

筑波山（男体山）の過去100年間における気温の長期変化

中津留 高 広*・林 陽 生**・上 野 健 一**・植 田 宏 昭**
 辻 村 真 貴**・浅 沼 順**・日 下 博 幸**

1. はじめに

気候変動に関する政府間パネルの第4次評価報告書(IPCC 2007)によると、最近100年間(1906~2005年)の全球平均気温は $0.74 \pm 0.18^{\circ}\text{C}/100$ 年の上昇率である。気温上昇の原因として、人類活動による化石燃料の消費に伴い CO_2 などの温室効果ガスの増加による温室効果の可能性が極めて高いと指摘している。

日本列島の平均気温を求める場合は、長期の観測データを保有し且つ都市化の影響が少ないこと、特定の地域に偏らないことを基準に選定された17地点の気象官署のデータを用い、過去100年間(1898~2008年)の気温上昇量 1.11°C を求めている(文部科学省ほか2009)。しかし、この気温上昇量には地球温暖化の成分のみならず、都市化による気温上昇も混在している可能性がある。

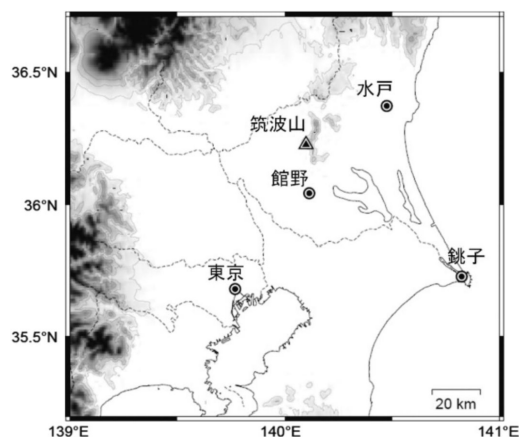
地球温暖化の実態を明らかにするためには、都市化の影響を受けず過去100年間に及ぶ観測が行われている筑波山頂のデータは貴重である。しかし、アメダスが設置された1976年以前の観測値は数値化されておらず観測原簿の状態で保存されている。また、1日の観測回数も年代により異なるため、数値化と同時に日平均値の補正も検討する必要がある。

そこで、筑波山頂(男体山)の過去の気温および風向・風速について長期変化を解析するためのデータベースを作成した(中津留ほか2010)。本報告では、このうちの気温に関し、アメダス以前の日平均気温に

補正を加え、100年以上に渡る長期間の変化傾向を求めた結果について示す。

2. 筑波山気象観測ステーション

筑波山は関東平野の北東部に位置する孤立峰であり、この周辺では標高が最も高い。筑波山周辺の地形の概略を第1図に示す。筑波山頂(男体山、東経 140.10 度、北緯 36.23 度、海拔高度 871 m)における観測の歴史は古く、国内では最初の山岳気象観測所として設置された。1893年から中央气象台(現気象庁)による冬季臨時気象観測が行われ、1902年からは旧皇族の山階宮家により通年観測が開始された。1909年には観測施設が山階宮家から国に寄贈されて「中央气象台附属筑波山測候所」として観測が続けられた(気象庁2001)。山頂には、1929年に建築された建物が現在も残っている(第2図)。その後、1976年にアメダスが設置されたが、統廃合により2001年12月に廃止され



第1図 筑波山周辺の地形の概略。

* 筑波大学大学院生命環境科学研究科環境科学専攻。

** 筑波大学生命環境系。

—2010年11月24日受領—

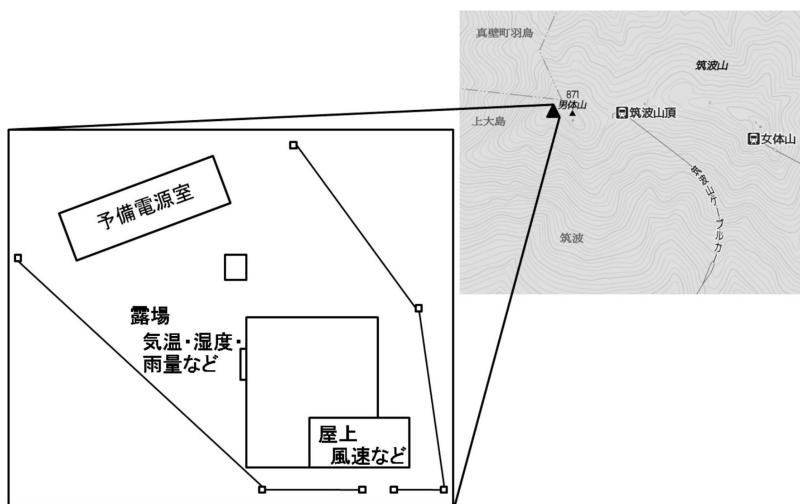
—2011年10月6日受理—

た。観測施設の周囲の状況を第3図に示す。

2006年1月から筑波大学の大気水文研究グループが「筑波山気象・水文観測プロジェクト」の一環で筑波山気象観測ステーションを設置し、アメダス時代と同じ場所で観測を再開した。観測項目は、風向風速、気温、相対湿度、地温、地表面放射温度、日射量、気圧、降水量、雨水pH、雨水電気伝導度、現在天気、ライブカメラによる観測地点周辺の画像などである(Hayashi *et al.* 2006)。こうして、欠測期間はあるものの通年観測を開始した1902年以来2010年まで109年間のデータの蓄積がある。筑波山気象観測ステーションの詳細やリアルタイム観測値の閲覧は、<http://mtsukuba.suiri.tsukuba.ac.jp>を参照して頂きたい。



第2図 筑波山（男体山）山頂に現存する旧中央気象台の建物（林，2006年撮影）。



第3図 観測装置の配置。

3. 解析資料

筑波山頂の1902年から1976年までの原簿記録をもとに数値化を行い、補正を施して日平均気温を算出し、アメダス設置後も含めた2009年までのデータと結合して解析を行った。1902年1月から1976年3月までは気象庁が編集している地上気象観測資料のCD-ROMに収録された原簿の画像、1976年4月から2001年12月までは気象庁年報のCD-ROMデータ、2006年1月から2009年12月までは筑波山気象観測ステーションの観測データを使用した。

日本列島の気温変化を求める際に気象庁が選定している17地点（網走，根室，寿都，山形，石巻，伏木（高岡市），長野，水戸，飯田，銚子，境，浜田，彦根，宮崎，多度津，名瀬，石垣島）の気温は、気象庁がWeb上で公開している年平均値（<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>）を利用した。

アメダス設置（1976年4月）以降は毎正時の観測値が得られるが、それ以前では時代によって1日観測回数が3回（06時，14時，22時），6回（02時，06時，10時，14時，18時，22時），8回（03時，06時，09時，12時，15時，18時，21時，24時），12回（隔時），24回（毎時）の場合がある。年代による気温の1日観測回数を第1表に示す。このため日平均値を基準にした長期的変動を解析する際には、少ない回数の観測値から日平均値を求める場合の誤差を除去する必要がある。本研究では毎時値から求めた日平均気温を基準とすることとして補正を行った。

4. 欠測の取り扱い

アメダス時代（1976年4月～2001年12月）の気温データの欠測処理は、気象庁が定めている気象観測統計指針（気象庁 2010）を参照した。この中で「気象観測統計の解説 第4章 要素及び現象ごとの統計値」に記載されている気温の平均値を求める場合のデータ処理方法を第2表に抜粋して示す。

気温の年平均値は段階を設けて処理されている。始

めに、時別値から日平均値を欠測値とするかを判断し、次に得られた日平均値から月平均値が欠測値であるかを判断する。その後、月平均値から年平均値を求める。基本的には、どの段階においても平均値を求める個数に20%以上の欠測がある場合は資料不足値として取り扱う。さらに、1年を通じて1カ月でも月平均値に資料不足値が含まれる場合は年平均値が求められない。

上記の指針に基づいた結果、筑波山頂での1977年、1978年、1981年、1987年、1996年、2001年の年平均値は資料不足値となったため解析から除外することとした。なお、アメダスが廃止された2002年から筑波山気象観測ステーションが開設された前年の2005年までは観測が行われていないため解析から除外した。

5. 観測回数と気温の補正

筑波山気象観測ステーションにて10分間隔で観測を行っているが、このうち2006年から2009年までのデータを用いて、観測回数の違いが年平均気温に及ぼす影響の評価を行った。

毎正時から求めた日平均気温と、過去の1日3回、6回、8回、12回の観測に合わせた時刻から求めた日平均気温との差および標準偏差を第3表に示す。第3表より、1日3回観測ではその差が+0.15～+0.23℃、1日6回観測では0.00～-0.02℃となった。また、1日8回、12回の観測に基づく年平均気温については、明確な差は見られなかった。このように1日の観測回数が少ないと毎時観測による日平均値との差が大きくなる傾向がある。本解析では1日3回と6回の場合について補正を行うこととした。

1日3回観測の観測時刻は、06時、14時、22時である。予備的な解析を行った結果、ほぼ日較差に相当する[14時と06時の観測値の気温差]と[3回の観測値から求めた日平均気温と毎時値から求めた日平均気温との差]に密接な関係が認められた。この関係を第4図に示す。第3表にも示した[3回の観測値から求め

第1表 筑波山頂（男体山）における気温の1日観測回数と実施年。

観測回数	3	6	8	12	24
該当年	1940 1948～1952	1902 1921～1927	1953～1975	1909～1920	1903～1908 1928～1939 1941～1947 1976～

- 3回観測：(06時, 14時, 22時)。
- 6回観測：(02時, 06時, 10時, 14時, 18時, 22時)。
- 8回観測：(03時, 06時, 09時, 12時, 15時, 18時, 21時, 24時)。
- 12回観測：(隔時)。24回観測：(毎時)。

第2表 気温の平均値算出の方法。

平均値	日	①平均気温	①毎正時の観測値(24回)を平均して求める。	①毎正時の観測値に欠測、資料不足値または疑問値があり、その回数が4回以下の場合は、欠測、資料不足値及び疑問値を除いて平均を求め「 <u>準正常値</u> 」とする。 ②①の回数が5回以上の場合は、欠測、資料不足値及び疑問値を除いて平均を求め「 <u>資料不足値</u> 」とする。 ③毎正時の観測値が全て欠測、資料不足値または疑問値の場合は、平均値を「 <u>欠測</u> 」とする。
半旬 旬 月		①平均気温 ②日最高気温の平均値 ③日最低気温の平均値	①日統計値を平均して求める。	①日統計値に欠測または資料不足値があり、その日数が半旬・旬・月のそれぞれの日数の20%以下の場合は、欠測及び資料不足値を除いて平均を求め「 <u>準正常値</u> 」とする。 ②①の率が20%を超える場合は、欠測及び資料不足値を除いて平均を求め「 <u>資料不足値</u> 」とする。 ③日統計値が全て欠測または資料不足値の場合は、平均値を「 <u>欠測</u> 」とする。
年			①月平均値を平均して求める。	①月平均値に欠測または資料不足値がある場合は、欠測及び資料不足値を除いて平均を求め「 <u>資料不足値</u> 」とする。 ②月平均値が全て欠測または資料不足値の場合は、平均値を「 <u>欠測</u> 」とする。

(気象観測統計指針(2010)より抜粋)

た日平均気温と毎時値から求めた日平均気温との差]の標準偏差は $0.44\sim 0.50^{\circ}\text{C}$ であるが、第4図の關係を用いることでその標準偏差が小さくなることが期待される。そこで14時と06時の気温差を利用して日平均値を求める次式で補正することとした。

$$T_{\text{day}} = T_{\text{day}^3} - 8.05 \times 10^{-2} \times (T_{14} - T_6) + 0.198 \quad (1)$$

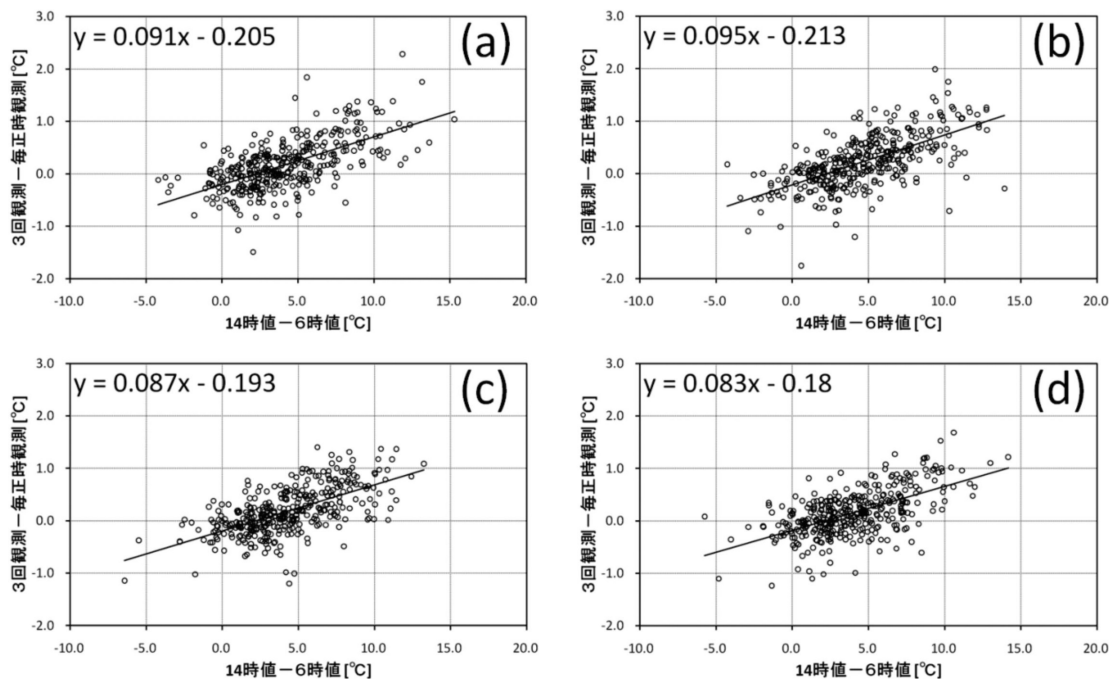
ここで、 T_{day} は補正後の日平均気温、 T_{day^3} は1日3

回の観測から求めた日平均気温、 T_6 は1日3回観測の06時の気温、 T_{14} は1日3回観測の14時の気温である。

1日6回観測による日平均気温の場合には、毎時値から求めた日平均気温との差が、1日3回観測の場合の1/10以下に減少すると同時に系統的に差がマイナスになる傾向が認められた。これらの特徴を補正するために、2006～2009年の4年間について毎時値から求めた日平均気温と6回観測から求めた日平均値の散布

第3表 各観測回数ごとの日平均気温から求めた年平均気温と毎時値から求めた年平均気温の差および標準偏差 (単位： $^{\circ}\text{C}$)。

期間	2006年		2007年		2008年		2009年	
	差	標準偏差	差	標準偏差	差	標準偏差	差	標準偏差
3回観測－ 毎正時観測	0.17	0.48	0.23	0.50	0.18	0.44	0.15	0.45
6回観測－ 毎正時観測	-0.02	0.19	0.00	0.21	-0.01	0.20	-0.01	0.19
8回観測－ 毎正時観測	0.00	0.18	0.00	0.20	0.00	0.17	0.01	0.19
12回観測－ 毎正時観測	0.00	0.11	0.00	0.12	0.00	0.10	0.02	0.10



第4図 [14時値－06時値の気温] (横軸) と [3回観測による日平均気温－毎時値による日平均気温] (縦軸) の關係。図中の式は回帰直線を示す。(a) 2006年, (b) 2007年, (c) 2008年, (d) 2009年。

図（第5図）を作成し回帰直線を求めた。4年間を平均した回帰直線を次式に示す。

$$T_{\text{day}} = T_{\text{day}^6} \times 0.997 + 3.55 \times 10^{-2} \quad (2)$$

ここで、 T_{day^6} は1日6回の観測から求めた日平均気温である。

毎時値から求めた年平均気温との差は1日3回観測の場合に式(1)、1日6回観測の場合に式(2)の補正式を用いた場合には $\pm 0.01^\circ\text{C}$ の範囲内となり、補正を行わない場合と比較して長期トレンドを評価する確度が向上した。こうした1日の観測回数の補正は年平均気温の算出の際には不可欠であるが、長期トレンドに及ぼす影響は本稿における解析期間（1902～2009年）では小さい。後述する通り、1902年から2009年の期間における気温変化率は、観測回数の補正の有無に係わらず $0.90^\circ\text{C}/100\text{年}$ となった。

6. 欠測期間に関する検討

本解析では、気象庁の指針に準じた欠測処理年およびアメダス廃止後の4年間を合計して、10年間の欠測が生じた。これによる差を評価するため、筑波山の年平均気温と最寄りの観測点である館野における年平均

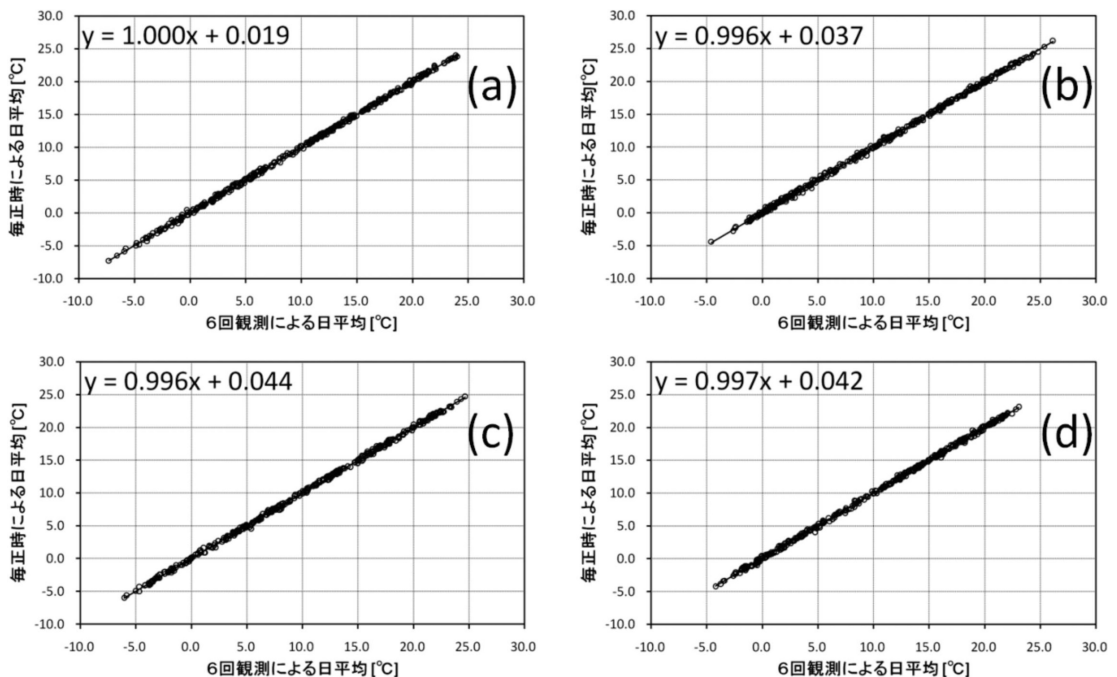
気温との相関関係から導出した式(3)を用いて、筑波山の年平均気温を補間して気温変化率を求めた。

$$T_{\text{Mt.tsukuba}} = T_{\text{tateno}} \times 0.613 + 1.504 \quad R^2 = 0.799 \quad (3)$$

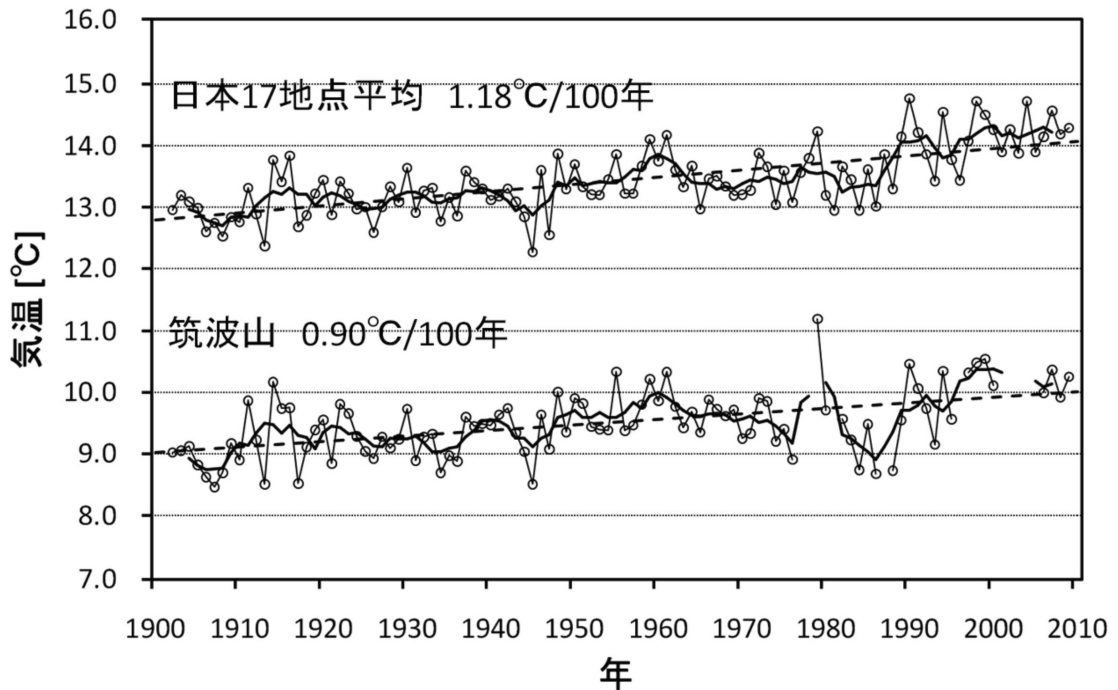
1902年から2009年の期間における気温変化率は、欠測期間を補間した場合、 $0.93^\circ\text{C}/100\text{年}$ となった。なお、式(3)による筑波山頂における年平均気温の欠測期間の補間は、現時点で適応可能な一つの方法ではあるが今後検討が必要と考えられる。従って、本稿では参考の値として取り扱うことにする。

7. 長期変化の特徴

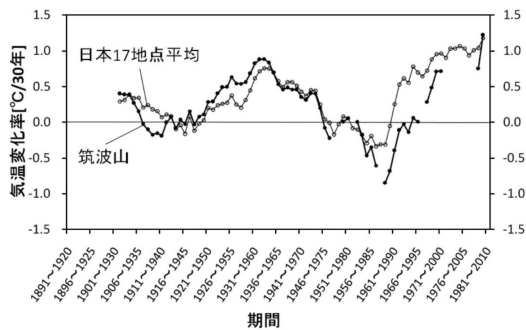
筑波山頂の観測値を補正して求めた年平均気温と、国内17地点の気象官署による観測値から求めた年平均気温の時系列変化と回帰直線を第6図に示す。これによると、筑波山頂では1902年から2009年の期間では100年間あたりほぼ 0.90°C の気温上昇を示した。この値は日本を代表する値 $1.18^\circ\text{C}/100\text{年}$ よりも小さいが、全球を対象として1906年から2005年の期間で得られている気温変化率 $0.74^\circ\text{C}/100\text{年}$ （IPCC 2007）よりも大きい。筑波山頂と日本を代表する気温上昇率の差は、



第5図 6回観測による日平均気温（横軸）と毎時値による日平均気温（縦軸）の関係。図中の式は回帰直線を示す。(a) 2006年, (b) 2007年, (c) 2008年, (d) 2009年。



第6図 筑波山頂と日本17地点の年平均気温の変化。筑波山頂には観測回数による補正を施している。太実線は5年移動平均値、破線は回帰直線を示す。期間は1902年から2009年。



第7図 筑波山頂（太線）と日本17地点（細線）の30年の気温変化率の変動。筑波山頂には観測回数による補正を施している。期間は1902年から2009年。

後者の場合に都市化による気温上昇の影響があると考えられる。

しかし、筑波山頂は海面高度付近の観測点と比べ、気圧や湿度が異なるため、気温の経年変化を比較しただけでは都市化の影響を分離することは難しい。そこで、単位体積の気塊に与えられたエネルギーを基準にした解析が必要である。

30年を単位にした気温変化率の変動を第7図に示す。これより、筑波山頂と国内17地点の平均ともに上昇期と下降期がほぼ同調して変動していることがわかる。詳細にみると筑波山頂では1930年代から1960年代に $+0.88^{\circ}\text{C}/30\text{年}$ の上昇傾向、1960年代から1990年代に $-0.85^{\circ}\text{C}/30\text{年}$ の減少傾向である。近年では上昇傾向に推移し、 $+1.22^{\circ}\text{C}/30\text{年}$ とこれまでに最も大きな変化率を示し、気温上昇が急激に進行していることを裏付けている。

8. まとめ

筑波山頂（男体山）における過去の気温を観測原簿から読み取り数値化を行い、観測時刻の違いに起因する誤差を補正した。最近の観測値と連結させて長期間の気温変化について解析を行った結果、以下の特徴および課題が明らかになった。

- (1) 筑波山頂における108年間（1902-2009年）の気温変化率は $0.90^{\circ}\text{C}/100\text{年}$ である。欠測期間を最寄りの観測値から推定した場合は $0.93^{\circ}\text{C}/100\text{年}$ である。いずれの値も日本を代表する17地点の気温変化率よりも小さい。

- (2) 30年間の気温変化率は近年上昇し、最近では +1.22°C/30年で最も高い水準である。
- (3) 今回行った補正方法により年平均値の変動を評価することが可能になった。しかし、季節や月ごとの気温変化を長期間で比較するためには、さらに詳細な補正を行い解析する必要がある。

謝 辞

本研究は、2005年度筑波大学学内プロジェクト研究(S)による支援および筑波山神社の協力を受けた。関係された多くの方々々に心より感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 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.
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis*. Cambridge, 996pp.
- 気象庁, 2001: 筑波山測候所のあゆみ. 気象庁予報部 通信課無線通信室 筑波山通信所東京基地事務所, 194 pp.
- 気象庁, 2010: 気象観測統計の解説. <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/kaisetu/index.html> (2011.10.6閲覧).
- 文部科学省, 気象庁, 環境省, 2009: 温暖化の観測・予測及び影響評価統合レポート「日本の気候変動とその影響」. 65pp.
- 中津留高広, 林 陽生, 上野健一, 植田宏昭, 日下博幸, 浅沼 順, 辻村真貴, 2010: 過去100年間における筑波山山頂の気温と風の変化. 日本気象学会2010年度春季大会講演予稿集, (97), 83.

解析に用いた資料

- 気象庁, 2002: 地上気象観測資料, 筑波山頂 (原簿). 1902年1月~1976年12月.
- 気象庁, 2007: アメダス観測年報 (時日別値). 1977年1月~2001年12月.

A Mean Annual Temperature Trend past 100 Years at the Summit of Mt. Tsukuba

Takahiro NAKATSURU**, Yousay HAYASHI*, Kenichi UENO**,
Hiroaki UEDA**, Maki TSUJIMURA**, Jun ASANUMA** and
Hiroyuki KUSAKA**

* (Corresponding author) Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba 305-8572, Japan.

** Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba.

(Received 24 November 2010 ; Accepted 6 October 2011)
