農業気象 (*J. Agric. Meteorol.*) 55 (3): 235–246, 1999

霜害発生予察のための 50 m メッシュ地形情報を用いた局地的冷却現象の解析

高山 成*・早川誠而**・河村宏明***

(* 鳥取大学大学院連合農学研究科
** 山口大学農学部
*** 山口県農林部)

Analysis of Localized Cooling for Prediction of Frost Damage Occurrence by Using 50-m Mesh Topographical Data

Naru TAKAYAMA*, Seiji HAYAKAWA** and Hiroaki KAWAMURA***

(* The United Graduate School of Agricultural Sciences, Tottori University,
4-101, Minami, Kozan-cho, Tottori, 680-0945 Japan
** Faculty of Agriculture, Yamaguchi University, 1677-1, Oaza Yoshida,
Yamaguchi, 753-8515 Japan
*** Department of Agriculture and Forestry Yamaguchi Prefecture, 1-1,
Taki-machi, Yamaguchi, 753-8501 Japan)

Abstract

Localized cooling Index (LCI) was calculated from temperature data measured at night during the Spring period at the agricultural farm and the AMeDAS station in Yamaguchi Prefecture.

On clear nights, relatively lower cooling degrees than usual were obtained in the inland basins and significant differences for localized cooling were observed among different regions. On the contrary, on rainy nights, lower cooling degrees than the standard were found in the coast and inland hills. From evening to midnight, localized cooling varied with time among different regions, however, from midnight to morning tendency of variations for localized cooling did not much change. Therefore, if a low temperature could be estimated using LCI at 2300, this result would provide useful information for the prediction of late frost occurrence.

Effect of topography on localized cooling differs from place to place. For inland areas, localized cooling mostly developed in complex terrain and behind the northwest mountains. In the west and east, localized cooling developed in the places behind the western and southwestern mountains, respectively. This phenomenon may be attributed to the fact that general wind was intercepted by the mountain and localized cooling developed.

The mean LCI at 2300 in April was estimated using multiple-regression analysis. The adjusted R square ($R^{2'}$) varied from 0.63 to 0.94. Therefore, it may be possible to use a multiple-regression formula for the quantitative estimation of localized cooling phenomenon.

Key words: Localized cooling, 50 m-mesh, Multiple regression analysis, Topographic factor.

キーワード: 局地冷却, 50 m メッシュ, 重回帰分析, 地形因子

1. はじめに

山口県では県の主要農産物として、ナシ、カキなどの果樹を栽培しており、春季における晩霜害が非常に問題となっている。霜害の被害を軽減するために農家では、防霜ファン、散水水結装置、石油ストーブなどの方法で霜害対策を行っている。しかし、設備投資や運転コストなどの負担が農家にとって大きく、少ない投資で最大限の防霜効果をあげることが重要な課題となっている。霜害発生危険性を正確に予測し、適切な対応を行うためには、営農現場のある地域において発生する局地性の強い冷却現象の発生要因を明らかにすると共に、地域の局地的な冷却量をよりきめ細かく評価することが必要である。

霜害の発生には俗に「霜穴」と呼ばれるような極めて強い局地性があることが知られている。例えば、山口県域の傾斜茶園において夜間冷却の特性について調べた Suzuki *et al.* (1982) によると、晴天条件下では茶園において独自の地形気象の発達が著しくなり、わずかな高度差にも関わらず谷部低地と丘陵頂上では温度の発現状況に大きな差が現われた。今回、研究対象地域の中でも特に霜害の発生が問題となっている、山口県の内陸に位置する美東町や秋芳町などの営農現場は、縦、横の最大幅が約 400 m × 500 m の盆地地形や幅が約 125 m の細長い谷筋といった、極めて微細な地形条件にある。このような地域において従来の 1 km (標準) メッシュを用いて気温値のメッシュ展開を行った場合、実際の地形条件を標準メッシュが十分に捉え切れず、微細な地形条件による冷却現象を十分に評価することができない。従って、局地的な冷却量を評価するには、地形条件をより細かい空間スケールで表現し、地形が局地的な冷却の発達度合いに及ぼす影響を定量的に評価する必要がある。

近年、リアルタイムの気象データを標準メッシュに展開するメッシュ気象値の整備が進み、作物の生育や収量の診断・予測、作期や作付けの計画・適地判定、病害虫の発生予察・防除等の解析に用いられ、メッシュ気象情報の適用範囲は確実に広がっている (Yamada, 1993)。しかし、先に述べたように国土が山がちで複雑地形が多い我が国において、従来の標準メッシュを用いての重回帰法や距離重み付け法では、微小な地形条件に起因する気象現象を捉え切れないことが指摘されている。例えば、Yamada (1995) は任意地点の現象が及ぶ範囲は地形が複雑な地域でかなり狭いことを示唆している。さらに、霜害発生予察にメッシュ気象情報を活用するには、気象値を短時間スケールでメッシュ展開することが必要不可欠であるが、短時間スケールで気象値のメッシュ展開を行った場合には各々月平均、旬平均、日平均と統計

期間を変えるとデータを扱う期間が短くなるほど、推定誤差が大きくなっている (Seino, 1993)。標準メッシュの粗さを克服するため、標準メッシュの 400 倍の細かい地域区画単位である 50 m メッシュが最近整備され様々な利用法が検討されている。50 m メッシュの地形因子を用いた重回帰法により気温分布を推定した Ohara (1998) の研究などもあるが、推定に際して多数の観測点を必要とする。従って、霜害発生予察を目的としたメッシュ気象情報の活用という観点においては、従来の気温値のメッシュ解析手法では不十分であると考えられる。

そこで本研究では、山口県において晩霜害危険期である 4 月について、短時間スケールで局地的に発生する冷却現象の発生要因を明らかにし、その発達度合いをより細かい空間単位で定量的に明らかにすることを目的とした。まず、山口県内の農園に設置した気象観測機器による観測データおよび AMeDAS 観測データを用いて、地域の局地的な冷え込みの度合いを示す指標である局地冷却度を算出した。次に、国土数値情報の 50 m 地形メッシュと局地冷却度との関係を調べ、局地的な冷却度合いを 50 m メッシュ単位で推定することを試みた。さらに、得られた局地冷却度評価値を、約 10 km 四方の地域単位の地形図と重ねあわせた局地冷却度マップを作成し、営農現場での活用の際に視覚から容易な形で、局地冷却の程度が分かる冷却度評価手法を開発することを目指した。

2. 材料および方法

2.1 研究対象地域と使用データ

研究対象地域は山口県域であり、東西方向が東経 130°55′から 132°17′まで、南北方向が北緯 33°54′から 34°36′までの東西に約 120 km、南北に約 110 km の地域である。地域的な気象特性を評価するには、対象地域においてある程度の観測密度が確保され、定時に決まった方法で観測された気象データが必要になる。本研究では、山口県内に位置する AMeDAS (地域気象観測システム) の 4 要素 (気温、雨量、風向風速、日照時間) 観測局および、県内 10 個所の農園における気象観測データを用いた。ただし、10 個所の農地における気象観測点のうちの 2 個所は、冷却度評価の精度検証のため 1997 年 4 月 9 日より 4 月 30 日までのデータを用いた。実際に局地冷却の評価の解析に用いた気象データは、AMeDAS 観測点および 8 個所の農地の気象観測点におけるデータのうち、日界を 7 時とした 1997 年 4 月 1 日から 4 月 30 日までの 17 時から翌朝 7 時までに占める 2 時間毎の気温である。県内 10 個所の農園における気象観測は、山口県が設置・運営する移動式気象ロボッ

ト 4 地点および、山口大学が設置・運営する自動観測装置 6 地点である。気温の測定はサーミスタ温度計を外部センサーとして装備したメモリー式温度計（佐藤計量器製作所、SK-L200 TH）を用いた。農園における気象観測機器の設置に際しては、センサー部を地表面 1.2~1.5 m の高さに放射除けを付けて設置し、強制的な通風はしていない。温度計はセンサー部が直径 14 mm、長さ 60 mm と大きいので、気温測定値は毎正時の瞬時値を対象時刻の平均的な気温を表す値と考え、その時刻の気温として採用した。研究対象地域および気象観測点の位置を Fig. 1 に示す。観測点のうち AMeDAS 観測局が 15 地点ある。AMeDAS は 1 km 以内の微小な地形の影響がなるべく少ないような地点を選んで設置されており、設置場所が比較的開けた地形条件にあるものが多い。一方、農地に設置した移動式気象ロボットおよび自動観測装置は、山口県西部では豊北町および豊田町のナシ園、県中央部では秋芳町のナシ園、美東町のカキ園、宇部市のチャ園、県東部では徳山市のブドウ園に設置した。また、局地的冷却評価の精度検証用として利用したのは、県中央部の阿東町長門峡のナシ園内に設置した 2 個所の自動観測装置である。これらの観測点はすべて非常に複雑な地形条件を備えた場所に設置されており、豊北町境下を除く観測点は概ね盆地地形内にある。

2.2 局地冷却度の算出方法

ある観測点 j が、観測日 i に普段の冷え方よりどの程

度冷えたかを、局地冷却度: $LC(i, j)$ (Sumino, 1961) として次式のように定義する。

$$LC(i, j) = T(i, j) - TAM(i) - GC(j) \quad (1)$$

$$TAM(i) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \{T(i, j)\} \quad (2)$$

$$GC(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{T(i, j) - TAM(i)\} \quad (3)$$

ここで、 $LC(i, j)$: i 日の j 地点における局地冷却度 ($^{\circ}\text{C}$)、 $T(i, j)$: i 日の j 地点におけるある時刻の気温 ($^{\circ}\text{C}$)、 $GC(j)$: j 地点の地理的效果による冷却度 ($^{\circ}\text{C}$)、 n : データ日数、 m : 観測点数である。局地冷却度は日界を 7 時として 17 時から翌朝 7 時までの 2 時間ごとについて算出した。データ日数は 4 月 1 日から 4 月 30 日までの 30 日間すなわち $n=30$ とした。 $GC(j)$ の算出に際してはそれぞれの観測点における気温実測値と $TAM(i)$ 値との偏差を、1 ヶ月間分平均した。従って、 $GC(j)$ の値には主に観測点間の標高の違い等といった、地理的な効果による気温差が反映される。しかし、農地の気象観測点については、局地的な冷却に関して微小な地形条件の影響を受け易い、複雑な地形上の盆地を選んで設置したため、特に晴天日において AMeDAS 観測点よりも観測点周辺の狭い範囲の地形の冷却効果が顕著となると考えられる。そのため、 $TAM(i)$ の算出に際して農地の気象観測点を複数含めると、周辺の狭い範囲の地形が冷え込みに強く影響を及ぼしている観測点の $T(i, j)$ の

Fig. 1. Study area and observational point. All weather station names are plotted with explanatory notes.

値が $TAM(i)$ の計算値に大きな影響を与える。冷却度の評価を行う対象地域の平均的な冷却量（気温低下量）を考えた場合、 $TAM(i)$ の計算値が特定の場所の局地的な冷却量によって偏ったものになると、結果的に $GC(j)$ や $LC(i, j)$ の計算値も特定の場所の局地的な冷却量によって偏ったものになる恐れがある。そこで、AMeDAS 観測点における $LC(i, j)$ を計算する際には、AMeDAS における観測値のみを用いた。すなわち、最初に AMeDAS15 地点 ($m=15$) で AMeDAS 観測点における局地冷却度を算出した。次に、農地の観測点における $LC(i, j)$ を計算するには、それぞれの観測点についてそれぞれ、計算対象観測点+AMeDAS 全点 ($m=16$) として計算した。このような計算方法により、特に農地の気象観測点について、微細な地形条件による冷却効果を反映した局地冷却度が算出されたと考える。

2.3 地形因子

対象地域が同じ気象条件下にある場合、観測点間の冷え込み方の違いは、観測点周辺の地理的・地形的条件などの違いがその地域の冷却に影響した結果であると考えられる。そこで、局地冷却度と地理的・地形的条件との関係を調べ、その結果を基に地形因子を説明変数、局地冷却度を目的変数とした重回帰分析を行い、局地冷却度の推算を試みた。地形因子は国土数値情報の 50 m 地形メッシュの標高値を用いて、観測点を中心に拡張メッシュ $R=1$ から $R=60$ までを算出した。拡張メッシュとは例えば $R=1$ の拡張メッシュならば、観測点のある

50 m メッシュのすぐ外側にある 8 個のメッシュのことである。従って、 $R=60$ までの拡張メッシュを用いて地形因子を計算することにより、観測点の近傍から 3 km 周辺までの地形との対応を表す地形因子を算出できる。ここでメッシュ拡張数 R を $R=1$ から $R=60$ としたのは、50 m メッシュを利用する場合にメッシュ拡張数を大きくすると、地形因子の計算が煩雑になり、ある一定の広さを持った地域を対象として面的に冷却度の評価を行ったりする場合に、実用性が制限されるためである。また、3 km 以上の範囲の地形条件が直接影響するような冷却効果は、地理的な冷却効果による現象であり、従来の 1 km メッシュを用いた解析等の方がより妥当であると考えた。算出した地形因子の定義を Table 1 に示す。

2.4 重回帰分析

地形因子を説明変数に局地冷却度を目的変数とした重回帰モデルを作り、これを使って観測点のない地域について局地冷却度を推定することを試みた。重回帰モデルは次式により与えられる。

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \cdots + a_nx_n \quad (4)$$

ここで、 Y : 平均局地冷却度 ($^{\circ}\text{C}$)、 a_0 : 定数、 a_n : 偏回帰係数、 x_n : 地形因子である。説明変数としてどの地形因子を採用するかは以下の手順で行った。

- (1) それぞれの地形因子と局地冷却度との単回帰において、95% 有意な地形因子のうち最も相関が大きい地形因子を x_1 とする。

Table 1 Topographic factors used for multiple regression analysis.
Topographic factors are calculated for 50 m-mesh-extension number $R=1$ to $R=60$, except for Distance from sea.

	Topographic factor	Unit	Symbol
1	Basin degree (1)	m	B1
2	Basin degree (2)	m	B2
3	Mesh plane mean altitude	m	MA
4	Rate of land mesh (1)	%	L1
5	Rate of land mesh (2)	%	L2
6	Open degree	%	OD
7	Undulation degree	Number	UD
8	Distance from the nearest the Sea of Japan	km	DJ
9	Distance from the nearest the Inland Sea	km	DI
10	Distance from the nearest coast	km	DN
11	Mean of factor 8 and 9	km	DM
12	Slope degree in east direction	Number	SE
13	Slope degree in southeast direction	Number	SSE
14	Slope degree in south direction	Number	SS
15	Slope degree in southwest direction	Number	SSW
16	Slope degree in west direction	Number	SW
17	Slope degree in northwest direction	Number	SNW
18	Slope degree in north direction	Number	SN
19	Slope degree in northeast direction	Number	SNW

- (2) 他の有意な地形因子のうち相関が最も大きい地形因子を x_2 とする。
- (3) 説明変数 x_1, x_2 の偏回帰係数 a_1, a_2 の有意性を検定し、有意であれば x_1, x_2 を採用する。有意でない場合は地形因子の拡張数 R を変え、再び検定を行い、有意と判定された地形因子の拡張数のうち最も相関が大きい場合を X_2 として採用する。有意な相関がない場合にはその地形因子を不採用とした。
- (4) x_1, x_2 以外の地形因子 $x_3, \dots, x_n$ についても、(3) と同様の手順を繰り返す。ただし、局地冷却度との単回帰において相関の高かった地形因子から順に調べる。
- (5) 有意な地形因子がなくなったら作業を終了する。

3. 結果および考察

3.1 局地的冷却の経日変化特性

下関地方気象台、秋芳町共栄ナシ園、美東町大田カキ園における局地冷却度の経日変化と天候状態を Fig. 2 に示す。下関地方気象台と秋芳町共栄、美東町大田では局地冷却度の変化傾向は逆となり、晴天日には局地冷却度が、秋芳、美東で負の値をとり、雨天日には逆に下関が負の値をとるという結果になった。また、数値は示していないが各観測点における $GC(j)$ は、下関などの沿岸地域の観測点では正の値を、農地の観測点などの内陸地域では多くの場合負の値となった。すなわち、晴天夜間には内陸地域では普段の冷え方よりも冷え易く、下関のような沿岸地域では冷え込みが発達しない。一方、雨天日には逆に沿岸地域の方が、地域全体の平均的な冷え込み度合よりも冷えていると考えられる。これは晴天夜間において内陸地域では放射冷却が発達するため、冷や

された空気塊が秋芳や美東などの盆地地形に位置する地域では、冷氣湖を発達させたためであると考えられる。しかし、図には示していないが秋吉台アメダス、豊北町境下ナシ園などの内陸地域でも高台地形に位置する観測点では、Fig. 2 に示した下関のような沿岸地域に位置する観測点と類似の傾向、あるいは独立性の強い局地冷却の特性を呈した。これは高台地形では冷却した空気が冷氣流として下方に流れ、冷氣の滞留が発生しないためと思われる。また、沿岸地域に位置する観測点のうち安下庄アメダスにおける 4 月 12 日前後の晴天期間では、下関と逆に局地冷却は負の傾向を示した。これは、山口県西端に位置する下関と東端に位置する安下庄では距離的に離れているため、天候状態の推移に時間的なずれが発生した恐れがある。すなわち、局地的な気象現象が必ずしも同一の天候条件下にあるとは限らず、周辺の地域からの影響度合いの違いなどが発生したものであると思われる。従って、局地冷却度の評価に際してはこうした気象条件・地理条件の差異も考慮する必要がある。

3.2 天候状態による局地的冷却の発現特性

晴天、雨天、曇のち晴の各天候条件下の夜間について、全観測点 23 地点の局地冷却度から算出した標準偏差の経時変化を Fig. 3 に示す。晴天条件下にあった 1997 年 4 月 12 日では、17 時の段階で標準偏差は 0 に近い値であったが夜半までに急激に増大し、その後増加傾向は緩やかになった。このように晴天夜間の場合は、日没前後の地域的な冷え込み方はほぼ一様であるが、日没後から夜半頃にかけて急激に冷却が発達する地域とそうでない地域とに分かれることを示す。また、図には示していないが局地冷却度の経時変化でも同様の結果が得られた。従って、局地的な冷却に関して、夜半過ぎから朝方にかけては、よく冷え込む地域とそうでない地域との変化の地域間差違は少ないと考えられる。気温は朝方に最低と

Fig. 2. Diurnal variation of $LC(i, j)$ at Simonoseki weather station, Kyoei pear farm and Ota persimmon farm at 2300 in April 1997.

Fig. 3. Time variation of standard deviation of $LC(i, j)$ under different weather conditions at night in April 1997.

なることから夜半過ぎからは、全域で冷却の発達徐徐に進み気温が低下していくものと考えられる。従って、23 時の段階で局地的な冷却度合いを評価することで、ある地域の夜間冷却の地域的な分布傾向をある程度把握することが可能であり、この結果は霜害予察に役立つ農業気象情報となりうると考えられる。

一方、雨天であった 1997 年 4 月 2 日では、17 時の段階で標準偏差は比較的大きく、夜半過ぎからわずかに減少するように転じた。しかし、雨天日では晴天日と比較して朝方の気温は高い傾向にある。すなわち、雨天日は一日を通じて局地的な冷え込みの地域的な差は比較的大きく地域間のばらつきが大きい、局地的な冷却の進行は時間と共にあまり変化しないものと考えられる。

また、曇天から天候が回復した 1997 年 4 月 22 日では全体的に標準偏差が小さく、局地的な冷却の地域的な差違や局地冷却の進行の程度は他の天候条件下よりも小さかった。これは曇天日には放射冷却が発達せず地域間の冷却量にも大きな差がなかったためであると考えられる。

以上の結果より、局地冷却度は局地的な冷却現象の発現に対して、天候条件による地域的なあるいは時間的な程度の変化状況にある程度表現していると考えることができる。すなわち、この指標を用いて地域的な冷却度合いを評価し、さらに地理的・地形的条件との因果関係を明らかにすることができれば、霜害発生予察に役立てることも可能であると考えられる。

3.3 局地冷却の発現特性に基づいた気象区分類

局地冷却度は局地的な冷却現象の発現に関して、その時の天候条件による地域的なあるいは時間的な変化が含まれていることが明らかとなった。局地冷却度の計算に際しては、空間的な広がりを持ったある一定数の観測点を必要とする。これまでの局地冷却度の算出では山口県全域をひとまとめにして計算してきた。局地冷却度の定義では解析対象地域が同一の気象条件下にあることが望ましい。しかし、移動性高気圧による天候の推移などによって、例えば県西部地域と県東部地域とは天候条件が異なる場合も十分考えられる。従って、県全域にあるすべての気象観測点の観測値を用いて局地冷却度の計算を行った場合、算出された $LC(i,j)$ 値が地域の冷却度合いを十分に反映しなくなる恐れがある。そこで、各観測点における 1997 年 4 月 1 日から 4 月 30 日までの 23 時の局地冷却度についてクラスター分析を行い、各観測点を局地的な冷却の傾向について分類することを試みた。その結果、樹系図において類似性の高かったグループは、ほぼ距離的に近い観測点がまとまった形となり、第一のグループには県西部地域、日本海沿岸、秋吉台の 9

点の観測点が、第二のグループには県中央部の内陸地域および防府の 7 地点が、第三のグループには県東部地域の 7 地点の観測点が入った。この結果に基づいて分類した結果を Fig. 4 に示す。計算された局地冷却度に気象条件が含まれていると考えれば、こうした地域分類は一種の気象区分として考えることができる。局地冷却度の予測に際しては山口県全域を一括して算出した場合および、農地に設置した自動観測装置による気象観測点が数多くある、県の西半分地域の場合を加えた計 5 つの気象区について局地冷却度を再計算した。さらに、それぞれの気象区ごとに重回帰分析を行い局地冷却度推算式の算出を試みた。気象区の境界について厳密には、山岳の分布状況等により決定されるべきであると考えられるが、今回は便宜的に市町村境界線を用いた。そのため、樹系図において第一グループに入った秋吉台は中部地区に入っている。しかし、秋吉台は局地的冷却の傾向に関して独立性が強く、位置的にも中部地区に入れて支障はないと判断した。また、西半分地区の境界線は、防府、山口、萩を結んだ線としこの 3 点を含めることとした。AMeDAS は 1 km 以下の微細な地形条件の影響を受ける事の割合少ない平坦な立地条件を選んで設置されているとされる。局地的冷却の変化傾向から分類された 5 つの気象区に関して、AMeDAS と農地の気象観測点の割合を見ると、東部地区では AMeDAS6 地点に対して農地の観測点 1 地点、全域地区では AMeDAS15 地点に対して農地の観測点 8 地点となった。従って、これらの気象区については、局地冷却度推算式に AMeDAS 観測値の影響が大きくなると考えられる。すなわち、複雑な地形条件に立地する農地における局地的な冷却度合いを評価するという観点からは、他の気象区と比較して推定式の信頼性が低くなる可能性がある。しかし、西半分地区、西部・日本海地区、中部地区については、各気象区に含まれる観測点のうちおよそ半数が農地の気象観測点であり、微細な地形条件による局地的な冷却度合いを反映した局地冷却度推算式を算出することが可能であると考えられる。

3.4 局地冷却度の推算

2.4 に示した手順に従って、1997 年 4 月の晴天条件下における 23 時の局地冷却度推算式を、それぞれの気象区ごとに算出した。局地冷却度の計算に際しては、データ地点数 m のみをそれぞれの気象区ごとに変え、後は 2.2 に示した方法と同様に行った。ただし、天候条件のうち晴天日は、対象とする気象区の中に位置するアメダス局において、17 時の日照時間カウントの平均値が 0.8 以上の日を選んだ。各気象区において算出された局地冷却度推算式を Table 2 に、それぞれの推算式に採

Fig. 4. The classification of Yamaguchi Prefecture into meteorological sections.

Table 2 Formulas for estimation of $LC(i, j)$ at 2300 in April 1997.

The meteorological section and weather condition	Formula for estimation of $LC(i, j)$
The western part and the coast of Japan Sea under the clear condition	$Y = -8.554X_1 - 0.016X_2 + 1.606$ (5)
The central part under the clear condition case	$Y = -6.659X_1 - 0.145$ (6)
The central part under the considerable cooling condition case	$Y = -0.135X_1 - 7.951X_2 + 0.171$ (7)
The eastern part under the clear condition case	$Y = -13.618X_1 - 0.017X_2 + 1.685$ (8)
The western part under the clear condition case	$Y = -0.019X_1 - 0.021X_2 - 0.019X_3 + 2.297$ (9)
All regions in Yamaguchi Prefecture under the clear condition case	$Y = -13.686X_1 - 0.028X_2 + 2.740$ (10)

Table 3 Explanatory variations for formulas, adjusted R square and SE .

Formula No.	Topographic factor and mesh-expansion number			R^2	Standard Error
(5)	SW : 60	L2 : 15	—	0.88	0.169
(6)	SNW : 13	—	—	0.69	0.266
(7)	UD : 2	SNW : 13	—	0.94	0.222
(8)	SSW : 48	L2 : 26	—	0.92	0.102
(9)	B1 : 13	L2 : 51	DJ	0.79	0.318
(10)	SE : 55	L2 : 14	—	0.63	0.376

用された地形因子、自由度調整済み決定係数および予測の標準誤差を Table 3 に示す。自由度調整済み決定係数とは、重回帰式のあてはまりの程度を表す決定係数 R^2 が説明変数の数を増やした時に自動的に大きくなってしまふ欠点を修正したもので、次式のように定義される。

$$\hat{R}^2 = 1 - \frac{(N-1)S_E}{(N-p-1)S_y^2} \quad (11)$$

ここで、 $\hat{R}^2$: 自由度調整済み決定係数, N : データ数,

S_E : 残差による変動 (残差平方和), p : 説明変数の個数, S_y^2 : 全変動 (実測値における平均からの偏差平方和) である。また、予測の標準誤差とは、推定式における予測誤差の標準偏差のことである。

地形因子は式に対する影響の大きな因子から順に X_1 , X_2 , X_3 と並べた。それぞれの式について説明変数として採用された地形因子は、下表中に英文字記号で示し、地形因子の 50 m メッシュ拡張数は記号に続けて数字で示した。局地冷度推算式の推定精度は全域の場合に、自

由度調整済み決定係数が最も小さくなり標準誤差は最も大きくなった。広い地域における冷却度を同一気象条件下にあると評価した場合には、冷却に及ぼす地理的な影響に対する評価が相対的に大きくなると考えられる。従って、局地冷却度推定式に微細な地形条件に関係した冷却効果が十分反映されなくなり、局地的な冷却現象を十分に捉え切れなくなる可能性があると思われる。

一方、気象区を細かい地域に分類した場合は、西部・日本海岸地区および東部地区で比較的精度の良い予測式が得られた。しかし、中部地区においては、アメダス日照計のカウント値を用いて抽出した「晴天日」の場合には低い相関の式となった。そこで、アメダス気温値を用いて区分した場合について調べたところ、強度冷却日となった場合は精度の良い式が得られた。強度冷却日は中部地区において1997年4月1日から4月30日までで、4個所のアメダス観測点の17時から23時までの気温降下量の平均が最も大きかった4月25日と26日を選んだ。この2日間は4月の期間中最も冷え込みが進んだ条件下にあったと考えられ、アメダス観測点における平均気温降下量は -9.0°C 以上あった。山口県中部の内陸地域では、晴天条件にあっても他の局地的な気象条件(晴天にあっても雲ができるなど)が局地的な冷却現象の発現に影響を与えていると考えられるが、このような偶発的な天候条件の予測を考えれば、より精度の高い予測が可能となるものと考えられる。

次に、局地冷却度推算式に採用された地形因子について見ると、中部地区を除いて各気象区で陸度(2)が採用された。これは沿岸地域と内陸地域を含めて局地冷却度を評価する場合には、海がどの程度の面積を占めているかといった地理的な要因が影響してくるためと思われる。また、西半分地区を除いた各気象区で方位別勾配度が採用され、3つの気象区で最も影響度が大きい説明変数となった。方位別勾配度は観測点周辺がどの方向の斜面に面し、その勾配がどの程度であるかを表現する地形因子である。西部・日本海岸地区、中部地区、東部地区における、方位別勾配度と局地冷却度との自由度調整済み決定係数(R^2)の最高値を散布図にしたものを、Fig. 5に示す。まず、それぞれの気象区について、メッシュ拡張数を $R=1$ から $R=60$ と変化させ、東、西方向の方位別勾配度と局地冷却度との単回帰分析を行った。次に、回帰式の有意性について F 検定を行ったところ、多くの場合に有意な相関が得られた。従って、東西方向の傾斜は県全域に渡って局地的な冷却の発現に強く影響を及ぼしている因子と考えられる。

次に、観測点の地域区分を細かくした西部・日本海岸地区、中部地区、東部地区について、それぞれの気象区

ごとに晴天・夜間の条件下において、局地的な冷却に顕著に影響を及ぼしている方位について考察した。西部・日本海岸地区について、東、西勾配度と局地冷却度との単相関について勾配度の拡張数を $R=1$ から $R=60$ としたときの変化をFig. 6に示す。西部・日本海岸地区では東勾配度($R=54$)と局地冷却度との間に有意な負相関が得られた。また、西勾配度の場合には拡張数 $R=42$ から $R=60$ までの場合について、概ね有意な負相関が得られた。すなわち、観測点から比較的遠い距離(約2 km以上)にある地形が局地冷却の発達に大きく影響している。西部・日本海岸地区における局地冷却度推算式では西勾配度($R=60$)が採用された。すなわち、西部・日本海岸地区に含まれる観測点のうちで、晴天・夜間に特に冷え込み易い地域は、観測点から西方向の海岸との間を山岳に遮蔽された谷地形であり、さらに海岸から比較的離れた地域に位置する観測点が、沿岸地域に位

Fig. 5. The radial chart of R^2 , is calculated from simple correlation of Slope degree in a certain direction and $LC(i, j)$ under clear conditions at 2300 in April 1997.

Fig. 6. Coefficient of correlation corresponding to variation of 50m-mesh-expansion number in the case of Slope degree. This case is for the western part and the coast of the Japan Sea under clear conditions at 2300 in April 1997.

置する観測点よりも冷却度合いが大きくなると言える。

中部地区の場合について、東、西、北西、北方向の勾配度と局地冷却度との単相関について、方位別勾配度の拡張数を $R=1$ から $R=60$ としたときの変化を Fig. 7 に示す。中部地区における局地冷却度推算式では、北西勾配度が特に重要な地形因子として採用された。また、方位別勾配度と局地冷却度との関係では拡張数 $R=10\sim20$ について有意な相関が多く得られた。すなわち、中部地区では観測点から比較的近い距離（約 500 m～1 km）にある地形が局地冷却の発達に大きな影響を及ぼしていると考えられる。また、西、北西、北勾配度と局地冷却度との関係については負相関が得られたが、東勾配度と局地冷却度との関係の場合は $R=16\sim19$ で正相関が、 $R=53\sim56$ では負相関が得られた。さらに、北東勾配度の場合についても $R=37\sim45$ で有意な負相関が得られた。従って、中部地区において晴天条件下で夜間に特に冷え込む地形条件は、西から北方向を山岳に遮蔽された盆地地形（谷地形）であり、とりわけ南東斜面側が最も局地的な冷却が発達しやすいと考えられる。

東部地区の場合について、東、南西方向の勾配度と局地冷却度との単相関について方位別勾配度の拡張数を $R=1$ から $R=60$ としたときの変化を Fig. 8 に示す。東部地区における方位別勾配度と局地冷却度との関係については、東勾配度の場合では拡張数 $R=30$ から $R=55$ で数多く有意な負相関が得られ、さらに南西勾配度の場合にも拡張数 $R=46\sim60$ で特に高い負相関が得られた。従って、東部地区において晴天条件下で夜間に特に局地冷却が発達しやすい地形条件は、南西方向を山岳に遮蔽された谷地形である。また、東部地区は瀬戸内海沿岸に位置する観測点を多数含むが、西部・日本海岸地区と同様に海岸から比較的離れた地域に位置する観測点

Fig. 7. Coefficient of correlation corresponding to variation of 50m-mesh-expansion number in the case of Slope degree. This case represents the center part under clear conditions at 2300 in April 1997.

Fig. 8. Coefficient of correlation corresponding to variation of 50m-mesh-expansion number in the case of Slope degree. This case represents the eastern part under clear conditions at 2300 in April 1997.

の方が、沿岸地域に位置する観測点よりも冷却度合いが大きくなると言える。

5つの気象区のうち西半分地区を除く気象区において、方位別勾配度が局地冷却度推算式の第一説明変数となった。すなわち、方位別勾配度は内陸地域の局地的な冷却の発現とより密接に関係していることになる。これは内陸地域における晴天条件下で夜間における局地的な冷却の発現は、放射冷却に伴って生じた気塊と地形条件によって形成された冷氣湖の発達によるところが大きく、さらに一般風（季節風）が山岳により遮蔽される地形条件の方が冷氣湖の発達に適しているためと考えられる。また、地域によって局地冷却に最も寄与する勾配度の方位が異なるのは、一般風が主に吹走してくる方向や海に面した方位が地域によって異なるためであると思われる。すなわち、県西部、日本海岸、県中部の内陸地域では西ないし北西方向から季節風が流入し易いが、県東部地域は西方を山岳地帯の陸地に阻まれているため、西方の山岳地帯を迂回した季節風が周防灘に大きく開けた南西方向より流入し易くなるためと考えられる。

3.5 局地冷却度推定式の推定精度

本研究で得られた局地冷却度推定式を用いて、営農現場における局地的な冷却度合いを評価した場合に、実際の冷却度合いとどの程度の差があるのかを考察する。阿東町長門峡ナシ園内に設置した2個所の気象観測点における気温の実測値をもとに局地冷却度を算出した。阿東町長門峡は山口県の中央部から東よりに位置し、中国山地の西端部にあたる。長門峡ナシ園が位置するところは標高が約 260 m 前後で周辺を山地に囲まれた谷地形の一部にあり、農園内に小規模な丘陵や窪地がある非常に複雑な地形条件を有する。長門峡上部の気象観測点は山麓の緩やかな斜面上にあるナシ園内の比較的平坦な所

に設置されている。また、長門峡下部の気象観測点は上部から約 100 m 程離れた小規模な窪地の底に設置されている。長門峡は気象区分において中部地区に位置するので、局地冷却度の算出は、中部地区と全域地区の 2 つの場合について行い、計算には 1997 年 4 月 9 日から 4 月 30 日までの観測値を用いて $n=22$ として計算した。また、長門峡ナシ園内において自動観測装置が位置する 50 m メッシュの地形因子から、式 (6)、式 (7)、式 (10) を用いて局地冷却度推定値を得た。阿東町長門峡ナシ園における局地冷却度推定値と実測値を Table 4 に示す。長門峡上部、長門峡下部における全域地区、中部地区の晴天日、強度冷却日のいずれの場合も、推定誤差はそれぞれの局地冷却度推定式の標準誤差と比較して妥当な値であった。従って、本研究で提案した手法を用いて微細な地形条件により局地的に発生する冷却現象について、定量的な評価を行うことができる可能性があることが示された。

本研究で得られた局地冷却度推算式は、1997 年度の気象観測データをもとに算出されており、気温の年次間差違や異常気象等が局地的な冷却現象に及ぼす影響について考慮されていない。また、本研究においては解析に用いる気象観測データの不足が最大の難点であった。今後、気象観測データを増やすと共に、気象条件の年変動や天候分類、また、GIS 等を用いた水域、植生等の地形因子導入等の改善を施せば、局地的な冷却現象をより精度良く評価できると考える。

3.6 局地冷却度評価マップ

山口県中部地区の美東町周辺における局地冷却度の評価値をマップ化したものを Fig. 9 に示す。山口県美東町は県のほぼ中央部に位置し西条カキの生産を行っている。Fig. 9 に示した美東町周辺の地域は、国土地理院発行の 2 万 5 千分の 1 地形図「秋吉台」に記される約 10 km 四方の地域であり、メッシュコード 513122 の 2 次メッシュ地域となる。図中、下段は 50 m 数値地図より

描いた地形図、中段は局地冷却度推算式 (6) を用いて算出した局地冷却度評価値のマップ、上段は局地冷却度推算式 (7) を用いた局地冷却度評価値のマップである。局地冷却度マップでは局地冷却度の推定値が負の大きな値となった場所、すなわち晴天・夜間条件下において局地的な冷却現象の発達が顕著になる場所程、濃い青色で示されている。逆に、局地的な冷却現象があまり発達しない場所は緑色から黄色で示した。その結果、式 (6) を用いた場合には冷却度マップ上隅に濃い青色で表されたように、地図北東の谷部を中心とした地域において強い冷却域が検出された。また、地図上西側に位置する台地地形や中央の平野部においても、局所的に青色に示された場所が現われ局地的な冷却域が検出された。これは美東町周辺が秋吉台のカルスト台地上にあり、石灰岩地形特有のドリーネなどによる様々な規模の窪地や盆地が存在するためと思われる。このような独特の地形を有する場所は、冷気が滞留し易いところであり、冷却に関して独自の局地気象の特徴を有するためと考えられる。また、式 (7) を用いた場合の局地冷却度マップでも式 (6) を用いた場合と同様に、地図上の北東地域における谷部に顕著な冷却域が検出された。しかし、式 (6) を用いた場合と比較してほぼ全域について冷却度が負の大きな値となり、顕著な冷却域は谷筋に沿って細長く広がっている。これは冷却が発達する日には全域的に冷却度合いが普段より進行し、谷部では冷氣湖が形成されるためと考えられる。この強い冷却域が検出された地図上北東に位置する地域は、美東町岩波地区付近である。美東町岩波地区は谷地形にカキ園が存在する場所で、局地的な冷却現象の発達による霜害発生が問題となっており、一部の農家ではスプリンクラーなどを設置して霜害対策にあたっている。従って、本研究で提案した局地冷却度の評価法を用いて、霜害発生の危険性の大きい場所をある程度予見することができたと考える。

このように霜害発生危険時において、局地冷却度推定

Table 4 Estimated and observational localized cooling index for Chomonkyo pear farm at 2300 in April 1997.

	Estimated value (°C)	Observational value (°C)	Error (°C)
All regions in Yamaguchi Prefecture under the clear condition case			
The upper place in Chomonkyo pear farm	-0.72	-0.89	-0.17
The lower place in Chomonkyo pear farm	-0.92	-0.85	0.06
The central part under the clear condition case			
The upper place in Chomonkyo pear farm	-0.75	-0.83	-0.08
The lower place in Chomonkyo pear farm	-0.80	-0.80	0.00
The central part under the considerable cooling condition case			
The upper place in Chomonkyo pear farm	-1.26	-1.15	0.12
The lower place in Chomonkyo pear farm	-1.11	-1.07	0.04

Fig. 9. Localized Cooling and topographical maps in Mitou Town and vicinity under clear conditions.

式を用いて局地冷却度を、50 m メッシュというきめ細かい単位で広域的に評価できることが分かった。すなわち、本研究で考案した手法を用いて地域の局地的な冷却度合いを評価することが出来れば、営農現場に対して適地判定や霜害発生予察の際に有用な判断材料となりうる情報提供が可能と考えられる。また、山口県が運営している標準メッシュ単位のメッシュ気温値（毎正時気温）について、晩霜害の危険期である春季・夜間の営農現場における気温実測値との誤差を筆者らが調べたところ、晴天条件下に内陸地域を中心とした営農現場の測定値がメッシュ気温値を大きく下回る事例が多く見られた (Takayama *et al.*, 1998)。これははじめに述べたよう

に 1 km（標準）メッシュが実際の地形条件を十分に捉えていないため、微細な地形条件による冷却現象を評価していないためである。すなわち、標準メッシュ単位で展開された気温値が、約 1 km 四方の平均的な気温を表しているため、局地的な冷却現象が顕著に発達した条件下では、複雑な地形条件にある営農現場において実際の冷え込みとメッシュ気温値との誤差が大きくなると考えられる。従って、微細な地形条件による冷却効果によって営農現場がどの程度冷え込むかを定量的に評価できれば、1 km メッシュ単位の気温値から 50 m メッシュ単位の気温値への変換が可能となる。実際、山口県内陸の美東町、秋芳町などの果樹園において、局地冷却度とメッ

シュ推定偏差（農地の気温実測値－1 km メッシュ気温値）との間に、強い相関がある地点が存在することを確認している（Takayama *et al.*, 1998）。今回算出した局地冷却度は局地的な冷却現象を、50 m メッシュ単位で定量的にある程度評価可能であることを示す結果となった。従って、本研究で提案した局地冷却度推定の手法を用いることにより、標準メッシュ単位の気象値から 50 m メッシュ単位といったより細かい地域区画での気温の推定が可能となり、営農現場に役立つ農業気象情報を提供できる可能性が示された。

4. ま と め

山口県において霜害発生予察を目的として、県内 8 箇所の果樹園、茶園に設置した気象観測機器および県内 15 地点の AMeDAS 観測局における夜間気温より局地冷却度を算出し、天候・時刻・地域による局地的な冷却現象の発現および分布特性を調べた。さらに、国土数値情報の 50 m メッシュの標高値をもとに各観測点の地形因子を求め、50 m メッシュ地形因子と局地冷却度との関係より、局地的な冷却の度合いと発生要因について考察した。その結果、以下のような知見が得られた。

- (1) 夜間における局地的な冷却は、天候条件により地域分布の特性が異なり、晴天日には内陸地域における盆地地形を有する地域が普段の冷え方よりも冷え込む。また、雨天日には全域的に晴天日と比較して、局地的な冷却は発達しにくい。内陸地域より沿岸地域の方が冷え込む度合いが大きい。
- (2) 晴天日は局地的な冷却度合いの地域的な差が顕著であり、雨天日、曇天日の順に差は小さくなる。
- (3) 晴天条件下では日没後から夜半にかけて、局地的な冷却が顕著に発達する地域とそうでない地域との傾向が明瞭となり、夜半過ぎから朝方にかけてはあまり変化しない。従って、23 時の段階で局地冷却度を評価し、これを用いて夜間の低温を予測すれば、霜害発生予察に役立つ情報の提供が可能となるものと考えられる。
- (4) 局地的な冷却現象の発達に影響を及ぼす地形条件は地域によって異なった。内陸地域では観測点が複雑地形上にある場合や北西方向に山岳がある場所などが冷え込み易く、県西部地域では西方向、県東部地域では南西方向に山岳があるような場所が冷え込み易かった。すなわち、一般風（季節風）を遮断するような地形を有する

山地の、風下側の地域が冷え込み易いと考えられる。

- (5) 地形因子を説明変数にした重回帰モデルを用いて、4 月の晴天条件下における 23 時の平均局地冷却度を推定した。その結果、 $R^2=0.63$ から $R^2=0.94$ までの式が得られ、50 m メッシュ地形因子を用いて局地的な冷却現象を定量的に評価できる可能性が示された。

なお、予測値の再現性、より詳細な天候条件の評価、天候の年変動などについては、改善の余地があり今後の課題としたい。

引用文献

- Ohara, G. and Ueyama, H., 1998: Produce by way of experiment for local 50m-mesh temperatures map. In Proceedings of the 98th Meeting of the Society of Agricultural Meteorology of Japan. The Society of Agricultural Meteorology of Japan, Tokyo, pp. 104-105（大原源二・植山秀紀, 1998: 局地的 50 m メッシュ気温分布図の試作. 日本農業気象学会 1998 年度全国大会講演要旨, 日本農業気象学会, 104-105）.
- Seino, H., 1993: An estimation of distribution of meteorological elements using GIS and AMeDAS data. *J. Agric. Meteorol.*, **48**, 379-383.
- Sumino, M., 1961: On the estimation of minimum air temperature in Miyagi Prefecture. *TENKI*, **8**, 226-230.
- Suzuki, Y., Sato, S. and Kawajiri, K., 1982: Frost damage and cold damage related to topographic climates in the warm region of Japan. (1) Distribution of minimum air temperatures on the slopes of Ube-Ono tea garden, Yamaguchi. *J. Agric. Meteorol.*, **37**, 289-295.
- Takayama, N., Hayakawa, S. and Kawamura, H., 1998: Research of mesh-temperature during the night in Yamaguchi Prefecture. In Proceedings of the 98th Meeting of the Society of Agricultural Meteorology of Japan. The Society of Agricultural Meteorology of Japan, Tokyo, pp. 106-107（高山成・早川誠而・河村宏明, 1998: 山口県における夜間気温のメッシュ値について. 日本農業気象学会 1998 年度全国大会講演要旨, 日本農業気象学会, 104-105）.
- Yamada, K., 1993: Situation of meteorological data and its intelligence system.—On summarizes of questionnaires to the prefectures.— *Agricultural Information Research*, **2**, 1-15.
- Yamada, K., 1995: Short-term air temperature on a regional scale and its estimation with a nocturnal cooling model. *J. Agric. Meteorol.*, **51**, 345-354.