

課題名	チベット高原を利用した温暖化の早期検出と早期予測に関する研究		
担当研究機関	独立行政法人国立環境研究所 独立行政法人農業環境技術研究所		
研究期間	平成17-21年度	合計予算額 (当初予算額 ベース)	78,958千円 (うち21年度 14,212千円)
研究体制	<p>(1) 温暖化に関連する生態系物理環境の長期モニタリング (独立行政法人農業環境技術研究所)</p> <p>(2) 温暖化に関連する生態系の構造と機能の定期調査 (独立行政法人国立環境研究所)</p> <p>(3) 温暖化影響の早期検出と早期予測に関する方法の開発と確立 (独立行政法人国立環境研究所)</p>		
研究概要	<p>1. 序 (研究背景等)</p> <p>主に人間活動に起因とされる温暖化が生態系にさまざまな影響を及ぼしている。しかし、生態系は構造と機能が極めて複雑であるため、温暖化影響の現状把握は不十分であり、将来の気候変化が生態系にどのような影響を及ぼすかについては明確な答えも殆どない。地球温暖化が非常に早い速度で進行している中、生態系に及ぼす温暖化影響を早期に検出し、そして将来の影響をなるべく早い段階で予測することが極めて困難な課題であり、非常に緊急な課題でもある。</p> <p>地球温暖化に伴う気候条件の変化、とりわけ気温の上昇に対して、生態系の応答は一定の時間的遅延が生じることが認識されている。その遅延の程度は生態系によって異なる。高緯度高標高の地域では、温暖化の影響が著しく遅延の時間も短いことが予想される。したがって、生態系に及ぼす温暖化影響の早期検出と早期予測のため、遅延時間の短い生態系をモニタリングすることは一つの有効な手段であると考えられる。</p> <p>チベット高原は地球上もっとも標高の高い生態系を持ち、標高が高いため気温が低く北極と南極以外に地球の第3極とも呼ばれている。地球の動きと大気循環の視点から、この地域はまるで大気中に突出した高いタワーのような存在で、気候の変化がこの高原では周辺の低地に比べ、顕著で観測されやすいと考えられている。これまでの研究では、過去数十年間チベット高原の気温の上昇幅は、近隣の低標高地域と比べはるかに高いことが示唆されている。一方、この地域の生態系が脆弱であり、環境のわずかな変化に対する生態系の応答反応も非常に大きくなることも予想される。しかし、本研究が始まるまでに、気候変化とそれに対する生態系の応答に関する長期観測データはほとんどなかった。</p> <p>そこで、本研究では、温暖化に伴う気候変化とそれが生態系に及ぼす影響の早期検出と早期予測のため、チベット高原の高い標高と大きな標高勾配に注目し、長期観測手法の確立、観測データの蓄積、及び観測データからの気候変化と生態系の応答関係の解明と予測モデルの開発を行った。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>本研究は以下の三つの具体的目的を設定した。それぞれを一つのサブテーマとした (図1)</p> <p>1) 地球上もっとも標高の高い生態系を利用し、温暖化に伴う気候条件の変動特性を明らかにする。具体的に、①標高の変化に伴う気温の空間的変動パターンに焦点を絞って、気温の上昇およびほかの関連気象要素 (降水・日射) の長期モニタリング手法の確立を目指すこと；②物理環境の長期モニタリングを行い、異なる標高の生態系における大気環境の変化特徴を明らかにすること；③これらの観測データと生態系の変化を関連付け、温暖化に伴う物理環境の変化の早期検出と早期予測のためのデータ解析を行うことであった。</p> <p>2) 生態系に及ぼす温暖化の影響をなるべく早期に検出することを目指す。具体的に、まず、対象生態系の構造 (群落の種組成、植生タイプ、土壤微生物など) と機能 (主に炭素・水・エネルギーフラックス)、そして生態系における過去の変化歴などの背景状況を明らかにする。つぎに、物理環境の変化に対して、高山生態系の構造上・機能上の変化特性、とくに時間変動特性を把握する。さらに、生態系の階層構造 (遺伝子、種、個体群、群落) にも注目し、気候変動</p>		

- が各階層に及ぼす影響を観測し、それぞれの変化特性を解明する。
- 3) 上記1)と2)の調査結果を利用し、過去の気象データやリモートセンシングデータも加えて、気候条件の変化と生態系の変化との関係を解明し、温暖化影響の早期検出と早期予測の方法を探る。

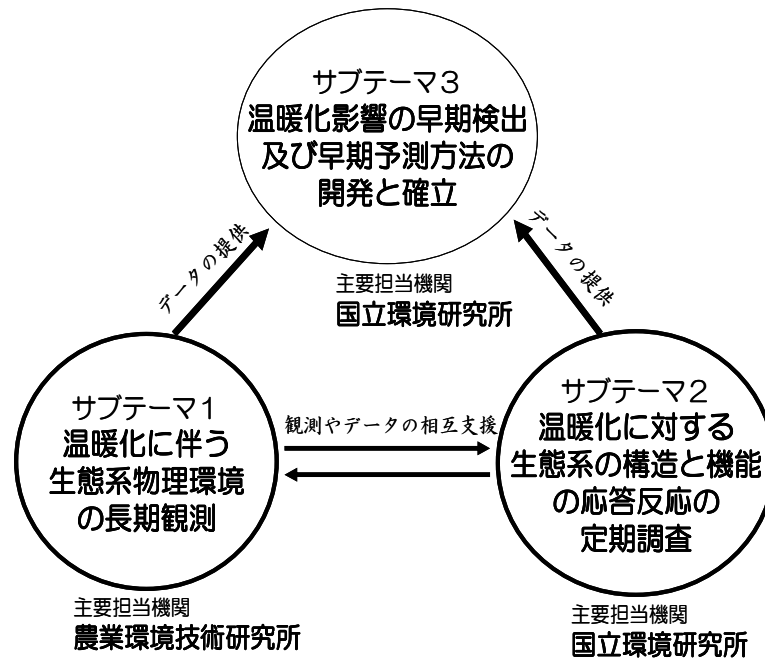


図1. 本研究の全体像

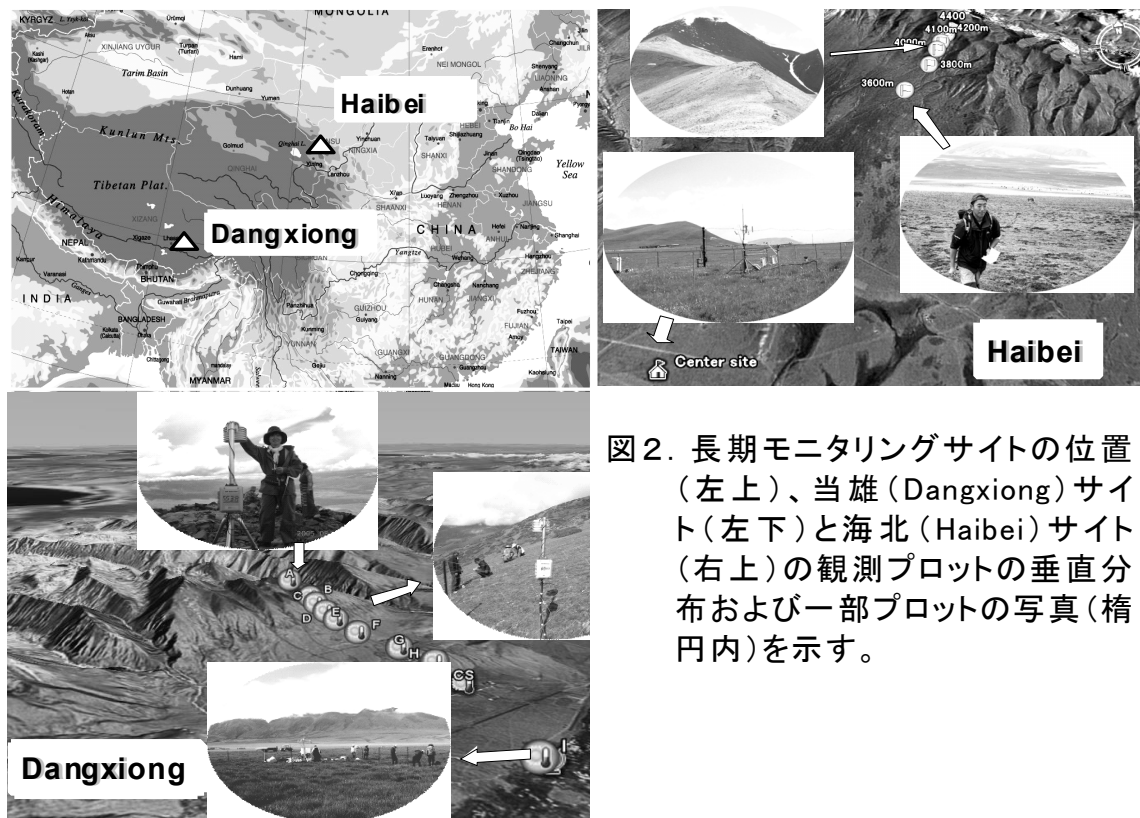


図2. 長期モニタリングサイトの位置 (左上)、当雄 (Dangxiong) サイト (左下) と海北 (Haibei) サイト (右上) の観測プロットの垂直分布および一部プロットの写真 (楕円内) を示す。

3. 研究の内容・成果

本研究においてこれまでの研究成果は、多数の国際誌に掲載されているが、成果を纏めた発信として2009年度に *Journal of Plant Ecology* との国際誌に特集号（2回刊行）を刊行した。以下の内容は公表された結果の一部と投稿中の成果をサブテーマ別に纏めてみた。

（1）温暖化に関連する生態系物理環境の長期モニタリング

青海・チベット高原は広大で、気候や生態系の特性が地域によって大きく異なる。本研究では、最も広い生態系を代表できる高山メドウ（Alpine meadow）地域に注目し、チベット高原の北限に位置する祁連山脈（チーリェン山脈）の海北、と高原の中央部に位置する念青唐古拉山脈（ニェンチェンタラ山脈）の当雄を長期モニタリングサイトにした。

「気候変化モニタリングシステム」の設立

この二つの観測サイトにおいても、「気候変化モニタリングシステム」を設立した。このモニタリングシステムは、山の麓に位置する総合気象観測サイトと山の南斜面に設置した垂直観測トランゼクトから構成される。

総合気象観測サイトでは、それぞれの斜面の下端位置に自動気象観測装置（AWS）を組み立て、気温、降水、湿度、土壌水分に加え、風向、風速、日射量、降水量、放射収支および熱収支の観測を行っている。また、衛星リモートセンシングデータとの結合を考えて、赤と近赤外領域の放射計も設置した。これらの長期観測データは、モデムと携帯電話を経由して、リアルタイムでモニタリングできるように通信システムを構築した。

垂直観測トランゼクトは、複数のプロットで気温・湿度・地温・土壌水分等の微気象観測を行っている。2005年に当雄サイトでトランゼクト上の異なる標高の10地点（4300 m、4400 m、4500 m、4650 m、4800 m、4950 m、5100 m、5200 m、5300 m、5500 m）、2006年に海北サイトで6地点（3200 m、3600 m、3800 m、4000 m、4200 m、4400 m）の気象観測プロットを設置した（図2）。ただし、生態系の調査は各サイトの一番上のプロットについて植生がないため行われていない。本研究で構築した温暖化モニタリングシステムは、「高標高」、「大きい標高差」と「統合的な生物環境の観測」の三点に関して、世界的にみても例のないシステムである。

主な観測結果

まず、垂直観測トランゼクトの多点観測から、生態系の物理環境の垂直分布パターンを明らかにした。①当雄サイト10点の観測データから、標高に対する気温の逓減率（高度に対する気温低下の割合）は夏と秋にほぼ一定で0.65~0.69(°C/100m)であった。しかし冬には4950m以下では常に気温の逆転層ができ4500m~4800m帯には温暖層があることが分かった。一方、チベット高原および周辺における30年平均気温の標高に対する逓減率は、緯度の影響を除くと、冬（1月）と夏（7月）ともにほぼ0.6°C/100mであることも示した。②気温以外に生態系影響に大きな気候条件として、水分状況を検討した。両サイトとも年降水量の変化は非常に大きかった。例えば、当雄では2006から2008まで各年の降水量はそれぞれ、273mm、380mm、627mmであり、3年間に降水量の多い年は少ない年の倍以上であった。降水は夏期（8月、9月）に集中し、相対湿度は夏から秋にかけ比較的高い値が観測された。これはアジアモンスーン気候の特徴でもある。③風速は秋から冬にかけ、徐々に強くなり、特に1月前後に強風の日が多い。

つぎに、上記の気候条件と植生との関連性について検討した結果、①植生指数の年変化は気温より水蒸気圧の年変化パターンに近い；また、②チベット高原東北部の海北と中央部の当雄は、草の分布上限が1000mも異なるが夏の植物成長期における気候条件は非常に一致するなどのことがわかった。

また、本サブテーマは他の二つのサブテーマに観測データを提供し、研究全体の円滑遂行にも大きく貢献した。

（2）温暖化に関連する生態系の構造と機能の定期調査

本サブテーマは、温暖化に対する生態系の応答反応（生態系に及ぼす気候変化の影響）を早期に検出するため、植物の遺伝子、種・個体群、ミニ生態系（垂直トランゼクトのプロット）、およびチベット高原生態系全体について、現地調査・野外測定を行った。

遺伝子解析からみた気候変動と植物の分布

温暖化が植物種分布への影響を検出・評価・予測するときの基礎的知見を得るために、過去の氷期・間氷期という気候変動に応じた植物の分布変化の歴史を、分子系統地理学的手法により推定した。チベット高原に広範囲に分布する植物金縷梅 *Potentilla fruticosa* L.を対象に、標高の高い高原中央部から標高の低くなる北東部にわたる23集団の葉緑体DNAの変異を解析した。その結果、高標高域の中央部集団は遺伝的多様性が高く起源の古い変異を保持していた。一方標高の低い北東部集団は遺伝的多様性が低く起源の新しい変異が優先していた。つまり高標高の高原中央部は過去の気候変動期を通じてキンロバイ集団が存続可能だったことを示唆している。このことは今後の温暖化が進行した際、種

の分布変化の予測または種の保全を考えるうえで重要な知見である。この研究の一部成果は日本生態学会でポスター賞を受賞した。

指標種

本研究の中間評価を受けてから指標種に関する研究にさらに力を入れてみた。温暖化影響の早期検出するためのモニタリング指標種を検討するため、青海チベット高原全体に分布する早春植物である天山報春 (*Primula nutans*、サクラソウ科サクラソウ属) の基礎的生理生態特性を一連の調査を行った。天山報春は早春緑の草原で目立ったピンクの花を咲くこと、物理環境条件 (気温、光、水分など) の変化に対して明瞭な形態的生理的变化を示す特性から、本種は温暖化モニタリングの指標種に相応しい候補種であることを示した。この体系的な研究は3つの連続論文として公表された。

植物は環境の変化に対して形態的・生理的な順応ができる。このような順応特性は温暖化影響の指標性を低下する側面がある。そこで、指標種の評価も気温変化に対する順応特性の定量評価が必要である。本研究では、Open Top Chamber (OTC) 内で栽培した高山植物を対象に、気温の上昇に対する植物の光合成・呼吸の順応特性の測定と解析を行った。その結果、OTC 内気温の上昇に対して竜胆属植物の光合成速度の順応が認められ、順応程度とそれが植物の物質生産の影響も評価できた。このような研究は、温暖化指標種についての検討に始めた試みであり、今後その成果の応用が期待される。

一方、本研究では、チベット高原の鉄道沿線に沿って、植物指標種になりうる種の空間的分布、それぞれ種の形態と物質生産特性の空間的変動を調査した。同じ種についても生息地の年平均温度低下に伴い個体サイズが小型化になり、地下部への配分が多くなることを明らかにした。これらのデータは、温暖化影響の評価に必要な指標種の選別に重要な基礎的知見を提供できる。

生態系の構造と機能の評価

指標種を利用した温暖化影響の検出と評価は、個々の種の分布範囲や植物群落内指標種以外の種の動態などの要素から影響を受けることがある。そこで、ある空間範囲内の植物群落 (ミニ生態系) の構造と機能の理解は生態系に及ぼす温暖化影響の検出と評価において重要になる。本研究では、ミニ生態系レベルで温暖化影響を早期に検出するための調査と測定を行った。標高差の大きいトランゼクトにおけるミニ生態系の構造 (植物群落の組成、種多様性など) と機能 (炭素・水・エネルギーフラックスなど) の観測は本研究の特色でもある。

【ミニ生態系の構造】まず、二つサイトのトランゼクトのミニ生態系について、植物群落組成・土壌微生物の組成の調査を行い、それぞれの垂直分布パターンを明らかにした。植物群落について標高の違いが大きくなるほど構成種の類似度が小さくなり、400 m の標高差で約半分の種が入れ替わることが示された。微小菌類相は標高間で高頻度種に相違がみられ、標高 5200m は低温耐性のセルロース分解菌相で他の標高より相対的に多いが、しかし、セルロース分解は標高 5200m 以上では分解活性が有意に低く、最大分解活性は標高 4950m でみられた。

【ミニ生態系の炭素吸収機能】一方、ミニ生態系の機能面での検討から、生態系呼吸は低標高では高く、標高の上昇に伴い低下することを示したが、気温の変化に対する生態系呼吸の応答速度 (Q10) は高い標高では高いことを観測した。また、生態系光合成は標高の変化に伴う明瞭な変化パターンが認められなかった。このようなミニ生態系の機能と環境要因との解析も行い、環境要因の変化によってミニ生態系の炭素吸収機能の変化の推定も可能になった。この研究の一部成果は日本生態学会でポスター賞を受賞した。

【放牧の影響】チベット高原では完全に自然な草原が極めて少ない。多くの場合放牧が行われている。生態系構造と機能の変化を的確に検出するため、放牧の影響も評価しなければならない。そこで、本研究では、上記のトランゼクトにおいて、放牧の影響を取り除くための柵を作って比較観測を行った (注: 現在も継続中である)。これまでの観測では、放牧は植物種多様性への影響があることが示された。一方、生態系機能については、生態系呼吸は柵内では柵外に比べ低い傾向があったが、光合成は柵外の方が高い。しかし、高標高では柵内外に生態系光合成と呼吸が明瞭な差がなかった。

【温暖化移植実験】今後温暖化影響の検出と予測のため、2006年から高標高から低標高へのミニ生態系移植実験を行った。移植したのは、50cm 深さの土壌と植生を含めた直径 30cm の円柱、または 1 x 1 m の四方体である。また、移植の影響を取り除くため、同じ標高での移植も行った。今までの結果、高い標高から移植したミニ生態系はバイオマス成長が増える場合が多いが、一部の種 (特にクッション植物) の成長が悪くなることも示唆された。この実験は現在でも観測中であり、今後の観測結果が期待される。

(3) 温暖化影響の早期検出と早期予測に関する方法の開発と確立

本サブテーマでは、生態系の変化と気候条件の関係を解明し、モデリングのアプローチで、温暖化とその影響の早期検出・早期予測に関する方法を開発する。生態系の変化については、生物季節相、葉面積指数 (LAI) や生態系機能の指標になる生態系の炭素フラックスに絞った。気候条件については主に既存の気象観測データを利用した。また、中間評価の指導に従い、モデル研究にさらに重視するように研究の調整を行った。

生態系の生物季節相と気候変化

まず、早期検出と早期予測を行うための現状把握として、チベット高原の気候条件と生物季節相の空間変動特性を明らかにした。その結果、①2004年までの30年間にチベット高原全体の気温が著しく上昇し、年平均気温は年に0.028℃上昇したことがわかった。これは近隣地域より上昇幅が大きい。②年平均気温の上昇率は標高に伴う変化が少なかったが、冬季には標高の上昇に伴い気温の上昇率が低下し、逆に夏季には標高の上昇に伴い気温の上昇率が明らかに高いことが分かった。③また、年平均気温の低いところでは気温の上昇速度が速いことが示された。④生物季節相については、1983年から17年間の衛星画像を利用し季節相の変化を検討した結果、標高の上昇に伴う春の展葉時期の早期化が顕著になる傾向が示された。さらに、⑤気温の低いところでは展葉時期が早いことがわかった。

生態系変化の検出力の向上

生態系変化の検出力を高めるため、花の反射スペクトル特性についての測定、解析およびモデリング研究を行った。その結果、Hyperspectral flower index (HFI)を開発し花の量(植生に対する割合)を正確に推定することを可能にした。そして、植生の季節相の変化をさらに正確に推定するため、花の影響も考慮したバイオマスの推定モデルを提示した。この研究は一連の成果を得て、多くの国際誌で論文を発表した。

予測モデルの開発

本研究では、中間評価を受けてから温暖化影響の早期予測のため、異なる角度からモデルの開発に力を入れてみた。これらのモデルは温暖化程度の大きくまたは早い高標高生態系の気候データの利用を条件として、生態系影響の早期予測を目指した。

まず、もっとも単純な経験モデルとして、これまでの気候データと生態系の季節相について多変量解析を行い、気候条件から生態系の季節相の推定・予測する多変量モデルを開発した。このモデルを使ってチベット高原決められた地点について季節相の変化を高い精度($R^2=0.64$)で推定できた。

つぎに、生態系機能の指標の一つである生態系の炭素フラックスの時間的変化を検討し、衛星データと生態系炭素フラックスとの間に高い相関を確認できた。これらの結果は生態系機能の変化の予測に応用されることが期待される。

さらに、既存全球モデルを利用し、チベット高原全体について、生態系構造の指標であるLAIと機能の指標である炭素フラックスの推定モデルを開発し、温暖化条件下でこれらの指標の変化の予測と検討を行った。

4. 考察

(1) 気候変化

本研究での気候変化の観測は以下の特徴がある。まず、地球上最も標高の高い生態系についての長期・多点の気候変化の観測研究である。特に、大気・物理環境だけでなく、土壌の物理環境も含め、本研究のような高い標高と大きな標高差のトランゼクトの観測は未だに例がないであり、いずれも観測の空白を埋めた。つぎに、本研究の気候観測は、主にサブテーマ2と3へデータを提供すると位置づけであった。これらの観測結果はすでに生態系機能の解析に十分に利用されている。

一方、本研究の気候観測データの解析から、新しい知見を得た。膨大な観測データは今後更なる解析が期待されるが、これまでの解析結果の中で、すでに多くの興味深い結果があった。例えば、標高の変化に伴う気温の通減率は以下の三つの点が注目される。まず、夏の通減率は冬の通減率より低いことである。つぎに、低標高より高標高ところの通減率が大きいことである。この2点から、気温の低い環境または時期では、温度の通減率が高いことが示唆されている。このことも、高標高や高緯度の温暖化速度が速くなることに貢献しているかもしれない。さらに、土壌温度と気温の標高に伴う変化が異なることである。

また、トランゼクトのデータから気温の垂直分布にある逆転層が注目される。これまで多くの生態系の観測がありながら植物多様性の垂直分布パターンは複雑でそのメカニズムが十分に解明されていない。その主な理由は気候環境の垂直分布特性に関する詳細な観測データがないためである。

しかし、前出したような詳しい気候条件の観測は直近の約5年間しかない。このような時系列データからでは、気候の長期変動の解析は困難な面がある。温暖化そのものの早期検出のためには、さらに長期間の観測が必要である。一方、これまでの詳しいデータの更なる解析は、生態系の温暖化影響の早期検出に大変重要な情報を提供できると思われる。

このようなことから、本研究は今後の継続観測と更なる詳細な解析が望ましい。

(2) 生態系の変化から温暖化影響の早期検出に関する検討

生態系は複雑な階層構造を持つため、一部の階層についての観測は、生態系影響の全容を解明するためには不十分である。一方、すべての階層について研究を展開することも現実的でない。そこで、

本研究では、主に三つのレベルで研究の展開を図った。それは、遺伝子レベル、個体レベルと生態系レベルである。

遺伝子レベルのデータ解析では、チベット高原における過去の気候変動と植物の分布について貴重な知見を得た。過去の気温が高い時期に、一部高山植物の避難所となった位置もこれまで推測された通りに遺伝子レベルで示唆した。このような研究は、今後チベット高原の温暖化に伴う植生の分布検討に必要な知見であり、温暖化影響の検出と予測の背景値にもなる。また、この種の研究は、膨大なデータを集める必要があり、今後もっと広い地域やもっと多くの生物種についての検討が望ましい。

つぎに、生態系に及ぼす温暖化影響の早期検出のための指標種に関する研究は特色がある。今まで指標種に関する体系的な研究はほとんどない。指標種に関する研究の殆どは特定の種について一部形質や生理特性に絞った内容である。本研究では、チベット高原に広く分布する早春植物天山報春を指標種として、その分布、微環境、生理生態特徴について一連の調査を行い、指標種として比較的に全面的な評価を行った。このような結果を利用して、気候条件と指標種の詳しい観測データがあれば、温暖化影響の評価と検出が可能になる。一方、本研究では、個体レベルでの研究として、人為的に「温暖化」した条件下で植物の光合成・呼吸の影響を調べた。面白いことに、高山植物は気温の変化に光合成と呼吸がすでに順応反応を示した。この順応反応の有無や順応に必要な時間は温暖化影響の予測にも大きな影響がある。

生態系レベルの研究結果も興味深い。生態系呼吸は、生態系機能の主な指標の一つである。異なる標高の生態系呼吸（生態系光合成も）の変化は、主にその標高の温度環境に起因することも考えられる。生態系の構造（種組成や土壌環境など）も間接的に温度環境の長期的な影響として理解できる。したがって、この結果は、温度環境に対する生態系機能の応答に関して、重要な知見である。一方、昨年度の解析では、標高の高いところでは、同じ気温の上昇に対し生態系呼吸速度の上昇が大きいことが示された。このことは、温暖化影響の早期検出に非常に興味深い現象である。今後の継続観測と確認が必要である。

（3）早期予測に関する研究

温暖化影響の「早期」予測は極めて困難な課題である。生態系の応答シグナルをなるべく早い段階で「検知」できることは、早期予測のひとつの鍵になる。現段階では、温暖化影響の早期検出は世界的にも研究途上であり、確実な知見が少ない。

本研究では、如何に早期予測に関わるシグナルを早期検出するかについて、いくつかの角度から工夫をした。まず、生態系の変化、特に気温の変化に回答する変化をすこしでも高い精度検出できれば、「早期検出」に寄与できる。本研究では世界的にみても初めて花の反射特性を詳しく検討した。その結果は、今後広く応用できることが期待できる。もう一つの工夫としては、衛星データから如何に生態系の季節変化を正確に把握できることである。本研究では、初めて生態系 CO_2 フラックスの時間的変化と衛星データから得た NDIV の時間変化を関連付けることを成功させた。この方法は、すでに多くの CO_2 フラックス観測データについて検証してある。また、生態系機能の指標ともなる GPP の推定モデルの向上により、生態系の機能的な面からの生態系の変化を少しでも評価の精度を上げ、早期検出にも寄与できる。さらに、温暖化影響の早期予測は、気候変化の早期検出にも工夫ができる。今後、気候変化の詳しい解析から有用な情報を得られるかもしれない。そのために、本研究のような標高の高い生態系での長期かつ連続観測が極めて重要であり、必要である。

上記の基礎的な検討以外、本研究では予測モデルの開発も着手した。非常に単純な予測モデルとかなり複雑なモデルを構築した。直接的な人為的影響がない場合、生態系の変化は気候変化に高い依存関係がある。チベット高原の場合、人口密度が低く比較的人為的な影響が少ない。本研究の多変量解析では気温と降水そしてサイト位置は春の展葉時期を非常に高い説明力があることがわかった。これらの知見から経験モデルでチベット高原生態系の季節変化を予測可能である。一方、比較的複雑なモデルの場合、生態系 LAI や炭素フラックスを非常に良い精度で予測できることもわかった。チベット高原の草原生態系の植生が比較均一であることもこの精度のよい予測に貢献しているかもしれない。