

筑波山における斜面温暖帯観測

渡 来 靖*

キーワード：筑波山、斜面温暖帯、地上気温、接地逆転層、サーモグラフィー

1. はじめに

斜面上で同一時刻の気温分布を観測した際、斜面の中腹に気温の極大域が現れることがしばしばある。この際、等高線に沿うように帯状に極大域が分布することから、この現象は「斜面温暖帯」と呼ばれている。斜面温暖帯は特定の斜面に限る現象というよりはむしろ、世界中の多くの山岳斜面で見られる現象であり、さまざまな地域を対象にこれまでに多くの研究がなされてきた。

斜面温暖帯は静穏な晴天夜間によく出現する。このような時には、地表付近は放射冷却によって熱を奪われ、高くなるほど気温が上昇する接地逆転層が形成される。斜面上では、放射冷却によって冷やされた空気は重くなるため、重力流として斜面に沿って下へ流れ出す。逆転層の上面にあたる高度の斜面は、この冷氣下降流の吹き出し口にあたり、そこでは補償流として上空から高温位の空気が下降することで昇温し、斜面温暖帯が形成されると考えられている。

関東平野北東部に位置する筑波山（標高877m）は、顕著な斜面温暖帯が出現する地域である。筑波山周辺に生活する住民にはその存在が古くから認識されており、その気候特性が利用されてきた。中腹は斜面温暖帯の出現により霜が降りにくいいため、古くから霜に弱いみかんの栽培が行われてきた。現在でも、西側中腹を中心に観光みかん園が広がり、特産品である福来（ふくれ）みかんや温州みかんが栽培されている。筑波山の斜面温暖帯に関する研究はこれまでも数多く行われてきた。古くは茨城県・水戸測候所（1957）や郡司（1958）が気温分布調査を行い、中腹230～240m付近を中心に斜面温暖帯の存在を明らかにしている。吉野（1982）は夜間の移動観測から、標高200～400mに温暖帯が存在することを示した。小林（1979）は航空機を使った熱画像観測を

行い、南～西～北西斜面に、標高250m付近を中心とした温暖帯を観測した。近年では、Ueda et al.（2003）は筑波山西側斜面において気温の鉛直観測や熱画像観測を行い、標高200～350m付近に斜面温暖帯が存在することや、斜面温暖帯の上空はほぼ等温な層となっていることを示した。堀ほか（2006）は、筑波山西側斜面における斜面温暖帯の発生頻度を調査し、冬季夜間にはおよそ50%の割合で出現し、そのほとんどは雲のほとんどない晴天時であったことを示した。

筑波山の斜面温暖帯観測は、Ueda et al.（2003）以降、再び精力的に行われるようになった。その主な目的は、斜面温暖帯の空間構造、特に斜面における気温や風の鉛直構造や温暖帯の水平的な広がり、斜面温暖帯の季節変化・季節別発生頻度の把握といったことが挙げられる。特に、斜面上の鉛直構造の調査は、斜面温暖帯形成の理論的骨組を成す斜面下降流や断熱昇温の存在を観測的に明らかにするためにも重要であり、さらなるデータの蓄積が望まれる。さらには、筑波山は地域住民にとってシンボリックな存在でありその気候学的特徴に関して強い関心が持たれている。筑波山周辺気象の実態解明・モニタリングとその研究成果の情報発信は、地域貢献の意味でも重要であると言えよう。

本稿では、筑波山斜面温暖帯をターゲットにした2回の集中観測について、その成果を紹介する。ひとつは、2004年12月10日夕刻から11日早朝にかけて行われた観測で、筑波山西側斜面を対象として気温の鉛直分布観測とサーモグラフィーによる熱画像観測の同時観測を行った。もうひとつは、2007年2月21日夕刻から22日朝にかけて実施され、西側斜面と東側斜面における地上気温・熱画像の同時観測や西側温暖帯域での気温・風の鉛直分布観測などが行われた。

* 立正大学地球環境科学部

2. 2004年の集中観測

筑波山西側斜面の斜面温暖帯観測に関しては、Ueda et al. (2003) の集中観測において斜面上の気温の鉛直分布観測が行われ、温暖帯域上空における等温層の存在等が示された。しかし、Ueda et al. (2003) では、気温の鉛直観測は最大で地上40m程度までに限られていた。そこで、2004年12月10日 - 11日に実施された集中観測では、斜面上の鉛直構造の更なる把握のため、繫留気球による鉛直観測を最大で地上100mまでに拡張した。さらに、サーモグラフィーによる連続観測を行うことで、リモートセンシングから斜面温暖帯の時間変化や空間分布を調べることを目的とした。なお、2004年観測に関しての詳細は、Watarai et al. (2005) にまとめられている。

2004年観測における観測地点を図1に示す。図中A - Dの4地点では、繫留気球による気温の鉛直分布観測を行った。用いた繫留気球は、ヘリウムガスを詰めた風船に釣り糸を結び、釣り竿とつなげた簡易的なものである。風船にはT and D社製温度ロガー「おんどとり Jr.」RTR - 52を結びつけ、リールで釣り糸の長さを調節して10m毎に気球を上下させて気温を測定した。測定高度は釣り糸の長さと同様の係留中の糸と地表面との平均角度から求めた。同時に、A - D地点では地上1.5m高度にてアスマン通風乾湿計による気温・湿度の観測と、放射温度計による地表面温度の観測をおこなった。すべての観

測項目は1時間間隔で測定した。さらに、図1の地点Tにサーモグラフィー（NEC三栄社製 TH3102MR）を設置し、筑波山西側斜面の熱画像連続観測を行った。撮影方向は、C、D地点の写る範囲に固定した。

図2は、A - D地点における地上気温の時系列を示す。日没後、各地点の気温は低下するが、最も標高が低いA地点（桜川）が最も低下率が大きいことがわかる。一方、中腹にあるC地点（光農園）は最も低下率が小さく、観測日の夜間を通して最も気温が高かった。その結果、低地と中腹の地上気温差は時間とともに増加し、11日2時には3.6の気温差となった。中間にあるB地点（つくし湖）では、日没後はじめはA地点のように急激に気温低下していたのだが、夜半過ぎに一旦気温が上昇し、C地点の気温に近づいているのは興味深い。B地点はその後、11日4時前後に急激に気温が低下し、早朝にはA地点よりも気温が下がっている。

図2の地上気温分布から、観測日の斜面温暖帯の中心が、C地点のある標高145m付近を中心に存在することがわかる。しかし、標高410mのD地点でも低地のA地点と比べて夜間気温が高いことから、斜面温暖帯はかなり高標高まで広がっていることが示唆される。B地点は斜面温暖帯の下部境界付近にあたるため、複雑な気温変化を示していると考えられる。なお、11日3時を過ぎた頃から、低地のA地点やT地点では濃霧が立ちこめ、B地点はほぼ霧の頂部に当たっていた。この事実とB地点における急激な気温低下が一致することから、この気温

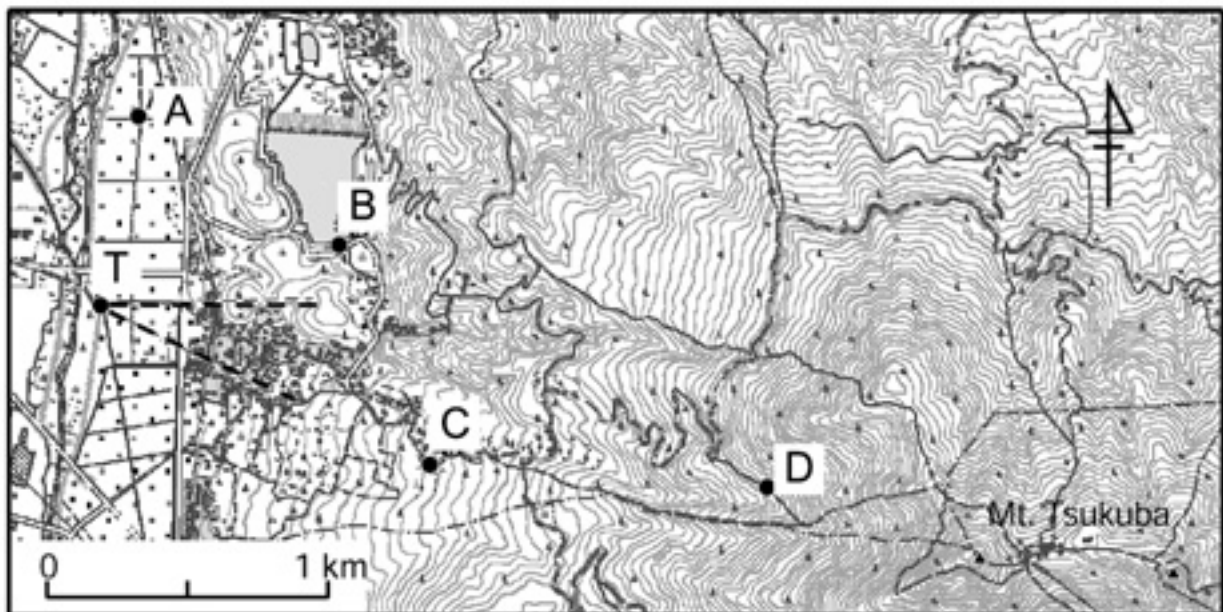


図1：2004年12月10 - 11日観測における観測地点（Watarai et al. 2005より）。A - Dの4地点が鉛直分布観測地点で、それぞれA：桜川（標高24m）、B：つくし湖（50m）、C：光農園（145m）、D：砂防ダム（410m）である。T地点はサーモグラフィー設置場所であり、破線はサーモグラフィーの視野角を表す。

低下はB地点の高度付近に移流した寒気の影響と思われる。

A - D地点における10日21時の気温の鉛直分布を図3に示す。どの地点も地上付近の気温が最も低く、上空ほど気温が高くなっていて、下層に冷気層が存在することがわかる。A地点やB地点では測定できた上空80m付近まで上空ほど気温の上昇を示したが、C地点では地上から約15mまでは上空ほど急激な気温上昇を示すものの、15mより上空ではほとんど等温となっており、Ueda et al. (2003) と同様の結果が得られた。図3に

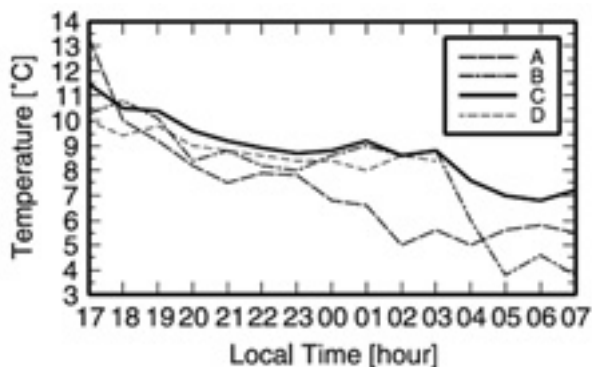


図2：2004年12月10 - 11日観測における、A - D地点での地上1.5m 気温の時系列 (Watarai et al. 2005より)。

は、筑波山に近い館野のゾンデデータを重ねてあるが、低地のA地点の気温プロファイルが館野のプロファイルにほぼ一致していることがわかる。一方、C地点のプロファイルは、下層の分布は館野の分布から大きく外れているが、その上の等温層は館野のプロファイルとほぼ一致しているか、やや高温となっている。また、C地点の高度がほぼ、館野における接地逆転層の上部にあたることは興味深い。

A地点の気温プロファイルと館野のプロファイルが一致することや、斜面温暖帯の極大域付近と考えられるC地点が接地逆転層の最上部に当たるといった事実は、斜面温暖帯の形成には筑波山より大きなスケール、恐らく関東平野スケールの逆転層形成にかなり影響されていることを示唆している。すなわち、斜面温暖帯の形成高度は、関東平野における接地逆転層の厚さによってほぼ決まっていると思われる。図3によれば、1日9時には接地逆転層は標高350mまで成長しており、このことから、斜面温暖帯の極大高度は10日21時以降さらに高高度へと移動したことが推測される。また、C地点やD地点で下層の気温が館野のプロファイルから大きく外れている点は、これらの高度における下層に斜面下降流が存在することを示している。このことは、温位のプロファイル

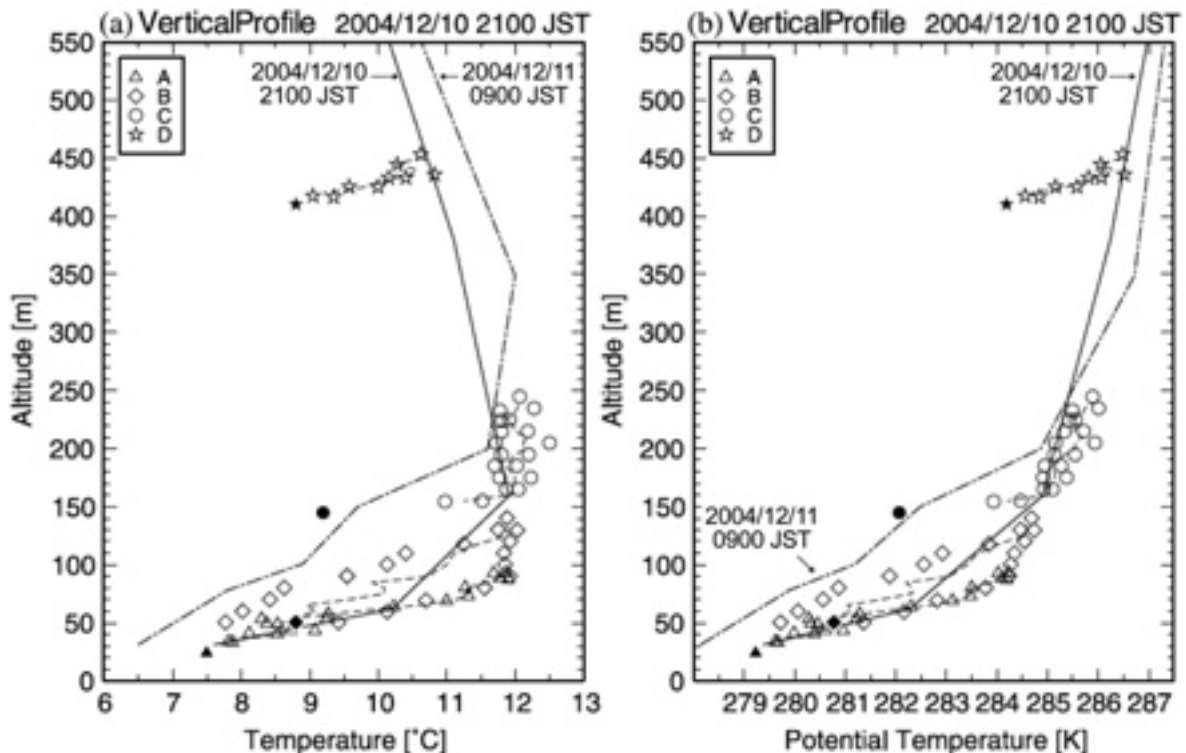


図3：2004年12月10日21時の(a)気温、(b)温位の鉛直プロファイル (Watarai et al. 2005より)。実線は同時刻の館野(筑波山より南へおよそ20km)におけるゾンデの気温プロファイル、一点鎖線は11日9時における館野の気温プロファイルを示す。記号と破線はA - D地点における気温プロファイルを示し(凡例は図左上)、黒塗りの記号はアスマン通風乾湿計で測定された地上1.5mの値を示す。

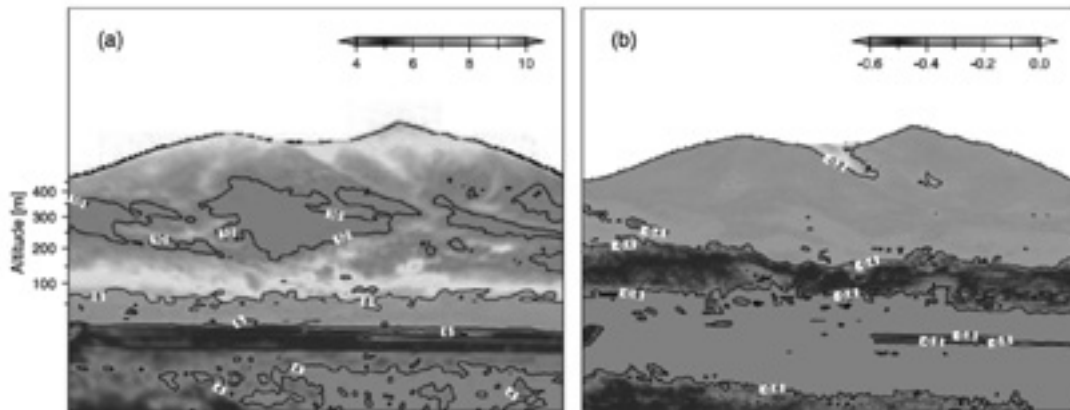


図4：2004年観測で測定された、筑波山西側斜面の熱画像（Watarai et al. 2005より）。(a)は2004年12月10日18時から11日3時までの平均表面温度（単位： $^{\circ}\text{C}$ ）であり、(b)は同期間の平均温度低下率（単位： $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ）を示している。

(図3 b) を見るとさらにはっきりする。温位は安定度の指標であり、空気は断熱変化する限り等温位面上を移動する。例えば、C地点の地上温位は約282Kであり、同じ高度の館野プロファイルの温位より約2.5K低い。そのため、C地点における地上付近の空気は斜面に沿って下降し、標高およそ60m付近まで達することが予想される。D地点の地上温位は約284Kであり、標高約150mまで下降するであろう。C地点の地上約15m以上における等温層は、館野のプロファイルよりもやや高温位となっているように見えるが、これは下降補償流による断熱昇温の存在を示しているかもしれない。

図4は、サーモグラフィーによる筑波山西側斜面の熱画像観測結果を示す。夜間の平均表面温度分布（図4 a）を見ると、低地の表面温度が約4 $^{\circ}\text{C}$ であるのに対し、斜面中腹の標高300m付近を中心に約10 $^{\circ}\text{C}$ の領域が見られ、低地に比べて約6 $^{\circ}\text{C}$ も高い。また、中腹の高温域は帯状に広がっているが、同高度でも場所によって1~2 $^{\circ}\text{C}$ 程度のむらが見られる。夜間の気温低下率で見ると、標高50m以下の領域では-0.6~-0.8 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ であるのに対し、中腹では-0.2~-0.4 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ と、低地のおよそ半分である。

サーモグラフィーの観測から、斜面温暖帯は標高300m付近を中心に100~450m付近に広がっていることが確認された。温暖帯がかなりの広範囲に及んでいることは、図3で見られた接地逆転層の成長にも関係すると思われる。斜面中腹の温度分布で見られるむらは地形と対応しており、同標高でも谷筋では低めとなる傾向がある。このことは、斜面下降流は重力流であり、周囲より低い谷筋に沿って流下するためと思われる。

3. 2007年の集中観測

2004年の集中観測によって、筑波山西側斜面における鉛直気温観測などを通して、斜面温暖帯の二次元的な構造がおおよそ明らかになった。斜面温暖帯の形成は低地における接地逆転層の形成に伴っており、その高度は逆転層の上部高度で決められるといった描像が見えてくる。ところで、斜面温暖帯の形成が関東平野スケールの接地逆転層に支配されていると仮定すると、斜面温暖帯はどの方角の斜面でもほとんど同じような特徴を持って観測されると想像されるが、果たしてそうであろうか。その疑問に答えるべく、2007年の集中観測では、西側斜面以外にも一つ、東側斜面にも測線を設けて観測をおこなった。さらに南側・北側斜面にも温度ロガーを設置して、筑波山周辺の水平分布の把握を大きな目的の一つに掲げた。

図5に、2007年集中観測の観測地点がまとめられている。集中観測は2007年2月21日夕刻から22日朝にかけて実施された。2007年観測では、これまで数多く観測がなされてきた西側斜面に加えて、東側斜面にももう一つの測線を設け、測線上のそれぞれ5地点（A-E）を設定してアスマン通風乾湿計による地上気温・湿度の観測と放射温度計による地表面温度の観測を3時間毎に行った。さらに、東西南北4斜面の斜面温暖帯分布を把握するために、4斜面それぞれの標高約50m、100m、200m地点に「おんどとり Jr.」を設置し、気温の連続観測をおこなった。この4斜面気温観測は、2月7日午後から集中観測日をまたぎ、2月28日午前までの21日間継続した。

集中観測日にはそのほか、西・東側斜面におけるサーモグラフィー同時観測や、西側斜面の斜面温暖帯形成域にあたる光農園においては、繫留気球による気温・風の

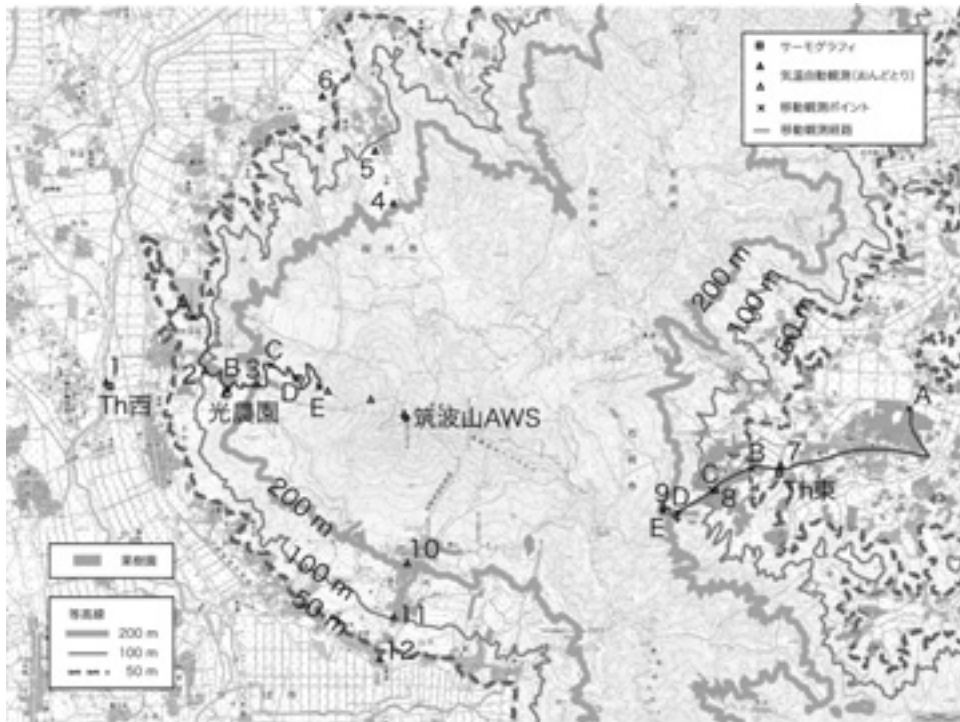


図5：2007年2月21 - 22日の集中観測地点図。アスマン通風乾湿計による地上気温観測は、西側斜面と東側斜面のA - E地点で観測された。地点間を結ぶ実線は移動経路。東西南北斜面の各3地点に温度ロガーを設置し、観測をおこなった（標高約50、100、200m地点；図中に1～12の番号で示された地点）。「Th西」「Th東」にはサーモグラフィが置かれた。光農園では、繫留気球による気温・風の鉛直分布観測等も行われた。

鉛直分布観測や自動気象観測装置による気温・風・放射等の連続観測が行われたが、本稿では地上気温観測に関してのみ報告する。

西側斜面・東側斜面における地上気温観測結果を図6に示す。東側斜面の結果（図6 b）を見ると、2004年に西側斜面で観測されたような気温の逆転の様子や、夜間の気温逆転の強さが時間とともに強まる様子が見られる。22日午前5時半頃には、低地の標高25m地点と中腹の標高200m地点でおよそ4.2の気温差があった。日の出直後の22日8時半頃になると、各地点とも急激に気温が上昇するが、5時半から8時半の上昇率は低地よりむしろ斜面で大きく、その結果8時半頃の25m地点と200m地点の温度差はさらに広がり約6となっている。西側斜面の結果（図6 a）を見ても気温の逆転の様子は読み取れるが、東側斜面と比べると時間経過に伴う逆転の強まりは鈍く、22日5時頃における標高50m地点と標高390m地点の気温差は1.5ほどしかない。しかし、今回の地上気温移動観測では、西側斜面の低地におけるデータが取得できておらず、この結果から西側斜面の逆転が弱いとするのは早計であろう。また、西側斜面では50m地点より140m地点のほうの気温が低い傾向が夜間中続いており、この結果は2004年観測の時とは異なっている。140m地点に近い光農園では、地上気温を含む様々な気

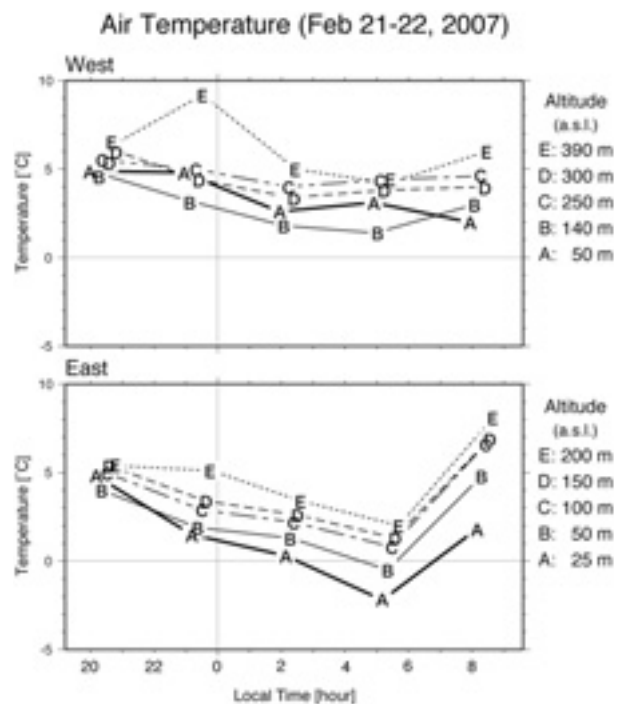


図6：(a)西側斜面、(b)東側斜面における、地上気温観測結果。

象要素が観測されているので、これらのデータもあわせて解析し、この気温極小現象が意味のあるものかどうかを慎重に調べる必要がある。

先に記したように、2007年の集中期間をまたぐ2007年

2月7日午後から2月28日午前にかけての21日間、筑波山の東西南北4斜面の標高約50、100、200m地点に温度ロガーを設置し、計12地点での連続地上気温観測を行った。このうち、各斜面の50m高度と200m高度の気温データを使って、以下のような斜面温暖帯指数 TBI を定義した。

$$TBI = T_{50} - T_{200} \quad (1)$$

ここで、 T_{50} 、 T_{200} はそれぞれ50m高度、200m高度の気温である。 $TBI < 0$ のとき、低地より中腹の気温が高いことになり、斜面温暖帯が形成されていると定義した。図7は、各斜面における TBI の時系列を示したものである。図7を見ると、明瞭な斜面温暖帯が出現した回数は観測期間中9回見られ、出現頻度は33%である。ほとんどの斜面温暖帯イベントは日没後に形成されて時間とともに強まり、日の出後に急速に崩壊する様子が読み取れる。斜面間を比較すると、北側斜面の TBI 時系列が他の斜面に比べて日変化が小さく、特に負値となることが少ないように見える。図左上に書かれたカッコ内の数値は、観測期間内の $TBI < 0$ の積算値（図中陰影部の面積に相当）であり、期間内の斜面温暖帯の積算強度に相当する値である。この値を比較すると、最も大きいのが東側斜面で800、次いで西側斜面で706、南側斜面

で584であり、最も小さいのが北側斜面で164となっている。この結果から東・西・南側斜面での斜面温暖帯の強さを比較するのは難しいと思われるが、東・西・南側斜面に比べて北側斜面では斜面温暖帯が滅多に形成されず、形成されても非常に弱いということは明白であろう。

図6や図7から、筑波山の東側斜面や南側斜面では、西側斜面とほぼ同等な強さの斜面温暖帯が形成されていること、それぞれの斜面での温暖帯はほぼ同時に形成されていることがわかった。一方、北側斜面においては斜面温暖帯が形成されても、その強さは他の斜面に比べて相当弱いということも明らかになった。このことは、斜面の特性に応じた局所的なプロセスが、斜面温暖帯形成に寄与していることを示唆している。

4. まとめ

本稿では、筑波山の斜面温暖帯をターゲットとした2004年12月と2007年2月の2回の集中観測結果について紹介した。2004年の観測では、筑波山西側斜面における気温の鉛直分布観測によって、斜面温暖帯の二次元的な構造が調べられた。斜面温暖帯の形成は接地逆転層の形成に大きく影響されていることが示唆された。しかし、サーモグラフィーの結果で同標高でも温暖帯の強度にむ

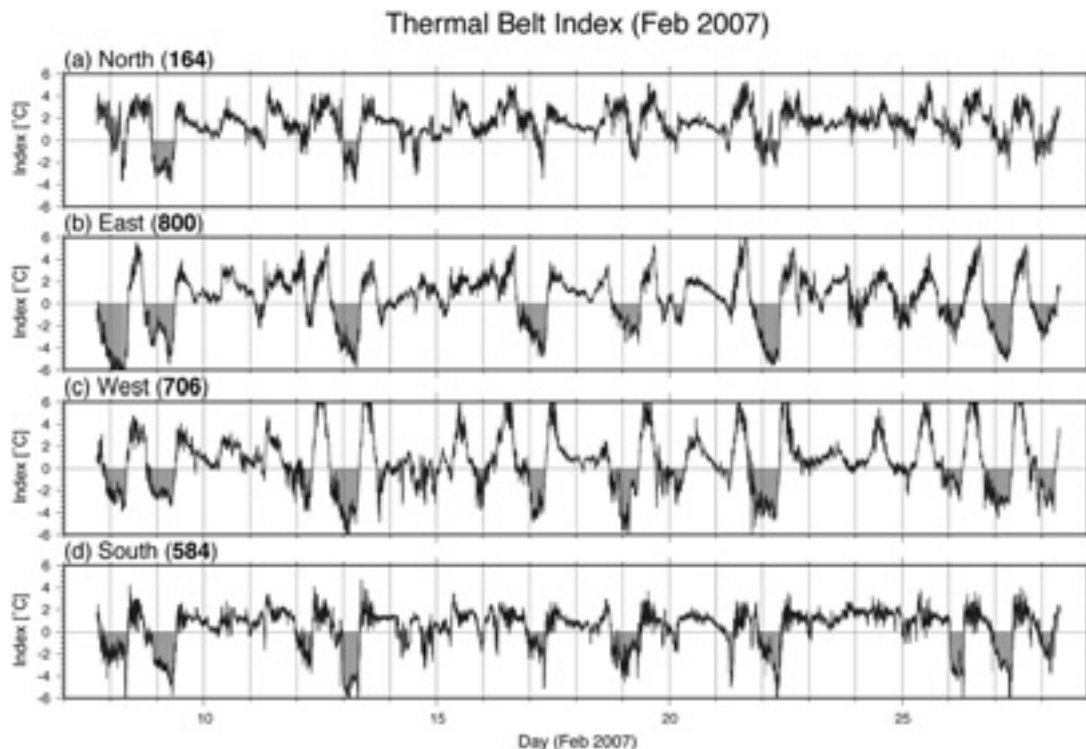


図7：筑波山の(a)北、(b)東、(c)西、(d)南側斜面における、斜面温暖帯指数 TBI の時系列。2007年2月。図左上のカッコ内の数値は、観測期間内に発生した斜面温暖帯の積算強度を指数化したもの。指数算出の元になった気温の観測点は、図5を参照。

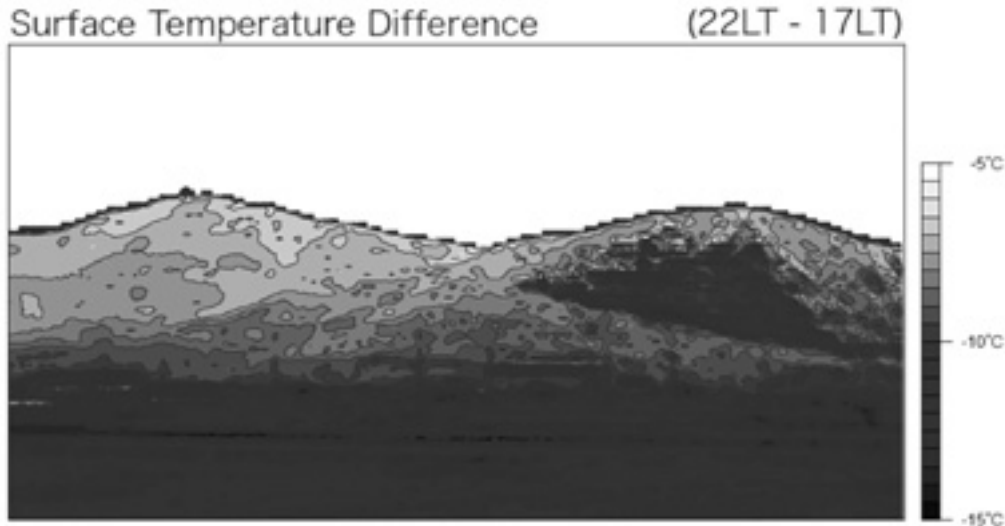


図8：サーモグラフィーによる、2005年1月9日夜間の地表面温度の22時と17時の差 (Hori and Watarai 2005より)。図左の山は宝鏡山で、右側の山の斜面に見られる三角形の領域は採石場のため裸地となっている。

らが見られること(図4)や、北側斜面の温暖帯強度や出現率が他斜面に比べて小さいこと(図7)は、斜面温暖帯形成に局所的な条件が寄与していることを示唆している。

斜面の気温分布に影響を与える局所的な条件としては、地形や土地被覆といったものが挙げられるだろう。先に述べたように、サーモグラフィーの観測で見られた分布のむらは地形の起伏と良く対応している。また、筑波山はアカマツやアカガシといった植物の森林となっている斜面が多く、森林の蓄熱効果によって夜間の気温低下が抑えられていることが斜面温暖帯の形成に寄与している可能性がある。

Hori and Watarai (2005) は、筑波山の南東に位置する宝鏡山と、その南東の山の斜面にある採石場を対象に、サーモグラフィーを用いて晴天夜間の表面温度低下率を調べた。宝鏡山の斜面は森林であり、一方採石場は裸地になっている。図8は、17時から22時にかけての気温低下を示す。採石場の斜面では約10%の温度低下を示しているのに対し、ほぼ同標高の宝鏡山斜面では約7%ほどの低下となっている。両者の差は地表面被覆の違い、すなわち森林の蓄熱効果による気温低下の抑制効果をもたらしていると推測される。

森林が夜間の蓄熱効果を発揮するには、日中に日射を吸収して森林が暖まる必要がある。北側斜面の森林は、日中に十分な日射を受けられないため、夜間の蓄熱効果をもたらすことができない。その結果、図7で示されたように、北側斜面のみ他斜面に比べて斜面温暖帯が発生しにくいという可能性もある。しかし、本稿で紹介

した観測結果のみではまだ不十分であり、更なる研究が必要である。

謝辞

本稿で紹介された2回の集中観測は、2004年については筑波大学第一学群自然科学類開設授業「気候学・気象学野外実験」として実施されたものです。2007年については、筑波大学学内プロジェクト(S)「筑波山における気象・水文環境の多要素モニタリングによる大気・水循環場の解明」(代表：林陽生・筑波大学教授)による成果です。これらの観測に協力頂いた大学生・大学院生に感謝致します。特に、2007年観測における東西南北斜面での気温連続観測に関しては、筑波大学自然科学類(当時)の加納遼平氏に尽力頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 郡司 助 1958：筑波山麓における気温の逆転について。産業気象調査報告, 21, 89 - 91.
- Hori, M. E. and Y. Watarai 2005: Observation of thermal belt on an open slope by use of infrared thermography. *Tsukuba Geoenv. Sci.*, 1, 3 - 10.
- 堀 正岳・植田宏昭・野原大輔 2006：筑波山西側斜面における斜面温暖帯の発生頻度と時間変化特性。地理学評論, 79, 26 - 38.
- 茨城県・水戸測候所 1957：「筑波山麓における果樹適応性調査(昭和31年度総合報告)」, 茨城県。
- 小林 守 1979：熱映像による筑波山の温暖帯の測定。天気, 26, 161 - 166.
- Ueda, H., M. E. Hori and D. Nohara 2003: Observational study of the thermal belt on the slope of Mt. Tsukuba. *J. Meteor. Soc. Japan*, 81, 1283 - 1288.
- Watarai, Y., M. E. Hori and Y. Hayashi 2005: Vertical

structure of the thermal belt in the western slope of Mt. Tsukuba: an observational study on 10 - 11 December, 2004. *Tsukuba Geoenv. Sci.*, 1, 11 - 17.

吉野正敏 1982 : 筑波研究学園都市の低温と接地逆転層の発達. 筑波大学水理実験センター報告, 6, 35 - 44.

Observation of the Thermal Belt on the Slope of Mt. Tsukuba

Yasushi WATARAI*

*Faculty of Geo-environmental Science, Risho University

Keywords: Mt. Tsukuba, thermal belt, surface temperature, surface inversion layer, thermography