

令和元年6月17日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H05111

研究課題名(和文)チベット高原における温暖化にともなう有機物分解促進メカニズムの解明

研究課題名(英文)Mechanisms of warming promote organic matter decomposition in the Qinghai Tibetan Plateau

研究代表者

廣田 充(Hirota, Mitsuru)

筑波大学・生命環境系・准教授

研究者番号：90391151

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：地球温暖化の影響が顕著化しやすい高標高域のチベット高原を対象として、温度上昇が土壌有機物分解を促進する機構解明を目的として、高山草原土壌からのCO₂放出速度の把握と土壌有機物の質的評価を行った。土壌からのCO₂放出速度は、標高が高いほど小さくなる一方で、温度上昇に対する応答は標高に関わらず一定で、低地に比べて高いことが明らかになった。土壌有機物の腐植組成分析の結果、当地の土壌有機物が大量に蓄積する要因として、レスによる埋没作用に伴う隔離封鎖と数千年スケールの過去の植物燃焼炭の存在が明らかになった。さらに、激しい温度上下の影響による風化作用が当地の腐植酸生成に関与している可能性を示唆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球温暖化に伴う温度上昇は、炭素循環を含む地球上の物質循環を変えてしまう危険性がある。特にCO₂濃度上昇に直接関わる炭素循環に対する温度上昇の影響は注目されている。本研究は特に地球温暖化の影響が顕著化しやすい高山域にあるチベット高山草原において、自然の標高差を利用した温度差が土壌からのCO₂放出速度や土壌有機物生成機構に及ぼす影響を調べ、温度の低い高標高域の炭素循環および土壌窒素無機化の特徴の理解を深めることに成功した。さらに、標高差を利用した昇温処理実験に着手し、温暖化が高山帯に及ぼす影響予測に利用できる実験環境を整備した。

研究成果の概要(英文)：To understand mechanisms underlying warming promotion of organic matter decomposition in alpine ecosystem, CO₂ emission from soil surface and soil organic matter (SOM) properties were investigated in an alpine grassland at four altitudes from 3600 to 4200 m along a slope on the northwestern Qinghai-Tibetan Plateau. The CO₂ emission rate was lower at the higher altitudes than that of lower altitude sites. Meanwhile, CO₂ efflux sensitivity to temperature expressed as Q₁₀ value, showed no clear trend. As for SOM properties, amounts of combined-form humic acids obtained by HCl pretreatment were remarkably higher than those extracted with Na₄P₂O₇, indicating that the combined form of humic acids is mainly Ca. Therefore, the formation of the organo-mineral complex may contribute to stabilizing SOM in the Qinghai Tibetan Plateau. These unique features of SOM may be attributed to large range of temperature change in such the alpine ecosystems.

研究分野：生態系生態学

キーワード：炭素循環 地球温暖化 有機物分解 土壌有機物 高山生態系 環境変動

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

温度上昇に対する陸域生態系の有機物分解の応答は、今日の炭素循環研究に残された課題の一つである。特に、大量の土壌有機物を蓄積している高緯度地域では(Tarnocai et al. 2009 GBC), 有機物の分解によって放出される CO₂ が地球温暖化を加速させる懸念がある。そのため、特にこれらの地域で温度上昇に対する有機物分解の応答に関して多くの研究が行われている。それらの研究により、土壌有機物やリター等の有機物分解が温度上昇にともなう促進されること(Davidson & Janssens 2006 Nature), 有機物の化学的組成の違いにより温度応答特性が異なることなど(Erhagen et al. 2013 GCB) が明らかにされているが、温度上昇にともなう有機物分解促進のメカニズム解明には至っていない。それは有機物分解における温度上昇の影響は、有機物分解に関わる化学反応の促進という直接的なものに加えて、様々なプロセスを介した間接的なものを含む複雑なものだからである。

研究代表者らは、中国科学院西北高原生物研究所と北京大学と共同で、2002 年からチベット高原において炭素循環に関する研究を展開してきた。これまでの研究で、チベット高原の土壌中に高緯度地域に匹敵するほどの大量の有機物を蓄積していることや現在も CO₂ の吸収源であることなどを明らかにしてきた。さらに、連携研究者を代表とするチベット高原における地球温暖化とその影響に関するプロジェクトにより、チベット高原でも地球温暖化が進行中であり、温暖化によって植物の生育期間が大きく変化している実態が明らかにされてきた。このような背景もあり、チベット高原でも野外温暖化実験が行われているが、それらは植物群集の構造と機能に着目した研究であり、有機物分解に関する研究はあまり行われていない。このような炭素蓄積かつ吸収の場として大切な役割を有するチベット高原において、温度上昇にともなう有機物分解促進の実態とそのメカニズム解明は極めて重要であると考え、本課題を着想するに至った。

2. 研究の目的

本課題の最終目標は、温度上昇時の有機物分解の温度応答パターンを明らかにするとともに、その変化機構を明らかにすることである。具体的にはチベット高原の高山草原において野外温暖化実験を実施し、有機物分解に関わる温度上昇の直接的影響と間接的影響を調べる。そして、温度上昇時の有機物分解の温度応答パターンと各影響の程度を明らかにする。さらに、4 年間の継続調査を通じて、それらの時間変化、馴化の有無とその程度も明らかにする。この野外温暖化実験の結果を確かなものとするために事前準備として、野外温暖化実験を実施するチベット高原の高山草原の標高にともなう土壌有機物、土壌有機物分解による CO₂ 放出速度、および土壌窒素無機化速度の評価を行う。

3. 研究の方法

本研究は、申請者らが既に炭素循環研究を展開しているチベット高原の海北ステーション付近の祁連山脈の山麓に広がる高山草原を対象とする。この高山草原は、標高 4200m から 3200m までの広標高域に広がっており、本研究ではこの標高差を利用して植生 + 表層土壌(以下、ミニ生態系とする)を、元々あった標高よりも低標高に移植することで温暖化させる手法(標高差を利用した移植による昇温実験)を採用する。

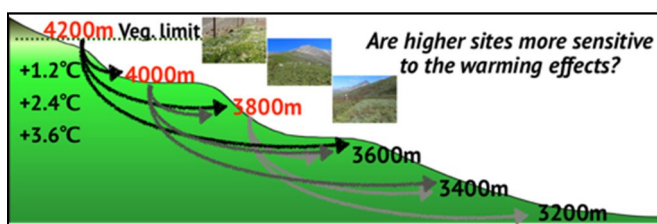


図1. 本研究で実施した青海・チベット高原海北地区の高山草原における移植実験の模式図。標高 4200m, 4000m, 3800m の高山草原に対する 3 段階の昇温効果(+1.2, +2.4, +3.6)を明らかにするために、各標高ごとに 5 つのミニ生態系を移植した。

例えば、標高 4200m に位置する高山草原の一部、ミニ生態系を標高 4000m、標高 3800m、標高 3600m に移植することで、それぞれ 1.2, 2.4, 3.6 の昇温効果を実現させる。この移植による昇温実験を行った区と対照区の両方において有機物分解(分解にともなう CO₂ 放出速度とリター分解速度)の温度応答、土壌窒素無機化速度と温度応答、土壌有機物の質、植物群集バイオマスと種組成、および分解菌類群集の組成を調べる。土壌有機物分解の評価は、チャンバー法を用いて生態系呼吸速度と土壌呼吸速度の測定と平行して、チャンバー内の植物バイオマス量とこれらの速度との関係から、従属栄養生物による土壌有機物分解速度を推定する方法(line-regression 法)を採用する。土壌窒素無機化速度については、イオン交換樹脂を用いた現場法(レジソコア法)を採用し、各区での土壌窒素無機化速度を推定する。土壌有機物の質の評価については、各区の腐植物質の定性評価を行う。植物群集のバイオマスおよび組成に関しては、経年変化を追うためにバイオマスや種組成をポイントフレーム法を用いて間接的に推定する。初年度は、移植実験前にこれらの項目に関する調査を 10 年以上家畜の被食を防いでいる保護区と家畜の被食圧がそのままの状態の対照区で行う。その後、昇温効果のみを明確にするために、家畜の被食圧がほぼ無い保護区において、各標高のミニ生態系の移植実験を行う。2 年目以降は上記の項目に関する調査を継続して行い、有機物分解に対する昇温影響の長期変化を明らかにする。

4. 研究成果

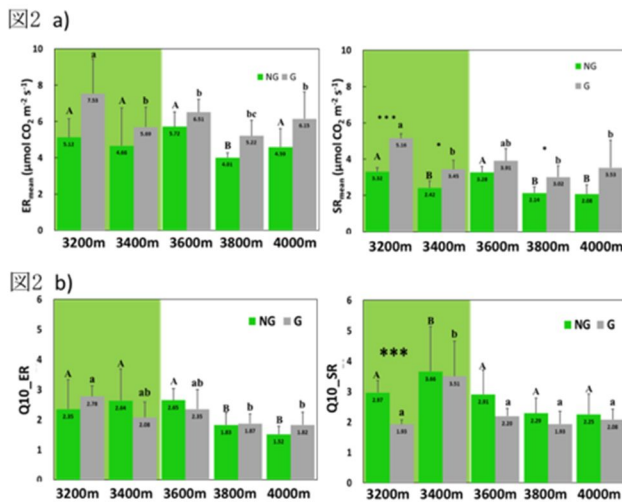
移植実験前の予備調査として、2015年8月に対象としている高山草原（標高3200m～4200m）において、標高200mおきに簡易気象タワーの設置・植生調査および土壌からのCO₂放出速度（生態系呼吸速度および土壌呼吸速度）の観測を行った。土壌有機物を質的に評価するために、各標高の土壌をB層まで採取した。

2015年9月末に当該高山草原において、図1のように標高4200m、4000m、3800mのミニ生態系を標高200m、400m、600mずつ低い位置に運ぶ移植処理を実施した。こうすることで、高標高域の高山草原における温暖化処理が有機物分解に及ぼす影響を明らかにしようとした。と同時に、標高の違いによって、温暖化の効果の現れ方に違いがあるかどうかを検証しようとした。

ところが、2016年春に中国当局から連絡が入り、移植処理実験を行った地域を含む青海省の海北地区への立ち入り許可が下りない事態となった。当初の連絡では、2016年のみ当該地区へ立ち入りが認められないということであった。立ち入り不許可は一時的なもので、2017年以降は許可が下りるという情報を得ていたためにそのタイミングを待っていたものの、結局2018年まで一度も入境許可が下りず、移植処理実験区で研究を行うことは出来なかった。そこで、本最終報告では、移植処理の前に行ったCO₂放出速度に着目した土壌有機物分解速度（生態系呼吸速度と土壌呼吸速度）、土壌窒素無機化速度、土壌有機物中の腐植物質、植物群集に関する結果述べる。

[土壌有機物分解速度]

生態系呼吸速度については、家畜の被食を10年以上停止している保護区では、標高に関わらずほぼ一定であったが、家畜による被食を受けている対照区では標高の上昇と共に緩やかに減少する傾向が見られた。土壌呼吸速度については、保護区と対照区の両区において標高の上昇共に減少することが分かった（図2a）。また生態系呼吸速度および土壌呼吸速度のいずれも保護区に比べて対照区の方が大きくなっており、植物バイオマスの減少にも関わらず、対照区では家畜の被食や糞尿の添加によって、土壌有機物の分解が促進されている可能性が改めて明らかとなった（図2a）。温度に対する応答特性（Q₁₀：温度が10℃上昇した際の変化の程度を表す指標）を見ると、生態系呼吸速度および土壌呼吸速度のいずれでも、高標高域ほど小さくなる傾向が見られた（図2b）。このことは、必ずしも低温環境にあるほど温暖化に対して敏感に反応する訳では

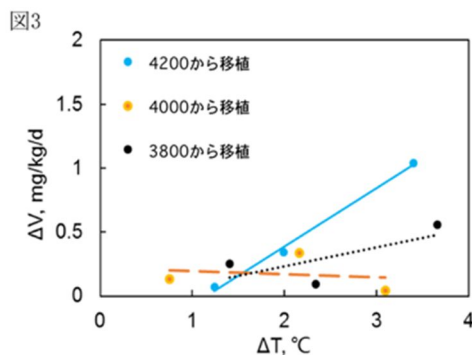


なく、当該地域の高山草原ではどの標高帯でも昇温に対して同程度反応し、有機物分解が促進されることが明らかとなった。

図2. 青海・チベット高原海北地区の高山草原（標高3200m～4000m）における保護区（NG）と対照区（G）の植物生育期間の日中の平均生態系呼吸速度（ER_{mean}）と平均土壌呼吸速度（SR_{mean}）（a）、生態系呼吸速度の温度依存特性（Q₁₀_ER）と土壌呼吸速度の温度依存特性（Q₁₀_SR）（b）。当該地域では、標高3200mから3400mまでが冬の放牧地となっており、3400mから4000mまでが夏の放牧地となっている。

[土壌窒素無機化速度]

保護区で測定した土壌窒素無機化速度（V）に関しても、標高が上昇しより低温になるにつれて指数関数的に低下する傾向がみられた。これは生態系呼吸速度や土壌呼吸速度でも見られた傾向である。土壌窒素無機化速度に関しては、協力研究者の協力を得て移植実験区を利用した温暖化処理区で調査を行っており、移植処理にともなう温暖化が土壌窒素無機化速度にどのような



影響を及ぼすのかについて、標高4200m、4000m、3800mの3ヶ所で調べた。図3にこれら3つの標高から移植したミニ生態系における窒素無機化速度と標高低下による気温上昇との関係を示す。同じ土壌温度の上昇では、4200mからの土壌無機化速度は土壌温度の上昇に最も大きな変化を示した。これは、標高の高い土壌では、無機化速度の温度に帯する敏感性（単位温度変化に伴う無機化速度の変化量）が高いことも示唆される。今後、詳しい観測実験が期待される。

[土壤有機物中の腐植物質]

当該高山草原の標高 4200, 4000, 3800, 3400m の 4 地点に設置してある保護区において土壤試料を採取し、世界土壤資源統合基準 (WRB, 2014) に基づき分類した(図 4)。土壤の一般理化学的分析によって、当地の土壤は弱酸性~中性の土壤 pH 値をもち、かつ、高い交換性陽イオン含量と塩基飽和度を示すカルシウム (Ca) に富む土壤であることが明らかになった。腐植組成分析は

図 4. 世界土壤資源統合基準 (WRB, 2014) に基づく土壤分類



(1) 水酸化ナトリウム (NaOH) とピロリン酸ナトリウム (Na₄P₂O₇) を用いた逐次抽出法 (OH-PP 法) と (2) 塩酸 (HCl) 処理後に NaOH 抽出を用いる Cl-OH 法の両抽出方法の組合せを考案して実施した。いずれの抽出法でも腐植酸、フルボ酸、ヒューミンの 3 画分の中ではヒューミンが卓越していたことから、燃烧炭由来の未風化有機炭素の存在、あるいはミクロ団粒による隔離封鎖による炭素貯留メカニズムが示唆された。また、Cl-OH 法から得られた結合型腐植酸 (HACl - HAOH; ΔHACl) の量は OH-PP 法から得られた結合型腐植酸 (HAPP) のそれよりも著しく多かったことから、結合型腐植酸は概して Ca

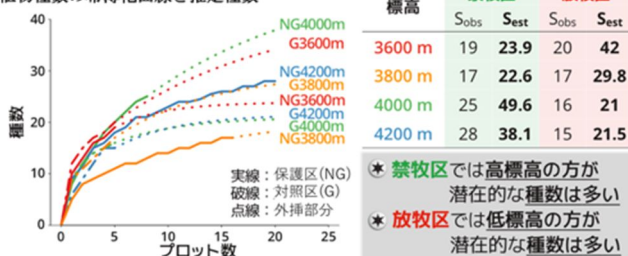
結合型の状態で安定貯留すること、その一方で、OH-PP 法による全抽出腐植酸量 (HAOH + HAPP) 中の結合型腐植酸量 (HAPP) の割合の変化から標高のより低い地点の下層では Fe・Al 結合型腐植酸が卓越し、安定貯留することが示された。さらに、下層土壤から Cl-OH 法で得られた腐植酸 (HACl) および OH-PP 法で得られた Na₄P₂O₇ 抽出腐植酸 (HAPP) の大部分は、燃烧炭由来の可能性が高く、長期炭素貯留機能をもつ日本の黒ボク土腐植表層と同じ、腐植化度の高い A 型腐植酸に分類されることが明らかになった。すなわち、青海チベット高原草地土壤の炭素貯留量が予想以上に高い理由は、レスによる埋没作用にともなう隔離封鎖と数千年レベルに及び、過去の植物燃烧炭の供給に起因することが示唆された。

上記の結果をさらに検証するために、当地の土壤の層位別腐植酸 (HApp) を新たに大量分取し、¹³C NMR 分析に供した。加えて、標高の更に低い内蒙古自治区の草地土壤腐植酸、ならびに、日本の黒ボク土土壤腐植酸の ¹³C NMR 分析データを加えて解析した。その結果、当地の A 型腐植酸は日本の A 型腐植酸と同様に、芳香族炭素が多環芳香族構造で成立するという共通点をもつ一方で、芳香族炭素とカルボキシ基炭素の含量が共に相対的に低いという特徴を示し、日本の A 型腐植酸と明らかに異なる特性を示すことが判明した。この結果から、同じ植物燃烧炭を起源とする A 型腐植酸でも青海チベット高原と日本の黒ボク土では腐植酸の生成メカニズムが異なり、日本のような温暖・湿潤な地域では化学的風化作用の寄与が強く、微粒炭が不溶性から可溶性に変化して A 型腐植酸が形成されるが、日較差・年較差の激しい青海チベット高原では温熱変化による物理的風化作用の寄与が大きく、微粒炭の細粒化が先行して不溶性有機物画分であるヒューミンへの分配が卓越し、化学的風化の影響が少ない当地特有の A 型 HA が生成したという仮説が提唱された。以上の結果は、青海チベット高原の草地土壤における炭素貯留メカニズムを説明する初めての知見であるとともに、当該地域の土壤有機物の安定性を理解する上で極めて重要な知見である。

[植物群集]

各標高の保護区 (NG) と対照区 (G) において、ポイントフレーム法を用いて各調査地点上の群集の最上部にある種のみを非破壊的に調査した結果をまとめたものが図 5 である。実際のプロット数を考慮して種数を比較するために、出現種数とプロット数の希薄化曲線を作成し、各調査地点における全種数の推定を行った。その結果、家畜の被食を長年抑えている保護区では、高標高域ほど潜在的な種数が多く、標高 4000m 地点の潜在推定種数は約 50 種、標高 3600m では約 24 種

図 5. 各標高の保護区 (NG) と対照区 (G) における植物種数の希薄化曲線と推定種数



と 2 倍もの差が見られる結果となった。一方で、通常の放牧区では、低標高域ほど種数が多くなるという逆の結果が得られた。このことは、標高という強力な物理的環境要因と家畜の被食圧という生物的環境要因も当該草原の植物群集組成に影響を与えていることを示唆している。家畜の行動、被食圧も標高の影響を受けている可能性が高いことから、標高が植物群集構造ならびに種多様性

にとって最も重要な制限要因であるといえる。と同時に、放牧地として長年利用されている高山草原の生態系構造や機能を理解するうえで、家畜の放牧圧の影響を考慮することが不可欠であり、温暖化にともなう有機物分解を理解するうえでも家畜の放牧圧の影響も含めた今後の研究が期待される。

[総括]

本研究の目的は、移植実験区を利用した温暖化にともなう有機物分解促進メカニズムの解明で

あった。しかし、移植実験後に不可避の事態が生じてしまい、移植実験を行った実験地にいけない状況が続いた。場所を変えて同様の実験を行うことも検討していたものの、当該地域へ入境可能かどうかは毎年不明瞭だったことに加えて、他の地域での移植実験に要する様々なコストを考えて、それを実施することが出来なかった。この点については、早急に対象地域を変更して別の同様の実験を実施すべきだったと感じている。一方で、既に移植処理を終えていることから、将来もし当該地域への入境許可が下りたら、調査地に入って本来の目的を達成させるための調査を行う予定である。ただ、集中的に行った事前調査によって、標高に伴う生態系呼吸や土壌呼吸の変化、窒素無機化速度に対する昇温効果、土壌腐植物質の組成、そして植物群集に関する多くの新たな知見が得られたことは、本研究の重要な成果と言える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Han B, Kitamura K, Hirota M, Shen H, Tang Y, Suzuki T & Fujitake N (2019) Humus composition and humification degree of humic acids of alpine meadow soils in the northeastern part of the Qinghai-Tibet Plateau, *Soil Science and Plant Nutrition*, 65:1, 11-19, DOI: 10.1080/00380768.2018.1547098

〔学会発表〕(計8件)

1. 韓貝貝・北村今日子・廣田充・沈海花・唐艶鴻・鈴木武志・藤嶽暢英 (2018) 青海チベット高原祁連山脈における高山草地土壌の有機物特性。日本土壌肥料学会 2018 年度神奈川大会, ポスター発表, 藤沢市
2. Mitsuru Hirota (2017) Microclimate and Livestock Grazing Influence CO₂ Fluxes in an Alpine Grassland on the Qinghai Tibetan Plateau, T2-07, The 12th International Congress of Ecology, Beijing, August 21, 2017.
3. Nobuhide Fujitake (2017) Soil Organic Matter Properties in an Alpine Grassland Used As Summer Pasture on the Qinghai Tibetan Plateau T2-07, The 12th International Congress of Ecology, Beijing, August 21, 2017.
4. 廣田充 (2017) 生物群集構造の変化が気候変動に及ぼす影響に関する考察: チベット高山草原における長期炭素循環研究から。日本生態学会第 64 回全国大会、ESJ64 シンポジウム、東京
5. 廣田充・西村貴皓・万銘海・杜明遠・李英年・唐艶鴻 (2016) 青海チベット高原における長期研究: 夏放牧区における群集レベルの CO₂ フラックス特性。日本生態学会第 63 回全国大会、ポスター発表、仙台
6. 西村貴皓・万銘海・廣田充・下野綾子・白石拓也・李英年・杜明遠・唐艶鴻 (2016) 青海チベット高原における長期研究: 標高に着目した禁牧 9 年後の植生構造の変化。日本生態学会第 63 回全国大会、ポスター発表、仙台
7. 北村今日子・廣田充・韓貝貝・唐艶鴻・賀金生・沈海花・藤嶽暢英 (2016) チベット高原祁連山脈における標高別土壌の有機物特性。日本土壌肥料学会 2016 年度佐賀大会, ポスター発表, 佐賀市
8. Wan Minghai, Mitsuru Hirota (2016) Contrasting grazing impacts on CO₂ effluxes from summer and winter pasture in an alpine grassland along an altitudinal gradient on the Qinghai-Tibetan Plateau, 山岳科学共同学位プログラム第 2 回学術集会, 静岡県浜松市

〔図書〕(計1件)

1. 廣田充 (2018) 世界の屋根、チベット高原の広大な草原に迫る危機。日本生態学会北海道地区会編 小林真・工藤岳責任編集。生物学者、地球を行く～まだ知らない生き物を調べに深海から、宇宙まで、文一総合出版。(分担執筆:P104-P110)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年:
国内外の別:

取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:

権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：廣瀬大
ローマ字氏名：Hirose Dai
所属研究機関名：日本大学
部局名：薬学部
職名：准教授
研究者番号（8桁）：20513922

研究分担者氏名：藤嶽暢英
ローマ字氏名：Fujitake Nobuhide
所属研究機関名：神戸大学
部局名：農学研究科
職名：教授
研究者番号（8桁）：50243332

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：唐艶鴻
ローマ字氏名：Tang Yanhong

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。