

アジア陸域の指標生態系における温暖化影響の長期モニタリング研究

国立研究開発法人国立環境研究所

生物・生態系環境研究センター センター長室 山野 博哉

生物・生態系環境研究センター 環境ストレス機構解明研究室 唐 艶鴻*

※平成28年12月迄

生物・生態系環境研究センター 生物多様性保全計画研究室 小熊 宏之

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農業環境変動研究センター

気候変動対応研究領域 米村 正一郎

気候変動対応研究領域 杜 明遠

国内研究協力機関： 国立研究開発法人森林総合研究所、筑波大学、信州大学

海外研究協力機関： 中国科学院チベット研究所、西北高原生物研究所、成都生物研究所
資源と地理学研究所、中国北京大学、北京師範大学、科学院大学、
モンゴル総合と実験生物学研究所、マレーシア森林研究所

平成25～29年度合計予算額 52,700千円

(うち、平成27年度当初予算額 9,710千円)

〔要旨〕アジア陸域は、多様な気候と生態系を持ち、温暖化の影響も多岐であることが予想される。当該地域の温暖化影響を包括的かつ早急に把握するため、本研究では、温暖化影響が比較的検出されやすい生態系（指標生態系）に注目し、温暖化影響の長期観測を行う。本研究プロジェクトは2013年度から実施し、これまで4カ国5箇所の観測サイトにおいて、観測機器の整備、保守または新しい観測機器の設置を行い、観測を開始した。構築した長期モニタリング・ネットワークは、赤道に近いマレーシア熱帯雨林から北緯47度以北のモンゴルステップ草原まで、海平面に近い低地林からチベット高原の5500mまで、アジア陸域の多様な環境と植生を含む。本研究で得られた成果は以下の通りである。1) 長期モニタリング研究として、外国の観測サイトについて定常的なモニタリングは順調に進んでおり、これらのデータの解析によって長期的な気象環境の変動と生態系構造と機能の変化との関係が解明されつつある。乗鞍岳では、植生調査地の再設置が無事完了し、継続的にデータ収集されており今後の解析が期待される。2) チベット高原（当雄サイト）では、草本植物の展葉期はモンスーン気候との高い関連性があることが示された。3) 熱帯林林床の稚樹は、林内の高CO₂を効率的に利用することで、資源が乏しい暗光環境での成長を補償している事が示唆された。今後は、多様な樹種の応答特性を明らかにし、気候変動が熱帯林の更新に与える影響を明らかにする。4) モンゴル草原では、草原植物種多様性に対する放牧の影響が年々変化していることが明らかになった。植物多様性に及ぼす放牧の影響を明らかにするためには、長期的観測を今後も継続する必要があることが示唆された。5) 衛星画像解析で問題となっていた、積雪ノイズを取り除く手法を開発し、植生フェノロジーに対する高山域での温暖化影響をより詳細に抽出することが可能になった。

[キーワード] 草原生態系、熱帯林、高山帯、温暖化、フェノロジー、二酸化炭素、水収支、植物多様性、長期モニタリング

1. はじめに

アジア陸域は、面積が広く、気候と生態系の多様性も高く、生態系の温暖化影響も時間的空間的変動が極めて大きい。したがって、当該地域の生態系における温暖化影響の全体像を的確かつ早期に把握するために、有効な観測戦略が求められる。中でも、長期間にわたる連続観測は、最も重要である。「地球観測の推進戦略」は、地球全体についての観測ネットワークを確立することを推進しているが、広範囲のアジア陸域生態系における生態系の温暖化影響に絞った観測ネットワーク、特に観測内容と方法を標準化した観測ネットワークは、まだ確立されていない。そこで、本研究の第一目標は、アジア陸域を対象として、温暖化影響を把握するための長期・定点・連続観測の強化と標準化を行い、当該地域における温暖化影響の長期観測ネットワークの基幹を構築することとした。

「平成24年度の我が国における地球観測の実施方針」と「地球観測の推進戦略」では、「発展途上国」「東アジア・東南アジア」そして「高山帯などの気候変動に脆弱な生態系」に関する長期観測が極めて重要であることが明確に示されている。アジアの陸域は、広大な草原・高山帯・熱帯林生態系を有する。これらの生態系は、以下の特徴がある。(1) 温暖化の進行程度が速く、生態系への影響が大きく、その影響検出も容易であるため、温暖化影響の指標生態系として利用できる；(2) そのほとんどは気候変動に脆弱で、発展途上国や地域に多く分布している；(3) これらの生態系の多くは、自然環境が厳しく、日本からは遠隔地が多いため、これまでのデータ蓄積が非常に乏しいか観測が空白である。以上のことから、本研究の第二の目標は、アジア陸域の主な気候区に広く分布している草原、高山帯と熱帯林生態系に絞って、長期観測を行い、当該地域全体の温暖化影響を包括的に把握するためのデータを提供することとした。

さらに、「平成24年度の我が国における地球観測の実施方針」では、「生態系・生物多様性に対する気候変動の影響」に関する長期観測が強調されている。しかし、アジア地域の陸域生態系における温暖化影響に関するこれまでの観測研究は、ほとんどが生態系「機能」の一つである炭素収支に関してのみ展開しており、生態系の温暖化影響を全面的かつ早期に評価するための観測研究は極めて不十分である。そこで、本研究の第三の目標としては、気候変動（生物環境）、植物季節相、多様性と生態系諸機能（炭素循環も含む）について、統合的な観測を行い、季節相と植物種多様性を重視した温暖化影響の評価手法を開発し、温暖化影響の早期かつ包括的な評価を目指した（図1）。

上記の観測や方法開発によって、国際協力組織、全球地球観測システム（GEOSS : Global Earth Observation System of Systems）に対して、長期・連続・定点観測拠点、生態系温暖化影響の評価手法と観測データを提供し、アジア陸域の生態系管理と環境保全、生物多様性の保護、及び気候変動とその影響に関する予測精度の向上に貢献することも本研究の目標である。

アジア陸域の指標生態系における温暖化の長期モニタリング

研究費総額:57,500千円 研究期間:5ヵ年(平成25-29年)



図1 本研究申請時の概念図

2. 研究目的

本研究の主な目的は、多様な気候と生態系を持つアジア陸域において、温暖化影響を強く受け、その影響を敏感に検出できる指標生態系に着目し、生態系の物理環境、構造・機能及び生物多様性に関する長期観測ネットワークの基幹を構築し、とりわけ、データ蓄積が不足または空白のアジア草原・高山帯・熱帯林生態系に関する観測を強化し、生物物理環境にも注目し、植物の季節相と多様性を重視した温暖化影響に関する包括的評価手法を開発する。これらによって、全球地球観測システムなどに対して、生態系の温暖化影響の長期観測方法、観測データを提供し、陸域生態系の温暖化影響の把握と予測を目指し、生態系の持続的な利用、生物多様性保全のための温暖化適応策の策定に貢献する。

3. 研究方法

本研究は、(1) 温暖化指標生態系の長期モニタリング・ネットワークの構築と維持、(2) 指標生態系物理環境の長期観測と気候変化の評価、及び(3) 指標生態系の温暖化応答モニタリングと温暖化早期評価手法の開発から構成される。

上記の三つの部分では、サブテーマ1は(1)と(3)、サブテーマ2(2)を担当した。中国の青海海北、チベット当雄、モンゴルのKBU、日本の乗鞍岳及びマレーシアのパソ計5地点で、

気象環境、生態系の構造と諸機能、フェノロジー、種多様性及び個体数の変化、炭素・水とエネルギーフラックスの観測を行った。これらの現地観測データを中心にし、衛星データも併用して、とりわけ、標高方向と南北方向における植生の生産力や植物種多様性の変化に注目しながら、アジア陸域生態系の温暖化影響を評価した（図1）。

これらの代表サイト及びその他の協力サイトと連携し、アジア温暖化影響の観測ネットワークの確立を目指した。これまで、植物個体群動態、フェノロジー、種多様性及び生態系機能に及ぼす気候変動の影響に関する評価手法を開発しながら、論文をはじめとする共同での成果発表等によって、全球地球観測システム（GEOSS）や生物多様性観測ネットワーク（BON）などに生態系の管理と環境保全、生物多様性保護に資するデータの提供や評価方法を提示した。



図2 東アジア指標生態系温暖化長期モニタリングネットワーク（2015年作図、再掲載）

4. 結果・考察

(1) 温暖化指標生態系の長期モニタリング・ネットワークの構築と維持

指標生態系を持つ4カ国5つのサイトにおいて、共同研究、研究協力体制を構築し、現地の生物気象・生態系観測システムを設置し、アジア陸域における温暖化指標生態系の長期モニタリング・ネットワークを構築し（図2）、下記のモニタリング研究を進めた。

モンゴル・KBU サイトでは、2004年から観測を開始し、2014年までに観測機器の更新作業を行い観測を継続した。また、植生調査地の微気象を把握するため、改めて2015年度の夏から2機の微気象観測を設置し、観測を開始し継続した。一方、モンゴル植物研究所（2015年からモンゴル科学院総合・実験生物学研究所に改名）の協力によって、2013年からKBUでの植生長期調査を開始した。計20のサブサイトで草原植生の基礎調査（1×1mの枠内、すべての植物種の同定、位置、高さなどの測定）を行った。また、KBUサイトと比較するため、モンゴルのメドウ草原と高山メドウ草原でも同じような植生調査を行った。

中国・青海サイトにおいては、2001年から観測を開始し、2016年度に観測機器を整備したうえで継続観測を行った。また、中国・チベットサイトでは、2006年から観測を始め、現地サイトの放牧実験地の保守、草原植物フェノロジーの長期観測機器の設置やデータ回収を行った。また、チベットの当雄サイトでCO₂フラックス観測と生物微気象の観測機器の保守、2015年もさらに一部の観測機器の更新も行った。2017年度に北京大学の協力によって4500mから5500mまでのミニ生態系移植実験も長期観測との比較研究として進めた。

マレーシア・パソサイトにおいては、林床の9個のサブサイトで気温、土壌温度と湿度の継続観測を行った。また、林床植物の生理特性を把握するため、光環境とCO₂環境と林床植物の光合成測定も行った。一方、異なる林床植物種のフェノロジーのカメラも継続した。

日本・乗鞍岳においては、微気象と植生調査地の設置を行って継続的にデータ収集するとともに、カメラによる植生と積雪の連続モニタリングを継続した。

(2) 指標生態系物理環境の長期観測と気候変化の評価

本研究では、4カ国5つの長期モニタリングサイトで、上記ネットワークを構築して生物気象の観測と生態系変化の調査を行っており、本節では気象等の物理環境に関して述べる。

三つの草原サイト、モンゴルのKBU、中国の青海とチベットサイトでは、現在も微気象観測を継続している。中国チベット高原においては、2つのサイト（海北と当雄）を設置し気象観測を行った。海北サイトでは、チベット高原の最北の祁連山脈にある冷龍嶺で、3400mから4400mまで計6つの標高、そして海北試験場の3200mの観測点を含め7つ標高について観測を行った。海北の観測サイトでは、植物分布の上限は約4200mである。当雄サイトはチベット高原中央部にある念青唐古拉山脈にも垂直観測サイトを設けた。植生分布上限は5200mであり、気象観測は4300mから5538mまで計11の標高で行った。過去の観測データを含め、海北サイトでは17年の、当雄サイトでは12年のデータを蓄積することができた。

①モンゴル草原の降水観測と動態

モンゴルの草原地帯においては、降水量と季節や年変動は、草原の炭素循環の時間変動をもたらし、草原生態系の構造と機能に大きな影響を及ぼすと考えられる。本研究では、主に研究協力者によって、KBUで降水の観測を行い、「バックトラジェクトリー」というモデリング手法によ

って、モンゴル草原における降水が何処で蒸発したか(蒸発起源)を明らかにした(Asanuma, 2016)。これらの解析によると、モンゴル草原の降水量の約 30-40%はモンゴル草原で蒸発したものである。これは、同緯度の南に下るに従って、アジアモンスーンの影響を受けて、太平洋あるいはインド洋起源の降水が増えることと対照的である。モンゴル草原の降水量がモンゴル草原からの蒸発量に高く依存することは、草原植物成長や畜産業に及ぼす気候変化の影響評価に当該地域内の水循環の重要性が増えることから、温暖化影響を考慮したこの地域の管理の検討をうながすものである。

②青海、当雄サイトとチベット高原全域の気象変化の関連性

本研究は、環境省と JST などの研究プロジェクトから引き続き、中国の海北と当雄で、草原生態系の微気象観測を継続している。また、炭素収支に関連する水・CO₂とエネルギー・フラックスの観測もこれまで同様継続した。

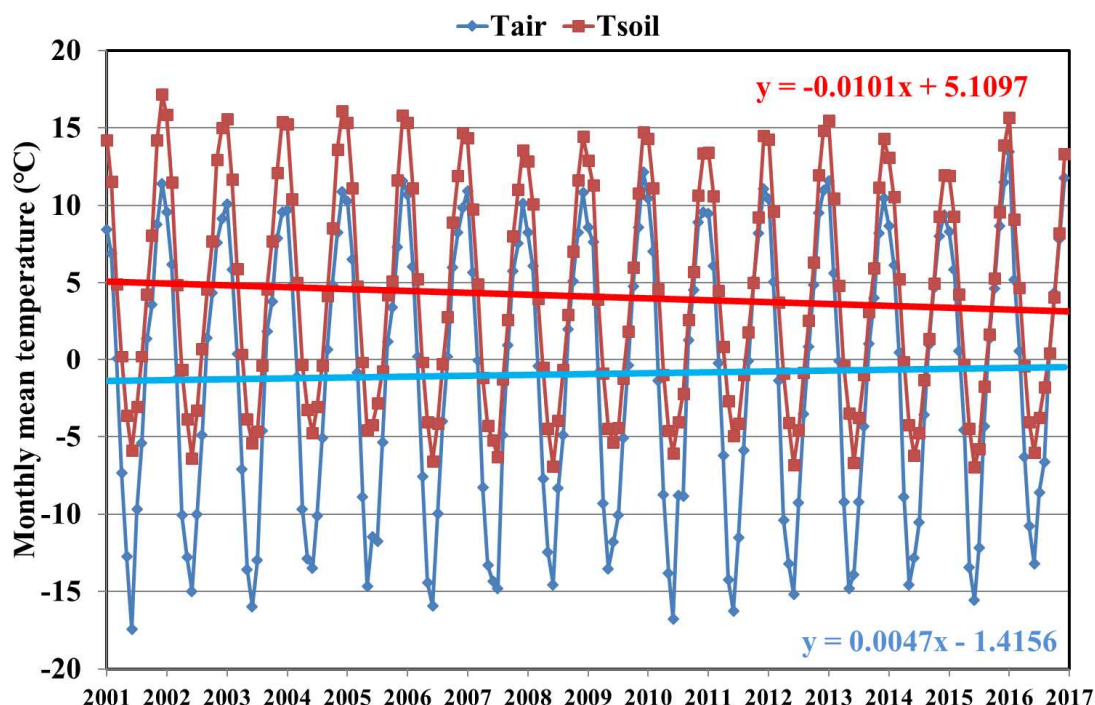


図3 海北サイト月平均気温と地温（5cm）の時間変化（2001-2017）

いままでの観測では、海北サイトの月平均気温と 5cm の地温の時間変化は、年々変動が大きいことや、気温がやや上昇し、地温が少々低下することが見られた（図3）。地温の低下は降雨量の増加と土壌水分の増加によることを考えられる。気温の変化は、チベット高原北部平均値の変化と一致した。また、当雄サイト 2005 年観測以来の変化はチベット高原の南部の平均値と一致し、弱い低下傾向が見られた（図4）。北部での 15 年間の気温では弱い上昇（0.132℃/10 年）が観測されたのに対し、中部（南部）では弱い気温の低下（-0.192℃/10 年）が観測された。同期間青海の全地域は 0.132℃/10 年の上昇とチベットの全地域は -0.33℃/10 年の低下であった。ちなみに、青海の全地域とチベット全域の 63 年のデータはそれぞれ 0.311℃/10 年と 0.235℃/10 年

の温度上昇であった。このことは、生態系の変化を観測するために長期のモニタリングを継続する必要があることを強く示すものである。

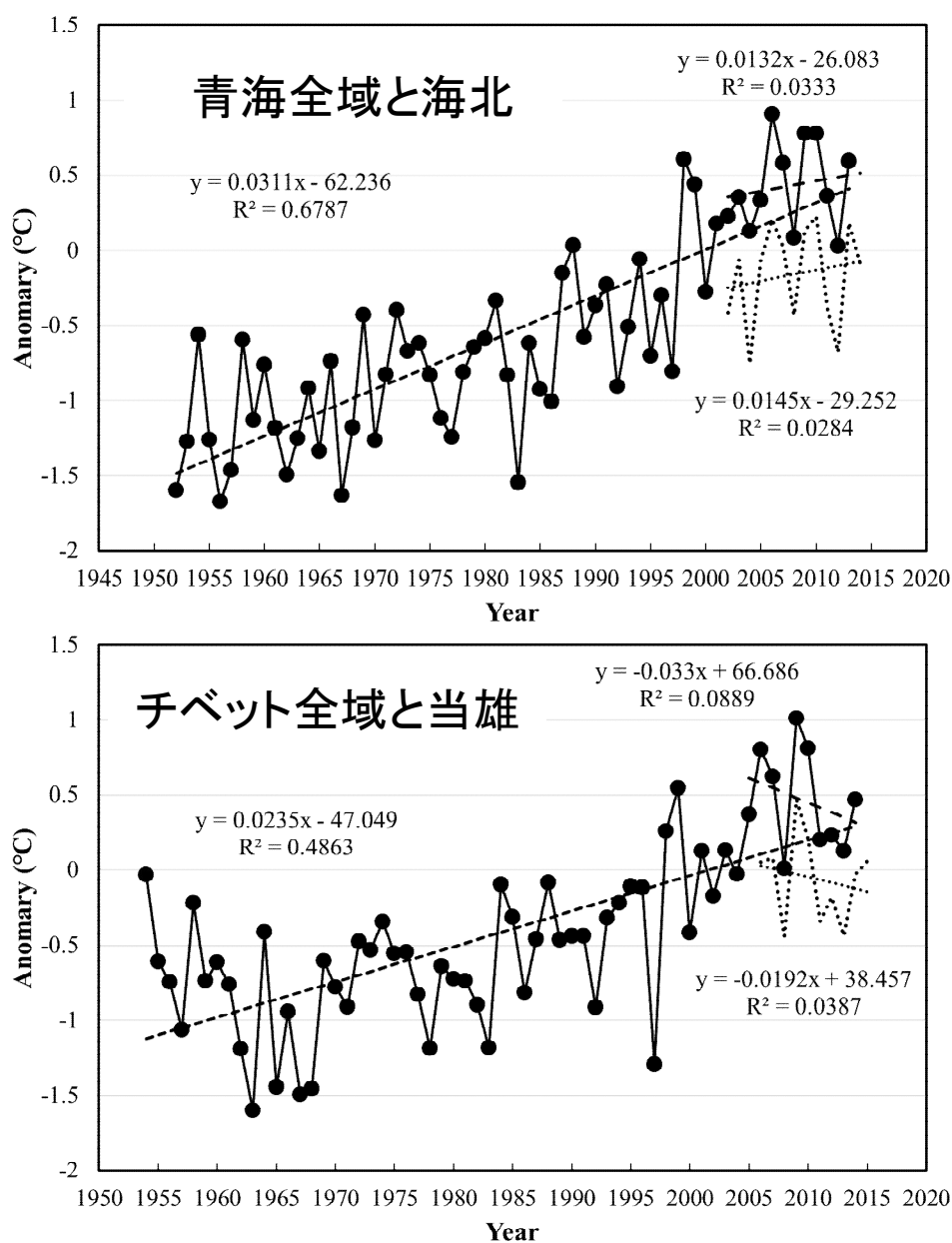


図4 青海省全域と海北サイト（上図）、チベット自治区と当雄サイトにおける1952年から2014年までの年間平均気温偏差値（℃）実線および2002年から2015年まで気温の変化。異なる期間の線形回帰線はそれぞれ変化する速度を示す。

③標高による年平均気温の変化

標高による気温の変化として、海北サイトと当雄サイトにおいて1200mの斜面に標高が異なる数地点での気象観測を行った。両サイトの標高による年平均気温の変化については、標高が高くなると気温の変化は小さくなった（図5）。海北では、谷間の3200m地点では0.053℃/年の気温上昇に対し、山の中腹では0.04℃/年になり、山頂では0.0008℃/年になった。当雄では、谷間の4300mでは気温の変化率は0.013℃/年（2015年までは-0.0192℃/年）であったが、山の中腹からの変化率はマイナスになり（温度低下）、4800m、5100mと5500mではそれぞれ-0.0125、-0.0145と-0.0281℃/年になった。

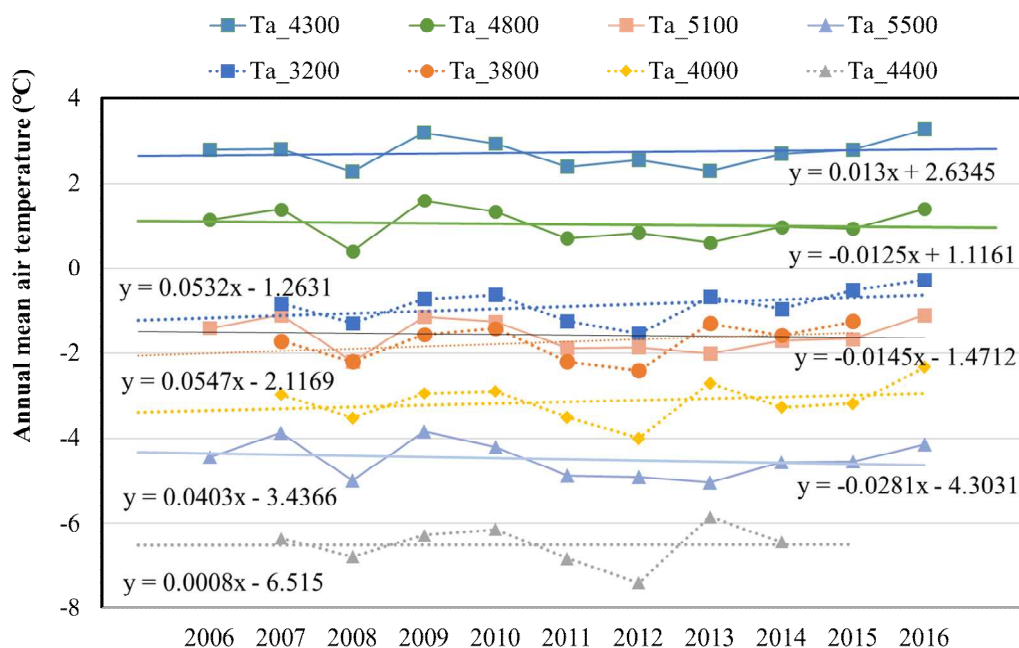


図5 海北と当雄の各高度における年平均気温の変化（2006-2016）

④乗鞍岳の微気象観測

高山生態系としては北アルプス乗鞍で2014年度から気象測定システムを設置し観測を行った。微気象の測定項目は、大気圧、風向・風速、雨量、温湿度（高度50cmおよび150cm）、地温（深度5cmおよび20cm）、土壌水分（深度5cmおよび20cm）、光合成有効放射である。

2014年夏季から2015年秋季までの結果から、各項目について特徴的は変化が見られた（図6）。低気圧の低下に伴い、降水が見られることが多かった。光合成有効放射も年変化を示す結果が見られた。風は西から南西の風が卓越していた。1時間の平均でも 10m s^{-1} 以上の日が多くみられた。温度も通常通り、夏季高く、冬季小さくなる傾向が見られたが、気温に比べて地温の変化は小さかった。

2015年夏季について日変化を求めたものを図8に示す。草地とハイマツでは大きく傾向が異なった。草地では昼間の気温が低かったのに対して、ハイマツ林では高かった。これはハイマツ群落が日射を吸収するために高い高度での気温が高くなったものと考えられる。夜間の気温については大きな差がなかった。地温についてはハイマツ群落の日射の遮蔽効果を受けて、昼間のみな

らず夜間にもハイマツ林の地温が低いことが特徴であった。20cm の地温を比較すると絶対値で 1.5℃程度の差があった。これらの観測は、高山生態系の変化を検討する上での基礎資料となる。

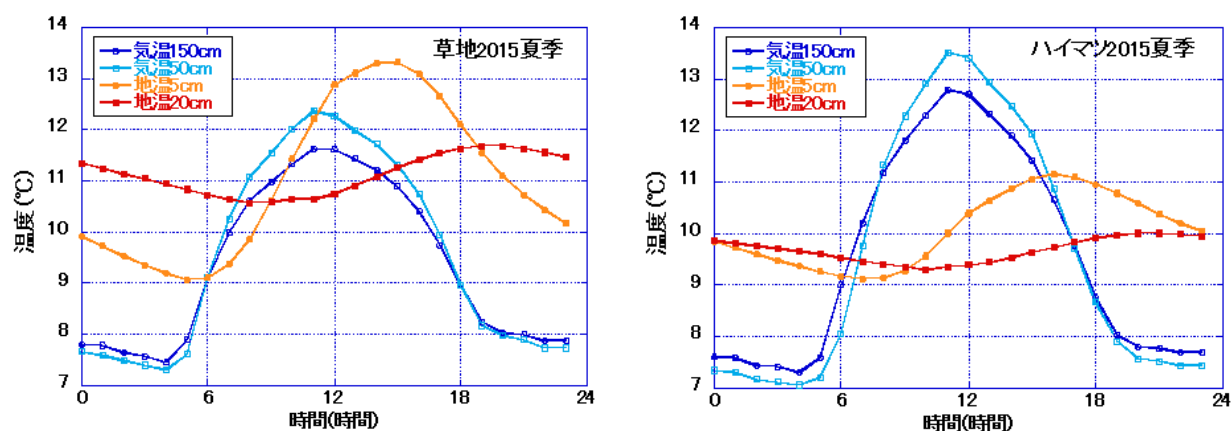


図 6 乗鞍岳の草地（左図）とハイマツ群落（右図）における気温と土壌温度の夏季平均日変化

⑤マレーシア林床環境の長期観測

林床環境は、林床稚樹の成長にとって最も影響の大きな要素である。稚樹生育状況は森林更新の基礎となるので、温暖化の影響評価や気候変動適応策の策定するためにも林床の物理環境を把握しなければならない。本研究プロジェクトは、東南アジアで最も詳しく林床の微環境を長期間で多点観測を行っている。

熱帯林床では、動物の出没が頻繁で高温多湿のこともあり、観測機器の保守にさまざまな困難がある。そのような困難を克服し、プロジェクト全期間を通して、70%の期間でデータを獲得した。一部のデータを解析し、以下のような結果を得た。

ギャップが林床より気温も土壌温度も高く、変動も大きかった（図 7）。地温が特にギャップサイトの方で高い傾向にあった。また、熱帯林内では1月付近の気温が最も低く、5月位に最も高い傾向が示された。観測した4年間、林内の気温は、23.5℃から27.5℃までの変動幅があった。気候変動に伴い、熱帯地域では極端な気象環境が頻繁に発生する傾向が増えている。本研究のような長期観測は、林床植物に最も影響の大きな物理環境の変動幅や頻度を把握できる。

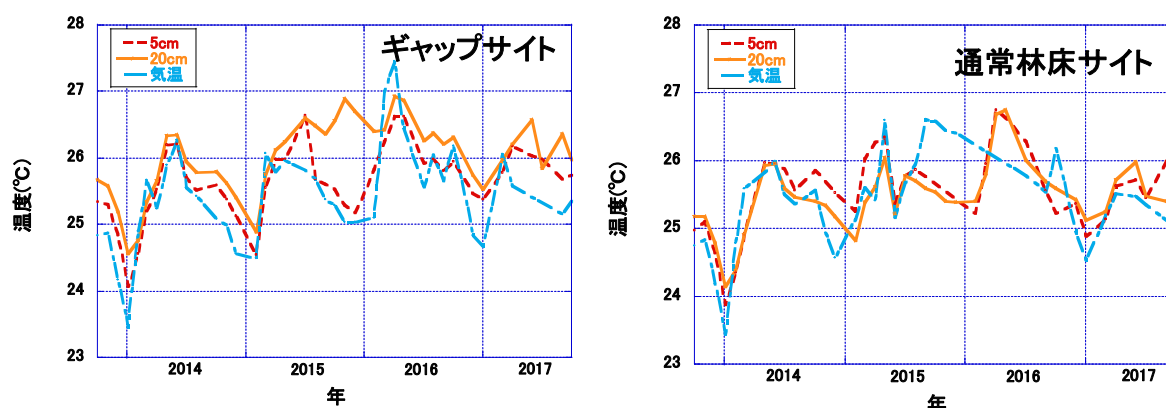
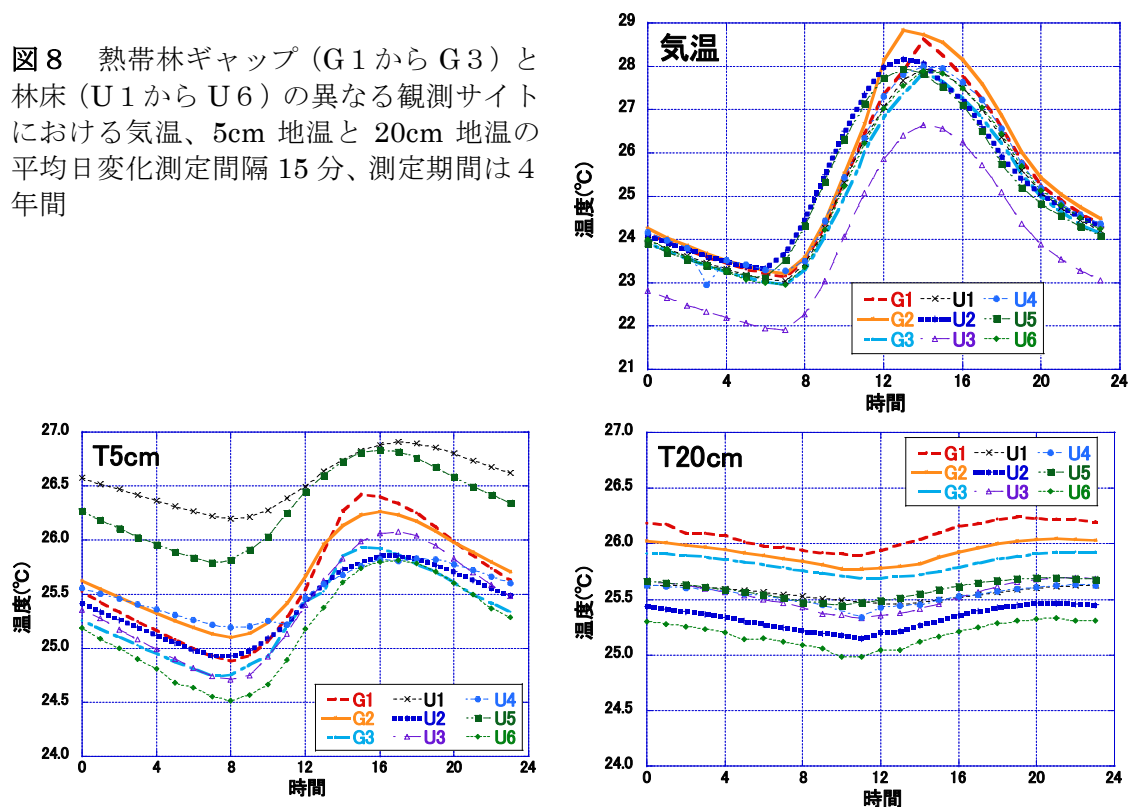


図7 マレーシア熱帯林林内のギャップ（左図）と林床（右図）における気温と土壌温度の月平均値

図8は測定期間中のギャップと林床の平均温度の日変化を示す。測定地点によって平均温度は異なっていたが、地温および気温ともにG1、G2地点での日較差が大きいことが分かった。G3地点では日較差が大きくなかったがギャップ地点の中では最も林冠開度が小さく通常林床に近かったためであると考えられる。温度が最大になる時間は、ギャップ地点で早まる傾向が得られた。これは、日射によりギャップ地点で地上まで日射エネルギーが到達するが、水平輸送を通じて、通常の林床に輸送されるメカニズムが存在するものと考えられる。逆に夜間ではギャップ地点での最低温度が遅くなる傾向が見られた。夜間は放射冷却により温度が低下していくが、夜間冷却が高い林冠開度を通して継続することが考えられる。

図8 熱帯林ギャップ（G1からG3）と林床（U1からU6）の異なる観測サイトにおける気温、5cm 地温と 20cm 地温の平均日変化測定間隔 15 分、測定期間は 4 年間



(3) 指標生態系の温暖化応答モニタリングと温暖化早期評価手法の開発

本節では、各指標生態系における植物種や多様性等の変化について述べる。温暖化指標となる生態系変化の特徴を把握し、指標化することは、まず、代表的な生態系の構造や機能についての長期観測が必要である。同時に、気象環境の変化も把握し、生態系の変化と気象環境の変化の関係を明らかにする必要がある。気象環境と生態系応答の関係は、温暖化予測に必要だけではなく、適応策を含む温暖化対策の推進にも不可欠である。本研究では、各代表サイトの状況に応じて、生態系の構造と機能に関する長期モニタリングを行った。

表 1 特性の異なるモンゴル草原の植生変化の長期観測。調査は 2013 年から 2017 年の 7-8 月に行われた。乾燥草原は、重点的にモニタリングしている KBU サイトである。比較のために、湿地草原と山地草原の植物多様性の変化のモニタリングを行った。

	調査サイト	柵内外	総種数	平均個体数	平均被覆度(%)	平均草丈(cm)
2013	山地草原	柵内	37	2.68	93.41	11.47
		柵外	34	2.69	92.16	9.89
	湿地草原	柵内	18		23.29	16.44
		柵外	19		23.34	4.02
	乾燥草原	柵内	12	2.76	64.29	11.69
		柵外	14	3.19	53.30	8.40
2014	山地草原	柵内	40	3.09	101.80	14.30
		柵外	41	2.43	109.03	12.01
	湿地草原	柵内	18	1.98	14.96	16.00
		柵外	25	2.83	68.16	3.66
	乾燥草原	柵内	14	3.23	69.92	11.64
		柵外	19	3.65	57.84	9.23
2015	山地草原	柵内	38	5.27	88.80	9.41
		柵外	39	4.87	93.07	6.48
	湿地草原	柵内	15	1.96	19.19	13.79
		柵外	23	2.86	42.19	2.82
	乾燥草原	柵内	14	3.17	61.52	8.25
		柵外	19	3.36	53.30	5.97
2016	山地草原	柵内	34	2.92	69.74	9.56
		柵外	36	2.97	71.52	7.50
	湿地草原	柵内	16	1.98	20.18	16.23
		柵外	21	3.24	49.41	3.19
	乾燥草原	柵内	12	3.05	55.47	7.63
		柵外	17	3.80	42.04	5.34
2017	山地草原	柵内	33	2.99	50.11	7.78
		柵外	36	3.85	56.99	5.15
	湿地草原	柵内	19	2.46	56.55	20.08
		柵外	25	3.48	54.93	3.68
	乾燥草原	柵内	13	2.75	63.95	6.44
		柵外	18	2.45	48.24	3.92

①モンゴル草原植物の種多様性とフェノロジーに関する長期調査

モンゴル草原は長い遊牧の歴史があるため、温暖化の影響とともに、放牧の影響を解明する必要がある。KBU サイトでは、放牧圧が強く、草原の退化が激しかった。そこで、2013 年から放牧させないように柵を作って、柵内外の植生に関して、個体群動態や種数の変動などの長期モニタリングを開始した。

KBU の調査は、10 個（100cm x 100cm）のプロットについて、それぞれにさらに 20cm x 20cm の小枠に分割し、その中での種組成、個体数、被覆度と種のフェノロジーなどに関する調査を行った。

KUB に関して、放牧の影響を受けていない柵内においては、放牧の影響を受けている柵外より種数と個体数が多いことが明らかとなった。また、モニタリング結果では、柵内の植物種数と個体数が増加する傾向があった（表 1）。

上記の結果は、放牧の影響を示すものである。一方、5 年間の観測において草原の気象環境は大きな年変動があったため、温暖化の影響の検出できたとは言いがたい状況にある。気候変化と放牧がどのように草原生態系の構造と機能を影響するかを明らかにするためには、今後、長期モニタリングを継続し、新たな観測データを蓄積する必要がある。

表 22-A KBU 乾燥草原における柵内外植物種の変化。調査は 2015 年夏 7-8 月に実施された。数字は同じ種出現した小枠の数を示す。

柵内		柵外	
種名	出現	種名	出現
*	1	<i>Allium bidentatum</i>	133
<i>Allium benuissimum</i>	1	<i>Allium odorum</i>	1
<i>Allium bidentatum</i>	223	<i>Allium prostratum</i>	20
<i>Allium odorum</i>	1	<i>Allium tenuissimum</i>	22
<i>Allium prostratum</i>	4	<i>Artemisia adamsii</i>	79
<i>Allium tenuissimum</i>	23	<i>Artemisia frigida</i>	109
<i>Artemisia adamsii</i>	51	<i>Artemisia macrocephala</i>	27
<i>Artemisia frigida</i>	165	<i>Artemisia pectinata</i>	1
<i>Artemisia pectinata</i>	1	<i>Artemisia scoparia</i>	15
<i>Artemisia scoparia</i>	4	<i>Astragalus adsurgens</i>	1
<i>Astragalus</i>	1	<i>Astragalus galactites</i>	31
<i>Astragalus galactites</i>	50	<i>Astragalus scaberrimus</i>	1
<i>Astragalus scaberrimus</i>	11	<i>Bupleurum bicaule</i>	13
<i>Astragalus. sp</i>	1	<i>Carex duriuscula</i>	2
<i>Bupleurum bicaule</i>	53	<i>Chamaerhodos erecta</i>	5
<i>Carex duriuscula</i>	2	<i>Chenopodium acuminatum</i>	66
<i>Chamaerhodos erecta</i>	6	<i>Chenopodium aristatum</i>	177
<i>Chen. aristatum</i>	1	<i>Chenopodium aristatum</i>	1
<i>Chenopodium acuminatum</i>	60	<i>Cleistogenes squarrosa</i>	5
<i>Chenopodium album</i>	2	<i>Dracocephalum foetidum</i>	6
<i>Chenopodium aristatum</i>	189	<i>Eragrostis minor</i>	142
<i>Cleistogenes squarrosa</i>	16	<i>Haplophyllum dauricum</i>	20
<i>Cymbaria daurica</i>	5	<i>Heteropappus hispidus</i>	19
<i>Dracocephalum foetidum</i>	2	<i>Kochia prostrata</i>	51
<i>Eragrostis</i>	1	<i>Linaria buriatica</i>	2
<i>Eragrostis minor</i>	80	<i>lychnis daurica</i>	1
<i>Haplophyllum dauricum</i>	79	<i>Potentilla acaulis</i>	4
<i>Iris bungei</i>	2	<i>Potentilla bifurca</i>	21
<i>Kochia</i>	1	<i>Potentilla strigosa</i>	11
<i>Kochia prostrata</i>	152	<i>Potentilla strigosa</i>	1
<i>Linaria buriatica</i>	11	<i>Salsola collina</i>	7
<i>Potentilla bifurca</i>	8	<i>Scorzonera radiata</i>	13
<i>Potentilla strigosa</i>	10	<i>Serratula centauroides</i>	2
<i>Salsola collina</i>	3	<i>Stellera dichotoma</i>	2
<i>Scorzonera radiata</i>	5	<i>Stipa Krylovii</i>	8
<i>Stellaria dichotoma</i>	1		
<i>Stipa Krylovii</i>	4		

表 2-B 湿地草原における柵内外植物種の変化。調査は 2015 年夏 7-8 月に実施された。数字は同じ種出現した小枠の数を示す。

柵内		柵外	
種名	出現	種名	出現
<i>Agropyron cristatum</i>	1	<i>Adenophora tricuspidata</i>	1
<i>Agrostis trinii</i>	15	<i>Allium bidentatum</i>	1
<i>Allium</i>	1	<i>Artemisia leucophylla</i>	1
<i>Artemisia laciniata</i>	6	<i>Artemisia medoxima</i>	2
<i>Artemisia medoxima</i>	1	<i>Carex coriophora</i>	25
<i>Artemisia. sp</i>	1	<i>Carex duriuscula</i>	58
<i>Carex duriuscula</i>	25	<i>Carex pediformis</i>	42
<i>Carex pediformis</i>	42	<i>Crepis bungei</i>	14
<i>Equisetum arvense</i>	7	<i>Equisetum arvense</i>	8
<i>Festuca ovina</i>	73	<i>Festuca ovina</i>	31
<i>Gentiana aquata</i>	1	<i>Galium verum</i>	3
<i>Gentiana barbata</i>	1	<i>Gentiana acuta</i>	4
<i>Geranium pratense</i>	5	<i>Geranium pratense</i>	5
<i>Glaux maritima</i>	20	<i>Glaux maritima</i>	3
<i>Halenia corniculata</i>	16	<i>Grepis bungei</i>	1
<i>Hordeum brevisubulatum</i>	37	<i>Halenia corniculata</i>	32
<i>juncus salsuginosus</i>	18	<i>Hordeum brevisubulatum</i>	2
<i>Koeleria macrantha</i>	16	<i>Juncus salsuginosus</i>	19
<i>Leymus chinensis</i>	47	<i>Koeleria macrantha</i>	14
<i>Myosotis alpestris</i>	15	<i>Leymus chinensis</i>	35
<i>Myosotis suaveolens</i>	2	<i>Parnassia palustris</i>	36
<i>Parnassia palustris</i>	2	<i>Pedicularis flava</i>	1
<i>plantago minor</i>	1	<i>Plantago depressa</i>	22
<i>Plantago depressa</i>	1	<i>Plantago minor</i>	7
<i>plantago minor</i>	10	<i>Poa pratense</i>	2
<i>Poa pratense</i>	3	<i>Polygonum alopecuroides</i>	3
<i>Polygonum alopecuroides</i>	2	<i>Potentilla anserina</i>	73
<i>Polygonum divericatum</i>	1	<i>Potentilla multifida</i>	7
<i>Potentilla anserina</i>	63	<i>Ranunculus japonicus</i>	38
<i>Ranunculus japonicus</i>	11	<i>Ranunculus pedatifidus</i>	24
<i>Ranunculus pedatifidus</i>	2	<i>Sanguisorba officinalis</i>	28
<i>Sanguisorba officinalis</i>	59	<i>Taraxacum ceratophorum</i>	24
<i>Taraxacum ceratophorum</i>	2	<i>Taraxacum galauanthum</i>	20
<i>Taraxacum galauanthum</i>	18	<i>Taraxacum officinalis</i>	1
<i>Taraxacum serataforum</i>	1	<i>Thalictrum minus</i>	4
<i>Thalictrum minus</i>	2	<i>Trifolium lupinaster</i>	18
<i>Trifolium lupinaster</i>	4	<i>Vicia cracca</i>	22
<i>Vicia cracca</i>	2		
*	8		

表 2-C 山地草原における柵内外植物種の変化。調査は 2015 年夏 7-8 月に実施された。数字は同じ種出現した小枠の数を示す。

柵内		柵外	
種名	出現	種名	出現
<i>Adenophora stenanthina</i>	5	<i>Adenophora stenanthina</i>	1
<i>Agropyron cristatum</i>	19	<i>Agropyron cristatum</i>	6
<i>Allium bidentatum</i>	20	<i>Allium bidentatum</i>	24
<i>Amblynotus rupestris</i>	3	<i>Amblynotus rupestris</i>	20
<i>Androsace incana</i>	30	<i>Arenaria capillaris</i>	7
<i>Arenaria capillaris</i>	2	<i>Artemisia commutata</i>	14
<i>Artemisia commutata</i>	20	<i>Artemisia lacianata</i>	8
<i>Artemisia lacianata</i>	3	<i>Artemisia monostachya</i>	4
<i>Artemisia monostachya</i>	8	<i>Aster alpinus</i>	49
<i>Aster alpinus</i>	40	<i>Astragalus adsurgens</i>	5
<i>Astragalus adsurgens</i>	16	<i>Astragalus membranaceus</i>	3
<i>Astragalus. sp</i>	9	<i>Bupleurum scorzoneraefolia</i>	3
<i>Bromus inermis</i>	9	<i>Bupleurum scorzoneraefolium</i>	11
<i>Bupleurum bicaule</i>	2	<i>Carex duriuscula</i>	31
<i>Bupleurum scorzoneraefolia</i>	9	<i>Carex pediformis</i>	52
<i>Bupleurum scorzoneraefolium</i>	4	<i>Cleistogenes squarrosa</i>	2
<i>Carex duriuscula</i>	23	<i>Cymbaria daurica</i>	47
<i>Carex korjinskii</i>	1	<i>Dianthus versicolor</i>	4
<i>Carex pediformis</i>	56	<i>Echinops latifolius</i>	3
<i>Carum buriaticum</i>	2	<i>Festuca lenensis</i>	58
<i>Cleistogenes squarrosa</i>	2	<i>Filifolium sibiricum</i>	15
<i>Cymbaria daurica</i>	21	<i>Galium verum</i>	13
<i>Delphinium. sp</i>	2	<i>Gentiana barbata</i>	1
<i>Dendranthemum zawadskii</i>	6	<i>Gentiana pseudoaquatica</i>	2
<i>Dianthus versicolor</i>	7	<i>Gentiana pseudosibiricum</i>	2
<i>Echinops latifolius</i>	5	<i>Gypsophylla daurica</i>	1
<i>Festuca lenensis</i>	47	<i>Gypsophylla daurica</i>	1
<i>Filifolium sibiricum</i>	22	<i>Halenia corniculata</i>	1
<i>Galium verum</i>	7	<i>Helictotrichon Schellianum</i>	11
<i>Geniana pseudoaquatica</i>	1	<i>Heteropappus hispidus</i>	28
<i>Gentiana barbata</i>	7	<i>Iris tygrida</i>	3
<i>Gentiana dahuricus</i>	1	<i>Koeleria macrantha</i>	44
<i>Gentiana. sp</i>	1	<i>Leontopodium ochroleucum</i>	33
<i>Gypsophylla daurica</i>	1	<i>Leuzea uniflora</i>	5
<i>Helictotrichon Schellianum</i>	8	<i>Linaria buriatica</i>	12
<i>Heteropappus hispidus</i>	2	<i>Linum sibiricum</i>	4
<i>Iris tygrida</i>	1	<i>Orostachys malacophylla</i>	2
<i>Koeleria macrantha</i>	33	<i>Oxytropis myrophylla</i>	8
<i>Leontopodium ochroleucum</i>	27	<i>Oxytropis salina</i>	1
<i>Leuzea uniflora</i>	3	<i>Oxytropis. sp</i>	2
<i>Linaria buriatica</i>	19	<i>Poa attenuata</i>	27
<i>Oxytropis salina</i>	1	<i>Polygonum angustifolium</i>	4
<i>Oxytropis sp</i>	1	<i>Potentilla acaulis</i>	69
<i>Oxytropis. sp</i>	2	<i>Potentilla fruticosa</i>	10
<i>Poa attenuata</i>	14	<i>Potentilla tanacetifolia</i>	6
<i>Polygonum angustifolium</i>	1	<i>Ptilotrichum dahuricum</i>	1
<i>Potentilla acaulis</i>	38	<i>Ptilotrichum dahuricum</i>	13
<i>Potentilla fruticosa</i>	23	<i>Ptilotrichum dahuricus</i>	3
<i>Potentilla sericea</i>	2	<i>Ptilotrichum dauricum</i>	1
<i>Potentilla tanacetifolia</i>	13	<i>Rumex acetosella</i>	11
<i>Ptilotrichum dahuricum</i>	5	<i>Sanguisorba officinalis</i>	11
<i>Ptilotrichum dahuricus</i>	5	<i>Scabiosa comosa</i>	4
<i>Rumex acetosella</i>	3	<i>Serratula centauroides</i>	8
<i>Sanguisorba officinalis</i>	6	<i>Serratula centauroides</i>	5
<i>Sanguisorba officinalis</i>	6	<i>Silene jensisensis</i>	11
<i>Scabiosa comosa</i>	17	<i>Stellera chamaejasme</i>	1
<i>Serratula centauroides</i>	1	<i>Stellera chamaejasme</i>	24
<i>Sibbaldianthe adpressa</i>	1	<i>Stipa baicalensis</i>	60
<i>Silene jensisensis</i>	6	<i>Thalictrum simplex</i>	29
<i>Stellera chamaejasme</i>	16		
<i>Stipa baicalensis</i>	47		
<i>Thalictrum simplex</i>	40		
<i>Thymus dahuricus</i>	12		
<i>thymus gobicus</i>	3		
<i>Veronica incana</i>	9		

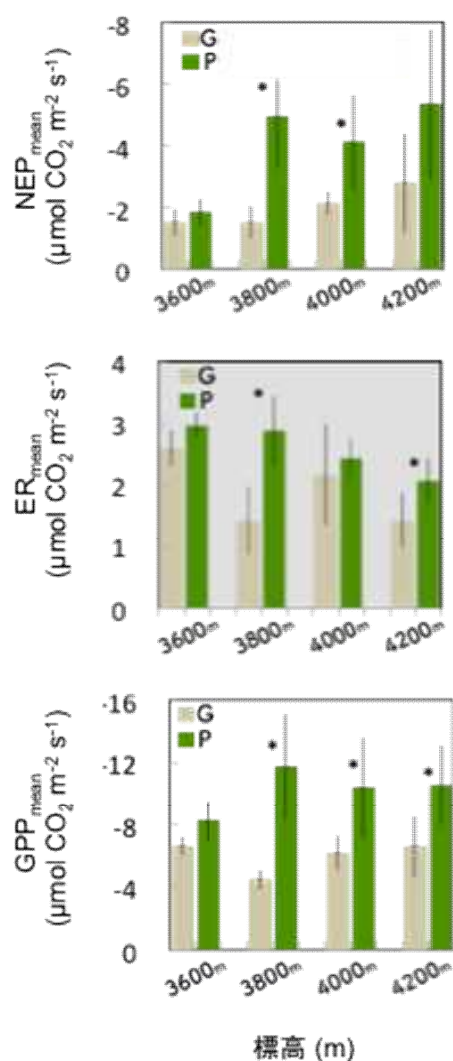
② 中国青海草原における温暖化影響の長期観測

青海草原は、炭素の吸収源になっている可能性が高く、植物種の多様性も高い。2001 年から温暖化影響の研究を始めて以来、さまざまな研究成果を出してきた。これらの結果は、東アジア草原生態系の温暖化影響に関して多くの知見を蓄積できた。

青海草原は、ほかの東アジア草原と同様に、過放牧による草原の荒廃や植物多様性の低下が観察される。そこで、本研究では、温暖化に加え、放牧の影響も明らかにすることを目的にした。家畜の侵入できない禁牧区を設置し、その禁牧区および隣接する対照区をモニタリングすることにより、放牧と気候変化の影響を評価した。

当該研究は、筑波大学の協力により、2006 年に夏期放牧地として利用されている中国青海省の海北草原の山岳斜面に広がる高山草原を対象に標高 3600m、3800m、4000m、4200m の位置に禁牧区 (20m x 5m) を設置した。そして各禁牧区と対照区にて、2015 年 8 月に植生調査を行った。植生調査は円形の枠を用いたポイントフレーム法で行い、群落最上層の植物種と被度、草丈を記録した。

図 9 中国海北サイトにおける異なる標高で放牧と放牧しない草原に関する長期モニタリング：通常の放牧 (Grazing) と柵を作って放牧しない (Protected) 場所に、炭素収支 (GPP：生態系の総生産、ER：生態系呼吸、NEP：生態系の正味生産) の変化を示す。



禁牧1年後の2007年には、3400mから4200mの5つの標高において通常の放牧区と禁牧区でチャンバーを用いて群集レベルのCO₂フラックスを測定した。その結果、放牧区の生育期間全体のCO₂フラックスは、標高によって大きく異なっており、灌木の金露梅(*Dasiphora fruticosa*)が優占する標高3400m付近では、生態系純生産が約23 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}$ と非常に大きく、炭素吸収源になっているものの、それより高い標高域では5から10 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}$ 程度の小さいCO₂吸収源か、あるいは数 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}$ のCO₂放出源になっている場所もあった(図9)。一方、禁牧1年後の禁牧区では、いずれの標高でもCO₂吸収源となっており、被食を停止すると植物バイオマスが大きくなり、その結果CO₂吸収量も増加することが明らかとなった。高標高域では、高山特有の厳しい風、強光、著しい低温のために、植物バイオマスは比較的小さくなり、総CO₂吸収速度(Gross Primary Production, GPP)も小さくなる傾向が見られる一方で、生態系呼吸速度も低温のために小さくなる傾向が見られた。その結果、GPPとERの差し引きで示されるNEPは、禁牧区であっても植物バイオマスが大きい低標高域よりも高標高域でも大きくなることが明らかとなった。

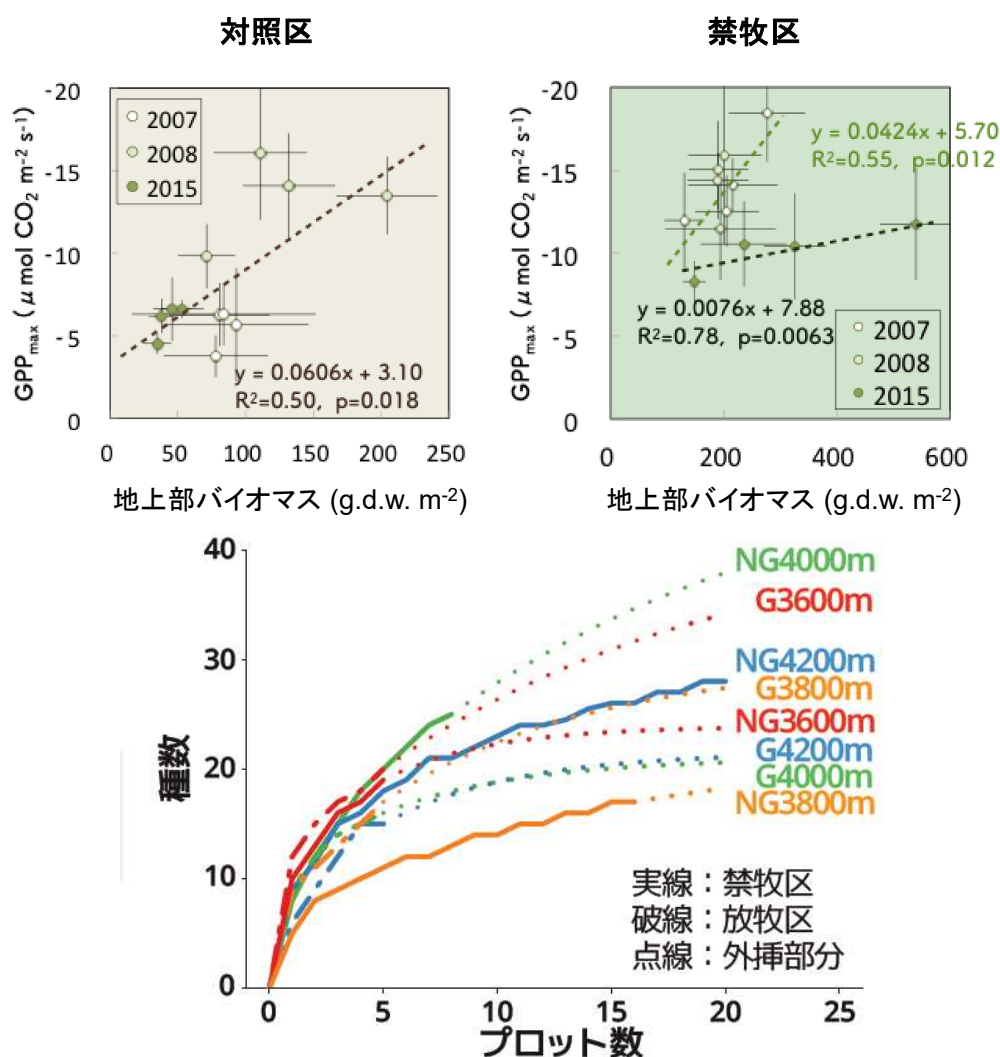


図10 中国青海草原における異なる標高に設置した放牧と禁牧区における地上部バイオマスと総生産の関係(上図)、及び植物群落の最上層の種数(下図)

同様の調査を標高 3600m から 4200m において禁牧 9 年目にあたる 2015 年夏に行い、禁牧処理の長期影響を検証した。非常に興味深いことに、標高が低い 3600m では、禁牧区で植物バイオマスが依然として大きいにも関わらず、対照区である通常放牧区と生態系純生産（NEP）に大きな差は見られなかった（図 9）。これは総 CO₂ 吸収速度（GPP）および生態系呼吸速度（ER）に差が見られなかったためである。このことから、長期禁牧処理によって、光合成能力（バイオマスあたりの CO₂ 吸収速度）が変化している可能性が示唆された。そのため光合成に直接関わる地上部バイオマスあたりの CO₂ 吸収速度を禁牧 1 年後（2007 年）、2 年後（2008 年）、そして 9 年後（2015 年）で対照区と禁牧区で比較した。その結果、禁牧区は対照区と比べてバイオマスあたりの GPP が大きく、禁牧 1 年後と 2 年後では、禁牧区のバイオマスあたりの GPP の 1.4 倍ほど大きいことが明らかになった（図 10 上図）。禁牧 9 年後には、両区での差はさらに大きくなっており、対照区のバイオマスあたりの GPP は、禁牧区のその 8 倍程度に相当することが明らかになった。これは、禁牧処理、特に長期禁牧状況を維持することによって、植物バイオマスは増加するものの、光合成能力は著しく低下し、生態系純生産も大きく減少し、通常放牧区と大きな違いが見られなくなる可能性を示唆している。つまり、草原退化を引き起こすような過放牧はすべきではないが、ある程度の放牧は高山草原の炭素吸収量を高い状態で維持するうえで必要になる可能性を示唆している。

対照区の草丈は禁牧区の草丈の 10% から 40% ほどしかなく、放牧が地上部バイオマスを減少させることが明らかとなった。また、群落最上層の種数はどの標高においても禁牧区の方が多かった（図 10 下図）。対照区では標高が上がるにつれ種数が減少する一方、禁牧区では逆に増加する傾向にあった。さらに、機能群ごとにみると、禁牧区では高標高ほどイネ科型草本の被度が低下し広葉型が増加するのに対し、対照区ではイネ科型だけでなく広葉型の被度も低下しマメ科および多肉植物が顕著に増加していた。以上の結果から、同じ夏期放牧地であっても、放牧が多様性および植生構造に及ぼす影響は標高によって異なる可能性が示唆された。以上の結果は、当該地域において、放牧管理による草原の適応策の可能性を示すものである。

③ チベットの当雄サイトにおける指標植物のフェノロジーと個体群動態

これまでの多くの研究によって、高山生態系は温暖化による気温の変化が低地と比べ大きいことが示されている。一方、気温の変化によって高山植物の応答も大きいことが予想されている。チベット高原に関しては、長期的に見て気温の上昇は周辺地域に比べ大きいことが報告されている。しかし、植物が気温の変化に関してどのように応答するかは、十分なデータの蓄積がない。われわれは、2006 年から、青海とチベットで、異なる標高に長期モニタリングのプロットを設置し、植物のフェノロジーや個体群動態の長期観測を行っている。高山生態系では、温暖化によって低標高の植物が高標高への移動によって、高標高の植物が追い込まれ、競争に負け、絶滅の可能性もある。また、高標高では固有種が多く、気温の上昇によって生育場所が少なくなる恐れもある。一方、気温の上昇によって高山生態系の植物種多様性が増えることも最近報告されている。このような状況の中で、気温の上昇は、高山生態系の植物多様性、生態系の機能にどのような影響を及ぼすか興味深い。そこで、本研究では、海北と当雄で、植物個体群動態やフェノロジーの長期モニタリングを始めた。

本研究では、まず、代表的な高山植物種について、フェノロジーと環境要因との関係を解析した。その結果、温度だけではなく、降水量に対する植物種の異なる応答を明らかにした(図 1 1)。チベット高原のモンスーン(季節風)は、草原植物の展葉日に及ぼす影響が大きいことがわかった。これは、温暖化影響の予測には、温度環境の変化だけでなく、水環境も注目する必要があることが示唆された。

一方、2007 年から 2017 年まで、代表植物種の個体群動態を追跡した結果(図 1 2)、同じ環境でも植物種によって、個体群動態の変化が異なることが示された。もともと分布の広い植物種 *Kobresia pygmae* は、経年変化が非常に少なく、一方クッション植物の *Androsace tapete* は、個体群のサイズが低下することが示された。

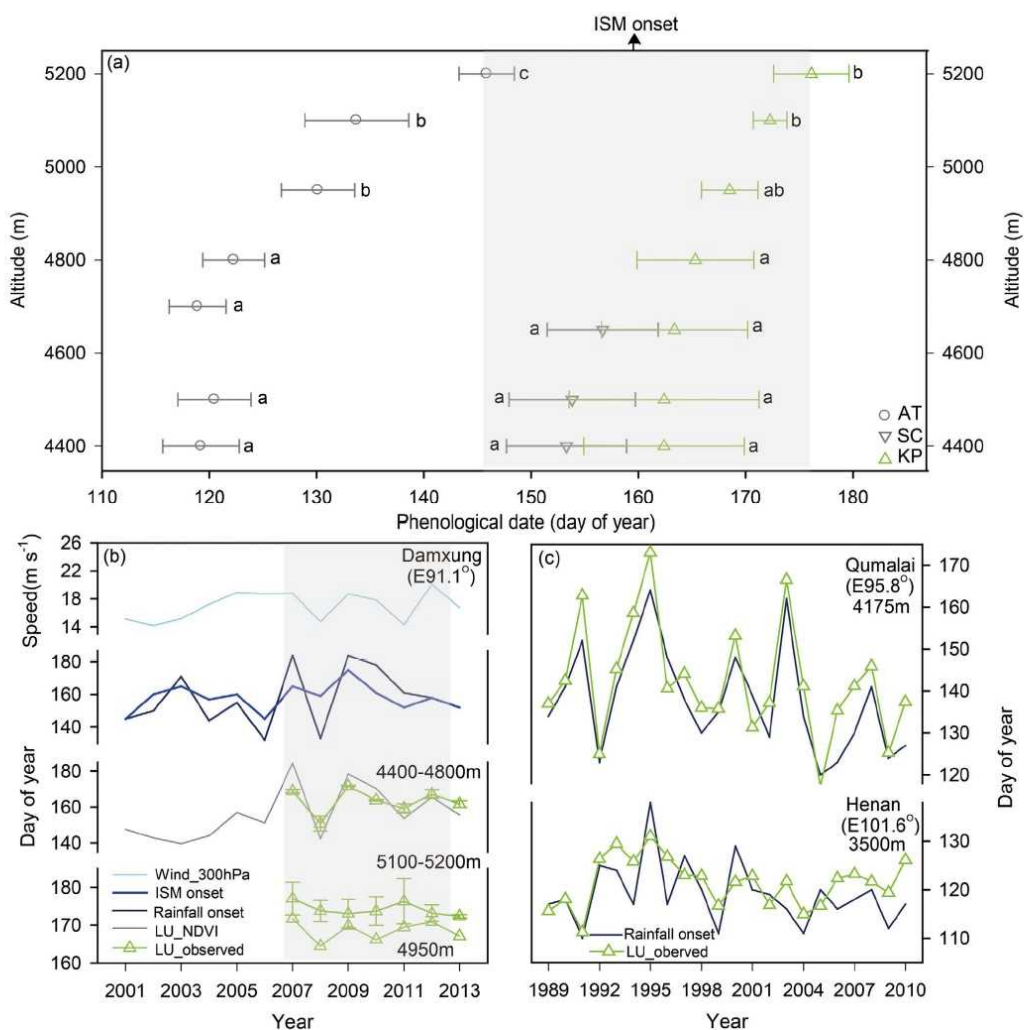


図 1 1 チベット草原における三つ代表的な植物種の展葉日の標高変化とモンスーンとの関係。(a)には、三つ種の 2007 年から 2013 年間の平均展葉日(円、三角と逆三角)と最大最小値を示す。AT, SC と KP はそれぞれ *Androsace tapete*, *Stipa capillacea* と *Kobresia pygmae* の略語。灰色はモンスーンシーズンの期間である。(b)は観測地の気象環境と衛星画像の植生指数から求めた展葉日(LU-NDVI)と実際観測した展葉日(LI-observed)を示す。(c)は比較するため、同じチベット草原でこれまで公表された他の研究者による観測した *Kobresia* 展葉日の長期変動を示す。

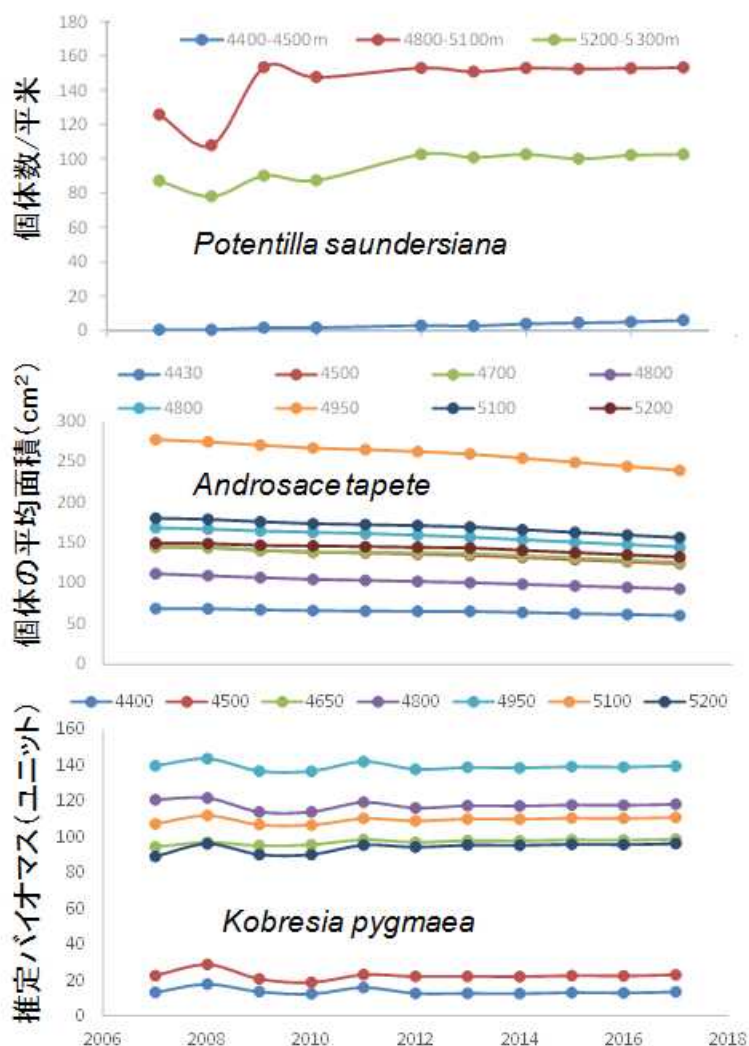


図 1 2 当雄サイトの異なる標高における指標植物種の個体群動態

一方、温暖化に伴い、植物の相互作用も大きく変化することが近年多くの研究によって指摘されている。特に、高山生態系においては、クッション植物によって植物種多様性を増加することが注目されている。そこで、本研究では、クッション植物と生育環境チベット自治区の当雄サイトにおいては、これまでの継続モニタリング結果をまとめ、クッション植物が周囲の植物種多様性に与える影響を評価した。その結果チベット高原（QTP）では、クッション植物の存在によって、局地の植物種多様性が増加し、その効果（RII_{sp}）は、年降水量やクッション植物のサイズによって大きくなるが、クッション植物周辺の植生被覆度が高くなることに伴い低下することもあることがわかった（図 1 3）。また、クッション植物による周囲植物種多様性の向上効果については、チベット高原では、降水量の影響が著しいことが示された。これらのことから、チベット高原のクッション植物は、高山生態系の植物多様性に貢献していること、降水量の変化はその貢献程度に影響を及ぼすことが明らかにされた。

以上のように、温暖化に対する植物種の応答の違いや、クッション植物の多様性への貢献の解

明は、今後の多様性変化とそれに対する保全優先種選定など、適応策を検討する上で貴重な情報となる。

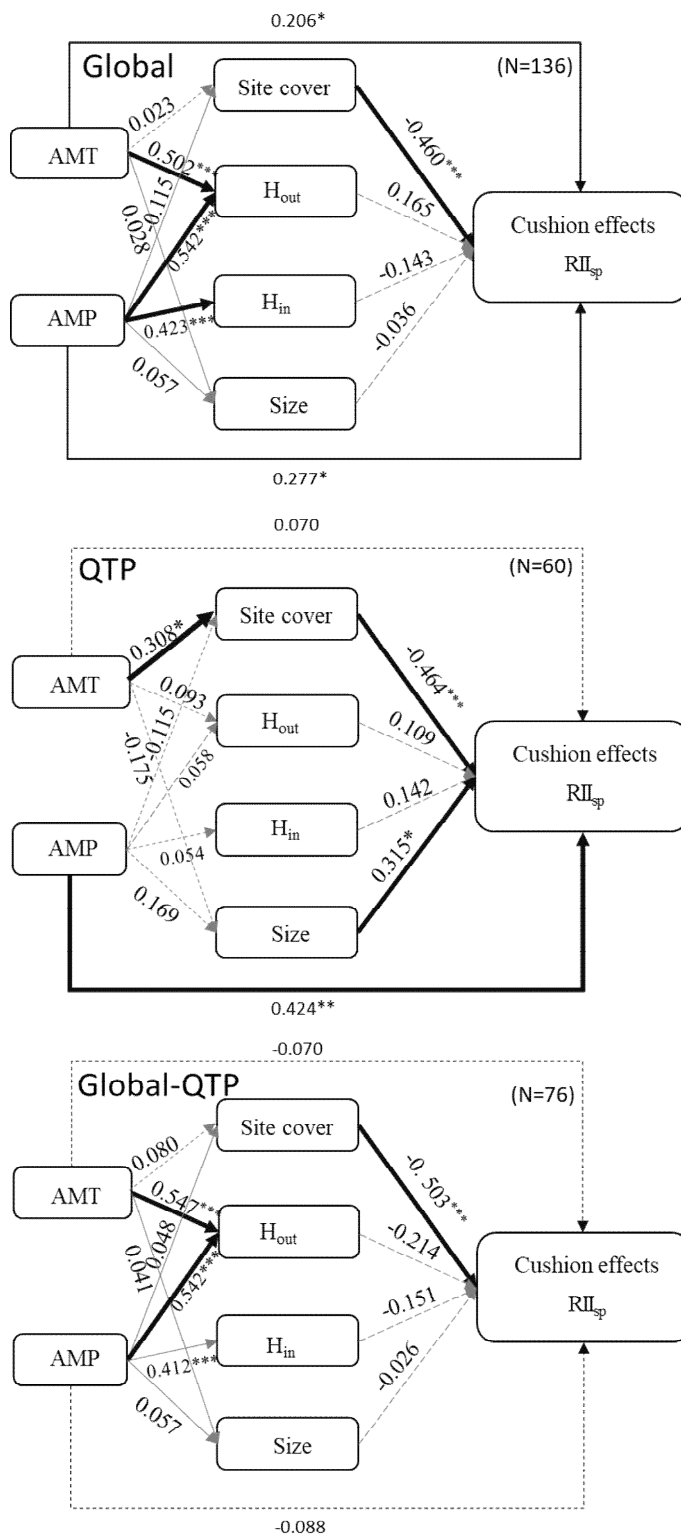


図 1 3 チベット高原 (QTP) におけるクッション植物の多様性増加作用 (RII_{sp}) に及ぼす環境要因の影響。比較として地球全体のクッション植物に関する文献調査データも示した。

④ 乗鞍岳サイトにおける観測方法の開発と高山植生変化の長期モニタリング

自動撮影方法の開発：乗鞍岳は北アルプスの南部に位置し、標高 3026m の剣ヶ峰を主峰とする山々の総称であり、全部で 23 の峰がある。摩利支天岳（標高 2872 m）山頂にある乗鞍旧コロナ観測所に自動撮影カメラを設置し、地上植生調査プロットの常時観測を行った（図 1 4）。観測には、毎正時にデジタル一眼レフカメラによる自動撮影を行い、JPEG ファイルを携帯キャリアで転送し、RAW ファイルは本体の SD カードに保存するカメラシステムを新規に開発して用いた。観測は 2015 年 9 月から 2017 年 10 月まで継続し、述べ 7562 シーンの撮影を行った。1 時間ごとに自動撮影し、国立環境研究所で可視カメラのデータを受信できるように、ネットワークモニタリングシステムを構築した。

乗鞍岳可視・近赤外カメラの設置状況



図 1 4 乗鞍岳の可視カメラと赤外線カメラによる生態系長期モニタリングシステム。

自動画像解析処理により、回収した膨大な量の画像から各画素に含まれる赤緑青（RGB）の値を抽出し、それを元に消雪過程の追跡と、植生の緑葉開始時期の面的な推定を行った。解析には天候条件のよい画像だけを選別することが必要である。ここでは雲や霧が発生すると山の稜線が不明瞭になり空と山の色が一樣になることから、稜線を含む位置に評価領域を定め、各画像の評価領域内の R 値の相対標準偏差を算出し、経験的に決めたしきい値よりも小さい場合には雲や霧に覆われていると判断し、その画像は解析から除外した。次に、解析対象範囲について RGB 値からグレースケールのヒストグラムを求め、各画素の積雪の有無を大津の二値化（Otsu、1979）により統計的に判別した。これにより対象範囲全体の画素数に対する積雪部分の画素数の割合（以下、積雪画素比）を算出し、消雪時期やパターンの年変動を数値化した。

植生の緑葉期間の推定には、Ide ら（2011）による各画素の緑色の濃さを表す指標の一つである Green Ratio（GR）を

$$GR = G / (R + G + B) \quad \dots\dots\dots (1)$$

として算出した。高等植物はクロロフィルなどの光合成色素が主に赤と青の光を吸収して光合成に利用する。したがって、色素含量が多く光合成活性が高くなると赤や青に比べて緑の光の反射率が相対的に高くなり GR も高い値を示す。GR はこのような植物の分光反射特性に基づいて植物の光合成活動を反映する指標であり、白色の積雪面や黒色に近い地面に対しては式（1）により $GR \approx 0.33$ を示す。本解析では全画素について GR の時系列変化を算出し、対象地域におけるフェノロジーの時空間分布を求めた。

消雪の過程についての観測と解析：図 1 5 に消雪プロセスを解析した対象領域と消雪画素比の時系列変化を示す。消雪期からデータが蓄積されていた 2016 年と 2017 年では、消雪画素比が 0.3 となる日付（DOY）を比較すると、約 30 日程度の差がある。気象庁報道発表によると、2016 年冬（12 月～2 月）は、日本海側の降雪量はほぼ全国的に少なく（気象庁、2016）、その後消雪期の高温が続き、特に北日本では日照時間がかなり多かった影響もあり、月平均気温は平年差 +2.3°C で 1946 年の統計開始以来 5 月としては最も高温となった（気象庁、2016）と述べており、これを反映して 2016 年の消雪が早かったことが推察される。

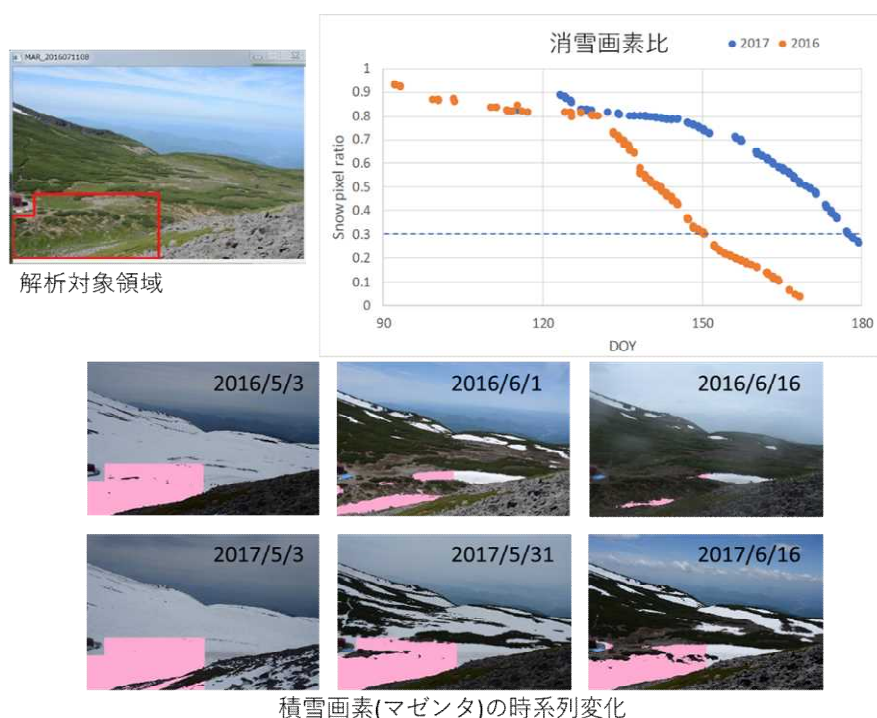


図 1 5 消雪過程の解析結果

植生の変化：常緑性のハイマツ 2 ヲ所と落葉性植物群落 4 ヲ所に評価領域（AOI）を設定し、その中の GR の平均値の時系列変化をグラフ化した（図 1 6）。GR は落葉植物では開葉に伴って上昇する一方、ハイマツなど常緑植物では消雪による緑葉の露出時に急上昇する。2016 年、2017 年の落葉性植物群落の展葉時期を比較すると GR 値が 0.35 になる日付（DOY）は 10 から 15 日

程度の差があり、30 日程度ある消雪時期の差と比べて小さい。これは消雪時期の評価が対象域全体であったのに対し、植生は更に狭い範囲での評価領域を設定したことによる影響に加え、消雪後における気象条件により植生の活動開始時期が決定されるものと推察される。こうした変化は新緑や紅葉等、観光利用に影響を与える可能性があり、利用面での適応策を検討する情報となることが期待される。

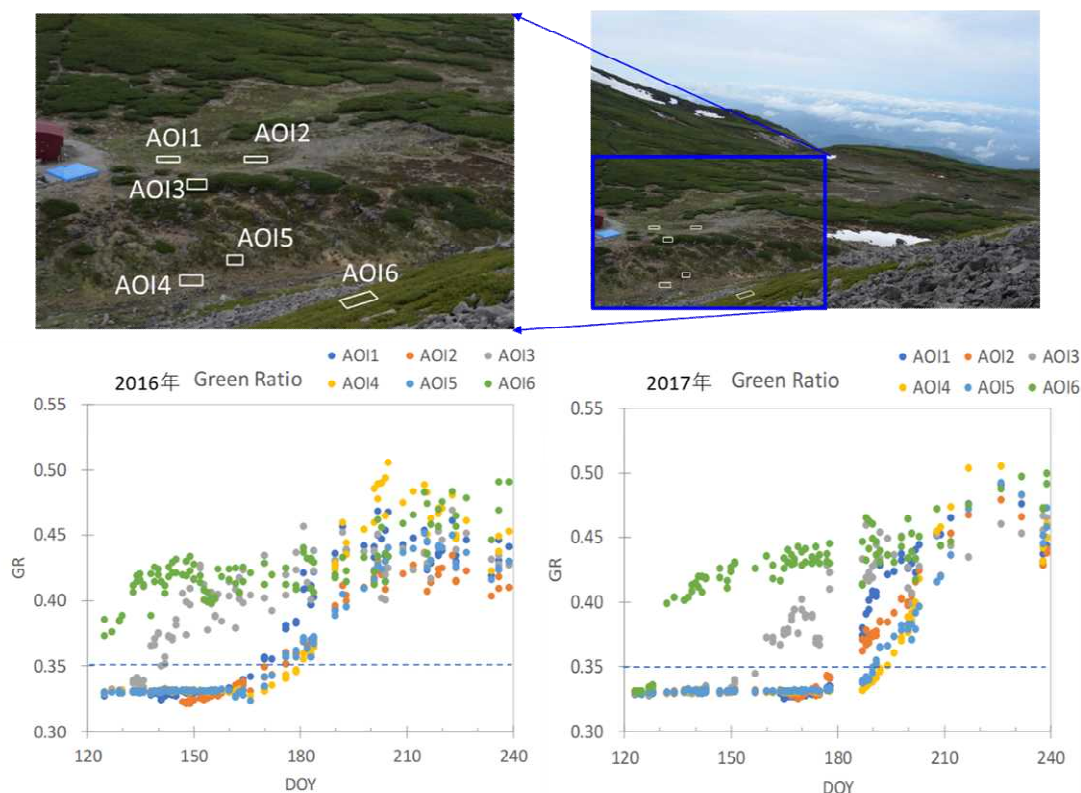


図 16 展葉時期の GR の時系列変化
AOI 3 と AOI 6 がハイマツ、それ以外は落葉性植物群落

⑤ パソ熱帯林林床植物のフェノロジー観測と温室効果ガス（CO₂）影響

高緯度地域に比べ、熱帯地域では温暖化による気温の上昇は顕著ではない。しかし、すでに気温の高い環境では、気温や主要な温暖化効果ガスであるCO₂濃度のわずかな上昇も生態系に大きな影響を与える可能性がある。さらに、温暖化に伴う昼夜の気温差の変化や、降水量または降水時間などのより広域な変化も予想される。これらの気候変化は、十分に把握されておらず、その熱帯生態系への影響も殆どわかっていない。また、温度上昇に対する植物の成長応答とその可塑性は、高温で育った植物ほど脆弱であることが示唆されている（Way and Oren 2010）。そこで、低地熱帯林であるパソ森林保護区の林床に 9 カ所のステーションを設置し、微気象を観測するとともに「次世代」の熱帯林を担う稚樹と幼樹のフェノロジー、成長動態（発芽、展葉、枯れなど）、種多様性に関する調査をおこなった。また、温室効果ガスであるCO₂ガス濃度の上昇が稚樹（実生）の生理機能特性におぼす影響については、ガス交換計測機器による光合成計測を実施した。

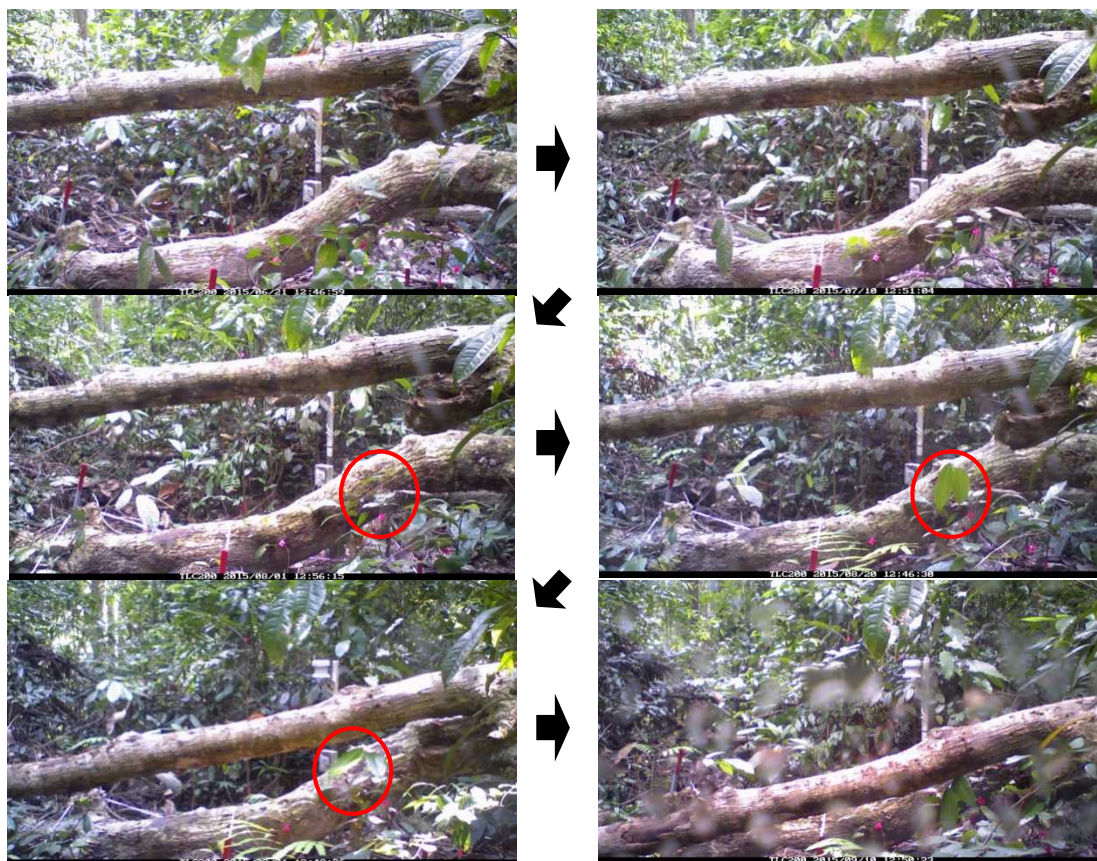


図17 パソ熱帯林林床における稚樹の生育動態. カメラの自動撮影（インターバルカメラ）によって、実生の生育動態を長期モニタリングしている。ここで示した、ギャップサイト（G1）は、9つの観測点（先述「微気象観測」を参照）のひとつである。撮影期間は、2016年6月21日から9月10日までの間、およそ10日ごとの写真を示す。赤で囲まれた範囲に、新葉が展開する様子が認められる。

インターバルカメラで得られた画像の解析によって、時系列にそった稚樹の展葉期、転葉の動態などを明らかにすることができる（図17）。例えば、写真右下側の稚樹は、8月10日から2枚の新葉が約1ヵ月かけて展開することが分かる。また、横たわる倒木が朽ちていく様子が時系列的に見て取れる。このように、熱帯林床での展葉タイミング、展葉速度、倒木の分解速度などは、微気象データ（気温、土壌温度、湿度）の関係を解析することにより、熱帯林のダイナミクスを理解する上での基礎データとなる。

熱帯林の中は非常に暗いため、林内に差し込む光は稚樹にとって重要な資源となる。植物の成長にとって重要な光環境を把握するために、9つ全ての観測点の中央で全天写真を撮影した（図18）。その結果、林冠の開空度は、林冠の開空度は17.3%から2.6%の範囲で変化し、年次ごとに減少する傾向を示した。特にGapステーションにおいてその傾向は顕著であった（図19）。

また、植物種多様性調査のために9つ全ての観測ステーションに、1m×1mの方形区を十字型に5つ設置した。植生調査は、2015年から1年ごとに実施しており、各ステーションに十字に設置した5つの1m×1mの方形区内に出現した全稚樹の個体の横にプラグを立て、出現した個体の位置とサイズ、個体の消長を毎年記録した（図20）。

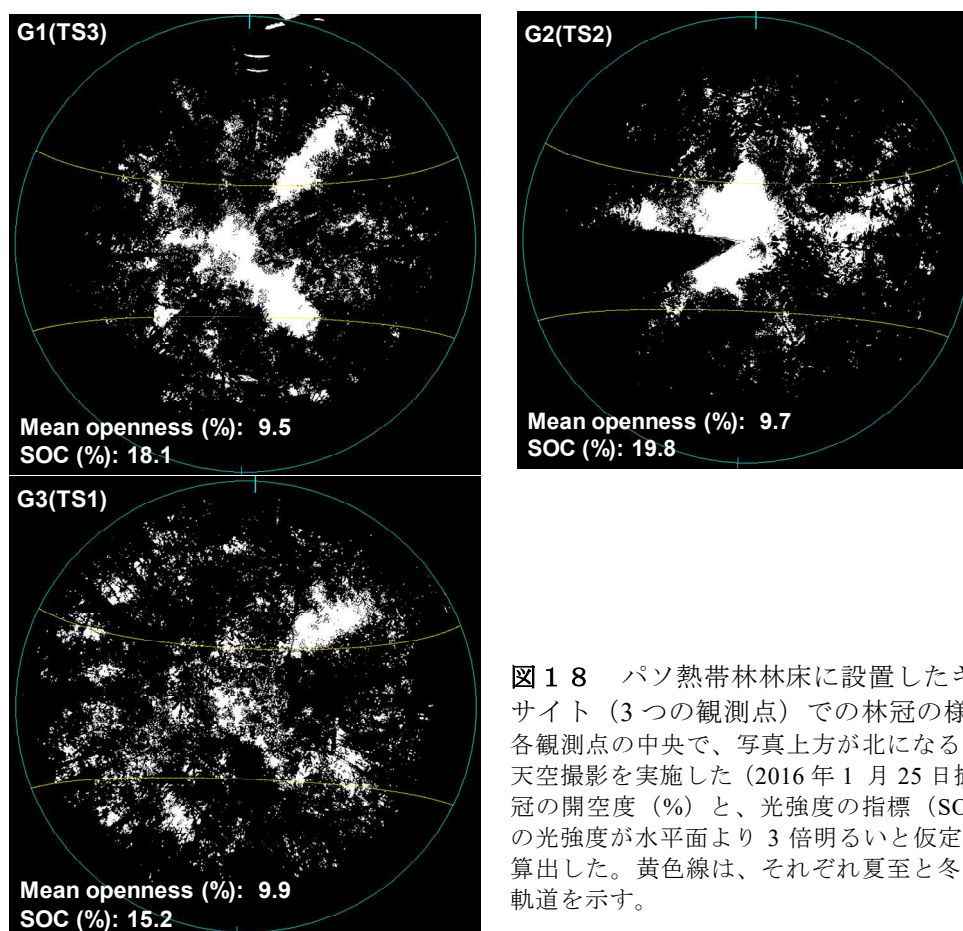


図 1 8 パソ熱帯林林床に設置したギャップサイト（3つの観測点）での林冠の様子。各観測点の中央で、写真上方が北になるように全天空撮影を実施した（2016年1月25日撮影）。林冠の開空度（%）と、光強度の指標（SOC：天頂の光強度が水平面より3倍明るいと仮定した）を算出した。黄色線は、それぞれ夏至と冬至の太陽軌道を示す。

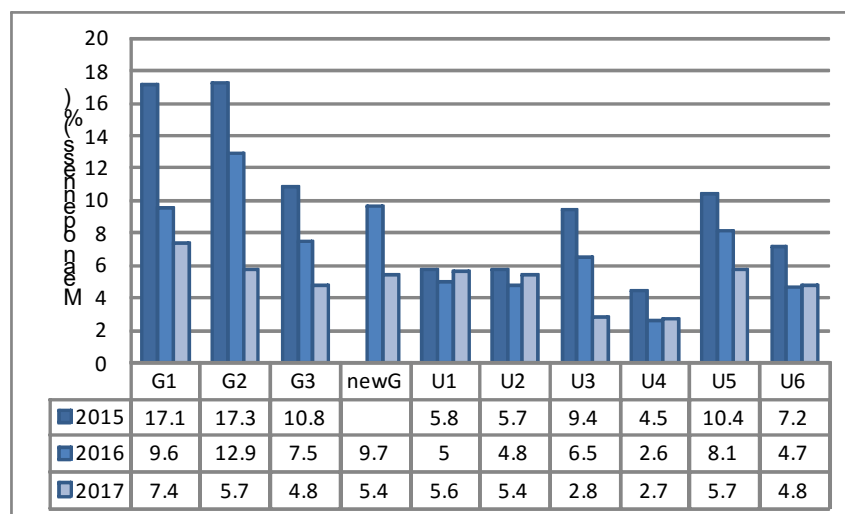


図 1 9 Gap ステーション (G) と林床ステーション (U) における植生調査プロット中央における林冠開空度の年次変化 (2015-2017)



図 20 パソ熱帯林林床での植生追跡調査の様子

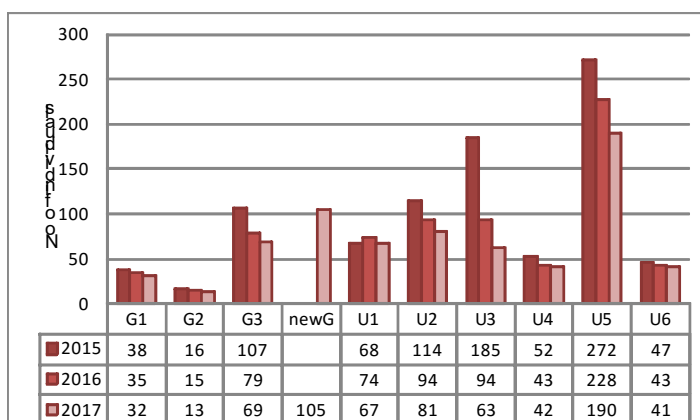
2015 年夏、全ての観測点に設置した、5 つの 1m×1m の方形区内に出現した全ての個体にラベルを付けた。次年度以降もこのラベルをもとに、個体の生残、成長などの追跡調査を実施する。

その結果、プロット全体における現存個体数は 899、705、598 (703) 個、植物種数は 150、139、138 (147) 種と年次を追って減少した (() 内の数は、新たに設置した New Gap ステーションを加えた場合)。各ステーションでの種数と個体数の年次変化はグラフで示した通りである (図 21)。平均群落高は、G2 と U1 以外のステーションにおいて増加する傾向を示した。ただし、G2 ステーションでは、上層木からの落枝などによって幹折れや個体の傾斜が発生した影響により樹高が減少したと考えられた。

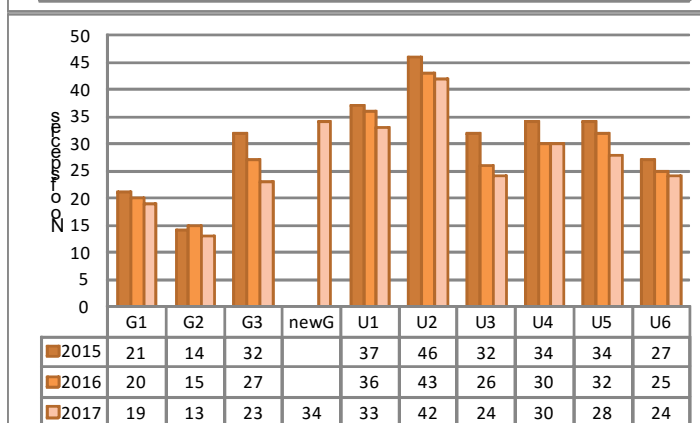
2015 年から 2017 年にかけて出現した植物種は、ステーションに関わらず個体数が少なかった種が数多く生残した。一方、多くの個体数が出現した植物種は、数を大きく減らす傾向を示した。特に、林床の U3 サイトに多く出現した *Hopea dryobalanoides* は、2015 年の 114 個体から 2017 年の 26 個体へと著しい個体数減少を示した。これら個体群の変化は、出現した植物種に大きく依存した特性を持つと考えられる。ただし、現在のところ 3 年間のデータしかなく、どのような環境要因によって稚樹の消長が変化するのかについては、更なるデータの蓄積が必要である。

今後も長期的にモニタリングを継続することで、環境や植物種構成が異なる熱帯林床の調査サイトにおいて、稚樹、すなわち森林更新に及ぼす気候変動の影響が明らかになり、熱帯森林生態系の構造と機能におよぼす影響評価に発展することが期待される。

(A) 現存個体数



(B) 植物種数



(C) 平均群落高

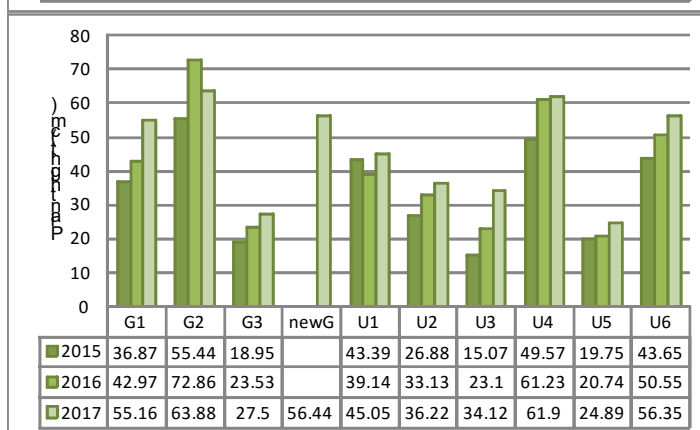


図 2 1 Gap (G) と林床 (U) の各ステーションにおける現存個体数 (A)、植物種数 (B)、平均群落高 (C) の年次変化 (2015-2017)

これまでの熱帯林床研究で、森林内部の大気 CO_2 濃度が林外と比べて高いこと（特に早朝）が分かってきた。林内の短期的な高 CO_2 濃度は、林床植物の光合成光補償点を低下させ、暗呼吸速度の低下に貢献しているかもしれない。また、高 CO_2 濃度は、暗い熱帯林で重要なサンフレック（木漏れ日）の光利用効率を上昇させているかもしれない。この 2 つの仮説を検証するために、熱帯植物の実生（フタバキ科）を用いた野外実験を行った。供試植物には、東南アジアで広く分

布するフタバガキ科 *Dipterocarpus sublamelatus* Foxw.の実生を選んだ。動的な光合成は、2つのCO₂濃度(350 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ 、700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$)条件下で、光強度を人工的にコントロール(20 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ から500 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (30分間)に急上昇させ、その後50 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (10分間)に急低下させる)することで測定した。その後、光強度に対する光合成速度の関係(光-光合成曲線)を2つのCO₂濃度条件で求め、光合成光補償点、暗呼吸速度、見かけの量子収率を算出した。全てのガス交換測定の前には、十分な灌水と被陰を施し、CO₂濃度処理以外の外的環境要因の影響を排除した。表3は、供試植物の光定常条件下でのガス交換パラメータ値を示す。

表3 3つの光定常条件(PPFD: 20、50、500 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)における、測定CO₂濃度ごとのガス交換パラメータ値、及びCO₂付加にともなう変化量(高CO₂効果)を示す。(Pは一元配置分散分析による測定CO₂濃度間の有意差を示す検定値であり、*の数が大きいくほど優位であることを示す。*、**、***、****はそれぞれP値が<0.05, <0.01, <0.001, <0.0001であることを示す)。

パラメータ	光強度	測定 CO ₂ 濃度		高 CO ₂ 効果(%)	P
		350 μmol CO ₂ mol ⁻¹ air	700 μmol CO ₂ mol ⁻¹ air		
純光合成速度 (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)					
A ₂₀	20	0.50 ± 0.05	0.85 ± 0.08	+70.6	**
A ₅₀	50	1.86 ± 0.04	2.94 ± 0.12	+58.1	***
A ₅₀₀	500	4.60 ± 0.30	8.47 ± 0.60	+84.1	***
気孔コンダクタンス (mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)					
g _{s20}	20	0.088 ± 0.008	0.068 ± 0.001	-23.1	ns
g _{s50}	50	0.074 ± 0.004	0.054 ± 0.007	-26.4	*
g _{s500}	500	0.103 ± 0.010	0.080 ± 0.003	-22.8	ns
見かけの量子収率 (mol mol ⁻¹)					
φ		0.052 ± 0.001	0.065 ± 0.001	+26.3	****
光合成光補償点 (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)					
Q _{kp}		12.9 ± 0.72	5.41 ± 2.01	- 58.0	****
暗呼吸速度 (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)					
R _d		0.75 ± 0.04	0.31 ± 0.17	- 58.9	*

これらの結果、熱帯林床に生育する *D. sublamelatus* は、短期的なCO₂濃度上昇によって、短期的な強光による炭素吸収量を約2倍に増加させた。この増加に対する短期的な強光利用効率の貢献は約7%であり、特に光照射にともなう貢献が大きかった。また、CO₂濃度上昇は、光合成光補償点を58%減少、見かけの光量子収率を26%上昇させた。これらの結果は、上記2つの仮説を支持した。したがって、熱帯林内の短期的なCO₂濃度上昇は、光強度の“定常状態”と“非定常状態”両方で光利用効率を上昇させることで、熱帯林床の暗い環境で抑制された植物炭素固定量を補償していることが示唆された(図22)。本研究では、光の照射時間が30分間と非常に長く、そのほとんどが強光条件での定常光合成速度に近い状態であった。この条件では、変動光に対する光利用効率の効果が抽出され難い。今後は、強光の照射時間を変化させることで、熱帯林内に差し込む木漏れ日の長さによって、光利用効率と高CO₂濃度の効果がどの程度変化するのかを明らかにしていく必要がある。

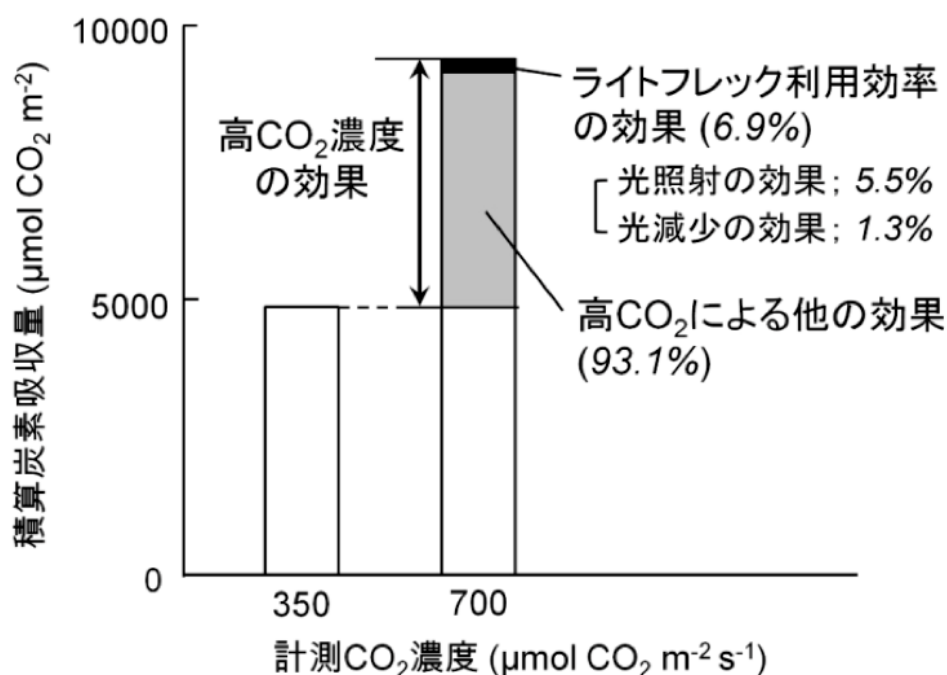


図 2 2 短期的な強光 (30 分) による積算炭素吸収量. 図中の“高 CO₂ による他の効果”には、「光合成基質としての CO₂ 添加の効果」、「定常光条件下での光利用効率の効果」などがある。(注) ライツフレック: 短期的な強光)

今後は、微環境変化にともなう植物機能特性の影響についての研究を深化させるとともに、微環境と植物の成長動態のモニタリング結果を用いた解析を実施することにより、温暖化によって起こりうる土壌呼吸増加による高 CO₂ への応答など、気候変動影響評価の高度化が期待される。

⑥各サイトの植生の長期変動を把握するための衛星データの解析

本研究の観測では、観測サイトと観測期間が限られているため、アジア陸域生態系において、できるだけ広い範囲と長い期間の温暖化影響を評価する方法として、現地モニタリングサイトの観測結果を衛星データと関連させる研究を行った。

温暖化に対する高山生態系の脆弱性は、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) でも指摘されており⁴⁾、植生モニタリングの必要性は世界的な共通認識となっている。そこで本委託業務では、アジア陸域の指標となるチベット高山草原、中国 (青海) 湿地草原、モンゴル乾燥草原、日本 (乗鞍岳) の高山域での植生モニタリングと衛星データ解析を実施している。また、低地熱帯林においては温暖化による影響が十分に分かっていないため、マレーシア (パソ低地熱帯林) においても同様に植生モニタリングと衛星データ解析を実施している。本研究では、これらのデータを解析することで、温暖化の影響を早期に検出することを目指している。

昨年度までは、各サイトの植生変化に関する衛星データの収集とそれぞれの時系列データの解析を実施した。しかし、マレーシア以外の観測地では、冬季の積雪によってデータに大きな不確実性が生じていた。

これらの衛星画像から積雪によるノイズを取り除くために、中国の研究協力者と共同で 3 つの

草原に有効な手法を開発した。図 2 3 は開発した方法の適用事例であり、ノイズが適切に除去されていることが示された。これらの分析と指標開発によって、積雪などの影響を受けない汎用性のある植生フェノロジーが明らかになり、この手法を高山植生の解析に適用することで温暖化の影響が広域で詳細に評価できることが期待される。

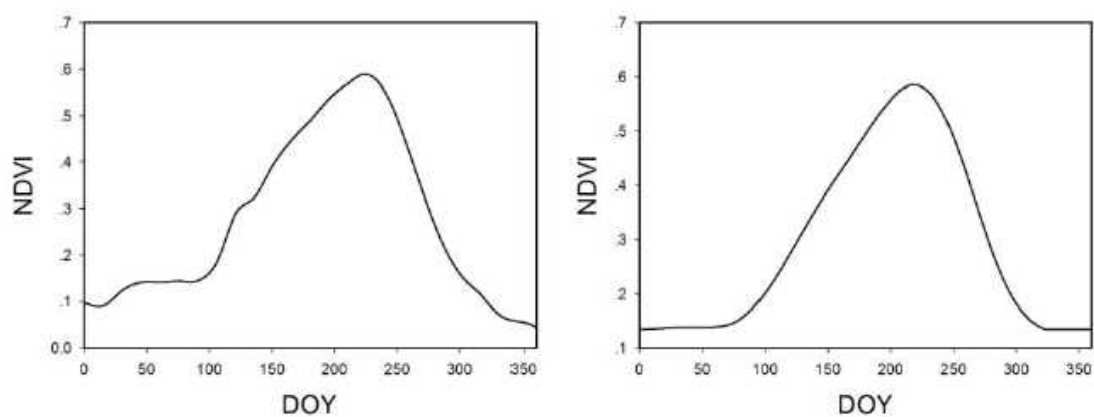


図 2 3 草原地域における積雪の影響を取り除く方法の開発例(NDVI は植生指数、DOY は年間通算日を示す。左：元の衛星データ；右：左のデータから積雪を取り除いたデータ)

5. 本研究により得られた成果

(1) アジア陸域の指標生態系における温暖化影響の長期モニタリング・ネットワークの運営：

広大なアジア陸域生態系においては、これまで温暖化に関する長期観測は散在的なものが多く、観測項目も揃っていなかった。例えば、高山生態系では温暖化に伴う希少種の減少が危惧されるが、これらの生態系に関する情報が極度に不足していた。本研究によって、緯度的にも標高的にもまたは気候区分や植生タイプにおいても多様なアジア陸域の生態系に関して、温暖化影響を強く受け、その影響を敏感に検出できると考えられる指標生態系（表1）を設定し、この地域全体の温暖化影響を把握するためのモニタリングが可能となった。一部の研究観測は各国の研究協力者に依頼し、ネットワークも構築することができた。4カ国5サイトの観測結果を広域に展開するために、衛星観測手法を開発した。これらによって、指標生態系の変化や今後の適応計画に貢献できる成果をいくつか得ることができた。温暖化影響を着実にモニタリングして検出するために、こうした取り組みを継続し、強化する必要がある。

(2) 指標生態系における温暖化影響評価・適応策への展望：

- ①モンゴル・KBUサイトにおいては、草原生態系の微気象、種組成、個体群動態及びフェノロジーに関する観測データの蓄積が行われ、放牧の影響が明らかとなった。
- ②中国・青海サイトにおいては、異なる標高において、植物種多様性や炭素収支に及ぼす放牧の影響を明らかにした。これらの成果は、草原生態系における放牧管理による草原の適応策の可能性を示すものである。
- ③中国・チベットの当雄では、世界的に唯一な高標高かつ広い標高幅を有する温暖化モニタリングを継続した。高山植物の展葉期とモンスーンの高い相関が明らかとなり、その共同研究の成果は関連メディアにも報道された。チベット草原において、クッション植物の個体サイズが大きくなると、周囲の植物種数も多くなることがわかった。温暖化に対する植物種の応答の違いや、クッション植物の多様性への貢献の解明は、今後の多様性変化とそれに対する保全優先種選定など、適応策を検討する上で貴重な情報となる。
- ④マレーシア・パソにおいては、熱帯林における稚樹の種間個体数の消長に関する長期観測データの不足は熱帯林更新の予測を妨げている。本研究における長期調査と写真撮影により蓄積された基礎データを解析することにより、各サイトにおける植物種数の低下傾向が示された。また、熱帯林の林床植物は高CO₂を有効に利用できるため、林床の暗い環境下での物質生産に高CO₂が貢献していることを解明し、森林生態系に関して、温暖化による地上CO₂変化の影響を考慮することによる影響評価の高度化への展望を得た。
- ⑤日本・乗鞍岳においては、消雪後における気象条件により植生の活動開始時期が決定される可能性が明らかとなった。こうした変化は新緑や紅葉等、観光利用に影響を与える可能性があり、利用面での適応策を検討する情報となることが期待される。
- ⑥アジア広域の温暖化影響評価へと展開するため、衛星データの解析手法開発を行った。

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表 (学術誌)

- 1) T. Kato, S. Toyoda, N. Yoshida, Y. Tang and E. Wada : Rapid Communications in Mass Spectrometry, 27, 1517-1526 (2013)
"Isotopomer and isotopologue signatures of N₂O produced in alpine ecosystems on the Qinghai-Tibetan Plateau"
- 2) T. Kato, K. Yamada, Y. Tang, N. Yoshida and E. Wada : Atmospheric Environment, 77, 338-347 (2013)
"Stable carbon isotopic evidence of methane consumption and production in three alpine ecosystems on the Qinghai-Tibetan Plateau"
- 3) L. Yu, H. Wang, G. Wang, W. Song, Y. Huang, S-G. Li, N. Liang, Y. Tang and J-S. He : Environmental Pollution, 181, 81-90 (2013)
"A comparison of methane emission measurements using eddy covariance and manual and automated chamber-based techniques in Tibetan Plateau alpine wetland"
- 4) H. Shen, S. Wang and Y. Tang : Journal of Plant Ecology, 6 (5), 418-427 (2013)
"Grazing alters warming effects on leaf photosynthesis and respiration in *Gentiana straminea*, an alpine forb species"
- 5) Y. He, P. Shi, X. Zhang, M. Du, W. Yan and W. Sun : Journal of Mountain Science, 31(6), 641-646 (2013)
"Elevational distribution of Cushion plant *androsace tapete* in the Southern slop of Nyainqentanglha Mountains, Tibetan Plateau"
- 6) Y. He, C. Kueffer, P. Shi, X. Zhang, M. Du, W. Yan and W. Sun : Plant Species Biology, DOI: 10.1111/1442-1984.12031 (2013)
"Variation of biomass and morphology of the cushion plant *Androsace tapete* along an elevational gradient in the Tibetan Plateau"
- 7) K. Ichii, M. Kondo, Y-H. Lee, S-Q. Wang, J. Kim, M. Ueyama, H-J. Lim, H. Shi, T. Suzuki, A. Ito, H. Kwon, W. Ju, M. Huang, T. Sasai, J. Asanuma, S. Han, T. Hirano, R. Hirata, T. Kato, S-G. Li, Y-N. Li, T. Maeda, A. Miyata, Y. Matsuura, S. Murayama, Y. Nakai, T. Ohta, T-M. Saitoh, N. Saigusa, K. Takagi, Y. Tang, H-M. Wang, G-R. Yu, Y-P. Zhang and F-H. Zhao : Journal of Forest Research, 18, 13-20 (2013)
"Site-level model-data synthesis of terrestrial carbon fluxes in the CarboEastAsia eddy-covariance observation network : toward future modeling efforts"
- 8) R. Li, T. Luo, Y. Tang, M. Du and X. Zhang : Journal of Arid Environments, 88, 70-77 (2013)
"The altitudinal distribution center of a widespread cushion species is related to an optimum combination of temperature and precipitation in the central Tibetan Plateau"
- 9) J. Li, S. Jiang, B. Wang, W. Jiang, Y. Tang, M. Du and S. Gu : Journal of Integrative Agriculture, 12(8), 1396-1401 (2013)
"Evapotranspiration and Its Energy Exchange in Alpine Meadow Ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau"

- 10) A. Moriyama, S. Yonemura, S. Kawashima, M. Du and Y. Tang : *Ecological Indicators*, 32, 245-252 (2013)
"Environmental indicators for estimating the potential soil respiration rate in alpine zone"
- 11) Z. Wang, T. Luo, R. Li, Y. Tang and M. Du : *Journal of Vegetation Science*, 24, 189-201 (2013)
"Causes for the unimodal pattern of biomass and productivity in alpine grasslands along a large altitudinal gradient in semi-arid regions"
- 12) Y. Wu, Y. Deng, J. Zhang, J. Wu, Y. Tang, G. Cao, F. Zhang and X. Cui : *Ecological Research*, 28(3), 493-501 (2013)
"Root size and soil environments determine root lifespan: evidence from an alpine meadow on the Tibetan Plateau"
- 13) M. Shen, Y. Tang, J. Chen, X. Yang, C. Wang, X. Cui, Y. Yang, L. Han, L. Li, J. Du, G. Zhang and N. Cong : *PLOS ONE*, 9(2), e88178 (2014)
"Earlier-Season Vegetation Has Greater Temperature Sensitivity of Spring Phenology in Northern Hemisphere"
- 14) J. Xia, S. Liang, J. Chen, W. Yuan, S. Liu, L. Li, W. Cai, L. Zhang, Y. Fu, T. Zhao, J. Feng, Z. Ma, M. Ma, S. Liu, G. Zhou, J. Asanuma, S. Chen, M. Du, G. Davaa, T. Kato, Q. Liu, S. Liu, S. Li, C. Shao, Y. Tang and X. Zhao : *PLOS ONE*, 9(5), e97295 (2014)
"Satellite-Based Analysis of Evapotranspiration and Water Balance in the Grassland Ecosystems of Dryland East Asia"
- 15) J. Fang, T. Kato, Z. Guo, Y. Yang, H. Hu, H. Shen, X. Zhao, A-W. Kishimoto-Mo, Y. Tang and R-A. Houghton : *PNAS:Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(26), 9527-9532 (2014)
"Evidence for environmentally enhanced forest growth"
- 16) R. Cao, M. Shen, J. Chen and Y. Tang : *Ecological Indicators*, 46, 129-137 (2014)
"A simple method to simulate diurnal courses of PAR absorbed by grassy canopy"
- 17) H. Tomimatsu, A. Iio, M. Adachi, L-G. Saw, C. Fletcher and Y. Tang : *Tree Physiology*, 34(9), 944-954 (2014)
"High CO₂ concentration increases relative leaf carbon gain under dynamic light in *Dipterocarpus sublamellatus* seedlings in a tropical rain forest, Malaysia"
- 18) Y. Wu, J. Zhang, Y. Deng, J. Wu, S. Wang, Y. Tang and X. Cui : *Plant Ecology*, 215(9), 1057-1066 (2014)
"Effects of warming on root diameter, distribution, and longevity in an alpine meadow"
- 19) Y. He, M. Liu, X. Xiao, X. Ren, L. Zhang, X. Sun, Y. Yang, Y. Li, L. Zhao, P. Shi, M. Du, Y. Ma, M. Ma, Y. Zhang and G. Yu : *Journal of Geophysical Research : Biogeosciences*, 119, doi:10.1002/2013JG002449 (2014)
"Large-scale estimation and uncertainty analysis of gross primary production in Tibetan alpine grasslands"
- 20) M. Shen, Y. Tang, A-R. Desai, C. Gough, and J. Chen : *International Journal of Remote Sensing* 35, 1162-1174 (2014)

- "Can EVI-derived land-surface phenology be used as a surrogate for phenology of canopy photosynthesis?"
- 21) S. Wang, F. Meng, J. Duan, Y. Wang, X. Cui, S. Piao, H. Niu, G. Xu, C. Luo, Y. Tang and Z. Zhang : *Ecology*, 95(12), 3387-3398 (2014)
"Asymmetric sensitivity of first flowering date to warming and cooling in alpine plants"
 - 22) S. Wang, C. Wang, J. Duan, X. Zhu, G. Xu, C. Luo, Z. Zhang, F. Meng, Y. Li and M. Du : *Agricultural and Forest Meteorology*, 189-190, 220-228 (2014)
"Timing and duration of phenological sequences of alpine plants along an elevation gradient on the Tibetan plateau"
 - 23) 唐艷鴻：独立行政法人国立環境研究所編 地球温暖化の事典, 207-213. 丸善出版 (2014)
「高山帯」.
 - 24) R. Cao, J. Chen, M. Shen, and Y. Tang : *Agricultural and Forest Meteorology* 200, 9-20 (2015)
"An improved logistic method for detecting spring vegetation phenology in grasslands from MODIS EVI time-series data"
 - 25) C. Wang, R. Cao, J. Chen, Y. Rao and Y. Tang : *Ecological Indicators*, 50, 62-68 (2015)"Temperature sensitivity of spring vegetation phenology correlates to within-spring warming speed over the Northern Hemisphere"
 - 26) Y. Hu, L. Jiang, S. Wang, Z. Zhang, C. Luo, X. Bao, H. Niu, G. Xu, J. Duan, X. Zhu, S. Cui , M. Du (2016) : *AGRICULTURAL AND FOREST METEOROLOGY*, 216, 93-104
"The temperature sensitivity of ecosystem respiration to climate change in an alpine meadow on the Tibet plateau: A reciprocal translocation experiment"
 - 27) Y. Hu, Q. Wang, S. Wang, Z. Zhang, FA. Dijkstra, Z. Zhang, G. Xu, J. Duan, M. Du, H. Niu (2016) : *PLANT AND SOIL*, 402, 263-275
"Asymmetric responses of methane uptake to climate warming and cooling of a Tibetan alpine meadow assessed through a reciprocal translocation along an elevation gradient"
 - 28) R. Li, T. Luo, T. Mölg, J. Zhao, X. Li, X. Cui, M. Du, Y. Tang (2016) : DOI: 10.1038/srep20985
"Leaf unfolding of Tibetan alpine meadows captures the arrival of monsoon rainfall, Scientific Reports"
 - 29) Tomimatsu H and Tang Y (2016) Effect of high CO₂ levels on dynamic photosynthesis: carbon gain, mechanisms, and environmental interactions. *J Plant Res* 129:365-377.
 - 30) L. L. Jiang, S. P. Wang, F. D. Meng, J. C. Duan, H. S. Niu, G. P. Xu, X. X. Zhu, Z. H. Zhang, C. Y. Luo, S. J. Cui, Y. M. Li, X. E. Li, Q. Wang, Y. Zhou, X. Y. Bao, Y. N. Li, T. Dorji, S. L. Piao, P. Ciais, J. Peñuelas, M. Du, X. Q. Zhao, L. Zhao, F. W. Zhang, G. J. Wang (2016) Relatively stable response of fruiting stage to warming and cooling relative to other phenological events. *Journal of ecology*, 97(8), 1961-1969.
 - 31) Ben Niu, Yongtao He, Xianzhou Zhang, Gang Fu, Peili Shi, Mingyuan Du, Yangjian Zhang, Ning Zong (2016) Tower-Based validation and improvement of MODIS gross primary production in an alpine swamp meadow on the Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 8, 1-19.
 - 32) Fandong Meng, Yang Zhou, Shiping Wang, Jichuang Duan, Zhenhua Zhang, Haishan Niu, Lili

- Jiang, Shujuan Cui, Xin'e Li, Caiyun Luo, Lirong Zhang, Qi Wang, Xiaoying Bao, Tsechoe Dorji, Yingnian Li, Mingyuan Du, Xinquan Zhao, Liang Zhao, Guojie Wang, David W. Inouye (2016) Temperature sensitivity thresholds to warming and cooling in phenophases of alpine plants. *Climatic Change*, 139, 579-590
- 33) Hongqin Li, Fawei Zhang, Yingnian Li, Junbang Wang, Leiming Zhang, Liang Zhao, Guangmin Cao, Xinquan Zhao, Mingyuan Du (2016) Seasonal and inter-annual variations in CO₂ fluxes over 10 years in an alpine shrubland on the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 228, 95-103.
- 34) Fandong Meng, Shujuan Cui, Shiping Wang, Jichuang Duan, Lili Jiang, Zhenhua Zhang, Caiyun Luo, Qi Wang, Yang Zhou, Xine Li, Lirong Zhang, Tsechoe Dorji, Yingnian Li, Mingyuan Du, Guojie Wang (2016) Changes in phenological sequences of alpine communities across a natural elevation gradient. *Agricultural and Forest Meteorology*, 224, 11-16.
- 35) Xine Li, Lili Jiang, Fandong Meng, Shiping Wang, Haishan Niu, Amy M. Iler, Jichuan Duan, Zhenhua Zhang, Caiyun Luo, Shujuan Cui, Lirong Zhang, Yaoming Li, Qi Wang¹, Yang Zhou, Xiaoying Bao, Tsechoe Dorji, Yingnian Li, Josep Penuelas, Mingyuan Du, Xinquan Zhao, Liang Zhao, Guojie Wang (2016) Responses of sequential and hierarchical phenological events to warming and cooling in alpine meadows. *Nature Communications* 7:12489 | DOI: 10.1038.
- 36) Xianzhou Zhang, Ling WANG, Yongtao He, Mingyuan Du, Jing ZHANG, Peili Shi, Chengqun YU, Yangjian Zhang (2017) Impact of Water Vapor on Elevation-dependent Climate Change. *Journal of resources and ecology*, 8 (1), 5-9.
- 37) Ben Niu, Xianzhou Zhang, Yongtao He, Peili Shi, Gang Fu, Mingyuan Du, Yangjian Zhang, Ning Zong, Jing ZHANG, Jianshuang WU, Satellite-based Estimation of Gross Primary Production in an Alpine Swamp Meadow on the Tibetan Plateau: A Multi-model Comparison. *Journal of resources and ecology*, 8 (1), 57-65.
- 38) Du M., J. Liu, X. Zhang, Y. Li and Y. Tang. (2017) Spatial distributions of Surface-air-temperature on the Tibetan Plateau and its recent changes *International Journal of Energy and Environment*, 11, 88-93.
- 39) Zhang X., Wang L., He Y., Du M., Zhang J., Shi P., Yu C., Zhang Y. (2017) Impact of Water Vapor on Elevation-dependent Climate Change. *Journal of Resources and Ecology*: 8:5-9.
- 40) Niu B., Zhang X., He Y., Shi P., Fu G., Du M., Zhang Y., and Zong N., Zhang J. Wu J. (2017) Satellite-based Estimation of Gross Primary Production in an Alpine Swamp Meadow on the Tibetan Plateau: A Multi-Model Comparison. *Journal of Resources and Ecology*: 8:57-65.
- 41) Niu B., He Y., Zhang X., Du M., Shi P., Sun W., Zhang L. (2017) CO₂ Exchange in an Alpine Swamp Meadow on the Central Tibetan Plateau. *Wetlands*, DOI 10.1007/s13157-017-0888-2.
- 42) Niu B., He Y., Zhang X., Zong N., Fu G., Shi P., Zhang Y., Du M., and Zhang J. (2017) Satellite-Based Inversion and Field Validation of Autotrophic and Heterotrophic Respiration in an Alpine Meadow on the Tibetan Plateau. *Remote Sens.* 2017, 9, 615; doi:10.3390/rs9060615.
- 43) Meng F., Jiang L., Zhang Z., Cui S., Duan J., Wang S., Luo C., Wang Q., Zhou Y., Li X., Zhang L., Li B., Dorji T., Li Y. and Du M. (2017) Changes in flowering functional group affect

responses of community phenological sequences to temperature change. *Ecology*, 98(3), 734–740.

- 44) Hu Y., Z. Zhang, Q. Wang, S. Wang, Z. Zhang, Z. Wang, G. Xu, M. Du and Feike A. Dijkstra. (2017) *Climatic Change* (2017) 143:129–142.
- 45) Yao Y., X. Wang, Y. Li, T. Wang, M. Shen, M. Du, H. He, Y. Li, W. Luo, M. Ma, Y. Ma, Y. Tang, H. Wang, X. Zhang, Y. Zhang, L. Zhao, G. Zhou and S. Piao. (2018) Spatiotemporal pattern of gross primary productivity and its covariation with climate in China over the last thirty years. *Glob Change Biol.* 24:184–196. *Agricultural and Forest Meteorology*: 252, 121-129.
- 46) Zhao J., T. Luo, R. Lia, H. Wei, X Li, M. Du, Y. Tang. (2018) Precipitation alters temperature effects on ecosystem respiration in Tibetan alpine meadows.
- 47) Meng F., Ji S. Zhang Z., Wang S. Duan J., Wang Q., B. Li, Luo C., Jiang L., Zhang L., P. Liu, Wang R. W. Lv, Z. Wang, Dorji T. and Du M. (2018) Nonlinear responses of temperature sensitivities of community phenophases to warming and cooling events are mirroring plant functional diversity. *Agricultural and Forest Meteorology*: 253-254,31-17.
- 48) Yao Y., Z. Li, T. Wang, A. Chen, X. Wang, M. Du, J. Jia, Y. Li, H. Li, W. Luo, Y. Ma, Y. Tang, H. Wang, Z. Wu, J. Yan, X. Zhang, Y. Zhang, Y. Zhang, G. Zhou and S. Piao. (2018) A new estimation of China's net ecosystem productivity based on eddy covariance measurements and a model tree ensemble approach. *Agricultural and Forest Meteorology*: 253-254,84-93.
- 49) Ge R., H. He, X. Ren, L. Zhang, P Li, N. Zeng, G. Yu, L. Zhang, S. Yu, F. Zhang, H. Li, P. Shi, S. Chen, Y. Wang, X. Xin, Y. Ma, M. Ma, Y. Zhang and M. Du (2018) A Satellite-Based Model for Simulating Ecosystem. *Remote Sens.* 10, 149, 1-20.

(2) 口頭発表

- 1) 唐艷鴻、李瑞成、廣田充、羅天祥：日本生態学会第 60 回大会(2013)
「異なる標高における植物の温度感受性評価」
- 2) 富松元、唐艷鴻：日本生態学会第 60 回大会(2013)
「光合成誘導反応の制限に及ぼす高 CO₂ 環境の影響」
- 3) 飯村康夫、大塚俊之、曹广民、賀金生、廣田充、下野綾子、唐艷鴻：日本生態学会第 60 回大会(2013)
「チベット高山草原における標高差に沿った土壌有機物の諸特性」
- 4) H. Tomimatsu and Y. Tang : 98th ESA Annual Meeting, 2013
"CO₂ supply and acclimation effects on photosynthetic induction response in Populus plants"
- 5) H. Tomimatsu and Y. Tang : 11th International Association for Ecology Congress, 2013
"Which effects of short- or long-term CO₂ response dose the enhanced photosynthetic induction response under high CO₂ environment?"
- 6) Y. Tang and H. Tomimatsu : 16th International Congress on Photosynthesis, 2013
"Temperature response of dynamic photosynthesis changes with environmental CO₂ concentration"
- 7) 小池百合子、浅沼順：日本気象学会大会講演予稿集、vol. 103、pp 241. (2013)

「モンゴル北部における水蒸気のバックトラジェクトリー解析」

- 8) 宮崎真、萬和明、浅沼順、近藤雅征、斉藤和之：日本地理学会発表要旨集、Vol 84、pp 112. (2013)
「季節凍土上の半乾燥草原における陸面過程モデルによる水文過程の再現性」
- 9) M. Du, Y. Li, F. Zhang, L. Zhao, S. Gu, S. Yonemura and Y. Tang : International Joint Conference of 11th AsiaFlux International Workshop, 3rd HESSS, 14th Annual Meeting of KSAFM, 2013
"International changes of temperature and CO₂ Exchange in an alpine meadow on the Tibetan Plateau in recent 12 years"
- 10) H. Tomimatsu and Y. Tang : The 78th Annual Meeting of the Botanical Society of Japan, 2014
"Photosynthetic response and leaf carbon gain under dynamic light "sunfleck" in natural habitat"
- 11) J. Asanuma, D. Ojima, K. Yorozu Y. Chen, M. Hosaka, K. Ichii, JAMSTEC; A. Ito, J. Hong, M. Kondo, Q. Li, K. Mabuchi, S. Miyazaki, W. Parton, H. Sato, K. Tachiiri, X. Zhang, Y. Xue, K. Yang, Z-L. Yang, Ailikun : MAIRS Open Science Conference, 7-10, Apr, 2014, Friendship Hotel, Beijing, China
"A summary of Asian Dryland Model Intercomparison Project (ADMIP)"
- 12) 唐艶鴻：日本生態学会第 61 回大会 (2014)
「青海・チベット草原の炭素循環に及ぼす放牧の影響評価」
- 13) 富松元、唐艶鴻：日本生態学会第 61 回大会 (2014)
「熱帯林林床の高 CO₂ 濃度が実生の炭素獲得におよぼす影響評価。」
- 14) 米村正一郎、安立美奈子、唐艶鴻：日本生態学会第 61 回大会 (2014)
「マレーシア 4 つの生態系土壌のガス交換」
- 15) 廣田充、下野綾子、白石拓也、李英年、古松、杜明遠、唐艶鴻：日本生態学会第 62 回大会 (2015)
「チベット高山草原における標高と放牧圧の違いに着目した植生構造とその変化—2007 年から 2014 年の変化—」
- 16) J. Asanuma, T. Sato, K. Aida, Y. Koike, K. Kobayashi, M. Saito, G. Davaa, and D. Oyunbaatar : Asian monsoon Hydroclimate -Review of MAHASRI and Beyond-, 4-5, March, 2015, Nagoya Univ., Japan
"Hydrometeorology in Mongolian Grassland"
- 17) 米村正一郎・杜明遠・唐艶鴻・富松元・Christine・Saw：日本農業気象学会 2016 年全国大会 (2016) :
「マレーシア熱帯林における林床の気象の特徴について」
- 18) 杜明遠・米村正一郎・唐艶鴻：日本農業気象学会 2016 年全国大会 (2016) :
「乗鞍におけるハイマツ群落の気象特徴について」
- 19) 富松元. 2017. 光照射パターンが開花フェノロジーにおよぼす影響. P2-P-450 日本生態学会第 64 回大会, 東京

- 20) 廣田充,西村貴皓,万銘海,杜 明遠,李英年,唐艷鴻, 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 (2016 年 3 月、仙台) 講演要旨,P2-495-
- 21) 西村貴皓,万銘海,廣田充,下野綾子,白石拓也,李英年,杜 明遠,唐艷鴻, 日本生態学会第 63 回全国大会 (2016 年 3 月、仙台) 講演要旨,P2-30-
- 22) Mingyuan Du,Yingnian Li,Fawei Zhang,Liang Zhao,Song Gu,Seiichiro Yonemura,Yanhong Tang, Statistical features of NEE and its relationship with temperature variations in an alpine meadow on the Tibetan Plateau in recent 14 years, Abstracts of AOGS 13th Annual Meeting, 31 Jul to 5 Aug, 2016, Beijing, China.
- 23) Mingyuan Du, Seiichiro Yonemura,Shigeto Kawashima,Xianzhou Zhang,Yongtao He,Ben Niu,Yanhong Tang, Abstracts of AOGS 13th Annual Meeting, 31 Jul to 5 Aug, 2016, Beijing, China.
- 24) Du M., Tang Y., Yonemura S., S. Kawashima, X.Zhang, Y. Li, Y. He, B. Niu, F. Zhang, L. Zhao L. and S. Gu. (2017) Some meteorological characteristics in high mountain region on the Tibetan Plateau, Abstracts of Third Pole Science Summit TPE-CSTP-HKT Joint Conference, Kunming, China.
- 25) M. Du, Y. Li, F. Zhang, H. Li, L. Zhao, S. Gu, S. Yonemura, Y. Tang. (2017) Climatic Variations in Recent Years on the Tibetan Plateau and Its Effect on Annual NEE and Ecosystem Respiration - an Example in an Alpine Meadow, International Congress of Ecology--INTECOL 2017 Beijing.
- 26) M. Du, Y. Li, F. Zhang, H. Li, L. Zhao, S. Gu, S. Yonemura, Y. Tang. (2017) Predictions of NEE and GPP variations with temperature increasing in an Alpine Meadow on the Tibetan Plateau, Joint conference of AsiaFlux Workshop 2017 and the 15th Anniversary Celebration of ChinaFLUX, Beijing, China.
- 27) M. Du, Y. Li, F. Zhang, H. Li, L. Zhao, S. Gu, S. Yonemura, Y. Tang. (2017) Predictions of NEE variations for future temperature increasing in an Alpine Meadow on the Tibetan Plateau, International Workshop on Response and Feedback of Forest Ecosystem Carbon, Nitrogen and Water Cycles to Climate Change, Xoshuangbanna, China.
- 28) 廣田充、唐艷鴻 (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 第 64 回日本生態学会 (2017 年 3 月、東京)
- 29) Mitsuru Hirota (2017) Eastern Asian grasslands under environmental changes towards sustainable future, T2-07, The 12th International Congress of Ecology, Beijing, August 21, 2017.
- 30) Mitsuru Hirota, Minhai Wan, Yingnian Li, Mingyuan Du, Yanhong Tang (2017) Microclimate and livestock grazing influence CO2 fluxes in an alpine grassland on the Qinghai Tibetan Plateau. The 12th International Congress of Ecology, Beijing, August 21, 2017.
- 31) Nobuhide Fujitke, Kyoko Kitamura, Beibei Han, Takeshi Suzuki, Miyuki Kondo Shen Haihua, Yingnian Li, Yanhong Tang, Mitsuru Hirota (2017) Soil organic matter properties in an

alpine grassland used as summer pasture on the Qinghai Tibetan Plateau. The 12th International Congress of Ecology, Beijing, August 21, 2017.

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

- 1) 国立環境研究所「環境儀」63号に本研究一部の成果を紹介

(<https://www.nies.go.jp/whatsnew/20170112/20170112.html>)

- 2) 2017年北京で開催された第12回国際生態学会でシンポジウム (Eastern Asian grasslands under environmental changes towards sustainable future, T2-07) を開催し、本研究の結果を広く紹介した。

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

- ① 本研究は、アジア指標生態系に関する長期観測ネットワークの基幹を構築した。4カ国5サイトを含めた観測ネットワークは、アジア陸域の温暖化影響の評価に対して、データ蓄積の不足を解消し、特に脆弱生態系の観測空白を埋めることに、論文やデータの提供などによって、貢献している。また、今後のアジア広範囲の温暖化影響に関する観測と評価に対して、特に高山生態系と熱帯生態系の温暖化適応策の策定に、必要な基礎データが蓄積できた。今後、これらのデータを活用し、温暖化適応研究への展開とまた関連研究へのデータ支援が期待される。
- ② 全球地球観測システム (GEOSS) や生物多様性観測ネットワーク (BON) などに対して、生態系の管理と環境保全、生物多様性保護に関する観測データ・知見及び評価方法を提示した。