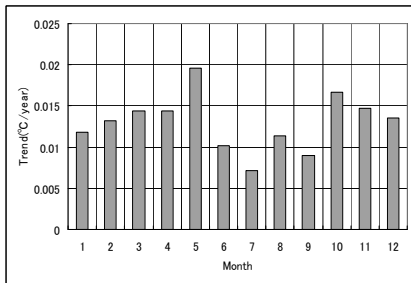


霜害予測*

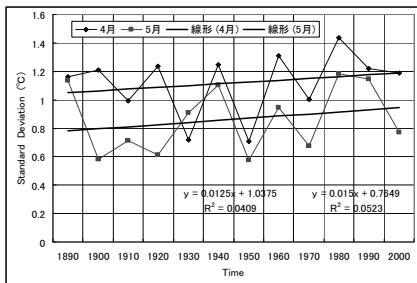
福島大学理工学群 渡邊 明

1. はじめに

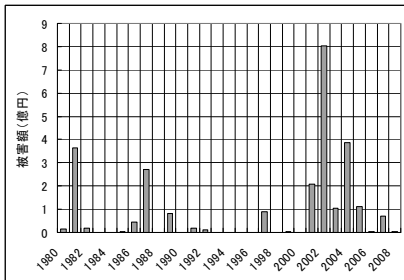
全球的な平均気温は、確かに上昇しているものの、局所的には大きな気温変動が生じており、その変動に伴う気象災害が近年頻発している。福島市内に位置する福島気象台では1890年から今日まで観測が継続されており、その経年変動では1.35℃/100年の割合で気温が上昇している。しかし、これらのデータを月別にみると一様に気温が上昇しているのではなく、第1図に示す通り月ごとに大きな違いを示している。中でも最も気温上昇が大きいのは5月で1.92℃/100年の割合で上昇しているのに対して、最も小さいのは7月で0.72℃/100年と月ごとに2.7



第1図 福島気象台における月別気温上昇率の年変動



第2図 福島気象台における4月と5月の最低気温の10年毎の標準偏差の変動



第3図 福島県の霜害による被害額の推移

倍も気温上昇量に差があることがわかる。とりわけ春期と秋期の気温上昇の割合が大きいことが東北地方全体の特徴である。こうした中、東北地域の果樹栽培地域では発芽や開花が早期化している。藤沢、小林和彦(2007)は福島と青森のりんごの発芽日や開花日の経年変動を調査し、福島では発芽が2.3日/10年、開花が2.7日/10年の割合で早期化していることを指摘している。

平均的な気温上昇は、発芽や開花を早期化しても春季の最低気温の変動は必ずしも安定して上昇しているわけではない。第2図に4月と5月の10年毎の最低気温の標準偏差の変動を示す。年々変動では4月、5月とも標準偏差が年々増加している。特に4月の最低気温の標準偏差が大きく、平均的に気温上昇しながらも寒暖の差が大きくなっていることを示している。こうした結果、第3図に示すとおり、福島県では晩霜害が発現し、多くの被害が発生している。特に2000年以降顕在化している。

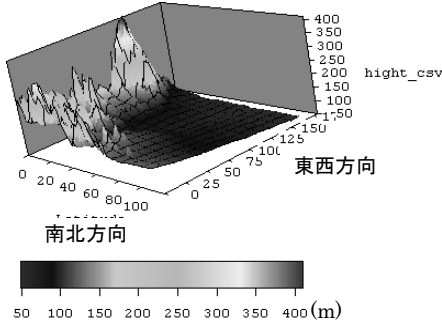
こうした晩霜害の災害低減を図るために、現在霜害発生予測時には燻煙作業が行われているが、そのための気温の監視と予測が必要になっている。しかも、栽培種によって氷点が異なると同時に、同じ種類であっても生育段階で氷点が異なり、例えば、りんごのふじでは、発芽時-1.6℃、展葉初期-1.4℃、花蕾露出期-1.4℃、花蕾着色期-1.3℃となっており、霜害を受けない安全限界温度(工藤ら, 1983)は、展葉開始期-3.5℃、花蕾露出開始期-1.5℃、花蕾着色期-1.0℃、開花期-1.5℃、幼果期-1.5℃と0.5℃の精度で一定の面積の気温監視と予測が必要になっている。ここで

* A prediction of frost damage
by Akira Watanabe

は当面 10kmX10km を範囲とし、地表高度 1.5m の気温を 0.5℃の精度で求めることを目標とし、霜害低減のための気温監視と予測について試みたのでその結果について報告する。

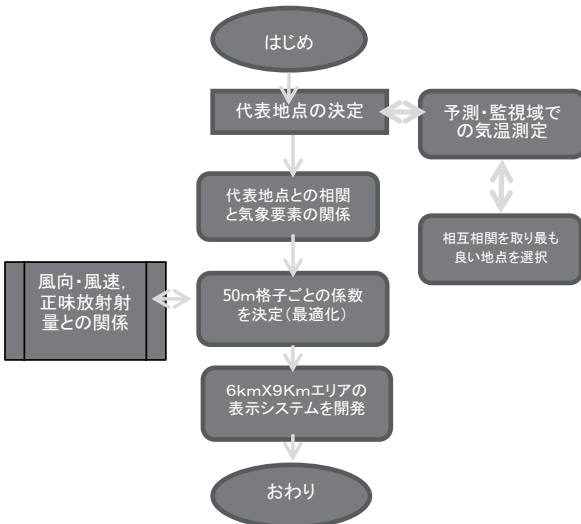
2. 気温監視システムの開発

今回対象とした領域の地形を第 4 図に示す。海拔 50m から 400m までの高度差があり、摺上川の扇状地を中心としたモモ、リンゴを中心とした果樹園地帯である。



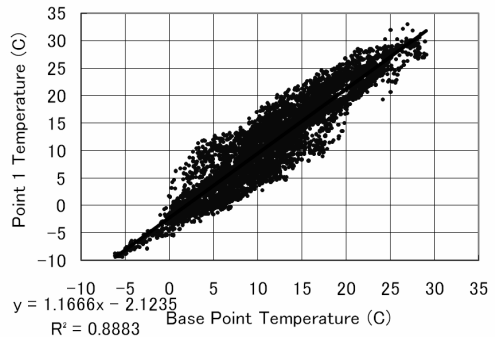
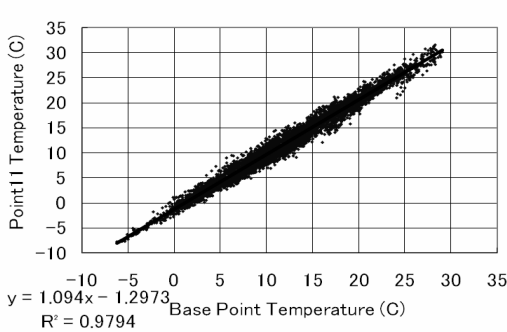
第 4 図北福島管内果樹園地帯の地形

気温監視には地形特性に応じて気温観測網を設置し、常時観測をすることが必要で、技術的にも容易であるが、設置、管理費用がかかるため、1 地点の監視で、この領域全体の監視ができるように工夫した。第 5 図にその手法の flowchart を示す。特徴的な地点に検定を行ったデータログを 18 地点設置し、相互相関を求めることによって、最も各地点間との相関がよい地点を代表地点として設定し、その地点にリアルタイムでデータ転送可能な気温・湿度測定装置 (KADE21) を設置し、その基準点の気温と各地点の気温との関係を Map factor として 50mX50m の分解能で求めることによって、一定の誤差で気温監視ができるようにした。

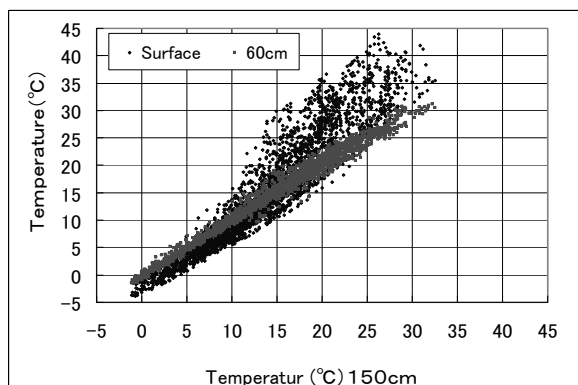


第 5 図 気温の 2 次元監視システム開発手法

第 6 図は 2009 年 3 月 10 日から 5 月 10 日までの代表地点と各観測地点との相関をとり、最もよかった地点 11 と、最も悪かった地点 1 との相関を示したものである。地点 11 との相関係数は 0.99、最も悪い地点との相関でも 0.94 とよい相関があるものの、最も相関の悪い地点では ±5℃ 程度の差異がある。しかし、最低気温付近では ±1℃ 程度の誤差になっており、最少二乗法による直線回帰定数と回帰係数を Map factor として領域内を内挿し、さらに、その Map factor

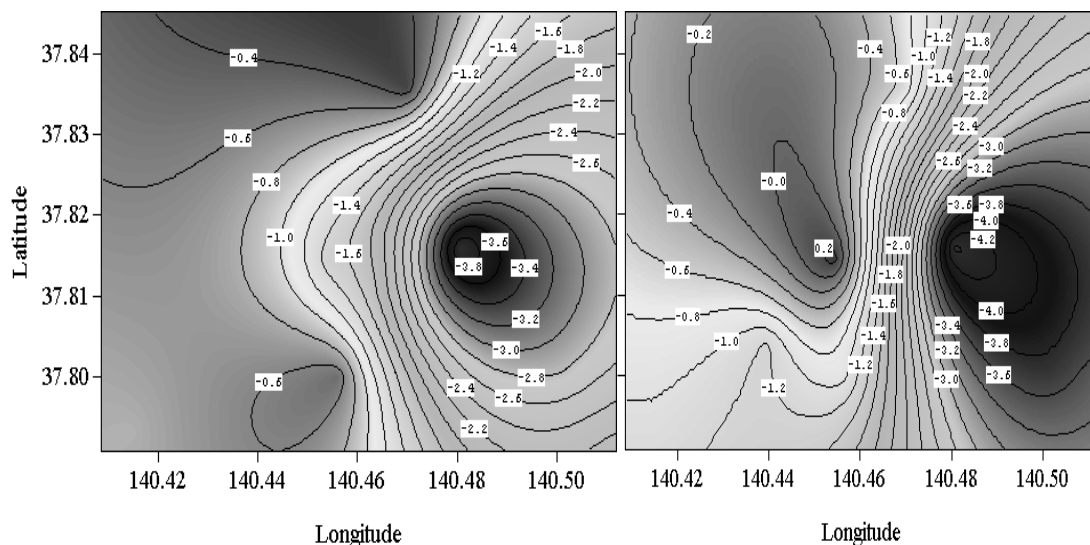


第 6 図 代表地点と地点 11(最も相関の良い地点、左図)と地点 1(最も相関の悪い地点、右図)の相関図



第7図 高度 1.5m の気温と地表温度、60cm の温度との関係
 の温度は、ほぼ±2℃程度の誤差で、直線性を示し、気温が5℃以上でやや高く、5℃以下でやや低い傾向を示している。しかし0℃付近で-0.04℃程度の誤差と小さい。一方、地表温度では、1.5m の気温に対して10℃を境に、それより高温で地表の温度が高く、それより低温で地表の温度が低くなっている。0℃付近では1.5m の高度の気温に対して平均-4.3℃程度低くなっている。最低気温を対象とする場合、いずれにせよ下層ほど低温で、1.5m の高度に近くなる程直線性が得られ、空間代表性も広くなると考えられる。しかし、実際に燻煙作業等の実施の可否については、従来どおりこうした気温監視データを見ながら生産者が直接判断する必要がある。

第8図に気温監視システムの結果の1例として、2009年4月6日の6時の気温分布を示す。やや高



第8図 2009年4月6日6時の観測値の客観解析(左図)と1地点の気温監視システムによる気温分布(右図) 単位は℃
 温の極値の出現域がずれており、そこで2℃程度の誤差が生じているものの、低温域の出現域はきちんと表現されている。極値も0.4℃程度の誤差で表現されており、ほぼ使用に耐える気温監視システムである。

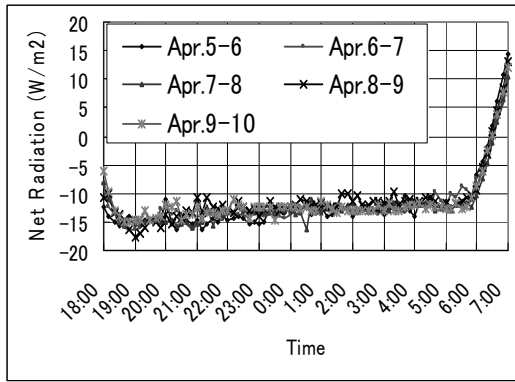
3. 最低気温の出現特性

最低気温予測は、従来熱収支法(近藤, 1982)によって行われてきたが、局地的な雲の発生などにより、最低気温予測値が大きく異なり、3次元数値モデルを用いて雲の発生予測も踏まえて予測する

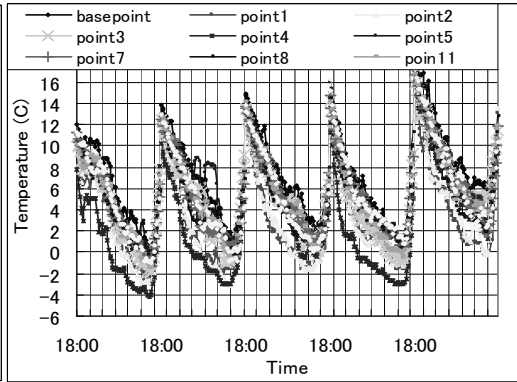
を高度などの地形特性を考慮しながらチューニングした。その結果、おおよそ±0.5℃の精度でリアルタイムに2次元表示できるシステムを開発した。なお、栽培種によって対象となる高度が異なり、特に霜害発生時の大気成層は安定な場合が多く、高度が低いほど低温になっている。第7図は2009年4月4日から5月10日までの高度1.5mの気温に対する地表温度と高度60cmの温度の関係を示したものである。高度1.5mの気温に対して高度60cm

ことが求められている。しかし、こうした雲の発生を予測するためには適切な初期値や境界条件が不可欠である。10km程度の水平スケールでは、1m/secの風速でも3時間予測すると、大気の種類が領域外になってしまい、ネスティングなどの手法をとり3時間ごとに気象庁予測のグリッドデータ(GPV)を境界条件として活用することなどが必要になる。しかし、GPVは必ずしも最低気温などを適切に予測する境界条件になっていない。

第9図は2009年4月5日から10日までの18時から翌7時までの夜間の10分ごとの正味放射収支量の変化を示したものである。この間、4月5日に気圧の谷が通過したものの、降水現象がなく、前線も本州南岸を通過し、7日、8日は移動性高気圧に覆われ、穏やかな日が続いた。このような総観

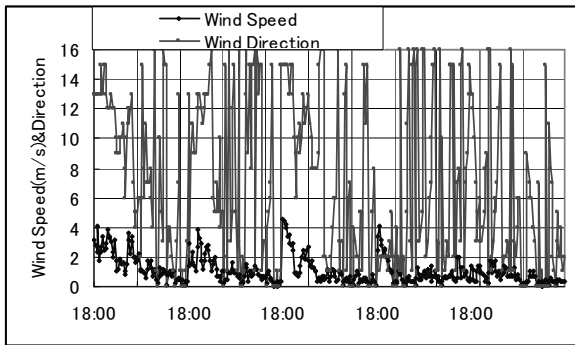


第9図 2009年4月5日から10日までの夜間の正味放射収支量の変化



第10図 2009年4月5日から10日までの夜間の気温変動

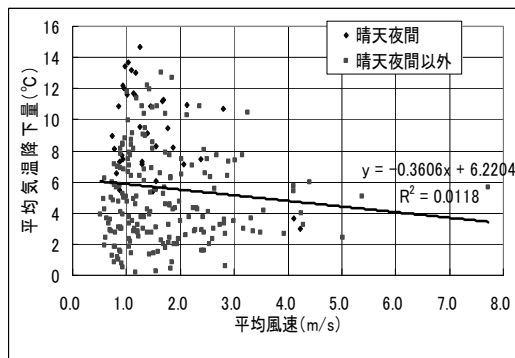
場の変化の中で、対象地域では第10図に示すような夜間の気温変動が観測された。対象領域内の最低気温は6日から10日かけて上昇しているものの、6日朝から10日朝まで零下を示す観測地点が出現し、果樹に霜害が発生した。また、第11図に同時期の風向・風速変動を示す。



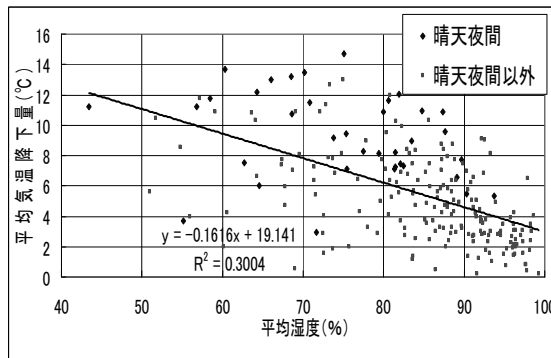
第11図 2009年4月5日から10日までの夜間の風向・風速変動

無視して、放射冷却量のみで地表付近の気温が下降することを示している。しかし、領域内で観測した夜間(18時から翌7時まで)の平均風速と11地点の平均気温降下量は第12図に示すとおり3m/sec以上の風速で夜間冷却量は約4℃と一定値を示す様子が示されているが、むしろ2m/sec以下の弱風領域では0℃から14℃までの大きな降下量の差異を示している。特に、晴天日(福島気象台の目視観測で雲量2以下)と晴天夜間以外とを比較すると、晴天夜間では6℃から14℃と比較的大きい降下量でまとまっているが、晴天以外の夜間気温降下量は非常に幅があることがわかる。さらに、第13図に対象領域の平均気温降下量と湿度との関係を示した。湿度が90%以上になると平均気温降下量は4℃

は移流量や風速 shear による鉛直混合を



第 12 図平均気温降下量と平均風速との関係



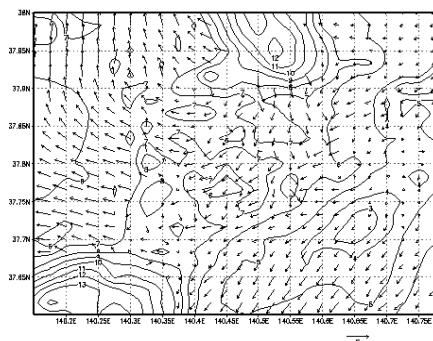
第 13 図平均気温降下量と平均湿度の関係

以下になるものの、90%以下の領域では晴天夜間，その他の夜間とも非常に変動幅が大きい。また，平均気温降下量が12℃程度の領域では，湿度が40%から80%ぐらいの幅で出現している。しかし，こうした変動がありながらも第10図の気温変動をみると，比較的一様な傾斜をもって下降していることがわかる。

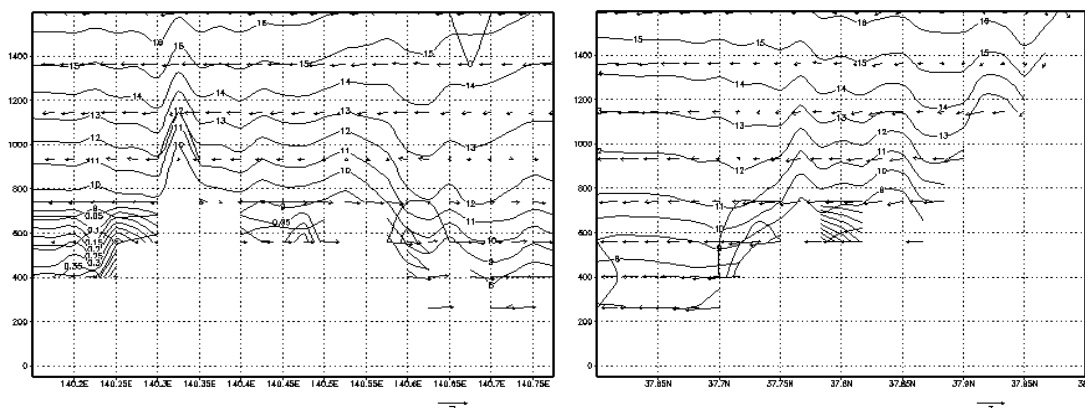
4. 最低気温予測

最低気温予測については，雲の出現による放射冷却効果が大きいため，3次元数値モデルを用いた予測が必要である。ここでは雲解像度が最もよいとされている Tsuboki and Sakakibara (2007)の開

発した CReSS (Cloud Resolving Storm Simulator) を用いて予測を行った。第14図は4月6日6時の地上気温と風向風速分布を示したものである。初期値は仙台管区気象台の高層観測がなくなったため輪島の5日21時の高層観測値を用いて9時間積分した結果である。数値実験の結果は，雲水量の存在は小さく，雲の出現がないことを予測している。しかし，地上1.5mの気温は6℃程度と，観測値が-3.8℃を記録したこととの差が大きい。第15図は同時刻の温位(°C)と風の東西-鉛直，南北-鉛直成分を



第 14 図数値モデルによる地上気温，風向・風速の分布



第 15 図数値実験による N37.8° における東西断面(ベクトルは風の東西-鉛直成分)と E140.5° における南北断面(ベクトルは風の南北-鉛直成分)

示したものである。気温分布では明確に等温位線が高度 1000m 付近から 400m 付近まで連続しており、地形に沿って下降していることが分かる。断熱変化では低地の低温は説明することは困難で、この数値モデルでは地表面温度を表現する放射過程が不十分であることを示している。

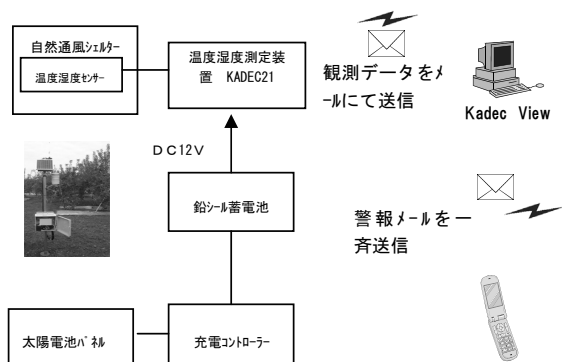
そこで、当面実用 model として、

$$\frac{\partial T}{\partial t} \cong \frac{T_{i+1} - T_i}{t_{i+1} - t_i}, \quad T_m = T_0 + \frac{\partial T}{\partial t} (t_m - t_0)$$

で計算を行い、予測を行った。ここで気温傾度 $\frac{\partial T}{\partial t}$ は、前 1 時間の気温観測から最小二乗法によって計算し、最低気温 T_m は予測を始める時刻 t_0 の気温 T_0 から日の出の時刻 t_m の気温として計算した。計算した気温を基準地点の温度として設定し、気温監視システムと同様な Map factor を用いて 2 次元的に果樹園地帯の最低気温を予測した。しかし、現在 3°C 程度の誤差が生じており、さらに調整が必要になっている。

5. まとめ

2008 年 3 月から 2009 年 5 月まで気象観測を果樹園地帯の多点で実施し、基準地点を設置するとともに、基準地点に対する気温変動状況を Map factor としてチューニングすることによって基準地点の観測のみで約 10kmX10km の範囲のリアルタイムでの気温監視システムを作り上げた。第 16 図にそのシステムの概要を示す。しかし、目標とする 0.5°C の精度にするには、誤差の大きい地点の観測を充実させながら精度向上を図る



第 16 図 気温監視予測システムの概要

ことが必要である。また、最低気温予測については、現在試行段階でチューニングが必要である。特に、気温傾度の求め方として、どの程度の時間を取ることが適切なのか、どの時間帯の気温傾度が最低気温を求めるのに適切なのかを検討する必要がある。また、局所的な数値モデルでは最低気温予測に重要な雲の出現が確実に予測できても、放射過程がまだ不十分で、観測に基づき parameterization の再検討が必要である。さらに、初期値問題や数値モデルを稼働さ

せるのに必要な計算機等の整備も重要であることから、簡易的な予測システムを開発した。今後、これらのシステムを適正化して、実用できるレベルまで精度向上を図る予定である。

この研究は 2008 年度、2009 年度の農業・食品産業技術総合研究機構委託研究「高精度最低気温予測手法および晩霜害発生予測モデルの開発」によって実施されたものである。

引用文献

藤沢茉莉子, 小林和彦, 2007: 日本におけるリンゴの発育早期化にみられる温暖化の影響, 農業気象, Vol. 63, No.4, 185-191.

工藤和典, 西山保直, 久保田貞三, 1983: リンゴの晩霜害に関する研究 (1), リンゴ花器, 幼果の晩霜害発生限界温度, 農林水産省果樹試験場果樹試験報告 C10, 23-33.

近藤純正, 1982: 複雑地形における夜間冷却, 天気, Vol.29, 935-949.

森洋介, 近藤純正, 庄司邦彦, 佐藤威, 安田延壽, 荻野谷成徳, 三浦章, 山沢弘実, 川中敦子, 高平進, 阿部愛美, 1983: 山地の夜間冷却と熱収支, 天気, Vol.30, 259-267.

森洋介, 近藤純正, 1984: 冷気の堆積. 流出を考慮した山地の夜間冷却, 天気, Vol.31, 45-52.

Tsuboki.K. and A. Sakakibara:2007:Numerical prediction of high-impact weather system, 1-273.