

筑波山の東西南北 4 斜面における高度100 m 間隔での通年観測

—斜面温暖帯に着目して—

植 田 宏 昭*¹・小 埜 祐 人*¹・大 庭 雅 道*²・井 上 知 栄*¹
釜 江 陽 一*¹・池 上 久 通*³・竹 内 茜*⁴・石 井 直 貴*⁵

要 旨

筑波山の東西南北 4 斜面上に、標高約100 m 間隔で気温ロガーを設置し、2008年 6 月 1 日から2009年 5 月31日までの期間において、30分間隔の通年観測を行った。斜面温暖帯を定量的に議論するために、麓からの逆転強度を斜面温暖帯指数 (Thermal Belt Index ; *TBI*) として定義した。*TBI* の大きさは、冬季を中心に極大となり、標高 200~300 m を中心に斜面温暖帯が形成されていた。斜面温暖帯の年間発生日数を各斜面で比較すると、西側103回、東側99回、南側59回、北側35回であった。斜面温暖帯を規定する広域の逆転現象との関係を議論するために、平野部に設置されている気象観測鉄塔データと斜面上の気温を比較した。

1. はじめに

筑波山の中腹地帯では、静穏な夜間に山地斜面の中腹の気温が麓に比べて相対的に高くなる「斜面温暖帯 (thermal belt)」と呼ばれる現象が発生する (吉野 1982)。この地域は、古くから在来種のフクレ (福来) みかんの栽培地として知られていた。一般にみかんの栽培条件は、年平均気温が15°C以上であること、さらに最寒月の最低気温が氷点下 1°C以上であることとされている。水戸測候所 (現在の水戸地方气象台) によって1953年から 3 年間にわたって実施された山麓での気象観測によると、中腹地帯における最寒月の最低

気温は氷点下 1°C以上であった (郡司 1958)。この値はみかんの栽培条件の下限でもあり、筑波山がみかん栽培の北限地であることも整合的である。筑波山の西側斜面では、上記の気象観測結果を受けて、昭和30年代 (1955年以降) から観光を主目的とした温州みかんの栽培が始まり、最盛期の1970年には、40戸以上のみかん栽培農家が存在していた (小林・腰塚 1983)。現在はみかん狩りを主目的とした栽培農家が11軒残存しているが、担い手の高齢化が問題になっている。このような背景の中、筑波大学では周辺地域との連携の一環として、筑波山頂でのアメダス代替施設の復活や (Hayashi *et al.* 2006)、斜面温暖帯に関する教育・研究プログラムを実施している。

第 1 図は風が静穏でよく晴れた条件下における深夜~早朝間の気温の鉛直プロファイルを示したものである。平野部では地面からの放射冷却により、地表付近の気温が低下するため、気温は高度とともに相対的に高くなる。このような大気の逆転現象が発現した際に、山岳が存在していた場合を考える。逆転層内の山岳斜面上の気温は、山麓に比べて相対的に高くなることは容易に想像される。ところが山岳斜面では、放射冷却による気温低下が同時に生じている。この斜面上で形成された

*¹ 筑波大学生命環境科学研究科。

*² 筑波大学生命環境科学研究科 (現：(財) 電力中央研究所)。

*³ 筑波大学生命環境科学研究科 (現：(株) 富士通エフ・アイ・ピー)。

*⁴ 筑波大学生命環境科学研究科 (現：(株) ウェザーニューズ)。

*⁵ 筑波大学生命環境科学研究科 (現：(株) ナビタイムジャパン)。

—2011年 3 月15日受領—

—2011年 5 月27日受理—

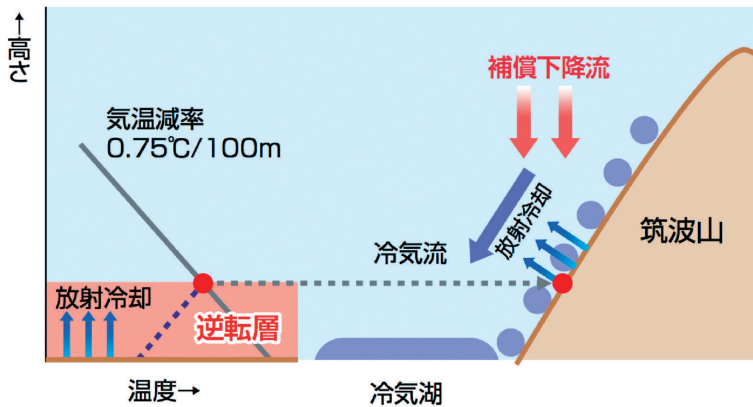
冷気は、重力に従って冷気流として山麓へと流下し、不足した空気を補うように下降流が引き起こされると考えられている(例えば Kobayashi *et al.* 1994)。下降流は断熱圧縮および気温の高い空気の鉛直移流を介して斜面上の気温を上昇させる方向に作用する。このように斜面温暖帯の発生因子を考える際には、広域の逆転層の影響と山岳域での局地循環に伴う熱・力学過程を同時に論じる必要がある。

模式図における山岳は、東西南北方向に一樣な斜面を持った場合を想定しているが、実際には筑波山の北東側は、柿岡盆地に面しているため、斜面によって冷気流の発生規模や逆転層高度に違いが生じることが考えられる。第2図は、1955年1月の最低気温を筑波山の東西断面にプロットしたものである(吉野 1961)。興味深いことに斜面温暖帯の高度は東西一様ではなく、西側(関東平野)の方が東側(柿岡盆地)より高くなっている。このような斜面間の非一様性を論じるには、異なる斜面上での同時観測データを用いて、逆転層の厚さの違いや、冷気流に伴う補償下降流の強度

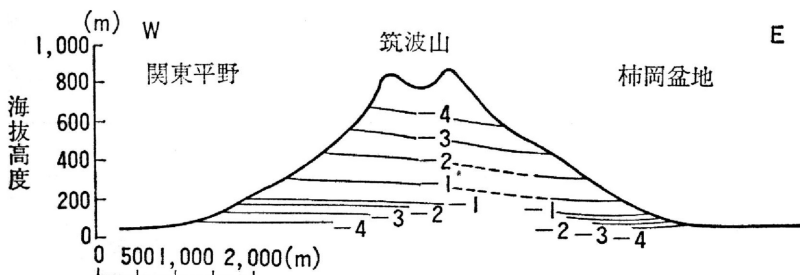
を比較する必要がある。

近年、Ueda *et al.* (2003) は気温ロガー、サーモグラフィ、ならびに係留気球を用いて集中観測を行い、西側斜面で観測された斜面温暖帯は100 m 以上の厚さを持つ等温層の一部であることを明らかにした。その後、堀ほか(2006) は筑波山の西側斜面において、2003年の11月から2004年の1月にかけて実施した3ヶ月間の気温観測データに基づき、3日に1回の割合で斜面温暖帯が出現することを明らかにした。

上述のように、筑波山においては過去に斜面温暖帯に関する観測的研究が行われているが、4斜面上で年間を通して観測した例はない。そこで本調査研究では、斜面温暖帯の発生頻度・強度・極大高度などの季節変動を明らかにするとともに、冷気流の発生と地形との関係を考察することを目的として、高度約100 m 間隔での気温観測を、異なる形状を持つ東西南北4斜面において実施した。また、斜面温暖帯現象と広域逆転との関係を論じるために、筑波山から南に約20 km 離れた平野に設置されている気象観測鉄塔(地上高213 m) で観測された気温データとの比較を行った。



第1図 斜面温暖帯の概念図。植田(2008)より引用。



第2図 筑波山における1955年1月の月平均最低気温の高度分布。吉野(1961)より引用。

2. 観測概要と解析方法

2.1 山岳観測と鉄塔データ

第3図aに筑波山および周辺の地形を示す。筑波山は関東平野の孤立峰(女体山頂877 m)と呼ばれるが、実際には北北東と南東に山地が連なり、北東側は柿岡盆地に面している。本研究では東西南北4斜面を選定し、各斜面において標高差約100 m 間隔で気温を計測した。観測期間は2008年6月1日から2009年5月31日までの1年間である。

観測は気温ロガー「Thermo Recorder おんどとり Jr」を使用して行い、30分間隔でデータを記録した。気温ロガーは全て地上1.5 m に設置し、ロガー本

体は日射の影響や雨の影響を受けないようアルミホイルで包まれた容器に格納し、温度センサー部分は外部に露出した。センサーの先端は、降雨による雫の付着を防止するため（冬季の氷結防止も含む）、天空方向に向けて観測を行った。なお、ロガーは全て自然通風としている。気温データの測定精度については、器差が最大で0.3°Cであることを考慮して、本研究では0.3°C以上の変動を取り扱うことにした。

筑波山頂の気温は、男体山頂（標高871 m）に設置されている気象観測ステーションのデータを使用した。山頂観測ステーションでは、地上1.5 mの気温を白金抵抗温度計を用いて10分間隔で観測している（Hayashi *et al.* 2006）。

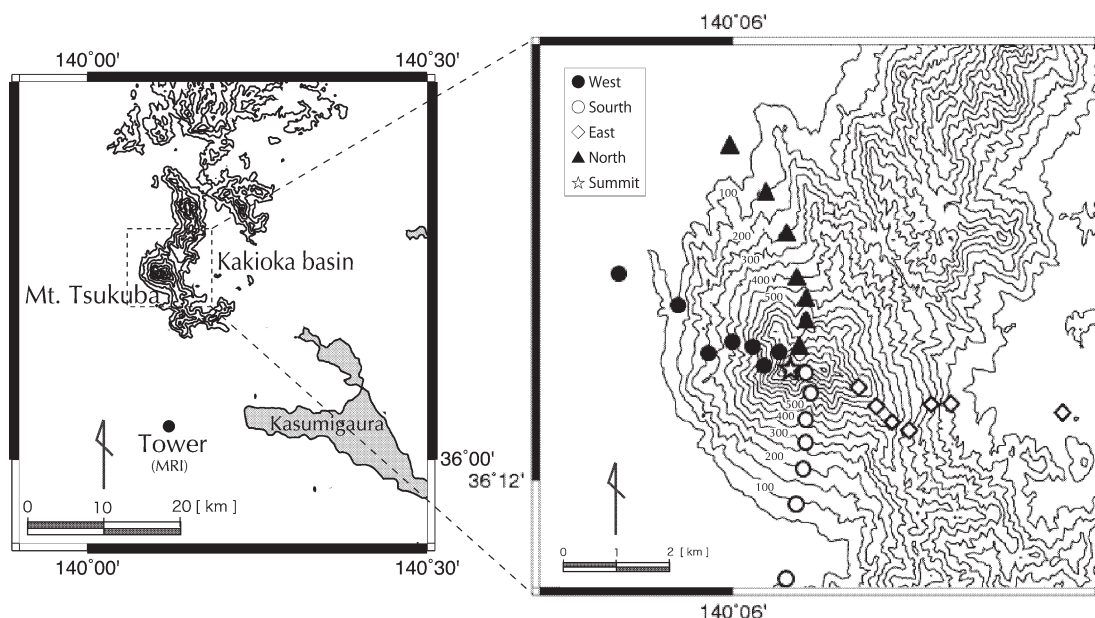
筑波山の斜面温暖帯と関東広域スケールの接地逆転層との関係（以下広域逆転と呼ぶ）を調べるために、筑波山から南に約20 km離れた、気象研究所の気象観測用鉄塔で測定された気温データを使用した。観測は6高度（地上高10 m, 25 m, 50 m, 100 m, 150 m, 200 m）に設置された白金抵抗温度計を用いて行われ、測定間隔は1分間である（花房ほか 1979）。鉄塔では地上付近の気温データが測定されていないため、高層気象台（気象研究所に隣接する敷地）に設置されている「アメダスつくば」の観測値で補完した。解析期間は2008年6月1日から2008年12月31日までの7ヶ月間である（鉄塔観測は2009年1月6日に終了）。なお、気象研究所の海拔25 mを鉄塔データの地上高に加算することで、筑波山の気温プロファイルとの比較を行っている。

2.2 斜面温暖帯指数
斜面温暖帯を定量的に議論するために、斜面温暖帯指数（Thermal Belt Index；以下 *TBI*）を以下を用いて算出した。

$$TBI(h,t) = T_s(h,t) - T_f(t) \tag{1}$$

$T_s(h,t)$ は斜面上 (slope) の高度 h , 時刻 t での気温, $T_f(t)$ は同時刻の山麓 (foot) における気温であり、正の *TBI* は2地点間で気温の逆転が生じていることを示している。

斜面温暖帯の強度や頻度の季節変化を同じ基準で論じるためには、日別に各斜面上において最低気温が出現する時刻 t_{min} を抽出し、その時の高度 h_{max} を決定する必要がある。本論文では、 h_{max} および t_{min} を (1) 式に代入した値を、斜面温暖帯指数 *TBI* と定義する。なお、最低気温は全ての高度でほぼ同時刻に出現していたため、本研究では共通の t_{min} を用いて計算を行っている。斜面上の気温の絶対値については、日最低気温の鉛直分布を3.2節において議論するとともに、各斜面における最低気温を第1表に示した。



第3図 筑波山域の地形図。左は周辺地形図、右は山岳域の観測点。左の黒丸は気象研究所の観測鉄塔を示す。

第1表 全観測点における日最低気温の月平均値。W, E, S, N は西, 東, 南, 北, 数字の1~7は麓からの順番, Alti.は地上高(単位はm)を表す。空欄は欠測を示し,*印は次の欠測を含む。W6:11/9-11/17, E1:1/17-1/24, S7:7/24-10/2, N1:6/1-7/24.

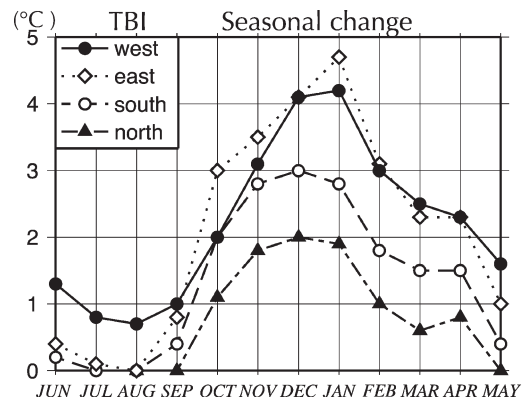
Station	Alti.	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May
W1	20	15.2	21.3	21.6	18.1	11.0	3.7	-0.9	-3.3	-2.4	0.0	5.8	12.8
W2	60	16.5	22.1	22.3	19.1	13.0	6.2	2.0	0.0	0.2	2.3	8.1	14.4
W3	145	15.7	21.3	21.5	18.4	12.8	6.3	2.3	-0.3	-0.2	2.0	7.6	14.0
W4	300	15.2	20.8	21.0	18.2	12.9	6.8	3.2	0.5	0.6	2.5	7.9	13.5
W5	400	14.9	20.4	20.6	18.0	12.7	6.8	2.8	0.0	0.3	2.0	7.5	13.4
W6	550	14.2	19.6	19.8	17.4	12.2	6.4*	2.8	0.1	0.4	1.9	7.4	13.0
W7	700	13.8	19.1	19.2	16.8	11.7	5.5	1.5	-1.3	-0.9	0.6	6.5	12.2
E1	30	15.2	21.0	21.4	18.0	10.6	4.4	-0.2	-3.9*	-1.8	0.5	6.3	12.9
E2	100	15.6	21.1	21.4	18.8	13.4	7.5	3.1	0.7	0.9	2.4	8.5	13.9
E3	220	15.2	20.6	21.0	18.5	13.6	7.9	3.9	1.3	1.3	2.8	8.6	13.8
E4	300	14.8	20.2	20.6	17.9	12.4	6.8	2.8	0.3	0.4	1.9	7.8	13.3
E5	400	14.6	19.9	20.4	18.1	13.2	7.2	3.3	0.2	0.4	2.2	7.8	13.2
E6	550	13.6	18.9	19.4	16.8	11.7	6.0	2.1	-0.5	-0.5	1.1	6.7	12.2
E7	700	13.1	18.5	19.0	16.2	11.1	5.4	1.4	-1.2	-1.0	0.4	6.1	11.9
S1	30	16.1	21.8	22.1	18.8	12.3	5.4	1.2	-1.2	-0.2	2.1	7.5	14.2
S2	85	16.3	21.7	22.0	19.0	13.0	6.1	2.1	-0.5	0.5	2.4	8.1	14.2
S3	200	16.1	21.7	22.0	19.2	14.3	8.1	4.1	1.1	1.5	3.6	9.0	14.6
S4	300	15.5	21.0	21.4	18.9	14.0	8.2	4.2	1.3	1.6	3.2	8.7	14.1
S5	400	15.1	20.5	20.8	18.6	13.5	7.7	3.8	1.1	1.2	2.7	8.3	13.7
S6	550	14.2	19.5	19.8	17.6	12.7	6.8	2.8	0.1	0.4	1.8	7.6	13.0
S7	700	13.8	18.4*			11.4*	5.7	1.8	-0.8	-0.6	0.8	6.6	12.1
N1	30		22.2*	22.1	19.0	12.1	5.1	1.2	-1.1	-0.1	2.0	7.7	14.4
N2	100	16.0	21.5	21.8	19.0	13.2	6.4	2.6	0.1	0.9	2.6	8.5	14.3
N3	200	15.1	20.7	21.0	18.1	12.5	5.9	2.3	-0.4	0.1	1.9	7.6	13.5
N4	300	15.1	20.6	20.9	18.3	12.9	6.9	3.2	0.5	0.7	2.5	8.0	13.7
N5	400	14.5	20.1	20.6	18.0	12.2	6.4	2.3	-0.2	0.0	1.7	7.3	13.2
N6	550	13.9	19.4	19.6	17.2	12.2	6.1	2.2	-0.4	-0.5	1.2	7.0	12.8
N7	700	13.1	18.4	18.6	16.1	11.0	4.8	0.6	-2.2	-1.9	-0.2	5.7	11.8
Summit	871	12.7	18.0	18.1	15.4	10.5	4.3	0.4	-2.6	-2.0	-0.6	5.5	11.0

3. 観測結果

3.1 季節変化

式(1)を用いて算出したTBIの季節変化を第4図に示す。TBIの大きさは全ての斜面において、12月に極大、8月に極小をとる。年間を通してTBIの値は、4斜面で類似の変化を示し、TBIの年平均値は西側斜面(2.6°C)と東側斜面(2.2°C)で大きく、次いで南側(1.5°C)、北側(1.1°C)の順に小さくなっている。

斜面温暖帯の発生頻度を調べるために、個々の事例においてTBIが+3.0°Cを超えた状態が、3時間以上持続した場合を、本稿では斜面温暖帯が出現している事例として判定した。第5図は各斜面での発生頻度を、月別に算出したものである。この定義によれば、年間の斜面温暖帯の発生は、西側斜面で103回と最も多く、次いで東側斜面の99回、南側斜面の59回と続き、北側斜面では最も少ない35回となっている。月ごとの変化を見ると、斜面によって差はあるが、夏期(6月、7月、8月)にはほとんど斜面温暖帯は発現



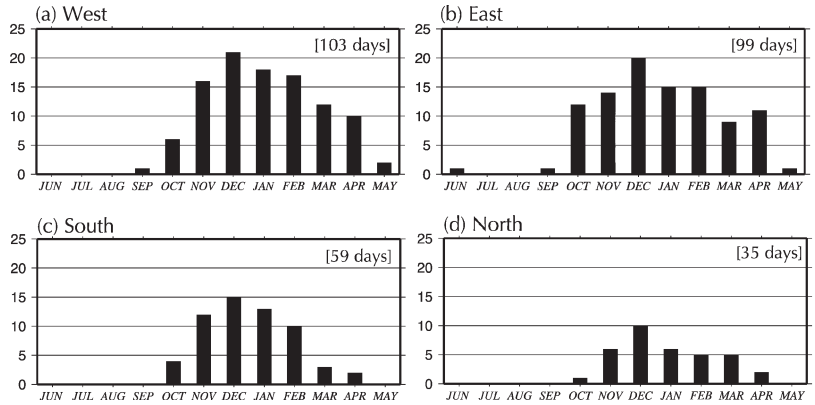
第4図 各斜面における麓からの逆転強度(TBI)の季節変化。1月は欠測期間(1/17-1/24)を除いた値。

せず、10月から徐々に発生頻度が増加し、12月または1月の極大を経て、4月頃まで気温の逆転現象が見られる。

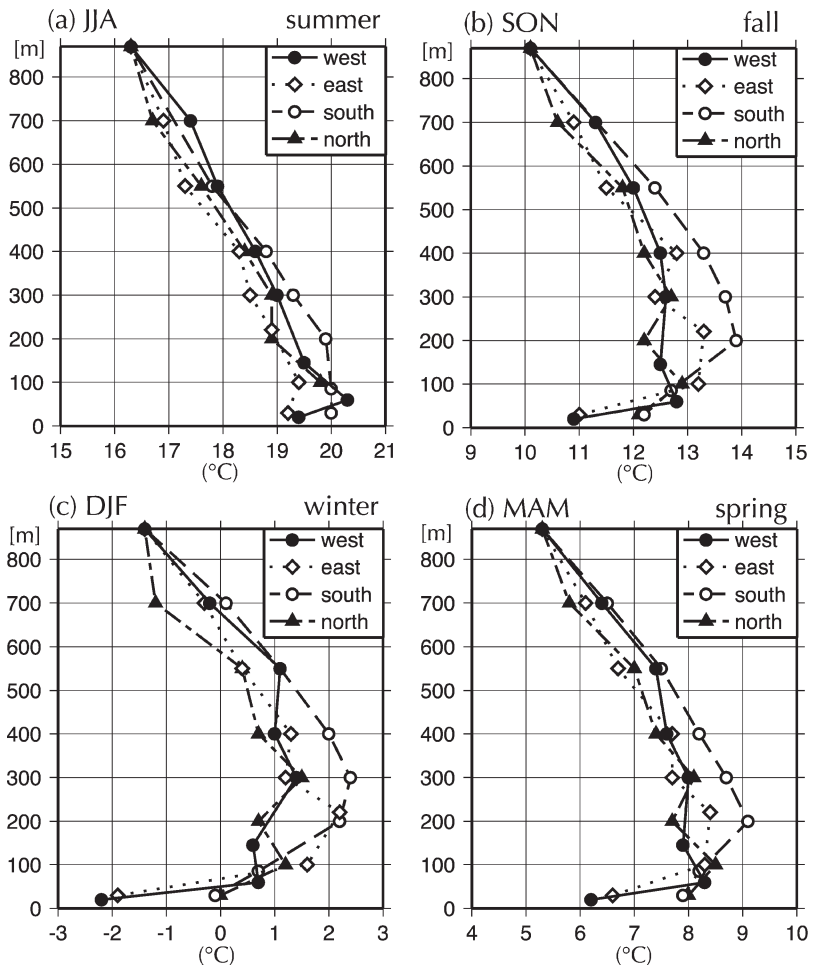
TBIは麓の気温が著しく低下した場合、あるいは

斜面の気温が高い場合のどちらの状態においても、大きな値をとるため、気温の絶対値を合わせて議論する必要がある。第6図に、季節平均した最低気温の鉛直プロファイルを示す。斜面間の比較を行うために、一枚の図に4斜面の値をプロットしている。夏期（6月，7月，8月）の気温は、西側斜面の麓付近を除き、高度とともに低下しているが、冬期（12月，1月，2月）には麓から高度200～300 m 付近まで逆転現象が発現している。

麓と斜面上での気温を仔細に見ると、冬期の西側および東側斜面の山麓での気温低下（ -2°C 前後）が顕著であり、山頂の気温よりも低くなっている。一方、逆転の上端の気温は、南斜面で最も高く、とりわけ冬期にその傾向が強い。このように、西側および東側斜面では、麓の気温の著しい低下が、TBIの増加要因と考えられる。一方、南側斜面では、麓の気温は大きく下がらないものの、斜面中腹における気温の低下量が小さいため、結果としてTBIが大きくなっている。麓の観測点は、小学校のグラウンドや畑地などであることから、比較的広域の気温を代表していると考えられるが、山岳域は樹木の有無や小さな谷などの微地形の影響も考慮する必要がある。森林による蓄熱効果や小さな谷を流下する冷気流



第5図 各斜面における斜面温暖帯の月別発生日数。年間の合計発生日数を右上に示す。(a) 西側斜面，(b) 東側斜面，(c) 南側斜面，(d) 北側斜面。



第6図 各斜面における日最低気温の鉛直プロファイル。(a) 夏期：6～8月，(b) 秋期：9～11月，(c) 冬期：12～2月，(d) 春期：3～5月。

の役割などは、今後の課題である。

3.2 日変化

吉野 (1982) が行った筑波山南斜面における斜面温暖帯の移動観測結果によると (第7図 a), 深夜から早朝にかけて, 斜面温暖帯の極大高度が上昇するとともに, 12°C前後の気温が極大高度域で維持されている。このような現象が統計的にも見られるかを確認するために, 晴天夜間のみを抽出して, 斜面上の気温の日変化を調べた。

第7図 b は南側斜面における秋期 (11月) の17時30分から翌朝7時までの気温変化を示す。気温の極大

高度 (破線) は, 日没前後 (17時頃) から深夜・早朝にかけて, 徐々に高くなっている。気温の絶対値 (例えば 7°Cの等温線) に着目すると, 朝方にかけて次第に下層の逆転層が厚くなると同時に, 200~300 m 付近の高温層は 8°C前後を保ったまま, 高度が高くなっている。

第7図 a を仔細に見ると, 0 時前後の1時間くらいの間に, 気温が一時的に低下し, その後に 4~5°C の強い逆転が 200 m 以下の高度に形成されていることに気付く。吉野 (1982) では, 斜面上に蓄積された冷気が, 斜面温暖帯をやぶって山麓に流下した影響を指摘しており, 類似の変動が今回の観測でも 3 時頃に確認できる。斜面上の冷気流の間欠的な運動については, 今後の研究を待ちたい。

3.3 広域逆転との関係

第1図に示したように, 斜面温暖帯は広域逆転に大きく規定されていると考えられる。そこで, 本調査では平野部に位置する気象観測用鉄塔データを用いて斜面上の気温との比較を行った。

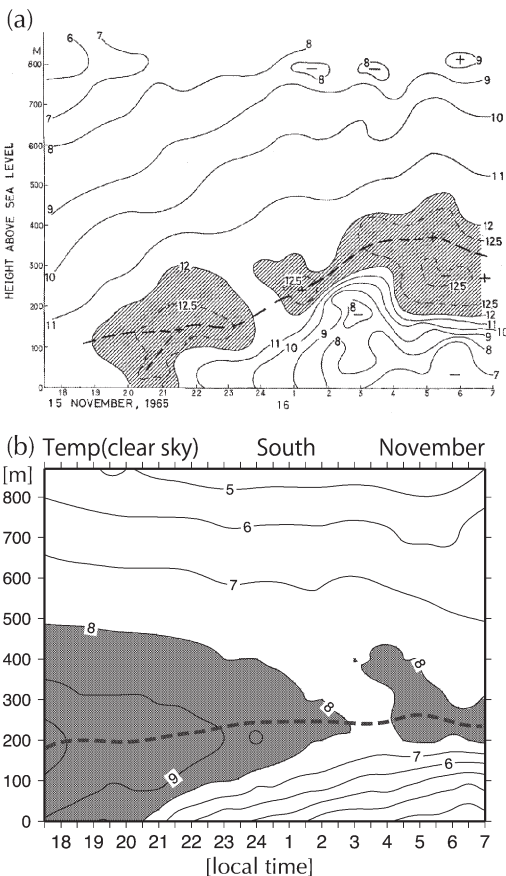
斜面および鉄塔で観測された日没前の気温プロファイルについて, 6月と12月の晴天日を平均したものを第8図に示す。夏の斜面上の気温は, 鉄塔の鉛直プロファイルに近く, 南斜面での気温差は約 0.5°C と小さい。また気温の逆転も地表付近 (100 m 以下) にしか見られない。

一方, 冬になると気温の鉛直構造は, 斜面上, 自由大気中ともに顕著な逆転を示し, 両者における気温の極大は, ほぼ同じ高度に出現している。興味深いことに, 斜面上の気温は, 自由大気中の同高度の気温よりも大幅に低くなっている。この結果は, 斜面温暖帯が広域逆転に支配されていることを示すと同時に, 斜面上では放射冷却や冷気流によって気温の低下が引き起こされていることを示唆している。

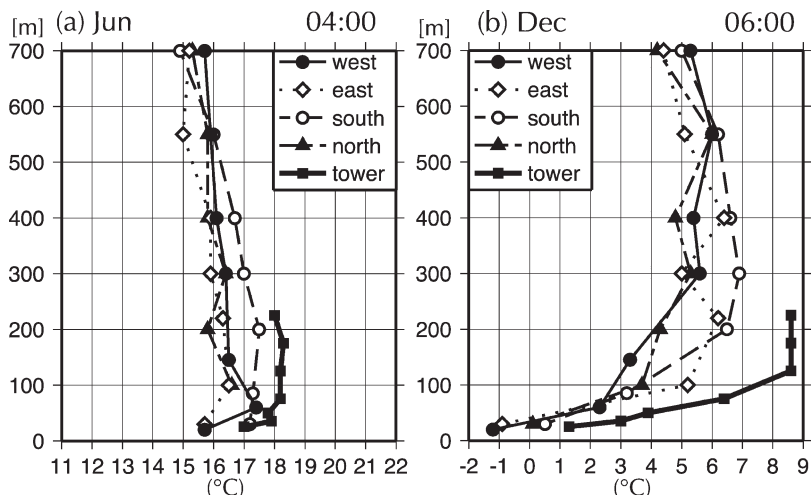
4. まとめと課題

筑波山の東西南北斜面における斜面温暖帯の特徴を調べるために, 4 斜面の気温を標高約 100 m 間隔で 2008年6月1日から2009年5月31日まで, 30分間隔の通年観測を行った。斜面温暖帯はいずれの斜面においても夏季にはほぼ発生せず, 麓からの逆転の強度 *TBI* は 1°C 以下である。

冬季になると, 気温の逆転は12月に最大となり, 標高 200~300 m を中心に斜面温暖帯が形成される。各斜面における12月平均の麓からの気温の逆転は, 西側



第7図 (a) 1965年11月15日17時30分より16日07時までの筑波山南斜面における気温のアイソプレス。陰影は12°C以上の顕著な温暖帯を示す。太い破線は斜面上で最も高温なところを結んだ線。吉野 (1982) から引用。(b) 南側斜面における11月平均気温の高度時間断面図。データは晴天夜間平均値に基づく。



第8図 4斜面上の気温と鉄塔気温(太実線)の比較。(a) 6月04時, (b) 12月06時。晴天日の平均値に基づく。

および東側斜面では4°C, 南側斜面で3°C, 北側斜面においては2°Cであった。斜面中腹の気温を比較すると, 最も高いのは南側斜面であり, 他の斜面と比べて約1°C前後高かった。この点を議論するためには, 斜面上での1日を通した熱収支の視点から, 日射による森林の蓄熱効果(例えばHori and Watarai 2005)や微地形による影響を議論する必要がある。

12月の山麓における最低気温は, 西側および東側斜面で約-2°C, 南側および北側斜面は約0°Cであった。このような西側および東側山麓での顕著な気温の低下は, 逆転強度が増大する理由の一つである。とりわけ, 盆地に面する東側斜面の麓では, 冷気湖の発達が継続的な気温低下を引き起こしている可能性がある。

気象研究所の鉄塔データとの比較により, 筑波山斜面上の夜間における冬期の気温は, 同じ高度における平野部の気温よりも低いことがわかった。このことは, 斜面温暖帯が標高200~300 mにピークを持つ気温の逆転現象である(Watarai *et al.* 2005)と同時に, 斜面上の冷却や局地循環の影響を受けていることを示唆するものである。鉛直循環に伴う熱力学過程(例えば木村 1994)は古くて新しい課題であり, 鉛直風の観測や数値モデリングなどを組み合わせた統合的な研究が待たれる。

謝 辞

本観測は筑波大学の大気科学野外実験の一環で行わ

れ, 33名の大学院生・学部生(著者を除く)によって実施されました。実施にあたり, 以下の皆様から観測圃場をご提供いただきました。南側斜面(田井小学校, ゐ多そば店, 東豊学園つくば松実高等学校), 西側斜面(酒寄光司氏, 海老沢 豊氏), 東側斜面(小幡小学校), 北側斜面(柿沼製粉株式会社, 来栖英世氏)。また, 筑波山神社, 酒寄観光みかん組合, 茨城森林管理署, 茨城県生活環境課による支援を賜りました。気象研究所のデータの

利用に際しては, 同研究所の足立アホロ氏に品質管理を含め, ご協力いただきました。ここに合わせて謝意を表します。

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.
 花房龍男, 藤谷徳之助, 伴野 登, 魚津 博, 1979: 筑波研究学園都市に新設された気象観測用鉄塔施設。気象研究所技術報告, (3), 1-50.
 Hayashi, Y. and Research Group for Intramural Project (S), 2006: Meteorological observation station at the summit of Mt. Tsukuba. Tsukuba Geoenviron. Sci., 2, 19-24.
 Hori, M. E. and Y. Watarai, 2005: Observation of thermal belt on an open slope by use of infrared thermography. Tsukuba Geoenviron. 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.
 木村富士男, 1994: 局地風による水蒸気の水平輸送: 晴天日における日照時間の地形依存性の解析。天気, 41, 313-320.
 小林 守, 腰塚昭温, 1983: 筑波山におけるみかん園の分布と小気候。筑波の環境研究, (7), 195-202.
 Kobayashi, T., M. Mori and K. Wakimizu, 1994: An observational study of a thermal belt on hillsides. J. Meteor. Soc. Japan, 72, 387-399.
 植田宏昭, 2008: 環境教育の現場—斜面温暖帯の観察—。

- 筑波大学環境報告書2008, 34-36, www.tsukuba.ac.jp/public/pdf/tsukubaER0926.pdf (2011.7.25閲覧).
- 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 Geoenviron. Sci.*, **1**, 11-17.
- 吉野正敏, 1961: 小気候—局地気象学序説. 地人書館, 274pp.
- 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.

Annual Observation at the Four Cardinal Slopes on Mt. Tsukuba
—With Focus on the Thermal Belt—

Hiroaki UEDA^{*1}, Yuto KOBANAWA^{*2}, Masamichi OHBA^{*3},
Tomoshige INOUE^{*2}, Youichi KAMAE^{*2}, Hisamichi IKEGAMI^{*4},
Akane TAKEUCHI^{*5} and Naoki ISHII^{*6}

^{*1} (*Corresponding Author*) Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Ibaraki 305-8572, Japan.

^{*2} Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba.

^{*3} Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba (*Present affiliation*: Central Research Institute of Electric Power Industry).

^{*4} Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba (*Present affiliation*: Fujitsu FIP Corporation).

^{*5} Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba (*Present affiliation*: Weathernews Inc.).

^{*6} Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba (*Present affiliation*: NAVITIME JAPAN Co., Ltd.).

(Received 15 March 2011; Accepted 27 May 2011)