

# モンゴルの永久凍土地帯における 脆弱性評価及び適応策の提言に関する研究

研究代表者:

独立行政法人 国立環境研究所  
地域環境研究センター 王勤学

研究分担機関:

慶應義塾大学 環境情報学部  
慶應義塾大学 政策・メディア研究科



# 研究実施体制

サブテーマ No.	サブテーマ名		氏名	所属機関名/部局/役職名
(1)	早期観測ネットワーク による永久凍土融解の 検出及び脆弱性評価	◎	王 勤学	(独) 国立環境研究所/地域環境研究 センター/主席研究員
			岡寺智大	(独) 国立環境研究所/地域環境研究 センター/研究員
(2)	気候変動に対する環境 容量・適応策評価シス テムの開発と適応策の 提言	○	巖 網林	慶應義塾大学/環境情報学部/教授
			渡辺正孝	慶應義塾大学大学院/政策・メディア 研究科/特任教授 (現中央大学教授)
			丹治三則	慶應義塾大学/環境情報学部/専任講師
			大場章弘	慶應義塾大学大学院/政策・メディア 研究科/特任助教

# 目次

研究開発背景

研究開発目的

サブテーマ構成

研究対象地域

主な研究内容と結果

サブ① 早期観測ネットワークによる永久凍土融解の検出及び脆弱性評価

サブ② 気候変動に対する環境容量・適応策評価システムの開発と適応策の提言

本研究開発により得られた成果

科学的意義

政策への貢献

研究成果の発表状況

朝日新聞 2014年2月27日 朝刊 2ページ 東京本社



## 生きるため 草原を去った

### 地球異変 1面から続く

#### 家畜大量死 収入求めて都市へ

モンゴル国、冬は厳しい寒さで、羊や馬の飼育が難しくなっている。牧民は都市へ移住し、収入を求めて暮らすようになった。



#### 国土むしばむ温暖化

温暖化が進むと、草原の乾燥が進み、家畜の飼育が難しくなる。牧民は都市へ移住し、収入を求めて暮らすようになった。



#### 適応策、日本が支援

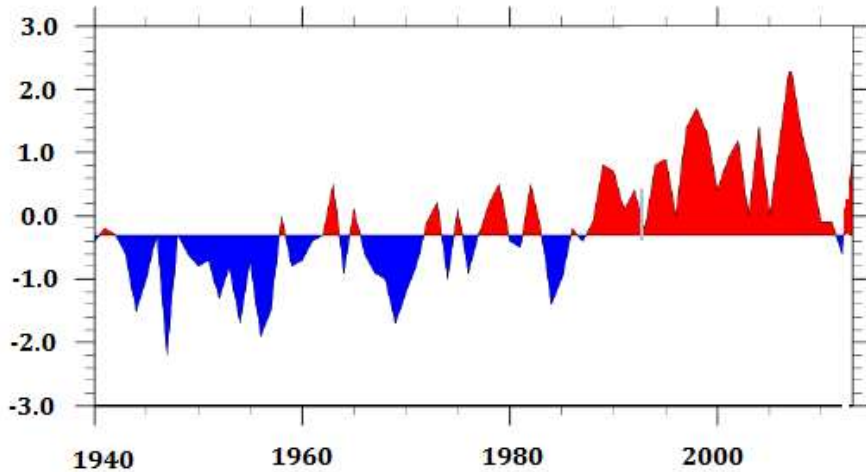
温暖化が進むと、草原の乾燥が進み、家畜の飼育が難しくなる。牧民は都市へ移住し、収入を求めて暮らすようになった。日本は、温暖化対策として、適応策の開発と実施を支援している。

朝日新聞

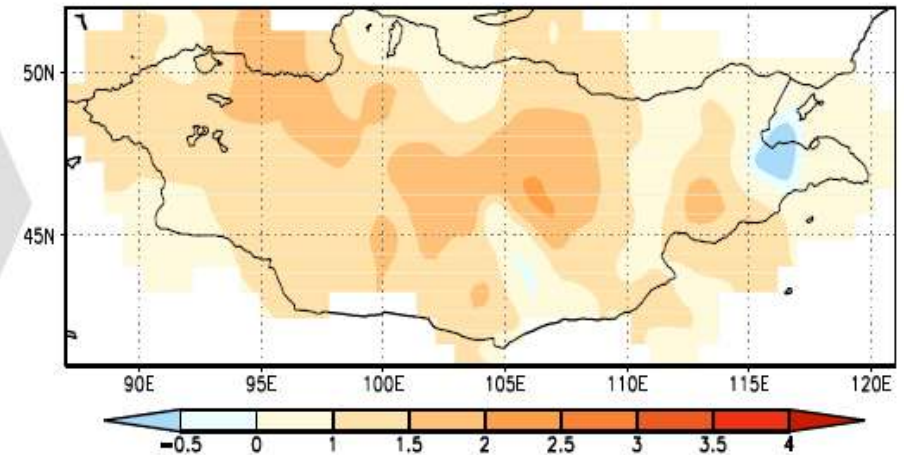


# 研究開発背景： 急激な気候変動

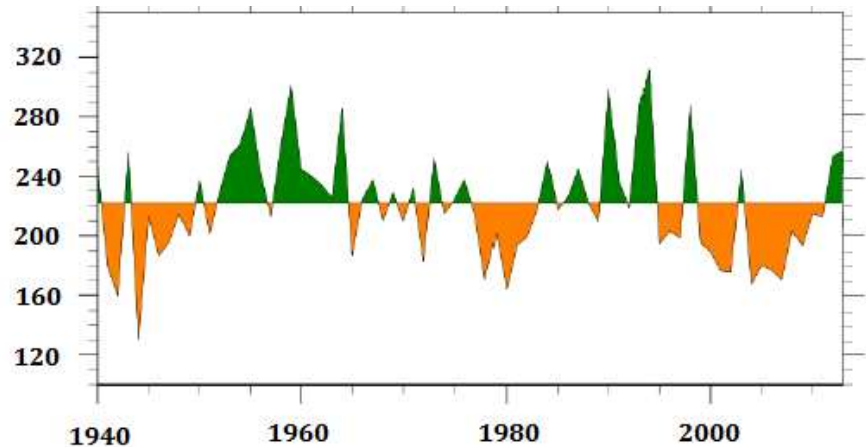
## 年平均気温の変化(40地点、1940-2013)



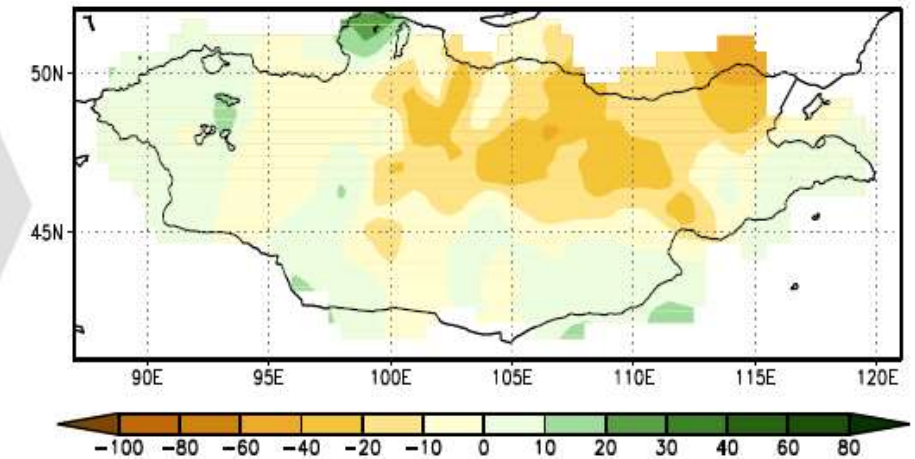
## 年平均気温変動の空間分布



## 年降水量の経年変化(40地点、1940-2013)



## 年降水量変動の空間分布



(P. Gomboluudev, 2014)

- モンゴルの年平均気温は1940年代から約**2.1°C上昇**(冬季+2.6°C、夏季+1.4°C)
- モンゴルの年降水量は1940年代から約**10%減少**(冬季24%減、夏季7%減)

# 研究開発背景： 枯渇する水資源

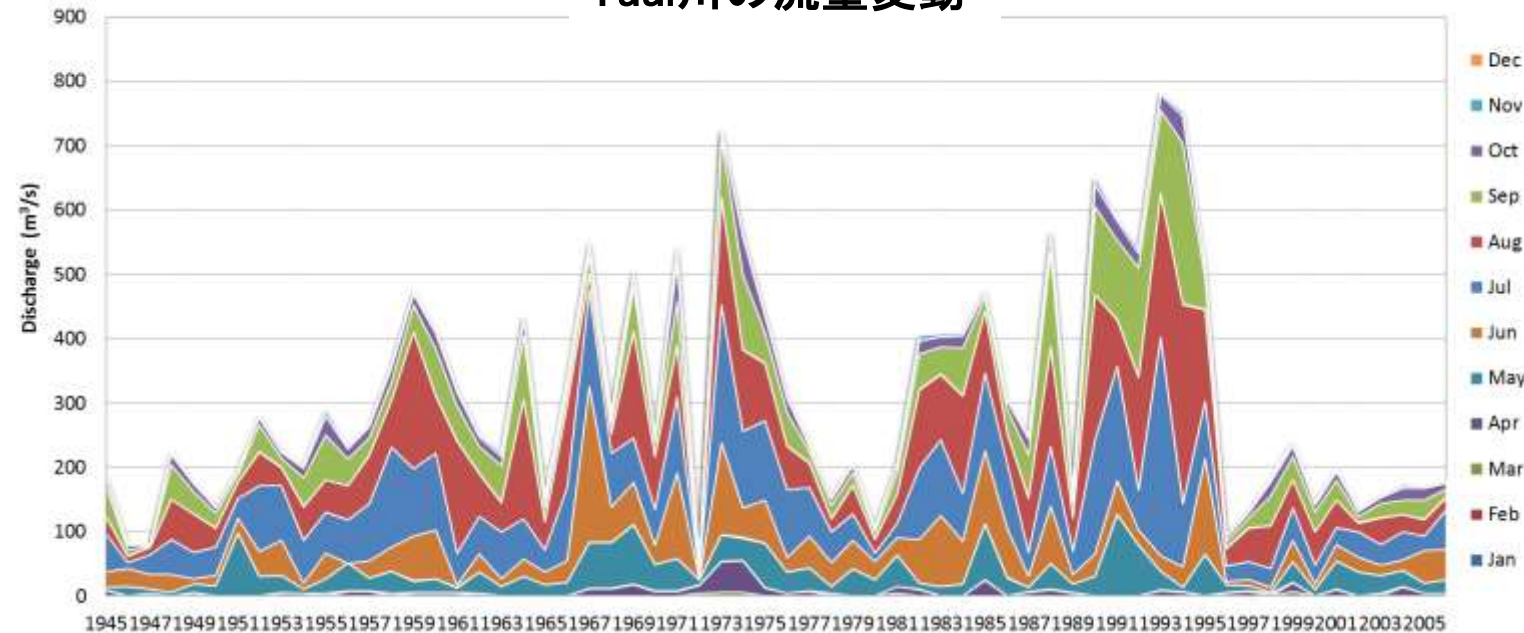
2005-8-21



2012-8-22



## Tuul川の流量変動



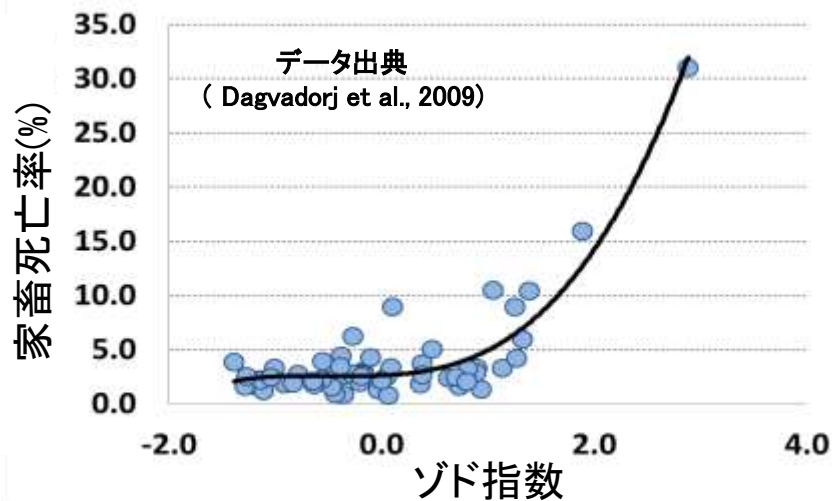
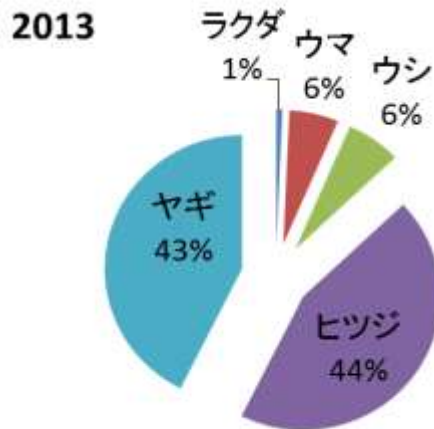
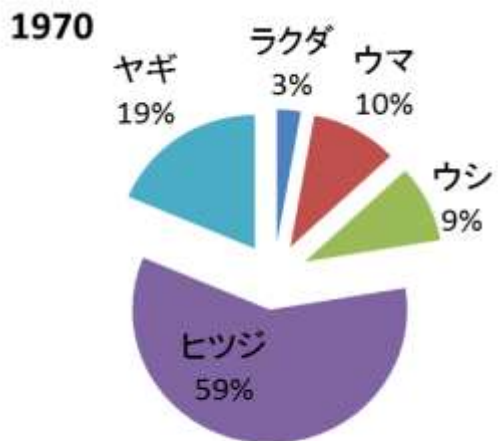
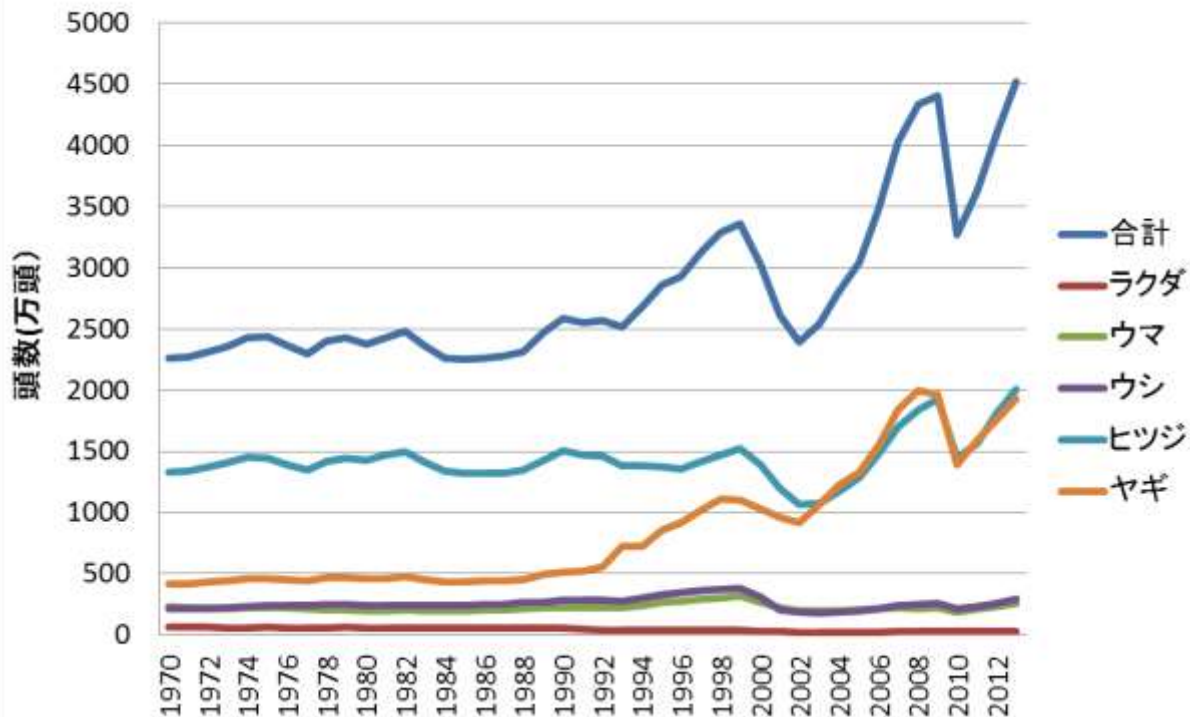
モンゴルIMHの調査によると、1990年代から地表水資源が枯渇した。1980年代から700 (12.6%) の河川、760 (18.1%) の湖沼、1480 (15.4%) の泉が消失したと言う。



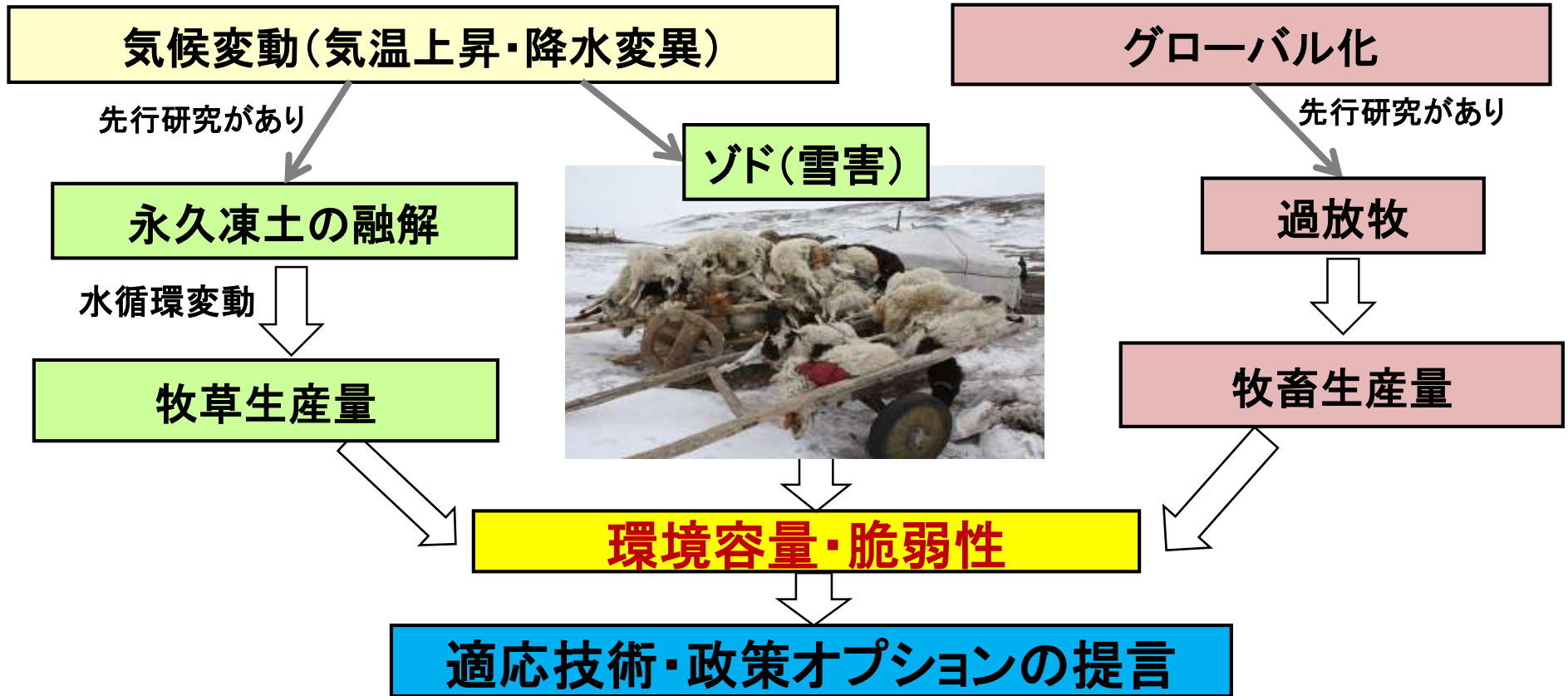
# 研究開発背景：脆弱な牧畜生産業



モンゴルの家畜頭数の経年変化

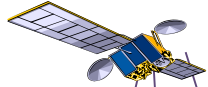


# 研究開発目的



- 既存の研究では、温暖化による永久凍土の融解や経済活動と過放牧の関係が明らかにされたものの、永久凍土の融解による水循環の変動や牧草・牧畜生産との関係が解明されていない。
- また、国民の35%の就業人口を抱える牧畜業において、過放牧による牧草地の退化など、様々な環境問題・社会問題(脆弱性)が生じており、適応策の策定が緊急の課題となっている。
- 本研究では、気候変動による永久凍土の融解に伴う草原生態系の脆弱性を明らかにすると共に、地域の環境容量(家畜収容力)と牧畜経済の持続性を維持できる適応策の提言を行う。

# 研究フレームとサブテーマ構成



早期観測ネットワーク



衛星観測システムによるデータ収集(中国科学院などと連携)



地上観測システムによるデータ収集(モンゴル科学院などと連携)

サブテーマ1 早期観測ネットワークによる永久凍土融解の検出及び脆弱性評価 (国環研)

サブテーマ2 気候変動に対する環境容量・適応策評価システムの開発と適応策の提言 (慶応大)

1-1 凍土融解・分布の検出

2-1 凍土融解・環境容量の評価

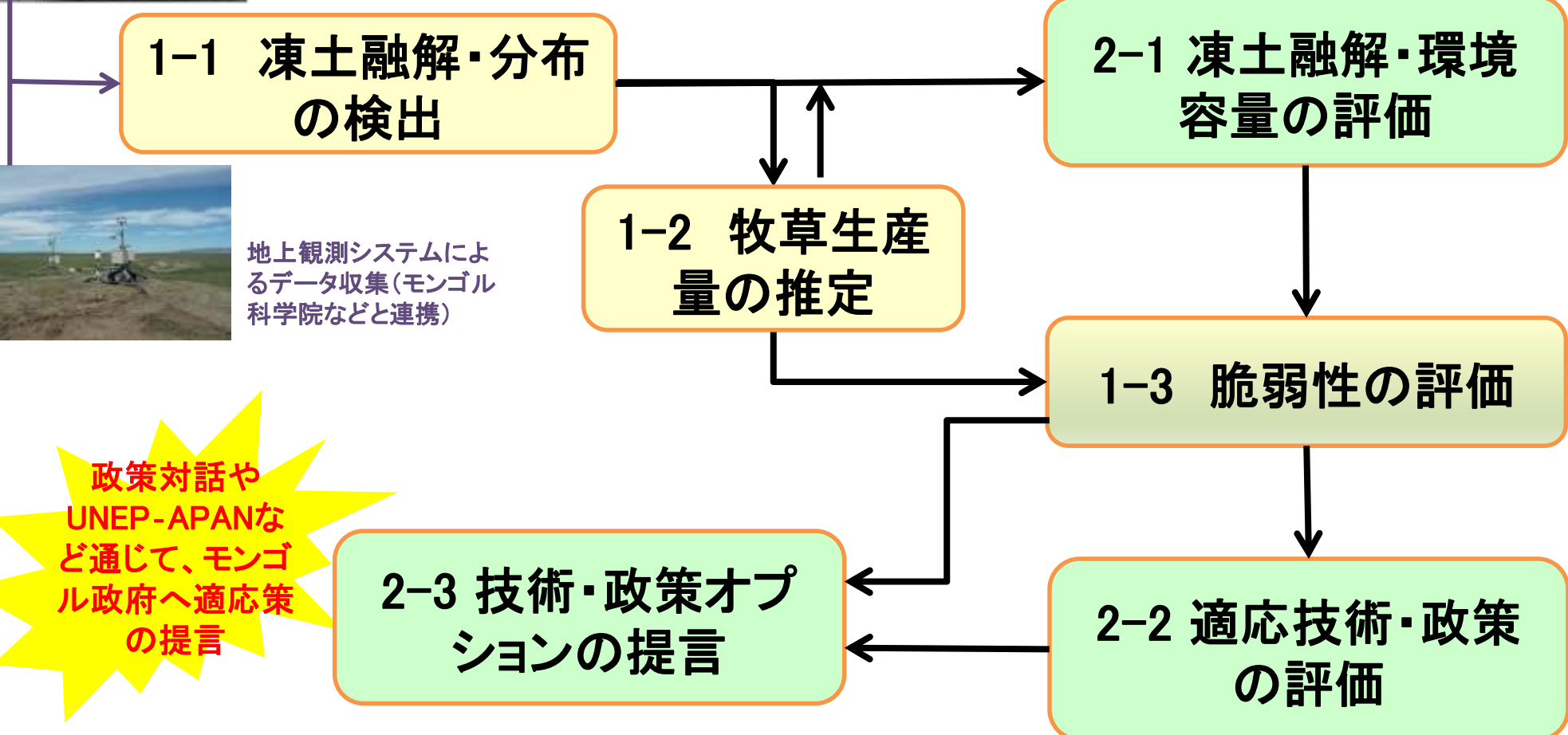
1-2 牧草生産量の推定

1-3 脆弱性の評価

2-3 技術・政策オプションの提言

2-2 適応技術・政策の評価

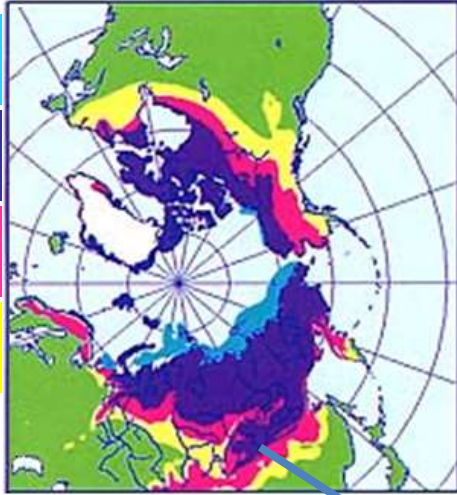
政策対話や  
UNEP-APANなど通じて、  
モンゴル政府へ適応策の  
提言





# 対象地域及びデータ収集

沿岸海底  
永久凍土  
連続的  
永久凍土  
不連続的  
永久凍土  
点状的  
永久凍土

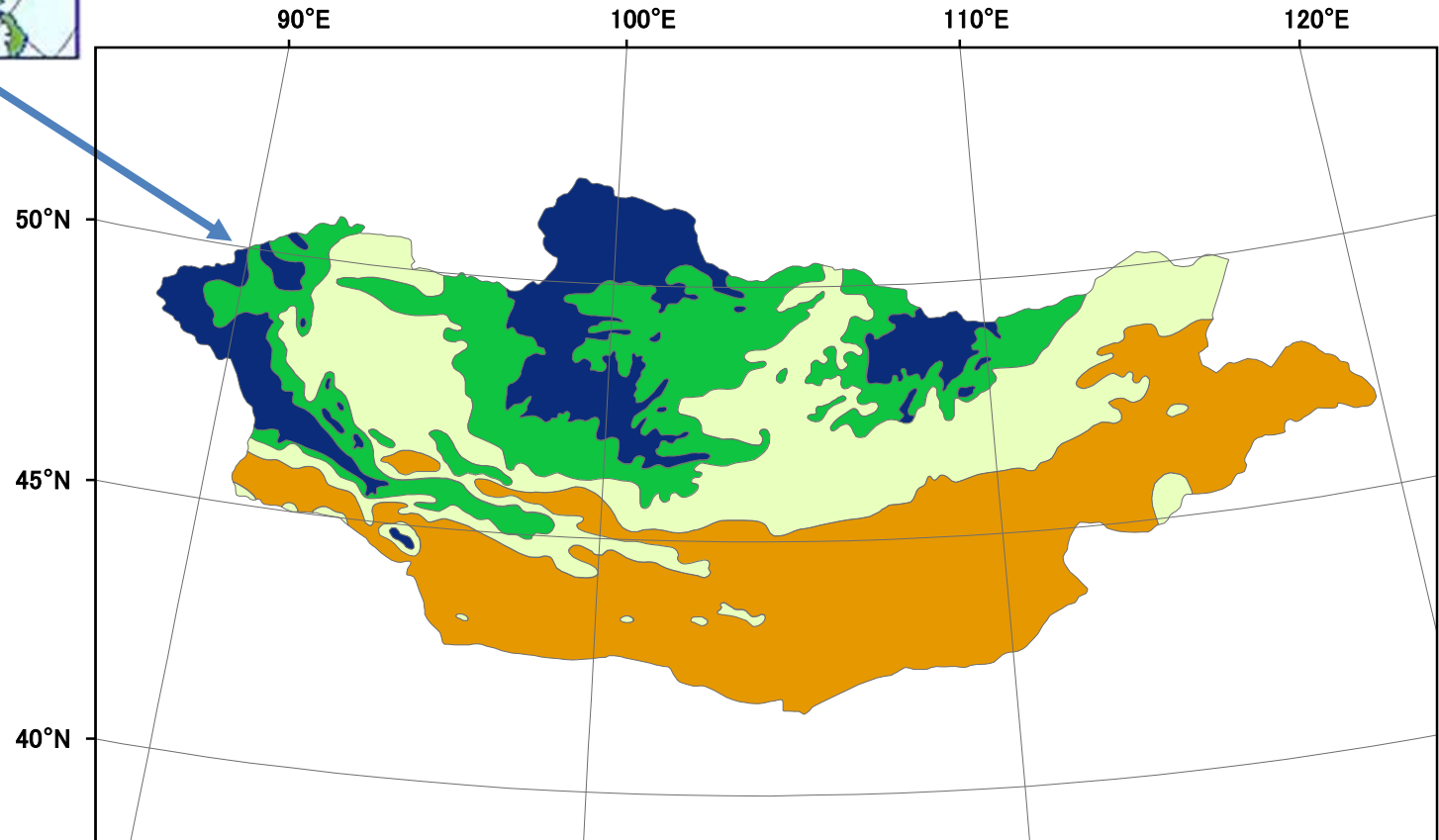


モンゴルの永久凍土地域は、シベリア永久凍土区の最南端であり、モンゴル国土の63%を占める。そのうち、

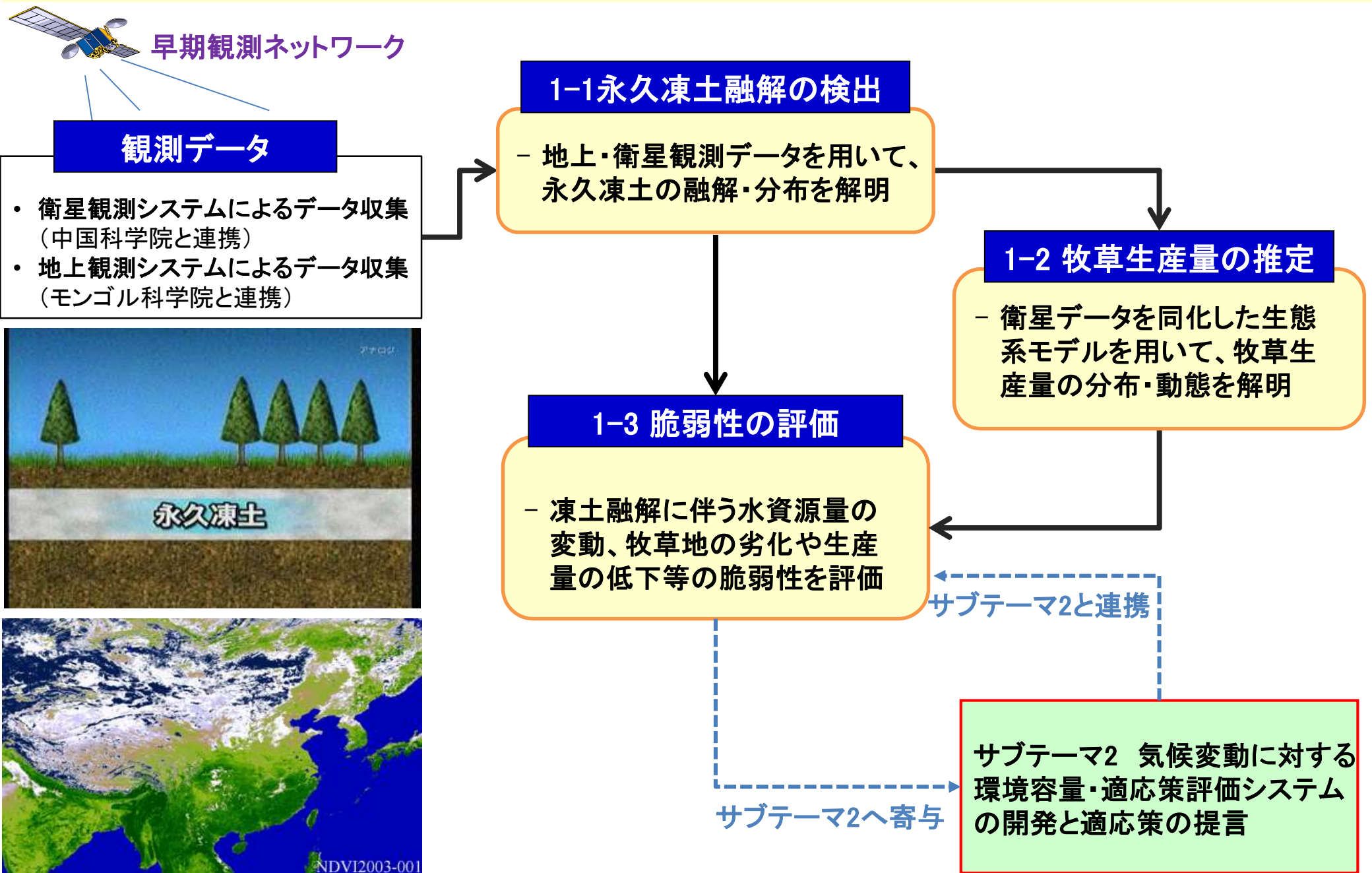
- 連続性永久凍土面積 14.1万km<sup>2</sup> 国土の9.4%
- 不連続性永久凍土面積 17.9万km<sup>2</sup> 国土の11.9%
- 点状的な永久凍土面積 62.5万km<sup>2</sup> 国土の41.7%

Data source: Batima P. & Dagvadorj D., 2000

北半球の凍土分布図



# サブテーマ1 早期観測ネットワークによる永久凍土融解の検出及び脆弱性の評価





# 1-1 永久凍土融解の検出

地中探査レーダー  
による凍土調査



Nalaikh典型草原モニタリングサイト



ボーリング掘削調査



凍土モニタリングサイト



バイオマス量調査



Davaat森林草原モニタリングサイト



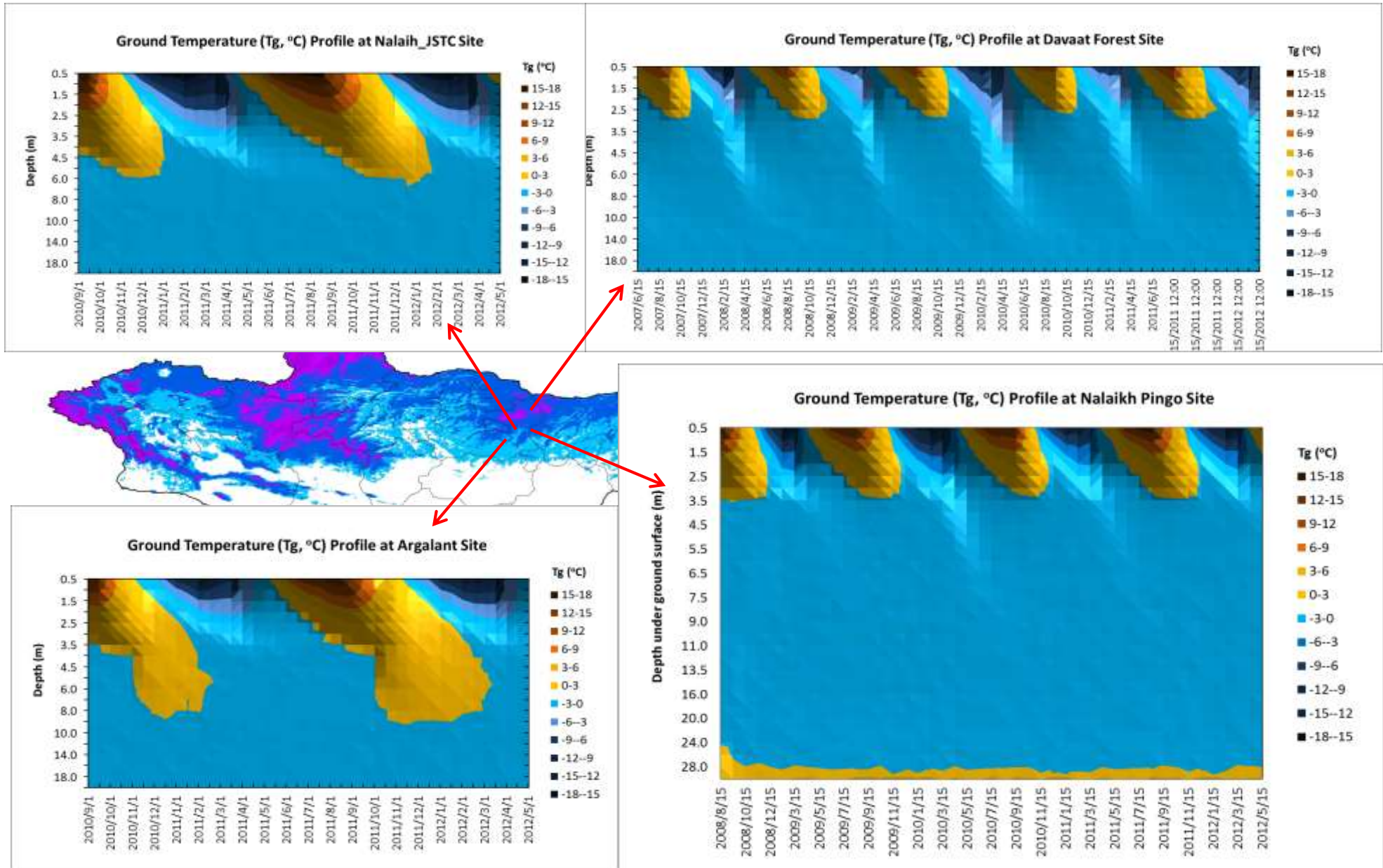
地中熱・水循環観測



Davaat草原モニタリングサイト



# 1-1 永久凍土融解の検出



永久凍土の活動層の深さと季節変化に大きな地域差が存在していることが分かった。

# 1-1 永久凍土融解の検出

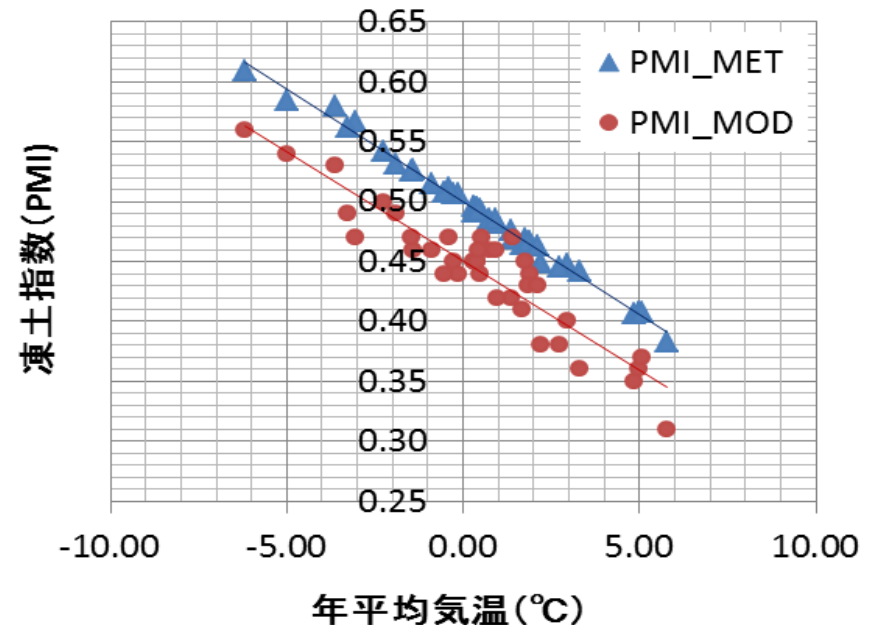
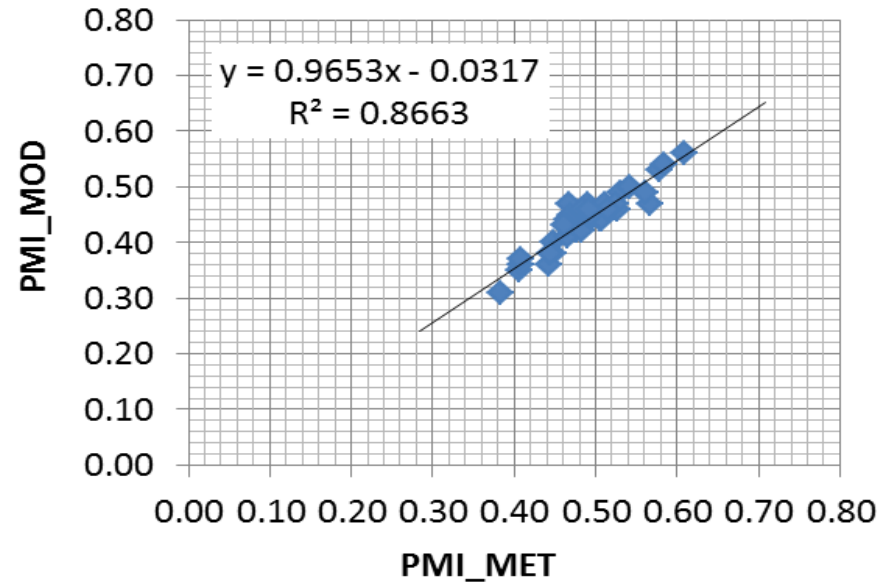
永久凍土の脆弱性を示す指標として、Nelson (1986)が開発した永久凍土インデックス (PMI)を用いた。

$$PMI = (T^-)^{1/2} / ((T^-)^{1/2} + (T^+)^{1/2})$$

ここで、 $T^-$ と $T^+$ はそれぞれ $0^{\circ}\text{C}$ 以下と $0^{\circ}\text{C}$ 以上の日平均温度の年間積算値である。

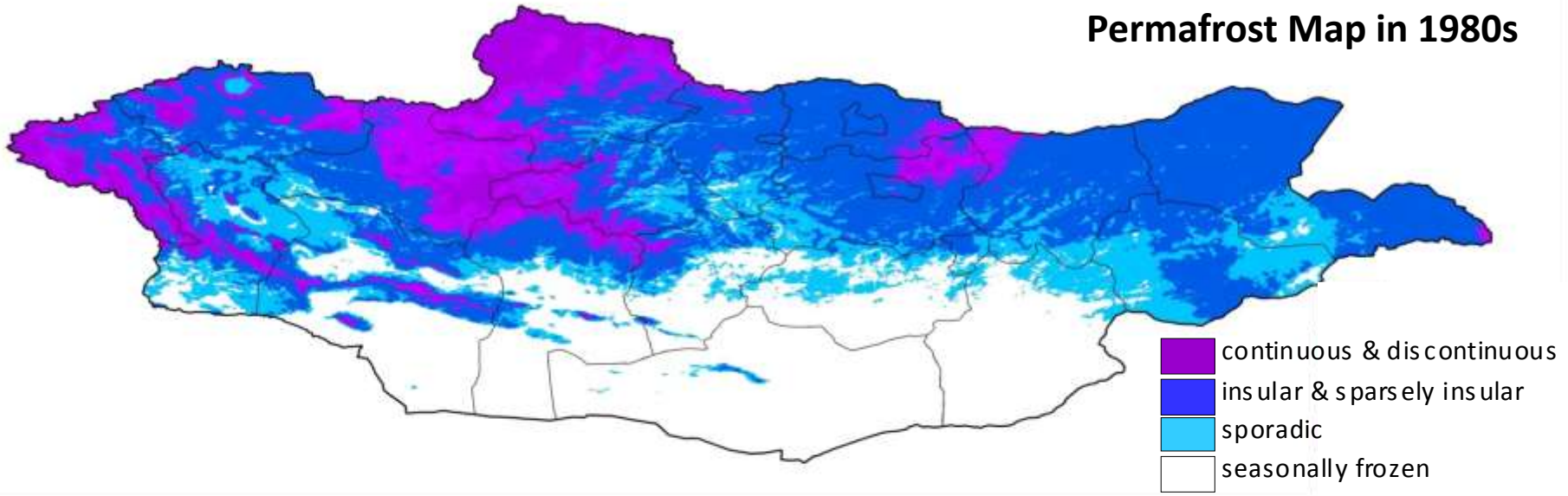
PMI_MET	PMI_MOD	凍土帯の種類
>0.45	>0.40	季節的凍土帯
0.45-0.50	0.40-0.45	点状的永久凍土帯
0.50-0.55	0.45-0.50	島状的永久凍土帯
0.55-0.65	0.50-0.60	不連続的永久凍土帯
>0.65	>0.60	連続的永久凍土帯

本研究では、2000-2014年間のMODIS地表温度のデータを入力することにより、1km空間解像度の凍土指数分布図を作成した。

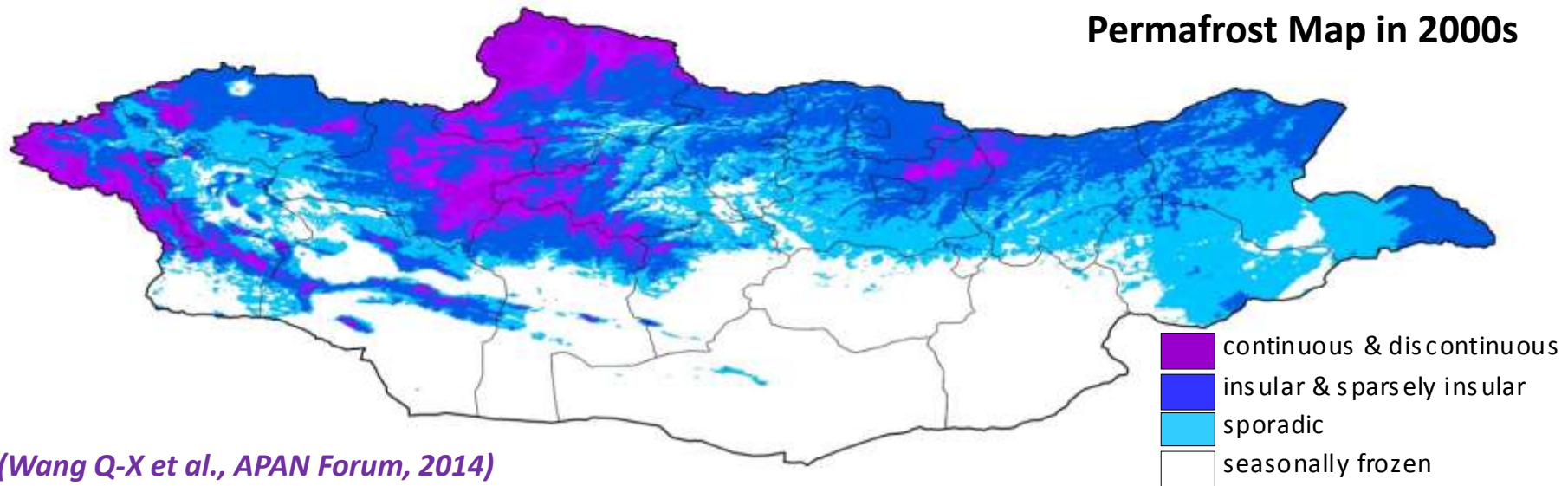


# 1-1 永久凍土融解の検出

Permafrost Map in 1980s



Permafrost Map in 2000s



(Wang Q-X et al., APAN Forum, 2014)

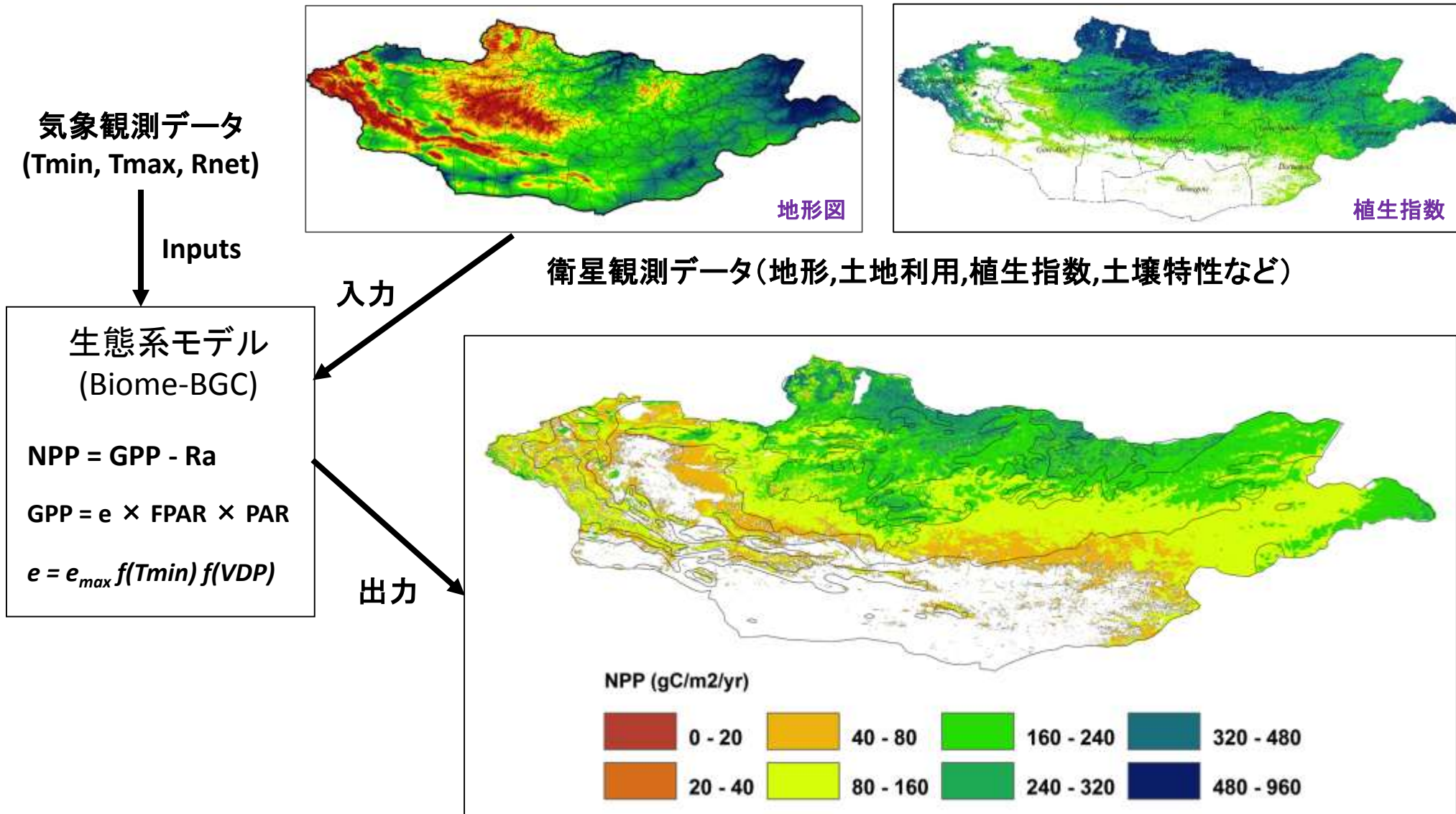
面積変化

-5.8%
-10.1%
7.8%
8.1%

連続・不連続的な永久凍土の面積が明らかな減少したことが判明した。

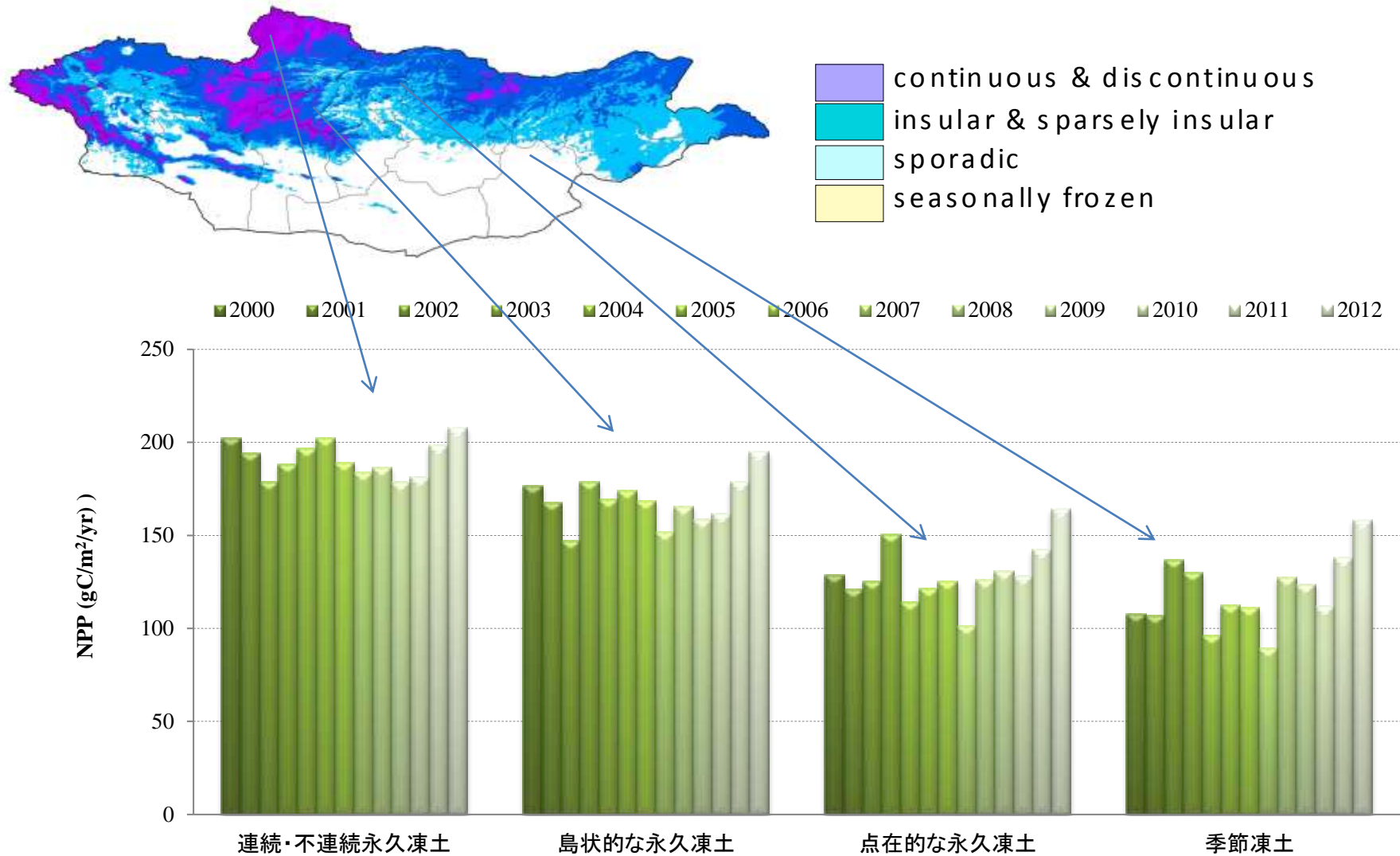


# 1-2 牧草生産量の推定



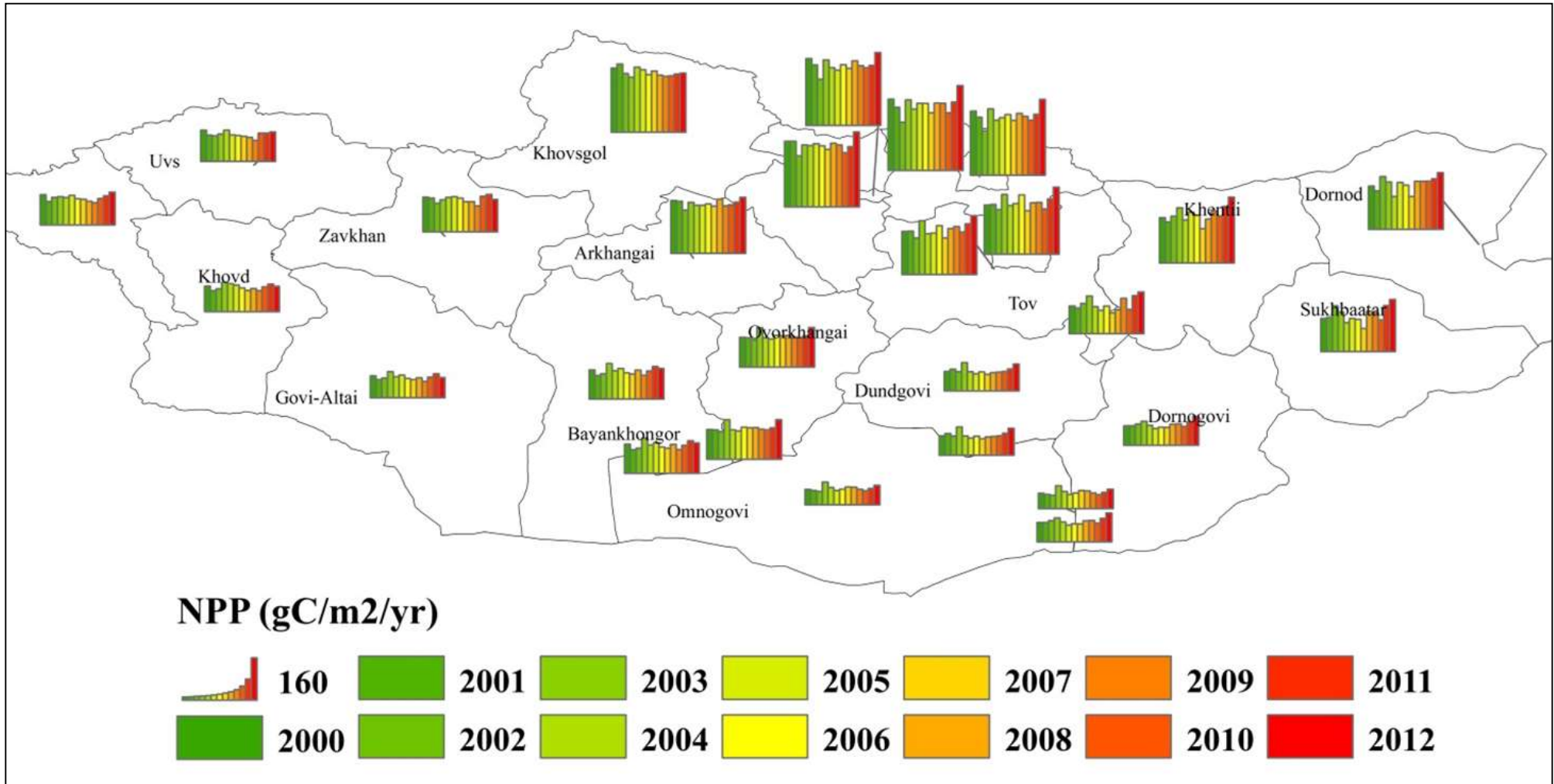
生態系モデルを用いて推定した2000-2014年の1km解像度の牧草生産量の分布図

# 1-2 牧草生産量の推定



**連続・不連続的な永久凍土地域では、森林やツンドラ・湿草原などが分布し、牧草生産量が高く、一方、点状的・季節的な凍土地域では、荒漠草原や砂漠などが広がり、牧草生産量が低いと判明**

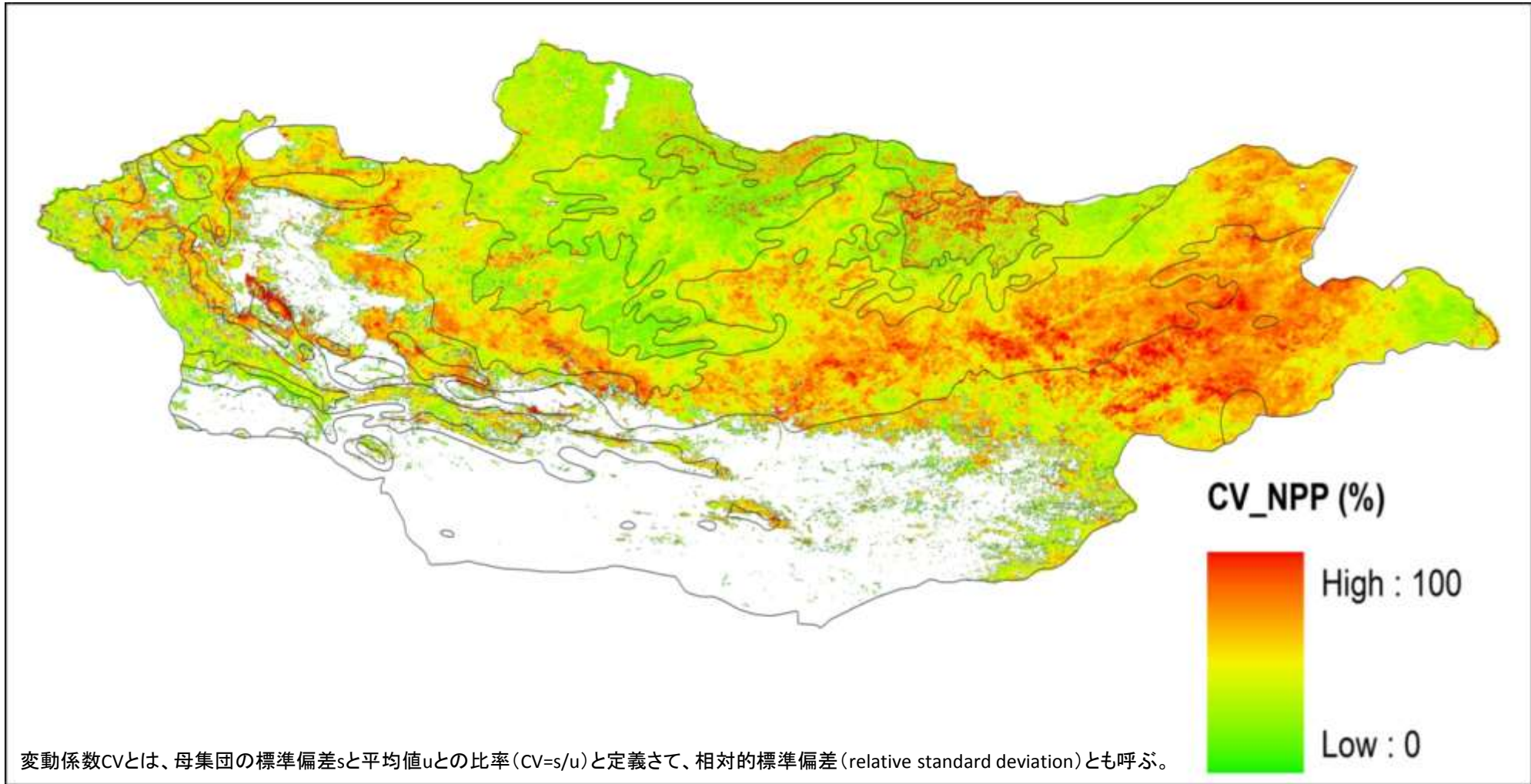
# 1-2 牧草生産量の推定



ソム(市町村レベル)とアイماغ(県レベル)の牧草生産量を集計した結果、**北部のセレンゲ県、ボルガン県、フブスグル県、トゥブ県及びヘンティー県では、生産量が高く、南部のウムヌゴビ県、ドルノゴビ県、バヤンホンゴル県などでは、生産量が低いと判明**



## 1-3 脆弱性の評価



牧草生産量の経年変化(2000-2012)の変動係数(CV)を求めた。その結果、北部の連続・不連続的な永久凍土地域ではCVが小さいが、**東南部の点状的な永久凍土地域と季節的な凍土地域ではCVが大きい**。つまり、この地域の**牧草生産は気候変動に対する脆弱性が非常に大きい**と判明

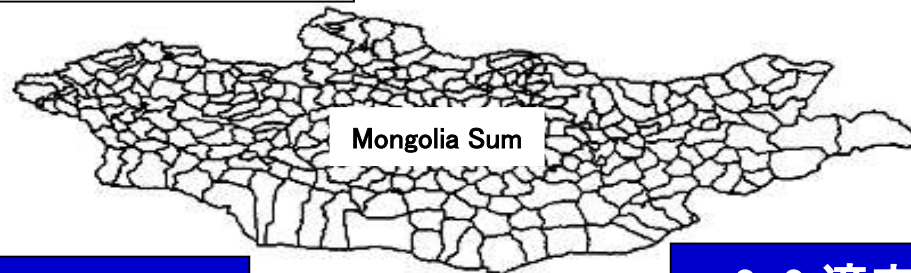
# サブテーマ2 気候変動に対する適応策決定システムの開発と適応政策の提言

## 観測データ

- MODIS衛星データ（サブテーマ1と連携）
- 永久凍土観測データ（サブテーマ1と連携）
- 気象データ（モンゴル気象水文研究所と連携）
- 異常気象予報値（モンゴル気象水文研究所と連携）
- 土地情報データ（モンゴル科学院と連携）
- 社会経済GISデータ（モンゴル国立大学と連携）

## 2-1 凍土融解・環境容量の検証

- FAOのSimSAGS モデルによる凍土融解・環境容量の検証およびソム（郡）レベルの環境容量と適正家畜頭数の決定



サブテーマ1  
と連携

## 2-3 技術・政策オプションの提言

- 適正放牧頭数へ誘導するための家畜総量規制政策、および放牧地の水資源利用・整備計画への提言

## 2-2 適応策・技術の評価

- 実証サイトにおいて適応策の選択による草原保全効果と家畜産業経済効果の評価

APAN Keio-Node: 科学的知見、適応技術・政策等の集積

UNEP APAN

モンゴル政策決定者への適応策の提言

# 2-1凍土融解・環境容量の検証

- ①
- ②
- ③
- ④
- ⑤

$$\frac{\partial \theta_l}{\partial t} + \frac{\rho_l}{\rho_l} \frac{\partial \theta_l}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] + \frac{1}{\rho_l} \frac{\partial q_v}{\partial z} + U$$

**土壌水分モデル**

- ① 体積含水率の変化
- ② 体積含水率の変化
- ③ 液体水フラックス
- ④ 水蒸気フラックス
- ⑤ 根による水分吸収量

**入力データ**

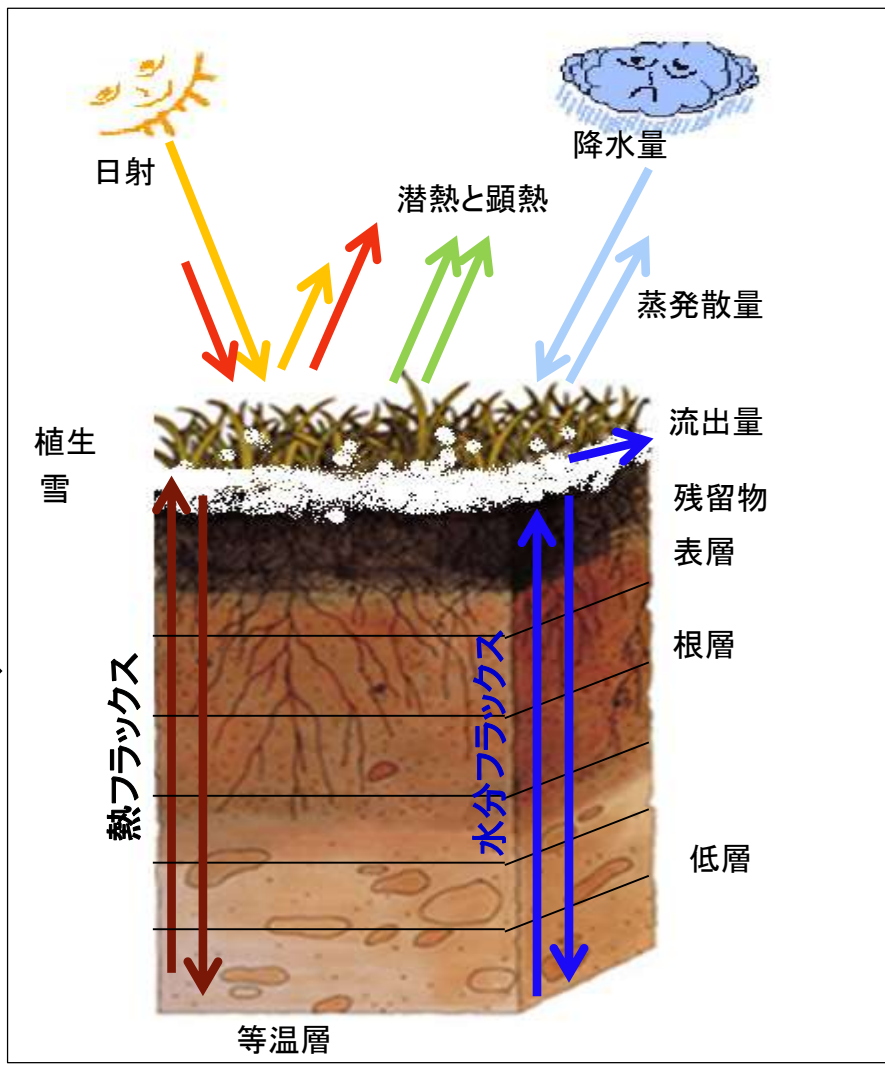
**駆動力要素**

気温、湿度、降水量、日射、風速などの気象データ  
(時間 または日単位)

**初期値**

1. ある時点の土壌温度と水分プロファイル
2. 土質、有機物含量、空隙率など土壌特性パラメータ
3. バイオマス、最大葉面積指数など植生パラメータ
4. 地点の地理情報

## SHAW(Simultaneous Heat and Water) モデル(Flerchinger, 2000)による凍土の融解と流出過程の評価



- ①
- ②
- ③
- ④
- ⑤

$$C_s \frac{\partial T}{\partial t} - \rho_f L_f \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ k_s \frac{\partial T}{\partial z} \right] - \rho_f c_f \frac{\partial q_f T}{\partial z} - L_v \left( \frac{\partial q_v}{\partial z} + \frac{\partial p_v}{\partial t} \right)$$

**土壌温度モデル**

- ① 土壌温度の変化;
- ② 水分凍結に必要な潜熱
- ③ 顕熱フラックス
- ④ 潜熱フラックス
- ⑤ 蒸発による熱放出

**出力項目**

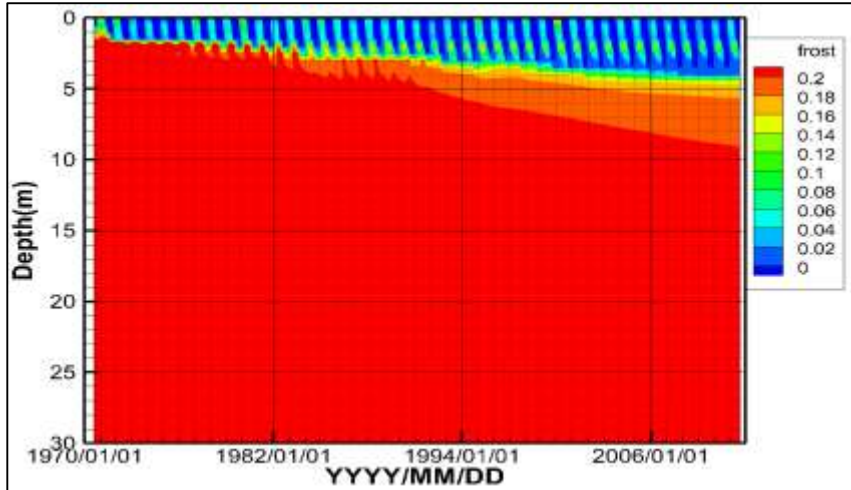
(時間 または日単位)

1. 土壌温度プロファイル
2. 土壌水分プロファイル
3. 表層の熱・水収支量
4. 凍結、融解過程及び活動層の深さなど
5. 草原の生産量と炭素吸収量など

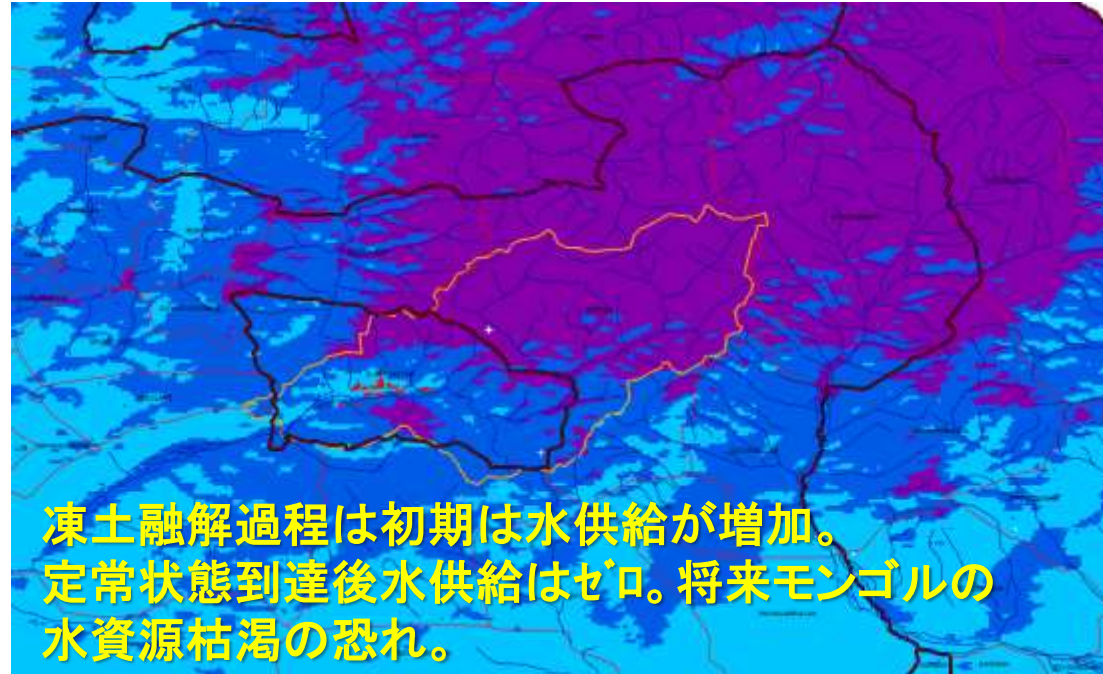
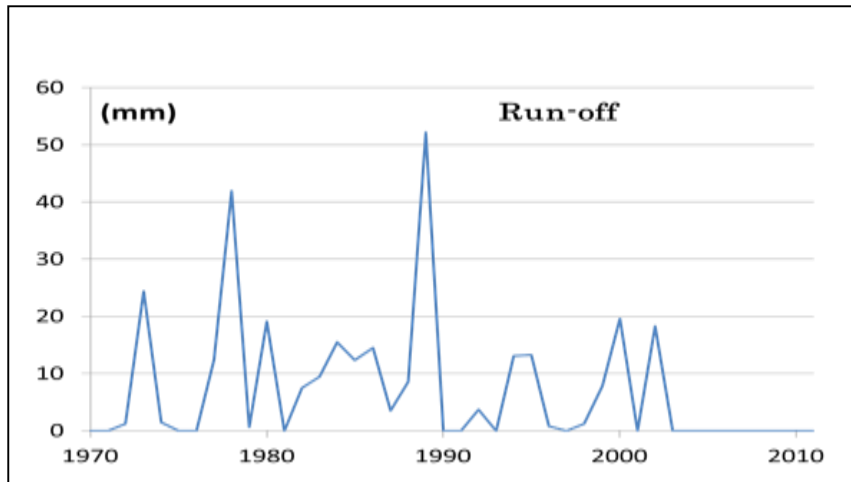


## 2-1凍土融解・環境容量の検証

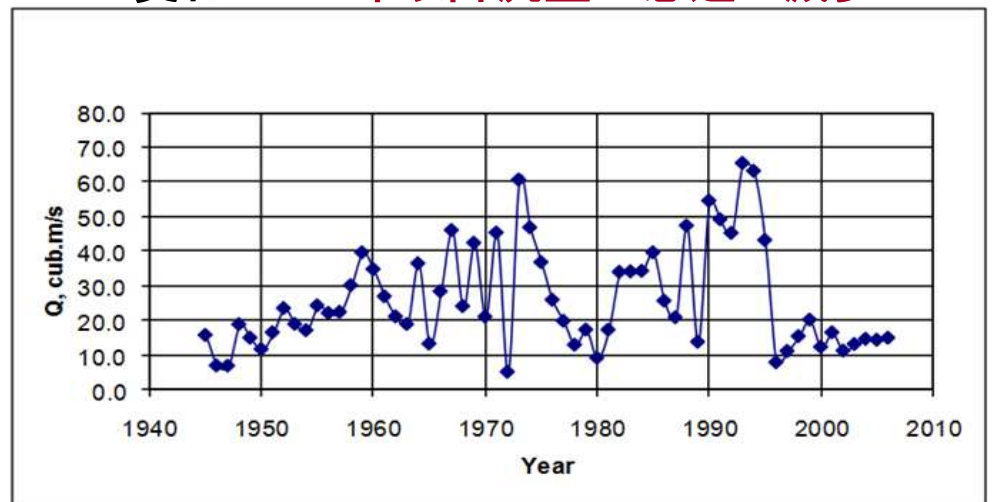
Nalaikhでの永久凍土の温度上昇と活動層が深くなるが、定常状態に向かう。



Nalaikh永久凍土融解に伴う流出量計算結果: 2002年以降流出量枯渇。



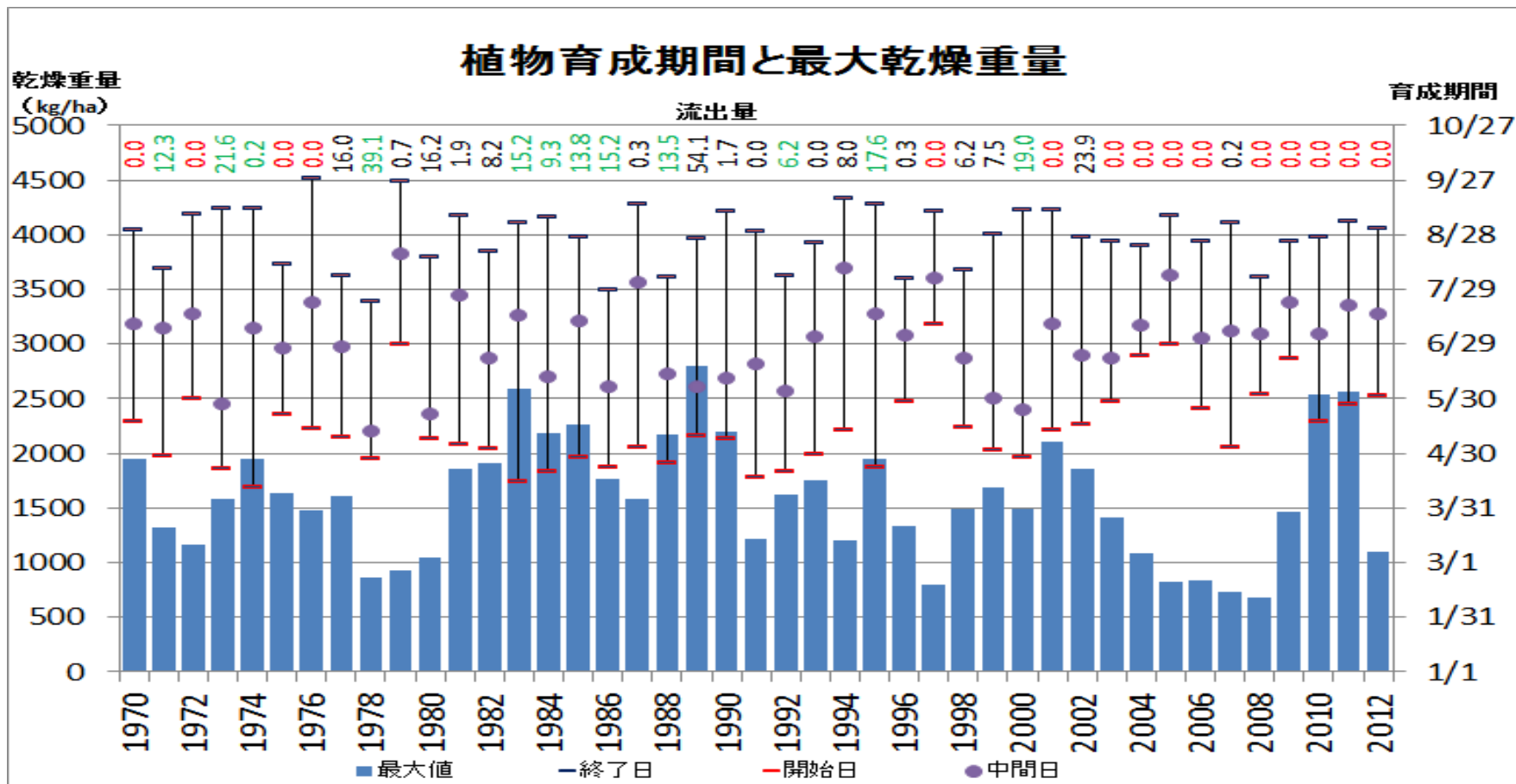
ウランバートル観測点におけるトール河流量変化: 1996年以降流量が急速に減少



## 2-1凍土融解・環境容量の検証

### 凍土融解に伴う流出量とグリーンアップの関係を説明

(1970年～2012年でのグリーンアップ時期、生育終了時期、牧草最大乾燥重量のデータは、Texas A&M大学のGLEWSデータ(TV-0031)を用いた)



- ・ **グリーンアップ時期は、3～4月に凍土融解に伴う流出量に規定されること**
- ・ **グリーンアップ時期の遅れは、草原生産量の減少にもつながり、ゾド発生リスクを高める。このため、凍土融解・流出量の推定はゾド発生予測にも適用可能と考えられる。**

## 2-1凍土融解・環境容量の検証

FAOのSimSAGS (Simulation of a Semi-arid Grazing System、Derry, 2004) に気象条件・植物量、井戸位置情報および実測された家畜頭数を初期値として与え、環境容量を推定した。

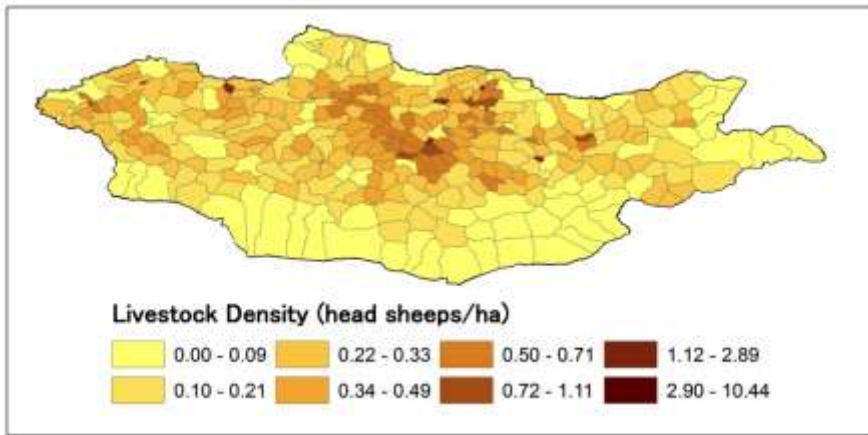
開始年	種	移動面積(ha)	実測頭数			モデル解析結果		
			総頭数	頭数/ha	総頭数/ha	総頭数	頭数/ha	総頭数/ha
1991年	ヤギ	14,290	5,070	0.355	1.056	5,804	0.406	0.998
	ヒツジ	46,599	32,694	0.702		27,590	0.592	
2005年	ヤギ	31,688	15,962	0.504	1.238	8,178	0.258	0.819
	ヒツジ	33,551	24,646	0.735		18,808	0.561	

- 1991年でのヤギ・羊の計算結果は実測頭数とほぼ同じであり、環境容量は0.998と推定された。
- 2005年での環境容量は1991年に比べて減少しており、グリーンアップの大幅な遅れとヤギ頭数増加がその原因と考えられる。

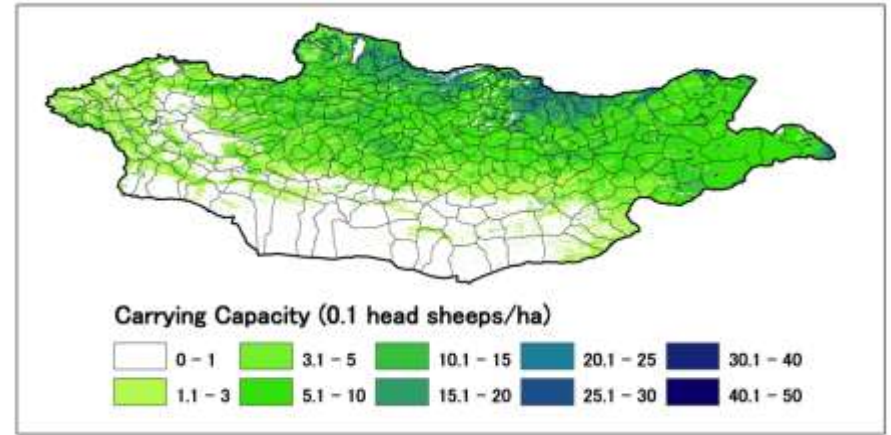


# 1-3 脆弱性の評価

# 2-1 凍土融解・環境容量の検証

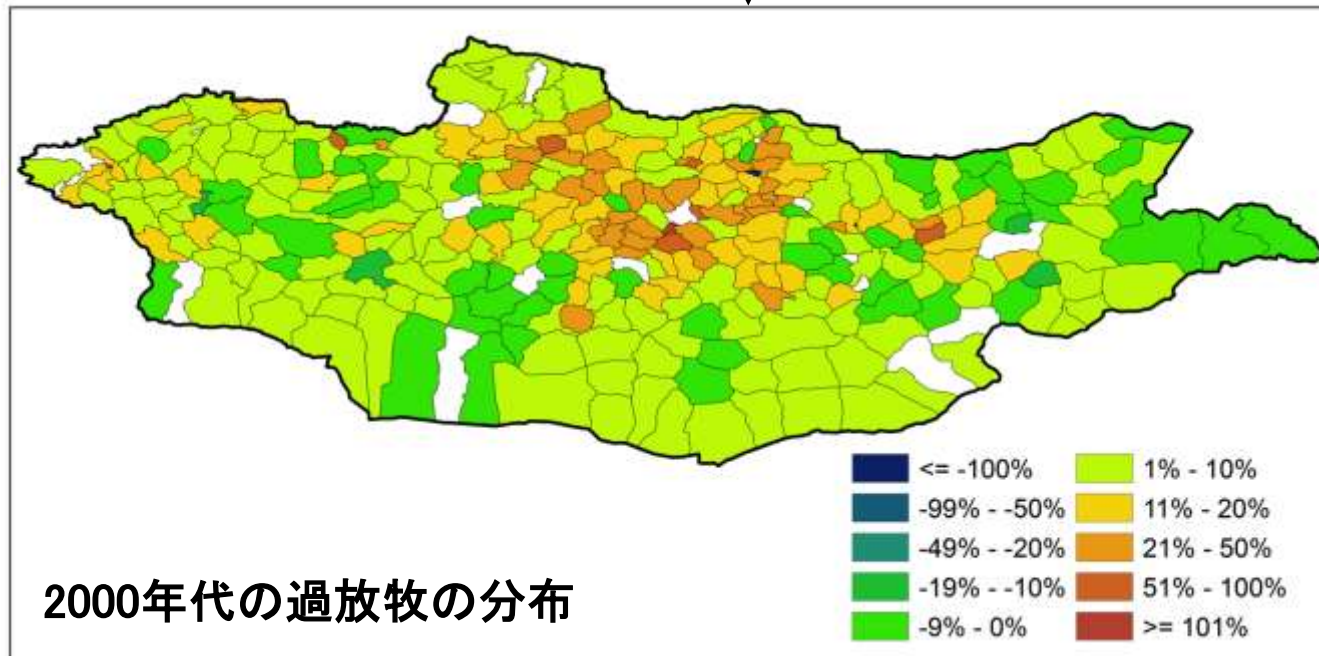


現状生産量



牧畜収容力

過放牧 = 現状生産量 - 牧畜収容力



モンゴル中央部、特に首都のウランバートル市周辺地域では、家畜放牧量は環境容量を大きく超え、過放牧していることが判明

## 2-2 適応策・技術の評価と実証

総量規制と適正家畜頭数

早期収穫と貯蔵

適応策②  
新しい水場の  
設置等

適応策① 携帯電話に干ばつなど早期警報の発信

情報の送信・返信共有システムによるコミュニケーション

適応策③  
早期収穫と  
貯蔵

遊牧民

テキストメッセージ(160文字)

- ① 天気予報
- ② 空間牧草量
- ③ 遊牧民からの返信
- ・ゾド発生予測

携帯電話



返信

携帯電話会社 Mobicom  
メールサーバ

知事, ソム長

- 地図ベースの情報
- ④ 過去のゾド被害量
- ⑤ 植生指標(衛星画像)
- ⑥ 過去の降雪分布

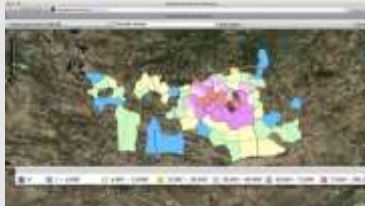
食肉処理の指示



ソム長:  
J. Enkhtuvshin



知事: A. Ochirbat



PC/スマートフォン

Webアクセス

メッセージ化

返信の  
格納

PostgreGIS (データベースサーバ)

③ 遊牧民からの返信

④ 統計データ (NSO, Mongolia)

ゾド発生予測システム開発

格納 ↓ 自動アクセス

本研究により取得した情報(他ソースも含む)

天気予報 (ECMWF, EUMETSAT)  
空間牧草量 (GLEWS, Texas A&M Univ.)

降雪, 植生指標データ (NOAA/NASA)

適応策① 適正放牧頭数へ誘導するための政策として、ゾド発生情報と積雪分布、草原生産量、食肉価格の情報と共に、モンゴル国家危機管理局を通して、ICTで配信するシステムを開発した。

実験日時:

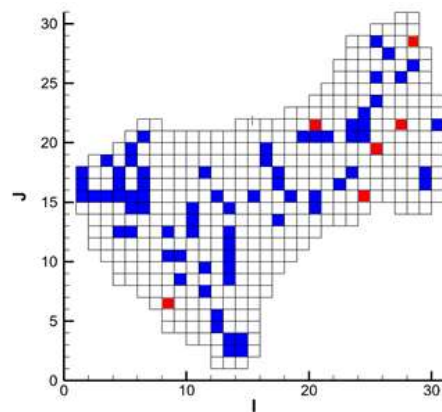
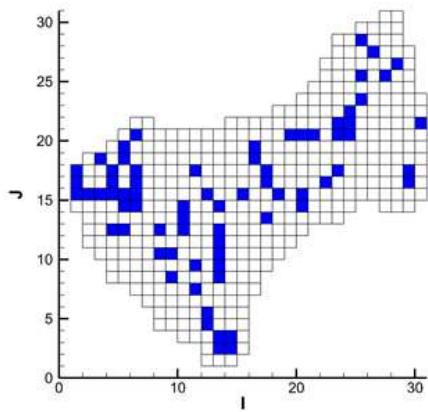
2014年8月か  
ら現在まで  
調査: Biger  
ソムの遊牧民、  
行政

社会実験のための  
ソム向けWS

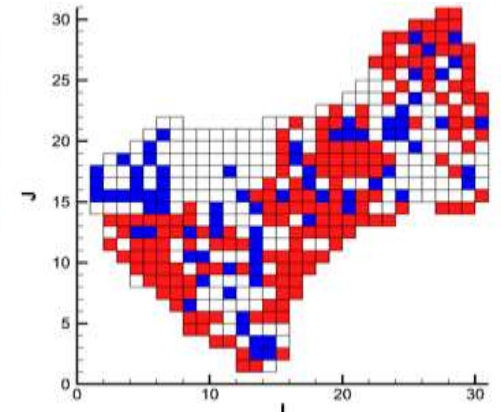
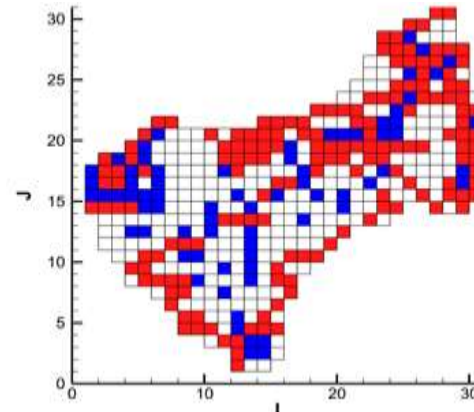


## 2-2 適応策・技術の評価と実証

**適応策②** 適正放牧頭数へ誘導するための政策として、アジア開発銀行が実施しているモンゴルでの適応策(新たな井戸設置等)に対して、SimSAGSモデルを用いて適応効果を評価した。その結果、井戸新設・水資源整備により家畜の行動範囲が広がり、利用可能な草原面積が広がる。このことにより家畜一頭当たりの草量増加につながり適応効果の増加が期待される。



Khureemaraalにおける水場(井戸のみ)の配置  
(左:ADBの井戸なし、右:ADBの井戸あり)



ヒツジの分布範囲(赤色セル) 3年目  
(左:ADBの井戸なし、右:ADBの井戸あり)

ヒツジの分布範囲(3年目)

セル数		面積(ha)		増加量(ha)	増加量(%)
ADB井戸なし	ADB井戸あり	ADB井戸なし	ADB井戸あり		
192	210	866,609	947,854	81,245	9.4



## 2-2 適応策・技術の評価と実証

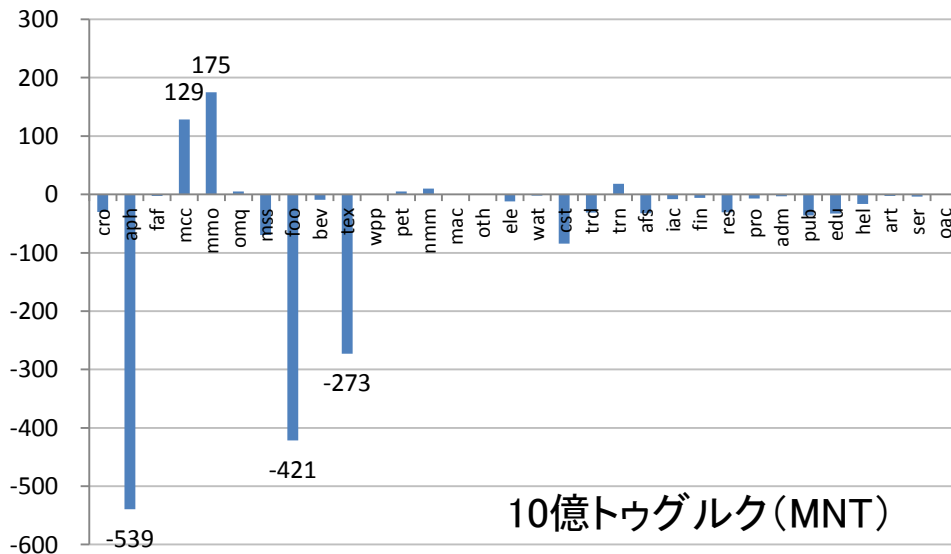
**適応策③** 早期収穫と貯蔵の政策を提案するため、応用一般均衡モデルを用いて、「牧畜部門生産性の低下と上昇シナリオ」、「食肉(製品)の輸出振興シナリオ」等様々なシナリオでの経済効果を評価した。その結果、**牧畜部門の生産性が40%低下(DP40)すると、GDPは8.3%減少し、失業率は14%上昇する。**一方、**最も高い輸出振興策の場合、畜産や食品製造が最も大きな経済利益を享受する。**石炭石油や金属採掘などの鉱業は経済が縮小し、**モンゴルの産業構造がグリーン経済へシフトする。**

シナリオ	牧畜部門の生産性
DP	低下 (DP40: 40%低下 DP20: 20%低下)
IP	上昇 (DP40: 40%上昇 DP20: 20%上昇)

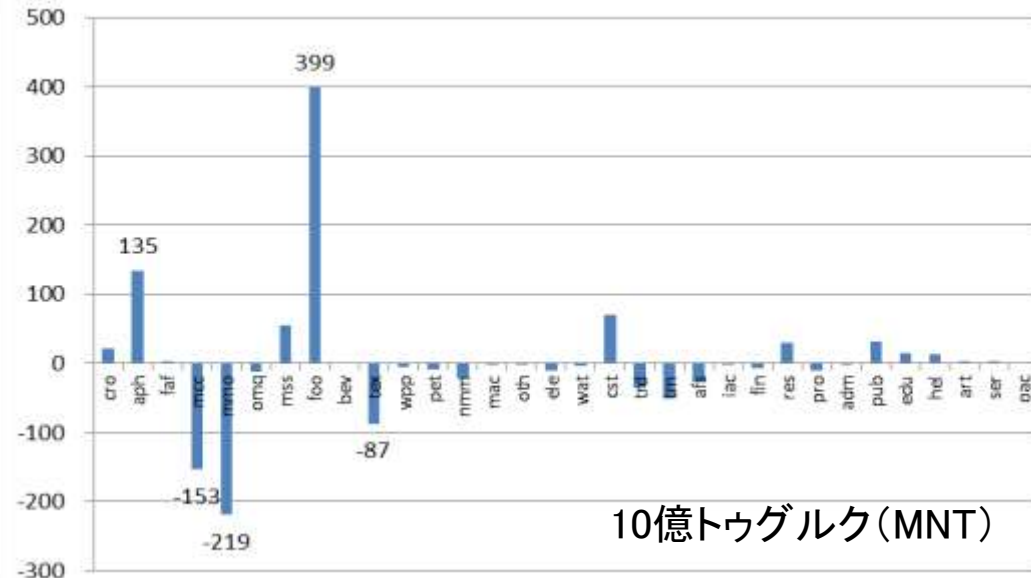
*\*DP40: 牧畜部門の生産性が40%低下*

シナリオ	説明
EX1	輸出が5倍
EX2	輸出が5倍 + 輸出価格が国内価格の2倍
EX3	輸出が5倍 + 輸出価格が国内価格の3倍

牧畜部門の生産性低下ケース(DP40)で  
生産額の変化



輸出振興策のケース(EX3)で  
生産額の変化



# 本研究開発により得られた成果

## 科学的な意義

- 解像度1km凍土分布図を作成、その結果、永久凍土の動的な変化の解析と予測が可能になった。
- 解像度1km牧草生産量分布図を作成、その結果、SUMやAIMAGなど各行政区レベルの牧草生産量、環境容量及び過放牧のモニタリングが可能になった。
- 凍土融解に伴う流出量の変動が、牧草のグリーンアップ時期・草原生産量の変動につながり、さらに、ゾド発生リスクを高めるというメカニズムを解明、その結果、凍土融解に伴う流出量の推定はゾド発生予測に適用可能になった。
- 新たな脆弱性指標やゾド発生予測システムを開発、その結果、ゾド発生予測、及び積雪分布、草原生産量、食肉価格等の情報を、ICT(情報通信技術)活用による情報発信が可能になった。



## 政策的な貢献

- 再生可能エネルギー等を用いた自立分散型社会インフラ(可搬冷凍設備(コンテナ型))による放牧頭数管理政策をモンゴル環境・グリーン開発省に提言し、モンゴルグリーン開発計画に組み込まれた。(モンゴル環境・グリーン開発省大臣記事: S. Oyun(2013/6 <http://www.assa.mn/content/13962.shtml?a=english>))
- 「日・モン環境政策対話」に反映、二ヶ国間の環境協力関係の強化に寄与、JCM事業にも貢献した。
- COP19(ワルシャワ)やAPAN関連の国際会議において、適応策の開発計画への主流化の成功例として各国の政策決定者、研究者に向けて発信し、結果的に国連の**全球適応策ネットワーク(GAN)の創設に貢献した**



# 研究成果の発表状況

## (4) マスコミ等への公表・報道等

全国紙 朝日新聞(2014年2月27日)の一面と二面他に、温暖化に関する特集記事として下記の地方紙14紙が2015年1月1-5日付紙面に掲載:

東奥日報(青森県)、上毛新聞(群馬県)、下野新聞(栃木県)、茨城新聞、神奈川新聞、静岡新聞、中部経済新聞(愛知県)、伊勢新聞(三重県)、京都新聞、高知新聞、山陽新聞(岡山県)、佐賀新聞、熊本日日新聞、宮崎日日新聞



**家畜大量死 収入求めて都市へ**

地球 異変 1面から続く

モンゴル、羊の群れが、凍結した草原を渡り、都市部を目指している。冬場の大雪と乾燥により、家畜は大量死を遂げ、牧民は収入を求めて都市部へ移住を余儀なくされている。



**国土むしばむ温暖化**

モンゴルは温暖化の被害を被る。国土の約70%が草原で、冬場の大雪と乾燥により、家畜は大量死を遂げ、牧民は収入を求めて都市部へ移住を余儀なくされている。

**適応策、日本が支援**

モンゴルは温暖化の被害を被る。国土の約70%が草原で、冬場の大雪と乾燥により、家畜は大量死を遂げ、牧民は収入を求めて都市部へ移住を余儀なくされている。

## 生きるため草原を去った

**解ける永久凍土**

モンゴルの首都ウランバートルが解ける。凍土の融解により、都市部は深刻な被害を被っている。凍土の融解により、都市部は深刻な被害を被っている。

## 強い温室ガス排出



モンゴルは温室ガスの排出が激しい。これは温暖化の主要な原因の一つである。モンゴルは温室ガスの排出が激しい。これは温暖化の主要な原因の一つである。



**遊牧捨てて都市に定住**

モンゴルの遊牧民は都市部に定住を余儀なくされている。これは温暖化の被害によるものである。遊牧民は都市部に定住を余儀なくされている。これは温暖化の被害によるものである。



# 研究成果の発表状況

## (1) 誌上発表 <論文(査読あり)> 8件

- SUN, Z-G, Q-X WANG, Q-A XIAO et al., *Remote Sens.* 7, 360-377 (2015)
- WANG Q-X and BATKHISHIG O.: *J Ecosys Ecograph.* 4:140, (2014)
- SUN, Z-G. , M.GEBREMICHAEL and Q-X WANG: *J. Meteor. Society of Japan*, 91 (5), 627-638 (2013)
- SUN, Z-G., M.GEBREMICHAEL, Q-X WANG et al.: *Remote Sensing*, 5 (10), 4735-4752 (2013)
- SUN, Z-G., Q-X WANG, B. MATSUSHITA et al.: *Hydrological Sciences Journal*, 58 (5), 994-1012 (2013)
- XIAO, W-W. , Z. SUN, Q-X WANG et al.: *J. Appl. Remote Sens.*, 7 (1), 073562 (2013)
- WU, T-H., L. ZHAO, R. LI, Q-X. WANG et al.: *International Journal of Climatology*, (33), 920-930 (2013)
- WU, T-H. , Q-X. WANG, L Zhao et al.: *Environmental Earth Sciences*, 67 (7), 1869-1876 (2012)

## (2) 誌上発表 <論文(査読なし)> 7件

## (3) 口頭発表 (学会・公開シンポなど) 22件

## (4) シンポジウム、セミナーの開催 4件

- Workshop on Adaptation for Climate Change and Green Development in Mongolia, Jan. 13-15, 2015, Tokyo, Japan.
- The 9th International Conference of Environment and Sustainable Development in Mongolian Plateau and Surrounding Regions, Aug.20-22,2013,Ulan-Ude,Republic of Buryatia, Russia.
- The 5th Environmental Innovators (EI) Symposium, Session 2: Embracing Change, Building Resilience with Communities, Jan.15-16, 2014, Tokyo, Japan.
- Workshop on the Investigation of Environmental Vulnerabilities in the Permafrost Regions of Asia. Jan. 14, 2014, Tsukuba, Japan

## (5) マスコミ等への公表・報道等 15件