

技術報告

筑波大学井川演習林における気温の空間分布特性

上治雄介^{1*}・山川陽祐^{1,2}

¹ 筑波大学農林技術センター
428-0504 静岡県静岡市葵区井川1621-2

² 筑波大学生命環境系
305-8572 茨城県つくば市天王台1-1-1

要 旨

高標高山岳地における気温の高度分布の実態解明に向けた事例研究として、南アルプス中央部に位置する筑波大学井川演習林内において気温の空間分布の特性を解析した。標高1060~1685mに位置する6地点の月平均気温、月平均最高気温、月平均最低気温は年間を通じてそれぞれ高度と概ね高い相関を示した。月平均最高気温については、気温と高度の相関がやや低く、これには各観測点における日中の日射量の大小が影響していると考えられた。月平均気温の通減率は夏季に小さく、冬季に大きいという季節変動を呈した。これに対して、月平均相対湿度、月平均比湿および月平均気温は夏季に大きく冬季に小さくなり、気温の通減率と湿度ならびに気温とが正反対の季節変動を呈した。以上の結果より、井川演習林における気温は顕著な高度分布を呈し、その高度分布の特性(気温通減率)は太平洋側気候帯における季節変化に伴う気層の乾湿ならびに気温によって強く規制される可能性が示された。

キーワード：気温、気温通減率、山岳気象、南アルプス

緒 言

山地における自然現象には、種々の環境要因の中でも特に気温に大きく影響を受けているものが多い。例えば植物の生長についてみると、樹木の開葉・開花は日積算気温から予測することができ(中野ほか 2001)、樹木の肥大成長にも気温が関係している(澤内ほか 2007)。人工的に温度条件を変えた樹木の成育実験では展開葉数や蒸散速度、落葉時期が変化する(Fukui 2001、山本ほか 2006)。また、山地における水、土砂の流動などの物質移動にも気温が大きく関与する。特に標高が高く急峻な山地斜面においては、気温が0℃をまたいで上下することにより土壌水分の凍結融解が生じ、これによる土砂生産および移動が顕著である(今泉ほか 2012)。

この他、土壌凍結深の発達度合いによって融雪水の土壌中への浸透量が規制されるといった成果も報告されている(岩田ほか 2011)。これらのことから、山地における諸現象の正確な理解を進めていく前提として、山地の気温分布に関する知見を深めることが非常に重要であると言える。しかしながら、山地、中でも高標高の山岳地においては、気温の時間的・空間的分布に関する知見が少なく、その実態や気温を支配する要因(気温とその他の気象条件あるいは立地条件との関係)に未解明な部分が多い。

現在、最も普及している気温観測網といえは気象庁が運用しているアメダス(地域気象観測システム：Automated Meteorological Data Acquisition System)である。アメダスの観測点は全国に約1300か所あり、そのうち900か所余り

*連絡者：上治雄介 筑波大学農林技術センター
428-0504 静岡県静岡市葵区井川1621-2
E-mail：ueji.yusuke.fn@un.tsukuba.ac.jp

で気温の観測が行われている。しかし、観測点の多くは標高の低い場所に集中しており、(アクセスや電源確保の点から)観測に困難を伴う高標高地における気象データは十分ではない。高標高地を対象にした既往研究の中には、調査地の気温を低地で計測したアメダス等の気温から逓減率(高度が大きくなるに従って気温が低下する割合)を用いて推定したものが見受けられる。実測値を得られなかったため、代替値として逓減率を用いて現地気温を推定したと考えられる。しかし、逓減率は地域や季節によって変化することが指摘されており(吉野 1986)、推定した気温が適切に補正されていない可能性がある。

以上のような背景から、本研究では、高標高山岳地帯における気温分布計測の一事例として、南アルプス中央部に位置する筑波大学井川演習林内において高度方向に高密度な気温観測を行い、気温の高度分布の特性を解析した。なお、ここでは長期的な気候変動が無いものと仮定し、(計測地点毎に)20から40年間のデータを平均する形で取り扱った。

材料および方法

調査地を静岡県大井川上流域に位置する筑波大学井川演習林とした(図1)。本演習林の面積は1760ha、標高は約950mから2406m(青蘆山山頂)と比高が大きい。平均斜度は38~40°と急峻な地形である。

井川演習林では1968年から気象観測を開始した。以降、観測点の追加、廃止が行われ、現在では6か所において観測を行っている(図2、表1)。観測開始当初はバイメタル式温度計を使用していたが、1988年からサーミスタなどの抵抗温度計に順次切り替えが行われた経緯がある。全ての気象観測地には百葉箱が設置され、気温観測は百葉箱の中で行っている。気温のデータ間隔は、1日あたり2回(日最高・最低気温)、6時間、3時間、1時間、10分と年代によって異なる。

各観測点において解析に用いたデータ期間を表2にまとめた。ただし、日最高・最低気温のみのデータは、10分または1時間および3、6時間間隔で観測したデータと同等に取り扱うこ

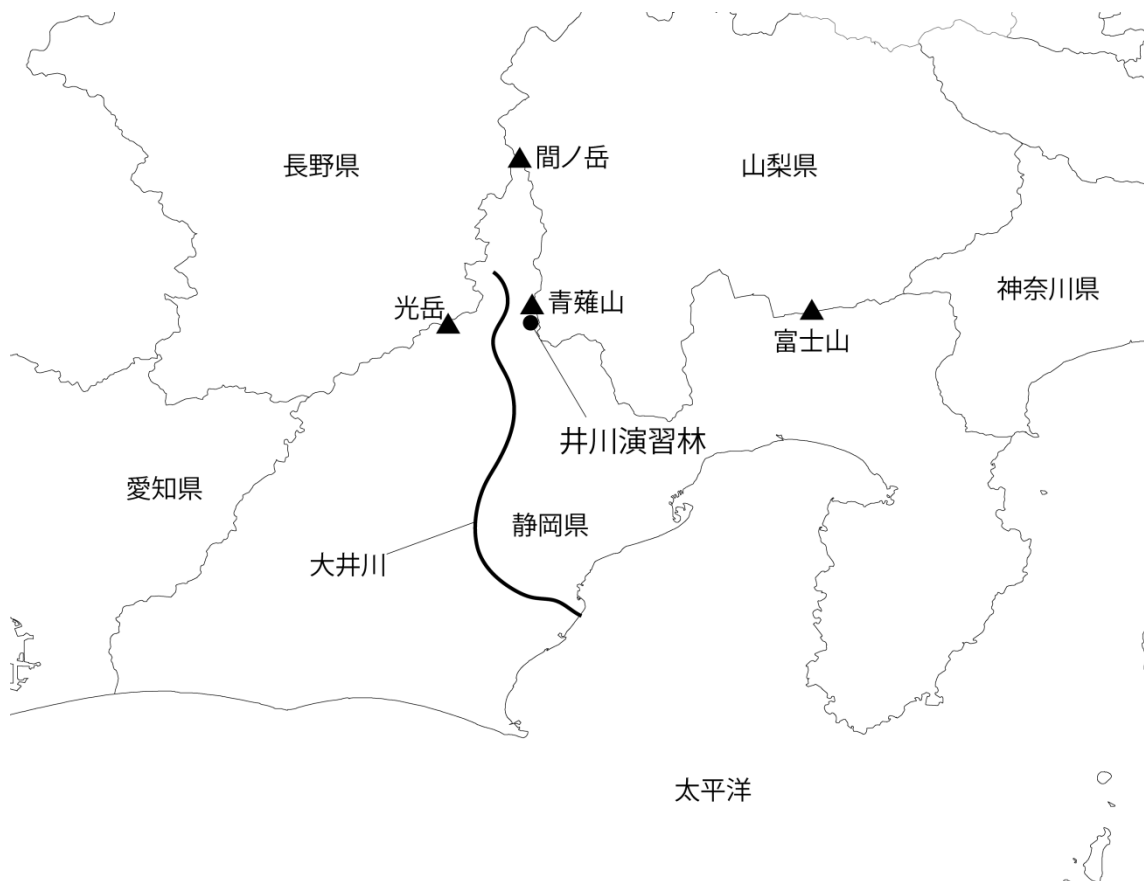


図1 調査地の位置

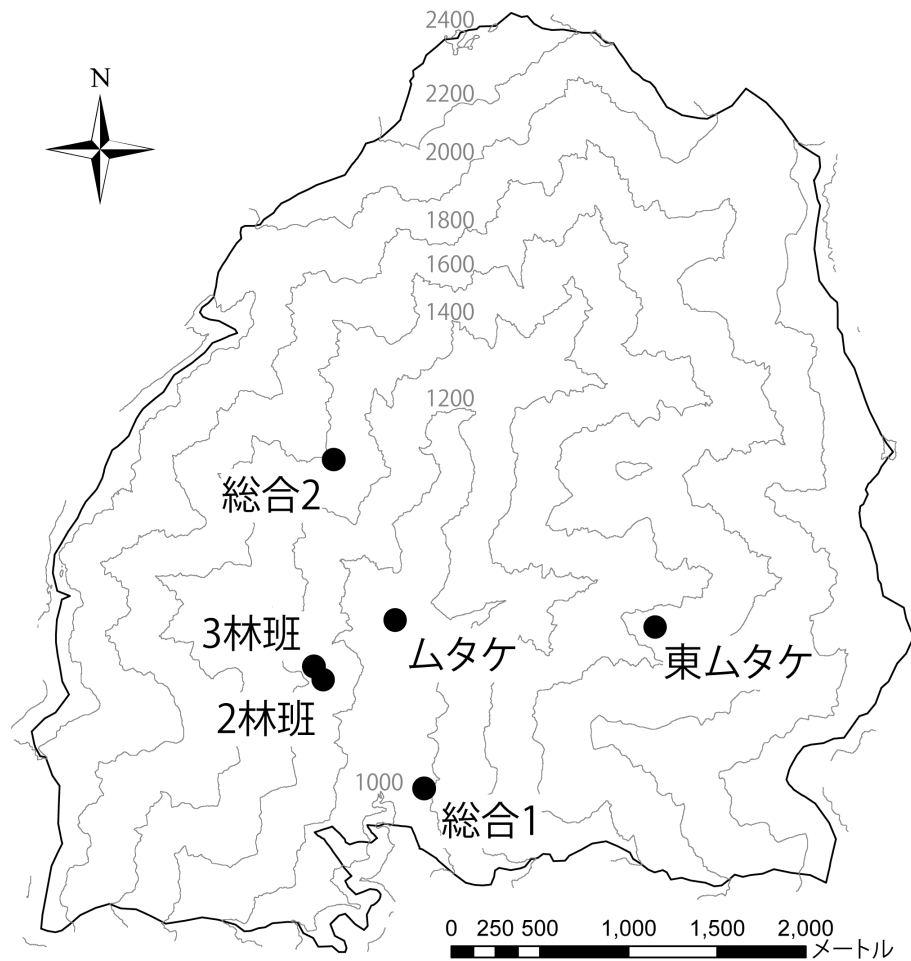


図2 井川演習林における気象観測地点

表1 各観測地点の位置

観測地点名	緯度	経度	標高(m)
東ムタケ	35° 20' 24"	138° 14' 29"	1685
総合2	35° 20' 54"	138° 13' 16"	1587
3林班	35° 20' 17"	138° 13' 10"	1400
2林班	35° 20' 14"	138° 13' 14"	1330
総合1	35° 19' 54"	138° 13' 36"	1175
ムタケ	35° 20' 26"	138° 13' 30"	1060

表2 各観測点において解析に用いたデータ期間

観測地点名	データ期間		
東ムタケ	1981/06/04	～	2012/11/26
総合2	1992/09/01	～	2013/04/08
3林班	1980/01/11	～	2013/05/14
2林班	1980/01/11	～	2013/05/14
総合1	1988/11/17	～	2013/04/08
ムタケ	1971/03/01	～	2012/10/05

とは困難と判断し、解析から除外した。解析においては、まず観測期間全ての日平均気温を求めた。「気象観測統計の解説」(気象庁 2005)に従い、10分間隔、1時間間隔データについては、毎正時の気温(1日あたり24回の観測)を平均して求めた。ただし、「気象観測統計の解説」(気象庁 2005)では1日に5回以上の欠測があった日は、欠測や疑問値を除いた後に平均し「資料不足値」として扱っているが、ここでは欠測とした。観測間隔が1時間より長い場合は1日分の全データを平均して求めた。欠測の基準は10分間隔、1時間間隔データの基準と大きく異なるように、1日の欠測率が4/24(0.17)より大

きい場合とした。次に観測年に関わらず月ごとに日平均気温を加算しデータ数で除して月平均気温とした。月平均最高気温、月平均最低気温についても、まず観測期間全ての日最高気温、日最低気温を求めた。10分間隔データの場合は、「気象観測統計の解説」(気象庁 2005)に従い、1日あたり観測値144回の中から日最高または最低気温を求めた。ただし、「気象観測統計の解説」(気象庁 2005)では1日に29回以上の欠測があった日は、欠測や疑問値を除いた後に日最高または最低気温を求め「資料不足値」としているが、ここでは欠測とした。観測間隔が1時間以上の場合は1日分の全データから日最高または

最低気温を求めた。欠測の基準は10分間隔、1時間間隔データの基準と大きく異なるように、1日の欠測率が28/144(0.19)より大きい時とした。次に観測年に関わらず月ごとの日最高または最低気温を加算しデータ数(欠測日を除く総日数)で除して月平均最高または最低気温とした。

井川演習林内の鉛直方向における気温分布を明らかにするため、観測点ごとの月平均気温、月平均最高気温、月平均最低気温と標高の関係について回帰分析を行い、逓減率を求めた。さらに、逓減率の変化には比湿が大きく関係することが指摘されていることから(長谷川 1970、佐藤ほか 2010)、井川演習林における比湿を以下の方法によって求め、気温分布(逓減率)との関係を解析した。

比湿の計算には次式を用いた(長谷川 1970)。

$$s = \frac{622e}{P - 0.378e} \quad (1)$$

ただし、 e ：水蒸気圧(hPa)、 P ：気圧(hPa)である。 e は次式により求めることができる。

$$e = e_{sat} \frac{RH}{100} \quad (2)$$

ただし、 e_{sat} ：飽和水蒸気圧(hPa)、 RH ：相対湿度(%)である。 e_{sat} は気温(t)を用いて次式により求めることができる。

$$e_{sat} = 6.11 \times 10^{\frac{7.5t}{237.3+t}} \quad (3)$$

なお、ここでは気温のデータ(t)を各気象観測点における月平均気温とし、月平均相対湿度は月平均気温と同様に求めた。すなわち、まず観測期間全ての日平均相対湿度を求めた。「気象観測統計の解説」(気象庁 2005)に従い、毎正時の相対湿度(1日あたり24回の観測)を平均して求めた。ただし、「気象観測統計の解説」(気象庁 2005)では1日に5回以上の欠測があった日は、欠測や疑問値を除いた後に平均し「資料不足値」として扱っているが、ここでは欠測とした。観測間隔が1時間より長い場合は1日分の全データを平均して求めた。欠測の基準は10分

間隔、1時間間隔データの基準と大きく異なるように、1日の欠測率が4/24(0.17)より大きい場合に欠測とした。次に観測年に関わらず月ごとに日平均相対湿度を加算しデータ数(欠測日を除く総日数)で除して月平均相対湿度とした。

気圧の計算には次式を用いた(気象庁1998a)。

$$P = P_0 e^{-\frac{gZ}{RT_{vm}}} \quad (4)$$

ただし、 P ：気象観測点の気圧(hPa)、 P_0 ：静岡気象台の気圧(hPa)、 g ：重力加速度(m/s^2)、 Z ：静岡気象台から気象観測点までの標高(m)、 R ：乾燥空気の気体定数($=287.05m^2s^{-2}K^{-1}$)である。静岡気象台の気圧 P_0 は気象庁のデータベース(気象庁 2013)から取得した静岡気象台における1971年1月～2012年12月までの月平均気圧を観測年に関わらず加算しデータ数(42回)で除して月平均気圧を求めた。 T_{vm} (K)は静岡気象台から Z までの平均の仮温度であり、

$$T_{vm} = 273.15 + t_m + \epsilon_m \quad (5)$$

となる。ただし、 t_m ：気柱の平均気温($^{\circ}C$)、 t ：静岡気象台の気温($^{\circ}C$)とし、逓減率を $0.5^{\circ}C/100m$ と仮定すると、

$$t_m = t + 0.005Z/2 \quad (6)$$

である。静岡気象台の気温 t も月平均気圧同様に気象庁のデータベース(気象庁 2013)から取得した静岡気象台における1971年1月～2012年12月までの月平均気温を観測年に関わらず加算しデータ数(42回)で除して月平均気温を求めた。 ϵ_m ($^{\circ}C$)は空気の湿り具合による補正值であり、温度範囲ごとに定数A、B、Cを用いる。

$$\epsilon_m = At_m^2 + Bt_m + C \quad (7)$$

なお、定数A、B、Cは表3のとおりである。

結果と考察

観測点ごとの月平均気温、月平均最高気温、月平均最低気温の年変化を図3に示す。地点間での気温の季節変動パターンは非常に類似しており、高標高な箇所ほど年間を通じて気温が低

表3 ϵ_m の計算に用いる定数

温度範囲				A	B	C
	tm	<	-30.0	0	0	0.090
-30.0	≤	tm	<	0.0	0.000489	0.0300
0.0	≤	tm	<	20.0	0.002850	0.0165
20.0	≤	tm	<	33.8	-0.006933	0.4687
33.8	≤	tm			0	0
						3.340

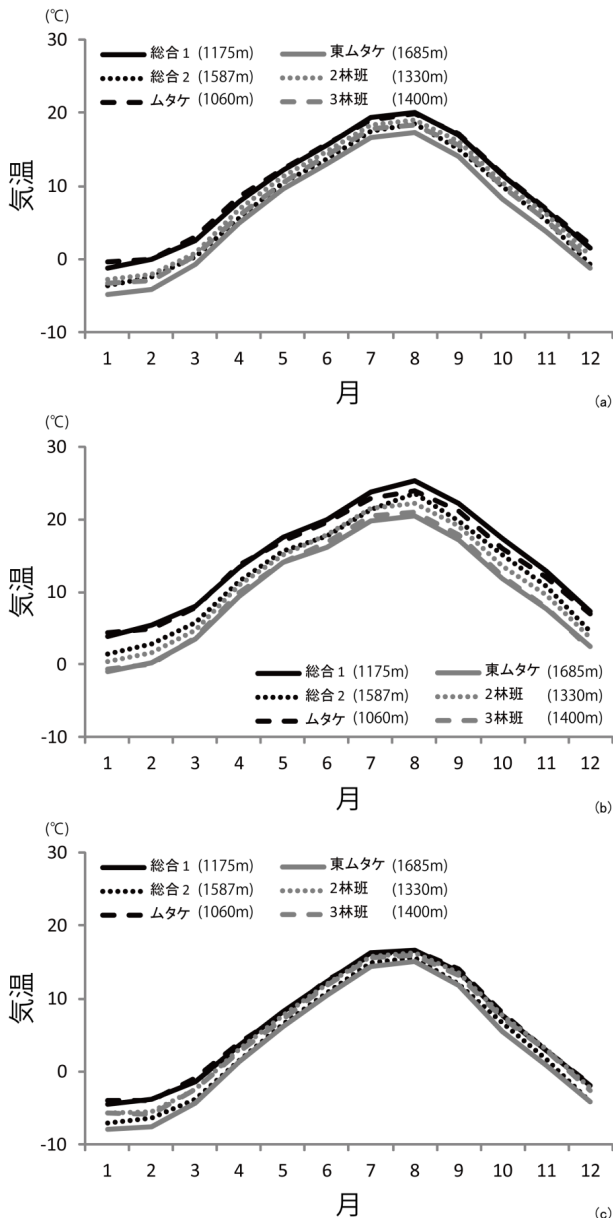


図3 井川演習林における (a) 月平均気温、
(b) 月平均最高気温、(c) 月平均最低気温

い傾向が認められた。また、最も気温が低いのは1月の東ムタケ観測所で -7.93°C 、最も気温が高いのは8月の総合1で 25.31°C であった。百葉箱は自然通風なので日射の影響を受け観測値が変化することが知られている。気象庁(1998b)やAikawa et al., (2006)によると、自然通風による観測値は強制通風による観測値より日中で $0.1\sim 0.4^{\circ}\text{C}$ 高く、夜間でやや低くなるとしている。このため、今回求めた月平均最高気温および月平均気温は過大に、月平均最低気温は過小評価されている可能性がある。

観測点ごとの月平均気温、月平均最高気温、月平均最低気温と標高の関係について回帰分析を行った結果を図4に示す。月平均気温および月平均最低気温は回帰直線によく適合しており

標高が大きくなるに従って気温が低くなることが確認できる。月平均最高気温についても同様の傾向がみられるが、回帰直線に対してややばらつきがある。これは観測点における日中の周辺環境が影響したものと考えられる。総合1と総合2は周辺10~20m四方の樹木を伐採してあり直射日光が到達する。一方、2林班と3林班は1965~1966年に植栽したヒノキ人工林の中にあり日中でも薄暗い。東ムタケとムタケは周辺を広葉樹に囲まれているため、2林班3林班に比べると明るい。これらの異なる立地条件における日射量の違いが気温に影響したと考えられる。

図4で得た回帰直線を基に月別の気温通減率を求めた結果を図5に示す。月平均気温の通減率は年平均で $0.51^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ となった。この値は、国内の数地点における報告(例えば長谷川1970、吉野1986)と比較するとやや低い。月平均最高気温における年平均の通減率は $0.62^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 、月平均最低気温では $0.41^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ となった。月平均気温の通減率と比較すると月平均最高気温の通減率は高く、月平均最低気温の通減率は低い。これは佐藤ら(2010)、が指摘するように、日中には強い日射により地面が加熱され対流混合層が形成されることや夜間の冷気湖の形成が原因ではないかと考えられる。

月平均気温、月平均最高気温、月平均最低気温毎の通減率の季節変化(図5)をみると、いずれも1月に極大となり、平均気温と平均最低気温は7、8月、平均最高気温は5月に極小となった。概ね、冬季に高く、夏季に低い傾向であった。井川演習林における通減率の季節変化パターンは、例えば冬季に極大、春季に極小となる大台ヶ原山(三重県、奈良県)での報告(長谷川1970)や、春季に極大、秋季に極小となる乗鞍岳東斜面(長野県)での報告(佐藤ら2010)と異なる。

ここで、井川演習林における気温通減率の季節変動特性のメカニズムについて考察する。気温の高度分布において、気温通減率の低下は、標高の上昇とともに気温が低下し、飽和した水蒸気が凝結する際に潜熱が放出されることによっておこる(吉野1986)。すなわち、気温通減率は水蒸気の凝結量に大きく規制され、水蒸気の凝結量が多い場合には通減率が小さくなると考えられる。湿度のデータとして、図6に各観測点の月平均相対湿度、図7に月平均比湿を示す。相対湿度ならびに比湿の季節変化は、標

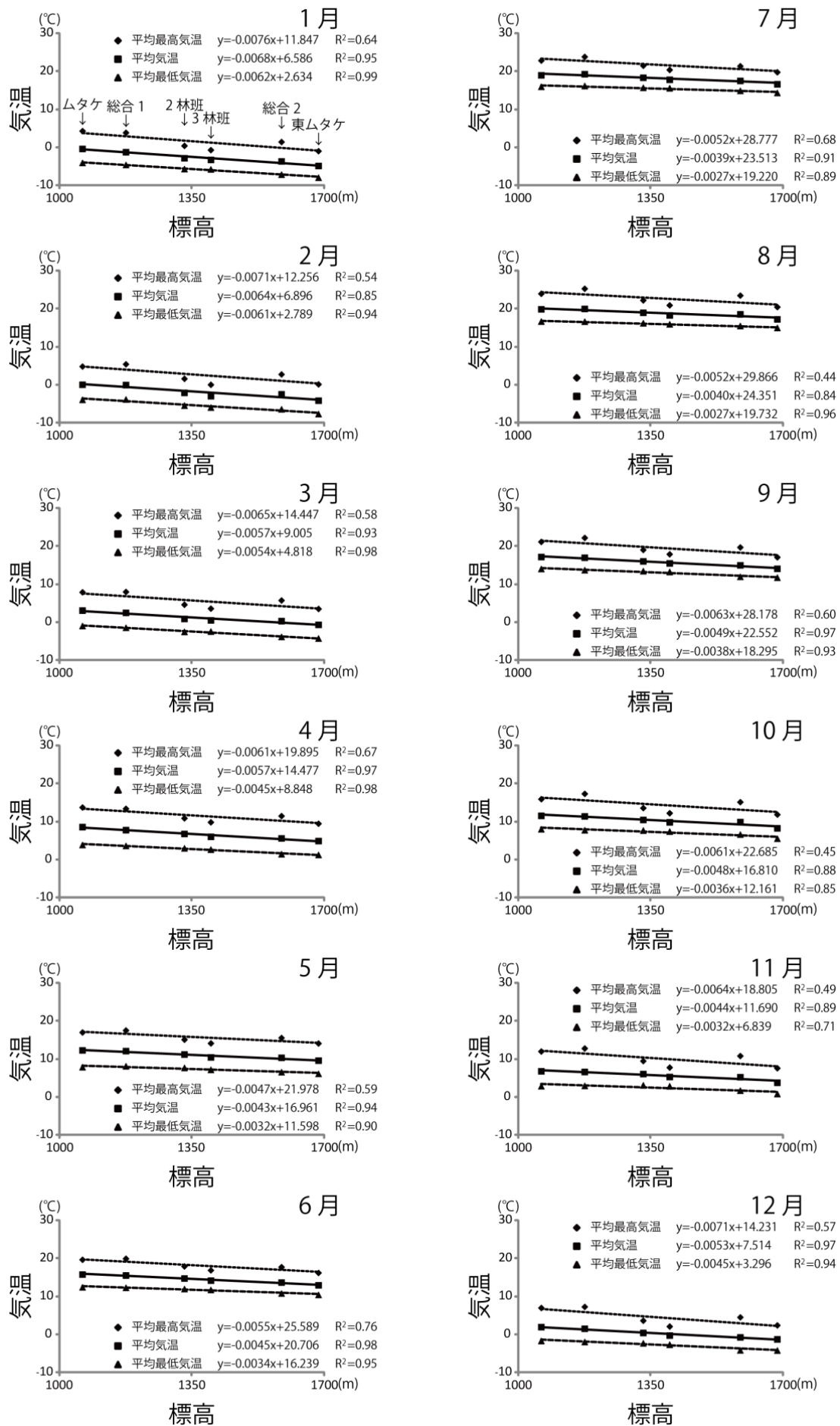


図4 月平均気温、月平均最高気温、月平均最低気温と標高の関係

高や地点に関わらず、夏季に高く冬季に低い。また、両データの月別平均値は、東ムタケの比湿が他の観測点に比べてやや低い値を示すものの、標高や地点に関わらず、概ね同程度の値であった。これら6地点における相対湿度および比湿の平均値と気温通減率との関係をそれぞれ図8、9に示す。通減率の高い冬季(12、1、2月)の相対湿度および比湿は低く、通減率の低い夏季(7、8月)の相対湿度および比湿は高いという明瞭な関係が認められた。この湿度(比湿)と通減率の明瞭な相関結果は先行研究の結果(長谷川 1970、佐藤ら 2010)と調和的である。井川演習林においては、湿度が高い夏季に水蒸気の凝結が生じやすく、通減率が低下すること

が考えられる。また一方で、気温自体が通減率に影響している可能性も考えられる。高温のときほど飽和水蒸気圧の温度に対する増加率が大きいために水蒸気の凝結量が多く、それに伴って解放される潜熱が大きくなり、高温時には通減率が低下する(例えば、近藤 1994)。言わずもがなであるが、夏季には気温が高く、冬季には気温が低くなり、図10に示すように気温と気温通減率は逆相関関係を呈する。以上のことから、夏季には多湿であることと高温であることの両条件が通減率の低下に寄与し、冬季にはこの逆の条件により通減率が高くなると考えられる。

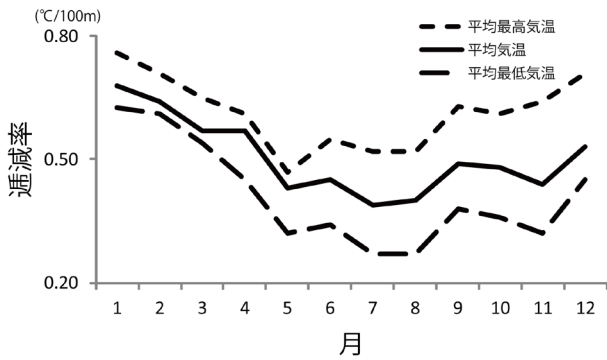


図5 気温通減率の季節変動

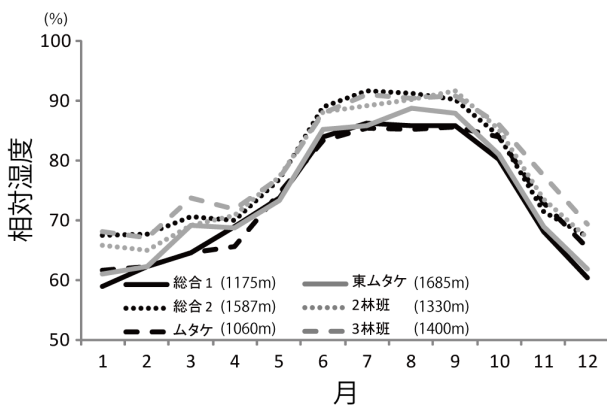


図6 相対湿度の季節変動

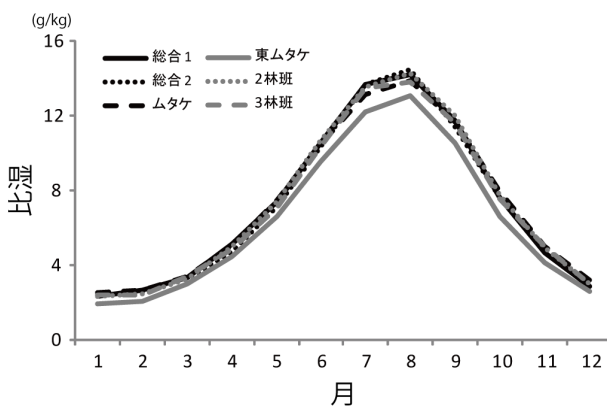


図7 比湿の季節変動

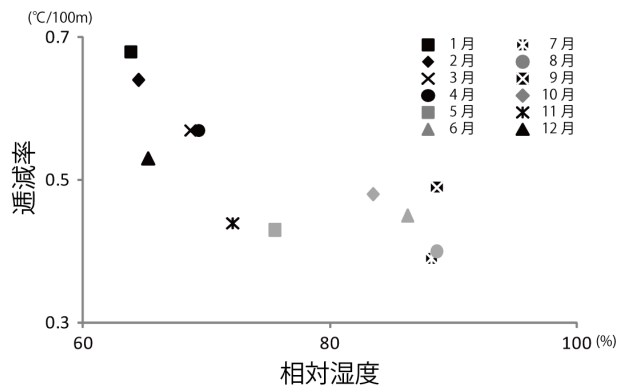


図8 月平均相対湿度(6地点の気象観測点における平均値)と月平均気温通減率の関係

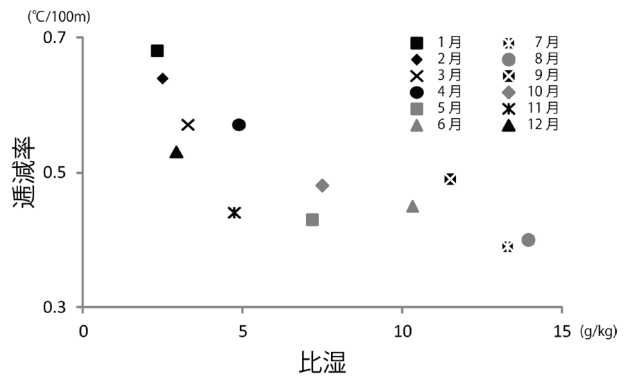


図9 月平均比湿(6地点の気象観測点における平均値)と月平均気温通減率の関係

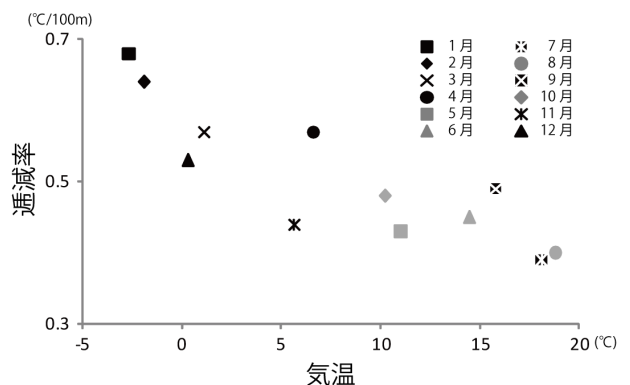


図10 月平均気温(6地点の気象観測点における平均値)と月平均気温通減率の関係

井川演習林は南アルプスの中央部に位置し、中央高地式気候帯の領域に含まれる。ところが、今回得られた気温逓減率と湿度および気温のデータからみると、井川演習林は太平洋側気候に強く規制された気温逓減率の季節変動を呈すると考えられる。すなわち、井川演習林の周辺においては、太平洋高気圧の勢力が強まる夏季には高温・多湿となって気温逓減率が小さくなり、大陸の高気圧の勢力が強まる冬季には低温・乾燥となって気温逓減率が大きくなるというメカニズムが考えられる。

おわりに

本報では、高標高山岳地における気温の高度分布の実態解明に向けた事例研究として、南アルプス中央部に位置する筑波大学井川演習林内において気温の空間分布の特性を解析した。その結果、各観測地点の各月毎の平均気温(日平均、日最大、日最低気温のそれぞれ月平均)は高度と高い相関を示し、また、その気温逓減率の季節変化は湿度(相対湿度、比湿)および気温の季節変化と正反対であった。井川演習林における気温は明瞭な高度分布を呈し、その高度分布の特性は季節変化に伴う気層の乾湿および気温によって大きく支配される可能性が示された。ただし、実際の気温分布には日射量あるいは気層の対流・滞留などのより局地的な条件が複雑に影響していることが考えられる。今後、それらの気象条件と気温の関係性をより細かい時間スケールで解析する余地がある。

謝 辞

本研究を行うにあたり、井川演習林における長期の気象データを使用させて頂いた。これらの観測業務にご尽力された教職員の方々に感謝いたします。また、筑波大学生命環境系の西井稜子研究員には解析を進める上で貴重なご意見を頂いた。ここに記して感謝致します。

引用文献

- Aikawa.M,Hiraki.T,Eiho.J (2006) Comparison of the Air Temperature Measured on Site Using Forcibly and Naturally Aspirated Shelters. 兵庫県立健康環境科学研究センター紀要 3:1-5.
- Fukui. K (2001) Effects of fluctuating temperature on mulberry sapling growth and dry matter accumulation. 日本蚕糸学雑誌 70(1):31-36.
- 長谷川力(1970)本邦の山岳における気温の特性. 地球科学 24(1):35-39.
- 今泉文寿、上治雄介(2012)山岳域人工林内での土砂移動と間伐材を利用したその抑止手法. 日本森林学会誌 94(1):24-30.
- 岩田幸良、長谷川周一、鈴木伸治、根本学、廣田知良(2011)土壌凍結深や地温が融雪水の下方浸透に与える影響. 土壌の物理性 117:11-21.
- 近藤純正(1994)水環境の気象学. 朝倉書店、東京. pp30.
- 気象庁(1998a)気象観測の手引き. 81pp.
- 気象庁(1998b)気象観測の手引き. 13pp.
- 気象庁(2005)気象観測統計の解説. 127pp.
- 気象庁(2013)過去の気象データ検索 (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>). (参照2013/10/28)
- 中野幸基、砂坂元幸、中村徹(2001)植物見本園の樹木フェノロジー I—開芽・開花時期と月平均気温および積算気温との関係一. 筑波大学演習林報告 17:41-51.
- 佐藤奈津美、鈴木啓助(2010)乗鞍岳東斜面における気温逓減率の変動とその要因. 日本気象学会大会講演予講集 98(448).
- 澤内寧子、野堀嘉裕、野田真人(2007)ヒノキアスナロの重量成長と気候情報の関係. 日本森林学会誌 89(4):292-296.
- 鈴木啓助(2013)中部山岳地域における気象観測の現状とその意義. 地学雑誌 122(4):553-570.
- 山本将功、中島敦司、松本尚子、吉田尚美(2006)温暖条件下で育成した*Acer rufinerve* Sieb.et Zucc.の成長と生物季節. 日本緑化工学会誌 32(1):112-117.
- 吉野正敏(1986)新版 小気候. 地人書館、東京.

Analysis of Air Temperature Distribution in Ikawa Forest of University of Tsukuba

Yusuke UEJI^{1*} and Yosuke YAMAKAWA^{1,2}

¹ Agricultural and Forestry Research Center, University of Tsukuba,
Ikawa 1621-2, Aoi, Shizuoka, 428-0504, Japan

² Faculty of life and Environmental science, University of Tsukuba,
Ten-nodai 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki, 305-8572, Japan

Abstract

Spatial variation of air temperature was observed and analyzed in Ikawa Forest of University of Tsukuba located in the Southern Japanese Alps as a case study toward revealing height distribution of air temperature in high mountain regions. Monthly mean air temperatures, monthly mean maximum temperatures, and monthly mean minimum temperatures observed at 6 points located at altitudes between 1060 and 1685 meters above sea level showed close correlations with elevations (i.e., clear temperature lapse rate with elevations) throughout the year. Some inconsistencies between monthly mean maximum temperature and elevations could be attributed to the difference in amount of solar radiation among observation points. The temperature lapse rate of monthly mean air temperatures indicated low values in the summer months and high values in the winter months while monthly mean specific humidity as well as air temperature indicated high values in the summer months and low values in the winter months. We concluded that the height distribution of air temperature in Ikawa Forest could be strongly controlled by both air humidity and air temperature which vary with the climate in Japan's Pacific coast.

Key words: Air temperature, Mountain meteorology, Temperature lapse rate, Southern Japanese Alps

*Corresponding Author: Yusuke UEJI Agricultural and Forestry Research Center, University of Tsukuba
Ikawa 1621-2, Aoi, Shizuoka, 428-0504, Japan
E-mail: ueji.yusuke.fn@un.tsukuba.ac.jp