川水位・流量の観測データには欠損値あるいは推定値が収録されている。本解析では河川結氷のない毎年 5-9 月のデータを利用する。観測は 1 日 1 回である(観測時刻不明)。解析対象期間は 1993-2003 年の 11 年間とした。データの品質検査を行なったのち、観測時刻ごとに最も近傍の観測所の計測値で置換することで欠損を補完し、解析用の良質なデータセットを作成した。

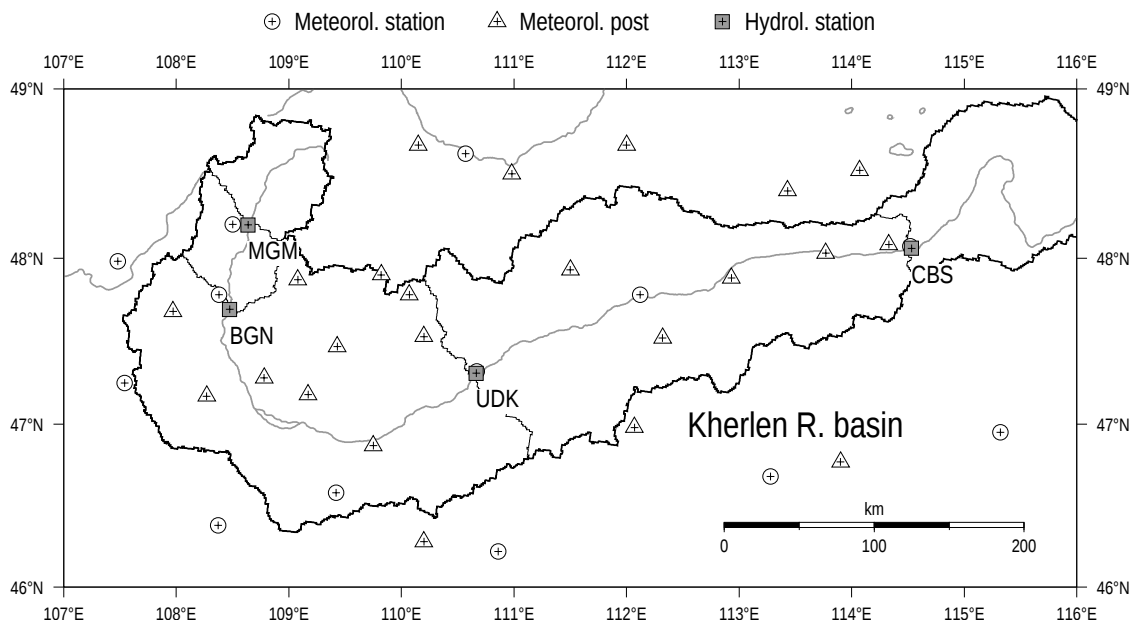


図 3.5.1 流域と観測所

ii)ヘルレン川の水循環

流域内の 3 つの水文観測所を基準として流域を、上流、中流、下流の 3 つの部分流域に分割した。部分流域ごとに 5 か月積算の降水量・流出量を 11 年分求めた。降水量は Thiessen 法で集計した。流出量は部分流域の上流側流量から下流側流量を差し引いて、部分流域の面積を用いて換算し集計した。

各流域における降水と流出の関係は異なっており、上流では降水と流出の間に関係性が見て取れるが、中流、下流では降水はあるが流出はほとんど発生せず、年によっては負の流出となる。この観測が示唆するのは、2つの可能性である。ひとつは、中下流域では降水はほとんどすべて蒸発し流出はほとんど発生しないことである。しかしこの仮説では、負の流出を説明することができない。もうひとつの可能性は、中下流域では流出があつてそれらが河川流出となつても、それとほぼ同量の水が河川から損失しており実質的に河川流量の増減に寄与しないことである。この二つめの仮説の確からしさを確認するために、以下では、まず観測所ごとの水収支を見積もり、部分流域ごとに集計して領域水収支を見積もり、最後に河道の水収支を考えてみる。

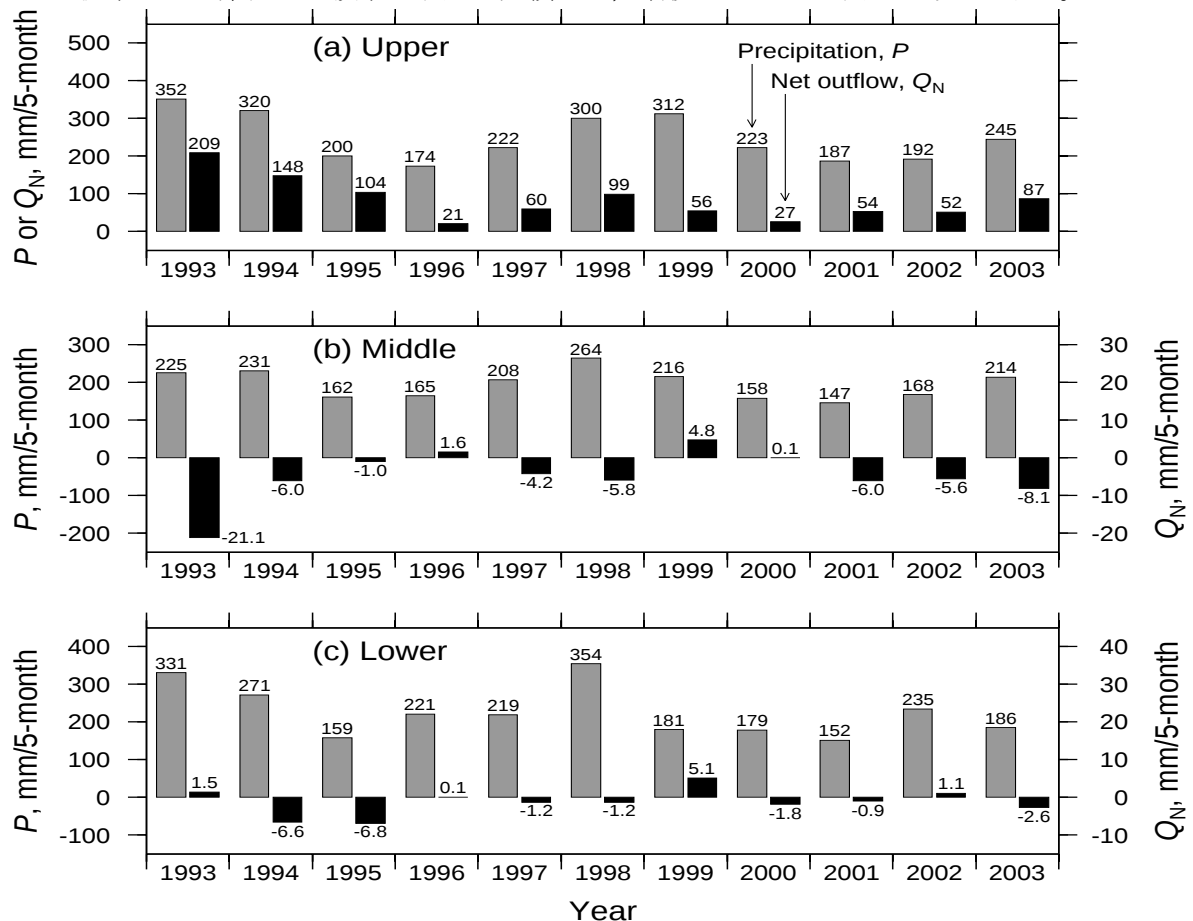


図 3.5.2 部分流域ごとの降水量と流出量の年々変化

部分流域ごとの領域水収支

部分流域ごとに Thiessen 法で降水量・蒸発量・流出量を求めた。本研究では、KBU で観測された蒸発データで同定されたバルク係数と新安江モデルを、12 の meteorostation に適用し、蒸発量を求めた。その結果を表 3.5.1 に示す。

表 3.5.1 部分流域ごとの 5 か月水収支 (累年平均と標準偏差(括弧内)単位: mm/5 month)

	降水量	蒸発量	流出量	流出量 (観測)
上流域	247 (62)	166 (26)	75 (34)	71
中流域	196 (38)	141 (20)	47 (15)	-3
下流域	226 (67)	160 (33)	57 (30)	-1

部分流域ごとの河道水収支

毎年 5-9 月の 5 か月間について次の河道水収支を考える。

$$\Delta W = (Q_i + P + Q_r) - (Q_o + E + Q_s)$$

ここに、 ΔW は河道内の貯留水量変化、 Q_i ：上流から流入する河川流量、 P ：河道水面への降水量、 Q_r ：周辺流域からの流出量、 Q_o ：下流へ流出する河川流量、 E ：河道水面からの蒸発損失量、 Q_s ：河道底面からの浸透損失量、各項の単位は、 $\text{m}^3/5\text{-month}$ である。なお、各部分流域の水面面積は Landsat TM のデータをもとに、流域の河川水面と陸面の二値化を行い、河川水面面積を計測した。それぞれ 82, 315, 318 km^2 である。

Q_i と Q_o は水文観測所のデータから算定した。 P は河道部分を小区間（ピクセル）に分解し、小区間ごとに最近隣の気象観測所の降水量を参照し、集計した。 E も同じく、小区間ごとに最近隣の気象観測所の風速、気温、湿度、気圧、地表面温度を参照し、バルク法で $\beta=1$, $C_H=1.2 \times 10^{-3}$ （水面蒸発時の係数）を与えて蒸発量を計算し、集計した。ただし、水面温度=地表面温度を仮定した。 Q_r は部分流域内の気象観測所ごとに算定した流出量を Thiessen 法で集計した。このとき周辺流域で発生した流出は、途中で損失することなくすべて河道に達すると仮定した。 ΔW をゼロと仮定すると、河道からの浸透損失量 Q_s が推定される。

表 3.5.2 部分流域河道ごとの水収支（累年平均と標準偏差（カッコ内）単位 $10 \times 10^6 \text{ m}^3/5\text{-month}$ ）

	Q_i	P	Q_r	Q_o	E	Q_s
上流	0 (0)	20 (5)	547 (248)	610 (408)	92 (29)	-132 (227)
中流	610 (408)	62 (12)	1552 (503)	457 (268)	578 (98)	1189 (713)
下流	457 (268)	72 (21)	1848 (966)	418 (257)	589 (95)	1370 (1066)

河道浸透損失の可能性

河道底面・側面からの浸透量の大小は、河道の断面形状や底面側面の土質構造、流水潤辺の長さなどで決まるとすれば、河川の水位の変化に比べて、河道形状や底面側面土質や底面長はほとんど変化しないので、浸透量の変化は河川の水位の変化で説明することができるだろう。河川の水位は流量の平方根と比例関係にあるので、浸透量は河川流量の平方根と関係があると考えられる。

各部分流域の河道ごとに毎年の上流下流平均の河川流量の平方根を求め、推定された浸透損失量との関係を調べた。これによると流量の平方根が大きいほど浸透量も大きくなる関係が見て取れる。

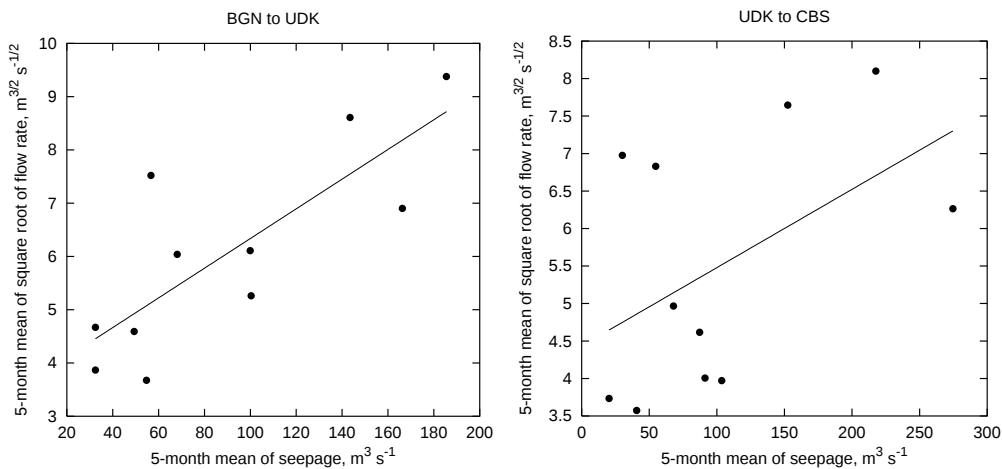


図 3.5.3 河川流量の平方根と浸透損失量の関係

まとめ

ヘルレン川周辺通常気象データをクオリティチェックして得られた良質なデータセットと、KBUでの集中観測データ、LANDSAT TMデータによる河道面積を総合的に活用し、ヘルレン川の水循環、そして河川と周辺地域の水のやり取りが明らかにされた。

iii) 温暖化実験による気候変化の影響評価

使用データ

影響評価には、現在気候と将来気候とよばれる2種類の格子型データを分布型水文モデルに入力して行った。入力は、解像度2.5度のNCEP/NCAR再解析データを領域気候モデルTERC-RAMSの初期・境界条件として与えた力学的ダウンスケール手法により、最終的に約30kmの解像度まで微細化された気候場データである。現在気候データは、NCEP/NCAR再解析データを用いて1990-2000年の30km気候場が再現されている。もう一方の将来気候データは、気象庁の大気海洋結合モデルMRI-CGCM2による標準実験とIPCCのSRES A2シナリオに基づいた温暖化実験の結果に基づいている。標準実験の1991-2000年、温暖化実験の2071-2080年のそれぞれの期間について、水平鉛直3次元（緯度経度約2.5度、鉛直17気圧面）の月ごとの累年平均を求めて、その偏差を温暖化による摂動項として、1990-2000年のNCEP/NCAR再解析データに加えたものを現在気候と同じ手続きで、ダウンスケーリングして導出された。

分布型水文モデル

分布型水文モデルは流域地形を表現する数値標高モデルを基礎としている。流域を構成するメッシュは、独立した斜面要素とみなされ、降水量とポテンシャル蒸発量などを入力変数とし、流出モデルによって流出量等が評価される。各メッシュからの流出はメッシュの中心を結ぶ河道を通じて下流へ集中していく。流域内の任意メッシュにおける河川流量を知ることができる。

本研究では、メッシュ流出モデルとして新安江モデル、河道内流出追跡モデルとしkinematic wave法かMulti-step Multi-reach Muskingum Cunge法（以下、MMMC法）を用いる。追跡計算の順番は陸らの最適追跡順番に従う。なお、メッシュ水文モデルのパラメーターは前述のように集中観測で得られたKBUの蒸発データを用いて同定した。また、MMMC法は従来のものから、ヘルレン川のような河床勾配が小さく、水量の少ない河川でも計算できるように改良したものが使われている。

結果

各部分流域平均の年降水量・蒸発量・流出量（河川流量）・貯留量の累年平均と変動係数を算定した（表3.5.3）。ここで貯留量は土壌水分の貯留量である。変動係数は標準偏差を平均で割り算した数値で、年々の変動性を意味する。

算定の結果、将来の降水量・流出量は流域全体で減少するが、減少量は上下流間でほぼ同じで、約10mm/年である。降水量の減少に関わらず、蒸発量が僅かに増加している。その結果、流出量に降水量以上の減少が見られた。蒸発量の減少は上流・中流・下流の順で小さくなっており、下流に行くほど、流域が乾燥し、水分供給が重要な要因であることを示唆している。このことは土壌水分貯留量の空間変化からも裏付けられる。

降水量と流出量の経年変化は図3.5.4に示されている。上流ほど降水・流出の絶対量は大きいので、相対的には下流ほど減少率が大きいことになる。また、下流域の流出量をのぞけば、降水量・流出量の年々変動性は大きくなる。すなわち、降水や流出の量が多い年と少ない年とで、年間量の差が大きくなる。極端な少雨が草原の生態系に不可逆なダメージを与える可能性もあるので、更に生態系の応答を調べる必要がある。

表 3.5.3 現在気候と将来気候における年降水量・年流出量の累年平均(mm/y)と変動係数

		現在気候		将来気候	
		累年平均	変動係数	累年平均	変動係数
上流域	降水量	477	0.137	466	0.171
	蒸発量	302	0.071	306	0.108
	流出量	181	0.291	163	0.307
	貯留量	68	0.116	66	0.139
中流域	降水量	338	0.171	325	0.226
	蒸発量	235	0.104	237	0.131
	流出量	107	0.282	90	0.339
	貯留量	59	0.150	54	0.202
下流域	降水量	283	0.173	274	0.238
	蒸発量	211	0.112	210	0.135
	流出量	75	0.389	62	0.322
	貯留量	50	0.197	45	0.187

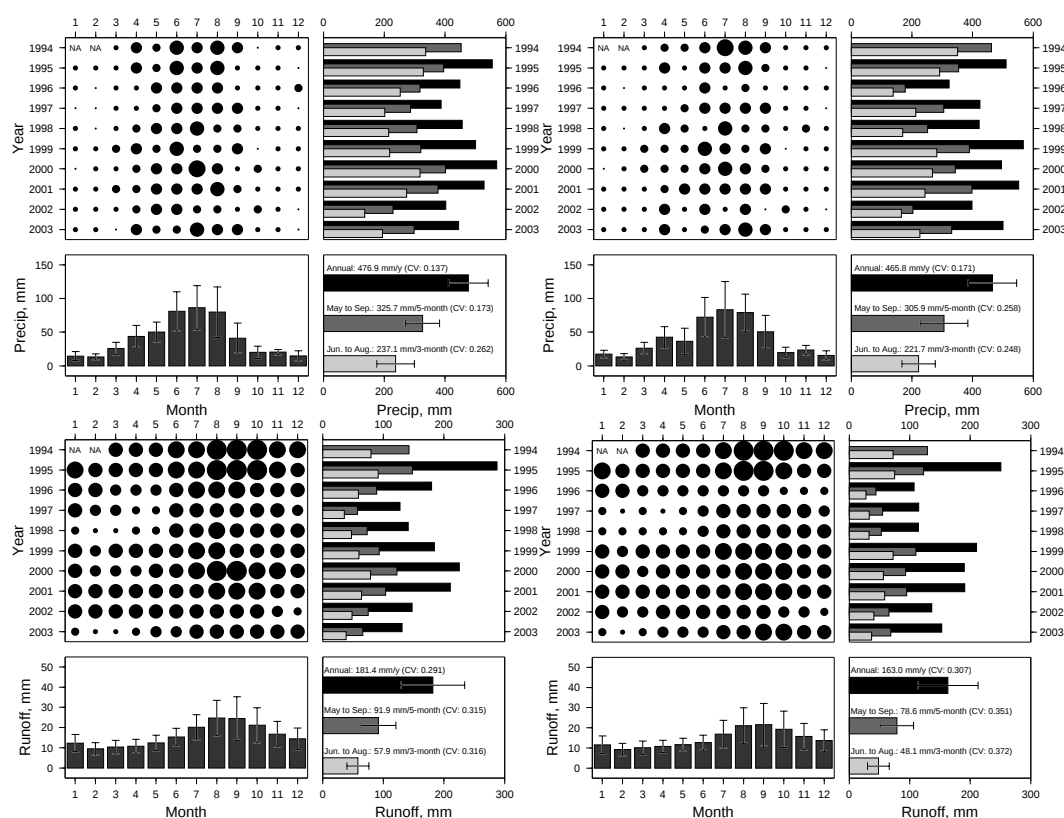


図 3.5.4a 上流域。左の上下図は現在気候の降水量と流出量，右の上下図は将来気候の降水量と流出量。

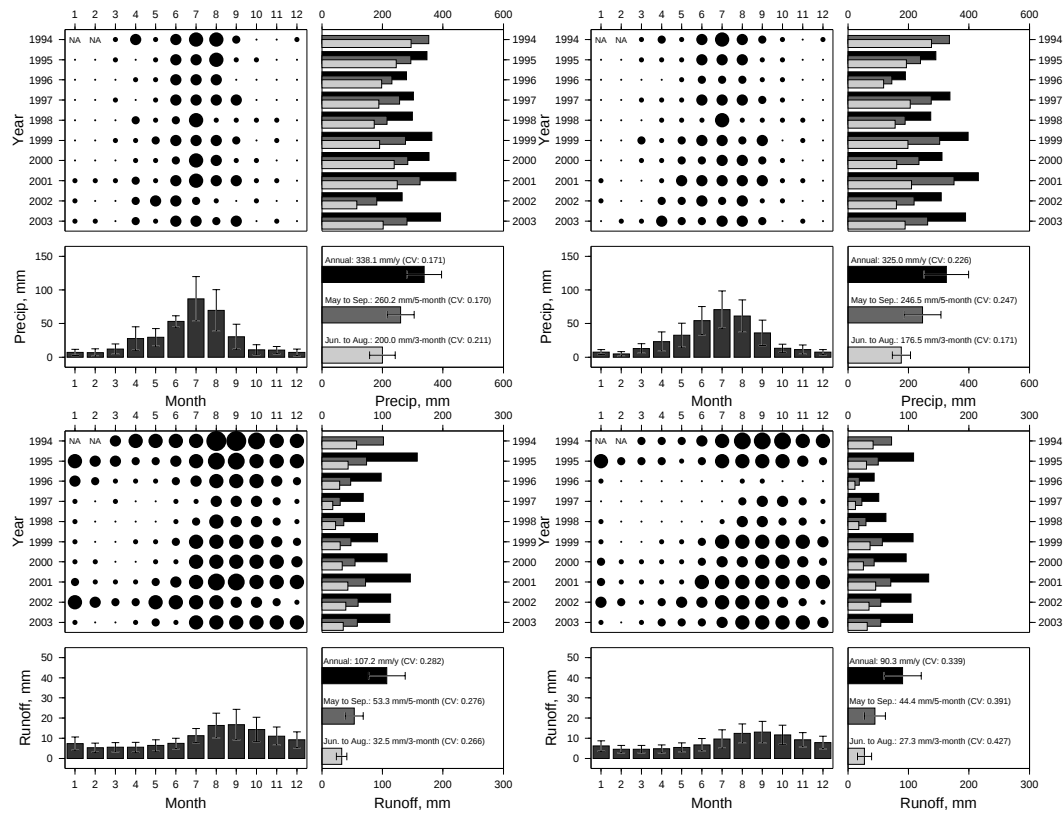


図 3.5.4b 中流域。左の上下図は現在気候の降水量と流出量，右の上下図は将来気候の降水量と流出量。

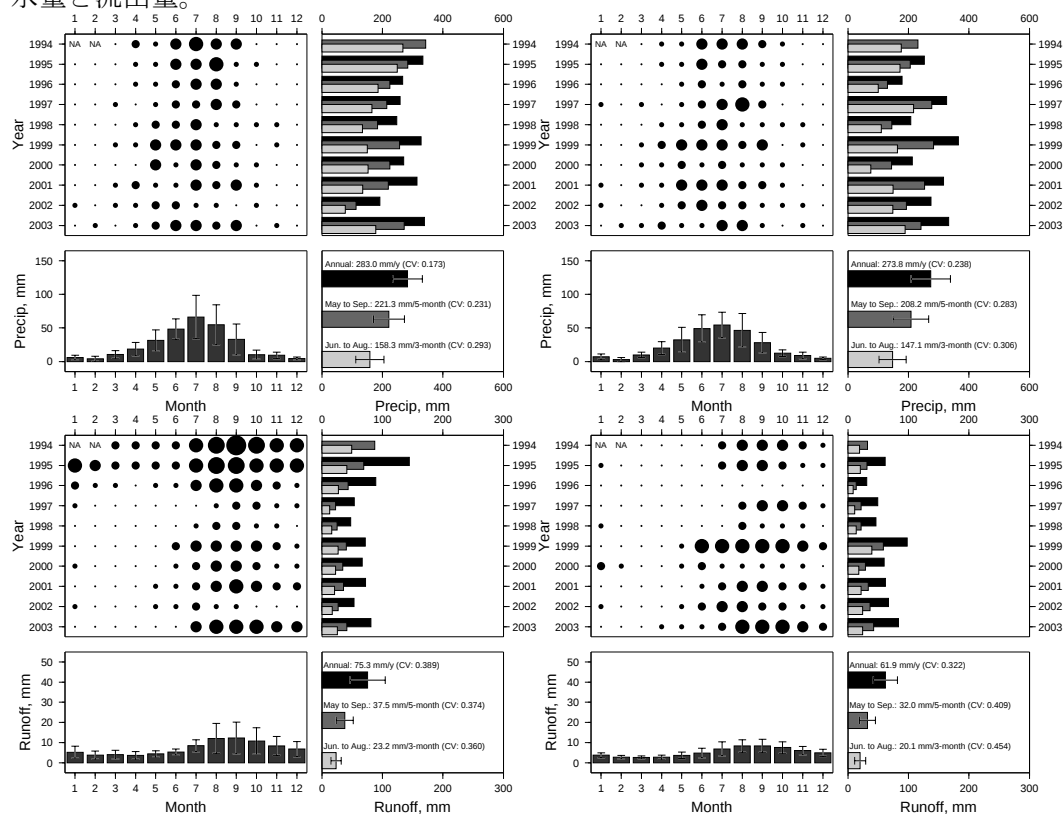


図 3.5.4c 下流域。左の上下図は現在気候の降水量と流出量，右の上下図は将来気候の降水量と流出量。

(2)研究成果の今後期待される効果

本研究において、過去の水文データを注意深く処理し、良質な水文データセットが作成された。このデータを用いることにより、ヘルレン川の水文レジームを現状を知ることができた。半乾燥地域の水文現象の解明に寄与する。また、温暖化実験により、温暖化による降水量、流出量の変化傾向が得られ、この流域の将来計画に重要な情報を提示することができた。

3. 6 グループ 6 (モンゴル国 Institute of Meteorology and Hydrology グループ)

(1)研究実施内容及び成果

本グループは、研究対象地域を管轄するモンゴル国 Institute of Meteorology and Hydrology (IMH)の研究者とECO Asia 大学の研究員からなり、本プロジェクトでは共同研究の相手国機関である。日本側研究者と共同で現地調査に従事すると共に、観測機材設置、サンプルの輸出手続きなどの様々な現実的な問題で研究の進展に貢献した。さらに、IMH の長期にわたる気象、水文、生物についての観測データを本研究に提供し、モデルの検証等に利用された。また、このようなデータを利用する場合に常に問題となるデータの精度、信頼性に関して、担当者を含め現場の情報を提供し、研究の精度向上にも貢献した。得られた研究結果についても、ワークショップや現地滞在時の議論などを通じて、現地の人のみならず知識により適切なコメントやアドバイスをした。ECO Asia については、教育機関ということで、同大学の研究者のみならず学生も現地観測に同行し、今後の環境研究を担っていく次世代の教育にもつとめた、なお、研究員の内の 1 名は、本プロジェクト 3 年目より筑波大学院に国費留学生として来学し、日本側とモンゴル側の架け橋となりながら、本プロジェクトの一部として研究をすすめている。

(2)研究成果の今後期待される効果

IMH にとっては、本プロジェクトは国際的な枠組みで水循環や気象学に関する研究に参加するという位置づけにあり、90 年代の市場経済の導入と同時期に始まった西側諸国との交流促進の流れにも含まれている。そのような観点からも、本プロジェクトを通じて国内外の関連研究者らとのネットワークが常時維持されたことは大きく、今後のモンゴル国と日本や世界の関係する研究者との密接な関係が今後も続くことが期待できる。また、従来モンゴル国をはじめ、多くの旧共産圏諸国のデータは非常に入手が難しくまた一般に公開ができないなどの制限が付けられることが多かった。今回、JST と IMH の契約ではこの点がはじめて改善され、このプロジェクトの期間中に得られた全てのデータを観測後 5 年で一般公開できるとの同意がなされた。これは世界の研究コミュニティの一員としての寄与を今後とも続けていく流れと見て良いと考えられる。

ECO Asia は比較的新しい大学であるが、次世代を担う教育を環境問題に焦点を当てて運営を行っている。本プロジェクトで野外観測に学生、研究者と参加したことで、最新の観測機材にふれ、また得られた結果を Workshop で発表することで、研究面のみならず教育面でも効果があった。

4 研究参加者

①グループ0(総括)

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
杉田 倫明	筑波大学大学院生命環境科学研究科 地球環境科学専攻	教授	総括	平成13年12月～
李 勝功	筑波大学大学院生命環境科学研究科	CREST 研究員	生態・熱・水・CO2 フラックスの解析	平成14年7月 平成18年10月
	中国科学院地理学与資源研究所	教授		平成18年11月～
佐藤 友徳	筑波大学大学院生命環境科学研究科	CREST 研究員	領域気候モデルの構築とメカニズムの解明	平成14年4月～ 平成18年3月
	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		平成18年4月～
小谷亜由美	筑波大学大学院生命環境科学研究科	CREST 研究員	地表面フラックスの測定と解析	平成18年4月～ *平成18年4月グループ1から異動
近藤 昭彦	千葉大学	教授	ソーートセンシングによる環境情報の抽出	平成14年4月～
加藤 秀和	筑波大学大学院生命環境科学研究科	D3	生態・熱・水・CO2 フラックスの解析	平成16年4月～
Ishgaldan Byambakhuu	筑波大学大学院生命環境科学研究科	D2	生態・熱・水・CO2 フラックスの解析	平成17年4月～ *平成17年4月グループ6から異動
阪口 かなえ	筑波大学大学院教育研究科	M1	生態・熱・水・CO2 フラックスの解析	平成17年4月～
塩澤 暁子	筑波大学環境科学研究科	研究補助員	経理・事務	平成14年1月～ 平成14年3月
古館 道子	筑波大学環境科学研究科	研究補助員	経理・事務	平成14年4月～ 平成14年5月
澤口 安代	筑波大学大学院生命環境科学研究科	研究補助員	経理・事務	平成14年6月～

②グループ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)

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
-----	-----	-----	------	------

浅沼 順	筑波大学大学院生命環境科学研究科地球環境科学専攻	助教授	グループ統括・広域熱・水蒸気交換に関する研究	平成13年12月～
宮崎 真	筑波大学地球科学系	助手	広域熱・水蒸気交換に関する研究	平成13年12月～平成14年3月
松島 大	千葉工業大学工学部建築都市環境学科	助教授	広域熱・水蒸気交換に関する研究	平成13年12月～
小谷 亜由美	筑波大学大学院生命環境科学研究科	D5	地表面フラックスの測定と解析	平成14年10月～平成18年3月 *グループ0に異動
小島 透	筑波大学環境科学研究科	M2	地表面フラックスの測定と解析	平成14年1月～平成16年3月
田中 久則	筑波大学環境科学研究科	M2	地表面フラックスの測定と解析	平成14年10月～平成15年3月
松浦 陽介	東北大学大学院理学研究科	M2	AWS データによる長期熱収支の推定	平成14年10月～平成17年3月
家本 薫	筑波大学大学院環境科学研究科	M2	シンチロメータを用いた観測の実施・補助	平成14年12月～平成17年3月

③グループ2(草原生態系の人間活動の関係の解明)

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
鞠子 茂	筑波大学大学院生命環境科学研究科構造生物科学専攻	助教授	草原生態系の水・炭素循環プロセスの解明	平成13年12月～
及川 武久	筑波大学大学院生命環境科学研究科生命共存科学専攻	教授	陸域生態系炭素循環モデルの構築と草原生産量のシミュレーション	平成13年12月～
田村 憲司	筑波大学大学院生命環境科学研究科生物圏資源科学専攻	助教授	原生態系の土壌の劣化プロセスの解明	平成13年12月～
烏云娜	大連民族大学生物資源・環境研究所	教授	陸域生態系炭素循環モデルの構築と草原生産量のシミュレーション	平成14年4月～

川田 清和	筑波大学農学研究科	大学院生	草原生態系の水・炭素循環プロセスの解明	平成 14 年 4 月～ 平成 15 年 6 月
劉 建軍	西北農林科技大学 林学院	副教授	モンゴル草原の 地下部バイオマス と生産力に対する 放牧圧の影響解 析	平成 14 年 10 月～
李 吉宰	筑波大学大学院生 命環境科学研究科	D5	陸域生態系炭素 循環モデルの構 築と草原生産量 のシュミレーション	平成 14 年 4 月～
浦野 忠朗	筑波大学大学院生 命環境科学研究科	D1	モンゴル草原の 地上部バイオマス と CO2 フラックス の観測結果解析	平成 14 年 4 月～
深野 基嗣	筑波大学環境科学 研究科	大学院生	草原生態系の土 壌の劣化プロセス の解明	平成 14 年 4 月～ 平成 15 年 3 月
浅野 眞希	筑波大学大学院生 命環境科学研究科	D3	草原と森林の土 壌調査と解析	平成 14 年 10 月～
高井 市郎	筑波大学生命環境 科学研究科	大学院生	生態・熱・水・CO2 フラックスの解析	平成 15 年 4 月～ 平成 15 年 7 月
星野 亜季	筑波大学大学院生 命環境科学研究科	M2	畑作の土壌新侵 食、植生変化へ の影響の解明	平成 15 年 4 月～ 平成 17 年 3 月
李 弼宰	筑波大学大学院生 命環境科学研究科	D3	モンゴル草原生 態系の炭素・水動 態の 1 日ステップ のモデル開発	平成 16 年 4 月～
陳 玉香	吉林大学生物農業 工学院	副教授	モンゴル草原生 態系の炭素・水動 態に対する放牧 圧の影響のモデル 評価	平成 16 年 4 月～
大瀬 健嗣	筑波大学大学院生 命環境科学研究科	研究生	土壌・植生の現地 調査に関する専 門的アドバイスの 提供	平成 16 年 6 月～ 平成 16 年 8 月
桜井 俊輔	筑波大学生物学類	大学生	草原生態系の水・ 炭素循環プロセス の解明	平成 14 年 4 月～ 平成 14 年 11 月
斉藤 雄久	筑波大学生物学類	大学生	草原生態系の水・ 炭素循環プロセス の解明	平成 14 年 4 月～ 平成 14 年 11 月

④グループ3(同位体を利用した水・物質循環プロセスの解明)

氏名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
辻村 真貴	筑波大学大学院生命環境科学研究科地球環境科学専攻	講師	グループ統括・同位体水循環に関する研究	平成13年12月～
田中 正	筑波大学大学院生命環境科学研究科地球環境科学専攻	教授	同位体水循環研究に関するアドバイス	平成13年12月～
田瀬 則雄	筑波大学大学院生命環境科学研究科地球環境科学専攻	教授	同位体水循環研究に関するアドバイス	平成13年12月～ 平成18年3月
恩田 裕一	筑波大学大学院生命環境科学研究科生命共存科学専攻	助教授	同位体物質循環に関する研究	平成13年12月～
杉本 敦子	北海道大学地球科学環境研究院	教授	同位体水循環に関する研究	平成13年12月～
山中 勤	筑波大学大学院生命環境科学研究科地球環境科学専攻	講師	同位体水循環に関する研究	平成13年12月～
田中 幸哉	韓国慶熙大学校文理科大学地理学科	副教授	同位体物質循環に関する研究	平成13年12月～
嶋田 純	熊本大学理学部	教授	同位体地下水循環に関する研究	平成14年4月～
島津 弘	立正大学地球環境科学部地理学科	助教授	同位体物質循環に関する研究	平成16年8月～ 平成17年3月
加藤 弘亮	筑波大学大学院生命環境科学研究科	D4	同位体を用いた表面流出・土壌侵食に関する研究	平成14年10月～
佐々木 リサ	筑波大学環境科学研究科	M2	水蒸気安定同位体比の変動プロセスに関する研究	平成14年8月～ 平成16年3月
安部 豊	筑波大学大学院生命環境科学研究科	D2	モンゴル・ヘルレン川流域における地下水流動系に関する研究	平成15年4月～ 平成16年8月
樋口 覚	熊本大学大学院自然科学研究科	M2	季節凍土地帯における地下水流動に関する研究	平成15年4月～ 平成17年3月
櫛引 令子	北海道大学大学院環境科学院	M1	同位体水循環に関する研究	平成16年4月～ 平成18年3月

藤原 英司	農業環境技術研究所	研究員	土壌浸食の現地調査に関する専門的アドバイスの提供	平成 16 年 6 月～ 平成 16 年 8 月
梶浦 岳	立正大学大学院地球環境科学研究科地理空間システム学専攻	大学院生	同位体物質循環に関する研究	平成 16 年 8 月～ 平成 17 年 3 月
高田 佳恵子	筑波大学環境科学研究科	研究補助員	水サンプルの科学分析補助	平成 15 年 4 月～ 平成 16 年 3 月

⑤グループ4(メソスケールモデルの構築とモンスーン水循環)

氏名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
木村 富士男	筑波大学大学院生命環境科学研究科地球環境科学専攻	教授	メソスケールモデルの構築とアジア地域の水蒸気輸送プロセスの解明	平成 13 年 12 月～
中川 清隆	上越教育大学自然系	教授	GPS による気象調査および解析	平成 14 年 12 月～ 平成 17 年 4
岩崎 博之	群馬大学教育学部	助教授	可降水量と放射量の時間・空間分布の解明	平成 13 年 12 月～
新居 知己	群馬大学教育学研究科	大学院生	モンゴルの降水気候学	平成 14 年 12 月～ 平成 18 年 3 月
佐久間 大介	群馬大学教育学部	大学生	レーダーと GPS を用いた乾燥地域の積乱雲活動の日変化	平成 16 年 4 月～ 平成 17 年 3 月
黒川 知恵	筑波大学大学院生命環境科学研究科	研究補助員	領域気候モデルの構築と気候メカニズムの解明	平成 17 年 6 月～

⑥グループ5(分布型水文モデルによる流出解析)

氏名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
陸 旻皎	長岡技術科学大学環境建設系	助教授	分布型水文モデルによる流出解析	平成 13 年 12 月～

石平 博	山梨大学工学部	助教授	凍土の半乾燥地域水循環への影響に関する研究	平成 14 年 4 月～ 平成 17 年 3 月
熊倉 俊郎	長岡技術科学大学工学部	助手	陸面水文過程のパラメタリゼーションと大気モデルとのカップリング	平成 14 年 4 月～
上米良秀行	長岡技術科学大学大学院工学研究科	D5・研究補助員	地表面過程のパラメタリゼーションと気候モデルと地表面モデルの結合	平成 14 年 12 月～ *平成 17 年 6 月～研究補助員
土井 洋典	長岡技術科学大学環境システム工学専攻	M2	Kherlen 川の水文モデリング	平成 16 年 3 月～ 平成 17 年 3 月

⑦グループ 6(モンゴル国内のデータ収集と水文・気象・生態現象の解析)

氏名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
Gombo Davaa	Institute of Meteorology and Hydrology	Hydrology Section head	モンゴル国内のデータ収集と水文・気象・生態現象の解析	平成 14 年 5 月～
Dambaravjaa Oyunbaatar	Institute of Meteorology and Hydrology	Researcher	モンゴル国内のデータ収集と水文・気象・生態現象の解析	平成 14 年 5 月～
Oyunjargal L.	Institute of Meteorology and Hydrology	Weather Forecasting Section head	モンゴル国内のデータ収集と水文・気象・生態現象の解析	平成 14 年 5 月～
Azzaya D.	Institute of Meteorology and Hydrology	Director	モンゴル国内のデータ収集と水文・気象・生態現象の解析	平成 14 年 5 月～
Gombolhudev P.	Institute of Meteorology and Hydrology	Science Secretary	モンゴル国内のデータ収集と水文・気象・生態現象の解析	平成 14 年 5 月～
Gantsetseg B.	Institute of Meteorology and Hydrology	Researcher	モンゴル国内のデータ収集と水文・気象・生態現象の解析	平成 14 年 5 月～

Ganbaatar T.	Institute of Meteorology and Hydrology	Researcher	モンゴル国内のデータ収集と水文・気象・生態現象の解析	平成 14 年 5 月～
Batkhuu D.	Institute of Meteorology and Hydrology	Researcher	モンゴル国内のデータ収集と水文・気象・生態現象の解析	平成 14 年 5 月～
Adyasuren.Ts	Environmental Education & Research Institute ECO ASIA	Professor and President	モンゴル国内のデータ収集と水文・気象・生態現象の解析	平成 15 年 4 月～
Batkhashig.Ts	Environmental Education & Research Institute ECO ASIA	Researcher	モンゴル国内のデータ収集と水文・気象・生態現象の解析	平成 15 年 4 月～ 平成 18 年 1 月
Amgalan.A	Environmental Education & Research Institute ECO ASIA	Researcher	モンゴル国内のデータ収集と水文・気象・生態現象の解析	平成 15 年 4 月～ 平成 18 年 1 月
Byambakhuu.I	Environmental Education & Research Institute ECO ASIA	Researcher	モンゴル国内のデータ収集と水文・気象・生態現象の解析	平成 15 年 4 月～ 平成 17 年 3 月 *平成 17 年 4 月～グループ 1 に異動

5 招聘した研究者等

氏名(所属、役職)	招聘の目的	滞在先	滞在期間
Gombo Davaa (Head of Hydrology Section , Institute of Meteorology and Hydrology, National Agency for Meteorology, Hydrology and Environment Monitoring of Mongolia)	研究プロジェクトで主催する国際ワークショップに参加してもらい、モンゴル国における水文観測の現状と過去のデータに関する情報提供を含んだ発表をしてもらおうと同時に、プロジェクト参	海洋科学技術センター 東京事務所	H14. 12. 2 ～H14. 12. 6
Adyasuren Tsokhio (President and Professor of Environmental Education and Research Institute ECO ASIA)			

Lamjav OYUNJARGAL (Head of Weather forecasting division, Institute of Meteorology and Hydrology, National Agency for Meteorology, Hydrology and Environment Monitoring of Mongolia)	加者の発表に対して、現地の情報に通じている立場からの適切な助言をしてもらい、議論に参加してもらうことで本プロジェクトのスムーズな進行を計るため.		
田中幸哉(韓国慶熙大学校 文理科大学 地理学科 副教授)	研究プロジェクトで主催する国際ワークショップ参加および発表.	海洋科学技術センター 東京事務所	H14. 12. 2 ～H14. 12. 5
田中幸哉(韓国慶熙大学校 文理科大学 地理学科 副教授)	データ分析・解析に関する情報の共有と次年度の研究スケジュールに関する調整を目的とした研究プロジェクト内のグループミーティング参加および発表.	筑波大学	H15. 11. 6 ～H15. 11. 7
Dambaravjaa Oyunbaatar (Researcher of Institute of Meteorology and Hydrology, National Agency for Meteorology, Hydrology and Environment Monitoring of Mongolia)	研究プロジェクトで主催する国際ワークショップに参加してもらい、モンゴル国における水文観測の現状と過去のデータに関する情報提供を含んだ発表をしてもらうと同時に、プロジェクト参加者の発表に対して、現地の情報に通じている立場からの適切な助言をしてもらい、議論に参加してもらうことで本プロジェクトのスムーズな進行を計るため.	海洋科学技術センター 横浜研究所	H15. 12. 1 ～H15. 12. 6
Sodovyn Khudulmur (Director of the Information and Computer Center, National Agency of Meteorology, Hydrology and Environment Monitoring Director of the National Remote Sensing Center)			
Dolgorsuren Azzaya (Director of Institute of Meteorology and Hydrology, National Agency for Meteorology, Hydrology and Environment Monitoring of Mongolia)			
田中幸哉(韓国慶熙大学校 文理科大学 地理学科 副教授)	研究プロジェクトで主催する国際ワークショップ	海洋科学技術センター 横浜研究所	H15. 12. 1 ～H15. 12. 4

	プ参加および発表.		
田中幸哉（韓国慶熙大学校 文理科大学 地理学科 副教授）	地球惑星科学関連学会2004年合同大会におけるスペシャルセッション出席および発表. これまでに得られた知見から, 今後の研究の方向性を探るための討論に参加してもらう.	幕張メッセ 国際会議場	H16. 5. 12 ～H16. 5. 14
Keith G McNaughton (Research Fellow, School of GeoSciences, University of Edinburgh, Scotland)	The 6 th International Study Conference on GEWEX in Asia and GAME（京都）において本研究チームのグループ1の活動に含まれる「地表面と大気境界層を介した水, 物質輸送」に関する講演および本研究チームの発表論文について議論, アドバイスをもらう.	京都国際交流会館	H16. 12. 1 ～H16. 12. 5

6 成果発表等

(1) 原著論文発表（国内誌 10 件、国際誌 45 件）

○国内誌

1. 杉田倫明(2003): 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. RAISE Projectの概要. 筑波大学陸域環境研究センター報告, No. 3, 147-156.
2. 佐藤友徳(2003): モンゴルにおける地上風系の日変化について. 筑波大学陸域環境研究センター報告, No. 4, 125-128.
3. 佐藤友徳(2004): 2003年7月2日モンゴルで発生した漏斗雲とダウンバースト. 天気, 51, 161-162.
4. 鈴木和美, 山中 勤(2004): Palmer Drought Severity Index (PDSI) を用いたモンゴルの旱魃の解析. 筑波大学陸域環境研究センター報告, No. 5, 3-12.
5. 西川知行, 恩田裕一, 田中幸哉, 加藤弘亮, 辻村真貴, 関李紀, 浅野眞希, Gombo Davaa, Dambaravjaa Dyunbaatar(2005): Cs-137 を用いたモンゴル国における土壌侵食量の推定. 砂防学会誌, Vol. 58, No. 3, 4-14.
6. 鞠子 茂・小泉 博(2005): 生態系炭素フラックスの研究と調査法 ―現状と将来―. 日本生態学会誌 55, 113-116.
7. 廣田 充・鞠子 茂(2005): 土壌における CH₄ の放出および吸収の定量化 日本生

態学会誌 55, 141-150.

8. 佐藤友徳, 木村富士男 (2006): モンゴルにおける環境変化診断のための領域気候シミュレーション. 筑波大学陸域環境研究センター報告, 印刷中.
9. 上米良秀行, 陸 旻皎 (2006): モンゴル東部ヘルレン川流域の水収支の推定. 水工学論文集. 9. 30 投稿予定.
10. 上米良秀行, 佐藤友徳, 陸 旻皎 (2006): モンゴル東部ヘルレン川流域の水文場にみる気候変化の影響. 水文・水資源学会誌. 10. 30 投稿予定.

○国際誌

1. Sato, T. 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. Iwasaki H. (2004): Diurnal Variation of Precipitable Water and Convective Activity with Dual Maxima in Summer Season around Mt. Tanigawa in the northern Kanto District, Japan. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 82, 805-816.
3. Sato, T. (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.
4. Sato, T 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.
5. Liu, J.J., 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.
6. Li, S.-G., 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.
7. Sato, T. 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.
8. Li, S.-G., M. Tsujimura, A. Sugimoto, L. Sasaki, T. Yamanaka, 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.
9. Li, S.-G., 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
10. Li, S.-G., 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.
11. Li, S.-G., 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.
12. Chen, Y., 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/s11258-005-9038-7.
13. 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). *Journal of Hydrology*, 印刷中.
 14. Yamanaka, T., M. Tsujimura, D. Oyunbaatar and G. Davaa(2006): Isotopic variation of precipitation over eastern Mongolia and its implication for atmospheric water cycle. *Journal of Hydrology*, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.07.022, 印刷中.
 15. Tsujimura, M., 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. *Journal of Hydrology*, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.07.025, 印刷中.
 16. Tsujimura, M., 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. *Journal of Hydrology*, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.07.026, 印刷中.
 17. Asanuma, J. and K. Iemoto(2006): Measurements of regional sensible heat flux over Mongolian grassland using large aperture scintillometer. *Journal of Hydrology*, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.07.031, 印刷中.
 18. Kotani, A. and M. Sugita(2006): Variance methods to estimate regional heat fluxes with aircraft measurements in the convective boundary layer. *Journal of Hydrology*, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.07.029, 印刷中.
 19. Matsushima, D. (2006): Estimating regional distribution of surface heat fluxes by combining satellite data and a heat budget model over the Kherlen river basin, Mongolia. *Journal of Hydrology*, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.07.028, in press.
 20. Asano, M., 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. *Journal of Hydrology*, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.07.024, 印刷中.
 21. Li, S.-G., 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. *Journal of Hydrology*, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.07.020, 印刷中.
 22. Mariko, S., T. Urano and J. Asanuma(2006): Effects of irrigation on CO₂ and CH₄ fluxes from a Mongolian steppe soil. *Journal of Hydrology*, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.07.027, 印刷中.
 23. Onda, Y., 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. *Journal of Hydrology*, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.07.030, 印刷中.
 24. Li, S.-G., J. Asanuma, A. Kotani, G. Davaa and D. Oyunbaatar(2006): Evapotranspiration from a Mongolian steppe under grazing and its environmental constraints. *Journal of Hydrology*, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.07.021, 印刷中.
 25. Sato, T., F. Kimura and A. Kitoh(2006): Projection of global warming onto

- regional precipitation over Mongolia using a regional climate model. Journal of Hydrology, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.07.023, 印刷中.
26. Chen, Y., 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. Journal of Hydrology, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.07.019, 印刷中.
 27. Iwasaki, H. and 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, P.3394-3405.
 28. Iwasaki, H. (2006) : Impact of interannual variability of meteorological parameters on vegetation activity over Mongolia. J. Meteor. Soc. Japan, 84, P.745-762.
 29. Sato, T. and F. Kimura(2006): How does Tibetan Plateau affect transition of Indian monsoon rainfall?. Monthly Weather Review, 印刷中.
 30. Yamanaka, T., I. Kaihotsu, D. Oyunbaatar and T. Ganbold(2006): Summertime soil hydrological cycle and surface energy balance on the Mongolian steppe. Journal of Arid Environments, 印刷中.
 31. Iwasaki, H., T. Sato, T. Nii, F. Kimura, K. Nakagawa and I. Kaihotsu(2006): Diurnal variation of convective activity and precipitable water around Ulaanbaator, Mongolia and impact of soil moisture on convective activity in the nighttime. Monthly Weather Review, 投稿中.
 32. Iwasaki, H. (2006): Study on influence of rainfall distribution on NDVI anomaly over the arid regions in Mongolia using an operational weather radar. SOLA (Scientific Online Letters on the Atmosphere), 印刷中.
 33. Li, S.-G., W. Eugster, J. Asanuma, A. Kotani, G. Davaa, D. Oyunbaatar and M. Sugita (2006): Gross ecosystem productivity, light use efficiency and water use efficiency of Mongolian steppe respond quickly to soil moisture pulses, 投稿中.
 34. Li, S.-G., M. Tsujimura, A. Sugimoto, G. Davaa, D. Oyunbaatar and M. Sugita(2006): Temporal variation of $\delta^{13}\text{C}$ of larch leaves from a montane boreal forest in Mongolia, 投稿中.
 35. Yamanaka, T., I. Kaihotsu, D. Oyunbaatar and T. Ganbold(2006): Characteristics and controlling factors of regional-scale surface soil moisture variability over semi-arid grassland in Mongolia. Journal of Meteorological Society of Japan, 投稿中.
 36. Sato, T., F. Kimura and A. Hasegawa(2006): Vegetation and topographic control of cloud activity over arid/semiarid Asia. Journal of Geophysical Research - Atmosphere, 9.30 投稿予定.
 37. Kotani, A. and M. Sugita (2006): Characteristics of Surface Roughness Parameters of the Mongolian Steppe Area. Agricultural and Forest Meteorology, 10.30 投稿予定.
 38. Urano, T., S. Mariko, K. Kawada and T. Oikawa(2006): Influence of rainfall event on CO₂ fluxes in a Mongolian semi-arid grassland. Agriculture, Ecosystems & Environment, 11.1 投稿予定.
 39. Mariko, S. and T. Urano(2006): CO₂ release and CH₄ uptake by ant-nesting soil in a Mongolian semiarid grassland. Soil Biology & Biochemistry, 11.1 投稿予定.
 40. Lee, G., P. Lee, S.-G. Li, M. Sugita and T. Oikawa(2006): Estimation and Validation of Carbon/Water Cycles in a Mongolian Grassland Ecosystem under

Non-grazing Condition Using Sim-CYCLE. Ecological Modeling, (或は、Ecological Research) 11 月中旬投稿予定.

41. Sato, T., M. Tsujimura, T. Yamanaka, F. Kimura, H. Iwasaki and M. Sugita(2006): Intraseasonal variation of oxygen stable isotope in precipitation over semi-arid area in Northeast Asia. Journal of Geophysical Research - Atmosphere, 11.30 投稿予定.
42. Asanuma, J. (2006): Correlating and Decorrelating Modes Between Temperature and Water Vapor Fluctuations in Unstable Surface Layer Revealed with Orthogonal Wavelet Transform, Boundary Layer Meteorology 投稿予定.
43. Tsujimura, M., S. Higuchi, J. Shimada, Y. Abe and T. Tanaka(2006): Groundwater flow modeling in Kherlen River Basin, eastern Mongolia. Hydrological Processes, 11.30 投稿予定.
44. Tanaka, Y., H. Kato, Y. Onda, M. Tsujimura, G. Davaa and D. Oyunbaatar(2006): Runoff generation mechanism in semiarid Mongolia catchments. Hydrological Processes, 11.30 投稿予定.
45. Urano, T., T. Oikawa, and S. Mariko (2006): Soil CO₂ and CH₄ fluxes during a growing season in a Mongolian semiarid grassland. Soil Biology & Biochemistry, 11.30 投稿予定.

(2)その他の著作物 28 件

1. 鈴木将郎 (2002): モンゴル国ヘルレン川流域の植生変化と水文環境の関係. 40p. (筑波大学自然学類卒業論文)
2. 杉田倫明(2003): 水循環プロセスと生態系との係わり-水文学から見たモンゴル高原-. 岩波「科学」, 2003年5月号
3. 田村憲司(2003): モンゴル草原の土壤保全にむけて-土壤学からみたモンゴル高原-. 岩波「科学」, 2003年5月号
4. 浅野眞希(2003): 日本モンゴル学術交流会. 岩波「科学」, 2003年11月号
5. Saandar, M. and M. Sugita(2004): Digital atlas of Mongolian natural environments (1) vegetation, soil, ecosystem and water. CD-ROM, 2004年9月
6. 鞠子 茂: 植物群落の物質循環測定法, 陸上植生に対する地球温暖化影響の調査・測定法, 地球環境調査計測事典, 竹内 均監修 pp. 804-829 (2004)
7. Abe, Yutaka (2004): Study on groundwater flow system in the Kherlen river basin, Mongolia. 63p, Appendix 8p. (筑波大学生命環境科学研究科修士論文)
8. 浅野眞希 (2004): モンゴル国ヘルレン川流域のステップに分布する土壤の諸性質に関する研究. 73p. (筑波大学生命環境科学研究科修士論文)
9. 小島 透 (2004): モンゴル国ヘルレン川流域における蒸発散を支配する要因の解明. 85p. (筑波大学環境科学研究科修士論文)
10. 佐々木リサ (2004): モンゴル国ヘルレン川流域における水循環に伴う安定同位体比変動プロセス. 58p. (筑波大学環境科学研究科修士論文)
11. 西川知行 (2004): 環境同位体を用いたモンゴル国半乾燥地域における土壤侵食量と侵食履歴の推定. 138p. (筑波大学環境科学研究科修理論文)
12. 星野亜季 (2004): モンゴル国における自然草原と耕作放棄地土壤の一般理化学性の比較. 23p. (筑波大学生物資源学類卒業論文)
13. 家本 薫 (2005): 非一様植生面上での大口径シンチロメーターを用いた熱収支の観測. 52p. (筑波大学環境科学研究科修士論文)
14. 松浦陽介 (2005): 衛星データを用いたモンゴル半乾燥域における土地被覆と蒸発散量の推定. 118p. (東北大学理学研究科修士論文)
15. 浦野忠朗 (2005): モンゴル半乾燥草原における放牧区及び禁牧区での地上部バイオマスとCO₂ フラックスの季節変化. 45p. (筑波大学環境科学研究科修士論文)

16. 樋口 覚 (2005): 環境トリチウムおよび3次元流動シミュレーションを用いたモンゴルヘルレン川流域における地下水流動解析 (Groundwater Flow System Study revealed by Environmental Tritium and 3-D Groundwater Flow Simulation in Kherlen River Basin, Mongolia). 89p. (熊本大学自然科学研究科修士論文)
17. Sato, T. (2005): Numerical Study on the Formation Mechanism of the Arid Climate in Northeastern Asia. 98p. (筑波大学生命環境科学研究科博士論文)
18. Kotani, A. (2006): Characteristics of Scalar Admixture in the Atmospheric Boundary Layer and Estimation of Regional Surface Fluxes Over Semi-arid Area. 137p. (筑波大学生命環境科学研究科博士論文)
19. Lee, P. (2006): Estimation and Validation of Carbon/Water Cycles in a Mongolian Grassland Ecosystem under Non-grazing Condition Using Sim-CYCLE. 106p. (筑波大学生命環境科学研究科博士論文)
20. Hoshino, A. (2006): Physico-chemical Properties and Micromorphological Characteristics of the Soils under Grazing and Cultivated Fields in the Kherlen River Basin, Mongolia. 87p. (筑波大学生命環境科学研究科修士論文)
21. 阪口かなえ (2006): モンゴル半乾燥地における夜間蒸発量の評価と推定. 58p. (筑波大学自然学類卒業論文)
22. 烏云娜・田村憲司(2006): 北東アジア半乾燥地域における砂漠化の生態学的過程および土壌肥沃度に関する研究, JSPS 研究報告書. pp. 47.
23. 浅野眞希(2006): モンゴル国北東部における草原土壌の特性および環境要因との相互作用について. 「ユーラシア研究」東洋書店, 2006年11月第35号.
24. Azzaya Dolgesuren・大畑哲夫・杉田倫明・開発一郎(2005): 4th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TERRESTRIAL AND CLIMATE CHANGE IN MONGOLIA, 26-29 July 2005, Ulaanbaatar, Mongolia. GEWEX News(World Climate Research Programme).2006
25. Davaa, G. D. Oyunbaatar, and M. Sugita(2006): Surface Water of Mongolia. モンゴル環境ハンドブック, モンゴル環境ハンドブック編集委員会編, 印刷中
26. 同上, 日本語版, 印刷中
27. 同上, モンゴル語版, 印刷中
28. 浅野眞希(2006): モンゴルの土壌と土壌劣化. モンゴル環境ハンドブック, モンゴル環境ハンドブック編集委員会編, 印刷中

(3)学会発表

①招待公演 (国内会議 6 件、国際会議 20 件)

○国内会議

1. 杉田倫明(2005): RAISE Project: Summary of the First 3 Years' Activities. 「モンゴルの環境は今」ー環境調査の着地点ー「モンゴルの環境は今」実行委員会主催, 駐日モンゴル国大使館, 2005. 5. 14.
2. 杉田倫明(2005): 点での観測, 線・面の推定値. 日本気象学会 2005 年度春季大会, 東京大学, 2005. 5. 16.
3. 浅沼 順(2005): 直交ウェーブレット変換のフラックス観測への応用について. 農業環境工学関連 7 学会 2005 年合同大会, 金沢, 2005. 9. 12.
4. 杉田倫明, 浅沼 順(2005): Recent findings from RAISE project results. 2nd Symposium on Water Cycle in Northern Eurasia. Sapporo, 2005.12.14.
5. 浅沼 順, 家本 薫(2005): Scintillometer Measurement of the Large Scale Sensible Heat Flux over Mongolia Semi-Arid Grassland. 2nd Symposium on Water Cycle in Northern Eurasia. Sapporo, 2005.12.14.
6. 小谷亜由美, 杉田倫明 (2006): 航空機観測データを用いた混合層分散法による地表面フラックスの推定. 日本気象学会 2006 年度春季大会, つくば, 2006. 5. 22

○国際会議

1. Sugita, M. (2002): Evaporation map of the world as estimated from combination of complementary relationship and ABL model and verified with GAME-AAN dataset. VIII International Congress of Ecology, Seoul, Korea, 2002.8.
2. Sugita, M. (2002): RAISE project to study the atmosphere-hydrosphere-biosphere interactions in northeastern Asia. 2002 International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia, Tokyo, 2002.12.3-4.
3. Azzaya, D. (2002): Meteorological observation system in Mongolia. 2002 International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia, Tokyo, 2002.12.3-4.
4. Davaa, G. (2002): Hydrological observation system in Mongolia. 2002 International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia, Tokyo, 2002.12.3-4.
5. Oyunjargal, L. (2002): Activities and operation of the weather forecasting section of the Institute of Meteorology and Hydrology. 2002 International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia, Tokyo, 2002.12.3-4.
6. Sugita, M. (2003): Outline of the RAISE 2003 Field Campaigns and some Initial Findings. The 2nd International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia, Yokohama, 2003.12.2-3.
7. Azzaya D. (2003): Soil moisture studies in Mongolia. The 2nd International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia, Yokohama, 2003.12.2-3.
8. Adyasuren T., M. Erdenetuya, I. Byambakhuu, A. Amgalan (2003): Spectral Reflectance of Some Associations of Plant-Soil in Mongolian Steppe Zone. The 2nd International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia, Yokohama, 2003.12.2-3.
9. Adyasuren T., M. Erdenetuya (2003): Vegetation Cover Monitoring in Mongolian Plateau using Remote Sensing Technology. The 2nd International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia, Yokohama, 2003.12.2-3.
10. Sugita, M., J. Asanuma, S. Mariko, M. Tsujimura, M. Kimura, M. Lu, D. Azzaya and T. Adyasuren (2004): RAISE project: summary for the first three years' activities. International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia 2004, Tsukuba, 2004.11.9-10.
11. Oyunbaatar, D. (2004): Application of flood routing models along the Kherlen river basin. International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia 2004, Tsukuba, 2004.11.9-10.
12. Davaa, G. (2004): Hydrological changes in the upper Tuul river basin. International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia 2004, Tsukuba, 2004.11.9-10.
13. Gomboluudev, P. and L. Natsagdorj (2004): The impact of desertification on Mongolian climate and its numerical study using regional climate model (RegCM3). International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia 2004, Tsukuba, 2004.11.9-10.
14. Ganbaatar, T. and D. Azzaya (2004): Climate change impact on *Microux brandii* Radde and *Agriddae* in Mongolia. International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia 2004, Tsukuba, 2004.11.9-10.
15. Adyasuren, T. (2004): ECOASIA/FAO. Mongolian natural resource (land and water) database gateway. International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia 2004, Tsukuba, 2004.11.9-10.
16. Mijiddorj, S. (2004): GIS approach to the thematic mapping of Mongolian natural environments. International Workshop on Terrestrial Change in

- Mongolia 2004, Tsukuba, 2004.11.9-10.
17. Sugita, M. (2005): Recent findings from RAISE project. The First International Symposium on Terrestrial and Climate Change in Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia, 2005.7.26-29.
 18. Oyunjargal, L. (2005): Comparison between the RADAR precipitation data and rain-gauge data. The First International Symposium on Terrestrial and Climate Change in Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia, 2005.7.26-29.
 19. Adyasuren, T., M. Sugita and M. Erdenetuya (2005): Assessment of pastureland change using remote sensing data in Eastern Steppe zone of Mongolia. The First International Symposium on Terrestrial and Climate Change in Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia, 2005.7.26-29.
 20. Oyunbaatar, D., D. Matsushima, M. Sugita and T. Sato (2005): Comparison between AWS and standard station measurements of basic hydrometeorological elements in Kherlen river basin-RAISE Projects area. The First International Symposium on Terrestrial and Climate Change in Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia, 2005.7.26-29.

②口頭発表（国内会議 57 件、国際会議 41 件）

○国内会議

1. 中村史郎, 浅沼 順, 檜山哲哉, M. Strunin, 大畑哲夫(2002): 航空機観測によるシベリアタイガ林上のフラックスの空間分布について. 日本気象学会 2002 年春季大会, 2002.5.
2. 浅沼 順, 上米良秀行(2002): わが国における過去 30 年間のパン蒸発の長期トレンドについて. 水文水資源学会 2002 年研究発表会, 2002.8.1.
3. 浅沼 順 (2003): モンゴル森林・草原変遷域におけるフラックス観測. 基盤研究 (A) (1) ”各 種陸上生態系における炭素・水・熱フラックスの相互関係の微気象生態学的解析” 成果発表会, 2003.10.18.
4. 辻村真貴, 嶋田 純(2003): モンゴル・ヘルレン川流域における地下水流動系. 地球惑星科学関連学会 2003 年度合同大会, 幕張メッセ, 2003.5.29.
5. 杉田倫明, 小谷亜由美, 小島 透(2003): 乾燥地域の水循環プロセスの解明: モンゴル国ヘルレン川流域における大気-地表面相互作用. 2003 年度日本水文科学会学術大会, 茨城県つくば市, 2003.10.30-31.
6. 辻村真貴(2004): トレーサー水文学の可能性ーモンゴルにおける研究事例を中心にー. 日本学術会議地球環境研連GWSP (Global Water System Project) 小委員会研究会 (ペアーレ京都), 2004.2.19-20.
7. 家本 薫, 浅沼 順(2004): シンチロメーターを用いた顕熱フラックスの計測について. 琵琶湖プロジェクトにおける水・熱フラックスの監視・予測技術に関する研究会, つくば, 2004.2.21.
8. 松島 大(2004): モンゴルで行った気象観測と植生リモートセンシング. 仙台管区気象台 科学講演会, 仙台, 2004.2.23.
9. 杉田倫明(2004): 最近の地球環境関連分野における気象・水文計測器の利用. 日本農業気象学会セミナー. 東京ビッグサイト, 2004.4.9.
10. 杉田倫明(2004): 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: RAISE プロジェクトの概要. 地球惑星科学関連学会2004年合同大会スペシャルセッション, 幕張メッセ, 2004.5.13.
11. 松島 大, 松浦陽介(2004): 草地における地表面の二方向・分光反射特性. 地球惑星科学関連学会2004年合同大会スペシャルセッション, 幕張メッセ, 2004.5.13.
12. 松浦陽介, 松島 大(2004): パターン解析によるモンゴル北東部の土地被覆推定. 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会スペシャルセッション, 幕張メッセ,

2004. 5. 13.
13. 小島 透, 杉田倫明, 小谷亜由美(2004): モンゴル・ヘルレン川流域における蒸発散過程を支配する要因の解明. 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会スペシャルセッション, 幕張メッセ, 2004. 5. 13.
 14. 家本 薫(2004): モンゴル草原サイトにおけるシンチロメーターによる顕熱フラックスの測定. 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会スペシャルセッション, 幕張メッセ, 2004. 5. 13.
 15. 小谷亜由美, 杉田倫明(2004): 航空機データを用いた広域地表面フラックスの推定. 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会スペシャルセッション, 幕張メッセ, 2004. 5. 13.
 16. 浦野忠朗, 鞠子 茂, 川田清和, 李 吉宰, 及川武久(2004): モンゴル草原におけるバイオマスと CO₂ フラックスの時間変化. 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会スペシャルセッション, 幕張メッセ, 2004. 5. 13.
 17. 劉 建軍(2004): Influence of Grazing Pressures on Belowground Biomass and Productivity in Mongolia Steppe. 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会スペシャルセッション, 幕張メッセ, 2004. 5. 13.
 18. 田村憲司, 浅野真希, 星野亜季, 東 照雄(2004): 降水量のことなるヘルレン川流域のステップにおける土壌断面形態的特徴. 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会スペシャルセッション, 幕張メッセ, 2004. 5. 13.
 19. 浅野真希, 田村憲司, 東 照雄, 前島勇治(2004): モンゴル国北東部のステップにおけるカスタンノーゼムの諸性質と気候の関係, 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会スペシャルセッション, 幕張メッセ, 2004. 5. 13.
 20. 星野亜季, 田村憲司, 浅野真希, 東 照雄(2004): モンゴル国ケルレン川流域における草原土壌と耕作放棄地土壌の断面形態と一般理化学性の比較. 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会スペシャルセッション, 幕張メッセ, 2004. 5. 13.
 21. 李 勝功(2004): モンゴルカラマツ林における植物の水の酸素安定同位体の変化とモデリング. 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会スペシャルセッション, 幕張メッセ, 2004. 5. 13.
 22. 山中 勤, 辻村真貴, 佐々木リサ, 杉本敦子(2004): 草原上の大気水蒸気および蒸発散フラックスの安定同位体組成: 日本とモンゴルの比較. 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会スペシャルセッション, 幕張メッセ, 2004. 5. 13.
 23. 佐々木リサ, 辻村真貴, 山中 勤, 杉本敦子, 李 勝功(2004): ヘルレン川流域における水循環に伴う安定同位体比変動プロセス. 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会スペシャルセッション, 幕張メッセ, 2004. 5. 13.
 24. 安部 豊, 田中 正, 辻村真貴, 嶋田 純, 樋口 覚(2004): トレーサーからみたモンゴル・ヘルレン川流域における地下水涵養機構. 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会スペシャルセッション, 幕張メッセ, 2004. 5. 13.
 25. 樋口 覚, 嶋田 純, 辻村真貴, 安部 豊(2004): トリチウムを用いたモンゴルケルレン川流域における地下水流動評価. 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会スペシャルセッション, 幕張メッセ, 2004. 5. 13.
 26. 嶋田 純, 辻村真貴, 樋口 覚, 安部 豊, 斎藤 章(2004): モンゴル・ケルレン川河谷低地における TEM 法による地下水賦存特性の把握. 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会スペシャルセッション, 幕張メッセ, 2004. 5. 13.
 27. 陸 旻皎, 上米良秀行(2004): Hydrological observation and preliminary analysis of Kherlen River basin. 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会スペシャルセッション, 幕張メッセ, 2004. 5. 13.
 28. 恩田裕一, 田中幸哉, 辻村真貴, 西川知行, 加藤弘亮(2004): 環境同位体を用いたモンゴル国半乾燥地域における土壌侵食量と侵食履歴の推定. 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会スペシャルセッション, 幕張メッセ, 2004. 5. 13.

29. 田中幸哉, 西川知行, 加藤弘亮, 恩田裕一, 辻村真貴 (2004): モンゴル国ヘルレン河流域の小流域における表面流発生および土砂流出の違い. 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会スペシャルセッション, 幕張メッセ, 2004. 5. 13.
30. 佐藤友徳, 辻村真貴, 木村富士男, 佐々木リサ (2004): 領域気候モデルを用いたモンゴル東部における大気水収支解析. 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会スペシャルセッション, 幕張メッセ, 2004. 5. 13.
31. 岩崎博之, 新居知巳 (2004): モンゴルにおける「雨期の中休み」の特徴. 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会スペシャルセッション, 幕張メッセ, 2004. 5. 13.
32. 岩崎博之, 新居知巳 (2004): モンゴルにおける気象要素の年々変動・季節変動が NDVI に与える影響, 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会スペシャルセッション, 幕張メッセ, 2004. 5. 13.
33. 近藤昭彦 (2004): モンゴル草原における植物生産力とフェノロジーの年々変動. 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会スペシャルセッション, 幕張メッセ, 2004. 5. 13.
34. 佐藤友徳, 木村富士男 (2004): 北東アジアにおける乾燥気候の形成に対するチベット高原の役割. 日本気象学会 2004 年度春季大会, 気象庁, 2004. 5. 16.
35. 西川知行 (2004): Cs-137 を用いたモンゴル国における土壌侵食量の推定. 砂防学会, 宮崎, 2004. 5. 18-19
36. 松島 大 (2004): 陸面過程とリモートセンシングあれこれ. 第 16 回日本気象学会夏季特別セミナー, 2004. 7. 24.
37. 浅野眞希, 田村憲司, 前島勇治, 松崎浩之, 東 照雄 (2004): 放射性炭素年代測定法によるカスタンノーゼム炭酸塩集積層の生成速度について. 日本土壌肥料学会 2004 年度大会, 福岡, 2004. 9. 15
38. 佐藤友徳, 木村富士男 (2004): 北東アジアの乾燥域形成に及ぼすチベット高原の顕潜熱加熱. 日本気象学会 2004 年度秋季大会, 福岡, 2004. 10. 8
39. 安部 豊, 田中 正, 辻村真貴 (2004): モンゴル・ヘルレン川流域における地下水涵養プロセス. 日本地下水学会 2004 年秋季講演会, 熊本, 2004. 11. 1-2
40. 浅野眞希, 田村憲司, 前島勇治, 松崎浩之, 東 照雄 (2005): 半乾燥地域に分布する土壌の炭酸塩集積速度の推定. AMS 研究協会第 7 回 AMS シンポジウム, 京都, 2005. 1. 13.
41. 松島 大 (2005): リモートセンシングや大気境界層観測による大気-地表面間の熱・水交換過程のモデル化・定量化. 東京都立大学大学院理学研究科 集中講義「自然地理学特別講義 II」, 2005. 1. 31-2. 2
42. 浅沼 順 (2005): 不安定接地層内のフリーエ/フェーズ空間におけるスカラー間の相似性. 地表面フラックス面的分布に関する研究会, 2005. 2. 26.
43. 樋口 覚 (2005): 環境トリチウムおよび 3 次元流動シミュレーションを用いたモンゴルヘルレン川流域における地下水流動解析. Inter-University Hydrology and Hydrogeology Seminar 2005, 2005. 2. 28.
44. 川田清和, 浦野忠朗, 及川武久, 中村 徹, 田村憲司, 杉田倫明, 鞠子 茂 (2005): モンゴルステップにおける放牧の有無が植物群落構造におよぼす影響, 日本生態学会 52 回大会. 大坂 2005. 3. 28.
45. 辻村真貴, 安部 豊, 田中 正, 嶋田 純, 樋口 覚, 上米良秀行 (2005): モンゴル・ヘルレン川流域における河川水と地下水の交流関係. 水文水資源学会, 筑波大学, 2005. 7. 4.
46. 浅沼 順, 家本 薫 (2005): Scintillometer Measurement of the Large Scale Sensible Heat Flux. 海洋研究開発機構 地球環境観測研究センターでのセミナー, 横須賀, 2006. 2. 15.
47. 松島 大 (2006): 衛星データと熱収支モデルを併用した地表面熱フラックスと関連するパラメータの推定. 日本地球惑星科学連合 2006 年大会, 2006. 5. 18.

48. 松島 大 (2006): リモートセンシングと数値モデルによる地表面熱フラックスと関連するパラメータの推定, 日本気象学会 2006 年度春季大会, つくば, 2006. 5. 22.
49. 松島 大 (2006): 衛星データと地表面熱収支モデルの併用による表層土壌水分広域分布の推定可能性. 北ユーラシア気候変化・水循環変動に関する研究集会, 横浜, 2006. 7. 3.
50. 岩崎博之 (2006): モンゴルの植生活動度の予測可能性. 北ユーラシア気候変化. 水循環変動に関する研究集会, 横浜, 2006. 7. 3.
51. 岩崎博之 (2006): モンゴルで見られる 2 タイプの降水の季節変動. 北ユーラシア気候変化. 水循環変動に関する研究集会, 横浜, 2006. 7. 3.
52. 小谷亜由美 (2006): 高緯度半乾燥地域における大気境界層の研究. 北ユーラシア気候変化. 水循環変動に関する研究集会, 横浜, 2006. 7. 3.
53. 辻村真貴 (2006): モンゴルにおける地下水を中心としたトレーサー水文学研究の課題と可能性. 北ユーラシア気候変化. 水循環変動に関する研究集会, 横浜, 2006. 7. 4.
54. 佐藤友徳 (2006): 地球温暖化と植生変化による半乾燥地域の気候変化. 北ユーラシア気候変化・水循環変動に関する研究集会, 横浜, 2006. 7. 4.
55. 浅沼 順 (2006): モンゴル草原における大口径シンチロメータによる広域顕熱フラックスの観測. 水文水資源学会 2006 年研究発表会, 岡山, 2006. 8. 29
56. 浅野真希, 田村憲司, 前島勇治, 松崎浩之, 木方展治, 藤原英司, 東 照雄 (2006): モンゴル国ステップにおける土壌の炭酸塩集積過程の解明ー加速器質量分析計を用いた時間要因解析法の検討ー. 日本土壌肥料学会 2006 年度大会, 秋田, 2006. 9. 5.
57. 浅沼 順 (2006): モンゴル草原における大口径シンチロメータを用いた広域平均フラックスの測定について. 農業環境工学関連 7 学会 2006 年合同大会, 札幌, 2006. 9. 12

○国際会議

1. Tanaka, Y. (2002): Runoff processes of granite and sandstone drainage basins around Ulaanbaatar. 2002 International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia, Tokyo, 2002. 12. 3-4.
2. Asanuma, J., D. Matsushima and M. Sugita (2002): Surface flux observations during RAISE intensive observation and estimation of regional energy/water fluxes over Kherlen river basin. 2002 International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia, Tokyo, 2002. 12. 3-4.
3. Tsujimura, M. (2002): Isotopic analysis to study hydrological processes in Mongolia. 2002 International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia, Tokyo, 2002. 12. 3-4.
4. Mariko, S. and G. Lee (2002): Ecological model and observations to study grazing and climatic impacts on Mongolian rangeland. 2002 International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia, Tokyo, 2002. 12. 3-4.
5. Kimura, F. and T. Sato (2002): The roles of orography on northeastern Asia dry climate. 2002 International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia, Tokyo, 2002. 12. 3-4.
6. Sato, T. and F. Kimura (2002): The relationship between precipitable water and static stability around the Central mountains in Japan during the warm season. International Workshop on GPS Meteorology, 2003, 2003. 1. 6.
7. Sato, T. and F. Kimura (2002): The orographical effect on the formation of arid climate in northern China. The 2nd workshop on regional climate modeling

- for monsoon system, 2003, 2003.3.
8. Onda, Y., T. Nishikawa, H. Kato, Y. Tanaka, M. Tsujimura, G. Davaa and D. Oyunbaatar (2003): Overlandflow generation and surface erosion in Mongolia. American Geophysical Union, Fall Meeting, San Francisco, 2003.12.12.
 9. Tsujimura, M. (2003): Water and mass cycle processes revealed by tracer approach in Kherlen River Basin, eastern Mongolia. The 2nd International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia, Yokohama, 2003.12.2-3.
 10. Lu, M., H. Kamimera, D. Oyunbaatar and D. Gombo (2003): Hydrological observation and preliminary analysis of Kherlen River basin. The 2nd International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia, Yokohama, 2003.12.2-3.
 11. Sato, T. and F. Kimura (2003): Subsidence over East Asia responded by diabatic heating of Tibetan Plateau. The 2nd International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia, Yokohama, 2003.12.2-3.
 12. Mariko, S., T. Urano and T. Oikawa (2003): Biomass and carbon fluxes in a Mongolian grassland. The 2nd International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia, Yokohama, 2003.12.2-3.
 13. Li, S.-G., J. Asanuma, A. Kotani and M. Sugita (2003): Environmental controls on CO₂ flux over Mongolian larch forest and steppe grassland. The 2nd International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia, Yokohama, 2003.12.2-3.
 14. Lu, M., H. Kamimera, H. Doi, D. Oyunbaatar and G. Davaa (2004): Spatial Variation and Long-Term Change of Hydrological Regime of Kherlen River Basin, Mongolia. Western Pacific Geophysics Meeting, 2004, Hawaii, 2004.8.18.
 15. Iwasaki, H. (2004): Impact of interannual variability of meteorological parameters on NDVI over Mongolia. The Sixth International Workshop on Climate Change in Arid and Semi-Arid Region of Asia, Ulaanbaatar, Mongolia, 2004.8.25-26.
 16. Tsujimura, M. (2004): Budget analysis on groundwater and river water interaction in Kherlen River Basin, eastern Mongolia. International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia 2004, Tsukuba, 2004.11.9-10.
 17. Tanaka, T., M. Tsujimura and Y. Abe (2004): Groundwater recharge process in Kherlen River basin, eastern Mongolia. International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia 2004, Tsukuba, 2004.11.9-10.
 18. Iwasaki, H. (2004): Impact of interannual variability of meteorological parameters on vegetation activity and predict possibility of vegetation activity over Mongolia. International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia 2004, Tsukuba, 2004.11.9-10.
 19. Matsushima, D., Y. Matsuura, I. Byambakhuu and T. Adyasuren (2004): An estimation of areal distribution of evapotranspiration over Khentii region using a combination of satellite data and a heat budget model. International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia 2004, Tsukuba, 2004.11.9-10.
 20. Doi, H., M. Lu and H. Kamimera (2004): Development of a physically based model for soil water and heat transfer processes in semi-arid cold region. International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia 2004, Tsukuba, 2004.11.9-10.
 21. S.-G. Li, J. Asanuma, A. Kotani, G. Davaa, D. Oyunbaatar and M. Sugita (2004): Water balance for a Mongolian steppe and its environmental constraints. International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia 2004, Tsukuba,

2004. 11. 9-10.
22. Urano, T., O. Takehisa, M. Shigeru and K. Kawada (2004): Seasonal dynamics of biomass and carbon dioxide fluxes in a Mongolian grassland. International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia 2004, Tsukuba, 2004. 11. 9-10.
 23. Sato, T., F. Kimura and A. Hasegawa (2004): Cloud frequency in eastern Mongolia and its relation to the orography. International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia 2004, Tsukuba, 2004. 11. 9-10.
 24. Kimura, F. and T. Sato (2004): Downscaling of precipitation over Mongolia using regional climate model. International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia 2004, Tsukuba, 2004. 11. 9-10.
 25. Sato, T. and F. Kimura (2004): The impact of diabatic heating over the Tibetan plateau upon Northeastern Asia arid region. The 6th International Study Conference on GEWEX in Asia and GAME, Kyoto. 2004. 12. 4.
 26. Asanuma, J. (2005): Schintilometer measurements of Regional Sensible Heat Flux at KBU. The First International Symposium on Terrestrial and Climate Change in Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia, 2005. 7. 26-29.
 27. Tanaka, T., M. Tsujimura and Y. Abe (2005): Groundwater Recharge Process in Arid and Semi-arid Regions. First International Symposium on Terrestrial and Climate Change in Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia, 2005. 7. 26-29.
 28. Matsushima, D. (2005): Estimating Regional Evapotranspiration over Kherlen River Basin Combining Satellite Data and a Heat Budget Model. The First International Symposium on Terrestrial and Climate Change in Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia, 2005. 7. 26-29.
 29. Iwasaki, H. (2005): The break in Mongolian rainy season and its possible mechanism. The First International Symposium on Terrestrial and Climate Change in Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia, 2005. 7. 26-29.
 30. Sato, T. (2005): Numerical experiment on precipitation change over Mongolia under global warming. The First International Symposium on Terrestrial and Climate Change in Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia, 2005. 7. 26-29.
 31. Tsujimura, M. (2005): Summary of products by tracer approach in RAISE project (tentative). The First International Symposium on Terrestrial and Climate Change in Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia, 2005. 7. 26-29.
 32. Tanaka, Y., H. Kato, T. Nishikawa, Y. Onda, M. Tsujimura, D. Oyunbaatar and G. Davaa (2005): Comparative study on overland flow generation in Baganuur and Kherlenbayan-Ulaan drainage basins. The First International Symposium on Terrestrial and Climate Change in Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia, 2005. 7. 26-29.
 33. Sato, T. and F. Kimura (2005): Diurnal cycle of precipitable water vapor and convective instability around the central mountains in Japan during August 2000. IAMAS 2005 scientific assembly, Beijing, 2005. 8. 5.
 34. Sato, T. and F. Kimura (2005): Role of mountains on the formation of the arid climate in northwestern China. IAMAS 2005 scientific assembly, Beijing, 2005. 8. 11.
 35. Asano, M., K. Tamura, Y. Maejima, Y. Shirato, H. Matsuzaki, J. Undarmaa, and T. Higashi (2006): The Carbon Isotopic Composition of Pedogenic CaCO_3 in the Steppe Soils, Mongolia, Oxford, England, 2005. 4. 6.
 36. Kato, H., Y. Onda, M. Tsujimura, Y. Tanaka, G. Davva and D. Oyunbaatar (2006): Determining Soil Erosion History and Processes Using Fallout Radionuclides in Semi-arid Grassland, Mongolia. Japanese Geomorphological Union, Joint

- International Meeting Environmental Changes and Earth Surface Processes in Semi-arid and Temperate Areas, Ulaanbaatar, Mongolia, 2006.6.11.
37. Tanaka, Y., H. Kato, Y. Onda, M. Tsujimura, G. Davaa and D. Oyunbaatar(2006): Runoff Generation Mechanism in Semiarid Mongolian Catchments. Japanese Geomorphological Union, Joint International Meeting Environmental Changes and Earth Surface Processes in Semi-arid and Temperate Areas, Ulaanbaatar, Mongolia, 2006.6.11.
 38. Tsujimura, M. (2006): Groundwater hydrology and modelling (1): Integrated approaches of multi-tracers, geophysical and modeling techniques to investigate the groundwater hydrology -A case study in Kherlen River basin, eastern Mongolia-. National Workshop on "Groundwater Hydrology and Management", Ulaanbaatar, Mongolia, 2006.6.15.
 39. Sato, T. (2006): Comparative study on the land-cover change and global warming impacts on regional climate in Northeast Asia. ESF-JSPS Frontier Science Conference for Young Researchers 2006 -Climate Change-, Sweden, 2006.6.27.
 40. Sato, T. and F. Kimura (2006): Mechanical and thermal influence of Tibetan Plateau on seasonal change of precipitation in South Asia. University allied workshop 2006, Taiwan, 2006.7.19.
 41. Sato, T. (2006): Numerical study on the arid climate formation in middle latitude Asia. RACHAD2006 workshop, Lanzhou, China, 2006.7.26.

②ポスター発表（国内会議 21 件、国際会議 25 件）

○国内会議

1. 佐藤友徳, 木村富士男(2002): 北東アジアにおける乾燥気候の形成と山岳による影響(数値実験). 日本気象学会 2002 年度秋季大会, 2002.10.9.
2. 川田清和, 及川武久, 中村徹, 田村憲司, 杉田倫明, 李 吉宰, 浦野忠朗, 鞠子茂(2003): 「モンゴルステップにおける植生および炭素フラックス」. 日本生態学会、つくば, 2003.3.20.
3. 浅野眞希, 田村憲司, 前島勇治, 川田清和, 東 照雄(2004): モンゴル国ヘルレン川流域のステップに分布する土壌の諸性質. 日本ペドロロジー学会 2004 年度大会、国立科学博物館 新宿分館, 2004.4.3.
4. 岩崎博之, 新居知己(2004): モンゴルにおける気象要素の年々変動と植生指標の年々変動の関係. 日本気象学会 2004 年度春季大会, 東京, 2004.5.18.
5. 岩崎博之, 新居知己(2004): モンゴルにおける「雨期の中休み」について. 日本気象学会 2004 年度春季大会, 東京, 2004.5.18.
6. 浦野忠朗, 川田清和, 鞠子 茂, 及川武久(2005): モンゴル草原における地上部バイオマスと CO2 フラックスの時間変化. 日本生態学会 大阪大会, 2005.3.28.
7. 浅野眞希, 田村憲司, 前島勇治, 白戸康人, 松崎浩之, 東 照雄(2005): モンゴル国ステップおよびゴビステップにおける炭酸塩炭素 $\delta^{14}\text{C}$ 値の垂直分布特性の比較. 日本ペドロロジー学会 2005 年度大会, 2005.4.3.
8. 佐藤友徳, 長谷川 明, 木村富士男(2005): モンゴル東部における雲の出現パターンと地形起伏の関係. 日本気象学会 2005 年度春季大会, 東京大学, 2005.5.15.
9. 浅沼 順(2005): 直交ウェーブレット変換から見た温度と水蒸気量の相似性. 日本気象学会 2005 年度春季大会, 東京大学, 2005.5.15.
10. 家本 薫, 松島 大, 浅沼 順(2005): 非一様植生面上での大口径シンチロメーターを用いた地表面熱収支の観測. 日本気象学会 2005 年度春季大会, 東京大学, 2005.5.15.
11. 岩崎博之, 新居知己(2005): モンゴルにおける「雨期の中休み」期間の大規模循環場の特徴. 日本気象学会 2005 年度春季大会, 東京大学, 2005.5.16.

12. 松島 大(2005):モンゴル国の半乾燥域における展葉開始期と気象条件の関係. 日本気象学会 2005 年度春季大会, 東京大学, 2005. 5. 16.
13. 小谷亜由美, 杉田倫明(2005): 航空機観測データを用いた混合層分散法による地表面フラックスの推定. 日本気象学会 2005 年度春季大会, 東京大学, 2005. 5. 17.
14. 浅野眞希, 田村憲司, 前島勇治, 白戸康人, 松崎浩之, 木方展治, 東 照雄(2005): モンゴル国草原土壌における無機炭素の同位体分布特性. 日本土壌肥料学会 2005 年度大会, 島根, 2005. 9. 6-7.
15. 岩崎博之, 佐藤友徳, 新居知己, 李勝功, 開発一郎, 小池俊雄(2005): モンゴルにおける積乱雲活動と可降水量の日変化の関係について. 日本気象学会 2005 年度秋季大会, 神戸, 2005. 11. 20.
16. 川瀬宏明, 木村富士男, 佐藤友徳(2005): 夏季のモンゴルに降水をもたらす擾乱. 日本気象学会 2005 年度秋季大会, 神戸, 2005. 11. 20.
17. 岩崎博之 (2005): 中緯度の定在 Rossby 波と熱帯大気の相互作用の可能性. 日本気象学会 2005 年度秋季大会, 神戸, 2005. 11. 22.
18. 烏云娜, 田村憲司, 浅野眞希, 東 照雄 (2006): モンゴル国の草原生態系回復過程における群落構造と土壌理化学性. 日本ペドロロジー学会, 神奈川, 2006. 3. 20
19. 星野亜季, 田村憲司, 藤巻晴行, 浅野眞希, 東 照雄(2006): 耕作および放牧が草原の土壌諸性質に及ぼす影響 ～モンゴル国ヘンティ県における事例～. 日本ペドロロジー学会, 神奈川, 2006. 3. 20.
20. 浦野忠朗, 鞠子 茂, 杉田倫明, 浅沼 順, 及川武久(2006): モンゴル半乾燥草原における土壌炭素フラックス. 第 53 回日本生態学会大会, 新潟, 2006. 3. 25.
21. 新居知己, 岩崎博之, 遠藤伸彦(2006): モンゴルにおける降水の年々変動と季節変動に関する研究. 日本気象学会 2006 年度春季大会, つくば. 2006. 5. 21.

○国際会議

1. Kato, H., S. Mariko, T. Urano and M. Sugita (2004): Influence of Grazing on Surface fluxes and Net Ecosystem Production over the Mongolian Grassland. International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia 2004, Tsukuba, 2004. 11. 9-10.
2. Kotani, A. and M. Sugita (2004): Aircraft turbulence measurements to estimate surface heat fluxes from the mixed layer variance methods over semi-arid grassland in Mongolia. International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia 2004, Tsukuba, 2004. 11. 9-10.
3. Matsuura, Y. and D. Matsushima (2004): Estimation of Evapotranspiration in Northeastern Mongolia combining Satellite data and Ground data. International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia 2004, Tsukuba, 2004. 11. 9-10.
4. Hoshino, A., K. Tamura, M. Asano, and T. Higashi (2004): Comparison of several properties between the soils under the grassland and the abandoned field in the Kherlen river basin, Mongolia. International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia 2004, Tsukuba, 2004. 11. 9-10.
5. Yamanaka, T., M. Tsujimura, D. Oyunbaatar and G. Davaa (2004): Isotopic variation of precipitation over eastern Mongolia. International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia 2004, Tsukuba, 2004. 11. 9-10.
6. Kamimara, H., M. Lu, H. Doi, D. Oyunbaatar and G. Davaa (2004): Spatial Variation and Long-Term Change of Hydrological Regime of Kherlen River Basin, Mongolia. International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia 2004, Tsukuba, 2004. 11. 9-10.
7. Kato, H. (2004): Overland flow generation and surface erosion in Mongolia.

- International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia 2004, Tsukuba, 2004.11.9-10.
8. Sato, T., G. Lee, M. Lu, P. Lee, Y. Chen, H. Kamimera, F. Kimura, T. Oikawa and M. Sugita (2004): Modeling approach to the atmosphere-hydrosphere-biosphere interactions in Mongolia. International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia 2004, Tsukuba, 2004.11.9-10.
 9. Iwasaki, H. (2004): On "break" in Mongolian rainy season. International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia 2004, Tsukuba, 2004.11.9-10.
 10. Higuchi, S., J. Shimada, M. Tsujimura, Y. Abe and G. Davaa (2004): Groundwater flow system in Kherlen River Basin revealed by environmental tritium. International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia 2004, Tsukuba, 2004.11.9-10.
 11. Tsujimura, M. (2004): Hydrological processes in Kherlen River Basin revealed by isotope tracer approaches. International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia 2004, Tsukuba, 2004.11.9-10.
 12. Asano, M., K. Tamura, Y. Maejima, H. Matsuzaki and T. Higashi (2004): The characteristics of soils at the steppe of Kherlen River Basin, Mongolia. International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia 2004, Tsukuba, 2004.11.9-10.
 13. Asanuma, J. (2005): Time-Scale Analysis of Surface Flux Components over Mongolian Grassland and Forest. The First International Symposium on Terrestrial and Climate Change in Mongolia, 2005.7.26-29.
 14. Kato, H., Y. Onda, Y. Tanaka, T. Nishikawa, G. Davaa, and D. Oyunbaatar (2005): Influence of grazing on surface heat balance, vegetation and carbon dioxide flux over the Mongolian grassland. The First International Symposium on Terrestrial and Climate Change in Mongolia, 2005.7.26-29.
 15. Kotani, A. (2005): Estimation of surface heat fluxes around Kherlen river basin by airborne turbulence data. The First International Symposium on Terrestrial and Climate Change in Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia, 2005.7.26-29.
 16. Asano, M. (2005): Genesis of calcic horizons in Mongolian steppe soils using radiocarbon isotope analysis. The First International Symposium on Terrestrial and Climate Change in Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia, 2005.7.26-29.
 17. Hoshino, A. (2005): Effects on water retention by cultivation and grazing in the Kherlen river basin, Mongolia. The First International Symposium on Terrestrial and Climate Change in Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia, 2005.7.26-29.
 18. Li, S.-G. (2005): How summer season precipitation affects net ecosystem carbon dioxide exchange over the grazing steppe in central Mongolia. The First International Symposium on Terrestrial and Climate Change in Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia, 2005.7.26-29.
 19. Matsushima D. (2005): Estimating Inter- and Intra- Seasonal Changes of Satellite NDVI and LAI over Kherlen River Basin Using a Bi-Directional Reflectance Correction. The First International Symposium on Terrestrial and Climate Change in Mongolia. Ulaanbaatar, Mongolia, 2005.7.26-29.
 20. Kamimera, H. and M. Lu (2005): Runoff Analysis of the Kherlen River Basin using the Distributed Hydrological Model. The First International Symposium on Terrestrial and Climate Change in Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia, 2005.7.26-29.

21. Chen, Y., P. Lee, G. Lee, S. Mariko and T. Oikawa (2005): Simulation about grazing effect on below-ground processes of a Mongolian grassland ecosystem. The First International Symposium on Terrestrial and Climate Change in Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia, 2005.7.26-29.
22. Byambakhuu, I. (2005): Estimation of vegetation indices using ground spectral measurements at Kherlen Bayan-Ulaan site of RAISE project. The First International Symposium on Terrestrial and Climate Change in Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia, 2005.7.26-29.
23. Asano, M., K. Tamura, Y. Maejima, Y. Shirato, H. Matsuzaki and T. Higashi (2005): $\Delta^{14}\text{C}$ variations of pedogenetic CaCO_3 in Steppe soils under climatic sequence, The 10th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry, Berkeley, CA, 2005.9.8.
24. Kato, H., Y. Onda, Y. Tanaka, M. Tsujimura, G. Davaa and D. Oyunbaatar (2006): Evaluating soil erosion history using fallout radionuclides in semi-arid grassland. Mongolia European Geosciences Union, Vienna, 2006.4.7.
25. Kato, H., Y. Onda, M. Tsujimura, Y. Tanaka, G. Davva and D. Oyunbaatar (2006): Determining Soil Erosion History and Processes Using Fallout Radionuclides in Semi-arid Grassland, Mongolia. Japanese Geomorphological Union. Joint International Meeting Environmental Changes and Earth Surface Processes in Semi-arid and Temperate Areas, 2006.6.11.

(4)特許出願

- ①国内出願 (0 件)
- ②海外出願 (0 件)

(5)受賞等

①受賞

浦野忠朗他(2006):第 53 回日本生態学会大会, ポスター賞(優秀賞)

②新聞報道

Mongolian daily newspaper: "Onoodor" (Today), No. 65 (1527), 2002.03.18

7 研究期間中の主な活動

(1) ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2002 年 12 月 3-4 日	2002 International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia	海洋科学技術センター・東京事務所	100 名	モンゴル国を対象にした自然環境変化を扱っている 3 つのプロジェクトが相互の研究成果・情報・意見の交換を行うことで今後の研究の進展を計ることを目的に共同開催したワークショップ。各プロジェクトから個々の研究テーマに関する合計 30 件の発表があり、6 セッションで討論が行われた。

2003年8月8日	蒙日合同ワークショップ	モンゴル国立気象・水文研究所 (IMH) ・ Mongolia	37名(そのうち、モンゴル側 22名)	モンゴル国立気象・水文研究所 (IMH) との合同ワークショップ. 相互の研究に関する認識を共有することを目的に開催. 日本側の代表、及川・木村・安成の3教授がこれまでの関連研究事例や RAISE プロジェクトにおける研究計画を紹介した.
2003年12月2-3日	The 2 nd International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia	海洋科学技術センター・横浜研究所	106名	2002年に引き続きモンゴル国を対象とした自然環境変化を扱っている3つのプロジェクトで共同開催したワークショップ. 各プロジェクトからの発表(計32件)とホストグループである地球観測フロンティアを中心とした議論を行った. また、前年に引き続き来日した、カウンターパートである IMH や ECO Asia からモンゴル人研究者との情報交換を行った.
2004年5月13日	地球惑星科学関連学会合同大会スペシャルセッション「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」	幕張メッセ国際会議場	50名	一般に公開した学会のスペシャルセッションとして開催. 2003年度に実施した集中観測の研究成果を中心に計24件の発表およびディスカッションが行われた.
2004年11月9-10日	Third International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia	筑波大学	130名	2002年, 2003年に引き続き行われたワークショップ. モンゴル国大使, モンゴルからの研究者8名を含む延べ130名が参加, 43件の発表およびディスカッションが行われた.
2005年7月26-29日	The First International Symposium on Terrestrial and Climate Change in Mongolia	Mongolia-Japan Center in Mongolia	100名	過去3年間, 毎年行ってきたワークショップを拡大して開催したシンポジウム. 研究成果・情報・意見の交換を行うことで今後の研究の進展を計ると同時に, これまでに得られた成果をより多くのモンゴル人研究者と共有することを目的に開催.
2006年10月12日	JST CREST 事業「水の循環系モデリングと利用システム」領域「北東アジア植生変遷域の水循環」	筑波大学	50名	5年間の研究成果を一般に公表することを主目的とする研究報告会. サブグループごとに成果を発表する. 同

	環と生物・大気圏の相互作用の解明」研究報告会			時に、プロジェクト参加者間で成果の共有を計り、他グループの最新の結果を今後の各自の研究に取り込めるようにする。
2006 年 11 月 28-29 日	2006 International Workshop on Terrestrial Change in Mongolia	海洋研究開発機構 (JAMSTEC) ・東京事務所	100 名	毎年行ってきたワークショップの5回目、モンゴル国を対象にした自然環境変化を扱っている3つのプロジェクトとモンゴル国研究者との間の連携をはかると共に、一般研究者への研究成果の公表と研究の取りまとめにつなげられるようにすることを目的に開催する。

8 結び

研究の目標等から見た達成度

当初予定した目標はほぼ実行でき、またかなりの部分を論文として公表できた。しかし、個々の研究については、より深い解析や事例研究にとどまらない一般化の模索など、同じ内容でもやれること、やらねばならないことはまだまだあるというのが実感であった。そのような意味で、達成度としては 80%くらいだろうか。

得られた成果の意義等の自己評価

科学としては、この地域を対象にした水循環と生態系、大気圏を含んだ総合的な研究は実質的にはじめてということもあり、新しい内容の発見、今後の研究の指針になるような論文が出された点で意義が高いと考えている。一方、将来予測については、実施担当者からは与えた条件、与えたモデルの中での予測であり、1つの予測結果として報告すべき出ある点を強調されている。実際、あらゆる条件を試みているわけではないこと、モデルも基本的に大気圏、生態系、水文各1つであり、モデルの不確定さの検証などは今後さらに研究を進める必要があるだろうと考える。

今後の研究の展開

大きくは3つの点で、この地域を対象にした今後の研究が必要であろうと考える。1つはロシアから中国程度まで範囲を広げた広域、長期間の環境研究。モンゴルの草原地域を主に研究しこれについてはかなりのことがわかったが、実はこの変化と周辺域の変化は密接に関わっており、個別に切り出ただけでは複雑な地球システムの一部を見ているに過ぎず、重要な作用が見過ごされている可能性もすてきれない。この様な点を、他の地域の研究者と連携しつつ進める必要があろう。2つ目は、水循環に関する研究、特に深層地下水についての研究である。現在モンゴルの地下水利用はウランバートルを除けばほとんどは浅層地下水である。このため、本研究では主にこの不圧帯水層に焦点をあてて研究を進めた。しかし、将来の水利用を考えると深層地下水の利用が重要と考えられる。ところが、深層地下水に関しては、今のところデータも少なくその存在も不明な点が多く残されている。今年度よりモンゴル側の要望で地下水に関するパイロットスタディーが UNESCO の枠組みで開始された。現在のところ検討段階に過ぎないが、今後この方面の研究が重要であろう。3つ目はモデル研究である。本プロジェクトでは3つのモデルを利用して気候、植生、水循環の研究を行った。現段階ではオフラインで相互に必要な部分のみ結果のやりとりを行った。今後オンラインにつなげていく必要があるのは当然であるが、その前に共通する要素についての

各モデルでの要求される精度について詰めていく必要があるように思われる。乾燥地域で気候あるいは水文として年降水量が 10 mm 程度の誤差に収まるのであれば、十分容認できるが、生態系モデルではこの違いで草原が沙漠になりうる。このような違いをいかに埋めていくかが、今後の研究に大事である。

研究代表者としてのプロジェクト運営について

本研究チームは、比較的近くにいるメンバーで構成しているため、意思の疎通を図りやすい条件にあると思われたが、研究のスムーズな進行という点ではそれでも難しいことがあった。しかし、その中で多くの博士号(4名、見込み含む、以下同じ)、修士号(16名)取得者が本プロジェクトを通してあらわれたことは、次世代の育成という点で有意義であった。また、毎年行った関連プロジェクト、モンゴル研究者と共催のワークショップとシンポジウムにより、プロジェクト内にとどまらない研究成果の議論の場が設けられたのは良かった。これらを通して本プロジェクトの成果を世界に通用する Journal of Hydrology の特集号として発行できた。研究費については、どのような研究費でも常に不足するのは確かで、比較的余裕のあったこの事業でも、比較的近いテーマで新たな外部資金を求め、不足分を補填する必要があった。

戦略的創造研究推進事業に対する意見、要望

初年度から2年度にかけては、慣れていないこともあり、予算要求の方法など手続きのややこしさ、必要な書類の多さを何とかして欲しいと感じた。1つ1つはたいした量ではないのであるが、その書類を書く時間がいくつもたまると、肝心の研究を圧迫することになる。今でもそう感じているが、慣れるに従ってどのような方法でもまあ何とかなることは事実である。その他多くの点では、自由度が大きく、研究を進める上で非常にプラスになった。特に外国の相手方研究機関に対して、JST から研究費を送金できる点はすばらしく、このおかげで、様々な現地観測、モンゴルでのシンポジウムの開催などをスムーズに行うことができた。

本事業の募集方法については、1つ変えても良いかと感じる点がある。現在国内のほとんどの研究費への応募には、研究グループを作ってしまうそのリストも含めて提案する形になっている。これを応募の段階では、代表者とせいぜい数名だけのリストでも良しとする。審査後、研究費が獲得できた時に研究代表者が〇〇のテーマを研究するメンバーを募集するという形があっても良いのではないか。このような形を取ることで、研究代表者と研究参加者の間に明文化した契約のようなものを交わすことができる。代表者は年間〇〇の予算を支給、それに対して参加者は〇〇をいつまでに行うといった内容。本来、今のシステムでもそれは可能なはずであるが、実際には研究費を獲得することがまず至上命令になるので、予算額もはっきりしない中で実際にできること、できないことがかなりの場合あやふやの内に研究がスタートすることになってしまう。これを上記のようなシステムに変えると、予算は既に決まっているので、やる内容、やれる内容を予算に合わせてはっきりすることが可能であり、研究の進行がスムーズに進む可能性がある。



手間のかかる草原の植生調査
(上)と土壌調査(左)、モンゴ
ル国 Darhan にて。



現地での討論。Baganuur 近郊



小型複葉機による水蒸気サンプリング
とリモートセンシング観測中、ヘルレン
川上空 1000 m 付近



完成したフラックス観測ステー
ション Khemeen Bayan Ulaan



厳冬期の雪のサンプリング
Khemeen Bayan Ulaan 付近