

## 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

## (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

大気環境研究領域 杜 明遠・米村正一郎

京都大学農学研究科 川島茂人

独立行政法人国立環境研究所

生物圏環境研究領域 唐 艶鴻

平成17～21年度合計予算額	12,428千円
(うち、平成21年度当初予算額)	2,263千円)

## [要旨]

チベット高原を利用した温暖化の早期検出と早期予測のため、2005年にチベット高原中央部の当雄、2006年に高原北部の海北に温暖化観測システムを構築し、長期モニタリングを始め、現在も継続中である。温暖化観測システムは総合気象観測サイトと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は、日射・温度・水などの気象環境の、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、降水量等の観測を行った。プロットは、当雄では海拔4300mから5530mまでの10地点（標高差1200m）、海北では3600mから4400mまでの5地点（既存の3200mの観測サイド入れて計6地点、標高差1200m）に設置した。両垂直観測トランゼクトでも草原植生の限界線（草線）を含めた。草線の標高は海北では4200mにあり、当雄では5200mにある。4年半の観測の結果から、標高が1000mも異なるが、草線付近では夏の基本気候条件はほぼ同様であることが分かった。さらに、総合気象観測サイト（山麓）にある気象官署の過去50年の気象データと斜面での4年観測データの相関関係から、草線での気温上昇を推測した。また、観測結果から、標高に対する気温の遞減率は、夏にほぼ一定で0.65～0.69(°C/100m)であった。冬には当雄の4950m以下、海北の3800以下では常に気温の逆転層ができ、温暖層があった。当雄では、降水量は夏期に集中しており、秋から冬にかけては、きわめて少なくなる。標高5100mのところで降水量は最も多い。風速は秋から冬にかけて、徐々に強くなり、1月前後にもっとも強いことが観測された。一方、総合気象観測サイトの気象環境と生態系特性の関連を把握するため、植生指数と気象環境の関係を調べた。その結果、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との相関が高いことがわかった。すなわち、チベット高原の草原生態系では、水蒸気圧の変化と植生量が密接に関係していることが示された。

本研究では、地球の第三極ともいわれているチベット高原の高標高かつ大きな標高差を利用した多地点の連続気象観測は世界的にも貴重な試みである。4年弱の観測期間は気候の長期変動を検出できないが、厳しい自然環境の中で様々な困難を乗り越えて観測方法の確立と貴重な長期観測データは、地球温暖化の進行状況の解明に大変意義のある情報を得た。これらのデータはすでに生態系の構造と機能の解析に利用され、今後の継続観測とデータ解析が期待される。

[キーワード] 地球温暖化、生態系被害、早期予測、チベット高原、長期モニタリング

## 1. はじめに

地球温暖化に対する生態系の応答は、非常に複雑でありしばらく経ってから顕著になることが特徴である。この時間的な遅延ゆえに対処が遅れてしまい、多大な被害をもたらす可能性がある。従って、温暖化の影響を早期に検出することが極めて重要である。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、温暖化の影響が早期にかつ大きく現れる可能性が高い。そこで、本研究では、チベット高原において、気象環境の長期モニタリングを行い、温暖化を早期に検出する方法や、温暖化による生態系への影響を早期に予測する方法の開発を目指した。そのため、気候変動を直接的に反映する気象要素を把握すると同時に、生態系の変動にも注目した。

青海・チベット高原の気候に関するこれまでの研究はかなりの割合が1000年から100万年スケールの長期気候変動を扱った、いわゆる第四期研究または古気候研究の内容である。氷床や湖底堆積物中の同位体、花粉、成分構成などを使った様々なものがある。造山運動により海底から世界最高標高地域になった変動の大きな場所であること、氷河などの発達した地域であるため地史が氷中などにそのまま保存されやすかったことなどが、古気候や古環境の研究対象として、多くの研究者をひきつける理由であると考えられる。また、第四期の一時期に見られた、温室効果ガスの増加による全球温暖化期の記録は、近年の地球温暖化によってもたらされる生態系の将来像を、過去の中に見いだすことが出来る可能性を持っている。古気候、古環境の研究が扱う時間スケールは非常に長く、我々が考察しようとしている「地球温暖化と熱収支や植生との相互作用」に対して、間接的にはヒントとなるアイデアは見いだせるかもしれないものの、余りにも時間的スケールが異なっている。そこで当面は、これら第四期研究や、古気候、古環境に関する研究などは、レビューから除外することにする。

チベットの気候変動に関する研究で、次にカテゴライズされるのは、単独年から数十年（つまり、気象観測データを使うということ）の時間スケールで、チベットの気候・気象や地理と、周辺の気候・気象あるいは地球規模の気候・気象現象との関係を論じた研究である。チベット高原は、地球の第3の極と呼ばれ、回転体地球から大気中に突出したタワーのような地域であることから、大気側の変動の影響が現れやすいと考えられている。また、生物にとって非常に過酷な環境であることから、気候変動に対して、特に影響を受けやすい（脆弱という言葉を使う人もいる）地域であると考えられている。このような特性に着目し、様々な観点から、チベットの気候や気象を解析している。この時間スケールの研究の中から、我々の研究目的に関連した研究を選び出す。まず、チベットに関する最近の研究の中から、地球温暖化に関する論文を簡単にレビューする。さらに、熱収支や熱環境に関する論文と、植物の分布や変動に関する論文についてレビューする。

Luら<sup>1)</sup>は、中国内の温暖化の地域的な特性を明らかにした。DuanとYao<sup>2)</sup>は、温暖化の下でのヒマラヤモンスーンの変動性について論じた。LiuとChen<sup>3)</sup>は、最近10年間のチベット高原の温暖化状況について示した。Thomas<sup>4)</sup>は、蒸発散に着目し、その時間的空間的特性のトレンドを明らかにした。Duら<sup>5)</sup>は、チベット高原における人間活動と気候変動の間に存在すると考えられる相互作用について議論した。チベットの温度環境の変動傾向については、JiangとWang<sup>6)</sup>、Liら<sup>7)</sup>、TangとZhai<sup>8)</sup>などによる研究がある。

チベット高原の熱収支に関する研究としては、Xuら<sup>9)</sup>は、チベット高原上の熱と水の収支を2年間について見積もった。Maら<sup>10)</sup>は、リモートセンシングデータを用いて、チベット高原上の熱

収支を評価した。Guら<sup>11)</sup>は、地上観測データにもとづいて、草原生態系の熱収支を明らかにした。Gaoら<sup>12)</sup>は、チベット草原の熱収支、水収支などのモデル化手法について検討した。この他、チベットを対象とした熱収支に関する研究には、Xuら<sup>13)</sup>、Maら<sup>14)</sup>、XuとHaginoya<sup>15)</sup>、ZhaoとChen<sup>16)</sup>などがある。また、熱収支とも密接に関係する降水量に着目した研究も多い(e.g., Yangら<sup>17)</sup>、BhattとNakamura<sup>18)</sup>、Liら<sup>19)</sup>、Endoら<sup>20)</sup>)。

一方、植物と気候変動に関する研究も数多く行われている。Songら<sup>21)</sup>は、現在および将来の気候条件下で卓越する樹木の分布について考察した。Luoら<sup>22)</sup>は、亜熱帯から高山に至るトランゼクトを設定し、葉面積指数と純一次生産力の変化を明らかにした。Zhouら<sup>23)</sup>は、高山草原生態系の安定性について議論した。Caoら<sup>24)</sup>は、観測値にもとづいて、生態系の炭素フラックスの年次変動について明らかにした。これらのように、チベットを対象として、植生と気候との相互作用を扱った研究は、最近数年間だけでも様々な側面から行われている(e.g., Luoら<sup>25)</sup>、Songら<sup>26)</sup>、Ni<sup>27)</sup>、WengとZhou<sup>28)</sup>、Chenら<sup>29)</sup>)。

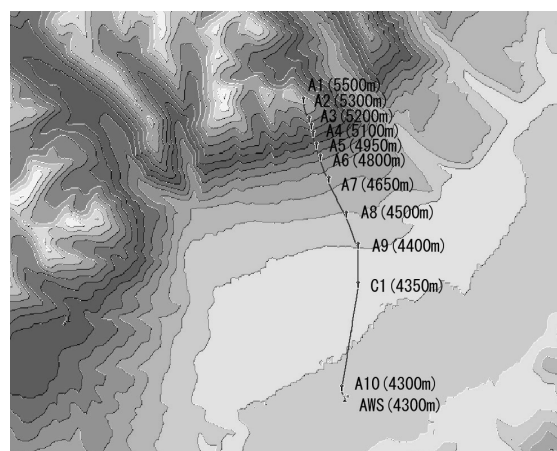
我々はこれまで行われてきた気候変動と植物生態系の相互作用に関する研究を基礎として、地球温暖化の生態系への影響を、早期に評価することが可能な指標を明らかにすることを目的としている。そのため本年度は、チベット高原中央部の当雄と東北部の海北に、長期自動気象観測システムを設置するとともに、標高差1200mのトランゼクトに沿って10地点と7地点の小型気象観測機器を設置し、観測値の収集をおこなった。同時に、植生や土壌の調査を定期的に行い、短期的な気象条件の変化や長期的な気候変動と、植生や土壌特性の変化との関係を明らかにしていく計画であった。

## 2. 研究方法

(1) チベット高原中央部に位置する当雄において、標高差約1200mのトランゼクト(調査横断面)を設定し、標高の異なる10地点に簡易気象観測システム(A1~A10)を設置し、気温、湿度、地温、土壌水分等のセンサを取り付けた。図1に、観測地域における標高の概要と、観測地点の配置を示す。C1は中国科学院の観測地点。図2に、簡易気象観測システムの設置状態を示す。

図1 研究対象地域の概要

A1~A10: トランゼクトに沿った気象観測機器の設置位置、AWS: 総合気象観測装置の位置、C1: 中国科学院観測地点



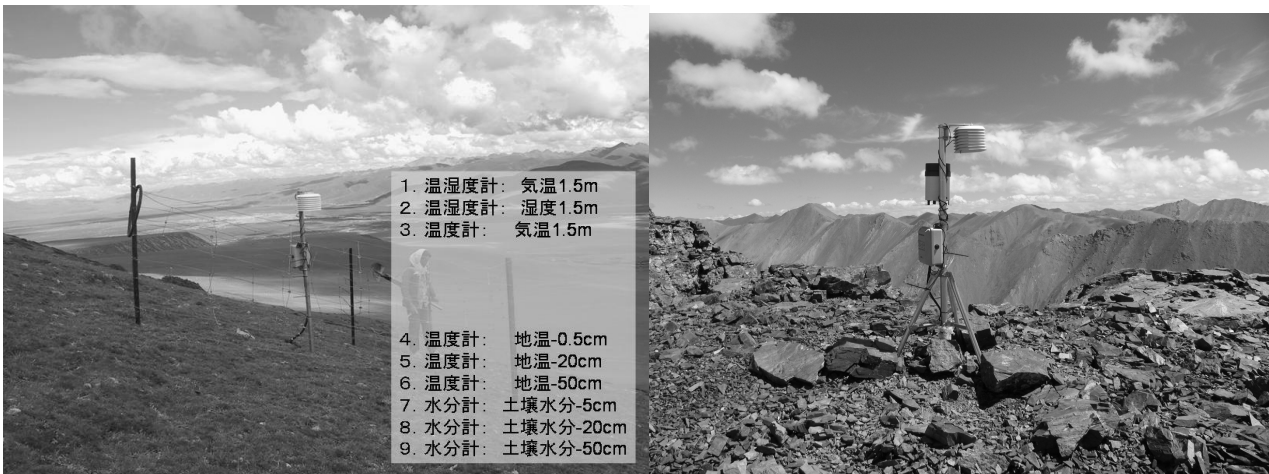


図2 簡易気象観測システムの設置状態（左：斜面上、右：山頂）

(2) トランゼクトの下端位置に、自動気象観測装置(AWS)を組み立て、気象要素(気温、湿度、風向、風速、日射量、降水量等)を長期間モニタリングできるようにした。

(3) 自動気象観測装置では、放射収支および熱収支も観測できるように、各種センサを取り付け、土壌水分計、地温形も複数設置した。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。設置時の観測装置の外観を図3に示す。自動気象観測装置のセンサおよび機器構成を図4に示す。



図3 設置時の観測装置外観

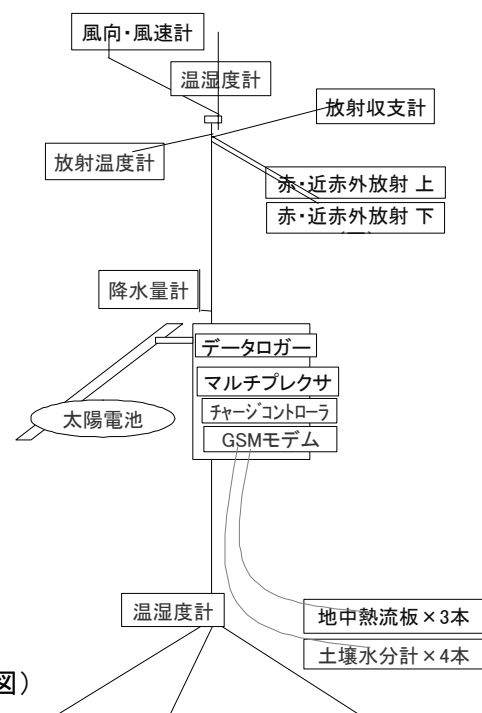


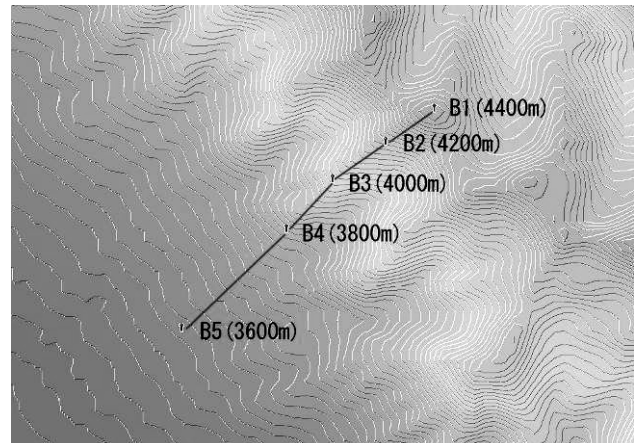
図4 自動気象観測装置のセンサおよび機器構成（右図）

(4) 自動気象観測装置のデータは、モデムと携帯電話を經由して、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。

(5) 2006年には、チベット高原の東北端に位置する青海高原にも、標高差約800mのトランゼクト(調査横断面)を設定し、標高の異なる5地点に簡易気象観測システム(B1~B5)を設置し、気

温、湿度、地温、土壌水分等のセンサを取り付けた。図5に、観測地域における標高の概要と、観測地点の配置を示す。

図5 青海高原海北観測トランゼクト。  
B1～B5：トランゼクトに沿った  
気象観測機器の設置位置



### 3. 結果

#### (1) トランゼクト観測値の解析結果

##### ① 日平均気温の分布

図6に標高に対する日平均気温の分布図です。冬に相対高度500mまで気温の逆転層があり、斜面に温暖帯が形成する。

##### ② 月平均気温のプロファイル

図7に標高に対する月平均気温のプロファイルを示す。夏には気温の遞減率はほぼ一定で、 $0.65 - 0.69^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ であるが、冬には4950m以下では常に気温の逆転層ができ、4500m～4800mの所は温暖層がある。図7に示すように、12月4650m（相対高度350m）の平均気温は常に4300mより高い。

③ 図8に標高に対する月平均地温（地下20cm）のプロファイルを示す。夏から秋にかけての地温低下時には、中低標高の所から冷却が始まったことがわかる。

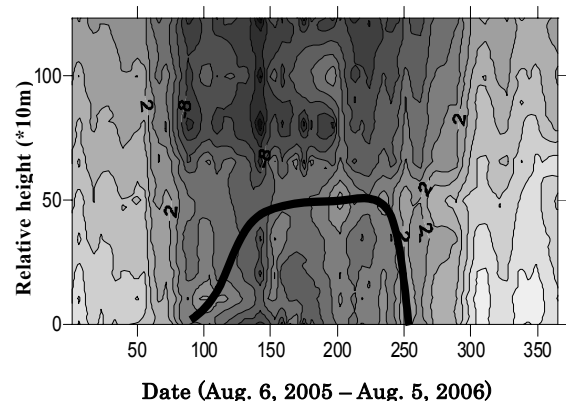


図6 標高に対する日平均気温の分布。黒線  
気温が最も高い高度を示す。

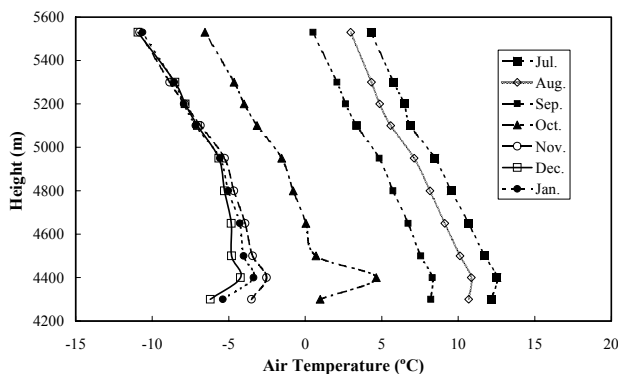


図7 標高に対する気温のプロファイル

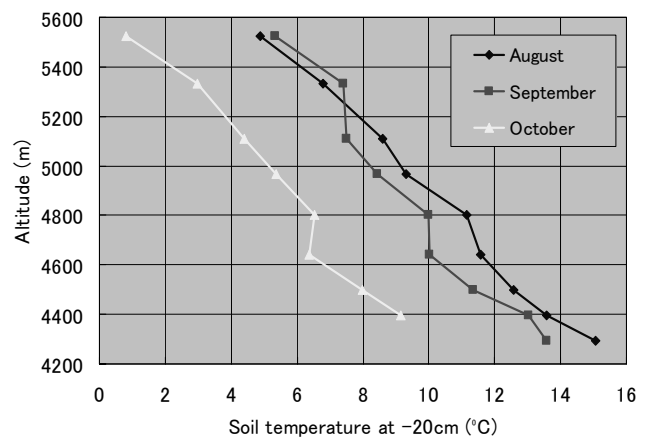


図8 標高に対する地温のプロファイル

④ 日最低気温の時空間変化

トランゼクトに沿って得られた日最低気温の時空間変化（トランスマップ）を図9に示す。横軸は日付、縦軸は標高である。8月から9月初めにかけては、各標高の最低気温は同じように低下したが、その後、標高の低い所ほど気温低下が速く進んだ。10月に入ると、トランゼクトの半ばより低い標高では、等温線が縦に並ぶ形になり、最低気温の標高差があまり無くなる傾向が表れた。斜面底部から100m程度の厚さの夜間逆転層が表れていると考えられる。

⑤ 青海高原におけるトランゼクト観測値

青海高原トランゼクトに設置した簡易気象観測システムで得られたデータも徐々に蓄積しつつある。図10に、青海高原トランゼクト上の3高度における、気温の経時変化観測値を示す。図11に、海北における冬の標高に対する平均気温のプロファイルを示す。当雄と同様に冬に3800m以下に逆転層がある。この逆転層は、図12に示すように、夏にも風速が弱い晴天にも現れる。

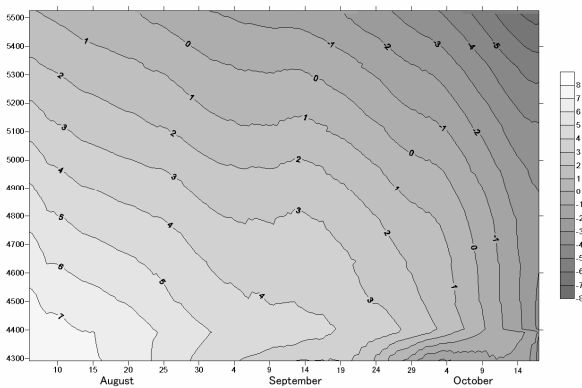


図9 最低気温のトランスマップ

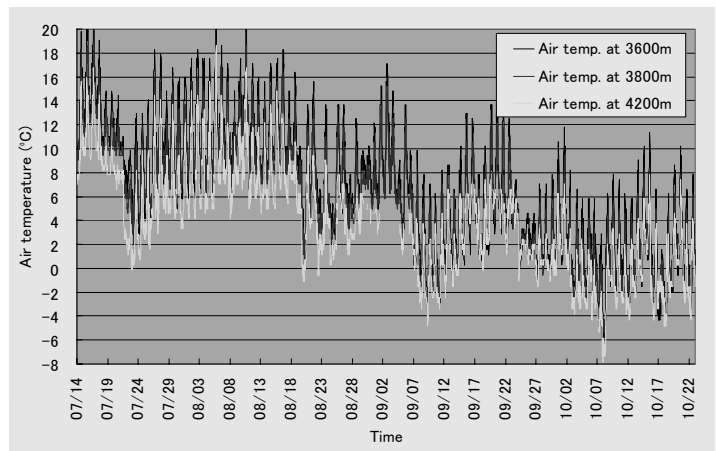


図10 青海高原トランゼクト上の3高度における、気温の経時変化観測値

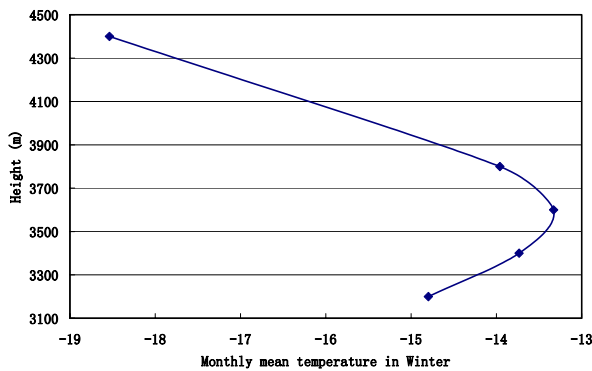


図11 海北における標高に対する気温のプロファイル（冬の平均）

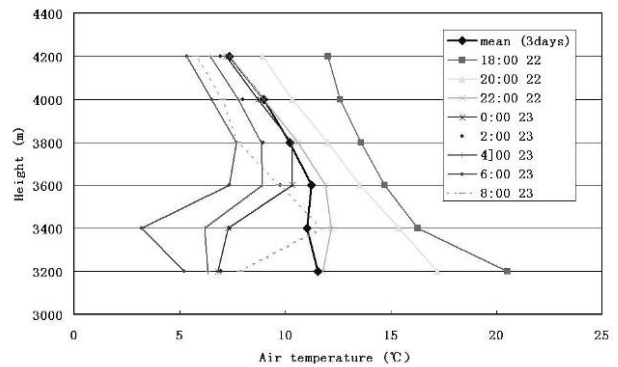


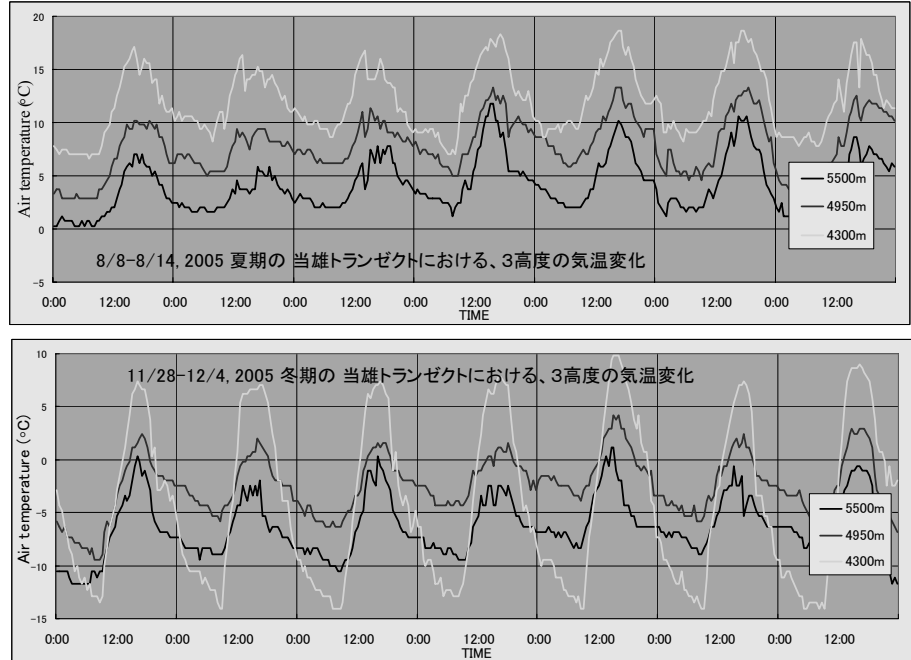
図12 海北における標高に対する気温のプロファイルの時間変化（夏、2008年7月22-24日）

⑥ 夏期と冬期の気温変化

図13に、夏期と冬期それぞれ1週間の気温経時変化を示す。5500mと4950mの気温を夏期と冬期

で比較すると、日変化パターンや日較差は、ほとんど同じで、平均値が10℃異なることが明らかな差である。一方、4300mの気温は、夏期と冬期で大きく異なり、冬期の日較差は夏期の2倍以上の大きさを示し、夜間の気温低下は、夜明けの直前まで低下し続けることがわかる。

図13 夏期と冬期それぞれ1週間の気温経時変化



⑦ トランゼクトの気温プロファイル

標高差1200mに沿った気温の変化を夏期と冬期について、時刻別に整理した。夏期は一日中どの時刻でも、トランゼクトの上から下まで、ほぼ一定の気温低減率を示した(図14)。5300m以上の2地点が、それら以下の地点よりも高温にシフトしているのは、これらの高度では、地表に植生が無くなるためであると考えられる。一方、冬期の気温プロファイルから、70%以上の時間で逆転層が現れていること、逆転層の高さは500m以上にもなること、日較差が標高5200m付近で最小となること、標高4300mの日較差は、20℃にもなることなどがわかる(図15)。日較差が最小となる高度は、植生限界付近であり、植物土壌系と大気との相互作用がある限界高度である。斜面の中央部の標高4600mから5200m付近は、広大な温暖帯となっている。

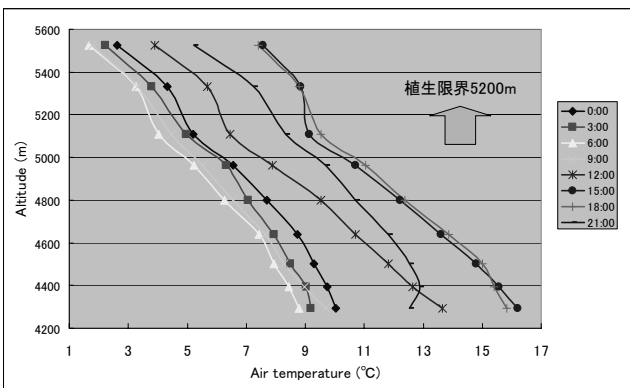


図14 夏期のトランゼクト気温プロファイル

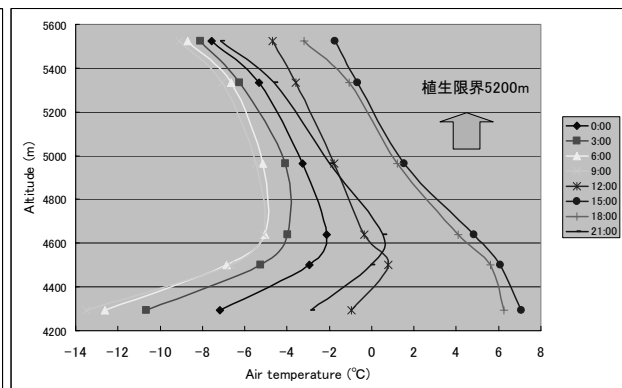


図15 冬期のトランゼクト気温プロファイル

⑧ 降水量の分布

図16にトランゼクトの年降水量の分布です。標高5100mでの降水量が最も多く、5100mまでは標高が高いほど降水量が増加するが、5100mより上では標高が高いほど降水量が減少している。また、降水量の季節変化は、図17に示すように、いずれの標高においても7～8月にかけて降水が多くなっており、モンスーン気候の特徴が表れていることがわかる。標高5500mでは1月と12月に多くの降水が観測されているが、他の標高ではこの傾向は見られない。また、降水量分布は明確な日変化を示した。夜間はいずれの標高でも降水がよく降ったが、特に斜面中腹で降水量が多くなった。一方、日中は高標高部を中心に降り、高標高部ほど降水量は多くなった。これは日中、加熱によって対流が発生し、水蒸気の輸送が起きているためであると考えられる。

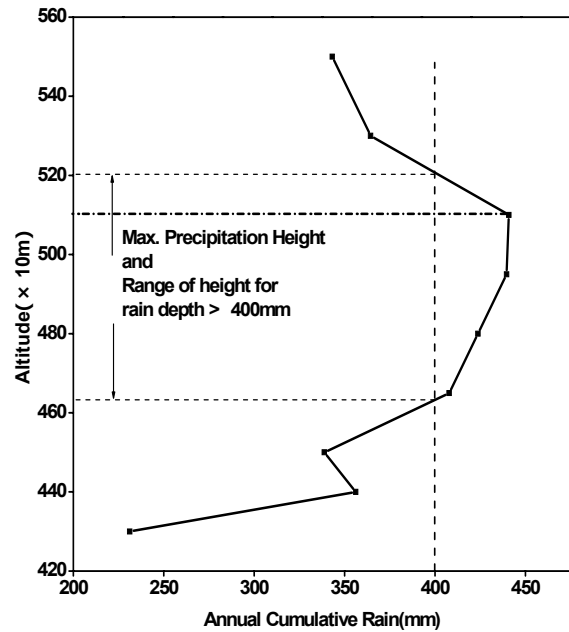


図 16 トランゼクト降水量プロファイル

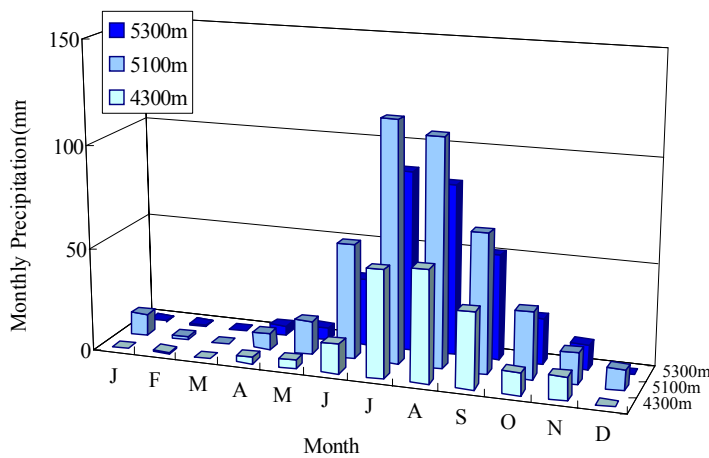


図 17 3つの標高  
(4300,5100,5300m)における月  
積算降水量の年変化 (2006年8  
月~2007年7月)

⑨ 気温の変動

図18には当雄における4300mと5540mの日平均気温の変化(2005年8月-2009年1月)を示す。両高度の温度変動は同じように見えるが、気温の差は夏より冬のほうが少ない。また、標高の高い5540mでは気温の日々変動(標準偏差)が大きく、特に、図19に示すように、冬には大きかった。これは、標高の高い斜面は谷間によりよく大気の実際の変動を現していると考えられる。海北では、同様な年々変動を観測された。この5年間、温暖化が見られなかった。逆に、2008年と2010年の冬は最も寒かった。当雄では、2010年1月の平均気温は2006-2009年の平均より3℃も低かった。



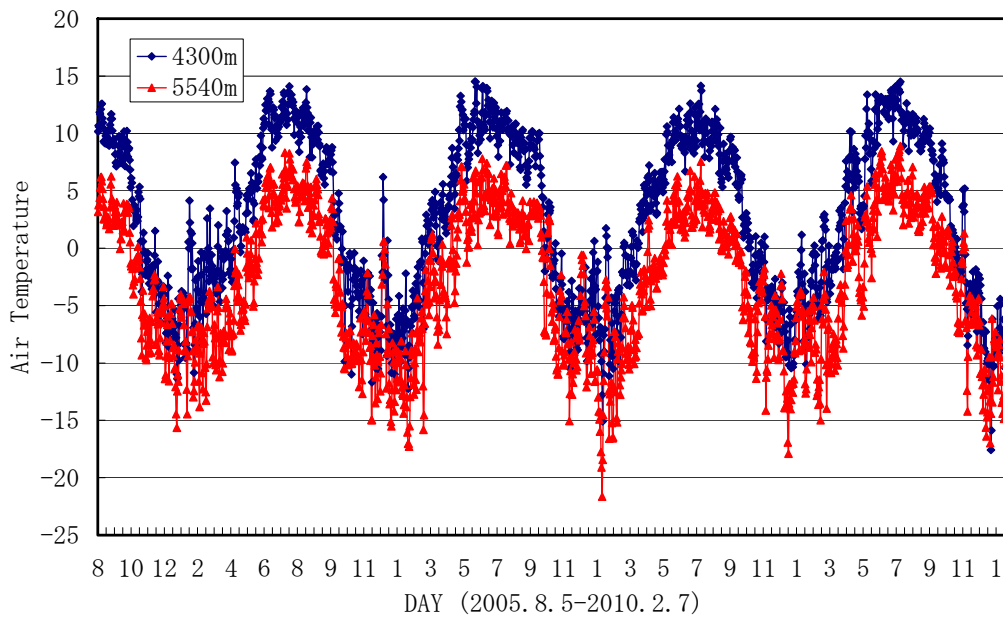


図 18 当雄における4300mと5540mの日平均気温の変化（2005年8月—2009年1月）

年々変動について、また4年余りのデータですが、夏に斜面上の気温は4年間の変動が少ないに対し、図20に示すように、冬に年々変動は非常に大きかった。4800mのところでは、暖冬の2006年と2010年冬の気温差は7℃以上もあった。しかし、植生限界地5200m付近の気温年々変動は小さかった。

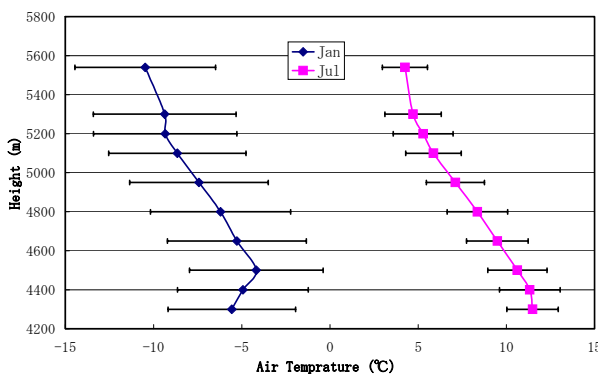


図 19 トランゼクト気温プロファイルと標準偏差（2005-2009）

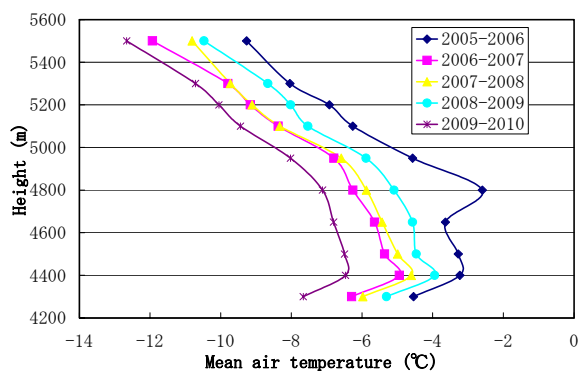


図 20 冬のトランゼクト気温プロファイルの年変化（2005-2009）

#### ⑩ 高山草原生存極限（草線）の気候

チベット高原中央部当雄の高山草原生存極限（草線）付近（標高5200m）および東北部海北高山草原生存極限（草線）付近（標高4200m）におけるの気象観測データを分析し、草原生存極限（草線）付近の気候条件を取りまとめた。チベット東北部の海北と中央部の当雄における草線の標高差は1000mになるが、3年以上の観測結果、両草線冬の気候条件が違うが（標高の低い4200mの草線は温度が低い）、夏の植物成長期における気候条件は非常に一致する。これは、チベット高原に

おける高山草原生存極限は主に気候で決まられていると考えられる。表1に示すように、チベット高原における高山草原生存極限の主な気候条件として、以下の3点を考えられる。a)最暖月の平均気温は5.0℃前後である。b)日平均気温0℃以上の積算温度は500℃日くらいであり、5℃以上の積算温度は240℃日くらいである。c)当雄における降水量の観測により、5200mから降水量は急激に減少することから、土壌水分も重要で、0-20cmの土壌体積含水量は5%以上である。

表1 チベット高原における高山草原生存極限（草線）と周辺の気候条件

	7-8月 平均気温	日平均気温 0℃ 以上積算温度	日平均気温 5℃ 以上積算温度	5cm 土壌 体積含水量	20cm 土壌 体積含水量
4200m草線	4.8±0.25℃	494±16 °C日	245±22 °C日	14±1.5 %	9±1.8 %
5200m草線	4.7±0.42℃	582±101 °C日	266±101 °C日	6±0.3 %	10±0.2 %

## (2) 自動気象観測装置による観測値の解析結果

チベット高原における気象観測値は継続的に得られている。今年度は、1年以上の観測値が得られた自動気象観測装置（AWS）によって得られた結果についてまとめる。

### ① 日平均気温

日平均気温は、正弦曲線形の明瞭な年周期変動を示す（図21）。高温期間は、7月から8月にあり、最大値は15.7℃である。低温期間は、12月から1月にあり、最低値は約-10.5℃である。日平均気温の年周期変動のレンジは、約26℃である。また、気温上昇期間の方が、気温降下期間よりも長い。9月から11月の気温低下速度は、2月から6月の気温上昇速度よりも大きい。

### ② 日平均水蒸気圧

日平均水蒸気圧は、正弦曲線形の明瞭な年周期変動を示す。高水蒸気圧の期間は、7月から8月頃であり、最大値は11.3hPaである。低水蒸気圧の期間は、1月から2月にあり、最低値は0.8hPaである。日平均水蒸気圧の年周期変動のレンジは、約10.5hPaである。年周期変動の位相は、気温とほぼ一致する。

### ③ 日平均風速

風速はきわめて特徴的な年内変動をする（図22）。夏期は風が弱く、冬期には風が強い。10月頃から徐々に風速が強くなり、1月までの4ヶ月間、経過日数に比例して風速は直線的に増加する。1月に最も風は強くなり、日平均風速の最大値が8m/sを超えた日も現れた。1月以降の風速はやや弱まるものの、風の強い期間は4月頃まで続く。5月になると風は弱まり、その後8月まで風速の弱い期間が続く。この期間の中でも、8月から9月頃の風が最も弱い。

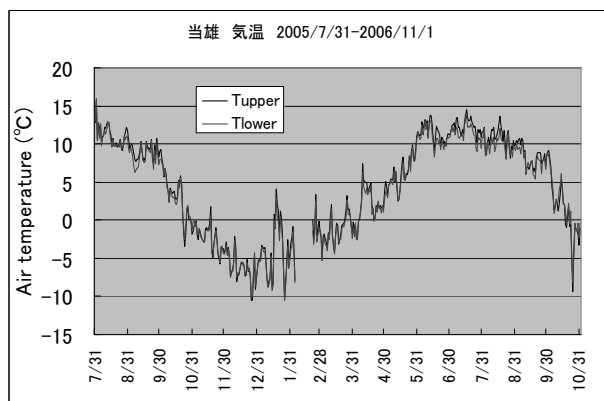


図21 当雄における気温の年変化

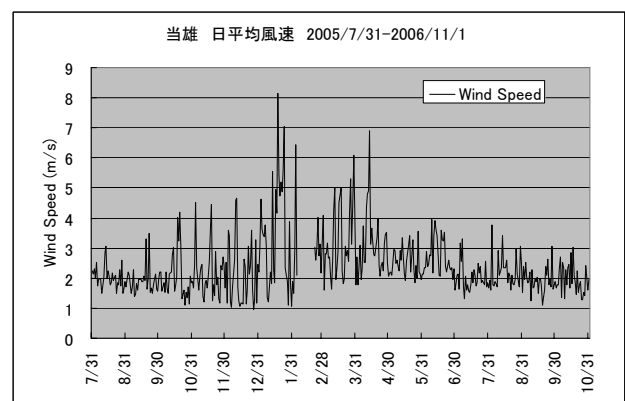


図22 当雄における風速の年変化

## ④ 短波放射

下向き短波放射について、最大値を結んだ包絡線が持つ年周期変化は明瞭で、 $35\text{MJ}/\text{m}^2$  から  $15\text{MJ}/\text{m}^2$  のレンジを示す（図 23）。放射量の大きくなる夏期の変動は大きく、チベットでは夏期高温期間が降雨期間になるためと考えられる。上向き短波放射については、 $5\text{MJ}/\text{m}^2$  以下の日が多く、年間を通じて安定した値を示す。10 月末に 2 年続けて表れたピークは、降雪によるものである。当雄では降雪は少なく、降っても短期間で溶けてしまい、地表面が雪に覆われる期間は非常に短いことがわかる。

## ⑤ 長波放射

長波放射は下向きも上向きも明瞭な年周期の変化を示す（図 24）。下向き長波放射のレンジは  $15\text{MJ}/\text{m}^2$  以上あるのに対して、上向き長波放射のレンジは  $10\text{MJ}/\text{m}^2$  より小さい。長波放射収支は冬期に大きくなり約  $10\text{MJ}/\text{m}^2$  となるが、夏期には小さくなり  $5\text{MJ}/\text{m}^2$  以下となる。冬期は短波放射収支が小さく  $10\text{MJ}/\text{m}^2$  程度なので、短波放射収支で入ってきたエネルギーは、そのまま長波放射収支で出て行くことになる。

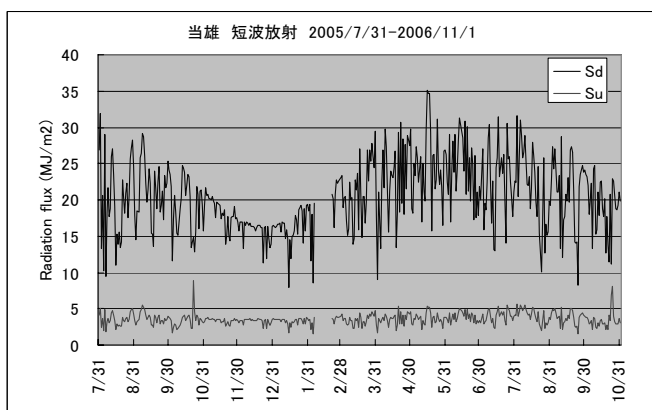


図 23 当雄における短波放射の年変化

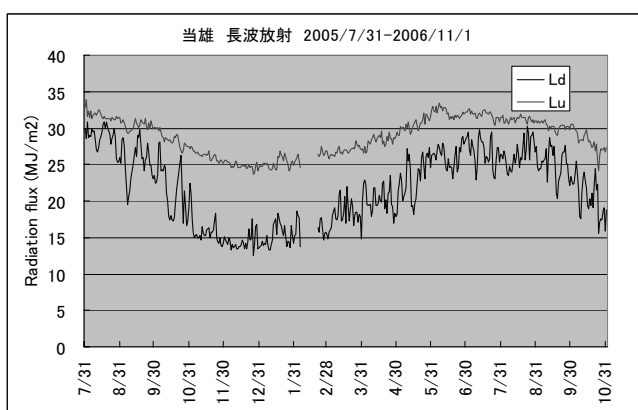
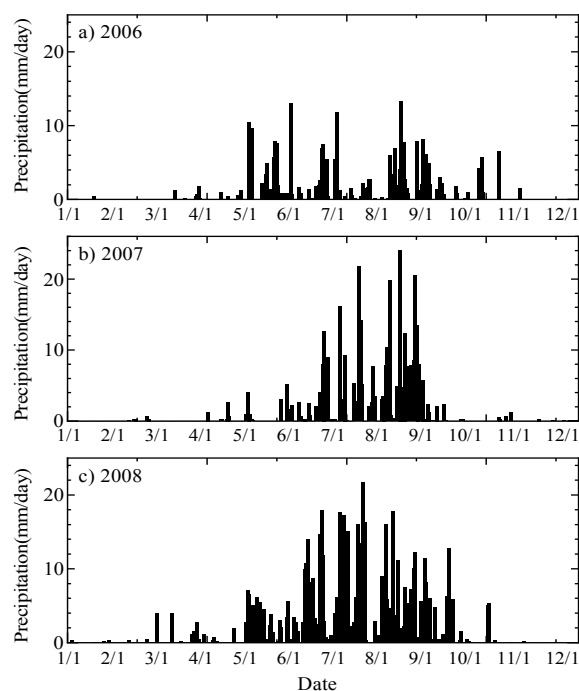


図 24 当雄における長波放射の年変化

## ⑥ 降水量

図 25 に当雄で観測された降水量の a)2006 年, b)2007 年, c)2008 年の年変化を示す。各年とも、降水は夏期モンスーン期である 6 月から 9 月に集中しており、冬期にはほとんど観測されていない。これは、アジアモンスーン気候の特徴であり、当サイトがその影響を強く受けていると考えられる。2006 から 2008 まで各年の降水量はそれぞれ、 $273\text{mm}$ ,  $380\text{mm}$ ,  $627\text{mm}$  である。2006 年は少雨高温の年で、2008 年は多雨低温の年と考えられる。

図 25 当雄における降水量の年変化。2006 から 2008 まで各年の降水量はそれぞれ、 $273\text{mm}$ ,  $380\text{mm}$ ,  $627\text{mm}$  である。



## ⑦ 植生指数 NDVI

植生指数を Skye 社の 2 波長放射計の観測値から以下の式によって計算した。

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}) \quad (1)$$

ここで、NIR は、近赤外波長での反射率であり、730 nm での上向き放射量を 730 nm での下向き放射量で割って求めた。RED は、赤色波長での反射率であり、660 nm での上向き放射量を 660 nm での下向き放射量で割って求めた。

植生指数の年変化はきわめて明瞭なラクダのこぶ型のパターンを示した。この年変化パターンを、他の様々な気象要素の年変化パターンと比較した。その結果、植生指数の年変化パターンと気温の年変化パターンでは、位相が明らかに異なり、特に上昇時は植生指数の変化がかなり遅れて表れることが分かった（図 26）。これに比べて、水蒸気圧の年変化パターンは、植生指数の年変化パターンと比較的良く一致し、位相のずれも気温より一致した（図 27）。これは、水分が十分に供給されている高山湿地の中においても、水蒸気圧の高低と植生の量が密接に関係していることを示す。またこのことは、乾燥している季節が卓越するチベット高原の湿地において、水収支に与える植生の影響が大きいことを示唆している。

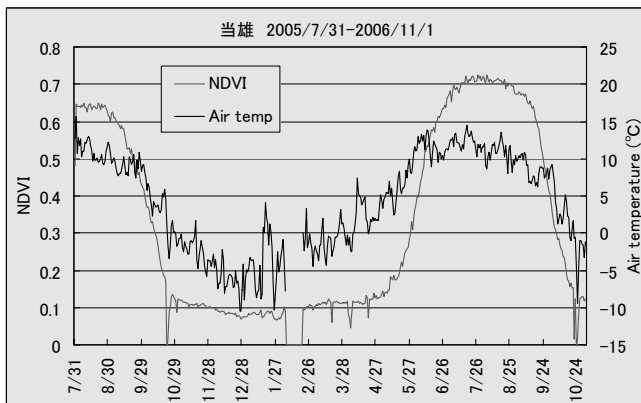


図 26 植生指数 (NDVI) と気温の年変化

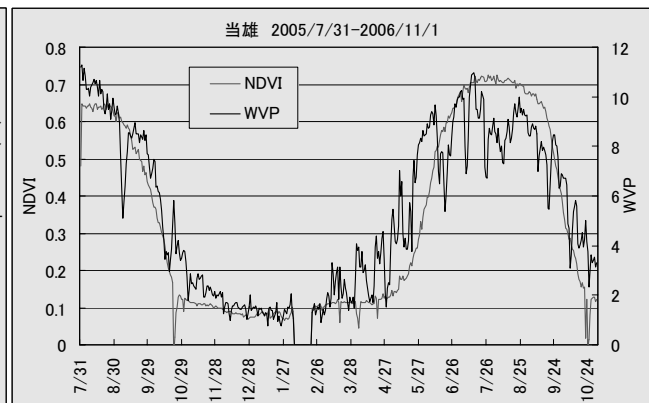


図 27 植生指数 (NDVI) と水蒸気圧 (WVP) の年変化

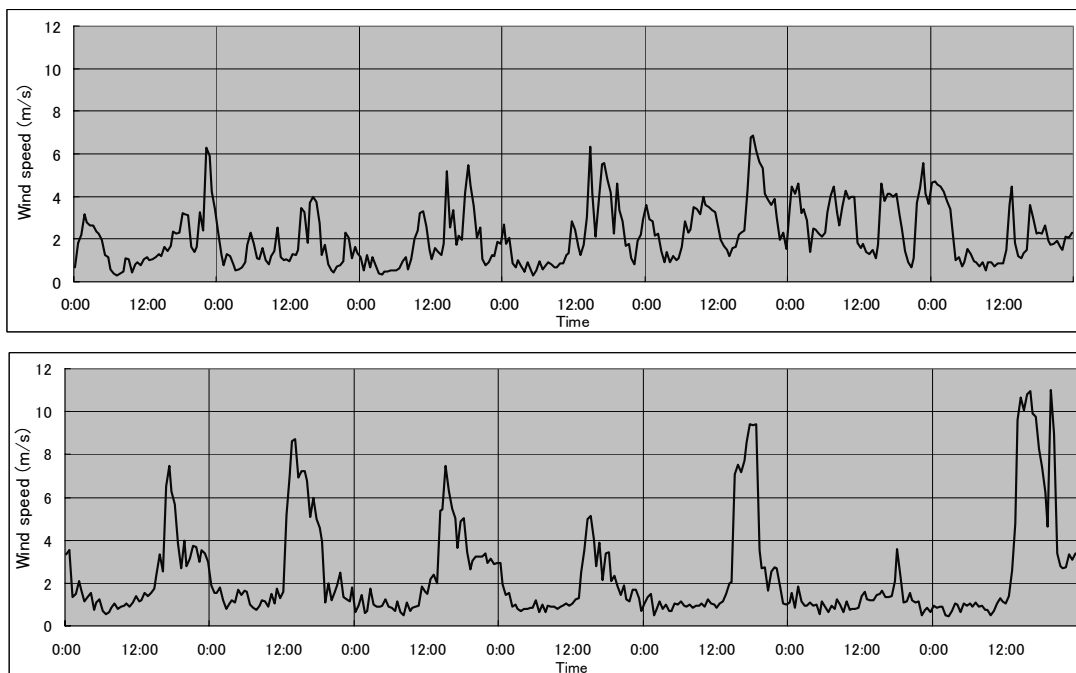


図 28 夏期(上段)と冬期(下段)における 1 週間の風速経時変化

### ⑧ 夏期と冬期の風速

図28に夏期と冬期の風速を示す。図29に昼と夜の平均風速の年変化を示す。冬期は夏期よりも日変化が明瞭で、日中の風速が強いこと、冬期夜間は安定層の影響で規則的に風速は弱くなるものの、最低でも1m/s位はあり、静穏状態にはならないことなどがわかる。

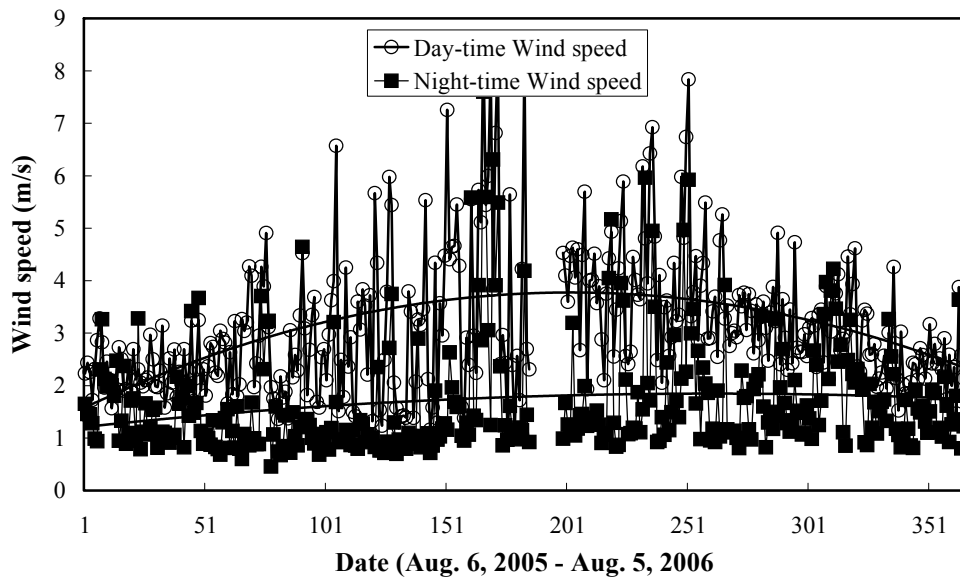


図 29 昼と夜の平均風速の年変化

### ⑨ 夏期と冬期の放射収支

4成分放射収支計の結果をもとに、夏期と冬期における正味短波放射収入量と正味長波放射支出量を求めた。夏期は短波放射収入量が、1日当たり15から20 MJ/m<sup>2</sup>、長波放射支出量が2から5 MJ/m<sup>2</sup>程度ある(図30)。この差15 MJ/m<sup>2</sup>位が、純放射として、蒸発散や顕熱フラックスに使われる。冬期は短波放射収入量がほとんど長波放射支出量として出て行ってしまい、純放射量は非常に小さな値になっている(図31)。昼と夜の正味放射は、冬に大きな負の値が示した(図32)。

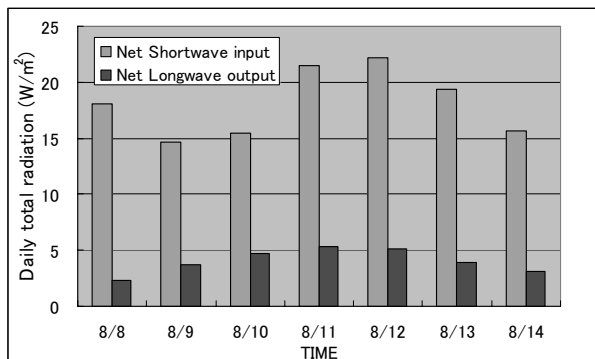


図 30 夏期の正味短波放射収入量と  
正味長波放射支出量

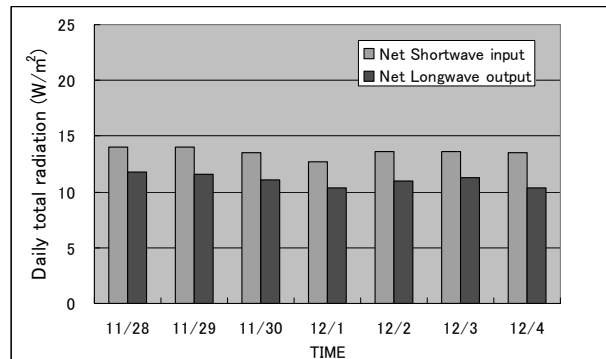
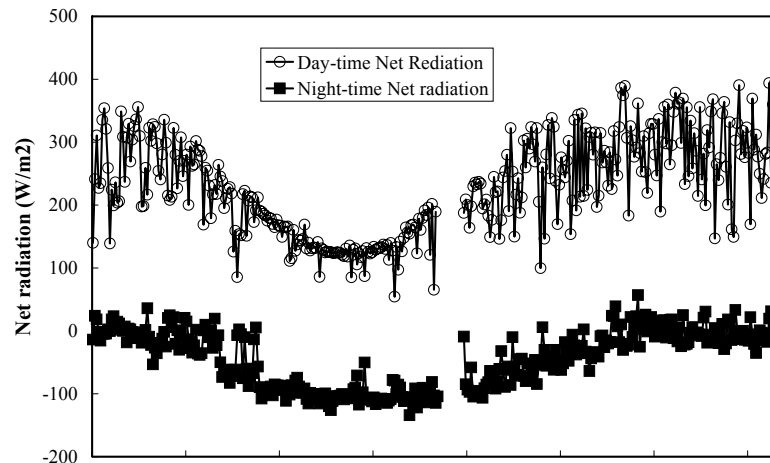


図 31 冬期の正味短波放射収入量と  
正味長波放射支出量



Date (Aug. 6 2005 – Aug.5 2006)

図 32 昼と夜の正味放射の年変化

(3) 既存の気象観測所観測値を用いた解析とシミュレーション

① 標高に対する気温の遞減率

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遞減率は、緯度の影響を除くと、冬（1月）と夏（7月）ともにほぼ $0.6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ である（図33）。また、当雄の斜面で得られた気温では、冬に逆転層が形成し、相対高度200–400mの斜面において、中腹温暖帯が見られることがわかった。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、温暖化の影響が早期にかつ大きく現れることが推測されているが、図33に示すように、標高4500m以上での気象観測値は極めて少なく、本研究課題で取得しつつあるデータは、非常に貴重であると考えられる。

② 冬の斜面上の気温分布のシミュレーション

冬に観測された斜面に温暖帯があることは、夜の放射冷却と山谷間の局地循環に在るものと考えられるが、検証するため、YSA社の乱流拡散モデルにより、シミュレーションを行った。図34にシミュレーションモデルに使う当雄における地形とシミュレーションの結果を示した。昼に気温は標高による低下し、全体に西風が卓越しているに対し、夜には風が弱く、谷間に収束する風があり、気温が低く、斜面の中腹に温暖帯が形成されることがわかった。

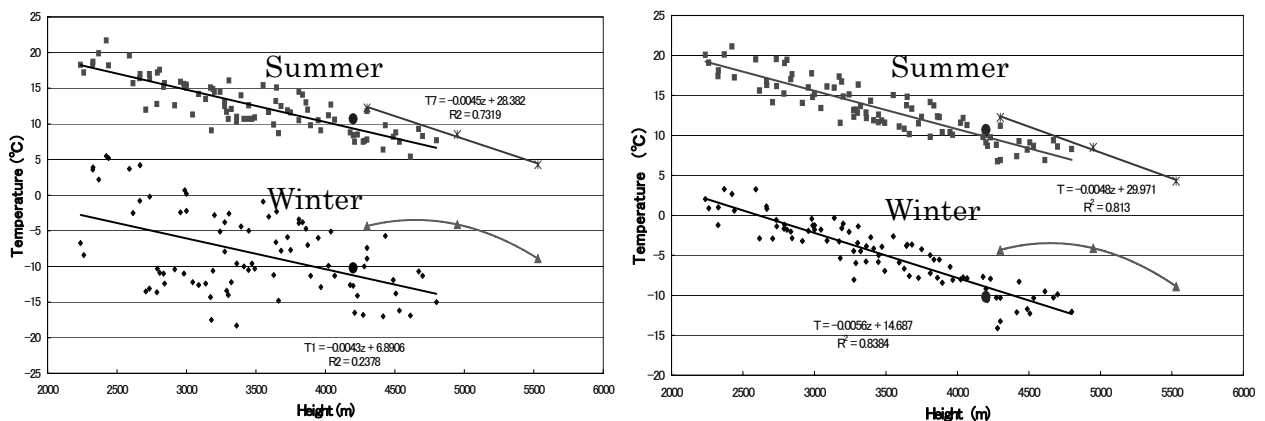


図 33 チベット高原における気温と標高の関係（左：緯度補正なし、右：緯度補正あり）

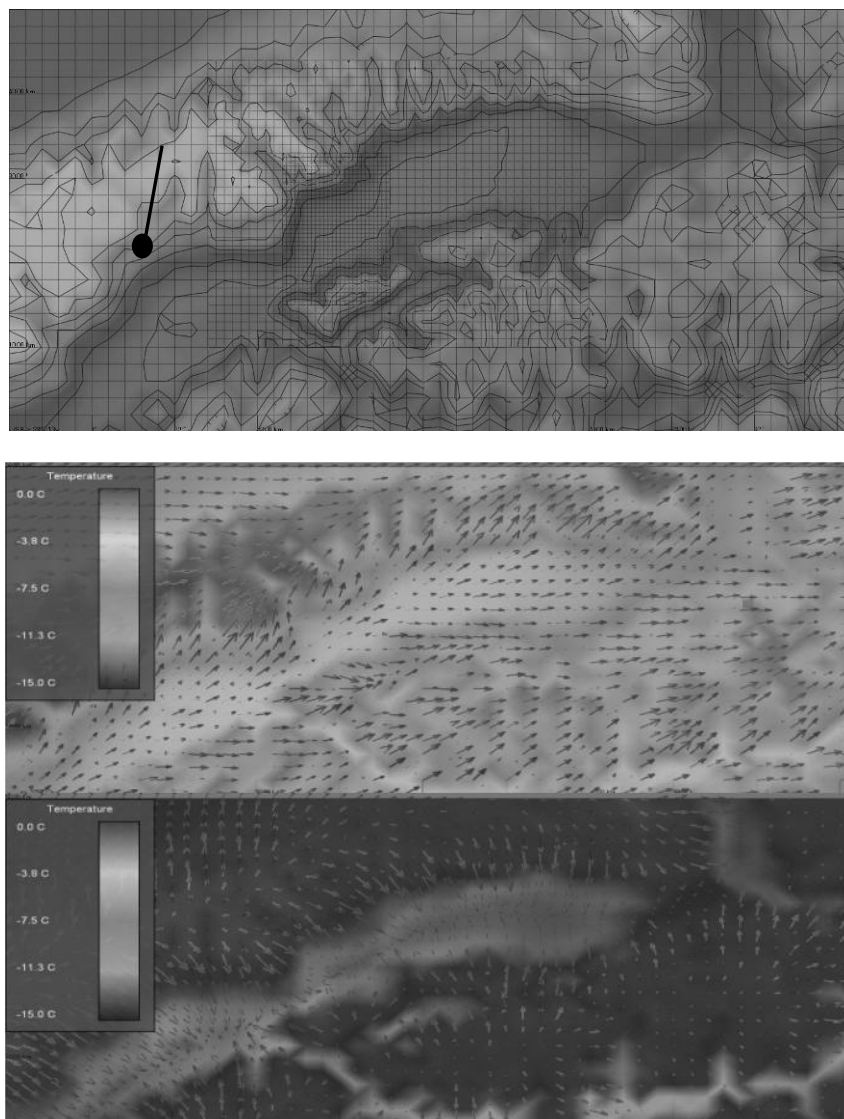


図34 シミュレーションモデルに使う当雄における地形(上)とシミュレーションの結果(中: 昼の気温と風速の分布; 下: 夜の気温と風速の分布)

### ③ 当雄の気候変動

当雄における気象官署の気候データを収集し、1960年から気候の変動を得られた。図35と図36に示すように、当雄の年平均気温は1℃位から3℃近いまで変化し、50年間約2度の温度上昇があった。この温度上昇は特に冬に顕著であった。斜面に同様な気温上昇があれば、また、今後上昇し続ければ、草線の上昇(標高の高いところへのシフト)も考えられる。また、降水量について、1982年前に減少の傾向があるが、1982年以後上昇の傾向が見られる。

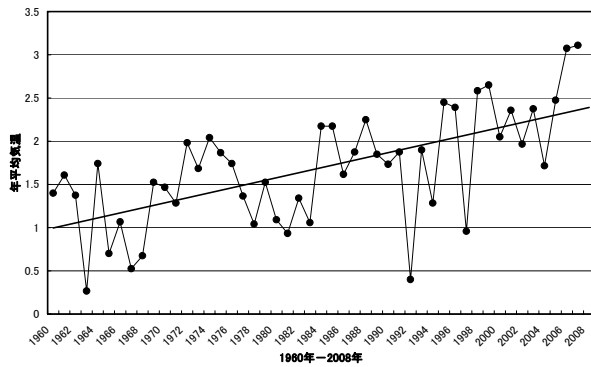


図35 当雄における年平均気温の変化

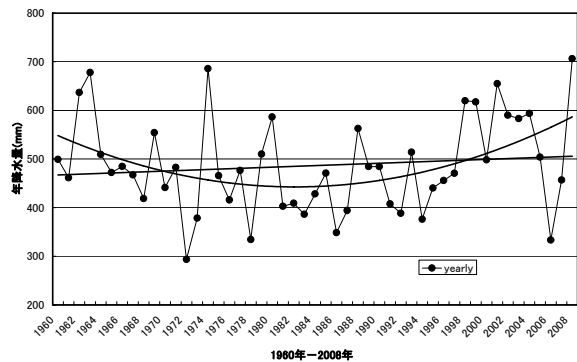


図36 当雄における年降水量の変化

④ 草線の気候変動

チベット高山地域における地球温暖化を把握するため、上記のモニタリングデータを、これまでに収集したチベット高原の気象官署の観測データと組み合わせて、高山地域における気象要素の長期変動の解析を試みた。気象官署の1963年からの日平均気温、湿度（水蒸気圧、相対湿度）、風速、蒸発量、地表面温度、雲量、日照時間のデータを利用し、上記のモニタリングデータと瀬ステップワイズ線性回帰法で気象官署のデータから高山地域1963年からの気象要素の復元を行った。その結果、図37に示すように、草線上5300mのところ年平均気温の上昇は気象官署の4300mより小さいが、上昇していることが分かった。上昇幅は気象官署の3/5しかなく、官署との差は、冬に大きく、夏に小さい。また、高山の気温は気象官署の気温、最高気温と正の相関があり、最低気温と地表面温度および風速と負の相関がある。高山の気温変化は局地循環（気温の逆転層）の強さと関連していると考えられる（最低気温が低く、風速が弱い場合、局地循環（気温の逆転層）が強い）。地温の変化も気温と同じ傾向があるが、上昇幅はさらに小さい（約気象官署の1/3）。土壌水分は年々変動があるが、傾向は見られなかった。

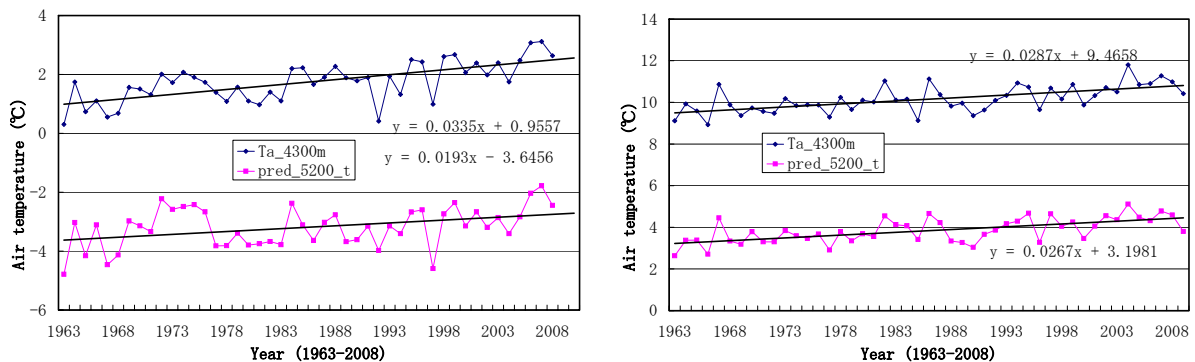


図37 4300mの気象官署の観測気温と斜面5200m草線付近の推定気温の変化（1963-2008）（左：年平均気温、右：8月の平均気温、Ta\_4300：4300mの気象官署観測値、pred\_5200\_t：5200mの推定値。）

さらに、推定した草線付近の日平均気温0℃以上と5℃以上の積算温度と積算日数の変化も推定した。図38に示したように、現在の積算温度は60年代より100℃日以上の増加したことが推定でき



る。特に、植物成長必要な5℃以上の日数は45年間10日以上も増加したと推定できた。

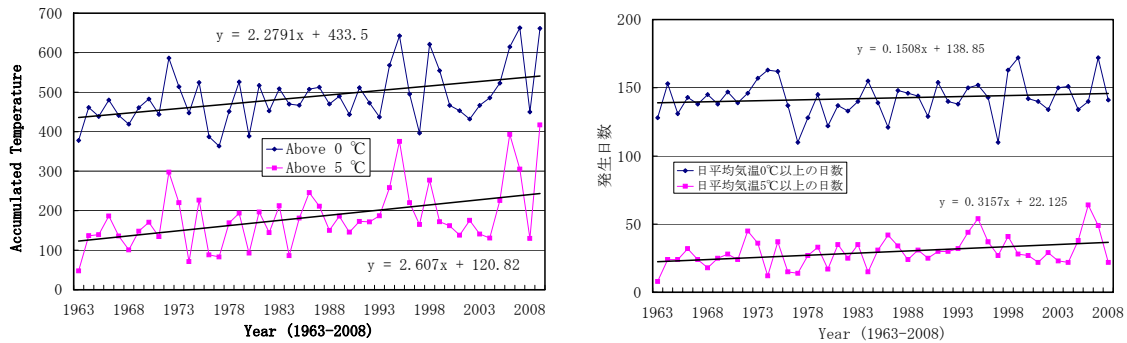


図38 斜面5200m草線付近の推定積算温度とその積算日数の変化（1963-2008）（左：積算温度、右：積算日数）

#### ⑤ チベットにおける気温の地理分布パターンの変化

チベットにおける気温の地理分布パターンの変化について。チベット高原90地点1956－2005年の気温データを利用し、気温の分布パターンと1980年前後を分け、そのパターンの変化を明らかにした。図39に示したように、人間活動が多い標高の低い地域の温暖化は標高の高い地域より顕著であることがわかった。特に冬の気温上昇は標高の低い地域で顕著である。また、北西部の温暖化は南東部より進んだことがわかった。

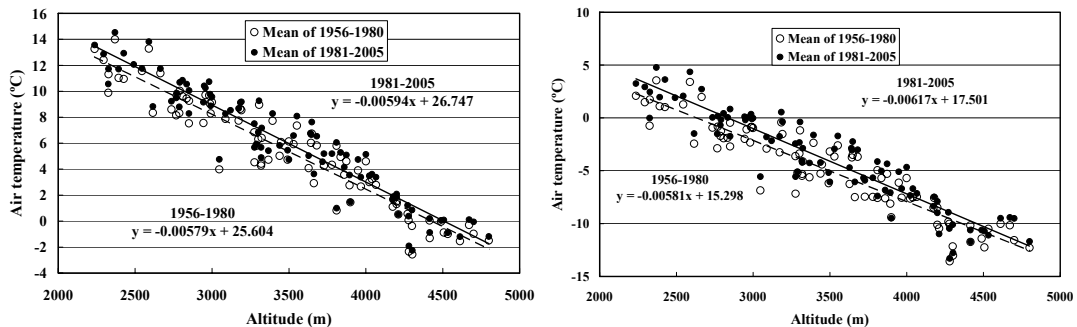


図39 チベット高原における気温と標高の関係変化（左：年平均気温、右：1月平均気温、緯度と経度の補正あり）

#### 4. 考察

本研究では、チベット高原中央部と北縁部において、それぞれ標高4300mから標高5500mまで、標高3200mから標高4400mまで、観測断面（トランゼクト）に多数の観測点を設け、気温、湿度、地温、土壌水分などの連続観測を行った。得られた結果に基づいて、以下のようなことが考察される。

- 両サイトの多数の観測点のデータから、降水量は夏期（8月、9月）に集中しており、秋から冬にかけては、きわめて少なくなる。これは、アジアモンスーンの特徴であるが、高原中央部の当雄においては、この特徴がより顕著であった。このことも本研究の観測サイトがチベット高原全体の気象状態を代表できる証拠の1つと言える。注目されるのは、当雄サイトでは植生限界線に近い標高5100mでの降水量が最も多いことである。これは局所の気象現象か

または高原の降水量の垂直分布における一般的な現象かについて今後更なるの観測と検討が必要である。

- 風速について、両サイトとも秋から冬にかけて徐々に強くなり、特に1月前後に非常に強い風の日が断続的に現れる。この変化はチベット高原上空を流れる気流の季節的変動を反映していると考えられる。一方、昼夜の変化については二つのサイトでは放射冷却によって夜の風速が弱いことがわかった。
- 二つの観測トランゼクトとも常に気温の逆転層ができ、当雄では4500m～4800mの所、海北では3400-3800のところのところに温暖層がある。この気温の逆転層が生態系にどのような影響を及ぼすかについては興味深い。また、冬期の気温は高標高地帯であるにもかかわらず、氷点下数十度というような低温にはならなかった。今後、チベット高原の気温の空間的分布を把握するため、高標高の測定結果と既往の研究成果との整合を行う必要がある。
- チベット高原の放射環境は、標高が高いため、短波放射量も高いと考えられるが、本研究で観測した短波放射量は、夏期には曇天が多いため値の低い日も多い。夏期全体では、降水量は多いが日射量は特に多くはない。冬期には、日射量は比較的あるが降水量は非常に少ない。相対湿度はこのような降水と放射環境を反映し、夏期に飽和に近い日が多く見られるが、秋期から冬期にかけては、10%程度まで低下し極めて乾燥した環境になる。夏期モンスーンがもたらす多量の水分は、地中にかなり蓄えられる可能性が高い。地中に蓄えられた水分の効率的な利用は温暖化に対する生態系の応答を解明するために極めて重要である。
- 二つの観測トランゼクトは繁茂した草原から植生の殆どない石礫までの景観が含まれたため、気象環境と植生分布の検討ができる。北部の海北と中央部の当雄における植生の分布限界(草線)は、標高が約1000mも異なるが夏の植物生育期間の気候条件はほぼ一致している。ただし、これらの観測サイトの植生限界(草線)の気候条件が冬期では異なる。今後、草原植生の分布限界における気候条件の特徴をさらに解析し、特に広範囲について植生限界と気候条件の確認を行う必要がある。また、植生限界の気候条件の指標化は、温暖化に伴う高山植生の移動の早期予測にも必要であろう。
- 本研究では「長期」モニタリングの期間が短く(5年弱)、気温などの年々変動を示したが、長期変動の把握は不可能である。したがって、温暖化に伴う気候変動を把握するためには、現在の観測システムをさらに活用して、継続的な観測と研究が極めて重要であり、必要である。一方、生態系の挙動を把握するため、これまで展開してきたトランゼクト上の植生調査、生態系機能の測定もさらに詳しく継続していくことが重要である。
- 本研究では、当雄サイトにおいて植生指数の年変化はきわめて明瞭なパターンを示した。しかも、植生指数の年変化パターンは、水蒸気圧の年変化パターンと比較的良く一致し、位相のずれも気温より相関が高かった。これは、水分が十分に供給されている高山湿地においても、水分条件(蒸気圧の高低)と植生の量が密接に関係していることを示す。一般的に、草原植生の成長は、水不足による制約が一つの主要な要因と考えられる。しかし、気温の低いチベット高原ではいままでも低温が植物成長の主要な制限要因であると認識されてきたが、今回の観測結果は、長期間の観測データに基づく、熱収支・水収支の解析が重要であることを示唆している。

## 5. 本研究により得られた成果

青海・チベット高原は自然条件が過酷で社会的情勢も複雑であるために、これまで本研究のような長期的総合気象観測例がなかった。本研究では基本的な気象要素を含め、生態系の挙動を解明するため殆どの気象要素について、遠隔地の継続観測方法を確立し、5年近くの観測データを蓄積した。特に、気象官署の観測範囲をカーバしていない標高の高い高山生態系（標高4800m以上）について、これまでに例のない詳しい観測データであり、地球上もっとも標高の高い生態系の気候変化の解明において必要な情報を提供できるだけでなく、高山生態系の温暖化検出と予測においても極めて意義のある結果である。

本研究のデータから、さらに以下の結果を得た。

- ① 二つの観測トランゼクトにおいて植生限界線（海北では4200m、当雄では5200m）では、生育期間の気候条件はほぼ同じであることがわかった。
- ② 山麓にある気象官署の過去50年の気象データと観測トランゼクトでの4年観測データの相関関係から、植生限界（草線）での気温上昇の推測が成功した。
- ③ 多地点温度観測システムで得られた気温から、標高に対する気温の通減率（高度に対する気温低下の割合）は、夏から秋にかけての気温低下時にほぼ一定で、0.65～0.69(°C/100m)であるが、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。
- ④ 冬期の気温は、高標高地帯であるにもかかわらず、氷点下数十度というような低温にはならなかった。地温は、夏から秋にかけての地温低下時に、中低標高の所から冷却が始まったことが分かった。夏から秋にかけて気温が徐々に低下していく中で、相対湿度は比較的高い値で推移した。
- ⑤ 夏から秋にかけて降水量は比較的多かったが、9月初めの気温と湿度が低下した期間は、降水量が非常に少なくなった。降水量は夏期（8月、9月）に集中しており、秋から冬にかけては、きわめて少なくなる。これは、アジアモンスーンの特徴であるが、本研究サイトの当雄において、この特徴が顕著であることは、本サイトがチベット高原の気象状態を代表していることの証拠の1つとなる。
- ⑥ 風速は秋から冬にかけて、徐々に強くなり、特に1月前後に、非常に強い風の日が断続的に現れる。チベット高原上空に吹く気流の季節的変動が現れていると考えられる。

今後、チベット高原の気温の空間的分布に関して既往の研究成果との比較を行う必要がある。植生指数の年変化はきわめて明瞭なパターンを示した。植生指数の年変化パターンは、水蒸気圧の年変化パターンと比較的良く一致した。これは、水分が十分に供給されている高山湿地においても、水蒸気圧の高低と植生の量が密接に関係していることを示す。

## 6. 引用文献

- 1) A. Lu, Y. He, Z. Zhang, H. Pang, J. Gu: Climate research, 27, 189-195 (2004)  
"Regional structure of global warming across China during the twentieth century"
- 2) K. Duan, T. Yao: Journal of the meteorological society of Japan, 81, 251-257 (2003)  
"Monsoon variability in the Himalayas under the condition of global warming"
- 3) X. Liu, B. Chen: International Journal of climatology, 20, 1729-1742 (2000)

- "Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades"
- 4) A. Thomas: *International Journal of climatology*, 20, 381-396 (2000)  
"Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China"
  - 5) M. Du, S. Kawashima, S. Yonemura, X. Zhang, S. Chen: *Global and planetary change*, 41, 241-249 (2004)  
"Mutual influence between human activities and climate change in the Tibetan Plateau during recent years"
  - 6) H. Jiang, K. Wang: *Advances in atmospheric sciences*, 18, 1215-1223 (2001)  
"Analysis of the surface temperature on the Tibetan Plateau from satellite"
  - 7) Q. Li, S. Yang, V.E. Kousky, R.W. Higgins, K. Lau, P. Xie: *International Journal of climatology*, 25, 1675-1696 (2005)  
"Features of cross-pacific climate shown in the variability of China and us precipitation"
  - 8) H. Tang, P. Zhai: *Chinese Journal of Geophysics-Chinese edition*, 48, 526-534 (2005)  
"Comparison of variations of surface air temperatures in eastern and western China during 1951 similar to 2002"
  - 9) J. Xu, S. Haginoya, K. Masuda, R. Suzuki: *Journal of the meteorological society of Japan*, 83, 577-593 (2005)  
"Heat and water balance estimates over the Tibetan plateau in 1997-1998"
  - 10) Y. Ma, Z. Su, T. Koike, T. Yao, H. Ishikawa, K. Ueno, M. Menenti: *Physics and chemistry of the earth*, 28, 63-74 (2003)  
"On measuring and remote sensing surface energy partitioning over the Tibetan Plateau - from GAME/Tibet to CAMP/Tibet"
  - 11) S. Gu, Y. Tang, X. Cui, T. Kato, M. Du, Y. Li, X. Zhao: *Agricultural and forest meteorology*, 129, 175-185 (2005)  
"Energy exchange between the atmosphere and a meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau"
  - 12) Z. Gao, N. Chae, J. Kim, J. Hong, T. Choi, H. Lee: *Journal of Geophysical research - Atmospheres*, 109, D06102 (2004)  
"Modeling of surface energy partitioning, surface temperature, and soil wetness in the Tibetan prairie using the Simple Biosphere Model 2 (SiB2)"
  - 13) J. Xu, S. Haginoya, K. Saito, K. Motoya: *Hydrological processes*, 19, 2161-2186 (2005)  
"Surface heat balance and pan evaporation trends in Eastern Asia in the period 1971-2000"
  - 14) Y. Ma, S. Fan, H. Ishikawa, O. Tsukamoto, T. Yao, T. Koike, H. Zuo, Z. Hu, Z. Su: *Theoretical and applied climatology*, 80, 259-273 (2005)  
"Diurnal and inter-monthly variation of land surface heat fluxes over the central Tibetan Plateau area"
  - 15) J. Xu, S. Haginoya: *Journal of the meteorological society of Japan*, 79, 485-504 (2001)  
"An estimation of heat and water balances in the Tibetan Plateau"
  - 16) P. Zhao, L. Chen: *Advanced in atmospheric sciences*, 17, 140-156 (2000)  
"Calculation of solar albedo and radiation equilibrium over the Qinghai-Xizang Plateau and analysis of their climatic features"
  - 17) M. Yang, T. Yao, H. Wang, L. Tian, X. Gou: *Hydrological processes*, 20, 505-513 (2006)

- "Estimating the criterion for determining water vapour sources of summer precipitation on the northern Tibetan Plateau"
- 18) B. Bhatt, K. Nakamura: *Journal of Geophysical research - Atmospheres*, 111, D02115 (2006)  
"A climatological-dynamical analysis associated with precipitation around the southern part of the Himalayas"
- 19) X. Li, G. Cheng, L. Lu: *Arctic Antarctic and Alpine research*, 37, 246-252 (2005)  
"Spatial analysis of air temperature in the Qinghai-Tibet Plateau"
- 20) N. Endo, B. Ailikun, T. Yasunari: *Journal of the meteorological society of Japan*, 83, 621-631 (2005)  
"Trends in precipitation amounts and the number of rainy days and heavy rainfall events during summer in China from 1961 to 2000"
- 21) M. Song, C. Zhou, H. Ouyang: *Journal of vegetation science*, 16, 341-350 (2005)  
"Simulated distribution of vegetation types in response to climate change on the Tibetan Plateau"
- 22) T. Luo, Y. Pan, H. Ouyang, P. Shi, J. Luo, Z. Yu, Q. Lu: *Global ecology and biogeography*, 13, 345-358 (2004)  
"Leaf area index and net primary productivity along subtropical to alpine gradients in the Tibetan Plateau"
- 23) H. Zhou, L. Zhou, X. Zhao, W. Liu, Y. Li, S. Gu, X. Zhou: *Chinese science bulletin*, 51, 320-327 (2006)  
"Stability of alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau"
- 24) M. Cao, B. Tao, K. Li, X. Shao, S. Prience: *Acta botanica sinica*, 45, 552-560 (2003)  
"Interannual variation in terrestrial ecosystem carbon fluxes in China from 1981 to 1998"
- 25) T. Luo, S. Brown, Y. Pan, P. Shi, H. Ouyang, Z. Yu, H. Zhu: *Forest ecology and management*, 206, 349-363 (2005)  
"Root biomass along subtropical to alpine gradients: global implication from Tibetan transect studies"
- 26) M. Song, C. Zhou, H. Ouyang: *Mountain research and development*, 24, 166-173 (2004)  
"Distributions of dominant tree species on the Tibetan Plateau under current and future climate scenarios"
- 27) J. Ni: *Mountain research and development*, 20, 80-89 (2000)  
"A simulation of biomes on the Tibetan Plateau and their responses to global climate change"
- 28) E. Weng, G. Zhou: *Environmental modeling & assessment*, 11, 45-58 (2006)  
"Modeling distribution changes of vegetation in China under future climate change"
- 29) X. Chen, X. Zhang, B. Li: *Ecological modelling*, 181, 79-86 (2005)  
"Influence of Tibetan Plateau on vegetation distributions in East Asia: a modeling perspective"

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表 (学術誌)

- ① 趙亮, 徐世曉, 李英年, 趙新全, 于貴瑞, 古松, 杜明遠: *Acta Agrestia Sinica*, 14, 248-253 (2006)  
"Seasonal Variation of Surface Fluxes of two Species Meadows on the Qinghai-Tibet Plateau"
- ② Du, M., Maki, T., Kawashima, S.: *Journal of Ecotechnology Research*, 12, 122-125 (2006)

- “Wind tunnel experimental study on the effects of polyethylene windbreak net on evaporation”
- ③ 井上聡、川島茂人、横山宏太郎: 雪氷 (日本雪氷学会)、68、2、115-122 (2006)  
「メッシュ気候値 2000 による温暖化時の最大積雪深予測値の検証」
- ④ Kato, T., Tang, Y., Gu, S., Hirota, M., Du, M., Li, Y., Zhao, X.: *Global Change Biology*, 12, 1285-1298 (2006)  
“Temperature and biomass influences on interannual changes in CO<sub>2</sub> exchange in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau”
- ⑤ 李英年, 王勤学, 杜明遠, 趙亮, 徐世暎, 唐艷鴻, 于貴瑞, 趙新全, 古松: *Acta Agrestia Sinica*, 14, 165-169 (2006)  
“A Study on Replenishment and Decomposition of Organic Matter in and Mat-Cryic Cambisols CO<sub>2</sub> Flux Between Vegetation and Atmosphere”
- ⑥ 李英年, 杜明遠, 唐艷鴻, 趙亮, 王勤学, 趙新全, 古松: *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 20, 79-84 (2006)  
“UV-B Changing Characteristics of Alpine Meadow Area at Haibei Station in Qiliang Mountain”
- ⑦ 李英年, 張法偉, 劉安花, 趙亮, 王勤学, 杜明遠: *Chinese Journal of Agrometeorology*, 27, 265-268 (2006)  
“Responses of Soil Temperature and Humidity to Changes of Vegetation Coverage in Alpine *Kobresia tibetica* Meadow”
- ⑧ Du M., S. Kawashima, S. Yonemura, T. Yamada, X. Zhang, J. Liu, Y. Li, S. Gu, Y. Tang, [MODSIM07] LAND, WATER AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT: INTERGRATED SYSTEM FOR SUSTAINABILITY, Modelling & simulation Society of Australila & New Zealand, 2146-2152 (2007).  
“Temperature distribution in the high mountain regions on the Tibetan Plateau – Measurement and simulation”
- ⑨ Zhao, L., Xu, S., Li, Y., Tang, Y., Zhao, X., Gu, S., Du, M., Yu, G., *Frontiers of Biology in China*, 2, 3, 324-332 (2007).  
“Relations between carbon dioxide fluxes and environmental factors of *Kobresia humilis* meadows and *Potentilla fruticosa* meadows”
- ⑩ 張法偉, 李英年, 李紅琴, 王勤学, 杜明遠, 趙亮, 汪詩平, THE COMPARATIVE STUDY OF THE APPARENT PHOTOSYNTHESIS RATES OF 3 TYPICAL VEGETATION QUANTUM YIELD AND MAXIMUM TYPES ON QINGHAI-TIBETAN PLATEAU, ACTA AGRESTIA SINICA, 15, 5, 442-448 (2007).  
“青藏高原 3 種主要植被类型的表观量子效率和最大光合速率的比较”
- ⑪ 張法偉, 劉安花, 李英年, 趙亮, 王勤学, 杜明遠, ACTA ECOLOGICA SINICA, 28, 2, 453-462 (2008).  
“青藏高原寒湿地生態系統 CO<sub>2</sub> 通量”
- ⑫ 戚培同, 古松, 唐艷鴻, 杜明遠, 吳力博, 趙亮, COMPARISON OF THREE METHODS FOR MEASUREMENT OF EVAPOTRANSPIRATION IN AN ALPINE MEADOW, ACTA ECOLOGICA SINICA, 中国生態学会編集, 28, 1, 202-211 (2008).

“3種方法測定高寒草甸生態系統蒸散比較”

- ⑬ 鄭澤梅 于貴瑞 孫曉敏 曹廣民 王躍思 杜明遠 李俊 李英年、*應用生態學報* 19 (02)、290-298.  
Chinese Journal of applied ecology. 19 (02)、290-298 (2008)  
“渦度相關法和靜態箱/氣相色譜法在生態系統呼吸觀測中的比較”
- ⑭ 李英年;王勤學;杜明遠;趙新全;趙亮;徐世曉;古松、*高原氣象* 27 (1) 193-201 (2008)  
“祁連山海北高寒濕地微氣象日變化特征”
- ⑮ 李英年; 趙亮; 徐世曉; 杜明遠; 王勤學; 趙新全、*干旱区研究*、25 (2)、266-272. (2008)  
“祁連山海北高寒草甸紫外輻射與氣象要素的關係”
- ⑯ S. Gu, Y. Tang, X. Cui, M. Du, L. Zhao, Y. Li, S. Xu, H. Zhou, T. Kato, P. Qi, and X. Zhao,  
JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 113, D08118 doi:10.1029/2007JD009173.  
(2008) “Characterizing evapotranspiration over a meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan  
Plateau”
- ⑰ 喬艷麗, 古松, 唐艷鴻, 杜明遠, 趙亮, 李英年, 張曉春, 江莎, 高玉葆, *南開大學學報*  
(自然科學版), 41(3), 69-78.(2008)  
“青藏高原的散射輻射特征”
- ⑱ 張法偉、李英年、趙新全、古松、王勤學、杜明遠、唐艷鴻、*生態學雜誌*、28 (10): 1685-1691.(2008)  
“一次降水過程對青藏高原高寒草甸通量和熱量輸送的影响”
- ⑲ 薛曉娟、李英年、杜明遠、劉安花、張法偉、王建雷、*中國農業氣象*、29 (3)、312-315. (2008)  
“祁連山坡地垂直帶三種牧草的生長試驗”
- ⑳ T. Ohtsuka, M. Hirota, X. Zhang, A. Shimono, Y. Senga, M. Du, S. Yonemura, S. Kawashima and  
Yanhong Tang, *Polar Science*, 2, 4, 277-285.(2008) “Soil organic carbon pools in alpine to nival  
zones along an altitudinal gradient (4400–5300 m) on the Tibetan Plateau”
- ㉑ .Y. Cui, Gu S., Zhao X.Q., Wu J., Kato T. & Tang Y. (2008) *Agricultural and Forest Meteorology*,  
148, 144-151.  
"Diurnal and seasonal variations of UV radiation on the northern edge of the Qinghai-Tibetan  
Plateau. "
- ㉒ 謝健, 劉景時, 杜明遠, 康世昌, 汪奎奎, *地理科學進展*, 28 (2), 223-230. (2009)  
“拉薩河流域高山水熱分布觀測結果分析”
- ㉓ 崔琚琰、楊浩、杜明遠、王軼虹、*水土保持通報*、29 (1)、99-102. (2009)  
“基於<sup>137</sup>Cs的土壤沉積速率的定量模型”
- ㉔ Du, M., S. Yonemura, T. Yamada, X. Zhang, Y. Li, S. Gu, L. Zhao, Y. Tang, *Proceedings of the 6th  
International Conference on FLUID MECHANICS (FLUIDS)*, WSEAS Press, 58-63 (2009).  
“A numerical simulation of the influences of local circulation over complex terrain on gas dispersion  
on the Tibetan Plateau”
- ㉕ C. Luo, G. Xu, S. Wang, Z. Chao, Z. Zhang, J. Duan, X. Chang, Y. Li, X. Zhao, M. Du, Y. Tang, B.  
Kimball, *Global Change Biology*, doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.02026.x (2009)  
“Effect of warming and grazing on litter mass loss and temperature sensitivity of litter and dung mass  
loss on the Tibetan plateau”
- ㉖ 李英年、趙亮、趙新全、王勤學、杜明遠、張法偉、*山地學報*、27 (3)、265-269. (2009)

“高寒金露梅灌叢草甸植被反射率特征”

- ㉗ G. Xu, Z. Chao, S. Wang, Y. Hu, Z. Zhang, J. Duan, X. Chang, A. Su, C. Luo, Y. Li, M. Du, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, DOI 10.1007/s10705-009-9311-6.(2009)  
“Temperature sensitivity of nutrient release from dung along elevation gradient on the Qinghai-Tibetan plateau”
- ㉘ 薛曉娟, 李英年, 杜明遠, 劉安花, 張法偉, 王建雷、*冰川凍土*、31(4), 642-649.(2009)  
“祁連山東段南麓不同海拔土壤有机质及全氮的分布状况”
- ㉙ 王建雷、李英年、杜明遠、王勤學、唐艷鴻、薛曉娟、張法偉、汪詩平、*山地學報*、27(4), 418-426.(2009)  
“祁連山冷竜嶺南坡小气候及植被分布特征”
- ㉚ M. Hirota, P. Zhang, S. Gu, M. Du, A. Shimono, H. Shen, Y. Li, Y. Tang, *Journal of Plant Ecology*, 2(4):197-205; doi:10.1093/jpe/rtp024. (2009)  
“Altitudinal variation of ecosystem CO<sub>2</sub> fluxes in an alpine grassland from 3600m to 4200m”
- ㉛ G. Xu, Y. Hu, S. Wang, Z. Zhang, X. Chang, J. Duan, C. Luo, Z. Chao, A. Su, Q Lin, Y Li, M Du, *Plant Ecology*, DOI 10.1007/s11258-009-9714-0.(2010)  
“Effects of litter quality and climate change along an elevation gradient on litter mass loss in an alpine meadow ecosystem on the Tibetan plateau”
- ㉜ 薛曉娟, 李英年, 張法偉, 王建雷, 汪詩平, 杜明遠、*西北植物學報*, 29(10) :2070—2075.(2009)  
“祁連山冷竜嶺南麓垂直帶植被移地試驗中鵝絨委陵菜克隆生長特征”
- ㉝ 謝健, 劉景時, 杜明遠, 康世昌, 王忠彥, *水資源与水工程學報*, 20(5), 14-18.(2009)  
“念青唐古拉山南坡夏季降水梯度觀測”
- ㉞ 王建雷, 李英年, 王勤學, 杜明遠, 薛曉娟, 張法偉, *中國農業气象*, 2010 (1), 19-24. (2010)  
“祁連山海北地區兩種高寒草甸植被類型的土壤熱通量比較”
- ㉟ 謝健, 劉景時, 杜明遠, 王忠彥, *地理科學*, 30(1): 113-118.(2010)  
“念青唐古拉山南坡气温分布及其垂直梯度”
- ㊱ 杜 明遠・米村 正一郎・何永涛・石培礼、*關東の農業气象*、35、12-13.(2009)  
“チベット高原標高 4300m の湿地フラックス觀測サイド”

## (2) 口頭発表

- ① M. Du, T. Maki, S. Kawashima: Abstracts of 12th Asian Eymposium on Eco-Technology, 2B15, (2005)  
“Wind tunnel experimental study on the effects of polyethylene windbreak net on evaporation”
- ② 杜 明遠、陳 洪武、雷 加強、徐 新文、李 生字、何 清、申 彦波：日本沙漠学会第 16 回學術大會講演要旨集, 16, 69-70 (2005)  
「タクラマカン砂漠中心部における緑化による局地氣候變化について」
- ③ 川島茂人、井上 聡、米村正一郎、杜 明遠：日本气象学会 2005 年度春季大會講演予稿集, 481 (2005)  
「夏期高温時における市街地と水田地域の气温差と兩地域の熱収支構造」
- ④ 井上聡、広田知良、岩田幸良：水文・水資源学会 2005 年研究發表會要旨集, 132-133 (2005)



- 「十勝平野における 12 月積雪期間の推定」
- ⑤ 杜明遠、加藤知道、唐艷鴻、古松、李英年、趙亮、川島茂人：農業環境工学関連学会 2006 年合同大会発表概要、13 (2006)  
「チベット高山草原生態系における CO<sub>2</sub> フラックス及び植物生産と春季温度変化の関係」
- ⑥ 井上聡、川島茂人、横山宏太郎：日本農業気象学会 2006 年春季大会講演要旨集、79 (2006)  
「メッシュ気候値 2000 による温暖化時の最大積雪深予測値の検証」
- ⑦ 井上聡、広田知良、岩田幸良：農業環境工学関連学会 2006 年合同大会発表概要、43 (2006)  
「十勝地方での降雪量観測」
- ⑧ 井上聡、広田知良、岩田幸良：2006 年度日本雪氷学会講演予稿集、82 (2006)  
「3 種類の降水量計による冬季比較観測」
- ⑨ 川島茂人、杜明遠、米村正一郎、井上聡、唐艷鴻：日本農業気象学会 2006 年春季大会講演要旨、39 (2006)  
「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」
- ⑩ 川島茂人、杜明遠、米村正一郎、井上聡、唐艷鴻：日本気象学会 2006 年度春季大会講演予稿集、349 (2006)  
「チベット高原における気象環境のトランゼクト解析」
- ⑪ 小林義和、下田星児、永井秀幸、間野正美、滝本貴弘、丸山篤志、宮田明、唐艷鴻、及川武久、岩田 徹、大場和彦、加藤知道、杜明遠、濱田洋平、農業環境工学関連学会 2007 年合同大会 プログラム、(2007).  
“S1 プロジェクト農耕地・草地 5 サイトにおける炭素収支の比較”
- ⑫ 杜明遠、川島茂人、米村正一郎、井上聡、李英年、古松、趙亮、張憲州、唐艷鴻、日本気象学会 2007 年度春季大会講演予稿集、(社) 日本気象学会、91、(2007).  
“チベット高原における山地気象観測の意義”
- ⑬ 川島茂人、唐艷鴻、杜明遠、米村正一郎、井上聡、日本気象学会 2007 年度春季大会講演予稿集、(社) 日本気象学会、91、(2007).  
チベット高原における気象環境の長期モニタリング、
- ⑭ Du M., S. Kawashima, S. Yonemura, T. Yamada, X. Zhang, J. Liu, Y. Li, S. Gu, Y. Tang, International congress on Modelling and Simulation Land, Water & Environment: Intergrated Systems for Sustainability ABSTRACTS, 325- (2007).  
“TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE HIGH MOUNTAIN REGIONS ON THE TIBETAN PLATEAU -MEASUREMENT AND SIMULATION-”
- ⑮ 杜明遠、李英年、古松、趙亮、張憲州、劉景時中国科学院青藏高原高寒草地碳素生物地球科学循環學術研討會論文摘要集、(2008)  
“高原産地局地循環及びその局地気候和碳通量的相互関係”
- ⑯ 杜明遠、川島茂人、米村正一郎、井上聡、張憲州、李英年、古松、趙亮、唐艷鴻、日本農業気象学会 2009 年全国大会講演要旨、(2009)  
“チベット高原における高山草原生存極限 (草線) の気候条件について”
- ⑰ Mingyuan DU, Shigeto KAWASHIMA, Yanhong TANG, Seiichiro YONEMURA, Tomoki USHIYAMA, Satoshi INOUE, Tetsuji YAMADA, Xianzhou ZHANG, Yingnian LI, Soung GU, Liang ZHA、0

日本農業気象学会 2009 年全国大会講演要旨, (2009)

“A numerical simulation of air temperature distribution over complex terrain on the Tibetan plateau”

- ⑱ 李英年, 趙新全, 趙亮, 徐世暁, 汪詩平, 王勤学, 張友偉, 杜明遠, 古松、中国科学院青蔵高原高寒草地碳素生物地球科学循環學術研討會論文摘要集 (2008)  
“放牧对高高寒草甸生態系統 CO<sub>2</sub> 年淨交換量的影响”
- ⑲ 薛曉娟, 李英年, 杜明遠, 劉安花, 張法偉, 王建蕾、中国科学院青蔵高原高寒草地碳素生物地球科学循環學術研討會論文摘要集 (2008)  
“祁連山东段南麓不同海拔高度土壤机盾 (碳) 及全氣的分布狀況”
- ⑳ 張法偉, 劉安花, 李英年, 趙亮, 王勤学, 杜明遠、中国科学院青蔵高原高寒草地碳素生物地球科学循環學術研討會論文摘要集 (2008)  
“青蔵高原高寒湿地生態系統 CO<sub>2</sub> 通量分析”
- ㉑ 川島茂人, 澤理沙, 杜明遠, 米村正一郎、 2008 年度春季大会講演予稿集, 93, (2008)  
“チベット高原における冬期気温のトランゼクト解析”
- ㉒ 澤理沙, 川島茂人, 杜明遠, 米村正一郎、 2008 年度春季大会講演予稿集, 93, (2008)  
“チベット高原における山地斜面降水量のトランゼクト解析”
- ㉓ 川島茂人, 澤理沙, 中村公人, 杜明遠, 米村正一郎、平成 20 年度農業農村工学会大会講演 (2008)  
“チベット高原における気象環境の長期モニタリング”
- ㉔ M. Du, S. Kawashima, S. Yonemura, X. Zhang, J. Liu, Y. Li, S. Gu, L. Zhao and Y. Tang, Abstracts CD for MOCA-09, the IAMAS/IAPSO/IACS 2009 Joint Assembly, Montreal, Canada, July19-29, 2009. abs00185.pdf. (2009)  
“Long-term Meteorological Observations in High Mountain Region on the Tibetan Plateau”
- ㉕ M. Du, S. Kawashima, S. Yonemura, X. Zhang, J. Liu, Y. Li, S. Gu, L. Zhao and Y. Tang, The 5th International Symposium on the Tibetan Plateau, The 24th Himalaya- Karakorum-Tibet Workshop Joint Conference, Abstract, (2009)  
“Observation and evaluation of climate change in High Mountain Region on the Tibetan Plateau”
- ㉖ J. Liu, Jian Xie; M.n Du; T. Gong; H. Wang, The 5th International Symposium on the Tibetan Plateau, The 24th Himalaya- Karakorum-Tibet Workshop Joint Conference, Abstract, (2009)  
“Impacts of temperature inversion in winter on soil water variability in Tibetan Plateau River”

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について  
地球温暖化問題へのデータの提供。