地形および衛星データによる 中国・寧夏の気温分布の推定

石郷岡康史*・町村 尚*・楊 桂清**

(* 北海道大学農学部
** 中国寧夏農学院)

Estimation of Air Temperature Distribution in Ningxia, China
using Topographical and Satellite Data

Yasushi ISHIGOOKA*, Takashi MACHIMURA* and Gui Qing YANG**

(*Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo, 060-8589 Japan)
(**Ningxia Agricultural College, Ningxia, China)

Abstract

Distribution of air temperature around Guyuan Prefecture, south part of Ningxia in China, which has only a few meteorological observation sites, was estimated in $2\text{km} \times 2\text{km}$ mesh size by using the following methods; 1) regression estimation by altitude of each mesh, 2) regression estimation by surface temperature estimated from GMS infrared data, 3) multiple regression estimation by topographical factors of each mesh, which were calculated using altitude mesh data around the study area, 4) multiple regression estimation by NDVI and altitude of each mesh.

Hourly air temperature was estimated by methods 1) and 2). Correlation coefficients by method 1) were low in winter morning, but were sufficiently high in other time. During the daytime, estimation by method 2) was accurate enough. But in most cases, accuracy of surface temperature method was lower than the method by using altitude, which was caused by low resolution of GMS data.

Monthly mean temperature and monthly mean maximum and minimum temperatures were estimated by methods 1), 3) and 4). Correlation coefficients by method 1) were low in winter, especially in monthly mean minimum temperature. For method 3), stepwise regression analysis was used to decide the most effective topographical factors for the monthly mean minimum temperature. As a result, some topographical factors except altitudes were selected in winter and estimation using selected topographical factors was more accurate than using altitude only. This result indicates that the effect of topographical factors for air temperature was larger than that of altitude in winter morning. For method 4), stepwise regression analysis was carried out and NDVI was selected for several months. Estimation using NDVI and altitude was more accurate than using only altitude. These results indicate that the condition of ground vegetation affect the air temperature distribution in summer.

Key words: Air temperature distribution, GMS infrared data, Topographical factors, NDVI.

キーワード: 気温分布, GMS 赤外データ, 地形因子, NDVI

1. はじめに

近年、半乾燥地における砂漠化の進行が顕在化し、深刻な問題となっており、この半乾燥地の砂漠化とその防

止に関する研究は各方面で行われている。しかし、このような地域は一般に地上気象観測点が少なく、気象情報の不足が研究の発展に大きな障害となっている。したがって、観測データの無い地域の気象情報を限られたデータから精度よく推定できる方法が確立されれば利用価値は高い。本研究では、気象情報の中でも最も基本的な要素

1994年6月8日 全国大会にて発表

1997年6月23日 受付, 1998年2月13日 受理

である気温に着目し、地上気象観測点の少ない中国内陸部の半乾燥地の面的な気温分布の推定法の検討を行った。

一般に気温は高度が増加すると、気温減率にしたがって低下する。そのため、比較的狭い地域においては標高からの気温推定が可能である。青木ら（1992）は、北海道赤井川盆地において標高と日最高、最低気温との関係を調べ、盆地内の気温は標高に対してほぼ直線的な関係があると報告している。また、月平均気温は標高のみではなく、地形などの様々な因子により影響を受けることが知られている。そのため、観測地点の実測値と種々の地形因子との重回帰式から、任意地点の月平均気温を推定する方法が実用化されている（例えば、栗原・村上、1982；水野・市川、1984）。

以上のような気温分布の推定には、対象地域の地形情報が必要不可欠である。我が国においては国土数値情報が整備され、全国の1 km×1 kmメッシュの地形情報が作成されている。そのため、地形情報の入手が比較的容易である。しかし、世界の多くの半乾燥地帯では地形情報が整備されていない。また、地上気象観測点も少なく、設備も十分整っていないことが多い。そのため、地形情報を利用した広域の気温分布の推定には困難が伴う。

ところで、半乾燥地は植生地と裸地の区分が比較的明瞭なため、気温分布が植生分布に影響されていると考えられる。真木ら（1994）は、乾燥地であるトルファン（中国・新疆ウイグル自治区）において、夏季の日中に植生地は裸地と比較して気温が低くなると報告している。したがって、植物の活動が活発な季節の気温分布の推定に植生状態を考慮すると、正確な推定が期待できる。しかし、植生をパラメータとした気温分布の推定については、現在まではほとんど検討されていない。

一方、人工衛星で観測された赤外データから地表面温度分布を求め、気温分布を推定することが可能である。谷ら（1984）は北海道全域を対象としてGMS（気象衛星ひまわり）赤外データとアメダスデータから気温分布の推定を行った。堀口ら（1986）は対象地域を小地域に分割することで推定精度の向上が可能であることを報告している。地上気象観測点の無い任意の地点の気温が推定できるため、観測点の少ない地域の気温の推定に、人工衛星データを使用するメリットは大きい。GMSを使用すれば、赤外データから1日24回毎正時の地表面温度情報が得られるため、特定の時間帯に制約されずに気温分布の推定ができる。ただし、赤外データは雲に影響されるため、気温分布の推定は晴天時の特別値に限定される。また晴天時においても、大気補正等各種の補正が必要となる（阿部ら、1979）。

以上のように、気温分布の推定については多くの手法

が提唱されている。しかし、実用段階において各推定法に関する特徴の比較検討はあまりなされていない。そこで本研究では、中国内陸部の半乾燥地を対象として、標高および人工衛星による地表面温度データを使用した気温時別値の分布の推定を行った。また標高、地形データおよび植生データを使用して月平均気温、月平均最高気温、月平均最低気温の分布の推定を行い、推定法の適応性について検討した。

2. 研究方法

2.1 研究対象地域

研究対象地域として、中国・寧夏（Ningxia）回族自治区南部の固原（Guyuan）地区を選定した。

寧夏回族自治区は、中国中央部の黄河流域の北緯35°–39°、東経104°–107°に位置する（Fig. 1）。面積は66,400 km²であり、北海道（面積83,000 km²）よりもやや小さい。標高は1,000 m–3,500 mの範囲にあり、相対的に北部で低く、南部で高い。また、西部から北部にかけて黄河が流れており（Fig. 1 参照）、流域はこの黄河の水で灌漑された水田や畑地が広がっている。年降水量は200 mmから500 mm前後と少なく、夏季に集中している。

本研究の対象地域とした固原地区は、寧夏回族自治区南部に位置し、面積は17,000 km²である。標高は1,300 m–2,800 mであり、黄土高原と呼ばれる地域に属し、深い浸食谷によって地形は比較的複雑である。年降水量は約500 mmで、寧夏北部の約200 mmと比較して多い。しかし、降水の年変動が大きく、また寧夏北部と比較して灌漑設備も未発達であり、度々大規模な干害が発生する地域である。

寧夏における地上気象観測点（気象官署）は、平均約2,700 km²に1点の割合であり、日本のアメダス観測点

Fig. 1. Study area and observation sites in Guyuan Prefecture, Ningxia, China. Sites from 1 to 7 are by this study, and from A to F are meteorological stations. See Table 1 for description of the sites.

Table 1 Description of the observation sites. Sites from 1 to 7 are by this study, and from A to F are meteorological stations. Monthly mean air temperature at Heicheng and Dawan were not available.

No.	Observation sites	latitude	longitude	Altitude (m)	Land use	Monthly mean air temperature (°C)	
						Jul., 1991	Jan., 1992
1	Heicheng	36° 21'N	106° 07'E	1,575	Crop field	22.5	-
2	Touying	36° 09'N	106° 11'E	1,675	Crop field	23.4	-5.8
3	Kaicheng	35° 53'N	106° 16'E	1,900	Crop field	19.8	-7.0
4	Dawan	35° 43'N	106° 15'E	1,990	Crop field	19.1	-
5	Heshanpu	35° 40'N	106° 14'E	2,130	Bush	18.9	-5.0
6	South slope of Mt. Liupan	35° 39'N	106° 12'E	2,810	Bush	14.6	-7.5
7	Liancai	35° 34'N	105° 52'E	1,855	Crop field	20.6	-6.0
A	Tongxin	36° 59'N	105° 55'E	1,344	Desert	24.5	-6.7
B	Haiyuan	36° 34'N	105° 39'E	1,854	Desert	21.6	-5.8
C	Guyuan	36° 00'N	106° 16'E	1,750	Town	20.2	-8.4
D	Mt. Liupan	35° 39'N	106° 12'E	2,900	Bush	13.5	-8.8
E	Longde	35° 37'N	106° 06'E	2,079	Town	17.6	-7.6
F	Jingyuan	35° 29'N	106° 20'E	1,948	Crop field	18.8	-6.3

の平均密度(約 440 km²)と比較してかなり少ない(楊ら, 1990)。そのため、面的な気温分布情報が特に必要とされる地域である。

2.2 使用したデータ

本研究では、以下の 5 種類のデータを使用した。

a) 気温実測データ

固原地区内および近傍の 6 ケ所の気象官署と著者らが設置した 7 ケ所の観測地点において 1991～93 年に実測した気温データを使用した。

気象官署では、1 日 4 回(2, 8, 14, 20 時, LST)の定時測定および日最高気温、最低気温の測定を行っている。測定機器は、百葉箱内に設置した水銀温度計(自然通風)および最高最低温度計を使用している。また、日平均気温は 4 回の測定値の平均値としている。

著者らが設置した 7 ケ所の地点では、百葉箱内に設置したサーミスタセンサ(自然通風)により気温を 30 分間隔で測定し、データロガー(コーナシステム製:KADEC-U)に記録した。ただし、解析中使用した月平均気温は、気象官署の 1 日 4 回の測定時刻に合わせて計算した値である。また、日最高気温および日最低気温は、30 分間隔で測定した値の最高値および最低値とした。

気象官署と著者らが設置した観測地点(以下、観測地点)の一覧を Table 1 に、地図上の位置を Fig. 1 に示す。

b) 標高メッシュデータ

対象地域である固原地区全域について、1:200,000 地形図をもとに 2 km×2 km の格子点の標高を読み取り、標高メッシュデータを作成した(Fig. 2)。標高の分解能は、100m とした。対象地域の範囲は東西 160 km(80 メッシュ)、南北 200 km(100 メッシュ)であり、そのうち固原地区に属するメッシュは 4,249 個であった。

Fig. 2. Grid map of altitude in the study area.

c) 地形因子メッシュデータ

地形因子は、標高メッシュデータを使用して、正務(1989)等の地形因子を参考にして独自に作成した。標本数が少ないことを考慮し、地形因子の種類は 6 つに限定した。以下に採用した地形因子を示す。

① 標高(Z)

中央メッシュの 4 頂点の平均標高とした。

② 東西傾斜(G_{EW})

中央メッシュの標高を C 、中央メッシュの東西に隣接するメッシュの標高を E, W として、 $G_{EW} = W - E$ とした。但し、 $W < C > E$ あるいは $W > C < E$ である場合は

0とした。

③ 南北傾斜(G_{NS})

中央メッシュの標高を C 、中央メッシュの南北に隣接するメッシュの標高を S, N として、 $G_{NS}=N-S$ とした。但し、 $N < C > S$ あるいは $N > C < S$ である場合は0とした。

④ 起伏度(R_I)

中央メッシュおよび隣接する周辺メッシュの9個のメッシュの中の最高標高と最低標高の差とした。

⑤ 開放度1($EXP1$)

隣接する8個の周辺メッシュのうち、中央メッシュより高いメッシュの個数とした。

⑥ 開放度2($EXP2$)

隣接する8個の周辺メッシュのうち、中央メッシュより低いメッシュの個数とした。

d) 植生指数メッシュデータ

植生の状態をパラメータ化する方法として、リモートセンシングで使用されている植生指数の利用が最も便利である。本研究では、植生指数として最も一般的なNDVI(Normalized Difference Vegetation Index)を使用した。NDVIは地球探査衛星LandsatのTM(Thematic Mapper)データを使用して、次式により求めた。

$$NDVI = (BAND4 - BAND3) / (BAND4 + BAND3) \quad (1)$$

但し、BAND3:バンド3のデジタル値、BAND4:バンド4のデジタル値である。使用したTMデータは、固原地区のほぼ全域が晴天となった1990年8月10日に観測されたものである。

得られたNDVIデータから、対象地域のNDVIメッシュデータを作成した。この際、TMデータは分解能が30m×30mであり、2km×2kmの標高メッシュデータとサイズが大きく異なる。そのため、各メッシュ内のNDVIの平均値をメッシュNDVIとした。

算出した各メッシュNDVIを、Fig.3に示す。固原地区におけるNDVIの値は、概略北部で小さく、中央から南部で大きくなっている。これは、自然植生が比較的豊富な標高の高い山地が、中央部から南部へ縦断しているためである(Fig.1, Fig.2参照)。また平地の一部の地域でも大きい値を示し、これは河川流域の農耕地と考えられる。

e) 地表面温度メッシュデータ

対象地域の地表面温度は、GMS赤外データの等価黒体温度に大気補正を施して算出した。使用した大気補正式は、阿部ら(1979)の次式である。

$$T_s = T_{bb} + \Delta T \quad (2)$$

$$\Delta T = \sec \theta \{ 0.189 AW + 4(1-A) \} \quad (3)$$

Fig. 3. Grid map of NDVI in the study area on Aug. 10, 1980. Black areas were covered with cloud and were excluded from the analysis.

但し、 $A = 1400 / \{ (310 - T_{bb})^2 + 1400 \}$, T_s : 地表面温度(K), T_{bb} : 等価黒体温度(K), ΔT : 大気補正量(K), θ : 衛星天頂角(rad), W : 可降水量(mm)である。可降水量は、対象地域から約300km離れた寧夏回族自治区銀川气象台の高層気象観測データから計算した。解析に使用したGMSデータは、1991年6月から8月までの4日間の13データ(気象官署の測定時刻)である。

GMS赤外データの分解能(対象地域において、東西約5km×南北約9km)は、標高および地形メッシュデータのサイズ(2km×2km)と異なるため、地表面温度データを最近隣内挿(最も近いメッシュの数値を採用する方法)により2km×2kmメッシュに加工した。

2.3 気温分布の推定法

2.3.1 気温時別値の分布の推定

2種の方法により、気温時別値の推定を行った。

第一に、著者らが設置した7地点において、1991年7月1日～12月31日の毎正時に測定された気温実測値を目的変数、観測地点の標高を説明変数として回帰分析を行い、求められた単回帰式を用いて気温分布の推定を行った。

第二に、GMS赤外データによる地表面温度データからの推定を行った。著者らが設置した7地点および気象官署6地点の計13地点から得た気温実測値を目的変数、観測地点が属するメッシュの地表面温度を説明変数として回帰分析を行い、求められた単回帰式を用いて気温分

布を推定した。

2.3.2 月平均気温、月平均最高気温、月平均最低気温の分布の推定

3 種の方法により、月平均気温、月平均最高気温、月平均最低気温の分布の推定を行った。気温実測値は、著者らが設置した 7 地点と気象官署の 6 地点の計 13 地点から得た。解析に使用した期間は、1991 年 6 月～1993 年 5 月である。

第一に、2.3.1 と同様に、気温の実測値とその地点の標高について回帰分析を行い、求められた単回帰式により気温分布を推定した。

第二に、標高を含めた地形因子を説明変数としてステップワイズ重回帰分析を行い、月平均気温、月平均最高気温、月平均最低気温の最適推定式を算出した。ステップワイズ回帰分析における変数選択法として、逐次変数選択法(変数増減法)を採用した。説明変数選択の基準は F 値(分散比)とし、変数選択の基準となる有意水準は採用、棄却ともに 15% とした。目的変数としての実測データは、欠測地点が比較的少ない 1991 年 6 月から 1992 年 9 月までの月平均気温、月平均最高気温、月平均最低気温を使用した。ただし、観測地点によっては欠測期間が存在するが、その期間については欠測地点を除外して回帰式を算出した。

第三に、NDVI および地形因子を説明変数としてステップワイズ重回帰分析を行い、メッシュ NDVI が採択されたケースについて気温分布の推定を行った。変数選択の基準は F 値とし、有意水準は 15% とした。植生を考慮した推定式は、地上に植生の繁茂がみられる季節にのみ有効である。したがって、NDVI を加味した気温分布の推定は、1991 年と 1992 年の夏季(6 月～9 月)について行った。

3. 結果と考察

3.1 気温時別値分布の推定

3.1.1 標高からの推定

標高と気温の関係が、時刻によってどのように変化するかをみるため、時刻別に標高と気温の相関係数を調べた。Fig. 4 は、1991 年 7～9 月(夏季)と 1991 年 10～12 月(秋から初冬)の各時刻(0 時から 23 時, LST)の相関係数を時刻毎に 3 カ月間平均した値を示したものである。

夏季について見ると、早朝 7 時頃に最も相関係数が小さくなっており、正午から夜にかけて大きくなった。しかし 1 日を通して相関係数の値が -0.6 以上と大きかった。一方、秋から初冬は日変化が著しく、13 時～21 時には -0.6 以上と相関が大きくなったが、それ以外の時

Fig. 4. Hourly variations of mean correlation coefficient between air temperature and altitude in summer (Jul.-Sep., 1991) and from autumn to early winter (Oct.-Dec., 1991).

間帯は小さく、特に深夜から早朝にかけて極めて小さかった。また、早朝には僅かな正の相関となっていることから、強い放射冷却による気温の逆転が示唆される。真木ら(1995)によると、トルファン盆地において、冬季に逆転層が形成されることが多く、冬季の晴天の早朝に気温の逆転強度が強いと報告している。固原地区においても同様に放射冷却により逆転層が形成されている可能性が高く、標高と気温の関係が直線的ではなく複雑になっていると考えられる。

3.1.2 GMS による地表面温度からの推定

GMS 赤外データから算出した地表面温度を用いて気温の回帰推定を行った。推定値と実測値の r^2 (寄与率)と RMSE (Root Mean Square Error) を Table 2 に示す。また、比較のため同時刻の標高からの推定結果も併せて掲載する。地表面温度を使用した推定結果は、観測日時によって精度良く推定されている時と精度が悪い時が見られた。特に、雲域の多い 6 月 10 日に関しては精度が非常に悪く、雲域として除去した地域以外でも大気中の水蒸気の影響を強く受けていた可能性がある。

時刻による推定精度の変化について、谷ら(1984)は、日射の影響が地表面の傾斜や植生により異なり、場所による地表面温度の違いが大きくなるため、気温と地表面温度の相関は夜間や早朝より日中に低くなると報告している。また、楊ら(1990)も日中晴天時において、GMS 赤外データから算出した地表面温度と気温の相関が低くなることを指摘し、地表の植生状態の差異による影響と考察している。本研究においては上記のような特徴は認められず、推定精度はむしろ日中に高く、早朝(8 時)に

Table 2 r^2 and RMSE between air temperatures observed and estimated from surface temperature and altitude.

Date	Time	No. of sites	Estimation from GMS surface temperature		Estimation from altitude	
			r^2	RMSE(°C)	r^2	RMSE(°C)
1991.5.21	8:00	13	0.22	1.67	0.37	1.50
	14:00	13	0.55	2.52	0.90	1.22
	20:00	13	0.92	1.27	0.87	1.65
1991.6.10	8:00	13	0.19	1.47	0.65	0.97
	14:00	13	0.08	2.58	0.70	1.48
	20:00	13	0.28	3.12	0.81	1.61
1991.7.29	2:00	13	0.43	1.58	0.78	0.98
	8:00	13	0.27	2.06	0.48	1.74
	14:00	13	0.83	1.79	0.92	1.20
	20:00	13	0.49	3.42	0.79	2.19
1991.8.03	2:00	13	0.58	2.25	0.80	1.29
	8:00	13	0.28	2.40	0.73	1.79
	14:00	13	0.49	2.08	0.77	1.97
Mean			0.43	2.17	0.74	1.51

低かった(Table 2)。以上のような相違の原因として、早朝の放射冷却によりメッシュサイズ(5 km×9 km)よりも小規模な局地的気温分布が形成され、観測地点での測定値のメッシュに対する代表性が失われていたことも考えられる。

地表面温度による推定結果の一例として、Fig. 5 (a)に1991年8月3日14時(LST)の結果を、また比較のためFig. 5 (b)に同時刻の標高からの推定結果を示す。分解能の違いがあり、地表面温度から推定した気温分布はかなり粗い。推定精度をみると、地表面温度を使用した場合 $r^2=0.49$ 、RMSE=2.08°Cで、標高からの場合は $r^2=0.77$ 、RMSE=1.97°Cで、地表面温度による推定精度は低かった。しかし、全体的に標高の低い北部で気温が高く、南部の山岳地帯で気温が低いという傾向は、標

高による推定結果と概略一致している。そのため、対象地域の相対的な気温分布の把握には使用可能といえる。

3.2 月平均気温、月平均最高気温、月平均最低気温の分布の推定

3.2.1 標高からの推定

標高と気温の関係の季節変化をみるために、相関係数の月毎の変動を、Fig. 6に示す。

月平均最高気温については全期間を通して相関係数の値は大きく、標高と直線関係が認められた。また、全期間について有意水準1%で有意性が認められた。久保田(1961)は宮城県において気温と標高の関係の季節変化を解析し、夏季の月平均最高気温と標高の相関が低くなるという結果を報告している。久

保田はこれは、季節風や海洋の影響と報告しているが、本研究で対象とした寧夏・固原地区は、最も近い海岸から1,000 km以上内陸に位置し、季節風や海洋の影響は極めて少ないと考えられる。そのため、季節を問わず標高と気温に高い相関が認められたと推測できる。

一方、月平均最低気温、月平均気温については、冬季に相関が極めて低く、特に月平均最低気温は有意性が認められない月も見られた。その他の時期については高い相関が認められたが、月平均最高気温と比較して相関は小さかった。この結果も、3.1.1の結果と同様に、放射冷却により標高と気温の関係が複雑になったことに起因すると考えられる。

以上の結果から、月平均最高気温については季節と関係なく、月平均最低気温、月平均気温については冬季を

Fig. 5. Distribution of air temperature in the study area at 14:00 (LST) on Aug. 3, 1991. (a) estimated from surface temperature, (b) estimated from altitude.

Fig. 6. Monthly variation of correlation coefficient between air temperature and altitude at observation sites.

除いた季節に限り、標高のみをパラメータとして比較的精度の高い気温分布の推定が可能であるといえる。

3.2.2 地形因子からの推定

気温が低下する早朝(特に冬季)には気温と標高の相関係数が小さく、標高のみの単回帰式から気温を推定すると精度が悪いことが判明した。このような時には標高以外の要素が大きく寄与していると考えられる。そのため、地形因子を説明変数に入れた重回帰式による気温の推定を行った。

標高との相関が比較的低い月平均最低気温について、ステップワイズ回帰分析により採択された地形因子の回帰係数と回帰式の r^2 とRMSEを、Table 3に示す。また比較のため、標高(観測地点を含むメッシュ標高)のみ

の単回帰による推定結果も掲載する。

標高と月平均最低気温の相関が特に低くなる冬季(11～2月)において、標高(Z)は採択されずに標高以外の地形因子が採択された。特に東西傾斜(G_{EW})が比較的多く採択されたことから、東向き斜面と西向き斜面の温度環境の相違が示唆される。すなわち、本解析では G_{EW} は東向き斜面を正としており、そして偏回帰係数は全て正の値であることから、冬季の最低気温は東向き斜面は西向き斜面と比較して高いことになる。早朝、東向き斜面は西向き斜面よりも早く日射を受け始める。そのため、西向き斜面で放射冷却が続いている間に東向き斜面では昇温が始まるため、最低気温に差が生じたと考えられる。一方、気温を考える上で、標高(Z)は重要な因子であるにもかかわらず採択されなかったことから、冬季の固原地区においては、月平均最低気温の分布に傾斜方位が標高より大きく寄与しているといえる。

一方、冬季以外の季節については標高(Z)は必ず採択された。また1991年7月、8月、1992年7月には標高(Z)の他に開放度1(EXP1)が採択された。

採択された説明変数の数は、栗原・村上(1982)などの結果と比較して少なかった。これは、今回設定した観測地点の殆どが盆地底部や谷筋に位置し、地形的に近似であることや、各説明変数(地形因子)間に比較的高い相関が見られることに起因すると考えられる。そのため、なるべく多くの異質な地形的特徴を持つ場所に観測地点を設置することが望ましい。

地形因子を取り入れた推定式による気温分布の推定結果の一例として、Fig. 7(a)に、1991年8月の月平均最低気温(標高(Z)と開放度1(EXP1)が採択)についての

推定結果を、また比較のためFig. 7(b)に、標高のみの単回帰式からの推定結果を示す。両者を比較すると、地形因子を用いた推定値の方が、標高からの推定値より全体的に推定気温が高く、また地形的特徴を反映して推定気温の分布は複雑になった。推定精度は、地形因子を用いた推定値の方が $r^2=0.96$ 、RMSE=0.51℃で、標高からの推定値の $r^2=0.83$ 、RMSE=0.94℃であり、地形因子を使用した推定は精度が向上したといえる。また、他の月に関しても、地形因子の導入による精度の向上が認められた(Table 3)。

3.2.3 植生指数および地形因子からの推定

植生が夏季の気温に影響するかな

Table 3 Result of stepwise regression analysis for monthly mean minimum air temperature.

Month	No. of sites	Estimation from topographical factors						Estimation from altitude	
		Regression coefficients						r^2	RMSE
		Z	G_{EW}	G_{NS}	RI	EXP1	EXP2		
1991 Jun.	13	-0.39						0.77	0.97
Jul.	13	-0.51			0.040			0.84	0.85
Aug.	13	-0.57			0.038			0.96	0.51
Sep.	13	-0.35						0.75	0.89
Oct.	13	-0.27						0.64	0.64
Nov.	13	0.45						0.28	1.34
Dec.	13	0.40						0.31	1.09
1992 Jan.	11	0.45						0.35	1.23
Feb.	11							0.19	1.09
Mar.	11	-0.37				-0.049		0.89	0.63
Apr.	11	-0.34						0.79	0.83
May.	11	-0.40						0.87	0.73
Jun.	12	-0.43						0.75	1.07
Jul.	12	-0.55			0.035			0.89	0.73
Aug.	12	-0.41						0.88	0.59
Sep.	12	-0.41						0.86	0.57
Mean								0.69	0.86
								0.62	1.02

Fig. 7. Distribution of monthly mean minimum air temperature in the study area on Aug. 1991. (a) estimated from topographical factors, (b) estimated from altitude.

をみるため、各観測地点が属するメッシュのNDVIと、標高による気温推定値と実測値の残差の関係を調べた。

Fig. 8 (a)は1991年、1992年の6月～9月の月平均最高気温で、Fig. 8 (b)は同時期の月平均最低気温である。

月平均最高気温(Fig. 8 (a))に関しては、各地点毎のNDVIと残差(推定値－実測値)との間に5%で有意な正の相関関係が認められた。すなわち、標高による推定気温はNDVIの小さい地点で過小評価され、NDVIの大きい地点で過大評価されている。晴天日の最高気温は一般に太陽南中時の1～2時間後に観測されるが、同時に植物の蒸散が活発な時刻でもある。その結果、植生地は裸地と比較して地表面温度が低く、気温の上昇が相対的に小さくなると考えられる。したがって、月平均最高気温の分布は植生の影響を受けていると推測できる。

一方、月平均最低気温(Fig. 8 (b))についてはNDVIと残差との間に有意な相関は認められなかったが、最低気温には植生よりも周囲の地形が大きく影響しているためと考えられる。

月平均最高気温について、NDVIと地形因子を説明変数としてステップワイズ重回帰分析を行い、採択された説明変数を調べた(Table 4)。その結果、1992年6月～9月に標高の他にNDVIが説明変数として採択された。NDVIの回帰係数は全て負の値であることから、夏季の月平均最高気温の分布は地表の植生により影響され、植生地は裸地と比較して低温になるといえる。これは、真木ら(1994)による報告と一致する。標高とNDVIの標準偏回帰係数を調べると、標高が $-0.71 \sim -0.82$ 、NDVIが $-0.22 \sim -0.33$ であり、標高による気温変化の大きさ

Fig. 8. Relationship between NDVI and air temperature difference between estimated from altitude (T_e) and observed (T_o). (a) monthly mean maximum air temperature, (b) monthly mean minimum air temperature in summer (Jun. -Sep., 1991, 1992).

Table 4 Result of stepwise regression analysis for monthly mean maximum air temperature in summer (Jun.–Sep., 1991, 1992).

Month	No. of sites	Estimation from topographical factors and NDVI							Estimation from altitude	
		Regression coefficients						r^2	RMSE	r^2
		Z	G_{EW}	G_{NS}	RJ	EXP1	EXP2			
1991 Jun.	13	-0.81						0.98	0.56	0.98
Jul.	13	-0.90						0.98	0.65	0.98
Aug.	13	-0.88						0.98	0.63	0.98
Sep.	13	-0.76						0.99	0.41	0.99
1992 Jun.	12	-0.67					-7.01	0.99	0.41	0.97
Jul.	12	-0.69					-6.94	0.99	0.39	0.97
Aug.	12	-0.59					-8.95	0.98	0.62	0.93
Sep.	12	-0.54					-9.52	0.96	0.73	0.91
Mean								0.98	0.55	0.96

Fig. 9. Distribution of monthly mean maximum air temperature in the study area on Jul. 1992. (a) estimated from NDVI and altitude, (b) estimated from altitude.

と比較して植生状態の気温への影響は小さい。しかし、標準偏回帰係数は両者とも1%で有意であり、植生が気温に与える影響は看過できないといえる。

一方、月平均最低気温、月平均気温についても同様にステップワイズ重回帰分析を行ったが、NDVIは採択されなかった。そのため、植生が気温分布に大きく影響するのは主に日中であるといえる。

NDVIを取入れたモデル式による気温分布の推定結果の一例として、Fig. 9 (a)に、1992年7月の月平均最高気温の推定結果を、また比較のためFig. 9 (b)に、標高のみの単回帰式からの推定結果を示す。

北西部の黒色部分は Landsat 観測時の雲域であり、解析より除外した。NDVIと標高から推定した気温は、標高のみから推定した気温と比較してNDVIの小さい北部の地域で明らかに高く算出されており、またNDVI値の大きい南部の地域でやや低く算出されている。また北

部から中部にかけての谷筋は農耕地が存在する比較的NDVIが大きい地域であり、標高のみの推定と比較して気温は低く推定されている。推定精度、NDVIと標高を用いた推定値は $r^2=0.99$ 、 $RMSE=0.39^\circ C$ で、標高のみによる推定値は $r^2=0.97$ 、 $RMSE=0.71^\circ C$ であり、NDVIと標高を用いた方法に推定精度の向上が認められた。

4. ま と め

中国寧夏固原地区を対象として、気温時別値、月平均気温、月平均最高気温、月平均最低気温の分布の推定を種々の方法で行い、各方法の特徴について調べた。その結果、以下のような点が明らかになった。

(1) 標高のみをパラメータに用いて気温の時別値の推定を行ったところ、冬季の早朝以外は標高と気温実測値の相関が高く、精度の高い推定が可能である。一方、GMS 赤外データから推定した地表面温度を使用すると、

標高からの推定と比較して推定精度は多少犠牲になるが、標高や地形情報を全く必要としないため、目的によっては有効といえる。

(2) 月平均気温、月平均最高気温、月平均最低気温を標高のみから推定すると、月平均最高気温は季節と関係なく、月平均最低気温、月平均気温は冬季を除いた季節に、比較的精度の高い気温分布の推定が可能である。また、標高の他に地形因子をパラメータに加えた推定では、冬季の月平均最低気温の推定に有効性が認められた。さらに、標高の他に植生をパラメータに加えると、夏季の月平均最高気温の推定は、より精度が高くなった。

今回地上気象観測点の少ない地域の気温分布の推定法とその特徴について検討したが、条件や目的に応じた推定法を選択することが必要と考えられた。特に本研究で対象とした固原地区のみならず、中国西北地域のような半乾燥地は植生の分布特性が明白であるため、気温分布の推定に植生を考慮することは有効な手段であると思われる。

引用文献

- 阿部勝宏・山本孝二, 1979: 静止気象衛星“ひまわり”の赤外放射データによる海面水温の算出. 天気, **26**, 493-507.
- 青木正敏・細野達夫・谷 宏・松村伸二, 1992: 北海道赤井川盆地における日最低気温および日最高気温と標高の関係. 農業気象, **48**, 1-10.
- 堀口郁夫・谷 宏・元木敏博, 1986: 農業気象における人工衛星データの利用に関する研究—(3)GMS(ひまわり)赤外データによる地域分類と小地域の気温推定. 農業気象, **42**, 129-135.
- 久保田 効, 1961: 宮城県における気温の統計的な分析. 天気, **8**, 220-225.
- 栗原弘一・村上律雄, 1982: 広島県メッシュ気候図(1) 1 km²メッシュ平均気温の推定. 研究時報, **34-1**, 17-28.
- 真木太一・杜 明遠・潘 伯榮・上村賢治, 1994: 中国西北部の乾燥地トルファンにおける砂漠・オアシス気候と蒸発散特性. 農業気象, **50**, 185-195.
- 真木太一・潘 伯榮・閻 国榮・上村賢治・鮫島良次・杜 明遠, 1995: 冬季のトルファン盆地における風および逆転層の気温と湿度の特性. 農業気象, **51**, 1-10.
- 水野 量・市川政治, 1984: メッシュ気候図作成におけるステップワイズ回帰分析法の改良—気温について—. 研究時報, **36-2**, 71-78.
- 正務 章, 1989: 応用気象問題における地形因子解析の応用—任意地点の二次的気象要素などの推定・予測問題. 気象研究ノート, **166**, 1-3.
- 谷 宏・堀口郁夫・元木敏博, 1984: 農業気象における人工衛星データの利用に関する研究—GMS(ひまわり)赤外データによる地表面温度とAMeDAS気温との関係. 農業気象, **40**, 111-117.
- 楊 桂清・堀口郁夫・谷 宏・元木敏博・大沢和祐・伊藤恒雄, 1990: 「ひまわり」による中国寧夏地域の夏季気温の推定例. 農業気象, **46**, 137-142.