

モンゴルや中国北東部を中心とするアジア北東部は、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 - 草原 - 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）。この様な場合は、外部条件のわずかな変化に対して、影響を受けやすく、例えばこの地域ではその結果、砂漠化する危険性が高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、冬季から春期にかけての大きな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、植物の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いる。また、直接的な人間活動としては、社会体制・情勢の変化に伴った、草原域での過放牧と管理されていない水利用の増加があげられる。

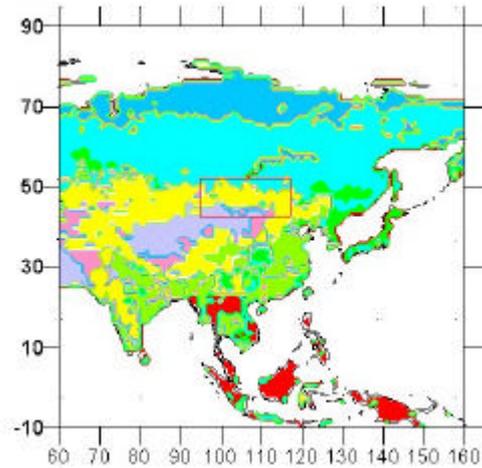


図1 東ユーラシアの植生帯と研究対象領域（赤い枠）。黄色が草原、水色がタイガ、薄い紫が砂漠

しかしながら、このような一般論的な説明は、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い。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、大気圏の変化と人間活動が、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、水利用システムの構築の提案を行う（図2）。

対象地域として、モンゴルを中心とした半乾燥地域を主たる領域として設定する。この地域では、これまでモンゴル政府機関による降水、流量、土壌水分などの水循環プロセスを解明するのに必要な程度の観測データの蓄積があり、半乾燥域およびその周辺の水文諸量の地理的分布、年々変化などに関する研究が行われてきている。一方、この地域を含む東アジアの大気物理量の分布、年々変動の研究も比較的多くの研究が行われているが（たとえば、Yatagai and Yasunari, 1994）、未だに、この地域がなぜ乾燥しているのかという疑問に対する答えは出されていない。大気現象と地表面プロセスを結びつける、地表面での熱・水フラックスと水文・気象・植生量の関係については、ここ10年ほどの間の、国際研究計画GAME (GEWEX Asian Monsoon Experiment)の一部として、本研究グループの構成員らが行った観測結果から、土壌の乾湿の状態、大気と地表面のエネルギーと水の交換量が大きく異なること、さらに、植生の量にも大きな違いが出るのが解明されている。しかしながら、本研究で目指すような、大気圏、水圏、生物圏のそれぞれの専門家が参加し、その相互作用を解明するという試みはこれまでになされていない。そこで、このような複数分野にまたがる研究を実施しうる具体的な大流域として、モンゴル北東部に位置する流域面積122,500 km<sup>2</sup>を有するケルレン川流域を設定する（図3）。ケルレン川は、ウランバートルの北東部を源流域とし、東方へと流れ、年流出高が山岳・森林域からなる西部源流部で100~200mm、草原が主体の流域中央から末端部で25mmと東に行くに従い、湿潤から乾燥域へと変化する。この様な流域において、観測を集中的に行うサイトを山岳・森林域と草原域に設け、以下に述べる研究計画を実施する。

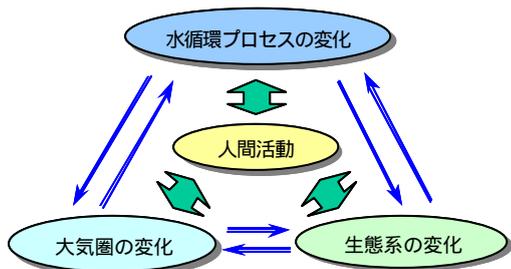


図2 水循環と生物・大気圏、人間活動の関係

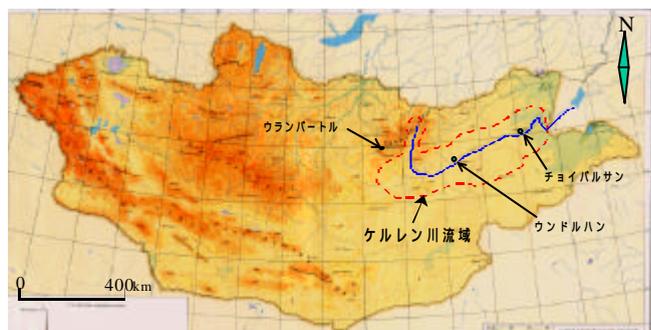


図3 対象流域の略図。地形図はモンゴル全体を、赤の点線がケルレン川流域を示す。

本研究では、全体としては、現状の把握、モデル化をまず行い、その結果の検証の意味を含めたモデルによる過去の再現と実測データの比較を行う。さらにモデルにより将来予測をおこなうことで、草原系保全、水利用システムの構築を行う(図4)計画となっている。このような計画の実行のために、現状の解明のために5つの、将来予測のために3つのサブプロジェクトを設定する。それぞれのサブプロジェクトの結果を別のサブプロジェクトが利用するという有機的な構造を取っており、東アジア半乾燥域の大気圏、水圏、生物圏相互作用を効率的かつ精度よく解明し、限られた研究期間の中で将来予測、望ましい水利用システムの提案を行うことができるはずである。

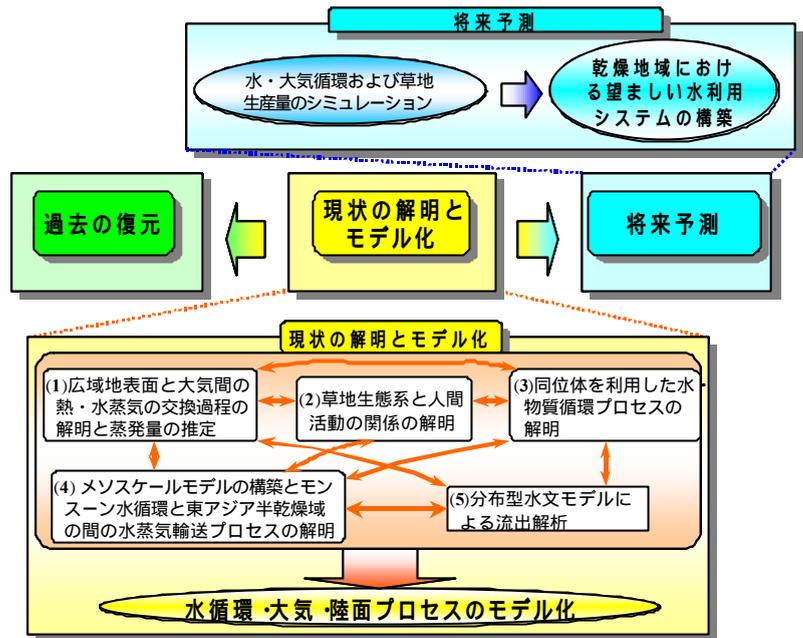


図4 本研究プロジェクトの枠組み。図中矢印は次ページ以降に詳細に記述されているが、それぞれのグループの密接な連携を示している。

## 1. 現状の解明とモデル化

図4に示された、現状の解明を行うに当たり、研究対象地域に山岳・森林サイトと草原サイトを設定し、以下に示すサブプロジェクトのための観測を実施する(図5)。得られた結果から現状のモデル化を行い、将来予測へと進める。

### (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量の推定

本サブプロジェクトでは、対象研究地域を代表する山岳・森林サイトと草原サイトにおいて、陸面と大気間の熱と水蒸気の交換過程を明らかにすることを目的としている。得られた結果は、(4)および(5)のサブプロジェクトにおけるモデルの向上、検証に利用されるとともに、(2)、(3)のサブプロジェクトの結果と照らし合わせることで、生物と水循環との関係や研究地域全体の水循環プロセスの解明につなげられる予定である。

#### 1.1 衛星データを用いた熱収支モデルによる推定

山岳・森林サイトと草原サイトにおいて、以下の2つの方法を適用することで、広域のフラックスを求める。このために、境界層中の温度・湿度・風速のプロファイル、地表面フラックスなどの測定を実施する。

##### (1) 地上気象からのバルク法と線形熱収支モデル

NOAA-AVHRR熱赤外から求まる地表面温度、GMS可視・近赤外から求まる日射量と地上気象観測データの平面内挿値を利用し、松島(2001)によるバルク法と熱収支式を組み合わせた線形熱収支モデルによって、顕熱・潜熱フラックスの時空間分布を求める。

##### (2) 混合層モデル

混合層は地上数kmまでわたって存在するため、その中の物理量は広域を代表していると考えられる。この混合層の熱・水収支は、地表面フラックスと水平移流に支配されることから、水平移流を(5)のサブプロジェクトの数値モデルなどで与えることによって、混合層の温度・湿度プロファイルから、地表面フラックスを求めることができる。これまでに、Brutsaert(1987)によって海上で応用されたのみであり、陸面上での応用は未だ無い。

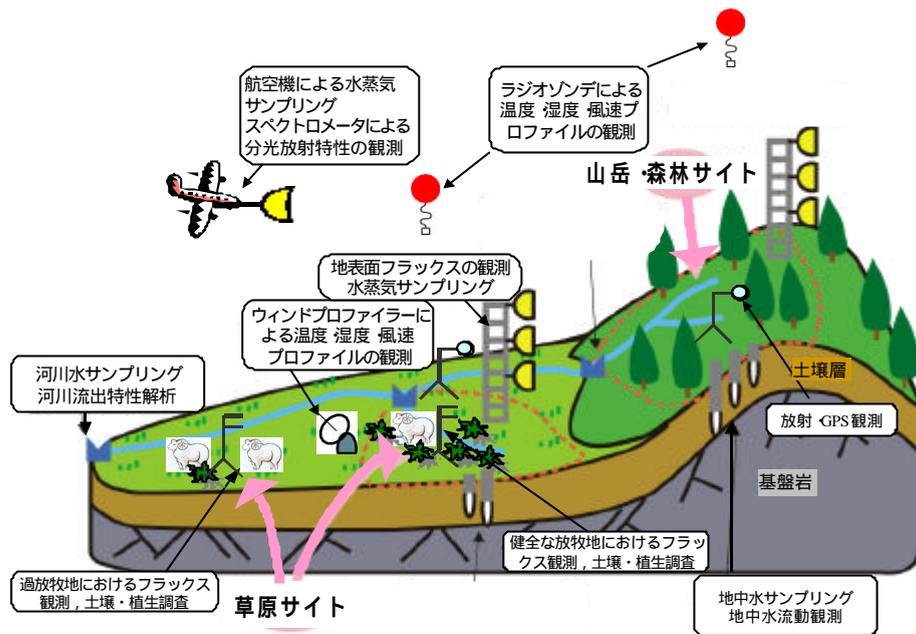


図5 野外観測模式図

## 1.2 広域蒸発量の推定

1.1で得られた結果を利用し、対象地域の広域蒸発量を推定する。得られた結果は、分布型水文モデルと大気モデルの地表面パラメタリゼーションの検証に利用される。

## (2) 草地生態系と人間活動の関係の解明

本サブプロジェクトは、過放牧による草地生態系の変化のプロセスを解明する。過去の内モンゴルにおける過放牧地での観測(Li et al., 2000; 郷, 1996)によると、羊の過度の踏みつけのために土壌表面が固結し、土壌の保水力が著しく低下する。このため降水の地下への浸透が妨げられ従って、土壌の乾燥に一層進む。これが風食による地表面土壌の流失を招き、その土地の植物生産力の劣化を加速させる悪循環となっている。同様なプロセスがモンゴルの草原でも見られるのか、あるいは気象条件の違いから異なるプロセスが支配的なのかを解明する。特に草地生態系で従来研究されている植物生産量や、土壌環境のみならず、気圏、水圏との相互作用を研究する上で重要な水・熱・炭素フラックスにも焦点を当て、過放牧の行われている草地とそうでない草地を対象に観測を行うことで、その違いを明らかにしていく。

### 2.1 草原生態系の水・炭素循環プロセスの解明

モンゴルでの草地生態系に及ぼす放牧の影響を解明するため、放牧の程度の異なる地点において、土壌(物理性、化学性、呼吸量)、植生(バイオマス、純一次生産量)の調査を行い、その比較検討を行うことで、過放牧の影響を明らかにしていく。同時に、草原生態系の生産力を規定する水分状態や気象条件との関係を明らかにするために、土壌水分量、地温、地表面の水・熱・炭素フラックスの測定を行う。これらの観測から、過放牧の影響の有無と、草原生態系の関係、草原生態系を中心とした水・炭素循環プロセスの解明していく。

### 2.2 陸域生態系炭素循環モデルの構築

陸域生態系炭素循環モデルSim-CYCLE(Ito and Oikawa 2000)を2.1で得られた知見をもとに、本研究地域の現状を再現できるように改良する。

## (3) 同位体を利用した水・物質循環プロセスの解明

本サブプロジェクトは対象地域の水循環の量のみならず水の輸送経路、すなわち、いまある地点で降っている降水が、どれほど前にどこで蒸発し、その後いかなる経路をどの位の時間を経てどの様にしてこの地点までたどり着いたかとい

# RAISE 研究計画

(4/6)

う点を解明する。この様な経路の解明には水循環のトレーサーとして用いられてきた水すなわち $H_2O$ に含まれる、 $^1H$ および $^{18}O$ の同位体である重水素( $^2H$  or  $D$ )、トリチウム( $^3H$ )、および酸素18( $^{18}O$ )が有用である。これらの同位体は、水分子を構成しているため文字通り水と同じ挙動をし、一方その存在率は化学反応では変化しないが、水循環プロセスによって変化する。例えば、降水プロセスでは、重い水から降雨となるので、降水、水蒸気中の同位体の存在率(同位体比)に変化が生じる。すなわち、水循環の各プロセスに存在する水の同位体比は過去の履歴を表していると考えられ、水循環の各プロセスにおける同位体比を求めることで、水の履歴を求めることができる。この様な考え方に基づき、降水の同位体比を利用して水循環プロセスを推定する試みは多くなされてきているが、地中水、大気の水蒸気まで含めて同位体比を求めた上で行われた研究はほとんど無く、それを行うことが、本サブプロジェクトの一つのユニークな点である。また、同地域で、大気数値モデルと同位体解析を併用して、水循環プロセスを解明していこうとする研究は、Numaguti (1999)などで手がつけられ出したばかりである。本サブプロジェクトでは、大気メソスケールモデルに加えて、陸面の分布型水文モデルと連携を行い、精度の高いプロセスの解明とモデルの構築を行う。本サブプロジェクトでは、以上の様な点に注目し、研究対象領域の水循環の経路を明らかにすることを主な目的と設定し、以下のような研究を行う。

## 3.1 東アジア半乾燥域の水循環プロセスの解明

水の輸送経路を明らかにするために、研究対象地域内全域での降水のサンプリング、草原と山岳・森林サイトにおける水蒸気・降水・地中水・河川水のサンプリングを行う。水蒸気は航空機を利用し、境界層内から自由大気中までのプロファイルの取得に努める。降水は既存気象観測所および新たに設置する観測網を利用して流域内の空間分布の把握を行う。地中水は、基本的には集中観測サイトでのサンプリングを年間を通して行っていく。得られたサンプルは国内に持ち帰り、国内既存施設において解析を行う。同時に、河川流出、地中水流動の観測を2つの観測サイトにおいて行う。これらの解析結果と、他のサブプロジェクトから得られる結果を比較検討していくことで、研究対象領域の水循環プロセスを解明していく。

## 3.2 水循環・同位体変動モデルの構築

水循環と同位体変動プロセスを表現するモデルの構築を行う。このモデルを(4)のサブプロジェクトで構築される大気メソスケールモデル、(5)で構築される水文モデルに組み込むことで、滞留時間などの精度の上がったモデルを構築していくことができ、現在の水循環、同位体変動の再現のみならず、将来予測を行うことができる。

## (4) メソスケールモデルの構築とモンスーン水循環と東アジア半乾燥域の水蒸気輸送プロセスの解明

### 4-1. 半乾燥地域の形成メカニズムとその変動要因の解明

東アジアのモンスーン循環には、西太平洋やインド洋の海面からの顕潜熱フラックスやチベット高原の地表面過程とともに、北東アジアの乾燥・半乾燥域の顕熱加熱が重要な役割を演じている(Kato, 1989)。しかし、モンゴルを中心とした乾燥・半乾燥域がなぜこの場所に形成されているのかは必ずしも明確にされていない。一般的にはモンスーンにより形成されたハドレー循環の下降域にこの場所が当たると考えられるが、アルタイ山脈やチベット高原の存在など、地形的な効果も強く働いていると考えられる。そこで、本サブプロジェクトでは、地上気象や客観解析などの既存のデータや領域気象モデルを用いて、東アジアの地形が積雲活動や降水に及ぼす影響を調査し、同時にGMSやNOAAの衛星画像を利用して雲活動や水蒸気の長期変動を調べることで、東アジアの半乾燥域の形成メカニズムを明らかにするとともに、この地域における水循環の変動をもたらす気候学的要因を解明する。

### 4.2. 半乾燥地域の気候循環のモデル化とモンスーン循環との相互作用の解明

東アジア半乾燥域の陸面過程と水循環をGCMあるいはメソスケールモデルにより再現しようとするとき、モデルの中で仮定されている諸過程のパラメタリゼーションの精度に限界があることが大きな障害となる。大陸上において最も大きな誤差要因は、積雲対流のパラメタリゼーション、雲や積雪による放射過程、および土壌水分量や植生のパラメタリゼーションなどである。降水の少ない半乾燥地域では、格子点サイズより小さな雲による放射過程と地表面熱収支の2つが特に重要であると考えられる。降水や雲の変動を通して、土壌水分・植生活動と放射過程は強く相互作用をしており、この相互作用の実態解明とモデリングに焦点を当て、領域気象モデルの精度向上に反映させる。

具体的には、地表面放射4成分とGPSによる可降水量の長期間観測を対象領域における山岳・森林サイトと草原サイト



# RAISE 研究計画

(6/6)

シミュレーションが行われる。以上を様々なシナリオについて行っていくことで、将来予測を行うと同時に、望ましい草地の管理手法、水利用システムの構築を提案していく。

## (1) 大気環境のシミュレーション

GCM モデルの幾つかの地球温暖化シナリオを入力とし、本研究プロジェクトで構築されたメソスケールモデルを走らせることで、研究対象領域の大気場の予測シナリオを出力し、(2) - (3) の入力情報として利用する。

## (2) 水循環場のシミュレーションと望ましい水利用システムの提案

GCMの将来予測シナリオに基づいて(1)のサブプロジェクトで出力される降水量を主とした予測量を水文モデルに入力することで、様々なあり得るシナリオに対して、本研究地域がどのような水資源量を有するかを予測する。この予測量は(3)のサブプロジェクトで、草原生態系の生産量の変化を予測するのに利用される。また、(1)、(3)のサブプロジェクトから得られる知見と合わせて、本地域に適した望ましい水利用システムの提案を行う。

## (3) 草地の生産量シミュレーション

陸域生態系炭素循環モデルの入力に、地球温暖化シナリオ下の大気メソスケールモデルと分布型水文モデルの出力を用いることで、草地の生産力の将来予測を行う。また、仮想的な気象条件、水分状態に対する草地の状態をシミュレートし、その結果を比較検討することにより、適切な草地維持の管理手法の構築を行っていく。

以上の計画を図7に従って実行する。

図7 研究スケジュール

		平成14年	平成15年	平成16年	平成17年	平成18年
準備研究	(1)現地予察	←→				
	(2)観測機器等の準備 設置	←→				
現状解明研究	(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量の推定		←→		→	
	(2)草地生態系と人間活動の関係の解明		←		→	
	(3)同位体を利用した水 物質循環プロセスの解明		←→		→	
	(4)メソスケールモデルの構築とモンスーン水循環と東アジア半乾燥域間の水蒸気輸送プロセスの解明		←→			→
	(5)分布型水文モデルによる流出解析		←→			→
将来予測研究	水・大気循環および草地生産量のシミュレーション			←→		→
中間総括と問題整理				←→		
研究総括と望ましい水利用システムの提言						←→