

マルチ・エージェントモデルを用いた牧畜民放牧 モデルの構築と牧草地劣化への影響評価 ーモンゴルを事例としてー

小松 悟¹・金子 慎治²

¹正会員 広島大学大学院助教 国際協力研究科開発科学専攻 (〒739-8529広島県東広島市鏡山1-5-1)
E-mail:skomatsu@hiroshima-u.ac.jp

²正会員 広島大学大学院教授 国際協力研究科開発科学専攻 (〒739-8529広島県東広島市鏡山1-5-1)
E-mail:kshinji@hiroshima-u.ac.jp

モンゴルでは近年牧草地内にある、牧畜に利用可能な井戸が減少している。そのため限られた井戸周辺に牧畜民が集中して放牧を行うことで、周辺の牧草地が劣化している。本研究では、牧草地内の井戸の設置状況の違いによる、牧畜民の放牧行動の影響を分析し、井戸と牧草地劣化の定性的関係を明らかにしようと試みた。マルチ・エージェントモデルと呼ばれる、シミュレーションモデルで牧畜民行動をモデル化した結果、牧草地内の井戸の数を1990年比から2005年比まで減少させた場合、牧草地の劣化面積が増加することを確認した。本研究より途上国のような情報が限られた地域であっても、井戸の配置と牧草地劣化との定性的関係を示すことが可能となった。

Key Words : multi-agent model, herder, pastureland degradation, well, Mongolia

1. はじめに

(1) 研究の背景

牧畜業はモンゴル国（以下：モンゴルと記す）の主要な経済活動である。特に牧畜民が家畜とともに牧草地を移動しながら放牧・肥育する移動放牧が盛んである。近年牧草地の砂漠化が進んでおり、その原因のひとつには過放牧が挙げられている。

過放牧はなぜ発生するのか。それは牧草地内の井戸が不足することにより、放牧可能な牧草地が減少しつつあるため、特定の井戸周辺の牧草地が劣化することに起因している。井戸は主に人間と家畜の飲用に利用されており、1990年代までは国が主体となり建設及び維持管理を行ってきた。しかし1991年の民主化以降、井戸建設・維持管理が不十分となり、結果として利用可能な井戸が減少した。例えば1990年にはドンドゴビ県サイツァガハーン郡には、家畜・ガソリン動力の井戸が199基、伝統的な手汲み井戸は112基の合計311基存在したとされる。ただ2005年に少なくとも61.3%の井戸の家畜・ガソリン動力の井戸(199基中122基)が利用不可能となっている¹⁾。また伝統的な手汲み井戸は112基のうち、多くの井戸がすでに耐用年数である20～30年を経過しており、また約37%の井戸は塩分濃度が非常に高いとされている(Pacific Consultants International and Mitsui Mineral

Development Engineering¹⁾より推定)。このため井戸全体で利用可能なものは1990年から2005年にかけて、48～61% (148～189基)に減少したと考えられる(148基とは、塩分濃度が高い手汲み井戸が全て利用不可能と考えた場合の、全ての利用可能な井戸(家畜・ガソリン動力井戸を含む)の数を示す。189基とは、塩分濃度が高い手汲み井戸が全て利用可能と考えた場合の、全ての利用可能な井戸の数を示す)。

結果、牧畜に必需品である井戸による水供給の減少により、放牧地として利用可能な土地が減少しつつある。ドンドゴビ県では1990年時点と比較して2005年には、水源不足による未利用牧草地が7%増加した²⁾。牧畜民は利用可能な井戸のある地域に移動するため、牧草地の利用に関して、低利用地や未利用地と過放牧地と利用形態が明確に分かれつつある。すなわち一定地域への家畜の集中により牧草地の劣化が進行しつつあると考えられる³⁾⁴⁾。

(2) 研究目的

以上のように、モンゴルでの砂漠化の原因は、牧草地にある使用可能な井戸の数が減少し、牧畜民が残された利用可能な井戸の周辺に集中することであると考えられる。しかし、こうした因果関係を実証的に分析するに足るデータが十分でないため、こうした因果仮説を確認

することは容易ではない。もし井戸と牧草地劣化については砂漠化との定性的な関係が解明されれば、牧草地保全を行うためには、井戸を適正に配置し、家畜の一定地域への集中を緩和することが望ましいことの傍証となる。

井戸の数と牧草地劣化との間はいったいどのような関係があるのだろうか。少なくとも井戸の減少と牧草地劣化との関係は、単純な線形関係ではないと想定される。井戸と牧草地は共に、牧畜民の行動を介した関係で成り立っているため、牧畜民がどのような牧草地を放牧場所として選択しているのかを評価する必要がある。この課題に対して、Fernandez-Gimenez, and Allen-Diaz⁹⁾によると、砂漠化地域では井戸に近づくほど、周辺が過放牧状態になっていることから井戸周辺が家畜によって利用される頻度が高いと報告している。しかしながら、牧畜民の放牧に対する意思決定を踏まえたうえで、井戸の配置と牧草地の劣化とを対比させた研究は存在しない。さらに、牧草地という空間を移動する牧畜民の行動が、過放牧や牧草地劣化とどのようなメカニズムで関連しているかについては、現在までに十分に解明できていない。

そのため本研究では、マルチ・エージェントモデル (Multi-agent Model) というシミュレーションモデルを利用して、井戸の数の違いによる牧草地劣化の程度を定性的に判断することを試みる。マルチ・エージェントモデルとは、各行動主体が自ら及び周囲の環境条件に応じて、どのような行動や意思決定を採るかを推定するシミュレーションモデルである。これにより、各牧畜民が自らの置かれた家畜数や牧草地、井戸の設置状態に応じて、どのような放牧行動をとるかを推計することで、牧草地の状態がどのように変化するのかが推定できる。複雑な牧畜民の行動を精度よく再現することは困難である。そこで本研究ではこうした研究目標の第一歩として、可能な限り現実のデータと整合させた仮想的な分析対象牧草地を設定し、しかし情報が限られた要因については一定の論理的妥当性を確保することにより、井戸の配置と牧草地劣化との蓋然性関係を示すことを目指す。

シミュレーションモデルを用いて牧畜民の行動分析を行うことは、政策的にも以下の2点の意義がある。まず砂漠化問題がある地域はモンゴルのような発展途上国が多い。発展途上国では政府のモニタリング能力が弱く、牧草地劣化の変化を継続的に観測してデータを得ることが難しい。もし牧畜民行動を現実的に即した形でシミュレートできたら、牧畜民の放牧によりどの程度牧草地劣化が進むのか予測することができる。次に井戸の増設が牧草地劣化に歯止めをかけることが期待されても、その政策的効果を計るためには長い年月のモニタリングデータが必要になる。シミュレーションモデルを構築することで、井戸設置がどの程度の効果を持つのか、事前に予測することが見込まれる。このように本研究はモンゴルの

砂漠化対策だけではなく、広く砂漠化研究の中での応用が期待できるものである。

(3) マルチ・エージェントモデル

マルチ・エージェントモデルを最初に利用したのは、民族ごとの居住地分化を推定した Schelling⁶⁾である。Janssen⁷⁾によると「エージェント」とは、「人間・動物や組織などを指し示し、周囲の状況に反応し、他のエージェントとも意思疎通をする主体である。またエージェントは学習・記憶・移動を行うことや感情をもつことができる」と定義されている。

マルチ・エージェントモデルは土地利用における各住民の行動を推定し、そこから自然環境全体を考察するのに適したモデルである。先行研究でも土地利用変化や土地被覆変化を分析するためにマルチ・エージェントモデルが利用されてきた。例えば Deadman et al.⁸⁾はブラジル熱帯林において、農民行動の農地利用行動をシミュレートし、農民行動が与える土地利用変化を推定している。しかしマルチ・エージェントモデルを用いて牧畜民行動や牧草地利用の変化を評価した既存研究は数少なく、カメルーンの牧畜民・耕作民と村長との間で水源や放牧地利用について交わされる契約関係をモデル化した研究⁹⁾があるに過ぎない。マルチ・エージェントモデルを利用して各牧畜民がどのように牧草地利用に対して影響を与えるのかを検討する、研究の蓄積が望まれている。

本研究では、マルチ・エージェントモデルを利用してモンゴルの牧畜民の放牧行動をモデル化することを目的とする。特に牧畜民の放牧にとって不可欠な井戸の設置状況の違いに注目する。そして各牧畜民の放牧行動の変化が地域全体の牧草地の状態に与える影響を議論する。

尚、本稿では牧草地利用に関して、井戸の増減による影響を中心に評価している。現在までに牧草地内の井戸設置数が、非常に大きく変動した要因であるためである。しかし将来的には気候変動による降水量減少や気温上昇、家畜頭数の増加も牧草地劣化に与える要因として、十分に検討する必要がある (例えば Iwasaki¹⁰⁾ 参照)。

2. 調査の概要

調査はモンゴル中部にあるドンゴビ県サイツァーガンハーン郡で実施した。調査地の主な牧畜関連指標は表-1に示した。調査は2006年10月にドンゴビ県サイツァーガンハーン郡にある2つの村(Naran, Tersh)で実施した。調査では村長や村医者と一緒に行き、できるだけ多くの世帯を訪問した。把握できた147世帯に質問を行い、無回答などを取り除いた後、有効回答は138世帯を利用した (有効回答率は93.9%)。調査項目は家畜の

種類別頭数や移動放牧の頻度、移動する場所（郡内、県内、県外）等を設定した（村内という項目は、村と村の境界をはっきりしていないこと、多くの牧畜民が村を越えて放牧をおこなっていると予想されたため設定を行っていない）。放牧範囲を牧畜民家畜の種類別頭数は、Sheehy¹³⁾の牧草要求量に基づく羊換算頭数に換算した。調査結果を表-2に示す。

表-1 調査地の主な指標 (2005年)

	ドンドゴビ 県 ^a	サイツァガー ンハーン郡 ^b
面積 (単位: 1,000km ²)	74.7	3.4
人口 (単位: 1,000人)	49.6	13.9
牧畜民人口	16.9	3.8
世帯数 (単位: 1,000世帯)	12.6	2.6
牧畜民世帯数	7.9	1.0
牧畜民世帯あたりの 家畜数 (頭数)	232.2	192.8
家畜数 (単位: 1,000頭)		
合計	1,829.1	188.6
ヤギ	825.4	87.8
羊	819.7	83.4
馬	119.5	12.7
牛	43.8	3.8
ラクダ	20.7	1.0

(出所) a: NSO¹¹⁾

b: Saintsagaan Town Office¹²⁾。但しサイツァーグンハーン郡の面積はPacific Consultants International and Mitsui Mineral Development Engineering¹³⁾を引用。

表-2 調査結果

変数名	平均	標準偏差	最小値	最大値
家畜頭数 (1世帯 当たりの家畜頭 数, 羊換算頭数)	359.6	304.5	30.5	1,788.0
放牧回数(年間に 移動する回数)	4.7	3.7	0.0	20.0
住居から最寄り の井戸までの距 離 (km)	1.8	1.0	0.2	5.9
放牧範囲	・郡内=77世帯 ・県内=38世帯 ・県外=33世帯			

3. モデルの構成

図-1 にモデルの初期設定及び放牧モデルを記す。本モデルでは行動主体となる牧畜民（エージェント）、その牧畜民が放牧行動を行うための場所であり、牧草地（スペース）、牧草地内にランダムに設定される井戸（属性要因）で構成されている。

尚、牧畜民が放牧場所を決める要因は、牧畜民からのヒヤリング調査により牧草量と井戸に絞っている。それよりも優先順位の下がる都市部からの距離や冬营地（冬季の越冬地）の有無等については、データの入手の都合上、導入を行っていない。モンゴルでは牧草地の私的所有制度はないものの、牧畜民間の伝統的なルールとして、ある牧畜民の冬营地周辺では他の牧畜民は利用しない、という暗黙のルールが存在する。このルールが放牧場所選択に影響している可能性はある。

初期設定と放牧モデル（20回）の実施を1年分のサイクル（1サイクル）とし、推計結果の安定性確保のため合計 1,000 サイクル実施した。放牧モデルの中で、移動するかどうかの意思決定は20回行うものとし、最大の移動回数は20回と設定した。これは調査において、一年間の移動回数の最大数が20回であったためである。そして井戸の設置数を変化させて、井戸設置数の違いがどのように牧草地劣化に影響するか推計した。以下にそれぞれの構成要素を記す。尚エージェントモデルの構築は、構造計画研究所の artisoc academic 1.0¹⁴⁾を利用した。

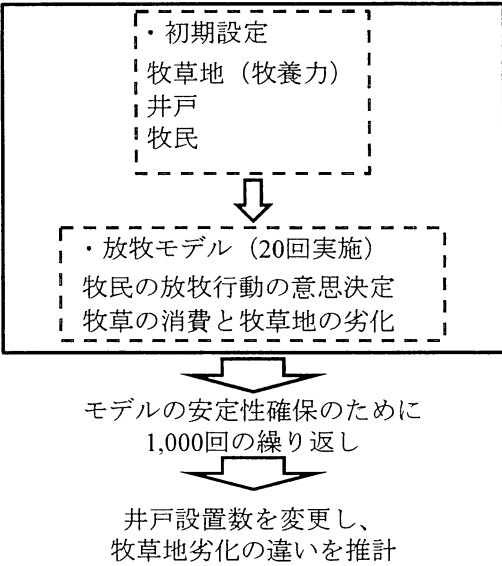


図-1 モデルの構成

(1) 初期設定

a) 牧草地（牧養力）

牧草地は、調査地となるドンドゴビ県の牧草地の状態を再現できるよう設定した。牧草地は牧畜民によって影響を受ける主体であり、自らは決して動かない。牧草地の面積は $30\text{km} \times 30\text{km}$ とし、ループ構造（空間の上端と下端、左端と右端がつながっている構造）とした。その牧草地内に、蜂の巣状の正六角形グリッドを 900 個設定し、グリッドの重心間の距離が 1km になるように設定した。そのため 1 つのグリッドの大きさは 0.866km^2 、牧草地全体の面積は $900 \times 0.866 = 779.4\text{km}^2$ となる。

各牧草地内の牧草量を示す指標として「牧養力」とよばれる指標を利用した。牧養力はある一定の牧草地内にある牧草地の量を示す指標で、植物生産性や、ある一定の牧草地内にある牧草量で飼養可能な家畜数を示すのにも利用される。本研究で利用した牧養力データは Pacific Consultants International and Mitsui Mineral Engineering²⁾を採用した。これをもとに計算するとドンドゴビ県の各牧草地グリッドの牧養力は平均 36.5、標準偏差は 8.2 である。この値を各サイクルの最初に牧養力の初期値として、この値を正規分布に従う形で、牧草地にある 900 グリッド内に分布させた。

b) 井戸

井戸は牧畜民が放牧するにあたって必要不可欠な水供給源であり、牧畜民の放牧行動を決めるものである。1990 年にはドンドゴビ県サイツァガンハーン郡には 311 基の井戸が存在したが、2005 年に、利用可能な井戸は 148～189 基となっている。（第 1 章に詳述）サイツァガンハーン郡の面積（ $3,406\text{km}^2$ ）を元に井戸密度を計算すると、本研究で設定した牧草地（ 799.4km^2 ）には 1990 年に約 71 基の井戸が存在することになる。近年の井戸減少を考慮すると、井戸は 2005 年に約 34～43 基まで減少したと計算される。

本研究では以下の理由から、牧草地に設置する井戸は全て同質の手汲み井戸と想定した。まず調査対象となったすべての牧畜民は、少なくとも 1 つ以上の手汲み井戸を利用しており、ほとんどの牧畜民が 1 年を通じて手掘り井戸のみを利用していた。また、機械式井戸は機器メンテナンスやポンプでの汲み上げの際に燃料が必要であるため、井戸の設置を行っても持続性が担保できない。したがって、井戸の数が利用可能な井戸と一致しないケースがある。また、手汲み井戸は井戸間の質の違いが不明であったため、すべて同じものであると仮定した。

本章では井戸の設置状況の違いが牧草地利用に与える影響を調べるため、井戸の設置状況は、71 基（1990 年と同密度）、60、50、43、40、34、30 と設定した。34 と 43 はそれぞれ 2005 年現在の井戸設置数の下限値と上限値である。30 の設定値は、今後井戸が減少する場合

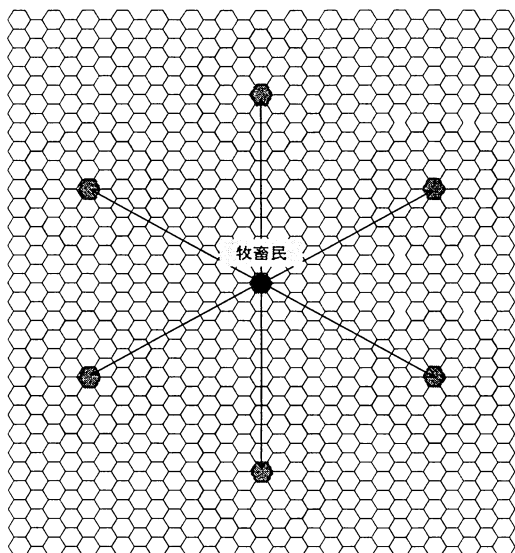
の牧草地劣化を想定した場合である。すべての井戸は各サイクルの最初にランダムに牧草地内に配置する。

c) 牧畜民

牧畜民は、牧草地内にある井戸の分布状況と牧草地内を行動する主体である。牧草地内には 83 体の牧畜民エージェントを設定した。牧畜民数の設定方法は以下の方法を用いた。まず Saintsagaan Town Office¹²⁾によるとサイツァガンハーン郡には 978 の牧畜民世帯があり、そのうち調査地となった 2 つの村（Naran, Tersh）には合計 403 の牧畜民世帯が登録されている。但しすべての登録されている牧畜民が、Saintsagaan で放牧しているとは限らない。実際は多くの牧畜民は他地域（トゥブ県、バヤンホンゴル県など）で放牧をおこなっており、冬季に郡内に戻ってくる。そのため実際に放牧を郡内で行っている牧畜民世帯は統計資料より少ないと考えられる。これを考慮するため、本章では調査で発見できた 147 世帯をこの地域で放牧している牧畜民と定め、全登録牧畜民世帯の $147/403 = 36.1\%$ がこの地域で放牧を行っているとした。その結果、サイツァガンハーン郡で放牧している牧畜民は 978 世帯の牧畜民世帯のうち $978 \times 36.1\% = 353$ 世帯と推定される。本シミュレーションで対象とした牧草地は 799.4km^2 、サイツァガンハーン郡は $3,406\text{km}^2$ であるため、研究対象の牧草地内にいる牧畜民数は $353 \times 799.4/3,406 = 83$ 世帯となる。

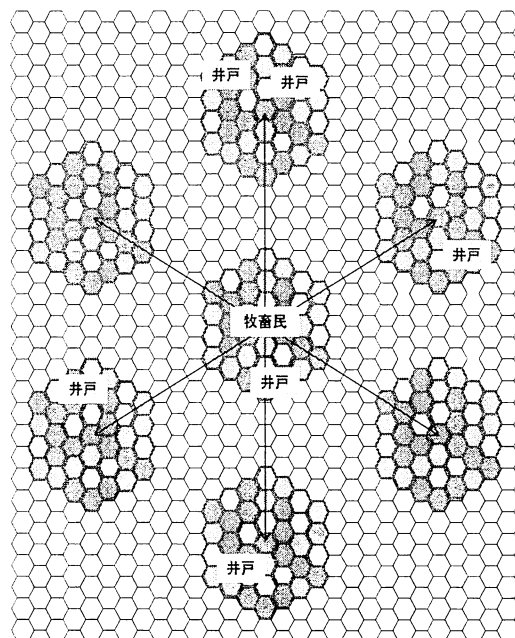
各牧畜民の所有する家畜数は、調査で得られた牧畜民世帯の家畜数を元にランダムサンプリング（復元再抽出）を行った。これをモデルの中の各牧畜民（83 世帯）が所有する家畜数として、各サイクルの最初に設定した。これによりモデル内の牧畜民世帯の家畜数の分布と、調査地での家畜数分布と同一にすることができる。

牧畜民の行動は井戸の有無と牧草地の牧草の質の状態に規定される。放牧モデルは大きく分けて牧畜民の意志決定（どこで放牧するか）を示す「牧畜民の放牧行動の意思決定」と、及び牧草地内の牧草の消費（牧養力の低下）を示す「牧草の消費と牧草地の劣化」という 2 つの要素で構成される。



(注) 各六角形は、牧草地グリッドを示す。黒色で示したグリッドは牧畜民の現在地、灰色で示したグリッドは牧畜民の移動候補地を示す。

図-2 移動候補地の選定



(注) 図中の「井戸」は牧畜民の移動後の場所から 3km 以内に井戸があることを示す。

図-3 移動候補地での牧養力及び井戸の有無の検討

(2) 放牧モデル：牧畜民の放牧行動の意思決定

a) 現在の場所の牧草地の状態の把握

牧畜民はまず自分の周囲 3km の範囲にあるグリッド (合計 37 グリッド) の平均牧草量 (牧養力) を計算する。3km に設置したのは、調査の結果 90%以上の牧畜民世帯は井戸から 3km 以内の場所に住むためである。井戸から大きく離れた場所に牧畜民は居住しないため、3km を牧畜民の利用範囲を考えるのは妥当である。なお、初期の位置においては、牧畜民はランダムに選択されたいずれかの井戸から 3km 以内に居住すると想定した。

b) 移動候補地の選定

牧畜民は現在いる場所から 6 方向に、10km ないし 12km 離れた場所に移動候補地を選定する (図-2 参照)。Fernandez-Gimenez and Batbuyan¹⁵⁾ はバヤンホンゴル県東部の調査をもとに、モンゴルの牧畜民の移動距離は、1 回当たり 8.2-12.9km であると推定したため、これを根拠とした。Administration of Land Affairs, Geodesy and Cartography, Mongolia¹⁶⁾ によると、バヤンホンゴル県東部と本調査対象地域との植生帯は同様の乾燥ステップとなっている。次に、各移動候補地の周辺 3km 以内の 37 グリッドの平均牧養力を計算するとともに、利用可能な井戸があるかどうかを検討した (図-3 参照)。牧畜民は各移動候補地の中で、井戸が利用でき、かつ最も平均牧養力が高い場所を検討対象移動候補地として選定する。

c) 移動するかどうかの意志決定

移動する前の場所と、b) で選定された移動候補地とを比較して、もし移動した場合に平均牧養力が増加するかどうかを検討した。増加する場合は移動を行い、増加しない場合は移動を行わないものとした。移動のコストは、既存の統計データや調査から推定することが困難であるためにゼロと仮定した。実際モンゴルの牧畜民はゲルと呼ばれる移動住居に住んでおり、移動は比較的容易であると思われることから、この仮定は妥当なものであると思われる。

(3) 放牧モデル：牧草の消費と牧草地の劣化

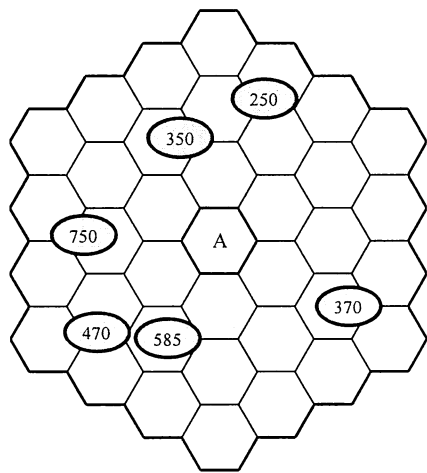
牧草の消費と牧草地の劣化に関しては、以下の 2 点に留意した。

a) 各牧草地に対する放牧圧の推定

移動後ないし現在地で牧畜民は放牧を行い、家畜は牧草地を消費する。牧草の消費は各移動に関する意思決定の後に実施されるため、合計 20 回実施される。そのため、移動を実施しなくとも移動を行ったとしても、牧草の消費は行われる。

牧草地の消費の程度については各牧草地グリッドがどの程度の数の家畜より影響を受けているかに依存する。まず、各牧草地グリッドから周囲 3 グリッド (3km) に

いる牧畜民の家畜数を合計する。各牧畜民の家畜 37 グリッド全てに平均的に影響を与えるとして設定したため、1つの牧草地グリッドに与える影響はその合計数から 37 で除した。計算方法の具体例は図-4 に記した。



(注) 丸は牧畜民、丸の中の数字は各牧畜民が所有する牧畜数(羊換算頭数)を示す。例えば、牧草地 A に与える放牧圧は、 $(750+470+585+350+250+370)/37=75(\text{頭/グリッド})$ と計算できる。

図-4 牧草地の劣化度の計算方法

b) 放牧圧に依存した牧草量(牧養力)の減少

牧草量(牧養力)の減少度合いは、牧草地内にある牧草の量と牧畜民の所持している家畜の量との関係で決まると仮定した。Chen et al.¹⁷⁾によると、モンゴル草原では家畜の密度が 0.7 頭/ha (=70 頭/km²: 羊換算頭数)を超えると地上部バイオマスが長期的に減少し続け、草原が維持されなくなることが示されている。本章のモデルでも同様に牧草地を消費する家畜が 70 頭/km² 以上の場合に牧草量が減少するものとした。また Chen et al.¹⁷⁾の結果より、1 年間放牧圧が 70-80 頭/km² の状態が続いたときは、地上バイオマス量が 76.5%、80 頭-120 頭/km² の場合に 72.6%、120 頭/km² の場合は 69.6%に減少している。本研究では Chen et al.¹⁴⁾の結果から推定し、1 回あたりの放牧圧が 70 頭-80 頭/km² の場合(グリッド当たり 60.6 頭-69.3 頭の場合)は牧草量が 1.33%、80-120 頭/km² の場合(グリッド当たり 69.3 頭-103.9 頭の場合)は 1.59%、120 頭/km² の場合(グリッド当たり 103.9 頭以上の場合)は 1.80%に減少するものと設定した。70 頭/km² 以下の場合には、牧草地は減少しないものと設定した。

Chen et al.¹⁷⁾は、モンゴル中部・ヘンティ県南部の事例を示している。ヘンティ県南部の植生は乾燥ステップ及びステップであり、調査地域のドンドゴビ県と比較すると若干牧草量が良い地域も見られる¹⁶⁾。ただヘンティ県がドンドゴビ県と隣接する県であり、気候条件も大きく変化しないことから Chen et al.¹⁷⁾のデータを利用した。

c) 牧草地劣化状況の評価

牧草地劣化についての定義は存在しないため、本研究では牧草地劣化の程度を、平均牧養力(36.5)からの程度、牧養力が減少したかで評価した。具体的には、平均牧養力から 20%減少(軽度の劣化)、33%減少(中程度の劣化)、50%減少(大幅な劣化)として、合計 900 グリッドの中から劣化したグリッドの数を比較した。

4. 結果・考察

(1) 分析結果

図-5~図-7に牧草地内の900グリッドのうち、劣化したグリッドの数を示す。

図-5に、軽度の劣化(初期の平均牧養力から牧養力が20%減少)したグリッドの数を示す。縦軸に劣化グリッド数を表示し、横軸に井戸の設置数を表示している。井戸設置数が71基(1990年比)の場合と比較すると、34基~43基に減少した場合(2005年比を想定した場合)はそれぞれ牧草地の劣化面積が1.37~2.42%増加した。

図-6には、中程度の劣化(初期の平均牧養力から牧養力が33%減少)したグリッドの数を示す。井戸設置数が71基(1990年比)の場合と比較すると、34基~43基に井戸が減少した場合にはそれぞれ牧草地の劣化面積が1.73~2.66%、増加した。また図-7に大幅な劣化を示した牧草地の数の推移を示す。1990年比と比較して2005年には、劣化面積が1.92~2.74%増加した。

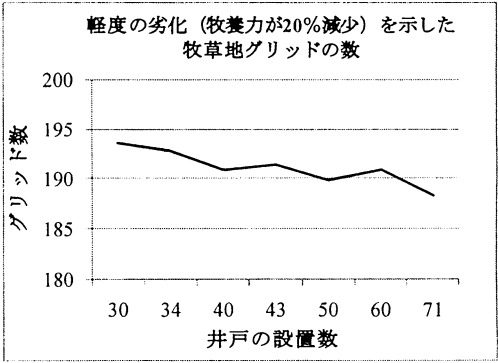


図-5 軽度の劣化を示した牧草地グリッドの数と井戸設置数との関係

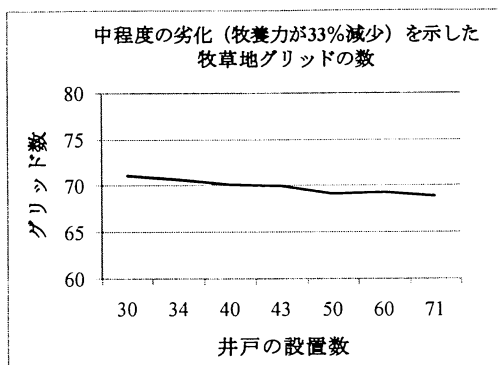


図-6 中程度の劣化を示した牧草地グリッドの数と井戸設置数との関係

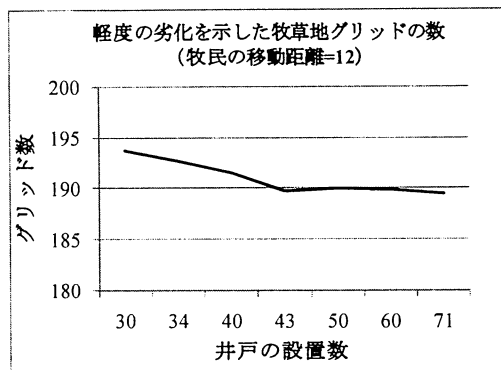


図-8 軽度の劣化を示した牧草地グリッドの数（移動距離を12kmとした場合）

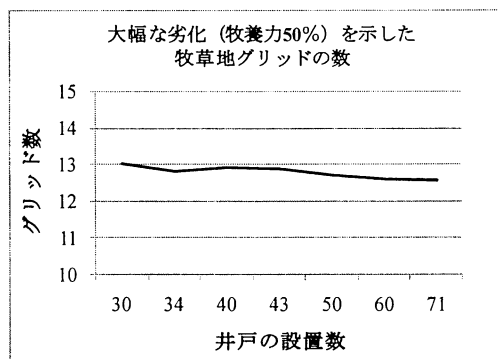


図-7 大幅な劣化を示した牧草地グリッドの数と井戸設置数との関係

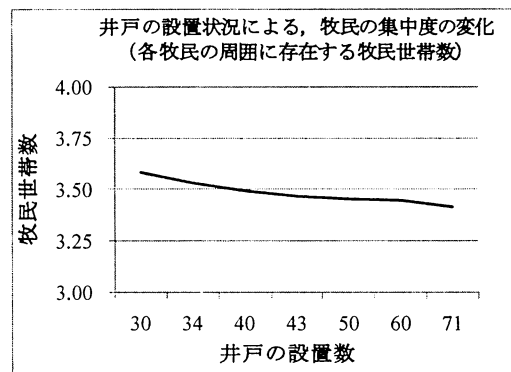


図-9 井戸設置数と牧畜民の集中度との関係

図-5～図-7より、井戸が今後減少を続けたと仮定して、30基になったときの牧草地劣化を検討した。井戸が71基から30基まで減少した場合、軽度の劣化でみると劣化面積は2.84%、中程度の劣化、大幅な劣化と比較すると劣化面積はそれぞれ3.26%、3.63%増加することが示された。これらの結果は、井戸の減少が今後も続いた場合に、牧草地の劣化がより深刻化することを示唆している。

モデルの頑健性を評価するため、牧畜民の移動距離を10kmから12kmに変化させて解析を行った。その結果の一例として、軽度の劣化を示した場合の結果を図-8に示す。図-8では、井戸設置数が71基（1990年比）の場合と比較すると、34～43基の場合はそれぞれ牧草地の劣化面積が0.87～1.55%増加した。同様に、中程度の劣化を示した牧草地面積は0.54～2.07%、大幅に劣化した牧草地面積は2.97%～4.77%増加した。牧畜民の移動距離が妥当な範囲内で変化する限りにおいては、井戸の設置数の減少により牧草地劣化が進行するという結果には、変わらないことを示すことができた。

図-5～図-8より、井戸の設置数が34～43基から71基に増加した場合、軽度の劣化・中程度の劣化をした牧草地グリッドは減少したものの、大幅な劣化を示した牧草地の数にはほとんど変化がみられなかった。この傾向は、移動距離を12キロに変化させた場合も同様であった。大幅に牧草地劣化が進んだ地域においては、井戸を増設しても十分な牧草がないため、牧畜民に利用されないと思われる。よって牧草地が大きく劣化した地域での井戸の増設は、砂漠化対策として効果が低い可能性がある。

図-9には、牧草地内における井戸が減少した場合の、牧畜民の一定地域への集中度を示した（移動距離を10kmとした場合）。牧畜民の集中度とは、各牧畜民の周囲3kmに存在する、自分を除いた牧畜民の世帯数で表わされる指標である。図-9によると、井戸の設置数が増加するほど、一定地域に集中している牧畜民の数が減少することが示された。本分析により、近年の井戸の減少が地域的過放牧を促していることを間接的に示すことができた。

(2) 井戸設置コストの積算と費用負担

牧草地内に井戸を1基設置するためのコストは、62.78

万トゥグリク（約60,500円、2005年平均為替レートで1トゥグリク=10.37円¹¹⁾）である³⁾。そのため、もし1990年比まで井戸の数を増加させると考えると、サイツァガンハーン郡の井戸の設置数は現在の169基（148～189基の平均値）から311基まで増加することになる。そのための142基の井戸設置費用は合計で約89.15万トゥグリク（約860万円）と算出できる。つまり、この費用は牧草地劣化を0.87～3.63%減少させるための費用として考えることができる。サイツァガンハーン郡の牧畜民は978世帯¹¹⁾（2005年現在）であり、井戸設置費用をドンドゴビ県に登録されている牧畜民に負担させると想定した場合、牧畜民1世帯当たりの費用は計算で約91,000トゥグリク（約8,790円）となる。Komatsu et al.³⁾によると牧畜民1世帯の平均年収は1,596.74千トゥグリク（約153,976円）であった。上記の負担金額は年収の約5.6%にも上るため、牧畜民が井戸建設の費用を支払うのは、負担の大きさの面から困難なことが想定される。実際に井戸設置を行う場合は援助機関やモンゴル政府の負担を求めつつ、同時に今後も修復が必要な井戸は増加することが想定されるため、持続的に井戸管理を行う仕組みづくりが必要になってくると思われる。

5. 結論

本研究では、マルチ・エージェントモデルを利用して牧畜民の放牧行動をモデル化した。牧畜民の放牧によって不可欠な井戸の設置状況の違いにより、牧畜民の放牧行動の変化が地域全体の牧草地の状態に影響を与えるのかを考察した。

分析の結果、牧草地内に設置する井戸の数を1990年比から2005年比まで減少させた場合、牧草地劣化面積は0.54～4.77%増加することが確認された。マルチ・エージェントモデルの利用により、井戸の減少により牧草地劣化が発生しているという定性的な関係を導くことが可能になった。そして砂漠化対策を行う場合は、井戸設置費用が高額のために、井戸設置のためにはモンゴル政府などの支援策の必要性が示唆された。本研究の成果を利用することで、情報が限られた場合でも、井戸の配置と牧草地劣化との定性的関係を示すことができた。

本研究によりマルチ・エージェントモデルは、モンゴルの牧畜民の行動分析を行うのに適したモデルであることが示された。井戸と牧草地劣化の問題は空間的な要因を可能な限り考慮することが望ましく、限られた情報の中で空間情報を扱える点でも、マルチ・エージェントモデルは有効であると示した。砂漠化が問題になるのはモンゴルのような発展途上国であり、これらの国では砂漠化状況のモニタリングを定期的実施するのが難しい。

また井戸の設置を行った際に、その効果がどの程度牧草地劣化の緩和という形になって現れてくるのか、継続的にモニタリングを行うことも困難である。マルチ・エージェントモデルは、井戸の設置の与える牧草地劣化緩和の効果をシミュレートできるとともに、途上国で不完全な砂漠化モニタリングデータの結果を補完することが期待できる。

今後残された研究課題を列挙する。第1に、移動回数の設定である。本研究では便宜的に調査データから得られた最大移動回数を、モデル内での移動回数の上限と定めている。しかし理論上の移動回数の上限は、牧畜民の世帯状況や家畜数等のデータから定める方が望ましい。第2に、牧畜民間の交渉や意思疎通は想定していない。しかし現実には近隣の牧畜民同士で牧草地や井戸の設置状況を伝達しあっており、コミュニケーションの情報の有無が放牧行動に影響を与えている可能性がある。したがって、情報の有無に焦点を当てた研究が推奨される。また本研究では牧草地の劣化程度を牧草の減少量として示したが、これらの値が定量的に妥当なものかどうかは慎重に検討する必要がある。特に井戸の設置数と牧草地劣化との関係において、牧草地劣化を防ぐために最低限必要となる井戸設置数（井戸設置数の閾値）といった指標を得ることが望ましい。牧草地の劣化の程度について述べた資料は、1990年から2000年の乾燥地面積の増減で記したJigmed¹⁰⁾があるが、この研究は牧草の減少量から厳密な形で牧草地劣化を示したものではない。定量的に家畜の密度と牧草地劣化の程度を、時系列で示した研究は筆者らの知る限りないことから、本研究で得られた牧草の減少量は絶対量としてとらえるのではなく、定性的な傾向としてみるのが適当である。以上の課題は、今後の研究に譲ることとする。

謝辞：本稿作成に当たって、モンゴル国立農業大学のBaasansuren Sandui 講師、Undamaa Jamusran 教授には調査に関して多大な協力をいただいた。また神戸大学研究員の大床太郎氏からは大変有益なコメントをいただいた。本研究は株式会社構造計画研究所より、artisc 1.0 の教育目的による無償貸与を受けた。本稿は広島大学 21 世紀 COE プログラム「社会的環境管理能力の形成と国際協力拠点」（広島大学大学院国際協力研究科、拠点リーダー：中越信和）、環境省「地球環境研究総合推進費」における研究課題「北東アジアにおける砂漠化アセスメント及び早期警戒体制（EWS）構築のためのパイロットスタディ(HI6～HI8）」（研究代表者：武内和彦）、旭硝子財団「研究奨励」における「マルチエージェントモデルを用いた牧民行動モデルの形成と砂漠化対策の評価—モンゴルでの持続的な牧民社会の構築に向けて」（研究代表者：金子慎治）の研究成果の一部である。モンゴルでの面接調査に快く回答いただいた方を含め、ここに記して謝意を表したい。

参考文献

- 1) Pacific Consultants International and Mitsui Mineral Development Engineering.: *Mongolia: The Study for Improvement Plan of Livestock Farming System in Rural Area, Final Report*. Tokyo, Japan, 2006a.
- 2) Pacific Consultants International and Mitsui Mineral Development Engineering.: *Mongolia: The Study for Improvement Plan of Livestock Farming System in Rural Area, Final Report, GPS manual*. Tokyo, Japan, 2006b.
- 3) Komatsu, S., Matsuoka, S. and Tanaka, K.: Estimating Benefits for Pastureland Conservation through Water Supply Improvements; Cases of Contingent Valuation Studies in Desertified Area of Mongolia, *Environmental System Research*, Vol.35, pp.191-198, 2007.
- 4) 国際協力事業団:モンゴル国ゾド対策に向けた地方牧畜業体制改善事前調査報告書, 国際協力事業団, 2003.
- 5) Fernandez-Gimenez, M. E., & Allen-Diaz, B.: Vegetation Change along Gradients from Water Sources in Three Grazed Mongolian Ecosystems, *Plant Ecology*, Vol. 157, No. 1, pp.101-118, 2001.
- 6) Schelling, T. C.: Models of Segregation, *The American Economic Review*, Vol. 59, No. 2, pp. 488-493, 1969.
- 7) Janssen, M. A. ed.: *Complexity and Ecosystem Management: The Theory and Practice of Multi-Agent Systems*, Edward Elgar, Cheltenham, U.K., 2002.
- 8) Deadman, P. J., Robinson, D. T., Moran, E., and Brondizio, E.: Colonist Household Decisionmaking and Land-use Change in the Amazon Rainforest: an Agent-based Simulation, *Environment and Planning B*, Vol. 31, Issue5, pp. 693-709, 2004.
- 9) Rouchier, J., Bousquet, F., Requier-Desjardins, M. and Antona, M.: A Multi-agent Model for Describing Transhumance in North Cameroon: Comparison of Different Rationality to Develop a Routine, *Journal of Economic Dynamics & Control*, Vol. 25, Issue3-4, pp. 527-559, 2001.
- 10) Iwasaki, H.: Impact of Interannual Variability of Meteorological Parameters on, Vegetation Activity over Mongolia, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 84, No. 4, pp. 745-762, 2006
- 11) NSO (National Statistical Office of Mongolia).: *Mongolian Statistical Yearbook 2005*, Ulaanbaatar, Mongolia, 2006.
- 12) Saintsagaan Town Office.: *Statistics of Saintsagaan Town* (Received information from town databases on October, 2006), 2006.
- 13) Sheehy, D. P.: Sustainable Livestock Use of Pastoral Resources, Bruun O. & Odgaard O. eds.: *Mongolia in Transition*, Curzon Press Ltd., Surrey, U.K., 1996.
- 14) 株式会社構造計画研究所: artisoc academic 1.0, 株式会社構造計画研究所, 2007.
- 15) Fernandez-Gimenez, M. E. and Batbuyan, B.: Law and Disorder: Local Implementation of a Mongolia's Land Law, *Development and Changes*, Vol. 35, Issue1, pp. 141-165, 2004.
- 16) Administration of Land Affairs, Geodesy and Cartography, Mongolia: *Geographic Atlas of Mongolia*, Ulaanbaatar, Mongolia, 2004.
- 17) Chen, Y., Lee, G., Lee, P., and Oikawa, T.: Model Analysis of Grazing Effect on Above-ground Biomass and Above-ground net primary production of a Mongolian grassland ecosystem, *Journal of Hydrology*, Vol. 333, Issue1, pp. 155-164, 2007.
- 18) Jigmed, G.: The Current Situation of Grassland Resources in Mongolia, *Bulletin of the Faculty of Agriculture Niigata University*, Vol. 58, No. 2, pp. 133-136, 2006.

ASSESSING THE HERDING BEHAVIOR THROUGH MULTI-AGENT MODEL AND ITS IMPACT ASSESSMENT OF PASTURELAND DEGRADATION IN MONGOLIA

Satoru KOMATSU, Shinji KANEKO

The objective of this study is to assess the herders' grazing behavior and evaluate the effect of the distribution of wells in combating desertification in Mongolia. We applied a multi-agent model to simulate the herders' grazing behavior and assess whether herders' behavior affect the degradation of pastureland. We found that the degraded areas of pastureland increase when the density of wells decreases from 1990 to 2005 level. We also found that the herders' density at the particular pastureland increases as the number of wells decreases. We argued that a multi-agent model can be a promising approach for modeling herders' grazing activity and its impact on desertification.