

夜間冷却量と気象要素の日々の関係とその季節性について

—気象観測データを用いた検証—

紺野 祥平*1・大久保 さゆり*2・菅野 洋光*3

要 旨

農研機構東北農業研究センター（岩手県盛岡市下厨川）内にある気象観測露場における過去5年間（2009年～2013年）の気象データを用いて、夜間冷却量（ T_{noc} ）と気象要素の日々の関係およびその季節性について検証を行った。積算正味放射量（ R_{net} ）、積算弱風時間（ Wd_{ot} ）、積雪深（ SD ）の各気象要素を説明変数として、 T_{noc} について重回帰分析を行ったところ、 T_{noc} に対し、主に R_{net} と Wd_{ot} が寄与していることがわかった。 T_{noc} と R_{net} の日々の関係を、各月について Wd_{ot} の階級別にみたところ、夜間を通して風の弱い日に限らず、一晩の間に弱風が少なくとも数時間継続した場合には、地表面の放射冷却によって著しい気温低下がもたらされることが示唆された。また、 Wd_{ot} に対する T_{noc} と R_{net} の相関係数の違いには季節性がみられ、その要因についても考察を行った。

1. はじめに

地上付近における日々の夜間冷却量と気象要素の関係およびその季節性を把握することは、凍霜害や寒害対策の点で重要である。夜間冷却量の大きさは、地上における放射収支や風の強弱、地表面状態などに影響されることが知られている（近藤 2000）。しかし、気温や風に加え、放射量を長期にわたり実測している観測露場は少ない。放射量のデータの扱いに関して、夜間冷却に対する気象要素の影響を検証したこれまでの研究をみると、放射冷却が強まった晴天夜間の数日間に限り実測した研究（例えば桑ほか 1997；Maki *et al.* 1986）や、実測値の代わりに推定値（地上気象データおよび対象地近隣の高層気象データから計算）を用いた研究（例えば近藤・森 1982；飯島・篠田

2004）は多い。一方、放射量の長期にわたる実測データを用いた研究は、筑波大学水理実験センター報告（寄崎ほか 1982；鳥谷・吉野 1985, 1986；Toritani 1989）など、一部の報告に限られる。寄崎ほか（1982）では、逆転強度と正味放射量の日々の関係を夜間平均風速の階級別に検証したが、対象期間が寒候期のみであり、季節性については触れられていない。鳥谷・吉野（1985, 1986）では、気温低下量および気温低下率と夜間平均風速、熱収支の季節変化をみたものの、月ごとまたは年ごとの平均値に着目したため、それらの日々の関係とその季節性については明らかにされていない。また、Toritani（1989）では、冷却率と正味放射量および夜間平均風速の月平均値の推移に加え、これらの要素の日々の関係について検証したが、その季節ごとの特徴については論じられていない。

農研機構東北農業研究センター内にある気象観測露場では、周りが畑地の好条件下で、気温や降水量、風向風速に加えて、上向きと下向きの長・短波放射量や積雪深などの気象要素を継続的に測定している。そこで本研究では、過去5年間（2009年～2013年）にわたる気象データを用いて、夜間冷却量と各気象要素の

*1（連絡責任著者）農研機構東北農業研究センター、〒020-0198 岩手県盛岡市下厨川字赤平4、shoheikonno@affrc.go.jp

*2 農研機構東北農業研究センター。

*3 農研機構中央農業総合研究センター。

—2014年7月28日受領—

—2014年11月20日受理—

日々の関係およびその季節性について検証を行った。

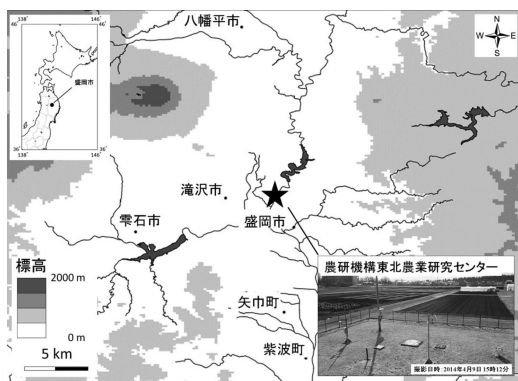
2. 方法

2.1 対象地域

対象地域は農研機構東北農業研究センター（岩手県盛岡市下厨川）の気象観測露場で、盛岡市街地から北へおよそ5 km離れた岩手県内陸部に位置する（北緯39度45分10秒，東経141度08分18秒；第1図）。観測点の標高は175 mで、北から南に向けて約1/120の勾配で緩やかに傾斜をなしている。観測点周囲には畑地が広がっている。冬季の積雪期には対象地域を含めた周囲一帯が雪面となるが、春季から秋季にかけては周囲の畑地で作物の栽培が行われるため、露場と周囲の畑地では地表面状態が異なる。従って、本研究で得られる観測値（特に上向き長・短波放射量）は、冬季は広い雪面、春季から秋季は広い畑地の中における裸地面の代表値として扱った。なお、盛岡地方気象台における積雪深の平年値によると、対象地域は例年11月下旬から3月下旬にかけて積雪期であり、融雪期は主に3月となる。

2.2 使用データ

農研機構東北農業研究センター敷地内の気象観測露



第1図 対象地域。

第1表 観測機器の概要。

気象要素	設置高度	使用機器
気温	1.5 m	白金抵抗体温度計（通風式） ヴァイサラ社, HMT333
風向風速	6.5 m	風向風速センサー R.M. YONG 社, CYG-5103
下向き短波放射量	5.0 m	日射計（霜・雪付着防止ファン付） ブリード社, CMP-11F
下向き長波放射量	5.0 m	赤外放射計（ヒーター付） Hukseflux 社, IR02
上向き長・短波放射量	1.5 m	2成分放射計（ヒーター付） Hukseflux 社, RA01
積雪深	3.0 m	光波式積雪深計 新潟電機社, SDM-301DC

場において測定された、2009年1月1日～2013年12月31日の気温、風向風速、上向きと下向きの長・短波放射量、積雪深の10分値を使用した。観測機器の概要を第1表に示す。

2.3 解析手法

気象観測露場において得られた測定値を用いて、夜間冷却量 (T_{noc})、積算正味放射量 (Rn_{tot})、積算弱風時間 (Wd_{tot})、積雪深 (SD) を算出し（第2表）、これらの関係を調べた。 T_{noc} および Rn_{tot} の算出方法については、それぞれ Konno *et al.* (2013)、青木ほか (1992) を参考にした。また、風の強さを表す気象要素としてこれまで平均風速が多く用いられてきたが（例えば Maki and Harimaya 1988；森・近藤 1984）、本研究で Wd_{tot} を用いた理由として、以下の点が挙げられる。地表面状態の様な平坦地における晴天静穏な夜間を考えた場合、地表面における放射冷却が接地逆転層を発達させ、地上気温の低下をもたらす。この接地逆転層は強い安定層のため、上空の風の影響を受けにくい性質を持つが、ある程度上空の風速が強まると、逆転層と上空大気の混合が起これ、大気から地表へ顕熱が供給されるため、気温低下が抑制される。従って本研究では、 T_{noc} と風速の関係をみる際に、接地逆転層が発達し、夜間冷却が促進される弱風状態の継続時間に注目するのが適当と考え、 Wd_{tot} を用いることとした。なお、接地逆転層と上空大気の混合を起こす風速の臨界値について、Acevedo and Fitzjarrald (2003) は、水平方向に均一な地表面の場合、平均して地上風速1.5 m/s程度（地上高4 mで風速を測定）としている。また、本対象地域における夜間の気温と風速の時系列データをみても、地上風速がおおよそ1.5 m/s程度を下回ると気温の降下量が大きくなる傾向がみられたことから、本研究では臨界値を1.5 m/sとした。また、積雪期には地表面の熱的性質の違いにより、積雪が深くなるほど T_{noc} が大きくなるとされている（近藤・森 1983）。従って、気象要素に SD を取り入れた。

なお、晴天静穏夜間の傾斜地においては、夜間冷却量に影響を及ぼす要因として、本研究で扱う気象要素の他に、周囲から流れ込む冷気流の効果も考えられる。冷気流の発生は間欠的で、冷気流により気温が低

下する場合には、気温の低下と共に風速の増加が認められる(中村 1976)。対象地域は北から南に向けて緩やかに傾斜しており、晴天静穏夜間の風向は北または北東の場合が多い。しかし気温と風速の時間変化をみると、気温低下と風速増加の関係は不明瞭で、むしろ弱い風が断続的に続く中で、気温が時々刻々低下する時間帯が多くみられた。このことから、本対象地域における気温低下量には、観測地点に流入する冷気流の効果よりも、その場の地表面における放射冷却の強さや風の強弱および積雪の有無が大きく影響するとした。夜間冷却量が冷気流の効果に大きく依存するような地域においては、本研究で用いる気象要素の他に、冷気流の方向を示す指標となる風向なども考慮する必要があると考える。

3. 結果および考察

3.1 夜間冷却量と気象要素の重回帰分析

T_{noc} に及ぼす気象要素の影響を明らかにするために、 Rn_{tot} 、 Wd_{tot} 、 SD の各気象要素を説明変数として、 T_{noc} について重回帰分析を行った(第3表)。重相関係数は全ての月について危険率1%で有意となり、係数の大きさは1月~2月および5月~11月に0.7~0.8前後、3月~4月に0.6程度、12月に0.53となった。

偏回帰係数は、 Rn_{tot} では1.19~4.05の値をとり、全ての月において危険率1%で有意となった。 Wd_{tot} では-0.01~0.39の値をとり、4月、7月、8月以外

第2表 T_{noc} と各気象要素の定義。一夜間は日の入り時刻30分前から日の出時刻までの時間で定義。

項目	定義
T_{noc}	「日の入り 30 分前の気温」 - 「一夜間の最低気温」
Rn_{tot}	一夜間における正味放射量の積算値
Wd_{tot}	一夜間における風速 1.5 m/s 以下の時間の積算値
SD	一夜間における積雪深の平均値

の月において危険率1%で有意となった。一方、 SD の偏回帰係数については多くの月で有意性が認められず、有意性が認められた月においても係数の値はほぼ0に近い値となった。 T_{noc} と SD の関係に有意性がみられなかったが、近藤・森(1983)によると、 T_{noc} が急激に大きくなるのは SD が50 cm以上のときで、 SD が10 cm程度では地中伝導熱を遮断することができなとしている。対象地域の SD はほぼ50 cm以下で経過するため、 T_{noc} と SD に有意性がみられなかったことが考えられる。なお、4月における SD の偏回帰係数は-2.86となり、危険率5%で有意であったが、対象地域における融雪期は主に3月で、4月の $SD > 0$ cmの日数を求めるとわずか4日(全150日のうちの約3%)であった。従って、4月における積雪日数は、夜間冷却量に対する積雪量の効果を説明できる程十分なデータ数でなく、今後さらにデータを蓄積した上で議論を行う必要がある。

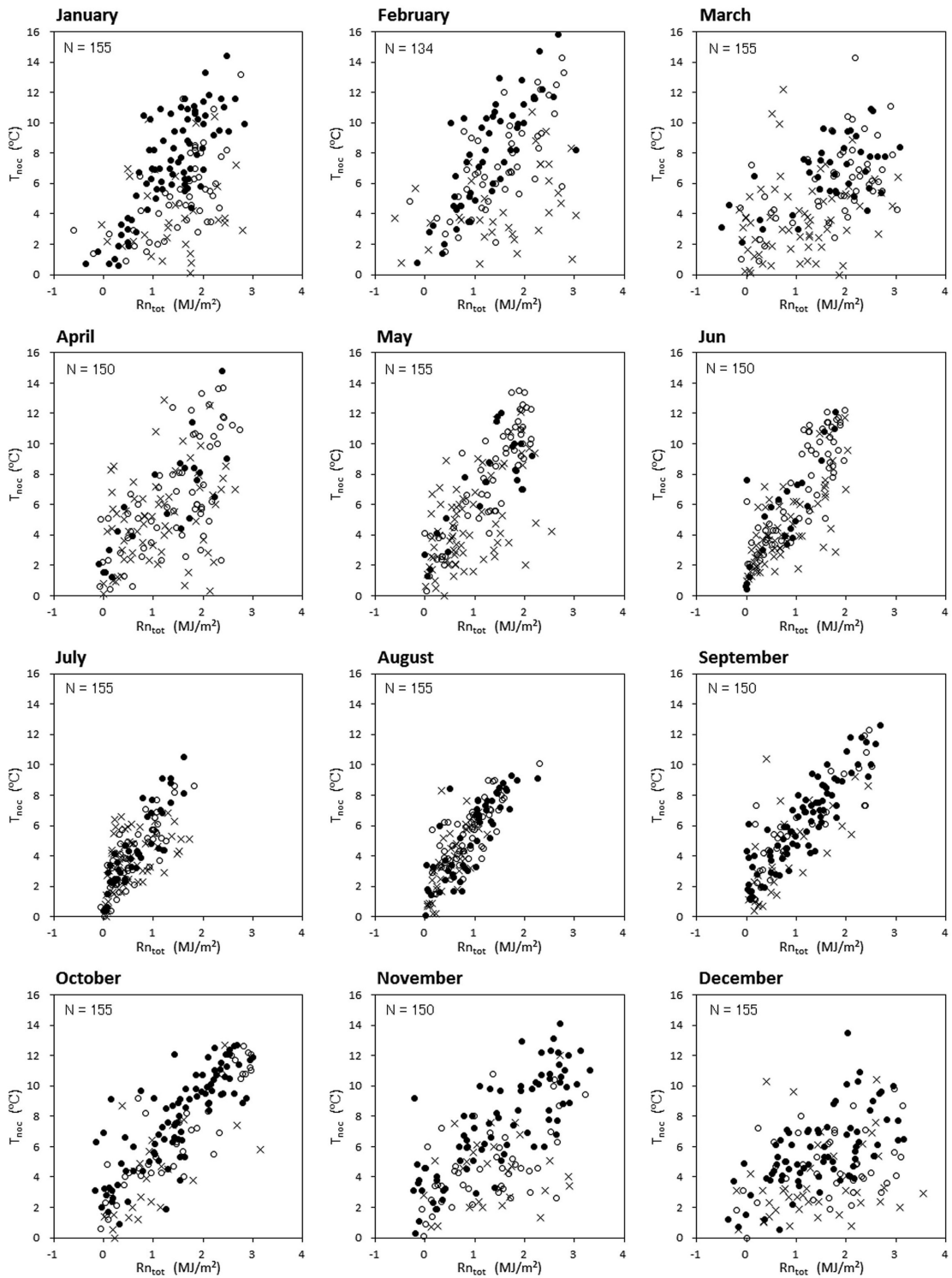
3.2 夜間冷却量と積算正味放射量および積算弱風時間との関係

T_{noc} の大きさに影響を及ぼす Rn_{tot} および Wd_{tot} について、 T_{noc} との日々の関係およびその季節性を検証した。本研究では、 T_{noc} と Rn_{tot} の日々の関係を、各月について Wd_{tot} の階級別に示した。 Wd_{tot} の階級区分を決めるにあたり、全期間のデータを2時間ごとの Wd_{tot} (2h未満、2h以上4h未満、...12h以上14h未満、14h以上)で区分し、各区分における T_{noc} と Rn_{tot} の相関係数を求めた。その結果、 $8h \leq Wd_{tot}$ に該当する区分で0.7以上、 $4h \leq Wd_{tot} < 8h$ に該当する区分で0.5以上0.7未満、 $Wd_{tot} < 4h$ に該当する区分で0.5以下となり、相関係数は全ての区分において危険率1%で有意であった。従って本研究では、 Wd_{tot} の階級区分を $8h \leq Wd_{tot}$ 、 $4h \leq Wd_{tot} < 8h$ 、 $Wd_{tot} < 4h$ の3つの階級で定義した。

Wd_{tot} の各階級における T_{noc} と Rn_{tot} の日々の関係を第2図に示した。 Rn_{tot} は冬季、春季および秋季に最大で3~4 MJ/m²前後、夏季に最大で2~3 MJ/m²

第3表 各月における気象要素の重回帰分析結果。 ** 危険率1%で有意、* 危険率5%で有意。5月~10月は無積雪期。

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
重相関係数	0.66**	0.68**	0.61**	0.61**	0.78**	0.82**	0.73**	0.82**	0.85**	0.85**	0.73**	0.53**
偏回帰係数 Rn_{tot}	2.63**	2.59**	1.32**	2.44**	3.47**	4.05**	3.42**	3.98**	3.29**	3.29**	2.08**	1.19**
Wd_{tot}	0.32**	0.39**	0.27**	0.11	0.28**	0.19**	0.07*	-0.01	0.11**	0.11**	0.29**	0.19**
SD	0.03*	0.01	0.02	-2.86*	-	-	-	-	-	-	0.14	0.03



第2図 各月における T_{noc} と Rn_{tot} の関係 (Wd_{tot} の階級区分別). ●, ○, × はそれぞれ $8 \text{ h} \leq Wd_{tot}$, $4 \text{ h} \leq Wd_{tot} < 8 \text{ h}$, $Wd_{tot} < 4 \text{ h}$ の階級を示す.

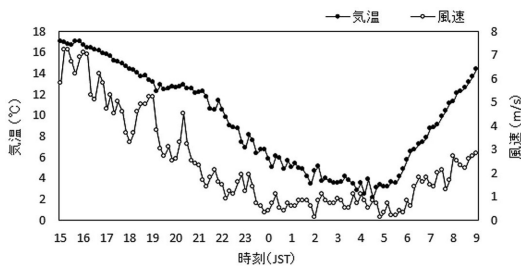
前後であった。 T_{noc} は冬季、春季および秋季において最大13~16°C前後、夏季において最大10~12°C前後となり、これらの強い冷却は、主に対象地域を移動性高気圧が覆った晴天静穏な夜間に発生していた。

T_{noc} と Rn_{tot} の相関係数を求めると(第4表)、 $8h \leq Wd_{tot}$ の階級においては各月とも高い相関(1月、2月および4月~11月にかけて約0.8以上、3月と12月に0.6以上)が得られた。これらの結果は、 T_{noc} が Rn_{tot} に大きく依存していることを示している。また第4表によると、 $8h \leq Wd_{tot}$ に加えて、 $4h \leq Wd_{tot} < 8h$ の階級においても、 $8h \leq Wd_{tot}$ の階級と同様に高い相関が認められた。第2図をみると、 $4h \leq Wd_{tot} < 8h$ の階級においても、 $8h \leq Wd_{tot}$ の階級並に T_{noc} が大きい日があることがわかる。このような日における気温と風の時間変化をみると(第3図)、一晩において風が強い時間帯と弱い時間帯があり、風が弱い時間帯に著しい気温低下が生じる傾向がみられた。晴天静穏な気象条件下における夜間冷却は、冷却開始から数時間までの間に著しいことが知られている(Gustavsson *et al.* 1998; Whiteman *et al.* 2004)。これらの結果から、一晩の間に弱風が少なくとも数時間続いた場合には、夜間を通して静穏な日と同様に、地表面の放射冷却による夜間の著しい気温低下がもたらされることが示唆された。

$Wd_{tot} < 4h$ の階級においては、 T_{noc} と Rn_{tot} の相関係数が高い月(主に6月~10月の暖候期)と低い月

(主に11月~5月の寒候期)の違いが明瞭となった(第4表)。このことは、 T_{noc} に対して Rn_{tot} や Wd_{tot} 以外の要因が関与していることを示すものである。その主な要因として、総観規模における暖気および寒気移流を伴う風の影響が季節により異なることが考えられる。暖候期は、台風や前線などの影響を受ける日を除けば、他の季節に比べ極端な暖気および寒気移流の影響も少なく、比較的夜間の風も穏やかである。そのため、 $Wd_{tot} < 4h$ の場合においても、移流の影響を受けにくく、 Wd_{tot} で設定した風速の閾値を超える風がそれほど強くないため、接地逆転層が大きく崩されず、結果として各 Wd_{tot} において T_{noc} と Rn_{tot} の相関が高くなったことが考えられる。一方、寒候期は、西高東低の冬型の気圧配置や前線を伴う発達した低気圧が日本海から東北地方を通過する頻度が高いため、対象地域は暖気および寒気移流を伴う強い風の影響を受ける日が多い。そのため、この移流の影響と、閾値を超える風が逆転層を大きく崩すほど強風であることが、 $Wd_{tot} < 4h$ の階級を中心に T_{noc} と Rn_{tot} の相関を低くした要因として考えられる。本研究では Wd_{tot} を T_{noc} の説明変数として用いることにより、平均風速では見落としやすい、短時間の弱風によって気温が低下する事例を検出する方法を新たに示すことができた。しかし、より精度を高く T_{noc} を推定するためには、上で述べた移流の影響を指標として取り入れるとともに、 Wd_{tot} についてもより適切な閾値の設定や閾値を超える風の強さの評価を行っていく必要がある。

また、今回得られた観測値は、冬季は広域な雪面、春季から秋季にかけては広域な畑地の中に位置する裸地面の代表値である。従って、今回の結果が作物の栽培されている畑地に適用できるかどうかを判断するためには、観測地点のみでなく、周辺の畑地を含めて、上向きと下向きの長・短波放射量を中心とした気象要素を測定する必要がある。



第3図 気温と風速の時間変化。2010年5月2日夜間の事例。

4. まとめ

夜間冷却量に及ぼす気象要素の影響を、過去5年間

第4表 各月における T_{noc} と Rn_{tot} の相関係数(Wd_{tot} の階級区分別)。** 危険率1%で有意, * 危険率5%で有意。

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
相関係数 $8h \leq Wd_{tot}$	0.79**	0.79**	0.60**	0.82**	0.81**	0.83**	0.90**	0.84**	0.89**	0.83**	0.80**	0.63**
$4h \leq Wd_{tot} < 8h$	0.62**	0.71**	0.54**	0.66**	0.87**	0.83**	0.80**	0.80**	0.86**	0.89**	0.59**	0.29
$Wd_{tot} < 4h$	0.12	0.36*	0.23	0.34**	0.54**	0.73**	0.48**	0.70**	0.65**	0.63**	0.26	0.22

の長期にわたる気象観測値に基づいて調べた結果、積算正味放射量と積算弱風時間が夜間冷却量の大きさを決める重要な要素であることがわかった。夜間冷却量と積算正味放射量の日々の関係を、各月について積算弱風時間の階級別に検証した結果、夜間を通して静穏な日に限らず、一晩の間に風の弱い状態が少なくとも数時間続いた場合には、大きな気温低下がもたらされることが示唆された。

積算弱風時間に対する夜間冷却量と積算正味放射量の相関係数の違いには季節性がみられ、暖候期には両者の相関係数が積算弱風時間に依存せず、寒候期には両者の関係が積算弱風時間に依存する傾向が認められた。その要因として、総観規模における寒気および暖気移流を伴う風の影響が考えられた。これらの要素は、本研究で取り入れることのできなかった指標であり、今後より精度の高い夜間冷却量の推定を行う上で重要な要素になると思われる。

謝 辞

本研究は、文部科学省気候変動適応研究推進プログラム「東北地域のヤマセと冬季モンスーンの先進的ダウンスケール研究」により実施されました。

参 考 文 献

- Acedo, O. C. and D. R. Fitzjarrald, 2003: In the core of the night-effects of intermittent mixing on a horizontally heterogeneous surface. *Bound.-Layer Meteor.*, **106**, 1-33.
- 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.
- Gustavsson, T., M. Karlsson, J. Bogren and S. Lindqvist, 1998: Development of temperature patterns during clear nights. *J. Appl. Meteor.*, **37**, 559-571.
- 飯島慈裕, 篠田雅人, 2004: 広域の大気状態が中部日本山岳地域の夏季の夜間冷却に及ぼす影響. *地理学評論*, **77**, 716-733.
- 近藤純正, 2000: 地表面に近い大気の科学. 東京大学出版会, 336pp.
- 近藤純正, 森 洋介, 1982: アメダス (地域気象観測所) データを用いた夜間冷却量の解析と最低気温予報式 (1). *天気*, **29**, 1221-1233.
- 近藤純正, 森 洋介, 1983: アメダス (地域気象観測所) データを用いた夜間冷却量の解析と最低気温予報式 (2). *天気*, **30**, 143-150.
- Konno, S., T. Nakano and H. Takahashi, 2013: Temporal and spatial variability of nocturnal cooling in a complex of small valleys in the Kanto Plain during the winter. *J. Agric. Meteor.*, **69**, 191-200.
- Maki, M. and T. Harimaya, 1988: The effect of advection and accumulation of downslope cold air on nocturnal cooling in basins. *J. Meteor. Soc. Japan*, **66**, 581-597.
- Maki, M., T. Harimaya and K. Kikuchi, 1986: Heat budget studies on nocturnal cooling in a basin. *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 727-741.
- 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放射冷却. *天気*, **31**, 45-52.
- 中村圭三, 1976: 夜間の緩斜面上の冷氣流と気温分布について. *地理学評論*, **49**, 380-387.
- 桑 南平, 小林哲夫, 武政剛弘, 森 牧人, 後藤慎吉, 薦田広章, 1997: 複雑地形上の中小都市における晴天夜間の下向き赤外放射について. *天気*, **44**, 175-180.
- Toritani, H., 1989: A local climatological study on the mechanics of nocturnal cooling in plains and basins. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science at the Institute of Geoscience of University of Tsukuba, 177pp.
- 鳥谷 均, 吉野正敏, 1985: 夜間, 接地気層における気温の時間変化と熱収支との関係について. 筑波大学水理実験センター報告, (9), 103-107.
- 鳥谷 均, 吉野正敏, 1986: 夜間の冷却過程における地表面付近の気温変化と熱収支との関係について. 筑波大学水理実験センター報告, (10), 39-45.
- Whiteman, C. D., T. Haiden, B. Pospichal, S. Eisenbach and R. Steinacker, 2004: Minimum temperatures, diurnal temperature ranges, and temperature inversions in limestone sinkholes of different sizes and shapes. *J. Appl. Meteor.*, **43**, 1224-1236.
- 寄崎哲弘, 田宮兵衛, 甲斐憲次, 1982: 寒候期, 気象観測塔で観測された接地逆転の特性. 筑波大学水理実験センター報告, (6), 45-52.

Diurnal and Seasonal Relationships between Nocturnal Cooling and Meteorological Parameters: Validation Using Observation Data

Shohei KONNO*¹, Sayuri OKUBO*² and Hiromitsu KANNO*³

*¹ (*Corresponding author*) NARO Tohoku Agricultural Research Center, 4 Akahira, Shimo-kuriyagawa, Morioka, Iwate 020-0198, Japan.

*² NARO Tohoku Agricultural Research Center.

*³ NARO Agricultural Research Center.

(Received 28 July 2014; Accepted 20 November 2014)

Abstract

We investigated diurnal and seasonal relationships between nocturnal cooling and meteorological parameters by using 5-year observation data from the NARO Tohoku Agricultural Research Center, Japan. Multiple regression analysis between nocturnal cooling (T_{noc}) and meteorological parameters (total net radiation, Rn_{tot} ; total weak-wind duration, Wd_{tot} ; and snow depth, SD) revealed that Rn_{tot} and Wd_{tot} dominantly contributed to T_{noc} . Diurnal relationships among T_{noc} , Rn_{tot} , and Wd_{tot} suggested that a strong temperature drop occurred not only on calm nights but also at nights when weak wind conditions lasted at least a few hours. In addition, in the warm season, correlation coefficients between T_{noc} and Rn_{tot} were nearly the same in every Wd_{tot} category. In the cold season, however, those coefficients varied with Wd_{tot} . We attributed this difference to the strong, synoptic-scale winds that accompanied cold and warm advection in the cold season.
