

# 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

## The Rangelands Atmosphere-Hydrosphere-Biosphere Interaction Study Experiment in Northeastern Asia

杉田 倫明\*

Michiaki SUGITA\*

In the northeastern Asia, a climatic shift from humid condition in the northern part to arid condition in the southern part can be found in a relatively narrow, boundary zone. As a consequence of the steep gradient in climatic conditions, a distinct "ecotone" (i.e., forest-grassland-desert) is formed in the northeastern Asia. Such an ecotone is sensitive to changes in external environment even though those changes are very small. The main focus of RAISE Project is the evaluation of the effects of these changes on the rangeland ecosystem with emphasis on the role of hydrologic cycle in northeastern Asia. The strategy of the project includes field observations for the understanding of the current status of the ecosystem and the modeling of the atmosphere, hydrosphere and biosphere in this area. The models to be produced and optimized for the area will then be used for the prediction of the possible changes of the area in response to likely scenarios of future climate and land use changes.

### 1 はじめに

陸域環境研究センターを中心とした研究グループが科学技術振興事業団の戦略的創造研究推進事業の研究領域「水の循環系モデリングと利用システム」に提案した研究が採択され、2002年12月より5年間の計画で活動を開始している。本稿では、その概要をまとめて紹介する。

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・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)。このような場合は、外部条件のわず

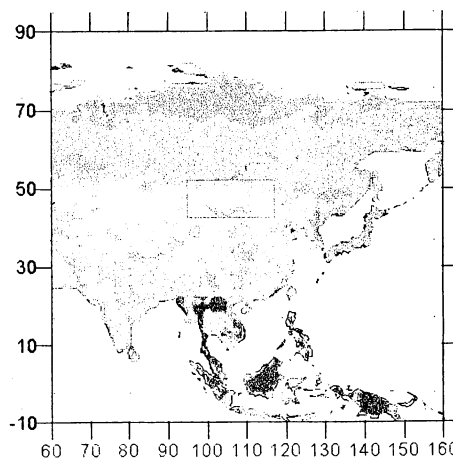


図1 東ユーラシアの植生帯と研究対象領域(枠内)。領域の中央が草原、北側の影部がタイガ、南側の影部が砂漠。

\* 筑波大学地球科学系

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年程度の間の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(たとえば、Yatagai and Yasunari, 1994)。この様な大気圏の温暖化、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。

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、どの様なプロセスでおこること、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、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

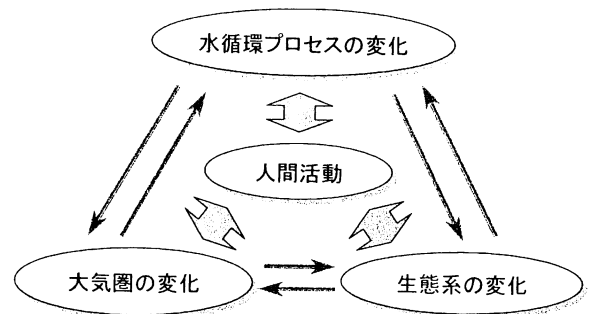


図2 水循環と生物・大気圏、人間活動の関係

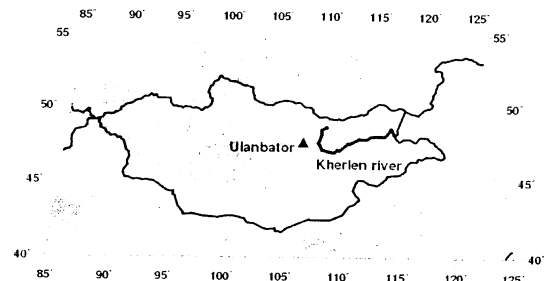


図3 対象流域の略図

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、モンゴル東北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

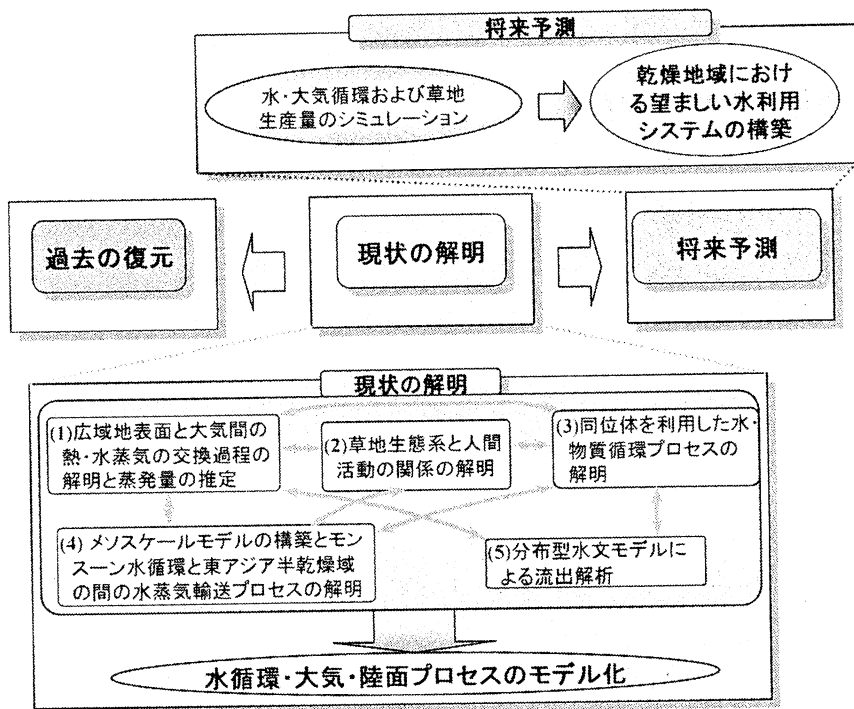


図4 本研究プロジェクトの枠組み

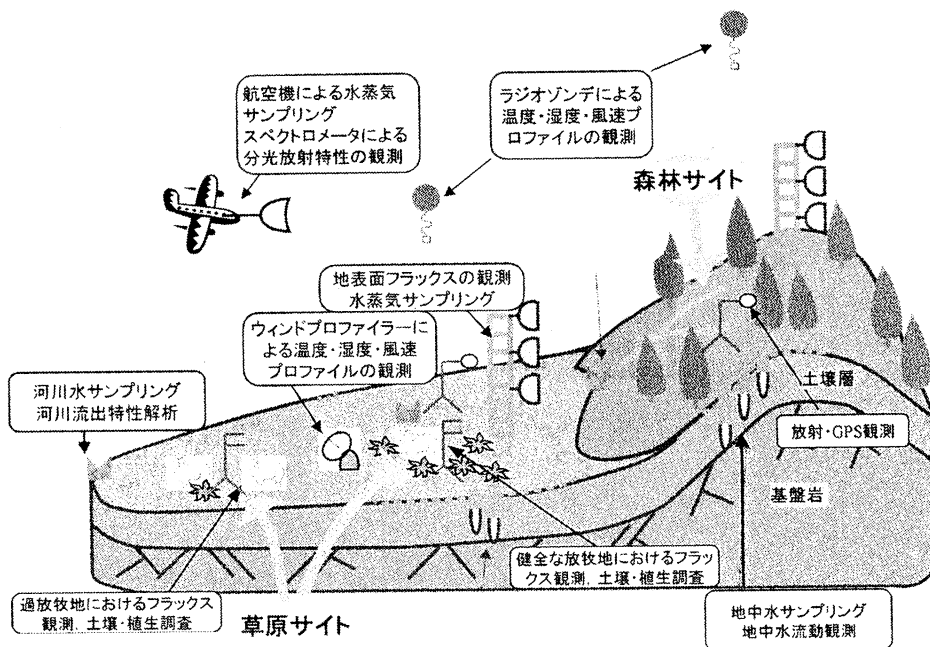


図5 野外観測模式図

行うサイトを森林・山岳域と草原域に設け、以下に述べる研究計画を実施する。

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計画となっている(図4)。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。

## II 計画の概要

### II-1 現状の解明

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

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。得られた結果を、(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。

このために、山岳・森林サイトと草原サイトにおいて、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、Matsushima(2001)によるバルク法と熱収支式を組み合わせた線型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。さらに、森林と草原地域にフラックスステーションを設置し、地表面フラックスの多地点での観測を行う。また、境界層内の航空機により水蒸気と気温の測定を行うことでも対象地域の広域蒸発量を求める予定である。

#### (2) 草地生態系と人間活動

過去の内モンゴルにおける過放牧地での観測(Li *et al.*, 2000)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、過放牧による草地生態系の変化のプロセスを解明していく。

具体的には、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・炭素循環プロセスを解明していく。

また、陸域生態系炭素循環モデル

Sim-CYCLE(Ito and Oikawa, 2000)を観測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

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う点を解明することが重要であり、この様な経路の解明に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 $^{16}O$ 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。

具体的には、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、草原と森林・山岳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、研究対象地域の水循環プロセスを解明していく。

さらに、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間の水蒸気輸送プロセスの解明

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ためと考えられるが、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により、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。

一方、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において行い、サブプロジェクト(1)-(2)で得られる地表面フラックスの観測値などと併用することで、雲による放射過程と地表面過程を明らかにし、モデルの精度向上に利用する。さらに、(3)のサブプロジェクトにおいて同位体を利用して求められる水循環プロセスを組み込むことで、数値モデルの水循環過程の精度をさらに向上させる。精度の上げられたモデルを境界層、流域規模、東アジア規模の3つの領域に対して適用し、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を解明し、将来予測の精度向上に資する。

#### (5) 分布型水文モデルによる流出解析

大気の数値モデルでの陸面の水文現象の表現は、水循環の予測という点からは必ずしも十分ではない。このため、陸面の水文現象のモデル化は、

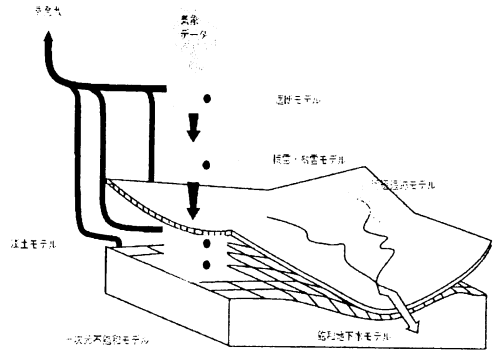


図6 分布型水文モデルの概念図

従来から大気の数値モデルと切り離す形で行われてきた。本プロジェクトでもこの方向を踏襲し、研究地域の陸面水文過程を予測するための分布型の水文モデルを構築する。従来の研究と大きく異なるのは、(4)のサブプロジェクトにおいて、同一地域をカバーする大気モデルが構築される点にある。両者は現状では必ずしも直接結合することはできないが、それぞれのモデルを運用する研究者が密接に連携することで、それぞれから出力される結果の利用、相互比較、検証を行うことが可能となり、得られる結果の信頼性を向上することができる。また、(1)-(3)のサブプロジェクトにおいて、プロセスを明らかにすることができるので、ブラックボックスとする場合の多いモデルを現実を反映した形に近づけることができ、特に将来予測の場合にその精度が向上することが予想される。

研究地域に適用できる分布型水文モデルには、遮断、蒸発、積雪・融雪、凍土、河道流、不飽和・飽和地中流などの水文プロセスが再現されねばならない(図6)。これらはモデルを構成するサブモデルとして表されるが、本サブプロジェクトでは、これらのサブモデルの選択、新規作成に当たり、まず対象地域のDEM、河道位置、流域界などの数値地理情報、土壌水分特性などの土壌情報、LAIや樹高の分布などの植生情報の

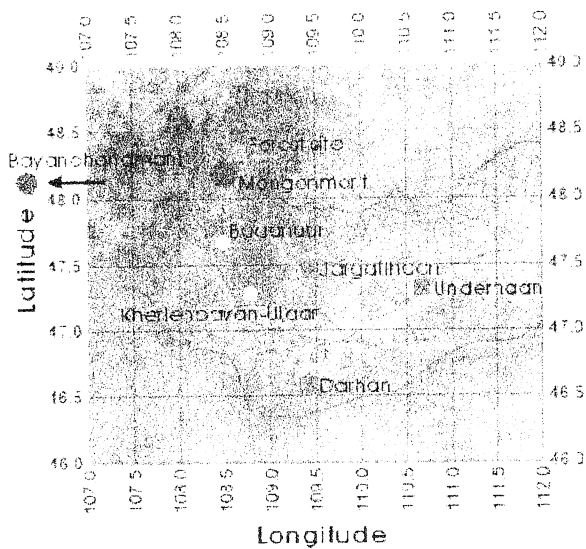


図7 観測サイトの分布(四角はAWS, 小さい丸印は斜面流出, 大きい丸印はGPS, 三角はフラックス・生態調査の各観測点を示している)

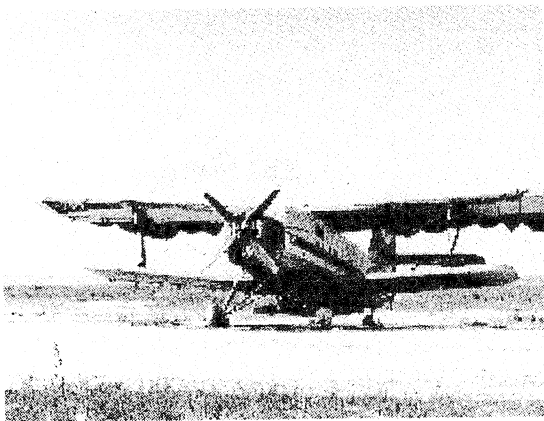


図8 航空機観測に使用する飛行機(AN-2)

収集を行う。これらの情報を統合することで、将来予測に利用できるモデルを構築していく。続いて、モデルの検証のため、河川流量、積雪面積、土壤水分、衛星搭載マイクロ波輝度温度等を収集し、水文モデルの出力との比較検討を行う。また、大気モデルの出力や、(3)のサブプロジェクトで得られる、水文プロセスに関する知見との比較検討を行い改良をすすめる。

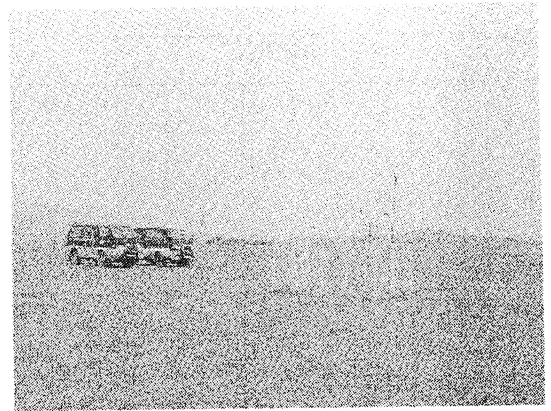


図9 Kherlen Byan-Ulaarに建設中のフラックス観測点 (李勝功氏 撮影)

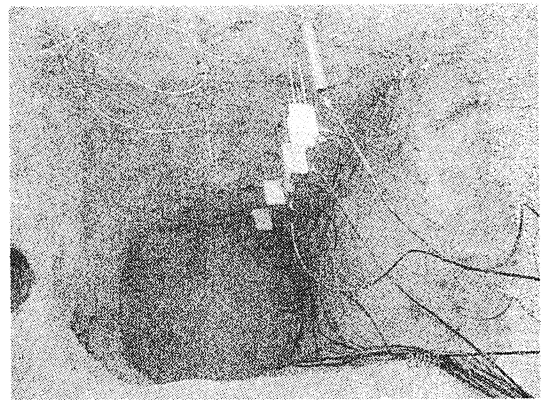


図10 森林サイトの地中に埋められた土壤水分、温度センサー (李勝功氏 撮影)



図11 Baganuurの斜面に建設された保護エリア (田村憲司氏 撮影)

表1 RAISEのための特別観測

Location/Name	Type	Measured items
Forest	Flux station	Fluxes, general meteorology and hydrology
		Water and water vapor sampling
		Biological parameters
Mungenmorit	GPS station	GPS
Baganuur	AWS	General meteorology and hydrology, fluxes by a bulk method
Baganuur (Hillslope)	Hillslope	Discharge, soil erosion of protected and unprotected area
Khereen Bayan-Ulaan	Flux	Fluxes, general meteorology and hydrology of protected and unprotected area
		Water and water vapor sampling
		Biological parameters of protected and unprotected area
		GPS
Khereen Bayan-Ulaan (Hillslope)	Hillslope	Discharge, soil erosion of protected and unprotected area
Undorhaan	AWS	General meteorology and hydrology, fluxes by a bulk method
Darhan	AWS	General meteorology and hydrology, fluxes by a bulk method
Jagalthaan	AWS	General meteorology and hydrology, fluxes by a bulk method
Bayanchandmani	GPS station	GPS

表2 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soon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					←→	





図12 森林サイトの概観 (李勝功氏 撮影)

以上の項目を解明するために、相手側機関であるモンゴル国気象・水文学研究所で継続的に観測されているデータを取得して利用すると共に、より詳細なデータを得るための特別観測を実施する。観測地点として、主に森林1地点、草原1地点を中心とし、それ以外に自動観測による観測地点を丘陵斜面2地点、草原4地点に設置する(表1、図7参照)。また、ウランバートルの空港に設置されているドップラーレーダーや航空機によるリモートセンシングを実施し、広域の諸要素の取得につとめる(図8-12)。

## 11-2 将来予測

研究対象流域における水循環過程と大気圏、生物圏の現状の把握とそのモデル化が完成したところで、モデルを将来予測のためのシミュレーションに利用する。大気圏とシミュレーション結果を水文モデルの入力として利用することで、水循環のシミュレーション結果が得られる。これらを陸域生態系炭素循環モデルに入力することで、生態系の将来予測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。具体的には、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、水

文モデル、生態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。

以上の計画を表2に従って実行する。

## 111 おわりに

2001年12月よりプロジェクトが開始され、ほぼ一年が経過したところである。この一年の間に、メンバーによる6回の現地調査、相手側研究機関とプロジェクトのスポンサーである科学技術振興事業団の間の契約締結、予備調査の実施、現地観測施設の設置、観測機材の準備などを進めてきた。本稿は、申請段階の計画を元にその後の活動内容を加えたものである。2003年度には現地での集中観測が予定されており、メンバーの大半がかなりの期間をモンゴルで過ごすことになる予定です。

## 謝辞

プロジェクトの立ち上げから現在まで、プロジェクトメンバーをはじめとして、関係する教職員、院生諸氏、そして、陸域環境研究センターの全面的な支援を受けてきた。また、研究場所の中心として、加速器センター内にある共同研究棟を利用させていただいている。最後に、本プロジェクトは科学技術振興事業団の戦略的創造研究推進事業(CREST)の研究領域「水の循環系モデリングと利用システム」〔統括：虫明功臣(東京大学教授)〕によるものあり、科学技術振興事業団や同領域研究事務所には研究進行の上で様々な支援をいただいている。ここに記して感謝する。

## 文献

- Ito, A. and Oikawa, T. (2000): The large carbon emission from terrestrial ecosystems in 1998: A model simulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, 78, 1-8.

- Kato, K. (1989): Seasonal transition of the lower-level circulation systems around the Baiu front in China in 1979 and its relation to the Northern summer monsoon, *J. Meteor. Soc. Japan*, **67**, 249-265.
- Li, S. G., Harazono, Y., Oikawa, T., Zhao, H. L., He, Z. Y. and Chang, X. L. (2000): Grassland desertification by grazing and the resulting micrometeorological changes in Inner Mongolia. *Agricultural and Forest Met.*, **102**, 125-137.
- Matsushima, D. (2001): Regional distribution of sensible and latent heat fluxes over rice paddies using satellite infrared temperature and a heat-budget model, in 'Hyperspectral Remote Sensing of the Land and Atmosphere', W. L. Smith, Y. Yasuoka, Eds., *Proc. of SPIE*, **4151**, 300-308.
- Numaguti, A. (1999): Origin and recycling processes of precipitation water over the Eurasian continent: Experiments using an atmospheric general circulation model. *J. Geophys. Res.*, **104**, 1957-1972.
- Yatagai, A. and T. Yasunari, (1994): Trends and decadal-scale fluctuations of surface air temperature and precipitation over China and Mongolia during the recent 40 year period (1951-1990). *J. Meteor. Soc. Japan*, **72**, 937-957.