

水資源量に基づく乾燥・半乾燥牧草地の利用可能量と その脆弱性の評価 (所内公募型提案研究)

Evaluation of the pasture carrying capacity and its vulnerability based on water
resources in arid and semi-arid regions

平成30～令和2年度
FY2018～2020

NIES



国立環境研究所研究プロジェクト報告 第139号

NIES Research Project Report, No.139

SR-139-2021

水資源量に基づく乾燥・半乾燥牧草地の利用可能量と
その脆弱性の評価
(所内公募型提案研究)

Evaluation of the pasture carrying capacity and its vulnerability based on water
resources in arid and semi-arid regions

平成30～令和2年度
FY2018～2020

所内公募型提案研究「水資源量に基づく乾燥・半乾燥牧草地の利用可能量とその脆弱性の評価」

(期間：平成 30 年 4 月～令和 3 年 3 月)

課題代表者：王 勤学

執筆 者：王 勤学、中山忠暢、岡寺智大

編 者：王 勤学

序

本報告書は、平成30年～令和2年度の3年間にわたって実施した所内公募型提案研究A「水資源量に基づく乾燥・半乾燥牧草地の利用可能性とその脆弱性の評価」の研究成果をとりまとめたものです。

乾燥・半乾燥地域に分布している典型的な国であるモンゴルでは、急激な気候変動のほかに、大規模な都市拡大、鉱山開発および定住化に伴う農地開発が進行しています。この研究は、モンゴルの四つの代表的地域（半乾燥地域にある都市と草原地域、および乾燥地域にある鉱山と砂漠地域）を対象に、気候変動に加え、人為的攪乱が牧草地の利用可能性およびその脆弱性に及ぼす影響を評価しました。その結果、乾燥地域では、首都ウランバートルの生活用水に匹敵する量の鉱業用水が取水されていることがわかりました。また、都市化や鉱山開発に伴う過度な地下水汲み上げが周辺域の水循環に大きな影響を及ぼしていることを明らかにしました。さらに、市場経済が導入されてからの、特に2000年以降、都市と鉱山地域では放牧圧が牧草地の環境容量を大幅に上回っており、牧草地の脆弱性が一層高まっていることを解明しました。

これらの研究成果は、乾燥地域の持続可能な開発目標（SDGs）に深く関連するものだと考えています。この研究を実施するにあたり、国立環境研究所とモンゴル科学院およびモンゴル国立大学とそれぞれ共同研究協定書（MOU）を締結し、国際共同研究の体制を強化しました。そのため、2018年と2019年にそれぞれつくば市とウランバートル市にて三者合同会議を開催し、研究の方向性や実施内容および環境政策への貢献について幅広く議論を行いました。この研究を通じて、乾燥・半乾燥地域における気候変動適応策の策定に資する科学的知見の整備ができたと思います。今後、研究成果をモンゴルの周辺諸国に共有することで研究ネットワークをさらに拡大していくことを期待しています。

令和4年3月

国立研究開発法人 国立環境研究所

理事長 木本昌秀

目 次

1	研究の概要	1
1.1	研究全体の目的、目標、構成等	1
1.2	研究の概要	2
2	研究の成果	3
2.1	サブテーマ1：水資源需要量の時空間変動の推定	3
2.1.1	目的と経緯	3
2.1.2	方法	3
2.1.3	結果と考察	9
2.1.4	まとめ	15
2.2	サブテーマ2：水資源供給可能量の時空間変動の推定	16
2.2.1	目的と経緯	16
2.2.2	方法	18
2.2.3	結果と考察	23
2.2.4	まとめ	28
2.3	サブテーマ3：牧草地の環境容量およびその脆弱性に及ぼす影響評価	31
2.3.1	目的と経緯	31
2.3.2	方法	31
2.3.3	結果と考察	37
2.3.4	まとめ	40

【資料】

1	研究の組織と研究課題の構成	
1.1	研究の組織	
1.2	研究課題と担当者	
2	研究成果発表一覧	
2.1	誌上発表	
2.2	口頭発表	

1 研究の概要

1.1 研究全体の目的、目標、構成等

乾燥・半乾燥地域は、地球の陸地面積の約41%を占めており、そこで暮らす人々は20億人以上に及び、その約9割の人口が開発途上国に分布する。本研究は、乾燥・半乾燥地域に分布している典型的な国であるモンゴルを研究対象地域として選定した。モンゴルは、乾燥・半乾燥地域に分布する最大の内陸国であり、国土面積の80%以上は草原である。人々の主な生計手段は放牧であるため、草原に大きく依存している。草原は、気候変動と人間活動に敏感で脆弱であるため、生態学的機能と人々の生活を支える生態学的安全保障と見なされている。しかし、ここ数十年で、経済的利益の最大化を追求するため、一部の地域において過放牧の現象が見られ、さらに、都市や鉱山開発、農地開墾など人為的な攪乱が草原の劣化をもたらし、結果的に生態系機能や生産性、および牧畜民の生計にも影響を及ぼしている。

モンゴル気象局より入手した該当国気象観測の時期が最も長い6地点(Ulaanbaatar, Baruun-Haraa, Choir, Sainshand, Zamiin-UudとMandalgobi)のデータ解析によると、1945-2019年の75年間に年平均気温は約2.8℃も上昇し、その上昇幅は世界平均より遥かに大きいことが分かっている。さらに、モンゴルは寒い地域であり草原の下に永久凍土が存在しているため、温暖化に伴って永久凍土が融解され、土壌水分や地下水など、水資源の変化をもたらし、最終的に草原の生産性や脆弱性、さらに肉を中心とするモンゴルの食料安全保障に多大な影響を与えると考えられる。温暖化の影響を解明するため、我々は、2006年からの5年間「温暖化影響早期観測ネットワークの構築」を実施し、東アジア地域をカバーできる衛星観測データや代表的な生態系における地上観測データを取得し、温暖化が永久凍土の融解や環境資源の劣化に及ぼす影響を評価した。また、2012年からの3年間、「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」を実施し、温暖化に伴う永久凍土の融解が草原生態系に及ぼす影響を評価した。さらに、2014年からの5年間、中央大学、(株)日立製作所、(社)海外環境協力センター等と共同で実施した「二国間クレジット(JCM)推進のためのMRV等関連するモンゴルにおける技術高度化事業」において、モンゴル全土の草原域における二酸化炭素吸収量のモニタリングと評価を行った。その結果、気候変動が永久凍土の融解と地表水分状況の挙動に及ぼす影響、さらに牧草生産量に及ぼす影響を解析し、永久凍土の融解は生活インフラだけでなく、広域な草原にも影響を及ぼしていることが分かった。特に、土壌表層から植物への水分供給が減少し、植物の成長が遅れ、家畜の生育不良から凍害発生時には甚大な家畜被害を生む事が初めて分かった。これらの結果から、気候変動が永久凍土の融解、そして地表水分状況、さらに牧草生産量に影響を与え、最終的に家畜の頭数および牧草地の環境容量に影響を及ぼすと考えられる。

牧草地の環境容量およびその脆弱性は、気候変動だけでなく、人為的影響も大きく関わっている。モンゴルでは、1990年の初めから市場経済への移行や家畜の私有化政策に伴い、家畜頭数の急増と家畜種構成の変化が起こった。例えば、カシミヤ市場の拡大に伴い、ヤギの頭数が急増した結果、ヤギが草を根こそぎ食べてしまうため、草原への圧力を増大させることにつながった。また、遊牧民は、商品の流通・販売に適した都市周辺や幹線道路沿道その他、井戸や湖周辺などの水資源域に集中するようになり、こうした場所では、放牧圧が高まり、裸地化や生物多様性の低下などの問題が起こっている。また、都市・農地・鉱山開発も急拡大した。モンゴル国家統計局によると、1993年に約60万人だった首都Ulaanbaatar市の人口(全国人口の約28%)は、2019年には約154万人に急増し、これは全国人口(約330万人)のおよそ半数近くが首都に集中したことを意味する。さらに、産業構造も大きく変わり、中でも最も急成長した産業は鉱業であった。鉱業生産額は、2005年に初めて農林畜産業を超え、第一産業となり、その後も急上昇を続けており、2017年には農林畜産業の生産額の2倍超となっている。これらの人為的な攪乱は、これまでにない規模で草原に大きな影響を及ぼしている(図1)。裸地化した草原は、土壌のアルカリ化と砂漠化を招き、強風は表土を吹き飛ばしてしまう。一度失われた植生の回復は困難になってしまうため、牧草地の保全と持続的利用は、地球環境・食糧問題への対処という観点からも極めて重要な課題である。そのため、これらの地域において気候変動や人間活動に伴う水循環の変化が環境の脆弱性に及ぼす影響を明らかにし、それに対する適応策・適応技術オプションの提案が急務である。

ただし、この地域においてはデータの整備が遅れているため、環境の脆弱性評価や適応計画の策定に必要なデータが不足であり、入手も困難である。そのため、本研究は、まず、乾燥・半乾燥地域のモンゴルに分布しているいくつか典型的な地域を対象に、気候変動に加え、鉱山開発、都市拡大など人為的攪乱が水資源および牧草地の利用可能性とその脆弱性に及ぼす影響の評価手法を開発し、将来的に、乾燥・半乾燥地域の草原域に適用していくことを目指す。



図1 乾燥・半乾燥地域の持続的な開発に深く関連する牧草地の環境容量および脆弱性の影響要因

この目的を達成するため、モンゴル科学アカデミー地理地質生態研究所およびモンゴル国立大学等の機関との共同研究体制を作り、さらに、これまで構築してきた観測ネットワークや開発してきたモデルを生かしながら、下記の三つのサブテーマを設けて研究を進めた。

サブテーマ (1) 水資源需要量の時空間変動の推定 (担当：岡寺智大 主任研究員)

サブテーマ (2) 水資源供給可能性の時空間変動の推定 (担当：中山忠暢 主幹研究員)

サブテーマ (3) 牧草地の環境容量およびその脆弱性に及ぼす影響評価 (担当：王勤学 主席研究員)

そのうち、サブテーマ (1) で作成した水需要インベントリは、サブテーマ (2) の分布型水文 (NICE) モデルの定常計算の入力データとして利用する。また、サブテーマ (2) で算定した水資源利用可能性 (土壌水分量、地下水など) をサブテーマ (3) の環境容量および脆弱性指数の推定に利用し、最終的に、水資源の制約が牧草地の環境容量および脆弱性に及ぼす影響を明らかにした。

1.2 研究の概要

乾燥・半乾燥地域に分布するモンゴルの代表的地域を対象に、気候変動に加え、都市拡大や鉱山開発など人為的攪乱が水資源および牧草地の利用可能性とその脆弱性に及ぼす影響を明らかにした。そのため、まず、インベントリ調査により産業別の水資源需要量を推定し、また、プロセス型の統合型水文生態系モデル NICE (National Integrated Catchment-based Eco-hydrology) を適用することによって都市と鉱山地域での過度な地下水汲み上げが周辺域の水循環の改変に及ぼす影響を解明した。さらに、牧草地の環境容量および脆弱性の評価モデルを開発し、都市拡大や家畜頭数の急増など人為的攪乱の影響を定量的に評価した。

2 研究の成果

2.1 サブテーマ1 水資源需要量の時空間変動の推定

2.1.1 目的と経緯

人為的攪乱の水資源への影響を評価するには、どこでどれだけの水を利用しているかの定量的データが不可欠である。しかしながら、モンゴルのような途上国では、水需要に関する定量的データの整備が不十分であるため、水資源需要量を定量的に推計する手法の開発が必要となる。そこで、水資源需要量の時空間変動を把握し、プロセス型の3次元水文モデル(NICE)の入力データ(取水量)として活用するため、水需要インベントリの算定手法を開発し、県別・産業別水需要量を推計し、対象地域の水利用特性を考察した。また、対象地域の観測データや現地調査結果と比較することで算定結果を検証した。

2.1.2 方法

水需要量の推計手法はボトムアップ型とトップダウン型の大きく2つに分類できる。前者はある活動量(例:人口)に活動量当たりの水需要量(例:1人あたりの生活用水量)に基づいて活動主体の水需要量を積み上げる手法で、重複集計への留意は必要であるものの、対象地域で取得可能なデータに応じて算定モデルを構築する汎用性の高い手法である。他方、後者は計量経済モデルなどの経済モデルに基づく算定法で、理論上重複集計の問題はない反面、産業連関表などのデータ制約に大きく左右されるという難点がある。一般的に発展途上国ではデータ制約が大きく、本研究の対象地域のモンゴルでは国単位の産業連関表はあるものの地域単位の産業連関表は整備されていないため、本研究ではボトムアップ型手法を用いて、基本式(1)から地域単位(2.1.2.2参照)の水需要量を算定する。

$$wd_{(p)} = \sum_i a_{(p,i)} * w_{(p,i)} \quad (1)$$

ただし、 wd : 水需要量、 a : 活動量、 w : 水需要係数、 p : 地域、 i : 部門。

1) 水需要量の定義

水需要量に関する一般的な指標としては、取水量と水消費量があり、前者はある活動への給水のために河川や地下水などの水源から取り出した水量であるのに対し、後者は活動する中で実際に消費された水量(作物の蒸発散量、家畜や人間の飲料水量など)となる。一般的に中央政府や水供給者等により給水管理のために取水量のデータが集約的に整備されている可能性が高い一方で、水消費量については事例調査等による報告値などの非集計データであることが多い。モンゴルのような発展途上国では特にデータの整備が進んでないことを想定して、本研究では入手可能性の高い取水量を水需要量とする。

2) 地域区分

地域区部は、行政単位区分に基づき、22地域(1首都21アイマグ)とする。(表1)

表 1 地域区分

地域コード	地域名	地域コード	地域名
A01	Arkhangai	A12	Khovd
A02	Bayankhongor	A13	Khuvsgul
A03	Bayan-Ulgii	A14	Orkhon
A04	Bulgan	A15	Selenge
A05	Darkhan-Uul	A16	Sukhbaatar
A06	Dornod	A17	Tuv
A07	Dornogovi	A18	Ulaanbaatar
A08	Dundgovi	A19	Umnugovi
A09	Govi-Altai	A20	Uvs
A10	Govisumber	A21	Uvurkhangai
A11	Khentii	A22	Zavkhan

3) 部門分類

モンゴルの産業構造および取水データの取得可能性に基づいて、1. 農業（灌漑用水）、2. 畜産業（畜産用水）、3. 鉱業（鉱業用水）、4. 工業（工業用水）、5. 家計（生活用水）の5部門とした。

4) 灌漑用水

灌漑用水は、農作物の生育のために人工的に供給する水であり、農地面積により取水量が規定されるが、モンゴルでは、農地面積は全国集計値のみで地域毎のデータが入手できない。ただし、収穫面積および作付面積は共に地域毎に集計されており、作物種が多く、年次別データの欠損が少ない¹⁾ことから作付面積に基づいた手法を開発する。まずは作物種別に作付面積と灌漑率により各地域の灌漑面積を推計した。灌漑率はモンゴルの1993年農事歴および作付面積に基づいて、小麦2%、野菜100%、ジャガイモ45%、飼料作物70%とした^{1) 2)}。

次に、灌漑面積あたりの用水量を推計するため、灌漑用水量のデータの調査収集を行った。モンゴルの灌漑用水の定量的データは全国集計値が過去3年分（2006年、2009年、2016年）とモデル推計による灌漑用水必要量1年分（1993年）がある²⁾。これらのデータに基づけば、モンゴルでは年間0.094-1.29 km³が灌漑用に取水されており、灌漑面積当たり用水量は2,876-6,484 m³/haとなる。

5) 畜産用水

畜産用水は、家畜の育成に必要な水であるため、家畜頭数により取水量が左右される。モンゴルでは羊、山羊、馬、牛、ラクダといった主要な家畜頭数を地域毎に毎年統計データとして公表している¹⁾ため、家畜頭数に基づいて水需要を推計する。

そこで、家畜頭数あたりの用水量を求めるために、畜産用水の定量データの調査を行った。まず、家畜頭数あたりの用水量については、畜種ごとの代表性の高い科学的知見が得られなかった。また、畜産用水を直接的に示すデータはないものの、畜産用水を含む農業用水取水量の全国集計値の過去4年分のデータがあるため、そこから畜産用水を抽出した。具体的には、モンゴルの農業は畜産業と耕作農業の2部門のみで構成されているため、農業用水取水量から灌漑用水(2.1.2.4参照)を控除した差分を畜産用水とし、その結果、年間0.11-0.13 km³が家畜用に取水されていると推定される。合わせて畜種別家畜頭数を羊相当頭数へ換算することで、畜種別頭数の差異による水需要係数の等価性の問題を回避する。なお、畜種別羊換算係数は、山羊0.9、馬7、牛6、ラクダ5とした³⁾。これにより取得可能な年次の羊相当頭数あたりの畜産用水量は1.2-2.3 m³となる。

6) 鉱業用水

鉱業用水は、鉱物の採掘、精製などの生産プロセスで必要となる水であるため、鉱物生産量に基づいて鉱業用水量を推計する。モンゴルの鉱物生産量は、国民経済計算内の部門別国内総生産額（GDP）として毎年公表されており、地域毎の鉱業および採石業の生産額を得ることができる。しかしながら、生産額という貨幣単位集計値は本社所在地域に集約されるため、実際の生産地で生産量を適切に捉えることができないという問題がある。そのため、重量等の物的な鉱物生産量の地域別データが必要であるが、モンゴルでは統計情報として整備されていない。ただし、全国値は鉱物資源石油公社のウェブサイトで過去7年分の10鉱物種の生産量が報告されている⁴⁾ほか、世界鉱物統計データから1970年以降の15鉱物種の年間鉱物生産量を取得することが可能である⁵⁾。同時に、モンゴル国内の鉱山事業者による年報や調査報告書等で報告値を入手可能な鉱山もあることがわかった。

そこで本研究では世界鉱物統計データおよび入手可能な主要鉱山の報告値を組み合わせ、各アイマグの鉱物生産量の推計データを整備した。具体的には、まず、世界鉱山統計データから入手可能なモンゴルの鉱物種の生産量を抽出した（表2）。

表2 モンゴルの鉱物種別生産量抽出データの概要

分類コード	分類	単位	収録期間
SC1	無煙炭	トン（メートル法）	1979-1989
SC2	石炭	トン（メートル法）	1970-1978
SC3	褐炭（Lignite）	トン（メートル法）	1979-1990
SC4	褐炭（Brown coal & lignite）	トン（メートル法）	1991-2018
SC5	無煙炭・瀝青炭	トン（メートル法）	1994-2002
SC6	無煙炭・半瀝青炭	トン（メートル法）	2007-2008
SC7	銅（鉱山）	トン（金属量）	1978-2018
SC8	銅（製錬）	トン（メートル法）	2000-2018
SC9	蛍石	トン（メートル法）	1970-2018
SC10	金	キログラム	1990-2018
SC11	石膏	トン（メートル法）	1975-2018
SC12	鉄鉱石	トン（メートル法）	2003-2018
SC13	鉛	トン（金属量）	2013-2018
SC14	モリブデン	トン（金属量）	1979-2018
SC15	原油	トン（メートル法）	1994-2018
SC16	岩塩	トン（メートル法）	1977-2018
SC17	銀	キログラム（金属量）	1987-2018
SC18	鋼	トン（メートル法）	2004-2018
SC19	錫	トン（金属量）	2005-2018
SC20	タングステン	トン（金属量）	1981-2012
SC21	亜鉛	トン（金属量）	2001-2018

次に、表2の分類に基づき、各鉱物種の国内生産者（鉱山、製錬業者など）の所在地、生産量、稼働年および閉鎖年の情報を文献調査およびGoogleMap等の地図データベースから精査し、生産者ごと（のべ46生産者）の全国に占める標準的な割合を配分係数として整備（表3）し、各年次の全国値に乗じて求められた結果を、地域ごとに集計すること

で鉱物種別生産量を求めた。また、モンゴル国内には銅製錬業者が2件あるものの、立地および生産量の情報の確定ができなかったが、Eerdenet 銅山 (M01) の尾鉱から製錬していることから、同アイماغ内に立地しているものとし、生産量も同量と仮定した。なお、蛍石、石膏、岩塩、銅、錫については生産者の特定ができなかったため、算定対象から除外した。

表3 モンゴル国内の生産者の全国に占める標準的な割合 (配分係数) と生産量参照年次一覧

生産者コード	鉱物種	生産者 (鉱山・製錬業者)	地域	配分 係数	参照 年次
M01	銅	Eerdenet	Orkhon	35%	1978
M02	銅	Oyu Tolgoi	Umnugovi	35%	2013
M03	銅	Tsagaan Suvarga	Dornogovi	30%	2012
M04	金	Oyu Tolgoi	Umnugovi	77%	2013
M05	金	Boroo	Selenge	16%	2004
M06	金	Bayan Airag	Zavkhan	8%	2014
M07	鉛	Dulann Khar Uul	Bayan-Ulgii	100%	2013
M08	モリブデン	Eerdenet	Orkhon	41%	1978
M09	モリブデン	Tsagaan Suvarga	Dornogovi	59%	2012
M10	亜鉛	Tumurtiin Ovoo	Suhubaatar	100%	2005
M11	鉄鉱石	Bargilt	Khenti	6%	2011
M12	鉄鉱石	Bayangol	Selenge	66%	2007
M13	鉄鉱石	Tumurtei	Selenge	13%	2011
M14	鉄鉱石	Tumurtein Gol	Selenge	12%	2008
M15	鉄鉱石	Tumurtolgoi (Tolgoi)	Darkhan	0%	2009
M16	鉄鉱石	Beren	Arkhangai	3%	2007
M17	銀	Bayan Airag	Zavkhan	25%	2014
M18	銀	Dulann Khar Uul	Bayan-Ulgii	25%	2014
M19	銀	Oyu Tolgoi	Umnugovi	25%	2013
M20	銀	Eerdenet	Orkhon	25%	1978
M21	タングステン	Khovd Gol	Bayan-Olgy	25%	1981
M22	タングステン	Ulaan-Uul	Bayan-Olgy	25%	1981
M23	タングステン	Tsagaan Davaa	Tov	25%	1981
M24	タングステン	Bürentsogt	Sukhbaatar	25%	1981
M25	原油	Tamtsag (Tamsag)	Dornod	50%	1998
M26	原油	Zuunbayan	Dornogovi	50%	1970
M27	石炭	Tavan Tolgoi	Umnugovi	22%	2011
M28	石炭	Baganuur	Ulaanbaatar	15%	1978
M29	石炭	Shariyn Gol	Darkhan-uul	2%	1965
M30	石炭	Shivee Ovoo	Govisumber	8%	1990
M31	石炭	Aduunchuluun	Dornod	2%	1979
M32	石炭	Bayanteeg	Uvurkhangai	0%	1962
M33	石炭	Mogoiingol	Khuvsgul	0%	1971
M34	石炭	Talbulag	Sukhbaatar	0%	1970
M35	石炭	NuurstKhotgol	Uvs	0%	2011
M36	石炭	KharTarvagatai	Uvs	0%	1964
M37	石炭	TevshiinGovi	Dundogovi	0%	1990
M38	石炭	Nariin Sukhait	Umnugovi	17%	2008
M39	石炭	Ovoot Tolgoi	Umnugovi	7%	2008
M40	石炭	Ukhaa Khudag	Umnugovi	19%	2009
M41	石炭	Baruun Noyon Uul (BNU)	Umnugovi	5%	2014
M42	石炭	Baruun Naran	Umnogovi	0%	2014
M43	石炭	Khushuut	Khovd	0%	1971
M44	石炭	Ulaan Ovoo	Selenge	0%	2010
R1	銅	Eerdenet 銅山の尾鉱利用業者	(Orkhon)	50%	1997
R2	銅	Eerdenet 銅山の尾鉱利用業者	(Orkhon)	50%	2014

最後に、文献調査により鉱物生産量あたりの取水量を鉱物種別に求める。鉱物生産量あたりの水需要量は一般的に鉱石量基準と精鉱量基準の2種類があるが、本研究での生産量は鉱物種により重量単位が異なるため、データの単位に応じた係数を設定した(表4)。なお、石炭生産量は6種類に分類されている(表2)が、分類種別の水需要係数の設定が困難であるため石炭の種類に関わらず生産量あたりの取水量は一定と仮定した。

表4 鉱物種別生産量あたりの水需要係数

鉱物種	水需要係数	単位	備考
石炭	1.3	m ³ /トン (メートル法)	世界平均 ^{5),6)}
銅 (鉱山)	88	m ³ /トン (金属量)	世界平均 ⁷⁾
銅 (製錬)	48	m ³ /トン (金属量)	世界平均 ⁷⁾
金	400	m ³ /kg	世界平均 ⁷⁾
鉄鉱石	0.6	m ³ /トン (メートル法)	世界平均 ⁷⁾
鉛	21.9	m ³ /トン (金属量)	世界平均 ⁷⁾
モリブデン	706	m ³ /トン (金属量)	世界平均 ⁷⁾
原油	1.9	m ³ /トン (メートル法)	世界平均 ^{5),6)}
銀	5,440	m ³ /トン (金属量)	世界平均 ⁷⁾
タングステン	477	m ³ /トン (金属量)	世界平均 ⁷⁾
亜鉛	26.8	m ³ /トン (金属量)	世界平均 ⁷⁾

7) 工業用水

工業用水は、工業製品(鉱業除く)を生産するために取水される水であるため、工業製品の生産量に規定される。モンゴルの工業製品の生産量データは一部の地域(ウランバートル、トゥール川流域など)で報告値がある⁸⁾ものの、全アイマグでは国民経済計算の部門別生産額のみとなるため、工業部門(鉱業除く)の生産額に基づいて推計する。モンゴルの国内生産額の部門分類は、大分類(3部門:農林水産業、工業、サービス業)と中分類(11部門)があり、工業は鉱業、製造業、電力・ガス・熱供給業、建設業からなるため、ここでは製造業、電力・ガス・熱供給業、建設業(以下、その他工業部門と呼ぶ。)の総額とする。その他工業部門の生産額は、全国集計値および地域別集計値がそれぞれ1990年と2010年から入手可能であるが、2010年以降のその他工業部門の全国値と地域別データの合計を比較したところ、15-18%の誤差が生じることが判明した。誤差補正のため、その他工業部門の地域別データから全国に占める各地域の割合を求め、全国値を地域別割合で案分した値をその他工業部門の地域生産額とした。

その他工業部門の生産額あたりの取水量を求めるために、モンゴルの工業用水データの調査と整備を進めた。モンゴルではその他工業部門の水需要に関する代表性の高いデータそのものはないものの、過去4年分の鉱業部門を含む工業用取水量の全国集計値は公表されているため、そこから鉱業用水(2.1.2.6参照)を控除した水量を当該取水量とする。また、ウランバートルおよびトゥール川流域では食品製造業、建設資材製造業、電力・熱供給業の過去2年分の水使用量が報告されている⁸⁾ため、全国値との収支バランスをとることで、ウランバートル、トゥール川流域内の4アイマグ(表1内A01、A04、A17、A21:以下4アイマグ)およびその他アイマグにおけるその他工業部門の生産額あたりの取水量を求めた。その結果、その他工業部門の生産額100万トゥグルグ(日本円で約4万円)あたりの取水量は、ウランバートルで13-32m³/年、4アイマグで4-11m³/年、その他アイマグで26-542m³/年と推定される。

8) 生活用水

生活用水は、一般家庭の生活に必要な水であり、各地域の人口により左右される。また、モンゴルでは井戸水に依存する農村部と水道整備されている都市部では給水システムが大きく異なるため、地域ごとの農村人口と都市人口を整備

する。なお、モンゴルの水道整備状況は都市によっても異なるため、都市人口はさらに水道整備都市と水道未整備都市に分類する。

モンゴルの都市人口および農村人口は全国集計値が1956年に初めて公表され、1963年から毎年集計され、地域別集計値は1990年から公表されている。しかしながら、1990年から2000年の地域別集計値の合計と全国集計値の間には誤差が生じていることが判明したため、各地域の全国に占める割合と全国集計値を用いて、当該期間の地域別都市および農村人口を補正した。また、水道は首都および殆どのアイマグセンター（日本の都道府県庁に相当）に導入されている⁹⁾ため、ソム単位（日本の市区町村に相当）の都市人口統計より水道整備都市と水道未整備都市の人口を地域ごとに整備する。ただし、ウランバートルを除き水道整備に関する確定的な地域情報は入手できなかったため、水道整備都市はアイマグセンターおよび同地域内でアイマグセンター同等の都市人口と都市化率のソム（例：Zamiin-Uud）と仮定した（表5）。なお、ソムごとの都市人口は2014年からのみ公表されているため、ソム統計から地域の都市人口合計に占める水道整備都市の人口割合を求め、欠損年次の地域都市人口に乗じることで、水道整備都市および未整備都市の人口を地域ごとに推計した。

表5 モンゴルの水道整備都市（仮定含む）一覧

地域コード	地域名	水道整備都市名
A01	Arkhangai	Erdenebulgan (Tselserleg)
A02	Bayankhongor	Bayankhongor
A03	Bayan-Ulgii	Ulgii
A04	Bulgan	Bulgan
A05	Darkhan-Uul	Darkhan
A06	Dornod	Kherlen (Choibalsan)
A07	Dornogovi	Sainshand
A07	Dornogovi	Zamiin-Uud
A08	Dundgovi	Saintsagaan (Mandalgovi)
A09	Govi-Altai	Yesunbulag (Altai)
A10	Govisumber	Sumber (Choir)
A11	Khentii	Kherlen (Undurkhan)
A12	Khovd	Jargalant (Khovd)
A13	Khuvsgul	Murun
A14	Orkhon	Bayan-Undur (Erdenet)
A15	Selenge	Sukhbaatar
A16	Sukhbaatar	Baruun-Urt
A17	Tuv	Zuunmod
A18	Ulaanbaatar	Ulaanbaatar
A19	Umnugovi	Dalanzadgad
A20	Uvs	Ulaangom
A21	Uvurkhangai	Arvaikheer
A22	Zavkhan	Uliastai

次に、各地域の一人あたりの生活用水量を推計するため、関連データを調査、収集した。まず、農村での生活用水量については、モンゴル全域でのデータは確認できなかったもの、トゥール川流域の農村地域（29ソムと19ソムセンター）水需要量と農村人口の推計値（2010年、2012年）および予測値（2015年、2021年）が報告されており⁸⁾、そのデータから流域内の4アイマグの農村人口あたりの生活用水量を地域別に求めるとともに、その他地域についてはトゥール川流域の平均値を適用することとした。その結果、農村人口あたりの生活用水量は2.3-5.3m³/年と推計される。

次に、水道整備都市の生活用水については都市用水として1997年から5年ごとに公表されている全国値⁹⁾の他、ウランバートルおよび一部のアイマグセンター（Zuunmod）で給水業者の2010年頃の調査報告値⁸⁾を入手した。データが入手できなかった地域（欠損地域）の生活用水量は、全国値からウランバートルおよびZuunmodを控除した値とする。ただし、最新年次（2017年）の都市用水の全国値はウランバートルの取水量より過少になるため、欠損地域の用水量の算定には利用しなかった。最終的にウランバートル、Zuunmod、その他地域の都市人口で都市用水量を除いて、各地域の水道整備都市の1人あたりの生活用水量を求めた。なお、欠損年次については全国の都市用水量（推計値含む）を水道整備都市人口で除した値を参照する。水道未整備都市の生活用水に関するデータは入手に至らなかったため、トゥール川流域の19ソムセンターの一人あたり生活用水量⁸⁾で代替する。その結果、水道整備都市の1人あたりの生活用水量は14.4-77.6m³/年、水道未整備都市の一人あたりの生活用水量は2.8-5.6m³/年となった。

2.1.3 結果と考察

1) 灌漑用水の推移と地域特性

モンゴルの灌漑用水は1988年の4.2億m³をピークに減少し、1990年代以降は年1億m³程度で推移していたが、近年はやや増加傾向にあり、2018年では1.5億m³が取水される結果となった（図2）。地域別では、Tuv（A17）およびSelenge（A15）での灌漑用水が一貫して多く、直近でそれぞれ3,690万m³と4,980万m³を取水している。また、1990年前半まではZavkhan（A22）も多くの灌漑用水（最大6,640万m³）を利用していたと推計されるが、現在はその利用量は大きく減少している。

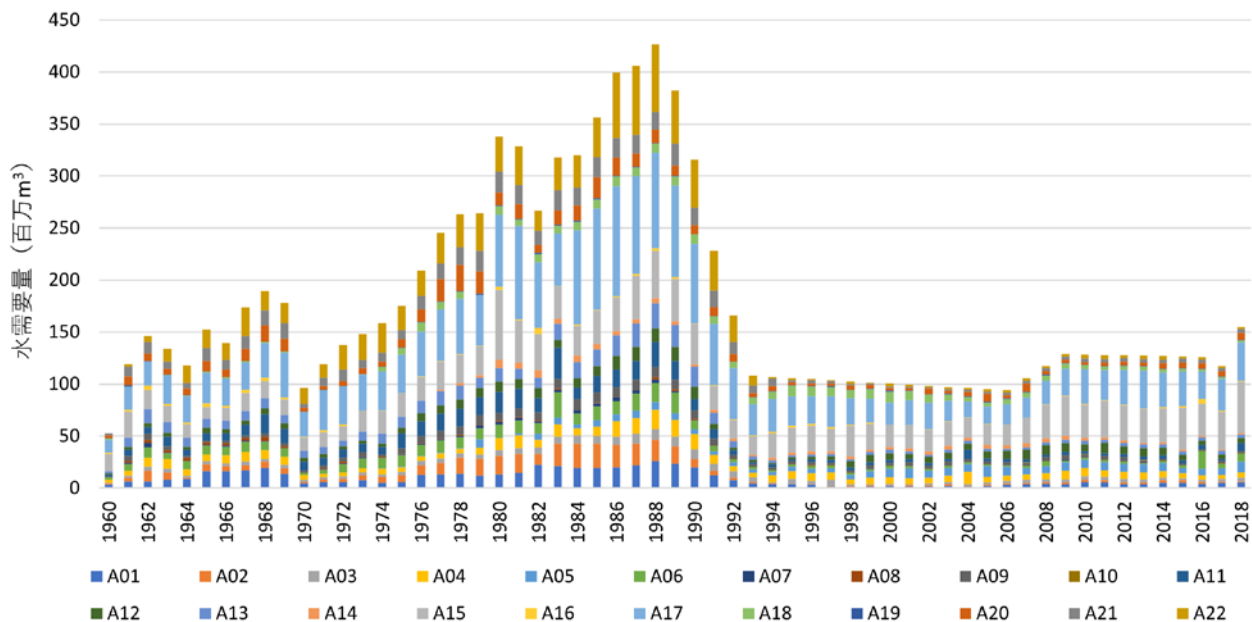


図2 モンゴルの地域別灌漑用水量の推計結果

2) 畜産用水の推移と地域特性

モンゴルの過去49年間の畜産用水量は、1980年代までは年間1.2億 m^3 以下で推移し、1990年代以降はやや増加傾向にあり、直近2018年には1.4億 m^3 弱まで増加しているとの結果となった(図3)。地域別では、Khuvsgul(A13)、Uvurkhangai(A21)、Arkhangai(A01)での取水量が総じて多く、各地域で、年間920-1000万 m^3 の水を家畜の生育に利用している。

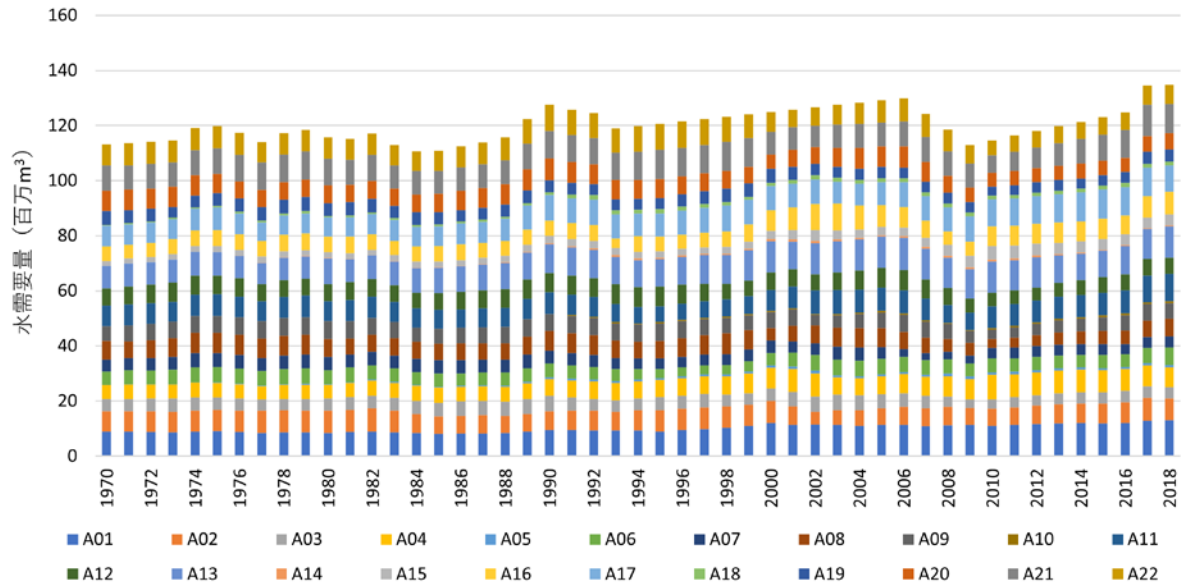


図3 モンゴルの地域別畜産用水量の推計結果

3) 鉱業用水の推移と地域特性

モンゴル全土の鉱業用水の推移をみると、1970年には240万 m^3 であったが、2018年には1億2,580万 m^3 という結果となり、水需要が過去49年で53倍に増加していることがわかった(図4)。また、主要取水地域は、1970年代はDarkhan-Uul(A05)およびウランバートル(A18)、1980-2000年代はOrkhon(A14)、2010年以降はUmnugovi(A19)と、年代により大きく変化していることも明らかとなった。

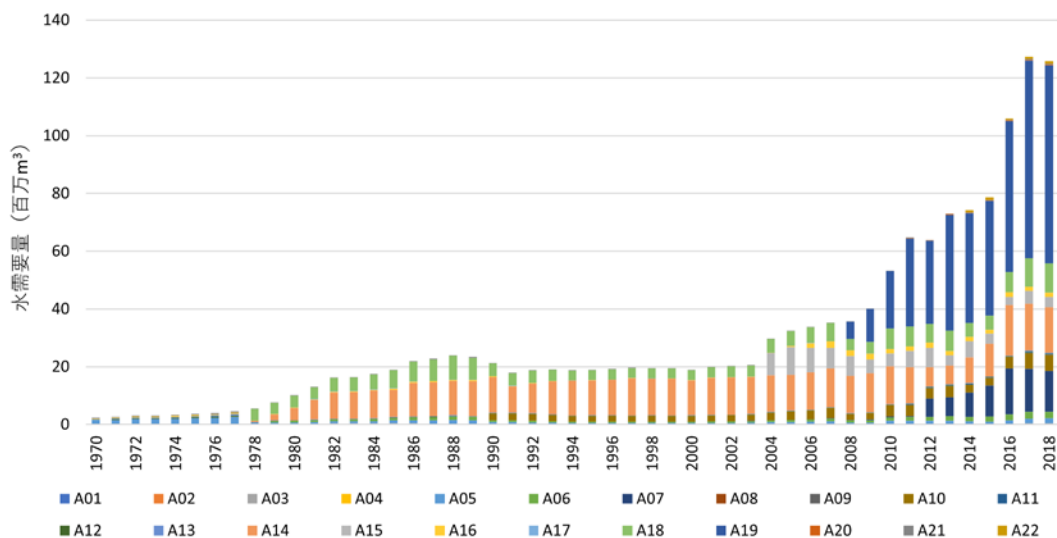


図4 モンゴルの地域別鉱業用水量の推計結果

4) 工業用水の推移と地域特性

その他工業部門の水需要は、過去8年間減少傾向にあり、2010年には1.7億 m^3 であったが、直近2017年は0.67億 m^3 と6割強削減される結果となった(図5)。主要利用地域はウランバートル(A18)であり、2017年は全国の58%を占めることがわかった。

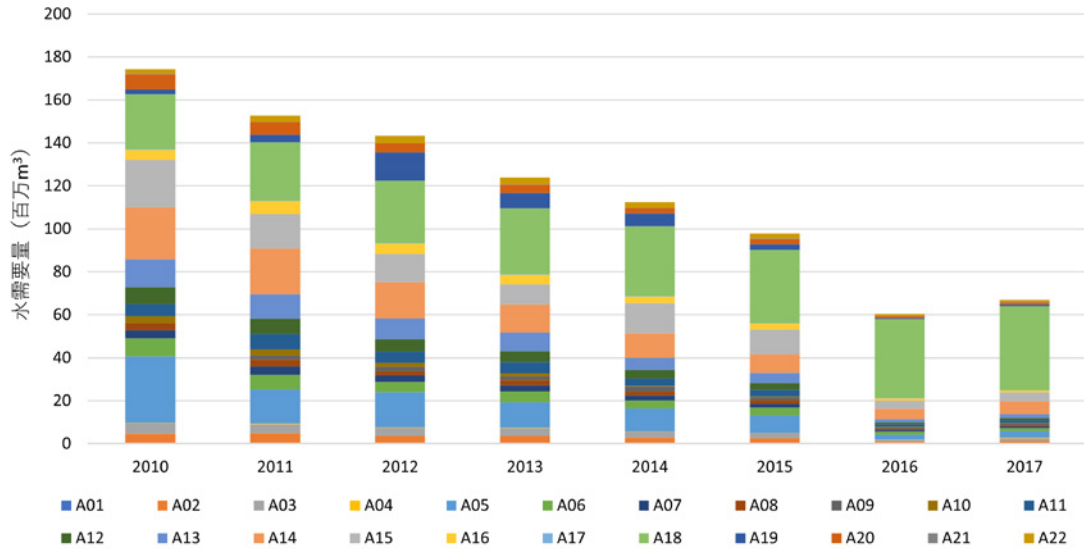


図5 モンゴルの地域別工業用水量の推計結果

5) 生活用水の推移と地域特性

都市部の生活用水(都市用水)の過去30年の推移をみると、2000年代初頭から2012年にかけて7,250万 m^3 まで減少したものの、概ね年間9,000万 m^3 が取水されていると推定される(図6)。また、最大取水地域はいずれの年次も首都ウランバートル(A18)で、1970年には全国に占める割合が5割であったが、2019年には8割を超えていることが明らかとなった。

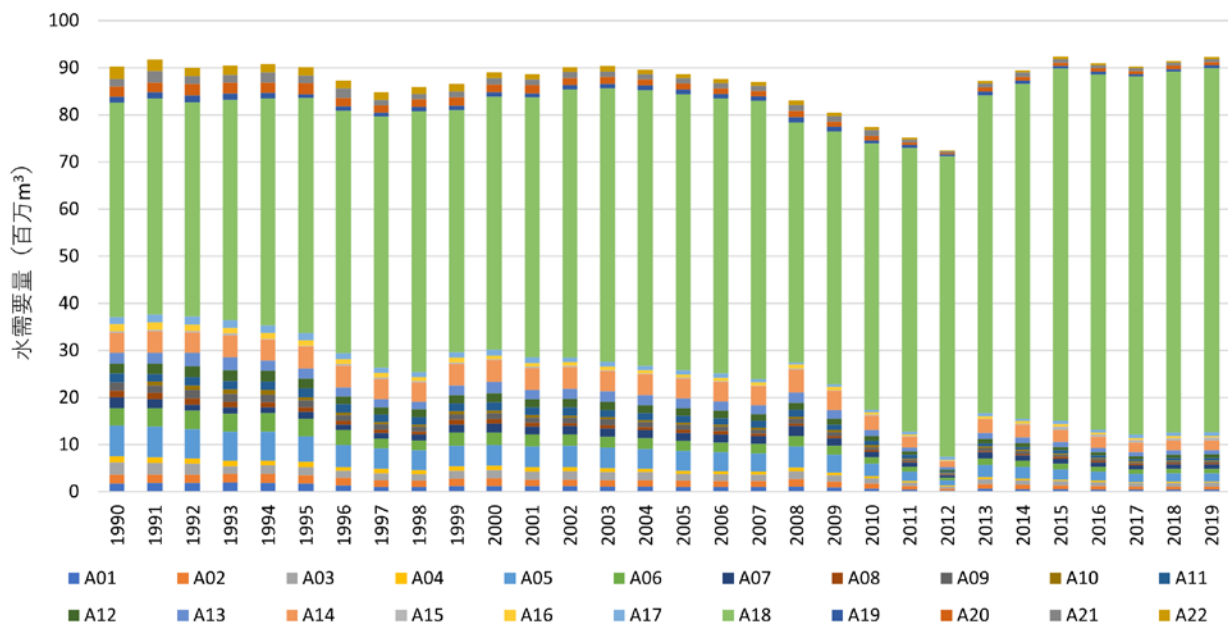


図6 モンゴルの地域別都市用水量の推計結果

一方、農村部の生活用水（農村用水）は、2000年代までは年間230-270m³で横ばいであったが、2010年以降増加へと転じ、2019年には540万m³と倍増していることが明らかになった（図7）。また、地域別では総じて Khuvsgul (A13) の取水量が大きい（2019年：47万m³）ほか、Tuv (A17) での取水量（2019年：41万m³）も多いことがわかった。

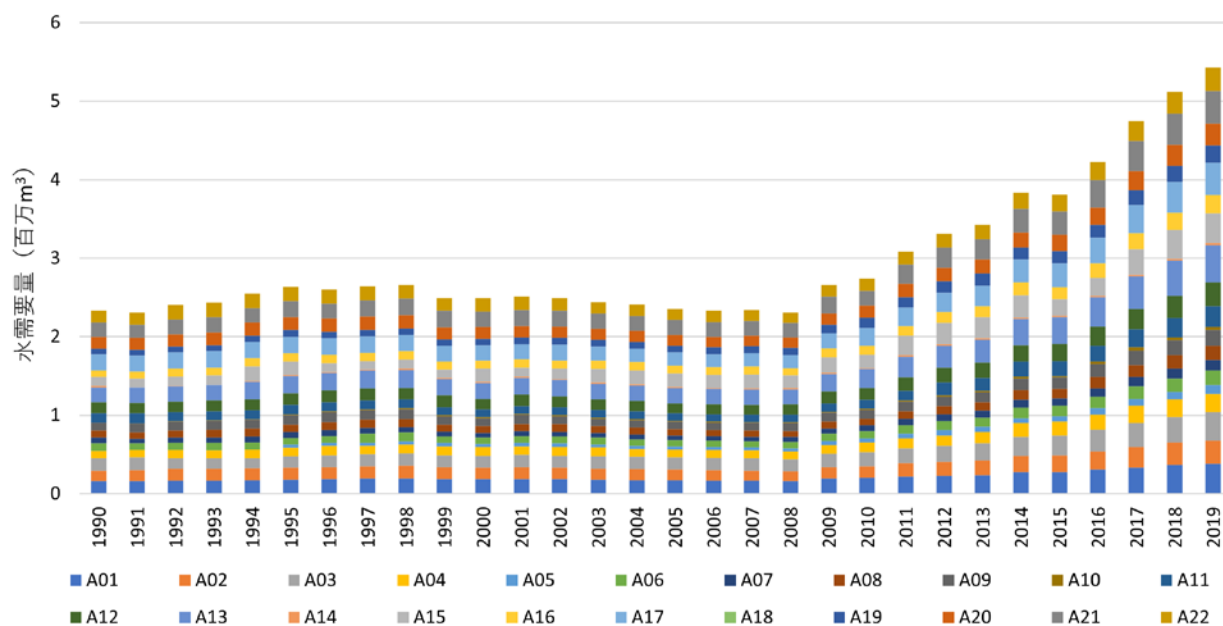


図7 モンゴルの地域別農村用水量の推計結果

6) 算定結果（全国集計値）の検証

本研究の算定結果検証のため、モンゴル全土の部門別水利用量と比較する。モンゴル部門別水利用に関する最新の知見は、2018年5月のフレルスフ首相の国会本会議での水事情に関する施政方針演説（<https://montsame.mn/jp/read/141743>）での報告値（以下、2018年報告値）である。ここでは具体的な年度への言及がないため前年2017年の報告値との想定の下、同年の本研究の結果（2017年算定結果）との比較を、図8で示す。農業部門以外の部門は本研究の推計値が過大となり、特に鉱業部門で顕著ではあることが明らかとなった。ただ、部門別割合は報告値に近い構成となっており、比較的実情に即した結果と考えられる。

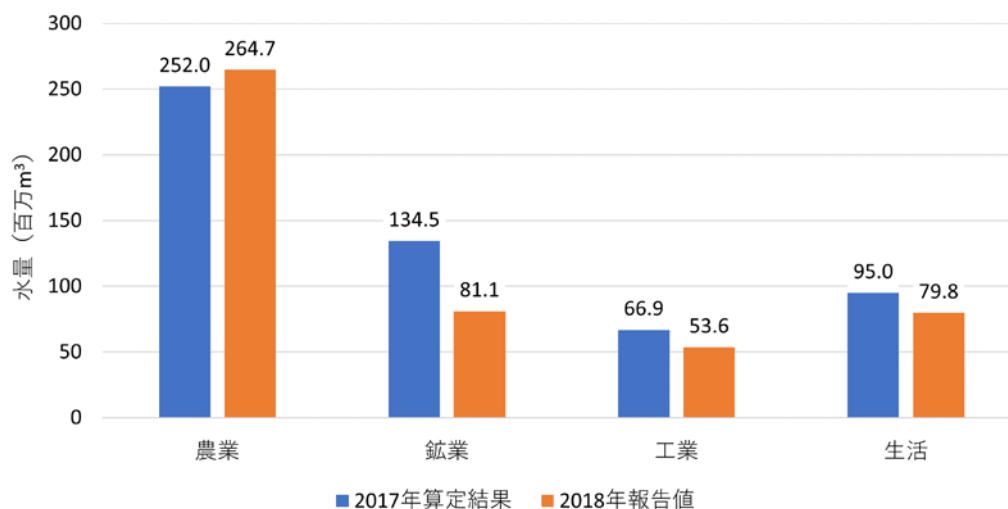


図8 モンゴルの部門別取水量の算定結果と現地報告値の比較

7) 畜産用水の観測値との比較

畜産用水の算定に用いた水需要係数の検証を現地観測データとの比較により行う。本研究では、現地 18 地点で地下水位の観測を実施し¹⁰⁾、その内畜産用の取水井戸 4 地点では現地利用者（畜産農家）への聞き取り調査からおおよその種別ごとの家畜頭数を知ることができたため、地下水位の変動データ（30 分単位）と井戸の開口部面積に基づいて日平均取水量および 95% 信頼区間（95%CI）を求め、羊相当数あたりの畜産用水量を推計した（表 6）。また、内 1 地点（井戸 2）では流量計による実取水データ（1 時間単位）が一部取得できたため、同様に羊相当数あたりの畜産用水量も求めた。

表 6 観測地点での羊相当頭数あたりの取水量推計値

井戸	観測手法	日数	日平均±95%CI (m ³ /日)	羊相当数あたりの取水量 (m ³ /頭/年)
1	水位計	260	2.85±0.38	0.11–0.15
2	水位計	263	0.18±0.02	0.04–0.05
3	水位計	262	0.05±0.01	0.01–0.01
4	水位計	261	2.80±0.34	0.33–0.42
2	流量計	98	0.93±0.41	0.13–0.33

本研究の畜産用水の推計では羊相当数あたりの畜産用水量 1.2-2.3 m³/頭/年とした（2.1.2.5 参照）が、観測データからの推計値は最大 0.42m³/頭/年となっており、算定に用いた係数は観測値より 3 倍以上過大となることがわかった。この原因としては、観測地点での参照データの不確実性の問題がある。まずは、地下水位変動から推計値は実取水量より 2.6-8 倍過少評価になる可能性が井戸 2 の結果から推察される。また、現地での聞き取り調査によると、1 日に複数の井戸を利用する農家もあり、観測地点のみで 1 日の取水量を賄えているとは限らないということや、現地農家は家畜頭数を正確に把握しているわけではないという参照データの制約が不確実性の要因として挙げられる。加えて、今回参照した観測地点は全てモンゴル南部の乾燥地域に立地するため、気候条件による給水制約も一因と推測される。

8) 都市用水の現地調査結果との比較

都市用水の算定結果の検証のため、トゥール川流域事務所（ウランバートル）への聞き取り調査で得られたウランバートルの都市用水データ（3 年分、以下調査結果）と比較する（図 9）。その結果、実績値と比較すると算定結果はやや過剰となるものの、誤差率 1～13% と良好な結果であることがわかった。

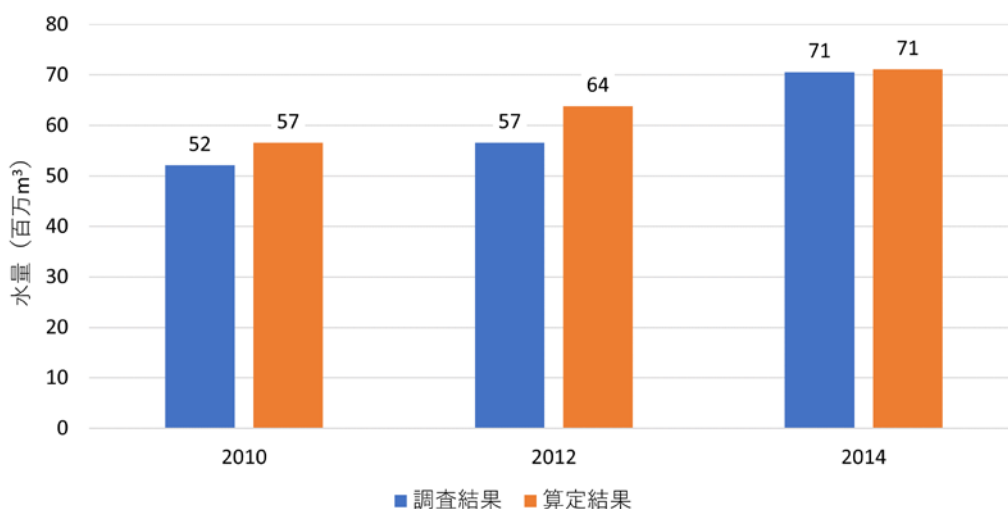


図 9 ウランバートルの都市用水実績値と算定結果

また、モンゴルの都市用水データに関連して、AQUASTAT ではモンゴル全国の都市用水量は 2012 年から 2017 年にかけて 7,300 万 m³ から 4,530 万 m³ に減少している²⁾ が、その間にウランバートルの都市用水の水源は 4 地点から 7 地点に増加しているほか、ポンプ場の増設、水道管も 30km 以上延長されていることが現地調査で判明しており、ウランバートルの都市用水量が大きく減少しているとは考え難いため、2017 年の同報告値は実情から著しく乖離した値と推察される。

9) 鉱業用水の現地調査結果との比較

鉱業用水の算定結果の検証のため、研究対象地域の Umnugovi (A19) 県ハンボグド市にあるオユトルゴイ鉱山への現地調査結果と比較する (表 7)。オユトルゴイ鉱山では 10 万 t/日の鉱石処理に対して毎秒 696L の水を利用しているとの話であったため、鉱石処理量 1000t あたりの水需要は 601m³ と想定される。それに年間鉱石処理量を乗じると現地調査に基づいた水利用量 (現地推計値) を求めることができる。同時に、Umnugovi (A19) の銅および金の算定結果の集計値と比較したところ、算定結果が過小評価となるものの、誤差率 8-17% と比較的実情に即した結果であることが明らかとなった。

表 7 オユトルゴイ鉱山の現地調査による取水量と Umnugovi (A19) の金銅鉱山の算定結果の比較 (単位百万 m³)

	鉱石処理量 (千 t)	現地推計値	算定結果	誤差
2014	27872		17	-11%
2015	34537		21	-17%
2016	38152		23	-17%
2017	41177		25	-12%
2018	38783		23	-8%

2.1.4 まとめ

モンゴルの地域別取水量を把握するために、地域単位で部門別水需要インベントリを作成し、用途に応じた取水特性を地域ごとに時系列分析した。その結果、灌漑用水 (Tuv, Selenge)、畜産用水 (Khuvs gul、Uvurukhangai、Arkhangai) 工業用水 (ウランバートル)、生活用水 (ウランバートル) は比較的水資源の豊富なモンゴル北部で主に取水されているのに対し、鉱業用水 (Umnugovi) は水資源の少ない乾燥地域でウランバートルの生活用水に匹敵する水量が取水されているとの知見が新たに得られた。また、算定結果の検証のため、観測データや現地調査結果と算定結果の比較分析を行った結果、概ね実情に即した信頼性の高い結果が得られていると結論付けられる。

引用文献

- 1) National Statistical Office of Mongolia (2014) Mongolian Statistical Information Service, National Statistical Office of Mongolia: Ulaanbaatar; <http://www.1212.mn/> (Accessed 08/16/2019).
- 2) FAO (2019) AQUASTAT Main Database, FAO: Paris; <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=en> (Accessed 09/07/2019).
- 3) プロマーコンサルティング (2011) モンゴルにおける農林水産業と農林水産政策等の調査・分析、平成 22 年度自由貿易協定等情報調査分析検討事業、農林水産業：東京。
- 4) Mineral Resources and Petroleum Authority (2020) Mining, Mineral Resources and Petroleum Authority: Ulaanbaatar; <https://mrpam.gov.mn/article/50/> (Accessed 07/16/2020).

- 5) British Geological Survey (1999) World mineral statistics data, British Geological Survey: Nottingham; <https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/wms.cfc?method=searchWMS> (Accessed 07/16/2020)
- 6) International Energy Agency (2016) Water energy nexus, World Energy Outlook 2016, International Energy Agency: Paris.
- 7) Gunson, A.E. (2013) Quantifying, reducing and improving mine water use, A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of philosophy, The university of British Columbia, Vancouver.
- 8) Ministry of Environmental and Green Development (2012) Tuul river basin integrated water management plan, “Strengthening Integrated Water Resources Management in Mongolia” project: Ulaanbaatar.
- 9) Batimaa, P., Myagmarjav, B., Batnasan, N., Jadambaa, N., Khishigsuren, P. (2011) Urban water vulnerability to climate change in Mongolia, Water Authority, Mongolia, Ulaanbaatar.
- 10) Okadera, T., Wang, Q., Nakayama, T. (2019) Groundwater monitoring for evaluating the pasture carrying capacity and its vulnerability in arid and semi-arid regions: A case study of urban and mining areas in Mongolia, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 266 012013

2.2 サブテーマ2 水資源供給可能量の時空間変動の推定

2.2.1 目的と経緯

モンゴルでは1990年の市場経済の導入に伴う急激な社会経済的な変化によって、急激な都市拡大、鉱山開発、および人々の定住化を促進する農地開発が進行している。これらの人為活動に伴って、世界の新興国と同様に近年高い経済成長率及び社会的発展を遂げてきたことは確かであるが、気候変動の影響も加わり、水資源の枯渇、水質汚染、牧草地の荒廃など様々な生態系の劣化を引き起こしている。特に、総水使用量に占める地下水の割合は全国平均80%以上で地下水の過度な利用および枯渇が近年深刻な問題になっており、水資源の総合的な流域管理が急務である。

モンゴルには29の河川流域があり、グリーン開発環境省（MEGDT）が管理を行っている（図10）¹⁾。これらの流域のうちで、経済的な中核である首都のウランバートルおよび南ゴビの鉱山の中核では上記のような環境の荒廃が著しい（写真1）²⁾。トゥール川はモンゴル北部の草原地域を流れており、中流域でウランバートルに沿って流れている。急激な都市開発および工業への水供給のために過度に地下水が使用されてきており、現状のペースでの水利用は持続可能ではないとの指摘がなされている³⁾。一方、ガルバ川流域は南部のゴビ砂漠に位置しており、流域の大半は裸地や砂漠で占められている。同流域には大規模な鉱山が幾つかあり、特に、オユトルゴイ鉱山は世界最大級の金および銅の埋蔵量と言われている。これらの鉱山での過剰な地下水取水によって、周辺地域の地下水に依存する遊牧民への影響も危惧されている⁴⁾。

このような背景のもと、人為活動および気候変動が流域内における水資源の劣化に及ぼす影響を定量的に評価するために、本研究では経済的な中核であるウランバートルおよび南ゴビの鉱山を含む2つの流域（トゥール川およびガルバ川流域）を対象にして、2018年から水循環および生態系の観測を開始した（図10）。併せて、本研究では入手可能な既存データを最大限に活用して、過去40年間について2つの流域を含む高解像度データを構築した。このデータを用いることによって、著者がこれまでに開発してきた統合型水文生態系モデルNICE（National Integrated Catchment-based Eco-hydrology）（図11）⁵⁾を2つの流域に適用し、人為活動および気候変動が水循環の改変に及ぼす影響を定量的に評価した（図10）⁶⁾。更に、得られた結果を拡張してNICEとインバースモデルを結合することによって新たなモデル開発を行った（NICE-INVERSE）⁷⁾。このモデルを用いることにより、上記の都市域および鉱山域を含む2つの流域を対象にしてパラメータの感度解析および家畜飲水量の時空間変動を逆推定し、幾つかの家畜の飲水量は減少傾向にあることが明らかになった。

本研究によって急激な都市化と鉱山開発に伴う過去40年間の水循環の改変が定量的に評価され、地域的な水文生態学的劣化と水ストレスの関連性が示唆された。また、本研究で開発した方法や得られた結果は、都市化や鉱山開発などの人為活動に伴うインベントリデータの入手が難しい地域において水資源量の時空間的変動を評価するためにも有効であると考えられる。

トゥール川流域



ガルバ川流域



写真1 本研究で対象とした、環境の荒廃が著しい、経済的な中核および鉱山の中核を含む2つの流域（左：トゥール川流域、右：ガルバ川流域）の様子。

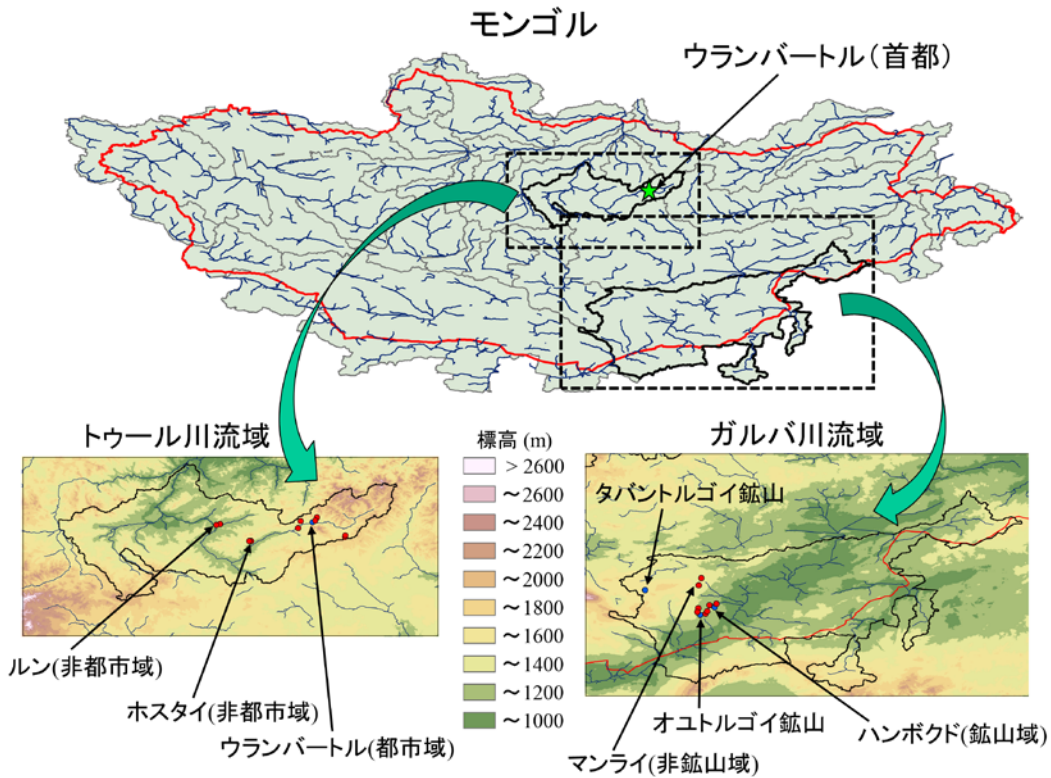


図 10 本研究で対象としたモンゴルのトゥール川およびガルバ川流域。上図の赤線はモンゴルの国境、灰色線は国内にある総計 29 の河川流域を示す。下図の赤丸はモンゴルの大学・研究機関と共同で 2018 年に新規に計器を設置した水循環観測地点を示す。Nakayama *et al.* (2021a) ⁶⁾ より翻訳・抜粋。

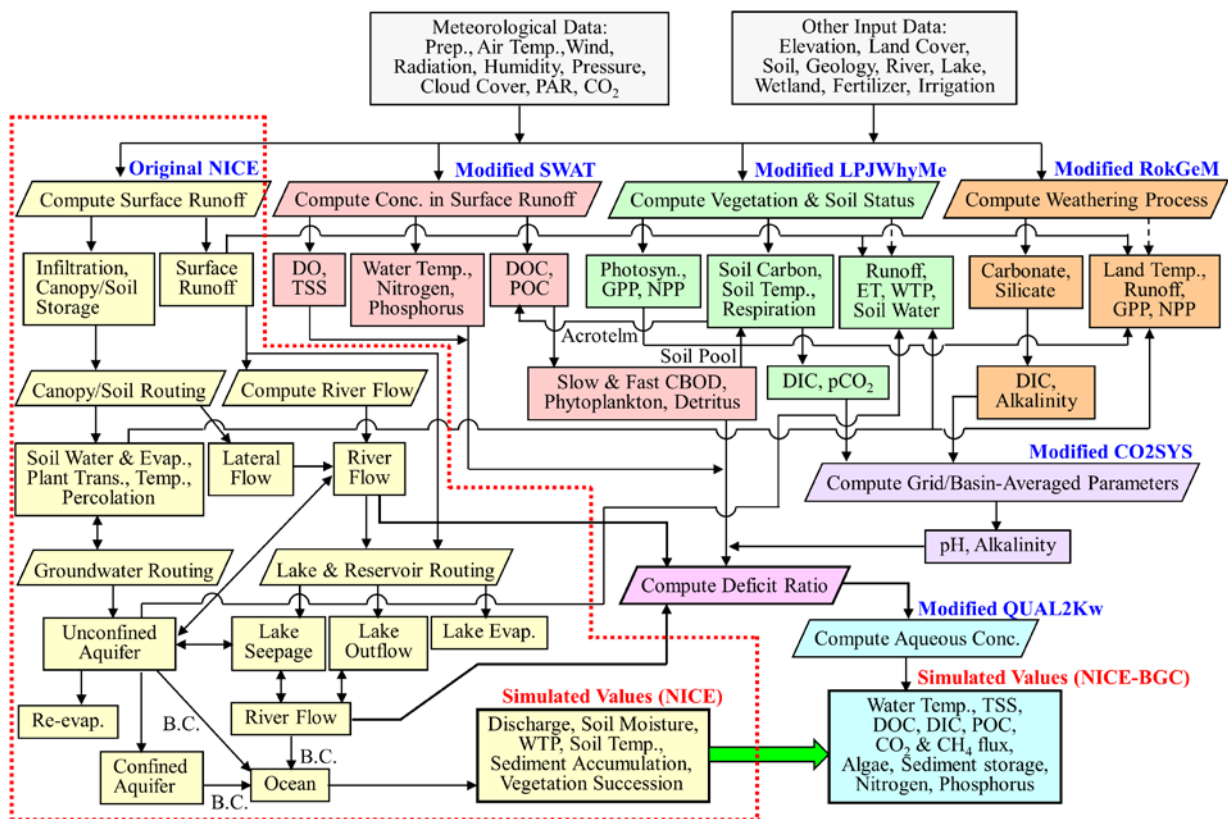


図 11 統合型水生態系モデル NICE および NICE の拡張による生物地球化学結合モデル NICE-BGC の開発。NICE では表面流 - 地下水間での熱や物質の移動（化学反応も含む）に加えて陸域 - 水域間での相互作用も計算される。赤点線枠内に今回モンゴルの流域に適用した水循環サブモデル。スパコンモノグラフ Part V⁵⁾ より抜粋。

2.2.2 方法

NICE を用いた過去 40 年間の水循環シミュレーション (図 11) を行うにあたって、入手可能な既存データ (グローバルデータ・統計データ・衛星データ・GIS データ・現地観測) を最大限に活用し (表 8)、四つの重点研究地域 (都市域・非都市域・鉱山域・非鉱山域) を含むトゥール川およびガルバ川流域を対象にして、ArcGIS を用いて 0.05 度 (約 4-6 km) メッシュデータを作成した。土地被覆は計算期間 (1980-2018 年) で不変と仮定した。両河川の集水域は標高と河道データを用いて ArcGIS で計算し、既存データと良好に一致することを確認した。両流域での気象データについて、年降水量は 2 つの流域でともに 2010 年までは徐々に減少し、それ以降は微増している (図 12)。ガルバ川流域にはゴビ砂漠を含む乾燥域が広がっており降水量は年間 100mm 程度と、草原域の広がるトゥール川流域に比べてかなり小さいことがわかる (図 13)。平均気温は 2 つの流域でともに年々増加しており、2001-2002 年や 2009-2011 年にかけては「ゾド」と呼ばれる極寒の冬⁸⁾ が発生している。

人為的取水が流域の水循環の改変に及ぼす影響を評価するために、流域の水循環変化への影響が大きいと考えられる都市用水・家畜用水・鉱業用水の経年変化 (1980-2018 年) をソム (町) ごとに算定し、インベントリデータを新たに構築した (図 14)。同図より、ウランバートルでの水使用量は 100,000-200,000m³/day で年々増加してきており、限定された既存研究での値⁹⁾ の範囲内にあることがわかる。一方、オユトルゴイ鉱山での水使用量は鉱山開始の 2008 年以降、急激に増加してきており鉱業部門が水使用に占める比率が大きい (84%)¹⁰⁾。次に、両流域で構築したデータについて井戸のポイント情報や河道・地形情報などを用いて空間的に再配分することにより、モデル入力のために約 40 年間の 0.05 度 (約 4-6 km) メッシュデータ (日平均値) を作成した (図 15)。区間的再配分の計算の際には、トゥール川流域では 6 箇所の水源地の情報データやウランバートルの人口分布データ、ガルバ川流域では 28 箇所の水源地の情報データやポンプ容量データなどを考慮した (表 8)。両流域での家畜用水量は都市用水量および鉱業用水量に比べて総量はかなり小さいが、取水範囲は流域内に広範囲で広がっていることがわかる。

これらの新たに構築したデータを用いて、プロセス型の 3 次元モデル NICE を両流域へ適用した。本計算の前に、著者らが 2018 年から開始した現地観測データ⁵⁾ および既存データ (表 9) を用いてモデル検証を行い、良好に一致することを確認した。次に、時間刻み 6 時間で 1980 年 -2018 年のシミュレーションを行い、都市と鉱山地域での過度な地下水汲み上げが周辺域の水循環の改変に及ぼす影響を定量的に解明した。併せて、気候変動および人為活動が水循環へ及ぼす影響の分離を行うために、降水量・都市用水量・家畜用水量・鉱業用水量それぞれが地下水位変化に及ぼす影響の感度解析を行った。これにより、各要因が地下水位変化に及ぼす寄与率を算定することが可能になった⁶⁾。

さらに、NICE をインバースモデルと結合することによってパラメータ逆推定およびインベントリ精緻化を行うための新たなモデル開発 (NICE-INVERSE) を行った (図 16)⁷⁾。計算値と観測値の差から計算される重み付き最小二乗の目的関数を最小化するようにガウス・ニュートン法を解くことによって¹¹⁾、モンゴルで代表的な 5 種類の家畜 (馬・牛・羊・ヤギ・ラクダ) の飲水量を逆推定するサブモデルを新たに構築した。同モデルを用いることによって、都市域および鉱山域を含む 2 つの流域について、パラメータの感度解析および家畜飲水量の時空間変動を逆推定することが可能になり、都市化と鉱山開発に伴う地域的な水文生態学的劣化を通じた水ストレスとの関連性を評価するのに有効である。

最終的に、サブテーマ 1 および 3 とのインターフェース構築のために、本研究において NICE を用いたシミュレーションによって得られた結果を用いて、両流域でのサブ集水域ごと (トゥール川: 29 集水域、ガルバ川: 106 集水域) の水収支 (降水量・蒸発散量・土壌水分量・浸透量・表面流出量・地下水流出力量・家畜用水量・都市用水量・鉱業用水量・地下水位変化量) の時系列データ (日平均値) を共有データとして作成した。

表8 NICE シミュレーションのための様々な入力データのリスト。Nakayama et al. (2021a)⁶⁾ より抜粋。

Data set	Original	Year	Source and reference
Climatology	1.0°	1980-2018	ERA-interim; ECMWF (2019)
Elevation	1.0km	around 1996	GTOPO30; U.S. Geological Survey (1996a)
Land cover	1.0km	around 2000	GLC2000; European Commission (2015)
Soil texture	1.0km	around 1970-2000	HWSD; IIASA (2012)
Vegetation type	0.25°	around 2000	GLDAS Vegetation Class; NASA (2013)
River networks	1.0km	around 1996	HYDRO1K; U.S. Geological Survey
Lakes and wetlands	0.5 min	around 1990-2000	GLWD; Lehner and Döll (2004)
Geological structures	0.5°	around 1970-2000	GLiM; Hartmann and Moosdorf (2012)
Crop type	5 min	around 2000	MIRCA2000; Portmann et al. (2010)
Irrigation type	5 min	2000-2008	GMIA; FAO (2016)
Irrigation water use	5 min	1998-2002	GCWM; Siebert and Döll (2010)
Basin boundary data	polygon	around 2010	MNET (2013)
Core sampling	point	around 2010	Ministry of Environment (2015), Batsaikhan et al. (2018)
Numbers of livestock	each soum	1980-2018	National Statistics Office of Mongolia
Numbers of livestock	5 min	around 2010	Gilbert et al. (2018)
Source of water supply in Ulaanbaatar	polygon	around 2010	JICA and CTI Engineering International Co., Ltd. (2010)
Population	each soum	1980-2018	National Statistics Office of Mongolia
Population	1.0km	2000-2015	NASA (2018)
Water use in	point	2002-2015	MNET (2010), MEGD (2012), Sato (2015)
Water supply in OT	point	2008-2018	Oyu Tolgoi LLC. (2013), Torquoise Hill Resources Ltd. (2019)

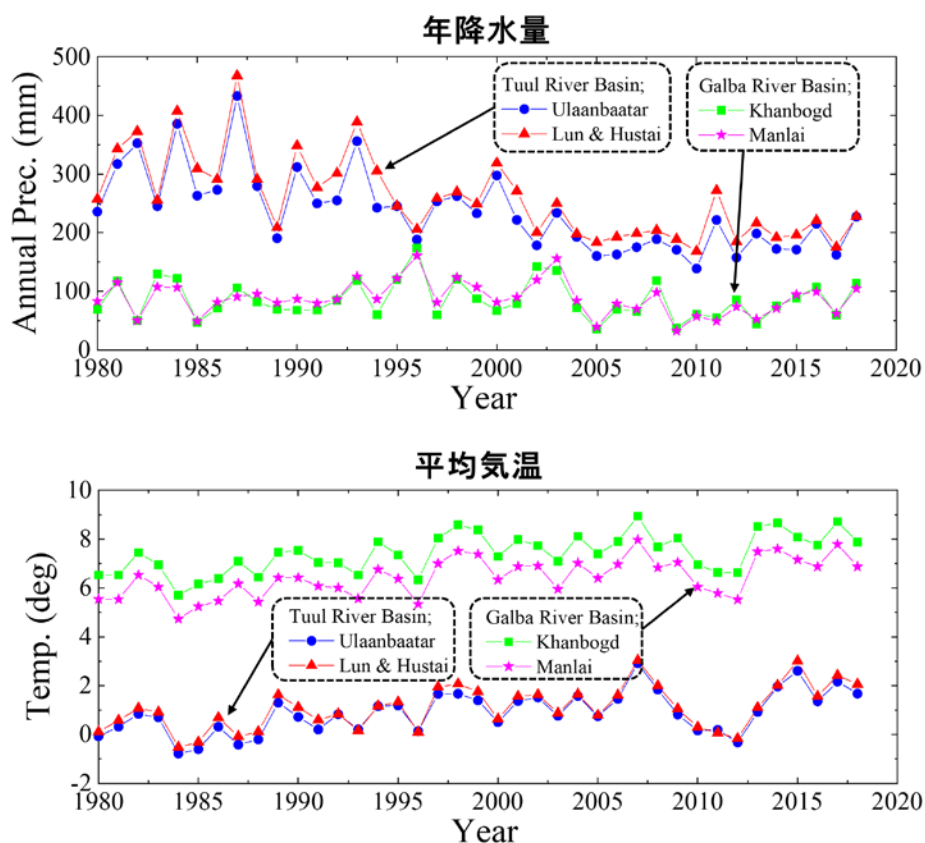


図12 2つの流域での1980年-2018年における年降水量（上図）と平均気温（下図）の経年変化。

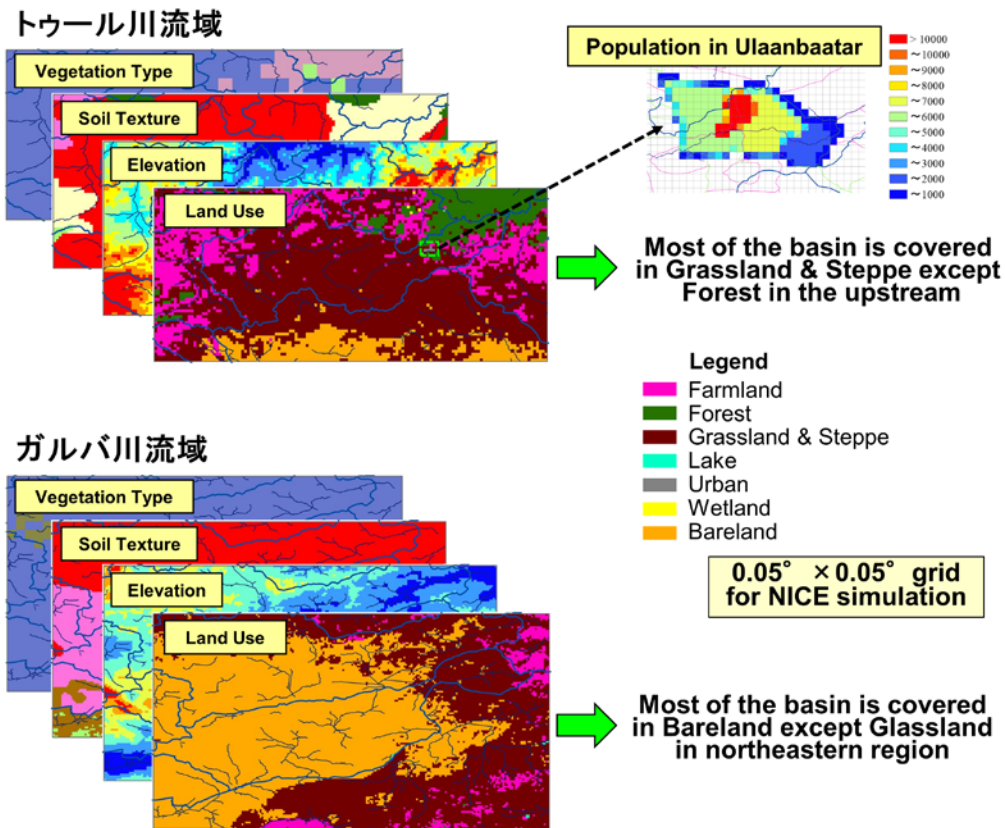


図 13 NICE を用いた水循環シミュレーションのために、本研究において新たに構築した 2 つの流域におけるマルチレイヤーでのデータセットの例。

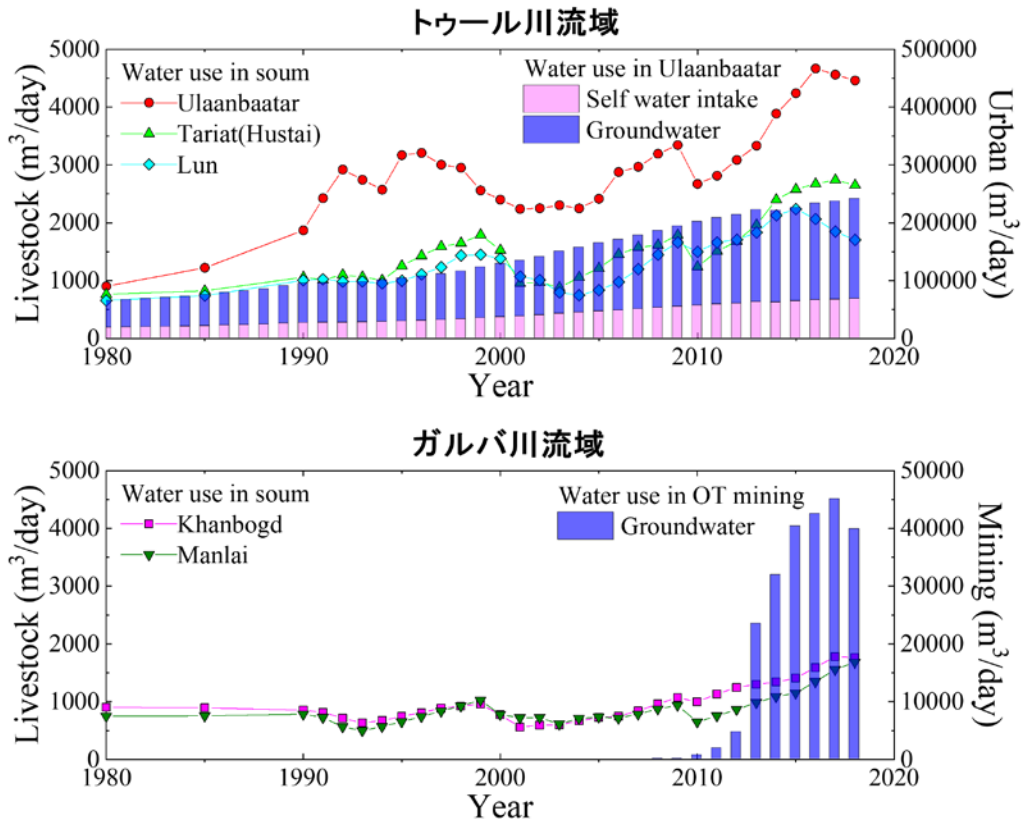


図 14 2つの流域での1980年-2018年の水需要量の算定結果。同図において、線はソム(町)ごとの家畜用水量、縦棒は都市用水量(トゥール川流域)および鉱業用水量(ガルバ川流域)を示す。Nakayama *et al.* (2021a)⁶⁾より抜粋。

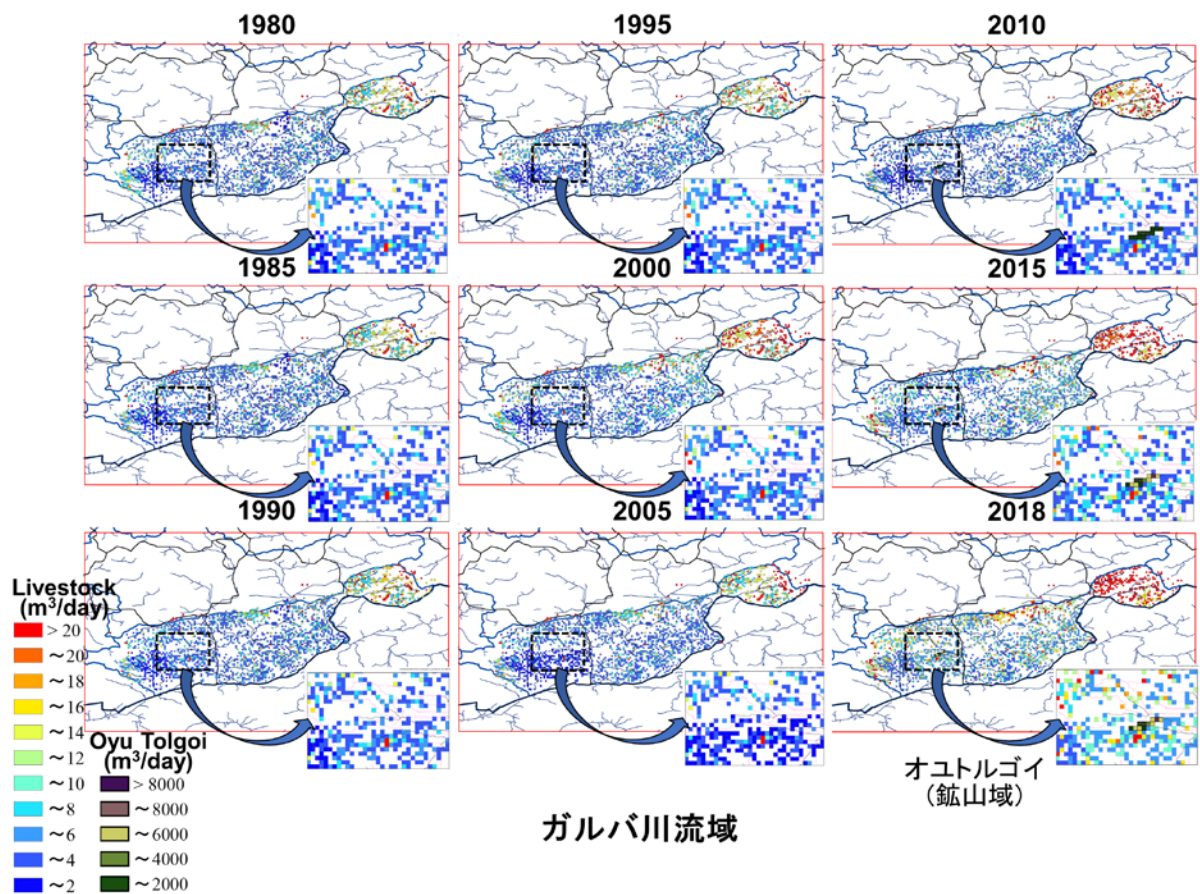
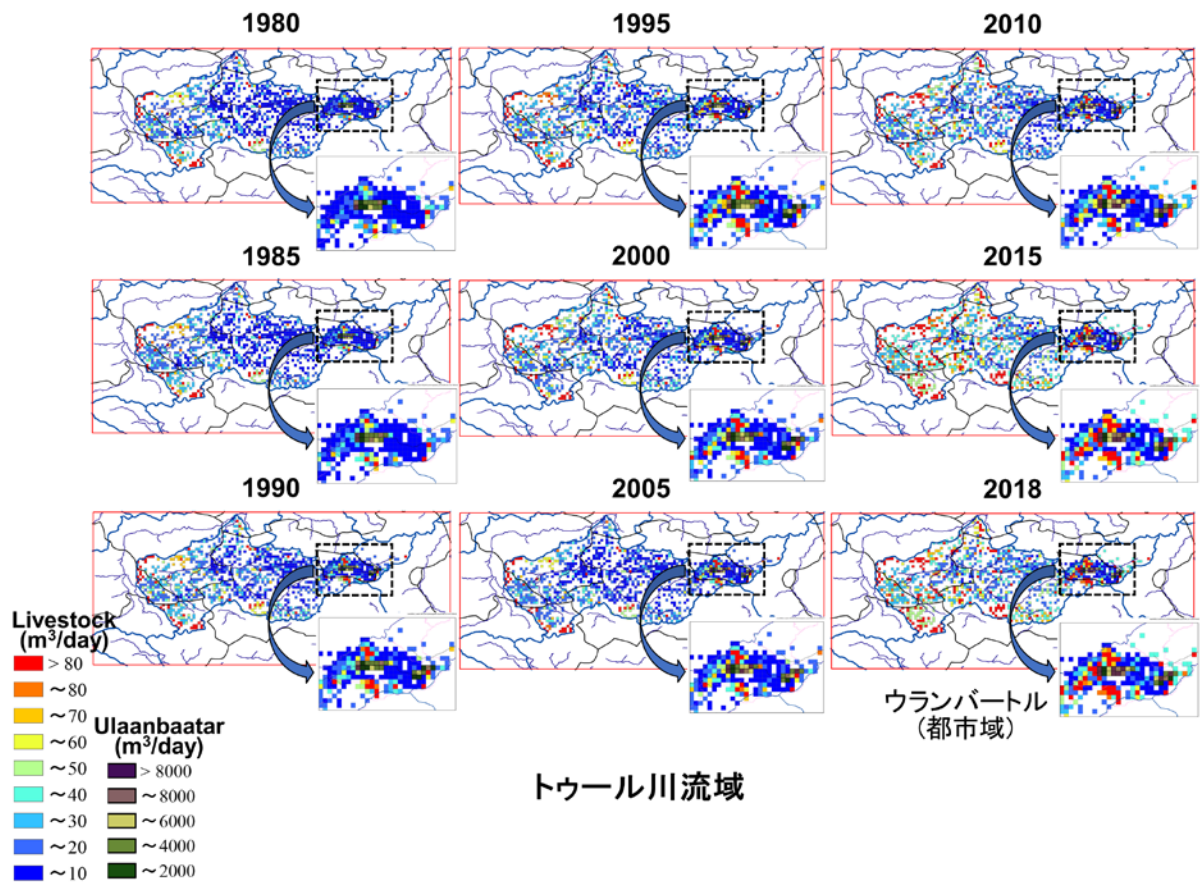


図 15 NICE 入力用に新たに構築した 2 つの流域における 1980 年から 2018 年までの水需要量の 0.05 度 (約 4-6 km) メッシュデータ。各図の右下の拡大図はウランバートル (都市域) およびオユートルゴイ (鉱山域) 周辺の水需要量を示す。Nakayama *et al.* (2021a)⁶⁾ より抜粋。

表9 モデル検証に用いた観測データのリスト。表中において、No.1～20は著者らが2018年から開始した現地観測データを示す（図10の赤丸に対応）。*は表8における数値標高モデル（Digital Elevation Model；DEM）から算出した標高値を示す。Nakayama *et al.* (2021a)⁶⁾より抜粋。

No.	Basin	Point Name	Type	Lat. (°)	Lon. (°)	Elev. (m)	Areal Class	Data Source and Reference
1	Galba	Khanbogd-1	Groundwater level	43.25	107.07	1071.0	Mining	Nakayama et al. (2021a)
2	Galba	Khanbogd-2	Groundwater level	43.29	107.24	1016.0	Mining	Nakayama et al. (2021a)
3	Galba	Khanbogd-3	Groundwater level	43.29	107.24	1017.0	Mining	Nakayama et al. (2021a)
4	Galba	Khanbogd-4	Groundwater level	43.04	106.97	1171.0	Mining	Nakayama et al. (2021a)
5	Galba	Khanbogd-5	Groundwater level	43.18	106.79	1192.0	Mining	Nakayama et al. (2021a)
6	Galba	Khanbogd-6	Groundwater level	43.08	106.77	1211.0	Mining	Nakayama et al. (2021a)
7	Galba	Khanbogd-7	Groundwater level	43.10	107.02	1186.0	Mining	Nakayama et al. (2021a)
8	Galba	Manlai-1	Groundwater level	43.74	106.80	1268.0	Non-mining	Nakayama et al. (2021a)
9	Galba	Manlai-2	Groundwater level	43.92	106.87	1300.0	Non-mining	Nakayama et al. (2021a)
10	Tuul	Ulaanbaatar-1	Groundwater level	47.81	106.64	1234.0	Urban	Nakayama et al. (2021a)
11	Tuul	Ulaanbaatar-2	Groundwater level	47.81	106.64	1234.0	Urban	Nakayama et al. (2021a)
12	Tuul	Ulaanbaatar-3	Groundwater level	47.99	106.96	1399.0	Urban	Nakayama et al. (2021a)
13	Tuul	Ulaanbaatar-4	Groundwater level	47.94	106.93	1315.0	Urban	Nakayama et al. (2021a)
14	Tuul	Nalaikh-1	Groundwater level	47.66	107.43	1644.0	Non-urban	Nakayama et al. (2021a)
15	Tuul	Lun-1	Groundwater level	47.88	105.32	1022.0	Non-urban	Nakayama et al. (2021a)
16	Tuul	Lun-2	Groundwater level	47.87	105.26	1001.0	Non-urban	Nakayama et al. (2021a)
17	Tuul	Hustai-1	Groundwater level	47.59	105.85	1216.0	Non-urban	Nakayama et al. (2021a)
18	Tuul	Hustai-2	Groundwater level	47.59	105.82	1254.0	Non-urban	Nakayama et al. (2021a)
19	Tuul	Nalaikh-2	Groundwater level	47.69	107.44	1534.0	Non-urban	Nakayama et al. (2021a)
20	Tuul	Ulaanbaatar-5	Groundwater level	47.93	106.68	1322.0 *	Urban	Nakayama et al. (2021a)
21	Tuul	Ulaanbaatar-6	Groundwater level	47.83	107.46	1445.0 *	Urban	Byambasuren & Odonsetseg (2015)
22	Tuul	Ulaanbaatar-7	Groundwater level	47.90	106.99	1299.0 *	Urban	Byambasuren & Odonsetseg (2015)
23	Tuul	Ulaanbaatar-8	Groundwater level	47.79	106.61	1223.0 *	Non-urban	Byambasuren & Odonsetseg (2015)
24	Tuul	Ulaanbaatar-9	Groundwater level	47.91	106.97	1298.1	Urban	Byambasuren & Odonsetseg (2015)
25	Tuul	Ulaanbaatar-10	Groundwater level	47.91	107.11	1326.3	Urban	Byambasuren & Odonsetseg (2015)
26	Tuul	Ulaanbaatar-11	Groundwater level	47.89	106.84	1273.6	Urban	Byambasuren & Odonsetseg (2015)
27	Tuul	Ulaanbaatar-12	Groundwater level	47.83	107.48	1408.0 *	Urban	IGG (2018)
28	Tuul	Ulaanbaatar-13	Groundwater level	47.83	107.31	1377.0 *	Urban	IGG (2018)
29	Tuul	Ulaanbaatar-14	Groundwater level	47.90	106.98	1297.0 *	Urban	IGG (2018)
30	Tuul	Ulaanbaatar-15	Groundwater level	47.89	106.91	1298.0 *	Urban	IGG (2018)
31	Tuul	Ulaanbaatar-16	Groundwater level	47.90	106.85	1289.0 *	Urban	IGG (2018)
32	Tuul	Ulaanbaatar-17	Groundwater level	47.88	106.77	1265.0 *	Urban	IGG (2018)
33	Tuul	Ulaanbaatar-18	Groundwater level	47.88	106.77	1265.0 *	Urban	IGG (2018)
34	Tuul	Ulaanbaatar-19	Groundwater level	47.80	106.58	1222.0 *	Non-urban	IGG (2018)
35	Tuul	Bosgo-1	River discharge	48.03	107.73	1530.0 *	Non-urban	NUM (2018)
36	Tuul	Ulaanbaatar-20	River discharge	47.89	106.95	1290.0 *	Urban	NUM (2018)
37	Tuul	Altanbulag-1	River discharge	47.68	106.28	1187.0 *	Non-urban	NUM (2018)
38	Tuul	Lun-3	River discharge	47.85	105.18	1012.0 *	Non-urban	NUM (2018)

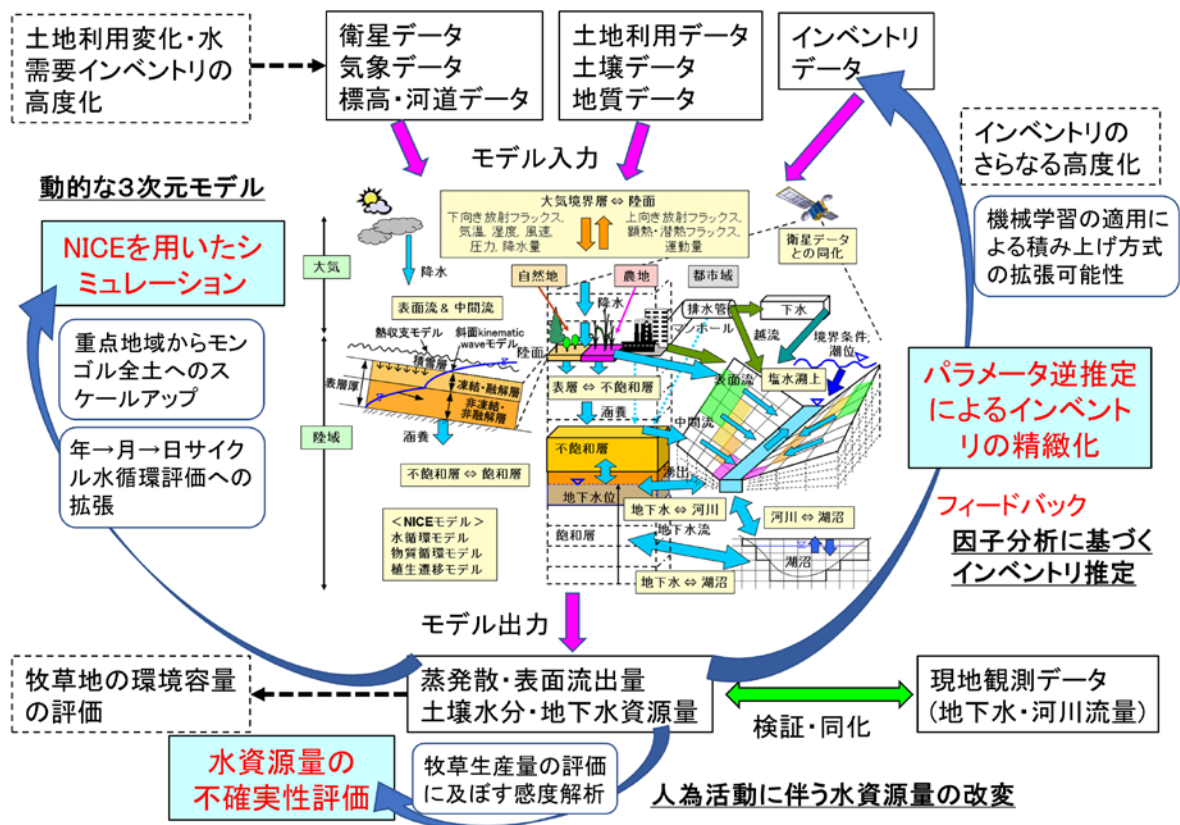


図 16 NICE とインバースモデルとの結合を通じた新たなモデル開発 (NICE-INVERSE) による、パラメータ逆推定を通じたインベントリの精緻化および水資源量の不確実性評価。Nakayama et al. (2021b)⁷⁾ より翻訳・抜粋。

2.2.3 結果と考察

プロセス型の3次元水文生態系モデル NICE を適用することによって都市と鉱山地域での過度な地下水汲み上げが周辺の水循環の改変に及ぼす影響を評価した。地下水位変化の評価に先立って、トゥール川流域での既存の観測データを用いて、モデルで計算された河川流量の検証を行った (図 17)。ガルバ川流域はモンゴル南部のゴビ砂漠に位置しており、年間を通して数日以外は降水量がほとんどなく水無川であり流量観測は行われていないため、モデル計算値との比較は行わなかった。同図より、河川流量は夏季の降雨期に最大になるとともに、下流に向かって増加する特性がモデルにより再現された⁶⁾。また、月平均値での標準偏差は日平均値の標準偏差よりも値が小さくなることが示された。トゥール川中流域のウランバートル周辺では河川水と周辺の比較的浅い地下水との間での周期的な水循環の相互作用が指摘されており、以下に記載する地下水の改変を評価するベースが構築された。

また、グリッドごとの計算値を空間平均することによって、両流域でのサブ集水域ごと (トゥール川: 29 集水域、ガルバ川: 106 集水域) の水収支を評価した (図 18)。同図より、2つの流域では水収支の空間的偏在性が大きく異なることがわかる⁶⁾。トゥール川流域では北部に位置する流域の上流及び下流域では降水量が比較的大きいものに対して、ウランバートルを含む中流域では地表流出量が周辺域よりも小さくなっている。一方、ガルバ川流域ではトゥール川流域に比べて全体的に降水量および地表流出量が小さくなっており、特にオユトルゴイでの鉱山開発に伴う過度の地下水取水によって地表流出量はかなり小さくなっており深刻な状況であることが見てとれる。

上記で示した河川流量や蒸発散量を含む水循環の検証を行った後に、地下水位変化の経年変化の解析を行った (図 19)。同図より、トゥール川流域ではウランバートルの都市化に伴う過剰取水によって水循環が広範囲にわたって改変されてきており、地域ごとにトレンドが大きく異なることがわかる⁶⁾。ウランバートルの過剰取水地域から離れた下流域 (No.34) や自然地 (No.18) では地下水取水の影響はほとんど見られないが、中心部 (No.32) では地下水の過剰取水¹²⁾に伴って地下水位が2000年以降に大きく低下してきたことがわかる。一方、ガルバ川流域ではオユトルゴイ鉱山

の取水近傍 (No.3)、その外側の地域 (No.4)、取水の影響の見られない地域 (No.9) での空間的異质性が大きく、鉱山の取水近傍では 2010 年以降に鉱山開発に伴う取水が地下水位低下に深刻な影響を及ぼしていることが明らかになった。

更に、都市域と非都市域、鉱山域と非鉱山域での水循環に及ぼす影響の感度解析を行うことによって、気候変動および人為活動が水循環へ及ぼす影響の分離について検討を行った (図 20)。同図より、トゥール川流域の都市域では 2000 年以降の地下水位低下のうちで半分以上がウランバートルでの地下水取水に起因しており、ガルバ川流域の鉱山域では状況がより深刻で 2010 年以降の地下水位低下はほぼ 100% オユトルゴイでの地下水取水に起因していることが判明した⁶⁾。両流域で都市化や鉱山開発などの人為活動が水循環の改変に及ぼす影響は、非都市域および非鉱山域での解析結果と比べることで明白である。

一方、本研究で算定した家畜や都市および鉱山での水需要量は不確実性が大きく、水循環のシミュレーション結果に影響を及ぼすと考えられた。水資源量の定量的評価およびモデル入力のパラメータの不確実性の低減に向けて、NICE をインバースモデルと結合しパラメータ逆推定およびインベントリ精緻化を行うための新たなモデル開発 (NICE-INVERSE) を行った。同モデルを用いることによって、各家畜 (馬・牛・羊・ヤギ・ラクダ) の飲水量および地域ごとの相違を評価した (図 21)。同図より、家畜飲水量は全体的に 2015-2018 年にかけてほぼ一定で既存研究の範囲内となったが、ガルバ川流域では牛・羊・ヤギの飲水量が年々減少する特性がモデルで計算された。同流域には乾燥域が広がり降水量は年間 100mm 程度であり、オユトルゴイでの鉱山開発に伴う過度の地下水取水によって周辺域での水ストレスが増加していることが計算結果より示唆された⁷⁾。更に、各家畜の飲水量間での相関を NICE-INVERSE により計算した (表 10)。同表より、トゥール川流域では羊とヤギ、ガルバ川流域では馬と羊、牛とラクダ (全て、相関係数 = -0.96) それぞれの間で負の相関が非常に高く、トゥール川流域では馬とラクダ (相関係数 = 0.79)、牛と羊 (相関係数 = 0.77)、ガルバ川流域では牛と羊 (相関係数 = 0.68) それぞれの間で正の相関が比較的高くなっていることがわかる。この相関は各家畜の飲水量間での関連性を示しており、図 21 の飲水量の原単位の変化と併せて、環境荒廃に起因する水ストレスの定量的評価や最適な家畜比率を検討するうえでも重要である。

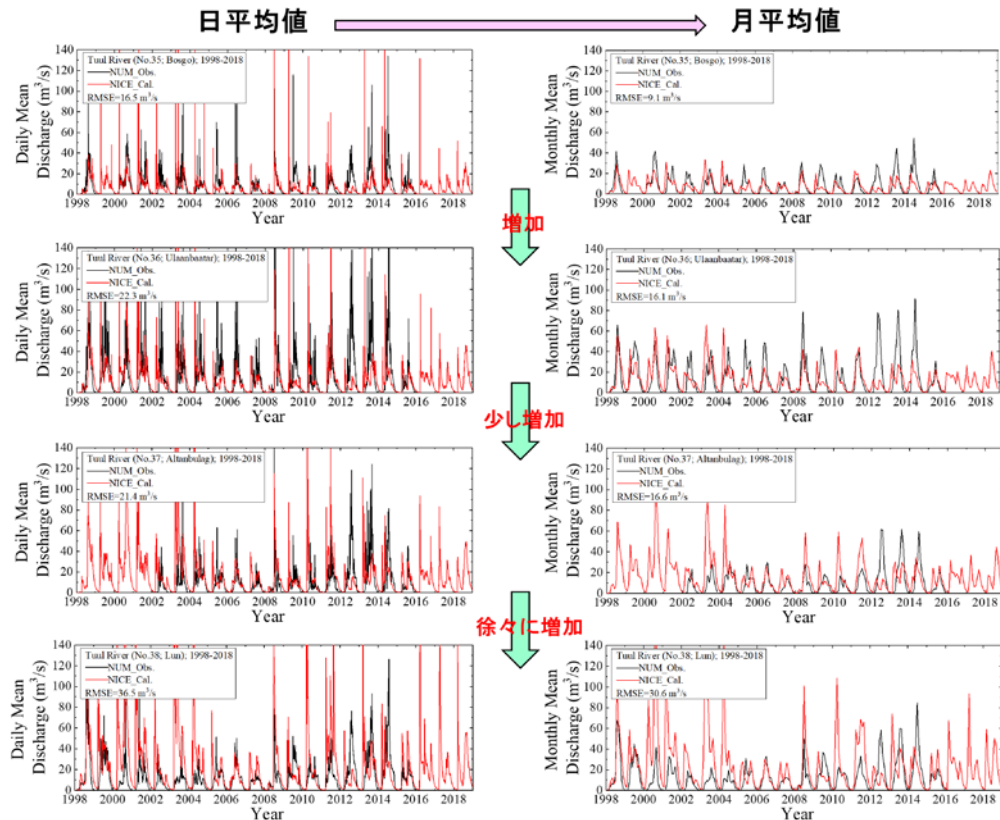
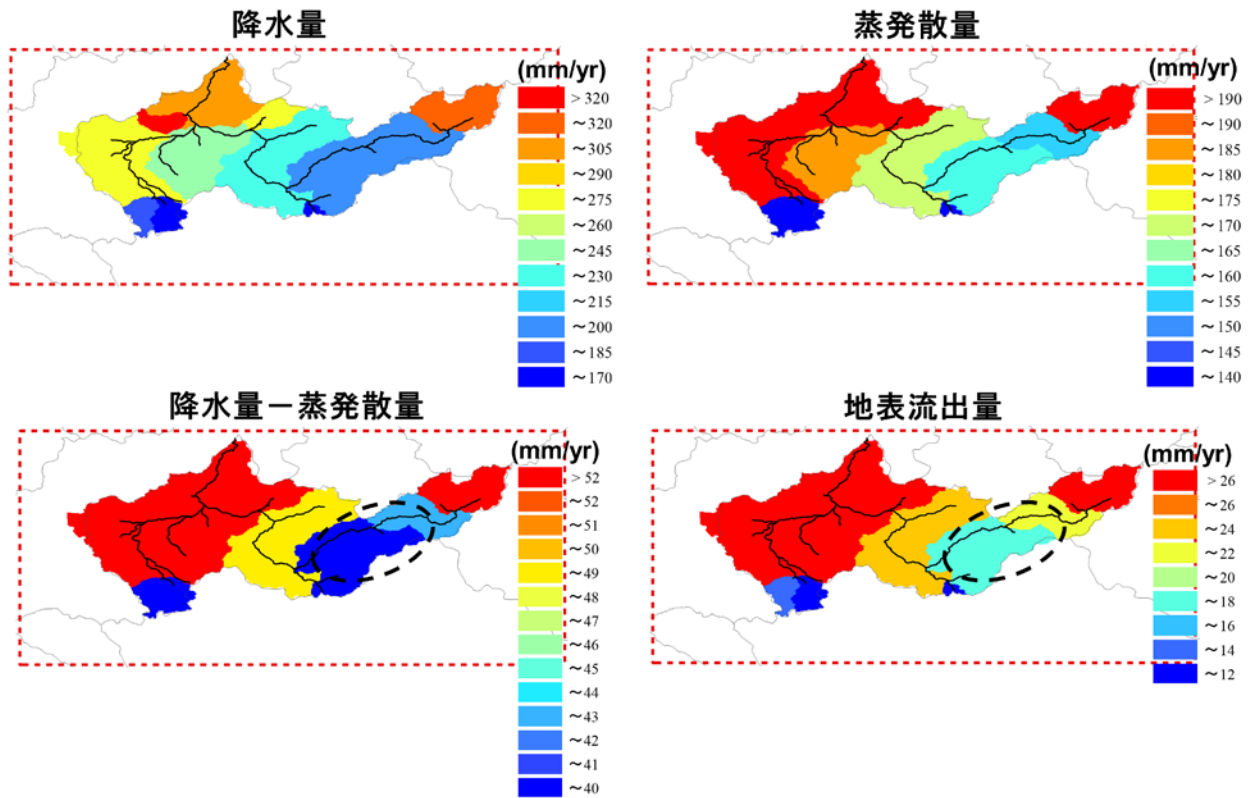


図 17 トゥール川流域における 1998 年 -2018 年の日平均および月平均での河川流量の比較。黒線はモンゴル大学提供による観測値、赤線は NICE によるシミュレーション結果を示す。図中の No. は表 9 の観測地点に対応し、図の上から下に向かってトゥール川上流から下流に向かう。Nakayama *et al.* (2021a)⁶⁾ より抜粋。

トゥール川流域



ガルバ川流域

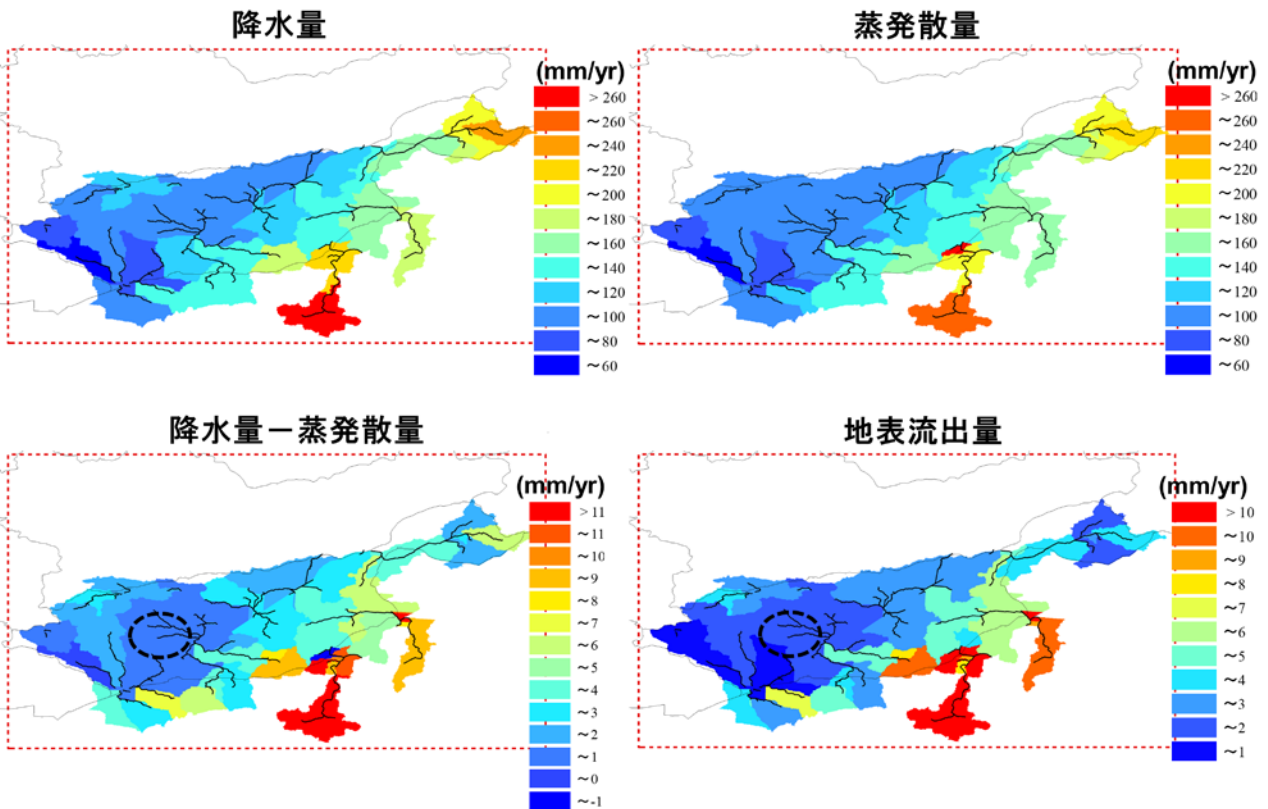


図 18 2つの流域における1998年-2018年での水収支の年平均値の計算結果(サブ集水域ごとの空間平均値)。黒点線で囲んだ領域ではウランバートル(都市)およびオユトルゴイ(鉱山)での過剰取水によって周辺域よりも流出量が小さくなっている。Nakayama *et al.* (2021a)⁶⁾より抜粋。

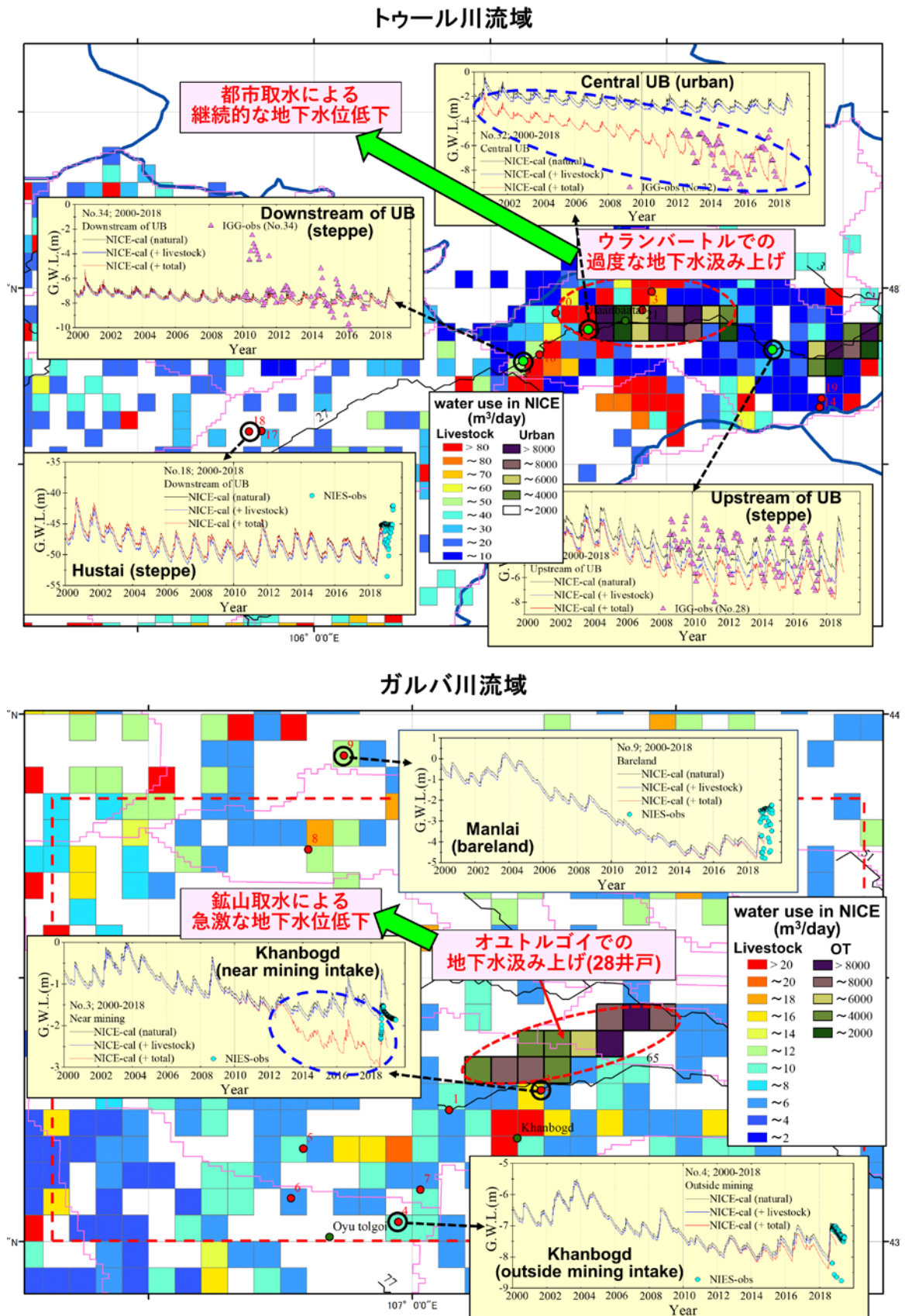
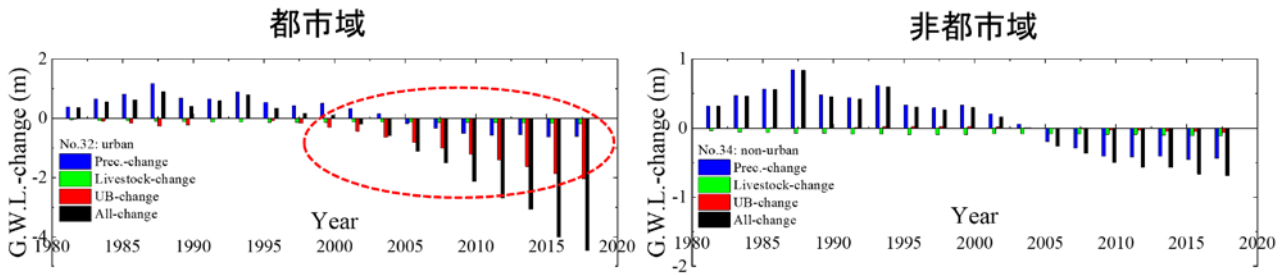


図 19 2つの流域における 2000 年 -2018 年の地下水位のシミュレーション結果。背景のメッシュデータは図 15 で算定した水需要量を示す。水色の丸は著者らが 2018 年夏から開始した観測データ、紫色の三角はモンゴル科学アカデミーの観測データを示す (表 9)。黒線、青線、赤線はそれぞれ、地下水汲み上げなし、家畜用水量のみ考慮、家畜用水量・都市用水量・鉱業用水量全てを考慮した NICE シミュレーション結果を示す。図中の No. は表 9 の観測地点に対応する。Nakayama *et al.* (2021a)⁶⁾ より翻訳・抜粋。

トゥール川流域



ガルバ川流域

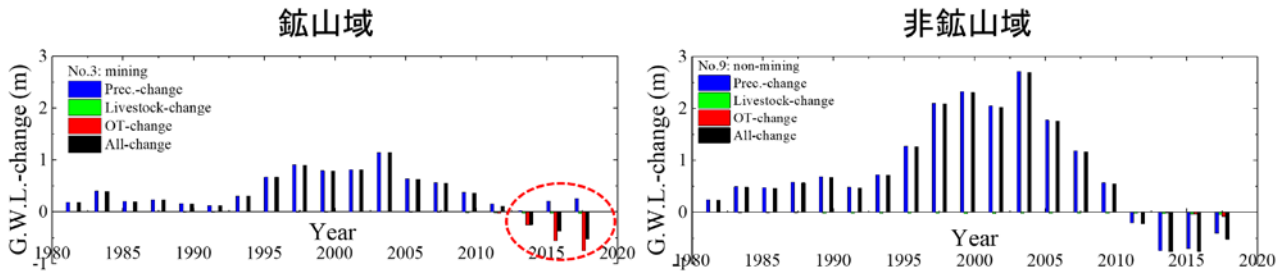
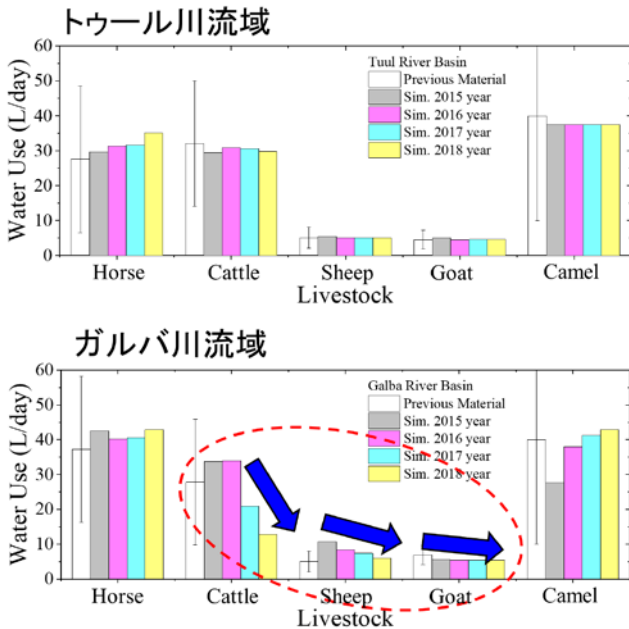


図 20 NICE で計算された、降水量（青色）・家畜用水量（緑色）・都市用水量および鉱山用水量（赤色）が地下水位変化に及ぼす感度解析の計算結果。縦軸は 1980 年の地下水位からの変化量 (m) で、正值は地下水位上昇、負値は地下水位低下を示す。図中の No. は表 9 の観測地点に対応する。Nakayama *et al.* (2021a)⁶⁾ より抜粋。

家畜飲水量の原単位の年変化



家畜飲水量の感度解析結果

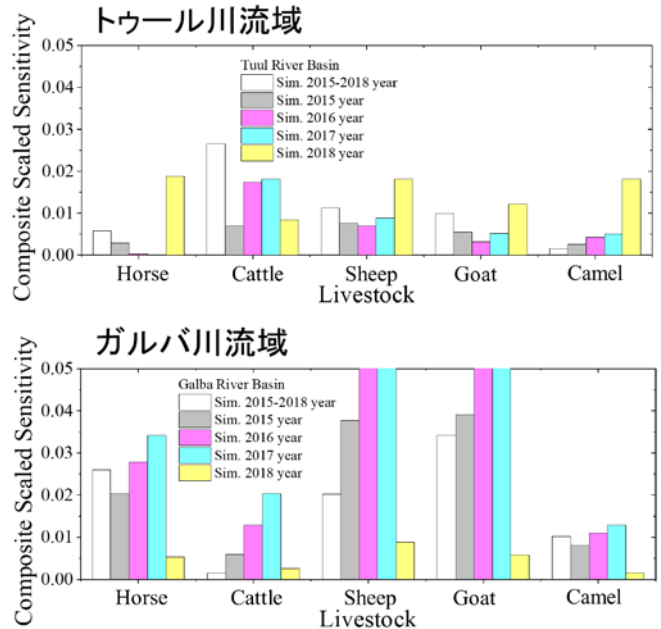


図 21 NICE-INVERSE で計算された家畜ごとの飲水量の年変化および、家畜飲水量の感度解析のシミュレーション結果。エラーバーは既存データの範囲を示す。Nakayama *et al.* (2021b)⁷⁾ より抜粋。

表 10 NICE-INVERSE で計算された各家畜の飲水量間での相関係数。Q_horse, Q_cattle, Q_sheep, Q_goat 及び Q_camel は各家畜（馬・牛・羊・ヤギ・ラクダ）の飲水量の原単位を示す。Nakayama et al. (2021b)⁷⁾ より抜粋。

Tuul River	Q_horse	Q_cattle	Q_sheep	Q_goat	Q_camel
Q_horse	1.000	-0.554	-0.692	0.466	0.791
Q_cattle	-0.554	1.000	0.773	-0.762	-0.741
Q_sheep	-0.692	0.773	1.000	-0.959	-0.708
Q_goat	0.466	-0.762	-0.959	1.000	0.545
Q_camel	0.791	-0.741	-0.708	0.545	1.000

Galba River	Q_horse	Q_cattle	Q_sheep	Q_goat	Q_camel
Q_horse	1.000	-0.611	-0.964	-0.165	0.423
Q_cattle	-0.611	1.000	0.679	-0.222	-0.964
Q_sheep	-0.964	0.679	1.000	-0.095	-0.480
Q_goat	-0.165	-0.222	-0.095	1.000	0.167
Q_camel	0.423	-0.964	-0.480	0.167	1.000

2.2.4 まとめ

モンゴルの経済的な中核である首都ウランバートルおよび南ゴビの鉱山の中核を含む2つの流域（トゥール川およびガルバ川流域）を対象に、著者がこれまでに開発してきた統合型水文生態系モデル NICE⁵⁾ を適用し、過去40年間に人為的活動がこれらの流域の水循環へ及ぼす影響を定量的に評価した。計算に先立って、入手可能な既存データを最大限に活用して流域を含む高解像度データを構築した。このデータを用いた計算を行った結果、2つの流域では水文・気象・植生・土壌・地質条件などの様々な要因に伴って水循環が時空間的に偏在しており、人為活動に伴って水循環も大きく改変されてきたことが明らかになった⁶⁾。トゥール川流域では、遊牧民の家畜引水によって水循環は若干変化してきたものの、ウランバートルでの過剰な地下水利用によって地下水位は過去数十年にわたって著しく低下してきた。一方、ガルバ川流域では、オユトルゴイ鉱山が開始した2010年以降に地下水位は急激に低下してきた。次に、気候変動および人為活動が水循環へ及ぼす影響の分離を行うことにより、都市域と非都市域、鉱山域と非鉱山域での水循環に及ぼす影響の定量的評価を行った。本解析により、トゥール川流域の都市域での地下水位低下のうちの半分以上はウランバートルでの地下水取水に起因しており、ガルバ川流域の鉱山域での地下水位低下はほぼ全てオユトルゴイでの地下水取水に起因することも判明した⁶⁾。

更に、NICE とインバースモデルを結合した新たなモデル NICE-INVERSE を開発した。このモデルを用いた計算によって、2つの流域でのパラメータの感度解析および家畜飲水量の時空間変動を逆推定し、幾つかの家畜の飲水量は減少傾向にあることが明らかになった⁷⁾。これにより、急激な都市化と鉱山開発に伴う過去40年間の水循環の改変が定量的に評価され、地域的な水文生態学的劣化と水ストレスの関連性が示唆された。また、本研究で開発した方法や得られた結果は、都市化や鉱山開発などの人為活動に伴うインベントリデータの入手が難しい地域において水資源量の時空間的変動を評価するためにも有効である。

本研究では家畜の放牧・都市活動・鉱山開発に伴う水資源の改変に及ぼす影響評価を行ったが、ウランバートル（トゥール川流域）ではトイレなどによる有機物汚染問題が、南部の鉱山（ガルバ川流域）では重金属汚染が深刻な問題になっている。NICE を霞ヶ浦や利根川流域に適用した知見（Nakayama and Watanabe (2008)¹³⁾、スパコンモノグラフ Part II⁵⁾）や NICE の物質循環モデルへの拡張版である NICE-BGC を大陸・全球スケールへ適用した知見（Nakayama (2017)¹⁴⁾、スパコンモノグラフ Part V³⁾）などをベースにさらなる解析が必要である¹⁵⁾。現在、南部のガルバ川流域にある鉱山での過度な水需要を満たすために「オルホン - ゴビ水輸送プロジェクト（北部のオルホン川から南ゴビの鉱山までの700km以上のパイプライン建設）」が計画されている⁶⁾。このプロジェクトに伴って両流域での深刻な水・物質

循環および生態系劣化が予想されるが、本研究で開発した手法や得られた結果をもとにして、類似する中国の南水北調プロジェクトの知見 (Nakayama and Shankman (2013)¹⁶⁾、スパコンモノグラフ Part IV⁵⁾) などを活用した広域スケールでの科学的な環境影響評価が今後必要であると考えられる (図 22)。

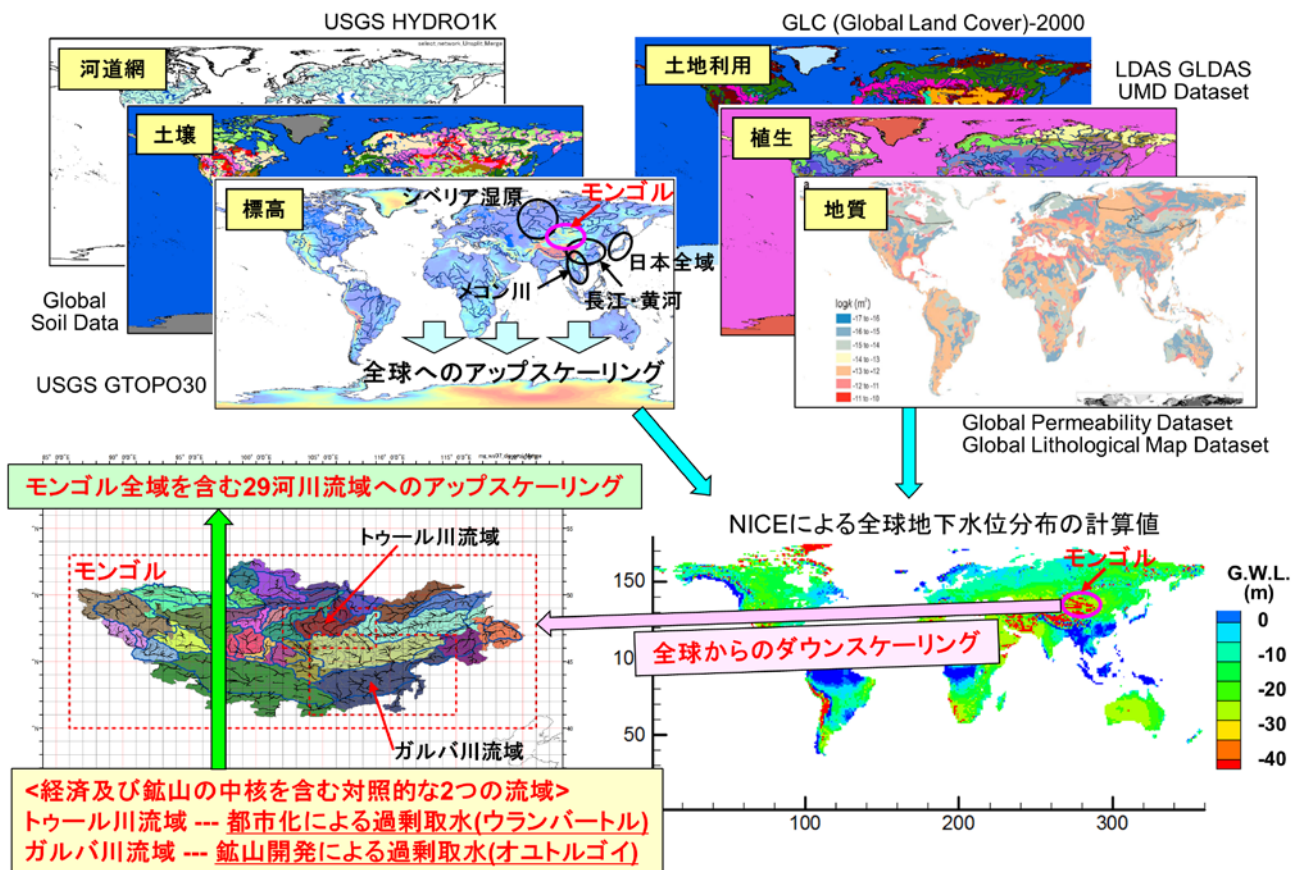


図 22 本研究で取り扱ったトウルおよびガルバ川流域からのアップスケーリング、および、著者の既存研究による大陸・全球スケール (スパコンモノグラフ Part V⁵⁾) からのダウンスケーリング、によるモンゴル全域での水循環評価に向けて。左上図の黒丸の領域は、既存研究において NICE による水物質循環の評価を行ったアジアの主要な流域を示す。

謝 辞

本研究を行うにあたって、株式会社ケーズブレインズ エリデニ博士 (2019年3月までは国立環境研究所地域環境研究センター特別研究員)、モンゴル科学アカデミー Ochirbat Batkhisig 博士および Dorjgotov Battogtokh 博士、モンゴル国立大学 Uudus Bayarsaikhan 博士および Badamdorj Bayartogtokh 博士、にはトウル川およびガルバ川流域での観測・調査を行うにあたって多大なご協力を頂いた。アメリカ地質調査所 Richard B. Winston 博士および Christian Langevin 博士、には NICE-INVERSE の開発にあたって有用なアドバイスを頂いた。ここに記して謝意を表したい。

引用文献

- 1) International Finance Corporation (IFC), 2017. Mining, Groundwater Management and Water Monitoring Training.
- 2) Banerjee, R., Möller-Gulland, J., van der Linden, W., et al., 2014. *Mongolia: Targeted Analysis on Water Resources Management Issues*. Technical Report. 2030 Water Resources Group, 2030. <https://www.2030wrg.org/mongolia-targeted-analysis-wrm-issues/>.

- 3) Ulaanbaatar, 2018. *Green Development Strategic Action Plan For Ulaanbaatar 2020*. <https://www.greengrowthknowledge.org/national-documents/mongolia-green-development-strategic-action-plan-ulaanbaatar-2020>.
- 4) Torquoise Hill Resources Ltd., 2019. *Extraordinary Oyu Tolgoi 2018 Annual Report*. Canada.
- 5) 異なる植生から構成される自然地モデル・主要作物や灌漑を含む農業生産モデル・管路網や都市構造物を含む都市モデル・ダムモデル・水循環モデル・物質（土砂・炭素・窒素・リンなど）循環モデル・植生遷移モデル等、様々なサブモデルから構成される。現在、著者はNICEについてプラスチック動態モデルへの新たな拡張を進めている。NICEは首都圏・霞ヶ浦・釧路湿原などの日本国内のみならず、長江・黄河・メコン川・シベリア湿原・モンゴル、更に近年は全球にスケールアップして、様々な流域の水物質循環及び生態系評価に用いられてきている。NICEの詳細については網羅的にまとめた下記のスパコンモノグラフ（Part I-V）；
 - ・ Part I (<http://www.cger.nies.go.jp/publications/report/i063/i063>)；NICEの基礎方程式について(釧路川流域・華北平原)
 - ・ Part II (<http://www.cger.nies.go.jp/publications/report/i083/i083>)；自然共生・都市再生に向けたNICEのシミュレーション(霞ヶ浦・関東平野・釧路湿原)
 - ・ Part III (<http://www.cger.nies.go.jp/publications/report/i103/ja/>)；アジアの都市域へのNICEの適用事例(華北平原及び黄河下流域・大連市・首都圏)
 - ・ Part IV (<http://www.cger.nies.go.jp/publications/report/i114/ja/>)；中国の長江・黄河流域を含む大陸スケールへ適用事例
 - ・ Part V (<http://www.cger.nies.go.jp/publications/report/i148/ja/>)；NICEと炭素循環モデル結合による全球炭素循環の高度化
 上記のモノグラフ、および、関連の既存論文や書籍を参照。
- 6) Nakayama, T., Wang, Q., Okadera, T., 2021a. Evaluation of spatio-temporal variations in water availability using a process-based eco-hydrology model in arid and semi-arid regions of Mongolia. *Ecol. Model.* 440, 109404. doi:10.1016/j.ecolmodel.2020.109404.
- 7) Nakayama, T., Wang, Q., Okadera, T., 2021b. Sensitivity analysis and parameter estimation of anthropogenic water uses for quantifying relation between groundwater overuse and water stress in Mongolia. *Ecohydrol. Hydrobiol.* 21(3), 490-500. doi:10.1016/j.ecohyd.2021.07.006.
- 8) Gomboluudev, P., Kurosaki, Y., Natsagdorj, L., Munkhbat, B.-O., 2018. *Climate of Mongolia*. In: Jamsran, U., Tamura, K., Luvsan, N., Yamanaka, N (Eds.), *Rangeland Ecosystems of Mongolia*. Munkhiin Useg, Co., Ltd., Ulaanbaatar, pp. 75–107.
- 9) Sato, H., 2015. Mongolia: The Study on the Contaminated River Tuul – Focusing on Couwor Aupaum of the City of Ulaanbaatar. *Bulletin of the Research Institute of Social Systems* 15. Chuo Gakuin University., pp. 1–12 (in Japanese).
- 10) Asian Development Bank (ADB), 2014. *Demand in the Desert: Mongolian's Water-Energy-Mining Nexus*. Mandaluyong City, Philippines.
- 11) Hill, M.C., Banta, E.R., Harbaugh, A.W., Anderman, E.R., 2000. MODFLOW-2000, the US Geological Survey modular ground-water model—user guide to the observation, sensitivity, and parameter-estimation processes and three postprocessing programs. U.S. Geological Survey Open-file Report 00-184.
- 12) Japan International Cooperation Agency (JICA) and CTI Engineering International Co., Ltd., 2010. *Preparatory Survey Report on the Ulaanbaatar Water Supply Development Project in Gachuurt in Mongolia*. Ministry of Roads, Transport, Construction and Urban Development Water Supply & Sewerage Authority of Ulaanbaatar City, Mongolia.
- 13) Nakayama, T., Watanabe, M., 2008. Missing role of groundwater in water and nutrient cycles in the shallow eutrophic Lake Kasumigaura, Japan. *Hydrol. Process.* 22, 1150-1172. doi:10.1002/hyp.6684, 2008a.
- 14) Nakayama, T., 2017. Development of an advanced eco-hydrologic and biogeochemical coupling model aimed at clarifying the missing role of inland water in the global biogeochemical cycle. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 122, 966-988. doi:10.1002/2016JG003743.

- 15) 例えば、中山忠暢「計算で挑む環境研究－シミュレーションが広げる可能性5 シミュレーションによって見えてくる水の流れ」(地球環境研究センターニュース 2020年3月号) (<https://www.cger.nies.go.jp/cger-news/202003/351005.html>) を参照。
- 16) Nakayama, T., Shankman, D., 2013. Impact of the Three-Gorges Dam and water transfer project on Changjiang floods. *Global Planet. Change* 100, 38-50. doi:10.1016/j.gloplacha.2012.10.004.

本章 2.2 で用いた幾つかの図および表については、下記の2つの原著論文より引用・抜粋した。

- ・ Nakayama, T., Wang, Q., Okadera, T., 2021a. Evaluation of spatio-temporal variations in water availability using a process-based eco-hydrology model in arid and semi-arid regions of Mongolia. *Ecol. Model.* 440, 109404. doi:10.1016/j.ecolmodel.2020.109404. Copyright Elsevier.
- ・ Nakayama, T., Wang, Q., Okadera, T., 2021b. Sensitivity analysis and parameter estimation of anthropogenic water uses for quantifying relation between groundwater overuse and water stress in Mongolia. *Ecohydrol. Hydrobiol.* 21(3), 490-500. doi:10.1016/j.ecohyd.2021.07.006. Copyright Elsevier.

2.3 サブテーマ3 牧草地の環境容量およびその脆弱性に及ぼす影響評価

2.3.1 目的と経緯

環境容量とは、自然の包容力と人為的な攪乱による影響との関係（環境容量＝自然の包容力／ヒトの活動の集積）を示す指標である¹⁾。これまでに熱環境容量、水環境容量、生活環境容量、炭素固定容量、環境受容力、そして牧草地の牧養力など様々な指標が開発されている。これらの指標を活用することで、自然の包容力を定量化することにより、ライフスタイルや未来社会のあり方を探ることが可能になる。

脆弱性とは、影響の受けやすさを示す指標であり、環境分野のみならず医療・臨床心理分野、情報セキュリティ分野など様々な分野で使用されている²⁾。環境分野の脆弱性は、気候変動や人為的攪乱の大きさや激しさといった外力、および自然または人間社会の感受性と適応力の関数であると定義されている²⁾。そのうち、感受性は、攪乱による影響の受けやすさを示し、一方、適応力は、潜在的な影響の顕在化を抑制する力を意味する。気候変化の脆弱性は、気候変動性や極端な現象を含む気候変化の影響によるシステムの影響の受けやすさ、または対処できない度合のことである。脆弱性はシステムが受ける気候変化の特徴・大きさ・速度と、システムの感受性、適応力の関数である³⁾。

本研究では、上述の複数ある環境容量のうち、牧草地の環境容量（または家畜の牧養力）およびその脆弱性を取り上げた。牧草地とは、家畜および動物を牧養する用途を有し、天然と作植生を有する農牧草地に含まれる土地である。牧草地の環境容量とは、ある牧草地で一定の生産力を維持しながら、放牧できる家畜の最大飼育数（羊単位でSUで表す）を意味している。ここで、環境容量は「適応力」、放牧圧は「影響の受けやすさ」を表す。つまり、放牧圧が大きくなったり、または環境容量を小さくなったりすると、牧草地の脆弱性が大きくなると考えられる。本研究の目的は、水資源に基づく牧草地の環境容量およびその脆弱性の評価モデルを開発し、気候変動に加え、人為的攪乱が牧草地の環境容量およびその脆弱性に及ぼす影響を明らかにすることであった。

2.3.2 方法

本研究では、図23に示した水資源に基づく牧草地の環境容量およびその脆弱性の評価モデルを開発した。

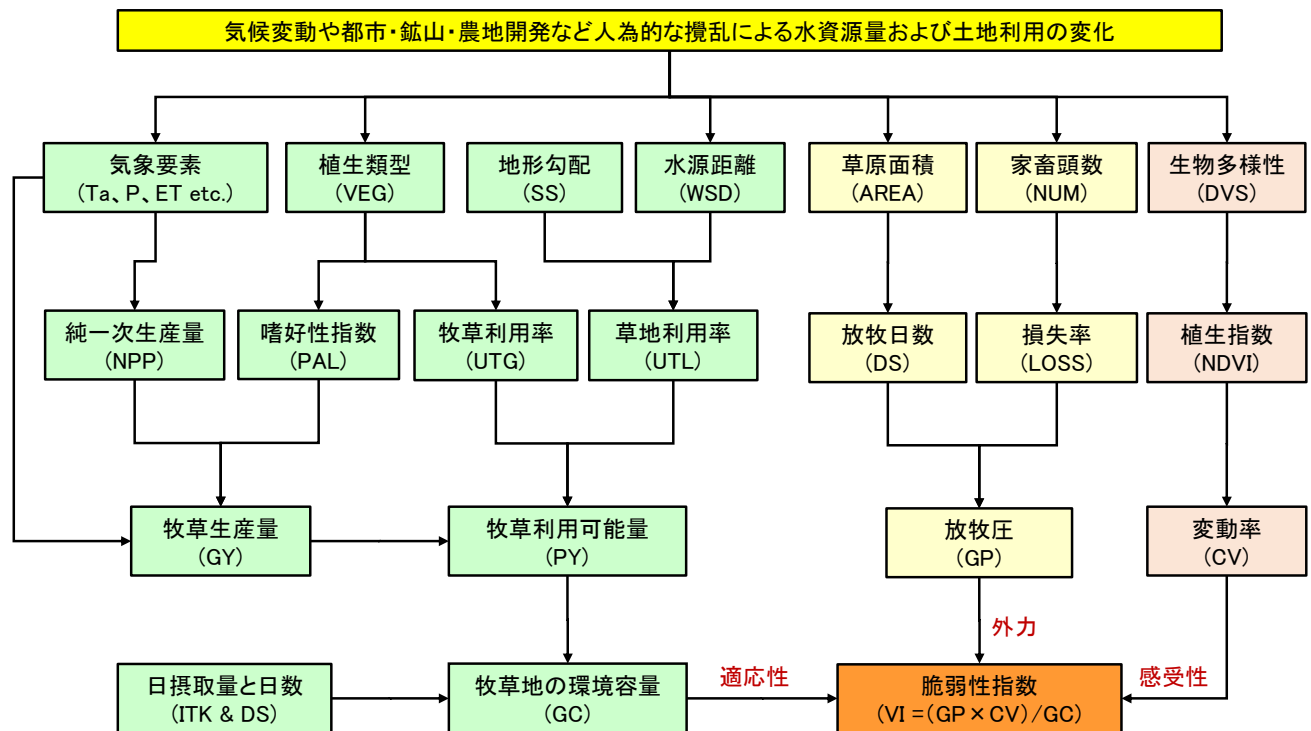


図23 牧草地の環境容量およびその脆弱性の統合評価モデル

推定の手順として、まず、気候変動に深く影響される単位面積の純一次生産量 (NPP, kg/ha) をベースに、植生類型 (VEG)、牧草の利用率 (UTG)、嗜好性指数 (PAL) および草地の利用率 (UTL)などを考慮して、単位面積の牧草生産量 (GY) および利用可能量 (PY, kg/ha) を推定した。その次、家畜1頭当たりの摂取量 (ITK, kg/SU) と放牧日数 (DS) を用いて単位面積の牧草地の環境容量 (GC, SU/ha) を計算した。また、ソム (町) またはバグ (村) などの行政単位の家畜頭数 (NUM, SU) と損失率 (LOSS) および衛星データを用いて推定した草原面積 (AREA, ha) の比から牧草地への放牧圧 (GP) を推定した。最終的に、外力を表す指標である牧草地への放牧圧 (GP) と、生態系の感受性を表す指標として植生指数の変動率 (CV)、および適応能力を表す指標である環境容量 (GC) の関数から脆弱性指数 (VI) を算出した。VIは1以下であれば、脆弱性が小さく、生態系の回復力を維持可能であるが、1より大きければ大きいほど生態系の脆弱性が高く、一旦破壊してしまうと回復が難しくなると考えられる。

(1) 牧草地の環境容量

牧草地の環境容量 (GC) は、草地の生産力を家畜の収容力で示し、標準体重の羊 (Sheep unit : SU) を単位面積あたり何頭放牧できるか (SU/ha) を示したものであり、式 (1) で推定された⁴⁵⁾。

$$GC = \frac{PY}{INT \times DS} \quad (1)$$

ここで、PYは単位面積あたりの牧草利用可能量 (kg/ha) であり、式 (2) で計算された。ITKは1日あたりの羊単位の摂食量 (1.8kg/SU)⁶⁾ であり、DSは年間の放牧日数 (365日) である。

$$PY = GY \times UTG \times UTL \times PAL \quad (2)$$

$$GY = \frac{NPP}{1 + (BNPP/ANPP)} \quad (3)$$

式 (2) のうち、GYは単位面積あたりの牧草生産量 (kg/ha) であり、式 (3) で計算された。ここで、NPPは、リモートセンシングデータと結合された生態系プロセスモデル (Biome-BGC)^{7,8)} を使用して計算された純一次生産量 (gC/m²) である。BNPPは、植生の地下部のNPPであり、ANPPは、地上部のNPPである。BNPP/ANPPは植生類型によって異なっているが、本研究ではモンゴル北部の典型的な草原地域での測定データ (地上部は約55%で、地下部は約45%) に基づいて、BNPP/ANPPは0.8で設定したが、モンゴルでは南北間の地域差が大きいため、この定数で適用した場合、推定結果に誤差が生じることが予想されるため、今後南部の乾燥地域でも現地調査を実施する予定である

また、式(2)のうち、UTGは牧草の利用率であり、植生種類によって異なっているが、本研究では80%を採用した⁹⁾。PALは牧草の嗜好性指数であり、植生種類によっても異なる¹⁰⁻¹¹⁾。さらに、UTLは、草地の利用率であり、地形や水源へのアクセスビリティによって決定され、式 (4-6) で推定された¹²⁾。

$$UTL = \left(1 - \frac{D_{ss}}{100}\right) \times \left(1 - \frac{D_{wsd}}{100}\right) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} D_{ss} &= 0.0093 \times SS^2 + 1.0409 \times SS, \text{ when } 0 \leq SS \leq 60 \\ D_{ss} &= 100, \text{ when } SS > 60 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} D_{wsd} &= 0, \text{ when } WSD < 0.8 \\ D_{wsd} &= 11.42 \times WSD^2 - 7.1792 \times WSD, \text{ when } 0.8 \leq WSD \leq 4 \\ D_{wsd} &= 100, \text{ when } WSD > 4 \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、Dss は地形の勾配による低減係数であり、Dwsd は水源の距離による低減係数である。SS は地形の勾配で、WSD は河川や湖沼、井戸など水源への距離を示す。式 (5) は、地形勾配が小さければ小さいほど、牧草地の利用率が高くなることを意味する。また、式 (6) は、水源が多ければ多いほど、水源への距離が小さくなり、結果的に牧草地の利用率が高くなることを意味する。

(2) 牧草地への放牧圧

本研究では、放牧圧 (GP) は単位面積当たりの家畜頭数だと定義され、次のような式 (7) で算定された¹³⁾。

$$GP = (\text{NUM} \times (1 + \text{LOSS}) \times \text{DS}) / (\text{AREA} \times 365) \quad (7)$$

ここで、NUM は統計年鑑による年末の家畜頭数を、LOSS は家畜の死亡率と出荷率を合わせた損失率を指す。AREA は利用可能な草地面積であり、DS は年間の放牧日数である。

(3) 牧草地の脆弱性

上述のように、脆弱性とは、気候変動や人為的攪乱の大きさや激しさといった外力、および自然または人間社会の感受性と適応力の関数であると定義されている²⁾。脆弱性は、外力、感受性、適応能力の関数であり、式 (9) のように表すことができる¹⁴⁻¹⁶⁾。

$$\text{脆弱性} \cong f(\text{外力}, \text{感受性}, \text{適応能力}) \quad (8)$$

即ち、外力が強くなればなるほど、または感受性と適応力が小さければ小さいほど、脆弱性が大きくなることを意味している。

実際なところ、図 23 で示したように、牧草地の脆弱性に影響を与える要因は様々ある¹⁷⁾ が、外力、感受性および適応能力など三つの側面から検討することが可能である。そのうち、外力とは、気候変動および人為的な攪乱を指し、前者を表す指標は気温、降水量、乾燥度、雪など、後者を表す指標は人口密度、道路密度、放牧密度などが上げられる。また、生態系の感受性は、所在する地理的位置、気候、地形、土壌特性など自然条件によって形成されているが、広域の植生指数の変動率 (CV) で表す生態系の安定性との相関が高い。さらに、生態系の適応能力は環境容量で表すことが可能である。つまり、環境容量が大きければ大きいほど、適応能力が高いと考えられる。以上の三つの側面を考慮すると、牧草地の脆弱性指数 (VI) は、下記のような関数で表すことが可能である。

$$VI \cong f(GP, CV, GC) \cong (GP \times CV) / GC \quad (9)$$

ここで、GP は、外力として定義した放牧圧であり、GC は、適応能力を示す牧草地の環境容量である。図 23 に示されているように、この変数は地形や土壌、気象や水文、そして植生種類と生産量から計算されている。CV は、生態系の感受性を表す植生指数 (NDVI) の変動率である。

(4) 事例研究地域の選定

上述の統合評価モデルは、モンゴル北部の半乾燥地域に分布する都市 (Ulaanbaatar) と草原 (Altanbulag) 地域、および南ゴビ県に分布する鉱山 (Khanbogd) と砂漠 (Manlai) 地域など 4 つの地域に適用された (図 24)。そのうち、都市地域は、モンゴルの経済的な中核である首都の Ulaanbaatar 市を選定した。草原地域は、Ulaanbaatar 市西部の Altanbulag 町 (ソム) を選んだ。この地域には典型的な草原ステップや森林ステップが広がっている。鉱業地域は、南ゴビのガルバ川流域に分布している鉱山の中核である Khanbogd 町 (ソム) を選定した。この地域では、大規模な鉱山が幾つかあり、特に、オユトルゴイ鉱山は世界最大級の金および銅の埋蔵量と言われている。最後に、砂漠地域として、南ゴビの Manlai 町 (ソム) を選定した。この地域の大半は裸地や砂漠で占められている。

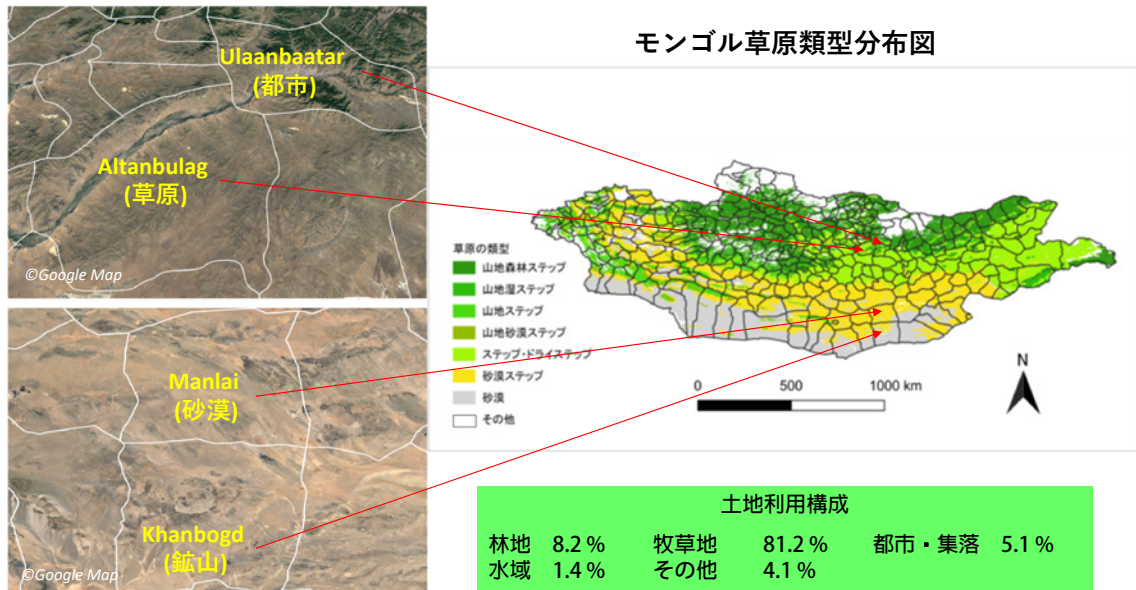


図 24 事例研究地域：半乾燥地域の都市 (Ulaanbaatar) と草原 (Altanbulag) 地域、および乾燥地域の鉱山 (Khanbogd) と砂漠 (Manlai) 地域の分布図

(5) データ収集と解析

統合評価モデルの入力データとして、我々は、まず研究対象地域の高精度の地形や土地被覆 (図 25)、そして植生指数 (NDVI) や蒸発散 (ET) および純一次生産量 (NPP) などの衛星データを収集・解析した。そのうち、高精度の地形図 (解像度 30m) は、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS) によって撮影した衛星画像を用いて開発した全球陸域を対象とした高精度デジタル 3D 地図 (https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/aw3d30/index_j.htm) を利用した。

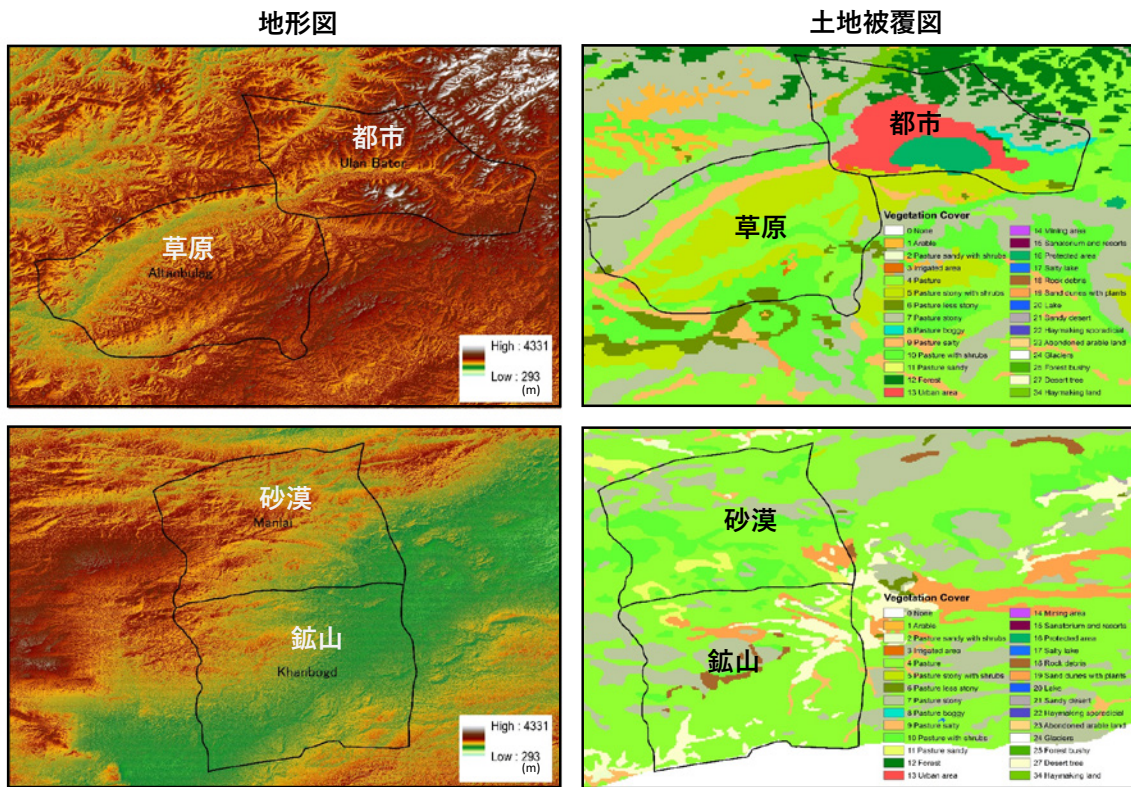


図 25 ALOS World 3D-30m から得られた高精度の地形図および Landsat 画像から得られた高精度の土地被覆図

土地被覆データ（解像度 30m）は、米国の地球観測衛星であるランドサット（Landsat8）リモートセンシング画像データを使用して作成した。図 26 は、作成した鉱山地域の土地被覆図である。それによると、この地域の裸地と岩地は 2002 年の 60.1% から 2019 年の 44.8% に減少し、草地はほとんど変わらず、そして、湿地は増えて、鉱山と建築が 2002 年の 0% から 2019 年の 10.2% に大幅に増大したことが分かった（表 11）。

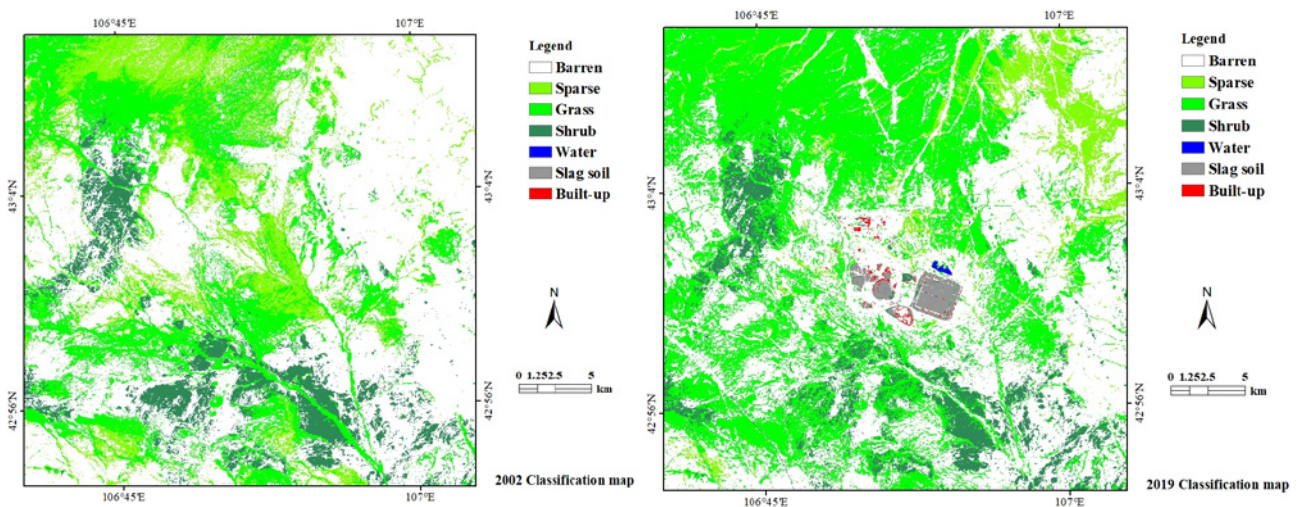


図 26 ランドサット（Landsat8）データを用いて解析した 2002 年から 2019 年鉱山地域の土地被覆変化

表 11 ランドサット（Landsat8）データを用いて解析した 2002 年、2010 年と 2019 年の鉱山地域の各土地被覆の割合

土地被覆類型（Land Cover）	2002	2010	2019
裸地と岩地（Barren & Rocks）	60.10%	51.40%	44.80%
草地（Grass）	31.10%	35.30%	32.20%
灌木（Shurb）	5.80%	6.00%	5.10%
湿地（Wetland）	3.10%	2.30%	5.40%
鉱山と建築地（Mining & built）	0.00%	5.10%	10.20%

また、2000 年から 2019 年の植生指数（NDVI）や蒸発散（ET）および純一次生産量（NPP）など植生に関するデータ（解像度 1km）は、米国の地球観測衛星である Terra と Aqua に搭載されている中分解能撮像分光放射計（MODIS）によって撮影した衛星画像を用いて開発した全球陸域を対象としたデータプロダクト（MOD13、MOD16 と MOD17）を（<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/>）ダウンロードし、解析した。図 27 は、四つの事例研究地域における 1km メッシュの植生指数（NDVI）および純一次生産量（NPP）の経年変化を示したものである。

そして米国国立大気研究センター（NCAR）を中心に開発が進められているメソ気象モデル WRF（<https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>）を用いてシミュレーションした気温、湿度、風速、降水量、放射収支などの気象データ（解像度 10km）を利用した（図 28）。図 29 は、2000 年から 2019 年までの気温、降水量、蒸発散量、水分不足指数などの気象要因の経年変化を示したものである。これらのデータを評価モデルに入力することで、対象地域の牧草生産量や環境容量の時空間的变化を推定した。

さらに、都市化や過放牧など人為的攪乱を表す指標（放牧圧）を推計するため、2000-2019 年市町村別の人口、産業、家畜頭数（牛、馬、羊、ヤギ、ラクダなど）のデータを入手し、QGIS（キュージーアイエス、旧称：Quantum GIS）を用いて解析し、放牧圧（GP）の推定に用いた。図 30 はモンゴル統計データの基に作成した 2012 年と 2018 年の村（バグ）単位家畜頭数（羊単位：SU）の分布図である。

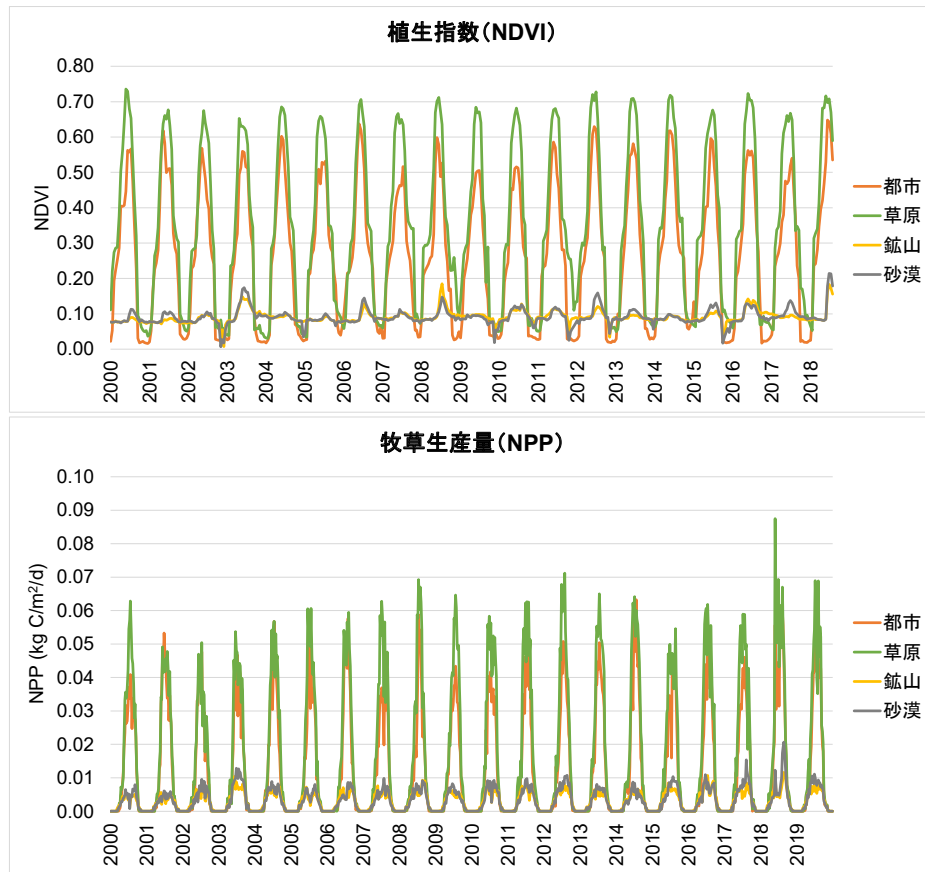


図 27 四つの事例研究地域における 1km メッシュの植生指数 (NDVI) および純一次生産量 (NPP) の経年変化

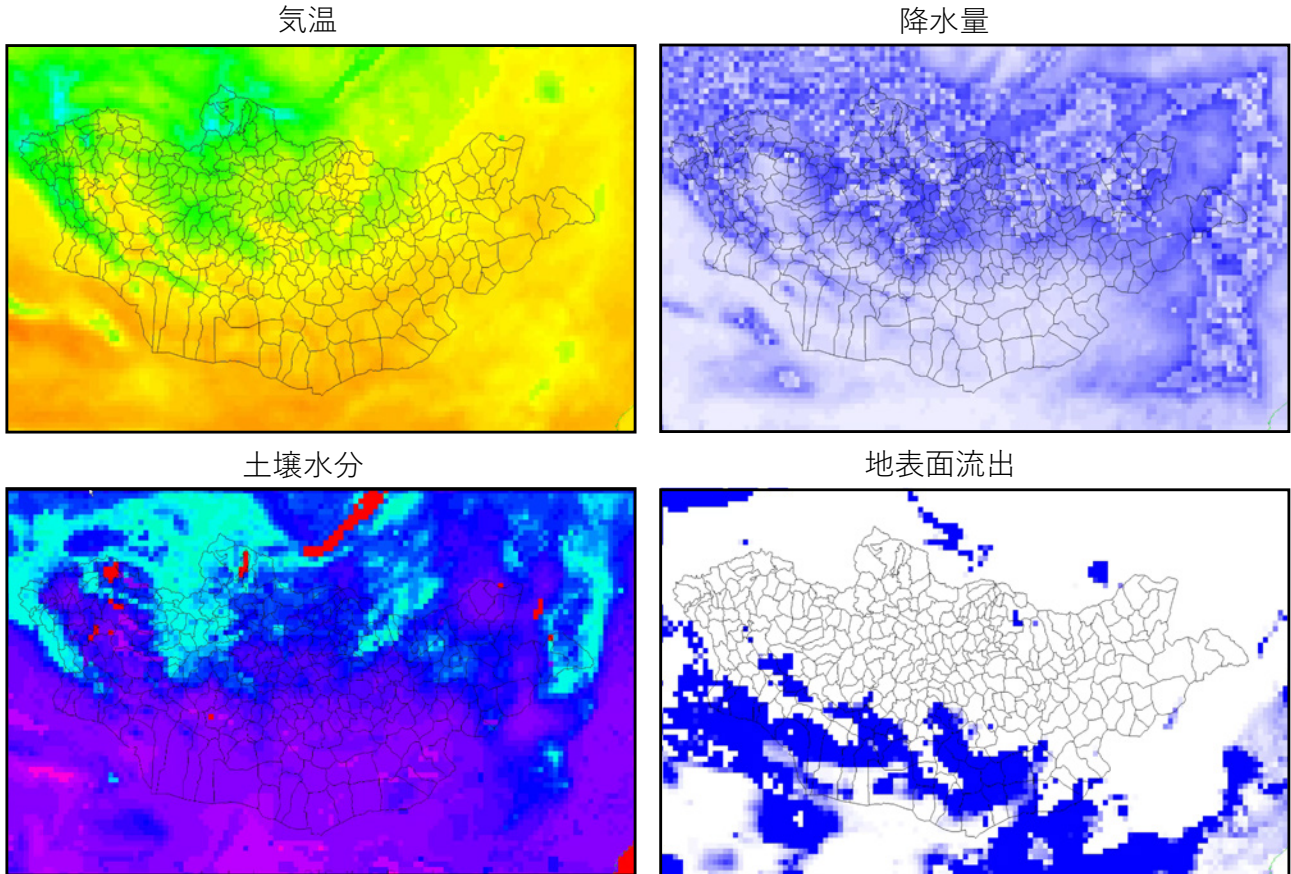


図 28 WRF モデルを用いてシミュレーションした気温、湿度、土壌水分、地表面流出データ (解像度 10km)

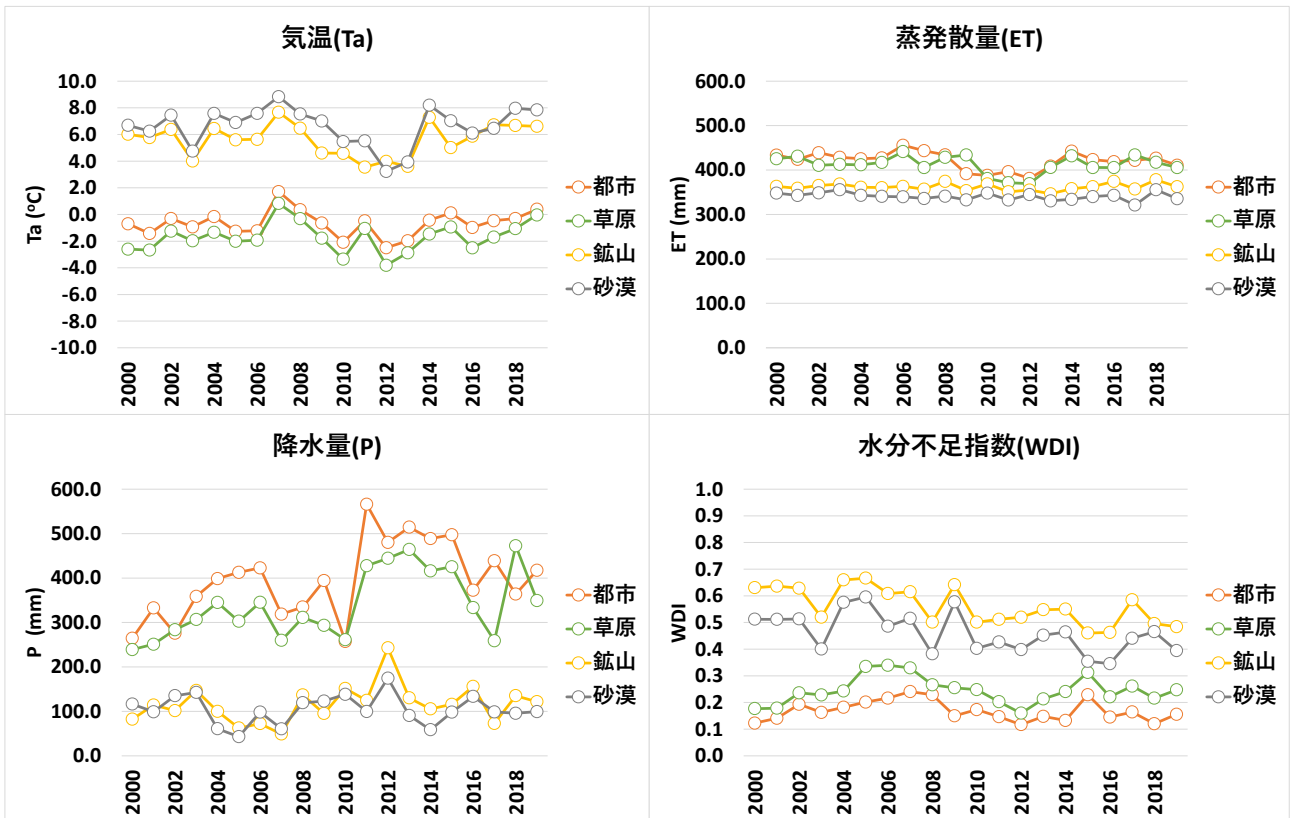


図 29 WRF モデルを用いてシミュレーションした四つの事例研究地域における 2000 年から 2019 年までの気温、降水量、蒸発散量、水分不足指数などの気象要因の経年変化

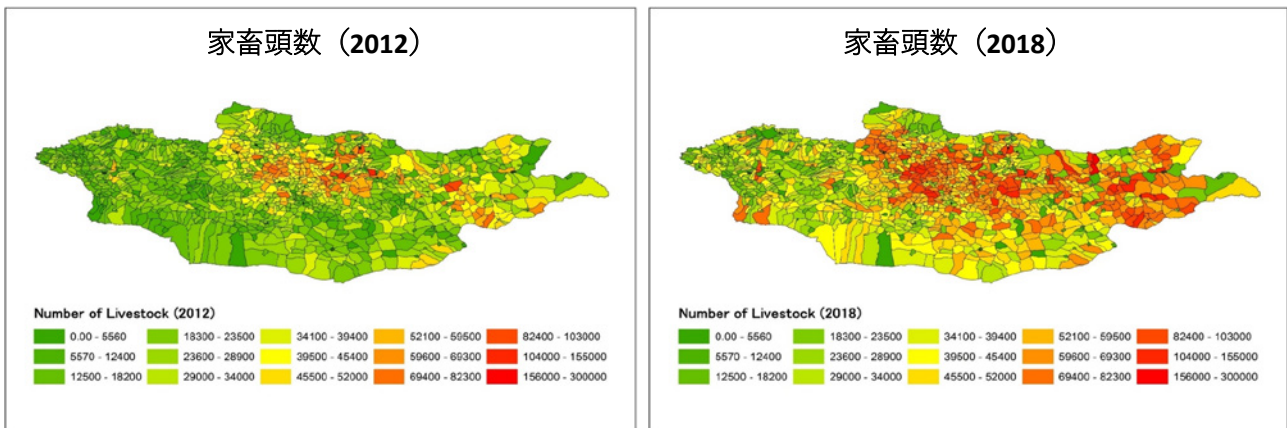


図 30 モンゴル統計データの基に作成した 2012 年と 2018 年の村 (バグ) 単位家畜頭数 (羊単位: SU) の分布図

2.3.3 結果と考察

(1) 牧草地の環境容量および脆弱性の地域差

評価モデルを用いて推定した各地域の植生変動率、放牧圧、環境容量および脆弱性指数の経年変化を図 31 で示している。

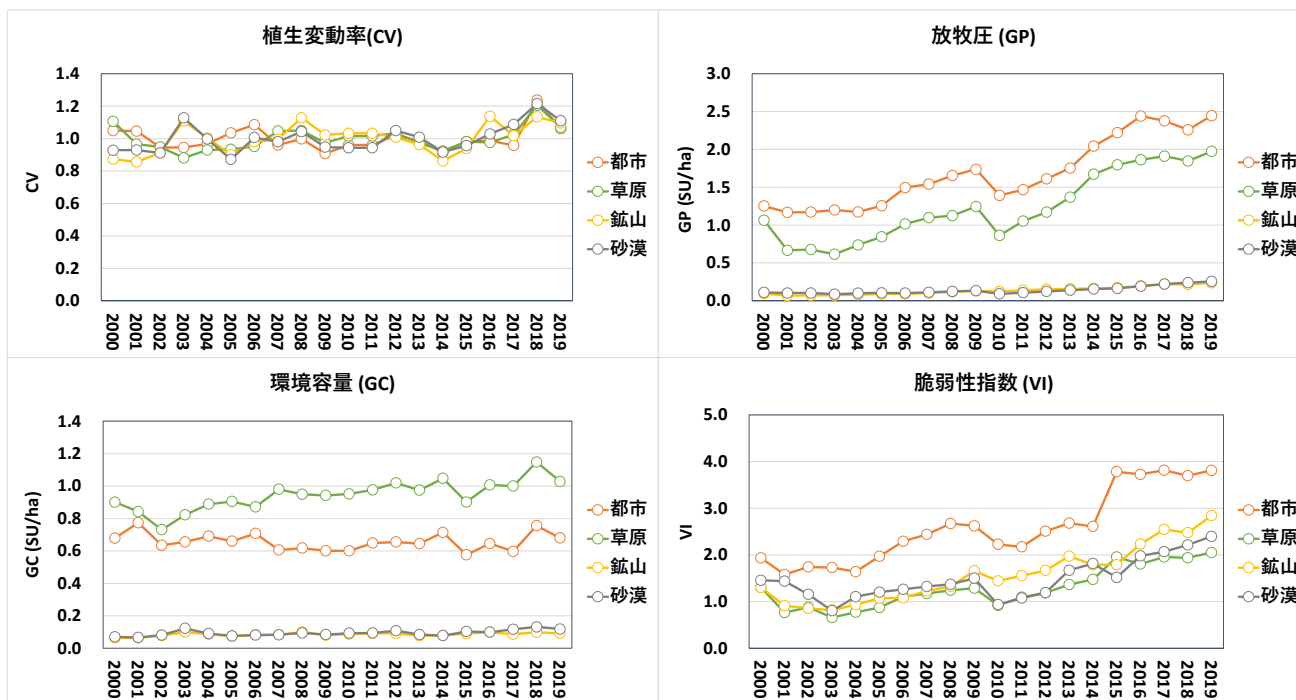


図 31 モデルで推定した 2000-2019 年の各地域の植生変動率、放牧圧、環境容量および脆弱性指数の経年変化

推定結果によると、牧草利用可能量 (PY) は、草原地域 (Altanbulag) が最も高く、その次に都市 (Ulaanbaatar)、砂漠 (Manlai) と鉦山地域 (Khanbogd) の順になっている。2000 から 2019 年の 20 年間の PY の平均値はそれぞれ、483.7 kg C/ha、335.3 kg C/ha、48.7 kg C/ha と 44.2 kg C/ha と推定され、大きな地域差を示されている。PY に対応する理論的放牧能力、即ち牧草地の環境容量 (GC) は、それぞれ 0.95 SU/ha、0.66SU/ha、0.10 SU/ha、0.09 SU/ha と推定された。半乾燥地域の草原と都市地域の PY と GC は、乾燥地域の砂漠と鉦山地域よりはるかに大きいことが数値で示された。

また、モンゴル統計年鑑より取得した対象地域の家畜頭数 (NUM) と衛星データから推定された牧草地の面積 (AREA) から実際の放牧圧 (GP) を求めた。それによると、2000 年から 2019 年までの 20 年間の GP は、都市地域の放牧圧が環境容量の 2.6 倍になっており、その次に、鉦山地域は 1.6 倍、砂漠地域は 1.5 倍、そして草原地域は 1.3 倍となっており、都市地域の放牧圧が最も大きいことが分かった。

さらに、MODIS 衛星が測定した 250m メッシュの 16 日毎の植生指数 (NDVI) から 4 地域の年平均値を推定し、2000 年から 2019 年の変動率 (CV) を求めた。それによる、それぞれの地域の CV は 0.86 から 1.24 の範囲に変動しているが、地域間の差が殆どなかった。

最後に、モデルで推定した脆弱性指数 (VI) を見ると、放牧圧の影響につれて、4 地域の差が大きく、そのうち、都市地域はこの 20 年間の平均値は 2.58 であり、最も高く、その次に鉦山 (1.57)、砂漠 (1.47) そして草原地域 (1.29) の順となっている。

(2) 牧草地の環境容量および脆弱性の変化率

気候変動と人為的な攪乱による影響を解明するため、地域毎のそれぞれの指標の 20 年間の曲線の傾きから変化率を求めた。表 12 は、各指標 20 年間の年平均値の最大値、平均値、最小値そして変化率を示した。それによると、CV の変化率はとても小さく、4 地域共に、この 20 年間有意性のある変化が認められなかった。ただし、放牧圧 (GP) の年変化率は大きく、そのうち、都市地域の 7.16% が最も大きく、その次の草原地域でも 7.02% であり、鉦山地域の 0.86% と砂漠地域の 0.72% で変化率が小さい。環境容量 (GC) の変化率は、都市地域でわずかに減少傾向 (-0.14%) にあるものの、他の地域では増加傾向にあり、そのうち、草原地域の年増加率 (1.24%) が最も大きいことが分かった。最終的に、脆弱性指数の変化率を見ると、都市地域では 11.97% で最大、その次に、鉦山地域では 9.35%、そして、草原

地域では 6.37%、砂漠地域では 5.33% で最小であった。以上の分析から見れば、環境容量や植生指数の変化率は気候変化と高い相関があるため、過去 20 年間に気候変動による影響が小さいことを示唆している。しかし、脆弱性指数の変化率は、人間活動が誘発する放牧圧と高い相関があるため、この結果から、過去 20 年間に人為的攪乱が牧草地の脆弱性に大きな影響をもたらしたことを示唆している。

表 12 モデルで推定した 2000-2019 年各指標の年平均最大値、平均値、最小値、標準偏差と変化率

指標	統計項目	全国	都市	草原	鉱山	砂漠	単位
植生指数変動率 (CV)	最大値	1.21	1.24	1.21	1.14	1.22	
	平均値	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
	最小値	0.92	0.91	0.88	0.86	0.87	
	標準偏差	0.06	0.07	0.07	0.09	0.08	
	変化率	0.51%	0.21%	0.47%	0.71%	0.73%	/yr.
放牧圧 (GP)	最大値	0.76	2.44	1.97	0.24	0.26	kg C/ha
	平均値	0.46	1.68	1.23	0.13	0.14	kg C/ha
	最小値	0.29	1.17	0.61	0.07	0.09	kg C/ha
	標準偏差	0.15	0.45	0.45	0.05	0.05	
	変化率	2.28%	7.16%	7.02%	0.86%	0.72%	/yr.
環境容量 (GC)	最大値	0.54	0.77	1.15	0.10	0.13	kg C/ha
	平均値	0.44	0.66	0.94	0.09	0.09	kg C/ha
	最小値	0.39	0.58	0.73	0.06	0.07	kg C/ha
	標準偏差	0.04	0.05	0.09	0.01	0.02	
	変化率	0.58%	-0.14%	1.24%	0.10%	0.19%	/yr.
脆弱性指数 (VI)	最大値	1.61	3.81	2.05	2.84	2.40	
	平均値	1.04	2.58	1.29	1.57	1.47	
	最小値	0.67	1.58	0.66	0.82	0.80	
	標準偏差	0.30	0.76	0.43	0.58	0.42	
	変化率	4.27%	11.97%	6.37%	9.35%	5.33%	/yr.

(3) 推定結果の不確実性

この研究では、リモートセンシングデータを基に牧草地の面積と生産量を推定した。また、水資源へのアクセスビリティや地形勾配などを考慮して牧草地の利用率や環境容量を推定し、さらに、家畜頭数の統計データを用いて、放牧密度を推定し、牧草地の放牧圧と脆弱性指数を推定したため、結果と結論に影響を与える可能性のある不確実性があると考えられる。まず、牧草地の面積と生産量は、衛星リモートセンシングデータと生態系プロセスモデルによって推定され、メッシュの大きさによって空間的分散が異なるため、計算用メッシュのサイズやメッシュ内データの統計手法によって、推定値に誤差を生じる可能性が大きい。特に、乾燥地域の草原は点的に分布され、メッシュのサイズが大きくなると、面積の小さい草原を捉えることが困難であるため、大きな誤差を生じる可能性がある。また、家畜頭数の統計データは行政区毎に統計されており、メッシュ単位のデータが存在しないため、結果的に行政区単位の放牧密度に合わせて、環境容量と脆弱性指数を推定するしか方法がない。そのため、実際の家畜データは行政年鑑から取得され、環境容量は、1km 空間分解能でリモートセンシングに基づき得られたメッシュデータから地域的に平均化された。両者の

間に共に不確実性が生じることが考えられる。さらに、環境容量に大きく影響する牧草地の利用率は水源へのアクセスビリティに左右されているが、水源へのアクセスビリティのデータがあまりないので、河川や湖、そして井戸の情報から推定したため、それによる不確実性が最も大きいと考えられる。

2.3.4 まとめ

本研究により、気候変動に伴う土壌水分や地表・地下水などの水循環量の変動や、社会経済活動に伴う土地利用変化や過放牧など、人為的な攪乱が牧草地の環境容量およびその脆弱性に及ぼす影響の評価手法を確立することができた。モンゴルの半乾燥地域に分布する都市(Ulaanbaatar)と草原地域(Altanbulag)、および乾燥地域に分布する鉱山(Khanbogd)と砂漠地域(Manlai)など4つの事例地域に適用した結果、市場経済が導入されてから、特に2000年以降、都市および鉱山地域において放牧圧は環境容量を大きく超え、牧草地の脆弱性が一層高くなっていることを明らかとなった。そのうち、環境容量、放牧圧および脆弱性の順序は次のとおりである。

- (1) 環境容量：草原地域>都市地域>砂漠地域>鉱山地域；
- (2) 放牧圧：都市地域>草原地域>鉱山地域>砂漠地域；
- (3) 脆弱性：都市地域>鉱山地域>砂漠地域>草原地域。

また、評価モデルを適用することで、水資源へのアクセシビリティの改善などにより牧草地の利用率を高めることで、特に都市と鉱山地域において環境容量が大きくなったが、実際の放牧強度の増加率は環境容量の増加率を超え、さらに、都市や鉱山開発によって牧草地の面積が減少され、結果的に放牧圧が大きくなり、脆弱性を悪化させることとなった。今後は、研究成果をモンゴルおよび周辺国の研究者や政策決定者との共有や研究ネットワークの拡大を通して、これまで開発してきた統合モデルを用いた家畜頭数の適正管理や、水資源と飼料供給システムの構築など様々な適応策の効果を評価していきたい。

引用文献

- 1) 大西文秀 (2013) 「流域圏からみた日本の環境容量」大阪公立大学共同出版会。
- 2) 白井信雄、田中充、小野田真二、木村浩巳、馬場健司、梶井公美子 (2012) 脆弱性の概念と気候変動適応における脆弱性の構造に関する分析. 第40回環境システム研究論文発表会講演集。
- 3) 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第二作業部会報告書「気候変化 2001：影響、適応、脆弱性」<http://www.env.go.jp/press/files/jp/24277.pdf>
- 4) Stoddart, L. A.; Smith, A. D.; Box, T. W., *Range Management*. cGraw-Hill: New York, 1975.
- 5) Rees, W. E., Revisiting grazing capacity: Area-based indicators of sustainability. *Population and Environment* 1996, 17 (3), 195-215.
- 6) Agricultural Industry Standard of the People's Republic of China - Calculation of Reasonable Livestock Capacity for Natural Grasslands. Ministry of Agriculture of the People's Republic of China: 2002; Vol. NY/T635-2002.
- 7) Running, S., R. R. Nemani, F. A. Heinsch, M. Zhao, M. Reeves, and H. Hashimoto. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *BioScience*, 54(6): 547-560. 2004.
- 8) Zhao, M., F. A. Heinsch, R. R. Nemani, and S. W. Running. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. *Remote Sensing of Environment*. 95: 164-176. 2005.
- 9) Fang, Y. P., The effects of natural capital protection on pastoralist's livelihood and management implication in the source region of the Yellow River, China. *Journal Of Mountain Science* 2013, 10 (5), 885-897.
- 10) Damiran, Daalkhaijav. (2005). Palatability of Mongolian Rangeland Plants. Eastern Oregon Agricultural Research Center, Union, Oregon, USA.
- 11) Tibebu Kochare, Berhan Tamir, Yisehak Kechero. Palatability and Animal Preferences of Plants in Small and Fragmented

Land Holdings: The Case of Wolayta Zone, Southern Ethiopia. *Agri Res & Tech: Open Access J.* 2018; 14(3): 555922 DOI: 10.19080/ARTOAJ.2018.14.555922

- 12) Holechek, J.L., R. D. Pieper and C.H. Herbel. 2004. *Range Management: Principles and Practices*. Prentice Hall, New Jersey.
- 13) Fan, J.; Shao, Q.; Wang, J.; Chen, Z.; Zhong, H., Temporal and spatial dynamics analysis of grazing pressure in grasslands of the Three-River Headwaters. *Chinese Journal of Grassland* 2011, 33 (3), 64-72.
- 14) IPCC (2007). 'Climate Change: The Physical Science Basis.' Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. (Cambridge University Press: Cambridge, UK.)
- 15) Polsky, C., Neff, R., and Yarnal, B. (2007). Building comparable global change vulnerability assessments: the vulnerability scoping diagram. *Global Environmental Change* 17, 472–485.
- 16) 三村信男 (2006) 「地球温暖化対策における適応策の位置づけと課題」『地球環境』 11 (1) : pp.103-110.
- 17) Yang Tingting, Li Peng, Wu Xinhong, Hou Xiangyang, Liu Pengtao, Yao Guozheng (2014) Assessment of vulnerability to climate change in the Inner Mongolia steppe at a county scale from 1980 to 2009. *The Rangeland Journal* 36, 545-555.

[資 料]

1 研究の組織と研究課題の構成

1.1 研究の組織

[A 研究担当者]

地域環境研究センター 王 勤学

(注) 所属・役職は年度終了時点のもの。また、*) 印は過去に所属していた職員等を示す。

[B 協力研究者]

EERDENI	地域環境研究センター (平成 30 年～令和 2 年)
Ochirbat Batkhishig	Institute of Geography and Geoecology, Mongolian Academy of Sciences
Dorjgotov Battogtokh	Institute of Geography and Geoecology, Mongolian Academy of Sciences
Uudus Bayasaikhan	School of Arts and Sciences, National University of Mongolia

1.2 研究課題と担当者

サブテーマ 1 水資源需要量の時空間変動の推定

岡寺 智大

サブテーマ 2 水資源供給可能量の時空間変動の推定

中山 忠暢

サブテーマ 3 牧草地の環境容量およびその脆弱性に及ぼす影響評価

王 勤学

2 研究成果発表一覧

2.1 誌上発表

<雑誌>

発表者・(刊年)・題目・掲載誌・巻(号)・頁

中山忠暢 (2018) 地表水-地下水相互作用及びその生態系や生物地球化学へ及ぼす影響~プロセス型モデルを用いたアプローチ~. 地下水学会誌, 60 (2), 143-156

Nakayama T., Pelletier G.J. (2018) Impact of global major reservoirs on carbon cycle changes by using an advanced eco-hydrologic and biogeochemical coupling model. *Ecological Modelling*, 387, 172-186

Nakayama T., Maksyutov S. (2018) Application of process-based eco-hydrological model to broader northern Eurasia wetlands through coordinate transformation. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 18 (3), 269-277

Tanaka-Oda A., Endo I., Ohte N., Eerdeni, Yamanaka N., Hirobe M., Nachinshonhor G.U., Koyama A., Jambal S., Katsuyama M., Nakamura T., Matsuo N., Jamsran U., Okuro T., Yoshikawa K. (2018) A water acquisition strategy may regulate the biomass and distribution of winter forage species in cold Asian rangeland. *ECOSPHERE*, 9 (12), 1-13

Okadera T., Wang Q-X., Eerdeni, Nakayama T. (2019) Groundwater monitoring for evaluating the pasture carrying capacity and its vulnerability in arid and semi-arid regions: A case study of urban and mining areas in Mongolia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 266

Nakayama T. (2020) Inter-annual simulation of global carbon cycle variations in a terrestrial-aquatic continuum. *Hydrological Processes*, 34, 662-678

Ai Z., Wang Q-X., Yang Y.H., Manevski K., Yi S., Zhao X. (2020) Variation of gross primary production, evapotranspiration and water use efficiency for global croplands. *Agric. For. Meteorol.*, 287 (15), 107935

Li R., Zhao L., Wu T.H., Wang Q-X., Ding Y.J., Yao J., Wu X., Hu G., Xiao Y., Du Y., Zhu X., Qin Y., Yang S., Bai R., Du E., Liu G., Zou D., Qiao Y., Shi J. (2019) Soil thermal conductivity and its influencing factors at the Tanggula permafrost region on the Qinghai-Tibet Plateau. *Agric Forest Meteorol.*, 264 (15), 235-246

Nakayama T., Wang Q-X., Okadera T. (2021) Evaluation of spatio-temporal variations in water availability using a process-based eco-hydrology model in arid and semi-arid regions of Mongolia. *Ecological Modelling*, 440, 109404

Nakayama T., Wang Q-X., Okadera T. (2021) Sensitivity analysis and parameter estimation of anthropogenic water uses for quantifying relation between groundwater overuse and water stress in Mongolia. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 21 (3), 490-500

Wang Q-X., Okadera T., Nakayama T., Batkhishig O., Battogtokh D., Bayasaikhan U. (2021) Evaluation of the Influence of Anthropogenic Disturbances on Pasture Grazing Capacity and Its Vulnerability in Arid and Semi-Arid Regions ---A case study in Mongolia. *Proceedings of the Environmental Science and Technology International Conference (ESTIC 2021)*, 2021, 38-41

Qian, Q., Wang J., Zhang X., Wang S., Li Y., Wang Q-X., Watson A. E., Zhao X. (2022) Improving herders' income through alpine grassland husbandry on Qinghai-Tibetan Plateau. *Land Use Policy*, 113 (2022) (105896), 1-10

<書籍等>

発表者・(刊年)・題目・出版社・総頁数

Nakayama T. (2019) - . Nakayama T.ed., *Development of process-based NICE model and simulation of ecosystem dynamics in the catchment of East Asia (Part V)*, Center for Global Environmental Research (CGER), National Institute for Environmental Studies (NIES), 122p

2.2 口頭発表

発表者・(暦年)・題目・学会等名称・予稿集名・頁

- EERDENI, 王勤学, 岡寺智大, AiZhipin, OchirbatBatkhisig (2018) ウランバートル市におけるゲルからのCO2排出量のマッピング. 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 同予稿集
- Wang Q-X., Okadera T., Eerdeni, Batkhisig O. (2018) Evaluation of Carbon Sequestration for Different Land Covers in Mongolia. JpGU Meeting 2018, Abstracts, HCG22-08
- Liu, X., Wang Q-X. (2018) Risk assessment of drought disaster for maize based on integrating multi-sources data. JpGU Meeting 2018, Abstracts, HCG22-04
- Ai Z., Wang Q-X., Yang Y. (2018) Dynamics of water and carbon use efficiency of global croplands from 2000 to 2014. Japan Geoscience Union Meeting 2018, Abstracts, HCG22-P01
- Nakayama T. (2018) Recent progress of an advanced eco-hydrologic and biogeochemical coupling model in terrestrial-aquatic continuum. 17th World Lake Conference, Proceedings of 17th World Lake Conference, proceedings, 620-622
- Nakayama T. (2018) Simulation of inter-annual variations of carbon cycle accompanied by hydrologic changes in terrestrial-aquatic linkages. AGU Fall Meeting 2018, Abstracts, H44C-02
- Okadera T. (2019) Developing an inventory model for evaluating the demand of water resource. International Seminar on Environmental Vulnerability and its Adaptation Strategies in Arid and Semi-Arid Regions, -
- Okadera T., Wang Q-X., Eerdeni, Nakayama T. (2019) Groundwater Monitoring for Evaluating the Pasture Carrying Capacity and its Vulnerability in Arid and Semi-arid Regions: A Case Study of Urban and Mining Areas in Mongolia. th International Forum on Sustainable Future in Asia/ 4th NIES International Forum, Program, 102
- Wang Q-X. (2018) Pasture Carrying Capacity and its Vulnerability: Integrated Indicators for SDGs in Arid and Semi-Arid Regions. The 18th Conference of Science Council of Asia (SCA) "Role of Science for Society: Strategies towards SDGs in Asia" , -, ISBN:978-4-60000044-8 C
- 王勤学, 岡寺智大, 中山忠暢, EERDENI (2018) 気候変動の適応や SDGs に向けたスマートな遊牧に適した技術システムの提案. いばらき宇宙ビジネスサミット 2018, -
- Wang Q-X., Okadera T., Nakayama T., Batkhisig O., Battogtokh D., Bayasaikhan U. (2019) Impacts of Land Use/Cover Changes on Pasture Carrying Capacity and its Vulnerability in Mongolia. The Second International Conference of Environmental Science and Technology (EST-2019), Proceedings, 30
- Nakayama T., Wang Q-X., Okadera T., Deni E. (2019) Evaluation of spatio-temporal variations of water availability by using process-based eco-hydrology model in arid and semi-arid regions of Mongolia. International Society for Ecological Modelling Global Conference 2019, Abstract, O15.03
- Nakayama T. (2019) Simulation of impact of nutrients on carbon cycle changes in inland waters by using an advanced eco-hydrologic and biogeochemical coupling model in terrestrial-aquatic continuum. 2019 AGU Fall Meeting, Abstracts, B43I-2596
- Wang Q-X., Okadera T., Nakayama T., Eerdeni, Batkhisig O., Battogtokh D., Bayasaikhan U. (2019) Development of an Integrated Model for Evaluation of Pasture Carrying Capacity and its Vulnerability based on Water Resources in Arid and Semi-arid Regions---A Case Study in Mongolia. JpGU Meeting 2019, Proceedings, HCG28, P03
- 王勤学, 岡寺智大, EERDENI, 渡邊正孝, 志々目友博, 大場章弘, Batkhisig O. (2019) モンゴルの草原域におけるCO2フラックスのモニタリングと評価. 日本地球惑星科学連合 2019 年大会, 予稿集, ACG32, P05
- Wang Q-X., Okadera T., Nakayama T., Batkhisig O., Battogtokh D., Bayasaikhan U. (2020) Impact of Water Accessibility on the Carrying Capacity and Vulnerability of Pasture in Arid and Semi-arid Regions --- A Case Study in Mongolia. 5th International Forum on Sustainable Future in Asia - Fostering a Healthy and Sustainable Environment to Achieve the Sustainable Development Goals, Proceedings
- Nakayama T., Wang Q-X., Okadera T., Batkhisig O., Bayarsaikhan U. (2020) Application of process-based eco-hydrology model to urban and mining hubs in Mongolia. XIII International Conference on Environment and Sustainable Development of the Mongolian Plateau and Surrounding Territories, Proceedings, 268-272

Wang Q-X., Okadera T., Nakayama T., Batkhishig O., Dorjgotov B. (2020) PASTURE VULNERABILITIES RELATED TO PERMAFROST DEGRADATION AND THEIR POSSIBLE ADAPTATION STRATEGIES IN MONGOLIA. XIII International Virtual Conference on Environment and Sustainable Development of the Mongolian Plateau and Surrounding Territories (ICOMP2020), Proceedings, 217-220

Wang Q-X. (2020) Assessment of regional eco-environmental vulnerabilities ---A case study in Mongolia. JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Abstracts, HCG24-05

Nakayama T. (2020) Quantifying impact of anthropogenic disturbances on carbon cycle changes in inland waters by using advanced earth system model in terrestrial-aquatic continuum. 2020 AGU Fall Meeting, Abstracts, B019-0015

Nakayama T. (2021) Estimation of carbon cycle changes in river-estuarine continuum by using advanced earth system model. EGU General Assembly 2021, Abstracts, EGU21-3602

王勤学, 岡寺智大, 渡邊正孝, Batkhishig O. (2021) ウランバートル近郊および郊外の牧草地における炭素吸収量の計測と比較評価. 日本地球惑星科学連合 2021 年大会, 「同予稿集」, ACG34-10

Wang Q-X. (2021) EVALUATION OF THE INFLUENCE OF ANTHROPOGENIC DISTURBANCES ON PASTURE CARRYING CAPACITY AND ITS VULNERABILITY IN ARID AND SEMI-ARID REGIONS. INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (EST2021), Abstracts, 3, 36

Nakayama T., Wang Q-X., Okadera T. (2021) Quantifying impact of anthropogenic disturbances on water availability and water stress in Mongolian urban and mining hubs by using process-based eco-hydrology model. 2021 AGU Fall Meeting, Abstracts, H21H-06

国立環境研究所研究プロジェクト報告 第139号
NIES Research Project Report, No.139

(SR - 139 - 2021)

水資源量に基づく乾燥・半乾燥牧草地の利用可能量と
その脆弱性の評価
(所内公募型提案研究)
平成30～令和2年度
Evaluation of the pasture carrying capacity and its vulnerability
based on water resources in arid and semi-arid regions
FY2018～2020

令和4年3月31日発行

編集 国立環境研究所 編集分科会

発行 国立研究開発法人 国立環境研究所

〒305-8506 茨城県つくば市小野川16番2
E-mail: pub@nies.go.jp

Published by the National Institute for Environmental Studies
16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506 Japan
March 2022

組版 株式会社 イセブ
〒305-0005 茨城県つくば市天久保2丁目11-20

無断転載を禁じます

国立環境研究所の刊行物は以下の URL からご覧いただけます。
<https://www.nies.go.jp/kanko/index.html>

